平成16年度

建設施工と建設機械シンポジウム

論　　文　　集

平成17年１月27日～28日
東 京・機 械 振 興 会 館

主催：社団法人　日 本 建 設 機 械 化 協 会

後援：独立行政法人　土 木 研 究 所
　　社団法人　　日 本 機 械 土 工 協 会

論文審査規定概要

１．審査方法

論文アブストラクト及び本論文の２段階で行い、１編の論文について４名の審査委員が審査を行う。

下記の審査基準に基づき、審査委員会が採択の判断を下した場合に採択される。

２．審査基準

新規性、有用性、完成度、信頼性並びに本シンポジウムの主旨に合致するかどうかの視点で採否の判断を行う。

３．審査委員名簿（順不同・敬称略）

	委員名	機関名	所属・役職
委員長	近藤　悟	㈳日本建設機械化協会	常務理事
副委員長	渡辺和弘	国土交通省	総合政策局　建設施工企画課　機械施工企画官
委員	山元　弘	㈱土木研究所	技術推進本部　先端技術チーム　主任研究員
	福川光男	鹿島道路㈱	専務取締役　生産技術本部担当
	大坂　衛	大成建設㈱	土木本部　機械部　部長
	星野春夫	㈱竹中工務店	技術研究所　先端研究開発部 アドバンストコンストラクション部門　主任研究員
	松本　毅	コマツ	開発本部　商品企画室　担当部長
	有光秀雄	コベルコ建機㈱	カスタマーサポート部　サービス技術グループ シニアマネージャー
	雨宮信一	新キャタピラー三菱㈱	相模開発センター　　トラクタ開発部長
	田中利昌	日立建機㈱	建設システム事業部　技術部　部長
	外村圭弘	西尾レントオール㈱	東京支店　取締役支店長
	森實　裕	㈳日本機械土工協会	副会長
	鈴木英隆	㈳日本建設機械化協会	技師長
	浅野邦彦	㈳日本建設機械化協会	技術部長
	近藤治久	㈳日本建設機械化協会	調査部長

平成 16 年度

「建設施工と建設機械シンポジウム」論文集

目　　次

*印　口述発表者

1．【基礎処理】

1．低空頭・狭隘対応場所打ち杭工法
…… 鹿島建設㈱：*小滝　裕… 1

2．大規模埋設物の直下に地中連続壁を構築するラッピングウォール工法の開発
…… 鹿島建設㈱　機械部：*船迫　俊雄… 5

3．SMW 新造成システムの開発（新駆動方式による大深度対応型高精度原位置攪拌工法の開発）
…… 大成建設㈱：*藤谷　俊実、高瀬　義行、鈴木　庫雄… 9

4．深層混合処理機方向制御システムの実施工への適用
…… ㈱竹中土木：*廣渡　智晶、大西　常康、
㈱竹中工務店：山本　光起… 15

5．大深度・掘削土再利用連壁（TSW）の施工事例
…… ㈱竹中工務店：*田中　裕也、長谷　理、北村　敏直… 21

2．【締固・理論】

6．厚層における土の締固め管理に用いる新しい密度測定器 SST の開発
…… *愛媛大学大学院：本田　恭邦、
愛媛大学工学部：室　達朗、敷島　直樹… 25

7．建設車両用タイヤを用いた締固め方法の開発
…… 国立明石工業高専：*中口　顕良、江口　忠臣、
愛媛大学：室　達朗… 29

8．粗粒材を対象とした振動ローラ加速度法の課題と提案
…… 大成建設㈱：*西澤　修一… 35

9．端面掘削方式を用いた岩盤深礎掘進機の性能実験
…… 愛媛大学大学院：*岩田　智明、
愛媛大学工学部：室　達朗、河野　幸一… 41

10. 回転溝切削機における円盤型圧壊破砕刃と円盤型剥離破砕刃の性能比較
…… 愛媛大学大学院：*黒瀬　賢二郎、
愛媛大学工学部：室　達朗、河野　幸一… 45

11. 月面探査ローバーの車輪形状の最適化
…… 呉工業高等専門学校：*重松　尚久、
愛媛大学工学部：室　達朗、
呉工業高等専門学校専攻科：大知　剛… 49
12. 最新の締固め施工管理と深層転圧能力を有する多角形ドラム
…… ボーマクジャパン㈱：*長田　耕一、倉持　勝裕、加藤　美貴男… 53

3.【トンネル】

13. カッター引込み式工法によるビット交換方法の開発
（作業用立坑や地盤改良を不要としたシールド機のビット交換工法）
…… カッター引込み式工法研究会：*杉森　真、上嶋　正樹、山内　悟… 57
14. 長大インバート桟橋を使用したトンネルの合理化施工（３スパン移動桟橋によるインバート施工）
…… 佐藤工業㈱：*京免　継彦、森　安弘、中谷　幸一… 63
15. コンパクトシールド工法における掘削土のポンプ圧送設備とセグメント搬送計画
…… 佐藤工業㈱：*金崎　伸夫、今村　貴彦、
東京都下水道局：松井　邦恭… 67
16. パイプルーフ変形計測システム
…… 大成建設㈱：*戸田　浩、宮崎　裕道、近藤　高弘… 73
17. テール内形状保持装置（TKS）の開発
…… 佐藤工業㈱：*篠宮　政幸、守山　亨、
東京地下鉄㈱：藤木　育雄… 79
18. 繊維補強コンクリート施工における定量供給装置の開発
…… 東亜建設工業㈱：*松島　弘樹、内倉　廉二、泉　信也… 85
19. 非開削管きょ撤去工法「Re（り）キューブモール」による既設推進管の撤去埋戻し
…… 三井住友建設㈱：*清水　安雄、石田　喜久雄、
機動建設工業㈱：荒木　大介… 89
20. TBM 掘削全断面鉄道トンネル高精度急速施工
…… 清水建設㈱：*藤井　攻、茅野　浩一、小野　啓二… 95
21. ボールスライダー工法（重量物移動工法）の開発と実用化
…… 佐藤工業㈱：*松井　淳一、
㈱エス・エム・ケイ：渡辺　実、
㈱浅井：上原　俊明… 101
22. 世界最大級の泥土圧シールドマシンによる長距離施工について
…… ㈱大林組：*的場　一彦、中山　正夫、
長谷川　英崇、野中　圭二郎… 105

４．【情報化施工】

23. FRS Ⅲの開発　―――シールドトンネル曲線施工部の遠隔測量システム―――
…… ㈱フジタ：*浅沼　廉樹、渡部　幸浩… 111

24. END 工法　～新しい環境浚渫（Environmental Dredging）技術～
…… 五洋建設㈱　土木本部機械部：*室田　恭宏、八島　慎治… 117

25. レーザ装置を用いた路床、路盤の検測方法
…… ㈱ NIPPO コーポレーション：*佐々木　拓郎、高橋　幸男、梶原　覚… 121

26. TS・GPS を用いた盛土締固め情報化施工管理要領（案）について
……国土交通省　関東地方整備局　関東技術事務所：菊地　健仁… 125

27. ネットワーク型－ RTK 測量の建設工事への導入
…… ㈱トプコン販売：*玉木　直行、
鹿島・市川・青協・杉山共同企業体　テクノプラザ造成工事事務所：所長　森　信幸、
㈱ジェノバ：細谷　素之… 129

28. 北海道電力純揚水式京極発電所上部調整池建設工事への情報化施工（IT 施工）
システムの導入と実績について
……鹿島建設㈱京極発電所上部調整池工事（事）：*堀川　明広、
北海道電力㈱京極水力発電所建設所：高野　準、
㈱トプコン販売：江藤　隆志… 133

29. 無人化施工による鋼製スリットダム工事
…… ㈱フジタ：*三鬼　尚臣、須郷　茂夫… 139

30. 無人化施工のマンマシンインターフェイスに関する調査
独立行政法人　土木研究所：*山口　崇、石松　豊、山元　弘… 145

５．【環境・理論】

31. 工事の実施による大気環境に係わる環境影響評価に関する研究
……㈱ 土木研究所：*林　輝、吉永　弘志、山元　弘… 149

32. 建設機械のライフサイクルにおける二酸化炭素排出
……㈱ 土木研究所：*吉永　弘志、山元　弘… 155

33. 電動駆動式テレスコピッククラムシェルの開発と稼働実績
－地下鉄建設工事における環境負荷低減の取組み－
…… コマツ：*勝沼　清、
東京地下鉄㈱：藤木　育雄、辻　雅行… 161

34. 加熱工法による油汚染土壌浄化プラント
軽質油、重質油、VOC の分解が可能な油汚染土壌浄化プラントの紹介
…… 日工㈱：*蓬莱　秀人、藤原　和也、山元　明宏… 167

35. アスファルトタンク内蔵型フォームドスタビライザによる施工
…… 鹿島道路㈱　機械センター：*木村　直之… 173

36. 木造家屋解体機の開発
…… 日立建機㈱：*石井　啓範、
山形日立建機㈱：村井　俊和、
積水ハウス㈱：輕部　元喜… 177

６．【機械・装置】

37. 覆工コンクリート施工における自走式噴霧養生装置の開発
…… 東亜建設工業㈱：*藤本　正一、大山　茂、加藤　大喜… 181
38. ランブルストリップス施工機械の開発
…… ㈱NIPPO コーポレーション：*立花　洋平、相田　尚、
㈱ 北海道開発土木研究所：平澤　匡介… 185
39. 排水性舗装機能回復車の施工性能について
…… 酒井重工業㈱：*後藤　春樹… 191
40. トンネル覆工打音診断システムの開発
㈱熊谷組：*森　康雄、岩井　孝幸、時岡　誠剛… 197
41. 自動打音調査システム「易打天（いだてん）」
…… ㈱ハザマ：*武石　学、
㈱ダイヤコンサルタント：小泉　和広、
㈱ウォールナット：新　弘治… 203
42. リニューアル工事における建物外壁タイル診断装置の自動化について
…… 東急建設㈱：*中村　聡、西尾　仁、大矢　和久、
東急リニューアル㈱：新津　清隆… 209
43. 油圧作動油の粘度特性最適化による建設機械の燃費改善
…… デグサジャパン㈱：*浜口　仁、
RohMax USA Inc. - Douglas Placek、
RohMax Additives GmbH - Klaus Hedrich… 213
44. 鉄道営業線上に高架橋を構築する移動式直接高架施工機
…… 東急建設㈱：*井藤　幹雄、荻原　克巳、平井　幸雄… 219

１．低空頭・狭隘対応場所打ち杭工法

鹿島建設㈱：○小滝　裕

１．はじめに

近年、都市再生事業の一環として都市土木施設のリニューアル、機能向上が図られているが、それらの一つとして既設鉄道の高架化工事や桁の架け替え工事、耐震補強工事がある。このような工事では、既設の桁下や既設構造物と隣接する位置など低空頭あるいは狭隘な箇所で新たに基礎杭を施工する必要がある。このような厳しい施工条件下でも対応可能な杭の施工法としてＢＣＨ(Bottom Circulation Hole) 工法とパイプドリル工法を開発した。

低空頭・狭隘対応場所打ち杭工法について報告する。

２．ＢＣＨ工法の開発

(1) 背景

低空頭・狭隘な場所での場所打ち杭の施工法としては正循環工法（サーキュレーション工法）や逆循環工法（リバースサーキュレーション工法）があり、それらの代表的な工法として正循環工法にはＢＨ工法が、逆循環工法にはＴＢＨ工法が挙げられる。正循環工法は、その掘削機構上、逆循環工法よりも施工機械を小型化することが可能であるが、孔内全体に掘削ズリを浮遊させた高比重の安定液を循環させるため、孔壁にマッドケーキが形成されやすく、かつ杭先端にスライムが沈降する傾向が高い。そのため、本設構造物としての支持力特性において品質・信頼性が低いとされてきた。

一方、逆循環工法は、常に孔内を低比重の良好な安定液で満たすため、造成される杭の品質・信頼性は高く、本設構造物としての杭の造成に使用されてきた。しかしながら、逆循環工法は、施工機械が大きくなるため、超低空頭・狭隘な場所での適用性は正循環工法より劣っていた。そこで、正循環工法であるＢＨ工法を基本としながら安定液の品質を向上させることでＴＢＨ工法と同等の支持特性を有し、かつ、低空頭・狭隘な場所での施工を可能とする場所打ち杭工法としてＢＣＨ工法を開発した。

(2) ＢＣＨ工法の概要

ＢＨ工法とＢＣＨ工法の掘削機構を図－１に示す。ＢＨ工法では掘削ビット先端から安定液を噴出させ、安定液に掘削ズリを混入した泥水を孔口まで押し上げて孔内から排出するというものであるため、安定液の管理を怠ると所定の杭の支持力が得られないという欠点を有している。そこで、下記の改善を実施した。

・掘削ビット直上に揚泥管を設置して、掘削ズリが混入した泥水を、孔内を循環させずに地上に速やかに排出する。
・孔口から良質な安定液を供給することで、常に孔内を良質な安定液で置換する。

その結果、小型の機械でより低空頭・狭隘な場所での施工が可能で、かつ本設杭としての十分な支持力特性を有する場所打ち杭の造成を可能とした。ＢＣＨ工法の概要を図－２に示し、主な特長を以下にまとめる。

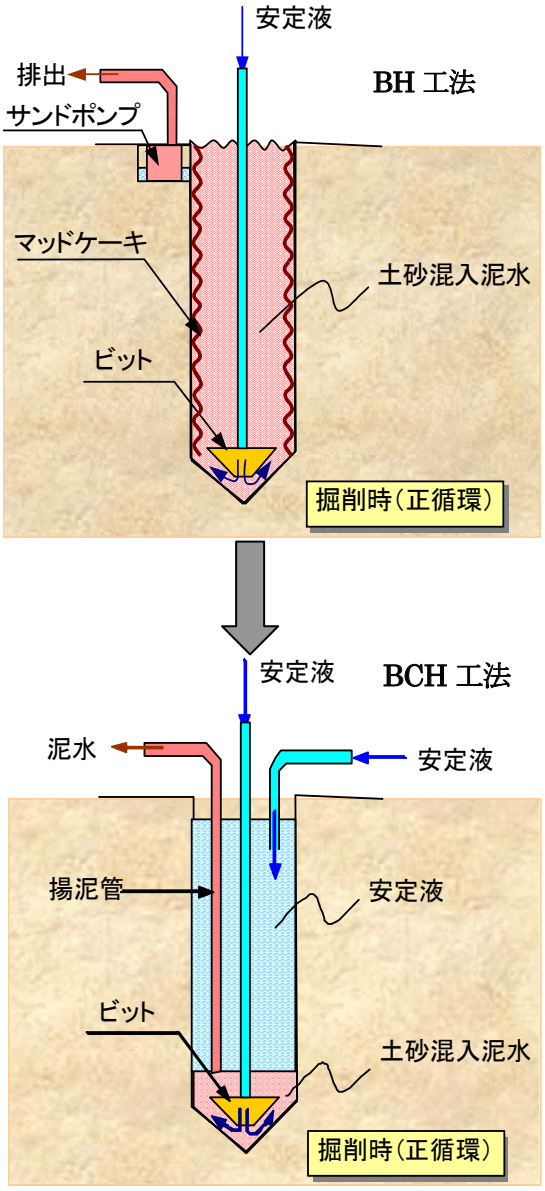
①スライムの浮遊を防ぐため、掘削ビットの上方1.5m以内に吸引口が位置する揚泥管を新たに配置し、掘削ズリを掘削直後に吸引して孔外へ排出する。

②安定液の品質を良好に保持するために、ビット先端に加えて孔口からも良質の安定液を供給する。

③これらの杭品質の向上に向けた改良に加えて、狭隘部での施工性の向上を図るために、揚泥管にスイベル装置を設置して揚泥管の脱着を容易にする。

④掘削完了後、一定時間底ざらい運転を行うこと

により別工程のスライム処理を不要とした。



図－１　掘削機構



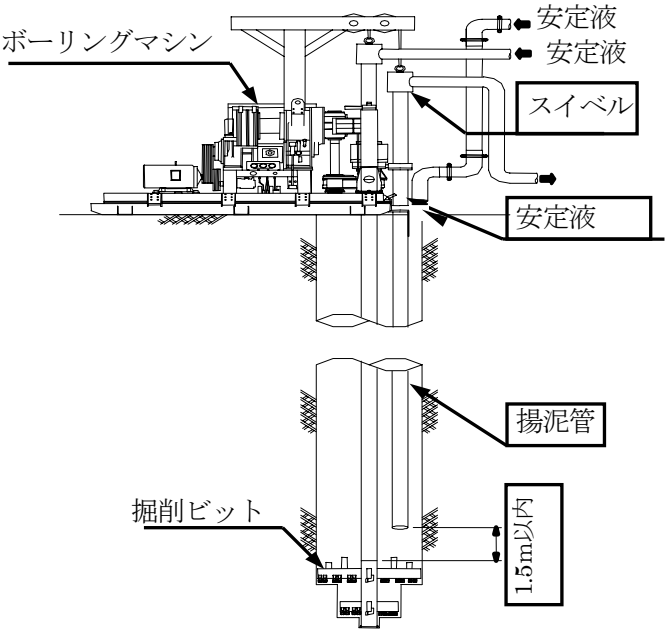
写真－１　施工状況

(3)掘削試験と押込み試験の概要と結果

ＢＣＨ工法の支持力性能を定量的に把握し、構造物として十分な支持力を有することを確認するために、掘削試験と押込み試験を実施した。試験杭は、杭径Φ0.8m、杭長Ｌ＝26.5mであり、対象地盤は、上部からローム、粘土及びシルトで、先端部の支持地盤は砂と礫の互層であった。

試験杭の掘削中にビット直上（ＧＬ－20m）、孔口及びその中間地点（ＧＬ－10m）の３深度にて安定液を採取し、その比重を測定したが、ビット直上では 1.10、孔口及びその中間地点では 1.08 程度と良好な結果が得られた。また、超音波孔壁測定器による杭の出来形管理も可能となった。これらにより孔内の安定液を良質に維持できることが検証された。

杭の押込み試験（地盤工学会基準 JIS1811）は多段階載荷方式・多サイクルによった。杭先端の変位が 100 ㎜(杭径の 12%)を超過し、杭頭反力 13,500kN を得られた段階で押込み試験を完了した。砂と礫の互層であり、礫の影響でN値が大きくなったと推定される区間を除き、杭の周面支持力度の試験値は設計値を上回ったことから鉛直支持力は設計値の約２倍の値となり、十分な支持力を有することを確認した。



図－２　パイプドリル概要図

３．パイプドリル工法の開発

(1) 背景

営業線高架橋近傍または直下で低空頭・狭隘な場所における場所打ち杭の施工がもとめられ、これらの工事は既設構造物基礎に近接した場所での施工となるため、周辺地盤の変状を抑止することが最重要課題とされる。

従来、低空頭下の場所打ち杭工法としては、TBH工法及び深礎工法が多用されてきた。しかし前者は孔壁の保持を泥水に頼っているため、泥水管理が孔壁の安定に直結していることや、それでも孔壁崩壊の危険性がゼロと言えない点で信頼性にやや難がある。また、既設杭等の障害物が存在する場合には事前に全撤去する必要があるという問題があった。一方後者は地下水位以下の施工においては補助工法を併用する必要があり、工期・安全の面で問題があった。

変状抑止が可能な工法としては、鋼管圧入工法が知られているが、ハンマーグラブを用いて揚土を行うため、高架橋下のような空頭が制限された条件下での施工はこれまで不可能であった。

そこで本工法では排土法として泥水による逆循環式（リバース工法）を採用し、更に小型全旋回圧入機（パワージャッキ）、特殊三翼ビットおよび門型櫓を一体とした場所打ち杭施工システムを新たに開発することにより、変状抑止効果が高い鋼管圧入工法の長所を生かし、既存工法では成し得なかった超低空頭下での施工を実現した。



写真－２　門型櫓



写真－３　掘削ビット

(2)パイプドリル工法の概要

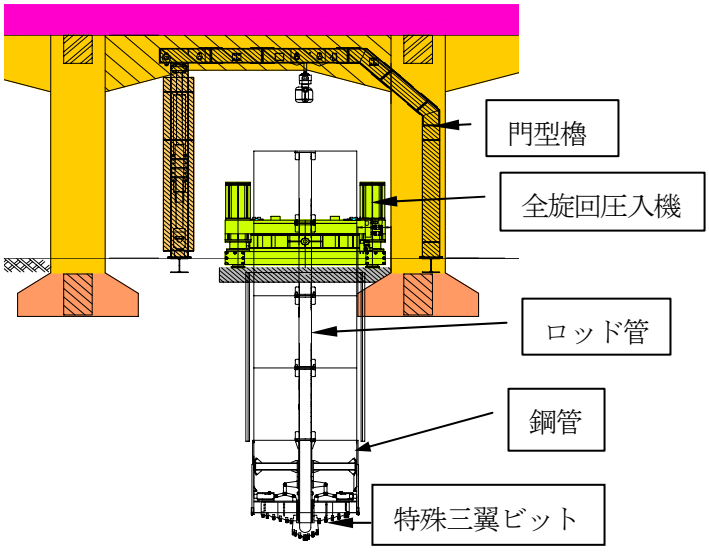
パイプドリル工法は空頭制限下において鋼管圧入・削孔を実現するため、当社が開発した特殊三翼ビット・小型全旋回圧入機・門型櫓で構成されたシステムを採用する。工法全体概要を図－３に示す。

①特殊三翼ビット

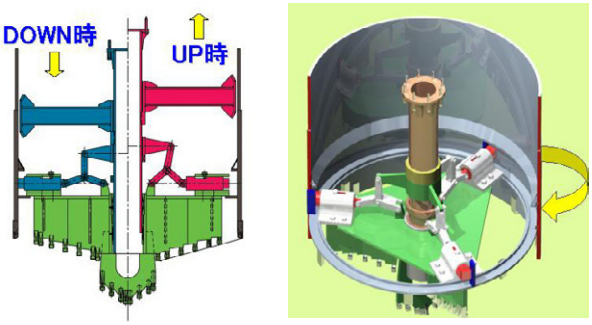
特殊三翼ビットは、ロッド管の上下に連動して３個のピストンが出入りする機構を有している。これは図－４で示すように、３個のピストンが鋼管の回転力をビットに伝達する役割を果たしているためで、地上から続く掘削ロッド管から駆動力を得る従来方式とは根本的に異なる。この機構の開発により、上部に設ける必要があったロータリテーブル及びスイベル装置をビット部に内臓することができ、結果として地上に突出する高さの縮小並びに鋼管セット時の施工性を確保することが可能となった。また、リンク機構を採用することにより、ロッド管の上下動という簡易な動作のみで特殊三翼ビットの着脱・回収が可能となっている。

②小型全旋回圧入機（パワージャッキ）

小型全旋回圧入機は、低空頭・狭隘な場所での施工に対応するため従来の鋼管圧入ジャッキよりも大幅に小型・軽量化を図りながら、回転トルク690kNm(最大860kNm)、圧入力350kNを確保している。



図－３　パイプドリル概要図



図－４　掘削ビット機構



写真－４　施工状況

(3) パイプドリル工法の特長

①鋼管による孔壁養生で既設構造物の変状を抑止できる。(営業線近傍での施工が可能)

②空頭が制限される施工条件下での杭施工が可能である。(高架橋下での施工が可能)

③低騒音・低振動で施工が可能である。(夜間対応)

④松杭等の地下障害物を有する条件下でも高品質な杭の施工が可能である。(障害物の事前撤去が不要)

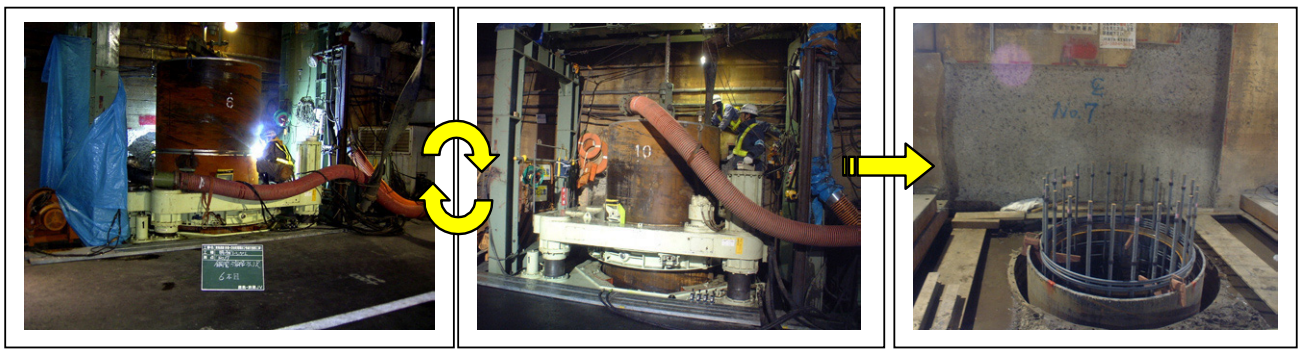
４．今後の展望

都市再生に伴い、鉄道営業線近接部における立体交差化工事ならびに既設高架橋のリニューアル工事などが今後さらに増加すると予想される。

ＢＣＨ工法とパイプドリル工法のさらなる高度化を進めることにより、これらの工事の品質と施工性の向上を図っていく所存です。



１．門型ヤグラの組立　　２．パワージャッキの据付け　　３．特殊三翼ビットの挿入



４．鋼管建込・溶接（繰り返し）　　５．削　孔（繰り返し）　　６．鉄筋籠建込

写真－５　施工順序

２．大規模埋設物の直下に地中連続壁を構築するラッピングウォール工法の開発

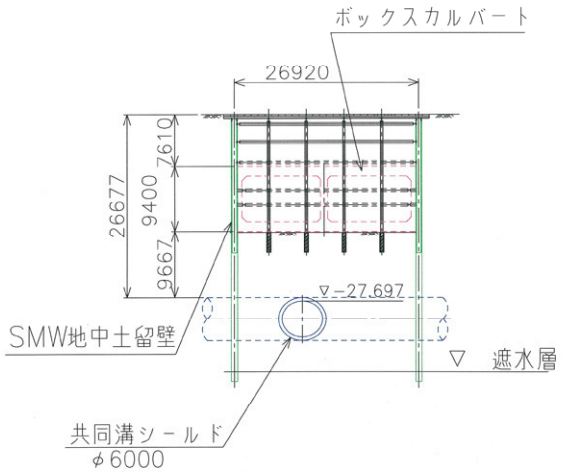
鹿島建設㈱　機械部：○船迫　俊雄

１．はじめに

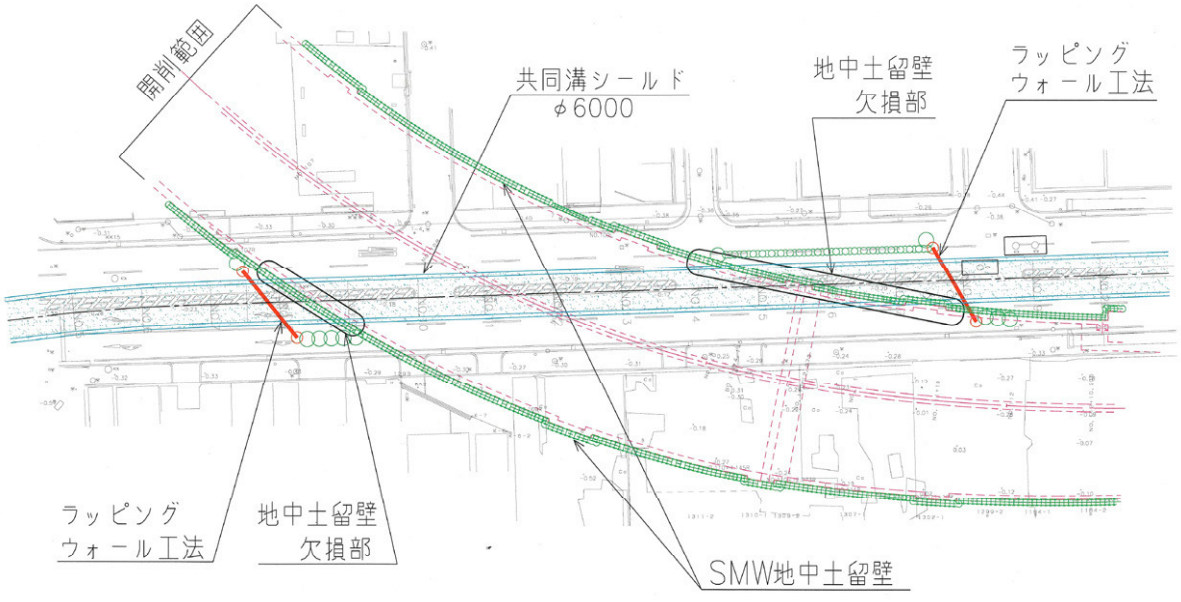
都市部で地中連続壁工法を施工する際、共同溝など、移設できない埋設物が横断していると、埋設物下部及び周辺に欠損部が生じる。従来、埋設物が小断面で浅い位置の場合は、欠損部を地盤改良工法などで閉合させることができたのだが、大断面・大深度の場合は、凍結や開削などの大掛かりな工法しか対処できなかった。そこで、大断面・大深度の埋設物による欠損部に、地中連続壁を効率良く施工可能なラッピングウォール工法（Wrapping wall method ： 地下構造物を連続壁で包み込む工法の意）を開発し、実証工事を行った。以下にその内容を報告する。

２．工事概要

阪神高速道路公団淀川左岸線Ⅰ期工事は、供用中の阪神高速道路湾岸線と同神戸線を結ぶ高速道路 5.7km を築造するものである。このうち、阪神高速島屋第５工区土留壁設置工事（その２）では、大断面開削トンネルの築造に先立ち、ＳMW工法を主体とした地中連続土留壁を施工する。当工事は、ＳMW地中連続土留壁の構築ラインに、重要インフラ施設である共同溝（外径 6.0m、土被り約 27m）が横断していた。（**図－**



図－１　標準断面図



図－２　全体平面図

１、２参照)。開削して構造物を構築するためには、埋設物の周辺及び下部に生じる土留壁の欠損部を止水し、施工中の盤ぶくれを防止する必要があった。この欠損部対策は技術的に問題が多く、近隣や埋設物への影響を及ぼすことなく施工しなければならない条件であった。

３．従来工法の問題点

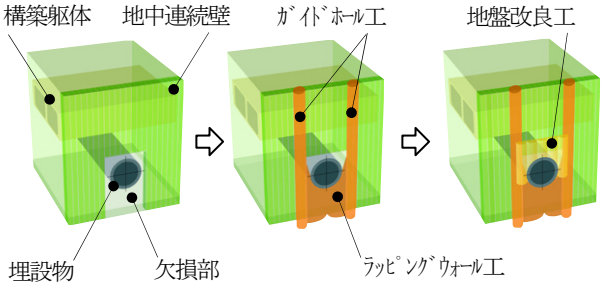
従来、移設できない埋設物に対する地中連続壁の欠損部対策は、小規模の埋設物の場合は地盤改良工法などで行うのが一般的である。当工事は、埋設物が大断面・大深度であることから改良範囲の限度を超えるため、止水壁を閉合できない。従来、このような条件の場合は、凍結や開削工法、立坑内からの水平地盤改良工などの大掛かりな方法を余儀なくされていた。しかし、これらの工法では以下のような問題があった。

① 施工が長期となり、多大な工費を要する。
② 高水圧に耐えられる止水性能が求められているのに対し、薬液注入工や地盤改良工は、均一性に問題があることや共同溝に接する地盤を確実に改良できないなど、品質面で満足できない。
③ 薬液注入工や地盤改良工は、広い範囲を施工する必要があるため、共同溝に対し隆起や沈下などの変位を生じさせることが懸念される。
④ 開削や立坑の構築を行った場合、道路占用や周辺の用地確保が複雑化し、住民や都市機能に対する負荷が大きく、それが長期に及ぶ。
⑤ 凍結工法を行った場合、周辺の広い範囲に地盤沈下など大きな影響を及ぼす。

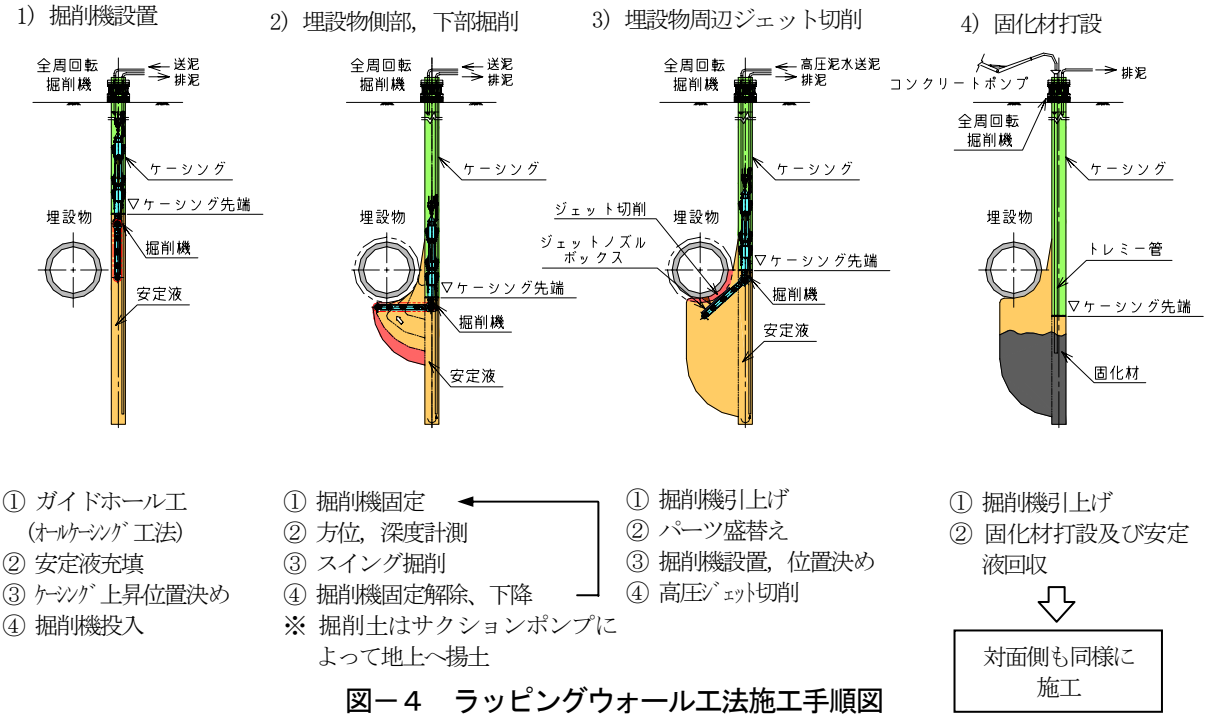
検討の結果、従来工法では品質面、技術面、環境面で問題が多く、施工が困難であると判断した。そこで、これらの問題を解決する新工法を開発することとした。

４．ラッピングウォール工法の内容

図－３に新工法の概要を、**図－４**に施工手順図を示す。



図－３　ラッピングウォール工法概要図



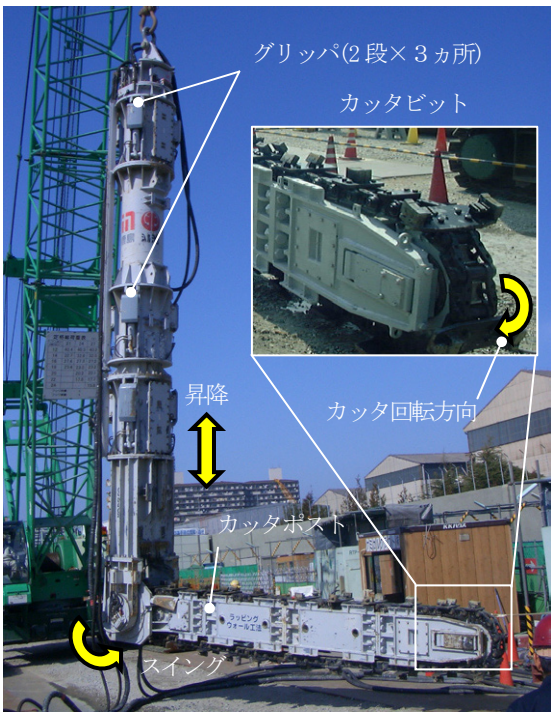
図－４　ラッピングウォール工法施工手順図

新工法は、簡易な手順で短期間に施工でき、周辺環境や埋設物への影響を最小限に抑制するため、安定液を用いた地中連続壁工法を基本とした。具体的には、専用機械によって、欠損部である埋設物の側部及び下部を掘削後、固化材に置換える。専用機械の投入・設置は、埋設物との離隔約１ｍに設けたガイドホール（φ1.5m）を使用する。新工法施工後は、埋設物上部に地盤改良工を施工し連続壁を閉合させる。

この工法の確立には、以下に記す４つの技術の開発が必要であった。

(1) 掘削機の開発

施工機械は、大断面の埋設物を横断して掘削するため、長尺の掘削機構を 90 度まで屈曲させる構造とした。掘削は、多様な土質を効率良く掘削可能なチェーンリンク式カッタビット（ＴＲＤ施工機と同様の機構）を採用した。また、掘削機構が長尺なため、掘削中の反力を十分に確保する必要があった。そこで、オールケーシング工法で施工したガイドホール内のケーシングを利用し、内側をグリッパで支持する方式とした。**写真－１**に掘削機を、**表－１**に掘削機の主な仕様を示す。



写真－１　掘削機全景

表－１　掘削機の主な仕様

項　　目	仕　　様
全　　長	15.8～17.8 m (ｽｲﾝｸﾞ半径6.2m)
全装備重量	約22 ton
壁造成幅	450～600 mm
カッタ接線力	64 kN
ｽｲﾝｸﾞﾄﾙｸ	Max 380 kNm
ｸﾞﾘｯﾊﾟ支持力	233 kN×6ヵ所 (3ヵ所×2段)

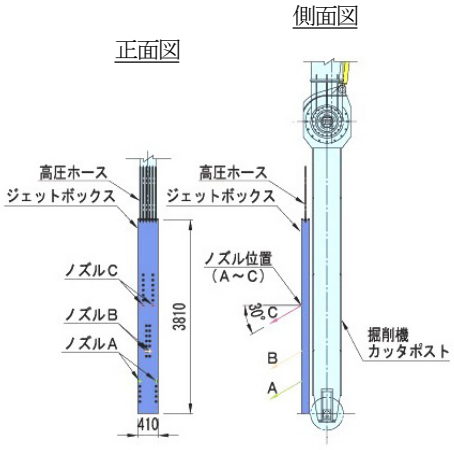
(2) 高圧ジェット切削技術の開発

機械掘削は、埋設物の損傷を防ぐためある程度の離隔を保って行う。残った埋設物周辺の地山は、高水圧に耐え得る優れた止水性能を確保するため、別の方法で確実に除去する必要がある。そこで、高圧ジェット噴射による地山切削技術を開発した。

埋設物を損傷させることなく、効率良く確実に地山を切削するため、土質条件や離隔距離など多くの条件を模擬して実験を行い、噴射仕様を見出した。**表－２**にその仕様を示す。

表－２　高圧ジェット切削の主な仕様

項　　目	仕　　様
噴射材料	安定液
噴射圧力	11 MPa
噴射流量	140 ℓ/min×2ヵ所
ノズル個数	6ヵ所（3段×2列）
噴射個所数	2ヵ所 （3段のうち1段のみ選択）
切削距離	Max1.5m(離隔限界0.5m)



図－５　高圧ジェットボックス組立図

高圧ジェット切削は、掘削機のカッタビットを外して高圧ジェットボックスを取り付けて行う。**図－５**に高圧ジェットボックス組立図を示す。噴射中は定点噴射にならないように、掘削機の昇降機構を使用してノズル位置を往復移動させる。

(3) 施工管理システムの開発

施工中の掘削機の姿勢や埋設物との離隔距離などの情報を、リアルタイムで把握するための施工管理システムを開発し導入した。これにより、施工中の地中の情報が視覚的に把握でき、安全で高い精度の管理を可能とした。**図－６**に施工管理システムのモニタ画面を示す。

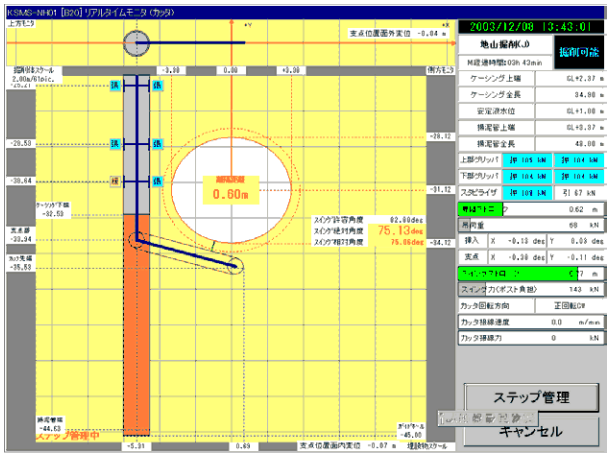


図 － ６　施工管理システムモニタ画面

(4) 新固化材の開発

掘削溝中の安定液と置換える固化材は、ブリーディングが生じず高流動で、埋設物形状に応じて密着するなど優れた充填性を有することが求められた。また、泥水との置換を確実に行うため材料分離を生じないこと、対面からの掘削時に固化材をカッティングするため貧配合であることなども要求された。そこで、特殊増粘剤を添加した新たなコンクリートの開発を行い、配合実験を経て、要求機能を満足できる材料を確立することができた。

５．施工実績

多くの技術的な課題があった中、様々な要素実験や現場規模の実証実験にて、検証を繰り返して工事に臨んだ。施工は、共同溝の横断部２ヵ所を、2003 年８月から 2004 年３月にかけて行い、無事完了した。

当工法は、以下に述べる特徴を有することが確認できた。

① 地下水の変動や埋設物の変位など、周辺環境に影響を及ぼすことなく施工できる。
② 埋設物に密着した、高品質の止水壁を構築できる。
③ 簡易な方法で短期に施工可能なため、周辺施設や都市機能に対する制約を最小限に抑えることができる。



写真－２　施工状況

６．おわりに

近年都市部では、市街地の再開発や大深度の地下空間の構築など、都市再生をキーワードとした事業が増加傾向にある。都市部において地中連続壁を施工する際は、移設できない埋設物が横断している場合が非常に多い。今回開発したラッピングウォール工法により、特殊条件下の埋設物欠損部対策として、新たな地中連続壁の構築方法を確立することができた。

ラッピングウォール工法は、大断面・大深度の埋設物周辺及び下部に、均質な改良体が要求される高水圧下の地中連続壁工法として有効と考えられる。都市再生分野の工事が増加する中、今後当工法が、共同溝や地下鉄などの埋設物欠損部対策の一つとして参考となれば幸いである。

3．SMW 新造成システムの開発（新駆動方式による大深度対応型高精度原位置攪拌工法の開発）

大成建設㈱：○藤谷　俊実、高瀬　義行、鈴木　庫雄

1.　はじめに

近年、都市部の地下空間を高度に有効利用するため、大深度の山留止水壁を効率良く高い精度で構築できる技術が求められている。山留止水壁の種類は、壁式（ＲＣ連続地中壁）と柱列式（ソイルセメント柱列壁）に大きく分類される。柱列式は、壁式に比べ経済性に優れるが、大深度や構築精度に関し改良すべき点があった。新たに開発したＳＭＷ新造成システムは、従来のソイルセメント柱列壁の課題を解決し、大深度山留止水壁を高精度に施工できるものである。

本文では、このシステム（以下ＵＤ－ＨＯＭＥＴ工法と記述する）の概要と、実工事への適用結果について報告する。

2.　開発の目的とシステムの概要

従来のソイル柱列壁工法の大深度・大口径施工での課題として、施工誤差、施工性、環境への影響がある。大深度での施工誤差の原因は、従来の施工機の駆動部がリーダ上部にあり、ここから地中のオーガーヘッドを回転させるため、駆動力を錐先端まで有効に伝達することができず、孔壁が曲がりやすくなること。また、先端錐の変位計測を断続的にしか行えないため、曲がり始めを検出できず、早期の修正制御が行えないことである。施工性については、地盤により先行削孔が必要であることとベースマシンとして三点式杭打機を使用するため、施工場所の制限を受けることである。

これらの課題を解決するため、開発目標を次のように設定した。

① 大口径の削孔能力を有する削孔ユニットの開発

② 削孔中も計測可能な、削孔精度管理システムの開発

③ 汎用クローラクレーンでの施工法の開発



写真－１　三点式杭打機による施工状況

3.　機械関連要素技術の開発と詳細

主な要素技術は、三つある。

① 三軸を基本構成とする中空モータを利用した削孔ユニットの開発

② 本削孔システムに組み込む連続計測システムの開発

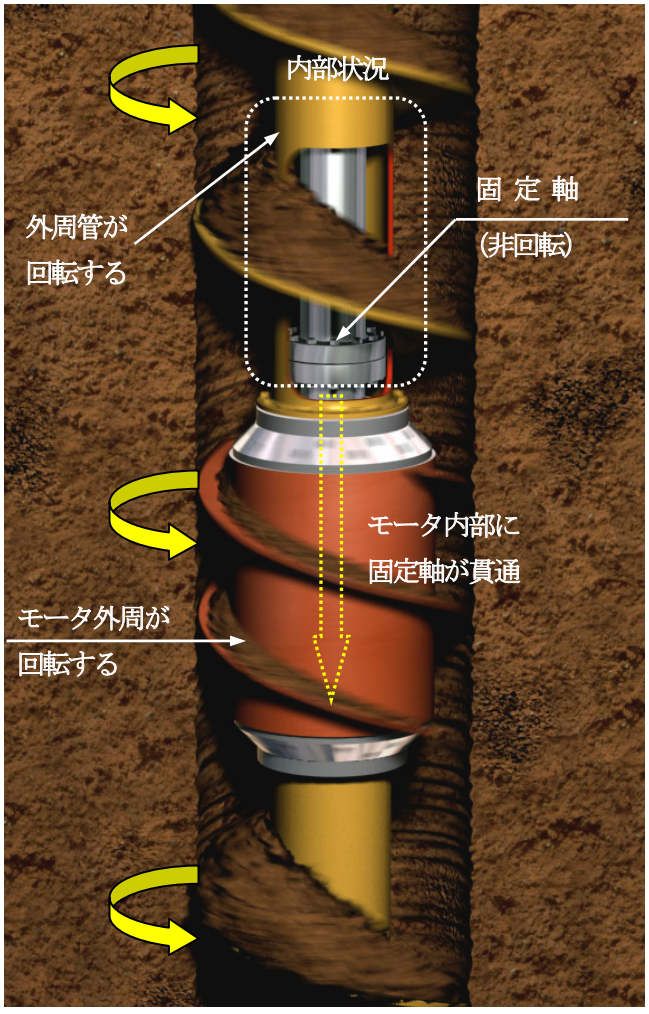
③ 礫地盤の削孔を可能とし削孔性能を向上する動力制御装置となる油圧ユニットの開発

次にそれぞれの項目について詳細に説明する。

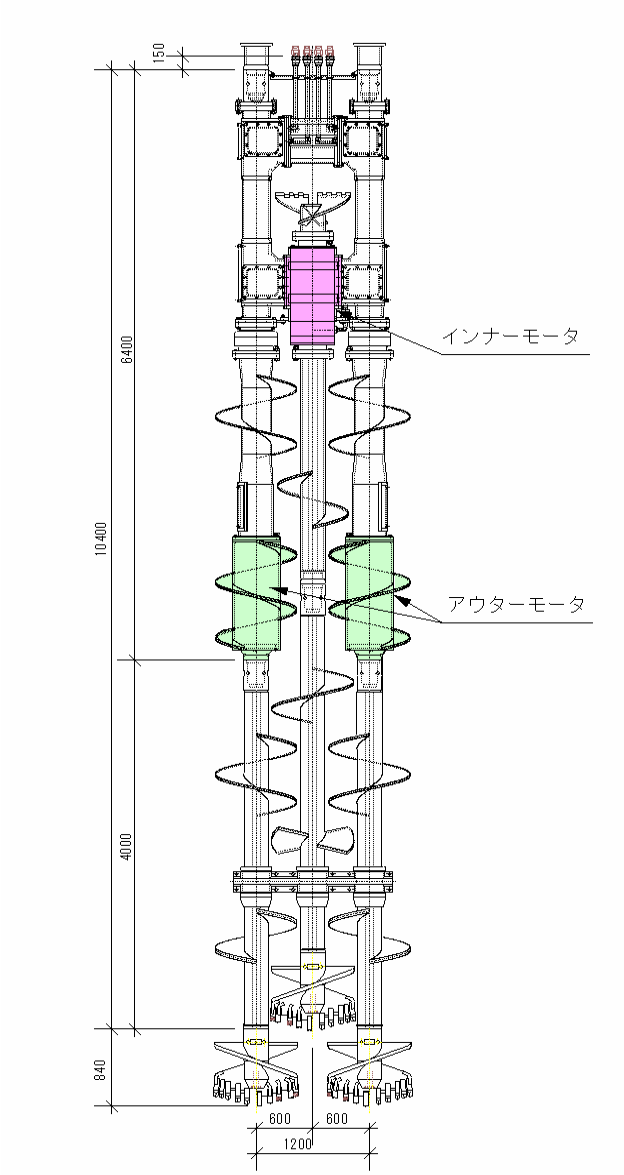
3.1.　中空モータと三軸削孔ユニット

中空モータには、中空軸を回転させるインナーモータと、モータを貫通する中空固定軸の周囲をモータ本体が回転するアウターモータの２種類がある。三軸削孔ユニットは、左右のアウターモータ本体と混練用オーガーが同時に回転し、その内側の中空固定軸の内管を、先端にセメントミルクを送る輸送管としている。つまり、二重管構造になっている。

開発当初、単軸削孔ユニットでの中空モータの複数配置、アウターとインナーの組み合わせ、さらに中空モータ取り付け位置を変えて削孔実験を行った。この時の施工データの解析結果より、削孔所要動力、削孔反力、削孔速度などを考慮して、三軸削孔ユニットの中空モータの配置と台数、組み合わせを決定した。



図－１　中空モータの概要



図－２　三軸削孔ユニットの中空モータ構成例

3.2.　連続計測システム

従来型ＳMWの削孔では、削孔深度に応じて、オーガーロッドを準じ継ぎ足していく。その為、削孔深度が深くなるにつれて、ジョイント数も増え削孔に必要なビット荷重も増加し、錐・ロッド全体に加わる軸応力が増大する。その結果、削孔中の錐・ロッドは、スネークラインと呼ばれる形状となる。このため、地上の固定点からロッド内の空間を利用して計測する光学的方法や、軸が回転するため傾斜計などによる連続計測ができなかった。

今回、このような課題を解決するため地上固定部か

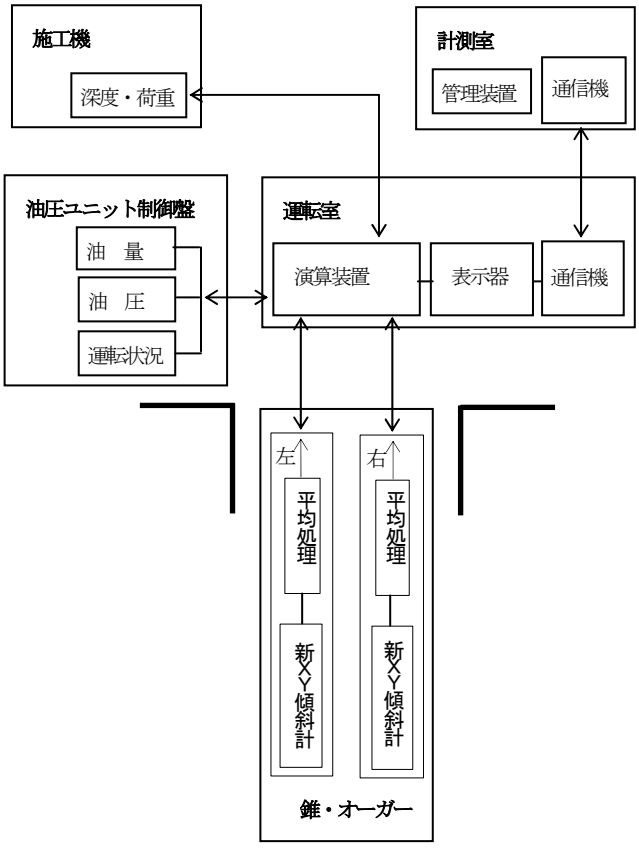
ら中空モータまで貫通する中空固定軸に固定された傾斜計と深度の計測データを利用した、連続計測システムを開発した。

3.2.1.　連続計測システムの詳細

システムの開発にあたって、次のように計測時の前提条件を設定した。

- 削孔は先端部の錐のみによって行われる。
- 上部のオーガーでは、削孔後の壁面は新たに削孔されない。
- 上部のオーガー部および固定ロッド部は必ず、先端の錐が削孔した孔壁の中を通過する。
- 錐の傾斜は、静止状態で実際の孔壁内の傾斜角を示す。

実際の削孔において、これらの条件が満足される場合、錐先端付近の中空モータの直上内部に装着された傾斜計の角度と、その時の深度を連続的に測定・演算し深度方向に順次積分すれば、錐先端のＸＹ軸方向の水平変位量が求まる。システムの構成図を図－３に示す。削孔中には、錐の切削による衝撃加速度や、エアーの噴出による傾斜計計測データにおよぼすノイズ



図－３　連続計測システムの構成図

が発生する。これを除去する方法として、移動平均処理と回帰処理の２種類の演算処理方法について実施した。

①　傾斜計データの時間経過による単純２０項移動平均処理による方法。

②　傾斜計データをＹ軸、計測時の深度をＸ軸として1m区間毎の回帰処理による方法。

3.2.2.　連続計測システムの精度検証

連続計測システムの精度を検証するため、削孔を一時停止して計測する方法③と削孔終了直後に計測する方法④の二つの方法を実施した。

③　従来のD.A.M.Systemとほぼ同様に、深度５ｍ毎に削孔を停止し、その時の安定した傾斜角（①と同一の傾斜計）と深度により、深度５ｍ毎における錐のＸＹ軸方向の水平変位量を求める方法。

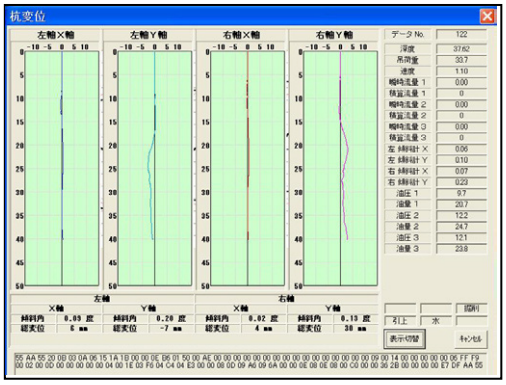
④　挿入式傾斜計による測定方法。

削孔終了直後に挿入式傾斜計を削孔ユニットの固定ロッドおよびオーガーに予めセットされたケーシングに挿入して、挿入式傾斜計自体の傾きを検知し、その上端と下端のズレ（変位）を測定する。この測定値を孔底から地上まで 50ｃｍ毎に変位量を加算することにより、孔口までのボーリング孔の地中変位量を、絶対値で把握する方法（写真－２参照）。この④の方法を正として、他の①～③の計測値を比較した。その結果40mの削孔深度における誤差は、ＸＹ軸方向のどちらの水平変位量も±30～50mmであった。[1)]

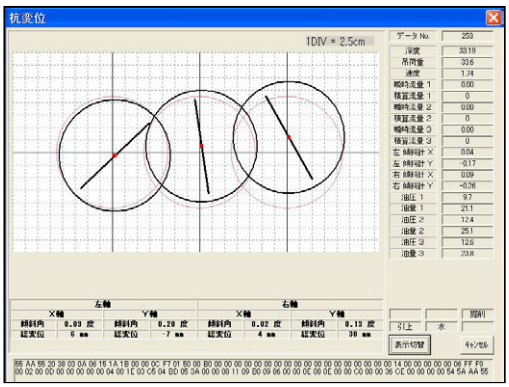


写真－２　挿入式傾斜計による削孔精度確認状況

この連続計測システム（移動回帰処理）による施工時の計測画面の状況を写真－３、４に示す。



写真－３　深度と変位量の表示



写真－４　オーガー先端断面の位置表示

3. 3.　油圧ユニット

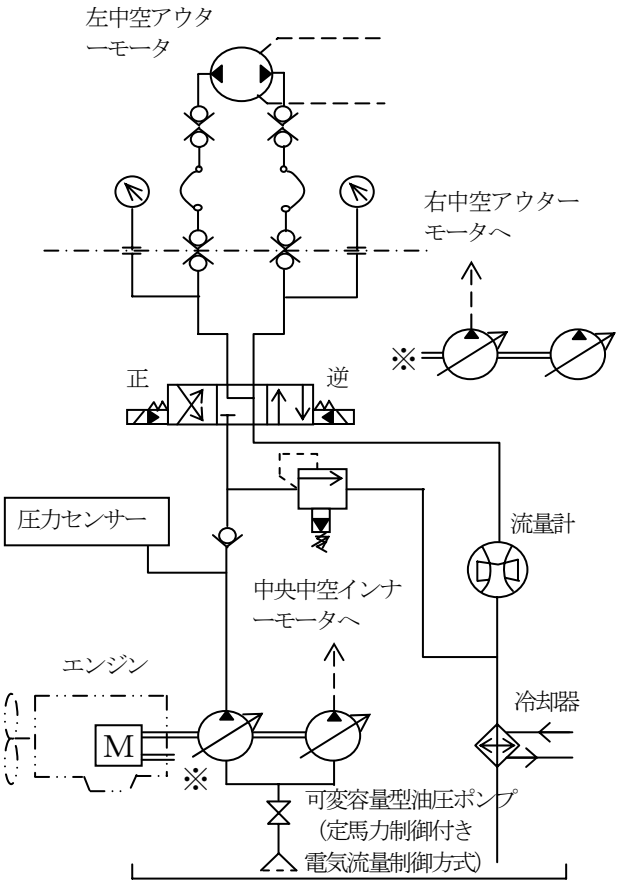
本システムでは、新たに削孔ユニットの駆動用に油圧ユニットも開発した。その概略仕様を表－１に示す。この油圧ユニットは、礫地盤掘削用に衝撃揺動回転制御などの各種掘削制御機能を組み込んでいる。また、削孔時の作業効率と機動性を向上させるため三点式杭打機に搭載できる搭載型油圧ユニットも開発し使用している。写真－５に搭載型油圧ユニットの状況を示す。また、油圧回路の概略を図－４に示す。

表－１　油圧ユニットの概略仕様

油圧ユニットの主な仕様	
外形	L5500×W2200×H2500mm
質量	13　ton
エンジン	４サイクル水冷エンジン、470kw
ポンプ	アウターモータ用 30MPa、255L/min、2 台
ポンプ	インナーモータ用 30MPa、323L/min
ポンプ	パイロット用　40 MPa、25L/min
冷却能力	ファン：75kw/h、水クーラー：150kw/h
ｵｲﾙﾀﾝｸ	1600　L



写真－５　ベースマシン搭載型油圧ユニット



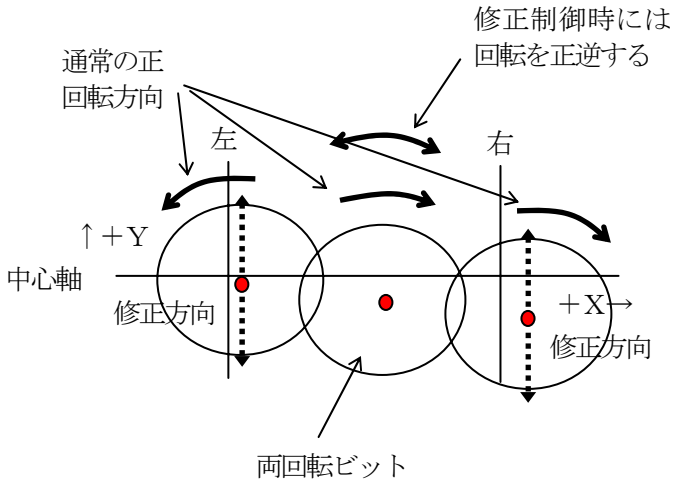
図－４　油圧ユニットの油圧回路

4.　修正削孔と制御方法

従来型ＳMW機の三点式杭打機による施工の場合、次のような修正削孔と制御をしていた。深度が浅さく

深度10m程度までは、ある限界を設定して、X方向（オペレータから見て左右方向）には、杭打機本体を左右に走行させて錐とロッドを鉛直に位置させる。また、Y方向（オペレータから見て前後方向）には、支持機のリーダを前後にスライドさせて、錐とロッドを鉛直に位置させる。この修正操作を、削孔中に絶えず行う。更に、鉛直性が保てなくなったら削孔を停止して錐のターニング（錐の上下修正操作）をする。この場合、錐とロッドの傾斜を修正する方向に支持機のガイドを傾斜させる。状況によるが傾斜角は、2°程度である。深度が深くなった時は、杭打機の走行およびリーダのスライドによる修正は、効果がなくなるためリーダの傾斜とターニング操作が主となる。

ＵＤ－ＨＯＭＥＴ工法の削孔ユニットのみで、位置・姿勢制御を行う時は、従来の修正方法に加えて、錐を個別に制御できる利点から、それぞれの錐の回転方向と回転数を変える操作をする。左右回転方向の切削抵抗の合力バランスを変えることで、Y方向の変位量の修正は可能である。そのバランスを変えるポイントは、中央の錐の回転方向と回転数を、Y方向の変位量に応じて変える事である。つまり、変位、捩れの状況により、中央の錐の回転方向を任意に変えればよい。しかし、従来の単方向回転ビットでは、逆回転時の削孔効率が低いため、新たに両回転ビットを開発した。実施工の結果、従来の単方向回転ビットの正逆回転よりも両回転ビットの正逆回転による削孔は、削孔ユニットのねじれ修正により有効であることを確認した。



図－５　両回転ビットによる修正制御イメージ

5.　実施工による施工結果

実際の工事において、下記の施工条件で従来型ＳMW工法とＵＤ－ＨＯＭＥＴ工法で施工した結果を述べる。

5.1.　施工時間の比較

削孔径　φ900　@600　造成長　40.5m

先行削孔　φ900　Ｌ＝40.5m（従来型ＳMWのみ実施）

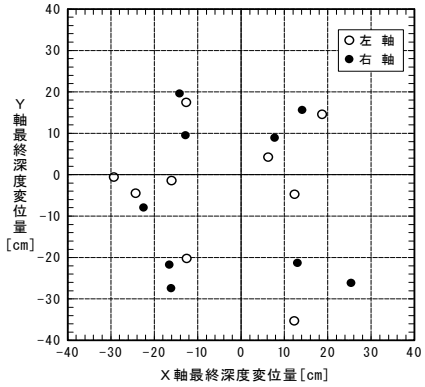
なお、ここの施工場所での従来型ＳMW工法による平均施工時間を100とした場合の比較を表－２に示す。これによると、ＵＤ－ＨＯＭＥＴ工法は、従来型SMW工法に比べて、削孔時間は長いが、先行削孔が不要なことと削孔精度の向上により応力材建て込み時間が短縮されたために、全施工時間は短縮された。

表－２　施工時間の比較表

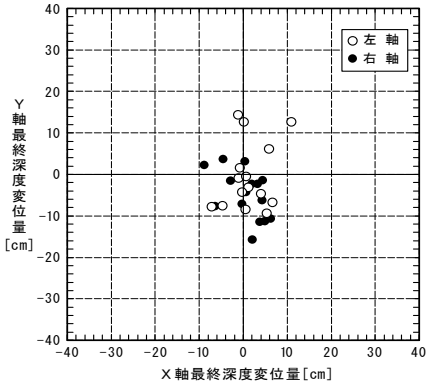
	先行削孔	削孔・造成	応力材建込み	合計
SMW	35	42 (DAM 計測)	23　(2 本)	100
UD-HOMET	－	55 (連続計測)	15　(2 本)	70

5.2.　削孔精度の比較

深度40m付近における掘削変位の分布図を図－６、７に示す。



図－６　従来型ＳMW変位量



図－７　ＵＤ－ＨＯＭＥＴ変位量

削孔精度について、最大深度での変位量グラフ図－６、７を比較すると、明らかにUD－HOMEＴ工法が、従来型ＳMW工法より精度がよい。この削孔精度が向上した理由は、削孔部のねじれに対する剛性が増したためと考える。更に、UD－HOMEＴ工法は、駆動部が錐軸先端付近にあり、従来型ＳMW工法に見られる上からの押さえつけによる、オーガージョイント部の折れ曲がりが少なくなることも削孔精度向上の一因と考える。

当工事では連続計測による変位量を確認しながら、各軸の回転方向・回転数制御と施工機リーダの前後左右の傾斜調整およびターニングにより、変位量の修正を実施した。[2)]

6.　クローラクレーン（フライング）による施工

ベースマシンに三点式杭打機を使用する場合，削孔とベースマシンは同一の施工基盤での作業になる。これに対し，本工法は、地上固定部が回転しないため、ベースマシンとしてクローラクレーンが使用でき，異なる施工基盤での作業が可能になった。また，ベースマシンが、削孔位置から離れるので，条件によっては，従来型ＳMW工法と比較して，狭い作業帯の中での作業も可能である。今回実際に、削孔部が傾斜地においてベースマシンとして、クローラクレーンを使用して施工を行った。この際、オーガーの振れ止め用として新たに開発した口元ガイドを、削孔部ガイドウォール上面に設置して施工した。口元ガイドの状況を、写真－６に示す。また、写真－７に施工状況を示す。



写真－６　口元ガイドの設置状況



写真－７　フライング方式の施工状況

7.　おわりに

UD－HOMEＴ工法は，2002年8月から開発を開始し，約1年で実施工を行い，大深度の柱列壁を高精度に造成することができた。実際の施工を実施して、当初の開発目的を達成できたことが確認された。さらに、駆動部が地中に入って削孔するために、削孔ユニット周辺が低騒音で環境負荷の低減が可能な工法であることが検証された。今後、多種な施工環境への適用、発展が見込まれる工法と考える。なお、本報文を作成するにあたり、資料の提供をいただいた共同開発先の成幸工業㈱、成和機工㈱をはじめとする関係者の方々にお礼申し上げる。

参考文献

1)　藤谷・橋本・林：ＳMWの新造成システムの削孔精度連続計測システム、土木学会第 59 回年次学術講演回、6-170、土木学会、平成 16 年 9 月

2)　秋田・林・伊藤：新連続地中壁造成システムによる土留壁の施工、建設の機械化　‘04. 3 号、(社)日本建設機械化協会、2004 年 3 月

4．深層混合処理機方向制御システムの実施工への適用

㈱竹中土木：○廣渡　智晶、大西　常康
㈱竹中工務店：山本　光起

1．はじめに

軟弱地盤にスラリー状のセメント系固化材を添加し、深層混合処理機により原位置で地盤と混合撹拌する深層混合処理工法は、早期に改良効果が期待でき、低振動・低騒音であることから土木分野で数多くの施工実績を重ねている。また、兵庫県南部地震において液状化防止効果が確認されてからは、建築分野にもその適用範囲に拡がりを見せている。筆者らは一昨年、深層混合処理機の先端位置をリアルタイムに検出する軌跡管理システムと、油圧ジャッキとワイヤを用いて処理機の先端位置を自在に制御する方向制御システムの開発について報告した。本報では、これらシステムの概要とシステムを実施工に適用した結果および精度検証を行った結果について報告する。

2．開発の目的

深層混合処理工法で杭状に形成される改良体(以下、改良杭と称す）は、各々が接合（以下、ラップと称す）され連続した壁体として外力に抵抗する設計が一般的に採用されている。本工法の開発は、従来工法と較べ改良杭の鉛直精度を向上させ、ラップ幅を低減させることを目的とする。これより、施工数量および産業廃棄物発生量の削減が可能となる。

3．工法の概要

3．1　深層混合処理工法

深層混合処理工法で使われる深層混合処理機は、1本ないし2本の駆動軸を装備している。簡易式バッチャープラントで製造されたスラリー状のセメント系固化材を攪拌翼の先端から吐出しながら貫入を行い、原地盤と混合・撹拌する。深層混合処理機の全景を**写真－1**に示す。



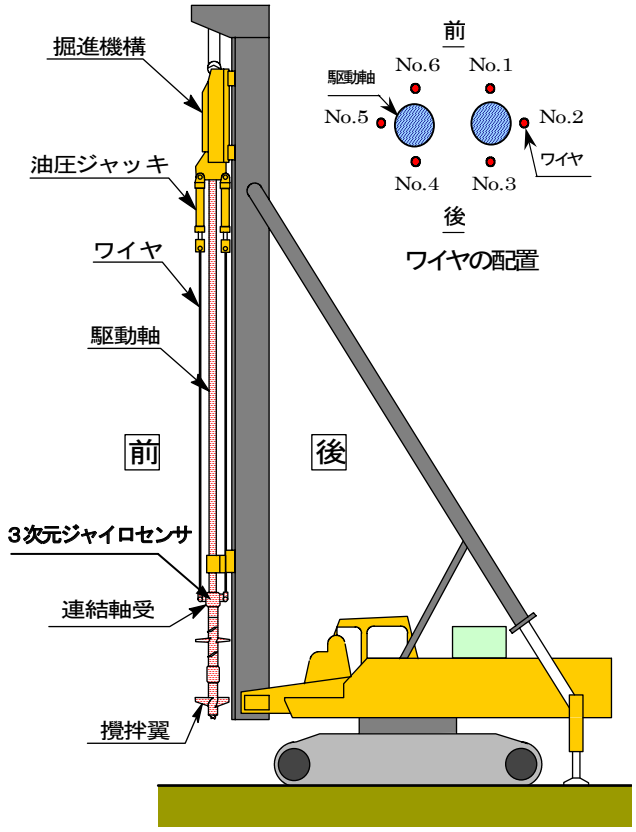
写真－1　深層混合処理機全景

3．2　施工精度の管理方法

ラップ施工による改良杭相互の一体化を確実なものとするため、従来は施工時のバラツキを考慮し、ラップ幅を200mmとして施工を行っている。また、処理機先端位置の直接的な制御方法が確立されていないため、ラップ幅や鉛直性を確保する手段として施工スピードを慎重にコントロールする等の工夫が行われている。これより、深層混合処理機を運転するオペレータには、高度な技量と多大な作業負荷が要求されるのが実情である。

４．方向制御システムの概要

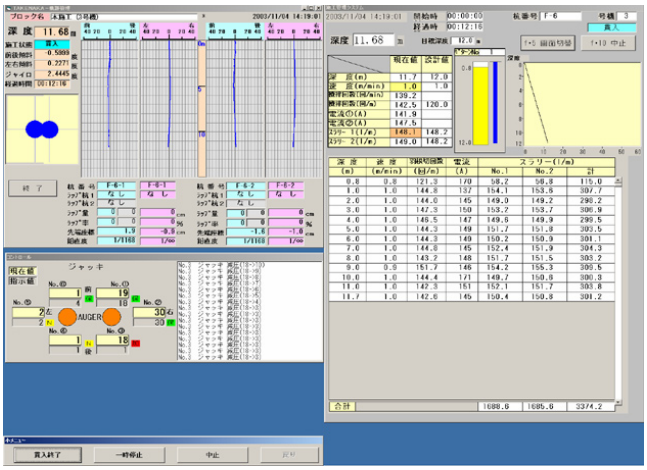
方向制御システムの全体図を**図－１**に、油圧ジャッキとワイヤの仕様を**表－１**に示す。方向制御システムは、掘進機構下端に取付けられた油圧ジャッキ、油圧ジャッキの引き力を連結軸受部に伝達するワイヤ、地中における処理機先端位置をリアルタイムに検出する３次元ジャイロセンサを納めた連結軸受および管理室内に設置する施工管理システムから構成される。方向制御は、施工管理システムのモニタ画面にリアルタイムに表示される処理機先端位置の軌跡にもとづき、油圧ジャッキを適宜操作することで行う。施工中のモニタ画面の一例を**図－２**に示す。画面左上側に先端位置の軌跡を、左下側に現在の油圧ジャッキの操作状況を、画面右側に注入量や撹拌回数などの施工管理状況を表示している。



図－１　方向制御システム全体図

表－１　油圧ジャッキとワイヤの仕様

油圧ジャッキ	前後方向	本数	前後各2本、計4本
		引き力	Max 200kN
	左右方向	本数	左右各1本、計2本
		引き力	Max 340kN
ワイヤ	前後左右	外径	φ35.6mm



図－２　施工中のモニタ画面

４．１　油圧ジャッキ

油圧ジャッキは、前後方向に各々2 本、左右方向に各１本の計６本を装備した。油圧ジャッキの引き力は、撹拌翼先端での横方向力が約 2.0kN となるよう設定した。また、駆動軸が２軸であるため、前後方向に較べ左右方向の剛性が大きくなることから、左右方向は前後方向より引き力の大きい油圧ジャッキとした。油圧ジャッキの取付け状況を**写真－２**に示す。油圧ジャッキの操作用回路は、高圧（25MPa）と低圧（7MPa）の２系統とした。これは、以前行った制御手法確認実験において、油圧ジャッキを操作して引き力を与えたところ、操作した油圧ジャッキとは反対側のジャッキにワイヤを介して引き力が生じ、制御の抵抗となる現象が確認されたためである。これより今回使用する深層混合処理機では、制御に使用しない油圧ジャッキに、常時低圧の引き力を発生させ、ワイヤを介し生じた引き力が 7MPa を上回ると、ロッドが引き力に追従して伸びる構造とした。



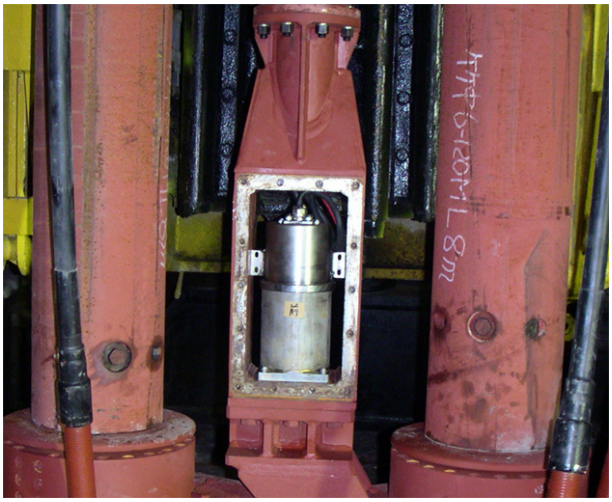
写真－２　油圧ジャッキ

４．２　ワイヤ

油圧ジャッキの引き力を連結軸受に伝達するワイヤは、引張り荷重による伸びが生じない PC 鋼より線を採用した。また、腐食対策として、ワイヤの外周はポリエチレンで被覆されたものとし、太さは最大引張り力を考慮してφ35.6mm とした。

４．３　軌跡管理システム

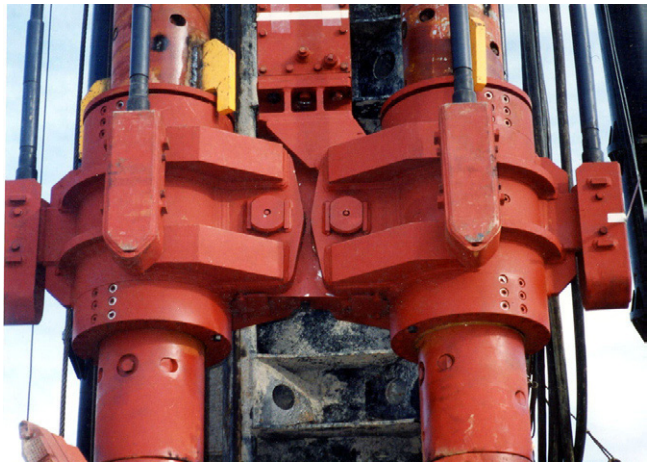
軌跡管理システムは、連結軸受直上の保護ケース内に設置された３次元ジャイロセンサと管理室内に設置された管理システムより構成される。３次元ジャイロセンサは、光ファイバージャイロ１基および傾斜計２基で構成されており、施工時の天頂軸方向の回転角（ヨウ角）と水平２軸の傾斜角（ロール角、ピッチ角）を検出し、そのデータをもとに貫入中の処理機先端位置の座標をリアルタイムに演算する。連結軸受の直上の保護ケース内に設置した３次元ジャイロセンサを**写真－３**に示す。



写真－３　３次元ジャイロセンサ

４．４　連結軸受

２本の駆動軸は、軸間距離を規定値に保つため軸間に連結軸受を設けている。連結軸受は、ワイヤの定着部も兼ねており、貫入に伴い土中に入るためベアリング支持構造になっている。掘削軸の剛性は前後方向に較べ左右方向が高くなるが、構造上左右方向には油圧ジャッキが１本しか装備できないことから、油圧ジャッキの能力を大きく設定するだけでなく、リンク機構を設けて剛性を下げる工夫を取った。**写真－４**に連結軸受部のリンク機構を示す。



写真－４　リンク機構

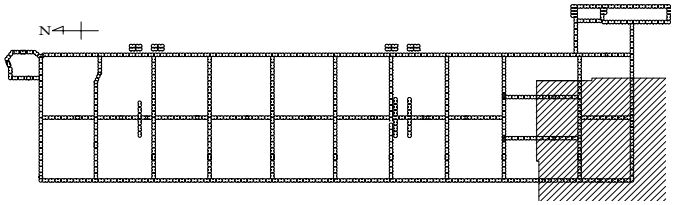
４．５　自動制御

方向制御システムの操作は、処理機オペレータもしくは施工管理者が行うことを想定している。しかし、オペレータや施工管理者が操作する場合、方向制御に対する熟練度が必要となることや、施工中の処理機やプラントの運転、施工管理と並行作業となることより作業が煩雑化し、人的ミスによる問題の発生も考えられた。そこで、実施工に適用するに当たり、改良杭のラップ状況などの施工条件と施工中の処理機先端位置の変位に応じて、油圧ジャッキを自動的に制御する機能を試験的に採用し、その適用性の検証を計画した。また、各深度における熟練者の油圧ジャッキ操作を自動的に記録し、各深度に応じて再現させる機能も追加した。

５．実施工への適用結果

５．１　工事概要

実施工への適用は、平成 15 年 10 月に自社ビル新築工事の基礎部地盤改良工事で実施した。基礎工事には、「TOFT 併用パイルド・ラフト基礎」という複合基礎工法が採用され、方向制御システムは、同工法を構成する「TOFT 工法（耐液状化格子状深層混合処理工法）」で適用した。対象工事の杭配置を**図－３**に、施工条件を**表－２**に示す。施工位置は工事区域の南西部（網掛部）で、施工総本数は 73 本である。



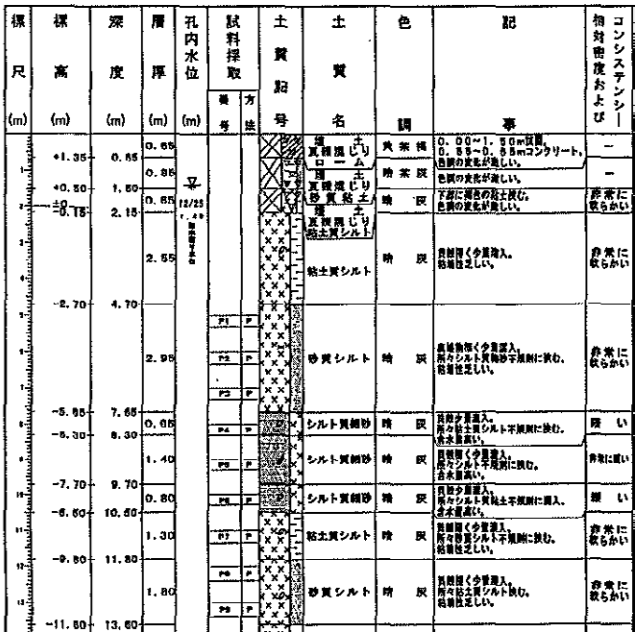
図－３　杭配置図

表－２　施工条件

改 良 長	L=11.2m
設計基準強度	1,800kN/m^2
セメントの種類	高炉セメントB種
セメント添加量	175kg/m^3
水セメント比	80%

施工場所の土質は、表層に瓦礫混じりの埋土、GL-9m 付近までは含水比の高いシルト質細砂、それ以深は粘着性に乏しい粘土質シルトと砂質シルトの互層である。**図－４**に工事区域の土質柱状図を示す。

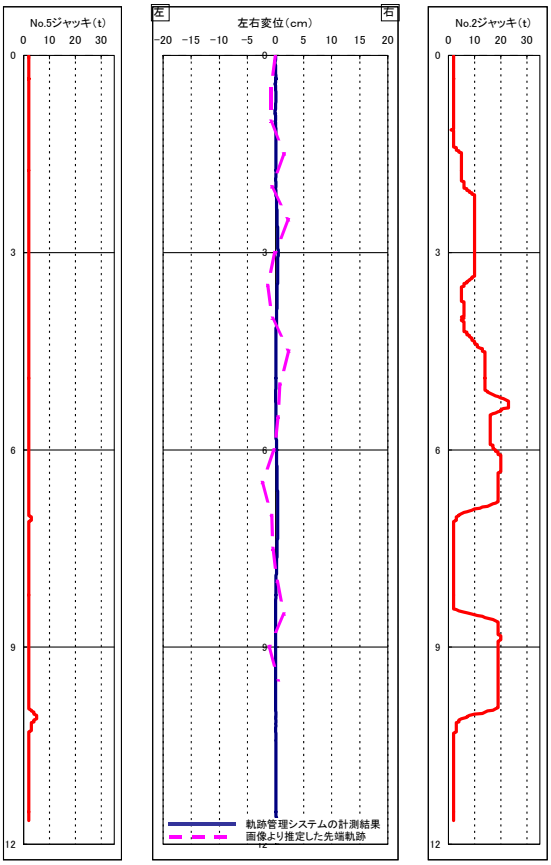
改良杭の１本に対し、施工完了後に大口径ボーリングを実施するため、セメントに着色材（ベンガラ）を混ぜて施工した。



図－４　土質柱状図

５．２　方向制御

油圧ジャッキの操作は、管理室から軌跡管理システムのデータを参照しながら、適宜施工管理者が行った。油圧ジャッキの操作は貫入時のみ行い、目標深度に到達した段階ですべての油圧ジャッキは中立（低圧側）に切替えた。左右方向（ラップ方向）における、油圧ジャッキの操作状況と軌跡管理システムの計測結果の一例を**図－５**（青色実線）に示す。図より、軌跡が左方向へ変位するのを抑えるため、右ジャッキ（No.2）を操作した結果、処理機先端位置がほぼ鉛直に制御されたことが判る。また、油圧ジャッキの最大引き力は 230kN であった。これより、本方向制御システムにより処理機先端位置を自在に操れることが確認できた。



図－５　計測結果と推定した先端軌跡

５．３　鉛直精度

表－３は処理機先端位置の各深度における変位量の平均値と着底深度の平均値を施工日別に示す。

表－３　改良杭深度別変位量

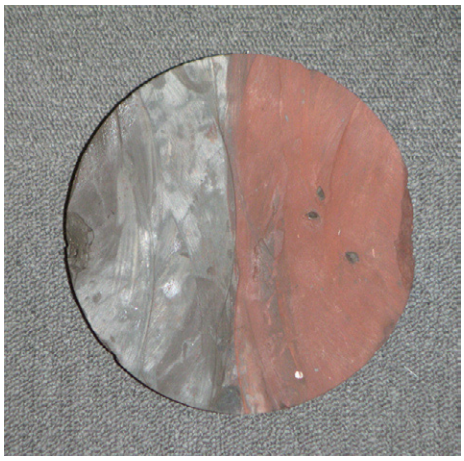
施工日	深度別変位量(cm)				着底深度
	3m	6m	9m	着底	(m)
10月27日	0.59	0.78	2.56	4.40	11.6
10月28日	0.40	0.76	0.91	1.88	11.6
10月29日	0.53	0.91	1.99	3.12	11.7
10月30日	0.96	0.94	1.59	1.72	11.7
10月31日	0.72	0.84	1.78	2.45	11.6
11 月 1 日	0.86	0.80	1.38	1.94	11.6
11 月 4 日	0.70	1.21	2.74	3.68	11.6

この表より、初日は方向制御に不慣れなこともあり、着底時の変位量が大きくなっていることが分かる。しかし、２日目以降は方向制御にも慣れ、変位量が小さくなっている。また、深度が深くなるに従い、変位量は多少大きくなるが、従来の深層混合処理工法と比較すると小さい値である。最終日に着底時の変位量が多少大きな値を示しているが、これは試験的に行った自動制御の結果を含むことに影響を受けている。

また、施工完了後、鉛直精度確認のため着色材を添加した改良杭のラップ部に大口径ボーリングを行った。大口径ボーリングには、外径 220mm のサンプラを使用した。ボーリング孔では、鉛直精度を検証するため孔曲がり測定器による鉛直変位の計測およびボアホールカメラを用いた孔壁撮影を行った。ボアホールカメラの画像より推定した先端軌跡を**図－５**（赤色破線）に示す。軌跡管理システムの計測結果と画像より推定した先端軌跡を比較すると、両者はほぼ±3cm 以内で一致しており、大口径ボーリングの結果からも改良杭の鉛直精度を確認することができた。

５．４　施工品質

採取したボーリングコアを用いて、改良杭の一軸圧縮強度を確認した。一軸圧縮強度の平均値は、3,000kN/m² と設計基準強度を上回ったことから、方向制御を行う装置類（ワイヤ、連結軸受、信号線保護管）は、改良杭の施工品質に悪い影響を与えないと考えられる。GL-10m 付近のコアを**写真－５**に示す。向かって右側が着色材により赤色を呈した杭、左側が通常の地盤改良杭である。



写真－５　GL-10m のボーリングコア

５．５ 施工効率

施工対象杭 73 本のうち、連続的に施工したのは 72 本、施工期間は計 7 日間であった（1 本は載荷試験用に離れた位置に施工）。1 日当たりの施工本数は最大で 13 本/日、施工日当りの平均で 10.3 本/日であった。施工日別の施工本数と通常施工を行った 1、2 号機の平均施工本数を**表－４**に示す。

表－４　施工日当りの施工本数

施工日	施工本数	1、2号機平均
10月27日	8本	14本
10月28日	11本	13本
10月29日	11本	14本
10月30日	9本	13本
10月31日	13本	13本
11月1日	12本	14本
11月4日	8本	14本
小計	72本	－

改良杭１本当たりの施工時間は、最長で 35 分/ 本、最短で 28 分/本、平均で約 29 分/本であった。標準施工時間が 28 分/本（貫入・引抜き 1.0m/分、先端処理 0.5m/分）であることから、方向制御を行っても従来工法と殆ど施工効率に差違の無いことが確認できた。また、貫入時の油圧ジャッキの操作が、処理機の運転・操作に影響していないことをオペレータより確認した。

５．６　自動制御

施工中、自動制御手法の検証を行った。検証の結果、改良杭のラップ条件と先端変位に応じて油圧ジャッキを自動制御した場合、左右ラップの条件では、強度が発現していない杭側に大きく変位する傾向が見られた。これは、修正指示のタイミングに問題があると考えられたため、タイミングについて再検討を行っている。また、３次元ジャイロセンサの方位角を判断基準に加えることも検討している。

６．まとめ

今回行った実施工への適用の結果、開発した本システムは、改良深度に関わらず処理機の先端位置を少なくとも 5cm 以内で制御できることが実証できた。今回は改良長が比較的短いケースではあったが、改良長は長くなっても本システムの対応は可能であると考えられる。しかし、現状での適用可能深度は、継杭施工に未対応であることから最大 GL-25m 程度と考えている。

本システムの適用により、鉛直精度の向上、ラップ幅の低減が可能となり、施工数量および産業廃棄物の削減が可能となりコスト低減が期待できる。一方、方向制御の効果は、地盤条件や施工条件に影響を受けると考えられることから、今後、実施工データの蓄積と制御の自動化を進め、作業の省人化、施工品質の安定化を図って行きたい。また、今後は汚染土壌の封じ込め対策や止水性の高い土留め壁など、新しい分野への適用も視野に入れていきたい。

最後に、本システムの開発にご協力をいただいた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

1) 藤井、大西 他：深層混合処理機の施工精度制御装置の開発、第 9 回建設ロボットシンポジウム論文集、2002
2) 藤井、山本 他：深層混合処理機の建入れ精度制御システムの開発（その 1、2)、日本建築学会、学術講演会梗概集、2002
3) 大西、廣渡 他：深層混合処理工法の方向制御システムの開発（その 1、2)、土木学会、第 59 回学術講演会梗概集、2002
4) 太田、大西　他：深層混合処理機の施工精度管理システムの開発、日本建設機械化協会、建設機械と施工法シンポジウム、2002
5) 大西、山本　他：深層混合処理機の施工精度制御装置の実用化 第 11 回建設ロボットシンポジウム論文集、2004

5．大深度・掘削土再利用連壁（TSW）の施工事例

㈱竹中工務店：○田中　裕也、長谷　理、北村　敏直

1. はじめに

近年、都市部の地下工事における大深度化が進む中、工事中の掘削残土は増加傾向にある。また、掘削残土は環境保全，残土処理場の不足の面から発生を抑制させ、リサイクルすることで場外への搬出量を減らすことが求められている。

竹中ソイルセメント連続地下壁工法(以下、TSW＝Takenaka Soilcement Wall Method)は、RC 連続壁の掘削手法とソイル柱列壁の山留め構成要素を組み合わせた、大深度地下対応の山留め工法である。TSW工法の最大の特長は、掘削土のリサイクルが可能なことである。

今回、(仮称)名駅四丁目7番地区再開発ビル新築工事において、TSW 工法としては最大規模となる掘削深さ 62m、壁面積 27,672m^2 の山留め壁を所期の仕様で構築できた。また、掘削土の再利用率 67.0%と高いリサイクルが実現できたので、併せて報告する。

2. 本論

2－1. 工事概要

本工事は、名古屋駅周辺における地区機能更新のリーディングプロジェクトとして2004年1月に着工した。

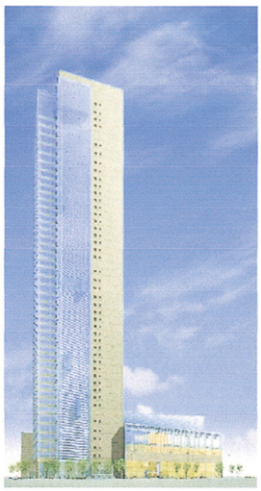
地上部は高さ247mの事務所棟(高層棟)と映画館を有する店舗棟(低層棟)から構成され、地下部は深さ30m の駐車場と DHC から構成されている。表－1に工事概要を、図－1に建築パースを示す。

2－2. 山留め工事概要

今回実施した TSW による山留め工事の概要を、表－2に示す。山留め壁は、下部粘性土の盤膨れ防止のため、GL－65mの粘土層へ到達させている。また、TSW の高い遮水性能により、排水対象となる地下水量を少なくすることをねらった。

表－1　工事概要

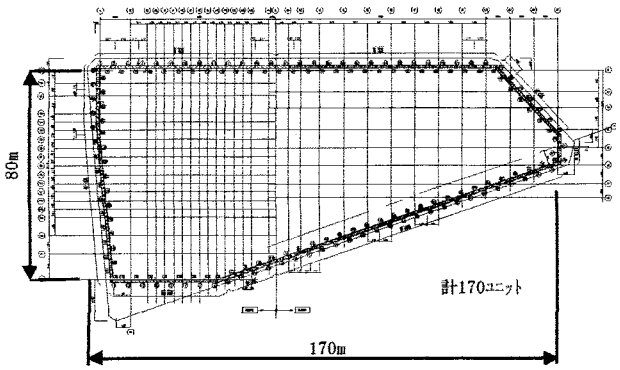
工事名称	(仮称)名駅四丁目7番地区再開発ビル新築工事
建築地	名古屋市中村区名駅
建築主	東和不動産㈱、トヨタ自動車㈱、㈱毎日新聞
設計監理	㈱日建設計
施工	竹中・大林・鹿島・清水共同企業体
建築用途	事務所，店舗，映画館，駐車場、(DHCプラント)
階数	B6,F47，P2
敷地面積	11,643.15m^2
延床面積	193,873.72m^2
構造種別	RC,SRC(1F以下),S(2F以上),CFT(高層棟)
建物高さ	GL+247.0m



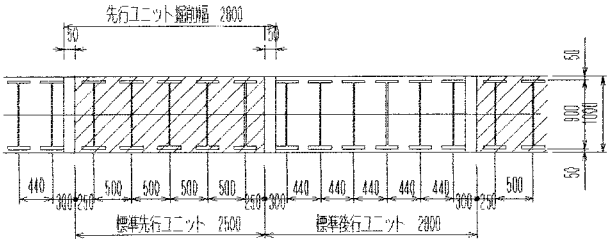
図－1　建築パース

表－2　山留め概要

名称	単位	数量
壁厚	mm	1,000
周長	m	446.3
掘削長	m	62.0 (SGL-3.0～-65.0)
壁面積	m^2	27,672.2
ユニット数	U	170
ユニット当掘削土量	m^3	173.6
設計掘削土量	m^3	27,672.2
芯材	－	H-900*300*16*28他
芯材ピッチ	mm	440～500
芯材数量	本	917



図－2　山留め平面図



図－3　先行・後行ユニット図

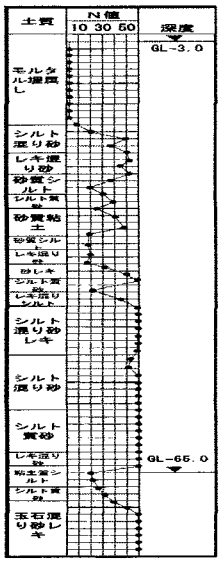
本作業所での TSW は、山留めとしての遮水性と併せて、芯材（H900×300）にスタッドを溶接し、地下外壁と一体化させることで、本設躯体として活用している。また、建物外周部の杭の代わりに、TSWを本設杭として活用する設計となっている。このため、ソイルセメント強度を通常の仮設壁として採用している 0.5N/mm^2 から1.2N/mm^2 に上げている。強度アップは、後行ユニットの掘削効率に影響を与えるため、機種選定と併せて施工計画に反映する必要があった。

ユニットの割付けについては、図－3に示すように先行ユニット、後行ユニットとも掘削幅 2,800mm であり、壁厚を 1,000mm、ラップ長を 150mm とした。芯材の設置方法は、先行建込み方法を採用した。先行ユニットは 5 本の芯材を、後行ユニットは 6 本の芯材を幅止め材で繋ぐことによりユニット化し、後打ちのソイルセメントによる芯材への建込み精度の悪影響を防いだ。

2－3. TSW 工法の概要

本工法は、RC 連続掘削機により矩形断面の掘削を行い、掘削土とセメントミルクを現場内に設置したソイルセメント製造装置によって混合撹拌する。

また、掘削溝は超音波測定装置で掘削状況が確認でき修正掘削が可能なため、今回のような大深度の

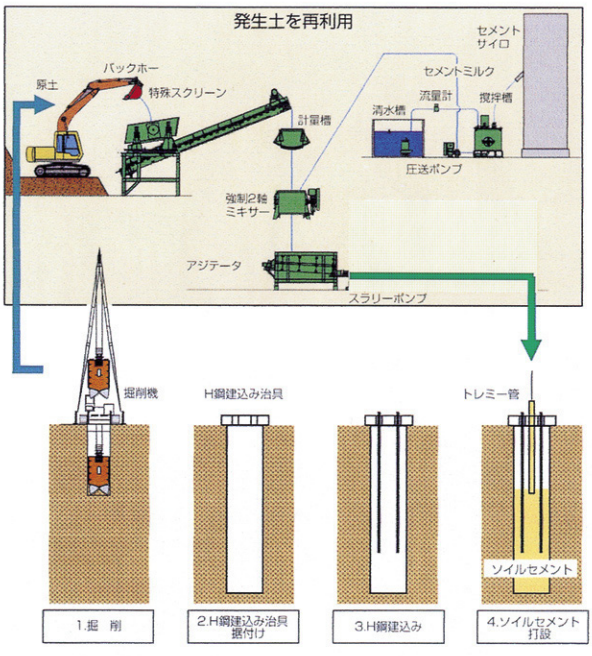


図－4　土質柱状図

場合は、ソイルセメント柱列壁工法と比較し高い遮水性が得られる。芯材の H 鋼材は芯材ガイドと傾斜計により、1/500 の鉛直精度で掘削溝に先行して慎重に建て込む。

その後、ソイルセメント製造装置からポンプ圧送されたソイルセメントを、分配ホッパーとトレミー管を使用し、順次打設し均一なソイルセメント連続壁を構築する。

打設中に掘削溝から回収ポンプで回収した安定液は泥水処理システムに入り、遠心力で比重の重い土砂分と水に分離される。残土と水は材料として有効にリサイクルされる。施工フローを図－5に示す。



図－5　TSW 施工フロー

2－4. ソイルセメントの基本配合

ソイルセメントは現地発生土を使用するために、施工場所の土質性状に影響を受ける。このため、事前に現地発生土による試験練りを実施し、必要な設計強度が確保できるように配合を決める。

今回の試験練りは、過去のTSW施工データを参考に、セメント量をパラメータに150kg, 170kg, 190kgと設定し、一軸圧縮強度試験を実施した。この結果を表－3に示す。日本建築センターの「地盤改良の設計及び品質管理指針」の設計基準強度を参考に NO.2 を基本配合とした。1m^3 当り、掘削土量 1,250kg、セメント 170kg、ベントナイト 10kg、水 286kg である。

また、プラントから掘削溝まではポンプ圧送するために、施工上流動性が、重要な要素になってくる。これは、テーブルフロー値により示されるが、最適値としては、20～24cm であることが分かっており、テーブルフロー値は 22±2cm を目標値とした。

表－3 試験練りの結果

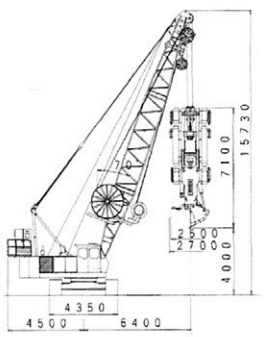
番号	セメント (kg)	掘削土量 (kg)	ベントナイト (kg)	水 (kg)	含水率 (%)	テーブルフロー (cm)	一軸圧縮強度(28日) (N/mm2)
NO. 1	150	1, 250	10	292	34. 4	24×24	2. 29
NO. 2	170	1, 250	10	286	33. 8	22×22	2. 52
NO. 3	190	1, 250	10	279	33. 1	23×23	3. 04

2－5. 機器の選定

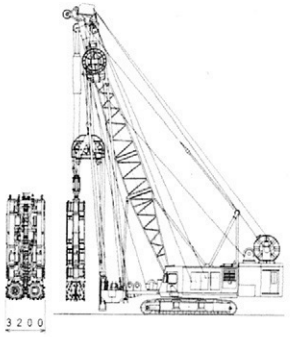
掘削機は、大きく分けて①バケット式掘削機と②水平多軸式掘削機の２種類が考えられる。過去のTSW施工実績では、掘削長が約 40mまででであったため、すべてバケット式掘削機により施工を行ってきた。しかし、本作業所では、掘削長が62mもあるため、浅い部分をバケット式掘削機で、深い部分を水平多軸式掘削機で掘削することで、各掘削機の特長を生かした効果的な掘削方法を計画した。

掘削対象は、先行ユニットが地山のみであり、後行ユニットは先行ユニット両端部のソイルセメントと中央部の地山であった。TSW は本設杭として設計されているため、従来の仮設山留め壁と異なり、ソイルセメント強度を上げた結果、バケット式掘削機で後行ユニットを掘削する場合、掘削能率が落ちることが予想された。このため最終的に、15mまでの掘削はバケット式掘削機で行い、それ以降 62mまでを水平多軸式掘削機で掘削することにより、最適な掘削計画を目指した。使用台数は、バケット式掘削機１台に水平多軸式掘削機１台の組合せとし、２セット準備して施工を行った。

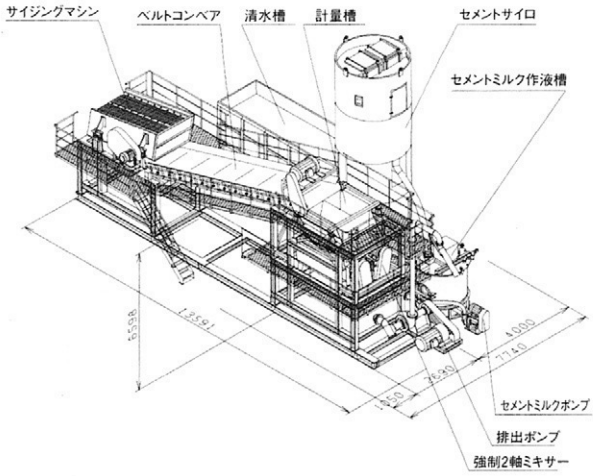
ソイルモルタル製造プラントの選定については、1ユニットの打設量が 180m^{3}であるため、１時間あたり 30^3～50m^{3}の能力を有する機種を選定することで、１日当たり６時間程度の打設時間を想定した。使用台数は掘削機に対応し２セットを配置した。



図－6 バケット式掘削機



図－7 水平多軸式掘削機



図－8 ソイルセメント製造装置

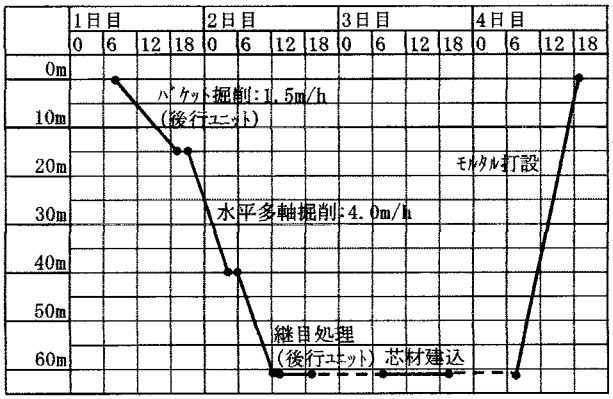
2－6. 施工サイクル

１日目と２日目の作業として掘削機による掘削、掘削溝の超音波測定、修正掘削、スライム処理がある。バケット式掘削機の掘削速度は先行ユニットで 2.7m/h、後行ユニットで 1.5m/h と、後行ユニット掘削で掘削速度が落ちることが分かった。水平多軸式掘削機の掘削速度については、先行・後行ユニットとも 4.0m/h と掘削速度にあまり変化は見られなかった。また、各ユニット継目の遮水性向上のために、後行ユニット掘削後、バケットに爪(300×100)を取付けた後、先行ユニット

の側面にキー溝をつける作業が 3 時間程度要した。

3 日目の作業は、スライム処理の実施後、芯材架台のセット、150tクローラクレーンによる芯材の建込み作業及び芯材のユニット化、トレミー管のセットがある。工事後半の作業では、作業スペースの確保が困難になり、芯材の建込み時に掘削溝に対し、クローラクレーンが垂直にセットできない状況等、芯材の建込み作業に不利な状況が増え、時間を要した。

4 日目の作業は、ソイルセメントの作泥と掘削溝へのソイルセメントの打設がある。夜間掘削も含めて前日までに掘削された現地発生土は午前中の打設分に材料として使用されるが、午後の打設分は当日の掘削土を使用することでソイルモルタルの供給を可能にしている。また、打設完了後のソイルセメント製造装置の洗い作業が 2 時間程度かかるので、計画時には考慮しておく必要があった。



図－9 後行ユニットの施工サイクル

3. 施工結果

3－1. ソイルセメントの強度管理

作業開始時に原土ピットから、よく撹拌した原土を採取し含水率を測定する。この測定値に基づき基本配合をソイルセメント製造装置に入力し、作泥を実施した。

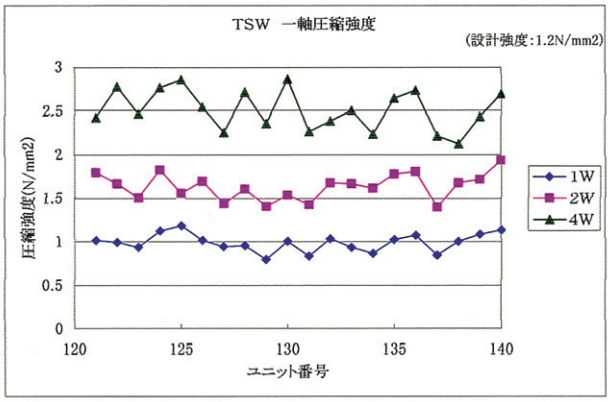
一軸圧縮強度測定のためのサンプルは、強制 2 軸ミキサー部で採取し、1 週, 2 週, 4 週強度を確認した。図－10に一軸圧縮強度結果の一例を示す。4 週強度で設計強度 1.2N/mm^{2}の 2 倍程度発現していることが確認できた。

3－2. 現地発生土の再利用率

今回の大規模作業所において、TSW 工法を採用した目的に、現地発生土の排出を押え、ソイルセメント材料として再利用させるということがあった。

ソイルセメント製造装置には、ある程度の粘性土は振動スクリーンによる流動化と、強制 2 軸ミキサーによる剪断撹拌機能で、材料として活用させる機能を備えている。加えて、今回水平多軸式掘削機を多用することで、掘削土に対し同様の剪断撹拌効果を発揮することができ、現地発生土の再利用に貢献できた。

結果は、全170ユニットの掘削土量27,672m^{3}に対し、ソイルセメント材料として使用した掘削土が 18,543m^3 あり、現地発生土の 67.0%を再利用した山留め壁の構築が実現できた。



図－10 TSW 一軸圧縮強度

4. おわりに

TSW としては過去に経験の無い掘削長 62mという大深度の掘削土再利用連壁に取り組んだ。すでに確立されている TSW の各種要素技術を用いながら、所期の成果を得ることが出来た。また、水平多軸式掘削機の採用で現地発生土の再利用率の向上につながった。反面、安定液の劣化が予想以上に早く進み作液量が大幅に増加した。この点は、今後の計画時の課題であると考える。

最後に、本工事に御協力頂きました関係各位に謝意を申し上げます。

(参考文献)

・中原 淳、古川政彦、北村敏直:「ソイルセメント連続壁工法(TSW 工法)の品質管理事例」、基礎工、総合土木研究所、1999 年 7 月

6．厚層における土の締固め管理に用いる新しい密度測定器 SST の開発

○愛媛大学大学院：本田　恭邦
愛媛大学工学部：室　達朗、敷島　直樹

1. はじめに

現在の締固め密度測定には RI 計器が一般的に使用されており，短時間に高精度の測定結果が得られている．しかし，散乱型の計器ではごく表面の密度しか計測できず，透過型であっても貫入孔が必要であり，約 20 cm の深さまでしか測定できない等の問題がある．締固め機械の大型化や作業能力の向上に伴い，厚層締固めが可能となりつつあるため，地表面よりかなり深い位置での密度を測定する装置の開発が必要である．

そこで，6 個の土圧計を配置し，地盤内に生じる 3 次元の応力を測定できる密度測定器 SST(Stress State Transducer)を地中に埋設し，転圧時に伝わる地盤内応力データを基に土の密度を決定する方法を提案する．この方法だと,従来のように測定のために, RI 計器設置のための貫入孔の必要が無くなるため，非破壊かつリアルタイムでの深層における密度管理が可能であり，締固め工の省力化，効率化が図れると考える．

本研究の目的は，SST が厚層での締固め管理に用いる密度測定器として適応可能かどうかを照査することである．そのために，鉛直加振型履帯式車両を用いた転圧実験を行い，締固めた土の密度を計測するとともに，その際に生じる地盤内応力を計測する．実験で得られた応力データを密度に変換して推定した密度と，実際に計測した密度との比較を行う．履帯式車両の総重量 4.9 kN と最大加振力との載荷比 α を 0.4 , 0.8 および 1.2 とし，振動周波数 10～25 Hz において合計 13 通りの実験条件で，深さ 45 cm に撒きだしたまさ土地盤に対して模型実験を実施した．

2. 実験装置および実験方法

2.1 まさ土地盤

試料土として使用した愛媛県産のまさ土を使用した．最大粒径 4.75 mm，平均粒径 0.78 mm，均等係数 12.0，曲率係数 3.0，比重は 2.66 である．JISA1210,1.1a に規定する締固めエネルギー E = 551.3 kNm/m^3 において，最適含水比 ω_{opt} は 12.8 %，最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 1.88 g/cm^3，飽和度 S_r は 82.1 %であった．従って，土の締固め管理基準の締固め度 90 %(D_{90})は 1.69 g/cm^3 である．まさ土供試地盤は，最適含水比に調整した土を，長さ 540 cm，幅　150 cm，高さ 65 cm の土槽内に深さ 45 cm に達するまで充填し作製した．

土の乾燥密度とコーン指数との関係を調べるためにコーン貫入試験を実施した．その結果，土の乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)は，次式に示すように，コーン指数 q_c (kPa)と初期地表面からの深さ z (cm)の関数で与えられることが分かった [1]．

$$\frac{\rho_d}{\gamma_w} = 1.271\left[\frac{q_c}{\{1+3.101(z/H)\}p_0}\right]^{0.109} \quad (r=0.991) \quad (1)$$

ここに，γ_w は水の密度 1.00 g/cm^3，p_0 は大気圧 98.0 kPa, H は層厚 45 cm であり，r は相関係数である．

2.2 履帯式車両による締固め実験

実験に使用した，鉛直加振機を搭載した履帯式車両を図-1 に示す．鉛直加振機を搭載した車両総重量 W は 4.9 kN であり，車両重心偏心率 e は 0.07，履帯幅 B が 20 cm, 履帯接地長は L が 91 cm, 平均接地圧は q が 13.5 kPa である．搭載した加振機は，2 軸偏心マスで構成さ

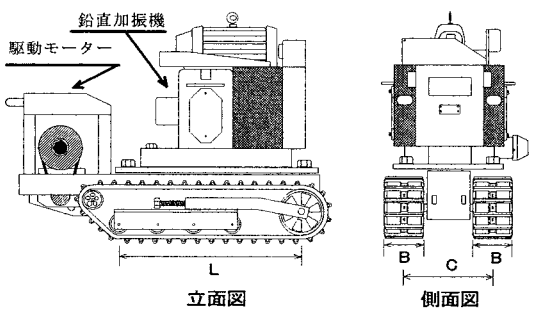


図-1　実験車両

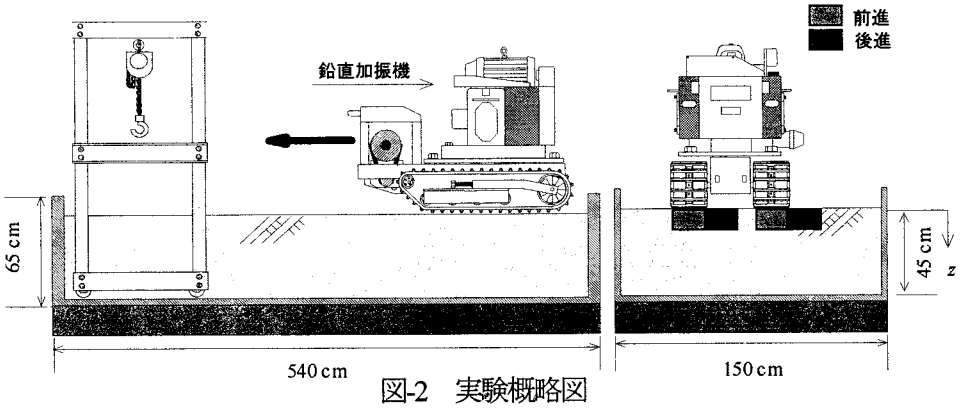


図-2　実験概略図

れており，加振トルクおよび振動周波数を調整することにより，鉛直方向に最大加振力 9.8 kN を発生することができる．

図-2 に実験概略図を示す．図のように前進で土槽端部まで走行した後，チェーンブロックで別の走行レーンを後進で通過するように調整した．なお，N 回往復走行させたときの転圧回数を N 回とした．0.75 kW のモータによって後輪スプロケットを駆動させ，車両速度 V を 3.75 cm/s に設定して自走走行させた．転圧実験は N = 1～3 を無振動転圧とし，N = 4～13 を振動転圧とした．

地表面の沈下量 S (cm)は，各転圧回数毎に初期地表面からの履帯の轍の部分における位置を，計 12 ヶ所デプスゲージを用いて計測し，その平均値とした．また，コーン貫入試験を履帯の轍部分直下において最低 5 ヶ所の位置で実施し，貫入速度を 3.42 cm/min として，土槽底面まで深さ方向のコーン指数 q_c の変化を計測した．さらに，車両が走行することによって生じる地盤内応力を 6 個の土圧計を配置する SST を用いて，z が 40 cm の位置に埋設し，後進時の応力変化を測定した．

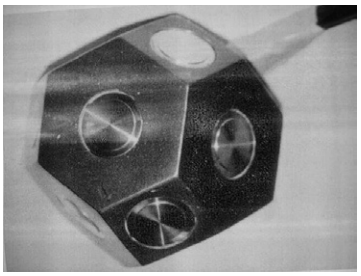
2.3　SST による地盤内応力測定

地盤内の 3 次元の応力状態を測定するために，6 個の土圧計を直交座標系と，非直交座標系に配置した SST を使用した．最大寸法約 12 cm×12 cm の応力測定装置は，土圧計の保護と，せん断応力の影響を最小限にし，正確な応力を測定するため，全体をテフロン素材で覆われている．SST の外観を写真-1 に示す．

図-3 に示すように，3 つの土圧計が X, Y, Z の直交座標系の方角へ垂直に配置され，他の 3 つは X，Y，Z 軸に対して 0.995 rad の角度にある n_1, n_2 および n_3 軸の非直交座標系に垂直は位置されている．SST から得られる応力は，X, Y, Z 方向の応力を σ_X(kPa)，σ_Y(kPa)，σ_Z (kPa)であり，n_1，n_2 および n_3 軸方向をそれぞれ σ_{n1} (kPa)，σ_{n2} (kPa)，σ_{n3} (kPa)とする．これらの応力を測定することにより，土中に発生する 3 つの主応力 σ_1 (kPa)，σ_2 (kPa)，σ_3 (kPa)を求めることができる．さらに，主応力の関係から八面体応力を算出することができる [2]．八面体垂直応力 σ_{oct} (kPa)および，八面体せん断応力 τ_{oct}(kPa)を次式に示す．

$$\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \tag{2}$$

$$\tau_{oct} = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{9} \right]^{1/2} \tag{3}$$


写真-1　SST の外観

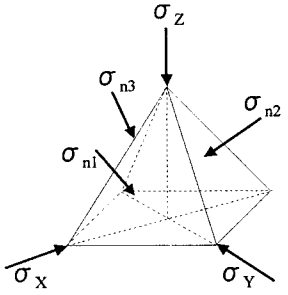


図-3　SST の座標図

3. 実験結果

3.1 深さ方向の乾燥密度分布と転圧回数

載荷比 $\alpha = 1.2$, 振動周波数 $f = 16$ Hz での，コーン貫入試験より算出した乾燥密度 ρ_d (g/cm^3) と深さ z (cm) の関係を図-4 に示す．乾燥密度 ρ_d は転圧回数 N の増加とともに増大することが確認された．また，同実験条件における各種乾燥密度データと転圧回数の関係を図-5 に示す．この図において，ρ_{dmax} は測定された乾燥密度の最大値，ρ_{dave} は全層での乾燥密度の平均値，ρ_{dbot} は $H = 5$ cm ($z = 40$ cm)の位置での乾燥密度である．なお，ρ_{dbot} は SST の埋設位置と同じ深さでの密度であり，SST による推定密度との比較には ρ_{dbot} を用いる．

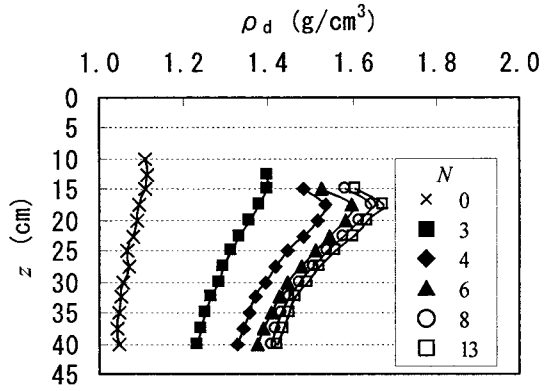


図-4 乾燥密度 ρ_d と深さ z ($\alpha = 1.2$, $f = 16$ Hz)

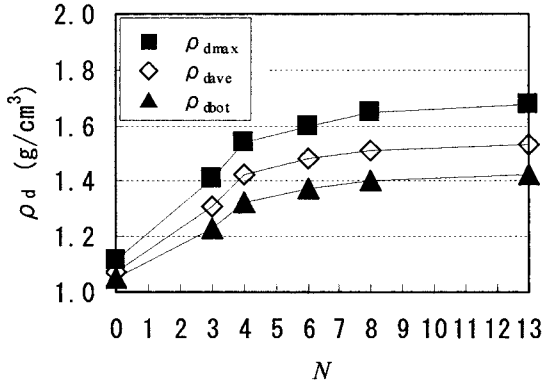


図-5 各種乾燥密度と転圧回数 ($\alpha = 1.2$, $f = 16$ Hz)

3.2 SST で計測した地盤内応力

履帯式車両が走行することにより水平面上に生じる応力を土槽底面からの距離 H が 5 cm($z = 40$ cm)において，SST を用いて計測した．一例として，$\alpha = 1.2$, $f = 16$ Hz, $N = 13$ での，八面体垂直応力 σ_{oct}(kPa)および八面体せん断応力 τ_{oct}(kPa)と，水平距離 X_H(cm)の関係を図-6 に示す．この図において，σ_{oct} と τ_{oct} は同じような分布を示しているが，τ_{oct} の方が大きな値であった．図-7 に，$\alpha = 1.2$, $f = 16$ Hz における八面体応力と転圧回数の関係を示す．$N = 3$ までの無振動転圧過程ではほぼ一定値となり，振動転圧過程の $N = 4$ で値が急に上昇している．その後徐々にであるが値が増大しているが，大きな変動は見られなかった．

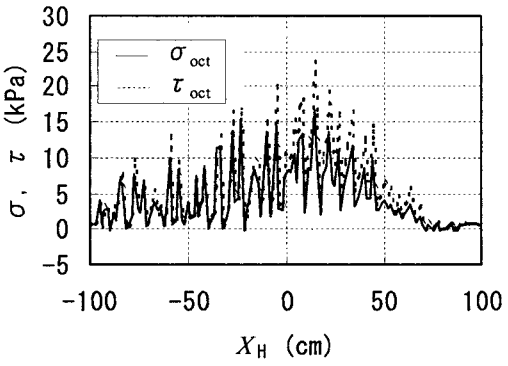


図-6 八面体応力分布 ($\alpha = 1.2$, $f = 16$ Hz, $N = 13$)

4. 考察

4.1 密度推定方法

SST により計測した地盤内応力から締固め密度を推定するため，Bailey[3]の提案した以下の式を用いた．

$$\ln(\rho_d) = \ln(\rho_{d0}) - \left\{ (A + B \cdot \sigma_{oct}) \left(1 - e^{(-C \cdot \sigma_{oct})}\right) + D(\tau_{oct} / \sigma_{oct}) \right\} \quad (4)$$

ここに，ρ_d(g/cm^3)は転圧後の締固め密度，ρ_{d0}(g/cm^3)は転圧前の初期密度，σ_{oct} (kPa)は八面体垂直応力，τ_{oct} (kPa)は八面体せん断応力であり，A, B (kPa^{-1}), C (kPa^{-1}), D は締固め係数である．この 4 つの締固め係数は，初期密度の異なる供試体を 3 軸圧縮試験で種々の八面体応力を作用させたときの密度変化から得られる係数である．本実験試料土のまさ土については，以

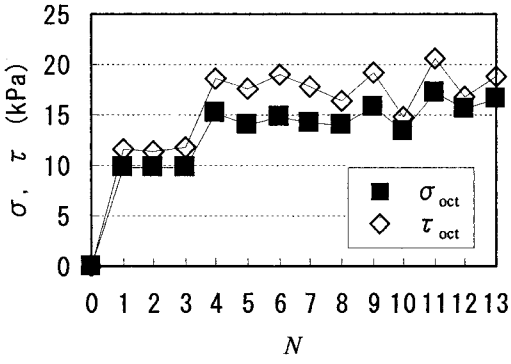


図-7 八面体応力と転圧回数 ($\alpha = 1.2$, $f = 16$ Hz)

下のような近似式により係数を設定した.

$$A = -0.1795 \times \rho_{d0} + 0.2606 \qquad (r = 0.999) \qquad (5)$$

$$B = 0.00009533 \times \rho_{d0} - 0.000143 \quad (r = 0.999) \qquad (6)$$

$$C = -0.03662 \times \rho_{d0} + 0.04557 \qquad (r = 0.910) \qquad (7)$$

$$D = -0.001040 \times \sigma_{oct} \times \rho_{d0}^{-6.0342} + 0.2508 \times \rho_{d0} - 0.3895 \qquad (r = 0.960) \qquad (8)$$

4.2 SSTによる締固め密度の予測

それぞれの実験条件における，所定の転圧回数毎に計測した深層部乾燥密度ρ_{dbot}と，SSTから得られた地盤内応力を(4)式を用いて推定した密度ρ_{dest}との比較を行った．なお，振動転圧過程における締固め密度の予測を目的としているため，無振動転圧過程は密度予測を行わないものとした．従って，上式の転圧前の初期密度ρ_{d0}には，無振動転圧終了時のN = 3におけるρ_{dbot}を使用した．図-8にα= 1.2, f= 16 Hzにおける深層部乾燥密度ρ_{dbot}と，乾燥密度推定値ρ_{dest}の比較を示す．また，締固め密度管理基準の締固め度 90 %(D_{90}= 1.69 g/cm^3)を図中に示す．この実験条件においては，振動転圧過程(N = 4 以降)における八面体応力(σ_{oct}, τ_{oct})の変化が微小であったため，密度推定値ρ_{dest}はほぼ一定値となっている．また，実際の深層部乾燥密度ρ_{dbot}との誤差は+3.8 %(N = 4)から−6.6 %(N= 13)の範囲であった．今回行った合計13通りの実験条件において，密度推定結果を比較すると，振動転圧を行った直後(N= 4)の誤差がやや大きくなっていたが，最終転圧時(N= 13)には，誤差がおおよそ±5.0 %程度に収まっていた．

4.3 実施工における適応性

本研究では，載荷比αと振動周波数fを変化させ，SSTの密度測定器としての性能を照査した．今回の模型実験では，車両が地盤から跳ね上がらない($\alpha \leqq 1.0$)場合も，地盤から跳ね上がりながら衝撃力による転圧を行う(α>1.0)場合も含まれている．従って，実施工のようにさらに大きな衝撃力が作用した場合においても密度推定が可能であると考えられる．しかしながら，あくまでも特定の材料・条件での見地なので，適応にあたってはまだまだ不明な点が多いのが現状である．

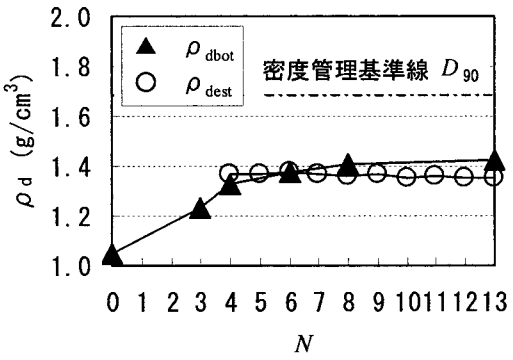


図-8 乾燥密度測定値ρ_{dbot}と推定値ρ_{dest}の比較
(α= 1.2, f= 16 Hz)

今回の実験では密度管理基準を満たす土の密度測定は行えなかったが，今後載荷比αや振動周波数fを変化させ，さらに締固まった土の密度測定を行いたい．

5. まとめ

厚層での締固め密度管理のに用いる機器であるSSTの性能を照査するため，転圧実験により実際に計測した密度と，SSTの応力データを基に推定した密度との比較を行った．その結果，いずれの実験条件においても，最終転圧時(N = 13)にはSSTによる推定密度の誤差はおよそ±5.0 %以内に収まっており，SSTが密度測定器として比較的有効であることが分かった．また，載荷比αが1.0より大きい，衝撃力を伴う転圧を行った場合にもほぼ妥当な測定結果であった．そのため，本実験条件よりも大きな力で転圧を行った場合についても，SSTによる密度測定は可能だと考えられる．なお，今後は土質条件の変化に伴う適応性なども検討していく予定である．

参考文献 1) 室達朗, TRAN Dang Thai, 三林貴宏, 趙偉民：厚層まさ土に対する遠心加振型履帯式車両の振動転圧効果に関する実験的考察, 土木学会論文集, No.714/VI-56, pp.53-64, 2002年9月.

2) MURO, T., MIYOSHI, M. and MITSUBAYASHI, T. 1998. Effect of a Tracked Vehicle Mounting an Oscillator on the Vibro-Compaction of a High Lifted Decomposed Granite Sandy Soil, SOILS AND FOUNDATIONS, 38(4), 129-144.

3) BAILEY, A. C. and JOHNSON, C. E. 1989. A Soil Compaction Model for Cylindrical Stress State, Transactions of the ASCE, 32(3), 822-825

7．建設車両用タイヤを用いた締固め方法の開発

国立明石工業高専：○中口　顕良、江口　忠臣
愛媛大学：室　達朗

1．緒言

近年，高速道路建設や空港建設など現場の土工量が増大している現場において，効率的な締固め方法が必要とされており，厚層締固めが可能となる新たな締固め方法開発の要求が高まっている．また振動，騒音，多大なエネルギー消費を抑え，環境負荷を低減させる方法の検討は重要である．

従来，埋立地などの軟弱な地盤に構造物を建設する際，振動ローラが多用されてきた．しかしながら振動ローラは条件によって転圧回数による密度上昇のピークがあること，振動による揺すりこみ効果は期待できないことなどの問題点が存在する[1) 2)]．

環境負荷低減の方策として，既存建設機械を代価利用することが挙げられ，重ダンプトラックに装着されているオフザロードタイヤ(Off the Road Tire，以下ＯＲタイヤと呼ぶ）を用いた低振動，高効率な締固め方法の開発を行う．

タイヤによる地盤の締固めにおいてタイヤと剛性輪（ロール）を比較した場合，タイヤの特徴は，タイヤ内圧を高めることにより表層の密度が上がる，締固め表層の水密性を高める，輪荷重（タイヤ１輪当たりの荷重）を大きくすることにより締固めが深層部までおよぶ，粘性の高い湿潤土においてこね返し効果（ニーディング効果）を持つことが挙げられる．これらの特徴から，地盤の締固めにタイヤを用いると，輪荷重とタイヤ内圧との組み合わせで締固め力を変えることができる．またタイヤというゴム質の持つ粘弾性特性により，シルト・ローム質といった粘性土において，通過したタイヤ踏面で転圧されることによってもこね返し現象が生じるため，その効果は著しい．

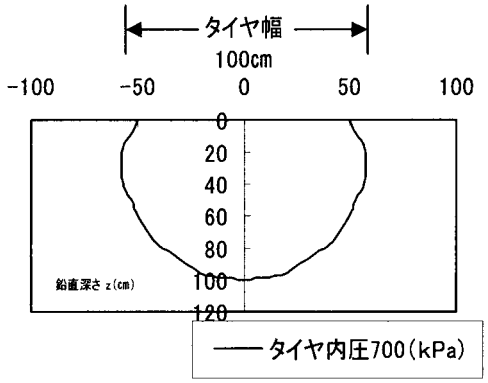
タイヤの接地面には接地圧が作用し，一般に接地圧はタイヤの内圧とほぼ等しくなることが知られている．接地面下の地盤内部には，その接地圧に応じた応力が分布する[3)]．**図－１**はタイヤ内圧700kPaの時の垂直応力を深さ方向に図示した圧力球根である．土中の垂直応力が200kPaの伝播範囲を示し，接地圧を円形等分布荷重と仮定した．これより垂直応力はタイヤの接地面直下のみに影響するわけではなく，タイヤ接地面を中心に垂直方向，水平方向に広がる圧力球根を形成している．タイヤ内圧を一定にし，軸荷重を増加すると，同じ値の応力球根は深さ方向に拡大する特徴がある．またタイヤの走行によって地盤には垂直応力以外にせん断応力が作用する．

本研究では，踏圧面を確保しながら大きな輪荷重が得られるＯＲタイヤを締固めに用いることを想定している．建設運搬車両である重ダンプトラックは，最大積載時の車両総重量が300t を超えるものもあり，タイヤ１本当り50t 程度の荷重を支持していることになる．また，積載量の変更により，任意の荷重設定が行える利点がある．ＯＲタイヤはそれ自身が変形することにより荷重を支持する特徴を持つ．ここでは，ＯＲタイヤを用いることによって踏圧面を確保し，載荷重との組合せおよびＯＲタイヤ変形の特徴を活用した厚層試料の締固め効果を検討することを目的とする．

2．転圧試験

(1) 三軸圧縮試験

タイヤと地盤の接触状態を考える上で，地盤の各圧縮モデル係数を決定する必要がある．三軸圧縮試験により係数を推定し，また，せん断応力による締固め効果を評価する．試験は八面体垂直応力σ_{oct}を一定に保持しσ_1，σ_3を順次変化させることによっ



図－１　圧力球根（垂直応力 200kPa）

てせん断応力 τ_{oct} を制御した．σ_{oct} は 100, 200, 300, 400kPa で載荷する．初期間隙比は 0.8，0.9，1.0，試料砂は愛媛県松山産のまさ土使用し，直径 50㎜，高さ 100㎜ の供試体とした．まさ土の土質特性は土粒子比重 (27℃/15℃) G_S=2.66，平均粒径 D_{50}=0.78㎜，均等係数 U_C=12.0，曲率係数 U_C=3.0，最大乾燥密度 ρ_{dmax}=1.88g/cm^3，最適含水比 12.8%である．

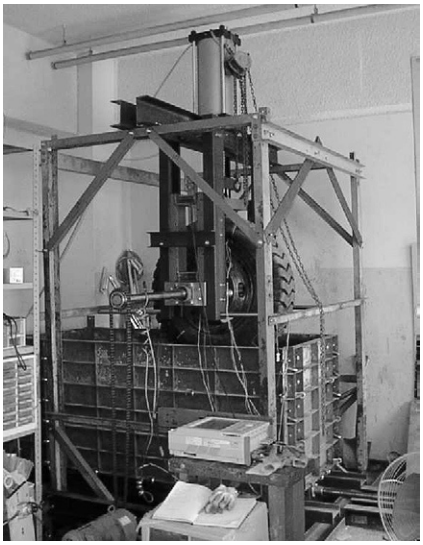
(2) 転圧試験

試験装置はエアシリンダー（最大容量 970ｋPa)，載荷フレーム，ガイド，鋼製土槽 (1000×1000×2200㎜)，モーター（土槽を送るもの)，供試タイヤ（外径 1055 ㎜，幅 296 ㎜)，土圧計（SST）で構成されている．試験装置外観を**図－２**に示す．

実タイヤによる締固め効果を考察するために室内転圧試験を行った．供試地盤は最適含水比に調整したまさ土を１ｍの厚さでまき出し表面を成型した．転圧前の供試地盤間隙比は 1.134 であった．ＯＲタイヤを静止状態で載荷し，その後純粋転動にて転圧を行った．軸荷重は 7.84kN，10.78kN，13.72kN の３通りで，繰り返し転圧をそれぞれ 10 回行う．ＯＲタイヤの空気圧設定は 350，500，700kPa とした．

(3) 重ダンプトラック現場転圧試験

実際の重ダンプトラック走行による転圧効果を実証するために，試験ヤードにおいて現場転圧試験を行った．試験走路部 30ｍ を設定し，試料土の厚さは 1ｍ となるようにブルドーザーによってまき出した．転圧は積載状態にて走行速度 10～15㎞/h で行った．走行速度は通常の転圧ローラと比較して高速である．現場転圧試験は採石場において発生した粗粒土を用いて行った．ＯＲタイヤの内圧は 600kPa に調整し，32t 積重ダンプトラックを満載状態にして転圧を行った．転圧後の密度計測には，自動走査式表面形RI密度計とフレーム型RI密度計を用いた．



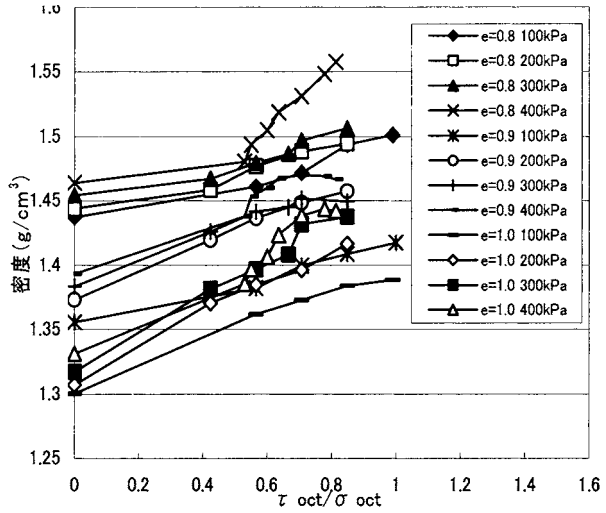
図－２　転圧試験装置

３．結果と考察

(1) 三軸圧縮試験結果

図－３は八面体垂直応力と八面体せん断応力との応力比と載荷後の密度を示す．図中凡例の応力表示は八面体垂直応力である．一部のパターンを除き，各初期間隙比とも応力比1.0付近まで応力比が増加するに従って密度も増加している．八面体垂直応力を一定にし，応力比を増加させることにより八面体せん断応力を増加させた．つまり八面体せん断応力の増加に伴い密度も増加したといえる．しかし初期間隙比 e=1.0, 0.9 の場合，垂直応力 400kPa 載荷時，応力比を増加させていくと，一度密度上昇はピークを迎えその後減少した．これは，初期間隙比が大きい供試体に対して，応力比が 0.7～0.8 付近まで負のダイレイタンシーにより密度は増加するが，その後正のダイレイタンシーが生じ，密度は減少したと考えられる．

各圧縮応力とも初期間隙比が大きい場合，初期間



図－３　三軸圧縮試験による応力－密度関係

隙比が小さい場合と比べて，最終的な締固め後の密度は小さくなっている．初期間隙比が小さければ八面体せん断応力を増加させていっても正のダイレイタンシーは生じず，締固め効果は高くなると考えられる．

以上の結果より，八面体せん断応力が大きくなると密度も大きくなる傾向にあるので，八面体せん断応力は土の締固め効果を高めるといえる．しかし，実際に厚層まき出した土の初期間隙比は 1.0～1.1 ぐらいであるため，現場で重ダンプトラックによって締固める場合，垂直応力とせん断応力の応力比が 0.8 以上になるような状態は避けるべきである．応力比が 0.8 以上になると先述通り，正のダイレイタンシーにより体積が膨張する可能性があるためである．今回の実験より考えられることは，初期間隙比が大きい状態で締固めた場合，初期間隙比が小さい状態で締固めた場合よりも十分に締固まってない時点で密度のピークを迎え，体積が膨張し密度は小さくなる可能性があるということである．すなわち，初期間隙比が大きい状態で締固めた場合十分な締固め度を得ることができない可能性がある．これを防ぐために，初期間隙比と体積が膨張し始める密度との関係を実験により推定すること，かつ応力比が 0.8 以上にならないようにすること，厚層まき出した土の間隙比を小さくすることが必要であると考えられる．厚層まき出した土の間隙比を小さくするには，まき出した後ドーザなどで土をならしてから重ダンプトラックによって締固めることによって，ある程度間隙比を小さく抑えられると考えられる．

(2) 圧縮係数の推定

Bailey[4] らは締固めを考察するにはせん断応力の効果を加えることが必要であるとし，締固めのモデルとして八面体垂直応力 σ_{oct} と八面体せん断応力 τ_{oct} を用いて次式を提案し乾燥密度を求めた．

$$\ln(BD)=\ln(BD_i)-\left\{(A+B\sigma_{oct})(1-e^{(-C\sigma_{oct})})+D\left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma_{oct}}\right)\right\} \quad (1)$$

ここで，A：締固め係数，B，C：締固め係数 (kPa^{-1})，D：せん断応力による体積ひずみの構成係数，BDi：初期密度 (g/cm^3)，BD：締固め後密度 (g/cm^3) である．この A，B，C，D の各圧縮係数は三軸圧縮試験により決定する．

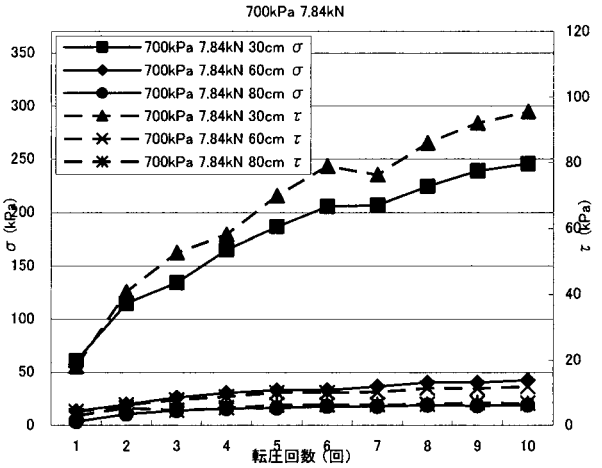
式(1)より，三軸圧縮実験で得られた八面体せん断応力，体積変化，および八面体垂直応力から最小二乗法により係数を推定した．ここで，係数 A，B，C は垂直応力だけを考慮して求めることができる．その後，せん断応力を考慮した係数 D を合わせて四つの係数を推定した．本研究で使用したまさ土の各係数の推定結果は**表－１**の通りである．現場においてこの圧縮モデルを用い，発生する軸荷重とせん断応力，初期密度を計測することで，タイヤに起因する締固めの影響の推測ができ[5]，過剰転圧等を防ぎ環境負荷の低減につながる．

(3) 転圧試験結果

図－４は転圧回数に伴う八面体応力の推移を示す．転圧回数の増加とともに八面体垂直応力，八面体せん断応力共に大きくなる．しかしこの八面体応力は地盤層の圧縮量の減少に伴い，最終的にはある一定の値に漸近していくと考えられる．また応力伝達は深さ方向に減衰するため，深部では八面体応力

表－１　供試まさ土の圧縮モデル係数の推定結果

A	B(kPa-1)	C(kPa-1)	D
-0.211	-15×10^{-3}	-1125×10^{-3}	-0.101

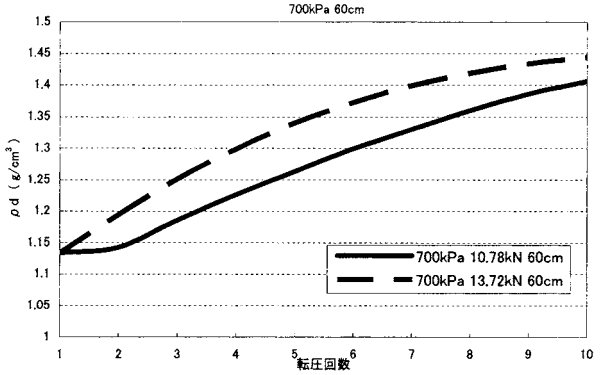


図－４　転圧回数による八面体応力の推移

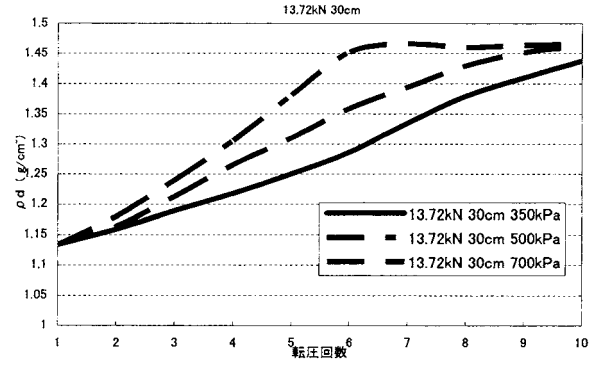
は小さくなっている．転圧 10 回目のσ_{oct}は，深さ 30cm のものと比較して，60cm は 80%減，80cm では 90%減少している．τ_{oct}についても転圧 10 回目で深さ 30cm のものと比較し，60cm は 90%減，80cm では 95%減少している．　また八面体せん断応力の減衰の仕方は，700kPa のように高いタイヤ内圧と，7.84kN の小さい軸荷重では，接地圧がタイヤ内圧同等の高い応力から，低い応力の圧力球根が幾層も，深さ方向に小さく発生するので，深さ方向に応力のばらつきが生じたと考えられる．また，八面体せん断応力の減衰の仕方は，八面体垂直応力に比べて大きい．

しかし前述の緒言のとおり，タイヤ内圧が一定の場合，軸荷重が大きくなることで圧力球根の到達点は深部まで届く．これらを利用すれば，重ダンプトラックは大軸荷重によって，深部への圧力球根到達が期待でき，まき出し層内の応力差が小さくなると考えられる．

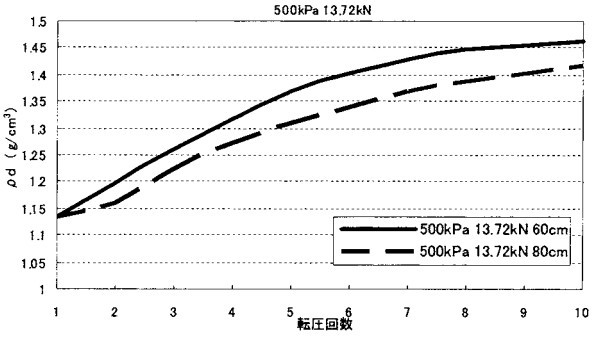
次に式(1)を用いた密度予測を**図５，６，７**に示す．**図－５**は軸荷重と密度の関係を示す．軸荷重が大きくなることにより密度は増加している．タイヤ内圧は一定であり，軸荷重を増加したことで，各応力の圧力球根の到達点はそれぞれ深くなる．よって



図－５　軸荷重を考慮した転圧回数と密度の関係



図－６　空気圧を考慮した転圧回数と密度の関係



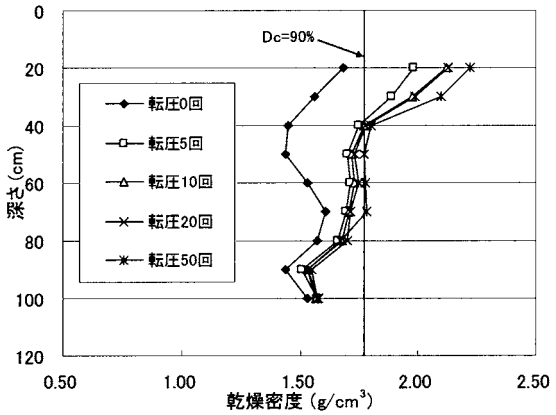
図－７　深さを考慮した転圧回数と密度の関係

同じ深さ地点には更に大きな圧力球根が届き，八面体垂直応力，八面体せん断応力は共に増加すると考えられるからである．また，軸荷重が大きい場合，密度上昇の立ち上がりも早く，初期転圧において効率的な締固めができ，環境負荷の低減につながると考えられる．つまり現場での車両の大軸荷重は，更なる締固めの効果が期待できると考えられる．**図－６**はタイヤ内圧と密度の関係を示す．転圧回数４～

８回付近の初期の転圧においては，密度の高い順に500kPa，　700kPa，350kPa となった．ここで，この実験に用いたタイヤ規格内圧は 550kPa である．規格内圧に最も近い500kP では垂直応力の締固め効果とせん断応力の締固め効果の組み合わせが初期転圧において最大になったと考えられる．また 700kPa では，垂直荷重のみを考慮した場合，接地面積が小さい分大きな垂直応力を作用させることが可能だが，タイヤ内圧をあげると弾性輪から剛性輪へと近づき，軟弱地盤での走行は困難になり，初期間隙比の小さい場合でも接地面積の減少によりせん断応力は発生しにくく，締固め効果は減少すると考えられる．しかし 10 回以上転圧を行うならば，せん断応力による締固め効果を垂直応力による作用で補い，500kPa 同等以上の締固め効果になると考えられる．350kPa の場合，接地圧はタイヤの空気圧を上回れないため，接地面下の応力は小さくなる．しかし，同じ軸荷重条件であれば，低いタイヤ内圧では，接地圧の最大値は低くなるが，同じ値の応力球根は大きくなり，深部まで届き，深さ方向における密度のばらつきを小さくすることができると考えられる．またタイヤの接地面積が広くなることで軟弱な地盤での走行を可能とし，踏圧面下で発生するせん断力も大きくなると考えられる．密度上昇の立ち上がりは遅いが，転圧回数を 10 回以上行うのなら，十分 500kPa と同等以上の締固め効果を有すると考えられる．タイヤ内圧の調整は載荷荷重とその走行地盤状態を考慮しなければならない．深さと密度の関係を**図－７**に示す．10 回転圧で，60cm と 80cm の密度差は約 0.05g/cm^3，締固め度の差は 2%強である．ここで 0.05 g/cm^{3}は 80cm の 10 回転圧時付近の，一回の転圧で締固める成果と同等である．締固めにおいて，深さ方向の密度のばらつきは好ましくない．まき出し層内の密度のばらつきを抑制するためには，軸荷重による圧力球根の到達深さを考慮して，まき出し層の深さを決定しなければならない．また，深さ 80cm では，転圧回数１～10 回全てでτは０とし垂直応力のみを考慮した場合，締固め度は平均で約 1.5%減少している．せん断応力による締固め効果は十分期待できると考えられる．



図－８　重ダンプトラックによる転圧状況

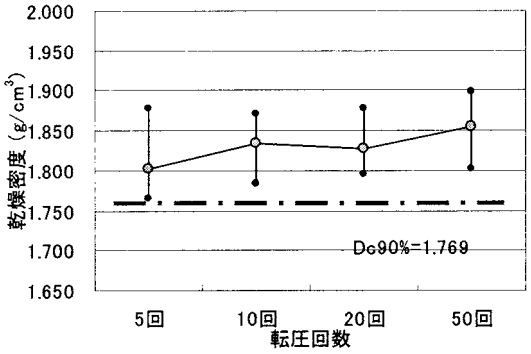


図－９　転圧後密度分布

以上の結果より，重ダンプトラックの特徴である大軸荷重による応力球根の拡大，大踏圧面による走行性，接地圧の制御，せん断応力の発生は締固めに有効であると考えられる．

(4) 重ダンプトラック現場転圧試験

実機を用いた転圧試験を行うことで，本方法の効果を検証する．**図－８**は 32t 積重ダンプトラックによる現場転圧試験の状況である．**図－９**は転圧回数の深さ方向の密度分布について，フレーム型 RI 密度計により測定した結果である．　ブルドーザーによる敷き均し後の初期密度は高い状態にあるものの，深さ 80cm の位置まで基準密度の 85%を転圧 10 回で達成している．しかし，基準密度の 90%を達成するためには 70cm の深さで転圧 50 回が必要である．また転圧回数 50 回まで行っているが，過転圧は確認されておらず，この段階でも密度増加が生じてい



図－10　表面型 RI 密度計による測定結果

る．**図－9**の結果は 18.00R33 のタイヤサイズにおいても，深さ 80cm 程度まで一定の締固め効果を示しているが，本法の特徴である踏圧面確保による試料土の拘束が，大きく寄与していると考えられる．**図－10** は自動走査式表面型 RI 密度計による密度計測の結果である．全計測地点のばらつきも含めて表示している．転圧 10 回以降は全測定データについて，基準密度の 90%を満足している．また，転圧 10 回以降のデータのばらつきも安定しており，現場適応時に管理が容易になると考える．

以上のように，現場転圧試験においても重ダンプトラックによる締固め効果は確認された．これはタイヤ走行の特徴である踏圧面確保のよる試料土の拘束，踏圧面内接地圧の均一性，走行によるせん断応力発生，さらに運搬車両を用いることによる大軸荷重が，それぞれ締固めに対して効果的に作用することを利用した結果である．

4．結言

本研究においてせん断応力を考慮した厚層締固め効果について検討した結果，得られた知見を以下に示す．

(1) 三軸圧縮試験結果より応力比を増加させることは八面体せん断応力を増加させることになり，八面体せん断応力の増加に伴い密度も増加する．垂直応力のみだけでなくせん断応力を考慮したほうが締固め効果は高い．

(2) 初期間隙比が大きい場合せん断応力によってある程度までは体積収縮するがその後，正のダイレイタンシーにより体積が膨張することがある．施工時ではまき出した土の初期間隙比の調整も十分検討するべきである．

(3) タイヤ内圧を大きくすると弾性輪から剛性輪へと近づくため，せん断応力が減少する可能性がある．また，タイヤの規格以上の空気圧にすることは，初期間隙比の大きい供試体に対して締め固め効果は低くなる．

(4) 密度予測式を利用し，最適締固め条件を選定することによって，過剰転圧などを防ぐことを可能とし環境負荷の低減や効率的な締固めができると考えられる．

(5) ＯＲタイヤと運搬車両の特徴を利用した重ダンプトラック実車両現場厚層転圧試験において，深層部まで一定の転圧効果が現れた．試料土に対する 32t 積重ダンプトラックによる転圧試験は，転圧 50 回，深さ 70cm において基準密度の 90%に達している．

謝辞：本研究を進めるにあたり日本国土開発株式会社に現場試験のご協力を賜りました．ここに，記して感謝する次第であります．また，本研究の一部は平成 16 年度科学研究費補助金（基盤研究（C））によって行われた．

参考文献

1) タイヤ設計指針作成委員会：オフロードタイヤ工学，テラメカニックス研究会，pp. 20－21，1999.
2) ローラ設計指針作成委員会：転圧ローラ工学―締固め性能に着目して―，テラメカニックス研究会，pp. 1－11，1999.
3) 前出1）pp. 210－211
4) Alvin C. Bailey and Clarence E. Johnson：A Soil Compaction Model for Cylindrical Stress States，ASAE，pp. 1－4，1989.
5) 江口忠臣・室達朗・生木泰秀・斉藤秀男：重ダンプトラックタイヤを用いた厚層転圧工法に関する研究，土木学会論文集VI（投稿中）

8．粗粒材を対象とした振動ローラ加速度法の課題と提案

大成建設㈱：○西澤　修一

1．はじめに

近年､加速度計を重機の振動転圧輪付近に取り付け、地盤剛性をリアルタイムに把握する振動ローラ加速度法が、GPS 転圧回数管理システムと併用する形で広く適用されている。今回、ロックフィルダム工事にて振動ローラ加速度法を用いて適用性の試験を行った結果、粗粒材を対象とした場合、一般に地盤剛性の判定法として評価を得ている点に関しては、主に材料の締固め特性の影響で基本的な課題があることがわかった。

しかし、同時に振動ローラ加速度法（以下、加速度法と称す）は、材料に対する締固め荷重の適正度が現場で簡易に判定できることがわかった。そこで加速度法を水置換試験法と併用して、締固め品質管理の高度化を図ることを提案する。

2．現場試験の方法

2-1　振動ローラ加速度法の試験方針

試験を行うに当たり、３種類の盛土材の締固め品質は、水置換試験と表面沈下量測量で把握し、この水置換データを基準として、加速度計データとの比較検証を行った。加速度計は重機の振動転圧輪の回転軸付近に上下振動用と水平振動用の２個を取り付けて振動波形を取得しスペクトル分析して、上下加速度からは乱れ率を､水平加速度からは基本振動数の振幅値(f0)をそれぞれ求めた。

乱れ率は、締固めによって地盤が硬くなり、地表面で振動輪が跳ねて地盤に衝突することにより発生する基本振動数の 1/2､1/4 などの分数調波スペクトルに起因するもので、地盤剛性の指標となる。また水平振幅(f0)は、締固め機械で転圧するとき、振動輪の沈下によって転圧輪が走行時に地盤から受ける走行抵抗※1) により発生すると考えられ、弊社が独自に沈下量や沈下の収束を推定する指標としてシステム開発し、使用している。

締固め機械の走行速度は、３種類の盛土材ロックⅠ,Ⅱ,Ⅲに対してすべて 2.5㎞/h 前後とし、転圧回数は過転圧を避けるため４回で終了する。

2-2　加速度データの取得方法

本システムは加速度データを１秒間で 256 個取得するが、スペクトル分析で精度よい振幅値を求めるため４秒間のデータ数が必要である。そこで１秒ごとに最新加速度データと４秒前の古いデータとを絶えず交換しながら、分析結果を１秒単位で出力する。

加速度の取得位置は、GPS を重機に搭載して１秒単位で重機の走行軌跡データを把握する。

2-3　試験概要と使用材料

現場試験は、加速度法と水置換試験法を併用する方法、および加速度法のみを実施する方法とを選択して行った。ロックⅠ,Ⅱ,Ⅲの撒出し厚は 105㎝で、30tf 級大型振動ローラを使用し、水置換試験法は表面沈下測量と併せて合計５ヵ所で行った。１ヵ所当たりの点数は３点である。

その他は加速度法のみで実施した。試験フィールドごとに距離約 20ｍの試験用走行レーンを白線で設定し、加速度データはこのレーン上で転圧回数別に記録した。加速度法は 35 ヵ所で行い、合計 35 種類の加速度データを取得した。

3．品質管理試験と加速度法の併用試験の結果

3-1　試験結果

加速度法と水置換試験法の併用試験結果のうち、紙面の関係で３例のみを**表-1** で示す。

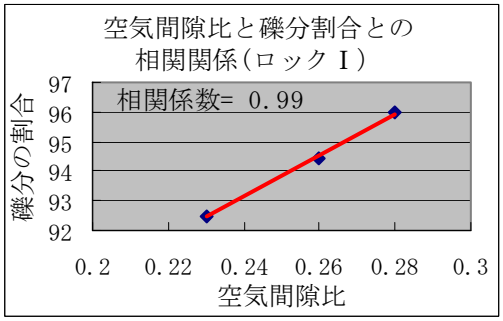
3-2　合成比重と沈下量及び空気間隙比と礫分の関係

材料に応じた沈下状態を調べるため、合成比重と沈下量の相関性および空気間隙比と礫分の相関性を求め

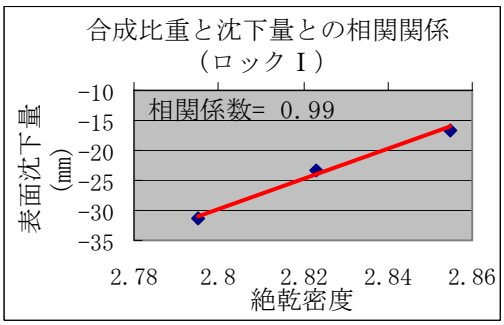
表－1　水置換、レベル測量および加速度法の結果一覧

ゾーン種別	加速度指標		水置換試験						水準測量
	乱れ率	水平振幅	絶乾密度	吸水率	空気間隙比	礫分	砂分	均等係数	沈下量
ロックⅠ	0.638	6388	2.855	0.7	0.26	94.4	5	14.8	-16.5
	0.562	5130	2.823	0.6	0.28	96	3.7	12.9	-23.3
	0.59	4354	2.795	0.7	0.23	92.5	6.6	16.6	-31.3
ロックⅡ	0.752	5704	2.669	1.9	0.26	89.4	8.5	34.4	-16
	0.822	6349	2.688	1.8	0.23	87.5	10.5	38.4	-30.8
	0.678	6515	2.702	1.6	0.25	88.1	10.4	38.4	-41.5
ロックⅢ	0.623	5018	2.667	0.9	0.23	85.5	12.35	28.1	-13.5
	0.687	4740	2.658	1.1	0.17	87.7	10.3	76	-12.8
	0.723	4474	2.655	1	0.24	84.3	12.7	41	-17.3

た結果、ロックⅠにのみ**図－1、図－2** で示すように高い相関性が認められた。ロックⅠは比重が大きいほど沈下量が小さいことから、締固め荷重に対して比重が大きいほど締固め効果がすぐに限界になりやすいと考えられる。また礫分の割合が高いほど間隙比が大きい傾向を示し、間隙比が大きいままに締固め効果が限界になりやすいと考えられる。



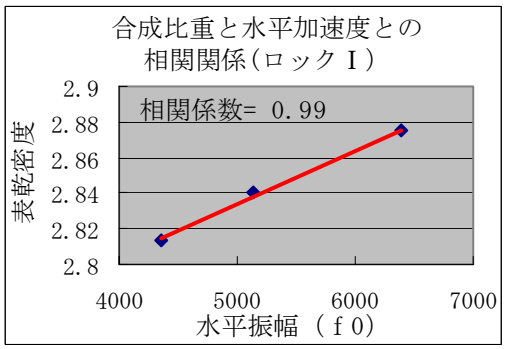
図－1　礫分の割合と間隙比の関係



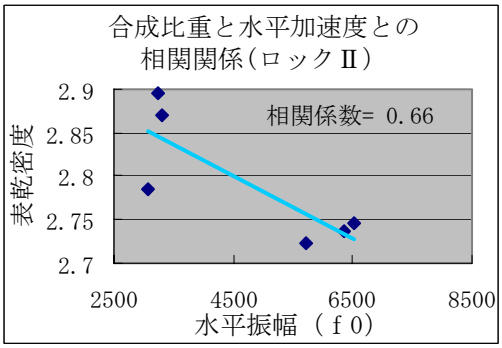
図－2　合成比重と締固め効果の関係

3－3　合成比重と水平加速度との相関性

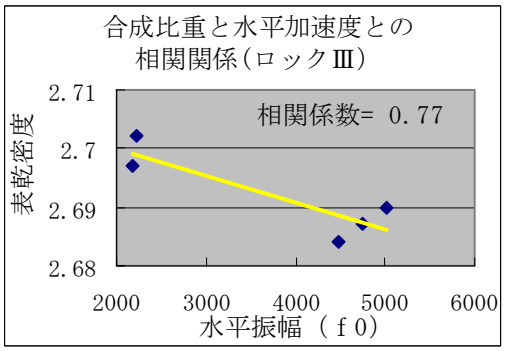
締固めに伴う走行抵抗を材料別に調べるため、合成比重と水平振幅(f0)との相関性を求めた結果、材料により大きな違いが見られた。ロックⅠは**図－3** で示すように比重が小さいほど水平振幅(f0)（＝走行抵抗）は小さく、ロックⅡ、Ⅲは反対に**図－4、図－5** で示すように、比重が大きいほど走行抵抗が小さい傾向を示す。



図－3　比重と走行抵抗の関係：ロックⅠ



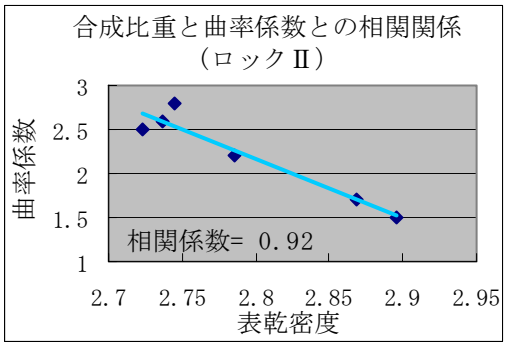
図－4　比重と走行抵抗の関係：ロックⅡ



図－5　比重と走行抵抗の関係：ロックⅢ

3-4　合成比重と曲率係数との相関性

曲率係数は均等係数とともに粒度分布曲線の変化状態を示す指標である。特に均等係数が似通っている場合、曲率係数が大きいほど D_{60}～D_{10} 間の粒度分布が粗礫側に偏っていることを示しており、小粒子が多く破砕されていると推定できる※2)。そこで比重と曲率係数との相関性を調べた結果、ロックⅠ、Ⅲは相関性が見られなかったが、ロックⅡは**図－6** で示すように高い相関性があり、比重の小さい粒子構造が多い材料ほど、粒子破砕が多く生じた結果と推測される。



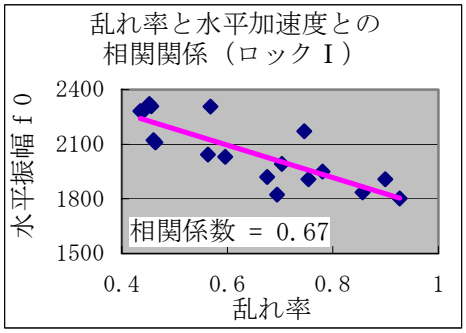
図－6　比重と粒度分布の関係:ロックⅡ

4．加速度法のみの試験結果

4-1　乱れ率と水平加速度の相関性

乱れ率と水平振幅(f0)は、2個の加速度センサーで個別に取得し解析を行う。そこで加速度センサーの検知性能を調べるため、材料別に転圧回数2～4回のすべてのデータを抽出し、乱れ率と水平振幅(f0)の相互の相関性を調べた。

その結果、ロックⅠが0.7、ロックⅡが0.8、ロックⅢが0.6の相関係数があり、個々に取得した乱れ率と水平振幅(f0)のすべての検知データは、信頼性のあるデータであると確信できた(**図-7** 参照)。



図－7　ロックⅠの上下・水平加速度

4-2　締固め地盤特性と乱れ率の相関性

乱れ率と水平振幅(f0)の変化傾向は、**図-8 ～図-13** で示すとおり様々な形態を示し、乱れ率と空気間隙比・締固め密度との相関性は見られない。

4-3　加速度データの変化傾向

4-3-1　変化タイプの分類

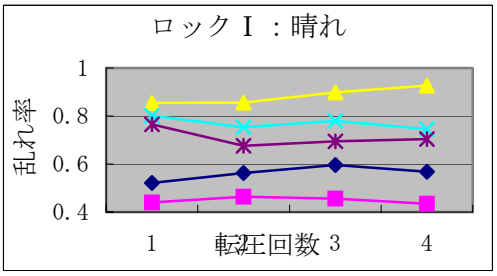
35種類の加速度データを用いて、転圧回数に伴う乱れ率と水平振幅(f0)の変化傾向について、それぞれ転圧回数4回の値から2回の値を差し引き、その増・減傾向に基づいて加速度データを下記の4タイプに分類した。

A タイプ：　乱れ率は上がり，水平振幅(f0)も上がる。
B タイプ：　乱れ率は上がり，水平振幅(f0)は下がる。
C タイプ：　乱れ率は下がり，水平振幅(f0)は上がる。
D タイプ：　乱れ率は下がり，水平振幅(f0)も下がる。

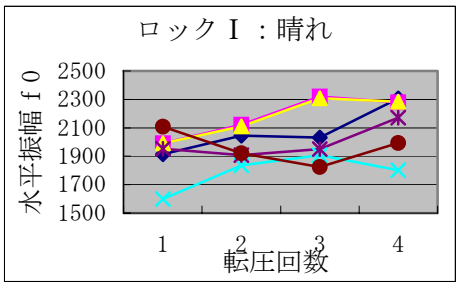
なお水置換試験の結果から、ロックⅠ，Ⅱ，Ⅲの空気間隙比はいずれも4回転圧で規定値をすべて超えており、十分な締固め効果が得られている。

4-3-2　加速度軌跡データと変化タイプの発生要因

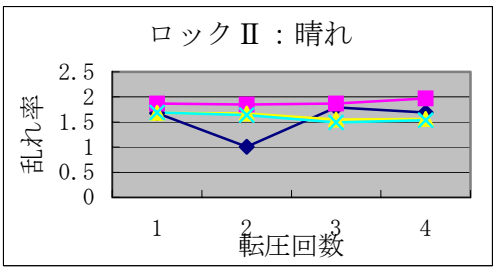
上記A～Dで示すように、転圧に伴う加速度波形の変化が4タイプに異なって発生した要因について、品質管理データ、沈下測量データ、加速度データおよび加速度軌跡データに基づいて総合的に検討し、以下のような知見を得た。



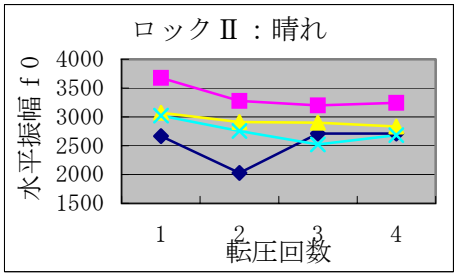
図－8　ロック Ⅰ の乱れ率



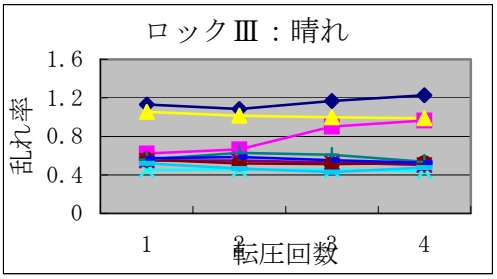
図－9　ロック Ⅰ の水平振幅(f0)



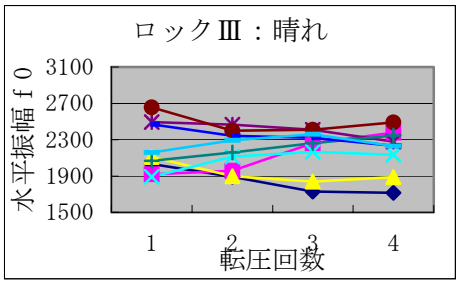
図－10　ロック Ⅱ の乱れ率



図－11　ロック Ⅱ の水平振幅(f0)



図－12　ロック Ⅲ の乱れ率



図－13　ロック Ⅲ の乱れ率

(1)　A タイプ

転圧に伴って乱れ率と水平振幅(f0)が共に増大しており、振動転圧輪が地表面で上下・水平方向で跳ねていることが原因と思われる。特に水平振幅(f0)が増大する要因は、粗礫分が偏って多い粒度分布の場合、転圧面の平坦性が確保される前に締固め効果がすぐに限界となって、走行抵抗を受け続けるためと思われる。A タイプは全体の 34%と最も多い。ロック Ⅰ の半数データがこれに入っており、ロック Ⅰ が代表的な材料である。

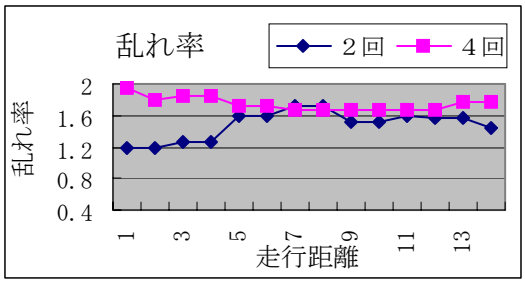
(2)　B タイプ

転圧に伴って乱れ率が上昇し、一方で水平振幅(f0)が低下する。特に水平振幅(f0)が減少する要因は、細粒分や砂分が適度に混じった粒度分布の場合、砂分が粗礫の間にかみ合うことによって締固め効果が高められ、転圧面が次第に平坦になって走行抵抗が収束したと考えられる。B タイプは全体の 17%にすぎない。

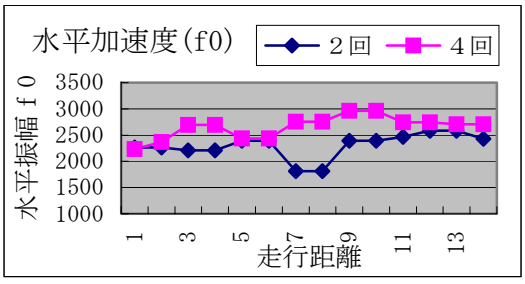
(3)　C タイプ

転圧に伴い乱れ率は下降傾向を示し、また水平振幅(f0)が上昇傾向を示すのは、転圧面の上層部の地盤剛性が高まりにくいことに加え、走行抵抗が収束しにくい結果と思われる。ロック Ⅱ の半数がこれに入っており、ロック Ⅱ が C の代表的な材料である。C タイプは全体の 31%と多い。

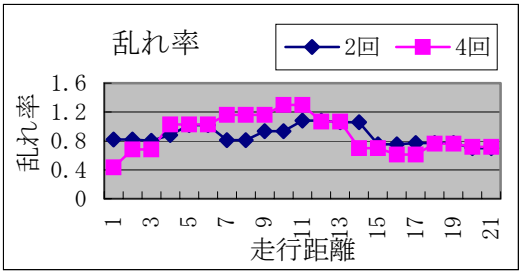
特に乱れ率が高まらない原因は、粒径が小さいか比重が小さい粒子が破砕しやすい場合、地盤剛性は高まりにくく、その結果、乱れ率も高まらないと考えられる。また粒子破砕と関連して水平振幅(f0)が増大する原因は、破砕の進行によって沈下が収束しにくいと推測される。



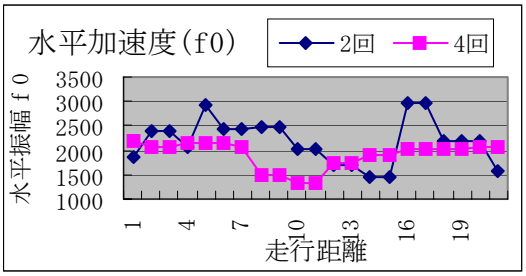
図－14　A タイプの乱れ率



図－15　A タイプの水平振幅(f0)



図－16　B タイプの乱れ率



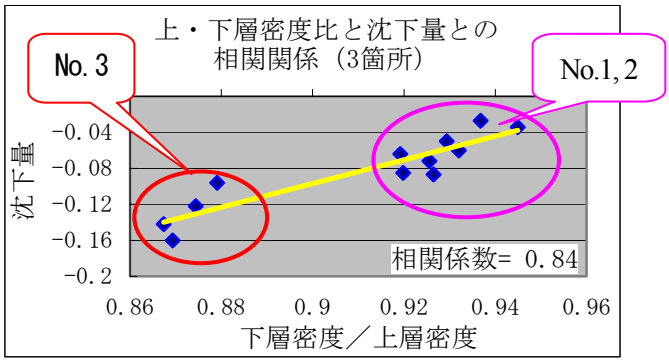
図－17　B タイプの水平振幅(f0)

ロックⅡの特徴として、**図－6** で示すように比重が小さいほど曲率係数が大きい現象は、比重が小さいものほど粒度分布が粗礫分の多いほうに偏っていることを示す。これは小・中粒径の粒子が破砕されやすい特性をもつことを裏付けていると推測される。

今回の試験とは別に、2003 年 7 月にロックⅡを用いた試験を敷均し厚 1.5m で行っており、このときは 2 孔式 RI 計器を No.1～No.3 の 3 ヶ所に設置し、締固め層内を上・下層に分けて密度計測を行った。その結果、層内の平均締固め密度は 3 ヶ所ともに大きな差は無かったが、**図－18** で示すように No.1, No.2 の沈下量が 8cm に対し、No.3 は倍の 16cm あり、また No.3 の上層部の密度は 3 者で最も大きく、また下層部の密度は反対に最も小さかった。

このように No.3 の沈下量が大きい原因は、上・下層の密度差が他より大きいことを考慮すると、上層部において粒子破砕が生じたことによると推測される。そして No.3 の上層部の密度が他より高かった原因は破砕された細粒分が礫間に入り込んだことによると思われる※3)。反対に No.3 の下層部の密度が他よりも低かった原因は、上部層における粒子破砕の影響により下層部への締固めエネルギーの伝達量が減少したことによると思われる※4)。

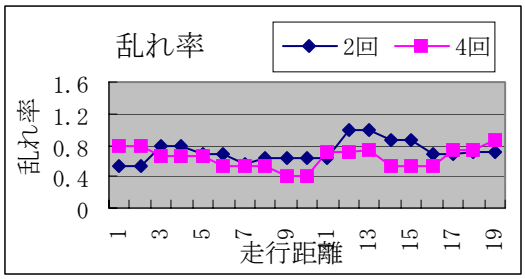
上記 2003 年 7 月のロックⅡの試験結果からも、今回の結果が裏付けられたと考える。



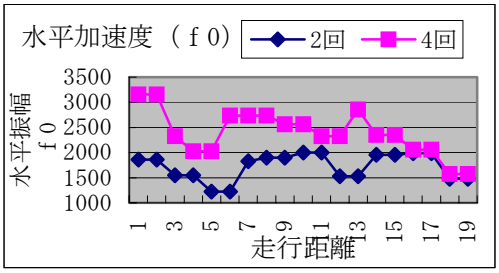
図－18　沈下量と層内密度比の関係

(4)　D タイプ

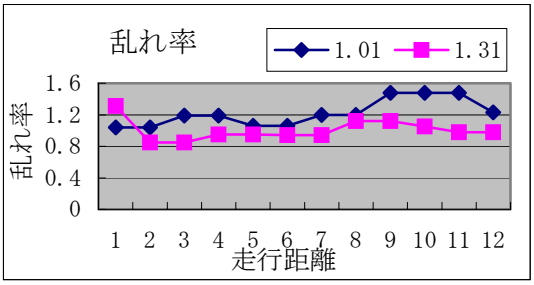
転圧に伴い乱れ率が下降傾向を示すとともに水平振幅(f0)も同様に下降傾向を示すが、締固めに伴い沈下傾向も収束を見せる。C タイプと同様に粒子破砕が発生しやすい材料であるが、水平振幅(f0)が低下傾向を示すのは、締固め効果が生じていると考えられる。その原因は、粒度分布において砂分や細粒分の割合が C タイプよりも多く含まれることにより、粒子破砕をある程度防ぐとともに、砂分が粗礫の間にかみ合うことにより締固め効果が高められたと考える※5)。D タイプは全体の 18%と少ない。



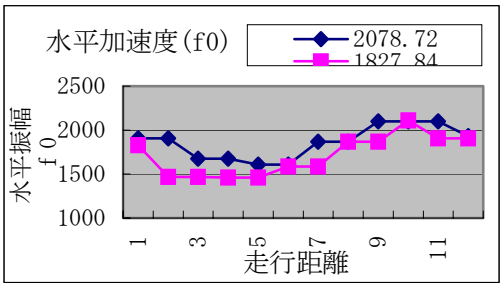
図－19　C タイプの乱れ率



図－20　C タイプの水平振幅(f0)



図－21　D タイプの乱れ率



図－22　D タイプの水平振幅(f0)

５．締固め度評価指標としての乱れ率の課題

ロックⅠ・Ⅱ・Ⅲの３材料を使用したフィールド試験の結果、乱れ率が転圧に伴って上昇傾向を示したデータ数は全体の半数に過ぎず、残り半数は下降傾向を示すか、または変化傾向はほとんど見られなかった。乱れ率の半数が転圧に伴って上昇傾向を示さなかったことは、粗粒材を対象とした場合、乱れ率と空気間隙比･締固め密度との相関性は低く、乱れ率で締固め度を評価する方法に課題があることを示した。

粗粒材に対する乱れ率の課題としては、①粒子破砕の影響の有無、②盛土材に対する締固め荷重の適正度が主な要因と考えられる※6)。

粒子破砕は構成する粒子群の接点部の圧砕や、粒子全体が破壊分離するなどして初期の粒度分布が変化する現象であるが、その詳細に関してはほとんどわかっていないのが現状である。しかし、振動ローラ加速度法の実用化においては、上記の課題解決が不可欠であろう。

６．まとめ

振動ローラ加速度法を用いた今回の試験結果から、実工事において締固め荷重の適正度合いを適宜に管理することの重要性を再認識した。締固め効果を挙げる上で、一般にせん断強度は空気間隙比の減少に伴って増加するとの考え方が支配的であり、せん断強度の低下そのものへの関心は低い。しかし、締固めに伴う粒子破砕の発生は、地盤変形係数やせん断強度の低下を招き、内部摩擦角が小さくなるなど、施工する上で好ましくない影響がある※7)。

そこで、締固め品質管理に関する新たな方法として、今回の試験で行ったように水置換試験を行う際に振動ローラ加速度法を併用する現場試験方法を提案する。水置換試験法で得られた転圧後の品質管理データと、振動ローラ加速度法で得られた転圧過程の加速度軌跡データを併用することにより、転圧過程での判定が重要な粒子破砕の有無や締固め荷重の適正度など、品質管理データを裏付ける資料が簡易な方法で得られるであろう。これにより、盛土の品質をさらに高める必要があると考える。

参考文献

1）　転圧ローラ工学、テラメカニックス研究会、pp104～108
2）　粗粒材料の現場締固め、㈳土質工学会、pp73
3）　粗粒材料の現場締固めの評価に関するシンポジウム　論文集、㈳土質工学会、pp110
4）　粗粒材料の現場締固め、㈳土質工学会、pp70
5）　粗粒材料の現場締固めの評価に関するシンポジウム　論文集㈳土質工学会、pp. 107～pp. 112
6）　粗粒材料の変形と強度、㈳土質工学会、pp176
7）　粗粒材料の現場締固め、㈳土質工学会、pp10

9．端面掘削方式を用いた岩盤深礎掘進機の性能実験

愛媛大学大学院：○岩田　智明
愛媛大学工学部：室　達朗、河野　幸一

1. 緒言

起伏が多く周りを海で囲まれた決して広くはない国土の我が国において、より豊かな経済活動を進めようとするとき、交通、輸送、発電などに多くのトンネル、橋梁、道路の建設が必要となる。また地方の人口分散から都市部への人口集中といった社会の流れに伴って、今後さらに深い地下の利用、開発が進むことが予想される。このことから、掘削方法の開発による合理化、コストダウンを要求する掘削効率の発展が求められる。

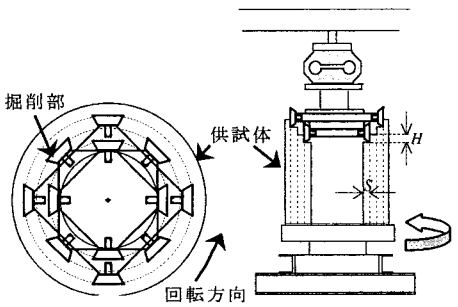
2. 端面掘削

従来の掘削工法の多くが 1 自由面を掘削する平面掘削を採用している。自由面とは、破砕の際に破壊を拘束しない面のことをいうが、掘削効率を向上させるための方策として、2 自由面をもつ岩石の端面を剥離破砕刃で掘削する端面掘削は、平面掘削との比較実験では比エネルギーが約 1/9～1/41 に減少し、端面掘削方式は極めて効率的な掘削が可能なことが過去の研究[1)]から明らかにされている。

3. 実験装置および実験方法

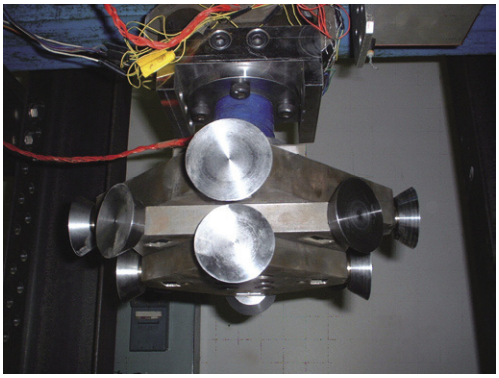
(1) 実験装置[2)]

実験装置概略図を**図－1**に示す。岩石供試体は、回転速度 3r.p.m.のターンテーブルに設置しており、深礎掘進機モデルの 1 回転当たりの貫入深さを制御するためのウォームギアジャッキを用意し、同図に示す内径 15cm、外径 30cm、高さ 27cm の中空の円筒岩石供試体において、各 4 個の剥離破砕刃をもつ計 3 段で構成されている深礎掘削機モデルで供試体を鉛直方向に掘削する。深礎掘削機モデルを**写真－1**に示す。刃には、直径 5(cm)、刃物角 55π/180(rad)の円盤型剥離破砕刃を使用する。段の高さである切込み深さ H を 2.0(cm)、端面から剥離破砕刃までの距離である切込み幅 S を 2(cm)のピッチで回転させながら岩石端部に押しつけることにより岩石を破砕していくことで掘削が行なわれる。供試体はモルタル供試体を擬似岩石とし、モルタル A(一軸圧縮強度 S_C=0.382kN/cm^2)、モルタル B(S_C=0.962kN/cm^2)、モルタル C(S_C=1.756kN/cm^2)において、それぞれ 1 回転当たりの貫入深さ p を 0.05、0.10、0.15（cm/round）の 3 通りに設定し端面掘削実験を行った。



（A）平面図　　（B）立面図

図－1　実験装置概略図



写真－1　深礎掘削機モデル

(2)　実験方法

掘削中に1回転当たりの貫入深さが一定となる変位制御の実験を行い、推進力 F_Z(kN)、作用トルク T(Nm)、貫入量 d(cm)を測定する。1枚の刃に作用する推進力 f_Z(kN) 、転がり抵抗力 f_X(kN)、全動力 P(kNcm/s)および効率的な掘削を示す指数として全動力 P (kNcm/s)を発生した掘削土量 V_E (cm^3/s)で除して得られる比エネルギーE_S(kNcm/cm^3)についてそれぞれ計算した。

4.実験結果

(1)　推進力 F_Z と作用トルク T

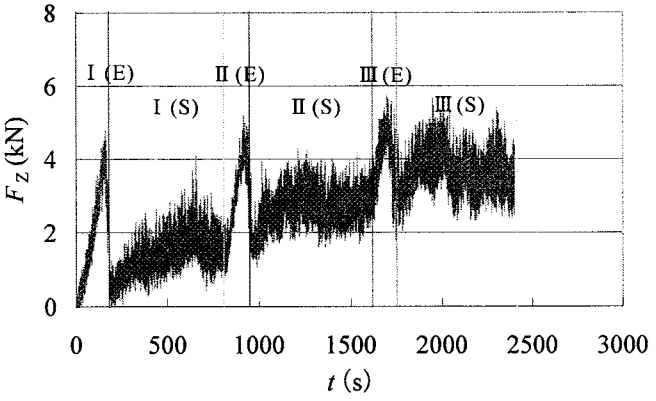
図－2 に一例としてモルタルBの推進力 F_Z と掘削時間 t の結果を示す。図中のⅠ(E)、Ⅰ(S)、Ⅱ(E)、Ⅱ(S)、Ⅲ(E)、Ⅲ(S)はⅠ(E):1段目の刃が掘削し始め端面が破壊する（初期端面掘削）までの区間、Ⅰ(S):破壊後、定常に掘削（定常端面掘削）し、2段目の刃が接地するまでの区間、Ⅱ(E):2段目の刃が初期端面掘削するまでの区間、Ⅱ(S):破壊後、3段目の刃が接地するまでの区間を示している（Ⅲ(E)以下同様）。図から分かるように初期端面掘削時と定常端面掘削時とでは、明らかに異なる変化を示す。

刃が初めて供試体に接地して端面が破壊するまで(Ⅰ(E))推進力 F_Z は急激に増加し、端面破壊後(Ⅰ(S))は推進力 F_Z は穏やかに増加し、ある一定値を示すことが明らかとされた。2段目、3段目も同様な傾向を示す。

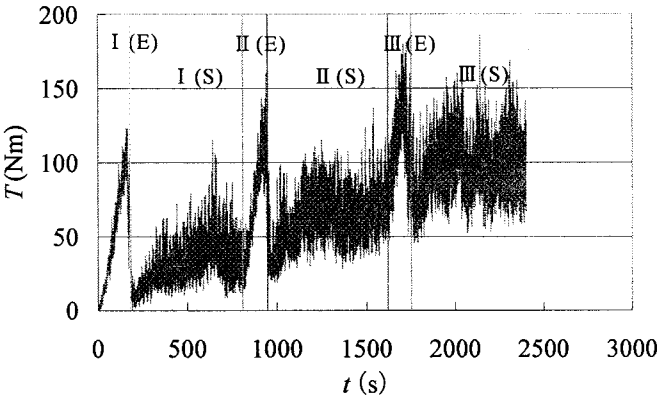
また、一例としてモルタルBの1回転当たりの貫入深さ p が 0.05cm/round 時の作用トルク T と掘削時間 t の結果を**図－3** に示す。推進力 F_Z の変化と同様、初期端面掘削時と定常端面掘削時での変化は相違する。

(2)　掘削段階別の1枚の刃に作用する推進力 f_Z 及び転がり抵抗力 f_X

図－4 に掘削段階別の刃1枚に作用する推進力 f_Z の変化について示す。この推進力 f_Z は、



図－2　推進力 F_Z と掘削時間 t の関係
（モルタルB　p=0.05cm/round）



図－3　作用トルク T と掘削時間 t の関係
（モルタルB　p=0.05cm/round）

Ⅰ(E)、Ⅰ(S)時では一段目の刃、Ⅱ(E)、Ⅱ(S)時では二段目の刃、Ⅲ(E)、Ⅲ(S)時では三段目の刃の推進力 f_Z を示している。つまり、Ⅱ(E)時では1段目は定常端面掘削をしているが、この時の推進力 f_Z は2段目の初期端面掘削を行なっている刃の大きさである。同じ段での初期端面掘削時と定常端面掘削時の推進力 f_Z を比較すると、初期端面掘削時の方が大きい値を示していることが分かる。Ⅰ(E)の値がⅡ(E)、Ⅲ(E)の値に対して大きな値を示した理由、またⅠ(S)の値がⅡ(S)、Ⅲ(S)の値に対して大きな値を示した原因には、切り込み幅 S の減少に伴い、推進力 f_Z が低下したと考えられる。またⅡ(E)、Ⅲ(E)時では、初期端面掘削を行っている刃と定常端面掘削を行っている刃が存在するため、合成されたデータから初期端面掘削を行っている刃のみの正確な推進力 f_Z の抽出が完全にできていない可能性も

含まれる。

また、一段のみで掘削している状態での初期端面掘削時の推進力 f_{ZE} に対する定常端面掘削時の推進力 f_{ZS} の比を減少率 ξ_Z と表すと、平均減少率 ξ_Z は実験より 0.781 の値が得られた。

図－5 に掘削段階別の刃 1 枚に作用する転がり抵抗力 f_X の変化について示す。刃 1 枚に作用する推進力 f_Z の変化と同様、同じ段では初期端面掘削時の方が大きい値を示していることが確認された。なお、二、三段目において、一段目と比較して小さくなるのは切り込み幅 S のが壁面切削により見かけ上、減少したためだと考えられる。

ここで、減少率 ξ_X を一段のみで掘削している状態での初期端面掘削時の転がり抵抗力 f_{XE} に対する定常端面掘削時の転がり抵抗力 f_{XS} の比で表すと、平均減少率 ξ_X は実験より 0.701 の値が得られた。

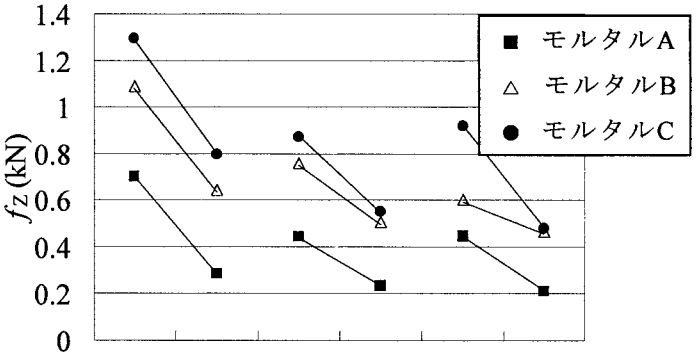
(3)　全動力 P

全動力 P(kNcm/s)は、剥離破砕刃の転動距離 L (cm)と転がり抵抗力 F_X (kN)との積を単位時間当たりで示した回転動力 P_R(kNcm/s)と掘削終了までの貫入量 6.0cm と推進力との積を単位時間当たりで示した推進動力 P_T(kNcm/s)の和を全動力 P として算定した。回転動力 P_R と推進動力 P_T は推進力 F_Z(kN)、作用トルク T(kNm)および回転数 N(r.p.m)を用いて次式で表される。

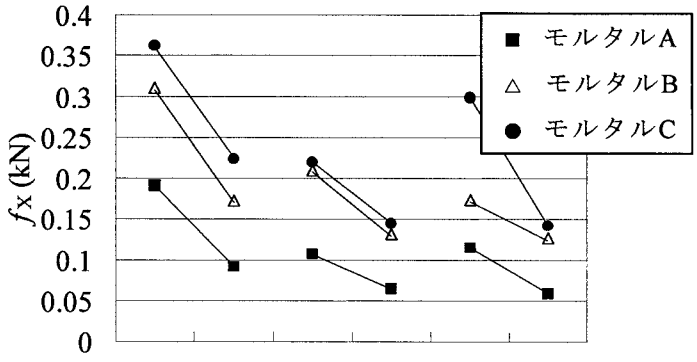
$$P_R = \frac{2\pi N}{60} T \qquad (5)$$

$$P_T = F_Z \cdot p \qquad (6)$$

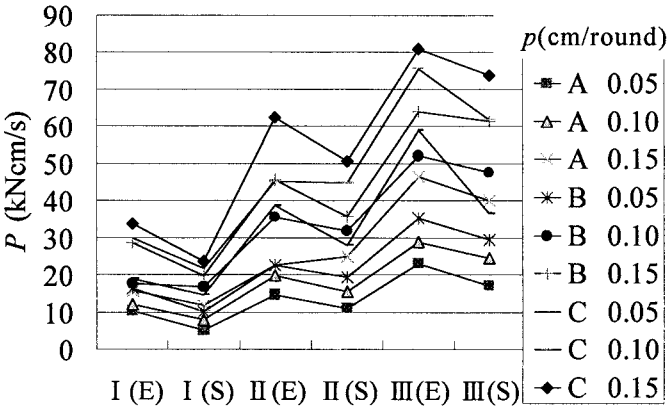
掘削段階別の全動力 P の変化について**図－6** に示す。掘削する刃の枚数が増えるに従って全動力は増加し、また同じ段での掘削に対しては定常端面掘削時のほうが全動力が小さい値を示すことが分かる。またこの実験における最終での全動力 P(kNcm/s)は一軸圧縮強度 S_C (kN/cm^2) と 1 回転当たりの貫入深さ



図－4　掘削段階別の刃 1 枚に作用する推進力 f_Z の変動(p=0.05cm/round)



図－5　掘削段階別の刃 1 枚に作用する転がり抵抗力 f_X の変動(p=0.05cm/round)



図－6　掘削段階別の全動力 P の変動

p(cm/round)を用いて次式の関係で表される。

$$P = 219\, S_C^{0.479}\, p^{0.682} \quad (R^2=0.983) \qquad (7)$$

(4)　掘削土量 V_E

段階毎の掘削土量を算出し、単位時間あたりの掘削土量 V_E を**図－7** に示す。またこの実験における最終での単位時間当たりの掘削

土量 V_E（cm^3/s）は一軸圧縮強度 S_C（kN/cm^2）と 1 回転当たりの貫入深さ p（cm/round）を用いて次式の関係で表される。

$$V_E = 22.7\, S_C^{-0.0119}\, p^{1.07} \quad (R^2=0.992) \qquad (8)$$

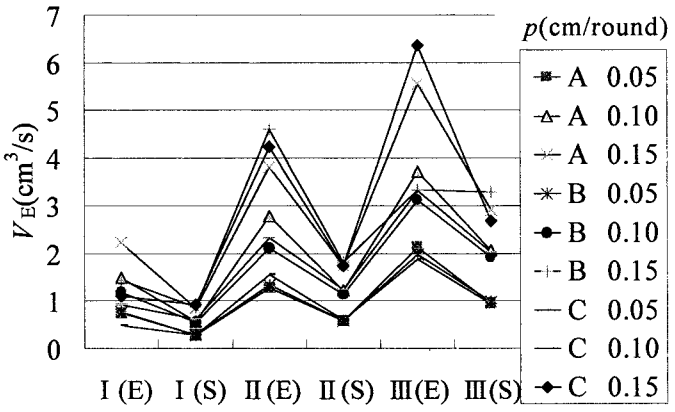
(5) 比エネルギーE_S

効率的な掘削を示す指数として、掘削に要する全動力Pをその時に発生した掘削土量V_Eで除した値を比エネルギーE_Sとする。掘削段階別の比エネルギーE_Sの変化について**図－8**に示す。定常端面掘削時の比エネルギーは初期端面掘削時に比べ大きな値を示した。

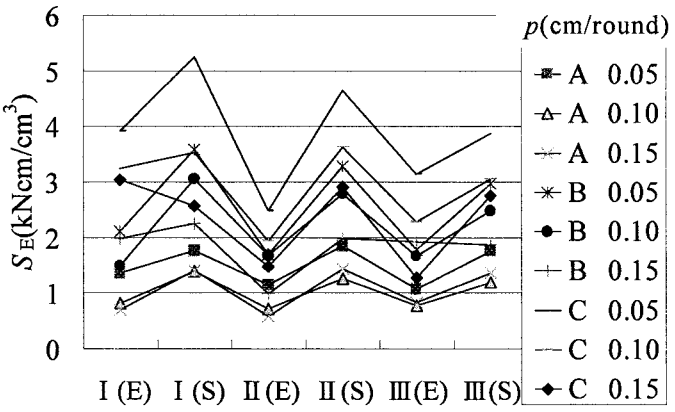
またこの実験における最終での比エネルギーE_S($kNcm/cm^3$)は一軸圧縮強度S_C(kN/cm^2)と 1 回転当たりの貫入深さ p（cm/round）を用いて次式の関係で表される。

$$E_S = 1.08\, S_C^{0.503}\, p^{-0.335} \quad (R^2=0.980) \qquad (9)$$

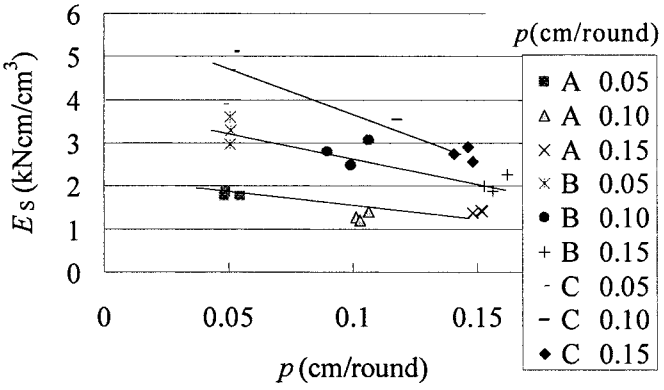
次に比エネルギーE_Sと 1 回転当たりの貫入深さ p（cm/round）の関係を図－9 に示す。図から分かるように 1 回転当たりの貫入深さが大きくなるにつれ、比エネルギーは減少の傾向が見られる。



図－7 掘削段階別の掘削土量 V_E の変動



図－8 掘削段階別の比エネルギーE_Sの変動



図－9 比エネルギーE_Sと
1 回転当たりの貫入深さ p の関係

5.結論

（1）定常端面掘削時の刃 1 枚に作用する推進力f_Z、転がり抵抗力f_Xは初期端面掘削時に比べ小さな値を示す。

（2）平均減少率はξ_Zが 0.781、ξ_Xが 0.701 である。

（3）各々のモルタルに対して、比エネルギーは 1 回転当たりの貫入深さ p が大きければ大きいほど小さく、特に一軸圧縮強度が大きいものほど 1 回転当たりの貫入深さ p を増やせば効率的に掘削を行えることが判明した。

参考文献

1)Muro.T.,Tsuchiya.K,Kohno. K. 2002. Experimental considerations for steady state edge excavation under a constant cutting depth for a mortar specimen using a disc cutter bit, Jounal of Terramechanics, 10, 143-159

2) Muro.T.,Tran .D. T. 2002. Edge Excavation Property of a Disc Cutter Bit in New Tunnel Boring Machine, Today and Tomorrow of the Science and Technology Exchange between Ehime University – Japan and Ecole Central de Nantes - France, Proceeding of the 2nd EU – ECN Joint Seminar 2001, 183-190.

10. 回転溝切削機における円盤型圧壊破砕刃と円盤型剥離破砕刃の性能比較

愛媛大学大学院：○黒瀬　賢二郎
愛媛大学工学部：室　達朗、河野　幸一

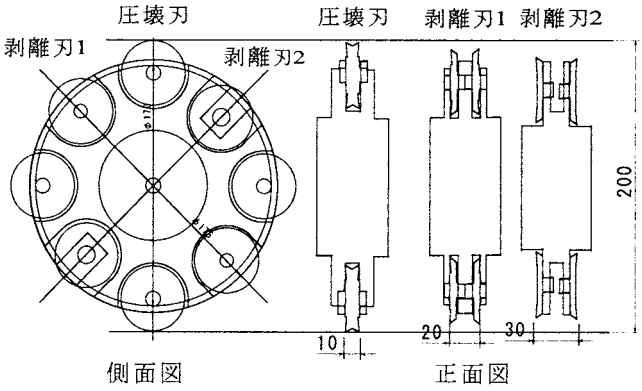
1. 概説

岩盤の掘削工事を精度良く効率的に進めていくことが可能な大型岩盤切削機[1)]（サーフィスマイナー）などによる岩盤切削工法が注目されている。岩盤切削工法とは岩盤を層状に掘削する工法である。掘削する1層の厚みは通常5～30cmで、層状に掘削することで岩盤を薄く掘削できるため、一般の硬岩掘削工法に比べ低騒音・低振動での硬岩掘削が可能である。そこで、その補助掘削として溝を作ってから岩盤切削工法を行うことで、より効率の高い掘削が可能と考えられる。

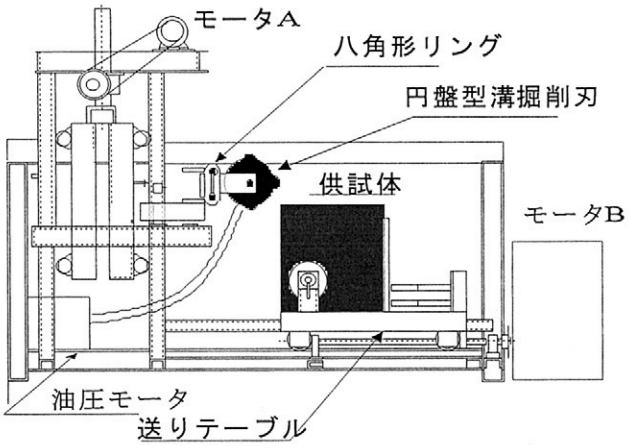
本研究の目的は、掘削効率を向上させるための方策として、2自由面をもつ岩石の端面をディスクカッタビットで掘削する端面掘削[2)]の特性を実験的に明らかにし、比エネルギーによる円盤型剥離破砕刃（以下、剥離刃という）と円盤型圧壊破砕刃（以下、圧壊刃という）の性能を比較することである。

2-1 実験装置

本研究のために円盤型溝掘削刃を製作した。圧壊刃、剥離刃1、剥離刃2から構成され、刃幅は圧壊刃が10mm、剥離刃が5mm、刃物角は共にπ/3radである。また回転半径に5mmずつ差をつけている。刃自体は純粋転動しておりトルクが発生しない。刃の全体図を**図—1**に示す。またその他に円盤型溝掘削刃に駆動転動力を与える油圧モーター、切削刃に作用する主分力*Fx*、背分力*Fz*を測定する八角形リング、供試体を切削刃へ送りこむ供試体送りテーブルが設置されている。実験装置の全体図を**図—2**に示す。



図－1　掘削刃全体図



図－2　実験装置

2-2 岩石供試体

栃木県産の流紋岩質軽石凝灰岩（大谷石）と、6種類の異なる強度のセメントモルタル供試体；モルタルA、モルタルB、モルタルC、モルタルD、モルタルE、モルタルFを作製し、擬似岩石として用いた。強度*Sc*は、大谷石が1.03(kN/cm^2)、モルタル供試

体がモルタル A：0.38 (kN/cm^2)、モルタル B：0.96 (kN/cm^2)、モルタル C：1.76(kN/cm^2)、モルタル D：2.34(kN/cm^2)、モルタル E ：2.50 (kN/cm^2)、モルタル F ：3.00(kN/cm^2)である。モルタル供試体の寸法は、25×25×25cm である。

2-3 実験方法

これらの実験装置を用いて切削深さ Z=0.5,1.0,1.5cm と変化させて溝掘削実験を行った。なおすべての実験において切削ドラムの回転数 140r.p.m、最大回転トルクは 140Nm である。また、送りテーブルの送り速度は 0.21m/min の一定とした。またこの送り速度を切削速度とする。

3-1 実験結果

実験により得られた大谷石による深さ Z=1.5cm の時の背分力 F_Z の経時変化の生データを**図—3**に、その拡大図を**図—4**に示す。図—4から分かるように圧壊刃および剥離刃1,2の背分力がはっきり表れていることが分かる。

また、円盤型溝掘削刃が回転し、切削刃が順次変化していくため、常に切削刃が当たっていないことから、短周期の波形になり、なおかつ主分力 F_X と背分力 F_Z とが 0 にまでもどる激しい波形になっている。またどの実験条件においても背分力 F_Z が主分力 F_X よりも大きい値を示している。

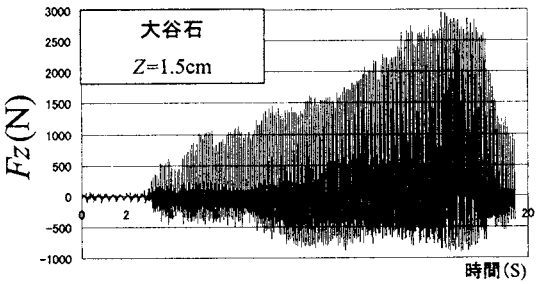
切削トルク T(Nm)は次式より算定した。

$$T=(F_Z\sin\theta - F_X\cos\theta)\times r \quad (1)$$

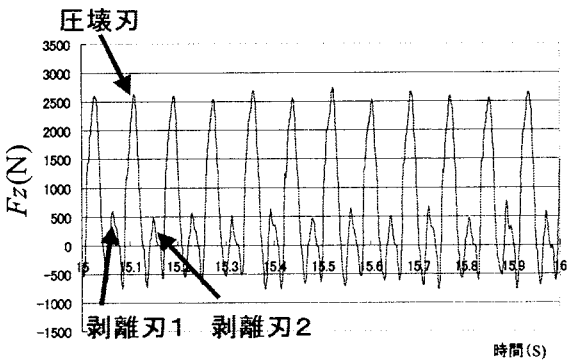
T：切削トルク (Nm)
F_X：主分力 (kN)
F_Z：背分力 (kN)
θ：切削刃の作用角 (rad)
r ： 作用半径 (cm)

3-2 圧壊刃と剥離刃 1、2 の比較

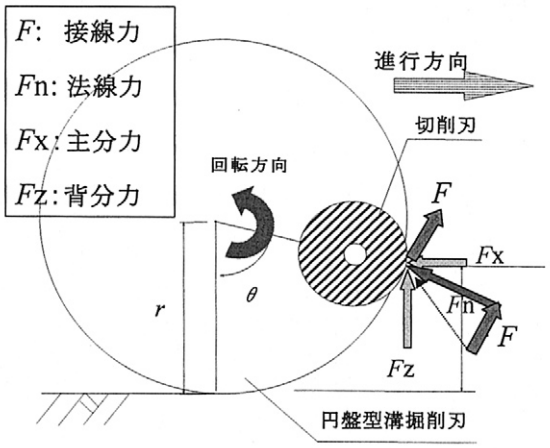
測定した主分力 F_X と背分力 F_Z においては、すべての切削刃が定常掘削状態になってからの掘削時間を 10 分割したブロック毎の最大値を抜き出し、平均したものを主分力 F_{XSM}(kN)、背分力 F_{ZSM}(kN)、トルク T_{SM}(Nm)と定義した。これにより圧壊刃だけに働く F_X、F_Z、T を求めることができる。



図－3 背分力 F_Z の経時変化



図－4 拡大図



図－5 溝掘削機諸力

剥離刃に働く F_X、F_Z、T の最大値を抜き出し、平均したものを主分力 F_{XEM}(kN)、背分力 F_{ZEM}(kN)、T_{EM}(Nm)と定義した。これにより剥離刃 1，2 だけに働く F_X、F_Z、T を求めることができる。切削深さ Z=0.5cm 時の F_X、F_Z と圧縮強度 Sc の関係を**図－6**、**図－7** に示す。また、深さ別のトルク T と圧縮強度 Sc の関係を**図－8** に示す。この図で圧壊刃より剥離刃

1, 2 のほうが少ない力で掘削していることが分かる。また、供試体の強度が大きくなると主分力 F_X、背分力 F_Z およびトルク T も増加する。

3-3 掘削土量

本実験において発生したズリを算出した。掘削によって発生するズリを時間当たりで表したものを掘削土量 V_E (cm^3/s)とし、次式で算出した。

$V_E=B/t$ (2)

$B=[(vt-r\sin\theta)(r-r\cos\theta)$

$+(\pi r^2\cdot\theta/2\pi-(1/2\cdot r^2\sin\theta\cos\theta)]\cdot b$ (3)

V_E: 掘削土量 (cm^3/s) B: 発生ズリ (cm^3)

v: 切削速度 (cm/s) t: 切削時間 (s)

b: 掘削幅 (cm) r: 作用半径 (cm)

θ: 切削刃の作用角 (rad)

なお、実験条件において、切削深さ Z=0.5,1.0,1.5cm としているため、Z=0.5cm のときは、圧壊刃しか作用せず、Z=1.0cm のときは圧壊刃と剥離破砕刃 1 が作用するため、それぞれの刃によって算出される土量を合計している。Z=1.5cm のときも同様に、圧壊刃、剥離 1、剥離 2 の合計土量となっている。

また、圧壊刃に及ぼす主分力 F_{XSM}(kN)、背分力 F_{ZSM}(kN)およびトルク T_{SM}(Nm)、剥離刃に及ぼす主分力 F_{XEM}、背分力 F_{ZEM} およびトルク T_{EM} について、切削深さ Z(cm)と岩石の一軸圧縮強度 S_c (kN/cm^2)の関係についてそれぞれ重回帰分析を行い、次式に示す実験式を得た。R は重相関係数である。

$F_{XSM}=0.556Z^{1.089}S_c^{0.623}$ (R=0.948) (4)

$F_{ZSM}=1.887Z^{0.396}S_c^{0.453}$ (R=0.933) (5)

$Ts_M=45.40Z^{0.872}S_c^{0.719}$ (R=0.892) (6)

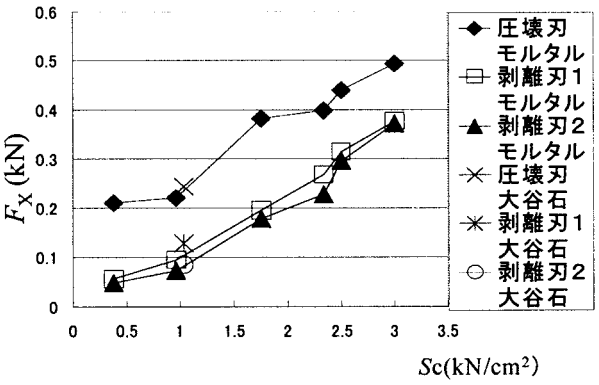
$Fx_{EM}=0.558\,Z^{0.663}Sc^{0.786}$ (R=0.833) (7)

$Fz_{EM}=1.155\,Z^{1.025}Sc^{0.625}$ (R=0.821) (8)

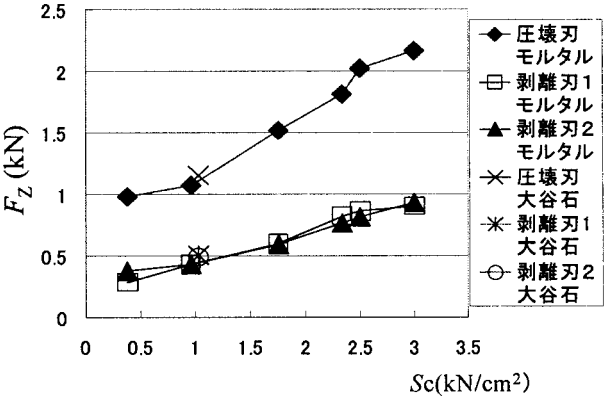
$T_{EM}=9.872\,Z^{0.878}Sc^{0.454}$ (R=0.754) (9)

3-4 掘削動力、比エネルギー

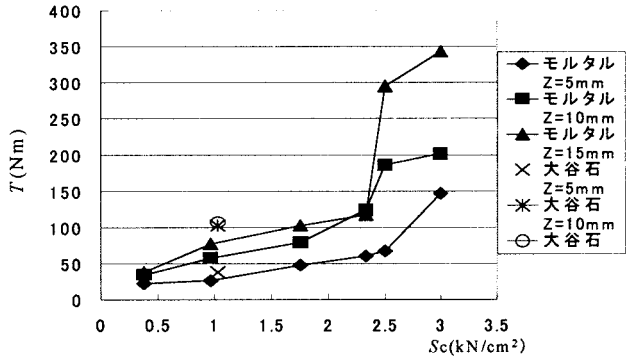
掘削に必要な動力を求めるため、実験によって得られた主分力 F_X (kN)、背分力 F_Z (kN)より切削刃の



図－６ 主分力 Fx と圧縮強度 Sc の関係



図－７ 背分力 Fz と圧縮強度 Sc の関係



図－８ トルク T と圧縮強度 Sc の関係

接線方向力 F(kN)を算出した。単位時間当たりの動力 P を次式として定義する。

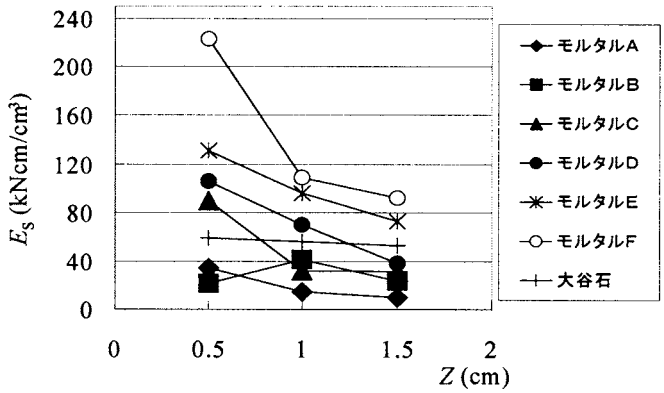
$P=2\pi r\times F\times 140/60$ (kNcm/s) (10)

P : 掘削動力 (kNcm/s)

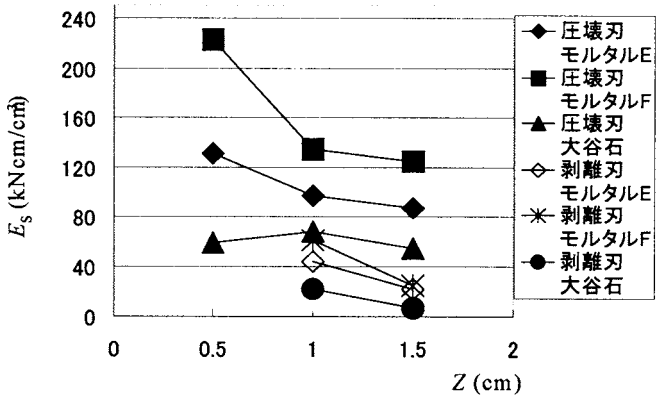
r : 切削ドラム半径 (cm)

F : 接線方向力(kN)

本実験で用いる切削ドラムの回転距離と 1 分間当たりの回転数は 140rpm と一定であるので、動力は接



図－９　比エネルギーE_Sと深さZの関係（合体刃）



図－10　比エネルギーE_Sでの圧壊刃と剥離刃の関係

線方向力によって決定され、単位時間当たりの掘削動力として表す。

次に、掘削動力Pを上述の掘削土量V_Eで除することによって、単位体積を切削するのに必要な動力として表すことができ、これを比エネルギーE_Sとして次式のように定義する。

$$E_S = P / V_E \quad (\mathrm{kNcm/cm^3}) \quad (11)$$

E_S　：比エネルギー　(kNcm/cm³)

P　：掘削動力　(kNcm/s)

V_E　：掘削土量　(cm³/s)

また、図－９に合体刃による比エネルギーE_Sと深さZの関係を示す。また、圧壊刃と剥離刃の関係を図－１０に示す。

比エネルギーE_Sは溝掘削特性を評価する際、掘削効率にあたりこのE_Sの値がより小さければ、単位体積を掘削するのに必要な動力が小さいということになり、より効率のよい掘削であると判断できる。掘削動力P(kNcm/s)および比エネルギーE_S(kNcm/cm³)について、切削深さZ(cm)と岩石の一軸圧縮強度S_c(kN/cm²)の関係についてそれぞれ重回帰分析を行い、次式に示す実験式を得た。Rは重相関係数である。

$$P = 11.56 Z^{0.707} S_c^{0.754} \quad (R=0.821) \quad (12)$$

$$E_S = 25.69 Z^{0.787} S_c^{1.025} \quad (R=0.845) \quad (13)$$

図－9と図－10より、圧壊刃のみの掘削時に比べ合体刃の方が比エネルギーが小さいことにより、より効率的に掘削していることが分かる。また、モルタルE、モルタルF、大谷石における圧壊刃と剥離刃の比エネルギーを比較すると剥離刃は圧壊刃の平均で1/3.5で掘削していることが分かった。

4. 結論

溝掘削を行うことによって端面掘削をする剥離破砕刃がどの程度有効であるかを解明するために岩盤の溝掘削機を製作し、それを用いて様々な条件で実験を行い、円盤型溝掘削刃に作用する主分力、背分力、およびトルクとそれより算出する掘削動力、掘削土量、比エネルギーより溝掘削特性を明らかにした。その結果、次の新しい知見を得た。

1)比エネルギーにおいて圧壊刃と剥離刃では、剥離刃の方が約1/3.5倍となり効率的であることが分かった。

2) 圧壊刃に及ぼす主分力、背分力およびトルク、剥離刃に及ぼす主分力、背分力およびトルクについて、切削深さと岩石の一軸圧縮強度の関係についてそれぞれ重回帰分析を行い、式(4)-(9)を得た。

3) 掘削動力および比エネルギーE_S(kNcm/cm³)について、切削深さと岩石の一軸圧縮強度の関係についてそれぞれ重回帰分析を行い、式(12)-(13)を得た。

参考文献

1) 竹垣喜勝、古川忠彦、丸山健一：大型岩盤掘削機3500SMサーフィスマイナーの低騒音・低振動岩盤切削工法、建設機械、420、Vol.36、No.2、pp.46-50、2000年2月

2) 室達朗、土屋清、河野幸一、若林優輔：ディスクカッタビットによるモルタル端面の定常掘削特性に関する実験的考察、土木学会論文集No.687/Ⅲ-56、pp.37-47、2001年9月

11. 月面探査ローバーの車輪形状の最適化

呉工業高等専門学校：○重松　尚久
愛媛大学工学部：室　達朗
呉工業高等専門学校専攻科：大知　剛

1.はじめに

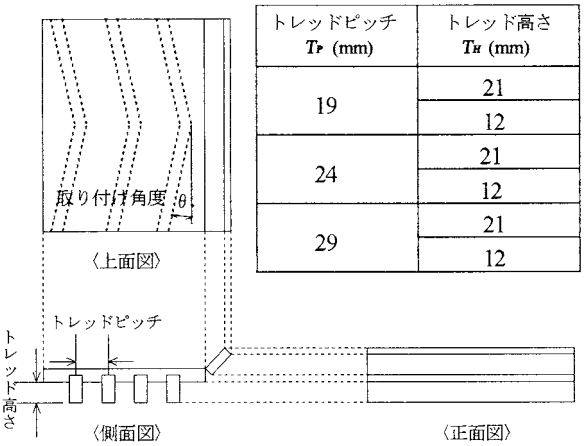
現在、我が国の宇宙開発において、月周軌道からの月の観測を目的としたプロジェクトが推進されており、それに次ぐミッションとして無人探査機による月面調査が検討されている。月面は、重力の違いや粉塵のような細かい砂（レゴリス）で覆われているなど地上とは全く異なる条件を有する環境のため無人探査機の開発が必要不可欠である。月面地盤などの軟弱地盤での車両の運動特性は地盤の変形に大きく影響される。従って、車両の運動特性は機械工学的なアプローチだけではなく、機械と地盤との相互作用（テラメカニクス）という観点からの検討が重要である[1]。そこで、本研究では、試料砂にシミュラントと呼ばれる模擬月面砂を用い、平板牽引試験を行い、トレッドの高さやトレッドピッチなどの平板状態やトレッドの取り付け角度が地盤に及ぼす影響を調べ、車輪形状の最適化を行った。

2.供試地盤

今回の実験で使用したシミュラントは月面のレゴリスを模した擬似月面砂であり、実際のレゴリスと化学成分、粒度分布、比重、粘着力 c、内部摩擦角 ϕ がほぼ一致するように作られたものである[2]。シミュラントの土質性状は、土粒子密度 2.93g/cm^3、均等係数 Uc=57.81、曲率係数 Uc'=1.46 である。この試料砂を土槽全体に約50 mmずつ3層に分けて地盤を作成した。各層ごと平坦に整地したのち、各層の下に10 mm程度の網目の装置を置き、次の層を作成し、その装置を引き上げることで緩詰めの均一な地盤の作成を行った。上記の方法で作成した地盤密度（乾燥密度）は1.63g/cm^{3}であった。

3.実験装置および実験方法

平板牽引試験の実験装置は、試料砂をいれた 4,000 × 2,500 × 1,000 mm の土槽、3 種類のトレッドピッチ(19, 24, 29 mm)、2 種類のトレッド高さ(12, 21 mm)、平板、ウインチ、変位計、ロードセル、メモライザから成る。図-1 に平板概略図と平板の諸元を示す。図-2 に平板牽引試験の実験装置を示す。前面の土砂が平板上にのり上がるのを防ぐため、平板の前端部がそり状になるよう鉄板を溶接し、ウインチとの接合箇所を設けた。平板の後端部には変位計のワイヤーを接合する箇所を設けた。実験は平板をウインチでつなぎ、トレッドピッチ 3 種類とトレッド高さ 2 種類の組み合わせで平板を 6 種類に変化させ、牽引試験を行った。また、トレッドの取り付け角度を4種類に変化させ、それを正方向と逆方向にそれぞれ牽引した。有効牽引力は平板と牽引装置との間にロードセル



トレッドピッチ T_P (mm)	トレッド高さ T_H (mm)
19	21
	12
24	21
	12
29	21
	12

図-1　平板の概略図と平板の諸元

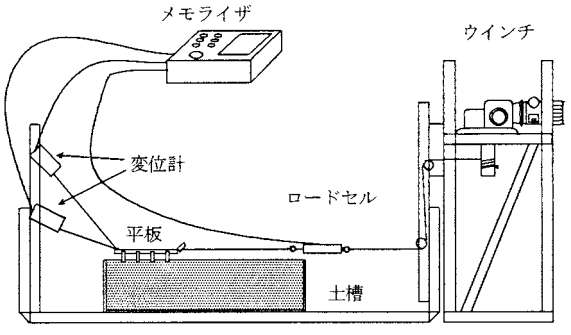


図-2　平板牽引試験装置

を介して測定した。また、それぞれの平板に 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5kg の 5 段階に分けたおもりをのせることで、平均垂直応力 p を 0.98, 1.96, 2.94, 3.92, 4.90 kPa に変化させて実験を行った。また、牽引距離をスリップ量と定義して、150 mm を牽引した。また、その中で最適なトレッドピッチとトレッド高さの比で取り付け角度(5, 10, 15, 20°)を 4 種類に変化させ実験を行った。

4.実験結果と考察

4.1 せん断抵抗

緩く堆積した砂質土、練り返した軟弱な粘土、および正規圧密粘土で構成される地盤上で、様々な接地圧 p の下で標準履帯モデルを牽引したときの、せん断抵抗 τ と履帯のスリップ量 j の関係は、一般的に Janosi-Hanamoto の関係式[3] (1)が用いられる。

$$\tau = (m_c + m_f \cdot p)\{(1 - \exp(-a \cdot j)\} \qquad (1)$$

p : 平均垂直応力 (kPa) , j : スリップ量 (cm)
m_c : 地盤と平板との間の付着力 (kPa)
m_f : 地盤と平板との間の摩擦係数
a : 形状変形係数 (1/cm), τ : せん断抵抗 (kPa)

図-3 にスリップ量とせん断抵抗の関係の一例として、トレッドピッチ T_P = 29mm,トレッド高さ T_H = 12mm の形状の場合を示す。スリップ量の増加に伴いせん断抵抗は収束することが分かる。また、垂直応力が大きくなるほどせん断抵抗も増加することが分かる。なお、**表-1** に地盤ー車輪系定数を示す。**図-4** にせん断抵抗とトレッドピッチートレッド高さ比の関係を示す。シミュラントでは最適トレッドピッチートレッド高さ比 T_P/T_H が 1.14(T_P=24mm, T_H=21mm)～1.38(T_P=29mm, T_H=21mm)と明確な値を得る事ができた。垂直応力が大きい場合に傾向が顕著に現れることが分かる。さらに T_P/T_H が 1.5 付近からせん断抵抗が低下しているのが分かる。一般に、牽引力は**図-5** に示すように、スリップ量の増大とともにトレッド底面およびトレッド両側面に滑り線が成長し、その滑り線上にせん断抵抗を発生せしめる土の進行性破壊により発生する[4]。牽引による沈下に際し、重要となってくるのが平板に取り付けられたトレッドが牽引されることで地盤に描く土の進行性破壊による滑り線である。この滑り線がトレッドピッチートレッド高さ比によって次のトレッドに届くか届くまでの途中で終わってしまうかで牽引力や滑り沈下量に影響を

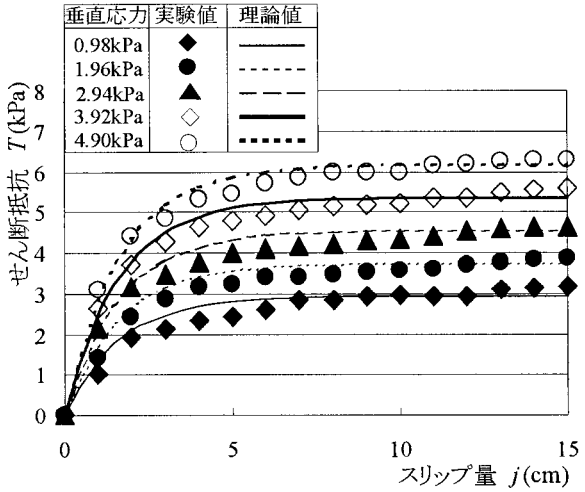


図-3 スリップ量とせん断抵抗の関係

表-1 地盤ー車輪系定数

	m_c (kPa)	m_f	a (1/cm)	重相関係数 r
シミュラント	0.668	0.565	0.951	0.949

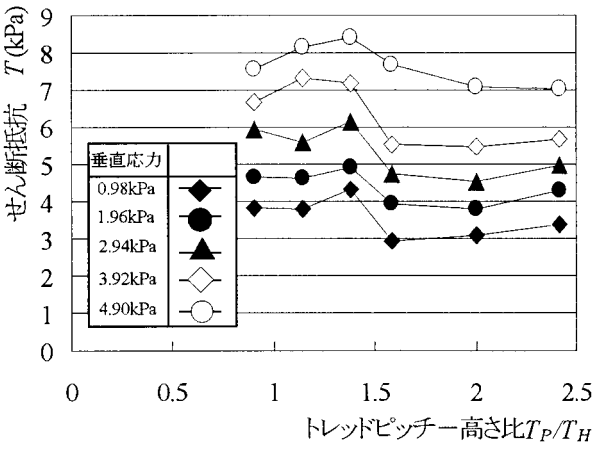


図-4 せん断抵抗と T_P/T_H の関係

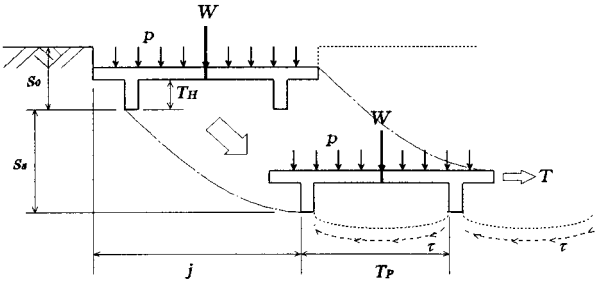


図-5 滑り線と有効牽引力の発生機構

与える。トレッドピッチートレッド高さ比が 1.38 以降の 3 点はいずれも高さ 12mm のトレッドであり、トレッド高さに対しトレッドピッチが広いため滑り線が途中で終了してしまったと考えられる。今回はこの実験より得られた 1.38 を最適トレッドピッチートレッド高さ比とした。

4.2 滑り沈下量

車両が走行する場合、静的沈下に加え、この滑り沈下が生じる。滑り沈下量 s_s とスリップ量 j_s は車両の走行性能を左右する重要な因子の一つであり、接地圧により異なる。滑り沈下量 s_s とスリップ量 j_s の間には一般に滑り沈下量を予測する式としての Muro の関係式[4](2)が用いられる。

$$s_s = c_0 \cdot p^{c1} \cdot j_s^{c2} \qquad (2)$$

c_0, c_1, c_2：地盤ー車輪系定数, j_s：スリップ量（cm）
p：平均垂直応力（N/cm^2）, s_s：滑り沈下量（cm）

図-6 にスリップ量と滑り沈下量の関係の一例として、トレッドピッチ T_P = 20mm, トレッド高さ T_H = 21mm の形状の場合を示す。スリップ量の増加に伴い、滑り沈下量も増加し、やがて収束する傾向がある。なお、表-2 に地盤ー車輪系定数を示す。図-7 にシミュラントにおける滑り沈下量とトレッドピッチートレッド高さ比の関係を示す。トレッドピッチが狭く、トレッド高さが高い平板形状であるほうが沈下量が大きくなる傾向が見られた。

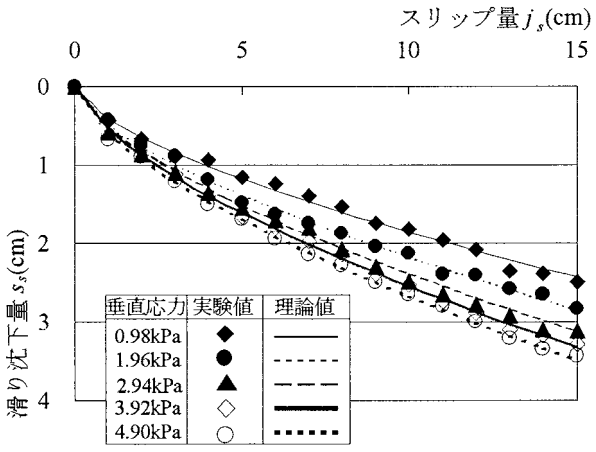


図-6 スリップ量と滑り沈下量の関係

表-2 地盤ー車輪系定数

	c_0 *	c_1	c_2	重相関係数 r
シミュラント	0.079	0.436	0.959	0.983

* $(cm^{1+2C-C2}/N^{C1})$

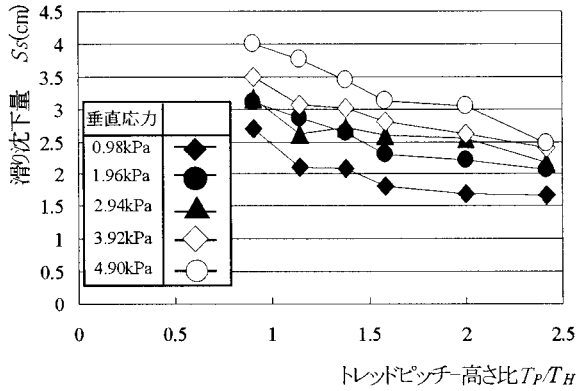


図-7 滑り沈下量と T_P/T_H の関係

4.3 トレッドの取り付け角度

次に、トレッドピッチートレッド高さ比を 1.38 にした平板に、トレッドの取り付け角度を 5, 10, 15, 20° の 4 種類を正方向、逆方向に分けて計 8 種類に平板を変化させて牽引した。

4.3.1 せん断抵抗 図-8 にせん断抵抗とトレッドの取り付け角度の関係を示す。図-8 よりトレッドの取り付け角度 θ が－ 20° に近づくにつれ、せん断抵抗が大きくなる傾向がある。これはトレッドが V 字の形になることで牽引すると土がトレッドの中心に集まり、土の逃げ場がなくなるためそれが直接、抵抗につながったと考えられる。逆に逆 V 字の形である 20° に取り付けた平板では土を左右に分けて牽引されるため抵抗が小さくなったと考えられる。

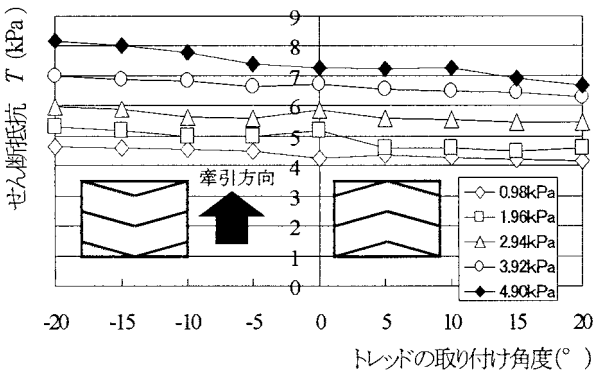


図-8 せん断抵抗とトレッドの取り付け角度の関係

め抵抗が少なくなったと考えられる。図-9 に牽引時の土の動きを示す。

4.3.2 滑り沈下量 図-10 に滑り沈下量とトレッドの取り付け角度の関係を示す。図-10 よりトレッドの取り付け角度θが 20 ° に近づくにつれ、滑り沈下量が大きくなる傾向がある。逆にθが－ 20 ° に近づくにつれ、滑り沈下量が小さくなる傾向がある。これはトレッドが逆 V 字の形になることで牽引すると土を左右に分けて進むか、V 字型の形のトレッドの中心に土を集めながら牽引されるため沈下量が大きくなっていったのではないかと考えられる (図-9 参照)。

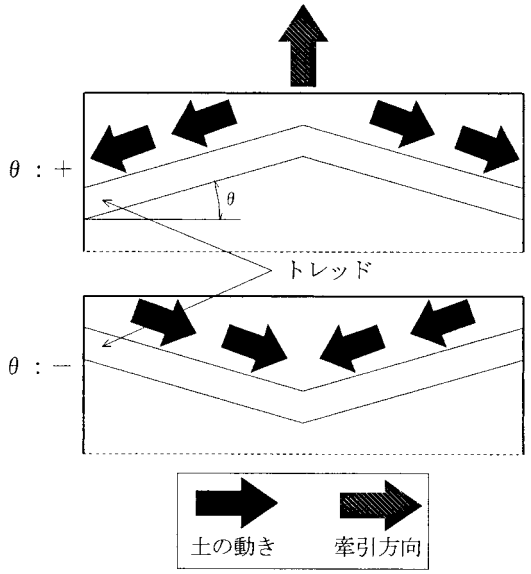


図-9 牽引時の土の動き

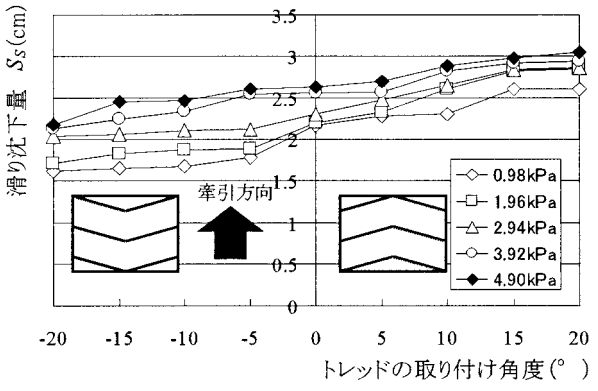


図-10 滑り沈下量とトレッドの取り付け角度の関係

5. 結論

平板牽引試験より得られたデータより、シミュラントを走行する最適な平板形状はトレッドピッチートレッド高さ比からトレッドの取り付け間隔とトレッドの高さの比は約 1.38、トレッドの取り付け角度は進行方向に対して逆 V 字型に取り付けた平板であることが分かった。今回は 20 ° までしか変化させなかったが、最適な角度があるのではないかと考えられる。また、トレッド高さに対し、トレッドピッチが大きすぎると滑り線の関係上、せん断抵抗が減少することが考えられる。このトレッドピッチートレッド高さ比により適用する地盤での牽引力が最大の点が分かると最適な施工機械のトレッドピッチやトレッド高さが分かり効率的な作業が可能になると考えられる。さらに、今回の実験は月面を想定し、乾燥した砂質地盤で行ったが、今後、含水比を変化させた砂地盤において同様の実験を行うことで、土石流災害などの復旧用機械などに応用することが可能だと考える。

なお、今回の実験は地上で行われているため、月面での重力や真空といった条件を考慮していない。月面での車両の挙動を模擬するためには、月面での重力を考慮する必要があるが、地上試験レベルで月面重力を考慮するのは難しいため、今後は相似則の概念を用いて本質を究明していく必要がある。

<謝辞>

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金若手(B)No.15760369 の補助を受けて行ったものです。

6. 参考文献

(1) SELENE-B 検討チーム：月軟着陸実験計画 (SELENE-B) 提案書, (ISAS/NAL/NASDA), 12 章 pp.23, 2002.

(2) 深川良一：惑星探査・開発における地盤工学の貢献, 土と基礎, Vol.52, No.1, pp.10-12, 2004.

(3) Z.Janosi, and B.Hanamoto : The analytical determination of drawbar-pull as a function of slip for tracked vehicles in defomation soils, Proc.of the 1st Int.Conf.of the I.S.T.V.S, 1961.

(4) 室達朗：テラメカニックスー走行力学ー, 技報堂出版, pp.31-74, 113-118, 1993.

12. 最新の締固め施工管理と深層転圧能力を有する多角形ドラム

ボーマクジャパン㈱：○長田　耕一、倉持　勝裕、加藤　美貴男

１．はじめに

近年、情報化施工への取組みが活発となっており、振動ローラを用いた施工においても、加速度計やＧＰＳを用いた管理手法が開発され、徐々に実用化され始めている。また、道路建設工事の経費削減・工期短縮が求められており、締固め施工においても、盛土における厚層施工化等が検討されてきた。
当社では、主としてドイツを始めとした海外での施工工事において、各種技術を適用した振動ローラを提供し、施工品質向上、効率化等へ寄与している。本稿では、これらの技術の概要について、海外における施工例を交えながら紹介する。

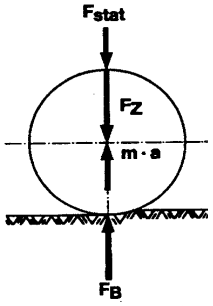
２．締固め管理[1)2)]

締固め施工では、優れた転圧能力を有する振動ローラが多用され、古くから、ローラの振動挙動が地盤の硬さによって変化することが知られている。これに着目し、1980 年頃から、振動挙動を計測することにより、地盤の締固め状況をリアルタイムで把握しようとする取り組みが始められている。さらに、計測値に合わせて振動条件を調整することにより、締固め作業を効率・最適化する管理システムの開発が各社にて進められている。

２.1.　締固め度評価

締固め管理では、締固め状態の検出が、最も重要かつ基本であることは言うまでも無い。現時点では、確立された技術は存在しないが、ローラへ加速度計を取付け、検出された周波数特性を、ひずみ率、乱れ率、等の手法により評価する方法が開発・具体化され始めており、具体的な成果も報告されている。一方、当社では、1982 年に加速度計を用いた検出器（OMEGA メータ）を開発し、これをベースとした締固め管理ツールを提供してきた。OMEGA メータでは、地盤へ付加したｴﾈﾙｷﾞより導出した計算値を出力しており、同じ地盤剛性であっても、地盤条件等により出力値が変化するため、計測値は、固有値ではなく、無次元値として扱う必要があった。

その後、直接地盤剛性を計測する検出手法の開発を進めた結果、２０００年に、これを可能とした E_{VIB} メータの開発に成功した。これは、振動輪が受ける反力を用いた方法を採用しており、ローラ変位との関係により、直接地盤剛性を得ることが大きな特徴である。概略検出手法を以下に示す。



$F_B = Fstart + Fz - ma$

F_B : 地盤反力
m :ドラム振動質量
a : 加速度
Fz : 起振力
$Fstart$: ローラ付加重量

図１　ローラー地盤間の力関係

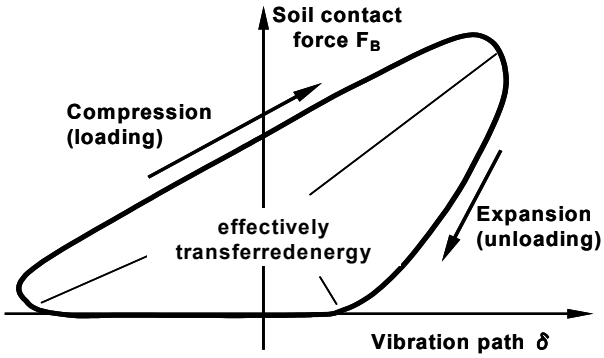


図２　地盤反力ー変位線図

まず、振動ローラと地盤間の力の関係を図１のようにモデル化する。本モデルにおける力のつりあい式は、図の右側へ示したとおりである。ローラ本体に関わる緒元は既知であるため、締固め作業中の、加

速度 a を検出することにより、地盤反力 F_B が導出される。次に、導出された F_B を、加速度の２回積分によって得られる変位 δ に対してプロットすると、図２のような曲線が得られる。この曲線の押込み（Compression）部の直線の傾きが地盤反力係数となり固有値を得ることができる。

２.２.　締固め自動制御（VARIOCONTROL）

当社では、起振力付加方向を連続的に垂直から水平へと変更できる機構（VARIO）を組み込んだローラを有しており、前出の E_{VIB} メータ（BTM-E）からの計測値に合わせて起振力付加方向を制御するコントローラと組合わせて、図３に示すような自動転圧制御システム（VARIOCONTROL）を開発・提供している。本システムでは、目標締固め度を E_{VIB} 値として設定することにより、地盤の状況に合わせた転圧力での施工が自動的に行われる。これを用いた施工例を図４に示す。転圧前では、非常に軟弱な地盤エリアが存在しているが、５回転圧後には、ほぼ均一な締固め状態となっている。本システムを用いることにより、熟練作業者の勘に頼ることなく、施工後の品質を飛躍的に向上させることが可能となる。

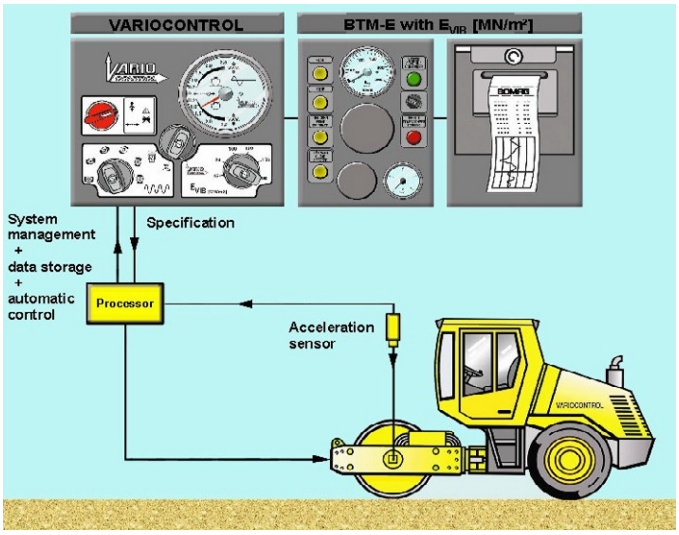


図３　締固め自動制御システム

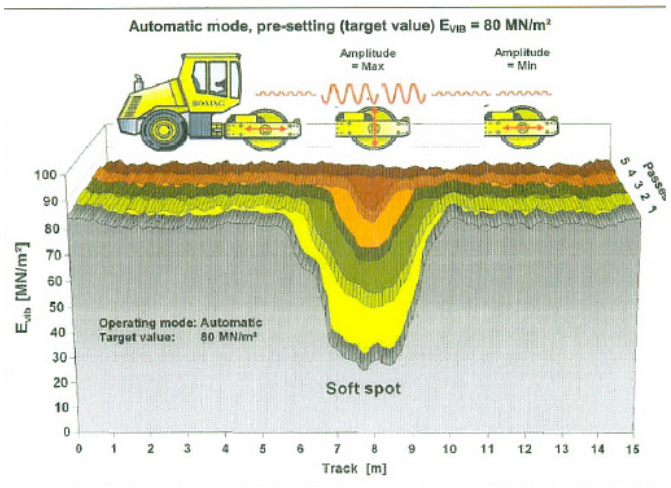


図４　自動転圧制御施工結果例

２.３.　転圧管理

前項は、転圧施工作業の自動制御システムであるが、実施工においては、施工現場全体の転圧状態を総合的に管理する必要がある。

当社では、これをディスプレイ表示するとともに、データをメモリーカードにて取出すことが可能となるシステム（BCM）を提供している。更に、これを、GPS と組合わせることにより、より高度な管理が可能となるシステムを構築している。また、舗装施工向けのシステム（Asphalt Manager）では、舗装温度モニタリングも含め管理可能となっている。

３．多角形ドラムローラ[3)]

施工効率化や工期短縮等の要望に対応するために、メーカ各社では各種転圧能力向上が検討されている。高振幅化など機械的能力の向上が検討されているが、機械構造上の制約等により限界がある。

そこで、ドラムを多角形（八角形）としたローラを開発・適用しテストを重ねた結果、これまでに無い転圧能力を実現できることが確認された。本ドラムの最大の特徴は、非常に深い層まで到達する転圧能力であり、転圧条件によっては、巻出し厚を２倍以上にすることが可能である。

３.１.　八角形ドラム

ドラムの外形を図５に示す。本ドラムは３つの八角形のドラムを繋ぎ合わせたものであり、各ドラムは、千鳥状に位相をずらして接合されている。幅方向端部へは円形リングが溶接されており、ローラ回送時等の、八角形ドラム先端角部の路面への接触を防止して

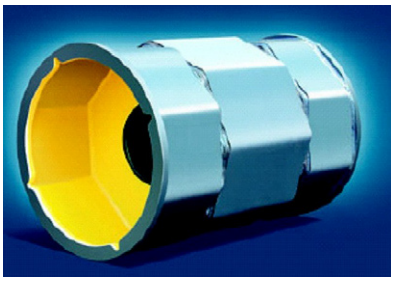


図５　多角形ドラム

いる。これにより、硬い路面においても、高速レンジにて回送することが可能となっている。
従来のドラムに比べて多角形ドラムは非常に優れたセルフクリーニング効果をもっており、スクレーパーを省略することができた。

3.2.　転圧状態

図６に、円形ドラムと多角形ドラムの転圧状態模式図を示す。左端は、従来の円形ドラムを示しており、回転中は転圧力が常に同一方向に作用している。

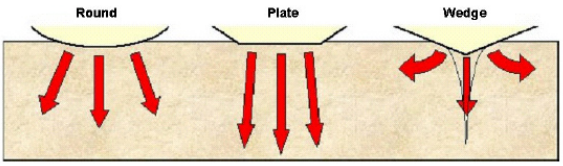


図６　転圧状態模式図

一方、多角形ドラムでは、プレート面とウエッジ面において異なる方向に転圧力が負荷される。プレート面の転圧では、地盤に垂直方向に転圧力が作用し、ウエッジ面の転圧では、地盤を横方向へ押し出す方向へ転圧力が作用する。ローラの回転とともに、通常の転圧状態と、押し広げ状態が繰り返されるため、練り効果と剪断効果が同時に発生する。また、ウェッジ転圧時の前後には、局部的に低圧密部が発生するため、地盤中のエアを表面へ押し出すことも可能となる。
結果として、転圧表面の状態に左右されることなく、多角形ドラムは非常に深い層まで、転圧効果を発揮することが可能となる。

また、地盤の可塑性が向上し、更にはドラムと地盤の接触面が確実に広く取ることができるため、ジャンピングやカオス挙動の発生を激減させることが可能となる。従来の円形ドラムで問題となっていたドラム前方での弓状の押し出し変形がまったく発生せず、優れた駆動力を有していることに加え、大幅な転圧回数の削減が可能となっているため、低速走行速度においても、非常に高い転圧力と深層への転圧効果を発揮することができる。

以上のことより、本ドラムはあらゆる地盤に対して良好な転圧が可能であると言えるが、唯一、転圧後の表面層については、プレート面とウエッジ面の特殊な相互作用により、非常にルーズで柔らかくなることも認識しておく必要がある。

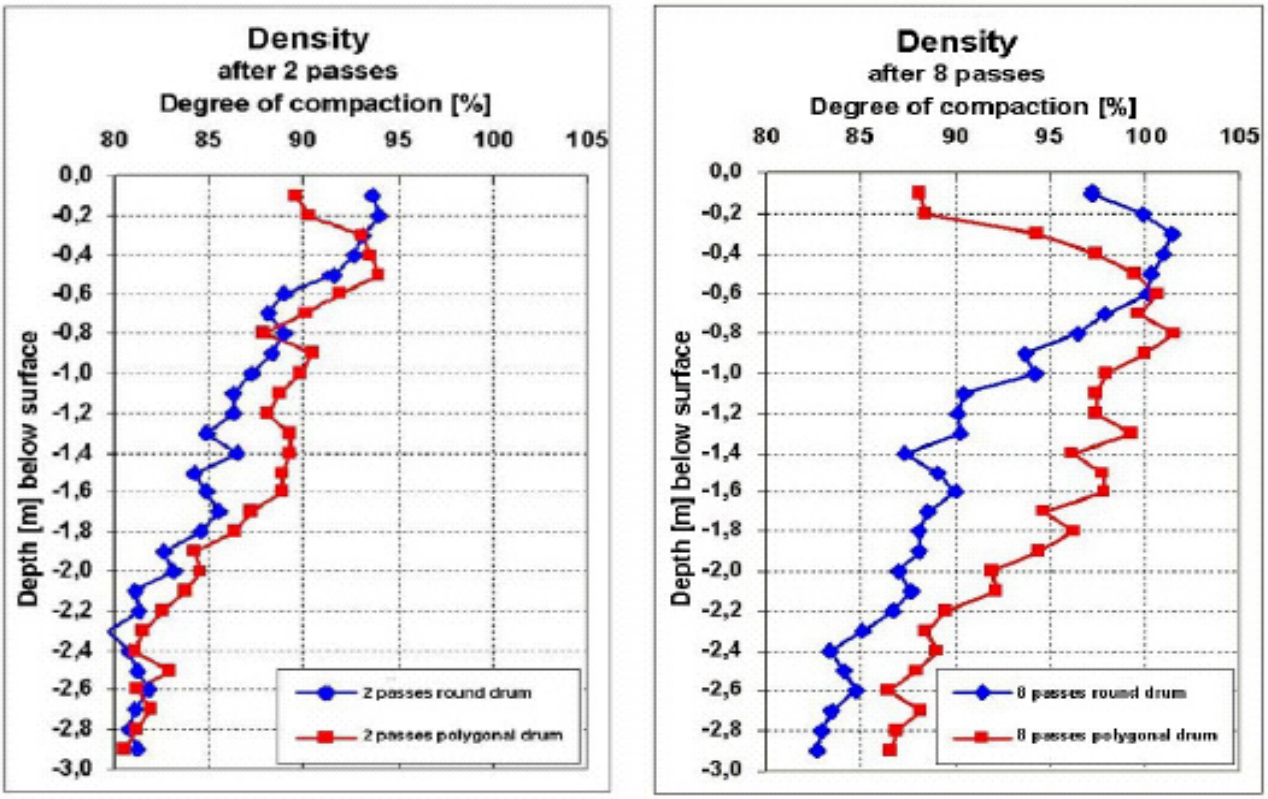


図７　転圧状態比較

３.３.　実施工適用例

ライプチヒ（ドイツ）南部のＢ９５道路建設現場における施工例を紹介する。この地域は、シルト質の軟弱礫粒地盤であり、５m深さの全土壌入換えによる改質・転圧が必要であった。しかし、コスト圧縮・工期短縮のため、入換え対象層の薄層化の検討が進められ、多角形ドラムによる試験が実施された。

３.３.１. 深層転圧能力

まず、転圧能力検証のため、３m盛土にて試験を実施した。（バックホーで撒き出し、前転圧無し）多角形、円形ドラムの２台の２５トンシングルドラムローラを用い、転圧状態を比較した。２回、８回転圧後の密度計測結果を図７に示す。（２孔式γ線密度計にて 10cm 間隔で計測）0.7m 程度より深い層においては、転圧能力の高さが明確であり、最底部においても転圧効果が認められる。

３.３.２. 実施工への適用

前項の結果より、５m既存層のうち、上部２mのみを掘削し３mの既存層を多角形ドラムにて転圧する工法が可能と判断され、効果を最終確認した。

転圧前と、３回、８回転圧後の状態をグラフ化したものを、図８へ示す。約 0.7～2.5m まで、締固め度が 100%を超えており、2.0～4.0m の範囲で、明確な締固め度の上昇（7～8%）が認められる。4.0m 以上の層では転圧効果が減少し転圧前の状態に近づいている。逆に、地表から 0.7m までの層では、締固め度が減少しており、多角形ローラの転圧における大きな特徴の一つが認められる。

３.３.３. 適用分野

多角形ドラムは、非常に高い深層転圧能力を持っていることは、上述を含め多数の実績にて証明されており、国内でも適用分野は広いと思われる。撒き出し厚の増加による工期の短縮、土壌入換え代替工法適用によるコスト削減など従来の振動ローラの能力の限界を超えた活用が考えられる。また、転圧表面の平坦化が必要な場合は、円形ドラムを併用するなど従来技術との組み合わせも含め適用したい。

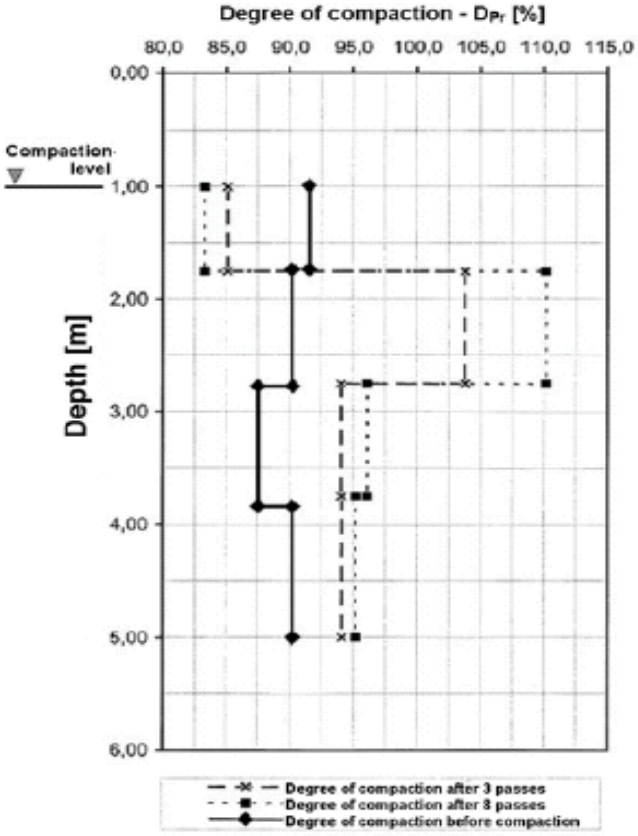


図８　転圧前後の圧密度

４. おわりに

当社の最新技術について、情報化・効率化・低コスト化に関係するものを中心に紹介したが、海外では多数の実績があり、広く活用されているものばかりである。しかし、国内への紹介・技術開示が不十分であったため、実施工への適用は進んでいない。今後は、具体的に検討・採用・活用を進めていただくために、記載できなかった技術や詳細も含めて、施工関係者等の方々への技術開示を継続し、国内事情に合わせた改良を重ねながら貢献していく所存である。

---

[1] Hans-Josef Kloubert；New intelligent compaction systems for vibratory rollers；2001

[2] Jean-Louis Briaud / Jeongbok Seo；INTELLIGENT COMPACTION；Texas A&M University；Dec.2003

[3] Hans-Josef Kloubert；Single Drum Rollers with Polygonal Drum；BAUMA2004；March.2004

13. カッター引込み式工法によるビット交換方法の開発（作業用立坑や地盤改良を不要としたシールド機のビット交換工法）

カッター引込み式工法研究会：○杉森　真、上嶋　正樹、山内　悟

１．はじめに

カッター引込み式工法は、シールドのカッタービット交換において、作業用立坑や地盤改良を必要とせずに、全数のカッタービットを何回でも交換できる工法である。

本工法は、シールドマシンのスキンプレート内にカッターヘッド部を引込むと同時に、固化材を充填することでスキンプレートに囲まれた不透水性の改良区間を形成し、それを止水壁とした安全な空間でカッタービットを交換するものである。

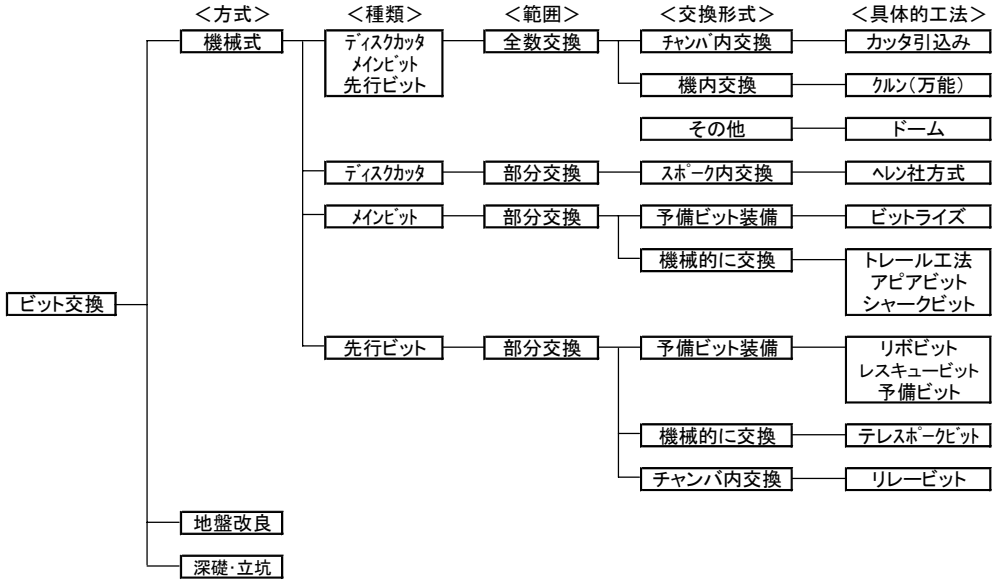
本工法は、施工実績のある機械的地中接合、ＣＩＤ工法（Concentric Interlace Docking）を基本とした従来安定技術の応用で、安全にカッタービットを交換することができる。

本報文では、カッター引込み式工法の概要、カッタービット交換の施工順序、および、止水壁の形成実験結果について紹介する。

２．開発経緯

近年、大都市部におけるシールドトンネル工事は、用地の取得が困難なことや地下構造物の輻輳化、地表構造物の密集化などにより中間立坑の築造が難しく、またその築造コストを削減するために、長距離化する傾向にある。長距離のシールドトンネル施工では、カッタービットの耐久性が重要なポイントになるが、長距離化によってさまざまな土質を掘進する場合、各土質に適したカッタービットに交換することにより、掘削速度が向上し、効率的な施工が可能になる。

カッタービットの交換は、中間立坑内で行うか、シールド機を地盤改良域内で停止させ、シールド機の外部か隔壁より地山側へ作業員が出てカッタービットを交換する方法が一般的であったが、中間立坑の築造や地表からの地盤改良の築造工費と工程が大幅に増加するため、これらを必要としない機械的ビット交換工法が提案され実施工に採用されてきた。



図－１　カッタービット交換工法の分類

しかし、これらの実績ある工法は、掘削外径４m程度以上が必要であったり、全数交換できなかったり、カッタービットの耐久性に一番影響する砂礫地盤に欠かせないディスクカッターの交換ができない等の課題があった。

今後のシールドトンネルの施工効率は、いかに迅速に、安全に、何度でも、カッタービットを交換できるかに大きく影響されることから、ディスクカッターの交換ができ、全数交換できるカッタービット交換システムの開発が望まれていた。

３．カッター引込み式工法の概要

（1） 工法の説明

カッター引込み式工法では、縮径したカッター本体をスキンプレート内に引込むと同時に、カッター前面に固化材を充填することにより、スキンプレート内に改良ゾーンを形成する。固化材の種類や強度、改良ゾーンの長さなどは、地下の土水圧条件に応じ設定する。力学的に安定かつ止水の確保されたカッターチャンバ内で、人力による全てのカッタービットの交換が可能となる。所定の交換が終了の後、固化壁をカッターにより切削しながら押出し、一連のビット交換作業が終了する。

（2）工法の特長

本工法の特長は以下に示す通りである。

① 任意の場所でビット交換が可能
（ビット摩耗による掘進不能等のリスク回避）
② 全てのビット(ディスクカッタ含む)の交換が可能
③ 繰返しビット交換作業が可能
④ 中小口径への適用が可能
⑤ チャンバー内作業のため、カッター点検・補修が可能
⑥ 構造がシンプルで、本来の掘削機能を損なわない
⑦ 従来技術の応用で安定かつ安全な工法
⑧ 地上からの地盤改良や立坑が不要
⑨ 工程の短縮
⑩ 建設コストの縮減

また、シールド工事の特殊施工において、本工法を応用することにより地盤改良を不要とするなどの効果が得られる。以下にその応用例を示す。

① 機械式地中接合が可能
② 親子シールドの地中分離が可能

（3）シールド機の構造

本工法に用いるシールド機は、通常と比較して、以下に示す機械的な特殊機構を装備している。

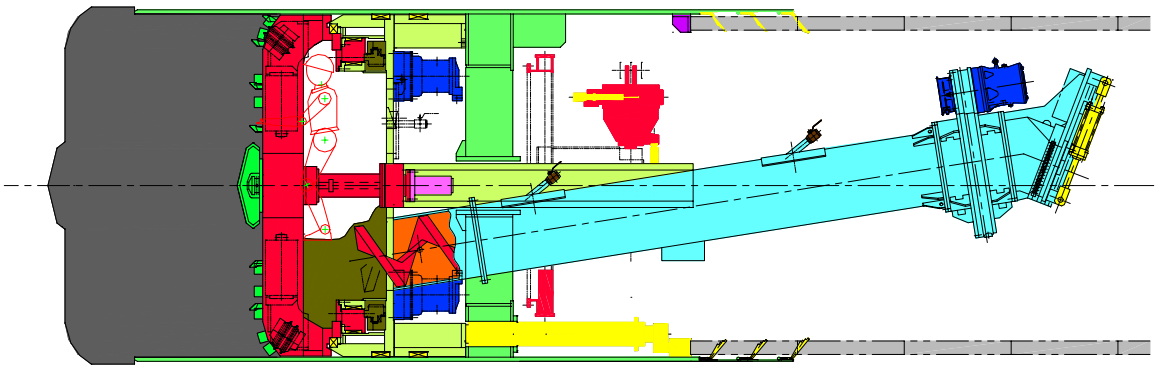
① スポーク、面板の拡縮機構

スポークの拡縮機構に関しては、機械的地中接合工法、球体シールド工法等で、幅広く用いられており、課題となる『縮径量の確保』に関しても、

【縮径量】＝【フード板厚】＋【クリアランス】

であるため必要量が小さく、中小口径シールドへの適用が可能となっている。

面板の拡縮機構に関しては、施工事例が極めて少ない現状ではあるが、縮径量が小さくてすむため、シンプルな機構で実現が可能である。また、実施工では、



図－２　カッター引込み式工法概念図

引込み寸法の固定面板と伸縮カッターの組合せによる泥水式シールドの施工例も有り、シールド機種（土圧式／泥水式）に制約を受けることなく、幅広い適用が可能となる。

②カッター本体の前後スライド機構

カッター本体のスライド機構には、以下に示す２つの形式があり、条件に応じて使い分けを行う。

ａ）単純スライド構造

所要の引込み寸法を考慮した固定のフード（スキンプレート）を装備し、カッターを１動作で引込むシンプルな機構。単純スライド構造によるカッター引込み式工法の施工手順を図－３に示す。

ｂ）スライドフード構造

機長の短縮と引込み寸法の向上を目的とし、スライドフードを押出した後、カッター引込みを行うため、２重構造のフード(スキンプレート)を採用した機構。

（4）切羽の安定

カッター引込み時における切羽の安定は、クレーショック（高粘性可塑状充填材）と固化材充填によって確保している。

カッター引込み準備段階において、チャンバー内の掘削土砂は、クレーショックにて予め置換する。クレーショックは粘性が非常に高い充填材で、透水性が低く、地下水等によって容易に希釈されない性質を有している。また、加圧下における体積変化が非常に少ない。このため、チャンバー内の土砂と置き換え充填を行った場合でも、チャンバー内に安定した状態で存在することができ、切羽地山の保持が可能である。また、クレーショックは固化しないため、カッター引込み後チャンバー内から容易に排出することが可能である。カッター本体をスキンプレート内に引込む際、カッター先端部より固化材を注入し、カッター本体引込み時に発生する空隙を充填する。この固化材は、２液混合型の可塑状注入材料で、一般的にはシールドトンネルの裏込め注入材として使用される。この材料の特徴は、２液を混合した後5～10秒以下でゲル化し、可塑状固結領域を経て早期に強度を発揮する。この固化材を、スキンプレート内に加圧充填することで、切羽地山の安定を図りつつカッターと切羽地山の間に固化壁を形成させる。固化壁は、スキンプレート内面との付着力と、カッターフェイスによって支持されている構造とみなし、土水圧に対して十分な強度と止水性を確保できる厚さとする。

クレーショックと固化材の配合例を表－１、表－２に示す。

（5）適用範囲

本工法の適用範囲は以下に示す通りである。

① 適用シールド径：φ２．５m以上

② 適用機種：土圧式、泥水式双方に適用可能

③ 適用土質：転石・玉石混じり砂礫層
その他一般土砂層

④ 地下水圧：０．３MＰａ程度を目安
（水圧条件に応じ引込み寸法を設定する）

交換回数：２回以上の交換でコストメリット有り

表―１　クレーショック配合例

A液		B液
助材クレーサンド	水	塑強調整剤
TAC-β	清水	TAC-3S
520 kg	800 L	50 L

表－２　裏込め注入材配合例

A液						B液
硬化材	助　材 ｸﾚｰｻﾝﾄﾞ	起泡剤	安定剤	水	空 気	塑強調製剤
ﾀｯｸﾒﾝﾄ	TAC-α	TAC-2	TAC-Re	清水	－	TAC-3S
350 kg	35 kg	0.5 kg	4.5 kg	634 L	135 L	100 L

ゲルタイム ５秒以内

σ_{1H} ＝0.1～0.15 N/mm^2

$\sigma_{1日}$ ＝2.0 N/mm^2

(1) カッターヘッド部の引込み準備

1－1 シールドジャッキとテールスキンプレートを固定する。

1－2 シールドジャッキをリングガーダー部から取外し、カッターヘッド部とジャッキの前面の隙間にスペーサを入れる。

1－3 フード部とカッターヘッド部の固定を外す。

(2) 充填材(固化しない)の注入

2－1 伸縮カッターを全て縮径し、引き込み準備完了。

2－2 カッターを回転させ、スクリューコンベヤーから土砂を出しながら、充填材をチャンバー内に注入し、土砂と置換する。

(3) カッターヘッド部の引き込み

3－1 注入管をシールド機からカッター前面に出し、固化材を注入する。

3－2 注入圧とシールドジャッキの圧力を同調させ、安定した速度でカッターヘッド部を所定の位置まで引き込む。

(4) カッター部の点検及びカッタビットの交換

4－1 チャンバー内の充填材を排出してカッター部の点検及びカッタービットの交換を行う。

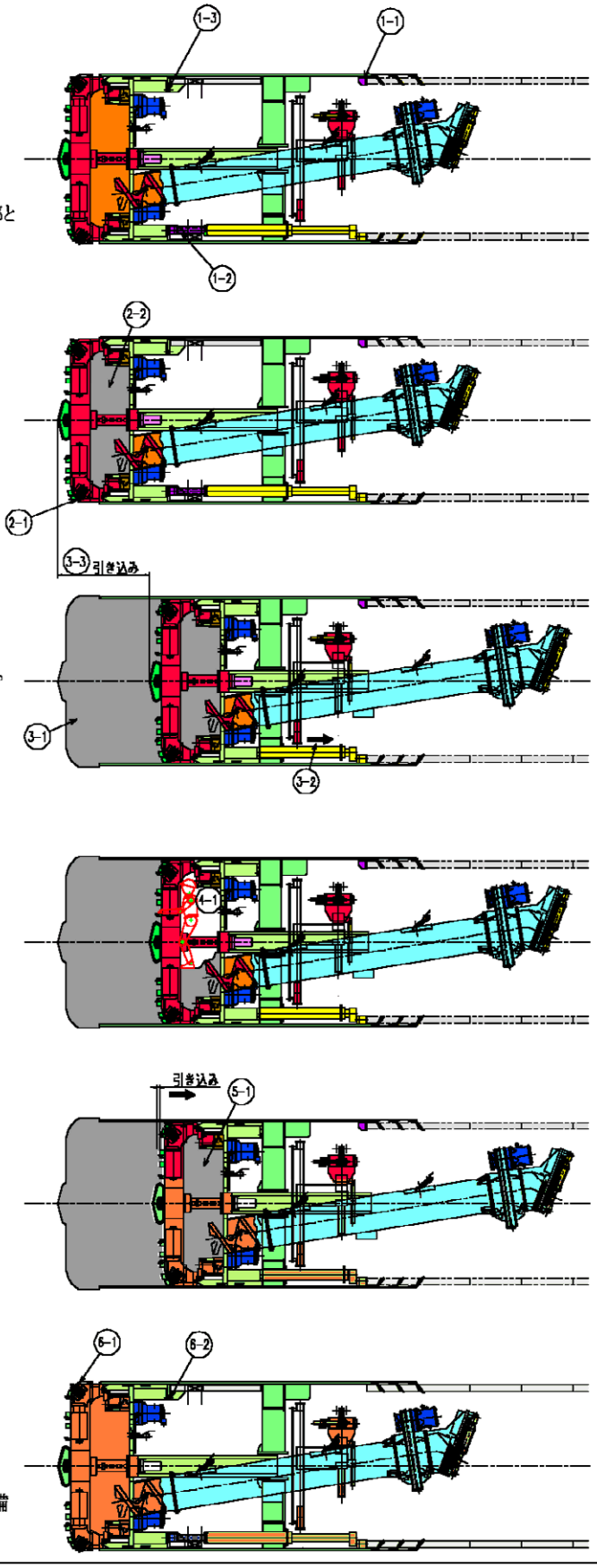
(5) カッターヘッド部と固化材との縁切り

5－1 交換作業の終了後、チャンバー内に充填材を再注入する。注入圧に同調してカッターヘッドを引き込み、固化材とカッターの縁切りを行う。

(6) カッターヘッド部の復帰

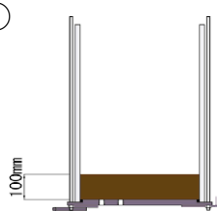
6－1 カッターを回転させ、同調で縮めたシールドジャッキを伸ばして固化材を切削する。

6－2 カッターヘッド部が所定の位置に復帰したところで、引き込み準備の作業で行った固定等を復旧する。



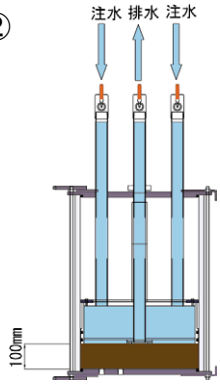
図－３　単純スライド構造　ステップ図

①



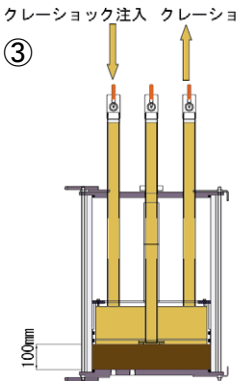
モデル前部に厚さ 100㎜ の土層を作成する。

②



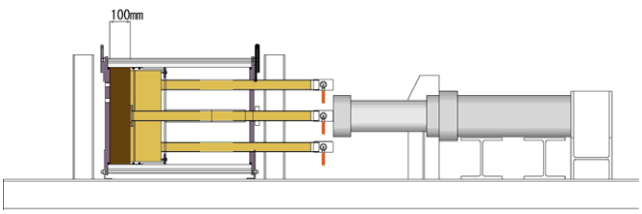
模型内にカッター揺動部を取り付け、注入管より注水しモデル内部に水を充填する。

③

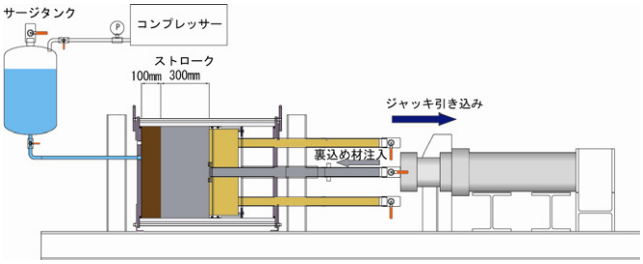


注入管よりクレーショック注入を行い、チャンバー内部の水をクレーショックで置換する。

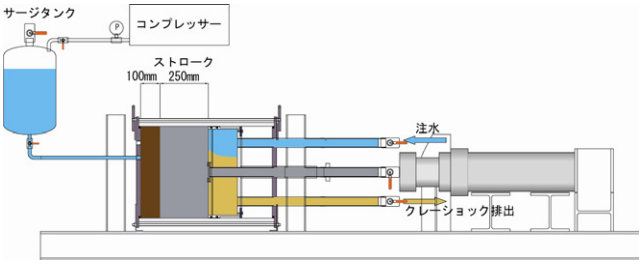
④　クレーショックを充填させたモデルを、引き抜きジャッキ架台に設置する。



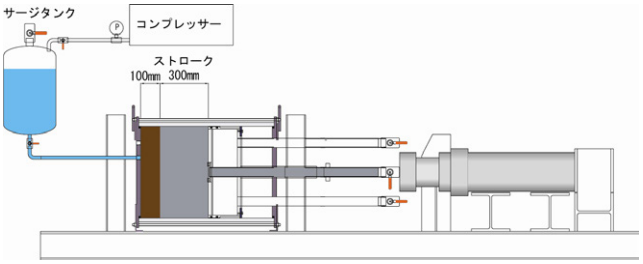
⑤モデル前部にもうけた注水孔より、内部に水圧をかける。水圧を作用させる為に、サージタンクを用いエアーコンプレッサーにて加圧する。中央注入管より、裏込め注入材を注入しながら、ジャッキにて揺動部を引込む。



⑥　裏込め注入材の強度が発生した後に上部注入管より注水し、下部の注入管からクレーショックを排出する。



⑦　揺動部内の水を排出し、モデル前部からの漏水が無いことを確認する。



⑧　モデルを解体し、チャンバー内に固化材が浸入していないことを確認する。

図－４　実験手順

４．止水壁の形成実験

本工法において、カッター交換を安全に行うためには、クレーショックおよび固化材の充填、止水壁の形成の可否が重要となってくる。そこで、シールドマシンカッター引込み部のモデルを製作し、止水壁形成の確認を行った。

（1） 実験の目的

本実験の目的は、固化材の注入状況と、造成後の固化壁の形成状況を確認することであり、具体的に以下の項目を検証した。

- 固化材が、カッター引込みと同調してスキンプレート内に充填され、止水壁が形成されることを確認する。
- クレーショックが、固化材と混ざり合うことなくチャンバー内に存置され、容易に撤去できることを確認する。
- 形成された止水壁が十分な遮水性を有していることを確認する。

（2） 実験概要

シールドマシンカッター引込み部の試験モデルは、外径φ510㎜、長さ 700㎜ で、固化材の充填状況を目視確認できるように、シールドマシンのスキンプレートは、透明のアクリル樹脂を使用した。

実験モデルを写真－１に示す。実験は、図－４に示す実験手順により進めた。

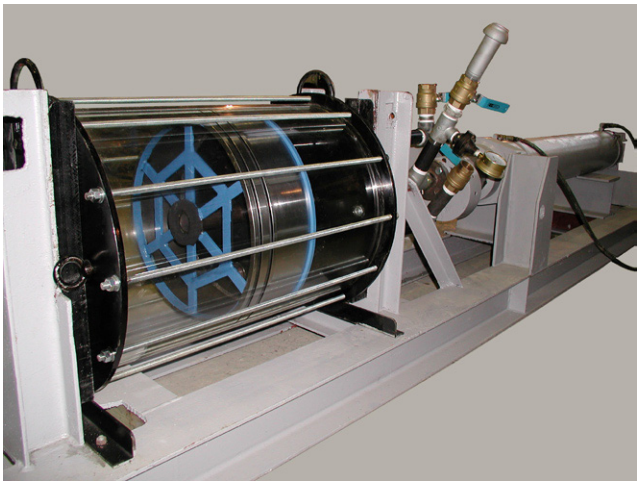
（3） 実験の結果

前述の手順に基づき、平成 16 年 7 月 21 日に㈱タック機材センターにて、公開実験を行った。実験の結果、固化材はスキンプレート内に充填され、止水壁が形成されるプロセスを目視確認することができた。写真－２は、固化材の充填状況である。注入終了後、解体し固化壁を調査したところ止水壁に十分な遮水性があることが確認できた。

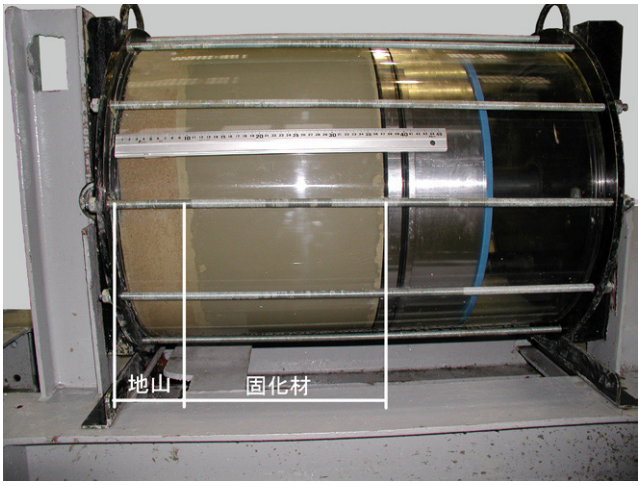
モデル解体後もチャンバー内には、止水壁はカッターフェイス前面に形成されており、チャンバーの中に固化材が入り込んでいないことを確認した。

６．おわりに

カッター引込み式工法の引込み機構については、機械式地中ドッキング工法(CID 工法)で、複数の実績があり実用化されている。今回の実証実験により、引込み後の固化壁の造成についても実用段階であることの確信が得られ、実施工での適用を検討している。　本工法は、石川島播磨重工業㈱、川崎重工業㈱、佐藤工業㈱、㈱立花マテリアル、㈱タック、中部電力㈱によるカッター引込み式工法研究会で実施工の適用を検討している。



写真－１　カッター引込み式工法試験モデル



写真－２　固化材注入状況

14. 長大インバート桟橋を使用したトンネルの合理化施工（３スパン移動桟橋によるインバート施工）

佐藤工業㈱：○京免　継彦、森　安弘、中谷　幸一

１．はじめに

単線施工しかできない比較的断面が小さいトンネルにおいて、工程短縮のために、インバート工と掘削工を同時に施工する方法として、インバート施工部分を跨ぐインバート桟橋（下部施工範囲 通常 10.5m×1～2 スパン）を用いて行われている。しかし、施工条件によっては、インバート工の進行が掘削全体工程に影響をおよぼす恐れがある。

新宇治川放水路トンネル工事は、円形断面の全線鉄筋コンクリート覆工を行うウォータータイトトンネルであり、掘削工と覆工の併進、コンクリート養生期間、防水シート保護対策等の厳しい施工条件、工程条件を与えられた。これらの条件に対応するため、国内最大長の３スパン移動桟橋（全長 80m）を用い、バランスの良いインバート工と掘削工との並進を実現している。

本報文は、３スパン移動桟橋の概要と施工実績について紹介するものである。

２．工事概要

(1) 工事概要

新宇治川放水路トンネル工事は、毎年のように浸水被害を受けているいの町枝川地域の浸水被害低減のために緊急に行われている放水路工事である。

宇治川は流域面積 14.2km2、流路延長 7.5km の仁淀川支川で、放水路は、宇治川の洪水を仁淀川へ最大毎秒 55m3 放流する放水路トンネルである。放水路延長は、2,587m で、トンネル長約 2,365mのうち新宇治川放水路トンネル第一工事は、1,320m を施工する。

工事名：新宇治川放水路トンネル第一工事

発注者：国土交通省四国地方整備局
　　高知河川国道事務所

工事箇所：高知県吾川郡伊野町字三ツ森地内

企業体：佐藤・五洋 JV（5.5：4.5）

トンネル概要：延長 1,320m

仕上がり内径：6,980mm の真円形（外水圧トンネル）

(2) 新宇治川放水路トンネル工事の特徴

1) ウォータータイトトンネル(止水構造のトンネル)

ウォータータイトトンネルとは、トンネル内と周辺地山を完全に遮蔽し、坑内への水の進入を防いだ耐圧トンネルである。周辺の地下水の枯渇防止を目的とする。掘削中の地下水減少を最小限に食い止め、早期に覆工を完了することで、地下水位を復元させる。

①トンネル横断方向の対策

トンネル全周を厚さ 2mm の防水シートで覆い、コンクリートの継ぎ目には止水板をはさむことにより、トンネル内部への地下水の流出を防ぐ。

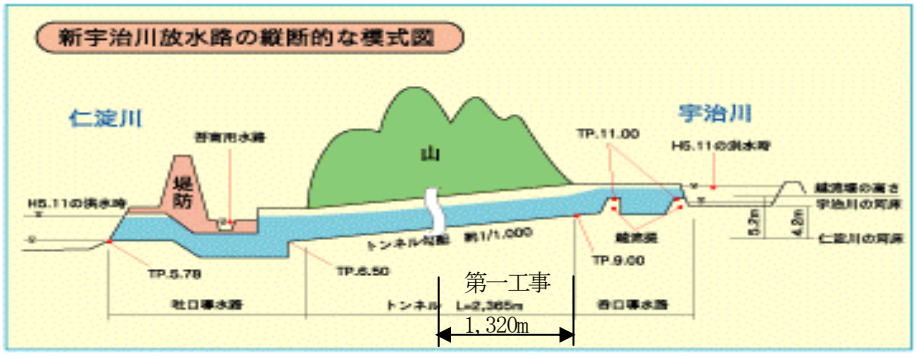


図-１　新宇治川放水路の概要図

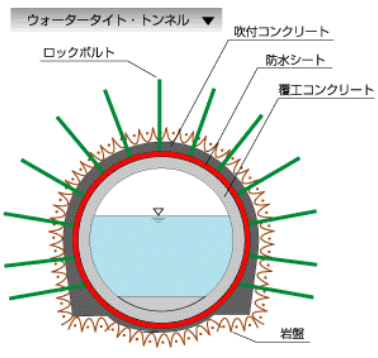


図-２　ウォータータイトトンネル断面

②トンネル縦断方向の対策

ウォーターバリアとファンカーテングラウチングを採用して、トンネル縦断方向に水が流れることを防ぎ、地下水の低下を防ぐ。

ウォーターバリアとは、吹き付けコンクリートと防水シートおよび防水シートと覆工コンクリートとの接触面を地下水が流動しないように止水材を注入するものである。また、ファンカーテングラウチングとは、地山の緩み領域を通って地下水がトンネル縦断方向に流動しないように、トンネルの周りにエリマキ状の壁を作るものである。

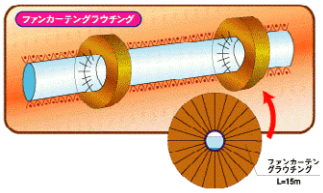


図-３　ファンカーテングラウチング

③施工中の排水制御

トンネル周辺の観測井戸にて地下水位をリアルに計測する。坑内からの水抜きボーリングはバルブを設け、水位の状況をみながら水量を制御する。

(3) 地山を乱さないトンネル掘削工法の採用

1) ＮＡＴＭ工法

2) 自由断面掘削機による機械掘削

発破による地山のゆるみを防止するため、ＣＩ区間以下では自由断面掘削機による掘削とする。また、機械による掘削が困難な箇所では、割岩工法、割岩発破併用工法により掘削とする。

３．３スパンインバート移動桟橋の概要

３スパンインバート移動桟橋の概要を示す。

全長：71.8m（インバート工作業内空 34.5m）

駆動：タイヤ式 前輪駆動（電動）

通過重量：60ｔ（要中間サポート）車幅:4m

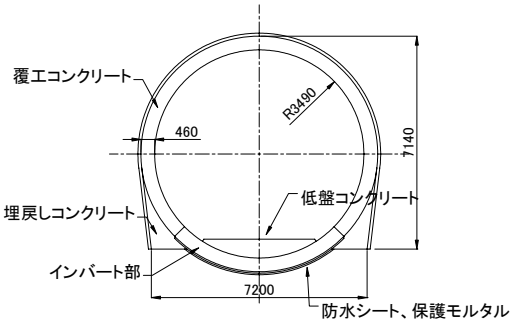
曲線施工：Ｒ＝300m対応　　重量：200ｔ

４．３スパン移動桟橋採用の経緯

早期の地下水位復元のため、覆工開始を掘削進行450m到達時点とした。このため覆工開始以降は掘削とインバートコンクリート、覆工コンクリートの３工種が併進することとなる。この併進施工を効率よく行うことが求められた。

(1) インバート施工の留意点

トンネル工事の施工手順は、掘削、インバート工、覆工の順で行う。図－４に設備概要図、図－５に標準断面図を示す。インバート工は、図－５に示すとおり、下方約１／３の施工を行うものである。



図－５　標準断面図

1) 計画時の留意点

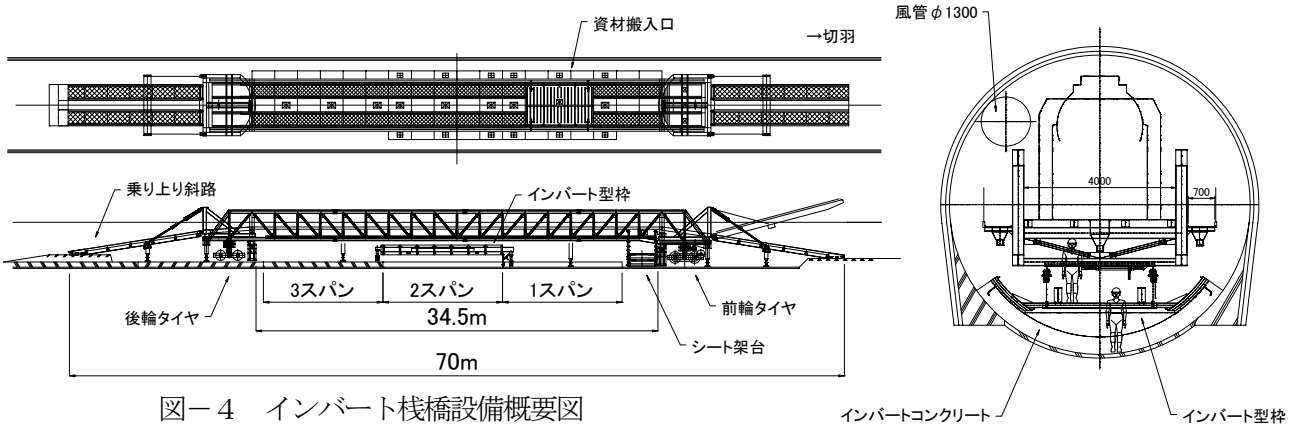
①切羽進行 450m時点で覆工開始

切羽進行 450m時点で覆工を開始するの計画であるため、当然インバート工はそれより前から始めなければならない。桟橋自体の全長が 80mあるため切羽進行350m地点でインバート工を開始することにした。

また、覆工と切羽の離隔距離は、最大で 600mと設定されている。それ以上の離隔は許されない。

②インバートコンクリート養生期間

インバートコンクリート打設後の養生は7日間と設定されている。養生期間が過ぎなければ、桟橋の後輪



図－４　インバート桟橋設備概要図

タイヤが打設箇所に乗ることは出来ないため、コンクリート打設は、最短で7日に1回のペースとなる。したがって、インバート工の月進行は、1スパン長10.5mのコンクリート打設が最多で4回の42mとなり、同様に覆工の進行も42mで抑えられてしまう。切羽進行が月80mとすると毎月40m程度離されるため、全体工程に影響が出る。

③トンネル掘削との並行作業

インバートの掘削作業中とコンクリート打設作業中は通行止めとなり切羽への行き来は出来ない。切羽の掘削を止めないためには、インバート部の掘削とコンクリート打設は同時に行う必要がある。

④防水シート保護モルタル

防水シートの損傷を防ぐためシートの敷設前後に地山およびシートに厚5㎝のモルタル吹付けを行う。

施工手順は、吹付け（地山の平滑化）→シート敷設→吹付け(鉄筋による損傷保護)→鉄筋組立てとする。

⑤型枠セット

インバートコンクリート型枠の浮き防止は、トンネル内面あるいは桟橋から浮き防止反力を取ることが出来ないため、ウエートで対応する。

⑥自由断面掘削機の搬出

掘削が完了した時点で自由断面掘削機を切羽から坑外へ搬出しなければならない。自由断面掘削機の重量は100ｔ、坑内での分解可能重量は40ｔで、通過重量は60ｔとなる。

(2) インバート桟橋スパンの選定

1または2スパンの桟橋でのインバートコンクリートの施工速度は、トンネル掘削、覆工コンクリートの施工速度に比べ非常に遅いため、工程はアンバランスになり、経済面でも大きな問題となる。

移動桟橋を3スパン化することでインバートコンクリート打設進行は、トンネル掘進と同等の進行が得られる。打設完了後の養生期間は8日～9日と、最短養生設定期間の7日間には余裕はある。覆工コンクリートの打設は、インバートコンクリート養生期間の余裕日に組入れることにより、週3回、月12回の打設が可能となる。

3スパンインバート桟橋とすることは、掘削速度を落とすことなく、上記3工種の施工工程および作業員の配置の面でバランスが良くなり合理的といえる。

各スパン数の月間インバートコンクリート打設回数および月進長は次のとおりである。

- 1スパン桟橋の場合は、打設3回／月、月進31.5m
- 2スパン桟橋の場合は、打設4回／月、月進42.0m
- 3スパン桟橋の場合は、打設6回／月、月進63.0m

インバート桟橋のスパン数による工程比較検討を行った結果を表―1に示す。

5．施工結果

- 内空は10.5m×3＋3mの合計34.5mを確保したが、作業スペースとしては、これ以下に出来ない限界であった。

	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日
3スパン桟橋	CON掘削	1日 2スパ	2日 2スパ	3日 2スパ	4日 3スパ	5日 3スパ	6日 3スパ	7日 3スパ	8日 3スパ	桟橋移動											
		シート	鉄筋	型枠	CON掘削	1日 2スパ	2日 2スパ	3日 2スパ	4日 2スパ	5日 3スパ	6日 3スパ	7日 3スパ	8日 3スパ	9日 3スパ	桟橋移動						
						シート		鉄筋	型枠	CON掘削	1日 2スパ	2日 2スパ	3日 2スパ	4日 2スパ	5日 3スパ	6日 3スパ	7日 3スパ	8日 3スパ	桟橋移動		
											シート	鉄筋	型枠		CON掘削	1日 2スパ	2日 2スパ	3日 2スパ	4日 3スパ	5日 3スパ	6日 3スパ
																シート	鉄筋	型枠	CON掘削	1日 2スパ	2日 2スパ
			覆工打設					覆工打設				覆工打設					覆工打設				
2スパン桟橋	CON掘削	1日 2スパ	2日 2スパ	3日 2スパ	4日 2スパ	5日 2スパ	6日 2スパ	7日 2スパ	桟橋移動												
		シート	鉄筋	型枠					CON掘削	1日 2スパ	2日 2スパ	3日 2スパ	4日 2スパ	5日 2スパ	6日 2スパ	7日 2スパ	桟橋移動				
										シート	鉄筋	型枠					CON掘削	シート	鉄筋	型枠
1スパン桟橋	CON	1日	2日	3日	4日	5日	6日	7日	桟橋移動												
									掘削シート	鉄筋	型枠	CON	1日	2日	3日	4日	5日	6日	7日	桟橋	

表―1　インバート桟橋のスパン数による工程比較表

・　駆動はタイヤ式を採用、前輪タイヤが地山（モルタル吹付け上）を走るため走行が不安定であった。地山が堅固なＣ区間以上では問題はなかったが、軟弱なＤ区間の一部では、路盤補強用のモルタルコンクリートが潰れタイヤが潜り込む場面が何度もあった。重機等で牽引しながら走行した。
・　コンクリート打設はブーム式ポンプ車で行った。当初、トラックミキサー車からのシュート打設、配管切替機による配管打設も行ったが、円の曲率半径が小さく、打ち上がり速度が速いため、型枠の浮き上がりに注意しながら打設しなければならなかったので、ポンプ車を選択した。
・　重量物の通過は中間サポートの設置で対応した。問題なく自由断面掘削機を搬出することができた。
・　資材の搬入には中間部に油圧開閉式の扉を備えた。しかし、資材の積み卸しは、クレーン付トラック等で行ったが、専用の揚重装置を設置すべきであった。
・　曲線部施工は、乗上がり斜路を旋回させ、全体の横送り装置、折畳み式安全通路等を操作して行った。

６．おわりに

平成16年9月にトンネル掘進が完了した。併進作業当初は、一つの段取りの狂いが全工程に影響し、足踏みすることが多かった。３スパン移動桟橋は機械設備として未知の部分は多かったが、アイデアを出しあって、限られたスペースおよび時間の問題を一つ一つ解決していくことで、最大効率で、掘削、インバート工、覆工の併進作業を行うことが出来た。これは、３スパン移動桟橋は、小断面トンネルの合理化施工として有効であることを示していると考える。

最後に、今回の３スパン移動桟橋によるインバート施工の採用ならびに施工にご支援、ご協力戴いた国土交通省四国地方整備局高知河川国道事務所の皆様をはじめ関係各位に深く感謝申し上げる。



画－１　インバート桟橋組立て搬入



画－２　コンクリート打設状況



画－３　インバート桟橋全景

15. コンパクトシールド工法における掘削土のポンプ圧送設備とセグメント搬送計画

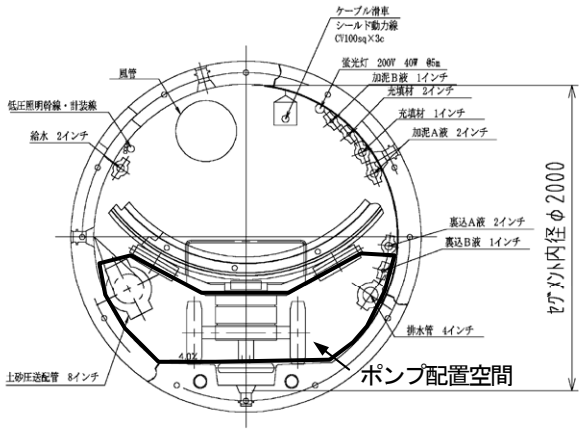
佐藤工業：○金崎　伸夫、今村　貴彦
東京都下水道局：松井　邦恭

1. はじめに

コンパクトシールド工法は、『後方設備内包型３分割シールド』[1)]を特徴の一つとしている。これは、大きなブロックのセグメントを取り扱うにあたって支障となる後方設備を取り除くために開発した技術である。後方設備を配置しないために掘削土砂の運搬はずり鋼車方式を基本とした。

その一方、この方式は掘進延長が長くなるに従い、施工サイクル中で掘削土の運搬時間がクリティカルとなる。掘進延長が１㎞ を超える長距離施工において一層の施工の効率化を図るために、掘削土の運搬時間が掘進サイクルに影響しないポンプ圧送方式の採用が求められた。本論文では、低床台車に設置可能なピストンポンプの開発を行い、中継ポンプを中間立坑に配置することによりポンプ圧送を計画した。

さらに、低床台車上のセグメント搬送において、曲率半径 15mの急曲線施工において支障がない、ベッセルを用いたウインチ索引によるセグメント搬送方式を採用したことを報告するものである。



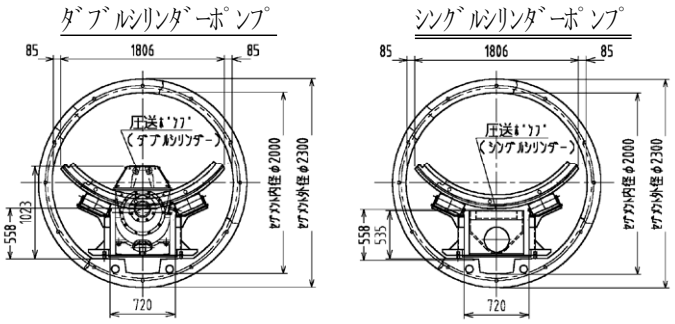
図－1　坑内セグメント搬送状況

2. コンパクトシールド工法における圧送ポンプの課題と対策

坑内に配置する圧送ポンプは、上部空間を配管及び切羽作業の通路として確保するために、**図-1** に示すセグメント搬送の下部空間を活用する配置とした。
土砂圧送ポンプを設置する低床台車は、高さ方向および幅方向(最大スペース 720㎜)に制約を受けるため、「低く・細く・高圧送能力」の条件を満たす圧送ポンプを選定する必要がある。

(1)圧送ポンプの選定

圧送ポンプにはピストンタイプ、スクイーズタイプ、ロータリータイプがある。今回の選定条件である高さが低くできるという点からピストンタイプとした。ピストンポンプには、シングルシリンダーとダブルシリンダータイプの２通りがあり、**図-2** に配置比較図を示す。ダブルシリンダータイプは並列配置であり、切替バルブ等構造のために所定の高さで格納することが難しい。シングルシリンダータイプは１本のシリンダーの前後スライド動作のみで圧送を行うシンプルな構造のため、高さ及び幅を小さくできる利点を考慮して選定した。



図－2　ダブルシリンダーポンプとシングルシリンダーポンプの配置比較

さらに、土砂圧送の連続性を確保するためにシングルシリンダーポンプを改良し、両端可動タイプのシン

グルシンリンダーポンプ(以下、タンデムポンプと称す)を開発した。

⑵ タンデムポンプの特長

タンデムポンプは、**図-3**に示すように第1ユニット及び第２ユニットと称する２つのポンプを直列に配置して、土砂の圧送・充填を連続的に行えることが特長である。**表-1**に示す①～⑥の手順により、第一、第二ユニットのシリンダー及びバルブの動作を相反する動きにすることにより、連続圧送が可能となる。

連続圧送することで土砂の反動が生じ難いために、振動・騒音が低減でき、また、ユニット間のジョイント部をフレキシブルな構造にできるために曲線に対応できることも特長の一つである。また、従来のシングルシリンダーポンプと比較すると、２本のシリンダーの交互圧送による連続土砂圧送を行うため、シリンダー径を細くしても同等の圧送能力が得られることが挙げられる。

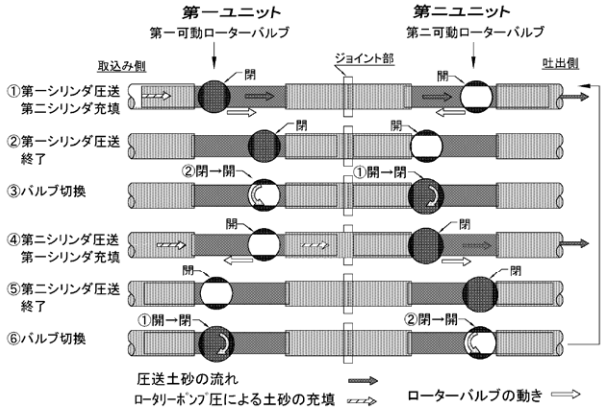


図-3 タンデムポンプの作動原理

表-1 タンデムポンプの手順内容

手順	内容
①	第一シリンダー内の土砂を吐出側に圧送すると同時にロータリーポンプの圧力で土砂を充填し、第二シリンダーは取込側に引戻しながら、土砂を充填する。
②～③	圧送が終了後、第一バルブを開→開、第二バルブを開→閉の操作を行う。
④	第二シリンダー内の土砂を圧送と同時に、第一シリンダーを取込側に引き戻しながら、ロータリーポンプの圧力で土砂を充填する。
⑤～⑥	圧送が終了後、第一バルブを開→閉、第二バルブを閉→開の操作に引続き、①の手順に戻る。

コンパクトシールド工法においては切羽土圧の制御機構として、短尺スクリュー＋ロータリーポンプを基本としている。タンデムポンプとの組合せにより、圧送サイクル中のタイムラグを極力小さくすることで掘削土砂を連続的に圧送でき、ロータリーポンプと圧送ポンプ間の配管閉塞等を防止できる。

⑶急曲線(R=15m)の対策

曲線半径R=15mの急曲線施工に対応するために、ポンプ圧送に必要な装置を制御盤、動力盤、ポンプ駆動装置、ポンプ本体の各部位に分割して縦１列に配置する形式とした。図-4に急曲線（R＝15m）における台車内の圧送ポンプ状態図を示す。

セグメントの搬送条件から、低床台車の長さを１m

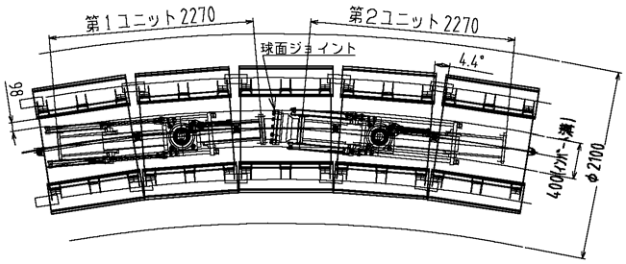


図-4 急曲線（R=15m）の圧送ポンプ状態図

にすることでジョイント部の中折れ角度が4.4°となる。ポンプユニットの長さを2,270㎜にすることにより低床台車の幅スペース720㎜の範囲でクリアランスを確保した。また、ポンプは左右の急曲線に対応できるために中央配置とし、ポンプユニットは１台の低床台車にのみ固定し、球面ジョイントで接続する構造とした。

⑷圧送配管の延長方法

圧送ポンプ方式の全体計画図を図-5に示す。圧送配管の延長方法は、低床台車の最後尾付近に伸縮ストロークが1.6mの伸縮管（6B）を2台配置することにより、直線時では3mの延伸を可能とした。また、低床台車内の配管(延長約17m)は、急曲線部において左カーブと右カーブで730㎜の伸びの差が生じる。その対処方法として、ホースを上下方向に余裕を持たせ、水平方向の伸び及び縮みに対処する方式を採用した(図-6参照)。



図-5 ポンプ圧送台車配置図

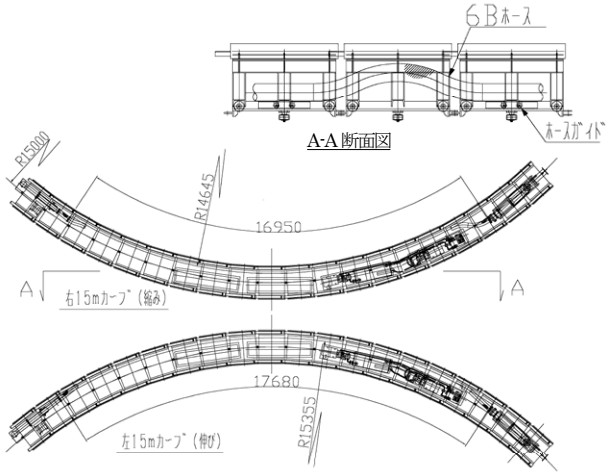


図-6 急曲線部の低床台車内の配管構造図

2. 中間立坑を利用した中継ポンプ配置計画[2)]

コンパクトシールド工法は、下水道再構築における主要枝線への適用を主目的に開発したものである。主要枝線においては、一般に路線の途中に取水ポイントが計画され、通常は管渠が築造された後に、取水用の中間人孔および接続管が施工されている。本計画では、この中間人孔のスペースを有効利用し、中継ポンプを設置することを立案した。そこで、中間立坑の工事着手を早め、シールド工事と同時に施工することとした。

今回計画した中間立坑への中継ポンプ配置計画について述べる（図－7）。中間立坑は、φ3.5m、掘削深さ10.0mのライナープレート式立坑である。その中に円形人孔を構築し、主要枝線と接続管（内径φ0.9m）で接続するものである。

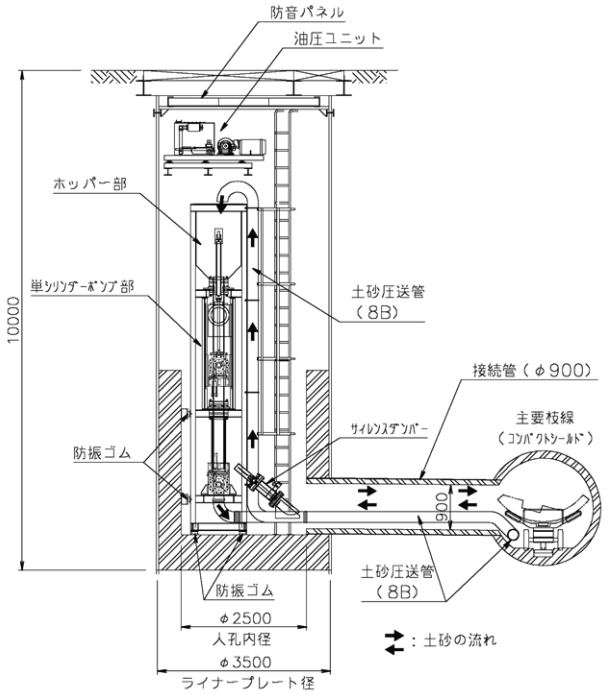


図-7 中継ポンプ配置図

ポンプ形状は、縦長の円形人孔スペースに収めるため、縦型の単シリンダータイプとした。なお、人孔内径はポンプを設置できる最小寸法よりφ2.5mとした。

切羽から圧送された土砂は、ポンプ本体上部のホッパー部で受け、単シリンダーポンプ部に供給し、発進立坑まで圧送する。また、油圧ユニット、制御装置および動力盤は上部のステージに配置する。

騒音対策として、中間立坑内の上部に防音パネルを設置することとした。また、振動対策として、中継ポンプの吐出口側の配管にサイレンスダンパーを設置し、さらに、ポンプ本体と人孔構造物の間に防振ゴムを設置する計画とした。

3. セグメント搬送装置の概要

（1） セグメント搬送位置の決定

セグメント搬送装置の検討は図-8 に示すフローに従い検討した。

コンパクトシールドの４分割３ヒンジセグメントは図-9 に示す通り、既設セグメントとのクリアランスが78㎜と狭く、通常のシールド工法のように坑内で回転させることができないため、セグメント組立時の姿勢のまま切羽まで搬送される。

セグメントを円滑に搬送するためには、覆工セグメントとのクリアランスをなるべく広く取ることが望ましいが、搬送セグメント端部をスプリングライン近くまで下げると土砂圧送ポンプに干渉するため、セグメントの搬送位置は搬送セグメント底部がインバート床部から 598mmの位置（覆工セグメントとのクリアランス 78mm）に設定した。

①セグメント搬送位置の決定
⇩
②低床台車上のセグメント搬送方法の決定
⇩
③急曲線部（R=15m）への対応
⇩
④勾配変化への対応
⇩
⑤搬送台車～低床台車へのセグメント乗継ぎ検討
⇩
⑥低床台車～シールドエレクター部へのセグメント乗継ぎ検討

図-8 セグメント搬送の検討フロー

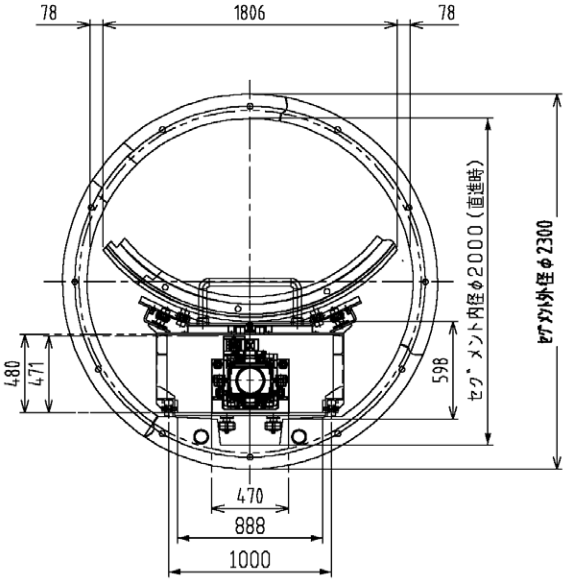


図-9 セグメント搬送位置

(2) 低床台車上のセグメント搬送方法の決定

台車上のセグメント搬送においては、一般的にローラー搬送が用いられる。前述したとおり、セグメント搬送時のクリアランスが狭いために、搬送時の蛇行が生じにくいセグメント搬器（ベッセル）を用いたウインチでの牽引搬送を採用した（**図-10**）。

ベッセルは牽引ワイヤーを取付ける連結具としての役割の他に、搬送中のセグメントを安定させる走行ガイド等の役割がある。

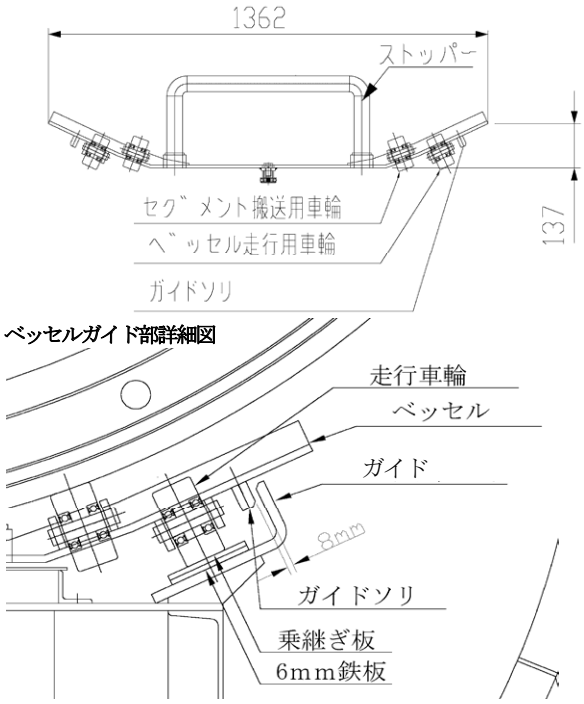


図-10 ベッセル及びガイド詳細図

ベッセルの形状は、搬送時のセグメント高さを極力低くするために、セグメントに合わせたコンパクトな凹型形状とし、ベッセルは低床台車上に斜めに設置された走行路を車輪で走行する構造とした。

また、**図-10** に示すように低床台車の両端部にはガイドを設け、ベッセルに設けた走行ガイドソリをガイドに沿わせて走行することで、坑内での低床台車の線形に沿ったセグメント搬送を可能とした。さらに、低床台車間には通常 60 ㎜のクリアランスがあり、曲線部の外側はより大きくなるため、前方の台車と重なるように走行路に乗継ぎ板を設けた。

(3) 急曲線部（R=15m）への対応

急曲線部を円滑に搬送するには、1 台のベッセル長を短くすることが望ましい。そのため、ベッセルはセグメント幅 1m に対応させ、ベッセルの長さを 1.2m とし、計 4 台のベッセルを連結して搬送する構造とした。また、急曲線部における低床台車間の開きを少なくするため、1 低床台車長を１ｍとし、低床台車 33 台（全長約 36m）を連結した構造とした。急曲線部でのベッセル・低床台車の状況を**図-11** に示す。

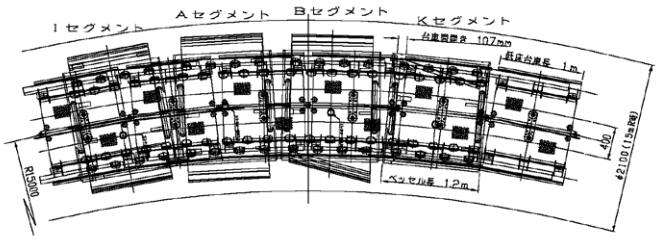


図-11 急曲線時の低床台車・ベッセル状況

急曲線部において、低床台車の走行路の段差が生じる課題がある。低床台車の走行路、すなわち乗継ぎ板は前方の台車に対して傾斜しているため、**図-12** に示すように曲率半径 R=15 の曲線においては８㎜の横位

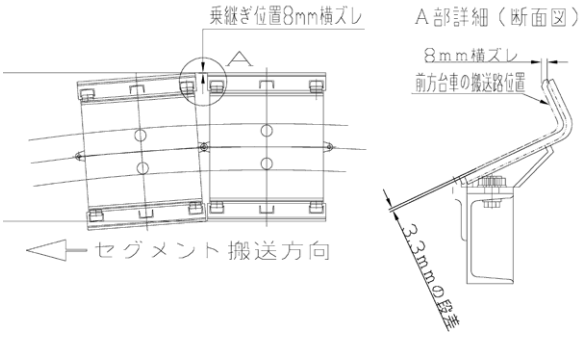


図-12 低床台車乗継ぎ時の高さのズレ

置のズレに対しては 3.3 ㎜の段差が生じる。そのため、ベッセルのスムーズな搬送が困難になる。

この乗継ぎ時の段差を解消するため、乗継ぎ板の下に厚さ 6 ㎜の鉄板を設けて対処とした。前方台車との段差が 3.3 ㎜に対して、前方台車とのクリアランス 2.7 ㎜を確保した。図-13 に段差解消方法を示す。

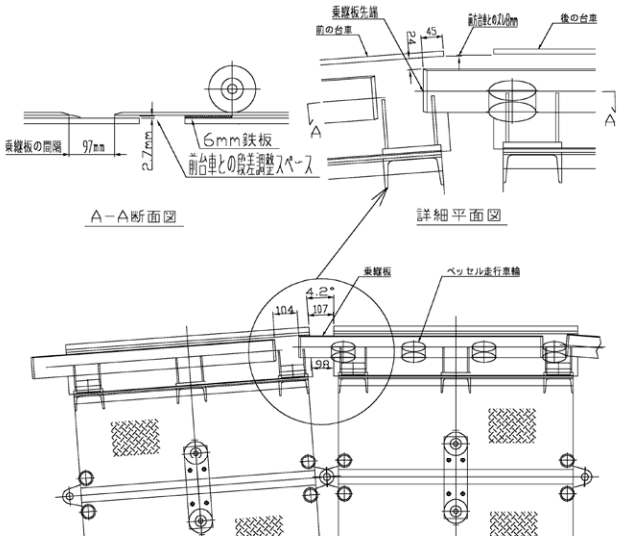
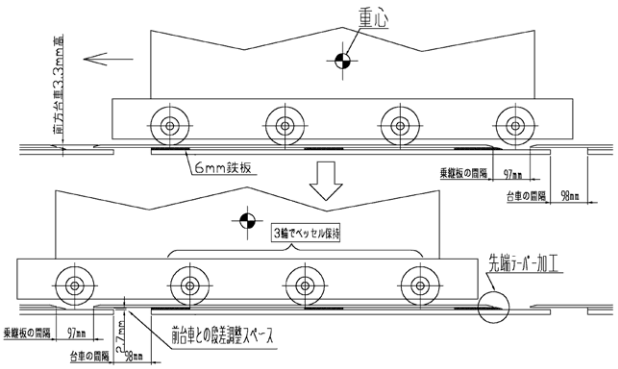


図-13 急曲線時台車間乗継ぎ概要

また、乗継ぎ板は段差を生じさせないために走行路全面に設けるが、急曲線時に各々の低床台車間の角度の差によって出来る乗継ぎ板間の隙間にベッセル車輪が落ち込むことが考えられる。このため、ベッセル走行車輪は 4 輪とし、1 つの車輪が乗継ぎ板間の隙間に位置した場合でも、残りの 3 輪でセグメントの自重を受け持つ構造とした。**図-14** に乗り継ぎ部の車輪拡大図を示す。



図－14 乗継ぎ部の車輪配置

(4) 勾配変化時の対策

セグメントは低床台車の最前列と最後尾にウインチを設け、ワイヤー牽引にて搬送を行う。

ベッセルのワイヤー接続部は、牽引時の重心を安定させるためにベッセル中央部とし、ワイヤは作業員通行の支障とならぬよう、低床台車の通路床下部の溝部に配置した。曲線時の形状に即したワイヤー牽引方向を考慮して、低床台車ワイヤー設置部にワイヤーガイドローラーを設けた。

このシステムを採用する工事における路線の縦断勾配は 1.7‰～13‰であり、勾配変化時に約 100 ㎜のワイヤの浮上がりが発生し、ワイヤーガイドから外れる可能性がある（図-15）。

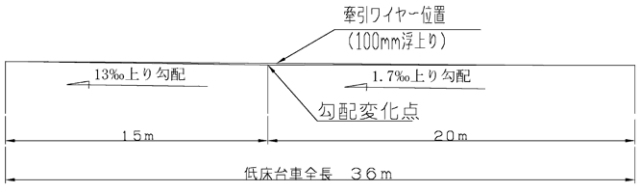


図-15 勾配変化時のワイヤ浮上がり量

この対策として、ベッセル及びワイヤの接続部に干渉しない回転式の浮上り防止装置を、低床台車の通路部下部に配置した。図－16 にワイヤ浮上がり防止装置図を示す。

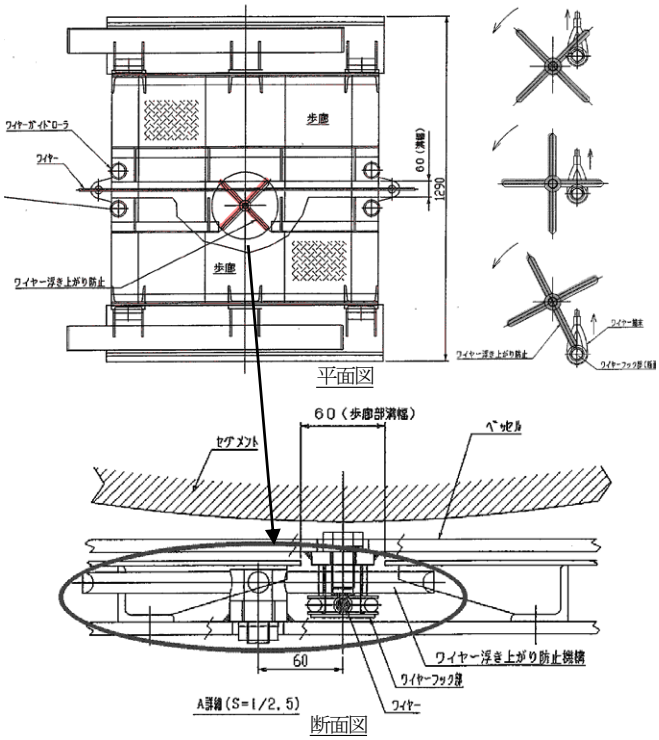
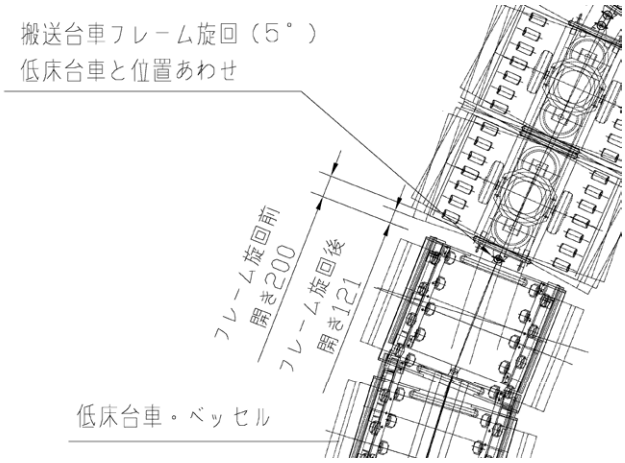


図-16 ワイヤー浮上り防止装置概要図

⑸ 搬送台車と低床台車間のセグメント乗継検討

セグメントを発進立坑から切羽に運搬する搬送台車と低床台車間のセグメントの搬送についても、低床台車間の乗継と同様、急曲線部で台車間開き・乗継ぎ高さの段差が課題となる。この課題を解決するため、搬送台車のフレームを回転(左右各 5°)する構造にし、低床台車との向きを合わせることで乗継ぎ時の開き、段差を解消する方法を採用した。台車間の開きを幅 300 ㎜の鋼製セグメントの重心位置（150 ㎜）以下にするために、5° の回転により 200 ㎜から 121 ㎜に抑えた（図－17 参照)。



図－17 搬送台車と低床台車の乗継ぎ図

⑹ 低床台車とリフター間のセグメント乗継ぎ検討

低床台車とシールドエレクター部へのセグメント搬送は、低床台車の前にリフターを設け、エレクターまでの区間に設置された搬送ローラー位置までセグメントを運搬する方式を採用している。低床台車とリフター間乗継ぎ時においても、図-18 に示すとおり、曲線部（R＝15m）の低床台車とリフターの間隔は 280 ㎜となる。そこで、急曲線区間のみ低床台車に鋼製セグメント用補助ローラーを追加して対処することとし、補助ローラーの追加で乗継ぎ部の間隔を 108㎜とした。

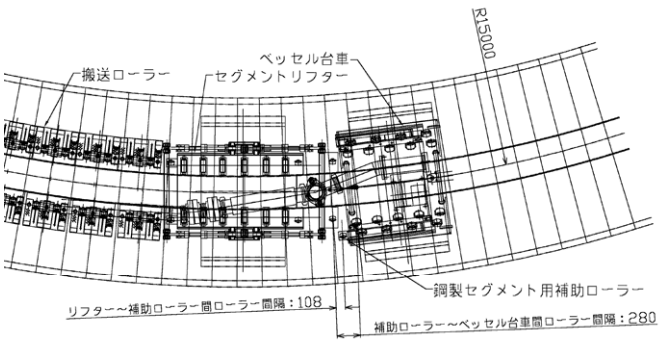


図-18 低床台車～リフター間乗継ぎ概要

⑺ 低床台車の自走装置の検討

従来のシールド工法では、後続設備はシールド本体らワイヤで牽引する方式が一般的である。ワイヤー牽引方式ではセグメント運搬に支障となるため、シールドの掘進速度に同調した自走装置を追加してポンプの配管延長に対応することとした。自走装置の平面図を図-19 に示す。自走装置の構造は、セグメントのインバートの側壁に反力をとり、油圧ジャッキの延伸により速度をコントロールする方式とした。反力受部は常にバネを張った状態で作用させ、1 リング掘進完了後の盛替え時には油圧でバネを開放する方式を採用した。この方式により、常に反力を確保でき、停電などの故障時においても、低床台車が逸走する危険性がない構造とした。

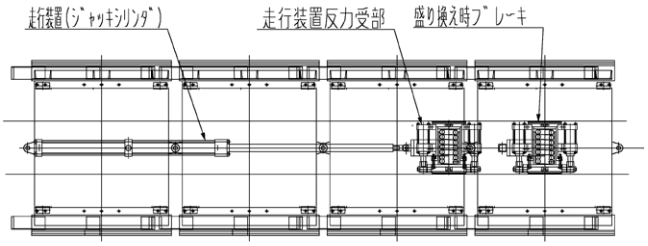


図-19 自走装置平面図

4. おわりに

本報告で述べた掘削土のポンプ圧送方式及び低床台車方式のセグメント搬送は、東京都港区の下水道局の工事において採用する予定である。今後、実施工により本計画の成果及び改善点を検証したいと考えている。

【参考文献】

1)守屋、勝沼 他：後方設備内包型３分割シールドの開発；第 56 回年次学術講演会, 2001.10.

2)金崎、松井 他：コンパクトシールド工法における土砂ポンプ圧送（中間立坑を利用した中継ポンプ配置計画）：第 59 回年次学術講演会,2004.9.

16. パイプルーフ変形計測システム

大成建設：○戸田　浩、宮崎　裕道、近藤　高弘

1.はじめに

パイプルーフ工法は立体交差など都市土木で多く採用される。重要構造物の直下や側部にパイプルーフで防護して空間を確保し、新たにトンネルや構造物を構築する。この様な工事では内部掘削による土圧バランスの変化でパイプルーフが変形し、重要構造物へ影響を及ぼすことが最も懸念される。そこで施工進捗に合わせてパイプルーフ変形を詳細に監視する必要がある。

従来は、パイプ内に固定ピッチ（5～10m程度）で水盛式沈下計や電子スタッフを設置してパイプの変形を把握していたが、測点ピッチが粗く、しかも鉛直変位しか把握できないために、掘削進行に伴う撓みの進行を詳細に捉えることが出来ず、計測はしていても「情報化施工」とはほど遠いのが現状であった。

そこで、上下・左右の二次元変位が測定可能で、かつ、固定ピッチではなく任意のピッチで細かく測定できる自走式のプリズム台車による計測システムを考案した。本稿では、パイプルーフ内部掘削による変形監視にパイプルーフ変形計測システムを採用した東京地下鉄㈱綾瀬立体交差工事での実施例を報告する。

2.適用工事概要

本工事は、東京地下鉄㈱綾瀬車庫により分断されている区道をアンダーパスで横断することにより立体交差化する工事であり、当該施工区間は、東京地下鉄用地内に 2 つ立坑を築造し、電車車庫部をパイプルーフ工法による非開削で施工するものである。

この約 126mに亘る非開削部区間は、綾瀬車庫部の線路直下をアンダーパスで横断する際に、営業線や中川汚水幹線の重要近接構造物と広範囲で近接する。（図-1.参照）

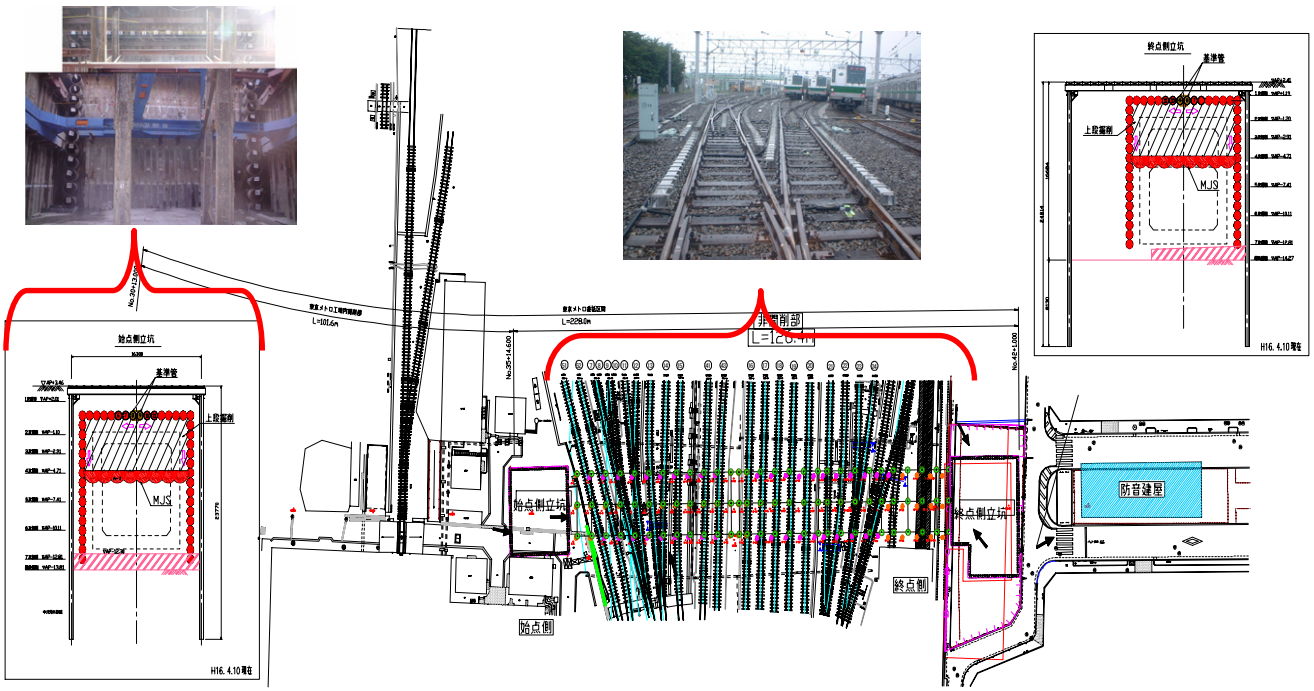
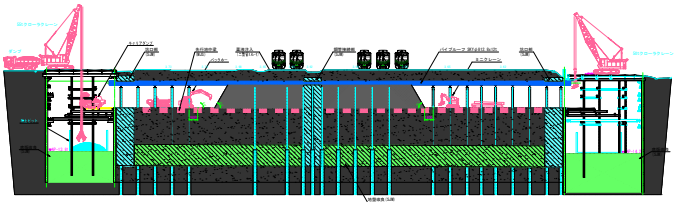
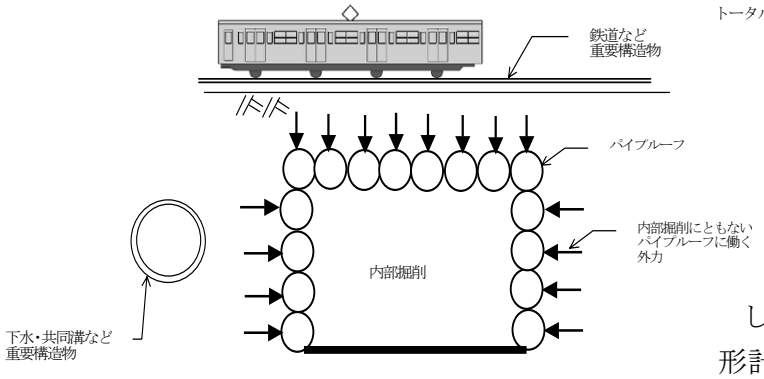


図-1.全体平面図（及び始点・終点立坑正面図）

非開削部の上段部分の施工は、軟弱砂質土の掘削と並行して支持杭及びパイプルーフ支持桁を設置する手順になっており、安全な施工を行うために掘削切羽の自立が必要であり、薬液注入が行われた。
上記の掘削による不等沈下や薬液注入による不等隆起といった、営業線や中川汚水幹線への悪影響が懸念されたため、本稿で紹介するパイプルーフ変形計測システムによって、地山防護工としての非開削部パイプルーフの安全を確認しながら慎重な施工が行われた。(図―2 及び図―3.参照)
なお、綾瀬車庫部の地上の軌道計測には、後述する HyPoS による軌道変状計測システムを導入して、電車走行の安全確保を行っている。

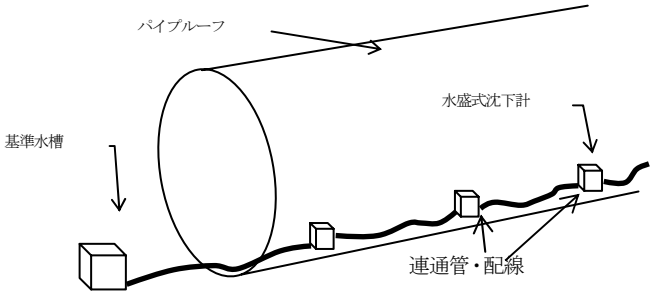


図―2.施工縦断面図



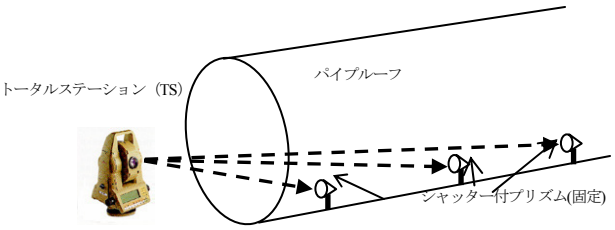
図―3. パイプルーフと重要構造物の関係

3. パイプルーフ変形計測システムの開発経緯
3.1.従来方法による計測例
従来は、図－4. のように、パイプ外部に基準水槽、パイプ内部各測点に水盛式沈下計を設置してパイプの変形を計測していた。しかしながら、この方法では下記のような欠点があった。
①測点の鉛直変位のみの計測となり、水盛式の特性上、パイプがほぼ水平でないと適用可。
②側部パイプルーフで必要となる水平変位は計測不可能。



図－4. 水盛式沈下計による計測方法

3.2.開発経緯
システム適用工事では、上部に多数の綾瀬車庫部軌道、側部には中川汚水幹線があり、内部掘削時のパイプルーフの変形計測が要求された。
そこで、上記の従来方法の欠点を打開するために、図－5. に示すようにパイプ管内に固定ピッチでシャッター付プリズムを設置し、管口からトータルステーション(以下、TSと記す)で変形計測を行う方法を計画した。

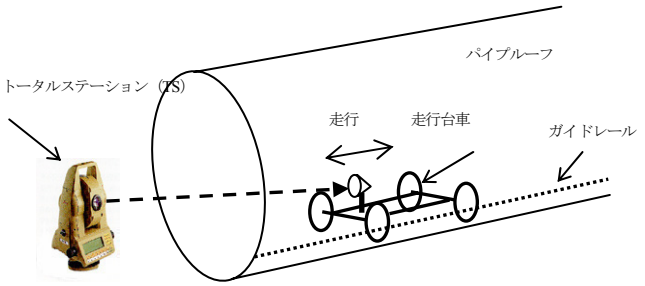


図－5. 固定プリズムによる計測方法

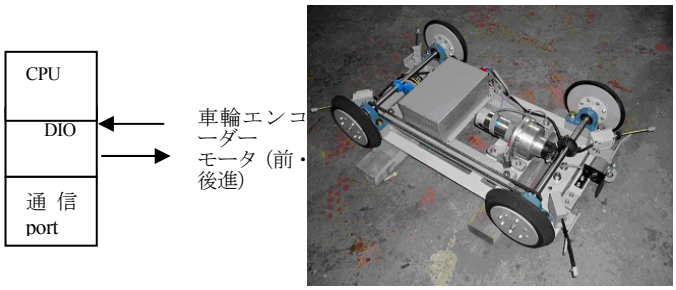
しかしながらパイプ全長にわたる固定ピッチでの変形計測はもちろんであるが、掘削切羽近傍では、より細かいピッチでの変形計測、つまり局部変形の計測が必要であるとのパイプルーフ変形解析結果により、図－6.に示すような、固定ピッチではなく任意のピッチで細かく測定できる自走式のプリズム台車による計測方法を考案した。

4.システム概要
4.1.システム概要
パイプルーフ変形計測システムは、図-6 及び図―7. に示すようにパイプルーフにガイドレールを取り付け、

自走式プリズム台車がガイドレール上の任意の位置に移動する事で計測するシステムである。
自走式プリズム台車が停止し次にTSが測定を行いこの作業を繰り返すことでパイプ全体の変形を測定するものである。
（自走式プリズム台車の主な機能）
・外部からの制御で所定の距離を前進および後進する機能を有し、パイプルーフ内の測点位置を任意に選択できる。

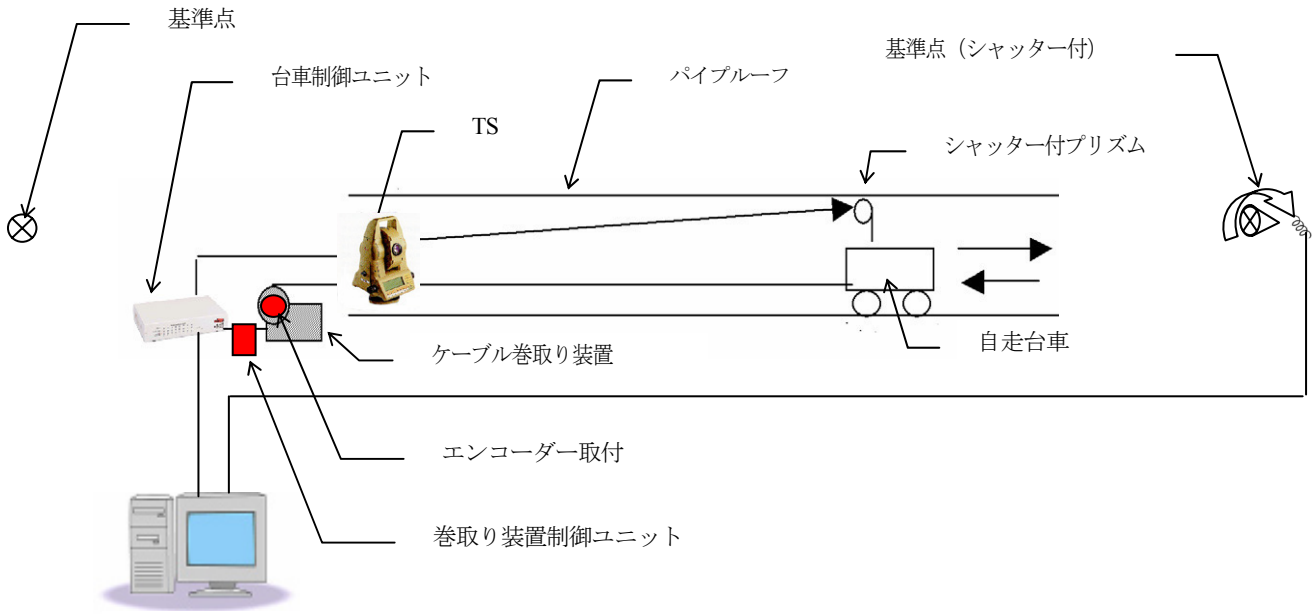


図－6.　自走式プリズム台車による計測方法



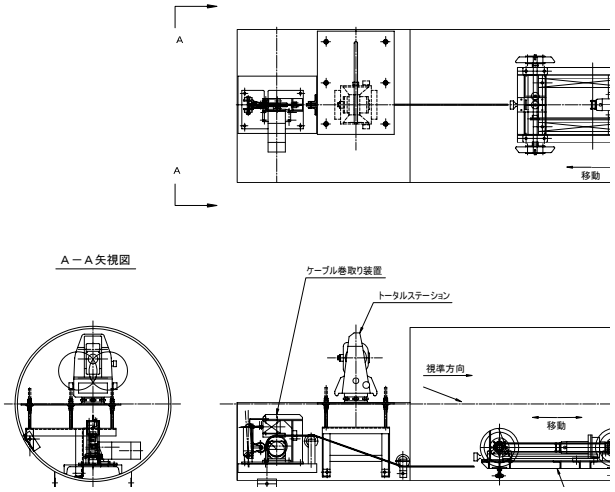
図―7.走行台車のシステムブロック図

4.2.システム構成
図―8.にパイプルーフ変形計測システム図を示す。また、図―9.に TS・自走台車・巻取り機配置図を示す。
① パイプルーフの変形を TS で測定するに当たり、不動点となる基準点を前方および後方に設置する。
②その際に前方方向の基準点を視準すると同一視野内に自走台車のプリズムが入ってしまう。
そこで走行台車および前方のプリズムにはシャッターを付け対応する。
③制御計測用 PC が走行台車、TS、ケーブル巻取り装置、プリズムシャッターを制御する。
④台車の構造と制御：走行車輪は磨耗したり変形してはならない。また真円度の保持が重要である。
台車はケーブルを引きずるが、ケーブルの自重による摩擦や、剛性を考慮すると細いケーブルに限定される。したがって太くて硬い多芯ケーブル等は使用不可であり、動力ラインのほかには通信用ライン程度しか確保できない。したがって、台車を正確に停止したり、微動するために CPU を搭載しインテリジェント化を図った。
⑤構成装置の概要
・TS：自動追尾式トータルステーション（測量機械）。
・シャッター：TS が視準する際にターゲットプリズム以外のプリズムを隠す機器。
・自走台車：モータ駆動による前進後進を行う台車装置。
車輪の回転数を検出するエンコーダが搭載。



図―8.パイプルーフ変形計測システム図

・ケーブル巻取り装置:
走行台車に供給する電力および信号用ケーブルを巻取る装置。
台車の走行に応じて前進時は繰り出し、後進時は巻き取り、前後進時ともに走行に同期。
・台車制御ユニット:TS、巻取り装置、自走台車に信号を配信する装置。
・制御計測用 PC:システム全体の管理制御を行う。



図―9.TS・自走台車・巻取り機配置図

⑤TS によるパイプルーフ変形測定補正方法

近年近接施工に伴う構造物等の変状計測に自動追尾式トータルステーション(TS)を用いることが多くある。TS を使用した計測には常につきまとう問題であるが、TS 架台自体の変位・変形による誤差の補正が必要である。TS による測定精度の向上方法を実現したものとして、HyPoS(特許出願中)が既に商品化されている。しかしながら、パイプルーフは立坑内で施工する場合が多く、基準点が自由に設置できないので、以下に記す「HyPoS」をそのまま適用することが難しく、新たな補正方法が必要となった。

HyPoS の補正方法は三次元空間に 4 点の基準点を必要とする三次元座標変換補正手段である。

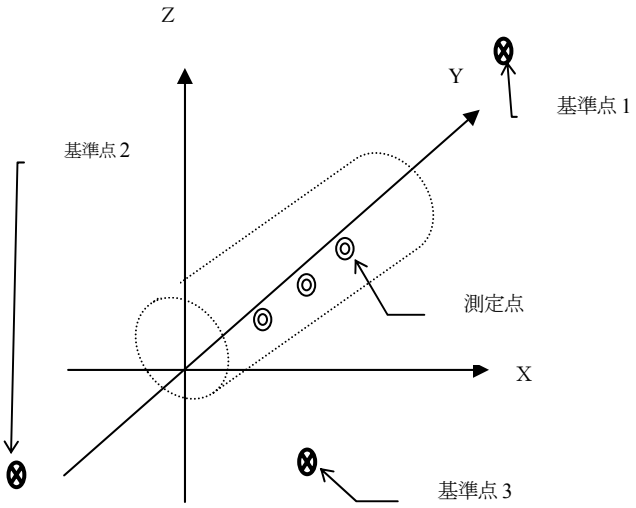
この手法は測定対象が広いフィールドで有効である。しかし全ての現場で有効な基準点 4 点が確保できるとは限らない。例えばトンネル内部などの閉鎖され一方向のみにしか空間利用できない対象がある。

この場合には、三次元空間に有効的な 4 点の基準点を設置することが困難であるため HyPoS 方法を有効に活用することはできない。

そこでこのような測定環境において、基準点 3 点を用いた高精度な補正手法を考案した。

(補正方法概要)

図-10.のように基準点 1、2、3 からなる三角形を基準点 1 を原点に、基準点 2 をＹ軸上に(X 軸でもよい)、基準点 3 を XY 平面上に座標変換を行う。座標の平行移動および回転を行い、測定毎に下図に示す様に基準点 1 から 3 を XY 平面座標に座標変換することで、TS 本体の姿勢の日変化をキャンセルし各測点値を高精度に測定するものである。



図―10.基準点および測定点の配置

5.現場実施状況結果

5.1.走行台車への電源通信接続ケーブルについて

ケーブルリールも検討したが大きさや設置スペースの問題で従来式のケーブルリール(スリップリング付き)は使用できない。

そこでケーブルのみを巻取る(たぐり寄せる)小型なケーブル巻取り装置を試作した。(写真 1)

当初、ケーブルは普通の丸形のケーブルを使用した。そのため数回の往復動作でケーブルにヨリが発生して巻取り装置に噛み込んでしまうという問題が発生した。(写真 2)



写真 1：巻取り装置設置状況

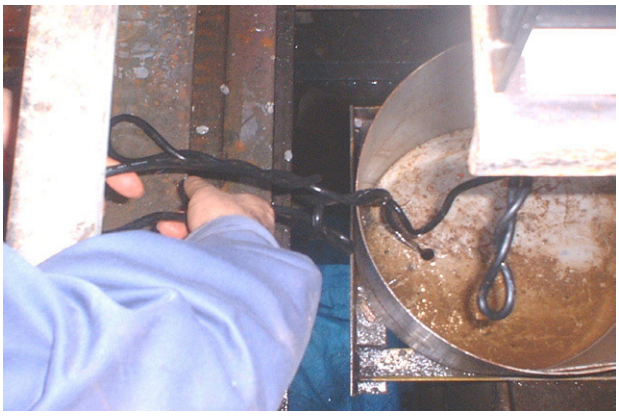


写真 2：丸形ケーブルを使用しヨリが発生している状況

(対策)

その解決策としてケーブルにヨリが発生しないように、平形(メガネ型)のケーブルを製作し対応した。

これによりケーブル自身にヨリが発生することは無くなった。(写真 3)

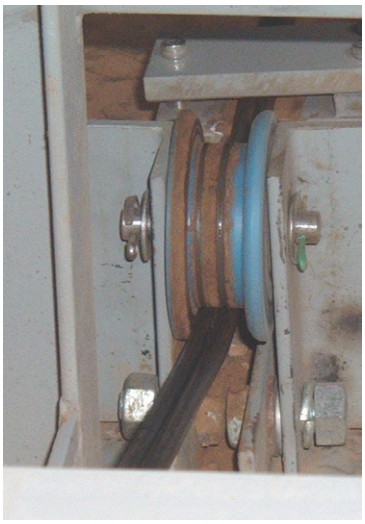


写真 3：平形ケーブル

しかしケーブル形状を変えることでヨリは無くなったが新たに、走行台車と巻取り装置との間で制御タイミングの差・巻取り装置のローラ速度と走行台車の移動速度の違いによりケーブルを損傷する現象がたびたび発生した。(写真 4)



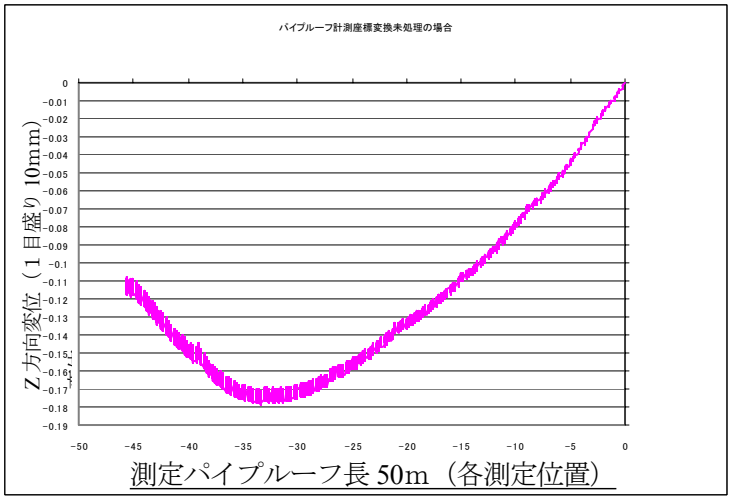
写真 4：台車移動速度と巻取速度の違いによるケーブル損傷状況

巻取り速度差によるケーブル損傷対策として、巻取り装置をインテリジェント化し、走行台車速度と巻取り装置のケーブル巻取り速度が同期するように制御することでケーブル損傷を改善した。

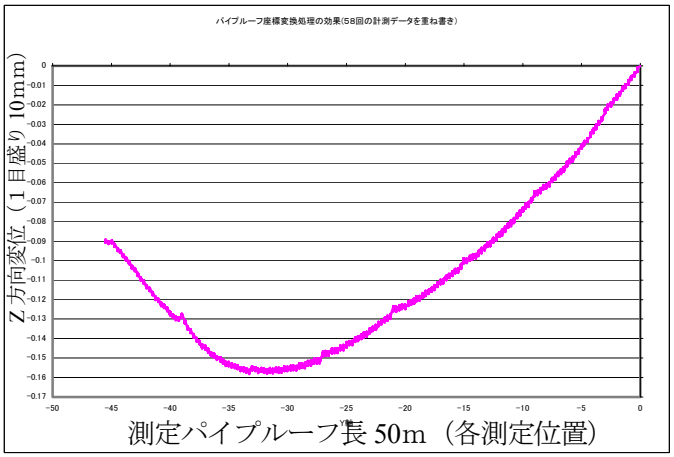
5.2. パイプルーフ変形測定補正方法について

走行台車をパイプルーフ内で約60回走行させて、所定の各測定位置において測定を行った。

TS によるパイプルーフ変形測定補正方法を実施した場合としない場合での計測結果グラフ(図―11、図―12)を下記に示す。



図―11.補正方法未実施計測結果



図―12.補正方法実施計測結果

（結果）

①補正方法実施の場合

計測値のばらつきは、±1.5mm程度であった。

ただし、TS カタログ精度に依存する。

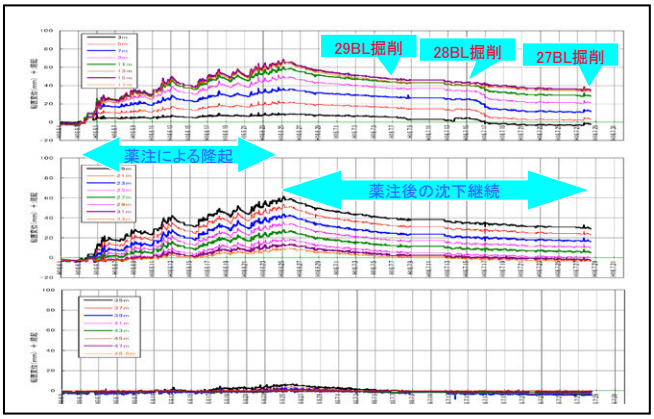
（ 今回使用 TS は測角精度3″ ）

②補正方法未実施の場合

計測値のばらつきは、±10mm程度であった。

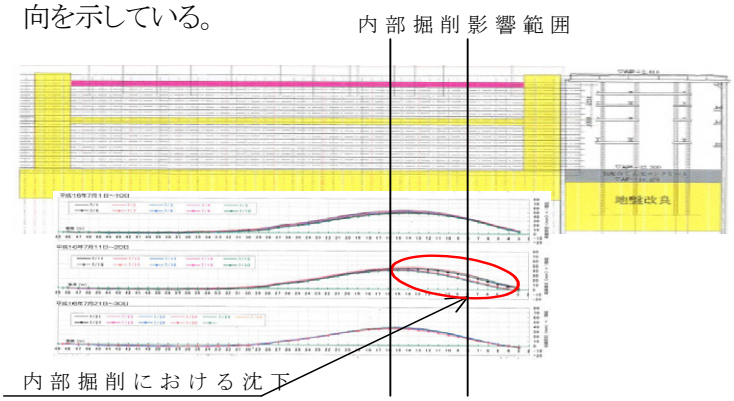
5.3.計測データについて

掘削時作業の安全と近接する軌道及び中川汚水幹線変形管理のためパイプルーフ変形を計測している。図-13.に薬液注入中及び注入後の内部掘削のパイプルーフ変形経時変化グラフを示す。薬液注入により、パイプルーフ管体は隆起傾向を示しているが、掘削後には沈下傾向を示している。



図―13.パイプルーフ変形経時変化グラフ

図-14.に薬注終了後の内部掘削前と掘削後のパイプルーフ変形分布を示す。薬液注入により、パイプルーフ管体は隆起傾向を示しているが、掘削後には沈下傾向を示している。



図―14.パイプルーフ変形分布グラフ

7.効果

従来は粗い固定ピッチでの鉛直変形計測（1 次元）のみであったのが、本システムにより、掘削時に切羽近辺など重要部分を任意の細かなピッチで鉛直・水平 2 次元の計測が可能となった。

したがって、上部近接構造物だけでなく側部近接構造物への影響監視や、支保工変形など他にも有用な施工情報として活用可能である。

8.おわりに

本稿では、紙面の都合上、綾瀬立体交差工事での精度等について、詳細の報告はできないが、本システムは今後のパイプルーフ変形計測の分野において、有望であると考えている。

最後に、本システムを実施するにあたり、御理解を頂いた東京地下鉄㈱殿、㈱地下鉄メインテナンス殿ならびに関係各位に厚く御礼を申し上げます。

17. テール内形状保持装置（TKS）の開発

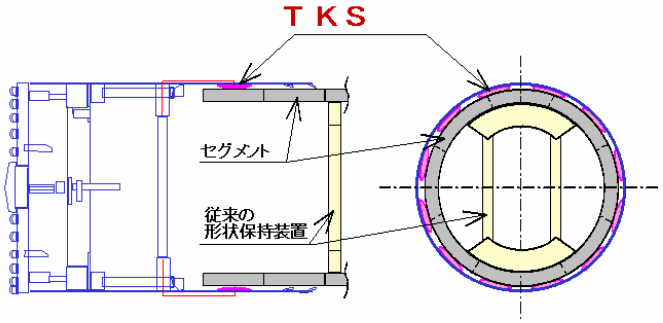
佐藤工業㈱：○篠宮　政幸、守山　亨
東京地下鉄㈱：藤木　育雄

1．はじめに

テール内形状保持装置（以下、ＴＫＳと呼ぶ）は、シールドテール内に取り付けた膨縮自在な膨張体を膨らませて、組立完了直後のセグメントリングを周囲から支持する形状保持機能を有する装置である。

従来のシールドでは組立完了直後のセグメントリングに形状保持装置を用いることができなかったが、ＴＫＳを用いることにより、組立完了直後のセグメントの不安定な状態を改善し、自重による変形の抑制や、掘進中のテールクリアランスの急激な変化に対する推力の分力の緩和効果などにより、セグメントのクラック発生の影響因子を排除することが可能になる。また、締結力の弱いセグメント継手の構造（突合せ継手等）を持つセグメントリングの組立精度の向上効果もある。

本報告は、ＴＫＳを構成する装置の概要を説明するとともに、各種試験から得られた計測結果を用いて推力の作用によるセグメントリングの変形を抑制するための膨張体の設計方法を紹介するものである。



図―１　従来の形状保持装置とＴＫＳ

表―１　従来の形状保持装置

項目	仕様	問題点
保持方法	上下拡張、上下および左右拡張による部分拡張	上下間の水圧差による変形位置を保持していない
保持位置	セグメント内部	セグメントの搬送、作業員の移動、測量等の障害
	組立直後のセグメントリングの後方１リング	**組立直後のセグメントリングを保持していない**

2．ＴＫＳ開発の背景

(1) ＴＫＳ開発の背景

組立完了直後のセグメントリングの周囲は無支持状態にあり、それがセグメントに与える影響を認めながらも、その影響を明確にできなかった。しかし、セグメントの幅広化や簡素化された継手の開発、また、シールドトンネルの大断面化が進められ、それに伴ってその影響が顕著に現れることが懸念される状況にある。

1) 従来の形状保持装置

セグメントリングは、トンネルの本体構造であることなどから、高い組立精度が要求される。リングの剛性による変形の抑制だけでは、経済性も含めて限界がある。このため、組立完了直後、裏込め注入時、注入材の固化時、地山の土水圧の作用時等、時系列的にみて最終の組立精度に与える影響を最小限にする方法として、機械的に変形を抑制できる形状保持装置の設置が要求される。従来の形状保持装置は、エレクター等のセグメントの組立装置との関係から、シールドテールの端部に設置せざるを得ないため、組立完了直後のセグメントリングに形状保持装置を用いることができなかった。表―１は従来の形状保持装置の問題点を示したものである。

2) セグメントの幅広化、継手の簡素化、シールドトンネルの大断面化

①推力によるセグメントリングの変形

セグメントの製造コストの低減や施工速度の向上のため、セグメントの幅広化や簡素化を目的とした継手の開発が盛んに行われている。組立完了直後のセグメントリングの周囲は無支持状態にあるため、掘進時にシールドの姿勢が変化することによって、シールドジャッキ推力による鉛直方向分力がセグメントのクリアランスに生ずる角度分発生する。これによるモーメントでセグメントリングの変形の影響が顕著になるこ

とが考えられる。

②セグメントリングの高い組立精度

組み立てられたセグメントリングは、切羽側が若干開く、いわゆるラッパ状になっているのが一般的である。セグメントの幅広化や簡素化を目的とした継手の場合は、ラッパ状が顕著に現れると予想される。組立時の精度が最終精度に与える影響を考慮すると、組立時から高い組立精度が要求される。

③自重による断面力

シールド工法技術の進歩に伴って超大断面シールドトンネルの施工例も増えているが、大断面化によりセグメントリングの自重が増加するため、外荷重によって発生する断面力に比べ、組立完了直後の自重による断面力が支配的になることも予想される。このため、自重により発生する断面力を低減することが合理的と思われる。

(2) ＴＫＳの開発における課題

セグメントリングの内部に十分な施工空間を確保した上で、セグメントを精度よく組み立てることができ、組立後は直ちに当該セグメントを保持することが可能であること。また、シールドジャッキ推力によるセグメントリングの変形の影響、自重による断面力の低減等の問題をすべて解消できるセグメントの形状保持装置を開発することを課題とした。

３．ＴＫＳの概要

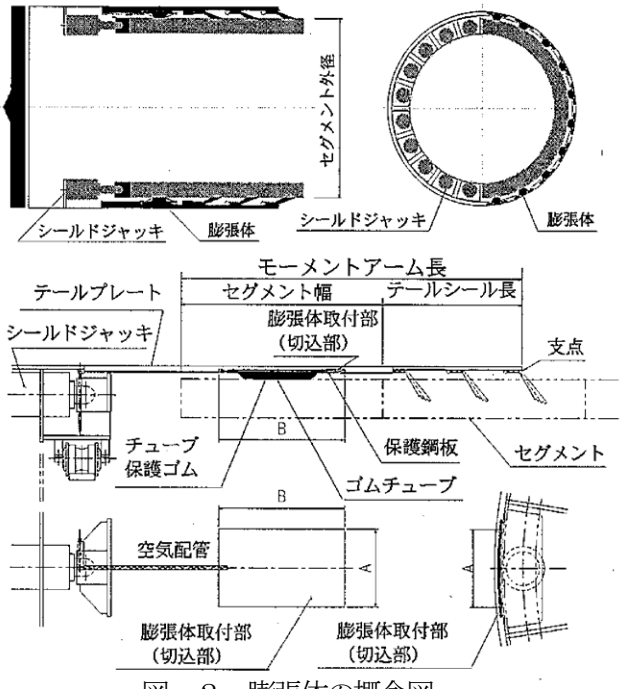
(1) ＴＫＳの概要

ＴＫＳはシールドテール内に取り付けた膨縮自在な膨張体を膨らませて、組立完了直後のセグメントリングを周囲から支持する形状保持機能を有する装置であり、テール内の形状保持システムを構成する装置は、セグメントリングを支持する膨張体とそれを制御する空圧制御装置からなる。図―２および図―３は膨張体の作動の概念図を示したものである。

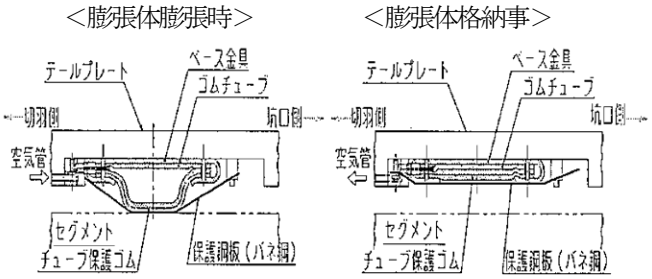
(2) システムを構成する装置

1)膨張体

膨張体は以下に示すゴムチューブ、チューブの保護ゴム、保護鋼板から構成される。膨張体は圧縮空気により膨張し、強制排気により収縮させるもので、テール内に格納されている。テールの内面では、シールドジャッキのスプレッダーが作動するため、スプレッダーの角で膨張体が損傷しないように、膨張体はスプレッダーの幅より小さくなっている。



図―２　膨張体の概念図



図―３　膨張体の作動概念図

①ゴムチューブ

ゴムチューブはテールプレート内に格納され、圧縮空気の送気と強制排気により膨張､収縮させる本体である。ゴムチューブはゴム板を折り曲げてチューブ状に加工された構造である。現時点においては空気圧力を最大0.35MPa としている。

②チューブの保護ゴム

チューブの保護ゴムは、ゴムチューブに異物等があたっても破れないようにするものである。また、ゴムチューブが破裂した場合には破裂音の低減を図る機能もある。

③保護鋼板

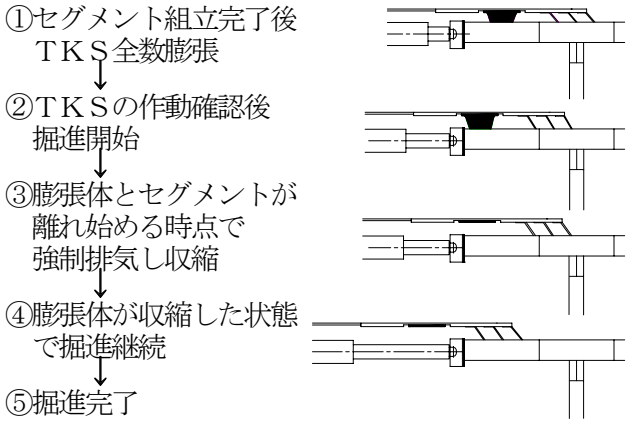
シールドの推進はセグメントリングを周囲から支持した状態で行なわれるため、膨張体とセグメントリングとの摩擦低減用に保護鋼板が用いられる。

2)空圧制御装置

膨張体の膨張および収縮のための圧縮空気の送気、強制排気を制御する装置である。すべての膨張体を一括して制御することを基本とするが、膨張体ごとに制御する場合や膨張体をブロックに分割して制御する場合など、施工条件や施工方法により、一括制御以外の制御方法の組み合わせも設定できる。圧縮空気および強制排気の制御においては、坑内環境に配慮して、とくに排気時の消音対策が必要である。

(3) 掘進における膨張体の作動概念

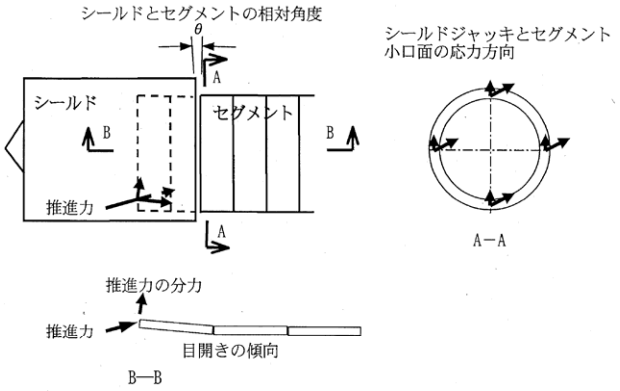
掘進における膨張体の作動の概念を以下に示す。



図―４　掘進における膨張体の作動概念

(4) ＴＫＳの使用による効果

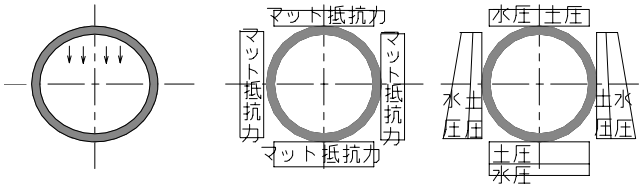
①組立完了直後のセグメントリングを周囲から支持し、シールドジャッキの推進によるセグメントリングの変形を抑制して、セグメントのクラックおよび欠けの防止を図ることができる。



図―5 シールドとセグメントの相対角度に伴う変形の概念

②セグメントの組立完了直後の自重によって発生する変形および応力の抑制を図ることができる（図―６参照）。

③セグメント間締結力の弱い継手構造（突合せ継手等）のセグメントリングの組立精度の向上を図ることができる。



図―６　荷重図

４．膨張体の基本性能試験

(1) 試験項目

テール内形状保持システムを開発するにあたり、膨張体を構成する保護部材（チューブの保護ゴム、保護鋼板）、シールド掘進時のテールクリアランスおよび膨張体に作用させる空気圧力を変動因子と考え、膨張体の材料選定、膨張体性能の確認等を行うため表―２に示す試験を実施した。

表―２　試験項目

名称	試験目的	実験確認項目
単体試験	・気密性 ・復元性	膨張体の基本性能 ①膨らみ部の形状確認 ②チューブ保護ゴムの厚みによる相違の確認 ③保護鋼板の厚みによる相違の確認 ④膨張体内圧力の制御・保持状況 ⑤減圧時の膨張体形状（自然排気、強制排気）
複合試験	・気密性 ・耐圧性 ・復元性	テール内での膨張体の膨張性能 ①設定最大圧力0.35MPaの確認 ②膨らみ幅部の形状確認（0.05MPaピッチ） ③チューブ保護ゴムの厚みによる相違の確認 ④保護鋼板の厚みによる相違の確認 ⑤膨張体内圧力の制御・保持状況 ⑥減圧時の膨張体形状（自然排気、強制排気）
	・気密性 ・耐圧性 ・耐久性	推進時の膨張体の挙動 ①膨張体内圧力の確認 ②推進力の増加有無の確認 ③保護鋼板の厚みによる相違の確認 ④セグメントと膨張体の接触状況 ⑤膨張体内圧力の制御・保持状況 ⑥膨張体の擦れ状況（最終時）
	・気密性 ・耐圧性 ・変形性	膨張体のセグメントの動きを抑制する効果 ①膨張体内圧力の確認 ②膨張体抵抗力によるセグメントの動き抑制状況及び押付位置による相違の確認 ③膨張体内圧力の制御・保持状況
	・簡便性	膨張体交換の作業性
摺動試験	・耐圧性 ・耐久性	膨縮および摺動の耐久性能

(2)試験で得られた成果

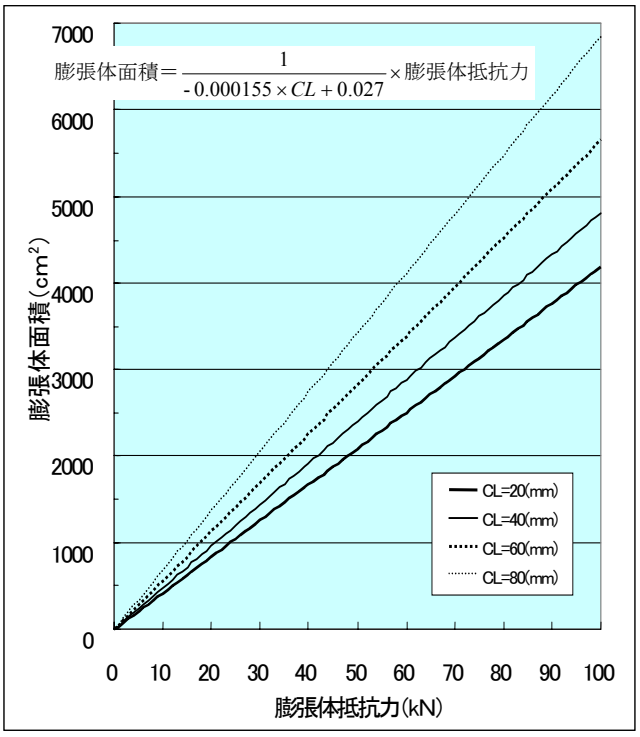
1) 膨張体の構成材料等

膨張体を構成するゴムチューブは、クロロプレン系のゴムで強度は450kg/2.5cmとし、チューブの保護ゴムは厚さ５㎜のニトリロ・ブタジエンゴムとした。また、保護鋼板は厚さ0.６㎜のバネ鋼とした。膨張体の空圧制御は電磁弁を利用し、排気は、膨張体のテールスキンプレート内への格納を迅速に行う必要があるこ

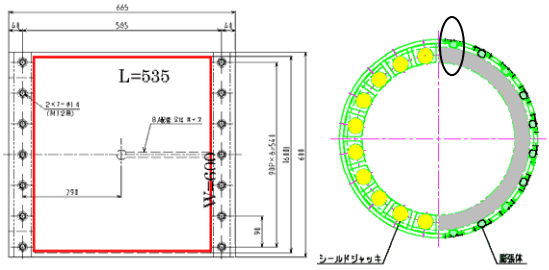
とから、負圧を利用した強制排気方式とした。

2) 膨張体の性能

テールクリアランスが一定で膨張体に作用させる空気圧力を変化させた場合も、空気圧力が一定でテールクリアランスを変化させた場合も、どちらの場合にも、膨張体の抵抗力はそれぞれの変化要因との間に一次の相関が成立していることが確認された。



図―７　膨張体の面積と膨張体の抵抗力



膨張体の面積は可動部分であり、例えば左図の太線の範囲である。一方、膨張体の抵抗力は１箇所あたりであり、例えば右図の楕円で示した部分である。

図―８　膨張体の面積と抵抗力の説明図

3) 膨張体の変形特性

膨張体を構成する材料が、ゴムおよび空気という膨縮自在に変形するものであることから、シールドジャッキの推進分力によるセグメントの動きを抑制する効果があることを試験から確認した。

セグメントの移動開始時点の推進分力に対して、モーメントの釣り合い式から必要な膨張体抵抗力を計算し、それと試験値とを比較すると、概ね試験値が計算値の 1.1 倍程度の値を示していた。

4) 実機に装備する際の膨張体の面積の算出方法

試験から得られた結果をまとめ、膨張体の抵抗力と膨張体の面積との関係を求め、実機に装備する際の膨張体の面積の算出方法を定めた。

テール内面とセグメント外面との距離であるクリアランスの大きさにより、膨張体の接地面積は異なる。このため、要素実験から、クリアランス別に大きさの異なる２種類のゴムチューブの近似式を平均して、膨張体の抵抗力と膨張体の面積との関係を求めた。

図―７はそのようにして求めた両者の関係である。

＊膨張体の面積の算定式の説明

$$膨張体面積＝\frac{1}{-0.000155\times CL+0.027}\times 膨張体抵抗力$$

試験から得られた2種類の膨張体の近似式から算出する。

作用空気圧0.35MPa、膨張体抵抗力Pm(kN)、テールクリアランスをCL(mm)として、膨張体抵抗力とクリアランスの関係式は、

a膨張体（600^{W}×535^{L}）の抵抗力：Pm①＝-0.4770×CL+86.16・式①

b膨張体（380^{W}×535^{L}）の抵抗力：Pm②＝-0.3261×CL+55.82・式②

膨張体抵抗力の比率（a膨張体の抵抗力／b膨張体の抵抗力）は、膨張体面積の比率（a膨張体の面積／b膨張体の面積）と同様の傾向を示しており、膨張体の抵抗力と膨張体の面積は1次の相関関係にあることが確認できた。

これにより、これら2式の両辺を膨張体の面積で除し、単位面積あたりの膨張体の抵抗力（膨張体の圧力）Pm'(kN/cm²)に変換すると、

式①は、Pm'＝-0.0001486×CL+0.02684・・・・・・・・・・式③

式②は、Pm'＝-0.0001604×CL+0.02746・・・・・・・・・・式④

これら2式の傾き及び切片について、平均して1式にまとめると、

Pm'＝-0.0001545×CL+0.02715・・・・・・・・・・・・・・式⑤

ここで、式を安全側に丸めると、

Pm'＝-0.000155×CL+0.027・・・・・・・・・・・・・・・・式⑥

式⑥の両辺に膨張体の面積A（cm²）を乗じると、

Pm'×A＝(-0.000155×CL+0.027)×A・・・・・・・・・・式⑦

ここで、Pm'×Aは、膨張体の抵抗力になるので、

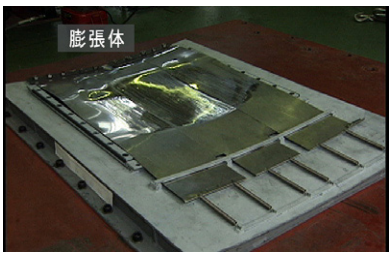
A＝{1/(-0.000155×CL+0.027)}×Pm・・・・・・・・・・式⑧

式⑧により、膨張体の抵抗力から、必要な膨張体の面積が算出される。

5) 摺動試験

摺動実験の概要と状況を写真で示す。









５．膨張体の設計方法

膨張体の設計は、ジャッキ推力の作用によるセグメントリングの変形を抑制することを第一義として、影響が大きいと考えられるシールドとセグメントの相対角度に伴う推力による鉛直方向分力をＴＫＳで吸収できることに着目して行う。

設計は膨張体の面積を算出することにある。膨張体の面積はテール端部を支点とする推進分力（セグメントリングを変形させる力）と、推進分力に対応する膨張体の抵抗力との釣り合いから算定する。以下には、膨張体の設計例を示す。

図―９は掘進時の膨張体とテールシールおよび形状保持装置の位置関係を示したものである。掘進開始前のそれぞれの位置は、形状保持装置が前リングのほぼ中央に、テールシールが形状保持装置の少し切羽側に、膨張体が組み立てたセグメントリングの中央にある。

図―10は横断面のイメージである。トンネル軸方向のテールとセグメントとの相対角度が生じて、シールドジャッキによる推進分力が上向きに作用し、上半部の膨張体で抵抗している時のイメージを示す。

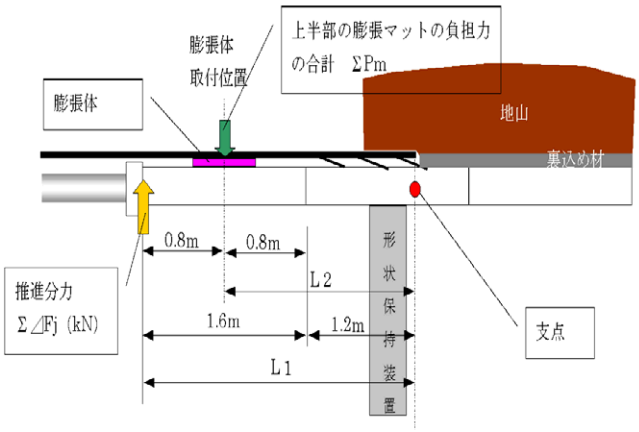
(1)設計条件

①セグメント外径：Ds ＝φ6,600㎜
②テール内径：Dt＝φ6,660㎜
③テールクリアランス： ｃ＝30㎜
④シールドジャッキ本数：Nj＝24本
⑤シールドジャッキ推力：Fj＝2,000ｋN
⑥スプレッダーの円周方向の長さ：Ws＝65㎝
⑦セグメント幅：1.6m
⑧膨張体を設計する時の取付位置をセグメントリングの中央とする。また、膨張体、推進分力の作用位置は図―９に示すとおりとする。
⑨シールドジャッキの常用推力は装備推力60%とする。
⑩トンネル軸方向のテールとセグメントとの相対角度はα＝0.5° とする。

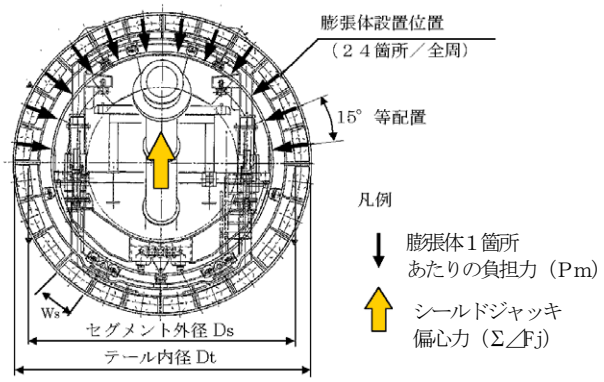
(2)設計手順

①推進分力（Σ⊿Fj）の算定

$$\Sigma \triangle Fj = 60\% \times Fj \times Nj \times \tan\alpha$$
$$= 60\% \times 2,000 \times 24 \times \tan 0.5^\circ$$
$$= 251 \ \mathrm{kN}$$



図―９　縦断方向位置関係図



図―10　横断面のイメージ

②膨張体１箇所あたりの抵抗力（Pm）の算定

図―９に示すテール端部を支点とする釣り合いの式および図―10 に示す鉛直方向の力の釣り合いから以下のように算定する。

$$\Sigma \triangle Fj \times L1 = \Sigma Pm \times L2$$
$$\Sigma \triangle Fj \times (1.6+1.2) = \Sigma Pm \times (1.2 + 0.8)$$
$$\Sigma Pm = Pm \times \{2 \times (\sin 7.5 + \sin 22.5 + \sin 37.5 + \sin 52.5 + \sin 67.5 + \sin 82.5)\}$$

上記の２式および推進分力より

$$Pm = 1.4 / 7.7 \times \Sigma \triangle Fj$$
$$= 1.4 / 7.7 \times 251$$
$$= 46 \ \mathrm{kN}$$

試験結果から、算出された膨張体の抵抗力に1.1を乗じて、必要な膨張体の抵抗力Pmを求めると、

$$Pm = 1.1 \times 46$$
$$= 51 \ \mathrm{kN}$$

③膨張体の面積の算定

膨張体の面積の算定式から算定する。

この設計例では、テールクリアランスが 30 ㎜であ

る。蛇行等によりクリアランスは計算上で最大60㎜となるが、実際にはその反対側のクリアランスが0になることはない。そこで最少クリアランスは10㎜確保するものとした。したがって、施工時の最大クリアランスは50㎜となる。

$$A=\frac{1}{-0.000155\times CL+0.027}\cdot Pm$$

$$=\frac{1}{-0.000155\times 50+0.027}\cdot 51$$

$$=2,649\ cm^2$$

ここに、

A：膨張体の面積（cm^2）

CL：クリアランス（㎜）

Pm：必要な膨張体の抵抗力（kN）

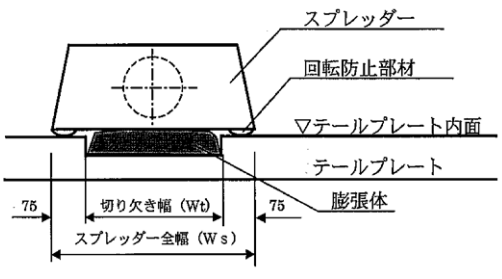
④膨張体の形状寸法の決定

膨張体の形状寸法は、円周方向の長さ、トンネル軸方向の長さおよび厚さを決める必要がある。

このシステムは、膨張体をテールプレート内に格納している。一方、シールドジャッキの先端の球座にはスプレッダーが装着されており、スプレッダーは自由に回転することができる（図―11 参照）。膨張体の円周方向の長さは、膨張体を保護するために、スプレッダーの角がテールプレートに接触しない長さにする必要がある。この円周方向の長さと、算定した膨張体の必要な面積からトンネル軸方向の長さが求まる。

本設計例の場合、スプレッダーの全幅（円周方向の長さ）は、W＝65 cmである。切り欠き幅を 50 cmとすると、トンネル軸方向の長さは、膨張体の必要な面積の2,649 cm^2から2,649／50＝53.0≒55 cmとなる。

膨張体の厚さは 25 ㎜とし、膨張体を設置する部分の切り欠いたテールプレート厚（＝テールプレート厚－25㎜）を最後にチェックしておく必要がある。



図―11　スプレッダーの概念図

6．ＴＫＳの効果の確認について

ＴＫＳは、東京地下鉄㈱の１３号線（池袋から渋谷に至る延長 8.9km）の全シールド工事で採用することとしている。

シールド工事は、複線シールド、駅シールド、単線シールドの全１０工区からなり、使用するセグメントは、鉄道トンネル最大となる１．６ｍのセグメント幅である。トンネルの掘進は，平成１７年度から順次開始する予定である。

ＴＫＳの効果の確認は、これらの全シールド工事において行う予定であり、確認項目は以下のとおりである。

①推進分力の吸収効果

推進分力の吸収を確認するために、セグメント内面にコンクリートひずみ計を設置して発生応力を計測する。

②組立の真円度

組み立てられたセグメントの真円度を把握するために、テールクリアランス計を用いて、ＴＫＳの作動の有無による違いを計測する。

③セグメントリングの自重による応力の低減

ＴＫＳを作動させることによるセグメントの自重による応力の低減効果を確認するために、セグメントにはひずみ計を設置して発生する応力の状態を計測する。

7．おわりに

開発したＴＫＳは、従来できなかった組立完了直後のセグメントリングの形状保持を可能にするもので、建設コストおよびライフサイクルコストの縮減という社会ニーズにも合致した技術である。今後、セグメントの幅広化や継手の簡素化の開発がますます進められる中で、シールドトンネルの大深度化や大断面化への開発技術の一翼を担っていくものと期待している。

東京地下鉄１３号線で十分な効果が確認されれば、再度報告する予定である。

最後にＴＫＳの開発に際し、共同開発者である早稲田大学理工学部小泉淳教授（東京地下鉄㈱：シールドトンネル調査委員会委員）、および協力していただいた石川島播磨重工業㈱、六菱ゴム㈱の関係各位に深く感謝申し上げる。

18. 繊維補強コンクリート施工における定量供給装置の開発

東亜建設工業㈱：○松島　弘樹、内倉　廉二、泉　信也

１．はじめに

新幹線トンネルにおけるコンクリート剥落事故などを契機として、山岳トンネルや橋梁施工分野ではコンクリートのひび割れに対する社会的関心が高まっており、コンクリートの剥離・剥落防止策の一つとして繊維補強コンクリートの適応例が増えている。コンクリートの補強繊維は鋼製や非鋼製など既に数社が開発・商品化しているが、非鋼繊維のようにアスペクト比（縦横比）が高く細長い材料は材料同士が絡み合う（ダマになる）性質が非常に強く、これを山岳トンネルなどの建設現場で取り扱う場合には大がかりなプラント設備が必要となったり、煩雑な準備作業や人力投入作業が必要となるなどの課題があり、標準的な現場施工技術として確立されたものはなかった。

そのため新たな原理に基づく自動定量供給装置を開発し、実際のトンネル施工現場でその性能を確認したので報告する。

２．開発概要

（１） 開発の目的

近年、第二東名高速道路など一部の山岳トンネル工事においては、二次覆工コンクリートの剥離・剥落対策としてコンクリートに靭性やひびわれ拘束能力を付加するために鋼繊維が使用されていた。しかし靭性に優れている反面、高価で錆びるといった問題もあり、ポリマー系などの非鋼繊維も注目されつつある。例えば日本道路公団からは平成 15 年 9 月に非鋼繊維の使用も含めた繊維補強覆工コンクリートの施工管理要領が出されている。

その一方、コンクリートプラントやトラックミキサーへの非鋼繊維供給方法は確立されておらず、いまだに人力供給に頼っているのが現状であり、品質面や安全面での問題も浮上していた。

そのため、コンクリート補強繊維など高アスペクト比の材料を安全かつ精度良く定量供給可能な装置の市場調査を行ったが、粉粒体を材料とする分野では各種の定量供給装置が開発・実用化されているものの、コンクリート補強繊維のようなダマになる性質の強い材料を安定的に定量供給できる方式は見出せなかったため、新たな原理に基づく方式の開発・実用化に着手した。

（２） システムの原理

今回開発したコンクリート補強繊維の定量供給装置「テーブルアップ･フィーダ」（写真１、図１）は、非常に簡易な原理でありながら、高アスペクト比の材料を高い精度で自動的に定量供給可能にした装置であり、その原理は以下の通りである。

① 円筒形容器内に昇降可能なテーブル（底板）を装備し、テーブルの上昇にともなってせり上がってきた材料を円筒形容器上部に取り付けたスクレーパー（撹拌羽根）で、円筒形容器の外部周囲に定量的に掻き落とす。テーブルの上昇速度を加減することで、材料の供給量を調整することが可能である。



写真１　テーブルアップ･フィーダの外観

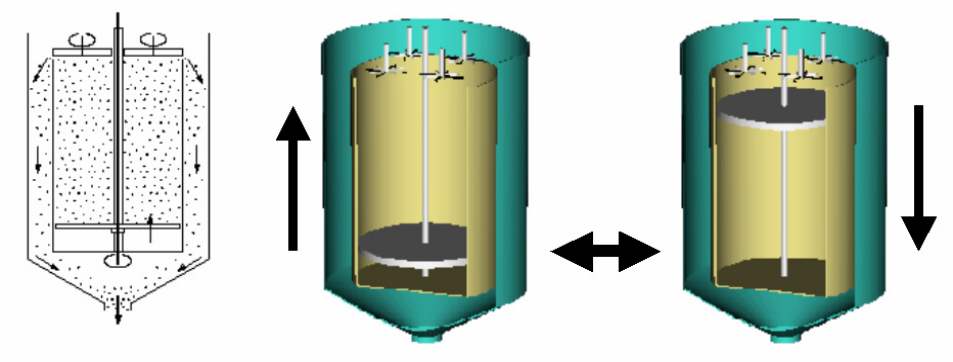


図１　テーブルアップ･フィーダの原理模式図

② 円筒形容器の外部には、掻き落とされた材料が周囲に飛散しないための外管を、また、円筒形容器の下部には、掻き落とされた材料を受け止めてその流れを整流化するためのホッパーをそれぞれ装備する。これにより、テーブルの上昇とスクレーパーの回転により定量供給された材料を、ホッパー下部に配置した輸送装置や混練装置へと安定的に投入することが可能である。

③ テーブルアップ･フィーダのホッパー下部に配置する輸送装置、混練装置としては、旋回流（スパイラルフロー）を応用した空気圧送装置（写真２）やブロワ、ベルトコンベアの他に、生コンミキサーやトラックミキサーなどへの直接投入も可能であり、様々な現場施工方法に対応可能である（図２）。

（３） システムの特長

今回開発したテーブルアップ･フィーダの特長は、以下の通りである。

① 高い定量供給性

装置自体の定量供給性が原理的にも高い上、供給する材料の質量変化をロードセルによりリアルタイムに計量管理するため、非常に高い精度で材料の定量供給が可能である。

② 供給量の変更調整が容易

テーブルの上昇スピードをインバータ制御により変更調整できるので、材料の供給量を任意に変更調整可能である。

③ 各種粉粒体材料の定量供給も可能

コンクリート補強繊維のような高アスペクト比の材料のみならず、木材チップなどの不定形な木質系材料、モミ殻などの穀物類、その他従来では定量供給が困難であるとされていた各種材料の定量供給も可能である。

④ 運転と保守管理が容易

可動部がテーブル駆動部とスクレーパーのみであり、材料の噛み込みなどがほとんど発生せず、運転と保守管理が容易である。

⑤ 取り扱う材料を傷めない

材料の掻き落としは、特殊形状の樹脂製スクレーパーにより行なうため、材料の損傷はほとんどない。



写真２　旋回流応用の空気圧送装置

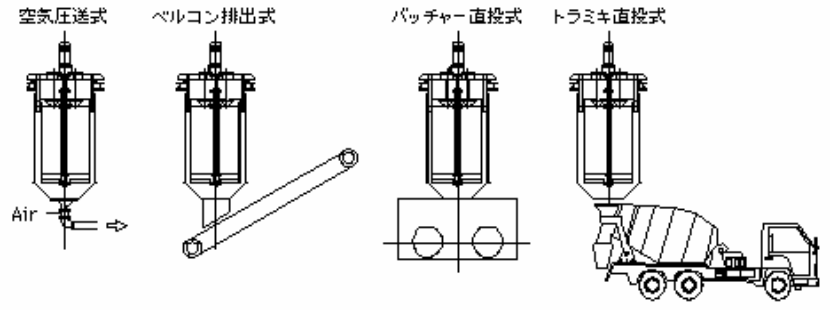


図２　テーブルアップ･フィーダ利用の施工システム例

表１　コンクリート補強用非鋼繊維一覧

メーカー名	品　名	原　料	比　重
萩原工業	バルチップM	ポリプロピレン	0.91
クラレ	クラテック RF4000	ビニロン	1.30
グレースケミカルズ	STRUX 85/50	ＰＥ／ＰＰ	0.92
プラスワン	リプロファイバーバベル	再生ＰＥＴ	1.35

３．実証実験

（１）　実験概要

今回のテーブルアップ･フィーダ開発時点で入手可能なコンクリート補強用の非鋼繊維は表１の通りであった。このうち当社山岳トンネル現場（後述）で使用検討されていたバルチップMを用い、テーブルアップ･フィーダの定量供給性確認実験を行った。

（２）　実験方法

当該トンネル現場では、高強度覆工コンクリート（セメント配合量 450kg/m^3）に対しバルチップMを 9.1kg/m^3 混入する計画であった。現場で使用するバッチャープラントは１バッチ当り 0.5 m^3 の混練を行うため、１バッチ当りの混入量は 4.55kg である。また１バッチ当りの混練時間は45～60sec であるため、１バッチ当り 40 秒前後でバルチップM4.55kg を投入しきれるシステム設計を基本とし、テーブルアップ･フィーダ作動時間を増減させバルチップMが定量的に排出されるか否かを実験した。

（３）　実験結果

実験結果を図３に示すが、テーブルアップ･フィーダの作動時間とバルチップMの排出量との間には一次的な強い相関関係があり、テーブルアップ･フィーダの定量供給性は非常に高いことが確認できた。

４．実用化

今回開発したテーブルアップ･フィーダと現場で使用するバッチャープラントとを連動的に自動運転させるために、図４に示すようなシーケンス制御回路を組み込み、実際の山岳トンネル現場において実証運転を行った。

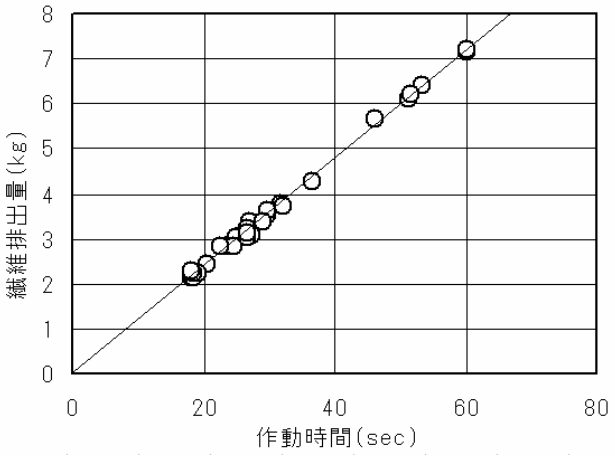


図３　定量供給性確認実験結果

（１）　工事概要

本工事は、山形県米沢市蟹ヶ沢地区において地滑り地帯に約 13m^2 の排水トンネルを築造するものであり、覆工コンクリートは非鋼繊維補強コンクリートの吹付け施工により行われた。

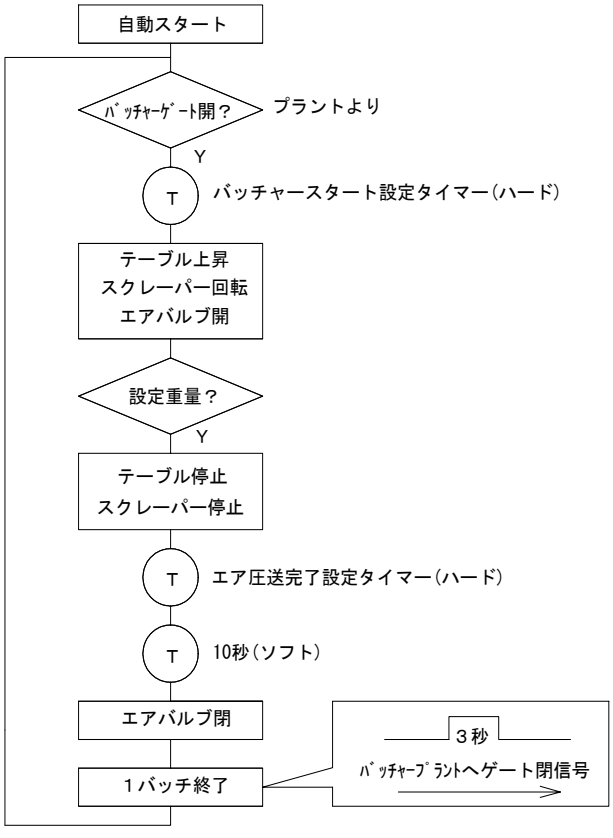


図４　テーブルアップ･フィーダのシーケンス制御

表２　蟹ヶ沢トンネル覆工吹付コンクリート配合表

粗骨材の最大寸法（mm）	スランプの範囲（cm）	水セメント比（%）	細骨材率（%）	単位量（kg/m3）				
				水 W	セメント C	細骨材	粗骨材	非鋼繊維
15	18±2.5	45	65	203	450	1,006	550	9.1

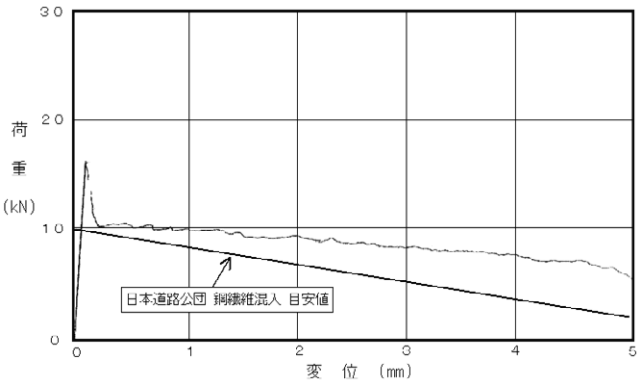


図５　非鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度試験結果

（２） 施工状況

本現場における繊維補強覆工コンクリート配合は、表２に示す通りセメント量 450kg/m^3 の高強度コンクリート配合であり、混入する非鋼繊維としては前述の通りバルチップMを使用した。

本現場では、写真３に示す通り覆工コンクリートを現場で混練するバッチャープラントとは別置に、非鋼繊維の定量供給装置であるテーブルアップ･フィーダを設置し、１バッチ毎に自動運転によりバルチップMを計量供給した。

テーブルアップ･フィーダからバッチャープラント混練ミキサーへの非鋼繊維の搬送方法としては、前述のスパイラルフローを応用した空気圧送方式とした。

テーブルアップ･フィーダによりバルチップMを混入した繊維補強コンクリートの強度試験結果の一例として、図５に曲げ強度･曲げタフネス試験のグラフを示す。

５．おわりに

本論文で報告したテーブルアップ･フィーダはロードセルによる自動計量機能を組み込んだ補強繊維の定量供給装置であるが、最近の山岳トンネル現場においては、繊維メーカーが出荷前にあらかじめ



写真３　非鋼繊維補強コンクリート現場施工状況



写真４　簡易型補強繊維供給装置「サブフィーダ」

工場バッチャープラント１バッチ分、あるいはトラックミキサー１車分などの計量梱包を行い、施工現場ではバッチ毎あるいはミキサー車毎に投入だけ行う方法も一般化しつつある。

このような状況に対応して、計量機能付きの高級機種ともいえるテーブルアップ･フィーダとは別に、計量機能を省き、あらかじめ計量梱包された補強繊維を簡便かつ安全、確実に投入可能な簡易型補強繊維供給装置「サブフィーダ」（写真４）も開発しており、山岳トンネル現場での試験評価も終えている。

これらの両装置により山岳トンネル覆工コンクリート施工の効率化や省力化、安全性向上などに資することができれば幸いである。

最後になりますが、両装置の開発･製作ならびに現場での実証試験にご協力いただいた東亜機械工業(株)はじめ関係各位に感謝の意を表します。

19. 非開削管きょ撤去工法「Ｒｅキューブモール」による既設推進管の撤去埋戻し

三井住友建設㈱：○清水　安雄、石田　喜久雄
機動建設工業㈱：荒木　大介

１．はじめに

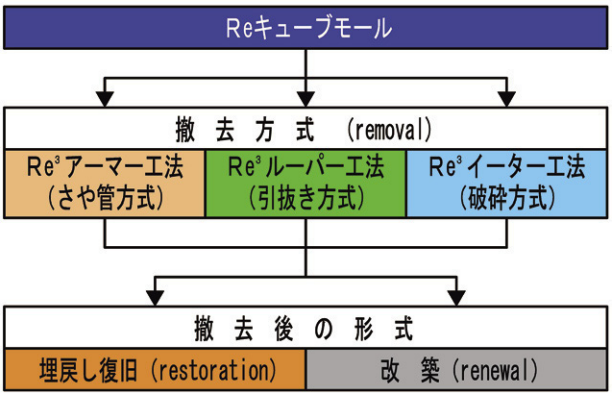
都市部の地下空間は、都市活動を支える上下水道や通信施設等のライフラインをはじめ、様々な用途の地下構造物で過密状態になっている。地下利用が進むその一方では、耐用年数を超えて老朽化した管きょや、硫化水素に起因するコンクリート構造物の硫酸腐食により、短期間に劣化した管きょも認められる。また、管きょの新設やルート変更等により、不要となる管きょも発生している。不要な管きょを地中に放置することは、地下の有効活用を図る上で障害になる。また、劣化の著しい管きょは、安全性という点でも課題を残すことになる。これらの撤去には、地下埋設物、地上交通、周辺生活環境への影響が少ない非開削での施工技術が求められている。

このような状況のもとで開発したのが、非開削による既設管きょ撤去技術「Ｒｅキューブモール」である。本稿では、Ｒｅキューブモールの概要とルーパー工法（引抜き方式）による管きょ撤去・埋戻し事例について紹介する。

２．Ｒｅキューブモールの概要

筆者らは、シールドで構築されたトンネルの撤去・埋戻しを非開削で行う「ＢＦ(バックフィル)シールド工法」の開発・実用化を進めてきた[1]。Ｒｅキューブモールは、シールドよりも小径の推進工法や開削工法で布設された管きょの撤去技術として開発したものである。

Ｒｅキューブモールは、図－１に示すようにアーマー工法、ルーパー工法、イーター工法の３種類の撤去方式により構成され、管きょの種類や形状等、様々な施工条件に適応できる。また、管きょ撤去後の利用目的に応じて、原地盤に復旧する「埋戻し」、または新設管に入れ替える「改築」を選択できるシステムになっている。Ｒｅキューブモールの特徴を以下に示す。



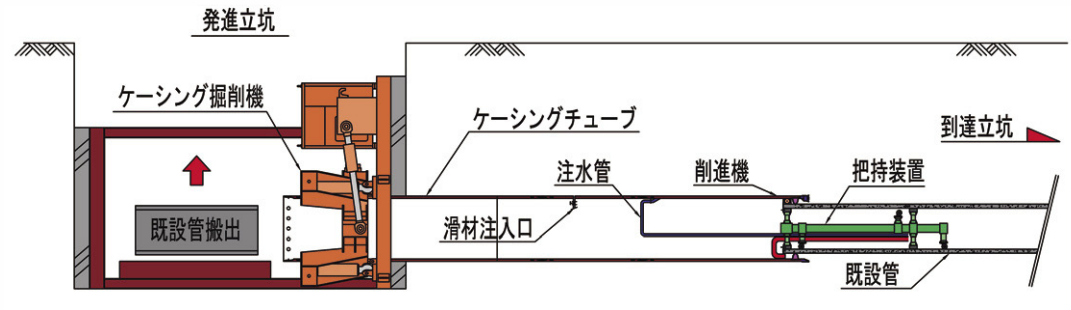
図－１　Ｒｅキューブモールの体系

① 非開削工法のため、道路交通や周辺環境への影響を低減できる。
② 豊富なバリエーションを有するため、多種多様な施工環境に対応できる。
③ 老朽化した管きょを新設管に交換できる。
④ 高機能化、大容量化に伴う拡径改築が可能である。
⑤ 下水道など管きょを供用しながらの流下施工が可能である。

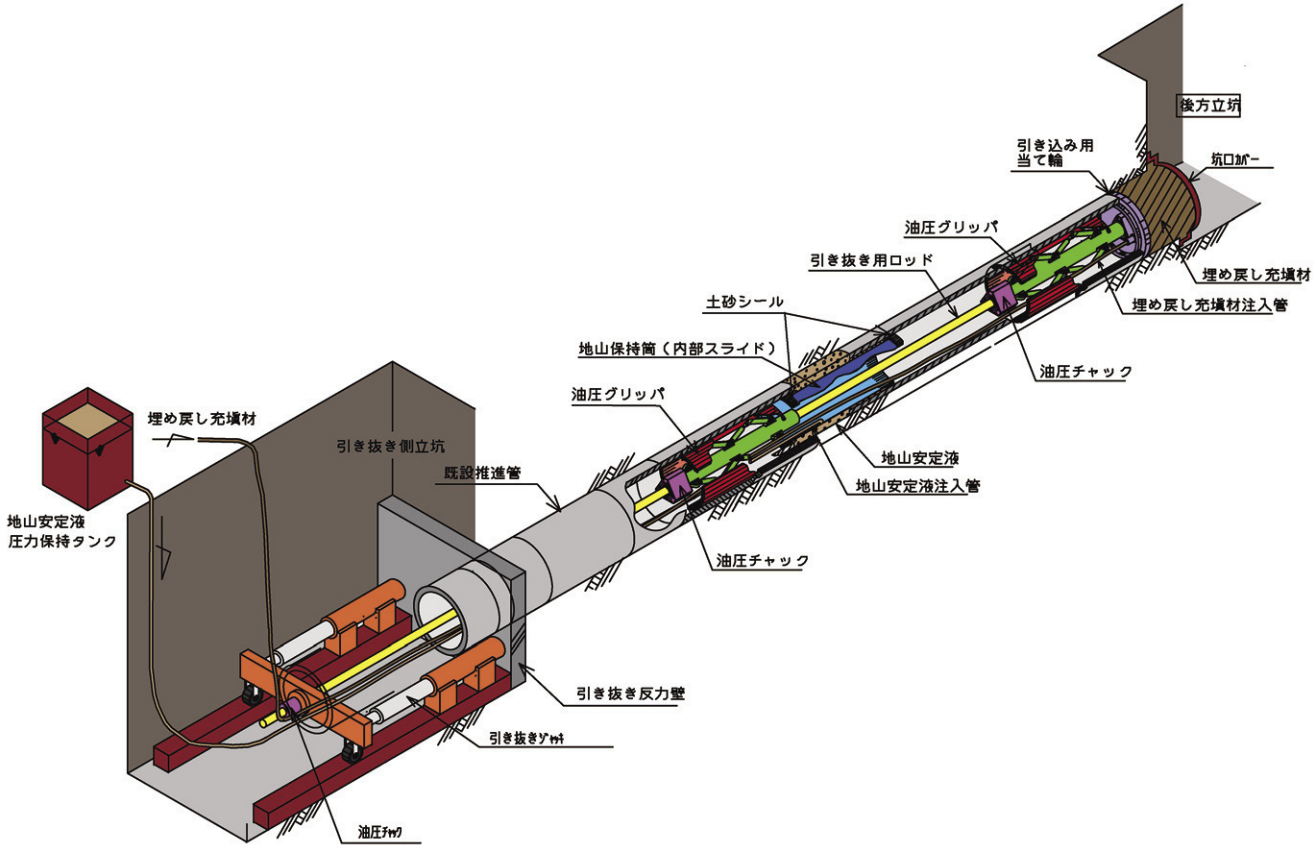
２－１．アーマー工法（さや管方式）

本工法は、ケーシング掘削機を発進立坑に設置し、ケーシングチューブ（さや管）を水平方向に圧入して管きょの外周地盤を掘削しながら、順次ケーシング内の管きょを撤去して、対向立坑に到達させるものである。図－２にアーマー工法の設備概要を示す。

既設管きょ撤去後、埋戻し用隔壁を装着し、ケーシングチューブを引抜いていくことで、埋戻しに対応し、ケーシングチューブ内に新設管を布設することにより、



図－２　アーマー工法 設備概要図



図－３　ルーパー工法 設備概要図（埋戻しタイプ）

改築に対応する。

２－２．ルーパー工法（引抜き方式）

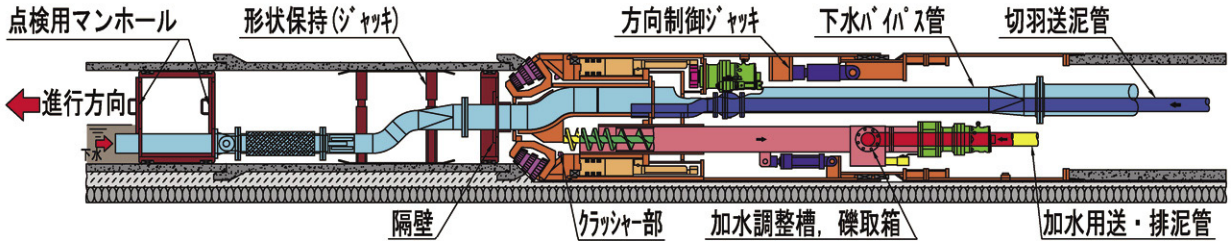
本工法は、管きょ内に複数の油圧グリッパを配置して、交互にグリッパで管きょを把持しながら、管きょ周面の過大な付着抵抗力を分散して、管きょを引抜くものである。引抜きに伴って生じるグリッパ後方管の空隙には、管内に設けた地山保持内筒から周囲に安定液を注入し、地盤の安定に必要な状態に加圧保持する。

管端部に埋戻し隔壁を装着することで、埋戻しに対応し、対向立坑に元押し装置を設置することにより、撤去と同時に新設管を布設する改築工法に対応する。図－３にルーパー工法の設備概要（埋戻しタイプ）を示す。

２－３．イーター工法（破砕方式）

本工法は、泥水によって切羽の安定を図りながら、密閉型掘削機により管きょをメカニカルに切削し、破砕ガラ等を流体輸送方式により坑外に搬出する。

掘削機の推進方法によって牽引式と元押し式に分け



図－４　イーター工法 設備概要図（改築タイプ）

られ、撤去埋戻しには牽引式、撤去改築には元押し式を採用する。図－４にイーター工法の設備概要（改築タイプ）を示す。

２－４．適用範囲

Ｒｅキューブモールによる既設管きょの種類、健全度、施工区間の地盤条件、断面形状、施工延長、線形等の適用範囲を表－1 に示す。

３．施工事例

ここでは、ルーパー工法による推進管の撤去・埋戻しについて紹介する。当工事は、約半年前に推進工法で布設した管きょについて、発進立坑側の幹線道路下を占有する約 10m 区間を撤去し、埋戻すものである。

３－１．工事概要

工事場所　　：　東京都杉並区
既設管種　　：　推進管　呼び径 1350mm、L=2.43m
引抜き距離　：　9.72m（推進管 4 本）
土　被　り　：　5m
土　　質　　：　砂礫

３－２．引抜き力の検討

管の最大引抜き力 Fは、次式により算出した。

$F = S \cdot L \cdot R =$　670 (kN)

ここに、S：管外周長　　5.0m
L：管引抜き長　　6.8m
（グリッパを設置する坑口から３本目の管端部まで）
R：管周面抵抗力　19.6kN/m^2
（過去の経験値などからの想定値）

表－１　適用範囲

	アーマー工法	ルーパー工法	イーター工法
概　要	さや管による２工程方式	無排土による引抜き方式	密閉型掘進機による破砕方式
管　種	推進管	推進管	推進管を除く管渠
管の状態	劣化した管渠にも対応	比較的健全な管渠	劣化した管渠にも対応
地　盤	軟弱土、普通土	普通土、硬質土	広範囲な土質に対応
管　径	400～1350mm	800～3000mm	800～3000mm
延　長	60m程度	長距離施工可能	長距離施工可能
線　形	直線区間	曲線区間可能	曲線区間可能

また、グリッパの押付け力 Pは、次式により算出した。

$P = F / \mu$　＝1120 (kN)

ここに、μ：摩擦係数　　0.6　（想定値）

３－３．使用機器

管きょ内にグリッパ装置と地山保持内筒を各１台配置し、立坑内に牽引ジャッキ装置、地上部に埋戻し注入プラントを設置した。使用機器を表―２に、坑内の機器配置を図－５に示す。

３－４．計測管理

推進管引抜き作業中は、危険防止のため坑内への立入

表－２　使用機器

機器名	仕　様	数量
油圧グリッパ装置	φ1250mm 最大押付け力 3920kN	1 式
地山保持内筒	スライド量 500mm	1 式
牽引ジャッキ装置	ジャッキ 4 本 総牽引力 3920kN	1 式
埋戻し材注入プラント	二液型可塑状注入材料	1 基
エアコンプレッサ	0.4kw	1 台
安定液用タンク	$1m^3$	1 基
ＰＣ鋼棒、カプラ	φ36mm	1 式

りができないので、監視カメラや変位計等の計器を設置し、パソコンに表示・記録する計測管理を行った。表－３は計測項目である。

表－３ 計測項目

計測項目	機　器	点数	計測範囲
牽引ジャッキ圧力	圧力計	1	0～100Mpa
管引抜き量	変位計	1	0～1000mm
グリッパジャッキ圧力	圧力計	1	0～100Mpa
地山保持圧力	土圧計	1	0～500Kpa
内筒スライド量	変位計	1	0～1000mm
埋戻し材注入圧力	圧力計	1	0～1MPa
埋戻し材注入流量（主材）	流量計	1	100ℓ/min
埋戻し材注入流量（硬化材）	流量計	1	10ℓ/min
坑内監視	ﾈｯﾄﾜｰｸｶﾒﾗ	1	

３－５．施工手順

推進管撤去埋戻しの手順を以下に示す。

① 隔壁、牽引アンカーの設置

撤去する推進管の先端と残置する推進管の終端の接合部には、各々鋼製の特殊継手が設置されている。この特殊継手に鋼板を溶接して隔壁とし、埋戻し材注入孔を設置する。牽引アンカーは、特殊継手に溝形鋼を２本背中合わせに溶接したものである。

② 内筒、グリッパ装置、ＰＣ鋼棒の設置

地山保持内筒とグリッパ装置を管内の所定の設置する。ＰＣ鋼棒は放射状に４ヶ所設置し、カプラにて接続する。写真－１は地山保持内筒、写真－２はグリッパ装置である。

③ 内筒のエアパッカー拡張、安定液充填

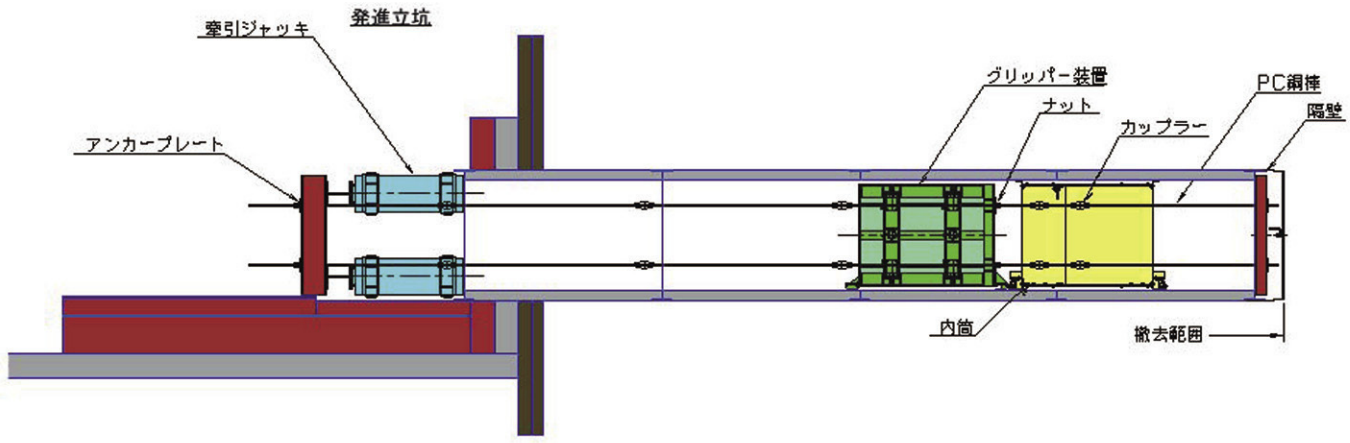
エアコンプレッサにより、地山保持内筒の隔壁側と立坑側の止水用エアパッカーを拡張後、立坑上のタンクで作泥した安定液をエアパッカー間に充填する。

④ グリッパ作動

グリッパを作動し、摩擦板を推進管内面に設定した荷重で押付ける。押付け力は 1100kN とした。

⑤ グリッパ装置牽引

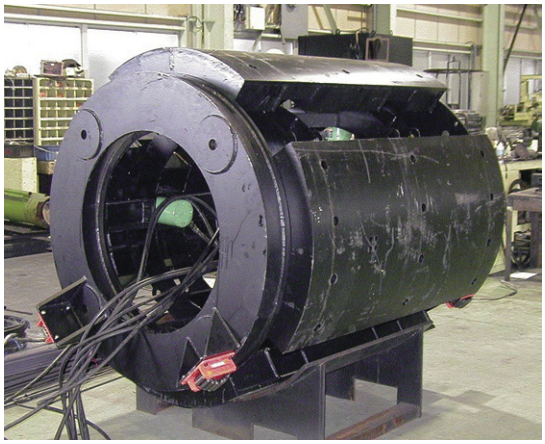
立坑のジャッキによりグリッパを牽引する。１サイクルの引抜き量は、内筒のスライド量(500mm)から



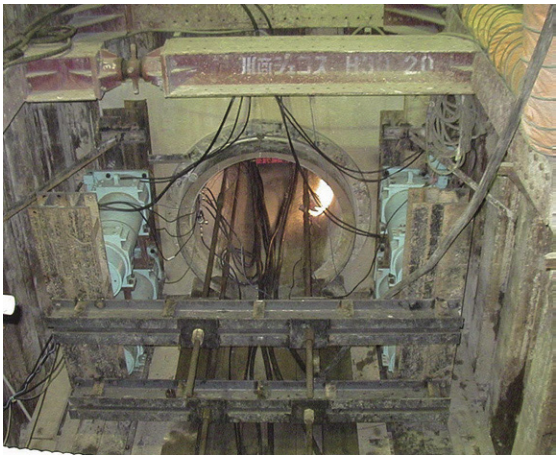
図－５　坑内機器配置図



写真－１　地山保持内筒



写真－２　油圧グリッパ



写真－３　引抜き状況

400mm とした。写真－３は引抜き状況である。

⑥ ＰＣ鋼棒盛替え

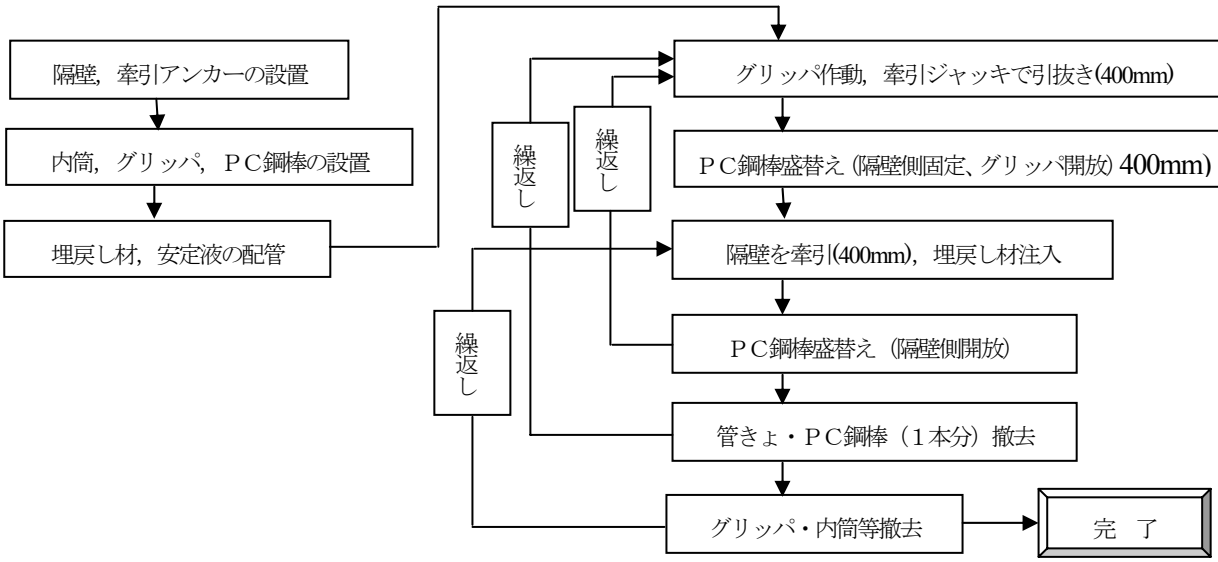
隔壁側から牽引するため、グリッパ装置のナットを緩め、ＰＣ鋼棒の盛替えを行う。

⑦ 隔壁側牽引、埋戻し材注入

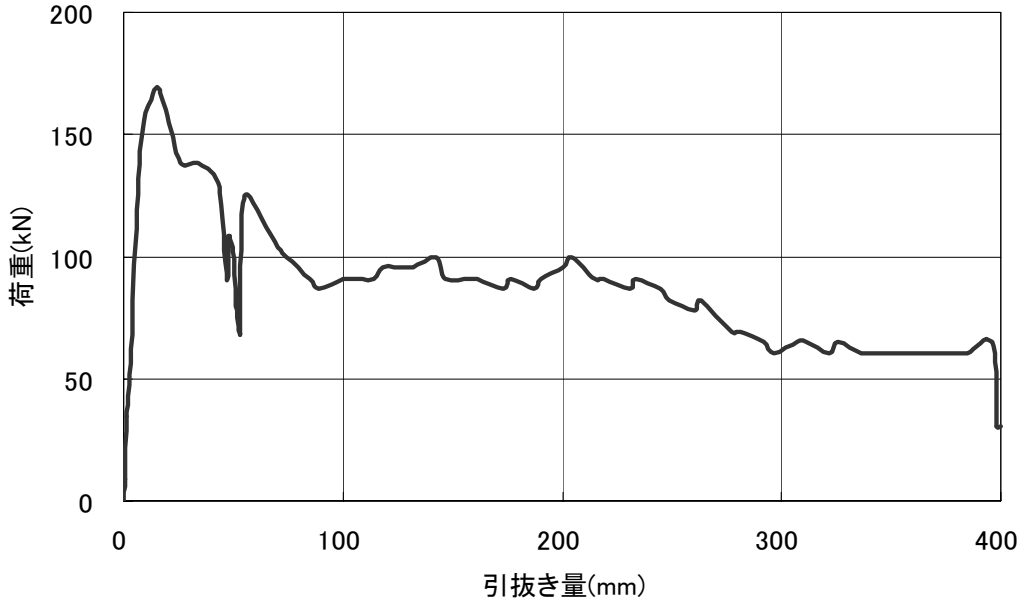
隔壁側から 400mm 牽引すると同時に、地上プラントから隔壁の注入孔へ埋戻し材を注入する。埋戻し材は、注入圧力と注入流量により管理する。

⑧ ＰＣ鋼棒盛替え

グリッパ側から牽引するため、隔壁側のナットを緩め、ＰＣ鋼棒の盛替えを行う。



図－６　施工フロー



図－７　初期引抜き力変化図

以下、グリッパ装置からの牽引、隔壁側からの牽引及び埋戻し材注入を繰返すことで推進管を引抜く。図－６は施工フロー図である。

３－６．施工結果

グリッパの押付け力を 1100kN に設定して約 50mm 引抜いてみたが、グリッパに滑りは生じなかった。このときの初期引抜き力（最大値）は、170kN であった。その後 400mm まで引抜き、隔壁側にＰＣ鋼棒を盛替え、埋戻しながら牽引した。図－７に初期引抜き力の変化を示す。引抜き力は徐々に低下し、70kN 以下で１本目の管を引抜くことができた。最大引抜き力は、検討時の 1/4 であった。２本目以降は、引抜き力が低下していることから、隔壁側から直接牽引して推進管を引抜くことができた。

今回のルーパー工法による施工では、撤去距離が短いものの、計測管理システムにより、引抜き状態を坑外から監視でき、グリッパや内筒の機能などについて有効なデータを得ることができた。その一方では、推進管特有の狭い坑内において、ＰＣ鋼棒の盛替え作業等を効率よく行うことが課題として残された。今後、長距離施工やφ1000mm 以下の管きょに対して、効率的な施工システムを構築していく予定である。

４．おわりに

Ｒｅキューブモールは、地下空間の有効利用を図るために開発した技術である。下水道などのインフラ整備が新しい施設の建設から、既存施設の維持管理に移行しつつある現状において、補修・補強だけでは対応できないような劣化が著しい管きょの改築、布設されたその場所で高度化へ対応できる拡径改築、新たな地下利用計画で支障となる管きょの撤去のほか、様々なライフラインの再構築にも利用可能な施工法である。

今回の施工で得た知見をもとに、今後も、施工システムの改良を行い、非開削による既設管撤去埋戻し・改築技術として社会のニーズに応えられるようにしたい。

<参考文献>

(1) 石田喜久雄・鈴木明彦他、バックフィルシールド工法の開発、土木施工、Vol.33、No.8、山海堂、1992.8.

20. TBM 掘削全断面鉄道トンネル高精度急速施工

清水建設㈱：○藤井　攻、茅野　浩一、小野　啓二

１．はじめに

ＴＢＭ（Tunnel Boring Machine）とは機械制御により掘削を行う全断面トンネル掘削機をいい、主として山岳トンネルにおいて硬岩地山の機械化掘削のためにこれまで開発が進められてきた。ＴＢＭ工法は 1960 年後半から日本に導入されていたが、日本の岩盤地質が不均一であるなどの理由によりその普及は伸び悩んでいた。その後、地質が複雑で変化の激しい状況を特に意識したＴＢＭ及び支保方法の開発、改良、改善が進み、ＴＢＭ工法の地盤に対する適用性の拡大と信頼性の向上、ならびに急速施工性によって再び施工件数が増加し始めた。

用途別に見ると施工実績の約 8 割が上水道、下水道、水力発電用導水路などの水路トンネルであり、道路・鉄道トンネルにおいてもすべて導坑掘削での実績である。

本論文で報告するトンネル建設工事は国内では初めてとなる TBM 掘削による全断面の鉄道トンネル建設工事であり、主に現場で使用した機械設備の仕様を説明し、掘削の状況・掘削管理方法など説明する。

本施工では人力補助の低減、作業環境の改善を目的とし、設備の機械化、自動化の検討を行い、高精度急速施工を実施したものを報告する。

２．工事概要

国土交通省は、昭和 24 年に策定された利根川改訂改修計画の一環として、関東首都圏におけ

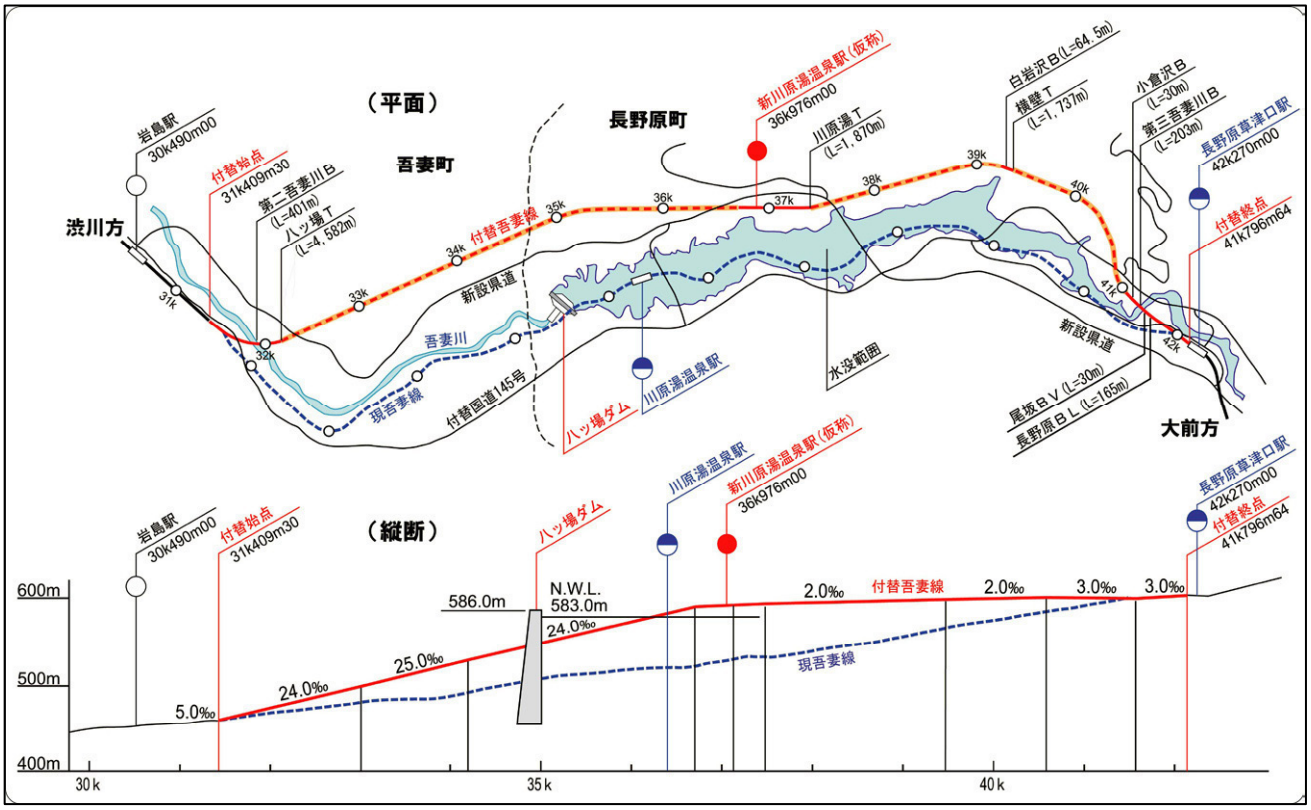


図-1 吾妻線付替工事　全体概要図

る利根川流域の洪水調整と水資源開発を目的としたダム群の建設を計画実施してきた。その一つに八ッ場ダム建設があり、これにより JR 吾妻線は川原湯温泉駅を含む約６ｋｍの区間が水没することになった。そこで国土交通省による JR 吾妻線の機能補償として、岩島駅から長野原草津口駅間の約 10.4ｋｍの路線付替え工事に着手することになった。図-1 に吾妻線付け替全体概要図を示す。

本工事はその路線付け替え工事の一部として発注された鉄道トンネル工事としては国内初めてとなる TBM 掘削による全断面の鉄道トンネル建設工事である。以下に工事概要を示す。

工事名称	吾妻線岩島・長野原間付替八ッ場T新設工事
発注者	東日本旅客鉄道株式会社 上信越工事事務所
施工者	清水・西松・間　共同企業体
工事場所	群馬県吾妻郡吾妻町・長野原町
工期	平成11年11月30日～平成18年1月18日
トンネル延長	4124m(TBM掘削)
掘削外形	φ6820mm
掘削方式	TBMによる全断面機械掘削

３．機械設備

本工事で使用する機械設備の構成はトンネル掘削を進める TBM、吹き付け・ロックボルト施工を行う TWS、掘削したズリを坑外まで搬出するための延伸ベルコン、換気設備、給水設備等などから構成されている。以下、主な設備について説明する。

(1) ＴＢＭ掘削機

地山は全般に固結度も高く掘削時に坑壁からの抜け落ちや緩みの増大等の可能性が小さく良好な地山と考えられることから TBM はｵｰﾌﾟﾝﾀｲﾌﾟを考案した。ＴＢＭの外観を図-1 に示す。

しかし、ルーフサポートのないオープン型の TBM の場合、切羽近傍での支保が可能で地山の緩みを即時改良し最小限に抑える事ができる反面、肌落ちや小崩落に対する防護がなく、危険を伴う。そこで、必要最小限の長さのルーフサポートを取付けることで、駆動装置などの主要機器の保護と崩落に対する作業の安全が図れ、かつオープン型のメリットである切羽近傍での地山補強を可能とした。



写真-1　TBM 外観

ＴＢＭの各名称を図-2 に示す。

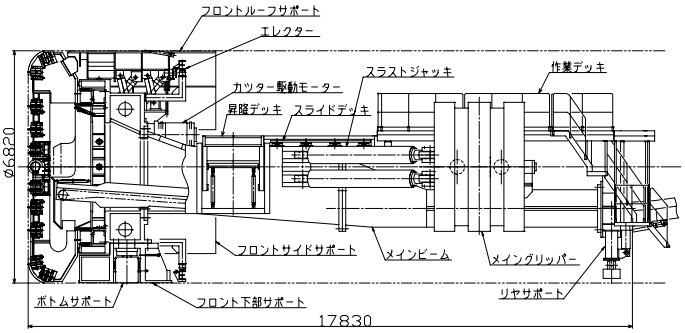


図-2　ＴＢＭ各部名称

カッターヘッドはカッター間隔を小さくしカッターを密に配置できるようドーム形状とし、最外周のゲージカッターは交換頻度を低減する為、カッターの同一軌跡上に 2 個のカッターを配置する「2 パス」とした。

カッターは 17 インチシングルカッタを 38 個、センター部 8 個とゲージカッター2 個を取り付けられるようにした。

カッターリングの形状は磨耗交換時まで一定した刃先幅（貫入幅）を保つことができる平型カッターとした。

カッターリングの材質としては実績と経済性から SNCM（ニッケル・クロム・モリブデン鋼）を使用した。

カッターサイズについては、通常、比較的硬質で均一な岩盤ではカッター荷重を大きくしてカッター貫入量を大きくしたほうが効率のよい

掘削が出来る。カッターの最大荷重は内部のベアリングサイズなどによって決定されるため、出来るだけ大型のカッターを装備することが望ましいが、カッター交換時の作業性や掘削径に対するカッターヘッド面盤上の取付けスペース、岩盤の圧砕に必要なカッターピッチなどを考慮し、今回は 17 インチカッターとした。カッターの交換方法はカッターヘッド内部から交換可能な「内取付け方式」とし、不良地山部でも安全に作業ができ、面盤からの出代を最小限にして面盤の山留め効果が期待できるようにした。

カッターフェイスは掘削ズリを効率よく取り込める様に出来るだけ大きくとることが望ましいが、不良地山での切羽崩落を防ぐ山留めとしての機能を考慮し、面盤型とした。スリット幅はカッターピッチから想定される礫径から 200ｍｍ程度とした。フェイススクレーパ部の開口は粘土質等に対応できるよう 2 種類の開口率を選択できるようにし、開口率はスリット調整板を取付けた状態で 13%、スリット調整板なしで 18%とした。

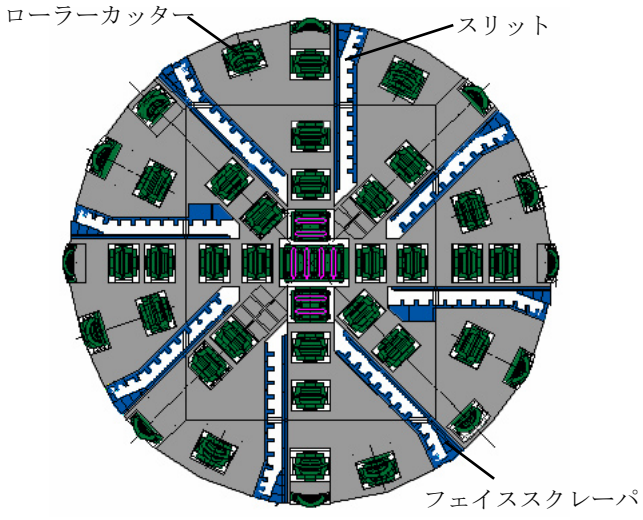


図-3　カッターフェイス

カッター支持方式はセンター部に空間が確保され、排土装置が設置でき、カッターヘッドへのアクセスが可能な周辺支持方式とした。カッターヘッド支持に使用される軸受けは負荷能力の高い 3 ローラ型軸受けを採用した。図-3 にカッターフェイスを示す。

カッターヘッドの駆動方式はインバータ制御による電動モータ駆動とし、カッタートルクはカッターによる破砕掘削トルク、カッターヘッドの摩擦抵抗、掘削ズリの掻き上げトルクなどから決定した。カッター回転数は純掘削速度と密接な関係にあり、カッター貫入量が一定であれば回転数が高いほど、純掘削速度は向上するが、カッターのベアリング、シールの寿命、ズリ搬出量などから円周速度の限界があり、今回は 0～6 回転までの可変速とした。

スラストジャッキ推力は掘削に必要な推力（カッター許容荷重）、本体部摩擦抵抗、後続台車の牽引抵抗などを考慮して決定した。

推進反力となるメイングリッパの推力は所要掘削推力に余裕をもたせ、かつ、トンネル壁を傷めない様グリッパシューの接地面積を大きく取り、低接地圧化を図った。

表-1 にＴＢＭの仕様を示す。

表-1　ＴＢＭ仕様

形　　式		オープン型
掘　削　径		φ6.82m
全　　長		約 92.8m
重　　量		約 5500ｋN
総　出　力		約 2300KW
カッター		
	取付方式	内側取付方式
	カッタ径	17 インチ
	取付個数	48 個
カッター駆動装置		
	電動機	315KW×6 台
	トルク	3071/6142ｋN･m
	回転数	0 ～6rpm
推進装置		
	総推力	12142ｋN
	ストローク	1800ｍｍ
	伸長速度	MAX　100mm/min
メイングリッパー		
	グリッパー力	35280ｋN
	張り出し量	250ｍｍ
	接地圧	3.46Mpa

後続台車は門型構造とし、作業員通路とメンテナンス空間、およびバッテリーロコの運行確

保を図った。トンネル掘削断面と後続台車の位置関係を図-4 に示す。

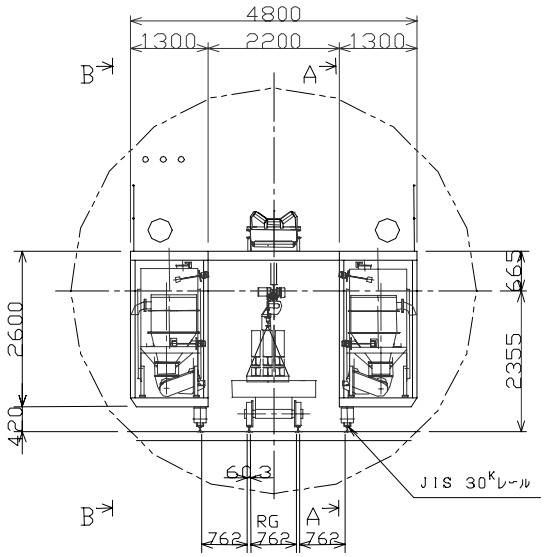


図-4　掘削断面と後続台車の位置関係

次に後続台車の諸元を表-2 に示す。

表-2　後続台車諸元

No.1 台車（左）	No.1 台車（右）
吹付けプラント	吹付けプラント
No. 2 台車	No. 2 台車
泥水タンク	運転席
No. 3 台車	No. 3 台車
休憩室	インバータ制御盤
No. 4 台車	No. 4 台車
油圧ポンプユニット	起動器盤
No. 5 台車	No. 5 台車
集塵機用水タンク 集塵機	トランス 集塵機
No. 6 台車	No. 6 台車
コンプレッサー	動力ケーブル
No. 7 台車	No. 7 台車
計装ケーブル	ニーブレス組立台車
No. 8 台車	No. 8 台車
長尺風管カプセル	ｱﾄﾞﾊﾞﾝｼﾝｸﾞﾃｰﾙﾋﾟｰｽ

その他、本機にはサイドサポートに載荷試験ジャッキを左右 1 基づつ装備した。これにより掘削時を除いて、常時ジャッキの押し付け力による地山変位量を測定し、岩盤評価するための「岩盤載荷試験」を行い、地山評価に役立てた。

(2) TWS（トンネルワークステーション）

TBM の本体から後続台車間でトンネル掘削に必要な機械を集約化し、施工の急速化を図れるような設備を搭載した。図-5 に示す。

① 前方マンケージユニット

ルーフサポート直後の天端 120 度範囲の吹付け作業を行う為のマニュピレータ部、作業員が乗り込み足場とするケージ部、リング支保工を組み立てる把持装置部から構成されている。

② 前方穿孔機ユニット

上半 120 度範囲のロックボルト打設、及びフォアポーリング穿孔に使用する。

③ 後方穿孔機ユニット

後方での下半ロックボルトの打設、及び前方でのフォアポーリング穿孔を行う。このユニットは唯一作業床の前方から後方まで移動可能な台車であり、上半ロックボルト打設時には前方まで移動し、2 台のドリフタでロックボルトの打設が可能となっている。また、このユニットには切羽前方探査装置を装備しており、切羽前方地山を穿孔し、その穿孔速度や打撃圧力等のデータをパソコンに取り込み掘削エネルギー、破壊エネルギーなどを算出しそのデータから地山の硬、軟や破砕帯等脆弱地山の有無を予知、判定できるようにした。

④ 後方マンケージユニット

後方でのロックボルト打設時の足場として装備した。

⑤ 吹付けロボット

今回、急速施工を目的とし新規開発したもので、この吹付けロボットは TBM メインビーム上の作業床に設置された走行用レール上を走行し、吹付け位置まで移動した後、本体を 90 度回転させて吹付けノズルをガイドリングに沿って移動させ、トンネル内全周を吹付けするものである。

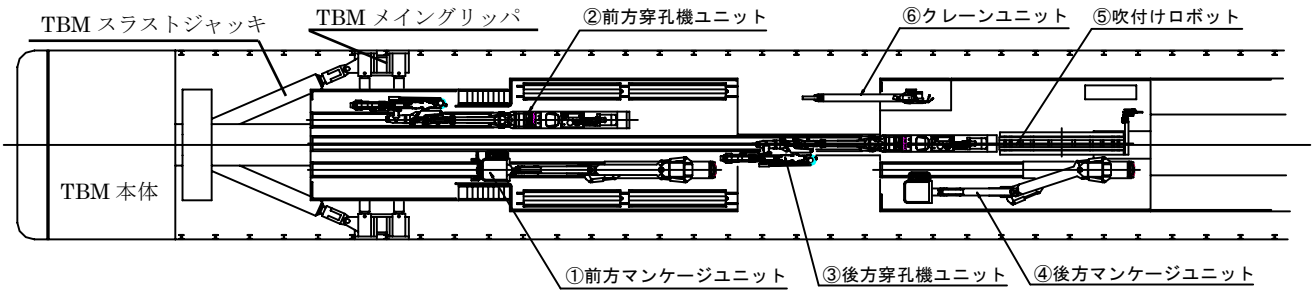


図-5　TWS（ﾄﾝﾈﾙﾜｰｸｽﾃｰｼｮﾝ）

このロボットの特徴を以下に示す。

・TBM 掘削断面内周面（360 度）への吹付けが可能である。
・特別な足場を用意する必要もなく、ガイドリングの旋回中心と掘削断面の中心を一致させることで、吹付け面とノズルの距離を一定に保ち定量的で均一な品質の吹付けコンクリートによる支保を実施することが可能となる。
・吹付けロボットを使うことで人力補助の低減が可能となる。

支保作業をしていないときにはガイドリングを架台よりも上方に収納した状態にして格納しておけるので、その他覆工作業のための作業スペースの確保、見通しの確保が可能となる。

吹付け機の設置状況を写真-2 に示す。

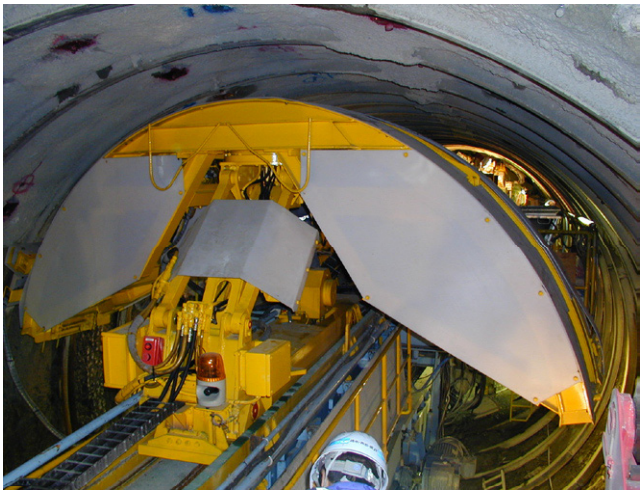


写真-2　吹付けロボット

吹付け範囲を図-4 に示す。

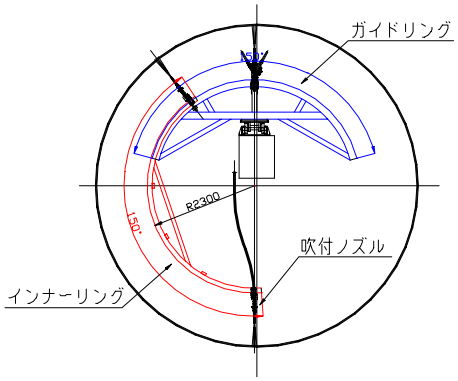


図-4　吹付け範囲図

インナーリングはガイドリング内を通過し反対側にも移動できるので、全周の吹付けが可能となる。

⑥ クレーンユニット

バッテリーロコで搬入された鋼製支保工およびロックボルト､モルタルなどの資材を TBM 作業床上に引き上げる為に使用する。

３．掘削管理

本論文では人力補助の低減、作業環境の改善を目的とし、設備の機械化、自動化の検討を行い、高精度急速施工を施工するために掘削機械の検討したが、掘削するトンネルの掘削精度が最も重要である。ＴＢＭが計画線上を正確に掘進するためには、地質の影響等により変化する掘進姿勢と掘進方向の差異（ＴＢＭの挙動特性）を考慮し、適正な姿勢で掘進する必要がある。

ＴＢＭが岩盤を掘進中、機械の特性、測量の誤差等で偏位、偏角の差異が生じた場合、無理のない掘進軌跡になるようにリアルタイムに本体の方向制御を行わなければならない。

また掘進中は、地質の変化、機械の特性等により計画線から離脱する事がある。操作室に姿勢監視および制御装置が配置されており、リアルタイムに方向・姿勢制御ができるようなシステムを検討した。

ＴＢＭ掘進時の掘削精度を確保するためには、ＴＢＭを常に制御し、計画された線形を保つようにしなければならない。また、客観的な地山評価を行うためにも以下のシステムを導入し掘削管理を行った。

今回、採用したシステムの概要図を図－９に示す。

TBM 掘削の測量管理には自動追尾型のトータルステーションを使用し、マシンのピッチング、ローリング、ヨーイング、水平偏差、垂直偏差をリアルタイムに測量し TBM 運転席で掘削機の位置が把握できようにし、掘進精度の確保に役立てた。同時に片番 1 回の手測量も同時に行い測量確認を行った。トータルステーションの設置状況を図－１０に示す。

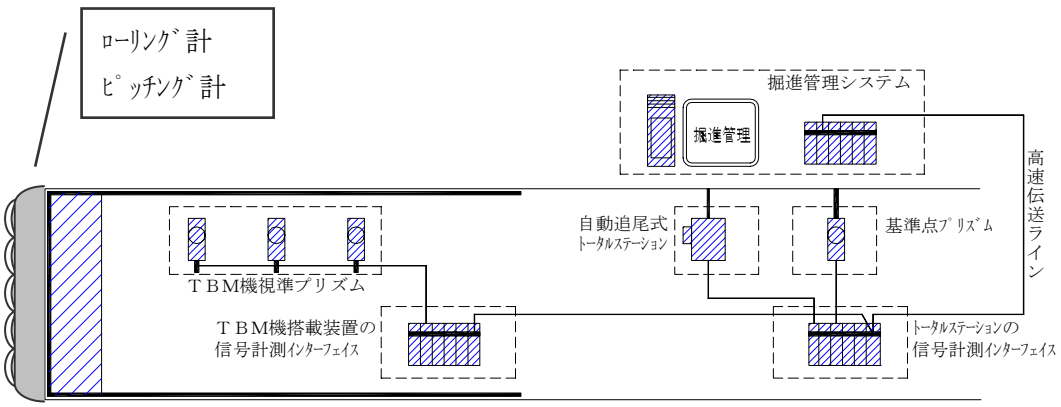
４．おわりに

本トンネルの掘削計画での蛇行許容量は水平、垂直ともに±70㎜とし、20㎜を超えた時点で方向修正のジャッキ操作を行うこととし、多種の情報を基に正確な掘削を行う事が出来ている。

今回はＴＢＭの方向・姿勢制御と自動測量システムについて述べたが、これらの掘削管理は地山観察と施工データの収集、地山性状から掘進までにいたるまでのＴＢＭの機械データを集積し、適正な機械性能で発揮させ施工していることを付け加えておく。



図-１０　トータルステーション配置状況



図－９　自動測量システム概要

21. ボールスライダー工法（重量物移動工法）の開発と実用化

佐藤工業㈱：○松井　淳一
㈱エス・エム・ケイ：渡辺　実
㈱浅井：上原　俊明

１．はじめに

ボールスライダー工法（以下、本工法という）は、鋼球を上下でエンドレスに２列配置したボール式重量物移送装置（ボールスライダー）を用いて重量物の直線・曲線・回転移動を行うものである。

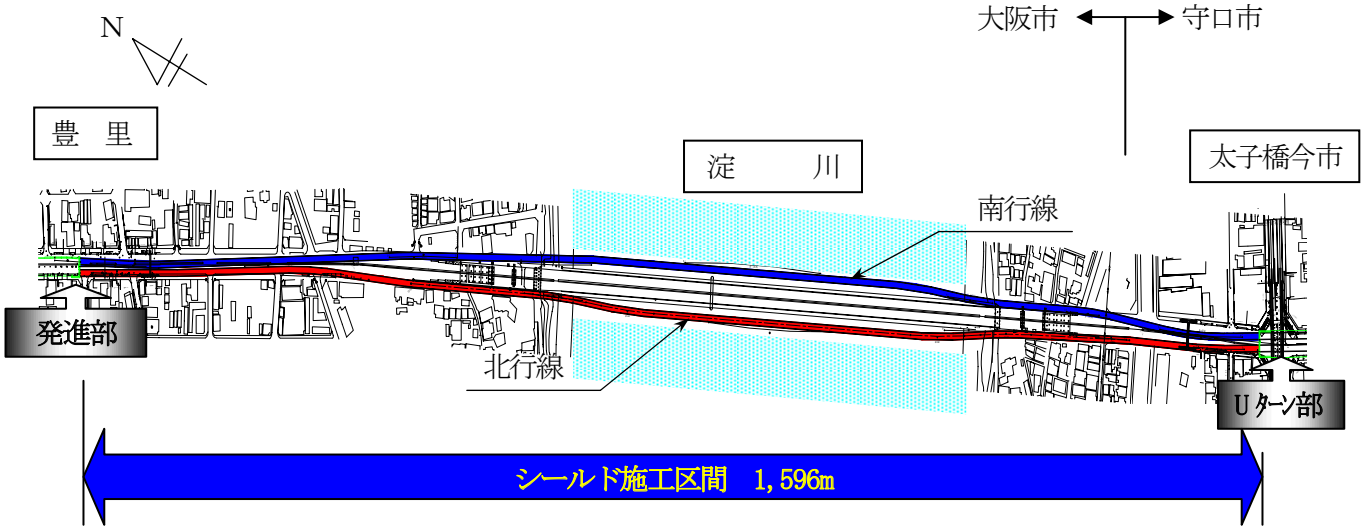
シールドが立坑内に到達した後、再発進させることの多い地下鉄のシールド工事では、シールドを立坑内で移動・Ｕターンさせることになる。従来、シールド移送は、ローラー式重量物移送装置やエアキャスター方式を用いるのが一般的であるが、ローラー式重量物移送装置は、直進性は非常に優れているものの、回転移動には不向きであり、Ｕターンさせる場合は、数度の盛替えが必要であった。ボールスライダーを用いることにより、その欠点を解決し、盛替えなしでシールドの移動・Ｕターンを短時間で行うことが可能となった。

本報文は、本工法の概要および大阪市営地下鉄８号線工事における泥水加圧式シールドφ5,440（約 170ｔ）を8m移動し、180° 回転させた施工実績を紹介するものである。

２．工事概要

高速電気軌道８号線（２工区）（以下、本工区という）は、駅部の豊里停留場（仮称）の南端から淀川を横断して太子橋今市停留場の北端に至る約1.6kmをφ5440の泥水加圧式シールドマシンにて、単線折り返し方式により約3.2kmを掘削する工事（以下、本工事という）である。

シールドトンネルが通過する地盤は、発進部ならびに到達付近では、沖積砂礫層（Amg）と沖積粘性土（Amc）からなり、掘進部分の大半の土質は、想定最大礫径φ160mm～200mmの洪積砂礫層（Tg）とＮ値20～28程度の洪積粘性土（Oc）とＮ値60以上の砂質土との互層からなる。自然地下水位はGL-2～3m程度で、土被りは15～31mである。また、淀川横過部分の地下水圧は、0.38Mpa程度である。中量型鉄道では最急勾配の50‰の縦断勾配となっている。シールドマシンは掘進延長が約1,600m×2と比較的長距離であるため、耐久性向上を反映した構造としている。

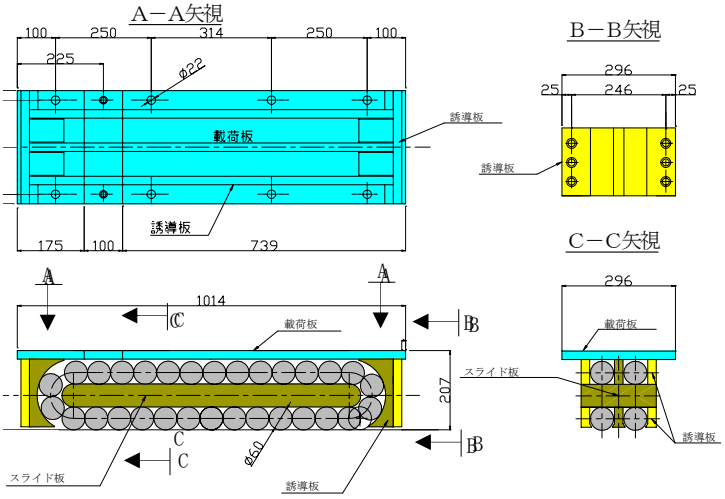


図－１　シールド平面図

3．本工法の概要

(1) ボールスライダーの構造

ボールスライダーの単体構造は、鋼製フレーム内に鋼球（材質：高炭素クロム軸受鋼鋼材）をキャタピラ状に収納したものであり、小型なので取り付けも容易に行える。（荷重試験の結果、本工事ではφ60㎜ の鋼球を使用する。）



図－２　ボールスライダー構造図

(2) ボールスライダーの特徴

ボールスライダーの特徴として、従来のローラ式重量物移送装置と基本概念は同じであるが、滑動させる部分が球状になっていることにより、目的に応じて直進・曲進・旋回ができ、接地面積が小さいため牽引力も軽減できる。また、移送時の騒音・振動がほとんどない。したがって、従来工法と比べ作業性に優れ、環境・安全面においてもさまざまな欠点を解決したものといえる。

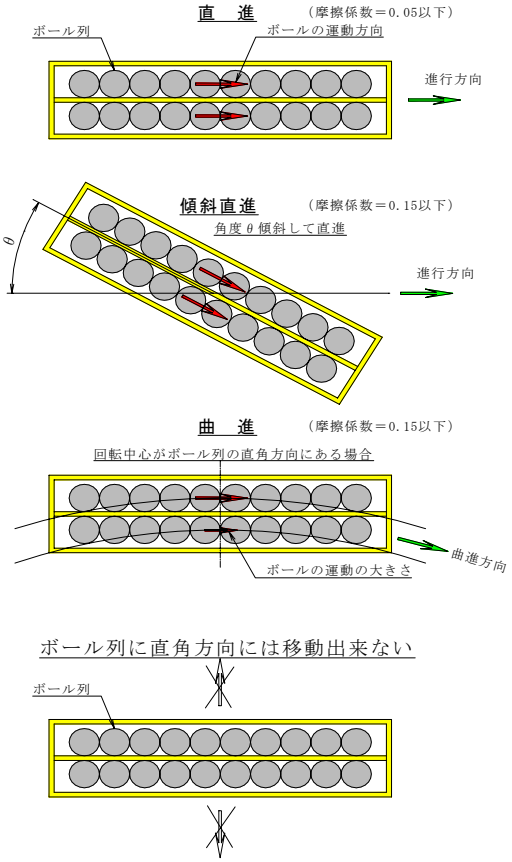
4．本工法採用の経緯

(1) Uターンの施工条件

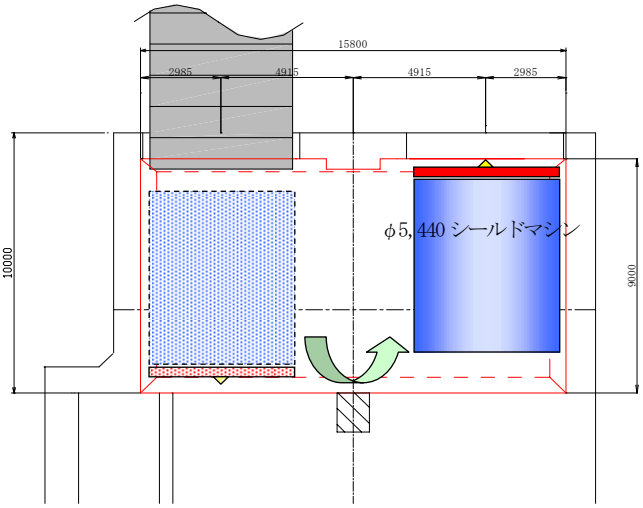
本工事は、北行線をφ5,440 のシールドマシンにて掘進・到達後、南行線の発進位置へ移動およびUターンを行う工事である。

本工区は制約条件上、全体工程が厳しくマシンUターン後の再発進をできる限りスムーズに行うことが要求された。また、Uターン場所として隣接工区が施工を行っている駅部を使用するため、作業スペースは限られており、環境条件には特に配慮が必要であった。

Uターンにおける物理的条件は、以下の通りである。



図－３　ボールスライダー単体の動き（例）



図－４　Uターン概要図

・シールドマシン寸法：φ5,440㎜　L=7,270㎜
・シールドマシン重量：170t
・Uターン立坑寸法：15.8m×9m

(2) Uターン工法の選定

Uターン工法は、上記の施工条件を考慮して選定した。以下の条件を踏まえて比較検討を行った結果を表－1に示す。

条件①（工期短縮）

過大設備による工期遅延を避け、準備工・盛替作業等を極力少なくする。

条件②（施工環境）

隣接工区内での昼夜間作業となるので、騒音・振動等に配慮し安全な作業を行う。

条件③（省スペース施工）

駅部構築中の隣接工区内での作業となり、与えられた作業スペースは限られているため、大型機器等の配備はできない。

表－１　工法比較

工法	条件	評価	
従来工法	①	チルタンク方式の場合、移動・回転を伴う作業においては数度の盛替え作業が生じるため段取りに手間がかかる。	×
	②	エアキャスター方式の場合、大型コンプレッサーを使用するため、夜間作業における騒音が懸念される。	△
	③	エアキャスター方式の場合、コンプレッサー等の大型機器を配備するスペースが必要となる。	△
ボールスライダー工法	①	移動回転が自由自在なため、盛替え作業がない。	○
	②	移動・回転に使用する機器はセンターホールジャッキのみであるため、振動・騒音は発生しない。	○
	③	機器の配備はセンターホールジャッキ用油圧機器、反力材を取り付けるための電気溶接機のみである。	○

上記の結果、本工法は、本工区の条件に対して、総合的に適していると判断できる。

(3) 試験施工

本工法は、今回が初の施工となるため、試験施工を行いその適正を確認した。

①試験目的

・敷き鉄板上にて、直進・横移動・回転が可能なことを確認する。

・敷き鉄板上で荷重の変化に対し直進・横移動・回転それぞれのころがり摩擦係数がどの程度の数値を示すか計測する。

・敷き鉄板に、荷重の変化に対し、どの程度の窪みができるか計測を行う。

・鋼球の大きさおよび個数に対する荷重の適応範囲を求める。

②試験方法

・架台の下に鋼球φ50.8㎜のボールスライダーを４基、中心に対して45°方向に配置し、油圧ジャッキにより移動させ、その作動圧力を計測することによって抵抗を求める。

・荷重は、100ton をかける。



写真－１　試験状況

③試験結果

直進および回転状況は、鋼球通過後の鉄板に0.3㎜ 程度の窪みができたが、動作は良好であることが確認できた。また油圧ジャッキの計測結果より、ころがり摩擦係数は以下の数値となった。

直進移動：0.05 以下

回転移動：0.15 以下

以上の経緯により、本工事においてボールスライダー工法の採用を決定した。

５．施工結果

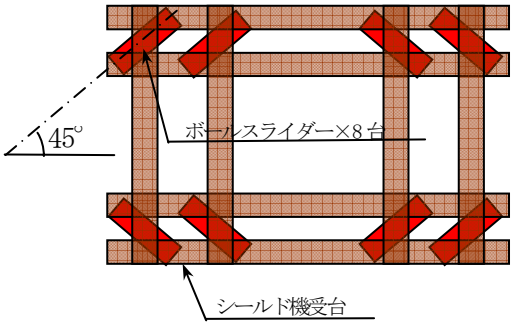
準備工として、到達部の作業床に敷鉄板を敷き並べ、継ぎ目等の段差は2㎜以下となるよう面取りを行い、到達架台を配備した。

以下にU－ンの施工実績を示す。

(1) 施工順序

①シールド機を定着した受台にボールスライダーを回転中心に対して45°に８台設置する。

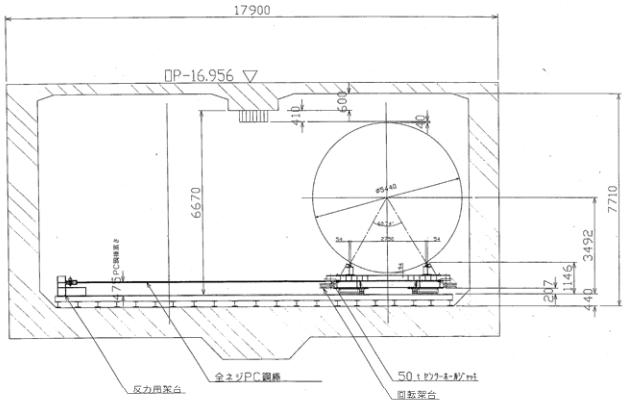
①-1. シールド機を定着した受架台を 100t ジャッキ×6台を使用してジャッキアップする。
①-2. 架台最下段の鋼材を撤去し、ボールスライダーを図－５のように８台設置する。
①-3. ジャッキダウンする。



図－５　ボールスライダー配置図

②シールド機を 8.0m 再発進側へ横移動する。

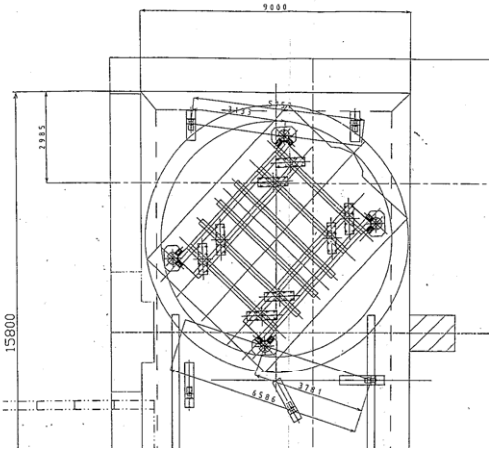
②-1. シールド機受台に回転台、反力側は作業床の鉄板にＰＣ鋼棒固定用のブラケットを取り付ける。
②-2. 受台側にセンターホールジャッキ（50t 仕様、ストローク 200mm）×2 台を設置する。
②-3. ＰＣ鋼棒を設置する。
②-4. センターホールジャッキを伸ばし受架台を移動させる。センターホールジャッキのストロークが 200mm のため、40 ストロークで 8m を移動させる。



図―６　移動概要図

③シールド機を 180° 回転させる。

180° 回転には、４回の反力盛替えが必要となる。回転角度は、1 回目 45° ⇒2 回目 30° ⇒3 回目 60° ⇒4 回目 45° （計 180° ）となり、移動方法は、上記の横移動と同様である。



図―７　回転概要図

④シールド機を 1.73m 再発進側へ横移動する。

再発進に伴う位置決めを行う。移動方法は、②③と同様である。

⑤受架台をジャッキアップし、ボールスライダーを撤去する。

(2) 施工時間

①② : H16.6.16 20:30 ～ H16.6.17 05:00　8.5hr
③④ : H16.6.17 08:30 ～ H16.6.17 17:00　8.5hr
⑤　 : H16.6.17 20:30 ～ H16.6.17 23:30　3.0hr
延べ時間 20 時間

(2) シールド機 170t に対する牽引力　()内摩擦係数
横引時 : 約 17t （0.100）
回転時 : 約 12t （0.071）

上記の結果、シールド機のＵターンは、トラブルもなく非常に効率的に行われ、工期の短縮に貢献したと思われる。また、施工の際の騒音・振動もなく、安全面においても問題ないことがわかった。



写真－２　Ｕターン状況

６．おわりに

今回のＵターンの実績により、ボールスライダーの性能および安全性について期待通りの結果が得られた。

今後、ボールスライダー工法は、大断面シールドＵターン工事をはじめ、地下鉄工事、橋梁工事、トンネル工事等様々な重量物移動工事に適用でき、用途拡大が期待できる。

最後に今回の本工法の採用ならびに施工にご支援、ご協力戴いた大阪市交通局の皆様をはじめ関係各位に深く感謝申し上げる。

22. 世界最大級の泥土圧シールドマシンによる長距離施工について

㈱大林組：○的場　一彦、中山　正夫
長谷川　英崇、野中　圭二郎

1．まえがき

首都高速中央環状線新宿線は中央環状線の東京都目黒区青葉台から板橋区熊野町に至る延長 11ｋｍの路線であり、街路の環状６号線（山手通り）の整備とともに、平成 18 年度の完成を目指して建設が進められている。本工事はそのうち豊島区千早一丁目の立教通り立坑～新宿区上落合二丁目の大江戸線中井駅までの延長約 2,020m 区間（外回り）を掘削外径φ12.04m の世界最大級の泥土圧シールドマシンにより施工するものである。計画路線は山手通りの下を縦断し、鉄道や橋脚基礎等の重要構造物に離隔 1D以内に近接することから切羽の安定保持が重要となる。土質は前半が東京礫層(以下 Tog 層)が主体の礫地盤(想定最大礫径φ300㎜)であり、後半はN値 50 の非常に密な江戸川層砂質土層（以下、Eds 層）と江戸川層粘性土層（以下、Edc 層）の互層となることからビットの磨耗対策が必要となる。

また、シールドの発進基地は、山手通りと立教通りの交差点付近に位置し、道路拡幅予定地内のごく限られた用地しか確保できないうえ、2 本のトンネルを同時期に施工するため、省スペースなシールド設備計画が高速施工の可否を左右することになる。

そこで本工事ではシールドマシンにビット磨耗と礫地盤に対応した大型の特殊先行ビットを配置するとともに、切羽の安定保持と掘削土砂の塑性流動化を確実に行うための攪伴装置を装備した。また、長距離施工、高速施工に対応できる土砂搬出設備、資材搬送設備等を狭隘なスペースの中で設置し、掘進管理として掘削土砂の塑性流動性の状況および排土量管理の精度の向上を図った計測システムを採用した。本報文では、シールドマシン、後方設備を含む地上設備の概要及び本掘進途中までの施工実積について報告する。

2．工事概要

事業概要を図－１に、工事概要を表－１に示す。本工事の特徴とその主要因に関する対策項目について、図－2 に示す。特に大断面土圧シールドマシンで掘進延長の半分を占める礫地盤でのビット磨耗対策、道路拡幅予定地を使用した狭隘なスペースでの地上設備の設置、工期短縮を図るために大量の掘削土砂を効率よく搬出するための土砂搬出設備、切羽を優先とした一次覆工作業に加え同時施工となる床版設置工・内部支保工(発注予定)を考慮した資材搬送等が、円滑でかつ高速施工を実現するうえで重要となる。また、掘削土砂



図－1　事業概要図

表－１　工事概要

工事名称		SJ51工区～SJ53工区(外回り)トンネル工事
発注者		首都高速道路公団
施工者		大林・大豊・東急特定建設工事共同企業体
工期		平成14年3月14日～平成17年2月15日
施工場所		東京都豊島区千早一丁目～新宿区上落合二丁目
工事内容	シールド機径	φ12,020㎜
	トンネル延長	2,018.1m　掘削土量　229,766m^3
	トンネル線形	平面線形：R=500m(左ｶｰﾌﾞ)、R=600m(右ｶｰﾌﾞ)　縦断線形：i=2.5%（最急勾配）
	掘削工法	泥土圧（気泡）シールド工法
	一次覆工	RCｾｸﾞﾒﾝﾄ（ﾜﾝﾊﾟｽｾｸﾞﾒﾝﾄ2）：833ﾘﾝｸﾞ　外径φ11,800㎜、桁高450㎜、幅1,500㎜
		ﾀﾞｸﾀｲﾙｾｸﾞﾒﾝﾄ：253ﾘﾝｸﾞ　外径φ11,800㎜、桁高400㎜、幅1,200㎜
		鋼製ｾｸﾞﾒﾝﾄ：307ﾘﾝｸﾞ　外径φ11,800㎜、桁高400㎜、幅1,500㎜
	発進･到達方法	発進方法：NOMST壁、到達方法：地盤改良工
	土質	武蔵野礫層(Mg)、東京層(Toc,Tos)、東京礫層(Tog)、江戸川層(Edc,Eds)
	土被り	9.2～23.4m（河川横断部4.6m）

のチャンバー内での塑性流動状態の可視化、レーザースキャンによる掘削土量、ロードセルによる土砂重量等の計測はて掘削作業の安全性､施工精度の向上を図るうえで必要となる。

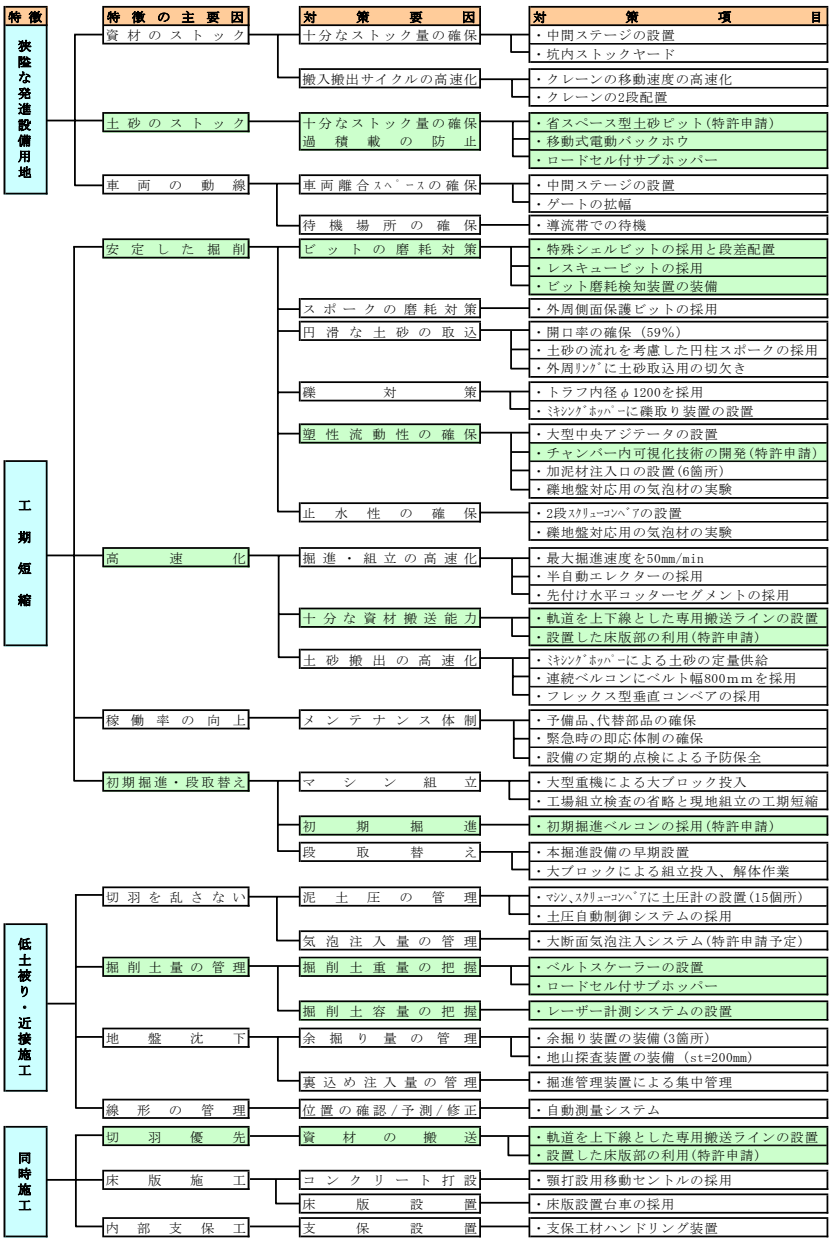
３．シールドマシンとビット磨耗対策

シールドマシン全体図を図－３に、仕様を表－２に示す。

本工区は、掘削地盤前半に出現する礫径φ50～300 程度の Mg 層・Tog 層、発進立坑土留壁部の NOMST 壁、換気所の柱列式地中連続壁等の切削があることから、カッタービットの母材部（シャンク）には真空焼入れを施したＳＫＣ２４を、刃先部（チップ）には耐摩耗性、耐熱性、耐食性、高圧縮強度等種々の特性をもった耐久力のある WC-Co 系超硬合金材を使用した。

本工事では長距離掘進・礫地盤への対応として、カッタービット（さし刃型ビット）の他に、高耐久性を有する大型の特殊先行ビットを採用した。図－４にビット磨耗予測と実積（630R）を図－５にビット配置図を示す。

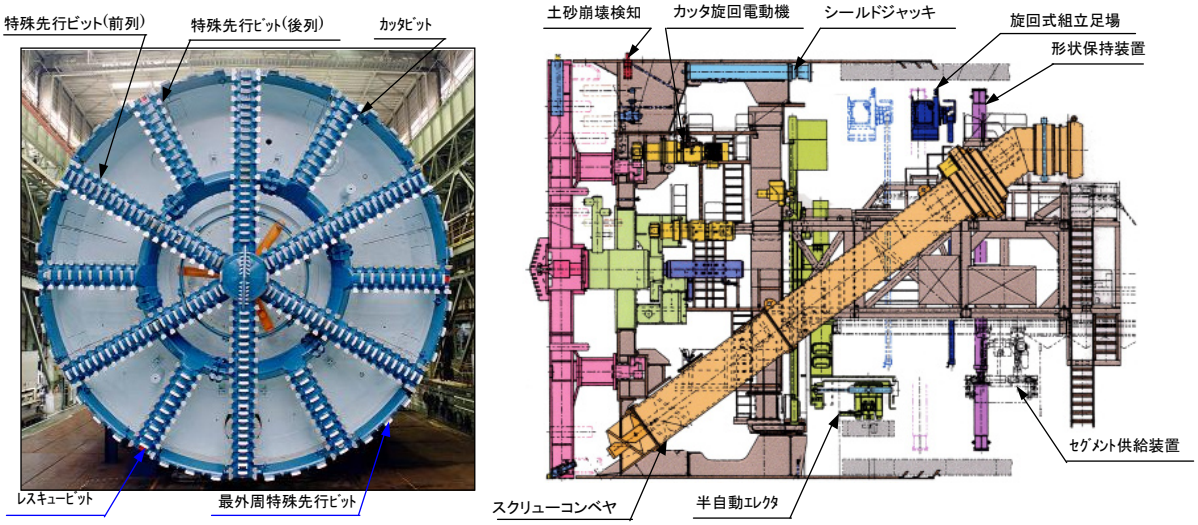
ビットの磨耗予測についてはカッタービットのみ配置した場合の磨耗量は、46.6 ㎜（磨耗係数=26.7×10^{-3}）に達すると推定され､許容磨耗量 30 ㎜を超える結果となる。そこで、特殊先行ビットを併用し、カッタービットの長寿命化を図ることとした。特殊先行ビット併用による磨耗低減効果は、過去の実績より 40%程度であることが確認されており、その効果により､カッタービットの推定磨耗量は 28 ㎜（磨耗係数=16.0×10^{-3}）と許容磨耗量以下になる。　また、砂礫層における特殊先行ビットの磨耗は、カッタービットの磨耗係数に対して初期磨耗で 2.69 倍､通常磨耗で 2.15 倍の磨耗係数が実績として報告されている。この磨耗係数をもとに、特殊先行ビットの磨耗量を推定すると 66.4㎜ となり、ビット摩耗限界



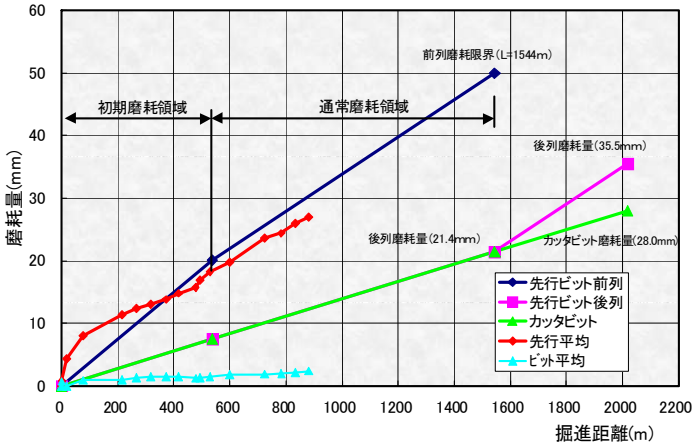
図－2　工事の特徴と対策

表－２　マシン仕様

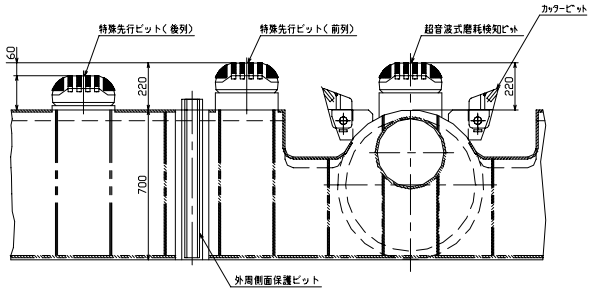
項　目	詳　細　項　目	仕　様
シールド本体	シールド外径	φ12,020㎜
	シールド機長	11,200㎜
	テールシール	ﾜｲﾔﾌﾞﾗｼ耐圧型×3段
推進装置	シールドジャッキ	3,500kN×2450st×36本
	総推力	126,000 kN
	単位面積あたり推力	1,110kN/m2
カッター装置	スポーク本数	主ｽﾎﾟｰｸ6本+補助ｽﾎﾟｰｸ6本
	開口率	約59%
	支持方式	中間支持方式
	装備トルク	定格（100%）　28,846kN-m（α=16.8） 最大（120%）　34,615kN-m（α=19.9）
	カッター回転数	0.456rpm
	余掘り装置	ｺﾋﾞｰｶｯﾀｰ3基装備（最大余掘り量150㎜）
撹拌装置	中央部撹拌装置	回転式中央ｱｼﾞﾃｰﾀ：羽根径φ4,200㎜ 回転ﾄﾙｸ：1,094/1,641 kN-m 回転数：2.0/1.33rpm
	外周部撹拌装置	撹拌翼12本、固定翼4本
排土装置	形式	軸付ｽｸﾘｭｰｺﾝﾍﾞｱ：φ2,000㎜
	排土能力	約350m3/h（効率100%時）　0.7×7.0rpm
	排土可能礫径	φ420㎜



図－3　シールドマシン全体図



図－4　ビット磨耗予測と実積



図－5　ビット配置図

50㎜を超える結果となる。そのため、特殊先行ビットも前列･後列の段差配置にして対応した。

前列特殊先行ビット（以下、前列ビット）の磨耗限界までの掘削距離は1544m（磨耗係数=37.4×10^{-3}）で、その後、後列特殊先行ビット（以下、後列ビット）での掘削となる。この間、後列ビットは、前列ビットに保護された状態にあるが、カッタービットと同様に土砂磨耗が予測され、前列ビットが磨耗限界に達した地点で 21.4 ㎜（磨耗係数=16.0×10^{-3}）の磨耗が推定される。後列ビットが、この磨耗状態から掘削を開始すると、到達時の磨耗量は35.5㎜（磨耗係数=37.4×10^{-3}）と推定されるが、磨耗限界量50㎜に対して約1.4倍の安全率を有している。

したがって、特殊先行ビットを段差配置とすることにより、ビット交換なしでの施工が可能となる。

ビットの磨耗量については、磨耗検知ビット（超音波式4セット）を装備し、常に磨耗量を把握するとともに、最も磨耗が予想される最外周部については掘削外径を確保するために、レスキュービット（油圧機構による格納型伸縮カッタービット）を3箇所に配置した。

4．土砂搬出設備

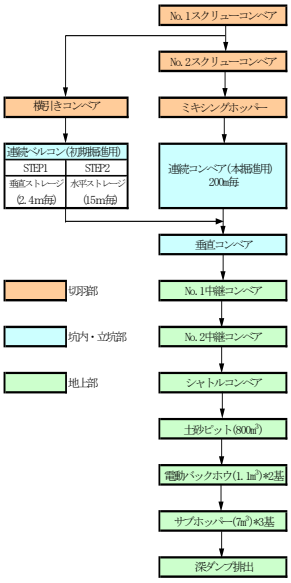
本工事は泥土圧式シールド工法の採用により、大量の掘削土砂を効率良く地上の土砂ストックヤードまで搬出する必要がある。表－3に土砂搬出設備について比較検討と搬出フローを示す。

土砂搬出の方法としてズリ鋼車、ポンプ圧送、泥水輸送等が考えられるが、設備の設置スペースの面からポンプ圧送が有力となる。しかし、大断面（φ10m以上）の場合、既存で最大能力の圧送ポンプを2系統設置したとしても掘進速度は2cm/min程度であり、礫地盤での管内閉塞、調達コスト等を考慮すると連続コンベアによる土砂搬出が最も効率的であり、コストの低減が図れる。掘削土砂の搬出フローは1・2次のスクリュ

表－３　土砂搬出設備の比較と搬出フロー

比較項目	細目	連続ベルコン+VHC	圧送設備	泥水輸送
使用機械	主要機械	連続ベルコン　1基、VHC　1基	ｸﾗｯｼｬｰ、圧送ポンプ10台、配管延長装置	混合槽、送・排泥ポンプ6台、ﾊﾞｲﾊﾟｽﾊﾞﾙﾌﾞ、配管延長装置
	調達方法	・施工条件によって異なるが、汎用品としてはベルト幅610mmで、最大900mm幅があるが新規製作となる。 ◎	・配管系統が２系統であれば、調達可能であるが、掘進スピードは２ｃｍ／ｍｉｎ程度となる。それ以上の掘進スピードまたは1系統とする場合は、新規製作となる。 ×	・大断面用の泥水輸送ポンプの調達は可能である。 ○
搬出性	搬出効率	・掘削土が潤角のとれる状態であれば搬出効率が高いが、泥土状で潤角が取れないと搬出効率が低下する。礫径は通常ベルト幅の1/3程度までは搬出可能である。 ◎	・掘削土砂の流動性が圧送に大きく影響する。礫径が一般に圧送シリンダー径の１／３以上であると、閉塞を起こし易い。 ×	・礫の大きさは配管径の１／３程度であるが、排泥ポンプで閉塞を起こす可能性があるが、圧送の場合より少ない。 ○
	搬出能力	・最近、山岳トンネルやTBM等で採用され始めているが、汎用品では搬出量180m³／ｈｒで、最大では1000m³/ｈｒストレージカセットの設置が施工方法によって異なる。掘進スピードは最大は5cm/minが可能であり、掘削土砂の性状が良いほどと搬出能力が高くなる。 ◎	・φ１０ｍ以上の実績は数件であるが、現状の圧送ポンプで最大８０～１００m³／ｈｒ（吐出圧３．４Mpa～２．５Mpa）であり、1系等での圧送が困難である。掘進スピードは２～２．５cm/min程度である。 △	・横断道クラスの泥水輸送設備があることから、掘進スピードは最大４cm/minまでは可能であり、通過礫径φ１２０ｍｍまで可能である。 ○
施工性	地上設備	・省スペース化が図れる。 ○	・省スペース化が図れる。 △	・地上に泥水処理設備が必要となる。 ×
	坑内設備	・坑口付近にベルト延長装置が必要となる。 △	・中継ポンプ、配管延長装置が必要となる。礫径をφ５０ｍｍ程度にするクラッシャーが必要となる。 ×	・中継ポンプ、配管延長装置が必要となる。礫径をφ５０ｍｍ程度にするクラッシャーが必要となる。 ×
	初期掘進	・ベルト延長装置を本掘進時に設置するため、初期掘進長が長くなる。 △	・初期掘進長が短い ○	・初期掘進長が比較的短い ○
	段取り替え	・ベルト延長装置を本掘進時に設置する期間が必要となる。 △	・段取り替えが短くてすむ。 ○	・段取り替えが比較的短くてすむ。 ○
	トラブル要因	・常時ベルトの蛇行修正を心がけ、ベルトの損傷が無ければトラブル要因としては少ない。 ◎	・礫径がφ５０ｍｍ以上になると、礫の噛み込みや圧送抵抗の増大により閉塞を起こしやすくなるうえ、ｽｸｲｸﾞﾊﾞﾙﾌﾞの交換が必要となる。 ×	・φ２００ｍｍ程度の礫までは流体輸送できるが、閉塞のする可能性がある。ウォーターハンマー、排泥管の摩耗対策が必要。 △
	メンテナンス	・ベルト延伸作業が、200ｍごとに発生する。蛇行修正、スクレーパの取替え等が必要となる。 △	・ポンプの消耗品が発生するため、定期的に部品の交換が必要となる。 △	・ポンプの消耗品が発生するため、定期的に部品の交換が必要となる。 △
環境性	騒音・振動	・ほとんど無いが、ベルトが乾いたあとの始動時に粉塵が発生する。 ◎	・圧送抵抗の増大により、衝撃音と振動が大きい。 ×	・坑内での騒音、振動は少ないが、地上部において１次処理に用いられる振動篩機で振動が発生する。 △
切羽の安定	切羽保持	・保持しやすい。 ○	・保持しやすい。 ○	・低土被りでの切羽水圧の制御が難しい。 △
	礫対策	・φ２００程度であれば、特に必要ないがそれ以上の場合は礫取り装置が必要となる。 △	・φ５０ｍｍ以下とするため、クラッシャーが必要となる。 ×	・φ２００ｍｍ程度の礫までは流体輸送できるが、それ以上の場合は礫取り装置が必要となる。 △
実績		・山岳トンネルやTBMにおいて数件の実績があり理、最近ではシールド工事での採用も増えている。 ◎	・非常に多い ○	・土圧式での実績は小口径ではあるが、大口径ではない。 ×
総合評価		◎	△	×

注）ズリ鋼車案は床版同時施工、立坑兼用、地上設備ヤードの面積等から条件的に困難であることから、検討項目から除外した。

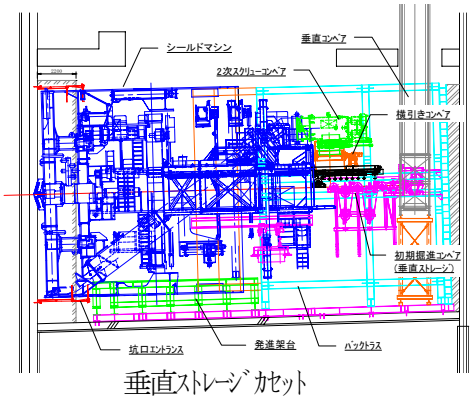


ーコンベアから定量供給機能と礫取装置を装備した（φ280㎜ 以上）ミキシングホッパーにストックされて連続コンベアに投入される。連続コンベアは坑口部に200m連続搬出可能な水平ストレージカセットを設置し、ロードセル付のウインチでベルトテンションを制御しながら掘進と同期させてベルトの撤出しを行う。掘削土砂の垂直搬送は平ベルト上の搬送物に桟付ベルトを被せて密閉する構造で、高含水土の搬送にも対応可能な垂直コンベアを採用した。地上部は中継コンベア、シャトルコンベアを介して土砂ピット(800m³)にストックされ、電動バックホウ（1.1m³）でサブホッパー(7m³)に搬出後、計量されて深ダンプに排出される。表－４にコンベアの仕様を示す。

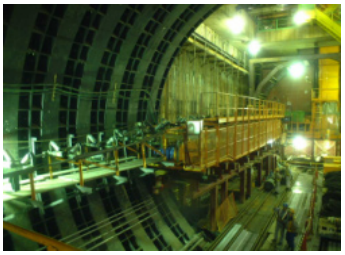
連続コンベアは初期掘進時からも使用できることから、ベルトストレージ量を水平および垂直に自由に調整でき、本掘進にも適用できるレーシングジョイントの初期掘進コンベアを開発し、実用化した。(特許申請中)　図－６に初期掘進用コンベアの発進時およびの水平ストレージカセット設置状況を示す。

表－４　コンベアの仕様

項目		連続ベルコン	垂直ベルコン	No.1中継ベルコン
コンベア機長 (m)		1992.2	13.6	98.4
揚程 (m)		14	33.27	0.9
搬送能力 (t/hr)		560	420	420
ベルト	ベルト幅 (mm)	800	1200	1050
	ベルト張力 (kN/m)	800	1250	250
	芯体	ナイロン	テトロン	ナイロン
	プライ数	4	6+1	2
	トラフ角 (°)	37.5		45
	その他	ｽﾄﾚｰｼﾞ量　400m	波桟高さ　280mm 有効幅　620mm	
駆動形式	形式	ﾀﾝﾃﾞﾑﾌﾟｰﾘｰ	ｼﾝｸﾞﾙﾄﾗｲﾌﾟﾁｪｰﾝ	ｼﾝｸﾞﾙﾄﾗｲﾌﾟﾁｪｰﾝ
	制御方式	インバーター	インバーター	定速
	モーター	ﾄﾞﾗｲﾌﾞ：90kW*2台 ﾃﾝｼｮﾝ：15kW	Fベルト　：75kW 平ベルト：55kW	22kW
その他(安全装置他)		水洗クリーナー 各種クリーナー ズリ詰り検出器 滑り検出器 ﾍﾞﾙﾄ速度検出器 引綱ｽｲｯﾁ 蛇行検出器	各種クリーナー 逆転防止装置 ズリ詰り検出器 ﾍﾞﾙﾄ速度検出器 引綱ｽｲｯﾁ 蛇行検出器	各種クリーナー ﾍﾞﾙﾄ速度検出器 引綱ｽｲｯﾁ 蛇行検出器



垂直ｽﾄﾚｰｼﾞｶｾｯﾄ


初期掘進用コンベア


水平ｽﾄﾚｰｼﾞｶｾｯﾄ

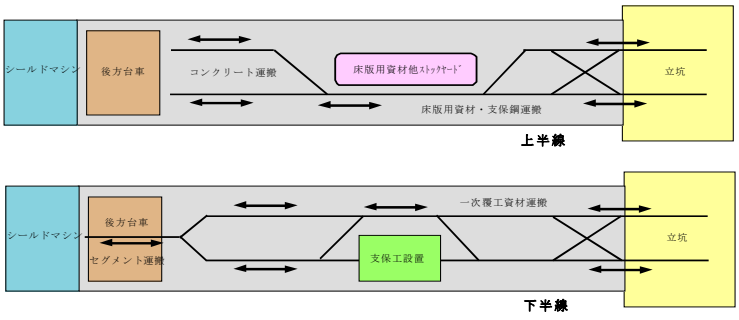
図－６　連続コンベア設置状況

5. 軌道設備

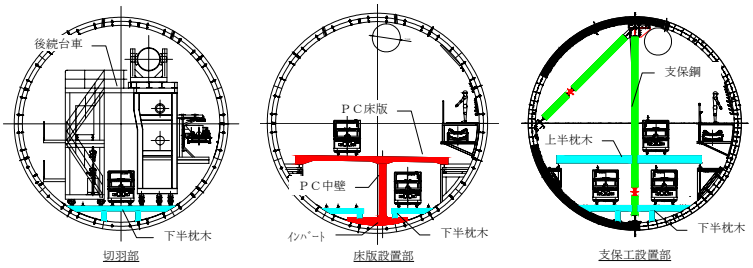
坑内の資材搬送は掘進作業と並行して道床部となる床版設置工事、連絡坑等の切開き部の補強を行う支保工設置工事（発注予定）を行うため、セグメント等の資材の他、PC 構造の床版、中壁、支保鋼材等を円滑にかつ切羽作業優先となるよう運搬を行う必要がある。

そこで軌道は、従来大断面シールドで採用されている枕木をトンネル中心に敷設する方法ではなく、トンネル下部に敷設してセグメント運搬専用の下半線とし、上半線は設置した床版をそのまま利用する床版、支保鋼材等の運搬専用線とした。（特許申請中）

図－７に上下線の軌道路線図、図－８に軌道の坑内断面図を示す。



図－7　軌道路線図



図－8　坑内軌道断面図

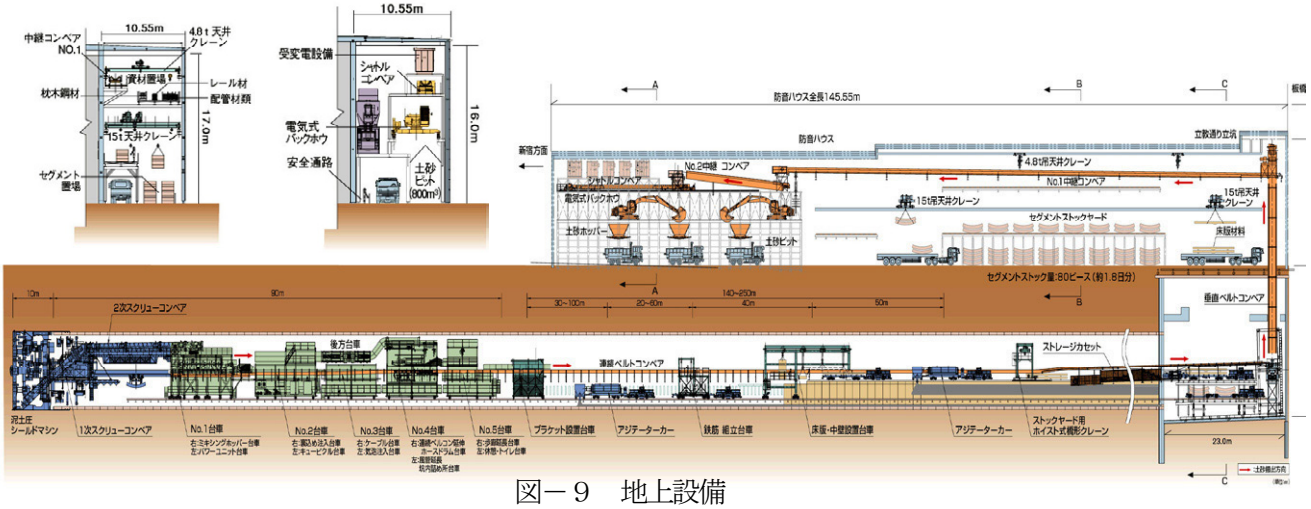
6．地上設備

中継コンベア、揚重設備等の地上設備は山手通り上の防音ハウス内(長さ 145m、幅 22m、高さ 16～20m)の半分を占用して納めた。セグメント等の資材は約８R 分をストックでき、搬入及び投入用として天井クレーン（7.5ｔ*スパン 9.3m）２基とその他資材用として天井クレーン（4.8ｔ*スパン 9.3m）１基を設置した。プラント設備（裏込め注入・気泡注入設備）は土砂搬出設備（シャトルコンベア、電動バックホウ、土砂ピット）並びに受変電設備と供用できる構台上に設置し、省スペース化を図った。図－９に地上設備の設置概要図を示す。

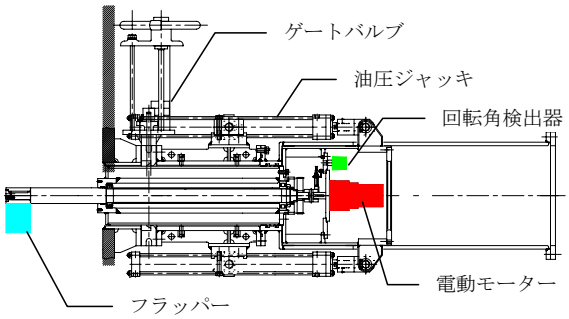
7．計測管理

①チャンバー内可視化装置

大断面の泥土圧シールドにおける塑性流動性の定量的な評価手法を確立するためにチャンバー内可視化装置を開発し(特許申請中)、導入した。これはチャンバー内に、電動回転式フラッパーをゲートバルブを開いて油圧ジャッキで挿入し、電動モーターで回転させて、各回転角度ごとの電流値(トルク値)を測定するものである。また、事前にモデル解析した計算値から逆解析することにより、最も回転トルクの高い位置を流れの方向とし、そのトルクから掘削土砂の粘性式を推定し、チャンバー内の塑性流動状態の可視化を行う。図－１０に可視化装置を示す。



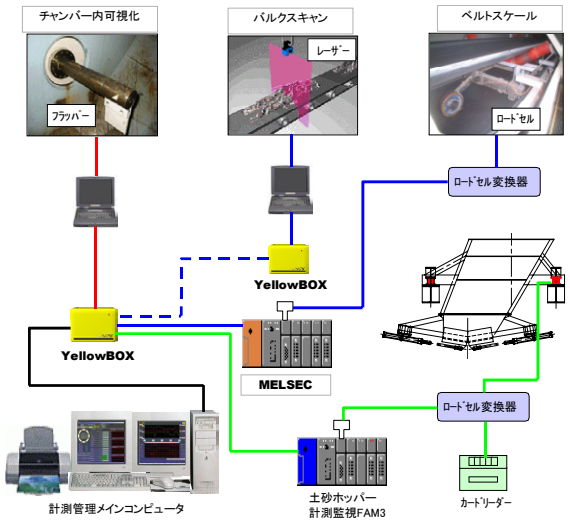
図－９　地上設備



図－１０　可視化装置

②土量計測

掘削土砂の土量は重量と容積を切羽に最も近い位置で計測を行い、地上でも場外への搬出で過積載とならないように再度重量の計測を行う。坑内での容積計測はレーザー光で連続ベルコン上に積載された土砂を測距し算出した断面積に、ベルト速度とスキャンタイムとの積から求める。重量計測は同様に連続ベルコン上の一定区間に積載された重量をロードセルで計量し、ベルト速度との積の総和で求める。計測の結果は毎リングの排土量に異常が無いかを、統計的管理手法を用いて管理している。図－１１に計測システムの概要図を表－５に各計測システムの仕様を示す。



図－１１　計測システム

表－５　計測システムの仕様

項目	ベルトスケール	土砂体積	土砂積載重量
型式	BW-802-DMS	BULKSCAN　200/210	KLM-10-4
メーカー	REMBE	SICK	川鉄アドバンテック
計測位置	連続ﾍﾞﾙｺﾝ(No.2台車)	連続ﾍﾞﾙｺﾝ(No.2台車)	サブホッパー
計測原理	ロードセル	ﾚｰｻﾞｰ伝播時間測定	ロードセル
検出個所	１箇所	１箇所	４箇所
計量範囲	0～1000t/hr	0～600m^3/hr	0～12ｔ
計測制度	±1/1000F.S	±0.5%	±1/100F.S
ｽｷｬﾝﾀｲﾑ	100msec	40msec	100msec

８．施工実積

①ビット磨耗

ビットの磨耗状況については図－４より、初期磨耗領域で特殊先行ビットは約27㎜、磨耗係数は30.0*10^{-3}となっており、当初予想していた初期磨耗量以内と考えられる。カッタービットは約2.4㎜で、磨耗係数は2.55*10^{-3}となっており当初予想していた磨耗量より大幅に少なくなっている。これは特殊先行ビットによる先行切りの効果が大きく、カッタービットへの負担が軽くなっているものと思われる。

②掘進実積

初期掘進から現在（630R）までの掘進状況を図－１２に示す。掘進速度は初期掘進時では15㎜/min、本掘進時では23㎜/minである。推力は管理土圧の上昇により増えてはいるが、平均で57100ｋNと装備推力の45%であり、前面抵抗以外の地山との摩擦抵抗の割合は46%程度となっている。また、カッタートルクは17700ｋNmと装備トルクの61%で、一般の泥土圧式シールドの実積からすると10%程度大きいと言える。これは礫

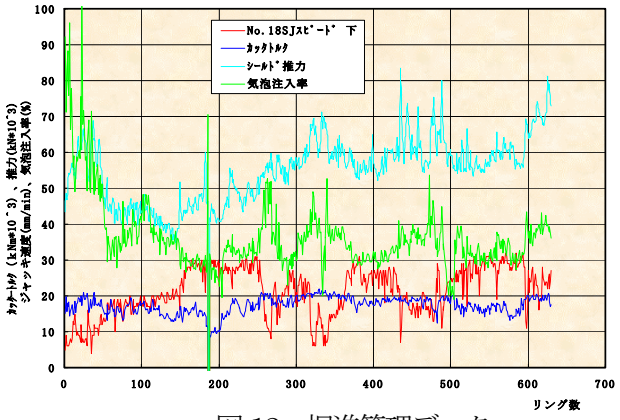


図-12　掘進管理データ

率が多いこととN値50以上の固結した江戸川層粘性土層（Edc 層）が出現したためと考えられる。添加材となる気泡材の注入率は平均で 33.6%であるが、250Rよりカッタートルクの上昇を押えるために高分子系の分散材を2%程度注入している。

９．おわりに

掘進延長のほぼ半分を終了したところであるが、同時作業として床版設置工事のほかに支保工設置工事も始まり、順調に掘進作業が進めば来年の４月末に掘進作業が終了する予定である。

23. FRS Ⅲの開発　―――シールドトンネル曲線施工部の遠隔測量システム―――

㈱フジタ：○浅沼　廉樹、渡部　幸浩

【概　要】

近年のシールド工事は、自動掘進やセグメント自動搬送等の自動化がめざましく、作業の省力化が図られている。しかし、計画された路線どおりに施工が進んでいるかを日常管理する測量作業は、多くの場合、職員が二人一組で、坑内作業の休憩中や交替時の限られた時間に行っており、担当者には大きな負担となっていた。これらの事から各ゼネコンや測量器メーカーは、自動測量システムを開発、実用化して来たが、多くのシステムは、

・シールド坑内に測量器を固定する為、他の作業の支障となる。
・曲線部では、シールドマシンの計測が出来なくなる為、測量器の頻繁な盛り替え作業を生じる。

などの課題があった。

フジタでは、測量器に設置した位置出しカメラにより測量用基準点（以下、基準点と表記）を画像認識する事で、測量器自身の位置を解析可能とした新位置出しシステムを開発。これにより、測量時にのみ、測量台車を基準点まで自走させて測量を行うことを可能とした。また、これらの一連の作業をすべて作業所事務所から遠隔操作する。遠隔測量システム「ＦＲＳⅢ」(Fujita Remote control Surveying systemⅢ)を開発、大幅な省力化と従来システムの課題解決を実現した。



写真１-１　ＦＲＳⅠ運用状況



写真１-２　ＦＲＳⅡ運用状況

以下にそのシステム概要と運用手順を示す。

１．システムの概要

ＦＲＳⅢとは、今までに開発されてきた、自走型遠隔測量システム(ＦＲＳⅠ　写真 1-1 参照)と後続台車格納型遠隔測量システム(ＦＲＳⅡ　写真 1-2 参照)のそれぞれの特徴を合わせ持ったシステムである。

FRSⅠ･･･走行による利便性の向上
FRSⅡ･･･台車格納による運用性の向上

また、自己位置の測定方式は、坑内に設置されたＦＲＳ用の基準点を測定して算出する後方交会方式から、通常の測量に使用される基準点を用いて測定する画像認識方式に変更し、測量精度の向上を図った。

①　システムの概要

本システムは、事務所から測量器を搭載した自走台車を遠隔操作することでシールドマシンの挙動解析を可能としたシステムである。

システムの構成は、

・坑外の事務所や中央制御室に設置された遠隔操作ユニット(写真 1-3 参照)
・シールドマシンの後続台車に連結された格納台車(写真 1-4 参照)
・格納台車に収納され測量時のみ稼動する自走台車(写真 1-5 参照)
・シールドマシン内に設置された未知点(写真 1-6 参照)

以上の４つから構成され、各ユニットはネットワークや無線を用いて制御されている。



写真１-３　遠隔操作ユニット



写真１-４　格納台車

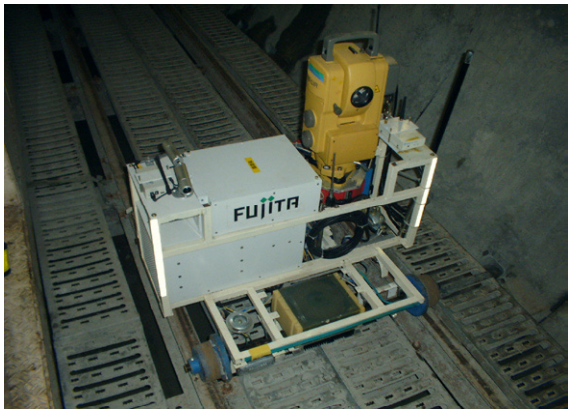


写真１-５　自走台車



写真１-６　未知点

② 運用手順

事務所からの遠隔操作による測量の流れを、次に示す。(図 1-1，図 1-2 参照)

1）坑外の事務所や中央制御室に設置された遠隔操作ユニットを起動し、シールド坑内の後続台車内に格納台車に収納された自走台車を本線レール上に設置する。
2）本線レール上に設置された自走台車を起動し、無線走行にて基準点まで走行する。
3）自走台車に搭載された監視カメラを、基準点測量用のカメラに切り替え、基準点を自走台車内の画像センサの視野に入る様に自走台車を走行させ、位置の微調整を行う。
4）自走台車セット完了後、画像センサにて基準点の位置計測(画像認識)を行い、そのデータを用いて自己位置(機械点)の算出を行う。
5）後視点を視準後(方向角設定)、マシン内の未知点を順次測量する。
6）測量完了後、計測結果を解析してシールドマシンの挙動解析や設計路線からの誤差の解析を行い、マシン計測データをシールド掘進システムに反映させる。
7）自走台車を格納台車まで返送させ、本線レール上から回収した格納台車内に収納する。

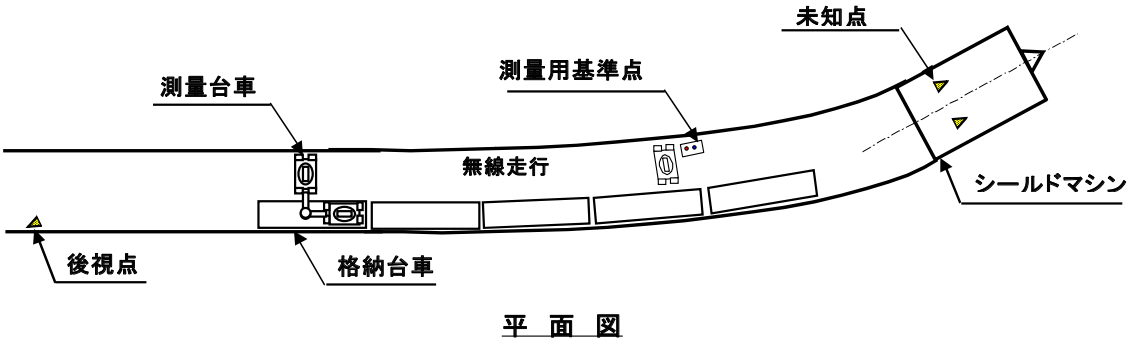


図1-1　ＦＲＳⅢシステムレイアウト図

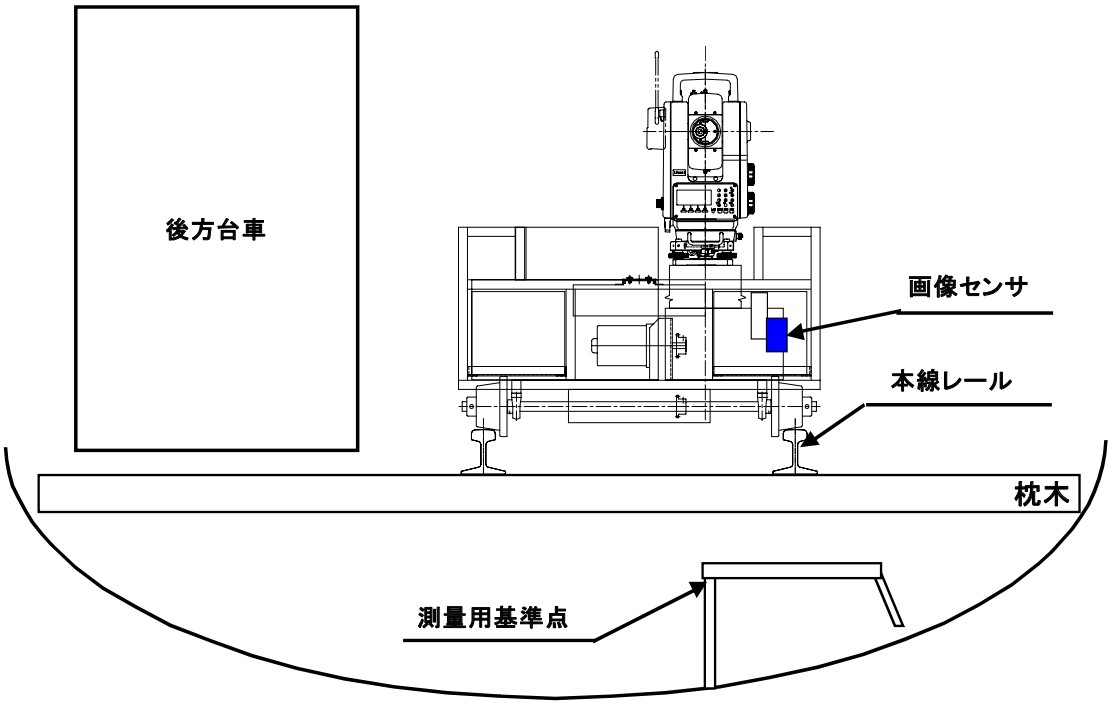


図1-2　ＦＲＳⅢ　基準点計測レイアウト図

２．ＦＲＳⅢの特長

ＦＲＳⅢの特長としては、

・通常の測量に使用される基準点が転用可能。（画像認識方式の採用）

・曲線施工時のカーブ測量が可能。（自走方式の採用）

・自走台車を格納する事により、測量時間の短縮が可能。（格納台車やワイヤレス充電装置の採用）

以上の３つが挙げられる。これらは、今までの遠隔測量システムでは個々に達成できていたが、全てを合わせた物は今回のシステムが初めてである。

以下に個々の特長を述べる。

（１）画像認識による位置出しシステムの採用

通常、測量器の位置出しは、基準点上に測量器を設置し、基準点に測量器の中心軸を合わせ測量を行う。

しかし、今までの遠隔測量システムでは、測量器が台車に固定される為、基準点上に設置できず代替の手法として、坑内に新たに遠隔測量システム用の基準点

(写真 2-1 参照)を設け、測量を行った。

しかし、この方法では

・測量器の視準精度や測角精度に影響され、自己位置算出精度の低下を生じる。

・曲線施工時に、遠隔測量用の基準点が視準出来なくなる。

・シールドマシンが小口径の場合、バッテリー機関車の運行や作業員の通行の妨げになる。

・システムを運用する為に、新たに遠隔測量用の基準点の測量作業が増える。

以上の問題を生じていた。

そこで、本システムでは、これらの問題点を解決する為に、通常の測量で使用される基準点を用いて、自己位置の測量を可能とした画像認識方式(写真 2-2　図 2-１参照)を開発し、システムへの導入を行った。

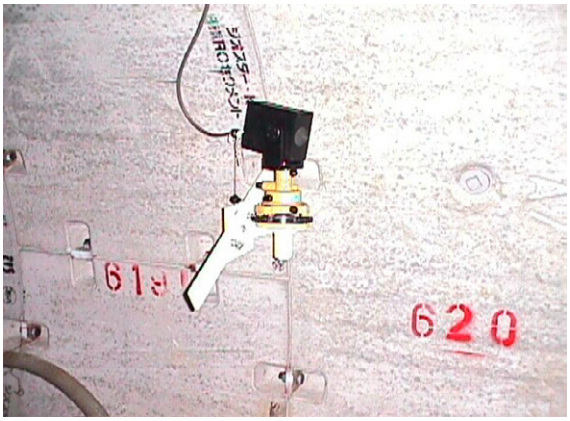


写真 2-１　プリズムによる基準点計測

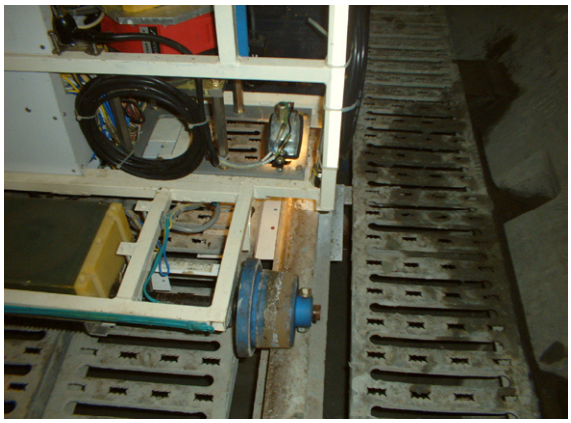


写真２-２　画像センサによる基準点計測

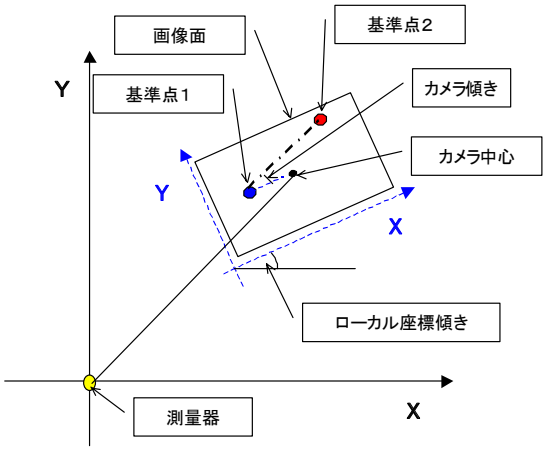


図２-１　画像認識方式概念図



写真２-３　測量用基準点

この画像認識方式は、予め座標の求められている２つの基準点(写真 2-3 参照)を、画像センサにて計測する事で測量器の自己位置を算出し、シールドマシン内の未知点を測量する方法である。

画像センサは、測量器が固定されている自動整準台の台座と一体になっており、常に鉛直方向にカメラが向く構造になっている。

また、測定に用いられる基準点は、異なった２つの色の基準点を設け、２つの基準点の色と形を認識する事で、画像面での位置関係を計測するシステムとなっている。

これにより、通常の測量で求められる測量器の基準点上へ設置精度が不要となり、画像面に２つの基準点が写っていれば測量可能となった。

２）自走台車方式の採用

ＦＲＳＩでは、牽引式の測量台車を採用したが、測量器を搭載した状態での走行の振動等が問題となり、ＦＲＳⅡでは採用されなかった。しかし、今回のＦＲＳⅢでは

・使用機械の小型軽量化⇒車体重量の軽量化が可能

・無線技術の向上⇒坑内での長距離通信化が可能

以上の様な周辺技術の向上により、再度、自走台車方式が可能となり、新規に測量台車の製作を行った。(写真 2-4 参照)

これにより、ＦＲＳＩに比べＦＲＳⅢでは、容積で約 1/2、重量で約 1/7 になり、また自走式の台車が可能となった。(表 2-１参照)

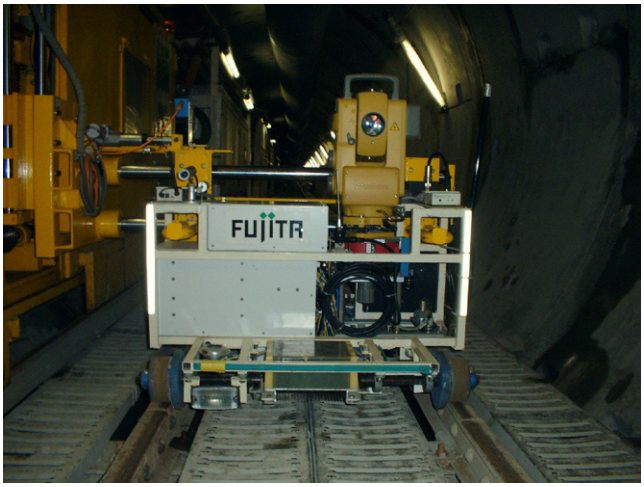


写真２-４　自走台車各部名称

表２-１　ＦＲＳⅢの諸元

項　　目		FRSⅢ
寸　　法	L*W*H	638＊760＊750
重　　量	kg	50
軌　　間	mm	610
軸 間 距 離	mm	512
測 量 器 精 度		2”
走 行 方 式		自 走 式
無 線 方 式		SS 無 線
電　　源		DC24V

３）格納台車やワイヤレス充電装置の採用

自走台車方式の採用に当たり、ＦＲＳＩと同様に

・　自走台車走行距離によるサイクルロス

・　坑内移動時の測量器本体の結露

・　小口径における自走台車の保管場所

・　自走台車への電源供給方法

以上の事が問題となった。

そこで、ＦＲＳⅡで採用した後方台車牽引方式を改良し、測量時は、自走台車を本線レール上に設置・測量作業を行い。測量終了時は、自走台車を格納する格納台車方式を採用した。

格納台車の主な構成を以下に示し、詳細を述べる。

・自走台車をレール上に設置、回収する**旋回アーム**

・自走台車を坑内の湿度から守る**格納ＢＯＸ**

・自走台車への電源供給を行う**ワイヤレス充電器**

①旋回アーム

旋回アームの機能は、

・自走台車を本線レール上に設置･格納する。

･事務所からの指令や自走台車の測量結果を中継する。

以上の２つの機能が必要となる。従って、本アームは、自走台車を本線レール上に移動する為、格納 BOX から出るための旋回モータ･自走台車を本線レール上に移動する左右スライドジャッキ･自走台車をレールに設置させる昇降モータ･本線レール位置を検出するレール検知センサから構成されている。(写真 2-5 参照)



写真２-５　旋回アーム

②格納ＢＯＸ

自走台車は先に述べた様に、小口径の場合、その設置場所の確保が困難となる。また、搭載された測量器も防水型とはいえ、シールド坑内の様な高温多湿の環境下では、本体への悪影響が懸念される。従って、本

システムでは、自走台車を自動的に折りたたんで収納する格納ＢＯＸを採用。測量以外の時は、常に密閉して除湿管理を行う構造とした。(写真 2-6,2-7 参照)



写真２-６　格納動作中



写真２-７　格納完了

② ワイヤレス充電器

通常、バッテリー機関車等の坑内車両は、使用前や使用後に人間が充電装置に、ケーブルを接続し充電作業を行っている。同様に自走台車も充電の必要を生じるが、先の方法では必ずケーブルの接続に人間が仲介する必要を生じてしまい、遠隔測量の意味がなくなってしまう。その為、本システムでは、非接触で充電可能なワイヤレス充電器を採用した。(写真 2-8,2-9 参照)



写真２-８　送電部（格納台車）



写真２-９　受電部（自走台車）

３．施工結果

現場導入時に実施した精度検証結果を右に示す。検証方法は、ＦＲＳⅢで視準した同一のターゲットを人による測量結果と比較した。その結果、未知点座標の測量誤差は、シールドマシンが掘進する事により、測距距離が変化しても±10mm 以内に入っている事が確認された。また、今回の施工結果により、キューブ方式では 15～25 分の測量時間が必要だったが、画像位置出し方式では、10～15 分程度の時間で測量可能な事が確認された。

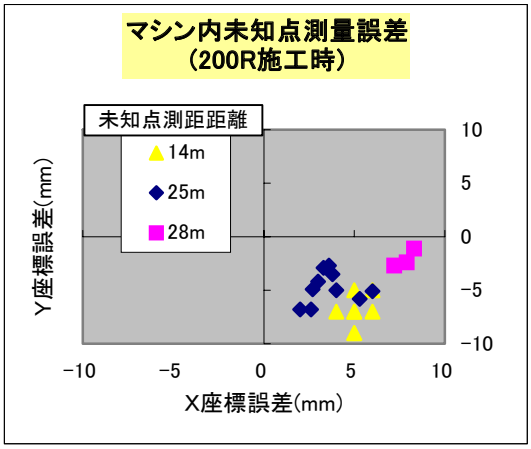


図３－１　精度検証結果

４．終わりに

本システムは、小口径から大口径までのほとんどのシールドトンネルや、山岳トンネルに使用されるＴＢＭなどの機械掘削工法にも適用可能となる。

今後は、急曲線施工等の施工実績を積み重ね、システムの改良し、商品化を図って行く。

24. END 工法 ～新しい環境浚渫（Environmental Dredging）技術～

五洋建設株式会社　土木本部機械部：○室田　恭宏、八島　慎治

1.はじめに

浚渫工事において、重金属やダイオキシン類で汚染された水底土砂の浚渫時の水質汚濁防止、浚渫土砂の処分地不足問題の解決など、21世紀の浚渫工法は環境保全型であることが重要な要素になってきました。

これらのニーズに対応する工法として、濁りの発生が少ない密閉式グラブ浚渫工法があります。グラブの構造上、必要以上の厚さで浚渫するので、浚渫・運搬・処理のコストアップの問題以外に、慢性的な処分場不足の問題にさらに負担をかけることになります。

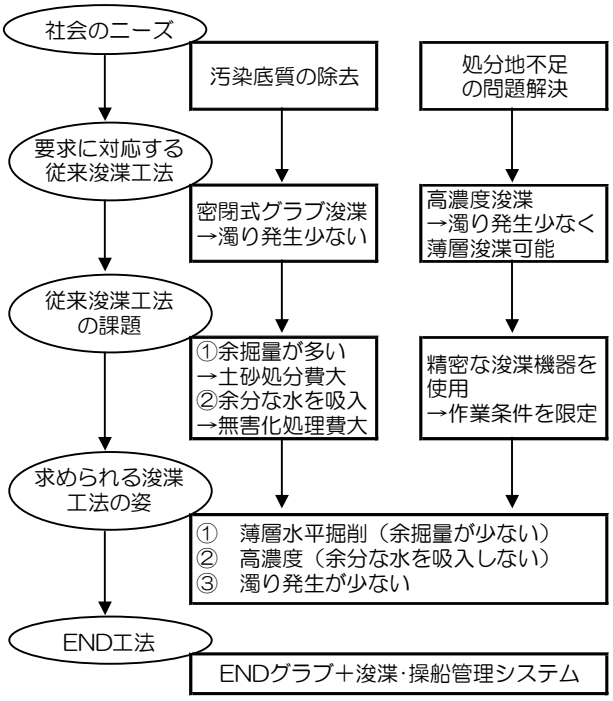
高濃度底泥浚渫船による高濃度浚渫工法は、高度な浚渫技術により、水質汚濁の低減と薄層浚渫を可能としています。ところが、精密な浚渫機器を使用しているため、作業条件を限定するという弱点があります。

五洋建設は、こうした課題を一気に解決する新しいグラブ浚渫工法「END 工法＝環境浚渫(Environmental Dredging)工法」を 2002 年に開発しました。現在までに七件の工事、施工土量約 69,000m^3、施工面積約 157,000m^2、平均層厚約 44cm を施工し、各種調査を実施し、有効性を検証しました。

END 工法の開発の背景を図－1に示します。

2.END 工法の技術

END 工法は、END グラブと浚渫・操船管理システムの二つの技術から構成されます。このグラブと管理システムは陸上運搬可能であり、全国各地に在港しているあらゆるグラブ浚渫船やクレーン付台船に取り付けて、施工することができます。



図－1 END 工法の開発の背景

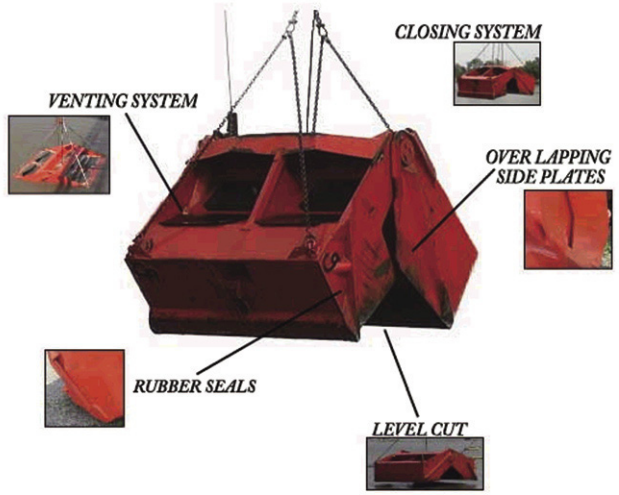
(1)END グラブ

米国やカナダでは港湾や河川に堆積する重金属等を含んだ汚染底質の浚渫が 1990 年初頭から行われています。これらの施工では、水平掘削での余掘の低減による浚渫土量の減容化と、水質汚濁の低減のために米国で開発された写真－1に示す END グラブが多く使用されています。現在、当社では米国から技術導入した 7m^3級(浚渫面積 23m^2)と 4m^3級(浚渫面積 13m^2)の 2 つの END グラブを保有しています。

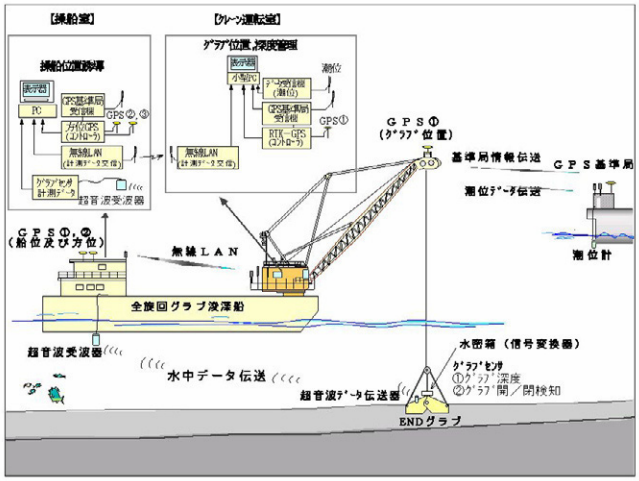
(2)浚渫・操船管理システム

END グラブを全旋回式クレーン船に取り付けて浚渫する際、浚渫毎にグラブの位置と深度を管理することが、工事区域全体の仕上がりの良さにつながります。目標浚渫位置・深度へグラブを

誘導することを目的として、図－2に示す浚渫・操船管理システムを開発しました。



写真－1　END グラブ



図－2　浚渫・操船管理システムの概要

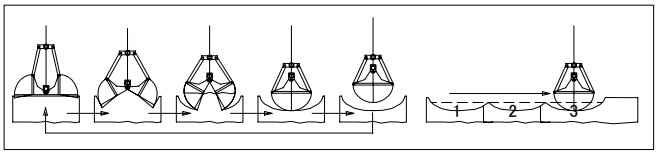
3.END 工法の特長

END 工法の技術的な特長は、必要な堆積土砂だけを薄く平らに掴み取ること、余分な海水を水面上に吸い上げずに高濃度で浚渫できること、浚渫時の濁り発生量が少ないことの三点です。

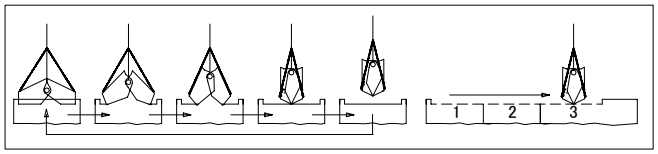
(1)薄層水平掘削

図－3に示すように従来型グラブを使用した浚渫では、グラブの深度を下げながら閉じて、土砂を掴んでいました。掘り跡が円弧状になり、余分に土砂を掴み、掘り跡も凹凸になっていました。

END グラブの特許であるユニークな機構により、吊り上げに伴う単純なグラブ閉じ操作だけで、図－3に示すように海底土砂を薄く水平に掴み取ります。



(a) 従来型グラブ



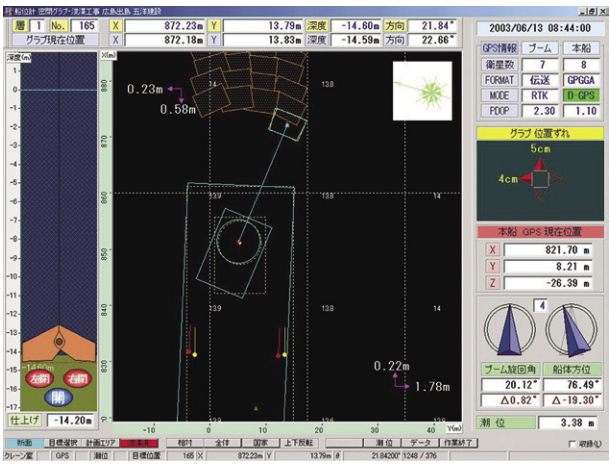
(b) END グラブ

図－3　浚渫機構の相違

また、工事区域全体を薄く水平に仕上げるためには、1掘削毎のグラブの深度を同じ高さとし、平面的に掘り残しがないように重ね合わせて掘っていきます。

浚渫・操船管理システムで、浚渫目標位置と END グラブの現在位置をリアルタイムにモニタに表示し、オペレータがそれを確認しながらENDグラブを操作することで、工事区域全体を薄層で水平に浚渫することができます。END グラブに取り付けた水圧式水深計で刃先の深度を、クレーンブーム先端に取り付けた RTK-GPS で END グラブの平面位置を、それぞれ 1cm 単位の精度で計測します。

写真－2にモニタ画面を示します。



写真－2　モニタ画面

写真－3にオペレータによる操作状況を示します。



写真－3　オペレータによる操作状況

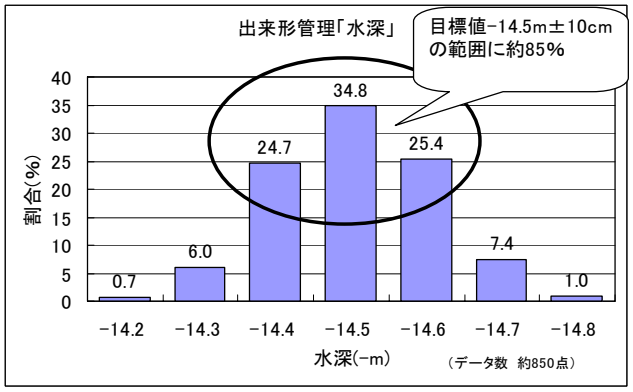
2003 年夏、広島において面積約 75,000m^2 の航路を浚渫し、深浅測量から得られた測点の水深から出来形を調査しました。広島港での浚渫状況を写真－4に示します。



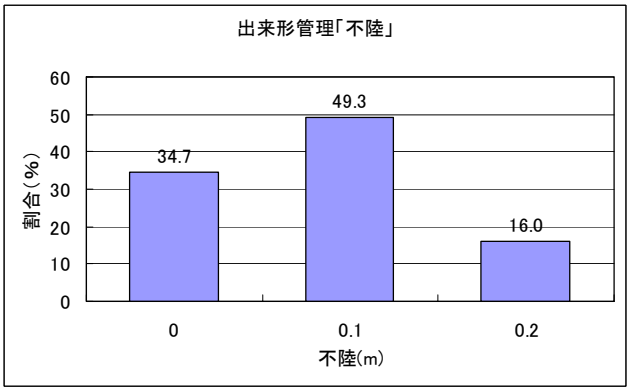
写真－4　広島港での浚渫状況

目標水深-14.5m に対して、出来形の約 85%が±10cm に収まり、精度の高い浚渫ができることを確認しました。出来形管理図を図－4に示します。

また、図－5に示すように、不陸（掘り跡の凹凸）を 20cm 以内に抑え、水平に仕上がることも確認しました。



図－4　出来形管理図



図－5　不陸管理図

(2)高濃度浚渫

浚渫・操船管理システムで、1掘削あたりの浚渫土量とグラブ容量とを一致させて、海底の土砂を掴み取ります。さらに、グラブ内に溜まった余分な水を、写真－5に示す END グラブの通水口から海面へ排出することにより、高濃度で土砂を浚渫することを可能としています。



写真－5　ベンチングシステム

2004 年春、境港において見かけ容積含泥率を調査しました。含泥率は 72.1～93.0%、平均 84%であり、高濃度で浚渫できることを確認しま

した。計測状況を写真－6に示します。



写真－6　含泥率計測状況

(3)水質汚濁の低減

END 工法によって濁りの発生が少なく理由は以下の4点です。

①土砂を掴み取る際、図－3に示したようにEND グラブの刃先のみが海底面に接します。接触面積が広い従来型グラブのように、グラブ吊り上げ時の吸い上げや付着した泥による濁りの発生を防ぎます。

②写真－1に示したように END グラブの左右がオーバーラップして閉じる構造で、ゴムシールを装備しているので、土砂を掴んだ時、密閉状態となります。

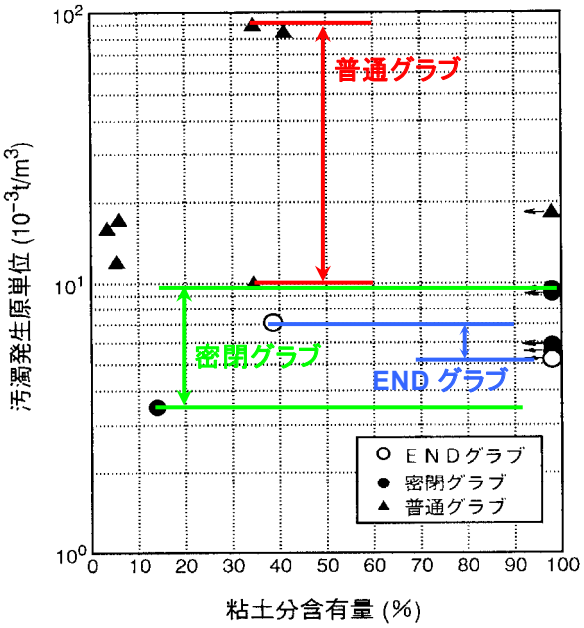
③END グラブのベンチングシステムによるもので、グラブ下降時には、図－6(左)のように通水口が開き、水圧による海底地盤の土砂の舞い上がりを防止します。グラブ上昇時には、図－6(右)のように通水口が閉じ、掴んだ土砂がクラブの外に逃げず、濁りが発生しません。



図－6　ENDグラブ下降時と上昇時の様子

④END グラブにセンサーを取り付け、モニタでグラブの刃先が完全に閉じたことをオペレータが確認できます。異物を噛み込んで、グラブが中途半端に閉じて浚渫土砂が漏れるのを未然に防ぎます。

広島と境港での調査で得られたEND 工法による汚濁発生原単位を、既往の普通グラブおよび密閉グラブの調査結果と併せて図－7に示します。



図－7　汚濁発生原単位

広島での調査結果、END グラブ 7m^3 級の汚濁発生原単位は 7.13×10^{-3}t/m^3 となりました。境港での調査結果、END グラブ 4m^3 級の汚濁発生原単位は 5.20×10^{-3}t/m^3 となりました。既往の文献によると、密閉グラブは $3.50\sim9.54\times10^{-3}$t/m^3、普通グラブは 10×10^{-3}t/m^3 以上です。END 工法は密閉グラブと同様に、汚濁発生量を低減できることを確認しました。

4.最後に

今後、表層に堆積する軟弱底泥やダイオキシン類などに汚染された土砂の除去を対象に、END 工法を積極的に活用していきたいと考えています。

25. レーザ装置を用いた路床、路盤の検測方法

㈱NIPPO コーポレーション：○佐々木　拓郎、高橋　幸男、梶原　覚

１．はじめに

近年の建設工事においては、公共工事、民間工事の減少により競争の激化等非常に厳しい情勢に立たされており、各企業にとって経費の削減、省力化、省人化が大きな課題となっている。舗装工事に注目すると未だ従来的な施工方法に頼る部分が多く、特に測量や路床、路盤工の作業には省力化、省人化における改善の余地が多分にある。

これまで舗装を構築する際は、事前測量により施工現場内に所定の間隔で基準高を明示した丁張り杭を設置し、路床、路盤の施工時は、その基準高から現地盤までの差により検測を行っている。より正確な路床、路盤を構築するには出来るだけ多くの丁張り杭を設置し、複数の作業員によって細かく検測すればよいが、矛盾ながらこの丁張り杭を設置するために起こる弊害も多く存在する。いくつかの例を下記に示す。

① 丁張り杭を設置する際の設置作業及び基準高明示の為の測量作業により多くの労力、日数を費やす
② 丁張り杭を設置した事により、施工機械の進行及び施工の妨げになるのと同時に、材料搬入車両の経路等が制限される為、出来高及び出来形に影響する
③ 検測時に水糸等を使用して行う為、複数の人員を必要とし、また、人為的ミスによる誤差が発生する場合もある
④ 丁張り材（木材）の費用及び撤去費用が掛かってしまう

以上のような問題を解決すべくレーザ装置を用いた検測方法により測量作業の大幅な軽減や、路床、路盤の検測方法の合理化を確立した。ここでは施工、装置の概要や、合理化を進めるに当たりイーベース社、トプコン社と共同で開発した新型レーザ受光器について報告する。

２．レーザ検測方法の概要

２－１．使用器械

レーザ検測方法は「回転式レーザ発光器」から照射されるレーザ光を基準高とし「レーザ受光器」を用いて検測する。以下の写真－１に回転式レーザ発光器を、表－１に回転式レーザ発光器の主要諸元を、写真－２にレーザ受光器を用いた検測状況を示す。



写真－１　回転式レーザ発光器（Ｒｔ－５ｓａ）トプコン社製

表－１　Ｒｔ－５ｓａの主要諸元

レーザ光照射距離	300m（半径）
勾配設定	±50%
精度	±2.4mm／100m
総重量	7.9kg
寸法（高・幅・奥行）	203×289×337㎜



写真－２　レーザ受光器による検測状況

２－２．手順

レーザ検測をする際に、いくつかの事前準備が必要になる。以下にその内容を示す。

① 基準高A、B、C、Dの設置

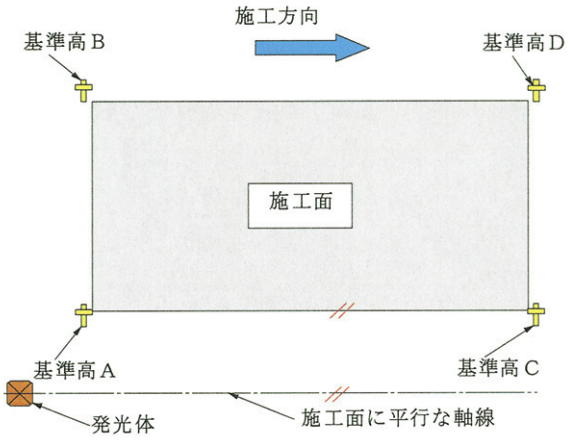
施工面全体の高さの基準となる丁張り杭を設置する。（図－１）

② 軸線の表示

施工面外に施工面に対して平行もしくは垂直な軸線を表示する。（図－１）

③ 回転式レーザ発光器の設置

発光器の勾配設定を正確にするため、手順②で表示させた軸線上に設置する。（図－１）



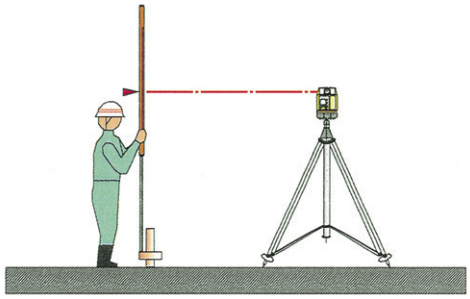
図－１　回転レーザ発光器の設置

④ 回転式レーザ発光器の設定

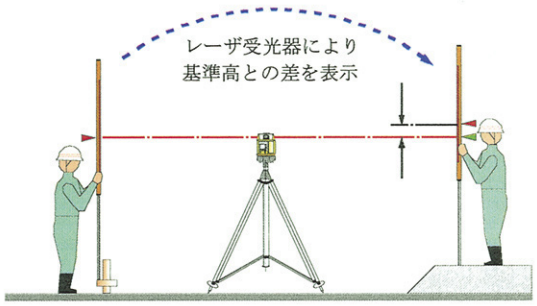
基準高A，B，C，Dを基に計画高に合わせた勾配及び高さを設定する。（図－２）

⑤ レーザ受光器での検測

上記手順まで設置したら、レーザ受光器を用いて目的の路床路盤の検測を実施する。（図－３）



図－２　回転レーザ発光器の設定



図－３　レーザ受光器での検測

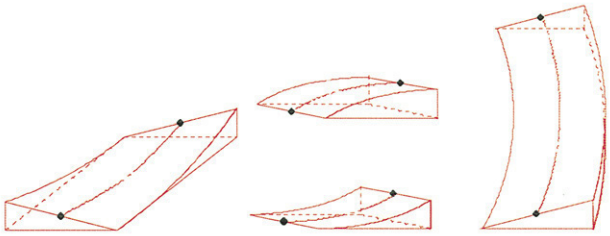
２－３．適用条件

レーザによる検測方法は、使用する回転レーザ発光器の特性上、以下に示すような条件下では適用できない。

① 連続して勾配変化した面（図－４）

② 濃霧

③ 雨天



図－４　レーザ検測が出来ない施工面

３．従来の検測方法との比較

３－１．水糸検測とレーザ検測

レーザ装置による検測方法は、レーザ光を水糸の代わりにするため従来の丁張り杭と水糸を用いた検測方法に比べて、事前に実施する測量作業や丁張り設置、検測員数の大幅な軽減がなされ、合理化された施工が可能である。また、これまではできなかった丁張り設置点以外の任意の測点での検測もできる為、出来形精度も格段に向上した。

実際の現場に於いて、水糸による検測方法とレーザ装置による検測方法を比較検討した。結果を次頁の表－２に、施工状況を次頁の写真－３、４に示す。

表－２　水糸検測とレーザ検測の比較

	水糸検測	レーザ検測
経済性	2～3名の人員が必要	1～2名の人員が必要
	測量コスト大（丁張り設置、日数、材料）	測量コスト小（数点の基準高）
施工性	丁張り間のみ検測可能	レーザ半径内ならどこでも検測可能
	検測中は重機や材料運搬車の動きが制限される	検測中の重機や材料運搬車の動きはほぼ無制限



写真－３　従来の施工状況



写真－４　レーザ検測時の施工状況

３－２．経済性

レーザ検測によって上層路盤を１０万㎡施工するケースを試算すると、従来の水糸検測による施工と比較して、測量や丁張り設置費用が約９０％、延べ作業員数が約３０％、総計して直接工事費で約１８％削減が可能である。

４．レーザ受光器の開発

４－１．既存のレーザ受光器と新レーザ受光器

共同開発しているイーベース社、トプコン社で現在市販されている２機種のレーザ受光器を実際に現場にて使用し、問題点を抽出することとした。使用した機種とその問題点を以下に示す。

１）ＴＸ－１１（イーベース社、写真－５）の問題点

① 水に弱い
② 片手で持って作業するには重い
③ 伸縮しない為受光位置の変更が困難
④ 表示が小さく見えにくい
⑤ レーザ光を自動で検出する時に時間が掛かる



写真－５　ＴＸ－１１（イーベース社製）

２）ＬＳ－７０Ａ（トプコン社、写真－６）の問題点

① 光部が小さく、垂直度合いを確かめながら受光位置を手動で探すため、検測に時間が掛かる
② 伸縮時の誤差が大きく正確さに欠ける
③ 表示が小さく見えにくい

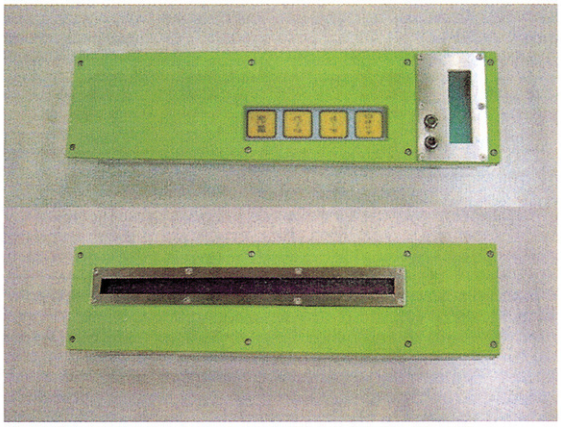


写真－６　ＬＳ－７０Ａ（トプコン社製）

前述の問題点を踏まえて、開発目標を次の通りとした。

① 総重量の軽量化
② 耐水対策型
③ 検測速度の向上
④ 検測値表示部分の視認性向上

その結果、受光部は現場での実使用に適した 200㎜前後とし、検測値表示部分は検測値を別置きで表示できるように無線式とした。新たに開発したレーザ受光器を写真－７に、主要諸元を表－３に示す。



写真－７　開発機

表－３　開発機の主要諸元

耐水性	耐水形
受光範囲	210mm
表示部	無線式
電源	単三乾電池×４本
使用時間	約40時間(アルカリ電池使用時)
総重量	約1 kg(電池含む)

４－２．性能確認試験

開発器の性能を確認するために既存器との比較試験を行った。試験は、検測速度、取り扱い易さに重点を置いて総重量、耐水性、視認性等も加えた比較を行った。その結果、開発機は、受光してから瞬時に検測値が表示され、取り扱いも煩わしさは感じなかった。
表－４に既存の受光器と開発機の性能比較結果を示す。

性能比較試験使用機器

① 受光器１：ＴＸ－１１（イーベース社）
② 受光器２：ＬＳ－７０Ａ（トプコン社）
③ 受光器３：開発機（ＮＩＰＰＯ・イーベース・トプコン共同）

表－４　性能比較試験結果

	TX－11	LS－70A	開発機
総重量	約2.7kg	約2.2kg	約1kg
取り扱い易さ	片手で作業するには重い	伸縮させた棒を固定しづらい	軽くて作業しやすい
検測速度	約8～10秒	約30～40秒(検測員の技量による)	瞬時
耐水性	非防水	耐水形	耐水形
視認性	○	△	◎

５．今後の課題

さらに、施工の合理化を図るために、次の２点を課題とした。

① 連続した勾配変化にも対応できる当該工法の合理化
② 厳しい自然環境下での当該工法の合理化

６．おわりに

今回実用化したレーザ装置による検測方法は、省力化、省人化といった時代のニーズに応えるものであり、多くの現場からも大変好評を得ている。今後も、施工を通じて施工機械のみならずあらゆる観点からの技術の確立に寄与していくと共に、現場のニーズに応えるべく改良、改善を行っていきたい。

最後に本工法の実用化に際し、社内・外の多くの関係者から貴重なご意見、ご助力を頂き、この場をかりて感謝いたします。

26. TS・GPSを用いた盛土締固め情報化施工管理要領（案）について

国土交通省　関東地方整備局　関東技術事務所：○菊地　健仁

1．はじめに

国土交通省では、施工現場から得られる情報を利活用した情報化施工の推進を図っており、その具体的な技術としてＴＳ（トータルステーション）やＧＰＳ（衛星測位システム）を利用して締固め機械の位置を計測し、その位置情報を有効に活用することにより、締固め回数による盛土の品質を管理する手法を取りまとめ、情報化施工に関する管理ツールの１つとして平成１５年１２月に「ＴＳ・ＧＰＳを用いた盛土の締固め情報化施工管理要領（案）」を策定しました。

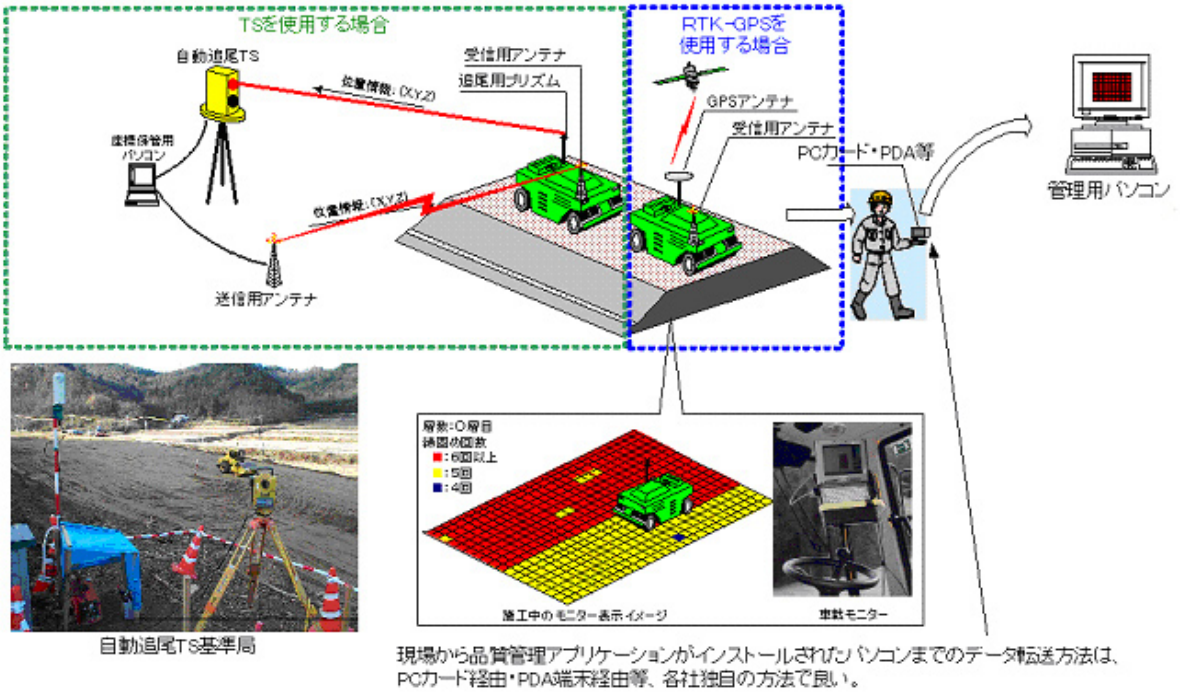


図１．ＴＳ・ＧＰＳを用いた盛土の締固め情報化施工の概要

2．ＴＳ・ＧＰＳを用いた盛土の締固め情報化施工管理要領（案）の概要

（１）適用の範囲

本管理要領（案）は河川土工及び道路土工において、ＴＳ又はＧＰＳを用いた盛土の締固め管理に適用する。

（２）目的

本管理要領（案）は河川土工及び道路土工において、ＴＳ・ＧＰＳを用いて盛土の締固め管理を行う際のシステムの基本的な取り扱いや施工管理方法及びデータ取得、締固め回数の確認方法を定めることを目的とする。

（３）管理項目

ＴＳ・ＧＰＳを用いた盛土の締固め管理方法の管理項目は、締固め回数とする。なお、所定の締固め度を確保するため施工含水比についても管理する。

（４）適用条件

ＴＳ・ＧＰＳを用いた締固め管理方法を適用し、効果的に運用するためには、施工現場の地形や立地条件、施工規模及び土質の変化などの条件を考慮しなければならない。

（5）締固め回数の確認方法

ＴＳ・ＧＰＳを用いた盛土の締固め管理は、ＴＳ・ＧＰＳが取得する締固め機械の位置座標（Ｘ，Ｙ座標）を基に、施工範囲全面を表す締固め回数分布図を、締固め機械のオペレーターがモニターで確認しながら施工と同時にかつ連続的に管理するものである。

（6）機器構成

ＴＳ・ＧＰＳを用いた締固め管理システムは、基準局、移動局及び管理局に設置する機器で構成する。

（7）ＴＳ・ＧＰＳの性能

施工に用いるＴＳ・ＧＰＳの測量機器は、以下の性能を有するものとする。

ＴＳ：距離精度±（５mm＋１０ｐｐｍ×基準局と移動局の距離）　角度精度１５度以下

ＧＰＳ：水平（ｘｙ）／垂直（ｚ）±（２０mm＋２ｐｐｍ×基準局と移動局の距離）

（8）データ処理システム

データ処理システムは、ＴＳ・ＧＰＳで取得した締固め機械の位置座標を無線等を介して車載パソコンに取り込み、施工とほぼ同時に締固め回数分布図をモニター表示出来るものとする。また、施工範囲を 0.25ｍ又は0.50mサイズの管理ブロックに分割でき、かつ締固め幅を任意に設定出来ること、さらに締固め機械の位置座標取得箇所と実際の締固め位置との関係をオフセット出来る機能を有するものとする。なお、ＧＰＳの場合、ＦＩＸ解でのデータのみを取得する機能を有するものでなければならない。

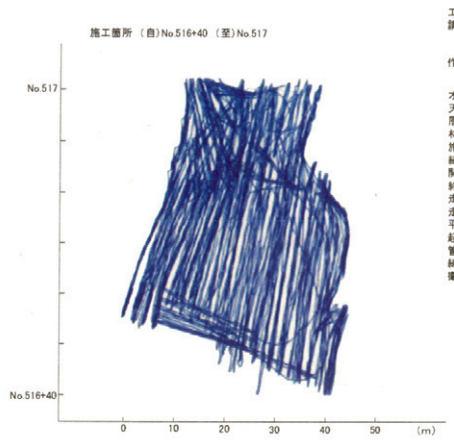


図２．走行軌跡図

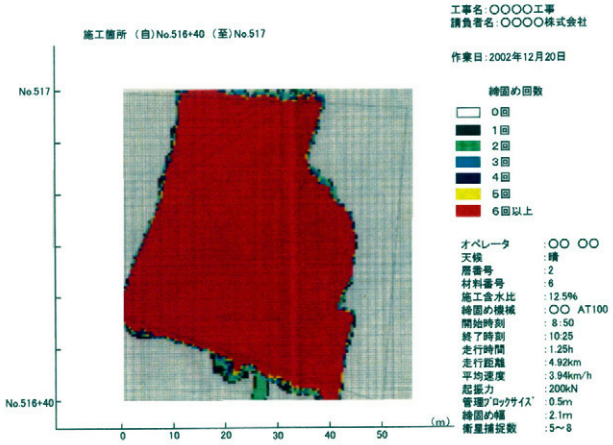


図３．締固め回数分布図

（9）振動ローラを使用する場合の留意事項

締固め機械として振動ローラを使用する場合は、起振しなければシステムが作動しないものとする。

(10) 計測障害に関する事前調査

締固め管理システムの適用にあたっては、地形条件や電波障害の有無等を事前に調査し、本システムを適用出来ない場所がある場合は、その範囲を明確にしておく。

(11) 試験施工による締固め回数の設定

本施工着手前及び盛土材料の土質が変わるごと、また、路体と路床のように品質管理基準が異なる場合に試験施工を行い、本施工で採用する締固め回数を定めるものとする。

(12) 管理ブロックサイズ

本管理要領(案)での適用機種は、ブルドーザ、タイヤローラ、振動ローラとし、締固め機械により決められた管理ブロックサイズを使用するものとする。

(13) 締固め判定

本管理要領(案)では、管理ブロックの四隅の一点あるいは一辺を締固め機械が通過すると、そのブロックを締固めたと判断する「管理ブロック四隅の一点判定方法」を標準とする。

(14) 締固め方法

車載パソコンのモニターに表示される締固め回数分布図において、施工範囲の管理ブロックの全てが、規定回数だけ締固めたことを示す色になるまで締固めるものとする。

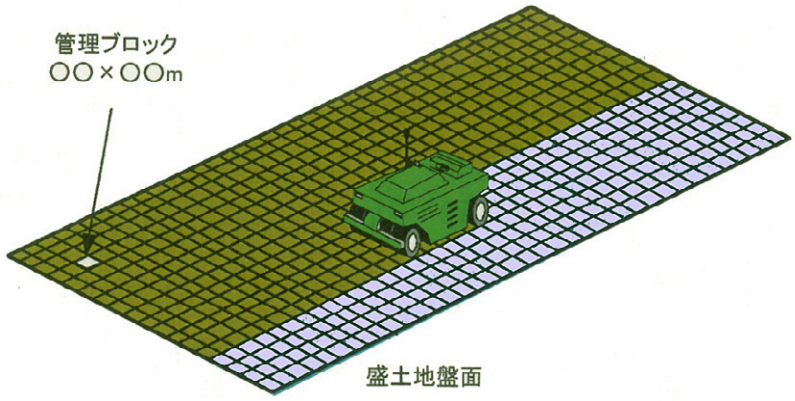


図４．管理ブロックの概念図

(15) 施工時管理

締固め回数分布図と走行軌跡図及び盛土管理図を施工時の日常管理帳票として作成・保管する。また、施工含水比を施工日ごとに測定し、記録するものとする。

(16) 締固め管理基準

締固め管理基準は、施工範囲全面を表す締固め回数分布図により行い、定められた締固め機械により決められた管理ブロック全てにおいて、規定回数だけ締固め機械が通過したことを確認しなければならない。

(17) 検査データ

締固め回数分布図と走行軌跡図及び盛土管理図を検査データとする。

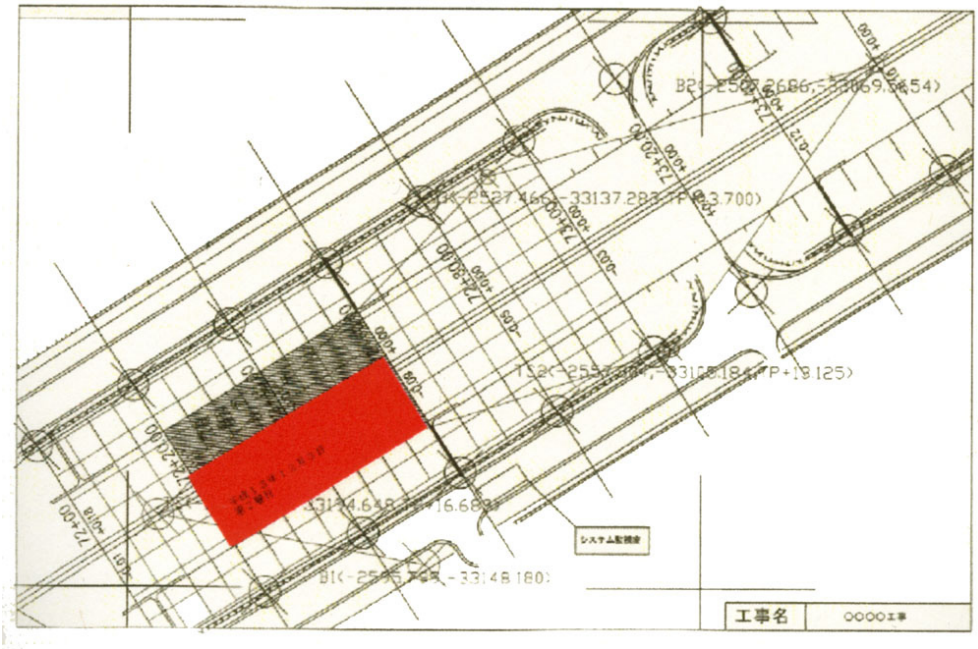


図５．盛土管理図

３．締固め判定方法と管理ブロックサイズの基準

（1）現場試験で採用した締固め判定方法

適切な管理ブロックサイズを決定するため、施工面積と締固め回数などを同一にした施工条件において、比較試験を実施した。

なお、この試験で採用した締固め判定方法は、下記の２方法である。

1）管理ブロック四隅の１点判定方法

図６で分かるとおり、締固め機械が管理ブロック四隅の１点又は１辺を通過するだけで、そのブロックを１００％締固めたと判定する。一見、踏み残しが多くなると推察されがちであるが、締固め機械の幅を示す

線に隣接ブロックが未締固めブロックとして残っていて、このブロックを締固めることで、最終的には施工範囲のほとんどの面積を締固めることが出来る。

2）管理ブロック面積の５０%判定方法

図７で分かるように、例えば管理ブロック面積の４９%を締固め機械が通過しても、そのブロックは締固めしていないと判定する。したがって、既に締固めた箇所を再締固めする頻度が多くなる。この判定方法は、綿密に締固めることにはなるが過転圧となり易く、また、管理ブロック四隅の１点判定方法よりも作業効率が悪くなる。

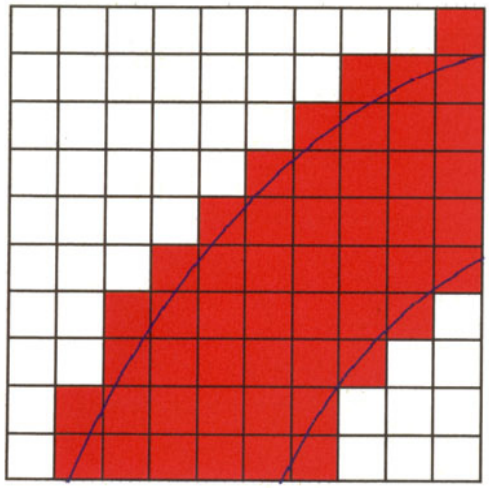


図６．管理ブロック四隅の１点判定方法

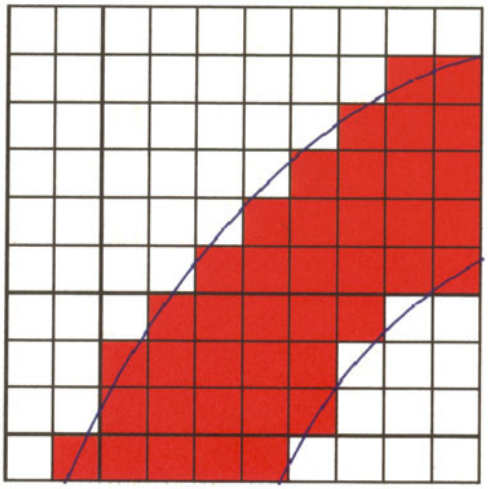


図７．管理ブロック面積の５０%判定方法

（2）管理ブロックサイズの基準

試験フィールド事業で実施した管理ブロックサイズ決定試験の結果から、次のことが確認出来た。

1）施工の締固め率は、各締固め機械とも平均で約９３%程度である。（バラツキが大きい。）

2）システム施工で、管理ブロック面積の５０%判定方法の場合、どの管理ブロックにおいても、従来施工よりも締固め率（施工品質）はよいが、作業効率（施工時間比）がかなり劣る。

3）システム施工における管理ブロック四隅の１点判定方法と、従来施工とを比較した場合、締固め率（施工品質）と作業効率（施工時間比）が同等以上となる管理ブロックサイズは、ブルドーザが０．２５m、タイヤローラと振動ローラが０．５０mである。

4．おわりに

本管理要領(案)は、新たな締固め度を提案するものではなく、規定の締固め度が得られる締固め回数と、締固め機械の走行軌跡を追尾、記録することで管理しようとするものである。

これまでの盛土の品質管理では、締固めた土の密度や含水比等を点的に測定する品質規定方式が主流であった。これに対し、本管理要領(案)では、事前の試験施工において、規定の締固め度を達成するための施工方法を確定しておき、実施工事ではその施工法に基づき締固め回数による管理を行っていく工法規定方式を採用している。

品質規定方式では、盛土の品質を直接計測することが出来るのに対し、工法規定方式では、盛土の品質を間接的に評価することになるが、締固め回数の管理は締固め機械の走行軌跡を把握することにより実施されるため、作業ヤード全域を面的に管理することができ、品質の均一化や過転圧の防止等に加え、締固め状況の早期把握による工程短縮が図れるなど多くの利点を有している。

本管理要領（案）で示す管理方法は、現行の砂置換法及びＲＩ計法に加える第３の盛土施工管理手法として位置付け、個々の現場条件に応じて、適切な管理方法が選択して使用されることを想定している。この管理手法は、特に土質特性の変化が少ない現場での適用性が高く、施工管理の大幅な改善が期待され、今後、普及促進を図っていくものである。

27. ネットワーク型－RTK測量の建設工事への導入

株式会社トプコン販売　東京営業所　新規営業グループ：○玉木　直行
鹿島・市川・青協・杉山共同企業体　テクノプラザ造成工事事務所：所長　森　信幸
株式会社ジェノバ：常務取締役測量事業部長　細谷　素之

１．はじめに

位置測定技術として、ＧＰＳ（Ｇｌｏｂａｌ・・Ｐｏｓｉｔｉｏｎｉｎｇ・Ｓｙｓｔｅｍ）が使用され始めて久しい。民間においてはナビゲーションや車輌の運行管理システム（配車システム）にＧＰＳが使われており、ＧＰＳを利用した測位技術は、日常生活に欠かせない程、浸透している。

測量分野においては、１９８６年にＧＰＳが一部導入されて、１９９６年の公共測量作業規程の改定に至り、従来のトータルステーションに加えて、正式に基準点測量にＧＰＳが使用できるようになった。これによりＧＰＳは特別な測量機との位置付けから、一般測量機としての認識が高まり、測量の手法が大きく変わったものと考える。

更にＲＴＫ（Ｒｅａｌ・Ｔｉｍｅ・Ｋｉｎｅｍａｔｉｃ）と呼ばれる新たな測量方法が、２０００年に公共測量作業規程の作業マニュアルに追加されたことで、益々、測量分野におけるＧＰＳの普及率が高まってきている。

２．ＲＴＫ手法

広く一般的になりつつあるＧＰＳを使用した位置測定の中で、重要なファクターは「精度」である。ＧＰＳを使用する環境で、その要求精度に基づいた測り方や利用方法が行われる。例えば地殻変動量を計測する電子基準点の場合は、精密な精度が必要な為、２４時間常時データを取得し続け、最終成果は約２週間後に算出される。

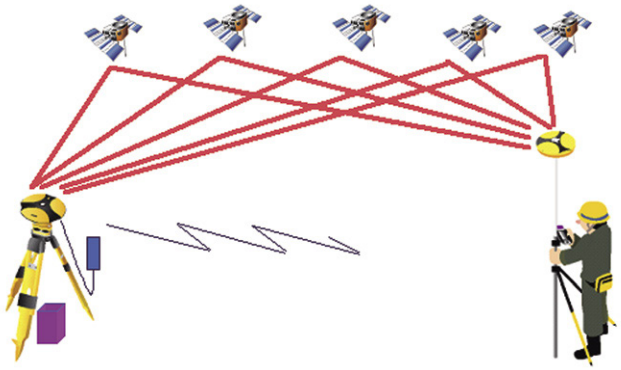
一方、カーナビゲーションの場合は、地図上に自分の車の位置がどこにあるのかが概略判れば良いが、瞬時に位置が判らないとその意味を発揮しない。

このように、精度により観測時間が異なるのが従来の利用方法だが、近年、精度と瞬時性を同時に要求されるようになってきた。特に施工現場においては、高精度な位置情報がリアルタイムに取得できるということは大きな意味をもっている。

ＲＴＫ手法は、１台のＧＰＳ受信機を既知点（固定点）に設置、継続的に観測を行う。もう１台のＧＰＳは新点（移動点）に移動、固定局と移動局の観測点相互で送受信し、瞬時に基線解析から３次元の相対位置を求める手法である。

リアルタイムで移動側の位置が測定できるという大きな利点を生かし、大規模造成工事では、ＲＴＫ－ＧＰＳ手法を使用した、ドーザーや振動ローラー及び有人測量など、数多くの工事にその技術が使用されている。

（図―１）

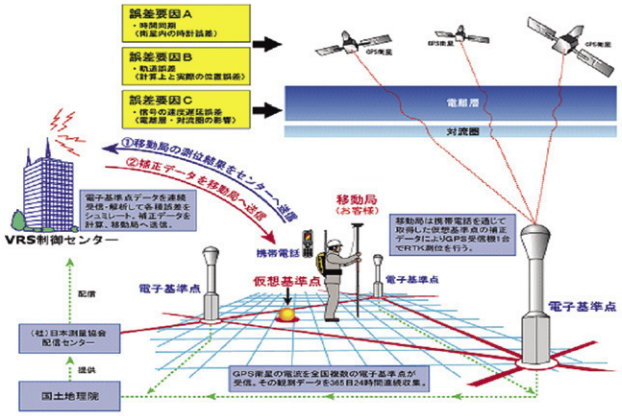


図－１　ＲＴＫ手法概念図

３．ネットワーク型ＲＴＫ手法

ネットワーク型ＲＴＫ手法とは、仮想基準点を用いたＲＴＫ測位方式であり、遠く離れた複数の基準点での観測値から、近傍に基準点があるようなデータを作る手法である。実際には固定点を設置しないが、仮想の固定点を作成し、あたかもその固定点からの情報であるかのごとく、補正データを受信して、移動局の位置を測位する測量手法である。

（図―２）



図－２　ネットワーク型ＲＴＫ手法概念図

今回、紹介するテクノプラザ２期造成工事においては、ＲＴＫ手法の最新技術であるネットワーク型ＲＴＫ手法を採用し、施工を行っている。

ネットワーク型ＲＴＫ手法による測量方式は、本年２００４年度に公共測量の分野において、「仮想基準点方式による公共測量マニュアル」が制定され、測量分野においても公に測量技術として使用できる新技術として注目を集めている、最先端の技術として注目を集めている。

４．実施例の紹介

（１）導入工事

・工事名：テクノプラザ２期造成ＪＶ工事
・工事地区：岐阜県各務ヶ原市
・施工：鹿島・市川・青協・杉山　共同企業体
・施工期間：平成１６年３月１日～
　　平成１７年１０月３１日迄
・土工量：１，２００，０００㎥

（２）実施状況

ＧＰＳを使用した高精度位置測定は、転圧振動ローラーに搭載され、転圧締固め管理システムの位置測定に利用されており、工事の品質管理に使われている。

（写真―１）（写真―２）

測位手法はネットワーク型ＲＴＫ手法を利用し、リアルタイムに振動ローラーの位置を算出。重機位置と転圧の回数をパソコンにて記録・管理している。

（図―３）

具体的に、テクノプラザ２期造成工事で行われているネットワーク型ＲＴＫ手法は、遠く離れた基準点として電子基準点のデータを使用している。美濃・愛知大口・愛知一宮の電子基準点・３点を使用して観測点付近に仮想基準点を生成、その生成されたデータを移動局で受け取り、仮想基準点からのＲＴＫとして測位する。情報の受け取り方法としては、ネットワーク型ＲＴＫの固定局の配信業務を行っている会社、（株）ジェノバのサーバーより情報を受けている。

汎用性の高い携帯電話をテレメーターとして使用し、具体的操作も携帯電話の電源を入れて電話を掛けるという単純なものであり、高精度なリアルタイム測位を行うという高度な技術を使用してはいるが、現実的な稼動は非常に使いやすいものに仕上がっている。

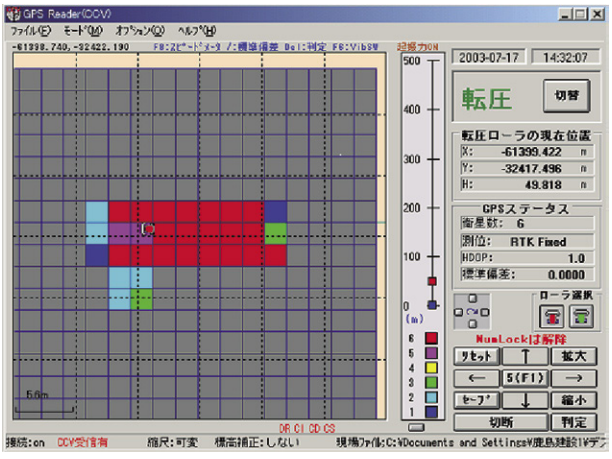
（写真―３）



写真－１　転圧振動ローラー設置状況



写真―２　モニター設置状況



図－３　転圧振動ローラーソフト画面



写真―３　ネットワーク型ＲＴＫで使用した携帯電話

（３）導入効果

テクノプラザ２期造成工事にてネットワーク型ＲＴＫ手法を使用した、導入効果について述べる。

①固定局設置の省略

先述の通り、ＲＴＫ手法については固定局及び移動局の最低２セットのＧＰＳ受信機が必要であるが、ネットワーク型ＲＴＫ手法を採用することで、自設の固定局設置は不要となる。このため、固定局用のＧＰＳ受信機の導入が不要となった。

②無線の申請が不要

ＲＴＫでの測位の場合は、固定局からのテレメーターとして多くの場合、無線を使用するケースが多い。無線は高出力のものを使用する際、総務省の各総合通信局に許認可申請を行う必要がある。

ネットワーク型ＲＴＫ手法を採用することで、申請の必要がなくなり、更にテレメーターが携帯電話という汎用的なものにすることで、システムの機材準備から、設置・調整に至るまで比較的短期間で行えた。

４．おわりに

測位技術は、飛躍的に進化しつづけており、今後も新技術を応用したものが出現するであろうと思われる。広く位置測位技術が民間利用されているこ

とからも、研究・実験・実用の大きな流れが続くことは間違いない。今後は、その技術をいかにして効率的な運用を行っていくか、その応用力が更なる合理化・コストダウンを図れるキーポイントであると考えられる。

今回紹介したテクノプラザ２期造成工事においても、ネットワーク型ＲＴＫ手法を取り入れたことで、測位のコスト削減が実現できたものと考えている。施工において、品質を向上させながらコストダウンを図る目的に沿ったシステムであると言える。ネットワーク型ＲＴＫに限らず、リアルタイムに位置計測を行う技術は、今後施工の現場にその情報技術と共に更に浸透していくと考えられる。

参考文献

長谷川昌弘・川端良和編著：基礎測量学、電気書院
２００４．４

28. 北海道電力純揚水式京極発電所上部調整池建設工事への情報化施工（IT 施工）システムの導入と実績について

鹿島建設㈱京極発電所上部調整池工事（事）：○堀川　明広
北海道電力㈱京極水力発電所建設所：高野　準
株式会社トプコン販売：江藤　隆志

1. はじめに

北海道電力㈱が虻田郡京極町に建設を進めている純揚水式京極発電所の上部調整池工事は、広範囲な面積を改変する大規模な土工事と内側全面のアスファルトフェーシング舗設を含んでおり、縦横断的には約70%が曲面により構成されているプール形式の調整池である。また、建設地点は豪雪寒冷の厳しい気象条件のため、年間稼動期間が夏季の5ヶ月間に限定されることから、複雑な形状での大土工量の急速施工を実施しなければならない。

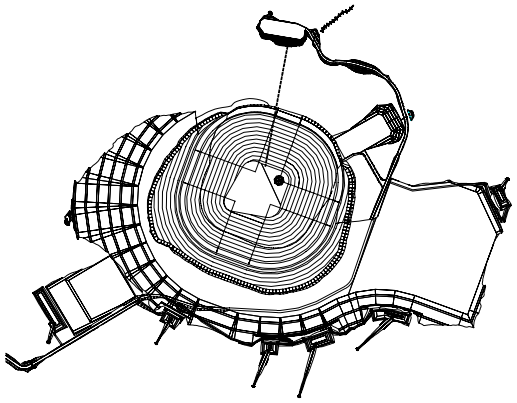
今回、上記の対策として3次元CADによる設計データ、GPS等による3次元測位及び重機の油圧制御技術を融合した3次元施工システムを中心に調査・設計・施工・施工管理までを一連のシステムで管理できるIT施工管理システムを開発・導入した。

当システムも導入後3年が経過する中で、様々な改良や開発を行った結果、実用的なシステムの域に達したのでその概要と実績について報告する。

表－1、図－1、2に上部調整池の工事概要を示す。

表－1 京極発電所上部調整池工事諸元

ダム形式	表面アスファルト 遮水壁型フィル(プール形式)
堤頂長	1,108.6 m
堤体積	1,251,000 m^3
天端標高	892.4 m
遮水壁面積	177,170 m^2
総掘削土量	6,193,000 m^3
総貯水容量	4,400,000 m^3
有効貯水量	4,120,000 m^3

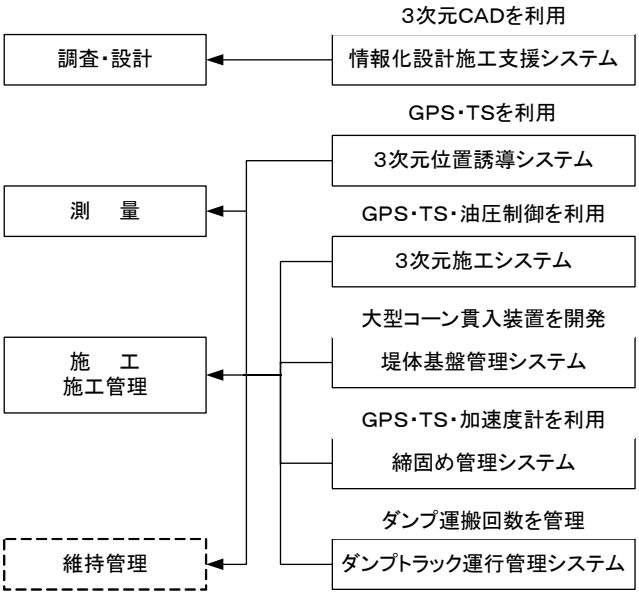


図－1 上部調整池平面図

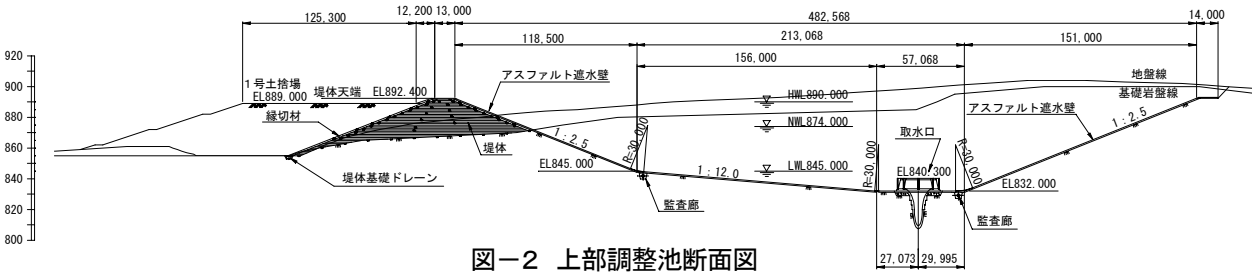
2. IT施工管理システムの概要

IT施工管理システムは、調査・設計－測量－施工・施工管理－維持管理における一連のプロセスにおいて、現況地形データや設計データ等の情報を共有し、各プロセスにおける省力化・省人化と高精度化を目的に構築されている。

図－3にIT施工管理システムの構成を示す。



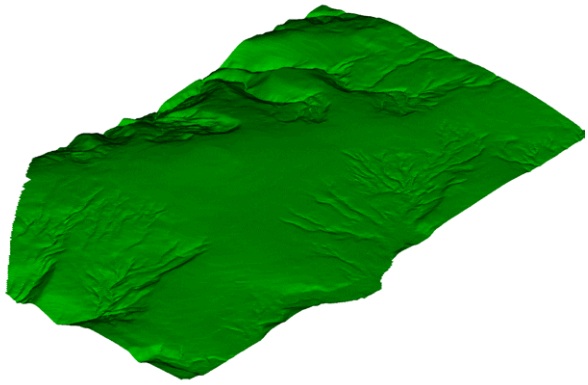
図－3 IT施工管理システム構成図



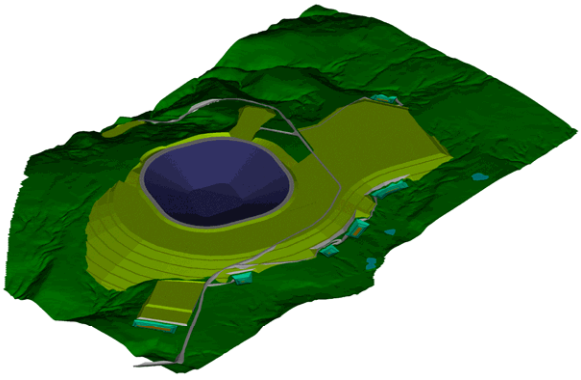
図－2　上部調整池断面図

2．1　情報化設計施工支援システム
（3D－DAM　CAD）

本システムは、AutoCADをベースとして開発したシステムであり、ダム等の設計・施工に伴う膨大なデータを3次元図形処理により、計画の変更・追加に迅速に対応するとともに、大幅な省力化及び高品質化を実現した設計施工支援システムである。大きな特長は以下のとおりである。



図－4　上部調整池着工前CG



図－5　上部調整池完成後CG

①3次元測量結果からの地形図の自動作図
②ダム・トンネル・道路造成等の3次元自動作図
③土量、面積等の自動数量計算・帳票出力
④出来形数量の自動作図・数量計算・帳票出力
⑤景観CGの自動作図
図－4、5に本システムで描画したCGを示す。

2．2　3次元位置誘導システム（3D－NAVi）

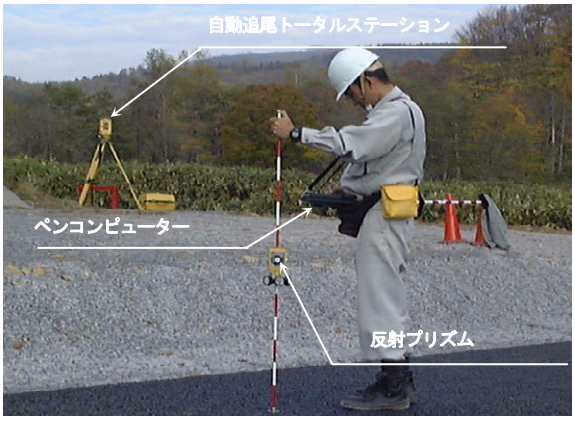
本システムは、RTK－GPS・自動追尾トータルステーション（以下「TS」と記す）等をポジショニング機器として使用し、ペンコンピュータに予め3D-DAM CADで作成した3次元メッシュデータを登録し、設計データ上の位置を画面上で指示することで、ワンマンで測定者を指定した位置に誘導することができるシステムである。

3D－NAViの最大の特徴は、この基本機能を利用して法面の切り出し位置や盛立位置への誘導を簡便・迅速に行うことができることである。

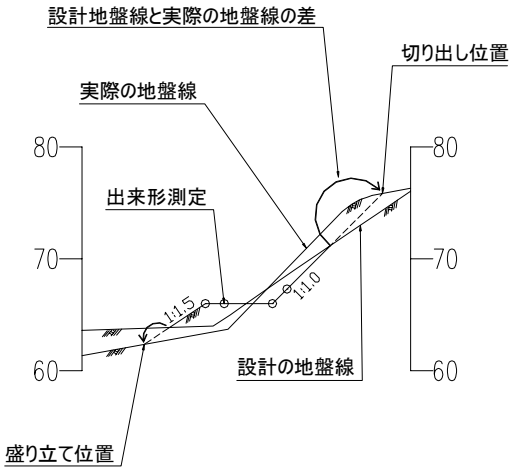
その他の機能は以下のとおりである。

①RTK－GPS またはTSとの連動が可能
②進行方向へのペンタイプコンピュータ画面回転機能
　（常に進行方向へ正対）
③音声ガイダンス誘導機能
④「ポイント誘導」指定点への誘導
⑤「法杭誘導」法面盛り立て・切り出し位置への誘導
⑥「方向杭誘導」方向杭設置位置への誘導
⑦「標高差測定」設計面と現在位置との標高差測定
⑧「座標差測定」登録点と現在位置との XYZ差測定
⑨「出来形測定」 自動測定機能による連続測定

写真－1に3D－NAVi（TS）による測定状況を示す。また、図－6に法面における法杭誘導の概念図を示す。



写真－1　3D－NAViによる測定状況



図－6　法杭誘導概念図

2．3　3次元施工システム（3D－MC）

本システムは、3次元設計データと RTK-GPS、TSによって測定された重機の位置情報をリアルタイムに照合させ、設計データどおりに重機の油圧をコントロールし自動制御を行うことができるシステムである。

3次元設計データをもとに重機の排土板、バケットの高さ・傾きを自動制御することにより、現場に3次元設計データをそのまま再現できることが特徴である。これにより従来、種々の工程を踏まえて行われてきた作業（丁張り等）を省力化し、かつより高い精度で効率的な施工を実現できるようになった。

3D－MCには、ブルドーザと油圧ショベルを導入しているが、以下に機種ごとのシステムの概要を述べる。

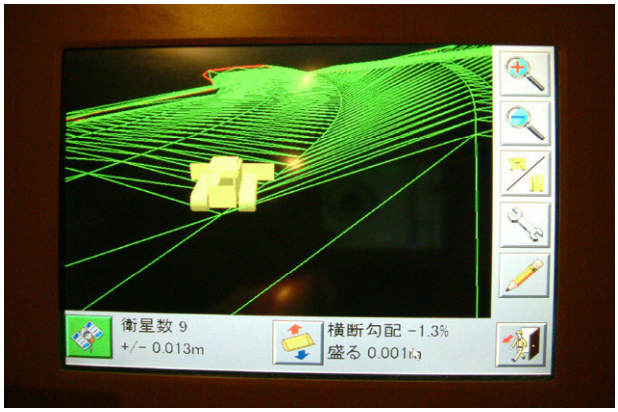
（1）　3D－MCブルドーザ

ブルドーザを所定の位置まで誘導することができ、排土板の高さやチルトの自動制御（油圧制御）と方向指示を行うことができる。一般的な土工事の管理基準値が適用される場合はRTK－GPSを使用し、アスファルトフェーシングの施工基盤のような施工管理基準値の厳しい個所については、TSをポジショニング機器として使用する。

写真－2に3D－MCブルドーザの施工状況を、写真－3に搭載コンピュータ画面を示す。



写真－2　3D－MCブルドーザ施工状況



写真－3　3D－MCブルドーザ搭載コンピュータ画面

（2）　3D－MC油圧ショベル

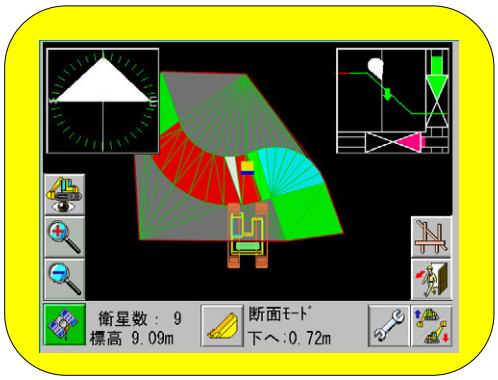
3D－MC油圧ショベルは、ツインGPSアンテナ・ロータリーセンサ・傾斜センサから構成され、油圧ショベルを所定の位置まで誘導することができ、バケット刃先が設計法面切り出し位置（盛立位置）やバケットの法面に対する位置を運転席の専用コンピュータに表示する。

これらの機能により、あらゆる曲線（曲面）でも丁張りをほとんど設置することなく作業することが可能である。

図－7に3D－MC油圧ショベルの概念図を、写真－4に施工状況を、写真－5に搭載コンピュータ画面を示す。



写真－4　3D－MC油圧ショベル施工状況



写真－5　3D－MC油圧ショベル
搭載コンピュータ画面

2．4　堤体基盤管理システム

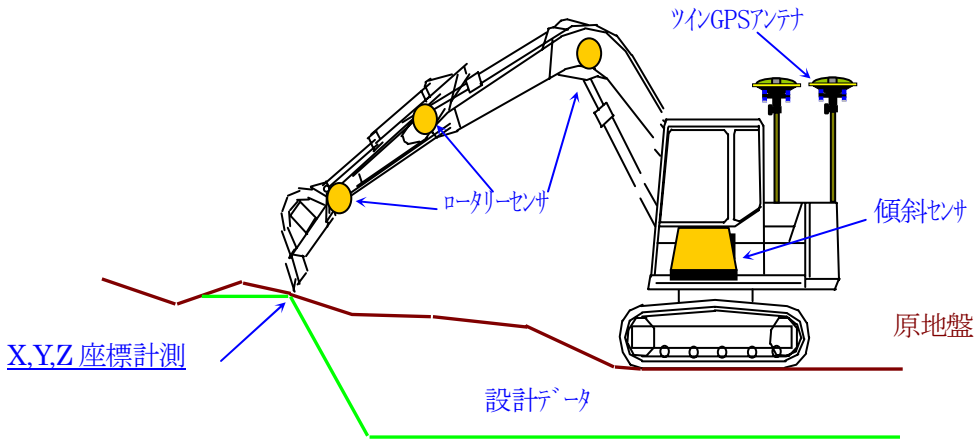
本システムは、本工事の特徴である土砂地盤に対して、堤体基盤の強度を短時間で簡易に把握するため、油圧ショベルに大型コーン貫入装置を装着し、基盤面の強度試験を行うシステムである。

試験データは油圧ショベルに装備された専用表示器にリアルタイムで表示され、即時に基盤強度が確認できるとともに、3D－NAViとの連動により3次元位置情報も含めたデータが取得できる。また、試験結果から、本システムの解析ソフトで品質管理図の作成も可能である。

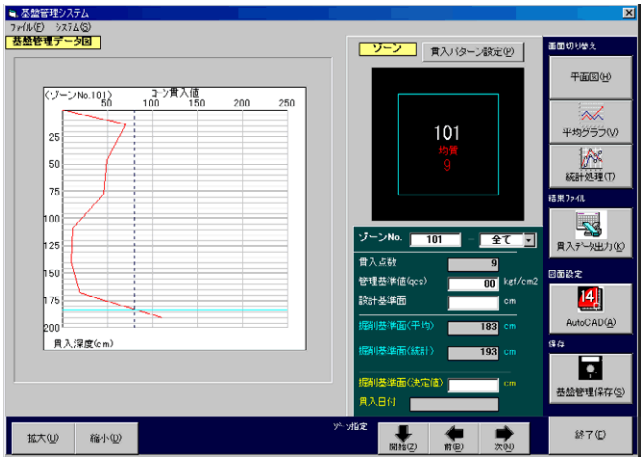
写真－6に貫入試験状況を、写真－7に解析ソフト画面を示す。



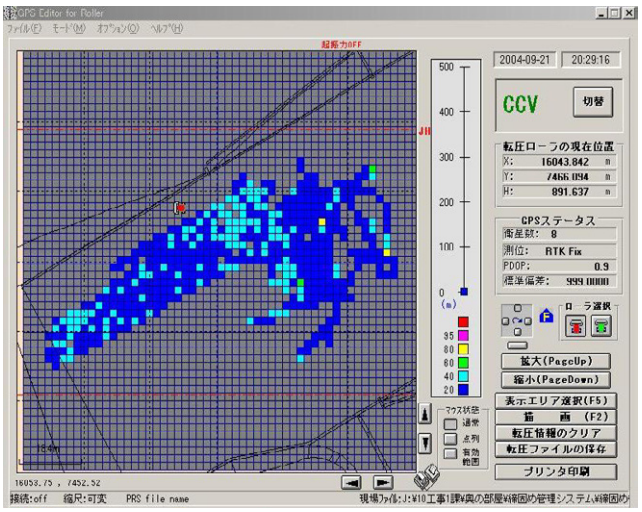
写真－6　貫入試験状況



図－7　3D－MC油圧ショベル概念図



写真－7　解析ソフト画面



写真－9　解析ソフト画面

2. 5　締固め管理システム

本システムは、RTK－GPS等の測位システムを用いて、盛土の締固め回数を設定したメッシュ毎に管理するものである。予め盛土転圧エリアをメッシュで設定し、規定回数締固めたか否かを振動ローラの走行軌跡を分析して色分けで判定する。

また、ローラに設置した振動加速度計の信号から転圧面の締固め度と基本振動周波数（CCV）を求め、運転席のデジタルメータに表示し、締固め度を面的に管理するシステムも試験導入している。

写真－8に転圧状況を、写真－9に解析ソフト画面を示す。



写真－8　転圧状況

2. 6　ダンプトラック運行管理システム

本システムは、ダンプトラックの運転手全員にCFカードを配布し、キャビン内に搭載したPDAに土質・切土場・盛土場別の運搬データを入力・収集するシステムである。1日の作業終了時にCFカードを回収し、自動集計処理された土質・切土場・盛土場別の運搬回数結果を一覧表及びグラフ化することが可能である。

3. IT施工管理システムの導入実績

当現場で導入しているIT施工管理システムの中で、特に測量・建設機械関係のシステムを中心に、以下に導入実績を示す。

3. 1　3次元位置誘導システム（3D－NAVi）

本システムは、当現場で5セット導入されている。

GPS基地局を現場内に設置し、工事用無線にてRTK－GPSを運用しており、土工事の出来形測量や切土・盛土測量に利用している。また、TS対応は2セット分導入済みであり、堤体盛立試験の沈下量測定やアスファルトフェーシングの出来高測量等、高精度の測量に利用している。測位システムの違いによる測定精度は、以下のとおりである。

① RTK－GPS：平面　±10mm
　　高さ　±20mm
② 自動追尾TS：平面　±1mm
　　高さ　±1mm

3．2　3次元施工システム（3D－MC）

（1）　3D－MCブルドーザ

本システムは、当現場で3セット導入されている。

2セットは油圧制御対応であり、1セットは油圧制御対応なしの表示・誘導タイプである。3セットとも測位システムとしてRTK－GPSとTSに対応しており、土工事ではRTK－GPSを使用し、アスファルトフェーシングの施工基盤等にはTSを使用している。測位システムの違いによる施工精度は、以下のとおりである。

① RTK－GPS：平面　±50mm
　　高さ　±50mm
② 自動追尾TS：平面　±25mm
　　高さ　±25mm

（2）　3D－MC油圧ショベル

本システムは、当現場で3セット導入されている。

RTK－GPSによる制御のみではあるが、現在までに曲面を含む切土・盛土作業に使用しており、十分な精度で施工可能である。施工精度は、以下のとおりである。

① RTK－GPS：平面　±50mm
　　高さ　±50mm

3．3　締固め管理システム

本システムは、当現場で1セット導入されている。

RTK－GPSによる転圧回数の面的な管理においては、実用上満足の行く精度が得られている。

TSによる試験施工も実施しているが、今後の改良によっては、沈下測定によりリアルタイムに締固め度の管理が可能になると考えられる。

施工精度は、以下のとおりである。

① RTK－GPS：平面　±20mm
　　高さ　±20mm
② 自動追尾TS：平面　±5mm
　　高さ　±5mm

3D－MCブルドーザと比較して施工精度が高い理由として、振動ローラの施工速度や敷均し後の施工に起因するもと考えられる。

4．　導入効果と今後の課題

前述のように、IT施工管理システムは種々の情報技術（IT）と重機の油圧制御・センサ技術等を組合せ、調査・設計－測量－施工・施工管理を一体として管理していくものであり、導入により以下に示す効果を得ることができた。

① 重機土工工事における多大な省力化・省人化と高い施工精度を確保することが可能となった。
② 各種管理資料（出来形図、数量計算等）を迅速にかつ正確に作成するとともに、全てのデータの電子納品が可能となった。
③ 土工事では初めて、面的な管理が可能となり、各層毎のトレーサビリティを保証することが可能となった。

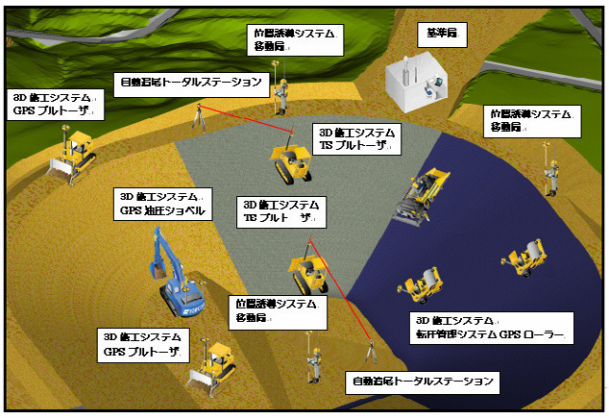
今後の課題としては、アスファルトフェーシング舗設工事に向けて、さらなる施工精度の向上が必要であり、測位システムの改良（GPSとTSの融合）と油圧制御・センサ技術及び耐久性の改良を進めることが重要となる。

5．　ま と め

IT施工管理システムの開発から導入初期の段階では、ハード・ソフトの両面で種々の不具合が発生し、その都度、関係部署の多大なる努力により問題を解決し、実用的なシステムを構築することができた。

本システムの実用化にあたりご指導・ご協力を頂いた関係各位に深く感謝の意を表します。

最後に本システムの施工イメージを、図－8に示す。



図－8　IT施工管理システム施工イメージ

29. 無人化施工による鋼製スリットダム工事

株式会社フジタ　九州支店：○三鬼　尚臣、須郷　茂夫

１．はじめに

国土交通省雲仙復興事務所は，雲仙・普賢岳火山砂防計画に基づき，平成６年１月より，遠隔操作重機による無人化施工試験工事を開始した。平成７年９月には水無川１号砂防えん堤の築堤に着手し，平成 10 年３月末には水無川２号砂防えん堤が完成した。これら２つの砂防えん堤は，GPS 施工管理システムを用いた無人化 RCC 工法により築堤され，完成後約 170 万㎥の土砂を補足することが可能となった。しかしながら，長期化･大規模化した火山災害から地域の安全を確保するためには，さらに上流部における砂防設備の整備が必要であり，無人化施工による適用工種の拡大を図るため，さらなる研究・開発が求められた。そこで，平成 14 年 10 月より水無川砂防えん堤スリット工事において，これまでの遠隔重機操作技術，映像通信技術，遠隔計測技術を駆使した鋼製スリットえん堤工事に着手した。１基当たり 15 トンの鋼製スリットを精度よく設置し，鋼製スリットの固定方法としてマスコンクリート規模の高流動コンクリート採用するなど，その全工程を遠隔操作にて施工した。



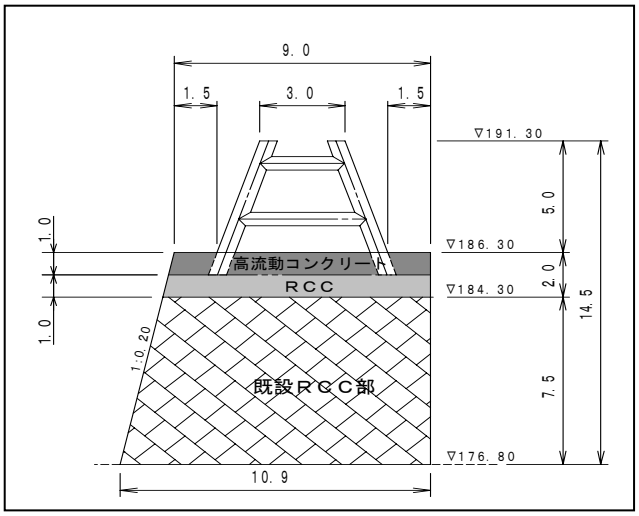
図－１　水無川３号砂防えん堤完成位置図

本報文では，水無川３号砂防えん堤スリット工事における施工成果の紹介と現在施工中の赤松谷川１号砂防えん堤スリット工事おいて実施予定している新規開発技術の紹介を行う。

２．鋼製スリットえん堤の概要

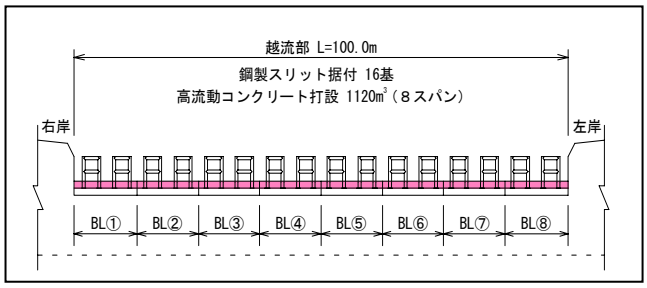
鋼製スリットえん堤は堤体越流部を格子状（スリット）にすることにより，小規模な洪水の際に流下する土砂はスリット間を透過させ，大規模な土石流の発生に備えて，えん堤上流域の貯砂容量を確保することに優れた砂防施設である。また，鋼製スリット砂防えん堤は，従来のコンクリートえん堤と鋼製スリットを組み合わせた複合えん堤と言える。

図－１に水無川３号砂防えん堤の完成位置図を示す。水無２号砂防えん堤から上流に向かって右側が水無川３号えん堤，左側が赤松谷川１号えん堤である。既設 RCC（Roller Compacted Concrete）部の上に RCC 基礎コンクリート 1.0mを打設後，鋼製スリットを設置し，厚さ 1.0mの高流動コンクリートで根固めを行った。図－２に鋼製スリットえん堤標準断面図を示す。



図－２　鋼製スリットえん堤標準断面図

堤高 14.5m，堤長 232.40m，越流部 100m の区間に 16 基の鋼製スリットを設置し，8 つのブロックに分割して高流動コンクリートを打設した。図－３に鋼製スリットえん堤正面図示す。



図－３　鋼製スリットえん堤正面図

３．鋼製スリット砂防えん堤標準工法の策定

鋼製スリットの運搬・据付から高流動コンクリートの運搬・打設までの一連の施工過程を無人化により実施する前例のないものであった。そこで，「施工方法提案型」の方式を採用し，技術提案がなされた。その提案技術は以下のとおり設計に反映され，標準工法が定められた。

(1)鋼製スリットの運搬･据付け

①鋼製スリットの運搬は，重ダンプトラックにより安全に運搬する。

②鋼製スリットの据付けは，バックホウ（把持装置付き）により所定の精度で安全に設置する。

(2) コンクリートの運搬打設

①コンクリートは，下層部をＲＣＣ工法，上層部を有スランプコンクリートとする。

②有スランプコンクリートの運搬は，品質確保を考慮しアジテータ機能付きトラックとする。

③有スランプコンクリートの打設は，平坦性等からポンプ車による。

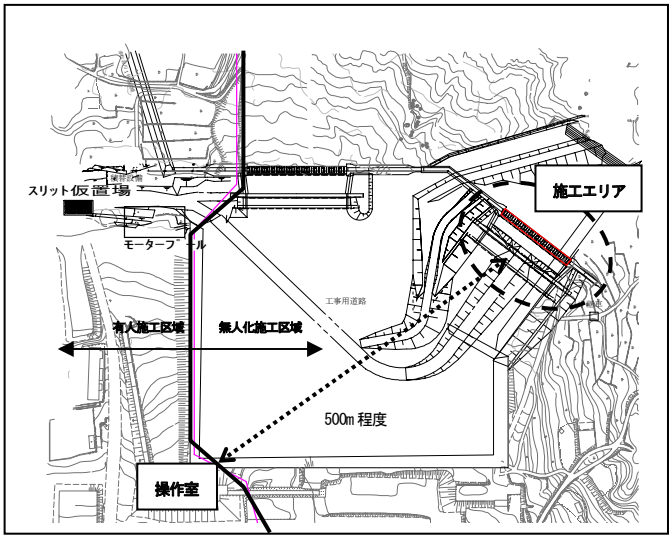
(3) 型枠

①上下流側の型枠は土砂型枠とする。

②妻型枠は，転用または埋設できるものとし，バックホウ（把持装置付き）により設置する。

４．鋼製スリット砂防えん堤の無人化施工

図－４に全体施工平面図を示す。水無川２号砂防えん堤の右岸袖部に，遠隔操作室を設け 500m程度離れた場所から遠隔操作を行った。上記で述べた標準工法に基づき，図－５に示す施工手順を設定した。



図－４　全体施工平面図



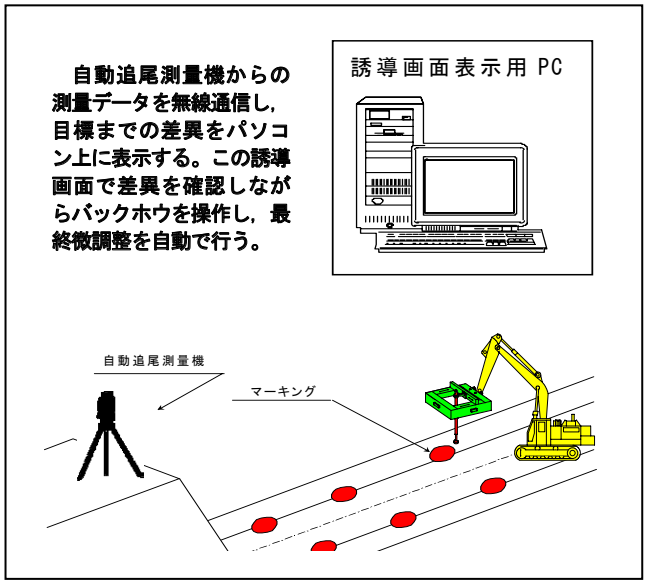
図－５　無人化施工手順

基礎コンクリート下層部の RCC を打設後，スリット据付位置を遠隔操作でマーキングする。高流動コンクリートの打設サイクルから，打設ブロックを 8 箇所に分割し，第 1 日目にスリット 2 基の据付と型枠の設置を行う。続いて第 2 日目に高流動コンクリート打設する。このサイクルを 8 回繰り返して越流部を完成させた。

５．鋼製スリットの据付位置マーキング

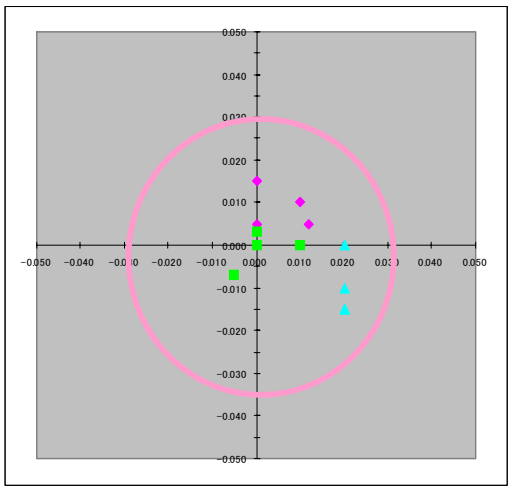
鋼製スリットの据付位置のマーキングおよび基準高さの計測は無人測量システムにより実施した。

無人測量システムは自動追尾式光波測距儀を用いて，リアルタイムに位置を計測しながら，マーキング機構を搭載したラジコンバックホウを目標点まで誘導するシステムである。図－６に無人測量システムの概要図を示す。



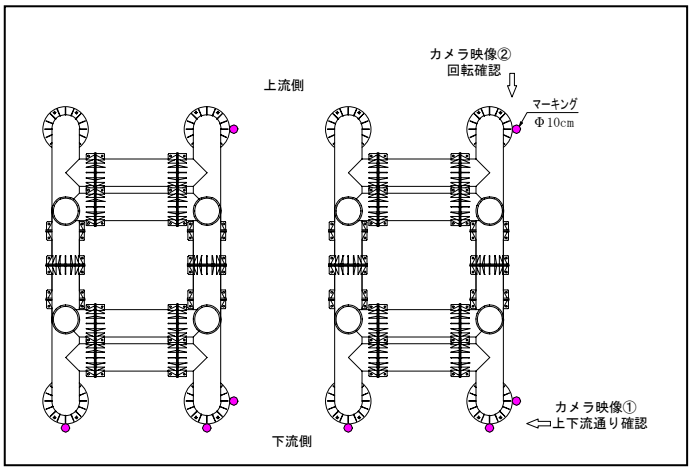
図－６　無人測量システム概要図

無人測量システムのマーキング精度については，事前に有人区域にて試験施工を行い，±30㎜以内の誤差であることを確認した。図－７にマーキング誤差分布を示す。



図－７　無人マーキングの誤差分布

スリット１基に対してＬ型に４箇所のマーキングを施した。えん堤軸方向に２箇所，直角方向に２箇所ベースプレートに接するようにマーキングを配置し，２方向からのカメラ映像でスリットの位置と回転を確認することとした。図－８にカメラ視認方向とマーキング配置図を示す。



図－８　カメラ視認方向とマーキング配置図

６．鋼製スリットの運搬･据付

鋼製スリットの運搬はラジコンダンプトラック(45t)のベッセルを取り外して専用の運搬架台を取り付けたスリット運搬車にて行った。

【施工上の留意点】

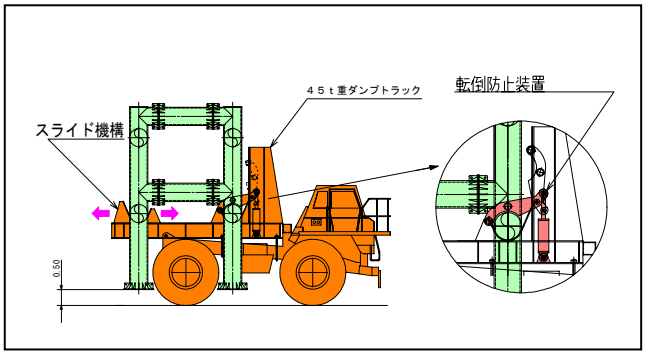
急な勾配(10%程度)の工事用道路を運搬する際に，鋼製スリットが転倒する可能性が考えられた。

【改善と工夫】

①運搬時に鋼製スリットがずれて転倒しないように，遠隔操作での開閉を可能にしたフックにより固定する転倒防止装置を考案した。

②バックホウにて鋼製スリットを把持する際に，把持抵抗を緩和するための検討を行い，後方の荷台にはスライド機構を設けた。

図－９にスリット運搬車を示す。



図－９　スリット運搬車側面図

鋼製スリットの据付は専用の把持装置を搭載したラジコンバックホウ（3.5m³）にて行った。

【施工上の留意点】

鋼製スリットの高さ（H6000mm）重量（W15t）と大型であるため①ラジコンバックホウの機種選定，②把持装置の製作・取り付け方法，③重心位置，④据付時の工夫等を検討する必要があった。

【改善と工夫】

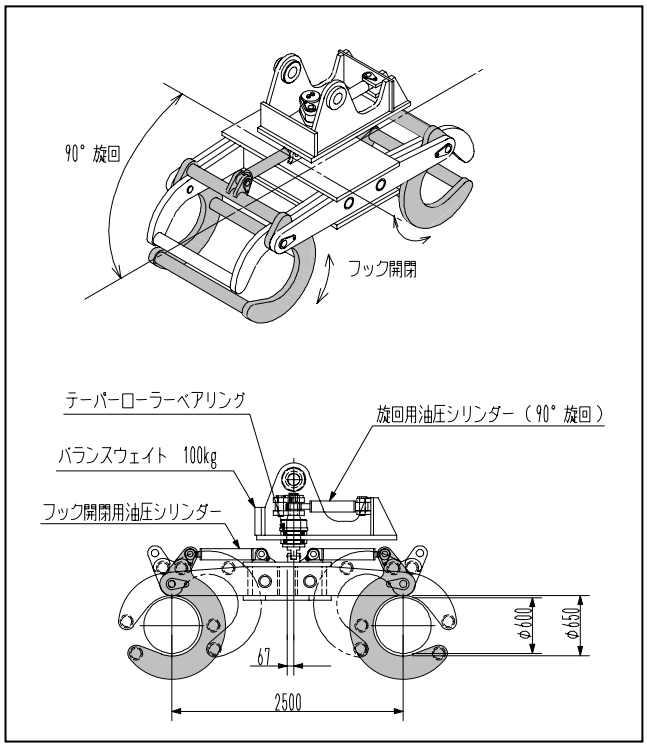
①ラジコンバックホウの機種選定では同重量の鉄板でテスト行い，吊上げ限界範囲内であることを事前に確認した。

②把持装置は油圧機構により，フックの開閉による鋼製スリット鋼管を掴む構造とした。

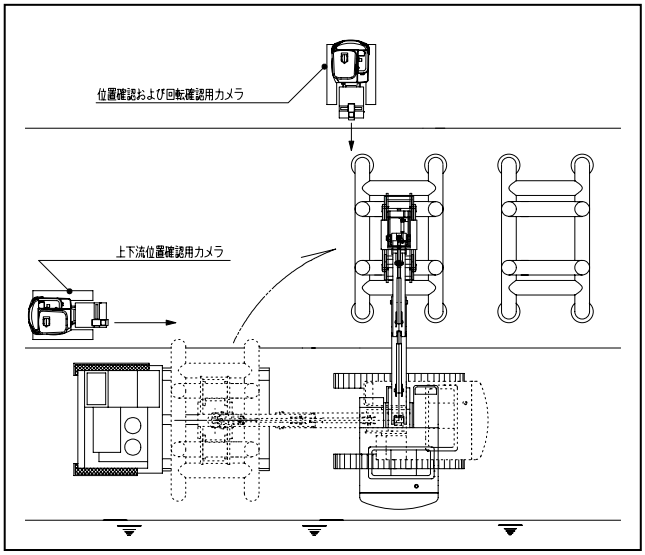
③把持装置に重心位置を考慮したバランスウエイトを追加して，鋼製スリット据付け時のバランス調整を図った。

④据付時の工夫として，スリット把持装置を回転させる機構を，油圧シリンダー用いた機構とした。これにより，油圧モータ特有のバックラッシュの低減と把持装置の重量を小さくすることができた。

図－10 にスリット把持装置詳細図を図－11 にスリット据付重機配置図を示す。



図－10　スリット把持装置詳細図



図－11　スリット据付重機配置図

スリット据付作業は無人測量システムによるマーキングとスリット脚部とのずれをモニター映像で確認し，据付目標値内（±50mm）に達するまで繰返し据付作業を行った。据付高については，事前に鋼製スリット脚部位置の高さを無人測量システムで計測しておき，ベースプレートの底面に鋼材（H-100）を溶接して調整を行った。

鋼製スリット据付1基あたりの平均サイクルタイムは約2時間であり，1日あたり2基の据付が標準である。据付完了後は妻型枠の設置と土砂型枠の整形を行う。

鋼製スリットの据付精度は，平面位置で最大37mm（据付精度規格値±100mm），基準高さは23mm（据付基準高規格値±50mm）であり，規格値を十分満足する値が得られた。

7．高流動コンクリートの運搬･打設

鋼製スリットの根入れ部となる基礎コンクリートについては自己充填性と自己レベリング性に優れたコンクリートが必要とされる。このため，打設エリア内のスリット（障害物）の間隔および無人化施工による天端の平坦性確保の観点から自己充填性ランク２の高流動コンクリートを採用した。高流動コンクリートの運搬にはラジコンダンプトラック（45t）を改造し，移動中の材料分離を防止するためのアジテータ機能を付加した 18m³ 積タン

クを搭載した。

【施工上の留意点】

①材料の分離

②運搬車のタンク内部壁面に付着した粘性の高い高流動コンクリートの清掃。

③高流動コンクリート打設中のタンク内残量が操作室で確認することができない。

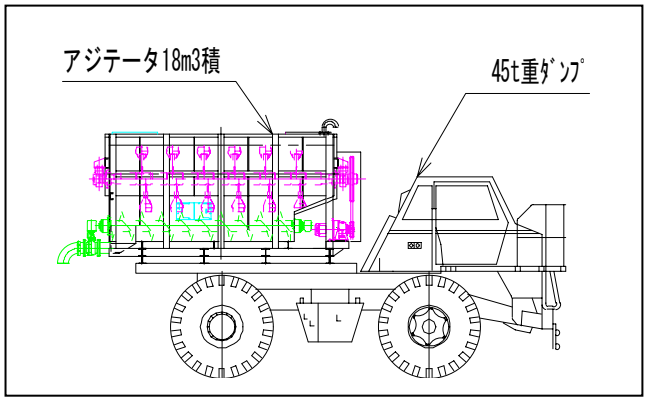
【改善と工夫】

①タンク内部に攪拌用のパドルを取り付けた攪拌軸2本装備し，コンクリートの引抜きをスムースに行うためのスクリュウコンベヤを搭載した。

②特殊な樹脂系のシートを選定して張り付けることによって，粘性の高い高流動コンクリートが内部壁面に極力残らないよう考慮した。

③高流動コンクリートの残量検知は，タンクを支持する4箇所の支柱にひずみゲージを取り付け，重量変化に伴うひずみ値を検出して，残量1/4でランプが点灯するように設定した。

図－12に高流動コンクリート運搬車を示す。



図－12　高流動コンクリート運搬車

高流動コンクリートの打設は，ラジコンブルドーザで牽引するラジコンポンプ車（4tベース，ブーム長16m）により打設を行った。

【施工上の問題点】

事前に実施した試験施工より次の項目が問題となった。

①高流動コンクリートの流動距離が4mを超えると材料分離の傾向が見られる。

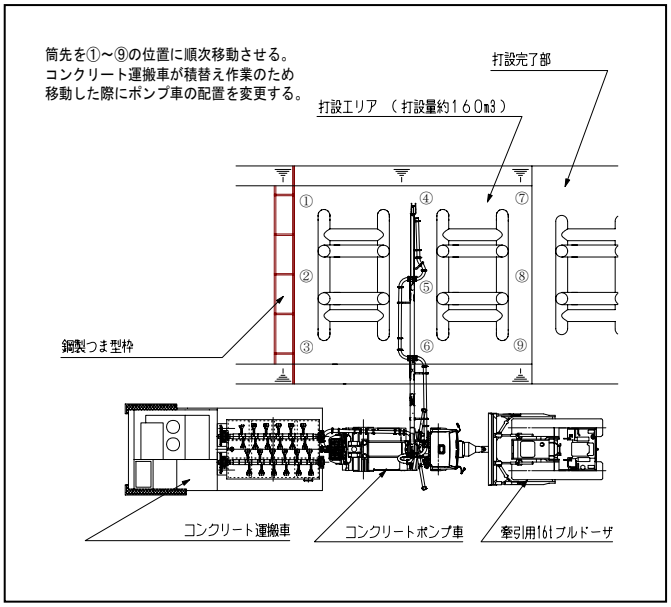
②打設範囲が広く，セルフレベリング性能だけでは，十分な天端の平坦性が得られない。

【改善と工夫】

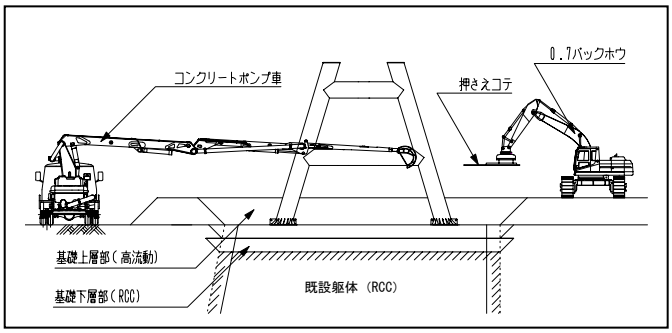
①ポンプ車の筒先を頻繁に移動させ，流動距離を短くし，同時に天端の平坦性も確保する。

②バックホウに均しコテを取り付け，打設天端を揺動することで，セルフレベリング性能を助長する。

図－13にコンクリート打設時の機械配置図を図―14に天端仕上げ状況を示す。



図－13　高流動コンクリート打設時の機械配置図



図－14　天端仕上げ状況

高流動コンクリートの日平均打設量は160m3程度，1日の平均打設時間は8時間37分であった。コンクリート天端の仕上げ高さは，最大･最小ともに30mm以内に収まっており，平坦性についても高精度に施工できたと考えられる。

ラジコンポンプ車のポンプ圧力などをカメラでモニタリングしながら打設したため，配管閉塞による打設中断や，打設を途中で中止する事態も発生しなかった。事前の試験施工による問題抽出と改善対策が功を奏したと考える。

８．新規技術開発と問題改善への取組み

鋼製スリットの運搬･据付，高流動コンクリートの運搬・打設は上記に述べた問題点の抽出とその改善を実施することで，規格値を十分満足する施工精度が得られた。しかしながら，完成後の精度確認や段階確認検査などは，有人測定に依存している。以下に今後の課題とその対処案を紹介する。

鋼製スリット据付作業の改善

今回の据付作業は無人測量システムによるマーキングとスリット脚部の誤差をモニター映像で確認しながら，トライアンドエラーを繰り返して，据付作業を行った。この方法では，誤差量を定量的に把握することができないため，モニター映像による観念的な判断で据付完了を決定した。

【新規改善策】

無人測量システムで用いた自動追尾式光波測距儀をリモート操作し，スリットの天端に取り付けた反射シートを計測しながら据付作業を行う。反射シートの場合，レーザー反射率が低いため自動追尾機能が使えない。このため，新たにリモート操作機能と視準状況を確認するためのCCDカメラおよびピント調節機能を自動追尾式光波測距儀に追加する。写真－１にCCDカメラおよびピント調節機構を示す。



写真－1　CCDカメラおよびピント調節機構取付

この改善策により，据付時のトライアンドエラーの回数を低減し，誤差量を定量的に把握して出来形計測の遠隔操作化を図る。

もうひとつの新たな試みとして，デジタル写真測量技術の導入を検討している。これまで遠隔計測に利用してきたGPSや自動追尾式光波測距儀は，計測ポイントにGPSアンテナやミラーをラジコン操作によってセットする必要がある。このように接触式の計測方法の場合，鋼製スリットなどの複雑な形状した構造物のそばでは，ラジコン操作で計測ポイント近傍に誘導することが困難である。また，構造物の陰に隠れて計測が不可能になる可能性が高い。そこで，非接触方式で計測可能な方法として，複数のデジタル写真を画像処理して3Dモデルを作成するデジタル写真測量技術の導入を検討している。

デジタルカメラの性能が飛躍的に向上しており，高解像度のデジタル写真撮影が可能。デジタルカメラをSS無線LANにより遠隔操作し，シャッター操作や，画像ファイルの自動転送が可能。既存の遠隔操作技術と組み合わせることで，被写体に近づいて撮影することが可能。鋼製スリット脚部とマーキングを撮影することで，据付誤差の確認を行い，画像データとして保存することが可能になると考えている。

６．おわりに

雲仙･普賢岳における砂防事業は，今後より一層危険な上流警戒区域における施工を計画している。より複雑な構造物の施工を目指すためには，計測・制御技術の更なる向上が必須となる。IT技術やリモートセンシング技術を積極的に取り入れ，無人化施工の適用範囲拡大に努めていきたいと考える。

30. 無人化施工のマンマシンインターフェイスに関する調査

独立行政法人　土木研究所　技術推進本部（先端技術）：○山口　崇、石松　豊、山元　弘

１．はじめに

我が国では、地形的および気象的条件のため、火砕流、土石流、地すべり、および崖崩れなどの土砂災害が多数発生している（平成６～１５年の平均で８３７件／年　国土交通省調べ)。これらの災害復旧や災害防止を行う事業では、二次災害や災害の発生が予想される大変危険な現場での作業を伴うこととなる。このような危険区域での土木作業では、安全対策として遠隔操作型の建設機械による無人化施工を実施することが有効であり、雲仙・普賢岳の噴火災害の復旧事業をはじめとして近年多くの災害復旧の現場などで遠隔操作型の建設機械を用いた無人化施工が行われている。

しかし、これらの無人化施工における施工効率は、作業内容により違いはあるが、操作者が搭乗して操作する場合の６割程度と言われており、低いのが現状である。無人化施工などの遠隔操作による作業の実用性や効率に大きく影響する要因として、機械の作業状況（機械の位置、姿勢、作業対象との位置関係、作業対象の状況など）を操作者に伝える方法の良否が常に問題となっている。

そこで本調査では、遠隔操作による効率的な作業実施のために、操作者へ的確に作業情報を伝達するマンマシンインターフェイスのうち情報表示技術について、現状の課題の整理を行ったものである。調査は、既存文献による分析と現場調査などの実態調査を行った。

２．無人化施工

無人化施工は、油圧ショベルやブルドーザーなどの建設機械に無線受信機、コントローラ、電磁比例弁を取り付け、遠隔地からオペレータが無線で送信する操作信号により建設機械を動かす技術と、建設機械の施工状況の目視確認が困難な場合に施工のために必要な建設機械近傍の画像などの情報をＣＣＤカメラ等で取得し伝送する技術を用いて、安全な遠隔地から建設機械を操作して作業を行う施工法である。

この施工法は、雲仙・普賢岳の噴火に伴う災害復旧工事に適用されたことを契機として、適用できる工種を増やしながら、飛躍的に進歩・発展し、それ以降、現在までに１０６件（１９９４．１～２００４．９、建設無人化施工協会調べ）の工事実績がある。特に災害復旧工事では、非常に危険な災害発生現場で作業員の安全を確保しつつ、迅速に工事を施工することが必要なため、無人化施工は重要な施工法の一つとなっている。

無人化施工のマンマシンインターフェイスに関しては、雲仙・普賢岳の噴火に伴う災害復旧工事に無人化施工が適用され始めた当初、様々な試行錯誤が行われた。施工状況の画像情報に関しては、遠近感を補完するために３次元モニタと偏光メガネやヘッドマウントディスプレイを用いて立体画像を表示することも試



図－１　最近の無人化施工の事例

みられたが、オペレータの疲労感が強く長時間の作業には不向きであるなどの理由から、現状ではＣＣＤカメラの２次元画像を用いて、複数箇所・方向（建設機械の種類、作業により異なる）からの画像により遠近感を補っている。その他では、エンジン回転数、冷却水温度、燃料残量などの建設機械の状況情報や建設機械の稼働音も提示することも試みられたが、現状では、それらの情報は利用されていない状況である。

なお、ブルドーザーによる敷均し作業や振動ローラによる締固め作業では、ＧＰＳなどを用いて、建設機械の位置情報などをリアルタイムで計測し、その情報を利用して敷均し高さや締固め回数の管理を行う情報化施工の技術も利用されている。

３．既存文献による課題の調査

雲仙・普賢岳および有珠山の噴火に伴う災害復旧工事など、実際に無人化施工を導入した事例について文献等の資料を収集し、マンマシンインターフェイス等に関する課題を整理・分析した。

結果は図－２のとおりであり、マンマシンインターフェイスに関する課題では、視覚関連の課題が２９％を占めており、触覚関連と操作遅延関連の課題がそれぞれ１０％を占めていた。したがって、文献によると視覚関連の情報が最も重要であることが分かった。

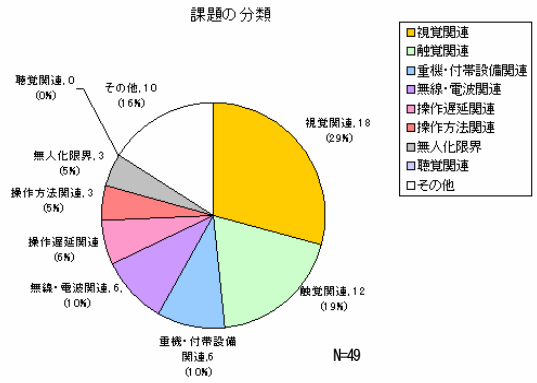
視覚関連の課題の内訳としては、遠近感把握の困難性、立体（凹凸）感の把握の困難性が視覚関連の４４％を占めている。

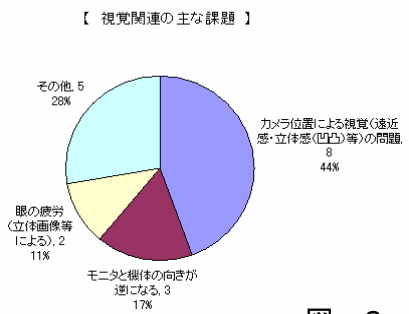
２次元の画像による遠近感把握の困難性については、一般に遠近感と視野角との関係があり、目標物と背景との距離が同じであれば、広い視野角が得られる広角レンズの方がカメラに近い物がより大きく、遠い物はより小さく写るという仕組みから遠近感がより協調された奥行きのある構図となり、視野角が狭いレンズでは奥行きの乏しい画面になる。しかしながら、広角レンズは広い範囲を把握可能であるが精度の高い仕事には向かないため、視野角の拡張については、作業内容に配慮し適切な選択をすることが望ましい。

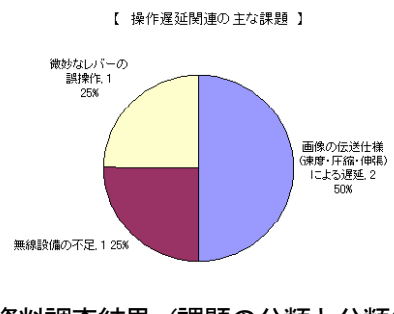
立体感、とりわけ凹凸状態把握に関する問題については、カメラ位置による影響が大きな理由の１つに挙げられており、特に高所からのカメラ画像は地表の陰影が消えて見えることから凹凸が捉えにくく、横方向からの画像を追加するなどの工夫が必要である。

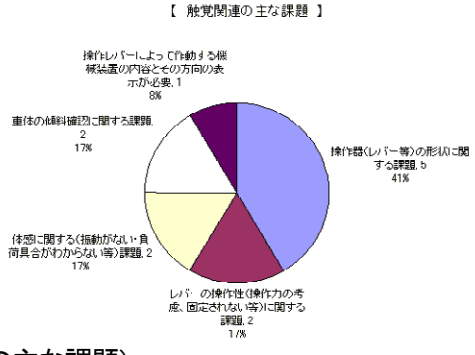
ＣＣＤカメラの２次元画像を用いた遠隔操作では、視点の違う複数台のカメラによる画像を用いるなど遠近感や立体感を２次元画像でも把握しやすいように現場で工夫している。しかしながら、目で直接見て作業する搭乗操作と比べると、文献では遠近感や立体感が操作性に大きな影響を与えることが示されている。

触覚関連の課題の内訳としては、操作レバーの形状と操作性に関する課題で触覚関連の５８％を占めている。遠隔操作のレバーは短く、微細な操作が難しく、操作レバーにエンビ管を差し込んで改良を行っているケースが多く、オペレータの手、指の感覚に合わせた操作レバー









図―２　資料調査結果（課題の分類と分類毎の主な課題）

（およびボタン）の配置や形状が課題となる。

また、バックホウは遠隔操作機のレバー操作が搭乗席でのレバー操作とほぼ同じとなっているが、ブルドーザーやダンプトラックなどは、搭乗操作の場合、両手両足を使った操作であるのに対し、遠隔操作の場合は搭乗時と同じ数だけの操作を両手のみで行わなければならないため非常に複雑な操作となる。

次いで振動と操作力（重機の作業部位にかかる負荷に比例した反力）などの体感に関する課題が１７％を占めている。体感がないと作業中に発生する振動や力の負荷のかかり具合を把握することができないため、無理な操作を行うこととなる。そのため、建設機械の足まわりの故障の原因となることも多い。また、重機情報の一つである車体の傾斜感覚の不足も課題に挙げられている。

操作遅延の課題の内訳としては、画像伝送の遅延に関する課題で５０％を占めている。その主な要因としては、画像の伝送処理時間（圧縮、伸張）が挙げられる。

一般的に、人間がリアルタイムと感じる限界のタイムラグは５０msec 程度といわれており、2,４００bps の伝送速度の特定小電力無線局を利用した場合、伝送距離が２００m を越えたところで「遅れ（４０msec 程度）」を感じるとの事例の報告がされている。さらに、無線中継車を介した超遠隔操作施工といわれる１,０００m を越える伝送距離の場合には、５０msec 程度の遅れとなっている（ただし、超遠隔操作におけるこの程度の遅れは満足のいく結果であると言われている）。

通常の土木施工現場においては有線での遠隔操作も可能であるが、災害復旧現場では有線による伝送は非常に困難である。さらに、無線中継車を介した超遠隔操作の導入要望は今後も増えることが予想されることからも、画像の伝送方法をはじめ、伝送距離、データ量を十分考慮した上で伝送速度を決定する必要がある。

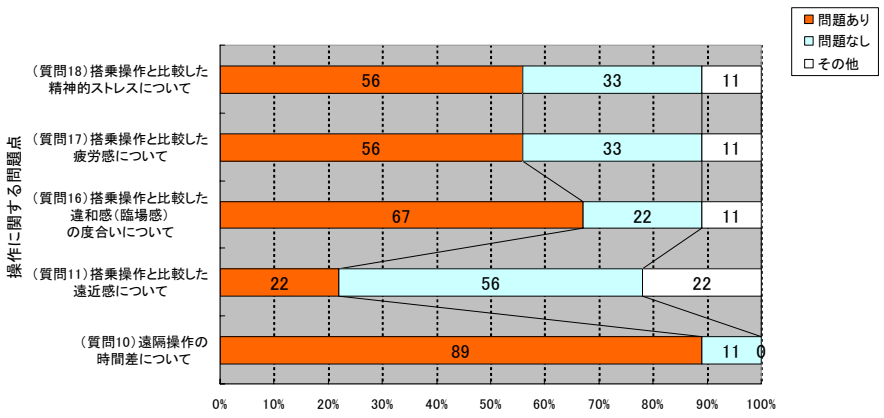
また、無線が原因による操作遅延については、経験を積むことにより慣れるという報告もなされている。

４．　現場調査

平成１５年度に無人化施工を実施していた２工事について、現地調査を行い、操作者に対してヒアリングを実施した。ヒアリング結果のうち、操作に関する結果の抜粋は、図－３のとおりである。

今回調査において、最も多くの操作者が遠隔操作で問題があると感じている課題は、搭乗操作と比較した時間差（操作遅延）であった。これは、今回調査した現場では、現場条件から制御系、映像系の全ての情報を中継車とアンテナ基地局の２箇所を経由して伝達しているなど時間差の発生しやすい状況があり、この問題がクローズアップされる結果となったものと思われる。

また、最も問題がないと感じている課題は、搭乗操



※　質問１１：その他の内訳は搭乗操作経験無しおよび未回答である。
※　質問１６～１８：その他の内訳は搭乗操作経験無しである。
※　質問１７：疲労感はないという回答を問題なし、それ以外を問題ありとした。
※　質問１８：ストレスはないという回答を問題なし、それ以外を問題ありとした。

図－３　現場調査結果（操作に関するヒアリング結果の抜粋）






図－４　無人化施工におけるマンマシンインターフェイスの事例

作と比較した遠近感であった。この結果は、資料調査と逆の結果となった。問題なしの回答の内訳を見てみると、遠近感はつかみ易いが１１％で、操作に支障がない程度のある程度の遠近感はつかめるが５５％であった。

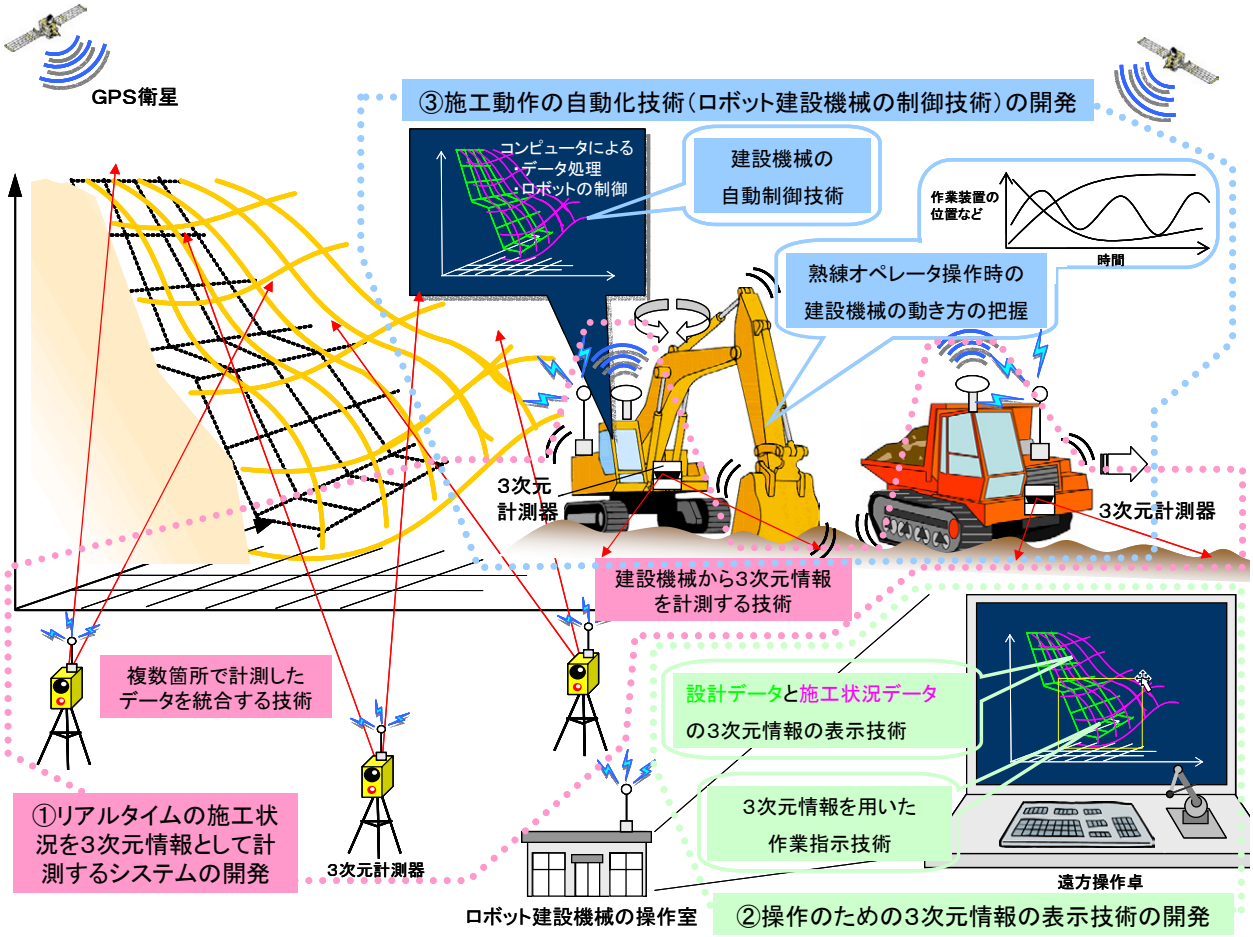
５．まとめ

無人化施工などの遠隔操作による作業の実用性や効率に大きく影響する要因である、機械の作業状況を操作者に伝える方法の良否について、それに与える影響が大きな課題の抽出を目的として、無人化施工におけるマンマシンインターフェイスに関する資料調査と現場調査による実態調査を行った。

調査実施前、視覚関連の情報が最も重要な課題となることを想定していた。結果は、既存文献の分析においては、視覚関連に関する課題が最も多い割合を占めていたが、今回の操作者へのヒアリングにおいては、最も問題を感じていない課題となった。これは、操作者が遠近感などに関する現状の視覚情報に満足している訳ではないが、無人化施工として現状の施工効率（搭乗の約６割程度）で作業を行うには支障がない、ある程度の遠近感などの情報を取得できていることを意味している。

今後は、効率的な作業実施を可能とする視覚情報の表示方法に関して、最新の情報通信技術、ロボット技術及び情報化施工技術を踏まえ、ＧＰＳにより計測された位置情報や３Ｄ－ＣＡＤによる設計の３次元情報及びレーザースキャナーやステレオビジョンにより計測された現況地形の３次元情報などの利用の検討を実施する予定である。

また、検討に際しては、平成１５～１９年度の５カ年計画で国土交通省が実施している総合技術開発プロジェクト「ＩＴ等によるロボット施工システムの開発」の研究項目である「建設機械のＩＴ施工技術の開発」と連携し進めて行くこととしている。（図－５参照）



図－５　「建設機械のＩＴ施工技術の開発」における研究概要

31. 工事の実施による大気環境に係わる環境影響評価に関する研究

独立行政法人　土木研究所：○林　輝、吉永　弘志、山元　弘

1．目 的

環境影響評価法(平成９年６月公布)に対応した省令において「工事の実施」による大気環境（大気質・騒音・振動）が標準項目として新たに評価の対象となり、土木研究所は調査、予測、評価を行う標準的な技術手法を平成 12 年度にとりまとめている。 技術手法については新たな評価項目について実務者からの意見も得られ、ユニット（組み合わせ機械）を単位として予測する方法に多少の課題が残っている。

本研究は環境影響評価の事例調査、工事大気環境の現場調査および環境影響評価の実務担当者から寄せられた意見・要望に基づき課題として「技術手法の適用範囲の拡大」、「環境保全措置の検討」および「測定方法の検討」をとりあげ、対応策を検討するとともに今後の「予測用データのとりまとめ方針」を検討したものであり、円滑かつ適正な環境影響評価の実施を支援することを目的としている。

2．技術手法の適用範囲の拡大に関する検討

土木施工の工種は多岐にわたっており、技術の進歩に伴って変化しつつ種類も増大している。予測可能なユニットを増やし適用範囲を拡大するためには実測データの充実とともにより合理的な予測用データの設定が必要である。今回、工事騒音確認するとともに、ユニットの騒音について機械別の測定値による合成とユニットの測定値から機械別騒音を分析する方法の検討を行った。

2．1　現地測定による予測用データの拡充

国土交通省では北海道開発局事業振興部機械課、各地方整備局道路部機械課、各公団および独立行政法人土木研究所が協力して平成 10 年度から現場での実測調査を継続している。図-1 はデータ収集からとりまとめまでの一連の工程を図示したものであり、データ収集に適した現場を選定し、工事工程に合わせて測定を行う必要がある。工事は現場条件により影響を受ける要因が多いため多難な調査となる。

平成15年9月に騒音の予測用データの一部を改訂したが、今回、例として鋼管井筒基礎工の騒音をとりあげ、予測計算と実測結果を比較し、予測用データの拡充による効果を確認した。平成 12 年の技術手法(改訂前)に基づく予測においては鋼管井筒基礎工の予測用データが１種類であるが平成 15 年改訂版の技術手法(改訂後)に基づく予測では、鋼管井筒基礎工の予測用データが「油圧ハンマ」と「中堀工法」として細分された。転石混じりの硬質地盤における中堀工法による施工現場での実測結果と比較した結果、改訂前の予測用データによる予測値は実測値＋約 12 dB であるが、

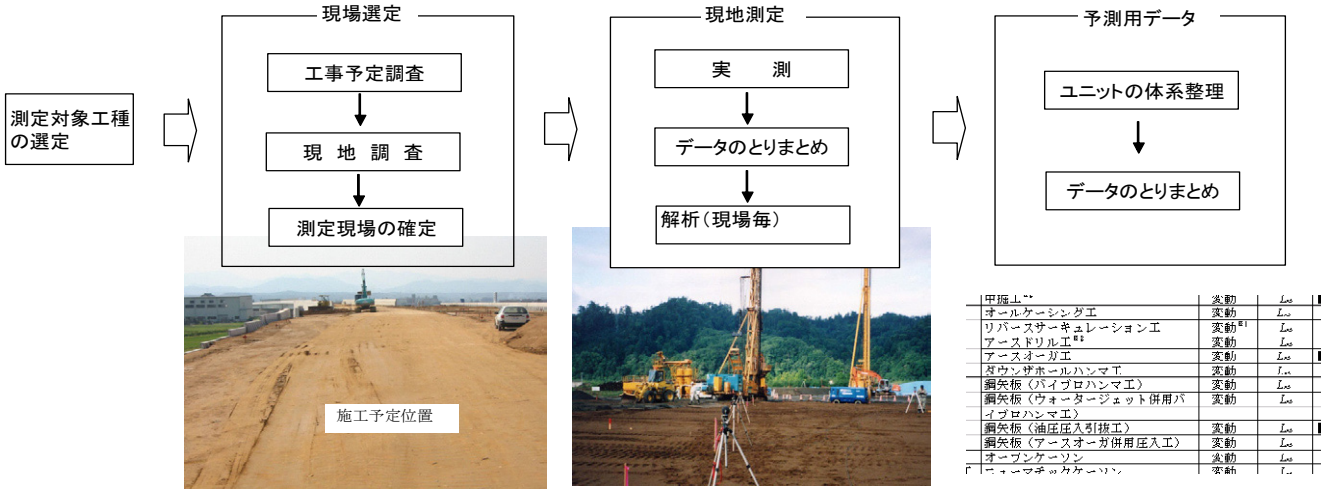


図-1 現地測定による予測用データの収集解析

改訂後のデータでは＋約１dB となり予測精度の向上が確認できた。今後の予測用データのとりまとめ方針の検討結果については**５．予測用データのとりまとめ方針**で記述する。

２．２　ユニットの騒音と機械別の騒音

現行の予測手法においては図-2 のような複数の機械から構成されるユニットを１つの発生源とみなしデータ収集・予測を行っているが、ユニットの騒音を機械別の発生量から合成したり、複数の測定点における測定値から機械別の騒音を分析する手法について検討した。

理想的な条件では図-3 の 式によりユニットの騒音を合成したり、ユニット内の機械別の騒音を分析できるが、騒音の伝搬には地表面での反射など複雑な要因が影響することや測定値に誤差が含まれる影響から、分析可能な条件が限定される。

今回、構内において既知の音源を使用して合成・分析の計算値と実測値を比較した。

合成については騒音（A 特性実効騒音レベル）の計算値はほぼ実測値の±1.5dB の範囲に収まっており、妥当性が確認された。

分析については（1）騒音測定現場が平坦で障害物が少ないこと、(2) 音源となる機械がある程度拡がりを以って配置されていること、(3) 個別機械の近接位置に騒音測定点の配置が可能であること等、条件を限定することで機械別の騒音発生量(A 特性実効音響パワーレベル)の算出ができる可能性が見出された。

３．環境保全措置の検討

３．１　環境保全措置の概要

環境影響評価の技術手法において記載されている環境保全措置のうち代表的なものを表-1 にまとめた。環境保全措置の定量評価は、工法変更のように予測用データの拡充によるものと、仮囲いの効果のように計算で行うものに大別できるが、定量評価が困難など不明な点がいくつか残されている。今回、典型的な環境保全措置について検討した。

３．２　施工方法による対策（現場内運搬工に関する環境保全措置の検討）

現場内運搬工についてダンプトラックの走行速度の制限による騒音・振動・粉じんの低減効果について

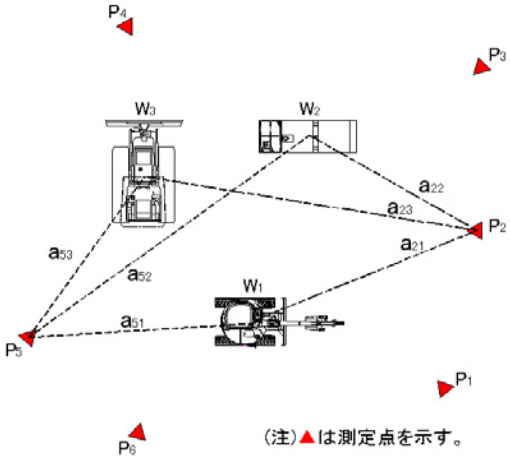


図-2 機械と測定点の配置例

$$\frac{1}{2\pi}\cdot\begin{bmatrix} 1/a_{11}^{\,2} & 1/a_{12}^{\,2} & \cdots & 1/a_{1n}^{\,2} \\ 1/a_{21}^{\,2} & 1/a_{22}^{\,2} & \cdots & 1/a_{2n}^{\,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{m1}^{\,2} & 1/a_{m2}^{\,2} & \cdots & 1/a_{mn}^{\,2} \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix}$$

音源と受音点の距離の逆数の2乗　　音源のパワー　　測定点の音の強さ

図-3　機械別の騒音と測定値の関係

表-1 環境保全措置のまとめ

環境保全措置	粉じん等	騒音	振動
環境影響の小さい工法への変更	◎	◎	◎
仮囲いの設置	○	◎ 3.4	
機械配置の変更	◎	◎	◎
施工方法による対策	○ 3.2	○ 3.2	○3.2
散　　水	◎		
低騒音・低振動型機械の使用		○ 3.3	○

◎、○：環境保全措置。うち◎は現行において定量評価可能

数字は本報告における該当部分

調査した。現場内運搬工の騒音は、エンジン音が卓越しておりエンジン回転速度を低く抑えられる変速段を選択することで騒音が抑制される。構内実験の結果、図-4 のデータが得られた。走行速度 30km/h を 4 速で 15km/h に制限することで騒音発生量(A 特性実効音響パワーレベル)が約 8dB 低減している。振動・粉じんについても同様に調査した結果、走行速度 30km/h と 15km/h では、振動レベルは速度低下により約 6dB 低下し、粉じん濃度は約 1/10 に低減した。

これらの低減効果は舗装路における速度と発生量に

関する文献等から計算した値よりも大きく、現場内運搬工においては速度低下が環境保全措置として有効であることが確認できた。

３．３　発生源対策（低騒音型建設機械の使用）

低騒音・低振動型建設機械については指定基準により機械としての騒音振動の抑制効果は確認されているが、実工事における抑制効果は工事の条件等により異

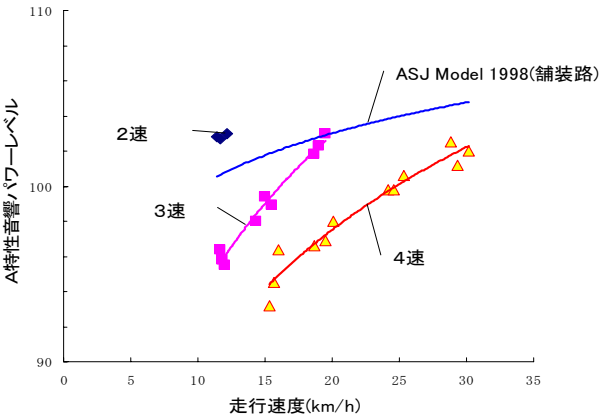


図-４　ダンプトラックの走行速度と騒音

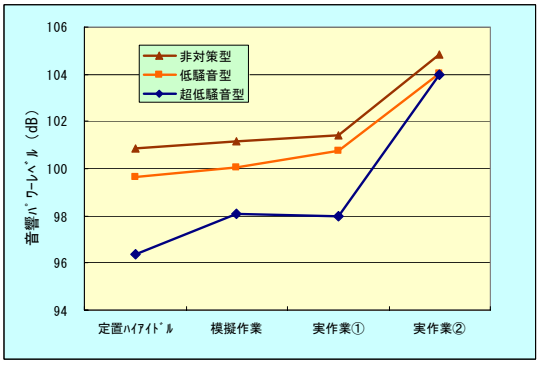


図-５　低騒音型建設機械使用の効果

なるため定量評価が困難である。

そこで、実作業における定量的な騒音対策効果を構内実験で確認した。実験対象機械は山積みバケット容量 0.8m^3 のバックホウで非対策型、低騒音型、超低騒音型（騒音レベルが低騒音型の基準値より 6dB を超えて低減しているもの）の３種類とした。運転条件は、(1)定置ハイアイドル、(2)模擬作業（溝掘削→左旋回→排土→戻り旋回）、(3)実作業①（通常の実作業）、(4)実作業②（比較的ハードに運転）の４条件とした。騒音発生量(A 特性実効音響パワーレベル)の測定結果を図-5 に示す。実作業②を除いて、低騒音対策型建設機械の効果が明らかとなった。実作業②はバケットから発生する衝撃音が卓越しており、低騒音型建設機械の効果は作業方法に留意しないと生かされないことがわかった。

３．４　伝搬経路対策

建設工事の騒音の遮音壁による効果は、音源、受音点、遮音壁の位置関係から算出するが計算で必要な音源高さのデータは未整備なため便宜的に 1.5m を仮定している。今回、電動バイブロハンマによる矢板の打ち込み時等の騒音源分布を測定し回折効果の計算値に与える影響について調べた。

図-6 は、電動バイブロハンマによる矢板打ち込み時の騒音レベル分布図である。図において横軸は、矢板の露出長さであり、実験開始が 10m で、終了時には露出長 1m となり矢板は 9m 打ち込まれている。縦軸は、測定点の高さを示したものである。矢板からの音の発生は少なくバイブロハンマが主な音源であり、矢板の打ち込みに従って、音源が下方に移動している。

これらの調査結果から高さ 3m の遮音壁について音源高さを 1.5m で試算すると予測誤差が 10dB 以上となる場合があり、遮音壁の効果の予測においては音源高さのデータが重要であることがわかった。さらに工事の騒音対策においては、遮音壁による伝搬経路対策だけでは効果が得られない場合もあるので代替工法による機械の変更など音源対策を総合的に検討することが必要であることがわかった。

また、防振溝の効果について試算を行い関東ローム（表面波速度がほぼ 90m/s）で 20Hz の振動源の場合、1m の深さの溝で 6dB の振動低減が図れることなどがわかった。

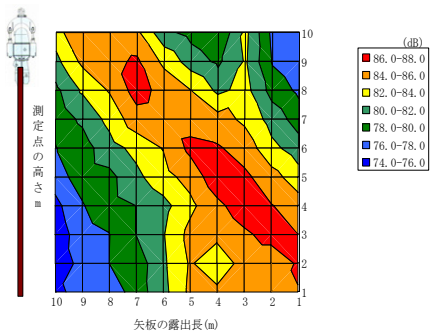


図-６　矢板打ち込み時の騒音発生源

４．測定方法の改善検討

４．１　大気質測定方法の改善案

建設工事から発生する粉じん等の測定においては、地形の影響や陸風・海風の関係で早朝と日中では風向が逆転するなど現場特有の風向を把握する必要がある。今回、降下ばいじんの測定について測定時間の短縮によるデータ数の増大と測定位置の適正化による測定精度の向上を目的として過去の測定データの整理、気象データとの比較を行い降下ばいじん測定方法の改善案を検討した。

まず、これまで計測された降下ばいじんの捕捉量の分布(1451 点)と計測器の精度の関係から測定時間は１日単位から半日単位に短縮することが可能であることがわかった。

次に、風向を予測する方法として(1)当日の気象、(2)前日までの気象、によって行う方法を比較した。設定風向と測定中の風向が 90° 以内で一致した確率は、(1)の方法では 64.5%、(2)の方法では前日が 59.6%、２日前が 56%となった。このことから、(1)の方法を基本とするが、(2)を併用し測定前日の風向･風速を観測し、測定開始時刻と終了時の風向の変化など測定時間中の主風向を見極めることで風向を予測することとし、これまでの風向風速の事前調査を３日から１日に短縮することとした。

さらに、地上高さ 1.5m と 10m の風速(図-7)、風向の関係と風速のべき乗則（風速比が高度比のべき乗に比例）から地上 10m での風向風速測定を他の高さの測定に置き換えることが可能となった。

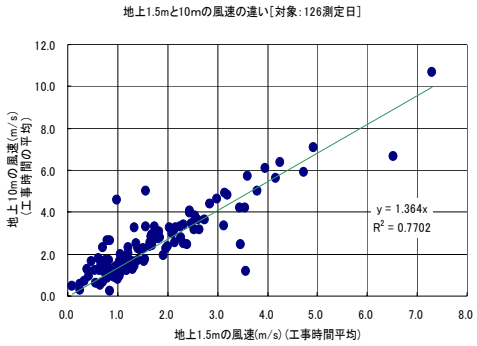


図-7　地上 1.5m と 10m の風速

４．２　騒音測定方法の簡素化

騒音源データの収集のための実測調査では、建物あるいは土木構造物などが存在することが多い。今回、橋梁架設工事の現場を例として、複雑な現場条件において測定を簡素化する案について検討した。

まず、実際の橋梁架設現場におけるトラッククレーンの騒音の伝搬についてシミュレーションを行う(図-8)とともに反射音と直接音を比較し反射音が無視できる条件について試算し、実音源からの距離と虚音源からの距離の比が１：２以上のエリアを測定点とすることで反射音の影響度合いを 1dB 以内とすることができることがわかった。

またクレーン作業については、エンジン音が卓越しているため低騒音型建設機械の指定のための判定基準値が予測用データとして使用できないか検討した。判定基準値と現場での実測データを比較した結果、後者は 4dB 程度下回っていたが安全側（予測値が大きめ）の予測となるため、指定のための判定基準値を予測に使用できることがわかった。

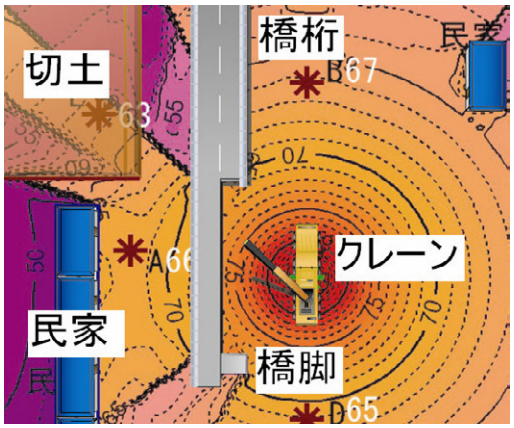


図-8 橋梁架設工事の騒音伝搬計算例

５．予測用データのとりまとめ方針

予測用データについては追加公表を予定しており、とりまとめ方針について検討した。

５．１　粉じん

工事の実施に伴う大気質については降下ばいじんを標準項目として予測することとしており，現行の予測手法においては図-9 をモデルとした式(1)を基本としている。降下ばいじんの測定値については式(1)をあて

はめ最小２乗近似でパラメータ a, c を算出している。文献 [1]の記載値においては距離減衰に関するパラメータ c は工事の種類ごとに 1.0～2.8 の間に分布しているが, 測定値の近似値のため真の値とは限らない。

表-2 は「粉体噴射攪拌工」について測定回ごとに拡散のパラメータを解析したものである。距離減衰に関するパラメータ c は 1.5～2.1 の間に分布しているが, 距離減衰の係数の 0.5 程度の違いは近似結果には影響しないと考えられる。表-2 でパラメータ c を 2.0 に統一して再解析し a の平均値を採用すると式(1)における「粉体噴射攪拌工」の代表値は(a, c)=(3,300, 2.0)となる。

一方,一般的なプルーム式では重力の影響を受ける降下ばいじんは式(2), 式(3)で計算される。拡散幅に Pasquill-Gifford の拡散幅の近似式における大気安定度 D, 落下速度を Stokes の式で比重を 3.0 として降下ばいじん量を試算し, 距離減衰を(1)式のべき乗の形と比較した例が図-10 である。距離のマイナス２乗でよく表現できる。他の事例も同様の傾向であった。

以上から, 降下ばいじんの距離による減衰は現場測定値および計算値の双方で発生源からの距離を x とすれば x^2 で表現できると言える。予測用データは工種ごとのパラメータ c=2.0 を基本とする予定である。

$$C_{d-ground} = \sum_{directions} \iint_{R} a \cdot u^{-1} \cdot x^{-c} \, dS \quad (1)$$

$C_{d\text{-ground}}$: 工事１日の降下ばいじん量(t/km^2・日), *directions*: 風向頻度, R: 発生源のうち風向により予測地点の降下ばいじん量に影響する領域, a: 工事の種類ごとの定数, u: 風速(m/s), x: 微小領域 dS から測定点（予測地点）までの距離(m), c: 定数とし,測定点（予測地点）に影響する範囲は $\pi/8$ としている。

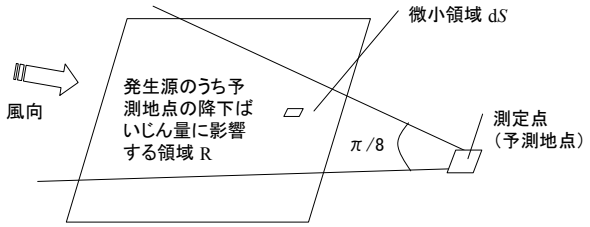


図-9 工事粉じんの予測

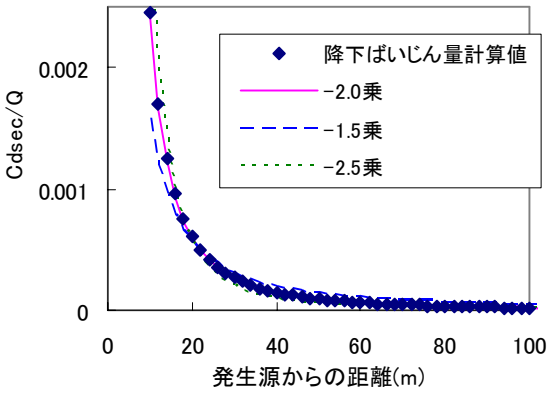


図-10 降下ばいじん計算例(u=3m/s 50 μ m)

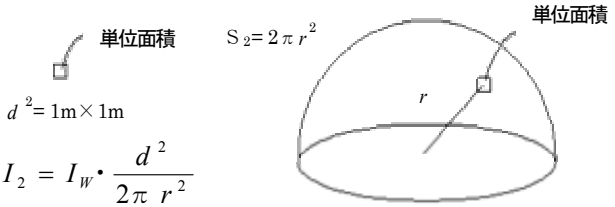
$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\, u\, \sigma_y\, \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - He + V_s \cdot x/u}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$C_{d\,\mathrm{sec}} = C \cdot V_S \quad (3)$$

C: 粉じん濃度(mg/m^3), Q: 発じん量(mg/s), u: 平均風速(m/s), x: 風向に沿った風下距離(m), y: x 軸に直角な水平距離(m), z: x 軸に直角な鉛直距離(m), σ_y, σ_z : 水平(y), 鉛直(z)方向の拡散幅(m), He: 発じん箇所の高さ(m), V_s: 落下速度(m/s), C_{dsec}: 降下ばいじん量(mg/m^{2}s)

表-2 粉体噴射攪拌工の降下ばいじん解析値-測定現場ごとの解析値

	測定１	測定２	測定３	測定４	測定５	測定６	測定７	平均
発生源の面積(m^2)	559	48	564	564	567	567	385	465
パラメータa	2,988	496	1,394	1,704	299	2,724	3,141	
パラメータc	1.6	1.6	1.8	2	1.5	2.1	1.7	
平均風速(m/s)	2.4	3.8	1.5	3.1	2.2	3.8	7.9	3.5
平均日射量(kw/m^2)	-	0.25	0.068	0.2	0.28	0.13	0.41	
大気安定度		C	B	C	C	C	D	



$$\rightarrow L_2 = L_W - 20\log_{10}\left(\frac{r}{d}\right) - 8 \qquad (4)$$

図-11 騒音の距離による減衰の考え方

$$\Delta L_g = \begin{cases} -K \log_{10}\left(\dfrac{r}{r_c}\right) & r \geq r_c \\ 0 & r < r_c \end{cases} \qquad (5)$$

K,r_c：音源，予測地点の高さ，地表面の状態で決定される係数

r　：発生源から予測地点までの距離(m)

5．2　騒音

騒音予測は騒音のエネルギーが図-11 のように半円球に拡散するとの仮定を基本としている。単位面積に音のエネルギーが集中した場合の音の大きさを I_W とすると音源からの距離rでは面積比でr^{-2}に比例してエネルギーが減衰する。騒音はデシベルに変換して表現するので計算式は(4)になる。環境影響評価においてはこれに地表面効果および回折による減衰を加算している。日本音響学会の建設工事騒音予測モデル [2]によると地表面効果の計算式は(5)となるが予測用データは点音源を仮定できる距離を確保し、地表面の影響が少ない 30m 以下と目安とした位置での測定値から r^{-2} の減衰を仮定してとりまとめる予定である。

5．3　振動

地盤を伝搬する振動に関しては等方等質の半無限弾性体とみなした波動方程式の解としてＰ波，Ｓ波，レイリー波が存在することや内部減衰を経験的に取り入れた Bornitz の式で予測できることが知られている。工事振動の予測式は Bornitz の式で振動加速度を予測値

$$L_{va} = L_{va0} - 20n\log_{10}(r/r_0) - 8.68\alpha(r - r_0) \qquad (6)$$

L_{va}, L_{va0}：振動源から距離r[m]，r_0[m]における振動加速度レベル[dB]

とした式(6)を基本としている。

技術手法[3]等においては r_0=5m とし他のパラメータは測定値に基づき以下としている。 L_{va0}：工事の種類ごとの固有値， α=0.001（固結地盤−岩，玉石），α=0.019（未固結地盤−粘性土，砂質土），n=0.75（実体波 n=1 とレイリー波 n=0.5 の中間値）。

式(6)についての測定値は L_{va}，r，パラメータは L_{va0}，n，α である。筆者らは数多くの現場測定値を(6)式にあてはめ重回帰分析を行い幾何減衰係数 n については従来の 0.75 とレイリー波を仮定した 0.5 で予測精度に差がないことおよび未固結地盤では内部減衰係数 α は高周波バイブロ以外の平均値が 0.01 であることを報告しており [4]、n=0.75、α=0.01 を基本として予測用データを設定する予定である。

6．おわりに

「工事の実施」による大気環境への影響は、対象となる施工法や建設機械により様々な特徴を示し、非常に複雑である。また、建設技術の進展に伴い新たな工法や建設機械が開発されることにより変化していくことが予想される。このため、現場のデータ収集を基本として今後も継続的な実態の調査と予測方法の研究を続けていくことが必要である。また、これらの継続的な研究に加えて、環境保全措置の具体な方法、実例について調査検討し、環境対策に直面する現場対応の参考となるようとりまとめて行きたい。

なお、本報告は国土交通省建設施工企画課をはじめとする各地方整備局等の調査結果によるところが大きい。関係者の皆様に深甚なる謝意を表す。

参考文献

1)　建設省土木研究所：道路環境影響評価の技術手法（その1），土木研究所資料第 3742 号，2000.12

2) 日本音響学会建設工事騒音予測調査研究委員会：「建設工事騒音の予測モデル“ASJ CN-Model 2002”」，日本音響学会誌 58 巻 11 号，2002 年 11 月

3)　建設省土木研究所：道路環境影響評価の技術手法（その2），土木研究所資料第 3743 号，2000.12

4) 吉永弘志，吉田 正，林 輝：工事振動の発生と伝搬，(社)日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集，2004.9

32. 建設機械のライフサイクルにおける二酸化炭素排出

独立行政法人　土木研究所：○吉永　弘志、山元　弘

1. はじめに

地球温暖化防止京都会議（COP3）で合意された温室効果ガス６％の削減目標を達成するためには、他の産業分野とともに建設事業における削減計画の策定、技術開発が不可欠である。図１は建設事業が国内排出量に与える影響を模式的に表現したものである。国内排出量の部門別内訳の中で、建設事業は多くの部門に関連しており、削減対策を進めるにあたっては例えば次のような視点を設定することが考えられる。

1) 各々の工事において実施する削減対策。
2) 施工法に着目し、削減対策を開発することで複数の現場での適用効果を図る対策。
3) 使用材料に着目し、製造・加工時の削減対策を実施することによる国内総量の削減。
4) 建設機械のライフサイクルに着目し、製造・稼動・廃棄時の削減対策を実施することによる国内総量の削減。
5) 事業計画に着目し、CO_2排出量を評価することで構造規格を決定することによる対策。
6) 事業計画から工事の実施、維持管理に至るライフサイクルに着目しCO_2排出量を総合評価することで事業計画を策定することによる長期的な削減対策。

CO_2排出量は、経済成長や生活水準の向上とともに必然的に増加するため、これを抑えて削減するためには、あらゆる視点で削減対策を実施し、効果を積み上げることが必要である。

本研究は、さきの4)の視点での削減対策に着目したものである。また、削減対策を実施するに当っては評価尺度として排出量の算定方法が規格化されていること、算定の基本となる原単位が正確に算出されていることおよび算定方法が客観的かつ簡易であることが必要である。これまで建設機械の製造･稼働に伴うCO_2排出量については算出事例もあるが、今回、機種別により詳細な調査を実施した。

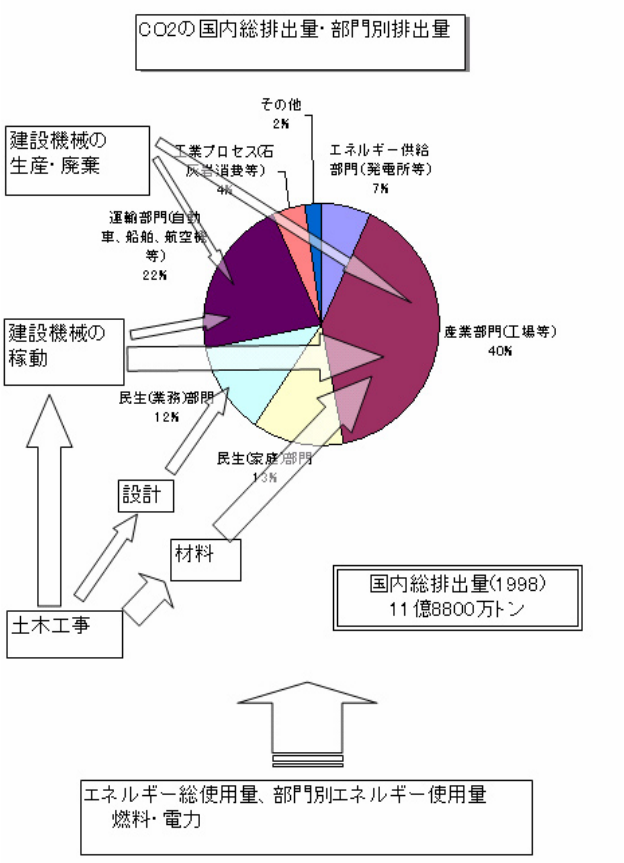


図１　CO_2の国内排出量と建設事業

2. 研究方法

2.1　算定における基本的な考え方

建設施工分野におけるCO_2の排出量は、国内排出量の約1%を占める[1]が、その主要な排出源は建設機械である。図２は建設機械動向調査[2]による建設機械の国内保有台数の推移である。100 万台以上が保有されており、1 台当たりの質量が大きいものが多いため建設

機械を視点にした対策を軽視することはできない。

建設機械によるCO_2の直接の排出は機械の稼動による燃料の消費であるが、図3に示すように製造や廃棄において工場の電力消費など様々な場面で間接的にCO_2排出している。機械については、同じ方法で大量に製造され、使用方法も同様なため、削減対策方法が見出されると同じ方法が同種の機械全てに適用でき、波及効果が大きいと考えられる。また、工事ごとの燃料消費量や省エネによる経費節減効果とともに購入から廃棄までのライフサイクルにおける燃料費等の節約による経費節減効果が明らかになると省エネ型機械や省エネに配慮した操作方法の効果がより顕著になり、民間における自主的な取組による削減対策が促進されることになる。算出方法は図3の各過程についてエネルギー消費量、材料・製品の質量、輸送距離、稼動時間、産業連関表の原単位等を基本とし積算することとした。

2. 2　製造過程で排出されるCO_2の算定

建設機械の工場では、材料、部品、製品を購入して加工組み立てして出荷する。算出方法を図4に示す。建設機械を内作・外作に分け、工場におけるエネルギー消費量から内作におけるCO_2排出量を算出するとともに重量比で外作における排出量も算出する。また、材料、部品、製品に分類し、産業連関表から個々の排出量を算出し合算する。調査は次の要領で行った。調査にあたり、用語の定義が不明確であると回答者の計上が異なり、調査結果のバラツキが大きくなるため用語について表1に示すように定義づけした。

◆調査対象

建設機械製造業4社

◆調査対象機械

バックホウ	35t,20t,6t
トラクターショベル	17t,7t
ブルドーザ	20t
ホイールクレーン	25t

また、算定式は以下のとおりとした。

◆算定式

a．材料から発生するCO_2排出量の算定

$$C_{A1} = \Sigma (M_j \times f_j) \qquad (式1)$$

ただし、C_{A1}：材料から発生するCO_2排出量(kg-CO_2/台)、M_j：材料j別の重量(kg/台)、f_j：材料j別のCO_2排出量原単位(kg-CO_2/kg)

b．内作・外作の加工・組立から発生するCO_2排出量の算定

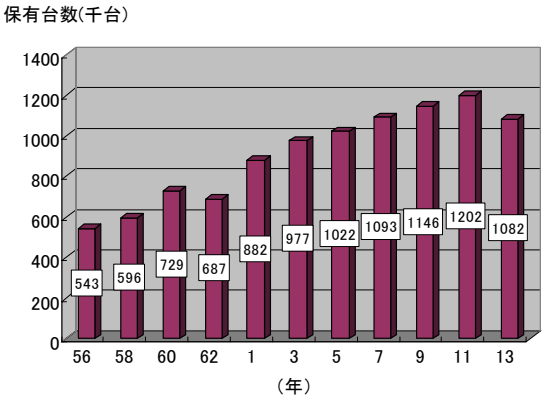


図-2 建設機械の国内保有台数の推移

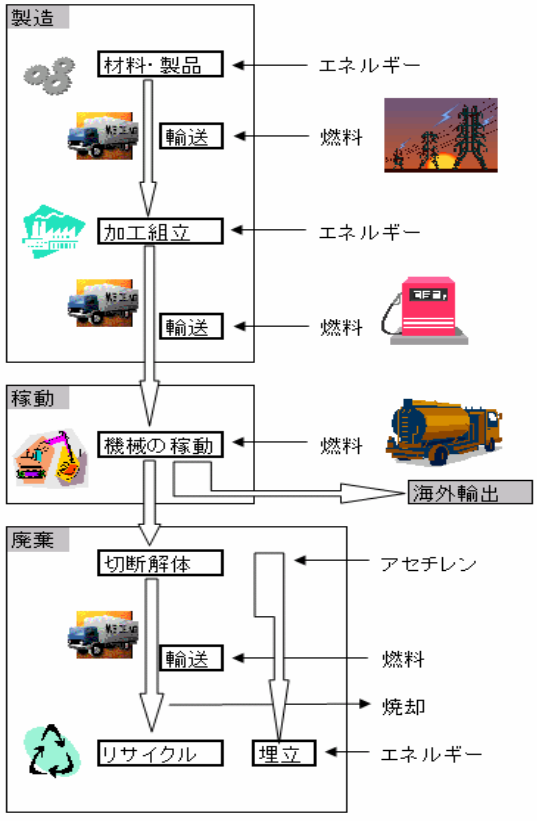


図3 建設機械のライフサイクルにおけるCO_2排出

$C_{A2}=(\Sigma M_p)\times f_p$　　(式2)

ただし、C_{A2}：加工・組立から発生するCO_2排出量(kg-CO_2/台)、M_p：外作、内作の部品重量(kg/台)、f_p：外作・内作のCO_2排出量原単位(kg-CO_2/kg)、p：外作・内作を表す添字

c．製品の加工により発生するCO_2排出量の算定

$C_{A3}=\Sigma(M_k\times(f_k-f_j))$　　(式3)

ただし、C_{A3}：製品から発生するCO_2排出量(kg-CO_2/台)、M_k：製品k別重量(kg/台)、f_k：製品k別のCO_2排出量原単位(kg-CO_2/kg)、f_j：製品別の材料から発生するCO_2排出量原単位(kg-CO_2/kg)

d．輸送により発生するCO_2排出量の算定

$C_{A4}=\Sigma M_j/S\times L\times f_t$　　(式4)

ただし、C_{A4}：輸送により発生するCO_2排出量(kg-CO_2/台)、M_j：材料j別重量(kg/台)、f_t：輸送トラックのCO_2排出量原単位(kg-CO_2/km･台)、S：輸送トラック１台当たりの積載量(kg/台)、L:材料､製品、建設機械の輸送距離（=600km）、t：輸送を表す添字

e．製造のCO_2排出量の算定

$C_{AT}=C_{A1}+C_{A2}+C_{A3}+C_{A4}$　　(式5)

ただし、C_{AT}：製造のCO_2排出量(kg-CO_2/台)、C_{A1}：材料から発生するCO_2排出量(kg-CO_2/台)、C_{A2}：加工・組立から発生するCO_2排出量(kg-CO_2/台)、C_{A3}:製品から発生するCO_2排出量(kg-CO_2/台)、C_{A4}：輸送により発生するCO_2排出量(kg-CO_2/台)

2．3　廃棄過程で排出されるCO_2の算定

建設機械を更新、廃棄する際には、中古として海外で使用される場合と廃棄される場合があり、国内のCO_2排出量に影響がある廃棄処分について調査した。建設機械を**表 2** ように材料ごとに分類し、処分過程で排出される排出量を積み上げて算出した。

算出式は次とした。

$C_{CT}=C_{C1}+C_{C2}+C_{C3}+C_{C4}$　　(式 6)

ただし、C_{CT}：廃棄、C_{C1}：切断・解体、C_{C2}：輸送、C_{C3}：埋立、、C_{C4}：焼却により発生するCO_2排出量(kg-CO_2/台)

2．4 稼動時に排出されるCO_2の算定

稼動時に排出されるCO_2は、既存資料[1)]に示されている年間排出量の算定式を参考として図 5 に示すよう

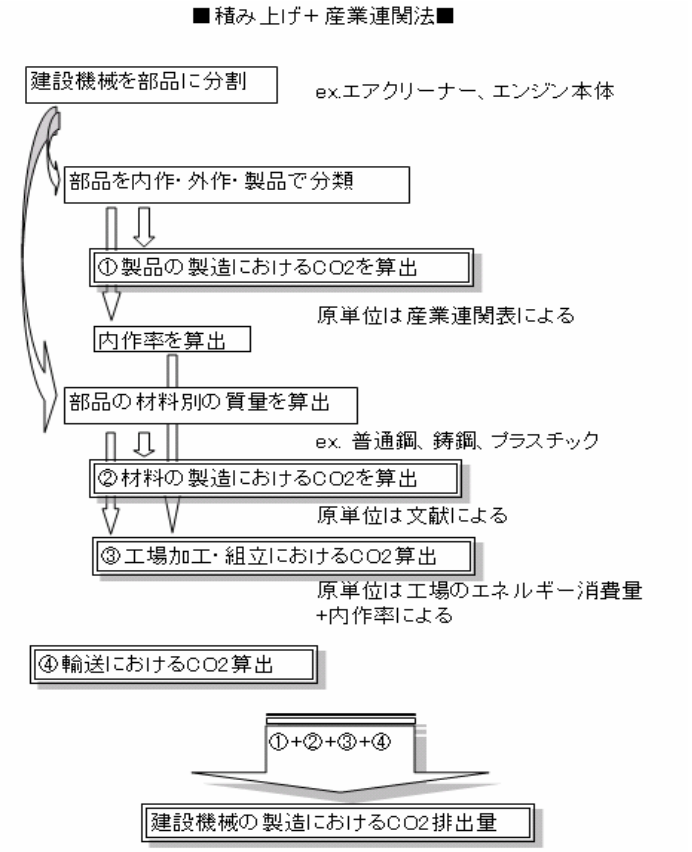


図 4 建設機械の製造過程における CO_2 排出量の算出

表 1 建設機械の製造における用語の定義

用語	定　義
材料	鋼板、樹脂など建設機械の部品になる前の材料をいい、建設機械では①鉄、②非鉄金属、③コンクリート、④ゴム、⑤プラスチック、⑥油脂・塗料、⑦作動油・軽油の７種類に分類する。
製品	建設機械の部品として購入する製品とするが、産業連関表にCO_2の排出原単位が設定されている等の条件を満足するものとする。
内作	全て自社工場内で、材料を部品に加工することをいう。なお、工程別CO_2排出比率の高い「溶接」、「機械加工」を自社工場で行っているものについては、「内作」として扱う。
加工	切削、熱処理、溶接などにより材料から部品を製作する作業をいう。
外作	自社工場以外（外部）に発注して材料から部品に加工することをいう。なお、外作で加工された部品は、組立ラインにそのまま供給できるものとする。
組立	部品、製品をネジ、ピン等で建設機械に組立てる作業をいう。
加工・組立	内作による部品の製作及び部品等を用いて建設機械を組立てる工程をいう。
製造	材料、製品の搬入から建設機械の出荷までの工程をいう。
輸送	材料、製品の輸送、建設機械の出荷等に伴う輸送をいう。
稼動	建設機械を建設工事現場で使用することをいう。
廃棄	建設機械の海外輸出、および回収・解体・運搬・処分等までの工程をいう。

表2 廃棄過程で排出される CO_2 排出量の算出

材料	処分方法	CO_2 排出由来
鉄・非鉄金属	鉄屑	アセチレンの使用・輸送
コンクリート・プラスチック等	埋立	輸送・埋立
作動油・油脂等	焼却	輸送・焼却

に(ライフサイクル運転時間)×(時間当たり排出量)を基本として算出することとした。

ライフサイクル運転時間は建設機械損料表に記載されている（標準耐用年数）×（年間標準運転時間）を採用することとした。建設機械損料表は、国土交通省が総務省の承認統計として国土交通省の有資格者名簿に記載された業者を対象として実施したものである。稼動時間については平均的に稼動している機械のものを対象としており、標準使用年数は処分機械について購入年、稼動時間を調査したものである。

時間当たり排出量は軽油の排出量原単位に基づくこととしたが、原単位は出力当りの排出量となっているため、定格出力から計算できるように負荷率をかけている。負荷率は工事費の積算で使用している実作業時の燃料消費率(出力の条件が定格出力)と CI モード※1 の燃料消費率(出力の条件が軸出力)の比である。

※1　C1 モード:ISO 8178-4 に規定された建設機械等に用いられるエンジンの排出ガステストサイクル。

3. 調査結果

3. 1　製造過程で排出される CO_2

表 3、表 4 はバックホウおよびブルドーザの製造過程のうち材料に由来する CO_2 排出量の算出例であり、図 6 は材料別の排出量を図示したものである。製品に含まれる鋼材や作動油、油脂等は別途、製品の排出量において算定している。ブルドーザ は、質量当りの排出量が多い鋳鋼、鍛鋼の割合が高く、バックホウと比較して排出量が多くなっている。材料の質量の合計が建設機械の質量よりも多くなっているが、歩留まりを考慮したためである。表 5 は歩留まりの調査結果である。平均的な値は 75%程度である。

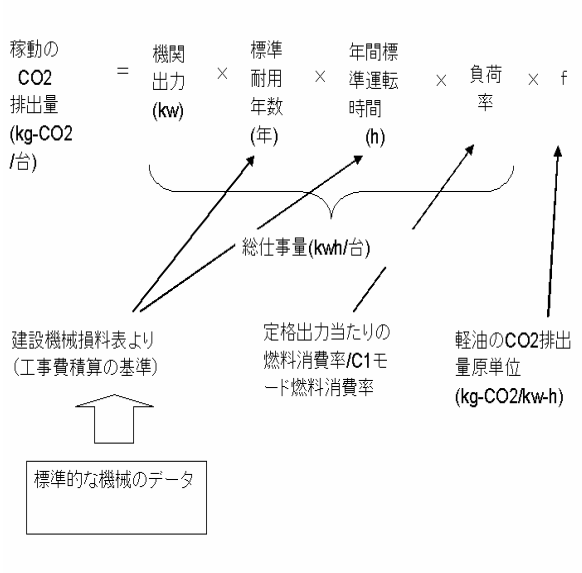


図5 建設機械の稼動時における CO_2 排出量の算出

表3 20t クラスバックホウの材料別質量構成と CO_2 排出量

材料の種類	合計質量 (kg/台)	構成割合 (%)	排出原単位 (kg-CO2/kg)	CO_2 排出量 (kg-CO2/台)	CO_2 排出割合 (%)
鋳鋼	1,417	6.2	4.28	6,072	17.1
鍛鋼	3,217	14.0	2.89	9,283	26.2
普通鋼	14,878	64.9	1.30	19,387	54.7
非鉄金属	31	0.1	4.60	144	0.4
コンクリート	3,293	14.3	0.12	398	1.1
ゴム	60	0.3	1.28	77	0.2
プラスチック	45	0.2	1.61	73	0.2
油脂・塗料	11	0.0	2.44	26	0.1
合計	22,954	100.0	-	35,462	100.0

表4 20t クラスﾌﾞﾙﾄﾞｰｻﾞの材料別質量構成と CO_2 排出量

材料の種類	合計質量 (kg/台)	構成割合 (%)	排出原単位 (kg-CO2/kg)	CO_2 排出量 (kg-CO2/台)	CO_2 排出割合 (%)
鋳鋼	6,881	27.8	4.28	29,478	47.3
鍛鋼	5,600	22.6	2.89	16,161	26.0
普通鋼	11,984	48.5	1.30	15,614	25.1
非鉄金属	195	0.8	4.60	897	1.4
ゴム	47	0.2	1.28	61	0.1
プラスチック	20	0.1	1.61	32	0.1
合計	24,727	100.0	-	62,243	100.0

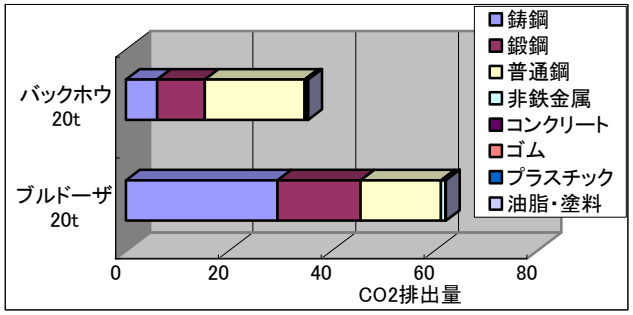


図6　建設機械の製造における材料別 CO_2 排出量※2

※2 製品として購入した作動油等を除く

表5　歩留まりのメーカー調査結果

メーカ	対象部品	歩留まり（%）
A社	（全機種として）	71.0
B社	バックホウの例	75.4
C社	切板の場合	70~80
D社	ブーム、アームの切断	70~80

製品に由来する CO_2 排出量は製品内訳のそれぞれに排出原単位を乗じることで算出した。組み立て加工に由来する CO_2 排出量は、工場における重油、電気の使用による排出量と生産質量から生産質量当りの排出量を算出し、各機種ごとの生産質量に乗じることで算出した。 また、輸送に由来する CO_2 排出量は、輸送質量、トラックの輸送距離当りの排出原単位、輸送距離から算出した。表6は製造の CO_2 排出量の算出結果である。質量当りに換算するとバックホウに比べてトラクターショベル、ブルドーザが大きくなるが、鋳鋼・鍛鋼の割合が大きくなるためである。また、今回の調査結果を他の調査結果と比較したのが表7である。建築学会は質量当りで、総プロは機械の価格当りで建設機械全体について同じ原単位を使用しており、建築学会の値は今回調査のブルドーザと同程度となる。本調査結果は、他の調査結果と比較しても妥当と考えられる。

3．2　廃棄過程で排出される CO_2

表8は廃棄過程で排出される CO_2 の調査結果である。20tバックホウで製造過程の3%程度であるが、建設機械の国内での解体率は14%程度であり、寄与率では0.4%程度となる。

3．3　稼動時に排出される CO_2

稼動時に排出される CO_2 を表9に示す。使用年数、年間運転時間は「建設機械等損料算定表」によった。

またエンジンの排出原単位および負荷率は文献[1)]に記載されている値を使用した。

なお、「建設機械等損料算定表」の値は建設業保有機械を対象としたものであるが、リースレンタル業保

表6　建設機械の製造過程で排出される CO_2

機　種		製造の CO_2 排出量　t-CO2/台				
		材料	製品	加工組立	輸送	合計
バックホウ	6t	10.7	4.3	3.2	0.4	18.6
	20t	35.5	4.3	4.6	1.4	45.8
	35t	64.6	6.5	10.4	2.4	83.9
トラクターショベル	7t	8.1	21.0	2.2	0.5	31.8
	17t	43.1	14.2	12.6	1.3	71.2
ブルドーザ	20t	62.2	4.6	12.0	1.5	80.3
ホイールクレーン	25t	43.1	36.5	8.0	2.0	89.6

表7 原単位の比較

機　種	算定方法	機械質量当り t-C02/t
バックホウ20t	積み上げ方式+産業連関方式（本調査結果）	2.3
ブルドーザ20t		4.0
鉱山・土木建設機械	産業連関法(建築学会)	4.2
バックホウ20t	総プロ（土木分野）（価格当り原単位）	2.2
自動車　1.3t	積み上げ方式+産業連関方式（日本自動車工業会）	2.6

表8 建設機械の廃棄過程で排出される CO_2

機種		廃棄の各過程における CO_2 排出量 (kg-CO2/台)				合　計 (kg-CO2/台)
		切断・解体	輸送	埋立	焼却	
バックホウ	6t	16	59	46	387	508
	20t	47	188	254	841	1,330
	35t	76	316	437	1,575	2,404
トラクターショベル	7t	17	65	36	671	789
	17t	45	169	82	1,007	1,303
ブルドーザ	20t	57	203	7	1,043	1,310
ホイールクレーン	25t	71	258	58	2,339	2,726

有機械の保有割合が増加しているので、今後、CO_2排出量の算定精度向上を図る上では考慮していく必要があると考えられる。予備的な調査であるが、図7は、建設機械リースレンタル業 30 社が保有するバックホウ 153 台のアワメータの記録の分布である。建設業保有の機械と比較して稼動時間が少ないことが推定されるが、工事が集中する時期に調達され、機械過不足の調整役を担っていることが原因と考えられる。

表9 建設機械の稼動で排出される CO_2

機種		機関出力(kw) CO_2排出原単位(kg/kwh) 負荷率	使用年数(年) 年間運転時間(h) ライフサイクル運転時間(h)	CO_2 排出量(t-CO2/台)
バックホウ	6t	41 0.780 0.53	7.1 880 6,248	106
	20t	141 0.731 0.57	7.1 880 6,248	367
	35t	165 0.731 0.57	7.1 880 6,248	430
トラクターショベル	7t	62 0.743 0.53	9.4 600 5,640	138
	17t	156 0.731 0.55	9.4 600 5,640	354
ブルドーザ	20t	152 0.731 0.57	9.9 470 4,653	295
ホイールクレーン	25t	193 0.731 0.32	9.9 870 8,613	389

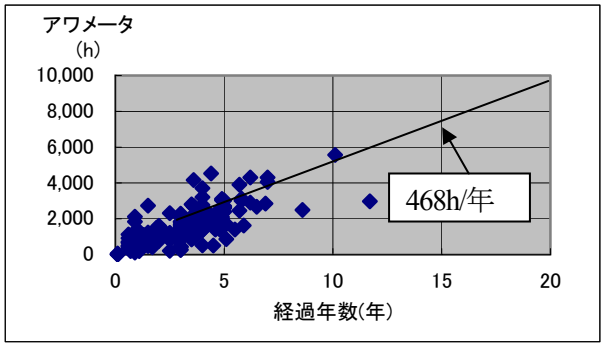


図7 リースレンタル業保有機械（バックホウ）の稼働時間の記録（例）

4. まとめ

建設機械の製造・稼動・廃棄のライフサイクルにおける CO_2 排出量は表 10 とおりである。また、図8に排出割合の例を図示する。今後、削減実績を評価する際には機種の構成割合の変化、年間稼働時間の変化を考慮するか否かで結果が大きく異なることが予想される。本調査結果に限らず CO_2 排出量は計算結果を左右する要因が多い点を看過しないように留意する必要がある。

なお、本報告は土木研究所が独立行政法人へ移行する前に村松、江本、朝倉、水上、平下らが調査したものを筆者らがまとめたものである。

表10 建設機械のライフサイクルにおける CO_2 排出量

機種		ライフサイクルにおける CO_2 排出量(t-CO2/台)			合計(t-CO2/台)
		製造	稼動	廃棄	
バックホウ	6t 20t 35t	19 46 84	106 367 430	0.5 1.3 2.4	126 414 516
トラクターショベル	7t 17t	32 71	138 354	0.8 1.3	171 426
ブルドーザ	20t	80	295	1.3	376
ホイールクレーン	25t	90	389	2.7	482

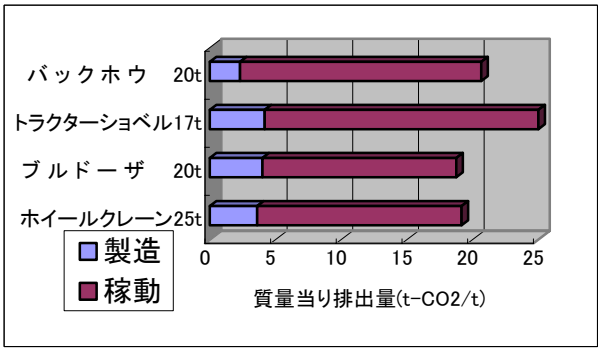


図8 建設機械のライフサイクルにおける CO_2 排出量

参考文献

1) 建設省建設経済局建設機械課：平成 11 年度　建設技術開発会議　建設施工の環境・安全政策部会　第1回　建設施工の地球温暖化対策検討分科会　資料 1-6　建設機械からの年間二酸化炭素総排出量 1-7 建設機械及び施工に関する地球温暖化技術

2) 経済産業省・国土交通省：平成 13 年度　建設機械動向調査報告

33. 電動駆動式テレスコピッククラムシェルの開発と稼働実績－地下鉄建設工事における環境負荷低減の取組み－

コマツ：○勝沼　清[3]
東京地下鉄株式会社：藤木　育雄[1]、辻　雅行[2]

1. はじめに

東京地下鉄株式会社（以下：東京メトロという）建設部は、自治体を除く公共工事発注団体としては初めて平成11年3月にISO14001を認証取得し、様々な環境負荷低減活動を積極的に推進している。現在施工中の地下鉄13号線(渋谷～池袋間)建設工事においては、工事用車両や建設機械に起因する排出ガスや騒音の低減を図っている。工事用車両に関しては「CNGエンジン」、「粒子状物質減少装置」および「排ガス2次規制車」の導入を図り、建設機械（テレスコピッククラムシェルおよび油圧ショベル）についてはその一部を電気駆動式に替えることによって排出ガスをゼロにすると同時に、大幅な騒音低減も実現している。

本論文では電気駆動式テレスコピッククラムシェルの開発・導入の背景、仕様および環境負荷低減の効果などについて報告する。

キーワード：地下鉄建設、開削工事、環境負荷低減、テレスコピッククラムシェル、電気駆動、ケーブルリール

2. 発注者としての環境対策の取組み方針[1)]

21世紀に入り地球環境は、日々変化して新たな課題が生じており、これらに対応するため環境に関する法令・条例が強化されている。

国においては大量生産・大量消費・大量廃棄に歯止めをかけるため、『グリーン購入法』や資源の枯渇防止のために循環型社会の形成を目指して『建設リサイクル法』を施行している。また、東京都ではディーゼル車の排出ガス規制を盛り込み『環境確保条例』を平成15年10月から施行し、17年4月以降に規制が強化される予定である。地下鉄建設工事においても、これらの法令・条例を遵守し、企業の事業特性による環境側面を考え、環境負荷低減に取り組むことが重要であり発注者の責務と考えている。

地下鉄は自動車・バスはもとより、他の軌道系交通機関と比べても二酸化炭素排出原単位が最も小さく地球温暖化の点から極めて地球環境に優しい交通機関である(**図1**)。

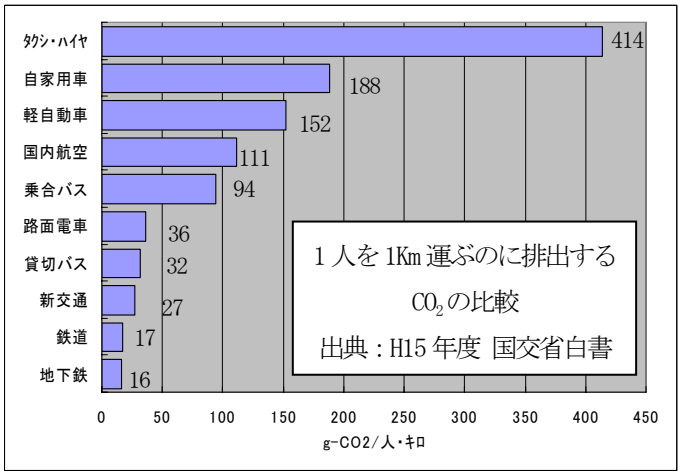


図1 旅客交通機関別の CO_2 排出原単位(H12年度)

しかし一方で、その建設段階においては道路中央に作業帯を設け、大型の建設機械や多数の工事用車両を使用し、長期にわたり工事を行うために都市環境に多大な負荷を与えていることも事実である。

従って、真に「人と地球に優しい地下鉄」を目指すために、地下鉄13号線建設工事における排出ガスや騒音の低減を図ることとし、テレスコピッククラムシェルなどの建設機械の一部を従来のディーゼル駆動式から電気駆動式に替えて導入した[1)]。

(1)ISO14001の認証取得

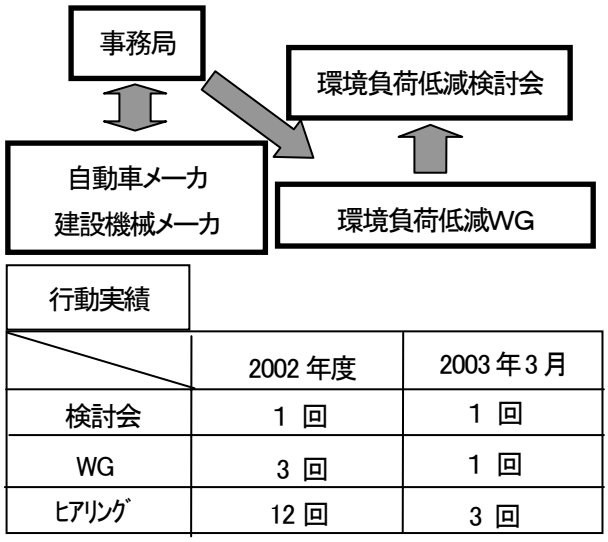
東京メトロでは、平成10年3月16日に旧帝都高速度交通営団工事部に環境対策課を設立し、ISO14001の規格要求事項に沿って環境マネジメントを構築し[1)]、

平成 11 年 3 月 26 日に自治体を除く公共工事の発注団体としては国内で初めて環境マネジメントシステムの国際規格である「ISO14001」の認証を取得した。東京メトロでは ISO14001 環境マネジメントシステムに基づき、様々な目的・目標を設定し環境負荷低減活動を実施している[3]。

(2)環境負荷低減への取り組み

①取組み体制

ISO14001 の環境マネジメントプログラムにおける環境負荷低減活動のひとつである『電動化・排出ガス対策型建設機械の採用』を達成するため、発注者および施工業者からなる『環境負荷低減検討会』および『ワーキングープ』を平成 13 年 2 月に設立した。また、メーカは必要の都度、オブザーバとして参画した[1](図 2)。



行動実績

	2002 年度	2003 年 3 月
検討会	1 回	1 回
WG	3 回	1 回
ﾋｱﾘﾝｸﾞ	12 回	3 回

図 2 取組み体制

これは、東京メトロのみならず実際に工事を行う工事請負業者自らが環境負荷低減の必要性を自覚し、その上で双方が協力して施策を実施することが不可欠であると考えたためである。

平成 13 年 2 月に検討会を立ち上げ、以後月 1~2 回のペースでワーキングを実施し、市場調査および工事で使用する建設機械の環境負荷低減の方策を検討した。

②コスト負担

実効ある環境負荷低減を推進する場合のコスト負担を解決する必要があるものと考えられる。

基本的には、発注者が率先して取り組む必要があるが、一方ではコスト縮減の観点から事業費を増加させることは極力避ける必要がある。東京メトロでは、13 号線駅部の土木工事発注に際して、技術開発や施工方法の工夫をはじめ、さまざまなコスト縮減施策を採用し、およそ 5%（25 億円）のコスト縮減を達成した。

この自助努力で生み出したコスト縮減額の一部を環境負荷低減に振当てることとした。[1]。

3. 建設機械における環境負荷低減方策の概要

13 号線建設工事で使用するディーゼル車の排出ガス対策の第 1 段階として、平成 14 年度に駅部 7 駅（合計 15 工区）で使用する工事用車両のうち、クレーン付き 4ton トラック 15 台に対しては「粒子状物質減少装置」を装着すると共に、2ton トラック 15 台については従来のディーゼルエンジン仕様から「CNG（圧縮天然ガス）エンジン仕様」に変更して合計 30 台の排出ガス対策型車両を導入した。これらの工事用車両は、工事期間中に主として作業基地と現場間の資機材運搬のために常時使用する工事用車両である。



図 3 稼動状況



図 4 稼動状況

第2段階として平成15年6月には駅部7駅の工事に使用する 10ton ダンプトラックに「酸化触媒装置」を装着し、平成15年10月より施行された東京都環境確保条例のディーゼル規制に前倒しで対応した。

また、工事の大半を費やす掘削工事で長期にわたり使用する建設機械の「テレスコピッククラムシェル」および「油圧ショベル」の一部を従来のディーゼル仕様から電気駆動の機種に替えて導入することとした(**図3、4**)。

本文は、駅部建設工事に使用する電気駆動式テレスコピッククラムシェルにおける環境負荷低減方策の概要について報告する。

(1)電気駆動式テレスコピッククラムシェルの開発方針[2)]

テレスコピッククラムシェル（以下：テレスコクラム）は駅部開削工事において路面を覆工した後、地下掘削によって生じた土砂を地上まで揚土し、ダンプトラックに積み込む機械あり、バケット容量が 0.7m^3、地下約18メートルの深さまで対応可能なものである。

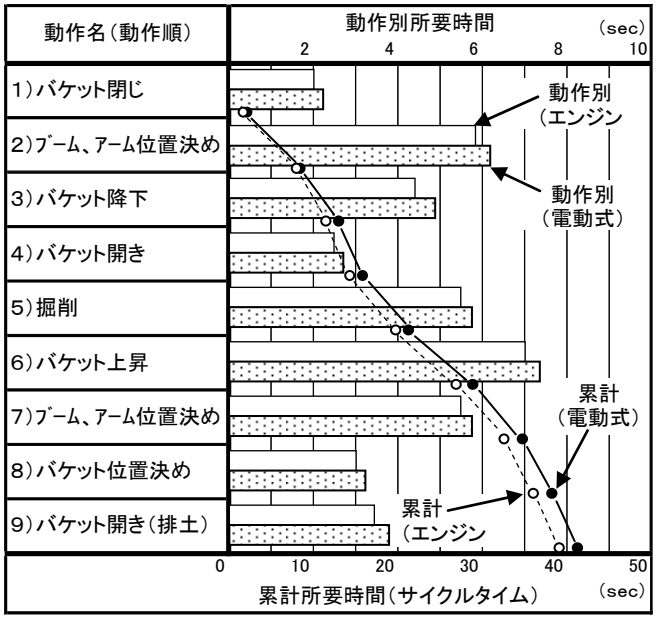
今回は排出ガスを“ゼロ”とすると共に周囲騒音をも低減して環境負荷低減に効果のある電気駆動式を開発し導入することとした。

①作業性能の維持

駅部開削工事において、テレスコクラムの掘削作業は全体工程の中で大きなウェートを占めるため、エンジン式に対して同等以上の作業性能が要求された。

電動機の回転速度は一定（スターデルタ起動方式で1分間に 1,500 回転/50Hz）であるため、エンジン式（2,000 回転/分）と比較して機関回転速度が大幅に小さいため作業性能が低下する課題がある。この課題に対しては大型の油圧ポンプとそれに見合った電動機を採用して機械の作業速度を確保した(**表1**)。

表1 電動式の作業性能



②集電装置

テレスコクラムは複数の開口部からの土砂搬出を行うため、これらの開口部間を移動する必要がある。**表2**に示す通り複数の集電方式について比較検討を行ない、若干構造が複雑になりコストが高くなるものの、安全性や使い勝手の良さ、および移動の容易さなどを評価して下部走行体にケーブルリールを搭載する「水平ケーブルリール方式」を採用することとした。

(2)新技術の開発結果

下部走行体にケーブルリールを搭載する場合、その搭載スペースは上下左右に制約のある狭い空間となる。

そのため、実用機に先立ち「水平ケーブルリール」を事前に開発して性能を確認した。

表2 集電装置比較

集電方式 / 比較項目	ケーブルリール		レール		スウィング	
ケーブルの損傷 安全性	○	・旋回してもケーブルは静止安定 ・走行時ケーブルを踏付けない	×	・旋回時ケーブルが振られる ・作業機とケーブルが干渉する	×	・旋回時ケーブルが振られる ・後退時ケーブルを踏付ける
地上側設備 要員	○	・地上側では電源以外の設備は不要	△	・機械が移動する全域に懸架レールが必要	×	・後退時にケーブルをさばく要員が必要
稼動可能な範囲	○	・面状の広い範囲で稼動できる	×	・機械の移動は懸架レールで制約される	△	・広い範囲の稼動が可能だが、ケーブルのさばきが課題
構造のシンプルさ コスト	×	・リール、スリップリングなどの装置が必要で構造は複雑．コスト高	○	・構造はシンプル．コスト安	○	・構造はシンプル．コスト安

また、下部走行体にケーブルリールを設ける場合、電動機などの主要な電気機器が搭載されている上部旋回体まで電気を伝える必要があるが、途中に旋回する箇所があり、回転しながら電気を伝える装置（スリップリング）と走行モータなどに供給される油圧ホースの双方を一つの回転軸上で同時に回転しながら通す電気・油圧複合回転継手が必要となる。これについても今回新規に開発を行なった。

①コンパクトなケーブルリール

狭隘なスペースに納めるために、鉛直軸を中心に薄型のドラムが水平に回転する形式とし、スリップリングや駆動モータなどの主要なコンポーネントは小型化し、ドラムの内部空間に押し込むことにより全体の高さを低く抑えた。

また、電源ケーブルはドラムに対し、多列・多層巻きとし、40m のケーブルを搭載しつつもコンパクトな外形を達成した。

しかし一方で多列巻きとしたことにより、ケーブルの乱巻きや、最悪は「からみ」「ひきちぎり」などのトラブルも想定されたため、試作品により先行研究を実施した。

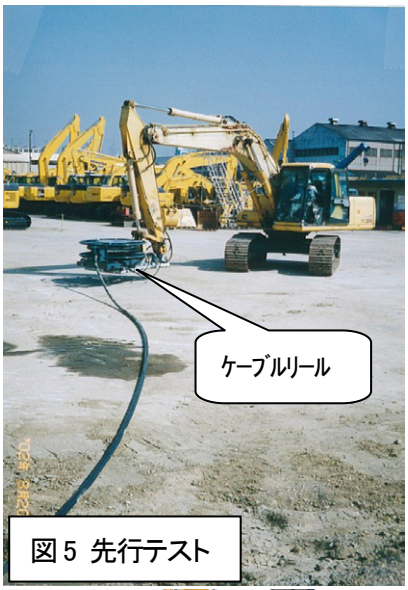


図 5 先行テスト


図 6 水平ケーブルリール

テストの結果、若干の乱巻きは生じるものの大きなトラブルに至る恐れは無く、実用上なんら問題の無いレベルと判断された（図 5、6）。図 7 に水平巻取り型ケーブルリールの概形を示す。

②電気・油圧複合回転継手

車両旋回中心部において、電源ケーブル（3 相電源、アースの計 4 系統）と油圧配管・ホース（左右走行モータ、ケーブルリール駆動モータ、ドレーンの計 7 系統）を同時に一軸上で、互いに絡み合わないよう回転しながら接続する必要がある。

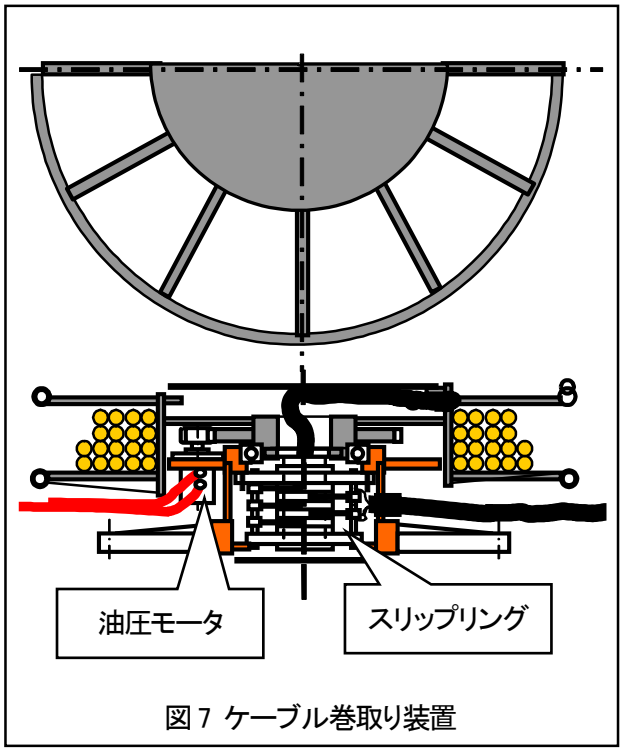


図 7 ケーブル巻取り装置

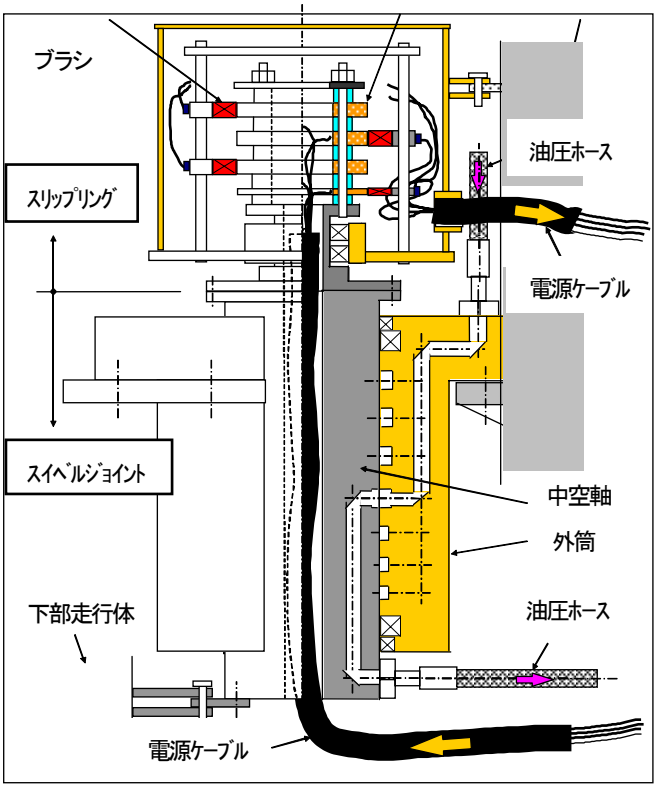


図 8 電気油圧複合回転継手

このため、油圧回転継手（スイベルジョイント）を下方に、電気回転継手（スリップリング）をその上に

設け、双方の軸を連結した電気・油圧複合型の回転継手を開発した(図 8)。

スイベルジョイントの軸は中空となっており、この内部を電源ケーブルが下方から入り、上部のスリップリングの軸（リング）に至る。スイベルジョイントの外筒とスリップリングの外枠（ブラシ側）は車両の上部旋回体に固定され、互いに連結された双方の軸は下部走行体に固定されている。

(3)特長

電動テレスコクラムは「電気」で駆動する形式としての特長の他に、ケーブルリールを旋回しない下部走行体に搭載したことによって得られる特長を併せ持っている。

①リールを下部走行体に搭載する形式としての特長

(a)機動性の確保

車両が旋回しても、電源ケーブルはその動きとは無関係に接続されており、振り回される事がないためケーブルの損傷や電気事故発生の恐れが少ない。

(b)信頼性の確保

車両が前後に走行しても、電源ケーブルはリールによって巻取ったり繰出されるため、これを踏み付けたり、引きちぎったりする恐れが少ない。

(4)主要諸元

表 3 に電気駆動式テレスコクラムの主要諸元を示す。

表 3 主要諸元表

形　式	コマツPC200SC-6電動ﾃﾚｽｺﾋﾟｯｸｸﾗﾑｼｪﾙ
ｸﾗﾑｼｪﾙﾊﾞｹｯﾄ容量	0.7　m3
機械質量	27940　kg
最大掘削深さ	20430　mm
最大掘削力	62.8　kN
ﾃﾚｽｺｱｰﾑ伸縮速度	伸び：95　m/min（無負荷/ｱｰﾑ垂直）
	縮み：60　m/min（負荷/ｱｰﾑ垂直）
寸　法	
全　長	14265　mm
全　幅	3180　mm
全　高	3210　mm
後端旋回半径	2860　mm
電動機	
出　力	90　kw
電　源	三相, 400V, 50Hz
ｹｰﾌﾞﾙ巻取り装置	
形　式	水平巻取り、多列･多層巻き、油圧巻
設置場所	下部走行体、後部･左右　履帯間
巻取り･繰出長	最大40　m
電源ｹｰﾌﾞﾙ	100　m2×3C、14　mm2×1C
外　径	φ53　mm
質　量	5.3　kg/m
ｺﾈｸﾀ	単極ｺﾈｸﾀ、防水ﾀｲﾌﾟ

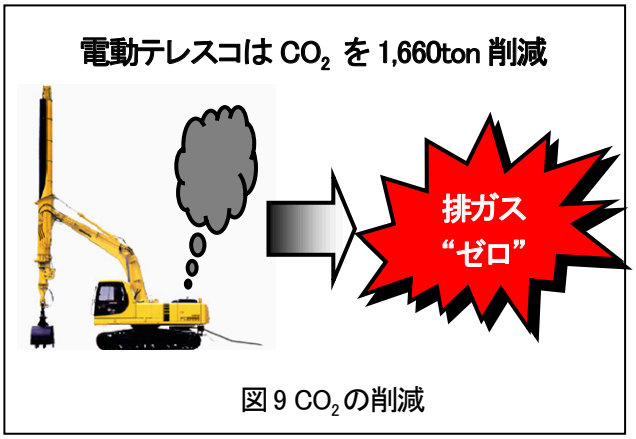


図 9 CO_2 の削減

4. 電動テレスコクラムの導入効果

(1)大気汚染の低減 [1),2),3)]

①CO_2 排出量の削減

電動テレスコクラムと同等の 135ps のディーゼルエンジン仕様車 1 台が 1 日 8 時間、月に 25 日間、30 ヶ月稼動する場合の CO_2 排出量は 276ton となる。13 号線の工事では 6 台の電動テレスコクラムが導入されているので、工事期間中に 1,660ton の CO_2 の排出を削減することができる。この CO_2 排出量を工事期間中に吸収・浄化するには、東京ドーム約 10 個分(47ha)の森林面積が必要となる。本施策の導入により、近年深刻化している『地球温暖化』の防止に対して微力ながら貢献しているものと考えている。(図 9)。

②有害物質の削減

電動テレスコクラムは NOx、CO、HC などの有害ガスや、黒煙、PM など有害物質を一切排出しないため、周辺住民や作業員の健康を害する恐れが無い。

135ps のディーゼルエンジン仕様車 1 台が 1 日 8 時間稼動した場合の有害物質である粒子状物質(PM)の排出量の試算結果を図 10 に示す。

(2)騒音の低減 [1),2),3)]

騒音が低いため、周辺の住環境への影響を小さく抑えることができる。騒音の実測値はディーゼルエンジンと比較して約 10dB の改善が得られ、環境に与える

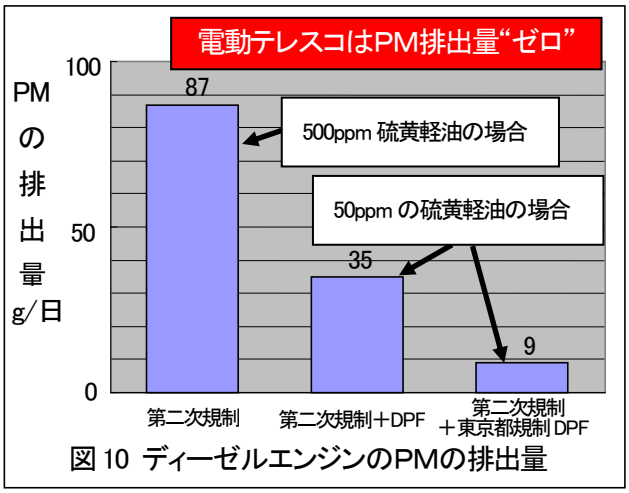


図 10 ディーゼルエンジンのPMの排出量

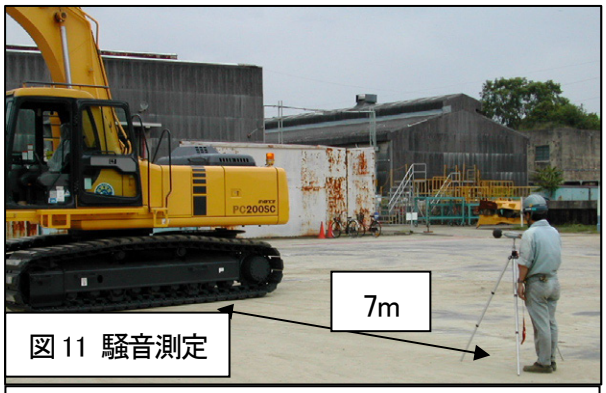


図 11 騒音測定

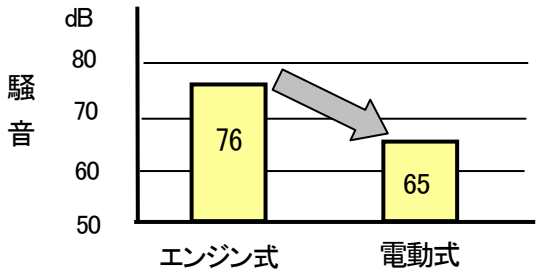


図 12 騒音低減効果

騒音公害も改善される(図 11、12)。

5. 電動テレスコクラムの稼働実績

図 13 に示す通り、電動テレスコクラムは平成 13 年 10 月から稼働した。電動テレスコクラムは 6 台が駅部構築と駅の出入り口に採用され、延べ約 180 ヶ月稼動する予定である。

6. 今後の改善点

今回、電動テレスコクラムを新規に開発し、地下鉄建設現場で稼動したが、作業場所の移動、機械の現場

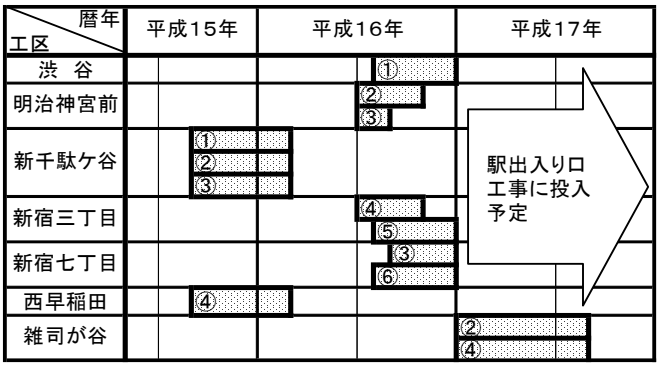


図 13 電動テレスコの稼動実績･予定

搬入や搬出時には電源が無いと移動できないなどの使い勝手の改善要望があった。今後は走行時には走行専用の小さなエンジンに切り替えるなどの改善を図りより使い易い機械とするよう改善を図りたい。

7. おわりに

今回の 13 号線地下鉄建設工事における環境負荷低の取組みは､鉄道はもとより他の公共工事に先駆けて､東京メトロが発注者として率先して行ったものである。

建設工事は都市環境および地球環境規模の環境負荷低減を重要な命題として推進して行かなければならない。本文が今後の建設工事のあり方の参考となれば幸甚である。

末筆ですが、今回の電動テレスコクラム導入に対する環境負荷低減の取組みに際して､ご指導･ご協力を賜りました関係各位に対して心から感謝を申し上げます。

＜参考文献＞

1)田邊：地下鉄工事における環境対策：JREA, 2003. Vol.46, No.9
2)田邊、川上、内田：地下鉄工事における環境負荷低減；建設の機械化, 2004. 3, No.649
3)前村、村松、藤沼：地下鉄 13 号線における環境対策；日本ﾄﾝﾈﾙ技術協会, 55 回施工体験発表会, 2004. 11.19

＜著者＞

1 東京地下鉄株式会社 建設部 部長
(〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
2 東京地下鉄株式会社 建設部 沿道調整課 課長
(〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
3 コマツ 営業本部 直轄営業部 担当部長
(〒107-8414 東京都港区赤坂 2-3-6)

34. 加熱工法による油汚染土壌浄化プラント　軽質油、重質油、VOC の分解が可能な油汚染土壌浄化プラントの紹介

日工㈱：○蓬莱　秀人、藤原　和也、山元　明宏

1．　開発の背景

欧米に遅れること 10 年余り、典型 7 公害の中で最も対策が遅れていた土壌汚染に対し、平成 15 年 2 月 15 日に『土壌汚染対策法』が施行された。　他の 6 公害(大気、水質、騒音、振動、臭気、地盤沈下)は、排出量や発生量を規制する事により、公害の発生や被害の拡大を抑える事を目的にしているのに対し、今回のそれは第一に土壌汚染の状況を把握し、人への健康被害防止の措置をはかる事を最大の目的としている。『土壌汚染防止法』では無く『土壌汚染対策法』となったのもこれが所以である。

戦後急速な産業復興を遂げ GDP 世界第２位にまで急成長してきた日本国経済であるが、それの推進力となったのは石油であると云っても過言ではない。　石油は、一次ｴﾈﾙｷﾞｰとしてのみならず化学製品の原料として、又、それの経済性、安全性、ﾊﾝﾄﾞﾘﾝｸﾞ性等が優れている事から工業製品製造ﾌﾟﾛｾｽにおける洗浄液や溶媒として大量に使用され無雑作に処分されてきた。その代償として油汚染土壌と言う負の遺産を、将来に残す結末となっている。　土壌汚染全体の半数以上が、油が介在する汚染である言われており、油臭や水に浮く油膜が不快であるだけでなく、それを人体が直接摂取する事による健康への影響が懸念されている。　土壌の環境基準として、第一種特定有害物質である VOC 類 11 種、第二特定有害物質である重金属類 9 種、第三種特定有害物質である農薬類７種の 27 物質が指定されており、油に関してはそれの構成成分であるﾍﾞﾝｾﾞﾝのみがこれに該当する。

油汚染土壌の浄化対策は、土地売買に伴う汚染による土地評価額の減損を抑える為のﾘｽｸ回避措置として、『土壌汚染対策法』施行前より民間ﾍﾞｰｽで自主的に実施されている。　油汚染土壌の浄化技術として、自然治癒力を利用したﾊﾞｲｵﾚﾒﾃﾞｨｴｲｼｮﾝ、高温焼却技術を応用したｾﾒﾝﾄｷﾙﾝでの浄化等があるが確実性ならびに経済性等から日本では普及に至っていない。　この様な時代の要請の下、経済的で尚且つ確実、ｽﾋﾟｰﾃﾞｨに油汚染土壌を浄化でき、浄化後の土壌は本来の機能を損なう事なく土としての本質を保持しながら微生物や植物が早い段階で生息できる土壌浄化技術の確立が待ち望まれている。

土質の変化がなく、経済的に尚且つ確実に油の浄化が可能な手法として、低温加熱工法があるが、以下では当社が開発した油汚染土壌浄化ｼｽﾃﾑの概要を紹介する。

2．　土壌浄化ｼｽﾃﾑ概要

当社は、道路舗装資材であるｱｽﾌｧﾙﾄ合材(重量比で約 95%の乾燥加熱された骨材(砂利、砂、ﾌｨﾗｰ)と原油の残渣油であるｱｽﾌｧﾙﾄ約 5%とを粒度配合に基づいて混合したもの)を生産するｱｽﾌｧﾙﾄﾌﾟﾗﾝﾄを製造販売している。　長年ｱｽﾌｧﾙﾄﾌﾟﾗﾝﾄで培ってきた乾燥加熱技術、集塵技術、脱臭技術、冷却技術、制御技術等をﾍﾞｰｽに油汚染土壌の浄化ｼｽﾃﾑを開発した。　本浄化ｼｽﾃﾑは、大量の油汚染土壌を低ｺｽﾄで確実に処理する事が可能で、尚且つ比較的低温で処理できるので土壌本来の性質が変わらない事や、ｼｽﾃﾑ内で有害物質を分解し無害化するために二次公害の恐れが無い事等が特徴である。

今現在、当社の土壌浄化ｼｽﾃﾑ NTR(Nikko Thermal Remediation System)として、浄化対象物質や能力に応じて StageⅠ、StageⅡ、StageⅢのﾗｲﾝﾅｯﾌﾟを取り揃えている。　(第１表参照)

(1) StageⅠ

StageⅠは、油汚染土壌を加熱する一次処理装置にｶｳﾝﾀｰﾌﾛｰ方式を採用し、ｶﾞｿﾘﾝ、灯油、軽油等の軽質油で汚染された土壌を最も経済的に大量に浄化するのに

適している。

ｶｳﾝﾀｰﾌﾛｰ方式は、熱媒体であるﾊﾞｰﾅ燃焼ｶﾞｽと油汚染土壌とが、一次処理装置内で相向かい合う方向に流れて熱交換を行う直接加熱ｼｽﾃﾑである。

(第１表)

NTRｼｽﾃﾑｼﾘｰｽﾞ一覧

○:浄化可能物質

汚染物質		Stage Ⅰ	Stage Ⅱ	Stage Ⅲ
油類	ガソリン	○	○	○
	灯　油	○	○	○
	軽　油	○	○	○
	A 重 油		○	○
	B 重 油		○	○
	C 重 油			○
	マシン油			○
	原油・タール・ピッチ			○
第一種特定有害物質	四塩化炭素			○
	1,2-ジクロロエタン			○
	1,1-ジクロロエチレン			○
	シス-1,2-ジクロロエチレン			○
	1,3-ジクロロプロペン			○
	ジクロロメタン			○
	テトラクロロエチレン			○
	1,1,1-トリクロロエタン			○
	1,1,2-トリクロロエタン			○
	トリクロロエチレン			○
	ベンゼン			○

(2) StageⅡ

StageⅡは、StageⅠのｼｽﾃﾑにﾊﾟﾗﾚﾙﾌﾛｰ方式の三次処理装置を加え、一次処理装置から飛散発生する高濃度の土粒子を捕集し、高温に加熱処理を行う事により、処理対象物質はStageⅠのそれに加えA重油、B重油まで対応が可能となる。

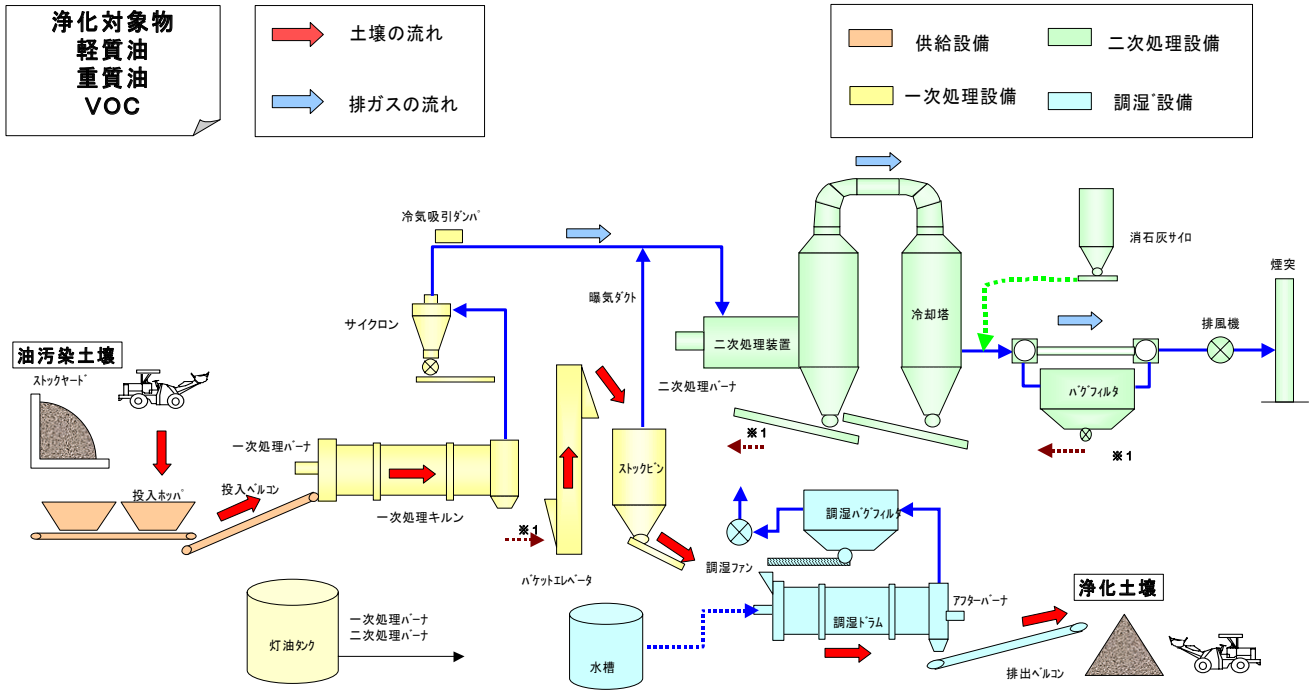
ﾊﾟﾗﾚﾙﾌﾛｰ方式は、熱媒体であるﾊﾞｰﾅ燃焼ｶﾞｽと油汚染土壌とが装置内で同方向に流れながら熱交換を行う直接加熱ｼｽﾃﾑである。

(3) StageⅢ

StageⅢは、ﾊﾟﾗﾚﾙﾌﾛｰ方式の一次処理装置を採用する事と、二次処理装置の下流側に冷却塔とﾊﾞｸﾞﾌｨﾙﾀを組合せる事により処理対象物質は、StageⅡのそれに加えC重油、ﾏｼﾝ油、ﾀｰﾙ、ﾋﾟｯﾁ、さらには第一種特定有害物質であるVOCで汚染された土壌も浄化が可能となった。

(図-1)

NTRシステム　StageⅢフロー図



３．　NTR ｼｽﾃﾑ StageⅢの特徴

以下では、第一種特定有害物質である VOC と重質油で汚染された土壌を浄化する事が可能な NTR ｼｽﾃﾑ StageⅢ(写真-1 参照)を（図-1）に基づいて紹介する。

(写真-1)



３．１　土壌の流れ

(1) 一次処理装置(土壌の乾燥・加熱・分級)

土壌と熱風とが同一方向に流れるﾊﾟﾗﾚﾙﾌﾛｰ(並流)方式の一次処理装置は、土壌の流れ方向に傾斜させた回転自在の円筒型とし、内部を断熱二重構造とする事で 400℃まで土壌を加熱できるようにした。内部には、一次処理ﾊﾞｰﾅから発生する熱風で土壌を効率よく加熱できるよう、土壌を細かく分散させるための掻き揚げﾌﾗｲﾄを備えている。　一次処理ﾊﾞｰﾅ近傍のﾊﾞｰﾅ火炎が形成される領域は、土壌をﾄﾝﾈﾙ状に分散させる特殊な掻き揚げﾌﾗｲﾄ構造とし、土壌が直接火炎に接触し含有油の燃焼や土質の変性が起こるのを防いでいる。　土壌を目的の温度まで乾燥加熱するのに約 5 分を要し、土質、含水比、油含有量、浄化ﾚﾍﾞﾙに応じて一次処理装置の回転数、土壌加熱温度、排ｶﾞｽ温度を最適値に設定する事ができる。

浄化のﾒｶﾆｽﾞﾑとしては、ﾊﾞｰﾅ燃焼による熱風を直接土壌に接触させて加熱し、含有油の蒸気圧を高めて気化させる事を基本原理としている。　ただ、水の沸点が 100℃であるにも拘わらず、洗濯物が常温で乾くのと同様に、油成分の沸点以上に加熱する必要は無い。

又、土壌から水分が抜けて行く過程において、水を媒体にしたﾊﾞｲﾝﾀﾞ作用が無くなり、一次処理装置から排ｶﾞｽと共に土壌の微粒分が分離飛散して行く。このとき、土壌全体重量の約 10%が飛散土粒子として排ｶﾞｽと共に一次処理装置から飛散して行くが、表面積比では土壌全体の約 80%以上を飛散土粒子が占めている。　土粒子表面に油が付着しているものと考えると、重量比 10%の微細土粒子を土壌から分級することにより、土壌全体から 80%の油を取り除く事が可能となる。（写真-２参照）

(写真-2)



(2) ｽﾄｯｸﾋﾞﾝ(土壌の均熱・曝気)

円筒縦型断熱二重構造を有するｽﾄｯｸﾋﾞﾝは、一次処理ｷﾙﾝで処理された土壌とｻｲｸﾛﾝとﾊﾞｸﾞﾌｨﾙﾀで捕集された微細土粒子とをｽｸﾘｭｰｺﾝﾍﾞｱやﾊﾞｹｯﾄｴﾚﾍﾞｰﾀで搬送してｽﾄｯｸﾋﾞﾝに貯蔵できる様にした。

一次処理装置での加熱滞留時間が 5 分足らずである事、加熱方式の特性から土粒子の外面から中心に向かって熱が伝わり、粒径によって温度のﾊﾞﾗﾂｷが生じる事等から、土粒子表面に付着した油や VOC は気化蒸発し易いが、粒径が大きい土粒子ほど中心部分の温度が低く内部に含浸している油成分は抜け難い。　ｽﾄｯｸﾋﾞﾝで土壌を一旦溜める事により、温度の低い大きな土粒子が、温度の高い小さな土粒子から伝熱を受けて均熱化がはかられ曝気を促すと共に、雰囲気酸素による油や VOC の酸化分解作用によって浄化を更に促進させる事が可能である。

（表-２）にｽﾄｯｸﾋﾞﾝでの浄化促進効果の一例を示す。

(表-2)
(土壌処理温度200℃ 排ｶﾞｽ温度300℃)

汚染物質(油種)	A 重 油		マシン油	
汚染濃度 (ppm)	10,000	15,000	10,000	15,000
一次処理ｷﾙﾝ処理後 (ppm)	700	800	2,500	2,800
ｽﾄｯｸﾋﾟﾝ曝気後 (ppm)	90	120	150	180

※一次処理装置の出口の濃度が3000ppmのものが
150℃の貯蔵温度で30分曝気させる事で、
200ppm以下に低下している。

(3) 調湿装置(土壌の調湿)

土壌の中に礫、ｺﾝｸﾘｰﾄｶﾞﾗ、その他異物が混入していた場合でも、それの噛み込みや詰まりによる機器類へのﾀﾞﾒｰｼﾞを少なくできる事、安全性やﾒﾝﾃﾅﾝｽ性等を考慮して、本調湿装置は土壌の流れ方向に傾斜させた回転自在の円筒型とし、内部に散水用ﾉｽﾞﾙを数箇所に設ける構造とした。 浄化処理後の高温土壌に散水を行う事により、水蒸気と共に発生する粉塵を捕集できる様ﾊﾞｸﾞﾌｨﾙﾀを備え、又、ここでの結露を未然に防止するために、ｱﾌﾀｰﾊﾞｰﾅで結露が起こらない温度まで処理ｶﾞｽを昇温できる構造とした。

土壌へ調湿を行う目的として、第一に防塵対策であるが、第二には浄化後の土壌に微生物が生息繁殖し、植物が生殖できる環境を取り戻してやる事が重要である。

３．２ ｶﾞｽの流れ

(1) ｻｲｸﾛﾝ(微細土粒子の浄化・捕集)

一次処理装置で分級した微細土粒子は、表面積が大きい事から高濃度の汚染物質が付着している事になる。 一次処理装置は、浄化対象物に応じて排ｶﾞｽ温度を 200～500℃の範囲で制御する事が可能で、土壌の加熱温度より100～150℃高く設定する。 これは気流乾燥の原理と同様で、飛散土粒子を高温の排ｶﾞｽ中に分散させる事により加熱し、土粒子表面に付着した油を気化蒸発させる。 浄化されｻｲｸﾛﾝで捕集された飛散度粒子は、一次処理ｷﾙﾝでの処理土壌に還元できる様ｽｸﾘｭｰｺﾝﾍﾞｱでﾊﾞｹｯﾄｴﾚﾍﾞｰﾀに戻される。

微細土粒子の表面から気化蒸発した油成分は排ｶﾞｽと共に、次の工程である二次処理装置に送られ、ｻｲｸﾛﾝで捕集できない小さな土粒子は、二次処理装置を経てﾊﾞｸﾞﾌｨﾙﾀで捕集される。

(2) 二次処理装置(有害物質の熱分解)

二次処理装置では、一次処理装置で気化蒸発させた油や VOC を無害の二酸化炭素と水とに酸化分解する。 VOC 並びに油の構成元素は、炭素、水素、酸素、塩素、硫黄、窒素、等が主であり、これらを無害化する条件として、分解処理温度 750℃以上、滞留時間 2 秒以上が必要である。 ただし、処理する油や VOC の種類によっては、有害な硫黄酸化物、窒素酸化物、塩化水素等が生成される場合があるが、ﾊﾞｸﾞﾌｨﾙﾀに消石灰を添加してこれら有害物質を中和させている。

二次処理装置では、これら有機塩素化合物等を効率よく分解させる必要があり、分解炉に要求される要素として、三つの T が重要である。 即ち、分解温度の Temperature、混合攪拌の Turbulence、滞留時間の Time である。 二次処理装置の構造としては、円筒二重ﾒﾀﾘｯｸ構造の燃焼室と円筒縦型ｾﾗﾐｯｸ構造の滞留室とで構成されている。 二次処理ﾊﾞｰﾅの火炎が燃焼室で水平方向に形成されるが、この炎に向かって多数の噴出し孔を設けた燃焼室内筒より、15～20m/s の高速で被処理ｶﾞｽを火炎に衝突させて攪拌と均熱化をはかる。 燃焼室で均熱化された被処理ｶﾞｽは、滞留室に入り無害の二酸化炭素と水とに分解される時間（2 秒以上）保持される。 処理温度に関しては、二次処理装置出口に備えた温度ｾﾝｻｰで温度監視を行い、ﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸ制御によって 750℃以上となる様ﾊﾞｰﾅ燃焼量をｺﾝﾄﾛｰﾙしている。

(写真-3 参照)

(3) 冷却塔(分解ｶﾞｽの冷却)

冷却塔の構造として、円筒縦型のﾄﾞﾚﾝが発生しない完全蒸発方式とした。 750℃以上の処理ｶﾞｽに水を噴霧して約 4 秒で 180℃まで冷却するが、このとき噴霧する水の粒子径が大きいと水滴が完全に蒸発せず冷却塔下部にﾄﾞﾚﾝが発生して来る。 ﾄﾞﾚﾝが発生すると一連の処理過程で生成する塩化水素や硫黄

酸化物により、塩酸や硫酸がﾄﾞﾚﾝに析出し二次公害を招く恐れがある。　従って、水の噴霧粒子径を小さくする事のできる二流体噴霧ﾉｽﾞﾙを採用しｺﾝﾌﾟﾚｯｻｰ空気を噴霧媒体としている。　(写真-3 参照)

(写真-3)



(4) ﾊﾞｸﾞﾌｨﾙﾀ(分解ｶﾞｽの中和・捕集)

ﾊﾞｸﾞﾌｨﾙﾀでは、ｻｲｸﾛﾝを通過してきた細かい土粒子を捕集し、硫黄含有油で汚染された土壌や VOC で汚染された土壌を処理したときに二次処理装置で副生成される硫黄酸化物や塩化水素を消石灰で中和する。　中和反応は乾式で行われ、消石灰添加装置で消石灰をﾊﾞｸﾞﾌｨﾙﾀの入り口側に添加する。　消石灰が濾布表面にﾌﾟﾚｺｰﾄされ硫黄酸化物並びに塩化水素を含んだ排ｶﾞｽが濾布を通過する時に、この消石灰に接触反応し、硫黄酸化物は硫化ｶﾙｼｳﾑ(石膏)に、塩化水素は塩化ｶﾙｼｳﾑにに中和される。　これらの中和生成物は安定で尚且つ無害であるので、全量を土壌に還元し土壌そのものの安定化をはかる。

4.　技術的展望

(1) 土壌ｽﾄｯｸｼｽﾃﾑの構築

汚染土壌の受け入れ段階で土壌を一旦ｽﾄｯｸさせる必要があるが、VOC や揮発性油で汚染された土壌の場合、揮発成分や臭気の拡散や粉塵の飛散を防ぐ必要がある。　又、油分の地下への浸透並びに雨水による流出、引いては作業環境に関するｼｽﾃﾑ構築が急がれる所である。

(2) 前処理ｼｽﾃﾑの開発

汚染土壌の受入れ基準として、ｱｽｺﾝｶﾞﾗ、ｺﾝｸﾘｰﾄｶﾞﾗ、廃木材、鉄屑等の異物の混入が無いことが条件であるが、土壌持ち出し時にこれらの異物を完全に除去することも難しいため、土壌受け入れ時にこれらの選別を余儀なくされることも否めない。　従って、傾斜ｸﾞﾘｽﾞﾘｰ、振動ｽｸﾘｰﾝ、ﾄﾛﾝﾒﾙ、磁選機等の分別装置により異物を取り除くｼｽﾃﾑの構築も必要と考える。又、粘土質、ｼﾙﾄ質の土壌を浄化する場合は、生石灰をﾐｷｻで添加して土質を改良するｼｽﾃﾑの開発が待ち望まれる。

(3) 重金属の浄化ｼｽﾃﾑ

本浄化ﾌﾟﾗﾝﾄは、油汚染土壌を直接熱風に曝す事により加熱し、含有油を熱脱離(気化蒸発)させると共に、一次処理装置内部での風選別を利用して油含有量が多い細かな土粒子を飛散分級させる事を基本原理としている。　分級を効率よく行うためには、土粒子の凝集媒体である水を除去し、尚且つ土粒子相互の摩擦により、土粒子表面に付着している油土粒子を削りとる作用も見逃せない。　これらの作用を利用し、重金属で汚染された土壌の分級が可能なｼｽﾃﾑ（StageⅣ）の構築が急がれる。　このｼｽﾃﾑを構築する事が出来れば、油と重金属、又は VOC と重金属等の複合汚染土壌にも、本 NTR ｼｽﾃﾑでの浄化が可能となる。

(4) 農薬・PCB 等の浄化ｼｽﾃﾑ

本浄化ﾌﾟﾗﾝﾄは、一次処理ｷﾙﾝの制約上 400℃までの土壌加熱に対応しているが、この温度域で安全に尚且つ経済的に農薬、PCB 類を土壌から熱脱離させる事ができるのであれば、気化分離した農薬や PCB を二次処理装置で熱分解させる事が可能であると考える。　安全性に関する実績やﾉｳﾊｳを蓄積し、油、VOC、重金属、農薬までに対応した浄化ｼｽﾃﾑ

（StageⅤ）の開発が望まれる。

(5) 経済性の追求

当社は、ﾄﾞｲﾂ BBU(Bilfinger Belger Unbelt)社とﾊﾞｸﾃﾘｱを活用した油汚染土壌の浄化技術について、技術提携を結んでいる。　もともと自然界に生息する油に有効な土着菌を採取し、その培養液を軽質油(ｶﾞｿﾘﾝ、灯油、軽油 etc)で汚染された土壌に散布する(ﾊﾞｲｵｵｷﾞｭﾒﾝﾃｰｼｮﾝ)事により、浄化を行う事が可能である。　汚染濃度、土質、含水比等の諸条件が整えば、低温加熱工法よりも低ｺｽﾄで尚且つ二酸化炭素の発生も少なく浄化を進める事ができる。

従って、土壌を受け入れた段階で汚染濃度、土質、含水比、浄化期限等の条件を基に、もっともｺｽﾄﾐﾆﾏﾑに浄化を進めるための選択ﾌﾟﾛｸﾞﾗﾑを構築して行きたい。

(2) おわりに

今回の『土壌汚染対策法』は、人への健康被害の防止をはかる事が最優先となっており、人以外の生物や環境への影響はあまり考慮されていない。　地球は人類だけのものではなく、人類誕生以前から生物はこの地球で共存共栄をはかり、種の保存を目的に今後も生き続けなければならない。　人類の欲望の代償として、公害が顕在化し自然が破壊され、今日も種が滅び行く。　地球温暖化を始めとする自然破壊の原因を作り、又その原因を知り得るならば、人類自らが知恵を出し勇気を払って自然の修復に努めなければならないと思う。

従って、今後も継続的に、経済性、安全性、効率性をより高めた土壌浄化ｼｽﾃﾑを開発、改良し、我が社の経営理念でもある、企業を通じて社会（自然）に奉仕できればと願っている。

35. アスファルトタンク内蔵型フォームドスタビライザによる施工

鹿島道路株式会社　機械センター：○木村　直之

1．はじめに

近年、地球環境の保全、省資源、省エネルギー等の観点から各分野において様々な技術革新が求められている。舗装業界においてもその意識は広く浸透し、新技術、新工法の開発、活用が行われている。このような背景から鹿島道路では従来の加熱混合方式に比べ、環境保全、コスト削減が可能となる常温混合方式の一つであるフォームドアスファルト工法の導入、普及の促進に積極的に取り組んできた。

本報文はフォームドアスファルト工法に使用する特殊装備を施したフォームドスタビライザの新型機KS-200（範多機械株式会社製）の機能と特徴を紹介すると共に、施工実例を報告するものである。

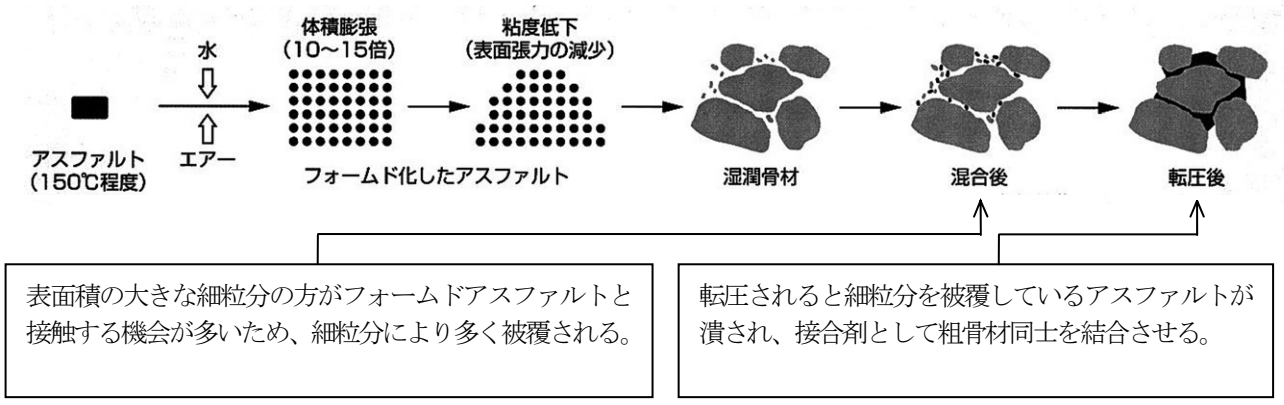
2．フォームドアスファルト工法

フォームドアスファルト工法とは高温（150℃～180℃程度）のストレートアスファルトに少量の水とエアーを添加してフォーム（泡状）化させたアスファルトを、現地で路盤材と混合し強化路盤を構築する安定処理路盤工法のことである。



写真―1　フォームドスタビライザ KS-200

フォーム化したアスファルトは体積が 10～15 倍に膨張し、粘度が非常に低く、常温の湿潤骨材にも容易に付着するので分散性の良い安定処理混合物が製造できる。特徴としては現地の低品質骨材を有効利用することができ、また短い工期で高品質な路盤を確保することが可能である。さらに一般的なアスファルト舗装と比較してCO_2、NO_X等の大気汚染物質の発生を抑制でき、経済、環境両面において優れている工法である。



図―1　フォームド混合物生成のプロセス

３．フォームドスタビライザKS-200の特徴

今回導入したフォームドスタビライザ KS-200 は鹿島道路のアイディアをもとに範多機械株式会社が完全オリジナルとして設計・製作したものである。大きな特徴としては大型アスファルトタンクを搭載したことにある。

（1）アスファルトタンク内蔵

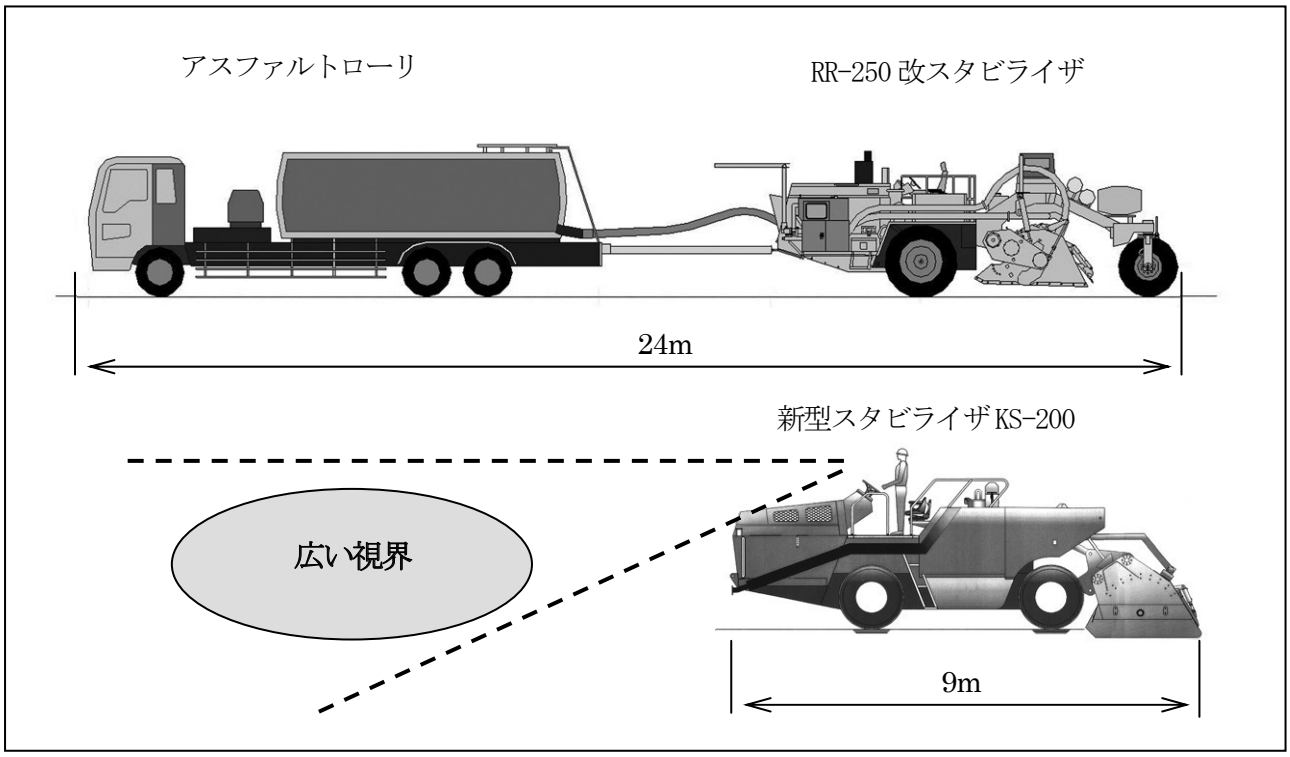
3,500 リットルの大型アスファルトタンクを内蔵することによりアスファルトローリと連結する必要がなくなった。これにより施工時の編成が縮小し、これまで困難であった狭いエリア、曲率の小さい箇所での作業が可能となった。さらにレーン移動時等の後退作業の時、スタビライザ単体で動けるので機動性が大幅に向上した。また前方視野が広がり安全性も向上した。アスファルトタンクは自動温度調整装置付軽油バーナを搭載しており、待機時においてもアスファルトの温度を一定に保つことができる。

図―２は従来のCaterpillar社製RR-250改スタビライザと新型スタビライザ KS-200 の作業時の全長を比較したものである。

（2）ミキシングロータ

これまでのフォームドスタビライザはミキシングロータを車体中央部に配置していたが、KS-200 は車体後方に配置しているので、施工開始箇所の処理残しがなくなり、均一な処理品質が得られる。

またロータフードがサイドへのシフト機能を備えており、タイヤの際を越えて破砕･攪拌作業ができる為、マンホール周りや路肩際、構造物際まで処理残しなく施工できる。次頁写真―２はロータフードを車体左側にシフトした状態。タイヤの際から 30ｃｍ外側にオーバーハングさせることが出来る。フード内のロータはコニカルビット（144 本）を装備し、高い破砕性と攪拌性を備えている。また混合深さはフード後部の操作盤にて設定した値を保持するよう深さセンサーにより自動制御される。



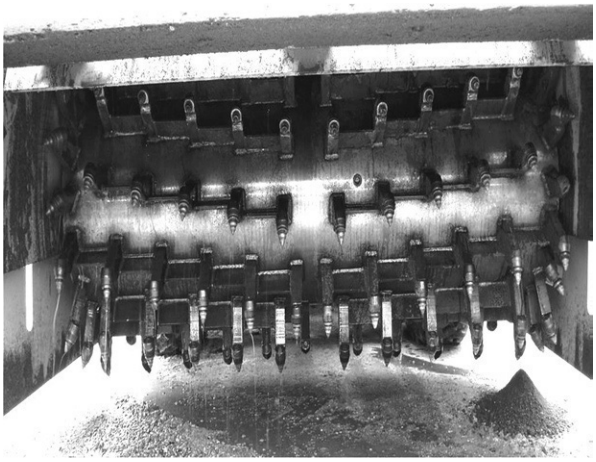
図―２　作業時の編成比較



写真―２　ロータフードのシフト

（３）フォームドアスファルト制御システム

フォームドアスファルトの混合量の制御は作業開始時に作業幅員、混合深さ、アスファルト添加量、現地路盤材の比重を制御パネルから入力する。入力された情報に基づき、機械に搭載されたコントローラが作業速度に応じてフォームドアスファルトの吐出量を自動制御する。アスファルト噴霧ノズル、アスファルトポンプのバランスによって決定される最適速度に対して、±25%の範囲で比例制御が可能である。例えば最適速度が４m/min の場合、３～５m/min の範囲で比例制御を行う事ができる。速度範囲を外れるようなことがあればアスファルトの吐出を自動的に停止する。



写真―３　フード内のロータ

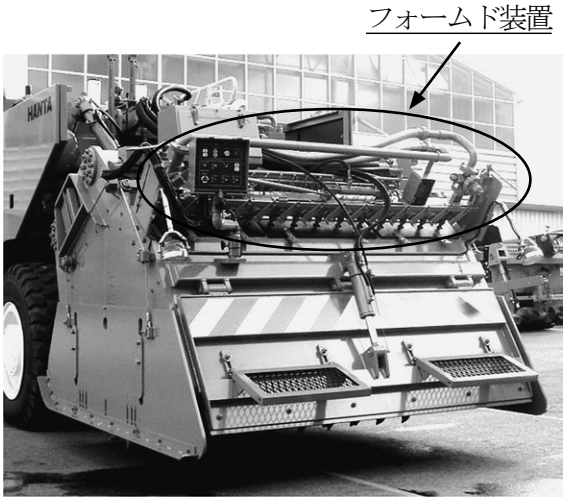
（４）フォームド装置

フォームドアスファルト噴霧ノズルは、作動ノズルの個数を調整することにより作業幅員に対応する。フォームド装置ユニットは信頼性の高いカナダ SOTER 社のものを採用。アスファルト噴霧ノズルとミキシングチャンバを一体化し、それぞれ独立したノズルの先端でフォームドアスファルトを作る為、ノズルの詰まりや泡の不均一さがなく高品質な混合物が製造できる。



写真―４　制御パネル

またアスファルト配管の洗浄機構は範多機械（株）がデストリビュータの技術で培ったエア洗浄方式を採用することによりメンテナンス性が向上している。



写真―５　フォームド装置

４．施工実例

（1）施工現場

・工事名　　平成 15 年度　県単舗装道路修繕工事
・発注者　　千葉県成田土木事務所
・工事箇所　　千葉県富里市十倉　　主要地方道　富里酒々井線
・総延長　　404m
・総面積　　1980 ㎡

施工現場は比較的交通量が少なく、大型車の通行も殆どない道路であったが、工区内に３箇所の交差点がありマンホールも数箇所存在していた。また幅員は4..5～5.0mであったが、急激な幅員変更と路肩の植栽が道路に迫っていた為、既存機 RR-250 改での施工は困難と考え、KS-200 で施工を行った。最適アスファルト量は配合試験の結果 4.0%とした。また強度を高める為、セメント 2.5%を添加した。

５．おわりに

今回紹介した KS-200 の導入により、これまでフォームドアスファルト工法が困難とされていた狭隘な箇所での施工が可能となった。施工実例で報告した千葉県富里の現場以外にも、宮崎県都城市など全国で約 16,000 ㎡の施工実績があるが何れの現場も良好な結果を残している。また工期短縮、交通規制延長縮小は周辺環境に寄与したものとして現場担当者はもとより、企業者、発注者からも好評を得ている。今後、適用範囲の拡大が期待できるが施工規模を見極め、既存機 RR-250 改との使い分けあるいは併用により、効率良い施工を行っていきたい。

今後も社会情勢を反映して建設業に対する環境保全、省資源、省エネルギーへの要請は一段と大きくなると考えられるが、社会のニーズに基づいた建設機械の開発、普及を進めていきたい所存である。

表－１　日当り施工量

日数	施工量	アスファルト使用量	備考
１日目	６００㎡	１２．０ｔ	予備破砕舗装厚：５～１０ｃｍ 処　理　厚：１８ｃｍ
２日目	６８０㎡	１３．６ｔ	
３日目	７００㎡	１４．０ｔ	

（2）施工結果

日当り施工量は表―１の通りである。既存機 RR-250 改を使用した場合、現場の条件等を考慮すると施工日数４日間が予定されたが、施工日数３日間で終える事ができた。施工際やマンホール周りの処理残しをバックホウ等で排出し、整正によって生じた余剰材に置き換える作業が大幅に減少した事やレーン移動時の時間短縮が大きな要因と言える。また懸念された交差点での一般車両等との交錯も施工編成縮小に伴い規制延長を短縮できた為､最小限に抑える事ができた。

36. 木造家屋解体機の開発

日立建機：○石井　啓範
山形日立建機：村井　俊和
積水ハウス：輕部　元喜

1. 緒言

1.1 建設リサイクル法

近年，地球温暖化・資源枯渇など地球環境問題のクローズアップとともに循環型社会の構築が求められるようになってきている．このような中，環境元年と言われる平成12年に公布・施行された「循環型社会形成推進基本法」を基に7つの個別法が施行された．

この内，「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」いわゆる「建設リサイクル法」は，建築系解体廃棄物を中心とした義務・規制について制定したものであり，一定規模以上の解体など建築施工が対象である．本法律が対象としている建設廃棄物は，最終処分場の4割，不法投棄量の9割を占めるとも言われており，リサイクルへの取組みの遅れが大きな課題となっている．このため，本法律では分別解体と特定建設資材再資源化の実施義務（「特定建設資材」としてコンクリート，コンクリート及び鉄から成る建設資材，木材，アスファルト・コンクリートが指定されており，再資源化等率95％が目標値として設定されている．）を課すと共に，解体工事業者について登録制度を実施する事などにより，不法投棄を無くすと共に残余年数の少ない最終処分場の延命を図る事などを目的としている．

ここで，建設系解体廃棄物と関係が深い建築物の着工延床面積の推移を図1に示す．この図から，昭和40年代以降に着工延床面積が急増しているのが分かる．特に昭和40年代に建てられた建築物はその多くが都市部に集中しており，これらの建築物が施工から30年以上経過し，更新期を迎えていることから，今後，都市部を中心に建設系解体廃棄物の発生量の急増が予想される．

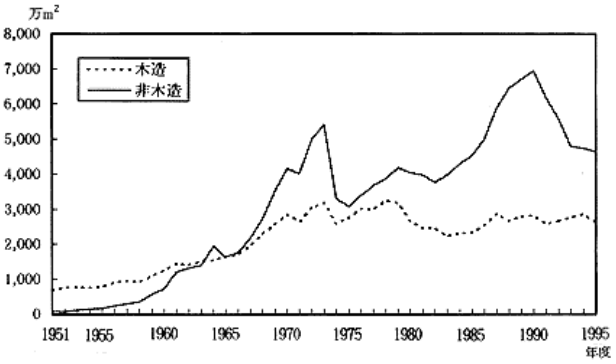


図１　建築物着工延床面積の推移
（1 都 8 県）

1.2 解体機械

これら解体施工は，大別して，ビル解体などの［大型建造物解体］と一般住宅などの［低層家屋解体］とに分けられる．

［大型構造物解体］は，コンクリートと鉄骨が対象となるため，油圧のコンパクト・高出力を生かしきれる運転質量20ﾄﾝ以上の油圧ショベルを使用するのが一般的である．高所作業をこなすためにフロント部を高くしたハイリフト機の先端部にコンクリート圧砕機や鉄筋鉄骨カッタなどを取り付けた解体仕様機が多く用いられている．(図2)

一方，［低層家屋解体］は，そのほとんどが木造で，低くて壊れやすい構造のため，運転質量3～4ﾄﾝのミニ油圧ショベルから6ﾄﾝの小型油圧ショベルが多く用いられている．特に，都市部における低層家屋解体に注目すると，敷地が非常に狭く，敷地への進入路も狭いなどの制限から，自ずと現場に搬入できる解体機械の大きさも制限され，3～4ﾄﾝのミニ油圧ショベルが多く用いられている．しかし，これらミニ油圧ショベルではサイ



図 2　52mスーパーハイリフト解体機械



図 3　木造家屋解体機(ミニモク)

ズが小さい故に作業範囲や力の面で能力不足であり，屋根等の上層部解体については人手作業にてカバーせざるを得ないのが現状で，効率的な解体とはなっていない．

そこで我々は，上述した都市部における低層家屋解体に着目し、狭所にも運搬･進入が可能で、クラスを超えた作業高さを持つミニ油圧ショベルベースの木造家屋解体機(ミニモク)(図3)を開発した．

2. 木造家屋解体機

2. 1　コンセプト

都市部に多く見られる狭所現場での木造家屋解体作業をターゲットとした場合に求められる機能を検討した結果，本解体機の開発コンセプトを以下の3点に設定した．

・屋根まで届く作業高さ

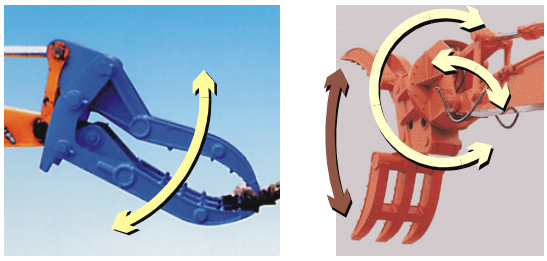
前述のように，都市部狭所現場では通常，3～4ﾄﾝミニ油圧ショベルが使用されるが，現状のミニ油圧ショベルの作業範囲は2階建て木造家屋の屋根までカバーできていない．したがって，家屋上層部の解体は人手で行っており，これが工期の延長や危険作業の増加に繋がっている．そこで，本解体機は木造2階建ての屋根まで到達する最大作業高さを目標とした．

・狭所進入性と作業時安定性の両立

本解体機は都市部狭所現場を対象としており，当然狭所現場への運搬･進入性の確保は必要不可欠であり，クローラ全幅は可能な限り短くすることが望まれる．しかし，クローラ全幅を短くすることは側方作業時の安定性を著しく低下させる恐れがある．そこで，本解体機では，狭所進入性と作業中の安定性を両立させることを目標とした．

・多様なアタッチメントに対応

従来のように分別解体を必要としない解体作業においては，軽量かつ堅牢であることから，バケットシリンダにより爪を開閉する機械式フォークグラップル(以下，機械フォーク)(図4a)が重用されてきた．しかし，この機械フォークは，そ



a.機械フォーク　　b.全旋回フォーク

図 4 フォークグラップル

の位置と姿勢がブームとアーム角度によって決定されるため，家屋のある位置に存在する部材を掴もうとする時のフォーク姿勢が一義的に決まってしまい，対象に合わせたフォーク姿勢でのアプローチが不可能な構造となっている．この結果，分別解体のような繊細なハンドリング性能を要求される作業には不向きである．

ここで，バケットシリンダによりフォーク全体が上下に揺動し，旋回モータによりフォークの爪部分が旋回し，さらに爪用シリンダにより爪が開閉する全旋回式フォークグラップル(以下，全旋回フォーク) (図4b)に着目すると，機械フォークと比較して2自由度追加されていることから，フォーク姿勢を自由に変えながら部材へアプローチすることができ，例えば，家屋への多様な角度からのアプローチや，トラックの荷台方向に合わせた積込作業等，分別解体作業に有効であると考えられる．

しかし，全旋回フォークを通常のミニ油圧ショベルに適用する場合，その質量の大きさ，および油圧経路の増加が問題となる．全旋回フォークはバケットや機械式フォークと比較して構造が複雑で，標準のバケットと比較して質量が3倍近くあり，その結果，作業中の安定性が著しく損なわれてしまう恐れがある．そこで，本解体機は作業中の安定性を向上させることで，全旋回フォークのように質量が大きいアタッチメントを搭載した際にも作業性を保つことを目標とした．

また，従来の油圧ショベルのフロントに対して，本解体機ではアタッチメントの追加自由度分，油圧経路を増加することで，多様なアタッチメントへ対応を図ることとした．

2. 2　仕様

本解体機の主な特徴を以下に述べる．また，図5は本解体機の全体構成図である．

(1)都市型狭所現場への運搬性，進入性を鑑み，本体は3.5ﾄﾝクラスのミニ油圧ショベルをベースとしている．

(2)フロントは標準の油圧ショベルがブーム，アームの2ピースから構成されているのに対し，本解体機ではハイポスト，ストレートブーム，ロングアームの3ピース構成となっており，作業範囲を上方に拡大している．これにより木造2階建家屋の屋根までカバーすることが可能であり，6ﾄﾝクラスの小型油圧ショベルと同等の作業高さを有する．

(3)足回りは，現場への進入性と作業時安定性を両立させるために，可変クローラ幅走行体を採用している．具体的には，現場への進入時は1クラス下の3ﾄﾝクラスのクローラ幅に縮めて，軽自動車並みの狭所進入性を確保し，作業中は1クラス上の4ﾄﾝクラスのクローラ幅に広げて安定性を確保する構成となっている．

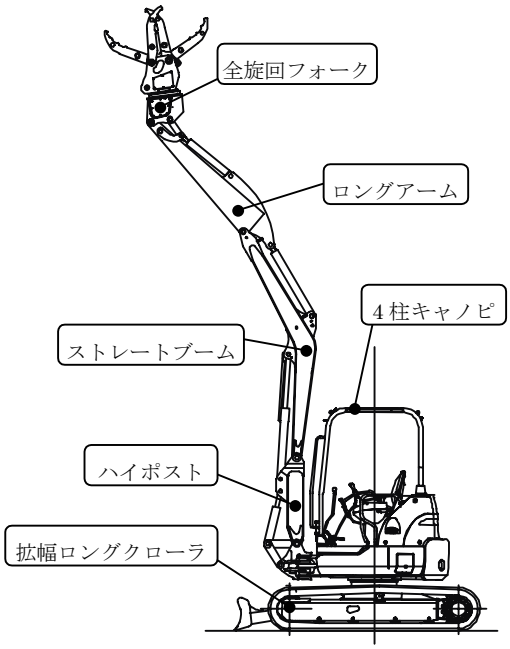


図 5 全体構成図

(4)分別解体作業に有用な全旋回フォークをはじめとし，作業内容に応じた多種のアタッチメントが搭載可能である．具体的には，前述の拡幅クローラを広げて作業中の安定性を向上させ，質量の大きなアタッチメントを搭載した際にも作業性を確保している．また，フロント先端に冗長油圧経路を2系統有することで，2自由度までのアタッチメントに対応可能な構成となっている．

(5)解体作業時の安全性，視認性を鑑み，前ガード付4柱キャノピ，ガード付天窓を基本装備とした．

表1に，本解体機の仕様・性能を示す．

3. ユーザテスト

本解体機を用いてユーザテストを行い，オペレータにヒアリングを実施した。63項目について評価を行った結果，表2に示すように，開発コンセプトとして取り上げた各種機能について非常に良い評価を得ることができた．これは，本解体機の都市型低層木造解体に対する有効性を示す結果であると言える．

表 1 木造家屋解体機(ミニモク)の仕様

項目		仕様値
バケット容量	m^3	0.11
運転質量	kg	4280
エンジン定格出力	kW/min^{-1}	23.5/2450
	[PS/rpm]	[32/2450]
走行速度	km/h	4.4/3.1
シュー方式		溶接組立式 ダブルグローサ
シュー幅	mm	300
接地圧	kPa $[kgf/cm^2]$	32.5 [0.33]
後端旋回半径	mm	870
ブームスイング角 左/右	deg	66/66
輸送時		
全長	mm	5060
全幅（クローラ拡張/収縮）	mm	1950/1550
全高	mm	2670
作業範囲		
最大作業半径	mm	6500
最大作業深さ	mm	2960
最大作業高さ	mm	7460
最大ダンプ高さ	mm	4850
フロント最小旋回半径 [スイング時]	mm mm	2230 [1800]

表 2 ユーザテスト結果

項目	概要
高所作業性	高所の操作感は6ﾄﾝショベルに近い
挟所進入性	非常に狭いところでも進入可能である
安定性	フロントが長い割には安定している
全旋回式 フォーク	慣れてくると非常に使い易い (柱へのアプローチ、積込作業)

4. 結言

(1)挟所現場における木造家屋解体をターゲットにした，木造家屋解体機を開発した．

(2)フロントはフロントハイポスト，ストレートブーム，ロングアームから構成されており，２階建家屋の屋根までカバーする6tonクラスの小型油圧ショベル並の作業高さを実現した．

(3)拡幅クローラを採用することで，挟所現場への運搬・進入性と作業中の安定性の両立を実現した．

(4)作業具としては上下チルトと旋回機能を付加した全旋回式フォークの搭載し，家屋への多様な角度からのアプローチや，トラックの荷台方向に合わせた積込作業を可能とした．

(5)開発した試作機を用いてユーザテストを行った結果，挟所現場における家屋解体に対する本解体機の有効性を確認した．

37. 覆工コンクリート施工における自走式噴霧養生装置の開発

東亜建設工業㈱：○藤本　正一、大山　茂、加藤　大喜

１．はじめに

山岳トンネル分野では、過去に施工された覆工コンクリートの不具合が社会的な問題となっているが、覆工コンクリート施工においては、生コン打設後 15 時間程度でセントルを脱型せざるを得ず、またトンネル貫通後の通風により乾燥が急激に進行するため、その結果としてコンクリート表面に微細なひび割れが生じやすい。

その対策の一つとして、コンクリート表面の水分量を一定に保持して乾燥収縮を防止する湿潤養生があげられるが、トンネル坑内で任意の場所を移動しながら覆工コンクリート表面を湿潤養生可能な自走式装置は開発されていなかった。

そのため当社ではバックホウのブーム先端にアタッチメント式に着脱可能な噴霧養生装置を開発したので、その成果をここに報告する。

２．開発概要

（１） 開発の目的

一般にコンクリートは打設後、乾燥収縮によるひび割れ発生の防止と、所要の強度発現を目的として表面を湿潤状態に保たねばならず、散水や養生マットによる湿潤養生が行われるが、山岳トンネルの覆工コンクリート施工の場合には、アーチ型であることやセントルその他の施工設備でトンネル坑内が輻輳していること、あるいは坑内をダンプトラックやトラックミキサーなどの作業車輌が常時運行していることなどから、効果的な湿潤養生を行うことは困難であるのが実情であった。

そのためトンネル内の任意の地点に移動可能であり、覆工コンクリート表面を適切な湿潤状態に保たせられる自走式噴霧養生装置を考案、開発した。

（２） システムの説明

今回開発した装置は、セントル脱型後の覆工コンクリート表面水分量を一定に保持し、乾燥収縮を防止するための自走式噴霧養生装置である（写真１）。

本装置は、バックホウのブーム先端に装着した拡張･格納自在な折畳み式のトラスアーム（写真２）に収納したアーチ状ノズルパイプと、バックホウ本体と一体型で搭載した噴霧ユニット（高圧ポンプと噴霧ノズル）、発電機ならびに水タンクなどから構成される。噴霧ノズルから微細な霧状の水滴を噴霧し、コンクリート表面の乾燥を防止する。

また、コンクリート表面を均一な湿潤状態に保つ



写真１　自走式噴霧養生装置（噴霧状態）



写真２　自走式噴霧養生装置（アーム格納状態）

ため、バックホウ本体の油圧を利用して運転席からノズルとトラスアームの拡張･格納や、ノズルと壁面と距離･角度の調整操作ができるようにしている。

さらに、バックホウは通常の走行速度とは別に低速度域での速度調整を可能としている。

将来的には、走行移動中に壁面と噴霧養生装置が接近し過ぎるとアラームで警告を発する自動警報装置の取り付けや、コンクリート表面の湿潤状態などを遠隔計測できる各種センサー類の取り付けも考えている。

（３） システムの構成

今回開発した自走式噴霧養生装置は、以下の機器より構成される。

① ベースマシン

型式　後方小旋回型油圧ショベル 0.28m³級

噴霧速度　4～10m/min

② 給水ポンプ

型　式　高圧３連式プランジャーポンプ

圧　力　4.0MPa

吐出量　2,400L/hr（40L/min）

③ 水タンク

型　式　鋼製・ベースマシン一体型

容　量　1,800L

④ 噴霧ノズル

型　式　微霧ノズル 1/4M KB 8038 S303-RW

数　量　53 個

圧　力　3.0MPa（max）

噴霧角度　80°

噴霧量　15.1～21.3 L/hr

（４） 施工方法

セントル脱型後に乾燥収縮が問題となる区間を自走式噴霧養生装置により坑内を巡回噴霧して湿潤養生を行う。噴霧時の走行速度は坑内の湿度や通風状態によっても変わるが、概ね 4～10m/min 程度と想定している。

噴霧作業は、他の車輌の運行を妨げないよう基本的には図１の通りトンネル断面の右側もしくは左側に寄って行うが、他の作業が行われていない時間帯には図２のようにトンネル中央を往復走行させて全断面の噴霧を行うことも可能である。

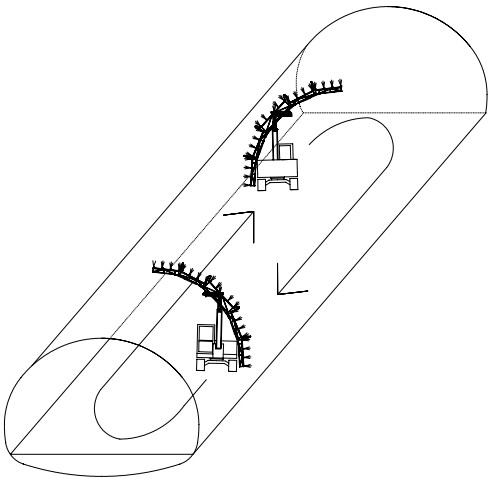


図１　通常の噴霧養生状況（左右巡回）

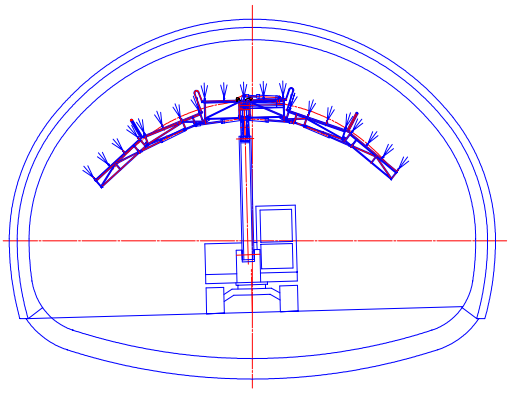


図２　他の車両通行がない場合（中央部往復）

３．実証実験

（１） 実験概要

自走式噴霧養生装置の実機開発に先立ち、当社技術研究所において実際のトンネル坑内を模した環境で各種条件での噴霧試験を行い、そのときのコンクリート表面水分率を測定することにより、噴霧による湿潤養生効果の確認を行った。

（２） 実験方法

適切なノズル噴霧角度や噴霧量、噴霧圧力など噴霧能力を決定するための基礎実験を行った。すなわち、図３、写真３に示すように既製のコンクリート板を設置し、噴霧ノズルとコンクリート板の間のオフセット距離を変化させ、様々な条件で噴霧した後の表面水分率を計測した。表面水分率の測定には水分計 HI-520（ケット科学研究所）を用いた。

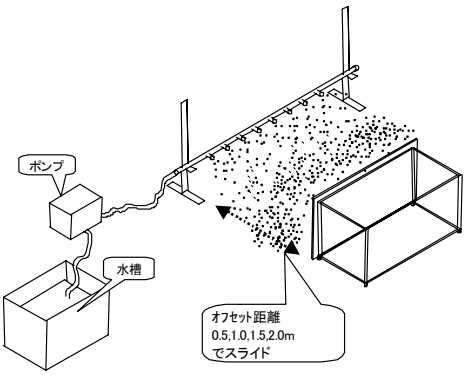


図３　噴霧能力決定のための基礎実験配置図

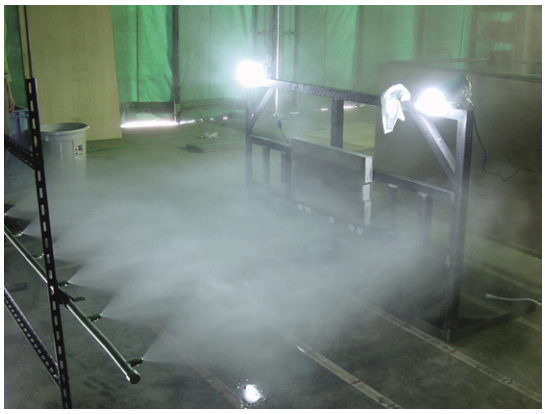


写真３　噴霧試験状況

（３） 実験結果

まず噴霧ノズルとして噴霧角度 60° ならびに 80° の２種類を用意し、コンクリート表面の水分率分布を調べた（写真４、図４）。この結果より、両者に大きな違いはないものの、噴霧の広がりの点で 80° の方が若干有利であることが確認できた。

また噴霧後のコンクリート表面水分率の経時変化を調べたところ、図５の通り噴霧直後から乾燥が進み、30 分程度で表面水分率が一定化することから、トンネル坑内においても少なくとも 30 分毎の噴霧が必要であろうことが確認できた。



写真４　噴霧角度比較試験（左 60° ／右 80° ）

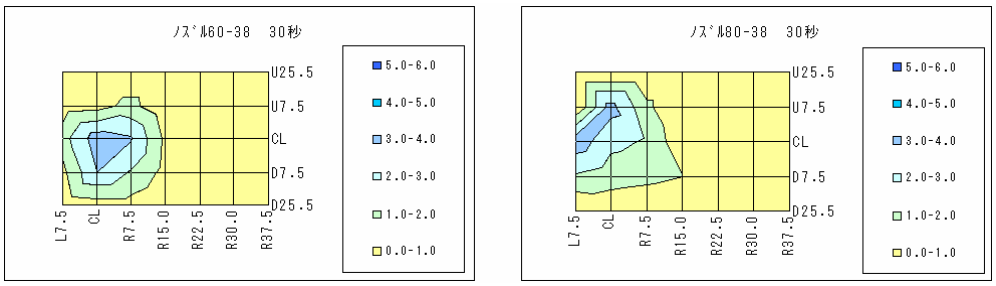


図４　表面水分率比較試験（左 60° ／右 80° ）

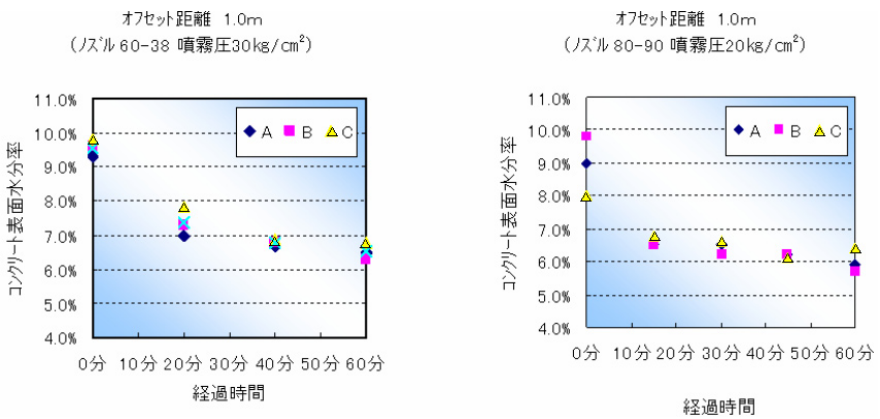


図５　表面水分率の経時変化（左 60° ／右 80° ）



写真５　トンネル坑内での試運転状況

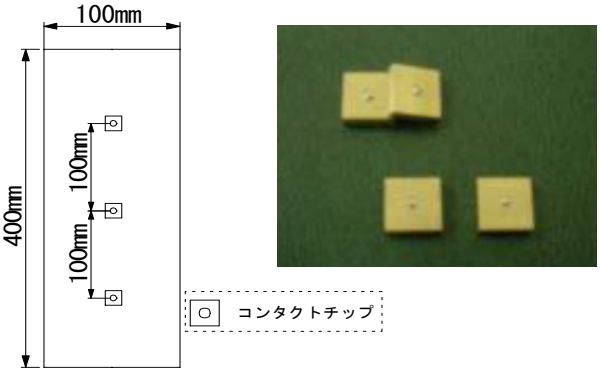


図６　コンタクトチップ貼付図

４．実用化

今回開発した自走式噴霧養生装置を山岳トンネル現場で実際に稼働させ、トンネル坑内環境での有効性を確認する予定であったが、現場工程上の都合から本論文執筆時点では実機を現場搬入し運転準備を進めている状況である（写真５）。

本装置による噴霧養生効果の確認方法としては、下記の試験方法を計画している。

（１） 試験概要

自走式噴霧養生装置による効果を把握することを目的として、トンネル覆工コンクリート表面のひずみ量を計測することにより、噴霧の有無によるコンクリートの乾燥収縮への影響を確認する。

（２） 試験方法

ひずみ計測には、変位量を測定するコンタクトゲージ法を用いる。

実際にセントル打設する覆工コンクリートと同じ試料により角柱供試体(100×100×400mm)を作成し、噴霧の有無による収縮状況を確認する。供試体にはひずみ計測用コンタクトチップを図６のように 100mm ピッチで貼り付け、写真６に示すコンタクトミクロンストレインゲージ MSG-D1 により定期的にひずみ量を計測する。

上記の供試体でのひずみ計測と並行して、覆工コンクリートにも同様にコンタクトチップを貼り付け、脱型･セントル移動直後からのひずみ計測を行うとともに、表面水分率、温度、湿度の計測も行う予定である。



写真６　コンタクトミクロンストレインゲージ

５．おわりに

今回開発した自走式噴霧養生装置の有効性を、実際のトンネル現場から得られたデータとともにご報告するつもりであったが、前述の通り現場工程上の都合により、本論文執筆時点では噴霧養生による乾燥収縮低減効果の実測データを得るまでには至らなかった。来年１月のシンポジウム発表当日にはその成果をご報告できると考える。

山岳トンネルの覆工コンクリート施工では、乾燥収縮などによるひび割れ発生に厳しい評価が下される状況にあるが、今回開発した自走式噴霧養生装置がその改善策の一翼を担い、トンネル施工の効率化、安全性向上に貢献できれば幸いである。

最後になりますが、本装置の開発･製作にご協力いただいた東亜機械工業(株)はじめ関係各位に感謝の意を表します。

38. ランブルストリップス施工機械の開発

㈱NIPPO コーポレーション：○立花　洋平、相田　尚
㈱北海道開発土木研究所：平澤　匡介

1．はじめに

平成15年の交通事故による死亡者数は7,702人で、昭和32年以来、46年振りに7千人台まで減少した。これは、様々な安全対策の取組み、また安全技術の進歩等による結果と考えられる。しかしながら、交通事故件数、負傷者数は再び増加に転じるなど、交通事故の状況は依然として厳しいものである。

北海道の交通事故の特徴は、事故件数に対して死亡事故の割合が高く、特に正面衝突事故による死亡事故が多いことが挙げられる。正面衝突による死亡事故の割合は全国に比べ約2倍で、全死亡事故の約2割を占める。これは北海道の都市間距離が本州に比べ2倍と長く、走行速度も高く、対面の2車線道路が多いことによるものである。死亡事故を削減することは、道路政策の最重要課題の一つであり、このような死亡事故を削減する新しい対策手法の開発が期待されている。

米国では、主に路外逸脱事故の防止対策技術として、道路外測線の外側に連続的に溝を設ける「ランブルストリップス」が普及している（写真－1）。



写真―1　コロラド州におけるランブルストリップス

ランブルストリップスは、道路の舗装路面上に設置された隆起状あるいは溝状の直線パターンである。その目的は、車両が車線を逸脱した時に、タイヤがランブルストリップス上を通過することにより突然ゴロゴロと音が発生し、さらに車両の振動がハンドルに伝わり運転者に対して、警告を与えることである。したがって、うっかり・ぼんやり・脇見・居眠りといった交通事故に対し有効な対策手法である。

（独）北海道開発土木研究所では、正面衝突の多発箇所である一般国道5号線八雲町の対策として、冬期除雪の妨げにならず、かつ今後の正面衝突事故対策として確立すべく、様々な効果の測定試験や試験施工を実施し、実道に適したランブルストリップスを開発し、実用化を行った。本稿では、ランブルストリップスの概要，施工，機械について報告する。

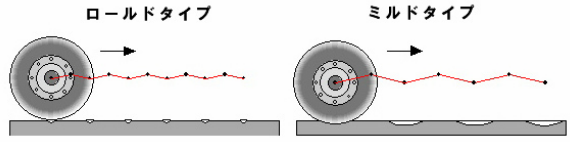
2．ランブルストリップスの概要

ランブルストリップスは、1955年にコンクリート舗装に型を押し付けて施工した米国ニュージャージー州での適用が最初と云われている。その後、1990年代から急速に普及し、現在では34の州に様々な規格で設置されている。ランブルストリップスは、施工法により、表－1に示すように切削式、転圧式、成形式、隆起式の4種類に分類されている。

表－1　ランブルストリップスの種類

呼び名	切削式	転圧式	成形式	隆起式
	Milled Type	Rolled Type	Formed Type	Raised Type
成型方法	切削機または専用機で路面を切削する	ローラあるいは路面側に型を用意して成型する		凸型のストリップスで溶着ラインや鋲など
施工時期	任　意	舗設時（As舗装）	打設時（Co舗装）	任　意

現在、そのほとんどは、既設のアスファルト舗装に、安価でかつ迅速に施工が可能な切削式である。切削式は、転圧式よりも振動で12.6倍、音で3.4倍の効果があると報告されているように、その高い効果が普及の要因と推察される（図－1）。



図－1　ランブルストリップス上を通過した時のタイヤの動き

３．転圧式（ロールドタイプ）ランブルストリップス

わが国においては、1997 年北海道縦貫自動車道長万部～虻田洞爺湖区間において、転圧式のランブルストリップスが設置され、現在も何カ所かで設置が行われている。

転圧式のランブルストリップスでは、舗設時に同時に行わなければならず、その方法は次の 2 つがある。

①マカダムローラの鉄輪に突起物を取り付け、フィニッシャで敷均し後所定の路面温度で転圧する。

②鉄筋を人力で並べ、所定の路面温度で鉄筋上を転圧する（写真－2，3）。



写真－２　丸鋼の配置状況



写真－３　ローラ転圧状況

転圧式ランブルストリップスの特長は、以下のとおりである。

1）長所

・施工が容易

・様々な形状（ピッチ）に変えられる

2）短所

・舗設時に限定される

・出来形が諸条件に影響受ける（路面温度、転圧回数等）

・人力で並べる場合、人員数，労力が掛かる

・転圧回数により、舗装体密度に差が生じる

上記問題点を踏まえ、(独) 北海道開発土木研究所では、現在供用中の国道にランブルストリップスを設置することを目標に、切削式ランブルストリップスの導入を検討した。

４．切削型（ミルドタイプ）ランブルストリップス

４－１．規格の検討

ランブルストリップスを一般国道の中央線上に設置し、正面衝突事故対策に活用する目的でスタートし、重大事故発生現場の国道において供用試験を計画した。当該路線の中央線は 15cm の黄色線が 2 条に引かれており、その外幅は 50cm であった。したがって、50cm 幅の内側に納めるよう、切削幅は 35cm とした。

深さの規格は、米国の報告書を基に 12mm 前後が適していると想定し、9mm，12mm，15mm の 3 種類について比較検討することとした。

（１）苫小牧寒地試験道路における試験施工

平成 13 年 11 月、苫小牧寒地試験道路に前述した異なる深さの 3 種類のランブルストリップスを設置した。さらに、平成 14 年 12 月には路肩部への設置を念頭に自転車に対して不快感を与えないことを目標とする寸法のものも設置した。

ここでは、実際に自動車，大型車，オートバイ，自転車による走行実験、および、降雪時、凍結時の状況調査を行った。また、数回にわたり一般道路利用者による実走行試験を行い、アンケート調査を実施した（写真－4）。その結果から、実路における設置規格を決定した。



写真－４　一般道路利用者の走行状況

（2）センターライン上への規格（センターランブル）

3 種類の深さでは、深くなるにしたがって「危険ではない」と答えた人の割合が少なくなってきた。15mm については「少し危険を感じた」・「危険を感じた」と回答した人の割合が多い。また、ビデオで走行状況を観測した結果、急ブレーキや急ハンドル、転倒といった危険な状況は見られなかった。

以上の結果から、実路への設置規格は深さ 12mm を標準と決定した。

（3）路肩側への規格（ショルダーランブル）

センターランブル上を自転車で走行した際、その振動により不快に感じる場合がある。そこで、タイヤがランブルストリップスの底部に入り込まない程度の寸法で、且つ自動車に対しても警告効果がある規格を検討した。

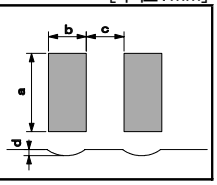
切削縦幅はセンターランブルが 150mm であるのに対し、80mm と細くし、試験的に切削間隔を 115mm と 150mm の 2 種類を比較する試験を行った。その結果、切削間隔 150mm のものが最も効果的と判断し、平成 16 年 7 月から試験的に実路への設置を開始した。

センターランブルおよびショルダーランブルの設置規格を表－2 に記す。

表－２　センターとショルダーの設置規格

［単位：mm］

	センター	ショルダー
切削横幅：a	350	350
切削縦幅：b	130～150	80
切削間隔：c	170～150	150
深　　さ：d	9～12	9



４－２．施工機械の開発

前述したように、現在米国ではほとんどが切削型のランブルストリップスとなっており、その施工機械も様々である。しかし、ほとんどが広い国土にふさわしく、大型高出力の専用機である。わが国の道路事情を考慮した場合、信号が多く、道路幅員等から規制方法まで考えると小回りが効き、片側交互通行による交通規制時に危険でないコンパクトなものが望まれた。切削溝を連続的に形成するためには、様々な方法が考えられたが、機械を定位置で停止し、その都度切削するのでは極端に施工効率が悪い。連続的に施工するためには、どのような方法が適しているかを、以下の 4 案について検討した。

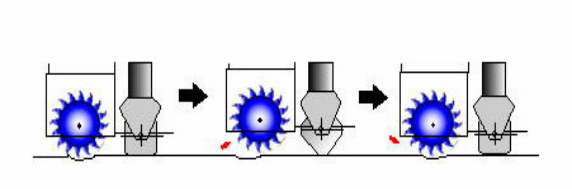
a）異径車輪による連続切削

b）CPU による任意位置自動切削

c）センサーロープの波形配置による自動切削

d）波形型枠による自動切削

これらを、施工性，経済性の観点から検討を重ねた結果、異径車輪による連続切削が最適と判断し、実機へ対応した。図－2 に示すとおり、既存の切削機の案内輪を異径車輪に改造し、走行することによって切削ドラムが上下する方法を採った。



図－２　異径車輪による連続切削概念

（1）センターランブル対応型

案内輪を通常の円形ホイールに変えることにより、通常の小型切削機としても使用でき、開発費の削減が可能となる。主要諸元を表－3 に、全景を写真－5 に示す。

表－３　センター対応型機の主要諸元

本体製造元	Wirtgen社（独）
型式	W350
走行方式	3輪ホイール（1輪に異径車輪装着）
本体寸法	L=2.79m，W=1.15m，H=1.87m
車両重量	4.10t
出力	32kw
専用切削ドラム	W=350mm，φ=460mm
ビット本数	118本



写真－５　センター対応型機全景

（2）ショルダーランブル対応型

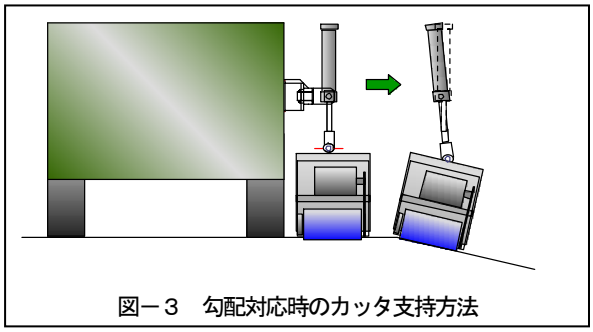
ショルダーランブルに対応するために、留意すべき点は次のとおりであった。

a）外側線側に設置するため、カッタドラムは進行方向の左側にあることが望ましい

b）車道部に対して片勾配になっていることも考えられ、カッタ部が横断方向への傾きに追従できる

c）路肩部は車道部に比べ、経済的な施工断面になっていることもあり、荷重負荷を少なくする。

以上を目標とし、ショルダー対応型機の開発に取り組んだ。図－3 は、勾配に対応した切削方法の概念である。開発機の諸元を表－4，全景を写真－6 に示す。



図－３　勾配対応時のカッタ支持方法

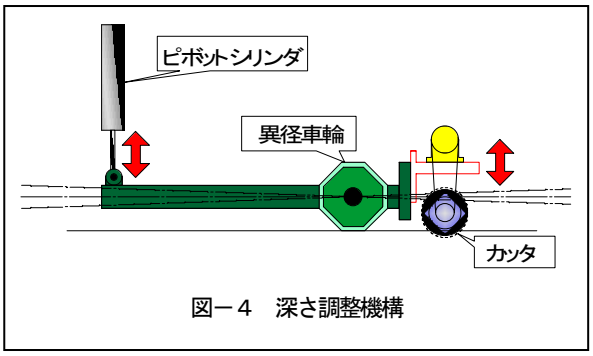
深さのコントロールは、カッタドラムの位置での調整

表－４　ショルダー対応型機主要諸元

本体製造元	(株)NIPPOコーポレーション
型式	RSH35001
走行方式	4輪ホイール（異径車輪を2輪装着）
本体寸法	L=3.19m，W=2.04m，H=2.58m
車両重量	6.50t
出力	88kw
専用切削ドラム	W=350mm，φ=180mm
ビット本数	40本



写真－６　ショルダー対応機全景



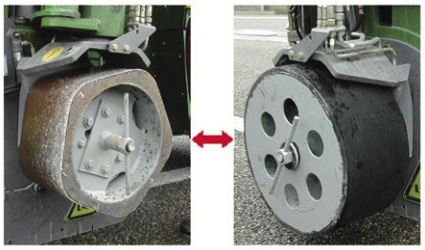
図－４　深さ調整機構

と、路面起伏の変化に対応できるようピボットシリンダによる調整の 2 段階で行えるようにした（図－4）。

（3）高性能型ランブルストリップス切削機

高規格道路等では、さらに施工効率を向上させ 1 日あたりの施工量を増やすことが、ランブルストリップスの普及促進に繋がると考え、高出力型のランブルストリップス切削機を開発した。

異径車輪はウレタンゴム製の 5 角形とし、回送時には円型ホイールアタッチメントにより高速で移動できる（写真－7）。



施工時　　回送時

写真－7　異径車輪と回送時用アタッチメント

施工時は、出来形を見ながらシリンダ高さを調整できるようにリモートコントロール切り換え式とした。

表－５　高性能型機の主要諸元

本体製造元	(株)NIPPOコーポレーション
型式	RSW50001
走行方式	4輪ホイール（1輪に異径車輪装着）
本体寸法	L=3.35m，W=1.65m，H=3.55m
車両重量	6.2t
出力	60kw
専用切削ドラム	W=350mm，φ=460mm
ビット本数	118本

施工速度は、状況によるが 3～7m/min である。高

性能型ランブルストリップス切削機の主要諸元を表－5，全景写真を写真－8 に示す。



写真－８　高性能型の全景

５．実路での施工

（１）センターランブル

平成 14 年 7 月、一般国道 5 号八雲町に試験的に約 700m 設置した。当該区間は、平成 8 年から平成 12 年までの 5 年間に交通事故死者数が 14 人に上っており、そのうち 10 人が正面衝突事故によるものだった。

施工編成は、規制→位置出し→切削→清掃という流れであるが、必要に応じ散水車で清掃を行う。施工速度はおよそ 3m/min であり、出来形も良好であった。



写真－９　センター施工状況



写真－１０　供用状況

八雲町での結果を踏まえ、交通事故多発箇所を中心に設置を続け、現在までの設置実績は約 110km である。施工状況を写真－9 に、供用状況を写真－10 に示す。

（２）ショルダーランブル

平成 16 年 7 月、一般国道 238 号稚内において、試験的に約 7,000m 設置した。当該路線では一部区間の路肩が車道部に比べ低くなっていたり、勾配がある部分もあったが、専用切削機によりほぼ追従して切削できた。

さらに、操作性について改良を重ね、平成 16 年 10 月現在まで、約 22km 設置済みである。

写真－11 に施工状況を、写真－12 に設置完了状況を示す。



写真－１１　ショルダー施工状況



写真－１２　設置完了状況

（３）高機能舗装での施工

排水機能を有する高機能舗装では、通常のブラシ式スイーパによる切削廃材の清掃作業を行った場合、路

面の空隙に粉分を擦りつける結果となる。舗装路面全体の面積からすると、極々小面積であり影響はほとんど無いと考えられるが、対処策として①吸引式スイーパによる清掃、②汚泥吸排車（バキュウム）による清掃を実施した。吸引式スイーパは高速で作業ができるが、吸引口が車体の内側にあるので、規制条件や中分側に障害物がある場合には適さない。汚泥吸排車を使用する場合、ホース先端に専用ノズルを装着し、廃材を掃除機のように吸い取る方法で行う。写真－13 に、高機能舗装での施工状況を示す。



写真－１３　高機能舗装面の清掃状況

６．ランブルストリップスの効果

ランブルストリップスの設置を開始し、約２年が経過した。その間、各道路管理者による様々な角度からの評価が行われ、好評を得ている。最初に施工した一般国道５号八雲町では、ビデオカメラによる走行速度，通過位置の調査，ランブルストリップスを踏んだ車の挙動について調査した。さらに、冬期の実路での状況等についても走行調査した。その結果、次のような具体的な効果が現れた。

①ランブルストリップス設置区間では、車両がやや路外側を走行する。（正面衝突事故抑制効果）

②ランブルストリップスを踏んだことによる危険な挙動はない。

③ランブルストリップスを踏んだことによって、危険を回避した車が記録された。

④冬期間においては、除雪した後では積雪下でも振動によって中央線位置を把握できる。

また、昨年度末までの正面衝突事故件数は、設置前の２年間に対し、38.7%減少した。

７．今後の課題

これまで、現場状況、規格の違いにより、3 機種の施工機械が開発されたが、さらに施工の合理化を図るために、次の２点を課題とした。

①高機能舗装施工時の清掃作業の合理化（高速化）

②路面の不陸あるいは勾配変化でも出来形を確保できる自動制御方法

８．おわりに

平成 16 年 10 月現在、北海道を中心に総延長約 150km の切削型ランブルストリップスが設置された。その間、道路管理者・施工業者が一体となり、設置規格・施工法・施工機械の開発に取り組み、一定の成果を挙げることができたものと考える。

国土交通省北海道開発局では、平成 16 年度道路事業の交通安全施策の一つとしてランブルストリップスの設置を挙げており、年間 100km の施工を予定している。さらに国土交通省の地方整備局や JH においても採用され始めてきており、さらなる施工の合理化を検討していく所存である。

正面衝突事故の痛ましいニュースは、今年も多く報道されている。ランブルストリップスによって事故を完全に無くすることはできないが、１件でも多く未然に事故を防ぐことができることを期待する。

最後に、当初からアドバイスを頂いた室蘭工業大学の斉藤和夫教授、また協力頂いた北海道警察はじめ多くの関係者の皆様に感謝の意を表します。

〔参考文献〕

1) Michael.S.Griffith,Safety Evaluation of Rolled-in Continuous Shoulder Rumble strips Installed on freeways, 2000

2) 平澤ほか：北海道におけるランブルストリップスの開発について，北海道開発土木研究所月報，p.7～20（2002.6）

3) 平澤、浅野、相田：正面衝突事故対策としてのランブルストリップスの開発，月刊道路建設，p.34～40(2004.4)

4) 平澤、浅野、相田、斉藤：一般道路におけるランブルストリップスの導入，月刊舗装，p.17～22（2004.10）

39. 排水性舗装機能回復車の施工性能について

酒井重工業株式会社　事業推進部：○後藤　春樹

1．はじめに

近年急速に普及している排水性舗装は、雨水排水機能、騒音低減機能等の優れた機能を有しているにもかかわらず、空隙に堆積する土砂等の空隙詰まり物質によって共用から 3～5 年程度でその機能は低下している。

一般に 10～15 年と言われる排水性舗装の寿命の中で、排水機能の低下を回避しつつ舗装の耐久寿命までその機能を継続させる機能回復作業は、舗装打換工事（切削オーバーレイ）よりも効率的かつ経済的でなくてはならない。

この様な社会的要望を満足する為に、当社の排水性舗装機能回復車 CJ500 は、表面の空隙詰まり物質除去用として 10km/h までの高速洗浄方式と、舗装内部の空隙詰まり物質除去用として 3km/h までの低速キャビテーション洗浄方式との 2 つの洗浄方式の組み合わせにより、効率的に施工することを狙いとしたものである。

本報文では、高速洗浄からキャビテーション洗浄までの洗浄性能及び施工性能を明らかにすることで、現場に合わせた最適な洗浄方式と舗装のライフサイクルを最大限に活用する施工方法について述べる。

2．CJ500 の洗浄方式

上述した排水性舗装の空隙詰まりによる排水機能の低下を解消する為に、現状では、既に低下した排水機能を回復させる機能回復方式と、まだ機能低下に陥っていない排水性舗装を短い間隔で洗浄し、機能低下を防止する機能維持方式の両面で対応している。

当社排水性舗装機能回復車 CJ500 の洗浄方式は、従来の機能回復車に比べ洗浄性能及び吸引回収性能をより効率化すると共に前述した機能回復と機能維持の両方に対応できる様、作業速度の高速化も行っている。

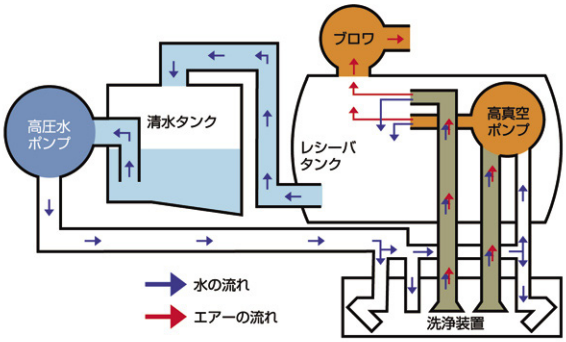


図 1：CJ500 洗浄水のフロー図

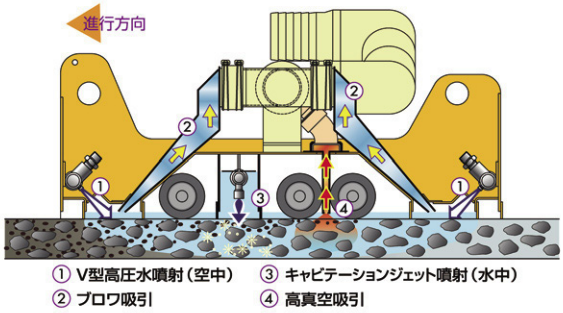


図 2：CJ500 洗浄装置断面図

図 1 に CJ500 の洗浄水の流れを示し、図 2 に洗浄装置の断面図を示す。ブロワ吸引（図 2 の②部）と高真空吸引（図 2 の④部）の 2 系統の吸引システムより回収した汚泥水はレシーバタンク内で効率的に沈殿濾過され、清水タンクへ送水される。また、図 2 に示す洗浄装置内の洗浄システムでは、図中①部の高圧水吹付と吸引回収を各々独立した空間で行うことにより、従来に比べ空気・水漏れ等を抑える効果が向上している。さらに、キャビテーション洗浄方式を採用することで、従来除去できなかった舗装深層部の空隙詰まり物質も除去できるようになっている。これは、図中③部において舗装路面と

洗浄装置の間に形成した水槽の中で高圧水を噴射することでキャビテーション気泡が発生し、その気泡が骨材に衝突した際に生ずる衝撃力で骨材に付着した空隙詰まり物質を遊離させるものである。図3にキャビテーション発生試験の状況を示し、図4に骨材に付着した空隙詰まり物質を遊離させる状況を図解したイメージ図を示す。図3の様に水中にて高圧水を噴射した場合、キャビテーション気泡によってノズルの噴射部が白濁していることがわかる。

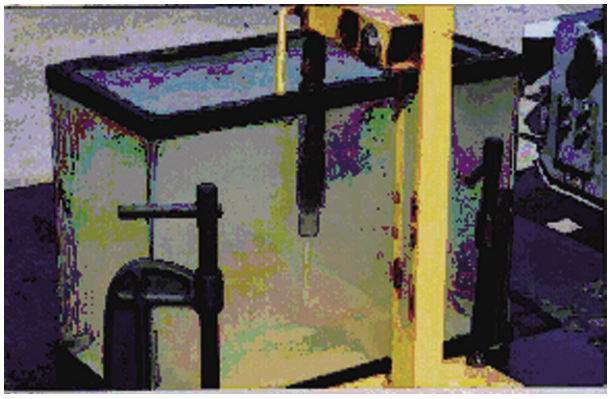


図3：ｷｬﾋﾞﾃｰｼｮﾝ発生状況

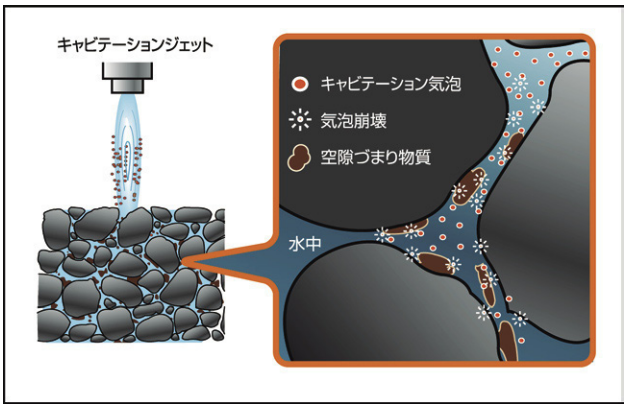


図4：ｷｬﾋﾞﾃｰｼｮﾝによる洗浄イメージ図

3．洗浄能力と洗浄効果

キャビテーションの洗浄能力を確認する為に、当社技術研究所内において従来の高圧水洗浄とキャビテーション洗浄を比較した。

図5は上述したキャビテーション洗浄(水中噴射)と従来高圧水洗浄（空中噴射）による比較試験の結果である。試験は、φ10mm の丸棒に石膏を塗布し、各々一定時間の噴射を行なったものである。図より従来の空中高圧水噴射に比べキャビテーション洗浄（水中噴射）の方が上面、側面からの矢視共に石膏の除去範囲が広く、丸棒の裏側までその範囲が及んでいる事がわかる。

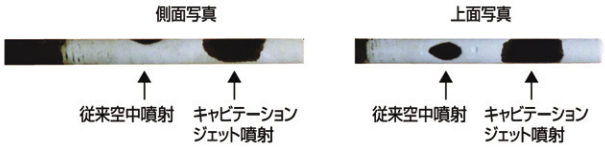
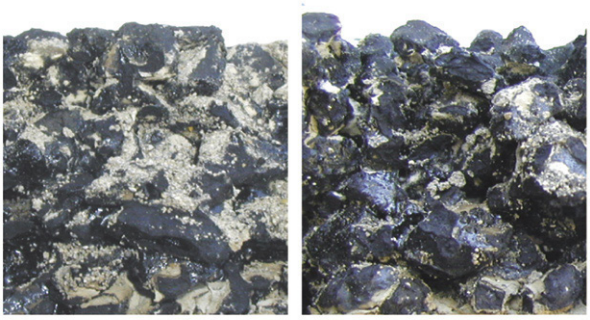


図5：丸棒による洗浄比較

また、図6は各々の洗浄方式で洗浄した後の舗装の断面を観察したものである。供試舗装は、場内に設置した舗装厚5cmの排水性舗装に石膏を混入した混合土砂を作成し、洗浄前に排水性舗装表面から散布し、タンパ等で舗装内に強制的に押し込み、養生したものを用いた。試験は、従来高圧水洗浄とキャビテーション洗浄にて各々作業速度0.6km/hで洗浄を行なった。結果、従来の洗浄方式では、舗装表面から 1～2cm のみを洗浄できているのに対し、キャビテーション洗浄では、舗装深層部までの空隙詰まり物質を除去できていることがわかる。



従来高圧水洗浄　　ｷｬﾋﾞﾃｰｼｮﾝ洗浄

図6：洗浄後の舗装断面比較

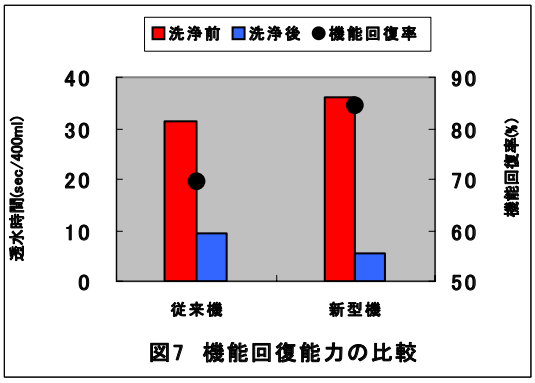


図7　機能回復能力の比較

さらに、図 7 に示す現場透水試験における従来高圧水洗浄とキャビテーション洗浄の比較においても、キャビテーション洗浄では、洗浄後に新設時の透水能に回復している等の優位性があり、従来洗浄に比べ 2 割以上の洗浄能力の差が認められた。

場内試験では、キャビテーションの効果を明確に見る為に作業速度は 0.6km/h で一定とした。しかしながら、実際の洗浄作業では作業速度 10km/h までの高速洗浄も行う為、ここでは、作業速度の増加に伴う洗浄能力を理論的且つ経験的な見地から考察を行うこととする。

実際の機能回復作業においては、作業速度の増加に伴い洗浄水の回収率が低下（洗浄水の消費量が増加）する現象が見られる。この回収率の低下が空隙詰まり物質回収量の低下や単位時間当たりの作業面積の低下を生じる原因となっている。図 8 に作業速度の増加に伴う洗浄水回収率と作業面積の変化を示す。また、図 9 に作業速度の増加に伴う連続作業時間の推移を示す。

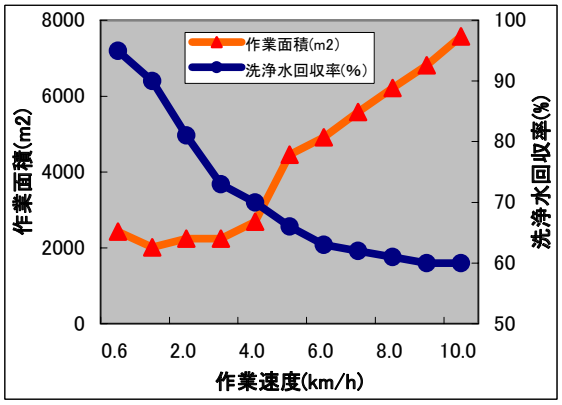


図 8：給水 4t 当たりの連続作業面積

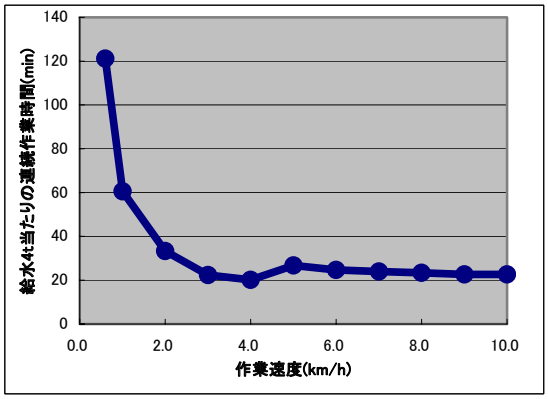


図 9：給水 4t 当たりの連続作業時間

ここで、図 8 の作業面積は、図 9 で示した 4t の洗浄水を消費する時間から算出した作業面積である。実際の機能回復工事においては、清水タンクに約 3t、レシーバタンク約 1t の水を補給しながら作業を行なっている。従って、ここで示した給水 4t とは、最大積載量 4t の給水車 1 回分の水量のことである。

洗浄水回収率の計測については、供用約 1 年の排水性舗装（実道）で行なった。洗浄前の透水時間が 10（sec/400ml）以下と比較的回収率が低下しやすい状況ではあったものの、傾向としては、作業速度 1km/h 付近では 90%以上の回収率が得られ、速度 10km/h では 60%程度に低下している。また、給水 4t を消費する為の作業面積については、作業速度 1km/h 付近では、消費時間 120min にて約 2000m2 の作業能力(1000m2/h)があり、速度 10km/h では 20min の消費時間で約 8000m2 の作業能力を有している事がわかる。

洗浄能力を論じる場合、単位時間当たりの作業面積だけでなく、舗装体内に堆積した空隙詰まり物質をどの程度除去回収できるかが重要な指標の一つである。前述した通り、作業速度の増加に伴う洗浄水回収率の減少によって空隙詰まり物質の回収量（以下、土砂回収量）も減少するが、ここでは、その関係を実測値に理論的要素を考慮して定量的に示す事とした。

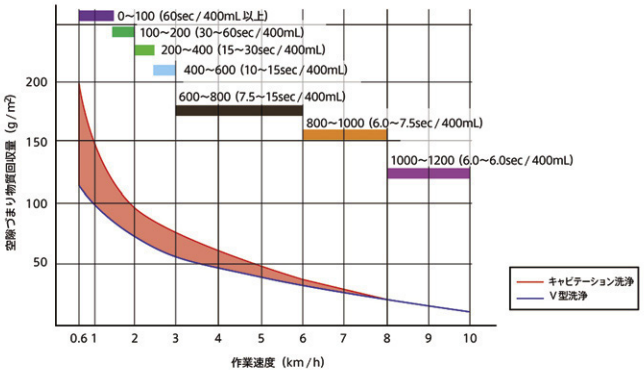


図 10：推奨作業速度と土砂回収量の関係

現場での試験において、各々異なる現場での作業速度 0.5～1.0km/h と 4～6km/h の単位面積当たりの土砂回収量を計測した。一方、洗浄水がある単位面積を通過する時間を作業速度との関係で曲線を作成し、上記 2 つの作業速度域の点をこの曲線上の基

準とし、図 10 を作成した。さらに、図中に示した洗浄前の現場透水量は、回収された土砂回収量に対応して経験上どの程度透水機能が低下しているかを表したものである。洗浄方法としては、キャビテーション洗浄、V 型高圧水洗浄を曲線で表している。ここで、実施工における V 型高圧水洗浄とは、V 型高圧水洗浄、ブロワ吸引、高真空吸引を総合した洗浄・吸引システムであり、キャビテーション洗浄とは、上記洗浄システムにキャビテーション洗浄を含めたものを言う。推定した回収量曲線の妥当性は、図 8 の洗浄水回収量曲線と土砂回収量曲線が同様の漸近線で表されている事で示されるものと考えられる。図より作業速度 1km/h 付近の土砂回収量は 100～200g/m2 であり、この時の洗浄前現場透水量は 100ml/15sec 以下とある程度透水機能が低下している状態と考えられる。また、作業速度 10km/h 付近では、約 20g/m2 の土砂回収量となり、これに対応する 1000ml/15sec 付近の現場透水量は透水機能が維持されている状態の舗装であると言える。言い換えれば、1000ml/15sec の場所では、舗装体内に堆積する空隙詰まり物質の量も少ないものと考えられる為、透水能の高い場所では V 型高圧水洗浄にて作業速度を上げ、空隙詰まり物質の堆積量が多いと思われる 0～100ml/15sec の様な透水能の低い場所では、より低速のキャビテーション洗浄が有効であると言える。また、低速作業域にてキャビテーション洗浄の土砂回収量が V 型洗浄のそれより多く、高速作業域では両洗浄方式共にほぼ同一の値を示すのは、前章で述べた通り、キャビテーション洗浄方式は洗浄装置と舗装表面との間に水槽を形成し、水中にてキャビテーション気泡を発生させる事が特徴であり、その気泡の衝撃力で骨材に付着した空隙詰まり物質を遊離させ、吸引回収する洗浄方式である。従って、作業速度が低速である場合は、十分に水槽形成が可能であり、キャビテーション気泡が発生しているものと考えられ、高速作業域では、洗浄水の回収率が低下する現象と共に水槽形成が困難になるため、V 型洗浄方式とキャビテーション洗浄方式がほぼ同一の土砂回収量になるものと考えられる。

このような状況から、一般的に言われる低下した機能を回復させる機能回復作業には、キャビテーション洗浄方式を、機能低下が生じる前に洗浄する機能維持作業には、V 型洗浄方式を選択した上で、それぞれ洗浄前の現場透水量と舗装体内に堆積した空隙詰まり物質の量によって作業速度を選択することができれば、より効率的な施工を行う事が出来るものと思われる。

４．舗装寿命と施工性能

一般的に 10～15 年と言われる排水性舗装の寿命の中で、排水機能の低下を回避する為には、何らかの機能回復・維持の措置を取る必要がある。ここでは、年間の空隙詰まり物質の堆積量と機能回復車による土砂回収量の関係を示す事で、舗装（機能）寿命を舗装の耐久寿命まで延長させる為の効率的な施工法について述べる。

図 11 に排水性舗装のライフサイクルのイメージ図を示す。

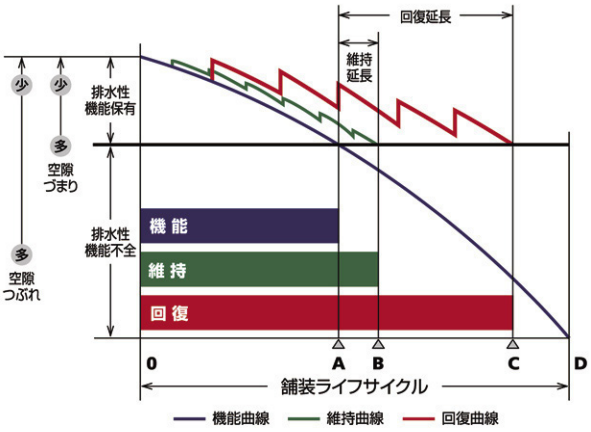


図 11：排水性舗装のﾗｲﾌｻｲｸﾙ図

図中機能曲線は、共用後に機能回復・維持作業を行わず放置した状態を表している。D 点を耐久寿命とした場合、共用後 A 点で、空隙詰まりによって不透水状態に陥っていることを示している。ここで機能維持作業に着目すると、洗浄効果が舗装表面から 1～2cm のみの洗浄効果に留まっている為、出来るだけ短いインターバル（空隙詰まりの舗装体底部への進行を抑える）で洗浄せざるを得ないこととなる。ただし、一度深部まで進行した空隙詰まり物質は、機能維持作業では除去できないということになる。

一方、機能回復作業を見るとキャビテーション洗浄により舗装体底部まで洗浄効果があり、比較的長いインターバルにて洗浄施工を行うことが出来る特徴を持つ。図中にて機能維持作業（A 点から B 点へ機能寿命の延長）に比べ機能回復作業（A 点から C 点へ機能寿命の延長）の方が排水機能をより長く延長できているのは、機能維持作業で取残された、あるいは洗浄のインターバルよりも早い間隔で進行する空隙詰まりに機能維持作業は対応できず、機能回復作業（キャビテーション洗浄）の方が確実に空隙詰まり物質を回収する能力に優位性が見られるためである。

次に土砂回収量から見た機能回復作業の施工サイクルを検証する。図 12 に一般的な年間の推定空隙詰まり量と機能回復作業によって回収されなければならない空隙詰まり物質量回収量を示す。

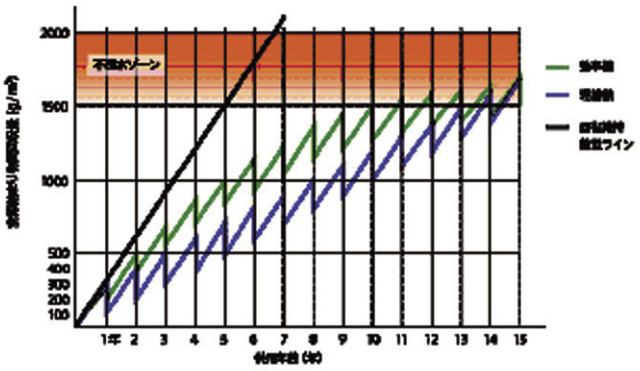


図 12：推定空隙詰まり量と必要土砂回収量の関係

図中、回復・維持放置ラインを見ると共用後約 5 年で空隙詰まり物質量が 1500～2000g/m2 に達すると不透水となっていることがわかる。これは、年間の空隙詰まり堆積量が約 300g/m2 にて共用年数が 5 年程度で不透水となる舗装が多いとした過去の実績より推定したものである。ここで、理論値のラインは、排水性舗装の耐久寿命を 15 年と仮定した場合に図中、放置ラインで見られる共用 5 年で 1500g/m2 の点を共用 15 年へスライドさせ、耐久寿命 15 年まで不透水状態から回避させる事を狙った値である。図より、機能回復作業を 1 年に 1 回行なう事で、理論的には前章で求めた空隙詰まり物質 200g/m2 を回収できれば、15 年の耐久寿命において排水機能を保持する事が出来るものと考えられる。

また、実際の空隙詰まり物質の堆積状況や回収効率を加味した効率値のラインは、図 13 に示す実道にて実測した供用年数の経過に伴う土砂回収量を考慮し、供用初期から徐々に土砂回収量を増加させたものである。

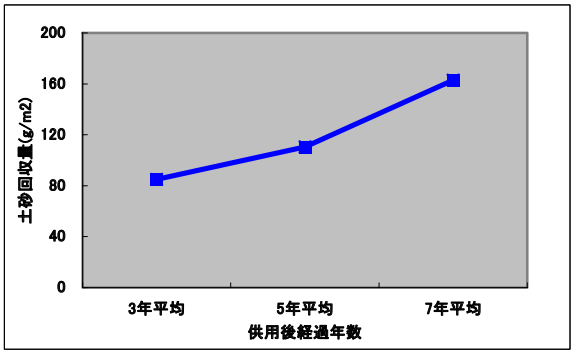


図 13：供用年数と土砂回収量の関係

機能回復・維持工事の最も重要な目的の一つは、排水機能を耐久寿命まで確保することであり、排水性舗装の機能が失われた時点で、舗装の打換作業を行うことを想定すれば、供用後 5 年サイクルで打換作業を行なわなければならない。図 14 に透水機能の低下によって打換えられる排水性舗装のサイクルと透水機能の回復ラインを示す。耐久寿命 15 年の場合は、5 年に 1 度、計 3 回の打換作業を行うこととなるが、これを機能回復・維持工事を行う事によって 1 回（舗装の耐久寿命時）に削減出来る事を意味し、機能回復工事が舗装打換工事に比べ経済的であることを示しているものである。

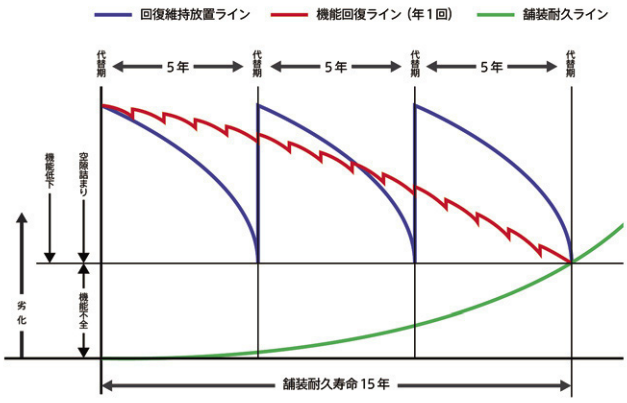


図 14：機能回復工事とﾗｲﾌｻｲｸﾙの関係

5．まとめ

本報文では、キャビテーション洗浄及び高速Ｖ型

洗浄に関する洗浄性能並びに施工性能を明らかにすることで、舗装の耐久寿命まで排水機能を継続させる為の最適な施工方法を示した。

結論として、

1）キャビテーション洗浄方式は、低速時の洗浄性能が優れており、舗装体底部までの空隙詰まり物質を遊離除去できる能力を有している事がわかった。また、作業速度 1km/h 付近での土砂回収量が 100～200g/m2 と排水機能が既に低下した舗装の洗浄に非常に有効である事がわかった。

2）V 型高圧水洗浄方式においては、作業速度 10km/h までの高速洗浄域での作業が可能であり、土砂回収能力としては 20～100g/m2、作業能力としては、給水 4t の洗浄水を 20min で消費し、約 8000m2 の洗浄作業が可能となる事がわかった。

3）より効率的な機能回復・維持工事を行う為に、洗浄前の現場透水量と舗装体内部の空隙詰まり物質の堆積量から最適な作業速度と洗浄方式を選択できる事がわかった。

4）排水性舗装の耐久寿命が 10～15 年であるのに対し、透水機能は 5 年程度で不透水の状態となっている。排水性舗装の耐久寿命まで透水機能を確保する方法として、1 年に 1 回 200g/m2 の回収を行う方法を示した。この施工方法では、透水機能不全の為の舗装打換作業に対しても十分経済性があるものと考えられる。

以上、排水性舗装の機能回復・維持工事に関わる技術的な施工方法について述べてきたが、今後は、この資料を基に本施工への技術指針として提案していきたいと考えている。

40. トンネル覆工打音診断システムの開発

㈱熊谷組　土木技術部：○森　康雄、岩井　孝幸
㈱熊谷組　技術研究所：時岡　誠剛

1．はじめに

トンネル覆工のはく落事故を契機にコンクリート構造物の点検の重要性が再認識されるようになり、定期的な点検が義務付けられるようになった。通常の定期点検は、目視と打音調査によるものであるが、人力による打音調査では、個人によって打撃力や判定が異なることや長時間の点検は、苦渋作業であり、疲労や集中力の低下により打撃力や判断力が持続しないなどの問題点が指摘されている。

ここでは、トンネル覆工の健全性を打音法により診断することを目的に、機械化した打撃装置による打撃音を解析し、劣化の有無を定量的に判定できるトンネル覆工打音診断システムを開発した。

2．打音法とは

打音法とは、ハンマーなどによりコンクリート表面を打撃してコンクリート中に弾性波を発生させ、この弾性波によりコンクリート表面から空気中に放射された音の大きさや高さをもとに健全性を判定する手法である。

コンクリートをハンマーで打撃すると、コンクリートとハンマーの両方から音が発生し、これらが混ざった音として観測される。コンクリートから発生する音は、以下のような音の合成音と考えられる。

①打撃位置の破壊を含む弾塑性的変形が直接空気中に放出される音
②変形によって発生する弾性波（表面波、縦波、横波）がコンクリート表面や内部を伝搬して任意の位置の表面を振動させることにより発生する音
③コンクリート構造物そのものが打撃によってたわみ振動することにより発生する音

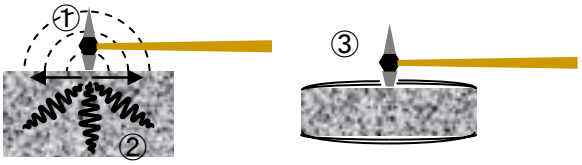


図1　ハンマーの打撃によって発生する音

①、②の現象を利用して衝撃弾性法や超音波法として部材の厚さや内部欠陥の位置の測定を行なっている事例[1)、2)]は見られるが、打音法での打撃音は①～③の合成音となるため定量的に健全性を評価することは困難である。③については厚さの異なるコンクリート板での振動実験を行い、コンクリート中の空洞を定量的に評価することを試みている報告もある[3)]。しかし、現実には、劣化箇所の周辺との拘束条件、劣化範囲に対する打撃位置、劣化の面積、劣化（空洞）までの距離等パラメータが多いため、打音法による打撃音だけをもとに、劣化の種別、範囲、厚さ等を理論的に解析することは困難である。

しかし、人力による打音では打撃力や判断基準に個人差があるにもかかわらず、打撃音の高さ、大きさなどをもとに健全性を判定している。

打音法におけるコンクリートの劣化状態に応じた打撃音の一般的な傾向を**表1及び表2**に示す。

表１　打音法における打撃音の大きさ

音の大きさ	大 ←→ 小	
打撃位置	劣化部の端部	劣化部の中心
劣化部と周辺の拘束状態	自　由	ピン　固　定
	（はく離）	（空洞等）

表２　打音法における打撃音の高さ

音の高さ	低 ←→ 高
劣化の面積	広い　狭い
劣化部の厚さ	厚い　薄い

３．打音法診断基礎実験

本打音診断システムを開発するにあたり、システムを構成する打撃機構や解析・判定方法を選定するために、各種基礎実験を行なった。

３．１ 基礎実験１[4)]

はく離や空洞を模擬したコンクリート供試体を用いて、健全な供試体との打撃音の違いをもとにした健全性の判定の可能性について検証した。

（１）劣化模擬供試体

供試体の大きさは90cm×45cm×30cm（図. 2）、コンクリートの設計基準強度は21N/mm^{2}である。

①はく離を模擬した供試体

コンクリート曲げ試験用の供試体（10cm×10cm×40cm）を割裂して所定のひび割れ幅となるように設置し、周囲にコンクリートを打設した。

②空洞を模擬した供試体

10cm×40cm の一定面積で奥行き方向に空洞を設けた供試体である。

表3　劣化模擬供試体

試験体No.	模擬した劣化	ひび割れ深さ（mm）	空洞までの距離（mm）	ひび割れ幅※
1	健全	－	－	－
2	水平はく離	20～30	－	小
3	水平はく離	20～30	－	大
4	水平はく離	50	－	小
5	水平はく離	50	－	大
6	水平はく離	100	－	小
7	水平はく離	100	－	大
8	斜めはく離	－	－	小
9	斜めはく離	－	－	大
10	空洞	－	50	－
11	空洞	－	100	－

※ ひび割れ幅　小（0.3～0.7mm）、大（1.0～2.0mm）

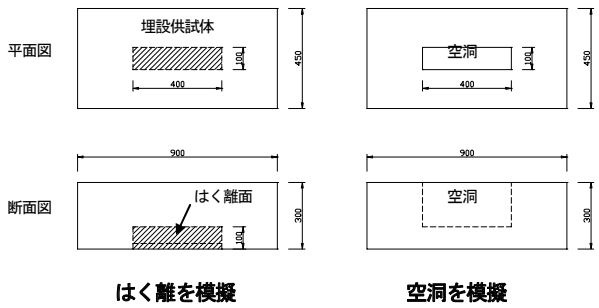
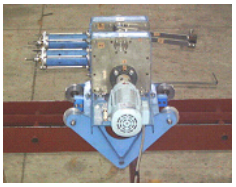


図２　劣化を模擬した供試体

（２）打撃装置及び判定指標

基礎実験１で使用した打撃装置と劣化部の判定を行なうために用いた判定指標（打撃音の音圧レベル）を表４に示す。

表４　打撃装置と判定指標（基礎実験１）

	実験１－１	実験１－２
打撃装置	打撃装置１	打撃装置２
	 手動でスプリングバネを圧縮し、その反発力でハンマヘッドをピストン運動させ供試体表面に衝突させる	 モーターに取り付けたカムでスプリングバネを圧縮し、その反発力で柄の付いたハンマヘッドを回転運動させ供試体表面に衝突させる
ハンマーの質量	55～230g	150～350g
判定指標	音圧レベル（500～2kHz）	音圧レベル（4～6kHz）

３．２ 基礎実験２[5)]

基礎実験１の結果をもとに、実構造物として既設の鉄道高架橋床版と道路橋床版及び新設の道路トンネル覆工の健全性調査を行い、並行して行なった部分的な破壊検査や電磁波レーダーなどの非破壊調査結果と比較し、健全性判定方法や判定基準について検討した。

表５　打撃方法と判定指標（基礎実験２）

対象構造物	鉄道高架橋床版	道路橋床版	道路トンネル覆工
調査目的	はく離調査	空洞、ジャンカ調査	空洞調査
打撃方法	基礎実験１で用いた「打撃装置２」	人力によるハンマー打撃（質量：1.3kg）	人力によるハンマー打撃（質量：1.3kg）
判定指標	音圧レベル（500～2kHz、2～5kHz）	音圧レベル（500～2kHz、2～5kHz）	音圧レベル（500～2kHz、2～5kHz）最大音圧振幅振動継続時間

３．３ 実験結果

紙面の関係上、基礎実験の結果は他の発表論文

[4),5)]に譲るとし、ここでは、その結果のまとめを以下に示す。

① 質量が 250g 程度のハンマーを用いれば、コンクリート表面から 10cm 程度までの深さの劣化の有無を判定できる。
② ジャンカ、空洞、はく離の識別は不可能である。
③ 健全性の判定指標は、打撃音の音圧レベルと最大音圧振幅とする。振動継続時間は、ノイズや暗騒音の影響があり、打撃音と認められる最小値（閾値）の設定が難しいため、判定指標とすることは困難である。
④ はく離の厚さが薄い場合は、最大音圧振幅と低音域（500～2kHz）の音圧レベルが健全部のそれよりも大きい。
⑤ 深さの深い劣化については高音域（2～5kHz）の音圧レベルが健全部のそれより大きい。
⑥ ハンマーの質量を大きくすると深い場所の劣化の判定が可能である。

４．本システムの基本コンセプト

基礎実験の結果をもとに、打音診断システムの基本コンセプトを「通常、トンネル覆工調査として人力で行なわれている点検ハンマーを使った打音法における打撃方法、判定方法を再現する一方で、人力による打音法の問題点を解決する。」こととする。

人力による打音法の問題点の解決方法は以下の通りである。

① 打撃装置を機械化することにより一定の打撃力で打撃することができる。
② 打撃音を解析し、一定の判定基準をもとに健全性を定量的に判定できる。

（１）診断性能

人力による打音で診断できる以上の能力は要求せず、表面から深さ 10cm 程度までの劣化の存在可能性を判定する。また、劣化の種類と打撃音の特性について定性的な傾向は見られるが、理論的裏付けが困難であり定量評価できないため、劣化の種類の識別はしないものとする。

（２）診断の役割（位置付け）

人力による打音調査は、目視でコンクリートの表面状態を確認しながら、ひび割れ等に沿って 10cm 程度以下のピッチで打撃し、劣化の種別（はく離の有無等）や浅層部分の劣化の有無を判定する。このような工程を完全に機械化するためには高度な技術が必要であり、経済性を考慮すると非現実的である。

したがって、本システムは、打音法による概略調査を行うものとし、平面的に 30～50cm ピッチのメッシュ交点を打音して健全性を診断し、その判定結果が不明確な箇所について人力により再確認するものとする。

（３）汎用車への搭載

経済性の観点から専用車に搭載することはせず、その都度、高所作業車をリースしてそのステージに打撃装置を搭載する。

（４）調査範囲

調査範囲は、覆工全体を調査できることが望ましいが、道路トンネルなどに設置されている化粧板部は調査できないことや車両の安全性上問題となるアーチ部のみの調査を想定して、仰角 90° （鉛直上向き）から 20° までとする。打撃装置の側面図を**図 3** に示す。

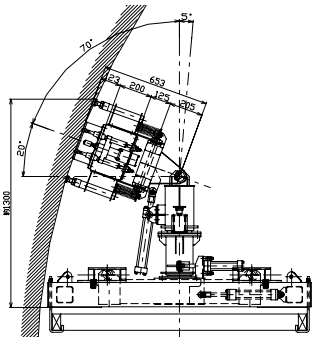


図3　打撃装置側面図（仰角20° ）

５．打撃装置

上記コンセプトをもとに、打撃装置の仕様を以下の通りとする。

本システムの打撃装置は、試作用の打撃装置（**図 4**）と同じものを 50cm ピッチで 5 基 1 列に配置した。装置全景を**図. 5** に示す。

（1）コンパクトであること

柄の付いた点検ハンマータイプではハンマー動作のためのスペースを必要とするため、垂直運動であるピストンタイプとした。

（2）低振動、低騒音

動力機構から発生するモーターの回転、スプリングバネの摩擦音など、振動や騒音はコンクリートの健全性を診断するうえでは、大きな障害とならないが、診断精度向上のためには機械式は適切ではない。また、油圧式では人力と同程度の打撃力（ハンマーの質量：250g、速度：1.5～2m/s）を得ることは困難である。

したがって、打撃装置の動力をソレノイド（電磁石）式とした。

（3）人力による打撃動作の再現

人力による打撃力は、加速度センサーを取り付けたハンマーで健全な供試体を打撃し、加速度を測定した。これをもとにハンマーの打撃時の速度として1.5～2m/s（個人差有り）とし、これをハンマーの設計速度としてソレノイドを利用した打撃装置の試作機（**図 4** 参照）を製作した。この試作機で、健全な供試体を打撃し、人力の打撃音と比較、検討を行い、ソレノイドに流す電圧（100V）と時間（20ms）を決定した。ハンマーの打撃動作は人力による打撃と同様に、打撃時は押し付けることなく、打撃後はフリーな状態となり、しかも、2 度打ちしないような機構とした。



図4　ソレノイド式打撃装置（試作機）

（4）軽量化

高所作業車は、全国各地で容易に調達できるように、比較的多く流通している積載荷重 1t とした。

打撃装置の打撃面への押し付け力：5 基×20kg/基=100kg

高所作業車、打撃装置オペレータ（2 人）：150kg として、さらに余裕分（50kg）を考慮して、打撃装置の質量は 700kg を目標とした。

結果的に材料としてアルミなどを利用することにより 450kg まで低減することができた。

（5）打撃位置の移動

打撃装置の移動は、高所作業車の移動、高所作業車のブーム制御によるステージ移動によるものとし、鉛直移動（50mm）、フレームの回転（±5°）、水平移動（100mm）などの微調整機能は、打撃装置に持たせた。



図5　打撃装置全景

6．打撃音の解析と健全性の判定

調査箇所の打撃音の大きさ（音圧）と高さ（周波数特性）が健全部のそれの平均値からどの程度相違しているかをもとに、健全性を判定する。以下にその判定方法を示す。

6．1 打撃音の取得

無指向性マイクロフォンにより集音し、打撃点からマイクロフォンまでの距離は 10cm とした。システム系統図を**図 6** に示す。

また、打撃装置、周辺機器やトンネル覆工面への反射の影響及び周辺からの暗騒音の影響を軽減する対策として打撃ハンマー及びマイクロフォンの

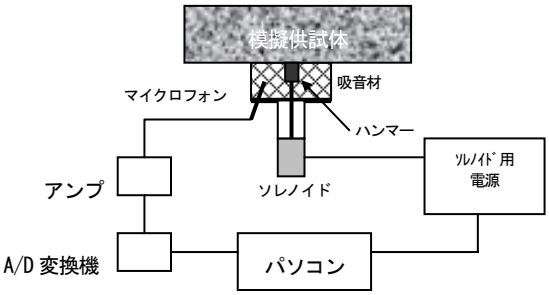


図 6　システム系統図

周囲に、内部に吸音材（多孔質アルミパネル(t=1.3mm)、グラスウール(t=25mm)）を取り付けた円筒形のカバーを設置した。カバー内部を**図 7** に示す。

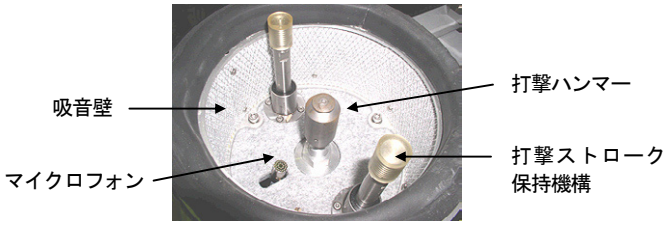


図7　打撃ハンマー

健全部のデータは、健全であると判断される箇所の打撃音をあらかじめマイクロフォンで集音、記録、解析し、音圧レベルと最大音圧振幅が正規分布に従って分布しているものとして平均値と標準偏差を算出する。

健全部のデータは、1 ヶ所につき 10 回の打撃音を収録するものとし、異なる 10 ヶ所を打撃し、計 100 回の打撃音を健全部のデータとする。また、調査箇所については5回の打撃音の平均値を当該箇所のデータとする。

６．２ 打撃音の解析

打撃音の高さは、FFT 解析を行い 500～2kHz の低音域と 2k～5kHz の高音域の２つの周波数帯域に応じたフィルタを作成して、時間軸上でフィルタリングを行い、音圧レベルの周波数解析を行なう。打撃音の大きさは、500～5kHz でフィルタリングした時系列データの最大振幅とする。

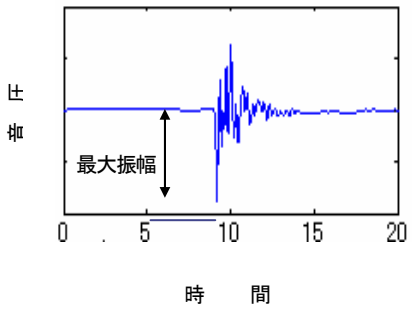


図8　打撃音の時系列データ

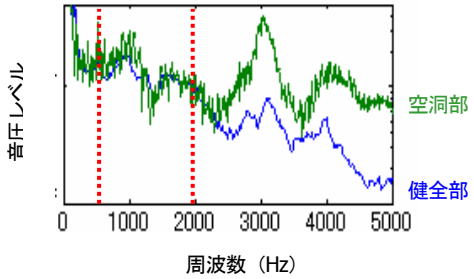


図9　周波数解析結果

６．３ 健全性の判定

上記低音域と高音域の音圧レベルと最大音圧振幅を健全性の判定の指標とし、**表 6** に示す基準をもとに、調査箇所の打撃音について判定指標ごとに評価点を求める。

表 6　各判定指標ごとの判定基準

調査箇所の打撃音の判定指標の範囲	評価点
平均値－ａσ～平均値＋ａσ	3 点
平均値－ａσ～平均値－ｂσ　または 平均値＋ａσ～平均値＋ｂσ	2 点
平均値－ｂσ以下　または　平均値＋ｂσ以上	1 点

表 6 の平均値とは、健全部の打撃音の判定指標の平均値、σ は標準偏差、a 、b は任意の定数である。a 、b はデータの積み重ねにより適切な診断ができるように決定する。総合評価点は、下式の通り、各判定指標の評価点を加算して求める。各評価指標の重み付け係数は評価結果に対する影響度に応じて可変とする。

総合評価点＝Σ（各判定指標の評価点×重み付け係数）　　式(1)

この総合評価点をもとに**表 7** に従って健全性を判定する。

表 7　健全性の判定

総合評価点	健全性の判定
差分の 2/3+最小値より大きい	健全
差分の 2/3+最小値以下、1/3+最小値以上	要確認
差分の 1/3+最小値より小さい	劣化

※　差分＝最大値－最小値

ここで、最大値とは、総合評価点が取り得る上限値、最小値は総合評価点が取り得る下限値である。

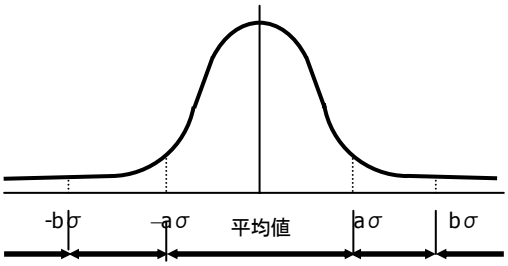


図10　健全部の打撃音の評価指標の分布

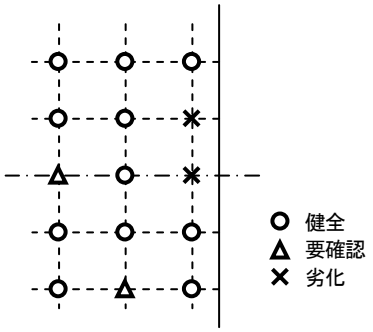


図11　打音診断結果出力例

7. 今後の課題

本システムについては、当面、以下の項目について検証、検討を行なう予定である。

① 打撃装置の高所作業車ステージへの取り付け方法について検討する。

② 実際のトンネルにおいて動作性能、診断性能の確認を行なうとともに、診断方法について再検討を行いシステムの性能向上を図る。

また、今回開発したシステムでは、人力による打音法の当面の問題点は解決されたが、本格的に人力による打音法を再現するためには以下のような機能を付加させなければならないと考える。

① 障害物を回避したりコンクリート表面の状態を観察するための視覚機能

② この視覚機能と打撃音により得られた情報をもとに、打撃位置を判断する機能または遠隔操作機能

例えば、打撃した箇所で軽音が発生した場合、劣化範囲をより詳細に特定するために、打撃間隔を小さくするなど打撃箇所を適切に判断、移動できる動作機構

③ 打撃位置自動検出機能

④ 人力打音と同程度の速度で調査ができる運動機能

参考文献

1) Applied Research Co.,Ltd. : 弾性波レーダシステム（iTECH-3），2001.11（Ver3.3）

2) 歌川紀之、中村英孝、伴通ほか : 打音法によるトンネル覆工健全性評価のための現地実験，土木学会年次学術講演会，pp.308-309，2001.10

3) 鈴木文大，榎本秀明，稲川敏春ほか : トンネル覆工コンクリートを対象とした打音評価法，物理探査，第 54 巻第 6 号，pp.374-387，2001

4) 森　康雄、岩井孝幸、戸上郁英、時岡誠剛 : 打音診断システムの自動化に向けた基礎実験，土木学会年次学術講演会，pp769-770,2003.9

5) 土屋勝彦，森　康雄，岩井孝幸，時岡誠剛 : コンクリート打音診断システムの基礎的検討，コンクリート構造物の非破壊検査への期待論文集 Vol.1, pp227-236，2003.7

41. 自動打音調査システム「易打天（いだてん）」

ハザマ：○武石　学
㈱ダイヤコンサルタント：小泉　和広
㈱ウォールナット：新　弘治

１．はじめに

トンネルは年月を経過するとともに老朽化が進行していき，覆工崩落などの事故が発生する危険性が高くなるものと考えられる．トンネルに本来必要な機能を確保し，事故を防止するためには，定期的な点検・検査により覆工の健全性を評価し，必要に応じた補修・補強を行っていくことが重要となる．現在このような点検・検査方法としては目視観察とハンマ打音による方法が一般的に実施されているが，これは覆工表面のひび割れ，漏水，遊離石灰等を目視で確認し，これらの異常部や目地などを重点的にハンマで打音調査するものである．

目視調査に代わるものとしてＣＣＤカメラやレーザーによる自動計測技術の開発は進められているが，ハンマを用いた打音調査はいくつかの自動調査技術が開発されつつあるものの，いずれも現場適用試験段階であり，実用化されているものは少ない．

本研究は，こうした背景を受けて，筆者らがこれまで開発を進めてきた自動打音調査システム「易打天」について，その概要と現場適用実験結果についてまとめるとともに，調査結果の有効性について検討したものである．

２．ハンマ打音調査法の問題点と自動化への課題

人による従来のハンマ打音による覆工調査は，覆工の状況を目視しながら打撃することで，視覚，聴覚および触覚（反発度合い）をもとにした総合的な判断ができるという利点がある．加えて，表面の剥落が懸念される場所においてはその場で叩き落としによる対処が可能であり，鉄道や道路トンネルの最も基本的な点検方法の一つとなっている．しかし，この方法には上述のような長所がある反面，表－１に示したように客観性，作業性などの点で問題があり，特に，点検作業自体が高所作業車上での上向きの苦渋作業であることや，トンネル全線を点検・調査するためには多大なマンパワーや調査時間を要することなどが解決すべき課題となっている．

以上のようなハンマ打撃による調査法の現状における問題点を整理し，自動化に向けての課題と対応策を表－１のように整理することで自動化の方向性を明確にすることとした．この表に示すように，従来の方法の問題点は，①評価基準の客観化，②作業全体の効率化③調査結果の記録・保存などに集約され，自動化に際してはこれらの課題を解決しつつ，本来の打音調査の長所である広い適用性などを損なわないように留意する必要がある．

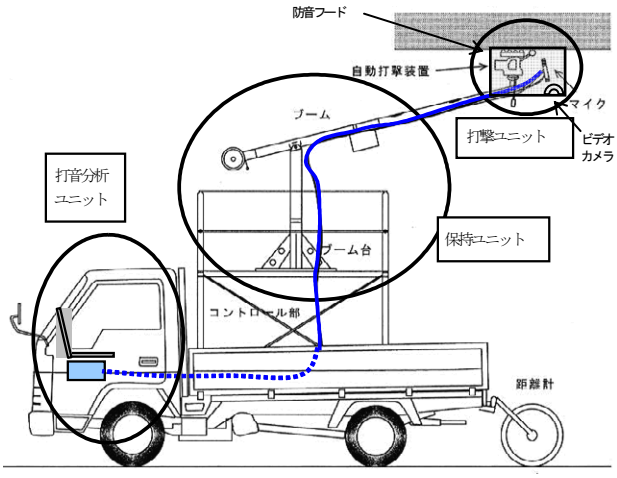
こうした問題点のうち，①の評価の客観性を確保す

表－１　ハンマ打音による方法の問題点と自動化に向けての課題

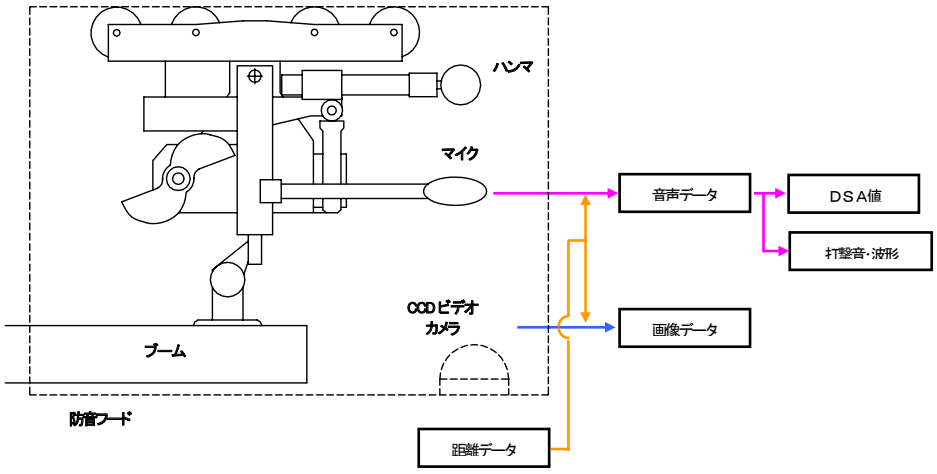
項　　目	現状の問題点	自動化に向けた課題	対応策
評価基準の客観化	主観的であり個人差がある	客観的で安定した評価の実現	音響エネルギ分析手法の導入
作業全体の効率化	苦渋作業であり，広範囲の調査ではマンパワーを要する	迅速かつ容易な調査の実現および省力化	自動打音装置の開発 トンネル軸方向での連続調査
調査結果の記録・保存	調査結果の保存が困難	データ保存・表示が容易	調査結果のデジタルデータ化
経 済 性	広範囲では経済性が低下する	安全で経済的なシステム開発	既存技術の有効活用

るためには，打撃音をマイクロフォンで収録し，その音響エネルギを分析する手法を採用することとした．また，ハンマ打撃している覆工表面についても防音フード内に取り付けたＣＣＤビデオカメラで撮影，記録することとした．これらの音響，映像記録は，打撃位置の情報とともに保存することにより，両記録について同位置で比較することが可能となり，結果の評価や異常値の除去にも活用できる．また，測定結果を記録後処理によりデータを加工することや分布図を容易に作成することが可能となるほか，調査結果がデジタルデータとして保存されるため，③の調査結果の記録・保存の課題にも対応できる．

②の作業性については，自動打撃装置を開発することで対応した．打撃を自動化することにより，作業性の改善と同時に打撃力の安定化を図ることが可能となる．また，調査方向をトンネル周方向ではなく，トンネル軸方向とすることで，電磁波探査に使用されるアンテナ保持機構をそのまま適用することが可能となり，保持装置自体を小型･軽量化することができる．なお，十分な調査密度を確保するためには，軸方向に一定間隔の測線を設けて，調査を行うことで対処することとした．



図－１　自動打音調査システム構成例



図－２　システム概念図

３．自動打音調査システムの構成

（１）装置の全体構成

前述のような設計思想に基づいて開発された自動打音調査システムの概要を図－１に示した．図に示したように，本システムは，打撃ユニット，保持ユニット，打音分析ユニットから構成される．以下に各ユニットの構成を簡単にまとめる．

１）打撃ユニット：打撃ユニットはバネにより一定の力でハンマを押し出す部分と走行ガイド装置および打撃音を集音するマイクロフォンから構成される．これら全体を防音フードで覆うことで交通騒音等の影響を遮断することとした．

また，防音フード内にＣＣＤビデオカメラを取り付けることにより，打撃覆工面の映像を記録できる．

２）保持ユニット：電磁波探査用のアンテナ保持装置をベースに構成されており，移動車輌上に固定される．保持ユニットは可動性を有しており，その先端に打撃ユニットを取り付けることにより，天端～肩部・側壁までの調査が可能な構造となっている．

３）打音分析ユニット：打音分析ユニットは移動車輌の運転席等に搭載され，調査結果をリアルタイム表示するとともに記録・保存を行う．その際，打点位置は移動車輌に取り付けた距離計によって計測し，同時に記録・保存するものとした（図－１，図－２参

照）．本システムに用いられる距離計は，測定誤差が測定距離の 1%未満であることから，適切な調査区間の設定や，途中にマーキングを入れることで誤差が加算されないようにすることが可能であり，実用上の問題は生じないものと考えられる．

なお，図－１は 2t トラックをベースとして組み立てた本システムの構成例であるが，本システムは保持ユニットが据え付け可能な台車であれば搭載が可能であり，水路や歩道トンネル等の小断面トンネルから高速道路トンネルなどの大断面トンネルまで幅広く適用が可能である．

また，保持ユニットのブーム台部分は約 60cm 四方と小さく，高所作業車のステージ部にも取り付けが可能であるため，保持ユニット自体のブーム長さによらず，さらに大断面トンネルなどにも対応することができる．

（2）打撃音分析装置の原理と概要

本システムに適用した打撃音分析装置は，500g の球形ハンマで叩いた打撃音を狭指向性マイクロフォンで収録し，以下に示す方法で求められる音響エネルギ指数（0～200 の数値）で表示するものである．

図－３に示すように，健全部の音響エネルギの分布に対して，欠陥部（浮き，空洞，劣化部など）のエネルギ分布は，より低周波成分にピークが移動する．ここで，図中の欠陥部のピークに相当する，特定帯域の音響エネルギに着目し，この部分の音響エネルギと打撃により発生した全音響エネルギとの比をとることで音響エネルギ指数を求めている．具体的には，トンネル覆工に剥離等の欠陥がある場合には音響エネルギ指数が 0 に近い値を示し，健全な場合には 200 に近い値を示す．

なお，音響エネルギ指数は覆工の強度などコンクリートの物性自体を判定するものではないが，これまでの実績からこの指数が 100 程度より大きな値であれば健全であると考えてよいことが確認されている．

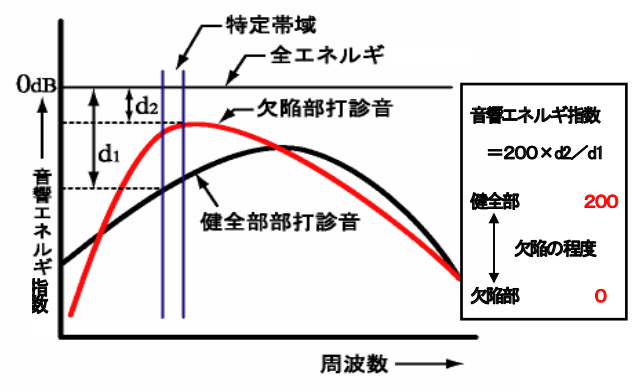
この音響エネルギ分析装置（図－４）は，これまでは人力打撃用として開発され，多数の適用実績を有するものであるが，今回の開発に伴い，打音分析速度の向上と出力のデジタル化について改良を行い，一定時間間隔で打撃される音響データを確実に取得することを実現した．今回新たに開発を行った部分について，合わせて図－４に示した．

４．現場適用実験

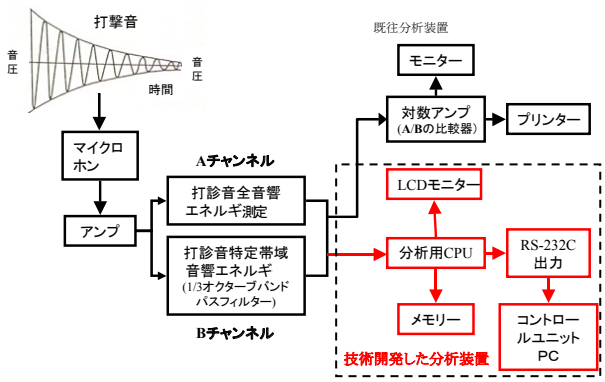
現場適用実験は，建設後 30 年以上を経過した道路トンネルにおいて実施した．この実験は，本システムを実際のトンネルに適用した場合の基本的な性能を評価することを目的としている．具体的には，取得データの安定性と調査データと覆工状況の対比等について確認することとした．以下に各項目に対する検討結果を示す．

（1）取得データの再現性

本システムによって得られるデータの安定性について評価するために，天端および肩部における延長約 30m の測線を設定し，この上で繰り返しデータを取得



図－３　音響分析の原理



図－４　打撃音分析装置の概要

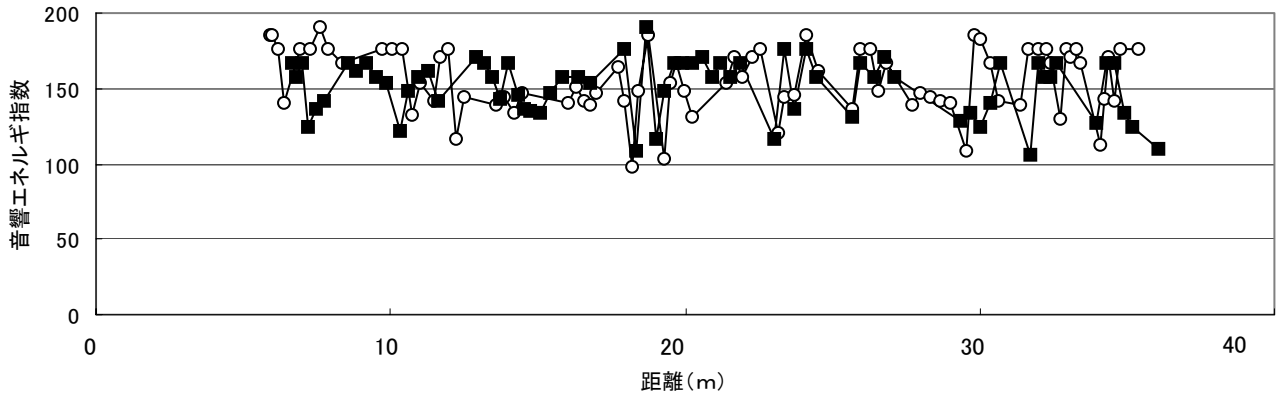
して検討を行った．図－５に天端部測線において２回測定した音響エネルギ指数の分布を示した．この図からわかるように，２回の測定結果はほぼ一致しており，音響エネルギ指数の値は130～180の間で分布している．一方，肩部における調査結果では，平均的な音響エネルギ指数が130程度と天端に比較してやや低いものの，全体としてほぼ同等な結果が得られた．これらのことから，本システムによる調査結果には十分に再現性があるものと考えられる．

また，前述したように，通常のトンネル覆工においては，この指数が100以上の部分では覆工が健全であると判定できることが確認されており，本実験を行った区間では覆工の健全性が保たれているものと判断される．このことは目視観察によっても，この区間で覆工表面の劣化や閉鎖クラックなどの変状が見られなかったこととも合致している．なお，図－５の取得データにばらつきが生じた原因としては，打撃位置が各測点とも微妙に異なっていることや，トンネルの覆工の表面にはフィルム状に泥が付着していたことなどの影響が考えられる．

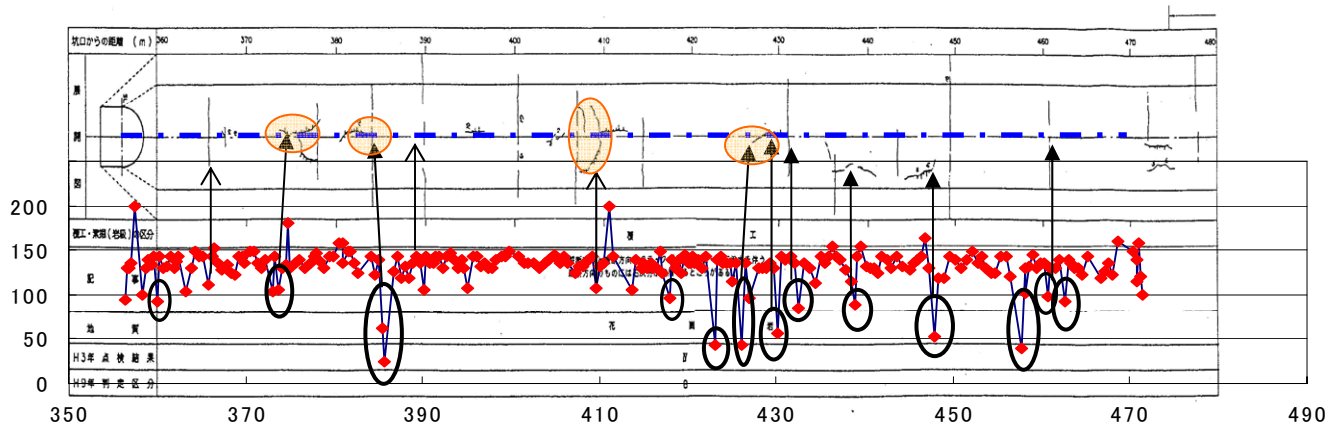
（２）調査結果と覆工状況との対比

本システムで連続的に測定した場合のデータの安定性と，実際の覆工の状況との対比を確認するために，前述した安定性の評価実験とは別に，約100mの測線を設けて連続測定実験を実施した．測定結果を図－６に示したように，ほぼ全区間において安定したデータが取得されていることがわかった．また，音響エネルギ指数の平均値は131，標準偏差20.6と，安定性確認実験結果とほぼ等しい結果が得られた．

この図の中で，音響エネルギ指数が100以下を示す位置（○で囲んだ部分）は，そのほとんどが展開図に示された覆工面のひび割れまたは目地近傍に対応しており，これらの近傍で覆工表面の状況を反映したもの



図－５　データ取得安定性の確認実験結果



図－６　調査結果と展開図の対比状況

と考えられる．

なお，実験時のトラックの移動速度は時速 1.5～2.0km/h であり，このときの打点間隔は 30～45cm 程度であったことから，縦断方向の測線間隔を 50cm 程度に配置することにより，ほぼ 50cm 四方に 1 点以内の打点密度での調査が可能であるものと考えられる．

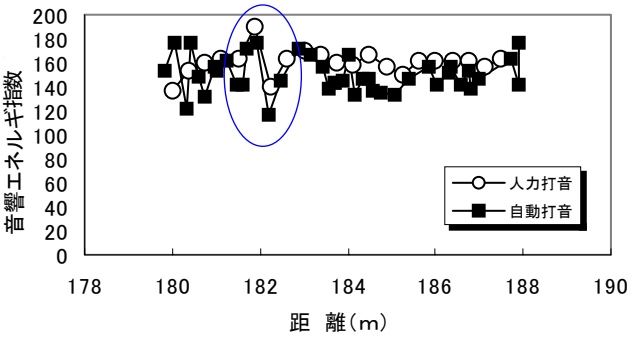
（3）人力打撃と自動打撃との比較

本システムで移動しながら取得した測定データに対する調査結果の確実性を評価するために，自動打音装置と人力による打音調査結果との比較を行った．実験は，約8mの測線を設けて本システムによる連続測定を実施した後，同じ測線上を熟練者により可般式の測定装置を用いて50cm間隔でデータ取得を行うことによって実施した．図－7に示した測定結果から，自動打音結果は人力による打音と同様に安定したデータが取得されていることが確認された．このときの，音響エネルギ指数の平均値は人力による打音が160であったのに対して，本システムの測定結果は，150程度の値が得られており，やや低い値となっているものの十分に再現性のあることが確認された．特に，182m付近の音響エネルギが急激に変化する点に対しては，人力も本システムも同様の傾向を示しており，微妙な覆工の変化を把握することが可能であった．

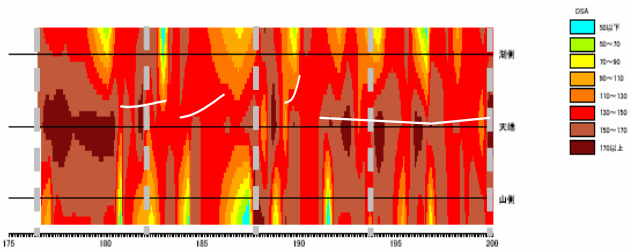
5．調査結果の活用方法に関する検討

（1）覆工表面健全性の平面分布図の作成

本システムの調査結果は，図－5に示したようなグラフをリアルタイムで取得することができるほか，複数の測線の調査データをもとに平面分布図を作成することが可能である．図－8は再現性の確認実験を行った 30m 区間（図－5の測定区間）において天端と両肩部の3測線を設けて実施した結果をもとに平面分布図を作成した例である．この例には，覆工の目地と目視観察で確認されたひび割れについても記入している．なお，この事例では測線設置密度が粗いため，やや不自然な覆工表面の音響エネルギ指数分布となっているが，必要に応じてより密な測線配置での調査を行うことにより，十分な精度で平面分布図を作成することができるものと考えられる．こうした表示により，直感的に劣化部分の推定ができることに加え，連続する空洞や劣化部分などがある場合は，その範囲も推定することが可能となるものと考えられる．また，図－9のような打音調査を行っている覆工壁面のビデオ画像と比較することにより，劣化部の状況と音響エネルギの比較検証，打継ぎ目や埋設金物など劣化ではない部分の異常データを除去するかどうかの検証をすることも可能となる．



図－7　音響エネルギ指数の比較



図－8　調査結果の平面分布図

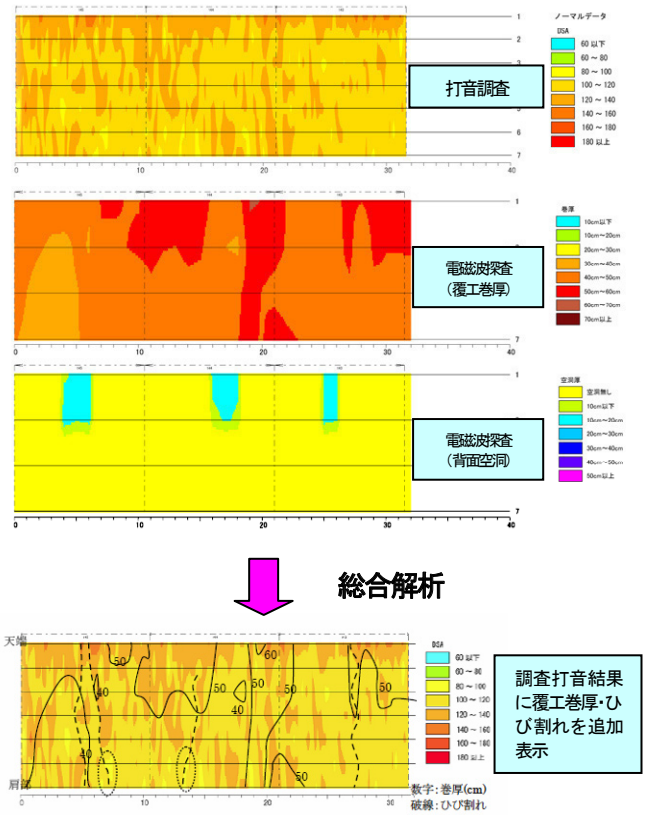


図－9　覆工壁面の画像

（2）電磁波探査結果との併用

本システムは前述したように電磁波探査装置と共用可能な保持装置を用いていることから，自動打音調査と電磁波探査を一つの作業台車を用いて実施することが容易にできる．このことにより，ハンマ打撃により把握される覆工表面および比較的表面に近い部分の劣化，剥離，浮き等の不具合と，電磁波探査により把握される覆工の巻厚や覆工背面空洞などの調査結果を組み合わせることにより，総合的に評価することができる．

図－10 は供用中のトンネルにおいて，本システムで行った打音調査結果と電磁波探査結果の分布図，それらを組合わせた分布図を示したものである．打音調査，電磁波探査の結果は上３つの分布図のようにそれぞれ別々に示されるが，測線，距離を基準に３つを組合わせることにより，図－10 の一番下の図のような直感的に調査結果を確認できるような分布図を作成することが可能となる．また，目視観察で確認されたひび割れの分布を破線で書き加えるとさらに状況を把握することが容易となる．



図－10　レーダー探査との総合解析結果

このように，調査結果が同時に確認できることにより，覆工の表面だけでなく内部構造から打音調査で異常が見られた部分の原因についても推定することが可能である．

（3）評価基準の客観化

本システムは前述したように数値化した測定結果により評価し，デジタルデータとして記録する．このことは調査対象を継続的に監視することが可能であることを示している．本システムで調査したトンネルを一定周期後に再度調査し，測定データを比較することで継時的変化や新規に発生した劣化部分を確認できると同時に，補修した箇所がある場合には対策による効果についても客観的に検証することが可能となる．このように，竣工検査，健全性の診断検査，補修後の効果の確認など，いろいろなケースで本システムによる検査の適用が考えられる．

６．まとめ

本研究では，筆者らが開発した自動打音調査システム「易打天」が，現場実験を通じて十分に覆工のハンマ打音調査に適用できることが確認された．また，打音調査と電磁波探査の組合わせによる覆工健全性の総合的な評価も可能であることを示すことができた．同時に調査結果についても客観的なデータとして記録できることで，継時的変化の検証が可能であると考えられる．これらのことから，本システムの適用に関して有効性を確認すると同時に，様々な検査への適用の可能性についても示すことができた。

今後は，新設トンネルの竣工時検査への適用や既設トンネルの健全性評価などにおいて，現場調査結果を蓄積しながら，より実用性の高いシステムとするための改良を行っていく予定である．

参考文献

1）笠博義，小泉和広，稲垣正晴：トンネル覆工の自動打音調査システムの開発，土木学会トンネル工学研究発表会，vol.13，pp.343-348，2003

42. リニューアル工事における建物外壁タイル診断装置の自動化について

東急建設㈱：○中村　聡、西尾　仁、大矢　和久
東急リニューアル㈱：新津　清隆

1. はじめに

近年、昭和40年代の高度成長期に建てられた多くの建築物は、老朽化が進み更新時期を迎えている。またバブル経済崩壊後、建築物に対する考え方も変化しつつあり、従来の「スクラップアンドビルド」から「ストック」へと社会の価値観も変化してきている。この様な社会的背景のもと建築物リニューアル工事における外壁面の診断・補修工事は建物の長寿命化だけでなく、外壁面の崩壊による災害を防止する手段として重要と考えられる。

筆者らは、これまでに外壁面での作業を自動化・無足場化する装置の開発取り組み、作業の安全性向上、コスト削減を図ってきた。外壁タイル診断は通常、点検ハンマによって発生する打音や擦過音からタイルの浮きや、剥離についての判断を検査者の感覚に頼って行われ、定量的な判断が困難である上に、診断結果を記録に残しづらいなど、自動化が望まれているテーマであった。

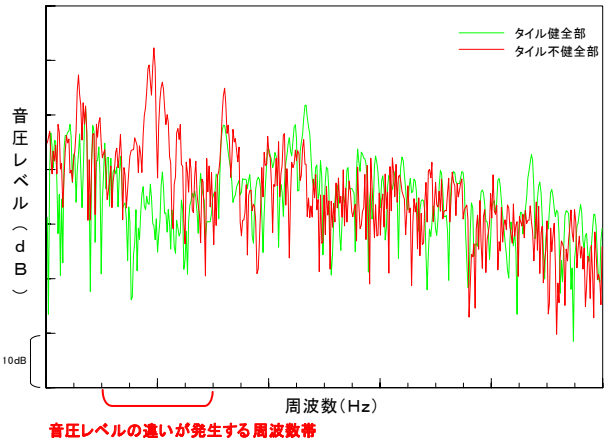
今回開発した外壁タイル診断装置は、これらの問題点を解決する手段として、外壁面の作業を自動化する技術と以前から研究を進めてきた外壁タイル診断技術の知見を応用し開発したものである。当該装置は、通常人間で行うような外壁面を叩いたり、擦ったりという点検時の動作を同様に行う事ができ、これにより発生した打音もしくは擦過音をある一定の周波数に限定し解析する事で、外壁タイルの剥離を定量的に判定するものである。また、診断している壁面の状況及び診断音、位置情報は映像として記録され再現性のあるデータとして保存することが可能となっている。本論文は、開発した外壁タイル診断装置の概要ともに実際の建物リニューアル工事における外壁タイル調査に適用した事例について報告するものである。



写真－1　タイル外壁診断装置

2. 外壁タイル打音診断の基本原理

通常、人力によるタイル外壁面診断は点検ハンマによって発生する音の違いを聞き分け、健全部と不健全部を判別している。タイルの健全部、不健全部を叩いて発生する音の違いを定量的に示すために模擬外壁タイル壁面や建物タイル外壁面を使用して実験を実施した。実験によって得られた外壁タイルの打音を、周波数毎の音圧レベルに分けて解析したものを図－1に示す。



図－1　健全部、不健全部での打音波形の違い

実験によりタイル壁面健全部、不健全部では1000Hz～3000Hz の周波数帯で打音波形の違いが見られ、不健全部ではこの周波数帯において音圧レ

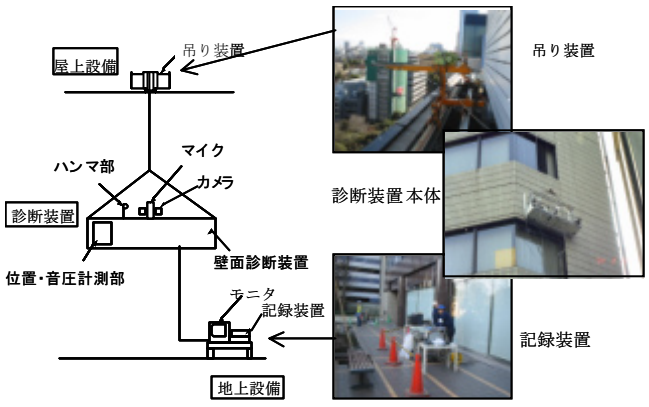
ベルが健全部よりも高いことが確認された。この帯域における音圧レベルの違いが、耳で打音を聞いた際に感じる音の違いになっていると予想される。

3. 外壁タイル診断システムについて

3. 1　外壁タイル診断装置の概要

人間による打音診断は安価、単純でありながら正確な診断ができる反面、診断を行うために足場が必要なことや、診断結果を記録として残しづらいことなどが問題であった。今回開発した外壁タイル診断装置は、人間による打音診断の原理を機械へ応用し,自動化することによって足場の組立や高所作業を無くす事を目的とした。また、診断時の映像、打音・擦過音、位置情報を再現性のあるデータとして記録し、コンピュータによる診断音の解析を行うことで定量的な診断を行う外壁タイル一次診断システムを開発コンセプトとした。

外壁タイル診断装置のシステム構成は、建物屋上に設置する「本体吊り装置」、「診断装置本体」、診断装置から送られてくる打音データと画像データを地上で記録する「記録装置」の3つから構成される。(図－2参照)



図－2　壁面診断システム概要

診断装置本体には、点検ハンマを作動する「ハンマ部」、打音・擦過音を収集する「マイク部」、診断を行っている外壁面の映像を撮影する「カメラ部」、診断位置を計測する「位置計測部」が内蔵されている。(写真－2参照)この診断装置の特長を以下に示す。

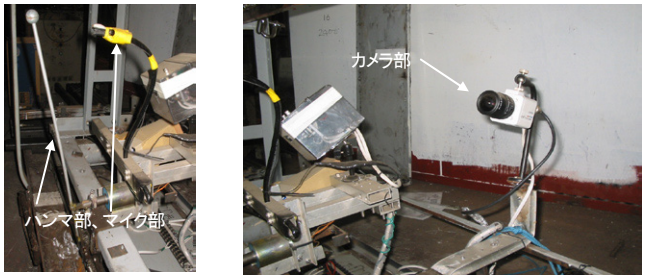
① 点検ハンマを左右に移動させタイル面を擦ることで発生する擦過音と、点検ハンマを前後に移動させタイル面を打撃することで発生する打音の2種類を選択できる。

② 診断音と壁面の画像、位置情報が、映像として生データの保存可能であるため、解析時などに再現可能である。

③ 収集した外壁タイルの診断音を解析する際に、コンピュータを使用し健全部の打音と相対的に比較する事で定量的な診断が可能。

④ 診断音は電子データとして保存が可能であり、診断結果のグラフや図を作成することができる。

⑤ 1つの診断列における打診回数を変更する事で、診断の細かさを自由に決定できる。



写真－2　診断装置内蔵機器

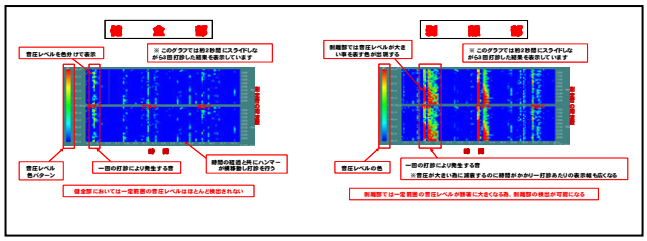
3. 2　外壁タイル診断結果の解析

本装置によって診断できる項目は、診断音による外壁タイルの剥離、映像によるひび割れ形状の解析の２項目である。

外壁タイル診断の解析方法は、診断装置本体のマイクによって収集されたタイル診断音をコンピュータによるウェーブレット変換解析で行う。コンピュータでは、タイル剥離部で顕著に表れるある周波数帯の診断音が、どの程度の音圧レベルで発生しているかを色分けしたグラフによって表示し、視覚的にタイルが剥離しているかをわかるようにしている（図-３参照)。これにより人間の感覚や作業の熟練度等に左右されない定量的な外壁タイル剥離診断をおこなうことができる。

カメラの映像によるひび割れ診断は0.1㎜までのクラックがモニタにより確認でき、ひび割れの太さによる補修方法の違いにも対応のできる診断結果を得ることが可能である。ひび割れの太さを計測する際は、モニタに映し出されるひび割れと実際のひ

び割れ太さの比率を補正するモニタ用クラックスケールを使用する。



図－3　健全部、不健全部での音圧レベルの違い

4　実際の建物による実証施工

4．1　　実証施工内容

開発した診断装置の作業性や診断結果の妥当性を確認するため、実際の外壁タイル面にて実証施工を行った。対象建物は、鉄筋コンクリート造の地下1階、地上9階建てのオフィスビルで、竣工後は19年経過している建物である。この実証施工では、外壁面の窓等を除いた外壁タイルの面積約626㎡を診断装置での実証施工範囲とした。



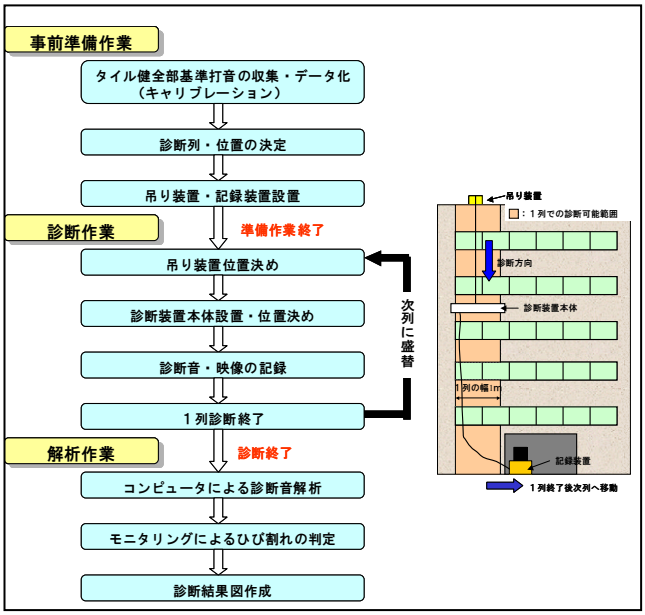
図－4　実証施工対象建物の外壁タイル
診断範囲及び外壁タイルの外観

4．2　　外壁タイル診断作業手順

今回の実証施工は、地上での操作及びモニタによる監視に2名と、屋上吊り装置の操作に1名の合計3名によって行った。診断作業の手順は図－5の作業フロー図に示すように、事前作業として診断時にタイル不健全部の打音データと比較するタイル健全部基準打音データの収集・記録をシステムのキャリブレーションとして行う。キャリブレーション終了後、建物の診断する外壁面位置及び列を決定し、各装置の設置を行う。

次に、屋上に設置している吊り装置と診断装置本体の位置決めを行い、外壁面の診断を開始する。診断中は、地上で診断音と映像を記録する。診断列1列の診断が終了したら次列に装置を盛替え、同様の手順で診断を行う。

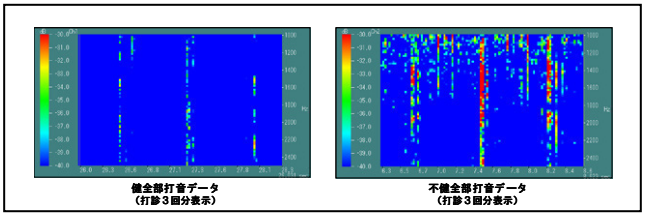
診断時に記録した診断音と画像データを診断作業終了後、解析し診断結果図を作成する。



図－5　外壁タイル診断作業フロー

4．3　　実証施工結果

実証施工でキャリブレーションを行った際に収集したタイル健全部基準打音データと、タイル診断時に記録した不健全部打音データを並べて図－6に示す。図－6のグラフは音圧レベルが大きい程、レベルに合わせた色で表示されるようになっている。

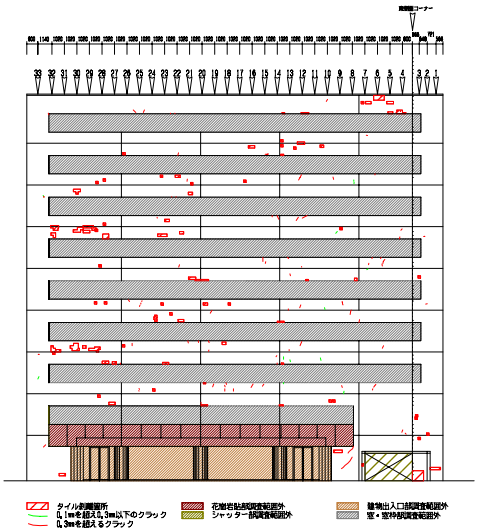


図－6　実証施工における打音データ

2つのデータを比べると、健全部では音圧レベルの小さい打音が不健全部では比較的大きく発生している事

がわかる。これにより、実際の建物外壁タイル壁面においても健全部と不健全部の判別が可能な事が確認された。

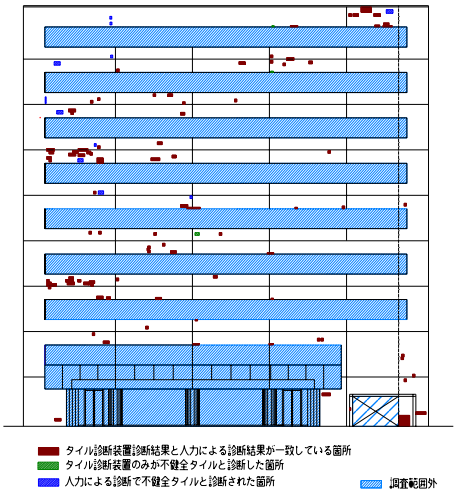
次に診断結果のデータを基にタイル不健全部位置とひび割れ位置を示した診断結果図を図－7に示す。この診断結果図を作成する事で、タイル壁面を補修する際に不健全部やひび割れ位置を特定するデータとして使用でき、一定期間毎に診断する事で建物長期修繕計画のデータとしても活用できる。



図－7　外壁タイル診断結果図

今回行った実証施工で得られた診断結果の妥当性について検証する為、実証施工での診断結果（図－7）と人間による打診結果を比較し図－8に示す。図－8の塗りつぶされている箇所が診断装置による結果と人力による打診結果が一致している箇所である。

626㎡のタイル外壁面に対して、タイル不健全部と診断されたタイルの面積は 9.27 ㎡、診断装置による診断結果と人力による検証結果が一致した面積は 8.71 ㎡（不健全部面積の 94%）であった。また、診断装置による診断結果が一致しない箇所は、健全部を不健全部として診断した箇所も含めて 0.79 ㎡（不健全部面積の 8.5%）という結果になった。この結果から外壁タイル診断装置を用いた診断結果は、人力で行った診断結果と同程度の妥当性がある事を確認できた。



図－8　診断装置による診断結果と
人力による診断結果

表－1　診断装置と人力の診断結果合致割合

	タイル不健全	装置・人力合致	装置・人力不一致
面積（㎡）	9.269	6.712	0.767
割合（%）	—	94.0	8.5

診断実施面積626㎡に対する値

5. おわりに

今回開発した外壁タイル診断装置は、診断における無足場化や高所作業の削減を実現し、騒音などの外的影響がある屋外環境下においても外壁タイル診断が可能な事が確認された。しかし、ベランダや排気ダクト等障害物近傍の診断不可能部分への対策や、設備の簡易化による作業人員の削減などの課題も多い。

今後、設備の簡易化や装置の軽量化、診断可能範囲を拡大する機構の開発などを進め、様々な建物形状でも診断が可能な装置の開発を進めると同時に、タイル壁面以外の診断・検査装置を視野に入れた開発を行いたいと考えている。

【参考文献】

1）福田,他,壁面作業ロボットの開発（その2）,東急建設技術研究所報 No.20,p221-223,1994
2）難波　精一郎,音の科学,p1-34,1989
3）後藤,細貝,他,ウェーブレット変換を用いた配管腐食診断システム,日本機械学会論文集 C 編、64-625 号、pp. 3342-3347,(1998)

43. 油圧作動油の粘度特性最適化による建設機械の燃費改善

デグサジャパン株式会社：○浜口　仁
RohMax USA Inc. - Douglas Placek
RohMax Additives GmbH - Klaus Hedrich

1．はじめに

油圧ショベルのように油圧システムを多用する建設機械では、油圧ポンプの効率が機械全体の燃料消費に及ぼす影響が非常に大きい。油圧ポンプの効率は油圧作動油の粘度の影響を強く受けることも旧知の事実である。

作動油の主成分としては、鉱油系のベースオイルが通常用いられるが、油温が上昇すると粘度が低下するため、高負荷作業時にはポンプの内部漏れが増加し、効率は著しく低下する。一方、低温時には粘度が上昇するため、ポンプや配管部の流動抵抗が増加して燃費が悪化する。

作動油の粘度-温度特性を改善するために、粘度指数向上剤と呼ばれる高分子化合物を添加することにより、高温時の粘度低下と低温時の粘度上昇を抑制することができるが、運転中の負荷により高分子が機械的にせん断され、運転時間とともに作動油の粘度が低下する問題があった。

本研究では、せん断安定性に優れた粘度指数向上剤を適用することにより、長期にわたりポンプ効率を大幅に改善できることを報告する。

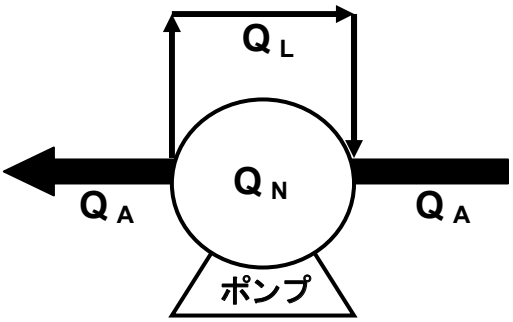
2．ポンプ効率

実用の油圧ポンプでは、図―１に示すように、作動油の内部漏れ（Q_L）により、実際の吐出流量（Q_A）は公称流量（Q_N）より少なくなる。

$$Q_A = Q_N - Q_L$$

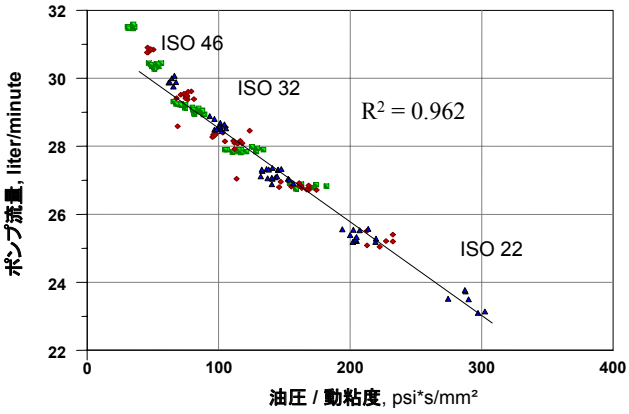
また、ポンプ効率（V_E）は、下式で表される[1)]。

$$V_E\% = 100 \times Q_A / Q_N$$



図―１　油圧ポンプの内部漏れと流量の関係

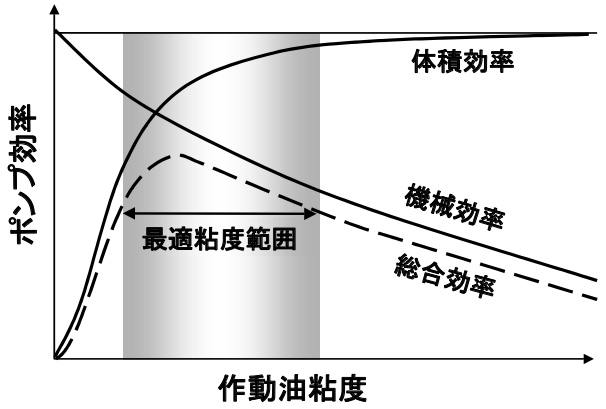
内部漏れはポンプの吐出圧力が高くなるほど、また、作動油の粘度が低くなるほど増加する。図―２にベーンポンプにおける吐出圧/作動油粘度とポンプ流量の関係の一例を示す。



図―２　ベーンポンプの吐出量と圧力/粘度
(Eaton-Vickers V20 ポンプ)

これより、油圧ポンプの体積効率は、作動油の動粘度と比例関係にあり、動粘度が高くなるほど効率は高くなり、動粘度が低くなるほど効率は低下することがわかる。一方、ポンプの機械効率は、作動油の粘性抵抗により、動粘度が高くなるほど

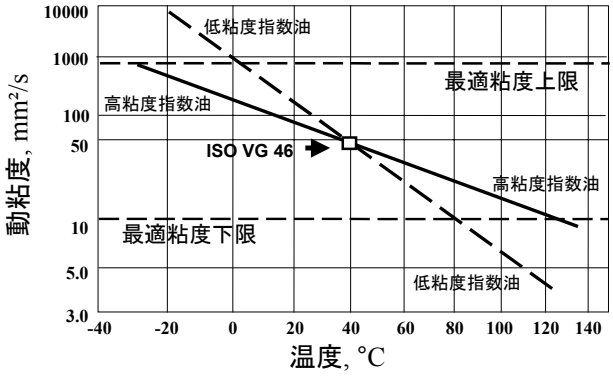
低下し、動粘度が低くなるほど向上する。ポンプの総合効率は、体積効率と機械効率の積で表わされるため、図―３に示すように、総合効率が高くなる最適粘度領域が存在する[2)]。



図―３　作動油粘度とポンプ効率の関係

３．油圧作動油の粘度・温度特性

一般に知られているように、非水系の潤滑油は、低温では粘度が高く、高温では粘度が低下するという特性を有している。温度変化に対する粘度の変化の程度を表わす尺度として粘度指数が用いられ、図―４に示すように、粘度指数が小さいと温度変化に対する粘度の変化が大きく、粘度指数が高いと温度変化に対する粘度の変化が少ない[3)]。



図―４　油圧作動油の粘度温度特性
（ISO VG 46 の例）

これより、高粘度指数油は、低粘度指数油と比較して、広い温度範囲で最適粘度領域に留まることがわかる。言い換えると、高粘度指数油は、低温域で粘度が低く、高温域で粘度が高いことがわかる。従って、高粘度指数油は、低温時の粘度増加による機械効率の低下を防ぎ、同時に高温時の粘度低下による体積効率の低下を抑制する効果が期待できる。

４．ポンプ試験

上述した高粘度指数油のポンプ効率に及ぼす影響を確認するために、ベーンポンプとピストンポンプを用いてポンプ試験を実施した。試験に用いた油圧回路を付図―１に、ポンプの仕様を表―１に示す。

表―１　供試ポンプの仕様と試験条件

ポンプ形式	斜板型ピストンポンプ	ベーンポンプ
ポンプ押しのけ容積, cm^3/rev	28.6	21.3
ポンプ回転数, min^{-1}	2,100	1,500
圧力範囲, MPa	0～34.3	0～24.5
温度範囲, ℃	60～100	20～100

次に、試験に用いた供試作動油を調製するに当たり、せん断安定性の異なる４種類の粘度指数向上剤（いずれもポリメタクリレート系）を使用した。その内容を表―２に示す。

表―２　供試油に用いた粘度指数向上剤

コード	平均分子量	KRL 試験*における粘度低下率, %
A	約２万	６
B	約４万	１１
C	約６万	１６
D	約１５万	２０

*CEC L-45-A99 法[4)] 20Hr 試験による

ポンプ試験に用いた供試油の粘度データをまとめて表―３に示す。各供試油は、鉱油系基油（Group II）にデニソン HF-0 相当の主添加剤を加え、粘度グレードに応じて基油と粘度指数向上剤

の添加率を調整した。

表—３　供試油の内容と粘度特性

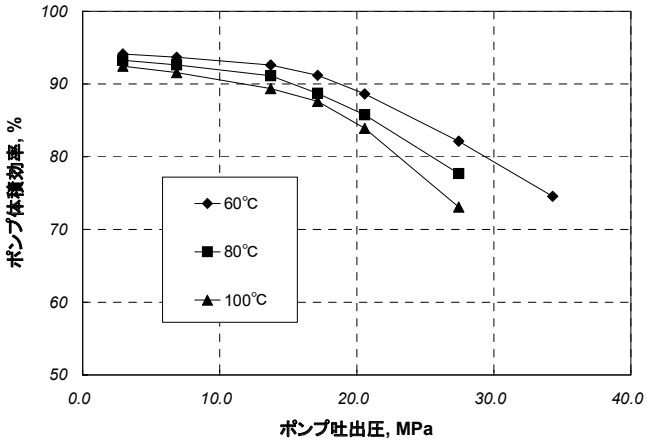
供試油コード	ISO VG	用いた VII	40℃粘度	100℃粘度	粘度指数
P-0	46	なし	45.9	6.8	103
P-1	46	B	44.7	7.2	122
P-2	46	B	46.1	7.9	141
P-3	46	B	47.8	8.6	158
P-4	46	B	46.0	9.7	202
P-5	46	A	46.0	8.4	160
P-6	46	C	45.4	8.4	162
P-7	46	D	45.2	8.3	162
V-0	46	なし	42.7	6.6	100
V-1	46	A	43.3	7.8	151
V-2	46	B	44.9	8.1	153
V-3	46	C	45.5	8.1	153
V-4	46	D	44.1	7.9	153
V-5	46	A	50.3	9.9	189
V-6	46	B	46.2	9.6	198
V-7	46	C	45.4	9.6	205
V-8	46	D	45.3	9.9	212

ポンプ効率の算定にあたっては、一定の温度・圧力条件におけるポンプ駆動モータの消費電力ならびに吐出流量より求めた。本稿では割愛するが、ポンプ効率測定の繰り返し精度は±１％以内であった。

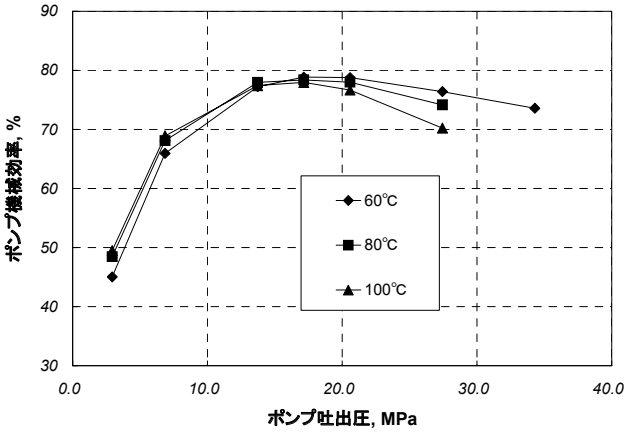
５．結果

はじめに、斜板型ピストンポンプに供試油 P-0（粘度指数向上剤を含まないシングルグレード油）を用いて、圧力および作動油の温度（粘度）がポンプの体積効率に及ぼす影響を検討した結果を図—５に示す。これより、ポンプの体積効率は、吐出圧が高くなるほど、また、温度が高くなるほど低下することがわかる。

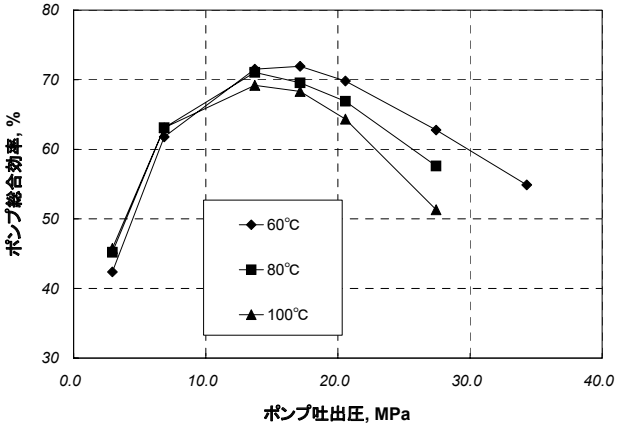
次に、同じく圧力と油温がポンプの機械効率に及ぼす影響を図—６に示す。これより、吐出圧が 10 MPa 以下の低圧条件下では、油温が低いほど機械効率が低下するが、これは、作動油の粘性抵抗が大きくなるためであり、一方、吐出圧が 20 MPa 以上の高圧条件下では、油温が高いほど機械効率が低下するが、これは、油膜厚さの低下により、境界潤滑領域が増加するためと考えられる。



図—５　ポンプ吐出圧と体積効率の関係
（斜板型ピストンポンプ；シングルグレード油）



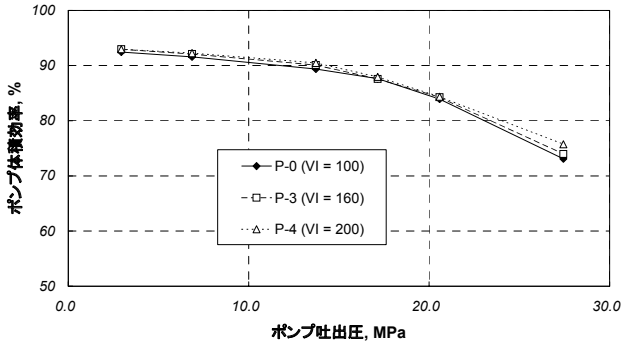
図—６　ポンプ吐出圧と機械効率の関係
（斜板型ピストンポンプ；シングルグレード油）



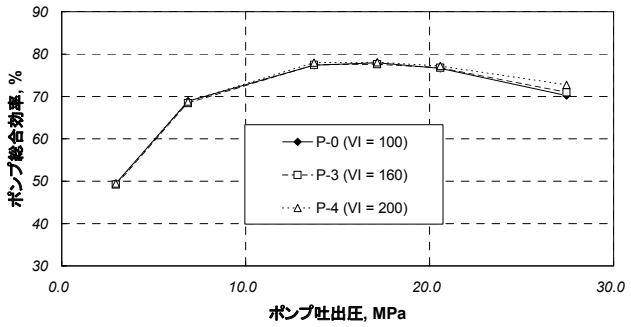
図—７　ポンプ吐出圧と総合効率の関係
（斜板型ピストンポンプ；シングルグレード油）

次に、ポンプ効率に及ぼす作動油の粘度指数の

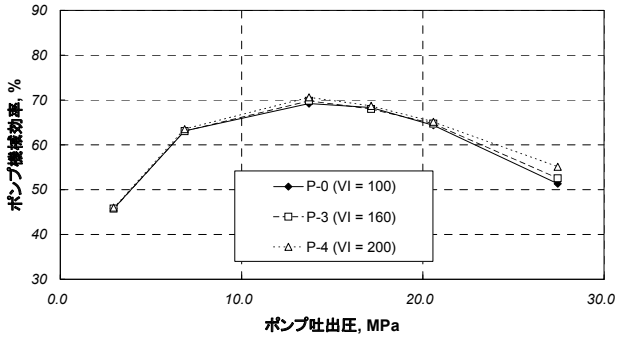
影響を把握するために、斜板型ピストンポンプに供試油 P-0, P-3 および P-4 を用いて実験を行った。その結果を図―８から１０に示す。



図―８　ポンプ吐出圧と体積効率の関係
（ピストンポンプ；マルチグレード油）



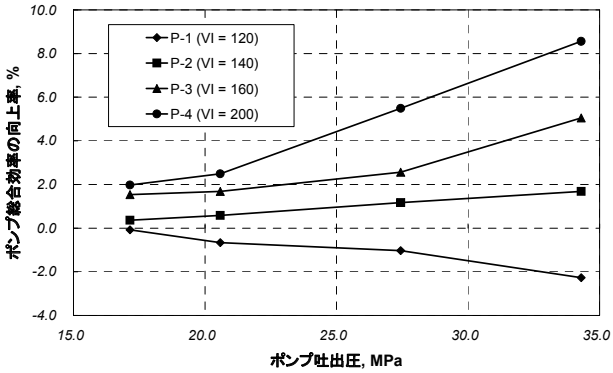
図―９　ポンプ吐出圧と機械効率の関係
（ピストンポンプ；マルチグレード油）



図－１０　ポンプ吐出圧と総合効率の関係
（ピストンポンプ；マルチグレード油）

これらの結果から、高粘度指数作動油は、高温時に粘度低下が抑制されるために、内部漏れを低減し、油膜形成も容易になるため、ポンプ効率を維持することがわかる。この傾向は、吐出圧が高くなるほど顕著である。

マルチグレード作動油の粘度指数とポンプ総合効率の向上率を、シングルグレード油との比較で、まとめて図―１１に示す。これより、高温高圧条件時には、粘度指数 200 の供試油で、最大で約８％の効率向上が認められた。一方、粘度指数 120 の供試油については、ポンプ効率はむしろ低下している。これは、粘度指数向上剤の一時的せん断により、ポンプ内での実効粘度がシングルグレード油よりも低くなるためと思われる。

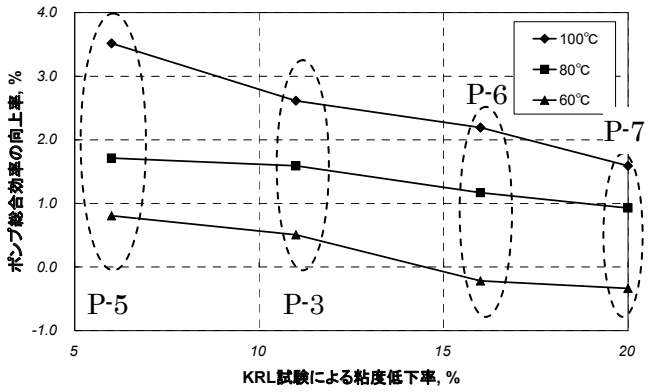


図－１１　作動油の粘度指数とポンプ効率
（ピストンポンプ；油温＝１００℃；
シングルグレード油 P-0 との比較）

上図で得られた高粘度指数油のポンプ効率向上効果は、適切なせん断安定性を有する粘度指数向上剤を用いた場合にのみ得られる効果である。この点を確認するために、せん断安定性の異なる粘度指数向上剤を用いて、粘度指数を 160 に調製した供試油 P-3, 5, 6 および 7 について同様の実験を行った結果をまとめて図―１２に示す。

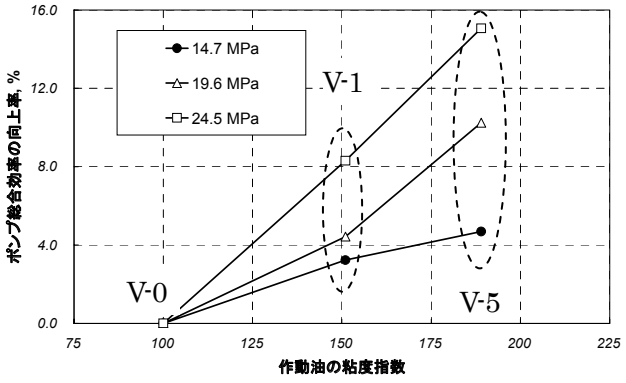
これより、せん断安定性に劣る粘度指数向上剤を用いた場合、ポンプ効率の向上効果は著しく低下することがわかる。

次に、ベーンポンプを用いてマルチグレード作動油の粘度指数とポンプ総合効率の向上率との



図－１２　作動油のせん断安定性とポンプ効率
（ピストンポンプ；吐出圧 = 27.4 MPa ）

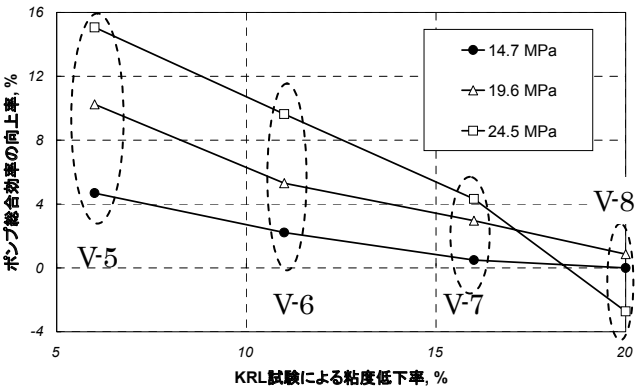
関係を、シングルグレード油との比較でまとめて図―１３に示す。これより、ピストンポンプの場合と同様に、作動油の粘度指数が高いほどポンプ効率は向上し、この傾向は吐出圧が高いほど顕著となる。ベーンポンプの場合、ピストンポンプと比較して、内部漏れが大きいため、粘度指数の影響が現れやすく、粘度指数 190 で最大約 15%の効率向上が認められた。



図－１３　作動油の粘度指数とポンプ効率
（ベーンポンプ；油温＝１００℃）

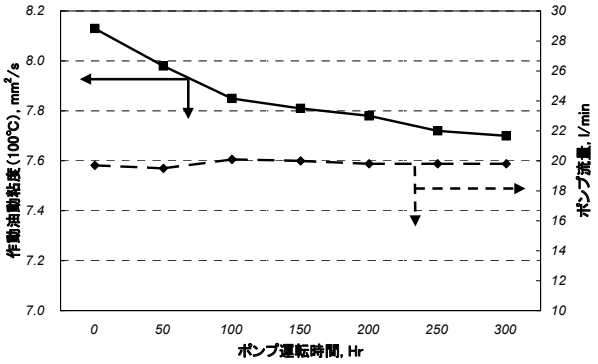
次に、ベーンポンプにおける、作動油のせん断安定性とポンプ効率との関係をまとめて図―14に示す。ピストンポンプの場合と同様に、せん断安定性の悪い粘度指数向上剤を用いると、ポンプ効率は著しく低下することがわかる。

油圧作動油は、使用中にポンプの機械的せん断により粘度低下するが、適切な粘度指数向上剤を



図－１４　作動油のせん断安定性とポンプ効率
（ベーンポンプ；粘度指数 200 油の比較）

選択することにより、ポンプ効率の低下を防止することができる。その一例として、ベーンポンプを 300 時間連続運転した場合の作動油の粘度推移と、ポンプ流量の関係を図―１５に示す。



図－１５　作動油の粘度とポンプ流量の推移
（ベーンポンプ；供試油 V-3；圧力＝24.5 MPa）

これより、作動油粘度は運転時間の経過とともに徐々に低下するが、ポンプ流量はほぼ一定であることがわかる。これは、粘度指数向上剤の永久せん断により作動油の見かけ粘度は低下するが、ポンプ内の実効粘度は、粘度指数向上剤の一時的せん断の影響を受け、一定の値を保持しているためと考えられる。すなわち、永久せん断により分子量が低くなるため、一時的せん断が小さくなる現象により、両者の和がほぼ一定で推移するものと思われる。

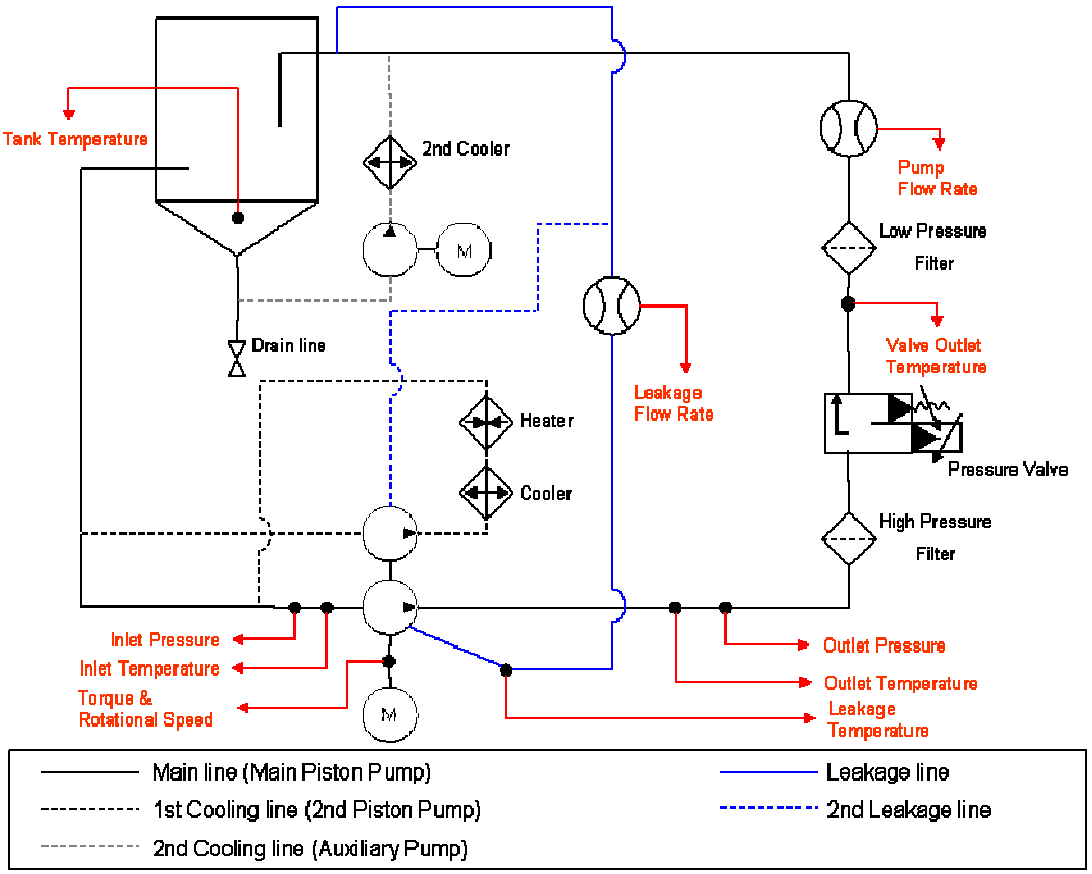
６．まとめ

ピストンポンプとベーンポンプを用いた一連のポンプ効率試験結果から以下の知見が得られた。

- 油圧作動油の粘度指数を高めることにより、ポンプ効率は向上する。
- その効果は、高温・高圧条件になるほど顕著となる。
- 粘度指数向上剤のせん断安定性を高めることにより、ポンプ効率はさらに向上するが、せん断安定性の悪い粘度指数向上剤を用いると、効率は低下する。
- せん断安定性に優れた粘度指数向上剤を用いることにより、長期の使用において一定のポンプ効率を維持することができる。

［引用文献］

1) P.W. Michael, S.N. Herzog, T.E. Marougy, “Fluid Viscosity Selection Criteria for Hydraulic Pumps and Motors”. NCFP paper 100-9.12. International Exposition for Power Transmission and Technical Conference. 4-6 April 2000, Chicago, IL, USA.
2) G.E. Totten, Handbook of Hydraulic Fluid Technology, Marcel Dekker, New York, 2000, p. 27.
3) S.N. Herzog, C.D. Neveu, D. Placek, “Boost Performance and Reduce Costs by Selecting the Optimum Viscosity Grade of Hydraulic Fluid”. Lubrication and Fluid Power Expo, Indianapolis, IN, USA. May 4-8, 2003.
4) CEC Test Method: CEC-L-45-A99. “Taper Roller Bearing Test”. 1999.



付図―１　ポンプ試験油圧回路図（ピストンポンプ）

44. 鉄道営業線上に高架橋を構築する移動式直接高架施工機

東急建設㈱：○井藤　幹雄、荻原　克巳、平井　幸雄

1. はじめに

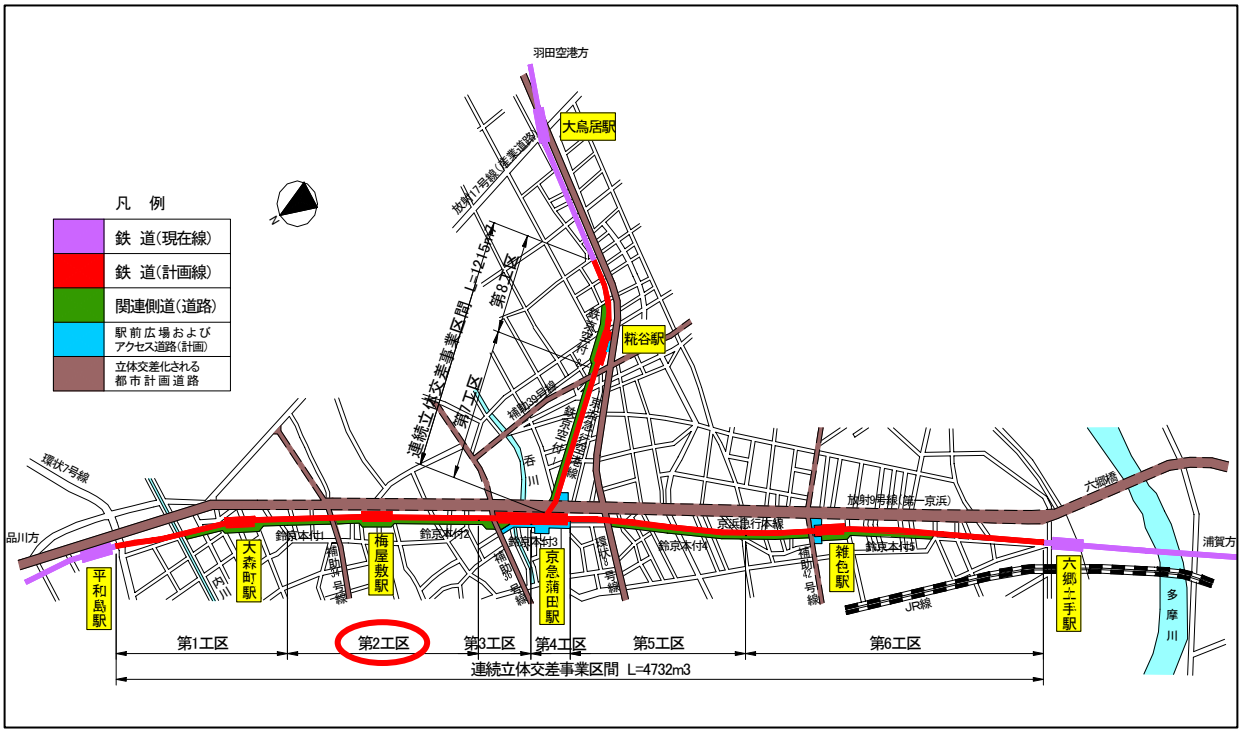
都市交通網の改善を目的として整備される鉄道の複々線や立体交差化工事は、既設路線の安全性を確保することはもちろん騒音・振動など周辺環境対策が要求されることから、多くの時間的・空間的制約のもとで行うことが必要である。

京浜急行電鉄㈱発注の京急蒲田駅付近連続立体交差事業は蒲田駅付近約 6.0km の立体交差化を行うものであるが、東急建設㈱、㈱奥村組、㈱森本組との3社共同企業体が担当する第2工区においても敷地の制約等があり、仮線用地を使用せずに営業線直上に高架橋を構築することになった。そこで、中間に支保工を設けずに高架橋を構築できる「鉄道ラーメン高架橋のプレキャスト構築工法」を提案した。本工法での施工にあたり、東急建設㈱は、京浜急行電鉄㈱、㈱タダノとの共同で、鉄道営業線を跨いでクレーン作業を行う「移動式直接高架施工機」を開発した。「移動式直接高架施工機」は、営業線を跨ぐ広い作業床を持ち、その上に大型油圧クレーンを装備したものである。本報告では、本工事及び「移動式直接高架施工機」の概要について報告する。

2. 工事概要

本工事は交通の円滑化、安全性の向上、地域の発展利便性の向上を目的とし、都市高速鉄道京浜急行電鉄本線の平和島駅から六郷土手駅までの延長約 5.4km（事業区間約 4.7km）の区間、及び同空港線の京急蒲田駅から大鳥居駅までの延長約 2.1km（事業区間約 1.3km）の区間を連続的に立体交差化する「京急蒲田駅付近連続立体交差事業」である。工期として平成 14 年1月から平成 24 年 3 月までを予定している。

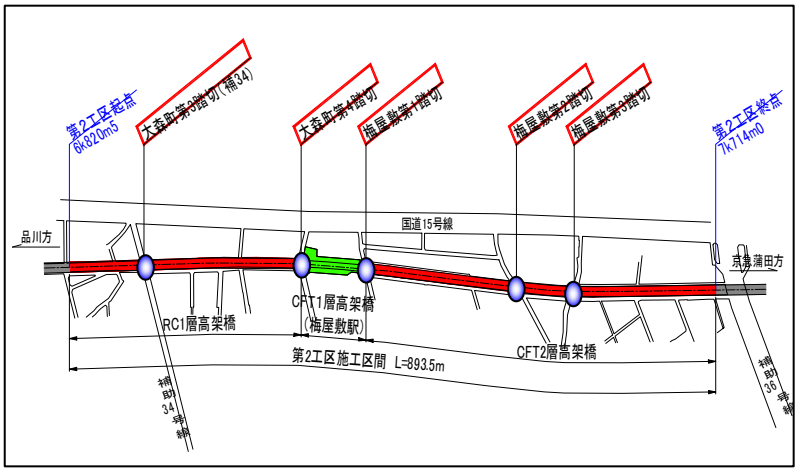
立体化交差化により、環状8号線、第一京浜など計 28 箇所の踏切道が解消される。全体事業の概要を**図－1**に示す。



図－1　全体事業の概要

当 JV は事業区間約 6.0km のうち工事延長 893.5m（第2工区）を担当し、全工区において直上工法にて施工する。京急蒲田駅付近連続立体交差化工事を早急に進めるために、施工のための用地買収の縮小と施工費の圧縮が上げられている。その一環として建築限界の縮小を行うが、現在の運行速度（120km/h）を維持するために軌道内覆工ができないなど厳しい条件の中での施工となる。**図－2**に第2工区工事概要を示す。

施工延長　　L＝893.5m
踏切除去数　　5　箇所
除去踏切名称
① 大森町第３踏切（補 34）
② 大森町第４踏切
③ 梅屋敷第１踏切
④ 梅屋敷第２踏切
⑤ 梅屋敷第３踏切



図－2　第2工区工事概要

この厳しい条件の中で、安全性の確保、施工費の低減、品質の確保が図られる工法として、建築限界を縮小し無支保工で高架橋を構築できる「鉄道ラーメン高架橋のプレキャスト構築工法」を提案し、この工法で施工するための「移動式直接高架施工機」を計画し製作した。

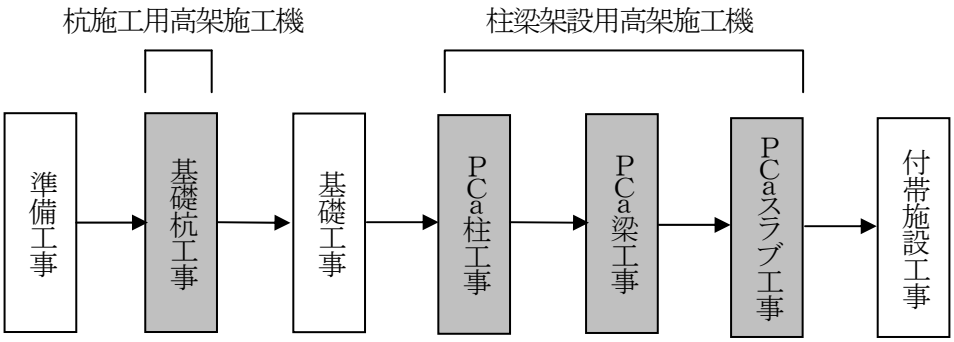
3. 工法の提案

「鉄道ラーメン高架橋のプレキャスト構築工法」は、施工の合理化・省力化・急速化を実現するため、型枠・支保工機能を有する工場製作のプレキャスト部材を用いて、経済性、耐震性に優れたラーメン形式の高架橋を構築する工法として提案した。「鉄道ラーメン高架橋のプレキャスト構築工法」の特長を下記に示す。

① 型枠支保工兼用のプレキャスト部材を用いるため、現場に於ける型枠・支保工の組立・解体作業の省力化が可能
② 従来工法に比べ、作業効率が向上することから、終電から始発までの限られた時間でも大幅な工期の短縮が可能
③ 梁・床版支保工などの仮設工事削減により、営業線の安全運行の確保ができ、また線路閉鎖・き電停止回数や危険な高所作業が減少し、さらに作業騒音も抑制
④ 工期の短縮や工事の省力化により、トータルコストの低減が可能
⑤ 天候に左右されない工場でプレキャスト部材を製作するため、安定した品質を確保することが可能
⑥ プレキャスト部材を使用するため、型枠や熱帯材の使用を大幅に削減

4. 施工手順

本高架橋の構築においては、基礎杭の施工を行う「杭施工用」とプレキャスト部材の架設を行う「柱梁架設用」の「移動式直接高架施工機」2基を計画して使用する。基礎杭工事では基礎杭の施工位置まで杭施工用高架施工機を移動させて、作業床上に装備されたクレーンを使用して開口部に掘削機を設置し基礎杭の掘削を行う。その後、クレーンを使用して鉄筋籠の建込み作業を行い、コンクリートを打設し基礎杭の築造を行う。工場製作のプレキャスト柱・梁・スラブは、き電停止後に営業線上をモーターカー及び台車にて施工場所まで運搬し、柱梁架設用高架施工機に装備されたクレーンにて建込み及び組立を行い、ラーメン高架橋を築造する。本工事の施工フローを**図－3**に示す。



図－3　施工フロー

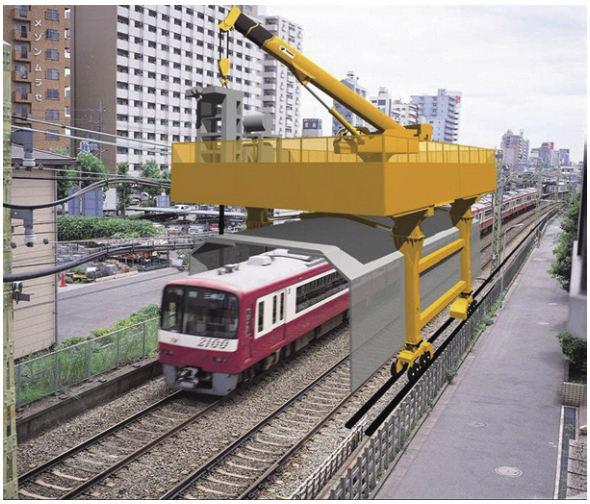
5. 移動式直接高架施工機

本工事では、基礎杭の施工を行う「杭施工用」とプレキャスト部材の架設を行う「柱梁架設用」の2基の移動式直接高架施工機を製作した。移動式直接高架施工機の特長を下記に示す。移動式直接高架施工機の施工イメージ図を**図－3**に示す。

① 営業線を跨ぐような形で作業床を設置し、その上にクレーンを装備していることから、線路敷地内での高架工事が可能

② 工事区間によって線路敷地の幅が異なること、また駅等の構造物があることから、作業床の幅や高さが油圧装置を用いて自在に調整可能

③ クレーンの油圧ユニットに騒音の小さい電動モーターを採用することで、夜間作業の騒音を抑制



図－3　移動式直接高架施工機による施工イメージ図

5－1. 杭施工用高架施工機の仕様

高架橋の基礎杭を施工するにあたり、掘削機の移動及び基礎杭用の鉄筋籠建込み作業を行うクレーンを装備し、基礎杭施工の作業床を設けた杭施工用高架施工機である(**写真－1**)。**表－1** に杭施工用高架施工機の仕様を示す。

表－1　杭施工用高架施工機の仕様

クレーン	クレーン能力	25t × 10m
	最大揚程	25m
	最大作業半径	22m
	ブーム長さ	10.6m～25.0m
架　台	作業床寸法	長さ21m 幅10.55m～13.2m
	ジャッキアップ量	500mm
	走行速度	13.4m/30min
	作業床搭載	掘削機25t 鉄筋籠2.5t×5本
質　量		190t(積載物含まず)



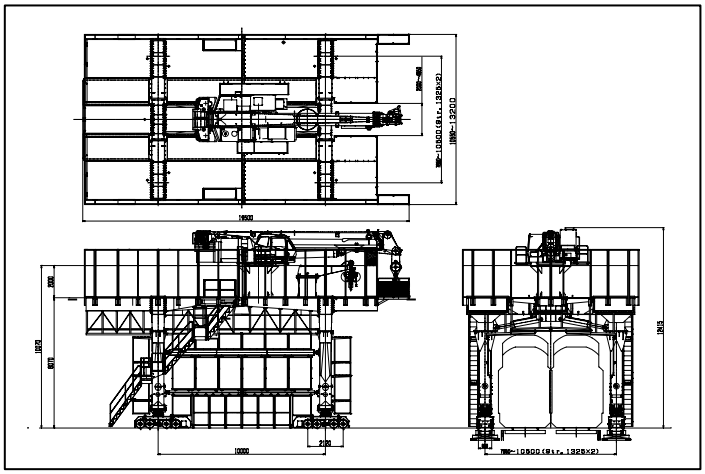
写真－1　杭施工用高架施工機仮組状況(塗装前)

5－2. 柱梁架設用高架施工機の仕様

工場で製作されたプレキャスト部材の柱・梁を装備されたクレーンにて建込み及び組立を行う柱梁架設用高架施工機である(**写真－2**)。**表－2**に柱梁架設用高架施工機の仕様、**図－4**に外観図、**図－5**に施工概要図を示す。

表－2　柱梁架設用高架施工機の仕様

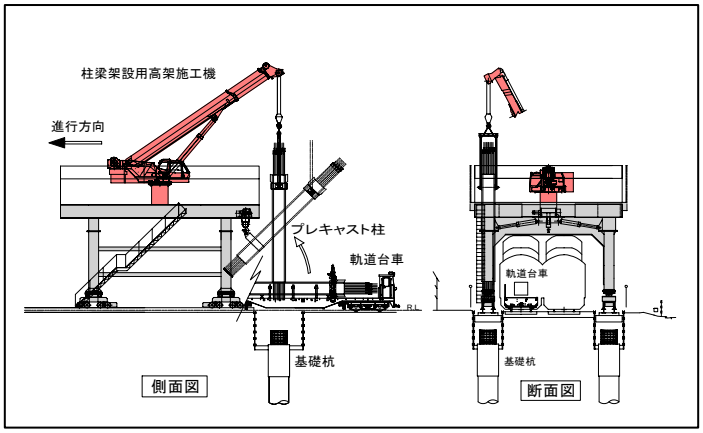
クレーン	クレーン能力	30t　×　8m
	最大揚程	25m
	最大作業半径	22m
	ブーム長さ	10.6m～25.0m
架　台	作業床寸法	長さ 19.5m　幅 10.55m～13.2m
	ｼﾞｬｯｷｱｯﾌﾟ量	500mm
	走行速度	13.4m/30min
質　量		205t(積載物含まず)



図－4　柱梁架設用高架施工機外観図



写真－2　柱梁架設用高架施工機仮組状況



図－5　柱梁架設用高架施工機による施工概要図

6. おわりに

移動式直接高架施工機の工場製作は、杭施工用、柱梁架設用とも平成15年9月末に完了している。平成16年度には杭施工用の現地組立を行い、杭施工用高架施工機による基礎杭の施工を開始する。また、柱梁架設用高架施工機の現地組立を続けて行い、クレーンを用いたプレキャスト構築工法による鉄道高架工事を開始する予定である。

最後に、本機の開発に際して発注者である京浜急行電鉄㈱の関係各位から頂いたご指導、ご協力に心から感謝申しあげたい。

平成 16 年度　建設施工と建設機械シンポジューム実行委員会・委員名簿

（順不同・敬称略）

	委員名	機関名	所属・役職
委員長	近藤　悟	㈳日本建設機械化協会	常務理事
副委員長	渡辺和弘	国土交通省	総合政策局　建設施工企画課　機械施工企画官
委員	山元　弘	㈱土木研究所	技術推進本部　先端技術チーム　主任研究員
	福川光男	鹿島道路㈱	専務取締役　生産技術本部担当
	大坂　衛	大成建設㈱	土木本部　機械部　部長
	星野春夫	㈱竹中工務店	技術研究所　先端研究開発部 アドバンストコンストラクション部門　主任研究員
	松本　毅	コマツ	開発本部　商品企画室　担当部長
	有光秀雄	コベルコ建機㈱	カスタマーサポート部　サービス技術グループ シニアマネージャー
	雨宮信一	新キャタピラー三菱㈱	相模開発センター　トラクタ開発部長
	田中利昌	日立建機㈱	建設システム事業部　技術部　部長
	外村圭弘	西尾レントオール㈱	東京支店　取締役支店長
	森實　裕	㈳日本機械土工協会	副会長
	鈴木英隆	㈳日本建設機械化協会	技師長
	浅野邦彦	㈳日本建設機械化協会	技術部長
	近藤治久	㈳日本建設機械化協会	調査部長

建設施工と建設機械シンポジウム論文集（平成16年度版）

平成 17 年 1 月 14 日　　印刷
平成 17 年 1 月 20 日　　発行

編　集
発行所　社団法人　　日本建設機械化協会
〒105-0011　東京都港区芝公園３－５－８
（機械振興会館内）
ＴＥＬ　(03)3433－１５０１
ＦＡＸ　(03)3432－０２８９

複 製 厳 禁

印刷所　昭和情報プロセス㈱
東京都港区三田5－14－3