

平成17年度

# 建設施工と建設機械シンポジウム

## 論 文 集

平成17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

独立行政法人 土木研究所

社団法人 日本機械土工協会

## 論文審査規定概要

### 1. 審査方法

論文アブストラクト及び本論文の2段階で行い、1編の論文について4名の審査委員が審査を行う。  
下記の審査基準に基づき、審査委員会が採択の判断を下した場合に採択される。

### 2. 審査基準

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

### 3. 審査委員名簿（順不同・敬称略）

	委員名	機関名	所属・役職
委員長	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
〃	藤野健一	(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 主任研究員
	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
	松本毅	コマツ	開発本部 商品企画室 担当部長（当時）
	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
	雨宮信一	新キャタピラー三菱(株)	相模開発センター トラクタ開発部長
	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
	森實裕	(社)日本機械土工協会	副会長
	鈴木英隆	(社)日本建設機械化協会	技師長
	浅野邦彦	(社)日本建設機械化協会	技術部長
	近藤治久	(社)日本建設機械化協会	調査部長

---

平成 17 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. 【環境】

1. 「再焼成 P S (ペーパーラッジ) 灰を用いた泥土改良システム」  
…………… \*北山 圭造、富来 正 (株)フジタ)… 1
2. 「油圧ショベルの「省エネモード」を活用した二酸化炭素排出量縮減効果の検討」  
－施工現場で今すぐできる地球温暖化対策の提案－  
…………… \*桜田 明彦、山崎 茂雄、山下 好紀、牧戸 由美  
(国土交通省 中部地方整備局 中部技術事務所)… 7
3. 「吸塵式煙突除染システムの開発」  
…………… \*岩崎 則夫 (株)銭高組)、鈴木 康之、六反田 等 (新東サーブラスト(株))… 13
4. 「建設汚泥の新しい再資源化処理工法」－繊維質固化処理土工法と生成土の強度特性－  
…………… \*森 雅人 (株)森環境技術研究所)、  
高橋 弘 (東北大学大学院環境科学研究科)… 17
5. 「ホイールローダ用低騒音バケットの開発」  
…………… \*今村 一哉、中田 国昭 (コマツ)… 25
6. 「ハイブリッドショベルの開発」－省エネシミュレーション技術と実証実験－  
…………… \*南條 孝夫 (株)神戸製鋼所)、鹿兒島 昌之、小見山 昌之 (コベルコ建機(株))… 29

2. 【道路・舗装・橋梁】

7. 「鋼床版上 SFRC 舗装の施工」  
…………… \*和田 裕三、杉山 全 (鹿島道路(株))、  
大寺伸幸 (国土交通省 関東地方整備局 横浜国道事務所)… 35
8. 「鋼橋塗替えの高度化に関する調査」  
…………… \*石松 豊、山元 弘 ((独)土木研究所)… 39
9. 「スリップフォーム工法の応用施工例と供給方法の改善」  
…………… \*山内 盛人、菊地 重徳、内山 伸一郎 (前田道路(株))… 43
10. 「太径曲線パイプルーフ工法の開発」－下向きパイプルーフの実大施工試験－  
…………… \*白井 俊輔 (鹿島建設(株))、藤谷 俊美 (大成建設(株))、  
伊藤 康裕 (鉄建建設(株))、秋山 浩志 (コマツ地下建機(株))… 49

### 3. 【施工システム】

11. 「遠隔操縦ロボット(ロボQ)による坑内チップング施工」  
..... \*三村 洋一、本多 茂 (株フジタ)… 53
12. 「路上工事渋滞縮減に向けた建設機械の要求性能」  
..... \*林 輝、山元 弘 ((独)土木研究所)… 59
13. 「苗吹付緑化技術「ビオ・セル・ショット工法」の開発と活用事例」  
..... \*出雲井 雄二郎 (株大本組)、吉田 修 (吉田建設株)、  
福嶋 昭 (兵庫県立農林水産技術総合センター北部農業技術センター)… 63
14. 「長岡市古志東竹沢における緊急排水対応」(16・10・23新潟県中越地震)  
..... \*本間 政幸、笠原 邦昭  
(国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所)… 69
15. 「メインブーム兼用型解体機による解体工事の合理化」  
..... \*森川 勝 (コベルコ建機株)… 75

### 4. 【情報化施工】

16. 「IT を活用した盛土締固め施工管理について」(情報化施工の取り組み)  
..... \*宮部 聡志、本間 政幸 (国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所)… 79
17. 「高精度 GPS を利用した建設機械の情報化施工システム」  
..... \*神田 俊彦、永井 孝雄 (コマツ)、沖 政和 (ハザマ)… 83
18. 「舗装工の情報化施工について」  
..... \*坂本 鋼三 (国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所)、  
金澤 哲也 (国土交通省 関東地方整備局)、  
藤島 崇 (JCMA 施工技術総合研究所)… 89
19. 「建設施工におけるコンカレントエンジニアリングの実践」  
... \*芦田 恵樹、建山 和由 (立命館大学理工学部)、大前 延夫 (ハザマ大阪支店)… 93

### 5. 【基礎】

20. 「大深度・低空頭対応型 CSM 機の開発」  
..... \*嶋田 尚正、梅本 慶三、増田 浩二 (株間組)… 99
21. 「既設構造物下(低空頭)において使用する基礎杭建込機の改良と適用」  
..... \*高島 泰、安藤 喜敏、浜田 史朗 (東急建設株)… 105

## 6. 【トンネル・推進工法】

22. 「スライドゲートの開発と実用化」  
(地盤改良を不要としたスライドゲートによるシールドの発進・到達)  
…………… \*早川 淳一、小野 崇 (佐藤工業(株))、佐藤 修一 (JFE 建材(株))… 109
23. 「シールド位置姿勢計測システムのバージョンアップと実用化」  
(セグメント組立パターン計画システムを組み込んだシールド自動方向制御)  
…………… \*勝又 哲也、上地 勇 (佐藤工業(株))、船山 正行 (株)トキメック自動建機)… 113
24. 「遠心力トンネル吹付け工法の実施工への展開」  
…………… \*丸山 信一郎、山下 高俊、長野 祐司 (三井住友建設(株))… 117
25. 「部分拡幅シールド工法(VASARA 工法)の開発」  
…………… \*神尾 正博 (鹿島建設(株))、浅野 裕輔 (石川島建材工業(株))、  
杉山 雅彦 (三菱重工業(株))… 123
26. 「超大口径管φ 3500 推進工事の施工」  
…………… \*佐藤 英郎、藪 ノ 和洋 (株)奥村組)… 129
27. 「翼推進工法の工事への適用」  
…………… \*森 正嗣、南葉 昭雄 (株)銭高組)、高橋 慎吾 (日立造船(株))… 137
28. 「シールドを用いた場所打ち支保システムの開発と適用」  
…………… \*千代 啓三、川嶋 潤二 (熊谷・東洋・大本・井上特定建設企業体)、  
井浦 智実、((独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東北新幹線局)… 141
29. 「シールドトンネル点検システムの開発」  
…………… \*渡部 修 (国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所)、  
二瓶 正康 (現 国土交通省 関東地方整備局 江戸川河川事務所)、  
安井 成豊 (JCMA 施工技術総合研究所)… 147

## 7. 【施工機械・装置・要素】

30. 「函渠・側溝等における清掃機械の開発」  
……………\*佐々木 力、元木 真二、大岡 正憲  
(国土交通省 四国地方整備局 四国技術事務所)… 153
31. 「無人ラフテレーンクレーンの実施工への適用 (無人化施工技術の課題)」  
…………… \*笠原 邦昭、本間 政幸 (国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所)… 157
32. 「『垂直土砂搬送装置』 実用機の開発」 - 鉄道建設工事への適用 -  
……………\*高橋 浩史、平井 幸雄、金井 孝行 (東急建設(株))… 163
33. 「低騒音舗装の機能維持装置開発検討」  
……………\*村上 大幹 (国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所)、  
佐久間 孝司 (国土交通省 関東地方整備局 東京国道事務所)、  
佐野 昌伴 (JCMA 施工技術総合研究所)… 167
34. 「建設車両用タイヤのカット防止」  
…………… \*古東 佑介、江口 忠臣 (明石工業高等専門学校)、  
室 達朗 (愛媛大学 名誉教授)… 173
35. 「月面探査ローバに最適なトレッド形状の検討」  
……………\*大知 剛、重松 尚久、下岡 幸司 (呉工業高等専門学校)… 179
36. 「Investigating the contact dynamics between tool  
and granular material using Distinct Element Method (DEM)」  
…………… \*Ha H. BUI、深川 良一 (立命館大学大学院理工学研究科)… 183
37. 「超大型油圧ショベル EX8000 の開発」  
…………… \*斎藤 敏夫、相原 三男 (日立建機(株))… 191
38. 「触覚情報を用いた水中バックホウ遠隔操作システムの開発」  
……………\*平林 丈嗣、白石 哲也、加藤 英夫 ((独)港湾空港技術研究所)… 195

# 1. 再焼成PS（ペーパーズラッジ）灰を用いた泥土改良システム

○ (株)フジタ 北山 圭造  
 (株)フジタ 富来 正

## 1. はじめに

建設事業において、環境への負荷が少ない循環型社会形成への様々な取り組みが積極的に実施されている。

建設発生土の利用基準として平成16年3月31日に国土交通省所管事業を対象に出された通達を表1に示す。これによると、盛土その他に適用するには第4種建設発生土以上、出来れば第3種建設発生土以上が望ましいことがわかる。

当社は、これまで古紙リサイクル過程で産業廃棄物

として発生したPS（ペーパーズラッジ）灰を再処理することにより製造される再焼成PS灰（マッドキラー）の高い吸水性に着目し、建設分野への有効利用を図ってきた。

本稿では、建設汚泥や泥土として処理されているものを、建設発生土として取扱うことが可能な品質（第4種建設発生土以上）に改良することができるシステムの概要と、泥土圧シールド工事に適用した事例を報告する。

表1 土質区分基準と適用用途標準（抜粋、各適用には別途留意事項有り）

区分 (国土交通省令)	細区分	ユーン 指数 kN/m <sup>2</sup>	大分類	含水比 (地山)	工作物 の 埋戻し	土木構 造物の 裏込め	道路 (路床) 盛土	道路 (路体) 盛土	一般 堤防	公園 緑地 造成
第1種建設発生土 (砂、礫及びこれらに 準ずるもの)	第1種	-	礫質土	-	◎	◎	◎	◎	○	◎
	第1種改良土		砂質土	-	◎	◎	◎	◎	○	◎
第2種建設発生土 (砂質土、礫質土及び これらに準ずるもの)	第2 a 種	800 以上	礫質土	-	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	第2 b 種		砂質土	-	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	第2種改良土		人工材料	-	◎	◎	◎	◎	◎	◎
第3種建設発生土 (通常の施工性が確保 される粘性土及び これに準ずるもの)	第3 a 種	400 以上	砂質土	-	○	○	○	◎	◎	◎
	第3 b 種		粘性土	40%程度以下	○	○	○	◎	◎	◎
			火山灰質粘性土	-						
第3種改良土	人工材料	-	○	○	○	◎	◎	◎		
第4種建設発生土 (粘性土及びこれに 準ずるもの(第3種建設発 生土を除く))	第4 a 種	200 以上	砂質土	-	○	○	○	○	○	○
	第4 b 種		粘性土	40~80%程度	△	△	△	○	○	○
			火山灰質粘性土	-						
			有機質土	40~80%程度						
第4種改良土	人工材料	-	△	△	△	○	○	○		
泥土	泥土 a	200 未満	砂質土	-	△	△	△	○	○	○
			粘性土	80%程度以上	△	△	△	△	△	△
	火山灰質粘性土		-							
	泥土 b		有機質土	80%程度以上						
泥土 c	高有機質土	-	×	×	×	△	×	△		

◎ (そのままで使用可能なもの)

○ (適切な土質改良を行えば使用可能なもの)

△ (○と比較して土質改良にコスト時間が必要なもの)

× (使用が不適なもの)

## 2. 建設工事からの排出物の取扱い

シールド工事の場合、掘削物が土砂か汚泥かの判断は、掘削工事（一体の施工システム）にともなって排出される時点で行なうものとされている。

シールド工事における一体の施工システムの範疇は、泥水循環工法（泥水シールド）と泥水非循環工法（泥土圧シールド）によって違いがあるが、ここでは泥土圧シールド工法に関して述べる。

泥土圧シールド工法ではホッパー等の貯留設備から排出される時点までを一体の施工システムととらえ、ここからの排出物が泥状を呈するかどうかで判断している。ここで、泥状を呈するとは、標準仕様ダンプトラックに山積みができず、また、その上を人が歩けない状態をいい、この状態を土の強度を示す指標でいえば、コーン指数がおおむね 200 kN/m<sup>2</sup> 以下又は一軸圧縮強度がおおむね 50 kN/m<sup>2</sup> 以下である。また、運搬中の練り返しにより泥状を呈するものも汚泥として取扱う。

本改良システムは、泥土圧シールド工法の泥土を一体の施工システム内で、瞬時に建設発生土として取り扱うことが可能な品質（第4種建設発生土以上）に改良し、ピットから搬出される時点で泥状を呈さない性状とするものである。

## 3. 再焼成PS灰

本システムで改良材として使用する再焼成PS灰は、古紙から再生紙を作る過程で発生するペーパースラッジ（PS）灰を処理して製造したもので、化学的に非常に安定した無機多孔質な材料である（写真1）。

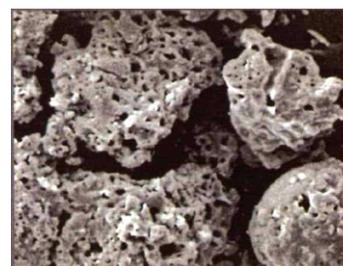


写真1 電子顕微鏡写真

また、再焼成PS灰は、pHが中性域であるとともに、有害物質を含まず動植物に害を与えない環境負荷の低い材料である。再焼成PS灰粒子の無数の微細孔は、高い吸水能力を有しており、泥土を瞬時に改良することができ、養生時間が不要といった特徴がある。

表2は、再焼成PS灰と既存の改良材を比較したものである。

表2 再焼成PS灰の特徴

項目	再焼成PS灰	石灰系	セメント系	高分子系
改良原理	吸水効果による物理的改良。	吸水、発熱により含水比を低下させる改良。	セメントの水和・固結化作用により、土の強度増加を図る改良。	泥土の自由水に作用し水分吸着、固定化、土表面の被覆による改良。
改良効果	再焼成PS灰が行き渡らない部分も吸水作用による改良効果が期待できる。	石灰が行き渡らない部分も吸水作用で改良効果が期待できる。	セメントが行き渡らない部分は固まらないため、改良効果にムラがしやすい。	添加量が少量のため、均一な改質効果を得るため液体タイプを使用。高価である。
適用可能土質	粘性土、砂質土をはじめ、腐植土にも適用可能である。	粘性土の改良に適している。	砂質土系の改良に適している。粘土および有機物の含有量が改良効果に影響する。	粘土、シルトの泥土に適している。土の含水比が高い場合注意が必要である。
適用可能含水比	高含水比の土であっても適切に添加することにより、十分な改良効果が期待できる。	石灰を混合した後も泥状となる土には改良効果は期待できない。	高含水比の土であっても適当なセメント添加量によって硬化し、改良固化が期待できる。	砂の場合は含水比50%程度粘土の場合は100%程度までしか改良効果が期待できない。
環境影響	中性から弱アルカリ域で改良ができ、動植物に対する影響が極めて少ない。	消石灰は消防法で危険物第3種に指定。pHは上がり強アルカリとなる。発熱する。	六価クロムの溶出に対する不安がある。pHは上がり強アルカリになる。	中性域で毒性がなく長時間放置しても問題がない。
施工性	瞬時に改良できるため、養生期間が必要ない。	固化に必要な数日程度の養生期間が必要である。貯蔵、施工時の取り扱いに注意。	固化に必要な数日程度の養生期間が必要である。	養生期間には必要ないが、改良土の強度が低く盛土材等としての利用ができない。

#### 4. 施工機械

本改良システム施工機械は、以下の装置等で構成される。

- ・ 改良材貯蔵設備（サイロ）
- ・ 改良機
- ・ 運転制御システム

##### 4-1. 改良材貯蔵設備

改良材は、小規模改良の際はフレキシブルコンテナでの運用もあるが、通常ジェットパック車で搬入する。陸上の場合縦型、地下空間の場合横型のサイロを数基設置する。そこより必要量をロータリーフィーダ、スクリュウコンベヤ等を用いて改良機内に添加する。

##### 4-2 改良機

再焼成 PS 灰はコンクリート製造等のミキシングと異なり完璧さを要求しないという特徴がある。よって、高価なミキシングプラントを使用する必要が無く、比較的安価で単純な構造の専用機械を開発した。

改良装置は、2種類のスクリュウにより定量切出、

攪拌、排出を連続して行なう機構となっており、

- ・ ストレート型（図1）
- ・ 折り返し型（図2）
- ・ 大処理量用（図3）

の3種類の基本形状を基に、現地状況に応じて柔軟にシステムを構築している。

特長として次のような点を有している。

- ・ 改良土量の変動にもスクリュウ回転数を変えることで連続的に対応可能である。
- ・ バッチ処理に比して大容量化が容易い。
- ・ 密閉されたケーシング内で混合攪拌するため、粉塵や騒音の発生が少ない
- ・ 広範囲な土質性状に対応可能である。

##### 4-3. 運転制御システム

本施工機械、機械の運転、制御、データ保存等を現場ごとの要求に合わせてカスタマイズしている。

基本的には、機械の単独運転、連動運転制御、機械稼働データ保存が可能であり、その他ベルトスケールとの組み合わせ等の実績がある。

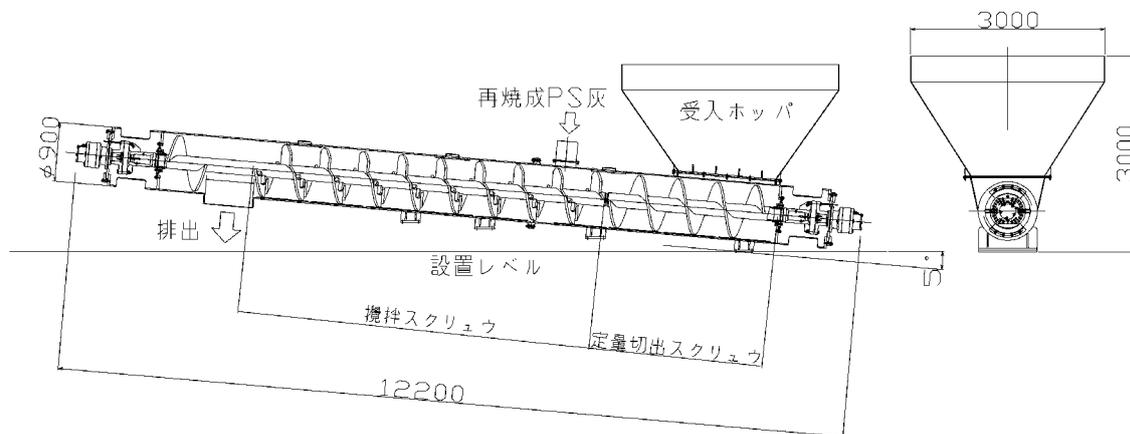


図1 改良機（ストレート型）

ストレート型は円筒形のケーシング内に定量切出用スクリュウコンベヤ1列と、攪拌用スクリュウコンベヤ1列を直線状に配置した改良機基本の形状である。全ての形状に共通する改良の流れは

- ① 受入ホッパにベルトコンベヤ、バックホウ等を用いて泥土等を投入する。
- ② 定量切出スクリュウコンベヤによりホッパ下部よりケーシング先端方向へと泥土等を定量搬送する。定量切出スクリュウコンベヤは可変速である。

- ③ 攪拌用スクリュウコンベヤ部へ到達した泥土に適量の再焼成PS灰を添加する。添加量は定量切出しコンベヤの回転数に応じて変化させる。
- ④ 混合攪拌部を通過中に泥土は、再焼成PS灰と混合され建設発生土として取り扱い可能な土質となってケーシングから排出される。
- ⑤ 切出しスクリュウと攪拌スクリュウの回転数は、受入泥土等の性状、量に合わせて個々に回転数を設定する。

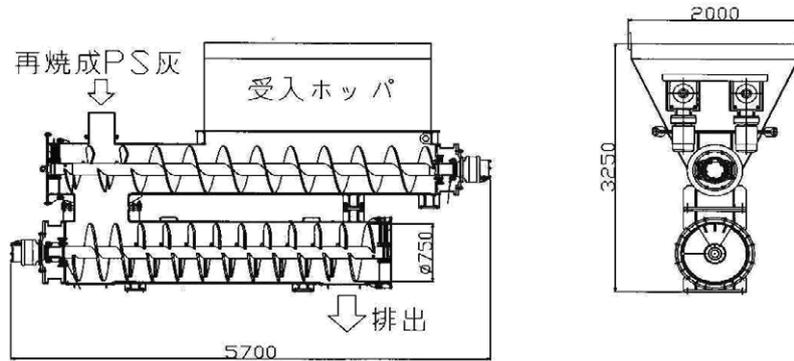


図2 改良機 (折り返し型)

折り返し型は定量切出用スクリュウコンベヤ1列と、攪拌用スクリュウコンベヤ1列が上下2段に配置されている狭隘な場所用の改良機である。シールド立坑内等で設置面積が非常に限られる際に適用する。上段と下段はフランジ接続であるため、平面上の折り返し角度を自由に設定して設置可能である(図は180度折返し)。

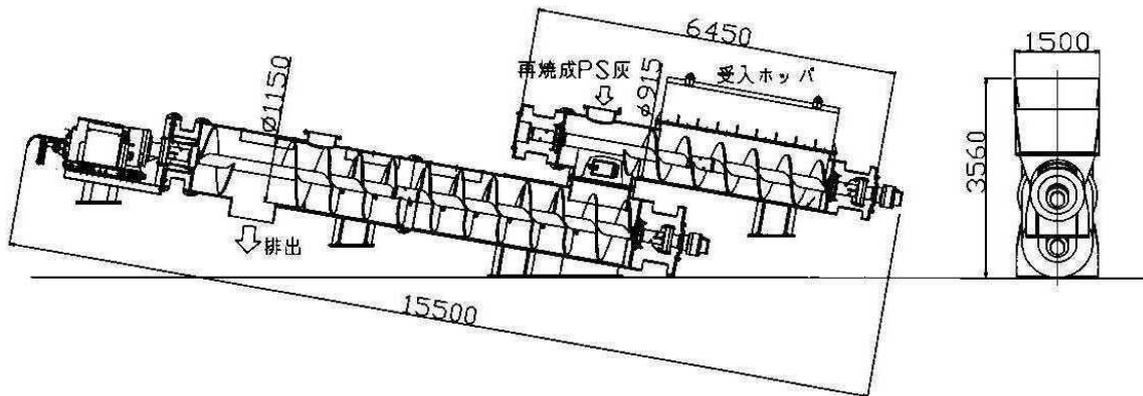


図3 改良機 (大処理量用)

大処理量用は浚渫、大断面シールド工事に適用すべく製作した機種であり、図は200 m<sup>3</sup>/h級 (処理能力は土質性状による)の改良機である。スクリュウを片端支持としていストレート型と違い、大処理量用ではスクリュウが大型であるため両端支持としている。よってケーシング2段の形状となっている。

## 5. 施工事例

### 5.1 工事概要

工 法：泥土圧推進工法

呼 び 径： $\phi 3,000\text{mm}$

延 長： $L=72.0\text{m} \times 4 \text{本}=288.0\text{m}$

土かぶり：29.2m

掘削土量：3,085 $\text{m}^3$

### 5.2 地質概要

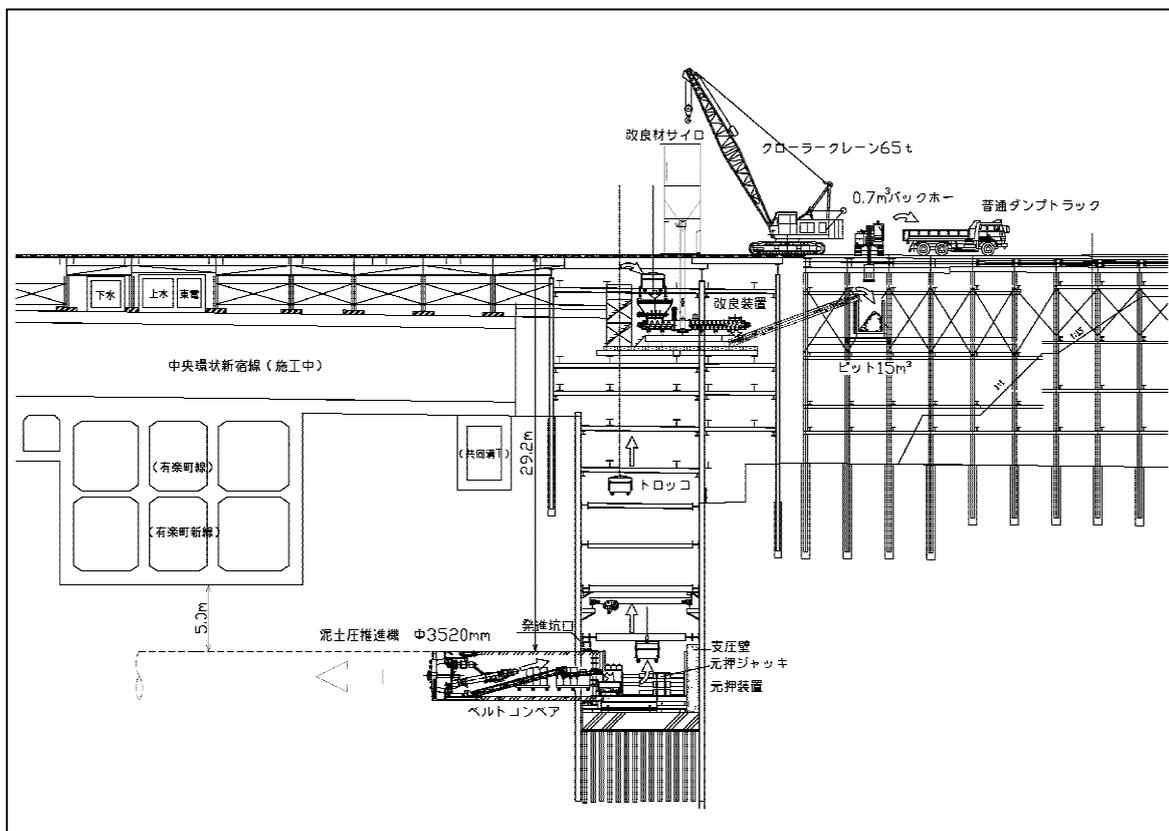
本地区は、洪積の武蔵野台地に位置し、地表面より6m付近までは沖積層が分布するが、それ以深には洪積層が武蔵野礫層、東京層、東京層群の順で分布してい

る。

推進通過位置は、管中心で地表より31m付近となり、全線にわたり東京層群の粘性土層(Tkc)の掘削となる。この粘性土層は層厚が15m程度有り、平均N値20程度の均一な固結シルトとなっている。

### 5.3 改良機器設置

作業基地が都市部での主要幹線道路交差点の狭隘な場所であるため図4に示すように改良材サイロを除いて発進立坑の中段に設置した。



### 5.4 改良材添加量

掘削土の含水比は、地下水や切羽に注入する添加材等によって変化するため、改良材添加量(以下、添加量と称す)もそれに応じて調整する必要がある。そこで事前に、含水比を変化させた掘削土に対して、所定のコーン指数管理値(200 $\text{kN}/\text{m}^2$ 以上)を満足する添加量を室内試験で決定した(図5)。

掘進時は、掘削土の含水比に応じて添加量を調整した。

### 5.5 改良効果

4本の推進工は、土質が均一であったため、ほとんど同様な施工状況であった。また、泥土改良についても同様であり、ここでは掘削土の含水比が比較的大きか

った初期掘進時（50%から60%）でも改良効果は、第4種建設発生土以上（コーン指数200 kN/m<sup>2</sup>以上）の品質を満足した。写真2、3は改良前、改良後の状況である。一連の処理の流れの中で直ちに改良が行われていることが明確に見て取れる。

泥土改良の品質管理は、セメントや石灰を用いて有効利用を目的とする場合には養生時間が必要で煩雑となることがあるが、本システムでは瞬時に均一の改良が可能であることから改良直後のコーン指数試験によって直ちに品質を確認することが可能であった。

また、養生時間を必要とするものは、その養生のためのストック設備が必然的に多大となり、都市部等での狭隘な環境では、これが一体の施工システム内での改良の成立を妨げる要因となる場合があると考えられる。

本泥土改良システムは、処理土の養生のためのストック設備が不要であることから都市部での適用範囲が大きいといえる。

泥土圧推進の泥土を一体の施工システム内において瞬時に泥状を呈さない第4種建設発生土以上の性状に改良し、盛土材として有効利用することができた。

## 6. おわりに

現状では発注者毎に産業廃棄物に対する考え方に相違が見られる。たとえばシールド工事からの排出物は土質改良の実施、未実施にかかわらず、すべて産業廃棄物と判断される場合がある。こうした場合でもリサイクルを容易にする本システムは有効性が認められている。

また、本改良システムはシールド工事にとどまらず、浚渫土等の改良工事にも多数適用されており、泥土の発生抑制および有効利用は、無駄な廃棄物を出さないゼロエミッション社会に貢献できる技術であると考察する。

今後も効率的なリサイクル推進に取り組み、環境への負担の軽減に寄与する所存である。

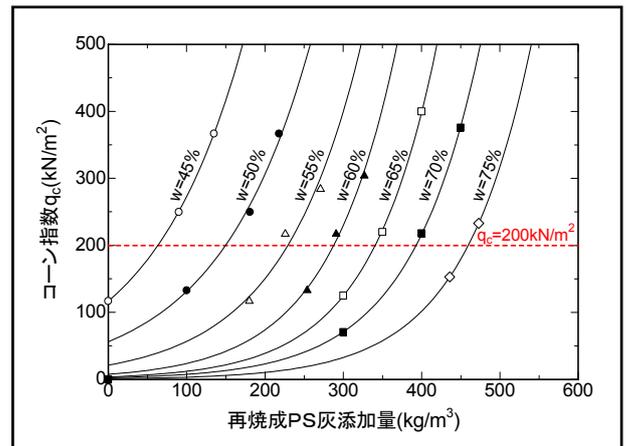


図5 含水比変化に対する改良土のコーン指数試験



写真2 推進機ゲートから排出される固結シルト



写真3 改良土（第4種建設発生土以上）

## 2. 油圧ショベルの「省エネモード」を活用した二酸化炭素排出量縮減効果の検討 — 施工現場で今すぐできる地球温暖化対策の提案 —

国土交通省中部地方整備局 中部技術事務所：山崎 茂雄、○桜田 明彦  
山下 好紀、 牧戸 由美

### 1. はじめに

建設施工分野における地球温暖化対策として、施工段階における二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の縮減には建設機械の燃料消費量（燃費）を低減させる取組みが有効なのは論を待たない。しかし、建設機械に係わる地球温暖化対策を検討するにあたって必要となる燃費の絶対的な評価・試験方法は世界的に見ても存在しないことから、建設機械を低燃費運転することによるCO<sub>2</sub>縮減の計画にあたって具体的な数値目標がたてづらい、また実行した場合の評価には個別の機械の給油量管理を行う必要があるなど多大な労力を要するものの相対的な評価しかできないという実態があり、建設機械に係わる温暖化対策を難しくしている現状があった。そこで、絶対的な燃費を評価し将来的には低燃費型建設機械の指定制度等にもつながる燃費試験方法を検討した結果、現在主要3機種（油圧ショベル、車輪式トラクタショベル、ブルドーザ）の燃費試験方法が日本建設機械化協会規格として暫定的に制定され試行されている。

本報告は、この燃費試験方法の検討過程で実施した油圧ショベルの試験運転の際、機種や運転パターンにかかわらず省エネモード選択時には燃費の低減傾向が

みられることに着目し実際の施工現場で稼働している油圧ショベルの燃費調査や各種実態調査等を実施したところ、油圧ショベルの省エネモード活用が施工段階の地球温暖化対策に有効であることを確認したので報告するとともに、今後予想される各種制度の制定を待たずに実施できる建設機械に係わる地球温暖化対策として提案するものである。

### 2. 建設機械の地球温暖化対策と油圧ショベル

#### 2. 1 油圧ショベルのCO<sub>2</sub>排出量寄与率

建設施工に使用される建設機械の排出ガス対策の効果は保有台数の上位を占める主要3機種の影響が大きいが、保有台数に機械の稼働時間等を勘案したCO<sub>2</sub>排出量を算出すると、油圧ショベルは全建設機械の50%程度を占めている（図1、図2）ことから、油圧ショベルに対して各種対策をとることが建設施工のCO<sub>2</sub>縮減効果に有効であるといえる。

#### 2. 2 油圧ショベルの省エネモード

建設機械のCO<sub>2</sub>縮減技術は各メーカーで取り組まれており、その中心的技術はエンジン回転制御や馬力制御などによる低燃費技術となっている。

これらは特に油圧ショベルで最も多く取り組まれて

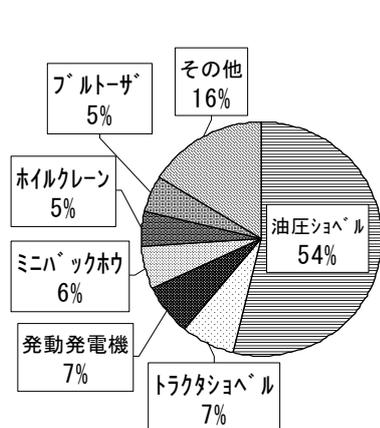


図1 建設機械のCO<sub>2</sub>排出寄与率

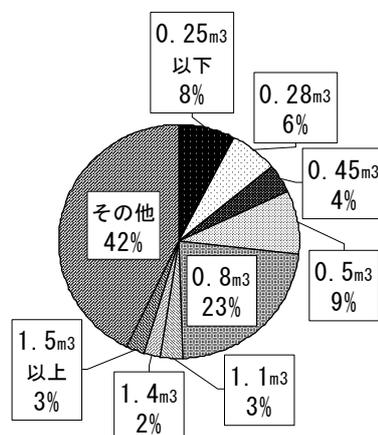


図2 油圧ショベル規格ごとのCO<sub>2</sub>排出寄与率



写真1 省エネモードスイッチの例

いるところで、代表的な技術として「省エネモード」があげられる。省エネモードはその呼称や選択方式はメーカーで異なるが、メーカーの設定しているスイッチ選択等を行ったとき、諸設定の変更や自動制御等によりエンジン回転速度を下げエンジン燃料消費率のよい運転点の運転頻度を高くするなどを行って単位作業量あたりの燃費を低減させる機構のことをいい、0.5 m<sup>3</sup>級（12 t級）以上の標準仕様の油圧ショベルのほとんどに採用されている。

ただし、機械の販売において一般家庭用機器やその他の汎用機械にみられるような省エネ性能の優位性を積極的に打ち出している例は少ないようで、現場での認知度とその活用実態は不明である。

### 2.3 省エネモード運転時の燃費低減効果

油圧ショベルの燃費試験方法策定にあたり、試験運転方法を決定するのに必要となる「実作業運転」と「実作業を模した試験のための運転」間の燃費の変動や相関を確認することを目的に掘削積込作業構内試験（以下、構内試験）をおこなっている。この試験は土質の影響を排除するために施工技術総合研究所構内に作業試験場を設け、平成12年度に0.5 m<sup>3</sup>級（12 t級）を、平成15年度には0.8 m<sup>3</sup>級（20 t級）の油圧ショベルを対象に、標準モードと省エネモードの両運転モードに対して実施した。

図3は構内試験における0.8 m<sup>3</sup>級油圧ショベルの「実作業運転」と「実作業を模した試験のための運転」それぞれの燃費の相関図であるが、省エネモード運転時には明確な燃費低減傾向があることがわかる。さらに各機械ごとに詳細に分析した結果、平均値で時間あたり作業量（作業能力）の低下を4～5%程度に抑えつつ燃費を約15%程度低減していることが確認された（図4）。

### 3. 現場実態調査

構内試験における運転においてその効果が確認された省エネモードが、様々な条件下で多様な作業を行う実際の施工現場でも同様の効果が発揮できれば施工現場における地球温暖化対策のひとつとなり得ると考えられる。

そこで省エネモードがどの程度利用されているのか

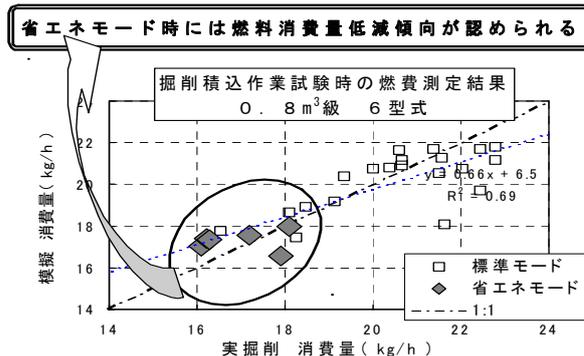


図3 構内試験時の燃費測定結果の事例

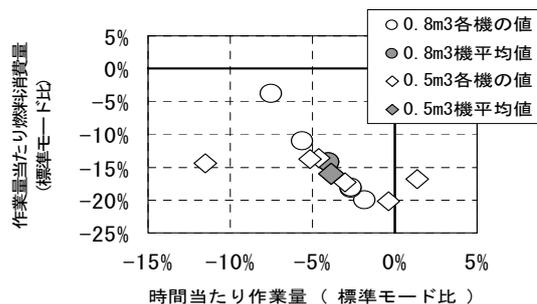


図4 省エネモード時の燃費低減効果

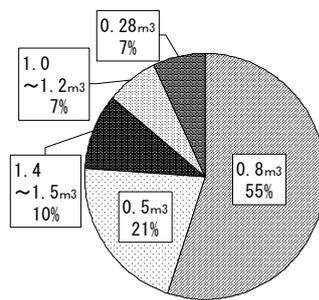


図5 現場で使用されていた油圧ショベルの規格

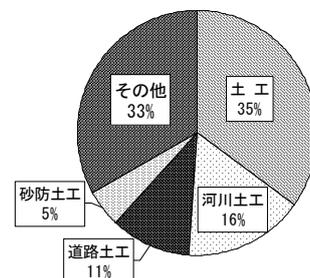


図6 油圧ショベルが稼働していた工種

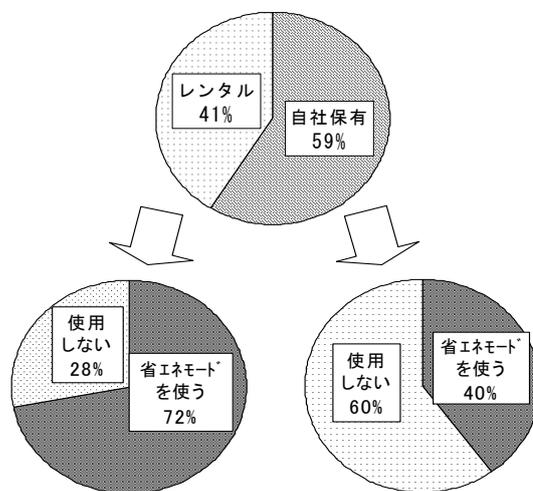


図7 保有形態と省エネモード使用の関係

現場実態を調べると共に、中部地方整備局直轄工事の2現場においてそれぞれ1台の油圧ショベルを標準モードと省エネモードで各1日運転し燃費の現場確認を行うこととした。

### 3. 1 アンケートによる現場実態調査

油圧ショベルが施工現場における一日の運転においてどのような作業を行っているか、また装備されている省エネモードがどのように利用されているか等を把握するため、中部地方整備局が発注した工事の施工現場で稼働している油圧ショベルのオペレータを対象にアンケート調査を実施した（おそらくこの種の現場実態調査は始めてではないかと思われる。）。

各現場とも工事最盛期の中でのアンケート実施となったものの75件の回答を得られたもので、回答の分析結果は次のとおりである。

- ①現場で使用されている油圧ショベルは0.8m<sup>3</sup>級が約5割を占めている。これは機械の普及率とも一致している。（図5）
- ②油圧ショベルの稼働していた主工種は土工が約7割を占めていた。（図6）
- ③レンタル機のオペレータ、運転経験が20年以上のオペレータは省エネモードの使用率が高い傾向がみられた。（図7、図9）
- ④図8に示すように、省エネモードを使用するオペレータは約7割に及ぶことがわかった。ただし、油圧ショベルは1日中同じ作業を継続的に行うことはなく単純な省エネモードの利用割合だけではその有効性を判断できないため、1日

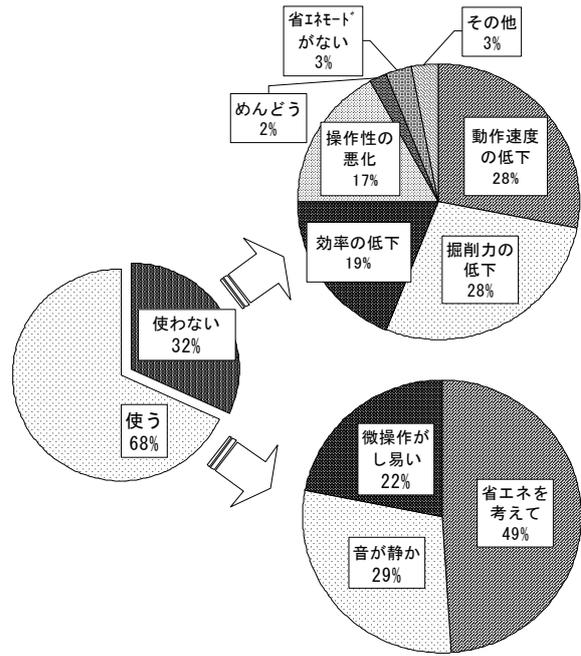


図8 省エネモード使用の有無と理由

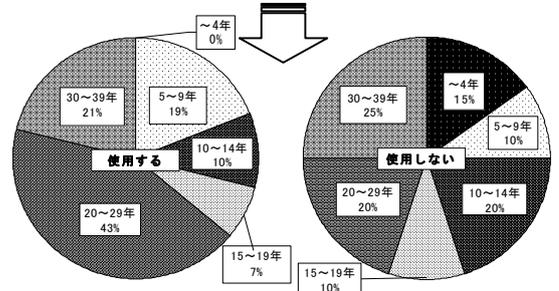
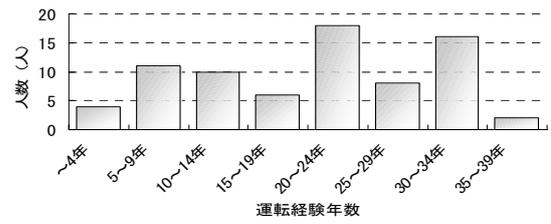


図9 経験年数と省エネモード使用の関係

「すべての作業に対する省エネモードの使用頻度」は約33%。  
 ※ここに、「すべての作業に対する省エネモードの使用頻度」  

$$= \sum (\text{各作業構成割合} \times \text{各作業での省エネモードの有効率})$$
  

$$= \{(28.0 \times 41.7) + (59.0 \times 26.7) + (5.6 \times 41.7) + (3.0 \times 20.0) + (2.1 \times 75.0) + (2.3 \times 25.0)\} / 100 \approx 32.5$$

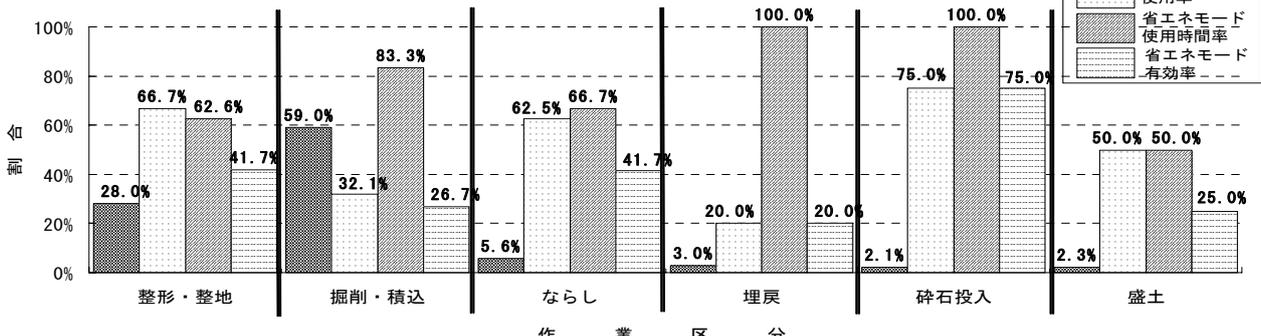


図10 作業ごとの省エネモード使用実態と総作業に対する使用頻度（モードの有効度）

における油圧ショベルの作業構成や作業項目毎の省エネモード利用割合、作業項目ごとの省エネモード使用時間割合について整理を行った。

その結果、図10に示すように1日の運転における作業時間割合は掘削・積込作業が高いが作業区分に対する省エネモードの使用率や使用時間率は低いこと、ならしや埋戻し作業ではこの逆の傾向があること、総作業あたりの省エネモード使用率（省エネモードが有効な割合）は約33%となることがわかった。これは、掘削・積込作業にあたっては省エネモード利用による「掘削力の低下や動作速度の低下」等を嫌うオペレータが多いことを表していると考えられ、図8に示す省エネモードを使わない理由とも整合しているといえる。

アンケートの結果、油圧ショベルのオペレータの多くに省エネモードは認識され利用もされているものの、十分にその有効性が発揮されるような活用となっていない実態が明らかになった。

### 3.2 実現場における燃費確認調査

#### 3.2.1 調査概要

構内試験と実現場における燃費や作業性の差異を確認すること目的として、中部地方整備局発注工事のうち2件の河道掘削工事における掘削・積込み作業において、標準モード使用時と省エネモード使用時の燃費やサイクルタイムの違いを調査した。なお、調査の実施条件は次のとおりである。

#### 調査条件

- 調査対象油圧ショベルは0.8m<sup>3</sup>級とした。
- 機種・型式の対象は、構内試験を行った6機種としこのうちの任意の2機種とした。
- 調査は、省エネモード運転作業を1日、標準モード運転作業を1日を交互に繰り返し給油量、サイクルタイム等を計測した。
- エンジン回転速度、排出ガス温度の測定はセンサーを取付けて自動取込した。
- オペレータは、1現場1人に固定した。
- アイドル制御機構（オートデセル）は、調査期間中「OFF」に固定した。
- 走行速度段は、長距離移動を含め低速度段とした。
- 稼働中のエンジン回転速度の調整は最高位置とした。なお、待ち等は最低位置でもよいこととした。
- エアコンは、未使用とした。

### 3.2.2 調査結果

#### ①燃費の測定結果

2現場における各油圧ショベルの給油量は表1に示すように省エネモードでの作業時は明確に減少していることから省エネモードの効果は明らかである。しかし、掘削・積込作業を対象として調査しているもの日々の作業構成や作業土量も変化するなど作業内容は同一ではなく単純な給油量では省エネモードの効果は評価できない。そこで、対象機種の各現場での掘削・走行・アイドル等の動作区分ごとに構内試験で得た時間あたり燃費に基づく検証を行うと共に、構内試験時におけるエンジン回転、エンジン負荷との差を補正するなどし各機械の時間あたり燃費を比較した結果、図11に示すよう構内試験時と同等以上の燃費低減効果を発揮していることが確認できた。

#### ②サイクルタイム

油圧ショベルの「掘削→旋回→ダンプトラックへの積込み→旋回」という一連の作業手順をサイクルタイムとして計測した結果、両現場の油圧ショベルとも省エネモード運転時は標準モード運転時に比べ1秒程度

表1 各油圧ショベルの給油量

機種	燃料補給量		燃料削減率
	標準モード時	省エネモード時	
Aバックホウ	148 L	115 L	22%
Bバックホウ	159 L	127 L	20%

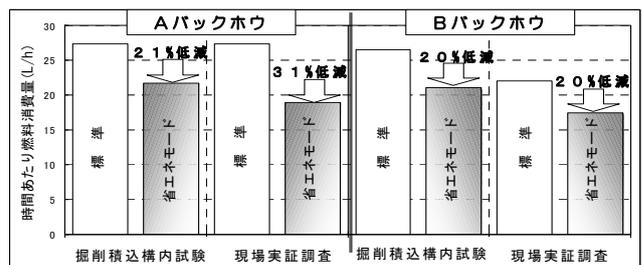


図11 調査機種の省エネモードの効果

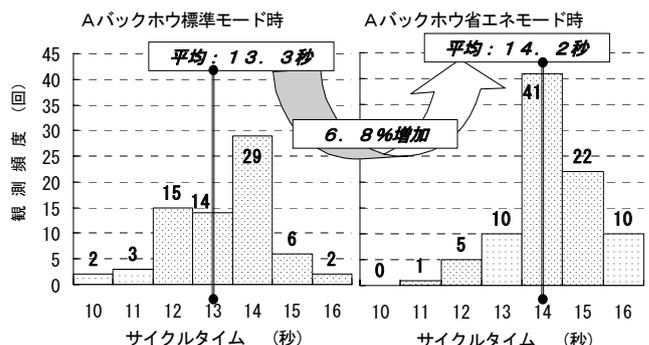


図12 省エネモード使用時のサイクルタイム

これまでの構内試験による省エネモード効果(平均値)				
項目規格	サイクルタイム	時間あたり作業量	時間あたり燃料消費量	作業量あたり燃料消費量
0.8m <sup>3</sup>	5%増	4%減	18%減	14%減
0.5m <sup>3</sup>	4%増	4%減	19%減	16%減

実現場での調査結果から、掘削積込作業試験で得られている省エネモードの効果が適用できる。



図13 省エネモードの使用効果

(割合としては7%程度) サイクルタイムが増加していた(図12)。ただし、時間的にはわずかであり、また現場での作業状況を観察したところ大きな作業能力の低下はみられず、標準モード作業日と省エネモード作業日の作業土量も大きな変化はみられなかった。

#### 4. 省エネモードの二酸化炭素排出量縮減効果

##### 4.1 省エネモードの燃料消費量低減効果

現場調査の結果、実現場における省エネモードの有効性は構内試験時と同等であることが確認できたことから、図13に示すようにこれまでの構内試験等で得られている数値を平均化し、0.5m<sup>3</sup>級と0.8m<sup>3</sup>級油圧ショベルの省エネモード使用時は15%の燃費低減効果があると評価することができるものと考えられる。

##### 4.2 省エネモードの二酸化炭素排出量縮減効果

油圧ショベルの省エネモード利用による燃費低減効果が施工現場のCO<sub>2</sub>排出量の縮減にどの程度影響するのか、平成16年度における中部地方整備局発注工事をモデルに試算した(試算は建設投資額と建設機械の稼働が比例関係にあると仮定している)。

試算の結果、平成16年度の中部地方整備局直轄工事において0.5m<sup>3</sup>級と0.8m<sup>3</sup>級の油圧ショベルが省エネモードをフル活用すれば、約80,000t-CO<sub>2</sub>の推定排出量からさらに約2,500t-CO<sub>2</sub>の排出量縮減が期待できる試算結果が得られた。これは中部地方整備局が実施する工事からの推定CO<sub>2</sub>総排出量の約3%にすぎないものの、年間走行距離10,000Kmのガソリンエンジン自家用車で考えた場合1,350台分の縮減量に相当するもので、CO<sub>2</sub>吸収のための必要森林面積に換算すればナゴヤド

##### ①中部地方整備局における排出量の推定値

中部地方整備局発注工事における排出量  

$$= ((\text{建設業の軽油消費量} \times \text{排出係数}) / \text{全国建設投資額}) \times \text{中部地方整備局事業費}$$

$$= (2,639 \times 2.64) / 325,231 \times 3,742 = 80,160$$

$$\approx 80,000 \text{ (t-CO}_2\text{)}$$

ここで、建設業の軽油消費量=2,639(千kL)

※「総合エネルギー統計」(平成12年度:資源エネルギー庁)による

排出係数=2.64(Kg-CO<sub>2</sub>/L)

※「地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン」(環境省)による

全国建設投資額=325,231(億円)

※国土交通省公表資料(平成12年度)による

中部地方整備局事業費=3,742(億円)

※中部地方整備局記者発表資料(平成16年度)による

##### ②上記排出量のうち油圧ショベルからの排出量推定値

油圧ショベルからの排出量

=中部地方整備局発注工事における排出量

×油圧ショベルの寄与率

=80,000×0.32=25,600≈25,000(t-CO<sub>2</sub>)

ただし、油圧ショベルの寄与率はその効果を確認済みの0.5m<sup>3</sup>級、0.8m<sup>3</sup>級の寄与率(図2)である。

##### ③油圧ショベル(2機種)省エネモードの100%活用効果

調査結果により33%の活用にすぎない油圧ショベルの省エネモードが100%活用されればその向上割合は67%となる。

したがって、

100%活用効果=25,000(t-CO<sub>2</sub>)×15%×67%

=2,512≈2,500(t-CO<sub>2</sub>)

ーム約125個相当の面積に相当するものでその効果は高いと考える。

#### 5. 省エネモードを活用した地球温暖化対策

##### 5.1 施工現場での積極的な活用に向けて

施工現場においては、作業性が落ちる等の理由から油圧ショベルの省エネモードが十分活用されていない現状があるが、「建設現場で今すぐできる環境対策」として省エネモードの積極的な使用は極めて有効であることがわかった。

今回の検討により省エネモード活用時の燃費低減効果を15%と定量化することができたことから、省エネモード運転時間あたりのCO<sub>2</sub>排出縮減量は次式で求めることができる。

$$\text{CO}_2 \text{ 削減量} = \frac{\text{燃料消費率} \times \text{稼働時間} \times \frac{0.15}{(1-0.15)} \times 2.64}{(\text{L/Kw-h}) \quad (\text{h}) \quad (\text{Kg-CO}_2/\text{L})}$$

本式における燃料消費率は、建設機械損料表などで公開されている値を使用すれば使用機械が特定できない施工計画段階においても稼働時間を計画するだけでCO<sub>2</sub>排出削減量を予測できる。

これまで、施工現場におけるCO<sub>2</sub>排出量削減効果は事前計画が難しくまた実施後の効果を求めるには施工単位ごと、施工機械ごとの細かな給油量管理が必要だったことと比べると、時間管理だけでCO<sub>2</sub>排出削減量が定量化できるので、今後工事発注機関においては技術提案などでの評価項目としての活用や発注仕様書での義務付け等に活用できるものと思われ、また、施工者にとっても事前に省エネモード活用による排出量削減効果予測等により環境に配慮した施工計画の立案や技術提案が可能となると考えられるなど活用メリットは大きいものがある。

なお、活用時には省エネモード活用時間管理が必要となるが、オペレータを時間管理の煩わしさから解放するためには、近年各社が開発を進めている「建設機械稼働管理システム」（各社呼称は異なる）の利用や既存のタコグラフ等を利用する方法等が考えられる。また、簡易な方法として省エネモードを選択するスイッチ等の電気信号を利用して回転灯の点滅させるなど外部表示を行うことによる確認も考えられる。これは施工中の現場の監督的役割の技術者が省エネモードの使用状況を低コストで常時確認できるだけでなく、発注者・施工者双方が施工現場の温暖化対策に積極的に取り組んでいることを社会的に容易にアピールするツールともなるもので、効果的な方法であると考えられる。

## 5. 2 地球温暖化対策の推進にむけて

京都議定書が2005年2月に発効し、建設施工分野におけるCO<sub>2</sub>排出量削減対策としては、今後燃費試験方法の確立による燃費性能を絶対値として評価することによる各種対策技術の推進や機械指定制度などの温暖化対策が進むと思われるが、解決すべき課題も多いと思われる。そこで各種制度制定までのつなぎ措置として、建設機械の省エネモードの機能を考慮した

機械の評価制度や各種の省エネ運転技術の向上に取り組むことは比較的短期間に実施できるだけでなく一定の効果も得られるため有効であると考えられる。

また、各機械メーカーにあっても、油圧ショベルの省エネモード機能搭載機をさらに増やしたりその効果を向上させるとともに他の建設機械への省エネモードや低燃費運転モード等の搭載を進めるとともに、施工者やオペレータ等エンドユーザーに対する積極的なPRを行うなどの取り組みを強化することも省エネモードの活用、ひいては建設施工分野における地球温暖化対策を推進する大きな原動力となるものと期待される。

## 6. おわりに

今回全機種ではないものの油圧ショベルの省エネモード使用効果を一定に評価できたことから、相対的な評価にはすぎないものの省エネモードを活用した運転を行うことがこれまでより一歩進んだ温暖化対策に寄与できることになるものとする。今後可能であれば今回直接確認できていない規格についての効果の評価や現場での実績の積み重ねによるCO<sub>2</sub>削減効果評価方法の精度向上に取り組みたい。

建設施工分野における地球温暖化対策は、建設機械に係る対策以外にも多様な手法が考えられるが、建設施工現場の第一線にたつ発注者・施工者双方の技術者におかれては、まずは「どんな現場でも1台は稼働している油圧ショベル」を利用した新たな投資が不要で手軽に実施できる施工現場の温暖化対策として、省エネモードの活用に積極的に取り組んでいただくとともに、地球温暖化対策の一手法として広く普及するなど、本報告が建設施工における地球温暖化対策推進の一助となれば幸いである。

最後に、中部地方整備局各事務所並びに各施工現場の関係者の皆さま及び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。

## 参考文献

- 1) 「建設施工における地球温暖化対策の手引き」、(社)日本建設機械化協会 (平成15年7月)
- 2) 「地球温暖化対策省エネ運転マニュアル」、(社)日本建設機械化協会 (平成15年6月)

### 3. 吸塵式煙突除染システムの開発

銭高組 技術研究所:○岩崎 則夫  
新東サーブラスト(株) 開発部:鈴木 康之、六反田 等

#### 1. はじめに

廃棄物焼却施設の解体工事は、ダイオキシン類のばく露を伴う危険な作業である。

そのため厚生労働省労働基準局から「廃棄物焼却施設内作業におけるダイオキシン類によるばく露防止対策要綱」<sup>1)</sup>が平成13年に公布され、解体作業前に内部に付着したダイオキシン類の汚染物を除去(以下、除染という)することが義務づけられた。

現状、この除染は、主に高圧ジェット水洗浄でこれをロボット又は、人に依るハンドリングにより除染する方法が用いられているが、汚染水が大量に生じるため、処理費を含めた解体費用が高価になっている。

本開発の吸塵式煙突除染システムは、汚染物を増量させない環境負荷低減型の工法であって、除染ヘッドのフード内に構成した研磨ブラシで汚染物を掻き落とし、それらを吸塵・密閉輸送してプレダスターで汚染物を袋詰めするものである。また、小型CCDカメラを搭載しており、管理区域外から作業工程を確認しながら安全にシステムを制御できる。

本報では、吸塵式煙突除染システムの機能、施工能力、作業環境改善等について紹介する。

#### 2. 開発の目的

焼却施設の解体工事は、付着または含浸しているダイオキシン類を拡散させないことであり、汚染物を増量させないことが重要である。

現状、高圧水やサンドブラストによる除染方法がルールとなり常用されている。また、これらの方法より改善を図ったドライアイスブラストやカッター切削方式などが提案されている。

これらによる除染作業は、ダイオキシン類汚染物が増量すること、また、ダイオキシン類が作業環境を拡散する問題がある。

そこで、本開発のターゲットはダイオキシン類汚染物を『拡散』『増量』させないことにして、次の目標を設定した。

- ①汚染物の除去から回収までクローズドシステムとする。
- ②汚染物が増量しない除染方法とする。

#### 3. システムの概要

本除染システム構成の概要を図1に示す。

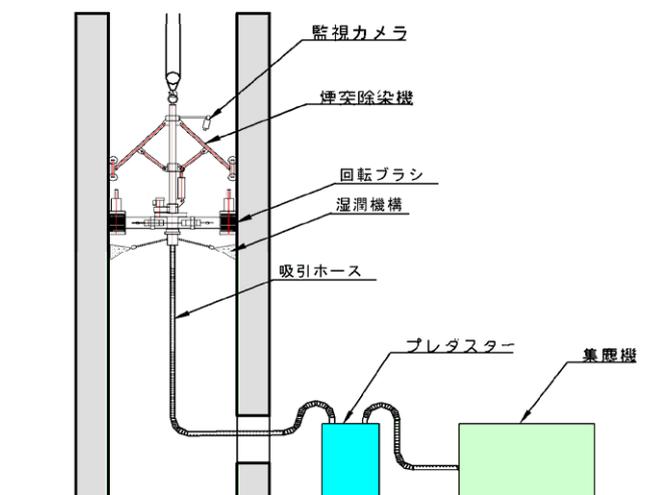


図1 吸塵式煙突除染システム構成の概要

本除染システムは、上部に煙突の内面を突っ張る3本の把持アームと下部に内面を所定圧力で追従させる回転アームに2対の除染機で取付けて構成されている。また、上方に内壁の障害物や除染程度などを確認する監視カメラを搭載し、下方に粉塵の飛散を抑止する噴霧機構を設置してある。さらに、除染ヘッドのフードからプレダスターを経由して集塵機まで、吸引ホースが接続してある。除染ヘッドのフード内に構成された研磨ブラシで汚染物を掻き落とし、その汚染物を吸引ホースで吸塵・

密閉輸送してプレダスターで汚染物を分離・回収して袋詰めする。

### 3-1 システムの仕様

#### 1) 対象煙突

内径:  $\phi$  1500~2500mm

なお、把持アームと回転アームを組替えることで対象径は、最小  $\phi$  900mm、最大  $\phi$  3500mmまで可能である。

#### 2) 除染装置本体

①装置高さ: 約2780mm

②重量 : 約500kg

③研磨ブラシ(2対設置)

・サイズ:  $\phi$  250×300mm幅

・回転数: 100~200rpm

・押付力: 10~20kg

④公転数 : 1~5rpm (インバータ制御)

⑤把持機構: 内径  $\phi$  1500~2500mmに対応する

・把持アームを組換えて、内径  $\phi$  900~3500mmに対応可能となる。

研磨ブラシは、煙突の内面が鋼板製の場合に用い、内面の材質がレンガやキャスタブルの時は、回転打撃式の除染ヘッドに組替えて、表層部を研削してダイオキシン類が含浸している部位を削り取ることもできる。

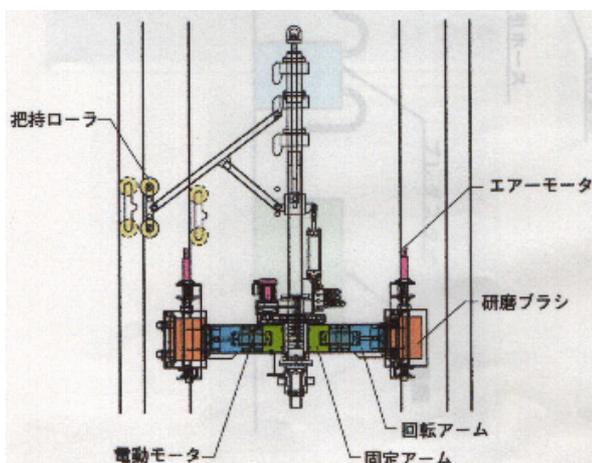


図2 除染装置本体（側面）

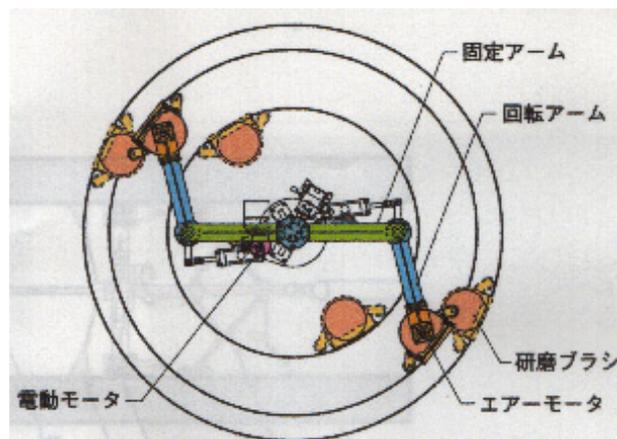


図3 除染装置本体（平面）

### 3-2 粉塵の飛散抑止

本システムは、粉塵の飛散抑止の噴霧機構が設置されている。一例として用いる粉塵飛散抑止剤の特長を次に示す。

#### 1) 一般性状

・外観: 微濁液状

・比重: 1.01

・pH : 6~7

・イオン性: 弱アニオン

#### 2) 特長

浸透性: アニオン性界面活性剤の働きにより、施工面への水分の高い浸透性を有する。

結着性: 機能性高分子の持つ高い結着性が施工面への薬剤の長時間保持と作業性の向上に寄与する。

保水性: 保湿剤の効果により高い保水性を長時間持続し、噴霧後の水分蒸発を抑制する。

### 3-3 吸塵効果

本システムの特長の一つは、ダイオキシン類を拡散させない吸塵式除染装置を用いている点である。所定の集塵仕様での検証結果を表1に示す。

集塵仕様

①吸引風量: 10 m<sup>3</sup>/min

②真空度 : 9.8 kPa

除去装置の除染ヘッドから2m離れた位置で、ピエゾバランサー粉塵計により計測した。

表1 粉塵量の測定

粉塵飛散抑止 処理の有・無	除去装置 運転の有・無	集塵機 運転の有・無	測定値 :mg/m <sup>3</sup>	摘 要
無	有	有	0.02~0.06	
		無	0.10~2.91	粉塵が目視可能 (粉塵煙となる)
	無	無	0.04~0.08	
有	有	有	0.02~0.06	
		無	0.06~0.55	

粉塵飛散抑止剤の有無と除去装置・集塵機の運転の有無による粉塵量の飛散の評価である。

粉塵飛散抑止剤無、除去装置・集塵機の運転無の0.04~0.08mg/m<sup>3</sup>比べ、粉塵飛散抑止剤を使用すると粉塵量は少なく、粉塵飛散抑止剤の効果はある。また、集塵機を運転させると同様に粉塵量は、少なくなることから吸塵式は有効である。

#### 4. 検証試験

内径φ2200mm×長さ50000mm鋼管を供試体に用いた。内面にセメントミルク(60%)を塗布して、諸条件でのセメントミルクの取れ具合を除染の程度として評価した。

吸塵式除染装置の外観を写真1、および検証試験の全景を写真2に示す。



写真1 吸塵式除染装置外観



写真2 検証試験全景

本除染システム・装置の作動を確認した後、機能・能力・作業環境について調査し、当初、設定した目標値であることを確認した。

機能として

- ①除染程度
- ②把持機構と把持圧
- ③除染ヘッドの追従性と与圧
- ④除染可能範囲

能力として

- ①昇降速度
- ②研磨ブラシの回転数

作業環境として

- ①粉塵濃度
- ②騒音

などが項目である。

検証試験の状況を写真3に示す。



写真3 検証試験状況

また、吸塵ダクトホースの集合部を写真4に示す。  
(2対の除染ヘッドからのダクト集合部)



写真4 吸塵ダクト

## 5. 本システムの除染フロー

### 1) 除染前準備

- ・架設電源の設置
- ・電気配線接続
- ・写真撮影

### 2) 残留灰回収、清掃

- ・粉塵飛散抑止の湿潤処理と飛散防止対策
- ・集塵機によるクローズドの残留灰の吸引回収
- ・回収した汚染物は袋詰にして処理

### 3) 除染

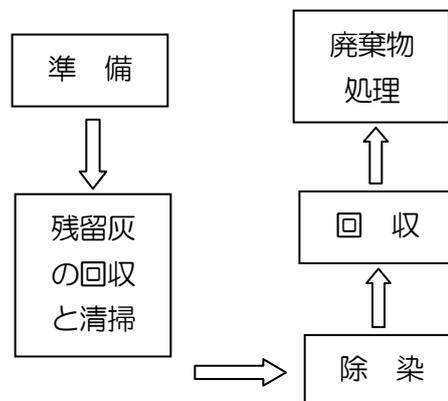
- ・除染装置及び昇降装置をクレーンにて煙突の上部に設置
- ・煙突の上端部に蓋をし、集塵機の作動で煙突内を負圧
- ・除染装置を下降し、制御ケーブル、吸塵ケーブルを接続
- ・粉塵飛散抑制機構により湿潤処理をしながら除染ヘッドで除染

### 4) 回収

- ・除染と同時にクローズドにより吸引回収

### 5) 廃棄物処理

- ・廃棄物処理法に基づき適正に管理して処分



### 5-1 本システムの特長

- 1) 汚染物の除去は、吸塵式の機械装置を用いる。
- 2) 機械により確実な除染ができる。
- 3) 粉塵の飛散がなく、環境が保全される。
- 4) 汚染物の除去から回収・袋詰めまでクローズド方式である。
- 5) 汚染物が増量しない。
- 6) CCDカメラにより遠隔操作し、除染の確認ができる。

### 6. おわりに

焼却施設の解体工事の基本は、付着しているダイオキシン類を『拡散』しないことであり、汚染物の除染手段は、汚染物を『増量』させない方法が望ましい。

本開発のコンセプトは、

- ①汚染物の除去から回収までクローズドシステム
- ②汚染物が増量しない除染方法

として吸塵式除染システムを紹介した。

今後、実用機は、フィールドにて実証を重ねて改善・改良をはかり、除染が高品質で、安全、且つ、処理能力を高めていく所存である。

### 参考文献

- 1) 厚生労働省労働基準局安全衛生部化学物質調査課：  
廃棄物焼却施設解体作業マニュアル，(社)日本保安用品協会，2001.6

## 4. 建設汚泥の新しい再資源化処理工法 — 繊維質固化処理土工法と生成土の強度特性 —

東北大学大学院環境科学研究科：高橋 弘  
（株）森環境技術研究所：○森 雅人

### 1. はじめに

建設汚泥は、建設工事に伴って発生する掘削汚泥や微細な泥状土などであり、そのままでは盛土などに直接流用できない。従って、年間800万トン程度の建設汚泥が排出されているにもかかわらず、建設汚泥のリサイクル率は低く、ごく一部再利用されるものを除き、大部分は産業廃棄物である「汚泥」として中間処理施設で脱水処理を施すか、あるいは直接最終処分場に持ち込まれている。しかしながら、処分場の不足・遠隔化は深刻な問題であり、輸送コストの負担から建設汚泥の不法投棄が後を絶たず、地球環境への汚濁負荷の影響が大きな問題となっており、建設汚泥の有効利用が望まれているのが現状である。

これまでの建設汚泥の処理法としては、天日乾燥、脱水処理、セメント系固化材による固化処理などが挙げられる。しかし、天日乾燥では仮置きの場合と処理に長時間を要し、また脱水処理では大きな脱水施設が必要であるとともに、濁水処理の問題などが依然として残る。固化処理工法はセメント系固化材を建設汚泥に混合させ、固化する工法であるが、本工法により生成される土砂（以下、固化処理土と記す）は、コンクリートのように硬くてもろい性質がある。例えば、泥水とセメント系固化材を混合し流動化させ、まだ固まらないコンクリートのようにポンプなどで流し込んで埋戻しなどの施工を行う「流動化処理土工法<sup>1)</sup>」では、生成される土砂（固化処理土）は、一軸圧縮試験における破壊ひずみが通常土より小さく、品質改良が十分とは言えず、盛土材としての用途に適さない場合が多々ある。例えば村田<sup>2)</sup>は、「流動化処理土工法の弱点は、処理土に粘り強さが無く、外力が加わると小さなひずみで破壊に至ることである」と述べている。

さらに固化処理土は乾湿繰り返しによる劣化が激しいと言われている<sup>3)4)</sup>。そのため、固化処理土を盛土材などとして使用する場合には、外部に露出しないように固化処理土を山土などで被覆する必要があると指摘されている<sup>4)</sup>。つまり、固化処理土は品質改良が十分であるとは言えない。

そこで著者らは、十分な品質特性を有する盛土材料として汚泥の再資源化をはかるために、建設汚泥に繊

維質物質である古紙破砕物と高分子系改良剤を添加し、高含水比泥土を再資源化する技術を開発した<sup>5)</sup>。本工法では、汚泥に古紙を投入し、古紙に自由水の大部分を吸水させるため、高含水比泥土に対しても大量のセメント系固化材を添加する必要がなく、かつ高分子系改良剤の添加量も少なくて済むため処理費の大幅な低減につながるとともに、処理土の内部に繊維質を含むため、破壊ひずみの大きい粘り強い土砂（以下、繊維質固化処理土と記す）の生成が可能になる。

本論文では、新しい処理工法（以下、繊維質固化処理土工法と記す）の概要と繊維質固化処理土の強度特性ならびに実際の施工例について詳述するとともに、今後の展開について述べることにする。

### 2. 繊維質固化処理土工法の原理

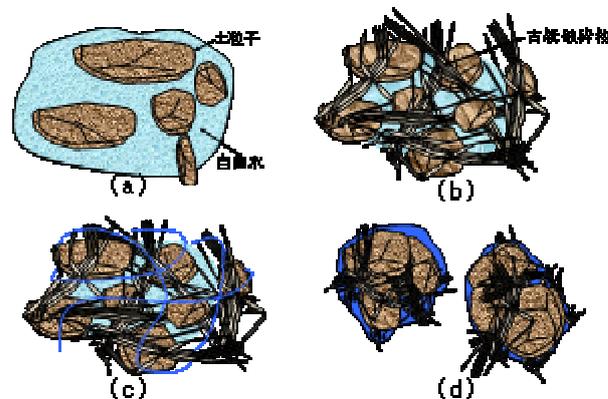


図1 繊維質固化処理土工法の原理

繊維質固化処理土工法の原理を簡単に記述すると以下ようになる。

- ①高含水比泥土は、図1(a)に示されるように土粒子が自由水の中で自由に動き回れる状態であるため、若干の降伏応力を持っているが、流体としての挙動を示す。このため高含水比泥土の運搬はパイプラインかバキュームカー等によらなければならない。
- ②この状態の高含水比泥土に吸水性の高い新聞の古紙のような繊維質物質を混入すると、図1(b)に示すように土粒子の周りの自由水が繊維質物質に吸水され、

見かけの含水比が低下する。繊維質物質の添加量は含水比に応じて増減させる。

- ③さらに高分子系改良剤を添加し攪拌すると、図1(c)に示すように水溶性高分子が溶解し、土粒子の表面に吸着する。土粒子間の架橋・吸着効果により団粒化構造の中に自由水を封じ込め、流動性を失わせ団粒状態となる。
- ④最後に助剤を混合し、攪拌機により泥土を攪拌してせん断を与えると、図1(d)に示すように土粒子が団粒化して疎水性の高い土砂が生成される。

処理土を植生土壌として再利用する場合、セメント系固化材を混入する必要はないが、盛土材の利用としてある程度の強度を必要とする場合は、目的とする強度に応じて、さらに必要量のセメント系固化材を添加する。

以上の工程により、高含水比泥土が繊維質固化処理土として再資源化される。

### 3. 繊維質固化処理土の安全性

本工法で使用する高分子系改良剤および助剤に重金属等有害物質は含まれておらず、地中の微生物により完全に分解されてしまうので、地球環境に負荷を与えないことが既に確認されている<sup>6)</sup>。また古紙に使用されているインキも、近年では、植物油を用いた環境に優しい「エコインキ」が開発され、既に使用されており<sup>7)</sup>、このインキも毒性が無い。古紙はほとんどがセルロースから構成されており、生物学的に難分解性物質である。セルロースを分解する生物は一般的に糸状菌であるが、①セメント系固化材の影響により土砂内部は高アルカリ性を示し、糸状菌等が生育できない<sup>8)</sup>、②土砂に含まれる粘土鉱物の大きさは $0.02\mu\text{m}\sim 1.00\mu\text{m}$ であり<sup>9)</sup>、繊維質固化処理土のセメント系固化材の水和によるセメンティング効果とあいまって間隙の大きさはそれ以下であると考えられるが、糸状菌胞子のうの大きさは $2\sim 10\mu\text{m}$ <sup>8)</sup>であるので、雨水とともに菌が侵入する可能性は極めて低いなどの理由から、繊維質固化処理土内部の古紙はほとんど劣化しないと推察される。従って、本研究で提案する繊維質固化処理土は、定性的ではあるが、地球環境に対して安全な土砂と言える。

### 4. 繊維質固化処理土の強度特性

#### 4.1 圧縮強度

初めに試験に使用する供試体を作成した。供試体の

作成には、模擬泥水を使用した。作泥方法は、粘土とシルトを40:60(乾燥質量比)で混合し、それに加水調整して含水比105%および150%の汚泥を作成した。供試体を作成は、「建設汚泥の高度処理・利用技術の開発(盛土グループ)共同研究最終報告書 建設汚泥改良土の耐久性<sup>10)</sup>」に準じた方法を用いた、その概要は以下に示すとおりである。

- ①粘土とシルトを40:60(乾燥質量比)で混合し、加水調整して含水比を調整する。
- ②繊維質固化処理土の作成には、含水比を調整した汚泥に古紙破砕物、高分子系改良剤および助剤を加え、攪拌・混合する。さらに所定のセメント系固化材を加え、混合する。固化処理土の作成には、泥水にセメント系固化材のみを加え、攪拌・混合する。
- ③初期養生として、上述の処理土を容器に入れて密封し、 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ で3日間静置する。
- ④固化処理土に対しては、初期養生後、処理土をときほぐし、その後、供試体を作成する。供試体作成には、直径5cm、高さ10cmのモールド(供試体作製容器)を使用した。一軸圧縮試験に使用する供試体の寸法は直径5cm、高さ10cmとし、また圧裂引張試験に使用する供試体の寸法は直径5cm、厚さ2.5cmとした。
- ⑤供試体から水分が蒸発しないようにモールドを密封材で被覆し、 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ で28日間養生する。

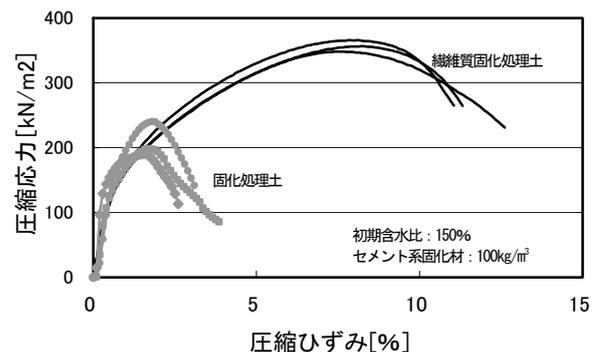
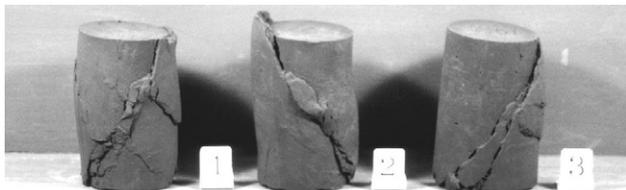


図2 一軸圧縮試験結果の一例

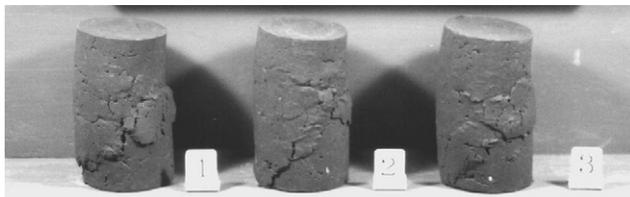
作成された供試体を材料試験機にセットし、一軸圧縮試験を実施した。図2に一軸圧縮試験の結果の一例を示す。図2の縦軸および横軸は、それぞれ圧縮応力および圧縮ひずみを示している。固化処理土の場合、荷重を増加させていくと圧縮ひずみも大きくなるが、1~2%の圧縮ひずみで圧縮応力は最大値を示し、破壊に至っていることが分かる。これに対して、繊維質固

化処理土の場合、破壊ひずみは7~8%と大きく、また破壊後も圧縮応力が急激に減少することなく、残留強度も大きいことが分かる。つまり、繊維質固化処理土は、セメント系固化材を用いた従来の固化処理土に比べて破壊に至るまでのひずみ量が大きく、残留強度が大きく粘り強い性質を示すことが大きな特徴である<sup>5)</sup>。

図3に試験後の供試体の破壊の様子を示す。固化処理土は明確な破壊面が現れており、岩石やコンクリートの破壊形態とよく似た形状を示している。これに対して繊維質固化処理土の場合、明確な破壊面が現れておらず、全体的に膨らんだいわゆる樽型変形を示している。これは、内部に繊維質物質を含むため、土粒子と繊維質が複雑に絡み合い、破壊を生じ難くしているのと同時に繊維質を通して応力が分散されるためであると考えられる。



固化処理土の破壊の様子



繊維質固化処理土の破壊の様子

図3 圧縮試験後の供試体の様子

#### 4.2 引張強度

図4に圧裂引張試験の結果の一例を示す。圧裂引張試験は、図5にその概略を示すように、供試体の直径方向に圧縮荷重をかけ、その荷重により供試体が左右に引っ張られる時の強度を求めるものである。図4の縦軸は圧縮荷重を、横軸は圧縮方向のひずみ量を示す。この図に示されるように、引張強度も圧縮強度と同じ傾向を示している。すなわち、固化処理土は小さなひずみで破壊に至るが、繊維質固化処理土は破壊に至るまでのひずみ量が大きいことが分かる。すなわち、繊維質固化処理土は従来の固化処理土に比べて、外部からの荷重に対して大きな変形に耐え得ることを示している。

図6に試験後の供試体の破壊の様子を示す。圧裂引張試験の場合も圧縮試験の場合と同様に固化処理土は

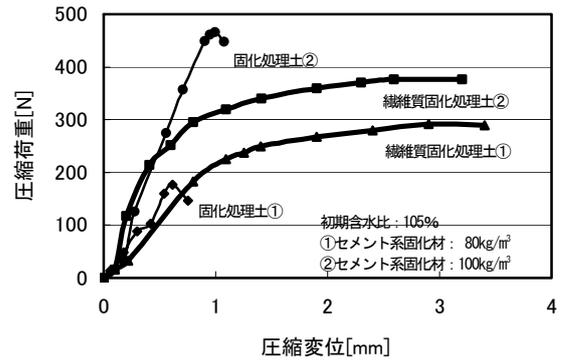


図4 圧裂引張試験結果の一例

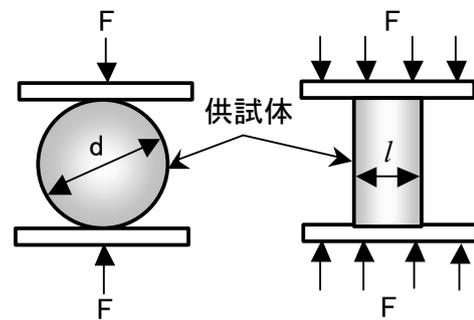


図5 圧裂引張試験の概



固化処理土の破壊の様子



繊維質固化処理土の破壊の様子

図6 引張試験後の供試体の様子

明確な破壊面が観察され、また供試体もほぼ円形を保っていることから、小さな変形で破壊に至ってしまったことが分かる。これに対して繊維質固化処理土は明確な破壊面が見られず、また全体的に押しつぶされている。これはこのような大きな変形が生じるまで破壊に至っていないことを示すものであり、繊維質固化処理土が従来の固化処理土に比べて、いかに粘り強い性質を示すかが分かる。

### 4.3 乾湿繰り返し試験における耐久性

セメント系固化材による従来の固化処理土は乾湿繰り返しにより劣化することが報告されている<sup>3)4)</sup>。すなわち、固化処理土は乾燥過程において収縮クラックが生じ、乾湿のサイクル数が増加するにつれて塊状の崩壊が発生し、一軸圧縮強度も減少する。そのため、固化処理土を実際に使用する場合は、乾湿の影響をなるべく受けないように、外部に暴露しないように山土などで被覆すべきであると報告されている。繊維質固化処理土に対しても乾湿繰り返しによる耐久性を評価するために、「建設汚泥の高度処理・利用技術の開発<sup>10)</sup>」に準拠して乾湿繰り返し試験を実施した。なお、この際、比較のため固化処理土も同時に作成し、乾湿繰り返し試験を実施した。試験では、40℃炉乾燥2日間、20℃水浸1日間の合計3日間を1サイクルとして10サイクル繰り返し、所定のサイクル毎に一軸圧縮試験を行い、一軸圧縮強度の変化を調べた。

図7にサイクル数と一軸圧縮強度との関係を示す。図中の▲および■印は固化処理土の結果を、また○、△、◇、□印は繊維質固化処理土の結果を示している。乾湿繰り返し実験を行うに当たり、初めに、固化処理土および繊維質固化処理土ともに12本の供試体を作成した。図中の値は、(一軸圧縮試験に供した供試体の数) / (一軸圧縮試験を行うに当たり現存していた供試体の数)を示している。すなわち、3/12とは、0サイクル時に12本の供試体が存在し、そのうち3本を使用して一軸圧縮試験を行い、それらの平均値を図中にプロットしたことを意味する。つまり、繊維質固化処理土の場合、一軸圧縮試験には常に3本の供試体が使用され、分母の値も常に3ずつ減少しており、これは10サイクルを通して常に供試体が崩壊せずに形状を保ち、一軸圧縮試験に供し得たことを示す。固化処理土の値は、以下のような試験状況であったことを示している。すなわち、初期含水比150%の固化処理土の場合、2サイクル終了した時点で7本しか供試体が現存せず、残り2回の試験で3本ずつ使用することを考え、1本のみ一軸圧縮試験に使用した。残りの6本でさらに乾湿繰り返し試験を続けたが、6サイクル終了時までには1本が崩壊し、5本のみ現存したため、最後の試験(10サイクル終了時)に3本使用することを考え、2本のみ一軸圧縮試験に使用した。10サイクル終了時には、1本のみ残っていたので、この1本を用いて一軸圧縮試験を実施した。初期含水比105%の場合、2サイクル終了までに11本の供試体が崩壊し、2サイクル終了した時点で

形を留めていた供試体は1本であり、その1本を用いて一軸圧縮試験を実施したため、この時点で供試体が無くなり、以後、乾湿繰り返し試験を継続することは不可能であった。前述したように、過去の研究において固化処理土は乾湿繰り返しの影響を受け劣化すると報告されているが、本実験でも従来の結果と同様の結果が得られた。2サイクル終了時の強度が0サイクル終了時の強度よりも増加しているが、この原因としては、セメント系固化材による水和反応の進展も一因と考えられるが、12本中11本の供試体が崩壊し、1本の供試体だけが残ったことを考えると、作成した供試体自体に強度のバラツキが若干あり、強度の最も強い1本のみが最後まで残ったためとも推察される。しかし、いずれにせよ、固化処理土は乾湿繰り返しの影響を大きく受け、劣化することが再確認された。

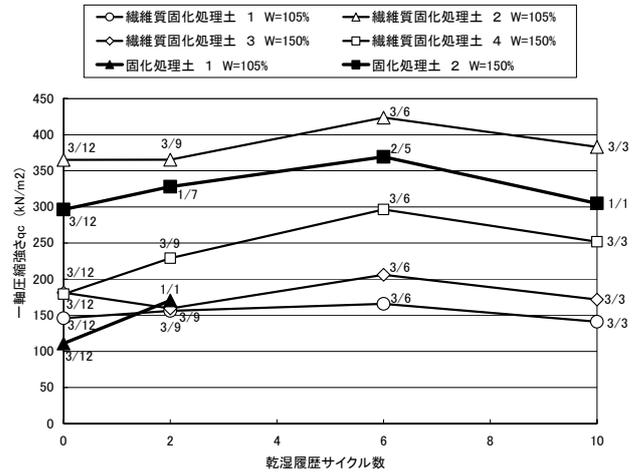


図7 乾湿繰り返し試験におけるサイクル数と一軸圧縮強度との関係

一方、繊維質固化処理土は、乾湿繰り返しのサイクル数が増加してもほとんど劣化せず、また一軸圧縮強度の低下も見られず、10サイクル終了時においても0サイクル時の強度とほぼ同程度の強度を有していることが分かる。また10サイクル時の値は、3本の供試体を用いて測定しており、繊維質固化処理土は劣化せず、乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示すことが実験的に確認された。図8に乾湿繰り返し試験終了後の供試体の写真を示す。先に述べたように含水比105%の固化処理土は2サイクルまでに9本の供試体のうち8本が崩壊した。

繊維質固化処理土は10サイクル終了後も供試体にクラックの発生や劣化はほとんど見られず、一軸圧縮強度も初期の強度を維持しており、強度の減少も見られ

ない。すなわち、繊維質固化処理土は乾湿繰り返しに強く、ほとんど劣化しないことが確認された。このことは、固化処理土のように使用箇所を限定する必要がないことを意味する。



2 サイクル終了後の固化処理土



10 サイクル終了後の繊維質固化処理土

図8 乾湿繰り返し試験終了後の供試体の様子  
(初期含水比はともに105%, セメント系固化材添加量は100kg/m<sup>3</sup>)

#### 4.4 凍結融解試験における耐久性

生成土を寒冷地において盛土として利用するためには、凍結融解に対する耐久性についても把握しておく必要がある。つまり、寒冷な地域では冬季間、土中の水分が凍結する。水は凍結によって体積が膨張するため、凍結融解を繰り返すことにより土粒子間結合力が低下し、土砂の強度が下がる可能性がある。しかしながら、凍結融解による繊維質固化処理土の耐久性については明らかになっていない。そこで繊維質固化処理土の凍結融解による耐久性について実験的に検討した。供試体の作成手順は上述した方法と同じである。本実験では供試体を-21℃で12時間凍結した後、+21℃で12時間融解を1サイクルとすることで1日の凍結融解のモデルとし、0, 1, 3, 5, 7, 15 サイクルごとに一軸圧縮試験を行った。また、比較のために従来工法で作成した固化処理土でも同様の試験を行った。

図9に凍結融解のサイクル数と一軸圧縮強度との関係を、また図10に凍結融解のサイクル数と破壊ひずみ

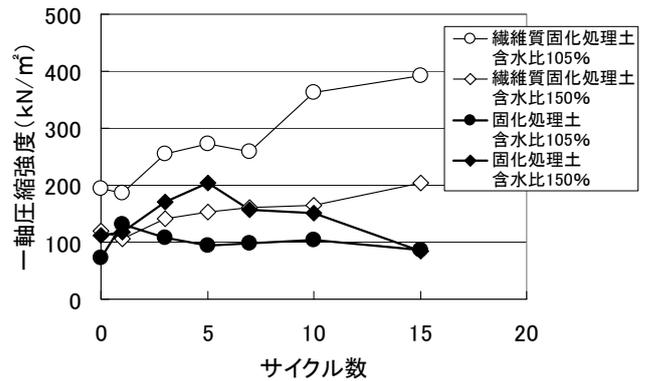


図9 凍結融解試験におけるサイクル数と一軸圧縮強度との関係

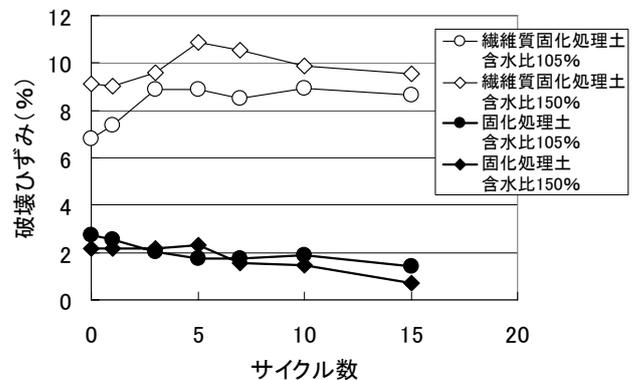


図10 凍結融解試験におけるサイクル数と破壊ひずみとの関係

ひずみとの関係を示す。繊維質固化処理土は凍結融解による劣化はほとんど見られず、強度はサイクル数の増加とともに増大している。これは、今回の実験では養生期間を7日間としたため、凍結融解試験中もセメント系固化剤の水和反応が進行したためであると考えられる。固化処理土も同じ7日間の養生期間としたので、同様にセメント系固化剤の水和反応が進行していると判断でき、劣化がなければ繊維質固化処理土と同様にサイクル数の増加とともに強度も増大するはずであるが、固化処理土の強度は3~5サイクル以降は徐々に減少し、15サイクル終了時には、初期強度と同等あるいはそれ以下にまで減少している。これは、明らかに固化処理土が凍結融解の影響を受けて劣化したためである。つまり、凍結によって固化処理土の内部に存在する水の体積が増大し、その結果、土粒子間結合力が低下したと考えられる。この土粒子間結合力は、破壊ひずみと密接な関係があると考えられるが、図10の結果

は上述の考察と同様の傾向を示している。

以上のことより、繊維質固化処理土の土粒子間結合力は凍結融解を繰り返しても低下することなく、その結果、繊維質固化処理土は凍結融解に対して高い耐久性を示すことが確かめられた。

## 5. 施工事例

### 5.1 流域下水道 尾花沢大石田幹線推進工事のポンプ場盛土利用(山形県発注, 図 11)<sup>11)</sup>

最上川を横断する推進工事と中継ポンプ場工事から発生した自硬性汚泥と非自硬性汚泥全量を再利用した事例で、①繊維質固化処理土は粘り強く、高耐久性であることから、田圃との境にコンクリート擁壁を作らない、②無代で盛土材として再利用、③自硬性汚泥の脱水・運搬・管理型最終処分場への処理費用との差額、④非自硬性汚泥の処理費用との差額が生じたため、4,000万円以上のコスト削減を図ることができた。



図 11 繊維質固化処理土工法における施工の様子(左のバックホウがミキサーを装着し攪拌している。右のバックホウは、出来上がった処理土を脇に仮置きする。)

### 5.2 高含水比土による盛土施工に関する技術 浜尾遊水地関連の築堤工事(国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所発注, 図 12)

国土交通省東北地方整備局では、民間会社等が保有する優れた新技術や特許技術等を東北地方整備局発注工事に活用し、コスト削減やリサイクル等を推進するため、平成 14 年度に 4 つの技術を募集した。その内の 1 つである「高含水比土による盛土施工に関する技術」に、繊維質固化処理土工法(応募時の名前はボンテラン工法)が採用され、福島県須賀川市の浜尾遊水地の工事現場で施工が行われた。本工事は、阿武隈川流域の浜尾遊水地および下流地区の洪水被害を軽減するため、

期間・経済性・実現性を勘案しつつ、遊水地内を掘削するとともに、この掘削土を利用して遊水地関連の堤防を整備し、貯水量を確保するものであり、河川等における高含水比土を効率的かつ経済的に築堤施工する技術が求められた。平成 14 年度の工事では、ボンテラン工法により 3,000m<sup>3</sup> が処理され、ボンテラン土を用いて築堤工事が行われたが、がり侵食を全く受けず、クラックの発生も見られないことから、繊維質固化処理土の高耐久性が改めて検証されたとともに、現場適用性にも優れていることが確認された。



図 12 浜尾遊水地における施工の様子(写真右のバックホウで高含水比原泥を掘削し、ピットに原泥を入れている。写真左のバックホウがミキサーを装着し、攪拌している。)

### 5.3 仙台東部共同溝工事(国土交通省東北地方整備局仙台河川国道事務所発注, 図 13)

当工事は、仙台市宮城野区小田原地内から青葉区本町間の一般国道 45 道路下にシールド工法により、共同溝 1.37km を構築するものである。当シールドは宮城野区小田原地内に発進立坑、発進設備を設置し、国道 45 号道路下を掘進するが、発進立坑の構築において地中連続壁を造成する際、セメントミルクを使用することから自硬性汚泥が発生する。そこで、建設現場におけるゼロエミッションを目指し、汚泥処理に繊維質固化処理土工法が採用された。当現場では、夜間の立坑掘進工事から排出される汚泥をピットに貯え、昼間に繊維質固化処理を行うが、当現場は仙台市中心部に近い工事現場であるため、限られた敷地内に生成された土砂を仮置きするだけのスペースの余裕はない。処理が終了する時点でダンプトラックが待機しており、処理後、直ちにダンプに荷積みし、4 号線バイパス拡幅工事現場に運搬する方式が採用されており、完全なゼロ

エミッションを実現した。

当現場は、限られた敷地内に効率的に重機が配置され、また常に振動・騒音を計測し、低振動・低騒音施工に細心の注意を払いながら周辺環境にも考慮し、かつ廃棄物を出さないゼロエミッションを実現しており、これからの環境調和型建設現場の見本とも言うべき現場になっている。



図 13 仙台東部共同溝工事現場の全景

(本現場は、先の 2 つの施工現場と異なり、市街地中心部近くに位置し、限られた作業面積しか取れないため、重機が効率良く整然と配置されている。赤丸印部が繊維質固化処理土工法の実施場所。)

## 6. 今後の展開

### 6.1 軽量盛土材としての利用

繊維質固化処理土工法により生成される土砂の特徴の 1 つに「軽量性」がある。生成土を軽量盛土材と考えると、大規模埋め立て工事における軽量盛土材としての利用、地すべり危険地域における地盤改良、建造物の裏込め材など多くの適用箇所がある。構造物に作用する土圧は土の密度に比例するので、建造物の裏込め材に軽量盛土材を用いることができれば、構造物自体を小さくすることができ、その結果、コスト削減に繋がる。大規模埋め立て工事などでは、埋め立てる土砂の自重で地盤沈下が生じてしまうことから、かなりのコストをかけて軽量盛土材を購入・作成しているが、繊維質固化処理土工法を用いれば、今までは廃棄物として捨てていた建設汚泥から安価に軽量盛土材を生成することができる。今後、軽量盛土材のとしての活用実績を期待したい。

### 6.2 浄水汚泥を用いた屋上緑化用人工軽量植生基盤材

## の作成

近年、ヒートアイランド対策や緑の持つ癒しの効果などからビル・マンション・病院などで屋上緑化のニーズが増えてきている。屋上緑化工事を行う場合、建物の屋上に植生基盤材を敷設する必要があるが、この植生基盤材に求められる重要な性質に「軽量性」と「保水性」がある。繊維質固化処理土は軽量であることを先に述べたが、建設汚泥を用いて繊維質固化処理土を生成した場合、処理土を形成している土粒子の密度が大きいので、湿潤時比重 0.6 以下という超軽量の土砂を生成することは難しい。一方、浄水汚泥は、元来、水中に浮遊懸濁していた粒子を凝集・沈殿させたものであるため、土粒子そのものの密度が建設汚泥の土粒子に比べてかなり小さいことから、超軽量の植生基盤材を生成することが可能であると考えられる。そこで、著者らは浄水汚泥に繊維質固化処理土工法を適用し、極めて軽量の植生基盤材を作成した。生成された基盤材は、計測の結果、湿潤時比重が 0.68 であり、超軽量の定義には若干及ばないものの、ほぼ超軽量であり、かつ他の人工軽量植生基盤材に比べて 2~3 倍という極めて高い保水性・保肥性を有することが確認された。図 14 は、浄水汚泥を用いて作成した植生基盤材により屋上緑化を行った一例であり、植生基盤材として高い評価を受けている。東京都のような大都市の浄水場では大量の汚泥が発生することから、例えば、浄水場から発生する汚泥を最終処分場で処理する際にかかっていた経費をそのまま使用して、PFI 事業等自らが軽量人工植生基盤材を生成したとすると、緑化工事費用の大半を占める軽量土壌の購入費が不要になる。この場合、浄水場の大幅な経費負担軽減にはならないが、軽量土壌を購入する必要がないので、極めて安価に緑化工事を行うことができ、ヒートアイランド現象の緩和や住民の税金の軽減などにも繋がると予想される。今後、このようなシステム作りを目指したいと考えている。



図 14 屋上緑化の一例(大分市役所本庁舎屋上緑化)

### 6.3 赤土流出による海洋生物被害の軽減対策

沖縄県では降雨により赤土がガリ侵食を受けて海洋に流出し、珊瑚などの海洋生物に被害を与えるなど、赤土流出が大きな問題になっている。これまでに赤土流出に対する様々な対策が施されているが、流出する赤土の大半は裸地からであり、従って、裸地に対する対策が最も効果的であると言える。繊維質固化処理土工法が赤土の改質に適用できれば、改良された赤土は、強度特性に優れ、乾湿繰返しに対する耐久性が高くなると予想されることから、ガリ侵食を受けることなく、赤土の流出が大幅に削減される可能性がある。現在、著者らの研究室で繊維質固化処理土の赤土改質への適用性を実験的に検討しており、近い将来、試験施工を行いたいと考えている。

### 7. むすび

建設汚泥リサイクル率の向上を目指して新たに開発された繊維質固化処理土工法は、生成される土砂が強度的に優れ、また乾湿繰返しや凍結融解に対して高い耐久性を示すなど、土質学的に優れた性質を有する。この優れた性質を生み出している最大の要因は、繊維質固化処理土を生成する過程で混合する古紙破砕物にある。再資源化処理の過程で高含水比泥土に繊維質物質である古紙破砕物を十分に攪拌・混合するため、生成される繊維質固化処理土では土粒子と繊維質が互いに絡み合った複雑な構造体を形成する。この土粒子と繊維質が絡み合った構造体自体で十分に山土などの一般土以上の強度を発現するが、さらにこの繊維質を通して応力が分散されるため、地震時のような大きな動的荷重がかかっても、地盤材料全体に応力が分散され、集中応力を受けることがない。このことが高い破壊ひずみを生み出し、粘り強い土を生成する。粘り強い土であるということは地震時の大きな繰返し荷重に十分耐え得ることを意味しており、以上の結果より、繊維質固化処理土は地震に強く、地震対策用地盤材料として十分使用可能であり、かつ効果的な地盤材料であると判断できる。今後、動的荷重による繊維質固化処理土の変形特性や液状化に対する検討などを予定している。

なお、本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(B)、課題番号 16360453、代表：高橋 弘(東北大学教授))によったことを付記し、謝意を表す。

### 《参考文献》

- 1)久野 悟郎：土の流動化処理工法，pp. 1-19，1997，技報堂出版
- 2)村田 修：流動化処理土工法，土木学会誌，Vol. 87，4月号，pp. 25-28，2002
- 3)小川 伸吉，飽本 一己，藤崎 勝利，椿 雅俊：建設汚泥改良土の利用に関する基礎的研究(その9)－乾湿繰返しによる性状変化－，第31回地盤工学研究発表会講演要旨集，pp. 303-304，1996
- 4)松原 榮一他7名：ため池堆積土を用いた軽量地盤材料の特性，軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム論文集，pp. 183-186，2000
- 5)森 雅人，高橋 弘，逢坂 昭治，堀井 清之，片岡 勲，石井 知征，小谷 謙二：古紙破砕物と高分子系改良剤を用いた新しい高含水比泥土リサイクル工法の提案と繊維質固化処理土の強度特性，資源・素材学会誌，Vol. 119，No. 4-5，pp. 155-160，2003
- 6)藤井 國博，山口 浩一，久保井 徹，矢崎 仁也：合成凝集剤の土壌環境に与える影響(Ⅱ)土壌中でのポリアクリルアミド誘導体の分解，国立公害研究所報告，第14号，pp. 21-31(1980)
- 7)読売新聞2002年10月11日付朝刊(海外で植林/環境配慮への取り組み/古紙リサイクル拡大/植物油使用エコインキ)
- 8)服部 勉，宮下 清貴：土の微生物学 pp. 4～14，2000，(株)養賢堂
- 9)大草 重康：粘土の不思議 pp. 38～39，1994，(社)団法人 土質工学会
- 10)建設省土木研究所(現独立行政法人土木研究所)，財団法人先端建設技術センター及び民間22社：建設汚泥の高度処理・利用技術の開発(盛土グループ)共同研究最終報告書 pp. 77～85
- 11)石井 知征，高橋 弘：ゼロエミッションとコスト縮減－建設汚泥を再資源化するボンテラン工法，月刊下水道，Vol. 26，No. 8，pp. 19-23，2003

## 5. ホイールローダ用低騒音バケットの開発

コマツ 研究本部 第一イノベーションセンタ 中田 国昭  
 コマツ 研究本部 第一イノベーションセンタ ○今村 一哉

### 1. はじめに

建設機械（以下建機と呼ぶ）は高馬力エンジンを搭載し作業機を動かす油圧装置、足回りを動かす伝達装置と数多くの騒音源を有しており、その発生レベルは自動車や鉄道など他分野の機械に比べ極めて大きい。環境省による毎年の環境白書では典型7公害の中で騒音に関する苦情件数は常に上位にあり、その内訳では建設作業騒音は工場・事業所騒音に次いで第2位を占めている。

このような騒音公害を防止するため昭和40年代半ばより建機に対する規制が施行され、規制値・稼働条件・測定方法など各観点で段階的な強化が行われている<sup>1)</sup>。現在の国土交通省低騒音型建設機械指定制度やE U騒音規制では、機械の大きさにより決められた半球球仮想面の定点6箇所機種毎に規定されたダイナミック条件（模擬作業サイクル）の等価騒音（発生騒音のエネルギー平均値）を計測し、計測値から換算したパワーレベルに対し搭載エンジン馬力に比例した規制値が定められている。

この規制が功を奏し、エンジンや油圧機器など常時発生する動力源騒音はこれを収納するマシナールームの防音や排・給気サイレンサーの音源対策などにより格段の低減が図られてきた<sup>2) 3)</sup>。しかし、現行規制では土砂・岩石のような対象物で実作業する条件がない上に過酷な接触、衝撃条件でも耐えられる低騒音作業機の開発が技術的に難しいため、発生頻度は少ないが作業機が対象物と衝突・接触して発生する最大騒音（作業騒音）の低減が進んでない。

このような背景から、マシナールーム外にある作業機・足回りの騒音は相対的に目立ちはじめ、特に民家に隣接する建材店等で稼働するホイールローダの作業騒音低減ニーズが強い。本開発では対摩耗・損傷に優れた鋼板で構成した積層板ダンパ技術をバケットに適用し作業時の低騒音化 $\Delta 5 \text{ dB (A)}$ を

行った。そして、徹底的な車体低騒音化を行い国土交通省に認定された超低騒音型建設機械にこの低騒音バケットを標準装備し、URBAN SILENCERと呼称し市場導入を行い、建機騒音の苦情の原因となる実作業時の低騒音化を実現した。

### 2. ホイールローダの現状騒音

ホイールローダ騒音（図1）の特徴はタイヤ式であるため走行時は足回り騒音の寄与度が小さく定置でエンジンをハイアイドルにした時の騒音とほぼ同等である。また、規制などで定められているダイナミック条件は作業対象物での実作業はなく、作業機をストッパーに当てない模擬作業サイクルである。このため、定置ハイアイドルとほぼ同等レベルであり、エンジンなどの動力源騒音の寄与度が圧倒的に大きく、規制対応では動力源を収納するマシナールームの防音がキー技術になる。

ところが、実作業では著しく騒音が増大し、とくに苦情の多いグレーディング作業では規制で定められたダイナミック条件に対し約25 dB(A)（エネルギー比で320倍）増大する。従って常時発生し被害頻度の多い動力源騒音の低減は勿論重要であるが、頻度は少なくとも最大騒音を発生し作業場近隣の住民より苦情の原因となる実作業騒音の低減

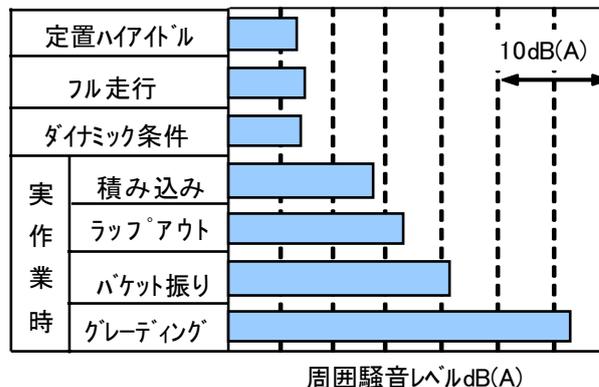


図1:ホイールローダの現状騒音

ニーズは益々高まっている。

しかし、従来はユーザの声を代表する営業部門からこの技術開発を強く要求されても打つ手がなかったため、音を極力たてないように作業速度の抑制、コンクリート路面の清掃、ヤード周囲の防音壁などユーザ側の努力で問題対応が図られてきた。

### 3. 作業騒音の発生メカニズムと低騒音化

作業騒音では耳で聞いても明らかにバケットから発生する音が多い。この発生メカニズムは、土砂・岩石などの衝突、コンクリート路面や砂利などとの引き摺り接触、起動・停止時ショックなどの力の作用によりバケット各部が振動し騒音として放射されている。従って、振動放射音の寄与が大きな部位に振動を抑える制振材料を適用する事が騒音低減に有効となる。しかし、従来の制振材はゴム、樹脂、アスファルトなど粘弾性特性を利用したものや制振鋼板しかなく建機の過酷条件に対し実用上問題があったため、鋼板から構成される独自の積層板ダンパ技術を開発・適用した(図2)。

鋼板を重ねた構造の積層板ダンパはリーフばねと同じ摩擦ダンパの一種であり、重なり合う鋼板同士が振動し層間の微小な相対変位により発生する摩擦力で騒音の原因となる振動エネルギーを吸収する。また、鋼板だけを素材としているため、前述の粘弾性材に比べ素材強度・耐摩耗性・耐候性のほかにリサイクル性にも優れている。さらに、鋼板構造物であるバケットに溶接などの取付けが容易であり、低コストで耐久性が高く補修が簡単という建機向け制振デバイスとしての優れた特長がある。

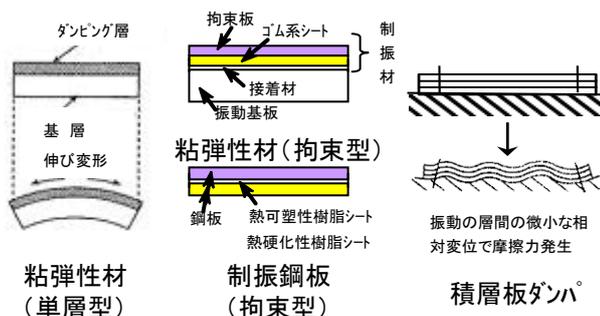


図2: 主な制音材料&構造

この適用にあたり、作業騒音の寄与が大きい周波数帯で実験による振動モード解析(図3)を行い積層板ダンパの取付けを次のように決定した。

- ①振幅が大きな側板部は全面に一体型の積層板を付加
- ②ねじり振動の大きなスピルガード部位は剛性を高めた構造にしてから積層板を付加
- ③高次振動モードが主体の底板は振動の腹が多数存在するので小型積層板を分散して付加

また、低騒音バケットの開発にあたり「実作業最大騒音を誰が聞いても明らかに低減効果があると分かるレベル:  $\Delta 5$  dB(A)」を研究目標値とし、作業性・操作性・耐久性は標準バケットの品質を損なわない重量・構造を配慮した。低騒音バケット(図4)は品質で実績のある標準バケットと構造・部材を共通化し、製作工程でつぎの特色をもつ業界初の

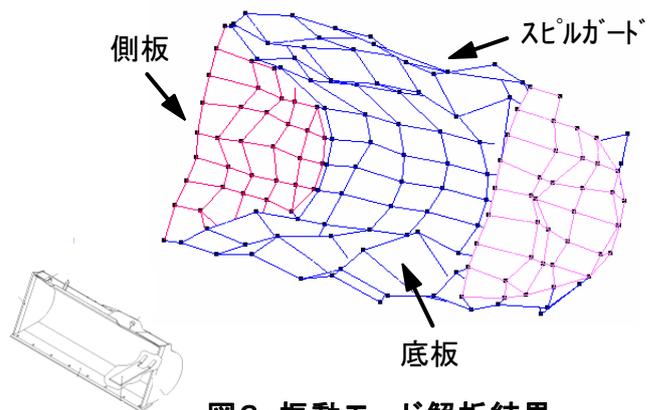


図3: 振動モード解析結果

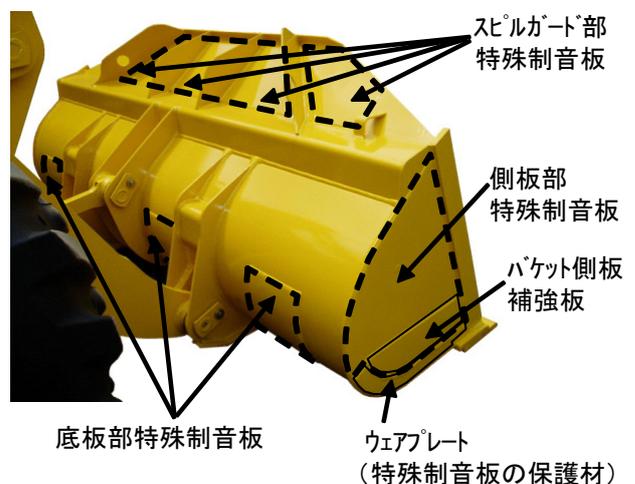


図4: 低騒音バケットの構造  
(特許出願中)

積層板ダンパをアドオンした。バケットとしてはホイールローダの中でも都市部で稼働する機会が多く低騒音化が望まれている山積み容量1.3m<sup>3</sup>の小型機種（当社該当機種WA100：機関出力68KW）用を対象に開発した。

#### ①特殊制音構造

材料は鋼板だけを使用し、表面は耐摩耗性に優れた高張力鋼板を採用。振動モードの節付近で各積層板を栓溶接で固定し、各層間の密着と外板の浮上がり防止により優れた制音効果と外観品質を両立した耐久の高い制音構造

#### ②積層板の保護構造

積層板が直接、土砂など作業対象物に曝露されないよう端部周辺は他部材、またはウェアプレート付加により保護。また、層間内部に雨水が浸入し、凍結や錆の発生がないよう積層板周囲を全周溶接し、これを防止

#### ③ハードな現場にも対応する堅牢設計

バケットが擦れやすく摩耗が多い部位に、積層板ダンパの制音効果を妨げない補強板を付加

また、効果確認水準試験の過程で積層板ダンパの最適設計パラメータをデータベース化したため、他機種のバケットでもこの研究開発成果を水平展開することにより適用可能にした。最適設計パラメータの骨子はつぎの通りである。

- ①内板の枚数は多いほど良い
- ②拘束点(ボルトや溶接固定)は少ないほど良い
- ③拘束点は振動モードの節位置であれば制音効果は悪化しない
- ④外板厚さは被対象物の剛性に応じた最適値がある
- ⑤押し付け力は大きい方が良く、ボルト止めの場合には、カラーを併用する必要がある
- ⑥面積は大きい程良いが、高次振動モードが主体の場合は分散配置が良い

### 4. 製品適用化事例と低騒音効果

低騒音バケットの製品化に先駆け、試作バケットをユーザ先で一定期間試用頂き、つぎのような非常に高い評価を得た。

- ・低騒音バケットは鈍い音がするだけで響かない

- ・作業時のバケットの音が全然違う（甲高い音がなく静か）
- ・低騒音バケットを装着して使いたい

実車での実作業騒音では図5の効果を得た。グレーディング作業やバケット振りのようにユーザの低減ニーズが強い、非常に大きい騒音を発生する作業条件で研究開発の狙いとする△5dB(A)を達成し、これが高評価につながった。

積み込み時の低減効果が少ないのはバケットに入った作業対象物が積層板ダンパと同じ機能の制振効果の役割を果たしているためであり、この作業条件では他の条件に比較し騒音レベルが小さいため、問題ないと思われる。

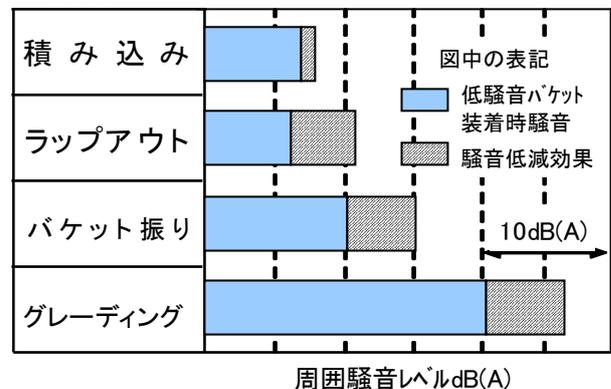


図5: 低騒音バケットによる実作業騒音

この製品適用化にあたっては、車体側の低騒音化も徹底的に行い、低騒音バケットを標準装備することによりユーザニーズに広く応えることにした。

車体低騒音化はつぎの現状調査をもとに行った。

#### ①騒音源寄与度

騒音源のランキングとその大きさのレベルを調査し対策が必要な騒音源と方策・低減量割付を決定

#### ②部位別放射寄与度

騒音源対策をしなくてもマシナールーム内に収納しているエンジンや油圧機器など主要な騒音源は防音対策により低騒音化ができるため、マシナールームのどの部位からどれだけの大きさの騒音が放射しているか調査し、対策部位と低減量割付を決定

#### ③伝搬経路別寄与度

対策部位からの騒音が、収納している騒音源からどのような伝わり方をして放射しているのかを調査し、振動伝搬なら防振・制振を、空気伝搬により

壁面を加振する透過音や隙間から直接放射する音なら遮音、冷却に必要な空気口から放射する音なら吸音・消音と、低騒音化の方策を決定

これらの調査結果より、騒音源対策はマシンルームの外に出ている排気音に対してはボンネット内に1個、外部には並列に2個の大型マフラを装備し、冷却開口部付近に位置し外部に騒音が放出しやすいファンに対しては低騒音型油圧駆動ファンを採用した。その他の騒音発生源を収納したマシンルームについては密閉化と吸音材の適切配置を行い、冷却風開口部は風を通して音は通さない吸音ブレードを備えた吸音ダクト構造とした。この低騒音化を行った当社WA100-5の構造を図6に示す。車体から発生する騒音を大幅に低減した当機種の騒音パワーレベルは、国土交通省指定の「超低騒音型建設機械」の認定機種となっている(表1)。

## 5. まとめ

夜間の道路工事、住宅地などの人口密集地や病院・学校に隣接した場所など都市部での工事では、

表1: WA100-5ホイールローダの騒音

単位: dB(A)

	騒音測定値 (パワーレベル)	国土交通省指定値
標準車	103	低騒音型建設機械 104
アーバンサイレンサ	97	超低騒音型建設機械 98

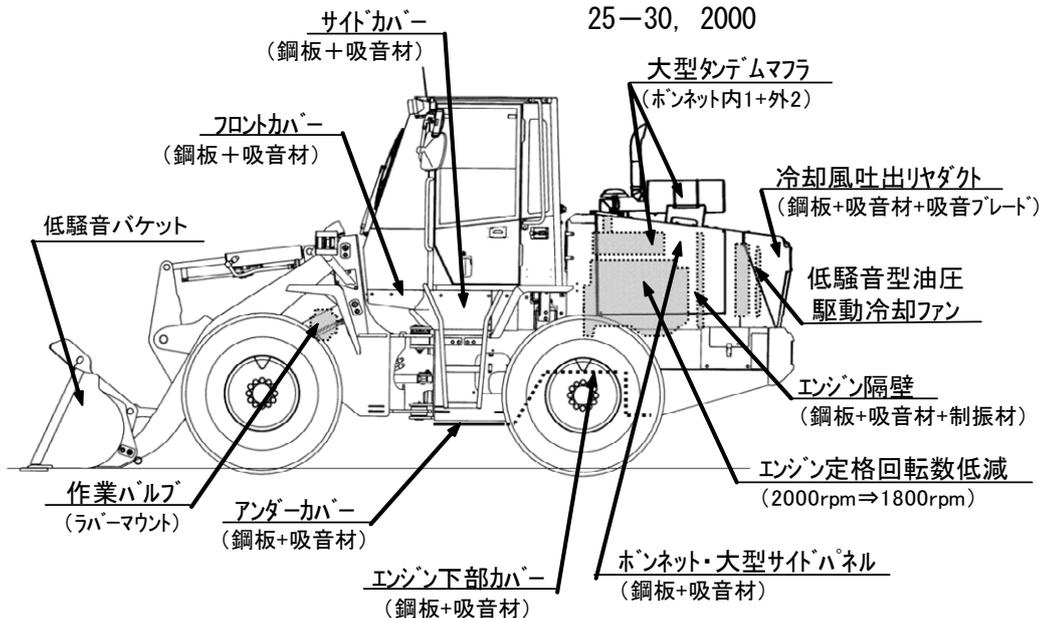


図6: URBAN SILENCERの低騒音構造

周辺の人々の暮らしを騒音で妨げることのない、静粛な建機が求められている。

環境騒音規制が年々強化される中で、自動車や鉄道など身近な機械と同様に建機でも車体の低騒音化が進んでいる。本研究開発では徹底した車体低騒音化を行い国土交通省に認定された超低騒音型建設機械に低騒音バケットを標準装備し、URBANSILENCERと呼称し市場導入を行い、建機騒音の苦情の原因となる実作業騒音の低騒音化を実現した。その結果、夜間の都市土木工事や除雪など、静粛性を要求される作業の低騒音化に大きく前進した。

しかし、工事現場周辺の人々にとって作業騒音は全く不要であることを真摯に受け止め、建設・土木工事や除雪作業などの更なる低騒音化に向けて建機の制音研究を加速し、画期的な商品開発により静かな建機づくりを進め、環境に優しい社会作りに貢献していきたい。

## 参考文献

- 1) 中田国昭：建設機械における超低騒音設計の勘どころ，機械設計，Vol. 49, No8. 64-69, 2005
- 2) 中田国昭：油圧ショベルの騒音と低減対策，騒音制御，Vol. 19, No. 4, 15-17, 1995
- 3) 中田国昭，他4名：超低騒音都市型油圧ショベルの研究開発，建設荷役車両，Vol. 22, No. 125, 25-30, 2000

## 6. ハイブリッドショベルの開発

### — 省エネシミュレーションと実証実験 —

(株) 神戸製鋼所 機械研究所 振動音響研究室 ○南條 孝夫  
コベルコ建機 (株) 開發生産本部 要素開発部 鹿児島 昌之  
小見山 昌之

#### 1. はじめに

近年、地球温暖化防止や経済性などの観点から、建設機械においても、作業中の燃料消費量を低減することが求められてきている。建設機械の中でも最も稼働台数の多い油圧ショベルに関しては、これまで油圧機器やエンジンの損失低減などに取り組んできているものの、それだけでは限界があり、大幅な燃料消費量低減を図るためには大胆なシステムの見直しが必要である。その低減対策として注目されているのが、自動車 で用いられているハイブリッドシステム<sup>1)2)</sup>の適用である。

このような状況下で、当社は省エネルギー効果 40%以上を目標に、新エネルギー・産業開発機構 (NEDO) およびコベルコ建機株式会社と共同で 6 tクラスのハイブリッドショベルを開発した。

本報では、ハイブリッド化による設計段階での省エネルギー効果の評価を行う目的で、ハイブリッドショベルのシステム全体をモデル化した動的シミュレーションモデルを開発し、ショベルの実作業における多様な作業状態を反映した燃費評価モードに基づき、燃料消費削減効果の予測を行うとともに、実証機製作による燃料消費削減効果の実証とシミュレーション評価の検証を行ったので、その結果を報告する。

#### 2. 油圧ショベルのハイブリッド化の狙い

油圧ショベルは、掘削などの高負荷作業と水平引き・均しなどの低負荷作業を短時間で繰り返すため大きな負荷変動を受ける。また、基本アクチュエータとして、ブーム、アーム、バケット、旋回、左右走行という分散配置されたアクチュエータを持っており、これらのアクチュエータに対し、高エネルギーを高応答に供給するために油圧システムが採用されている。

図1に従来油圧ショベルの動力活用状況を示す。従来の油圧ショベルでは、最大負荷に対応できる動力を油圧ポンプから供給し、余剰動力を熱として放出しながら機械の動きを制御しているため、作業有効動力が低い場合であっても、複合操作時のコントロールバルブでの各アクチュエータへの流量分配や合流のための絞り損失やブリード損失が大きくなり、投入動力はあまり下がらない。また、アタッチメントの下降時や旋回停止時など外部から与えられる位置エネルギーや運動エネルギーも熱として放出している。図2に従来ショベルのエネルギー伝達図を示すが、平均するとエンジン出力の20%しか有効活用されていないのが現状である。

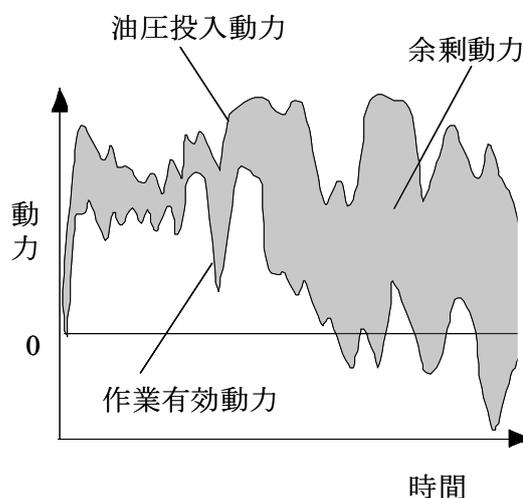


図1 ショベルの動力活用状況



図2 エネルギー伝達図

これらの状況を踏まえ、油圧ショベルのハイブリッド化については、以下のような狙いでシステム開発を行った。

- ・アクチュエータの独立駆動による油圧合流・分配ロスの低減
- ・電動油圧駆動アクチュエータによる制御ロスの低減
- ・位置エネルギーや運動エネルギーなどの回生エネルギーの再利用

また、動力供給を行う動力源の効率化については以下の狙いとした。

- ・バッテリー、キャパシタを用いたエンジン負荷の平準化と高効率領域運転
- ・エンジン間欠運転による燃料消費量削減

### 3. ハイブリッドショベルのシステム構成

今回開発したハイブリッドショベルの外観図、システム構成をそれぞれ図3、4に示す。6tクラスのショベルを対象としており、システム構成は図のようなシリーズハイブリッドシステムである。

アクチュエータシステムとしては、6個のアクチュエータを準独立な電動油圧駆動のアクチュエータとしており、油圧でのアクチュエータ間の干渉を最小限に抑えて従来発生していた油圧システム内での損失を低減させている。また、ブームについては、電動機、両回転油圧ポンプを用いたクローズドシステムとしており、ブーム上昇時に蓄積した位置エネルギーをブーム下降時に、油圧を介して電気エネルギーとして回生できるものとなっている。旋回は回転運動であることから、油圧は用いず、電動機で直接駆動するシステムとなっており、旋回停止時には、上部旋回体の運動エネルギーを電気エネルギーとして回生する。走行システムも回転運動であることから、電動機駆動に適しているが、電動機と減速機を直結するコンパクトな走行システムの開発が困難であることから、アーム、バケットの油圧源を用いた電動油圧駆動としている。

動力源は、エンジン、バッテリー、キャパシタからなるシリーズ方式のハイブリッド動力源となっている。動力源として、バッテリー、キャパシタを用いることで、ショベルのような負荷変動が激しい場合でも、負荷に対するエンジンパワーの過不足分をバッテリーで補うこ

とができるため、エンジン負荷を平滑化し、従来ショベルより小さなエンジンを用いてエンジンの高効率運転が可能となり、燃費を向上させることができる。

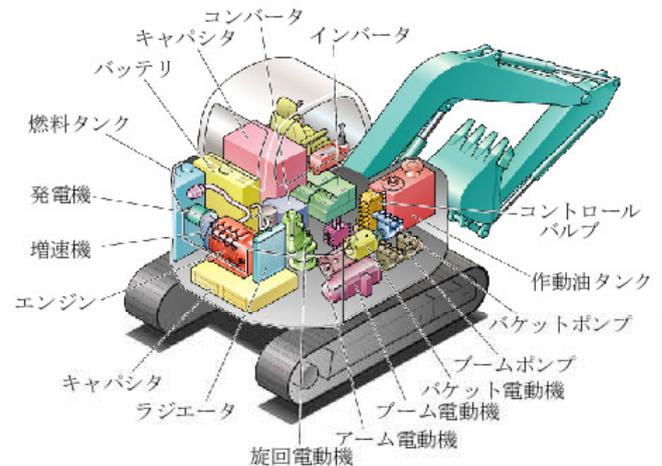


図3 ハイブリッドショベル外観図

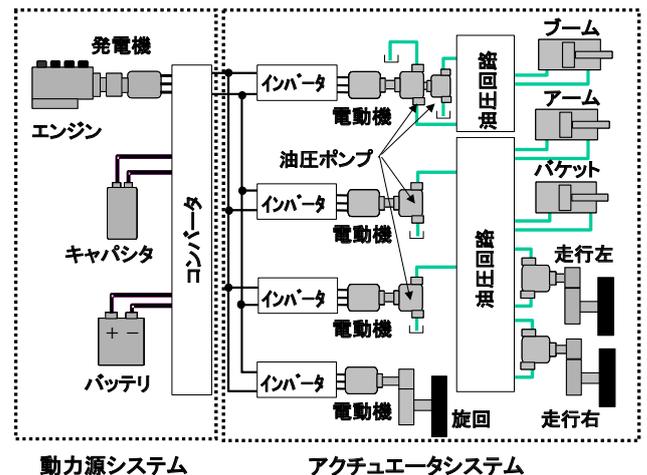


図4 ハイブリッドシステム構成図

表1 ハイブリッドシステム主要機器仕様

	仕様
ブーム	20kW (3000min <sup>-1</sup> )
アーム (走行左)	11kW (2000min <sup>-1</sup> )
バケット (走行右)	11kW (2000min <sup>-1</sup> )
旋回	6kW (3000min <sup>-1</sup> ) 減速比 = 330
エンジン	22kW (1600min <sup>-1</sup> ) 減速比 = 4.15
発電機	20kW (6600min <sup>-1</sup> )
バッテリー	6.5Ah (80セル)
キャパシタ	11.3F (132セル)

また、本システムは、エンジンパワーを一旦電気に置き換えているため、バッテリー、キャパシタ出力に余裕がある場合には、ショベルの作業中であってもエンジンを停止して作業を行うことができ、エンジンの間欠運転により、さらに燃料消費を抑えることができる。

表1にハイブリッドシステム主要機器の仕様を示す。上段はアクチュエータ駆動電動機の仕様、下段は動力源機器の仕様である。駆動電動機は、各アクチュエータの最高出力と同等以上の能力を持つように設定しており、動力源機器仕様は、連続重負荷作業条件とエンジン/発電機とバッテリーとの電力分担を考慮して決定している。エンジン出力については、従来油圧ショベルの約半分である。

#### 4. シミュレーションモデル

シミュレーションの目的は、ハイブリッドショベルの燃料消費量予測、および操作性設計を行うことである。図5にシミュレーションモデルの構成を示すが、ハイブリッドショベルの構成要素である動力源の駆動系および電力系、アクチュエータの油圧系、およびショベルのアタッチメントなどのリンク機構系を全てモデル化し、システム全体の応答を求める動的シミュレーションモデルを当社で開発した非線形動的解析コードSINDYS<sup>3)</sup>を用いて構築した。SINDYSは有限要素法

をベースにしており、上記の各要素を式(1)に示すMCK形の微分方程式に記述することによりモデル化できる。

$$M\ddot{q}_{n+1} + C\dot{q}_{n+1} + Kq_{n+1} = f_{n+1} - \bar{f}_n \quad (1)$$

ここで、 $q_{n+1}$ はリンク機構系では時刻  $t_{n+1}$ における変位、油圧系では流量積、電力系では電荷を表す状態量ベクトルである。 $f_{n+1}$ は  $t_{n+1}$ における外力項であり、 $\bar{f}_n$ は非線形要素力を各時刻で線形化することによる補正外力である。

このシミュレーションモデルは、燃費性能や省エネ評価を行うのが主な目的であり、各機器の効率特性や損失特性が実機特性を反映したものになければならないため、機器特性については、機器の単体試験で採取した特性データから式(1)の形式にあうような特性パラメータを同定し、モデル化している。

以下にシミュレーションモデルで考慮した主な機器の効率、損失特性を示す。

- ・バッテリー、キャパシタの充放電効率特性
- ・発電機、電動機の効率特性
- ・エンジンの燃費率特性
- ・電気系制御器の効率特性
- ・配管、バルブの圧力損失特性
- ・制御弁の絞りによる圧力損失特性
- ・油圧ポンプ、モータの容積効率、機械効率特性
- ・主要機器以外の補機での消費動力

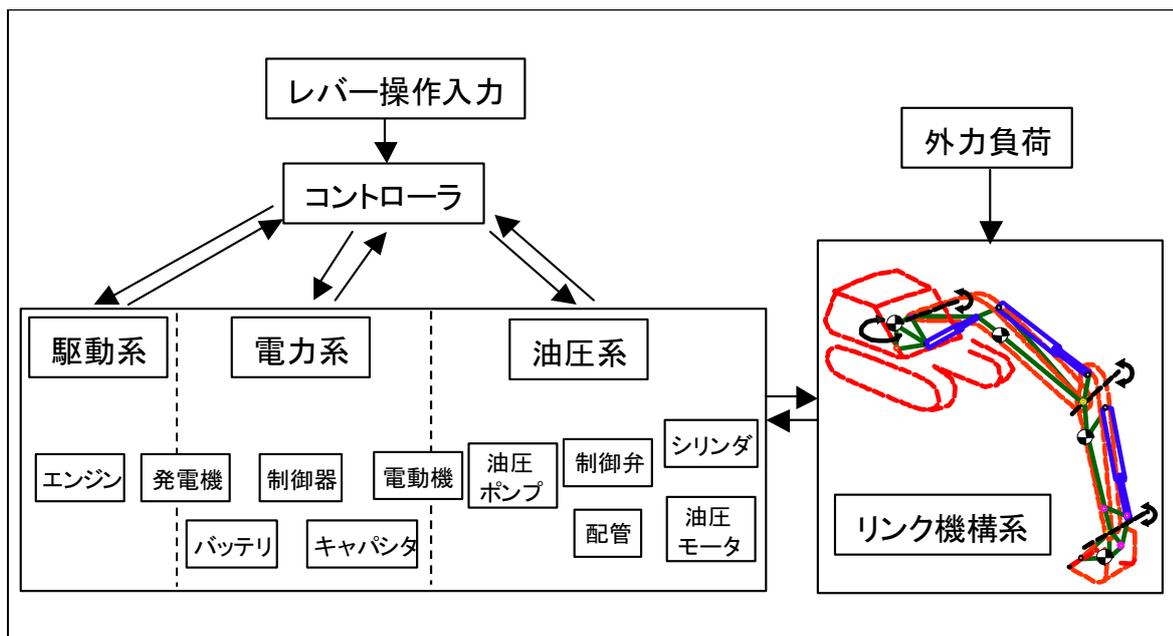


図5 ハイブリッドショベルのシミュレーションモデル構成

## 5. 実作業時の燃費シミュレーション

### 5.1. 対象作業

燃費評価の対象作業としては、6tクラスのショベルの作業として代表的な下水管理設工事を対象とし、独自に行った作業現場での稼働状況調査から策定した標準負荷モード<sup>4)</sup>に準じた作業で評価することとした。表2に標準負荷モードのサイクルタイムと時間比率を示す。エンジン停止を除いて軽負荷から重負荷の7作業を対象としており、現実に近い作業での燃費評価である。作業中のアクチュエータ速度および負荷は従来油圧ショベルで実測した負荷データを用い、作業工程にあわせてこれらの作業を組み合わせることで約1時間の連続作業負荷データを作成し、これをシミュレーションでの評価対象作業とした。

表2 標準負荷モードの構成

モード	作業パターン	サイクルタイム (s)	時間比 (%)
1	掘削積み込み	45	18
2	積みおろし	35	8
3	均し	50	8
4	吊り	80	10
5	矢板	75	7
6	走行	20	3
7	アイドリング	120	23
8	エンジン停止	80	23
合計			100

### 5.2. シミュレーション結果

#### (1) アクチュエータ動力

図6に評価作業の1つである掘削積み込み作業におけるアクチュエータ動力を示す。従来油圧システムとの比較のために、ハイブリッドシステムではアクチュエータ駆動電動機の入力電力、従来油圧システムでは実測した駆動油圧ポンプ出力動力をアクチュエータ投入動力として比較している。ハイブリッドシステムでは特にアクチュエータ出力（作業有効出力）の低い作業後半に大幅な投入動力低減が図られており、狙いとする低出力時の複合操作における油圧配分ロスが低減できていることがわかる。ただし、作業前半では急操

作時の電動機の加速や掘削中の低速、高負荷領域での電動機効率の低下などにより一部で従来油圧システムよりも悪い部分も出ている。図7にこの作業でのアクチュエータシステムのエネルギー収支を示すが、この作業では従来油圧システムに対し約45%の動力低減が図られている。表中、回生エネルギーは各アクチュエータの回生エネルギーの総和を示しているが、複合操作時には回生電力は他のアクチュエータ電力として使用されるため、動力源に回生されるエネルギーはこれよりもさらに小さくなり、実作業での動力源システムへの回生はあまり期待できない。これらの傾向は他の評価作業についても同様の傾向である。

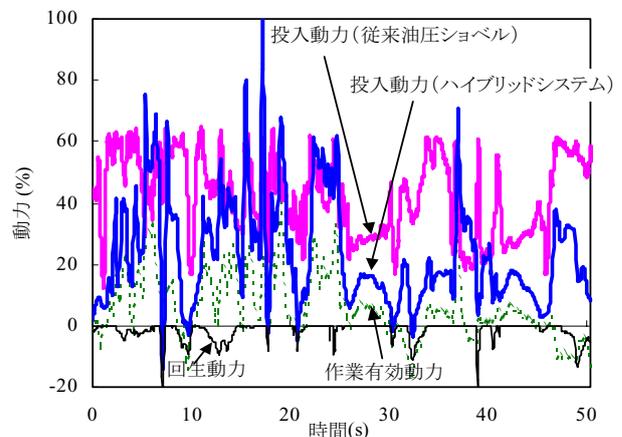


図6 掘削積み込み作業でのアクチュエータ動力

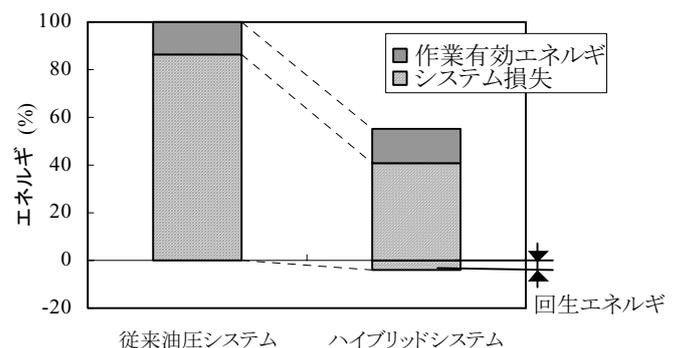


図7 掘削積み込み作業での消費動力比較

#### (2) 標準負荷モードでの燃費

図8に上記標準負荷モードでのアクチュエータ消費動力（動力源出力）、動力配分および燃費のシミュレーション結果を示す。図中、EDモードとは、アクチュエータ負荷とバッテリー、キャパシタの充電状態により、作業中であってもエンジンを停止し、バッテリーとキャ

パシタのみでアクチュエータを駆動する電気駆動モードを意味し、図にはEDモードあり/なしの2条件の結果を示した。EDモードなしの場合には、バッテリー、キャパシタの充電状態(SOC)が時間とともに高くなり、エンジンは高効率領域での運転が維持できないが、EDモードありの場合には、エンジンを間欠運転することで高効率域での運転が維持できていることがわかる。図9に標準負荷モード全体に対するシミュレーションでの燃費評価結果を示す。従来油圧ショベルに対し、64%の燃費削減効果が期待できる結果となった。

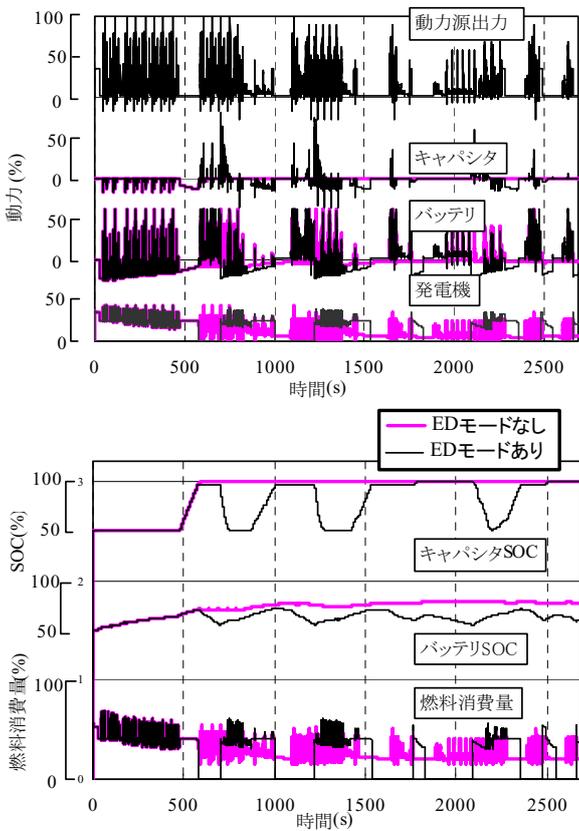


図8 標準負荷モードのシミュレーション結果

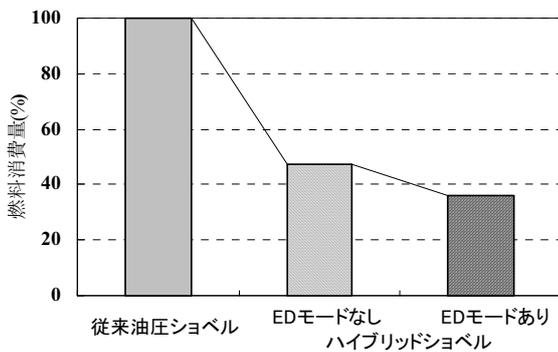


図9 標準負荷モードの燃費予測結果

## 6. 実証試験結果と精度検証

本研究開発では、燃費性能を実証するために、実際に6tクラスのハイブリッドショベル実証機を製作し、各種の試験により、従来油圧ショベルのとの性能比較を行った。作業機としての各アクチュエータの作動速度や応答性、操作性評価などの試験では、従来油圧ショベルと同等の性能を有していることを確認している。以下では、燃費削減効果についての実証結果とシミュレーション予測精度の検証結果を示す。

### 6.1. 作業モード別燃費評価

標準負荷モードの主要作業を含む4作業について、個別にハイブリッド実証機での燃費測定を行った。

各作業とも従来油圧ショベルでの作業サイクルタイムを目標に作業を行い、複数回の計測の平均値で評価した。図10に、各作業での従来油圧ショベルに対する燃費低減効果の実測結果とシミュレーションでの評価結果の比較を示す。作業により、燃費削減効果に差があることがわかった。シミュレーション結果と実測結果の比較では、作業により差にばらつきがあるが、どの作業も5%以内の燃費削減効果の誤差となっており、狙い通りの性能が確保され、またシミュレーションによる事前予測が精度よく行えていることが確認できた。

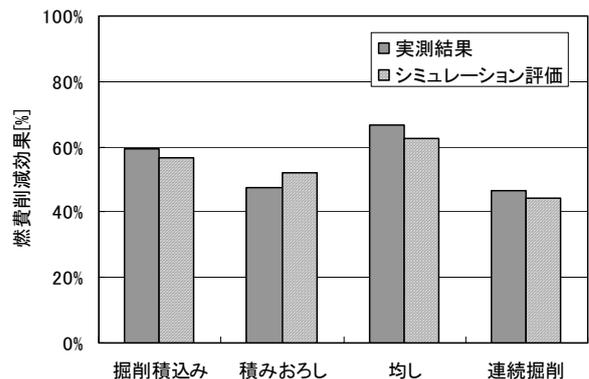


図10 作業モード別燃費評価結果

### 6.2. 下水枝管理設工事での燃費評価

実証試験では、実際の現場作業での燃費を評価するために、試験場に幅4m、長さ30mのアスファルト舗装道路を造成し、専門工業者に実証機を供与して、下水枝管理設の模擬工事を実施した。舗装剥取りから下水管理設と舗装修復まで、規定通りの1日工事を3回

実施し、燃費データを採取した。

この試験での従来油圧ショベルに対するハイブリッドショベル実証機での燃費比較を図 11 に示す。図中、ハイブリッドショベルについては、標準負荷モードのシミュレーションで事前予測した結果と実測結果を合わせて書いている。燃費実測結果はシミュレーション予測結果とほぼ同じとなっており、目標とする 40% 以上の省エネルギー効果が実証された。また、実作業での燃費性能は標準負荷モードとしてパターン化した作業モードに基づいてシミュレーションを行うことにより精度よく事前予測できることもわかった。

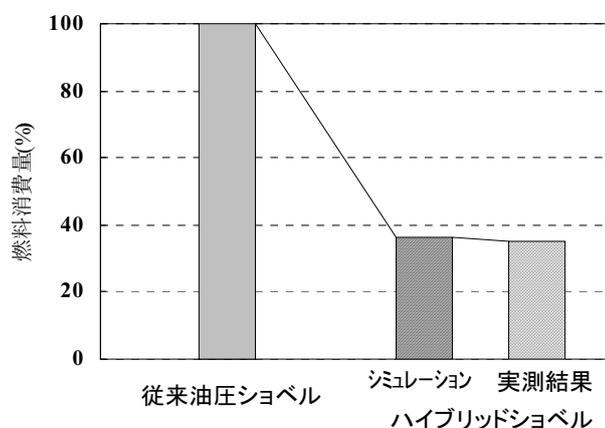


図 11 下水枝管工事での燃費評価結果

## 7. まとめ

建設機械の省エネルギー化のための方策として、6 t クラスの油圧ショベルを対象に、ハイブリッド化による燃費削減効果をシミュレーションにより評価するとともに、ハイブリッド実証機を製作し、ショベルの実作業での燃費評価を行った結果、従来油圧ショベルに対して 65% の燃費削減効果があることが実証された。また、ショベルの作業をパターン化した標準負荷モードに基づくシミュレーションにより、実作業での燃費性能が精度よく行え、設計段階での評価ツールとして活用できることがわかった。

ハイブリッドショベルの市場導入・普及については、コストダウンが重要となる。今後の商品化では、ハイブリッドシステムを構成する機器のコストダウンが必要である。

## 参考文献

- (1) 佐々木正和, 野津育朗, 荒木修一, 山田良昭, 菅野裕之, キャパシタ式 CNG ハイブリッドバスシステムの開発, 自動車技術会論文集, Vol. 32, No. 4, p181-186, 2001
- (2) 緒方誠, 須々木裕太, 武田信章, シリーズ式 HEV ノーステップバスの開発, 自動車技術会論文集, Vol. 33, No. 1, p101-104, 2002
- (3) 藤川猛, 井上喜雄, 今西悦二郎, 非線形動的解析プログラム” SINDYS”, R&D神戸製鋼技報, Vol. 34, No. 3, 1984, p109
- (4) 小見山昌之, 絹川秀樹, 田中恒次郎, 6 トンクラスショベルの省エネルギー効果評価モード, 建設の機械化, No. 626, April 2002, p28-33

## 7. 鋼床版上 SFRC 舗装の施工

国土交通省 横浜国道事務所： 大寺伸幸  
鹿島道路株式会社 横浜支店： 杉山 全  
鹿島道路株式会社 機械センター：○和田裕三

### 1. はじめに

近年、一部の鋼床版橋梁において、予想以上の交通荷重に晒される鋼床版デッキプレートとUリブ溶接部に疲労亀裂が確認されるケース（図-1）がある。この主な原因として大型車輛の軸荷重の増大、通行車輛数の増加が挙げられ、それらの原因に対して鋼床版の剛性不足が起因すると言われている。現在は亀裂発生部の上下を鉄板で挟み、ボルトで固定する、当て板補強が応急処置として行われているが、将来予想される重大な損傷を来たす前に本格的な補強対策が望まれている。

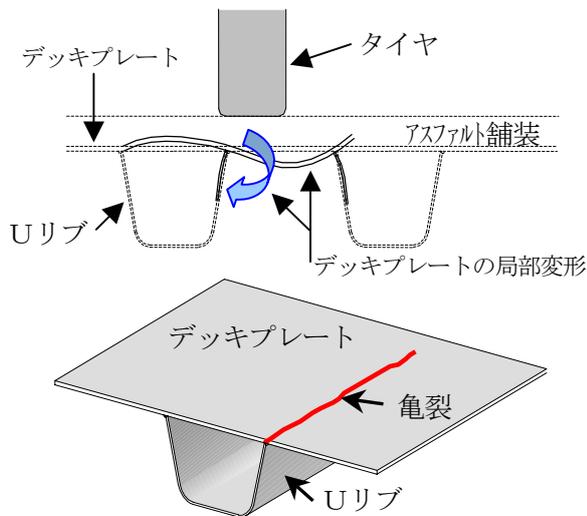


図-1 鋼床版の局部変形と疲労亀裂

筆者らは疲労亀裂の予防対策とともに、既に疲労亀裂が発生し、応急処置されている鋼床版への適用を見据え、恒久的対策としてコンクリート舗装を鋼床版上に敷設し、鋼床版の疲労軽減、剛性向上増大を目的とし施工を行った。

本件は鉄とコンクリートの融合という国内初の工法に取り組んだ施工事例と、施工機械について報告するものである。

### 2. 工事概要

工事名：一般国道 357 号 横浜ベイブリッジ舗装（その2）工事

場所：神奈川県横浜市 大黒埠頭・本牧埠頭

発注者：国土交通省 関東地方整備局  
横浜国道事務所

請負者：鹿島道路株式会社 横浜支店

主要工種：研掃工・スタッドジベル工・SFRC 舗装工、高欄工、その他

施工面積：約 1,000m×13m=13,000 m<sup>2</sup>

本工事を行った横浜ベイブリッジは既に上部道路を首都高速道路湾岸線として供用しており、下部道路を一般国道 357 号線（図-2）の新規着工区間として SFRC 舗装を行ったものである。なお、施工現場は地上 33m を越える場所であったため、機械の搬入、材料の供給は非常に困難であった。

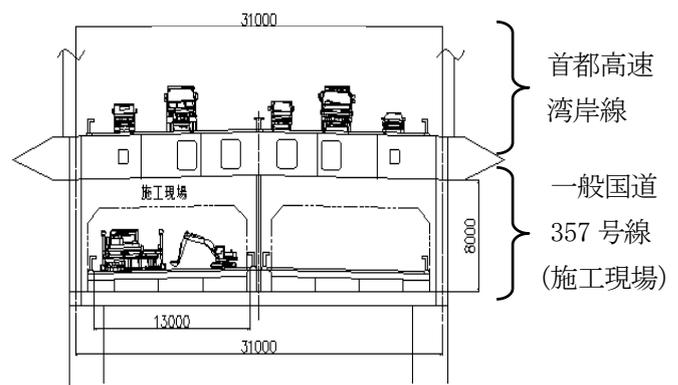


図-2 横浜ベイブリッジ断面

### 3. SFRC 舗装とは

SFRC 舗装とは、ベースとなるコンクリートにスチールファイバを添加した鋼繊維補強超速硬コンクリート（Steel Fiber Reinforced Concrete）を製造し、締固めを行い、鋼床版との接着にはエポキシ樹脂接着剤を用いることにより鋼床版と一体化させる工法である（図-3）。鉄板上にコンクリート

を舗装するため、通常のコンクリート舗装やグースアスファルト舗装とは異なった準備、施工、養生が必要であり、その施工上の工程は大別して4工種からなる。以下に本橋梁の施工に沿って説明する。

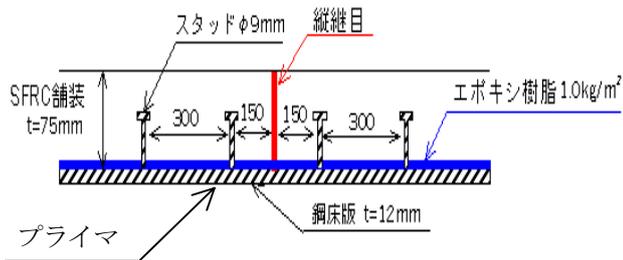


図-3 SFRC 舗装断面図

#### (1) 鋼床版準備工

ショットブラストでの鋼床版研掃後直ちにプライマを塗布し防錆処理を行う。その後 SFRC の乾燥収縮によるコンクリート版の反り上がりを防止するスタッドジベルを溶接する。溶接後、溶接部にも防錆プライマ処理を行う。

#### (2) SFRC 製造工

橋梁下まで運搬されてきたベースコンクリートを、ポンプ車により地上 33m の橋梁上に待機するアジテータ車へ圧送する。移送を終えたアジテータ車のミキサー内コンクリートにエアブローを用いて直接スチールファイバを投入(写真-1)混合し SFRC が製造される。



写真-1 スチールファイバ投入

#### (3) SFRC 打設工

打設直前、鋼床版上にエポキシ樹脂を塗布し、アジテータ車で現場内製造、運搬されてきた SFRC を、荷卸し、粗均し、締固め、縦仕上げを行う。

#### (4) 養生工

冬季の気温低下による初期凍害、橋梁振動によるダレを防止し、養生開始時期を早める目的で、真空脱水工法(写真-2)を採用した。真空脱水工法とはコンクリート打設直後、真空ホースを取付けた特殊マットパネルによりコンクリート舗装体から水と空気を取り去ると同時に、大気圧をコンクリートにかけて締固める工法である。早期養生開始による二次効果として表面強度の増加をもたらす好結果となった。



写真-2 真空脱水工法

### 4. 工機械の選定と施工条件への対応

#### (1) 機械編成

地上 33m の施工現場への進入道路が、橋梁の前後に接続されておらず、全ての資機材、作業車輛は、本工事用に作製したケージ及び、300 t クレーンによる搬入作業(写真-3)を必要とした。本橋梁の施工条件により決定された機械編成を図-4に示す。



写真-3 300 t クレーン、専用ケージによる搬入

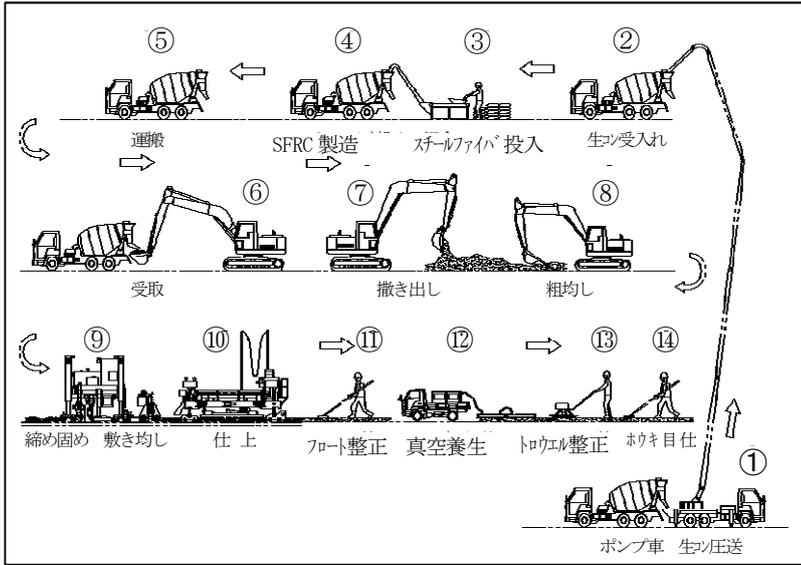


図-4 機械編成

(2) 機械施工に求められた事項と問題点

- ・資機材、作業車輛搬入のクレーン作業については、機械施工に不都合な状況が予想された。SFRC 運搬車輛の吊上げ順番待ち、ケージへの固定作業、吊り作業速度等の時間ロス、現場が港湾にある橋梁のため強風によるクレーン作業の中断等があり、連続的な SFRC 供給が確保できない。
- ・セットフォーム工法での打設のため、打設レーンの機械移動にはクレーン作業を必要とするが、使用する専用ケージには、重量、幅の制限があり、クレーン車は搬入できない。また、アウトリガの荷重集中が発生するクレーン作業を鋼床版上では行えない。そのため各機械が大掛かりな設備を必要とせず、単独横移動できる機能を備えていなければならない。
- ・粗均し用バックホウの作業半径不足の改善。鋼床版上には接着剤が塗布され更に施工幅員が6mあり、舗装面に乗り入れず横から作業を行わなければならない。
- ・本橋梁はコンジット舗装とならず SFRC 舗装が舗装表層となる。したがって平坦性は一般コンクリート舗装と同等としなければならない。
- ・人力施工削減により機械と人員との交錯を最小限に留め安全性を向上させる



写真-4 ⑨ファイバコンクリートフィニッシュ



写真-5 ⑥受取 ⑦撒き出し ⑧粗均し

(3) 問題点に対する対策と機械の改造

- ・予想されるクレーン作業の不都合を検討した結果、連続供給が必要なコンクリート搬入はポンプ車を使用する方式とした(写真-6)。これによりスチールファイバの投入、混合を現場内作業としなければならないが、SFRC の連続供給が確保でき、連続的な機械作業を可能にすることができた。

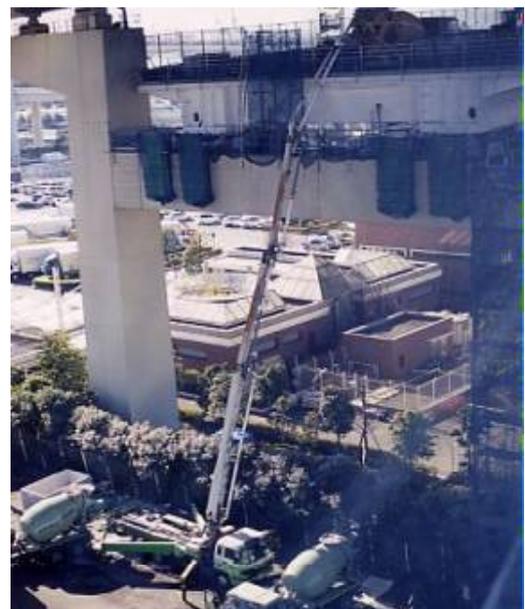


写真-6 ポンプ車による圧送

- ・施工機械の打設レーン横移動には、車軸を 90 度左右に回転でき、各駆動輪の回転方向を自在に変更できる構造とした。また車軸固定式のフィニッシャ牽引式スクリードには、新たに脱着式の補助車輪を設けることにより、横移動を可能とした。
- ・粗均しバックホウの作業半径不足には、特殊ブレードを作製し取付けた（写真－7）。SFRC と接触する先端部以外の横幅を、細長く絞り込んだ形状とすることで、ブレードを垂直に使用する作業でも、オペレータの前方視界を妨げることがない。



写真－7 特殊ブレード

- ・舗装の縦断方向の不陸は、従来のコンクリート舗装用の縦仕上げ機を使用し平坦性の向上をはかった。（写真－8）



写真－8 縦仕上げ機

- ・施工当初、舗装面に引きずり亀裂が発生するケースがあった。その原因は一般コンクリート舗装に使用されるフィニッシャ牽引式スクリードのエッジ形状に丸みがあり、SFRC に混入されているスチールファイバ同士の非常に強い結合力により、不陸を削り取れず、前方に引きずったためである。

これを解決するため、エッジを丸みのない直角形状（写真－9）へ改造し、摺動速度も可変式へと改造することにより、SFRC 舗装の品質を確保した。



通常のエッジ形状

改造後のエッジ形状



写真－9 エッジ形状の比較

## 5. 実施工における平坦性結果

3m プロファイルメータによる平坦性測定結果を表－1に示す。アスファルト舗装と比較しても遜色なく、コンクリート舗装としては非常に優れた結果が得られた。

表－1 平坦性測定結果 ( $\sigma_{3m}$ )

	標準偏差 (mm)	備考	平均	規格値
上り線	1.10	路肩側	1.075	機械施工 2.0 以下
	1.05	中央側		
下り線	1.10	路肩側	1.095	
	1.09	中央側		

## 6. まとめ

SFRC 舗装が採用された後も打設開始まで、実施工上の問題が山積みであり、汚水処理や廃材の区分けの徹底等、環境面への配慮も重要な解決事項の一つであった。また、SFRC 舗装が補修工事として展開されれば、片側交互通行での施工における材料供給方法、早期交通開放による道路利用者の不満解消等、様々な課題を克服しなければならない。今回の工事は全国で初の試みであり各方面から興味を寄せられる中、良好な結果を残せたことは喜ばしい限りである。そして今後補修、補強が必要とされる鋼床版橋梁に広く採用され好結果、好評価が得られるであろうことを確信している。

## 8. 鋼橋塗替えの高度化に関する調査

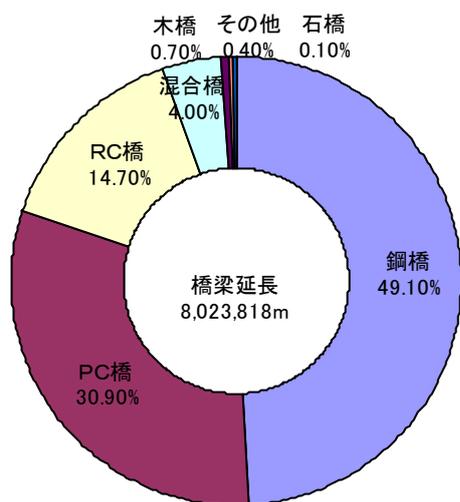
独立行政法人 土木研究所 ○石松 豊、山元 弘

### 1. はじめに

我が国の社会資本ストックは、その増加や老朽化を背景に、維持管理の合理化や長寿命化が求められている。鋼橋等の鋼構造物は、塗装等によって耐久性を確保しており、定期的な塗替え塗装を必要とする。ここで、塗膜耐久性は、塗料の性能と素地の品質によって決まるものであり、塗替え塗装時には、特に素地調整の影響が大きいと言われている。このため、本研究は、塗装間隔の延長化、維持管理の効率化を図ることを目標として、塗替え塗装時における素地調整の施工法の各種条件の設定を明らかにし、塗膜の品質の確保を図るものである。

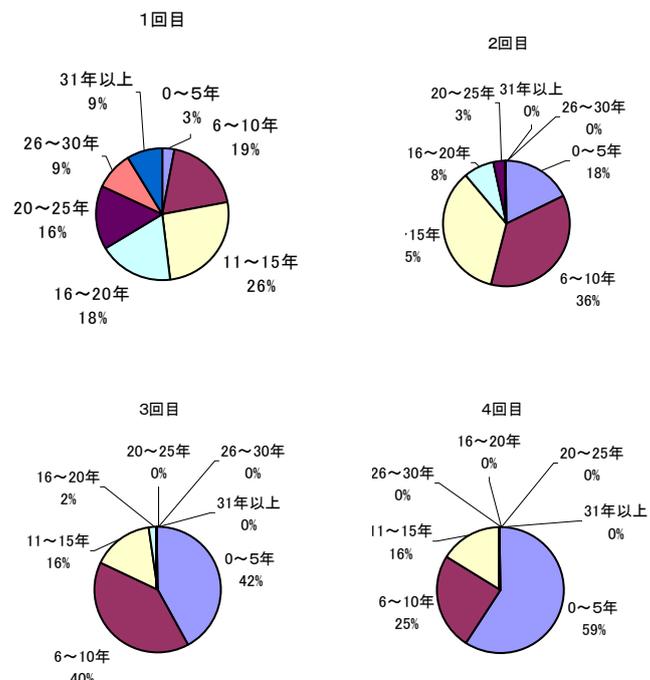
#### 1. 鋼橋塗替え塗装の実態調査結果

①道路橋は 13.6 万橋（うち 40%が鋼橋、図一より橋梁延長では約 49%）を超えているが、1970 年代に建設された鋼橋が団塊世代をなしており、今後、補修が必要となる。



図一 橋種別橋梁延長比率

②素地調整の品質は、塗装の耐久性に大きく影響すると一般的にいわれているが、このことが鋼橋の塗替え周期の調査から、具体的実績に基づき示された（図二より）。



図二 塗装補修履歴

③付着塩分量の実態を調査した。まず、現況の鋼橋における付着塩分採取については、都市部、山間部、海浜部の3地域に分けて採取した。これは、都市部では大気環境、山間部では凍結防止剤 (NaCl) の影響、海浜部では海風による塩の影響を考えたものであり、この3点の付着塩分量の実態を調査した。なお、採取部分は最も腐食の著しい主桁下フランジ下面とした。（写真一、写真二）

付着塩分量の測定には、吸光光度法により塩素イオンを検知し、塩分 (NaCl) 量に換算した。また、分析方法は、採取物を5%硫酸溶液に浸漬し、さびを完全に溶解させて塩分を抽出し、濾過したものである。

表一 付着塩分量 (NaCl mg/m<sup>2</sup>) 測定結果

地域	採取場所	mg/m <sup>2</sup>
都市部	主桁下フランジ下面	4,000~5,000
山間部	主桁下フランジ下面	25,000~35,000
海浜部	主桁下フランジ下面	40,000~50,000



写真-1 海浜部主桁下フランジ下面 錆採取前



写真-2 海浜部主桁下フランジ下面 錆採取後

## 2. 塗膜劣化による素地調整と付着塩分量との関係

鋼橋塗装において、素地調整の品質が塗膜劣化に大きく影響することは周知の事実である。素地調整は、鋼材表面に残存する錆、劣化塗膜、塩分等の介在物を除去し、鋼材表面を清浄でかつ適度に粗にする作業である。素地は、ブラスト処理等によって鋼材表面の素地調整を適切に確保することにより、錆や劣化塗膜を除去するとともに、水洗い等の洗浄を行うことにより、付着塩分を除去している。付着塩分に関しては、鋼道路橋塗装便覧（日本道路協会）では、塗膜上ではその許容量はNaCl 1100mg/m<sup>2</sup>以下が多いとされている。しかし、これまでの塗替え塗装の素地調整では動力工具による方法が一般的であったため、ブラスト法による場合は、その処理が明確になっていないのが現状である。

表-2 試験片の洗浄方法

	設定時	参考文献 <sup>4)</sup>
水圧	7.5MPa	6~8MPa
ノズルから洗浄面までの距離	約0.8m	1m
流量	3.5L/m <sup>2</sup>	3.5~4L/m <sup>2</sup>
洗浄回数		2回以上

表-3 試験片のブラスト処理方法

	設定時	参考文献 <sup>5)</sup>
空気圧	0.5MPa	0.5~0.7MPa
ノズル口径	8mm	6~8mm
噴射距離	約500mm	200~500mm
噴射角度	約70°	60~90°

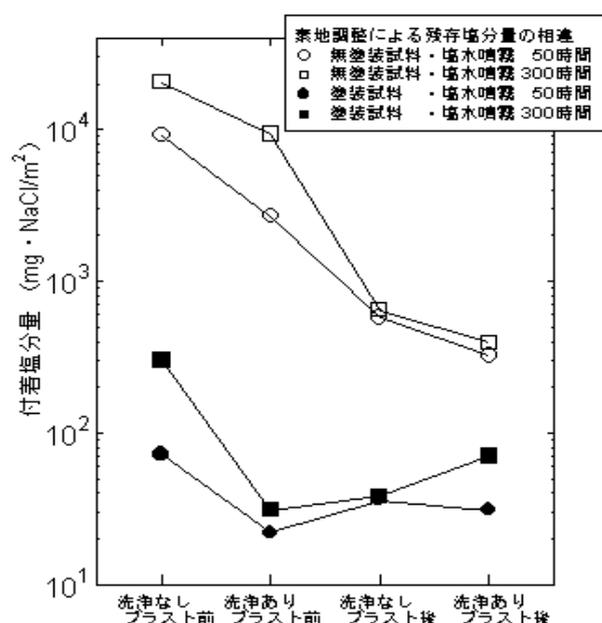


図-3 付着塩分量の変化

そこで、一般的なブラスト処理の有無と洗浄の有無（一般的というのは、ISO Sa 2.5、洗浄常温0~20℃1回）による付着塩分量の変化を調べた促進試験として、塩水噴霧試験を無塗料試料と塗料試料の2つの場合に分け、洗浄の有無、ブラストの有無をパラメータとして、実験した結果が図-3である。実験結果から、無塗料試料については、2000mg/m<sup>2</sup>NaCl以上あり、洗浄、ブラスト処理後も塗膜上の許容値を上回る結果となった。一方、塗料試験は、許容値を下回っている。

このことは、錆のある部分は、通常の洗浄、ブラスト処理を行っても許容値（素地上の許容値は明確なものは現在ないので、今のところ塗膜上のもので

述べている)まで付着塩分がとれない可能性が高いことが明白になった。

### 3. 複合サイクル試験 (JIS K5621) 日数と付着塩分量との関係の算出

現況の鋼橋において、洗浄やブラスト処理を施しても付着塩分量が許容値を上回る可能性がわかったが、本来曝露試験を行って明らかにする必要がある。しかし、曝露試験では時間がかかり過ぎるため、曝露に近いとされている複合サイクル試験で、現況の鋼橋に近似した試験片を作成して実験することに置き換えることが望ましい。そこで、曝露試験と比較的相関の良い日本塗料検査協会サイクル(S-6) (図-4) による複合サイクル日数と付着塩分量との関係を実験式で表せれば、実態に近い試験片を作成することができ、その試験片を使って、素地の処理実験を行うことができる。

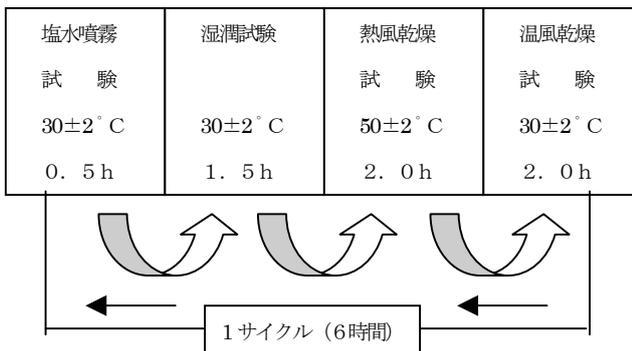


図-4 複合サイクル試験 (S-6)

データを採取する試験片として、次の通りとした。

材 質 : SS400

試料寸法 : 150mmH×70mmW×3.2mmT

塗 装 : フタル酸樹脂塗料 (鋼道路橋塗装便の A 塗装系に基づく)

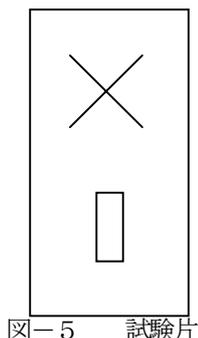


図-5 試験片

図-5のように塗装面の上面の中央部に約4cmの鋼面に達する傷(クロスカット)を、下に10mm×20mmの塗り残しを作成した。試験日数は100日とし、データは5日毎に採取して吸光光度法による分析により塩分を測定した。

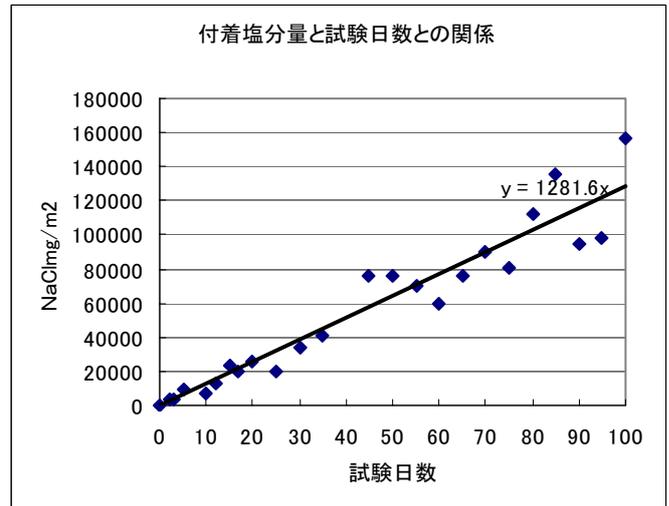


図-6 付着塩分量と試験日数との関係

図-6は、その実験により得られたものである。過去において、付着塩分量と曝露試験日数との関係が直線式で表されており、この場合も直線近似式が妥当であると考えた。図-5より次式が導き出された。

$$Y = 1.28 \times 10^3 X$$

Y : 付着塩分量 (NaCl mg/m<sup>2</sup>)

X : 複合サイクル試験日数 (日)

これにより、実態の付着塩分量を上式に代入することにより、促進試験である複合サイクル試験の日数を求めることができ、実態の鋼橋の錆の部分にあった近似的な試験片を作成することができる。

### 4. ふっ素樹脂における素地上の付着塩分に対する塗膜劣化の許容付着塩分量の解明について

塗膜上の許容付着塩分量は、「鋼道路橋塗装便覧」によると、「一般にNaCl 100mg/m<sup>2</sup>以下としている場合が多い」とうたわれている。しかし、素地上での許容量については、現在のところわかっていない。また、塗装によっても変わってくるものと思われる。ここでは、腐食の発生しやすい場所の現場塗替え塗装

では今後よく使われるであろう、ふっ素樹脂塗料についての許容付着塩分量を解明するため、以下のような実験をおこなった。まず、寸法150mmH×70mmW×3.2mmT（材質SS400）の試験片の片面をブラストによりISO Sa3まで処理した。次にNaCl溶液をはけにより塗布し、付着塩分量がそれぞれ0、50、100、150、200、250、300、400mg/m<sup>2</sup>になるように付着させ、これを各3枚作成した。これを表-4のように塗装し、JIS K5600-7-1のソルトスプレー試験を実施した。

表-4 ふっ素樹脂塗料塗装系

塗料名	塗膜厚
有機ジンクリッチペイント	75 μm
弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料	60 μm
弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料	60 μm
弱溶剤ふっ素樹脂塗料用中塗り	30 μm
弱溶剤ふっ素樹脂塗料用上塗り	25 μm
合計	250 μm

ソルトスプレー試験による塗膜劣化の評価：膨れの等級（JIS K5600-8-2）評価によって、許容付着塩分量を推定した。実験結果を図-7に示す。この結果から、付着塩分量200mg/m<sup>2</sup>以下については、膨れの現象があらわれなかった。よって、許容付着塩分量は200mg/m<sup>2</sup>以下と推察できる。

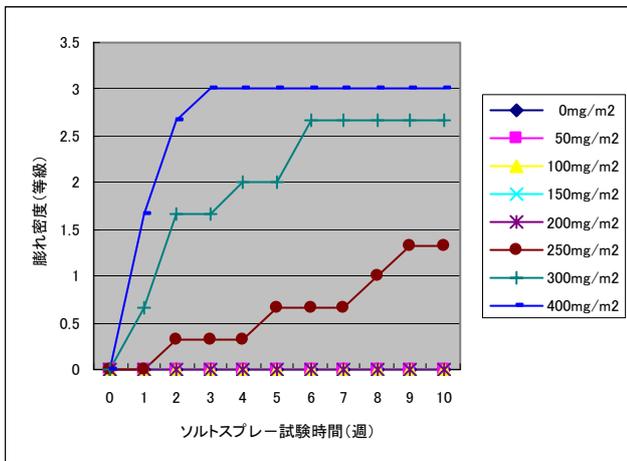


図-7 ソルトスプレー試験時間と膨れ密度の関係

### 5. 塗替え時の素地調整品質確保の試験

図-6により得られた実験式により、試験片を作成し、塩分除去に有効であると考えられる影響因子を全部取り入れて、素地調整の品質確保の試験を行った。ケレン作業は、ISO 8501-1によるSa3の処理を施した。ブラスト材は、一般に普及しているアルマダイトガーネットを使用した。洗浄については、スチームを使用し、洗浄回数を1回と2回、水量を約4L/m<sup>2</sup>と8L/m<sup>2</sup>とに分けて実施した。その結果が図-8である。

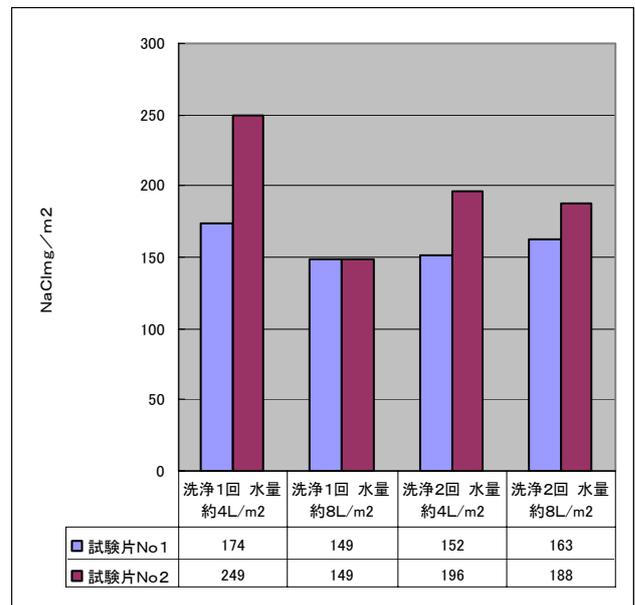


図-8 素地調整後の付着塩分量

この結果から、素地調整後の付着塩分量は、ほぼ、ふっ素の許容付着塩分量200mg/m<sup>2</sup>以下になっており、素地調整の品質確保が達成されている。また、洗浄の回数や水量には、特段の関係は見あたらないように推察される。

### 6. おわりに

一応、許容付着塩分量を満足する品質確保の条件は出たが、さらに詳細な試験をして、なるべくスチームではなく常温の水で、さらには洗浄無しで実施できる方が施工機器が少なく済み、その分全体のコストが下がり、LCCにも影響してくるのは周知の事実である。今後、より詳細に設定条件を整理していく必要がある。

## 9. スリップフォーム工法の応用施工例と供給方法の改善

前田道路(株)：○山内 盛人、菊地 重徳、内山 伸一郎

### 1. はじめに

近年、コンクリート構造物やコンクリート舗装工事では、省力・省人化や施工効率の向上が期待できることから、スリップフォーム工法が急速に普及してきている。コンクリート構造物への活用事例としては、高速道路等のセンターバリヤ、路肩のL型またはU型側溝、トンネル内の円形水路等々がよく知られている。弊社ではスリップフォーム工法を防草と路肩保護を目的とした路肩コンクリートシール工事に国内で初めて採用し、良好な結果を得ることができたので、以下にその概要を報告する。

また、舗装版においては、走行車両の振動・騒音の軽減、走行性向上等の効果が期待される連続鉄筋コンクリート舗装の舗装にスリップフォーム工法が活用されている。しかしながら、これを施工するスリップフォームペーパーへの生コン供給は、ペーパー前方に連続鉄筋が敷設されているために生コン運搬車が前方から直接材料供給を行うことはできないという課題がある。課題解決の一手法として、工夫したベルトコンベヤ(以下、ベルコンと略す)を用いて生コン供給を行い、良好な結果を得たので、合わせて概要を報告する。

### 2. 路肩コンクリートシール工事の概要

#### 2-1. 工事概要

本文で紹介する3件の路肩コンクリートシール工事は、島根県江津道路嘉久志舗装工事(以下、江津工事)と秋田県二ツ山地区改良舗装工事(以下、二ツ山工事)、山口県岩国飛行場(15)滑走路移設南地区幹線道路工事(以下、岩国工事)である。それぞれの工事概要を表-1に示す。いずれの工事も人力施工によるコンクリートシール工で設計されていたが、江津工事と二ツ山工事は施工時期が秋期であったため、天候不順が予想されていた。特に江津工事は水を含むと流れやすい砂質系シルトの土質のため、施工期間中に法面が流さ

れる危険性があった。一方、二ツ山工事は冬期の降雪までに施工を終了させなければならないため、工期短縮を可能とする工法が検討され、スリップフォーム工法を採用しての機械施工で対応することとした。

また、岩国工事では関連する他工事等の関係で施工時期が限られたため、当初設計では複雑に変化していた断面形状を可能な限り機械施工で対応できるように一定勾配に変更した。

江津工事の施工断面を図-1、2に、二ツ山工事の施工断面を図-3に示す。

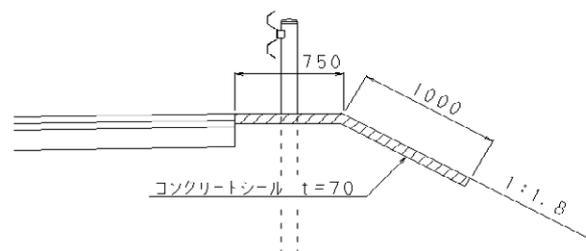


図-1 江津工事の施工断面(盛土部)

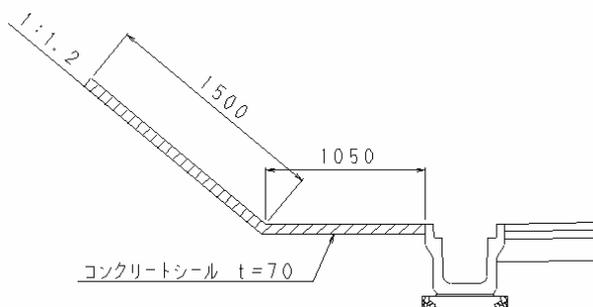


図-2 江津工事の施工断面(切土部)

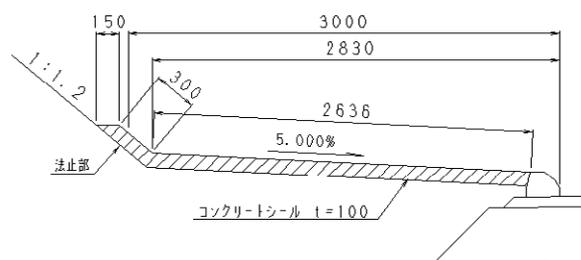


図-3 二ツ山工事の施工断面

表－１ 工事概要

工事名	江津道路嘉久志舗装工事	二ツ山地区改良舗装工事	岩国飛行場(15)滑走路移設南地区幹線道路工事
工事場所	島根県江津市嘉久志地内	秋田県能代地区河戸川～柏子所地内	米海兵隊岩国基地内
発注者	国土交通省中国地方整備局 浜田河川国道事務所	国土交通省東北地方整備局 能代河川国道事務所	広島防衛施設局 建設部土木課
工期	平成 16 年 3 月 24 日～ 平成 17 年 2 月 18 日	平成 16 年 3 月 11 日～ 平成 16 年 12 月 15 日	平成 16 年 3 月 12 日～ 平成 17 年 8 月 31 日
工種	コンクリートシーリング 2900m <sup>2</sup> t=7cm 平場 0.75m、法面 1.0m、勾配 1:1.8(盛土) 平場 1.05m、法面 1.5m、勾配 1:1.2(切土)	コンクリートシーリング 3990m <sup>2</sup> t=10cm 平場 2.636m( 5.0% ) 法止め部 0.3m、勾配 1:1.2	コンクリートシーリング 2155m <sup>2</sup> t=20cm 法面 3.167m、勾配 1:2.4
生コン品質	スランプ 5.0cm±1.5cm 空気量 4.5±1.5 %	スランプ 5.0cm±1.5cm 空気量 4.5±1.5 %	スランプ 5.0cm±1.5cm 空気量 5.0±1.5 %

## 2－2. 機械仕様

スリップフォームペーパーは、特性モールドを取り付けた GOMACO 社製 GT-6300 を使用した。それぞれの工事で使用したモールドの特徴と材料の供給方法を表－2 に示す。

表－2 モールド及び材料供給機

江津工事	盛土部勾配 1:1.8 モールドと切土部勾配 1:1.2 モールドを新規に製作。 材料の供給には盛土部、切土部共に GT-6300 専用の材料供給ベルコンを使用。
二ツ山工事	法止め部モールドは新規製作、その他は舗装専用モールドを転用。 モールドとの重量バランスを考慮してカウンターウェイトを載せるためのサイドマウントフレームを新規に製作。 材料の供給には横取り機(130m <sup>3</sup> /h)を使用。
岩国工事	舗装専用モールドを法面勾配にあわせるためのフレームとモールドへの材料投入ホッパを新規に製作。 材料の供給は横取り機から GT-6300 専用のベルコンに乗り継ぎしていたが、材料の分離から法肩部分にジャンカが発生。横取り機からモールドホッパへ直接投入に変更。

## 2－3. 施工上の留意点と対応策

江津工事、二ツ山工事の施工厚はそれぞれ 7cm と 10cm のため、表面乾燥よりも地盤の吸水によるヘアク

ラックの発生、および法面においては勾配から起こるダレによるヘアクラックの発生と不陸の 2 点が懸念された。その対策として打設面にプライムコートをして防水性を高め、法尻のダレ防止対策としてコンクリートに特殊添加剤を混入した。この添加剤はコンクリートやモルタルに含まれるセメント粒子間に存在する遊離水に作用して骨材の分離抑制と斜面でのコンクリートのダレを抑制する粘りを有し、バイブレータの振動が加わったときに流動性が向上するという相反する特性を持っている。

岩国工事では護岸工事が目的のため、施工厚が 20cm と厚く、勾配も 1:2.4 と急勾配なため、上記 2 件の施工同様生コンに添加剤を混入し、法面下側に鋼製の型枠を設置し端部の仕上げのみ人力作業とした。

## 2－4. 施工結果

江津工事の施工状況を写真－1 に示す。当該工事の日当り最大施工延長は 170m(4h/day) で、工期は当初の人力施工 30 日の予定から 13 日間短縮することができた。また、人力施工では困難な法肩の線形の確保と法面の平坦な仕上がりが得られ、法面と平場の施工ジョイントからの浸透水防止にもつながった。

二ツ山工事の日当り最大施工延長は 230m、日当り平均施工延長は 150m となり、人力施工 28 日の予定から 21 日間短縮となった。モールドによるコンクリートの成形は満足できるものであったが、写真－2 の左端



写真-1 江津工事の施工状況（盛土部）



写真-3 岩国工事の施工状況

に見られるように切土部とモールドの端部の隙間からコンクリートが噴き出し、施工終了後にハツリ作業を要する部分が生じた。このため、モールド端部垂直方向に止め板を加工したが、材料のみ込みが悪くなり、法止め部天場の整形に不都合が生じたことから、切土部法尻の整形とモールド端部の再加工を施したことで良好な仕上げが得られるようになった。



写真-4 岩国工事の端部仕上げ状況



写真-2 ニツ山工事の施工状況

岩国工事の施工状況を写真-3に示す。当該工事の日当たり平均施工延長は170mで、人力施工11日の予定から7日間短縮となった。施工当初は膨張目地の設置をスリップフォームペーパー通過後に一本爪リッパを使用して設置していた。しかし、コンクリートの硬化が早く、目地設置後の人力仕上げが困難なことから、翌日にコンクリートカッターで切断した後、目地を設置することによりスリップフォームペーパーで仕上げた平滑な平面を保つことができた。

写真-4に法面下の端部仕上げ状況を示す。法面下部においては、コンクリート版側面と型枠に角度がついているため締固め不足になる恐れがあった為、スリップフォームペーパー通過後に、棒パイプによる締固めを行い、人力による表面仕上げを行った。

今回初めての試みであったが、コンクリートシール工にスリップフォーム工法を採用したことにより、仕上がり面の品質に大きな成果を得ることができたと同時に、日当たり施工の増加によって全体工程を大幅に短縮し満足する結果となった。今後も構造物、舗装版の技術を応用することでスリップフォーム工法の可能性を拓けていきたい。

### 3. 材料供給方法改善の概要

#### 3-1. 従来の課題

スリップフォームペーパーへの材料供給は、いろいろ試されてはいるが、満足できるものはなかった。一例として弊社は、既報<sup>1)</sup>でトンネル内施工におけるハーフスリップフォーム工法で、横取り機とプレーサスプレッタの編成について報告した。これにより施工効率向上・工期短縮等の成果があった一方、専任オペレータが3人増加することと、生コン運搬車が通り抜けできないので材料供給効率が低下することが指摘されていた。これらの課題の解決策としては、スリップフォームペーパーに標準装備として付帯したベルコンを使用するという基本的な方法があるが、次のように材料密度が不均一化する課題が残る。

従来からのベルコンでスリップフォームペーパーの機側から生コンを供給すると、その落下位置はベルコンのヘッドプーリ端1ヶ所となるため、供給された生コンは山状に堆積した塊となる。図-4にその横断面模式図を示す。堆積山状塊に関しては、舗設後の版と断面面積が同等とみなせ、(1)式が成立する。

$$H = \{T \cdot W \cdot (1 + \eta / 100) \cdot \tan \theta\}^{1/2} \quad (1)$$

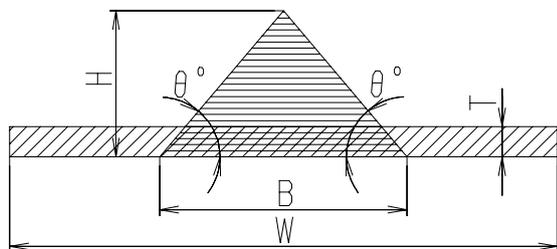


図-4 堆積山状塊の横断面模式図

ここに

T : コンクリート版の厚さ [m]

W : コンクリート版の幅員 [m]

B : 堆積山状塊の底辺長さ [m]

H : 堆積山状塊の高さ [m]

$\theta$  : 堆積山状塊の安息角 [°]

$\eta$  : 余盛率 [%]

一例として、 $T=0.21\text{m}$ 、 $W=4.9\text{m}$ 、 $\theta=50^\circ$ 、 $\eta=10\%$ とした場合、(1)式より堆積山状塊は底辺1.95mで高さ1.16mとなり、かなり高い山状であることがわかる。

実際の現場では、横断方向の材料抱込み量の均一化を図るために、山状塊の生コンを敷きならし用スクリーナーによって左右の機側方向へ撒き出しを行っている。その結果、山状塊の底面部分は自重による圧密を受けて材料密度が高く、一方、撒き出された部分は材料密度が低くなる。この横断方向の密度の不均一が、エッジランプ（端部のダレ）等につながり、版の仕上がりが状態へ悪影響を及ぼすことが懸念されている。

写真-5は標準装備のベルコンを装着した状況であり、ヘッドプーリが高い位置に設定されている。



写真-5 従来のベルコンの状況

#### 3-2. 改善した材料供給方法

ほぼ水平に設置したベルコン上にデフレクタ（材料そらせ板）を置き、ベルコン上で横行できる構造を考案した。これにより、ベルコンで搬送されてきた材料は、デフレクタのある位置で向きを変えられ、ベルコンの側方に落下する。また、デフレクタを連続的に移動し、材料の落下位置を変更することができる。その結果、1ヶ所に供給材料の高い山をつくらずに幅方向に分散して材料を堆積させることができ、敷きならした材料の密度を均一に仕上げることが可能となった。材料の流れと堆積の概念を図-5に示す。

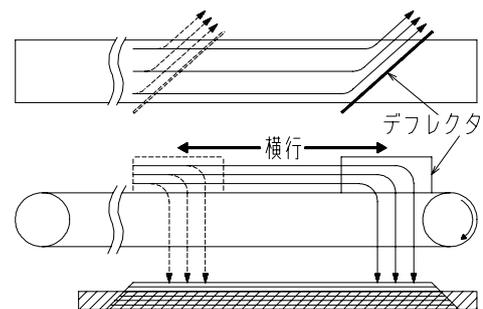


図-5 材料流れの概念図

### 3-3. 構造および施工実施例

スリップフォームペーバは米国 GOMACO 社製 Commander III New-generation を使用した。横行式デフレクタ付ベルコンを装着した新型装置の外観を写真-6に、主仕様を表-3に示す。ベースとなるベルコンにはモジュラータイプのものを用い、そのパイプフレームをデフレクタの横行レールとして利用し、軽量化を図った。

デフレクタ装置は横行駆動装置から切り離して構成し、ユニット化した。生コン運搬車の通行側によってベルコンの向きが左右入れ替わっても、材料の落下方向をオペレータ側に向けることができる。また、磨耗によって部品を交換する場合、交換時間の短縮も図れる。デフレクタの横行及びベルコンの駆動はスリップフォームペーバ本体の油圧を用い、新規に設計した油圧回路を追加するだけで済ませ、動力ユニットを新たに追加することなく、コンパクトにおさめることができた。横行の自動往復モードをスイッチで選択することにより、オペレータの操作によらず、両端に付けたリミットスイッチで指定された任意の範囲で横行往復動作を繰り返すことができるようにした。また、別に設けた手動スイッチではデフレクタを任意の位置に移動・停止させることができるようにもした。

本装置を使用して施工する場合、新たなオペレータは必要なく、スリップフォームペーバのオペレータがベルコンの操作を兼務する。従来の横取り機を使用する方法に比べると3人の要員を削減できた。

東海環状自動車道猿投山トンネルの施工において、本新型装置を使用し、均一なコンクリート版を舗設することができた。同トンネルは上り線延長が約4.4km、下り線延長が約4.2kmとかなり長い。ハーフスリップフォーム工法に本新型装置を組み合わせることで、生コン運搬車の通り抜けが可能となり、材料運搬効率を格段に向上させることもできた。平均舗設延長で324m/日、最長舗設延長は500m/日に達し、出来高を伸ばすことができた。その施工概要を表-4に示す。このような延長の長いトンネルの施工では、生コン運搬車や作業車の通り抜けの可否が施工能率に大きく影響する。それが可能なハーフスリップフォーム工法は、能率向上の面で適していると評価できる。



写真-6 新型装置外観

表-3 主仕様

走行装置形式	4脚クローラ
総質量	16,740 kg
エンジン定格出力	126 kW
表面仕上げ装置	オートフロート
ベルト幅	600 mm
ベルト速度	100 m/min
ベルト駆動油圧	17.2 MPa

表-4 猿投山トンネル施工概要

路線	上り線	下り線
施工面積	42246 m <sup>2</sup>	41375 m <sup>2</sup>
施工幅	4.9m, 4.6m	4.9m, 4.6m
版厚さ	210 mm	
スランプ	3.5±1.5	
空気量	5.5±1.5 %	
施工期間	H17/4/23~9/25	

### 3-4. 他の課題と対応

横行式デフレクタ付ベルコンの装着により、専任オペレータを増やすことなく、均一な密度のコンクリート版を舗設することができ、通り抜け可能な通行帯を確保して舗設能率が向上することが確認された。しかし、施工を通して判明した次なる課題は当然ある。基本的な課題として次の2点の解決が求められた。

#### 3-4-1. 幅を適合させる課題と対応

第1の課題は、現場によって異なる幅の条件にベルコンの長さを適合させる方法である。最初の施工現場では試行錯誤の要素が多く、調達性の良いモジュラータイプのベルコンをベースにした。トンネル幅または舗設幅が大きく異なる場合、通り抜け可能な通行帯を

確保しつつ施工するためには、ベルコンの中間ユニットを着脱してベルコン長さを変更する必要がある。その都度、コンベヤベルトも巻きかえる必要があり、経済的・時間的に大きな負担となる。この課題解決の方法として、スライド伸縮式や回転式等の案を検討した結果、最終的に油圧シリンダによる折りたたみ式を改良型ベルコンに採用した。比較的構造が簡単で軽量化可能であること、様態を短時間で変更できること、アクチュエータの油圧源が本体に既存であることが採用の主な理由である。生コン受取側になるテールプーリ側のベルコンフレームを約2メートルの長さで分割し、残りの固定されたベルコンフレームにピン支持により接合し、2本の油圧シリンダで回動する構造とした。生コン運搬車や作業車両が通過する際には、回動するベルコン部分をほぼ鉛直に立ち上げて通行帯を確保する。生コン受取時には水平位置に戻して作業を行う。これにより約1.7mの幅の変化に対応可能となった。なお、更なる幅の変化にも対応できるよう、固定されるベルコンフレームに中間ユニットを追加できる構造も加えた。ただし、その場合にはコンベヤベルトを巻きかえる必要がある。

### 3-4-2. 耐久性向上の課題と対応

モジュラータイプベルコンを使用した最初の装置は、軽量化と調達性でメリットはあったが、強度と耐久性に乏しい面があった。生コン運搬車との若干の接触等にも耐えることができる強度と耐久性のあるベルコンフレームを、チャンネル鋼材を骨組みにして新規に設計した。横行するデフレクタ装置を強化するとともに、磨耗部分は容易に部品交換できる構造とした。

上記課題に対応した改良型装置の外観を写真-7に示す。中国地方整備局「東広島バイパス 国信トンネル他舗装工事」の瀬野川トンネルの施工から改良型装置を適用した。その施工概要を表-5に、施工状況を写真-8に示す。延長は約250mと短い距離ではあったが、改良型装置の効果を確認することができた。

## 4. おわりに

スリップフォーム工法の適用範囲は広がりを見せており、その構造物の高付加価値化も図られている。その一つにパターンドスリップフォーム工法がある。高速道路のセンターバリヤにレンガブロック模様や乱貼



写真-7 改良型装置外観

表-5 瀬野川トンネル施工概要

路線	国道2号 東広島バイパス
施工面積	2200 m <sup>2</sup>
施工幅	8.5 m (2分割)
版厚さ	300 mm
施工期間	H17 / 7~8月



写真-8 瀬野川トンネル施工状況

り平板模様等を同時に成型していくもので、美的景観が向上する。スリップフォームペーパーのモールド後端直後にパターンを彫り込んだゴム製のロールをセットし、コンクリート仕上げ面に型押しで成型する。後日カラーリングを施せば一層効果的である。今後も技術開発・改良を通して更にスリップフォーム工法のメリットを生かしていきたい。

最後にこの工法を理解し、採用して下さった関係各位に深く感謝の意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 鈴木,山内: ハーフスリップフォーム工法による施工について 第25回道路会議論文集, 日本道路協会, 2003年11月5日

## 10. 太径曲線パイプルーフ工法の開発ー下向きパイプルーフの実大施工試験

鹿島建設株式会社 機械部 : ○ 白井 俊輔  
 大成建設株式会社 機械部 機械技術室 : 藤谷 俊実  
 鉄建建設株式会社 土木本部 新工法推進部 : 伊藤 康裕  
 コマツ地下建機株式会社 エンジニアリング部 : 秋山 浩志

### 1. はじめに

近年、都市交通機能の向上及び環境保全への配慮を目的に幹線道路の地下トンネル化が進められている。本線トンネルは地上交通などへの影響が少ないシールド工法で施工されるが、ランプと本線との接合部については開削工法による施工が一般的であり、地上交通への影響は避けられない。一方、非開削工法で施工する場合、トンネルの大断面化、大深度化に伴い従来の凍結工法、薬液注入工法のみでは、土留め止水性能の信頼性、安全性に課題が残る。

これらの問題を解決するため、大口径の曲線鋼管を連続して敷設し土水圧に対抗させ、その内部に大空間を構築する工法（太径曲線パイプルーフ工法）の開発を進めてきた。

図-1にシールドトンネル、図-2に山岳トンネルの合流部の構造を示す。また、図-3はシールドトンネル内で太径曲線パイプルーフを施工中の状態を示したものである。

太径曲線パイプルーフ工法の特徴を以下に示す。

- ① 太径曲線パイプルーフで土圧に対抗し、大断面地下空間を非開削で構築できる。
- ② 止水が必要な場合は、パイプルーフ内から凍結工法等で施工して止水する。
- ③ 太径曲線パイプルーフ管は、概ね外径500 mm以上の円形を基本とし、任意の曲率半径・断面寸法に対応できる。

本工法を実際の工事に適用するのはこれからであるが、昨年実施した実大規模の施工実験及び高水圧に対応するエントランスの止水実験により、実施工に適用できることが確認できたので紹介する。

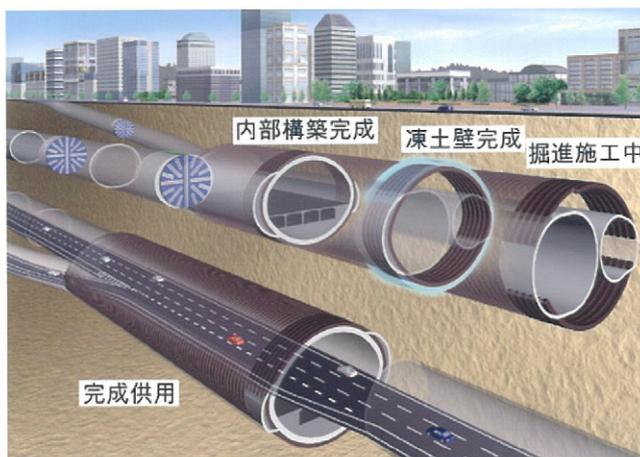


図-1 シールドトンネル合流部施工イメージ

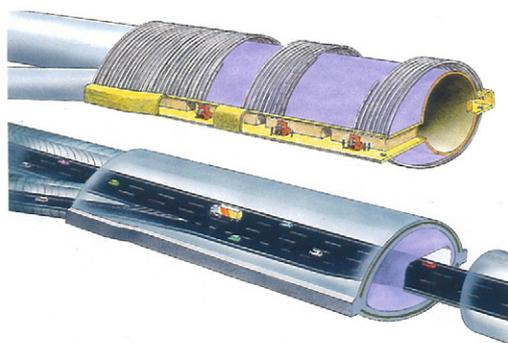


図-2 山岳トンネル合流部施工イメージ

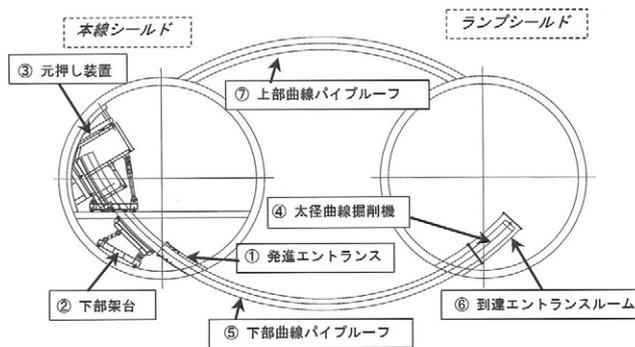


図-3 太径曲線パイプルーフ施工イメージ

## 2. 太径曲線パイプルーフ実大実験

### 2.1 実験の目的

本実験では、太径曲線パイプルーフ工法の核となる姿勢制御技術確立のほか、潜在的な技術的課題を顕在化し、その解決を図ることを目的とした。

### 2.2 実験の概要

実験全体図を図-5に、装置概観を写真-1に、また、発進エントランス部分を写真-2に示す。

本工法では太径の鋼管を密に施工するため、先行敷設した隣接する鋼管が施工精度にどのような影響を及ぼすかを確認する目的で1→3→2→4→5列(切羽に向かって右から)の順で実験を行った。

実験の主な仕様を以下に示す。

地 質：ローム、粘性土、礫混じり粘性土  
N値3～10

工 法：泥水式曲線推進工法

掘進機外寸： $\phi 830 \text{ mm} \times 2674 \text{ mm}$

装備トルク：25.4 kNm(7.0 min<sup>-1</sup>)

元押装置仕様：1470 kN $\times$ 1785 mmst $\times$ 2本

鋼 管 径：外径 $\phi 812.8 \text{ mm}$

推 進 長：L $\approx$ 21 m/列 (3 m/本 $\times$ 7 本)

縦断曲率半径：R=16 m

施 工 列 数：5 列

施 工 間 隔：1.2 m

### 2.3 実験状況及び結果

発進立坑部には、鋼管をセットする押し輪やこれを押込む推進ジャッキ等から構成される元押装置、掘進機・鋼管の位置調整及び固定を目的とした下部架台、更に発進坑口部にはエントランスを設置する。エントランスは、坑口部の止水を目的とするため、ワイヤーブラシ式とゴムパッキン(押え金物付き)を併用した。

掘進時に発生する反力は、実施工においてはトンネル内壁で受けるため、実験ではトンネル内壁を模擬した反力受け架台を設置した。

掘進は、実施工で想定される手順どおり、発進立坑から掘進機、鋼管を溶接で順次接続し、元押し装置で推進した。掘進スピードを図-6に、推力及び

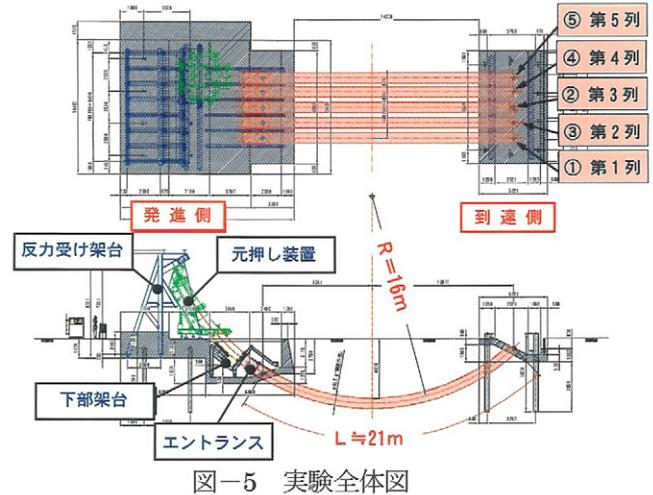


図-5 実験全体図



写真-1 実験装置全景



写真-2 エントランス、下部架台

カットトルクを図-7に示す。

掘進スピードは掘進精度の確保を目的とし、20～30 mm/min の範囲で制御した。また、ジャッキ総推力は300～500 kNの間を、カットトルクは10～15 kN $\cdot$ mの間を推移した。

本実験では、パイプルーフの目標到達精度を水平方向で±50 mm、鉛直方向で±100 mm とした。

この目標値は、シールドトンネル間の拡幅を行う場合を想定し、掘進機到達側トンネルのセグメント主桁を損傷しないために必要な値である。

この目標値を満足するための掘進制御方法として、以下の①～③の装置及び方法を複合的に組み合わせた。

- ① 下部架台の方向制御装置及びローリング防止装置
- ② 掘進機の揺動機構（全方向±3°）
- ③ 鋼管引き戻し・再掘削



写真-3 到達状況

実験の結果を以下に示す。

図-8に到達精度計測の例を示す。

施工途中では、先端位置は水平-50～30 mm、鉛直-60～0 mm 程度振れたが、到達時変位は水平、鉛直方向とも0～-20 mm 程度であった。

姿勢制御方法に関して実験で得られた知見は以下のとおりである。

鋼管2本(掘削長6 m)程度までの掘進初期時には、①を主体に用いることで地山貫入部での線形確保・蛇行抑制が可能である。しかし、それ以降の掘進では同様の修正効果は得られず、②及び③の手法を用いたローリング修正並びに蛇行修正を行い、計画線形及び目標到達精度を確保することができた。

したがって、特に発進側エントランス装置には基本的性能である止水性を確保する必要があるのは当然であるが、引き戻し操作に対する追従性及び耐久性が求められる。

#### 2.4 実大実験のまとめ

本実験においてφ812.6 mmの鋼管×曲率半径16 m×施工延長21 mの下向き施工実験で以下のことが確認できた。

- ・ 高精度の施工が可能（実験では鉛直、水平とも±20 mm 程度の到達精度）
- ・ 姿勢制御方法は、掘進機の揺動機構による修正及び引き戻し後再掘削による修正が有効である。

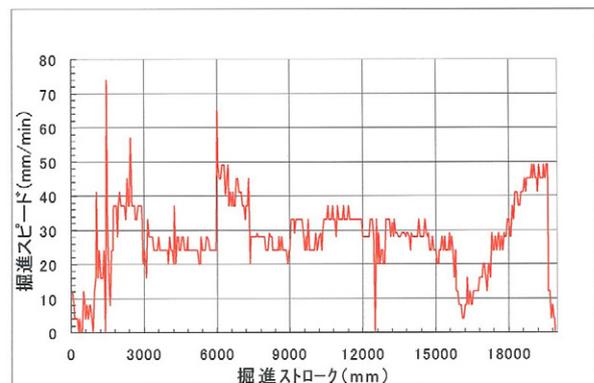


図-6 掘進ストロークと掘進スピード

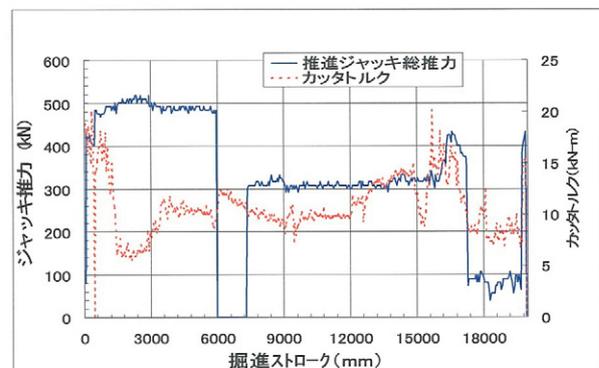


図-7 ジャッキ推力とカッタトルク

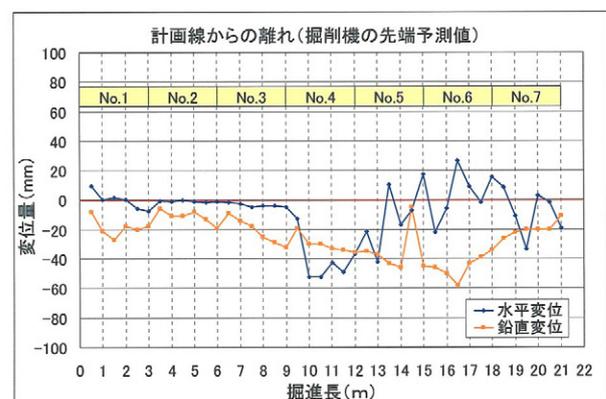


図-8 施工精度

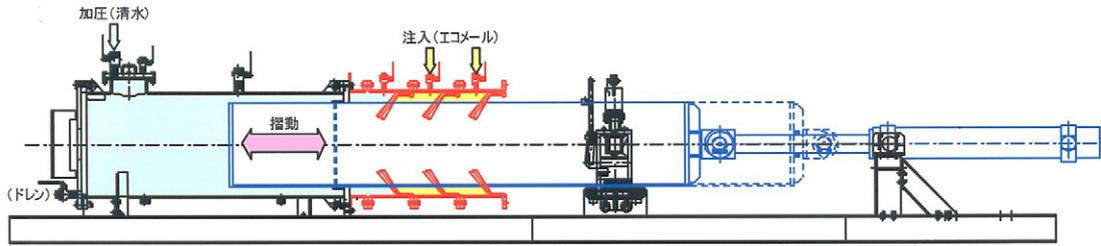


図-10 実験装置

### 3. エントランス止水実験

#### 3. 1 実験の目的

エントランスの止水性能及び姿勢制御のための引き戻し操作に対するエントランスの追従性及び耐久性確認を目的とする。

#### 3. 2 エントランスの構造

エントランスは図-9に示すようにワイヤーブラシを多段装備し、ブラシ間にテールシール用充填材を充填することで止水ゾーンを形成し止水する構造である。ワイヤーブラシの柔軟性により、施工誤差を吸収し引き戻し施工に追従できる。

#### 3. 3 実験の概要

図-10に実験装置全体図を示す。

清水を満ちし最大1.0MPaの水圧を作用させた加圧容器に鋼管(φ812.6mm)を挿入し、油圧ジャッキで1,000mm往復させながら、エントランスの止水状況を確認する方法で実験を行った。

鋼管の移動速度は50mm/minとした。

なお、施工精度を考慮して、エントランス部のクリアランスを73mm±50mmの範囲で変化させた。

写真-4は偏心量50mm、1.0MPa加圧時の実験状況を示す。写真から止水性能が確保されているのがわかる。なお、最も外側のブラシには、最も大きな差圧が作用するため、反転を防止する目的で簡易的なフラッパーを装備した。

#### 3. 3 エントランス止水実験のまとめ

多段ワイヤーブラシ式エントランスの止水実験で以下のことが確認できた。

- ・ 1.0 MPaの水圧下で施工できる。(フラッパー装備)
- ・ 引き戻し作業に対応できる。
- ・ 施工誤差を考慮し、鋼管の偏心量、最大50mmに対応できる。

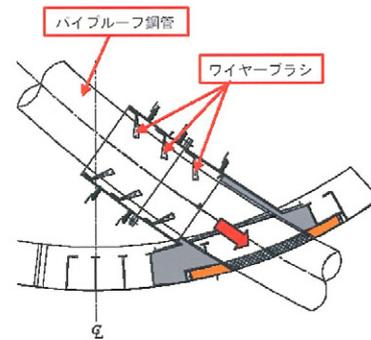


図-9 エントランスの構造



写真-4 止水状況(1.0 MPa、偏心50 mm)

### 4. おわりに

今回紹介した実験を通して太径曲線パイプルーフ工法を実施に適用できることが確認できた。また、姿勢制御方法、止水エントランスの構造等、種々の知見が得られた。今後、実施工に適用して更に完成度を高めるため首都高速道路株式会社と協議の上、研究を進めているところである。

### 参考文献

吉川 正, 加藤 誠, 永岡 高 他: 太径曲線パイプルーフ工法による非開削大断面地下空間構築工法(その1)~(その3), 土木学会第59回年次講演会, 2004.9

土橋 浩, 川田 成彦, 相沢 旬 他: 太径曲線パイプルーフ工法による非開削大断面地下空間構築工法(その4)~(その5), 土木学会第60回年次講演会, 2005.9

## 11. 遠隔操縦ロボット「ロボQ」による坑内チッピング施工

○ (株)フジタ 三村 洋一  
(株)フジタ 本多 茂

### 1. はじめに

ダム仮排水路トンネル閉塞工において、止水機能を担うプラグゾーンでは、閉塞するコンクリートの付着を確実にする目的で、仮排水路トンネルの覆工コンクリート表面全周にチッピング作業を行う。チッピング作業は人力作業が通常である。機械施工の場合はコンクリートハツリ機等を重機に装着して施工する。このチッピング作業は、騒音・粉塵等が激しい劣悪な環境であり、重機オペレータは、トンネル天端施工時、不自然な姿勢での作業が強いられる。

今回、このチッピング作業におけるオペレータの作業環境の向上、苦渋作業からの開放等を目的に、遠隔操縦ロボット（以下：ロボQ）を導入し、3箇所から

の映像を基にトンネル坑外のコントロールルームよりバックホウ（0.28m<sup>3</sup>級）とコンクリートハツリ機の遠隔操縦を行った。

本報告では、国土交通省中国地方整備局発注の灰塚ダム仮排水路トンネルで行ったロボQによるチッピング作業の施工結果について報告をする。

### 2. 施工システム

チッピング作業を行うのは、仮排水路トンネルの吐口から約160m入った33m区間である。施工配置図を図-1に示す。

チッピング作業施工設備一覧を表-1に示す。

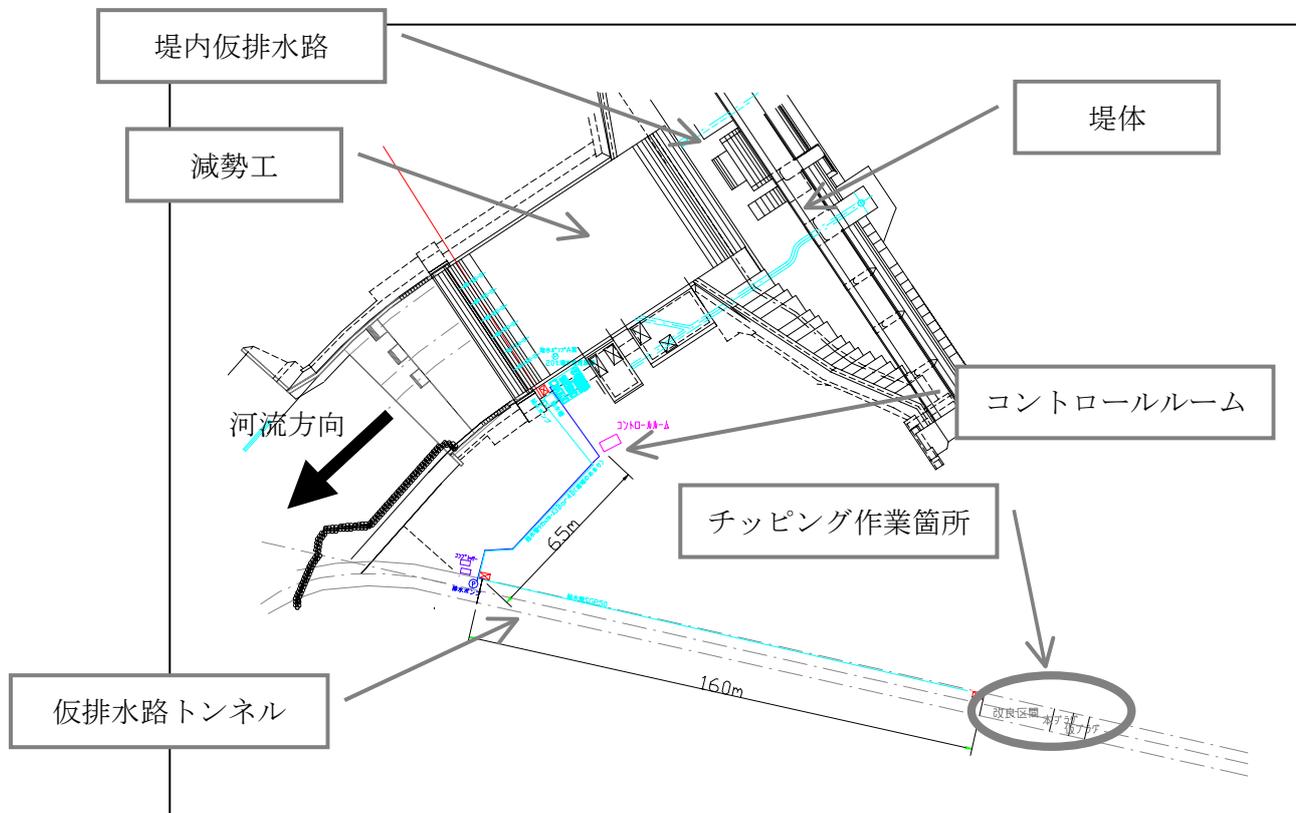


図-1 施工配置図

表-1 施工設備一覧

	使用機材	型式・仕様	数量(単位)	適用
チッピング設備	コンクリートハツリ機	11m <sup>2</sup> /h	1 (台)	
	上記取付油圧ショベル	0.28m <sup>3</sup> 級	1 (台)	
	コンプレッサ	11m <sup>3</sup> /min	1 (台)	
	配管	2B	200 (m)	
遠隔操縦設備	ロボQ		1 (台)	
	遠隔操作電磁弁盤	新規製作	1 (台)	スパイクハンマ操作用
	コントロールルーム	1.5K×4K	1 (棟)	
映像支援設備	カメラ(ズーム付き)	10倍ズーム	3 (台)	
	カメラ雲台	水平350°、上20°、下70°	3 (台)	
	カメラコントローラ	首振り、ズーム、フォーカス調整	3 (セット)	
	ロボQ映像受信盤		1 (台)	
	モニタ	20インチ(替替付き)	3 (台)	
	カメラコントローラ		3 (セット)	
	同軸ケーブル		1200 (m)	4系統分
照明設備	水銀灯	200V500W	4 (灯)	
	作業灯	100V300W	3 (灯)	
その他	給水ポンプ	水中φ80mm、18mH	1 (台)	
	給水槽	鋼製 5m <sup>3</sup>	1 (台)	
	排水ポンプ	水中φ50mm、20mH	2 (台)	
	換気ファン	300m <sup>3</sup> /min、400mAq、15kW×2	1 (台)	
	風管	防炎ビニルφ600mm	180 (m)	



写真-1 コンクリートハツリ機



写真-2 ロボQ取付状況

(1) コンクリートハツリ機

チッピング作業機械として、コンクリートハツリ機を取付けた。写真-1に示すようなφ70 (mm)のビットが6個ついた機械で、空圧による打撃力でチッピングを行う。今回は、油圧ショベル(0.28m<sup>3</sup>級)に取付けた。オペレータ搭乗運転の場合は、運転席に装備したフットペダル式のエア一弁を操作して作動・停止させる。

(2) 遠隔操作システム構成

図-2 にトンネル坑内の遠隔操作システム配置を示す。以下に各設備の概要を示す。

① ロボQ

ロボQとは、汎用油圧ショベル運転席に取付け

て遠隔操縦機械にすることができる装置である(国土交通省九州技術事務所と共同開発)。取付けた状況を写真-2に示す。

ロボQは、エアースリンダで駆動する装置であり、今回は、コンクリートハツリ機用に供給しているエアを分岐して用いた。

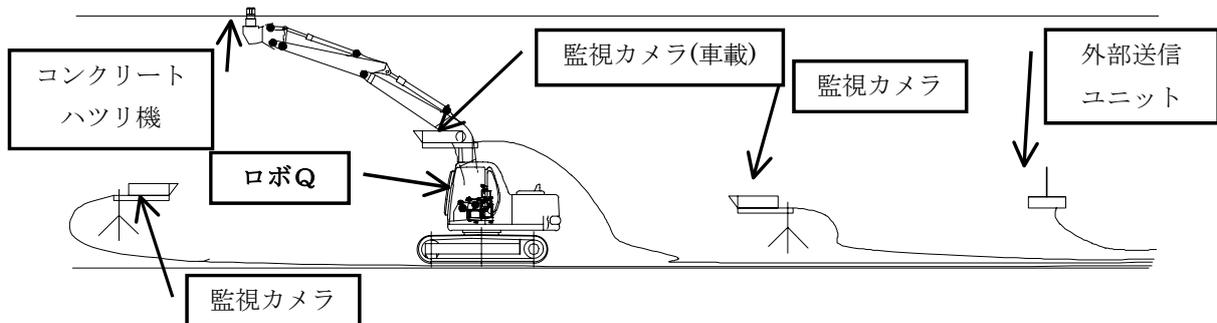


図-2 トンネル坑内遠隔操作システム配置図

② 外部送信ユニット

ロボQの操作は、写真-3 に示す遠隔操縦リモコンで行う。このリモコンは、特定小電力無線を使用しているため、通常、見通しの利く 150m位の距離でしか使用できない。しかし、今回は、トンネル坑外からの運転となるため、外部送信ユニットを取付けて、見通しの利かない 200m 以上離れた位置から操作できるように改造した。



写真-3 遠隔操縦リモコン

③ コンクリートハツリ機制御

コンクリートハツリ機の運転は、通常フットペダル式エア弁を使用するが、遠隔操縦を可能にするために、バックホウにコンクリートハツリ機遠隔操作盤（電磁弁内蔵）を取付けた。また、ロボQ側にも、リレー回路を追加し、リモコンの予備スイッチを利用して、電磁弁のON/OFFできるようにハードの改造を行うとともにロボQのソフトも改造した。

(3) 映像支援システム構成

見通しの利かないところからの遠隔操縦では、映像による支援が不可欠である。このため、モニタリング用に監視カメラ等を設備した。

① カメラ

バックホウ運転席上部に雲台付カメラを搭載した。施工状況の全景確認やハツリ機刃先確認用に雲台付固定カメラを2台配置した（写真-4、5 参照）。これら3台のカメラ操作は、有線でコントロールルームより行った。また、ロボQに装備されているカメラ映像は、SS無線で坑内映像無線盤まで中継し、そこから有線でコントロールルームまで配線し操作



写真-4 重機搭載カメラ



写真-5 固定カメラ

した。

② モニタ

コントロールルームには、20 インチのモニタを3台配置した。通常は、雲台付カメラの映像を映し出した。ロボQカメラは、レバーの作動状況を確認する場合に切替えて使用した。

③ 照明設備

施工場所の照明設備として、水銀灯4灯と作業灯3灯を設置した。作業灯1台は、重機に搭載した。照明に当て具合で影などにより、施工面の確認が難しくなったので、適宜調整した。

3. 施工結果

(1) 施工数量

ロボQによるチップング作業の施工数量を表-2

表-2 施工数量

		搭 乗 運 転		ロ ボ Q	ロ ボ Q
		( 底 盤 )	( 側 壁 )	近 傍 運 転	遠 隔 運 転
施 工 数 量	m <sup>2</sup>	86.7	80.5	38.7	72.6
時 間 当 た り 平 均 施 工 面 積	m <sup>2</sup> /h	3.61	5.75	2.58	3.77

に示す。施工は、オペレータ搭乗運転、バックホウ近傍でのリモコン運転およびコントロールルームでの遠隔運転を行った。

## (2) 施工状況

### ① 搭乗運転 (有人)

バックホウに搭乗し、通常の運転を行った。時間当たり施工面積は、底盤部が 3.61 (m<sup>2</sup>/h) で 86.7 (m<sup>2</sup>) を施工した。側壁部が 5.75 (m<sup>2</sup>/h) で 80.5 (m<sup>2</sup>) 施工した。底盤部およびその他に含まれる天井部は、施工面のアールがきつくコンクリートハツリ機刃先を壁面に平行に当てるのが難しくビット全てが壁面に当たらず、施工スピードが落ちた。また、運転席の反対側や天井部を施工する場合は、直接目視することが困難であることから施工スピードが落ちた。トンネル天端部を施工する時は、運転席シートを倒しての運転になり、非常に作業がやりにくく疲れる姿勢での運転となっ



写真—6 ロボQ近傍運転



写真—7 型枠際の施工

た。

### ② ロボQ近傍運転

ロボQを取付けた後、遠隔操縦のリモコン操作に習熟するために底盤部の施工および側壁部の施工(写真—6参照)を近傍で行った。当初は、運転操作の感覚に慣れず、施工スピードも上がらなかったが、徐々に施工スピードが上がっていった。

この際、写真—7に示すように型枠等障害物がある場合には、近傍で直接目視しながら施工した。この場合は、精度もよく、微妙な操作が必要な箇所の施工に適していることが判明した。時間当たり施工面積は、平均 2.55 (m<sup>2</sup>/h) で 46.0 (m<sup>2</sup>) 施工した。

### ③ ロボQ遠隔運転

オペレータが遠隔操縦のリモコン操作に慣れた後、操作場所を施工場所から約 200m 離れたコントロールルームからの遠隔操縦を行った(写真—8参照)。坑内の遠隔運転状況を写真—9に示す。

チッピング作業時は、車載カメラを中心に使用



写真—8 コントロールルームから遠隔運転



写真—9 ロボQ遠隔運転



写真-10 車載カメラ映像



写真-11 前方カメラ映像

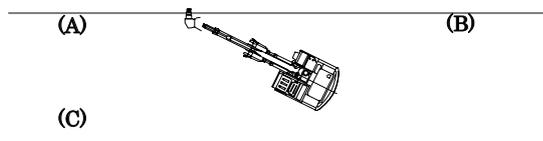


図-3 カメラ配置図

した(写真-10 参照)。カメラの配置状況を図-3に示す。壁との当たり確認用に、当初は、(A)と(B)にカメラを配置したが、壁との当たり状況は確認できても、壁との接触点の位置情報が分からないので、前方のカメラ(A)を(C)の位置に移動した。このカメラにて、車載カメラにて確認できない遠近感を確認できるようになった(写真-11 参照)。

重機の走行時は、図-3の前方および後方の固定カメラの全景映像および車載カメラの前方確認映像を使用して走行した。1日のハツリ作業の範囲は限られており、走行範囲も限られているため、事前に機材の配置を工夫して、作業効率の向上に努めた。後退時は、エア供給用のエアホースなどの引っ張り作業をするため、テレビカメラの映像を見ながら、人の補助による遠隔操縦を行った。当初の(A)と(B)のようなカメラの配置状況によ

っては、重機の陰になる部分ができるため、走行時のカメラ配置には留意した。

時間当たり施工面積は、平均  $3.77 \text{ (m}^2/\text{h)}$  で  $72.6 \text{ (m}^2)$  施工した。

### (3) 施工精度

#### ① 搭乗運転(有人)

出来形の凹凸度は、 $10 \text{ (mm)}$  程度であった。

#### ② ロボQ近傍運転

出来形の凹凸度は、 $10\sim 25 \text{ (mm)}$  程度であった。リモコンのレバー操作に習熟していなかったため、搭乗運転より少し凹凸が大きくなった。

#### ③ ロボQ遠隔運転

出来形の凹凸度は、 $10\sim 35 \text{ (mm)}$  程度であった。遠隔操作は、オペレータが打撃音や振動によるチップング感覚が把握できないため、近傍での運転より凹凸が大きくなった。

当初は、カメラ映像によるチップング面の確認ができなかったため、施工し残しがあった、カメラ配置を変えた後は、殆ど施工し残しはなくなった。

### (4) 作業環境

#### ① 粉塵

少量の水をコンクリートハツリ機刃先より噴射しながら施工すれば、粉塵の発生はかなり抑制できた。視界的には、良好に感じられるが、微細の浮遊粉塵が運転席のガラスおよびロボQに付着した。運転席のガラスに付着した粉塵のため、運転席からの視界は悪くなった。搭乗運転時には、防塵マスクの着用が必要であった。

この点、坑外コントロールルームでの遠隔運転では、粉塵などの全くない環境で、運転操作可能であった。

#### ② 騒音

コンクリートハツリ機の騒音は、重機近傍では、 $110 \text{ (dB)}$  あった。トンネル内で、音はほとんど減衰せず、機械より  $150\text{m}$  離れた坑口でも  $95 \text{ (dB)}$  あった。

このため、坑内では、コンクリートハツリ機で打撃中は、会話することは不可能であった。

坑外コントロールルームは、騒音がほとんどな

しの騒音レベルが 60 (dB) 以下であった。非常に静かな環境で、運転可能であった。

③ 温度

今回の施工は、冬場 0°C 近くの気温下の施工であり、近傍でのロボQ運転は、オペレータにとって厳しい条件であった。搭乗運転では、重機運転席のエアコンがきくため外気の影響はほとんど無かった。また、コントロールルームでの遠隔運転でも、快適な操作環境であった。

4. 今後の課題

搭乗運転の場合とロボQによる運転の場合の比較を表-3 に示す。

(1) コンクリートハツリ機による施工

トンネル断面は丸く、コンクリートハツリ機先端をブーム型の壁面に垂直に当てるのが難しく、搭乗の運転でも所定の施工量(チップング深さ 30 mm、11 m<sup>3</sup>/h、機械カタログスペック)を確保できていなかった。断面にコンクリートハツリ機を簡単に垂直に当れる機構や離れ確認に工夫が必要となる。

(2) チップング深さ

チップング深さは、設計で 25 mm であったが、目視運転でも、チップング深さの把握が難しかった。また、施工面の出来型の確認も難しかった。

振動が激しいため、センサの取付けは難しいが、確認治具などの取付けが考えられる。

(3) カメラ配置

カメラの配置は、施工面に合わせて移動が必要であった。もう少し、カメラ設備に移動が容易なような工夫が必要であった。

(4) 音声情報

ロボQは、作業場所の音声情報を伝送することも可能であるが、この場合、コントロールルームまでケーブルを 1 本追加敷設しなければならない。このため、今回は、音声情報を追加なしでの施工であった。このため、コントロールルームのオペレータは、チップング状況音が確認できなかった。映像によるハツリ機刃先の動きで確認したが、空打ちが多くなった。

5. まとめ

ロボQによる遠隔操縦は、有人搭乗運転に比べ、施工スピードの点で落ちるが、良好な環境下で作業を行うという目的は達成できた。また、近傍運転による刃先を直接目視しながら油圧ショベルを運転操作ができるという新たな使用方法も提示できた。

表-3 搭乗運転とロボQによる運転比較表

	搭 乗 運 転	ロ ボ Q 近 傍 運 転	ロ ボ Q 遠 隔 運 転
利 点	<ul style="list-style-type: none"> <li>慣れたレバー操作で運転できる</li> <li>トラブルは機械的トラブルに限られる</li> <li>施工スピードが早い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>直接目視しながら運転できる</li> <li>バックホウ周りを確認しながら走行できる</li> <li>障害物近傍の施工に適している</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高環境下での作業となる(クリーンなルームでの作業)</li> <li>刃先を拡大確認できる</li> </ul>
欠 点	<ul style="list-style-type: none"> <li>悪環境下での作業となる(騒音・振動・粉塵等)</li> <li>刃先を直接目視できないことがある</li> <li>無理な姿勢での運転となることがある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>悪環境下での作業となる(騒音・振動・粉塵等)</li> <li>慣れるまでに時間がかかる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>カメラ配置などが必要になる</li> <li>機械周りのトラブルの対応に改良がいる</li> <li>施工スピードは有人より落ちる</li> </ul>

## 12. 路上工事渋滞縮減に向けた建設機械の要求性能

独立行政法人土木研究所 山元 弘 ○林 輝

### 1. はじめに

道路渋滞の軽減に向け、交差点立体化が推進されている。一方、路上工事が引き起こす渋滞等の影響に対して厳しい目が向けられており、その縮減も喫緊の課題となっている。このようななか、路上工事渋滞をなるべく発生させないような交差点立体化の施工方法等を開発していく必要性が高まっている。

従来の工法による交差点立体化工事は、最低でも1~2年の工事期間を必要とし、この間は、工事中の交通規制・通行止めなどにより更なる渋滞の発生と周辺環境の悪化を招く恐れがあるため、渋滞が激しい交差点立体化工事の実施が困難となっている。

本研究は、交差点立体化工事に使用される建設機械に焦点を当て、路上工事期間の短縮や工事面積の縮小による渋滞軽減効果の評価方法について検討するとともに、建設機械の改良や技術開発を促進するための入札契約制度の動向等を踏まえ、路上工事渋滞の縮減に貢献する建設機械の要求性能についてとりまとめたものである。

### 2. 路上工事の施工実態

#### 2.1 路上工事の施工状況実態分析

路上工事の施工状況実態について3件の現場を対象に工種、工程、施工状況の分析を行い、路上工事の工事渋滞要因の課題を抽出した。

- (1) 各工事ともに、現有車線数を確保することを原則としているが、やむを得ず規制が伴う場合は夜間施工等にて対応している。
- (2) 工事施工時の必要幅が不足するケースでは、歩道を切削し歩道幅員を縮小させることにより切廻し道路幅員、作業帯幅を確保している。

#### 2.2 渋滞要因の分析

実態分析、ヒアリングの結果から、路上工事の工事渋滞要因の分析をおこない課題を抽出した。また、建設機械の工夫による渋滞解消への可能性、方向性

を検討した。

#### (1) 工事による主な渋滞要因

- ・作業帯が必要となり、車線、路肩幅員が縮小されることにより、走行速度が低下する。
- ・限定された区間で車線の切廻しをするため、平面線形が劣る傾向があり、走行速度が低下する。
- ・右折車線を規制する場合、右折車両が直進車を阻害する。
- ・工事用車両が作業帯に出入りする際、走行車両を阻害する。

#### (2) 工事渋滞の課題と対応方法

これらの要因に対する、交通渋滞解消に向けた課題、対応方法を表-1に示す。

表-1 工事渋滞の課題と対応方法

課 題	対応方法
作業帯幅、長さを減らす	・構築する構造物で規制車線がほぼ決定するため、設計段階で規制が極力ないように十分検討するとともに、建設機械の小型化を図る。
規制時間を減らす	・効率的な作業ができるよう、建設機械の組み立て、解体のスピード化を図る。 ・クレーンの吊り降ろしや掘削、積み込み作業等の作業スピード向上は安全上問題となるが、杭の圧入速度や舗装の切削、打ち換え、転圧等の作業スピードを向上させる建設機械を開発する。

### 3. 建設機械に由来する工事渋滞要因

建設機械の使用期間が工期に占める影響を分析調査するとともに、建設機械に由来する工事渋滞要因・課題について機種毎に抽出した。また、渋滞発生要因毎の交通渋滞抑止への寄与度を分析し、寄与度が大きく対策が必要なものを抽出した。建設機械の抽出は、「工期短縮」と「省スペース」の2つの観点から整理した。表-2に建設機械が及ぼす渋滞影響度一覧を示す。

#### 3.1 工期短縮に影響のある建設機械

工事工程の面から見た場合、基礎工および上部工架設工が全体工程に与える影響が大きいと考えられ、

表-2 建設機械が及ぼす渋滞影響度一覧

建設機械名	規格	使用工事	影響度	
			工期	施工ヤド*
クローラー	50t	基礎工	×	△
	65t	基礎工	×	△
ラッパ	20t	基礎工	×	×
	25t～50t	土工部	×	×
3点式杭打ち機	—	基礎工	◎	◎
	—	土工部	◎	○
リバース機	—	基礎工	○	△
トラック	100t	下部工	×	△
	160t	上部工（側径間）	◎	◎
	100t～200t	上部工（中央径間）	◎	◎
自走多軸台車	—	上部工（側径間）	◎	△
	—	上部工（中央径間）	◎	△
油圧ジャッキ	—	上部工（側径間）	○	×
	—	上部工（中央径間）	◎	×
サレントアイ	—	仮設（土留）	○	△

着色部：抽出した建設機械

基礎工および上部工架設工で使用する建設機械については、工期短縮の観点より表-3に示す施工機械を選定した。

表-3 工期短縮に影響のある建設機械

建設機械	工期短縮のポイント
3点式杭打ち機	組立、解体時間の短縮により工期短縮が可能
トラッククレーン	限られたスペースで高いつり上げ能力を持たば工期短縮が可能
自走多軸台車	油圧ジャッキのジャッキアップ能力向上により、架台規模が小さくなり、工期短縮が可能

### 3.2 作業スペースに影響を及ぼす建設機械

作業スペースの面から見た場合、大型建設機械（大型トラッククレーン、3点式杭打ち機）等が工事渋滞要因となる可能性が高い。

## 4. 建設機械による交通渋滞抑止への寄与度分析

建設機械が技術開発等により工事渋滞軽減に貢献できると考えられる日数を全体工期（日数）からみた割合で表し寄与度と定義するとともに、交通渋滞抑止への寄与度を分析した。各ケースについて、機械改良前・後の規制日数、幅員確保の割合および交通容量計算結果に基づき寄与度を求めた。

### 4.1 算出する寄与度

- ・ 規制日数短縮の寄与度

- ・ 幅員確保の寄与度
- ・ 交通容量確保の寄与度

### 4.2 寄与度の試算ケース

性能向上が工事渋滞軽減に貢献できると考えられる3種類のケースについて寄与度を試算した。表-4に寄与度の試算ケースを示す。

表-4 寄与度の試算ケース

ケース	概要
CASE1	上部工の地組立工において、自走多軸台車、油圧ジャッキのストローク性能を向上させ、工期を短縮させたケース。
CASE2	基礎工において、3点式杭打ち機の組立、解体の簡素化、迅速化および、打設能力向上または製品ラインナップ充実による上位能力機種の使用によって、工期を短縮させたケース。
CASE3	上部工の地組立において、規制時幅員に影響を与える100tトラッククレーンの性能を落とさず小型化したケース。

### 4.3 試算結果

表-5に寄与度の試算結果を示す。

表-5 寄与度の試算結果

ケース	計算種別	寄与度 (%)		
		規制日数短縮	幅員確保	交通容量確保
CASE1	地組立工	10.3	5.8	5.6
	全体工期	6.0	3.6	3.4
CASE2	基礎工	6.7	3.9	3.7
	全体工期	0.5	0.4	0.3
CASE3	上部工	0.0	8.3	6.4
	全体工期	0.0	8.3	6.4
組合せ	全体工期	-	-	9.7

注)組合せの値は、3つのケースを1工事に適用させて交通容量確保の寄与度として算出しているため、工種の重複する期間があり各ケースの合計値とは一致しない。

### 4.4 寄与度についての考察

寄与度計算結果から、自走移動台車、油圧ジャッキ、杭打ち機の性能向上、トラッククレーン小型化等が渋滞解消に寄与することとなった。

各々のケースについて、例えば全体工期の交通容量確保の寄与度をみても0.3～6.4%と少ないが、組み合わせることにより9.7%となる。このため、1つの工種からみたら微小な結果となっても、工期短縮、スペース縮小への取り組みは重要である。

## 5. 建設機械メーカーの動向

建設機械メーカーに対し、建設機械に求められている渋滞解消に貢献する性能やその実現の可能性、及び問題点に関する聞き取り調査を行った。

《建設機械に求められている機能》

- 3点式杭打ち機：リーダーの軽量化，リーダーの縮小，狭隘箇所での施工性（リーダーのチルト機能、回転機能），旋回範囲の縮小，安定性の向上，搬入搬出時の組み立て解体の簡易化
- トラッククレーン：本体のコンパクト化，旋回範囲の縮小，アウトリガージャッキストロークの向上（増大），据え付け時の簡易化
- 自走多軸台車：低価格化，自己昇降ストロークの向上，搬入時の組み立て（架台含む）の簡易化，走行性能の向上（空車時），操作の簡易化，自己昇降設備のストローク向上，操作の簡易化，走行時の安定性の向上
- 油圧ジャッキ：低価格化，ストロークの向上，昇降荷重の増大，

## 6. 路上工事渋滞削減を目指した建設機械の要求性能

立体交差化に向けた路上工事渋滞削減を目指した建設機械の要求性能の代表的事例を示す。

### 6.1 工期短縮を目的とした建設機械の開発

- (1) 3点式杭打ち機のリーダーを組立式から伸縮式や折畳式に改良し、機械組立工期の短縮する。

【対象機種：リーダー長 21m 以上、目標工期搬入・組立1日短縮、解体・搬出1日短縮】

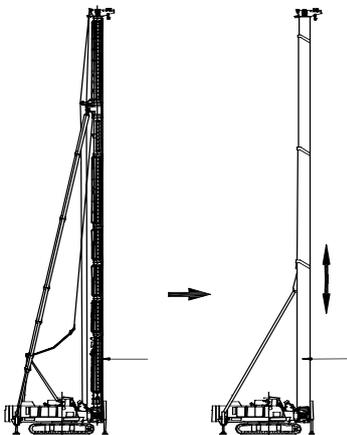


図-1 3点式杭打ち機のリーダーの改良

- (2) 自走式多軸台車のジャッキストローク向上による架台組立工期の短縮【目標工期短縮：10%短縮】

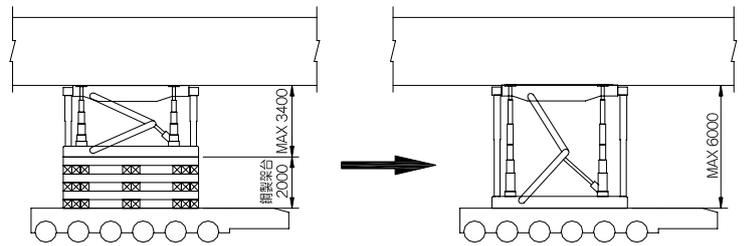


図-2 自走多軸台車のジャッキストローク向上例

### 6.2 規制幅の縮小を目的とした建設機械の開発

- (1) 三点式杭打ち機の小型化等による旋回範囲の縮小【対象機種：リーダー長 21m 以上、縮小目標：50cm（1車線当り普通車換算交通容量 150 台/h 増加）】

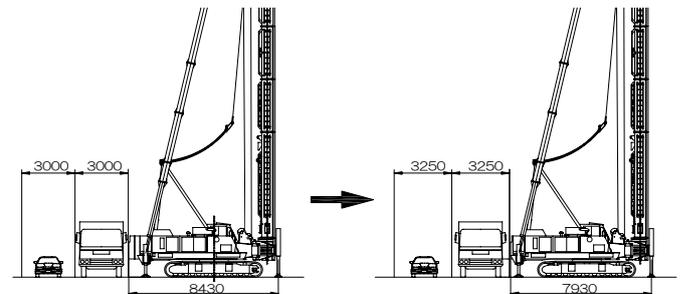


図-3 3点式杭打ち機の小型化例

- (2) トラッククレーン小型化等による旋回範囲の縮小【対象機種：100t～200t トラッククレーン、縮小目標：50cm（1車線当り普通車換算交通容量 150 台/h 増加）】

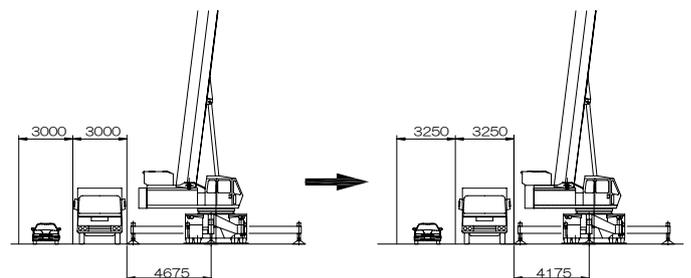


図-4 トラッククレーンの小型化例

以上の要求事項に対して、実現可能であると考えられる項目を抽出すると表-6 となる。

表-6 抽出した建設機械における課題

機械名称	開発箇所	今後必要な開発	開発による効果	寄与度		開発に対する問題点
自走多軸台車 (ジャッキ)	ジャッキ	ストロークの向上	自走多軸台車上に組み立てる架台省略 【工期短縮】	規制日数縮減	6.0%	市場規模に対するリスクや開発コストの回収が課題となる。
				幅員確保	3.6%	
				交通容量確保	3.4%	
3点式杭打機	リーダー	テレスコタイプや折り畳み式に変更	組立・解体時間短縮 【工期短縮】 組立・解体ヤード縮小 【省スペース】	規制日数縮減	0.5%	市場規模に対するリスクや開発コストの回収が課題となる。
				幅員確保	0.4%	
	カウンターウエート	小型化等による 旋回半径の縮小	施工ヤードの縮小 【省スペース】	交通容量確保	0.3%	
トラッククレーン	カウンターウエート	小型化等による 旋回半径の縮小	施工ヤードの縮小 【省スペース】	規制日数縮減	0.0%	-
				幅員確保	8.3%	
				交通容量確保	6.4%	

## 7. まとめ

これまで、建設機械メーカーは、工事従事者のニーズに応じて様々な開発やラインナップの充実を行ってきたが、道路利用者のニーズである「現道交通の渋滞を軽減させる建設機械」という視点からの研究、開発は、実際にはあまり取り組まれていない。

本研究ではこれらの取り組みを促進させるため『立体交差化に向けての路上工事渋滞削減を目指した建設機械の要求性能(案)』としてとりまとめ建設機械業界に提示するものである。

今後、国民からの路上工事に対する目は、ますます厳しくなることが考えられ、工事実施に向けては、これまで以上に研究、開発成果を生かした路上工事渋滞の削減が必要である。また、これらの技術開発を促進させる上でも、新技術や新工法などを適性に評価でき、それらに対してインセンティブを与えるような新しい入札・契約方式への取り組みや、技術開発に対するリスクを分散させるなど、技術開発を行いやすい土壌を育成していく必要がある。

## (参考文献)

- 1) 社団法人 日本道路協会：「道路の交通容量」，昭和59年9月
- 2) 道路使用実務研究会：「新しい道路使用の手引き」，警視庁交通部交通規制課，平成11年2月

## 13. 苗吹付緑化技術「ビオ・セル・ショット工法」の開発と活用事例

株式会社大本組 技術本部技術開発部 ○出雲井雄二郎  
兵庫県立農林水産技術総合センター北部農業技術センター 農業部 福嶋 昭  
吉田建設株式会社 吉田 修

### 1. はじめに

道路、河川、水路および造成地等の法面の草刈りに代表される管理作業は、交通障害の低減、火災の防止、景観の維持、害虫の発生予防等、その重要性が指摘されて久しい。そして、法面の維持管理は、肩掛け式刈り払い機による草刈り作業がほとんどであり、多くの時間と労力を要している。そのような中、労働力の高齢化ともあいまって刈り払い機を背負っての作業は、重労働であり、特に夏場の炎天下での作業は言うまでもない。

法面の条件は様々であり、傾斜がきつく足場の悪い法面での作業は危険度も増大し、機械による省力化が困難であるところも多い。苦労の末刈った草の処理も近年、焼却が困難となり、大きな問題となっている。

加えて、財政問題から、ライフサイクルコストの低減が、強く求められるようになってきている。要するに除草作業や刈草処分などの除草に係る経費の削減を図り、建設および維持管理の、いわゆるトータルコストの低減が重要な課題となっているのである。

そのような中、従来の法面管理に代わり、グラウンドカバープランツ（以下、GCP）を植栽して、草刈り作業を軽減しようとする取り組みが全国で行われている<sup>1)</sup>。これは、近年の環境や景観に対する関心の高まりを受けて、コンクリートやシートなどの人工物ではなく、植物を法面に植栽し、早期に土壌面を覆い、雑草の発芽・生育を抑制することによって除草管理作業を軽減し、更には景観形成を図ろうとするものがある。

しかしながら、GCPの大半は、栄養（苗）繁殖性植物（種子をほとんど付けないため、挿芽や株分けで増殖させる植物のこと。仮に種子が採取できても未熟であり、ほとんど発芽しない。）であり、ポット苗生産であるため、植え付けにあたっては機械施工ができず、手植えで行わざるを得なかった（写真－1）。この方法で

は、何より人力施工であることから大規模な植栽は経済的に不利であり、さらに法面植栽では作業上危険が伴うなど問題が多い。

このようなことから、GCPによる大規模な植生を機械施工（吹付け）により、安価にそして安全に実現しようと開発されたのが新緑化技術「苗吹付工：ビオ・セル・ショット工法」である。

本書では、その「ビオ・セル・ショット工法」の概要および施工方法、さらには活用事例について報告する。



写真－1 人力によるGCPの植栽状況

### 2. グラウンドカバープランツ（GCP）とは

日本では、地被植物とも呼ばれ、地表面を低く密に覆う植物のことで、「草本・木本の別、野生植物、園芸植物、その他植物学上の種別は問わず草丈の低いもの、刈り込みによって低く維持できる植物」のことをいう。また、公園、庭園をはじめとする様々な空間内の平坦地、法面などの地表面、さらには建築物壁面などの垂直面を修景、その他の機能目的のために群植することによって密に被覆する植物の総称であるというのが一般的な概念である<sup>2)</sup>。

また、園芸植物大辞典（小学館）用語索引巻にはカ

バークプランツ（英名；ground-cover plant）の項目があり、「地表面を低くおおい、地表の浸食、飛散、泥濘化などを保全し、修景をかほす植物」との記述がある。

要するに、日本においてはG C P活用の主目的は修景であり、雑草抑制というのは比較的新しい考え方である<sup>3)</sup>。

一方、王立園芸協会（RHS）から出版されている「ground cover plant」という小さなパンフレットに「地面を密に覆う植物で雑草の繁茂を抑える手法をグラウンドカバーと呼び、この用語は 1950 年代後半以降にイギリスの園芸書で頻繁に使われるようになった」という記述がある。観賞植物を植え付け、競合する雑草が出てこないように地表を厚く覆う手法がグラウンドカバーであり、そのために用いられる植物がグラウンドカバープランツということになる。このようにイギリスでは実に半世紀以上も前から、G C Pによる植生の目的は雑草抑制だったのである。

また、イギリスの G・S・トーマスの著書は、1970 年発刊で、原題が「Plants for Ground-Cover」となっている。これを訳せば「植物による雑草防除技術用の植物」とでもなるのだろうか。その他、庭仕事の労力を軽減する、あるいは怠け者の園芸愛好家のための植物である、などという記述がイギリスやアメリカのいくつかの文献にもある。これらの国では、G C P利用の第一の目的が雑草抑制であった。

そこで、我々はG C Pを

- ① 地表面を密に覆うことによって雑草の発生を抑制する。
- ② 開花による景観形成に優れる。
- ③ 草丈が低く（30cm以下）、刈り込みが原則不要である。
- ④ 軽微な維持管理によって長期の植生維持が可能である（宿根である）。

と定義した。

G C Pをそのように定義すると、前述のとおり栄養（苗）繁殖性植物がその大半を占め、種子繁殖性植物には、ほとんど存在しないのが現状である<sup>4)</sup>。

また、種子繁殖性植物の多くが種子を飛散させ、強雑草化する恐れが高いのに対し、栄養（苗）繁殖性植物は種子が付かないため、その危険性は極めて低い

も大きな特長である。

G C Pの雑草抑制メカニズムは地表面を密に覆うことによる遮光効果（G C Pが地表面を密に覆い、飛来した雑草種子に日光が届かないため、発芽しないか、発芽しても生育不良となる効果のこと。）やアレロパシー（他感作用ともいう。植物が放出する天然の化学物質がほかの生物に阻害あるいは促進的な何らかの作用を及ぼすこと。近年、この作用を利用した雑草防除などに注目が集まっている。）と考えられている。

ただし、雑草を完全に抑えることは困難であることから、メンテナンスフリーにはならないことに注意を要する。人力による取り組みの中で、G C Pを植えておけば雑草は全く発生しないという、間違った認識により、結果的に失敗と判断された事例も数多く耳にする。

### 3. ビオ・セル・ショット工法の概要

ビオ・セル・ショット工法（以下、本工法）とは、G C Pの機械吹付けを行うために、兵庫県立農林水産技術総合センター北部農業技術センター、株式会社大本組、吉田建設株式会社が共同開発した「特許第3088984号：空気式混合による植物苗の吹付け緑化工法」のことであり、苗による法面等への植栽の機械施工を可能にした新しい緑化工法である。本工法によれば栄養（苗）繁殖性の様々な種類を簡単に吹付け植栽することができ、経済的で景観上も好ましい多様な植生が可能となる。

工法概念図を図-1に示す

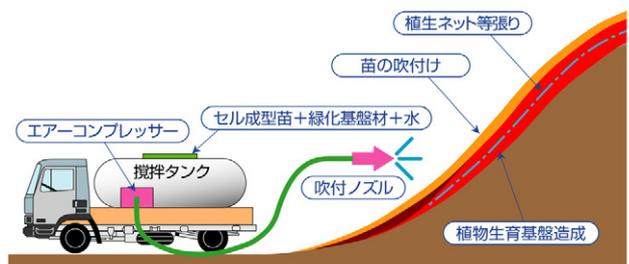


図-1 ビオ・セル・ショット工法施工概念図

## 4. 設計・施工手順

設計・施工手順を図-2に示す。

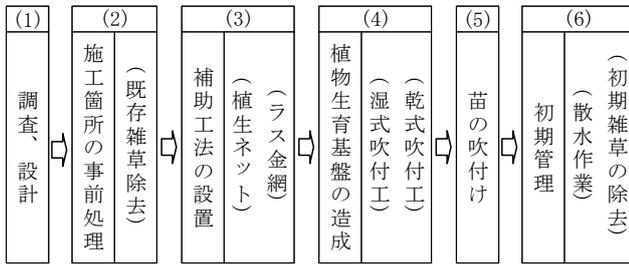


図-2 設計・施工手順

### (1) 調査、設計

まず、現場条件(土質、土壌硬度、法面勾配、土壌pH、気候、方位等)を調査する。その結果により、法面の事前処理方法、補助工法の必要性およびその種類、植生基盤の造成方法とその厚さ、吹付ける苗の種類、散水作業の方法について決定する。

### (2) 施工箇所の事前処理

新規造成地で雑草の発生がない場合は、特に必要ないが、既に雑草が繁茂している場合は、GCPにはそれを駆逐する能力はないので、雑草を完全に除去することが必要となる。雑草の根と共に表土を剥ぎ取る方法が最も確実であるが、除草剤を使用することも可能である。

### (3) 補助工法の設置

勾配等により、補助工法の有無を決定する。必要な場合は植生ネットかラス金網を設置する。ただし、寒冷地で冬期に植生基盤の凍上が予想される場合は、勾配にかかわらず、補助工法を用いるのが望ましい。

### (4) 植物生育基盤の造成

植物苗の吹付けに先立ち、専用の緑化基盤材で植物の生育基盤を造成する。土質、土壌硬度等の土壌条件により、生育基盤の厚さは異なるが、1～5cm程度を標準とする。造成方法は、1～2cmの場合は、A工：湿式吹付工とし、3～5cmの場合は、B工：乾式吹付工とする。

### (5) 苗の吹付け

植栽に使用する苗は専用のトレイを使用し、挿芽で育成する(写真-2)。これを植物生育基盤の上に新開発の吹付機械により、撒くように吹き付ける(写真-3)。専用の吹付機械は従来の攪拌翼に加え、圧縮空気が発生する対流により混合するエアブロー式攪拌装置を装備し、吹付苗(セル成型苗)の損傷を防止している。

現在吹付け可能な主な種類は、ヒメイワダレソウ、マツバギク、セダム類、タイム類などであり、病気や暑さ寒さ等に対する各種耐性を高め、最悪の事態である植生の全滅を回避するため、3種類以上の混植を基本としている。吹付けるセル成型苗は50セル(個)/㎡を基準とし、施工能力は吹付機械1台当たり700㎡程度/日である。



写真-2 吹付苗(セル成型苗)



写真-3 苗の吹付状況



写真-4 吹付2ヶ月後



写真-5 吹付5ヶ月後

### (6) 初期管理

吹付け後、GCPが活着するまでは散水を行い、過度の乾燥を防止する。GCPが全面を被覆するまでに発生する雑草は、必ず取り除かなくてはならない。

### 5. 望ましい適用箇所

本工法の望ましい適用箇所は、あくまで景観形成や雑草管理が必要な法面や平面である。自然遷移による樹林化を目的とするような箇所に適用するものではない。また、将来にわたって軽微な管理も不可能な箇所は、採用を控えるべきである。あくまで生き物である。メンテナンスフリーではなくメンテナンスイージーであることを十分に理解しておく必要がある。

### 6. 植生（生育）事例

吹付け後、全面被覆までに要する期間はその時の気象条件等に大きく左右されるが、おおむね春施工の場合で5ヶ月～1年、秋施工の場合で6ヶ月～1.5年程度である。

植生（生育）状況の一事例を示す。吹付け後1週間程度で活着し、2ヶ月後には当初の数倍の株に成長している（写真-4）。そして晩春から初夏にかけてGCP本来の旺盛な生育をみせ、5ヶ月後には全面被覆し、雑草抑制力を発揮している（写真-5）。こうなると雑草の侵入は非常に少なくなる。

### 7. 活用実績

平成11年から平成16年度末の施工実績は、岩手県から宮崎県の23都府県において、104件、141,400㎡である。その適用箇所別の内訳を図-3、図-4に示す。これによると、河川堤防、道路、公園での活用実績が多く、その3箇所を合わせると、件数で57%、面積では73%を占める。河川堤防での除草は不可欠であるし、道路も交通障害や火災予防の点から、除草が頻繁に行われている。公園は景観維持のため雑草の管理は重要である。いずれもGCPの雑草抑制力による除草作業の軽減や景観形成を期待して本工法を採用していると考えられる。言い換えれば、河川堤防、道路および公園においては、除草に多大な費用を要していて、これが、緊急で重要な課題となっていることが伺える。

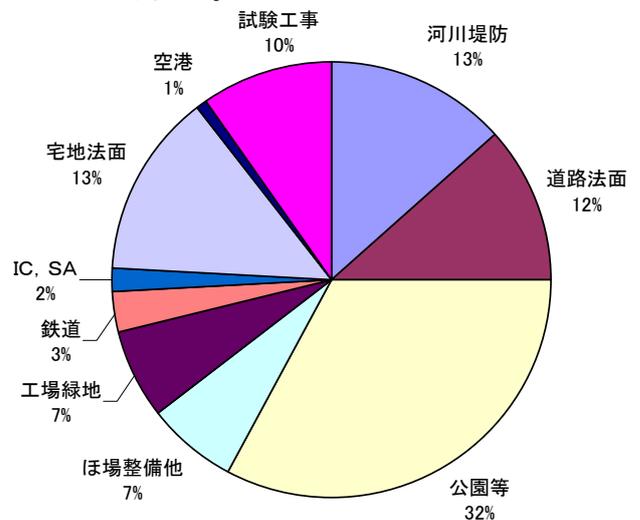


図-3 適用箇所別施工件数 (104件)

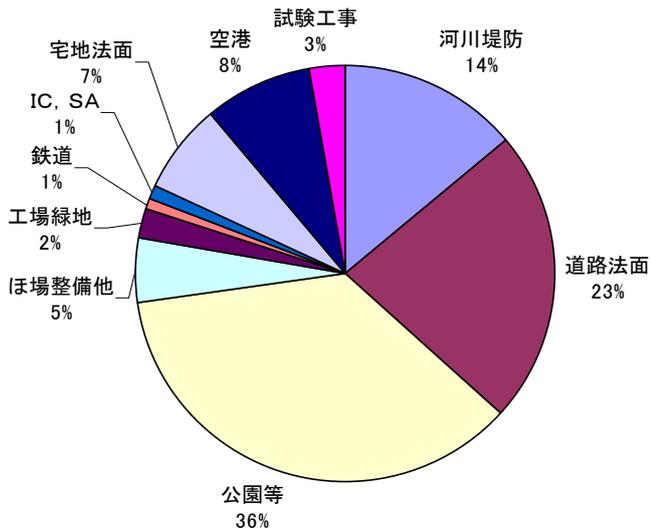


図-4 適用箇所別施工面積 (141,400㎡)

## 8. 主な活用事例

### (1) 公園 (市民農園) での事例 (写真-6)

平成11年に本工法が初めて採用された事例である。当初5種類のGCPを混植したが、約6年が経過し、3種類が優占種となっている。花が目立つマツバギクが他のGCPに被圧されたため、派手な景観ではないが、十分な雑草抑制力を発揮している。



写真-6

### (2) 河川堤防での事例 (写真-7)

河川堤防の除草管理は、景観の維持や堤防損傷の確認のため欠かせない作業である。このため頻繁な刈り払い、集草、処分が行われている。本工法を施工した河川堤防での植生状況と管理事例を示す。写真で分かるように、GCPが全面を被覆しているため、発生している雑草は非常に少ない。このため、除草作業はハンマーモアによる刈り払いのみで、集草・処分は行っていない。



写真-7

### (3) 道路での事例 (写真-8)

開花による非常に美しい景観を示している。この事例は施工後1年であるため、まだ、どの種類が優占種になるかは現時点では不明であるが、公園での事例が示すとおり、数年後には被圧されて、姿を消す種類が出てくると予想するのが自然な考え方であろう。

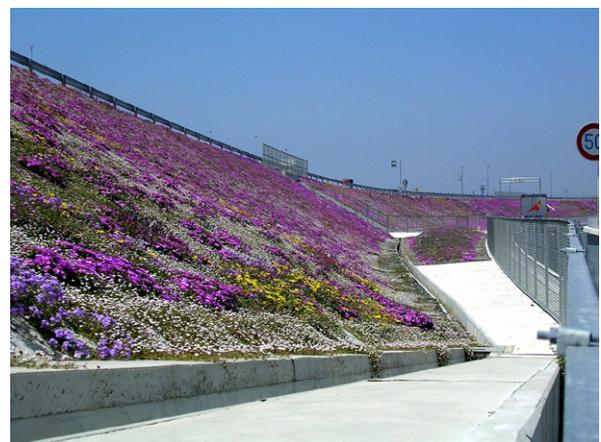


写真-8

### (4) 空港着陸帯での事例 (写真-9)

空港着陸帯の緑地における平面事例である。日本国内の主要空港で着陸帯に花を咲かせたのは、きわめて希なケースであると思われる。この事例は雑草抑制というよりも景観形成を主目的とした植物配合 (マツバギク主体) で施工した特殊なものであるが、本工法の幅広い場面での活用を示すものである。



写真-9

## 9. まとめ

植物で雑草管理を容易にしたいというニーズは高い。そして、本工法が今までで人力でしか植え付けられなかった栄養（苗）繁殖生植物による植栽の省力化やコスト削減を実現し、環境や景観問題に寄与する緑化を安価に実現する手段として、更には各種法面の維持管理費の削減に貢献できる技術であると確信している。GCPの景観形成や雑草抑制効果は高い。除草で困っている箇所は広大にあると思われる。

本工法は、法面のみならず、平面にも有効である。例えば大面積の緑地帯を有する空港でのGCPおよびその植栽手段としての本工法の有効性も報告されている<sup>5) 6)</sup>。

今後、刈草の多くが産業廃棄物になってくることを考えると、地球環境にも優しい技術である。美しい景観が創造できるということは地域の活性化にも寄与できるであろう。

また、近い将来義務化されるであろう、工場や倉庫などの大規模屋上緑化への適応も重要な研究課題と位置づけている。

植物という生き物を扱う技術として、これで完成ということはない。今後も技術改良を重ね、より満足度の高い技術へと進化させていくことが我々の使命と考えている。

ところで、「特定外来生物被害防止法」などの施策を背景に、一部の間で外来種と呼ばれる全ての植物を敵視するような風潮がみられるのが気になる。確かに本工法で使用する植物のほとんどは外来種といわれるも

のである。法面等に外来種を植栽することは、在来生物の生物多様性を乱し、周辺環境を攪乱するのではないかとの議論があることは承知しているが、一方で、人間による適度な攪乱は、種の多様性を高めるとする考え方があるのも事実である。勿論、新たな植物を導入する場合は、雑草化や生態系に及ぼす影響などに十分留意する必要があることに異論はない。しかし、日本国内の植物の大半は、過去のいずれかの時点で日本に入り込んできたもので、純粋に在来の植物は少ないのではないだろうか。問題になるのは、外来種の内でも固有種を駆逐するほどの侵略的な振る舞いをする種である。その点、本工法で使用する植物は、日本に入ってから相当な期間が経過しているし、種子繁殖がほとんどできないため、少なくとも雑草化の危険性は極めて低いといえる。

外来種や本工法に対する正しい理解のもと、適切な活用により、更なる地域環境への貢献を期待している。

### [引用・参考文献]

- 1) 有田博之・藤井義晴・友正達美・出雲井雄二郎・赤司英昭：農業土木学会論文集、No.192、pp143-151(1997.12)
- 2) 小沢知雄・近藤光男：グラウンドカバープランツ、誠文堂新光社、pp126-176(1987)
- 3) 有田博之・藤井義晴編著：畦畔と圃場に生かすグラウンドカバープランツ、農山漁村文化協会、pp26-40(1998)
- 4) 福嶋昭：農村の景観形成とグラウンドカバープランツ・農業技術体系花卉編、農山漁村文化協会、pp630の14-630の23(2000)
- 5) 高橋修・八谷好高：土木学会論文集、No.713/VII-24、pp131-144(2002.8)
- 6) 高橋修・八谷好高：土木学会論文集、No.713/VII-24、pp145-158(2002.8)

# 14. 長岡市古志東竹沢における緊急排水対応

(16・10・23新潟県中越地震)

北陸地方整備局北陸技術事務所○機械課長 本間政幸  
機械課整備係長 笠原邦昭

## 1. 新潟県中越地震

平成16年10月23日午後5時56分「新潟県中越地震」が発生し突然地面が大きく波打ち各地に甚大な被害をもたらした。この地震は中山間地域を襲った直下型地震で、振動計による観測が始まって以来の最大震度「7」を観測した。

その後も断続的に余震が発生し平成16年12月28日午後7時まで延べ877回（震度1以上）そのうち震度5以上は18回と長期に発生していることが特徴と言える。（図-1）

地震は道路を始めあらゆるインフラに大打撃を与えた。新潟県中越地区は、豪雪地帯であり現場は本格的な降雪までの間、応急復旧等の対応に時間との闘いを迫られた。

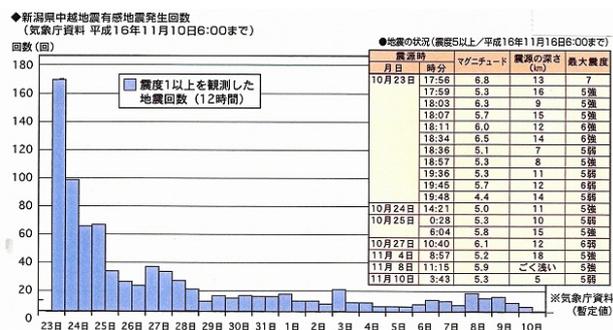


図-1 地震の状況 (気象庁資料)

## 2. 河道閉塞

山古志村（現：長岡市古志）の芋川流域では地震による地滑りによって5箇所でも河道閉塞により地滑りダムが発生し、中でも寺野地区、東竹沢地区における河道閉塞は規模が大きく、集落が水没するなどの被害が発生した。（図-2）

また地滑りダム下流の魚沼市竜光地区では101世帯約439人に地滑りダム決壊による土石流警戒のため避難勧告が10月30日に出され、土石流セ

ンサーと排水ポンプの設置を受け11月9日解除された。寺野、東竹沢の2箇所については11月2日新潟県知事からの要請を受け、5日より国土交通省が直轄砂防事業として取り組んでいる。



図-2 芋川流域の地滑りダム

## 3. 東竹沢地区河道閉塞の概要

東竹沢地区における地滑りダムの概要は表-1及び図-3に示すとおりで、ダム上流の木箆集落では25世帯中14世帯が浸水・水没した。

表-1 東竹沢地区河道閉塞の概要

地すべりの規模			
長さ(m)	幅(m)	想定深さ(m)	土量(m3)
350	295	30	1,292,540
河道閉塞の規模			
高さ(m)	最大長(m)	最大幅(m)	堰き止め土砂量(m3)
31.5	320	168	655,940
最大湛水量(m)			
2,560,500			

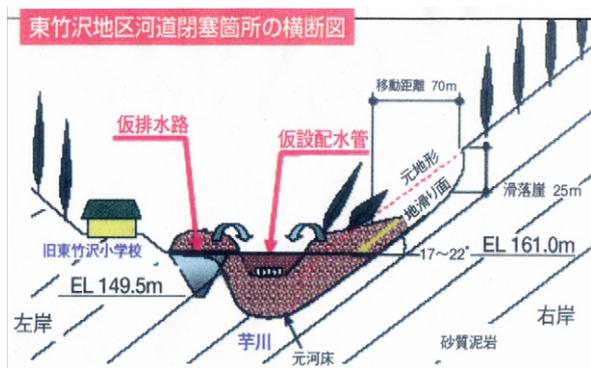


図-3 地滑りダム断面図

現場では越流による決壊を防ぐため大型土嚢による対策と、ポンプ排水によるダム水位を下げるための作業が24時間体制で緊急に行われ、仮排水路が完了した12月28日まで、国土交通省湯沢砂防事務所・担当JVら関係者の必死の努力が続けられた。この間、ダムの水位は越流水位に近づくと共にポンプ排水作業により下流側法面浸食が進行するなど、困難な対応が迫られた。

本報告では地震後排水作業が開始されてから水位が順調に低下し始めた12月9日までのポンプによる緊急排水対応における施工上の教訓を整理すると共に、河道閉塞対応上の問題と技術的な課題について報告する。

#### 4. 想定を超えた排水ポンプ車の使用

##### 4.1 陸路寸断

地震後山古志村内の道路は至る所で寸断され、緊急排水対応に必要な建設機械等は自衛隊大型ヘリ輸送（輸送最大重量6 t）手段しかなく、現場で使用できる建設機械等が制限された。

現地で使用された建設機械は最初にミニクレーン(重量約3.2 t)が輸送された。それを使って次に分解されて輸送されたクローラクレーン(重量約7.3 t)を組立、さらに分解されて輸送された油圧ショベル0.4~0.5m<sup>3</sup>級が現場で順次組立られ排水路の掘削、排水ポンプの設営に使用された。(写真-1) また、ヘリ輸送に先立ち空輸中のバランス確認のため吊り試験が必要であった。

＜施工上の改善点及び教訓＞

- ① 建設機械の導入機種・タイミングが重要。
- ② 自衛隊大型ヘリ 6 t 吊りは吊り試験が必要。
- ③ 民間のヘリ 3 t は調達が比較的容易に可能。



写真-1 自衛隊大型ヘリで輸送されたミニクレーンと組立が完了し稼働中の油圧ショベル

##### 4.2 排水ポンプ車の想定外利用

排水に用いたポンプは、国土交通省が全国に保有する排水ポンプ車7台を緊急に分解し、自衛隊大型ヘリにて輸送した。排水ポンプ車は通常トラックのエンジン動力で発電し、操作盤ユニットと一体で車載されているため、操作盤の分解梱包とポンプ・ホースの梱包を行い、車両から取外しができない発動発電機と簡易燃料タンクをリース調達した。国土交通省では排水ポンプ車を分解して現地に投入するのは初めての経験で想定外の使用が行われた。(図-4)

＜施工上の改善点及び教訓＞

- ① 排水ポンプ車の分解対応の迅速化を図る。
- ② ヘリ輸送に対応したポンプ車の対応。
- ③ 想定外使用を構想しておく。



図-4 緊急排水に使用された排水ポンプ車他

## 5. 緊急排水路排水ポンプの設置から運転まで

### 5. 1 排水ポンプの設置

国土交通省が東竹沢で使用した排水ポンプは、堤防での排水を想定しているもので設計上全揚程が8mである。また緊急排水路で下流へ安全に送水するため約250mの排水ホース延長が必要となったことから排水ポンプはEL154.00付近の道路上に設置され、水位の上昇によりポンプが運転する体制がとられ6台のポンプが据付けられた。(写真-2)

＜施工上の改善点及び教訓＞

- ① 揚程、損失を加味したポンプ性能を把握。
- ② 待受け、水位上昇運転による影響を想定。



写真-2 水位の上昇前に据付けられた排水ポンプ

### 5. 2 排水ホースの設置

緊急排水路の底部幅は当初2mで掘削され、そこにポンプ6台分のホースφ400mmが積重なった状態で設置された。幅2mに収められたホースは約250mにもおよびポンプ通水後は蛇行と上下逆転となり絡まった状況で排水運転された。

運転後も、排水ホースのトラブルで排水ポンプの停止・再運転が繰り返される度にホースの蛇行と上下逆転による絡みが進行し、緊急排水路内で圧迫された排水ホースは固定杭、針金、ホースの接続金具による接触により損傷を受けた。(写真-3)

＜施工上の改善点及び教訓＞

- ① 適切な排水ホースの間隔を確保する。
- ② ホースの直進性、余分な部分の処理。
- ③ ホース固定部分の養生を行う。

- ④ ホースによる長距離排水を避ける。



写真-3 緊急排水路に設置されたφ400mm6本のホース

### 5. 3 発動発電機の周辺と燃料補給

排水ポンプ制御盤、発動発電機の設置場所は排水箇所に近い場所が選定されたが、自衛隊大型ヘリで一方を斜面で囲われた狭隘な平地に投下されるため要求箇所への投下が難しく、点在した状況となってしまった。(写真-4)

また発動発電機及び搬入路周辺は粘性土質のため、降雨時は点検・給油・資材運搬のため泥濘地状態となった。このような状況下で日あたりドラム缶約40本の燃料がクローラダンプにより輸送される他、運搬路整正用の油圧ショベルが作業を行う中、電源ケーブルの損傷と燃料パイプにトラブルが発生し運転停止を引き起こした。

＜施工上の改善点及び教訓＞

- ① 狭隘箇所でのヘリ輸送着地点の明示。
- ② 電源ケーブル、燃料ホースの敷設、管理。
- ③ 発動発電機、制御盤周辺への立入り制限。



写真-4 田畑に点在した制御盤・発動・燃料缶

## 5. 4 排水ホースの損傷とポンプの運転管理

排水ホースの損傷からやむを得ずポンプを停止しなければならぬ状況が幾度か発生した。

排水ホースは毎分約30m<sup>3</sup>の水が流れているためホースが破裂しポンプの停止操作が遅れると、現場は噴出した水で溢れかえるため異常ホースの早期発見が交換作業のポイントとなった。

ホースの異常監視に現場担当者の視点が注がれ発見後は作業員の周到な準備連携によりホースの交換作業が迅速に行われた。

絡みあったホースの交換作業は時間を要したばかりか、他の正常なポンプの停止原因となった。また運転再開時は通水により膨張したホースが金具、杭等により損傷しないかポンプ側から吐出口まで監視が必要となった。

＜施工上の改善点及び教訓＞

- ①ポンプ停止操作の迅速化を図る。
- ②代替ホースの確保と交換作業の手順化。
- ③再通水時の監視体制の確保する。

## 6. 排水作業で下流末部が洗掘

### 6. 1 下流末部が洗掘

11月9日に排水ポンプ3台運転後11日には設置された6台の全ポンプがフル運転し、その後も水位の上昇に備え順次ポンプの増設が行われた。

排水開始当初から下流側では排水エネルギーによる小規模な地盤の浸食が確認されていたが、11月15日から地盤の浸食が大きく促進した。このまま排水を継続した場合、さらに地盤の浸食が進み河道閉塞の地滑り土塊まで達することが予測され、隣接する旧東竹沢小学校が崩落、地滑りダムが決壊する恐れが出てきた。ポンプの排水量を低下させる一方で、崩落が続く流末部分ではプラヒューム管で遠方へ排水を試みるが、高低差があるため滝しぶきのような水滴が斜面に当たり、浸食は解消できないため排水ホースを移設することとなった。（写真－5）

＜施工上の改善点及び教訓＞

- ① 排水先の安全性を確保する。
- ② 高低差がある部分での空中放水は危険。
- ③ 放水箇所の異常予見、監視が必要。



写真－5 排水による洗掘で斜面の崩落が進行

## 6. 2 排水ルート切り替え

排水ホースの移設は標高の一番高いところで切替を行い、旧東竹沢小学校の中を貫通しグラウンドを経て一気に約40m下の芋川に合流するルートが選定された。排水ホース移設時の地滑りダム水位はEL157.76で、越流水位EL161まで迫る中、時間との闘いが要求された。移設は排水ポンプ6台分を1本ずつ順次進めていく計画で作業が進められた。（写真－6）

切替部分では前後のホース絡みにより難航した他、ポンプ番号とホース番号の相違によりポンプ停止が手間取るなか、作業開始から翌日にかけて終了することができた。（写真－7）

＜施工上の改善点及び教訓＞

- ① 切替ポンプとホースの事前確認が必要。
- ② ホース交換ポイント、手順の確認。
- ③ ホース内残水処理方法の検討が必要。



写真－6 排水ホース移設作業状況



写真-7 排水ルート切替後の排水状況

### 6. 3 下り勾配と流末処理の難しさ

排水ルート切替が完了した11月18日以降水位低下のためポンプのフル運転が期待されたが、迂回ルートでの急激な下り勾配部分とホース末端出口河床部分でホースが激しく暴れ躍動した。

このためホースの損傷軽減と法面の侵食を押さえるため排水量を制限したが、状況の確認が困難な夜間はさらに排水量を制限したためダム水位の低下が進まなくなりポンプの増設が急ピッチで行われるとともに、下り部分の排水ホースは管路に取替えられた。

管路通水後はホース交換作業が不要となり安全に通水され信頼性が向上した。(写真-8)



写真-8 下り勾配部分では配水管に取替えられた

＜施工上の改善点及び教訓＞

- ① 下り勾配部分ではホース内の脈動がホース損傷原因となる。
- ② 急勾配部分では管路排水とする。
- ③ 放水は河床で流速を減衰させる。

## 7. 排水ポンプの増設

### 7. 1 排水ポンプの増設

11月16日以降今後の水位上昇に備え排水ポンプが順次増設され、11月18日には合計12台で排水が行われた。既に上流側のダム水位上昇でポンプが据付けられる平坦な場所は無く、油圧ショベルで搬入路と排水ポンプ組立投入ヤードが確保しなければならない条件となっていた。排水ポンプの組立運搬投入には油圧ショベル0.4～0.5m<sup>3</sup>級3台が使用され、ポンプと接続された排水ホース約60mを吊下げながらリレーし、斜面に近接した水中に投入する。投入後潜水土によって吊下げワイヤーが切り離され曳航船によって曳航される。潜水土は曳航時に排水ホースと電源ケーブルの曳航補助を行う。(写真-9)

＜施工上の改善点及び教訓＞

- ① 油圧ショベルによるポンプの投入手順化。
- ② 吊上げ機材の損傷防止に配慮。
- ③ 潜水土の安全対策を確立する。



写真-9 排水ポンプの投入状況

### 7. 2 排水ホースの設置条件

緊急排水路は排水ポンプ増設のため拡張された。拡張掘削された地盤はある程度平坦性が確保されたが凹凸や軟弱部では通水ホース時の重量によりホースの転がりや横滑りが発生し、ホースの屈曲と蛇行が抑えられない。木杭により固定を試みるがそれが更に障害部分(通水抵抗増大・ホース損傷誘引)となった。

＜施工上の改善点及び教訓＞

- ① ホース配置部分は横断方向の平坦性を確保。
- ② 固定による通水障害に注意が必要。

## 8. 緊急排水路から仮設排水管への移設

緊急排水路での排水を継続する中、12月4日に地滑り区域に施工を進めてきた仮設排水管（プラヒューム管φ1000mm×5条・呑口EL155m）からの排水が可能となった。緊急排水路で全揚程限界で運転されていた排水ポンプ10台を、順次移設するとともに、自走式ポンプ装置（北海道開発局応援）1台を併せて運転し更なる水位低下に向けた排水が行われ12月9日からは水位を急激に低下することができた。（図-5）

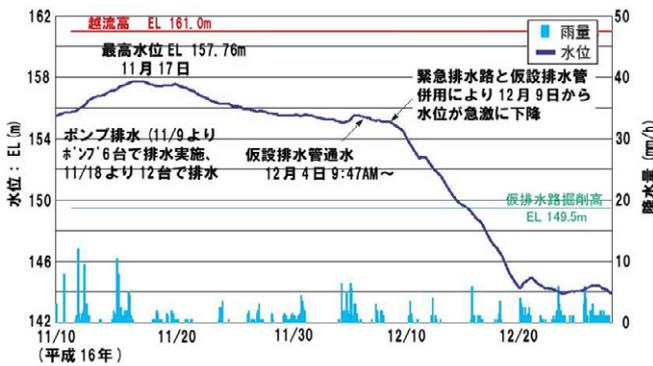


図-5 東竹沢土砂崩れダム水位経過

## 9. 施工上の問題と技術的な課題

### 9.1 施工上の問題

東竹沢地区の河道閉塞で緊急排水対応を行った結果から大容量排水ポンプを施工維持する上での問題点と対応を整理した。（表-2）

問題点と対応は、新潟県中越地震で発生した河道閉塞な対応であると認識しているが、最近の梅雨末期・台風等では想定外の排水対応を迫られることも考えられることから問題点として共有し災害対応時の参考としていただきたい。

### 9.2 技術的な課題

国土交通省が全国に保有する排水ポンプ車は今回の河道閉塞のように高揚程で分解を想定したものでは無いため、災害対策用機械の導入にあたって今後取り組むべき技術的な課題を整理しておく必要がある。（表-3）また、排水ポンプ車以外についても同様な状況におかれた場合に素早く対応できる体制も重要と考える。

排水ポンプの高揚程対応として直列接続可能な構造の検討、分解に対応した構造など改善すべき点については鋭意検討を進めている。

表-2 東竹沢地区河道閉塞対応時の問題点と対応

項目	問題点と対応
空輸	①輸送可能条件の事前確認が必要
	②空輸中のバランス確認のため輸送に先立ち吊り荷試験が必要(手続きに時間がかかる)
	③荷の接地時、風圧により荷が振られるため安全なスペースの確保が必要
	④荷の接地場所をパイロット等に指示するため接地場所のマーキングが必要
排水ポンプ	①現場に適合可能な機材のレイアウトのため発動発電機・電源ケーブル等に余裕が必要
	②排水量把握のためポンプ、ホース組合わせによる性能(損失・全揚程)の把握が必要
	③排水ホースの損耗防止、送水時維持管理低減のため適切なホース間隔、接地場所の凹凸、折曲がり、予長管理が必要
	④ホース、接続金具損傷防止、維持管理の省力のため下り配管部分(送水期間・送水距離・勾配等を考慮)では管路送水が必要
	⑤排水ホース交換作業を短時間でを行うため漏水等の異常判定基準を準備し、適切な時点での交換が必要
発電・電源	①電力会社との連携による電力供給
	②燃料系統のトラブルによる発電停止のため燃料タンク、配管の保護や明示が必要
据付機械関係	①油圧ショベルで重量物を安全に切り離すためオートフックなどの対策を考慮する
	②輸送機種の設定

表-3 技術的課題

技術的課題
①民間機の空輸(3t)を前提にした輸送ユニットの開発
②分解組立が容易なユニットの開発
③全揚程対策、長距離対策としてポンプの直列接続可能なポンプユニットの開発
④ポンプによる排水計画立案のため水位や流量計測技術等が素早くできる体制整備

## 10. あとがき

国土交通省は寺野、東竹沢の2箇所及び国道291号については現在も全力をあげて復旧作業が行われている。当初県で設置された東竹沢地区の排水ポンプは直轄砂防事業決定4日後運転を開始し、12月9日から順調に水位が低下するまでの間様々な危機に直面した。特に11月16、17日は土砂崩れダムが決壊する恐れに直面し、現場の緊張度が高まったが湯沢砂防事務所とハザマ・清水・福田JVは現場の状況と対峙し12月28日には最大湛水時より約14mの水位を低下させ、無事故で仮排水路を完了させた。現場では相当な疲労と困難な状況にあったことを報告する。

### 【参考文献】

- 1) 新田：大規模災害現場における機械の有効活用、建設の施工企画、No.663、(社)日本建設機械化協会、2005.5
- 2) 北陸地方整備局：平成16年(2004年)新潟県中越地震茅川河道閉塞における対応状況、2004.12
- 3) 本白・金沢：「新潟県中越地震」災害復旧報告会、土木学会関東支部新潟会、2004

## 15. メインブーム兼用型解体機による解体工事の合理化

コベルコ建機(株)：森川 勝

### 1. はじめに

我が国では建物が建築されてから消滅するまでの存続期間は、一般に木造住宅で約40年、非木造建築物で30年から40年程度と言われている。1960年代の高度成長期から30年以上経過した今、その役割を終えて解体される建物、設備が増えてきている。

図-1に過去40年間の非木造建築物着工量の推移を構造別に示す。この図から60年代は鉄筋コンクリート構造(RC造)が主流であったが、現在は鉄骨構造(S造)が主流となっていることがわかる。高度成長期に建てられた多くの建物が寿命を迎えている今、多様な構造物を低騒音、低振動、安全かつ効率的に解体できる機械を求められることが容易に推察できる。

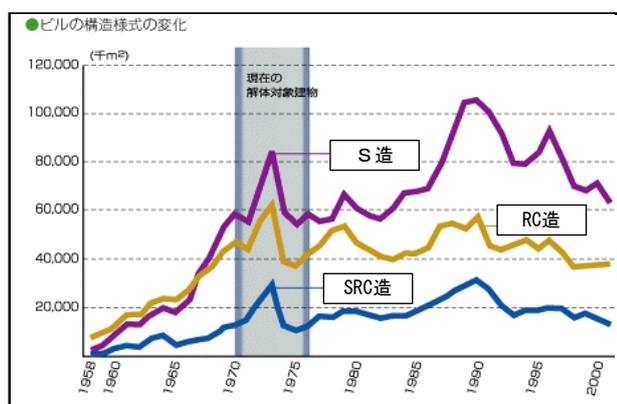


図-1：建築物着工量の推移／構造別による表示  
(建築統計年報出典)

図-2に9階を区分とした非木造建築物の階数別比率の推移を示す。過去30年間の推移より10階建て以上の高層化傾向を確認できるが、それでも30年間の平均では、9階建て以下が90%を占めている。

また非木造建築物を対象とする解体工事では、地表より上にある建物のみならず、地表下にある基礎構造物も解体対象となることが多い。油圧ショベルをベースマシンとした解体機は地上構造物のみならず基礎構造物も解体対象とする機械に発展、成長してきている。

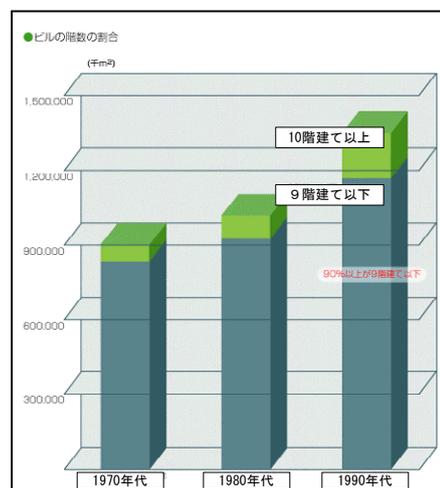


図-2：非木造建築物の階数別建築推移  
(建築統計年報出典)

### 2. ビル解体と超ロング解体機

ビル解体といえば鉄球と移動式クレーンで大音量を発生させながら解体といった、一昔前のイメージが残っているかもしれないが、現在では油圧ショベルをベースマシンとする、超ロング解体機(ハイリフト機)に、解体対象物に対応する圧砕機を付けて、低騒音、低振動で、かつ安全に解体するのが常識化している。



図-3：超ロング機による解体作業

超ロング解体機にて解体する風景を図-3に示す。

図-4には解体対象となる建物階数とベースマシンサイズの目安を示す。

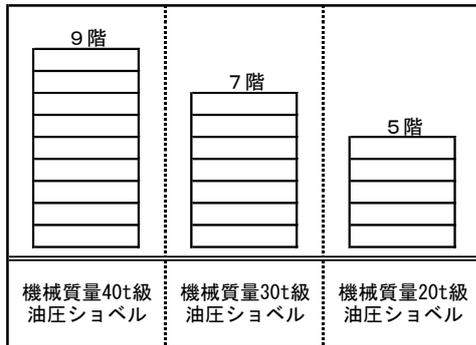


図-4：建物階数とベースマシンサイズの目安

上述したように解体対象となる建物は9階建て以下が90%を占めるため40t級油圧ショベルをベースとした超ロング機があれば、殆どのビル解体に対応できることがわかる。

### 3. 基礎構造物解体とセパレートブーム解体機

従来、基礎構造物の解体においては油圧ショベルの先端に装着したブレーカにより地道に破碎し、鉄筋の処理にあつては、ガス溶断作業を人手で行うことが少なくなかった。

一方、静的圧砕工法の大きな担い手として発展してきたコンクリート圧砕機は、今では開口幅が1,000mmを超える仕様機も普及し始めている。またコンクリートを圧砕する機能と同時に、鉄筋を切断する機能を併せ持つ圧砕機も増えてきている。この大型圧砕機と、バックホウと比較して広い作動範囲、大きな持ち上げ能力を持つセパレートブーム（2ピースブーム）を装着した解体機による地下構造物の解体方法が注目を浴び始めている。セパレートブームとはバックホウにおけるブームをメインブームとフロントブームに分離したブームとして定義している。セパレートブーム解体機の特長を図-5に示す。

セパレートブーム解体機と大型圧砕機を使用した解体方法によれば、厚さ1,000mmを超える基礎スラブ、基礎梁を解体対象とすることができる。また圧砕機で挟んで持ち上げ可能なサイズ、重量まで破碎したコンクリート塊を地上に持ち上げ、その塊を複数の解体機で手分けして解体することにより、効率的な基礎構造

物の解体を実現できる。更に5階建て程度の中層建物であれば超ロング解体機以上の施工能力で解体を行うことができる。

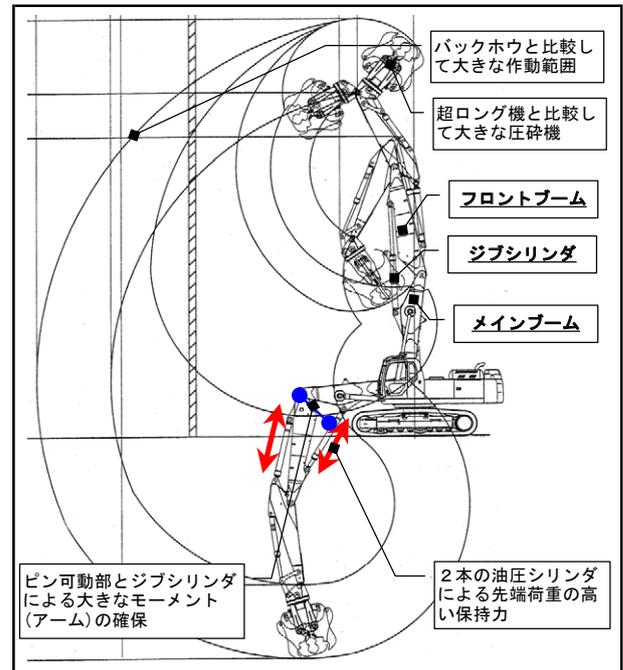


図-5：セパレートブーム解体機の特長

セパレートブーム解体機により基礎構造物を解体している作業風景を図-6に示す。



図-6：セパレートブーム解体機による基礎構造物の解体作業

### 4. メインブーム兼用型解体機のコネプト

上述した超ロング解体機、セパレートブーム解体機とも油圧ショベルをベースとして開発されたが、共に専用解体機として発展してきた。

ここで解体機に求められる主要な要件をまとめると

下記になる。

- ①ビル解体において所要の作業高さを確保できること
- ②基礎解体において大型圧砕機を装着できること
- ③解体で排出されるコンクリート殻等をハンドリングできること

従来、各々の要件に対して各々の専用解体機で対応してきた。①と②は同時工程での要件でないのにも関わらず、違う種類の解体機を使用するため解体業者にとっては機械の重複保有が必要であった。また機械搬入及び組立分解に伴う工期、費用などのロスを生じさせていた。

この解決策として当社が開発したものが、メインブーム兼用型解体機である。本機はベースマシン本体及びメインブームを兼用し、アタッチメントを用途目的に合わせて、超ロング、セパレート、バックホウ仕様に組換えることができる一台三役の解体機である。本機のコセプトを図-7に示す。

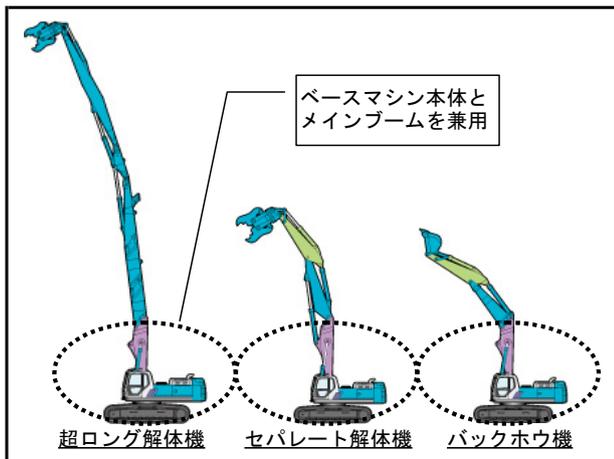


図-7：メインブーム兼用型解体機のコセプト

本機の開発に当たっては、単にメインブームの兼用だけでなく各アタッチメントでの特長、特にセパレートブームにおける持ち上げ能力を専用機と同等に確保することを主眼とした開発を行った。具体的には専用機と同等のジブシリンダによるモーメントを確保するために、当社独自のアタッチメント脱着構造を採用した。当該脱着構造を図-8に示す。

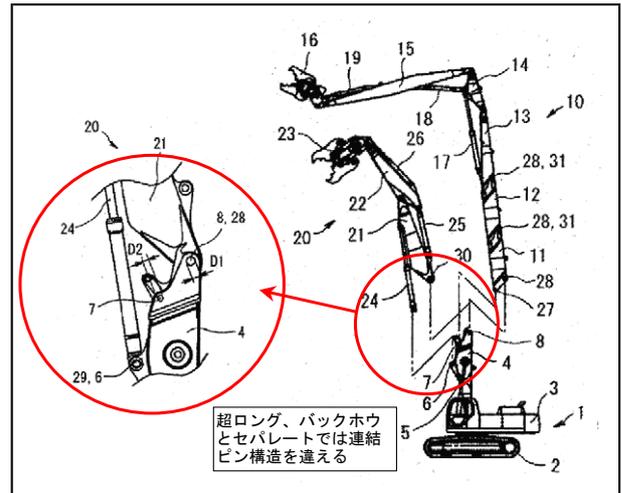


図-8：各アタッチメントの脱着構造

### 5. メインブーム兼用型解体機の使用実例

当社では機械質量 30 t 及び 40 t 級油圧ショベルをベースとしたメインブーム兼用型解体機の開発を済ませており、多くの解体工事で使用されて使用実績をあげている。当該二機種の主仕様値を表-1に示す。

表-1：メインブーム兼用解体機の主仕様値

油圧ショベル	仕様項目	アタッチメント		
		超ロング	セパレート	バックホウ
30 t 級	全装備質量	42,100kg	42,200kg	39,900kg
	最大作業高さ	23,005mm	16,350mm	10,800mm
	装着圧砕機	開口幅850mm	開口幅1,100mm	バケット容量
		質量2,350kg	質量4,000kg	1.4m <sup>3</sup>
40 t 級	全装備質量	55,300kg	55,700kg	51,400kg
	最大作業高さ	28,835mm	17,580mm	13,050mm
	装着圧砕機	開口幅850mm	開口幅1,150mm	バケット容量
		質量2,350kg	質量4,750kg	1.8m <sup>3</sup>

図-9、10には東京都内の中学校を解体した際の作業風景を示す。

本解体現場には 30 t 及び 40 t 級の解体機、各一台が投入された。対象建物の高さは5階建てであり、2台の超ロングアタッチメントにて解体を開始した。その後、5階から中層部までの解体に移行した際に、40 t 級解体機においてセパレートアタッチへと組み換え作業を実施した。この組み換え作業は半日で実施することができ、当日中に大型圧砕機での解体作業に移行することができた。工事全体としても超ロングとセパレート解体機を組み合わせることで解体を実施することにより、超ロングアタッチメントのみよりも短工期での工事が可能となった。



図-9：超ロングアタッチによる解体作業



図-10：セパレートアタッチによる解体作業



図-11：油圧式脱着ピン（メインブーム箇所）



図-12：アタッチ背面組立足場



図-13：積層式カウンタウエイト

## 6. 解体機の大型化と安全への配慮

図-1に示すように現在、解体工事ではRC構造のみならずS構造、SRC構造への対応に迫られている。S構造、SRC構造の建物を効率的に解体するために、質量5t超の大型鋼材圧砕機を使用した解体工事の実績が出始めている。当該圧砕機を装着して解体するには40t級油圧ショベルでは安定度が不足し、40t超の解体機が必要となる。当社では解体機の大型化ニーズを受けて80t級セパレートブーム解体機の開発を行った。

解体工事では機械の搬入搬出、組立分解は現場ごとに実施され、アタッチメントやカウンタウエイト、クローラの組立分解作業が頻繁に行われる。この作業過程では作業の効率化のみならずピン脱着、高所作業等への安全に対する配慮が強く求められる。

当該機にて開発及び採用した装備機能を図-11～13に、その装備目的を表-2に示す。

本機は現在、セパレートブーム仕様のみ解体機であるが、メインブーム兼用をコンセプトとし解体対象高さ40mの超ロングアタッチメントを開発中である。

表-2：80t級セパレート解体機における諸機能

装備機能	装備目的
油圧式脱着ピン	ハンマ打撃によるピン脱着作業の解消
アタッチ背面組立足場	滑り止め、安全帯反力受け確保による滑落事故防止
積層式カウンタウエイト	ウエイト脱着作業の効率化

## 7. おわりに

これまで様々な解体機を世に送り出してきた建設機械メーカーとしての自負を持ちつつ、今後も益々、多様化する解体工事に対し、今まで以上に環境及び安全に配慮した解体機の開発を継続していく所存である。

## 16. ITを活用した盛土締固め施工管理について

(情報化施工の取り組み)

国土交通省北陸技術事務所 機械課長 本間政幸  
○機械調査係長 宮部聡志

### 1. はじめに

公共工事は計画、調査、設計、工事施工、維持管理、更新の流れで実施され、各々の工程で様々な情報の受け渡しが行われている。工事施工においては、口頭指示、目視等の曖昧さ、紙ベース資料作成の手間等が作業効率を低くしているのが見受けられる。

一方、建設 CALS/EC の取り組みとして電子入札、設計・図面等書類の電子データ化、ネットワーク化を進めており、業務改善が図られている。

今回、インターネットで施工データを交換できるシステムを使用し、工事施工（道路盛土工）、監督業務の円滑な進行、効率化、品質の高度化等の業務改善に取り組んだ事例について紹介する。

### 2. 従来型の施工方法と問題点

従来型の施工方法と現状の問題点を以下に示す。

#### 2. 1 敷均し、締固め

##### (1) 従来型の施工方法

従来の敷均し、締固めは、作業指示を丁張りで行い、重機で締固め可能な厚さに敷均した後、地盤剛性が得られるまで所定回数を締固めし密度計測が行なわれていた。（図一1）



図一1 密度計測（R I計法）

##### (2) 従来の問題点

- 敷均し厚さ指示の丁張り準備に手間がかかり、5～10m間隔で設置となり、数量も少く熟練オペレータでも凹凸が残る。
- オペレータは、締固め回数を正確に把握する方法が

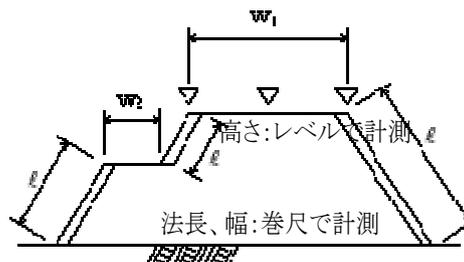
ないため過転圧の原因となっていた。

- 施工後に取得する品質データは膨大で帳票作成や管理に手間がかかる。

#### 2. 2 出来形管理

##### (1) 従来型の施工方法

従来の出来形管理は、設計図面で提示されている管理断面の寸法、高さを、人力で巻尺やレベル等により計測する。それを設計値と対比し、帳票を作成し管理・提出されている。



図一2 従来の出来高管理作業

##### (2) 従来の問題点

- 盛土寸法の計測、設計値との比較を人力で行い、帳票作成にも時間を費しており転記ミスも多い。
- 現地に計測用の杭を多く設置する必要がある。
- 現地計測値と設計値の対比資料が膨大である。



図一3 実証実験箇所

### 3. 実証実験

平成16年度に北陸地方整備局管内で、ITを活用した工事施工の実証実験を行った成果を報告する。

#### 3. 1 工事概要

工事名：荒川道路その6工事（図—3）

工事場所：新潟県岩船郡荒川町大字中野地先

工事概要：施工延長 860m

盛土量 22000m<sup>3</sup>

使用機械：振動ローラ10t 1台、ブルドーザ8t 1台

本実験のシステムは、締固め、敷き均し、出来形計測値がインターネットで請負者と監督職員にリアルタイムで確認できるものである。実験区間は、日本海沿岸東北自動車道の荒川IC（仮称）と国道7号を結ぶ道路盛土工で、施工延長860mのうち、約400mの敷均し、締固め及び出来形管理も対象とし、従来の手法とITを活用した管理方法の比較を行った。敷均し、締固め機械に搭載されたRTK-GPSとオペレータに作業指示および作業状況を表示する車載モニタ、作業指示・結果を作成・表示する請負者側コンピュータと、それらを蓄積するサーバ、作業結果を閲覧する発注者側コンピュータで構成されている。また、出来形管理支援システムは、

現地で出来形値を計測するトータルステーション（以下、TSと呼ぶ）と、設計データが入力されたデータコレクタ、3次元設計データの作成と出来形計測データの一覧表示を行うコンピュータで構成されている。

（図—4）

#### 3. 2 実験概要

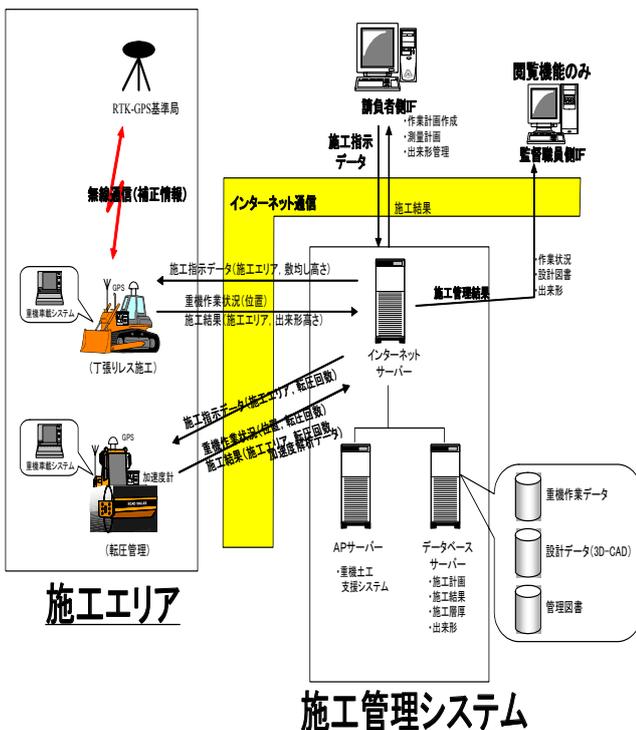
##### （1）敷均し、締固めシステム概要

重機のオペレータは指示値を車載モニタで自動受信し、指示値との差を確認しながら作業を行い、指示値を越えたら作業終了となる。事前の試験盛土施工を転圧回数6回、8回について実施し、締固め度は92.5%、93.0%となった。基準締固め度は最大乾燥密度の90%以上であり6回転圧で締固め度92.5%が得られたため6回とし、敷均し厚の規格値は200mmとした。



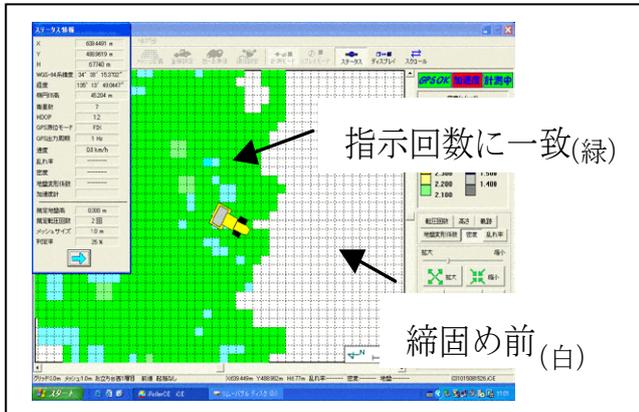
図—5 施工状況及び車載モニタ締固め作業の概要を以下に示す。

- ①現場代理人は、施工指示データを入力し、GPS（全地球測位システム）を利用し走行軌跡より、コンピュータ上で日々の出来高管理と、次の施工指示データを入力する。
- ②オペレータは車載モニタで自動的に現場代理人の作成した施工指示を受信する。モニタ画面は施工範囲を50cm間隔に分割されたものが表示され、それを確認しながら所定の高さになるまで敷均し作業を行う。
- ③作業完了後、オペレータが終了ボタンを押すと、敷均し作業完了がサーバに伝達され、締固め作業の開始が指示される。
- ④締固め作業は回数管理で実施し、車載モニタに施工範囲を50cm間隔で分割されたものが表



図—4 実験システム図

示されオペレータは、画面を確認しながら、全箇所が所定の回数になるよう施工を行う。現場代理人および監督職員はインターネット上でリアルタイムにこの結果を閲覧できる。(図一6)



図一6 車載モニタ画面 (締固め)

- ⑤オペレータが終了ボタンを押すと、サーバに施工終了が登録される。
- ⑥サーバで自動的に各種の帳票を作成し、保管する。

### (2) 施工管理基準

従来の砂置換やR I 計法による施工管理基準と情報化施工 (回数管理) による比較を表一1に示す。

表一1 締固め管理基準

項目	現状の方法	情報化施工 (回数管理)
測定項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・締固め度</li> <li>・数均し厚 (抽出管理)</li> <li>・出来高 (目視による施工範囲の確認)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・締固め度 (転圧回数、走行軌跡)</li> <li>・数均し厚 (全数管理)</li> <li>・出来高 (施工範囲、形状)</li> </ul>
測定方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・R I 計による密度管理 (締固め度)</li> <li>・スタッフ等の計測による写真管理 (数均し厚)</li> <li>・側点杭を目安に施工範囲を把握 (出来高)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・重機搭載GPSによる取得座標から換算された値</li> </ul>
帳票項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・締固め度 (品質管理帳票)</li> <li>・数均し厚さ (写真管理帳票)</li> <li>・進捗報告 (日報・月報)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・締固め回数分布図</li> <li>・数均し高さ分布図</li> <li>・3D出来高鳥瞰図</li> </ul>

### (3) 盛土出来形管理システム概要

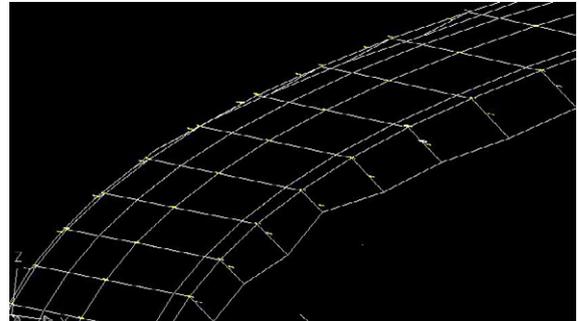
設計値をパソコンで3次元座標データ (図一7) に変換し、TSに転送し、任意断面の実測値より道路中心からの離れ高さ、離れ距離を計算し設計値と比較を行い、帳票作成システムに送信し即座に管理帳票を作成する。

出来形管理の作業手順を以下に示す。(図一8)

- ①2次元の設計図面データ、線形計算書から、3次元

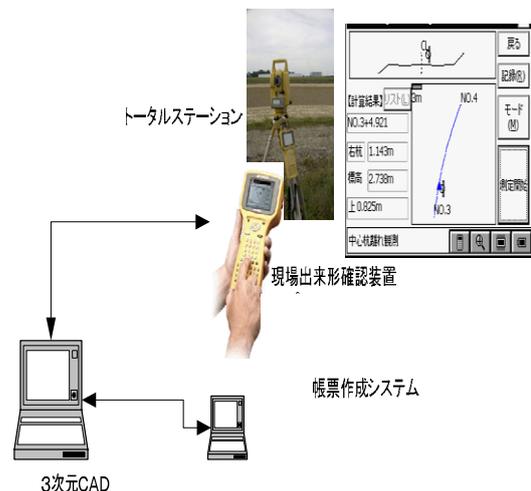
設計データを構築する。

- ②3次元CADから設計データをTSに転送する。従来の準備作業 (基準点から幅杭設置等) が省力化できる。



図一7 設計図面の3次元化

- ③請負者は、現地で必要な断面の変化点座標を計測する。
- ④請負者は、計測と同時に現場計測値と設計値を比較し、必要に応じて修正指示、問題なければデータを登録する。
- ⑤ 請負者は、現場計測値を帳票作成システムに転送し、自動的に出来形管理帳票を作成する。
- ⑥ 監督職員は、現場の断面について計測を行い、その箇所の設計値とのずれが規格値内であることを確認する。



図一8 出来形管理システム

### (4) 施工管理基準

従来の2次元的な施工管理基準と情報化施工による比較を表一2に示す。

表一 2 出来形管理基準

項目	現状の方法	情報化施工（3次元座標利用）
測定項目	・幅員 ・座標高（中心、端部） ・法長	・幅（法肩、法尻） ・基準高（中心・端部） ・法長
測定箇所	・幅員 ・座標高（中心、端部） ・法長	・中心位置 ・法肩位置 ・法尻位置
測定方法	・測量杭をトータルステーションで誘導した後、巻尺寸法・レベル標高管理	・トータルステーションによる中心離れ幅員・標高管理
規格値	・幅員（-100mm以上） ・標高（中心・端部）（± 50mm） ・法長（-100mm以上）	・幅（-100mm以上）従来通り ・基準高（± 50mm）従来通り ・法長 1<5m（-100）従来通り 1≥5m（法長-2%）従来通り
測定基準（測定頻度）	・施工延長40mに1箇所	・施工延長40mにつき1箇所
帳票項目	・測定結果総括表 ・測定結果一覧表 ・出来形管理図表 ・出来形管理図（工程能力図） ・度数表	・測定結果総括表 ・測定結果一覧表 ・出来形管理図表 ・出来形管理図（工程能力図） ・度数表

#### 4. 実証実験の効果

##### 4. 1 敷均し、締め固め

###### ① 品質向上

- ・オペレータの勘や技能に頼っていた施工を定量的に指示することによって、指示の確実な実行が確認でき、品質向上につながる。また、敷均し厚の均一化、過転圧防止にも役立つ。
- ・従来のサンプリングによる点的な管理から、面的な管理が可能となり、品質向上につながる。

###### ② 品質管理・検査の改善

本システムでは、任意の箇所の敷き均し、締め固め状況（図-9）が作業終了後即座に確認でき、帳票作成も可能なため、従来の人力による密度計測、品質帳票作成の作業が省力化され、施工管理だけでなく監督・検査業務の高度化と円滑化を実現できた。

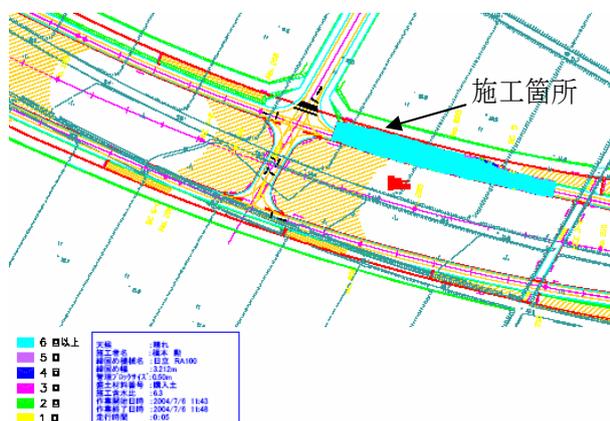


図-9 締め固め確認図

#### 4. 2 出来形管理

TSでの計測後、現地データと設計データの対比が即座にでき、現場代理人、監督職員もパソコンで確認可能となった。従来、管理断面の測量と計測後の帳票作成に多くの時間を費やしていたが、これらの時間を低減できた。

#### 5. 今後の課題

請負者、オペレータ、監督員等を対象に意見交換会を実施し意見、課題をまとめた。

##### 5. 1 敷均し、締め固め作業の課題

- ・請負者が利用しやすいようシステムを改良し操作性の向上を図る。
- ・機器の普及による機器コストの低減を図る。

##### 5. 2 出来形管理の課題

- ・3次元設計データの作成方法（費用分担を含む）と利用方法の確立が必要である。
- ・規格値は、道路中心からの離れ高さ、離れ距離を計測、管理するため出来形管理基準の見直しが必要である。

#### 6. まとめ

敷き均し、締め固めについては、作業指示値を電子的に作成でき、従来の口頭指示、目視や勘に頼っていた曖昧さが無くなり、丁張りに係わる計算、準備作業の削減、手戻りも防止でき高品質化になる。

出来形管理について、従来は管理断面ごとの点的管理にならざるを得ないが、TS、GPSを導入することにより、任意の断面で設計値と比較できるため面的管理が可能となり、出来形断面の測量、帳票作成における省力化、施工データを電子化し即座に活用できるので、施工管理だけでなく監督・検査業務の高度化と円滑化を実現できた。

今回の実験にあたり、ご指導、ご協力いただきました多くの皆様に御礼申し上げます。

# 17. 高精度GPSを利用した建設機械の情報化施工システム

コマツ 永井孝雄 ○神田俊彦  
ハザマ 沖 政和

## 1. はじめに

建設機械の作業機を自動で操縦するユーザーズは、30年以上前から存在していたが、主に水田の造成等に、回転レーザによるブルドーザのブレード制御が先ず実用化された。その当時はまだGPSはなく、やがて計測用に利用が可能なRTK-GPS受信機が登場したが当時は2000万円以上と高価で利用範囲はごく限られていた。本格的にRTK-GPSによる工事の施工が始まったのは1990年の無人化施工による雲仙普賢岳災害復旧工事（以下普賢岳）である。これを契機にRTK-GPSによる3次元計測システムの利用が広く認知され、その適用検討が始まったといえる。雲仙普賢岳災害復旧工事は大掛かりな工事であり、かつ試験施工も兼ねていたため、高精度なGPSによる地形の測量など今日の情報化施工につながる当時の最新技術が惜しみなく投入された。その結果、数多くの技術的な課題が明確になった。コマツでは、普賢岳用工事機械として自律走行可能なダンプトラックやラジコンブルドーザを提供すると同時に、これらの無人化施工システムを更に広くかつ容易に使用できるように仕上げることに傾注し、これまでに数多くの危険作業現場で施工実績を積み上げてきた。普賢岳においては無人化施工という制約がRTK-GPSによる計測技術の進歩に多いに寄与したが、日本におけるその後の普及は計測器用途が中心で、RTK-GPSを機械に搭載した建設機械はまだ普及していない。今回紹介するシステムはコマツが開発し、ハザマがその初号機を兵庫県淡路市津名町佐野・生穂地区150haの土砂採取事業の跡地造成工事に於いて2年間に渡って使用し、その間に改良を行った成果である。

一方で海外では、大規模鉱山でRTK-GPSを搭載した鉱山機械での利用がまず1995年から始まった。対象になったのが、発破のための穿孔機械、リクレーションに使用する大型ブルドーザと超大型積み込機であった。いずれの機械もRTK-GPSを搭載し、機械そのもので位置計測を行い、超大型機械を計測のため止めることなく稼働させる事を可能にした。更に積み込み機の場合には、鉱山生産管理コンピュータの指定どおり掘削する

ことが出来、容易に鉱石の品位を一定に保つことが可能になるため、多いにコストダウンにも寄与する。鉱山管理システムの代表的なサプライヤであるModular Mining Systems社などから各社の鉱山機械に装着するシステムが普及している。

鉱山機械から5年ほど遅れて土木工事用の建設機械にRTK-GPSを搭載するシステムが登場してきた。北米では昨年から急速にブルドーザとモータグレーダへのRTK-GPS搭載が目立ち始めた。日本ではRTK-GPSのコストが建設機械そのもののコストに比べて割高であることや、鉱山機械に比べて年間稼働時間が少なく償却コストが割高になることから本格的な普及はまさにこれからという段階である。本論文ではRTK-GPSを使用したブルドーザとモータグレーダの作業機を自動制御するシステムを先ず紹介する。さらにシステムを使用したときの効果をコマツやハザマの社内試験施工結果から紹介し、今後のRTK-GPSを使用する工事（以下GPS施工）普及に寄与したい。

## 2. 開発のねらい

GPS施工システムは、地上に設置するGPS固定局とそのデータ送信無線局、建設機械と搭載するGPS受信機と固定局データ受信機、さらに3次元設計CADデータを連携して操作する必要があるため、従来は主にこれらのシステムを施工業者が直接GPSや無線機、CADシステムをそろえてシステム構築と建機への装着作業を行っていた。これまでは建機への装着作業は標準化されておらず、油圧回路への追加工や作動油のオーバーヒート、電気配線の断線やショート等で問題を起こしたり、注文のたびに異なる部品やソフトのバージョンなどを管理するため、専門家をおく必要がある等、改善を求められる点が多い。このためこれらの作業の一部をシステム化して施工業者から一括して受注する会社も出てきたが、肝心の建機への搭載作業は、数多くある機種ごとに設計することや性能の作りこみなどは不可能であった。

本開発のねらいは、施工者が工事に必要な建機を選定する感覚で、GPS施工に必要な機材とシステム

1. あらゆる現場に対応するパッケージシステム商品（ワンストップショッピング対応）
2. コマツ建機に対応する、共通化され、コスト改善されたシステム
3. コマツ建機で最高に性能を発揮するように開発された自動制御システム
4. RTK-GPSには米国とロシアの衛星が受信可能なトプコン製を使用して稼働率が高い

を調達することが出来るようなシステム商品化、ワンストップショッピング化であり、施工者はシステム構築の為に要員や多くの専門メーカーとの折衝要員を必要とせずに購入と使用を可能にすることである。またその結果、これまでは規模が小さく適用が困難であったような工事現場にも、気軽に GPS 施工システムを投入できるようにすることである。

そのため弊社は、これらの個々のシステムを総合的に一体化し、フルラインメーカーの強みや自前のエレクトロニクス部門を持つ強みを生かし、システムコンポーネントを組み合わせることで、小規模から大規模な現場で使用される、ブルドーザ、モータグレーダの主要機種に対応できるシステムを開発した。図1に従来と本システムの比較、表1に本システム構成と対応機種を、本開発の特長を前ページにまとめる。

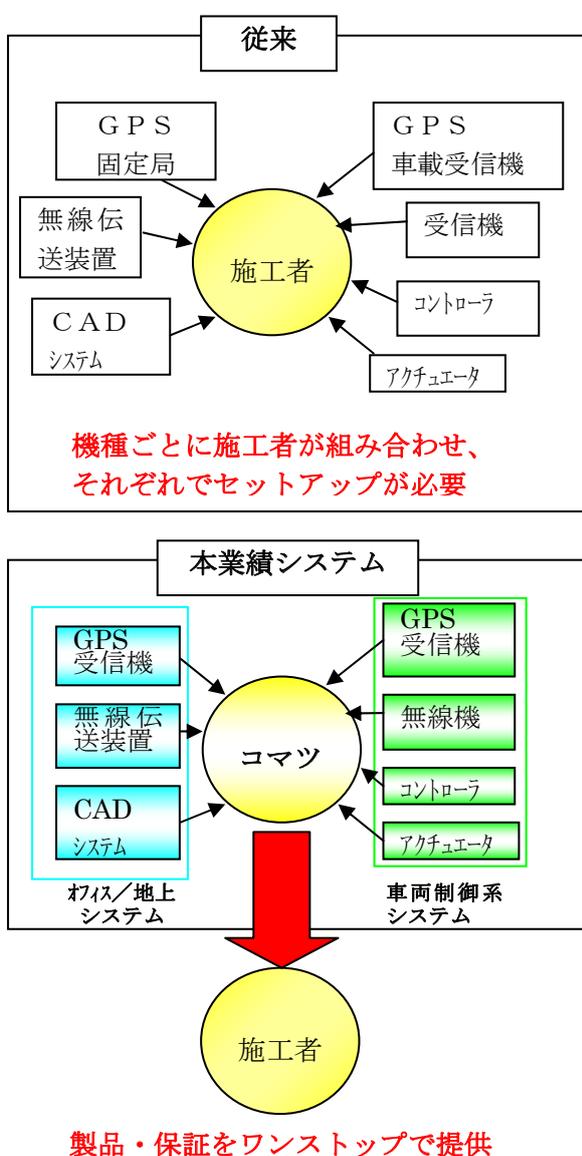


図1 従来と本システムの比較

表1 本システム構成と対応機種

区分	内容	
オフィスシステム	3D-CAD	
地上システム	GPS受信機	
	無線伝送装置	
車載システム	GPS受信機	
	無線受信機	
	コントローラ	
	油圧アクチュエータ	
対応機種	ブルドーザ*	D31-21, D37-21, D39-21, D61-15, D65-15, D85-15, D155-5, D275-5, D375-5
	グレーダ*	GD555-3*, GD655-3, GD675-3*

\*) 海外向け機種

### 3. 技術的説明

#### 【システム構成要素】

パッケージシステム商品は大きく区別すると、表1に有るようにオフィス系、地上系、車載系の各システムに大別され、これらを必要に応じて組み合わせ提供している。

オフィス系のシステムは、3次元 CAD システムである。本システム専用の 3D-CAD である必要はなく、施工計画図を T I N (三角メッシュ) ファイル形式で出力出来るものであればいずれの CAD も使用可能である。従来は 3D-CAD 専用機が必要であったが、機能向上と低価格化の目覚ましいパソコン上で作動するものが主流となっている。本システムでは、コマツが開発した砕石 CAD i-ROCK<sup>®</sup>のプラットフォームとして採用し、汎用 CAD として業界標準となっている Autodesk 社の AutoCAD<sup>®</sup>を提供する事とした。これにより、ソフトウェアの提供、教育、サポート、また各種図面の作成請負も提供可能と成っている。

地上系のシステムは、GPS 受信機と補正信号送信用の無線伝達装置から成っている。高精度 GPS の計測手法には RTK-GPS を採用することし、後述する GLONASS 衛星も受信出来る株式会社トプコン (以下(株)トプコン)製の GPS 受信機とコントローラを採用している。

車載系のシステムは、フルラインナップメーカーとしてのコマツの強みを生かし、GPS 施工システムを大型から小型までのブルドーザおよびグレーダの各機種共通のプラットフォームとして開発した。これにより、車載するコントローラ、GPS アンテナ、GPS 受信機、無線機、ケーブル類の共通化を実現し、コストダウン、補給性の向上、また、異なる車格間での操作性の共通化による使い勝手の向上を実現した。次に詳細を述べる。



図2 建機搭載システム

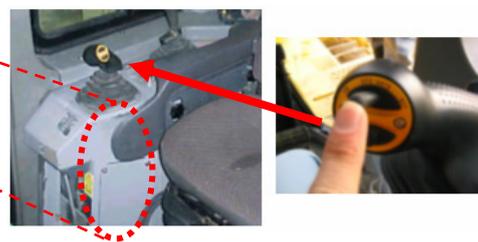


図3 自動/手動の切り替えSW

【建機搭載システム】

作業機（ブレード）の水平・垂直位置検出には、RTK-GPSにより、米国が運用しているGPS衛星とロシアが運用しているGLONASS衛星を併用できるシステムとなっている。ブレード背面に装着している傾斜計によりブレードの傾きを検出している。

施工設計データは、3次元CADを使用しTINファイル形式で作成し、オペ席前方に設置したカラー表示器と制御ユニットの一体型のコントロールボックスにインストールする。施工設計データのインストールには、デジタルカメラなどにも使用されているコンパクトフラッシュメモリを使用しており、特殊な機器などは不要である。

コントロールボックスのカラー表示器には、施行設計図面上に建設機械の現状位置をリアルタイムで更新表示し、オペレータが常時作業状態を確認出来るように成っている。

また、一方でコントロールボックスは、施行設計データとブレードの位置・姿勢をリアルタイムで比較し手動操作と自動制御一体型のコンパクトなバルブを駆動する事により、ブレード制御を行っている。

このバルブは、本システム用に開発された物であり、コンソール内に内蔵され外部への露出もなく、作動油温のオーバーヒートも皆無となっている。

自動/手動の切り換えは、ブレード操作レバー上に設けた切り替えSWで行い、レバーから手を離さずに手動/自動の切り換えが常時可能であり、違和感なく使い操作性の優れた物となっている。

【建設機械の作業機制御について】

本システムでは、ブレードの上下動作を制御するメインバルブをコントロールバルブで制御するシステムであり、図4に示す構成となっている。

ブルドーザの場合、ブレードは車体の前方に配置されておりブレードが整地した面を走行する。前後

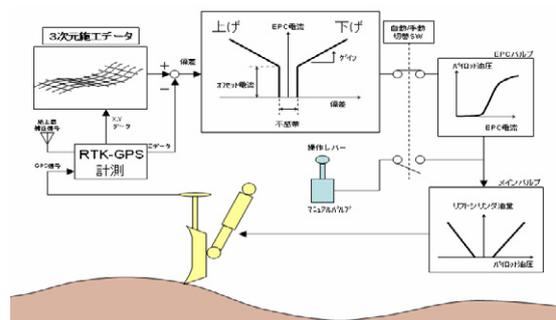


図4 GPSドーザの制御ロジック

方向の車体の仮想的な回転中心を履帯の接地面後端部とした場合、履帯前端部までの長さをC、ブレード刃先までの長さをLとすると、その比は1以上となる。図5参照。

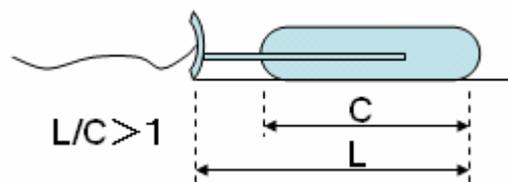


図5 ブルドーザの場合のブレード刃先位置

この場合、GPS位置計算遅れや油圧バルブ応答遅れ等により、履帯の僅かな上下変化がブレード刃先位置では大きく変化することになり、通常のフィードバック制御では発散して仕舞う場合がある。本システムでは応答性の良いEPCバルブを開発しブレードの制御応答性を確保し、ブレード目標位置での不感帯を設ける事により、不要なブレード動作を抑制する事により静定性を実現している。

グレーダの場合は、LC比が1以下（図6参照）であるので安定系で在るが、より施工精度の高い作業が要求されるため、ブルドーザと同様にブレード制御応答性の早さと、ブレード目標位置での静定性が求められる事に変わりはない。

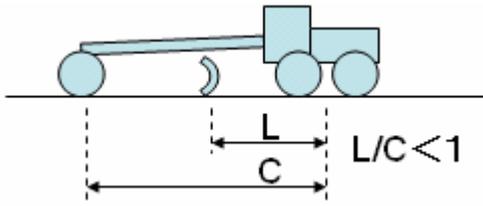


図6 グレーダの場合のブレード刃先位置

【GPS+GLONASS のメリット】

本システムでは、29機が稼働中の米国の GPS (Global Positioning System) と 13機<sup>\*1</sup>が稼働中のロシアの GLONASS (Global Navigation Satellite System) の両衛星からの電波を活用することが可能である。

高精度 GPS 計測には、最低でも5機以上の衛星が天空に可視状態で飛来している必要があり、またその配置も分散している事が望ましい。しかしながら、GPS 衛星だけを使用している場合は、時間帯によっては可視衛星が5機未満と成る場合があり、この時間帯での高精度 GPS 測位は不可能となる。よって、GPS 衛星に GLONASS 衛星を補完することにより、可視衛星数の増大し高精度 GPS 計測が可能となる。図7にグラフで示す。

また、GPS の軌道面傾斜角が 55° であるのに対し、GLONASS は 65° の傾斜を持つため、高緯度地域では GLONASS を利用出来る事はさらに優位であり、頭上を飛来する確率が高く成る為、特に上空視界が遮られているような場所でも高精度 GPS 計測が可能となる<sup>\*2</sup>。

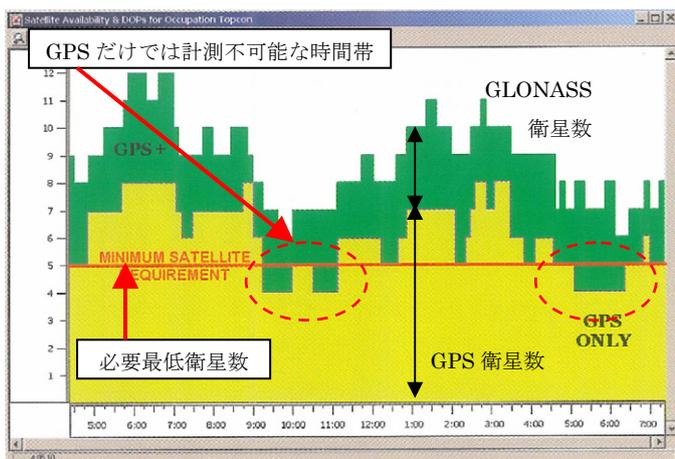


図7 可視衛星数の時間的変化 (㈱トプコン提供)

4. テスト施工結果と考察

テストは最初にコマツ社内で行い、さらにハザマでも整地精度の確認と施工時間の手動と自動の比較について行ったので報告する。

(a) 平面整地の精度の確認結果

(コマツ 社内実験場)

整地精度の確認は、10m×20 or 30mの水平面を GPS 施工にて仕上げ、仕上げ面を光学レベル測量により計測し精度を確認した。

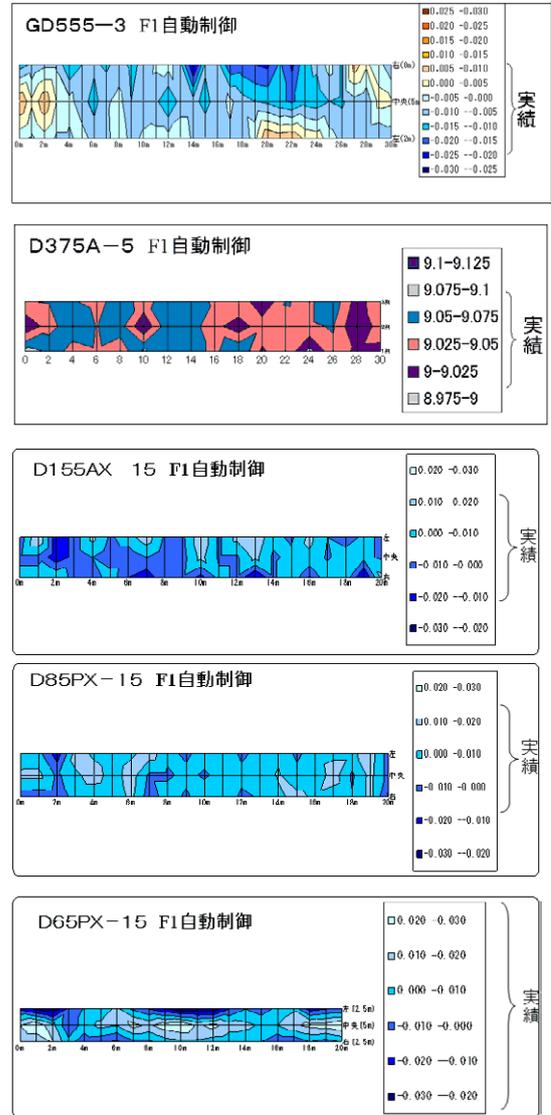


図8 整地精度テスト結果

モータグレーダ GD555-3 によるテスト結果は、+10～-26mm、大型のブルドーザ D375の結果は±5cmの範囲に入っており、続いて D155、D85は±20mm、中型のブルドーザ D65は±30mm、という結果となった。整地精度の差はそれぞれの機種特性と RTK-GPS 測量誤差に依存したものと考える。

施工管理基準にもよるが、D375は下層路盤整地に、D155、D85、D65と GD555は上層路盤整地に使用可能と考える。(RTK-GPS の測量精度誤差は±20mm程度である。)

(b) 情報化施工と従来施工での施工時間比較と精度の確認 その1 (コマツ 社内実験場)

テストはD65を用い、図9に示すような高速道路ランプウェイ形状を模して行い、GPS施工による仕上げ精度の確認と従来施工とで施工に掛かった時間を比較した(表-1)。

3D-CADによるテスト施工設計図は、横幅8m、縦断勾配は20mの平坦路の後、8%一定勾配となり、で縦断勾配は20m~50mの区間で縦断勾配は0~9%まで連続的に変化する設計となっている。

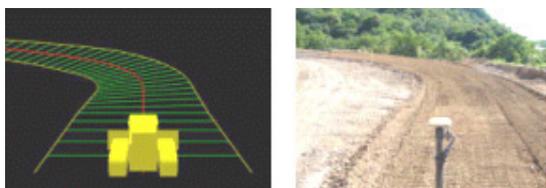
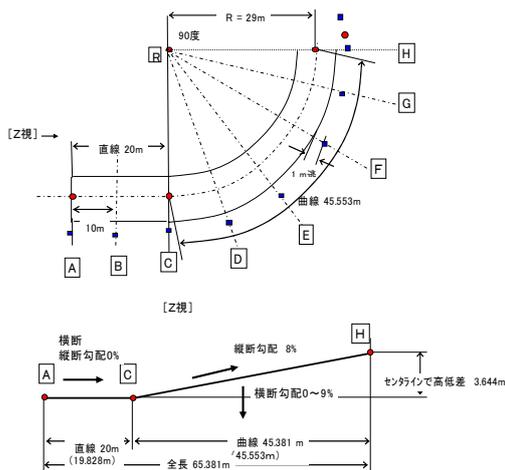


図9 施工図面と仕上がり形状

図11, 12, 13に、GPS施工テスト後の仕上げ面を光学レベル測量により計測した結果を示す。

図11に示すように、発進時から6m程度(約1車長分)は仕上げ精度に乱れが在り、本施工方法に於いては、1車長程度の助走区間を設ける事が有効で有ることが判る。また本来の道路形状では有り得ない設定であるが、水平面から8%の上り勾配への屈曲部に於いても精度が乱れる事無く、2車長以内に静定している事が判り、本GPS施工の有効性が確認出来る。

自動と手動での施工時間は表-2の結果となり、自動は手動に対し、丁張りで100%、施工で16%短縮し、丁張り・施工時間を含めた全行程では自動は手動に対し43%短縮している結果となった。

表-2 ランプウェイ形状施工 自動 vs 手動

丁張り、施工時間 テスト結果		
項目	自動	手動
人数、丁張り時間 (h)、丁張り本数	0	3人 2h 12本
ブルドーザ作業時間 (h)	3.63	4.32
参考: 施工時間 (h)	3.63	6.32

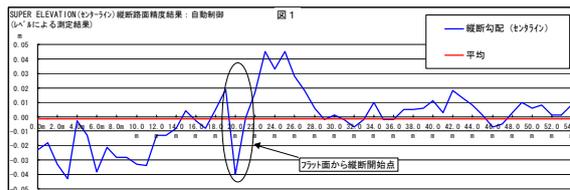


図10 センタライン縦断面での精度

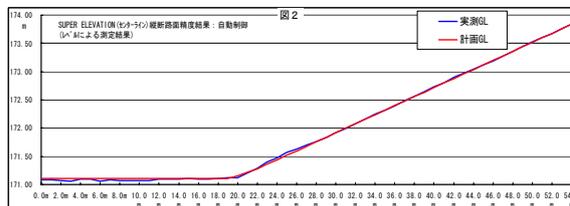


図11 センタライン縦断面形状

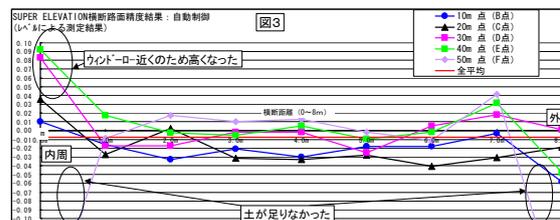


図12 横断面での精度



図13 テスト施工の様子

(c) 情報化施工と従来施工での施工時間比較と精度の確認 その2 (ハザマ 津名採土事業所)

50m x 50m平面を盛土成形により水捌け勾配1%に仕上げる、GPS施工と従来施工それぞれのテスト(図14)について報告する。

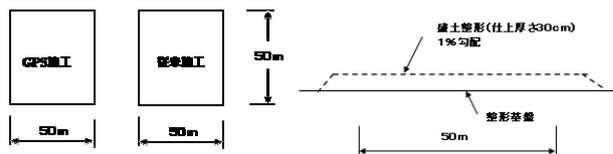


図14 テスト施工内容

各施工後地形を10mメッシュで光学測量し設計面との誤差を等高線で表した物を図15に示す。±5cmの施工基準範囲で面積比較すると従来工法の72%に対し89%と精度が向上している結果と

成り、本成果の有効性を確認できた。また、下段に参考として、施工基準を倍とした場合の比較では、従来工法の36%に対し61%となっている。

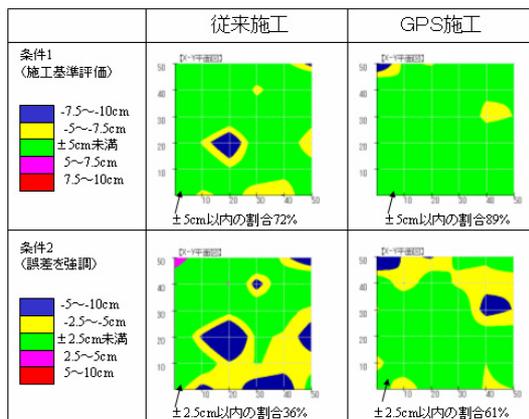


図 1 5 テスト施工後地形

10mメッシュ計測での各点の誤差分布を従来施工とGPS施工とで比較した物を図16に示す。標準偏差計算し3σ値では、従来施工の13.5cmに対し、情報化施工では8.4cmという結果という結果を得ることが出来、有効性を確認出来た。

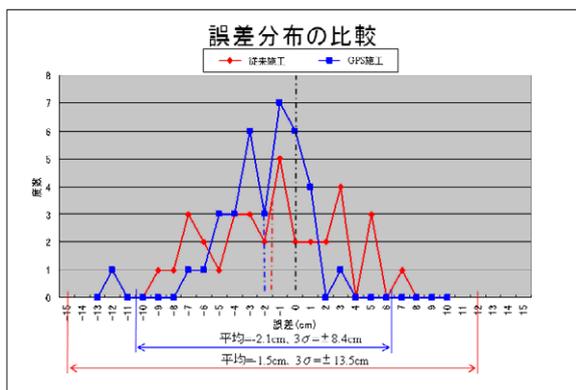


図 1 6 誤算分布の比較

また、それぞれの工区の施行時間を計測した結果を図17に示す。従来施工に対して情報化施工では施工時間を46%短縮する結果と成った。丁張りは不要となり、測量作業も含めて3時間の節約ができ、1%勾配フラット盛土成形時間も1時間の節約となった。

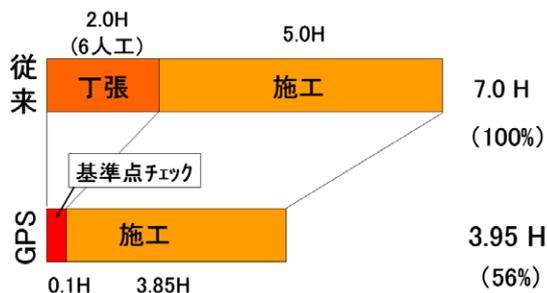


図 1 7 施工時間の比較

## 5. 経済的効果

本開発により所謂ワンストップショッピングでのGPS施工を行う際の機材調達での対応が可能となったが、テスト施工を通じて得られた結果より以下のような経済的効果が得られる事も期待出来る。

①丁張りが不要であり、ブルドーザやグレーダの機械の作業効率が向上した結果、4割以上の工期短縮可能となる。また、これにより施工従事者の労務費削減が可能である。

②丁張り直し作業や、仕上げ面確認の為の再測量作業など稼働中の機械近傍での作業が不要となり、安全性が向上する為、安全確保に必要なコストをセーブする事が可能である。

③ブルドーザやグレーダの機械の作業効率が2~3割向上する為、燃料の節約が可能であり、これにより二酸化炭素排出量の削減も可能となる。

④誰でも複雑な施工を精度良く行う事が可能であり、熟練オペレータの減少に伴う諸問題、高賃金化対応、苦渋作業の低減、オペレータ減少による工事受注の機会損失の低減が可能である。

## 6. おわりに

情報化施工システムの進展は、先行する米国の例を見るまでもなく、今後日本国内でも益々盛んになる事は確実である。そのためには、さらに使いやすく適正な価格のシステムとするべく、ユーザの知恵や意見を元に、本システムの改善に取り組んでいきたいと考える。

最後に、本開発にあたり貴重な意見や資料のご提供と試験施工のご協力を頂いた㈱トプコン・㈱ジオスケープはじめ関係各位に感謝の意を表します。

### <参考文献>

- \* 1 測量技術・建設技術審査証明報告書GNSS測量システム平成17年6月13日技審証第1701号
- \* 2 James P. Reilly, PhD, A review of the evolution of the Russian GLONASS system, All the Birds in the Sky,雑誌“POB”2004年9月号
- \* 3 神田俊彦: 情報化施工に対応する建設・鉱山機械とそのサポートシステム、建設の施工企画、No. 654、(社)日本建設機械化協会、2004年8月号

## 18. 舗装工の情報化施工について

国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所：○坂本 鋼三  
国土交通省 関東地方整備局： 金澤 哲也  
(社) 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 研究第三部： 藤島 崇

### 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により、施工の効率化、安全性の向上、品質の向上、環境保全の向上等に関する施工の合理化と監督・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ている。平成15年度には「TS・GPSを用いた盛土の締固め情報化施工管理要領（案）」がとりまとめられ、現場で活用されつつある。

本文は、情報化施工の適用範囲を拡大するため、舗装工について行った構内実験をまとめたものである。

### 2. 舗装工の現状

舗装工はITを導入することにより、その施工や施工管理の改善によるコスト縮減や品質の向上が大いに期待できる工種であると言える。図-1に代表的なアスファルト舗

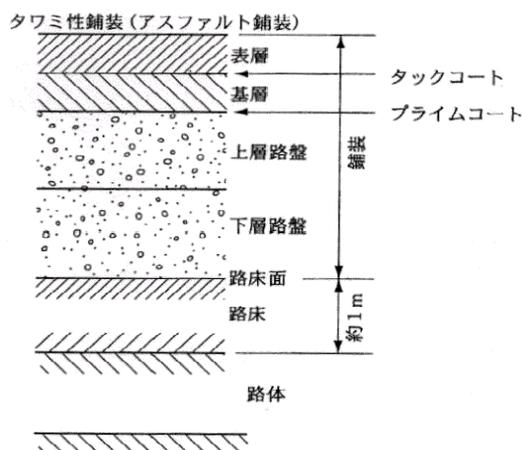


図-1 アスファルト舗装構成

装工の構成を示す。舗装工は、下層路盤から上層を指す。

現行の舗装工の施工管理項目は、出来形と品質で、出来形については下層路盤までは、設計図面に示される高さに対する管理が必要で、それ以上では厚さ管理である。

以下に、舗装工の施工の特徴を示す。

- ①高さ方向の出来形管理基準は、下層路盤以外は厚さ管理である。しかし、施工者は高さ管理を基本とし、結果として厚さを管理する手法をとっている。
  - ②表層の仕上がり面は、道路端の排水溝等の構造物の天端に合わせる（舗装面が排水溝よりも低いと雨水処理ができない、あるいは水が溜まるなどの不具合が生じる）。
  - ③舗装工では、工事費の約60～70%を材料費が占めている。また、上位の層（表層に近い）ほど材料が高価であるため、施工者は下層路盤の仕上げ高さを厳密に管理して、上層の材料をできるだけ必要最小限にとどめるように施工する。
  - ④不具合が生じた場合の再施工（施工のやり直し）は非常に困難である。
  - ⑤舗装工の最終段階の管理項目として表層の平坦性が必要である。
  - ⑥路盤の掘起こし、コア抜きによって、品質と出来形の両方の確認を行っている。
- 通常施工では、厚さ・品質確認は、掘り起こしやコア抜きによって行われる。この手法では施工面に対して点的な管理となるこ

とや、コア抜きによる局所的な舗装の品質低下といった問題が懸念される。

また舗装工では、路盤面に生じている不陸をその上位の基層・表層で吸収することになるため、路盤の仕上がり精度が舗装の出来形・品質や材料の使用量に直接影響する。したがって、舗装の出来形・品質の向上と経済性向上にあたっては、路盤の仕上がり精度の向上が不可欠である。

### 3. 情報化施工システム概要

IT を活用した場合の施工の方法及びその場合の施工管理手法について検討し、図-2 に示すの情報化施工システムを構築した。

### 4. 試験施工

施工技術総合研究所構内にて、前項で提案した情報化施工システムと現行施工を行い、

その実現性と精度・効果について確認した。試験規模は情報化施工区間 50m、現行施工区間 50m とし、図-3 に示す設計形状の道路を構築した。試験施工によって確認されたシステム導入の主なメリットについて以下に記す。

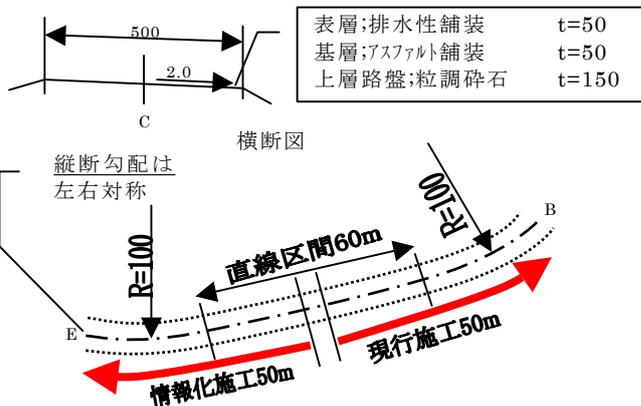


図-3 舗装工の設計形状

- ① 路盤整形作業の効率化・出来形向上
- ② 現行施工においては、重機による路盤整形

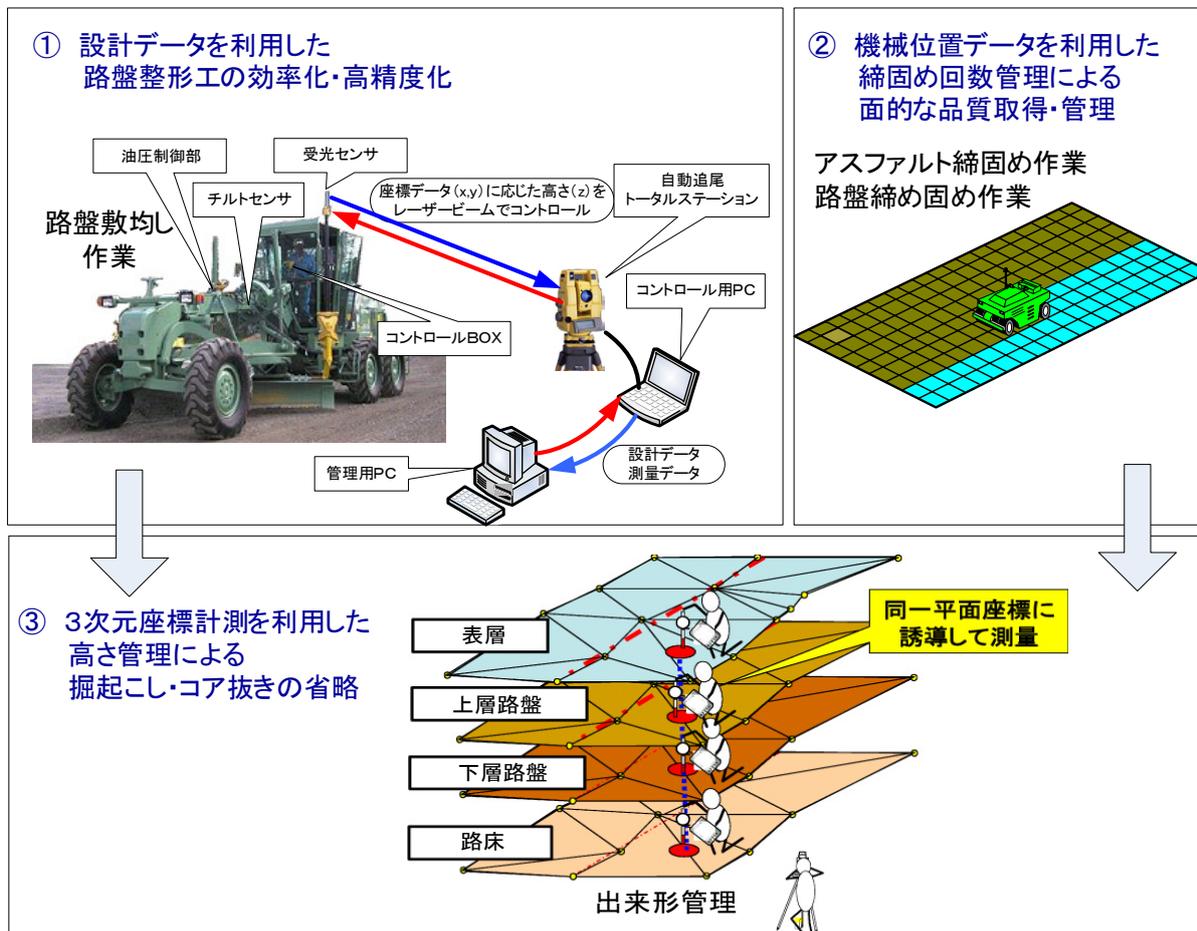


図-2 舗装工の情報化施工システム



写真-1 現行路盤整形作業時の確認作業



写真-2 路盤整形後の状況

作業と、写真-1に示すような路盤仕上り高さ確認作業を、複数回繰返す必要があるが、本システムでは、路盤面を整形するブレードの標高を、重機搭載のターゲットと道路脇に設置したトータルステーション（以下、TSという）を用いて施工中リアルタイムに測定し、仕上がり面の標高を面的に把握できるため、出来形確認のための施工中断が無くなり、作

業の効率化と燃料消費量の削減（38%）が実現できた。また、設計標高と路盤面との差を重機にフィードバックし、設計仕上がり標高に近づくようブレードの上下動を自動制御する機能により、図-4に示すように、路盤の面的な仕上り精度が向上した。

② 舗装の出来形向上

アスファルトフィニッシャ（非接触型ロン

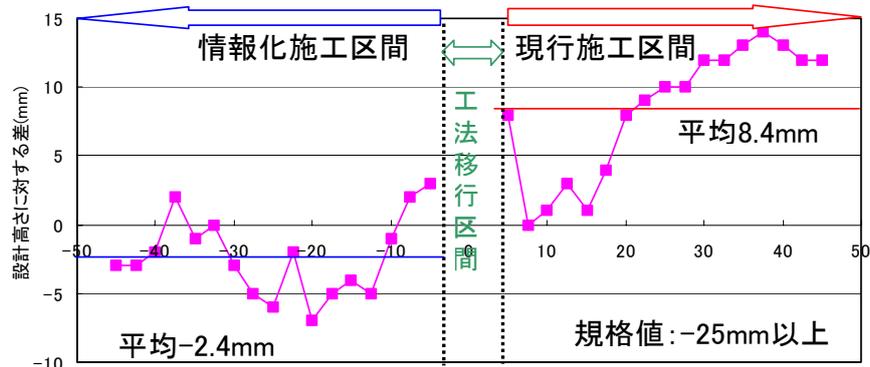


図-4 路盤仕上り精度の比較

(コアの締固め度の詳細)

情報化施工			現行施工				
測定箇所	以降区間からの距離(m)	コアの締固め度(%)		測定箇所	以降区間からの距離(m)	コアの締固め度(%)	
		基層	表層			基層	表層
中心	7.5	96.4	96.8	中心	7.5	97.8	97.0
海側	10	96.6	97.8	海側	10	95.6	99.2
山側	10	95.2	103.8	山側	10	95.9	99.4
中心	15	97.4	96.5	中心	15	95.5	96.5
海側	30	96.1	97.2	海側	30	95.1	97.1
山側	30	97.5	100.1	山側	30	95.2	104.5
中心	35	96.3	98.8	中心	35	97.5	99.4
海側	40	95.9	98.5	海側	40	96.5	101.2
山側	40	96.0	98.6	山側	40	96.2	97.3
中心	42.5	97.2	97.8	中心	42.5	97.2	96.2
平均		96.5	98.6	平均		96.3	98.8
平均に対する規格値		96%以上		平均に対する規格値		96%以上	
個々に対する規格値		94%以上		個々に対する規格値		94%以上	

図-5 密度試験結果

グスキー使用)と締固め機械(タイヤローラ等)を用いて現行施工区間と情報化施工区間の基層・表層を施工した結果、情報化施工区間の出来形の方が良好な精度であった。また、図-5のとおり締固め回数で管理した舗装の締固め度については、全ての密度計測箇所ですべての規格値を満足する結果が得られている。

### ③ 舗装厚検測作業の効率化

図-6は、TSで定点計測した路盤・基層・表層の仕上がり面の標高から算定した舗装厚と、同じ箇所ですコア抜きにより実測した舗装厚を、それぞれ縦軸、横軸として示した図である。同図より、TSによる算定値とコアによる舗装厚実測値の差の多くは±6mm以内に収まっている。これらの結果から、TSによる舗装厚計測は層厚管理に用いる手法として十分活用していただける可能性があることから、コア抜き等の破壊検査に代わり、非破壊にて、より高頻度で舗装厚を把握できる可能性があると考えられる。

## 5. おわりに

今回の試行工事において得られた成果を基に「舗装工の情報化施工要領案(試行案)」を作成した。

今後は、実際の施工現場においてフィールド試験などを実施し、さらに施工データの収集・検証を行っていくことで、本要領(試案)の精度向上を図っていく。

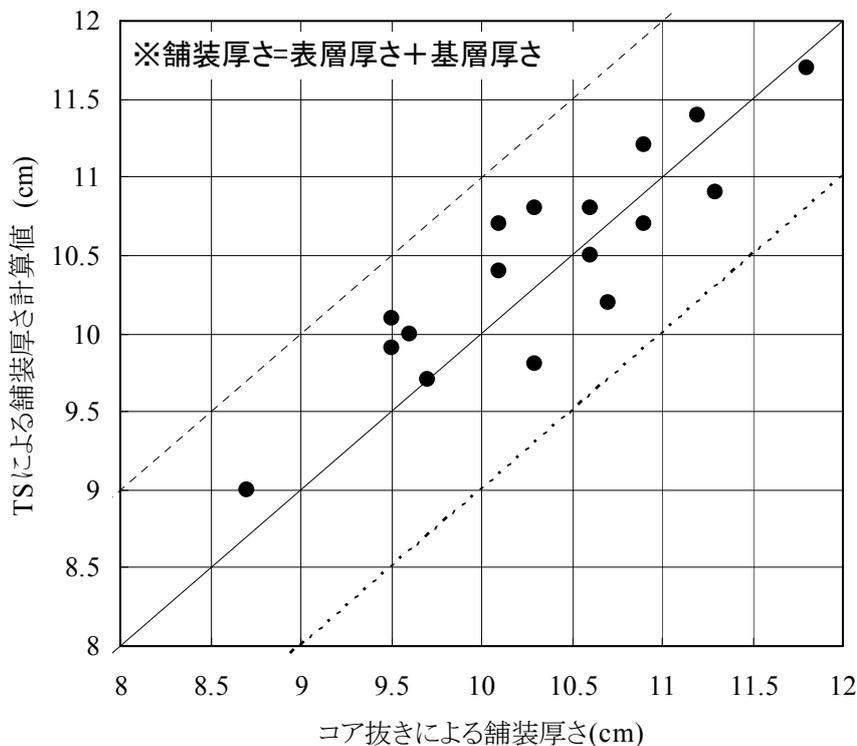


図-6 舗装仕上り確認精度の比較

## 19. 建設施工におけるコンカレントエンジニアリングの実践

立命館大学 理工学部 ○ 芦田 恵樹, 建山 和由  
ハザマ 大阪支店 大前 延夫

### 1. はじめに

情報化技術の進展と共に建設施工でも最新の情報機器を導入し、情報化施工のための様々なシステムが構築されるようになった。情報化施工における研究開発の主な方向としては、情報化施工のための道具の開発と得られた情報を利用して施工の合理化や効率化を図るシステムの構築が挙げられる。

本稿では、後者の情報の有効利用に関する研究開発の一環として、自動車や電気製品などの一般製造業ではすでに取り入れられているコンカレントエンジニアリングの基本的な考え方を建設施工に取り入れることにより開発された精密施工の内容とその導入効果について報告する。

### 2. コンカレントエンジニアリング<sup>1),2)</sup>

コンカレント (Concurrent) の con を辞書で引くと, com と同義で, 「共に」という意味がある。Current は流れ, 傾向, 電流という意味がある。両者を併せて Concurrent は, 「並行する」, 「共存する」, 「協調する」, 「同時の」, 「一致する」などの意味がある。

コンカレントエンジニアリングは, 1980 年代の後半, アメリカの防衛関係で試行的に始められ, 後に産業界に広まった。当時, 自動車や電気製品の製造業では, それまでの規格大量生産から消費者のニーズに柔軟に対応した製品作りにその方向性が変わり始めていた。消費者の多様な要求に応えるには, 製品の設計を柔軟に変えていく必要があるが, 新しい製品の設計とそれを製造するためのラインの変更には時間を要し, 時間とともに変わっていく消費者の要求に応えられないという状況に陥っていた。すなわち, 設計では, 多様な消費者のニーズを吸収して新しい製品の設計を行い, 工場では示された設計に応じて材料や部品の調達方法から組み立てラ

インの変更を行っていくが, この作業は, 新しい設計が示されてから始められることになるため結果として時間遅れを伴うことになり, その間に消費者の要望が変わってしまうことも起こり得た (図-1(a)参照)。

このような状況の中, 一般製造業では, コンカレントエンジニアリングを導入して, 柔軟でかつ効率的な設計・製造ラインの構築を目指して行った。ここでは, 設計・製造のプロセスを統合し, これらのプロセスを同時並行的に行うことにより, 効率的な生産システムの構築を行った (図-1(b)参照)。具体的には, 設計と製造の間で情報の共有化と双方向化をはかり, 関連するエンジニアが, 問題とその解決を同じ情報を用いて, かつ同時に議論することにより問題の解決と新しい生産体制の構築を迅速に行う仕組みを整えていった。



(a) 従来の設計・生産工程の流れ



(b) 設計と生産プロセスの統合

図-1 コンカレントエンジニアリングの導入

一般に建設施工では, 複数の工程の作業が所定の流れに沿って実施されていくが, 地質や天候その他, 想定外の事象に起因して, 予定していた工事の進捗が得られないことも多い。この際, 所定の進捗が得られない原因を特定し, その対策を講じなければならないが, 一般に施工工程は多様で多くの要素が関係し, かつそれらは施工の進捗と共に変化していく

ため、原因の特定は困難な作業となる場合が多い。さらに原因が特定されたとしてもその対策は原因を改善するだけでは不十分で、より合理的な施工を目指す場合には、それが他の工程に与える影響を把握した上で、施工全体として最適な解を導き出すことが求められる。

このため、ここでは、先に紹介したコンカレントエンジニアリングの考え方を建設施工に適用することにより、各工程に関する情報を統合的に管理するとともに、これらの情報の共有化と双方向的利用を通じて、実際の現場条件に応じて施工の柔軟で迅速な改善を行うことのできるシステムの構築を行った。

### 3. 施工現場の概要

図-2(a)は、今回、新たに施工システムの開発を行った採土現場の作業内容のイメージ図である。この現場は、主に関西国際空港建設用の採土を行っている現場であり、図-2(b)に示すような連続的な工程に従い作業が行われている。

すなわち、山側の採土地では発破、もしくは油圧ショベルにより土岩の掘削が行われる。掘削された土や岩は、ブルドーザで集められた後、油圧ショベルもしくはホイールローダで重ダンプトラックに積み込まれ、採土場下端にある破碎機まで運ばれる。



図-2 システムの構築を行った工事現場概要

破碎機で大きな岩塊は 200mm 以下の土砂にまで破碎され、ベルトコンベアでストックヤードまで運ばれる。ストックヤードの床には土砂の引き出し口があり、ここから引き出された土砂はベルトコンベアで積み出し桟橋まで運ばれ、土運船に積み込まれる。

この現場では、関西空港第1期工事の埋め立て開始から採土を始め、第2期工事の埋め立てで所定の土を出荷し、作業は既に完了している。

図-3 にこの現場で用いられた建設機械の一覧と地質概要を示す。現在では積み込み機械4台とダンプトラック10台を用い、最大4セット（(積み込み機械1台+重ダンプトラック(2~4台)×4)で、時間あたり 7,000 ton (4,000 m<sup>3</sup>) 以上の採土を行うことができる。

現場を構成する地山の地質は硬岩、軟岩、土砂からなるが、破碎機の処理能力は、時間あたり最大 2,500 ton と限られているため、長期にわたり恒常的に所定の採土を行うには、これらの土岩をバランス良く採取する必要がある。また、地山の地質構造は複雑に変動し、また重機の稼働状況も一定ではないため、時々刻々と変化する現場の条件を把握し、適切な対応を迅速に取っていく必要がある。このため、この現場では、汎用的な情報技術を利用した情報化施工システムの構築を行った。



図-3 現場で使用された建設機械と地質区分の概要

#### 4. 情報の有効利用における視点

情報化施工のシステムを構築するに際し、一般的に準拠すべき視点としては、下記が挙げられる。

##### 1) 情報の鮮度

現場は時々刻々変化していく。現場条件に応じた施工の改善を図る場合、古い情報に基づき施工の改善を図ったのでは、適確な改善を行うことができない。また、現場の情報が迅速に得られないがために改善に時間を要することになると、問題のある体制で施工を続けるか、あるいは作業が中断することも起こるため、施工効率の低下を招くことになる。この意味から施工の改善を検討するための情報は、可能な限り新鮮であることが要求される。すなわち、情報収集のリアルタイム性を確保するハードウェアを整備する必要がある。

##### 2) 情報の質と量

工事に関連する情報は多種多様である。これらの情報のすべてを同格で扱うことは、迅速で的確な判断を下す際に効率の低下を招くことになる。このため、工事の各工程とそこで発生する情報の綿密な分析を通じて、施工に支配的な影響を与える主要な情報のみを選択し、これらを効率的に収集すると共に有効に利用する方法を構築する必要がある。

##### 3) 情報の使い易さ

収集した施工情報を用いて、施工の改善を議論することになるが、ただ単に膨大な情報を表示するだけでは、技術者は判断することができない。技術者が的確な判断を下せるような情報提供の仕組みを作る必要がある。この際、各工程を横断して施工全体の情報を統合的に扱うことができ、かつ技術者が適切な判断を下すことができる情報システムを構築する必要がある。

これらの視点のうち、最後の視点は特に重要と考える。この現場では、重要な判断はシステムが自動的に決めるのではなく、現場の技術者が決めることにしている。これは、すべての判断工程を自動化してしまうと、システム自体の問題点を見つけ出すことができなくなり、技術的にはそこで成長しなくなるためである。

#### 5. 情報の収集システム<sup>3), 4)</sup>

前章で述べた視点 1)に基づき、現場施工に関する情報収集のためのハードウェアを構築した。図-4にそのシステムを示す。

すべての重機には、位置計測のためのGPSと稼働内容を記録するためのICカードが取り付けられている。また、ダンプトラックには積載情報を取得するためのペイロードメータ、これらの情報を通信するための無線装置等が搭載されている。また、現場の主要なポイントにはCCDカメラが取り付けられており、現場事務所にてリアルタイムで作業の状況を知ることができる。

現場事務所と採土場は約3km離れているが、この間は高速大容量通信を可能とする光ファイバー網で接続され、採土場内での情報通信には、スペクトラム拡散機能及び時分割制御機能を有する双方向無線通信システムが用いられた。

このようにして取得された施工情報は、現場事務所に設置されたメインサーバーに一旦蓄積され、現場技術者の意思決定支援のための情報に加工されるとともに、施工管理に必要なデータはディスプレイ上にリアルタイムで表示される。同時に、取得した情報は日常の施工管理のための帳票類に加工するとともに、後続の施工計画立案のための基礎データとしても利用された。

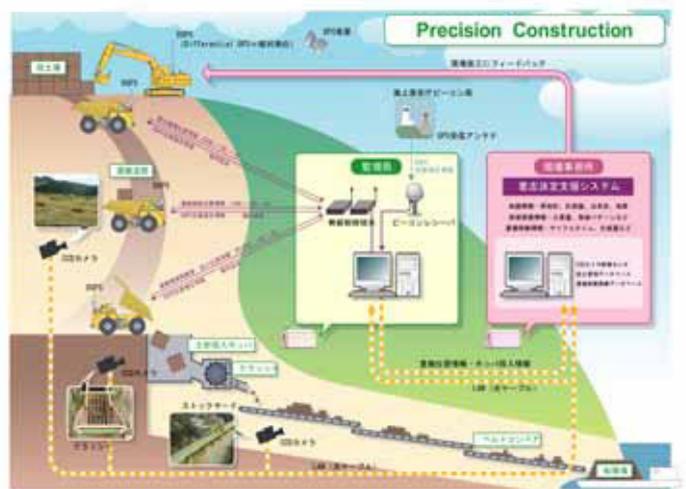


図-4 情報収集のためのハードウェア

## 6. 情報の統合

前述のハードウェアを用いて得られる施工に関する情報は、種類、大きさ、得られた時刻と場所などが全く異なる多種多様な情報と言える。各工程だけではなく施工全体としての改善を考えるには、これら多種・多様な情報間の関係を把握した上で、改善策を考えていく必要がある。ここでは、先に説明したコンカレントエンジニアリングの考え方を導入して、異なる情報を統合的に扱うシステムの構築を行った。

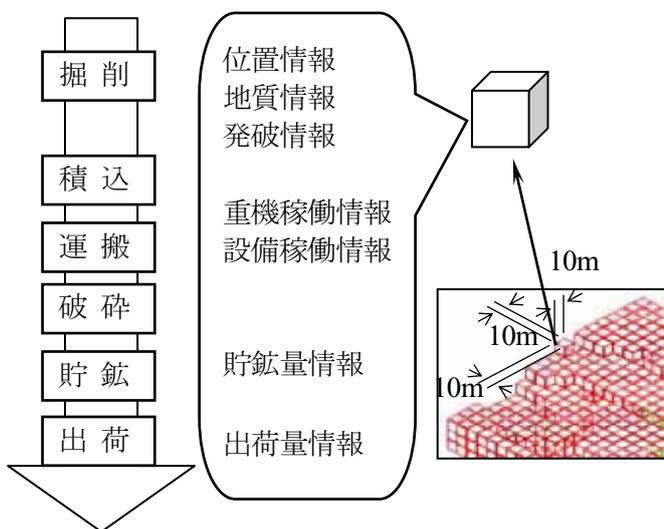


図-5 情報ユニットを用いた情報の統合

このシステムは、複数の工程間に連携を持たせた調和型の統合化システムを目指すものであり、図-5に示すように施工フィールドを仮想的に10m立方のサイコロ型の「情報ユニット」に細分し、個々のユニットの中にデータベース機能を持たせたものをその構成要素とする。このデータベースには地質・地形等の現場情報とともにその地盤を掘削するために要した重機の稼働情報等の施工情報を工程毎に記録していくことにより、全工程に関する施工情報の記録と更新を行った。このことは、情報収集という最上流の工程から、技術者の意志決定支援といった最下流の工程までを、このユニットが連続的に流れ下りて行くことを想像すると考えやすい。この考え方には、各工程で取得できる施工情報が明確になることやそのデータの記録過程が施

工の工程に対応しているため、現場技術者にとって情報発信源の特定が容易になるといったメリットがある。例えば、最下流の工程で問題点を発見した場合、各工程を逆上りながら、このユニットに記録された情報を基に原因解明を行うことができる。

このように統合化システムを構築するにあたり、システム間の連携を実現するために、ハード的なシステム間のリンクを張ることをせずに、情報ユニットの授受というソフト的な対策を講じているところにこのシステムの大きな特徴を見出すことができる。

## 7. 情報の共有と双方向化

前述の例で示したとおり、現場で問題が生じた場合、迅速に問題を把握して、それへの対策を早期に実行することが、施工の効率化にとってキーテクノロジーとなる。このために、ここでは、コンカレントエンジニアリングの考え方を導入した。すなわち、これまで説明した情報を工事に関連する技術者が同時に知ることができるとともに、双方向で打ち合わせができるシステムを作ることにより、現場で生じた問題に対し迅速にかつ柔軟に対応することのできる体制を作り上げた。

図-6に情報の共有化のイメージを示す。従来の情報の伝達方法では、情報は一方的に伝達されていくため、伝達が完了するまでに多くの時間を要することになる。これに対し、共有化を図ると関連する技術者が同時に情報を知り、その情報を用いてぎろんをおこなうことができる。

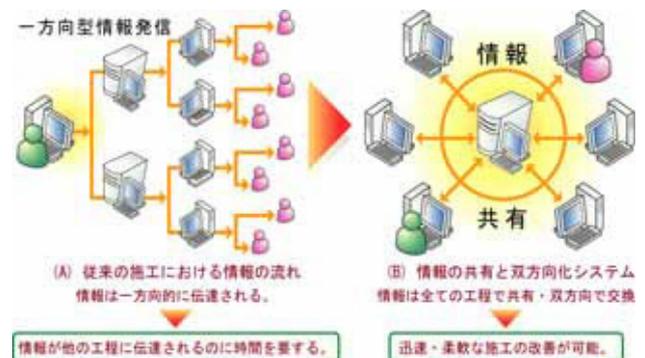


図-6 情報の共有化のイメージ

図-7と図-8に、その一例として、貯鉱量（ストックパイルの土量）の問い合わせと、それに応じた施工の調整に関するプロセスを取り出して、従来法と今回の情報化システムにおける情報の流れを示す。図-7の従来法では、現場J Vの事務所から、貯鉱量を問い合わせるまでに多くのプロセスを要することがわかる。これに対し、図-8は今回開発したシステムにおける情報の共有化と双方向化のイメージを示す。情報は、関係者間で共有されるため、情報問い合わせのプロセスの多くは省略されることがわかる。

この例の場合、図-7の従来法では、問題の把握から対策が決定されるまでの情報の伝達ステップは、69、それに要した時間は105分だったのに対し、図-8の新しい情報システムでは、19のステップと35分の所要時間にまで短縮をすることができた。

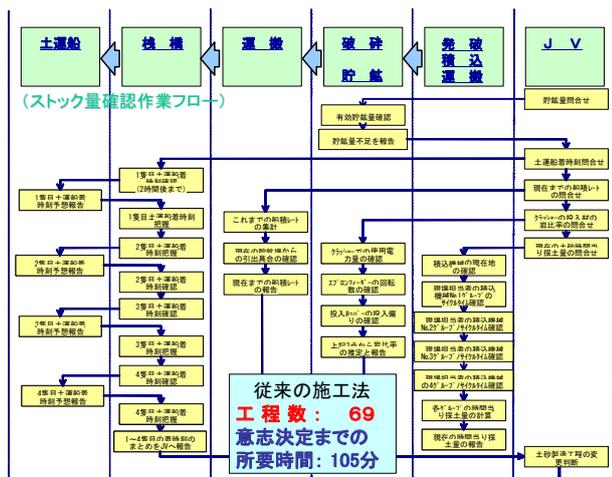


図-7 従来の情報伝達プロセス

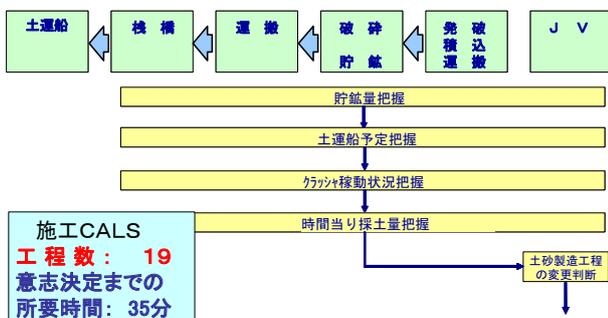


図-8 新しいシステムにおける情報の共有化

## 8. 効果の検証

施工情報の管理や分析に際して、コンカレントエンジニアリングの考え方を導入して「リアルタイム化」、「統合化」、「共有化」、「双方向化」といった着眼点を基に開発した今回のシステムでは、情報利用面で大きな効果を表した。図-9にこの現場における情報に関する改善度合の一例を示す。

この図に示すように、取り扱う情報量は16倍に、情報収集に要する時間は半分にまで減少した一方、意志決定に費やせる時間は2倍に増加し、余裕を持って施工に対しての判断が下せる環境が整ったことが判明した。すなわち、注目すべき情報の整理やそれによるプロセス間の統合といった従来は実施されなかった「情報利活用」面からの施工プロセスの見直しが、実際の工事の遂行に対して効果的であることが実例をもって示された。

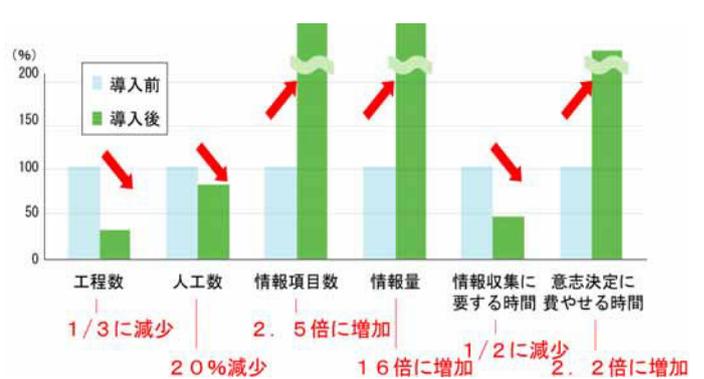


図-9 情報利用面での改善の度合

本システムを実施工で運用した場合の効果を図-10に示す。この図は関西国際空港の1期工事の際に用いられていた機械と施工法を用いる場合（従来工法と呼ぶ）を基準とし、これまで説明した統合型採土地管理システムを運用した場合とで1日当たりの生産量を比較した結果である。この図より明らかのように、日出荷量で21%の増加がなされていることがわかる。

今回開発したシステムでは、現場の状況に応じて重機の配置と使用方法、発破における削孔方法や火薬量、採土地の組合せなどの施工方法の最適化を図っていくことを目指している。すなわち、このシス

テムが稼働すると、工事において必要以上のエネルギーや資材の投入を最小限に抑えて所定の採土量を確保することができる。このため、工事が環境に与える影響を軽減する効果が期待される。図-11は、図-10と同様の考え方で1 m<sup>3</sup>の採土を行うのに使用した電力、燃料、爆薬の消費量をCO<sub>2</sub>排出に換算して従来工法と本システムで比較した結果である。この結果より明らかなように、今回のシステムの導入で単位体積の採土を行う際に発生するCO<sub>2</sub>を24%減らすことができ、環境に対する負荷を大幅に軽減することができた。このことは、建設施工においても、精密な施工を行い、施工効率の改善を行えば、環境への影響を抑え得ることを意味しており、今回のような採土工事だけでなく、様々な工事において同様の取り組みが進められることが期待される。

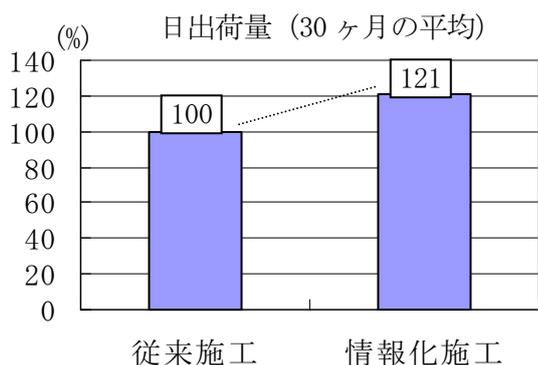


図-10 平均日出荷量の変化

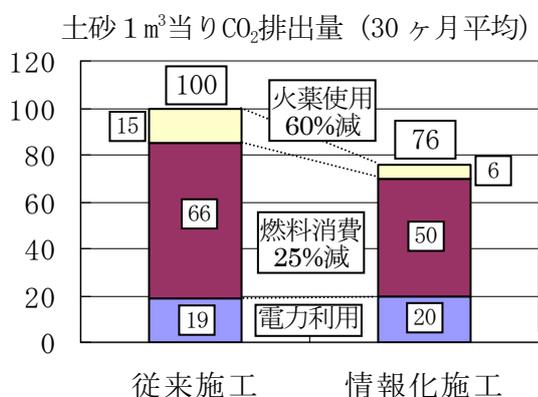


図-11 施工に伴う環境負荷の比較

## 9. おわりに

今回、コンカレントエンジニアリングの考え方を建設施工に導入して、施工の合理化と最適化を図るシステムの開発を行ったところ、施工効率のみならず環境負荷に関しても大幅な改善を得ることができた。このことは、不確定要因の多い建設施工においては、精密な情報の収集とその有効活用を通じて極力無駄を省けば、施工コストと施工に伴う環境への負荷を最小限に抑えることができることを示すものである。この意味から、我々はこのシステムを「精密施工」と称して、一般土工のみならず様々な建設施工で展開するための研究開発を目指している。

本年2月16日、京都議定書が発行した。世界が温室効果ガスの削減に向けて待ったなしの取り組みをして行くことになる。建設業界も例外ではなく、環境負荷軽減に向けた取り組みが求められることが予想される。このとき、ここで紹介した情報化施工というツールが効力を発揮することが期待される。

なお、ここで紹介した精密施工の実用展開は、立命館大学、ハザマと櫛ジオスケープの共同開発によることを付記しておく。

## 参考文献

- 1) 福田収一著：コンカレントエンジニアリング，倍風館，1993年
- 2) M. ハマー，J. チャンピー著，野中郁次郎監訳：リエンジニアリング革命，日本ビジネス人文庫，日本経済新聞社，2002年
- 3) 建山和由：ITと建設施工－Precision Constructionの試み－，建設の機械化，No. 625，pp. 3～7，2002年3月
- 4) 大前延夫，沖政和，澤正樹：現場内ネットワークを用いた大規模重機土工の施工管理，建設の機械化2000年12月
- 5) 奥村敬司，大前延夫，建山和由，須田清隆：大規模土工における施工CALSの開発，電力土木，2005年5月

## 20. 大深度・低空頭対応型 CSM 機の開発

株式会社間組機電部 ○嶋田尚正 梅本慶三  
株式会社間組技術第1部 増田浩二

### 1. はじめに

現在、地中連続壁は、SMW 工法や TRD 工法など施工性や経済性に優れた原位置攪拌ソイルセメント地中連続壁が主流となっている。今回開発された、カッターソイルミキシング (CSM) 工法は、水平多軸型地中連続壁掘削機をベースとした水平多軸回転カッター (Cutter) を用いて土 (Soil) とセメント系懸濁液を原位置で攪拌 (Mixing) し、等壁厚のソイルセメント壁体 (土留め壁・遮水壁等) を造成する工法である。その特徴として、以下のような点がある。

- ① 岩盤・硬質地盤においても、水平多軸回転カッターの性能をそのまま生かした高い掘削性能により、先行削孔等の補助工法が不要
- ② 優れた攪拌性能とカッティングジョイントによる高い遮水性
- ③ 等壁厚のソイルセメント壁の造成により、芯材の間隔を密に設定できるため、高剛性の壁体を造成可能
- ④ カッター部に内蔵した傾斜計により、リアルタイムでの掘削精度確認が可能

近年、都市部における大規模地下開発など 40 m 以深の大深度土留め壁築造へのニーズが高まっている。しかしながら、従来の CSM 機にて大深度施工を行う場合、カッターを支持しているケリーバーを長くする必要がある。そのため施工機械の大型化が避けがたく、掘削深度に限界 (35 m 程度) があった。そこで今回、低空頭型掘削機に、新しく開発された原位置攪拌用水平多軸回転カッターを吊り下げ方式にて装備し、大深度地下における原位置攪拌ソイルセメント地中連続壁が施工可能な掘削機を開発した。本報文では、今回開発した大深度、低空頭対応型 CSM 機の概要と、試験施工の概要を報告する。またドイツバウアー社において施工された内径 8,000 m

m の円形立坑構築の概要についても報告する。図-1 に、ケリーバー型と吊り下げ型 CSM 機の掘削方法の比較を示す。

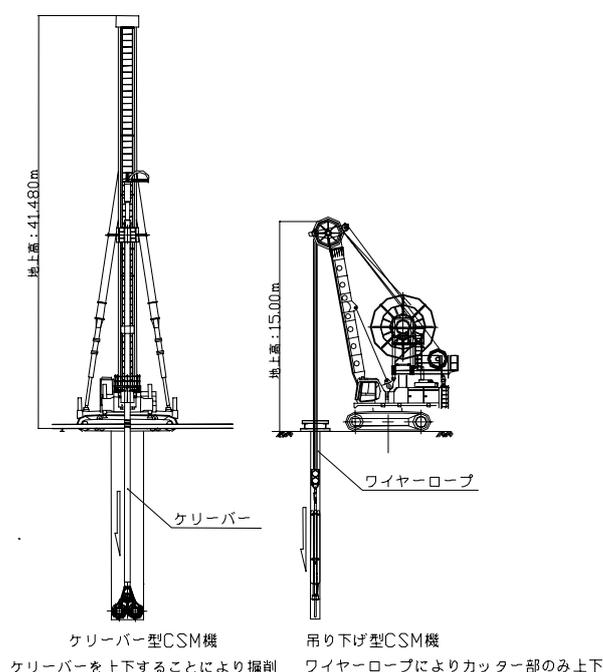


図-1：掘削方法比較

### 2. 吊り下げ型 CSM 機の概要

今回、開発した機械は従来のトレンチカッター、CBC25 のカッター部分を BC25 から吊り下げ型 CSM カッター、BCM10 に変更することを基本としている。従来の主な CSM 工法の特徴に加えて、以下のような特徴がある。

- ① 吊り下げ方式の採用により大深度対応が可能
- ② 低空頭条件下、狭いヤードでの施工が可能
- ③ ガイドフラップの稼動により方向制御、修正掘削が可能

表-1に掘削機の諸元を記す。

表-1：吊り下げ型CSM機諸元 (BCM10)

ベースマシン(BA1000)		
機械質量 (t)	110.0	
エンジン出力 k w [PS]/rpm	331 [450]/1800	(超低騒音型)
全幅 (mm)	5,446	
高さ (mm)	14,828	
吊り下げ式CSM機カッター部分(BCM10)		
重量 (t)	16.5	
全長 (mm)	9,057	
カッター直径 (mm)	1,395	
カッター部壁幅 (mm)	2,800	
カッターモータ トルク (KN・m)	100	左右独立して2台装 備し任意に駆動可 能
方向制御フラッ プ部傾斜角(°)	1.325	偏心量 107mm
回転数(rpm)	0~35	
ソイルセメント 壁造成幅(mm)	2,800	
ソイルセメント 壁造成可能厚 (m)	0.64~1.2	

## 2. 1 ベースマシン

ベースマシンは、トレンチカッターベースマシンBA1000を利用している。BA1000は、小松製作所製バックホウPC750 (3.1m<sup>3</sup>級)の改造型であり、最大吊荷重は40tである。平均接地圧は、0.026kPaである。掘削深度35m対応ケリーバー型掘削機の高さが41.48mに対し、吊り下げ型は高さ15m以下に収まっている。また造成可能深度は65mまで対応可能である。写真-1に吊り下げ型CSM機を示す。



写真-1：吊り下げ型CSM機

## 2. 2 カッター部

CSM機のカッター部は、トレンチカッター工法で実績のある水平多軸回転式カッター方式及び同形状のビットを採用した。左右のカッターは回転数、回転方向を任意に制御可能である。ただし、トレンチカッターでは掘削時、土砂を集める必要があり、土砂を中央部から取り込む回転方向にカッターが回転するのに対し、図-3のようにCSM機では中央部よりエアとセメントミルクを吐出するため回転をトレンチカッターの場合とは逆回転させて掘削を行う。掘削後カッター部を引き上げる時は、吊荷重の低減や固化液の攪拌を目的として、掘削時とは逆回転させながら引き上げる。また、掘削土砂がエアリフト効果により攪拌されやすいよう、カッター上部が下部より幅の狭いテーパ形状となっている。そのため、掘削時、カッター上部の横ゆれが懸念されるが、上部にガイドローラをつけることによりゆれを抑えている。方向制御の方法は、トレンチカッターと同様、カッター部に傾斜計を内蔵しており、運転室のモニターにてリアルタイムでチェックできる。そのデータを見ながらカッター回転軸と平行方向(Y方向)についてはカッター側面の方向制御フラップを動かすことにより行い、カッター回転軸と垂直方向(X方向)については、左右のカッター回転数を任意に変えることにより方向制御を行う。

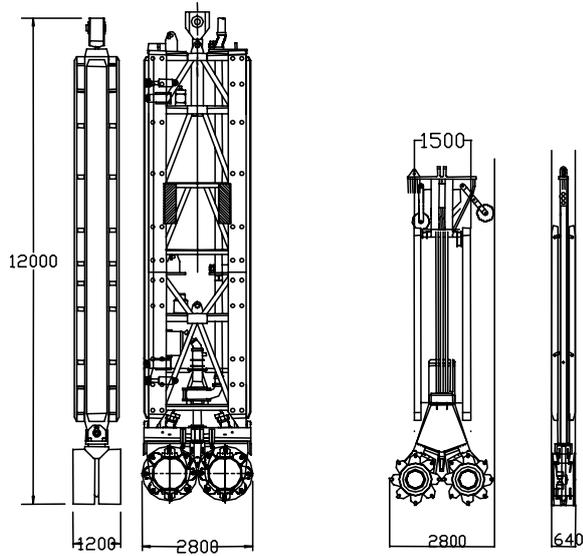


図-2：トレンチカッターとCSM機

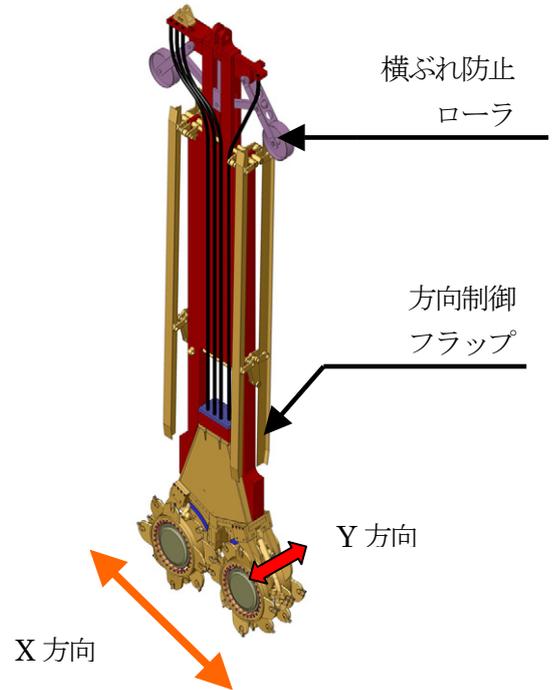


図-4：方向制御機構

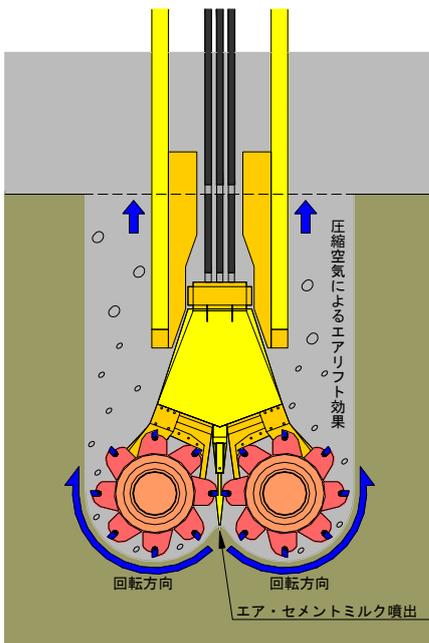


図-3：CSM機掘削モデル

### 3. 試験施工の概要

吊り下げ型CSM機の施工能力、造成されたソイルセメント壁の品質の確認等を目的として試験施工をおこなった。以下に、試験施工の概要および結果を報告する。

#### 3. 1 概要

当工事の概要を以下に示す。

施工時期：平成17年4月～平成17年6月

工事内容：掘削壁厚 640mm

掘削深度 40m

施工延長 8.0m (2.8m×2エレメント  
2.4×1エレメント)

(図-5エレメント配置図参照)

施工面積 320m<sup>2</sup>

土質条件 柱状図参照 (図-6)

要求品質：透水係数  $1 \times 10^{-6}$  cm/sec 以下

一軸圧縮強度 0.6N/mm<sup>2</sup> 以上

なお、試験施工は硬質地盤を含む40mの大深度施工であり、セメント主体の固化液での掘削はスラリー固化によるカッターの固着および引抜抵抗の増加が懸念されるため、掘削時にはベントナイト主体の掘削液

で掘削し、引き上げ時攪拌時には、セメント主体の固化液にて施工する2パス施工を採用した。表-2に掘削機以外の設備一覧を、表-3に注入液の配合を、写真-2に施工状況を示す。

先行 2.8	後行 2.4	先行 2.8
①	③	②
2.6	2.8	2.6
8.0		

図-5：エレメント配置図

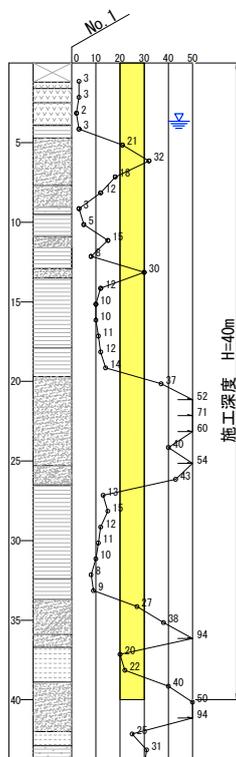


図-6：試験場所土質柱状図

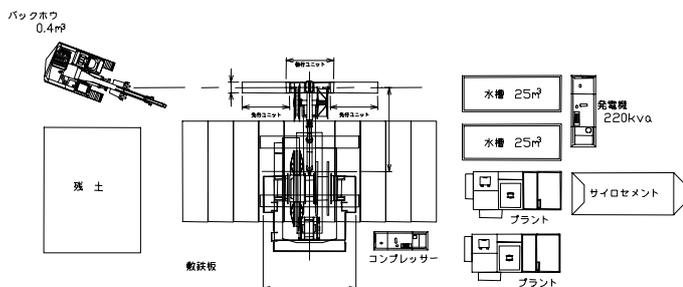


図-7：機械配置図

表-2：設備一覧

機材名	能力	備考
コンプレッサー	7.5m <sup>3</sup> /min	
セメントサイロ	30 t × 1	
水槽	25m <sup>3</sup> × 2台	
ラフタークレーン	25 t、50 t	芯材吊用
セメントミキシングプラント	2基	24m <sup>3</sup> /h仕様
バックホウ	0.45m <sup>3</sup> 級	排泥搬出用



写真-2：施工状況

表-3：注入液の配合

配合 (掘削体積 1m <sup>3</sup> あたり)	セメント kg	バントナト kg	水 kg	備考
掘削液	5	32	530	B/W=6.0%
固化液	197	5	292.5	W/C=148%

### 3. 2 試験施工結果

#### (1) 掘削性能

掘削経過時間と到達深度の関係を図-8に示す。

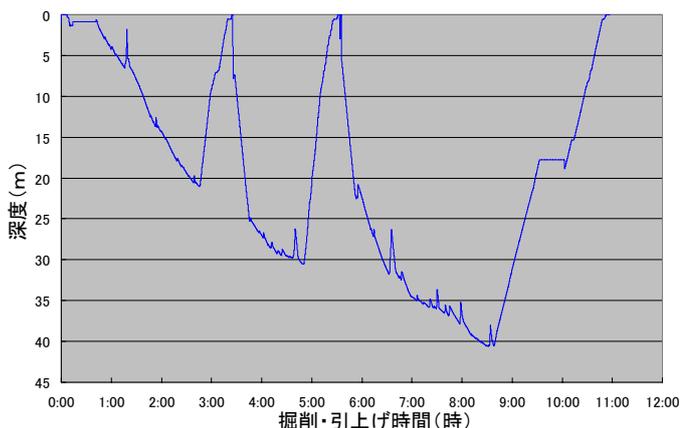


図-8：掘削経過時間と到達深度

掘削速度は以下のような結果となった。

- 全平均掘削速度：12cm/min
- 砂質土（N値=20程度）：19cm/min
- 砂質土（N値=50程度）：14cm/min
- 粘性土（N値=10程度）：9cm/min

1) N値による掘削速度

パワー工法研究会発行のCSM工法標準積算資料(案)から算出したケリーバー型による掘削速度と、試験施工の掘削速度を表-4に示す。標準積算資料(案)では、掘削から引抜までを固化液のみで施工する1パス施工を想定しているため、試験施工の掘削速度を1/2した数値と比較した。

表-4：掘削速度比較(cm/min)

	N値=20	N値=50	備考
ケリーバー式	9.7	6.5	標準積算資料による
	N値増加による速度減少率		
吊り下げ式	9.5	7	2パス施工のため試験施工値の1/2とした
	N値増加による速度減少率		

吊り下げ型とケリーバー型とは掘削性能に大差がないことがわかる。またN値の増加に対する掘削速度の低下も、ケリーバー型が32%に対し、吊り下げ型は26%と

ほぼ同割合の減少になり、ケリーバー式同様吊り下げ式CSM機の高い掘削性能が実証された。

2) 大深度下における掘削

大深度下で掘削性能評価を、大深度下での掘削性能が高いTRD工法の標準積算資料 (TRD工法協会発行) を用いて以下のことを考慮し行った。

- TRD工法は、CSM工法とは違いカッターを横方向に移動させて掘削する方法であり掘削方法が大きく違うため、掘削速度自体の比較では問題が多い。よって今回は掘削速度ではなく掘削速度の減少率にて評価を行った。
- TRD工法については深度40m、壁厚640mm、エレメント幅2800mmのソイル壁を造成する際に、下記の深度で各想定地盤が存在した場合の掘削速度を算出した。

表-5：掘削速度比較(cm/min)

	N値=20 深度10m	N値=61 深度40m	備考
TRD工法	27	7	
	速度減少率		
吊り下げ式CSM機	19	7	試験施工値
	速度減少率		

このように深度、N値の増大による掘削速度減少率は、TRD工法程度に抑えられており、大深度下での高い掘削性能が証明された。

(2) 掘削精度

カッター部に内蔵された傾斜計の変位計測結果は、40m掘削においてy方向では最大69mm、x方向では、最大18mmであり、原位置攪拌ソイルセメント壁の一般的掘削精度1/150から1/200に対して、それぞれ1/580、1/2200と高い掘削精度が確認できた。また今回は傾斜計による掘削管理の妥当性自体を確認するため、長さ12mの鋼材をセメントソイル内に沈め、その変位を計測したが、XY方向とも傾斜計による掘削変位計測結果とは10mm以内の誤差 (1/2000) であり、傾斜計による

掘削管理の有効性も確認できた。

### (3) 透水係数と一軸圧縮強度

No.3 エレメントにおいて、コアボーリングを行い造成されたソイルセメント壁の要求品質の確認をおこなった。透水係数については深度 10m において室内透水試験を実施し、 $2.41 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$  の結果が得られ、要求品質である  $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$  以下を満足することができた。また、一軸圧縮強度についても、深度方向で多少のばらつきが見られたが、要求品質 ( $0.6 \text{N/mm}^2$ ) を満足する結果が得られた。

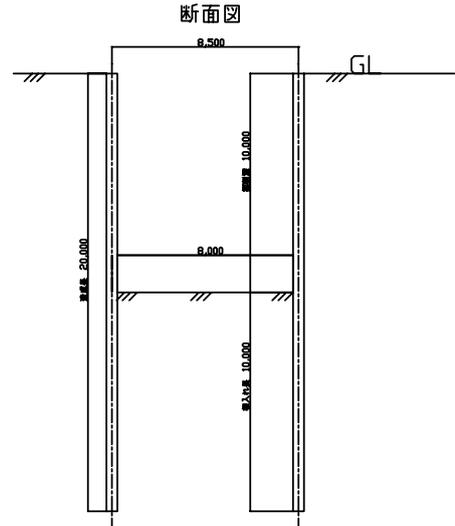


図-9：円形立坑施工図

## 4. 曲線への適用例

CSM 工法の場合、曲線施工といっても、地中連続壁の場合と同様、厳密には多角形となる。なお今回紹介する工事は、吊り下げ型ではなく、ケリーバー型の CSM 機により施工を行っている。

### 4.1 概要

施工場所：ドイツ

施工時期：平成16年12月～平成17年1月

工事内容：掘削壁厚：500mm

掘削深度：20m

施工延長：26.18m

(2.2m×14エレメント

φ8000円形立坑)

施工面積：569.8m<sup>2</sup>

土質条件：おもに細砂、N値=10～30

要求品質：一軸圧縮強度 0.5N/mm<sup>2</sup> 以上

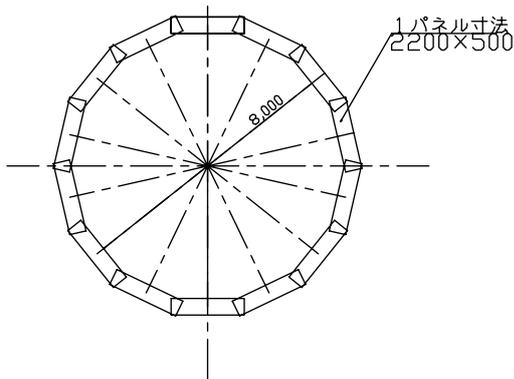
(実績：0.7N/mm<sup>2</sup>)



写真-3：円形立坑施工状況

図-9に円形立坑施工図を、写真-3において施工状況を示す。

### 平面図



## 5. おわりに

今回の試験施工を通じて、吊り下げ型 CSM 機の大深度掘削への有効性が証明された。近年、限られた都市部空間における高度利用を促進するための大深度土留め壁や、廃棄物処理場での遮水壁など、大深度、低空頭対応の吊り下げ型 CSM 機が活躍する場面は年々増えていくと考えられる。しかしながらまだこの工法の施工実績は少ない。今回の報告が、本工法の普及に役立てば幸いである。

最後に、本論文の執筆にご協力いただきました関係各位に感謝申し上げます。

## 21. 既設構造物下（低空頭）において使用する 基礎杭建込機の改良と適用

東急建設(株):○高島 泰、安藤 喜敏、浜田 史朗

### 1. はじめに

東急東横線と東京地下鉄13号線とが相互乗り入れする地下鉄新駅建設工事（13号相直）渋谷駅建設一期工事において、交差する銀座線高架橋の受替工事を実施した。当高架橋は東急文化会館連絡跨道橋（渋谷駅自由通路）に隣接しており、受替用支持杭（H-414、H-428 広幅鋼材×杭長 31m～33m）を建込む際、渋谷駅自由通路により上空制限 4.5m 下での施工を余儀なくされた。

このため、既設構造物下において大型クレーンが使用できないことから、特殊基礎杭建込機の改良開発を行い、受替用支持杭の建込を実施した。

本論文では、この特殊基礎杭建込機の改良開発経緯と適用について報告する。

### 2. 工事概要

地下鉄新駅建設工事である渋谷駅は、都道芝新宿王子線（明治通り）に位置し、始点側は渋谷一丁目16番地付近の宮下第1横断歩道橋付近から宮益坂下交差点を經由し、終点側は国道246号線交差点手前までの範囲となる。

この駅は東急東横線と東京地下鉄13号線との相互直通運転を計画している接続駅であり、地下3階層・ホーム2面4線となる。そのため掘削幅で最大36m、掘削深さは約30mを開削工法により構築する大規模な掘削工事である。（図-1）

当工事はこの銀座線との交差部より国道246号線交差点手前まで約90m区間を施工するものであり、事業主として東京急行電鉄(株)、また銀座線交差部を含めた30m区間の設計・施工管理を東京地下鉄(株)が行っている。

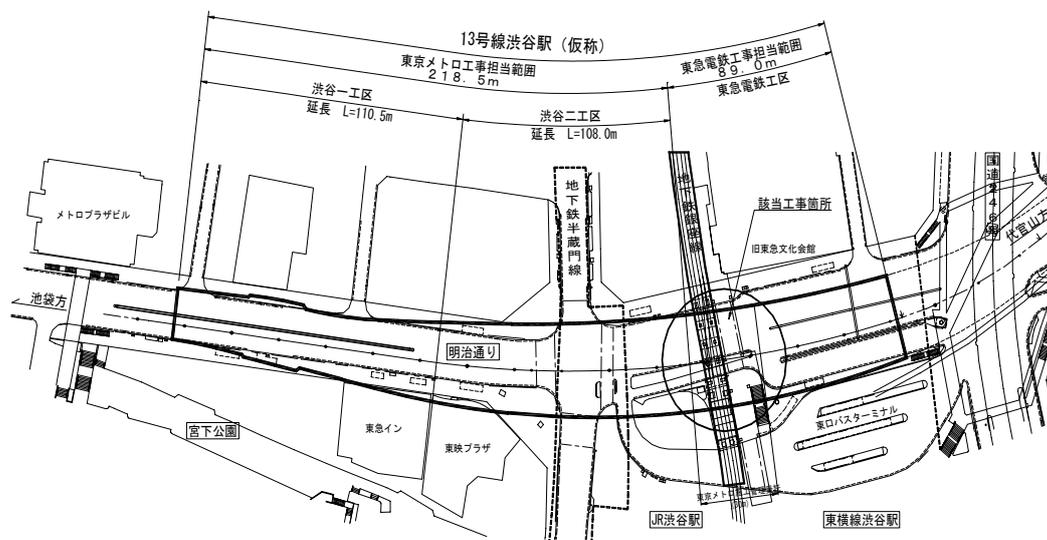


図-1 工事範囲平面図

### 3. 工法概要

銀座線高架橋は明治通りに6基の橋脚にて（金三第一高架橋）横断している。また、代官山方（南側）には東急文化会館連絡通路（明治通り横断連絡橋）が近接している。

当工事はこの直下を開削工法で施工するため、銀座線の受替工事が必要となり、路面交通に支障しない添梁形式の受替工法を採用し工事を行うことになった。この工法は既存フーチング基礎の周囲に受替用支持杭を打設するとともに、銀座線高架橋橋脚に添梁（鉄筋コンクリートPC構造）を設置し、その添梁を介して銀座線高架橋の荷重を新設支持杭で受替る工法である。（写真－1、図－2）



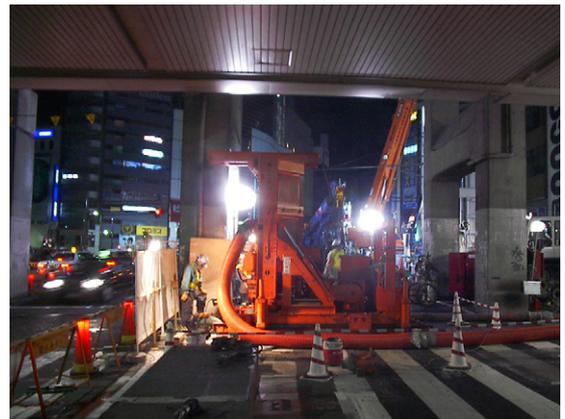
写真－1 施工箇所

受替用支持杭は、造成径φ700（芯材H-414、杭長31.0m、根入れ2.0m以上）およびφ750mm（芯材H-428、杭長33.5m、根入れ4.5m以上）の本杭及び控え杭を打設する必要がある。（表－1）

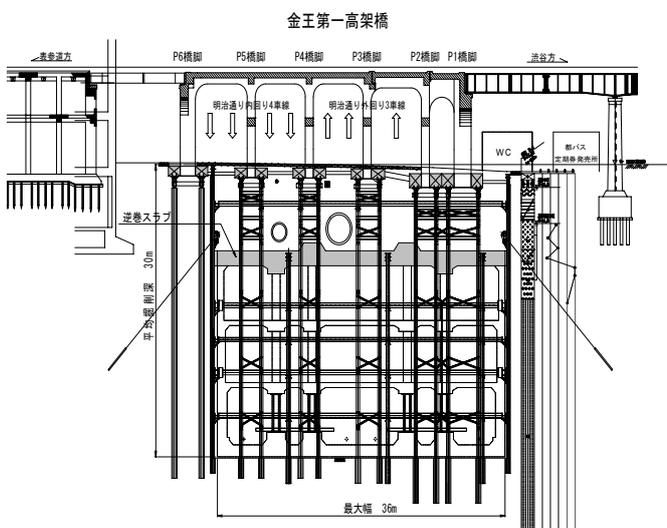
表－1 支持杭工施工数量

造成径	芯材種類	芯材長さ	施工本数	備考
φ750mm	H-428×407×20×35	33.0m	8本	銀座線高架橋P1、P2部
φ700mm	H-414×405×18×28	31.0m	8本	
φ700mm	H-414×405×18×28	31.5m	28本	銀座線高架橋P3～P6部
総本数			44本	
総延長			2524.0m	

支持杭造成における削孔は、TBH削孔機を採用し、杭先端支持力を確実に発現させるものとした。（写真－2）



写真－2 TBH機削孔機



図－2 工法概要断面図

### 4. 建込機械の検討と改造

#### 4.1 機械の検討

高架橋より代官山方（南側）の杭を建込むにあたり、東急文化会館連絡通路桁下部に杭を打設するため、空頭制限を受ける。そこで駅前自由通路下の施工空間4.5mの現場作業条件に合わせた機械の検討が必要となった。

駅前自由通路下の施工空間4.5mにて芯材を建込む際、大型クレーンを使用した場合、トップシーブから吊フックまでの高さが約3.5mとなる。その結果、布掘り内の有効高さを利用して継杭を行うには芯材の1本当りの長さが約1.0mに制約され、それに伴いジョイント箇所が30ヶ所となり、施工サイクルの延

伸が考えられた。

さらにクレーンの作業半径及び設置エリアの確保が必要となり、狭隘な作業エリアと作業時間の規制を考慮すると大型クレーンによる施工は不可能であると判断した。

そこで、鉄道改良工事等で架線下や構造物等の上空制限下での杭打工事を安全且つ能率良く施工できる伸縮リーダ式特殊杭打機を改造することで、芯材の建込みを施工するよう検討を行った。

また、杭先端支持力を確実に得るため、芯材建込み後のパイプロによる打設が必要となることから、施工サイクルの短縮を図るため機械にパイプロを実装することを検討した。

伸縮リーダ式特殊杭打機の機種は、装備されているウインチ性能を考慮し、TBX-200により検討を進めた。（写真－3）



写真－3 TBX-200（改造前）

TBX-200には下記の特長があげられる。

- ・ 杭芯のセッティングが容易なリーダ左右調整機構の装備
- ・ 運転席に装備されたリーダ傾斜計により、オペレータひとりで建ち合せが可能
- ・ 架線への接触・切断事故を未然に防ぐ、リーダ伸縮自動停止装置を装備
- ・ 鉄道改良工事での使用を想定しているため不慮のエンジン油圧トラブルにも、重機非常脱出装置にて脱出可能

## 4.2 機械の改造

主な改造箇所は、以下の通りとなる。

### ①インナーリーダガイドの構造変更

ブラケット揺動部からの荷重がインナーリーダガイドに加わるため、ガイドの面圧を下げる目的で丸パイプを角パイプに変更し、接触面積を増やした。

### ②アウトリガジャッキの追加

リーダガイド部の偏心構造によりパイプロを吊り下げた際、インナーリーダに偏荷重が加わり、更にフロントブラケットに捻れが生じることを防止するため、アウトリダ下部にアウトリガジャッキを追加した。

### ③リーダ伸縮ジャッキの能力

芯材（H-428×407×20×35、L=33.5m）の重量12t（ジョイント含む）とパイプロの重量3.7tに安全率1.5倍を考慮し、リーダ伸縮ジャッキ能力を150kNから240kNに変更した。

### ④補助用トップシーブの取付

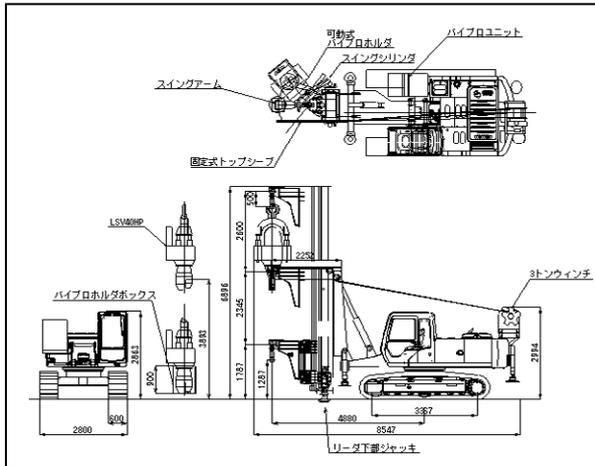
分割した芯材を建込み装置に直接吊り込むために、リーダの上部に補助用トップシーブを取り付けた。

### ⑤パイプロの装備

装備するパイプロはH形鋼フランジ面にチャッキングできる特殊横抱き式を採用することで低空頭に対応した。さらにパイプロの使用に伴い、機械設置時間の短縮を図るため、パイプロ用昇降ブラケット、パイプロホルダブラケット及びパイプロ油圧ユニット、操作盤を追加装備した。



写真－4 TBX-200 建込機仕様（改造後）



図－3 TBX200仕様図面（改造後）

表－2 機械性能表

本体形式	TBX-200(改良機)
全装備質量	26800 [kg]
平均接地圧	61.8 [Kpa]
エンジン出力	99.3 [kW/m-1]
走行速度	5.5 [km/h]
リーダー長さ	4.3～6.9 [m]
昇降力	240 [kN]
ウインチプル	30 [kN]
※30KW横抱式バイブロ LHV40HP実装	

### 4.3 機械動作順序

建込み作業の機械動作順序は、以下の通りとなる。

- ① 4.9t クローラにて、搬入車両（4t 車）より芯材を横倒状態で吊り上げ、建込機に装備した 3t 油圧ウインチにより芯材を共吊りし、建起し状態にする。
- ② 建起し状態の芯材に、リーダーブラケットスイベルに吊装置を取付け、芯材を玉掛けし吊り替える。
- ③ リーダ伸縮ジャッキを縮めて、吊り上げた芯材を削孔位置へ移動後建込みを行い、転落防止を施し玉掛けを外す。
- ④ 上記①～②の作業を再度行い、先に建込んだ芯材と添接板及び摩擦接合用高力ボルトにて固定し、若干引上げ、転落防止を撤去した後建込みを行う。
- ⑤ 上記の作業を繰り返し、設計杭長までの建込みを行い、その後機械を移動することなく、

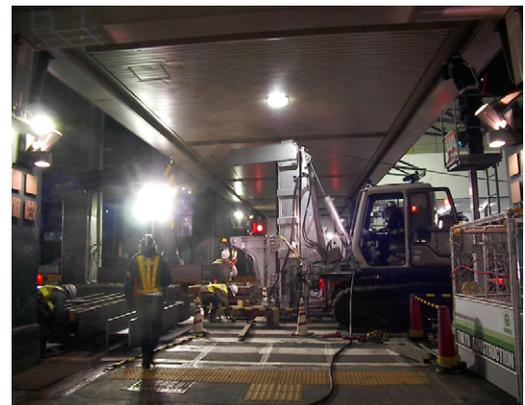
横抱き式バイブロに吊替え、圧入を行う。

### 5. 施工への適用

施工実績として、1本当たり削孔に2日間、杭建て込みに1日、注入造成に1日と1本当たり4日の工程とした。

大きいトラブル等もなく支持杭打設全数44本に対し、平成16年2月4日～6月18日までの延べ136日間。施工日として97日間で施工を完了することができた。

施工においても芯材1本当たりの長さを最短2.5mの長さで施工することが可能となり、ジョイント数も最大12箇所とすることができた。これらにより工程短縮と品質向上が得られた。



写真－5 芯材建込状況

### 6. おわりに

都市部での限られた施工条件（特に本件では空頭制限）及び施工時間の中での大型揚重機械が必要とされる工事において、その条件にあった機械を開発することは工事費用の増加につながる。当工事においては、既存の機械を改良することで、諸条件をクリアし、無事施工を完了することができた。

工事は平成17年8月現在、銀座線橋脚受替工事を終了し、本体構造物築造に向け掘削作業中である。改良機による施工により工事工程の促進に寄与したものと確信する。

最後に、本機の施工への適用にあたりご指導・ご協力を頂いた関係各位に対して心から感謝を申し上げます。

## 22. スライドゲートの開発と実用化

### (地盤改良を不要としたスライドゲートによるシールドの発進到達)

佐藤工業：早川 淳一、小野 崇

J F E 建材：佐藤 修一

#### 1. はじめに

スライドゲートは、従来のシールドや推進の発進・到達防護工である地盤改良や鏡切り作業を行わない、新しい発進・到達工法である。近年のトンネルの工事は、地下埋設物の輻輳化やそれに伴うトンネルの大深度化の傾向が増えてきており、地上部においても、立坑用地の確保が困難なことから道路上に立坑を設ける結果となり、多くの制約条件が発生している。そのため、地上から行う地盤改良の施工精度や品質の確保が困難な状況となり、コストが増大するケースが増えてきた。このような背景を踏まえて、厳しい条件下でも効率的で安全に発進・到達が可能なスライドゲートを開発した。本報告は、スライドゲートの開発とシールド到達の施工事例について報告するものである。

#### 2. 工法の概要

ケーソン工法（アーバンリング工法など）の立坑の土留め壁に、工場で作成したゲートを内包したスライドゲートユニット（以下ユニットと称する）を組み込み、所定の深さまで沈設させる。シールドの発進に使用する場合は、ユニットにエントランスを取付け、鏡きり作業を行わずにゲートを引上げ作業のみでシールドの発進ができる。また、到達の場合は高濃度泥水で満たされたエントランスに、ゲートを引上げ作業のみでシールドの到達が可能な工法である。

#### 3. 工法の特長

スライドゲートの特長は以下の通りである。

##### (1) コストの縮減

発進・到達の防護工を必要としないためコストの縮減が図れる。

##### (2) 工期の短縮

地盤改良工及び付帯工が省略できるため工期の短縮が図れる。

##### (3) 環境負荷の低減

地盤改良工の省略に伴い、産業廃棄物が発生しないため環境負荷が低減する。

##### (4) 信頼性の向上

鏡切り作業を行わないため、開口部が開放状態にならず地山安定に高い信頼性がある。

##### (5) 作業の簡素化

ゲートユニットを工場で作成するため、現場の作業が簡素化される。

#### 4. 工法の手順

シールドの発進および到達手順を従来の方法と比較した概要図を図-1~4 に示す。さらに、詳細なシールドの到達手順は以下の通りである。

- ① ユニートを内包したアーバンリングを所定の位置まで沈設する。
- ② 閉塞版付きエントランスをユニット前面に設置し、内部を高濃度泥水で充填させ、外部と同程度まで加圧する。
- ③ シールドをゲート手前まで掘進して停止する。
- ④ ゲートを引上げながら高濃度泥水を補足注入し、圧力を保持する。
- ⑤ シールドをエントランス内へ推進させ、パッキンを加圧してシールドに密着させる。
- ⑥ パッキンと閉塞版の間の高濃度泥水を排出し、閉塞版を撤去する。
- ⑦ ユニット内の高濃度泥水を裏込め材に置換して止水壁を形成する。
- ⑧ エントランスを撤去し、ユニット開口部とシールドのクリアランスを鉄板等で溶接し止水する。

⑨ ゲート及び所定の位置までマシンを撤去する。

[シールド発進]

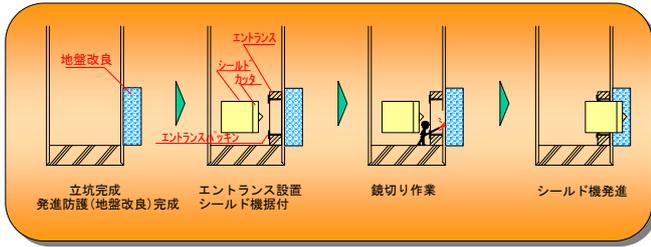


図-1. 従来工法

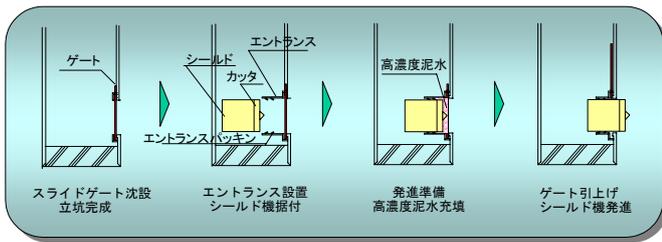


図-2. スライドゲート

[シールド到達]

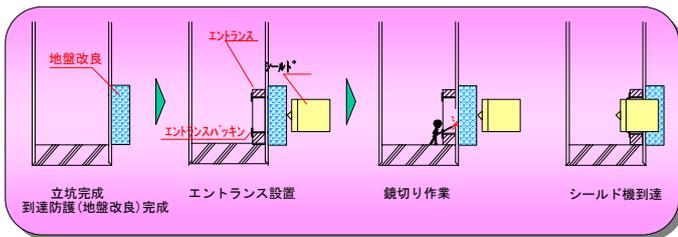


図-3. 従来工法

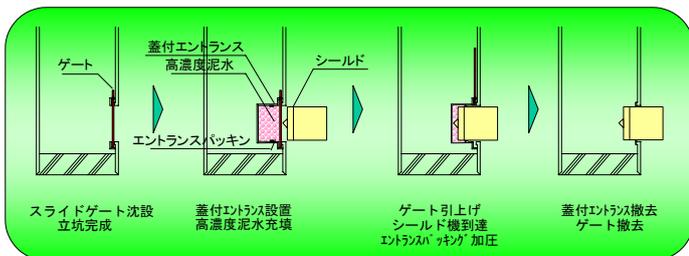


図-4. スライドゲート

5. 施工事例

5-1. 工事概要

本工法は、東京都下水道局発注の台東区池之端三、四丁目付近再構築工事の2期工事にて、VE提案によりシールド到達に採用された。その工事概要については以下の通りである。

(1) シールド工事

- ・ 工 法                    泥土圧シールド
- ・ 路 線 延 長            1,110m
- ・ シールド外径         φ2,490 mm
- ・ 仕上がり内径         φ1,650 mm

(2) 到達立坑工事

- ・ 工 法                    アーバンリング工法
- ・ 立 坑 外 径             φ4,308 mm
- ・ 立 坑 内 径             φ4,000 mm
- ・ 沈 設 長                22.94m

5-2. 土質条件

到達箇所土質は、東京層砂質土層 (Tos) で、粗砂を多量に混入し、所々に粘土を薄く挟み、含水量はやや多い土質である。N値は30~50以上で<密な~非常に密>な相対密度を示しており、地下水位はGL-10.67m、シールド到達位置の土被りは17.26mである。

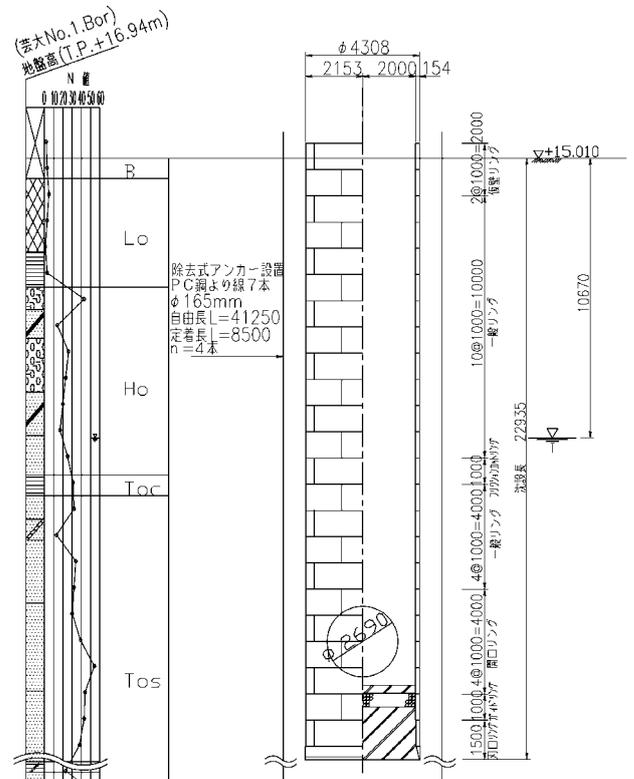


図-5. 到達立坑土質柱状図

5-3. VE提案

東京都下水道局発注工事では、契約後1回のVE提案が推奨されている。本工事では、図-6に示す高圧噴射攪拌工法と薬液注入工の併用による到達防護を、スライドゲートへ変更する事を提案し、採用された。採用の理由としては、地盤改良工の工期短縮、環境負荷の低減、コスト削減の効果が認められた結果であった。

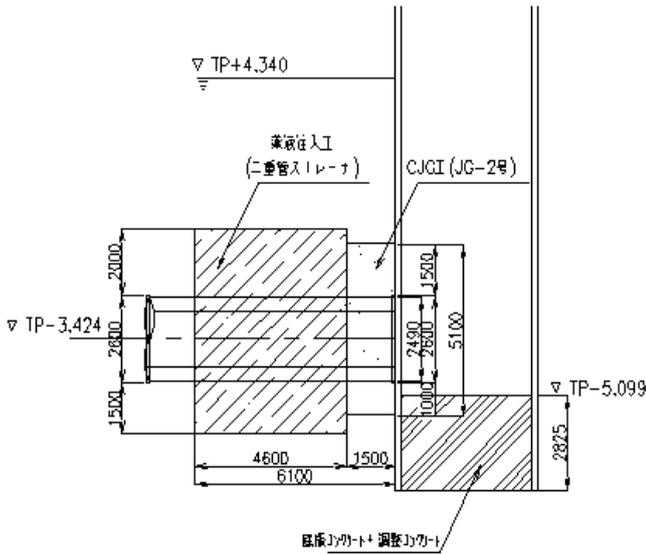


図-6. 設計到達防護図

#### 5-4. スライドゲート構造

シールド外径φ2,490 mmに対し、周囲100 mmのクリアランスを確保して、立坑開口部をφ2,690 mmに決定した。この開口部を閉鎖できるゲートを内包し、開口部補強構造およびアーバンリング1リング当りの幅を考慮して、ユニット全体寸法をW5,016 mm×H4,000 mm×t202 mmとした。

##### (1) スライドゲートユニット

スライドゲートユニットは、ゲート背面から漏水を防止する背面パッキン止水構造、ゲート引上げ時、上部からの漏水を防止するゲートパッキン止水構造、ゲート背面の土圧水圧に対抗するゲート及びゲート支持構造、開口部の欠円を補強する開口補強構造から構成されている。

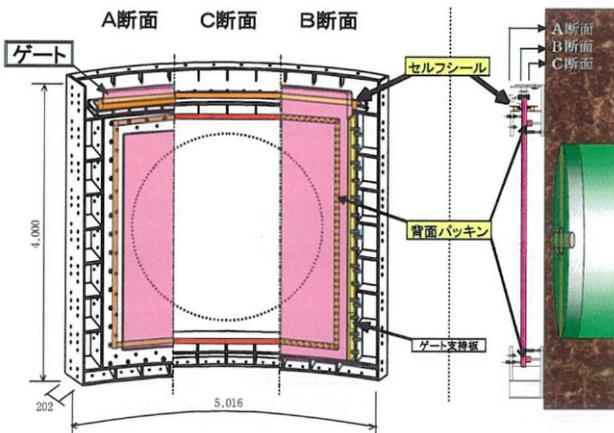


図-7. スライドゲートユニット詳細図

#### (2) エントランス

鋼製のエントランスの内面には、エントランスパッキンを設置した(図-8 参照)。パッキンは、鉄板入りの止水シールと補助ゴム膜の二重構造とし、補助ゴム膜に水圧をかけて膨張させ、止水シールをシールドに密着させて止水する構造である(図-9~10 参照)。



図-8. エントランス外観図

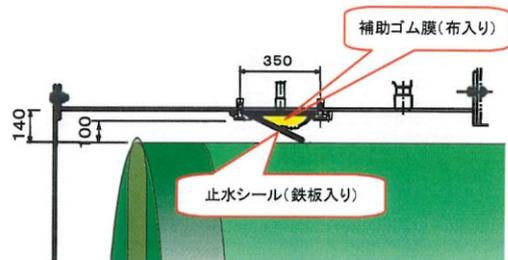


図-9. エントランス詳細図

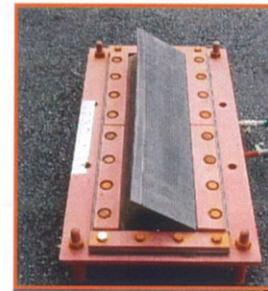


図-10. エントランスパッキン詳細図

#### 5-5. 到達作業時の留意点

##### (1) 高濃度泥水注入

シールド掘進に伴う土圧がゲートに掛かり始めるまでにエントランス内(8.3m<sup>3</sup>)に注入し、さらにゲート引上げによる圧力低下を防止するため、ゲート体積分の高濃度泥水の補足注入を行い、注入時は圧力計で確認しながら切羽の土水圧に抵抗できる圧力0.2Mpaまで加圧を行った。表-1に高濃度泥水の配合表を示す。標準配合は、クリーンバック助材の添加量は170kg/m<sup>3</sup>だが、

今回は土質状況により約半分の 80kg/m<sup>3</sup>とした。

表一 1. 高濃度泥水配合表

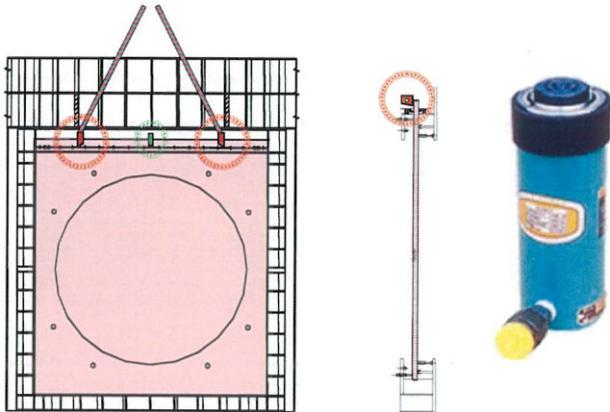
A液		B液
クリーンバック助材	水	クリーンバック急硬剤
80 (kg)	859 (L)	110 (L)

(1 m<sup>3</sup>当り)

### (2)ゲート引上げ

ゲート引上げには、地上に配置したクレーンを使用した。また、ゲートの競りやフリクションによってゲート引上げ初期に大きな揚力が必要になった場合を想定し、**図-11** に示すゲートの縁切りを目的とした引抜き装置を吊り治具上部へ2基取り付けた。

引抜き装置には、揚力 230kN でストローク 100 mm のジャッキを使用し、ジャッキが伸びることによって上部の鋼材を持ち上げ、この鋼材とゲートが連結されており、ゲートも同時に上がっていく構造とした。



図一 11. ゲート詳細図及び引抜き装置

### (3)シールドとユニット開口部のクリアランス

本工事では人孔の構築との関係でエントランスを撤去するために、ユニット開口部とシールドとのクリアランスは地山部分となり、従来工法の地盤改良を行わないことから、土砂や地下水の流出が懸念された。このクリアランスを完全な止水壁とするため、裏込め注入を行った。シールドが所定の位置に到達後、パッキンを加圧して止水し、さらにユニット最下部に設置したバルブから裏込めを注入し、打ちあがりに併せて高

濃度泥水を排出した。注入完了後、エントランスを撤去し、裏込めに置換されたクリアランス部分に鉄板を溶接して完全に地山と仕切る構造にした (**図-12**)。



図一 12. 裏込め充填及び止水鉄板溶接

### 6. シールドの到達状況

シールドをゲート手前 30 cm まで掘進し、エントランス内の内圧と土圧・水压の外圧が均衡するよう圧力管理を行いながらゲートを引上げた。シールドは、スライドゲートユニット開口部とのクリアランスが 100mm あったが、許容範囲内でエントランス内に到達し、漏水も無く、工事が完了した。



図一 13. シールド到達

### 7. おわりに

都市部では地下埋設物の輻輳化、トンネルの大深度化はますます進行し、地方部においても、多大な地盤改良を要する箇所や狭隘な作業条件などによって、地盤改良が困難化すると想定される。このような施工条件のあらゆる工事において、工期短縮・コスト削減を求められているなか、安全、施工、コスト、環境に極めて有効な工法であり、今後さらに展開していく考えである。

## 23. シールド位置姿勢計測システムのバージョンアップと実用化

(セグメント組立パターン計画システムを組み込んだシールド自動方向制御)

佐藤工業(株)：○勝又 哲也、上地 勇  
(株)トキメック自動建機：船山 正行

### 1. はじめに

近年、都市部におけるシールド工事は用地や地下埋設物の輻輳化等の問題によりシールド線形の計画上の制約やルートを選定を困難にし、厳しい条件下での施工を余儀なくされている。このような中、当社ではシールド掘進において自動位置姿勢計測システムを採用し、シールドの線形および掘削データ管理を自動化(高速化)して、日常のシールド管理業務を省力化している。しかし、曲線掘進では、セグメント組立方法を自動的に演算するシステムがないため、線形管理業務に多大な労力を要していた。

曲線掘進中の線形管理および施工(掘削)効率をさらに上げるため、セグメントのテーパ量・最大幅の位置(角度)・分割数などの諸条件をセグメントタイプごとに入力することで自動的にセグメントの組立パターンを計画すると同時に、測量結果を基にマシンの位置予想計算をセグメント組立パターンに合わせて行うシステムを開発し、従来のシールド位置姿勢計測システム(TIMS)をバージョンアップした。

本報文は、新たに改良した本システムの概要と初めて導入した東京都下水道局のシールド工事での実績について紹介するものである。

### 2. 工事概要

本工事は、東京都における再構築事業の一環として集中豪雨時の浸水被害の解消を目的に主要枝線の管渠を上野公園外周道路に沿って築造し、既存の不忍池幹線に接続する工事である。

本工事の路線(図-1)には、16箇所連続する曲線が計画されており、全路線に占める曲線の割合は32%でありR=30以下は8箇所である。

工事名：台東区池之端三、四丁目付近再構築その1-2  
及び二次覆工工事

工事場所：池之端二・三・四丁目、上野桜木一丁目、  
上野公園

施工者：佐藤・名工JV

工期：平成16年7月1日～平成18年2月22日

発注者：東京都下水道局

工法：泥土圧シールド工法

トンネル延長：L=1,100.25m

仕上がり内径：φ1,650mm

シールド外径：φ2,490mm

シールドの最大中折れ角度：9.3度

最小曲線半径：R=15m

勾配：1.7‰

土かぶり：9.5～17.2m

土質：東京層砂質土層(N値10～50)

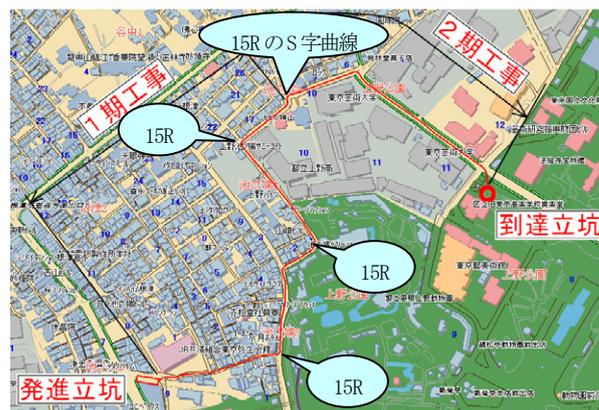


図-1 路線平面図

### 3. 開発の経緯

最近のシールド現場では、シールド自動位置姿勢計測システムがごく当たり前のように採用され、日常のシールドの線形管理および掘削データ管理が自動化・高速化したことでシールドの掘進管理業務が省力化されてきている。

現在、当社において使用しているシステムは、平成元年に自動方向制御を行うために開発され、急曲線における中折れ対応機能などが改良されてきたが、曲線掘進では、セグメント組立方法が自動的に演算するシステムがないため、線形管理業務に多大な労力を要していた。

曲線掘進中の線形管理および施工（掘削）効率をさ

らに上げるため、セグメントのテーパー量・最大幅の位置（角度）・分割数などの諸条件をセグメントタイプごとに入力することで自動的にセグメントの組立パターンを計画すると同時に、測量結果を基にマシンの位置予想計算をセグメント組立パターンに合わせて行うシステムを開発し、従来のシールド位置姿勢計測システムをバージョンアップした。

#### 4. システムの改善

表-1 システム改善策一覧表

	現 状	問 題 点	改善システム
1 中折れ対応	◆シールドの中折れ形式の対応は、X型のみ対応となっている。	◆V型に対応できない。 ・V型は、曲線施工時マシンの機長が変化するため、正確なマシン姿勢を把握できない ・さらに、計画方位に対し遅れが発生する	◆X型、V型いずれの中折れ形式にも対応できるシステムとする。
2 演算内容	◆演算内容は、線形、計画高およびセグメント幅・割付を入力すると数リング先の目標方位を自動的に演算する。	◆職員が出す指示は、測量データから演算するセグメントの割付であるが、自動演算機能がない。	◆測量データを入力しただけで目標方位からセグメントの割付を含む掘進指示を自動的に演算する。
3 出力図内容	◆出力図は、測量結果入力によるシールドの位置・姿勢のみの簡素なマシン図である。	◆出力図だけではマシンの状況が解らない。 ・他のシステム情報も見てマシンの状況を判断していた。	◆印字画面を他のシステムと繋ぎ、一つの図にまとめる。 ①シールドの位置・姿勢 ②クリアランス、ジャッキストローク差等 ③セグメントの出来形 ・セグメントの方位角 ・曲線区間での残テーパー量の表示
4 掘進指示	◆掘進指示に必要な曲線出口部におけるセグメントの残テーパー量 <sup>1)</sup> は、本システムに演算機能が無く、手計算で行っている。	◆手計算にて行うため、掘進指示書発行に時間がかかり次工程への引継ぎに間に合わない。	◆掘進指示書を自動的に作成するシステムとする。 ・テーパー量、最大幅の位置（角度）、分割数などセグメントタイプ毎に諸条件を入力することで、セグメントの組立パターンとセグメントタイプおよび曲線毎に使用残数量を演算する。 ・急曲線施工時におけるセグメントの組立パターンは、セグメントのせりを抑制するものである。
5 入力・表示	◆出力表示は、測量、計算、入力の3工程後となる。	◆測量結果の手計算部分が多く、指示書発行までに要する時間が長い。	◆出力表示は、測量、入力の2工程後とする。 ・測量データのみを入力による自動演算とする。 ・測量データの入力は測量位置付近で行う。 ※表示画面は以下のとおり 1. マシン位置・姿勢 2. セグメント出来形図 3. 掘進指示書（リング毎） 4. マシン図（測量結果）

1)残テーパー量：曲線全体として必要なテーパー量から既設のセグメントのテーパー量の合計を差し引いたテーパー量をいう

#### 5. システムの特長

##### (1) システムの特長

今回、バージョンアップした TIMS 改良型の特長は、以下のとおりである。

①中折れ機構（X型・V型）に係わらずシールドの位置姿勢計測が可能である。

②測量データを入力しただけで、作図から掘進指示書発行までが可能となり時間短縮が図れる（図-2, 3, 4）。

- ③急曲線施工時のセグメント組立指示が自動割付になったことで施工効率が大幅に向上する(図-5)。
- ④曲線出口部においても残テーパ量を自動演算するため、セグメントの組み間違い等を防止できる。
- ⑤セグメントの在庫管理を同時に行うことができる。
- ⑥シールド掘進線形、セグメントの組立精度の向上が図れる。
- ⑦三胴のシールド(2箇所の中折れ機構)への対応が可能である。

**(2) 測定項目**

坑内測量が終了した後、測量結果入力画面に結果を入力する。測定項目は、下記のとおりである。

- a. テールクリアランス
- b. セグメントの倒れ(傾き)
- c. セグメントの平縦断測量結果

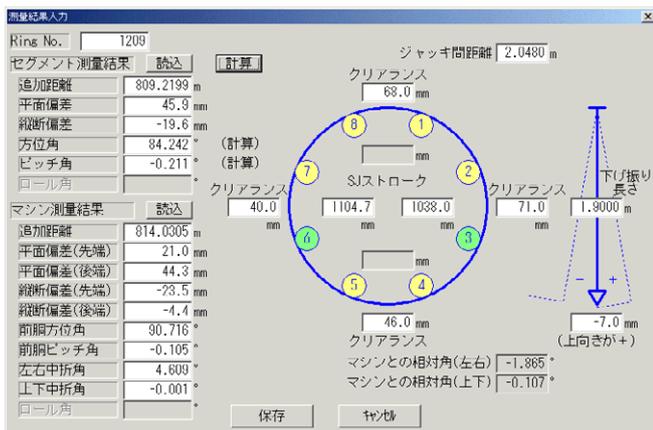


図-2 測量結果入力画面

**(3) 測定データ入力手順および出力形式**

測量結果の入力方法およびセグメント自動組立画面(図-4)の入力手順を以下に示す。

- ①最初に「測量結果入力」ボタンをクリックし、各測定項目に結果を入力する。
- ②現在のリング No. を表示(入力)する。  
※測量結果入力後は、次のリング No. を表示。
- ③次組立リング以降のセグメントタイプを変更する。  
※あらかじめセグメントタイプ設定で登録したセグメントタイプから選択する。(各テーパセグメントの諸条件を入力済)
- ④Kセグメントをクリックし、Kセグメントの位置(角度)を設定する。  
※現在のリング No. のKセグメントは緑色、内側に向

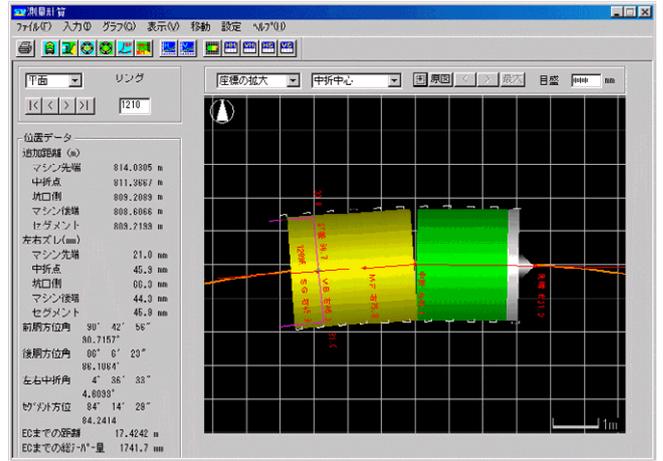


図-3 測量結果【グラフィック表示】

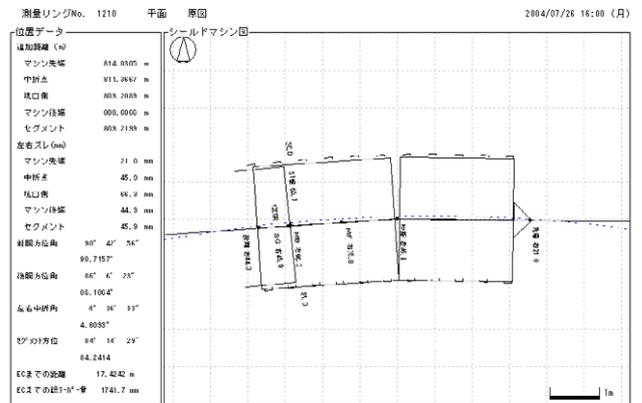


図-3-1 測量結果【グラフィック印刷】

う毎にリング No. が増加する表示としている。また、いも継ぎ場合は自動的に NG の表示となる。

- ⑤セグメントの予測位置(左右位置と上下位置)を赤色でグラフ表示。

※クリアランスを考慮し、セリを抑制する組合せを自動的に計画し、クリアランスが極小となる場合は、その部位について赤く表示する。

- ⑥「セグメントタイプ」「上端リブ番号」「セグメント平面偏差」「セグメント縦断偏差」「セグメント方位角」「セグメントピッチ角」を一覧表示する。

測量結果入力リング No. の次のリングから 20 リング分の計算を自動的に行う。

- ⑦「セグメント使用数」ボタン

セグメント使用個数(合計値)を設定すると、開始リング No. から現在のリング No. までのセグメント残数をセグメント使用数から逆計算して表示することができる。これにより、在庫管理が自動時に行われるためセグメントの搬入計画が容易に出来る。

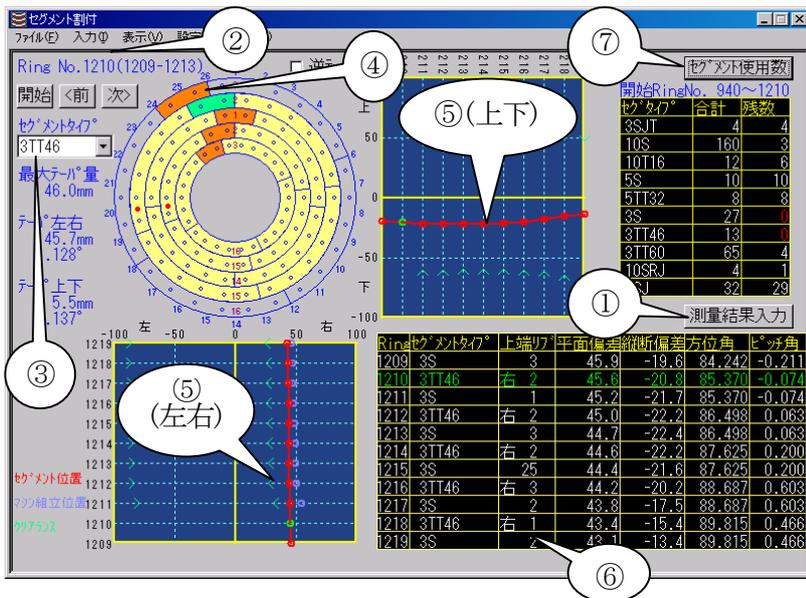


図-4 セグメント割付検討画面

(5) 掘進指示書

掘進指示書(図-5)は、セグメントの分割数およびボルト総数などの諸条件をあらかじめ入力することでタイプの異なるシールドへの対応が容易にできるようになった。また、掘進指示書の中に急曲線での余掘り範囲および余掘り量などの情報も同時(手動)に入力し、更に掘削時における各管理項目(切羽土圧・加泥注入圧・裏込め注入圧等)も追記できるようにした。

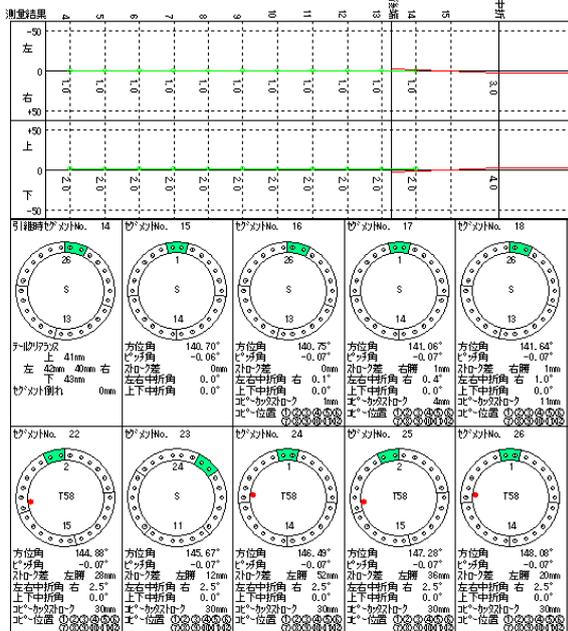


図-5 掘進指示書

6. 導入結果

図-6は、測量完了後に、すりつけ距離定数(蛇行量)

を解消する目標距離)と目標位置ズレ量(目標位置における蛇行量)を入力し、測量結果を元にシールドマシンの位置・姿勢を計算した予測値および実測値を入力したものである。

今回の導入においては、マシン先端における予測値と実測値の差は、導入区間全てにおいて±30mm以内となった。また、システム導入後は指示書の発行までの時間が大幅に短縮された。この結果、システムの有効性が実証され今後の曲線管理において役立つことが期待される。



図-6 予想値と実測値との差

7. 今後の課題

今後は、曲線出入口において中折れ角および余掘量の設定をマシンのタイプを問わず、自動的に行うシステムの開発を図りたいと考えている。

8. おわりに

本報告で述べた新しいシールド位置姿勢計測システムは、現在横浜市環境局および東京都下水道局発注のシールド工事現場において導入を行い、少ない人員のもとトンネルの施工精度はもちろんのこと、現場担当者の労力の省力化に大いに役立っている。今後は、上記の課題はもちろんのこと、導入現場からの意見をさらに吸い上げ、システムを進化させることで次世代のシールド掘進管理手法の先駆けとなるべく日々努力する次第である。

## 24. 遠心カトンネル吹付け工法の実施工への展開

三井住友建設(株)：○丸山 信一郎、山下 高俊、長野 祐司

### 1. はじめに

近年、山岳トンネル工事などの坑内で発生する微細な浮遊鉱物性粉じんは、視界不良による作業効率の低下を引き起こすばかりでなく、人体に吸入されるとじん肺にかかるおそれがあり、作業環境上非常に問題視されている。H12年には厚生労働省より「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」<sup>1)</sup>が示され、その中で「トンネル切羽から坑口に向かって50mの位置で粉じん濃度目標レベル $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下にすること」という数値目標が表された。一般的にトンネル工事では削孔・発破・ずり積み・ずり出し・吹付けコンクリート・鋼アーチ支保工・ロックボルトのサイクルにて地山を支持し、繰り返し掘削を進めるが通常換気設備でのコンクリート吹付け時の発生粉じん量が他の作業より多いのが現状である。このような状況のもと開発したのが、エアを多量に使用せず機械的な吹付け方式により発生粉じん量を抑えた遠心カトンネル吹付け工法である。現在、本工法をトンネル工事の実施工に導入して作業環境改善を目的に実績を積み重ねている。本報では、工法の概要とその実施工の導入効果について報告する。

### 2. 遠心カトンネル吹付け工法の概要

本工法は、コンクリートと急結剤を機械的に高速攪拌し混合させエアの噴出力によらず高速回転羽根車の遠心力により吹付け材料を地山へ投射する。このことにより、大気中への粉体急結剤やコンクリートの微粒子の拡散・飛散を従来のエア吹付け方式より大幅に抑えることができる。

#### (1) 遠心カトンネル吹付け装置の基本構造

遠心カトンネル吹付け装置の基本構造を図-1に示す。また、本装置の基本構造は次の事項により構成される。

- ①コンクリートと急結剤を別々に導く材料供給部
- ②高速回転する攪拌翼よりなる混合攪拌部
- ③吹付け材料を目標の地山方向に投射する吐出部

#### (2) 施工上の留意点

吹付け施工上の留意点は次のとおりとする。

- ①吹付けの投射速度は、これまでの実績よりインペラの回転数で $1000\sim 1500\text{r.p.m}$ の範囲とする。
- ②吐出口（ノズル）と吹付け面（地山）との離隔距離は、 $1.0\sim 1.5\text{m}$ が適切である。
- ③吹付け終了後は、インペラを回転させながら圧送部

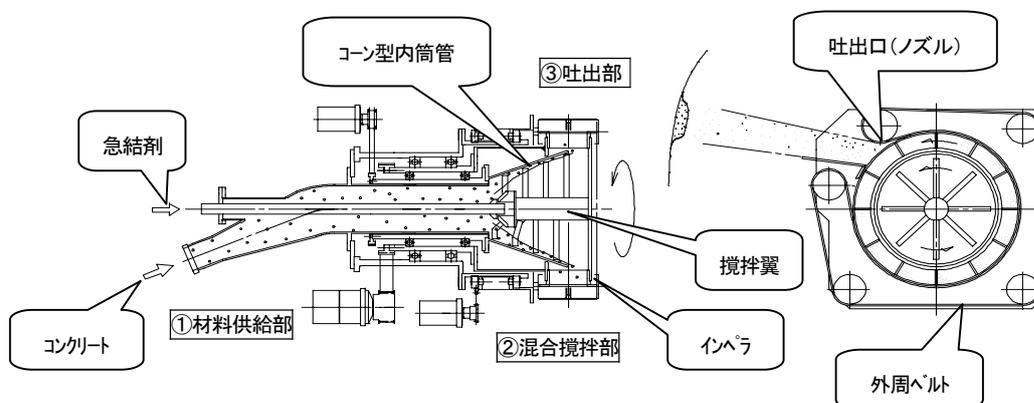


図-1 遠心カトンネル吹付け装置基本構造

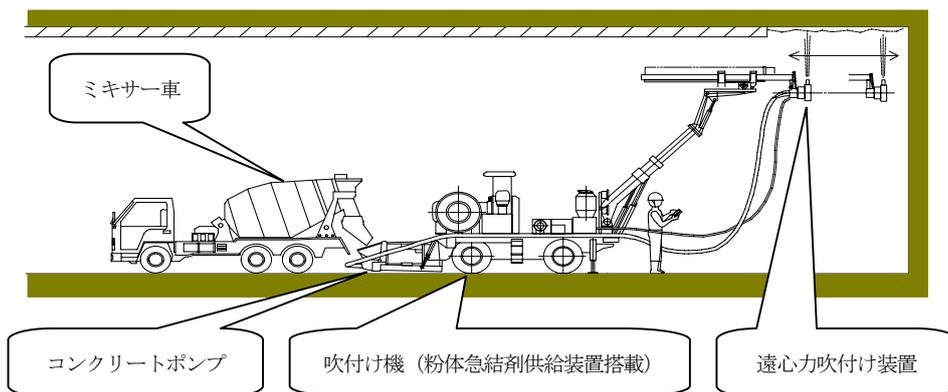


図-2 遠心力吹付け工法の施工概念図



写真-1 遠心力吹付け装置

混合攪拌部，吐出部を高圧水洗浄する。

### 3. 現場実施工

コンクリートの吹付けに本工法を展開した現場は道路断面トンネルと小断面トンネルの工事現場である。

#### 3-1. 道路断面トンネルへの展開

##### (1) 展開目的

実際の掘削サイクルの吹付け施工において，次に掲げる事項を主な目的とした。

- ①坑内作業環境向上のため，粉じん濃度の計測を行い発生粉じん量の低減効果を確認すること
- ②吹付けの材料強度が従来工法と同等以上であること
- ③施工能率が従来工法と同等以上であること

##### (2) 工事概要

静岡県立岩のトンネル工事に，平成16年3月から5月末までの2ヶ月間実際の掘削サイクル工程にのせて本工法を導入した。坑口付けより吹付けを開始し，吹付け延長160m，総吹付け量1147m<sup>3</sup>を施工した。工事概要を以下に示す。

工事場所：静岡県熱海市網代地内

工事内容：NATM工法タイヤ式機械掘削

トンネル延長L=284m

掘削断面積 A=87.2~123.3m<sup>2</sup>

工期：平成15年10月~平成17年6月

##### (3) 施工設備

図-2に，本工法の施工概念図を示す。吹付け施工設備は，主にコンクリートポンプ，粉体急結剤供給装置搭載の吹付け機および遠心力吹付け装置で構成され，その施工設備の主要仕様は表-1のとおりである。ま



写真-2 遠心力トンネル吹付け機

表-1 主要仕様 (道路断面トンネル)

吹付け方式	回転力方式 (遠心力タイプ)
実吹付け能力	15~6m <sup>3</sup> /h級
急結剤攪拌方式	強制攪拌方式
使用急結剤	粉体急結剤 (液体急結剤も使用可)
コンクリート供給	コンクリートポンプ (吐出量20m <sup>3</sup> /h級)
台車	タイヤ走行式
所要電源	105Kw

た，遠心力吹付け装置を写真-1に示し，遠心力吹付け機を写真-2に示す。

##### (4) 粉じん計測

吹付け施工中の粉じん計測については，同時期に独立行政法人土木研究所と「吹付け作業時の発生粉じん量の低減技術の開発」の共同研究を行っており，共同研究メンバーによる「遠心力トンネル吹付け機の粉じん濃度の低減効果を確認するための粉じん計測」としてH16年4月に実施した。粉じん濃度の計測位置は切羽後方50m地点とし，上半掘削時の二次吹付け中に行いデジタル粉じん計5台とローボリウムサンブラ1台を

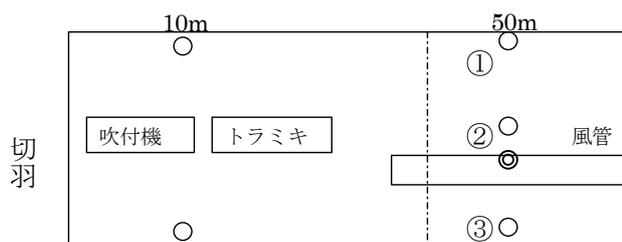


図-3 器材配置図 (○: デジタル粉じん計  
◎: ローボリウムサンブラ)



写真-3 粉じん濃度計測状況

表-2 発生粉じん量の濃度測定結果

			単位	1回目	2回目	3回目
坑内換気量			m <sup>3</sup> /min	720	720	720
ローボリウムサンブラ LV-40B	質量濃度	切羽より50m	mg/m <sup>3</sup>	1.09	1.66	0.08
デジタル粉じん計 LD-3K	相対濃度 (カウント値)	①切羽より50m左	cpm	997	1,448	208
		②切羽より50m中	cpm	1,106	1,393	214
		③切羽より50m右	cpm	1,234	1,591	206
		①②③平均	cpm	1,112	1,477	209
	算出K値	切羽より50m	mg/m <sup>3</sup> /cpm	0.00099	0.00119	0.00039
質量濃度(算出K値使用)		切羽より50m(平均)	mg/m <sup>3</sup>	1.10	1.76	0.08

図-3のように配置した。その時の粉じん濃度測定結果を表-2に示す。表-2より粉じん濃度は 0.08～1.66 mg/m<sup>3</sup> の範囲にあり、厚生労働省ガイドラインの切羽後方50mにおける粉じん濃度基準値 3 mg/m<sup>3</sup> を下回る結果を得た。

ここで、デジタル粉じん計の質量濃度(表-2の最下段)はデジタル粉じん計で計った相対濃度(単位cpm)にK値(質量濃度変換係数)をかけて質量濃度に換算した値である。ローボリウムサンブラによる質量濃度と比較するとほぼ同等の値であり、ガイドラインの粉じん濃度基準値 3 mg/m<sup>3</sup> 以下であることが確認できる。粉じん濃度計測状況を写真-3に示す。

#### (5) 吹付けコンクリートの配合と強度

現場で使用したコンクリートの配合を、表-3に示す。通常のエア吹付け方式で採用するものと同等の配合である。

表-3 吹付けコンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				粉体急結剤 C* (%)
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
58	58	209	360	1030	755	7

また、採取した吹付けコンクリートの強度試験の結果を表-4に示す。この結果より、材齢圧縮強度は 24 時間と 28 日ともに設計基準強度を十分満足するものであった。

表-4 吹付けコンクリート強度

吹付け方式	材齢 24 時間 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢 28 日 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
遠心力吹付け	9.9	27.7
設計基準強度 <sup>2)</sup>	5	18

### 3-2. 小断面トンネルへの展開

#### (1) 展開目的

3-1で述べた道路等の普通断面規模のトンネル工事では、昨今、送風機や集じん機の大型化が進み広く普及している。しかし水路等の小断面トンネル工事においては、道路トンネル工事に比べ施工上大口径の風管や大型の集じん機の設置が難しいため十分な換気ができず、坑内環境の改善が行いにくいのが現状である。前途のガイドラインにおいても、粉じん濃度目標レベルの達成が困難とされる中小断面トンネル工事については緩和処置がとられている。そこで、遠心力吹付け機のコンパクト化の開発を進め、5～20m<sup>3</sup>規模の小断面トンネルの実施工への展開を進めた。

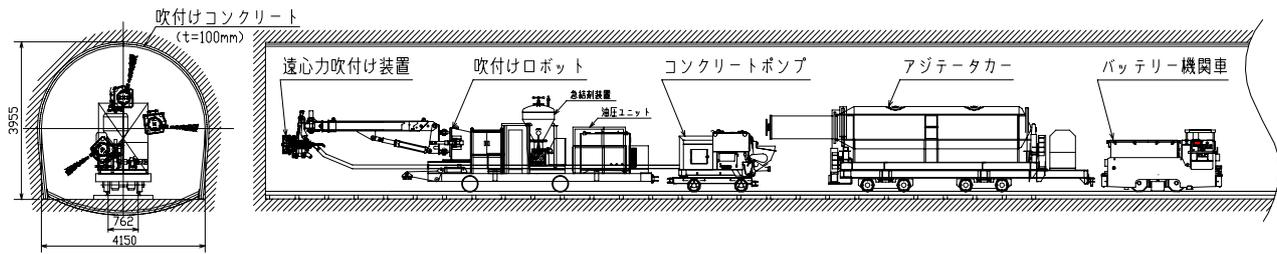


図-4 小断面トンネル吹付けシステム概念図

(2) 工事概要

神奈川県相模原のトンネル工事に、平成16年9月からこの工法を導入し、実際に吹付け施工を行った。吹付け延長102m、総吹付け量276m<sup>3</sup>を施工した。工事概要を以下に示す。

工事場所：神奈川県相模原市麻溝台5丁目

工事内容：NATM工法レール式機械掘削

トンネル延長L=945.272m

仕上がり内径φ3750mm

掘削断面積 A=17.630m<sup>2</sup>

内空断面積 A=11.039m<sup>2</sup>

工期：平成15年6月～平成18年2月

(3) 施工設備

図-3に、小断面トンネルに導入した吹付けシステムの概念図を示す。この小断面トンネル吹付けシステムはコンクリートポンプからレール走行型吹付けロボット及び吹付け装置本体までを一連で編成したものである。システムの特徴は次のとおりである。

- ①遠心力吹付け装置は小型化を図り、普通断面トンネル用の装置に比べ重量を軽減した。吹付け装置の重量は250kgである。
- ②吹付けロボットは、遠心力吹付け装置の重量に耐える構造とするため、エア吹きで使用している既製のロボットのブームを強化型のブームに改造した。
- ③コンクリートポンプは、汎用型油圧式ポンプでピストン径が小さく、シリンダ切替え時コンクリートの脈動が小さいものである。

また、この吹付けシステムの主要仕様を表-5に、外観を写真-5に示す。

(4) 粉じん計測

粉じん計測は、発生粉じん量の数値の把握とその比較を行うために、遠心力吹付け方式およびエア吹付け

表-5 主要仕様（小断面トンネル）

吹付け方式	回転力方式（遠心力タイプ）
実吹付け能力	10～3m <sup>3</sup> /h級
急結剤攪拌方式	強制攪拌方式
使用急結剤	粉体急結剤（液体急結剤も使用可）
コンクリート供給	コンクリートポンプ（吐出量10m <sup>3</sup> /h級）
台車	レール走行式
所要電源	75Kw
総重量	9,000Kg



写真-5 小断面トンネル吹付けシステム

方式について実施した。計測機器はデジタル粉じん計（P-5L）を用いて行い、計測箇所は坑内切羽から5mおよび50m後方の地点にした。その粉じん測定位置について図-5に示す。デジタル粉じん計による測定方法は、吹付けによる粉じんが定常状態に達した時点の吹付け開始後約3分から開始し、測定時間は切羽後方5mについて2箇所を各10分間、50mについて2箇所を各5分間とした。また、粉じん濃度の経時変化を把握するため、1分毎に粉じん濃度を記録した。

a) 遠心力吹付け方式の粉じん計測結果

遠心力吹付け方式の場合の切羽後方5m地点では、表-6の粉じん濃度（相対濃度）測定結果より粉じん濃度（相対濃度）は218～318cpmである。また、吹付け中の切羽の視界は良好で吹付けコンクリートの付着

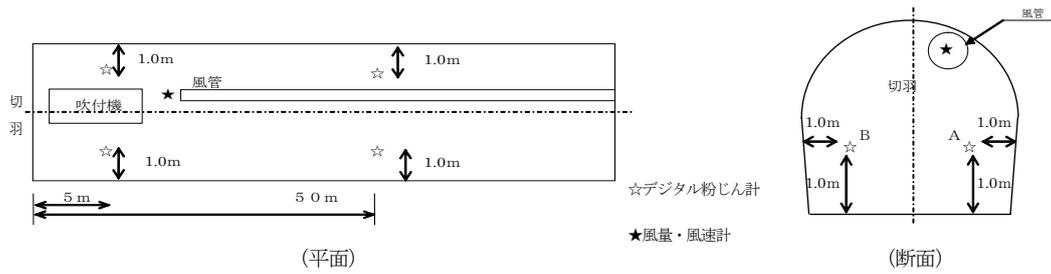


図-5 粉じん測定位置図

表-6 粉じん濃度（相対濃度）測定結果

吹付方式	測定日	吹付け条件					粉じん濃度（相対濃度）		使用機器
		切羽位置	スランブ	コンクリート吐出量	吹付け量	換気量	切羽から5m	切羽から50m	
		支保工No.	cm	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /min	cpm		
遠心力吹付け	平成16年9月3日	650	9.0	9.0	2.8	63.0	247		P-5L
		651	8.5	9.0	2.8	63.0	218		
		652	8.0	8.5	2.8	63.0	318	4	
平成16年9月8日	671	9.0	9.0	2.6	63.0	298	3		
エア吹付け	平成16年7月9日	463	9.0	9.5	2.8	59.6	610		
		464	9.0	9.5	2.8	59.6	658	104	
	平成16年9月29日	775	12.0	10.5	2.7	53.0	815		
		776	11.0	10.5	2.7	53.0	791	9	



写真-5 吹付け状況  
(遠心力吹付け方式)



写真-6 吹付け状況  
(エア吹付け方式)

面は目視で十分確認することができた。遠心力吹付け方式による吹付け状況を写真-5に示す。

次に、吹付けロボット後方のコンクリートポンプやアジテータ付近の視界は非常に綺麗な状態で、風管先端から坑口側への粉じん拡散はほとんど見られなかった。切羽後方50m地点の粉じん濃度（相対濃度）は3~4cpmで、75cpm(ガイドラインで定める切羽後方50m地点での濃度目標レベル、質量濃度3mg/m<sup>3</sup>に相当する値)に対して、非常に低い値であった。

遠心力吹付け方式は、吹付け材料の搬送に圧縮空気を使用しないことより、外部から切羽への空気の流入が少なく坑内の風向きが一定である。そのため、切羽で発生した粉じんのほとんどが風管内に吸い込まれ坑内での粉じんの拡散は少ないと考えられる。

b) エア吹付け方式の粉じん計測結果

エア吹付け方式の場合は、表-6より切羽後方5m地点での粉じん濃度（相対濃度）は610~815cpm、切羽後方50m地点での粉じん濃度（相対濃度）は9~104cpmであった。エア吹付け時は吹付けコンクリートの付着面が目視で確認できないほど多量の粉じんが発生し、切羽付近は骨材の跳ね返りが激しかった。エア吹付け方式による吹付け状況を写真-6に示す。

また、切羽後方50m地点の粉じん濃度測定結果では大きなバラツキが生じ、遠心力吹付け方式と比較すると粉じん濃度の計測値は非常に高い数値を示す場合があった。エア吹付け方式の場合は、切羽後方においては視界を確保するために、作業中局所的に粉じんを拡散する目的で圧縮空気によるエアブローを行っている。

よって、吹付け材料圧送のエアの他にこのようなエアが付加されたことにもより、発生した粉じんが十分に風管内に吸い込まれなかったものと考えられる。

#### (5) 吹付けコンクリートの配合と強度

使用した配合を表-7に示す。通常のエア吹付け方式で採用するコンクリートの配合と同等のものである。また、遠心力吹付け方式による吹付けコンクリート強度は、採取した吹付けコンクリートの強度試験の結果より同一現場で行ったエア吹付け方式による吹付けコンクリート強度とほぼ同等で、かつ基準の設計基準強度を十分満足したものであった。吹付けコンクリート強度の試験結果を表-8に示す。

表-7 コンクリートの配合

水 セメント 比	細骨材 率	スラン プ	単位重量 kg				急結剤添加率 (粉体急結剤) C×%
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
W/C %	S/a %	cm	W	C	S	G	
56	65	12-18	202	360	1075	596	7.0

表-8 吹付けコンクリート強度

吹付け方式	材齢24時間 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢28日 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
遠心力吹付け	7.2	26.2
エア吹付け	7.7	28.5
基準強度	5	18

#### 4. 実施工導入の効果

道路断面トンネルと小断面トンネル工事における本工法の導入効果を以下の事項に示す。

##### (1) 粉じん発生量

本工法における粉じん発生量については、両現場とも切羽後方50m地点で粉じん濃度3mg/m<sup>3</sup>以下とする厚生労働省ガイドラインの基準値を下回る効果を確認した。また、表-5より小断面トンネルにおいて遠心力吹付け方式の発生粉じん濃度はエア方式の約1/3～1/4程度の粉じん濃度となっていることが確認された。

##### (2) 吹付けコンクリートの強度

本工法における吹付けコンクリートの強度は、通

常のエア吹付け方式に採用されている配合のコンクリートを使用しても、設計基準強度を十分満足することが確認された。

##### (3) 施工性

遠心力吹付け方式の場合、道路断面トンネル工事では吹付け能力平均12m<sup>3</sup>/hとして施工し、小断面トンネル工事では吹付け能力平均8m<sup>3</sup>/hとして施工した。その結果、一連の工程に狂いを生じることなく、通常のエア吹付け方式と同等の施工サイクルを実現することができた。

#### 5. 今後の課題

今回、本工法を現場の実施工で適用したことで、作業環境向上を目的とした吹付け中の粉じんの低減効果と吹付けコンクリートの強度についてほぼ満足する結果が得られた。今後の課題は本工法の施工性を更に向上させることにあり、次の事項とする。

- ① 遠心力吹付け装置の耐摩耗性の向上
- ② 吹付け面の仕上がりの向上
- ③ 吹付け終了時の装置の清掃方法の明確化

おわりに

遠心力トンネル吹付け工法は、機械的な吹き付け方式により粉じん発生源である吹付け機械自体からの粉じん発生量を確実に抑え、坑内作業環境の向上を図ることが可能である。また、大型の空気圧縮機を必要とせず換気設備の負荷を軽減できるため、省エネが可能であると考えられる。

現在も小断面トンネルの工事現場において、遠心力トンネル吹付け工法を実施しており、今後もこの工法の粉じん低減効果の促進や吹付けの品質向上および遠心力吹付け装置の耐摩耗性等の施工性について検討を重ねていくこととしている。

#### 参考文献

- 1) 厚生労働省：ずい道建設工事における粉じん対策に関するガイドライン、2000.12
- 2) 土木学会：吹付けコンクリート指針(案)〔トンネル編〕、2005.7

## 25. 部分拡幅シールド工法（VASARAシールド工法）の開発

鹿島建設(株)：○神尾 正博  
石川島建材工業(株)： 浅野 裕輔  
三菱重工業(株)： 杉山 雅彦

### 1. はじめに

本稿では、従来は同一断面で施工されていたシールド工法において、任意の場所で補助工法を併用せずに部分的にトンネル内空（トンネル幅）を大きくする施工技術として新たに開発した「部分拡幅シールド工法（VASARAシールド工法<sup>※</sup>）」の工法概要と実施工現場での適用実績について報告する。

### 2. 開発の背景

近年、シールド工法による都市部の地下空間構築においては、トンネルの大深度化、長距離化に対する需要が益々増加する傾向にある。また、都市部の市街地では建設用地の確保が困難な状況にあり、施工時の周辺環境への配慮の観点からも、非開削工法による地下開発の必要性が増大している。

シールドトンネルは、発進立坑から到達立坑までを同一断面で構築するのが一般的であるが、部分的に断面を拡大したいというニーズは、種々のトンネル用途・規模・分野で多く存在する。

例えば、地下道路トンネルの非常駐車帯やランプ部、地下鉄トンネルの駅部、共同溝や電力洞道のケーブル接続部、小口径長距離トンネル施工時の物流搬送における離合部等の特殊部では部分的に拡幅空間が必要となる。

これに対して従来は、全線を最大必要断面に合わせた口径としたり、当該箇所両端に立坑を構築したりするほか、当該箇所周辺に薬液注入や凍土造成等の大規模な地盤改良を施してトンネル内部から切り拡げを行なう等の施工方法で対処していた。

こうした背景のもと、補助工法を併用せずに任意の

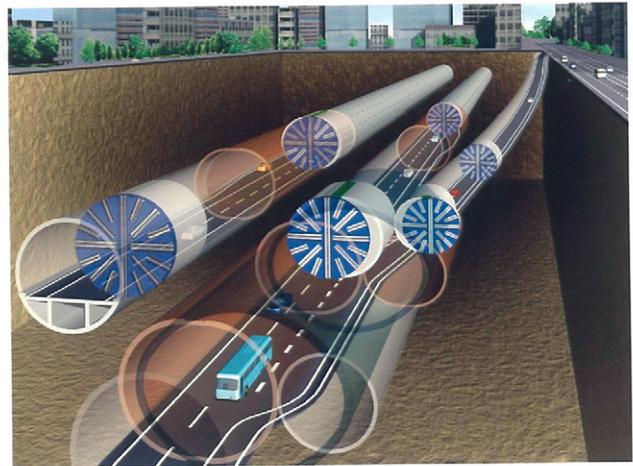


図-1 工法適用イメージ

箇所です安全かつ経済的に非開削でトンネルの部分拡幅が行なえる合理的な工法として、VASARAシールド工法を開発した。

### 3. VASARAシールド工法

#### 3-1. 工法の概要

VASARAシールド工法は、全ての部分拡幅作業がトンネル坑内で可能な工法であり、従来の補助工法を併用した工法と比べて、大幅な工期短縮と安全性の向上が図れる。また、全線を最大断面で掘進する方法に比べて、一般部のトンネル断面を縮小できることから大幅な事業コストの縮減や建設廃棄物・建設資材の削減も可能となる合理的な施工技術である。

本工法には、(1) VASARA-L工法 と (2) VASARA-S工法の2方式があり、トンネルの用途や規模に応じて、より合理的な施工方法の選択が可能である。

※ VASARA（バサラ）シールド工法

= Variable width（可変幅）+ Saving space（省スペース）+ Rapid construction（迅速施工）

**(1) VASARA-L工法 (L : Liningの頭文字)**

マシンテール内で一般部と同様に拡幅用セグメントを円形で組み立て、シールドマシンのテールを抜けた後でセグメントを外側に押し出して拡幅部分を形成する方法である。(図-2)

拡幅される部分の地山は、オーバーカッタ機構や面板スライド機構を使用して余掘り掘削(拡幅掘削)する。余掘り部には特殊充填材を注入して地山の崩落を防止する。

拡幅部のセグメントはスライド機構を有する特殊な

構造となるが、シールドマシンには特殊機構や大規模な改造が不要なため、

- ① 拡幅量が小さい
- ② 拡幅箇所が1~2ヵ所程度
- ③ 拡幅延長が短い
- ④ 小口径シールド

等の施工条件に適した方式である。

**(2) VASARA-S工法 (S : Shieldの頭文字)**

シールドマシン外筒部(スキンプレート)の一部が

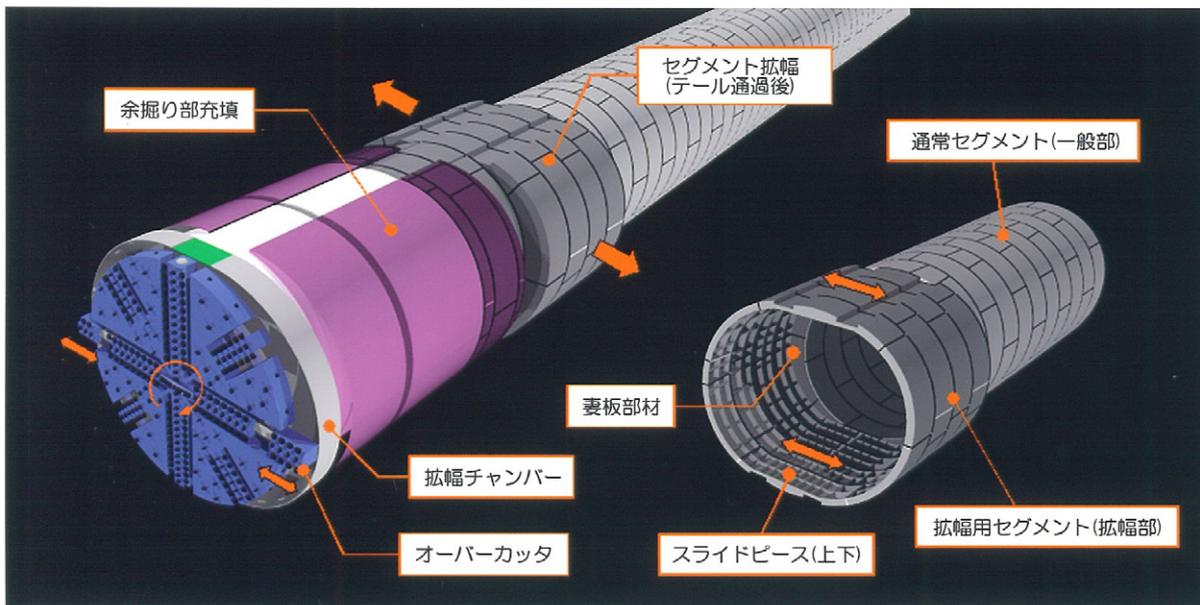


図-2 VASARA-L工法

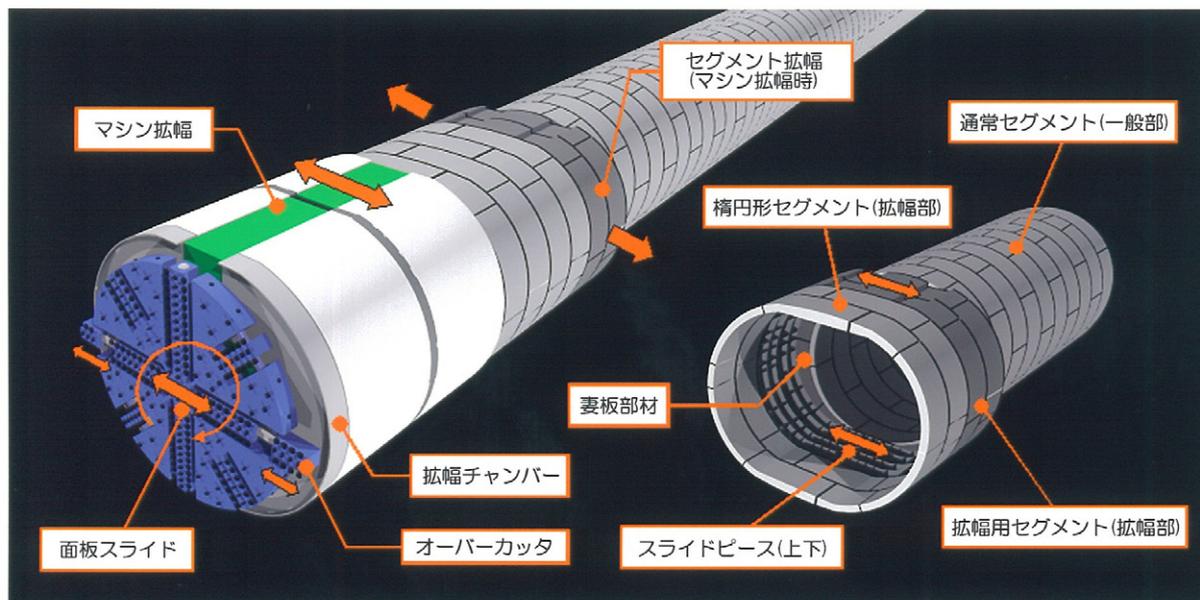


図-3 VASARA-S工法

S工法の場合は、拡幅区間の始端2～3リングで拡幅用セグメントを使用し、以後の拡幅部ではスライド機構のない楕円形セグメントを使用する。拡幅区間の終端部では、逆の要領で拡幅セグメントを楕円形（拡幅状態）で組み立てた後に、シールドマシンと一括して円形に縮幅し、通常掘進に移行する。

### (3) セグメント拡幅工

L工法の場合は、シールドマシンのテール部通過後に、土水圧によるセグメントの変形を防止する鉛直支保工及び左右への押し出し機構を有する拡幅装置を坑内に設置し、セグメント自体を地山側に順次押し出していく。この時、余掘り部に充填した特殊充填材は、セグメントの押し出しと同時にセグメントに設けた回収孔から坑内へ排出（回収）される。

S工法の場合は上述のとおり、拡幅区間の両端部でのみ、シールドマシンの拡幅装置を用いてセグメントも拡幅し、両端部以外の拡幅区間では楕円形セグメントを組み立てる。

### 3-3. 工法の特長

VASARAシールド工法の主な特長は、以下のとおりである。

- ① 補助工法を併用せず、非開削で拡幅部分を構築することができる。
- ② シールド掘進施工と並行して拡幅施工を行なうことができる。
- ③ 拡幅部以外の一般部は、通常どおり必要最小限の円形断面とすることができる。
- ④ シールド延長上で繰り返し何回でも拡幅及び縮幅することができる。
- ⑤ 場所ごとの必要断面に応じた任意の拡幅量に対応可能である。
- ⑥ 「泥水式」・「泥土圧式」のいずれのシールド工法にも対応可能である。
- ⑦ マシン入れ替え用の立坑が不要となり、事業費の縮減が可能である。
- ⑧ シールドマシンの大規模な改造や特殊機構の追加がほとんど不要である。（VASARA-L）
- ⑨ 拡幅機構を有する特殊セグメントは、拡幅区間の

前後のみであり、拡幅区間での曲線施工にも適応可能である。（VASARA-S）

### 3-4. 適用用途

VASARAシールド工法は、その特長により以下のトンネル用途への適用が可能である。

- ① 道路トンネル  
非常駐車帯や非常用設備設置箇所、地下ランプ接合部、曲線部での内空拡大区間（視距空間確保、車線拡幅、カント等）等
- ② 地下鉄トンネル  
駅舎端部、渡り線・引込み線等の路線合流部、機械設備設置箇所、避難通路等
- ③ 共同溝・電力洞道  
ケーブル接続部、分岐トンネルの開口補強部、機械設備設置箇所等
- ④ 小口径トンネル  
長距離施工時の坑内搬送車離合区間、機械設備設置箇所等

## 4. 実証施工実績

### 4-1. 施工概要

VASARAシールド工法の適用性の検証及び今後の技術開発における課題抽出を目的として、実施工現場での実証施工を行なった。（図-5）

今回の実証施工は、シールドマシンのテール内で円形状に組み立てた拡幅用セグメント（3リング）を、マシン通過後に外側に押し広げてトンネル内空を拡幅する「VASARA-L工法」を採用し、シールドマシン外径φ2,280mmの泥土圧式シールドで実施した。

表-1 施工諸元（工法適用範囲のみ）

施 工 場 所	滋賀県草津市
シールド工法	泥土圧式シールド工法
マ シ ン 外 径	φ2,280mm
覆 工（鋼 製）	外径φ2,150mm 内径φ2,000mm
拡 幅 工 法	VASARA-L工法
拡 幅 量	300mm（左右各150mm）
拡 幅 率	15%（300mm/2000mm）
拡幅リング数	3リング（=3.0m）

ラップした構造となっており、拡幅箇所ではシールドマシン外筒部を拡幅して、掘進と同時に拡幅部を形成する方法である。(図-3)

シールドマシンと同期して拡幅・縮幅する必要のある拡幅区間の両端(断面変化箇所)では、L工法と同様にスライド機構を有した特殊セグメントを用いるが、それ以外の拡幅部は可動機構のない楕円形状となるため拡幅区間での曲線施工にも適応でき、

- ① 拡幅量が多い
- ② 拡幅箇所が多い
- ③ 拡幅延長が長い
- ④ 大断面シールド

等の施工条件に適した方式である。

### 3-2. 施工手順

VASARAシールド工法の施工は、(1)拡幅掘削工 (2)セグメント組立工 (3)セグメント拡幅工に大別される以下の作業により構成される。(図-4)

#### (1) 拡幅掘削工

拡幅区間をシールドマシンのオーバーカッタ機能(伸縮スポーク又はコピーカッタを使用)で必要量・必要範囲だけ余掘り掘削する。拡幅量(余掘り量)が大きい場合には、面板スライド機構を併用した掘削機構を用いる。余掘り部の掘削土砂を取り込む機構としては、拡幅チャンバーを装備する。

また、余掘り部へは掘進と同時にシールドマシン機内から、流動性・遅硬性・非希釈性・非浸透性の性状を有する特殊充填材を注入し、掘削した地山の崩落・沈下を防止する。

#### (2) セグメント組立工

シールドマシンのテール部が拡幅掘削位置に達した時点で、スライド機構を有した拡幅用セグメントを円形(拡幅前状態)で組み立てる。

L工法の場合は、拡幅区間の全リングに拡幅用セグメントを使用する。

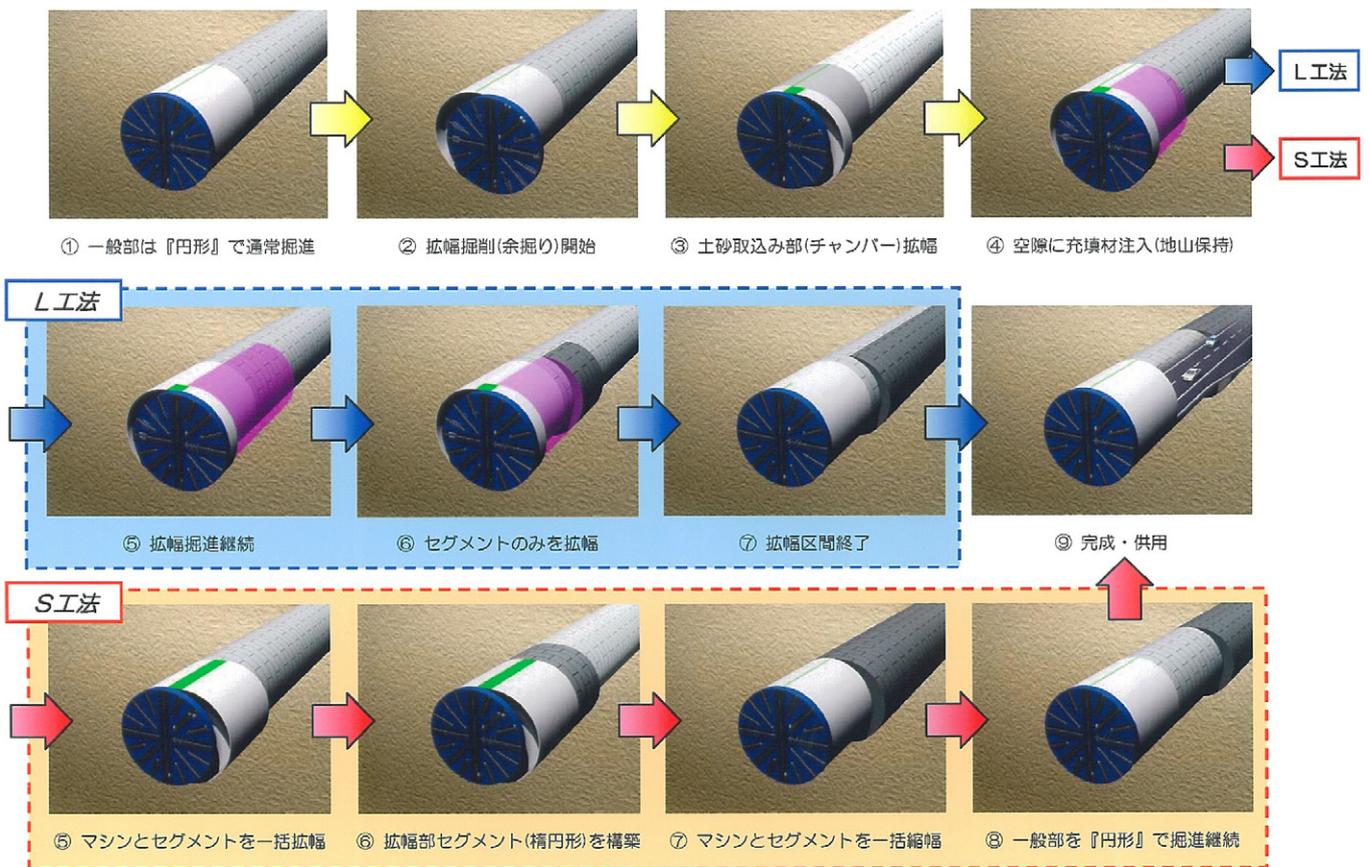


図-4 施工ステップ図

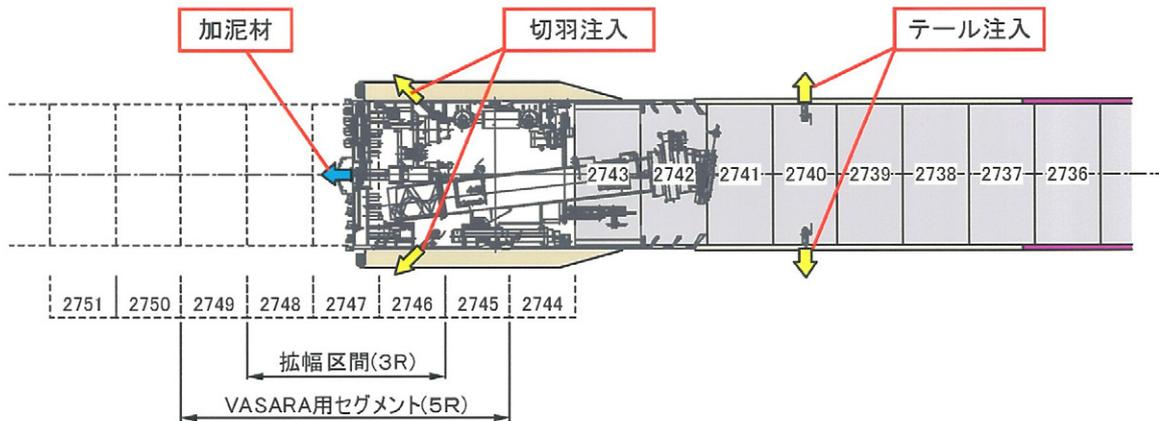


図-5 拡幅掘進状況図（平面図）

### (1) 拡幅掘削工

今回の実証施工では、シールド径が小さいことや余掘り掘削量が少ないことから、拡幅部の余掘り掘削をロングストローク対応の強化型コピーカッタ（最大ストローク 185mm）で行ない、掘削した土砂は機内から注入する特殊充填材でチャンバー側へ押し出して排土する手法で実施した。

拡幅掘削による余掘り箇所とテールボイド部には、地山の崩落・沈下抑止対策として、シールドマシンに設けた注入口8ヶ所とセグメントグラウトホールから特殊充填材を充填注入した。（写真-1）

### (2) 拡幅用セグメント

今回使用したVASARA用セグメントは、拡幅機構を有する特殊セグメント3リングとその前後に設置する調整用セグメントの計5リングである。

拡幅用セグメントは、上下にスライドピースを配置しており、左右水平方向に150mmずつ可動する機構とした。（図-6）

また、各リングの主桁内面には拡幅前に妻板部材を取り付け、スライドによって生じるリング間妻部の止水部材とした。

### (3) セグメント拡幅工

拡幅に先立って、鉛直方向の変形抑止のための補強柱（鉛直部材）と拡幅のための水平部材・拡幅用ジャッキを坑内に設置した。

セグメントの拡幅作業は、左右片側ずつを3リング

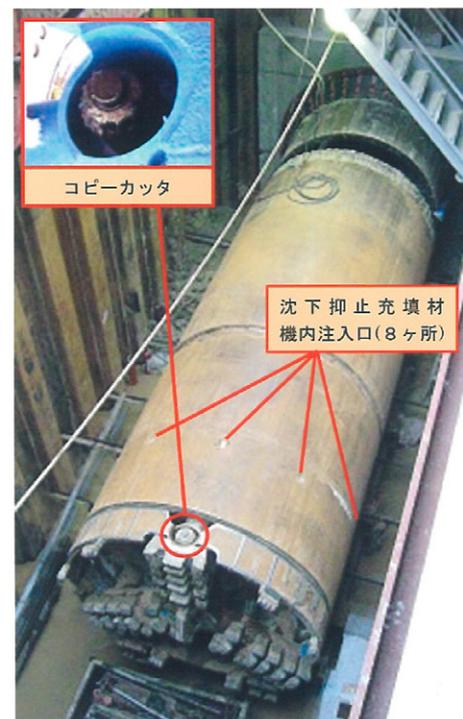


写真-1 シールドマシン（到達後）

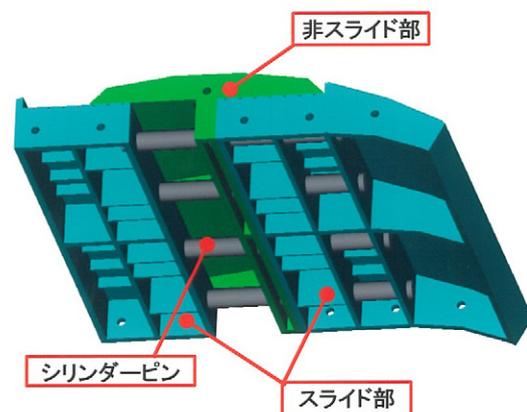


図-6 スライドピース概念図

同時に押し出す手法を用い、セグメントの拡幅と同時に余掘り部に充填注入した特殊充填材を坑内へ回収しながら実施した。(図-7)

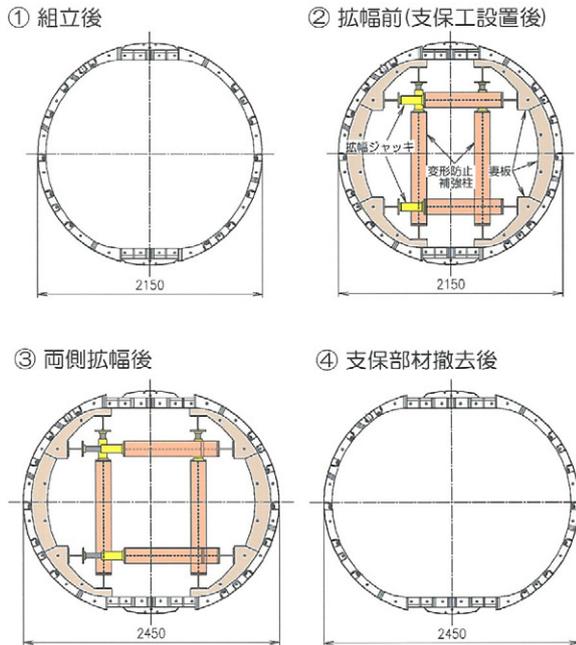


図-7 セグメント拡幅手順

#### 4-2. 施工結果と確認事項

##### (1) 拡幅掘削及び余掘り充填

当初、拡幅掘進時の姿勢制御と線形確保が懸念されたが、特殊充填材の注入箇所・注入圧の管理・調整により、通常と同様のジャッキパターンにより安定した掘進を実施することができた。

また、余掘り掘削箇所のサンプリングにより、特殊充填材が概ね均一に充填置換されていることが確認されており、余掘り掘削部の排土と充填置換に関しても良好な結果が得られた。

##### (2) 特殊充填材による地山保持効果

特殊充填材による地山保持機能を確認するため、地表面変位計測及びシールドトンネル直上 50cm の位置での地中内変位計測を実施した。

当該区間は、土被り 3m 程度 (1.5D) の低土被り施工であったため、拡幅掘削による地表面沈下やセグメント拡幅に伴う隆起等、周辺地盤への影響が懸念された。しかしながら、特殊充填材の注入量及び注入

圧管理により、こうした影響を発現することなく十分な地山保持効果が確認された。

### (3) セグメント拡幅機能

拡幅箇所に使用したスライド機構を有する特殊セグメントは、機械加工による高い製作精度と組立精度が要求された製品であり、実施工においてその確保が懸念された。

組立作業に若干の時間を要したものの、拡幅に伴うセグメントの競りや変形、過大な押し出し力の発生、充填材回収時の噴発等もなく、良好な施工状況であった。また、拡幅完了後の変状もなく、セグメントの拡幅機構・止水機構及び拡幅設備・拡幅要領の妥当性が確認された。



写真-2 拡幅施工後の坑内状況

### 5. おわりに

実際の施工現場における適用により、補助工法を併用しない非開削での地中拡幅工法として、実現性及び有効性を確認するとともに、今後の実用化に向けた施工方法と管理手法に関する様々な知見が得られた。

VASARA シールド工法は、必要な箇所のみを任意に拡幅でき(一般部の断面縮小化)、拡幅部を迅速に構築する(高速施工化)ことが可能な工法である。

今後も、適用実績を積み重ねながら、施工性・安全性・経済性に優れた合理的な工法技術として確立すべく、引き続き技術開発を推進していく所存である。

## 26. 超大口径管φ3500 推進工事の施工

(株)奥村組：○佐藤 英郎、藪ノ 和洋

### 1. はじめに

千葉県発注の「新港横戸町線 3・4 工区下水道施設移設工事」(内径：3,500mm、路線延長：196.0m)における泥土圧推進工事では、世界最大口径の組立式半円状 2 等分割 PC 推進管 (以降、PC 推進管と呼ぶ) を使用して、わが国はもとより世界初となる「超大口径管推進工法」を鋭意施工中である。本稿では工事概要および施工結果として推進力等の他、分割回収型掘進機「やどかり君」の超大口径管推進工法に対する適用性および今後の課題について報告する。

### 2. 「超大口径管推進工法」開発の背景

通常、推進工法では、規格化された呼び径 3,000mm までの推進管を施工領域とし、呼び径 3000mm 超についてはシールド工法、開削工法により施工されていた。この理由として、道路法による制約から、掘進機や推進管を一体化した状態での輸送が外径寸法や単体重量から困難なこと、又、超大口径管推進時の推力増大の問題が挙げられる。

3000mm超の径でも延長が短いトンネルの場合、推進工法を適用し機器や施工設備の転用を適正に標準化すれば、シールド工法、開削工法と比較した場合、コスト削減の可能性がある。

今回工事においては、前記の組立式推進管の他に、掘進機についても分割回収型『やどかり君』工法を適用し、輸送時の制約を回避するとともに、組立および解体、搬出時の容易性と転用性の向上を図った。さらに、滑材注入工法にスーパーL工法(二層滑材注入方式)を採用することで推力の低減を図り、PC 推進管の割れ欠け、クラックを極力防止する計画とした。

### 3. 工事概要

本工事は、千葉県稲毛区黒砂台 2 丁目～3 丁目付近における都市計画道路(新港横戸町線)の整備にともなう下水道幹線の移設工事として、内径 3500mm、路線延長 196.0m を泥土圧推進工にて築造するものである。土質は、洪積層(Ds2)の上に沖積粘性土層(AC)と腐植土層(Ap)が 5m 程度堆積し、地表付近の 2～3m 程度が埋土(BS)層となっている。

このうち掘進位置は埋土層と腐食土層部分にあたる。

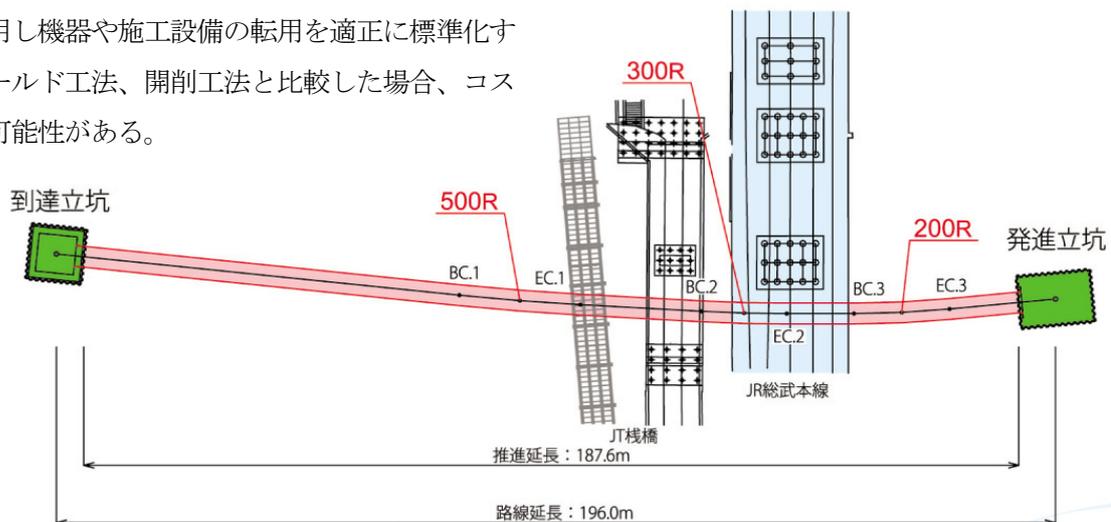


図-1 平面図

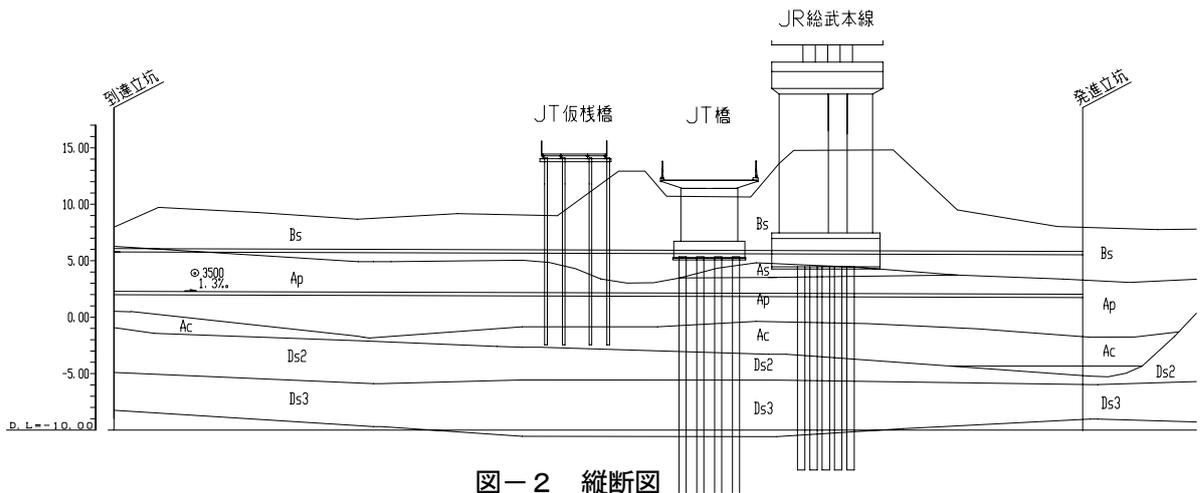


図-2 縦断面図



写真-1 JR 総武本線高架橋他

#### 4. 当工事の特徴と採用工法

①輸送時の制約（道路法）を回避するため、推進管を分割搬入し、現場で組立後、推進する。

⇒「半円状 2 等分割組立式 PC 推進管」の採用

②掘進機を分割搬入し、発進架台上で組立を実施する。また、到達後、分割解体し、到達立坑への大型重機搬入ができないため掘進機駆動部は発進立坑まで引き戻し回収する。

⇒分割回収型掘進機「やどかり君」工法の採用

③JR 総武本線高架および JT 橋、JT 栈橋が路線と直交するため、直下の横断が必要。変位抑制が必要。また、超大口径のため、推力増大の懸念がある。

⇒「スーパーエル工法」（二層滑材注入）の採用により推力の低減と地盤変状防止を図る。

等、上記 3 工法を組み合わせることにより、

**「超大口径管推進工法」**を採用した。

また、現場の特異性として、

④外径 4050mm の推進管は最小曲線半径 200m 区間で目地開口が約 54mm になる。

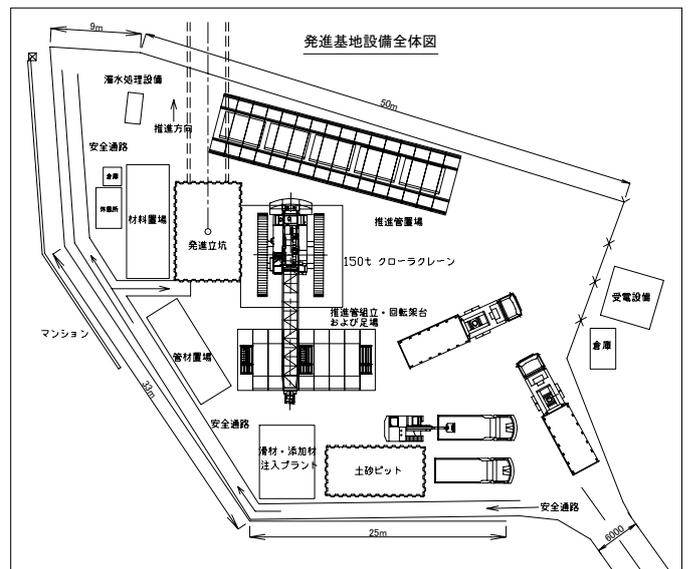


図-3 発進基地全体図

⑤掘進断面の土質が埋土と腐植土層の互層である。腐植土層は含水比が 300% を超え N 値が 5 以下と軟弱である。ことなどが挙げられる。

#### 4. 1 PC 推進管

##### 4. 1. 1 構造および仕様

PC 推進管は、本体に埋め込むシース内 5 箇所の円周方向に PC 鋼材を通して緊張することにより一体化し、供用時のひび割れを許容しないフルプレストレストコンクリート構造としている。分割部の継ぎ手面には接合キー 4 本を配備し、位置合せとせん断抵抗を図る。

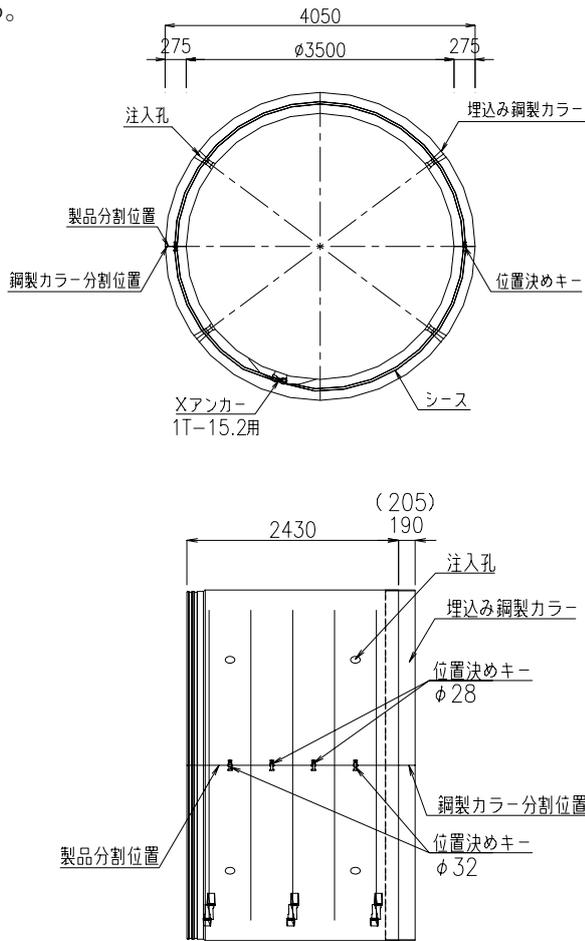


図-4 PC 推進管構造図

表-1 PC 推進管仕様

内径 mm	外径 mm	厚さ mm	長さ mm	質量 kN
3500	4050	275	2430(有効長) 2620(全長)	198.2
設計基準強度 N/mm <sup>2</sup>	PC鋼材	緊張力 kN/ケーブル	カラー長 mm	
50	PC鋼より線 1S15.2 N=5	185	190 205(200R区間)	

##### 4. 1. 2 推進管の検討

###### (1) 接合位置の検討

継手位置は、荷重に対する発生応力度と PC の緊張応力度との合成応力度を算出して、断面内の応力が圧縮側となる 30° ~51° の範囲に設定する必要がある。また、継手位置と目地開口長調整材末端が同位置に配置されないこと及び管製作時の型枠への吊孔設置位置を考慮して 37° とした。

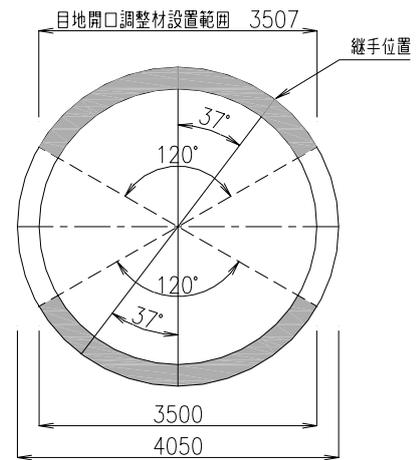


図-5 接合位置図

###### (2) 管接続部目地開口長の検討

曲線半径が同一であれば、管径の大きさに比例して目地開口長も大きくなる。今回工事では施工時の目地開口長に加え、地震時レベル 2 までの目地開口長を R=200m 区間で検討し、安全性を確認した。表-2 に各段階の目地開口長を示す。なお、レベル 1 での目地開口長は許容値内であるが、施工のバラツキにより許容値を超える恐れがあるため、R=200m 区間についてはカラー長を 15mm 延伸し 205mm とした。

表-2 目地開口長および屈曲角

	レベル1 (mm)		レベル2 (mm)	
	開口長・屈曲角		開口長・屈曲角	
	計算値	許容値	計算値	許容値
曲線施工時	54.3	60.0	54.3	120.0
地震時	2.0		29.1	
目地開口長	56.3		83.4	
屈曲角	0° 1' 12"	0° 51' 0"	0° 4' 1"	1° 42' 0"

#### 4. 1. 3 PC 推進管の組立手順

150t クレーン 1 台で PC 推進管の組立と推進工を同時に施工する。

以下、PC 推進管組立状況を示す。

##### ① 搬入



##### ② 架台上にセット



##### ③ PC 鋼材挿入



##### ④ PC 鋼材緊張



##### ⑤ 鋼製カラー分割部溶接



##### ⑥ 分割接合部コーキング



##### ⑦ 回転 (37°)



#### 4. 1. 4 安全対策

管径が大きいので、組立・投入作業には高所作業が避けられない。高所作業を減らし、効率的に組立・投入を実施するため、下記に示す設備工を実施した。

##### (1) 管組立・回転架台および足場 (2 管分)

移動式門型足場 (ゴム輪装着用) および固定式足場 (カラー溶接および玉掛用) を併用し、作業の効率化を図った。



##### (2) 管仮置架台および足場 (5 管分)

移動式門型足場 (ゴム輪装着用) を設置。



##### (3) 玉掛作業

管組立・回転架台から管仮置架台への移動および立坑内投入時に高所での玉掛作業とならないように、管吊り治具および玉掛方法を工夫した。

予め挿入しておいた誘導線を専用吊り具に取り付け、吊り具を吊り孔まで誘導する。また、吊り具の鋼棒を長くすることにより玉掛け作業を管内で手の届く高さとした。



発進立坑にスライド式安全帯掛けを設置



#### 4. 2 分割回収型掘進機「やどかり君」

計画時の留意点は以下の通りである。

- (1) 掘進機外径が4mを超え、総重量80tとなる。
- (2) 到達部への進入路が狭隘で急坂部があるため、大型重機の進入が困難である。
- (3) 転用に配慮した構造とする。
- (4) 推力低減が可能な適用機とする。

上記に対して「やどかり君」を適用することにより、

- ①掘進機輸送に際して内殻と外殻の分割搬入が可能で、輸送時の制約（道路法）を回避できる。
- ②分割単体最大重量である内殻を管内を通して発進立坑まで引き戻し回収することが可能で、到達部での大型クレーン（100tクラス）が不要となる。
- ③外殻（6分割）をボルト接合としており、組立・解体が容易で、転用性が向上する。
- ④推力低減工法であるスーパーエル工法の適用にあたり、予め掘進機に注入孔を設けられる。



写真-2 掘進機

表-3 掘進機仕様一覧

適用推進管	内径3500 (2等分割)
掘進機外径×機長	φ4070×4410 <sup>L</sup>
方向制御ジャッキ	1000 <sup>kN</sup> ×100 <sup>st</sup> ×21 <sup>MPa</sup> ×8 <sup>本</sup>
油圧ポンプ	8.3 <sup>L/min</sup> ×21 <sup>MPa</sup> ×1 <sup>台</sup>
ユニット電動機	5.5 <sup>KW</sup> ×4 <sup>P</sup> ×1 <sup>台</sup>
付属装置	ピッチング計、ローリング計
トルク	1215 <sup>kN-m</sup> (α:18)
回転数	1.04 <sup>RPM</sup>
電動機	22 <sup>KW</sup> ×4 <sup>P</sup> ×400 <sup>V</sup> ×6 <sup>台</sup>
排土量	55 <sup>m<sup>3</sup>/h</sup>
スクリー径	φ500×P400
トルク	17.4 <sup>kN-m</sup>
回転数	12.0 <sup>RPM</sup> (max)
ゲートジャッキ	105 <sup>kN</sup> ×550 <sup>st</sup> ×21 <sup>MPa</sup> ×1 <sup>本</sup>
電動機	22 <sup>KW</sup> ×4 <sup>P</sup> ×400 <sup>V</sup> ×1 <sup>台</sup>
電源	AC400 <sup>V</sup> 50 <sup>Hz</sup> 3 <sup>P</sup>



写真-3 掘進機内殻搬入状況

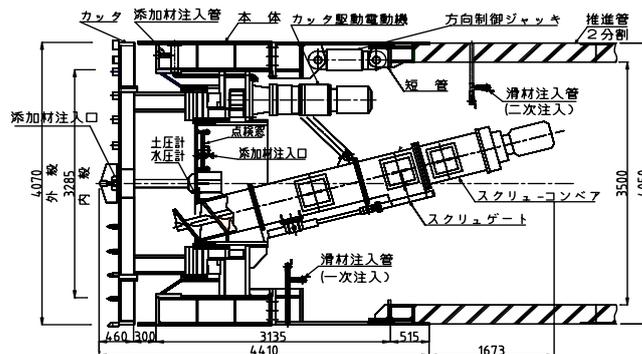
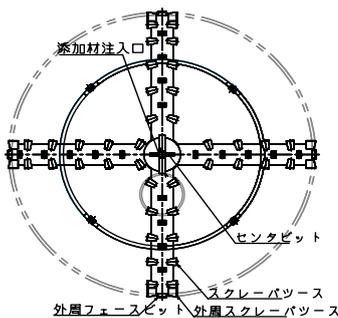


図-6 掘進機概要図

### 分割回収型掘進機「やどかり君」組立状況

① 押し角・元押ジャッキ組立完了



② 外殻（下部）投入



③ 本体後部（下部）投入・組立



④ 内殻投入・組立



⑤ 外殻（上部）投入・組立



⑥ 本体後部（上部）投入・組立



⑦ 短管投入・組立



⑧ スクリュ投入・組立



⑨ 押輪投入・組立



#### 4. 3 スーパーエル工法（二層滑材注入工法）

当工法は、推進管の周囲に縁切層を形成する方式で、本掘進機は後胴径を推進管外径より大きくし、さらに、前胴外径を後胴径より拡径しておく。推進時には前胴と後胴のボイド部に固結型の一次注入を行うとともに、後胴と推進管のボイド部に液性の二次注入を実施する。このことによって一次滑材層により二次滑材の地下水への希釈や地山への逸散を防止し、液性滑材の効果を十分に発揮させ推力の低減を図るものである。

また、当工法は一次滑材に固結型滑材を使用することで管の周辺地山に浸透してサンドゲル状態となり、地

山の緩み防止にも寄与する。

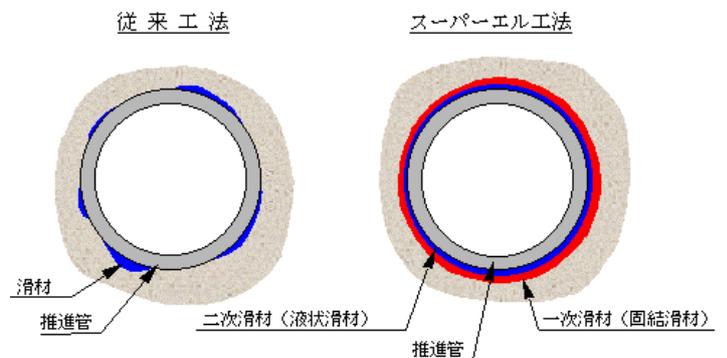


図-7 スーパーエル工法概要図

## 5. 施工結果報告

### 5. 1 推力の推移

総推力は9780kNとなり、ほぼ計画通りの結果となった。推力の推移を図-8に示す。

表-4 推力の比較

	総推力 kN	緑切時 最大推力 kN	中押設備	備考
計画総推力(下水道協会式)	19,383		2段	通常の滑材注入
計画総推力(スーパーエル工法)	9,771		不要	二層滑材注入
総推力(施工結果)	9,780	9,810	不要	二層滑材注入

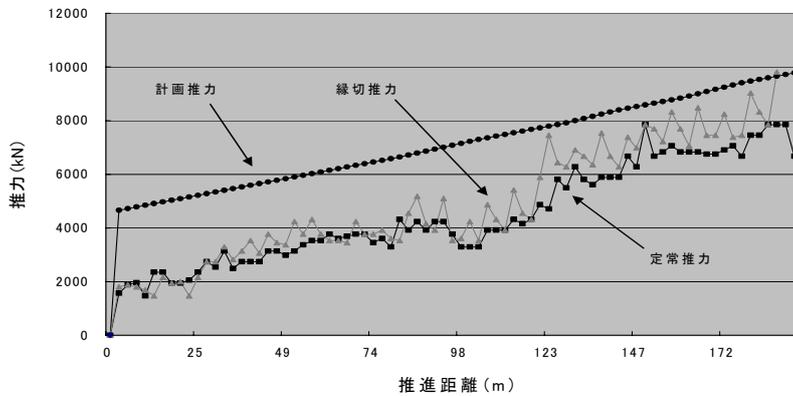


図-8 推力推移グラフ

### 5. 3 JR 高架橋計測結果

推進工はJR総武線高架橋橋脚との近接施工となるため、FEMによる解析を予め実施し、フチングの変位として水平3.4mm、鉛直0.0mm、杭の応力照査も許容値以下であることを確認している。しかし施工においては予測と異なることもあるため、推進管が通過する両端の橋脚で沈下、傾斜の計測工を実施した。その結果、変位は表-5に示す通り、警戒値の1/4~1/5となっており、気温の変化による変動を考慮すれば、ほぼ変位は皆無と判断される。

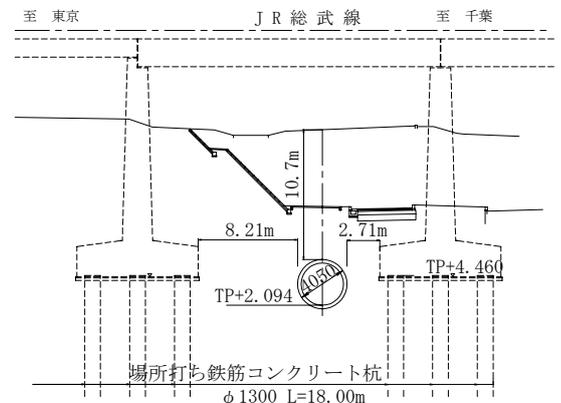


図-9 JR 高架基礎近接部概要

### 5. 2 PC 推進管適用結果

施工にともなうPC推進管の割れ欠け、クラック、漏水ともに全く認められず、良好な施工結果を得た。

推進時におけるPC推進管の挙動として、

- ① 2分割継手面の挙動、
- ② 管接続部の抜け出し量、
- ③ 表面ひずみ、

等について推進時に連続的な計測を実施した。到達後間もないため、現在、取得データの解析中である。機会があれば、これらについても報告したい。

現場での管の組立作業において最も時間を要した作業は、カラーの溶接であった。組立作業の効率化のため、溶接に代わるカラーの接合方法の検討が必要であると考える。

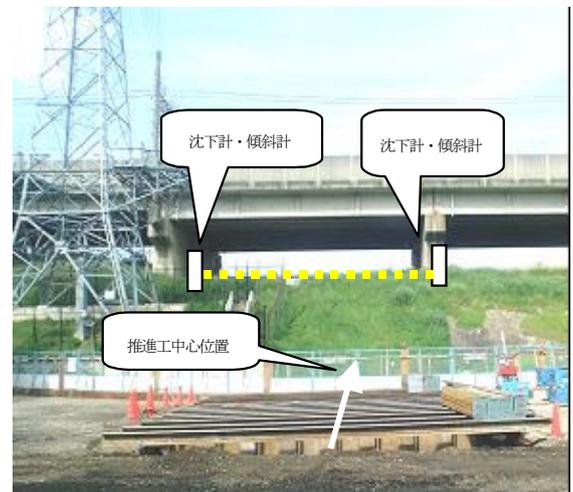


写真-5 計測概要

表-5 計測結果

計測項目		計測機器	警戒値	限界値	最大値 (実測値)
高架橋 基礎	沈下	水盛式 沈下計	1.5mm	3.0mm	0.3mm
	傾斜	設置型 傾斜計	2.5分	5.0分	0.5分

#### 5. 4 目地開口長

到達時の推進管全本数についての目地開口長の変位状況を図-10に示す。管の目地部には、厚さ 20mm の目地開口長調整材を貼付している（管 No. 72~78 は  $t=10\text{mm}$  クッション材のみ）。算定上、 $R=200\text{m}$  区間の左右差は 49mm となる。実際の左右差は  $R=200\text{m}$  の BC 手前から曲線中間部にかけてほぼ比例増加し、最大値が 63mm となり、 $R=300\text{m}$  区間では 38 mm となった。これは、推進路線の全線に亘って軟弱な腐植土層となるため、曲線外側の地盤反力が不足傾向にあったため、数値にばらつきが出たものと考えられる。施工時において  $R=200\text{m}$  区間で、目地開口長が最大 76mm となった箇所があったが、推進に伴い、隣接する管に徐々に開口長が分散していく傾向を確認した。

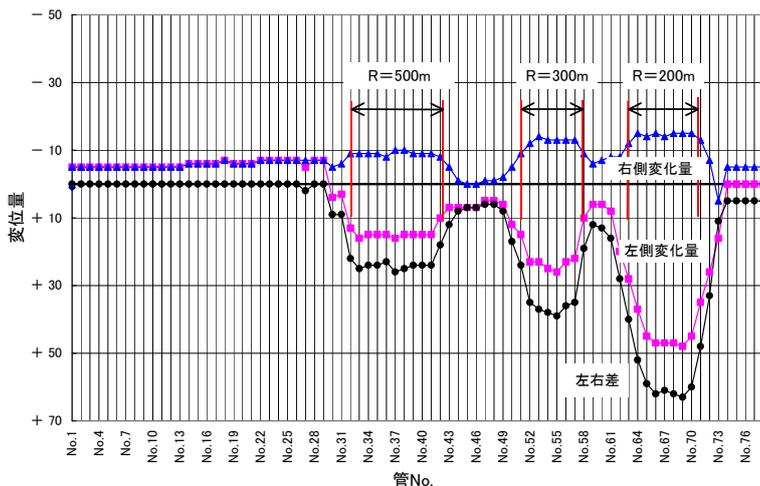


図-10 目地開口長

#### 6. おわりに

平成 17 年 7 月末に発進し、9 月末に無事到達した。9 月 30 日現在、掘進機の解体および引き戻しの準備作業中である。

掘進は、初期掘進（6 本）に実働 13 日間、本掘進に 38 日間を要し、当初目標日進量（3 本/日）の半分（1.5 本/日（12h））の結果となった。これは、掘進中ほぼ全線に亘ってコンクリートガラや木材等の障害物が出現し、排土装置の改良や障害物撤去作業を実施したことに起因す

る。したがって、特殊な事情（障害物）がないものとなれば 2 本/日（12h）の施工は十分可能である。

次期工事（掘進機引き戻し後、今回とはほぼ同距離のもう 1 スパンの施工を控えている。）に、今回の施工経験を十分に生かしたいと考える。



写真-6 発進基地全景



写真-7 管内状況



写真-8 到達

## 27. 翼推進工法の工事への適用

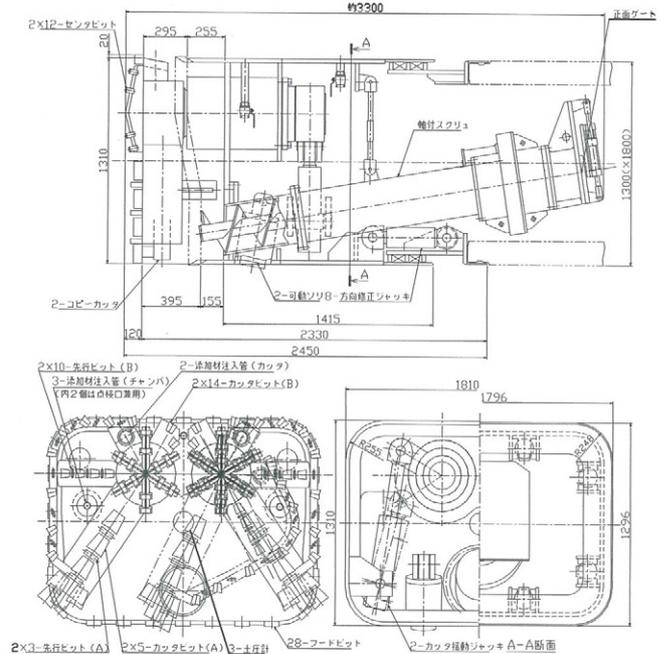
○銭高組 森 正嗣  
 銭高組 南葉 昭雄  
 日立造船 高橋 慎吾

### 1. はじめに

近年大都市圏の地下ではインフラが整備されガス、水道、下水道等の埋設管や地下鉄等の構造物が輻輳し、新たな管渠の敷設が困難な状況になっている。

そこで埋設物間に必要断面を確保できる扁平矩形推進機を開発した。矩形断面掘削機は一般に掘削機の中心軸を回転中心としたカッタで切削するため、矩形トンネルは正方形に近い形状となる。そのため扁平率が大きい場合その対応は難しい。翼推進工法の翼掘削機は1対のカッタヘッドを揺動することによって、様々な形状の断面が切削でき、大きな扁平率の矩形断面にも対応できる機構となっている。

本報文では自由な断面形状が掘削できる、翼推進工法の概要と、施工実績について紹介する。



### 2. 翼推進工法

#### 2-1 翼推進機の概要

(図1)(写真1)に、掘削機(翼推進)を示す。

翼推進機は、推進工法およびシールド工法に適用できるもので、左右1対の翼形状のカッタヘッドが、車に取り付けてあるワイパーのように往復揺動することによって矩形や円形、楕円形など様々な形状の都市トンネルの構築を可能とする。(図2参照)

また、中折れジャッキを装備して方向制御を容易とした。



写真1



図2

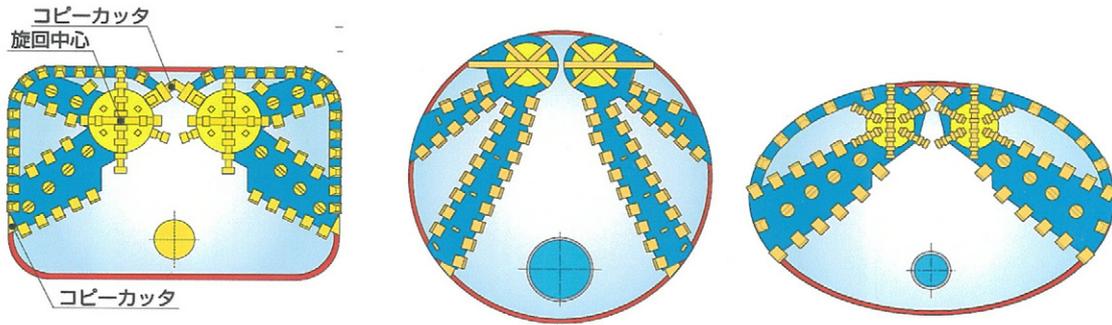


図3

翼推進機の特長として次の事項があげられる。

①様々な断面形状に適用が可能

翼推進機は、左右1対のカッタの回転中心が、トンネル中心よりも上部に偏芯して配置されている。またカッタは、トンネル断面の輪郭線に倣う形状の輪郭部を持っている。輪郭部にはカッタビットが配列されており、下部に未切削部が発生する場合にはコピーカッタを装備する。この左右のカッタが揺動することにより矩形、楕円形および円形等の様々な形状に適用できる。(矩形の場合は縦寸法および横寸法比が自在に選定できる。) (図3参照)

②シンプルな構造の推進機

一般に油圧モーターや電動モーターによるカッタの駆動は、大型のリングギヤや軸受けを使用するため、機内バルクヘッド部の構造が複雑となるが、翼推進機は、翼形状のカッタを油圧ジャッキの伸縮で駆動させることによって機内はシンプルな構造となっている。また揺動式カッタヘッドは、装備する油圧機器のためのスィベルジョイントを必要とせず直接油圧ホースが接続できる。これらの構造から同一断面の円形推進機と比較して、翼掘進機は重量、コストを低減できる。

③小口径への適用が可能

翼推進機は、駆動部の揺動ジャッキが最小径で□ 800 mm×800mmに収納できることから、小口径への適用が可能である。

④ローリング修正

矩形断面の場合、推進管がローリングした場合、出来形に直接影響し、推進機の修正も困難であった。翼推進機はローリング修正用の可動ソリをトンネル中心線を対象に左右に取り付けローリングの修正を行った。さらにカッタに装備したコピーカッタを単独に制御し下部左右の余掘り量に差を付けることによって、ロー

リングの修正を行うように設計した。

⑤切羽の安定性

泥土圧タイプで切羽の安定性が高く低土被りでの適用が可能である。また、密閉式泥土圧推進に位置づけられ、切羽安定のための補助工法を必要としない。また、添加材の対応によって幅広い土質での適用が可能である。

⑥隅角部外縁部が円弧状のボックスカルバート

一般のボックスカルバートは隅角部が90°であるが翼推進工法で使用するボックスカルバートは隅角部外縁部が円弧状になっている。これによって滑材注入口から注入された滑材の外周部への回り込みが良く、推進力の低減が図れ、ローリング修正が行い易い特性を持つ。

また、接続部の止水ゴムリングは、隅角部でのなじみが良く止水性が向上する。

当工事では内面に硫化水素に耐食性がある塩化ビニル樹脂を一体成型した。ボックスカルバートを(写真2)に示す。



写真2

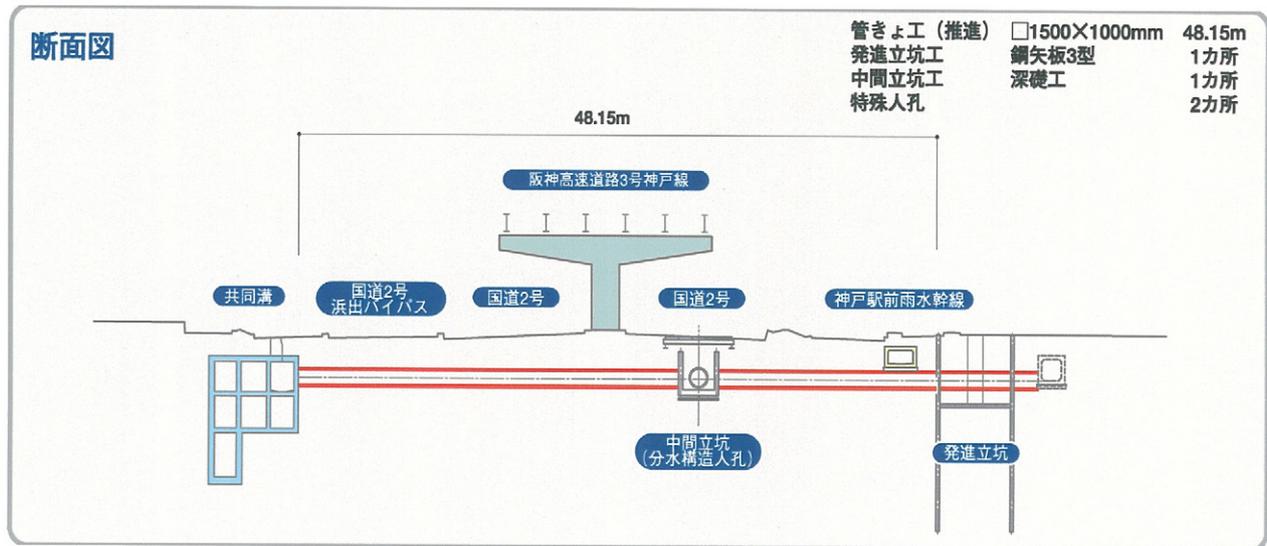
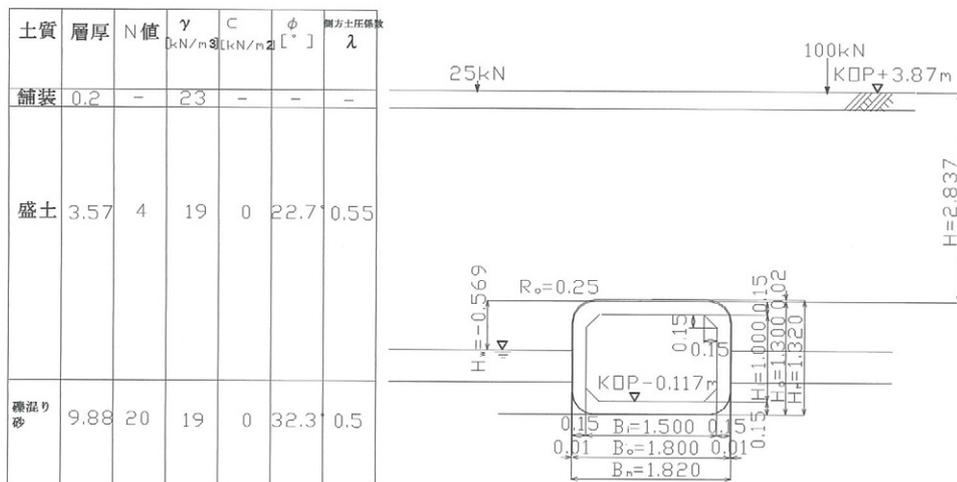


図4



ただし、長さの単位は[m]である。  
 地下水位以下では水中単位体積重量  $\gamma' = \gamma - 10$  [kN/m<sup>3</sup>] を使用する。

図5

### 3. 工事概要

本工事は、既成市街地の高度化に伴う汚水量の増加に対応するため、既設污水管と共同溝築造に伴い新設された污水幹線を接続するものである。図4に施工部の断面図を示す。

施工条件として、ポンプ場位置（上流側・図右）と共同溝位置（下流側・図左）を接続するものである。さらに、途中に神戸駅前雨水幹線の暗渠（□2400mm×1200mm）とNTTとう道（HPφ2200mm）が埋設管渠として近接しているため、必要流量確保の観点から仕上がり横寸法1.5m、縦寸法1.0mの矩形断面となる。また、埋設する管渠の土被りが平均で2.4mと浅いため、当初は開削工が考えられたが、交通量の多い国道を横

断するなどの条件から非開削工法になった。

#### 3-1 地盤条件

当該工区はN値が10以下の砂質土地盤を対象とすることや、既設埋設管渠が多数存在するなど縦断的な制約が多いため、縦横比の自在性が高い矩形断面の密閉式矩形推進工法（翼推進工法）が採用された。

現場で採取した掘削断面の土質は、礫分28%、砂分68.4%、細粒分3.6%、地山含水比  $w=15.15\%$  であり、中砂から粗砂が主体で均等係数6.5の砂質土で添加材の調整が重要であった。配合試験の結果、細粒分の補給と土砂のまとまりの良さから鉱物系と高分子系の複合添加材を使用することとした。

当該工事の地盤条件を（図5）に示す。

## 4. 実 施 工

### 4-1 推進準備

地上設備として翼推進機のパワーユニット及び中央制御盤、元押しジャッキ用油圧ユニット、加泥材プラント、滑材プラントを設置した。推進機は地上からの遠隔操作で、駆動用の油圧ホース、制御用ケーブル等は推進と同時に順次延長するようにワンタッチジョイントとした。坑口にエントランスパッキンを取り付けた後、翼推進機を所定の位置に設置した。

発進坑口に矩形のエントランスパッキンを取り付けるとともに、発進時にカッタの揺動により推進機が左右に振れる恐れがあるので鋼材で推進機を取り巻く、門型の振れ止めを取り付け、矩形推進機の外周をクサビにより固定した。

### 4-2 推進計画と施工結果

#### (1) カッタトルク

揺動運動によるカッタトルクの設定では、円形シールドにおけるトルク係数のような判断基準がないため、砂の緩みに対する押し上げトルクを考慮した設計を行った。またカッタ輪郭部となる外周プレートが地盤の間に土砂を圧密することが考えられるため、外周プレートをテーパーにして、掘削された土砂がチャンバ内に流動し、地盤に圧密されない構造とした。

掘進では、カッタトルクが高めに推移し、地山との干渉も認められたが、推進機刃口に取り付けたフードビットが効果的に働いたと考えられる。

#### (2) 推進力

推進力は砂のため土・水圧を分離し、設計用土圧は全土被り分とした。

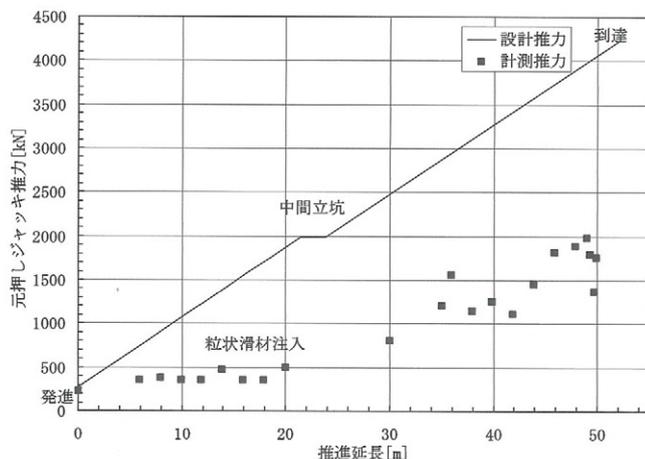


図6

初期抵抗力は、設計値の83%であり、カルバートでの計測土圧は隅角部外縁を円弧にしたこともあり、上方の砂の緩みを低減でき、設計値の40%程度となった。そのため到達付近での元押しジャッキ推力は設計値の34~50%となった。(図6参照)

#### (3) 方向制御

発進時は推進機のカッタ揺動の反力による本体の左右への振れもなく発進した。推進機には中折れジャッキ、可動ソリを装備しており方向制御、ローリング制御も順調に作動し高い精度で到達することができた。到達状況を(写真3)に示す



写真3

## 5. おわりに

翼推進工法は都市部の狭隘な地下空間に、翼掘進機によって扁平断面や自由な断面を構築し有効に利用することを目的として開発した。今回の施工実績を解析し、さらに翼推進工法の改良を重ねていきたい。

今後は、本技術を確認し、懸案となっている都市再開発の推進にともなうアンダーパス工事等に、扁平矩形断面を利用して、トンネル外郭部の先行掘削で大断面を構築する工法等、新たな展開を考えていきたい。

最後に技術開発ならびに工事にご協力頂きました関係各位に深く感謝申し上げます。

## 28. シールドを用いた場所打ち支保システムの開発と適用

熊谷・東洋・大本・井上特定建設企業体：○千代 啓三、川嶋 潤二  
 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東北新幹線局：井浦 智実

### 1. はじめに

一般に、地盤の堅固な山岳地域では NATM が、地盤が軟弱で自立することが望めない都市部ではシールド工法が標準工法として採用されてきた。しかし、近年、山岳地域では未固結の比較的不安定な地盤に対して NATM を、また、都市部では地盤の比較的堅固な大深度にシールド工法を適用する試みが見られる。これらの NATM とシールド工法の境界領域に対しては、切羽の安定性、安全性、工期の点で、シールド工法が優位であるが、経済性で NATM の方が優れており、両方の利点を兼ね備えた工法の開発が期待されている。

本論文で検討する三本木原トンネルは、図-1のように、含水未固結の砂質土地盤が主な対象となっており、NATM とシールド工法のまさに境界領域と言える地盤である。

本論文は上記のような背景をもとに、三本木原トンネルを対象に開発した「シールドを用いた場所打ち支保システム (SENS)」について概説する。また、構成する技術のうち、課題であった場所打ちコンクリート打設システムに特に注目し説明するとともに

に、実施工への適用結果と今後の展望について報告するものである。

### 2. 三本木原トンネルの概要と問題点



写真-1 NATM 施工における切羽崩落状況

三本木原トンネルは東北新幹線（八戸・新青森間）の建設工事の一部で、延長が 4,280m の新幹線複線断面トンネルである。また、三本木原トンネルで掘削対象となる地盤は主に未固結の帯水砂質土層で構成されている。

平成 13 年 8 月に、青森方坑口より NATM による

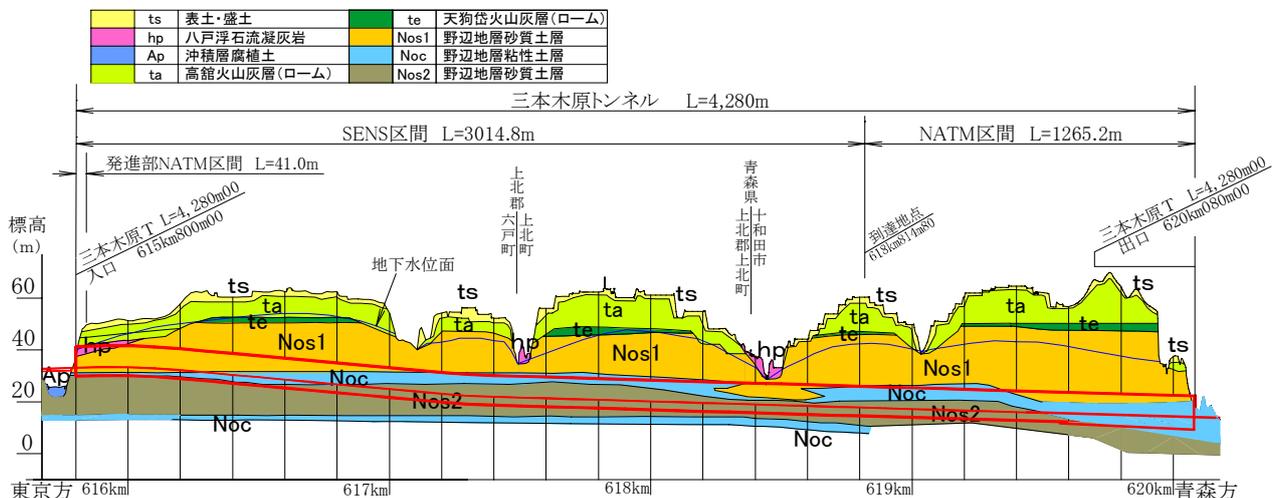


図-1 トンネル縦断面図

掘削を開始した。切羽面が不安定なため、地下水位低下工法や注入式長尺先受工などの補助工法を併用したが、写真-1のように、砂質土層が崩落し、平成14年には2度切羽の進行が停止した<sup>1)</sup>。このため、NATMによる掘削工事の安全性、補助工法の採用による経済性および施工性、掘削の低進行などが問題となった。

そこで、シールド工法を用いた新しい施工システムを開発し、NATMによる掘削を1,265.2mで終了し、反対側の東京方坑口より残り約3,000mの掘削を行うことを計画した。

### 3. SENSの開発

#### (1) SENSの概要

本工法の開発目的は、三本木原トンネルのように、地山条件等により補助工法の効果が十分に期待できず、切羽の自立が困難な層が含まれる場合に対し、シールド工法の“安全性”と“進行”，NATMの“経済性”を同時に満たす工法を確立することにある。

トンネル掘削工法には、「切羽保持」、「排土」、「覆工（内空断面の保持）」の3つの機能が必要であるが、前述のような経緯から新工法では、シールドを用いて「切羽保持」の機能を果たすことにより、切羽の安全性と進行の改善を期待した。また、シールド内の「排土」もシールドの装備で行う。

次に、覆工の考え方について説明する。シールド工法では一般にセグメントを使用しているが、セグメントは、NATMの吹付けコンクリートに比べ、製作精度が高く、止水性や外観の点で高い性能を有しているが、その反面経済性が劣る。新工法では一次覆工に対する要求性能をNATMと同様に考えて、内空変位等の坑内計測を通じて覆工の健全性を確認する必要はあるが、クラックや土砂をともしない漏水は許容するものとした。上記の考え方にもとづいて、セグメントに比べ経済的な場所打ちコンクリートを採用した。外観や導水のため、防水シート工と二次覆工を実施するが、それでも、セグメントよりも経済的に覆工体を構築することが可能となった。

上記の特長から、本工法を『シールドを用いた場所打ち支保システム』と称し、シールド(Shield

tunneling method)、ECL(場所打ちコンクリート)、NATMの技術を組み合わせ、それぞれの利点を取り込んだ新しいシステム(System)であることからこれらの頭文字を取り、略称としてSENSと呼ぶこととした<sup>2)</sup>。

#### (2) 場所打ちコンクリートの問題点

場所打ちコンクリートは、打設直後は液圧で地山の変形に抵抗し、ある程度地山が変形した後に硬化コンクリートとして支保を形成する。このため、硬化コンクリートに作用する土荷重の影響が小さくなることが期待される。

一方、場所打ちコンクリートは、覆工としての機能を果たすが、過去の施工実績が少ないため、打設システムの計画を十分検討する必要があった。打設システムの計画時に検討課題となった事項を以下に列挙する。

- 掘進と同時に、コンクリートがテールボイド全域に確実に充填されるための方法
- 型枠組立、掘進の施工サイクルの中でコンクリートを打設するため、圧送中のコンクリートの硬化対策
- 掘進完了後のコンクリートの清掃手順やコンクリート注入孔の閉鎖の方法

#### (3) 三本木原トンネルへのSENSの適用

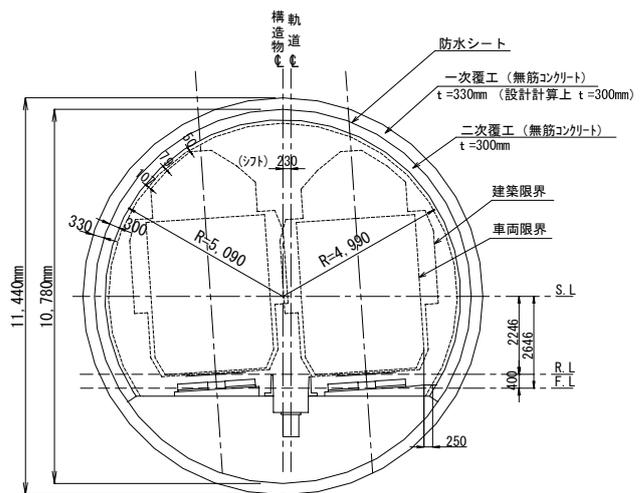


図-2 トンネル断面図(曲線部 R=8,000m)

三本木原トンネルのSENS区間の覆工断面を図-2に示す。図のように一次覆工は外径11.44m、覆工厚330mm(設計有効厚さ300m)で、その内側

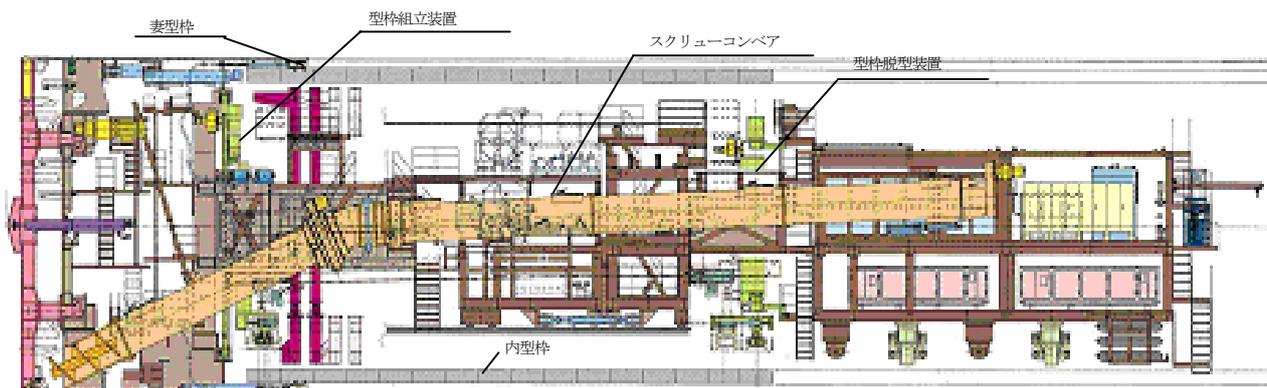


図-3 シールド全体図

に、NATM と同様にインバートコンクリートと化粧巻きとしての厚さ300mmの二次覆工を打設する。

三本木原トンネルでは新たな工法を適用したため、多くの課題が存在したが、本稿では、上記の課題に対し、SENS を適用した三本木原トンネルの施工設備、特に場所打ちコンクリート打設システムの概要と問題点を中心に説明する。

#### 4. 三本木原トンネルにおける施工設備

##### (1) シールド

SENS で使用するシールドは密閉型としている。これは、開放型の場合、テールで打設したコンクリート圧力がシールド外周を介して解放され、密実なコンクリートが打設できないためである。三本木原トンネルでは、図-3のように土圧式シールドを採用した。

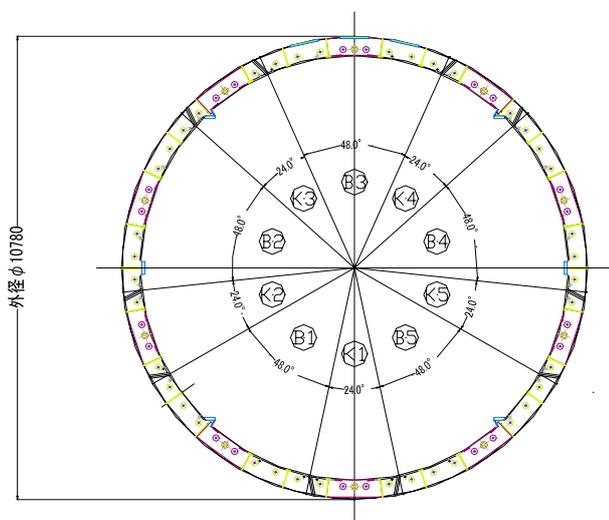


図-4 内型枠断面図

内型枠は、1.2m 幅の鋼製型枠を16リング使用している。図-4のように、1リングは10ピースに分割されており、どの位置からも脱型できるように半径方向挿入式のKピースとBピースの組み合わせとしている。

シールドには、本体に型枠組立装置を、後続台車に型枠脱型装置を装備しており、型枠脱型装置で脱型した型枠をホイストで切羽側に搬送し、テール内の型枠組立装置で組み立てるという方法で16リングの型枠を繰り返し使用する。

型枠のリング数は、以下のようにして決定した。シールドの推力は、コンクリートと内型枠外面との付着力を利用しており、コンクリートと型枠の付着

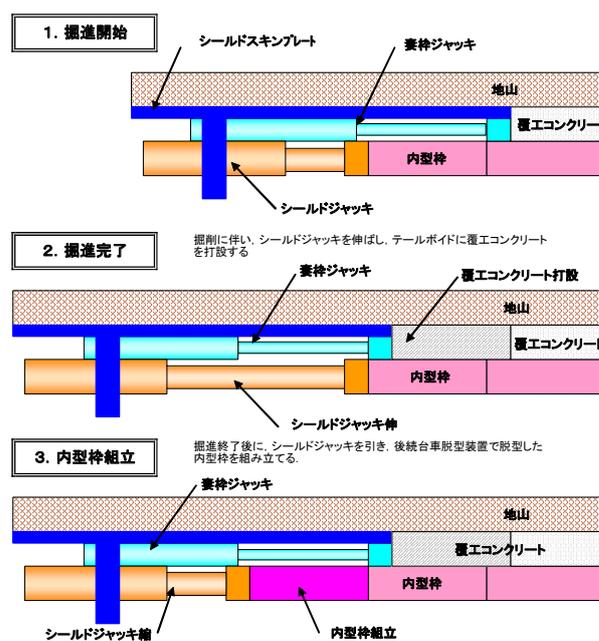


図-5 コンクリート打設順序模式図

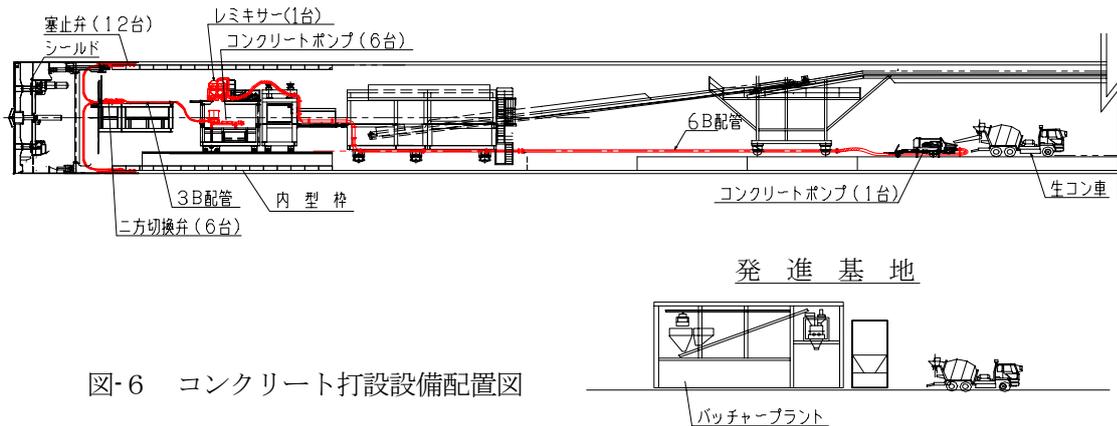


図-6 コンクリート打設設備配置図

力を  $200\text{kN/m}^2$  として計算した結果、付着力を確保するために7リングが必要となった。このため、コンクリート強度が発現する24時間の間に8リング進むことから、脱型する1リングを加えて合計16リングを装備している。

## (2) コンクリート打設システム

図-5にコンクリートの打設順序の模式図を示す。一次覆工コンクリートは、掘進にともなって発生するテールボイドに、確実に充填されなければならない。また、固結前のコンクリートを機内に抱えた状態で掘進するため、施工中の些細なトラブルでも1~2時間の短い時間で解決しなければ、掘進を停止する必要も生じる。このため、三本木原トンネルでは過去のECL施工例でのコンクリート打設システムの問題点を検討し、次のようなコンクリート打設システムを採用した。

### 1) 打設ルート・設備

コンクリート打設に関する設備の配置を図-6に示す。打設設備の故障や作動不良が掘進を円滑に行う障害となるため、システムの選定にあたってはこれまでの使用実績や動作の信頼性に留意した。また、軽微な故障であれば、バックアップ可能な設備とするように計画した。その特性は、以下のとおりである。

- ・ コンクリートは、トンネル内はアジテータトラックで運搬され、シールドの後方約25mに設置したコンクリート供給ポンプで後続台車上のレミキサーまで6インチ管を通して圧送される。
- ・ シールド内にコンクリート打設ポンプを6台設置し、それぞれのポンプに二方向切替弁を配置

して合計12箇所の打設孔から打設を行う。配管は3インチとし、コンクリートポンプは少量でも打設量の調整が可能なものを使用し、1台の故障であれば残りの5台でバックアップできる能力を有している。

- ・ コンクリート打設孔は、過去の事例を参考にして3m程度の間隔とし、写真-2のように12箇所の打設孔を配置した。

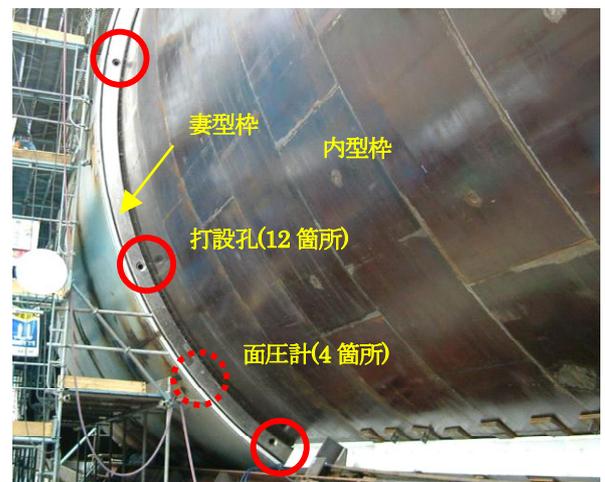


写真-2 打設孔配置状況

### 2) 塞止弁

掘進を停止した際には、配管内に残ったコンクリートを清掃するために、速やかにコンクリート打設孔を塞ぎ、配管内の残留したコンクリートと覆工コンクリートを分離する必要がある。このため、写真-3のように、コンクリートは分岐管を経由したルートで送り、油圧ジャッキ式の塞止弁で打設孔を閉鎖することとした。

図-7に塞止弁の構造図を、また、写真-4にコンクリート側から見た塞止弁開閉状況の写真を示す。

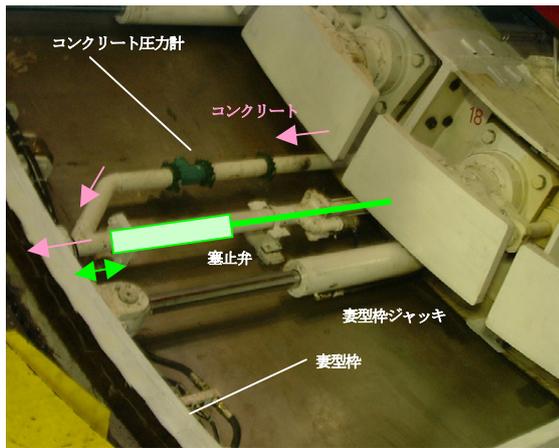


写真-3 塞止弁組立完了状況

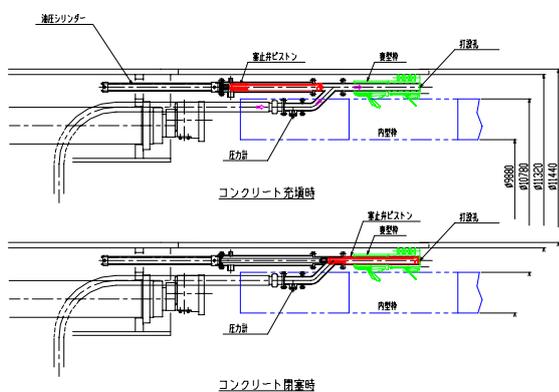


図-7 塞止弁構造図



写真-4 塞止弁開閉状況写真

### 3) 打設制御システム

コンクリートの打設ポンプが6台あるため、打設管理が複雑である。このため、打設率を設定すれば、掘進速度に応じてポンプの打設速度を自動的に調整できるソフトを使用している。これにともなって、6系統のコンクリート配管に対して、コンクリート圧力計を打設ポンプ口元1箇所、打設孔2箇所に、妻型枠1箇所の各4箇所に、流量計をポンプ口元の各1箇所に設置している。

### (3) コンクリートの開発

コンクリート品質には、施工上の制約から、表-

1のような厳しい条件が求められた。このため、特殊増粘剤や高性能AE減水剤を使用してこれらの要求を満足するコンクリートを開発した。開発にあたっては、各品質を確認するため、室内でポンプ圧送試験や充填性確認試験を、現地でも同様にポンプ圧送試験を実施し、コンクリートの性能を確認した。また、施工においても圧縮強度、スランプフロー、水中不分離性等の測定を行い、品質の日常管理を行っている。

表-1 コンクリートの要求品質

品質項目	要求品質
流動性	練りあがりから打ち込みまでの想定時間である4時間は流動性を保持すること
充填性	テールボイドに確実に充填できること
分離抵抗性	流動・充填時に分離しないこと
水中不分離性	地下水圧の加わる場所での打ち込みの際しセメント粒子の逸散を抑えられること
ポンプ圧送性	施工に必要な量の圧送が可能で、圧送後にその他の品質が低下しないこと
強度発現性	材齢1日における強度が15N/mm <sup>2</sup> 以上であること

コンクリートの日常管理を行う中で、これらの品質のうち、特に、流動性、ポンプ圧送性、強度発現性は、温度による変動が大きいことがわかった。このため、今後、気温によって適切な添加剤の配合量を選定する必要がある。

## 5. 施工状況

### (1) 進行

掘進速度は毎分15mm程度で、1リング約1.5時間、また、型枠組立に約1.0時間必要なため、1リングあたり少なくとも約2.5時間を要する。型枠の脱型は、型枠組立や掘進と平行して実施している。作業はコンクリートを抱えているため24時間連続して行っており、1日の進捗としては8~10リングである。ただし、以下のような理由から連続した掘進は最大でも16リングとしている。

- ・ 連続して掘進するとコンクリート配管やポンプホッパー内の滞留箇所のコンクリートが固結し、ポンプ圧力の上昇や閉塞の原因となる。

- ・ 打設したコンクリートが妻型枠に付着して、コンクリートがテールボイドに完全に充填されるのを阻害する。
- ・ 後続台車が走行するための一次インバートコンクリートを打設する必要がある。

このため、1.5～2日間連続して掘進した後は、0.5日掘進を停止して、配管やポンプの清掃メンテナンスを行い、その後、再度掘進を再開するというサイクルで施工を行っている。

また、図-8に示すように、妻型枠のテールブラシ背面に固結したコンクリートが蓄積し、テールブラシの型枠に対する柔軟な追従を妨げることがわかった。このため、約100リング掘進を行うと、2日程度要して、妻型枠をシールド側に引き出し、テールブラシの背面を清掃している。

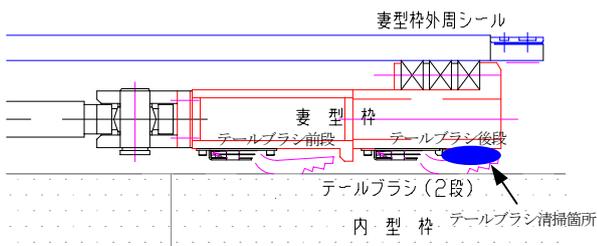


図-8 妻型枠テールブラシ背面清掃箇所

掘進は、8月末現在で約1200mを完了した。また、月進では、最高166.8mを記録しており、上記のようなシールド工法にはない工程が必要となるものの、同トンネルのNATMによる施工に比べ大きな進捗を得ている。

## (2) 覆工コンクリートの出来形



写真-5 一次覆工コンクリート打設完了

脱型後の一次覆工コンクリートの写真を写真-5に示す。一次覆工コンクリートには、掘進停止時にできる打継目やコンクリートの収縮等にもなるクラックが発生しているが、クラック幅も0.3mm以下のものがほとんどで土砂を引き込むような漏水は確認されていない。また、坑内計測の結果、トンネルの変位もほとんど確認されておらず、構造的に問題となるようなクラックは発生していない。

## (3) 周辺地盤への影響

シールド通過時の地盤の影響を測定した結果、土被りが1D程度の小土被りの箇所では、コンクリート打設時に地表面が10mm程度隆起したが、土被りが2D程度の箇所ではほとんど地表面の変位が見られなかった。

## 6. おわりに

三本木原トンネルでは、一次覆工コンクリートはNATMの吹付けコンクリートと比較して十分な性能を有していることが確認できており、早期の掘進完了を目指して施工を進めているところである。

ただし、今後、連続掘進が可能なリング数を増やし、妻型枠テールブラシ背面の清掃を不要とするような工夫を行うことによって、飛躍的に進捗を増やすことができると考える。また、コンクリート清掃方法など設備を工夫することでより省力化することのできる点もある。

今後、三本木原トンネルでの実績と問題点を踏まえ、SENSがNATMとシールド工法の境界領域の地盤に対する工法として、選択肢を提供できるよう施工実績を積むとともに、工法の改善・研究を進めていく所存である。

## 参考文献

- 1) 蓼沼慶正他：含水未固結地山トンネルにおける切羽安定方策，トンネル工学研究論文・報告集，第13巻，2003年11月
- 2) 佐々木幹夫他：場所打ち支保システムによる山岳密閉シールド—東北新幹線 三本木原トンネル—，トンネルと地下，第36巻4号，2005年4月

## 29. シールドトンネル点検システムの開発

国土交通省 関東技術事務所 ○渡部 修  
(現 国土交通省 江戸川河川事務所) 二瓶 正康  
(社)日本建設機械化協会 施工総合研究所 安井 成豊

### 1. はじめに

首都圏外郭放水路は、市街地を流れる中川流域の洪水対策を目的とした大深度地下の大断面トンネル(内径φ10.6m)であり、「洪水に対応する地下河川としての機能の維持」、「国道16号線直下に位置し、構造上の安全性と耐久性の維持」等が求められる。

そこで首都圏外郭放水路トンネルの機能維持を図るため、トンネルの点検システムについて開発検討を行ったものである。

トンネルは地下鉄や下水道など多くの施工実績があるが、点検方法や点検項目、点検基準などは統一されたものは無いため、点検システム開発にあたり、放水路を管理する事務所と想定される点検の種類、点検項目、点検精度等、提示された開発条件に基づきトンネル内部の変状を確認するシステムを検討し、実現にむけた要素技術の調査・試験を行った。

### 2. 点検システムの検討

トンネルの点検では大きく分けると以下の2つの点検がある。

- ①出水期前後の定期点検
- ②地震や異状発生時などの緊急点検

点検実施にあたっては、有毒ガスや内部状況が不明等の問題があり人間が直接入ると危険を伴う「緊急点検」について検討することとした。

今回の開発条件は、

- ①内部の変形と亀裂が確認できる
- ②リアルタイムで状況を確認したい
- ③トンネル内に手を加えない

との3つの要望により、作業員が入れる環境にあるのか、インバート上はどのような状況になっているのか等を考慮して点検装置の検討を進め、また、詳細な点検時に必要とされる非破壊検査技術や無人調査のため

のデータ通信技術を調査し、実現場において要素試験をおこなった。

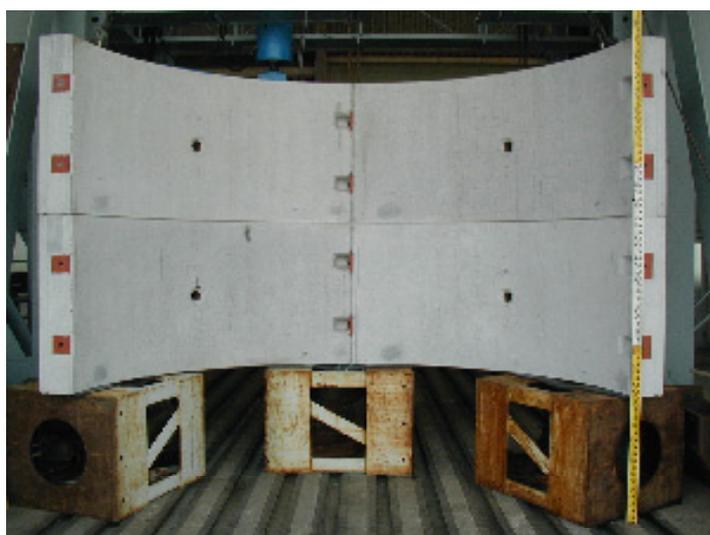
### 3. 要素試験

#### 3. 1 クラック計測技術

トンネル内部の異状確認として発生クラックの発見は重要であり、点検担当者が交代しても、変状箇所と現況が把握できるよう、画像として記録し保管する必要がある。

また、当初から特殊な検査装置を持つよりも、今後の検査技術の進歩(カメラ画像、情報処理速度の向上)に応じて装置を導入し、徐々に精度を向上させる等、汎用製品を活用した方が装置の発展性の上で有効である。

汎用のデジタルカメラ及びデジタルビデオカメラを用いたひび割れ検出装置について要素技術の試験を行うとともに当該トンネル内において模擬点検作業を行い、点検に必要な設計条件(照度、移動速度)等を確認した。



写真－1 試験体

試験体は外径φ3450mmのRCセグメントを用い、事前に0.02~0.8mmの幅のひび割れを発生させ、撮影幅、カメラ仕様(38万画素、140万画素等)、照度を変えて撮影した。

デジタルビデオカメラ及びデジタルカメラとも、撮影幅の変化に伴い検出可能となるひび割れ幅が変化することが確認され、特に照度の変化がひび割れ検出に大きく影響することを確認し下記のことが明確になった。

- ・撮影に必要な照度は500ルクス以上
- ・ビデオカメラによる移動点検時の速度は、2km/hr程度が望ましい。
- ・比較的大きなひび割れや欠け等の認識には14万画素以上で5m未満の距離で十分確認できる。
- ・ひび割れ幅等の確認を行うためには、258万画素以上のデジタルカメラにて近づけて撮影することが必要

また、民間で既に開発され、適用の可能性が考えられるレーザー式トンネル点検車を放水路トンネルに投入し、約100mの区間について点検作業を行い、点検方法としての有効性について検討し以下の結果を得た。



写真-2 点検車

- ・トンネル内部の状況を(欠け等を)確認可能。
- ・100m程度内面の画像を出力し検証、解析に要する期間は2週間。
- ・電子データとしてのボリュームは10m当たり約

14MB (9GB/6.3km)

- ・印刷出力は幅500mm用紙で100m当たり約1.4m (90m/6.3km)

### 3.2 内空断面変形計測技術

トンネル内面にターゲットを設置することなく、内空断面の形状変化が計測可能な技術として、レーザー方式を用いた計測技術について既存技術の調査を行った。調査の結果、1cm以下の精度にて計測可能な技術を採用し放水路トンネル内にて現地計測試験を実施した。

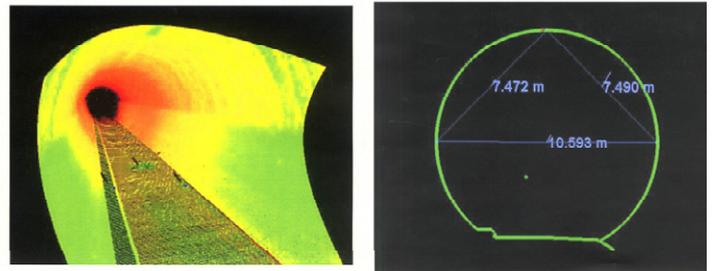


図-1 計測結果

試験結果は以下のとおりである。

- ・レーザー方式を用いた技術について、内空断面形状を必要な精度で計測可能。
- ・計測精度は11mの構造物で、約2mmの精度が確認された。
- ・内空断面の経時的変化を確認するためには、同位置断面を計測することが必要であり、そのために固定点となるポイントを設置する。

### 4. 初動点検システムの検討

緊急時はトンネル内に点検員に先駆けて入坑し内部確認を行う必要性があり、トンネル下部には河川からの流入土砂の堆積や流木等による走行移動の困難性が想定されるため飛行船方式を提案することとした。

飛行船にはビデオカメラを搭載し、運行させて内部の状況を収録し回収後、ビデオの再生画像によりトンネル内部の状況を速やかに把握して次の対応を判断しようとするものであり、初動点検試験用の飛行船の設計製作を行い、放水路トンネル内にて現地飛行試験を実施した。現地試験の結果、以下の内容が確認された。

- ・風向等の変化に伴い、飛行安定性が損なわれ風速

2～3 mが坑内に吹いた場合には飛行が困難となる状況が生じた。

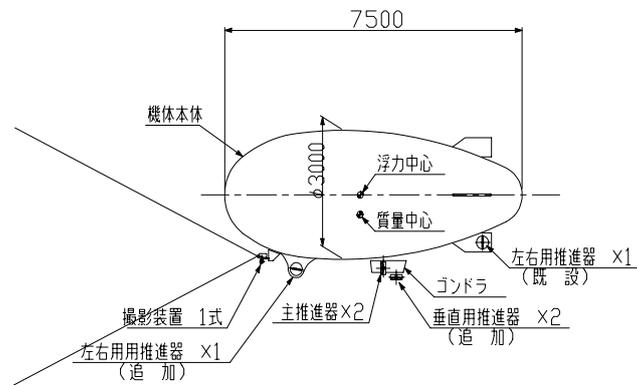
- ・曲線部等で、上部を接触しながらトンネルに沿って向きを変えることは、困難であることが確認。



写真－3 初期試験機

- ・風の影響がない場合には、飛行中はカメラのぶれ等の問題は生じないことが確認。
- ・必要推進力の確保とトンネル中心付近を飛行する制御方式の採用が必要。

上記課題に対する対策案を検討し、「推進器の出力アップ(推進器の増設)」「非接触自律飛行システム(超音波距離センサーを利用した制御)検討」飛行船の改造を実施した。



図－2 改造後試験機

飛行船は理論的に前後の推進器を制御しても姿勢制御が困難である、最適なフィードバックゲイン(距離

のずれを元にどの程度制御をかけるか)について各種試行し、曲線部を含むトンネル内の自律飛行を可能とした。



写真－4 改造後試験装置

- ・追い風0.3～1.0m/sの条件下において直線区間と曲線区間においてトンネル中心から上下左右1 m程度の範囲内にて自律制御して飛行を可能とした。
- ・飛行船に搭載したデジタルビデオカメラ(60万画素)にて撮影された画像にてトンネル前方全面の状態が把握可能であった。
- ・ただし、向かい風では安定性が損なわれ、自律飛行が困難であった。



写真－5 自律飛行状況

そこで、追い風や向かい風の多少の乱流が発生して  
た際にも安定して自律飛行が可能となるための飛行船  
形状や尾翼の影響等の最適化を図り、またリアルタイム  
で画像が見られるシステムについて改良した。

- 船首形状は、一般的な飛行船と同様に船首の曲率  
Rを大きい方が安定する。
- L/D（船体長/船体直径）にて安定な領域が多  
いケースは、2.0と3.0であった。
- 尾翼サイズが大きいほど安定性を増し、飛行船断  
面積の12%以上にて安定が確保される。

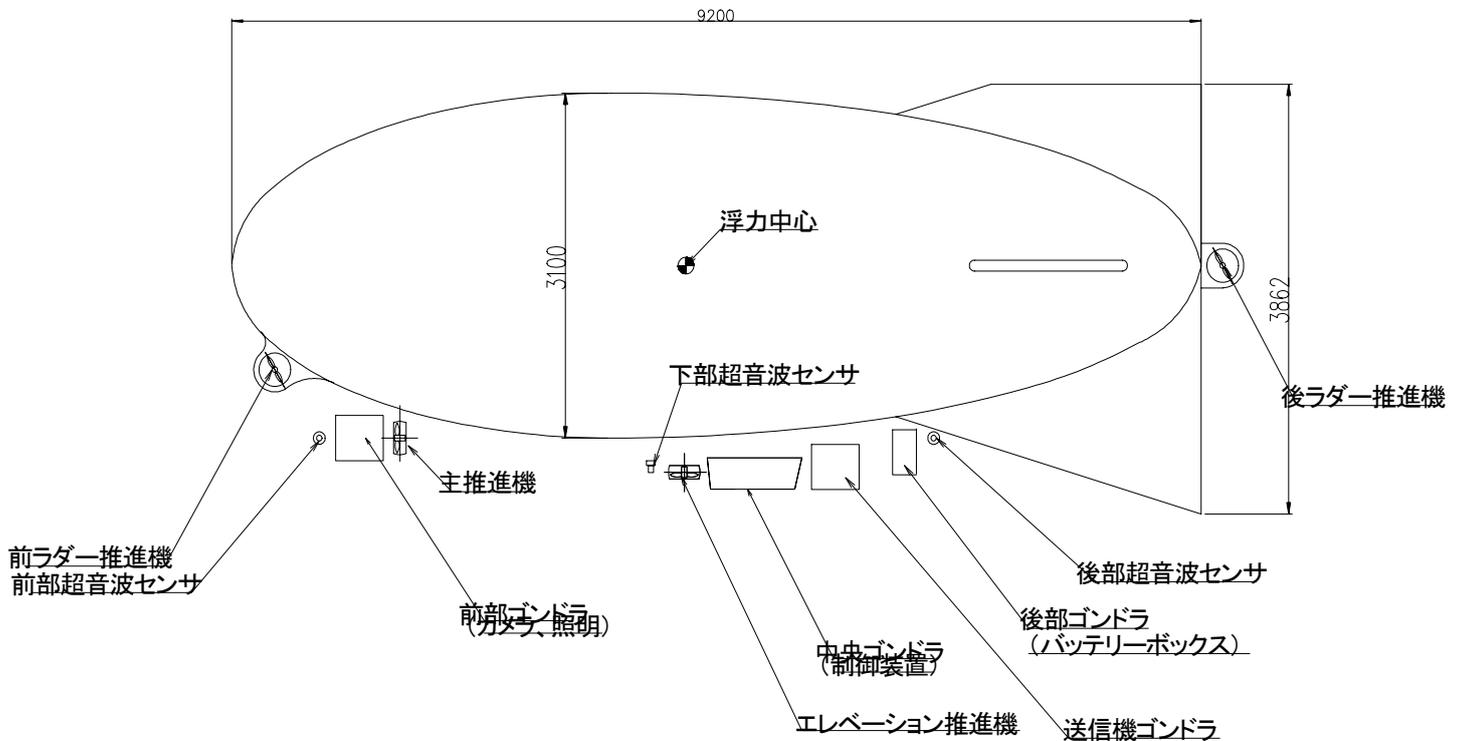


写真－6 風洞実験装置

縮小モデルを用いて、簡易な風洞実験を行った結果、  
下記の内容が確認された。



写真－7 改良後の試験装置

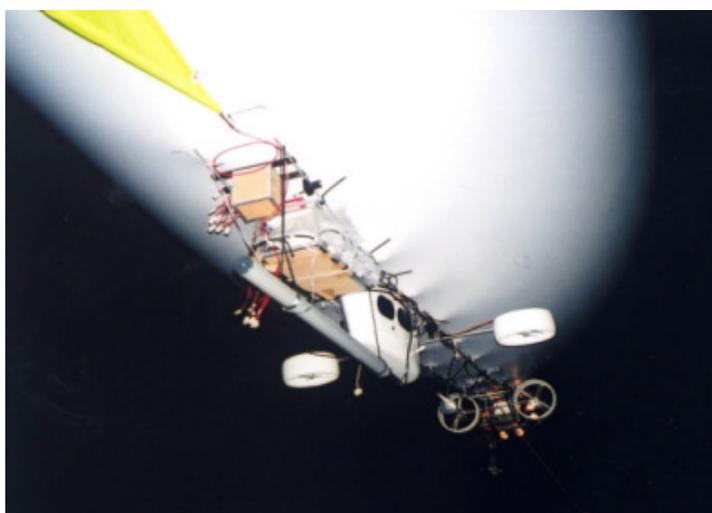


図－3 改良後試験機

画像送信方法としては、免許を必要としない特定小電力データ通信となる2.4GHzSS無線機を使用し、各種無線装置タイプ、アンテナ、画像圧縮方式を組合せ予備試験を行った結果、1000m以上の通信距離を確保できるのは、下記に示す組合せが最適であった。

- ・超長距離タイプ無線機
- ・27素子八木アンテナ
- ・MPEG4, 2（画像圧縮方式）

上記の結果、試験装置に無線機、アンテナ等を搭載し外郭放水路トンネル内において、飛行試験を行った。試験の結果、以下の内容が確認された。



写真－8 アンテナ等の搭載状況



写真－9 通信機搭載後の飛行状況

#### ①自律飛行について

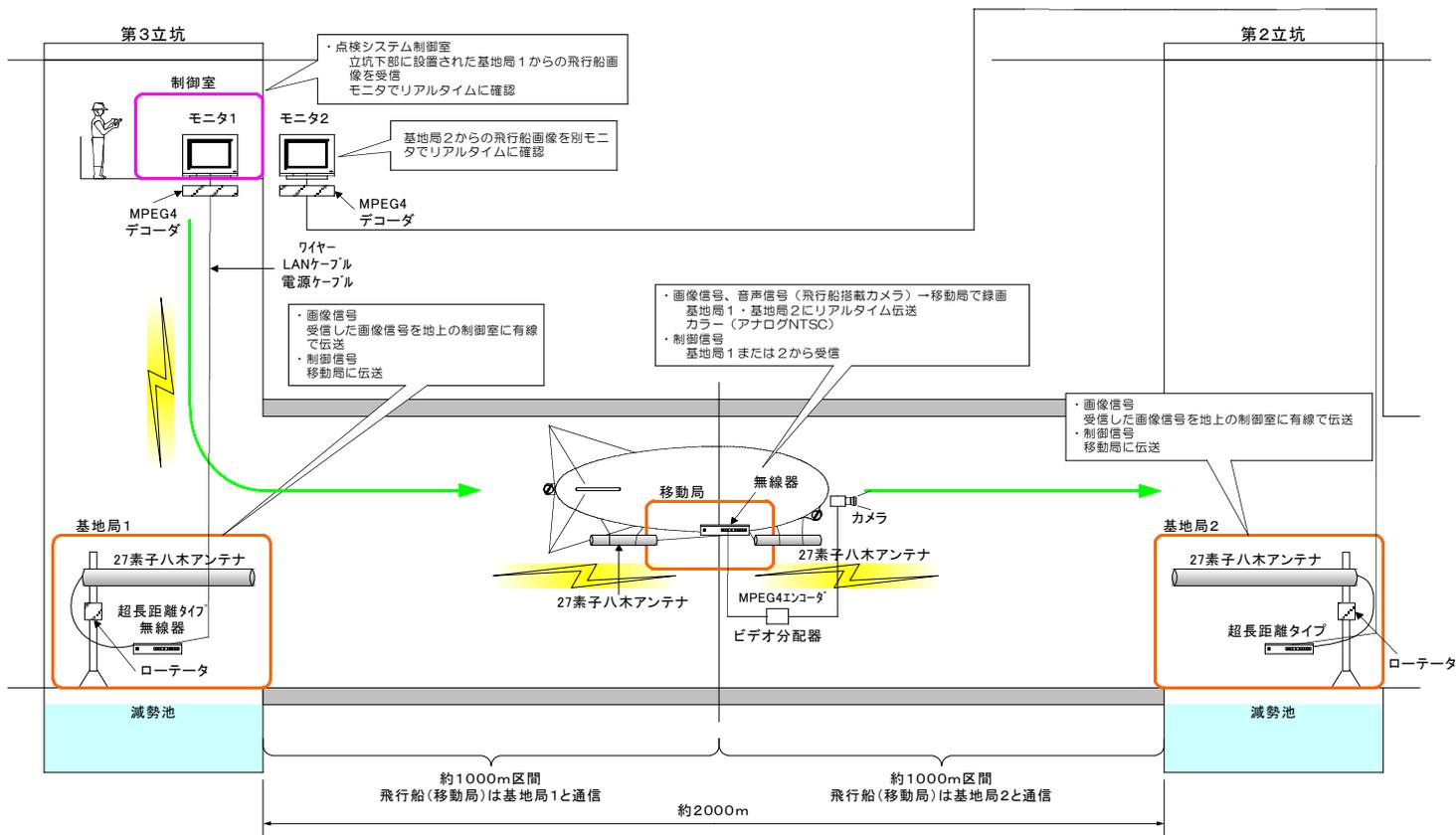
通信機搭載後、第3立坑から第2立坑に向かって自律飛行を実施した。その結果、追い風及び向かい風0.2～0.5m/sの条件下において直線区間と曲線半径250mのS字カーブを含む曲線区間においてトンネル中心から上下左右1m程度の範囲内にて自律制御を行いながら、立坑間距離約2kmを30分前後にて飛行可能とした。

#### ②画像送信について

飛行船に搭載したビデオカメラ（暗所撮影機能あり：20wハロゲンライト×8個）にて撮影された画像を第三立坑側（MPEG2圧縮）と第2立坑側（MPEG4圧縮）に無線送信した。そして、それぞれ基地局から約1km、約1.3kmの範囲でリアルタイムに画像が受信され、約300m区間のラップを含めて立坑間全線について飛行中に撮影された画像を立坑に設けた基地局にてリアルタイムに確認可能であった。

なお、第3立坑側よりも第2立坑側の方が通信距離が約300m長くなった要因として、画像圧縮方式の違い以上に電波の減衰が大きくなるR250mのカーブ区間が第3立坑寄りに集まっていることが大きく影響しているものと推定される。

飛行船の自律飛行制御の確立と、坑内無線通信システムの現段階における実現状況から下記に示すシールドトンネル点検システム構成を提案した。



機器構成(2~3立坑間の例)  
 図-4 初動点検システム案

## 5. おわりに

シールドトンネルにおいて、飛行船を用い無人にてトンネル坑内の概略状況を撮影し、リアルタイムに地上に画像を伝送するための初動点検システムを開発し、現地トンネルにて実証試験を行い、その能力を検証できた。

現時点での飛行点検可能な時間は、坑内の風向きと風速に影響され搭載重量の制限もあり、30~60分間(約2kmの第3立坑と第2立坑間の飛行可能)である。なお、飛行時間は搭載可能なバッテリー容量に左右され、今後の技術開発に伴い、飛行点検可能時間は延びるものと考えられる。

## 30. 函渠・側溝等における清掃機械の開発

国土交通省四国地方整備局 四国技術事務所 元木 真二  
同上 大岡 正憲  
同上 ○佐々木 力

### 1. はじめに

道路に付属する函渠・側溝の清掃作業（汚泥除去）は、現在側溝清掃車（汚泥吸引車）を用い、その吸引ホースを人力により汚泥付近まで持っていき、吸引作業を行っている。しかし、汚泥と一緒に函渠・側溝にある汚水まで吸引しているため、産業廃棄物処理量が増加し、清掃作業効率が悪い。また、比較的内空断面の大きい函渠・側溝では、複数の作業員がその中に入り、ミニバックホウなどの汎用建設機械により堆積土砂の掻き寄せ作業を行った後、吸引ホースで吸引している。そのため、長時間の低姿勢による作業、及び機械に近接した作業など、非常に苦渋で危険な作業となっている（写真－1参照）。

今回は、このような比較的内空断面の大きい函渠・側溝における劣悪な条件下での清掃作業について「産業廃棄物の縮減」、「作業員の苦渋性解消」、「清掃作業のコストダウン」を図るため、現有の側溝清掃車に取付可能なアタッチメント機械を開発した。

### 2. 開発概要

#### 2. 1 機械構造・機構の検討

「産業廃棄物の縮減」「作業員の苦渋性解消」「清掃作業のコストダウン」を目指し、以下の項目について検討した。

##### 2. 1. 1 水切り機構

水分の多い現場で「産業廃棄物の縮減」を目指したアタッチメント機械の構造・機構として、回収する汚泥から水分を除去出来る様、水切り機構を検討した。

検討ではネットコンベア式、トレンチャ式、スクリーュー式の3方式（図－1参照）による要素試験を行い、揚泥効率、水切り効率等から評価を行った。その結果、開発機には水切り用網付きバケットを使用したトレンチャ式を採用することとした。



写真－1 函渠・側溝清掃作業の現状

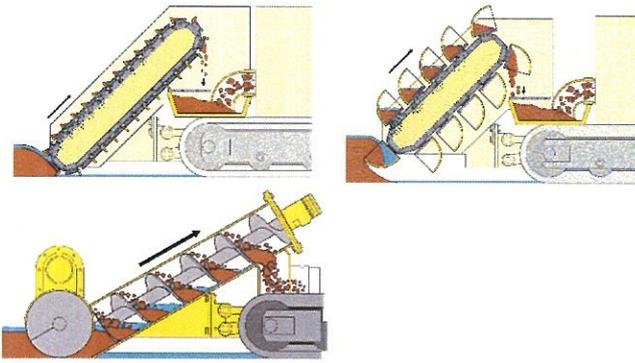


図- 1 機械構造・機構の検討 (左上: ネットコンベア式、  
右上: トレンチャ式、左下: スクリュー式)

2. 1. 2 多種多様な現場に対応が可能

開発目的の基本機能は水切り機構を有したトレンチャ式アタッチメントであるが、多種多様な現場条件に対応する為、土砂搬出専用の排土板式アタッチメント、及び吸引ホース取付を行った直接吸引式アタッチメントを加えた3種類のアタッチメントを考案した (図- 2 参照)。

2. 1. 3 遠隔操作が可能

開発機械は遠隔操縦式とし、作業員は函渠に入らずに作業をすることで、無人化施工による「作業員の苦渋性解消」を目指した。

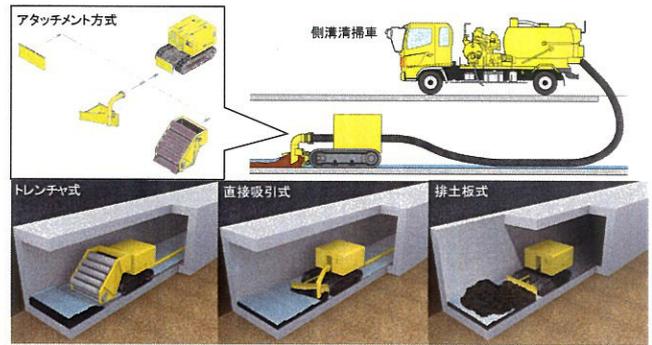


図- 2 開発機械の全体イメージ

2. 2 試作機の製作

試作機の検討・設計に基づき、試作機の製作を行った (写真- 2 参照)。試作機の基本仕様を表- 1に示す。

表- 1 試作機基本仕様

基本仕様	単位	トレンチャ式 装着時	直接吸引式 装着時	排土板式 装着時
全長	(mm)	2,358	2,020	1,650
全幅	(mm)	814	814	814
全高	(mm)	880	880	880
質量	(kg)	790	555	520
最低地上高	(mm)	75	75	75
走行可能水深	(mm)	340	340	340



写真- 2 試作機完成写真 (左: トレンチャ式、中: 排土板式、右: 直接吸引式)

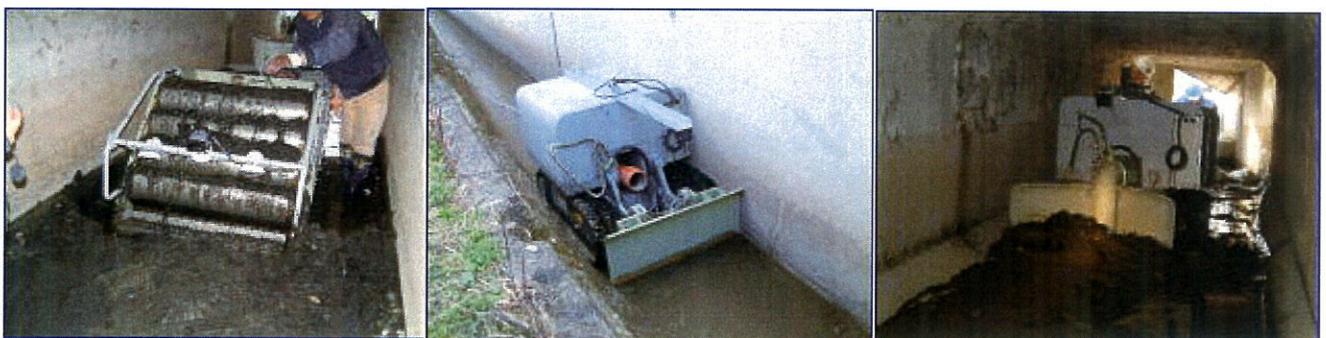


写真- 3 現場適応性試験状況 (左: トレンチャ式、中: 排土板式、右: 直接吸引式)

### 2. 3 工場内性能試験

各アタッチメント毎に様々な現場条件を想定した負荷試験を実施した。

試験条件は堆積土砂厚さ（10cm、20cm、30cm）、水深（10cm、20cm、30cm）を設定し、各条件で試作機の性能についてデータの収集を行った。

### 2. 4 現場適応性試験

香川県で試験可能な函渠を選定し、4箇所の現場において現場適応性試験を実施し、データの収集を行った（写真－ 3参照）。

### 3. 施工改善効果

工場及び現場にて試験機による土砂回収作業を行い、その際の土質条件、土砂堆積厚、水深、作業時間、作業パーティ構成等を記録し、データを採取した。そのデータを基に開発機械の施工改善効果を検証した。

### 3. 1 施工能力

各試験時の施工能力を表－ 2に示す。

表－ 2 施工能力のまとめ

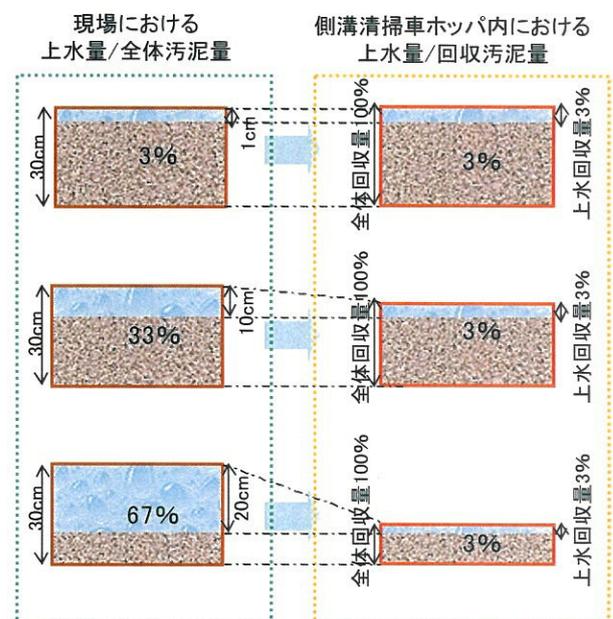
アタッチメント形式 (土質条件)	土砂堆積厚(cm)	1時間当たり施工量(m <sup>3</sup> /h)		
		10cm	20cm	30cm
排土板式 (砂礫、中細砂、シルト・粘土(有機))		2.34	2.75	2.92
直接吸引式 (砂礫)		2.41	2.38	2.38
直接吸引式 (中細砂、シルト・粘土(有機))		1.57	1.57	1.57
トレンチャ式 (砂礫、中細砂、シルト・粘土(有機))		1.55	1.53	1.52

従来施工の実績より、ミニバックホウと人力の併用作業の1時間当たり施工量は 1.63m<sup>3</sup>/h である。これ

により、施工能力については従来施工とほぼ同等であるか、それ以上であると言える。

### 3. 2 産業廃棄物の縮減

トレンチャ式の試験の結果において、現場の水分量に関係なく回収後の上水割合が3%程度で一定となった（図－ 3参照）。これは、バケットで汚泥を回収する際に十分水を切った状態で土砂を回収しているためである。このことから、「産業廃棄物の縮減」により、回収土砂を汚泥として処分する際の容量が減少し、処分費用の低減につながると言える。



図－ 3 回収時の上水量



写真－ 4 遠隔操作状況

### 3. 3 苦渋性の解消

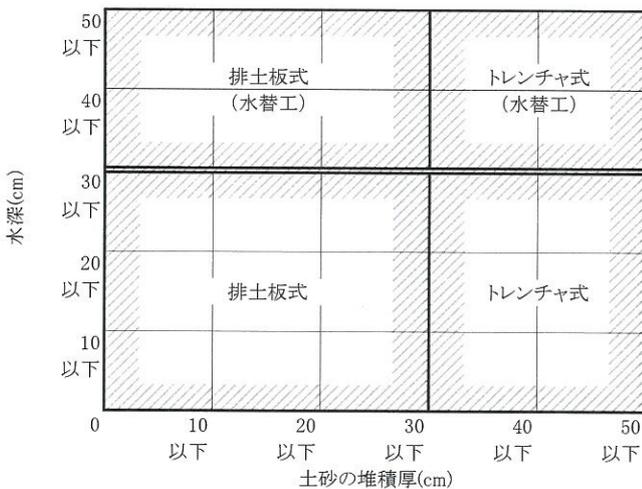
作業員の苦渋性を解消する為に、開発機械では無人化施工を目指し、有線方式による遠隔操作にて作業を行った（写真－ 4 参照）。

しかし、現場適応性試験時においては「夾雑物除去」「ホース及び操作用ケーブルの案内」について函渠内作業を行う人員が必要であった。これらの結果から、全ての現場での完全無人化施工は困難であることがわかったが、函渠内で作業を行う人員の低減により、「作業員の苦渋性解消」には一定の効果が得られることが確認できた。

### 3. 4 アタッチメントの選定

現場条件に合わせて最適なアタッチメントの選定が行える様、アタッチメント選定図（図－ 4 参照）を作成した。

選定図の作成は、水深、土砂の堆積厚さ、土質、アタッチメントの各条件毎にまずコストの比較を行った。さらに現場適応性試験で確認された事象や条件を考慮し、選定図を作成した。



図－ 4 アタッチメント選定図

### 3. 5 適応現場の整理

本機械が適応可能な現場の目標は「比較的内空断面の大きい函渠・側溝」であり、その寸法は、従来施工であればミニバックホウが投入される程度の寸法である高さ 1m、幅 1m 以上としていた。

本機械は、試作機の実寸計測で高さ 880mm、幅 814mm であり、内空断面 1m 角以上の函渠であれば適応可能である。

ただし、機械を投入するスペースの確保や、つり込

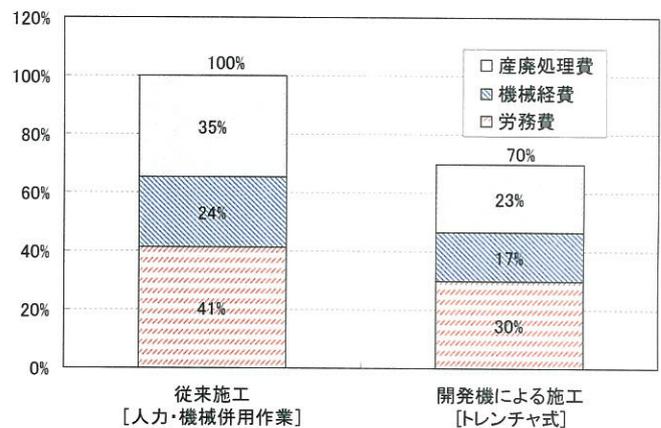
みを行うクレーン等の設置場所等、本機械を現地に投入する際には現場条件の事前調査が必要である。

よって、作業員が本開発機械を使用するにあたり、事前に確認を要する現場条件項目等を「清掃対象箇所選定要領」としてとりまとめた。これにより、本開発機械が適用可能かどうか、及び使用するアタッチメントはどれか、といった項目が容易に確認できるようになった。

### 3. 6 清掃作業のコストダウン

試作機による試験結果により算出した施工単価と、従来施工（人力・機械併用作業）を比較したグラフが図－ 5 である。

グラフから、約 30% の「清掃作業のコストダウン」が確認できる。これは清掃作業の機械化により、作業時間の短縮が人件費及び機械経費の低減に繋がったことと、トレンチャ式については回収土砂内の水分量を従来施工より減量することによる「産業廃棄物の縮減」効果によるものである。



図－ 5 施工費比較

### 4. おわりに

本開発機械により、当初目的としていた「産業廃棄物の縮減」「作業員の苦渋性解消」「清掃作業のコストダウン」について一定の成果が得られた。

今後は開発した機械が実現場で使用され、より効率的で安全な清掃作業が行われるようにフォローアップを行っていきたい。

## 31. 無人ラフテレーンクレーンの実施工への適用

(無人化施工技術の課題)

国土交通省北陸技術事務所 機械課長 本間政幸  
○整備係長 笠原邦昭

### 1. はじめに



写真1 無人クレーンの作業状況

北陸地方は急峻な地形であり、冬期の降雪など厳しい気象条件や急流河川が多い河川特性から、洪水や土砂崩落、土石流などの災害が発生する危険性が高い地域である。（写真1）

これまで北陸技術事務所では、災害現場や危険性が高い砂防工事現場における作業の安全を確保するため、バックホウ等各種建設機械の無人化施工技術の開発を行ってきた。

しかし、現在の無人化施工技術では資機材を吊り上げ遠方に移動する技術がなく施工性の低下を招いていた他、施工不可能区域があった。

そこで資機材を遠方に移動するのに最適で機

動性に優れた無人ラフテレーンクレーンの開発を平成16年度に行っている。

ここでは、無人ラフテレーンクレーンの概要と平成16年度に実践導入した結果について、施工状況と課題を報告する。

### 2. 開発の概要



写真2 無人ラフテレーンクレーン

本機は平成14年度から平成15年度の2ヶ年にわたり、無人化施工技術検討委員会を北陸地方整備局内に設立し、検討を行い完成をみている。

無人ラフテレーンクレーンは、大型の移動式クレーンでは日本初となる遠隔操縦可能な50t吊りラフテレーンクレーンである。（写真2）

ラフテレーンクレーンは、走行と作業が同一の運転席で操作可能なため、一人の運転手が作業場所まで走行して、そのままクレーン作業を行ったり、荷物を吊ったまま走行もできる。

また、総輪ステアリングや総輪駆動を採用しており、狭隘で荒れた場所でも作業性や機動性に優れるという特徴を持った車両である。無人化にあたっては、車両の特徴をなるべく無線操縦でも生かすようにしている。

現場へ導入した無人ラフテレーンクレーンの概要は以下にとおりである。

### 3. 無人ラフテレーンクレーンの特徴

- 1) 大型の移動式クレーンでは、国内初となる遠隔操縦可能な50t吊りラフテレーンクレーン。
- 2) 遠隔操作時の操作有効距離は最大150mを確保。



写真3 遠隔操作状況

3) ラフテレーンクレーンは操作機能が多く、非常に複雑であることから、遠隔操作時の送信機を作業用と走行用の2台に分けることで操作の安全性を確保。（写真4）



写真4 送信機（上が作業用，下が走行用）

4) 走行用送信機は、前後進、ブレーキ、ステアリング操作、アウトリガ自動水平張出・格納操作などが可能。

5) 作業用送信機は、旋回、ウインチ、ブーム伸縮、ブーム起伏などのクレーン操作が可能。

6) 遠隔操縦システムの無線装置は、無線免許が不要な特定小電力無線（482Hz帯）を採用している。また、混信・通信途絶・受信異常時に自動停止させる安全技術を採用している。

7) 無人化施工エリアが広い場合など状況に応じて、資材を吊りながら走行を行う吊り荷走行が可能。但し、吊り荷の定格荷重は有人作業時の70%を上限とし、遠隔操縦で一般公道の走行はできない。

8) 遠隔操縦時にもオペレータが吊り荷の負荷状態を常時監視可能なサブモニターシステムで運転席と同じ画面を見ることが可能。（写真5）



写真5 過負荷防止装置監視システム

また、運転席上部にも外部表示灯(3色灯)を装備しており、機械外観からも負荷状況が確認できる。

9) 遠隔操作時の作業効率の向上と安全性の向上を目的に画像支援システムを導入している。

#### ①キャビン上部カメラ

キャブの上部に設置され、有人搭乗時と同様な視界が確保できる。（写真6）

#### ②水準器カメラ

遠隔操作で確認が必要な水準器を見るために水準器カメラを装備している。



写真6 キャビン上部カメラ

### ③主・補助ウインチカメラ

主ウインチと補助ウインチの乱巻き監視用カメラとして装備している。

上記①、②、③の映像を切り替えにより遠隔モニタシステムSS無線(2.4GHz)で伝送している。

### ④ブーム先端カメラ(クレーンカメラ)

ブームの先端に取り付けられ、吊り荷の真上から見る事ができるため、目視が不可能な場所での作業が可能となった。(写真7)

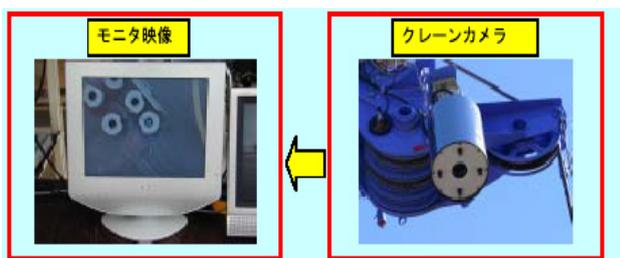


写真7 ブーム先端カメラ

10) 遠隔操作時における車両の動きは、送信機のレバー操作量に対応した制御となっており、より有人作業時の操作間隔に近づけている。

## 4. 無人ラフテレーンクレーンの法規制

無人ラフテレーンクレーンの開発に当たっては、関係部局と調整を行い「移動式クレーン検査証」と「自動車検査証」を取得した。

### 1) 移動式クレーン検査証

全作業を遠隔操作できる無人ラフテレーンクレーンは日本初の試みで前例がないため、労働局から下記の条件が付加され許可された。

#### 【厚生労働省栃木労働局より付加された条件】

- ①ラジコン操作位置はクレーンから最大150mとし、確実に電波の届く範囲で作業すること。
  - ②クレーン本体や外部警告灯・表示灯を目視確認できる位置から操作し、クレーンが障害物の陰に入らないようにすること。クレーン本体についてはモニターではなく、オペレータが確実に目視でクレーンの動きを把握できること。
  - ③ラジコンで運転する場合、クレーン本体にカメラを設置し、また必要に応じ現場にカメラを増設することにより、常に安全を確かめて運転すること。無人施工においても玉掛け作業は人に頼るケースがほとんどで、安全を確保するため車載カメラ等の設置すること。
  - ④遠隔操作時の「吊り荷走行」では、定格荷重を安全のため搭乗操作時の70%に制限すること。
- \*上記の条件は、仕様・運用に反映されている。

## 2) 自動車検査証

ラフテレーンクレーンの機動性を生かして砂防現場の狭隘な現場や災害現場での使用を想定しており、従来の無人化施工機械では、公道を走行することはなく、今回の開発機が無人化施工機械として自動車検査証を取得する初めてのケースとなることから、自動車交通局より走行条件が付加され調整の結果、自動車検査証を取得した。

#### 【国土交通省自動車交通局技術安全部より付加された条件】

「無人で公道を走行できる車両は保安基準に適合せず認められない。特定区域以外は走行しないという取り扱い上の制限では実行性がない」ことから、車両の構造で公道を遠隔操作できないこと。

#### 【遠隔操作での走行条件】

クレーン作業中(作業姿勢)以外では遠隔操作での走行ができない構造とすること。

無人ラフテレーンクレーンは、ブーム角度を15度以上を作業姿勢(車両の全高は5.83m以上)とし、それ以外の状態では遠隔操作ができ

ない構造とした。(図3)

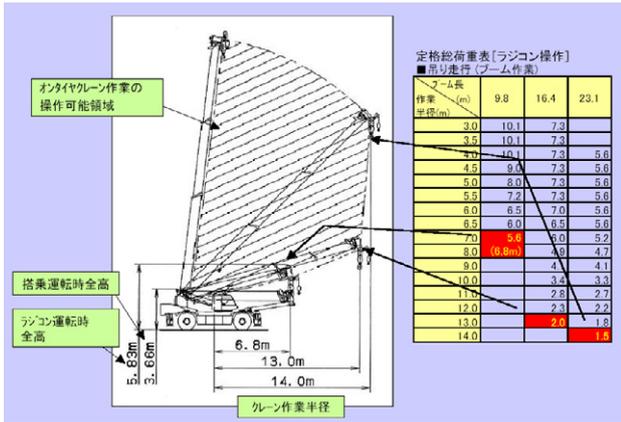


図3 クレーンの作業姿勢  
(遠隔操作での走行が可能な作業姿勢の範囲)

作業姿勢では保安基準に適合せず、公道上では遠隔操作で走行することはできない。

## 6. 無人ラフテレーンクレーン施工性調査

### 1) 施工性調査概要

施工性調査は金沢河川国道事務所白峰砂防出張所管内の柳谷地区で平成15年度に試験施工を、平成16年度には実際の柳谷地区の砂防工事に導入され施工を行っている。

調査は無人ラフテレーンクレーンを用いた無人化施工の施工効率(サイクルタイムを測定)の測定とオペレータヒアリングを実施し、有人操作と無人操作との比較や機械操作に対する慣れに対して次の工種を施工した。

- ①型枠設置工(円形型枠ブロック)
- ②U字溝設置工
- ③コンクリート工(打設)

またオペレータに対してヒアリングを行い有人との比較、特に劣る項目について調査した。

### 2) 施工性調査結果

(a) 有人操作と比較し、無人操作では平成15年度の作業効率は29%~41%の作業効率であったものが、平成16年度では45%~87%と作業効率が1.4倍~2.1倍に向上している。

平成15年度と比べ、本格的な現地施工となった平成16年度では施工量も多くオペレータがク

レーンの無人操作に熟練してきていることがわかる。しかし、作業工種によっては有人操作に比較して、まだ作業効率は低い結果となっている。(図4)

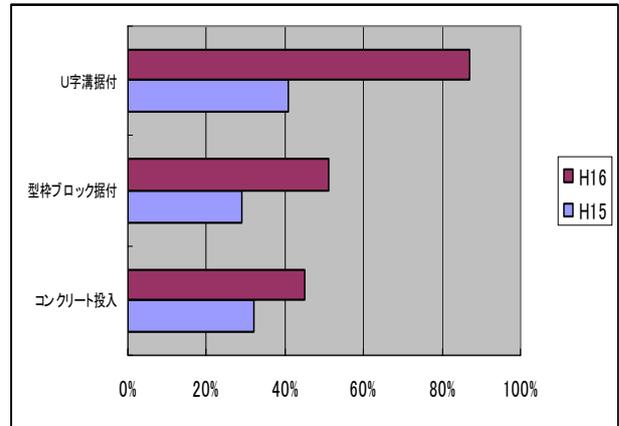


図4 無人クレーン作業効率(有人作業100%)

(b) 平成15年度と比べ一番作業効率が上がったU字溝据付について、平成16年度の施工時期によるサイクルタイムの変化は、移動(行き・戻り)の時間は施工箇所の違いによる回転半径が起因するもので、U字溝据付時の位置決めがクレーン操作の慣れによる施工性の向上が見られる結果となっている。(図5)

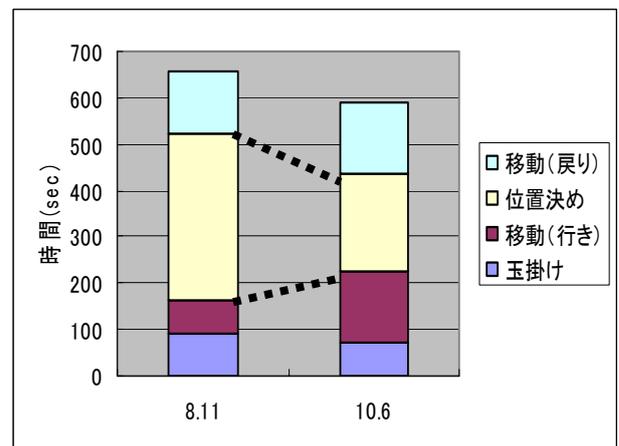


図5 U字溝据付の施工時期によるサイクルタイム

(c) また作業効率の向上が少なかったコンクリート投入工についても、9月6日と10月5日の1ヶ月後の施工性調査の結果から、この間の作業により、約35%の作業効率が向上しており、反復作業に伴う慣れ(習熟)が作業

効率の向上として現れている。(図6)

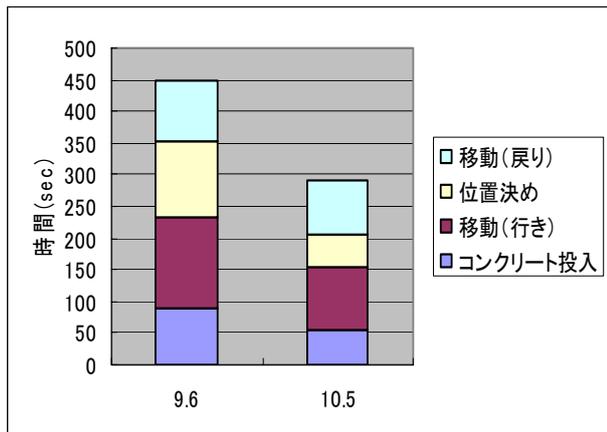


図6 コンクリート投入の施工時期によるサイクルタイム

(c) 操作の反復作業の慣れ(習熟)を判断するものとして、操作が難しい「位置決め」作業の作業効率だけを見ると、施工時期毎の比較から、U字溝据付では当初施工の2ヵ月後には施工効率が1.7倍に、コンクリート投入工に至っては僅か1ヶ月で2.3倍に向上している。(図7)

全ての条件が一緒ではないが、微操作が多い作業(U字溝据付工や型枠ブロック据付)は、やはり慣れるのに時間が掛かり、習熟しにくいことがわかる。

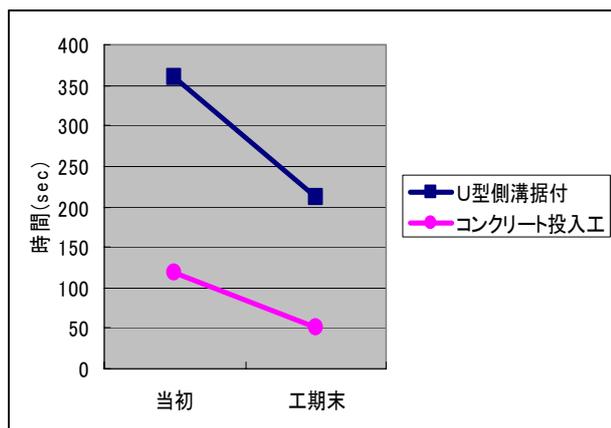


図7 位置決め作業の施工時期による比較

### 3) オペレータヒアリング

主なヒアリング結果は次のとおり

①据付作業時の微操作とモニター(3台)視認での操作は難しく慣れが必要。

②無人操作での作業用エンジン回転の設定が一定回転のため、操作レバーの操作量に対し機体の反応が少ないため、作業半径が大きい場合に時間がかかる。また微操作時には過大な動きとなるため、車体乗車時と同様なアクセルを設けてほしい。

③搭乗時(有人作業)は車体の負荷状況がクレーンの振動や傾きで体感できるが、遠隔操作では負荷状況が体感できず、過負荷に至ると安全装置が作動して停止する。負荷を確認できるサブモニターはあるが、吊荷の据付位置を調整しながら見るのは困難である。

④映像支援装置がうまく画像を受信できないことが頻発した。クレーン本体側の送受信アンテナ取付位置の変更、カメラの改良が必要。

### 4) 施工試験結果の考察

施工試験結果及びオペレータヒアリング結果から、有人操作と比較して無人操作の効率が低い理由として、次のことが考察される。

①レバー操作量と無人ラフテレーンクレーンの動作速度の感覚がつかみにくい。特に動き始めと止めがむずかしく、操作になれていない状況と考えられる。

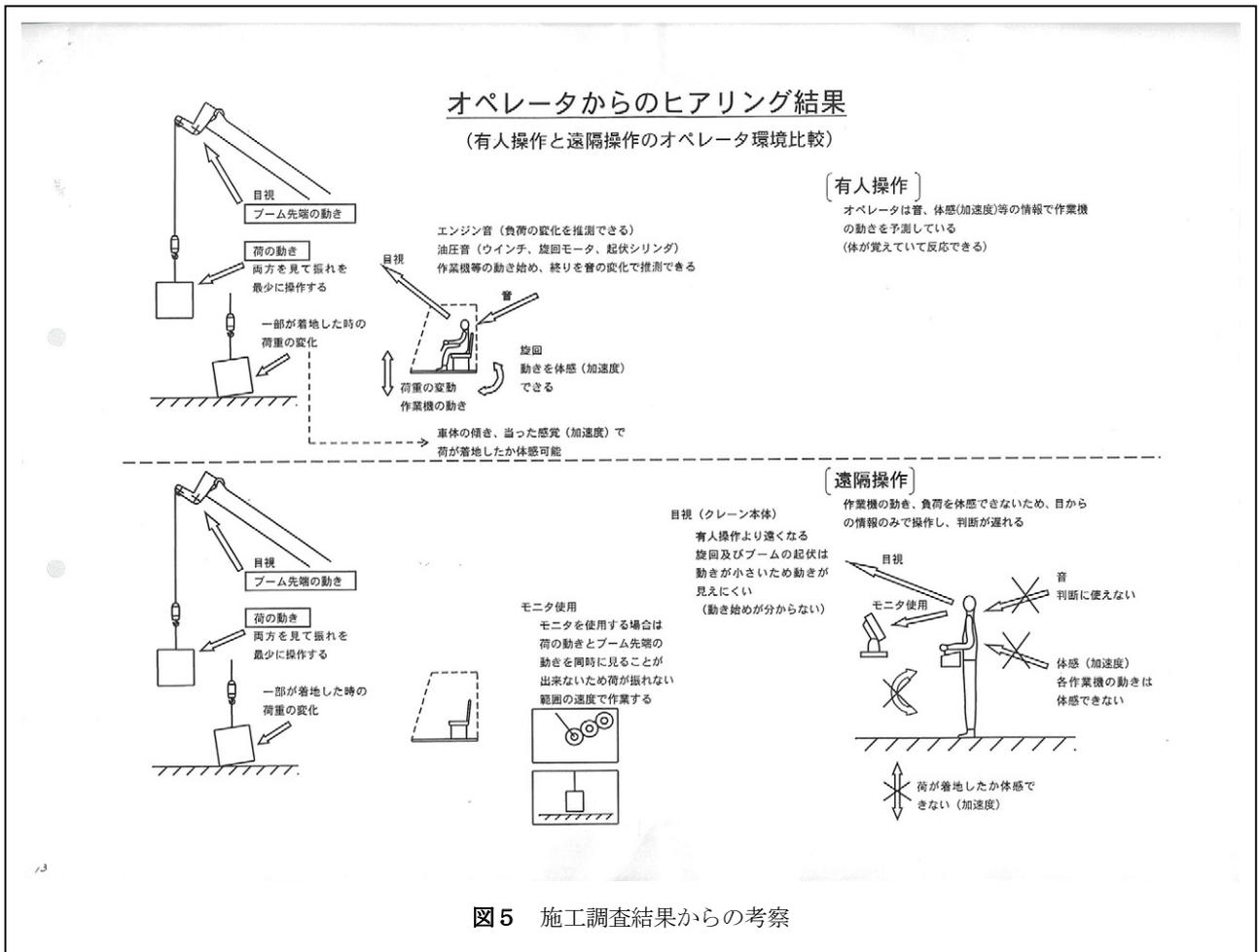
また、旋回については負荷により、動き始めのレバー位置が変化するため、慣れるのに時間を要する(1ヶ月以上)と考えられる。

②クロスレバーでの複合操作が難しい。

③乗車時と同様なアクセル操作の要望があるが、車両の限界を判断しにくいことから操作の安全性が課題となる。

③遠隔操作ではクレーンの動きが体感できない。映像や目視だけでは、作業機の微妙な動きや負荷状況が分かりにくい。このため判断が遅れて操作が遅れる。

搭乗していれば作業機の動き、負荷の状況が体感でき把握できることから、適切なアクセル操作やレバー操作にて作業が行えるが、無人操作ではレバーの微操作により対応することが有人操作より難しい。(図5)



## 8. 結論

平成16年度より本格的に白峰砂防工事現場における無人施工区域へ、無人ラフテレーンクレーンを導入したことにより、これまで作業員の安全が確保できなく施工が不可能であるとされてきた施工箇所の施工が可能となり、新たな無人化施工工種が確立され、他の無人化施工箇所においても活躍が期待される。

今回の調査結果では、無人操作の施工効率は有人操作に対し低い結果となっているが、平成15年度の試験施工調査結果と平成16年度の実施工調査結果では、オペレータの操作の習熟による施工効率の向上が確認できた。

しかし、クレーンの無人操作では機械の動きが体感できないため操作感覚を習得するまでに時間が掛かり、操作の習熟に要する期間が長いと思われるが、オペレータ自身の個人差があるため、一概に言えない感覚の部分が多い。

## 9. 今後の課題

オペレータの習熟による施工効率の向上は限界なのか、また習熟期間の短縮が可能か、この2点が今回の結果から課題であると考えられるが、これはオペレータによるところが大きく、今後の稼働状況を確認する必要がある。

操作感覚を習得しやすいように、クレーン本体の状況を表示するなどの方法も考えられるが、作業の最中にサブモニターすら見る余裕はないというオペレータヒヤリング結果もあることから、他の方法を検討するべきである。

搭乗時と同様の感覚でオペレータが、意のままに車両を、遠隔操作で動かせる状況を作ることが最大の課題であり、最大の難関でもある。

## 10. おわりに

今回の実施工への適用にあたり、ご協力いただいた関係者各位に感謝の意を表す。

## 32. 「垂直土砂搬送装置」実用機の開発 — 鉄道建設工事への適用 —

東急建設(株):○高橋 浩史, 平井 幸雄, 金井 孝行

### 1. はじめに

都市部の地下掘削工事等では、狭隘な地上空間において交通の妨げにならない土砂排出用開口部を確保し、昼夜にわたり安全に効率よく土砂を搬出することが求められている。

そこで、小口径のケーシング内を連続的に移動する連結プレートにより、効率的に土砂を搬送する「垂直土砂搬送装置」を実用機として開発し、実証試験の後、現在施工中である横浜市の鉄道建設工事に導入した。

本稿では、装置の開発過程から現場への適用までを報告する。

### 2. 装置の概要

#### 2.1 構造

本装置は、2本のケーシングからなる搬送ケース、搬送プレートを一定ピッチで連続して取付けた2本のチェーンおよびチェーン駆動装置から構成される。

(図-1、図-2)

#### 2.2 搬送原理

装置下部のホッパに投入した掘削土砂は、チェーンに取付けられたプレートにより順次掻揚げられ、連続的に一方のケーシング内を移動し、排出口から排土される。排土が終ったプレートは、残る一方のケーシングを使って再び地下に戻る。

#### 2.3 特長

- ① 土砂搬送部は搬送ケース分(1.24m×0.88m)の省スペースで設置可能
- ② 密閉された搬送ケース内を土砂が移動するため、土砂のこぼれがなく効率よく安全に搬送可能
- ③ 下部ホッパに投入された土砂を一定量ずつ搬送する機構のため、土砂定量供給装置が不要
- ④ 搬送ケースとチェーンを継足すことにより順次地下

への延伸が可能

- ⑤ 搬送ケースを途中で捻ることで土砂投入部と排出部の設置方向の変更が可能



図-1 垂直土砂搬送装置設置イメージ図

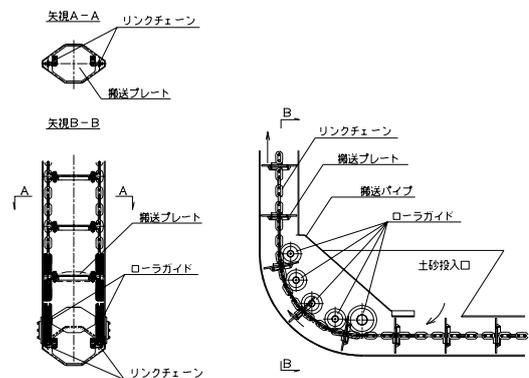


図-2 装置下部構造図

### 3. 実証実験

#### 3.1 実験概要

開発した装置の能力を検証するため、高さ約11mの装置を製作し実証実験を実施した。

搬送物は、砂、砂利、土丹、粘性土を用い、土質別搬送能力の検証、チェーン磨耗量の測定等を行った。

装置運転時間は377時間であった。

実験装置の仕様を表-1に、実験装置設置状況を写真-1に示す。

表-1 実験装置の仕様

理論搬送能力	60.0 m <sup>3</sup> /h
搬送速度	1.2~12 m/min
電動機出力	37kW 200V(インバータ仕様)
搬送プレートピッチ	600 mm
搬送ケース断面	1,240 mm×880 mm
揚程	11 m



写真-1 実験装置設置状況

#### 3.2 実験結果

##### ①土砂搬送量

土砂搬送量は、プレート1ピッチ毎に搬送されてくる土砂を、計測バケツに移してその容量を算出し、時間あたりの搬送量に換算した。

土砂搬送能力は、

$$Q = A \times 60 \times V \times \eta$$

Q: 時間あたりの搬送能力 (m<sup>3</sup>/h)

A: 搬送ケーシング断面積 (m<sup>2</sup>)

V: プレート搬送速度 (m/min)

$\eta$ : 搬送効率(充填率)

で求められ、ケーシング断面積が一定であれば、プレート搬送速度と充填率により決定される。

図-3に搬送土質別のプレート搬送速度と土砂搬送量の関係を示す。実験結果はほぼ比例関係にある。搬送速度を一定としたときの搬送量は、粘性土、土丹、砂の順に大きく、搬送効率  $\eta$  は搬送量から計算し粘性土で約0.7、土丹で約0.6、砂で約0.5となる。実験結果から得られた数値は、実証機設計に用いた数値と概ね一致し妥当性が確認できた。本機においての時間あたりの最大搬送能力は、搬送効率を0.5として60m<sup>3</sup>/h程度と考えるのが妥当と思われる。

砂利については垂直部搬送中でのプレートからのこぼれが多く、今回の実験では少量しか搬送できなかったため参考値とする。

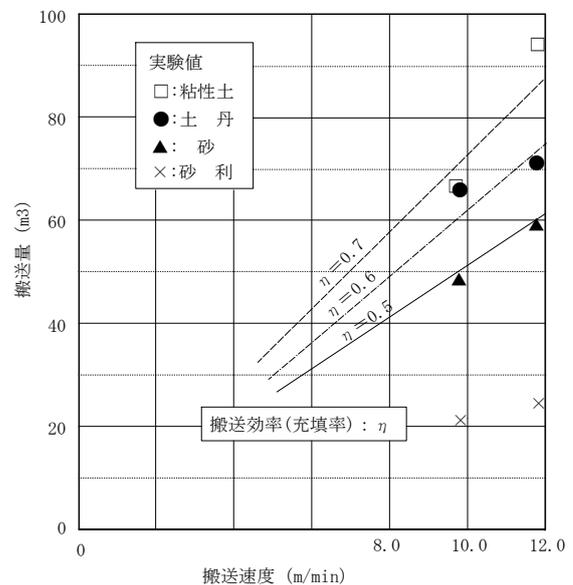


図-3 プレート搬送速度と土砂搬送量

##### ③チェーンの磨耗

図-4に運転時間とチェーン伸び量の関係を示す。チェーンは駆動部側、追従側の2本に対し500mm(1ピッチ分)当りの伸び量を測定した。

一般的には初期磨耗時期を経過すると、時間当りの磨耗量は減少傾向に推移すると言われているが、実験時間が初期磨耗時期を越えていなかったためか、結果は比例関係を示した。

実験結果とメーカーの磨耗許容値よりチェーンの許容運転時間を計算すると約 3,000 時間となるが、前述の磨耗量の減少分を考慮すると、実際には計算値以上になると思われる。

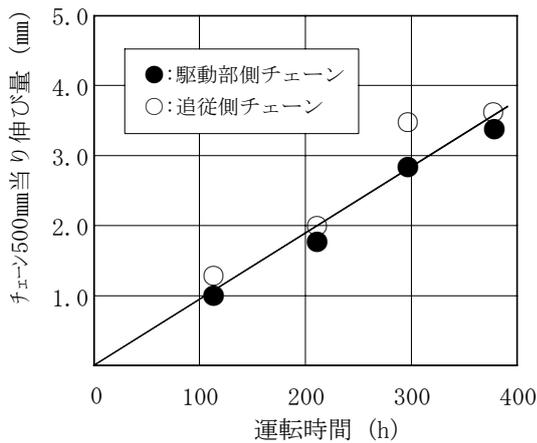


図-4 チェーン磨耗量

#### 4. 実施工への適用

##### 4.1 工事概要

装置を導入した、横浜市高速鉄道4号線日吉駅建設工事は、横浜環状鉄道(市営地下鉄4号線)中山～日吉間の起点である日吉駅を東急東横線日吉駅の下に建設するものである。

垂直土砂搬送装置の揚土対象となる慶応大学側の施工は、山岳トンネル工法により構築される。

##### 4.2 装置の採用経緯

本工事におけるトンネル掘削土砂の搬出箇所は、東急東横線日吉駅前の道路中央部に設けられた作業帯内に位置している。(写真-2)

従来のクラムシェルによる土砂搬出作業の場合は夜間に作業帯を拡幅して土砂搬出を実施する必要がある。

今回、トンネル工事の土砂搬出用開口部は2m×1.8m と非常に小さい上、掘削土砂の搬出を昼夜にわたり効率よく搬出する必要があることから、狭隘なスペース

で設置可能な「垂直土砂搬送装置」の導入に至った。図-5に装置設置図を、写真-3に設置状況を示す。



写真-2 土砂搬出場所全景

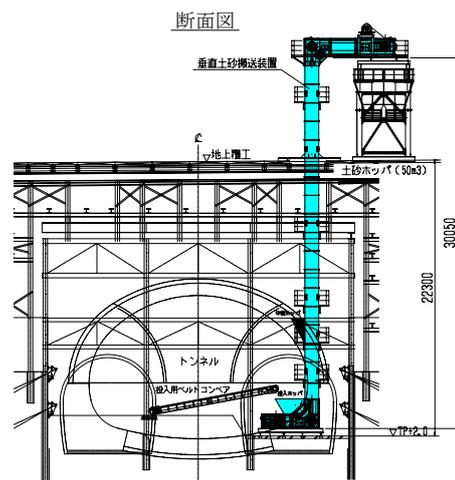
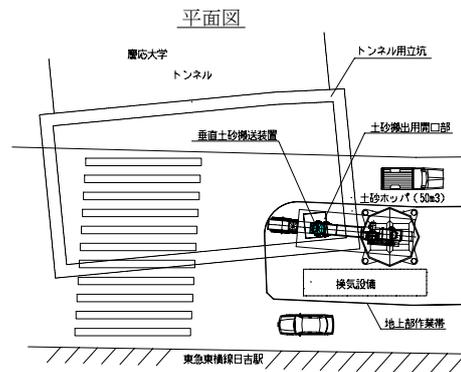


図-5 装置設置図

##### 4.3 装置の仕様

設置した装置の仕様は表-2のとおりである。運転操作は、地上部および土砂投入部(立坑下)に

て可能としている。

表－2 装置の仕様

理論搬送能力	60.0 m <sup>3</sup> /h
搬送速度	1.2～12 m/min
電動機出力	37kW 200V(インバータ仕様)
搬送プレートピッチ	600 mm
搬送ケース断面	1240 mm×880 mm
揚程	30 m

#### 4.4 施工実績

トンネル工事の総掘削土量は約15,000m<sup>3</sup>で、平成17年3月18日より、本年5月までの間に本装置で搬送した土量は約4,000m<sup>3</sup>である。(現在施工中)

稼働日数当たりの平均搬送量は91 m<sup>3</sup>/日、最大搬送量は190 m<sup>3</sup>/日、時間あたりの最大搬送実績は、約50 m<sup>3</sup>/hであった。

#### 4.5 安全装置

非常停止ボタンを、地上・地下部の運転場所の他、装置最上部、中間ホップ部に設置した。

操作回路にはモータの過電流保護装置を設置し、オーバーロード時に装置が自動停止するシステムとした。

また、土砂ホップ部には、光電センサ、機械式センサ、モニタを組み合わせた土量監視システムを導入した。当システムは土砂ホップ内土量を段階的に把握し、各段階にて警報作動および装置停止を自動的に実施する安全システムである。表－3に作動範囲を示す。

### 5. おわりに

今後、都市部における地下施設の施工では、狭いスペースにおいて、周辺環境に配慮し、安全でより効率的に土砂を搬送する技術が求められる。本装置はその要求を満足する機械として、当工事にてその成果が確認されることを期待される。今後は、各種データの収集、蓄積を行うと共に、市街地におけるトンネル工事や再開事業の大規模掘削工事に対し同装置の適用を図る所存である。

最後に本装置の開発・実験・現場適用にあたり、ご協力いただいた関係各位に対し感謝致します。



写真－3 装置設置状況

表－3 土量監視システム作動範囲

段階	ホップ容量	警報作動(自動)				機械停止(自動)	
		回転灯青	回転灯黄	回転灯赤	サイレン	投入用ベルトコンベア	垂直土砂搬送装置
第1段階	70%	○			○		
第2段階	90%		○		○	○	
第3段階	100%			○	○	○	○
第4段階	105%				○	○	○
最終						人力停止	人力停止

### 33. 低騒音舗装の機能維持装置検討

関東地方整備局 関東技術事務所 機械課 ○村上 大幹  
 東京国道事務所 機械課 佐久間孝司  
 (社) 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 研究第4部 佐野 昌伴

#### 1. はじめに

低騒音舗装は、排水性機能と低騒音機能を有している。供用開始後、塵埃等による空隙詰まりによりその機能は低下していく傾向にある。現状の排水性舗装機能回復車では高圧水の路面洗浄とバキュームによる吸引により、機能が低下してから空隙内の清掃を行い機能を回復させている。しかし、作業速度が遅いため渋滞の発生や清掃コストの問題等から、機能回復作業の反復回数を増やすことが難しい。そこで、作業速度を向上させて定常的な清掃作業の一環として機能維持作業を実現するための、空気のみによる「送風+吸引」方式の効率的な機能維持車(試験装置)の開発を行った。

なお、本検討は事業実施事務所の東京国道事務所と密接な連携を図り、試験フィールドの提供、現地の各種データ収集等は東京国道事務所が実施し、機能維持装置の検討、試験装置製作の他、民間技術開発の促進を図るための機能維持車の仕様とりまとめと公表を、関東技術事務所が行っている。

等、基礎的な事項を確認するための基礎試験装置を製作して、①ノズル配置、②エア噴射角度、③吸入流速、④作業速度について検討し、ノズル配置及び吸引カバー形状、エア噴射角度、吐出ノズル間距離等を決定した。(基礎試験装置を使用した試験)

基礎試験結果を基に機能維持装置(試験装置)を製作し、定置試験及び走行試験を実施した。定置試験により基本性能として、①圧力、②流速、③温度特性を確認し、走行試験により、①作業音、②信頼性、③操作性、④塵埃回収性能の確認を行った。

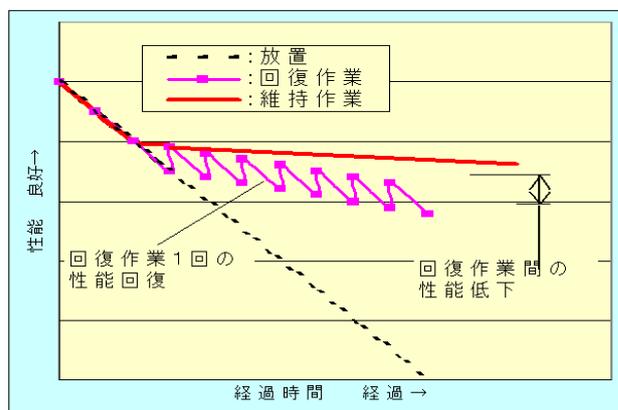


図-2 機能回復作業と機能維持作業のイメージ

#### 2. 検討内容

「送風+吸引」方式のノズル配置や塵埃回収性能

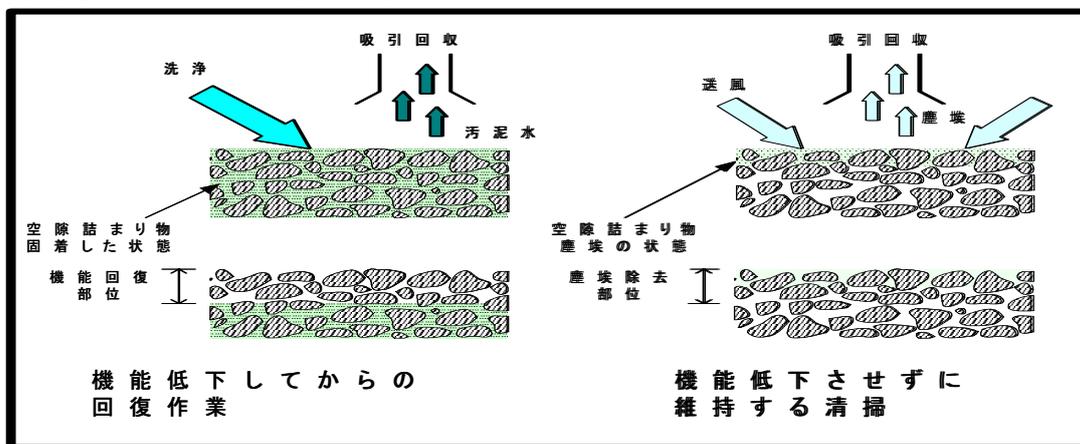


図-1 機能回復作業と機能維持作業との違い

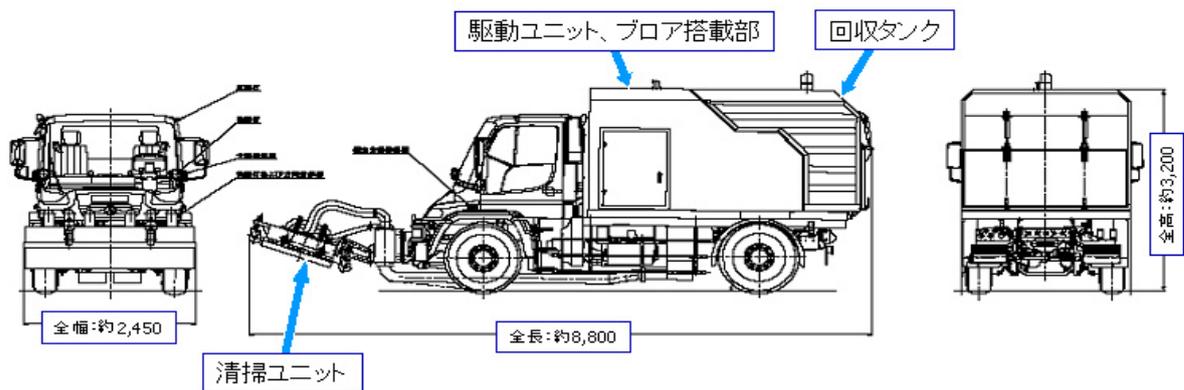


図-3 低騒音機能維持車

### 3. 基礎試験装置を使用した試験

#### 3. 1 試験その1 (エア噴射による砂の飛散状況の観察)

実施した多くの試みは、図-4に示すように、噴流が低騒音舗装路面に衝突した後に、更にカバーなどの一部に衝突して、複雑な渦流を生じていた。この渦流を減少させることが、回収量を増加される有効な手段だと考えた。渦流を減少させる方法として、本実験では図-5に示すように、中央部を鋭角にして突起を設ける方法を試みた。実施した結果、回収量が7割(参考値、速度は10km/h)を越し、それ以前の試みに比べ、回収量は飛躍的に増加した。このことから、渦流を生じさせない(減少させる)ことが、機能維持効果を高めるために、非常に有効な手段だと考えられる。

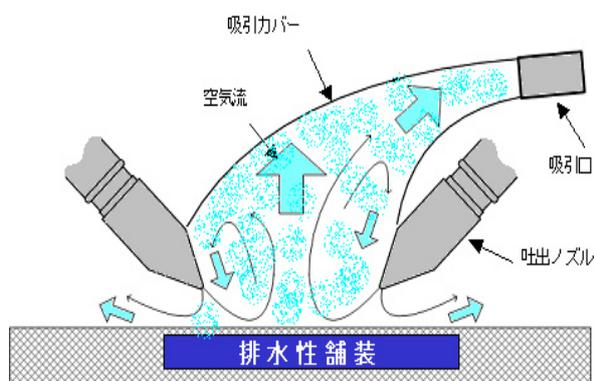


図-4 渦流が発生している事例

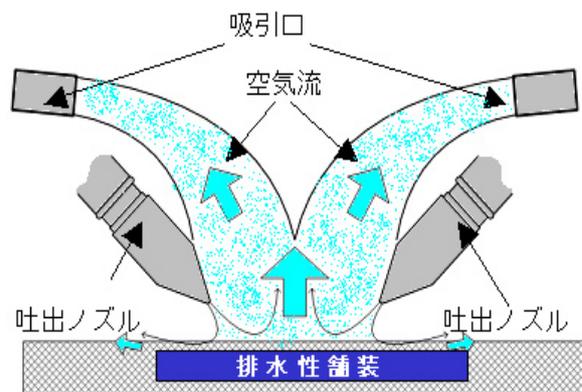


図-5 渦流を減少させた対策事例

また本基礎試験では、①ノズル配置、②エア噴射角度、③吸入流速、④速度についてパラメータを変化させて検討した結果を踏まえて、基本的なノズル配置及び吸引カバー形状を決定した。

#### 3. 2 試験その2 (機能維持作業の基本事項に関する基礎試験)

架装装置をベース車両に架装するのに先立ち、前項の試験結果に基づいて基礎試験用装置を製作し、機能維持作業の基本事項に関する基礎試験を行った。本基礎試験のフローを図-6に示す。試験の結果、ノズルスタンドオフを不陸の影響が避けられる25mm、吐出ノズルの角度は前47°、後55°とし、±10°の可変できる構造とした。

### 4. 試験装置を使用した試験

#### 4. 1 定置試験

架装装置の基本性能として、①吐出及び吸入圧力、

②流速、③温度特性（吐出及び吸入温度、エンジン温度、ブロー軸受部ケーシング温度、制御盤温度）について確認試験を行った。

圧力確認試験では、圧力損失が回転数に応じて約10kPa～17kPa程度発生し、架装装置の配管抵抗による圧力損失が大きいことが明らかとなった。

流速確認試験では、流速測定値は設計値とほぼ同じ値を示しており、管路の重大な漏れが無いことが確認できた。

温度特性試験では、吐出及び吸入エア温度、エンジン水温、ブロー軸受部ケーシング温度、制御盤内温度の変化を、1時間のエージングテストによって確認し、温度が架装装置に影響を及ぼさないことを確認した。

#### 4. 2 走行試験

##### 4. 2. 1 試験概要

試験装置の各部機能の確認及び信頼性の確認を行うため、テストコース（1周750m、コンクリート舗装路面）及び低騒音舗装路（延長100m）にて走行試験を行った。

##### 4. 2. 2 試験結果

###### ① 沿道環境への影響（作業騒音）

平成13年度に関東技術事務所構内において実施した路面清掃車の評価試験と比較した結果、試験装置の機体側面から2.0m離れた位置での最大騒音レベル約90dBは、他の清掃車と同程度であることを確認した。

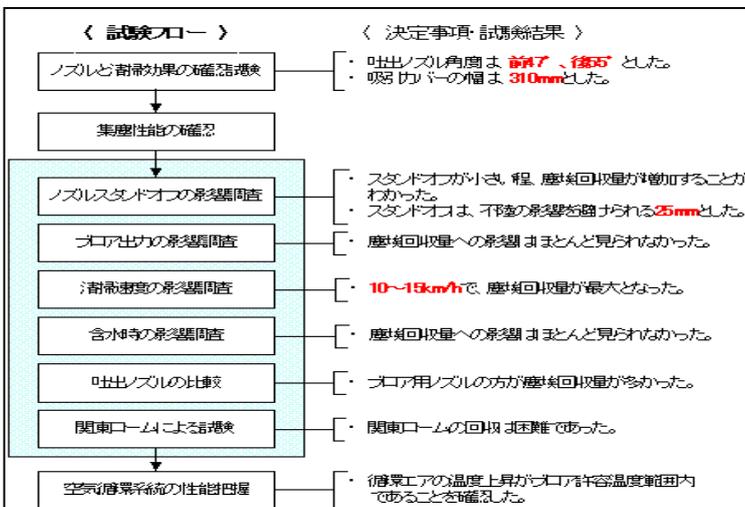


図-6 試験その2フロー

###### ② 信頼性の確認

ベース車両を50km/h程度まで連続的に加速させた場合にその走行風や走行振動によって車両または、架装物が共振する異常振動が発生しないことを確認した。

###### ③ 操作性の確認

塵埃回収試験の際、実際の作業時間を計測することによって操作性の確認を行い、作業時間計測の結果、停車時間内で回収できることを確認した。

###### ④ 回収塵埃の計量試験

ブロー風量60m<sup>3</sup>/min×2に対して、試験装置運転条件（ノズル前47°～後55°、ノズル間20mm）と同じブロー風量70m<sup>3</sup>/min×2では回収量が2倍以上となった。（表-1）。（ブロー風量80m<sup>3</sup>/min以上は試験用ブローの許容圧力を超えることが明らかになったため、試験を行う事ができなかった。）

###### ⑤ 連続走行試験

連続走行を行い、ボルトの緩み、異常音の有無、異常ひずみの有無、異常振動の有無等について確認を行った。その結果、異常は認められず連続的な走行に対しては十分な強度を有していることが確認できた。

表-1 回収塵埃の比較

風量 (m <sup>3</sup> /min)	回収重量 (g)	回収重量 (g/m <sup>2</sup> )	回収率 (%)
60	62.2	5.2	17.3
70	176.6	14.7	49.1

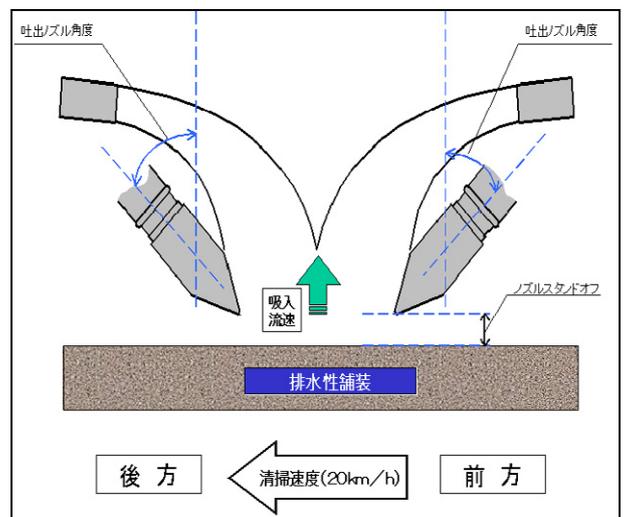


図-7 各部の名称

## 5. 現道試験

試験装置を使用して実際に現道での低騒音舗装の機能維持作業を行い、塵埃回収量の計測を行った。

作業結果（表-2）を見ると、路線や回数毎に回収量が異なり、試験装置は適正な回収ができていることから、その機能を満たしていると考えられる。なお、清掃面積は、清掃延長60m×清掃幅2.4m=144㎡を行った。

## 6. 機能維持清掃作業効果調査

清掃作業効果調査は、試験装置を用いて東京国道事務所により調査を行っており、平成16年度に表層が施工される工事から、施工直後に調査可能な箇所を選び、調査箇所とした。

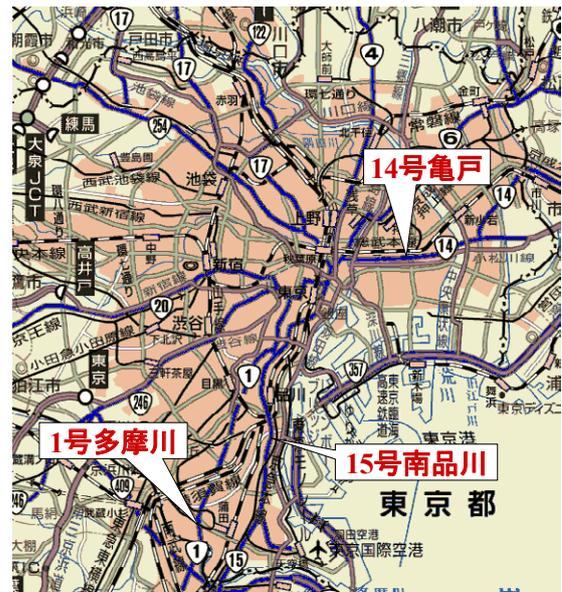


図-8 調査箇所位置図

調査箇所の概要を表-3に、位置図を図-8各調査箇所で行う機能維持作業の頻度を表-4に示す。

表-2 現道試験作業結果

番号	路線名	調査区間 (k.p.)	表層施工 完了時	第1回 (H17.3.12)		第2回 (H17.3.19)	
				回収量 (g)	単位面積当 り回収量 (g/m <sup>2</sup> )	回収量 (g)	単位面積当 り回収量 (g/m <sup>2</sup> )
①	1号多摩川	17.3~ 17.7	H17.2	717	5	517	3
②	14号亀戸	5.2~5.5	H17.2	1351	9	757	5
③	6号青戸	10.8~ 11.0	H16.5	1525	10	454	3

表-3 機能維持清掃作業の効果の確認調査箇所

路線	名称	方向	車線数 (片側)	調査区間(k.p.)	延長 (m)	表層施工 完了時期	総交通量(台・日) [大型車交通量]
14号	14号 亀戸	下り	4車線	5.2~5.5	300	H17.2	54711 [7933]
1号	1号 多摩川	上り	3車線	17.3~17.7	400	H17.2	59616 [10552]
15号	15号 南品川	上下	2車線	8.9~9.4	500	H17.1	48415 [9150]

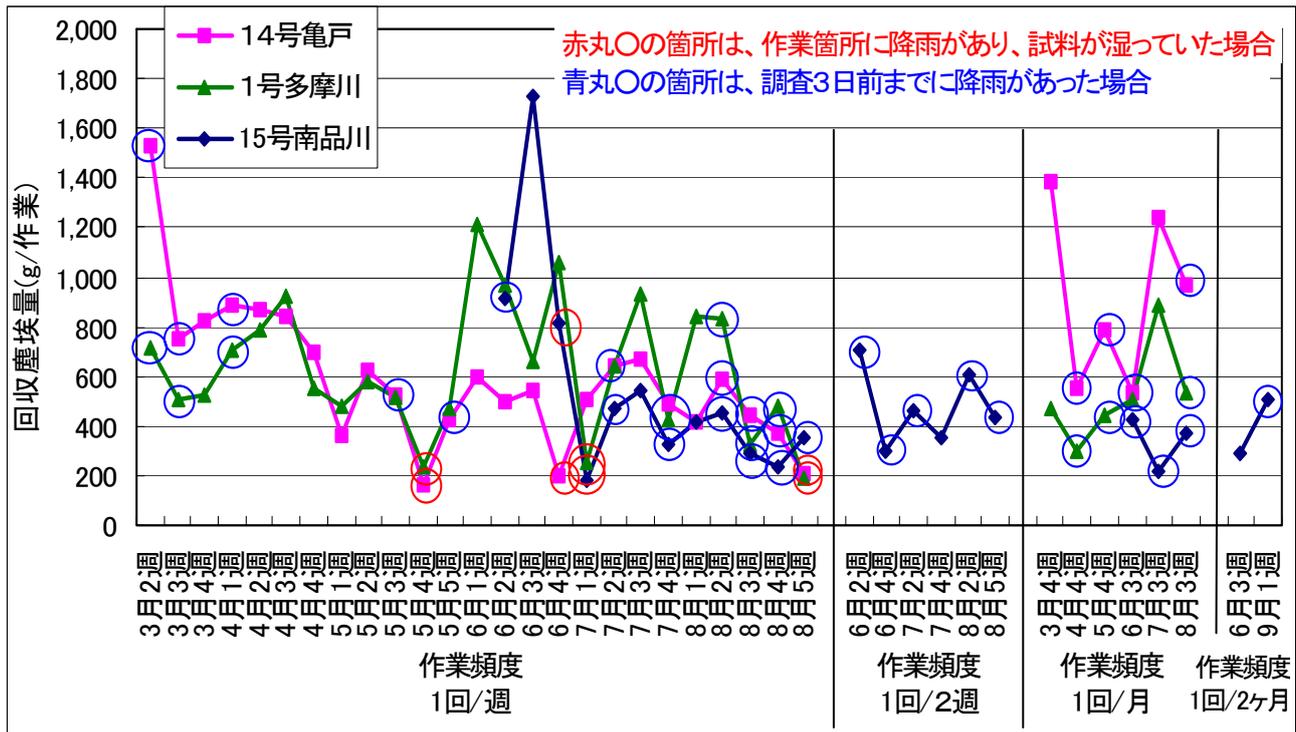
表-4 各調査箇所での機能維持清掃作業の頻度

調査箇所	維持清掃作業頻度
14号亀戸	1回/週、1回/月
1号多摩川	1回/週、1回/月
15号南品川 上り	1回/週 1回/2週 1回/月
15号南品川 下り	1回/2ヶ月 1回/3ヶ月 1回/6ヶ月

なお、15号南品川は、作業頻度による機能維持効果の比較を行うため、今年度より6号青戸に替わり新たに設定された調査箇所であり、この調査箇所は平成17年6月から作業を開始している。

各調査箇所には、維持清掃作業頻度の種類に合わせ複数の作業工区を設け、作業工区は、次に示す規模に統一した。

長さ50m×作業幅員2.4m=120㎡



図一9 回収塵埃量の変化

## 6. 1 調査結果

機能維持作業開始から平成17年8月までに実施した調査の結果を以下に示す。

### 6. 1. 1 回収塵埃量測定

機能維持作業において回収した塵埃量の変化を図-9に示す。現在までの傾向として、時間経過とともに回収量が減少するのではなく、1号多摩川（1回/週）や14号亀戸（1回/月）のように、初期段階よりも回収量が増加するケースもある。また、1号多摩川（1回/週）は清掃開始3ヶ月後でも回収塵埃量が1,200gを超えたケースもあり、気候や交通条件などの周囲環境と塵埃発生量には、何らかの関係があると考えられる。また、降雨の影響により試料が湿っていた時の回収塵埃量は約200gで比較的小さい傾向となっており、機能維持作業は降雨時は控えることが望ましいと推測される。

現在までの全体を通してみると、週1回の場合、回収塵埃量は400～1,000g/作業の幅に集中している。

この量は、単位面積あたりの回収塵埃量は、3.3～8.3g/m<sup>2</sup>となり、これを週1回作業で、年間50回の作業を行った場合に換算すると165g～415

g/m<sup>2</sup>・年が回収できていることになり、この値は、東京国道事務所の今までの検討で想定されている空隙つまり物の量の、供用開始後2年程度までは、路肩、OWP、BWPに関係なく1ヶ月当たり24g～28g/m<sup>2</sup>、年間約300g/m<sup>2</sup>が堆積するという値に近い値である。

また、回収塵埃量が多くなると考えられた、1回/2週、1回/月の作業工区でも1回/週の回収物量とあまり変わらなかった。

これは、週1回の作業時には最大約1,600g/作業の回収量を記録している事から、装置の能力の上限とは考えられないため、回収できない空隙の底部に堆積してしまったか、作業によって除去される前に降雨の排水と共に空隙つまり物が洗い流されている、などの要因が考えられる。

### 6. 2 回収塵埃粒度測定

代表的な調査箇所（14号亀戸）の回収塵埃のふるい分け試験結果を、図-10に示す。

同一工区においても作業時期が異なると回収塵埃の粒度はばらついており、季節により道路に堆積する塵埃の性質が異なる可能性も考えられる。

また、これまでの検討では、機能回復機の場合、

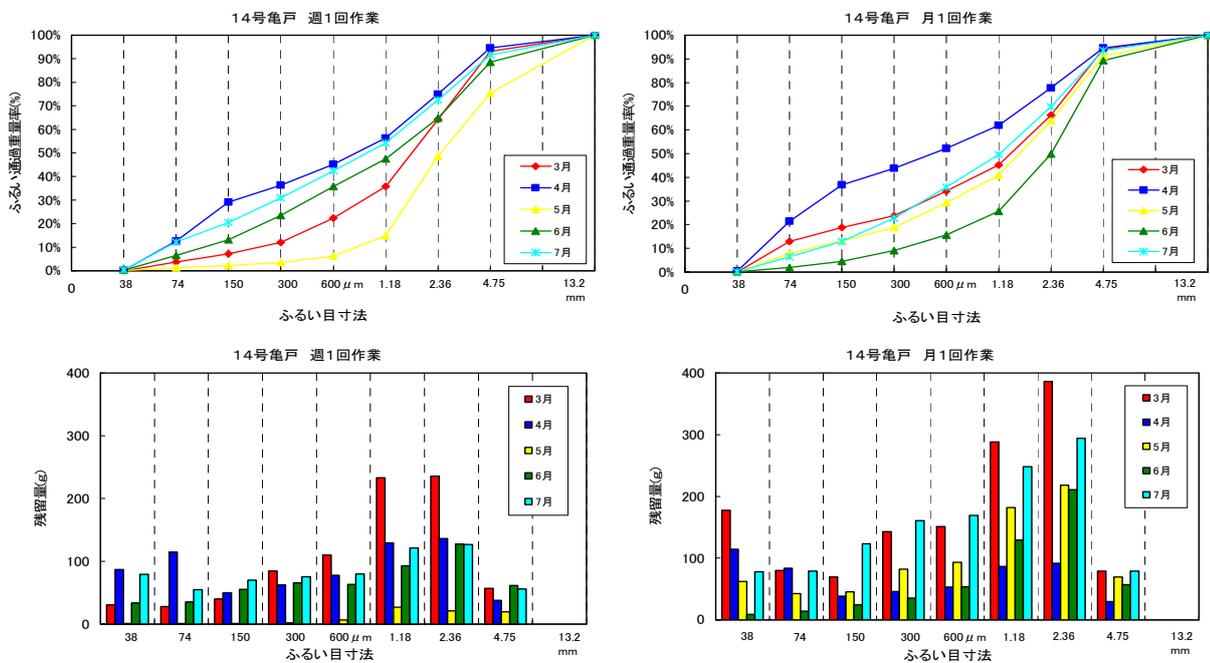


図-10 ふるい分け試験結果（14号亀戸）

高速型では、細かい粒子が回収しきれない傾向があったものに対して、機能維持装置では粗い粒径から細粒径まで回収できており、作業工区の切り取りコアの塵埃ふるい分け試験は実施していないため、比較してはできていないが、機能維持装置は十分な回収性能を満たしていると推測される。

## 7. 結論

今回本検討で開発した、空気のみによる「送風＋吸引」方式の機能維持車（表－5、図－10）により製作仕様の確率の目処が立った。今後、本件等結果に基づき機械開発における民間技術開発の促進を図るとともに、試験装置を使用した低騒音舗装機能維持実施要領（案）作成等の低騒音舗装維持管理手

表－5 機械仕様

項目	仕様
清掃方式	空気のみによる「送風＋吸引」
作業幅	2.4m
清掃速度	0～30km/h（平均20km/h程度）
塵埃回収量	10g/m <sup>2</sup> 以上（平均速度20km/h）
フロア風量	100m <sup>3</sup> /min×2（清掃時70m <sup>3</sup> /min×2）
作業用エンジン出力	95 kW /2,300min <sup>-1</sup>
回収タンク	0.8m <sup>3</sup>
ベース車両	UNIMOG U500型
車両総重量	16t
全長×全幅×全高	8,850×2,445×3,500mm
走行速度	0.12～85km/h

法の確立に寄与する計画である。



図－10 外観写真

## 8. 今後の課題

現道では実際に低騒音舗装の空隙に詰まっている塵埃量が不明であることから、作業前後でのコア抜き等を行い塵埃回収が良好に行われているか確認を行うとともに、機能維持作業により低騒音効果が維持されているかを確認する必要があるため、平成17年度も東京国道事務所と連携を図りながら、試験装置を使用して現道での低騒音舗装の機能維持作業を行い、収集されたデータを基に更なる実用化を目指して改良を進めていく予定である。

## 34. 建設車両用タイヤのカット防止

明石工業高等専門学校 都市システム工学科 江口 忠臣  
明石工業高等専門学校 建築・都市システム工学専攻 古東 佑介  
愛媛大学 名誉教授 室 達朗

### 1. 緒言

近年重ダンプトラック用ORタイヤの大型化が進み<sup>1)</sup>、生産財としてみられる場合が多い。そこで、現場でのORタイヤのバーストを防ぐために多くの研究がなされてきた。回転している状態でのタイヤ-路盤相互関係はORタイヤのサイドウォール部のカットやバーストに大きな影響を与える。本論文ではサイドウォール部のカットの実験的、理論的な研究について述べるものである。調査の対象には石灰岩採石場で稼動している重ダンプトラックに用いられている内部膨張圧 850 kPa の 3300-R51ORタイヤを用いた。また、次に示す3つの重要な因子を考慮してカットの進行の計算を有限要素法により行った；引張力、タイヤの回転、実用的サイドウォールの形状である。引張力はリムからビード部のはく離をも引き起こし、加えて製造過程の問題をいかにして解くかも問題となる。そしてそれは通常のタイヤよりも厚いサイドウォール部から生じるものである。本研究ではサイドウォールの構造の設計や基本的な機構を理解するために広く用いられている有限要素法を用いた。

大型建設車両のタイヤは、車両が現場をあちこち動き、また重量物を運搬するため、重厚なものでなければならず、大型建設車両用タイヤの機能不全を修理するのは極度に困難である。さらに修理には専門的な設備が必要で、寿命以下で機能不全となる場合、資源の活用性は減少してしまう。もしタイヤの機能不全を防ぐことができれば、タイヤの寿命は実質的に増加する。タイヤの主な故障には、

はく離、ショックバースト、カット等があり、図1には現場で発生したサイドカットの外観を示す。タイヤにカットが生じると形状の一樣性が失われ、カット先端に応力が集中する。カットの成長は最終的にタイヤバーストを引き起こす。それゆえ、タイヤの寿命を延ばすためにタイヤバーストの防止策を検討することが重要となる。

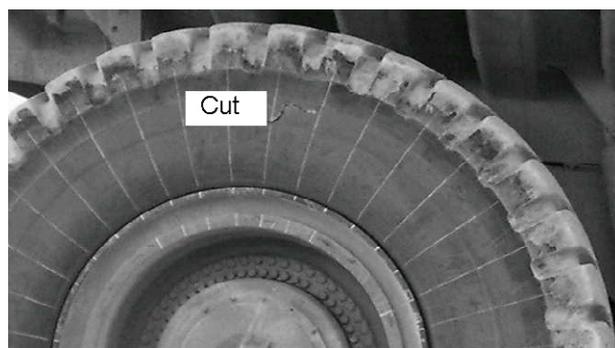


図1 サイドウォール部に発生したカット

これまで、建設機械用ゴム材の基礎的耐カット性については明らかにされている<sup>2)</sup>。しかし、土工現場において解決すべきカット問題は存在する。本研究の目的はORタイヤのサイドウォール部の応力を減少させる方策を探ることである。カット先端の応力集中によりサイドウォール部の一樣性は失われる。そこで応力緩和の方法として次の2つ方法が考えられる。一つはサイドウォール部の断面を増加させることでカットが発生しやすい近傍の応力を減少させる方法である。もう一つはバッファによる応力集中は他の部位での応力を緩和させるという現象を利用して亀裂進行を抑える方法である。

## 2. 応力解析

本研究での応力解析の流れは以下の通りである。

1. タイヤのモデル化
2. バッファ及び亀裂パターン組み合わせ
3. メッシュ分割
4. 有限要素法による応力解析

図2にタイヤ構造と解析の流れを示す。モデル化に際してはサイドウォールの矩形断面を想定する。実際のタイヤは3次元的な広がりを持つ円形中空体であるが、解析を容易にするため2次元平面応力問題として捉える。拘束条件はタイヤの特定の状態を考慮して設定された。ゴムのヤング係数  $12\text{MPa}$  とポアソン比  $0.48$  はサイドウォールの材料特性として用いる。

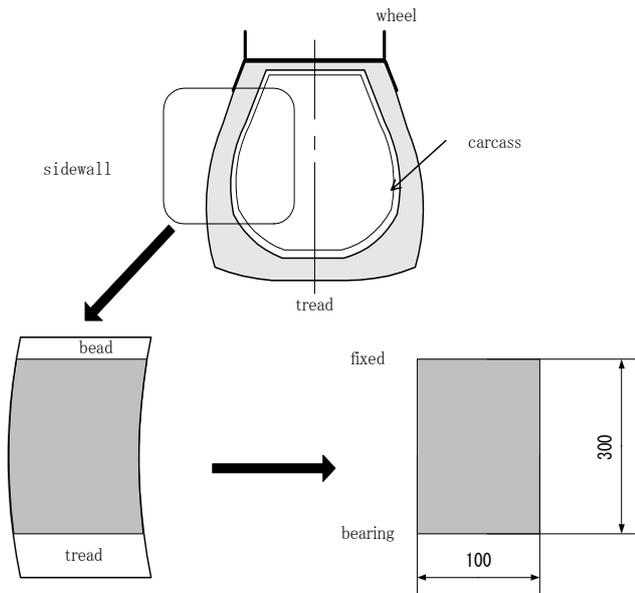


図2 タイヤ断面とモデル化

応力状態を調べるために3つの解析モデルを設定した(図3から5)。第一は亀裂が生じた際のサイドウォール部の応力状態を探るため、亀裂だけのモデルである。第2は亀裂予防の観点よりバッファがどの程度表面要素の応力を緩和するかについて調べるためのバッファのみのモデルである。第3は亀裂先端の応力緩和を調べるため、亀裂とバッファの組

み合わせのモデルである。

亀裂先端の解析値を安定させるために要素の組み合わせは考慮される。辺長が最小グリッド半径の1.5倍の正三角形要素を亀裂先端に配置する。有限要素法を用いた解析では、最大主応力やせん断力は要素の重心に働くものと考えなければならない。そして要素の重心を結んだ亀裂と線の形状を固定させる。亀裂深さのグリッドサイズを決めるために、グリッドサイズを亀裂パターンが同じに留まるまで変化させた。すると亀裂先端の応力が指数関数的に増加することがわかった。また、グリッドサイズの如何にかかわらず、バッファのない場合とバッファを挿入した場合の亀裂先端の応力の比の値は対数比として表され、一定となる。

本研究では亀裂先端に働く応力の指標として応力集中率を用いる。バッファのない解析モデルの表面要素に作用する最大主応力を基準となる応力値として用いる。

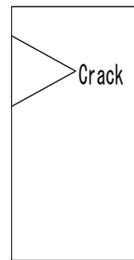


図3  
パターン1

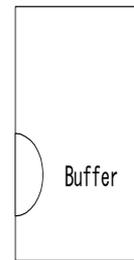


図4  
パターン2

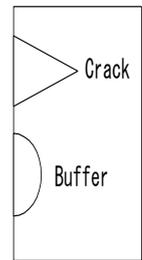


図5  
パターン3

## 3. ゴム試験片の疲労試験

図6に疲労試験のための試験機を示す。試験片形状は  $100\text{mm} \times 300\text{mm}$  とする。測定では初期不確実性を除去するために、新しい試験片を  $100\text{N}$  から  $200\text{N}$  の荷重で引張る。疲労試験は解析の結果が適用できるかどうかを決めるために行う。

本試験では試験片に载荷、除荷を繰り返し、亀裂進行を測定する。

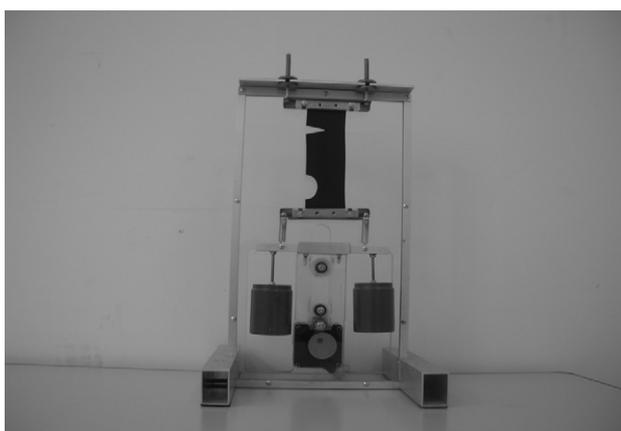


図 6 疲労試験機

#### 4. ORタイヤサイドウォール部の現場試験

土工現場においてORタイヤサイドウォール部のバッファ試験を行った。バッファは重度のカット方向に平行に、現場試験中にバッファ自体が欠陥とならないよう設置した。調査現場は高知県の鳥形山の石灰岩露天掘り鉱山で、平均標高 1200m である。また、現場では 15 台の重ダンプトラックが稼働しており、15m の高さベンチカットから運搬先までずりを運ぶもので、輸送平均距離は約 1000m である。現場にてタイヤ空気圧を最適に調整すれば 3300-R51OR タイヤの装着寿命は増加する傾向にある。路盤は砕石した石灰岩を敷き均し、グレーダーにより平滑に整備されている。石灰石の力学的定数は、みかけ比重 2.68、ショア硬さ  $35.1 \pm 2.4$ 、一軸圧縮強度  $42.4 \pm 13.1 \text{ MPa}$ 、引張強度  $3.8 \pm 1.0 \text{ MPa}$ 、砕石の超音波伝播速度  $29884 \pm 41 \text{ m/s}$  及びロサンゼルスすりへり減量 34.0% である。石灰岩塊の超音波伝播速度は  $1042 \pm 45 \text{ m/s}$  である。

図 7 に砕石現場での重ダンプトラックの稼働の様子を示す。

メーカーが推奨する大型空気タイヤ(3300-R51)の標準空気圧は  $700 \text{ kPa}$  である。重ダンプトラックのずり載荷時の平均速度は  $12.5 \text{ km/s}$  であった。



図 7 現場で稼働中の重ダンプトラック

#### 5. 結果と考察

##### 5.1 応力解析

バッファの効果を念入りに調べるためにバッファと亀裂のパターンを解析する。パターンは長さ 300mm、幅 100mm の矩形に深さ 20mm、開き 10mm の亀裂を設置する。集中応力が許容応力を超えると亀裂は成長し、サイドウォール部の破壊を引き起こす。そこで、亀裂周辺の応力分布を知ることは非常に重要である。応力は亀裂先端に集中する。バッファをこのパターンに組み入れた。

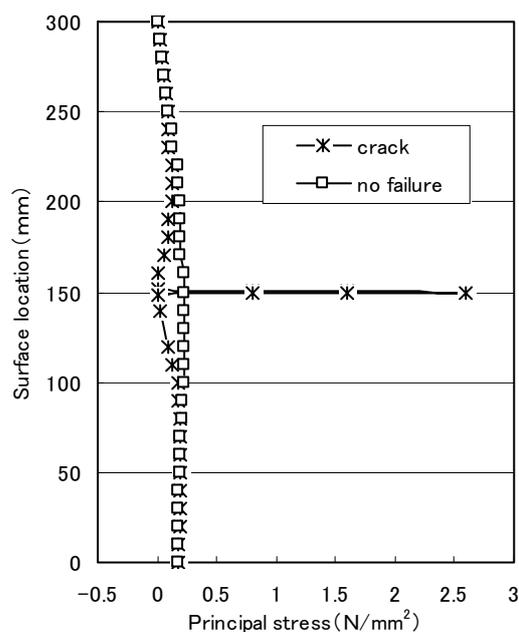


図 8 亀裂のみの時の応力分布

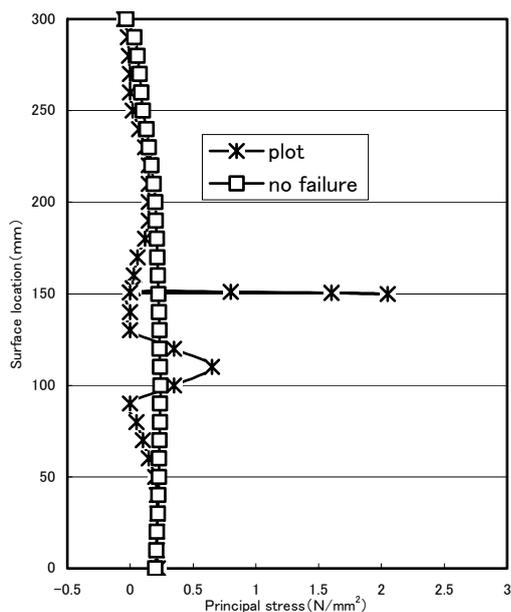


図9 バッファ挿入時の応力分布

図8に亀裂のみのパターンにおける表面要素の応力分布を示す。亀裂先端では最大主応力は  $2.51 \text{ N/m}^2$  となっている。欠陥のないパターンの  $0.24$  を基準の主応力とすると、亀裂根元の主応力は基準応力の約  $10$  倍に達している。応力集中は形状の均一性の欠如が引き起こす<sup>4)</sup>。応力集中の影響範囲は図8の応力集中はサイドウォールの破壊に亀裂先端を成長させるには十分である。一方、応力発生因子は空気圧で、既知の条件のもと引張力は一定である。つまり、亀裂先端の応力集中は亀裂付近に小さな応力集中を設けることで減少できる。亀裂とバッファの組み合わせのパターンの応力分布を図9に示す。半径  $20 \text{ mm}$  の半円バッファを亀裂の中心から  $40 \text{ mm}$  はなれた部分に設置した。亀裂先端の主応力は  $2.01 \text{ N/m}^2$  に減少し、バッファの最大主応力は  $0.71 \text{ N/m}^2$  となっている。この解析では応力集中の  $20\%$  減少がみられた。最適なバッファは亀裂先端の応力減少後の応力値によって決められることがわかる。注目すべき解析結果として、応力は亀裂開先隅角部で大きく減少し、開き先端でほぼ  $0$  まで減少される。

この現象は非常に興味深く、建設機械設備に用いられるゴムのカットはほとんどが転石により発生する。そして、ゴムの材料特性として、引っ張り状態ではゴムの晶化がみられるが、そのような状態ではわずかな外力でも簡単にカットする。その性質は、このような種類のカットからORタイヤのサイドウォールを保護するような引張力がほぼ  $0$  の範囲を生じさせる。

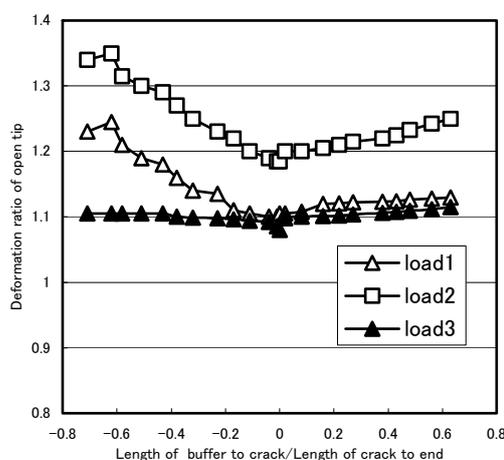


図10 バッファ位置と亀裂の変形

亀裂に対するバッファの機構は説明したが、バッファの機構と亀裂の変形を図10に示すが、バッファ位置が亀裂より固定端(ホイール)側にある場合は水平軸の正の値、接地面側にある場合を負で表している。この結果より応力減少の影響は接地面側で著しく現れている。この解析では、バッファは亀裂からの長さが半分から  $30\%$  の範囲内で応力分布に影響を与える。この解析結果はやや限られた経験上の知識を明らかにするが、より多くのバッファの影響に関する調査が求められる。しかしながら、本研究での解析から得られた結果は応力集中緩和を価値あるものとして示すものである。そして、亀裂先端付近に設けられたバッファが応力緩和に効果的に作用していることがみられ、バッファの影響は遠くの範囲には及ばないことが明らかとなった。したがって、最適な設

置方法はバッファと亀裂の位置関係によるといえる。

## 5.2 ゴム片の疲労試験

ゴム片の疲労試験は応力分布の解析結果に基づいて行われた。カットの亀裂とバッファはゴム片に人工的に亀裂断面を開き幅 5mm、深さ 20mmとし、直径 7.5mmから 20mmのものを亀裂から 10mmの距離に設置した。亀裂のみの試験片は平均寿命が 12.5 時間、全て 13 時間以内に破壊した。亀裂先端の成長速度は試験中増加傾向にあったが、この現象は明らかになっている<sup>4)</sup>。破断断面積は線形的に増加し、このことは応力集中を伴うカットが激しいタイヤバーストを引き起こすことを示している。つまり、ORタイヤのサイドウォール部のカット防止にふさわしい対策を早急に見つけることが非常に重要である。

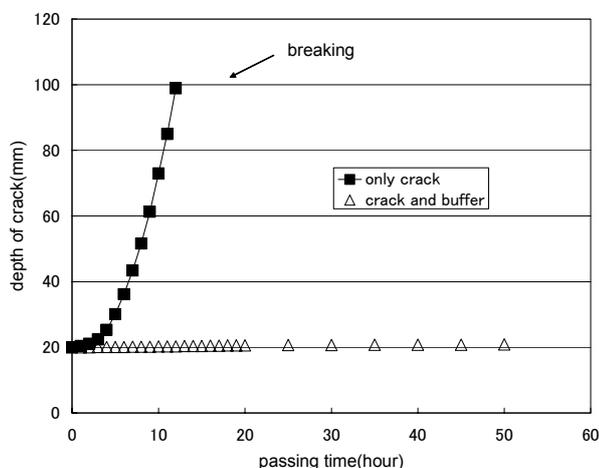


図 11 稼働時間と亀裂深さの関係

図 11 に疲労試験での時間の経過と亀裂深さの関係を示す。亀裂のみの試験片は 12.1 時間経過で破壊し、亀裂深さはほぼ放射状に成長している。上記したように小さな欠陥が ORタイヤのサイドウォールの破壊を急速に引き起こす。対照的にバッファ(直径 7.5mm)を挿入した場合の亀裂深さは 50 時間経過

で 20.9mm となり、50 時間まで増加はみられなかった。疑いなく、ゴム片のカットの成長は効果的にバッファを亀裂先端付近に配置させることで制御できる。

## 5.3 ORタイヤ現場試験

実際の ORタイヤでのバッファ試験は応力解析と疲労試験に基づき、現場で行った。バッファは図 12 のように重度のカット方向にほぼ平行に配置し、バッファ自体が欠陥とならないように慎重を期した。大型空気タイヤ(3300-R51)の標準空気圧はメーカー推奨の 700 kPa とし、重ダンプトラックのずり載荷時の平均速度は 12.5 km/s であった。

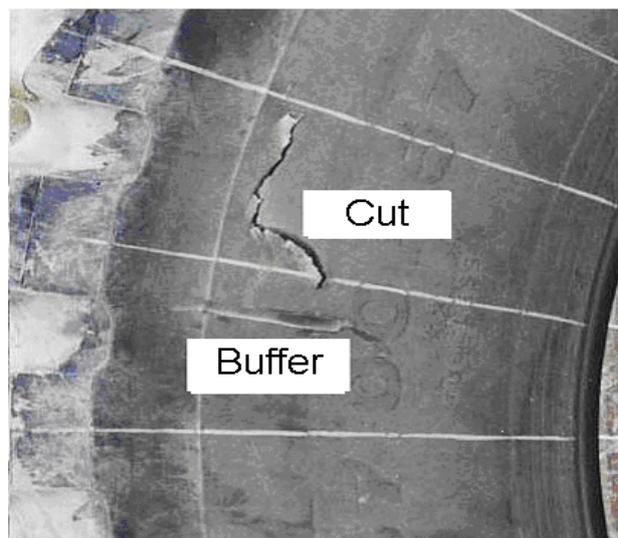


図 12 サイドウォールカットとバッファ

1200 時間試験の結果、好意的なものであった。試験中の亀裂の成長は明らかにみられなかった。この事実は解析に基づいた、応力集中を減少させるためのバッファの効果が確認できた。前述したことから、応力集中の効果を持つバッファと亀裂隅角部で応力が 0 となる現象によって、合理的なサイドウォールの設計が可能となる。

## 6. 結論

本研究の目的はORタイヤのサイドウォール部のカット進行を防ぐためにサイドウォールの応力分布を調べ、亀裂先端の応力緩和方法を提案するものである。結果として

1. 明らかに亀裂先端には応力が集中する。逆に亀裂開先部では応力は減少し、隅角部で0に近づく。このほとんど引張力が0となる範囲を生じさせる性質は、カットからORタイヤのサイドウォールを保護することを可能にする。応力集中は形状の一様性の欠如により生じるが、応力集中の緩和の影響が20%今回の解析によって認められた。最適なバッファの挿入は応力集中減少後の亀裂先端の応力値により決定できる。
2. バッファを挿入したときの亀裂の深さは50時間経過しても増加しなかった。疲労試験より、ゴム片のカットの成長は亀裂先端近くに効果的にバッファを設置することで制御できることが期待できる。
3. 現場試験中亀裂の明確な成長はみられなかった。これによりバッファによる影響が応力集中を緩和するという解析結果を確認できた。

謝辞: 本研究の現地作業に際し、西川裕雄氏(西川タイヤ(有)), 日鉄鉱業株の各位には多大なご協力をいただいた。ここに記して感謝する次第です。

## 参考文献

- 1) Eguchi, T. and Muro, T. 2000. Variation in Inflation Pressure of Off- the- Road- Tire, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress Proc., F2000IS005, 1-6.
- 2) Kawahara, S. 2000. Evaluation of Cutting

Resistance of Rubber for Construction Machinery, *Journal of Construction Management and Engineering* Vol.651, 27-35.

- 3) 西田正孝 : 応力集中, 森北出版, 1967
- 4) Eguchi, T. and Muro, T. 2003. The Prevention of Off Road Tire Bursting, *Proc. of the 9<sup>th</sup> European Conference of the ISTVS*,

## 35. 月面探査ローバに最適なトレッド形状の検討

呉工業高等専門学校専攻科 ○大知 剛  
 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

### 1.はじめに

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

### 2.供試地盤

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

### 3.実験装置および実験方法

平板牽引試験の実験装置は、試料砂をいれた  $4,000 \times 2,500 \times 1,000\text{mm}$  の土槽、3 種類のトレッドピッ

チ ( $19, 24, 29\text{mm}$ )、2 種類のトレッド高さ ( $12, 21\text{mm}$ )、平板、ウインチ、変位計、ロードセル、メモライザから成る。図-1 に平板概略図と平板の諸元を示す。図-2 に平板牽引試験の実験装置を示す。実験は平板をウインチでつなぎ、トレッドピッチ 3 種類とトレッド高さ 2 種類の組み合わせで平板を 6 種類に変化させ、牽引試験を行った。有効牽引力は平板と牽引装置との間にロードセルを介して測定した。また、それぞれの平板を平均垂直応力  $p$  を  $0.98, 1.96, 2.94, 3.92, 4.90\text{Pa}$  に変化させて実験を行った。また、牽引距離をスリップ量と定義して、 $150\text{mm}$  を牽引した。また、その中で最適なトレッドピッチとトレッド高さの比で取り付け角度を  $20^\circ \sim 40^\circ$  を  $5^\circ$  ずつ変化させ計 13 種類に変えて実験を行った。

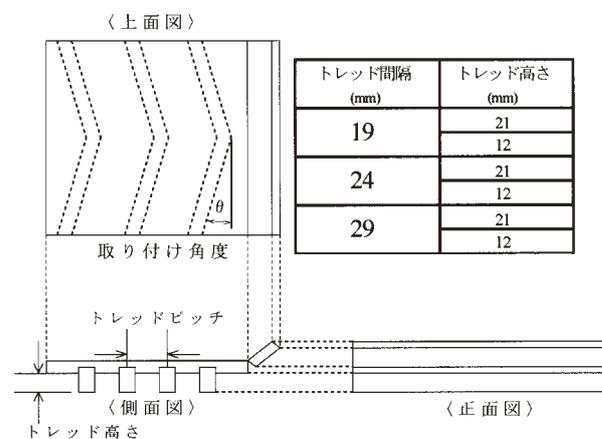


図-1 平板の概略図と平板の諸元

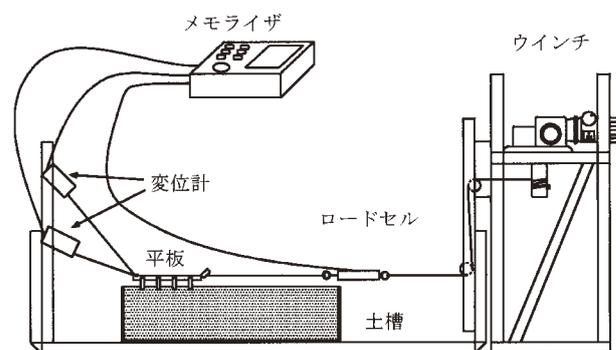


図-2 平板牽引試験装置

## 4.実験結果と考察

### 4.1 せん断抵抗

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

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

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

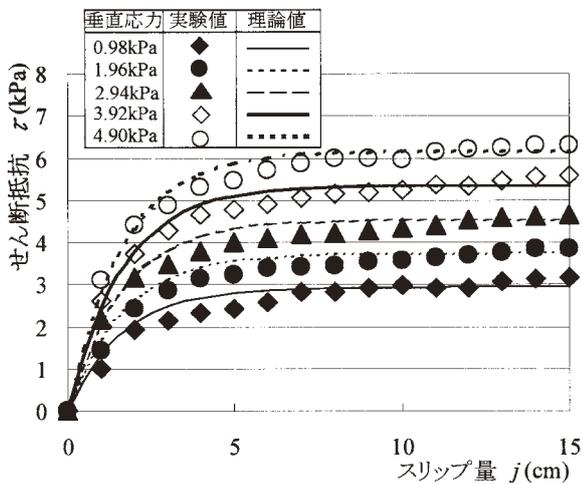


図-3 スリップ量とせん断抵抗の関係

図-3 にスリップ量とせん断抵抗の関係 ( $T_p = 29\text{mm}$ ,  $T_H = 21\text{mm}$ ) を示す。スリップ量の増加に伴いせん断抵抗は収束することが分かる。

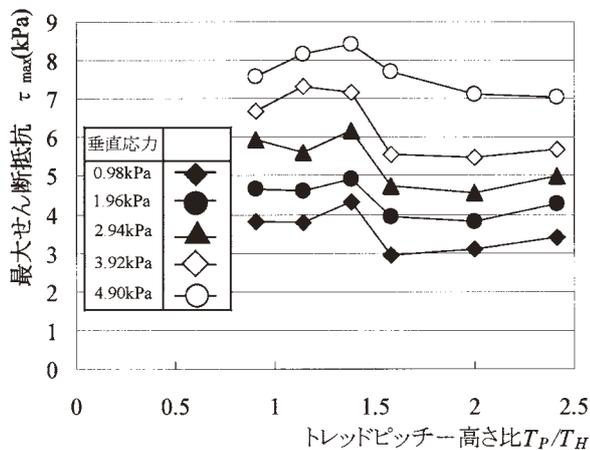


図-4 最大せん断抵抗と  $T_p/T_H$  の関係

図-4 に最大せん断抵抗とトレッドピッチ・トレッド高さ比の関係を示す。ここでせん断抵抗  $\tau$  が最大のときのトレッドピッチ・トレッド高さ比  $T_p/T_H$  を最適トレッドピッチ・トレッド高さ比  $T_p/T_H(\text{opt})$  と定義すると、1.38 付近であることが分かった。さらに  $T_p/T_H$  が 1.5 付近から最大せん断抵抗が低下しているのが分かる。

### 4.2 せん断抵抗と沈下量の関係

一般に、牽引力は図-5 に示すように、スリップ量の増大とともにトレッド底面およびトレッド両側面に滑り線が成長し、その滑り線上にせん断抵抗を発生せしめる土の進行性破壊により発生する<sup>4)</sup>。牽引による沈下に際し、重要となってくるのが平板に取り付けられたトレッドが牽引されることで地盤に描く土の進行性破壊による滑り線である。この滑り線がトレッドピッチ・トレッド高さ比によって次のトレッドに届くか届くまでの途中で終わってしまうかで牽引力や滑り沈下量に影響を与える。トレッドピッチ・トレッド高さ比が 1.38 以降の 3 点はいずれもトレッド高さに対しトレッドピッチが広いいため滑り線が途中で終了してしまっただと考えられる。今回はこの実験より得られた 1.38 を最適トレッドピッチ・トレッド高さ比とした。

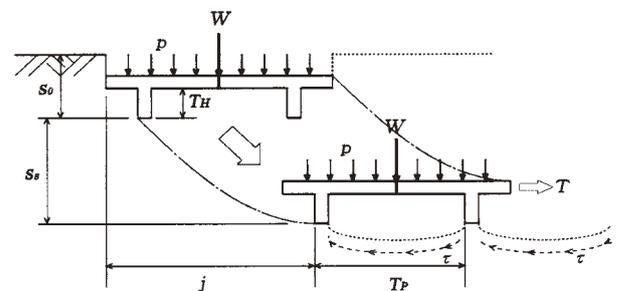


図-5 滑り線と有効牽引力の発生機構

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

$$s_s = c_0 \cdot p^{c_1} \cdot j_s^{c_2} \quad (2)$$

$c_0, c_1, c_2$  : 地盤-車輪係数 ,  $j_s$  : スリップ量 (cm)  
 $p$  : 平均垂直応力 ( $\text{N}/\text{cm}^2$ ) ,  $s_s$  : 滑り沈下量 (cm)

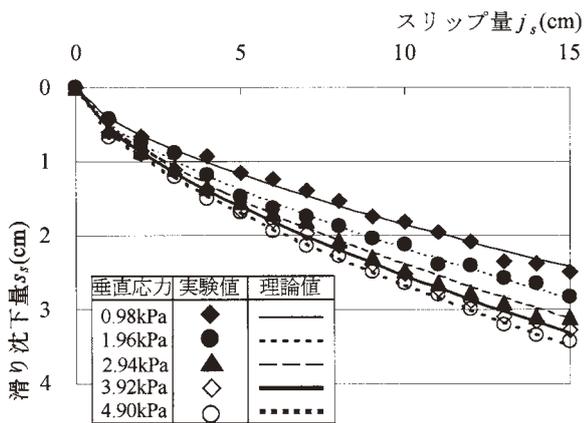


図-6 スリップ量と滑り沈下量の関係

図-6 にスリップ量と滑り沈下量の関係 ( $T_p = 20\text{mm}$ ,  $T_H = 21\text{mm}$ ) を示す。スリップ量の増加に伴い、滑り沈下量も増加し、やがて収束する傾向がある。

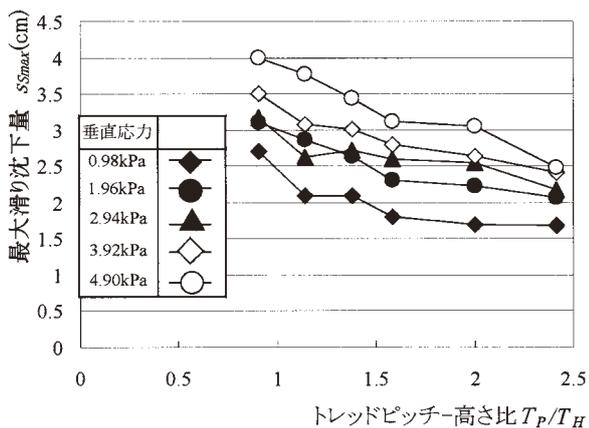


図-7 最大滑り沈下量と  $T_p/T_H$  の関係

図-7 に最大滑り沈下量とトレッドピッチートレッド高さ比の関係を示す。トレッドピッチが狭く、トレッド高さが高い平板形状であるほうが沈下量が大きくなる傾向が見られた。

#### 4.4 トレッドの取り付け角度

最適なトレッド取り付け角度を求めるため、最大せん断抵抗  $\tau_{max}$  とトレッドピッチートレッド高さ比  $T_p/T_H$  の関係から得られた結果より、トレッドピッチートレッド高さ比  $T_p/T_H$  を 1.38 にした平板に、トレッドの取り付け角度を  $20^\circ$  から  $-40^\circ$  まで  $5^\circ$  ずつ変化させた計 13 種類の平板を牽引した。

**4.4.1 せん断抵抗** 図-8 に最大せん断抵抗とトレッドの取り付け角度の関係を示す。これよりトレッドの取り付け角度  $\theta$  が  $-35^\circ$  まで最大せん断抵抗が大きくなり、 $-40^\circ$  で少し減少しているのが分かる。これはトレッドが V 字の形になることで牽引すると土がトレッドの中心に集まり、土が締め固められたためだと考えられる。逆に逆 V 字の形である  $20^\circ$  に取り付けられた平板では土を左右に分けて牽引されるため抵抗が少なくなったと考えられる。

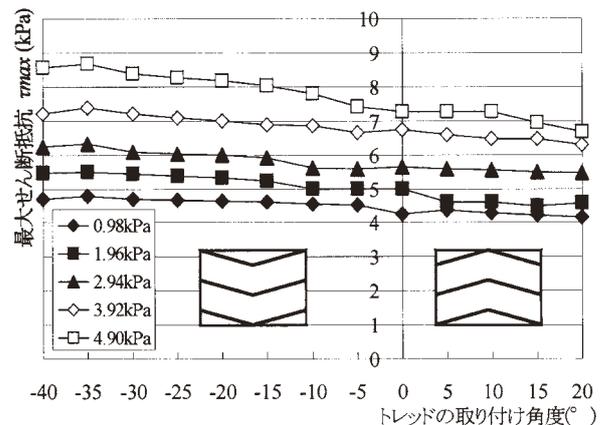


図-8 最大せん断抵抗とトレッドの取り付け角度の関係

**4.4.2 滑り沈下量** 図-9 に最大滑り沈下量とトレッドの取り付け角度の関係を示す。これよりトレッドの取り付け角度  $\theta$  が  $20^\circ$  に近づくにつれ、最大滑り沈下量が大きくなる傾向がある。逆に  $\theta$  が  $-40^\circ$  に近づくにつれ、滑り沈下量が小さくなる傾向がある。

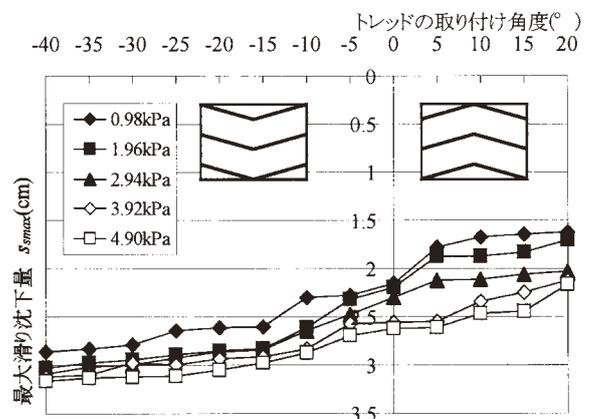


図-9 最大滑り沈下量とトレッドの取り付け角度の関係

**4.4.3 牽引時の土の動き** 図-10に牽引時の土の動きのモデルを示す。トレッドが逆V字の形で牽引すると土を左右に分けて進み、その沈下量も角度をつけるほど沈下量は小さくなった。V字型の形はトレッドの中心に土を集めながら牽引するため沈下量が大きくなっていったと考えられる。また、トレッドがV字の形で牽引すると土がトレッドの中心に集まり、せん断抵抗が大きくなったと考えられる。

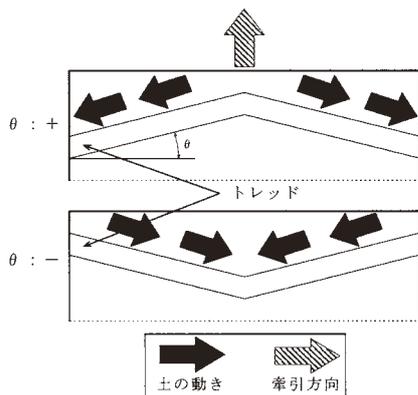


図-10 牽引時の土の動き

**4.4.4 地盤-車輪系定数** 表-1に取り付け角度別の地盤-車輪系定数を示す。この数値を用いて、シミュレーション解析を行うことで、低応力下での車両の走行性能を求めると考える。

**5. 結論**

シミュラントを走行する最適な平板形状はトレッドピッチ-トレッド高さ比からトレッドの取り付け間隔とトレッドの高さの比は約 1.38、トレッドの取り付け角度は進行方向に対して逆V字型に取り付けた平板であることが分かった。また、トレッドの取り付け

角度は $-35^\circ$  から $-40^\circ$  でせん断抵抗が最大となったため、最適な取り付け角度はこの範囲内にあることが分かった。このトレッドピッチ-トレッド高さ比や取り付け角度を特定することにより、適用する地盤での牽引力が最大の点が分かると最適な施工機械のトレッドピッチやトレッド高さが分かり効率的な作業が可能になると考えられる。さらに、今回の実験は月面を想定し、乾燥したシミュラントで行ったが、今後、含水比を変化させた砂地盤において同様の実験を行うことで、土石流災害などの復旧用機械などに応用することが可能だと考えられる。また、地盤-車輪系定数を用い、シミュレーション解析を行うことで、低応力下での車両の挙動の検討を行いたい。

〈謝辞〉

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

**6. 参考文献**

- (1) SELENE-B 検討チーム：月軟着陸実験計画 (SELENE-B) 提案書, (ISAS/NAL/NASDA), 12章 pp.23, 2002.
- (2) 深川良一：惑星探査・開発における地盤工学の貢献, 土と基礎, Vol.52, No.1, pp.10-12, 2004.
- (3) Z.Janosi, and B.Hanamoto：The analytical determination of drawbar-pull as a function of slip for tracked vehicles in deformation soils, Proc.of the 1st Int.Conf.of the I.S.T.V.S, 1961.
- (4) 室達朗：テラメカニクス-走行力学-, 技報堂出版, pp.31-74, 113-118, 1993.

表-1 取り付け角度別の地盤-車輪系定数

取り付け角度	$m_c$ (kPa)	$m_f$	$a$ (1/cm)	重相関係数	$c_0$	$c_1$	$c_2$	重相関係数
-40	3.323	0.821	0.056	0.972	2.348	0.203	0.443	0.982
-35	2.899	0.724	0.055	0.979	2.358	0.158	0.428	0.953
-30	3.102	0.772	0.049	0.988	2.898	0.217	0.472	0.977
-25	3.554	0.789	0.059	0.945	2.721	0.156	0.500	0.966
-20	3.596	0.766	0.055	0.981	2.972	0.149	0.393	0.961
-15	3.619	0.746	0.052	0.985	2.240	0.274	0.431	0.964
-10	3.412	0.752	0.055	0.983	2.249	0.220	0.457	0.958
-5	3.376	0.758	0.048	0.978	1.797	0.320	0.491	0.977
0	2.789	0.724	0.033	0.979	2.408	0.227	0.660	0.981
5	2.242	0.800	0.042	0.984	2.684	0.115	0.464	0.972
10	3.433	0.748	0.051	0.974	2.764	0.117	0.470	0.968
15	2.885	0.705	0.040	0.979	2.998	0.072	0.472	0.959
20	3.458	0.696	0.040	0.985	2.302	0.122	0.530	0.987

## 36. Investigating the contact dynamics between tool and granular material using Distinct Element Method (DEM)

○ Ha H. BUI, *Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University*  
Ryoichi FUKAGAWA, *Department of Civil Engineering, Ritsumeikan University*

### Abstract:

The contact dynamics between tool and granular material is presented in this study using numerical simulation. We focus on the failure mechanism and the resistance force acting on the cutting-tool during the excavation process. Our numerical simulations are performed in both two and three dimensional directions and compared with the 2D experimental model, which is carried out using aluminum bars regarding as soil model. This research has showed that DEM simulation results are well fitted in experiment in both mean of shear deformation pattern and the resistance force acting on the cutting-tool. The force has big fluctuation and the fluctuation is directly proportional to the granular size. In spite of fluctuation, the mean force is independent of particles size. The development of slip surface in 2D and the 3D failure mechanism during the excavation process could be visualized clearly through the DEM simulation.

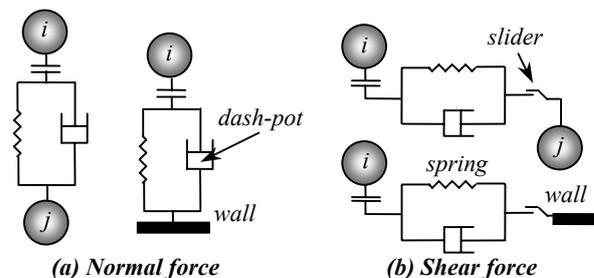
*Keyword: Distinct Element Method (DEM), excavation, granular material, cutting-tool, rake angle*

### 1. INTRODUCTION:

Recently, numerical simulation of granular material such as soil mechanics and silo engineering is usually using the Distinct Element Method which was developed by Cundall and Strack [1] in 1979. In this method, the granular material is modeled by circular particles (possible for irregular shape) and each couple of particles is connecting by a spring-dashpot model in both normal and shear directions as shown in Fig.1. The contact between two particles will then be described by a suitable contact model. This method has provided an excellent way to model the behavior of granular material.

This paper concerns a numerical investigation of an action of a rigid “tool” upon a granular material (excavation process). In 2D simulation investigation, the cutting-tool was first set on outside of a granular bin composed of irregular circle particles initially in equilibrium under gravity in side a rectangular box. After that, this tool was forced to move horizontally with a constant speed. This simulation was then extended into 3D simulation in which the spherical particles are assumed to be soil model.

We focuses on the total force acting on the cutting-tool and the shear deformation pattern of soil generating in front of the tool. In general, the resistance force acting on the tool can be calculated based on the passive earth pressure theory. However, several researchers have indicated that the actual resistance force is overestimated comparing with the theoretical value [2, 4]. This problem is considered due to the lack information of soil failure generating in front of the cutting-tool. Therefore it is necessary to clarify this failure mechanism.



*Fig.1: Models of contact force in normal and shear direction*

Our research reveals a big fluctuation in force acting on the cutting-tool and this fluctuation is proportional to the grain size. In spite of fluctuation, its mean value is independent of grain size. In 2D, this force tends to increase linearly with respect to the excavation progress, but in 3D this force seems to be constant after reaching a maximum value.

In the means of the failure mechanism, our simulation showed that the slip surface of soil failure is become curve and it is enlarged from the tool tip to the ground surface. The volume of 3D failure could be clarified in our simulation. The main results will be presented after the short description of the simulation method and of physical parameters for our simulation systems. Several aspects of the problem such as the influence of grain size, of the angle of the tool (rake angle) and of the cutting speed will also be discussed through this paper.

### 2. SIMULATION METHOD

For these simulations, we have developed our computer program based on the method proposed by

Cundall & Strack [1] so called Distinct Element Method. For a detailed description of this method the reader may refer to [2, 3]. In our simulation granular particles are assumed to be an assembly of circle disks in 2D and spherical ones in 3D. These particles contact each other at a contact point which is modeled by a spring-dashpot model, as shown in Fig.1, in both normal and shear directions. Using this model, the forces acting on particle including normal force and friction force could be calculated. The friction force in shear direction is then modeled to satisfy the Coulomb's friction law and finally the motion of particle will be solved by taking integration of the motion equations.

As mentioned above, in 2D simulations we used the circular particles. These particles are generated randomly in a rectangular box. Before starting a numerical simulation, one needs to compact the particles to a relax condition which has sufficiently small kinetic energy. The cutting-tool in this simulation consists of a rectangular rod enveloped by a circle particle in order to make the tool tip smoother. Since we are mainly interested in the failure pattern and the resistance force acting on the cutting-tool, the tool was initially set outside of the soil box at a desired depth as near as possible to the granular sample. Then this tool was pushed horizontally with a constant speed along the granular bed. Most of simulations were performed with speed of 2cm/s. Few of them, however, were performed with 1cm/s in order to compare with experiments. For the simulation with the cutting speed of 2cm/s, we used distributed radius particles. Four samples with different particles size are simulated in order to check the effect of particle size on the force fluctuation, these samples are listed in Table 1 as A, B, C, and D. Simulation with the cutting speed of 1cm/s used only two kinds of particles with diameter of 1.5mm and 3mm (sample F). This simulation will then be compared with an experiment using the same particle radius, excavation speed, excavation depth and void ratio. A detailed description of experiment will be described later.

In 3D simulation, the particles configuration are also generating some what similar to the 2D problem. Particles were also first generated randomly into a cubic-rectangular soil bin (120×120×120) mm, then they are compacted by gravity to the height of 50mm until the particle system is stable. The cutting-tool, which has width of 40mm, consists of a cubic-rectangular rod with smoothed surfaces and spherical edges. Initially, this tool was set on outside of the soil box at the depth of 30mm as near as possible to the granular sample, after that the tool is moved horizontally with a constant speed of 2cm/s. We also

considered the effect of the rake angle on the soil failure and resistance force by performing two simulations with rake angle of 90 degree (sample G) and 60 degree (sample H) comparing with the horizontal direction. The control diameters and void ratio in 3D simulation are distributed in Table 1 as sample G, H. The coefficient of internal friction equals 0.3 for both 2D and 3D. The walls in all simulations are treats as frictionless and the coefficient of friction between free particles and tool is 0.3.

Table 1. Characteristics of the samples.

Samples	No. of particles	Control diameter (mm)	Initial void ratio
A	8585	$2.8 \leq d \leq 3.6$	0.1954
B	3819	$4.0 \leq d \leq 5.4$	0.1963
C	1628	$6.2 \leq d \leq 8.2$	0.1928
D	1008	$8.2 \leq d \leq 10.1$	0.1947
F	7450	$d = 1.5; d = 3$	0.1485
G	51840	$2.0 \leq d \leq 3.0$	0.2125
H	51840	$2.0 \leq d \leq 3.0$	0.2231

In order to validate our simulation results, 2D experiments were performed in this study. In this experiment aluminum bars, which have 1.5 and 3mm in diameter and 50mm in length, were used regarding as granular material. Aluminum bars were distributed randomly into a soil box to the height of 14cm and the cutting-tool was immersed 8cm depth into sample. A 6-axis force sensor was attached behind the cutting-tool in order to measure the resistance force and moment acting on the cutting-tool. And a high speed camera was used to record the failure deformation pattern of the sample during the excavation process. The excavation was done by dragging the soil box to the left directions with a speed of 1cm/s. The experimental apparatus using in this study are shown in the Fig.2.

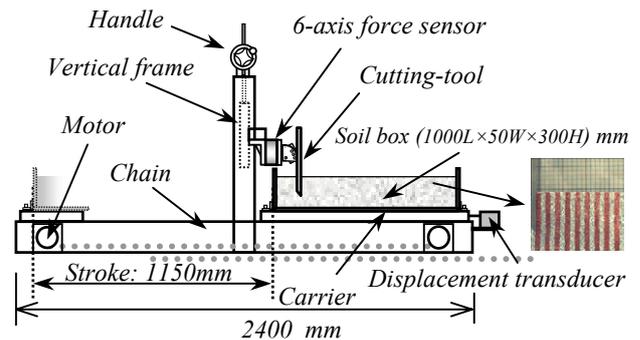
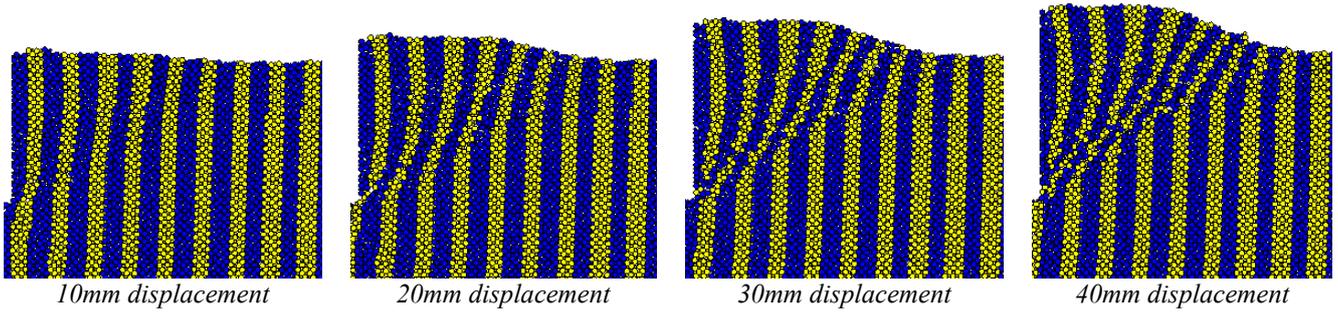
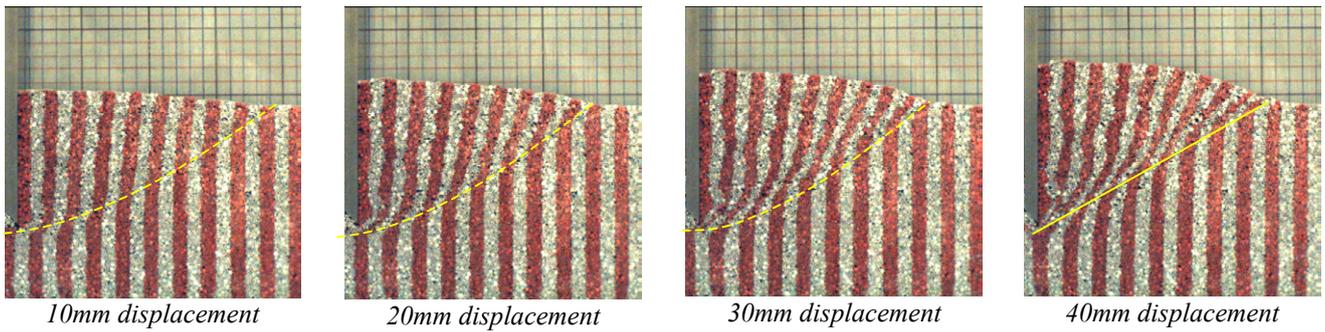


Fig.2: Two dimensions experimental apparatus



(a) Excavation progress in simulation using DEM (2D simulation)



(b) Excavation progress in experiment (2D experiment)

Fig.3: The comparison of soil deformation pattern between simulation and experiment

### 3. RESULTS AND DISCUSSION:

#### 3.1. Shear deformation and resistance force in 2D

Fig.3 shows the comparison between experiment and simulation results in term of the shear deformation pattern, each image was taken after 10mm displacement of the cutting-tool. Fig.3 (a) showed the simulation results while Fig.3 (b) showed the experimental one. From this figure it could be seen that the shear deformation pattern in simulation agreed very well with the experimental results. The slip line, boundary between moving soil volume and stationary soil volume, changes from curve line into straight line after each cycle where a new slip line is generated. The mechanism of this phenomenon can be explained due to the superposition of the soil mass in front of the cutting-tool.

The agreement between simulation and experiment is not only in term of shear deformation pattern but also in term of the excavation resistance acting on the tool as shown in Fig.4. In this figure, the simulation result is compared with three experimental results which were performed in the same condition. The result has shown that in both simulation and experiments, the force acting on the cutting-tool have big fluctuations. This fluctuation was caused by some reasons, one could be the magnitude of particles size and the other reason could be the effect of non-

cohesion material using in both simulation and experiment. In spite of fluctuation, this force seems to increase linearly with respect to the traveling distance of the cutting-tool.

In order to verify the effect of the particles size on the fluctuation of resistance force, we have performed four simulations using different size of particles corresponding to samples (A-D) as shown in Table 1.

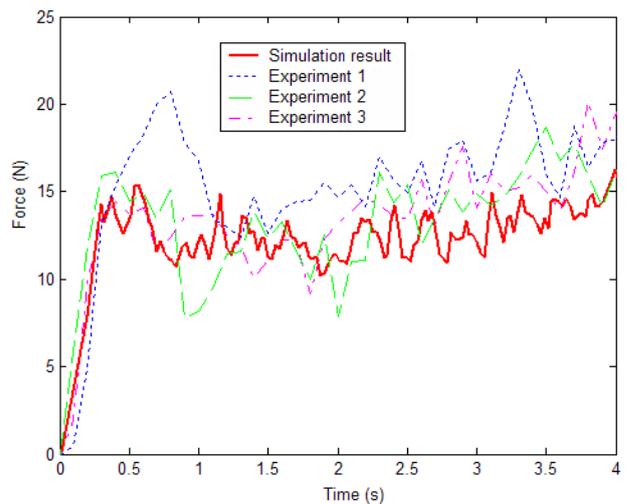


Fig.4: Horizontal component force acting on the cutting-tool as a function of time in experiment (dash lines) and simulation (solid line).

Fig.5 shows the results of the horizontal resistance force acting on the cutting-tool in simulations corresponding to different size particles simulation (samples A to D). From this figure, it could be seen that the force fluctuation reduces as the size of particle decreases. In spite of the fluctuation, the mean force is almost the same in all of simulations and this mean force increases linearly with respect to the time.

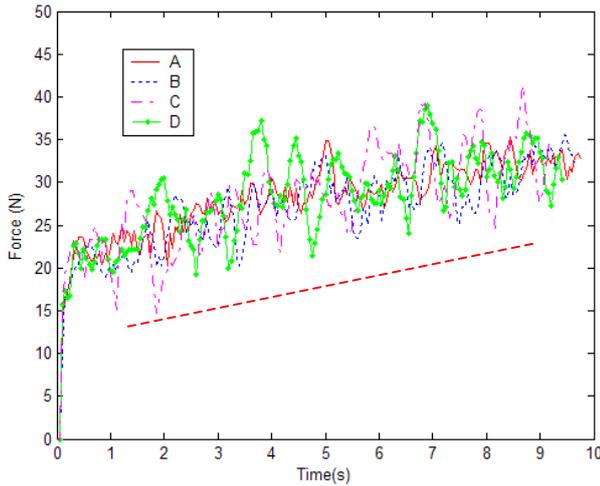


Fig.5: Horizontal component force acting on the cutting-tool as a function of time in 2D simulation corresponding to four samples (A-D).

### 3.2. Failure and resistance force in 3D

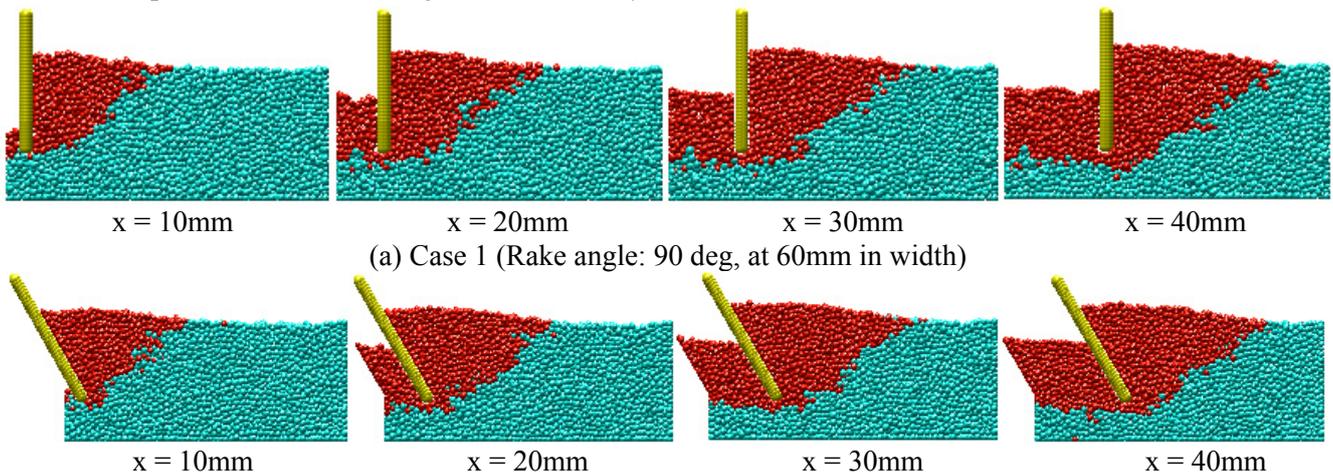
The 3D simulation results will be discussed in this section in term of comparison between two simulation samples (G, H). Sample G was simulated with rake angle of 90 degree while sample H is that of 60 degree.

Figs.6 and 7 show the cross sectional images which were obtained at every 10mm interval with respect to the traveling distance of the cutting-tool from  $x=10\text{mm}$  to  $x=40\text{mm}$ . In these images, the deep region (failure zone) represents an area where particles took the large displacement comparing with their initial position, while the region of stationary

particles is presented by the light color.

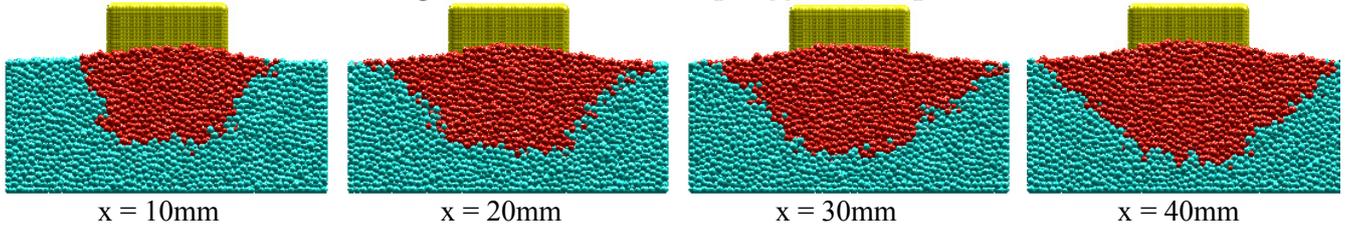
Fig.6 (a) shows the results of excavation using the cutting-tool with a rake angle of  $90^\circ$ . The cross section was taken at the plane where it is 60mm in width. From these images, it could be observed that the shape of boundary which divides deep color and light color (i.e., slip surface) changes from the curved line into the straight line during the progress of the blade, and the failure area of soil in front of the blade, deep region, increases with respect to the traveling distance of the blade. Fig.6 (b) shows the results of excavation for the cutting-tool with a rake angle of  $60^\circ$ . The images obtained in this case are similar to those of Case1, however comparing with Case1 as can be seen in the images of  $x = 10\text{mm}$  and  $x = 20\text{mm}$ , the shape of slip surface was first formed in the straight line and then it changes into the curved line while this is not found in Case1.

The cross sectional images in Fig.7 were obtained at a plane in front of the cutting-tool where it is 10mm far from the tip of the blade. Fig.7 (a) shows the results of excavation for the vertical blade (rake angle of  $90^\circ$ ). From these images, it could be seen that the failure area increases with respect to the traveling distance of the cutting-tool. Moreover, comparing these images it could be observed that the failure area in front of the cutting-tool expands rapidly from the images of  $x = 10\text{mm}$  to  $x = 20\text{mm}$ , however this expansion becomes small afterward as seen in the images of  $x = 30\text{mm}$  and  $x = 40\text{mm}$ . This indicates that the failure area in front of the cutting-tool seems to be constant after some displacements of the cutting-tool. Fig.7 (b) shows the results for the inclined blade (rake angle of  $60^\circ$ ). The images obtained in this case are similar to those of Case1. However, comparing with Case1 the failure area in front of the inclined blade seems to be smaller than that of the Case1.

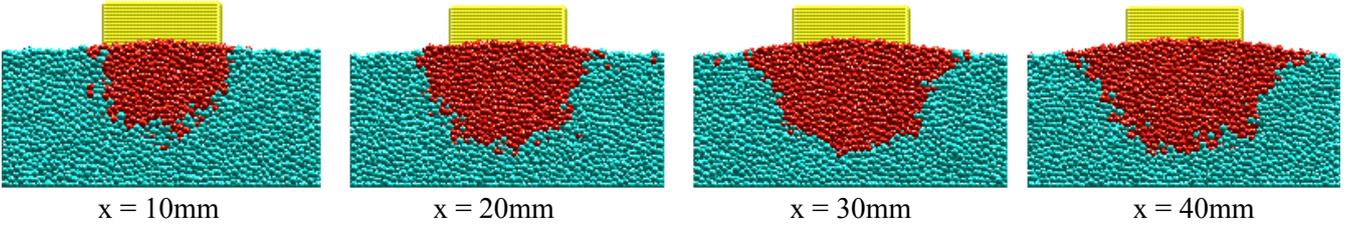


(b) Case 2 (Rake angle: 60 deg, at 60mm in width)

Fig. 6: Cross sectional images of failure length



(a) Case 1 (Rake angle: 90 deg, at 10mm in front of the blade)



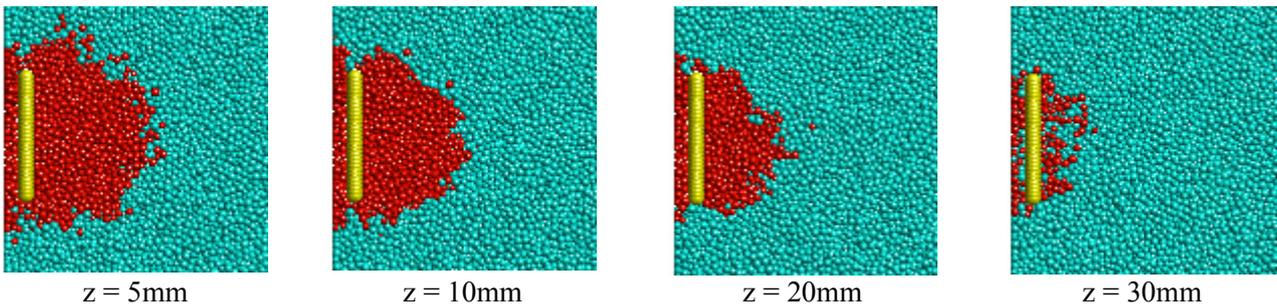
(b) Case 2 (Rake angle: 60 deg, at 10mm in front of the tip of the blade)

Fig. 7: Cross sectional images of failure width

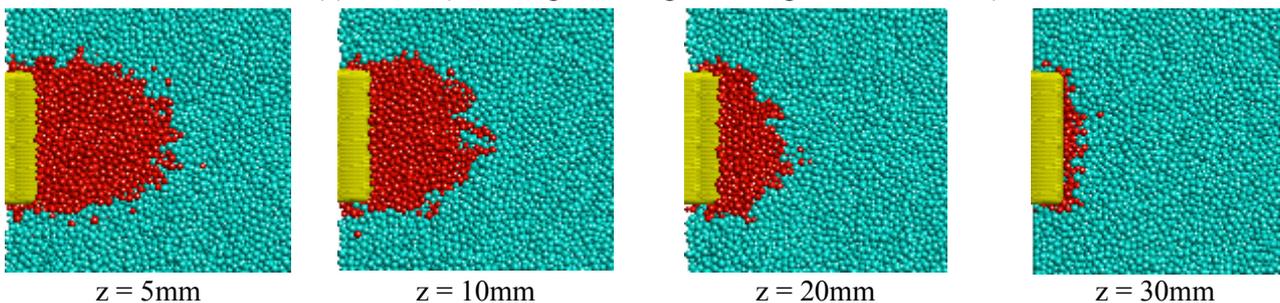
Fig.8 shows the cross sectional images which were obtained at every 10mm interval with respect to the excavation depth from  $z = 10\text{mm}$  to  $30\text{mm}$ . The first image was plotted at  $5\text{mm}$  in depth in order to eliminate the effect of particles which fall down due to the growing up of soil particles in front of the blade. Fig.8 (a) presents the excavation using vertical blade while the excavation with inclined blade is presented in Fig.8 (b). From these images it could be seen that the section of boundary, which divides deep color and light color (i.e., slip surface), becomes curved and the failure region enclosed by the slip surface is enlarged as the ground surface is approached. Moreover, comparing between Case1 and Case2, as could be

seen in the images of  $z = 5\text{mm}$  and  $z = 10\text{mm}$ , the angles of direction of slip surface from the excavation at the edge of cutting-tool seem to become wider for the Case1.

Fig.9 shows the 3D images of failure volume at the difference view when blade performed  $30\text{mm}$  traveling distance. From these images, the three dimensional configuration of failure mechanism was clarified. The failure volume around the cutting-tool was enclosed by a curved line at the free surface. Moreover it could be seen that a curved slip surface has expanded from the blade tip to the ground surface in both case of simulations (incline blade and vertical blade).

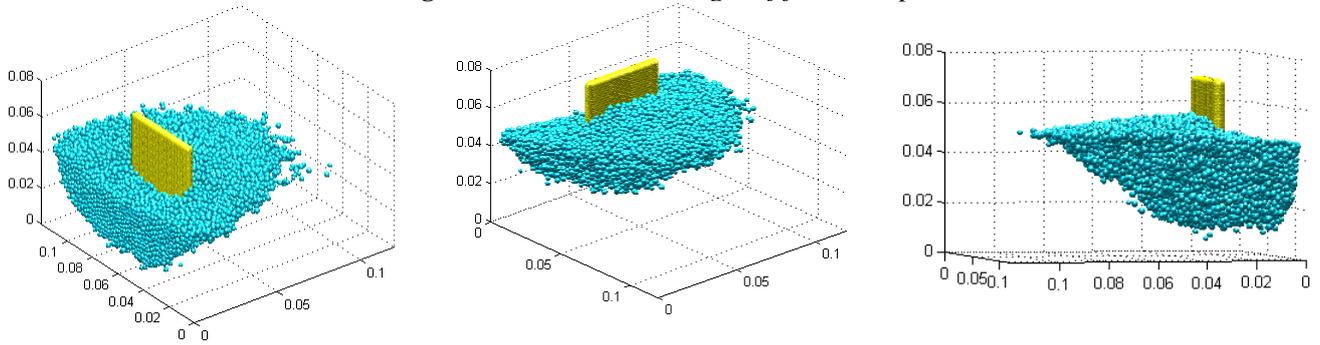


(a) Case 1 (Rake angle: 90 deg, traveling distance: 10mm)

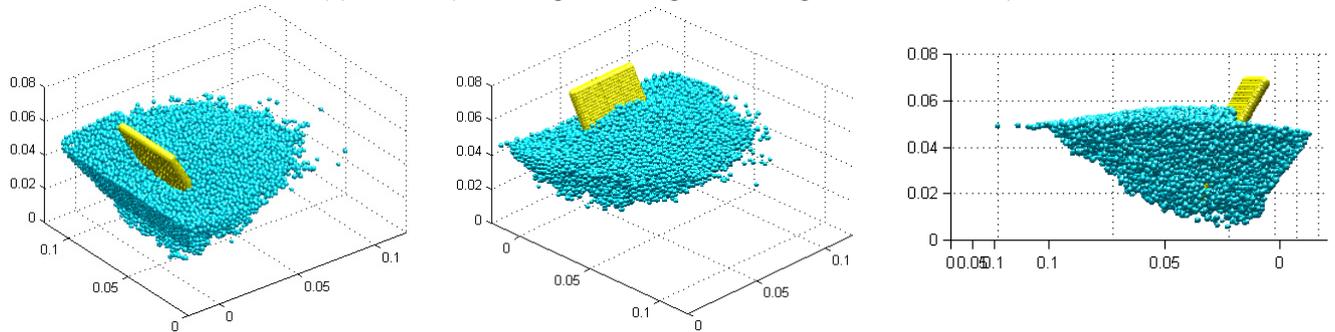


(b) Case 2 (Rake angle: 60 deg, traveling distance: 10mm)

Fig.8: Cross sectional images of failure depth



(a) Case 1 (Rake angle: 90 deg; Traveling distance: 30mm)



(b) Case 2 (Rake angle: 60 deg; Traveling distance: 30mm)

Fig. 9: 3-D Images of failure mechanism

Fig.10 shows the horizontal force acting on the cutting-tool for Case1 (rake angel of  $90^\circ$ ) and Case2 (rake angel of  $60^\circ$ ). Though this figure, each force tends to increase with irregular fluctuation with respect to time. Moreover, it could be seen that these forces increase rapidly in the fist interval of time but this increment becomes small afterward. This tendency also was observed in the failure width as shown in Fig.7 and it indicates that the force acting on the cutting-tool is proportional to the failure width of soil in front of the cutting-tool. Furthermore, comparing these forces in Fig.10 has shown that the force acting on inclined blade is smaller than the case of vertical blade.

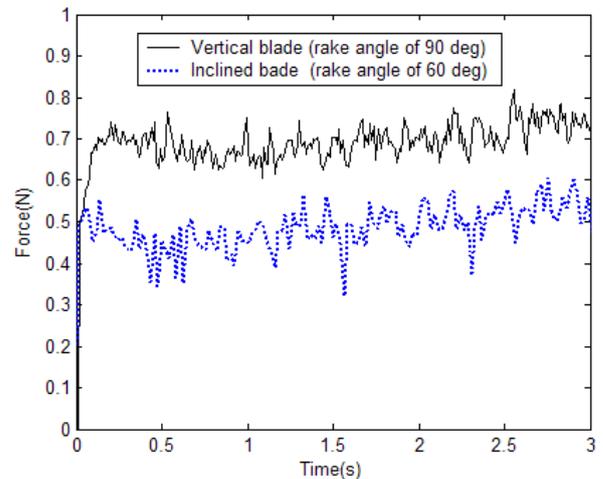


Fig.10: Horizontal force acting on cutting-tool

#### 4. CONCLUSIONS:

The numerical investigation of soil excavation using Distinct Element Method (DEM) has been presented through this paper. Our study focuses on the shear deformation pattern and the resistance force acting on the cutting-tool. Calculation results have shown that:

The 2D simulation results agreed very well with the experiment in both mean of shear deformation pattern and resistance force acting on the cutting-tool. The slip surface change from the curve line into the straight line after each cycle where new slip line is

generated. The force acting on the cutting-tool has big fluctuation and this fluctuation is directly proportional to the size of particles. In spite of fluctuation, the mean force is independent of particle size and it is increased linearly with respect to the traveling distance of the cutting-tool.

In 3D, calculation results have shown that the cross sectional images of the excavation mechanism could be presented at any planes in DEM simulation. The failure width of soil in front of the cutting-tool expands rapidly in the first interval of time however this tendency becomes small afterward. Furthermore, the angle of the direction of slip surface from the excavation direction at the edge of the cutting-tool seems to become wider as the rake angle of the cutting-tool decrease, this result is also in agreement with the experimental results using X-ray radiography method conducted by Fukagawa, et al. [4]. In term of the excavation resistance, 3D simulation indicated that the force acting on the cutting-tool also has fluctuation and its magnitude become smaller as the rake angle of the cutting-tool decreases. In spite of linear increment in 2D simulation, the force seems to be constant after reaching the maximum value. This tendency was also found in the expansion of failure width of soil in front of the cutting-tool. Finally, the 3D failure mechanism of soil excavation could be visualized clearly from the DEM simulation.

#### REFERENCES

1. P. A. Cundall and O. D. L. Strack: *A discrete numerical model for granular assembles*, *Geotechnique*, 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
2. Ha. H. BUI, R. Fukagawa, T. Kobayashi and K. Tamoi: DEM simulation of three dimensional soil failure with cutting blade, Proc. of the 7th Asia-Pacific ISTVS Conference, Changchun, China, September 2004.
3. Ha H. BUI. Numerical Simulation of Excavation with Cutting-Blade by DEM, Master Thesis, Ritsumeikan University, 2004.
4. R. Fukagawa, T. Kobayashi, K. Tateyama and H. Takahashi: Three dimensional visualization of the excavation mechanism for dry sandy ground by a CT-scan technique, Proc. of the 9th European Conference of the ISTVS, 9, Harper Adams, UK, pp. 128-135, 2003.
5. E. T. Selig and R. D. Nelson, Observation of Soil Cutting with Blade, *Journal of Terramechanics*, Vol. 13, pp. 32-53, 1964.



## 37. 超大型油圧ショベル EX8000 の開発

日立建機株式会社

資源開発システム事業部 開発設計センター

相原三男

○斎藤敏夫

### 1. 開発の背景

海外の大規模鉱山では、効率アップのためにダンプの大型化が進んでおり 300ton 級ダンプの年間需要は 160 台に達すると予想されている。これまで、300ton 級ダンプへの積込機はほとんどが電気ショベルであったが、油圧ショベルが有望視されるオイルサンド市場だけでも 300ton 級ダンプの全世界需要の 25% を占めていくものと予想される。

ペイロード 140ton 以上のマイニングダンプの需要推移を図 1.1 に示す。

このように、鉱山でのダンプの大型化により近年増加している 300ton 級ダンプにベストマッチングする積込機の開発を目的として、超大型油圧ショベル EX8000 の開発に着手した。

EX8000 の開発にあたっては、これまでの超大型油圧ショベルの経験を生かし、鉱山用積込み機械として最も望まれる

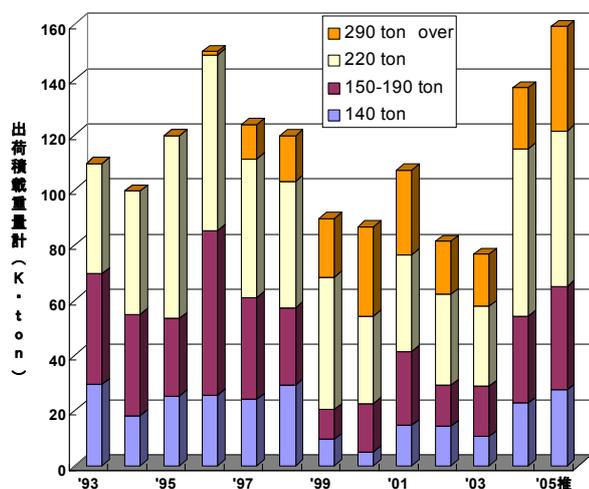


図 1.1 マイニングダンプ (140ton 以上) 需要推移

- ① 卓越した信頼性・整備性
  - ② 低額なライフサイクルコスト
- を実現させることを最重点視した。

また、流量応援型分散バルブシステムを始めとし、シリンダストロークエンド制御、リストコントロールタイプ電気レバー、カラー液晶ディスプレイ、シングルフランジ下ローラ等々といった新技術、新機軸を盛り込み開発を行なった。

### 2. 開発の狙い

300ton 級ダンプにベストマッチするバケット容量、作業範囲とした。図 2.1 に EX8000 外観写真、図 2.2 に EX8000 全体図を示す。

EX8000 の主仕様は下記である。

- ・ バケット容量 40m<sup>3</sup>
- ・ 全装備質量 805ton
- ・ 最大掘削半径 18500mm
- ・ エンジン出力 1400kw × 2 基
- ・ 本体 全高 9900mm



図 2.1 EX8000 外観

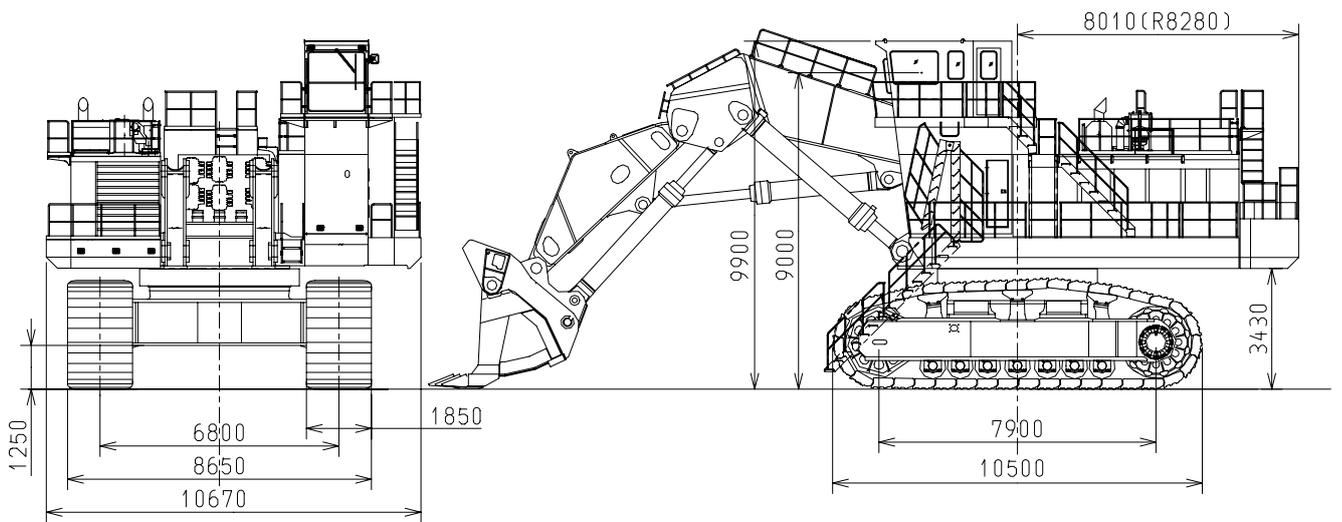


図 2.2 EX8000 全体図

### 3. 特徴

以下に新機軸とした技術 2 点について紹介する。

#### 1) 流量応援型分散バルブシステム

これまで超大型ショベルは大型化に伴い、コントロールバルブ数を増やして対応してきたが、配置上 EX5500 (全装備質量 515ton、バケット容量 27m<sup>3</sup>) 搭載のコントロールバルブ数 6 ヶが限界となってきた。例えば、本体からフロントへのホースの数量はフレーム上フランジ幅にて制限され、大幅な追加はできない。つまり、今までのようなバルブ数量による対応では 800ton 級のショベルシステムは不可能となる。

図 3.1.1 に EX5500 の本体-フロント間ホースを示す。

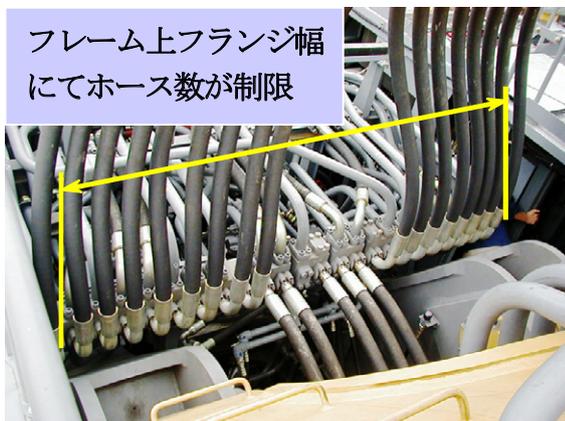


図 3.1.1 EX5500 本体-フロント間ホース

また、機能面からも既存機と同等の掘削、旋回、放土といったサイクルタイムを実現したいという狙いも本システム開発の背景である。

システムの構想として、コントロールバルブのレイアウトが困難な問題については、本体回路の簡素化を図る。コントロールバルブシステムとは別の供給ラインを備え、流量をアシストする分散メータインと呼ぶシステムを構成した。図 3.1.2 に構成を示す。

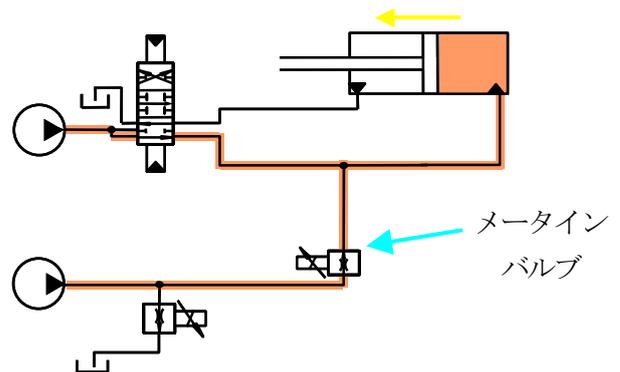


図 3.1.2 分散メータイン

また、サイクルタイムを速くするためにはシリンダからの戻り流量を再生し高速化を図る。フロント自重により出口ポート側に高圧が立つシリンダの場合、その圧油を再生することで大流量化が図れる分散メイクアップと呼ぶシステムを構成した。メイクアップは自

己の保持圧より流量を再生していることから動力を必要とせずエネルギー的にも好適である。図 3.1.3 に分散メイクアップの構成を示す。

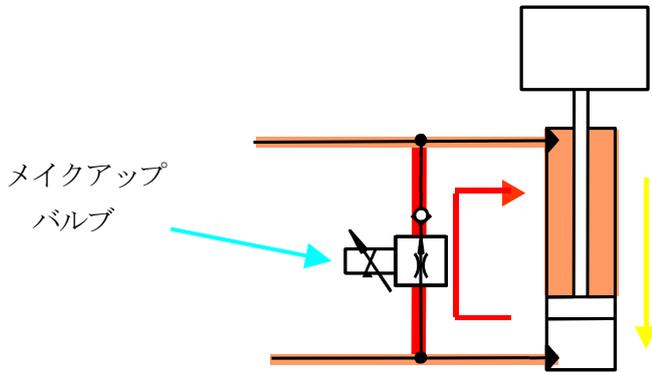


図 3.1.3 分散メイクアップ

以上のようなシステムを分散バルブシステムと呼び、比較的簡単な構成のバルブをフロントアタッチメントに分散配置し、流量をアシストすることが大きな特徴である。

メータイン及びメイクアップバルブは、シリンダポートに備えられ、図 3.1.4 に示す比例シート弁を開発した。この比例シート弁は、メインとなる主弁とそれを制御する制御弁とからなっており、制御弁の制御量に応じて主弁が制御されるポペット型の大流量を供給できるバルブである。

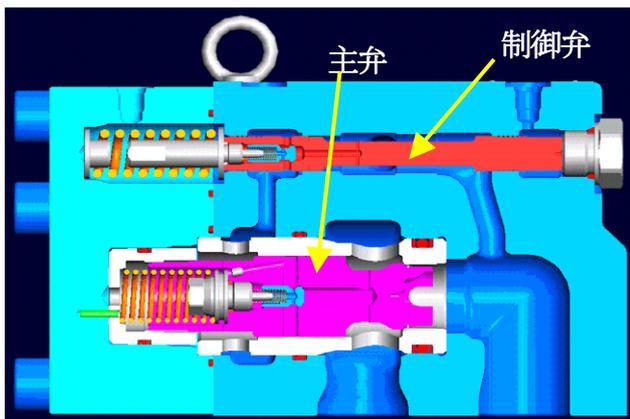


図 3.1.4 比例シート弁

## 2) モニタリングシステム

超大型ショベル等マイニング機用モニタリングシステムは、図 3.2.1 のモニタリングシステム開発フローに示すように最終的には Phase3 予防保全実現を目標

に開発を進めている。

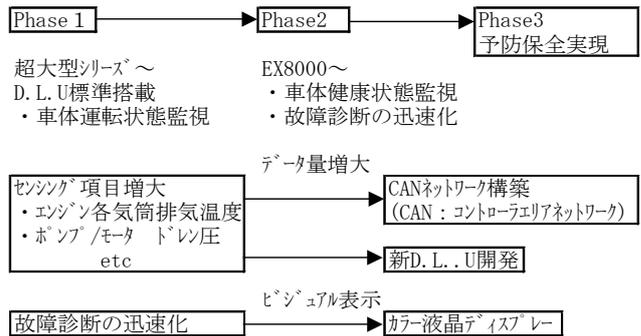


図 3.2.1 モニタリングシステム開発フロー

これまでの当社における超大型ショベルシリーズでは、D.L.U (データロギングユニット) を標準搭載し、車体の運転状態の監視を行なってきた。EX8000 では、さらに進め、例えば、エンジンの各気筒毎の排気温度やポンプやモータ等の油圧機器のドレン圧といったセンシング項目を大幅に増やし、車体の健康状態監視と故障診断の迅速化を狙った。

データ量の増大に対応するため、図 3.2.2 に示すようなコントロールエリアネットワークを構築した。機能毎にコントローラを割り当て、車体上に分散して配置した。各々のコントローラは、CAN の通信ラインで接続されており、センシングデータをネットワーク上に流す構成となっている。

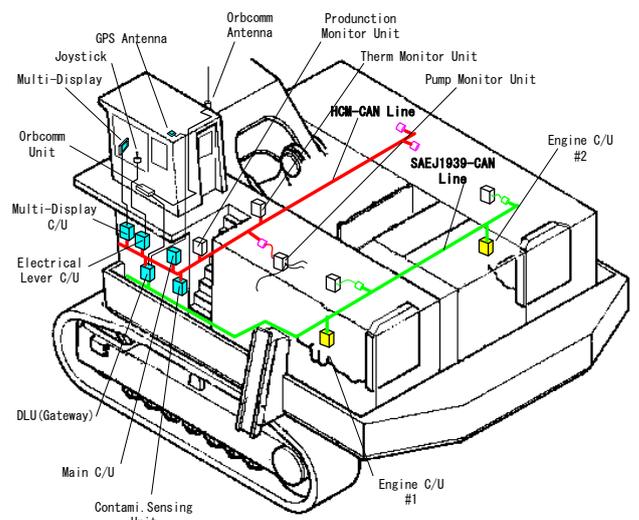


図 3.2.2 コントローラネットワーク

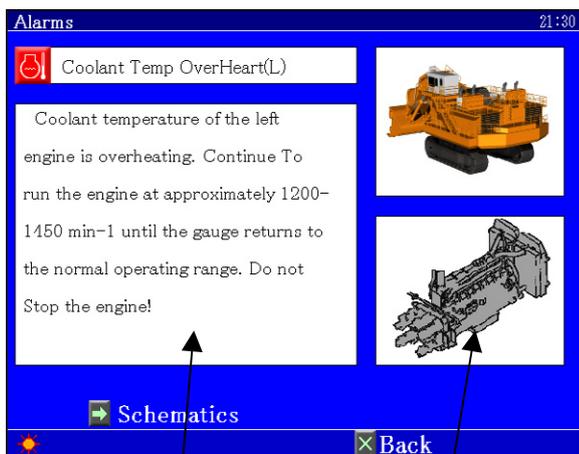
さらに、故障診断の迅速化のためには、ビジュアル表示が不可欠となるため、図 3.2.3 及び図 3.2.4 に示す 10.4 インチの液晶ディスプレイを表示器に採用した。



図 3.2.3 運転室内の液晶ディスプレイ



図 3.2.4 液晶ディスプレイ画面  
(メータと警報ランプ表示)



対処方法

故障詳細部位

図 3.2.5 液晶ディスプレイ画面  
(故障箇所のビジュアル表示)

図 3.2.4 に液晶ディスプレイの通常のメータと警報ランプ表示を示す。警報ランプ点灯時は、表示モードを切り換えることにより、図 3.2.5 に示すような故障箇所をビジュアル表示することができ、故障詳細部位及び対処方法も合わせて表示できる。

加えて、図 3.2.6 のようなスナップショット機能を設け、警報発生前後の関連するデータを表示する。例えば、冷却水オーバーヒート警報の場合は、水温の他、外気温といった関連するデータが表示可能である。

このような機能により、故障診断を迅速に行なうことができる。

### スナップショット機能

警報発生前後の関連するデータを表示

例) 冷却水オーバーヒート



<表示するデータ>

- ・外気温
- ・ラジエータ吸入空気温度
- ・冷却水入口温度
- ・ラジエータ出口水温
- ・ラジエータ冷却ファン用モータ圧力
- ・冷却水圧力
- ・エンジン回転数

図 3.2.6 スナップショット機能

### 4. 今後の展開

2005年9月現在、EX8000 1号機は、カナダのオイルサンド現場で稼働中であり、稼働時間は約 5000 時間に達する。

近々、主要部品の分解調査等を行い、マイニング機械に求められる高い信頼性の確保を継続していく。

また、本文で記載したモニタリングシステムは、マイニング機械に要求されるライフサイクルコスト低減のために非常に有効な手段であるが、まだ完成されたものではない。実機データの蓄積を継続し、予防保全の確立を図っていく。

## 38. 触覚情報を用いた水中バックホウ遠隔操作システムの開発

(独) 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 ○平林 丈嗣  
白石 哲也  
加藤 英夫

### 1. はじめに

港湾施設はその大部分が水面下に構築されるため、その整備や点検・診断、維持・補修の多くは水中での作業となり、また、現在は相当程度を潜水士等の人力に依存している。このような水中作業を一層安全で効率的に行うことができる技術の確立が急がれる。当研究所では、こうした観点から、港湾施設の整備や点検・診断、維持・補修、場合によっては災害復旧にも活用できる水中作業の無人化の研究開発を進めている。

ところで、陸上では既に施設の建設や点検の無人化が相当に進んでいる<sup>1)</sup>が、これは作業の遠隔化や無人ロボット化に有用な電波や光学映像が使用できることが大きな要因として挙げられる。これに対して、水中では濁りや浮遊物質による光の散乱により対象物の視認が困難であるなどの特殊な作業環境下にあるため、作業の無人化は容易でない。

本稿では、このような困難性を克服すべく開発した BILATERAL 操作による遠隔操作型的水中バックホウの事例を紹介する。

### 2. 水中に特化した遠隔操作インタフェイス

人間は、例えば周りの状況を手探り（触覚）で確認し脳でそのイメージ（触像）を構成することによって、視覚情報がなくても行動することができる。このことを水中バックホウを遠隔操作するような場合に当てはめてみると、人間の持つ優れた認識能力を前提に、乏しいながらも複数の情報を理解しやすい形に加工して呈示することによって水中で行われている作業状況をリアルタイムに認識する途が拓かれる。これは強調現実感 (Augmented Reality) と呼ばれる方法である。この方法を応用し、触像(Haptic Image)の視覚化などの研究を進めている。

その一つは、水中作業機械のマニピュレータが対象

物と接触したことを検出した際、その座標位置を求め、コンピュータグラフィクスによって視覚化して遠隔操作に必要な情報を呈示するというものである。具体的には、対象物との接触を作業アームの先端部に触覚センサや力センサを取り付けて検出し、この接触位置を作業アームの各可動部の角度やシリンダのストロークから計算する。さらに、その作業機械自体の位置座標を水中座標位置計測システムで計測することにより接触点の三次元座標位置を求める。この方法を繰り返せば、対象物の形状等が次第に明確になり、より現実に近い画像を3次元座標上に描くことができる。

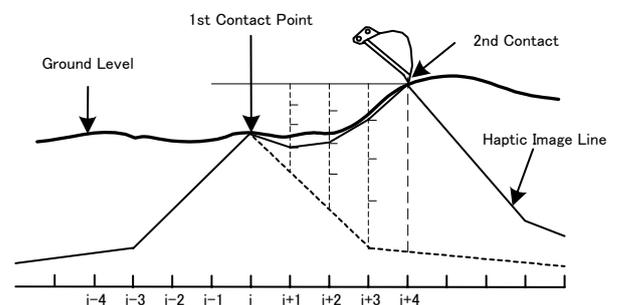


Fig.1 接触情報のCG化

さて、バックホウを有人で操作することを想起すれば、オペレータは、バケットの接触音、車体に伝わる振動、油圧安全弁の音の変化など様々な感覚を通して、バケットが対象物に接触したか、どの程度の負荷がかかったかを認識しながら操縦をしている。このことに着目し、さらに触像以外にも遠隔操作に必要な情報を呈示する方法の研究も行っている。それは、Slave (操作される作業機械側) が力センサで検出した情報を Master (遠隔操作するオペレータ側) にも力の感覚 (手応え) として呈示する Bilateral 制御の技術についても同時に研究を進めている。

過年度において水中独自の条件に特化したインタ

フェイスを研究しており，TVカメラを用いない無視覚条件下でも所定の精度で荒均し作業が可能であることを陸上実験<sup>2)</sup>により確認している。(Fig.2, Fig.3)



Fig.2 相似形入力装置による遠隔操作



Fig.3 無視覚条件下における平面均し作業結果

### 3. 遠隔操作型水中バックホウの開発

#### 3.1 実海域実験機の開発

陸上実験によりバックホウ遠隔操作に Augmented Reality を用いる要素技術は確立した。しかし，陸上実験機のエンジン出力の問題から実際のマウンド築造に用いられる割石より小さい 150mm 粒径を実験で用いており，実スケールでの均し実験を行う必要がある。そこで平成 16 年度に実海域における均し作業の実験を行うこととし，その実験機を製作した。

実海域実験機は，当研究所と共同研究を行っている佐伯建設工業(株)所有の水中バックホウ<sup>3)</sup>ビッククラブ3号(以下BC3)をベースマシンとした。BC3は

過去に水中遠隔操作を考慮した改造を施しており，比例電磁バルブ等基本的な装備が備わっている。

今回の改造では制御PC およびセンサアンプ等を入れた制御用密閉容器を設置した。制御用密閉容器は二重構造となっており，フロートスイッチ式の浸水センサを取り付けている。内部には制御機器類のほか，無停電電源装置を設置しており，断線や停電などに備えた。さらにバックホウセンサの生データを台船上から監視するため，モニタ，キーボード，マウスを遠隔地で利用できるコンソール延長器を設置しており，これを利用して搭載PCのリブートやプログラム修正が可能である。

角度センサは防水対策から機械的に回転部分のあるポテンショメータをやめ，直動磁歪センサを油圧シリンダ側面に設置し，跳石をガードするフレームを取り付けている。また水中でのバックホウ位置を測定するためのSBLトランスポンダと水圧計を設置した。水圧計のデータによりバックホウの水深を計測するため，20mの測定レンジにおいて誤差0.15%の高精度な水圧計を利用している。水圧計を利用した際に発生する潮位による影響はデータベースにその時間の潮位を入力することで補正する。機体方位，傾斜角度の検出には磁気方位センサ，およびジャイロを用いており，磁気方位センサはポリウレタン樹脂による密閉を，FOGは制御用密閉容器内に設置している。

反力センサはバックホウ出力に合わせて $\pm 200\text{kN}$ のロードセルに変更したものを新たに製作した。この反力センサは衝撃荷重を考慮し，皿バネを介し力感知する機構に変更している。設置したセンサに関する情報をFig.4に，反力センサをFig.5に示す。

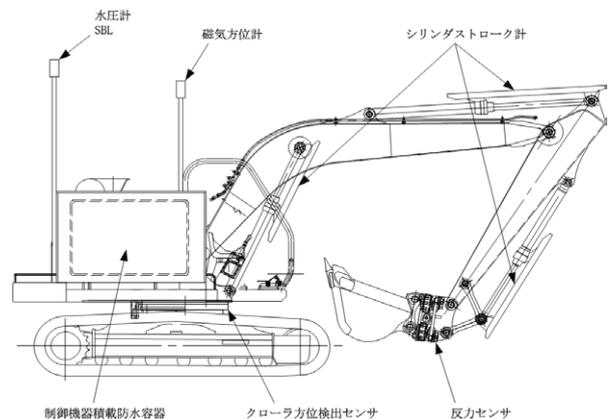


Fig.4 水中バックホウBC-3



Fig.5 反力センサ



Fig.7 相似形入力装置

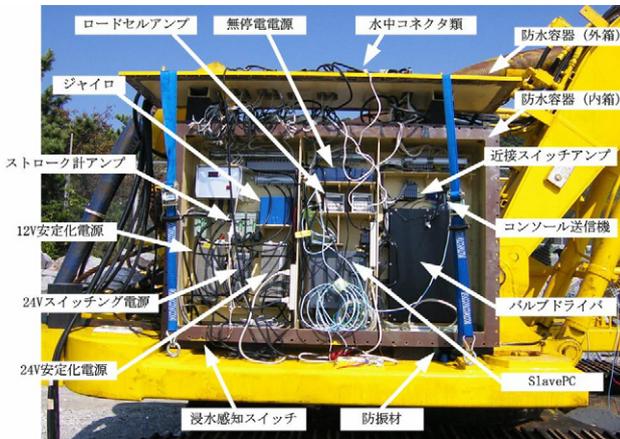


Fig.6 密閉容器内の搭載機器

### 3. 2 相似形入力装置の開発

Bilateral 制御を行うためのバックホウ用相似形入力装置を Fig.7 に示す。これは今回実験に用いる実験装置のフロント部分と相似の関係を持っており、さらに各関節独立に姿勢拘束力及び力覚フィードバックを出力するアクチュエータと関節角度を認識するロータリエンコーダを有しており、これらの制御およびデータ取得は遠隔制御コンピュータにより行われている。この遠隔制御コンピュータにより関節角度から先端座標を演算し指令値としてバックホウ搭載 PC に送信する。また、バックホウ搭載 PC から送られてきたフィードバック情報によってオペレータに力覚を提示する。

バイラテラル制御の方式は、油圧シリンダの特性を考慮して、可変ゲイン位置対称型バイラテラル制御<sup>4)</sup>とした。

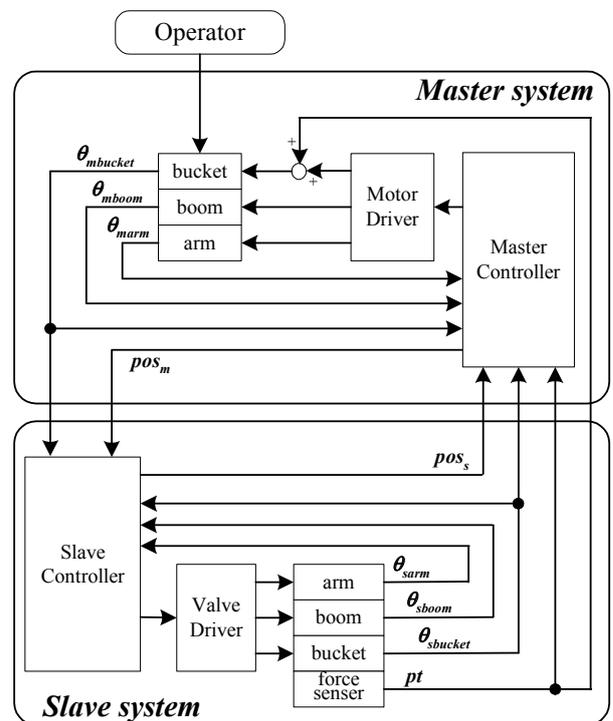


Fig.8 可変ゲイン位置対称型バイラテラル制御

### 3. 3 地形データベース

実海域での実験を想定し、広範囲での地形を蓄積するデータベースを構築した。このデータベースには 10cm 間隔で 50m×100m の計 50 万点の地形高さ情報を格納可能となっており、さらに丁張りの代わりとなる同数の目標高さデータも同時に格納している。また作業台船やケーソンなど周辺施設の位置も表示され、バックホウの位置、方位、姿勢などもリアルタイムに描画される。このデータベースも LAN に接続されており、通常は遠隔制御 PC から送信されてきたバケット接触高さのデータを格納するが、移動時など要求さ

れたタイミングには必要な範囲を切り出し遠隔制御コンピュータに地形データを送信する。また、超音波映像による地形データを読み込む機能やSBLによるバックホウ位置測位データをRS232Cポートから受信する機能、作業終了後の地形データをテキストファイルにより出力する機能を有する。

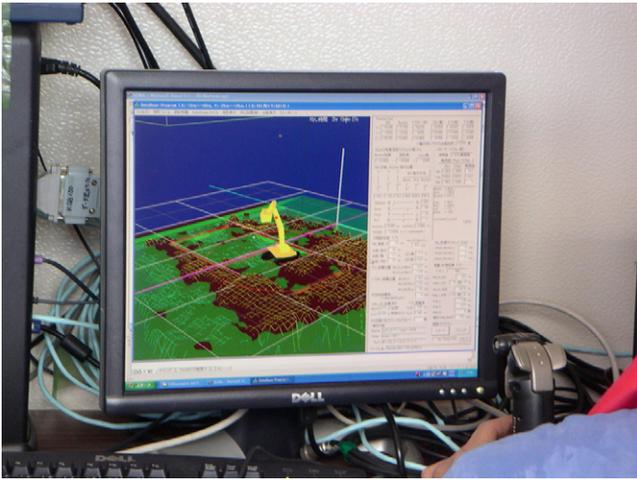


Fig.9 地形データベース画面

#### 4. 実海域実験

##### 4. 1 実海域実験海域

実験は平成16年10月4日～8日の5日間（うち悪天候による休止1日）、長崎県長崎市神ノ島沖防波堤の-16.5m 捨石マウンド上で行った。捨石の大きさは5～100kg/個、評価範囲は10m×10mとし、対象とする作業は±30cmの捨石荒均し作業とした。比較として潜水士による搭乗操作による荒均し作業を行っている。Fig.10に実験評価範囲を示す。海象条件は休止日を除いて波高50cm以下、透視度5m、潮流0～0.3ノットの非常に穏やかな条件であった。

##### 4. 2 実験準備

作業台船を実験海域まで曳航後、評価範囲の形状を認識するため超音波測量装置による地形測量を行った。このデータをデータベースに入力し地形を描画した画面により、オペレータはバックホウ投入場所や当日の作業計画を決定した。

バックホウ投入時には、動力油圧ホースに搭載PCへ電源供給および通信用の制御ケーブルを這わせ、ブ

イのケーブルで結束しながら投入を行った。バックホウ着底後のワイヤ玉外し作業は潜水士により行った。Fig.11にバックホウ投入状況を示す。

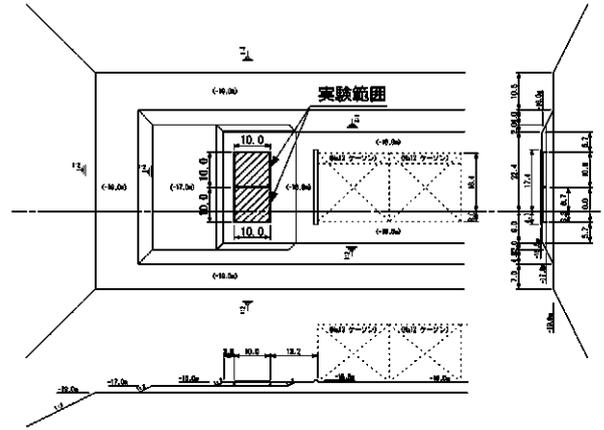


Fig.10 実験評価範囲



Fig.11 バックホウ投入状況

##### 4. 3 遠隔操作による均し作業

水中での動作確認を行った後、無視覚状況下における均し作業実験を行った。今回の実験では水中バックホウの特性を熟知している水中バックホウ作業経験者をオペレータとした。オペレータはTVカメラを用いず、前述のCGのみの情報で作業を行う。

基本的な動作として、必要な高さまで掘削し作業範囲外に捨てる作業を繰り返すこととした。バックホウの平面座標はSBLによる超音波測位を行ったが、鉛直座標はバックホウに取り付けられた水圧計のデータにより取得している。この座標に傾斜角、ブーム/アーム/バケット角度情報を加えることで絶対座標系と

してのバケット先端座標を算出する。オペレータはデータベースに入力されており絶対座標系を持つ設計高さ座標と比較することで、丁張りに頼らずに作業を行った。Fig.12 に遠隔操作の様子を示す。



Fig.12 遠隔操作状況

#### 4. 4 実海域実験まとめ

作業後に撮影したマウンドの状況を Fig.13 に示す。作業前の状況では約 80cm 程度の不陸が存在していたが、作業後にはスタッフからわかるようにほぼ平面に均すことができている。

また、作業後に水中水準器による測量を行っており、その測量結果を Fig.14、及び Fig.15 に示す。この結果は潜水土搭乘操作及び遠隔操作によって施工された範囲を 1m 毎に計測したものであり、数値は目標高さとの差である。

潜水土搭乘操作によって施工された範囲の測量点全点を平均すると+27cm であり、その標準偏差は±8.1cm であった。結果を見ると施工管理基準より高かった点が多数存在している。しかし目標高さを下回った点は存在せず、また、標準偏差も±8.1cm であり、全体的に高めではあるが平坦に均せている。潜水土搭乘操作では丁張りを見ながらの作業が可能であるため、潜水土が目測を誤ったか丁張りの張り方が甘かった可能性がある。

遠隔操作によって施工された範囲の測量点全点を平均すると+17cm であり、その標準偏差は±8.1cm であった。また施工管理基準±30cm を超えた点が 2 箇所あったが、目標高さより下回った点は 1 箇所であっ



Fig.13 作業後のマウンド状況

		港内側				
		①	②	③	④	⑤
No.1		0.20	0.21	0.29	0.24	0.25
No.2		0.33	0.26	0.12	0.24	0.35
No.3		0.07	0.22	0.33	0.29	0.32
No.4		0.16	0.29	0.35	0.35	0.23
No.5		0.40	0.35	0.35	0.35	0.25
No.6						
No.7						
No.8						
No.9						
No.10						
		港外側				

Fig.14 マウンド測量結果 (潜水土搭乘操作)

		港内側			
		①	②	③	④
No.11					
No.12					
No.13		0.16	0.08	0.19	0.16
No.14		0.15	0.21	0.19	0.21
No.15		0.02	0.18	0.24	0.07
No.16		0.33	0.14	0.34	0.10
No.17		0.26	0.16	0.11	0.06
No.18		0.20	0.12	-0.03	0.19
No.19		0.18	0.14	0.17	0.16
No.20		0.29	0.09	0.20	0.22
		港外側			

Fig.15 マウンド測量結果 (遠隔操作)

た。半数以上の測量点において+10cm～+20cm の間に入っている。ただし、平坦に均すという作業自体は標準偏差から示されるように十分な性能を有していると言える。

## 5. 結論

本研究では、安全で効率的な水中作業の実現を基本目標として、視覚情報が不十分な水中作業の遠隔操作において、作業機械から得られる接触情報（接触時に作用する反力、接触点の位置等）をバイラテラル操作系によってオペレータにフィードバックする手法を提案し、その有用性に関して、水中バックホウによる捨石均し作業を研究の対象事例として、部分模型による室内実験、油圧実験機による陸上及び実海域における実験を通じて検証した。

本研究により明らかになった主な事項は次のとおりである。

- ・ 操作端（Master）と水中バックホウ（Slave）が相似形で作動し、これと同時にバケットに作用する反力が操作端にフィードバックされる入力インタフェイスは、バケット操作の手応えやバックホウ各部の姿勢をオペレータが直感的に認識でき、無視界でも遠隔操作ができる手法として有効である。また、これを実現する制御機構として、バイラテラル制御系は有効である。
- ・ 上述した操作の手応えとあわせて、フィードバックされた接触情報をもとに均し作業に伴う地形変化などをCG化することにより、オペレータの認識力が高まる。
- ・ この遠隔操作システムを用いた水中バックホウによる捨石均し作業の実海域実験を長崎港で行った結果、施工精度は平均+17cm（標準偏差±8.1cm）であった。これは、潜水士がバックホウに搭乗して目視によって作業を行う現在の方法と同等の作業性である。

## 6. おわりに

水中作業においては、光学映像を用いた遠隔操作が困難であるなど、陸上作業とは異なる様々な技術的障

害によって容易に無人化が進まず、潜水士の目視による人力作業に多くを依存してきたが、本研究により、水中バックホウの遠隔操作システムは実用化の途が拓かれたと考える。

しかし、今回の研究対象とした捨石均し作業は、所定の施工精度を要求される重作業ではあるが、作業内容としては比較的簡明なものであって、例えば栈橋の点検・補修など、繊細で複雑な水中作業にまで本システムを適用することはできない。

特に、高度成長期に整備された数多くの施設が耐用年数に近づいており、これらを健全な状態に管理し、及び有効に活用することが求められる今日、本研究の成果を水中作業の無人化の第一歩として、今後とも、より高度で実用性の高い水中作業の無人化を目指して研究を進めていく考えである。

## 謝辞

長崎における実海域実験においては、国土交通省九州地方整備局長崎港湾・空港整備事務所に多大な協力を頂いた。関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 財団法人先端建設技術センター編：緊急時の無人化施工ガイドブック，財団法人先端建設技術センター編，2001年，pp22-24.
- 2) 秋園純一，平林丈嗣，山本恭，酒井浩，矢野博明，岩崎正揮：TELEOPERATION OF CONSTRUCTION MACHINES WITH HAPTIC INFORMATION FOR UNDERWATER APPLICATIONS", International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2004年, pp.340-345.
- 3) 大宮敬治，加藤政徳：平良港防波堤工事における水中バックホウによる施工，建設の機械化 7 月号，1996 年，pp.17-22.
- 4) 山田宏尚，武市教児，武藤高義：遠隔操作建設ロボットシステム用マスタ・スレーブ制御，日本機械学会論文集(C編)66 巻 651 号，2000 年，pp.140-147

平成 17 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
〃	藤野健一	(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 主任研究員
	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
	松本毅	コマツ	開発本部 商品企画室 担当部長
	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
	雨宮信一	新キャタピラー三菱(株)	相模開発センター トラクタ開発部長
	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
	森實裕	(社)日本機械土工協会	副会長
	鈴木英隆	(社)日本建設機械化協会	技師長
	浅野邦彦	(社)日本建設機械化協会	技術部長
	近藤治久	(社)日本建設機械化協会	調査部長

建設施工と建設機械シンポジウム論文集（平成17年度版）

---

平成 17 年 11 月 1 日 印刷

平成 17 年 11 月 7 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