

平成18年度

建設施工と建設機械シンポジウム

論 文 集

平成18年11月15日～16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：国土交通省
経済産業省

独立行政法人 土木研究所

社団法人 土木学会

社団法人 日本機械学会

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	山之内博行	(社)日本建設機械化協会	施工技術総合研究所 技師長
副委員長	三石真也	国土交通省	総合政策局 建設施工企画課 機械施工企画官
〃	榎村康史	(社)日本建設機械化協会	技師長
委員	山元弘	(独)土木研究所	技術推進本部 先端技術チーム 主席研究員
	福川光男	鹿島道路(株)	専務取締役 生産技術本部担当
	大坂衛	大成建設(株)	土木本部 機械部 部長
	星野春夫	(株)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
	大塚和夫	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(株)	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
	村上誠	新キャタピラー三菱(株)	直販部長
	田中利昌	日立建機(株)	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(株)	東京支店 取締役支店長
	川本正之	(社)日本機械土工協会	技術委員長
	藤野健一	(社)日本建設機械化協会	技師長兼調査部長
	浅野邦彦	(社)日本建設機械化協会	技術部長
	西脇徹郎	(社)日本建設機械化協会	標準部長

平成18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. 【施工機械・装置】

1. 「油圧ショベル用転倒時保護構造(ROPS)キャブの開発」
日立建機株式会社：○田村 和久、小松 和則、飯島 亨 … 1
2. 「フルバッテリー駆動ミニホイールローダの開発」
コマツ 研究本部建機第一イノベーションセンタ：○松村 幸紀、諏訪 正登、関 正暢 … 5
3. 「ニューマチックケーソン (New DREAM) 工法における遠隔地耐力試験装置の開発」
大豊建設株式会社：上月 直昭、大久保 健治、今村 秀雄、○長崎 正幸 … 9
4. 「ロボット浚渫船「カスザカス」における自動化システムについて」
国土交通省 関東地方整備局 霞ヶ浦河川事務所 機械課長：○程原 雄二
三菱重工業株式会社 船舶技術部 海洋計画G長： 矢野 州芳
エムイーエンジニアリングサービス株式会社 制御システム事業部 事業部長： 蒲池 薫 … 13
5. 「斜面用横引き4トラックアスファルトペーパーの開発と施工」
大成ロテック株式会社：○多田 勝俊、添田 耕治、小泉 慎太郎 … 19
6. 「大径3軸型深層混合処理工法ー (CDM-レムニ2/3(ツースリー))の開発と施工ー」
清水建設株式会社 土木技術本部 技術第一部：○守安 卓弥
国土総合建設株式会社 技術本部： 原 俊郎
株式会社不動テトラ ジオ・エンジニアリング事業本部： 野田 洋 … 23
7. 「多目的作業車をベースとした(維持・災害)ユニットの開発」
国土交通省 四国地方整備局 四国技術事務所：向井 一夫
○大岡 正憲、中田 雄一 … 29
8. 「災害復旧時における安全施工技術の検討(遠隔式大型土のう設置装置の開発検討)」
国土交通省 東北地方整備局 東北技術事務所 機械課：鹿野 安彦
○宮本 典明 … 33
9. 「災害教訓を基にした排水ポンプ車の改良について」
国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 機械課長： 本間 政幸
前) 機械課 整備係長： 笠原 邦昭
整備係主任：○高井 謙一 … 37
10. 「操作性を向上させた歩道除雪車の開発について」
国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 機械課長：○本間 政幸
機械課 機械設計係長： 小林 弘朗
機械設計係主任： 齋藤 剛 … 41
11. 「洗浄水を循環再利用する水循環式排水管清掃車の開発」
国土交通省中部地方整備局 中部技術事務所機械課：○桜田 明彦 … 47

2. 【トンネル・シールド】

- 1 2. 「新小型ジャイロの開発と『曲がり削孔式液状化対策工法』～構造物直下を地盤改良する施工法～」
五洋建設株式会社 技術研究所：○植田 勝紀 … 5 3
- 1 3. 「シールドのビット交換技術『リレービット工法』」
鹿島建設株式会社：○佐々木 哲也；永森 邦博；辻井 孝 … 5 9
- 1 4. 「急勾配シールドトンネルの施工における品質確保方法」
東京都下水道局 北部建設事務所工事第一課長：小松原 修義
東京都下水道局 北部建設事務所工事第一課 工事第二係長：土居 正司
株式会社奥村組 東京支社 機械部工務課長：○柴崎 貞典 … 6 5
- 1 5. 「狭小な立坑到達の推進工事における回収型掘進機の適用」
株式会社奥村組 東京支社 土木工事第三部：河井 弘幸、○西沢 武司 … 7 1
- 1 6. 「周辺環境および猛禽類に配慮したトンネル工事施工」
株式会社フジタ 東京支店：○三浦 孝、須貝 美代治
国土交通省 関東地方整備局 長野国道事務所：梶原 竹生 … 7 7
- 1 7. 長距離・高速施工シールド工事の施工設備について
-東西連係ガス導管工事（第1工区）施工実績（その1）-
東京湾湾央の高水圧下における機械式地中接合工について
-東西連係ガス導管工事（第1工区）施工実績（その2）-
鹿島建設 東京土木支店：○米沢 実、亀井 良至、隈部 毅彦 … 8 3

3. 【施工システム】

- 1 8. 「路面下空洞探査技術の開発」
関東地方整備局 関東技術事務所 機械課：○宮内 将彰、渡部 修
国土交通大学校 建設部 建設二科：神田 剛 … 9 3
- 1 9. 「4軸処理機を用いた深層混合処理工法」
(株)竹中土木：○枘田 旬祐、秀島 康史、大西 常康 … 9 7
- 2 0. 「超高層RC集合住宅建設工事における最新の機械化施工『工業化工法を支える機械施工システム』」
清水建設株式会社：西田 典宏、門脇 均、○廣瀬 豊 … 1 0 1
- 2 1. 「軌陸式重量物運搬台車の開発と鉄道営業線高架化工事への実用化」
東急建設株式会社：○中村 聡、荻原 克巳、安藤 喜敏 … 1 0 7
- 2 2. 「水無川における鋼製スリットの無人化施工」
株式会社フジタ：○中村 好典 … 1 1 1

4. 【施工管理・理論】

23. 「新潟県中越地震による災害廃棄物処理の実際と提案」
佐藤工業株式会社 事業開発本部 環境事業部：石橋 稔、○鈴木 茂生 … 115
24. 「早期地震警報による工事現場の地震時安全性向上」
鹿島建設株式会社横浜支店安全環境部：○柳瀬 茂樹
同 機械部：水谷 亮
同 横浜支店建築部：永田 鉄也 … 119
25. 「路面反射音による排水性舗装の排水機能評価手法の開発」
国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 機械課長：本間 政幸
機械課 機械設計係長：○小林 弘朗
機械設計係主任：齋藤 剛 … 123
26. 「建設混合廃材リサイクル処理機械のための分別機能に関する基礎的研究」
東北大学大学院 環境科学研究科：高橋 弘
東北大学大学院 環境科学研究科 (現) 株式会社ワイ・イー・シー：○中嶋 健太郎
日立建機株式会社：橋本 久儀 … 127
27. 「工事における音源別騒音発生量の分析」
独立行政法人土木研究所 先端技術チーム 主席研究員：山元 弘
主任研究員：吉田 潔
国土交通省国土技術政策総合研究所 環境研究部道路環境研究室 主任研究官：○吉永 弘志 … 135
28. 「建設工事降下ばいじんの予測手法」
独立行政法人土木研究所 先端技術チーム 主席研究員：山元 弘
総括主任研究員：林 輝
主任研究員：○吉田 潔
国土交通省国土技術政策総合研究所 環境研究部道路環境研究室 主任研究官：吉永 弘志 … 141
29. 「月面探査ローバの走行性に関する実験」
呉工業高等専門学校：重松 尚久
呉工業高等専門学校専攻科：○下岡 幸司
愛媛大学：室 達朗 … 147
30. 「ステレオビジョンによる建設機械物体認識の研究」
株式会社演算工房：○高屋 英永、藤田 裕司、笠島 尚志 … 153
31. 「複数の遠隔操縦ロボットによる一連土工作業の検証(バックホウと不整地運搬車による作業)」
国土交通省 九州地方整備局 九州技術事務所 副所長：木村 直紀
国土交通省 九州地方整備局 九州技術事務所 機械課：○井上 淳 … 159

5. 【情報化技術】

32. 道路建設における情報化施工技術 ～高精度GPSのモータグレーダへの適用～
鹿島道路株式会社：○桑田 直人 … 165
33. 大型スリップフォームペーバにおける3次元数値制御による機械施工の実用性について
前田道路株式会社：○菊地 重徳、古島 勝、内山 伸一郎 … 169
34. 「『トータルステーションを用いた出来形管理要領（案）』について」
国土交通省 国土技術政策総合研究所 高度情報化研究センター 情報基盤研究室
○阿部 寛之、金澤 文彦、田中 洋一 … 175
35. 「出来形管理効率化を目的とした情報処理による計測技術の有効性」
独立行政法人 土木研究所 先端技術チーム：○二瓶 正康、山元 弘、田中 洋一 … 179
36. 「無線LANを使用したバックホウの積み出し作業管理システムの開発」
日立建機株式会社：○小倉 弘
株式会社キック：西垣 重臣
株式会社日立製作所ワイヤレスインフォベンチャーカンパニー：石野 孝 … 185
37. 「舗装工における建設機械の位置情報技術を利用した施工・施工管理の提案」
国土交通省 関東地方整備局：○金澤 哲也
国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所：○坂本 鋼三 … 189
38. 「屋外作業ロボットの操縦・監視用画像伝送・認識技術に関する研究開発」
コマツ：○永井 孝雄
株式会社サイヴァース：川村英二
株式会社アイデンビデオトロニクス：橋本 綱四郎 … 193
39. 「長距離無線LANを使った環境監視システム」
東亜建設工業株式会社：○松島 弘樹、藤本 正一、宮下 広樹 … 199
40. 「施工現場・重機へのアドホックネットワーク適用検討」
株式会社日立製作所 トータルソリューション事業部：○高野 晴之
日立建機株式会社 技術開発センタ：小倉 弘
株式会社日立製作所 システム開発研究所：清水 淳史 … 203
41. 「レーザースキャナによる出来形管理手法について」
国土交通省国土技術政策総合研究所：○田中洋一、上坂克巳、金澤文彦 … 209

1. 油圧ショベル用転倒時保護構造(ROPS)キャブの開発

日立建機（株）○田村和久、小松和則、飯島亨

1. はじめに

土工機械の多くの種類では機械の転倒時保護構造（以下 ROPS : Roll-over protection structure）が用意され、転倒時に運転員を保護する事となっている。油圧ショベルでもその構造や特性に合わせた転倒時保護構造として、日本建設機械化協会団体 JCMAS-H08 が平成 15 年に制定された。この JCMAS に基づく国際規格化を審議中で、内容も ROPS となり要求性能も上がっている。今回新たに排ガス三次規制対応として発売した ZX-3 型油圧ショベル用キャブを本 ROPS 規格に対応すべくシリーズ開発を行なった。量産適用には視界や昇降性、生産性を損なう事なく必要な強度を得る事が重要で、キャブ部材が塑性変形しながら吸収するエネルギーをシミュレーションし最適構造を決定した。又車重により要求される強度が大きく変化する為に強度部材等の追加によるシリーズ化方策を確立した。最終的には実キャブをテストベンチにかけシミュレーション結果を確認・検証、要求仕様を満足するキャブ開発を実現した。（写真 1）



写真1 ROPS キャブ搭載 ZX200-3



写真2 実機転倒事故状況 (旧 EX-5 型)

2. 規格化の動向

JCMAS-H08 が制定される以前は油圧ショベルの転倒時保護要求規格は 6 t 未満のスイング式フロント構造のミニショベルに TOPS (Tip-over protection structure) が規格化されているが 6 t 以上の油圧ショベルには ROPS 及び TOPS 等の適用が無かった。これは転倒してもフロント等他の剛性の高い部分による保護が期待できる場合がある事 (写真 2)、他の土工機械と比較して走行の頻度が低いので転倒の比率も低いと思われる観点からである。しかしながら、油圧ショベルは稼働台数が非常に多い事もあり、ミニや他土工機械と比べて比率は低いとしてもかなりの数の転倒事故が発生しており、その場合重大な人身事故となる虞がある事から油圧ショベルの ROPS の規格が必要とされた。そこで油圧ショベルの生産量が世界的に圧倒的に多い日本が規格制定

にリードすべく H10 年に社団法人日本建設機械化協会 ISO 規格部会第 2 委員会に所属の TOPS 試験分科会が発足し事故分析、実験・解析等を実施し、JCMAS 制定に至った。さらに実車実験の結果から油圧ショベルも 360 度転倒する事から本規格も油圧ショベル ROPS とし垂直と後方荷重を追加、要求性能を上げて ISO 化を進めているところである。（図 1）

	JCMAS-EOPS (JCMAS-H08)	ISO-ROPS (ISO/CD 12117-2)
側方負荷エネルギー (J)	13,000(M/10,000) ^{1.25}	13,000(M/10,000) ^{1.25}
側方負荷荷重 (N)	-	35,000(M/10,000) ^{1.2}
後方負荷エネルギー (J)	-	4,300(M/10,000) ^{1.25}
垂直負荷荷重 (N)	9.8M	12.75M

M=車体重量(Kg)

図1 EOPS-ROPS 要求性能

3. ROPS キャブ開発

(1) 開発経緯

当社では前モデルである ZX-1 型 (H12 発売) に当社で初めてキャビン自体を強化し転倒時保護を目指したキャブ、CRES(Center pillar reinforced structure)キャブを市場投入した。(写真3) 本機はプレス構造キャブの外観デザインを損なう事なく、センターピラーを中心にレインフォースを挿入し構造強化を図った。(図2)

本機を開発するに当たっても前述の TOPS 試験分科会の規格化推進状況を鑑みたものであり事前検証を精度良く予測する為にシミュレーションモデルの構築をいち早く実施した。TOPS と ROPS に要求される大きなポイントは側方吸収エネルギーを達成する事である、この実現にはある程度構造体を塑性変形させてエネルギーを確保する必要がある。これをシミュレーションで再現するには材料特性は非線形で構造も非線形である弾塑性大変形解析を実施する必要がある、さらに塑性変形が進むとパネル同士の接触が発生しエネルギー出力に大きく影響する為に各部材の接触も定義しなくてはならない。これらを比較的簡単に解析するには陽的解法を使用する事がベストと考え当社では仏 ESI 社製 PAM-CRASH を用いる事とした。パネルの材質である SPCC-SPHC の材料特性はテストピース試験を行い非線形性を入力した。図3に旧 EX-5 型キャブでの試験結果と計算結果の変形状態を示す、図4に吸収エネルギーの推移を示す。試験結果と計算結果は非常に良い一致を示し、TOPS-ROPS 設計検討に十分な精度で使用出来る事を確認した。



図2 ZX-1 CRES キャブ構造

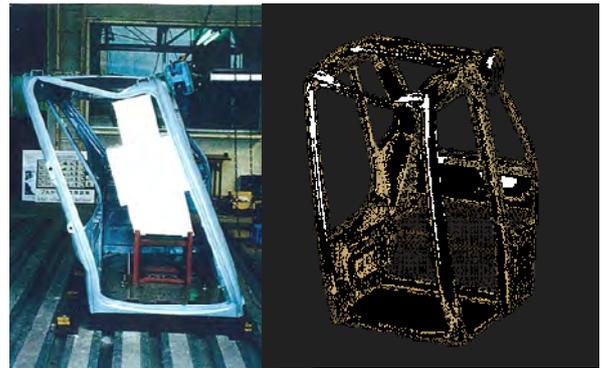


図3 側方負荷試験結果と解析結果



写真3 前モデル ZX-1 型 (CRES キャブ)

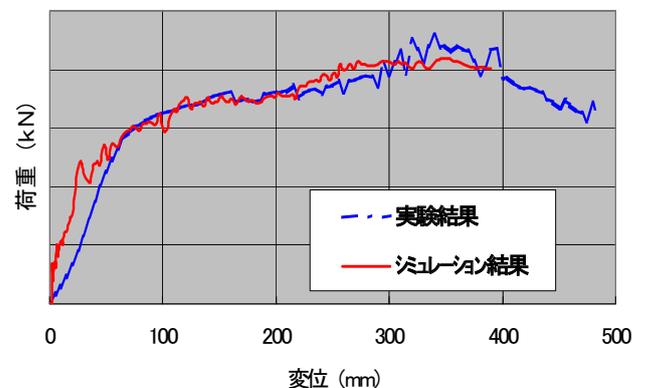


図4 側方負荷吸収エネルギー結果



写真4 実機横転試験状況 (旧 EX-3型)

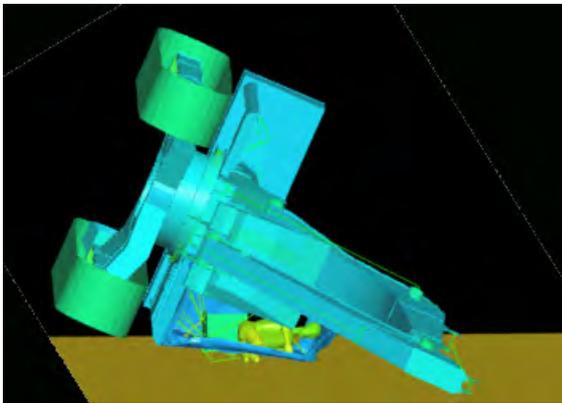


図5 車体横転解析結果



図6 ZX-3 ROPS キャブ構造

さらに実際の車体転倒時の負荷を予測可能とすべく本シミュレーションモデルをベースに車体全体モデルを構築し社内で実施した実機横転試験結果(写真4)を参考に車体転倒・横転が予測出来るモデルを構築した。図5にシミュレーション結果を示す、キャブの変形状態は実機実験結果を良く再現出来ており、その後本解析が後にROPS化の垂直荷重、後方荷重を決定する大きな鍵となった。

(2) ROPS キャブ開発

当社としては転倒や落石のリスクを伴う悪条件の現場でもオペレータの安全を最優先に確保すべく積極的に安全性能を追求する事を製品開発方針とし、2006年発売の排ガス3次対応機開発に際しキャブに関して、現在国際規格ISO 審議中のROPS規格の要件を満足し適用機種を車体重量50トンまでとする事を開発要件と設定し開発を実施した。本ROPSに適合する為の車重50トンを考慮すると、側方負荷エネルギーにてZX-1に対して数倍の強度が必要とされ、加えて垂直負荷、後方負荷要件が追加されており更なる高強度のキャブ開発が必要となる。

本強度要件を満足させると共に量産性、コスト、視界性能、昇降性能等を現行機レベルを維持する事等を考慮し、従来のプレスパネル構造から、一部ZX-1後方小旋回型機に採用した厚肉異型断面パイプ+プレスパネル構造を採用した。図6に本ROPS-キャブ外観を示す。又本キャブは車体重量11トンから50トンまでの搭載を考慮しているが、要求強度とコストのバランスにより

- 1) Aタイプ (～23トンクラス)
- 2) Bタイプ (24トンクラス～35トンクラス)
- 3) Cタイプ (～50トンクラス)

の3タイプ設定する事とした。その際、メイン構成部材である異型断面パイプ、プレスパネルは各タイプ共通とした。図7にAタイプキャブ強化構造を示す。Aタイプキャブに対して、強度メンバを追加する事によりBタイプを設定した。図8にBタイプ強化キャブ構造を示す。さらに高強度キャブ実現の為にCピラーとの結合は鋳鋼ジョイントを採用して強度アップ



図7 Aタイプキャブ構造



図8 Bタイプキャブ構造



図9 ROPS 負荷時変形状態

プを図った。本ROPSキャブ開発にはCRESキャブ開発ノウハウを踏襲しつつ、確立したシミュレーションをフルに活用しメイン部材、及び各強度メンバの設計に適用し事前に強度レベルを把握しながら最適設計を行なった。図9に各荷重負荷時の変形状態を示す。最終的には供試体キャブを製作しROPS試験機にて実験を実施し、全てのカテゴリのキャブにおいてROPS強度要求値を達成し、量産化適用を可能とした。

4. おわりに

今回開発を行なったROPSキャブは技術的にも相当ハードルは高かったが当社が長年構築したキャブ開発技術・シミュレーション技術を駆使し目処をつけ、視界性、昇降性、量産性、コストを十分満足する油圧ショベル用ROPSキャブを世界に先駆けて50tクラス対応を実現し、世界トップの安全キャビンを開発、2006年1月に市場投入する事が出来た。このような安全機能は万一を想定するもので即顧客の評価には結び付かないが、不幸中の幸いで本ROPSキャブ搭載のレンタル機で斜面の現場道路を走行中に、不意に旋回をしたところ下り方向へ滑り出し約2m下の路肩に転落する事故が発生したが本キャブはびくともせずオペレータは無事であった、その後このお客様から“怪我一つ無く無事にいられたのは、この機械のお陰である。この機械を命の恩人として買いたい。”との嬉しい言葉を頂いた。苦勞が報われた感があり、今後も安全な機械をリーズナブルな価格で市場に投入する事が我々の宿命であると肝に銘じ製品開発を行う所存である。

2. フルバッテリー駆動ミニホイールローダの開発

コマツ 研究本部 建機第一イノベーションセンタ ○松村 幸紀
 諏訪 正登
 関 正暢

1. はじめに

建設機械が動力源として使用しているディーゼルエンジンは排気ガスと騒音を発生するため、作業現場及びその周辺環境への影響が問題となっている。特にトンネルや屋内などの閉塞空間では作業者に、住宅街では近隣住民に影響が及ぶ。現状では、特殊なマフラやフィルタをエンジンの排気管に装着してこれら周辺環境への影響を抑えているが、無くすことはできない。

このような状況の中、環境配慮の目的でハイブリッド方式など電動化した建設機械の開発が盛んになっている。ハイブリッド方式の油圧ショベルでは、約40%の燃料削減が可能だという⁽¹⁾。負荷が平準化するので、出力が1ランク小さいエンジンを搭載でき、騒音や排気ガスの影響を抑えられる。しかし、ハイブリッド方式は地球環境にはやさしいものの、エンジンを搭載しているので作業現場の周辺環境への問題は残っている。

これに対して、エンジンを搭載しないフル電動方式は、排気ガス排出ゼロ、超低騒音が実現でき、作業周辺環境への影響をなくすることができる。

フル電動方式には、フルバッテリー方式のほかに商用電源方式がある。街中の電線から受電し、エンジンの代わりに搭載した交流モータを駆動する方式である。この方式は、エンジンと同出力のモータを選定すれば比較的簡単にフル電動化できるため、これまでも商品化した例が多数ある。しかし、電源工事が必要であり、電線により移動に制約を受けるため街中での短期工事には不向きである。

これに対して、フルバッテリー方式は充電済みの車両を現場に持ち込めば、自由に動き回れるという特徴がある。タイヤ式のように動き回る建設機械のフル電動化にはうってつけであり、エネルギー

回生の期待もある。このような背景から、今回フルバッテリー方式のミニホイールローダを開発したので、ここに報告する。

2. フルバッテリー駆動のメリットとデメリット

表1に、エンジン方式、ハイブリッド方式、フルバッテリー方式の3タイプについての性能比較表を示す。

表1 各駆動方式の性能比較表

△：劣る、○：同等、◎：優る

	エンジン	ハイブリッド	フルバッテリー
排気ガス	基準	○	◎
騒音	基準	○	◎
燃費／ランニングコスト	基準	◎	◎
稼働時間	基準	○	△
作業能力	基準	○	△～○
価格	基準	△	△
外観の変化	基準	○	△

表1に示すように、フルバッテリー方式は、他のエンジン搭載車に比べて環境にやさしい。

その一方で、稼働時間とコストが劣っている。エンジン車の場合は、燃料切れになっても軽油を足せばすぐに稼働できる。しかし、作業中にバッテリーが無くなってしまうと充電地点まで戻れなくなり、最悪の事態を招く。このため、1日の作業時間内にバッテリーが上がらないように工夫することが極めて重要である。また、多量のバッテリーを搭載するため、ハイブリッド方式に比べてコスト高になるし、外観の変化も大きくなる。

3. フルバッテリー駆動ミニホイールローダ

3. 1 車体構成

今回は、弊社製ミニホイールローダWA50-3をベース車両としてフルバッテリー化の改造を施した。諸元の比較を表2 諸元の比較に示す。

表2 諸元の比較

	エンジン車	フルバッテリー車
全長	4,630mm	4,880mm
全幅	1,690mm	←
全高	2,495mm	←
運転重量	3,475kg	約 3,100kg
バケット容量	0.6m ³	←
走行駆動方式	HST	←



図1 車体外観写真

図1に車体外観を示す。諸元からもわかるように、車体後部のカウンタウエイトを取り外し、その部分にバッテリーやコントローラ、冷却ユニットを搭載した。その結果として、車体が後方に250mm延長され、車重も若干減った。バッテリー

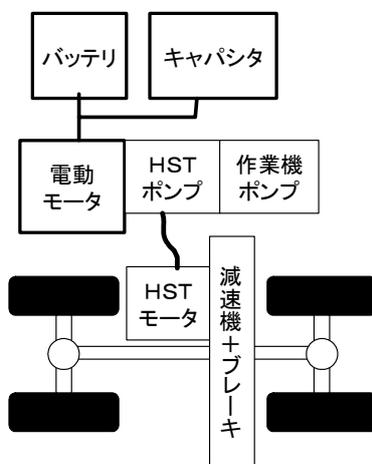


図2 車体構成

の配置などを工夫し、外観の変化を最小限に抑えるデザインとした。

車体構成を図2に示す。エンジンを電動モータに置き換えた構成とし、HSTや作業機等の油圧系はそのまま残した。駆動電源としてバッテリーと電気二重層キャパシタを併用した電源システムを搭載した。

バッテリーには、安価で入手性の良いシール式鉛バッテリーを採用した。このバッテリーは、急速充電が可能であり、1時間で約60%の回復ができる。

3. 2 キャパシタ電源システム

鉛バッテリーは、出力を上げると内部抵抗が増し、発熱によるロスが大きくなる。建設機械は負荷の変動が大きく、頻繁に高負荷がかかるため、発熱ロスにより稼働時間が減少してしまう。このため、稼働時間を延ばすは、なるべくバッテリーに高い負荷を与えないことが大切である。そこで、高負荷時の出力を補助するため、電気二重層キャパシタを組み合わせた電源システムを開発し、建設機械では始めて搭載した。高負荷時には、キャパシタから優先的に電力を供給し、バッテリーの負担を軽減することができる。

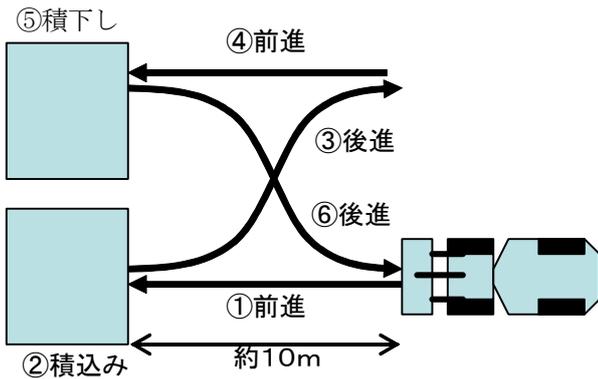
また、キャパシタには、バッテリー容量低下時の瞬時出力補助の役目もある。鉛バッテリーは放電が進むと出力が低下する。このため、時間の経過と共にオペレータは力不足を感じるようになる。つまり、バッテリー容量はまだあるのに“使えない”機械になってしまう。これは、見かけ上の稼働時間減少であると同時に、バッテリー車は非力だという印象につながる。これに対し、加速時や積み込み作業時など力を必要とする作業の際にキャパシタから瞬時出力を補助すれば、放電が進んでも作業性能が落ちない。実質的に放電完了間際まで作業が可能となった。

これらの効果により、従来の鉛バッテリーだけを搭載した場合に比べて、最大1.4倍の稼働時間の延長を実現した。

4. 稼働時間測定試験

4. 1 試験概要

ホイールローダの典型的な作業である、Vシェープ積込み作業により作業のサイクルタイムを比較した。同一オペレータにより、エンジン車とフルバッテリー車を用いて比較試験を実施した。Vシェープ積込み作業の概要を図3に示す。



エンジン車はフルパワーのみ、バッテリー車はフルパワーモードと軽作業モードの2モードで計測した。

4. 2 試験結果

試験の結果、表3の結果を得た。

表3 稼働時間計測結果

	エンジン車		フルバッテリー車	
	フルパワー	フルパワー	フルパワー	軽作業
稼働時間	8時間	2時間	2時間	3時間
放電開始時 サイクルタイム	3.5秒	3.5秒	3.5秒	4.5秒
放電終了時 サイクルタイム	↑	3.5秒	3.5秒	4.5秒

フルパワー時のVシェープ積込み作業のサイクルタイムは、エンジン車とほぼ同等であり、作業性能はエンジン車並であることがわかった。また、バッテリーの放電が進んでもサイクルタイムがほとんど変化しないことから、キャパシタ電源システムが有効に働いていることが確認できた。

5. 騒音低減

はじめにも述べたが、フルバッテリー方式の特徴の一つに超低騒音がある。エンジンを無くすことで最大の音源が無くなるが、ホイールローダには他にもHSTやデファレンシャルなどの音源がある。エンジン車ではそれほど気にならなかったが、フルバッテリー車ではその音が目立つようになった。特にフルアクセル走行時の騒音では、これらの機器から出される騒音のため、エンジン車に比べて1dBの低減効果しかなかった。このため、図5に示すように車体下部のフロントアクスルからリアアクスルにかけて、遮音カバーを装着した。この結果、エンジン車比で6dBが実現できた。

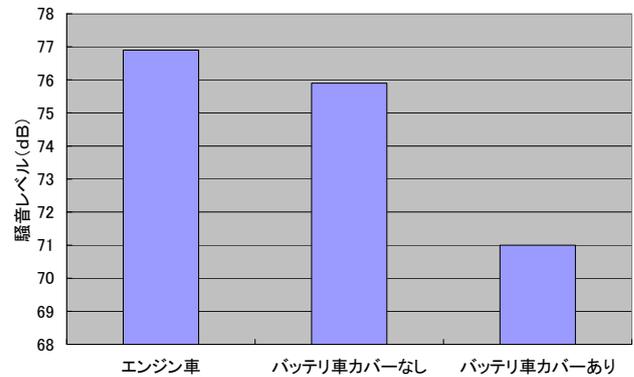


図4 走行時騒音低減効果



図5 遮音カバー（アーティキュレート部）

6. 適用作業

これまでに述べてきたように、フルバッテリー方

式の特徴と、それを十分に発揮できる作業との相関図を図6に示す。

夜間の都市土木工事では騒音が周囲に与える影響が問題となっており、工事車両の低騒音化のニーズが強い。そのため、エンジンの騒音が無くなるバッテリー化が望まれている。ただ、一機種だけバッテリー化できてもその他の車両や機器がうるさければ、意味が無い。この作業に向けては、工事車両全体がバッテリー化のように低騒音化していくことが必要である。

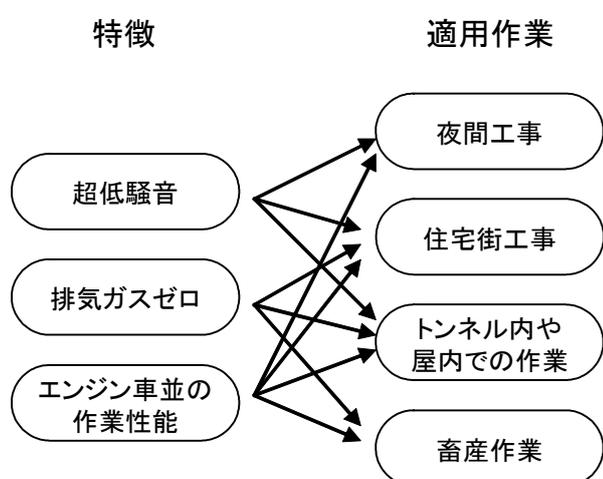


図6 フルバッテリー方式の適用作業

住宅街工事でも同様のニーズがある。この場合は、排気ガスも、工事箇所の住宅の垣根となっている植物を枯らすなどの問題を引き起こす。

トンネル内や屋内などの閉塞空間での作業については、作業員への配慮が重要となる。工事中のトンネルや屋内は、換気が不十分であることが多く、作業員への排気ガスの影響や酸欠を排除することが重要となっている。エンジンのマフラを強化するなどの対策はあるが、装着に手間が掛かかる割には効果が限定的である。バッテリー車であれば、このようなことを気にせずに作業することが可能となる。

畜産作業でのホイールローダの役目は、家畜へのえさやりや、糞尿の処理が主である。特にえさやりでは、家畜の目の前を通る際に排気ガスを直接吸い込んでいる。バッテリー式になれば、この問

題は回避できる。畜産の場合、畜舎から出た糞尿を一箇所に集め、堆肥化させる。堆肥化の過程では発酵するため、定期的に切り返し作業が必要になる。エンジン車並の作業性能はここで発揮できる。

7. まとめ

今般、弊社では環境問題に対する解決策の一つとしてフルバッテリー駆動のミニホイールローダを開発した。今後、人の生活圏の側近で作業することが多いミニから小型の建設機械では、低騒音や排気ガスゼロといったフルバッテリー建機のニーズが高まると考えている。一方、中型以上の建設機械では、ハイブリッド式が有利であると考えている。中型になると、その充電設備も大きくなり、扱いが困難になる。さらに、小型に比べてハイブリッド化による燃費低減効果ははっきりと現れるし、モータやバッテリーなどの追加コンポーネントを収納するスペースも確保しやすい。

今回、弊社ではミニホイールローダを題材としてバッテリー化に挑んだ。これは、回生エネルギーが期待できる、自由に動き回れるという、バッテリー化の効果が大きいだろうと考えたからである。もちろん、今回開発したキャパシタ+鉛バッテリーの電源システムは、油圧ショベル等他の建設機械へも適用可能であり、ニーズによって展開が可能である。

今後は、超低騒音、排気ガスゼロ、エンジン車並の出力という特徴を生かし、稼働時間をさらに延長することで、商品化を検討していく予定である。

参考文献

- (1) 南條孝夫、鹿児島昌之、小見山昌之：ハイブリッドショベルの開発、平成17年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集、p29-34

3. ニューマチックケーソン (New DREAM) 工法

における遠隔地耐力試験装置の開発

大豊建設株式会社 上月 直昭 大久保 健治 今村 秀雄
○長崎 正幸

1. はじめに

ニューマチックケーソン工法は、優れた耐震性能や幅広い土質への適応性など多くの優位性を持つ工法であり、遠隔操作による無人化工法が一般化している。その中でも New DREAM 工法は、従来の無人掘削工法で高気圧下作業となっていた掘削機の日常点検や修理・回収作業及び地耐力試験等を大気圧下作業とし高気圧作業を 100%削減した完全無人化ニューマチックケーソン工法である。

本稿は、New DREAM 工法の最後の要素技術である遠隔操作による地耐力試験装置の開発と性能確認試験の結果について報告するものである。

2. 遠隔操作による地耐力試験システムの概要

今回開発した遠隔操作による地耐力試験システムは、作業室スラブの直上にもう一枚のスラブを設け、二重スラブ構造の大型メンテナンスロック内において大気圧下で遠隔操作無人掘削機に地耐力試験装置を取り付け、遠隔操作により支持地盤の任意の位置へ移動させて、試験装置を設置し遠隔操作で地耐力試験を実施する一連のシステムである。このシステムが完成したことで、New DREAM 工法は高気圧作業の 100%無人化が達成された。New DREAM 工法概念図を図-1に、掘削

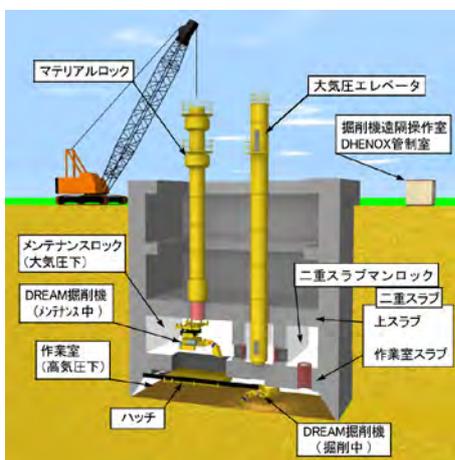


図-1 New DREAM 工法概念図

機の回収・試験装置装着から地耐力試験実施までの地耐力試験システムの一連の手順図を図-2に示す。

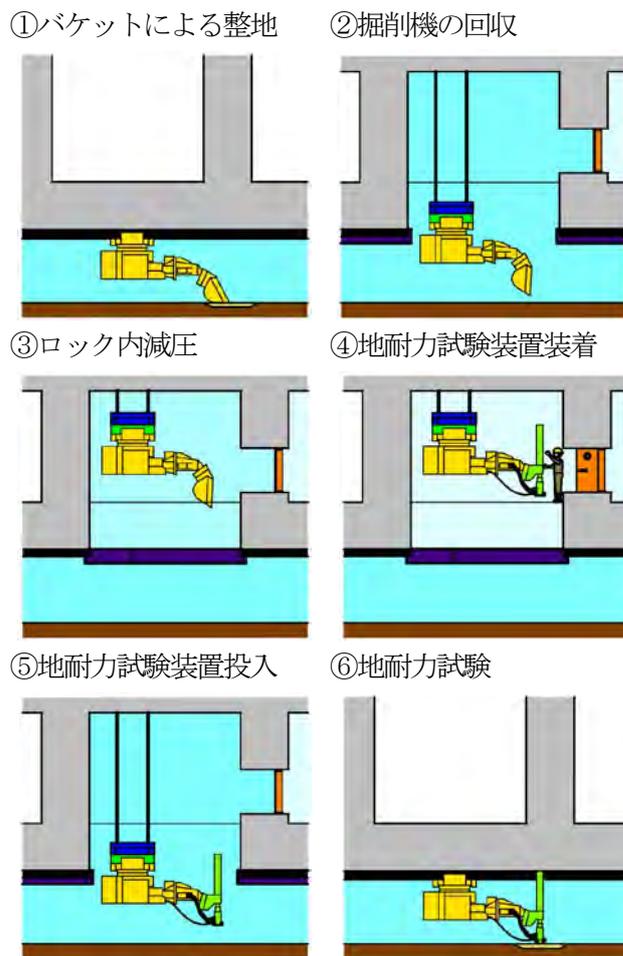


図-2 地耐力試験システム図

3. 試験の目的

- 1) 地耐力試験装置の動作確認及び遠隔操作による試験方法の問題点確認
- 2) 地耐力試験装置の変形量の計測及び補正值の確認
- 3) 従来の試験方法と本試験システムの計測結果の比較検討による本試験システムの信頼性の確認

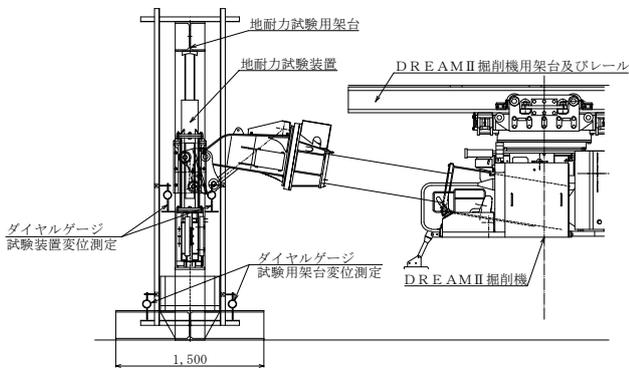
4. 遠隔操作による地耐力試験システムの試験概要

1) 使用機器

本地耐力試験システムの試験装置の主な構成は、次の通りである。

- ・地耐力試験装置本体
- ・遠隔操作制御システム
- ・試験データの表示と記録装置
- ・DREAM 掘削機（Ⅱ型）
- ・地耐力試験反力用架台

地耐力試験装置概要図を図－3、遠隔操作による地耐力試験状況を写真－1、2に示す。



図－3 地耐力試験装置概要図



写真－1 遠隔操作による地耐力試験状況



写真－2 遠隔操作状況

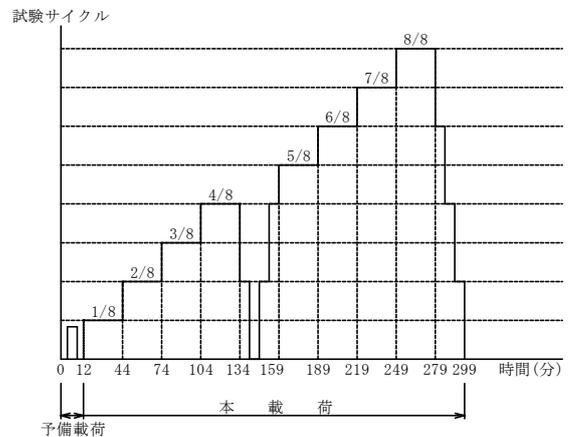
2) 試験方法

地耐力試験は、DREAM 掘削機（Ⅱ型）に地耐力試験装置を取り付けて遠隔操作により実施した。

3) 荷重方法

荷重試験方法は、ニューマチックケーソン施工マニュアル（第3版：平成12年2月：日本圧気技術協会）によると「作業室内の特殊な環境を考慮して、多サイクル方式による急速荷重試験方法による」とあるが、本システムでは地耐力試験装置設置後は地上で操作・測定が実施できるため急速荷重では無く、2サイクル・荷重保持時間30分で実施した。

試験サイクル図を図－3に示す。



図－3 試験サイクル図

4) 実施事項

- ・遠隔操作による地耐力試験装置の試験地盤への設置・撤去及び荷重・除荷の操作性を確認する。
- ・最大試験荷重 294kN (30t) まで荷重して試験装置の変形量を確認する。
- ・不動梁を用いた従来方法と本方法の計測値の差を確認する。

5. 試験結果

1) 地耐力試験装置の動作確認及び遠隔操作による試験方法の問題点確認

地耐力試験装置の試験手順・荷重手順に基づき、遠隔操作により試験装置の設置→地耐力試験の実施→試験装置の撤去の一連の動作確認を行った。その中で以下のことが確認できた。

- ・試験装置の設置に約5分の時間を要したが、一連の動作をスムーズに稼働することが確認出来た。

・各動作を遠隔操作により行ったが、的確に動作を確認出来た。

・鉛直方向の据え付け精度は、3/1000 と殆ど鉛直に据え付け出来ることを確認できた。

・遠隔操作による試験で特に問題点はなかった。

2) 地耐力試験装置の変形量の計測及び補正值の確認
地耐力試験実施にあたり、表-1の段階別荷重強度を載荷し試験を実施した。

表-1 段階別荷重強度

	荷 重 (tf)	荷重強度 (kN/m ²)
1 段階	3.8	520.4
2 段階	7.5	1,040.9
3 段階	11.3	1,561.3
4 段階	15.0	2,081.7
5 段階	18.8	2,602.2
6 段階	22.5	3,122.6
7 段階	26.3	3,643.1
8 段階	30.0	4,163.5

試験結果の資料を図-4、5に示す。

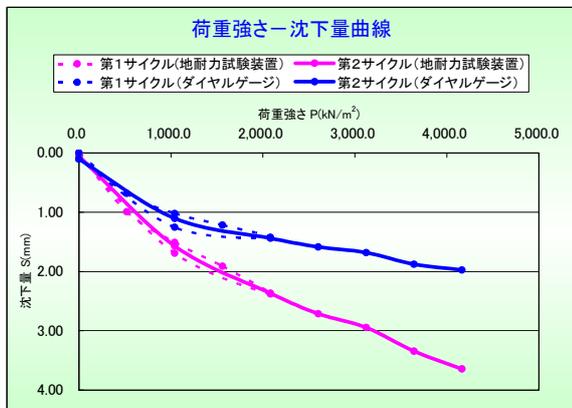


図-4 荷重強さ-沈下量曲線

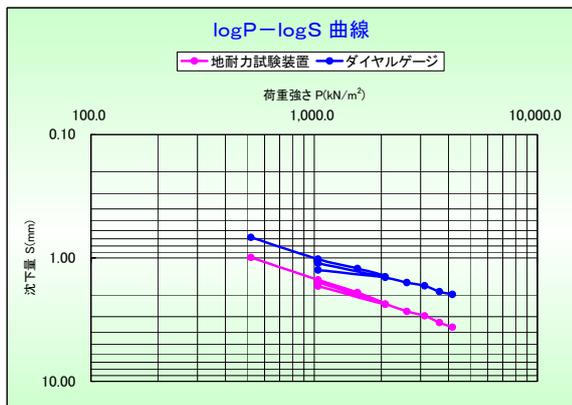


図-5 logP-logS 曲線

また、地耐力試験装置本体の縮みと試験用架台の伸びについて、図-6、7の結果が得られた。

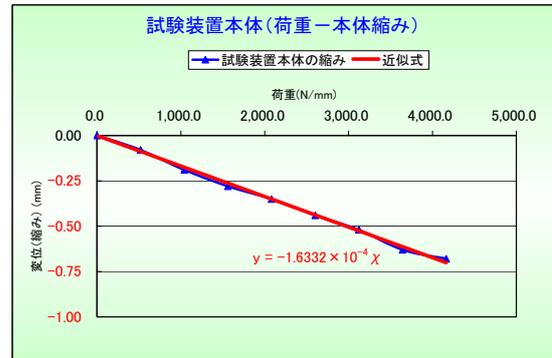


図-6 地耐力試験装置本体の縮み

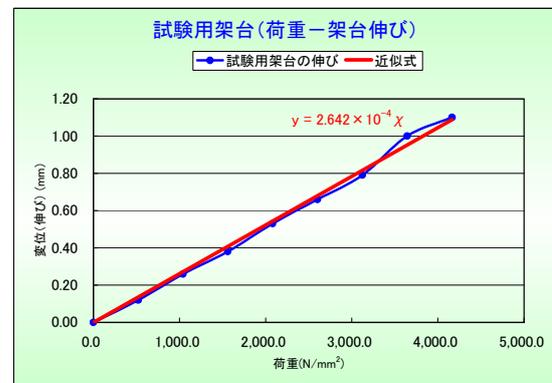


図-7 試験用架台の伸び

試験データより関係を近似式にすると図-6より「地耐力試験装置本体の縮み-荷重曲線」は $y = -1.6332 \times 10^{-4}x$ 、図-7より「試験用架台の伸び-荷重曲線」は $y = 2.642 \times 10^{-4}x$ となる。この近似式から地耐力試験装置の計測データを補正すると、「荷重強さ-沈下量曲線」及び「logP-logS 曲線」は、それぞれ図-8、9のようになり、本地耐力試験装置の計測値がダイヤルゲージによる計測データ（従来方法）に近似することが解った。

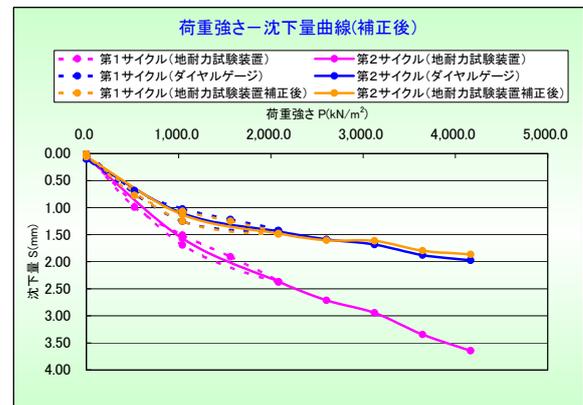


図-8 荷重強さ-沈下量曲線 (補正後)

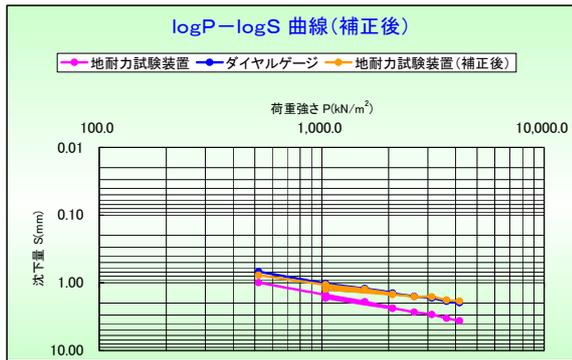


図-9 logP-logS 曲線 (補正後)

3) 試験結果から求められる地盤反力係数、極限支持力と従来工法による値との比較

・地盤反力係数

道路橋示方書IV下部構造編の「ニューマチックケーソンの平板載荷試験法」①から地盤反力係数の算出式は、次のとおりとなる。

(算出式)

$$k_s = P / \delta \quad (\text{kN/m}^3)$$

$$k = 1/2k_s \quad (\text{kN/m}^3)$$

ここに、k：載荷試験より求まる地盤反力係数

k_s ：繰り返し荷重に対する地盤反力係数

P：荷重強さ (kN/m²)

δ ：沈下量 (mm)

地耐力試験装置による補正前の計測値、補正後の計測値、従来方法 (ダイヤルゲージ) による計測値の3パターンについて地盤反力係数を算出した。

計測値の差は0~1.67mmであり、試験装置・試験用架台の変形量を補正すると0~0.11mmの誤差であった。また、それぞれの地盤反力係数は、表-2の通りとなり変形量を補正することで、ほぼ正確な値が得られることが解った。

表-2 地盤反力係数の比較

試験方法	地盤反力係数		摘要
	k_s (MN/m ³)	k (MN/m ³)	
試験装置(補正前)	901.2	450.6	
試験装置(補正後)	1,466.1	733.1	0.94
ダイヤルゲージ	1,553.6	776.8	1.00

・極限支持力

道路橋示方書IV下部構造編の「ニューマチックケーソンの平板載荷試験法」①より図-8「荷重強さ-沈下量曲線」、図-9「logP-logS 曲線」より沈下曲

線がほとんど一定に推移していることから降伏支持力の接点を判断することが出来ない。このため最大試験荷重の1.5倍が極限支持力となり、地耐力試験装置による方法及びダイヤルゲージによる従来方法とも624.5 (tf/m²) の同値となった。

6. 実施工での確認

当社のニューマチックケーソン施工現場において、遠隔操作室~試験箇所まで約100mの離隔で遠隔操作による地耐力試験を実施し、以下の確認ができた。

- 1) 約100mの離隔でも問題なく遠隔操作により一連の動作確認ができた。
 - 2) 遠隔操作により計測を行い、計測データの表示と記録が適正に出来ることが確認できた。
 - 3) 高気圧下の中で一部の通信制御機器と油圧制御機器に不具合が生じることが解った。
- 実施工による地耐力試験状況を図-10に示す。



図-10 遠隔操作による地耐力試験状況

7. おわりに

今回の試験で本地耐力試験装置が、遠隔操作で十分機能し、操作性能や計測精度が従来方法とほぼ同等であることが確認できた。これにより高気圧下での地耐力試験の無人化が可能になり、高気圧作業を100%削減した完全無人化ニューマチックケーソン (New DREAM) 工法が確立した。また、実施工による試験で不具合が発生した一部機器については、改善し近日中に実験により確認する予定である。

※参考文献

- ①道路橋示方書IV下部構造編「ニューマチックケーソン工法の平板載荷試験方法」

4. ロボット浚渫船「カスミザウルス」における

自動化システムについて

国土交通省関東地方整備局・霞ヶ浦河川事務所・機械課長 ○程原 雄二
三菱重工業（株）・船舶技術部・海洋計画G長 矢野 州芳
エムシーエンジニアリングサービス（株）制御システム事業部事業部長 蒲池 薫

1. はじめに

霞ヶ浦は、茨城県の南東部に位置し、湖面積220 km²、流域面積2,156 km²に及ぶ我が国第2位の面積を有する湖であり、農業・工業・上水道用水などの水源として、また、漁業やリクリエーションの場として利用されるなど、地域生活者の貴重な財産となっている。図1に霞ヶ浦の位置図を示す。

霞ヶ浦には、大小56余りの河川が流入している。平均水深約4m（最大水深約7m）と非常に浅く、昭和40年代半ば以降、流入人口の増加や社会経済活動の進展に伴い富栄養化による水質汚濁が進行し、利水や環境保全の面で様々な障害をもたらしている。

水質汚濁の要因としては流域から流れ込む汚水による外部要因と湖内に堆積している底泥から溶出する内部要因と言われている。

そこで、水質浄化の方策として底泥（富栄養化した堆積土）除去のため昭和50年から底泥浚渫を開始し、さらなる促進をめざして平成4年度より大規模浚渫を実施しており、全体計画としては、深度30cmの表泥浚渫を行い、全底泥量（推定4,000万m³）の1/5にあたる約800万m³の底泥を除去することとしている。

ロボット浚渫船『カスミザウルス』は大規模浚渫の担い手として平成6年度に建造されたハイテックロボット浚渫船であり、毎年浚渫作業に従事し、稼働開始から11年を経過し、その間、浚渫作業の実績をふまえて浚渫効率の向上、高含泥率浚渫、施工精度向上及び省力化を進めるため各種改良を加えて実施している。本報告は、その改良点について紹介する。

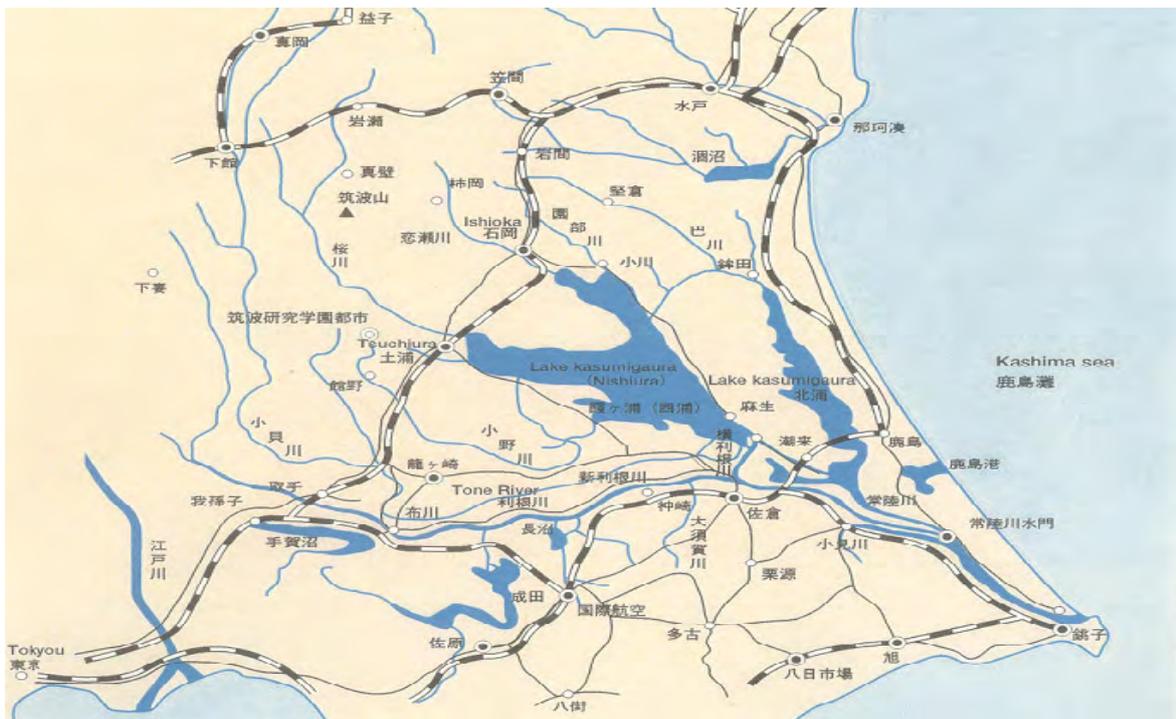


図1. 霞ヶ浦の位置

2. 霞ヶ浦における底泥浚渫の特殊性

水質汚濁の内部要因の底泥はリンや窒素を多く含んだ含水比200～400%の超軟泥である。浚渫中に底泥を拡散させることなく浚渫する必要がある。

また、浚渫土の処分方法は霞ヶ浦周辺の陸地にて天日乾燥するため高濃度浚渫が必要である。

図2に浚渫事業概要図を示す。

(1) 高効率機器採用による高能力浚渫

スパットキャリッジ, 集泥機旋回台等の採用に加えて自動化により安定浚渫及び連続運転が可能となり、浚渫作業における間接時間（浚渫で揚土してない時間）を削減し、稼働率・作業効率が高水準になっている。

(2) 回転バケット方式の採用による高濃度浚渫及び底泥拡散防止浚渫

スライド刃の付いた回転ドラムを内蔵したバケットで底泥を取り込み、スクリーコンベアで押し上げ、吸泥ポンプで吸引する集泥機である。

スライド刃の深さが底泥深さ（30cm）と同じになっており余水を吸い込むことなく高濃度浚渫を可能としている。また回転ドラムの速度とスイング速度を同期させる自動制御により回転ドラムが底泥を静かに切り取って行くこととなり、底泥の拡散を防止した浚渫が可能となっている。

(3) 自動化による大幅な省人・ロボット化

浚渫効率向上のための自動化, 省人・ロボット化のための自動化を浚渫作業全般に渡って採用したことにより、大幅な作業効率向上, 施工精度向上, 省人化・ロボット化; 環境に優しい浚渫が実現している。



図2. 浚渫事業概要図

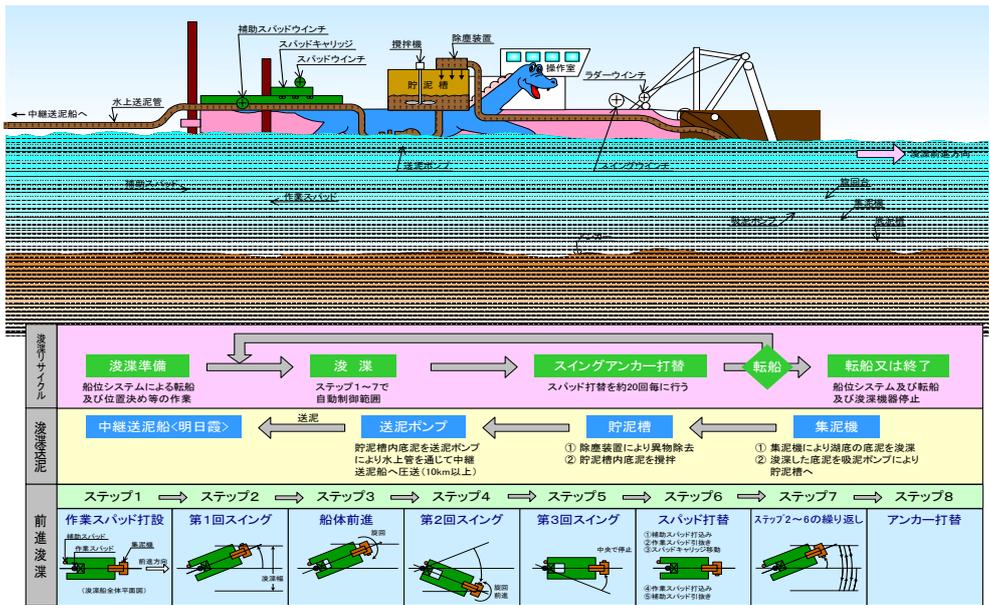


図3. 浚渫方法の概要

3. 浚渫自動化システムの概要

3-1 自動制御

浚渫自動制御のプログラムは、浚渫機器の機能別に独立した形で形成されている。運転操作は各機能別に自動運転と手動運転を選択し、任意の組合せで浚渫作業ができるように構築している。自動運転しながら必要に応じて運転員が手動介入して連続運転を保持し効率よい浚渫作業を行う。図3に浚渫方法の概要を示す。自動制御の各機能は以下の通りである。

(1) スイング自動制御

スイング速度設定値に従って、スイング角速度を一定に保持するように制御する。

寄切位置での減速及びスイング開始時の増速制御をする。

(2) ラダーウインチ自動制御

浚渫目標深度設定値に従って、浚渫深度を一定に保持するように制御する。

浚渫開始及び終了信号により、ラダーウインチを上げ下げ制御する。

(3) 集泥機自動制御 (吸泥ポンプ, 回転バケット, スクリューコンベア, 旋回)

回転バケット, スクリューコンベアはスイング速度と同調した制御を行う。

吸泥ポンプは回転バケットと同調した流量制御を行う。

貯泥槽のレベルが上限になった場合は、送泥ポンプ流量以下になるよう吸泥ポンプを制御する。

(4) 送泥ポンプ自動制御

送泥ポンプは、貯泥槽のレベルにより自動運転を開始し、回転数保持制御する。

作業中の排送ラインの閉塞等の圧力過大時は、循環弁の開により泥水を循環させて送泥ポンプを停止させない制御を行う。

(5) 前進自動制御

寄切位置でスパットキャリッジを使って設定された前進量だけ船体を前進させる制御を行う。

集泥機をスイング方向に旋回制御も行う。

(6) スパット打替自動制御

スパットキャリッジストロークエンドのスイング制御で中央に自動停止した位置でスパットの打替を行う。

3-2 運転監視

運転監視システムには浚渫モニタ、船位モニタ、施工管理モニタがあり、3台の表示器(LCD)によって運転監視情報が表示される。運転監視の各機能は以下の通りである。

(1) 浚渫モニタ

スパット形状表示、集泥機位置表示、各種パラメータ設定表示、警報表示の機能がある。

図4にスパット形状表示を示す。

図5に集泥機位置表示を示す。

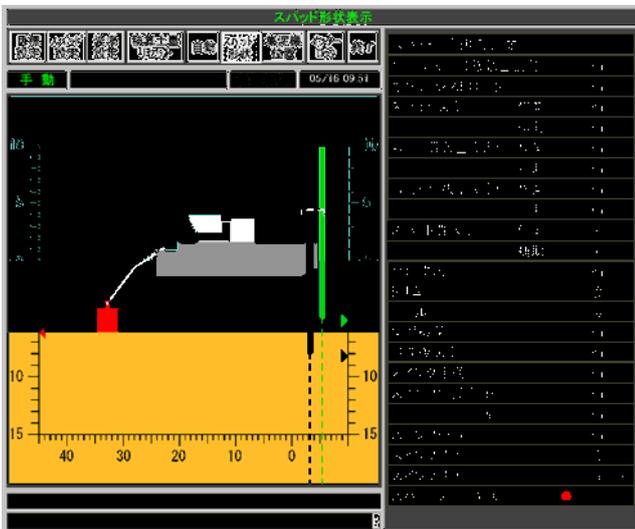


図4. スパット形状表示

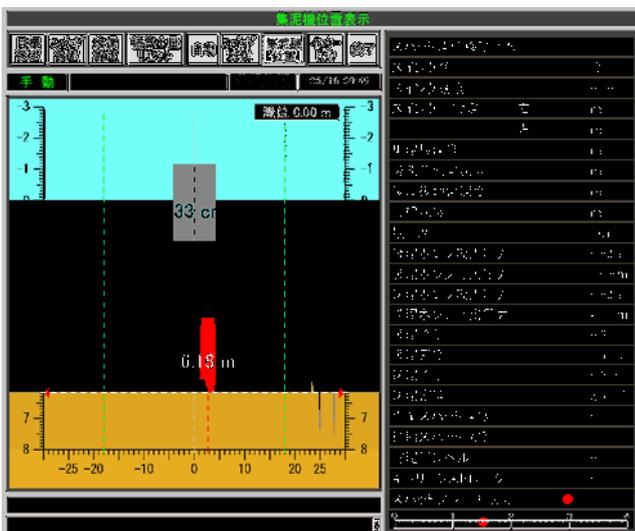


図5. 集泥機位置表示

(2) 船位モニタ

船位表示、パラメータ設定の機能がある。

図6に船位(集泥機位置)軌跡表示を示す。

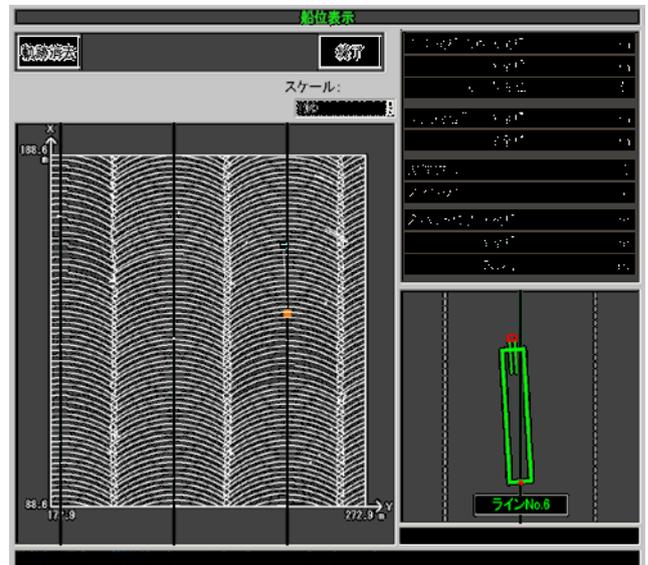


図6. 船位(集泥機位置)軌跡表示

(3) 施工管理モニタ

施工情報入力表示、施工管理帳表出力表示及び帳表プリンタ出力の機能がある。

図7に事業区域表示を示す。

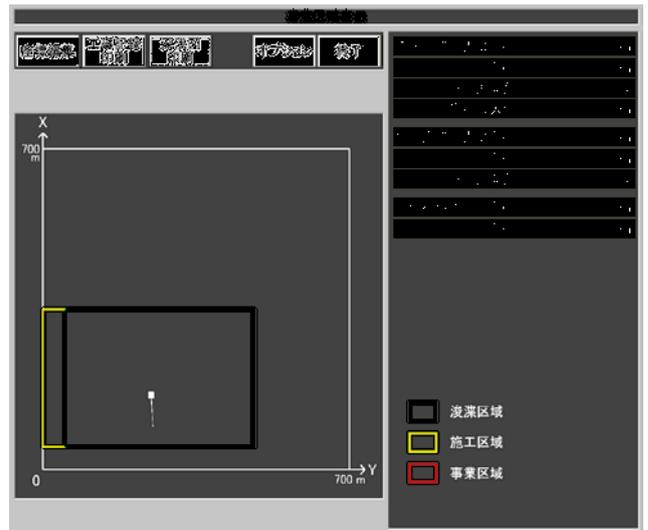


図7. 事業区域表示

表1. 施工精度改善

時期／事業年度	初期	過渡期	現在
	平成6年度～平成7年度	平成8年度～平成13年度	平成14年度～
浚渫工区測量	湖岸からの三角測量	GPS測量	RTK-GPS
浚渫工区の現地標識	工区4隅及び各レーン起点・終点に竹竿	RTK-GPS導入当初は竹竿併用	工区4隅のみに竹竿
船位システム	なし	RTK-GPS	RTK-GPS
方位及びスイング角度センサー	ジャイロコンパス	ジャイロコンパス	サテライトコンパス
位置表示	船位	×	○
	作業スパッド位置	×	○
	作業スパッドずれ量	×	○
方位計	精度	○	◎
	ジャイロコンパス初期補正	なし	RTK-GPS2点測量位置を正としてジャイロコンパス出力値を補正
施工精度改善内容	ジャイロコンパスの方位を正として前進浚渫で施工。浚渫レーンの中心線に対して作業スパッドのズレ量が検知できず時には起点と終点(400m)で最大10mのズレが発生した。	RTK-GPSの採用により作業スパッドの位置及び浚渫レーン中心線に対するズレ量が検知され、±25cm以上のズレ量になるとスパッド打換え時に自動修正されるソフトを追加した。浚渫中心に対するズレは解消した。	方位センサーをサテライトコンパスに切替え精度・信頼性の向上を図った。(ジャイロコンパスは精密機械であり取り扱いを間違えると狂った角度を検出する場合がある。)

4. 浚渫自動化システムの改良

4-1 RTK-GPS船位システムの導入

従来は陸上からの三角測量により初回スパッド位置測量をし、その位置情報を入力していた。その後の移動量及び船位はスパッドストローク値と方位GYROで積算していたが、スイング中のスパッドの横滑りが生じ、堀残しなどの要因となっていた。対策として陸上に測量者を張り付けて、頻繁に測量して船位修正を行っていた。測量のたびに浚渫を中止しなければならず、効率低下をきたしていた。また転船のたびに測量しながらの転船となり、位置決めするのにかなりの時間が必要であった。表1に施工精度改善を示す。

RTK-GPS船位システムの導入により、リアルタイムに精度よい船位計測が可能となった。これにより、スパッド打替時の船位修正が可能となり、位置ズレによる堀残しが生じなくなった。また転船時も陸上からの測量が必要でなく、移動しながら位置が把握できることにより転船時の大幅な時間短縮ができたと共に測量要員の省人化ができた。

4-2 後進浚渫の採用

従来は前進のみで計画されており、4～500m前進するとスイングアンカーを回収し、後方に大きく転

船していた。本船には排送管フロータも接続されており、合わせて移動させるため転船は1日仕事であった。

後進浚渫を採用した事により、横方向40m転船するのみとなり、スイングアンカーの移動及び、排送管フロータの移動も不用となり、転船時間が1時間程度となり大幅に短縮された。図8に浚渫作業図を示す。

4-3 連続浚渫機能の採用

従来はスパッド打替から次の打替までの浚渫1サイクル(図3のステップ1～7まで)であり、スパッド打替時には浚渫目標ラインからのズレ量を手動で補正後スパッドを打替していた。

RTK-GPS船位システム導入によりリアルタイムに船位を計測できることから浚渫目標ラインとのズレ量もリアルタイムに計算できることからスパッド打替時のズレ量補正も自動で行えるようになり、連続浚渫が可能となった。これによりスパッド打替時のズレ量補正作業が不用となったことで省力化と作業効率が向上した。

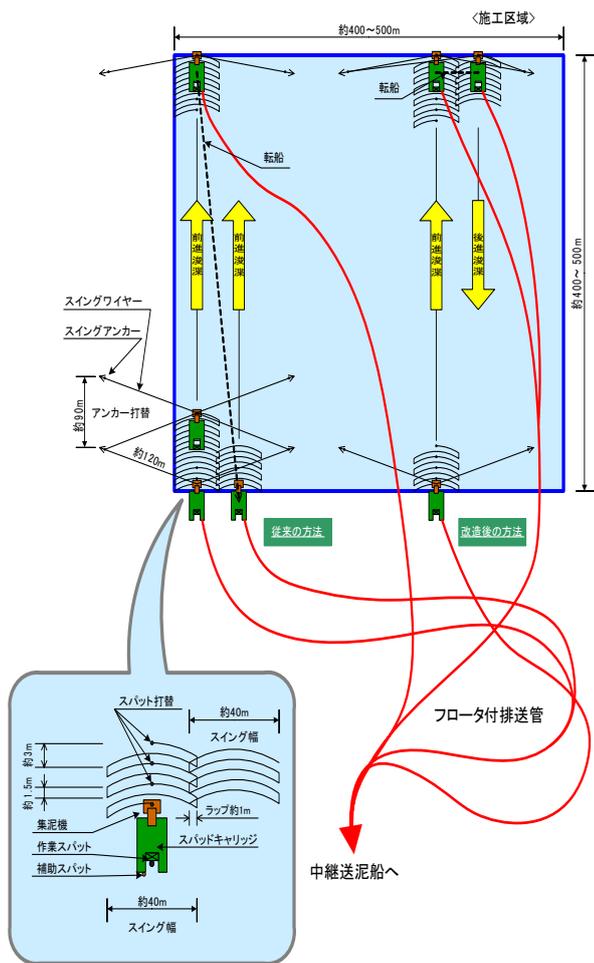


図8. 浚渫作業図

4-4 施工管理システムの自動化

従来の浚渫深度管理は、船位の水位データを基に前測原地盤高さのデータから目標深度を手動で算出し、ラダーを目標深度まで下降させていた。スイング幅（約40m）の間で目標深度が変化する場合は手動でラダーウインチを運転し、その都度深度を変更していた。施工管理の出来高検査時の深度情報は施工後の深度測定により確認している。

施工管理システムは、従来手動入力であった水位データをRTK-GPS船位システムの乙値でリアルタイムに算出し使用し、前測原地盤高の電子データを本船のシステムに取り込んで、浚渫コース設定・浚渫目標深度などの浚渫に必要な諸データを自動作成する。

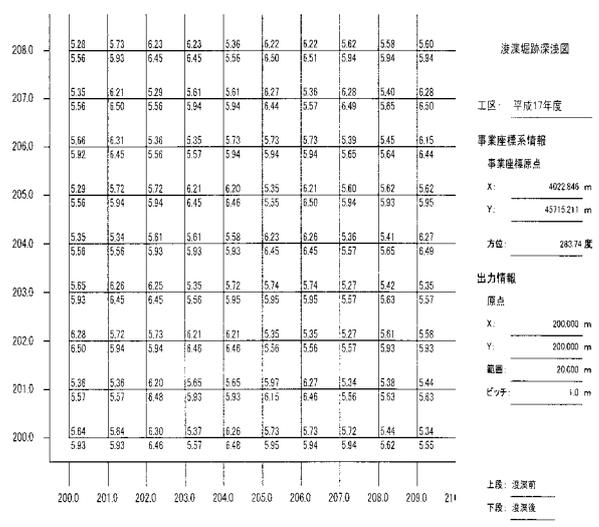


図9. 浚渫掘跡深浅図帳票

浚渫開始後の集泥機目標深度を保持するようラダーウインチをリアルタイムに自動制御する。

浚渫後の出来高管理データ取得のため、測深器を装備し、浚渫を進めながら施工後の深度データを収録する。図9に浚渫掘跡深浅図帳票を示す。

浚渫終了後出来高管理表（座標、前測原地盤高、集泥機浚渫深度・出来高深度）を自動作成する。

出来高管理表を作成することで、作業効率向上（余堀の減少）を図った。

5. あとがき

霞ヶ浦の浚渫において、『カスミザウルス』は11年間の稼働の中で、合理化施工、効率向上、省力化等の目的で改良を加えて現在に至っている。施工管理システムについては、出来高管理に置き換えるまでは確立されていないが今後の施工の中で精度、計測の諸条件等の各種データを蓄積し、施工の合理化を図っていきます。

また、霞ヶ浦は地域の人々にとって非常に関わりの密接な湖である。

『カスミザウルス』が湖の再生のために大いに活躍し、環境改善が図られればと期待しています。

5. 斜面用横引き 4トラックアスファルトペーパーの開発と施工

大成ロテック株式会社 ○多田 勝俊 添田 耕治 小泉 慎太郎

1. はじめに

近年わが国では、大型ダム・小型調整池等の斜面アスファルト遮水壁舗装工事が多数計画されている。その中で大規模の新規工事は少ないが、補修工事が多く計画され、小規模の工事に関しては新規の工事計画が多い傾向である。

従来の施工方法としては、大規模のダム工事に対する斜面アスファルト遮水壁舗装は、堤頂からウインチ車等で施工機械を斜面に対して上下に牽引する縦引きの施工方法を採用している。斜面の短い調整池等の小規模の工事は、繰返しの工程を避けるため、各施工機械に対し1台ずつアンカー車を配置し牽引する横引きでの施工方法を採用している。大規模な工事における縦引きの施工方法は確立されているが、横引きの施工方法に関しては、「アスファルトフィニッシャーや締めローラごとに、アンカー用の重機が牽引しながら平行して走行するため、堤頂部に広い走行スペースを必要とする」等の問題が残されていた。そこで、堰堤や廃棄物処分場など斜面の長さが10m未満の短い斜面アスファルト遮水壁舗装を効率的に施工できる舗装工法『ミニフェーシング工法』を考案した。この新工法を施工するにあたり『斜面用横引き4トラックアスファルトペーパー』を開発したのでここに紹介する。

2. 機械概要

本施工機械は、スリップフォーム工法で使用する機械をベースとし、必要な作業装置を組み付けた施工機械である。機械動作の流れとしては、延長フレーム中央に配置したホップ内に合材を受け、ホップ下部のベルトコンベアにより作業装置へ材料供給する。供給された合材をスクリュウにて全施工幅員へ均一に広げ、スクリッドで敷き均し締め固めを行う、アスファルトフィニッシャーとほぼ同じ機構となっている。

グレード・スロープ・ステアリング・アタック角のコントロールは、センサーを使用することにより自動制御が可能である。

本施工機械の機械仕様を表-1、全体図を図-1、機械全景を写真-1に示す。

表-1 機械仕様

項目	規格
施工幅員	斜面長 2.5~10m (5m以上は2段施工)
最大施工厚	100mm
施工法面勾配	0~45°
施工速度	0~2m/min
スクリッド	ボルトアップ方式 ダブルタンパーバイブレーター
総重量	30,000kg
本体寸法	L:5,000 W:9,000 H:3,040mm
自動制御	グレード・スロープ ステアリング・アタック角

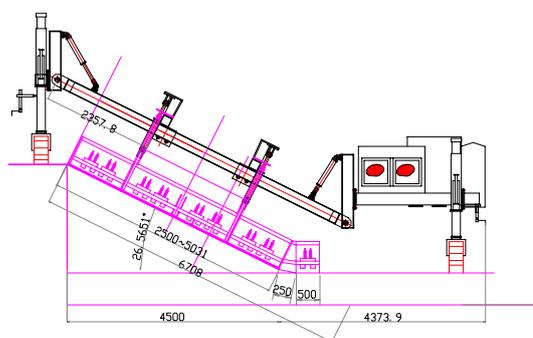


図-1 全体図

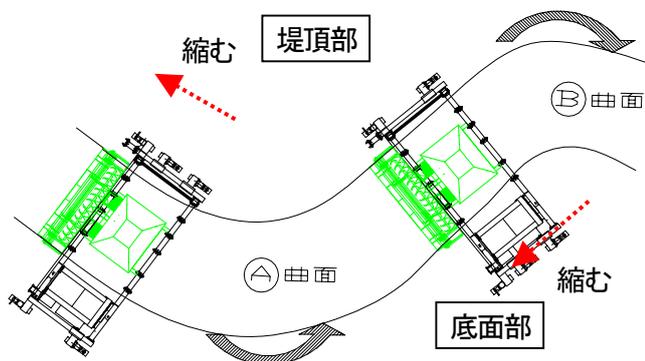


写真—1 機械全景

(1) 連続曲面施工への対応

前後左右計4ヶの走行トラックの内、前側の走行トラックを前後方向スライド式とした。これにより、内輪側の前後走行トラックの間隔を縮め、最小半径10mの連続曲面施工を可能とした。

(図—2、写真—2、写真—3参照)。



図—2 連続曲面施工イメージ



写真—2 スライド状況写真①



写真—3 スライド状況写真②

A曲面部施工時は堤頂部の走行トラックの間隔を縮め、B曲面部施工時は底面部の走行トラックの間隔を縮めることにより対応した。

また、曲面での走行性を補助するため、走行トラックを4輪独立走行方式とし、かつ個々にスピードコントロールを取付け可変走行可能とした。

(2) 様々な斜面勾配への対応

本体フレームに取り付けた4本の勾配調整シリンダを伸縮させ、本体フレームの角度を任意に変化させることにより、0~45°の斜面勾配に対応できる構造とした(写真—4参照)。



写真—4 勾配調整シリンダ

(3) 舗装の省力化

従来施工では、ウインチ車と敷均し機の2台が必要であったが、本施工機械を採用することで、堤頂部と

底面部を走行トラックが自走しながら、スクリートを牽引し施工できるため、1台で2台分の施工を可能とした。また、ダブルタンパーバイブレーター式のスクリーンを採用する事で、締固め度約98%（目標値：95%）が確保でき、結果として転圧機を1台減らす事が可能となった。

したがって、アスファルトフィニッシャー用アンカー車と1次転圧ローラ用アンカー車、1次転圧ローラの計3台を削減することに成功した。

ダブルタンパーバイブレーター式のスクリーンによる敷き均し路面性状を写真—5に示す。



写真—5 敷均し路面性状

3. 実施工例

平成17年8月より施工した実施工事例を紹介する。

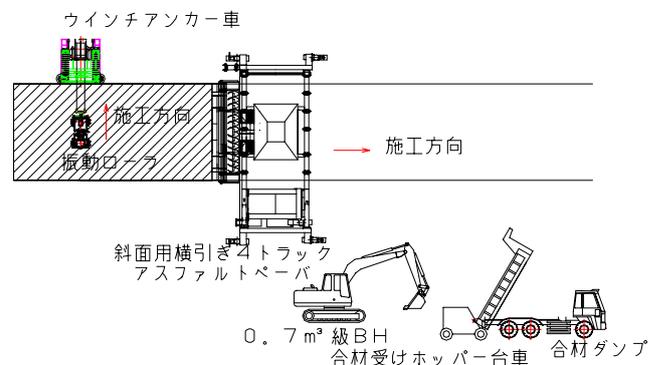
小規模調整池の斜面アスファルト遮水壁舗装に適用した施工事例である。施工条件は、現場の敷地が広く調整池が4ヶ所あるため「段取り換えが多い」、調整池側近に山があり「堤頂部走行スペースが広く取れない」という条件付の現場であった。

項目	形状・寸法
斜面長	2,570~3,240mm
斜度	27°
舗装構成	下層路盤：RC0-40 t=150mm 上層路盤：RM0-40 t=100mm 基 層：水密アスファルト t=40mm 表 層：水密アスファルト t=40mm 保 護 層：アスファルトマシック t=2mm
斜面舗装面積	8,540m ²

使用機械一覧を表—2、機械編成を図—3示す。

表—2 使用機械一覧

機械名	規格	台数
斜面用横引き4トラックアスファルトペーバ	舗装幅 2.5~10m	1
振動ローラ	1.6t 級	1
ウインチアンカー車	牽引力 3t	1
バックホウ	0.7m ³	1



図—3 機械編成

斜面全幅施工状況を写真—6に示す。



写真—6 斜面全幅施工状況

斜面長5m以上ある場合は、上下2段に分割して施工する必要がある。2段施工状況を写真—7、写真—8に示す。



写真一七 2段施工状況



写真一〇 連続曲面施工完了



写真一八 2段施工状況

半径10mの連続曲面施工状況を写真一九、連続曲面施工完了を写真一〇に示す。



写真一九 連続曲面施工状況

4. 今後の課題

本施工では試行錯誤はあったが、課題であった連続曲面（目標値：R=10）の施工も確立でき、施工面の仕上がりも良好なものが得られ無事竣工を迎えた。

しかし、本機械を開発する中で改造を重ねた結果、油圧回路が乱雑となり油温が上昇し電磁バルブの破損等の不具合があった。この現場に関しては、オイルクーラを増設し対応したが油温上昇だけでなく、組立・解体の容易さも考慮して油圧回路は整備する必要がある。また、曲面施工時1ヶ所の走行トラックに重量がかかってしまい、ステアリングが効かない現象がしばしば起こった。再度本機械全体の重量バランスを検討する必要がある。

5. おわりに

開発した本施工機械は、従来の縦引き施工はもちろんのこと横引き施工と比較して、施工の省力化を実現することができた。また、小型のウインチ車が走行するスペースを確保すれば、堤頂部の走行スペースも従来が約7.5mであったのに対し、ミニフェーシング工法を採用したことで3.0mの幅で施工可能であった。

今後、本施工機械の更なる操作性・施工性を高め、更に想定される現場状況に対応すべく、改良を進めていく予定である。

6. 大径3軸型深層混合処理工法

ツースリー

— (CDM-レムニ2/3) の開発と施工 —

清水建設(株) 土木技術本部技術第一部

○守安卓弥

国土総合建設(株) 技術本部

原 俊郎

(株) 不動テトラ ジオ・エンジニアリング事業本部

野田 洋

1. はじめに

深層混合処理工法(CDM工法)は、軟弱地盤にセメントスラリーを注入して、攪拌混合翼の回転により軟弱地盤を攪拌・混合しながら、セメントスラリーと地盤を化学的に結合させて強固な地盤を形成する地盤改良工法である。その特長は、あらゆる地盤に適用でき、盛土などの载荷に伴う改良地盤の変形がほとんどないことである。しかも、比較的短期間で強固な改良地盤が造成でき、低騒音・低振動工法であるため、近年でもその施工実績は豊富で、需要も確実に伸びている。

一方、近年の建設費縮減のトレンドを受けて、さらなる生産性の向上、すなわち、ハイスピード化と低コスト化が求められているのも事実である。このような背景を踏まえ、新たに開発した3軸型深層混合処理工法「CDM-レムニ2/3工法」は、従来型の1軸もしくは2軸型における各軸注入方式の混合形式から、単に攪拌混合翼の軸数増で3軸型にしたばかりではなく、2軸注入方式で、3軸混合を可能にした斬新な工法となっている。

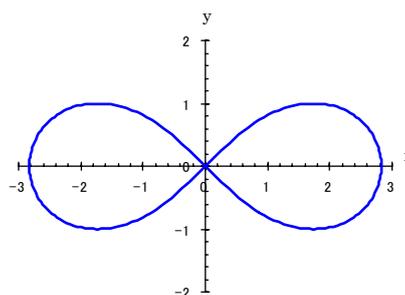
2. 原理と開発経緯

レムニ2/3工法は、清水建設(株)、不動建設(株)、国土総合建設(株)の3社共同で開発・実用化したものであり、従来の2軸型に比べ、全体として、工期を最大40%、工費を最大20%削減することを目標に開発したものである。

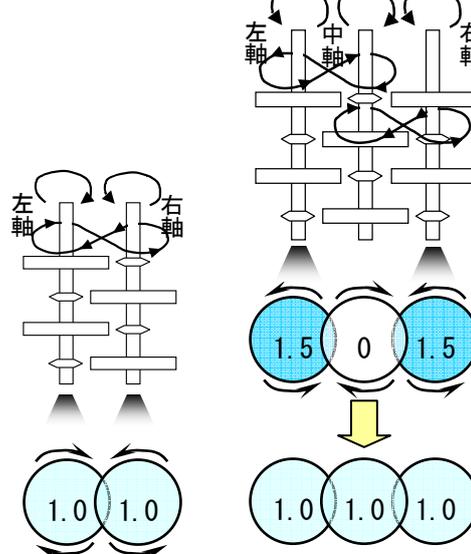
本工法は、3軸1列に駆動装置を搭載した深層処理機を使用しており、攪拌混合翼の直径を $\phi 1,000 \sim 1,300\text{mm}$ にした回転軸を、3軸同時に地盤中に貫入させながら、セメントスラリーの吐出を両端の左右軸の2軸のみから行うものである。両端の左右軸は、同一方向に回転させ、中軸は左右軸と逆方向に回転させる。この回転によって、セメントスラリーは3軸間を図-1に示すようにダブル ∞ (連珠図形、レムニスケート運動)型に流れる。これによ

て、軟弱土とセメントスラリーとが良く攪拌混合され、均一で強度の高い地盤改良体が造成できる。なお、工法名になっているレムニとは、スイスの学者、ベルヌイが1694年に発表した運動方程式のひとつであるレムニスケート曲線の考え方に由来している。

開発にあたっては、初めに基礎的検証として可視化模型実験を行い、各種補助装置の効果確認を実施し、次に、効果の高い補助装置を用いて実機による現場実証実験を行っている。



(a) ベルヌイのレムニスケート曲線



(b) 従来2軸式工法 (2軸注入+2軸混合)
(c) CDM-レムニ2/3工法 (2軸注入+3軸混合)

図-1 CDM-レムニ2/3工法の混合概

3. 工法の特徴と施工仕様

(1) 施工機械

主要な施工機械の組合せは、3軸施工に伴って、従来の2軸型から攪拌装置とプラント設備が若干アップする程度であり、標準的な2軸型の施工仕様から変更がほとんどない。施工管理装置は、従来型がそのまま利用できるようになっており、新工法採用における簡便性と経済性に優れている。

(2) 攪拌補助装置

本工法に使用する施工装備は、セメントスラリーを各軸間に満遍なく行き渡らせ、より攪拌効率を高める目的で、図-2に示す間隔保持板に取り付けた上下3段のスタビライザと、中軸にはスパイラルという2つの補助装置を設けている。これらの補助装置は、後述する可視化実験と現場実証実験を踏まえたものであり、新たな機械装置の追加や能力増加が不要で、装備の軽微な追加のみで取り付けられるというメリットがある。

2つの補助装置の効果は、貫入時には、図-3(a)に示すように、中軸のスパイラルが中軸周辺の未改良土を押し上げて、中軸の圧力を減少させ、改良土が中軸に集まりやすくする。一方、スタビライザは、左右軸から中軸への改良土の流れをスムーズに誘導すると同時に保持効果も発揮し、攪拌混合効果を高める。引抜き時には、図-3(b)に示すように、攪拌軸が逆回転することにより、スパイラルは地表に堆積した盛り土の押し戻しを行い、スタビライザは、土の流れと攪拌混合をさらに助長し、より攪拌効率を高める。この効果により、各軸間が均等に混合されることになる。

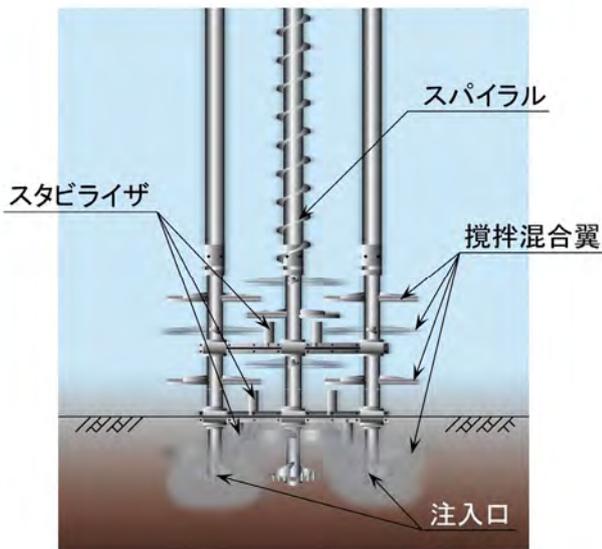


図-2 攪拌能力を高める補助装置

(3) 改良体の形状

改良体の形状は、図-4に示すように改良径φ1,000mm×3軸、φ1,200mm×3軸、及びφ1,300mm×3軸の3種類であり、各軸間のラップ長はいずれも200mmとしている。

(4) 適用範囲

本工法は、適用範囲において従来の2軸型と変わりがなく、改良径別の適用地盤は図-5に示すとおりである。打設長は、機械の大型化が伴わないように、現時点では30m以下に制限している。

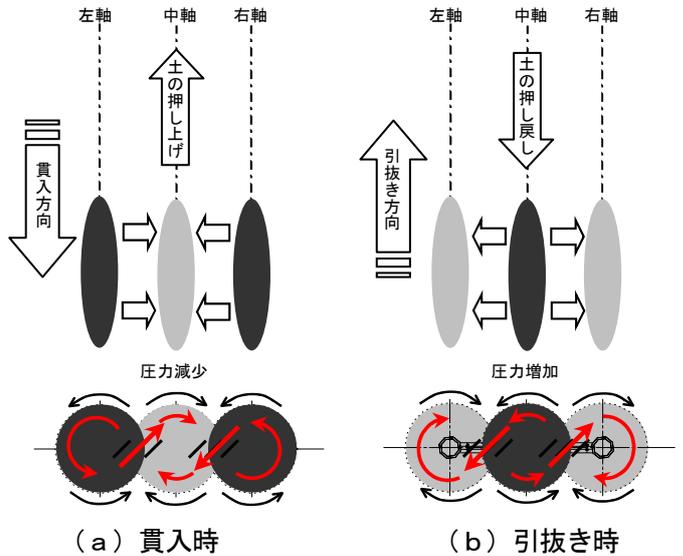


図-3 補助装置の効果

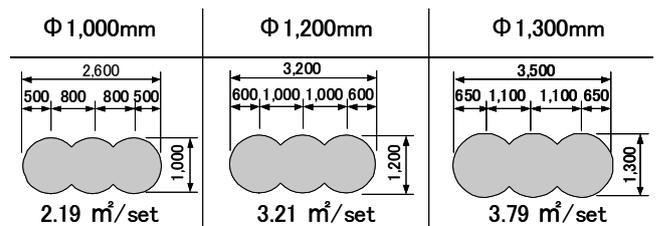


図-4 改良体の形状

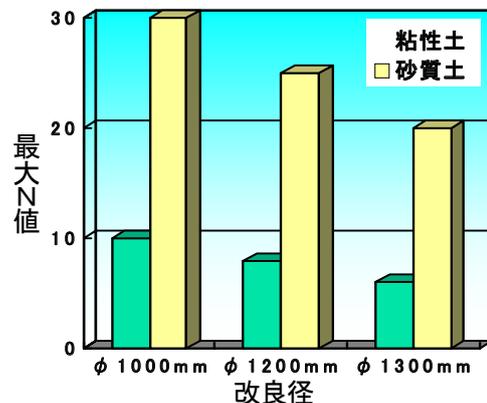


図-5 改良径別の適用地盤

4. 可視化模型実験

(1) 模型実験内容

攪拌混合の内部挙動を調査するために、攪拌混合状態をリアルタイムに可視化でき、かつ繰り返し使用が可能な可視化土層とこれに使用する疑似スラリーを開発し、基本条件把握用に可視化模型実験を行った。本模型実験により、各ケースの攪拌混合メカニズムを確認するとともに、攪拌混合性能がより高くなる補助装置の組合せ選定を行っている。実験装置は、**図-6**に示すように1/5模型を使用し、その試験状況を**写真-1**に示す。

実験仕様は、次に示すとおりである。

- ・実験装置：実機の1/5モデルの模型装置
- ・昇降装置：実速の1/5速度ギヤモータ
- ・駆動装置：実速同等の0~30rpmモータ
- ・攪拌翼：3軸φ1,300mmの1/5モデル
- ・注入装置：可変定量ポンプ
- ・透明水槽：L1,000×B500×H2,000mm
- ・土層：可視化可能なキトサン模擬土層
- ・スラリー：消散性、または残置性色素溶液

なお、実験ケースは、スラリー注入軸数と各種補助装置を組み合わせた11ケースで実施した。

(2) 模型実験結果

模型実験の結果、次のことが明らかになった。

- ① 3軸混合の原理は、中軸を中心とするダブル∞（連珠図形）型流動となっている。
- ② 3軸注入では、左右軸に比較して中軸にスラリーが集中する傾向が見られる。
- ③ 補助装置なしで単に2軸注入したケースは、中軸にスラリーが回り難い。
- ④ スタビライザと中軸スパイラルの2種類を組合せた補助装置は、もっとも攪拌混合性能に優れている。
- ⑤ **写真-2**には、3軸のうちの左右軸から疑似スラリーの色種を変えて2軸注入した場合のスラリー混合状態を示す。同写真から、2種類の補助装置により、中軸までスラリーが満遍なく行き渡っており、攪拌混合が良好に実施されていることが確認できる。

以上の実験結果から、補助装置としてスタビライザと中軸スパイラルの2種類の組合せが最適であるとの結論に至った。スタビライザには、注入スラリーを移動制御する導流効果と保持効果があり、中軸

スパイラルには、中軸混合部の圧力を貫入時に減少し、引抜き時に増加させて、改良土の上下方向混合を促進する効果があることが分かった。

5. 現場実証実験

(1) 現場実験内容

レムニ2/3工法の攪拌補助装置の混合能力を現場において調査する目的で、実機を用いた現場実証実験を行った。実験ケースは、レムニ2/3工法の仕様の2軸注入3軸混合方式と、比較用の3軸注入3軸混合方式、及び従来型の2軸注入2軸混合方式の各種ケースを設定し、施工性や貫入能力、改良体の品質について検証を行った。

実験シリーズは、**表-1**に示すように4シリーズを設定した。シリーズI~IIIでは、羽根切り回数を350、450回/m、スラリー混入率を10、15、20%として、これらの組合せで6ケースを設定した。シリーズIVでは、羽根切り回数450回/m、スラリー混入率10、15%の2ケースを設定した。

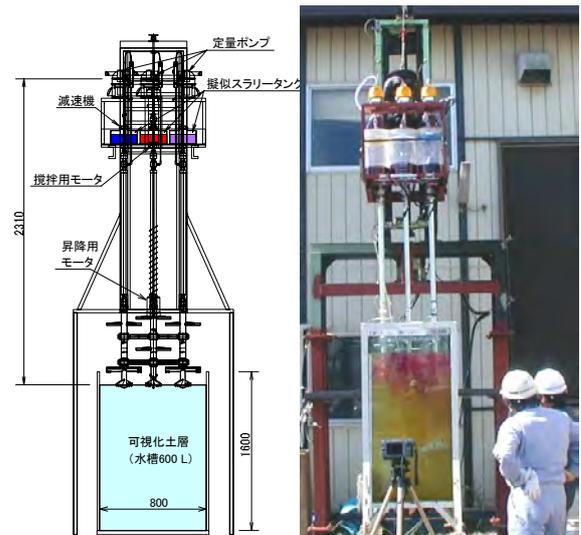


図-6 模型実験装置



写真-1 試験状況



写真-2 可視化実験の混合状況

なお、補助装置（A）は、スタビライザ＋スパイラルロード、補助装置（B）は、スタビライザのみの使用としている。羽根切り回数とは、攪拌翼が改良対象土中の任意の1m区間を通過した回転数の総数、混入率とは、改良土1m³当たりのセメントスラリー量を表している。

試験改良体の形状仕様は、次のとおりである。

- ・φ1,300mm×3軸（A=3.79m²）、及びφ1,300mm×2軸（A=2.56m²）
- ・打設長：7.0m、改良長：6.0m
- ・試験改良体数：20セット

試験改良体の対象地盤は、上部が腐植土（A_p）と粘性土（A_c）、下部が砂層となっており、上部軟弱層（A_p、A_c）は、層厚にバラツキがあるため、事前に現地の均一な粘性土に置換した。

（2）現場実験結果

改良体施工後に品質確認として改良体の針貫入試験、及びコア観察と一軸圧縮試験を実施した結果、以下のことが明らかとなった。

（a）針貫入試験

改良体の強度確認を行うために実施した針貫入試験の結果を図-7に示す。同図から、次の傾向が見られる。

①シリーズⅢの針貫入強度は、左右軸に対して中軸がもっとも大きくなる傾向を示す。しかし、シリーズⅠとⅡでは、その傾向が小さい。

②針貫入強度のバラツキは、シリーズⅠ<シリーズⅡ<シリーズⅢとなっており、補助装置有無の差が明らかとなった。

③シリーズⅠは、変動係数が20%程度であり、各改良軸の関係を比べると、もっとも安定している。

これらの結果から、シリーズⅠの2種類の補助装置付き2軸注入3軸混合方式は、シリーズⅢの3軸注入3軸混合方式に比べ、中軸にもセメントスラリーが十分満遍なく行き渡り、各改良軸間で均一な改良体が造成されて、品質的に安定した改良体が得られることが明らかとなった。

（b）改良体コア状況と一軸圧縮強度

針貫入試験後の深度から、オールコアサンプリングを行い、改良体のコア採取率とコアの一軸圧縮強度を調査した。調査結果は、次のとおりである。

①コア採取率は、どのシリーズも85~100%の範囲であり、良好である。

②図-8に示すように、コアの一軸圧縮強度は、スラリー混入率が大きいほど強度が高く、バラツキ（変動係数）も小さくなる。

③一軸圧縮強度の平均は、どのシリーズも同程度の値を示している。従来型の2軸注入2軸混合方式とすべての3軸混合方式は同様なコア強度結果となっている。また、2軸注入3軸混合方式は、各軸注入方式と同等の改良強度が得られており、十分実用に供し得るものと考えられる。

④図-9に示すように、2軸注入3軸混合方式では、中軸が左右軸より強度が高い傾向を示すが、スラリー混入率が大きくなるとその差は小さくなる。

（3）現場実験のまとめ

①2軸注入3軸混合方式の深層混合処理工法は、従来型の2軸注入2軸混合方式と同等の品質が確保で

表-1 現場実験シリーズの種類

シリーズ名	補助装置の種類	注入混合方式	ケース数
①シリーズⅠ	補助装置（A）	2軸注入3軸混合	6ケース
②シリーズⅡ	補助装置（B）	3軸注入3軸混合	6ケース
③シリーズⅢ	なし	3軸注入3軸混合	6ケース
④シリーズⅣ	なし	2軸注入2軸混合	2ケース

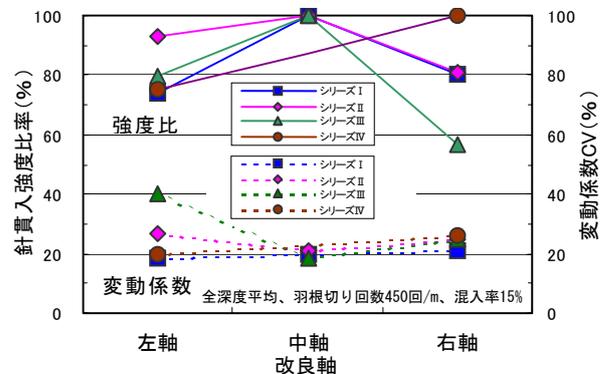


図-7 針貫入強度と改良軸の関係

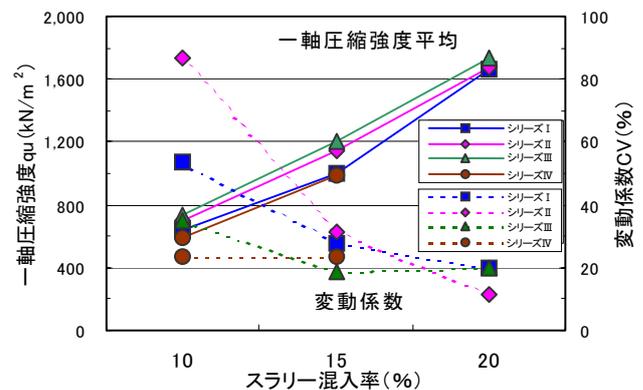


図-8 一軸圧縮強度と混入率の関係

きる。

②補助装置のない3軸式(シリーズⅢ)は、中軸の強度が高い値を示す傾向にある。

③2種類の補助装置付き2軸注入3軸混合方式(シリーズⅠ)は、3軸注入3軸混合方式よりも強度のバラツキが小さいことが明らかになった。

6. 施工事例

表-2に、CDM-レムニ2/3工法の施工事例と改良仕様を示す。5件の施工事例には、地方公共団体の官庁工事と民間工事が含まれている。事例1は、千葉県浦安市の研修施設建屋工事において、建屋基礎の液状化防止を目的として採用されたもので、改良体配置は格子状改良である。事例2は、千葉県佐原市における一般廃棄物最終処分場の建設工事である。事例3は、愛知県豊田市の土地区画整理事業における宅盤改良である。事例4は、東京都中央区晴海の護岸建設工事におけるケーソンの基礎地盤改良である。事例5は、新潟県上越市における新設地上タンクの基礎地盤改良である。セメントスラリーの注入混合方式は、事例1~3及び事例5は2軸注入3軸混合であり、事例4はスラリー混入率が45.5%と大きいため、3軸注入3軸混合方式で施工している。事例2の一般廃棄物最終処分場建設工事における施工状況と改良体出来形を写真-3、4に示す。

7. 現場の改良体強度

図-10は、表-2に示す5件の施工事例における改良体コア強度(一軸圧縮強度試験値)と変動係数を、スラリー混入率との関係で整理したものである。変動係数は概ね30%以下で深層混合処理工法として良好な値を示している。ただし、事例4ではスラリー混入率(45.5%)が大きいにも係らず、変動係数がやや高い値を示している。これは、改良対象と

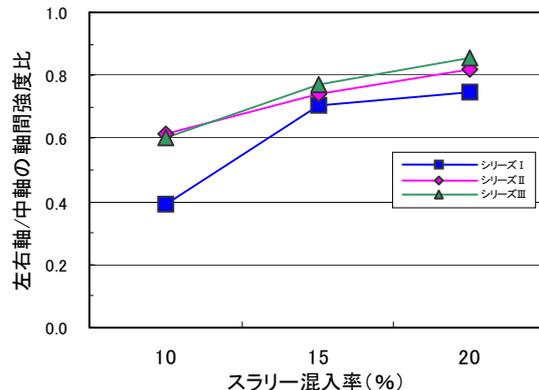


図-9 軸間強度比と混入率の関係



写真-3 レムニ2/3工法の施工状況



写真-4 改良体の出来形状

表-2 施工事例と改良仕様

施工No.	改良径	打設長 (m)	改良土量 (m ³)	固化材添加量 (kg/m ³)	改良率 (%)	スラリー混入率 (%)	設計基準強度 (kN/m ²)
事例1	φ1200mm×3軸	14.0	5,265	115	36	15.3, 17.9	700
事例2	φ1000mm×3軸	4.0~11.0	41,520	90	84.2	11.9	240
事例3	φ1300mm×3軸	11.5	3,335	115	83.3	15	500
事例4	φ1300mm×3軸	3.0	10,172	350	83.3	45.5	900
事例5	φ1300mm×3軸	6.9	10,066	310	83.3	40	3,200※

※実施工での設計基準強度

なる原地盤が、木片等の異物を混入する底泥土（ヘドロ）で、地盤自体が不均一な状態であり、これにより改良強度にもバラツキが生じたものである。

図-11 は、各事例の設計基準強度 (q_{uck}) に対する室内配合試験強度 (q_{ul}) 及び現場 90%信頼限界強度 ($q_{u90} = q_{uf}(1 - 1.3 \cdot Cv)$) をスラリー混入率の関係で整理したものである。現場 90%信頼限界強度 (q_{u90}) の設計基準強度 (q_{uck}) に対する比率は、施工条件によりバラツキが見られるが 1.3~3.8 の範囲となっている。さらに、混入率が増加すると q_{u90}/q_{uck} が小さくなる傾向を示し、良好な攪拌混合ができていると判断できる。室内配合試験強度 (q_{ul}) の設計基準強度 (q_{uck}) に対する比率は概ね 3.0 程度となっているのに対し、いずれの結果も現場 90%信頼限界強度 (q_{u90}) の設計基準強度 (q_{uck}) に対する比率が 1.0 を超えている。このことより、従来一般に使用されている強度安全係数 (3.0~4.0) を見直すことも考えられる。この辺の可能性を含めて、改良強度をより合理的に設定できるように、今後とも現場の実績データを蓄積して行きたい。

8. レムニ2/3工法の適用効果

レムニ2/3工法の適用効果の目安を把握するため、ここでは、従来の2軸型工法 (CDM工法 $\phi 1,000$) を比較対象にして、改良体の混合造成費と施工能力に関してレムニ2/3工法 $\phi 1,300$ 改良径とを比較する。この際の比較条件としては、打設長・改良長・地盤条件を同一のものに設定し、混合造成費では材料費と運搬・組立・解体費を含まずに算定している。図-12 には、平成18年度版の体系における改良体の改良長と混合造成費・施工能力の関係で両工法の比較結果を示す。同図から明らかのように、レムニ2/3工法は、従来2軸型工法 $\phi 1,000$ に比較して、適用効果が極めて優位であることが確認できる。

9. おわりに

本報告は、大径3軸型の深層混合処理機を使って軟弱地盤を改良する新工法「レムニ2/3工法」について、開発概要、施工事例及び現場の改良体品質を記述した。本工法は、まだ誕生したばかりのものであるが、幸いにも施工案件にも恵まれ、施工実績が増加する状況である。今後は、施工実績を積み重ねるとともに、幅広くより信頼できる現場適用データの蓄積に努めたいと考えている。

また、本工法をより長尺化、より大径化という観点でブラッシュアップをさらに図り、発展させて行きたいと考える。

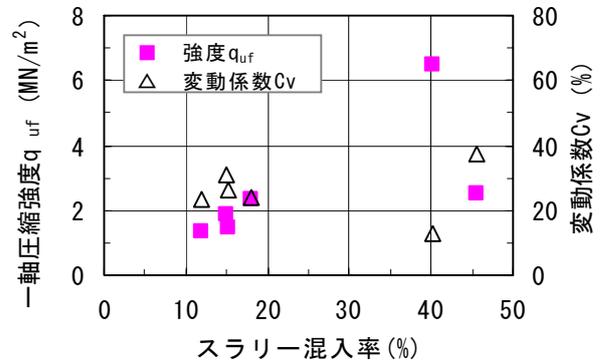


図-10 一軸圧縮強度と混入率の関係

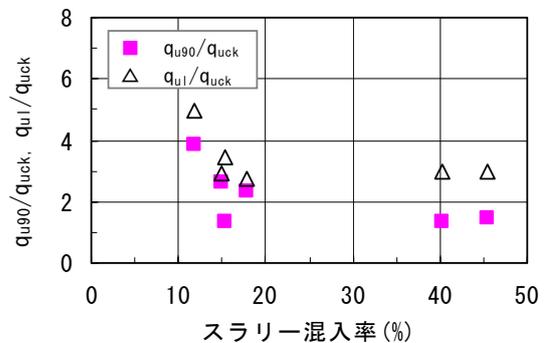


図-11 強度比率と混入率の関係

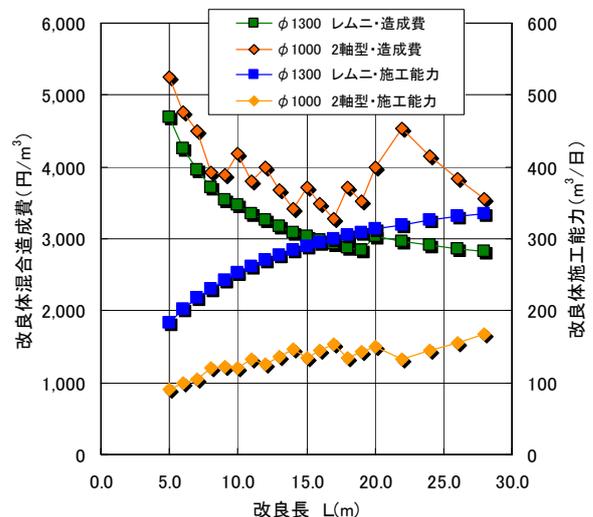


図-12 混合造成費と施工能力の比較

《関連文献》

- 1) 川崎他：CDM-レムニ2/3工法-大径3軸型による深層混合処理工法の合理化施工-，土木施工，Vol. 46, No. 12, 2005. 12
- 2) 原他：大径3軸型による深層混合処理工法の合理化施工-1 模型実験・実証実験，第41回地盤工学研究発表会，2006. 7-7-スリー
- 3) 守安他：大径3軸型深層混合処理工法 (CDM-レムニ2/3) の改良体強度，第41回地盤工学研究発表会，2006. 7

7. 多目的作業車をベースとした（維持・災害）ユニットの開発

国土交通省四国地方整備局 四国技術事務所 向井 一夫
 ○ 大岡 正憲
 中田 雄一

1. はじめに

道路維持用機械の稼働実態は、1年を通じて稼働するものではなく、定間隔または苦情処理対応等不定期な稼働となることが多い。また、災害対策用機械は、災害出動および訓練時のみの稼働となる。これらの機械のほとんどはトラック系車両をベースとしており、ベース車両自体としては共通している場合が多い。

今後、維持管理費用の縮減が望まれる中において、共通している部分を共通化し、維持コスト縮減に寄与していく必要がある。

そこで、共通ベース（4 t車クラス）と、架装する作業ユニット（道路維持用機械ユニット、災害対策用機械ユニット）の開発を行い、各作業の効率的な運用を図ることによりコスト縮減を目指すものである。（図-1）

2. 開発概要

2. 1 実態調査

現状の道路維持用機械、災害対策用機械の実態を知る為に、以下の項目について調査を行った。

2. 1. 1 稼働実態調査

機種別の年間稼働率は、高所作業に関わる機械（リフト車、高所作業車）や汎用性のある機械（作業車、標識車）の稼働率は高く、災害対策用機械は低い傾向である。

重複稼働状況では、特に重複稼働率が高いのは、作業車と凍結防止剤散布機、排水管清掃車と側溝清掃車、路面清掃車と散水車であった。

2. 1. 2 アンケート調査

アンケート結果から、ユニット化対象機種種の選定やベース車両の規格の検討にあたり考慮する主な点として、以下の調査結果がでた。

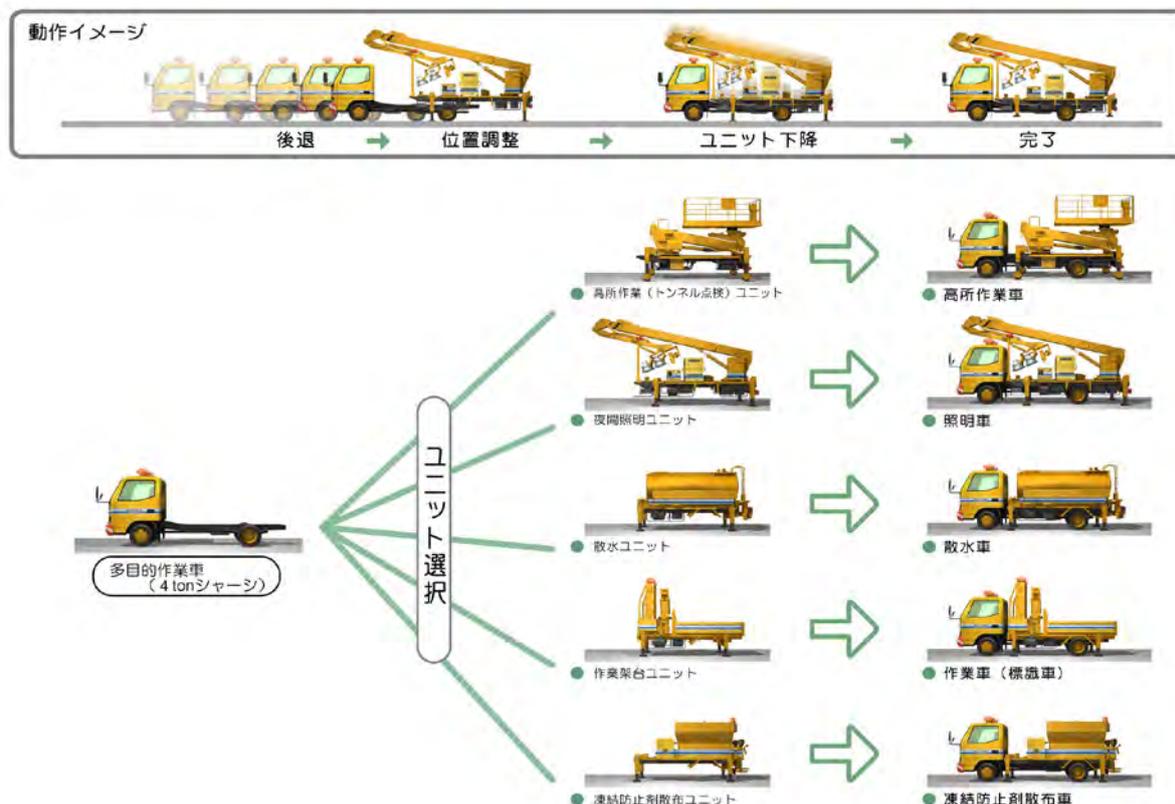


図-1 多目的作業車と作業ユニットのイメージ図

- ・作業車や高所作業車といった汎用的な機械は、業者保有やレンタル・リースの機械で代用可能。
- ・重複稼働では、路面清掃作業・側溝清掃作業・排水管清掃作業などの大型車同士の組合せが多い。
- ・標識車と作業車の統一、高所作業車とトンネル点検車の統一にあたっては問題ない。
- ・大型自動車免許保有者の割合が少ないため、普通自動車免許で運転できる車両が望ましい。

実態調査の結果から、ユニット化の設計で留意すべき点を以下のように整理した。

- ・ベース車両の規格を普通自動車免許で運転可能な機械を目標に、作業ユニットの小型化を図る。
- ・作業ユニットの脱着に必要なジャッキストロークは、格納庫のせり上がり量を考慮した長さにする。

2. 1. 3 関連法規の調査

ベース車両、作業ユニットごとに必要な「設計・製作」「車検・指定申請」「運用」の関係法規などを調査、整理する。

2. 2 ユニット化対象機種を選定

2. 2. 1 ユニット化の条件

ユニット化対象機種を選定する条件は次のとおりとした。

①機械構造上の観点から見た条件

- ・ベース車両が共通化できること。
- ・作業装置がユニット内に架装できること。

②運用上の観点から見た条件

- ・保有台数が極端に少なくないこと。
- ・高稼働率でないこと。
- ・重複稼働がないこと。あるいは、片方の機械がレンタル・リース等で代用が容易であること。

2. 2. 2 ユニット化対象機種

上記条件を考慮した結果、中型車をベース車両とし、表-1に示す機種をユニット化対象機種として選定した。

表-1 ユニット化対象機種

現行作業車	ユニット化対象機種
① トンネル点検車 リフト車 高所作業車	トンネル点検ユニット
② 作業車・標識車	作業標識ユニット
③ 散水車	散水ユニット
④ 照明車	照明ユニット
⑤ 凍結防止剤散布機	凍結防止剤散布ユニット

2. 3 ユニット化事前検討

2. 3. 1 ベース車両規格

現諸元と同じユニットを積載する場合、ベース車両は5.5t車(車両総重量11t)となり、大型自動車免許(車両総重量8t以上)が必要となる。普通自動車免許(車両総重量8t未満)で運転できる範囲で、最もスペックダウンの少ないベース車両は、2tベース4t2WD車となるが、トンネル点検ユニット及び照明ユニットの軽量化、作業標識ユニット、凍結防止剤散布ユニット及び散水ユニットの積載量減少は避けられない。また、災害出動を考慮すると駆動方式は4WDが望ましいが、出動実態では舗装路がほとんどなので、今回は2WDを選択する。ベース車両規格は下記のとおりとする。

■ 車両総重量 8,000kg未満
(2tベース4t車2WD)

■ 最大積載量 4,700kg
(最大積載量は作業ユニット質量に相当する。)

2. 3. 2 作業ユニットの検討

①トンネル点検ユニット

作業装置の軽量化を図ることにより、現行に比べて作業床面積及び最大作業半径等が縮小される。

②照明ユニット

垂直ポール式を採用する。ユニット質量は投光高10mの場合で4,020kgである。質量に余裕があるので、さらに投光高を上げることを検討する。

③作業標識ユニット

- ・現行クレーン装置のアウトリガーが、ユニット脱着に対応できていないので改造する必要がある。

- ・現行の凍結防止剤散布機を搭載した場合の散布剤積み込み量を確保するため、標識装置、荷台等の軽量化を図る必要がある。

④凍結防止剤散布ユニット

検討を行った結果、現行諸元に準じてユニット化が可能である。しかし、緊締装置位置の統一上、機器のレイアウト変更が必要となる。

⑤散水ユニット

取水ポンプを油圧水中ポンプにすることで約3,200Lの積載が可能となった。

⑥各ユニットの動力

作業ユニットの動力には油圧動力を採用とし、油圧装置はベース車両側に搭載するものとする。

2.4 脱着機構の検討

脱着方式は、色々な方式を検討した結果、ユニット側の制限が少なくシステム全体の重量が少なく済む水平脱着式(図-2)が適していると判断した。

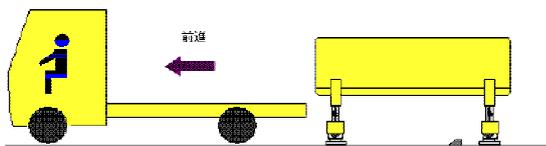


図-2 水平脱着方式

水平脱着式とした場合、ユニット化の検討対象とする5種類の作業ユニットのうち、トンネル点検ユニット、照明ユニット、作業標識ユニットは作業の性質上アウトリガーを装備していることから、アウトリガーを脱着用のジャッキと兼用できるメリットがある。残る散水ユニット、凍結防止剤散布ユニットにはアウトリガーの必要はないが、脱着用としてジャッキを装備することで全てのユニットに統一して脱着用のジャッキが備わる。

2.5 締結構造の検討

締結用の緊締金具は、国際・国内貨物コンテナ用として多数の実績がある。その中でも、上方向荷重に対して抜け止め(すみ金具)のあるツイストロック型(図-3)を選択した。

締結構造の設計条件を表-2に示す。

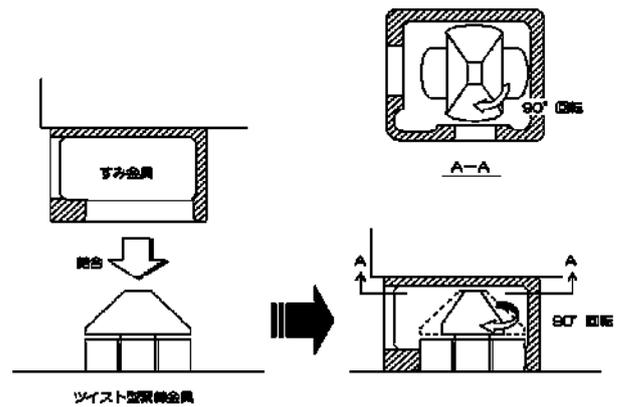


図-3 ツイストロック

表-2 締結構造の設計条件

締結方式		ツイストロック方式	
締結の金具	ベース車両	規格	緊締金具(ツイスト型) JIS Z1629
		数量	4個
	ユニット	規格	すみ金具 JIS Z1616
		数量	4個

2.6 動力伝達方式の検討

ユニット化を想定し、ベース車両から動力を取り出すには、次の4種類が考えられる(図-4)。各方式を比較した結果、ベース車両側で共通的に装備すべき動力伝達方式はトランスミッションPTOとし、図-4の①のPTOで油圧ポンプを駆動し、油圧ホースを作業ユニット側の油圧機器に繋ぎ、駆動する方式を選択した。

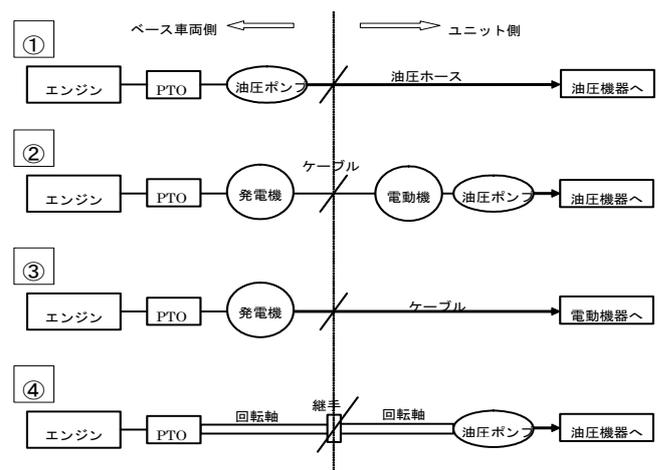


図-4 動力伝達方式

2.7 ベース車両の設計

2.7.1 シャーシの選定条件

シャーシは表-3に示す条件をもとに選定した。

表－3 シャーシの選定条件

項目	選定条件	備考
最大積載量	4,700kg 以上	緊締装置等架装含む
車両規格	2t ベース 4t 車 (車両総質量 8,000kg)	車両総質量8,000kg で積載量が最も多くとれるもの
駆動方式	後 2 輪駆動	
PTOの方式	トランスミッション PTO	

2. 7. 2 シャーシの選定

表－4 に国内自動車メーカーの 2 t ベース 4 t シャーシを示す。

表－4 国内メーカーの 2 t ベース 4 t シャーシ

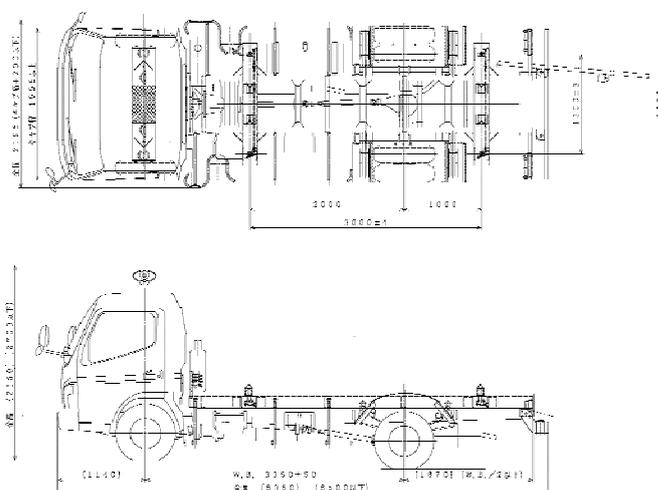
メーカー	車 型	ホイール ベース(mm)	フレーム 幅(mm)	備 考
日野	PB-XZU414M-TKFSW	3,430	750	最大積載量は 4,000kg
三菱	PA-FE83DEY74	3,350	753	
いすゞ	PA-NPR81N-L5PXYJS	3,365	850	フレーム幅は近い
日産	いすゞのOEM	3,365	850	将来 750mm に変 更の可能性有り

このうち、最大積載量が 4 t 以上のシャーシは 3 メーカーあり、メーカーによってフレーム幅は 750 mm と 850 mm の 2 種類がある。ただし、フレーム幅については、メーカー聞き込みにより近い将来 750 mm に変更される可能性がある。

ホイールベースについては、最大積載量 4,700 kg 以上のシャーシとして、表－4 に示すホイールベースが 3,300 mm 前後のものと、3,800 mm 前後のものがある。3,800 mm とした場合、作業ユニットにスペース的な余裕がでてくるが、ホイールベースが長くなる分、メインフレーム、作業ユニット側フレームも長くなることから、全体重量増になり、積載量が少なくなる。従って、今回検討では、3,300 mm 前後のホイールベースを選択した。図－5 にベース車両を示す。

3. 今後の計画

平成 17、18 年度の 2 ヶ年で開発行うものであり、平成 17 年度は、机上での調査、設計が中心であった。平成 18 年度は、今回の結果をもとに試作機を用いて脱着構造、締結構造、動力伝達方式の信



図－5 ベース車両図面

頼性、耐久性等を確認する予定であり、各作業ユニットの詳細設計を行う。

各作業ユニットの詳細設計及び試作機での実験を行って、共通に装備すべき部分について見直すことで、より効率的なシステムとしての提案が可能になると考えられる。

8. 災害復旧時における安全施工技術の検討

(遠隔式大型土のう設置装置の開発検討)

国土交通省 東北技術事務所 機械課 鹿野 安彦
○宮本 典明

1. はじめに

近年、全国的に自然災害が多発する傾向にあり、ここ数年でも大地震や集中豪雨による河川の氾濫など、大規模な災害が相次いでいる。その復旧対策は、被害拡大や二次災害の防止の観点から迅速な対応が重要である。対策工法には状況に応じて様々なものがあるが、大型土のう工は、汎用性が高く、機材の調達の利便性や作業の迅速性等から、多用される傾向にあり、代表的な復旧工法となりつつある。しかし、災害現場等における大型土のうの設置は、足場等もなく重機が錯綜するなかで、位置決め、玉掛け・外しなど人的作業が伴い、転落や重機接触等の二次災害の危険性が高く、安全対策上の課題となっているのが現状である。

本論は、災害復旧作業の安全確保と作業の迅速化を両立させることを目的として、自動化・遠隔化技術を活用し、作業員の安全対策を最優先させた遠隔式大型土のう設置装置の開発検討を進め、開発構想と要求仕様をとりまとめたので、概要を報告するものである。

検討にあたり、過去の災害事例から想定される活用場面を明確にし、事故事例や作業経験者の実態調査から施工要素(使用機械と作業員、材料等)とプロセス、そこに存在する危険要素と無人化・機械化等のポイントを分析した。そのうえで、作業プロセスと対応する機能を再構築し、危険性の高い作業要素が確実に解消され、安全性の確保と作業の迅速化が期待できる機能として、大型土のう袋、遠隔操縦式運搬機、土のう把持装置、誘導機能を構成要素とする「遠隔化大型土のう設置装置」の開発仕様のとりまとめを行ったものである。各要素技術の現状から土のうを自動玉掛・玉外しする把持装置と誘導機能を優先開発項目として、現在までに、模型実験等による機能検証段階に至っている。

2. 現状の課題と開発検討の目的

大型土のうは、災害時の応急復旧や緊急対策工とし

て堤防や護岸などの洗掘防止、押さえ盛土、土留め、また崩落箇所の緩衝材等として、緊急的に施設の機能を維持するために使用されている。そのため災害時には、迅速な設置が要求されるとともに、設置作業の安全性の確保が課題となっている。図-1に設置作業の状況と作業員、施工機械の位置関係及び安全上の課題等を示す。特に、足場の不安定箇所での土のう袋の玉掛け・玉外し作業時や誘導作業時は、落下、転落、挟まれ、巻き込まれ等の危険性が非常に高いものとなっている。そこで、これら危険作業を解消し作業の迅速化を目的として、大型土のう設置作業の自動化・遠隔化等技術の開発検討を行ったものである。



< 懸念事項 >

- ・危険箇所への立ち入り
- ・土のう上での作業員の転倒
- ・土のうからの落下
- ・土砂崩れ等への巻き込まれ など



< 懸念事項 >

- ・重機との接触
- ・吊り紐への挟まれ、巻き込まれ
- ・吊り荷の落下 など

図-1 土のう設置状況と課題

3. 開発検討

3.1 災害時活用事例と現場状況等

過去の災害における大型土のうの活用事例を基に、開発装置を活用すべき具体的な現場状況等を整理した。

3.1.1 河川災害事例

洪水時の河岸洗掘箇所への復旧や破堤箇所の応急復旧で「遠隔式土のう設置装置」を活用することにより不安定な堤防天端付近や堤外地の水際に立ち入ることなく作業が可能となる。(図-2参照)

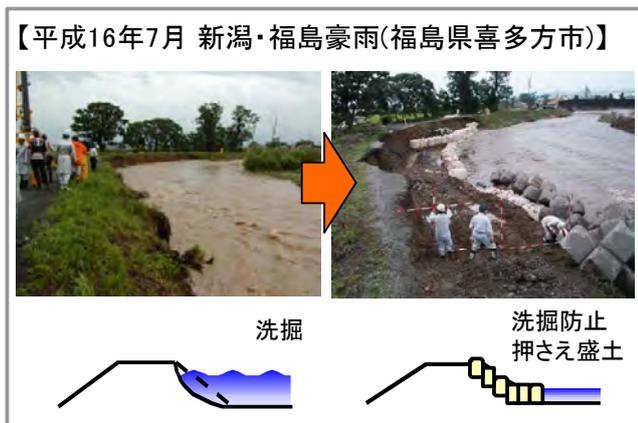


図-2 河川災害事例

3.1.2 道路災害事例

盛土法面の崩れや落石等の可能性がある箇所の予防措置では、二次災害が発生する危険性が高いことから、「遠隔式土のう設置装置」を活用することにより、保安距離を設けた作業が可能となる。(図-3参照)



図-3 道路災害事例

3.2 大型土のう設置作業と要求機能の検討

活用時の現場状況を踏まえ、災害復旧等の施工経験のある土木工事会社に対するアンケート調査とヒヤリング調査の結果から、「遠隔式大型土のう設置装置」に

要求される機能の検討を実施した。

3.2.1 土木工事会社への調査結果

(1) 土のう設置時に危険性について

大型土のう設置作業時に危険と感じた各項目の割合を図-4に示す。設置作業では、玉掛け・玉外しや位置決めを土のうに作業員が立ち上がったの作業となることから、落下・転倒や重機との接触、吊り紐への挟まれ、巻き込まれの割合が高く、複数の危険性を感じながらも作業を行っている実態であった。

また、ヒヤリング調査では、幸い事故発生の事例は皆無であったが、災害対応では迅速性も要求されるため、危険な場所への立ち入る場合あることに危険性を感じるという意見や、撤去時であるが、設置した土のう袋の劣化による破損・落下が多く、危険性を感じるという意見が設置時よりも多かった。

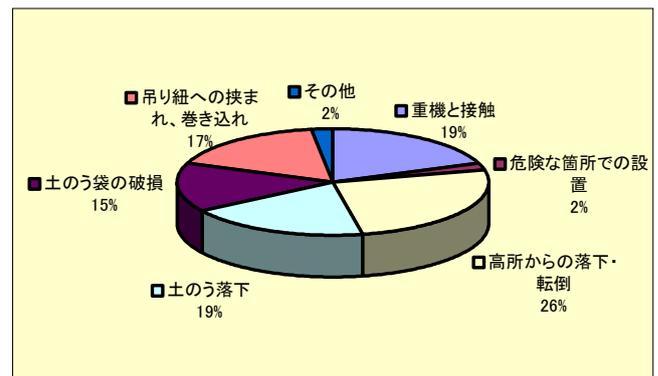


図-4 設置時の危険割合

(2) 土のう設置時の使用機械について

使用機械は作業条件によるが、クレーンの設置が困難で設置時の微調整や掘削等の他の作業と併用する場合は、「クレーン仕様バックホウ」が使い勝手が良いとする意見が多かったが、高低差のある場所やクレーンの設置が容易な現場等では、「クレーン類」が使いやすいという意見であった。



写真-1 クレーン仕様バックホウ

3.2.2 土のう設置作業と遠隔化・自動化の検討

これまでの検討結果を踏まえて、現在の大型土のう設置作業フローと各工程の要求機能から、どの工程をどのような機能で遠隔化、自動化することにより危険作業を減少又は解消させることが可能であるか、について検討を行った。

結果は、図-5に示すとおり現状の作業員による人力手作業である土のう袋の玉掛け・玉外し作業を「土のう把持装置」により自動化・遠隔化することで作業

員が危険箇所へ立ち入る必要が無くなり、また、土のう造成位置までの移動や適切な設置位置への吊りフック等を誘導する人力指示作業を「誘導機能」により自動化・遠隔化することで安全な安定した位置からの誘導が可能になるため、作業員と設置機械の間の危険性はほぼ解消される。さらには、これらの要素機能と既存（遠隔操作）機械を組み合わせた「遠隔式土のう設置装置」により、安全性の向上と作業の迅速化が期待できるものと考えられる。

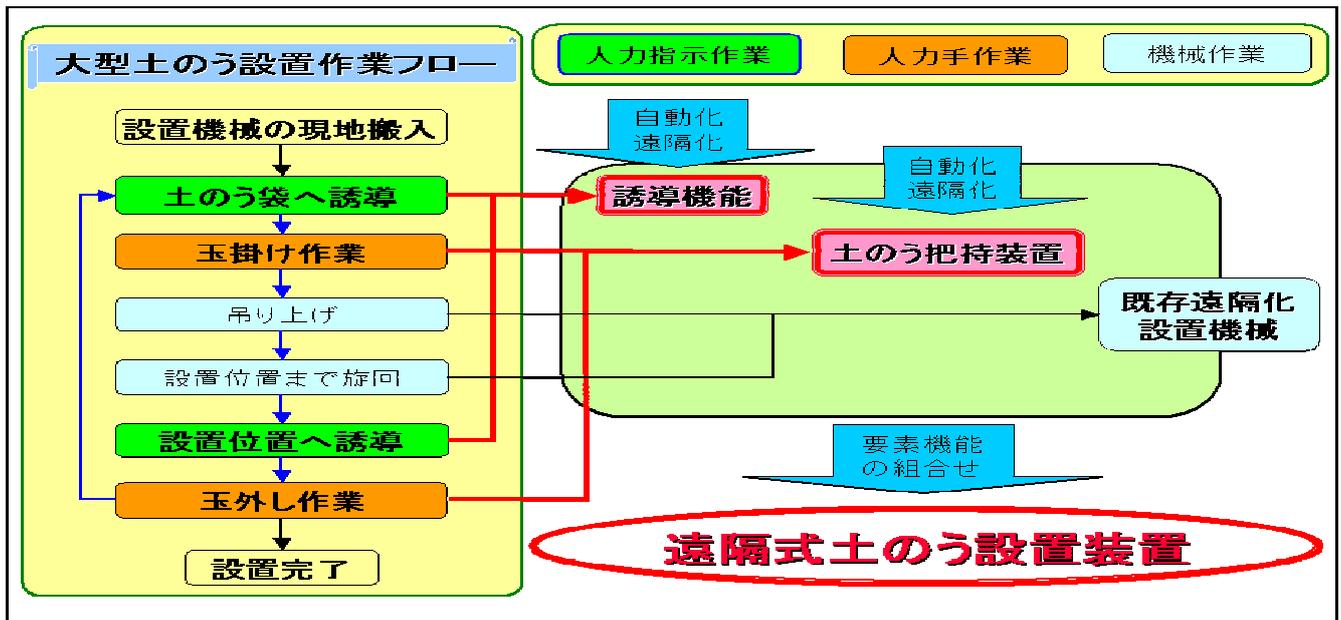


図-5 大型土のう設置作業フローと要求機能

3.3 要素技術と開発仕様

要求機能の検討結果から、遠隔式土のう設置装置の要素技術として次の3要素を抽出したが、開発状況調査から既存機械（技術）が市場に無いもの、類似機械（技術）は存在するが検討が必要なものがあり、今後の技術開発項目と主要仕様を検討した。

3.3.1 技術動向と開発項目等

(1) 土のう把持装置

現状技術として、木材やスクラップ等を掴む装置はあるが、大型土のうを掴む装置は存在しないこと、また、玉掛け又は玉外しの一方が可能な装置はあるが、1台で玉掛け・玉外し両作業を無人で可能な装置は存在しないことから、土のう袋と併せて自動化・遠隔化装置の開発の必要がある。

なお、把持装置はクレーン仕様バックホウ等のア



写真-2 既存の掴み装置等

タッチメントとして開発し、災害対応の外、一般施工においても使用可能な汎用性も考慮して開発する必要がある。

(2) 誘導機能

無人遠隔操作で大型土のうを掴み、設置する作業を効率的に行うためには、製作ヤード等の土のう袋の中心付近の真上と積み上げ設置目標地点に土のう把持装置を精度良く誘導する誘導機能の開発が必要

である。

(3) 遠隔操縦式設置機械の検討

被災地で危険箇所での対応も考慮する必要があり、既存の遠隔操縦式機械を活用するため、適応できる機種等の検討が必要となる。

3. 3. 2 開発仕様とりまとめ

開発目標とする遠隔式土のう設置装置の主要仕様(案)を表-1に示す。特に、本体ベース車両は

大型土のうの質量に対応可能な必要最低限の規格を示しており、この規格に限定されるものではない。また、ホイールクレーン等の使用も考慮した仕様で考えている。なお、作業装置、安全対策の細部仕様は今後の開発過程において最適化するものである。

表-1 遠隔式大型土のう設置装置の主要仕様(案)

対象作業	大型土のう工(設置)
対象物	<ul style="list-style-type: none"> ・大型土のう(トンパック/ジャンボ土のう) ・寸法: ϕ 1.1m ・重量: 約1.0t(最大約1.8t)
操作制御	<ul style="list-style-type: none"> ・搭乗及び遠隔操作方式 ・操作距離: 約50m程度(目視操作を想定)
作業範囲	<ul style="list-style-type: none"> ・揚程: 5m程度 ・リーチ: 6m程度
本体	<ul style="list-style-type: none"> ・ベース車両: 0.8m³級バックホウを想定 ・運転重量: 約20t ・定格出力: 100kW程度 ・全幅: 3.0m未満
作業装置	<ul style="list-style-type: none"> ・自動掴み装置(玉掛け・玉外し装置) ・油圧駆動のアタッチメント
安全対策	<ul style="list-style-type: none"> ・荷重検出(荷重を表示、過負荷制御) ・位置検出(作業半径、作業高さを表示) ・圧力検出(掴み力を表示) ・安全用センサ(接触・超音波等)

3. 4 大型土のう設置装置の開発イメージ

設置機械を既存遠隔操縦式バックホウをベースとした「遠隔式大型土のう設置装置」の開発イメージを図-6に示す。また、土のう把持機構の模型による実験状況を写真-3に示す。

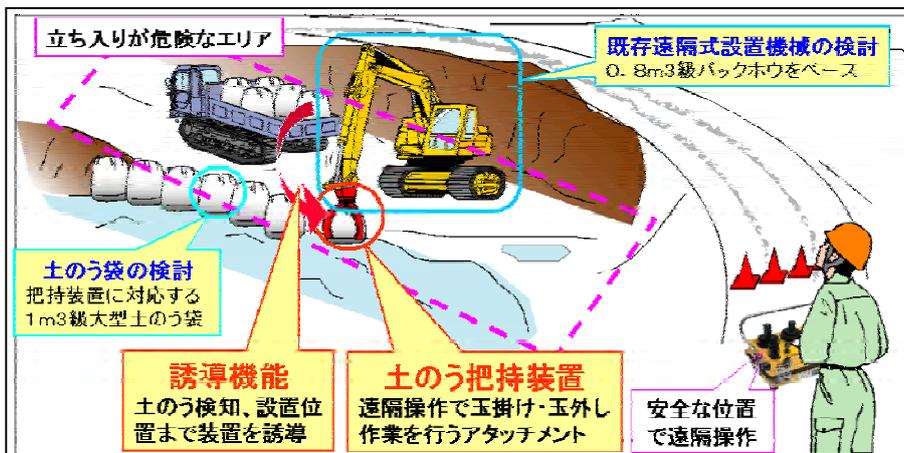


図-6 遠隔式大型土のう設置装置の開発イメージ図



写真-3 把持機構の実験状況

4. おわりに

今回、災害復旧時における安全施工技術として検討した大型土のう工の遠隔化は、作業員の危険作業を回避するうえでは有効な手段となるものと考えている。また、災害時に限らず一般工事でも多用されている工種でもあり、汎用性も考慮した設計を考えている。今年度から、耐久性の高い土のう袋の使用を考慮した「把持装置」の開発を行っており、模型実験等から具体的な把持機構の設計を進めている。

9. 災害教訓を基にした排水ポンプ車の改良について

国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 機械課長 本間 政幸
前) 機械課 整備係長 笠原 邦昭
整備係主任 ○高井 謙一

1. はじめに

北陸地方は、平成16年度に度重なる風水害や地震災害に見舞われ、大きな被害を受けた。これらの災害発生時には、北陸地方整備局が保有する災害対策機械や他の地方整備局からの応援機械も活躍し、国が管理する河川・国道のみならず自治体への応援を行い災害対応に従事した。

この結果、災害現場において災害対策機械の設営・運用等に係る様々な教訓を残した。

北陸地方整備局では、平成16年度に発生した「新潟福島豪雨」、「新潟県中越地震による芋川河道閉塞復旧作業（写真1）」で、長期間に及んだ緊急排水作業と、想定出動範囲を超えた対応を行った排水ポンプ車について、現場での教訓を基にポンプの小型軽量化を行うとともに、大排水量・高揚程・長距離の選択を可能とし、運搬・設営方法の改善について改良を行ったので、これらについて報告するものである。



写真1 芋川河道閉塞復旧

2. 緊急排水作業における問題点

2. 1 ポンプ揚程の不足

写真1に示す芋川河道閉塞復旧作業では、排水ポンプに設計値以上の全揚程と排水距離を求められた。ま

た新潟福島豪雨では、市街地での排水作業のため長距離排水（送水）が必要となった。

このように排水ポンプには、より高い所へ、より遠い所への排水が求められており、排水ポンプの全揚程を向上させる必要があった。

2. 2 ポンプの重量

従来型の排水ポンプ車（60m³/分）に搭載された排水ポンプは、1基当たり30m³/分の排水能力を持つが、ポンプ単体重量が550kgと重く、設営・移設・撤去を行うためには、通常25t以上のクレーンが必要である。

しかし芋川河道閉塞復旧作業では作業現場にクレーンが入れず、限られた重機での設営作業は困難を極めた（写真2）。



写真2 限られた重機での排水ポンプ設営状況

また新潟福島豪雨でも、狭隘な堤防天端や市街地にはクレーンが入れない、強風時は設営が行えない等の問題が報告された。

この様にクレーンの使用が困難な条件を想定し、全て人力での設営を可能とするため、排水ポンプを大幅に軽量化する事が求められた。

2. 3 輸送における問題

現場までの往路が寸断され、輸送手段が自衛隊の大

型輸送ヘリによる空輸のみとなった芋川河道閉塞作業では、緊急調達可能な大排水量ポンプとして、国土交通省が保有する排水ポンプ車を分解して空輸し使用する事となった。

しかし排水ポンプ車の各操作制御盤等は、分解・組立時の離線・結線工程に時間を要し、現場搬入までに時間を要してしまった。

迅速な空輸対応のため、離線・結線工程における作業の簡素化が求められた。

2. 4 照明の問題

長期間で広域的な排水を求められた新潟福島豪雨では、夜間も排水作業が続けられ、設営、撤収、排水場所の変更も指示された。この時、夜間の機械管理作業には照明車が必要であり、排水ポンプ車は常に照明車を同行した（写真3）。

しかし照明車の台数には限りがあり、必要な照明車を十分確保できない等の問題が発生し、機械の管理に支障をきたす事もあった。

このため夜間排水作業を想定し、単独作業時の運転管理を行う事の出来る照明灯が求められた。



写真3 照明車と排水ポンプ車

3. 排水ポンプの改良

3. 1 高揚程化

排水ポンプは小型軽量ポンプを使用して、より高い所へ、より遠い所へと排水するため、ポンプとポンプを直列接続可能な構造とした（写真4）。

排水ポンプの接続方法は、水中に投入されたポンプから排水ホースを経由して、陸上に設置した2台目のポンプを直列で接続し、さらに排水ホースを接続する

もので、ポンプ全揚程を2倍にする方法である（図1）。

採用した排水ポンプは単体の場合、全揚程10mであり、直列接続を行う事によって全揚程を最大20mとしている。



写真4 直列接続状況

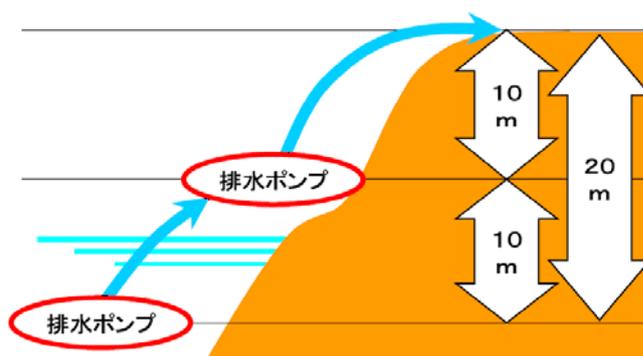


図1 排水ポンプ直列接続の概念

3. 2 軽量化

人力設営を可能とするため軽量化した新しい排水ポンプは、小型軽量化のため軽量高出力モーターを採用し、1台当り重量を30kg、11台で60m³/分の排水量に対応している（表1、写真5）。

表1 排水ポンプの性能比較

	数量(基)	重量(kg)	吐出力 (m ³ /分)	全揚程 (m)	出力(kW)	設営に必要な機械
改良前	2	550	30	8	71	クレーン 25t以上
改良後	11	30	5.5(5.0)	8(10)	12	不要

※（）内は揚程10m時の排水能力



写真5 新旧排水ポンプ (左:改良前、右:改良後)

3. 3高揚程排水試験の結果

今回直列接続を可能とした排水ポンプ車の性能を検証するため、高揚程排水試験を実施した。

試験にあたっては、実際の災害現場に近い条件とするため、災害時に使用する排水ホースを接続した状態で、最大で25mの実揚程を確保して実施している。

比較に使用した工場流量は、「JIS B 8301 遠心ポンプ、斜流ポンプ及び軸流ポンプ—試験方法」、「JIS B 8302 ポンプ吐出し量測定方法」に基づき計測された値である。

本試験で得られた流量は、工場で計測された流量に対して、概ね70~80%の値となっており、ホースの損失を確認する事ができた事から、今後は排水作業時間を想定する時の目安として利用可能である(表2)。

表2 高揚程排水試験結果

実揚程 m	15.0	20.0	25.0
現場流量 m ³ /分	3.9	3.5	2.3
(ホース延長) m	(115.0)	(170.0)	(220.0)
工場流量 m ³ /分	5.3	4.2	2.9
効率 %	73.5%	83.3%	79.3%

※ホース敷設勾配: 9~10%

4. 輸送性に関する改善

今回の改良では、空輸時における分解を前提とした構造へと改める事により、分解組立の作業時間を短縮している。

これらの改良内容は、各機器・操作制御盤内の配線をコネクタ接続化(写真6)し、各操作制御盤と車体の固定方法は、溶接を使わずボルト止めとする等、分解・組立が容易な構造としている。



写真6 コネクタ接続

また各操作制御盤の分解後寸法は、自衛隊の大型輸送ヘリ(CH47J型)内部に搭載可能な寸法とした。

5. 作業用照明装置の設置

従来から排水ポンプ車に装備されていた補助照明装置は、浸水箇所(排水箇所)へ投入済みの排水ポンプを監視する等のスポット的照明であり、ポンプ運転管理等の作業には使えなかった。

今回の改良では写真7に示す作業用照明装置を設置したものである。



写真7 照明装置の設置

6. 改良の効果

6. 1 排水ポンプの軽量化

ポンプ単体重量を抑え軽量化した事により、人力設営が可能となり、ポンプ設営作業時にクレーン等の重機を必要としなくなった。人力による排水ポンプ設営状況を写真8に示す。



写真8 排水ポンプの人力設営

改良後は、狭隘な市街地での排水作業や、周囲が冠水し重機の進入が困難な堤防天端での設営作業、さらにクレーンの使用が困難な強風下でも対応でき、排水ポンプ車の出動、配置、配置換え等への対応に柔軟性を持たせる事ができた。

6. 2 排水ポンプの直列接続による高揚程化

直列接続による排水ポンプの組み合わせにより大容量排水と高揚程排水・長距離排水の選択を可能とした。

この事は河道閉塞の様なケースのみならず、近くに排水できる場所がない市街地での長距離排水作業等でも、排水作業場所の選定が容易に行える等、災害現場への適応性が向上したものである。

6. 3 分解対応の効果

各操作制御盤や排水ポンプ等の配線接続方法をコネクタ化する事により、分解・組立及び離線・結線に要する時間を大幅に短縮している。

この事は芋川河道閉塞復旧作業の様に、搬入手段がヘリによる空輸のみとなった現場への輸送性が向上したものである。

また自衛隊の大型輸送ヘリ搭載時は、機器が機体内へ搭載可能な事から、吊り下げ輸送時に必要な吊り荷試験が不要となり、現場への搬入時間をより一層短縮する事が期待されている（表3）。

表3 空輸対応の比較

	分解	組立て	分解に必要な機械	ヘリ搭載時の形態
改良前	2日	1日	2tクレーン	吊り下げ
改良後	0.5日	0.5日	2tクレーン	機体内

※搭載ヘリ：自衛隊CH47J型

6. 4 照明装置設置の効果

今回設置した照明装置は照射範囲が広く、車両付近全周囲での作業が可能となる事から、夜間の設営・撤収・機械管理等に効果を発揮するものである。

従来、夜間排水作業の各工程において、排水ポンプ車に同行する必要のあった照明車については、排水ポンプの投入・引上げ等、足場の悪い現場に作業員が立ち入る場合にのみ必要となる。

この事により照明車は、夜間排水作業時間の大半を占める機械監視のための拘束時間を他現場の監視に活用出来る事となり、より効率的な運用が可能となるものと期待される。

7. あとがき

今回の改良では、災害現場における実際の排水作業実態を踏まえた、各種の問題点・課題を教訓として対策を行ったもので、今後想定される災害に幅広く対応できるようになった。

改良された排水ポンプ車は、排水ポンプの小型軽量・高揚程化等によって、設営のためのクレーンが不要となり、河道閉塞の高揚程排水や、狭隘で排水場所の確保が困難な市街地において長距離排水作業が可能となる等、災害想定を広くカバー出来るとともに、全ての設営を人力で行える事から、迅速な災害対応が可能となり今後の活躍が期待される。

10. 操作性を向上させた歩道除雪車の開発について

国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 機械課長 ○本間 政幸
 機械課 機械設計係長 小林 弘朗
 機械設計係主任 齋藤 剛

1. はじめに

写真-1 に示す、一人乗りの歩道除雪車（1.0m 級）は5本の操作レバーで除雪装置の上下・左右・前後の傾きと、投雪方向・距離の調整を行うとともに、雪質や積雪深さに応じて変動するエンジン音と投雪状況を感じ取って除雪速度をコントロールするため、操作が非常に難しい。

特に運転操作経験が浅いオペレータは、雪詰まりでの除雪作業の中断による効率の低下や操作レバーの持ち替え時の視点の移動による安全性の確保が困難などの課題を抱えていた。

本検討は、これらの課題に対応するため、歩道除雪作業の安全性・操作性の向上に加え、除雪コストの縮減により歩道除雪の拡充を図ることを目的として、簡易操作が可能な「歩道除雪車（1.0m 級）」の開発をすすめてきたものである。



写真-1 狭い歩道上での除雪作業

2. 歩道除雪作業の課題

過去のアンケート調査及び実態調査結果より、歩道除雪作業の課題（表-1）を整理し、対応策として有効性が確認された「雪詰まり防止機構」、「集約型操作レバー」「不陸追従機構」、「ワンタッチ式シャープピン」が歩道除雪作業に与える効果を検証した。

表-1 歩道除雪車の実態と課題

作業実態 (アンケート及び調査結果より)	課題			課題に対応する対応策
	作業効率の低下 (コスト縮減)	安全性の向上	施工品質の確保	基本方針 低コスト化を図るため、従来機を改造(センサー、バルブ等の既製部品追加)する範囲での検討
【雪詰まり】 1日1回以上の雪詰まりを経験した熟練オペレータは約6割に及んでいる(アンケート結果)。	○	○		雪詰まり防止機構 雪詰まり防止を図ることにより、作業効率の向上はもとより、雪詰まり除去時の危険回避が見込める。 ・過負荷時走行停止式 ・フロアの回転数にて雪の取込み量を制御し、雪詰まりを防止する機構 ・積雪深別速度制御式 除雪速度を積雪深別にダイヤル設定することで、雪詰まりをしない速度で作業が可能な機構
【複雑な操作レバー】 除雪装置レバーのシュート旋回操作が全操作回数の約半数を占め、1時間当りのレバー操作回数は459回に及んでいる(調査結果)。	○	○	○	集約型操作レバー 複雑である従来機の5本レバーを集約化を図ることで、操作回数の低減による作業効率、操作性の向上はもとより、オペレータがハンドル操作に集中できることによる安全性の向上、操作性が向上したことによる施工品質の向上が見込める。
【不陸部等の段差での操作】 昇降レバー操作回数は、1時間に128回、操作レバー全体の28%に及んでいる(調査結果)。	○	○	○	不陸追従機構 歩道乗入れ部等の不陸に除雪装置を自動追従させることで、作業効率、操作性の向上はもとより、オペレータがハンドル操作に集中できることによる安全性の向上、不陸部の操作が不要となるため操作性、施工品質の向上が見込める。
【シャープピン切断】 1日1回以上の切断を経験したオペレータが約半数に及んでいる(アンケート結果)。	○	○		ワンタッチ式シャープピン 工具レスでワンタッチにてシャープピンを装着可能なシャープピン機構とすることで、交換時間の短縮が見込める。

3. 簡易操作が可能な歩道除雪車の開発

各装置を開発するため、低コスト化を基本方針として従来機を改造（センサー、バルブ等の既製部品追加）する範囲で以下の項目について検討を行った。

3.1 雪詰まり防止機構（過負荷時走行停止機構、積雪深別速度制御機構）の検討

シャーベット状の積雪以外を検討対象とし、熟練オペレータと同等の作業効率を確保することを目標に検討を行った。

経験の浅いオペレータは、除雪時の負荷調整（作業速度調整）に苦慮していることから、過負荷時に走行を停止させ雪詰まりを解消する機構や、積雪深のダイヤル入力で熟練オペレータ並みの作業速度が得られる機構を検討した。

3.1.1 過負荷時走行停止機構の検討

過負荷時走行停止機構は、除雪作業中のブロー回転数をセンサーにて検知し、①回転数が設定値より低下（過負荷検出）した場合に走行停止、②回転数が設定値よりも上昇（負荷軽減）した場合に自動的に再走行する機構である。試験の結果から得られたブロー回転数で、図-1 に示す一連の動作が的確に作動し雪詰まりしないことが確認され、オペレータは除雪時の負荷調整が不要となった。



図-1 過負荷時走行停止式の制御フロー

3.1.2 積雪深別速度制御機構の検討

積雪深別速度制御機構は、除雪開始時の積雪深をダイヤル（写真-4 左上）入力すると作業速度の上限（図-2 積雪深 30 cm の場合、速度設定 1.0 km/H）を自動的に設定する機構である。試験状況を写真-2 に示す。

これは、オペレータが走行ペダルを全開に踏み込んでも、上限設定された速度以上には上がらず、過負荷

を予防するもので、経験の浅いオペレータでも熟練オペレータと同等の作業速度が得られるようにしている。また、オペレータのペダル操作の負担軽減を図るため、速度固定（オートクルージング）機構（写真-5 下）を設けた。

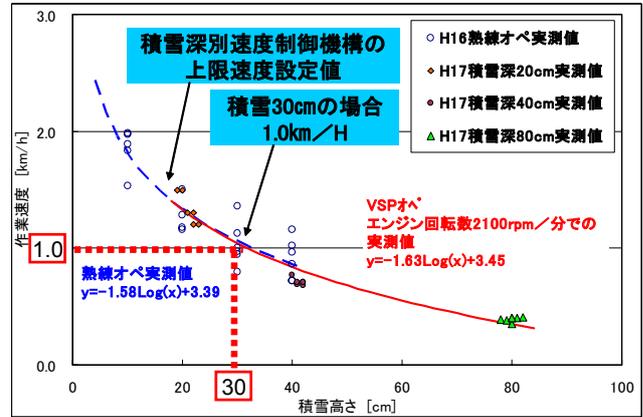


図-2 積雪深別速度設定の実測値



写真-2 雪詰まり防止機構の試験状況

3.2 集約型操作レバーの検討

集約型操作レバーは、「①操作が複雑、②除雪装置の動きと一致しない、③持ち替えが必要であった従来の5本レバー」（写真-3）に対し、除雪装置の上下・左右方向の操作を1本の操作レバーで、投雪方向・距離はレバーに組み込んだスイッチ操作により、持ち替えを不要としたもので、操作方向と作業装置の動きを一致させた（写真-4,5）。

これによりオペレータは除雪作業中、集約型操作レバーを握ったまま作業装置の全操作が行える（写真-5 下）ことから誤操作が解消され、運転操作（ハンドル操作、投雪位置制御、安全確認）に集中できるようにな

り、操作性・安全性の向上が図られた。試験状況を写真-6 に示す。



写真-3 従来機運転室

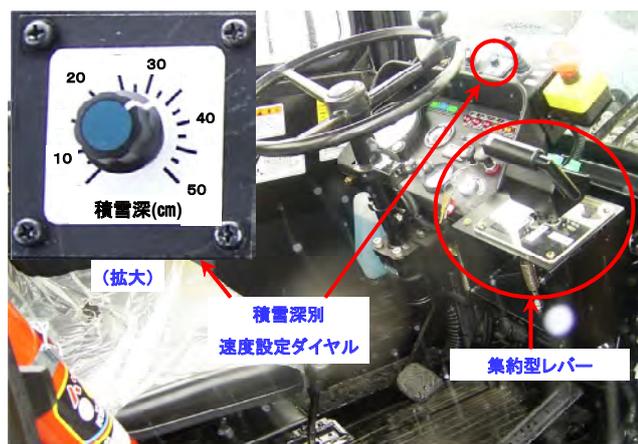
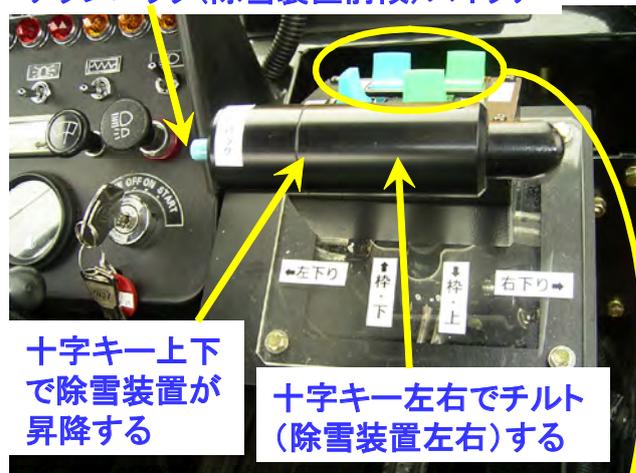


写真-4 簡易操作型運転室



写真-6 集約型操作レバーの試験状況

チップバック(除雪装置前傾)スイッチ



十字キー上下で除雪装置が昇降する

十字キー左右でチルト(除雪装置左右)する



シユート旋回・開閉の同時操作が実現

除雪装置は右手1本で操作可能

写真-5 集約型操作レバー

3.3 不陸追従機構の検討

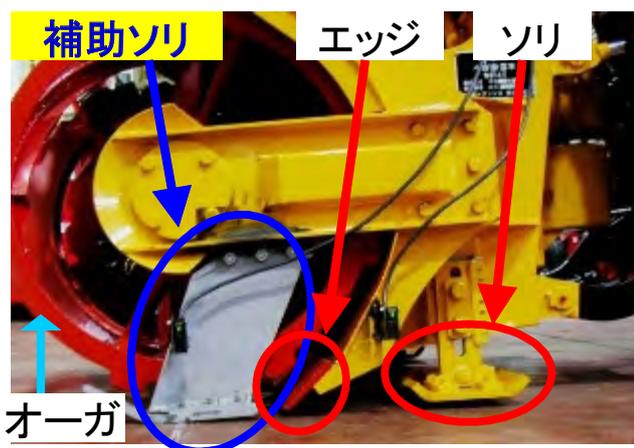
不陸追従機構は、歩車道のすり付け勾配 8% (旧通達：「S48 歩道および立体横断施設の構造について」に対応) において、除雪後の残雪 2 cm以内で、歩車道等の不陸、段差に自動的に追従できることを目標に検討を行った。

追従機構は、①歩車道等の不陸・段差への追従性を向上させるため、②除雪装置を上下、左右方向に動かす昇降油圧シリンダ及び前方下方向に傾けるチップバックシリンダ(写真-7)の伸縮をフリーにすることと、③エッジの前にある高速で回転するオーガが不陸、段差に接触しないように補助ソリ(写真-8)を新たに考案し、今まで(エッジ、ソリ)よりも前方に除雪装置

と路面との接地位置を設けた。

歩車道とのすり付け勾配 8%での負荷試験では、最大残雪が 4 cm と目標を達成できなかったが、路面に追従させることは可能と判断できた。

これにより、今までオペレータの感覚で行っていた除雪装置の上下・左右・前方下方向操作が大幅に軽減されることから、オペレータはハンドル操作や投雪位置の制御と周辺の安全確認に専念できるようになり安全性の向上が図られた。



3.4 ワンタッチ式シャープピンの検討

従来のシャープピン（写真-9）はボルトナット式であるため、交換には工具が必要であったが、ピンを挿入するだけでセット可能（工具レス）なワンタッチ式（写

真-10）とすることで、作業者の負担軽減、交換時間の短縮を目標に検討を行った。その結果、交換時間の半減（103 秒→52 秒）が図られた。

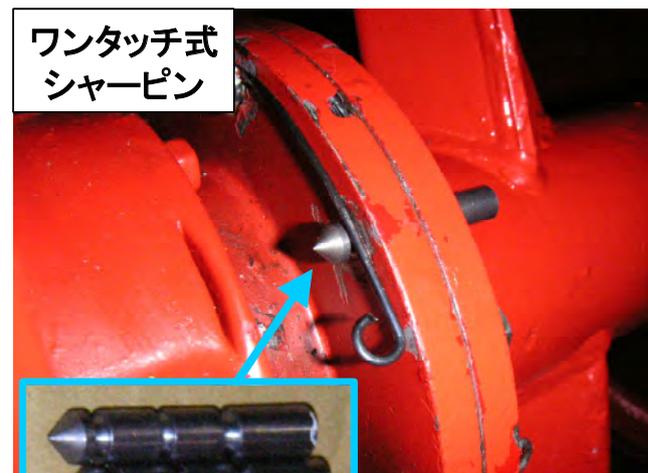
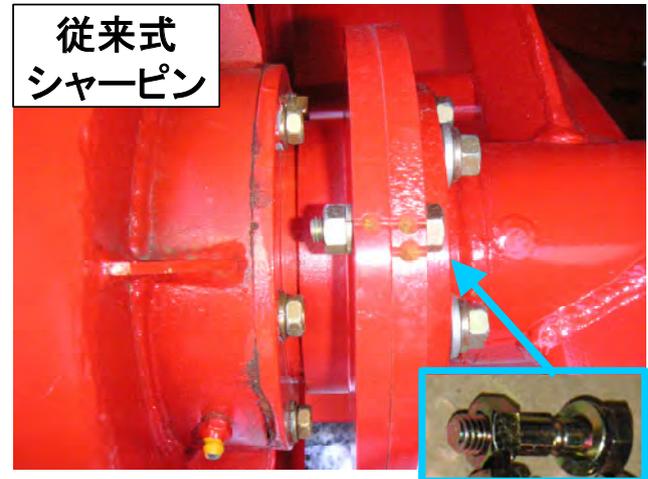


写真-10 ワンタッチ式シャープピン

4. 導入効果

考案した各技術を搭載した歩道除雪車（1.0m 級）により、「作業速度、レバー操作回数、路面追従性」等について除雪作業評価及びコスト評価を行った。

4.1 現道試験

現道試験（写真-11）は、従来機と今回開発した簡易操作型の歩道除雪車（過負荷時走行停止式雪詰まり防止機構、集約型操作レバー、不陸追従機構を装備した車両）を使用して、除雪区間長 215m（歩車道等のすり付け勾配 5%、不陸部 5 箇所含む）、積雪深 30 cm の条件で除雪作業を実施した。オペレータは、歩道除雪作業に従事しているボランティアサポートプログラム（VSP）2 名と、熟練オペレータ 1 名により実施した。



写真-11 現道試験状況

4.1.1 作業速度の向上

除雪作業時の平均作業速度は、従来機約 1.0 km/H に対して不陸追従機構を装備した場合、最大 1.5 倍(VSPオペレータA)の作業速度を得ることができた。オペレータ3名の平均では2割程度向上した(図-3)。また、不陸追従機構は作業速度の向上に効果があることが確認された。

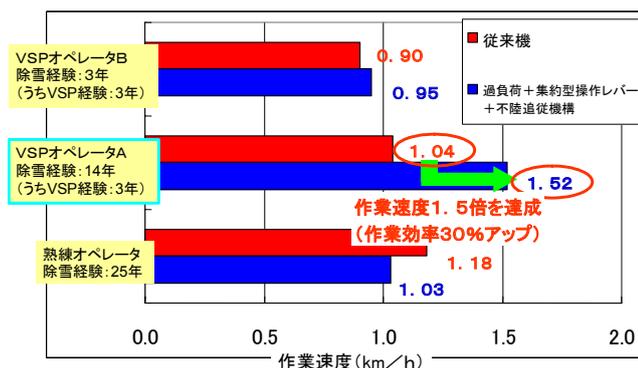


図-3 作業速度の比較

4.1.2 除雪装置操作回数(レバー操作)の低減

従来機では各オペレータが5本の操作レバーを巧みに操り、投雪位置の調整、段差への対応が必要となっているのに対し、開発した集約型操作レバーと不陸追従機構を組み合わせた除雪作業では、除雪装置の操作回数が従来機で最大200回だったものが10回に激減しており、オペレータの負担低減と作業効率の向上に大きく貢献していることがわかった(図-4)。

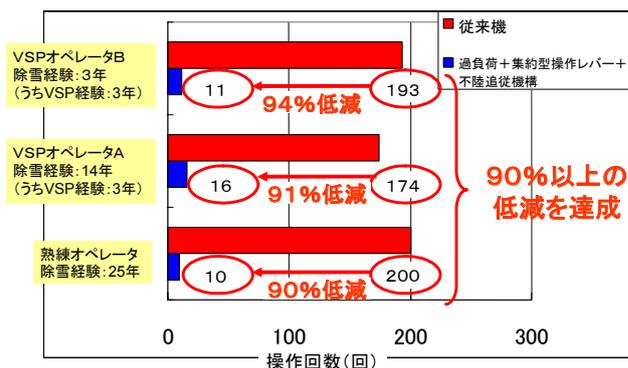


図-4 操作回数の比較

4.1.3 不陸の追従性

施工品質を示す「除雪後の残雪2cm」を開発目標とした不陸追従機構は、試験の結果、すり付け勾配5%まではオペレータの熟練度を問わず達成でき、大きな効果が得られた(図-5)。

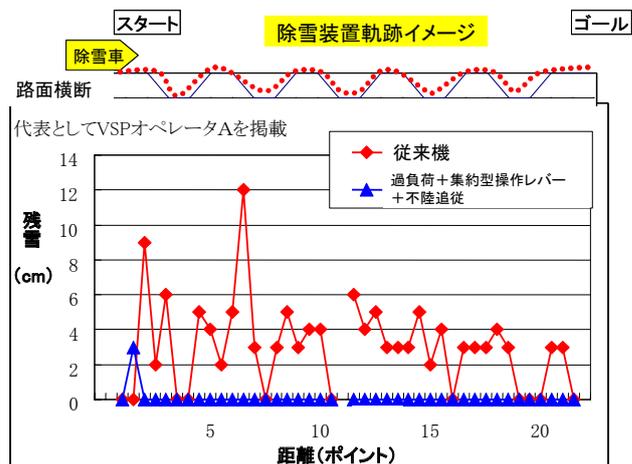


図-5 残雪量 (cm) の比較

4.2 コスト評価

現道試験から、効果が最大であったVSPオペレータAの作業速度(図-3)を例にコスト評価を行った。作業速度は、従来機に対し約30%(1.04km/h→1.52km/h)向上していることから、簡易操作型導入時の費用対効果(B/C)は、年間100時間稼働した場合1.14の効果(図-6)があり、稼働時間が増すとB/Cの向上が期待できる。

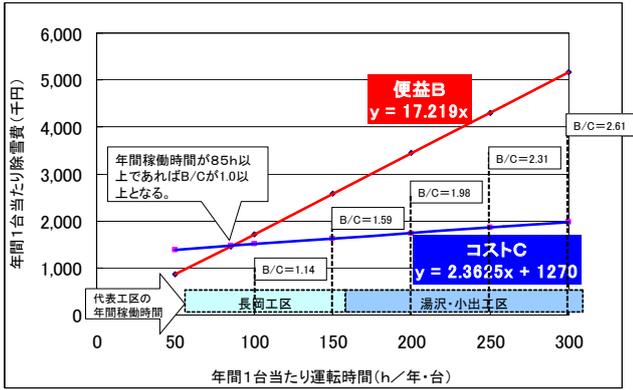


図-6 費用対効果

5. 普及について

新潟県、富山県及び石川県の除雪担当者を対象に簡易操作型の歩道除雪車を公開しPRを実施した（写真-12,13）。試乗した参加者からは、「操作が容易」「導入（改良）したい」などの意見が多数寄せられ、今まで苦慮していた歩道除雪の課題解消の期待が高まった。

北陸地方整備局では、歩道除雪車（1.0m 級・簡易操作型）を平成 18 年度に管内の歩道除雪箇所にて 6 台配置する予定である。また、既に稼働している従来機にも簡易操作に改造が可能であることから、今後、歩道除雪の拡充と、安全な歩道除雪作業に向けて導入・普及されることを期待している。



写真-12 富山県でのPR状況



写真-13 自治体担当者による試乗状況

6. まとめと今後の課題

開発した装置により小形除雪車（1.0m 級）の簡易操作が可能となったことから、運転操作経験が浅いオペレータでも熟練オペレータに劣らない除雪作業が行えるようになり、当初の目的を達成することができたと考えている。

平成 17 年度は、第三者などを巻き込むロータリ除雪車の事故が各地で発生しているため、事前に危険を回避するための安全対策機構等の考案が必要と考えている。一例として赤外線放射温度計による人接近検知センサーを写真-14 に示す。



写真-14 安全対策機構の一例

1.1. 洗浄水を循環再利用する水循環式排水管清掃車の開発

国土交通省 中部地方整備局 中部技術事務所 機械課 : ○桜田 明彦

1. はじめに

国土交通省では、工事の施工にあたり新技術・新工法等を積極的に導入し、施工の効率化、安全性の向上やコスト削減を進めているが、維持管理分野においても取り組むべき課題は多い。

直轄国道を常時良好な状態に保ち一般交通に支障を及ぼさないために実施している道路修繕や維持作業のうち、道路側溝や排水管路内の土砂等堆積物を除去・清掃する「排水構造物清掃作業」においては、大型の専用車両3台を用いた作業となることから安全面や作業の効率性、コストの面で課題を抱えている。

中部地方整備局中部技術事務所では、平成14年度から新しい発想の排水管清掃機械の開発調査に着手し検討を進めていたが、平成17年度には開発成果に基づく実用機が導入されるに至ったことから、機械の開発経緯と現場適応性試験結果を紹介する。

2. 清掃作業の実態と開発目標

2.1 作業実態と課題

排水構造物清掃作業は一般に、①排水管清掃車からの高圧水で堆積物を洗浄、②側溝清掃車で洗浄後の泥水を吸引回収、③散水車(給水車)から排水管清掃車へ不足した洗浄水を給水、という各作業を3台の大型専用車両で実施している。このため作業に伴う交通規制範囲



写真-1 作業状況 (車両を連ねた状態での規制)

が広くなり国道を利用される方々の利便性を損ねているだけでなく、作業現場や作業車両に対する事故の危険性も高い。

開発調査にあたり作業の実態と課題を把握するために、国道156号(岐阜国道事務所)および国道1号(静岡国道事務所)において現地調査を実施した結果からも、安全性、施工性、コストの面での課題を確認・整理できた(図-1)。

2.2 新しい清掃車の開発目標

排水構造物清掃作業が抱えている課題を解決するために、清掃作業に不可欠な洗浄水に着目し検討した

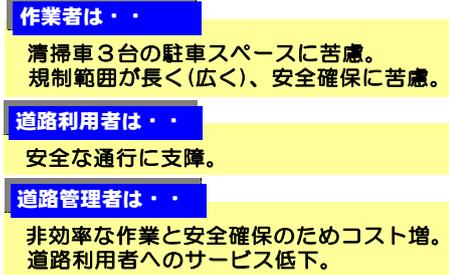


図-1 清掃作業の現状と課題

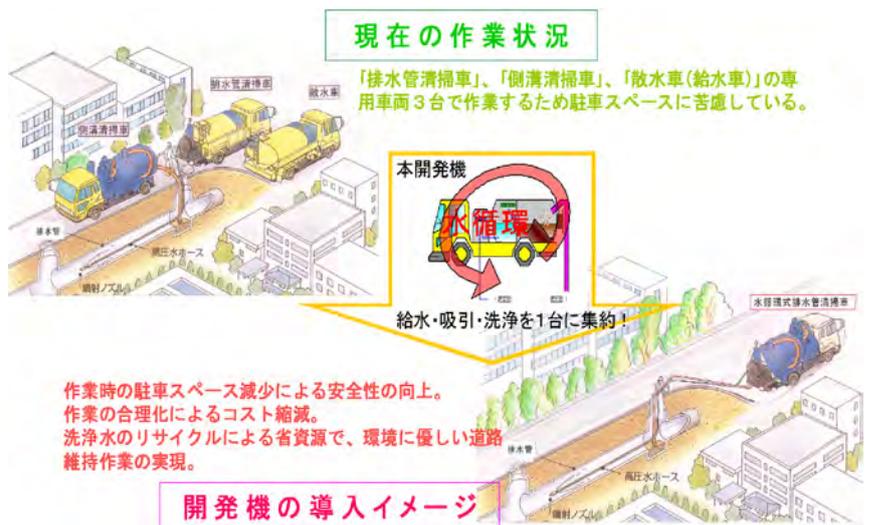


図-2 清掃作業の現状と新型清掃車導入イメージ

新しい清掃車の開発条件

1. 清掃作業能力を低下させないよう、新型清掃車に集約する各機能性能は、既存のそれぞれの専用車と同等程度とする。
2. 現場での利便性を確保するため、新型清掃車のサイズは既存の車両と同等程度とする。

図-3 新型清掃車の開発条件

結果、回収泥水を浄化し洗浄水として循環再利用することで、洗浄・吸引・給水の各作業機能を1台の車両に集約した新型清掃車を開発導入することとした(図-2)。なお、技術調査の過程で類似のコンセプトをもつ外国製品が存在することがわかったが、複雑な機構をもち、また車両のサイズが大きく一般国道で使用するメリットがないことから、図-3に示すように開発目標を設定し開発を進めることとした。

3. 要素技術の検討と機械設計

3. 1 新しい清掃車に適した泥水浄化方式

3. 1. 1 回収泥水の性状と浄化方式

新型清掃車の実現には、回収泥水を循環再利用するための浄化方法がポイントとなる。

そこで、国道156号(岐阜国道事務所)、国道1号(静岡国道事務所)及び国道41号(名古屋国道事務所)の清掃現場の泥水を採取し性状分析を実施したと

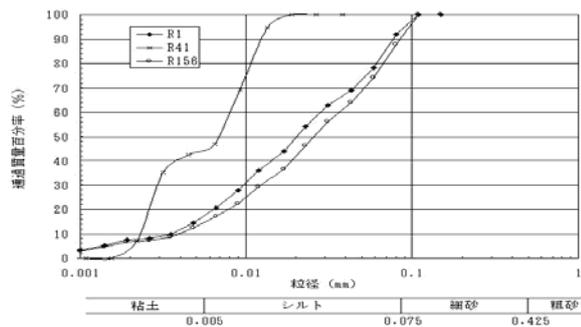


図-4 現場から採取した泥水の性状

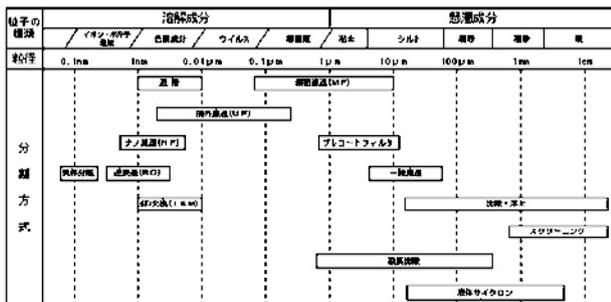


図-5 粒径と固液分離方式

ころ、泥水の粒径は1~100 μ mに分布していることがわかった(図-4)ため、この粒径に適合する浄化方式(図-5)から適切な方式の検討をすすめた。

今回開発する清掃車は1台の車両に浄化システムだけでなく高圧洗浄装置や吸引装置等も搭載するため、複雑な機械装置を持たずに固液分離できる凝集沈殿方式とするのが有利と考えられる。そこで、清掃現場で採取した泥水に凝集剤(PAC:ポリ塩化アルミニウム)を添加し凝集沈殿試験を行った結果、2,000~6,000mg/l程度のSS濃度を示していた3現場の泥水ともPAC添加率200ppmにおいて40分後のSS濃度が40~300mg/l程度まで低下することが確認できた(表-1)。また、凝集沈殿方式により新しい清掃車に必要な浄化性能が得られるものの、ある程度の反応時間がかかることもわかった。

3. 1. 2 浄化の効率化

新型清掃車が効率的な作業を実施するための浄化性能は回収泥水の浄化時間の長短が影響する。そこで効率的な浄化方法を検討するため、実際の排水管清掃現場において実験を実施した。

表-1 PAC添加率とSS濃度

項目	採取場所	SS濃度(mg/L)		
		R1(沼津)	R41(名古屋)	R156(美濃)
回収泥水のSS		1,748	2,553	5,730
PAC添加率	40ppm	600	250	800
	100ppm	500	60	-
	200ppm	300	40	100

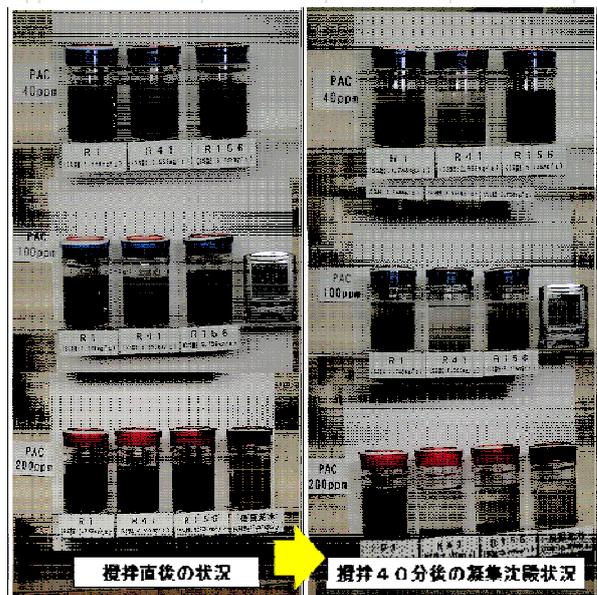


写真-2 凝集沈殿試験状況

①液体サイクロンの性能試験

ダム建設現場などでの濁水処理に用いられる、液体サイクロンに凝集剤を併用した浄化装置(写真-3)を清掃現場へ持ち込みその性能、機能を試験した。

試験の結果、次のような特徴が確認できた。

- i 泥水の吸引と浄化が同時に連続的に行われるため、処理速度は早い。(表-2)
- ii 固形物がサイクロンセパレータ本体とタンクの2ヵ所で発生するため、残土処分のための構造は複雑になる。

②凝集剤と凝集性能

凝集沈殿に用いる凝集剤は一般に有機系凝集剤の方が凝集性が高いとされているが、新型清掃車においてはコストの面及び浄化水を再利用することから毒性をもたない無機系凝集剤が望ましい。無機系凝集剤は一般にPACが用いられるが、近年石炭灰に由来する人工ゼオライト系凝集剤の性能の高さが注目されている。そこで、清掃現場の回収泥水に対して凝集沈殿試験を行い、次のような凝集沈殿速度向上等の効果を確認した。(写真-4)

- ①PACより大きなフロックが形成される。
- ②PACより沈降速度が速い。
- ③浄化水の透明度もPACより高い。

したがって、人工ゼオライト系無機凝集剤を使用す



写真-3 液体サイクロン式浄化装置

表-2 現場試験結果

項目	調査場所	国道22号	国道302号
回収泥水	SS濃度 mg/l	1690.0	4570.0
	平均粒径 μm	32.6	57.5
	最大粒径 μm	300.0	700.0
	性状	有機性排水	有機性排水
凝集剤	添加量 kg	0.6	3.6
	凝集時間 min	7.0	6.5
上澄水	上澄水量 ml	2.0	1.8
	SS濃度 mg/l	220.0	54.0

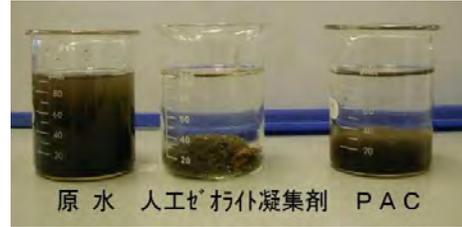


写真-4 凝集剤による沈降状況の違い

れば、作業効率向上の効果が高くなると考えられる。

3. 1. 3 回収泥水の浄化方式

浄化方式の検討結果から、液体サイクロンに凝集剤を併用した方式は処理速度は速いもののその構造から浄化・洗浄・吸引の機能を1台の車両に搭載した新型清掃車とするには検討事項が多いため、当面の導入を目指す清掃車は、自然沈降による凝集沈殿方式に凝集効果の高い無機系凝集剤を組み合わせる浄化方式として開発検討を進めるのが適当であると判断した。

また、凝集試験において回収泥水を概ね200mg/lまで浄化できることが確認できたことから、浄化性能の目標値は水質汚濁防止法に基づく排水基準のSS濃度である200mg/l程度に設定した。

3. 2 新しい清掃車の機械構造の検討

新型清掃車には、洗浄水と回収泥水を貯留するタンク、回収泥水を浄化する凝集沈殿タンクが必要となるが、これらを個別に設けるのは車両サイズと作業能力の面から現実的ではなく開発目標も達成できない。

そこで、ひとつのタンク内に油圧で可動する隔壁を設け洗浄水室と回収泥水室として分離し、泥水の浄化は回収泥水室で凝集沈殿させることで、清掃作業の進行に合わせて洗浄水室と回収泥水室の容量を変化させ必要な容量を確保することとした(図-6)。これによ

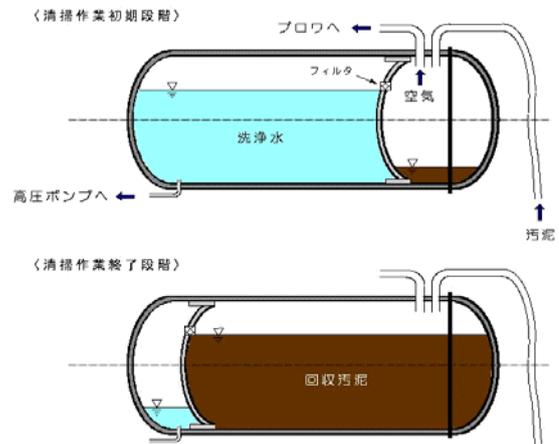


図-6 可動隔壁タンク構造

表-3 車両軽量化検討項目

No.	軽量化の方法	内 容	軽減重量
1	タンク鋼板のSUS材	タンク鋼板の板厚は、通常の鋼板の場合10.5~11.0mmの鋼板が使用される。材質をSUS材に変更すれば鋼板代を減らすことができ、その分、重量軽減が図れる。	110kg
2	空気清浄装置の簡略化	通常の吸引車の場合、乾燥した土砂や粉塵の吸引を行うことを想定して吸引用プロローブの先端に吸引空気の清浄装置を装備しているが、排水洗浄作業は泥水の吸引が主であり、タンク外にオーバーフロー防止用の流量装置を増設し、空気清浄装置を省略することができる。	150kg
3	シャーシの選定	シャーシメーカー4社のシャーシの仕様を検討し、仕様を満足するシャーシの中から軽量のものを選定する。	100kg
4	凝集剤タンクの樹脂化	通常はSUS材で作成する凝集剤タンクを樹脂製に変更する。	10kg
5	高圧水ポンプの選定	高圧水ポンプを選定するにあたり、要求仕様を満たすポンプの中から軽量のものを選定する。	60kg
6	配管材の材質	吸引配管用の配管等を軽量のアルミ製に変更する。	5kg
7	アルミホイールの採用	標準の鋼製ホイールからアルミホイールに変更する。	90kg

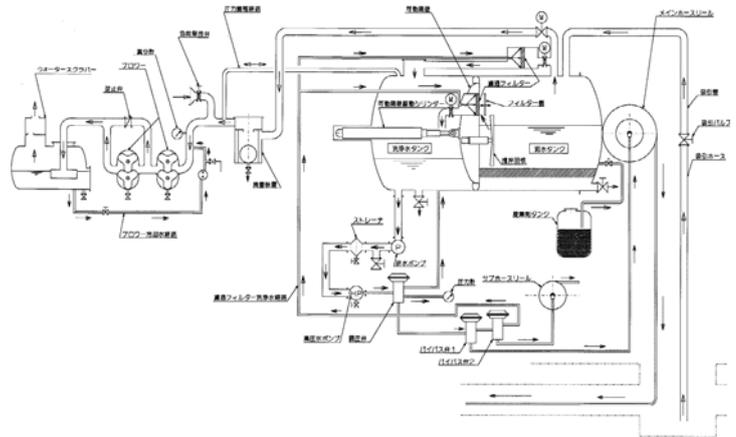


図-7 洗浄水の浄化循環システムフロー図

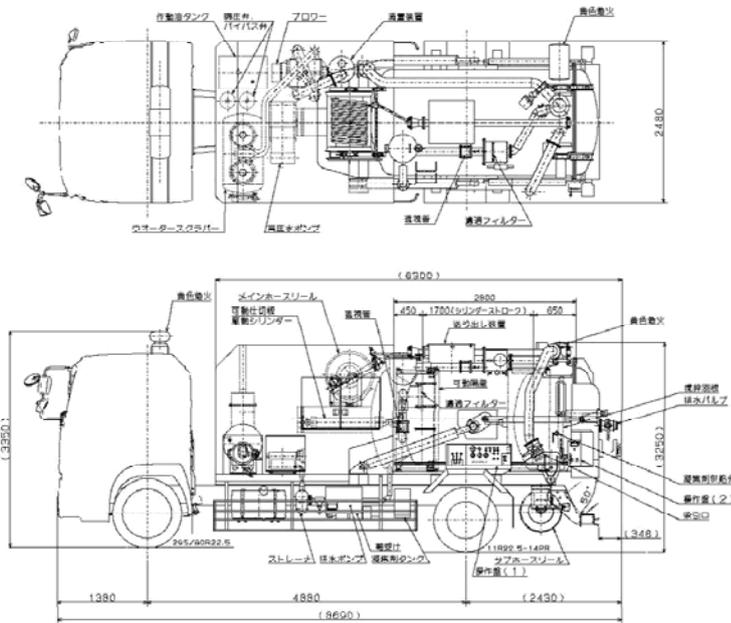


図-8 新型清掃車外観図

表-4 主要仕様

項目	仕様
1. 基本仕様	①高圧水により排水管や側溝を洗浄し、発生した泥水を吸引する。 ②回収した泥水を浄化し、洗浄水として再利用する。
2. 車両	①車種 St級トラック ②車両総重量 17,000kg以下
3. 作業装置	①水浄化装置 i 浄化方式 凝集沈殿方式 ii 浄化性能 浄化水SS濃度200ppm iii 凝集剤 無機凝集剤(有害性のないもの) ②タンク i 構造形式 可動隔壁構造鋼板溶接円筒型 ii 容量 洗浄水室(最大)3.9m3以上 回収泥水室(最大)4.7m3以上 ダンプ式 iii 泥土排出 ③高圧水ポンプ i 最大吐出量 180ℓ/min以上 ii 最大使用圧力 20MPa以上 ④吸引プロローブ i 風量 40m3/min以上 ii 静圧 -90kPa以下

り、従来の専用機と同等のタンク容量(4 m³)を1台の車両のタンクで確保することが可能となった。

また、新型清掃車は、一般国道で使用することから既存の各種清掃車両と同等の8~10トン車に必要な機能を搭載することを目標としており、必要な機能とタンク容量を確保しつつ車両全体の軽量化を図ることが必須である。そこで、車両の軽量化手法を検討した結果、約500Kgの軽量化技術を整理した(表-3)。

3.3 新しい清掃車の設計と要求仕様とりまとめ

要素技術と機械構造の検討結果に基づき、新型清掃車の構造設計を行い実機導入のための要求仕様を平成16年度にとりまとめた(図-8、表-4)。

4. 実機導入と現場適応性試験

開発成果に基づく新しい清掃車は、「水循環式排水管清掃車」として平成17年度に中部地方整備局に実機導入された。そこで導入にあわせて、現場適応性試験を実施し、本清掃車の性能および作業現場における課題解決の有効性を有しているかを確認した。

4.1 工場における機能確認

製作中の工場において、基本性能、機能を満足しているかどうか確認した。特に本清掃車の中心技術である水浄化能力については、清掃車のタンクに回収した泥水を凝集沈殿させた後に浄化水を採取し、SS濃度を測定し要求機能を満足していることを確認した。



写真-5 工場における性能試験状況



写真-6 現場作業状況
(最小限の交通規制による作業状況)

4. 2 実作業現場における調査

本清掃車による清掃作業を効率的に進めるためには、実作業現場での機能や作業性を評価し、施工歩掛や作業手順書等をまとめておく必要があるため、清掃車が配置される紀勢国道事務所管内の一般国道42号において作業を行い、各種調査を実施した。

4. 2. 1 浄化性能の確認

泥水の浄化効果をタンクの観察窓で確認したところ、写真-8に示すような極めて明確な凝集沈殿効果を確認した。さらにタンクから浄化水を回収しSS濃度を測定し、開発目標とした浄化性能(SS濃度が200mg/l程度)を確認した(注:2回目の作業における浄化性能は205mg/lであるが、これは凝集剤添加量と凝集反応時間の問題である)ことから、凝集



写真-7 現場作業状況
(洗浄と吸引の同時作業状況)

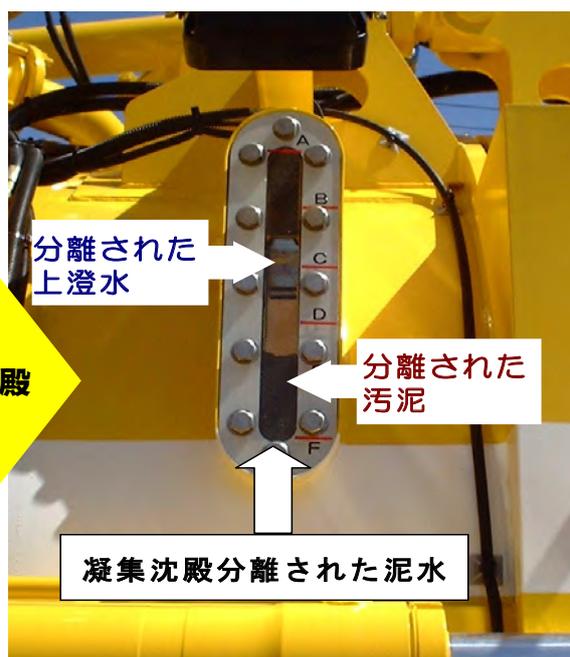
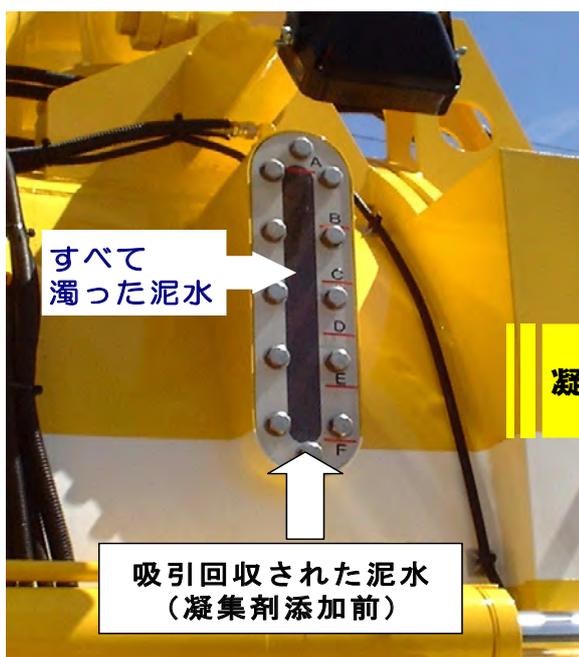


写真-8 タンク観察窓での浄化状況の確認

浄化	SS濃度	水素イオン濃度(pH)	浄化水の性状
1回目	55.2(mg/L)	7.5/(22℃)	
2回目	205(mg/L)	7.0/(23℃)	

図-9 現地浄化性能確認結果

沈殿方式による浄化システムの現場適応性は高いと評価できるものである。

4. 2. 2 施工歩掛とコスト縮減効果

作業状況を分析した結果、水循環式排水管清掃車による清掃作業は、使用機械が本清掃車1台ですむことから作業人員も減少し施工歩掛が改善されるため、排水管清掃1日あたりの施工コストは現況作業に比べ約30%の縮減が期待できることがわかった(図-10)。さらに清掃車の購入費と維持費も含めた総コストを試算した結果、10年間で約29%のコスト縮減効果が予測される(図-11)。

なお、試算には交通規制に要する費用は含めていないため、現場条件によってはさらに大幅なコスト縮減効果が発揮できると考えられる。

4. 2. 3 機械仕様の改良点

現場での作業状況の観察、国道事務所職員や維持

現況作業(組合せ作業)		水循環式清掃車による作業	
使用機械	排水管清掃車 側溝清掃車 給水車(必要時)	使用機械	水循環式清掃車
作業歩掛	世話役 1人 普通作業員 4人	作業歩掛	世話役 1人 普通作業員 3人

日あたり施工単価
が約30%縮減

図-10 施工歩掛とコスト縮減効果

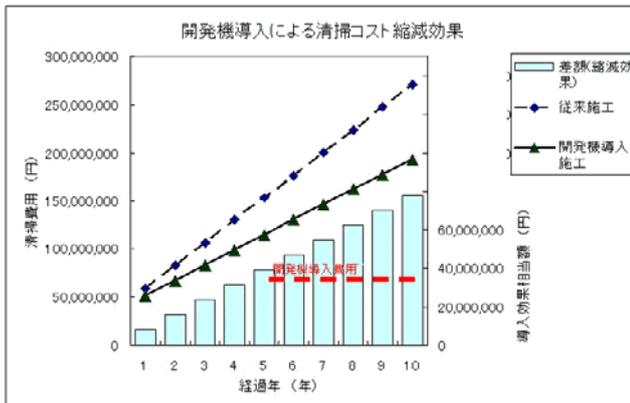


図-11 総コスト縮減効果

表-5 今後検討が必要な改良項目

改良・改善点	課題
タンク内部の視認性向上	効率的に回収した泥水を浄化するためには、タンク内部の凝集沈殿の状況や水位を把握することが重要になる。そのためにはタンク内部の様子を目で観察できることが望ましい。単に水位だけなく、沈殿の様子や上澄水の清濁度まで視認できるよう工夫した確認窓を設置することが必要。
水質や濁度の検出の自動化	効率的に作業するためには、泥水を吸引回収した後に泥水の水質や濁度を検出後、これに応じた適切な量の凝集剤を添加し凝集沈殿状況を判定する必要があるが、水質や濁度は目視で確認し凝集剤を添加するための経験が必要となる。この作業を現場作業員が判断するのは難しいと思われ、監視や添加を合理的に行える工夫が必要である。
凝集剤添加の自動化	今回の試験では使用した凝集剤は現場の泥水によく適合していたといえるが、多種多様な現場で高い凝集性を発揮できる凝集剤、さらには環境に優しい凝集剤についても選定作業を続ける必要があると思われる。
凝集剤の選定	今回の試験では使用した凝集剤は現場の泥水によく適合していたといえるが、多種多様な現場で高い凝集性を発揮できる凝集剤、さらには環境に優しい凝集剤についても選定作業を続ける必要があると思われる。
タンク操作の自動化	タンク内の洗浄水と回収泥水の容量に応じた隔壁の移動が水位等に応じて自動化できれば、作業の効率性が向上する。
遠隔操作機能の追加(安全性向上)	洗浄ノズルや吸引ノズルを扱う作業員がポンプ、プロワを遠隔操作できれば、作業の安全性や迅速性が向上する。
高圧洗浄装置の仕様	今回導入した清掃車の高圧洗浄装置の仕様は現行排水管清掃車より高く設定しているが、適正な使用とすればさらに車両をコンパクト化できる。

作業会社担当者等の意見等から、改良検討が必要な点を整理した(表-5)。他の操作性向上対策も含め今後の本清掃車導入時の仕様に反映していく必要がある。

4. 3 普及促進に向けた資料のとりまとめ

現場適応性試験の結果、新たに開発し現場導入した「水循環式排水管清掃車」は、排水構造物清掃作業が抱えている課題の解決に効果があることが確認できたことから、本清掃車の今後の普及促進を図るため、購入仕様書(案)、施工歩掛(案)と施工歩掛調査票(案)、作業手順書(案)のとりまとめを行った。

5. おわりに

排水構造物清掃作業の改善に高い効果があることを確認した「水循環式排水管清掃車」が今後広く普及し利用されるためには、道路管理者が標準歩掛や施工マニュアル等を策定するなど利用環境の整備をすすめ、各現場での活用を促進することが必要である。

一方、本清掃車をさらに小型化・高機能化したり操作性向上や低価格化などを図るために技術開発を進めることも、現場改善効果の向上だけでなく清掃車の導入意欲を誘発するなど本清掃車の普及に不可欠であるため、今後の各清掃車メーカーの取組を望むものである。

また、本清掃車は車両1台のみで移動し濁水を効率的に処理できる特徴を持つことから、開発目的とした「国道の排水構造物清掃作業」以外にも有用であると思われるため多様な活用方法についても検討され、本清掃車がより広く普及し利活用されることを期待したい。

最後に、中部地方整備局関係事務所・出張所並びに各作業現場の関係者の皆さま及び(社)日本建設機械化協会施工技術総合研究所のご協力により本報告をとりまとめることができたことを記し、謝意を表します。

1 2. 新小型ジャイロの開発と「曲がり削孔式液状化対策工法」

構造物直下を地盤改良する施工法

五洋建設株式会社 技術研究所 ○植田 勝紀

1. はじめに

阪神淡路大震災の後、耐震基準等が見直しされ既設構造物直下の液状化対策が求められるようになった。この施工法として、浸透性の高い恒久型の薬液を浸透注入し地盤中の間隙水を薬液に置換することで、上部構造物に影響を与えることなく地盤改良できる数種類の工法が開発された。その後、これらの工法は多くの液状化対策工事に採用され、そのニーズは次第に大型の構造物直下地盤へ、また、障害物の多い場所などへと対象が拡大してきた。構造物が長大化するほど、また、障害物が多くなるほど、従来の一般工法である直斜削孔方式では図-1に示すように未改良域が発生するなどの課題が指摘される。この課題に対して、図-2のイメージ図に示すように地盤内を3次元的な曲線を描いて削孔し、地上施設を供用状態で広範囲の構造物直下地盤を施工する「曲がり削孔式液状化対策工法」が開発され、この施工事例が報告されている。

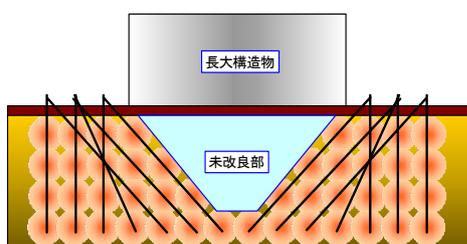


図-1 従来の施工法

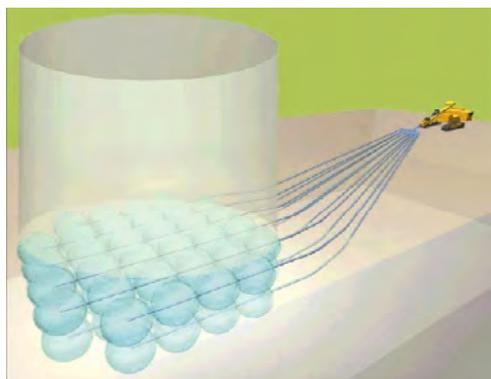


図-2 曲がり削孔式浸透固化処理工法のイメージ

本報では、新たに開発した「新タイプの小型ジャイロ」と、これを削孔位置検出装置に用いた「曲がり削孔式液状化対策工法」の概要、および施工実績等について報告する。

2. 開発の目的と課題

開発当初、既設構造物直下の液状化対策が必要な地盤を調査した。この結果、重要構造物は基礎杭などで支持されているものが多かった。また、対象構造物の大きさや地盤深度を考慮すると、総削孔長 100m程度で、地上から曲率半径 30m程度で曲げ制御した後水平にコントロールし、基礎杭間等の狭隘な地盤を正確に誘導することが必要であると考えられた。さらに、沿岸域の護岸部などでは、護岸背面直近の深度 10mを超える深い地盤を改良する条件も存在した。このためには、以下のような課題を解決する必要があった。

- ①基礎杭等が存在する構造物直下の地盤で、十分な精度が発揮できる削孔位置検出装置の実現。
- ②より高い精度で誘導削孔するために、位置検出装置とは別途に、削孔ロッド先端部の曲がり形状（曲率と向き）をリアルタイムで判定する装置の実現。
- ③削孔深度 10mを超える施工の全作業を、削孔機設置側の一方向から行う削孔システムと、地盤改良注入システムの実現。

3. 従来の削孔位置検出装置

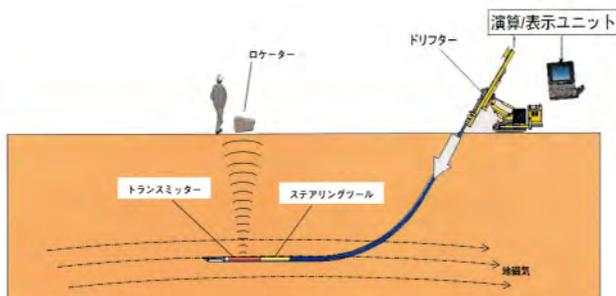
3.1 小口径ボーリングの位置検知技術

小口径ボーリングの掘削技術は、古くから井戸掘削や地盤注入工事などに採用されている。近年、小型ボーリング機の技術進歩に伴い削孔技術も向上し、これまでは鉛直削孔が主であったものが、HDD工法（Horizontal Directional Drilling Method）に代表される水平削孔や、さらに曲線箇所を増やして自在に削孔したいというニーズが多くなった。こうした状

況の中で、長距離削孔や曲線施工の事例も報告されるようになった。しかし、小口径ボーリングで長距離削孔する場合の削孔位置管理は、シールドトンネルのように人が入って測量することが出来ないため、採用した位置検出装置の性能に全面的に頼らざるを得ない。さらに、外径50～60ミリ程度の削孔ロッド内部に装備できる小型で高精度な装置の技術的課題などが指摘されている。

3.2 位置検出装置

HDD工法において最も一般的に使われている位置検出方法の一つに電磁波検知方式がある。これは、電磁波（ビーコン）を発信するトランスミッターを削孔ロッド先端部に装備し、地上の作業者がロケータでこの電磁波を測り位置と深度を把握するもので(図—3、写真—1参照)、取り扱いも容易である。ただし、トランスミッターの直上で計測するものが多く、地上に障害物がない場合に有効である。また、ステアリングツールといわれる地磁気検知装置は、内部に地球の磁方位データと鉛直傾斜角データを検出する装置が内蔵され、削孔距離をもとにコンピュータにて積分処理をして位置演算する。この装置は、地磁気を検出する原理であり、近隣に鋼管杭や矢板などの磁性体が存在するところでは磁界にひずみが発生するため、この外乱をキャンセルする機能が必要となる。



図—3 ロケータとステアリングツール



写真-1 ロケータで地中の電磁波を計測

3.3 従来のジャイロ

従来、ジャイロを用いた方位計測方法には、ジャイロコンパスとレートジャイロの二つの方式があり、両者とも方位計測を行うものであるが、その検出方法は異なる。ジャイロコンパスは地球の自転から真北方向を求める方式であり、レートジャイロは角速度を時間積分して基準角からの相対角度を求める方式である。ジャイロコンパスは現状では大型なため、小口径削孔用に適用されるものはレートジャイロ(写真—2に一例を示す)が使われており、前進または後退しながら相対方位の変化量を検出して位置演算する。

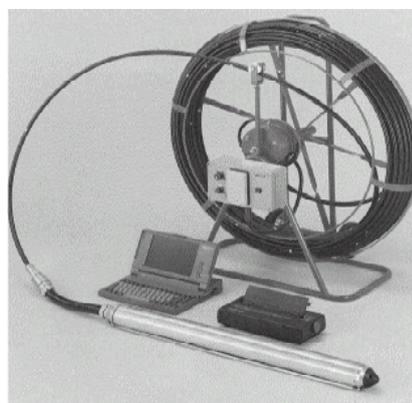


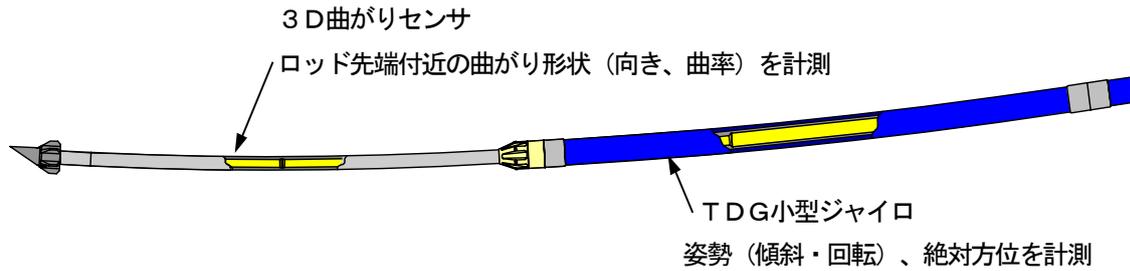
写真-2 レートジャイロの例

4. 開発した削孔位置検出システムと小型ジャイロ

4.1 位置検出システム

開発した位置検出システムは、削孔ロッド内部に組込む新型ジャイロ(以下、TDG:チュン・ド・ドライジャイロ、という)と、さらに前方先端ロッドの3D曲がりセンサの、二つの異なるセンサの組合せから構成される。図—4に削孔位置検出システムの概念図を示す。この2種類のセンサにより、以下を達成する。

- ①TDGは削孔を一時停止して絶対方位を計測する装置のため、削孔推進中の制御量(たとえば曲率半径○○mR達成)は3D曲がりセンサにて把握する。
- ②曲げられた量(たとえば○○mR達成)で数m推進した結果、後方のTDG設置位置において方位・傾斜を計測し、位置演算する。
- ③与えた制御量の上記①と、得られた制御結果の上記②との相関を数m毎に掴み、土質が変化し掘進特性が変わった場合は、早期に制御操作量の修正を行う。



図—4 削孔位置検出システム

本システムは、位置検知の高精度化ばかりでなく、過大修正→不足修正の繰り返しなどによる蛇行を防ぎ、推進中の地盤抵抗を過大化することなく、滑らかな曲線施工と長距離削孔が容易になることを目的とした。

4.2 削孔用小型ジャイロの開発

(1) 削孔用TDGの開発

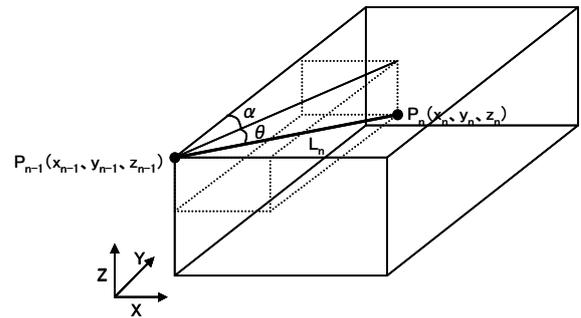
削孔用小型ジャイロを写真—3に示す。項2.で述べた基礎杭などがある構造物直下の特殊な施工条件においても誘導制御が可能となるために、機械式ジャイロとしては最も新しい原理の一つであるTDGを用いた削孔位置検出装置を開発した。



写真—3 ジャイロ装置一式

TDGを用いた位置検出装置は、ジャイロコンパスのように連続的に方位角を出力するものではなく、曲線部削孔時は約1.5m毎、直線削孔時は約3m毎に削孔作業を一時（約3分間）ストップし、その都度、水平方向の真方位と鉛直方向の傾斜角を得る。このため、計測値は定期的に得られる離散的データであり、約3分間の削孔停止中に複数回（2～3回）計測してこの平均値を採用する。このデータにより、区間ごとの推進距離をもとに3次元座標位置を演算し、この座標値のつながりで削孔軌跡を描く。図—5に本装置が管理装

置で扱う座標系と計測要素を示す。



図—5 管理座標と検出要素

直線区間の座標演算は、方位角データよりX-Y成分を、傾斜データよりZ成分を以下の式で算出する。

$$x_n = x_{n-1} + L_n \cos \theta \cdot \sin \alpha \quad \dots \text{式 (1)}$$

$$y_n = y_{n-1} + L_n \cos \theta \cdot \cos \alpha \quad \dots \text{式 (2)}$$

$$z_n = z_{n-1} + L_n \sin \theta \quad \dots \dots \text{式 (3)}$$

曲線区間の座標演算は、1推進距離 L_n を短く計測回数を増やして上記演算式をそのまま用いる場合と、 L_n を円弧として扱う場合の2つの方式がある。さらに、図—4に示した削孔ロッド先端部の3D曲がりセンサで検出した曲がり量と向きをこのジャイロ設置位置座標の前方にリンクして、先端ビットの座標位置を算出する。

(2) TDGの方位検出原理

TDGは、二軸自由度をもつジャイロの一種であり、回転するコマの概念図を図—6に示す。このジャイロは、モータ軸にフレキシブルヒンジと呼ばれる一種の自在継手を介してジャイロロータを所定の回転数で高速回転させ、角運動量保存の法則によるフライホイールの方向保持性を利用した機械式ジャイロである。

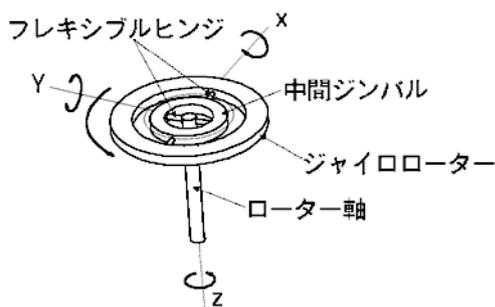


図-6 TDGのコマの概念図

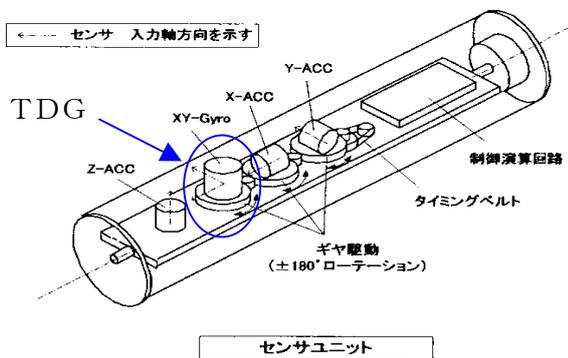


図-7 センサユニット内部

図-7に示すセンサユニットは、TDGと加速度計演算部から構成される。計測は、削孔ロッド内に収納されたセンサユニットの上面を上向きにした状態で停止した後、XY-Gyroのローター軸を高速で回転させ計測モードに入る。その後、X加速度計、Y加速度計とTDGが、Z軸周りに筐体とともに回転し一定角度毎にn回($2\pi/n$; nは2の倍数の自然数)停止しながら、XY平面内の地球自転角速度の水平、鉛直成分および傾斜角を計測する。計測された個々のデータにはセンサの固定誤差が含まれているが、1回ローテーションしたn個のデータを処理することにより、TDGや加速度計のバイアス誤差、スケールファクタ誤差を修正することができ、経年変化等の誤差成分などもキャンセルして高い精度で真方位を計測することが可能となる。さらに、TDGのコマは計測モードのときだけ回転動作するものであり、削孔推進中は休止状態となっている。このため、位置算出用の計測データは、削孔ロッドが地盤中を削孔推進する際に受ける衝撃などの外乱を直接受けることはない。また、耐衝撃性については、TDGが通電休止状態を基本に設計されている。

(3) 開発した小型ジャイロの方位検出誤差

TDGは、推進中の衝撃・振動などのない静止状態で測るものである。この条件における計測動作と、通電非計測時の耐振動性などについて、その基本仕様を表-1に示す。

表-1 小型ジャイロの基本仕様

項目	仕様	
測定範囲	方位角	360°
	傾斜角(ピッチ)	±90°
	回転角(ロール)	±180°
計測精度	方位角	計測方位誤差 ±0.5° 計測方位精度 0.35° (1σ) 緯度35°、基準角(ピッチ、ロール)±5°以内、静止時計測
	方位計測時間	150秒
	ピッチ/ロール	±0.3° (精度保証 ±15° 傾斜以内、静止時計測)
温度	センサユニット	0~50°C
	制御ユニット	0~50°C
保護等級	センサユニット	4MPa耐水圧構造 水中ケーブル
	制御ユニット	
	水中ケーブル	
耐振動性(通電非計測時)	正弦波	5~11.1HZ 振幅1mm一定
		11.1~50HZ 4.9m/s ² 一定
耐衝撃性(通電非計測時)	前後方向	1000m/s ² 、3msec
	左右方向	150m/s ² 、6msec
	上下方向	150m/s ² 、6msec

方位検出データは、方位計測誤差±0.5度、方位計測精度0.35度(1σ)であり、削孔用ロッド内に収まる小型装置としては、極めて高精度な装置である。しかし、100m削孔において±30cm以内の位置検出精度を得るためには、運用時に発生する誤差要因を排除する必要があり、実験を重ね対策を講じた。仕様でうたわれた誤差±0.5度を確保し、さらにこの誤差を小さくするためとった方法の一部を以下に示す。

①初期方位誤差の補正

管理座標系の推進方向(通常Y軸方位)を基線方位とし、TDG固体毎に基線方位を現位置で計測し、使用する機器に合わせたY軸方位の座標を設定する。

②計測動作中の確実な静止

削孔ロッドは回転して掘削する。方位計測の度に削孔を一時停止した直後はロッドの振れが徐々に戻るため、計測前に振れを解消する操作を行う。

③掘削時環境変化の補正

温度特性、傾斜特性など使用環境で変化する固有特性を補正するオフセット機能を具備する。

④削孔ロッド内でのアライメント調整

削孔ロッド内部にジャイロ装置を平行にキープする位置決め機構がある。

5. 施工実績

5.1 供用中の危険物タンク基礎地盤耐震補強工事

(1) 工事概要

1977年の消防法改正前に建設された特定屋外貯蔵タンク（以下、旧法タンク）3基の基礎地盤の液状化対策を2004年11月から約4ヶ月間で実施した。

対象の旧法タンクの地盤及び基礎は、消防法の新基準を満足していたが、大規模地震に対する耐震性向上を目的とし実施された。表-2に工事概要を示す。

表-2 工事概要

対象タンク	タンク内容	タール他
	公称容量	1400kL
	タンク内径	14.0m
	タンク数	3基
削孔本数		28本
削孔延長		1252m
曲率×曲線数		30mR×1ヶ所
改良深度		GL-3.3m~-8.3m
対象土量		4960m ³
使用薬液		エシリカII

(2) 曲がり削孔工法の適用

対象となる旧法タンク3基は他のタンクおよび防油堤に囲まれており、従来の直斜削孔では接続配管や他の施設の一部撤去が必要となるため、施工時にタンクの供用を一時停止する必要があった。また、未改良部が発生する可能性があることから、曲がり削孔工法による浸透固化処理工法が適用された。

図-8に削孔および改良断面図を示す。施工ヤードは改良深度までのアプローチ長を確保するため、タンクヤードの外周道路上に設置した。そのため、一部タ

ンクヤード側に仮設道路を設置し、削孔ライン上部を車両通行する状態で施工した。埋設供用管と機械配置の関係で計画深度を満たせない削孔機直近の改良部分は、直斜削孔にて補足注入を実施した。

本工事は、当時、日本では初めての危険物貯蔵タンク供用状態による施工であることから、施工中はタンク変位の動態観測を併用し慎重な施工を行った。全施工期間を通しての変位は計測誤差範囲の±2mm以内に収まっており、タンクへの影響は無いことを確認した。

写真-4、5に施工状況1、2を示す。



写真-4 施工状況1



写真-5 施工状況2

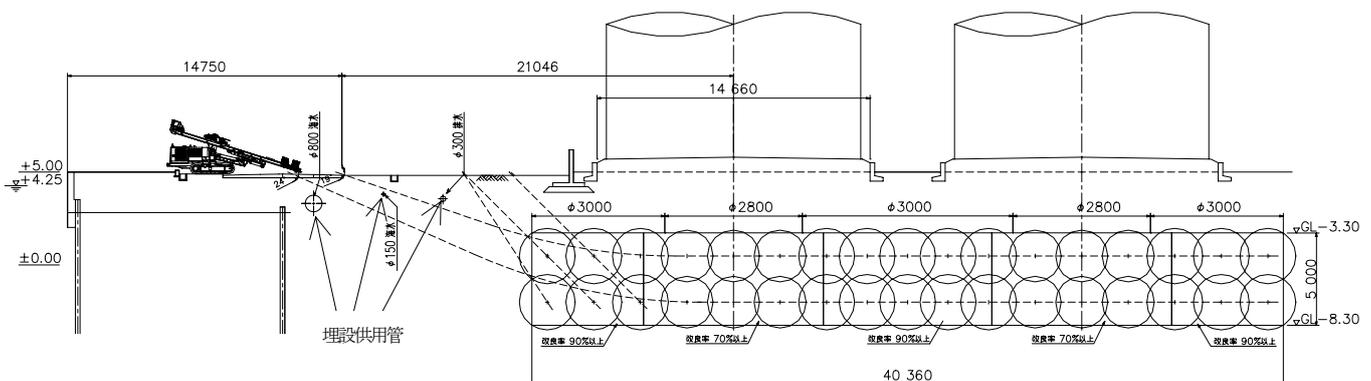


図-8 削孔および改良断面図

5.2 防潮水門耐震補強工事

(1) 工事概要

宮城県志津川湾に流入する八幡川の河口付近にある防潮水門の基礎地盤耐震補強工事である。平成17年4月から約6ヶ月間で実施した。志津川湾内には牡蠣やわかめの養殖場がある。このため、生態環境に配慮し、使用注入材は無機系材料を用い、さらに工事による水質汚濁は完全に防止する必要があった。

防潮水門は、約60m×19mの平面形状であり地盤にはφ350mmの基礎杭が200本存在した。1削孔長は約100m、削孔ラインと基礎杭の離隔は全て1m以下、最小では500mm以下であり、極めて高精度な位置検出技術と高い削孔誘導技術が必要であった。表-3に工事概要を図-9、10に改良平面図と改良断面図を示す。

写真-6は施工した防潮水門の全景である。

表-3 工事概要

削孔本数	24本
削孔延長	2316m
曲率×曲線数	30mR×1ヶ所
改良深度	EL-2.95m~-7.00m
対象土量	3956m ³
使用薬液	中性固化材

(2) 曲がり削孔工法の適用

従来の直斜削孔工法では、河川内水門躯体底盤に削孔穴を開ける必要がある他、河川内施工となるため汚濁拡散防止処置など多くの仮設備が必要となる。このことから、曲がり削孔工法による薬液注入工法が適用された。施工ヤードは、防潮水門の右岸に位置する運動公園に削孔機械を設置し、水門真横から基礎杭間24本を削孔し、中性固化材の割裂注入方式による液状化対策を実施した。写真-7に施工状況を示す。

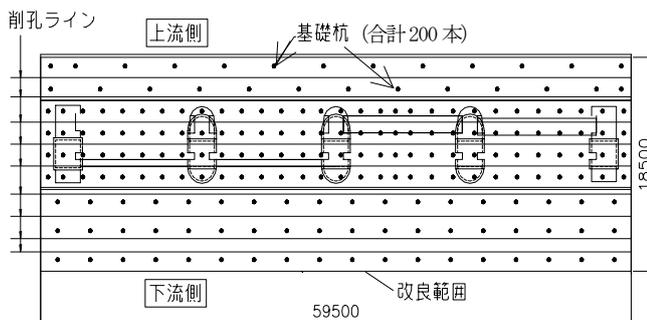


図-9 水門改良平面図

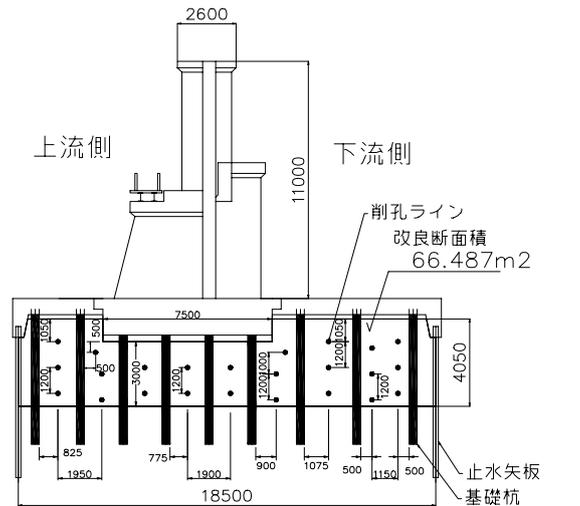


図-10 水門改良断面図 (合計200本)

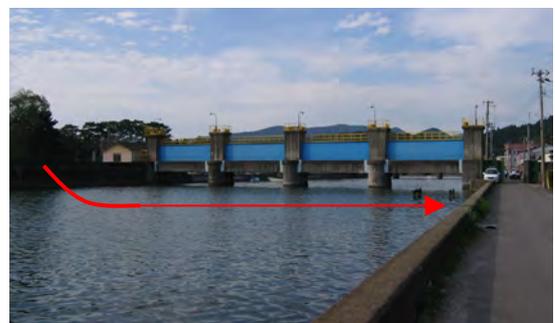


写真-6 防潮水門全景 (下流から)



写真-7 施工状況 (水門右岸)

6. まとめ

日本の沿岸地域には、空港施設や重要港湾、また発電施設など重要構造物が多く存在する。災害に強い国づくりが急がれる中、構造物の撤去や立坑構築など膨大な費用をかけずに、各種構造物を供用したまま地盤改良できるメリットは大きい。最後に、新小型ジャイロの開発に関して、多大なご協力をいただいた(株)トキメックの皆様に、本誌をかりて深く感謝の意を表します。

13. シールドのビット交換技術『リレービット工法』

鹿島建設株式会社：○佐々木 哲也、永森 邦博、辻井 孝

1. はじめに

近年、建設工事のコスト縮減を目的とした事業期間短縮への取り組みが進められている中で、シールドトンネル建設工事においては、トンネル延長が長距離化する傾向にある。

また、大深度地下の利用の規制緩和により、シールドトンネル建設工事の大深度化が今後進められて行くことに合わせ、掘削対象の地盤も今まで施工が行われてきた都市部の比較的柔らかい粘性土や砂質土から礫、軟岩に至るまで多様化して行くことが予想される。

このような背景から、カッタビットの摩耗や欠損に対する耐久性がさらに重要となっている。カッタビットには、特殊超合金材料が使用され、長距離掘削への耐摩耗性や硬い礫層、軟岩掘削などに対する耐久性も、使用材料の開発とともに向上しているが、厳しい条件下では、カッタビットの交換が必要となる工事もあり、カッタビットの交換技術の開発が盛んに行われている。

従来の技術では、構築した中間立坑でのカッタビット交換作業やシールド機の掘進を停止させて地盤改良などの施工を行い、シールド機前面に地山を自立させた作業空間を設け、作業者が進入しカッタビット交換を行ってきたが、交換作業の安全性向上や工程短縮を図れるカッタビット交換技術の開発は重要な課題であった。

当社で開発、実用化したリレービット工法は、地盤改良などの補助工法を必要とせず、シールド機内部からカッタビットを交換する工法であり、現在では複数の工事に適用されている。

さらに最近では、カッタビット交換工法の応用により、掘削地盤に応じて最適なカッタビットに交換しながら広範囲の地山に適応することや、NOMS T切削対策、地中障害物切削対策として応用されている。

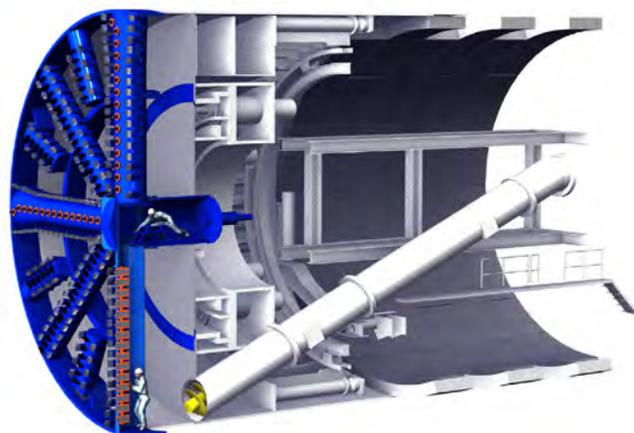


図-1 リレービット工法概念図

本文では、リレービット工法の概要と施工現場での適用実績及び経済効果について報告する。

2. リレービット工法

リレービット工法は、作業者がカッタ面板の回転軸であるシャフトを通じてカッタスポーク内部の作業空間に移動し、内側から摩耗したカッタビットを引抜き、新しいカッタビットを差し込むことでカッタビットの交換ができる工法である。

リレービット工法のビット交換装置は、装置内部を回転させるボールバルブ式、ゲートバルブを開閉するセーフティゲート式、バルブプレートと称する円形プレートを90°回転させるバルブプレート式などがあり、交換時に止水性を保つ構造となっている。図-1に本工法概念図を、図-2にボールバルブ式のリレービット交換手順を示す。

リレービット工法の特徴として次のことがあげられる。

- ①カッタスポーク内に作業空間(広さ約80cm四方)を設けたことにより、無圧気でビットの交換が可能である。

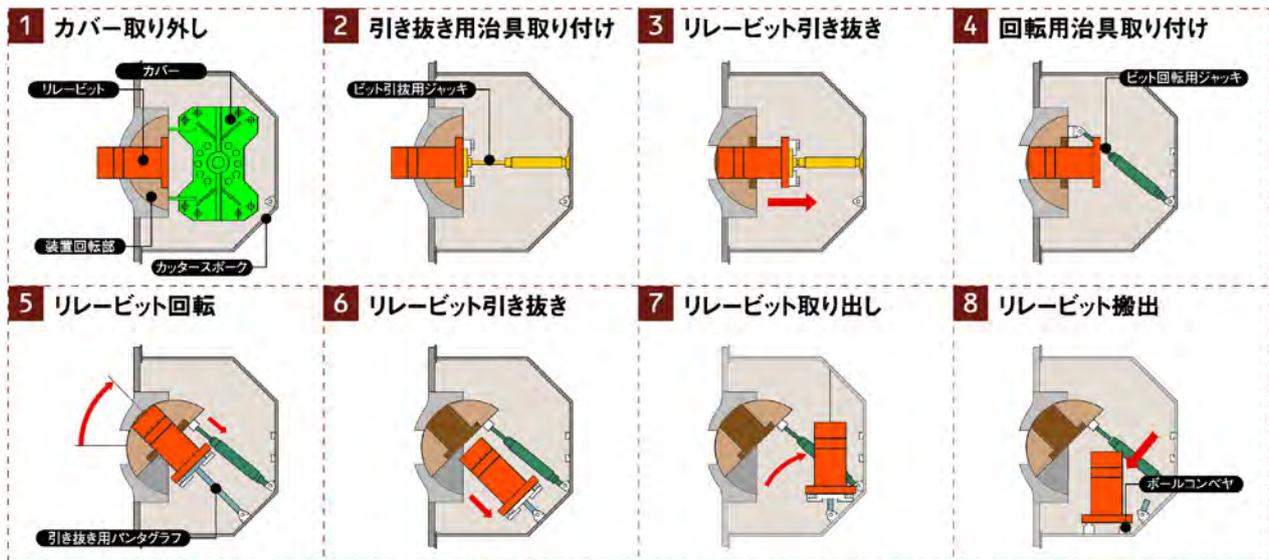


図-2 リレービット交換手順（ボールバルブ式）

- ②ビット交換は土質条件に関係なく、『いつでも、どこでも、何回でも』可能である。
- ③カッタビットの摩耗状況を目視確認できる。
- ④掘進中に土質が変化した場合、土質に適したカッタビットに交換できる。
- ⑤NOMS T壁の切削や既設洞道のセグメントの切削など、カッタビットに負担のかかる工事において、掘削対象物に応じたカッタビットへの交換や摩耗したカッタビットを交換できる。
- ⑥泥水式、泥土圧式の両方のシールド機に適用できる。

3. リレービット工法の適用実績

カッタビット交換工法が適用される状況は、施工条件により、次にあげるような用途分類ができる。

- ①長距離掘進におけるビット摩耗対策
- ②地中障害物切削におけるビット交換
- ③新素材コンクリート壁掘削におけるビット交換

これらの施工条件に応じて選定されるカッタビット交換工法のうち、当社施工現場で使用したリレービット工法の適用実績を以下で述べる。

3.1 長距離掘進における適用実績

(1) 工事概要

春日井共同溝は、愛知県春日井市大泉寺町と勝川町4丁目を結ぶ大泉寺工事（1工区：3,420m）と瑞穂工事（2工区：3,400m）の延長6,820mを、外径φ4,800mm



写真-1 φ4,800mm 春日井共同溝シールド機

の泥土圧式シールド機1台により施工する国内最長級のシールド工事である。掘進対象地盤は、礫径300mm程度の玉石混じりの砂礫層である。

シールド工事の概要は下記のとおりである。

- ・発注者：国土交通省中部地方整備局
- ・トンネル延長：6,820m
- ・掘削機外径：φ4,800mm
- ・トンネル外径：φ4,650mm
- ・仕上がり内径：φ4,200mm
- ・掘削対象土層：玉石混じり砂礫層

(2) シールド機の構造

カッタビットの摩耗や損傷が懸念される条件であり、掘進途中でのビット交換回数が増えることが見込まれ

たことから、リレービット工法が採用された。当該工事のシールド機は、作業スペース確保も配慮し、写真-1に示すように6本のスポークのうち、2本のスポークに合計9個のボールバルブ式のリレービットを装備した。

(3) リレービット交換実績

シールド機前面での作業が可能なEB5（中間立坑：820m地点）、EB3（オーバーホール部：3,400m地点）においては全種類のビット交換を、EB4（1,848m地点）ではリレービットのみの交換を実施した。表-1に各交換地点での摩耗係数を示す。摩耗係数に多少のばらつきはあるが、全体的には当初想定値を下まわり、良好な結果が得られたと判断する。

表-1 リレービット摩耗係数

地点	掘進距離 m	摩耗係数 $\times 10^{-3} \text{mm/km}$ (当初予測の)
当初予測	—	80
EB5	820	22.8 (29%)
EB4	1,848	42.2 (53%)
EB3	3,400	43.2 (54%)

また、EB4（区間摺動距離：513km）のリレービット交換時には側面硬化肉盛部の大きな摩耗（えぐれ）が確認されたが（写真-2）、その後側面の超硬チップを延長した強化型リレービット（図-3）を採用した（2,405m地点）ことから、EB3到達時にはチップ脱落・ビット折損を招く危険性があるリレービット側



写真-2 リレービット側面摩耗状況

面の摩耗（えぐれ）は軽減され、強化型リレービットの効果が確認された。

一方、摩耗量/ビット摺動距離で算出される摩耗係数（mm/km）は、カッタ切込み量によって摺動距離が変動するため、ばらつきが発生し、定量的な評価が難しい。リレービットの場合、EB5、EB4、EB3における摩耗係数は、図-4に示すように $23 \times 10^{-3} \sim 43 \times 10^{-3}$ (mm/km) となるが、掘削地盤・掘進距離から判断するとビットの耐久性に大きな違いがあるとは考えにくい。そこで、ビット1個あたりの掘削土量と摩耗量の関係に着目し、グラフ化したものを図-5に示す。各々の勾配（摩耗量/ビット1個あたりの掘削土量=mm/m³）は、ほぼ一定となり、ビットの耐久性が同等であることが分り、ビットの耐久性評価の指標として適用可能と考える。

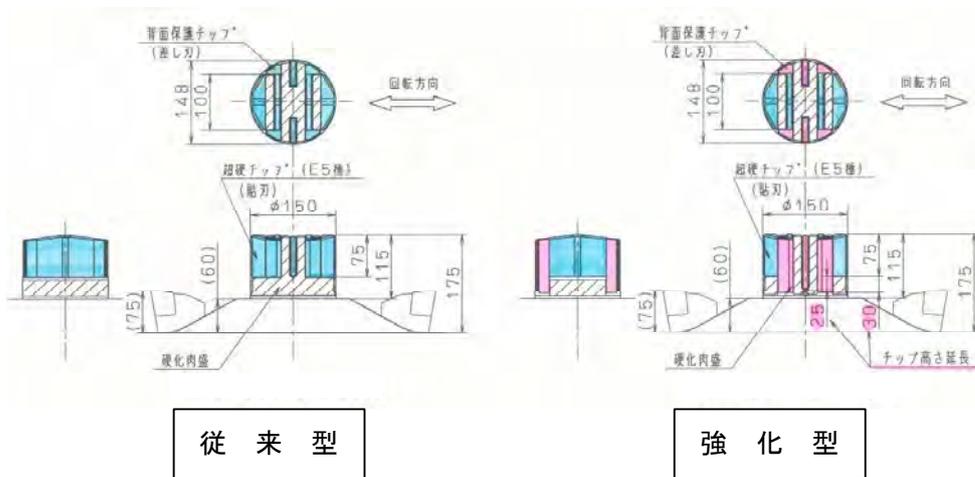


図-3 強化型リレービット

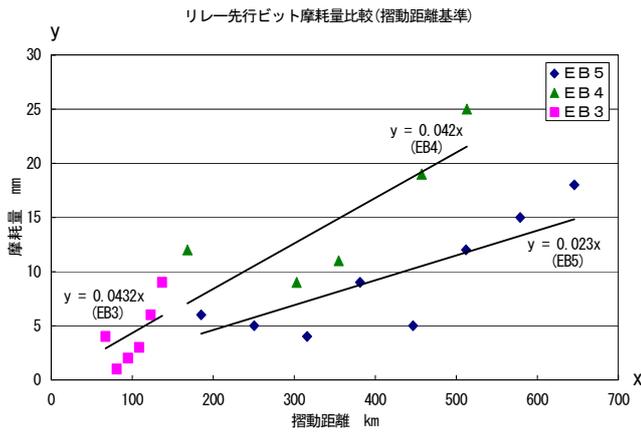


図-4 リレービット摩耗係数

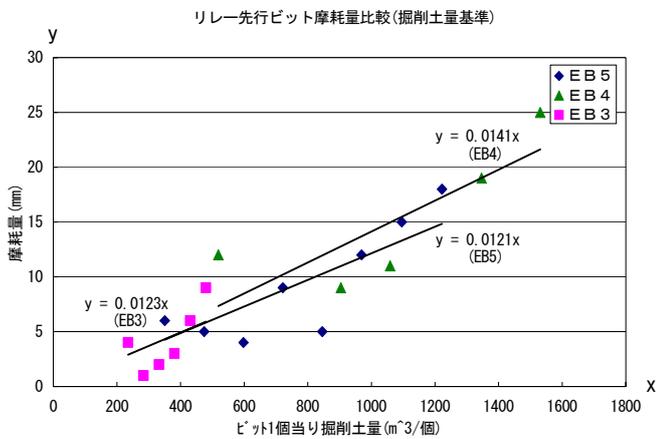


図-5 ビット1個あたりの掘削土量—摩耗量

3.2 地中障害物対策における適用実績



写真-3 φ8,990mm 勝島ポンプ所シールド機

(1) 工事概要

東京都勝島ポンプ所連絡管渠工事は、品川区勝島1丁目地先と品川区東大井1丁目13番地を結ぶ勝島ポンプ所と鮫洲ポンプ所間の延長387mに、外径φ8,990mmの泥水式シールド機により管渠を構築する工事である。掘削対象地盤は粘性土層であるが、路線途中には既設構造物のNOMST壁(計2枚)の切削、基礎杭(松杭×37本、鋼管杭×1本)切削とシールド機の到達で

表-2 専用ビット形状比較

	NOMST切削ビット	松杭切削ビット	鋼管杭切削ビット
形状			
刃型	<ul style="list-style-type: none"> V刃 NOMST切削実験から有利な平面すくい角を有する平刃バイトカッターを採用 	<ul style="list-style-type: none"> V刃(舟底) 木杭性状から食込み性、切削性を考慮してV刃バイトカッターを採用 	<ul style="list-style-type: none"> 平刃 低速回転によるスチール切削実験により平刃での切削性を確認
切削方向	両回転	両回転	片側回転
切削幅	60mm	40mm	50mm
取付ピッチ	100mm	50mm	50mm

はNOMS T壁の切削を行う必要があった。掘削対象物にあった効率的な掘削を行うために、リレービット工法を採用した。

シールド工事の概要は下記のとおりである。

- ・発注者：東京都下水道局
- ・トンネル延長：387m
- ・掘削機外径：φ8,990mm
- ・トンネル外径：φ8,800mm
- ・仕上がり内径：φ7,200mm
- ・掘削対象土層：粘性土層

(2) シールド機の構造

シールド機には写真-3のカッタスポークにセーフティゲート式リレービット交換装置を71個装備させた。掘削対象物に合わせた専用ビットの形状を、表-2に示す。

(3) リレービット交換実績

掘削対象物の直前においてリレービットの交換を合計4回実施した際の実績を表-3に示す。回数を積み重ねる度に時間は短縮され、4回目を行う時には1個あたり30分のペースで交換することができた。

表-3 リレービット交換実績

	1回目	2回目	3回目	4回目
交換目的	NOMSTビット 摩耗確認	松杭切削 ビット交換	鋼管切削 ビット交換	NOMSTビット 交換
交換個数	2	10	71	5
平均所要時間 (min/個)	120	40	30	30
交換場所	連壁土留内	地山	地山	地山

3.3 その他の適用実績

リレービット工法はこの2工事以外にも、表-4に示すように国内外5工事、6台のシールド機に適用しており、シールド機外径φ3,080mm(写真-4)が適用最小径となっている。



写真-4 φ3,080mm 須磨浦汚水幹線シールド機

4. 経済的効果

リレービット工法の経済的効果は、シールドトンネル延長の長距離化による建設工事コスト縮減である。さらに、ビット交換の簡便化による工期短縮及び中間立坑省略によって地上交通への影響を最小限に抑制することによる社会的便益が期待できる。

リレービット工法の適用要否による工事費及び工事工程を、トンネル延長5,000m、シールド機外径φ4,000mmの泥水式シールド機で掘削した場合において想定比較した。

比較対象とする従来技術では、トンネル延長の中間

表-4 リレービット工法適用実績

工事名	企業者	シールド機 外径	トンネル 延長	台数
11号線隅田川工区土木工事	帝都高速度交通営団	φ9,900mm	1,258m	1台
SJ11工区(4)~SJ31工区(外回り)トンネル工事	首都高速道路公団	φ13,070mm	1,700m	1台
台湾龍門原発循環冷却水放水路JV工事	台湾電力	φ8,300mm	1,250m×2	2台
石岡トンネル(第2工区)新設工事	国土交通省関東地方整備局	φ4,040mm	5,000m	1台
須磨浦汚水幹線布設工事	神戸市	φ3,080mm	4,394m	1台

表-5 リレービット工法要否による工事費比較表

項目	リレービット工法によるビット交換					従来技術によるビット交換				
	仕様	数量	単位	単価	金額	仕様	数量	単位	単価	金額
φ4.0m泥水式シールド機	ビット交換装置あり	1	式	490,000,000	490,000,000	ビット交換装置なし	1	式	370,000,000	370,000,000
ビット交換費用(ビット代、労務費ほか)	中間地点作業	1	回	28,000,000	28,000,000	中間立坑内作業	1	回	23,000,000	23,000,000
ビット交換費用(ビット代、労務費ほか)	到達立坑前作業	1	回	28,000,000	28,000,000					—
ビット交換用中間立坑構築工					—	中間立坑構築工	1	式	370,000,000	370,000,000
中間立坑発進・到達防護工					—	薬液注入、鏡切工ほか	1	式	70,000,000	70,000,000
到達立坑到達防護工					—	薬液注入、鏡切工ほか	1	式	23,000,000	23,000,000
合計					546,000,000					856,000,000

※コスト比較結果：(1-546,000,000円/856,000,000円)×100 ≒ 36%

地点に立坑外径φ10m、深さ41m、壁厚1mのビット交換用中間立坑を構築する。また、カッタビットの摩耗により中間立坑、到達立坑でのNOMST壁切削ができないため、到達防護工及び鏡切工を実施する。

対するリレービット工法では、発進及び到達立坑にNOMST工法が適用されており、トンネル延長の中間地点及び到達直前の計2回ビット交換を実施する。

リレービット工法要否による工事費比較結果を表-5に示す。この結果によるとリレービット工法を採用することでシールド機本体価格は30%程度割高にはなるが、全体工事費で約36%のコスト縮減が可能となった。また、表-6の工事工程によると、全体で約57%の工期短縮が可能である。今回の比較は、シールド掘進工に影響する部分についての比較であり、中間立坑構築工や発進・到達防護工によって、シールド掘進工期が延びる場合には、更なるコスト縮減、工期短縮が期待できる。

表-6 リレービット工法要否による工事工程比較表

項目	リレービット工法によるビット交換			従来技術によるビット交換		
	適用	数量	単位	適用	数量	単位
中間立坑到達掘進工		—			10	日
ビット交換工	中間地点	5	日	中間立坑内	5	日
中間立坑発進準備・掘進工		—			10	日
ビット交換工	到達立坑前	5	日		—	
到達立坑到達掘進工		3	日		3	日
到達立坑鏡切工		—			2	日
合計		13	日		30	日

※工程比較結果：(1-13日/30日)×100 ≒ 57%

5. おわりに

これまで8台のシールド機に適用されたリレービット工法の実績から、シールド機掘削能力を最大限に発揮させるために、摩耗したカッタビットの交換や地盤に適したカッタビットへの交換だけではなく、到達立坑のNOMST壁切削や松杭、鋼管杭などの既設障害物切削などにも本工法の有効性を確認することができた。また、砂礫層や岩盤掘削に使用されるローラビットについても、リレービット工法の要素技術を応用して開発を完了しており、1台のシールド機で軟弱地盤から硬質地盤に至る全地盤対応シールド工法が確立された。

従来のカッタビット交換技術では、立坑構築や地盤改良などの工事費の増大、また、シールド機外でのビット交換作業の安全性、周辺環境及び地上交通設備への影響などが課題となっていたが、今後はシールドトンネル工事にリレービット工法を適用することですべてが解決でき、長距離化・大深度化の施工が実現可能と考える。

参考文献

- 1) 永森邦博・小野大我：ビット交換技術「リレービット工法」、大深度化に対応する地下空間建設技術と建設機械、2004.9
- 2) 辻井 孝, 白井 徹弥：『リレービット工法』による玉石混じり砂礫地盤の長距離掘進, 日本プロジェクト・リサーチ講習会, 2004.3

1 4. 急勾配シールドトンネルの施工における品質確保方法

東京都下水道局 北部建設事務所工事第一課長

小松原修義

東京都下水道局 北部建設事務所工事第一課 工事第二係長

土居 正司

株奥村組 東京支社 機械部工務課長

○柴崎 貞典

1. はじめに

近年、シールド現場でも周辺環境等の影響から長距離、小口径、急勾配等の難工事が多くなってきている。本報では、+199.3‰と上り急勾配では国内最大級である【業平橋ポンプ所放流渠その5工事（東京都下水道局発注 H17.8.23～H18.6.21）】での施工実績から、急勾配施工における問題点、本工事における技術的対応方法ならびに結果について報告を行う。

2. 工事概要

(1) 工事内容

- ・泥土圧式シールド工法
- ・シールド機外径：φ5800mm
- ・仕上内径：φ5000mm
- ・管渠延長：471m
- ・セグメント

直線部：ハニカムセグメント

(幅1000mm) = 299リング

縦曲線勾配変化部：コンクリート中詰セグメント

(幅：500mm) = 48リング

急曲線部：スチールセグメント

(幅：1000, 500, 300mm) = 356リング

- ・残土搬出：14.760m³
- ・発進坑口：噴射攪拌杭工(SJM)6本、NOMST壁
- ・到達坑口：噴射攪拌杭工(SJM)14本、
二重管ストレーナー複相式1式
- ・計測工：東武鉄道、源森橋、北十間川護岸
(傾斜計、沈下計)

(2) 工事の特徴

- ・高水圧：最大土被り40m、最大水圧0.45MPa
- ・急曲線：交角90°、R=20m・CL=32m 2ヶ所
- ・急勾配：水平距離L=170m、土被りDP=40～6m
勾配+199.3‰

(3) 線形

平面・縦断線形を図-1及び2に示す。

発進直後にR₁=60mの曲線部施工を行い、次に源森橋直下を通過する前後でR₂=20mの急曲線部を2箇所施工する。(土被り40m)縦断曲線R₁=60mの施工を経て+199.3‰の急勾配区間に入り、170mの掘進後に縦断曲線R₃=60mで5‰の勾配に戻して到達する。(土被り6m)

(4) 土質概要

図-2縦断図に示すとおり、発進部から急勾配部手前までの土被り40mの大深度区間は洪積の締った砂礫(Tog)主体で、部分的にレンズ状の洪積硬質粘土(Toc)を含んでいる。(区間①)急勾配区間に入ってからすぐに層厚が約2mの洪積硬質粘土(Toc)が現れ、洪積硬質粘土が主体になった時には、切羽上部に沖積砂礫(btg)、下部に洪積砂礫(Tog)の土質構成となり、掘進とともに切羽の土質性状が複雑になる。(区間②)その後はローム(Lm)と沖積粘性土(Y1c)を挟んで、沖積砂礫(btg)・礫質土(Yug)の2種類の沖積砂礫層となり、特に沖積粘性土(Y1c)と礫質土(Yug)の層境付近に崩落性の高い箇所が存在した。(区間③)到達前の水平区間に入ると、沖積砂質土(Yus)・粘性土(Yuc)・礫質土(Yug)の互層になるが、大部分が地盤改良区間であることから比較的地盤が安定していた(区間④)



図-1 平面図

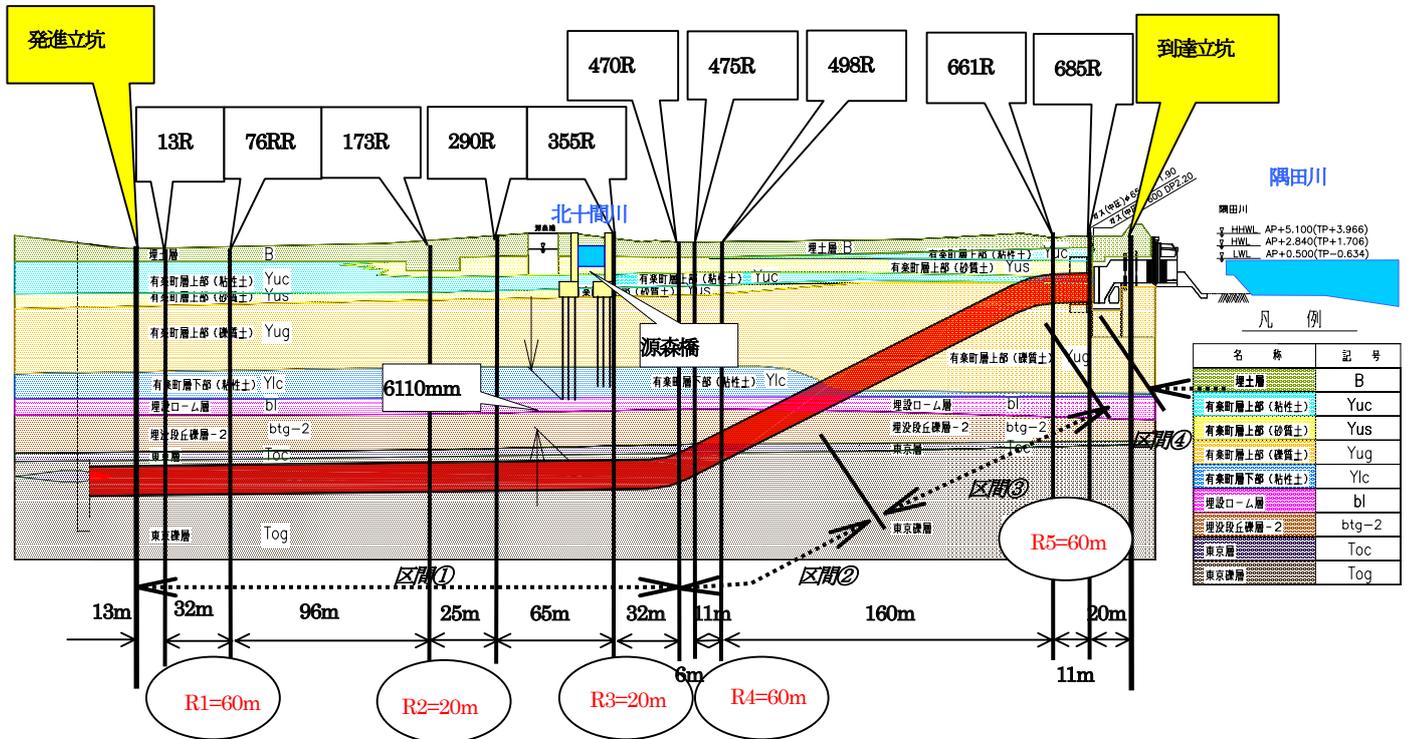
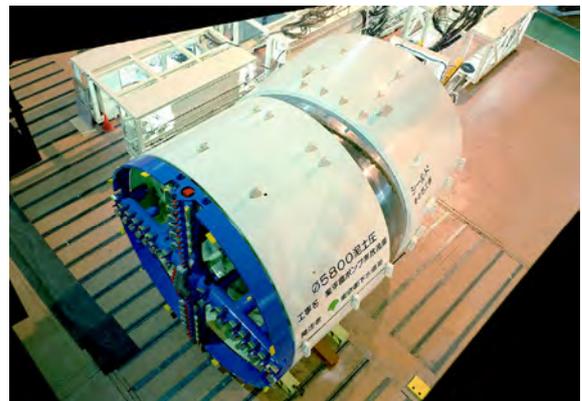


図-2 縦断面図

(5) シールドマシンについて

- ・高水圧 0.4kg/cm² 以上に対応するため、テールシールパッキンを3段装備
- ・急曲線 R=20m 対応のため、左右 11.1° の中折れ機構
- ・急曲線 R=20m 対応のため、スクリーコンベアー首振り機構を装備
- ・急勾配 R=60m 対応のため、上下 4.0° の中折れ機構
- ・坑口 NOMST 壁対応 NOMST 先行ビット装備
- ・メタン対応機内防爆仕様



3. 問題点と対策

急勾配施工時の問題点及び留意点は何点かあると思われるが、本報では、下記の2点について【業平橋ポンプ所放流渠その5工事】での施工結果と考察をふまえて述べる。

- (1) 坑内搬送設備の安全対策
- (2) 複雑な地盤への対応

(1) 坑内搬送設備の安全対策

<ピンラック&ピニオン方式サーボロコ>

急勾配部の施工にあたっては、セグメント運搬等に使用されるバッテリー機関車の安全対策が問題とされる。本工事では、ピンラック&ピニオン方式サーボロコ（写真-3）を使用した。

これは、従来のサーボロコにピニオンギアを装備し、平坦部では通常の手車の駆動力、急勾配部では軌条に設置したピンラックにギアが噛み込み、ピニオンギアの駆動力によって牽引力とする方式である。ピンラックが逸走防止の歯止めの役割も兼ねている。

また、浮上防止機構により、転倒・浮上を防止した。（写真-7）

平坦部と急勾配部の切替はセンサー感知で自動的に行うので、運転手の負担が減りかつ安全である。

サーボロコの稼働状況を写真-4～7に示す。

今回、ピンラック&ピニオン方式サーボロコを採用したが、平坦部から急勾配に遷移する縦断曲線区間（R=60m）ではサーボロコの構造上、ピンラックとのなじみが悪くなり、ロコ通過時に軽い衝撃のようなものが発生した。台車をボギー機構にする等、改良を加えれば、縦断曲線通過時にも今回のような衝撃は発生しないのではないかと考えられる。

<傾動装置>

急勾配部では材料台車からセグメント等の資機材を下す際には、荷が傾いた状態で吊るようになる。ところが荷は重力の影響を受けるため、水平に戻ろうとする。その為、荷が振れ危険性である。そこで本工事では、材料台車の荷台部分が傾く構造とした。これによって急勾配部でも荷が振れることなく安全に作業出来た。（図-3）

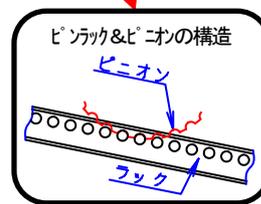


写真-3 ピンラック&ピニオン方式サーボロコ



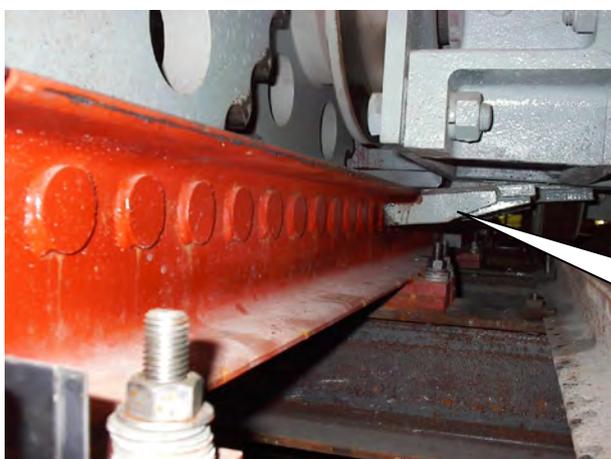
写真-4 サーボロコ急勾配を行く



写真—5 サーボコロコ下側

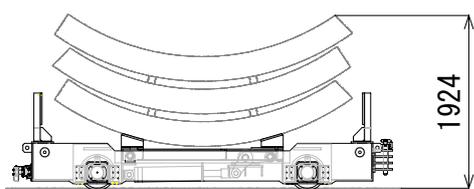


写真—6 サーボコロコ側面

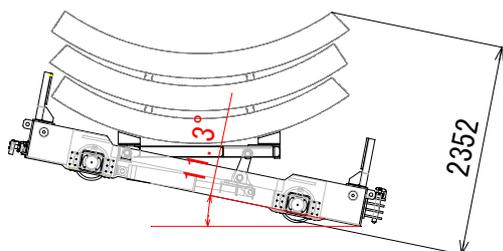


写真—7 浮上防止機構

浮上防止機構
ピンラック上部フランジがストッパーになり、
浮上り・転倒しない。



平坦部走行時

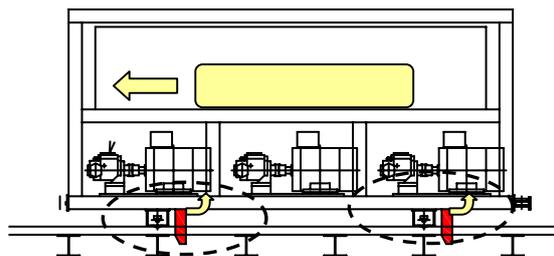


急勾配部走行 傾動装置作動

図—3 傾同装置

また、後続台車の逸走防止対策として、台車にストッパーを取付けた。これは後続台車の前進とともにこのストッパーが、枕木を通過する毎に単方向に回転する機構であり、これを採用することで、進行方向と逆方向に逸走した場合にはストッパーが枕木に引っかかり後続台車が停止する方式である。

(図—4 参照)

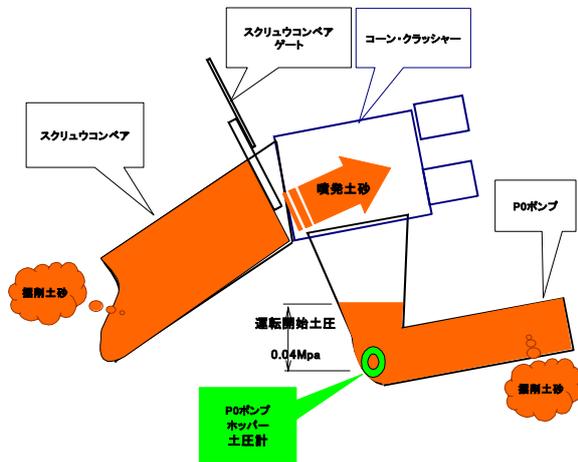


図—4 逸走防止装置

(2) 複雑な地盤への対応

① 当初 $H=0.04\text{Mpa}$

SCゲート開放 → 「噴発」



② 変更 $H=\text{切羽土圧} + \alpha$ $0.05\sim 0.15\text{Mpa}$

SCゲート開放 → 噴発なし

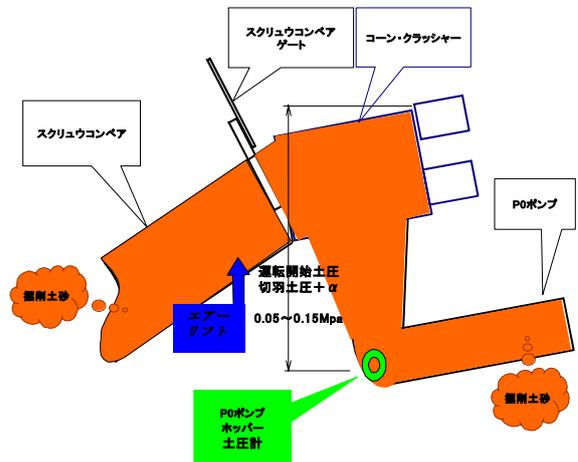


図-5 圧送ポンプ<P0>ホッパー土圧制御モデル図

<問題点の整理>

本工事は、当初から下記の課題があった。

- ・ ほぼ全線にわたり砂礫層
- ・ 圧送ポンプによる土砂排出
- ・ 立坑深さが45m

通常、土砂の圧送をスムーズにするためには、土砂が分離しないように加泥注入量を増やしていけばよいと考えられている。しかし、加泥注入量を増加させると、高水圧であるため、スクリュウコンベアのフライトと土砂の摩擦力が低下し、「プラグ効果」が損なわれ、排出ゲートで「噴発」し易く、切羽土圧が不安定になるという矛盾が生じた。

そこで、当現場では「噴発」と「閉塞」防止が懸案事項であった

更に、縦断図(図-2)を見て分かるように、急勾配部では特に土質が礫層から粘性土層までと実に8種類も変化し、かつ切羽土圧の変化と併せると非常に管理が難しいものであった。

<対策と結果>

そこで、噴発防止対策として、土砂圧送ポンプ<P0ポンプ>のホッパー内圧に着目し、内圧を制御させる

ことで噴発を抑える方法を採用した。

図-5にホッパー土圧制御の概略を示す。当初は、P0ポンプのホッパー内圧を0.04MPaで一定させていたが、「切羽土圧+ α 」と変化させることによって一定の成果を見ることができた。図-6は、P0ポンプホッパー内圧で制御する前後の切羽土圧の変動結果であるが、これからも明らかのように、対策後には切羽土圧の変動が少なく落ち着いた状態になっている。

ただし、この方法は一定の効果があったものの、今回のように土質が急激に変化する場合や土水圧の変化によって頻繁に制御値を変化させなければならないという条件下では、少々手間のかかる方法ではあった。今後は、切羽土圧の変動に対して自動調整可能なシステムを考案すれば、より応用範囲が広がるのではないかと考えられる。

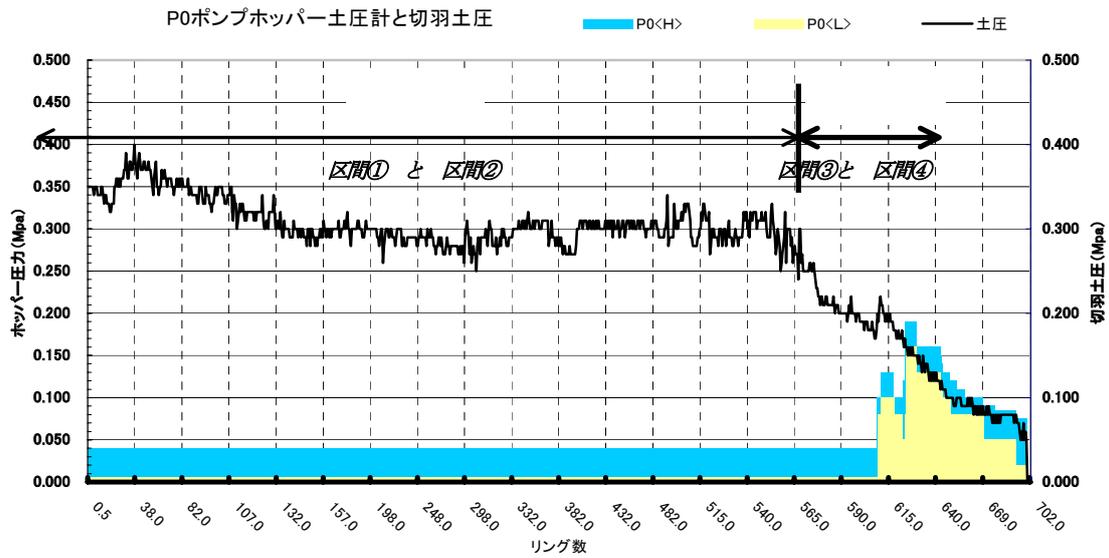
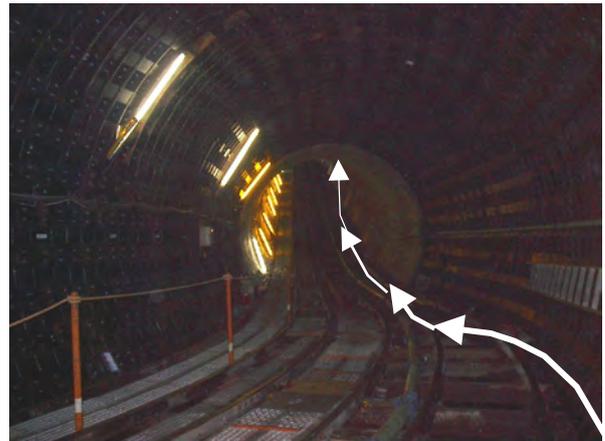


図-6 P0 ポンプホッパー土圧計による制御グラフ

3. おわりに

本文では紹介できなかったが、当工事は、高水圧・急勾配・急曲線に加えて、可燃性ガス、既設構造物（源森橋直下通過）および在来営業鉄道（東武線）との近接施工等、数多くの厳しい施工条件下であったが、平成 18 年 5 月に無事到達することができた。



15. 狭小な立坑到達の推進工事における回収型掘進機の適用

（株）奥村組 東京支社 土木工事第三部
河井 弘幸 ○西沢 武司

1. はじめに

地下空間に管路を築造する工法としてシールド工法や推進工法が採用されて久しく、その実績や件数は数多い。そして施工場所周辺の道路渋滞や沿道住民への影響を最小限に留めるといった社会的要求がより高まる傾向にある。それに伴い長距離化や低土被りといったより厳しい条件下での施工が求められる時代になっている。

また都市部では埋設物が多く立坑面積が十分に確保できない場合や、地上から作業できない場合などは非開削で施工を行うといった事例も多くなっている。

今回、横浜市の下水道整備事業において、大雨時の浸水被害防止対策としてφ1500mmの管路築造工事が実施された。工法は土質や発進基地の敷地条件、経済性等から泥濃式推進工法が採用されたが、到達立坑は埋設物の位置的關係からφ2300mmのライナープレートで計画され、掘進機は立坑到達後に駆動部等の機器を解体し、外殻を残置する形態での施工となった。

本報では掘進機の駆動部等の内蔵機器を安全に効率よく解体できる回収型掘進機「やどかり君」の適用例について述べる。

2. 工事概要

工事の目的は、二俣川流域の基幹排水路が都市化に伴う流出量の増大でその安全度が下がり幹線整備が必要となってきている、また下流河川である帷子川へ許容放流量以下にする必要があることより、二俣川1号雨水幹線の最上流部に流下貯留併用型雨水幹線を整備するものである。

推進路線の位置は図-1に示す通り、横浜市道「鴨居-上飯田線」下にあり、推進路線の平面線形は道路の南側を走る東海道新幹線との近接を避けるため北側の官民境界近くを通り、曲率で400m、曲線長がL=153mである。縦断的には図-2のように管路勾配は0.1%であるが、発進立坑部から到達部の約278m間で地表面の標高差が14mあり、勾配が5.4%の下り坂となっているため、土被りがGL-17.19m~-2.77mと大きく変化する。（写真-1、2参照）

推進路線の土質は大半がローム層であるが、発進部付近の下部に砂礫層があり、また到達立坑付近では軟弱な沖積粘性土層となる。このローム層のN値は5~36と硬さのバラツキが非常に大きく、また部分的に軽石層を挟んでいる。

工事内容を以下に示す。

工事名 : 都筑処理区二俣川1号雨水幹線
下水道整備工事(その9)
発注者 : 横浜市環境創造局
施工者 : 奥村・保土ヶ谷・坂本建設共同企業体
施工場所 : 神奈川県横浜市瀬谷区阿久和東3丁目
2番5地先~24番16地先
施工内容 :
・施工法 : 泥濃式推進工法
・推進管 : 内径1500mm、外径1780mm
・路線延長 L=278.727m
(推進延長 L=272.573m)
・線形 平面 R=400m, CL=153.148m 1箇所
縦断 上り0.1% (発進側より見て)
・土被り 17.19m (発進部) ~-2.77m (到達部)
・土質 ローム層、砂礫層、沖積粘性土層
掘進機解体工 1式



図-1. 平面線形

地質層序表

層相記号	地層名	地層名
B	黄土	完全新第四紀
Ac	沖積粘性土層	
M2L-k	ローム層1	
TuL	ローム層2	更新第四紀
Tt	洪積れき質土層	
Kks	洪積粘性土層	

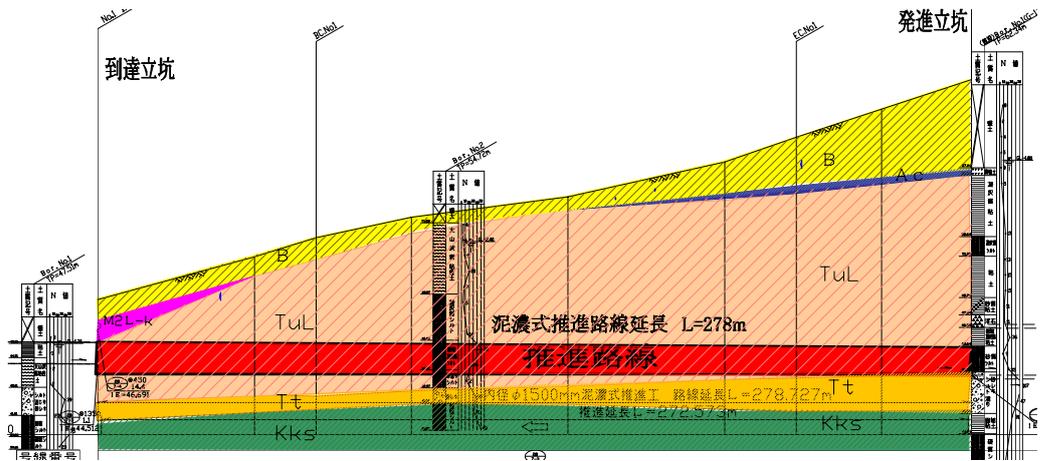


図-2. 縦断線形



写真-1. 到達立坑付近



写真-2. IP-1付近

3. 施工方法

(1) 回収型掘進機

到達立坑は埋設物の制約を受けて掘進機の引揚げに十分な大きさを確保できない。そこで掘進機の面盤のみを到達立坑から引揚げ、掘進機外殻は残置し、駆動部を発進立坑側へ引戻して回収する泥濃式の回収型掘進機を採用した（写真-3参照）。掘進機の制御盤、油圧ユニット等を組み込んだ後続管は1本目の推進管内に配置した（図-3参照）。

回収型掘進機は駆動部等の内蔵機器の簡易解体を目的に開発されたもので、泥土圧推進工法等で数多くの実績があるが、泥濃式では今回が初めての施工になる。（表-1参照）



写真-3. 泥濃式回収型掘進機

(2) 掘進機解体、駆動部引戻し

到達立坑において、鏡切り後に掘進機を面盤部分が顔を出す程度に押出す。その後、立坑内で面盤部分を取外し、引揚げを行う。ボルト接合されている掘進機内の方向修正ジャッキ、排土ゲート等を取外した後、外殻と駆動部（内殻）とを固定しているボルトを取外し、引戻しの車輪となるローラーを駆動部に取り付ける。駆動部を外殻から引抜いて分離した後、推進管内を発進立坑側へと引戻し地上へ引揚げる。（図-4参照）

表-1. 掘進機仕様

シールド	
型式	1500型泥濃式掘進機
適用ヒューム管	内径 φ1500mm
シールド機寸法	外径φ1800 x 機長3400mm
方向修正ジャッキ	500 ^N x50 ^t x30 ^{MPa} x4本
油圧ポンプ	0.2/0.24 ^l ・1・x30 ^{MPa} x1 ^B
ユニット電動機	0.3 ^t x4 ^P x400/440 ^V x1 ^B
電源	AC 50/60 ^{Hz} 3 ^Φ 400/440 ^V
カッター	
トルク	常用95/79 ^{kNm} 瞬時143/118 ^{kNm}
回転数	4.3/5.2 ^{r/min}
電動機	22 ^t x4 ^P x400/440 ^V x2 ^B

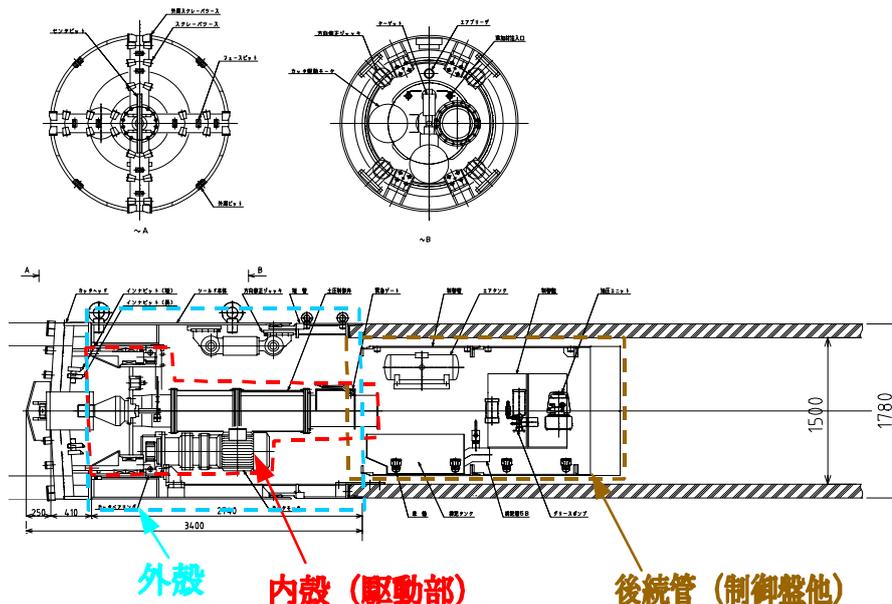


図-3. 掘進機構造図

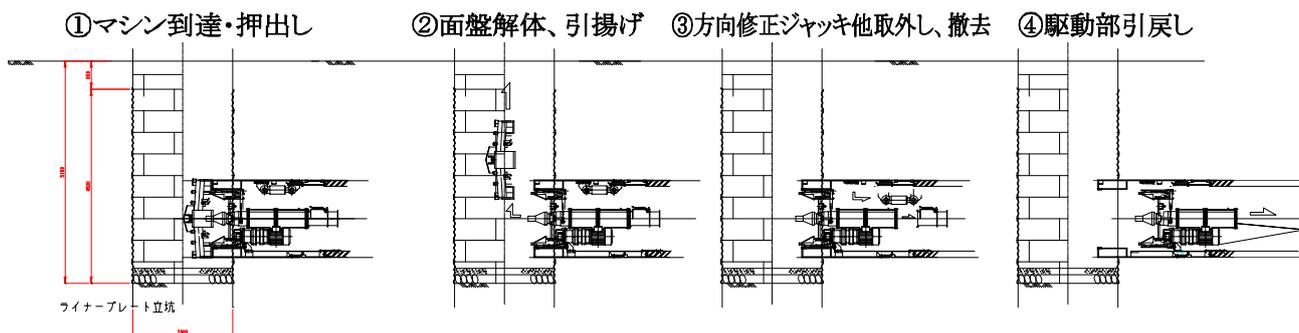


図-4. 解体、引戻し手順

4. 施工結果

(1) 掘進機解体工

掘進機解体工では回収型掘進機の特徴である「大部分の部品がボルト接合による組立」という利点を活かし省力化が図れ短期間で完了した。到達立坑での面盤解体・引揚げから掘進機内での方向修正ジャッキ等の解体、外殻と駆動部（内殻）の切り離し、後続管・駆動部の引戻し工までの工程はゆとりをもって4日で完了した。しかも通常の解体では狭い場所でガス溶断による鋼材の切断作業のため、換気や火災防止などの厳重な安全対策が必要であるが、今回の上記作業工程中にガス溶断が不要であったため、作業環境と安全性において非常に大きな効果があった。

(写真-4～7参照)



写真-5. 方向修正ジャッキ他解体状況



写真-6. 外殻-駆動部切離し



写真-4. 面盤解体引揚げ状況



写真-7. 外殻-駆動部切離し完了

(2) 引戻し工

a) 引戻し設備

引戻し方法は回収する部材にローラーを取り付け、ワイヤーロープで牽引するという単純なもので特別な設備を必要としない。牽引設備について、当初ウインチを立坑下に配置してワイヤーを巻き取る計画としていたが、立坑下に滑車を配し、これを介して地上のラフタークレーンでワイヤーを引揚げ、盛替えを繰返して行った。(図-5 参照) また管内全線にワイヤーを張るが途中で400Rの曲線が延長153mにわたってあるため、曲線の外側に滑車を配置してワイヤーを誘導した。(図-6、写真-8参照) また引戻し時にローラーが推進管目地に引っ掛かり無理な負荷が掛かることが予想されたので、事前に目地の溝を所定の材料で埋めた。

b) 後続管引戻し

後続管は予めローラーを取付けてあり、掘進機との固定ボルトを外すことで準備が完了した。牽引中は後続管の重心の偏芯によるローリングがあったが、先端部の左右のワイヤー長さをレバーブロックで調整しながら牽引してローリング修正を行った。(写真-9参照)

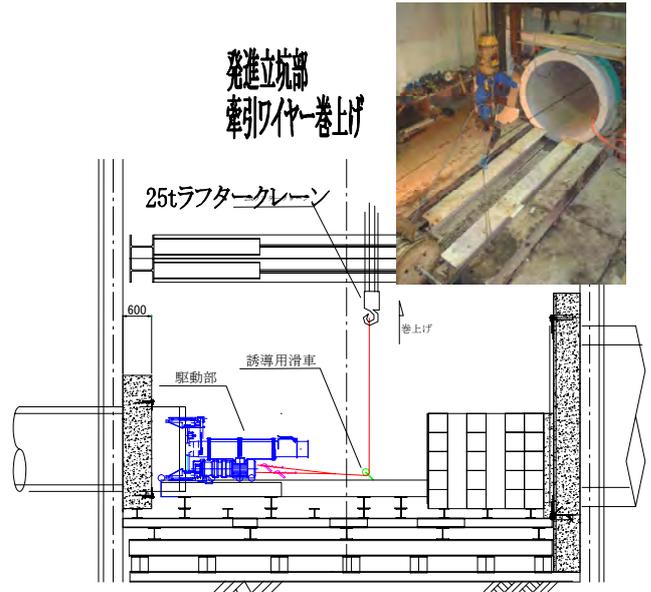


図-5. 発進立坑の回収設備

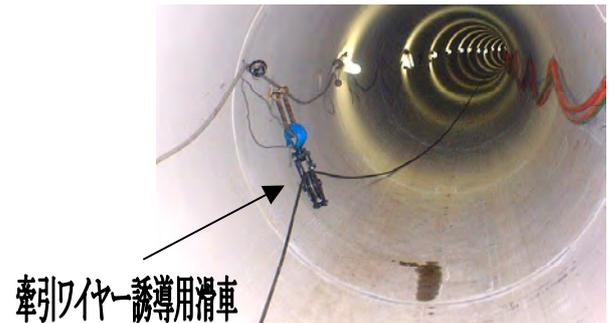


写真-8. 曲線部の回収設備

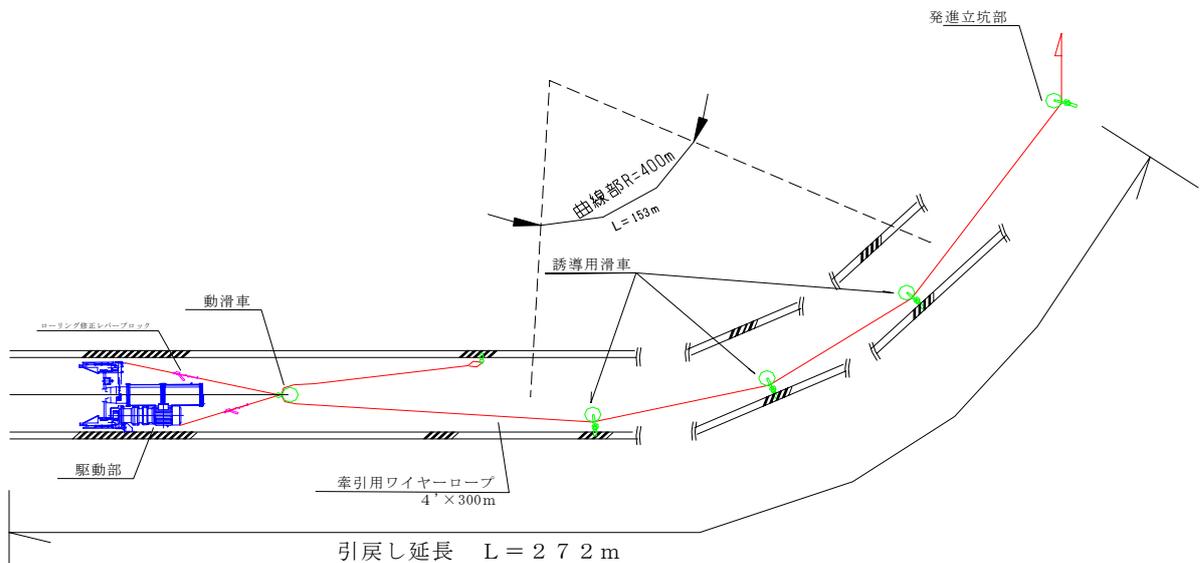


図-6. 曲線部の回収状況

c) 駆動部引戻し

駆動部は掘進機解体時にローラーを取付けた。駆動部の重量は 4.5 t あり牽引力も大きくなることが予想されたため、駆動部の前に動滑車を配置した。引戻しに要する力は当初想定していた牽引力よりも小さく、推進管内をスムーズに移動して順調に発進立坑まで牽引することができた。

(写真-10～12参照)

表-2 に回収結果を示す。

表-2. 回収結果の概要

	重量	設備	クレーン 作用荷重	牽引力	備考
後続管	1.7 t	4'ワイヤー 誘導用滑車	300kg	300kg	
駆動部	4.5 t	4'ワイヤー、動滑車 誘導用滑車	300kg	600kg	



写真-9. 後続管引戻し状況(到達側より)



写真-12. 駆動部引揚げ状況(発進立坑部)



写真-10. 駆動部引戻し状況(到達側より)



写真-11. 駆動部引戻し状況(発進側より)

5. おわりに

掘進機解体工での回収型掘進機の採用は省力化と安全性において大きな効果があった。特に狭い管内での火気作業を大幅に減らせるという点で作業環境の改善、現場安全管理の面で非常に有効であった。

また、掘進機の引戻しも当初の予想よりも牽引力は小さく、スムーズに行うことができ、特殊な設備も必要とせず、回収した駆動部も整備することで再利用が可能なことから環境面でも優れた利点がある。なお、残置した外殻部の仕上げ整形でガス切断が必要となったので、今後はこれら最終形態を考慮したボルト接合による掘進機的设计・製作が望まれる。実績を増やし、改善を重ねることで回収型掘進機の適用性や効果はさらに広がっていくと思われる。

今回の推進工事の施工にあたり、回収型掘進機採用の承諾、また施工管理でご指導を頂きました横浜市環境創造局殿に対し、この場を借りて御礼申し上げます。

16. 周辺環境および猛禽類に配慮したトンネル工事施工

株式会社フジタ 東京支店
 国土交通省 長野国道事務所
 株式会社フジタ 東京支店

○三浦 孝
 梶原 竹生
 須貝 美代治

1. はじめに

本工事は、比高差100mの急峻な崖に近接する山岳トンネルであり、この急崖斜面には猛禽類が生息している。終点側坑口から約130m付近には民家があり、また、猛禽類営巣地とトンネルとの位置関係は最小離隔距離が約110mと近接しており、トンネル掘削時期が、猛禽類の繁殖時期（求愛期～抱卵期～巣内育雛期～巣外育雛期）と重なることが施工上の課題となった。

この課題に対し、環境保全等を目的として組織された上田坂城バイパストンネル工法検討委員会（以下、委員会）において、トンネル工事が周辺環境や猛禽類等に与える様々な影響を検討した。

本報告では、トンネル工事に伴う騒音、振動、色彩、自然環境の変化、飛翔阻害等に対する対策を行い、監視・観測体制を確立し効果の確認を実施しながらトンネル工事施工をした事例について述べる。

2. 環境への配慮に関する検討事項

委員会において、トンネル工事が周辺環境や猛禽類等へ及ぼす影響を最小限に抑えるよう要請を受けた。これにより、以下の事項について設計、施工の検討を行った。図-1 に掘削工程と繁殖時期、表-1 に影響要因を示す。

2-1 周辺環境について

トンネル掘削を始める終点側坑口付近に民家があるため、騒音、振動の低減対策を検討した。また、建物の色彩についても周辺環境と調和するように検討をした。

2-2 猛禽類について

トンネル終点側坑口付近には軟弱な粘性土が分布しており、当初設計では、トンネル掘削前に、トンネル上部から垂直方向の地盤改良工（DJM工法）を計画していた。

しかし、この工法を施工するには、トンネル上部に機械高さ30m以上の大型機械（粉体噴射攪拌機）の設置が不可欠であり、その施工ヤードのために400m²程度の平場が必要であった。

そのために、トンネル坑口部には大規模な伐採や切土法面が発生するので、自然環境の変化を低減するため切土法面を可能な限り縮小させ、猛禽類の飛翔阻害の原因となる大型機械を使用しない地盤改良工について検討した。また猛禽類の営巣地とトンネルとの離隔が110mと近接しているため、騒音、振動、についても検討し、色彩についても猛禽類を刺激しない配色を検討した。

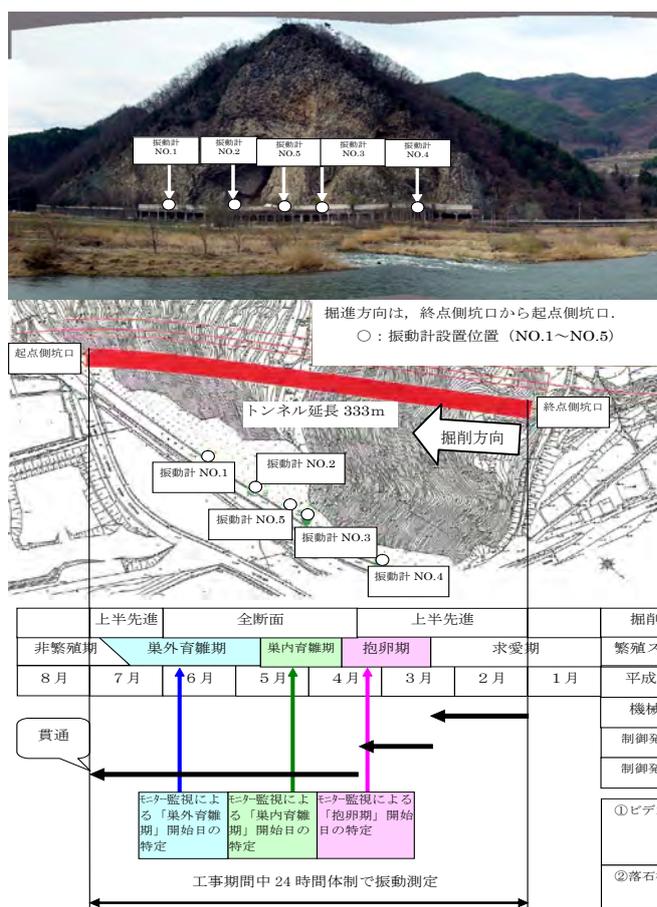


図-1 掘削工程と繁殖時期

表-1 影響要因

配慮項目	影響要因
周辺環境	騒音
	振動
	色彩
猛禽類	自然環境の変化
	騒音
	振動
	飛翔阻害
	色彩

3. 対策と施工方法

トンネル工事施工における周辺環境および猛禽類への配慮の対策を検討した。また、各対策の効果の確認をするため監視・観測体制を確立した。表-2 に検討した対策内容を示す。

表-2 検討した対策内容

影響要因	検討した対策内容
騒音	防音ハウス等の設置
振動	掘削方式の検討
色彩	周辺環境と調和する建物の色彩の検討
自然環境の変化	切土法面積を最小化
飛翔阻害	機械高さの低い機種・工法選定



写真-1 坑外防音設備

3-1 影響要因に対する対策

(1) 騒音の低減

トンネル掘削に伴う主な騒音としては、建設機械の稼働による騒音、掘削ズリの仮置場へのダンプアップによる騒音、ズリの二次運搬時の積み込みによる騒音、そして発破による騒音がある。

近くには民家があり、これらの騒音を低減させるため、騒音コンタ図を作成して、騒音影響範囲を民家において騒音基準値（55db）以下になるように、坑口前およびズリ置場には防音ハウス、坑内にはコンクリート充填式の防音扉、さらに敷地境界に高さ9mの防音壁を設置し、騒音の低減対策を行った。

図-2 に騒音コンタ図、写真-1 に坑外防音設備、写真-2 に坑内防音設備を示す。

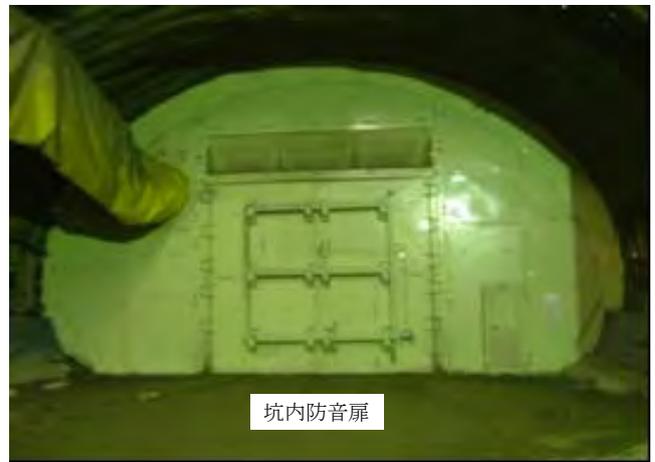


写真-2 坑内防音設備

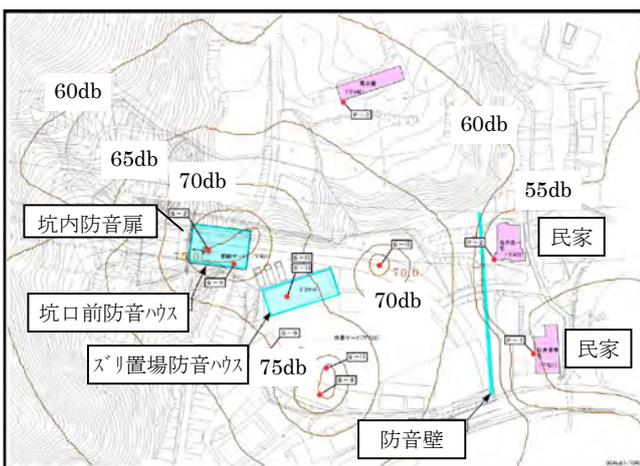


図-2 騒音コンタ図

(2) 振動の低減

掘削開始時の崖錐堆積物区間は、可能な限り機械掘削で行い発破を使用しないこととした。

それ以降のひん岩区間（地山弾性波速度3.0km/s）は、MS・DS電気雷管を使用し、制御発破A（最大25段）とした。さらに硬質なひん岩区間（地山弾性波速度4.5km/s）は、上半先進工法から全断面工法に変わり火薬の使用量が増加し、猛禽類営巣地に近づくので、より振動を低減可能な非電気式起爆システムを使用して制御発破B（最大150段）とした。

制御発破Bは、図-3に示すように秒時差の違う雷管と秒時差の違うコネクタの組み合わせにより25ms間隔で最大150段の段発破が可能となる。

これにより、一孔一段での発破ができ、各段当たりの爆薬量を減らすことができるため制御発破Aより振動低減効果は大きい。

表-3に制御発破概要と振動予測値の比較、図-3に非電気式起爆システム概要図、写真-3に結線状況を示す。

表-3 制御発破概要と振動予測値の比較

名称	掘削方式	施工概要	営巣地での予測値	
			振動値	騒音値
制御発破A	上半先進工法 (MS・DS 電気雷管)	30回/4秒程度の起爆	79mkine	51dB
制御発破B	全断面工法 (非電気式起爆システム)	130回/4秒程度の起爆	46mkine	44dB

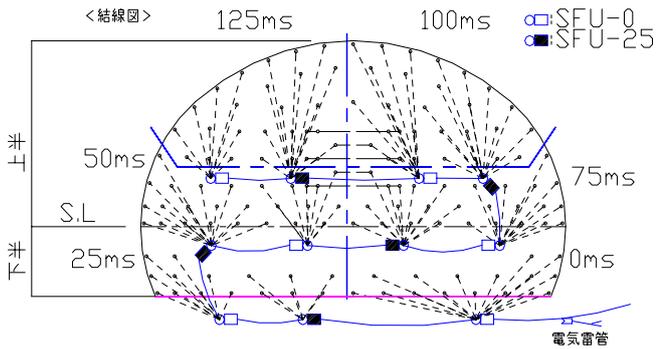


図-3 非電気式起爆システム概要図



写真-3 結線状況

(3) 色彩の調和

防音設備等の建物は、色彩を考慮し全体をグリーンネットで覆い、周辺の環境に調和させ、周辺住民や猛禽類から見て、違和感の無いよう配慮した。

(4) 自然環境の変化の低減

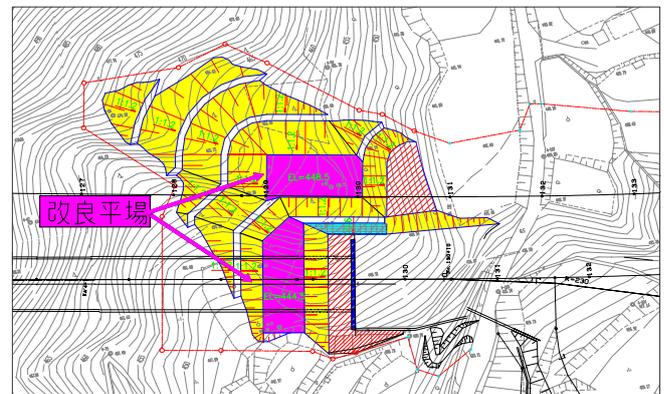
切土法面を縮小させる方法として、種々の比較検討を行った結果、以下の対策を行った。

- 1) トンネル上部からの垂直方向の地盤改良を、トンネル正面からの水平方向の地盤改良に変更し、改良機のための改良平場をなくすことにより、切土法面を縮小した。
- 2) トンネル坑口位置を当初設計位置より 13m 延長することにより、トンネルの地山に対する高低差を小さくし、全体的な切土法面を縮小した。

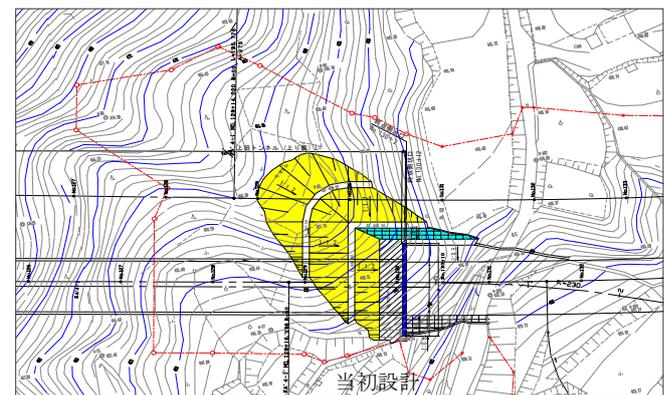
これらの対策を行うことにより、猛禽類の生息環境への影響を最小限にした。

また、緑地帯を保存し、周辺環境に対する環境負荷も低減した。

図-4 に終点側坑口平面図を示す。



当初設計



変更後

図-4 終点側坑口平面図

(5) 飛翔阻害の低減

法面の縮小に伴い、トンネル上部からの地盤改良工が無くなるため、トンネル正面からの水平方向の地盤改良工（補助工法：脚部補強対策、切羽・天端安定対策）の検討が必要となった。

1) 脚部補強対策

坑口部の地質はN値が5~10と低いものの、粘着力が100kN/mm²以上と高い粘性土のため、水平高圧噴射工法による脚部補強対策工が必要となった。ここで、山岳トンネルではあまり実績がないが、地下鉄工事等では多数実績があり施工性の良い全方位高圧噴射工法(MJS工法)を採用した。また、脚部に作用する荷重から、改良体は直径2mの下側のみの半円とし、上半脚部補強用として、左右各2つ、下半脚部補強用として左右各1つの施工を行った。

2) 切羽・天端安定対策

坑口掘削開始時の切羽安定対策工として、注入式長尺鏡補強工(FIT工法)、天端安定対策工には注入式フォアポーリング(PUIF工法)を採用した。注入材は土質に合わせてシリカレジンを使用した。

図-5に補助工法断面図、図-6に補助工法縦断面図、写真-4に脚部補強対策工施工状況、写真-5に注入式長尺鏡補強工施工状況を示す。



写真-4 脚部補強対策工施工状況



写真-5 注入式長尺鏡補強工施工状況

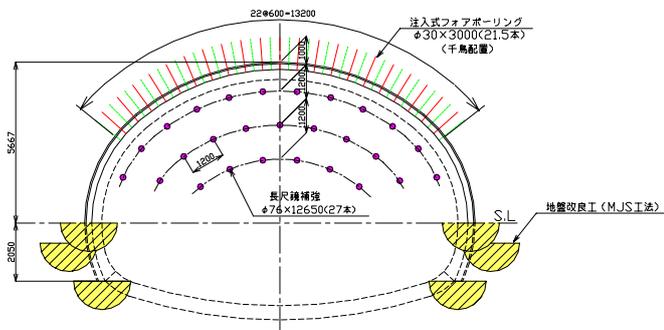


図-5 補助工法断面図

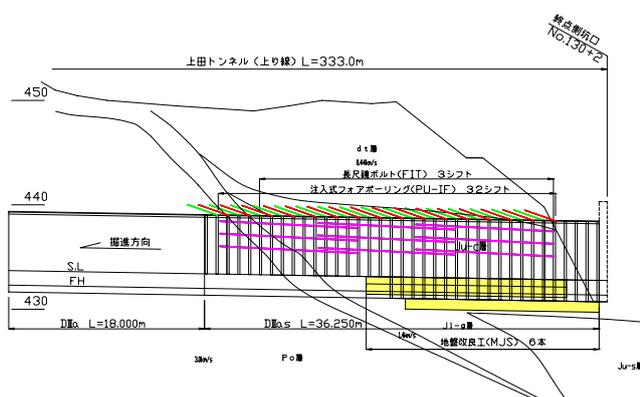


図-6 補助工法縦断面図

3-2 監視・観測体制の確立

各対策の効果の確認をするために監視・観測体制の充実を図った。

近接民家については、工事開始前、工事中について騒音・振動測定による監視を実施した。

猛禽類については、トンネル掘削時の営巣状況を監視するため、以下の体制により慎重な施工を行った。

- 1) ビデオカメラによる、営巣地の撮影および事務所のPCでのモニタリング。
- 2) 落石検知システムを使用した、落石の有無および発破振動値を事務所PCでのモニタリング。
- 3) 発破開始時、発破方式変更時のトンネル工法検討委員会および工事関係者による現地立会いによる観察。

なお、猛禽類に対する発破振動の明確な規制値がないため、発破作業の都度ビデオカメラによるモニタリングを行い、異常の有無を確認して記録をした。また、落石検知システムで振動値を確認

して常に振動予測値と対比を行いながら施工を行った。図-7 に監視・観測体制，写真-6 にモニタリングシステムを示す。

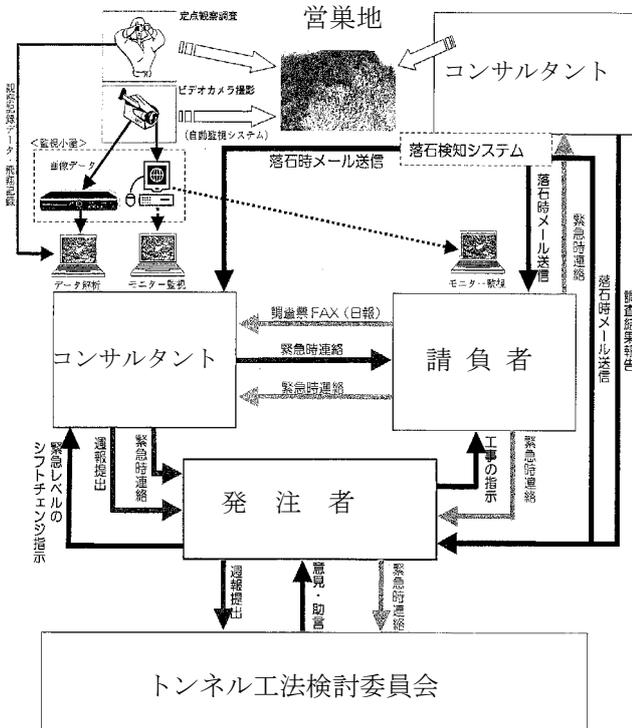


図-7 監視・観測体制



写真-6 モニタリングシステム

4. 施工結果

(1) 騒音について

騒音に関しては、坑口前とズリ仮置場へ防音ハウス，坑内にはコンクリート充填式の防音扉，さらに敷地境界には防音壁を設置し，民家付近の騒音測定の結果，騒音基準値内（55 dB）であることを確認した。また，猛禽類に対しては，ビデオカメラで常時監視を行い異常な行動のないことを確認した。

(2) 振動について

振動に関しては，民家付近の振動測定の結果，騒音基準値内（65 dB）であることを確認した。また，猛禽類に対しては，以下のような結果であった。表-4 に制御発破Bによる営巣地近傍の振動測定結果と再結果の一例，図-8 に，繁殖記録と発破掘削の関係を示す。

図表より，制御発破 A 区間の最大振動値は，一部 100mkine を超えるが平均的には 50~60mkine 程度であり予測値 79mkine 以下となった。しかし，表-4 より制御発破 B の実施初期段階において予測値 46mkine を満足できない状況となったことから，この実測値における発破条件を用いて再度振動予測を実施した。その結果，表-4 に併記したように制御発破 A で上半先進工法とすると最大振動速度は 160mkine と非常に大きくなると予測されたため，今後の対策として当初予測値を超過しても振動抑制効果の高い制御発破 B の全断面工法で掘進することが有効であると考え採用した。

当初は制御発破 A, B の段階的な採用によって営巣地近傍における振動を極力抑制する計画であったが，当初予測よりその抑制効果は低かったといえる。その要因としては，想定より地山が硬質であり振動伝播特性が高かったからであると考えられる。なお，当然ながらこのような岩質であったため通常発破や制御発破 A のみで掘削した場合，さらに大きな振動が発生し猛禽類に影響を与える結果となった可能性も否定できない。よって，より振動抑制効果の高い制御発破 B を用いて全断面工法で掘進することにより，振動低減効果があったものと考えられる。

表-4 制御発破Bによる営巣地近傍の振動測定結果と再結果の一例

切羽位置	対策工（掘削工法）	薬量(kg) [kg/m ³]	雷管段数 (段)	測定振動速度の 最大値*(mkine)
①No.126+5.0 (支保 No.77)	制御発破 A（上半先進）	30 [0.52]	24	58
②No.126+3.8 (支保 No.78)	制御発破 B（補助ベンチ付き全断面）	51 [0.51]	109	90
②の条件での 再予測結果	制御発破 A	51 [0.51]	24	160

※振動計 No.3 位置での計測結果

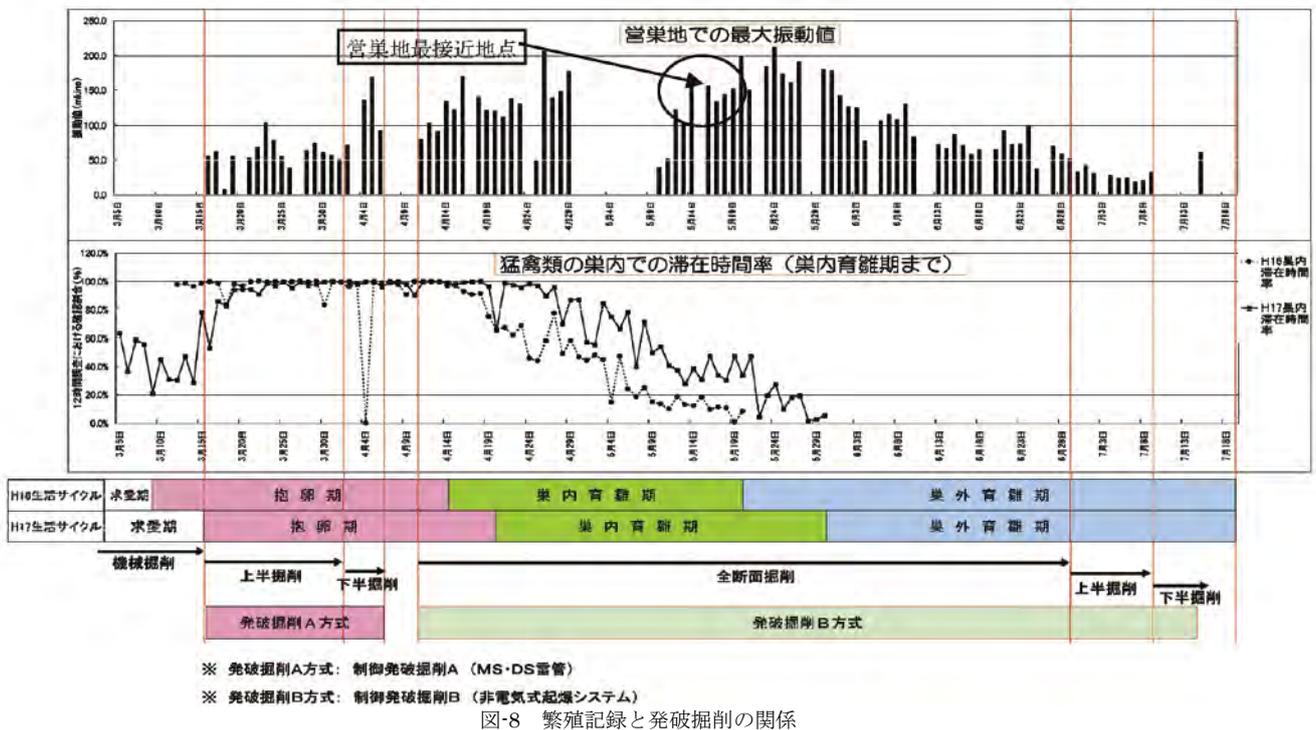


図-8 繁殖記録と発破掘削の関係

(3) 色彩について

色彩に関しては、近隣民家より好評を頂いた。猛禽類は営巣状況、飛翔状況から異常は見られなかった。

(4) 自然環境の変化について

法面の縮小については、トンネル坑口位置を13m延伸し、地盤改良工の変更を行うことにより、法面の面積を当初設計1977m²から871m²（44%）に縮小した。

また、切土量についても当初設計18,780m³から6,150m³（33%）に縮小できた。この対策により、自然環境の変化を最小限にした。

(5) 飛翔阻害について

地盤改良工については、トンネル上部から垂直方向の地盤改良工（DJM工法）では、大型機械を使用することから、水平方向の地盤改良に変更することにより、猛禽類の飛翔阻害に配慮した。例年の飛翔内容と対比しても、影響があったとは認められなかった。

(6) 監視・観測体制の確立

図-8より、制御発破A区間においてビデオカメラの観察からは100m/sineを超えた振動であっても猛禽類に異常な行動は見られなかった。

制御発破B区間において営巣地に最接近する前後で最大振動速度150m/sineを超過する場合も見られたが、特に猛禽類に異常な行動が見られなかった。

なお、猛禽類の巣内での滞在時間率に関しては、工事が行われていなかった前年（H16）と比べ、抱卵期、巣内育雛期の時期が若干遅れているが、グラフの傾きが同様のため、発破掘削とは関係のない生活サイクルに変化したものと思われ、掘削期間中に猛禽類は例年通り営巣し、雛も無事巣立ったことを確認した。

猛禽類の営巣地は千曲川左岸の急崖で常に風が強く、上田市街からも近い。よって、猛禽類が瞬間的な発破振動の影響を受けなかった要因としては周辺の自然および社会環境等へ順応している結果と考えることもできる。

5. まとめ

本報告は、周辺環境や猛禽類に配慮したトンネル工事の環境対策について述べた。

騒音、振動、色彩、自然環境の変化、飛翔阻害等に対する施工方法の対策を実施するとともに、施工者、発注者、委員会、コンサルタントによる検討・連携を深め、監視・観測体制を確立し、これらの対策の効果の確認を行った結果、周辺環境および猛禽類に配慮したトンネル工事施工が可能となった。

最後に、このトンネル工事を進めるにあたり、ご指導ご協力をいただいた委員会の中村浩志委員長（信州大学 教育学部教授）をはじめ、関係各位に謝意を表するとともに、この報告が今後の類似工事の参考になれば幸いである。

17. 長距離・高速施工シールド工事の施工設備について

－東西連係ガス導管工事（第1工区）施工実績（その1）－

鹿島建設 東京土木支店 ○米沢 実
 鹿島建設 東京土木支店 隈部 毅彦
 鹿島建設 東京土木支店 亀井 良至

1. 工事概要

本工事は、東京電力㈱富津火力発電所（千葉県）と東扇島火力発電所（神奈川県）を結ぶ延長20kmのLNG専用パイプラインを構築するものである。そのうち東京湾横断部約18kmの海底トンネルについては、富津側、扇島側から2台の泥水式シールドマシンで施工し、東京湾中央部で地中接合により貫通させる。シールド工法としては世界最長となる延長約9kmを平均月進量530m/月で掘進する計画であった。これを達成するため、長距離・高速掘進対応シールドマシンやセグメント複数リング一括搬送システムなどの高速施工設備、また、組立時間の大幅短縮が可能なQB（Quick Block）Ⅱセグメントの採用やプレキャストRC床版による完全二次覆工の省略等の高速施工対策を行なった。その結果、本掘進平均月進量665m/月、最大月進量1,168m/月と計画を上回る結果を得られたので、その計画と実績を報告する。



写真-1 掘進中のトンネル坑内

工事諸元

工事名：東西連係ガス導管新設工事（富津工区）
 企業者：東京電力株式会社
 施工者：鹿島・西松・大林 建設共同企業体
 掘進延長：L=9,030m
 トンネル線形：平面線形：R=4,000m（1カ所）
 縦断線形：最大i=3.0%（下り）
 最小i=0.2%（下り）
 土被り：13m～35m、最深部 海底下57m
 （土被り26m）
 セグメント：RCセグメント（QBⅡセグメント）
 内径：φ3.0m、桁高：220mm。
 幅：1.35m、軸挿入6等分割
 シールドマシン：泥水式シールド（中折れ）
 外径：φ3.62m
 内胴スライド式同時掘進機構
 機械式地中接合（A-DKT工法）装備



図-1 工事場所位置図

2. 計画と実績

長距離・高速掘進に対応するために立案した計画の概要と得られた実績は以下のとおりである。

2.1 セグメント

セグメントは、高速施工と坑内の取りまわし等を両立させることを考慮して、同規模内径では、過去最大の1,350mm幅を採用し、分割数は、軸方向挿入型の6等分割とした。

セグメント構造は、鹿島が開発したQB II (Quick Block) セグメントを採用した。QB IIセグメントは、セグメント間継ぎ手を調芯機能付突合せ継手、リング間継ぎ手をピン式のDS (Locked Disc Spring) 継手とした、ワンパス組立が可能な高速施工対応のセグメントである。セグメント間継ぎ手は、組立時の簡単なガイド機能を有するのみで、ボルト等での接続はない。継手面に作用する軸力により継手部を保持する構造である。

施工結果は、組立精度、漏水等の品質も非常に良好であり、継ぎ手機構の合理化による組立時間の短縮、幅広化による進捗の向上に大きく寄与した。

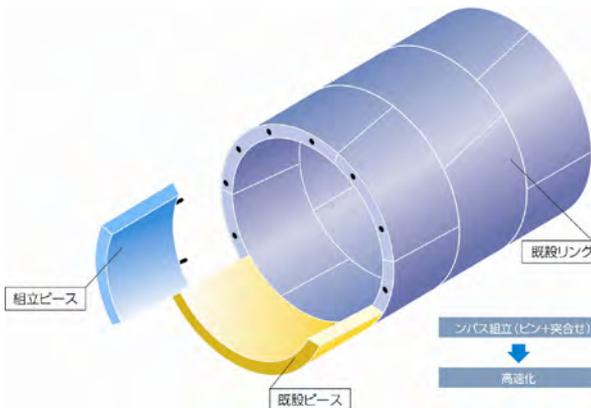


図-2 QB II セグメント概要



写真-2 QB II セグメント

2.2 シールドマシン

(1) 高速施工への対応

シールドマシンは、通常掘進、組立同時掘進を任意に選択可能なダブルジャッキ式同時掘進機構を採用した。ジャッキ速度は、最大掘進速度90mm/min

が可能な仕様とした。(4)で述べる固結シルト層に対応したカッター形状の工夫等も効果を発揮し、一部の礫層区間を除いて、ほぼ全線に亘り計画速度で掘進することができた。同時掘進を行わなくても十分な進捗を得ることができたため、内胴スライド式の同時掘進は8,000m付近の10リング区間のみ行なった。この区間では、セグメント応力等も含め各種のデータ計測を行い、同時掘進機構の妥当性を検証した。



写真-3 シールドマシン

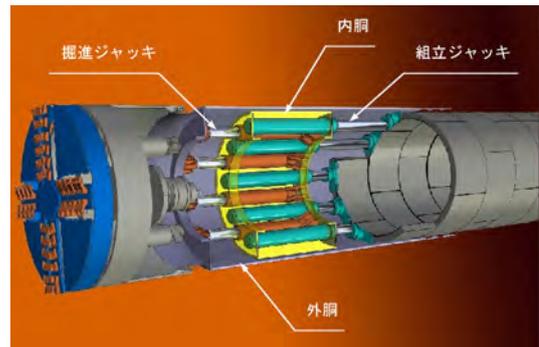


図-3 ダブルジャッキ式同時掘進機構

また、セグメント組立時間短縮を図るため、エレクター及びセグメント供給装置においては徹底したシミュレーションを行い、ジャッキ引き速度の向上や供給テーブルの採用によりアイドルタイムを最小限とした。

シミュレーションタイムは1リングの組立時間が20分であった。当初は、ほぼ20分を要していたが、作業員が慣れてきてからは、10分を切るようになり、以降はコンスタントに10分以内で組立を行ない進捗の向上に大きく寄与した。

(2) 長距離施工への対応

カッタービットは9kmを交換なしで掘削できる仕様とした。ビット材質は、耐摩耗性と対衝撃性に優れたE3種シンターヒップ処理とし、チップの大型

化を図り、許容磨耗量を 25mm とした。また、特殊先行ビットを段差 50mm で配置し、ティースビットの磨耗低減を図った。さらに、機械式地中接合のため、最外周部の掘削は伸縮スポークで行うが、全6本の伸縮スポークのうち、常時使用するのは2本のみとし、残りの4本はバックアップとした。そのうちの2本については、掘進終盤で出現すると予想される固結粘土用に切削性を考慮したビットを装備し、スポーク全体をチャンバー内に格納する構造とした。

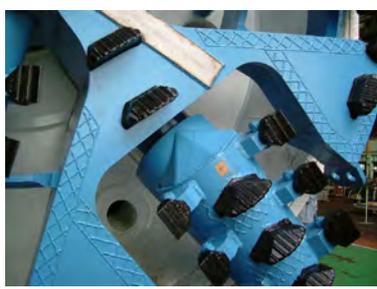


写真-4 伸縮スポーク式予備ビット

写真-5 特殊伸縮スポーク

途中で約 1.5km の礫層区間を掘削したが、異常磨耗やビットの損傷等の発生もなく、当初の2本のスポークで9kmの掘進を完了した。掘進終了後、カッターフェイスを地上で復元し、詳細な磨耗調査を行なったが、先行ビットの磨耗係数は計画値の約 1/2、ティースビットは約 1/4 であり、特に先行ビットの軌跡内にある部分の磨耗量はゼロであった。

これは、先行ビットの軌跡内であれば、ティースビットは全く磨耗しないということであり、今後の長距離シールドにとって有益な知見が得られた。



写真-6 復元されたカッターフェイス

(3) 高水圧への対応 (最大0.6MPa)

高水圧 (最大 0.6MPa) への対応として、カッター軸受土砂シールは4段装備し、うち3段は長距離連続運転時の温度上昇によるシールの劣化を懸念して、耐磨耗性・耐熱性に優れたフッ素ゴムを採用した。温度センサーを設置し、インターロック温度を 60°C に設定したが、計測値は 30°C 前後で推移した。これは、泥水式シールドであるため、泥水による冷却効果が大きかったと、推察される。また、土砂シール部分についても、解体後詳細な調査を行なったが、異常な磨耗等は認められず、健全な状態が保たれていた。

テールシールは、止水性、耐久性に優れた、実績も多いウレコンシールを採用し、4段配置することで確実に止水できる仕様とした。掘進中はテールグリースの注入管理を適切に行なった結果、漏水や裏込材の漏えい等は全く発生していない。

本工事では、ピース間に継手のないセグメントを使用するため、テール内で継手部の目開きをなくし、シールを封入することが重要である。そのため、エアジャッキによる「セグメントリングサポート」を開発し、マシンのテール内に装備することで、セグメントのシールを確実に封入できる機構とした。シール材を確実に封入できることで、テール内のセグメントの真円度が向上し、それが、次に組み立てるセグメントの位置合わせを容易にすることで、セグメント組立時間の短縮に大きく寄与した。



写真-7 セグメントリングサポート

(4) 多様地盤への対応

本工事では、ボーリングデータがなく、音波探査により設定した土層の掘進であり、想定外の地盤が出現するリスクが高いため、シールドマシンは多様な地盤に幅広く対応できる仕様とした。

カッターフェイスは、泥水式シールドとしては非

常に大きい42%の開口率をとり、面板やスポーク間を繋ぐフレームを強度の許す限り簡素化し、チャンバー内の泥水循環を良くすることで固結シルト等のカッターフェイスへの付着、チャンバー内の閉塞を防止することとした。また、ビットを大きくして、数を減らすことでビット周りの土の付着を低減し、さらに、トルク計算による必要トルク(315kN・m)に対して装備常用トルク645kN・m(Fs=2.1)、装備最大トルク1013kN・m(Fs=3.2)と大きな安全率をみることで、想定外地盤に対応できる仕様とした。これらの効果が発揮され、通常掘進速度の低下が懸念される固結シルト層においても、カッタートルクの上昇や掘進速度の低下を起こすことなく、順調に掘進を終了した。

2.3 資材搬送設備

(1) 立坑搬送設備

立坑上には荷降ろしを行う10 t 橋型クレーンの他に主資材(セグメント、インバート床版)をセグメントドーリーへ供給する4.8 t 橋型クレーンを設置した。セグメントは、立坑上のドーリーの最後尾に載せられると、ドーリー→リフト→セッターの順で自動搬送される。設備は全く問題なく順調に稼働し、ドーリー、立坑下セッター部に2リング分ストックできることから、リフトのトラブルが坑内搬送に直結するのを防止するバッファー機能を果し、稼働率の向上に大きく寄与した。

(2) 坑内搬送設備

坑内搬送を行うバッテリーカーの編成は、2台の6 tバッテリーロコ(重連)と5台の資材台車及び1台の人車とし、2リング分を一括搬送した。立坑下のセッター及び切羽のリフトアップ台車で2リング分のセグメントを一括して荷降ろしし、荷扱い時間を大幅に減少させ、3編成で運行可能とした。

また、坑内は実荷のバッテリーカー編成(切羽行)と空荷のバッテリーカー編成(坑口行)がすれ違えるように2 km、4 km、6 kmに離合箇所を設置し、分岐器はスプリング方式とし、切り替え操作を行なうことなく、離合することとした。運転方法は、長距離運転時のヒューマンエラーの排除を目的として、軌道上に設置されたIDタグと坑内300mごとに設置されたSS無線アンテナによる無人自動運転方式とした。自動運転システムは、中央管理室で現在の走行位置、走行速度等を把握することができ、後述する坑内情報幹線の冗長化等の対策とあいまって、全くトラブル、誤動作を起こすことなく、効率的な坑内搬送に有効であった。

また、緊急時対応として自走式の避難専用台車を後続台車内に格納しておき、緊急時には15km/hの高速で走行し、坑口まで避難できるようにした。



図-4 立坑搬送設備概要図



写真-8 セグメント搬送状況 写真-9 自走式緊急避難人車
(3) 切羽搬送設備

バッテリーカーにて搬送されたセグメントは、リフトアップ台車で荷受けした後、切羽搬送装置内に投入する。切羽搬送装置は、No. 1～No. 4台車下に設置されており、3リング分がストックされた状態でセグメントを切羽に順次前送りする。搬送装置上及びリフトアップ台車、仮置き台車にセグメントをストックできるため、搬送設備にトラブルが発生した場合もストック分を使用しながら、掘進作業が続けられるようにした。施工中も搬送設備の遅延や故障による掘進への影響を最小限に留めることができた。



写真-10 リフトアップ台車 写真-11 セグメント搬送装置

2.4 泥水輸送設備

本工事は、海底トンネルであり、通過土層に不確定要素があったため、泥水輸送設備は、全断面砂層、全断面粘性土層の両方において最大掘進速度に対応できる仕様とした。ポンプ仕様は、メンテナンス頻度の軽減を狙って、高揚程ポンプ（57.5m）を採用し、設置台数を軽減し、可変速ポンプはインバーター方式を採用した。（送泥ポンプ3台、排泥ポンプ13台）。ポンプの軸受けシールは高耐久性メカニカルシールを採用し、軸封水と併用することにより長超寿命化を図った。また、配管延長作業の頻度を低減するためにホースリール（伸縮ホース）は7mストロークのものを2連にして、1回の配管延長作

業で配管2本分（12m）の掘進が可能な仕様とした。配管延長作業中でもバイパス運転が可能ないように中間バイパスを2kmごと（計3ヶ所）に配置した。

2.5 泥水処理設備

泥水処理設備は、全断面砂層、全断面粘性土層の両方に対応できる仕様とした。

高速施工に対応するため、調整槽は、3基設置した。1基目（調整槽③）で泥水を受け、2基目（調整槽②）で比重、粘度調整を行い、3基目（調整槽①）を調整済み泥水の送泥用とした。

ローヘッドスクリーンは、2基設置し、1基は予備とし、メンテナンスを行いながら交互に使用する。

フィルタープレスは、全断面粘土層にも対応できるように4台設置した。

2.6 裏込め輸送設備

裏込め材は、A液に超遅延型安定剤（可使時間7日）を配合することにより長距離圧送を可能にするとともに、配管内の清掃頻度を低減した。さらに、長距離圧送を可能にするためにA液圧送管は3Bとし、坑内に中継設備を設置し、地上から遠隔操作が可能な設備とした。

2.7 総合施工管理システム

坑内に光ケーブルによる通信幹線を設置し、立坑上の中央管理室にて種々の管理を集中的に実施できる長距離トンネル用施工管理システムを導入した。光ファイバーは、切断等のトラブルを考慮してループ化を図り、冗長化した。



写真-12 中央管理室

(1) 総合掘進管理システム

坑内の各種システムを光ファイバーに集約して冗長化を図り、掘進管理は、鹿島が開発したKSGSシステムを用い、マシン、泥水輸送、泥水処理、裏込め輸送を中央管理室にて総合的に操作及び管理を行なった。情報の集中化とそれによる的確な判断に寄与した。

(2) 坑内環境管理システム

坑内には、300mごとに、酸素濃度、可燃性ガス、一酸化炭素、硫化水素検知器を設置し、各所の計測値を中央管理室に一括表示し、基準値を下回ると自動的に警報が鳴るシステムとした。

(3) PHSによる通信及び所在管理システム

入坑者は全員PHSを所持し、坑内及び坑外との通信が可能。PHSは入坑時に登録を行うことで、各自の所在が中央管理室にリアルタイムで表示される。また、全てのPHSから現場内一斉放送（坑内、地上、現場事務所）が可能なシステムとした。これにより、坑内の人員が人目で把握することができるとともに、全員がPHSを携帯したことにより、確実に連絡を取ることができ、施工管理上非常に有効であった。

(4) バッテリーロコ運行管理システム

バッテリーロコの運転状況は中央管理室、JV事務所等で確認可能とし、緊急時には、中央管理室からの一斉停止や遠隔運転も可能なシステムとした。

遠隔操作を行なうことは、場合によってはトラブルの原因となることも考えられるが、的確な運用ルールを定めることで、本工事では有効に機能した。



写真-13 所在管理システム



写真-14 ロコ運行管理システム

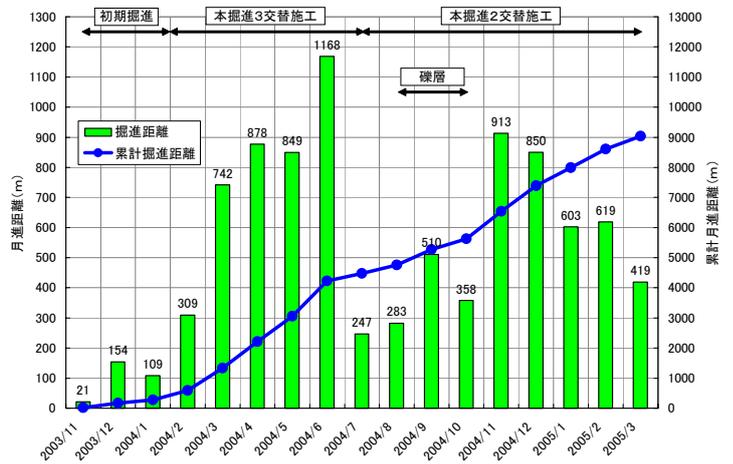
3. 施工実績

初期掘進（延長280m）は、平成15年11月末日に

開始し、後続台車投入作業を繰り返しながら、約2ヵ月で終了した。

平成16年2月初旬から、3交替施工による本掘進を開始し、同年6月には、シールド工事では世界記録となる月進1,168mを達成した。同年8月からは、2交替施工に変更して、平成17年3月中旬に本掘進を終了した。本掘進での平均月進量は665m/月を記録した。これは、シールドマシン、資材搬送設備等に致命的なトラブル等がなく、計画どおり稼働した結果によるものであり、設備のトラブルで掘進を止めた時間を作業時間から控除した稼働率は95%を超えている。また、突発的なトラブルにより掘進ができなかった日は、わずか1日のみであった。

表-1 月進量実績



4. おわりに

本工事では、シールドマシン、搬送・流体設備、セグメント等、各々の設計、設備が、計画どおりの機能を果たし、無事掘進を終了することができた。

このようなプロジェクトでは、計画時のリスクの抽出とそれに対して徹底した検討を行い、実施計画に十分反映させることが重要である。計画の立案、施工に際し、一体となって、検討、ご指導頂いた東京電力株式会社殿、また、多大なご支援を頂いた関係者の皆様には厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 米沢実・隈部毅彦・斉藤裕輔。黒崎秀：長距離シールドにおける高速施工（富津工区）、トンネルと地下、Vol. 37、No. 7

東京湾湾央の高水圧下における機械式地中接合工について

— 東西連係ガス導管工事（第1工区）施工実績（その2） —

鹿島建設 東京土木支店 ○米沢 実
 鹿島建設 東京土木支店 隈部 毅彦
 鹿島建設 東京土木支店 亀井 良至

1. 概要

東西連係ガス導管新設工事（富津工区）は、千葉県の富津火力発電所内に構築した発進立坑から約9km先に位置する、東京湾中間地点（海拔-57m）までの海底トンネルを泥水式シールド工法で構築し、対岸の扇島工区と機械式地中接合するものである。

当工事は、海底トンネルであるため、地上からのチェックボーリングがトンネル全線において不可能であったため、水平ボーリングマシンを用いた相対位置探査システムを採用し、互いに9kmずつの長距離掘進を行った後、0.6MPaという高水圧下において全く補助工法を用いることなく機械式地中接合を行なった。本報では、相対位置探査水平ボーリング及びA-DKT（Advanced-Direct Docking Tunnel）工法による機械式地中接合の計画と実績について報告する。

2. 機械式地中接合工法の概要

2.1 接合方法

本工事では、鹿島が開発した、従来の機械式接合工法であるDKT（Direct Docking Tunnel）工法を長距離掘進後の高水圧下での接合に対応するため改良した、A-DKT工法を採用した。

受入機は、前胴が内外胴の二重構造となっており、内胴（カッター部）を引き込むことにより貫入機を受け入れることができる構造となっている。貫入機も受入機同様に前胴が内外胴の二重構造となっており、内胴を押し出すことにより、受入機内に貫入できる構造となっている。貫入後は、受入機外胴内面に格納されているチューブシールを膨らますことにより、受入機外胴と貫入機内胴間で止水する構造である。受入機、貫入機とも内胴のスライドは、中折れジャッキを使用して行う。これにより、最も重要な止水面が掘進中は完全に保護された状

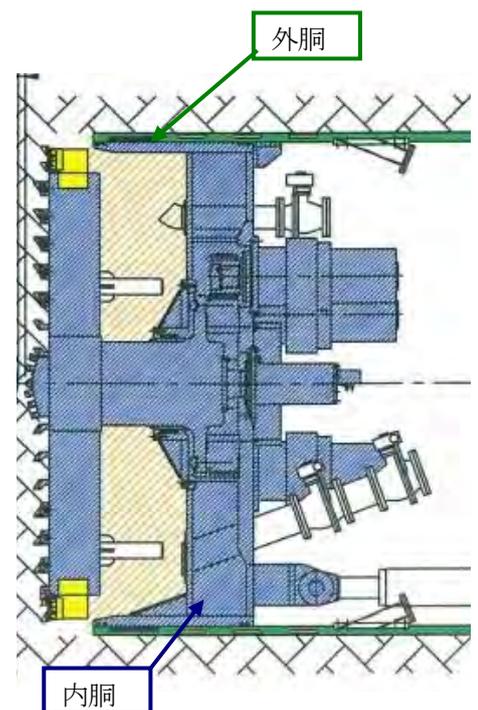
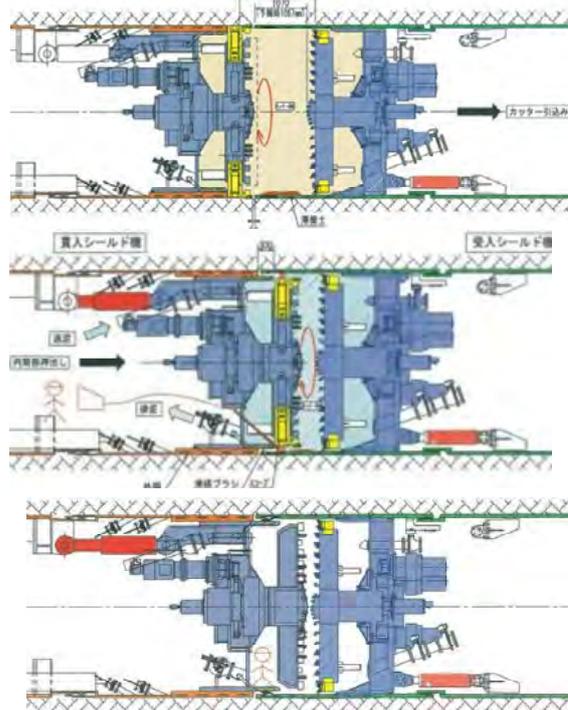
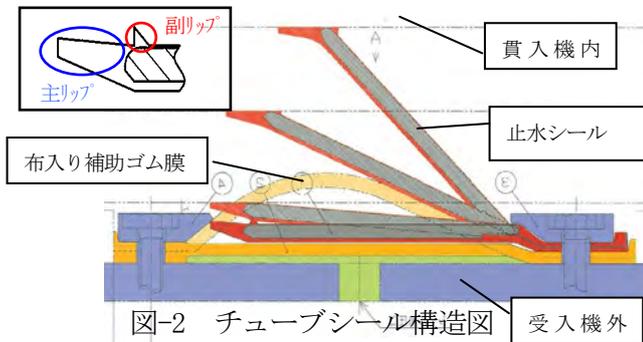


図-1 機械式地中接合フロー図

2.2 止水チューブシール

止水チューブの構造を図-2に示す。補助ゴム膜内に注水し、加圧することでシール部を起こし、止水面に押し当てることで止水する構造である。チャンバー内の水を抜くことで内外水圧差が高くなると、シール先端の押し付け力が更に大きくなるため、止水性能が向上するという特長を有する。シール先端のリップ部は、硬度を下げて密着性を高めた主リップと、異物の混入時の食い込み性を向上させるための副リップから構成されている。従来の補助ゴム膜を布入りの補強タイプに変更し、より高い圧力で加圧できるようにした。



2.3 止水面清掃機構

止水面は、掘進中は保護されおり、接合時の内胴、外胴スライド時に初めて露出される。この時点では、チャンバー内に泥水があるため、止水面に土砂が堆積することが懸念された。事前の実験により、若干の堆積でもチューブシールの止水性に重大な影響を及ぼすことが確認されたため、土砂を排除を目的として、貫入機のスポークに伸縮式ブラシを内蔵した。また、土砂の堆積、清掃状況を目視確認するために、ファイバースコープをチャンバー内に挿入する機構を貫入機に装備した。

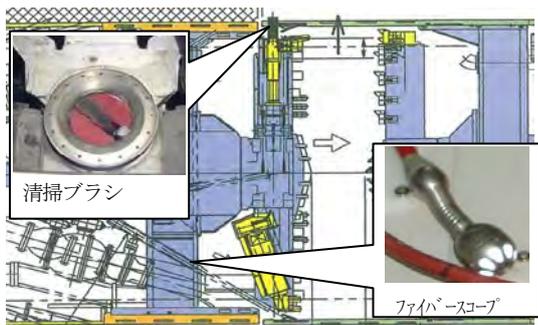


図-3 清掃用ブラシ、ファイバースコープ

3. 相対位置探査システム

3.1 相対位置探査システム概要

接合時のシールド機同士の中心のずれ量は±50mm. 以内にする必要があることから、富津ガス導管シールド、東京湾アクアライン、浪速共同溝等で実績のある水平ボーリングマシンを用いた磁気・R I センシング併用相対位置探査システムを採用した。小口径であり、R I センシング範囲が狭いことから、磁気センサーのみで、概略の相対位置が把握できるシステムを新たに実用化した。相対位置探査システムの施工手順は以下のとおりである。

- ①先着機（1工区）は掘進終了後、シールドマシンの一次解体を行ない、水平ボーリングマシンを設置する。
- ②後着機（2工区）が50m程度手前まで到達するのに合わせて先着機から水平ボーリング機を後着機の面の手前まで推進する。
- ③先着側のトンネル坑内から測量し、水平ボーリング機先端位置を確定させる。
- ④水平ボーリング機先端に装備した磁気センサーと後着機面板に設置した複数の磁石により相対位置を検出する。
- ⑤後着機面板のスリットからR I 線源を挿入しバルクヘッドに板を押し当て、後着機内側よりシンチレーションカウンター（ γ 線受信器）で計測を行い、高精度に相対位置を検知する。
- ⑥後着機は、探査結果により掘進線形を決定し、修正掘進を行う。

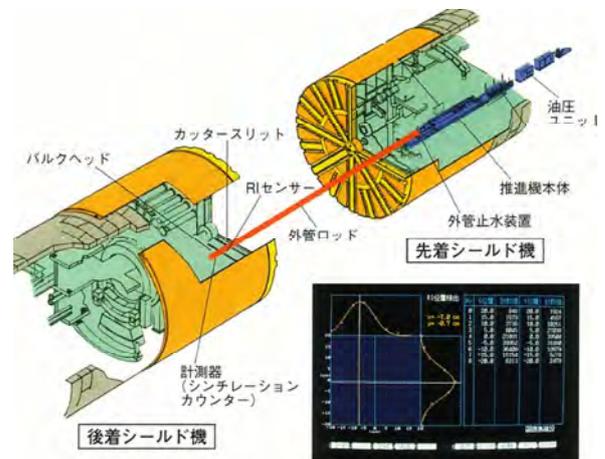


図-4 相対位置探査システム概要

3.2 水平ボーリングマシン

水平ボーリングマシンは、小口径泥水式推進機、鋼管挿入装置（元押し装置）、推進鋼管及びビエントランス装置から構成される。



写真-1 泥水推進機



写真-2 元押し装置

従来のボーリングマシンに対して、以下の改良、対策を行なった。

①シールドマシン径が小さいため、水平ボーリング機本体（Φ280）が通過可能な穴をシールドマシン面板に開けることが困難であったため、R I 線源のみをロッド（Φ65）により挿入可能な構造とした。

②高速施工対応

推進鋼管同士の接続を従来の溶接からねじ方式にし、推進、引抜き時の接続時間の短縮を図った。また、鋼管挿入装置の推進ジャッキを2連とすることでストロークの長大化を図り、鋼管1本分を盛替えなしで施工できる構造とした。



写真-3 RI探査ロッド



写真-4 鋼管接続部

3.3 磁気センシング

磁気センサーによる位置検知原理を以下に示す。

- ・磁気センサーを近づけ、シールドマシンの面板を回転させると配置された磁石がセンサーに最接近する面板回転角度で磁力のピーク値が検出される。
- ・複数の棒磁石を面板半径方向に対して角度をもって配置すると、磁気センサーの位置によりピーク間の角度（ $\theta 1$ 、 $\theta 2$ ）が異なるため、波形パターンか

ら半径方向の位置（ r ）がわかる。

- ・面板回転角度とピーク発角度からセンサーの位置角度（ θa ）がわかる。

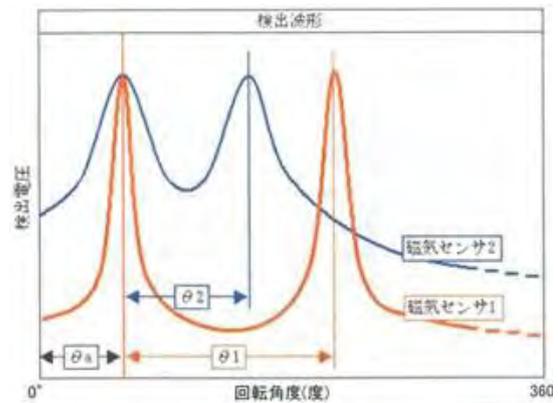
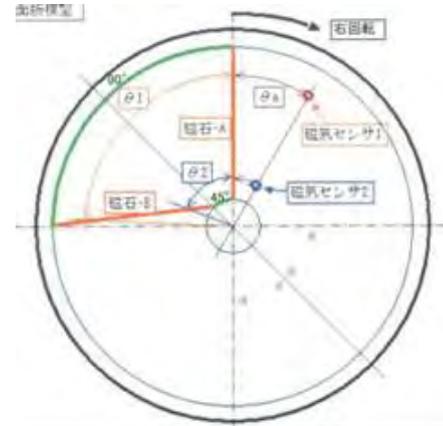


図-5 磁気センシング原理

当工事では、貫入機に図-5に示す6個の磁石を配置し、事前に実際の面板を使用し、センサー位置と面板回転角度における磁力波形データを50mmピッチでキャリブレーションし、実施工と比較することで位置を確定できるようにした。

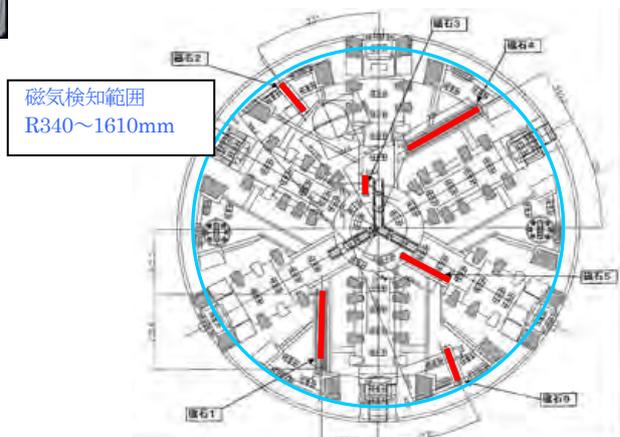


図-6 貫入機磁石配置

3.4 RIセンシング

RIセンシングシステムの仕様を表-3に示す。RI検知板の寸法は、相互の推定測量誤差（水平±300mm、鉛直±50mm）と水平ボーリングの施工誤差を考慮して決定したが、シールド径が小さく、従来のシンチレーションカウンターでの検知スペースが確保できなかったため、新たに小型軽量タイプ（従来の約1/7）を製作した。

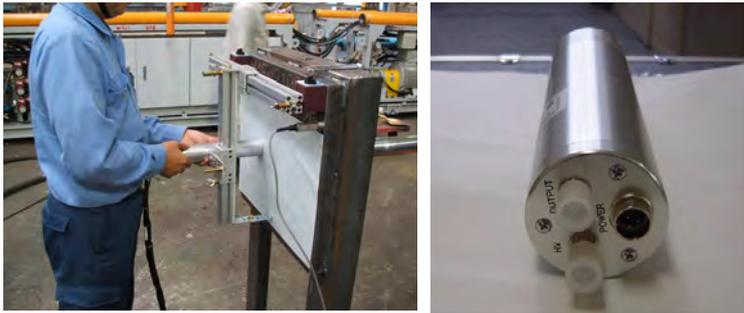


写真-5 シンチレーションカウンター

4. 施工実績

4.1 水平ボーリング

水平ボーリングは、後方から測量を行なうため、50mの推進長において水平、鉛直誤差を±20mm以内に収める必要があったが、十分に制御可能であり、目標精度を満足した。推進管の接続に予想よりも時間を要したが、所定工程内で推進を終了した。引き抜きは予想どおりの時間であった。

4.2 相対位置探査

50m地点での第1回目探査では、RIセンサーの検知エリアから外れていたが、磁気探査により位置を特定することができ、その後、修正掘進中に4回のRI探査を行なって、±10mm以内の精度で修正掘進を終えた。

4.3 機械式地中接合

(1) 受入機カッター引込み（内胴部引込み）

カッターの引き込みは、中折れジャッキを使用して行った。引き込み時は、内胴、外胴間の競りや漏水等はなく、非常にスムーズであった。また、接合時（貫入機のカッター押し出し時）にも特にトラブルはなかった。

(2) 止水チューブによる止水

貫入機による貫入後に止水チューブによる止水

を行った。図-7にチューブシール施工時の経過時間とチャンバー内水圧の関係を示す。チューブシール作動後、貫入機側より、チャンバー内の水を徐々に抜き、圧力の変動を確認した。チャンバー水圧が0.2MPa付近までは、復水が見られたが、それ以下では復水が見られなくなり、チャンバー内の水を完全に抜ききった時点で漏水確認を実施したところ、漏水は、ほぼゼロであり、全く補助工法を用いることなく、接合部を止水することが出来た。

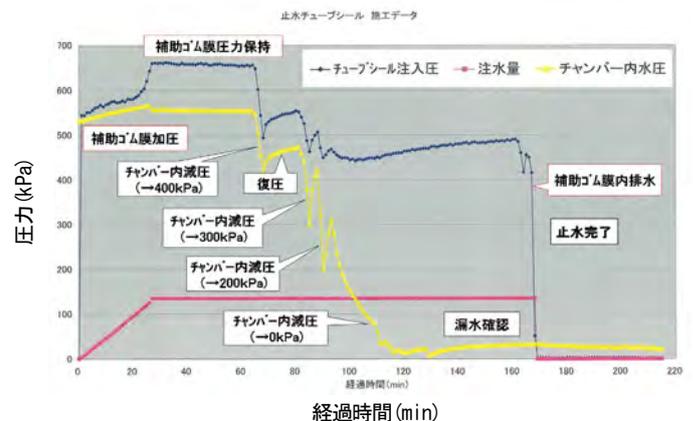


図-7 止水チューブシール施工結果

5. おわりに

当工事では、長距離、高水圧下の厳しい条件にもかかわらず、相対位置探査、地中接合とも大きなトラブルなく、無事工事を終了することができた。これは、事前の課題、リスクの抽出とそれに対して徹底した検討を行い、実施計画に反映させた結果である。また、検討の結果、各局面でフェールセーフを用意していたことは、施工する上で非常に安心感があった。計画の立案と施工に際し、一体となって、検討、ご指導頂いた東京電力株式会社殿、共同で計画・施工を行なった第2工区共同企業体、また、多大なご支援を頂いた関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) 富所達哉・高橋聡・米沢実・京屋宣正：長距離掘進後の高水圧下における機械式地中接合、トンネルと地下、Vol. 37、No. 7

18. 路面下空洞探査技術の開発

関東地方整備局 関東技術事務所 機械課 ○宮内 将彰
 関東地方整備局 関東技術事務所 機械課 渡部 修
 国土交通大学校 建設部 建設二科 神田 剛

1. はじめに

都市部の道路の地下はライフライン等に利用されるが、埋設物の破損等により空洞が発生し陥没事故を引き起こす場合もある。関東技術事務所では全国に先駆けて平成2年度に電磁波地中レーダ方式の路面下空洞探査車を開発・導入しており、関東地方整備局管内において平成17年度までに約1,000箇所の空洞を発見し、道路陥没の防止に効果を上げている。

今までの路面下空洞調査車による調査方法は、時速40kmで走行しながら迅速かつ広範囲に調査する一次調査と、一次調査で発見した異常箇所に対し一箇所ずつ車線規制を行い空洞位置及び規模の詳細を特定する二次調査により構成されている。

しかし、長時間におよぶ車線規制を伴う二次調査は渋滞を招くことから対策が求められていた。そこで、空洞の詳細位置が特定可能な「路面映像取得機能」と「GPS機能」及び「空洞データ」を合成させた「空洞詳細位置特定機能」を開発・搭載し、渋滞要因の一つとなっていたハンディ型地中レーダによるメッシュ調査を省略化した。

2. 路面下空洞調査について

路面下空洞調査車を図-1に示す。



図-1 新型路面下空洞調査車による一次調査

7台の地中レーダアンテナを用いて探査幅2.45m、

路面下1.5mまでの空洞を探査することが可能である。取得したデータを解析することにより異常信号の抽出を行い、さらに平面表示処理をすることにより異常信号の広がりを表示する。この広がりが空洞箇所である。

また、二次調査は、メッシュ調査、スコープ調査、空洞内部状況観察により構成される。

一次調査と二次調査の調査フローは図-2のとおりである。

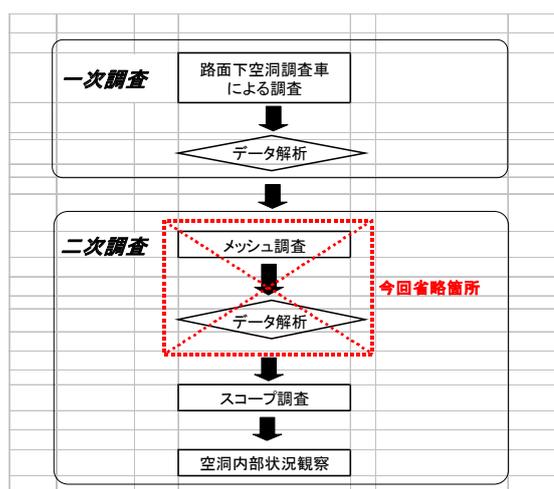


図-2 調査フロー

3. 空洞詳細位置特定機能の開発

路面映像取得を行うため、路面映像の取得方法と路面の照明方法について検討した。

さらに、各種のGPSシステムの比較検討した結果採用されたD-GPS（ビーコン）を用い地域差、走行速度による実証精度の試験を行い、空洞調査に対する適応性を確認した。

また、「路面映像とレーダデータ及びGPSデータの連携方法、路面映像と2次元処理結果の合成方法」「隣接する路面映像の合成方法」について実証試験を行ない適応性を確認した。

3. 1 路面映像取得機能の検討

3. 1. 1 路面映像の取得方法

路面映像取得に適応性のあるカメラについて検討をおこなった。カメラにはラインカメラとエリアカメラがある。ラインカメラはエリアカメラと比較して画素数が多く、高画質の映像が期待でき、データ加工が容易で、照度を均一化すべき範囲が狭くて良いことが挙げられる。よってラインカメラを採用した。(図-3参照)

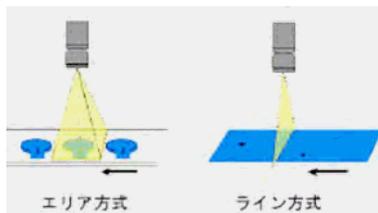


図-3 カメラ比較

3. 1. 2 路面の照明方法

ラインカメラの撮影に必要な照明を選定するため、表-1に示す照明装置を検討した。広角に照射可能であり、耐震・耐環境性の高いバックランプ(ハロゲン) 車両補助灯(ハロゲン)の組合せとした。

表-1 照明の検討

照明の種類	広角照射	耐震・耐環境性	検討結果
バックランプ(ハロゲン)	○	車両用:○	○
車両補助灯(ハロゲン)	○	車両用:○	○
舞台用照明(ハロゲン)	×	室内用:×	×
投光器(ハロゲン)	○	屋外用:△	△
投光器(ワンプ)	×	屋外用:△	×
車両補助灯(HID)	×	車両用:○	×
蛍光灯	○	屋外用:△	×

3. 1. 3 映像取得状況

昼間の晴天と曇天、雨天、夜間の状態のデータを取得した。以下に試験結果を示す。

昼間の撮影では、日陰と日向のコントラストが大きく、特に晴天時ではカメラでの制御が不能で、影部分の映像取得に問題が生じている。(図-4参照)

曇天時はカメラの感度領域の設定で調整が出来、影部分の映像取得が可能である。

雨天時の調査においては路面に滞水している場合でも、路面の映像情報の取得は可能である。

夜間の撮影では路面映像は良好であった。市街地における照明灯・ネオン等の影響と隣接する前後・左右の車両や対向車両のヘッドライト等の影響についての評価を表-2, 図-5に示す。



図-4 晴天時の影の影響

表-2 路面映像取得機能の評価

項目	検証結果	評価
明灯や電光看板等の影響	安定した路面映像データが取得できるため、影響はない。	○
隣接して走行する車両や対向車両からの灯火の影響	安定した路面映像データが取得できるため、影響はない。	○
車両挙動による影響	車両挙動による路面映像への影響はほとんどない。	○



図-5 周辺状況映像

上記の結果から、照明灯等の変動が路面映像に与える影響はほとんど無く、安定した映像を取得できることが確認できた。その他、撮影条件の変動による路面映像補正処理方法を検証した結果、日陰の補正については、大まかな路面の状況が確認できる程度まで補正することができた。照度不足で黒くつぶれた箇所や照度過度の白く飛んだ箇所、雨天時の状況については、補正することができなかった。

3. 2 GPS 機能の検討

空洞調査に適応可能な各種方式のGPS装置について表-3のとおり検討した結果、測位精度1mで日本全国使用可能なD-GPS（ビーコン）の適応性が高いため採用した。

表-3 GPS の検討

	GPS	D-GPS (FM 多重)	D-GPS (ビーコン)	RTK-GPS	VRS
測位精度	±10m	±5m	±1m	±0.02m	±0.02m
使用範囲	日本全国	都市部 FM 電波受信範囲	日本全国	基準局との通信範囲 (10km)	日本全国
データ更新間隔	1Hz	0.2Hz	20Hz	20Hz	1Hz
移動測位	○	○	○	○	○
価格(円)	5万	10万	100万	800万	400万
検討結果	×	×	○	△	△

選定した機種にて静止測位における精度と走行測位時における精度についてデータを取得し、図-6に示す検証を行った結果、誤差1m以下の測位精度を確認した。



図-6 GPS 装置検証状況

GPS装置が、実際の道路環境において有効に活用できるか検証を行なった。

GPS装置の位置精度は、安定した精度が得られる場合（図-7）と不安定な場合（図-8）があり、上空の見通しを遮るような高い建物が周辺にある状況では測位精度が不安定であった。

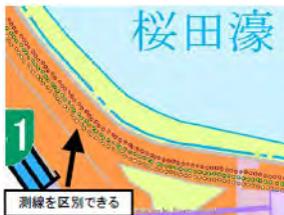


図-7 GPSデータ安定



図-8 GPSデータ不安定

したがって、GPSデータの精度が安定した場所であれば、地図ソフト上である程度の異常箇所位置は特定できた。また、走行軌跡についても、地図ソフト上で測線区別をつけることができた。

3. 3 空洞詳細位置特定機能の検討

「路面映像とレーダデータおよびGPSデータの連携方法と路面映像と2次元処理結果の合成」と「隣接する路面映像の合成」について検討した。

「路面映像とレーダデータおよびGPSデータ」の連携方法は高精度の距離パルスと高精度のGPSデータを二分配して、路面映像とレーダデータの取得ピッチごとに同時に記録し位置の同期をとった。（図-9参照）

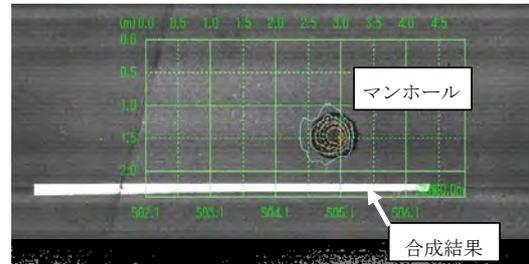


図-9 路面映像合成結果

「隣接する路面映像の合成」については、隣接する路面映像データ、および平面表示データの合成位置に大きなズレはなく、手動で容易に補正可能であり、データ合成機能の有効性を確認した。

（図-10参照）

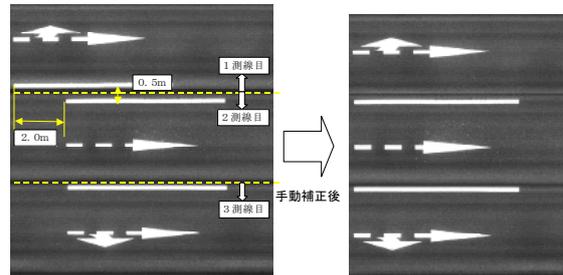


図-10 隣接する路面映像の合成と手動補正

4. 結果

4. 1 路面映像取得機能

路面映像を適正に取得するカメラ設定条件について、表-4の項目と設定値を最適値とした。また、撮影照度の関係から、昼間と夜間でカメラ設定を変

更する必要がある。(表一5 参照)

表一4 映像取得設定の最適値

	昼間	夜間
カメラレンズ絞り値	f=4.0	f=2.0
ソフトゲイン値	0	432
確認時の周囲の照度	25,000lux	2,000lux

表一5 路面映像取得機能

項目	検証結果	評価
実道調査への適応調整	【カメラ設定最適値】 昼間：f=4.0、ソフトゲイン=0 夜間：f=2.0、ソフトゲイン=432	○
周辺の照明等の影響	夜間撮影時における街路灯や車両灯火等、周辺の照明環境によって路面映像に与える影響は、ほとんどないことがわかった。 ただし、車両の挙動による照明の影響が若干ではあるが、確認された。	○
路面映像の補正	撮影条件の変動による路面映像補正処理方法を検証した結果、日陰の補正については、大まかな路面の状況が確認できる程度まで補正することができた。 そのほかの状況については、補正することができなかった。	△
耐久性	路面映像装置の耐久性については、1,500kmの調査を行った結果、大きなトラブルもなく、十分な耐久性を確認することができた。	○

4.2 GPS機能

D-GPS（ビーコン型）の使用範囲は灯台から半径200km以内であり、ほぼ日本全国をカバーできるが、高層ビル等建築物により使用が制限されることが確認された。(表一6 参照)

表一6 GPS機能

項目	検証結果	評価
GPS機能の結果	GPS データの安定した場所であれば、地図ソフト上である程度の位置は特定できる。また、走行軌跡についても、地図ソフト上で測線区別をつけることができた。 東京国道では、首都高の高架や周辺の高い建物の影響を受けてGPSの測位精度に誤差が発生した。そして、千葉国道は、非常に安定した測位精度が得ることができた。	△

4.3 空洞詳細位置特定機能

データを合成させた空洞詳細位置特定機能の検証結果を表一7に示す。

表一7 空洞詳細位置特定機能

項目	検証結果	評価
現地との整合性	平面表示処理結果の合成したデータについて、現地と路面映像位置と異常箇所位置（平面表示処理結果）の関係を検証した結果、三者の位置関係は整合性が取れていることがわかった。	○
路面映像結合（隣接する路面映像）	隣り合う路面映像データを結合した場合、数m程度のズレが生じている場合がある。原因は解明できていないが、人が手動で位置補正することによって容易に合わせる事が可能である	△

5 まとめ

新型路面下空洞調査車に空洞詳細位置特定機能を搭載したことによりメッシュ調査を省略できたため、平成17年度実績で249箇所のメッシュ調査を削減した。これにより1箇所当たり1~1.5時間程度かかっていた交通規制時間が短縮され、渋滞の緩和に役立っている。また、メッシュ調査を省略した新型路面下空洞調査車は旧型路面下空洞調査車と比較して約28%ものコスト削減に貢献している。

6 今後の課題

6.1 路面映像取得装置の改良

良好な路面映像を取得するためには、路面映像装置の設定をその時の照度にあわせて適切に設定することが必要となる。昼間と夜間の最適値は決定したが、今後は調査中の極端な照度の変動に対応できるカメラ装置の開発が必要であると考えられる。

6.2 歩道調査車への空洞詳細位置特定機能追加

歩道下の空洞を効率的に調査することを目的とした歩道調査車を平成13年に導入している。調査測線の計測距離により位置特定作業を行っているが、計測距離の誤差などにより異常箇所信号の特定が困難になるケースがある。そのため、路面下空洞調査車に搭載した空洞詳細位置特定機能装置を取り付けることにより異常箇所位置特定作業の効率化になる。

ただし、歩道調査車の機材搭載スペースの都合上、路面下空洞調査車より省スペースな空洞詳細位置特定機能装置を開発する必要がある。

19. 4軸処理機を用いた深層混合処理工法

株式会社竹中土木 ○ 栢田 旬祐 秀島 康史 大西 常康

1. はじめに

建設分野でのさまざまな変革に伴い、より一層の品質向上、施工効率の向上およびコスト削減を目的に、従来の2軸処理機を基に、並列4軸処理機を開発し、砂質地盤の耐液状化格子状深層混合処理工の実工事に適用した。その結果、従来の2軸処理機と比較して、改良体の品質は同等であり、施工効率は著しく向上することが明らかになった。

本稿では、開発した4軸処理機の特長を述べるとともに、工事の概要および適用結果について報告する。

2. 開発の背景

軟弱な地盤にセメントスラリーを添加・混合し地盤を強化する深層混合処理工法は、建築・土木の種々の用途に使用され、多くの施工実績をあげている工法である。この深層混合処理工法は、専用船による海上深層混合処理工と3点式杭打機等を用いた陸上深層混合処理工に大別される。専用船による海上施工では、改良径がφ1,300mm～φ1,600mmで攪拌軸の配置が矩形4軸またはφ900mm～φ1,000mmの8軸施工(4軸×2列)が主流である。一方、陸上施工においては、改良径がφ1,000mm、軸間800mmの2軸施工もしくは単軸施工が主流であるが、近年、攪拌軸を並列に3軸または矩形に4軸配置した新しい施工機の開発および実施工が行われている。また、深層混合処理工法ではないが、山留めなどの仮設用途のソイルセメント柱列壁工法においては、改良径φ650mm、軸間450mmの並列5軸機も実施工に適用されている。

このように、使用目的と改良形状に応じたさまざまな施工機械が開発されている中で、筆者らは特に砂質地盤における液状化対策として用いられる格子状深層混合処理工に着目した。この格子状深層混合処理工では、従来の改良径φ1,000mmの2軸処理機を用いて施



写真-1 4軸処理機の全景

工するケースが大半を占めていた。そこで今回、従来の2軸処理機を発展させて、並列4軸処理機を開発し実施工に適用することとした。そのねらいは、ラップ部分の減少による施工品質の向上と、施工効率の向上による工期の短縮・コスト低減である。

開発した4軸処理機の全景を写真-1に、改良断面形状を表-1に示す。

表-1 断面形状比較表

φ 1000 × 2軸	φ 1000 × 3軸
<p>A=1.5 (m²/セット)</p>	<p>A=2.19 (m²/セット)</p>
φ 1000 × 4軸	
<p>A=2.90 (m²/セット)</p>	

3. 4軸処理機の概要

施工機械の全体概要図を図-1に、施工順序図を図-2に、処理機上部のモータ部周辺を写真-2に、処理機的能力を表-2にそれぞれ示す。

4軸処理機は、2軸処理機用モータ（90kW×2台）と並列4軸装置を組み合わせて4本の駆動軸・攪拌翼を回転しており、駆動軸の軸間距離は800mm、改良径はφ1,000mmで、1回の施工による改良面積は2.9m²である。

ここでいう並列4軸装置とは、片側の1軸分オーガで2軸分を回転させる同期ギア装置を、左右に二つ組み合わせたものである。したがって、同期ギア装置による負荷分散効果が期待でき、実際には1軸あたり2軸分、つまり90kWオーガと同等の掘削トルクが期待できる。また、鉛直押し込み力についても、1軸当りの

処理機重量で比較した場合、2軸施工では2軸処理機用モータが10.7tで1軸当り5.35tであるのに対し、4軸施工では、2軸処理機用モータ10.7t＋並列4軸装置9.6t＝20.3tで1軸当り5.08tとなり、ほぼ同等の鉛直押し込み力がある。

4軸処理機は、従来の2軸処理機用モータを使用するため、これを運転するための動力供給は発電機600kVAが1台で可能である。

セメントスラリーの供給は、全自動プラント（24m³/h級）2台、スラリーポンプ4台で行い、セメントスラリーは4軸全てから吐出する。施工管理システムについても、2軸処理機の施工管理装置を2セット使用することにより、従来の2軸処理機による施工の品質に対する実績を受け継ぐ形とした。

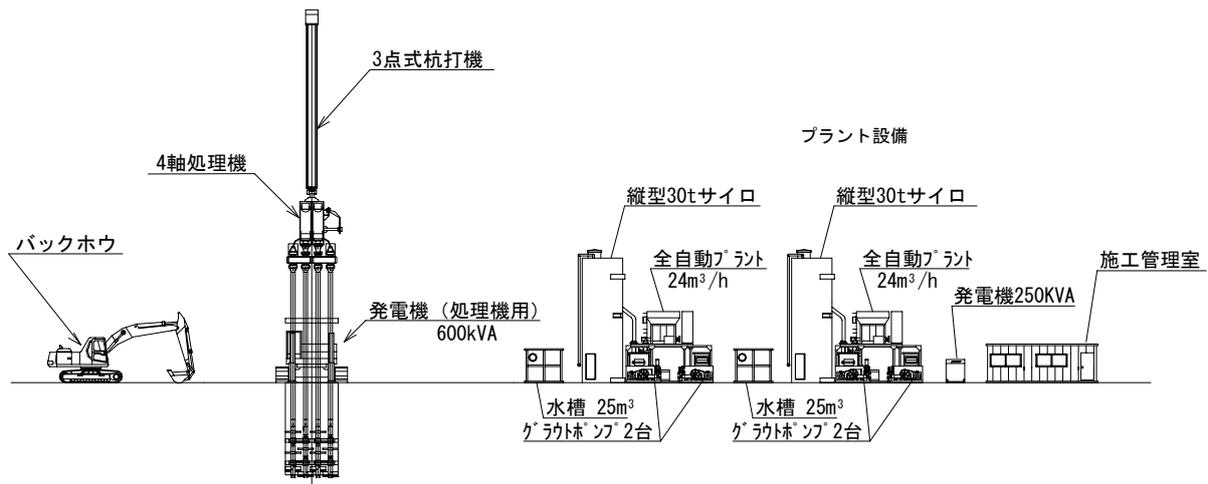


図-1 施工機械概要図

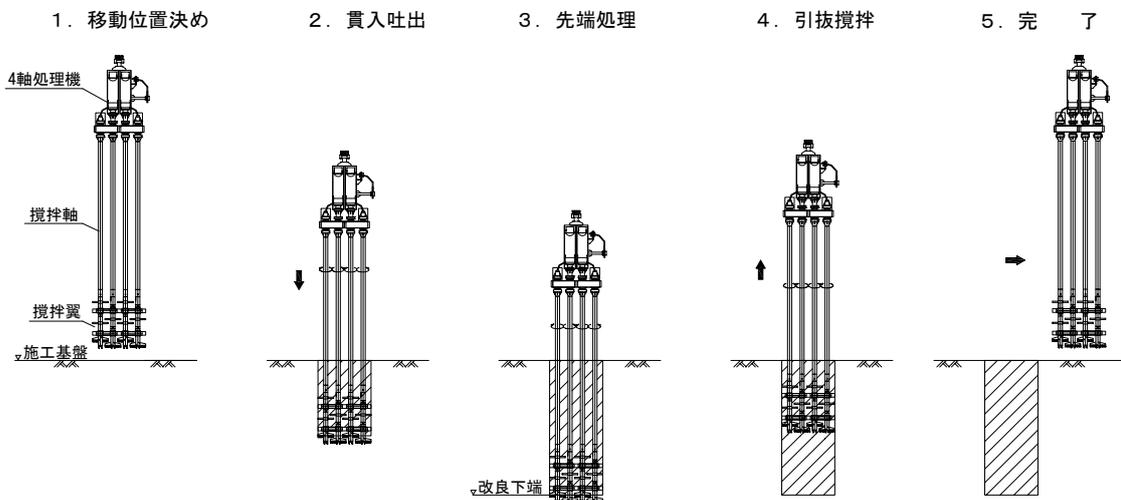


図-2 施工順序図

4. 実施工での4軸処理機の適用

1) 施工概要

大阪市福島区の分譲マンション新築工事における基礎工事のうち、杭併用の耐液状化格子状深層混合処理工に4軸処理機を適用した。

工事場所：大阪府大阪市福島区

施工時期：平成17年11月～平成17年12月

施工目的：建築基礎地盤の液状化対策

施工内容：格子状深層混合処理工

φ1000mm×4軸 203セット

打設長9.0m ラップ幅20cm

固化材の種類：高炉セメントB種

固化材添加量：250kg/m³

水セメント比：100%

設計基準強度：1500kN/m²

地盤はGL-4.0mまでが埋土、GL-8.0mまでがN値8～23の細粒分混じり砂層（土粒子密度 $\rho_t=2.6\sim 2.7\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=21\sim 25\%$ ）、それ以深が粘土質シルト層である。

改良杭・杭の配置およびコア採取位置を図-4に示す。また、改良対象地盤の代表的な土質柱状図および改良深さを図-5に示す

2) 改良体の品質

改良地盤の品質管理として、図-4に示したボーリング位置から採取したコアの一軸圧縮試験を実施した。表-3は細粒分混じり砂層の中央部における試験結果である。統計量を除く表中の数值は3供試体の平均値である。

この土層における平均一軸圧縮強さ quf_{28} は7,195kN/m²で、合格判定値を上まわった。また、強度の変動係数は26%であり、図-6に示すように、砂質土の改良としては従来の2軸処理機の変動係数の範囲にある。¹⁾

3) 施工効率

作業時間は8:00～17:00の8時間施工で、打設長9mの改良杭を203セット施工し、その実稼動日数は21日間であった。施工地盤は先に述べたように、平均N値15、最大N値23であり、地盤改良工事としては



写真-2 4軸処理機（上部）

表-2 処理機能力

項目	形式 / 能力		
モータ	90kW×4/8P×2台 (400/440V)		
回転数 (min ⁻¹)	50Hz	4P	32.2
		8P	16.1
	60Hz	4P	38.7
		8P	19.3
掘削トルク (1軸分に換算) (kN・m)	50Hz	4P	13.3
		8P	26.7
	60Hz	4P	11.1
		8P	22.2
改良径(mm)	φ1000		

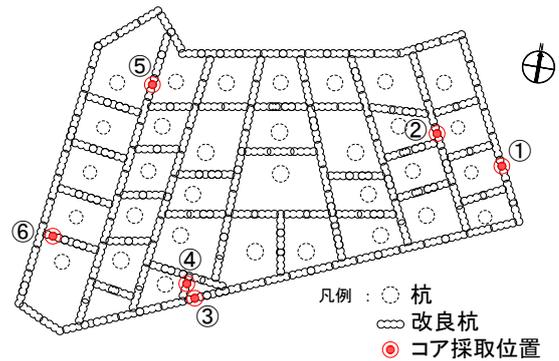


図-4 改良杭・杭の配置、コア採取位置

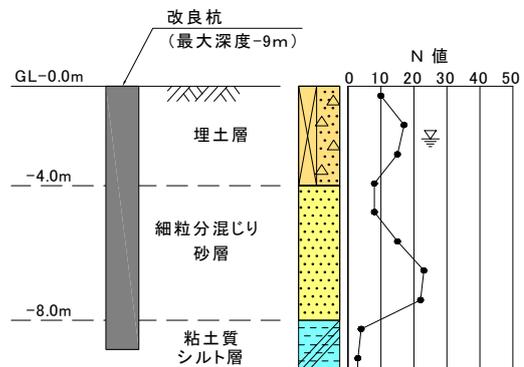


図-5 土質柱状図

表-3 品質試験結果

コア採取位置	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	含水比 W (%)	一軸圧縮強さ quf_{28} (kN/m ²)
①	1.994	19.0	9897
②	1.914	20.8	5090
③	1.991	21.7	5090
④	2.078	16.4	8283
⑤	1.920	21.3	6960
⑥	2.014	21.2	7850
平均値	1.985	20.1	7195
標準偏差	0.061	2.0	1888
変動係数 (%)	3.1	10.1	26.2

比較的硬い地盤での施工にも関わらず、1日当たりの平均施工数は9.7セット/日となり、国土交通省の標準積算歩掛（スラリー攪拌工）の9.0セット/日上まわることができた。また、並列4軸装置による負荷分散効果もあり、モータの異常な温度上昇や発電機の遮断等の障害も見られず、削孔能力は2軸処理機と同等であると考えられる。したがって、1回の施工で従来の2セット分の改良が可能となり、施工日数を約半分にすることが出来たと言える。

4) ラップ箇所の品質

格子状改良では改良壁としての一体性が重要であり、ラップ時間は24時間以内のラップを原則としている。しかし、比較的大規模な工事で、従来の2軸施工機にて施工した場合、先行して打設した改良杭の位置に戻って施工するのに3日以上かかるケースがある。このような場合、先行して打設した改良杭の強度発現が大きくなり、うまくラップ出来ず、せん断耐力の低下や遮水機能の低下の原因となることがあった。これを防止するために従来は、ラップまでの時間が長くなりそうな改良杭については、後行杭をセメントスラリーの吐出なしで施工（空打ち）し、先行打設した改良杭のラップ部分をあらかじめ乱しておく等の処置を行っている。しかし、今回の工事では、施工速度の向上により、片側から連続的に施工し、休日1日を挟む以外は全て24時間以内でラップ施工を行うことができた。

外周部改良土壁の掘り出し状況を写真-3に示す。掘り出した側面を観察した結果、ラップ交差部または1セット内に漏水は認められなかった。4軸処理機による施工は、2軸処理機の施工に比べてラップ交差部自体も半分になることから、止水に対しても有利である。

5. まとめ

開発した4軸処理機の概要と実施工に適用した結果を報告した。今後、構造物に対して、合理的な支持地盤および液状化対策として、格子状の改良地盤の採用が増えるものと予想される。その場合、格子状改良壁の一体性が確保されていることが重要となり、従来の2軸処理機よりも4軸処理機は有利になる。また、

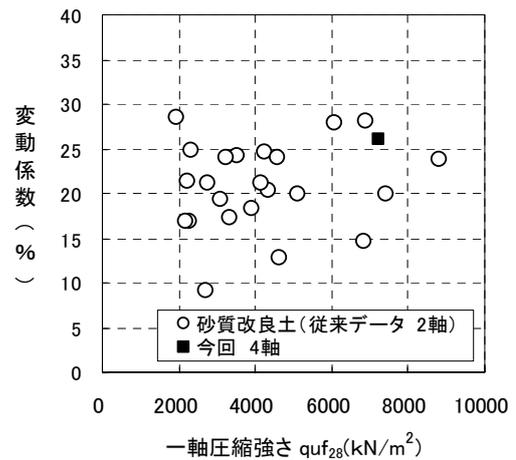


図-6 q_{uf28} の変動係数



写真-3 改良土壁

今回は打設長が比較的短い改良杭への適用であったが、4軸処理機の適用深度としては、液状化防止を考慮してGL-20m程度を考えている。

今後、セメントスラリーの供給装置や施工管理システムの一本化も含めて省力化を図るとともに、円形タンク基礎のような緩い曲線への適用や汚染土壌の封じ込めといった新しい分野への適用も視野に入れていきたい。最後に、本システムの開発および適用にご協力いただいた関係各位に感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 建築技術性能証明評価概要報告書 DCM-L 工法、2004年 (財) 日本建築総合試験所

20. 超高層 RC 集合住宅建設工事における最新の機械化施工

『工業化工法を支える機械施工システム』

清水建設株：西田 典宏，門脇 均，○廣瀬 豊

1. はじめに

近年の大規模マンション需要に後押しされ、超高層 RC 集合住宅の建設は未だ活況を呈し、首都圏のみならず全国規模で展開されている。このような超高層マンションの場合には、間取りの自由度や居住性、経済性を鑑み、大スパン空間を提供する目的で、多くは高強度コンクリートと高強度太径鉄筋を使用した純ラーメン RC 構造の構工法が採用されている。より高強度の材料の実用化、建設業界に対する安全・安心を求めるユーザーの声の中、品質管理手法の確立はもちろんのこと、工事の工期やコストに直結する施工システムの開発、改善についても常に当社は取り組んできた。

ここでは、ある大規模工事に対し、生産性向上、工期短縮のために採用した「工業化工法」の円滑な推進を目指して開発・導入を行った、機械化施工システムの概要と適用結果について報告する。

2. 工事概要

本工事は、数年来大型マンション開発が目白押しの東京港区湾岸エリアにおいて、地上 40 階を越える超高層の住宅棟 3 棟から成る、日本最大級のビックプロジェクトである。総延べ床面積は約 291,000 m² 総戸数は約 2000 戸を超え、完成後には 6,000 人程が暮らす街となる。

施工に際しては、1 期工事 (A 棟)、2 期工事 (B 棟、C 棟) に分かれて行った。また各棟は、建築面積も大きいことから、A 棟は 4 工区、B 棟は 2 工区、C 棟は 3 工区に分けて工事を進めた。



図1 完成予想図



写真1 工事状況

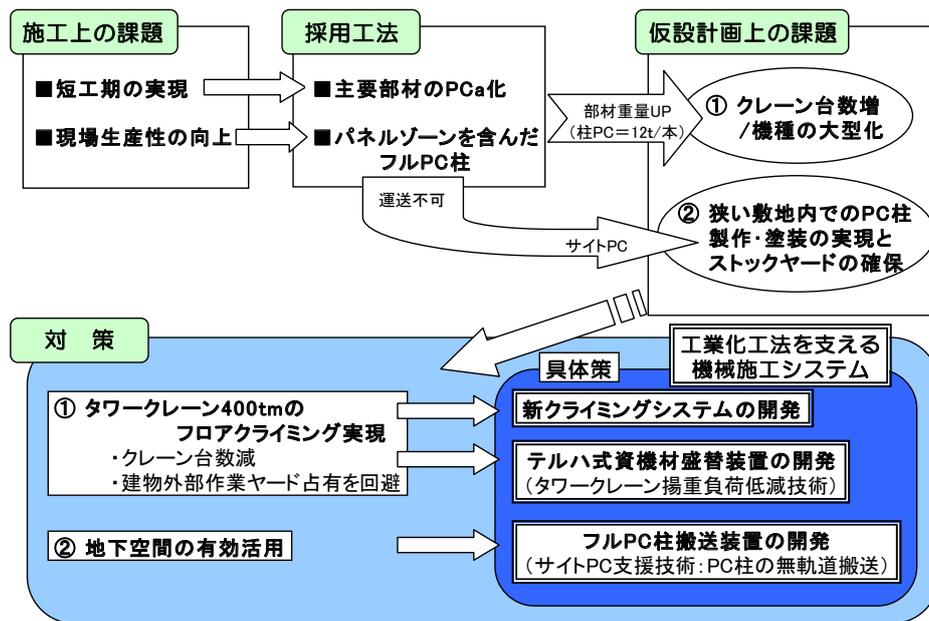


図2 施工上の課題と機械化施工システムの取り組み

3. 機械化施工システムへの取り組み

図2に示すように、本工事では、工期短縮実現のために、主要部材のPCa化が図られ、その中でも、柱については梁との取り合う部分（パネルゾーン）も含んだ、フルPC柱が採用された。

PCa化により部材の重量が増大することで、クレーン台数の増加や機種の大大型化が予想された。またフルPC柱についてはパネルゾーンを含んでいるため大型化し、かつ梁鉄筋が張り出している形状のため公道を運搬不可能であり、工事敷地内で製作・ストックヤードを確保しなければならなかった。

本報では、このような課題を解決させる方策として開発した、タワークレーンの新クライミング技術、タワークレーン揚重負荷低減技術（テルハ式資機材盛替装置）、サイトPC支援技術（フルPC柱搬送装置）から成る、工業化工法を支える機械化施工システムについて報告する。

4. 大型タワークレーンのRC造における

フロアクライミング技術

タワークレーンフロアクライミングシステム

4.1 経緯

超高層RC集合住宅の工事では、タワークレーンを建物の外部に設置し、ベースを1階に設置したま

まマストを継ぎ足してクライミングさせるマストクライミングが一般的である。この場合、マスト本数の増加、1階作業ヤードの縮小、またクレーンが建物をカバーする面積が小さくなることからクレーン台数が増加するという課題があった。

このため、特に平面的にも広い本工事においては、クレーン台数の削減や建物外部の作業ヤードの確保の観点から、クレーンを建物内部に設置しフロアクライミングさせることとした。

また、本工事では前述のように工期短縮の目的でフルPC柱が採用されたことから、最大約12tのPC柱を揚重することとなり、400t・mクラスの大型タワークレーンを使用しなければならなかった。

S造の場合とは異なり、RC造の場合、コンクリート打設後、強度の発現を待って、クレーンの荷重を躯体に受けクライミングしなければならない。当社で既に数件実績のある120t・mクラスの場合に対し、特に今回のような大型クレーンのフロアクライミングには、躯体で如何にクレーンの荷重を受けかが課題であった。PC柱をクライミング時の反力受けに利用することで、この課題を解決し、今回初めて400t・mクラスの大型タワークレーンのRC造におけるフロアクライミングを実現した。

4. 2 概要

本工事は1期工事と2期工事に分かれており、1期工事着工後、約1年遅れで2期工事を着工した。1期工事においては、強度の発現していない施工直後のコンクリート打設階の梁でクレーンの荷重を支えることができないことから、図3に示すように、所定のコンクリート強度が発現した階の梁、施工階の1フロア下の階（ $n-1$ 階）の梁を補強しクレーンの荷重を受けクライミングさせた。

この場合、躯体に仮設補強を施し、かつクライミング作業ごとに仮設補強の設置・撤去作業が生じる。また $n-1$ 階に、クレーン荷重を躯体の梁に伝えるため鉄骨受梁を設けなければならず、その設置・撤去作業にも時間を要するなどの問題があった。

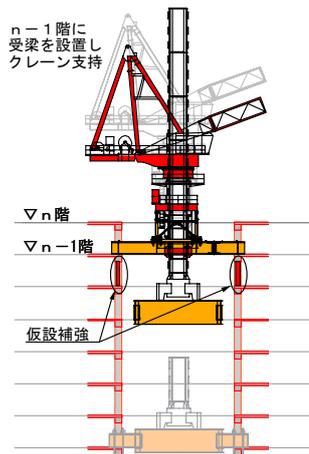


図3 1期工事でのフロアクライミング

従って2期工事では、その問題を解決するため、以下の改善を実施した。

本工事においては、前述の通り、パネルゾーンを含むフルPC柱を採用しており、このフルPC柱に着目し、フロアクライミング時のクレーンの荷重を受ける方法を実施した。フルPC柱は、予め製造されたPC柱部材を現場で組み立てるため、強度も発現しており、タワークレーンの荷重を受けることが可能である。またクレーン設置部周囲の柱には、二次部材取付け用の鉄骨金物が打ち込まれており、この金物を利用して、クレーンの荷重を受ける工夫をした。

これにより、仮設補強も減り、クレーン荷重を躯体の柱に伝えるための鉄骨受梁を施工階（ n 階）に設置しクライミングさせることが実現できた。

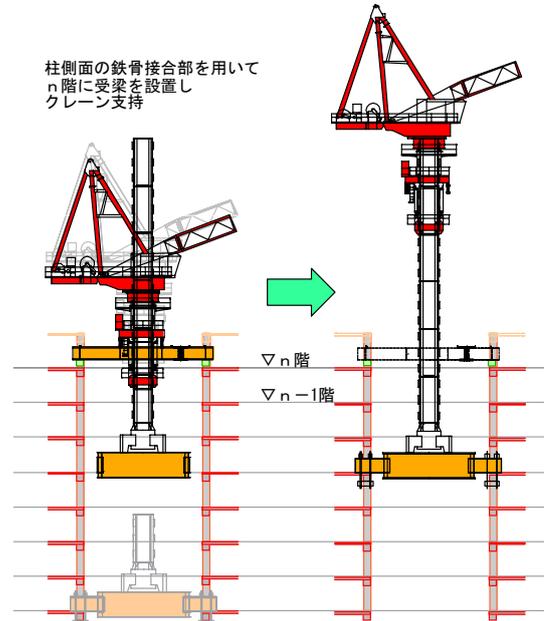


図4 2期工事でのフロアクライミング



写真2 タワークレーンクライミング状況

4. 3 効果

この方法により2期工事では、仮設補強の数量を3割ほど少なくできたほか、仮設補強や鉄骨受梁の設置・撤去手間も減少させ、クライミング所要時間も従来約2日要していたものを半減させることができた。

よって、クライミング作業に要していたタワークレーンの休止時間を減らし、工期の短縮に寄与することができた。

5. タワークレーン揚重負荷低減技術

テルハ式資機材盛替装置

5. 1 経緯

前述の通りタワークレーンを内部設置し台数を削減したことで、躯体サイクル工程の確保、短縮のためにはタワークレーン揚重負荷の低減、及び稼働率の向上が不可欠であった。

当社ではタワークレーンの揚重負荷の低減のため、数年来、様々な取り組みをし超高層集合住宅建設の工期短縮を実現してきた。

本工事では下階から施工階への転用資材（型枠材やサポートなどの仮設材）の盛替えの機能、外部からのタワークレーンによる資材（ALC・サッシ・ガラス等）搬入時の荷受け機能を合わせもった装置を開発・導入した。1棟あたり2～4工区に分かれて施工する本工事では、この装置が揚重負荷低減のために各工区に必要であった。従来装置と比べ、巻き上げ機を1台とすることや、荷受けステージを本体フレームから分離することで、よりシンプルな機構と操作性の向上を実現した。

5. 2 概要

本装置は大きく「クレーンユニット」部と「荷受けステージ」部で構成される。「クレーンユニット」部は、本体フレーム、手動式アウトリガー、フレーム上部に取り付けられた、走行・横行レールと巻き上げ機（電気チェーンブロック）から成り立っている。また「荷受けステージ」部は、ステージ部分と手動式アウトリガーで構成されている。

開口部に本装置を設置し、巻き上げ機により任意

の階に設置された荷受けステージ上へ台車等に乗せた資材を運び込む。その資材を巻き上げ機によって最上階（施工階）に揚重する仕組みである。また、巻き上げ機の揚程の範囲内であれば、どの階でもサービスが可能である。

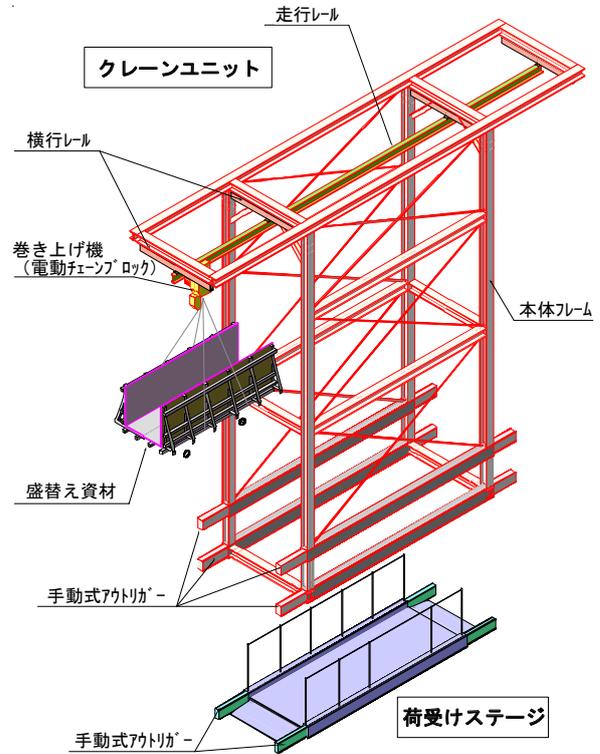


図5 テルハ式資機材盛替装置 概略図

外部からタワークレーンにて途中階へ資材を揚重（荷の取り込み）時は、横行レールにトロリを介して取り付けられた走行レールを端に寄せ、クレーンユニット上部の開口を大きくし、安全に荷受けステージ上に荷を取り込むことができた。



写真3 荷上げ状況 施工階（n階）

表1 テルハ式資機材盛替装置 仕様

クレーン ユニット	定格荷重	1.5t
	巻上速度	8.9m/min (電動チェーンブロック)
	横行速度	20 m/min (電動トロリ)
	走行速度	20 m/min (電動トロリ)
	揚程	25m
	自重	9.1t
	操作	有線操作盤
	安全装置	オーバードリミッター
荷受 ステージ	積載荷重	1.5t
	自重	0.9t

クレーンユニット自体のクライミングは、タワークレーンにて躯体施工サイクル毎に行う。

5.3 効果

1期工事(A棟)の4工区にそれぞれ本装置を適用し、タワークレーンの揚重負荷低減を図ることで、当初7日で設定されていた1フロア当たりの施工サイクルを6日に短縮することができた。さらに、タワークレーンの揚重負荷低減により確保した時間を仕上げ材等の先行揚重に充当することができた。

4台の装置は全て1期工事から2期工事へ転用し、同様の効果をあげている。

6. サイトPC支援技術

フルPC柱搬送装置(PC柱の無軌道搬送)

6.1 経緯

本工事においては、パネルゾーンを含めたフルPC柱を採用し、この柱を作業所内に設けた「サイトファクトリー」で製作した。

また、この柱の仕上げ仕様は塗装であり、塗装工事を柱の取付け後に行うと、足場等の仮設設備の増加、仕上げ工事の遅れなどの課題があった。そのため、柱の製作から塗装までをサイトファクトリーで行う計画としたが、1階部分のスペースでは柱の製作までが限度なため、養生・塗装のためのヤードは、検討の結果、地下部分に設けることとした。

そのため1階の製作ヤードで生産された最大重量

約12tのPC柱をクレーンにて1階床の開口から地下へ降ろし、地下では開口下から横移動する必要があった。地下空間での横移動については、当初天井クレーン等を設置する案もあったが、地下の制約条件などから走行自由度も高い無軌道の搬送システムが有効であると考え、各種方式の中から床に多少の凹凸があっても走行できるキャスターを用いた台車を装備した本装置を開発し適用した。

6.2 概要

本装置は、3tエンジン式フォークリフトをベースマシンとし、フォーク部に柱の把持装置を備えた台車を結合したものである。PC柱を積載した台車はベースマシンにて牽引され、所定の場所に移動後、柱を床に配置する。把持装置は、リフト機構とスライド機構により構成され、スライド機構により柱側面を挟み込み、リフト機構により柱底面もしくは柱から跳ね出している梁鉄筋を支持し台車に荷重を預けるものとなっている。これによって柱側面(塗装面)に触れることなく運搬ができる。

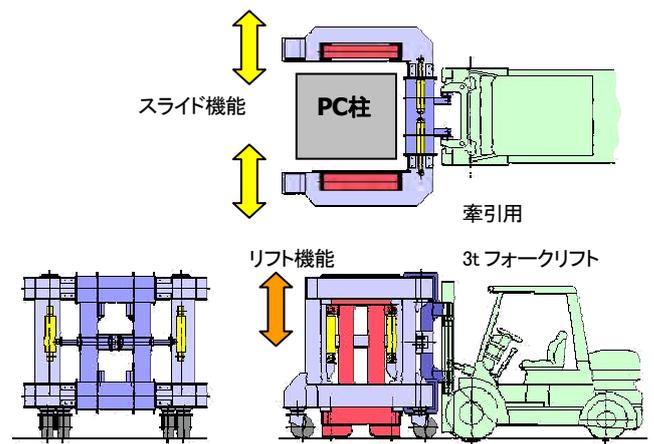


図6 フルPC柱搬送装置 概略図

表2 フル PC 柱搬送装置 仕様

牽引車	3tエンジン式フォークリフト		
搬送 台車	全体寸法	全長	2,345mm
		全幅	2,800mm
		全高	2,205mm
	リフト機構	油圧シリンダー φ100-500st(4本)	
	スライド機構	油圧シリンダー φ80-400st(2本)	
	持上能力	13,000kg	
	キャスター	重荷重用自在キャスター 4個	
	自重	3,000kg	
安全装置	動作回転灯/ブザー 他		



写真4 フル PC 柱ストック状況



写真5 フル PC 柱搬送装置 稼動状況

6.3 効果

本工事では、この搬送装置を2台開発・導入した。無軌道搬送のメリットを活かし、地下エリアを PC 柱ストック（養生・塗装）ヤードとして十分に利用することができた。これにより、限られた敷地の中での PC 柱の製作、塗装及び養生を行うサイトファクトリーを成立させることができた。2台の装置にて1期工事・2期工事あわせて約6,000本の柱を円滑に運搬することができ、これによって、サイクル工程6日の実現に貢献することができた。

7. おわりに

作業所の適切な計画、作業員の工夫や努力と、これらの機械化施工により、1フロア当たり6日の躯体サイクル工程を早期に実現できた。また地下部分を最大限に利用し PC 柱のサイトファクトリーを成立させ、工期短縮に寄与することもできた。

今後も超高層 RC 集合住宅の物件において、進化する工法に対応した機械施工システムの開発と既存技術の改善・改良を進めていくとともに、作業員の高齢化や減少への対応と、生産性向上に貢献できる新たな機械化施工システムを開発、提案していきたいと考えている。

最後に、各システムの開発・導入に当たり、ご指導、ご協力いただいた関係者の皆様に対し、深く感謝の意を表します。

21. 軌陸式重量物運搬台車の開発と鉄道営業線高架化工事への適用

東急建設㈱ ○中村 聡、荻原 克巳、安藤 喜敏

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化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、多くの時間的・空間的制約のもとで行なわれる。また、騒音・振動など周辺環境に配慮して工事を行なう必要がある。東急建設㈱、㈱奥村組、㈱森本組の3社共同企業体が担当する京浜急行電鉄㈱発注の京急蒲田駅付近連続立体交差事業第2工区においても敷地の制約等があるため、仮線用地を使用せずに営業線直上に高架橋を構築する「直接高架工法」を採用している。本工法での施工にあたり、東急建設㈱と京浜急行電鉄㈱、㈱タダノと共同で、鉄道営業線を跨いでクレーン作業を行うことのできる「移動式直接高架施工機」を開発し、用地の取得を最小限にとどめることによる事業期間の短縮と騒音などの周辺環境に配慮した施工を行なっている。今回、更に工期短縮と安全性向上を目指し、狭隘な箇所でもクレーンを使用せずに重量物を軌道内に搬入・運搬することのできる「軌陸式重量物運搬台車」を開発し、平成18年3月から柱や梁などの部材の運搬に適用している。本稿では、鉄道営業線工事における作業可能時間拡大と工期短縮、作業の安全性向上を目的とした軌陸式重量物運搬台車の開発と導入効果について報告する。

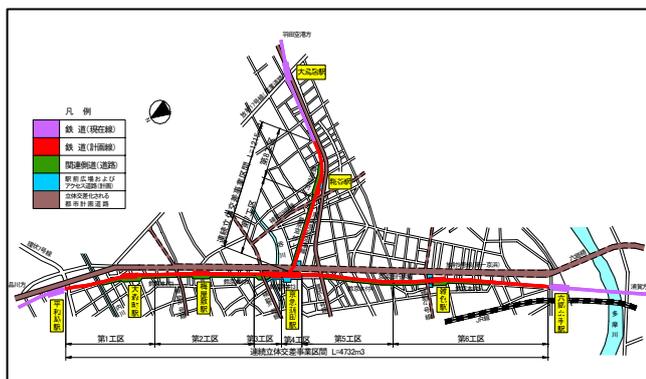


図-1 事業全体の概要

2. 工事概要

本事業は交通の円滑化、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までの延長約5.4km(事業区間約4.7km)の区間、およ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。この立体交差化により環状8号線、第一京浜など計28箇所の踏切道が解消される。

本事業では、用地買収による工期の遅れを防ぐため「直接高架工法」を約半分の区間で採用している。東急建設㈱、㈱奥村組、㈱森本組の3社共同企業体は事業区間約6.0kmのうち第2工区である工事延長893.5mを担当し、工区内の全てにおいて直接高架工法で施工を行なっている。

表-1 工事概要

工 事 件 名	京急蒲田駅付近連続立体交差事業 第2工区
工 事 場 所	京浜急行電鉄本線 6k820m500～7k714m000
発 注 者	京浜急行電鉄㈱
工 期	平成14年1月～平成27年3月
工 事 内 容	工事延長:893.5m 工法:直接高架工法 基礎杭築造数:162本 高架橋構築数:26 踏切撤去数:5箇所

3. 高架橋構築の施工手順

第2工区における高架橋の構築では、基礎杭の施工を行う「杭施工機」と柱や梁などの部材の架設を行う「桁架設施工機」の2機の「移動式直接高架施工機」(図-2)を使用している¹⁾。基礎杭工事では基礎杭の施工位置まで「杭施工機」を移動させ、作業床上に装

備されたクレーンを使用して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。

「桁架設施工機」は、モーターカーや軌陸式重量物運搬台車で運搬された柱・梁・スラブなどを装備されたクレーンを使用し建込みおよび組立を行い、ラーメン高架橋を構築する。高架橋構築の施工フローを図-3に示す。



図-2 移動式直接高架施工機施工イメージ図

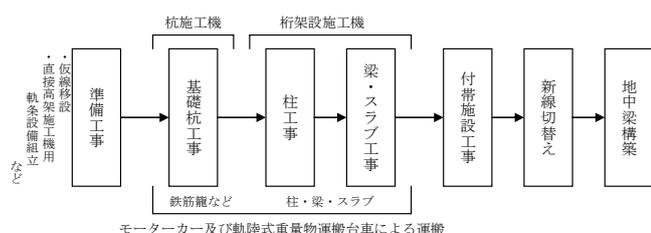


図-3 高架橋構築の施工フロー

4. 軌陸式重量物運搬台車開発の経緯

「移動式直接高架施工機」を用いた「直接高架工法」を採用することにより用地買収の縮小が可能になる反面、広い作業用地を確保することが困難になる。そのため、柱や梁、スラブなどの部材を施工箇所まで運搬する場合、工事区間から約7km離れたモーターカー基地からモーターカーによって運搬することになり、運搬に時間を要してしまうことや、運搬経路上での他工事や保線作業により作業状況に応じた運搬が容易に

できないなどの問題が生じた。また、工区内に作業用地を確保できたとしてもクレーンを使用して軌道内に部材を搬入する際、き電停止後に作業を開始するため実作業時間が短くなるなどの問題も想定された。

これらの問題を解決する手段として重量物を積載した状態で地上を走行し、軌陸切替え機能により軌道内に重量物を搬入・運搬可能な「軌陸式重量物運搬台車」を開発することとなった。

当社では以前より「重量物運搬台車」など、現場等における重量物運搬装置の開発を行っており、鉄道高架橋工事での鉄骨部材の陸上運搬やコンクリート部材の運搬(写真-1)などの実績がある。今回の「軌陸式重量物運搬台車」の開発には、これまでの重量物運搬装置の技術を応用し、軌道走行や軌陸切替えなどの新しい機能を付加している。



写真-1 重量物運搬台車による運搬

5. 軌陸式重量物運搬台車の概要

5.1 構造

軌陸式重量物運搬台車(図-4)は、自走式軌道走行台車の前後に、地上走行用車輪と軌陸切替え用油圧シリンダが組込まれた地上走行ユニットが取付けられている構造になっている。通常の軌陸車輛は軌道走行用車輪が上下動することにより軌陸の切替えが行なわれるが、軌陸式重量物運搬台車では地上走行用車輪が上下動することにより軌陸の切替えを行なう構造になっている。電源は内蔵されている超低騒音型発電機から供給される。



図-4 軌陸式重量物運搬台車

5.2 仕様

軌陸式重量物運搬台車の仕様を表-2に示す。運転はペンダントスイッチによる操作で行なうため運転席などは無く、操作者は運搬台車と共に歩いて移動する。地上走行は作業ヤード内のみでの移動となるため移動距離も短く、走行速度よりも安定性を重視するため地上走行速度を低速に設定し、最大 0.4km/h とした。また、軌道走行速度は操作者が道床を歩いて移動できる速度に合わせ、最大 1.8km/h とした。地上走行時における方向転換は左右タイヤの回転速度や方向を変化させて行い、狭いスペースでも方向転換が可能な構造としている。

表-2 軌陸式重量物運搬台車の仕様

最大積載量	25t
台車自重	14.3t(整備質量)
台車長	7,460 mm(荷台長さ 5,490 mm)
台車幅	2,730 mm(荷台幅 2,600 mm)
台車高さ	2,600 mm(手摺高さ 1,100 mm含む)
軌道走行速度	0.9km/h~1.8km/h(3段階切替え)
地上走行速度	0.08km/h~0.4km/h(3段階切替え)
電源	200V 10Kw, 100V 3Kw(照明用)

鉄道営業線内を走行するため軌道走行用車輪は絶縁車輪とし、レールを横断する形で走行する地上走行用車輪は絶縁とレールの保護を目的としてゴム製のソリッドタイヤを使用している。また、緊急時の対策として台車の前後に連結器と連結棒を配置し、故障した際には他の車輛で牽引が可能な構造になっている。電源についても発電機と商用電源の2種類から供給可能な機能を備え、搭載した発電機が故障した際にも分電盤

などから電源を供給し駆動が可能である。

5.3 運搬手順

軌陸式重量物運搬台車による運搬作業では、昼間に運搬する部材をクレーンで荷台に積込み、夜間線路閉鎖後に地上走行を行い軌道内に入線する(写真-2)。入線する際は、軌陸式重量物運搬台車の特長であるレールに対して直交方向に地上走行する機能を使用して、回転や切返しをせずに省スペースに入線できるため狭隘な場所でも長尺物の搬入が可能になっている。軌道内入線後は軌陸切替用油圧シリンダを縮め、軌道走行用車輪をレールにセットし、地上走行用車輪を地面から離れた状態で軌道走行を行う。基礎杭の築造や高架橋の構築を行っている直接高架施工機まで部材を運搬し、クレーンで部材をおろす(写真-3)。荷おろし後、軌道内入線箇所まで移動し、地上走行車輪を張出して軌道外まで移動する。

6. 軌陸式重量物運搬台車の導入効果

6.1 運搬作業の効率化による工期短縮

鉄道営業線工事では、き電線やトロリー線などの鉄道施設に接近する恐れのある揚重作業などを行う場合、き電停止後に作業を開始しなければならないが、軌陸式重量物運搬台車によって揚重作業を必要としない軌道内搬入が可能になり、停電を待たずして線路閉鎖後に運搬作業を開始することができる。京急蒲田駅付近連続立体交差事業第2工区では、モーターカー運搬による往復時間が線路閉鎖時間内に行なわれるため、夜間作業での作業時間が拡大され、運搬作業の効率化が図られている。また、他工区の工事や保線作業によってモーターカーによる運搬ができない場合や、作業状況に応じて運搬することにより効率化が図られている。

6.2 運搬に係わる環境負荷低減

軌陸式重量物運搬台車の導入による環境負荷低減について検討するため、部材を運搬する際に消費する燃料をモーターカーと軌陸式重量物運搬台車について京急蒲田駅付近連続立体交差事業第2工区の条件下で比較する。検討に際し、比較するモーターカーのエンジンの最大出力を 290ps とし、燃料消費量を最大出力 290ps のディーゼルエンジンに相当する 12.5ℓ/h と



写真-2 地上走行による軌道内搬入



写真-3 直接高架施工機による荷おろし

した。また、軌陸式重量物運搬台車の燃料消費量は搭載した発電機(デンヨーDCA-13SPK)の75%負荷時燃料消費量である9.2ℓ/hとした。運搬距離(片道)はモーターカーが7km、軌陸式重量物運搬台車が600mであるが、走行速度が異なるため運搬所要時間はモーターカー、軌陸式重量物運搬台車ともに片道で30分とした。表-3にモーターカーと軌陸式重量物運搬台車の燃料消費量を比較したものを示す。表-3の結果からモーターカーに比べ軌陸式重量物運搬台車が片道の運搬1回につき軽油1.7ℓ、往復の運搬1回につき軽油3.3ℓの燃料消費量を低減することがわかる。

表-3 燃料消費量による比較

運搬機械	時間あたりの燃料消費量(ℓ/h)	運搬距離(km)	運搬所要時間(分)	運搬1回(片道)の燃料消費量(ℓ)
モーターカー	12.5	7.0	30	6.3
軌陸式重量物運搬台車	9.2	0.6	30	4.6

次に、周辺環境影響低減効果について比較するため、部材を運搬する際に発生する騒音について検討を行った。表-4にモーターカーと軌陸式重量物運搬台車を使用して部材を運搬した際に測定した騒音測定結果を示す。騒音測定はアイドリング時と軌道走行時の2つの条件で行った。

表-4よりアイドリング時ではモーターカー、軌陸式重量物運搬台車ともにほぼ同じレベルの騒音であるのに対し、軌道走行時における騒音はモーターカーよりも軌陸式運搬台車が5dB低い。騒音レベルが5dB増加すると音の強さは約3倍に増えるとされている。²⁾

表-4 運搬時の騒音測定結果

	アイドリング時	軌道走行時
モーターカー	75.3 dB	80.9 dB
軌陸式重量物運搬台車	75.7 dB	75.9 dB

5. おわりに

平成18年3月から京急蒲田駅付近連続立体交差事業第2工区に軌陸式重量物運搬台車を導入し作業時間の大幅な増大により、現場の生産性向上、工期短縮、環境負荷低減などに効果があることを確認することができた。得られた知見などを基に軌陸式重量物運搬台車の更なる改良を行い、多種多様な工事において生産性の向上や効率化を行える機械として成長させていきたいと考えている。また、当事業の運搬以外の工種でも様々な工夫を行い、今後も工事の効率化や安全性向上を目指していく所存である。

最後に本装置の開発・製作・導入にあたり、ご協力いただいた京浜急行電鉄㈱の関係各位に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 井藤幹雄, 荻原克巳, 平井幸雄: 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, 平成16年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.219-222, 2004
- 2) 五十嵐隆重: 自然災害・公害対策技術シリーズ No.1 騒音・振動, 白亜書房, pp20-28, 204

2.2. 水無川における鋼製スリットの無人化施工

株式会社 フジタ
中村 好典

1. はじめに

平成2年に雲仙普賢岳の噴火活動が再開し、頻発する火砕流・土石流により、水無川流域に壊滅的な被害を与えた。この復興のために、無人化施工技術を採用した砂防えん堤や導流堤等の砂防施設が下流より順次整備されてきた。しかしながら、水無川流域には、未だ1億7千万m³もの火山堆積物が不安定な状態で存在しており、土石流氾濫による下流地域への被害を防止・軽減するために、さらに上流部における砂防設備の整備が必要となっている。本報告は警戒区域として指定されている水無川・赤松谷川の合流地点の赤松谷川側に部分透過型鋼製スリット砂防堰堤を無人化施工により建設した施工結果についてである。

2. 工事概要

水無川流域の砂防事業では、水無川1号及び2号砂防堰堤に続き、その上流に位置する水無3号において部分透過型砂防堰堤の建設が行われてきた。部分透過型（鋼製スリット）砂防堰堤は、越流部に格子状の切れ目（スリット）を設けることにより、小規模な洪水の際に流下する土砂は、スリットの間を透過させ、大規模な土石流の発生の際に、巨石・巨木を拘束することに優れた砂防施設である。本工事では、RCC工法（Roller Compacted Concrete）で築堤された越流部の延長120m区間に19基の鋼製スリット（8t/基）を設置し、高流動コンクリートで根固めした（図-1）。

工事名称：赤松谷川1号砂防えん堤スリット工事
工事場所：長崎県島原市南上木場町地先
工期：H16年9月22日～H17年11月30日
発注者：国土交通省 九州地方整備局 雲仙復興
工事事務所

工事内容：B型鋼製スリット 19基

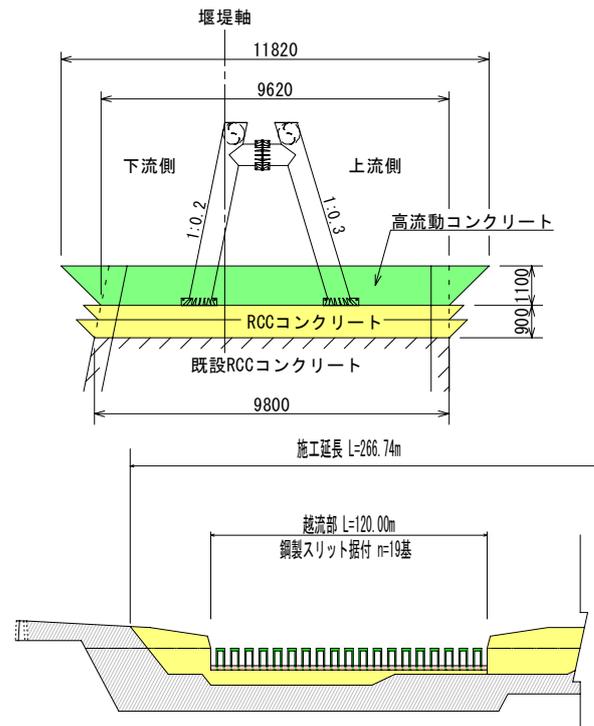


図-1 標準断面図及び平面図

3. 施工及びシステム概要

3-1 鋼製スリット砂防堰堤の施工

基礎下層部のRCCコンクリートをスリットの据付面高さまで打設完了する(①)。無人測量システムにより鋼製スリット据付位置へのマーキング及び据付面の基準高さを計測する(②)。鋼製スリットは工場で作られた二次製品とし、有人区域にて組立・仕上げ塗装を行う(③)。鋼製スリットの運搬は改造した65t級の重ダンプによって行う。専用把持装置を装着したバックホウで、日に2基のスリットを据付けた後、左右岸方向の妻型枠の設置、上下流の土砂型枠整形を行う(④、⑤)。翌日1ブロックで約146m³の高流動コンクリートを打設する(⑥)。高流動コンクリートは有人区域で専用運搬機械に積替えられ、遠隔操作にて運搬、専用ポンプ車で打設する。このスリット据付・コンクリート打設を1サイクルとし、これを10回繰返し施

工する（図-2）。

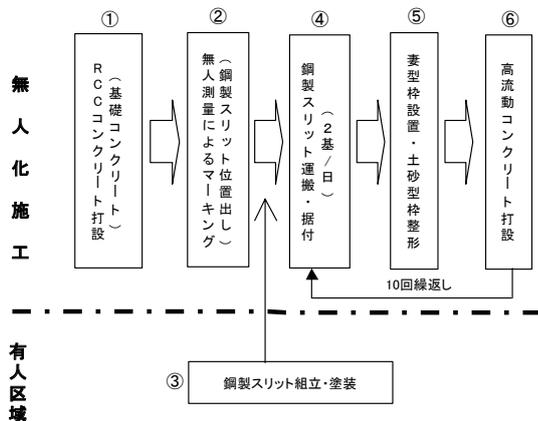


図-2 鋼製堰堤工施工フロー

3-2 遠隔出来型管理システムの導入

本工事では、入札時に測量業務に関する技術提案を行っており、その1つに「施工管理に伴う測量の無人化」を提案した。それには従来の無人測量システムによる日常施工管理に加えて、鋼製スリットの据付出来形測量を無人化することが含まれていた。これに対し鋼製スリット天端に取り付けたターゲットシールの測距測角情報を操作室で取得し、出来型管理を実施する手法を試みた。ターゲットシールにはトンネル断面計測等に使用される反射シート（70×70mm）を採用した。ターゲットの視準状況を確認できるように自動追尾型光波測距器の視準窓に CCD カメラを装着し、光波測距器の視準画面を操作室のテレビモニター確認できるようにした（図-3）。

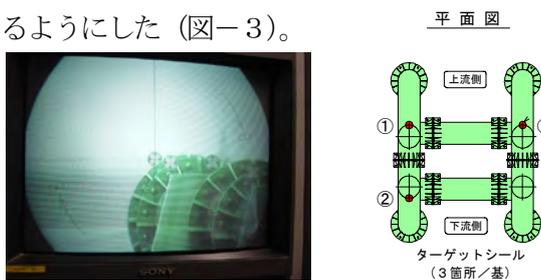


図-3 視準画面及びターゲット取付位置

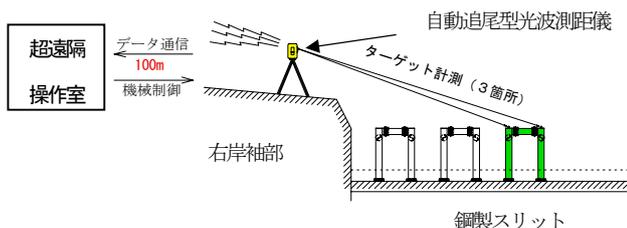


図-4 据付出来型管理システム概念

また、カメラ付光波測距器の遠隔制御と計測情報及

び誤差量の定量的取得に必要な管理ソフトを製作し、操作室内において光波測距器の遠隔制御及びスリットの出来型管理を可能とした（図-4）。

自動追尾光波測距器をスリット上下流リブ継目の通り上に据付けて、CCD カメラ取付ける（①）。光波測距器の視準窓には照準を合わせる十字線が設けてあるため、リブ継目の通りと十字縦線を合わせることでスリットの上下流の位置を決めることができる。次に無人測量システムによって予め位置出し測量をしておいたスリット脚部のマーキングに合わせてスリットを据付ける（②）。スリットリブ継目と合わせていたカメラ付光波測距器を遠隔操作し、各ターゲットを計測、データを操作室パソコンへ転送（③）、設計値との差異を算出する（④）。差異が規格値内に収束するまで②～④の操作を繰返し、スリット据付を完了する（図-5）。

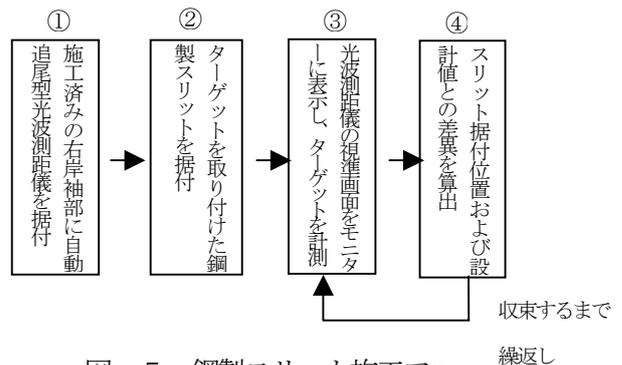


図-5 鋼製スリット施工フロー

4. 施工結果及び経過

4-1 スリット据付精度及び問題点

水無3号堰堤のスリット施工で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据付作業を行っていたため、据付完了が観念的な判断によるところが大きく、施工に時間を要していた。今回は光波測距器の十字縦線とリブ継目の通りとを合わせることでスリットの上下流位置を決めた上で、マーキングに合わせてスリットを据付けることができたことによりマーキングのみの据付作業に判断基準がもう1つ付加されたことで、作業時間の短縮が図れた。遠隔出来型管理システムの導入で誤差量の定量的な取得が可能となり、据付精度において規格値±100 mmに対しておおむね±30mm 以内の結果が得られ、据付作業の施工性を向上できた（表-1）。

表一1 スリット据付精度

測定項目		測定値		
		最大値	最小値	平均値
位置 (mm)	左右岸	47	0	4
	上下流	42	6	16
基準高 (mm)		-31	0	-5

スリット据付出来型管理に活用したシステムは精度面において一定の成果が得られたが、施工性・操作性・汎用性に関して以下に考察を述べる。

(1) 同形状のスリットとターゲットが並んでいる為、施工が進むにしたがって視準しているスリットが何基目であるかの判別が難しい。これに対してスリット 1 基ごとに番号をつけることでそれぞれのスリットが判別可能となる。それだけでは距離の離れたスリット番号認識はできないことからピント調節の可能な CCD カメラを採用とカメラのピント調節に関する制御を新たに追加する必要がある。

(2) ターゲット中心に照準を合わせるまでに、移動角度の大きい角度でおおよその位置合わせをした後に徐々に旋回角度を細かくすることで最終的に中心に照準を合わせてきた。この手法に特に熟練度は必要ないが、パソコンを十数回操作する煩雑さが伴う。しかし予め据付位置の設計座標が明確な場合においては、その座標まで光波測距器を自動誘導させる機能を付加することで操作性が向上する。

(3) CCD カメラ映像の転送が光波測距器から操作室まで有線であることから、適用範囲に限界がある。有線部を無線化することで、見通しが確保できる範囲では光波測距器の視準画面を取得できる。例えば、無人測量システムで光波測距器の視準画面が確認できれば、計測データにより信憑性が得られることが予想される。

4-2 ステレオ写真測量技術の導入

スリット施工部と土砂型枠材等の工事に必要な土砂採取エリアの着工前現地測量を実施する必要があった。しかし採取エリアに指定された水無 3 号堰堤上流部は未だに土石流の痕がそのままの巨石の多い荒地で、ある程度の機動力を備える無人測量システムであっても立ち入りは困難で、現況地形の測量を開始するためには、重機が走行できる程度の事前整地が必要であった。それ以前に、遠隔操作室を含め多くの無人化設備

の立ち上げが不可欠であり、これにはある程度の時間がかかることが想定されていた。これらの不具合を補完するため、「ステレオ写真測量」を概要現況地形データの取得という位置付けで導入した。写真測量とは座標の既知である基準点に対空標識などのターゲットを設置して写真に写し込み、写真上のポイントとその地上での 3 次元座標値を解析することにより撮影位置、撮影方向を求める非接触式計測手段である。これにより、後の無人測量システムによる詳細測量の着手範囲を決定した。

人は左右の網膜上に移った実像によって樹木先端の角度と根元の角度を認識する。これらの情報と眼基線によって樹木の立体形状を把握する。樹木の大きさは、経験上既知の大きさの物体と比較し、その大きさを比較想像する。例えば車や屋根の高さと比較すると樹木の大きさが想像できる (図-6)。

人の左右の目をカメラに置き換えたのが写真測量である。人は同時に左右の目で実像を捉えるが、カメラの場合は撮影基線長 B だけ移動して同じ対象を撮影し、2 枚の画像から画像解析により立体化することになる。画像に写った対象の中に座標の既知点を設ける代わりに既知の大きさのもの、例えば、測量用スタッフであっても、スケールを決定することができる。

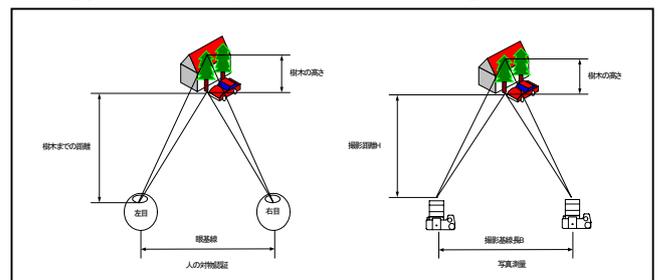


図-6 写真測量の原理イメージ

撮影対象の土砂採取エリアに座標の既知である基準点を設定し、対象をある撮影基線長だけ離れた位置からデジタルカメラで撮影する (①, ②)。解析ソフトに取込んだ 2 枚の画像に対し、標定と呼ばれる相互対応点(パスポイント)の指定を行う (③)。画像処理により、3 次元モデルを自動計測する (④)。出来上がった 3 次元モデルは任意断面図、等高線図、面積計算等、必要に応じた成果として表現できる (⑤) (図-7)。

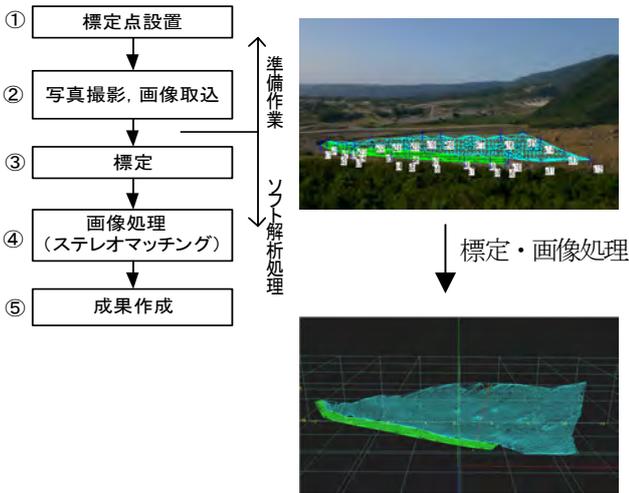
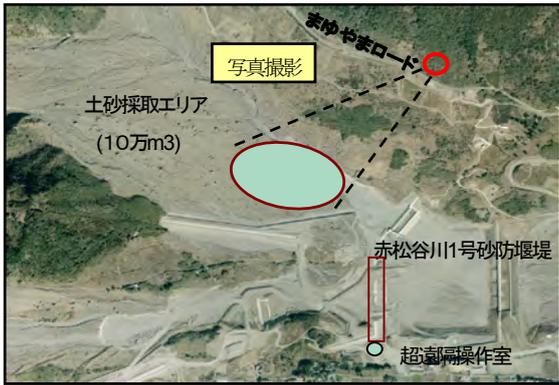


図-7 写真測量フロー 成果(3D)モデル

5-2 ステレオ写真測量施工経過

写真測量で作成した3次元モデルの現況断面図と無人測量システムで計測した地形断面図を基に土砂採取エリアの土量を算定し比較すると、実際の土量に対して写真測量から求められたものは10%程度大きかった。ただし、無人測量システムによる断面図は、転石や大きな段差を無くして重機の走行が可能な状態の地形データである。2つの手法で得られた断面を比較すると、撮影距離の短い水無川側の法肩付近は、写真測量結果と無人測量結果で近似した地形データが得られている。一方で撮影距離が長い背割り堤側では、高さ方向に大きな違いがある。地形の勾配についても、写真測量では表現できていないことがわかる。

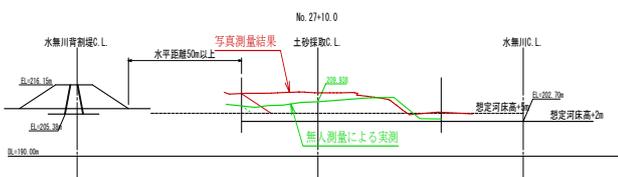


図-8 断面図の比較

土砂採取エリアの地形解析をするにあたって、計測範囲全体を撮影した。このときの撮影距離が450m～700m程度で、撮影基線長は撮影距離に対して1/5～1/3が理想であることから撮影基線長は150m程度に決定した。この撮影条件で奥行き方向の地上分解能を算出すると540mm～1330mm程度となる。全景を撮影したため、写真全体のうち計測対象範囲が占める割合は約1/5と小さくなった。その結果、特に奥行き方向に誤差は顕著となり、撮影位置から遠いエリアでは誤差が大きく、撮影位置から近い箇所は比較的良好な結果となった。

奥行き方向の誤差を低減させるためにはなるべく高い位置からの撮影が理想的である。しかし、水無川流域において対象エリア全体を高い位置から撮影するための撮影位置は限られている。また、水無川流域での工事が上流部に移っていくにつれ、着工前測量に適した撮影位置を確保することが困難になることが予想されることから、条件を満たす撮影手法は航空写真の活用が考えられるが、飛行方法、基準点の形状や設置方法等の課題について検討する必要がある。

6. 終わりに

新たな測量技術としてステレオ写真測量技術を補助的に展開し、土砂採取エリアの概算地形計測を行い、採取可能土量と詳細測量の着手範囲を決定し、土砂採取計画を立てる上で事前整地する範囲を無駄なく定めることができた。遠隔操作による無人化施工技術とともに無人測量システムやGPSを使用した工事管理に必要な測量技術も進歩してきた。雲仙普賢岳における砂防事業は、より危険な上流警戒区域の施工を計画している。それに伴い求められる技術の水準も高まると予想されることから、計測・制御に関する技術のさらなる向上を目指し無人化施工への適用範囲拡大に努めていく必要がある。

23. 新潟県中越地震による災害廃棄物処理の実際と提案

佐藤工業株式会社 事業開発本部 環境事業部
石橋 稔
○ 鈴木 茂生

1 はじめに

大規模地震発生時には、災害発生直後から、各種の災害廃棄物が突発的かつ大量に発生する。これら災害廃棄物については、崩壊等の2次被害や、腐敗等衛生面で問題となるため、早急な処理・片付けが必要となる。

しかし、過去の震災における処理、また水害廃棄物の処理を概観すると、それぞれ被災後の混乱状況下で対処されていることもあり、災害廃棄物を処理する過程で、仮置場の不足や、単純な廃棄物の撤去・処分を選択により生じる不適正・非効率・高コスト化など、いくつかの課題が浮かび上がってくる。

ここでは、新潟県中越地震における災害廃棄物処理に関して、長岡市の被災家屋処理の過程で実施した集積場管理業務を中心に処理内容の紹介するとともに近い将来予測される首都圏直下型地震における課題への対処策について言及したい。

2 長岡での災害廃棄物処理の実際

2-1) 新潟県中越地震の概要

平成16年10月23日に発生した地震は長岡市を中心に大きな被害をもたらした。マグニチュードは6.8に達し長岡市内では最大震度6強を記録した。死者14名、重・軽傷合計2,276名。住居被害は全壊1,546棟、半壊・一部破損合計58,362棟。河川の崩壊、崖崩れのほか、道路、電気、水道など市民生活のライフラインに大きな被害を与えた。11月26日の閣議決定により「平成16年新潟県中越地震による災害」として激甚災害に指定された。

2-2) 災害廃棄物処理経緯

地震による被災家屋の解体廃棄物は長岡市の一般廃棄物処理実績(H15:87,373t 旧長岡市分)の数倍が見込まれた。長岡市では被災直後より仮集積場におい

て被災家屋等災害廃棄物の受入を開始していた。これに対して、その被害の大きさから、適正処理の確保とリサイクル率の向上、作業環境管理、安全管理並びに事業費低減の観点から、仮集積場の拡大と当該場所における破碎・選別作業等の提案を行い、簡易プロポーザルを経て災害廃棄物処理業務委託を受けている。

2-3) 提案のコンセプト

提案に際し、災害廃棄物の発生現場から処理・処分に至る処理系統全体を見渡し、その上で、処理の要点としては、なるべく可能な限り排出元となる場所やその近傍の現場における分別の実施・徹底を図ることが重要と考えた。

選別手間はその作業自体はコストの増大となるが、適切にそれら選別作業を実施することで、近在の自治体等の焼却施設で処理可能な可燃物の取り出しや、金属等有価物の回収、発電ボイラー等サーマルリサイクル施設への利用など、処理コストの低い施設での処理量を確保することとなり、また、輸送距離の短縮化と輸送効率(廃棄物の見掛け比重が、選別により大幅に上がることで輸送効率が向上する)の向上などにより、処理事業全体の費用を大幅に削減できることとなる。

また、最終処分場に搬入する混合廃棄物量の大幅な低減により、残余量が限定される最終処分場に対する負荷の低減とともに、被災地の輸送経路の混乱回避、周辺地域への排出ガスや騒音等を抑制できる。

以上より、廃棄物分別の徹底を目的とした計画を行った。

表-1 徹底分別の目的

・リサイクル率の向上	} 結果として処理コストの低減
・運搬効率の向上	
・最終処分場の負荷低減	

2-4) 廃棄物集積場

被災現場で最低限に分別された震災廃棄物を集積場

に搬入した。集積場における作業を以下の表に示す。

表-2 集積場での作業

トラックスケールによる搬出入の重量管理
重機、手による更に細かな分別
破碎機による破碎中間処理
ふるい機による選別中間処理
大型車両への積み替え
適正処理施設への分配
特定廃家電、処理困難物の集積

運搬効率の向上と渋滞緩和のために、商品価値の高い長尺木材、コンクリガラ及び鉄骨など金属類は被災現場から直接リサイクル業者へ搬送した。

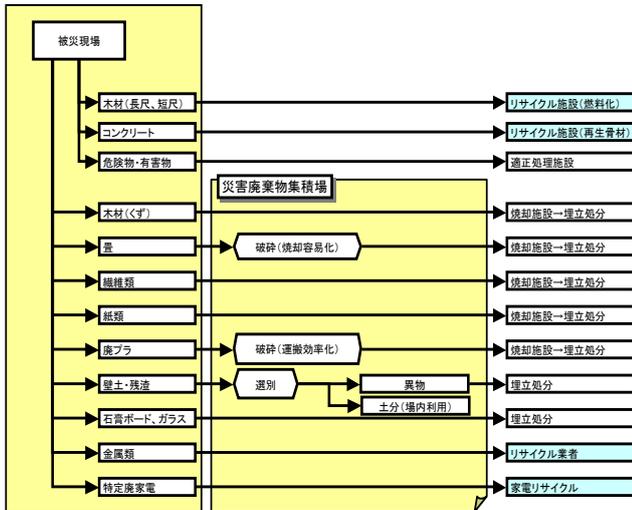


図-1 処理フロー図

集積場の全景写真を示す。総面積は約4ha、分別品目に合せて細かく区画を仕切って使用している。



図-2 集積場全景写真

2-5) 機械設備

■ 破碎設備

集積場では軟質系廃棄物に向け2軸の自走式破碎機を導入した。

プラスチック類は形状の自由さから我々の生活で多用されており、廃棄物量としても多いものとなる。これらプラスチック類は、積み込み時の空隙が非常に多く、また重量が軽い。このため、運搬に当たっては、車両の輸送効率が積載体積に左右されてしまう。運搬

作業では、車両の能力を生かしきれないこととなる。破碎することにより体積を約25%（実績値）に減容することで、運搬効率の向上が図れる。

なお、埋立処分の際に空隙が多いものは、実際には受け入れ拒否又は処分費用を割高に設定している場合もあり、そうした場合、破碎処理がおのずと必要とされてくる。



図-3 破碎機稼動状況(廃プラ)



図-4 破碎機稼動状況(土)

土に関しては、土が腐敗して悪臭を発生するうえに、最悪の場合、発酵熱によって発火する危険性もあり早急に場外に搬出する必要がある。また全体の処理コスト低減のために出来るだけ公共の処理施設を使うこととなるが、湿潤な土をその形状のまま焼却炉に直接投入したのでは、燃焼性が低く、不燃焼物が多く残ってしまう。そのため投入前処理として破碎が必要となるが、公共の焼却処理施設では、適当な破碎設備が備えられているケースは少なく、場内での破碎となる。

■ 選別設備



図-5 ふるい機稼動状況

中越地震における災害廃棄物では、住宅の構造上、壁土や解体残渣など土砂と異物との混合物が多く発生した。これらは土が大部分であるため焼却が出来ないうえ、腐敗が生じる有機物を含むために処分費用が高む管理型処分場に処分することとなる。

そこで集積場にふるい機を導入し土分と異物との篩い分け作業を実施した。篩い分けた土分(約70%)は場内の整備等で利用し、異物を処分場に搬出した。

3 中間処理の経済性

破碎機等設備を導入することは、処理費用を一時的に増加させると捕らえがちである。しかし、選別により廃棄物の運搬や処理方法を転換することで、事業費の総額で見ると、コストが削減できることが多い。以下に具体例で説明する。

■ 前提条件

表-3 前提条件

処理対象物	廃プラスチック 1,000(t)
比重	0.1 ↓ (10,000m ³)
8m ³ コンテナ車	42,000 (¥/台/日)
破碎機損料	7,500,000(¥/月)
破碎機処理能力	5(t/h)
稼働時間	6(h/日)
最終処分費用	23,257(¥/t)・・・空隙多
最終処分費用	15,907(¥/t)・・・空隙小

■ CASE-1 : そのまま処分

10,000m³の廃プラを8m³ごと搬出すると必要な台数は、10,000÷8=1,250(台)

42,000 (¥/台/日)のコンテナ車を一日2回転させると、1,250×42,000÷2=26,250,000(¥)・・・①運賃

処分場費用は、

1,000×23,257=23,257,000(¥)・・・②処分費用
よって合計は①+②=49,507,000(¥)・・・③合計

■ CASE-2 : 場内で破碎

処理能力と稼働時間より一日の処理量は30(t/日)
1000 tの廃プラを破碎するには1,000÷30=34(日)
月当たり7,500,000(¥/月)の機械を34日稼働すると、

7,500,000×34÷25=10,000,000(¥)・・・④破碎費用
実績から破碎処理により容積は25%に減る。
10,000m³の廃プラは2,500m³に減容される。

ケース1と同様に運搬費用は
2,500÷8=313(台)

313×42,000÷2=6,562,500(¥)・・・⑤運搬費用
処分費区分が変わり低価格の区分が適応される。

1,000×15,907=15,907,000(¥)・・・⑥処分費用
よって合計は④+⑤+⑥=32,469,500(¥)・・・⑦合計
以下に計算結果を表にまとめて示す。

表-4 破碎機の経済効果概算

	CASE-1	CASE-2
運賃	26,250,000 ……①	6,562,500 ……⑤
最終処分費	23,257,000 ……②	15,907,000 ……⑥
破碎費用		10,000,000 ……④
合計	49,507,000 ……③	32,469,500 ……⑦

以上より、場内で破碎したケースでは、そのまま処分するケースと比較すると、約1/3の費用低減が可能である。併せて燃料費が高騰する近年においては破碎による運賃抑制の効果は更に高まる。

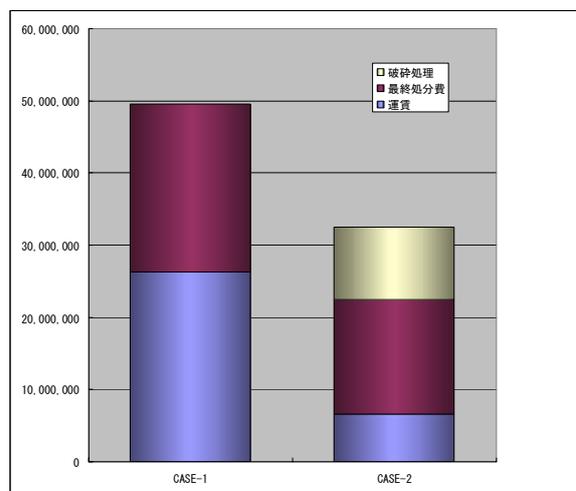


図 6 破碎機の経済効果グラフ

4 首都圏震災に備えて

近い将来、首都圏で大規模な震災が起こることが予想されており、これに対して、様々な自治体・研究機関から被害想定や復興プランが発表されている。その中ではいずれも数千万トン単位での災害廃棄物が発生すると予測されている。このような大量の廃棄物を、単純に焼却・埋立を行うのでは、最終処分場を抱える地域からの協力を得ることは難しい。

そのようなことに陥らないためにも事前の準備が必要である。

4-1) 機器類の手配

廃棄物処理には多くの機器・設備類が必要である。これまでの大規模災害事例から見た現場選別の要点を以下に記す。

- 搬出・処理先の受入状況に合せた廃棄物を選別する。…受入先施設の処理対象物・形状・処理能力
- 重機作業による粗選別（一次選別）後、定置式選別ラインによる二次選別。

表 5 選別の流れ

一次選別	重機作業	大物・大まかな選別
↓		
二次選別	定置式選別ライン	処理能力、処理精度の確保



図 7 重機（マグネット）と人力併用の一次選別作業

- 二次選別設備の組み合わせ。

あらかじめ廃棄物の量・性状を想定し、次工程受入先の条件を踏まえたうえで、適正な機材類を近郊等から調達する協定をあらかじめ結んでおく必要がある。特に破碎機は対象物に適した形式でないと能力を発揮できない。

表 6 二次選別ラインの構成

破碎機	処理対象物を取り扱いやすくする＝処理能力を高める。機械作業を可能にする。
ふるい機	付着・混在土砂（＝埋立物）の分離、径による分級
磁選機	鉄類の回収
人力ピックアップ	多様な選別に対応
搬送ベルトコンベア	処理能力を高める。場内作業を整理する。

4-2) 土地の手配

災害廃棄物を処理するためには、被災地から廃棄物を集積し中間処理を行うための土地が必要である。

現状の防災計画では住民の一時避難、仮設住宅などの防災公園的な計画はなされているが、復興に向けて廃棄物処分のための土地に関する取り決めは見受けられない。

実際には、市内に存在する住区基幹公園、都市基幹公園及び大規模公園、緩衝緑地帯、国営公園などを統括する行政の縦断的連携を考慮した計画が重要である。また、企業所有地の供出に関して、事前協定なども望まれる。

4-3) リサイクル技術の確立

廃棄物は「混ざればゴミ、分ければ資源」である。特に災害時には大量の廃棄物が集まってくる。

現在の技術では不純物の混在、量・質の不安定さなどからリサイクルが活発に行われていない物品であっても、安価に一定量以上の供給が想定できればリサイクルが復興ビジネスとして成立する可能性がある。

4-4) 処理施設設置届出など手続きについて

災害処理という緊急時において、中間処理施設設置に関して許認可の審査が迅速に行われることが必要である。

さらにリサイクル施設の準備に関して財政援助、税的優遇などのインセンティブが与えられるよう、各種の法的整備が望まれる。

5 最期に

新潟県中越地震での経験が、首都圏震災の際に有効に生かされ、復興の一助となれば幸いである。

24. 早期地震警報による工事現場の地震時安全性向上

鹿島建設株式会社横浜支店安全環境部 ○柳瀬 茂樹
 同 機械部 水谷 亮
 同 横浜支店建築部 永田 鉄也

1. はじめに

建設会社にとっては、建設現場での社員・作業員の安全確保は事業・生産活動の基本であり、日常的な作業の安全確保だけでなく、地震などの突発的な自然災害に対しても十分な配慮が求められている。

地震発生後、出来るだけ早くその情報を捉え、地震波の速さと情報伝達の速さの差を利用して、地震の揺れが対象地点に到達する前に揺れの到来を伝達できれば地震災害の低減に寄与出来るとの考えで、当社では1993年に『地震情報の直前検知・伝達システム』¹⁾を構築し、運用してきた。同システムは、東海地震を想定し、下田・伊東・真鶴・葉山・赤坂に地震計を設置し、いずれかの観測点で地震を検知した場合に現地でP波から震源位置・規模を即座に推定し、その情報をINS回線網(パケット通信)によりセンターに通報し、そこから更にポケベルや音声発生装置を通じて警報を発するもので、気象庁が構築している緊急地震速報システムの地域限定版とその先の警報伝達までを含めた統合的な試みであった。一方、本年8月より気象庁から緊急地震速報が、利用範囲が限定的で混乱なく利活用できる分野に絞って

先行提供が開始された。当社では2004年度からの試験運用の段階からこの緊急地震速報²⁾を使用し、独自の『鹿島早期地震警報システム』を構築した。

本システムの適用により、地震の大きな揺れが来る前に地震の到来を伝え、地震に対してより一層安全な建設現場を実現でき、BCPの一手段として有効であることを実証した。本稿では、本システムの概要、現場適用事例とその効果について報告する。

2. 鹿島早期地震警報システムの基本構成

気象庁の緊急地震速報は全国で起きる地震の発生時刻・震源位置・規模の情報で、特定の対象地点での『震度〇〇が〇〇秒後に来ます』という情報ではないので、ユーザーは距離減衰式を利用してこのような情報を得ることが一般的である。

当社では、震源位置・伝播経路・地盤条件等を考慮して距離減衰式よりもより高い精度で、特定の対象地点の予測震度及び予測到達時刻を推定する手法³⁾を用いて計算を行い、その結果を通報している。

この予測結果を利用して、各種警報・制御信号を出すことも、本システムのもうひとつの役目である。

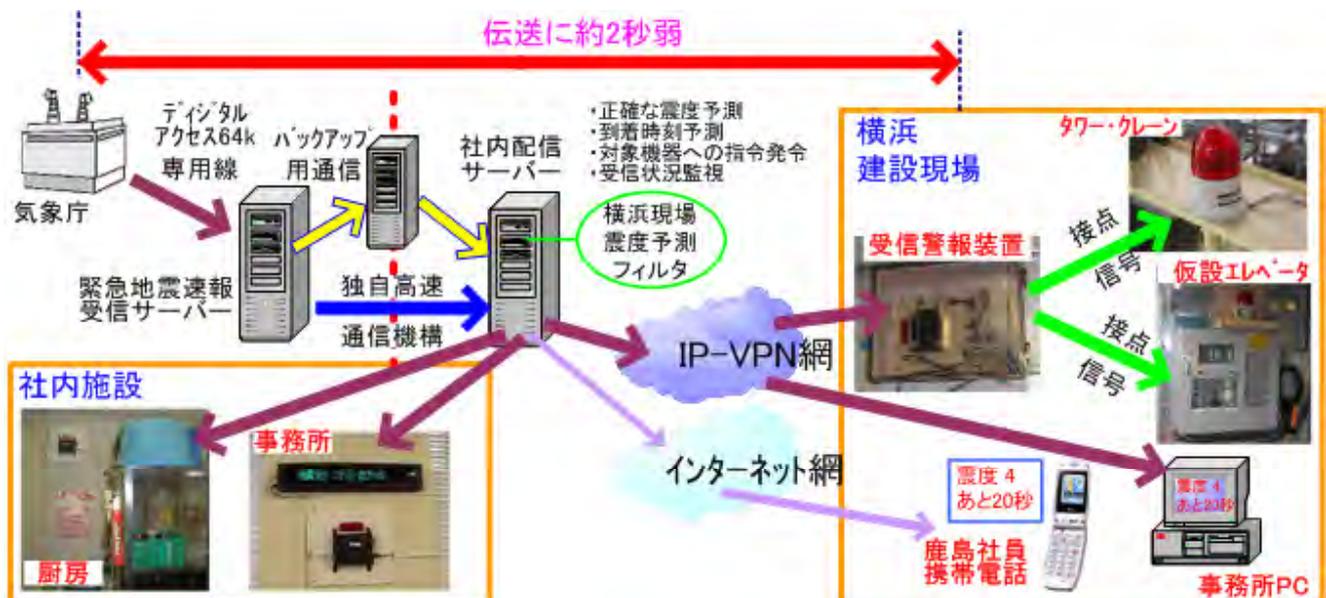


図1 鹿島早期地震警報システムの構成

利用にあたっては、いかに早く正しい情報を伝えるかが重要であるため、気象庁から専用回線で情報を受け取り、全国に展開されている社内 LAN を利用するシステムとしている。速報受信側（本社）での機器構成は以下の通り（図1 参照）。

- ・ 緊急地震速報受信サーバー
気象庁からの緊急地震速報を直接受信し、社内 LAN 内に送信するサーバー
- ・ 社内配信サーバー
社内 LAN 側で緊急地震速報を受信し、各適用地点に応じた予測震度・予測到着時刻を解析し、必要な情報・指示を配信するサーバー

なお、社内 LAN 内のセキュリティを確保しながら高速化が図れる独自通信機構を構築している。

3. 情報（警報）伝達

本システムでは、目的に応じて次のような各種の情報（警報）が社内 LAN を通じて伝達されている。

- ① 各種警報・制御信号
各警報機器（回転灯・ブザー・電光掲示板等）毎に起動レベルを設定して警報パケットが送られる。なお、各機器はパケットを受けて実際に起動させる多点の接点信号・RS-232C 信号に変換する受信警報装置（ブザー・フラッシュ付、常時接続監視を実施）を介して起動される。
- ② 予測震度・到着時間情報
警報を伝達された側の管理者には、パソコン用ソフトと携帯メールによる情報伝達を行う。
- ③ 気象庁の緊急地震速報
総務部門・研究部門等の、全国の地震情報を知る必要がある部署に対して、気象庁の発信する全ての緊急地震速報を伝達している。

4. 適用対象

緊急地震速報の具体的な適用を図るため、以下を対象に試験的な適用を実施している。

- ①本・支店内での地震情報共有を目的とした緊急地震速報の伝達
- ②技術研究所内での危険回避を目的とした警報伝達

③建設工事現場での危険回避を目的とした警報伝達 （三つの超高層マンション建設現場）

このうち③の建設現場の適用事例として、本稿では横浜にある超高層マンション建設現場（写真 1）を紹介する。

4.1 適用現場

当現場では建築資材の揚重用のタワークレーン（株小川製作所 OTA-450A、以下 T/C と略記）と工事用エレベータ（株サノヤス・ヒシノ明昌 HCE-20D50/70、以下、工事用 EV と略記）に利用されている。いずれも、地震時の安全に関しては、事前に十分な検討を行っており、さらに法的規制の下に厳重に管理されているため、基本的には地震が起こっても安全である。

しかし、T/C で揚重されるプレキャスト部材や鉄骨部材は数トンの重量物であり、これらの接触による既存建物の損傷や落下の危険性は否めない。また、吊り荷を扱う現場作業員が、揺れた吊荷によって飛ばされたり、挟まれたりすることも懸念される。

工事用 EV については、本設とは異なり、地震時管制運転装置が付いていないので、地震時に揺れを感じてオペレータが非常停止を行なうと、急激な停止による衝撃や、それに伴う機器損傷の恐れ・復旧の遅延、作業員の閉じ込めの懸念がある。

また、現場作業員は、仮の床や組まれた鉄筋の上、あるいは、未固定の柱・梁上等、不安定な場所で作業していることが多く、安全措置を施しているとは言っても、地震による大きな揺れにより転倒、転落するということも想定される。



写真 1 現場全景

早期警報を出すことで、これらの危険を回避することが出来れば、建設現場の安全確保に大きな効果があると考え、適用を試みた。

4.2 早期地震警報の利用方法

適用例では、早期地震警報システムを利用して、震度3以上での警報利用(図2)を行なっている。工事現場での事故等が懸念されるのは震度5強以上であるが、その頻度は数年に1回以下であり、通常の建設工事現場では1度も経験しない恐れがある。そこで、試行的な意味も含み、本適用では年数回の頻度が想定できる震度3で警報が発令されるように設定して、発報回数を増やしている。

4.2.1 タワークレーン

図4に接続概念図を示す。システムからの警報信号をT/Cオペレータの手元に設置されたブザー付回転灯を写真2)に送り、音と光により地震波の到来を知らせる。オペレータは建物最上部で作業中の鳶工・鉄筋工に無線(常時接続)で伝達、当該工はそれを周囲に伝達して危険回避を促す。オペレータは、さらに吊り荷を安全域に退避させる。

4.2.2 工事用エレベータ

工事用EV(写真3)には、制御盤の改造により、システムからの警報信号での最寄り階への自動停止を実現し、大きな揺れが来る前に作業員を降ろし、閉じ込めを防いでいる。

4.2.3 建設現場内各所への警報伝達

システムからの警報信号を建設現場内各所(写真4)に設けたブザー付回転灯に送り、同灯近くの作業者に知らせる。また、現場監督者には、警報が伝達されている理由を伝えるために、携帯電話のメールを利用して、予測震度や予測到着時刻、震源・規模といった情報を伝える(写真5)。

4.3 適用効果

2005年8月末の適用開始後、2006年8月中旬までに、警報信号は現場稼動中あるいは作業後に3回出ている。

2005年10月19日20時44分頃の茨城県沖地震では、現場作業終了後であったが、現場事務所(地上6階)回転灯への警報伝達が行なわれたことが確認され、

→ タワークレーン	回転灯点灯とともにブザー鳴動
↓	
↓ タワークレーン オペレータ	①玉掛者に無線で地震来襲通知、 ②危険回避
↓	
↓ 玉掛者	①周囲の作業者に地震来襲通知、 ②危険回避
↓	
↓ 作業者	①周囲の作業者に地震来襲通知、 ②危険回避
→ 現場内各所 回転灯点灯とともにブザー鳴動	
→ 鹿島社員 携帯電話で地震情報メール受信	
→ 仮設エレベータ ①回転灯点灯とともにブザー鳴動、 ②最寄り階自動停止	
→ 現場事務所 ①回転灯点灯とともにブザー鳴動、 ②必要な行動・連絡	

図2 現場での活用要領

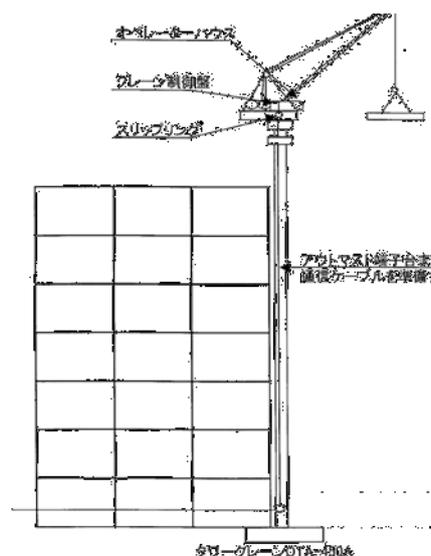


図4 タワークレーン接続概念図



写真2 タワークレーン・オペレータ室の回転灯

警報による点灯後十数秒で揺れを感じたとの報告がされている。

2006年4月11日17時46分頃の房総半島南東沖地震では、作業終了直後でT/Cや工所用EVは停止していたが、警報伝達は確認されている。高層部で作業中の作業員は警報を聞き直ちに周囲に呼びかけ退避することが出来た。感覚的な個人差もあるが、警報後約5ないし10秒で揺れを感じた模様である。なお、気象庁の緊急地震速報発報後約2秒弱で警報は現場に到着している。

2006年8月31日17時18分頃の千葉県北西部の地震は震央が比較的近く、更に震源が深いため発報は地震伝達とほぼ同時であったが、「0秒後に震度3」の警報が出された。

通常の建設工事期間は短いため大地震に遭遇する機会は少ないが、現場では人為的に警報を出しての抜き打ち訓練や、その後のアンケート(図4)を行なうことで、地震時の具体的な行動イメージを現場作業員各自に持たせることを試みている。数回のアンケート結果を見ると、「日頃からの安全通路確保が重要」・「具体的な行動を事前に考えておかないと、突然の警報では意外に動けない」・「昇降階段が少ない・通りにくい」等の意見が出されており、地震での活用以外に作業員各自の安全意識の向上が図れる効果が確認できた。このように早期警報を建設現場に適用することは、現場作業員の地震への備えや日常的な安全対策や防災意識向上という点からの意義も指摘できる。

5. おわりに

気象庁の緊急地震速報を利用して、工事現場への緊急地震警報システムを構築し運用している。現場へ地震情報を迅速に伝えることにより、作業員の安全確保をより一層充実できたと思われる。更に、作業員の安全意識・防災意識の向上への寄与も大きい。今後更に適用現場を増やし、運用を確実なものとしていきたい。

【参考文献】

1) 諸井他：地震情報の直前検知・伝達システムの構築, 第9回日本地震工学シンポジウム, 2281-2286, 1994, 2) 東田：強い揺れが来る前に地震情報を伝達, 地震予知総合研究振興会誌, 10-11, 3, 2006, 3) 神田他：緊急地震速報を用いた震度推定検討, 建築学会大会学術講演梗概集, 21304, 607-608, 2005



写真3 工所用エレベータと操作盤・ブザー付回転灯



写真4 朝礼広場のブザー付回転灯

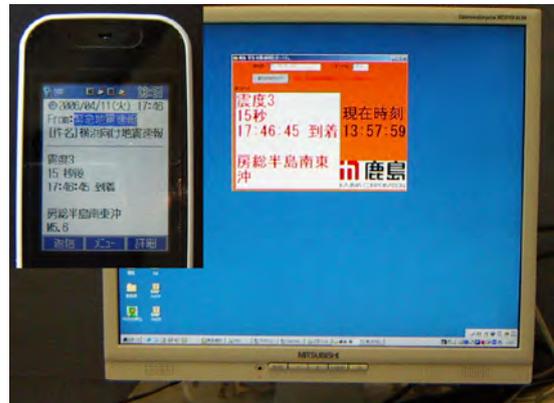


写真5 携帯メールと事務所パソコン画面

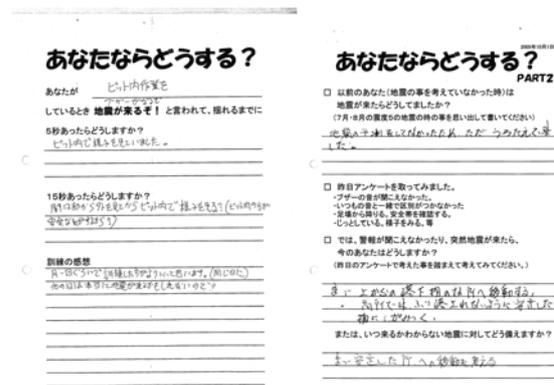


図4 現場でのアンケート例

25. 路面反射音による排水性舗装の排水機能評価手法の開発

国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 機械課長 本間 政幸
機械課 機械設計係長 ○小林 弘朗
機械設計係主任 齋藤 剛

1. はじめに

排水性舗装は、空隙率の高い多孔質な構造により水や空気といった流体を通すことから、雨水を浸透させる排水機能、交通騒音を低減させる吸音機能を兼ね備えているが、その機能も空隙の詰まりにより概ね2~4年後には失われてしまうため、機能を維持するには排水性舗装清掃車による清掃が必要となる(写真-1)。



写真-1 排水性舗装清掃作業

清掃時期や清掃効果の評価においては、清掃前と清掃後に現場透水量を測定し評価を行うが、清掃区間を閉鎖する交通規制が必要な事や現場透水量の測定が多い事など、これら時間がかかる一連の作業に対する効率化が求められている(写真-2)。



写真-2 現場透水量の測定

2. 概要

1 清掃区間の片側車線における現場透水量の測定は図-1に示すとおり、横断方向3ヶ所(OWP:外側車輪位置、BWP:外側車輪位置と内側車輪位置の間、IWP:内側車輪位置)、縦断方向3ヶ所の合計9ヶ所、1ヶ所当り3回測定の平均値を採用するので、清掃前と清掃後を合わせ合計54回の測定が必要となる。

本稿では、清掃作業の効率化を目的として、非接触型で交通規制を伴わない路面反射音を利用した評価手法について検討を行った。

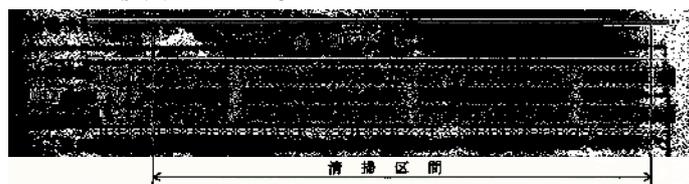


図-1 測定箇所例

3. 路面反射音の計測・評価システムの開発

排水性舗装の機能の一つである吸音機能に着目し装置の開発を行った。

開発コンセプトは以下のとおり。

- ①必要な時にパトロールカーへ容易に取り付けが可能であること。
- ②巡回等でパトロールカーに乗車する人が容易に操作できること。
- ③路面反射音を自動計測し、計測・評価結果を速やかに確認できること。

3.1 音源・受音装置の選定

装置の原理は、音源装置(スピーカー)から音を放射し、排水性舗装面に当たって反射した反射音を受音装置(マイク)で拾い騒音計で測定、「測定路面」となる排水性舗装の反射音と「基準路面」となる密粒舗

装の反射音との差で排水性舗装の空隙状態を判別するものである。各装置の選定は、音源装置の出力、安定性、再現性、指向性と車への搭載性を目的に検討を行った（表-1、写真-3）。

表-1 音源・受音装置の仕様

- 音源装置：ホーンスピーカ（TOA SC-715）
 - ・試験音：ピンクノイズ（200Hz～5kHz）
 - ・入力電圧：2V（RMS）、入力電力：0.5W（8Ω）
- 受音装置：ホーン内埋め込み型（TOA SC-715+ RION NL-06 マイク）
- ホーンの設置高さ：22cm
- ホーンの設置間隔：50cm
- ホーンの設置角度：鉛直下向き（0°）
- 架台材料：鉄・アルミ



写真-3 音源・受音装置

3. 2 計測・評価装置（ハードウェア）の開発

システムの機器構成は、図-3 に示すとおりで、各機器はジュラルミンケースに収納しておき、必要な時にパトロールカーの後部及び座席に設置するようにした（写真-4）。

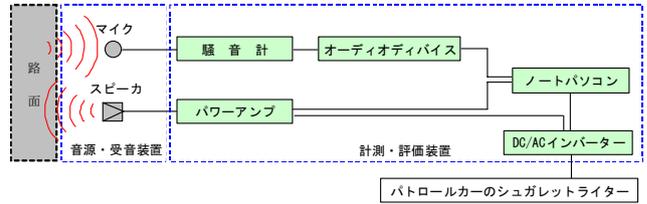


図-3 システムの機器構成図



写真-4 設置状況

音源・受音装置は、図-2 に示すとおり、エンジン停止時、アイドリング時、密粒舗装走行時（10 km/h～50 km/h）において、中心周波数帯域（500Hz～2kHz）での変化がほぼ一致していることから、車体本体から発生する騒音（タイヤ音、マフラー音、エンジン音、風雑音等）の影響を受けないことを確認した。

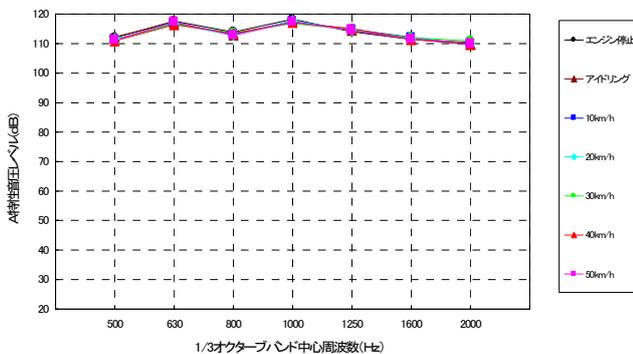


図-2 音源・受音装置の反射音測定

3. 3 計測・評価装置プログラム（ソフトウェア）の開発

3. 3. 1 ソフトウェアの概要

計測・評価プログラムは、排水性舗装の吸音効果を表す「吸音率」を計測・評価するものとした。一般的に入射した音に対する反射しない音のエネルギーの割合を「吸音率」とされているが、現場における正確な入射音の測定が困難であるため、本手法では、密粒舗装を「基準路面」として測定した反射音に対する排水性舗装を「測定路面」として測定した反射音のエネルギーの割合を「吸音率」と定義することとした。

図-4 は、空隙率の異なる排水性舗装（測定路面）の反射音エネルギーから密粒舗装（基準路面）の反射音エネルギーを差し引いた相対レベルを、1/3 オクターブバンド周波数帯分析を行った結果をグラフ化したものである。そこから分かるように中心周波数毎に相対レベルが異なることが分かる。例えば、排水性舗

装 (5mm、23%) では、1000Hz 帯で 3dB、1250Hz 帯で 4dB、1600Hz 帯で 2dB となる。そのため、吸音率の算出は、中心周波数毎の相対レベルのエネルギー平均値により求めることとした (式-1)。

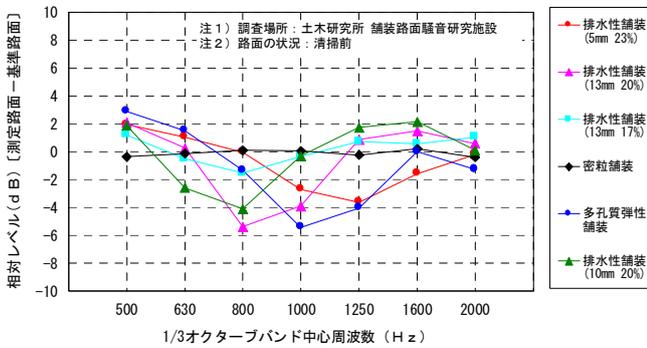


図-4 舗装構造別の吸音効果

$$\alpha = \{1 - 10^{(\Delta L / 10)}\} \times 100 \quad \dots \dots \text{式-1}$$

$$\Delta L = -10 \log_{10} \left[\frac{10^{(-\Delta L_{f1\text{Hz}} / 10)} + \dots + 10^{(-\Delta L_{fn\text{Hz}} / 10)}}{n} \right]$$

α : 吸音率 (%)

ΔL : 計算対象周波数範囲 (f1 ~ fn Hz) の相対レベルのエネルギー平均値 (dB)

※音の「エネルギー平均」の算出方法を利用

3. 3. 2 操作手順と CRT 画面

計測・評価装置プログラムの操作手順は図-5のとおり。計測場所情報 (地先名、路線番号、距離標、車線、その他)・計測条件 (測定者、走行速度、実測予定時間) を入力後に「計測開始」ボタンをクリックすると計測が開始され、設定した計測時間が経過の後、自動的に計測が終了し、「吸音率計測結果」が算出、表示される。なお、設定した計測時間が経過する途中においても計測を終了し、「吸音率計測結果」を算出、表示することも可能とした。

CRT 画面は図-6 と図-7 のとおり。1 画面内で等価音圧レベル (基準路面・計測路面)、相対レベル (計測路面-基準路面)、吸音率の周波数特性、吸音率の評価結果が確認できる。

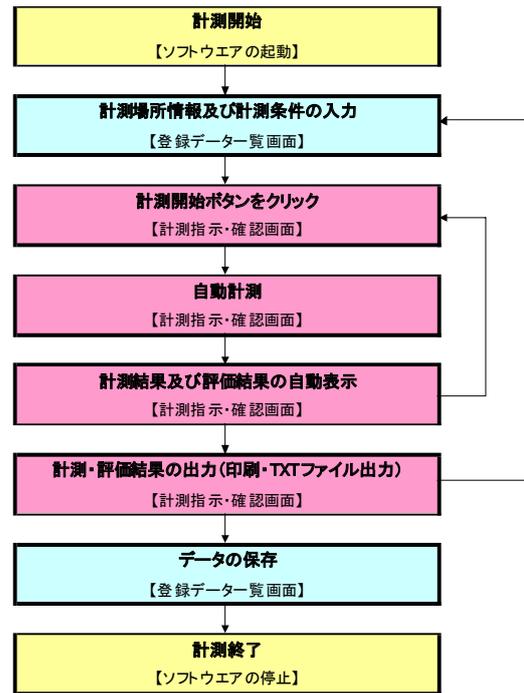


図-5 ソフトウェアの操作手順

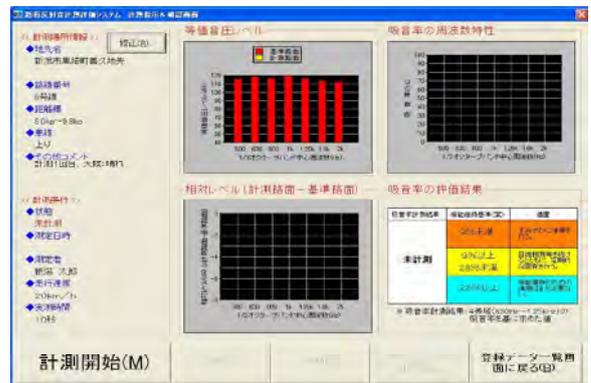


図-6 CRT画面 (計測開始時)

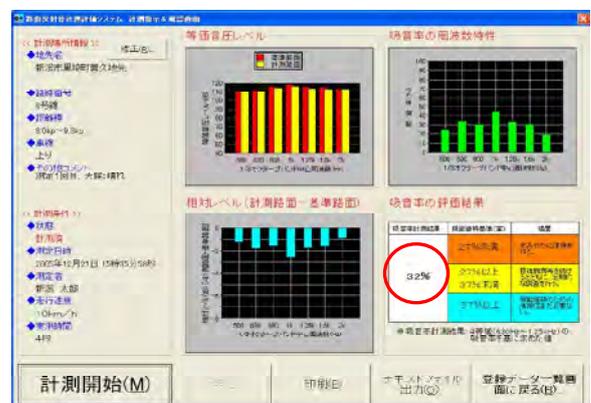


図-7 CRT画面 (計測完了時)

4. 機能維持評価基準値の検討

排水性舗装清掃実施の判断基準となる機能維持評価基準値を「透水量」から「吸音率」に変更するにあたり、平成 15～17 年度の現場透水量試験と路面反射音測定データのデータにより、透水量と吸音率の相関確認、機能維持評価基準値の算出を行った。

4. 1 計算対象周波数範囲の特定

吸音率を算出する周波数範囲のパターンを変え、透水量と吸音率の相関について確認した。方法は、現場透水量試験と路面反射音測定を同じ地点で実施した地点的評価の『地点評価』と、清掃区間内の地点データを平均した区間的評価の『区間評価』について、それぞれ透水量と吸音率の一次回帰分析による相関係数を求め比較した。その結果、相関係数が「0.9」と一番高くなった 4 帯域 (630～1250Hz) を計算対象周波数範囲に特定できたと共に、吸音率により排水性舗装の空隙状態を評価出来ることが確認できた (図-8)。

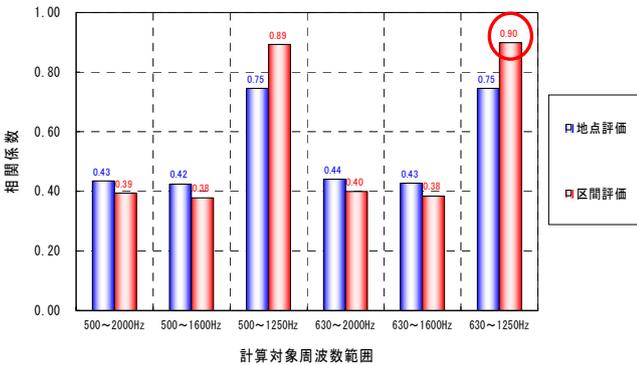


図-8 計算対象周波数範囲の相関性

4. 2 機能維持評価基準値 (案) の設定

地点評価と区間評価で求めた 1 次回帰式と 2 次回帰式を比較した結果、傾き・縦軸との接点が 2 次回帰式の方が近似することから、吸音率による機能維持評価基準値の算出は区間評価の 2 次回帰式から求めることとした。基準値 (案) の設定にあたっては、現行基準の透水量 200 (ml/15s) に対する吸音率は 0% 以下 (図-9) であるため、透水量 600 (ml/15s) に対する吸音率 8% 未満で清掃することを提案した (表-2)。

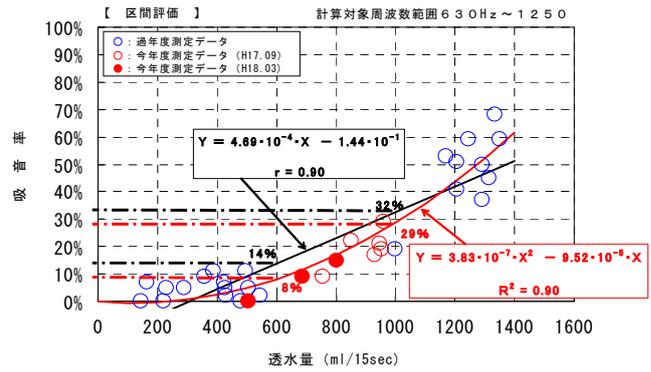


図-9 透水量と吸音率の関係(区間評価)

表-2 排水性舗装の機能維持評価基準値(案)

現行基準 (案)	措置	改訂基準 (案)
透水量 (ml/15s)		吸音率 (%)
200未満	速やかに清掃を行う。空隙つぶれ等、状況を判断して清掃による機能回復の見込みがあれば繰り返し行う。	8 未満 (透水量600ml/15s未満に該当)
200以上600未満	速やかに清掃を行う。	
600以上	目視観察等を続けるとともに、定期的に透水量試験を行う。	8 以上 (透水量600ml/15s以上に該当)

5. まとめ

路面反射音の計測・評価システムによる排水性舗装の空隙状態評価が可能となったことから、現状の交通規制区間内における人力作業での現場透水試験が、交通規制を必要としない走行車両による移動計測 (30 km/h) が可能となり、清掃作業自体の交通規制は残るものの、排水性舗装清掃作業の効率化及びコスト縮減、交通渋滞緩和が図られると期待される。

現場における聞き取り調査の結果では、1 清掃区間 (測定回数 54 回) における現場透水試験に要する時間は現場条件により異なるものの、現場透水試験器 1～3 台で測定した場合、約 6.5～3.5 時間程度かかっていたが、路面反射音測定 (清掃区間 500m、移動速度 30 km/h、横断方向 3 回計測) では約 3 分程度と大幅な改善となった。

6. あとがき

今後は、「排水性舗装の機能維持評価基準値」の精度を高め、「排水性舗装清掃要領 (試案) ・同資料編」の改訂に反映させる必要がある。

26. 建設混合廃材リサイクル処理機械のための 分別機能に関する基礎的研究

東北大学大学院環境科学研究科：高橋 弘，○中嶋 健太郎(現 (株)ワイ・イー・シー)
日立建機(株)：橋本 久儀

1. はじめに

近年、公害・環境の悪化などの諸問題への対応が叫ばれる中、環境に優しい機械あるいはリサイクル関連の研究が盛んに行われている。土木建設業の分野においても、建設省（現国土交通省）が1997年度に建設リサイクル推進計画を策定するなど、建設産業のゼロエミッション化を目指した取り組みが行われている¹⁾。

ところで、近年、解体工事の件数が増加しているが、今後は昭和40年以降の建築物が更年期を迎えるにあたり、解体工事件数は益々増加すると予想されている²⁾。建物の解体工事によって排出される建設混合廃材には将来的に再資源として利用できる角材、木屑、コンクリート塊などが多く含まれている。そのため、現在、分別解体が推奨されているものの、古い家屋は分別解体に適した建築構造になっておらず、建設混合廃材の処理費削減から、古い家屋の解体工事現場では、建物を材料の区別なく重機で一度に取り壊す「ミンチ解体」が多々見られるのが現状である。その結果、現場には様々な種類の建設混合廃材が混在し、それらの分別作業に多くの人手と時間を要している。そのため、建設混合廃材のリサイクル率が向上しないばかりでなく、廃材の不法投棄や野外焼却といった不正処理が増加し、社会問題にもなっている。それゆえ、分別作業の現場では自動化・ロボット化により廃材の自動選別を行う建設混合廃材リサイクル処理機械の開発が望まれている。今後、このようなリサイクル処理機械の開発が実現すれば、建設混合廃材のリサイクル率が向上し、新たな資源の採取の抑制、廃棄物の発生抑制、資源の循環的利用が促進されると考えられる。さらに、天然資源の消費をできるだけ節約し、環境への負荷をできる限り少なくする資源循環型社会に貢献できるものと考えられる。

本研究では、分別作業の無人化・自動化を実現するための基礎的研究として、排出された混合廃材の中でも抽出が容易で再生利用価値の高い角材およ

び最終処分場で混入の嫌う木材の分別機能について検討する。すなわち、これらの分別機能を有する建設混合廃材リサイクル処理機械を開発するための要素技術について検討することを目的としている。

2. 画像処理による角材・木材の自動検出

本研究ではリサイクル処理機械に視覚センサを搭載することを想定し、センサからの画像を処理することにより廃材の中から角材を検出することを試みる。画像から角材部分を検出するためには、何らかの特徴あるいは条件を満たす画素を選択的に検出する処理が必要であり、ここでは、角材の色彩と直線的な形状に着目して処理を行った。実験方法は、実際の解体現場から採取した混合廃材を地表面にランダムに並べ、図1のように混合廃材の山をデジタルビデオカメラで撮影し、取得した画像を画像処理ボードを通してパソコン上で処理を行った。なお、混合廃材は木材・木屑、アルミパイプ、鉄棒、トタンおよびコンクリート塊などから構成されている。

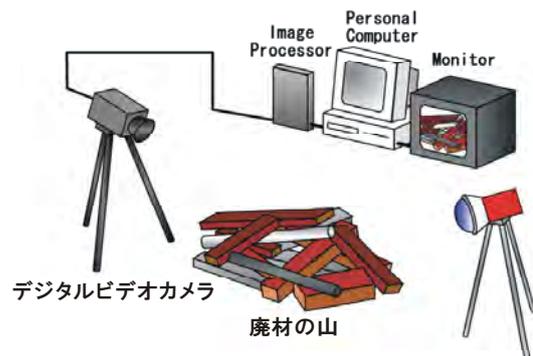


図1 画像処理システムの実験装置図

2.1 色彩による検出方法

本研究では、色彩による検出では、取得画像の中から色彩情報を表すYUVと呼ばれる値を用いて、

角材を検出する。取得したカラー画像の各々の画素には必ず YUV の情報が含まれているため、この YUV 情報を用いてカラー画像の全画素に対し、(1)式の条件を満たす画素を抽出し、抽出された部分を 1(白)、それ以外の部分を 0(黒)にした 2 値化画像を生成する。

$$(Y_{\min} \leq Y \leq Y_{\max}) \& (U_{\min} \leq U \leq U_{\max}) \& (V_{\min} \leq V \leq V_{\max}) \quad (1)$$

ここに Y_{\max} , Y_{\min} , U_{\max} , U_{\min} , V_{\max} および V_{\min} はカラー抽出処理における YUV の最大・最小しきい値である。すなわち、木材が本来有する色彩に関して、 YUV が示す値の範囲を予め把握しておけば、サンプリングされた画像中からこの (Y_{\max}, Y_{\min}) , (U_{\max}, U_{\min}) , (V_{\max}, V_{\min}) の範囲内にある領域を抽出すると、その領域は木材である可能性が高い。本研究では、 YUV のしきい値は実験的に求めることにする。

2.2 YUV 値測定と YUV しきい値の測定

色彩検出処理は、木材の YUV のしきい値をプログラムに入力しておき、画面から目的とする色彩の部分だけを検出する処理である。しかし、屋外の作業であることを考慮すると YUV は、同一材料でも天気のみならず時間帯によっても変化する。そこで、天気および時間帯などの影響をあまり受けず、かつできるだけ多くの木材が抽出できるように、色彩検出処理法を工夫する必要がある。本研究では、木材本来の色彩を有する数多くの木材を用意し、晴および曇の日において、朝・昼・夕のそれぞれの時間帯で、木材の YUV 測定を行い、 YUV の範囲を設定することにした。35 サンプルの木材の YUV を測定した結果、木材の色彩に関して Y と U の値においてその特徴が大きく 2 つに分れることが確認された。一方、 V の値に関しては、木材による違いが見られなかった。また、木材の色彩を肉眼観察すると、全体的に黄色がかった木と赤みがかった木とに分けられることが分かった。ここでは、便宜上、黄色がかった木を「黄木」、赤みがかった木を「赤木」と表現する。「黄木」は Y の値が大きく、 U の値が小さい傾向があり、「赤木」はその逆の傾向がある。そこで各 6 パターンでの YUV の平均値と標準偏差を求め、 Y と U はその平均値より大きい値と小さい値

とに分け、各々の値に対して、さらに平均値を算出した。すなわち、条件として 12 条件を設定した。 YUV の平均値を表 1 に、また、標準偏差を表 2 に示す。なお標準偏差および V の値は 6 パターンになっている。

表 1 各パターンの YUV 平均値

条件	Y	U	V
晴・朝・黄木	145	141	100
晴・朝・赤木	109	150	100
晴・昼・黄木	145	140	102
晴・昼・赤木	106	148	102
晴・夕・黄木	154	138	100
晴・夕・赤木	113	148	100
曇・朝・黄木	140	136	106
曇・朝・赤木	104	144	106
曇・昼・黄木	138	135	107
曇・昼・赤木	105	144	107
曇・夕・黄木	145	133	112
曇・夕・赤木	112	140	112

表 2 各パターンの YUV 標準偏差

条件	Y	U	V
晴・朝	21	6	6
晴・昼	23	5	5
晴・夕	24	6	7
曇・朝	21	6	6
曇・昼	19	5	5
曇・夕	20	5	6

この表の YUV 値を基に YUV のしきい値を設定する。 YUV のしきい値は平均値と標準偏差から以下のように算出する。

$$Y_{\min} = \bar{Y} - n_1 \sigma_Y \quad (2), \quad Y_{\max} = \bar{Y} + n_2 \sigma_Y \quad (3)$$

$$U_{\min} = \bar{U} - n_3 \sigma_U \quad (4), \quad U_{\max} = \bar{U} + n_4 \sigma_U \quad (5)$$

$$V_{\min} = \bar{V} - n_5 \sigma_V \quad (6), \quad V_{\max} = \bar{V} + n_6 \sigma_V \quad (7)$$

ここで、 $\bar{Y}, \bar{U}, \bar{V}$ は各パターンの平均値、 $\sigma_Y, \sigma_U, \sigma_V$ は YUV の 6 パターンの標準偏差である。 $n_1 \sim n_6$ の値は試行錯誤により $n_1=1, n_2=1, n_3=1, n_4=15, n_5=2, n_6=11$ と決定した。これらの諸式と各値を用いて 12 パターンの YUV のしきい値を表 3 に示すように決定した。

本研究では、表 3 に示すしきい値を用いて、画像処理により木材部分を抽出するアルゴリズムを以

下のように構築した。

- ① 原画像を取得する。
- ② 表 3 に示される色彩検出処理を 12 通り行い、検出領域が最大になるパターンを選択する。
- ③ ノイズ除去処理、収縮処理により、木材領域に似た小領域部分を除去する。
- ④ 膨張処理およびラベリング処理を行い、画像中の最大領域を抽出し、重心座標を求める。
- ⑤ 重心座標近傍の 5×5 の領域の YUV を測定し直し、その YUV を用いて再度、色彩処理を施し、木材部分を抽出する。

混合廃材から木材を検出する概要を図 2 に示す。

表 3 各パターンの YUV しきい値

条件	Y_{min}	Y_{max}	U_{min}	U_{max}	V_{min}	V_{max}
晴・朝・黄	124	166	135	231	88	166
晴・朝・赤	88	130	144	240	88	166
晴・昼・黄	122	168	135	215	92	157
晴・昼・赤	83	129	143	223	92	157
晴・夕・黄	130	178	132	228	86	177
晴・夕・赤	89	137	142	238	86	177
曇・朝・黄	119	161	130	226	94	172
曇・朝・赤	83	125	138	234	94	172
曇・昼・黄	119	157	130	210	97	162
曇・昼・赤	86	124	139	219	97	162
曇・夕・黄	125	165	128	208	100	178
曇・夕・赤	92	132	135	215	100	178

2.3 形状による検出

前述した色彩検出処理では、木材本来の地肌が現れている場合は、ほとんどの木材を画像処理により抽出可能となるが、この手法での検出は、色彩を基にしているため、木材とほぼ等しい YUV 値をもつ他の材料も抽出されてしまう。また、木材が塗装されていたり、汚れていたりして、木材本来の色彩が薄れてしまっている場合は、設定した YUV のしきい値の範囲外となることが多く、当然、検出されないことになる。解体作業現場では主に木材と他の廃材とを分別しているため、別の材料が検出された場合には、材料抽出時に識別センサにより材料が木材であるか否かを判断しなければならないが、これについては、後述する。ここでは、廃材の中から色彩検出処理によって検出されなかった木材を抽出するため、廃材の直線的な形状を検出し、そこから領域処理を施し、重心座標を得るアルゴリズムについて提案する。この検出処理は、色彩の違いから色彩検出処理では抽出が不可能である角材の検出を目的としている。ここでは、ハフ変換³⁾と呼ばれる直線検出において用いられる画像処理法を用いた。検出の主な処理は以下の通りである。

- ① ハフ変換により直線を抽出し、直線部分を膨張させる。
- ② 原画像を 2 値化し、膨張した直線部分との共通領域を抽出する。

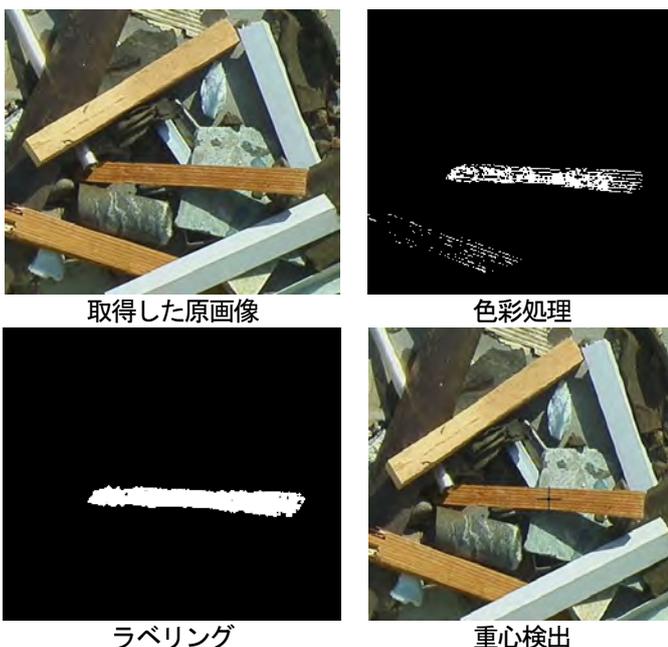


図 2 色彩処理による角材の自動抽出の様子

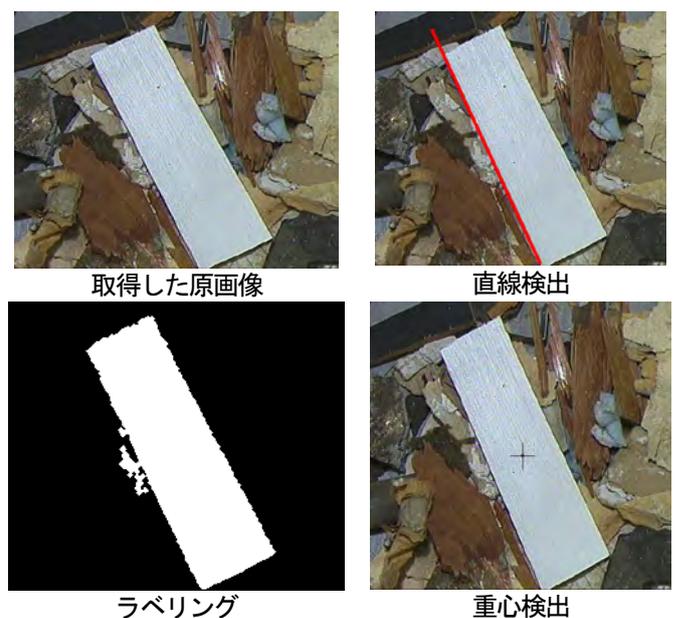


図 3 ハフ変換による直線部分の自動抽出の様子

③ 共通領域の重心を求め、重心近傍の5×5の領域のYUVを測定し直し、そのYUVを用いて、色彩処理を施し、木材部分を抽出する。

以上のようにして直線部分を有する材料を自動検出した結果を図3に示す。

2.4 木材自動検出システムの検証実験

色彩検出処理に関しては、異なる天候の日に、時間帯を変え、その都度、廃材の山に用いる材料、木材の配置をランダムに変化させて撮影を行い、50回の検証実験を行った。50回の実験のうち40回は廃材の山に木材を配置した状態で、残りの10回は抽出作業が終了し、木材が廃材の中からすべて取り除かれたと仮定して実験を行った。検証結果としては、前者は木材の重心座標が取得された時点で、後者は木材なしの判断が確認された時点で「検出成功」とした。直線検出処理は、材料の配置のみを変化させて、50回の検証実験を行った。

50回の実験を行った結果、2回の検出作業に失敗したが、48回は検出に成功した。その結果、96%の成功率が得られ、色彩検出処理は木材の自動検出のシステムとして有用であることが確認された。50回のうち2回の失敗の原因は以下のようなものであった。すなわち、取得画像に12パターンの色彩検出処理を施す際に、木材以外に似た色彩が画像上に存在し、それらの部分が各々結合して木材より大きな領域を形成した。そのため、検出される重心の位置がずれることにより検出処理が失敗した。これには、生じたノイズの数に応じて自動的に収縮処理の回数を調節するといったアルゴリズムの再構築が必要であると考えられる。

直線検出処理による木材自動検出アルゴリズムの検証実験では、50回の実験のうち35回の検出に成功し、その成功率は70%であった。すなわち、建設混合廃材リサイクル処理機械の自動検出システムとして、適用可能ではあるが、十分有用であると評価できるまでには至らなかった。15回の失敗原因は、直線検出がうまくいかなかったことに尽きる。直線検出処理の成功率を上げるためには、ハフ変換機能を拡張することが必要不可欠であるが、本検出アルゴリズムは、分別機能構築の基礎となり得ると考える。

3. 木材の自動識別システム

画像処理結果を基に、木材がマンピュレータなどを用いて自動抽出されたと仮定した場合、その次の処理としては、抽出した材料が木材であるかどうかを識別しなければならない。前述したシステムでは、取得画像から得られる視覚情報のみで木材の検出処理を行っているため、他の材料の色彩が木材の色彩に近い場合、他の材料も同時に抽出される可能性がある。そこで、木材と他の材料との自動選別機能を開発するため、機械が材料を掴んだ時に、その材料が木材であるかどうかを認識・識別する機能を具備する必要がある。そこで、解体機械で材料を掴んだ際に、材質を識別することを想定し、図4に示すような油圧ショベルのアタッチメントとして用いられるハンドを作成し、材料の識別アルゴリズムについて検討した。材料を識別する方法としては、まず材料の硬さにより識別する方法が考えられるが、ハンドに設置した歪ゲージからの信号だけでは、木材と他の材料を識別することが困難であったため⁴⁾、ここでは、材料をハンマーで打撃した時の音から材料を識別することにした。

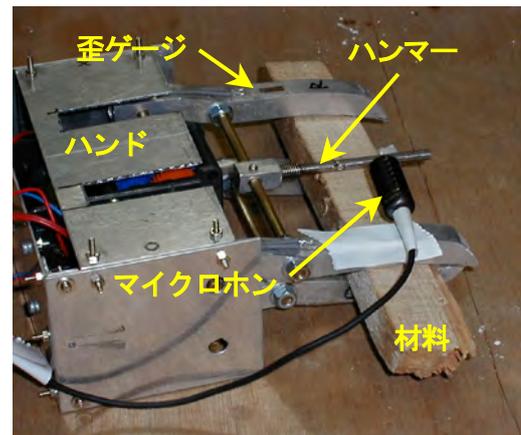


図4 マイクロホンを設置したハンド

聴覚センサとしては、エレクトレックコンデンサーマイクロホン (SONY 製 ECM-TS125) を用いた。図4に示すようにマイクロホンを片方のアーム部に取り付け、2本のアーム間に装着されたステンレス製のハンマーからの材料打撃音を検出した。検出された打撃音はマイクロホン端子から電圧値として出力され、A/D変換ボードを介して、パーソナルコンピュータに転送した。

材料を識別するにあたり、対象とする材料を複数個用意した。用意した材料は、木材5本、アルミパイプ(角)、アルミパイプ(丸)、鉄、塩ビパイプ、プラスチックの計10サンプルである。

3.1 材料打撃音の測定実験

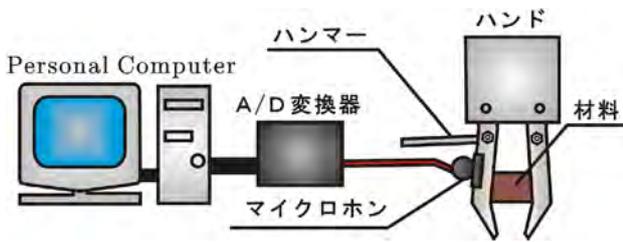


図5 実験装置の概略

実験では、図4に示すようにハンドで材料をはさんだ状態にし、全ての材料においてハンマーを持ち上げる変位を等しくして、材料を打撃した。実験装置の概略を図5に示す。データのサンプリング周波数はマイクロホンの周波数特性から最低 32[kHz]を必要とするが、ハードウェアの都合上、実行可能なサンプリング周波数の上限として1[kHz]を用いた。測定は約2秒間行い、2048個のサンプリングデータを得た。測定結果の一例を図6および図7に示す。図6は木材に対する結果であり、図7は、アルミパイプに対する結果である。紙面の都合上、他の材料の結果は割愛する。

図6および図7に示されるように、波形はどれもほとんど同じ形を示し、この図からだけでは、木材と他の材料とを区別することは困難であった。そこで、時間-電圧値グラフに対してFFT（高速フーリエ変換）を施すことを試みた。このFFT処理の結果を図8および図9に示す。図8は図6をFFT処理した結果であり、図9は図7をFFT処理した結果である、これらの結果を基に、木材と他の材料とを識別するためのアルゴリズムを提案する。

まず、木材とアルミパイプのFFTを比較すると、波形が作る領域面積に大きな違いが見られる。図9のように木材以外の材料の振幅が大きく変化するの、金属やプラスチックなどの打撃音に含まれる高周波数成分がサンプリング周波数の低下により、測定が不可能となり、雑音となって振幅スペクトルに影響を及ぼすエイリアシングという現象が起きているためであると考えられる。よって、このエイリアシングによる領域面積を算出し、その値を材料識別の判断基準とした。以下、領域面積の算出方法について述べる。

打撃音の測定により得られたFFTにおいて、横軸に対応する周波数は、サンプリング条件（サンプリング周波数1[kHz]，データ数2048）から導出される基本周波数0.48[Hz]の整数倍になっている。こ

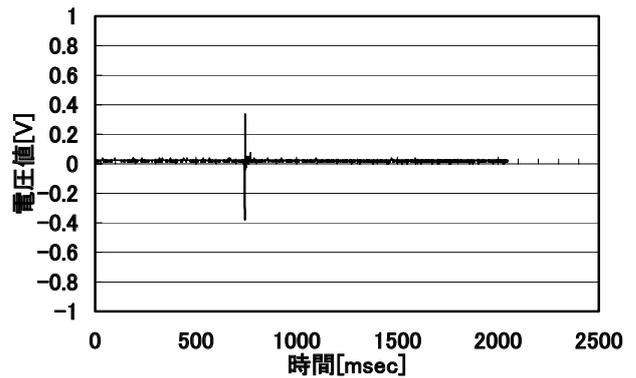


図6 木材に対する打撃音の波形

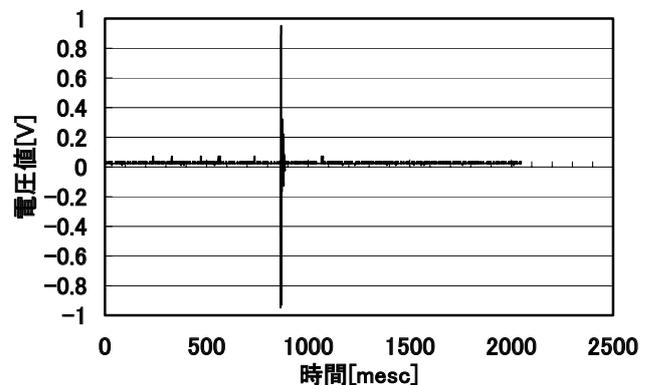


図7 アルミパイプに対する打撃音の波形

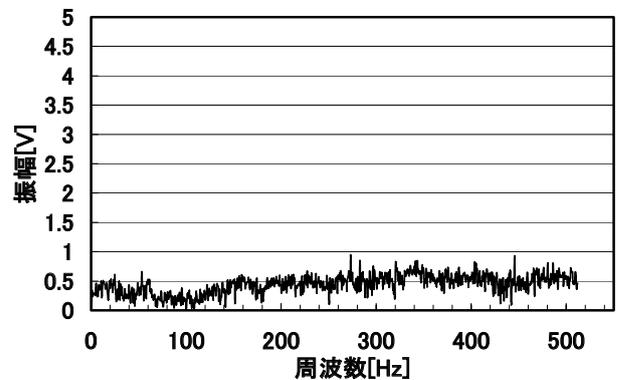


図8 木材に対する打撃音のFFT

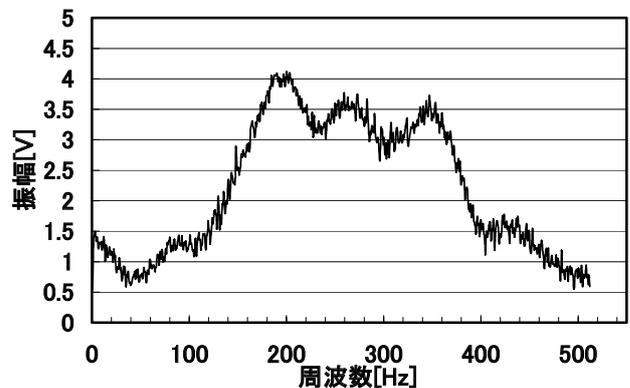


図9 アルミパイプに対する打撃音のFFT

れらは、基本周波数の n 次高調波と呼ばれ、 n の値は次数と呼ばれている。そのため、FFTは、次数と振幅スペクトルによるグラフに変換することができる。そこで、FFTを高さ：振幅スペクトルの値、幅：1（次数間隔）とする長方形で近似し、その面積を全ての領域において計算し、その和を取ることによって領域面積を算出した。この結果を基に、木材と他の材料との識別のしきい値を面積値の平均値から試行錯誤により500と決定し、その値より面積値が小さければ木材、大きければ木材以外の材料であると識別するアルゴリズムを構築した。検証実験の結果、このアルゴリズムによる識別の成功率は70%であったが、市販のハードウェアにより識別センサを構築していることを考えると、ほぼ妥当であると言え、建設混合廃材リサイクル処理機械の識別センサとして適用可能であると判断される。なお、今後は識別精度が向上するように、ハードおよびソフト面の改良が必要である。

4. 建設混合廃材リサイクル処理機械の提案

画像処理による木材の自動検出アルゴリズムおよび材料の識別アルゴリズムがほぼ妥当であることが確認されたので、ここでは、上述のアルゴリズムを組み入れた建設混合廃材リサイクル処理機械モデルを作成し、一連の自動作業の確認を行った。

本研究では、まず、建設混合廃材を自動抽出するマニピュレータの設計を行った。実際の解体作業現場では、図10に示すように油圧ショベルにハンドと呼ばれるアタッチメントを取付け、広範囲の材料を抽出するため、実際の油圧ショベルを模擬した自由度4のマニピュレータを想定し、さらに抽出作業を容易にするために手首に回転の自由度を与えた自由度5のマニピュレータを設計・製作した。

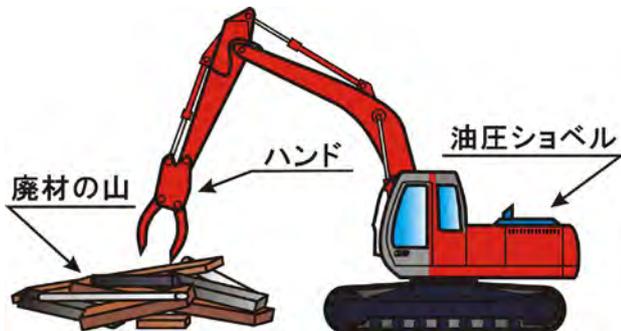


図10 油圧ショベルによる廃材処理のイメージ

本研究では、動力学解析を行い、ハンドを有する5自由度のマニピュレータを設計・製作した。マニピュレータの外観を図11に示す。なお、動力学解析の詳細は割愛する。

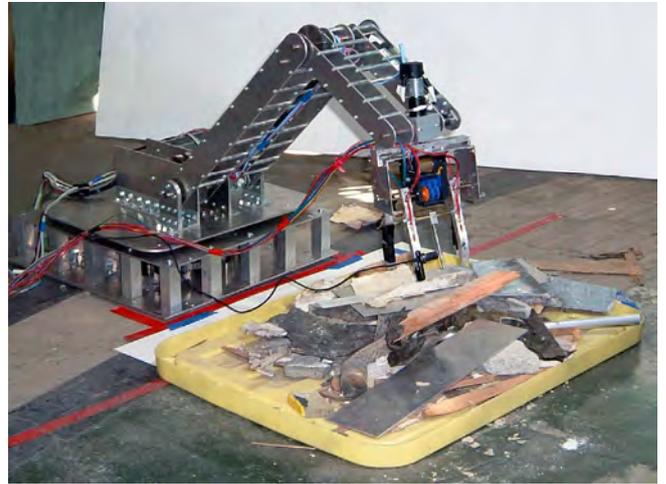


図11 建設混合廃材リサイクル処理機械モデル

5. 材料の3次元座標の取得

廃材の中から材料(木材)を自動的に検出し、機械を操作して目的とする材料を掴み、材料をハンマーで打撃して材料を識別するという一連の作業を行うためには、画像処理により材料(木材)が自動検出された後、ハンド先端を目標位置まで移動させるために、材料の3次元情報を取得しなければならない。そこで、ここでは自動検出された材料の3次元情報を取得するアルゴリズムについて検討する。

ところで、視覚センサによる対象物の3次元情報の認識には、様々な方法があるが、本研究では、測定系を簡単にするため、レーザポインタと一台のカメラによる手法を用いた。この手法では、対象物にレーザ光を照射し、その照射点をCCDカメラにより画像として取り込むことにより、カメラレンズの幾何学的条件を用いて照射点の3次元情報を取得する。しかし、本研究では、対象物が建設廃材であり、堆積状態が煩雑で、ピンポイントでレーザ光を目的とする対象物に照射するには長時間を要し、効率的ではない。そこで、レーザ光を廃材の山に照射し、その照射点の3次元情報を取得し、対象とする材料のZ座標と照射点Z座標が等しいと仮定した上で、材料の3次元座標を取得する手法を試みた。以下、その方法について詳述する。

5.1 座標系

本研究では、3種類の座標系を設定する。コンピュータの旋回部中心を原点とする絶対座標系 Σ 、デジタルビデオカメラのカメラレンズを中心に原点をとるカメラ座標系 Σ_c 、カメラの画像面を中心に原点をとる画像座標系 Σ_i である。この模式図を図12に示す。カメラ座標系の原点は、絶対座標系の原点上にあり、その距離は h である。また、 Y_c 軸と水平方向のなす角を θ_c とする。つまり、カメラは、廃材の山を斜め上方向から撮影できるよう水平方向から θ_c 傾けて設置してある。

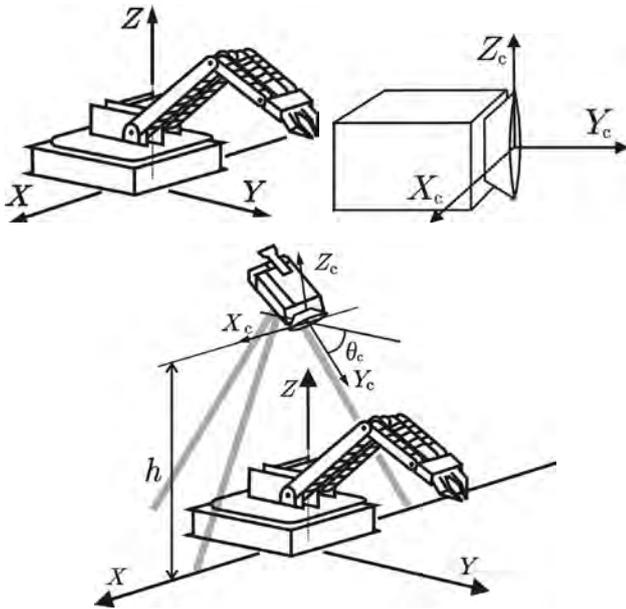


図12 座標系の定義

5.2 カメラレンズの幾何学的条件と絶対座標系への座標変換

カメラで任意の点 P を取り込むと、画像面に点 P が投影される。この時、次式が成り立つ。ただし、 f はカメラの焦点距離、 (X_{Pi}, Y_{Pi}) は点 P の画像面への投影点、 k_x, k_y はそれぞれ画像面における X_i 軸方向および Y_i 軸方向の1ピクセルあたりの長さである。

$$\frac{Y_{Pc}}{f} = \frac{X_{Pc}}{k_x X_{Pi}} = \frac{Z_{Pc}}{k_y Y_{Pi}} \quad (8)$$

次に、カメラ座標系 Σ_c から絶対座標系 Σ への変換式は、次式で示される。それゆえ、(8)および(9)式より、材料の3次元座標 (X_P, Y_P, Z_P) を求めることができる。

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_c & -\sin \theta_c \\ 0 & \sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Pc} \\ Y_{Pc} \\ Z_{Pc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix} \quad (9)$$

5.3 材料の3次元座標取得のアルゴリズム

図13に示すようにレーザポインタをカメラに取り付け、廃材の山にレーザ光を照射する。このときレーザポインタは、カメラの光軸と同じ方向を向いている。カメラの水平方向からの傾き θ_c およびカメラレンズの高さ h は、カメラの較正を行うことにより算出した。次に、照射点を画像処理により検出し、画像面上での座標 (X_{Pi}, Y_{Pi}) を取得する。そして、(8)式より、照射点のカメラ座標系 Σ_c での座標 $P_c(X_{Pc}, Y_{Pc}, Z_{Pc})$ を取得する。なお、照射点の X_{Pc} は、示したカメラとレーザポインタ間の距離であるため既知の値となる。さらに $P_c(X_{Pc}, Y_{Pc}, Z_{Pc})$ を(9)式を用いて座標変換することにより照射点の絶対座標系 Σ での3次元座標 $P(X_P, Y_P, Z_P)$ を求めることができる。

次に $P(X_P, Y_P, Z_P)$ の座標を用いて木材の3次元座標 $G(X_G, Y_G, Z_G)$ を求める。ここで、木材の高さ Z_G は、前述したように、廃材の山の中に照射されたレーザポイントの照射点の高さと等しいと仮定しているため、 $Z_G = Z_{Pc}$ が成り立つ。このとき、カメラ座標系 Σ_c での木材重心の座標を $G_c(X_{Gc}, Y_{Gc}, Z_{Gc})$ とすると、(9)式は以下のようなになる。

$$X_G = X_{Gc} \quad (10)$$

$$Y_G = Y_{Gc} \cos \theta_c - Z_{Gc} \sin \theta_c \quad (11)$$

$$Z_G = Y_{Gc} \sin \theta_c + Z_{Gc} \cos \theta_c + h \quad (12)$$

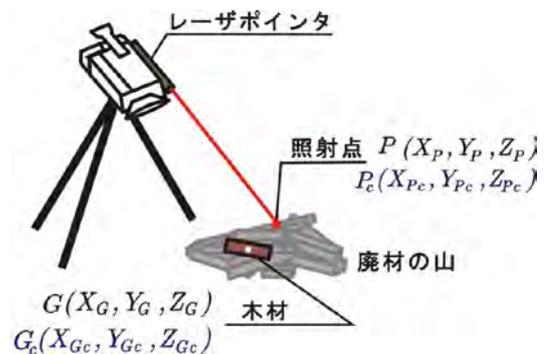


図13 材料の3次元座標取得の原理

また、(8)式より、画像処理によって検出された木材重心の画像面上での座標を (X_{Gi}, Y_{Gi}) とすると、次式

が成り立つ。

$$X_{Gc} = \frac{k_x X_{Gi} Z_{Gc}}{k_y Y_{Gi}} \quad (13), \quad Y_{Gc} = \frac{f Z_{Gc}}{k_y Y_{Gi}} \quad (14)$$

(14)式を(12)式に代入することにより、 Z_{Gc} が以下のように求められる。

$$Z_{Gc} = \frac{Z_G - h}{\frac{f \sin \theta_c}{k_y Y_{Gi}} + \cos \theta_c} \quad (15)$$

(15)式より求められた Z_{Gc} を用いることにより、(13)および(14)式から $G_c(X_{Gc}, Y_{Gc}, Z_{Gc})$ が算出される。これらの値を(10)ないし(12)式に代入することにより、木材重心の絶対座標系 Σ での3次元座標 $G(X_G, Y_G, Z_G)$ を求めることができる。

5.4 分別実験結果および考察

本研究では、建設混合廃材リサイクル処理機械の性能評価として、一連の作業に要した時間、材料分別の成功率を求めることにより性能を評価した。また、マニピュレータに搭載した視覚センサおよび音識別センサの各要素技術が、建設混合廃材リサイクル処理機械の自動選別機能として適切であるかを検討した。

まず、実験を行うにあたり分別の対象となる様々な種類の建設混合廃材を用意した。その主な材料は、木材、色つき木材、アルミパイプ、鉄棒、塩ビパイプ、プラスチックであり、さらに木材の色に塗装したアルミパイプ、鉄棒、塩ビパイプ、プラスチックを用意し、これらをランダムに並べ、分別実験を行った。まず、一連の作業に要した時間であるが、画像処理から最終的に材料を分別するまでの作業時間は、およそ3分30秒であった。そのうち、画像処理に要した時間は10秒、識別に要した時間は5秒であり、大半がマニピュレータの巡回移動によるものであった。マニピュレータの巡回速度を上げるためには、ハード部分を強固にするだけであり、特に問題はないと考えられる。従って、ハード的に改良が施されれば、処理速度の向上が見込まれ、処理速度は大幅に削減可能である。

次に、抽出の対象とする材料の種類を変えて分別実験を行った。抽出の対象とする材料の種類を変え、30回の分別実験を行った結果、21回の分別に成功し、その成功率は70%であった。この値は、建設混合廃材リサイクル処理機械の開発の初期段階としては、その有効性を示すのに満足な結果であると思われる。ま

た、視覚センサ、リサイクル処理機械のマニピュレーション機能および識別センサの各要素技術も一連の自動分別作業の中で適用可能であることが実証できた。また、木材と似た色をした他の材料による実験を行った結果、画像処理では、木材として認識されるが、最終的な音による識別センサにおいて他の材料であると分別されることが確認できた。さらに、色つき木材を直線検出処理した場合においても、識別結果が木材に分別されていることが分かる。

しかし、分別作業において失敗例も見られた。その主な原因としては、以下のようなことが考えられる。すなわち、材料の画像処理および材料の抽出作業に関しては、比較的成功率は高いものの、音による識別において失敗し、最終的に木材と他の材料との分別に失敗した例が多く見受けられた。打撃音での識別方法は、前述したように音データ測定の際に、ハードウェアの都合上、サンプリング定理を十分満足するだけのサンプリング周波数を確保できていないことが識別失敗の主たる原因として考えられる。よって、ハードが改良されれば、今後、材料分別の成功率はかなり高くなると予想される。

材料の抽出作業においては、ハンドの刃先が他の材料に干渉し、材料をうまく掴めなかったことが生じた。これは、3次元座標の誤差やマニピュレータの精度不足などが挙げられる。従って、これらの問題点を解決するためには3次元座標認識のアルゴリズムおよび自動抽出のアルゴリズムを再検討し、新たな改良を施す必要があると思われる。

参考文献

- 1) 建設副産物リサイクル広報推進会議：総合的建設副産物対策 平成10年度版, 1998.
- 2) 例えば、岐阜県生活技術研究所：木質系廃棄物の現状と問題, p.1, 2000.
- 3) 尾上 守夫編集：画像処理ハンドブック, pp.284-285, 1990, (株)昭晃堂.
- 4) 中嶋 健太郎：建設廃材リサイクル処理機械の開発に必要な自動選別機能に関する基礎的研究, 東北大学学士學位論文, 2002.

27. 工事における音源別騒音発生量の分析

独立行政法人土木研究所 山元 弘、吉田 潔
国土交通省 国土技術政策総合研究所 ○吉永弘志

1. 目的

土木研究所では環境影響評価における騒音予測用のデータを土木工事の実測調査に基づいて整備している。土木工事は複数の機械で行われており、予測用データはこの機械の組み合わせを最小単位とし1つの音源とみなしているが、予測の実務担当者からは機械別の発生量が求められている。機械別の騒音発生量の分析ができれば同種の機械を使用する工事騒音の予測、機械別に騒音対策を施した場合の効果の実測、バックグラウンド音が大きい現場での騒音測定など様々な応用が期待できる。そこで平面上に複数の機械が配置され同時に変動騒音が発生している条件で機械別の騒音発生量を分析する技術を開発することとした。

2. 工事騒音の特徴

土木工事騒音は時間の経過に伴い無規則に変動する。本研究はこのような変動騒音を対象とした。日本音響学会ではASJ CN-Model 2002においてこれらの騒音を代表するスペクトルを式-1としている¹⁾。

$$L_{A,rel}(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{f}{1,000} \right) \times [4.4548 - 0.1443(10 \log_{10} f + 2)]$$

f : Frequency, Hz (式-1)

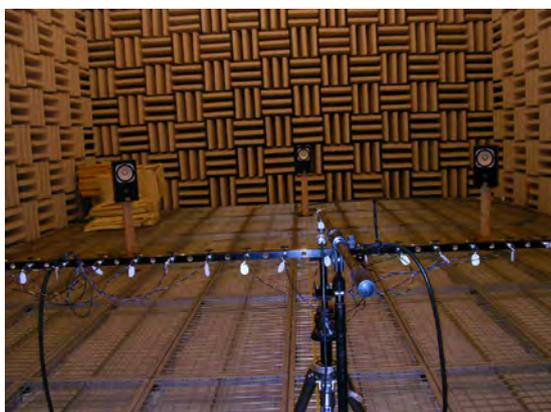


写真-1 無響室での実験

3. 分析方法の検討

機械別騒音の分析方法として1)機械の周囲にマイクロホン配置する方法、2)音源探査で適用されているマイクロホンアレイを応用する方法および3)音響インテンシティを応用する方法を比較し2)マイクロホンアレイを応用する方法が現場での適用性が高いと考え研究対象とした²⁾。マイクロホンは安全のため7m程度離れた位置とし、運搬の便を考慮して全長2mで10cm間隔の21個を基本とした(図-1)。

まず、最初に音源が無遠慮にあり平面波として到達する条件を仮定し、指向性の試算をした。図-2は図-1の左側の配置の場合の指向性の考え方を図示したものである。ある方向から到来する波の波面がマイクロホンアレイの各マイクロホンに到達する時間は音源の方向により異なる。このため音源方向とマイクロホンアレイの直線方向が垂直となる場合に受信信号の和が最大となる。音源方向とマイクロホンアレイが指向する方向がずれていると各マイクロホンが受信する信号の位相がずれるため受信信号の和は小さくなる。このずれの程度は高周波で波長が短いほど大きくなるので高周波ほど指向性が鋭くなる。しかし、高周波では音源方向と異なる方向でも各マイクロホンの受信信号が信



写真-2 屋外での実験

号の周期の整数倍でずれることで音源方向と同じ出力となり、いわゆる虚音源となる。図-4は図-1の左の配置で音源の方向に位相を合わせた場合の指向性を周波数ごとに計算したものである。方向が異なれば音源方向と正反対の方向の音の影響を受けるが正反対の方向に音源が存在しないことが明らかな場合は支障がない。図-1の右の配置では音源の方向からの音波到達時間がマイクロホンごとに異なる。そこで、各マイクロホンの受信信号を時間差だけそれぞれずらして和をとることとした場合の指向性は図-5となる。虚音源は減るが分解能が悪くなる。

複数音源の分離には分解能が高い方が良いので図-1の左の配置を採用することとした。図-4から250Hz以下の低周波では分解能が悪くなり、4000Hz以上では虚音源が出現する。この影響を避けるため、未知の音源を分析するにはバンドパスフィルタをかけることにした。

本マイクロホンアレイは、水平面内で方向別に音源が異なり地表面反射の影響がある現場の実情に合わせて。音源が水平面で異なる方向に存在するのでマイクロホンを面的に配置しないで直線的に配置するだけで音源別の騒音発生量を分析できる。音源別に音源の高さが異なっても高さ方向の音源探査をする必要がなく、水平方向に重点化できる。また、地表面反射については、図-3のようにマイクロホン相互の相対的な遅延時間が地表面からの反射音と直接音の場合でほとんど変わらないため同一の音源由来として分析できると考えた。

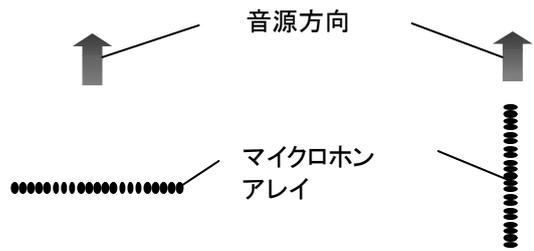


図-1 音源方向とマイクロホンアレイ

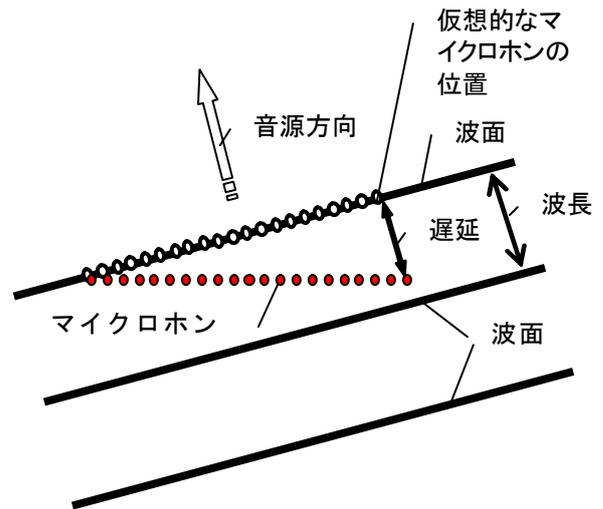


図-2 指向性の基本的な考え方

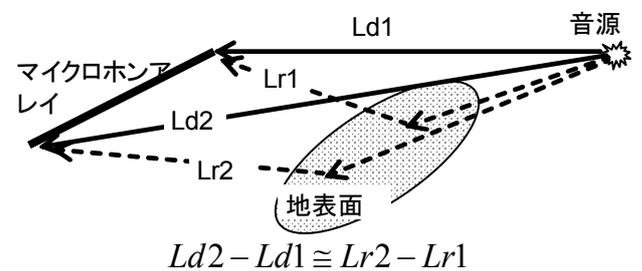


図-3 地表面反射の影響

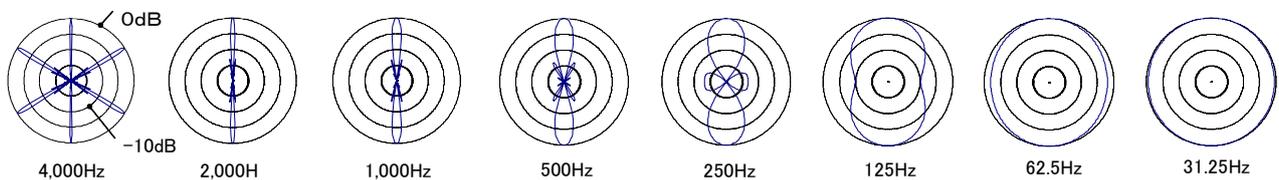


図-4 音源方向に直角にマイクロホンアレイを配置した場合の指向性

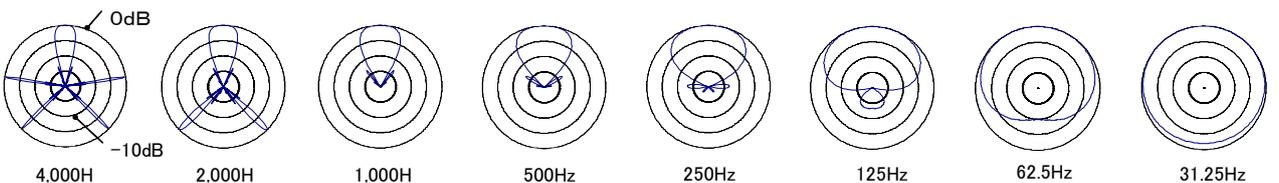


図-5 音源方向にマイクロホンを並べた場合の指向性

4. 実証実験

完全無響(写真-1)、半無響、および屋外(写真-2)の条件で測定を行った。無響室の大きさの制約があったため音源およびマイクロホンアレイの配置は図-6とした。音源は純音、1/1 オクターブバンドノイズおよび建設機械騒音の音源ファイルをスピーカーで再生した。マイクロホンは小野測器の MI-1431 にプリアンプ MI-3110 を付加したものを 10cm 間隔で 21 個配置した。各マイクロホンの出力は TEAC の AD コンバータ LX-20 を使用し 24,000 個/sec で同時サンプルし、建設機械音については LX-20 で A 特性補正をかけ、他は Flat でノートパソコンのハードディスクに記録した(図-7)。各マイクロホンの出力は B&K 4231 による校正値で音圧に変換した。この際、器差も補正される。実証実験は無響室、半無響室、屋外へと固定周波数音、建設機械の再生音、実作業音へと条件を厳しくしていった。

4-1 分析アルゴリズム

図-8 のように音源と各マイクロホン間の距離が異なるためマイクロホンで受信した信号のタイミングはずれている。音源の位置を仮定しタイミングを合わせて加算した値(遅延和)は仮定した音源の位置が真の位置の場合に最大となるはずなのでこの位置を平面内で検索することとした(音源が遠くにあり平面波とみなせる場合には図-2 のように方向のみを考慮して遅延和を計算するが分析では音源までの距離も考慮している)。遅延和は 21 個のマイクロホンの音圧を 2 乗し時間平均したもの(1 個当たりの 212 倍)で比較した。平面内の全領域でしらみつぶしに遅延和を計算すると計算量が莫大となるため計算の工夫をした。遅延和は距離よりも方向に敏感に変化するため最

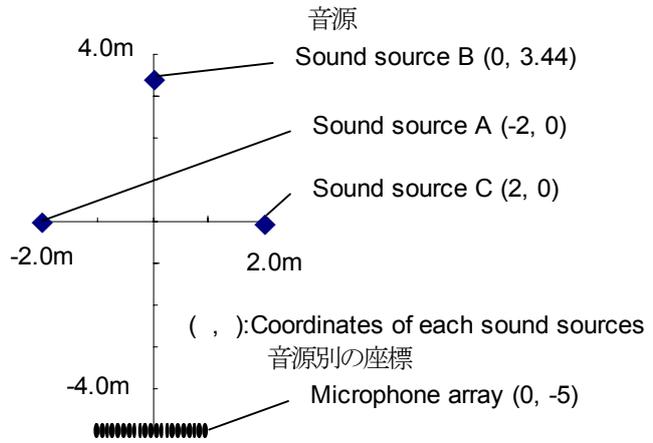


図-6 無響室における配置

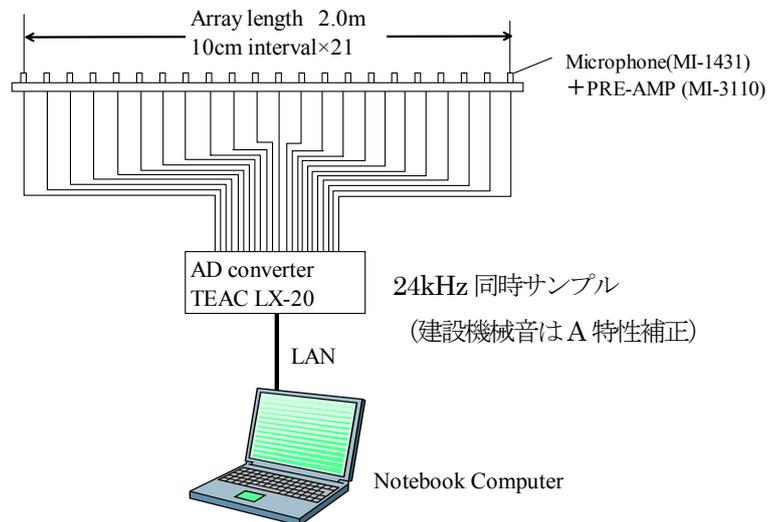


図-7 計測システムの構成

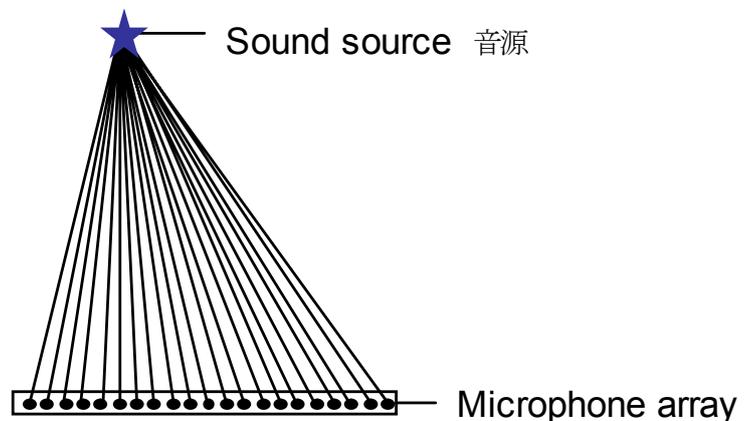


図-8 音源とマイクロホンアレイ

表-1 音源分析の例(1)

音源	方向(°) *3		距離 (m) *3		A特性実効音響パワーレベル(dB)		
	分析値*1	正解	分析値*1	正解	分析値*1	正解*2	誤差
A: 油圧ショベル	-21.7	-21.8	5.8	5.4	99.8	100.9	-1.1
	-21.6		5.9		99.4		-1.5
B: 発電機	-0.1	0.0	14.3	8.4	97.5	95.3	2.2
	0.0		12.6		95.5		0.2
C: ホイールローダー	21.2	21.8	5.6	5.4	99.7	100.2	-0.5
	21.4		5.4		99.3		-0.9
合計					103.9	104.2	-0.3
					103.2		-1.0

*1 マイクロホンアレイの音圧から分析した値

*2 単独の騒音計による測定から計算した値

*3 10秒間の平均値

上段:バンドパスフィルタをかける前

下段:バンドパスフィルタをかけた後

初に一定の距離を仮定して 0.1° ピッチで方向をずらして遅延和を計算し、次に極大点(複数)の方向で距離を 1.1 倍ピッチで変化させ遅延和が最大になる点を音源位置とした。平面内での音源位置の絞り込みのアルゴリズムについてはデータ解析を進めながら簡素化し計算負荷を小さくしていった。計算の手順は①遅延和の計算、②バンドパスフィルタ、③極大値とした。

なお、本アルゴリズムは人が音の位置を認知したり、特定の音を聞き取ることができるのは脳の中に外界と対応する空間があり音源の位置により反応する部位が異なると発想したことに基づいている。

4-2 バンドパスフィルタ

バンドパスフィルタは 250-4,000Hz バンドパス、101 段でハミング窓とした。建設機械の標準スペクトル(式-1)はこのフィルタを通すことで図-10のようにカットされオーバーオールで 1.0dB 少なくなる。図-10は音のエネルギーに面積が比例するように表現した。

4-3 無響室固定周波数音

図-6 の配置で無響室において音源Aから 500Hz 100dB、音源Bから 1000Hz 100dB、音源Cから 2000Hz 100dBの音を発生させ分析した結果、音源A、Cの誤差は 0.1dB だったが音源A、Cに挟まれた音源Bの誤差は 1.8dB となった。音源Bの精度が悪い原因として、それぞれ整数倍の固定した周波数を用いたため干渉の影響を受けていることが考えられる。音源A、B、Cともに 100dB で無相関の 1000Hz のノイズを発生させて分析した結果、0.2~0.3dB の誤差に収まった。無響室の実験で、手法の妥当性を確認した。

4-4 半無響室建設機械音

地表面の反射があり、大きさが変化する、低周波分・高周波分が混在する条件での分析の実証のために半無響室で建設機械の音を模擬的に発生させて実験を行った。音源は図-6の配置でAから油圧ショベルの掘削音(変動音)、Bから発動発電機の音(定常音)、Cからホイールローダーによる岩石運搬の音(変動音)とした。図-9の左側のグラフはある時刻における方向別の

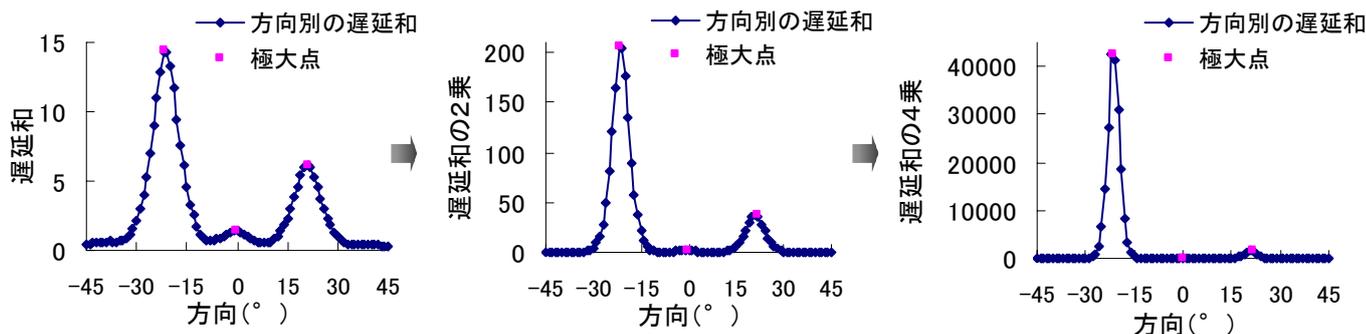


図-9 主音源位置の明確化

遅延和の例である。3つの山は左から油圧ショベル、発動発電機およびホイールローダーの音となる。A、B、Cから同時に発生させて10秒間分を分析した結果が表-1である。正解値はあらかじめ各単独音をマイクロホンアレイの中心の位置で測定した値から計算したものとした。表-1の上段がバンドパスフィルタをかける前である。A、Cはほぼ分析できていると考えて良い。しかし、音源Bの分析値は正解値+2.2dBとなった。これはA、Cからの低周波分の影響を受けているためと考えられる。下段は250-4000Hzのバンドパスフィルタをかけた後の分析値である。音源Bの正解値とのずれは縮小されている。3音源の合計はバンドパスフィルタなしで正解値-0.3dB、バンドパスフィルタをかけた後で正解値-1.0dBとなった。バンドパスフィルタをかけることで0.7dB小さくなり、4-2での想定値と同程度となった。

また、本研究の目的とは異なるが表-1にあるように音圧から音源の位置も分析できた。音源方向の分析精度は良好で誤差はおおむね0.5°以下となった。

4-5 屋外建設機械音

土木工事現場には風、地表面の反射、温度変化など分析値に誤差を与える多くの要因が存在すると考えられる。また音は高周波分および低周波分を含み大きさが変化する。さらに音源は点でなく移動する。このような厳しい条件での実現性を調べるため屋外で建設機械を稼働させて分析した。建設機械は写真-2にある油圧ショベルとした。単独の建設機械でもショベル、ブ

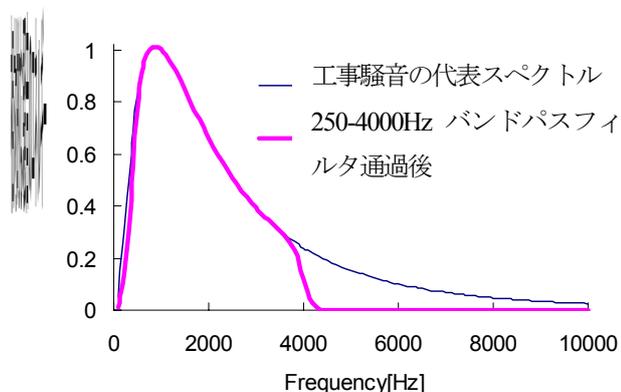


図-10 建設工事代表スペクトルにバンドパスフィルタを適用

ームおよびエンジンと音源が複数存在する。

図-11は1.0秒間の方向別騒音の計算例である。建設機械が模擬作業を行い音源が移動するので分析は0.1秒単位としている。グラフの左側からバケット音、ブーム音、エンジン音のピークがみうけられる。図-12は15秒間の分析結果である。この事例では騒音レベルの合計値が正解値-2.4dBとなった。他にも音源までの距離を変えた実験では-3.8dB、マイクロホンアレイの向きをバケット側に変えた実験で-4.1dBとなるなど大きな誤差が生じた。この誤差のうち1dB程度は4-2で想定したバンドパスフィルタをかけたことによるもので1dB程度は遅延和の過程によるものと考えられる。残り0.4~2.1dB程度の誤差の主要因として音源の移動が考えられる。音源が移動しないエンジン音だけの実験では誤差が-1.4dBとなりバンドパスフィルタと遅延和によると想定される誤差2dBと同程度となった。この誤差はマイクロホンアレイによる音源別の分析値の合計値と単独の騒音計の測定値の差で補正することとした。図-12の測定では表-2のように補正したバケット音71.1dB、ブーム音63.9dBおよびエンジン音70.2dBを音源別の騒音とみなす。

4-6 音源別の音の再生

本研究の目的とは異なるが音源別の音を再生することもできる。図-13は4-5の実験における建設機械の音からエンジン音とバケット音を分離した波形の例である（ブーム音は小さく出現頻度が小さいため分析を省略した）。再生すると良好に分離できていると聞き

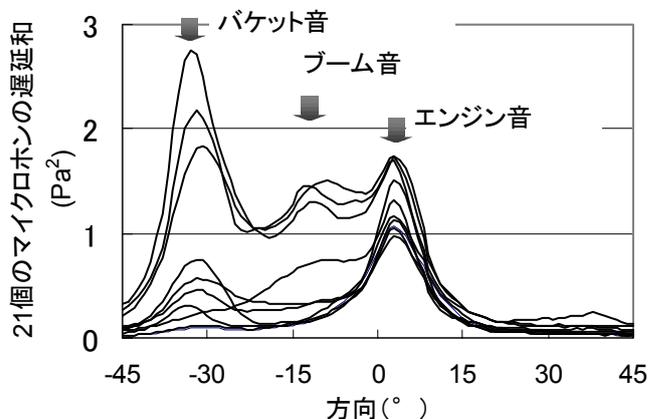


図-11 屋外建設機械稼働音の分析 0.1秒×10

取れる。道路を通行する様々な車両のタイヤ/路面音の抽出への応用なども期待できる。

4-7 低周波音源探査

本マイクロホンアレイは全長が 2m であり 100Hz 以下の低周波音は波長が 2m以上となるので図-4 では指向性がほとんどなく音源探査はできない気がする。

しかし、遅延和は音源方向で最大になるはずなので低周波音でも音源探査ならできるはずである。今回、無響室で250Hzの単音源の方向は誤差1.3°で分析できた。また図-9の中央および右側のグラフは遅延和を2乗、4乗したもので、単純な操作でも見かけ上、主音源方向の分解能を上げることもできる。

以上から、低周波音の音源探査を以下の方法で行うことが可能と考えている。1)低周波用のマイクロホンを使用する。2)観測時間を長くして精度を上げる。

5 まとめ

水平に配置した直線マイクロホンアレイ(延長2m、21個)を使用し、音源から7m程度、離れた位置から音源別の騒音発生量を分析する方法を考案した。

無響室および半無響室においてスピーカーから発生させた3音源を分析できることを確認した後、油圧ショベルを用いた屋外実験でエンジン、ブームおよびバケットの音源別の騒音発生量を分析した結果、分析値の合計値は単独の騒音計の測定値より2.4~4dB程度小さくなった。分析値が小さくなった要因として1dB程度は遅延和をかけたことによるもの1dB程度はバ

表-2 音源分析の例(2)

音源	A特性実効騒音レベル(dB)			分析結果 (補正後)
	分析結果 (補正前) ^{*4}	正解 ^{*5}	補正值	
バケット	68.7	-	-2.4	71.1
ブーム	61.5	-	-2.4	63.9
エンジン	67.8	-	-2.4	70.2
合計	71.7	74.1	-2.4	74.1

^{*4} マイクロホンアレイの音圧からの分析値

^{*5} 単独の騒音計の計測値

ンドパスフィルタをかけたことによるもので残り0.4~2dB程度は主に音源の移動によるものと考えられる。この誤差については単独の騒音計の測定値の差で補正することで音源別の騒音発生量とみなすこととした。

なお、本研究の目的外であるが音源の位置が音圧から分析できることや音源別に音を再生できることもできた。さらに低周波音の音源探査の可能性も見出すことができた。土木工事騒音以外の他分野での応用も期待できる。

参考文献

- 1) 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, pp.711-731, 2002.11
- 2) H.Yoshinaga, T.Yoshida and A.Hayashi: Analysis of individual machine noise in construction, The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2004.8
- 3) 吉永弘志, 林 輝, 山元 弘: 工事における機械別騒音発生量の分析, 騒音制御, Vol.29, No.6, pp.493-500, 2005

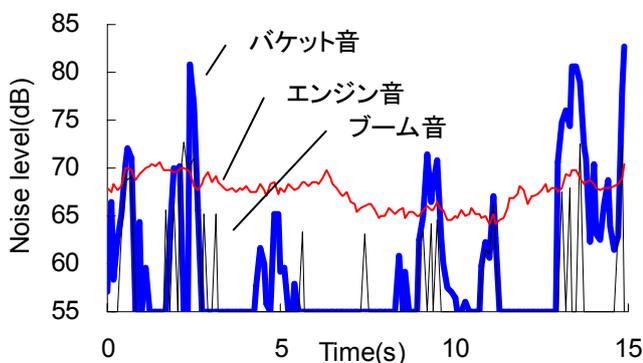


図-12 音源別の建設機械音

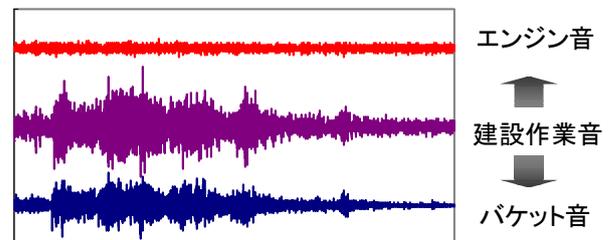


図-13 音源別に騒音を分離

28. 建設工事降下ばいじんの予測手法

独立行政法人 土木研究所 先端技術チーム 主席研究員 山元 弘
 総括主任研究員 林 輝
 主任研究員 ○吉田 潔
 国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 道路環境研究室 主任研究官 吉永 弘

【要旨】

本研究は平成 12 年度に策定した工事騒音・振動・大気的环境影響評価の技術手法において不足している知見、解析手法を検討するものである。建設工事降下ばいじんについては、鉛直拡散幅、水平拡散幅がガス状物質と同程度であり「重力沈降を考慮したプルームモデル」の適用が可能、裸地由来降下ばいじんは土質ごとに設定した「基準発生量」が風速のべき乗に応じて増減する式が適切との結論を得た。

1. 目的

建設工事降下ばいじんの環境影響評価に関する予測については、現場実測に基づき土木研究所が取りまとめたプルーム式を基本とする経験式（式-1 参照）が活用されているが、発生源高さの変化に対応させた予測、仮囲い効果の定量的評価については対応できていない。また、解析事例の蓄積により、想定した発生源周辺からの裸地由来降下ばいじん舞い上がりが解析結果に影響を与えていることもわかってきた。

$$C_d(x) = a \cdot \left(\frac{u}{u_0} \right)^{-b} \cdot \left(\frac{x}{x_0} \right)^{-c} \quad (\text{式-1})$$

Cd(x) : 1 ユニットから発生し拡散する粉じん等のうち発生源からの距離 x(m)の地上 1.5m に堆積する 1 日当たりの降下ばいじん量(t/km²/日/ユニット)

a : 基準降下ばいじん量(t/km²/日/ユニット) (基準風速時の基準距離における 1 ユニットからの 1 日当たりの降下ばいじん量)

u : 平均風速(m/s)

u₀ : 基準風速(u₀=1m/s)

b : 風速の影響を表す係数(b=1)

x : 風向に沿った風下距離(m)

x₀ : 基準距離(m)(x₀=1m)

c : 降下ばいじんの拡散を表す係数

予測モデルとして、より汎用性のある「重力沈降を考慮したプルーム式」(図-1、式-2 参照) が建設工事降下ばいじんに適用できれば、これらの課題解決に応用が可能であると考え検討することとした。

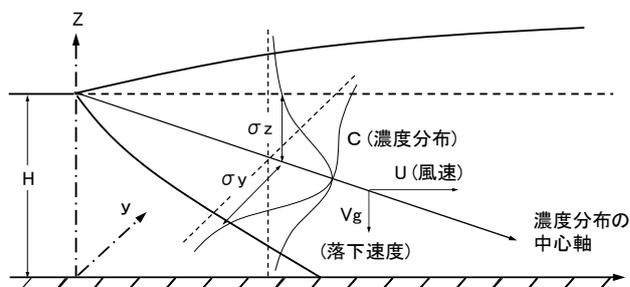


図-1 重力落下する粒子の拡散モデル

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - He + V_s \cdot x/u}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (\text{式-2})$$

C: 粉じん濃度(mg/m³)
 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)

2. 研究方法

「重力沈降を考慮したプルーム式」の建設工事降下ばいじんへの適用の可能性を実験により確認し、従来手法と「重力沈降を考慮したプルーム式」による現場実測データ解析結果を比較検討した。また、構内実験による裸地由来降下ばいじんの舞い上がり特性の確認、及び、仮囲いの効果を「重力沈降を考慮したプルーム式」を用いてモデル化する検討も行った。

2.1 降下ばいじんの拡散幅を調べる実験

「重力沈降を考慮したブルーム式」はこれまでに工事降下ばいじんのような比較的大きな粒子に用いた事例は見られず、まず適用性を確認する必要があった。

降下ばいじん粒子の拡散幅について、これまでガス状物質について多くの実験が行われているPasquill-Giffordの拡散幅とよく一致していれば、空気の擾乱に対してガス状物質と同程度の追従性があることとなり、「重力沈降を考慮したブルーム式」を工事降下ばいじんに適用可能であると考えた。

ブラス機を準用した発じん装置を考案し屋外で拡散幅を測定した(写真-1)。発じん材料は関東ローム(JIS Z8901 7種:代表粒径 $30\mu\text{m}$)とベントナイト($60\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$)とした。拡散幅はホーロー製のバットによる降下ばいじん量計測、デジタル粉じん計計測およびトレーサーガスの計測を同時に行い測定値を比較した。



写真-1 拡散実験

2.2 「重力沈降を考慮したブルーム式」による現場実測データの解析

(式-2)に適用する沈降速度等について、現場実測データから最小二乗法による解析を行い、従来手法と解析精度・予測精度等を比較検討した。

検証に用いた実測調査は、道路土工(硬岩掘削)の2003CB1216AMと2003CB1216PMの2ケースである。

2.3 風速等と発じん量の関係を調べる実験

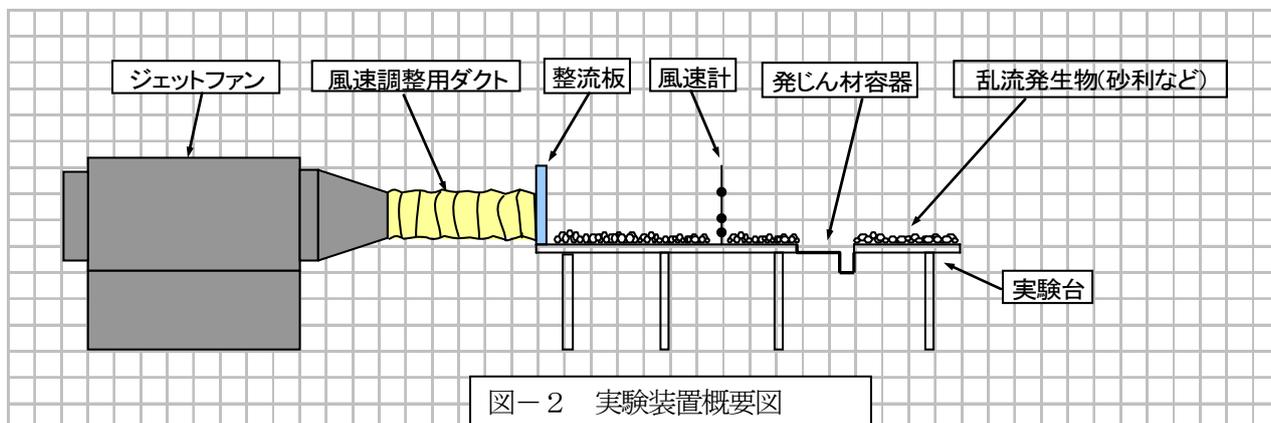
(式-2)の発じん量及び裸地由来降下ばいじんに関する知見を得るため、風速、粒径、含水比等と発じん量の関係を調べる実験を行った。

実験に当たっては、自然風測定から求めた「べき数」をもとに適切な鉛直風速分布を再現することが可能な装置を新たに考案し製作した。風の発生は最大風速 14.0m/s 以上が発生可能なジェットファンを使用し、整流装置を調整して必要とする鉛直風速分布を発生させた。風速は粉じん発生部直前に無指向性の熱線式風速計を設置して測定した。発じん部の面積約は 0.1m^2 とし、転動した発じん材はポケットに落下する形状の容器を実験台に設置した。発じん量は発じん前後の重量を測定して求めた。

実験装置を図-2に示す。

2.4 仮囲いの効果予測検討

「建設機械の稼働に由来する降下ばいじん」と「裸地由来降下ばいじん」について、「重力沈降を考慮したブルーム式」を応用し、環境保全措置としての仮囲いの効果を定量的に評価する手法を提案した。



3. 研究結果

3.1 降下ばいじんの拡散幅を調べる実験結果

図-3は鉛直方向、図-4は水平方向の拡散幅の測定事例である。水平方向の拡散幅の測定結果から工事降下ばいじんの拡散幅はガス状物質と同程度であることが確認できる。鉛直方向の降下ばいじん拡散幅はガス状物質との差がやや大きい箇所もあるが、重力による影響とは認められず、降下ばいじんとガス状物質は同じような傾向であると言える。実験は同一条件で3回づつ行い同様な結果を得ることができた。

本実験結果から工事降下ばいじんに「重力沈降を考慮したプルーム式」は適用可能と考えられ、拡散幅はガス状物質に関する文献値（Pasquill-Giffordの拡散幅）を使用することとした。¹⁾

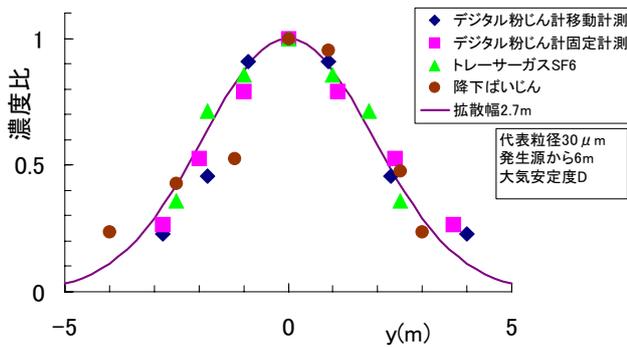


図-3 降下ばいじんの水平方向拡散幅の比較

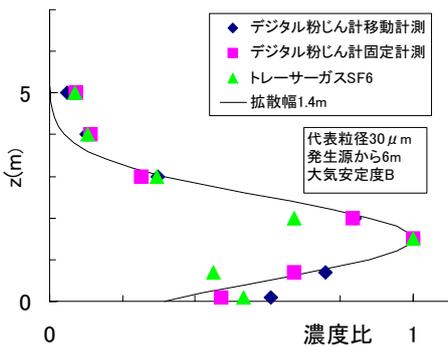


図-4 降下ばいじんの鉛直方向拡散幅の比較

3.2 「重力沈降を考慮したプルーム式」による現場実測データの解析結果

(式-2)を用いて降下ばいじんを予測する場合、粒子の沈降速度、発生源高さ、鉛直方向初期拡散幅を求める必要がある。ここでは、沈降速度については、0.4m/s~2.4m/s、発生源高さについては0m~4m、鉛

直方向初期拡散幅については0m~4mの間で、最小二乗法により最も相関の良い値を求めた。その他の計算条件は、大気安定度C、水平方向初期拡散幅は点発生源の間隔の1/2(2.5m)とした。

実測調査における発生源と測定点の位置関係を図-5、図-6に示す。なお、計算は地上1.5mの気象条件を用いて行った。実測値 2003CB1216AM 及び 2003CB1216PM との対応が良いのは、それぞれ、沈降速度 1.6m/s、1.4m/s、発生源高さ 1.5m、2.0m、鉛直方向初期拡散幅 3.0m、3.0m であった。

計算値（重力沈降を考慮したプルーム式による計算結果）を現行予測式（ $a=84000$ 、 $c=2.0$ ）による計算結果と比較したものを図-7に示す。計算値は遠方で実測値より過小になる傾向が見られるが、これは、バックグラウンド、地面反射、及び裸地由来降下ばいじん等の影響と考えられる。しかし、実測値との相関は重力沈降を考慮したプルーム式による計算結果が良いことから予測精度は、現行予測式と同程度以上と考えられる。

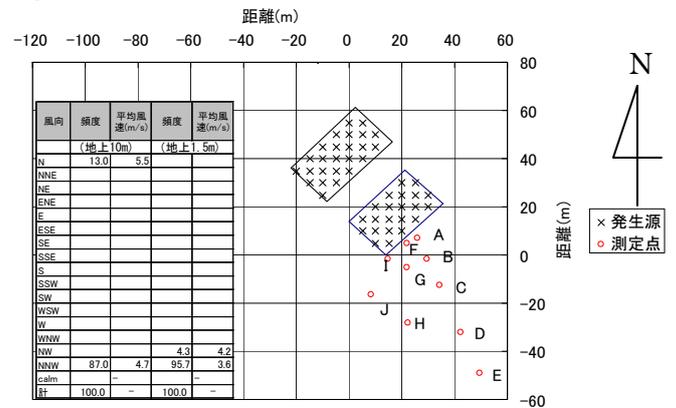


図-5 発生源と測定点の位置(2003CB1216AM)

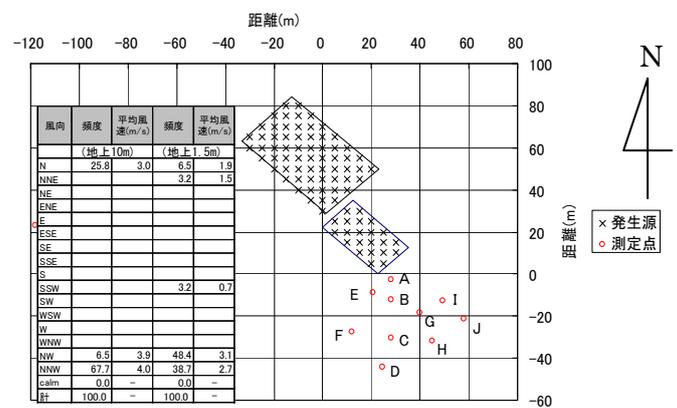


図-6 発生源と測定点の位置(2003CB1216PM)

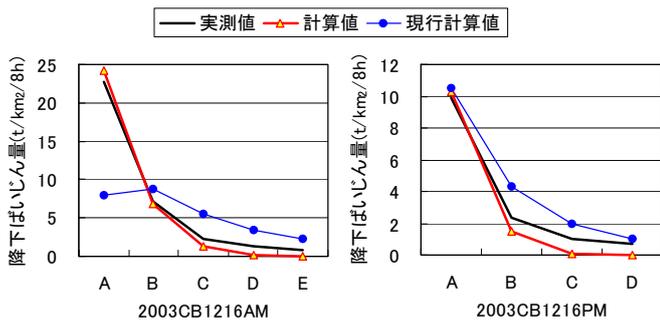


図-7 現行予測式による計算結果との比較

3.3 風速等と発じん量の関係調べる実験結果

1) 風速との関係

図-8に高さ0.03mにおける風速と発じん量の関係を示す。降下ばいじんの発生量は、風速が強まるのと同時に指数曲線的に増加し、粒径50 μ mでは風速5m/sを200 μ mでは風速が6m/sを超えた時点から発生量が多くなっている。

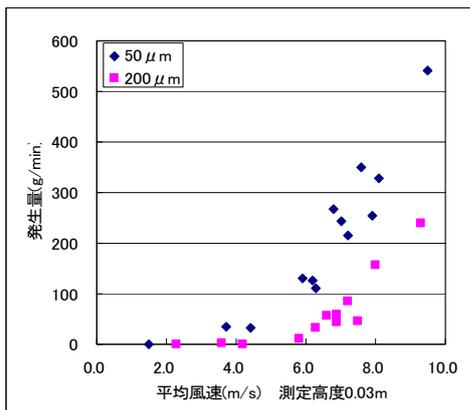


図-8 平均風速と発じん量の関係

2) 含水比との関係

図-9に含水比と発じん量の関係を示す。発じん時の平均風速(高度0.03m)は7.5~8.0m/sであった。

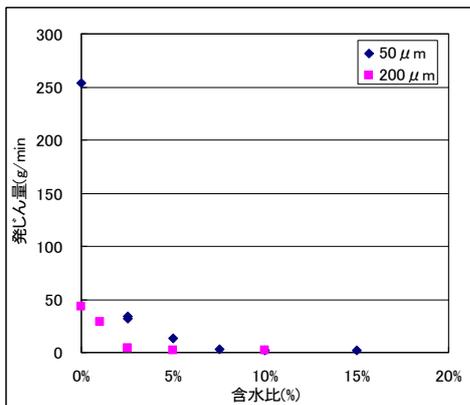


図-9 含水比と発じん量の関係

これによると、含水比が5%を超えると、50 μ m、200 μ mともに降下ばいじんの発生は見られなくなった。

3) 粒径との関係

含水比0%でほぼ同じ風速のときの粒径別での発じん量を比較した結果を図-10に示す。粒径50 μ m以上の場合は粒径が大きくなるに従って発じん量が減少している。これは単粒の重量が増えるためと考えられる。しかし、粒径30 μ mの場合は極端に発じん量が減っている。これは粒径が小さいため、粒間の摩擦が大きくなるためなどさまざまな要因が考えられるが、今後調査する必要がある。

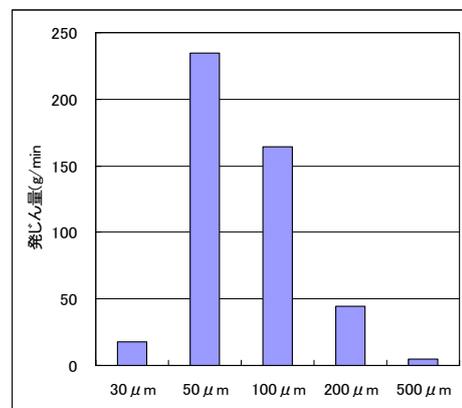


図-10 粒径と発じん量の関係

4) 表面状態との関係

砂利の面積比と発じん量の関係を図-11に示す。これによると、砂利の粉体材容器に対する面積が大きくなるに伴い、発じん量はほぼ直線的に減少している。但し、面積比10%、20%の場合は砂利で覆わない場合より発じん量が多くなっている。発じん後の状態を写真-2に示す。写真から砂利の周囲の粉体が減少して発じんしている様子が伺える。面積比20%以

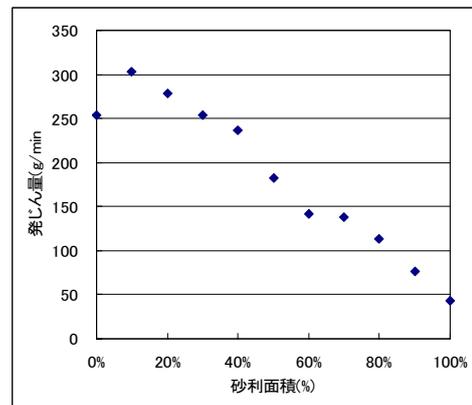


図-11 表面状態と発じん量の関係



写真-2 砂利面積 10%の発じん後の状態

下の場合、砂利の周辺の気流に乱れが発生して粉体が巻き上げられるためと考えられる。

3.4 仮囲いの効果予測検討結果

1) 「裸地由来の降下ばいじん」への仮囲いの効果

裸地からの発じん抑制及び降下ばいじん飛散防止については、仮囲いの形状及び仮囲い内側の風速分布状況に依存すると考えられる。また、仮囲いの効果が及ぶ範囲は、仮囲いの高さに比例するものと考えられる。すなわち、裸地に仮囲いを設置することによって発じんする領域を限定するという形で発じん抑制を表せる

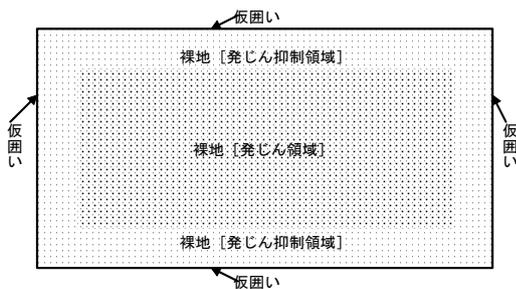


図-12 仮囲いによる発じん抑制 (平面模式図)

可能性がある (図-12 参照)。

2) 「建設機械の稼働に由来する降下ばいじん」への仮囲いの効果

風下側の仮囲いによる降下ばいじんの飛散防止効果については、仮囲い位置で天端より上に分布する降下ばいじんのみが仮囲いを越えて飛散するものと仮定する (図-13)。この場合、仮囲いより遠方の予測計算では発生量 Q を式-3のように補正することでその効果を取り込むことができると考えられる (重力沈降あり、反射なしとした場合)。

$$Q' = Q \cdot \left[1 - \int_{-\infty}^{H_w} \frac{1}{\sigma_z \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z - H + V_g \cdot x/u}{\sigma_z} \right)^2 \right] dz \right]$$

H_w : 仮囲い高さ

(式-3)

ただし、風が仮囲いを乗り越えか吹き下ろすかの境が仮囲い天端よりも低い位置にあることが想定され、詳細は数値解析あるいは実験等で確認する必要がある。

4 まとめと今後の課題

4.1 まとめ

本研究では、工事騒音・振動・大気の影響評価の技術手法で不足している事項への対応として、建設工事降下ばいじんについて、より汎用性のある「重力沈降を考慮したブルーム式」の建設工事降下ばいじんへの適用の可能性を実験により確認し、従来手法と「重力沈降を考慮したブルーム式」による現場実測データ

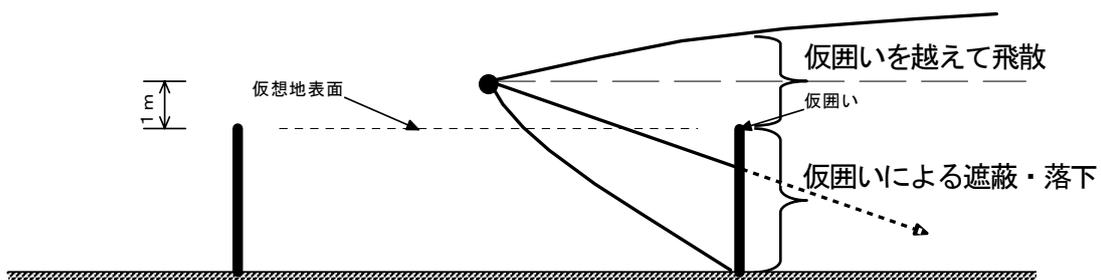


図-13 仮囲いを設置した場合の排出源高さの設定

解析結果を比較検討した。また、構内実験による裸地由来降下ばいじんの舞い上がり特性の確認、及び、仮囲いの効果を「重力沈降を考慮したプルーム式」を用いてモデル化する検討も行った。

検討の結果は下記の通りであった。

- 1) 拡散実験の結果、建設工事降下ばいじんの拡散幅はガス状物質と同程度であり、ガス状物質に関する文献値を「重力沈降を考慮したプルームモデル」に適用し建設工事降下ばいじんの予測が可能である。
- 2) 「重力沈降を考慮したプルームモデル」を用いて現場実測データを解析した結果、沈降速度、鉛直方向初期拡散幅、発生量を適切に設定して計算することにより、実測値と良く一致し、予測精度が現行予測式と同程度以上であることが確認できた。
- 3) 実験により、裸地由来降下ばいじん発生量は風速が強まるのと同時に指数曲線的に増加すること、粒径が大きくなるに従って発じん量が減少することが明らかになった。このことから、裸地由来降下ばいじんは土質（粒径に依存）ごとに設定した「基準発生量」が風速が強まるのと同時に指数曲線的に増加する式が適切と考えられる。
- 4) 仮囲いの効果については、「裸地由来の降下ばいじん」は発じんする領域を限定するという形で、「建設機械の稼働に由来する降下ばいじん」は仮囲い位置で天端より上に分布する降下ばいじんのみが仮囲いを越えて飛散するものとして、反映させることが適切であると考えられる。

4. 2 今後の課題

「重力沈降を考慮したプルームモデル」を適用した解析では遠方の降下ばいじん予測値が過小となる傾向が見られたため、必要な解析精度等を勘案しつつ原因を究明する必要がある。発じん実験においては粒径 30 μm のものの舞い上がりが非常に少ない結果となっており、現場データでの確認が必要である。仮囲いの風の乗り越え状況については、数値解析等で確認する必要がある。

上記の課題解決とともに、今後、工種毎、土質毎の建設工事降下ばいじんの粒径分布の解析や、「重力沈降を考慮したプルームモデル」を用いた現場実測データの解析を蓄積し、技術手法に反映させる方針である。

5. おわりに

「重力沈降を考慮したプルーム式」による現場実測データの解析」に用いたデータは国土交通省の工事現場で調査したものであり、解析は土木研究所が委託先の財団法人道路環境研究所および株式会社環境技術研究所と協力して行った。実験及び予測手法の検討については「道路環境影響評価の技術手法に関する大気質予測手法検討委員会」にご意見をいただいた。ここに、深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉永弘志、吉田 正: 工事粉じんの拡散, 第 45 回大気環境学会講演要旨集, p.621, Oct.2004

29. 月面探査ローバの走行性に関する実験

呉工業高等専門学校 重松尚久

呉工業高等専門学校専攻科 ○下岡幸司

愛媛大学 室達朗

1.はじめに 近年、月・惑星の探査・開発に関する研究が盛んに行われている。月には研究の対象としての価値のみならず、月から我々を取り巻く宇宙を観測できる可能性、資源利用の可能性、新たなエネルギー開発の可能性などがあるからである。ローバは将来の月面探査における重要な機器の一つであり、月の起源と進化に関する様々なデータを取得する際に、大きな役割を果たすと期待されている。しかしながら月面は、レゴリスと呼ばれる粉塵のような非常に細かい砂で覆われており、それに加えて重力が地球上の1/6という環境にある。そのため、小型のローバが十分な推進力を得て月面をスムーズに走行することが困難な場合が予想される。本研究では、シミュラント(模擬月面砂)地盤上を両輪駆動式2軸2輪式車両が走行する際に、斜面の傾斜角、車両の前・後輪の速度比を変化させた場合の、車両の走行性を明らかにすることを目的とする。

2.実験方法 月面地盤を模擬するために、試料砂としてシミュラント(模擬月面砂)を使用した。今回使用したシミュラントはFJS-1¹⁾と呼ばれており、粒子密度は 2.90g/cm^3 、粘着力 c は約 8.0kPa 、内部摩擦角 ϕ は 37.2° である。このシミュラントを $2,000\text{mm}\times 1,500\text{mm}$ 四方の土槽の中に厚さ約 100mm で敷き詰め、これを供試地盤とした。また、この土槽には耕運装置が組み込まれており、これによって地盤を攪拌・整地でき、すべての実験において同一の地盤状態が再現できるようになっている。なお、整地後の地盤で簡易式ベーンせん断試験機を用い、再現性を確認した。また、この土槽は、電動駆動により 40 度まで傾斜させることが可能である。図-1にそれぞれの車輪形状を示す。過去の研究²⁾より求めた最適なトレッド高さ-トレッドピッチ比 1.38 を

もとにし、トレッド高さ-トレッドピッチを $13\text{mm}-18\text{mm}$ 、 $21\text{mm}-29\text{mm}$ 、 $30\text{mm}-41\text{mm}$ とした3種類の車輪を作成した。便宜上、トレッド長さが 13mm の車輪をsmall、 21mm の車輪をmiddle、 30mm の車輪をbigと定義する。図-2に実験装置の概略図を示す。車輪の回転速度は、後輪を 1.00cm/s で一定とし、前輪の速度比を $1.00(1.00\text{cm/s})$ 、 $1.05(1.05\text{cm/s})$ 、 $1.10(1.10\text{cm/s})$ 、 $1.15(1.15\text{cm/s})$ 、 $0.95(0.95\text{cm/s})$ 、 $0.90(0.90\text{cm/s})$ 、 $0.85(0.85\text{cm/s})$ の、7種類に変化させた。今回の実験では、地球上での重量が約 $1,200\text{N}$ のローバが、重力が地球の1/6である月面で走行することを仮定し、前・後輪ともに接地圧が線圧 0.5N/mm となるようにした。また、前・後輪が進行方向に対して土から作用する力をモーメントとして測定するために8角形リングを使用した。

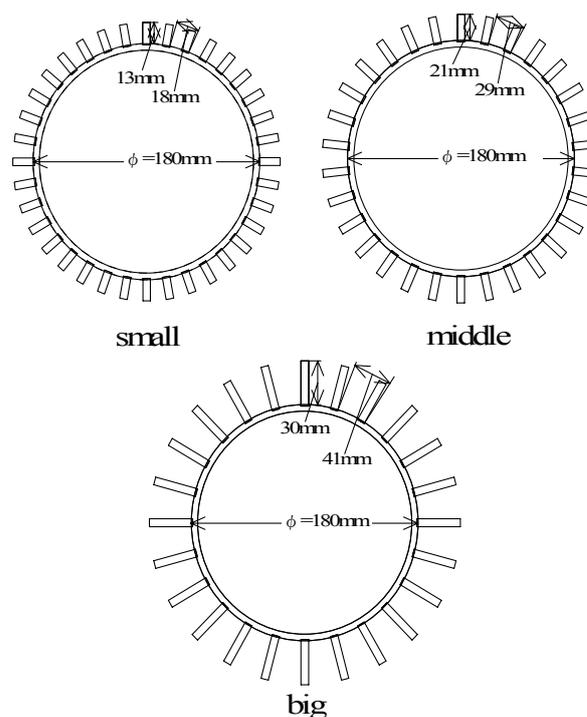


図-1 車輪形状

また、前・後輪に作用するトルクをロータリエンコーダにより、車両の水平移動距離をレーザー変位計により、それぞれ測定した。また、走行後の地盤の密度を、簡易式ベーンせん断試験器を用いて測定した。今回の実験では、地盤の傾斜角度を、small・middleの車輪では0、5、10°とし、平地・登坂走行を、bigの車輪では0、5、10、15°とし、平地・登坂・下降走行させた。なお、定常走行状態でのデータを有効なデータとして扱った。

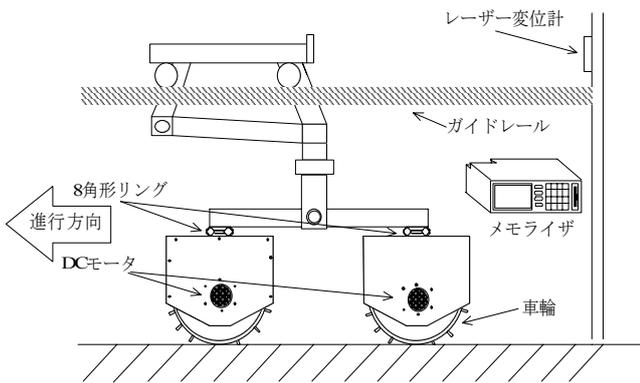


図-2 実験装置の概略図

3. 実験結果と考察

3.1 供試地盤の密度 今回の実験では、地盤の密度の測定に、簡易式ベーンせん断試験器を用いた。簡易式ベーンせん断試験器の刃の高さは20mmで、それが地盤の表面にすべて隠れる深さを1層目、表面から10mm差し込んだ深さを2層目、表面から25.5mm差し込んだ深さを3層目とした。200mm×200mm×100mmの容器にシミュラントをゆる詰めにし、それをバイブレーターで締め固めることでさまざまな密度の地盤を作り、3層に分けてベーンせん断トルクを測定した。地盤の表面の密度とベーンせん断トルクの関係を図-4に、その回帰式を式(1)に示す。

$$y = 1.9251x^{0.0668} \quad (1)$$

y : 地盤の密度 (g/cm³)

x : ベーンせん断トルク (N・cm)

地盤の表面から10mmの深さの密度とベーンせん断トルクの間接関係を図-4に、その回帰式を式(2)に示す。

$$y = 1.8656x^{0.0718} \quad (2)$$

y : 地盤の密度 (g/cm³)

x : ベーンせん断トルク (N・cm)

地盤の表面から25.5mmの深さの密度とベーンせん断トルクの間接関係を図-4に、その回帰式を式(3)に示す。

$$y = 1.8007x^{0.0791} \quad (3)$$

y : 地盤の密度 (g/cm³)

x : ベーンせん断トルク (N・cm)

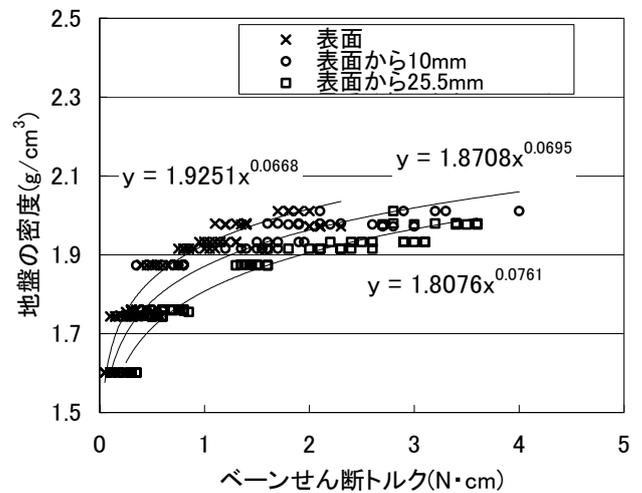


図-4 地盤の密度とベーンせん断トルクの関係

図-5に、耕運装置で整地した後の地盤の密度を示す。なお、この地盤の密度は、整地を行うごとに測定したものの平均値である。また、1層目の密度は1.70g/cm³、2層目の密度は1.77g/cm³、3層目の密度は1.79g/cm³となった。このように、深くなるにした

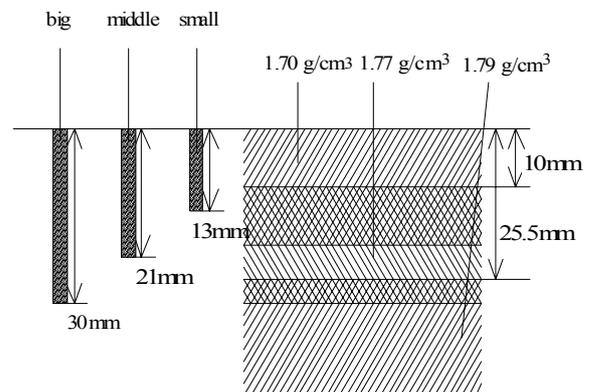


図-5 整地後の地盤の密度

がって、地盤の密度が大きくなっている。また、トレッドが長い車輪になるほど、トレッドが地盤の密度の大きい部分に達していることが分かる。

3.2 スリップ率 スリップ率とは、車両が走行するであろう速度に対する、実際に走行したときの速度の比率である。駆動状態($R\omega > V$)でのスリップ率(i_d)は、式(4)で表される。

$$i_d = \left(1 - \frac{V}{R\omega} \right) \times 100 \quad (4)$$

i_d : 駆動状態でのスリップ率(%)

R : 車輪の半径(mm)

ω : 車輪の回転速度(rad/s)

V : 実際に走行したときの速度(mm/s)

また、制動状態($R\omega < V$)でのスリップ率(i_b)は式(5)で表される。

$$i_b = \left(\frac{R\omega}{V} - 1 \right) \times 100 \quad (5)$$

i_b : 制動状態でのスリップ率(%)

R : 車輪の半径(mm)

ω : 車輪の回転速度(rad/s)

V : 実際に走行したときの速度(mm/s)

なお、この実験で求めたスリップ率は、車両の走行が定常状態になった際の、車両の速度と車輪の回転速度から求めたものである。

図-6に、bigの車輪における、傾斜角と前輪のス

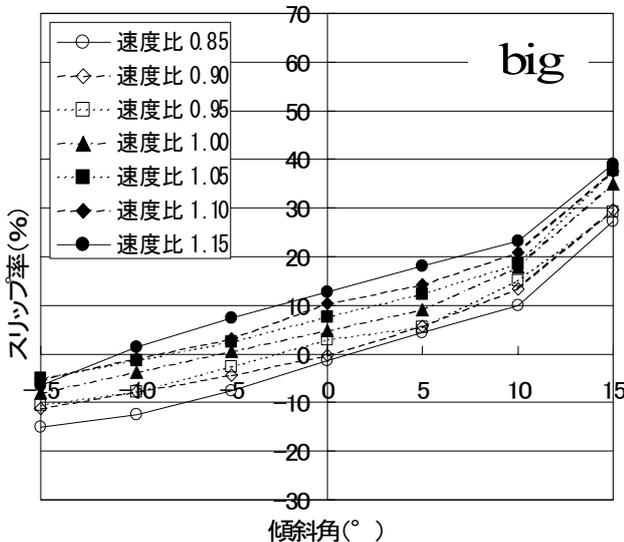


図-6 傾斜角と前輪のスリップ率の関係

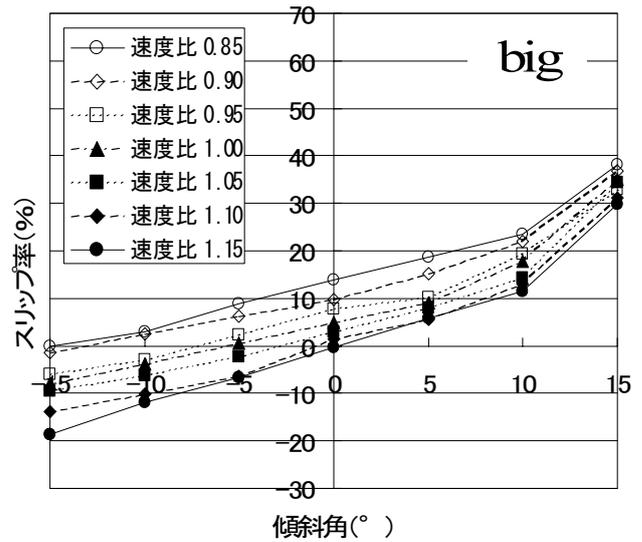


図-7 傾斜角と後輪のスリップ率の関係

リップ率の関係を示す。また、図-7に、bigの車輪における、傾斜角と後輪のスリップ率の関係を示す。すべての傾斜角において、前輪の速度比を増加させるにしたがって、前輪のスリップ率は増加し、後輪のスリップ率は減少する。また、地盤の傾斜角が大きくなるにしたがって、前・後輪ともスリップ率が增加することが分かる。これは、車両の自重の地盤と平行な成分が、斜面の下向きに働いているためだと考えられる。また、small・middleの車輪においても、bigと同様な傾向が見られた。

図-8に、前輪の速度比1.05における、傾斜角と前輪のスリップ率の関係を示す。なお、これまでの実験³⁾より、下降走行では車輪別の違いが表れないことが分かっているため、下降走行はbigのみの実験を行った。平地走行ではすべての車輪で車輪形状別の違いは見られないが、登坂走行では、地盤の傾斜が大きくなるにしたがって、smallのスリップ率が大きくなっている。これは、smallの場合、トレッドが地盤の表面のゆるい部分までしか届かず、十分に地盤を締め固められないためだと考えられる。また、すべての速度比において、速度比1.05の場合と同様な結果が見られた。なお、後輪においても、前輪と同様な傾向が見られた。

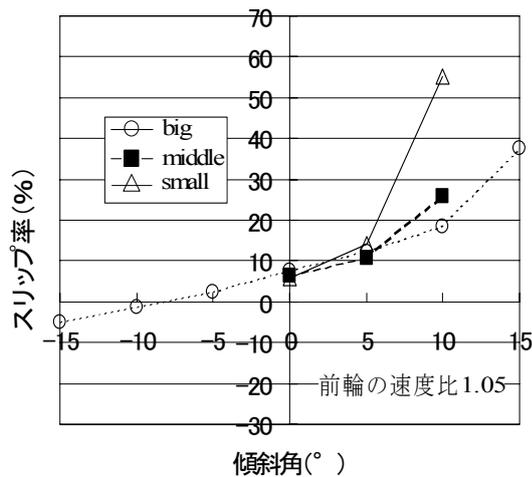


図8 傾斜角と前輪のスリップ率の関係

3.4 有効駆動力 有効駆動力とは、車輪が締め固めた地盤から受ける水平反力と等しく、駆動力と走行抵抗の差で定義される。なお、有効駆動力は、実験値より求めた最大値とした。図-9 に、big の車輪における、傾斜角と前輪の有効駆動力の関係を示す。また、図-10 に、big の車輪における、傾斜角と後輪の有効駆動力の関係を示す。前輪の速度比を増加させるにしたがって、前輪の有効駆動力は減少し、後輪の有効駆動力は増加する。下降走行の場合、前輪では、地盤の傾斜角の変化にともなう有効駆動力の変化は見られないが、後輪では、地盤の傾斜角を大きくするにしたがって、有効駆動力がわずかに増加する。また、登坂走行では、地盤の傾斜角が大きくなるにしたがって、前輪では有効駆動力が減少し、後

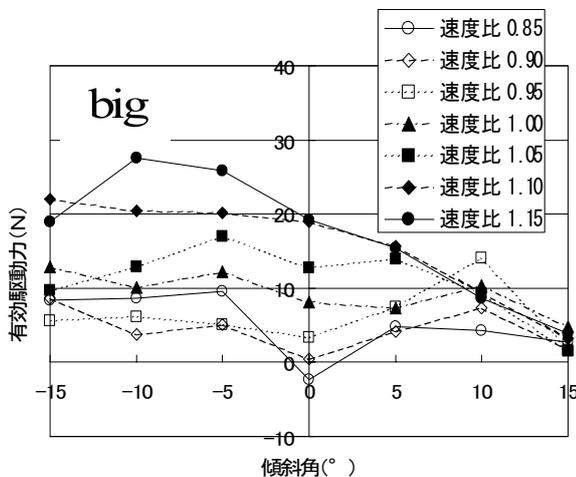


図-9 傾斜角と前輪の有効駆動力の関係

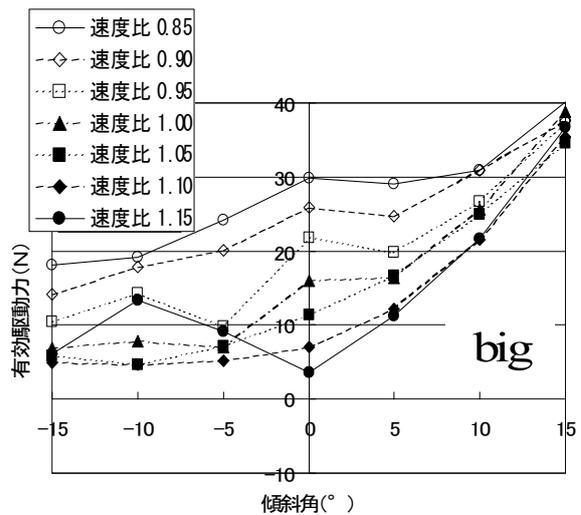


図-10 傾斜角と後輪の有効駆動力の関係

輪では有効駆動力が増加する。地盤の傾斜角が 15° の際に、前輪の有効駆動力は、ほぼ 0 に近い値となる。つまり、ほとんど仕事ができない状態である。また、前・後輪ともに、地盤の傾斜角が 15° の際に、速度比別での有効駆動力の差がほとんど無くなる。これは、傾斜が大きくなりすぎるとトレッドが地盤を締め固められず、車輪が空回りするためであると考えられる。また、登坂走行では、前輪の有効駆動力が減少し、後輪の有効駆動力の方が大きく働いている。これは、登坂の際に車両の重心が後輪側に偏心するため、後輪の接地圧が増加し、それによって後輪側の地盤のせん断抵抗が増加するためであると考えられる。

図-11 に、前輪の速度比 1.00 における、傾斜角と前輪の有効駆動力の関係を示す。また、図-12 に、前輪の速度比 1.00 における、傾斜角と後輪の有効駆

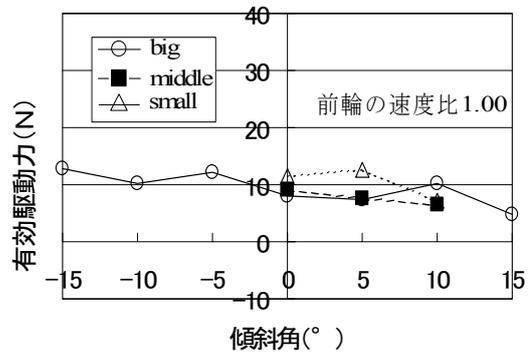


図-11 傾斜角と前輪の有効駆動力の関係

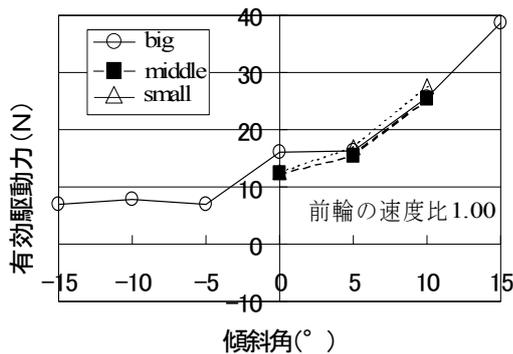


図-12 傾斜角と後輪の有効駆動力の関係

動力の関係を示す。平地走行・登坂走行では、前・後輪ともに、有効駆動力には、車輪形状別での違いがあまり見られない。これは、過去の研究²⁾において、接地圧がある程度大きくなるとせん断抵抗にトレッド形状による違いが現れないということが分かっており、そのため、重力が地球の1/6である月面を仮定した本実験では、車輪形状別での大きな違いが明確に現れなかったと考えられる。なお、過去の研究³⁾より、下降走行では車輪別の違いが表れないことが分かっている。また、前・後輪ともに、すべての速度比において、速度比が1.00の場合と同様な傾向が見られた。

3.3 車両走行後の地盤の密度 車両走行後の地盤の密度を、簡易式ペーンせん断試験器により、3.1で説明した回帰式を用いて求めた。なお、地盤表面から25.5mmの地点では、ペーンせん断トルクが測定器のレンジを越えてしまったため、測定できなかった。しかし、最低でも地盤の密度が2.05g/cm³はあると考えられる。

図-13に、bigの車輪における、傾斜角と車両が走行後の地盤表面の密度の関係を示す。また、図-14に、bigの車輪における、傾斜角と車両が走行後の地盤表面から10mm深さの地点の密度の関係を示す。地盤表面・表面から10mm深さの地点ともに、登坂走行・平地走行では、前輪の速度比の変化にともなう地盤の密度の変化は少なく、下降走行では、前輪の速度比を増加させるにしたがって、地盤の密度は大きくなる。地盤表面においては、登坂走行では、

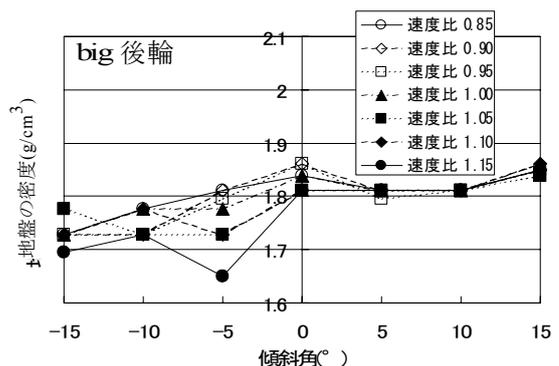


図-13 傾斜角と走行後の地盤の密度の関係 (表面)

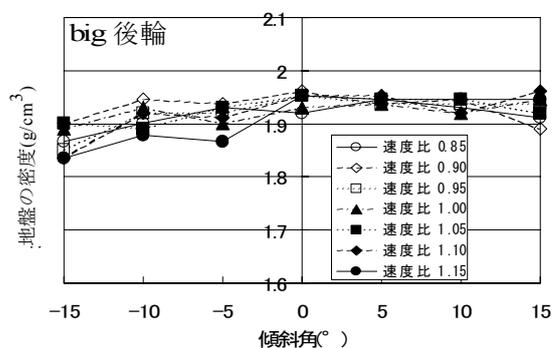


図-14 傾斜角と走行後の地盤の密度の関係 (表面から10mm)

傾斜角の変化にともなう地盤の密度の変化は見られないが、下降走行では、傾斜角が大きくなるにしたがって地盤の密度が小さくなる。地盤表面から10mm深さの地点では、登坂走行・下降走行ともに、傾斜角の変化にともなう地盤の密度の変化は見られない。また、地盤表面よりも、10mm深い地点の方が地盤の密度が大きいことが分かる。

図-15に、前輪の速度比1.00における、傾斜角と車両が走行後の地盤表面の密度の関係を示す。また、図-16に、前輪の速度比1.00における、傾斜角と車両が走行後の地盤表面から10mm深さの地点の密度の関係を示す。地盤表面・表面から10mm深さの地点ともに、走行後の地盤の密度は、bigとmiddleでは、ほとんど違いがないことが分かる。bigとmiddleに対して、smallではどの傾斜角においても密度が小さくなっているが、これは、トレッドが地盤の浅いところまでしか達しておらず、十分に地盤を締め固められなかったためだと考えられる。また、すべて

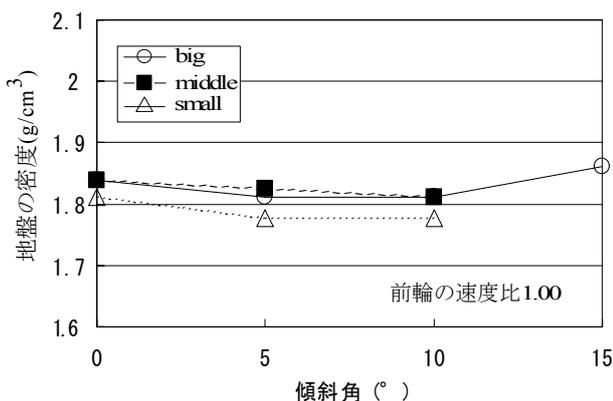


図-15 傾斜角と走行後の地盤の密度の関係
(表面)

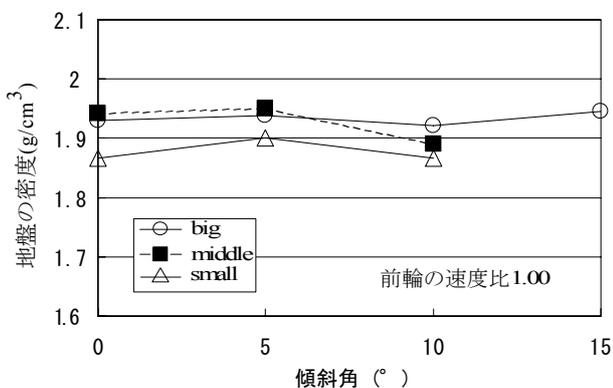


図-16 傾斜角と走行後の地盤の密度の関係
(表面から10mm)

の速度比において、速度比が1.00の場合と同様な傾向が見られた。

4.結論 本研究の結論を以下に示す。

- (1) スリップ率は、前・後輪ともに、地盤の傾斜が大きくなるにしたがって増加する。また、前輪の速度比を増加させるにしたがって、前輪のスリップ率は増加し、後輪のスリップ率は減少する。平地走行では車輪形状別のスリップ率の違いが現れないが、登坂走行では、smallのスリップ率が大きくなる。
- (2) 有効駆動力は、前輪では、下降走行の際に地盤の傾斜角の変化にともなう変化は見られないが、登坂走行では、地盤の傾斜角が増加するにしたがって減少する。一方後輪では、下降走行の際に、地盤の傾斜角を大きくするにしたがってわずかに増加するが、登坂走行で

は、地盤の傾斜角が大きくなるにしたがって増加する。前輪の速度比を増加させるにしたがって、前輪の有効駆動力は減少し、後輪の有効駆動力は増加する。また、有効駆動力は、接地圧が小さいため、すべての傾斜角において車輪別での違いが表れない。

- (3) 車両が走行した後の地盤の密度は、前輪・後輪での違いがない。すべての車輪形状において、地盤表面よりも、10mm深い地点の方が地盤の密度が大きくなる。また、bigとmiddleでは走行後の地盤の密度はほぼ等しく、smallではそれらよりも密度が小さくなる。

今回の実験は月面を想定し、乾燥したシミュラント地盤で行ったが、今後、含水比を変化させた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の足回りの最適化などに応用することが可能であると考えられる。

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。本論文の作成にあたり、宇宙航空研究開発機構青木滋氏、若林幸子氏、清水建設株式会社 金森洋史氏、佐藤等氏には多大なる助言をいただき、誠に世話になりました。

参考文献

- 1) 大知剛:砂質地盤における平板載荷試験および平板牽引試験について,平成16年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集,pp.537-538,2004.
- 2) 大知剛:月面探査ローバに最適なトレッド形状の検討,平成17年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集,pp.179-182,2005.
- 3) 下岡幸司,重松尚久:月面探査ローバの走行性に関する実験,平成17年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集,pp.509-510,2005.
- 4) 重松尚久,下岡幸司:月面探査ローバの走行性に関する実験,テラメカニクス研究会,テラメカニクス第26号,pp.15-20,2006.
- 5) 金森洋史,横山隆明,藤井勇人,中嶋洋,笈田昭,建山和由:月面ローバの走行性に及ぼす車輪形状の影響に関する実験研究,テラメカニクス研究会,テラメカニクス第23号,pp.75-80,2003.

30. ステレオビジョンによる建設機械物体認識の研究

株式会社 演算工房：○高屋 英永、藤田 裕司、笠島 尚志

はじめに

建設施工と建設機械の合理化及び品質確保を目的として、以前より建設機械自動化の研究が進められており既に一部実用化されつつある。特に近年は熟練技術者の減少により、自動化或いは数値化に基づく支援装置の要求が高まってきているといえる。建設機械は、「劣悪な使用環境」、「日々の施工により変化する対象物」といった点が、一般機械の自動化と比較して困難な課題である。例えば、従来の油圧ショベルの自動化、掘削支援システムを例に挙げた場合、油圧ショベル本体に GPS と傾斜センサ、ブーム及びアームに角度センサ、バケットにストロークセンサを装着するのが一般的である。しかしながらこれらの方法には、センサ類を取り付ける為の特別な改造を必要とし専用機械として高価なものになる。また各センサの誤差が累積或いは経時変化による間接部分の摩耗、がた・ブームのしなりが発生し、要求精度が得られないといった諸問題が発生する事が考えられる。そこで油圧ショベル本体に取り付けた、2眼もしくは3眼のステレオカメラシステムを使い撮影・画像処理を行う事で、バケットの3次元位置・向きを直接計測し、上記の諸問題を解決しようと試みた。その第一ステップとして、独立行政法人産業技術総合研究所3次元視覚システム研究グループとの共同研究にて、以下の研究、試験をおこなった。

研究内容

3次元視覚システム研究グループが開発した高機能3次元視覚システム(VVV)をベースに、画像間の微妙な輝度変化に対応する処理、また対応しきれない場合にはノイズとして自動的に除外する処理を組み込むことで解の安定を図った。この処理は、

外乱の影響が著しい屋外計測に有効と思われる。

試験方法

形状認識をする為には予め対象物の形状モデルを構築する必要があるが、計測環境に応じた最適なモデル形状を求める試験



図1 室内試験風景

と掘削面形状計測の精度を求める試験をおこなった。まず作業中の油圧ショベルのバケットを計測する事を想定した様々な角度からの計測試験と、バケットの一部が障害物に隠れた場合の計測試験を室内、屋外にて実施した。また、掘削面形状計測は、同様のカメラを用いて3次元計測をおこない体積計算をおこなう事で、理論値との誤差を求める事とした。

試験1

製作したバケット模型を想定される姿勢で静止させ(正面、斜め右、後ろ、上)同じ条件で100回繰り返して計測を行い、繰り返し計算精度を求めた。

	モデル1	モデル2
正面	ケース1	ケース2
右斜め	ケース3	ケース4
後ろ	-	ケース5
上	-	ケース6

表1 試験ケース

条件：被写体までの距離 約 4.0~5.0m

カメラ間距離横方向 1m、縦方向 0.5m

3眼カメラ

使用したカメラ：Point Grey Research Flea XGA

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6
認識率(%)	100	95	99	97	94	93
$\sigma_x(\text{mm})$	5.16	3.93	1.73	5.89	4.86	5.08
$\sigma_y(\text{mm})$	6.88	3.99	3.34	2.09	5.23	7.86
$\sigma_z(\text{mm})$	4.12	4.18	1.32	2.55	3.44	8.02

表2 試験結果

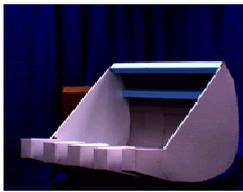


図2 バケツモデル

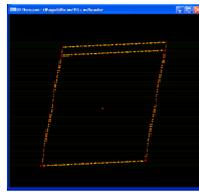


図3 モデル1

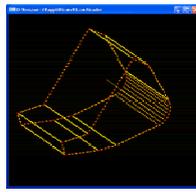


図4 モデル2

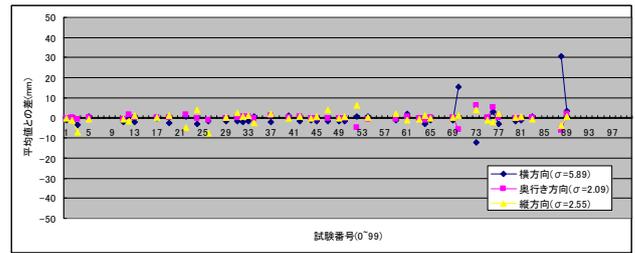


図5-3 繰り返し計算精度 (ケース4)

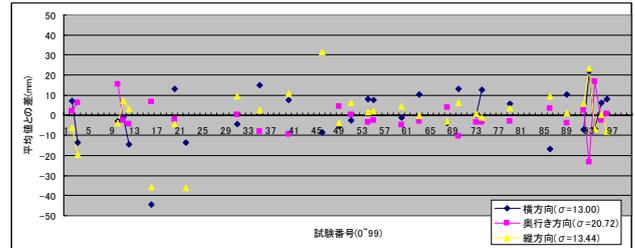


図5-4 繰り返し計算精度 (ケース5)

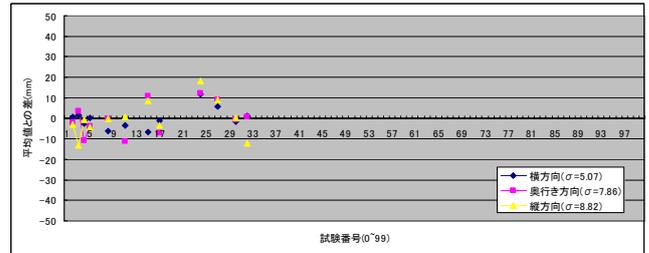


図5-5 繰り返し計算精度 (ケース6)

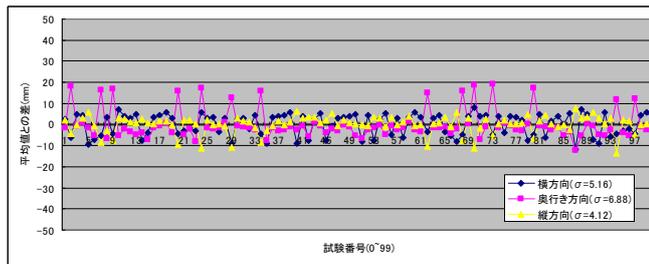


図5 繰り返し計算精度 (ケース1)

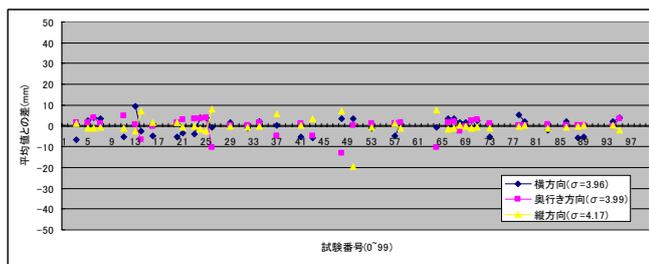


図5-1 繰り返し計算精度 (ケース2)

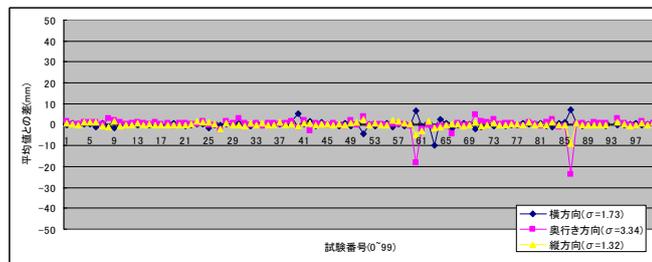


図5-2 繰り返し計算精度 (ケース3)

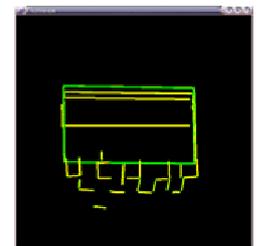
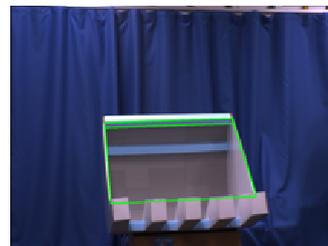


図6, 7 正面画像と正常認識の様子 (緑線が認識結果)

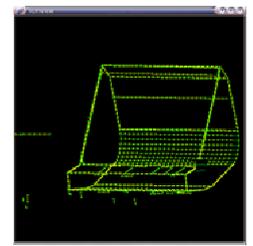
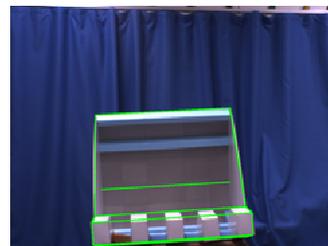


図8, 9 正面画像と正常認識の様子 (緑線が認識結果)

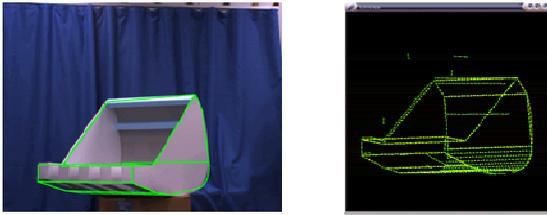


図 10, 11 正面画像と正常認識の様子 (緑線が認識結果)

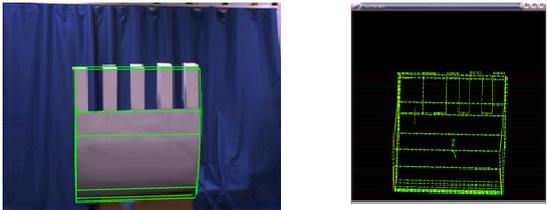


図 12, 13 正面画像と正常認識の様子 (緑線が認識結果)

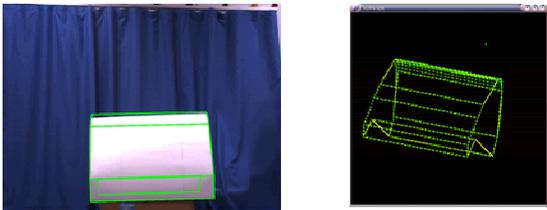


図 14, 15 正面画像と正常認識の様子 (緑線が認識結果)

結果

室内試験においては平面モデル、立体モデル共に90%以上の認識率であった。室内にてバケット形状が全て視認できる場合には平面モデル、立体モデルどちらでも問題ない事が確認できた。

試験2

製作したバケット模型の一部を隠し、同じ条件で100回繰り返して計測を行い、繰り返し計算精度を求めた。

	モデル1	モデル2
つめ隠れ	ケース1	ケース2
半分隠れ	ケース3	ケース4

表3 試験ケース

条件：被写体までの距離 約 4.0~5.0m

カメラ間距離横方向 1m、縦方向 0.5m

3眼カメラ

使用したカメラ：Point Grey Research Flea XGA

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
認識率(%)	84	85	51	81
$\sigma_x(\text{mm})$	3.83	7.53	2.11	4.54
$\sigma_y(\text{mm})$	3.92	4.32	0.59	2.11
$\sigma_z(\text{mm})$	5.00	6.12	0.66	3.26

表4 試験結果

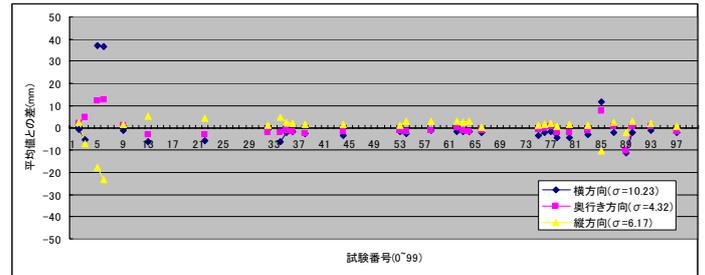


図16 繰り返し計算精度 (ケース1)

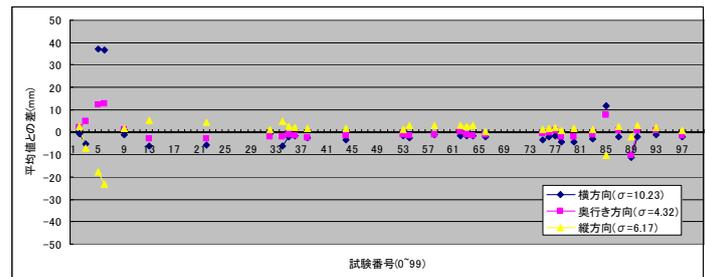


図16-1 繰り返し計算精度(ケース2)

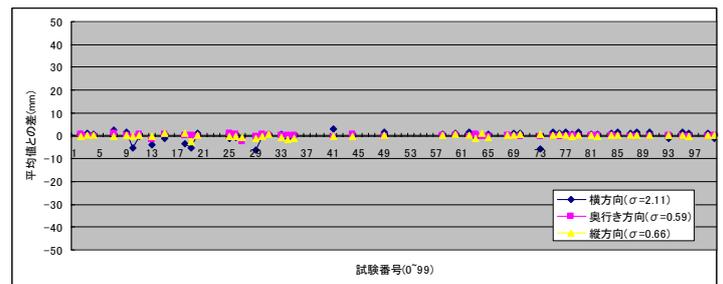


図16-2 繰り返し計算精度 (ケース3)

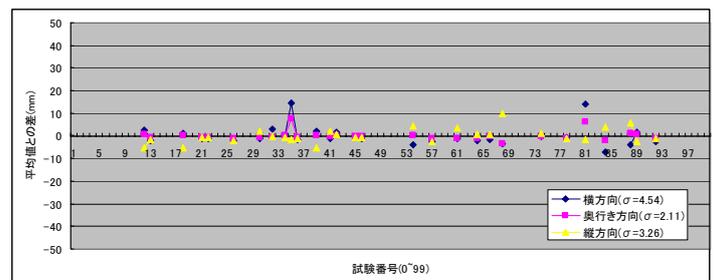


図16-3 繰り返し計算精度 (ケース4)

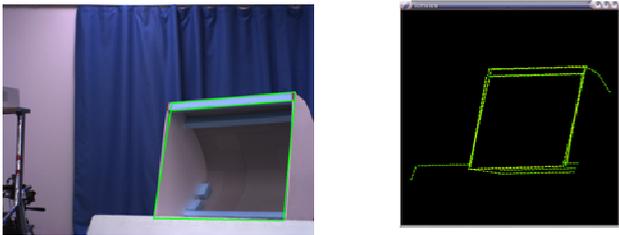


図 17, 18 正面画像と正常認識の様子（緑線が認識結果）

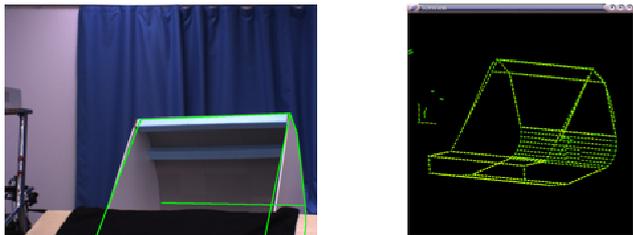


図 19, 20 正面画像と正常認識の様子（緑線が認識結果）

結果

バケットの一部が隠れた場合には認識率が80%近くまで低下した。平面モデルと比較し立体モデルの認識率は高く、バケットの一部が隠れる場合には立体モデルが有効である。

試験3

屋外において、室内試験で使用した2種類のモデルを用いて右斜め、左斜めから同じ条件で100回繰り返し

計測を行い、繰り返し計算精度を求めた。

	モデル1	モデル2
右斜め	ケース1	ケース2
左斜め	ケース3	ケース4

表5 試験ケース

条件：被写体までの距離 約5.0~7.0m

カメラ間距離横方向1m、縦方向0.5m

3眼カメラ

使用したカメラ：Point Grey Research Flea XGA

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
認識率(%)	12	95	19	95
$\sigma_x(\text{mm})$	2.07	5.40	10.83	5.40
$\sigma_y(\text{mm})$	2.46	3.17	6.81	3.17
$\sigma_z(\text{mm})$	2.63	1.93	5.99	1.93

表6 試験結果

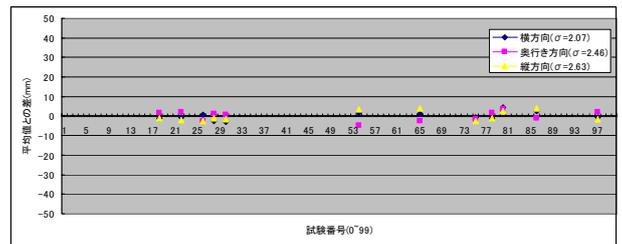


図 20-1 繰り返し計算精度（ケース1）

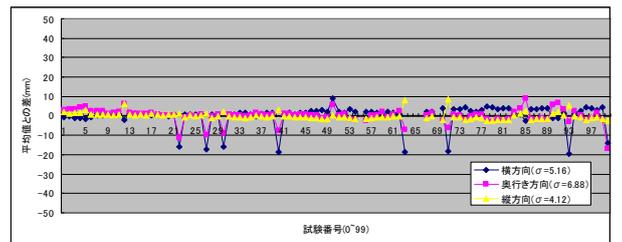


図 20-2 繰り返し計算精度（ケース2）



図 21 屋外試験風景

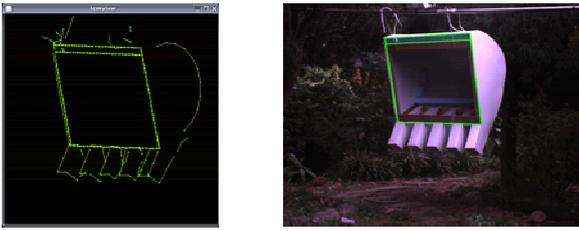


図 22, 23 正面画像と正常認識の様子 (緑線が認識結果)

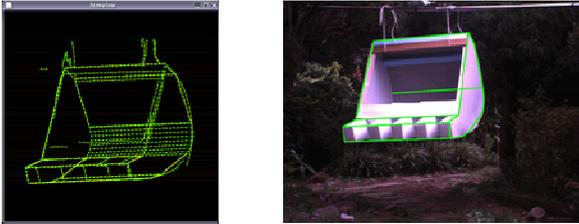


図 24, 25 正面画像と正常認識の様子 (緑線が認識結果)



図 26, 27 正面画像と正常認識の様子 (緑線が認識結果)

まとめ

屋外試験では、平面モデルの認識率は著しく低く、実用的ではない。おそらく背景に誤対応してしまう事が原因と考えられる。屋外計測では立体モデルを用いる事が好ましい。

試験 4

屋外にてシルト及び砂利の計測をおこない体積を求めた。理論値と計測値との誤差を基に計測精度を検証した。



図 28 土計測画像

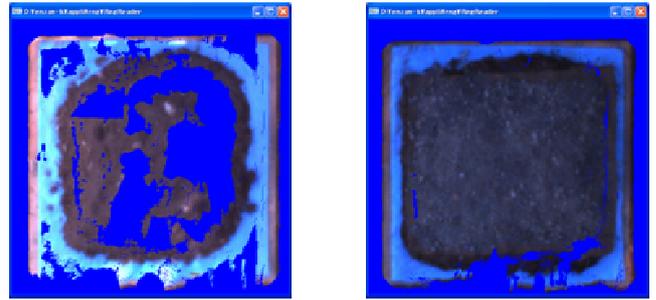


図 29, 30 相関法による 3次元点群データ

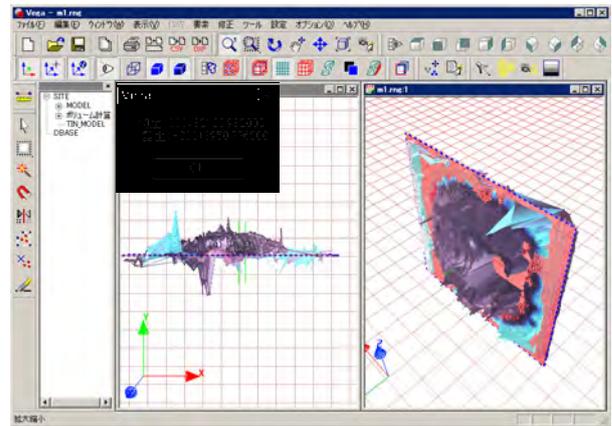


図 31 体積計算結果

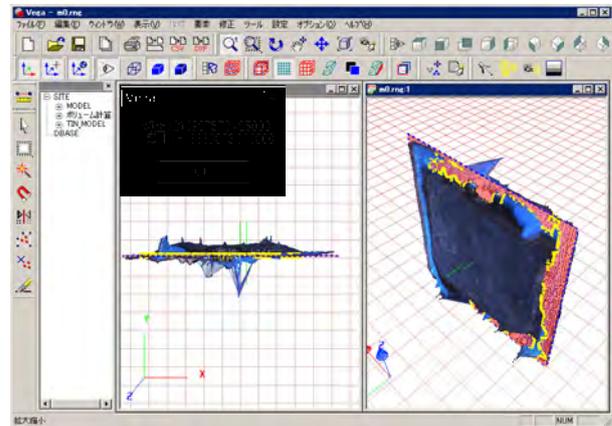


図 32 体積計算結果

まとめ

計測結果は、シルトの場合、実測値 0.25m^3 に対し 0.23m^3 、20回の繰り返しによる標準偏差は 0.017m^3 であった。一方、砂利の場合は、実測値 0.20m^3 に対し、計算結果は 0.20m^3 、20回の繰り返しによる標準偏差は 0.009m^3 であった。シルトの場合の結果が砂利に比べて不安定な要因として、カメラ間の輝

度量が微妙に異なるため、画像間での相関がとれにくかったことが考えられる。

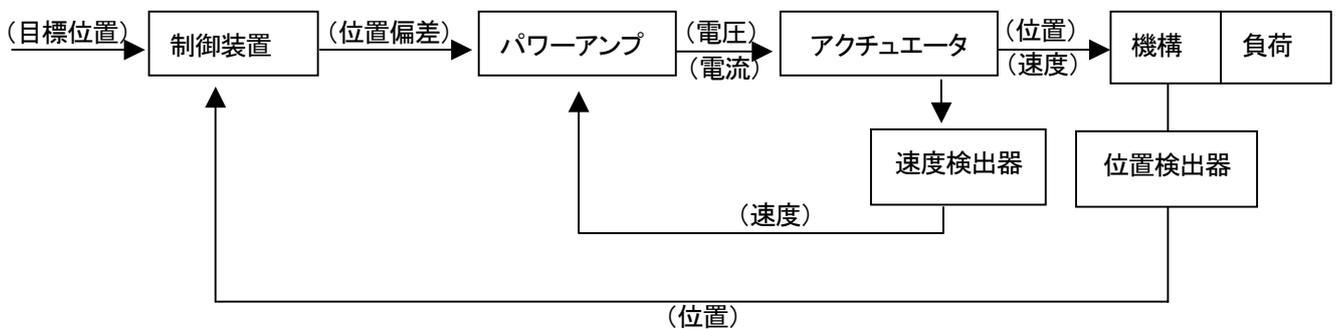
おわりに

3次元物体認識を屋外にて確実にこなす為には、正確な3次元モデル形状を構築する事が必要とわかった。処理速度は、屋内にて約1秒、屋外では約3秒という結果であった。この理由としては、屋外計測では計測データにノイズが多くノイズ除去に時間を要したからである。総合的計測時間は、バケ

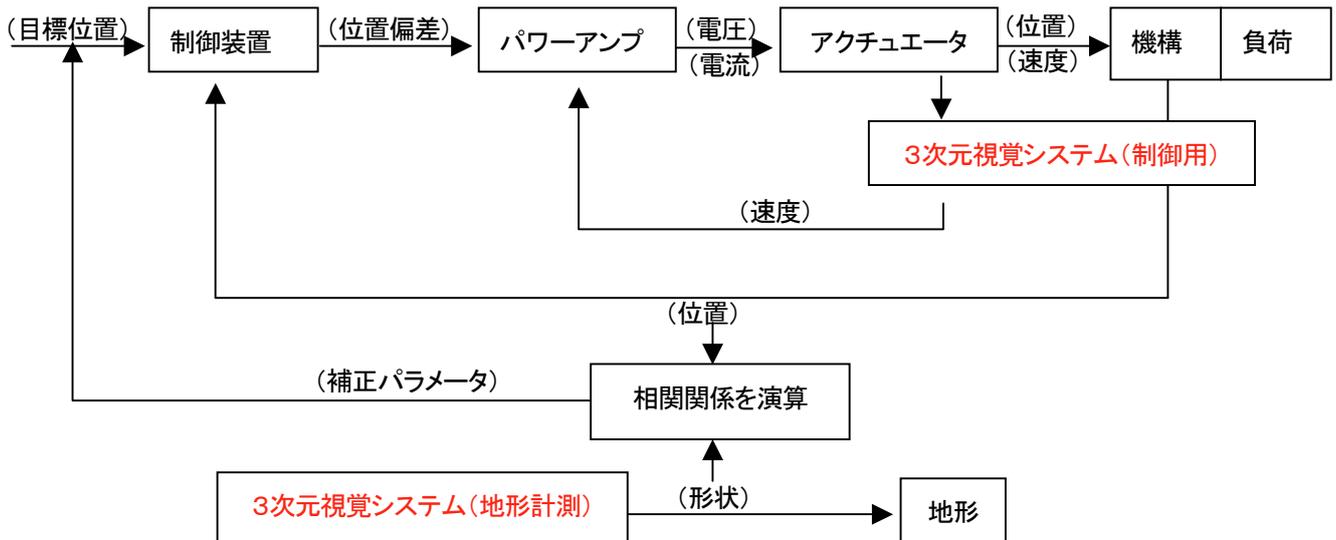
ット認識約3秒、位置計測約1秒、掘削面形状計測約3秒ほどであった。また屋外の外乱に対しては、カメラのシャッター速度を最適に設定する必要がある。将来的には、撮影写真のヒストグラムから最適なシャッター速度を求めるプログラムの作成も必要である。

今回の試験はカメラの撮影範囲を局部的に制限しておこなったが、運用する際には広範囲の計測に対応するために、アクティブカメラの採用、カメラ台数の増設などの検討が必要である。

従来の制御方法



高機能3次元視覚システムを用いた制御方法



3 1. 複数の遠隔操縦ロボットによる一連土工作業の検証 (バックホウと不整地運搬車による作業)

国土交通省 九州地方整備局 九州技術事務所 副所長 木村 直紀
機械課 ○井上 淳

1 はじめに

簡易遠隔操縦装置(以下「装置」という)は、平成10年度に九州技術事務所と㈱フジタが共同で開発を行ったもので、汎用の建設機械に搭載することで約300m離れた所から建設機械を操縦できる。平成18年現在で、九州地方整備局では防災拠点である九州技術事務所と3つの事務所にバックホウ用6台、ブルドーザ用1台、不整地運搬車用1台を配備している。

今回桜島の黒神川において、バックホウと不整地運搬車を使った掘削・積み込み・運搬の一連土工作業の実証試験(写真-1)を行い、良好な結果が得られたので報告するものである。



写真-1 桜島無人化施工

2 開発の経緯

土砂崩落等の緊急災害復旧は、被害の拡大防止や二次災害を防ぐために極めて迅速な作業が要求されるとともに、作業員の安全を確保する必要がある。崩落土砂の掘削除去を安全に行うには、遠隔操縦方式により安全な場所から建設機械を動かして作業することが有効である。しかし、緊急災害復旧に遠隔操縦方式の建設機械を用いる場合、以下の課題が挙げられる。

(1) 遠隔操縦専用機の市場性

遠隔操縦専用機は普及台数が少なく、調達にあたっては工場での遠隔操縦用に製作または改良されるのが一般的であり、完成まで時間がかかる。

(2) 道路搬送上の規制

遠隔操縦専用機は大型のため、道路交通法の規制から分解・組立を要する等、多大な時間とコストがかかる。

これらの課題を解決するため迅速性かつ簡易性を目的に、バックホウ(写真-2)、ブルドーザ(写真-3)、不整地運搬車(写真-4)の運転席に装着して、遠隔操縦ができる装置を開発した。



写真-2 バックホウ用



写真-3 ブルドーザ用



写真-4 不整地運搬車用

3 装置の特徴

装置は以下の特徴を有している。

- ① 汎用建設機械に数時間で装着して、遠隔操縦できる。
- ② 10個(ブルドーザは11個)のユニットに分割され、車等の交通手段で災害現場まで運搬できる。
- ③ 無線の資格を必要としない。

4 装置の構成

装置は、建設機械背面に設置したエンジンコンプレッサから送られた圧縮空気によってアクチュエーションユニットを動かし、建機の操作レバーを直接動かすことを基本動作としている。（図-1 参照）

遠方から操縦をする際に、施工効率の向上と建設機械近傍の安全確認を行うため、装置頭部の搭載カメラから送られる画像を確認しながら操縦できる。

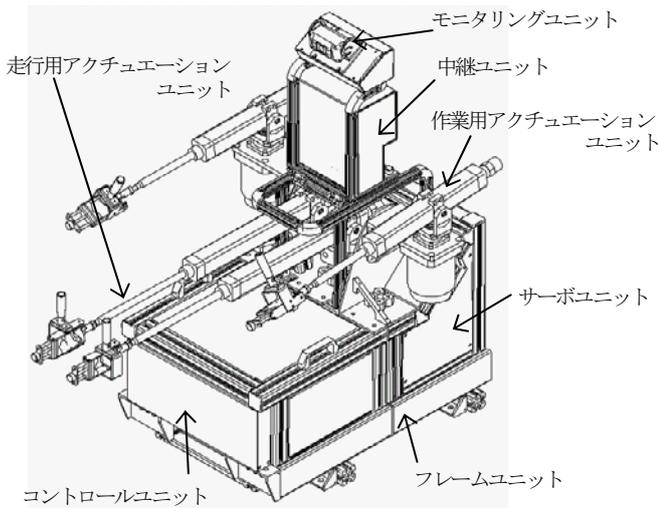


図-1 装置概要図

5 無線システム

5.1 従来の無線システム

従来の無線システムは、制御用を特定小電力無線で、搭載カメラの映像をSS無線で行っていた。図-2に従来の無線システムのイメージを示す。

この無線システムには、以下に示す技術的な課題が挙げられる。

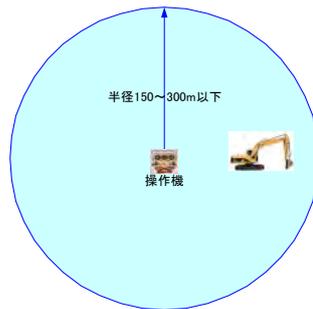


図-2 従来の無線システム

(1) 遠隔操縦するための制御用無線と、搭載カメラ映像用の無線がそれぞれに必要なため、稼働台数が増えた場合無線チャンネルが多数必要となり、電波干渉を生じる恐れがある。

(2) 不整地運搬車等が長距離移動によって操作機から150~300m以上離れると、電波が届かず建設機械が停止する。

5.2 無線LANシステム

図-3に無線LANシステムのイメージを示す。このシステムは従来の無線システムの技術的課題を解決し、以下の特徴を有する。

(1) 操作機、基地・中継局、装置を体系化した無線回線でシステムがコンパクトとなり、複数の装置の制御と搭載カメラ映像の通信が同時に行える。

(2) 中継局を追加することにより遠隔操縦可能な距離を数kmまで拡大することができる。

6 桜島実証試験

6.1 試験目的

本試験の目的は、装置を使ってバックホウと不整地運搬車による一連土工作业を行い、下記の項目について検証するものである。

(1) 装置による各建設機械(バックホウ・不整地運搬車)の施工能力の把握

(2) 無線LANを使つての作業範囲の拡大

6.2 試験の概要

本試験は、装置を搭載したバックホウ(0.45m³級)と不整地運搬車(6t級)を同時に遠隔操縦して、掘削積込み(写真-5)、運搬(写真-6)、土捨て(写真-7)までの一連の土工作业を行った。

試験は、①有人施工による運搬250m、②無線LANシステムによる運搬250m、③無線LANシス

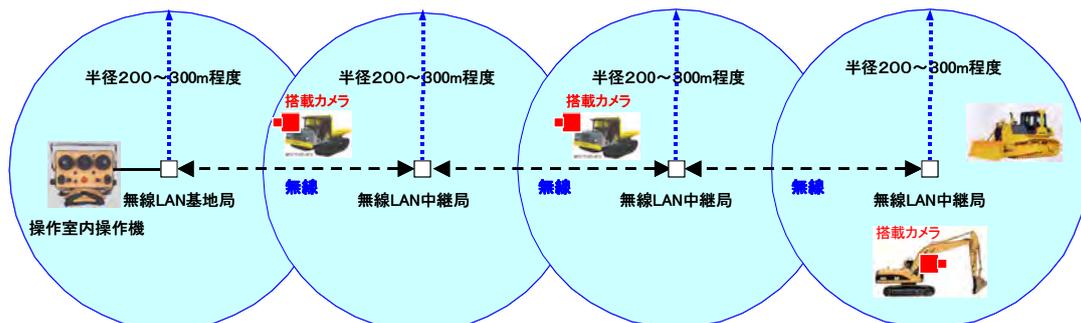


図-3 無線LANシステム

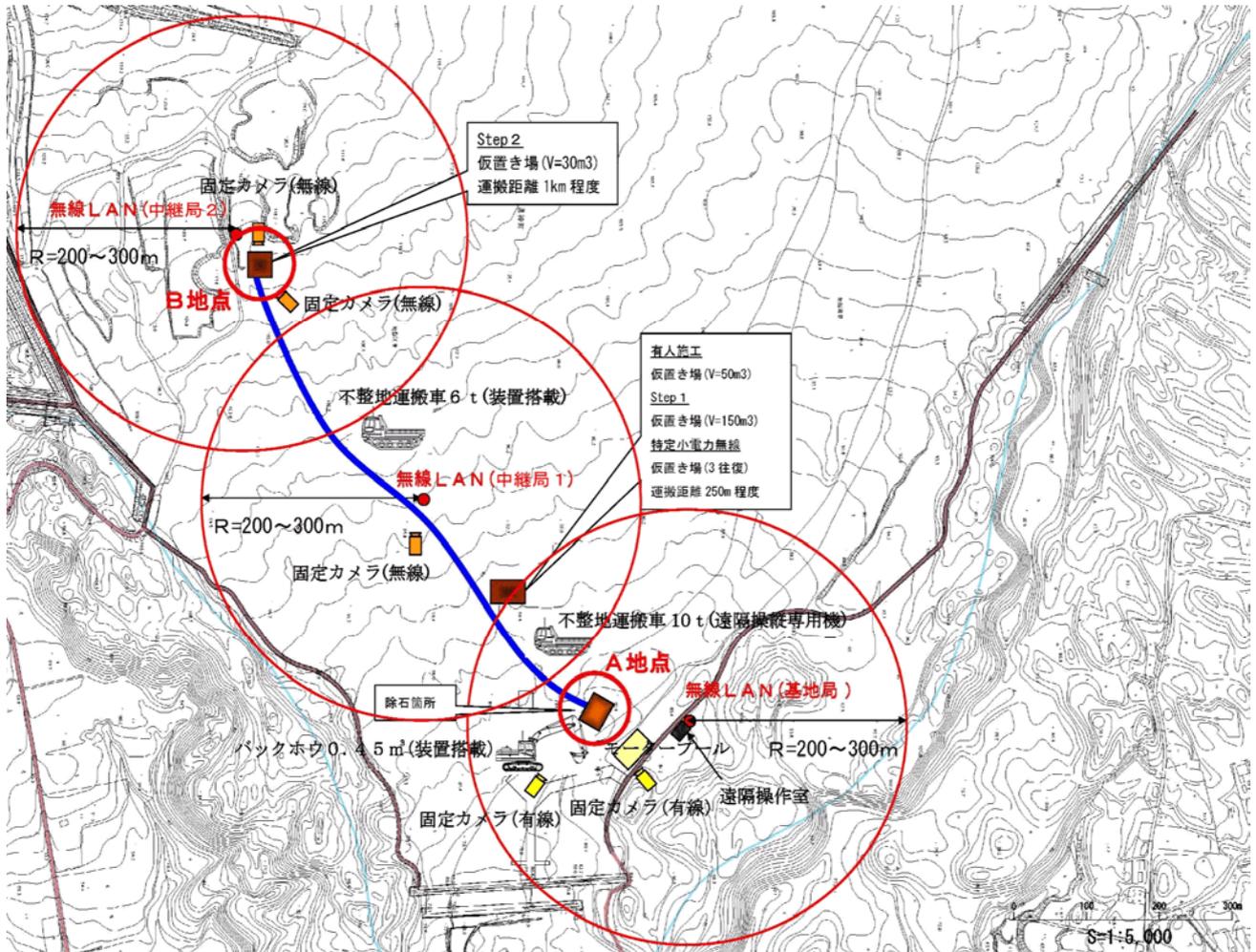


図-5 無人化施工概要図

6. 3 試験結果

6. 3. 1 バックホウの施工能力

バックホウの施工能力は掘削能力(m^3/h)により代表される。図-6より以下の考察が得られる。

- (1) 一般的な遠隔操縦方式である特定小電力無線による専用機の掘削能力は、対有人施工比で60%といわれるが、今回のSTEP 1・2の無線LAN、及び特定小電力無線による掘削能力はそれぞれ60%を上回っている。

6. 3. 2 不整地運搬車の施工能力

積載走行、荷卸し、空荷走行等を含めた一連のサイクル時間と運搬量より、不整地運搬車の運搬能力(m^3/h)を算出した。図-7より以下の考察が得られる。

- (1) STEP 1で、無線LANによる6 t車の運搬能力は有人施工に比べて約60%となっている。特定小電力無線による遠隔操縦専用機(10 t車)では約76%になっているが、無線LANではロ

ーミング^(注1)不調によって運搬能力が低下したと考えられる。ローミング不調を解消できれば専用機と同等の運搬能力が期待できる。

- (2) STEP 1とSTEP 2の運搬能力は、運搬距離が250mと1kmと異なるため、このまま比較することはできない。距離を加味した比較(運搬量×距離)をしてみると有人施工も大きく上回る結果となった。遠隔操縦では振動等の体感がない分、有人に比べ高速走行になりがちになると考えられる。

- (3) 特定小電力無線による施工能力は有人施工比90%となっている。運搬作業は掘削作業に比べて単純作業であるため効率が良くなると考えられるが、掘削土量が 9m^3 と極めて少ないことからもう少し多くの土量を施工して判断する必要がある。



図-6 バックホウ掘削能力

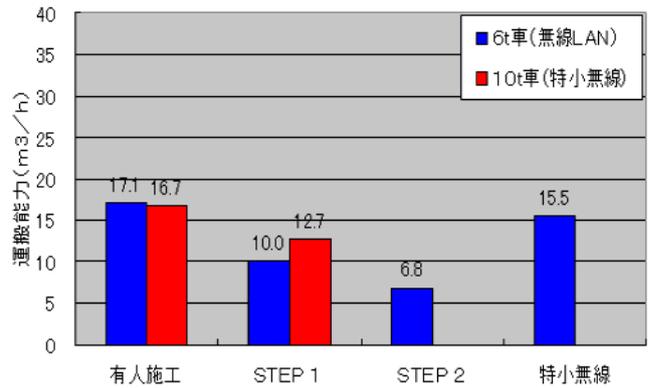


図-7 不整地運搬車運搬能力

6. 3. 3 無線LAN通信状態

今回試験を行った桜島の黒神川は非常に広大で見通しが良く、事前の無線伝播調査では1局の電波到達距離が500m以上となり、基地局、中継局1、中継局2の電波が互いに交差し受信切替が頻繁に発生した。

受信切替え回数を減らしてローミングがスムーズになるように、電波の強弱やアンテナ種類の検討を行っ

た結果、中間地点の中継局2の電波を停止させ、起点の基地局のアンテナに指向性の高い平面アンテナ(電波強度強)を、終点の中継局2のアンテナに指向性の低いダイポールアンテナ(電波強度低)を採用した。

試験中、図-8に示す箇所で不整地運搬車がローミングの影響により停止することが幾度かあったが、主な原因は表-2のように想定される。

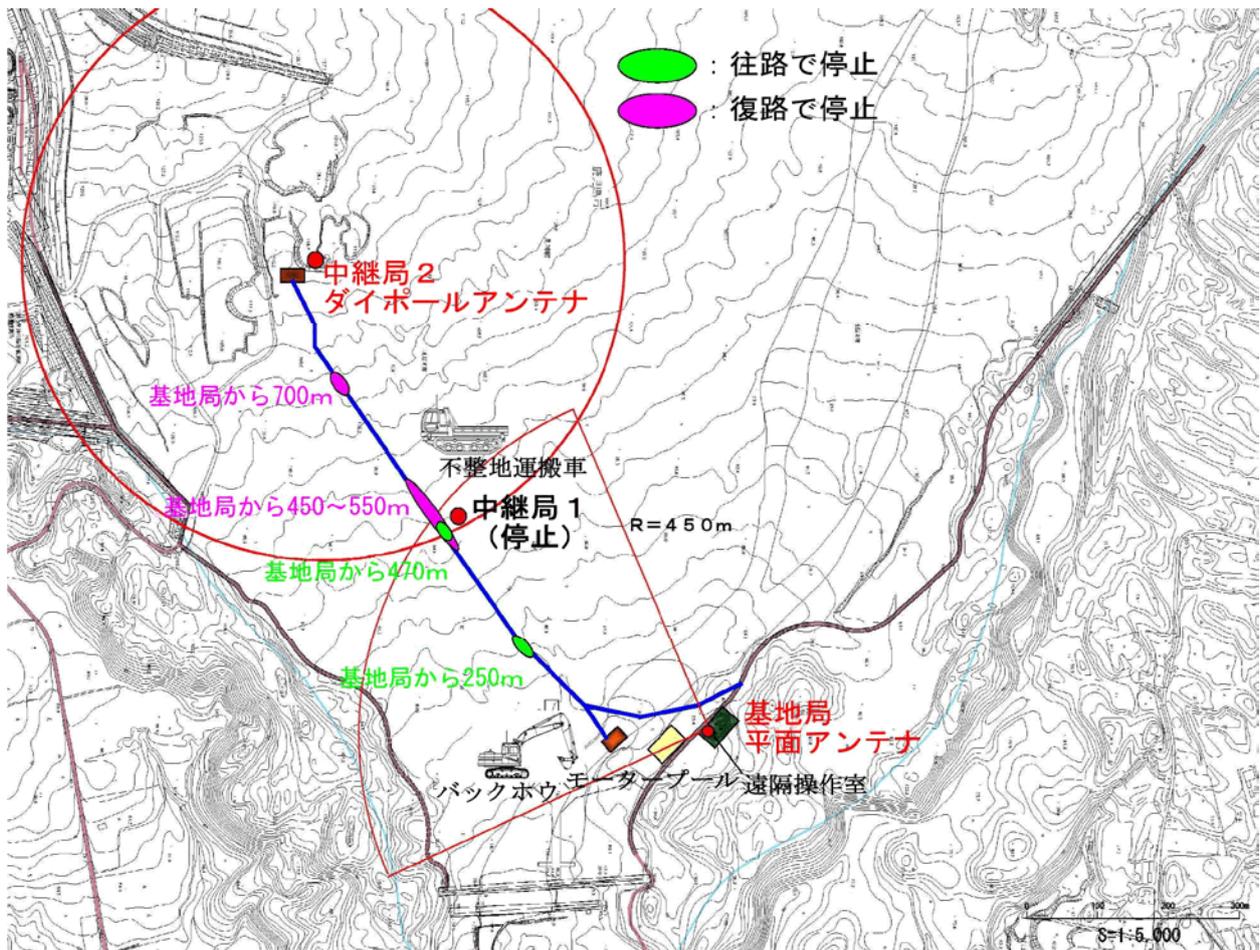


図-8 不整地運搬車停止図

表一 2 不整地運搬車停止位置と発生原因

不整地運搬車 停止地点	往路		復路	
	250m地点	470m地点	450～550m地点	700m地点
送信アンテナ	基地局(平面アンテナ)	中継局2(ダイポールアンテナ)	中継局2(ダイポールアンテナ)	中継局2(ダイポールアンテナ)
発生原因	平面アンテナの方向と車載アンテナの傾きが直交した	アンテナの高さ不足により走路の凹凸で、十分な電波が確保できなかった	(左同)	(左同)

6. 4 検証

本試験を踏まえ、装置及び無線LANシステム等、全般に関する総括的な検証について以下に示す。

(1) バックホウの施工能力

試験現場の土砂は硬からず適度な湿り気を持ち礫の混入も少なかったため、掘削し易い状態にあった。このため有人施工でも積算基準を上回り、遠隔操縦でも積算基準に近い値を示している。

(2) 不整地運搬車搭乗比較

今回の走行路では振動が激しく、搭乗運転では長時間作業は無理であろうとのオペレータの意見があった。この点から見れば装置の有用性が認められる。同時に建設機械及び装置に対して大きな振動ストレスがかかっていたことも事実であるため、稼働の前には十分な点検を行い、装置に問題がないかどうかを確認する必要がある。

(3) 無線LANシステム

良好な無線LANの通信状態を保ち、またローミング不調をなくすため今後以下の対策が考えられる。

1) 移動体の搭載アンテナの検討

不整地運搬車等の移動体のアンテナは路面の傾斜に対して追従できるように工夫が必要である。

今回使用したダイポールアンテナより電波を受ける範囲の広いホイップアンテナを使用すれば、ある程度の傾斜走行にも耐えることができる。

2) 基地・中継局アンテナの検討

本試験では、基地・中継局のアンテナ高さを最大3mまでとしたが、それ以上の十分なアンテナ高さを確保する必要がある。

3) ダイバーシティ機能の追加

ダイバーシティ方式^(注2)により1つの重機搭載無線機に2つのアンテナが付けられるように改良する。

4) 搭載カメラ画像の遅延

遅延の少ない(概ね0.1秒程度)画像エンコーダ／

デコーダが必要である。

5) 通信速度

無線LANの最大通信速度は54Mbpsで、画像伝送ではカメラ3～4台が限界である。また、通信距離や遠隔操作数により通信速度は落ちてくるため、画像情報や制御信号の遅延が発生する。通信速度の速い無線LAN機器の開発が必要である。

7 おわりに

本実証試験により、簡易遠隔操縦装置を使ってバックホウと不整地運搬車を同時に遠隔操作し、掘削・積込み・運搬といった一連の土工作业を無理なく実施出来ることが確認できた。同時に無線LANシステムの実験では、ローミング時に時間がかかる場合もあったが、その多くは想定範囲内で解決できるものであり、新たな問題ではないことを確認した。

今後の開発の方向性としては、災害復旧工事の作業だけでなく、一般建設工事における危険及び苦渋作業への積極的な導入等、その適用範囲を拡大していくことである。そのためには、視覚情報、通信、位置認識技術等をより一層改良発展させることが肝要となる。

(注1) 移動局の受信電波が1つの発信基地から違う発信基地の電波に移り変わる現象

(注2) カーテレビや携帯電話に採用されている複数のアンテナ方式で、その時々で最も通信状態が良いアンテナの電波を受信する方式

3 2. 道路建設における情報化施工技術

高精度 GPS のモータグレーダへの適用

鹿島道路株式会社

○桑田 直人

1. はじめに

近年、コンピュータや通信技術の発達は目を見張るものがあり、様々な分野において活用されている。道路建設業界においても例外では無く、現場作業の合理化を図るための情報化施工として、実施工等に積極的に取り入れられている。なかでも、コンピュータに入力した設計データをもとに機械を制御することができる三次元マシンコントロールシステム（以下 3D-MC）は最先端の情報化施工である。

本編は 3D-MC のシステムの紹介、更に実際に高精度 GPS-3D-MC を搭載したモータグレーダを使った施工実績とその結果を中心に有効性と施工精度を報告するものである。

2. 3D-MC を用いた情報化施工

(1) トータルステーションを使用した 3D-MC

トータルステーションとは光波測距離機能を持ったトランシットで、基準点から目標までの距離と角度を同時に求め、座標値に変換することができる測量機である。また、最近では自動追尾型トータル

ステーション（以下 TS）も開発され、ワンマン測量が実現している。

実際に重機を制御させる場合、まず設計データをもとに制御データを作成する。制御データが入力されたパソコン（以下 PC）と接続された TS は、グレーダに取り付けた受光センサを自動追尾し平面座標 (x,y) を求める。計測した位置情報と設計データを照合し、その座標における高さ座標 (z) と横断勾配情報を受光センサに送信する。この TS からの指示によりグレーダのブレード高さ及び横断勾配が自動制御される。（図 1 参照）

この自動追尾という性能上 TS と重機の数は一対一の関係になるため、複数の重機を自動制御する場合、その重機台数分の TS が必要となる。

(2) GPS を使用した 3D-MC

GPS (Global Positioning System) はアメリカ国防省が管理する軍事衛星を利用した汎地球測位システムのこと、一般的に幅広い分野に利用されている。身近なところではカーナビなど現在位置を知

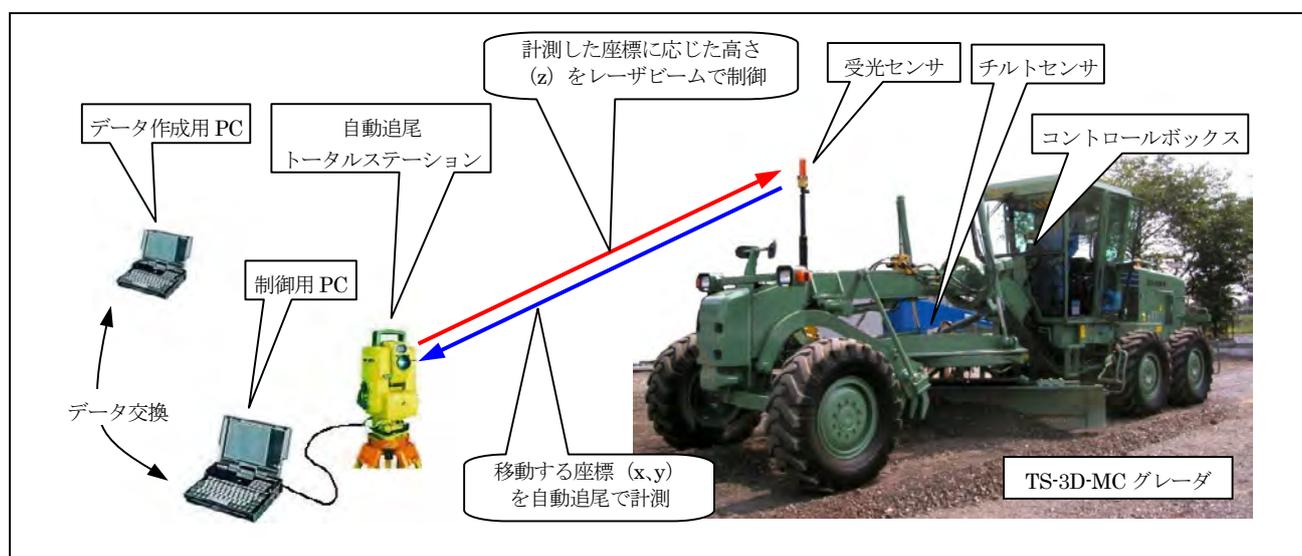


図 1 TS-3D-MC グレーダのシステム構成

るための手段として用いられている。最近はロシアの測位衛星であるグローナスも合わせた統合的な衛星ナビゲーションを行うことが出来るシステムも増えてきており、より精度が高い安定した情報を得ることができるようになってきている。

建設機械制御のための測位に用いられる GPS は RTK-GPS (Real Time Kinematic-GPS) である。RTK-GPS は現場に基地局と呼ばれる固定 GPS アンテナを設置し、1点観測法では避けられない衛星の軌道誤差や時計の誤差を除去するため、建設機械に装備された GPS アンテナと共に複数の点で同時観測を行い、相対的な位置精度を向上させるシステムである。これにより、常時移動している建設機械の位置座標を短時間かつ数センチメートルの精度で測位することが出来る。

まず、RTK-GPS によりグレーダの位置情報 (X_a , Y_a , Z_a) を取得し、グレーダ内の車載コンピュータに入力されている設計データ (x , y , z) と比較をする。その位置における高さ方向の差 ($z-Z_a$) を補正することによりブレードを自動制御する。このとき高さ情報と同時にグレーダが作業をしているエリアの横断勾配データも参照することにより、ブレードの勾配を自動制御する。概略の構成を以下に示す。

- ① GPS : 上記の測位衛星。高度約 2 万 km の 6 つの軌道の上に衛星が配置されている。
- ② 基地局 : RTK-GPS を形成するために設置される固定 GPS 受信機。無線で移動局と通信を行う。
- ③ 移動局 : グレーダ側に装備されている GPS 受信機とレシーバ。無線も備え、基地局と通信を行う。
- ④ コントローラ : 3D-MC 用専用ソフトウェアがインストールされ設計データが入力されている車載型特殊コンピュータ。GPS によって測位された位置情報を設計データと照合して作業装置の高さ及び横断勾配を制御する。油圧装置の感度等の設定も行う。
- ⑤ データ作成用 PC : 制御データを作成するためのコンピュータ、現場に持ち込む必要はない。

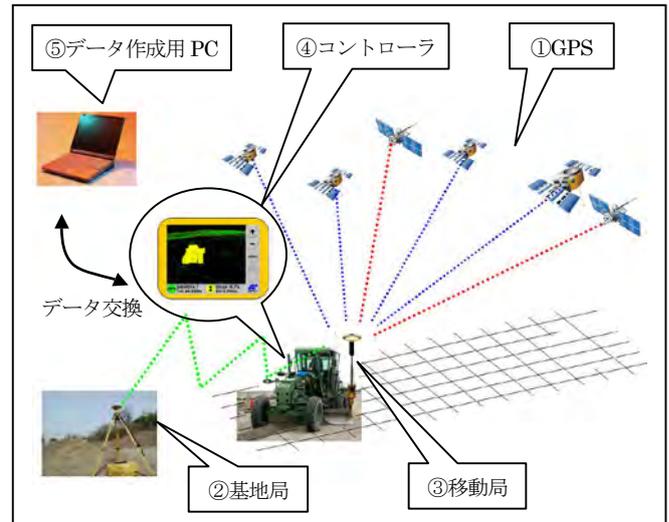


図2 GPS-3D-MC の制御イメージ

なお、グレーダの作業装置は通常手動により操作を行うので 3D-MC を装備する場合は自動制御に対応させるために電磁バルブを追加装備する必要がある。

GPS-3D-MC の一番の魅力は複数台の建設機械を同時に制御するとともに測量作業も実施することが出来ることにある。しかし精度的には許容できる作業は限られる。実際のマシンコントロール時は制御不感帯の設定や、建設機械固有の装置接合部の影響も受けるため、水平方向で $\pm 20\text{mm}$ 、垂直方向では $\pm 40\text{mm}$ 程度になる。垂直方向の仕上りがミリオーダーで要求される道路建設においては許容できる精度ではない。

(3) 高精度 GPS (mmGPS) を使用した 3D-MC

上に述べた垂直精度の点から、道路建設において GPS を使用するには限界があった。この垂直精度を向上させたシステムが、トプコン社製の mmGPS という高精度 GPS である。前述の TS と同等の垂直精度 $\pm 10\text{mm}$ を得ることができ、道路建設に必要な精度を確保することができる。基本的なシステムは RTK-GPS と同じであるが、最大の特徴は作業エリア内にゾーンレーザ発光器を設置することにより垂直精度を向上させることができる点にある。

ゾーンレーザは発光中心から幅 10m (上下 5m) のレーザを発光し、GPS 受信機とゾーンレーザ受光センサを備えた建設機械或いは測量器がこの

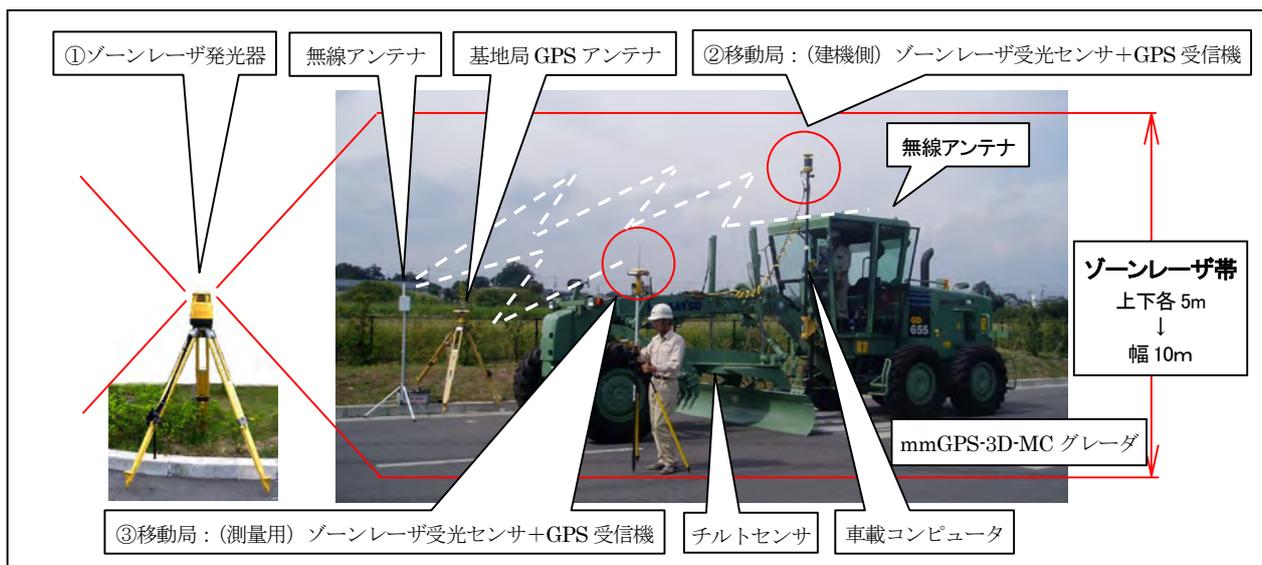


図-3 高精度 GPS-3D-MC 構成

帯域の範囲内にあれば、高い精度で垂直方向の座標を認識することが出来る。このときゾーンレーザ内の受光センサの台数に制限は無い。ゾーンレーザ発光器単体がカバーできる範囲は半径約300mであるが、制御上発光器は最大4台まで連続して並べることができ、有効半径にとられない連続施工環境を構築することが出来る。

なお、ゾーンレーザによる精度補正は垂直方向のみに行われるので水平方向の精度は従来のGPS-3D-MCシステムと変わらない。

3. 実施工時の3D-MCの効果と比較

(1) 実施工時3D-MCの効果

一般的に道路建設現場では、まず作業エリア側方等にあらかじめ計画高さの基準となる丁張杭と呼ばれる測量杭を一定間隔で設置する。建設機械のオペレータは丁張杭を見て現在の路盤面の高さを仕上り面と一致させるため、経験に基づいた作業装置の運転操作が必要となる。特に今回取り上げたグレーダは微妙な操作が求められ、熟練の技術を要する。この点を踏まえた上で高精度GPS-3D-MC施工により得られた効果を以下に示す。

・導入した現場

- ① 旭川紋別自動車道下白滝舗装工事
- ② 名寄市高砂舗装工事



写真1 高精度GPSグレーダによる現場作業状況

・得られた効果

① 仕上り精度と安定性の向上

これまでのグレーダの仕上り精度はオペレータの腕に頼っていたと言っても過言では無い。3D-MC導入によって、オペレータの腕に左右されることなく安定した仕上り精度が期待できるようになった。精度に関しては、施工条件にもよるが、これまで現場で確認された垂直方向精度は80%以上が±10mm以内に収まっている。

② 施工量の向上

材料の搬入などの条件にもよるが従来の手動作業と比較して1.5～2倍の施工量が得られる。

③ 仕上げ微調整量の適正化

敷均し後転圧ローラによって路盤を締固めるが、このときの沈下量を事前に確認しておき、敷均し時にその沈下分を見込んで仕上ることができる。



写真2 高精度 GPS-3D-MC フィニッシャ

④ 人員の省力化と安全性の向上

検測作業を削減することができるため検測員も削減できる。そのため現場内の近接作業が減り、作業員と重機との接触事故が防止でき安全性の向上にも繋がる。また、丁張杭を打つ手間も少なくなる。

⑤ 同一データにおける複数機械の制御

制御させる機械がブルドーザであれグレーダであれ、舗装を行うアスファルトフィニッシャ（写真2参照）であっても3D-MCに対応している機種であれば同一制御データを用いることができる。

⑥ 夜間作業の効率の向上

夜間の施工では全ての作業効率が低下する。特に丁張を参照して作業を行うグレーダの場合、施工量も精度も昼間の作業に比べて著しく低下する。3D-MC 使用時においてはオペレータの技量に関係なく、昼間の施工と同じ精度を得ることができる。

(2) タイプ別 3D-MC の比較

表1に3D-MC各タイプの特徴を示す。

表1 タイプ別 3D-MC の特徴比較

項目	GPS		高精度 GPS		トータルステーション	
	◎	半径 200m	○	半径 300m+	○	半径 300m
制御範囲	◎	半径 200m	○	半径 300m+	○	半径 300m
垂直方向 制御精度	△	±30mm	◎	±10mm	◎	±10mm
周辺への 影響	△	無線電波 の発信	△	無線電波 の発信	◎	無し
複数制御	◎	制御範囲 内無制限	◎	制御範囲 内無制限	△	1対1での 制御
天 候	◎	左右 されない	○	通常の GPS	×	降雨時 不可

一見、制御範囲が広く複数台制御することができる GPS タイプが優れているように見える。しかし前述の通り、高い垂直精度が要求される道路建設での使用は難しい。

そこで高精度 GPS の特徴に注目してみると、垂直精度と複数制御の項目で通常の GPS と TS の両方の優位な特性を備えていることが分る。更にゾーンレーザ発光器を複数台据えることによって制御範囲を拡大することができる。しかしこの高精度 GPS も万能という訳ではない。GPS を使用するためには建設機械が衛星信号を受信できる位置にいないといけない。トンネルや建物内においては信号を受信することが出来ない。更に切り立った地形やビルの側では反射波が生じて正確な信号を受信できず、橋梁の下や木陰などにおいても受信状態不安定となることがある。

以上のことから、どのタイプの 3D-MC を使用するかは現場の状況に応じて適切に選定する必要がある。

4. おわりに

当社で情報化施工を本格的に取り入れてから六年、それまでは回転レーザによって平面を作り出す 2D 制御を主としていたが、ダム の斜面部分の施工など技術的に困難とされる条件においてブルドーザによる TS-3D-MC が取り入れられた。その後、高速道路や一般道などでも使用されるようになり、施工条件が異なる様々な現場で活用してきた。しかし一つの現場に複数台の TS を導入した場合、光波が混同し制御できない状態になるという問題も浮上した。そこで複数台制御が必要な施工においては、1 対複数の建設機械、測量器の制御が可能な高精度 GPS を用いるようになった。まだ高精度 GPS による施工数は限られているが、確実に実績を挙げていることは間違いない。

団塊世代の退職、技術の伝承不足等による熟練オペレータ不足が問題となっている昨今、情報化施工によってその技術を補っていききたいと思う。

3.3. 大型スリップフォームペーバにおける 3次元数値制御による機械施工の実用性について

前田道路株式会社 ○菊地 重徳、古島 勝、内山 伸一郎

1. はじめに

情報化施工の一環である3次元機械制御技術(以下、3D-MC と略す)は、モーターグレーダやブルドーザ等の主に土工機械分野で実用化され、普及しつつある。

写真-1に3D-MC モーターグレーダを示す。本工法は、トータルステーション(以下、TS と略す)又はGPS(Global Positioning System; 全地球測位システム)を利用し、リアルタイムで3次元位置情報を把握しながら施工する。従来方式の施工に比べて下記のメリットが知られている。

- 1) 丁張りの設置を大幅に省略できる。
- 2) 重機オペレータの省熟練化が図られ、経験の少ないオペレータでも精度の高い施工が可能となる。
- 3) 計画高に対する現状が随時把握でき、都度の検測が不要となり、連続作業により作業能率が向上する。
- 4) 検測作業者が重機周辺を頻繁に歩行する必要がなく、安全性が向上し、省力・省人化が図られる。
- 5) 従来の丁張りによる点の管理に対し、連続した面の管理が可能となる。
- 6) 設計段階で作成されたCAD データを施工時の機械制御データに利用できると共に、施工後のデータをその後の保守管理にも活用できる可能性がある。



写真-1 3D-MC モーターグレーダ

モーターグレーダやブルドーザ等を用いる土工では、材料の敷きならしと転圧が繰り返行われることもあり、現在の3D-MCによる精度は十分に実用の範囲にある。スリップフォームペーバやアスファルトフィニッシュによる舗装工事では、1回走行するだけのいわゆるワンパス施工であり、3D-MCが適用可能であるか否かは判断が難しいと考えられ、普及が進んではいない。弊社ではスリップフォームペーバによるコンクリート版の舗設において、3D-MCの適用可能性を探るため、3D-MC スリップフォーム舗装の試験施工を実施した。その概要と結果について紹介する。

2. 施工編成と仕様

スリップフォームペーバは米国GOMACO社製GHP-2800を使用した。走行は2クローラ方式で、左右クローラの速度差によりステアリングを行う。舗設高さの調整は左右の脚を昇降させて行う。概略の仕様を表-1に示す。

表-1 GHP-2800 主要諸元

エンジン定格出力	244.9 kW / 2200 min ⁻¹
モールド幅	3980 ~ 9480 mm
スプレッドングスクリュー直径	406 mm
タンパー回転数 最高	120 min ⁻¹
パイプレータ回路数	標準 16, オプション 8
パイプレータ振動数 最高	183 Hz (11000 min ⁻¹)
トラッククローラ長	3660 mm
トラッククローラパッド幅	400 mm
本体高さ昇降量	914 mm

スリップフォーム工法は連続鉄筋を事前に敷設しておくのが一般的であるが、今回は3D-MCによる機械の動作把握が目的であるので無筋とし、コンクリートだけを舗設した。生コン供給も一般的には連続鉄筋が

あるため、プレーサプレッダや横取機を使用するが、今回は無筋としたので、アジテータトラックから直接路面に生コンを荷降ろしする簡便な方法を採用した。

今回使用した 3D-MC システムはライカ ジオシステムズ社製である。モールド後方の左右脚柱付近にそれぞれマストを立てて 360° プリズムを設置し、2 式の TS で自動追尾する。更にもう 1 式の TS を設置し、出来形の管理や施工中の微調整に使用する。また、各マストの基部には 2 軸勾配センサーが取り付けられている。3 式の TS は無線通信を介してスリップフォームペーパーに積載されたコンピュータと DATA 通信を行い、二つの 2 軸勾配センサーの DATA と合わせて、



写真-2 センサー取付状況

走行ステアリングとモールド高さとの両方を同時に自動制御する。センサーの取付状況を写真-2に、TSと無線通信機器取付状況を写真-3に示す。



写真-3 TS・無線通信機器

今回使用した 3D-MC システムの概略仕様を表-2に示す。なお、不可視赤外線レーザーを使用しており、気象条件によって性能は若干変動する。

表-2 3D-MC 主要諸元

TCA1201+M ガイド(TS と内蔵ソフトウェア)	
測定範囲	5 ~ 200 m
高さ精度	±2 ~ 4 mm
水平精度	±5 ~ 10 mm
測定回数	5 ~ 10 Hz

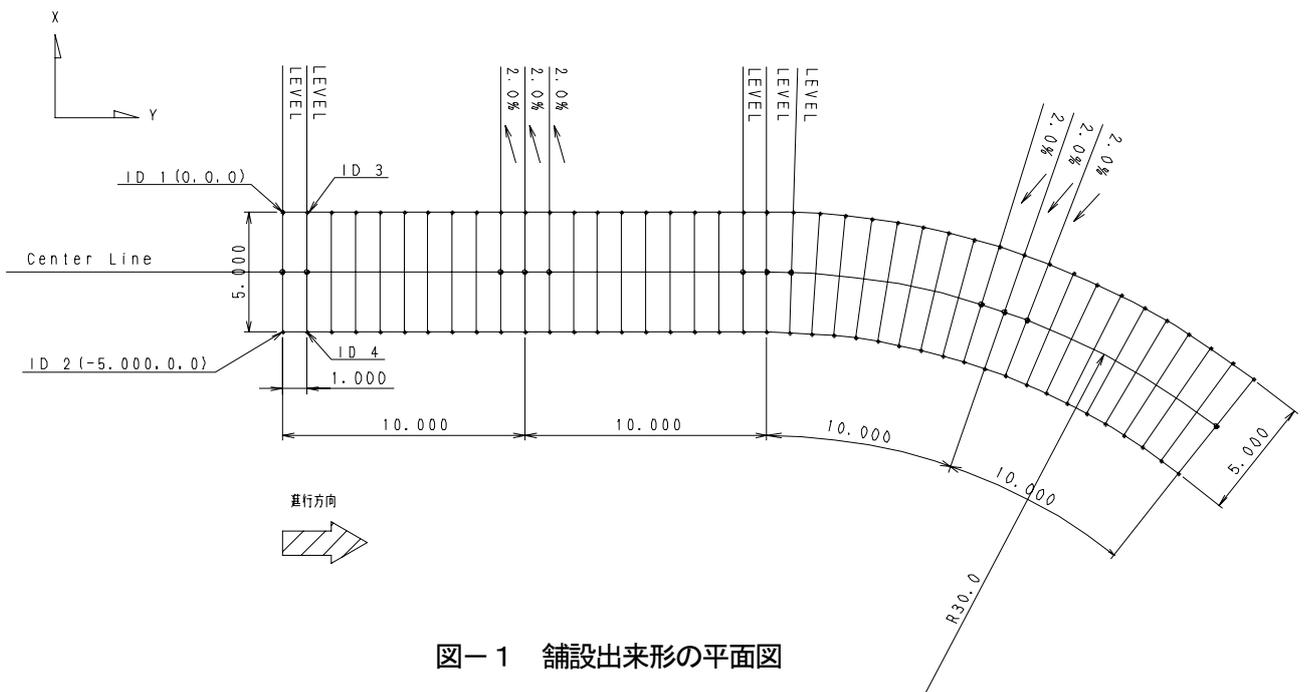


図-1 舗設出来形の平面図

3. 舗設出来形の計画

施工場所は弊社機械センターの構内であり、広さ・目的・費用等を検討し、幅員5m×延長約40mとした。性能確認試験であることから、通常の施工ではありえない厳しい変化条件を設定した。今回の施工条件をクリアできれば、殆どの実際の施工が可能になるという考え方である。図-1に計画平面図を示す。

センターラインの舗装厚さは常に20cmを目標とする。スタートから延長1mは水平に舗設し、延長9mまでの間に右上がり横断勾配2%まで傾斜をつけ、延長11mまで維持し、延長19mまでに水平に戻す。延長21mまで水平を維持し、延長29mまでの間で逆に左上がり横断勾配2%まで傾斜をつけ、終端まで維持する。これに加えて、後半の延長20mは曲率半径30mで右カーブしながら走行する。スタートラインから5m毎に検測ラインを設ける。舗設後に各検測ラインの中央・両端の3次元座標値を測定し、①平面方向＝ステアリングの精度、②高さ方向＝舗装厚さの精度を検証する。舗設条件を整理したものが表-3である。

表-3 舗設条件の変化

検測ライン	0	1	2	3	4	5	6	7
延長(m)	0	5	10	15	20	25	30	35
横断勾配	右上がり最大2%			左上がり最大2%				
走行ライン	直進				R30m右カーブ			

4. 試験施工の準備

4-1. データファイルの作成

3D-MCを稼働させるためには計画した出来形のデータファイルが当然必要である。3次元CADから設計データを作成する方法、又は、Excelを使用して設計データを作成・編集する方法がある。今回は後者によって、82ポイントのデータファイルを作成した。初めての作業であり、約4時間をこれに要した。一つのファイルデータのポイント容量は3000点までとされているが、2000点程度でファイル分割する手法が推奨されている。

4-2. 機器の取付と設定

機器の取付・設定はメーカーから技術協力を得て1日、

トリミング（材料を使わない試運転）に1日、計2日を要した。TSの配置状況を写真-4に示す。



写真-4 TSの配置状況

5. 試験施工の実施

2005年7月21日に試験施工を実施し、アジテータトラック10台、計40m³を舗設した。舗設した生コンの概略仕様を表-4に、舗設状況を写真-5に示す。アジテータトラックから路盤上にある程度分散して荷降ろしされた生コンは、横断方向に均一になるようスプレッディングオーガにより撒き広げられ、モールドが生コンを敷きならしていく。

表-4 生コンの概略仕様

曲げ強度	4.5 N/mm ²
スランプ値	5 ± 1.5
骨材最大粒径	25 mm



写真-5 前方から見た舗設状況

スタートライン直後に、スリップフォームペーパー通過後の両外端の下がりを計測できるように、予め杭を設置した。水系を張って下がりをスケールで測定し、スタート時の舗装高さが設計値に合致しているかを確認した。写真-6に状況を示す。

モールドによる敷きならし後の表面のコテ仕上げは、一般的にはスリップフォームペーパーに連結されたオートフロート装置を使用する。今回の試験施工では縦断方向に急激な高さ変化を設けており、オートフロートが追従できず、形成した表面を削り取る等、試験目的を阻害する可能性が予見された。よって、今回はコテ仕上げを行わず、モールドで敷きならしたままの状態とすることにした。敷きならし状況を写真-7に示す。



写真-6 水系による高さの確認



写真-7 敷きならし状況

6. 施工結果とデータの考察

施工の翌日、舗装したコンクリートがある程度固まった状態で、ハンドプリズムを使用してTSにより測

定し、検測ライン(測点) No.1~No.6において左端・中央・右端の計18点について3次元データを得た。

6-1. 水平方向データの考察

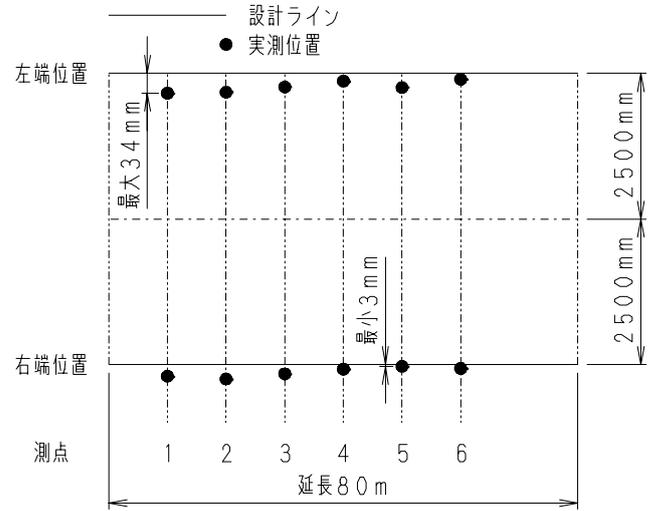


図-2 水平方向の測定結果

左右両端12点の水平方向の測定結果を図-2に示す。水平方向の設計ラインは、スタートから測点No.4までは直線走行、測点No.4~エンドラインまでは曲率半径30mの右カーブ走行である。実測位置(●)の傾向を見ると、測点No.1で約30mm右オフセットしていた端点が徐々に設計ラインに近づき、測点No.4で約10mm右オフセットとなっている。この間の延長は15mであり、直線走行部が続いていけば、更に設計ラインに近づく可能性がある。スタートラインに機械を配置した時にモールドが若干右にオフセットしていたと考えられ、これをスタート前に補正する等の処理が実際の施工では必要である。今回の結果より、水平方向の位置精度は概ね10mm以内と推定される。

測点No.5, No.6の実測位置に注目すると、左端と右端との距離が接近し、舗装幅が狭くなったデータになっている。これはモールドが変形した訳ではなく、モールド幅は一定であるが、モールドの延長方向長さに対してカーブの曲率半径が30mと小さかったため、一旦形成された右端面をモールド右側後端が削り取る状態で走行したことによるものである。直線走行部に比べると舗装幅が20~30mm減少した。曲率半径の小さい急カーブを舗装する場合にはこのような幅員減少が生じる可能性があり、3D-MCの性能に係わらないこれらの現象を考慮する必要がある。

6-2. 高さ方向データの考察

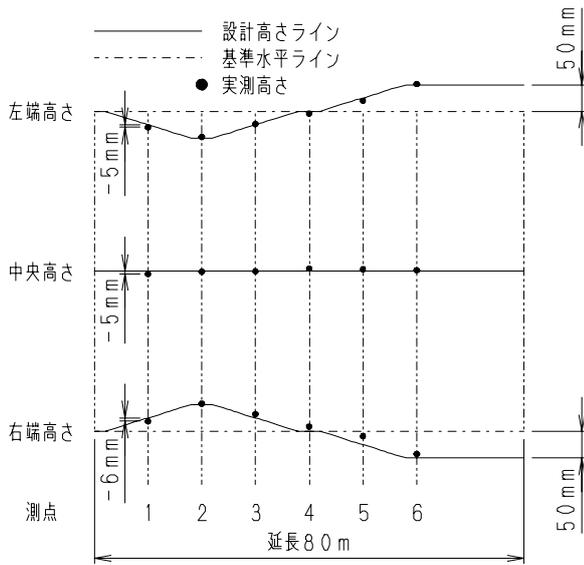


図-3 高さ方向の測定結果

測定した18点の高さ方向のデータを図-3に示す。舗設作業中の検測において、測点 No.1 で高さ位置を測定したところ、全幅において-5~-6mmで、設計ラインより一様に下がっていることが確認された。そこですぐに+5mmの調整操作を行った。測点 No.2 では両端+2mm、中央+1mmの値となっており、調整の効果が出たものと考えられる。



写真-8 舗設後の状況

スリップフォームペーバの左クローラ側から後方を見た舗設後の状況を写真-8に示す。左側端面の舗装厚の急激な変化を観察できる。

測点 No.2~No.6の間は、右上がり勾配→水平→左上がり勾配の過程であり、左端側は一貫して厚くする方向、右端側は一貫して薄くする方向にモールドが制

御される。この間、左端側は-1~+5mmの実測高さに対し、右端側は+7~+10mmと厚い方に片寄せた値となっている。左端側の一貫して厚くする方向ではモールドが高くなる(上がる)ことを妨げるものがないので、モールドが素直に制御に従う。右側の一貫して薄くする方向は、既に舗設されたコンクリートが下がるようとするモールドに抵抗し、なかなか下がらない現象によるものと考えられる。今回は延長20mで高さ100mmを下げる設計ラインであったが、図-3で見ると、実測点は延長方向に2~3mのズレがあり、追従が遅れていると考えられる。当然この応答性は生コンの性状に大きく依存するものであり、生コンのスランプによってモールドを下げる方向の追従性は異なると考えられる。

高さ補正をする前の測点 No.1 のデータと右端側のデータを除くと、±2mm以内に60%、±5mm以内に100%のデータが入る。今回の試験施工は水平な路盤上の延長30mの距離の中で、左右両端の舗装厚さが15cm~25cmと変化し、変化率は±25%になる。実際の施工ではありえない急激な変化における今回の結果からすれば、一般的な施工条件での高さ精度には問題ないと推定する。

今回試験施工における舗設速度は0.5~1.0m/minであるのに対し、3D-MCシステムからの制御周波数は6Hzであり、延長方向に1.4~2.8mm進行するごとに一度のペースで制御が掛かっていた計算になる。下式の関係がある。

$$P = 1000 \cdot V / (60 \cdot Q)$$

P : 制御ピッチ [mm]

V : 走行速度 [m/min]

Q : 制御周波数 [Hz]

走行速度と制御周波数との関係は位置精度に関係すると考えられる。今回のような大型スリップフォームペーバの場合、材料供給能力の制限から舗設速度は非常に低速であり、制御周波数は十分であると判断する。中小型スリップフォームペーバの舗設速度は大型機に比べて速いが、速度5m/minとしても制御ピッチは14mmである。これからして、スリップフォームペーバに3D-MCを適用する場合、制御周波数は十分に高く、問題にはならないと推定する。

7. まとめ

考察の結果を以下に箇条書きに簡単にまとめる。

スリップフォームペーバにおいて、3D-MC を適用する場合、

- 1) 水平方向の位置精度は 10mm 以内である。
- 2) スタートラインに機械を配置した際、水平方向の位置補正をしておく必要がある。
- 3) スタート直後及び施工中に舗装高さを検測し、高さ方向の位置補正をする必要がある。
- 4) 一般的な施工条件での高さ精度に問題はない。
- 5) 制御周波数は 6 Hz で問題はない。
- 6) 縦断方向の高さ変化の設計ラインは、生コンの性状を考慮して検討する必要がある。

今回の 3D-MC では TS を 3 台使用し、写真-4 に示す配置とした。TS の配置順序に制限はなく、左右のマスト先端に各々ある 360° プリズムに対して、2 台の TS が 1 : 1 に対応する条件を守れば良い。カーブ走行等によって TS の視線に対し、左右の 360° プリズムが交錯する状況もあり得る。このような場合には、左右のマスト高さに差をつけ、360° プリズムが同じ高さにならないように設定して TS の混乱を防ぐ方法が有効である。

位置精度に関して、第 3 項で記した通り「通常の施工ではありえない厳しい変化条件」であったことから、逆に一般的な施工条件での位置精度データが採取されていないことは課題ではあるが、3D-MC の舗装工事での実地適用の可能性を十分に期待できると考える。

8. おわりに

今回の試験施工は TS を使用する 3D-MC システムによって行った。これとは別に、高精度の GPS (例えば millimeter GPS) を使用する 3D-MC システムも舗装工事への適用が始まっている。このシステムは主に 4 種類 (①基地局、②移動局、③ゾーンレーザー発光器、④通信アンテナ) の装置で構成される。基地局と移動局は RTK-GPS (Real Time Kinematic-GPS) によって 3 次元位置情報を取得する。更に、移動局はゾーンレーザー発光器からのレーザー光線を受光し、高さ方向の位置精度を mm 単位に補正する。移動局は一つのシステムの中で複数設置できる。今回試験施工

したスリップフォームペーバに仮想的に当てはめると、360° プリズムの位置に移動局が設置されるイメージである。必要とされる 3 次元位置情報の数量が多い場合、その数量分の移動局を設置すればよい。TS がその追尾するプリズムに対して「1 : 1」の関係であるのに比べ、高精度 GPS の基地局と移動局は「1 : 多」の関係である。その観点から、同一施工区域内で多数の重機が同時に稼働する大規模工事には高精度 GPS による 3D-MC が適し、道路舗装のようにワンパスの単機で施工する場合は TS による 3D-MC がシンプルで適すのではないかと、という考え方もある。

いずれにしても、3D-MC によって施工するためには、設計ラインのデータファイルは必須である。施工機械に対しては各種機器の取付・調整も必要である。実地施工での省人化、省熟練化のメリットは大きいですが、施工時には表れないソフト面・ハード面での事前準備作業が相当な量で必要になることを考慮しなければならない。これら準備に掛かる手間と、実地施工で得られるメリットとを勘案すると、3D-MC 施工には適する工事規模があり、工事の規模が大きくなるほどメリットがあると考えられる。

3D-MC システムに係わる機器は現在のところたいへん高価である。また、測量機器としての性格を有することから、その精度・性能を維持するため、定期的なメンテナンスが必要になると予想される。

実地施工では表面に出ない要素や工事規模の適否を含めて、各工事に関して事前に経済性を十分に検討する必要がある。3D-MC システムは基本的に光学機器メーカーの製品であり、対象とする建設機械とのマッチングや調整に問題がでる可能性がある。また、トラブル発生時の原因追求の際、どちらに原因があるのかで対応が遅れる懸念もある。これらの課題の解決と更なる精度の向上をメーカーサイドにお願いしたい。時代の要請からしても、3D-MC システムはこれから更に普及していくと考えられる。

最後に、今回の試験施工に積極的に協力して頂いた荒山重機工業(株)、ライカ ジオシステムズ(株)に感謝申し上げます。

3 4. 「トータルステーションを用いた出来形管理要領（案）」について

国土交通省 国土技術政策総合研究所 高度情報化研究センター 情報基盤研究室

○阿部寛之、金澤文彦、田中洋一

1. はじめに

「トータルステーションを用いた出来形管理要領（案）」（以下、「要領」という。）は、道路土工の出来形管理の合理化を目的に、国土交通省で策定中の要領である。この「要領」の新しさは、現場で日常的に使用されているトータルステーション（以下、「TS」という。）と、従来の道路工事ではあまり利用されていない道路プロダクトモデルを設計段階から工事へ流通させて、施工管理に活用する点にある。

本稿は策定中の「要領」の概要を紹介するものである。

2. 検討の経緯

2. では、これまでの検討過程を記し、「要領」を策定するに至る経緯を紹介する。

情報基盤研究室では、建設 CALS/EC の一環として平成 13 年度から情報化施工の研究を開始した。平成 13 年度は土木施工業務の中での情報の流れを整理し、業務改善につながるサービス提供項目を分析し、平成 14 年度は土木施工で必要とされる情報に関する全体設計（システムアーキテクチャ：SA）案として取りまとめた。平成 15 年度は土工、舗装工などに対象を絞り現場業務改善サービスの抽出と体系化、各施工プロセスで扱われる情報やその流れ、作業内容などを表現した SA の構築、丁張り設置や出来形確認など具体的サービスを実現する SA の検証を行った。平成 16 年度はサービスを道路土工の施工管理と監督検査における出来形管理に絞り、現場技術者が日常の施工管理や測量で使用している TS と道路プロダクトモデルによる新しい出来形管理方法を検討した。平成 17 年度はこの新しい出来形管理方法の「要領」のタ

タキ台を作成し、必要となるデータ仕様書、アプリケーション等を開発した。また、技術資料やデータ収集のための構内実験を行なった。また更に、「要領」をタタキ台から試行案に改良し、この試行案の改善点抽出を目的に、全国 6 ヶ所の国土交通省の実工事で試行工事を行い検証した。

本年度は、昨年度試行の結果を踏まえ、「要領」とデータ仕様書、アプリケーションを改良し、昨年度は 1 社 1 機種だった TS のメーカー数を拡大して、早期の本格運用に向けた試行工事を全国で実施する。

3. 新しい出来形管理のねらい

最近の施工現場では国土交通省の推進する CALS/EC、電子納品に対応するため、IT 化が一応の進展を見せ一人一台のパソコンがインターネットにつながっている職務環境が実現した。現場の施工管理に業務支援ソフトを導入して丁張り計算や工事写真整理、完成検査資料作成等を省力化したり、測量機器に TS を用いる現場が増えてきている。しかし情報化施工については、特に中小規模の工事においてシステム導入コストとシステムで利用する設計データを作成する手間が大きいという採算的理由からそれほど普及していない。TS による出来形管理のシステム導入コストは TS の導入費用であり、既に TS を購入している現場は TS 端末機器の十数万円のバージョンアップ費用で済む。試行実験では工事費が 5000 万円以上であれば採算が合うと試算している。また、設計データの作成には 1 日ほど要するが、将来的には設計業務から工事施工に流通するようになり、施工業者の設計データ作成手間がなくなることも期待している。

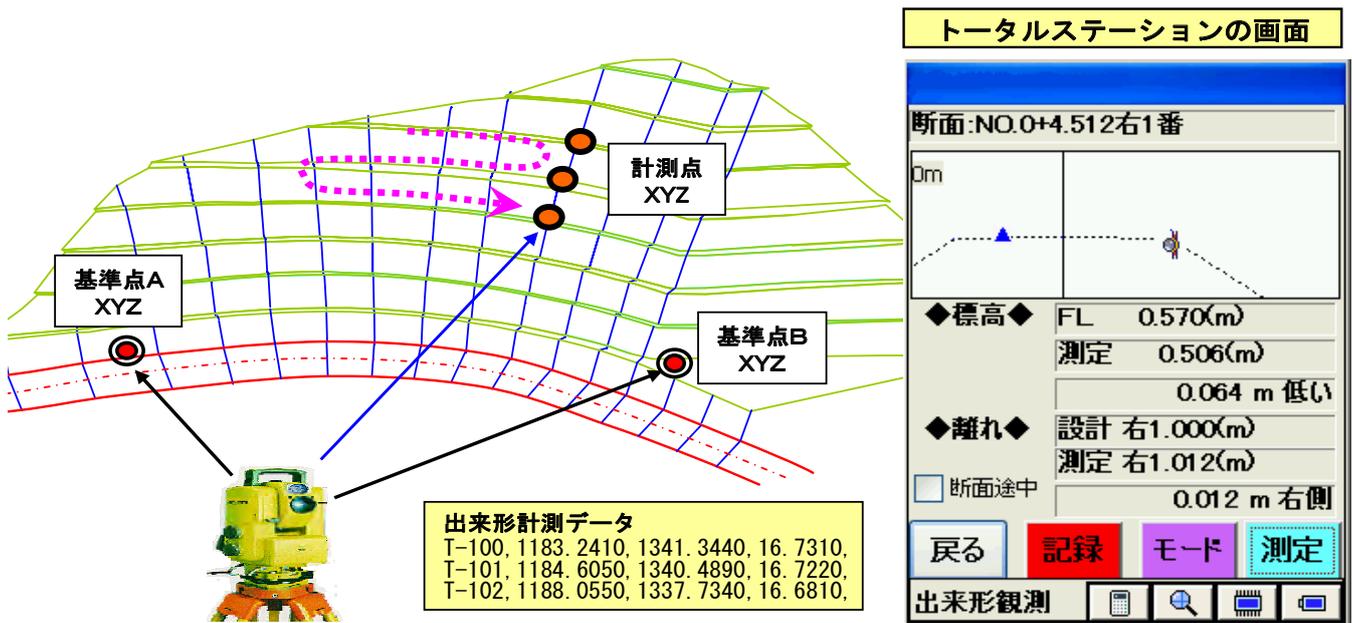


図-1 トータルステーションを用いた出来形管理のイメージ

4. TSを用いた出来形管理の概要

「要領」の出来形管理方法の特徴は、使用する測定器に現行の巻尺・レベルに替わって“施工管理情報を搭載したTS”を用い、出来形を3次元座標データで抑えることにある。ここで言う施工管理情報とは基準点や道路中心線形、道路横断形状のデータのことである。図-1に開発したTSの画面と現地計測のイメージを示す。開発したTSは、TSの画面上で現場の出来形と設計形状との差異を精密に表示することができる。TSによる出来形計測結果は3次元座標データであるので、パソコンによる出来形帳票や出来形図の自動作成が実現する。また、このTSは出来形管理のみでなく起工測量や丁張り設置にも利用可能で、施工管理業務全般の効率化と丁張り計算等の省力化・ミス防止等が期待できる。発注者側のメリットとしては、完成検査の省力化と高度化、出来形3次元座標データの維持管理での活用等が挙げられる。

5. 要領の内容

5. では、「要領」の内容を紹介する。図-2に目次を示すが、「要領」の主な記述内容は、①使用機器、②設計データの作成方法、③現地での出来形計測方法、④出来形管理基準及び規格値、

目次	
1. はじめに	2
2. 総則	3
2.1 本要領の目的	3
2.2 適用の範囲	4
2.3 用語の定義	6
3. TSによる測定方法	10
3.1 機器構成	10
3.2 TSの計測性能	11
3.3 出来形管理用TSの機能	12
3.4 基準点の設置	13
4. 道路土工における出来形管理	14
4.1 基本設計データの作成	14
4.2 基本設計データの確認	16
4.3 基本設計データの出来形管理用TSへの搭載	17
4.4 出来形管理用TSによる出来形計測	18
4.5 出来形計測点	20
4.6 出来形管理基準及び規格値	21
4.7 出来形管理写真基準	22
4.8 出来形管理資料の作成	23
4.9 電子納品成果としての整理方法	26
5. 添付資料	27
6. 参考資料	27

図-2 TSを用いた出来形管理要領(案) 目次

⑤出来形管理資料の作成方法、⑥電子納品方法である。

5-1 使用機器

図-3に使用機器と出来形管理の一連作業の流れを示す。機器構成は、“設計データ作成ソフト”と“出来形管理用TS”、“出来形帳票作成ソフト”の3つからなる。使用するTS本体は市販の

一般的なスペックのものとしたが、データコレクタには「要領」に対応する新たなソフトウェア機能を求めた。これは、昨年度（H17年度）の試行工事の結果、TSのユーザーである施工業者からの意見を参考にして決めたものである。新たな機能の要件は、「出来形管理用TS機能要件仕様書(案)」として整理し、現在複数のTSメーカーに提示している。なお内容については、現在開発中なため、ここでは詳述を控えたい。

5-2 設計データの作成

今後広く普及を目指すためには、設計データの作成作業の簡素化が重要となる。「要領」では、将来的には道路プロダクトモデルを設計業務成果から工事に流通させるという仕組みを目指す。現時点では設計から3次元設計データを流通させることは困難である。よって施工者が設計データを作成するのだが、この作成作業を支援する

ソフトを国総研で開発した。図-4に開発した設計データ作成ソフトの画面を示す。このソフトの入力インターフェースは、設計情報をテキストベースで作成・編集するエクセル的な、極力分かりやすいものにした。

このソフトによる作成手順は通常の道路設計と同じ流れで進む。まず線形計算書から読取った平面線形の幾何データを要素法で手入力し、次に縦断面図から読取った縦断面線形の幾何データを手入力する。難易度の高い横断形状の作成は、丁張り計算と同様なスタイルで、路肩端部や法尻などの構成点の道路センターからの離れ距離と標高（又は比高差）を入力して作成する。一般的な道路設計ソフトのように、片勾配や拡幅の変化や摺り付けをパラメトリックに入力しないこの方法は、入力項目数は多いのだが作成者にとって入力方法が理解しやすく、また修正が容易な長所がある。

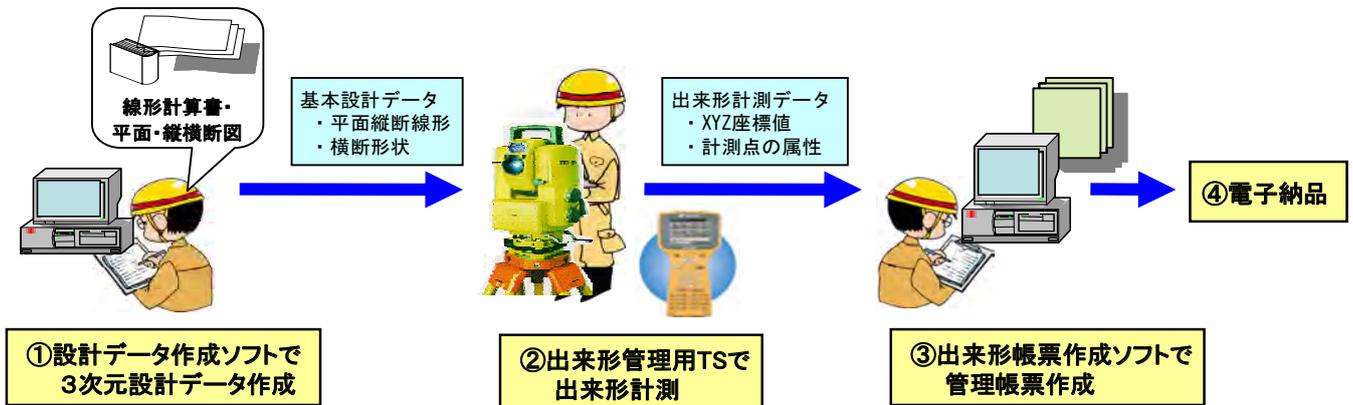


図-3 TSによる出来形管理の流れ



図-4 設計データ作成ソフトの画面

作成する道路の3次元設計データ仕様については、道路土工の設計・施工段階における基本的な設計仕様、形状構造、座標系を持つ表面的な基本骨格情報について定義可能な概念（スキーマ）の定義仕様書を作成した。これによりパソコンとTSとの間で道路3次元設計形状と出来形形状のデータ連携が可能になった。

5-3 現地での出来形計測

「要領」では、現地での計測効率を高めるために、TS設置時に後方交会法を使用することを認めた。これによりTSを基準点直上に据える手間を削減し、計測に適した現場の任意位置にTSを設置することが可能になった。図-5は、出来形の計測効率を、現行の巻尺・レベルとTSで比較したものである。この結果からTSは現行よりも約1.5倍、計測効率が高いことが確認できた。

TSの計測精度については一般に現行のレベルに劣り、計測誤差は測定距離に比例する。このため「要領」では、計測距離の制限として100mを設定した。

項目	現行の計測方法	TSによる出来形管理
計測範囲		
計測点数	12point	12point
計測時間	50.0min	32.2min
計測効率	4.2min/point	2.7min/point

注1) 現行の計測方法では基準高さ12点、長さ12箇所の計測を行った。
注2) TSによる出来形管理では、1回のTS設置と12点の座標計測を行った。

図-5 現行方法とTSの計測効率の比較

5-4 出来形管理基準及び規格値

出来形管理基準及び規格値は、測定基準を除き現行の土木工事施工管理基準に定められたものと同様にした(図-6)。測定基準は現行の40mから20mにつき1箇所に見直した。見直しの理由として、①従来から施工業者は20m間隔の横断面で出来形の自主管理を行っていること、②そ

もそも道路詳細設計の横断面は、土木設計業務等共通仕様書に基づき、標準として20m毎の測点について作成されること、③後述する出来形管理帳票の自動作成が可能になれば、施工業者の労力を増やすことなく、出来形のより適正な評価ができると考えたためである。

測定箇所	測定項目	規格値 (mm)	測定基準	
	基準高▽	±50	20mにつき1箇所以上	
	法長	L < 5m	切土：-200 盛土：-100	〃
		L ≥ 5m	切土：法長の-4% 盛土：法長の-2%	〃
幅(W1, W2)		-100	〃	

図-6 出来形管理基準及び規格値

5-5 出来形管理資料作成

図-3に示す通り、データを読み込み、帳票を自動作成し印刷・PDF化、XML化する出来形帳票作成ソフトを国総研で開発した。これにより現行のデータの手打ち入力手間・ミスの削減が期待できる。

6. あとがき

「要領」では新しい出来形管理として、TSと道路プロダクトモデルを活用した手法を示した。この手法は、TS以外の測量機器、例えばGPSや様々な設計データの応用が可能であり、今後の発展性が期待できる。今後、「要領」が普及し、現場の施工品質を確保しつつ生産性が向上することになれば幸いである。

参考文献

- 1) 有富孝一, 上坂克巳, 阿部寛之, 田中洋一, 柴崎亮介: トータルステーションを活用した道路土工における出来形管理システムの構築と現場実証, 土木学会情報利用技術委員会, 第31回情報利用技術シンポジウム (投稿中)

35. 出来形管理効率化を目的とした情報処理による計測技術の有効性

独立行政法人 土木研究所 先端技術チーム

〇二瓶 正康、山元 弘、田中 洋一

1. はじめに

土木工事の施工管理、監督において、工事目的物の出来形確認は、土木工事共通仕様書に確認の項目及びその頻度が明記されており、特に完成後に不可視となる施工箇所については、監督職員が確認できるよう十分な機会を提供することと記されている。また、定められた施工段階の確認だけでなく、施工の手順や現場の管理状況などを確認、把握するため、丹念に臨場することが工事目的物の品質確保につながる。しかし実際の現場では、職員数の減少と担当工事数の増加によって、全ての現場で十分な臨場を効率的に行うことは困難となっている。

情報技術を用いた計測手法は、計測の正確性や帳票処理の高速化等、少ない人員で出来形管理・段階確認を効率よく実施し監督職員を支援する効果的な確認ツールとして成立する可能性がある。

そこで、本研究では「トータルステーション(以下、TS)」と「デジタルカメラによる写真測量(以下、写真測量)」を対象に工事の出来形管理・段階確認効率化と高度化を実現する機能・計測性能について、実証実験を行い適用の可能性を検証する。

2. 出来形管理・段階確認の現状と課題

出来形管理・段階確認では、設計情報や規格値、施工計画書等の施工管理情報と現場計測情報に基づき、監督職員は確認対象の出来形及び品質が目標を満足しているか判断する。請負者は受注当初、段階確認の実施時期や手順を施工計画書に記述する。その後、工事の進捗に応じて立会願いを提出し、受発注者間で行われる工程会議により臨場立会の実施日程を調整している。

臨場立会では、監督職員が確認するために必要な資機材や写真、その他資料を請負者が準備することとなっている。また、確認記録として帳票や写真が必要である。写真は構造物の各辺を計測した巻尺と、計測結果を記載した黒板を一枚に収めるよう撮影して管理されている。しかし、実際には写真からテープの値や黒板の数値が読めないこともある。

このような状況の中で、工事目的物の品質確保を確実に担保するため、出来形管理・段階確認の重要性が議論されており、「公共工事の品質確保の促進に関する法律」も施行された。負担の増大を防止しつつ、品質確保を確実に担保するには、受発注者ともに出来形管理・段階確認の効率化・高度化が喫緊の課題である。

3. 実証実験の概要

本実証実験では、3種4級の舗装延長約50m、現場打擁壁、U型側溝、埋設管渠、集水升等を施工した。図-1に工事の概要を示す。

本実証実験は、3次元設計情報の施工段階における一貫した情報流通を前提として、道路舗装工の出来形管理・段階確認を従来の手法とTSを使った手法と・写真測量を使った手法を比較して効率化の検証を行った。また、臨場立会の効率化を目的としてインターネット共有サーバを介して遠隔地での確

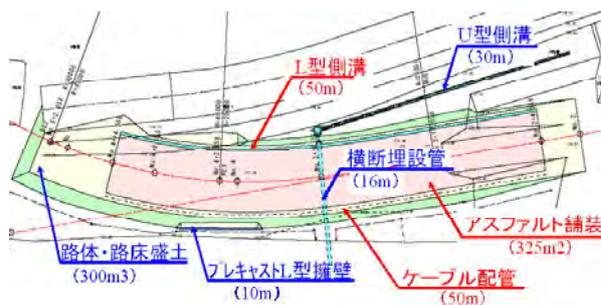


図-1 実証試験工事概要

認・判断も可能とするシステムとした。図-2に、TSでの出来形確認の利用ツールの配置と情報の流れを示す
 道路部の設計データは道路中心線形を基本として線形で表現されるが、擁壁工やU型側溝などの構造物は現行では線形を持たない。そこで、本模擬試験ではあらかじめ設計段階から擁壁工やU型側溝などの構造物にも線形を定義した。

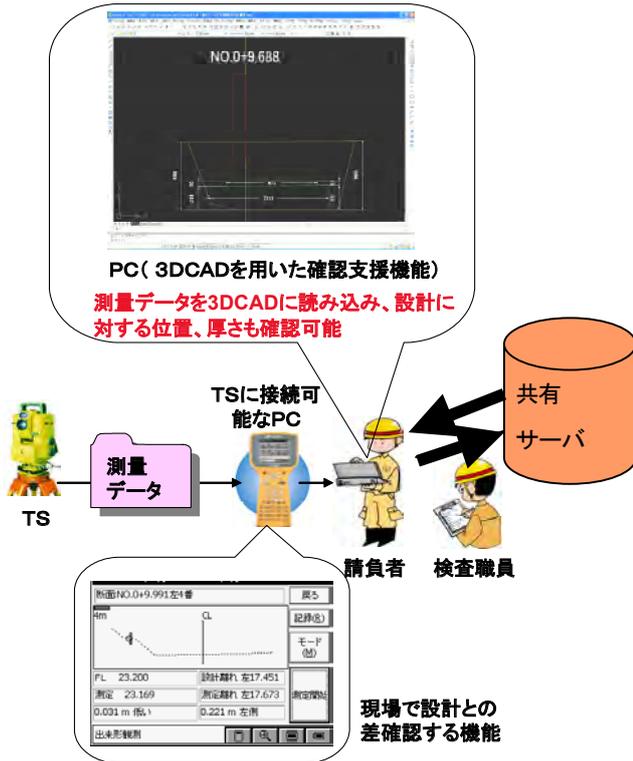


図-2 実証試験での利用ツールの配置と情報の流れ

4. 出来形管理・段階確認支援への適用性

本実証実験で出来形管理・段階確認支援に使用したTS及び写真測量の適用性について確認した。以下に詳細を記述する。

(1)TSによる出来形管理・段階確認

TSによる計測精度は、平成17年度に計測精度検証¹⁾により距離測定精度で巻尺と同等以上、高さ精度についても計測距離100m以内で±5mm以下と確認されている。

本実証試験では、道路土工、舗装工、現場打擁壁工、側溝工、埋設管渠工、集水升工の施工後の

出来形および不可視部分の出来形確認を実施した。図-3に実現イメージを示す。

出来形確認ではTSで取得した現場の3次元座標と設計の3次元座標を利用し、出来形と設計値の対比を現場で即座に行うことで出来形を確認する。

また、出来形確認で取得した3次元座標値を用いて、人手による帳票への加工作業無しに全体としての出来形管理資料の作成も行う。

この結果を現行の出来形管理・段階確認と比較し効率化について確認する。

実証実験の実施内容で想定している一般的な効果は、以下のとおりである。

請負業者： 請負者は、出来形計測と同時に出来形値と設計値のずれを確認できるため、修正指示を施工現場で迅速に行うことが可能となる。また、出来形管理の準備作業と計測後のデータ整理を省力化できる。

検査職員： 立会い計測の準備がほとんど不要となり、実地検査を容易にし、検査職員が判断した位置での検査が実現する。

(2)写真測量による出来形管理・段階確認

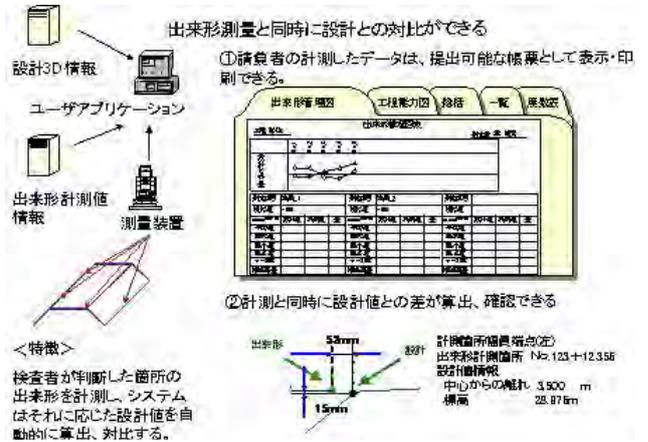


図-3 TSによる出来形管理・段階確認支援の実現イメージ

前述のTSを用いた出来形管理・段階確認では、小規模構造物の場合はTSの移動設置頻度が多くなる事や、形状によりTSでは計測出来ない場合がある。そこで組み合わせ技術として写真測量による出来形管理・段階確認の効率化を試みた。

本実証実験では、小構造物である現場打擁壁工、集水升工の施工途中段階で発生する不可視部分の

出来形確認とプレキャスト製品の寸法確認に対して写真測量を適用した。

写真測量では、高画質デジタルカメラ画像を利用し、基準寸法となる標尺とともに撮影角度を変えて検査対象を複数枚撮影する。

また、写真測量は、現場で撮影するのみで、設計との対比、確認を事後処理で行う。

撮影した写真からステレオ処理技術を利用して必要な出来形寸法を自動算出することで、出来形データを取得する。3DCAD上で3次元設計情報、数量と取得した出来形データを対比して、不可視部分の確認作業を効率化する。

実証実験の実施内容で想定している一般的な効果は、以下のとおりである。

請負業者：請負者は段階毎に、2枚以上の写真を計測し提出する。これにより出来形値が算出されるため、出来形確認の準備作業と計測後のデータ整理を省力化できる。

検査職員：不可視部分の確認の準備手間を省き、完成後でも出来形確認を再演できるデータを取得できる。

実証実験で利用した写真測量機器は以下のとおりである。

デジタルカメラ：Canon Power Shot 860
(800万画素)

処理ソフト：Kuraves G2(株)倉敷紡績)

5. 実証試験の実施

(1) TSによる出来形管理・段階確認

① 道路土工では試験施工+3層の盛土を実施した。施工後に、TSにて出来形計測を行い、3次元設計情報と対比した。その結果の例を表-1に示す。

TSでは、現場で計測と同時に出来形の良否が分かり、データを自動的に帳票出力することができた。

② 舗装工では土工とほぼ同様であるが各層の厚さ管理が必要となる。そこで各断面で出来形を表示し厚さの管理を行った。図-4は下層路盤完成時にTSによる出来形計測を行い、設計との対比結果を

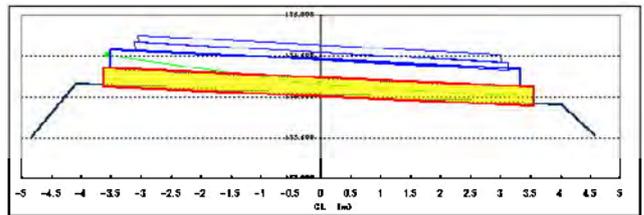


図-4 下層路盤施工出来形表示例

表示した出力例である。

③ 現場打擁壁工、側溝工、埋設管渠工では3次元設計情報と計測した3次元座標データを利用して表示した結果が図-5である。この様に、鳥瞰図として全体が確認でき、さらに最終的な擁壁・U型側溝位置を重ね合わせ、施工に支障が無いことを施工中に確認することができた。

表-1 出来形管理帳票の例

測定項目	中心標尺			法線標尺 右			法線標尺 左			法線 右			法線 左		
	設計値	実測値	差	設計値	実測値	差	設計値	実測値	差	設計値	実測値	差	設計値	実測値	差
規格値	±50			±50			±50			-10			-10		
現場目標値	±50			±50			±50			-10			-10		
測点又は区別	設計値	実測値	差	設計値	実測値	差	設計値	実測値	差	設計値	実測値	差	設計値	実測値	差
No.2+4.508	174.757	174.760	-3	174.748	174.769	-21	174.848	174.817	-32	0.65	0.28	-105	0.18	0.47	-38
No.2+7.058	174.087	174.118	-19	173.985	173.979	-16	174.178	174.173	-6	0.85	0.98	-12	1.25	1.54	-9
No.3	173.926	173.963	-35	173.825	173.811	-14	174.031	174.010	-21	0.72	0.83	-11	1.12	1.29	-17
No.3+10.278	173.643	173.666	-23	173.502	173.498	-6	173.784	173.793	-29	0.50	0.44	-6	1.11	1.21	-11
No.4	173.713	173.804	-41	173.587	173.562	-25	173.938	173.928	-11				0.07	0.20	-13
No.4+2.058	173.837	173.814	-23	173.653	173.691	-48	174.021	173.988	-32				0.21	0.60	-39
No.4+9.505	174.137	174.109	-28	173.977	173.952	-25	174.321	174.296	-25				1.85	1.92	-8
No.4+14.558	174.118	174.100	-18	174.036	174.069	-22	174.381	174.354	-26				1.89	1.89	-1
測定項目	幅員														
規格値	-10														
現場目標値	-10														
測点又は区別	設計値	実測値	差	設計値	実測値	差	設計値	実測値	差	設計値	実測値	差	設計値	実測値	差



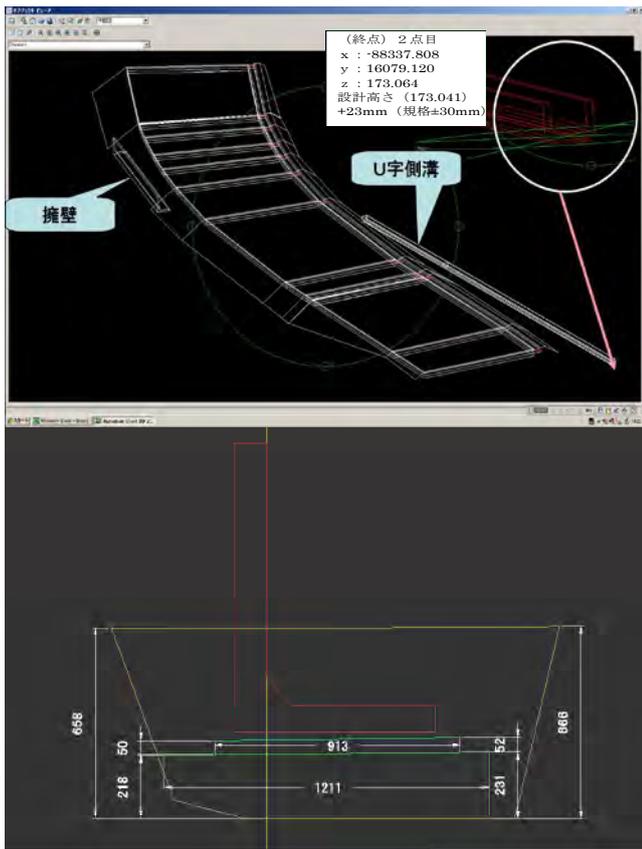


図-5 出来形確認表示例

④ 埋設管渠工では道路土工本体の道路中心線形からの中心離れ距離と高さの差で設計形状が決められている。図-6は埋設管の断面上で出来形計測結果と指定した設計値の対比を行った結果である。設置位置を3次元的に管理することで、後施工である、舗装工の配管作業での不整合などを事前に予防できる。

⑤ 集水升工では、設置位置の隅部分の3次元座標を目標位置に設定して管理した。現行(写真-1)では、事前の丁張りに基づいた升の設置位置であるが、施工後には丁張りは無くなるため、完成後に位置が特定できない場合がある。TSを用いた出来形管理では、絶対位置を管理することで正確な集水升設置位置が確認可能であった。ただし、升の内側や底部、背面などTSで計測できない箇所もあった。

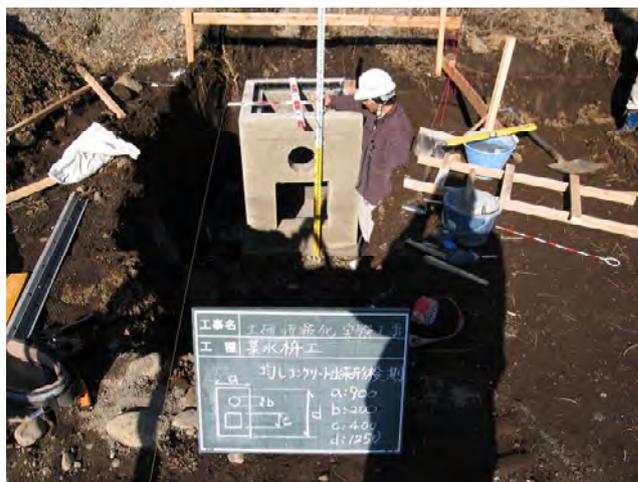


写真-1 現行の集水升の出来形管理

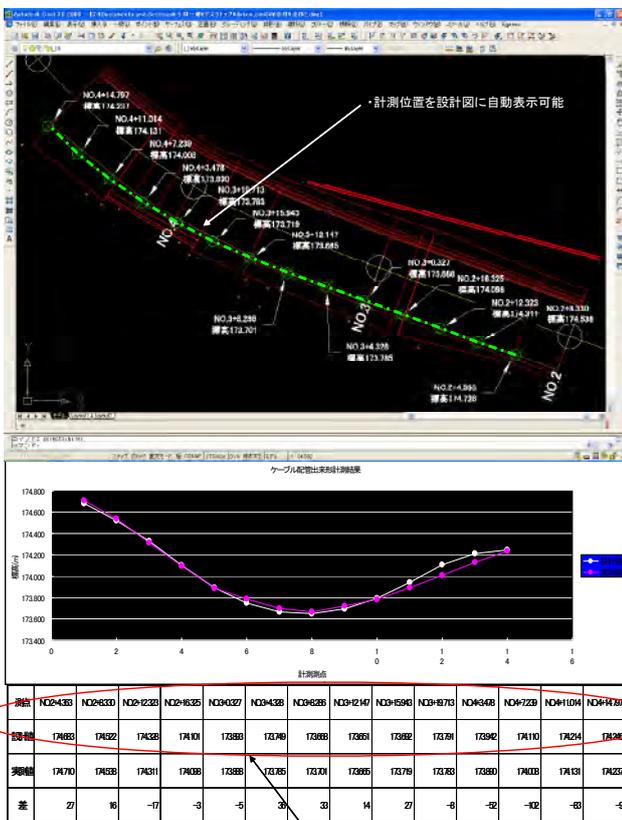


図-6 埋設管の出来形管理実施結果

これらの出来形確認は全て、設計情報の3次元化、出来形データの3次元座標によって容易に確認可能となった。

各工種の出来形管理・段階確認では現行の手法に対して確認行為の合理化が実現できたため、効率化できたと言える。表-2に時間短縮率を示す。

表-2 TSを用いた出来形管理による時間短縮率

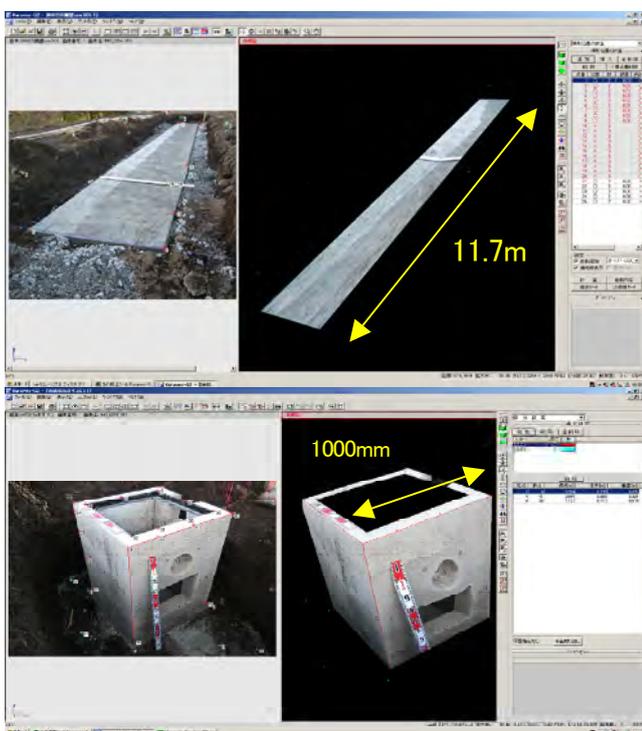
盛土工	74%減
擁壁工	63%減
排水側溝工	56%減
集水樹工(設置位置)	45%減

(2) 写真測量による出来形管理・段階確認

土工と舗装工は、TSで十分可能であり、写真測量で補足・併用する必要がない。

① 現場打擁壁工における不可視部分の出来形確認では、敷均しコンクリートの出来形計測において、写真測量の結果が延長方向11.7mに対し、テープでの計測結果が10.2mであった。結果として約1m程度の算出誤差が発生しており、延長方向の長さ、奥行きのある対象物の計測では誤差が大きいが確認され、延長の長いものはTSの範疇になる。(図-7参照)

② 集水升工における不可視部分の出来形確認では、1000mm 立方程度の枒を全体が写るよう撮影した場合、計測精度で10mm(1%)程度誤差が発生している。敷均しコンクリートの計測に比べ、集水升のような小規模な構造物では精度良く計測できるが、出来形として提出する数値としては誤差が大きく、巻尺等による実測と置き換わるにはより計測精



- サービス手順—
- ・ 標尺を入れて写真撮影×2枚
 - ・ 2枚の写真のみ提出
 - ・ 後処理で寸法抽出

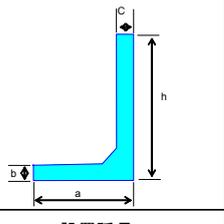
図-7 写真測量の表示結果

度向上が求められる。1%の誤差が許容されるように計測箇所を大きく撮影する必要がある。(図-7参照)

③ プレキャスト製品の寸法確認では、表-3のとおり最大で60mm弱の誤差が発生しているが誤差の大きさはステレオ処理を行う写真撮影角度の移動方向によって差が発生している。

現行測量と写真測量の対比結果

記号	実測寸法 (mm)	写真測量結果 (mm)	差 (mm)
a	750	786	36
b	90	90	±0
c	120	130	10
h	1000	1058	58
L	9.970	10.052	82



注) 施工延長Lの実測寸法は、TS計測によるもの

表-3 写真測量による材料確認の実施結果

写真測量では数値計算の過程で2枚の画像データについて相対点の照合を行う。このため改ざんはほとんど不可能である。ただし、写真の撮影方向によってはステレオ処理できない場合もあり、現場で複数枚の予備写真を撮影する必要がある。

出来形管理・段階確認の効率化として、現場での計測に関わる手間は、写真1枚当たりの計測対象面積が大きいほど現場での計測時間は短くなり効率的である(図-8参照)、しかし計測精度は対象面積に反比例して悪くなる。そこで計測精度を維持するため、写真1枚当たりの計測対象面積を設定する必要がある。

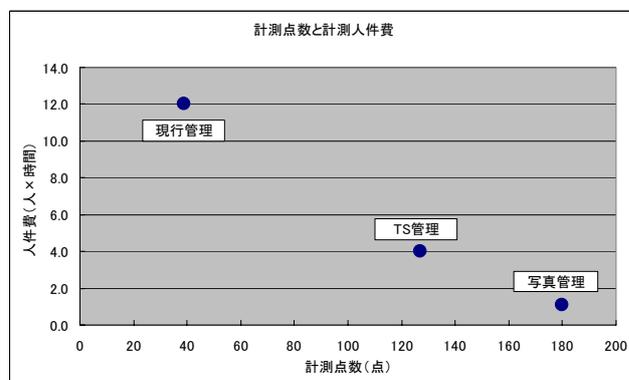


図-8 計測手法と計測人件費

6. 考察

今回の研究において、TS・写真測量共にシステムの所属による運用上の課題が明らかとなった。

出来形管理・段階確認実施時に検査職員が自ら判断するための支援システムを保有するか、請負者の保有システムを閲覧するかが必要であり、前者では発注者用支援システムの開発、後者ではシステムの機能が正確かどうかのチェックが必要となる。

TSによる出来形管理・段階確認は、設計との対比による確認の容易さ、時間短縮など有効性が確認できた。ただし、以下のような注意点が判明した。

小規模構造物では、巻尺に比べて計測時間を要する。構造物の細かい寸法までTSを用いて計測することは非効率である。

不可視部分の確認は、掘削出来形など、見通しのない部分で実施されることも多い。しかし、TSでは設置の手間が必要な上に、見通しがなければ計測ができない。

TSの計測精度は計測距離が離れることに比例して誤差が増える、延長の長い工事目的物の場合に計測箇所を一点で行うなど離隔をとりすぎると、計測誤差が管理基準に比較して大きくなる可能性がある。そこで、計測離れは100m以下とするなど注意が必要である。

③ 写真測量では、ステレオ処理する写真の撮影方法により奥行き延長の長い構造物の誤差が大きい。また、小規模構造物の出来形管理に対応できるが、プレキャスト製品の寸法確認では高さ1000mmに対して最大60mm弱の誤差が確認された。

写真の撮影角度(約10度を推奨)によってその計測精度が異なる。今回の撮影では、水平方向に角度を変えて撮影しているが上下方向に角度を変えて撮影することで縦方向の計測精度向上が見込まれる。この結果から、一層の計測精度向上が望ましく、計測範囲の設定など撮影要領が必要である。

写真測量は、現場での労力が少なく、短時間で計測できるが、机上(コンピュータ上)で写真から形状を算出する時間が必要である。

ただし、改ざんの困難な手法である事と完成後の寸法確認再現が可能である。

7. おわりに

TSと写真測量について研究してきたが、この技術が活用される基盤として3次元設計情報の流通実現が不可欠である。一貫した設計情報という前提に基づく施工管理が業務の効率化へ寄与することが確認できた。今後、既存の管理方法に対して、情報技術が置き換わった場合、これらの技術で従来よりも遙かに多くの施工管理情報を短時間で得る事ができる。特にTSでは任意位置で直ぐに設計と出来形の差異が把握できるため、受発注者共に容易に確認ができる。

しかし求められていない精度を確保するためにコストをかける恐れもあり、必要十分な計測要領を検討していく必要が有るだろう。

8. 謝辞

本研究を実施するに当たり(社)日本建設機械化協会施工技術総合研究所、熊本大学工学部環境システム工学科小林研究室など多くの方にご協力頂きました。記してお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 阿部寛之・他:土木工事の検査機器としてのトータルステーションの精度に関する一考察, 土木情報利用技術講演集, 土木学会, Vol.31, 2006年10月
- 2) 山元弘・他:工事全体を通して設計情報を利活用することによる施工管理効率化検討, 土木情報利用技術講演集, 土木学会, Vol.31, 2006年10月

3.6. 無線 LAN を使用したバックホウの積み出し作業管理システムの開発

日立建機株式会社 ○小倉 弘、株式会社キック 西垣 重臣
株式会社日立製作所ワイヤレスインフォベンチャーカンパニー 石野 孝

1. はじめに

近年、IT 技術を利用した情報化施工の進展が著しい。一般に情報化施工と言えば計画から、測量、設計、施工、維持管理の一連の工程を通し、施工に関わる情報を利用して施工の効率向上、精度・品質向上などを目的とした管理面の事例が多い。実際、施工業者へのヒアリングを行うと、施工中の物流の管理、手配の効率化に対する情報技術の利用が望まれている。図1に示すとおり、我々の生産する建設機械は、一連の工事工程の中で、実際にものを形作る施工工程で用いられる。従って、建設機械は施工のために工事情報を利用する、

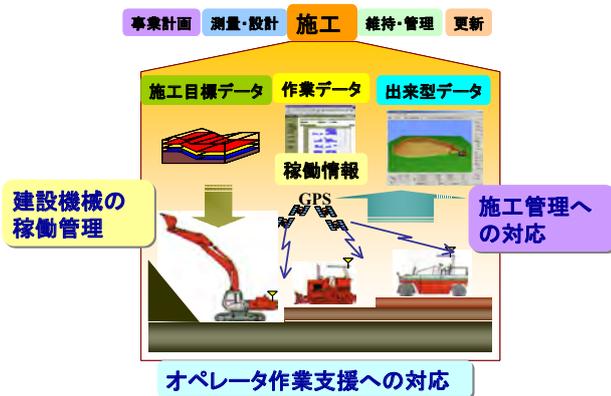


図1 建設機械メーカーにおける情報化施工

あるいは施工状況を情報として発信する情報源となる。その考えを元に、建設機械のIT化には大きく分けて「建設機械の稼働管理」「施工管理への対応」「オペレータ作業支援」の3テーマがあると考えている。「施工管理への対応」では実際の施工を行っている建設機械の稼働時間、稼働位置などの情報を施工管理へ用いること、あるいは計画、設計などの情報を機械施工のために利用することであり、施工工程の効率化、品質確保、あるいは安全性の確保などを目的とする。

特に施工工程全体の効率化、合理化は、施工業者の

一番の課題であるが、従来の情報化施工に関するシステムは、施工工程のある一部分の効率化・合理化を行うに過ぎないものが見受けられる。

そこで、施工現場の情報発信・収集基地となりうるバックホウを主体として、工期を通じて施工の効率化・合理化に貢献することを目的として、アプリケーションの検討・開発を進めてきた。

顧客要求調査の結果、①土木工事は土を運ぶ仕事であるので、物流の管理を効率化したい②施工現場の状況を現場事務所、本社の事務所で遠隔監視したいという項目が挙げられた。そこで、①の要求に対しては、無線 LAN を利用して、バックホウとダンプの通信を、ダンプへの積み込み作業イベントとみなすことで、ダンプの運搬回数、運搬土量の計測を行うシステムの開発を行った。また、②の要求に対しては、インターネットに直接接続可能な Web カメラの適用で、専用回線の設置不要で、施工現場の映像を現場事務所をはじめとして工事発注者・地域住民で共有することが可能である。

今回、上記無線 LAN によるダンプの運搬回数検知システムと Web カメラによる現場監視システムを実際の施工現場へ適用したので、その報告を行う。

2. システムの概要

2.1 無線 LAN による積み出し作業計測

無線 LAN を利用した積み出し回数の計測機能は、無線 LAN 方式 IC タグと基地局の通信機能を利用して、積み出し作業を行うバックホウと運土を行うダンプの通信をバックホウによる積み込みイベントとみなすことで、ダンプ毎の積み込み・運搬回数をバックホウ主体で計測するものである。

IC タグからは周期的にタグ識別データ (ID) が送信され、バックホウ搭載の受信機・PC では、IC タグ

からのデータを最初に受信した時刻と ID、所定時間 IC タグからのデータが途絶した時の時刻と ID を PC に記憶する。

受信開始時刻は積み込み作業を行うためにバックホウに所定距離だけ接近した時刻を表し、データ途絶時刻は、積み込み作業終了後、ダンプがバックホウから所定距離以上離れた時刻を表す。この2つの時刻の差分がダンプが積み込み現場で作業をしていた時間と考えられる。この時間を以下滞留時間と呼ぶ。機械の不具合でダンプがバックホウ付近で停止したり、バックホウ付近で積み込みのための待ち行列が発生するとこの滞留時間が長くなる。

運搬回数は、ダンプがバックホウに接近した回数のカウントで可能となる。また運搬土量については、ダンプの運搬回数に規定値 (10t ダンプで 5.5m³) を掛けあわせるで推定することにした。

2. 2 Webカメラを利用した積み出し作業位置の遠隔監視

施工現場の遠隔地での映像監視に対する要求は、年々高まっている。インターネットに直接接続可能なWebカメラの普及で、専用回線の設置不要で、施工現場の映像を現場事務所をはじめとして工事発注者、

地域住民で共有することが可能となった。

本システムでは、現場に設置したWebカメラの閲覧とカメラ画像を利用した作業指示画面の作成機能を有する。ただし、施工現場へのWebカメラの設置は設置場所の選定、電源・LANの引き回し、セキュリティなどの課題がある。また、容易に入手可能なカメラが現場を監視するために必要な解像度・機能を有しているかなど、実際に運用してみて確認すべき項目もある。

3. 実証実験

今回開発したシステムを、実際の施工現場にて実証実験を行った。

3. 1 実験の概要

- a) 工事名：上阿久津改良舗装工事
- b) 発注者：国土交通省宇都宮国道事務所
- c) 施工者：渡辺建設 (株)
- d) 工事概要：施工延長=460m 残土積出量=13,500m³ 舗装工=4,090m²
- e) 工期：平成17年11月2日～至平成18年10月30日
- f) 実証実験期間：平成18年3月24日～至平成18年5月20日

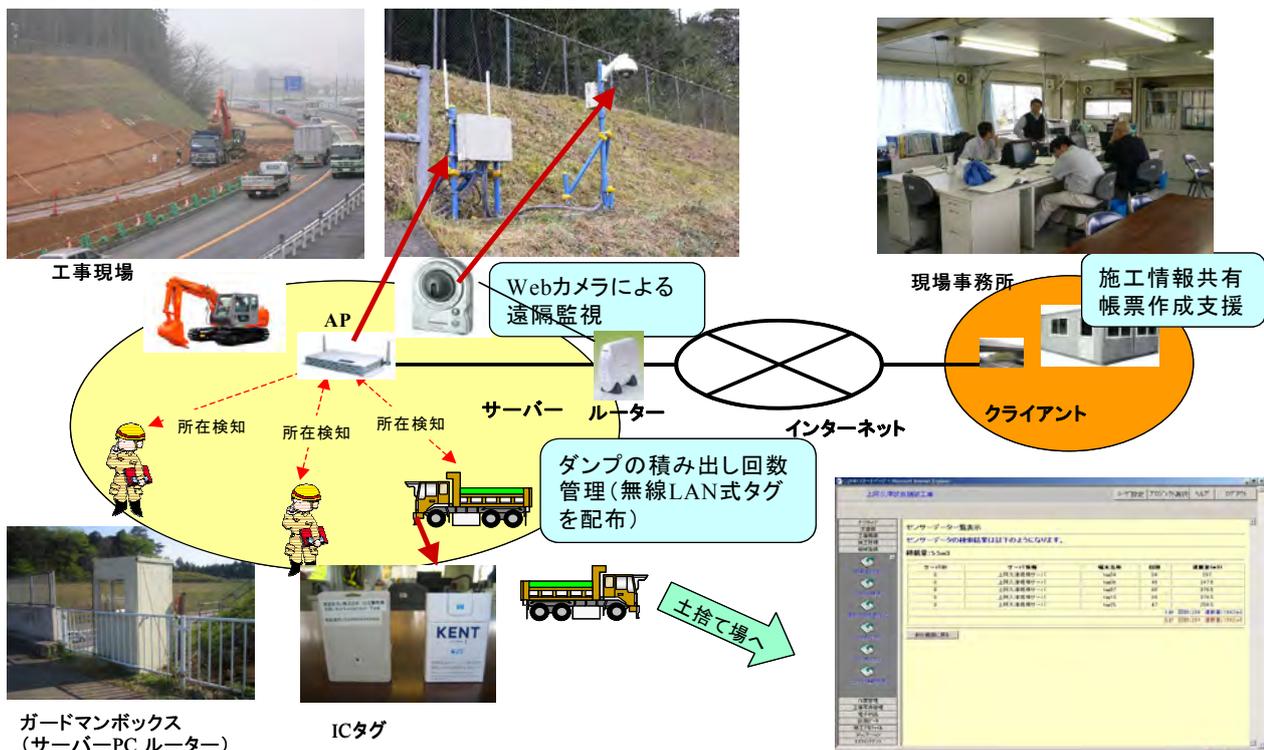


図2 システム概要

3. 2 実証実験の目的

無線LANとWebカメラを利用した積み出し作業管理機能と積出土量管理表自動作成機能の試行評価を行う。

3. 3 実証実験の実施内容

a) 無線LANを利用した残土積込場所におけるダンプの到着・発信イベントの検知とWebカメラによる積出作業状況画像の配信

表1 システム構成機器

機器名	メーカー名	型番	台数
Webカメラ	パナソニック	BB-HCM381	1
Webカメラ用屋外ハウジング			1
ルーター	アライドシステム	AR260S	1
無線LAN基地局	日立電線	HAP200B-S2	1
指向性アンテナ			1
無線タグ	日立製作所	ALT-180TAMS	5
サーバー(ノートPC)			1

今回の実証実験に使用した機器の一覧を表1に示す。無線LANによるダンプとバックホウの接近検知は、(株)日立製作所製の無線LANによる位置検出システム AirLocation を利用した。これは、TDOA(Time Differential of Arrival)方式による日立独自の位置検知モジュールを搭載した専用基地局を用い、IEEE802.11b 準拠の汎用無線LAN 端末を平均1~3mの高精度で位置検知できるものである。今回の実証実験では汎用無線LAN 端末として無線タグをダンプのオペレータに配布し、接近検知用のサーバを積み出し位置付近に設置した。検知用のサーバをバックホウ内に設置するほうが望ましいが、今回のシステムはサーバとインターネット間接続が有線である必要があり、検知サーバを現場設置とした。

b) 現場に設置した検知サーバから施工管理システムのサーバへの検知データの自動取込と残土積出土量管理表の自動作成

施工管理アプリケーションソフトについては、(株)キック製施工管理ソフトウェア c 2 m p に、ダンプ運搬回数計測・帳票作成機能を追加する形で開発し、現場事務所 PC で運用を行った。

この施工管理ソフトウェアは Web サービス型となっており、クライアント PC から施工管理システム本体が格納されているサーバへアクセスして、施工状況の確認、帳票の作成を行う。

施工現場の検知サーバに蓄積されたデータは、施工管理ソフトのデータ読み込み機能を起動することで施

工管理サーバに転送される。

4. 実験結果

4. 1 バックホウとダンプの接近検知

無線LAN基地局は、実際には50mから最大150mくらい離れた位置に設置した。無線LANはIEEE802.11b方式を採用しており、通信可能距離は通常100m前後と言われているが、今回の実験中、距離が長くて通信が出来なかったことは無かった。

検知サーバでは、ダンプが積み出し作業エリアから外に出たという判断をする部分が「通信途絶が7分継続したらエリア外」という仕様であった。つまり、滞留時間は最低7分ということになるが、位置検知のデータの10%弱が滞留時間7分未満となっていた。考えられる原因として、前日のサーバシャットダウン時に、検知サーバの制御ソフトを終了させないままサーバを落としたことが考えられるが、実験等で原因の特定を行っておく必要がある。



図3 ダンプ毎の運搬量表示画面

4. 2 積み出し作業の出来高管理

図3がダンプごとの積み込み回数の計測結果、図4が運搬回数の日別の推移を表すグラフである。また、当社油圧ショベルは機械稼働情報収集システム e-Service により、事務所で機械の稼働情報を閲覧することが可能である。図5に、実証実験で積み込み作業に使用したバックホウの稼働情報日報画面を示す。

この、運搬回数のグラフと稼働情報のデータの突合せで、以下のことがわかる。

- ・4月25日、26日は、ダンプのトラブルにより運搬

回数が減っている。そのリカバリーのため、通常より残業して作業を行っている。

・4月28日、5月10日は、滞留時間の増加が無いにもかかわらず、運搬回数が減少している。GWなどによる道路の渋滞が影響していると考えられる。

積み込み作業のサイクルタイム、運搬回数など、手作業による計測と同様の結果が得られていることから、本システムによる積み出し作業の計測が可能である見通しを得た。

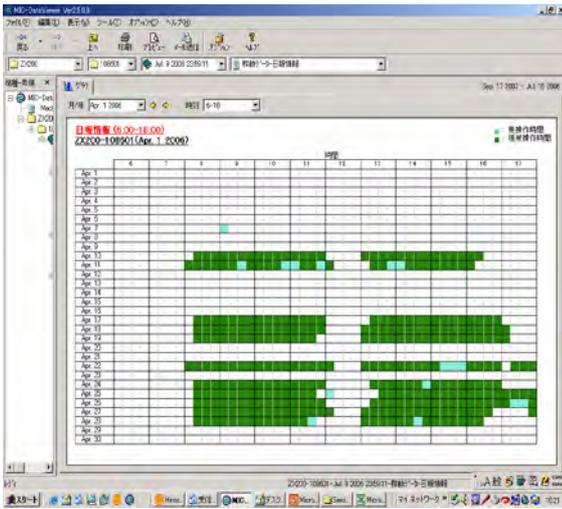


図4 バックホウの稼働情報表示画面

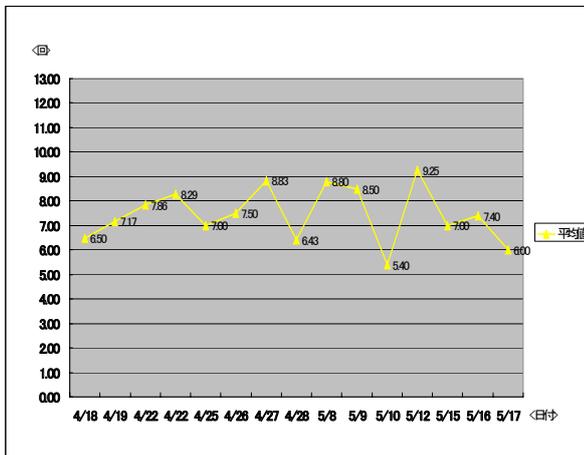


図5 ダンプ運搬回数平均値の推移

4. 3 積み出し作業の遠隔映像監視

図6にWebカメラによる映像のPC上での表示画面例を示す。通信負荷の軽減のため表示更新を3秒間隔に設定した。解像度、更新周期とも特に問題とならず、現場の安全監視、搬入物の荷卸位置の指示、打合せ時の作業場所の確認等に大きな効果があることがわかつ

た。ただし、カメラへのアクセスのセキュリティ管理の必要性、カメラの向きなどによってはカメラ周辺の住宅・住民が映りこんでしまうので、プライバシーへの配慮などが運用上の課題として挙げられる。



図6 Webカメラ映像の表示画面

5. 顧客評価

今回のシステムを運用した顧客の意見は以下のとおりである。

- ・ダンプ台数がもう少し多い現場で（今回は8台）、運用の効果がありそう
- ・ICタグの配布や回収は特に問題は無いが、バッテリーの持続時間がもう少し長いと良い
- ・監視カメラは、工事現場での監視だけではなく、工事発注者の事務所での状況把握や打合せ時での活用など、非常に便利である。

6. 今後の課題

今回の実証実験では、使用機材を最小限にするため、限られた条件での作業管理を行った。実際の施工現場は積み出し・荷降ろし位置が複数あり、無線機材の設置にも制約があることが考えられる。

今回開発したシステムをベースとして、現場毎に適したシステムへカスタマイズすることが容易な仕組み作りが必要と考える。

7. おわりに

本実験を行うにあたり、実証実験現場の提供、本システムの運用にご協力を頂いた、(株)渡辺建設(本社:宇都宮)の皆様、国土交通省宇都宮国道事務所の方々に感謝の意を表したい。

3.7. 舗装工における建設機械の位置情報技術を利用した 施工・施工管理の提案

国土交通省 関東地方整備局

金澤 哲也

国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所

○坂本 鋼三

1. はじめに

国土交通省では、位置把握技術、通信技術、情報処理技術等の IT（情報技術）を建設生産に適用して施工に係わる情報の効率的利用を図ることで、施工の効率化、安全性の向上、品質の確保、環境保全の向上と、監督・検査業務の改善を目指した情報化施工の推進を図ってきた。本報文は、公共事業に占める割合の高いアスファルト舗装工を対象に IT を組み合わせた施工・施工管理手法を構築し、試行工事を行った結果について報告するものである。

2. 現行の施工・施工管理方法

舗装工の施工管理項目は、出来形と品質である。出来形については、下層路盤までは、基準高さに対する仕上がり高さの管理が、その上位の上層路盤から表層までは厚さの管理が必要である。路盤の仕上がり精度が基層・表層の出来形と品質に直接影響するため、現行の施工法では、路盤の施工精度を保つため、仕上がり高さの目標となる丁張りを多く設置し、モータグレーダによる整形と高さ検測の繰り返し作業を行っている。このため、路盤整形作業には多くの労力と時間を要し、さらに、仕上がり高さの目標がない丁張り間はオペレータの高度な技能が要求される。

また、舗装施工後の出来形・品質確認においては、掘り起こしやコア抜き等の破壊検査が行われているが、この手法では施工面に対して点的な管理となることや、既に締固めた舗装を破壊することにより局所的な舗装の品質低下を招くという問題がある。

3. 適用した情報化施工システム

現行の施工・施工管理手法の問題点を解決・改善す

るため、図-1 に示す IT を利用した情報化施工システムを構築し、その利活用マニュアルとして「舗装の情報化施工要領（試案）」を作成した。そして写真-1 に示す 2 現場で運用した。以下にシステムの概要を説明する。

A 工事



B 工事



写真-1 試行工事対象現場

3.1 三次元重機制御グレーダシステム

光通信機能を備えた自動追尾トータルステーション(以降、自動追尾 TS という)と、道路線形の設計データを入力したコントロール用 PC(自動追尾 TS と直結)及びグレーダ側に設置された各種センサ、油圧制御部等で構成されている。本システムの主な特徴は下記のとおりである。

- ① 光通信機能付きの自動追尾 TS を用いて、施工中、常にブレードの位置を追尾、測定できる。
- ② 自動追尾 TS に直結しているコントローラよりブレードの現在位置における設計高さ・横断勾配を、リアルタイムで出力できる。
- ③ 自動追尾 TS に内蔵された光通信装置により重機側のレーザセンサにブレードの設計高さおよび横断勾配を送信し、ブレードが設計どおりの位置になるよう自動制御できる。

3.2 締固め回数管理システム

本システムは、締固め機械の走行位置座標を RTK-GPS で取得し、締固め対象物の品質を施工と同時に、かつ連続的に締固め回数で管理するものである。システムは、締固め機械に搭載した RTK-GPS 移動局とパソコン（以降、車載 PC という）、RTK-GPS 基地局、無線機等で構成されている。本システムの主な特徴は下記のとおりである。

- ① 施工中、締固め機械の平面位置を、数 cm の精度で連続的に計測できる。
- ② 施工中は、締固め範囲を一边が 0.25m の正方形のメッシュに分割した管理ブロック毎に、締固め機械が通過した回数を自動的にカウントできる。
- ③ 上記の締固め回数を、施工中、車載モニタに表示することにより、オペレータは締固め作業の進捗状況を面的に把握できる。

3.3 三次元座標計測システム

設計データや施工管理データを搭載し、計測対象

点の三次元座標を出力できる光波測距儀（以降、TS という）およびデータコレクタで構成される。指定した平面位置にターゲットを誘導する機能を有し、各層の仕上がり高さを定点計測できる。試行工事では、この機能を用い各層の締固め作業終了後に、指定する管理点の三次元位置座標(x,y,z)を、TS を用いて測量し、z 座標の差から路盤・基層・表層の層厚を求めた。

4. 試行工事の結果

情報化施工と現行施工の比較のため、2現場で試行工事を実施した、確認された情報化施工の導入効果を以下に紹介する。

4.1 路盤整形作業の効率化

現行施工では、モータグレーダによる路盤整形作業と、写真-2 に示すような丁張りを利用した出来形確認作業を、多数回繰返しなが路盤を目標高さに近づける。一方、情報化施工では写真-3 に示すように、路盤面を整形するブレードの高さを自動制御し

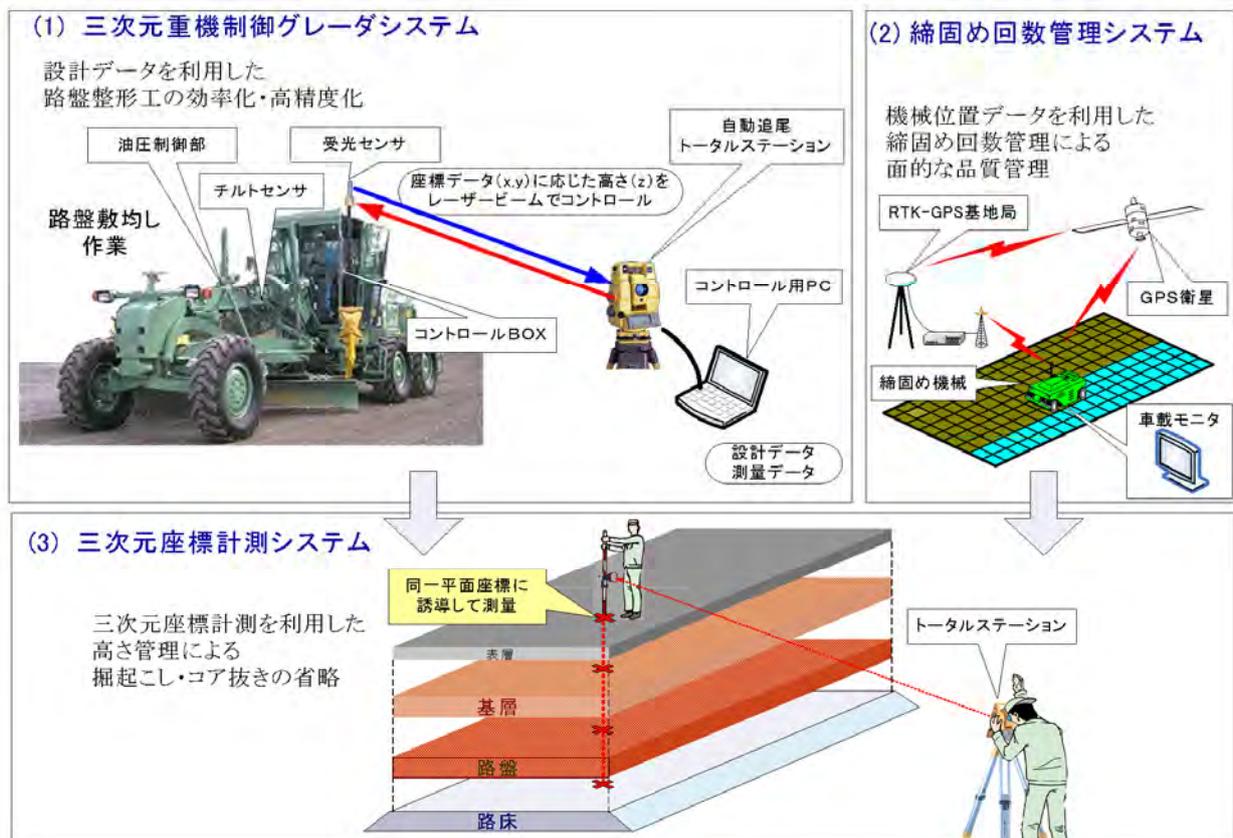


図-1 舗装工の情報化施工システム

て、目標高さに仕上げることから、出来形確認のための施工中断を低減でき、また表-1 に示すように短時間で仕上げ作業が完了する。現行施工と比較して作業効率が、A工事では 46%、B工事では 84%向上した。B工事の方が作業効率の向上率が大きいのは、A工事よりもB工事の道路線形の方が複雑であったため、情報化施工の効果がより顕著に表れたものと考えられる。



写真-2 現行施工による路盤の出来形確認



写真-3 情報化施工の路盤整形作業

表-1 作業効率の比較

項目	作業面積 (m ²)	施工区分	作業時間 (hr)	作業能力 (m ² /hr)	作業能力比 ①/②
A工事	900	①情報化施工	3	300	1.46
		②現行施工	4.4	205	
B工事	1,350	①情報化施工	5.4	250	1.84
		②現行施工	9.9	136	

4.2 環境負荷の軽減と安全性の向上

路盤整形作業の効率向上により約30～40%の燃料消費が削減され、環境負荷が軽減した。また重機周りの出来形確認作業を軽減し安全性が向上した。

4.3 出来形精度の向上

ブレードの上下動と横断勾配を設計どおりに自動制御する機能により、路盤の施工精度が向上した(図-2、表-2 参照)。その結果、情報化施工区間の表層の平坦性が向上した。また、施工時間は精度が向上しながらも前項で記したように短時間であっ

た。路盤の施工精度の向上は、材料費が高い基層・表層の材料ロス軽減に繋がるものと考えられる。

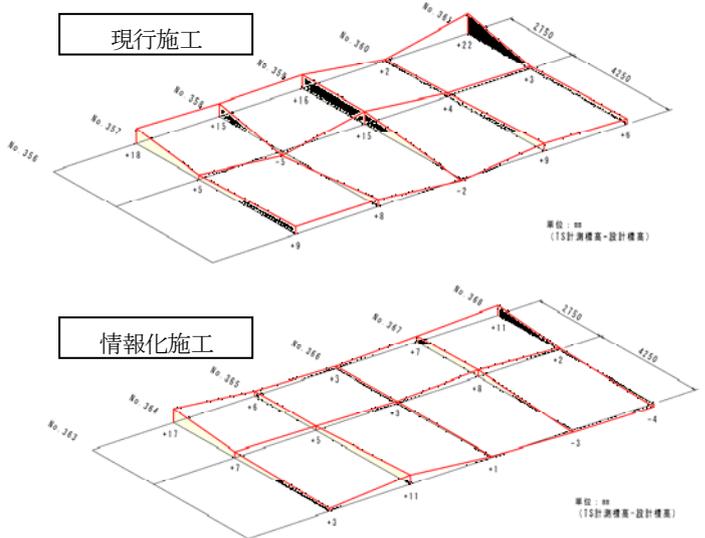


図-2 上層路盤の仕上がり精度比較

表-2 設計値と仕上がり値の比高 (単位: mm)

区分	平均値	標準偏差	最小値	最大値
現行施工	8.3	6.4	2	22
情報化施工	5.1	4.3	1	17

4.4 施工品質の均一化

図-3は、幅約8m×延長約100mの施工範囲を分割した管理ブロック毎に求めた、累積締固め回数を色分け表示した締固め回数分布図である。同図より、オペレータが締固め回数をカウントする現行施工の場合は、規定の締固め回数に満たない範囲(黒く着色された以外の部分)が存在し、その割合は路盤及

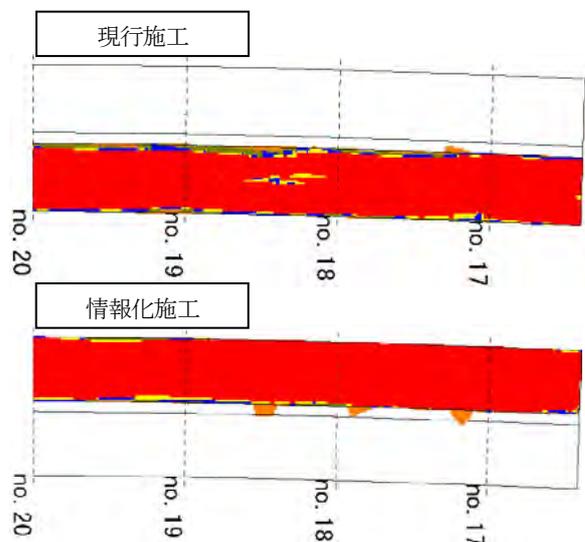


図-3 締固め回数分布図

び基層・表層とも施工範囲全体の4～10%程度であった。一方、車載PCのモニタで締固め回数を連続的に管理する情報化施工では踏み残しがほとんどなく施工範囲の全面が均一に締固められおり、全ての密度計測箇所ですべて規格値を満足する結果が得られた。

4.5 新たな出来形管理手法

図-4はTSによる定点測量で得られた基層・表層の仕上がり面の標高から算定した舗装厚と、この定点測量位置で採取したコア寸法との差を示したものである。同図より、TS測量による層厚とコアの層厚では、最大で約6mm、平均で約0.93mmの誤差が生じた。しかし、コア測定においても寸法測定位置の違いによって2～3mm程度のばらつきがあることから、TS測量による層厚の計測は実用上十分な精度があると評価できる。なお、厚さだけでなく幅員についても舗装の左右端の2点で平面座標を計測し、この座標差から求めることができた。

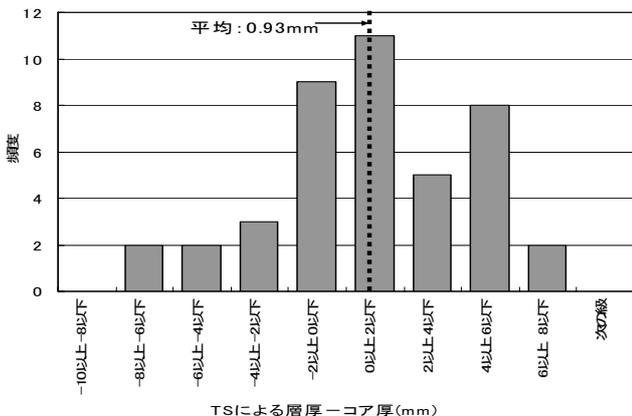


図-4 TS計測とコアによる計測値の差

4.6 監督・検査業務の改善

現行の監督・検査での出来形や品質の確認は、広い面積を点で代表させた管理手法である。情報化施工における監督・検査では、自動記録データを利用し、面的あるいは多数点の出来形や品質を短時間で効率的に確認できる。また、層厚確認においては、TSに搭載した表層設計標高データと各層の標高データとの差を任意点で容易に確認できる。監督職員は、この機能を活用し、適正な舗装厚を確保できることを事前に確認することが可能である。このような監督・検査手法は、良好な品質を確保するため有効なものと考えている。

4.7 コスト削減

舗装工に情報化施工を導入した場合のコスト削減効果について、概略の試算(直接工事費)を行った。

(1) 路盤工

作業効率の向上が約50%期待できる反面、モータグレーダ及びローラと組み合わせるIT機器費の増分を計上する必要がある。このため、現状においては現行施工とほぼ同等の費用がかかる。

しかし、情報化施工の普及に伴うIT機器の低価格化や施工管理の合理化あるいは工期短縮に伴う間接費の削減が期待できる。これらの事項を含めたコスト削減効果については、今後検証を進めていく。

(2) 基層・表層

基層・表層の作業効率は現行施工と大きな差がない。したがって、直接工事費だけに着目した費用比較では、ローラと組み合わせるIT機器の費用が増分となる。

5. 今後の課題

ITを組み合わせた舗装の情報化施工の施工・施工管理上の課題として、以下の事項が挙げられる。

(1) 3次元CADデータの流通

三次元重機制御グレーダシステムの制御データは、設計図書に線形計算書等を元に、手入力で作成している場合が多い(発注者への納品時、2次元に変換されてしまう)。したがって、設計者から施工者に直接、3次元CADデータが渡される環境を整備し、制御データ作成に費やされる時間・労力を削減する必要がある。

(2) 多点管理に対応した施工管理基準の策定

情報化施工によるTSを利用した、多点での面的な層厚管理となるため、これに対応した適切な管理基準および規格値の策定が必要である。

6. おわりに

今後は、さらにフィールド試験を実施し、データの蓄積と試案の再検証や従来施工との比較検討などを行い、ITを利活用した「舗装の情報化施工管理要領(案)」の策定に向けた検討を行っていく予定である。

38. 屋外作業ロボットの操縦・監視用画像伝送・認識技術の研究開発

○コマツ 永井孝雄
アイデン 橋本綱四郎
サイヴァース 川村英二

1. はじめに

建設機械をラジコンで操縦するユーザニーズは、30年以上前から存在していたが、本格的に屋外作業ロボットとして建設機械をラジコンで遠隔操作する技術が普及したのは平成6年1月年から始まった雲仙普賢岳の大噴火災害の復旧作業（無人化施工）からである。

近年建設機械の電子制御化が進み、遠隔制御されるラジコン建機は、屋外作業ロボットの代表といえる。ロボットの制御分野においては、最近の自立歩行など自律制御技術の目覚ましい進展にもかかわらず、実作業では、人間による操縦・監視は不可欠なものとされている。それは、実用性を考慮すると認識技術や自律制御技術がオペレータ操作に及ばず、ロボットの強力な出力を安全確実に制御するためには、人間による操縦や監視を必要とするからである。そして、最近ではオペレータの安全、作業環境向上の観点から、危険地帯や厳しい作業環境での屋外作業において、遠隔操縦技術の導入が進みつつある。

本研究開発では、更なる遠隔操縦性の改善のため、操縦者があたかも運転席にいるような感覚で操縦出来る、パノラマ映像無線伝送・認識システムを開発した。そしてこれを用いた遠隔操縦による作業効率が、搭乗操作や至近距離でのラジコン操作に比べてどの程度の効率になるのか、実機テストを行い定量的な検証も併せて行なったので以下に報告する。

2. 現状の無人化施工における課題

写真1と2に現在使用されている遠隔操縦・監視用画像伝送システムを示す。車載型のカメラ映像は使用しておらず、地上固定式監視カメラからの映像を頼りに操縦せざるを得ない状況である。このため、操縦熟練者とカメラ設置作業が必要となり、操作の容易化、機動性や作業効率等の見地から、改善の余地がある。これらを改善するには、車載型の高画質で遅延のない画像伝送装置が不可欠であるが、これまで遠隔操縦・監視に特化した映像伝送、認識技術の研究は、あまり行われてこなかったため、遠隔操縦に適した経済的な映像伝送システムは存在しておらず、現状で手にはいるシステムでは、多くの問題が存在している。関係者にヒヤリングした結果、次の

ように集約される。

- 1) 映像による遠隔作業時の効率が低い。固定カメラによる映像を頼りに操作しているので臨場感に乏しく、移動を伴う作業は特に機動性が悪い。
- 2) 車載可能でフル NTSC 映像品質を、遅延無く無線画像伝送が可能で許認可不要のシステムは国内では手に入らない。
- 3) 同時利用可能な映像伝送チャンネル数が 3ch と少なく、複数台の稼働が困難
- 4) 映像の視野が狭く、操縦するには不十分。特に搭乗席からのカメラ映像は人間に比べ視野が狭く、ズームやパン・チルト補えるが、見たい部分を選ぶのにその操作時間長く、実用に適さない。
- 5) ズームやパン・チルト付きのカメラは壊れやすく耐久性が不十分



写真1 映像を使用した遠隔操作室



写真2 映像を使用した遠隔操作室

3. 開発のねらいと目標

無人化施工において現在ネックになっているのは作業効率が搭乗操作時に比べ低いことである。先端技術研究センタの報告では、100m離れた場所からの遠隔操縦作業の効率が、映像を用いても搭乗時の61%、30m離れた場所からのラジコンでは64%、同じく50mでは56%と、目視では距離が長くなる従って効率が低下する。

車載型新画像伝送システムを開発する一番のねらいは、映像付きラジコン建機の作業効率を80-90%に向上させる事を最終目標とし、システム価格は現状以下で、無線の許認可は不要と、使いやすいシステムを提供出来ることとした。このため各要素別に以下のような目標を設定し開発のねらいとした。

- 1) 10ch以上のチャンネルを確保出来、画像伝送遅延の少ない無線伝送方式を開発
- 2) 広い視野を確保しながら、瞬時に注視したいエリアのズームアップ・パン・チルトを可能にするカメラ操作BOXの開発
- 3) 人間の眼とほぼ同様の視野を可能にする多眼カメラの画像合成技術を適用したマルチカメラBOXを開発
- 4) 以上のユニットをシステム化し、実機比較テストで搭乗作業時の80%以上の効率を目指す。また至近距離でのラジコン作業効率を上回る事を確認し、ねらいが正しかった事を検証する。

4. 各要素技術の課題とその解決方法

事前の調査や実験などを通じ、各構成要素の課題と技術について解析し、技術課題とその解決方法を集約した。

【画像送受信機】

事前にテストを行い許容される画像送受信遅延時間についての評価を行った。遅延時間の水準を変化させながら、被験者の官能評価で許容限界をチェックしたところ、100m秒(0.1秒)が境界であった。そのほか映像の乱れや画質向上も重要な課題であることも判明した。またこれまでの免許不要の2.4GHz帯の無線では、マルチパスによる映像の乱れやちらつきが多く作業者が疲れるため、ほとんどの映像は固定カメラによるものでも効率が低下させていることがわかった。これらの結果から課題を抽出し、その解決策を次のように策定した。

- マルチパスによる映像の乱れ防止
→地上波デジタル放送と同じOFDM方式の採用
- 多チャンネル、高画質を両立する
→OFDMに多値変調64QAMを組み合わせる事で高速化を行い、30Mbpsを達成事で最大10chチャンネル、640x480pixelを確保する。
- 遅延50~60mSを実現
→圧縮コーデックとしてJPEG2000の採用と誤り訂正回路の工夫

【マルチカメラBOX】

事前評価実験では、3台のカメラを利用して、実際の掘削作業などを行い、その際の作業視野として妥当性があるか否かの検証を行った。その結果、パノラマ視野(広角視野)の必要性およびメリットが改めて確認できた。すなわちパノラマ視野では、パワーショベルの旋回時に周囲の状況を一望に収めることが可能になり、効率的で安全な作業に役立つことが分かった。

その一方で、拡大視野ではバケット内部の内容物(岩石や土砂の質)を確認することが出来、品質の良いズーム映像も有効であることがわかった。更に作業に合わせてスムーズに視点を移動し、あるときはバケットを追尾する形で視点が移動し、あるときは掘削地面の状況を詳細に確認するために視点移動するといったことが、実際の作業に役立つことも分かった。ここでのポイントはパノラマ視野と拡大視野は、それぞれ旋回作業と掘削作業という異なる作業に利用用途が分化しているという点である。すなわちパノラマ視野は、全体を一望する必要がある一方で、視点移動の必要はあまりなく、特定の部分を拡大する必要性もあまりない。これに対し掘削作業視野としての拡大視野は、着目領域が中央(バケットがある方向)に集中しており、バケットの追尾など頻繁な視点移動が必要とされる。更に作業視野の場合、バケットの上下移動範囲が比較的大きいため、実験した垂直視野角90°では必ずしも十分でないことが判明した。

以上を整理すると、作業を支援するためのマルチカメラ画像視野は大きく分けて次の2種類の視野を提供する必要があると判断できる。

- ① 水平視野（従来パノラマ視野）
- ・ 主に水平方向の全体視野（150°以上の視野角）を提供する
 - ・ 部分的な拡大や、視点の移動は必ずしも必要ない
 - ・ 正面方向を中心として左右対称な映像を提供する（建機の正面方向を明確に作業者に伝えるため）

写真3にその例を示す。

② 垂直視野（中央作業視野）

- ・ 作業を行うために、正面方向の拡大視野を提供する
- ・ バケットとカメラは連動して回転するため左右視野角は通常範囲が良い
- ・ バケットの上下移動範囲が広いと下方90°、上方向60°程度の視野が必要
- ・ 視野範囲内での視点移動、ズーム拡大&縮小を頻繁に行う可能性があり、ズーム拡大時の画像品質は高いほどよい。
- ・ 写真4にその例を示す。



写真3 水平パノラマ

写真4 垂直パノラマ

この2種類の視野を同時に提供するマルチカメラシステムを実現するには、従来のカメラを水平方向に複数配置する方式では限界がある。またズーム品質を上げる一方で垂直視野を150°程度確保すると、カメラ台数が極端に増加し、システムを複雑にするだけでなく、妥当な価格帯から逸脱する危険性がある。

従来のマルチカメラでは通常の監視カメラで利用している交換可能なレンズ(Cマウント等)を利用しているため、カメラ台数が増えるとレンズの数も増加し、物理的な問題（大きさ、重量）と、コスト的な問題が発生する。

以上の点を整理し、マルチカメラBOXに求められる課題とその解決技術は以下のように集約できる。

- カメラの小型化
理想的なパノラマ画像合成を行うためには、なるべくカメラ間の間隔を狭める必要がある

ため、2cm角以下のサイズが望ましいカメラ取り付け後の耐振動強度が十分高くなる必要がある

→携帯電話などで利用されている、レンズ一体型のCMOSセンサカメラの採用

- 画像の解像度（画素数）向上
従来のNTSCカメラ（40万画素等）以上の画素数が望ましい
→ズーム時を考慮し、130万画素CMOS採用
- 広い水平視野を確保する一方で、油圧ショベル用には150°の垂直視野を同時に確保する必要がある。魚眼レンズでは見にくく、通常のマルチカメラではコスト、取り付けスペースの観点から大きな困難が発生する。
→超小型マルチカメラを水平・垂直視野用に2系統で使用するにより、8台のカメラによるパノラマ合成を実現する。
- 4台のカメラからビデオ信号のリアルタイム処理を行なう場合、1秒間に48百万画素のデータを入力する必要があり、さらにリアルタイムに合成処理に関わる演算処理を完了する必要
→4台のカメラ画像用にそれぞれに専用メモリバンクを用意し、各メモリバンクは時間分割によるマルチポート化を行なうことにより、見かけ上同時書き込み、同時ランダム読み出しが可能となるハードウェア構成を実現

【映像付遠隔操縦装置】

以上に述べた解決策やパンチルト・ズームなどの操作を瞬時にできるカメラ操作BOXを開発し、これらを組み合わせ、写真5に示すような、車載カメラのみの画像を頼りに遠隔操縦を行う遠隔操縦装置を構成した。また写真6は操縦風景を示す



写真5 遠隔操縦装置



写真6 操縦風景

掘削作業を行うときには垂直画面を主に使用し、旋回作業や走行時には水平画面に瞬時に切り替えられるようにカメラ操作 BOX を開発した。この BOX ではパン・チルト・縮小・拡大など操作も瞬時に出来るようにした。画面はプロジェクタにより 100 インチの大画面や通常の CRT・LCD などの使用が可能とした。このシステムを用いた遠隔操縦と搭乗操作、至近距離での目視遠隔操作により作業性の比較を行った。当初臨場感を最大限にすべく、半球に画像を映し出すことも検討したが、油圧ショベルのように旋回操作時には目が回ってしまい、逆効果であることがわかったので通常のフラット画面を採用した。また立体視については長時間作業の面で問題があり、当初から検討外とした。

表 1 に今回新規開発した画像伝送用送受信機の仕様、表 2 に 8 眼カメラにより画像合成するカメラ BOX の仕様を示す。また図 1 にシステム全体構成を示す。

仕様周波数	2.4GHz
出力	10mW
画質	640×480 画素
変調方式	OFDM
遅延時間	60m 秒
チャンネル数	10 チャンネル
圧縮方式	JPEG2000
伝送レート	30Mbps
フレームレート	毎秒 30 フレーム
到達距離	300m以上 600m以上 (リピータ使用時)
外形寸法	221×153×60mm

表 1. 画像伝送無線送受信機の主要仕様

カメラ	CMOS 130 万画素
カメラ数	横長画面用 4 個 縦長画面用 4 個
視野角度	横長画面 150 度×50 度 縦長画面 50 度×150 度
ズーム・パン機能	デジタル式
合成時間	40m 秒
フレームレート	30FPS
画質	合成後 640×480 画素
外形寸法	280×164×318mm

表 2. カメラ BOX 主要仕様

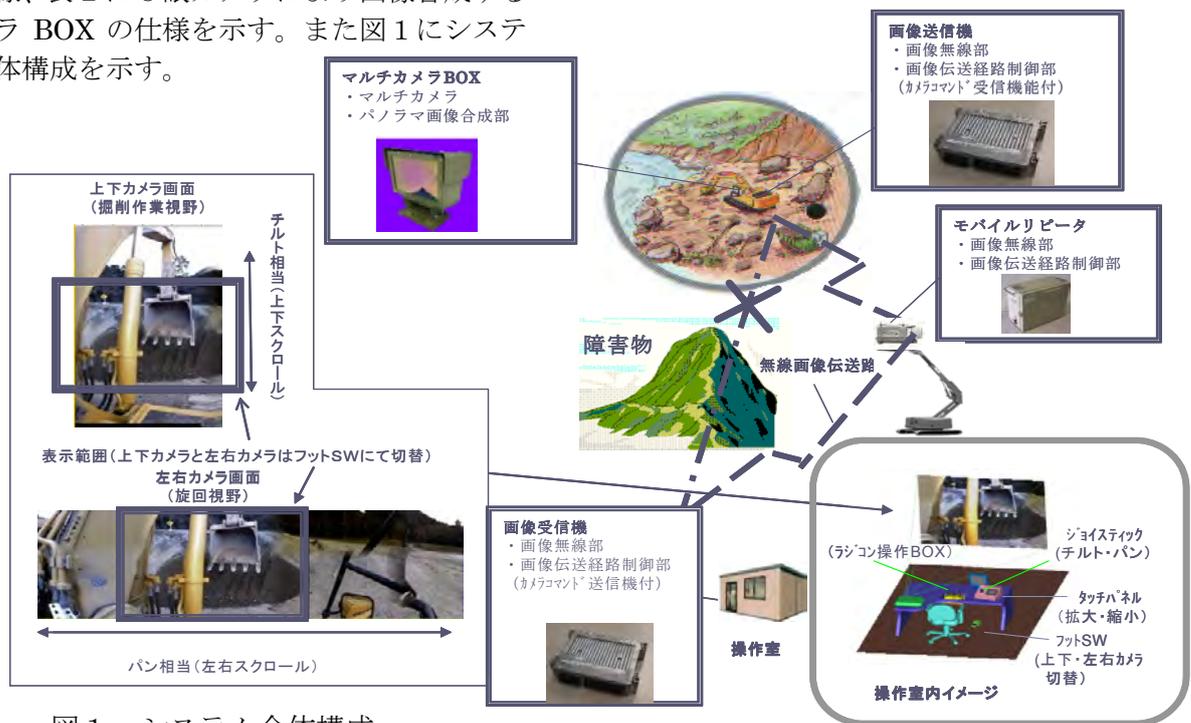


図 1 システム全体構成

5. 作業効率向上検証結果

開発したマルチカメラBOXと画像送信機などを弊社の0.8立米クラスのラジコン油圧ショベルに搭載し、搭乗操作時、至近距離での目視遠隔操作、画像のみを見ての遠隔操作で作業量試験などを行い、官能評価による実用性や作業量の計測結果などを比較した。

写真7に本システムを装着したラジコンつき試験機の概観を示す。ラジコン用受信機は430MHz又は1.2GHzを用い、画像送信用2.4GHzとの干渉を避けるようにした。また走行時の車体の振動による画面の振動もほとんど気にならなかった。試験は図2に示す弊社の試験場で実施した。作業量の比較は図4に示すように掘削と排土の連続作業で比較した。比較は搭乗作業時、15m～30mの至近距離での目視ラジコン、そして今回の車載カメラ映像のみによるラジコンの3水準で各6日間行った。実施した土工量試験の比較結果をグラフ1～3に示す。

搭乗操作の作業量を100とした場合、画像のみで作業した場合には82%であった。目視ラジコンでは70%の作業量にとどまった。



写真7 試験機の外観

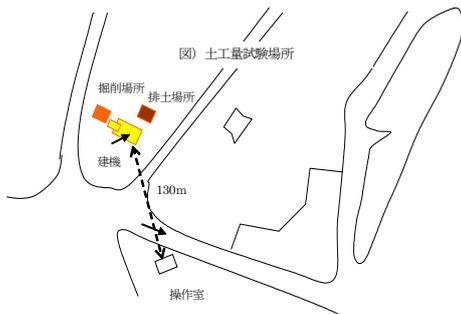
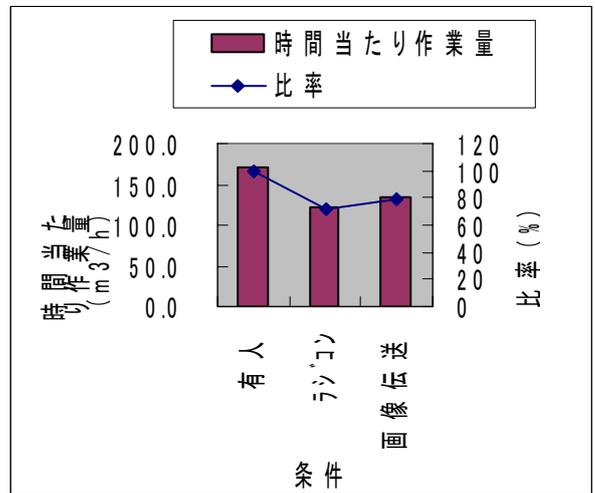


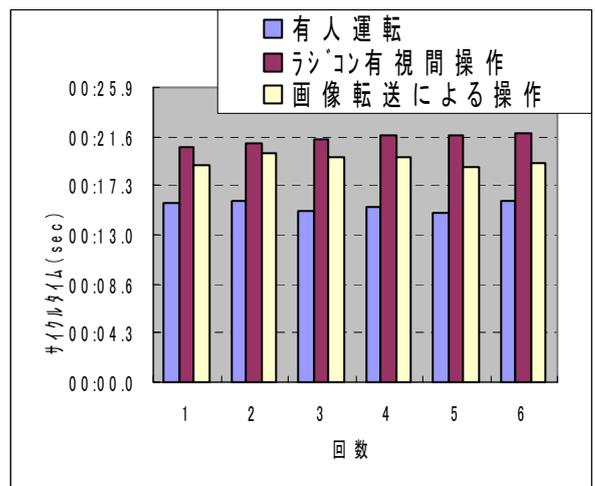
図2 試験場所

冒頭に述べたようにこれまでの映像で遠隔遠隔作業する場合は搭乗時に比べ61%といわれているので、今回の新しい映像システムは作業効率の向上が期待できることが確信された。作業量が増加した要因としては、以下のような事実によることが確認された。

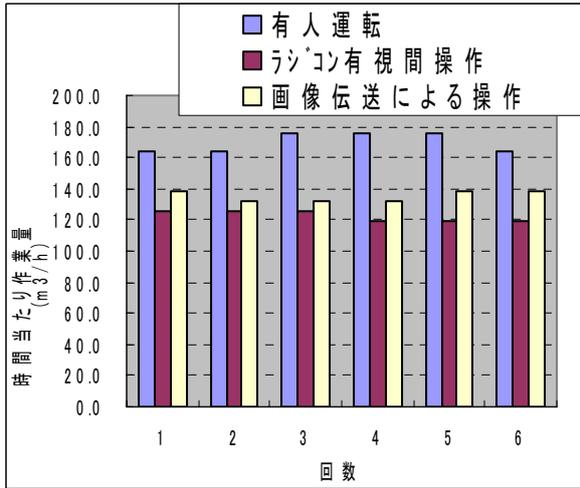
- 目視ラジコンでは掘削時バケットの中が良く見えないので、ブームとアームの動きだけでバケット操作をしなければならないのに対し、画像では確認しながら操作が出来、サイクルタイムとバケット満杯率が良い。
- 旋回操作時排土する場所の確認が目視より画像のほうが確実に容易なため、サイクルタイムが早い。



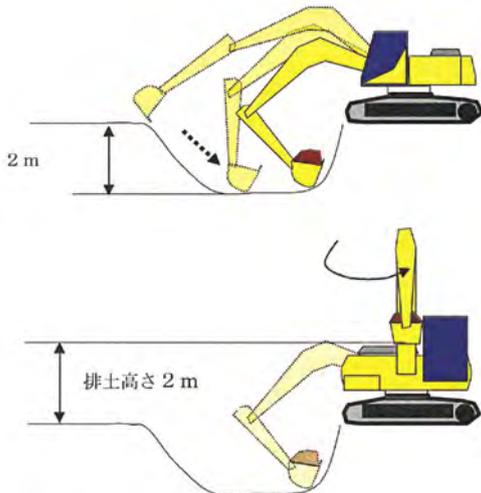
グラフ1 作業量平均値比較(m3/h)



グラフ2 サイクルタイムの比較



グラフ3 1時間あたり作業量の比較



2 mの深さまで掘削し、2 mの高さまで持ち上げて、90度回転し排土する作業を繰り返し、土工量を比較した。

図3 比較試験方法



写真8 テスト風景

6. 結論

8個のカメラを効果的に配置し、この映像をほぼリアルタイムで画像合成する車載装置を開発することが出来た。

免許不要な2.4GHz帯で、高品質の映像を、同じ場所で10チャンネル同時に送受信できる、車載型の送受信機を開発した。

搭乗時、目視ラジコン操作時、本システムを使用した映像のみによるラジコン操作時の比較作業試験を実施した。この試験結果より、無人化施工のネックになっていたラジコン作業の効率改善は、運転席からの高品質の映像を付加することにより、効率を10%以上改善できることがわかった。その作業効率改善に必要な映像は、画質がフルNTSCだけでなく、視野角度が水平方向と垂直方向ともに150度以上確保できるパノラマ画像を、遅延100m秒以下のほぼリアルタイムで伝送することが必要である。

7. おわりに

今回の映像装置は完成品ではなく、改善余地がまだまだ数多くある。がデモ車に試乗？（遠隔操作なので搭乗されませんが）された方々の評判は上々なので、市場に出せる日も近いと感じている。

最後に今回この研究に尽力いただいた中小企業基盤整備機構をはじめ関係者の皆様のご協力・ご尽力に対し感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) OFDM, 64QAMについて:Single-and Multi-carrier Quadrature Amplitude Modulation
- 2) 佐藤, 城間, 小島, 稲見, 松野 ; 遠隔操作ロボットにおける有効な提示カメラ画像の検証, 第22回日本ロボット学会学術講演会, 3A27, Sep/2004
- 3) T. Svoboda, T. Pajdla, Epipolar Geometry for Central Catadioptric Cameras. International Journal of Computer Vision, 49(1):23-37, August 2002.
- 4) H.-Y. Shum and R. Szeliski. Construction of panoramic mosaics with global and local alignment. International Journal of Computer Vision, 36(2):101-130, February 2000. Erratum published July 2002, 48(2):151-152.

39. 長距離無線 LAN を使った環境監視システム

東亜建設工業株式会社 ○松島 弘樹、藤本 正一、宮下 広樹

1. はじめに

インフラストラクチャー整備の進展や国民の生活レベル向上にともない、建設現場に向けられる一般市民の目は厳しさを増しており、建設工事物の品質を高めることは当然のこととして、建設現場から発生する騒音・振動や粉塵、排水等の環境にもこれまで以上に配慮した施工管理が求められている。

一方で、携帯電話や PHS、ブロードバンド、無線 LAN 等の通信技術の飛躍的進展にともない、従来では考えられなかったほど大容量のデータ通信が比較的安価に実現可能となってきた。

これらを背景として、建設現場から発生する騒音・振動値や粉塵値、工事排水濁度を 24 時間連続計測し、無線 LAN を使用することで数 km 離れた事務所まで伝送可能なシステムを構築した。

2. 開発の背景

(1) 開発の目的

一般的に土木工事の現場において、周辺環境に関する規制が厳しい区域では、その実測データを基にさまざまな低減策が講じられる。

騒音に関する例を挙げると、工事により発生する騒音およびその区域独自の暗騒音に分類することができるが、後者に関しては音源の特定や対策は実質不可能に近い。

従って、工事により発生する騒音源を特定し、対処する方法がとられているが、

測定方法として、従来は決められた頻度で計測員が計測点に張り付き、ペンレコーダやデータロガー、パソコン等にデータを記録し、事務所に持ち帰ってから評価・解析をおこなっていた。

上述の方法では万一基準を超過していたとしても相応の時間遅れがあるため、迅速な対応が困

難となる問題もあった。

しかし、リアルタイムに計測・管理するには、多くの人員を要するため、コストを抑制しながら確認できるシステムの開発が求められていた。

また、陸上工事は一般に『地形が複雑』『起伏・高低差が大きい』『ヤードが広範囲』『車両・重機の輻輳する』などの特徴を有する。

以上の点から情報の伝達には携帯電話や無線などが有効である場合が多い。(表 1)

表 1 通信手段による長所・短所

	携帯電話	ブロードバンド (ADSL・光)	一般電話回線 (ISDN・56k)	無線LAN	有線LAN
運用形態	公衆回線	公衆回線	公衆回線	自前	自前
通信コスト	×	△	△	◎	◎
設置コスト	○	△	△	△	○
距離コスト	◎	△	△	◎	△
データ伝送速度・量	△	◎	△	○	◎
サービスエリア	△	△	○	○	○
地形対応	△	○	○	×	○
距離対応	◎	◎	◎	△	○
トンネル対応	△	×	×	△	◎
情報秘匿性	△	△	△	○	○

(2) システムの概要

大別すると、環境管理項目に必要な各種センサー類とデータ変換装置、そしてデータを伝送するための通信装置および受信用の端末から構成される。

現場内で環境測定を実施するのに最適な箇所に計測器を設置する。

取得される計測データを、アクセスポイントを経由させ、無線 LAN で数 km 離れた事務所まで伝送することでリアルタイムに一元管理を行うことが可能となる。また、各データをもとに迅速な解析を行うことで施工へのフィードバックを早期に行うことができる。

3. 長距離データ伝送試験

秋田県内のトンネル現場において、事務所と現場約 4km 間のデータ伝送試験を行った。

当初、メーカーが推奨する各種の指向性アンテナや無指向性アンテナを様々に組み合わせて試験を行ったが、無指向性アンテナでは 4km の通信は不可能であること、また指向性アンテナの中でも仕様通りの性能を発揮できないものもあることを確認した。

そこで、指向性の特に強いアンテナを送信側とともに受信側にも設置し（写真 2）、それらを高精度に対向させることにより 4km の通信を可能とした。

なお、この組合せによれば、実用上、最大 7km までの遠距離通信が可能であることを確認した。



写真 1 事務所からトンネル現場方向を望む



写真 2 受信側アンテナ（指向性）設置例

4. 環境監視システム導入設置例

以下に、各現場で導入した環境測定監視システム設置例を示す。

（1）騒音振動監視システム

宮崎県内国道トンネル

トンネル施工現場付近に牛舎（写真 3）があり、夜間に現場から発生する騒音値を 45dB 以下とする低騒音の工事を行っている。

夜間でも生コンクリートを製造するバッチャプラントには遮音効果の高い防音パネルで外装し、機器ごとにも防音対策を施した。

牛舎の他、現場内数カ所に騒音・振動計を設置し、24 時間リアルタイムで計測・監視するとともに、万一管理基準値を超えた場合には警報を発信するシステムを導入している。



写真 3 牛舎でも騒音値を計測・伝送

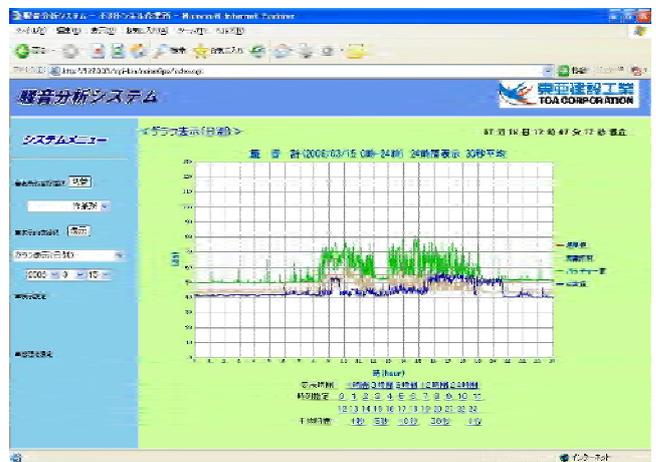


写真 4 騒音値計測データの一例

(2) 粉塵濃度監視システム

和歌山県内高速道路トンネル

現場周辺は有名な梅の産地であり、その梅畑の中を施工するにあたり、工事により発生する粉塵飛散による悪影響が懸念されるとともに、近隣住民への騒音にも配慮する必要があった。

これらの抑制対策を行うとともに、粉塵発生量および騒音・振動値を連続計測し（写真5）、長距離無線 LAN により事務所へと伝送して、発生状況の確認と基準値を超えた場合は迅速に対応できる体制を整えている。（写真6）



写真5 騒音・振動計、粉塵計測盤

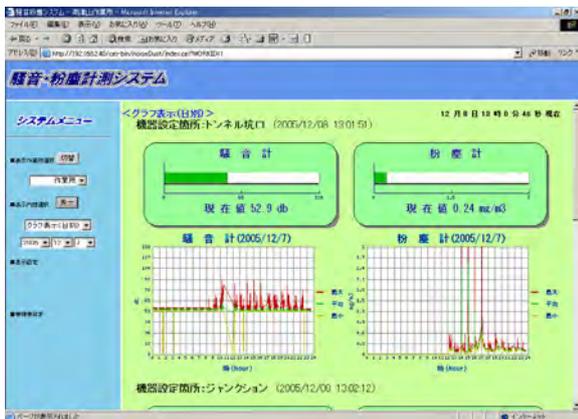


写真6 騒音・粉塵計測データ一例

(3) 濁度監視システム

秋田県内国道トンネル

現場周辺は『あきたこまち』などを生産する農業地帯であり、現場から発生する工事濁水を極力清浄化する必要がある。そのため濁水を高分子凝集材やPACなどの薬剤により、凝集沈殿させた後、

急速砂ろ過装置を使用することにより、放流水の濁り（SS成分）を20mg/L以下とする濁水処理設備を導入している。

処理水の濁度を放流前に計測し、管理基準値に適さない値であれば自動的に再処理するとともに、一連のデータと濁水の性状を確認するための動画データ（写真7）を、4km離れた現場事務所まで長距離無線LANで伝送し、常時確実に管理している。



写真7 濁水監視用WEBカメラ

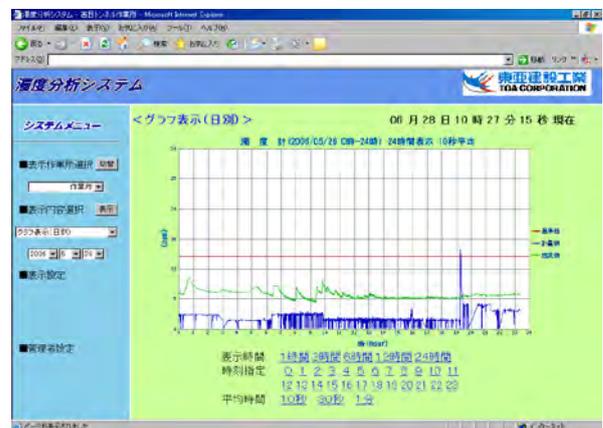


写真8 濁度計測データ一例

(4) 油圧ジャンボ 穿孔データ伝送システム

秋田県内国道トンネル

NATM トンネルでは地山性状を的確に把握し、設計・施工にフィードバックすることが重要となるため、日常的に各種計測および切羽観察を実施し、施工管理に利用される。それと併用して、切羽前方の地山性状を予測するために油圧ジャンボ穿孔時の穿孔速度・打撃圧・回転圧・フィード圧を

適宜計測し、無線 LAN で事務所までデータを転送している。

事務所では転送されたデータから不必要な部分をカットし、解析を行い、既施工区間との対比を行うことでより迅速な予測および地山評価を多角的に行うことが可能となる。(図 1)



写真 9 データ伝送用アンテナ (ジャンボ搭載)



写真 10 切羽監視用 WEB 画像

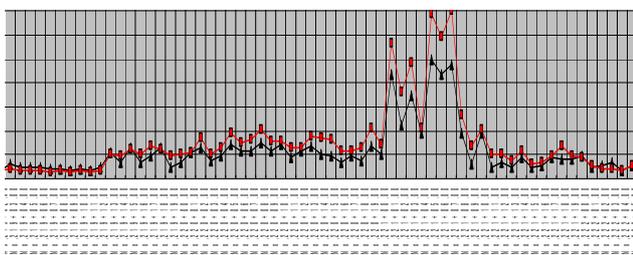


図 1 穿孔データグラフ例

5. 今後の展開

上記した事例をもとに、無線 LAN 相互間でデータ通信を行う、あるいはインターネットプロバイ

ダや社内イントラネットを経由してアクセス者が、いつ、どこからでも『現在の状況』をただちに確認することができる。(図 2)

コスト面においても相応の労力を費やす配線工事を省略することができ安価となること、またセキュリティに関する面も向上していることから今後ますます無線 LAN 環境の整備が進んで行くものと考えられる。

このような環境を利用し、現場相互間の施工管理・環境監視に対する意識を高めることは品質の向上にもつながるものと考えため、当社でもネットワーク構築を進めているところである。

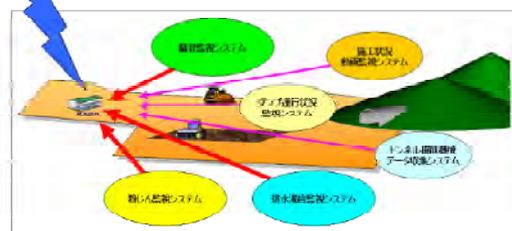
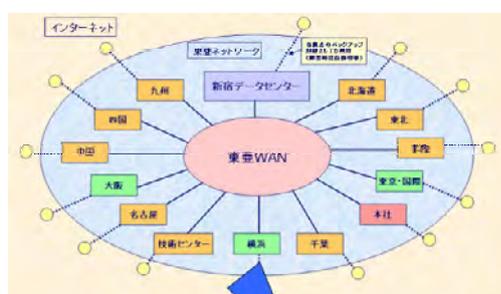


図 2 ネットワークイメージ

7. おわりに

時々刻々と状況が変化する工事現場においては、リアルタイムにその状況を集中管理握することは重要であり、その方法として無線 LAN を使用することはきわめて有用である。

現場状況によっては、既設の電話回線などの有線と組み合わせることにより、立地条件に適したネットワークを利用することで、さらに長距離かつ高速通信にも対応できる。

最後になりますが、本システムの開発・製作ならびに現場での実証実験にご協力いただいた(株)ジャストプランニングシステムはじめ関係各位に感謝の意を表します。

40. 施工現場・重機へのアドホックネットワーク適用検討

株式会社日立製作所 トータルソリューション事業部 ○高野 晴之
日立建機株式会社 技術開発センター 小倉 弘
株式会社日立製作所 システム開発研究所 清水 淳史

1. はじめに

近年、土木・建築の施工現場や重機に情報技術を適用し、施工の効率化や安全性向上を図る「情報化施工」が注目されている。具体的には工事進捗状況や作業結果をデータ化し、収集・分析や、その結果に基づきリアルタイムの作業指示・出来高管理を行うと共に、画像・映像による施工現場の状況の監視・記録などを行うものである。

国土交通省が、低入札工事における品質確保のため「発注者によるモニタカメラの設置・監督」および「受注者からの撮影ビデオの提出」を義務付けるなど、特に施工の信頼性や安全が重視されている昨今、情報化施工は必要不可欠な取組みといえる。

情報化施工の実現には、施工現場内、および施工現場と現場事務所を結ぶ情報通信ネットワークが必須となる。しかし施工現場は工事の進捗に応じ地形・状況が刻々と変化するため、有線・無線を問わず固定ネットワークの常時敷設が困難であることが予想される。このような環境におけるネットワークは、拡張性や柔軟性に富んでいることが望まれる。

本報告では、上記要求条件を満たす「アドホックネットワーク技術」、施工現場における実用性を検証するための「実証実験」、および「情報化施工への適用可能性」について報告する。

2. アドホックネットワークの概要

2.1 アドホックネットワークとは

アドホックネットワーク (Ad hoc Network) とは“その場限りのネットワーク”という意味をもち、大きく以下2つの特徴を有する。(図-1 参照)

- (1) 無線通信機能を持つ情報端末を近づけるだけで自律的にネットワークが構築される(プラグアンドプレイ)

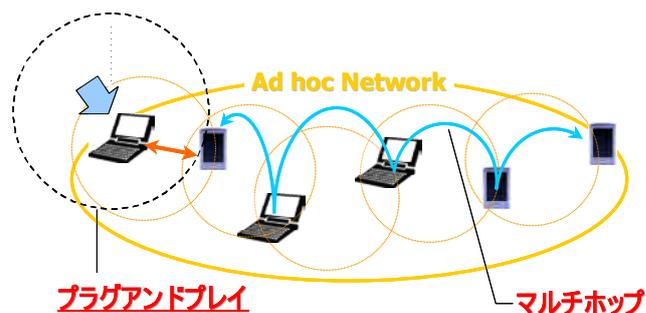


図-1 アドホックネットワーク概要

- (2) 直接無線通信が届かない(距離が遠い/見通しが利かない)端末にも、近隣の端末を経由しパケットリレー形式に通信を中継する(マルチホップ)

すなわちアドホックネットワークは、利用環境に応じた、効率的なネットワーク構築・運用を可能にする技術といえる。ネットワーク管理が、現状の一極集中から分散型にシフトするため、設備投資や保守コストの低減が期待でき、情報流通やサービス提供のビジネスモデルに大きな変化をもたらすと推測される。

2.2 アドホックネットワークの標準化動向

アドホックネットワークは、インターネット技術の標準化機関 IETF (Internet Engineering Task Force) の MANET WG (Mobile Ad hoc NETWORKS Working Group) で標準化が進められている技術である。

アドホックネットワークのルーティングの方式は大別して「Proactive 方式」「Reactive 方式」の2方式がある。本実験では施工現場という限定されたエリアにおいて、移動速度の遅い重機への適用を考慮し、高密度に存在する端末が低速で移動する環境に適した「Proactive 方式」の中の一つである、OLSR (Optimized Link State Routing) 方式を採用した。

2.3 アドホックネットワークの適用分野

アドホックネットワークは、一時的なイベント用のネットワーク、災害時や緊急時のネットワークへの適用が検討されている。また、移動する端末同士の通信にも適しているため、車車間の通信や、携帯端末(PDA や携帯ゲーム機など)間のコミュニケーションなどへの適用も検討されている。

特に情報通信手段の確保が重要となる災害時には、既存の固定ネットワークに障害が発生した場合でも、アドホックネットワーク機能を持つ端末(以下、「アドホック端末」と呼ぶ)を適宜設置するだけで代替ネットワークが構築可能である。総務省主導の下「首都圏直下地震発生時の帰宅困難者等の避難誘導に資するアドホック無線ネットワークの構築に関する調査検討会」が発足されるなど、その実用化が期待されている。

2.4 施工現場へのアドホックネットワークの適用

施工現場のネットワークに求められる要件は、以下の4つに整理できる。

- (1) 地形や状況の変化に柔軟に対応可能なこと(機器の位置やアンテナの調整の手間が少ないこと)。
- (2) 作業員間の意思疎通や、施工現場の安全監視のために必要な、音声・画像などの大容量なコンテンツを含む、多様な情報の伝送が可能なこと。
- (3) 作業の妨げにならないよう常時接続であること。
- (4) 施工費用低減のため、通話料金やパケット利用料の費用負担が少ないこと。

アドホックネットワークは、これらの要件を満たすことが可能な技術である。

例えばトンネル工事においては、開削・掘進の状況に合わせて、アドホック端末を追加設置するだけで、作業を停止させることなく容易に切羽(トンネル施工の最深部)までのネットワークが伸張できる。またアドホック端末を重機に搭載することにより、重機同士が近づくだけで通信し、相互に進捗情報を交換することが可能となる(図-2 参照)。

本報告では、アドホックネットワークの無線方式として IEEE802.11g などの無線 LAN を前提としてい

るので、音声や映像、テキストデータなど、様々な情報可能である。また、携帯電話と異なり「携帯電話の電波が届かないエリアでも利用可能(通信用の基地局設置が容易)」、「個々の端末に発生する通信費が不要」という利点がある。

今後は各種センサ技術と組合せ、施工現場の「見える化」、すなわち作業の効率や安全性の視覚化・数値化が進められると予想されるが、無線 LAN の使用を前提とするアドホックネットワークは、これらセンサ情報の通信にも活用可能である。

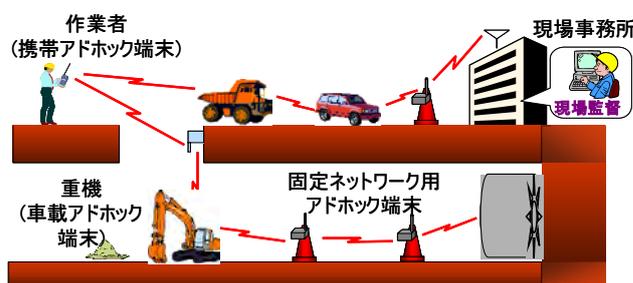


図-2 施工現場への適用イメージ

3. 実証実験について

3.1 実証実験の目的

アドホックネットワーク技術の施工現場・重機への適用検証のため、実証実験を2回実施した。以下にその実験について報告する。

3.2 実験の前提条件

表-1, 表-2, および図-3 に実証実験の前提条件を示す。

表-1 実験機器

#	機器		備考・仕様など
①	現場機材	油圧ショベル	
②		クローラキャリア	
③		一般車輛	現場監督車輛
④	端末・無線機器	汎用車載 PC	重機用車載機
⑤		ノート PC	主に固定ネットワーク
⑥		小型コントローラ※	ク(定位置設置)用
⑦		IEEE802.11b 無線 LAN カード/アンテナ	市販品, 無指向性, 1ch 固定

※ 施工現場に設置可能な Linux 搭載の制御端末 (試作機)

表-2 伝送データ種類

#	データ種類	条件等
①	重機 GPS データ	1 秒毎に計測
②	カメラ画像	JPEG フォーマット, CIF サイズ
③	VoIP (音声)	64kbps
	電話 MPEG (映像)	192kbps, 15Frame/sec

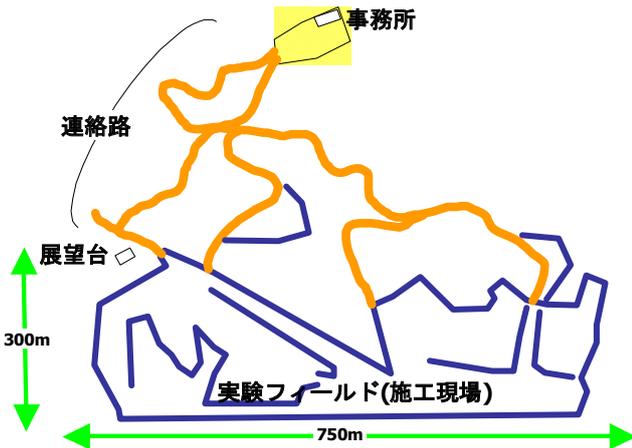


図-3 実証実験現場概念図

実証実験を行った現場は、実験フィールド(施工現場)、現場事務所およびその間を結ぶ連絡路で構成される。連絡路は複雑に湾曲した林道であり、見通し距離は短い。また実験フィールドは高台や掘削跡など、地形に大きな高低差があり、見通しがきかないため無線通信が直接届かないエリアが存在する。なお過去2回にわたる実験において、実験フィールド(施工現場)内の地形は大きく変化しており、図-3は2度目の実験時の地形を示している。また、現場事務所および実験フィールドを結ぶ連絡路は、ほとんど変化がない。

4. 第1期：基礎実証実験¹⁾

4.1 実験概要

第1期の実験は「施工現場におけるアドホックネットワークの基本機能の確認」「ネットワーク構築とその利用条件把握」を目的とした、基礎的な実証実験である。実施時期は2004年10月の5日間、主な検証項目は下記のとおりである。

実験1：重機と測定用端末との1対1通信の実施

および通信品質の検証

実験2：施工現場内固定ネットワークの構築および通信品質の検証

実験3：施工現場全体(移動体含む)でのアドホックネットワークの構築および通信品質検証

実験4：常時通信ができないエリアで作業する重機との通信実験

4.2 第1期実験の主な結果

第1期の実験により、大きく以下4点のことが確認できた。

- (1) 油圧ショベルの姿勢(方向/フロント上下)に大きく依存せず、ほぼ一定の伝送速度を確保可能。
- (2) 最大6Hopのアドホックネットワーク(=送信元を含む、6つのアドホック端末を経由するアドホックネットワーク)を構築。伝送速度はホップ数に反比例する、という経験則を得る。
- (3) 施工現場内の重機と事務所間で VoIP による音声通信と、映像通信を実現。音声はトランシーバより高品質、映像は相手の顔や重機の動作状態が視認できる程度。
- (4) 移動する重機などに搭載したアドホック端末にデータを一時蓄積し、対象となる重機に近づいてから、データを送受信する(以下、「データキャリア」と呼ぶ)ことで、地形に遮られたエリアや遠隔エリアなど、常時通信ができない重機との情報通信を実現。(図-4)

以上の結果から、施工現場におけるアドホックネットワークの有効性が確認された。

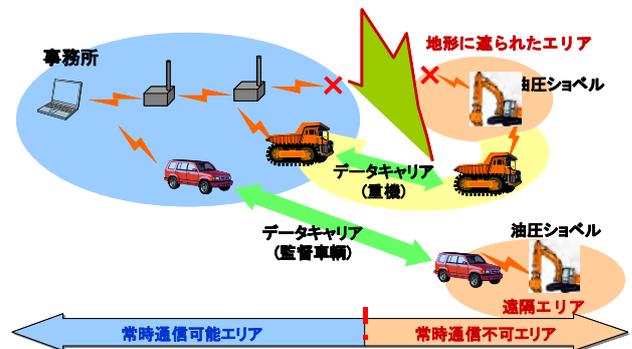


図-4 データキャリアの考え方

一方、技術的課題も下記のとおり整理できた。

- (1) アドホック端末として移動体が含まれる場合、頻繁にルート変更が発生し、ネットワークとしての通信安定性が低い。
- (2) 遮蔽物(ダンプの通過など)により、通信ルート変更が生じるが、そのルート切り替え時のアプリケーション(VoIP時)の再接続に最低4秒を要する。

5. 第2期：応用実証実験

5.1 実験概要

第1期実験では、アドホックネットワークの施工現場への適用可能性を検証すると同時に、技術的課題も整理できた。これをふまえ、第2期の実験の目的として以下2つを設定した。

- (1) 情報化施工への適用可能性の検証
- (2) 第1期実験の技術的課題の改善確認

(1)については、実際の施工現場で利用される製品・システムを想定し、実用化に向け、機器・アプリケーションの具体的な必要機能の洗い出しを行った。(2)については、ルート切り替え等に伴う切断から再接続までの時間の短縮化のために、アドホック制御信号の発信周期の最適化を行った。

実験実施時期は2005年11月の5日間、主な検証項目は下記のとおりである。

- 実験1：重機の稼働情報(燃料残、水温等)の取得
- 実験2：移動体を媒介としたデータ送受信
- 実験3：重機・作業員の作業エリアの把握

5.2 第2期実験の主な結果

- (1) 情報化施工への適用可能性の検証

① 実験1

実験1では、油圧ショベルに搭載したアドホック端末で、油圧ショベルの「燃料残量」「稼働時間(アワメータ)」「水温」の情報を取得し、ネットワークを経由し、現場事務所に送信する実験を行った。

油圧ショベルの稼働情報を把握することは幾つかのメリットが考えられる。例えば施工現場の視点で見れば、燃料切れによる重機の停止などを未然に防ぎ、稼働効率を上げることができる。また重機メ

ーカ/レンタル会社の視点で見れば、メンテナンス時期の事前スケジュールリングや部品の在庫最適管理に役立つ情報として活用できる。

今回、現場事務所～施工現場内油圧ショベルまで6Hopのアドホックネットワークを構築し、現場事務所で油圧ショベルの稼働情報を受信する実験を行った。この結果、ほぼリアルタイムに油圧ショベルの稼働情報を収集することができた(図-5参照)。

今後は取得すべきデータの精査や、そのデータの分析等により、施工現場向けの重機管理アプリケーションや、重機メーカー/レンタル会社向けの予防保守アプリケーションに適用していく方針である。



図-5 重機稼働情報取得実験

② 実験2

第1期実験では「移動する重機を媒介としたデータ送受信(データキャリア)」の基礎的実験を実施した。第2期実験では、現実の施工現場での利用シーンを想定し、下記2種類の実験を行った。

- (a) 2台のデータキャリアが任意に走行し、1台の油圧ショベルに対しデータの蓄積・転送を繰り返す
- (b) 1台のデータキャリアが、2台の油圧ショベルに対し、データの蓄積・転送を繰り返す

本実験では、通信プロトコルに改良を加え、短時間でデータキャリアとのデータ送受信が行えるようにした。アプリケーション面では、ブラウザに表示できるようにするなど、実際の利用を考慮した汎用性の高いアプリケーション設計としている。

実験の結果、いずれの場合においても、現場事務

所～油圧ショベル間の正常なデータ送受信を確認した。地形などに遮られた、直接通信できないエリアの作業員や重機に対する通信にはデータキャリアが有効であり、アドホックネットワークの特徴を活かせる適用事例と考える。

③ 実験3

実験3では重機・作業員の、作業エリアを把握する実験を実施した。

アドホックネットワーク機能を持った車載端末や作業員用 PDA など(以下、「移動体端末」)が、定位置に設置されたアドホック端末(以下、「固定端末」)に近づくと、その固定端末では、近づいた移動体端末からの強い電波強度を観測できる。換言すれば、ある固定端末において、電波強度が強く観測される移動体端末は、その固定端末の近くに存在していることを意味している。すべての固定端末が受信している電波強度を観測することで、対象となる移動体端末が、どの固定端末付近に存在するか、すなわち作業エリアが把握できると想定した。

実験の結果、環境条件等により電波強度が安定しないため、瞬間的にはエリアを特定できない場合もあったが、2～3秒間の電波強度を観測することで、該当移動体端末の位置を半径数十m範囲程度で把握できた。概略ではあるが、リアルタイムな作業員や重機の位置把握に活用できると考えられる(図-6参照)。

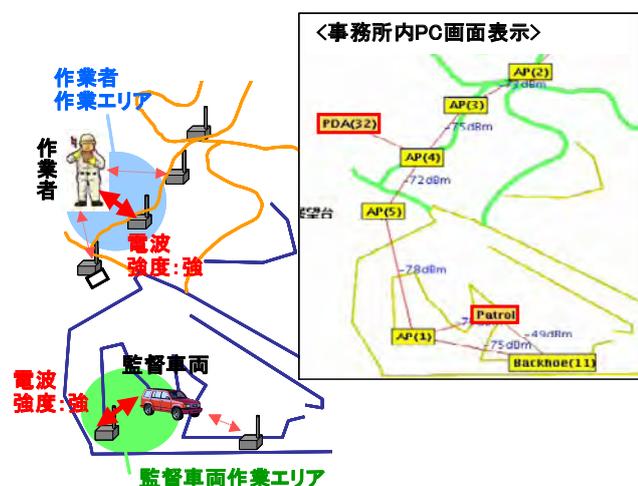


図-6 電波強度による位置把握実験

測位に関していえばGPSデータの利用が考えられるが、本取組みは「GPSの届かない地下、特にトンネル工事などにおいても概略位置の把握が可能である」という特徴を有している。トンネル工事では「作業員との音声通信手段」「酸素や有毒ガスなどのセンサ情報」などの情報取得が義務付けられているため、それらの情報通信のためのネットワーク敷設が必須となるが、本機能を組み込んだアドホックネットワークならば、ネットワークインフラを構築すると同時に、作業員の概略位置が把握可能である。

今後は実用化に向け、三点測量の適用や、電波強度の強弱により表示位置の調整を行うなど、位置測定精度の向上が考えられる。

(2) 技術的課題の改善確認

第2期の実験では、第1期の「ルート変更によるアプリケーション再接続までの時間短縮」という技術的課題を解決すべく、改善を行った。

今回採用したアドホックルーティング方式であるOLSR方式は、各アドホック端末がアドホック制御信号(ルーティングテーブルなどの情報)を一定周期ごとに送受信している。

本実験ではこの制御信号の発信周期を短く設定した。これにより、ある端末との通信が途絶えた場合でも、通信が途絶えたことを端末がすぐに認識し、通信の相手先を別の通信可能な端末に切り替えられる。

但し、アドホック制御信号の発信周期が短いほど通信帯域が圧迫され、本来流すべき通信に影響を与えるため、データ種別に応じた最適化が必要となる。

第1期の実験時はこの各端末のアドホック制御信号発信周期を、OLSR方式標準の2000[msec]としていたが、第2期の実験では500[msec]と1/4に短縮した。この結果、第1期実験時はVoIPによる音声通信の再接続までの時間は最低4秒だったが、今回の実験では、再接続までの時間は2秒未満と、短縮が確認できた。また今回の実験で設定した、アドホック制御信号発信周期500[msec]でも、標準設定(2000[msec])時と同様、主観評価ではトランシーバより高品質の音声通話が実現できた。今後は音声品

質を維持したまま、更に発信周期を短くし、再接続までの時間を短くするなど、アプリケーションに応じて最適なパラメータ設定をしていく方針である。

また、第1期の実験ではアドホックネットワークに移動体端末を含む場合、頻繁にルート変更が発生し、通信が安定しないという現象を確認した。今回採用した OLSR 方式は、各端末に優先度を設定し、この優先度に順じてネットワーク構成を決定する機能を有する。今回の実験では、ネットワークの安定性向上のために、固定端末を優先したネットワーク構築を行ったが、この設定とネットワークの冗長性とはトレードオフの関係にある。施工現場の機器構成ごと、最適なパラメータ設定を見出していく必要がある。例えば「油圧ショベルは状態(一定箇所にとどまり作業中/別の現場に移動中)に応じて優先度を変更する」、「平均移動速度が速い監督車両よりも、遅い重機の優先度を高くする」など細かな調整で、冗長かつ、より安定したネットワークの実現が期待できる。

(3) その他の第1期実験からの改善点

第1期実験時の固定ネットワーク用アドホック端末はノート PC、無指向性アンテナ(地上よりおよそ 2m の高さに設置)、エンジン発電機で構成した。

第2期実験では、実際の施工現場での利用を想定し、「小型で可搬性に優れる」「設置・起動が容易」という特徴を有する、Linux 搭載の小型制御端末(以下、「小型コントローラ」と呼ぶ)の試作機を、固定アドホック端末として利用した(図-7 参照)。

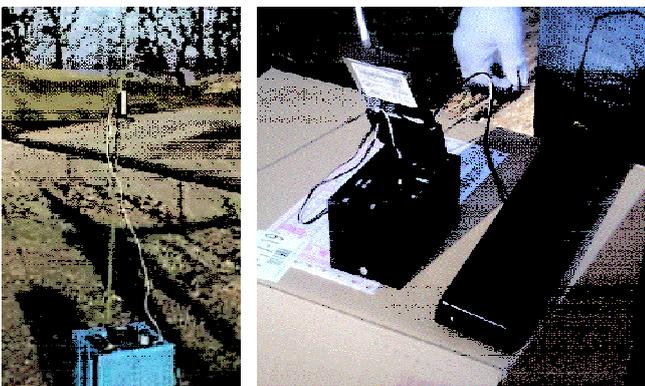


図-7 固定アドホック端末(小型コントローラ)

本実験に利用した小型コントローラはアドホック端末として十分機能し、また設置から稼働までが簡易な作業で実現できることも検証できた。

固定アドホック端末設置における最重要課題は電源供給の方法である。本実験では、小型コントローラをノート PC 用バッテリーで稼働させたが、活動時間に限界がある。実運用で固定ネットワークとして常時稼働させるべく、太陽電池と組み合わせるなど、電源確保について現在検討中である。

6. おわりに(課題と今後の進め方)

本論文では、アドホックネットワークの概要と、その施工現場や重機への適用可能性、およびその検証のための実証実験について報告した。

アドホックネットワークの施工現場や重機への適用が有効であることがわかり、また具体的なアプリケーションについても、一部有効性が検証できた。

現在、アドホックネットワークの情報化施工への適用の第一歩として「アドホックネットワーク利用施工管理システム」のプロトタイプシステムの仕様を検討している。本システムを、実際の施工現場で試験稼働させ、詳細パラメータの調整・最適化を行い、実用化につなげていく方針である。

但し「ホップ数の増加に伴う通信速度の低下」など、アドホックネットワーク特有の課題は、運用面でのカバーが必要な面もあり、SLA(Service Level Agreement)の考え方や、運用・サポートのビジネスモデルも含めて、検討していく予定である。

また、アドホックネットワークを、今後必須となる情報化施工のためのネットワークとして活用させることはもちろん、そのほかの応用分野にも活用範囲を広げていく予定である。

参考文献

- 1) 高野, 江口, 延命, 清水, 亀田: 「施工現場・重機へのアドホックネットワーク適用検討」, 土木学会 第30回情報利用技術シンポジウム, 2005年10月

4 1. レーザースキャナによる出来形管理手法について

国土交通省国土技術政策総合研究所

○田中洋一、上坂克巳、金澤文彦

【要旨】本研究は、レーザースキャナにより得られる地形情報と設計情報を比較することによる出来形形状評価の可能性について検証を行った。最初に、レーザースキャンにより施工現場の地形情報を地形データとして取得した。データ取得した場所は、平成17年度「施工管理情報を搭載したTSを用いた出来形管理要領（案）」を基に試行を行った現場とした。取得した地形情報は、出来形管理の算出プログラムを用いて設計形状とのを比較、評価を行った。また、出来形管理の現場試行で得られたトータルステーションの出来形値との比較を行った。それにより、レーザースキャナの計測精度について検証し、ロボット施工等の自動施工に必要な出来形計測方法について考察を行った。

1. はじめに

(1) 背景

我が国の土木施工においては、災害復旧現場、地下空間、トンネル、がけ地、土壤汚染の工事などで、危険・苦渋作業がいまだに多く存在しており、これらの劣悪な作業環境を改善し、安全を確保することが喫緊の課題となっている。そのため、最先端のIT・ロボット技術を活用し、現在行われている災害復旧現場等における施工効率を向上させるとともに、一般の施工現場においても低コストで容易に利用可能な作業支援システムや建設機械による施工の自動化技術などの開発が求められている。国土交通省では、平成15年度より平成19年度までの5ヵ年計画で総合技術開発プロジェクト「ロボット等によるIT施工システムの開発」¹⁾を実施している。このプロジェク

トでは、土木施工における危険・苦渋作業の解消のため、建設機械のIT施工技術の開発および3次元情報を用いた施工管理技術の開発を行っている。

(2) これまでの研究

ロボット等によるIT施工システムは、ITやロボット技術を活用し、現地の3次元地形情報をレーザースキャナやステレオカメラシステムでとらえて、3次元の設計情報を基に施工管理する技術である。国総研では、ロボット建設機械に搭載するためデータ量が少なく、面的な施工管理が可能となる3次元設計情報²⁾を定義した。そして、3次元設計情報とトータルステーションから得られる地形情報により、効率的な施工管理（出来形管理）を行う技術を開発³⁾した。また、レーザースキャナを用いて出来形管理を行う技術も大規模現場での利用事例⁴⁾が報告されているが、小規模な施工現場で利用するには多くの課題がある。

(3) 本研究のねらい

ロボット等によるIT施工システムは、施工中に面的な地形データを取得し、設計形状に対する差を指示値として表示するシステムとして検討がなされている。本研究では、ロボット等によるIT施工システムにおいて、施工途中で取得される面的な3次元地形情報を、出来形管理へ転用する手法について提案した。また、小規模な現場で実際に取得した出来形形状データからの評価手法についても検証した。さらに、平成17年度実施した現場試行で得られたトータルステーションの出来形計測値と比較を行い、レーザースキャナの出来形計測精度について検証を行った。

2. レーザースキャナによる出来形管理手法

(1) レーザースキャナによる地形データの取得

地形データ取得は、平成17年度に国土交通省直轄現場で行われた「施工管理情報を搭載できるトータルステーションを用いた出来形管理の現場試行」のうち1現場を選択した。

＜計測現場＞

取得時期 平成18年2月27日

取得現場 鳥取県東伯郡琴浦町田越地内

図-1に計測現場で利用した機器仕様を示す。

本機器は、リーグル社製のレーザーミラーのうち、高精度／長距離対応型のLMS-Z420を利用して計測を行った。本機器は、計測機器（レーザーの発信機）からの相対位置として計測対称面の座標群を計測する。座標群を3次元データ化する方法としては、計測対象3点以上に3次元座標を与えて変換する方法、もしくはレーザーの発信点座標と機械の向きを設定し、機械からの角度と距離で3次元座標化する方法がある。今回使用したシステムでは、計測対象面にターゲット（タイポイントと呼ぶ。）を設置し、それらに座標を与える手法で地形データの3次元化を行った。図-2に計測方法の概念図を示す。タイポイントの測量は、



図-2 計測方法の概念図

全体計測前か計測後に行われるもので、計測密度は水平及び鉛直方向に0.004度ピッチ（100mで19mm）でスキャンを行う。そのあと、タイポイント形状の認識を行い、登録した形状とのフィッティングにより中心位置を算出する仕組みとなっている。図-3に測量結果の3次元モデルを示す。レーザースキャナでは、反射距離から対象物の位置を特定するが、距離でフィルタリングを行うことで、除外区域が設定できる。また、画面内の欠測部分は、レーザーの反射が乱れるため計測されていないところである。



主な特長	高精度／長距離
レーザー安全規格 (JIS C 80825-1:2001)	Class 1
分解能(選択可能)	5mm
最短距離	2m
測定距離範囲 (反射率≧50%自然物ターゲット) (反射率≧10%自発物ターゲット)	800m 250m
精度(単発測定)	±10mm
精度(平均化)	±5mm
スキャンングレード(ラフスキャン) (フルスキャン)	1~20スキャン/秒 0.01~15度/秒
スキャンング範囲(ラフスキャン) (フルスキャン)	80度 360度
角度分解能	0.0025度
最小ステップ角	0.01度
測定点数/秒	回転ミラー: 8000点まで 揺動ミラー: 12000点まで
レーザー波長	近赤外
ビーム拡がり角	0.25mrad
データインターフェース	ECP、TCP、IP

図-1 計測現場で利用した機器仕様

(2) 地形データによる出来形管理ソフトの開発

レーザースキャナで取得される3次元の地形データを用いた出来形の評価方法を検討し、その評価方法に基づいて出来形評価を行うアプリケーションを開発した。計測機器により取得された地形データは、3次元座標値を持つデータ（1点/10cm²以上）である。座標値が道路形状のどこを測ったかという情報をもたないことが、地形データを用いて出来形評価を行う際の課題である。出来形を評価するためには、設計形状と出来形形状の対比を行わなければならない。このため、設計形状と対比させるための情報を、地形データからいかに導き出すかが、出来形評価を行ううえでの課題となる。

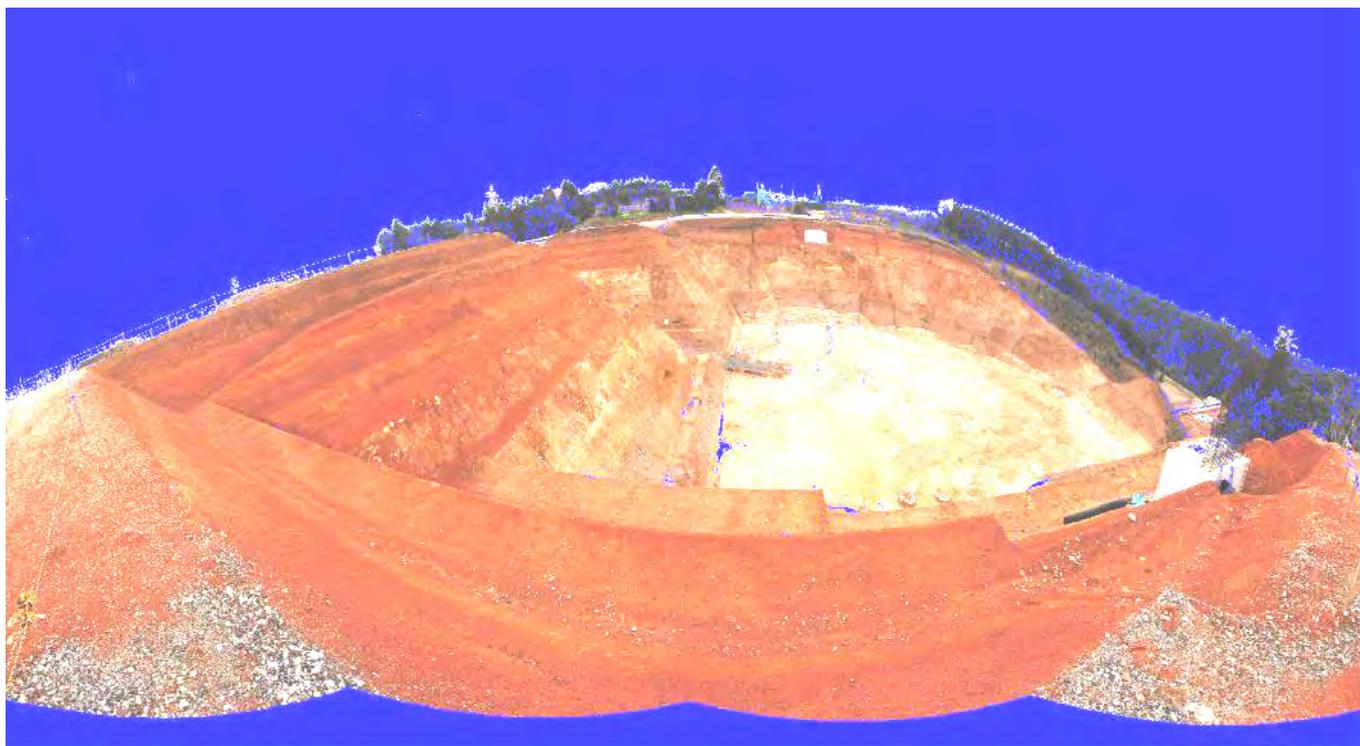


図-3 測量結果の3次元モデル

道路形状は、横断形状が定義され、横断形状が道路線形に沿って帯状に連続する構造となっている。道路の横断形状は基本的には折線により構成されるので、道路の横断面上で抽出した点群データの連なり具合を評価することで、設計上の変化点に対応する出来形の変化点が求められると考えた。このようにして求めた出来形の変化点を、評価することで出来形の評価を行うものとした。また、道路の横断面上で、設計形状と、その近傍にある地形を重ねて表示させることで、視覚的に設計と出来形の比較が可能であると考えた。図-4に出来形評価方法のコンセプトを示す。

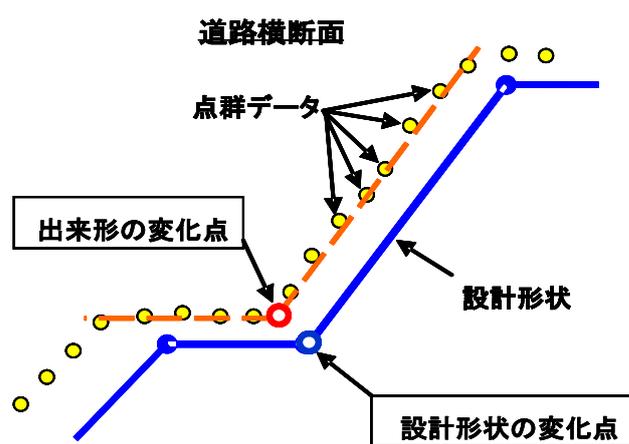


図-4 出来形評価方法のコンセプト

出来形評価（出来形の横断形状変化点の算出）ロジックは、最初に管理断面近傍にある計測点を抽出し、評価を行う管理断面上に計測点を投影させる。このとき抽出範囲は、アプリケーションで任意に変更することができる。図-5に管理断面近傍の計測点抽出方法を示す。

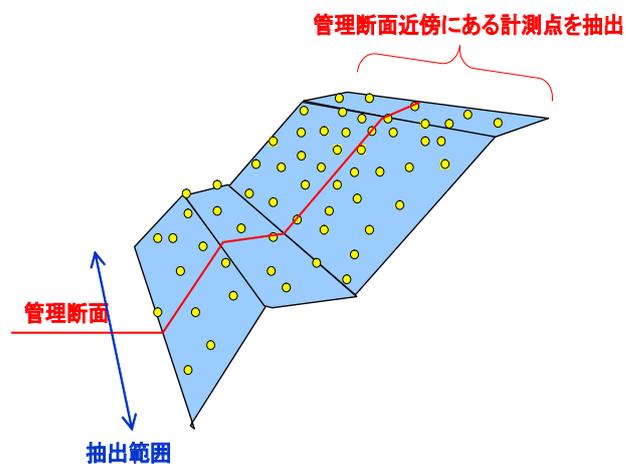


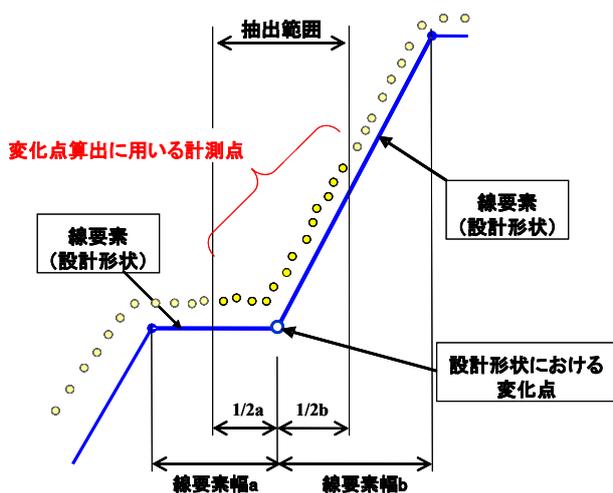
図-5 管理断面近傍の計測点抽出方法

そして、設計形状の変化点ごとに計測点を抽出し、設計形状の横断形状変化点ごとに、対応する出来形変化点の算出に用いる計測点を抽出する。現在の計測点抽出範囲は、設計形状線の前後にあ

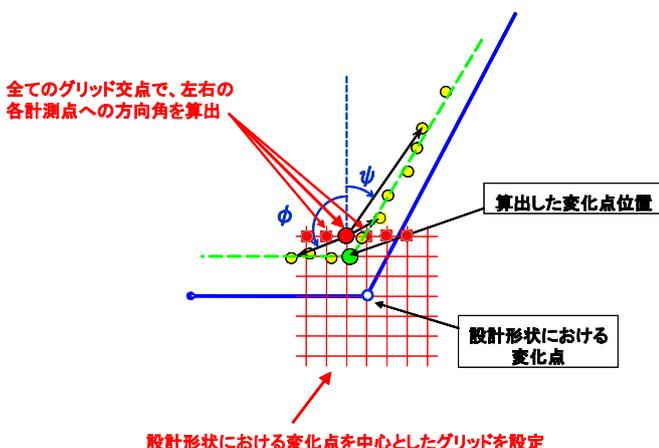
る線要素の1/2幅としている。抽出範囲は、アプリケーションで任意に変更することができる。図一6に変化点毎の計測抽出方法を示す。

出来形の変化点算出は、まず設計形状の横断形状変化点を中心とした1cm幅のグリッドを設定し、全てのグリッド交点位置で左右の各計測点への方向角(ϕ , ψ)を算出する。算出した ϕ , ψ についてそれぞれ標準偏差を算出し、その和が最小となるグリッド交点を、設計形状と対応する出来形の変化点位置とする。図一7に出来形変化点算出方法を示す。

算出した出来形変化点位置を、設計形状と対応する出来形計測点とみなし、TSによる出来形管理の方法と同様に、設計形状と出来形形状の対比を



図一6 変化点毎の計測抽出方法



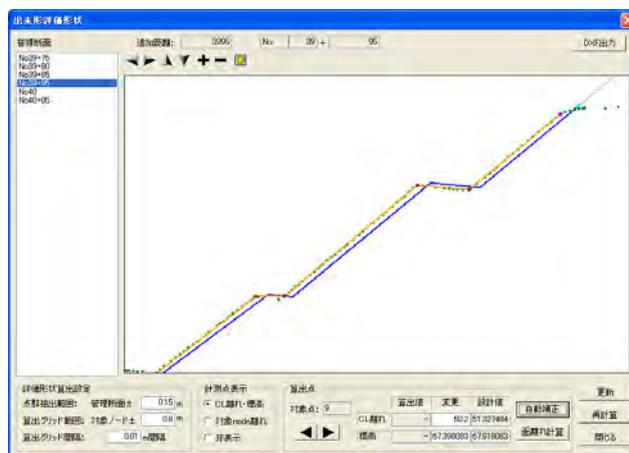
図一7 出来形変化点算出方法

行う。地形データを用いた出来形評価のための機能を、Autodesk Civil3D上で動作するプラグインプログラムとして開発を行った。【プラグインプログラムの動作環境：Autodesk Civil3D2006, Microsoft NET Framework 1.1】

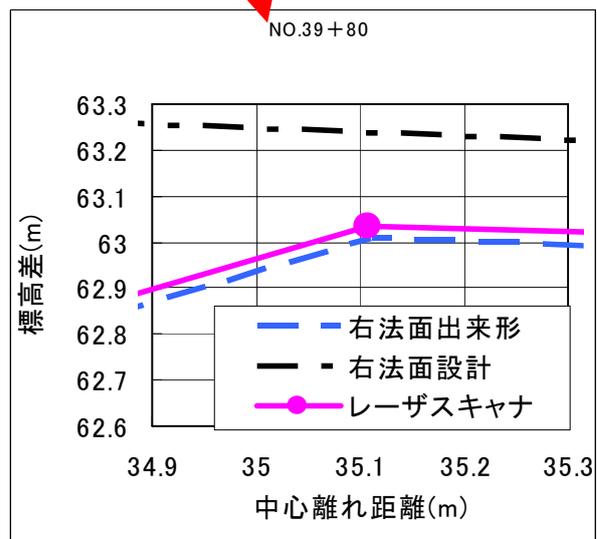
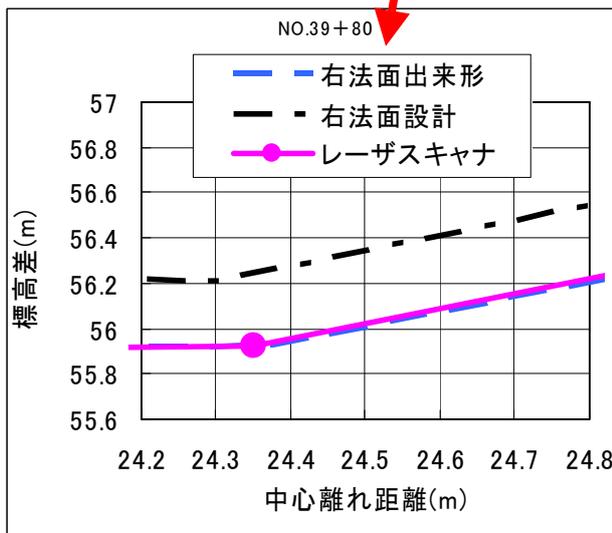
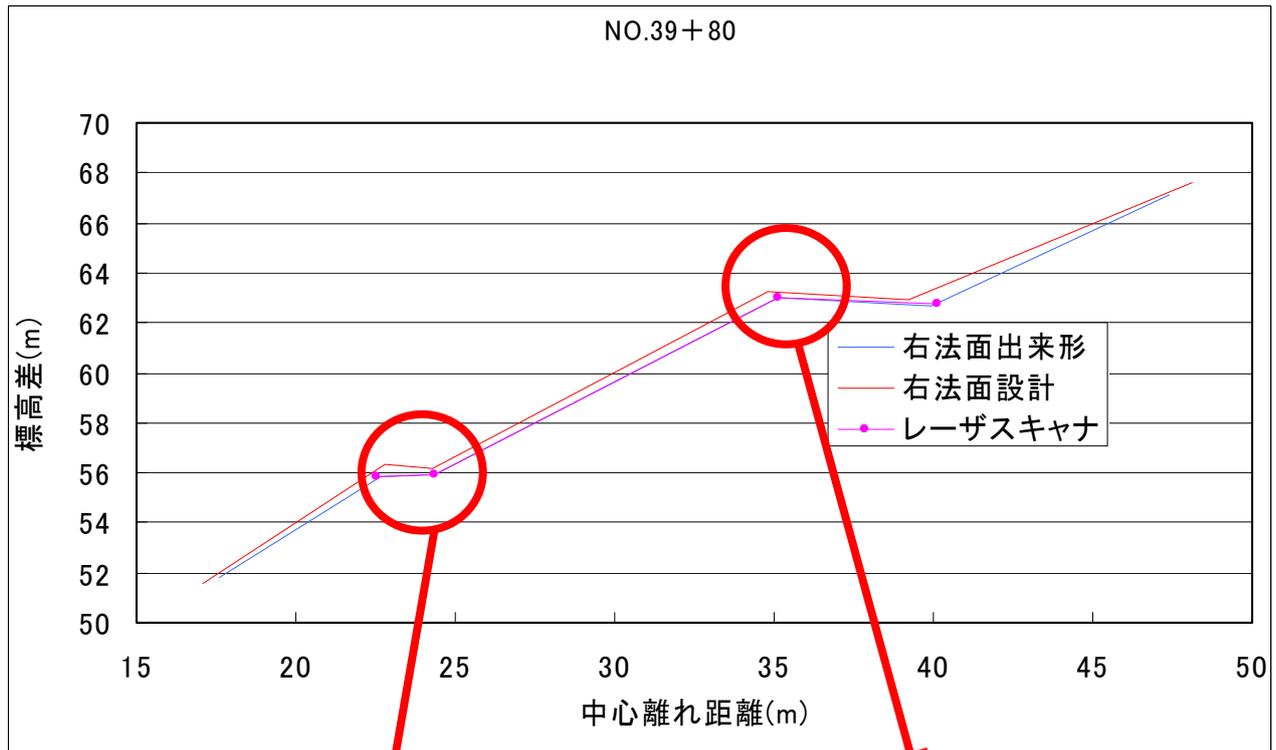
(3) 各種計測データとの比較

データを取得した工事は、橋梁施工のための進入路設置を兼ねた切土工事であり、設計形状と異なる箇所が多い特殊な現場であった。設計形状どおり構築されている箇所では、概ね出来形形状が計測点と重なるように、出来形変化点(出来形の横断形状変化点)が設定されることが確認できた。図一8に出来形評価形状の結果を示す。

測量機器の設置位置の関係で、場所によっては計測点を取得されていない部分があり、このような箇所ではうまく出来形ノードの設定ができなかった。特に、小段の上面については、奥まった部分で部分的に、全く計測点がないことがあった。また、小段の幅が狭いため、評価に用いる計測点が多く、設定できない箇所があった。今回開発したアプリケーションでは、横断図上に計測点をプロットして表示、出力する機能を持たせてある。道路横断面に、計測地形をプロットすることで、その連なりから視覚的に出来形形状が把握でき、設計形状と比較して見ることで、差異を確認することができた。



図一8 出来形評価形状の結果



TS 出来形 離れ (m)	TS 出来形 標高 (m)	レーザ算出 中心離れ (m)	レーザ算出 標高 (m)	幅員差 (mm)	標高差 (mm)
17.59	51.828				
22.687	55.829	22.52	55.856	-16.7	2.7
24.375	55.923	24.35	55.924	-2.5	0.1
35.111	63.006	35.107	63.034	-0.4	2.8
39.916	62.673	40.157	62.732	24.1	5.9
47.378	67.107				

図-9 レーザースキャナとTS計測結果の比較

図-9にレーザースキャナとトータルステーションによる計測結果の比較、地形データによる出来形管理ソフトで得られた座標値と、トータルステーションによる出来形管理箇所の計測座標値を示す。図より、最大 24 mm の差が生じている。誤差の要因としては、タイポイントのフィッティングによる誤差と出来形変化点の算出誤差がある。タイポイントのフィッティングによる誤差は、事前検証にて約 10 mm 程度という結果を得ている。算出誤差としては 15 mm 程度の誤差が生じていると考えられる。

3. 考 察

レーザースキャナによる測量では、特性から必要な箇所を限定して計測できないことや、雨・雪・砂塵なども計測してしまうことから、計測箇所が確実に出来形形状であるかどうか判断しにくい。このように計測点を出来形形状として判定する基準についても検討が必要である。

今回は、現状の出来形管理手法にあわせて出来形変化点を求め、管理断面上での設計データとの比較を行った。地形データによる出来形管理ソフトは、断面付近の点の抽出範囲設定などを変化させることによって、さらなる精度向上の可能性もある。今後は、対象点範囲と実測値との差についてより多くのデータ取得し検証する必要があると考えている。

また、レーザースキャナでは、多くの計測点を取得することができるが、人の判断には取得した地形情報全てを必要としない。無理にデータを少なくして管理断面上に投影して、出来形評価を行うより面的な設計情報と比較を行ううべきであることがわかった。地形の変化に対する評価は、平坦度や平滑性などの評価で十分である。そのため、数 cm 間隔の密な座標値全ては必要がない。今後は、平坦度や平滑度に必要な情報を抽出して、表現することができるアプリケーションが必要であると考えられる。そのときには、レーザースキャナで測定した面的な地形データを、平均化された

面として算出できることが課題であり、客観的な評価するためのアルゴリズムを構築することが重要と考えている。

4. おわりに

ロボット等による IT 施工システムで開発されている地形取得技術を活用して、レーザースキャナにより得られる地形データを用いた出来形管理に応用できるかについて検証を行った。現状の出来形管理手法と同程度の制度で行える可能性を示すことができたと考える。また、コストダウンが図られレーザースキャナによる施工管理が一般化し、小規模な現場で広く浸透すれば、今回の出来形管理手法を利用して施工の効率化に役立つことも期待できる。

参考文献

- 1) Hiroshi Yamamoto: Introduction to the General Technology Development Project: Research and Development of Advanced Execution Technology by Remote Control Robot and Information Technology, International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2006
- 2) Koichi Aritomi: The Construction Management Cooperated with Clients Using a Parametric Information Design Method; The second International Conference on Cooperative Design, Visualization and Engineering 2005, The International Information visualization Society, pp.157-165, 2005
- 3) 有富孝一・他: TS を活用した道路土工における出来形管理のトータルシステムの構築, 土木情報利用技術論文集, 土木学会, Vol. 15, 2006 年 10 月
- 4) 大塚正幸・他: 大規模土工工事の施工管理への空中レーザ計測の適用の試み, 第60回年次大会講演集, 土木学会, CD-ROM, 2006年9月

平成 18 年度 建設施工と建設機械シンポジウム実行委員会・委員名簿

(順不同・敬称略)

	委員名	機関名	所属・役職
委員長	山之内博行	(社)日本建設機械化協会	施工技術総合研究所 技師長
副委員長	三石真也	国土交通省	総合政策局 建設施工企画課 機械施工企画官
〃	榎村康史	(社)日本建設機械化協会	技師長
委員	山元弘	(独)土木研究所	技術推進本部 先端技術チーム 主席研究員
	福川光男	鹿島道路(株)	専務取締役 生産技術本部担当
	大坂衛	大成建設(株)	土木本部 機械部 部長
	星野春夫	(株)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
	大塚和夫	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(株)	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
	村上誠	新キャタピラー三菱(株)	直販部長
	田中利昌	日立建機(株)	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(株)	東京支店 取締役支店長
	川本正之	(社)日本機械土工協会	技術委員長
	藤野健一	(社)日本建設機械化協会	技師長兼調査部長
	浅野邦彦	(社)日本建設機械化協会	技術部長
	西脇徹郎	(社)日本建設機械化協会	標準部長

建設施工と建設機械シンポジウム論文集（平成18年度版）

平成18年11月2日 印刷

平成18年11月8日 発行

編集 社団法人 日本建設機械化協会
発行所

〒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(株)
東京都港区三田5-14-3