# 令和 2 年度

# 建 設 技 術 報 告 会

# 報 文 集

令和 2 年 10 月

北陸地方建設事業推進協議会

令和 2 年度「建設技術報告会」実行委員会

# 令和2年度建設技術報告会報文集　目次

## ■報告技術


| 技術番号 | 報告テーマ | 技術名 | 頁 |
|---|---|---|---|
| 第Ⅰグループ | | | |
| 1 | ① | 金沢港におけるICT浚渫工の取り組みについて<br>北陸地方整備局 金沢港湾・空港整備事務所 市川 大聖 | 1 |
| 2 | ① | プレキャスト桟橋工法～桟橋工事の生産性を向上～<br>五洋建設株式会社 池野 勝哉 | 5 |
| 3 | ① | 水中3D誘導システムの現場への適用<br>株式会社本間組 鈴木 敦子 | 9 |
| 4 | ① | N－Jet工法の開発<br>日特建設株式会社 竹内　仁哉 | 13 |
| 第Ⅱグループ | | | |
| 5 | ① | AI搭載ステレオカメラによる人検知型 ロードローラ転圧機 自動停止装置 「EyeThink」の開発<br>日本道路株式会社 工藤 朗 | 17 |
| 6 | ① | 3眼カメラを用いた配筋検査システムの妙高大橋架替下部その4工事における有効性評価<br>清水建設株式会社 吉武　謙二 | 21 |
| 7 | ③ | ICT活用による除雪トラックのマシンコントロール化<br>国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 小浦方　一彦 | 25 |
| 8 | ④ | i-Construction　施工段階での3次元データの利活用<br>株式会社植木組 河村　昭 | 29 |
| 第Ⅲグループ | | | |
| 9 | ② | 流電陽極方式鋼材腐食緩和工法（Znカートリッジ）の実装研究<br>株式会社国土開発センター 亀田　浩昭 | 33 |
| 10 | ② | 傾斜監視クラウドシステム「OKIPPA104」の開発<br>西松建設株式会社 鶴田　大毅 | 37 |
| 11 | ② | 専用架台と2種類のカメラを用いた集水井内の点検<br>株式会社興和 高澤　忠司 | 41 |
| 12 | ② | コンクリートのひび割れ画像解析技術 t.WAVE（ティー・ドット・ウェーブ）<br>大成建設株式会社 堀口 賢一 | 45 |
| 第Ⅳグループ | | | |
| 13 | ② | 桟橋鋼管杭補修技術「タフリードPJ工法」の改良<br>東亜建設工業株式会社 田中　亮一 | 49 |
| 14 | ⑥ | 遺構に配慮した金沢城公園　鼠多門・鼠多門橋の復元整備<br>石川県 中垣　学 | 53 |
| 15 | ⑥ | PlusStop縁石（バス停専用縁石）<br>株式会社アドヴァンス 細野 義則 | 57 |
| 16 | ⑥ | 金沢港機能強化整備事業<br>石川県 甲部　正章 | 61 |

# 令和2年度建設技術報告会報文集　目次

## ■掲載技術


| 技術番号 | 報告テーマ | 技術名 | 頁 |
|---|---|---|---|
| 17 | ① | 斜め往復撮影による標定点不要の造成地UAV写真測量手法の開発<br>株式会社フジタ 松岡　祐仁 | 65 |
| 18 | ① | レーザースキャナによるトンネル施工管理<br>佐藤工業株式会社 須佐見　朱加 | 69 |
| 19 | ① | 次世代建設生産システムA4CSELの開発<br>鹿島建設株式会社 三浦　悟 | 73 |
| 20 | ① | 次世代油圧ショベルによる作業自動化<br>大成建設株式会社 青木　浩章 | 77 |
| 21 | ① | 地盤改良の自動打設システム「GeoPilot®-AutoPile」<br>株式会社不動テトラ 田口　雄一 | 81 |
| 22 | ① | トンネル地山AI評価システムの開発<br>前田建設工業株式会社 小熊　登 | 85 |
| 23 | ② | 渋滞を抑制する新たな床版取替工法「DAYFREE」<br>株式会社大林組 岩城　孝之 | 89 |
| 24 | ② | 木装橋における維持管理を見据えた構造細目<br>株式会社国土開発センター 濱田　康行 | 93 |
| 25 | ③ | 非塩化物系凍結抑制剤を用いた物理化学系凍結抑制舗装「ツインメルトペーブ」<br>鹿島道路株式会社 尾崎　風香 | 97 |
| 26 | ④ | AIを用いた1週間波浪予測の精度向上<br>東亜建設工業株式会社 原 知聡 | 101 |
| 27 | ④ | 防災井戸バルブベント<br>株式会社興和 石田　謙介 | 105 |


【報告テーマ】
①:「良いものを安く(i-Construction)」
②:「社会資本の的確な維持管理・更新」
③:「雪に強い地域づくり」
④:「自然災害からの安全確保」
⑤:「環境の保全と創造」
⑥:「その他」

# 報 告 技 術

# 第Ⅰグループ

# 金沢港におけるICT浚渫工の取り組みについて

北陸地方整備局　金沢港湾・空港整備事務所　保全課　　市川　大聖

## 1　はじめに

国土交通省では、建設現場における生産性を向上させて、魅力ある建設現場を目指す取り組みとして「i-Construction」を推進している。

港湾工事では、2017 年度から浚渫工においてICTの導入・活用を進めている。当初は、マルチビームを用いた起工時・竣工時の深浅測量、3 次元データを用いた数量計算や出来形管理の取り組みを実施し、現在では施工段階においてICT化が進められている。また、他にも基礎工やブロック据付工及び本体工にもICTの活用が拡大しているところである。

## 2　工事概要

金沢港は、石川県金沢市に位置し、大型機械(建設機械・産業機械)を生産し、輸出する企業等が立地しているほか、中国や韓国との間に、コンテナ船等の国際定期航路が就航しており、地域経済を支えている。また、近年はクルーズ船寄港が増加しており、金沢のにぎわい創出の一翼を担っている。

金沢港(大野地区)泊地(-10m)浚渫外 1 件工事(以下「本工事」という)は、泊地を船舶が安全に航行できるよう、主にポンプ浚渫船で約 38 万$m^3$の土砂を浚渫した工事であり、ICT を活用した施工を行った。（図-1）

図-1　本工事の施工位置図

## 3　本工事における ICT 浚渫工の活用

### 3．1　施工手順

浚渫工における ICT 活用の流れ及び、本工事での活用状況を示す。（図-2、3）

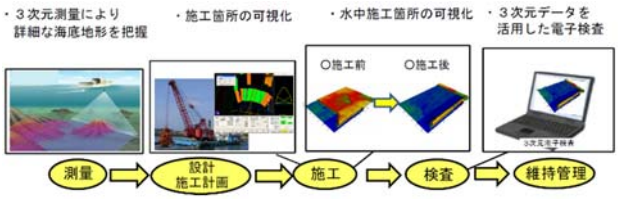



図-2　浚渫工におけるICT活用の流れ

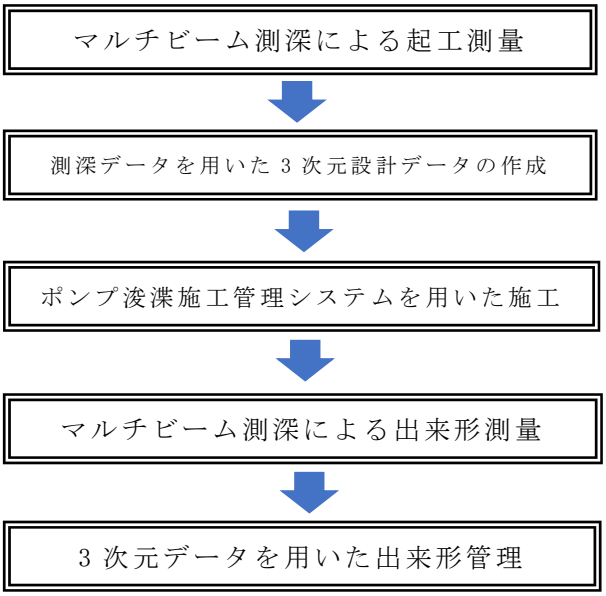



図-3　本工事の施工フロー

３．２　起工及び出来形測量

起工及び出来形測量は、ナローマルチビーム測深機を用いて実施した。従来技術のシングルビーム測深では、海底面を線状に測深していたのに対し、ナローマルチビーム測深（以下「NMB測深」という）は連続した面で、隣接する片側の測線を重複させながら測深する技術である。未測深区域がなくなり、測量範囲における全面積を計測することができるため、シングルビーム測深よりも詳細な地形把握が可能になり、計測結果の精度向上が図られる。（図-4）

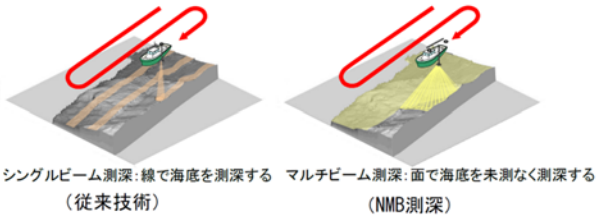



図-4　シングルビーム測深とNMB測深との比較

３．３　ポンプ浚渫施工管理システム

浚渫は、ポンプ浚渫船により施工し、浚渫船に搭載されているポンプ浚渫施工管理システム（以下「施工管理システム」という）を用いて作業を実施した。

ポンプ浚渫は、浚渫船先端部に取り付けた回転刃（カッター）により、水中の土砂を切り崩しながら土砂を吸い込み掘削する工法で、水中作業のため目視による確認が不可能であるため、従来出来形はオペレータの熟練度等に左右されていた。（図-5）

図-5　ポンプ浚渫の施工概念図

この施工管理システムは、浚渫船の操舵室にあるシステムモニタ画面にて、カッターの位置と目標浚渫位置をリアルタイムに可視化するとともに、事前に設定した施工水深にカッターを誘導（マシンガイダンス）させて、浚渫することが可能で、施工効率の向上が図られる。（図-6，7）

図-6　操舵室での作業状況

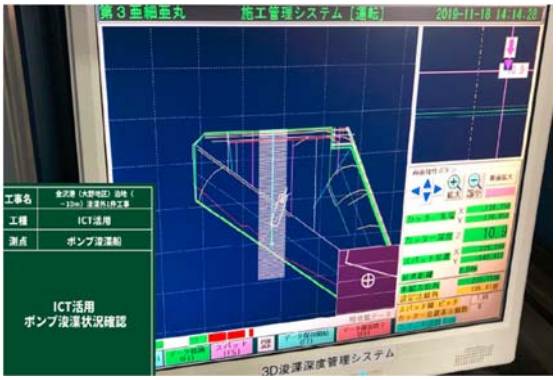



図-7　施工管理システムモニタ

３．４　浚渫土量の算出

従来は、シングルビーム測量によって得た各測線や、変化点の平均断面を用いて数量計算をおこなっていた。一方、NMB測深では全ての測量範囲が測深されることから、想定による数量計算がなくなり、従来よりも正確な土量の算出が可能となる。

４　ICT 活用の効果

本工事でICT活用した結果、以下の効果を確認できた。

４．１　測深時の作業性向上

従来は測深記録や解析時に、手書きの記入が必要だったが、NMB測深では記録するデータがすべてパソコン上の作業となり、オペレータの作業人数が1人減るなど作業性が向上した。

さらに、従来の測深結果は線状に表示され、異常物等の判別が難しく、再測することがあったが、NMB測深では3次元で広く確認できたため、判断がしやすく、結果としては再測回数が減るなど、一部の作業の短縮や省力化が図られた。

４．２　施工の効率化

施工管理システムを用いたことにより、従来では29日と想定される施工日数が、26日で完了し、3日間程度の施工日数短縮することができた。

また、目標浚渫位置とカッターの位置をリアルタイムに可視化できたため、従来と比較すると、施工水深まで掘りきれなかった箇所の、掘り直し作業が無くなり、作業効率が向上した。

４．３　３次元データを用いた出来形管理

NMB測深を用いたことにより、測量範囲の全面積が可視化され、3次元データで海底地形を把握することができ、地形変化を反映した正確な土量を算出することができた。また、3次元データから作成された、水深値ごとに色分けした段彩図によって、出来形管理において微細な地形の変化を確認できた。さらに、NMB測深によって得られた3次元データが基礎データとなって、維持管理が容易にでき、見た目にもわかりやすく活用できると考える。（図-6，7）

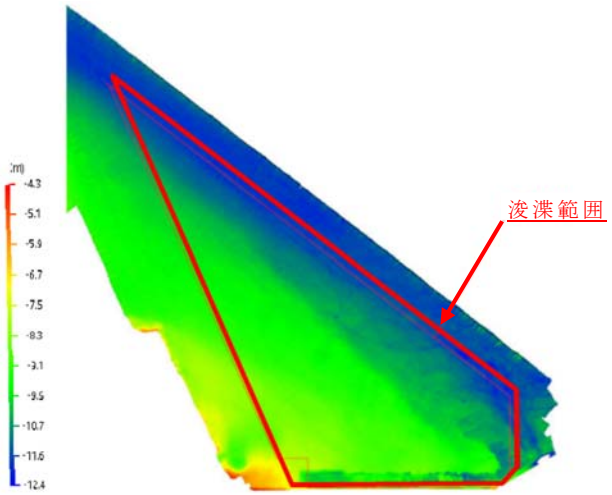



図-6　浚渫前の段彩図

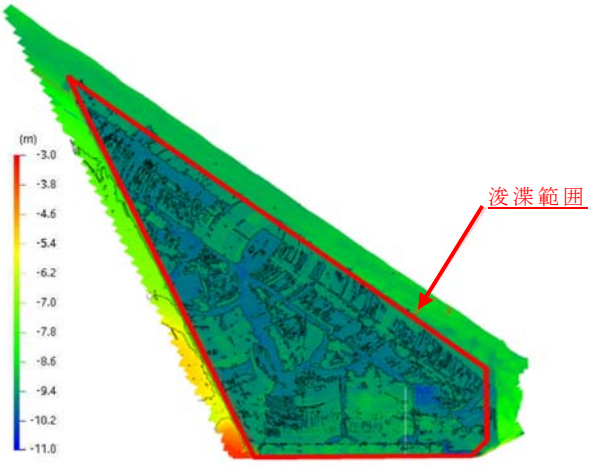



図-7　浚渫後の段彩図

５　ICT 活用における課題

５．１　データの整理

NMB 測深によって得られるデータは、シングルビーム測深で取得するデータ量と比較すると非常に多く、従来よりもデータ解析に係る作業が複雑だったことから、作業時間が16 時間多くなった。測深等に係る作業時間においても、使用機材の設置・調整や、検測項目が増えたことによって従来よりも 66 時間増加し、全体における作業時間もシングルビーム測深時と比べ、162 時間増加した。（図-8）また、作業の増加に伴い、作業人数が 1.5 倍に増加した。（図-9）

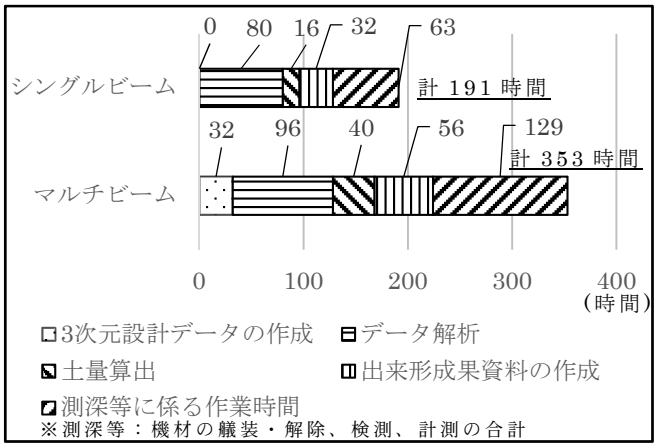



図-8　作業時間の比較

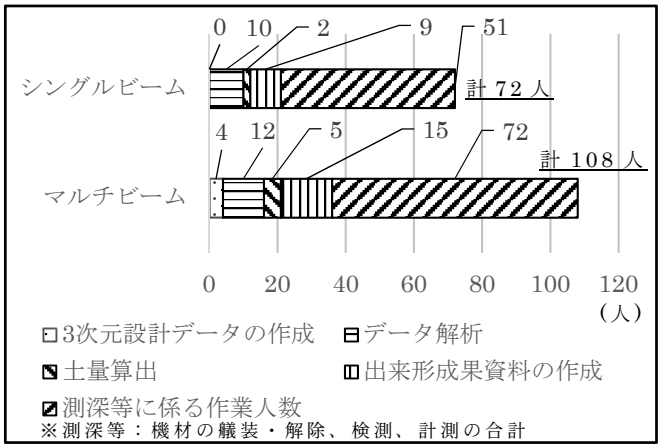



図-9　作業人数の比較

## 6　まとめ

本工事でICTを活用した結果、測量工では測深時の作業性及び取得データの精度が向上し、ポンプ浚渫では、施工管理システムの活用により作業効率の向上が図られた。

また、3次元データを用いた出来形管理においては、段彩図等の作成によって微細な地形の変化を確認することができ、今後の維持管理資料として有効活用できると考えられる。

一方、測量工における作業時間や人数においては、従来よりも多くの時間や人数を要したため、作業効率の向上は図れなかった。

今後は、現地での測深作業手順の見直しや習熟を図るとともに、3次元データの解析が容易にできるソフトウェアの開発を行うことで、作業効率の向上が期待できると考える。

陸上工事では、建設機械の自動化(マシンコントロール化)が進み、広く活用されているが、海上工事においては自動化による建設機械の活用事例が少ない現状である。海上工事においてもマシンコントロール機能を搭載した作業船が広く活用されれば、さらなる生産性の向上につながると考える。

最後に、港湾工事におけるICT活用の取り組みは、非常に重要な取り組みだと感じた。今後、さまざまな工種にICT活用が取り入れられることで、さらなる生産性向上が図られると考える。

謝辞：　本論文を取りまとめるにあたり、東亜建設工業（株）及び（株）北日本ジオグラフィの工事関係者様にご協力頂きましたことを感謝申し上げます。

参考文献

1)　港湾におけるICT検討導入委員会資料
2)　海洋調査技術マニュアル-深浅測量-（社）海洋調査協会
3)　3次元データを用いた港湾工事数量算出要領（浚渫工編）（平成31年度）4月改訂版

# プレキャスト桟橋工法～桟橋工事の生産性を向上～

五洋建設株式会社　技術研究所　担当部長　池野　勝哉

## 1　はじめに

桟橋工事において、プレキャスト施工は生産性向上の有効な手段として期待されている。これまで、上部工のプレキャスト床版は実用化されているものの、より海水面に近い梁などの構造部材は、鋼管杭との有効な接合技術が確立されておらずプレキャスト化が進んでいない状況にある。そこで、プレキャスト施工における杭頭接合および部材同士の接合技術を確立し、汎用的なプレキャスト桟橋工法を開発した（写真-1）。

## 2　プレキャスト化における技術的課題

桟橋は海中に突出した鋼管杭と上部工によるラーメン構造を成しており、地震慣性力や船舶接岸力などの水平外力に対して杭頭モーメントが卓越する。港湾の設計基準では、この杭頭部を剛結として設計されるため、プレキャスト上部工と鋼管杭との杭頭接合は簡易な施工で剛結条件を満足できる構造が望ましい。また、桟橋のプレキャスト上部工は現地ヤードで製作するサイトプレキャストが一般的であるが、鋼管杭への架設後にプレキャスト部材同士を一体化する必要がある。この作業は、通常海上において鉄筋継手や型枠支保工、コンクリート打設などを伴うため、施工上、簡素化された接合構造が求められている。

このように、プレキャスト化における技術的課題には①杭頭接合と②部材接合が挙げられる。本稿ではそれぞれの技術開発の概要について紹介する。

## 3　杭頭接合に関する技術開発

### 3．1　鞘管方式の概要

鞘管方式は、プレキャスト部材に鋼管杭よりも 200～300mm 程度大きな径の鞘管を埋設し、架設後、鋼管杭との間隙に無収縮モルタルを充填して無溶接で杭頭部の一体化を図るものである（図-1）。図-2 に従来方式（現場打ち）および鞘管方式（プレキャスト）による杭頭接合について模式図を示す。従来方式は下側の主鉄筋のみ鋼管杭と接続さ

写真-1　プレキャスト桟橋工法[1)]

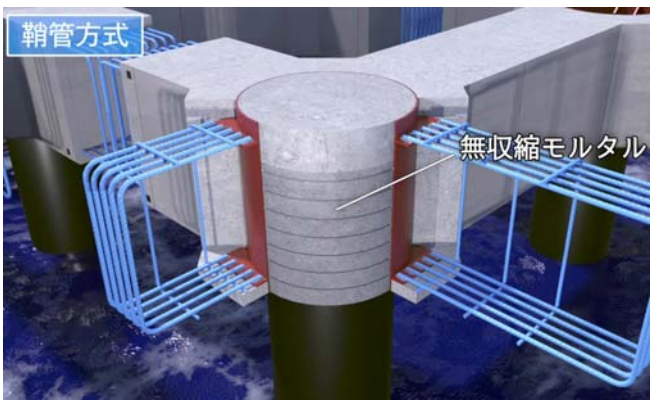



図-1　鞘管方式の概要

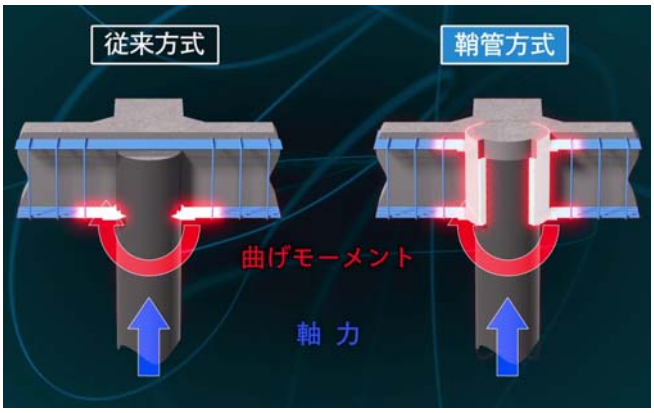



図-2　杭頭接合の模式図
（左：現場打ち、右：プレキャスト）

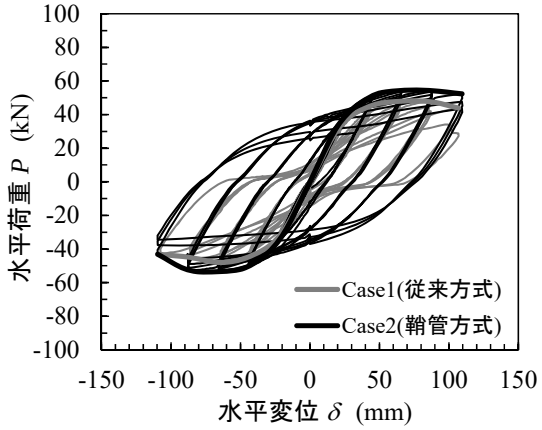



図-3　交番載荷実験での荷重-変位

れているのに対し、鞘管方式は鞘管が上下の主鉄筋に接続されているため、鋼管杭に作用する軸力および曲げモーメントが効率よく梁に伝達される。

### ３．２　杭頭接合部の構造性能

鞘管方式で接合された杭頭接合部の構造性能を確認するため、逆 T 形模型を用いた交番載荷実験を行った[2)]。図-3 に実験で得られた載荷位置における荷重-変位関係を示す。Case2（鞘管方式）は紡錘型の履歴ループを描き、損傷は杭頭接合部ではなく鋼管杭に集中していた。また、Case2 の履歴ループ面積は Case1 の約 2 倍であり、優れたエネルギー吸収性能を発揮している。杭頭接合部の剛結条件を確認するため、実験で計測された鋼管杭基部の相対回転角から杭頭固定度$\alpha$を評価した。杭頭固定度は、理論上、剛接合$\alpha$=1.0 からピン接合$\alpha$=0.0 までの範囲で示されるパラメータ[2)]である。載荷ステップ毎の杭頭固定度の変化を図-4 に示す。Case2（鞘管方式）は $5\delta_y$ まで$\alpha$=0.85～0.95 の高い固定度を維持しており、鞘管方式による杭頭接合で従来の現場打ち以上の剛結条件を満足できることが確認された。

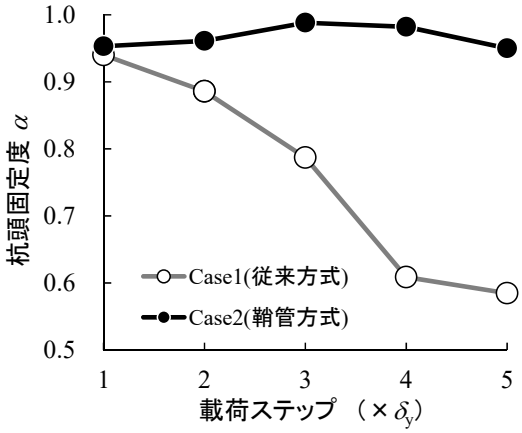



図-4　杭頭固定度の変化

## ４　部材接合に関する技術開発

### ４．１　ダブルスクエア継手の概要

一般に、プレキャスト部材の接合には重ね継手や機械式継手による方法が用いられるが、桟橋上部工では波浪等による動揺下での海上作業となるため、鉄筋同士の接触損傷や施工精度の観点から適用が難しい。そこで、桟橋上部工のプレキャスト部材同士の接合に適したダブルスクエア継手（以下、DS 継手）を提案している[3)]。DS 継手は、プレキャスト端面からコ字筋を突出させ、コ字筋同士を対面させて架設した後、コ字筋と接するようにスクエア筋を上から挿入し、その後、コ字筋の端部に束ねておいたせん断補強筋を所定の位置に配置、現場打ちコンクリートで一体化

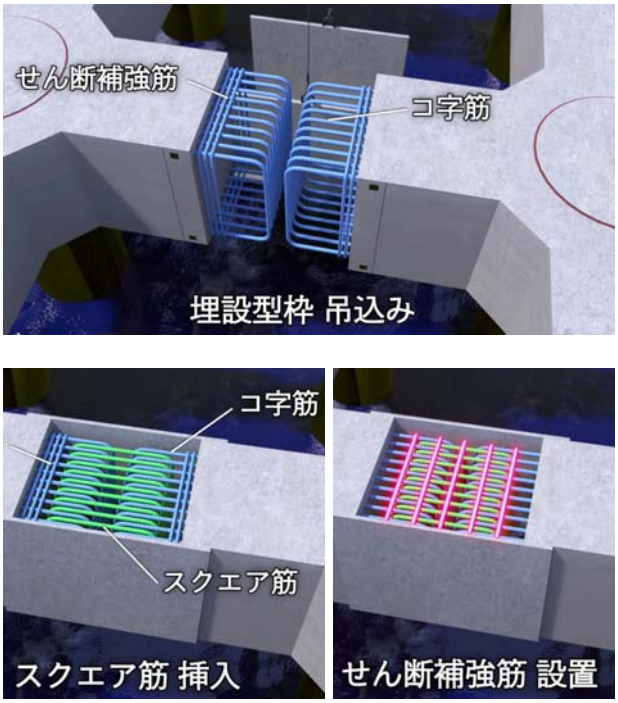



図-5　DS 継手の概要

を図るものである（図-5）。DS 継手は、鉄筋同士の接触損傷が回避でき、後述するように従来よりも現場打ち幅を縮小することが可能な継手方法である。

## ４．２　継手部の曲げ耐荷性能

DS 継手を有するプレキャスト梁の曲げ載荷実験（2 点対称一方向）について示す。実験は大小 3 種類の梁断面で実施している[4)]が、紙面の都合上、断面 M（梁高 $H$=440mm）の荷重-変位関係およびひび割れ性状を図-6、図-7 に示す。実験では曲げ載荷に伴い、打継面のひび割れが先行し、コ字筋とスクエア筋で形成される閉合域を避けるように曲げひび割れが分散する。DS 継手は、継手の無い RC-M と同様に実際の材料強度を用いた曲げ終局荷重を発揮しているが、曲げひび割れ後の剛性に着目すると、DS-M2 および DS-M3 が RC-M よりも小さい。DS-M2 および DS-M3 は閉合域の縦横比（$l_h/l_v$）が異なり、縦

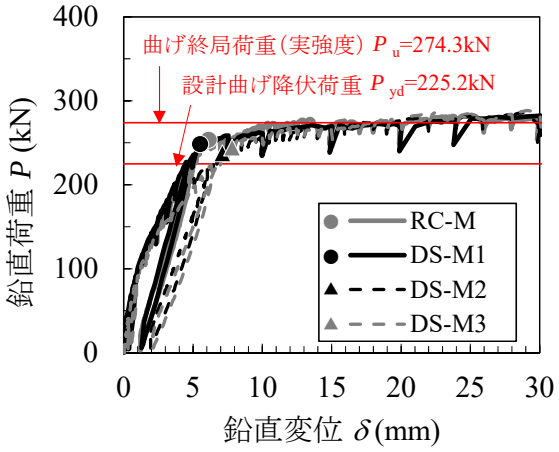



図-6　断面 M の荷重-変位関係

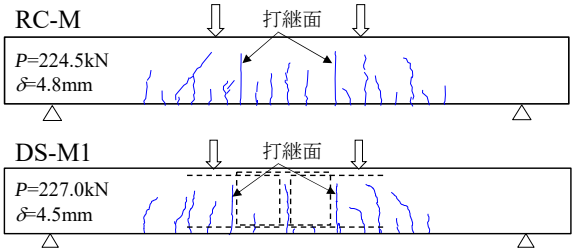



図-7　ひび割れ性状

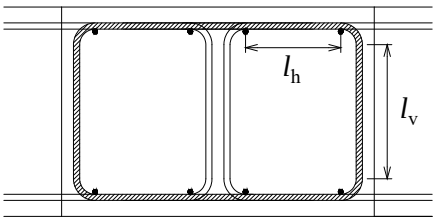



図-8　閉合域の縦横比（$l_h/l_v$）

横比（$l_h/l_v$）が小さくなるほど曲げ剛性が低下していることが分かる（図-8）。

このように、DS 継手ではコ字筋とスクエア筋で形成される閉合域の縦横比（$l_h/l_v$）が重要なファクターとなっている[4)]。

## ４．３　DS 継手の現場打ち幅の縮小効果

一般的な重ね継手およびループ継手（以下、LP 継手）を対象に、DS 継手における現場打ち幅の比較検討を示す。ここでは、コンクリート $f_c$=30N/mm$^2$、鉄筋 $f_{yd}$=345N/mm$^2$ とし、梁高 $H$（500～2000mm）および主鉄筋径 $\phi$

（D13～D35）をパラメトリックに変化させた。ここで、重ね継手は基本定着長 $L$ の 1.3 倍、同一断面内の継手集中を避けるため隣り合う継手同士の離隔を主鉄筋径の 25 倍、LP 継手の必要継手長は曲げ直径 dB の 1.5 倍以上とした。図-9 に各継手の検討ケース、図-10 に検討結果を示す。梁高が小さい場合は LP 継手および DS 継手ともに重ね継手と比較して現場打ち幅が縮小されるが、桟橋上部工のように梁高 $H$ が 1500mm 以上となると DS 継手が有利となることが分かる。

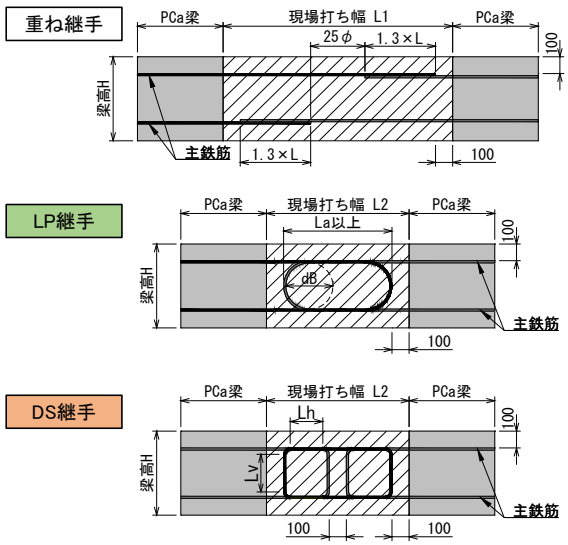



図-9　各継手の検討ケース

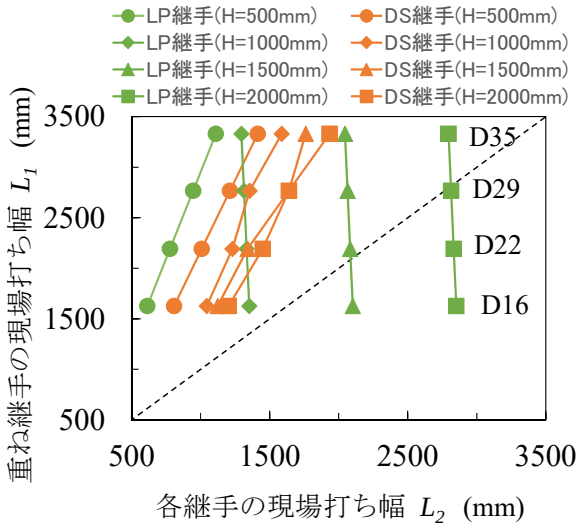



図-10　現場打ち幅の縮小効果

## 6　おわりに

本稿では、プレキャスト桟橋工法に関する杭頭接合「鞘管方式」および部材接合「DS 継手」について紹介した。本技術は現地の陸上ヤードで製作するサイトプレキャストを想定したものである。今後は更なる生産性向上のため、設計段階からプレキャストの概念が導入され、工場製作による部材の合理化や規格の標準化が進み、より安価なプレキャスト施工が可能になるものと期待される。

東京工業大学ならびに海上・港湾・航空技術研究所　港湾空港技術研究所との共同研究もよる成果の一部を掲載したものである。ここに記して関係者に謝意を表す。

## 参考文献

1)　川俣奨：桟橋上部工受梁のプレキャスト化施工について，marine voice 21，Vol.302，pp.12-15，2018.

2)　池野勝哉，岩波光保，川端雄一郎：鞘管方式による桟橋鋼管杭の杭頭接合部に関する交番載荷実験，構造工学論文集，Vol.64A，pp.724-733，2018.

3)　池野勝哉，岩波光保，川端雄一郎，加藤絵万：ダブルスクエア継手を有する PCa 梁の曲げ耐荷特性に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.65A，pp.40-51，2019.

4)　池野勝哉，齋藤創太，川端雄一郎，加藤絵万，岩波光保：ダブルスクエア継手を有する PCa 梁の曲げ載荷実験および適用範囲の提案，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.76，2020（掲載予定）.

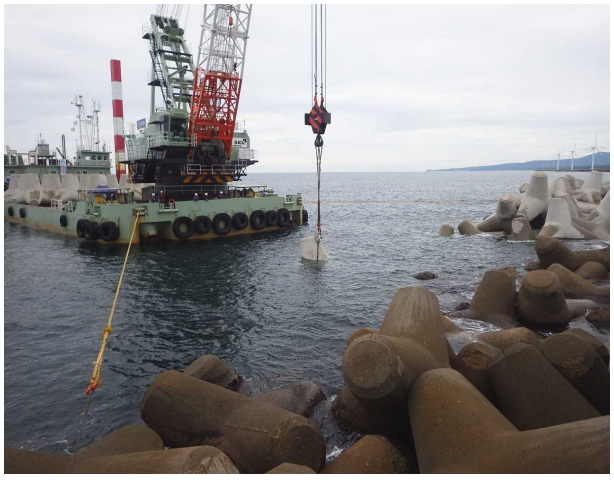
# 水中３Ｄ誘導システムの現場への適用

株式会社本間組　土木事業本部技術部　技術開発研究室　主任　○鈴木　敦子
土木事業本部機電部　機電課長　中澤　孝次
土木事業本部技術部　技術開発研究室長　本間　義信

## １　はじめに

港湾や海岸の整備事業では，構造物に作用する波力の軽減や環境の保全を目的として消波ブロックが多く採用されている．これまで水中部の据付において，クレーンオペレータは水中の状況を把握することができず，据付位置や据付状況は潜水士の目視による確認および判断に頼る場面が多かった．また，近年，港湾施設の沖合展開によりブロックの大型化が進んでいる．これに伴い，台船への積込やブロックの据付時に作業員や潜水士がクレーンオペレータの死角に入りやすい状況となる．その結果，作業員とブロックとの位置関係の把握が困難となり，作業員や潜水士とブロックの接触が懸念される．ブロックの据付状況を写真－１に示す．

本稿では，消波ブロックの据付工事における安全性および施工性の課題を提示し，課題解決のため開発した施工支援システム「水中３Ｄ誘導システム」を提案するとともに，本技術を採用した工事事例について報告する．



写真－１　消波ブロック据付状況

## ２　海上ブロック据付工事の課題

水中部での据付作業では，クレーンオペレータは潜水士と吊荷の相対的な位置関係を水中電話による連絡や水面に浮かぶ呼吸気泡を頼りに確認していた．また，吊荷と潜水士の離隔の確保は潜水士の単独判断に依存していた．クレーンオペレータは水中部の据付位置を正確に把握できないことから，ブロックの据付順序やブロックの向きは潜水士の判断に頼らざるを得なく，出来形を確保する上で大きな問題であった．また，陸上の仮置きヤードから作業船への消波ブロックの積込作業および気中部への据付作業ではクレーンオペレータの死角が発生するため，作業員とブロックが接触する可能性があり，安全上の課題となっていた．表－１ に海上ブロック据付作業の課題を整理する．

表－１　海上ブロック据付作業の課題

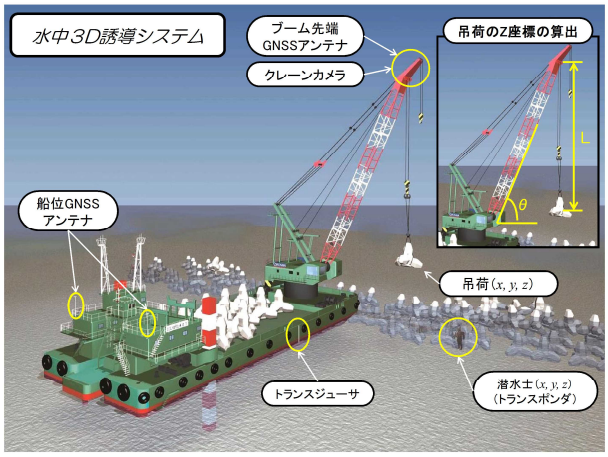
| 項　目 | 問　題　点 | 課　　題 |
|---|---|---|
| 安全性 | ・潜水士とブロックの位置関係は水中電話や呼吸気泡を頼りにしているため，ブロックと接触する可能性がある<br>・気中部据付時等，クレーンオペレータの死角が発生し，作業員がブロックと接触する可能性がある | ・吊荷と潜水士の位置を空間的に判断できるようにすること<br>・クレーンオペレータの死角をなくすこと |
| 施工性 | ・ブロックの据付順序や向きは潜水士や作業員の経験に頼らざるを得なかった<br>・クレーンオペレータはブロックの位置等を正確に把握できない | ・水中のブロックの位置を把握できるようにすること<br>・水中での据付位置を判断できるようにすること |

## ３　技術概要

前項で整理した課題を解決するために「水中３Ｄ誘導システム」を開発した．以下にシステムの概要について述べる．

### ３．１　吊荷の位置管理

本システムの概要を図－1 に示す．本システムは海上起重機船の船体後方およびブーム先端に設置したＧＮＳＳとクレーンの起伏角度（$\theta$）およびワイヤーの巻き出し長（Ｌ）から船体の方位，旋回角および吊荷の三次元座標（$x$，$y$，$z$）を算定する．ＧＮＳＳはＲＴＫ方式を採用することで作業中の吊荷の位置（$x$，$y$，$z$）をリアルタイムに把握できる．




図－1　システム概要

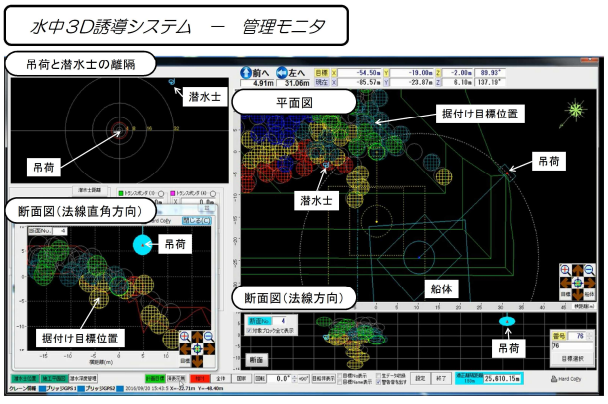
### ３．２　潜水士の位置管理

水中で作業する潜水士の位置管理は音響測深技術を採用している．船体に設置したトランスジューサと潜水士に携帯させるトランスポンダ間で音波を送受信することで，船体を基点とした潜水士の位置（$x$，$y$）を把握できる．また，潜水士の深度（$z$）はトランスポンダに内蔵した圧力センサで計測される作業中の連続データを基に把握することで潜水士の三次元座標（$x$，$y$，$z$）をリアルタイムに確認できる．

### ３．３　管理モニタ

図－2 にシステムの管理モニタを示す．管理モニタはクレーン操作室に設置され，事前の三次元測量（ＵＡＶによる画像測量，三次元レーザースキャナー測量，ナローマルチビームソナー測量等）の成果から得られた平面図および断面図を表示することができる．また，これらの画面にブロック据付目標座標を合成することでブロックの据付位置を表示する．これらの機能により，新設工事，更新工事を問わず，据付箇所の現況形状を平面図と断面図で詳細に表示することができるため，クレーンオペレータは一目で施工対象となる消波構造を空間的に把握することが可能である．また，管理モニタには吊荷の現在位置，潜水士の位置，船体形状およびクレーンの旋回状況も表示され，これらの情報からクレーンオペレータは水中の施工状況を視覚的に把握しながら作業を進捗させることができる．また，潜水士の位置もリアルタイムで表示されるため，クレーンオペレータは吊荷と潜水士の離隔を数値的かつ視覚的に把握しながら据付を行うことができる．

また，平面図および断面図に表示された据付目標位置は，据付けが完了する毎に，据付済みブロックとして着色される．



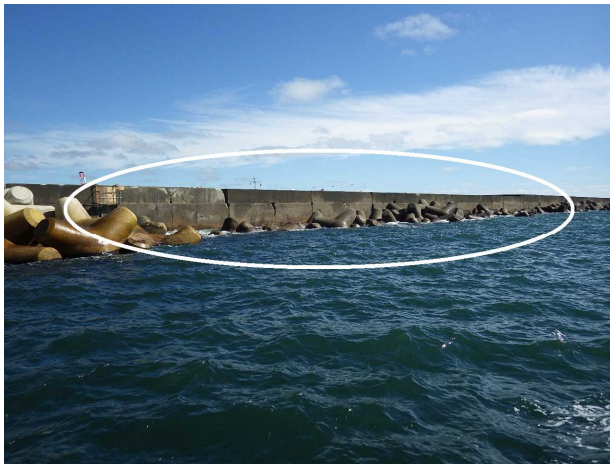

図－2　システム管理モニタ

### ３．４　その他

水中のブロックと潜水士の接触防止対策として，潜水士が吊荷を中心とする任意の危険エリア内に入った場合，警報を発する安全機能を備えている．また，作業船への積込時や気中部据付時に作業員がブロックと接触しないよう，クレーンのブームトップに取付けたカメラで吊荷周辺の上空からの監視が可能であり，クレーンオペレータの死角がなくなる．

## ４　適用事例

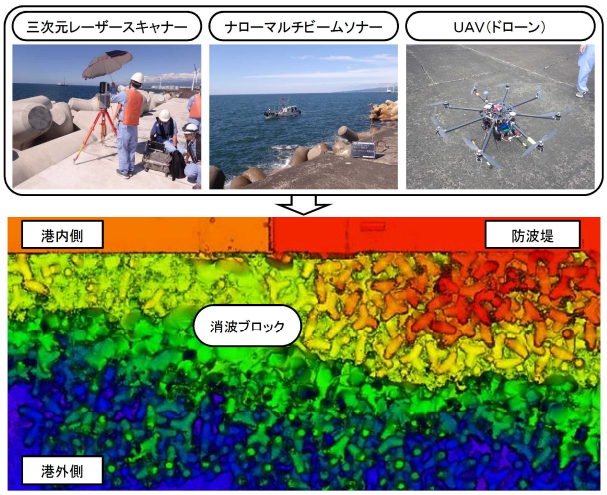
既設防波堤のブロック嵩上工事の適用事例を示す．本工事は天端高が沈下した 50t 型消波ブロックの嵩上げを実施することで消波機能の回復を図るものであった（写真－2）．施工箇所である既設ブロックの天端は凹凸があり複雑な形状となっていたことから，50t 型の大型消波ブロックを既存ブロック上に据付けるためにはブロックの噛み合わせを十分に考慮する必要があった．また，消波ブロックの大型化によりクレーンオペレータの死角が生じ，既設ブロックや潜水士の位置の把握が困難であった。以上のことから，施工時の正確な現況把握とブロックや潜水士の位置管理が安全性と施工性を確保する上で重要と考えた．



写真－2　天端の沈下状況

### ４．１　事前測量

既設消波ブロックの現況を正確に把握するため，気中部は三次元レーザースキャナー，水中部はナローマルチビームソナーによる事前測量を行った．三次元レーザースキャナーを設置した防波堤の固定点からは消波ブロックの港外側に死角が発生したためドローンによる航空測量データで補完した．各測量方法で得られた点群データから作成した空間データにより，既設消波ブロックの状況を正確に把握した（図－3）．




図－3　事前測量状況および既設ブロックの３Ｄ測量成果

### ４．２　据付シミュレーション

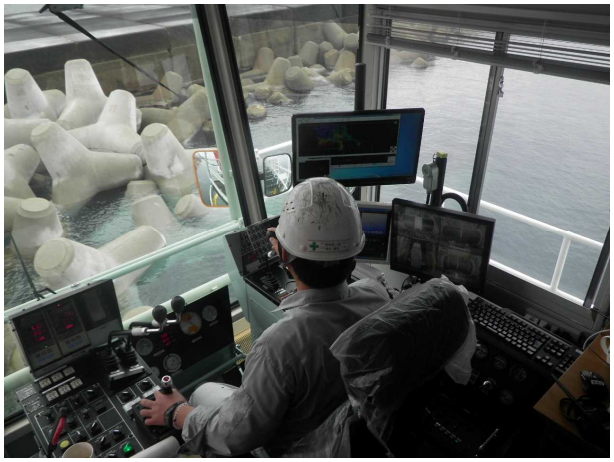
消波ブロックの特性上，据付順序やブロックの向きがブロックの噛み合わせに大きく影響するため，事前の三次元測量により取得した点群データを基に三次元模型を作製し，据付シミュレーションを行った．噛み合わせの良い断面を形成するよう新たに据付ける消波ブロックの据付順序やブロックの向きを検討し，据付計画を作成した．

４．３　データ入力

平面情報，断面情報，据付順序および消波ブロック据付座標等をシステムへ入力した．また，吊荷から半径 5m の範囲に潜水士が侵入した場合，オペレータ室内で警告音が作動するよう設定した．

４．４　ブロック据付

施工中，クレーンオペレータは管理モニタに表示された情報を基に吊荷および潜水士の位置を三次元で把握しながら消波ブロック据付作業を行った（写真－3）．据付計画に基づいた作業によりブロックの噛み合わせ調整時間が短縮され，既設ブロックの据え直しも最小限に抑えられたため，据付精度を確保しつつ作業時間の短縮に繋がった．また，水中の潜水士の位置が管理モニタ上にリアルタイムに表示され，吊荷と潜水士の離隔を数値的かつ視覚的に把握できたため，安全に据付を行うことができた．据付済みブロックの着色機能により，据付状況を視覚的に把握できた．



写真－3　ブロック据付状況

５　適用の効果

本システムを活用した施工方法を工事に適用し，以下の効果を確認した．

５．１　安全性の向上

①吊荷と潜水士の位置を空間的に管理しながら施工することにより，安全に据付作業を行うことができた．

②吊荷周辺の上空監視カメラによりブロック積込および気中部の据付時におけるクレーンオペレータの死角を排除することで，玉掛作業員と吊荷の接触防止の有効性が確認できた．

５．２　施工性の向上

①三次元測量により既設ブロックの詳細状況を把握し，施工を想定した事前のシミュレーションにより設定した据付計画を基に施工することで，所定の個数で出来形を確保することができた．

②船体の位置やブロック据付位置を管理モニタで迅速に把握しながら転船作業やブロック据付作業を行ったため作業効率が向上した．

③据付が完了する毎に据付済みブロックを着色表示することで，日々の進捗管理が容易となった．

６　おわりに

本稿では消波ブロック嵩上工事における安全性と施工性の向上を目的とした「水中３Ｄ誘導システム」を適用した事例を報告した．

ナローマルチビーム等の三次元測量の採用により現況形状を詳細に把握し，ブロックおよび潜水士の位置を三次元で管理するシステムを適用することにより，安全性および施工性が向上することを確認した．今後，ブロック据付座標算出の効率化や操作性向上，建設現場における生産性向上に向けた取り組みを継続していく考えである．

# Ｎ－Ｊｅｔ工法の開発

日特建設㈱　技術開発本部　地盤技術開発部　　中島　雅和　　佐藤　潤
事業本部　技術営業部　　○竹内　仁哉　　金舛　能史

## 1　はじめに

高圧噴射撹拌工法は、小型のボーリングマシンを用いて、超高圧の液体が構成するジェットのエネルギーを利用して地盤を切削破壊し、セメントスラリー（硬化材）と土を撹拌混合して軟弱地盤を改良する。これまでは主に土留め壁の欠損防護や底盤改良、シールド工事における発進・到達防護等の仮設として用いられてきたが、近年では地盤の液状化対策・耐震補強における構造物や杭基礎の補強方法として採用される事例が増えており、適用先が拡大している。

N-Jet 工法はこのような背景を踏まえ、コストダウン、工期短縮、廃棄物の抑制を目指して新規に開発した大口径の改良体造成を可能とした高圧噴射撹拌工法である。以下にその特徴と開発段階での実験結果を報告する。

## 2　Ｎ－Ｊｅｔ工法の概要

### 2．1　特徴

N-Jet 工法の施工は、二重管ロッドとロッド先端部に取り付ける長さ 1m 程度で硬化材を高圧噴射するためのノズルを装備するモニターを使用する。標準の施工手順を図-1 に示す。手順は他の高圧噴射撹拌工法とほぼ同一であり、ボーリングマシンのケーシング等で改良計画深度の下端まで削孔を行い、孔内に二重管ロッドとモニターを挿入し、噴射ノズルから硬化材を 2 方向に噴射しながら回転させ、改良計画の上端まで引き上げて改良体を造成する。

N-Jet 工法が他工法と異なるのは、1 噴射方向に対して近接したツインノズルから硬化材を高圧噴射する点にあり、効率的に硬化材と土を撹拌混合させようという狙いがある。特徴は次のとおりである。

(1) モニターに装備した噴射ノズルから硬化材を 2 方向に圧力 40MPa で噴射する。

(2) 計 4 個の噴射ノズルは上下に 5cm の間隔で配置される（写真-1）。

(3) それぞれのノズルから等量の硬化材が圧縮空気を伴って噴射することで、土中での高圧ジェット噴流の距離減衰を改善している。

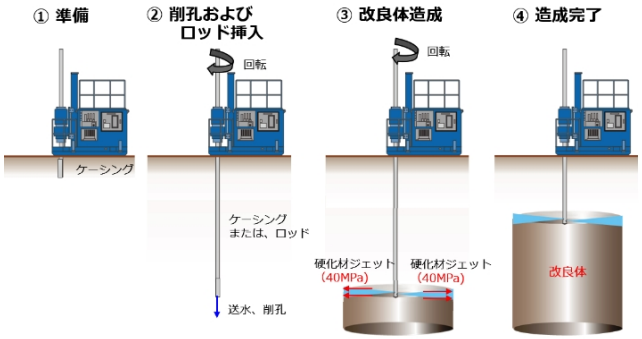



図-1　N-Jet 工法の標準施工手順

写真-1　ノズルからの噴射状況（高圧水）

### 2．2　標準施工仕様 [1)]

N-Jet 工法の噴射仕様および改良体径を表-1 に示す。噴射圧力は 40MPa を標準とし硬化材の噴射量や造成時間を変化させ、対象土質及びその N 値に応じた径の改良体を造成する。

表-2、表-3 には 3 種類の硬化材の配合と設計基準強度を示す。既往研究や従来工法における施工結果などを参考にして設定しており、一軸圧縮強さなどの基準強度は従来工法と同等である。

表-1 N-Jet 工法の標準仕様と改良体径

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 噴射仕様 | 噴射圧力 | | MPa | 40 |
| | 噴射量 | | L/min | 200~360 |
| | 造成時間 | | min/m | 5.0~8.0 |
| | 引上げピッチ | | cm | 5.0 |
| | 圧縮空気圧力 | | MPa | 0.7~1.05 |
| 改良体径 | 標準 | 砂質土 | N≦50 | 3.5m（直径） |
| | | 粘性土 | N≦3 | |
| | 最小 | 砂質土 | 150＜N≦200 | 1.3m（直径） |
| | | 粘性土 | 7＜N≦9 | |

表-2 硬化材の種類と配合 （1m³ 当たり）

| 材料 | 標準配合 | 低強度配合 | 高粘着力土質用配合 |
|---|---|---|---|
| セメント※1 | 760 kg | 470 kg | 760 kg |
| 混和剤※2 | 3.5 kg | 13 kg | 6.0 kg |
| 水※3 | 760 kg | 846 kg | 753 kg |

※1 普通セメントまたは高炉セメント B 種を使用する。
※2 標準、高粘着力配合は NJ 混和剤、低強度配合は低強度用配合の専用混和剤を使用する。
※3 水量は使用セメントの比重により適宜、調整を行う。

表-3 硬化材の配合と設計基準強度

| 配合 | 土質 | 一軸圧縮強さ（MN/㎡） | 粘着力 C（MN/㎡） | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| 標準配合 | 砂質土 | 3.0 | 0.5~0.75 | 付着力f 1/3×C 曲げ引張り強度 2/3×C |
| | 粘性土 | 1.0 | 0.3~0.5 | |
| 低強度配合 | 砂質土 | 1.0 | 0.2 | |
| | 粘性土 | 0.5 | 0.15 | |
| 高粘着力配合 | 粘性土 | 1.0 | 0.3~0.5 | |

## 3 開発段階での実験概要

### 3．1 水中での噴射荷重計測

#### 3．1．1 実験概要

N-Jet 工法の特徴であるツインノズルの地盤切削能力と使用するノズル寸法・形状に関する評価を行うために図-2 に示す装置を用いて水中噴射実験を行い、ロードセルで噴射荷重を計測した。噴射は清水を噴射圧力 40MPa で 2 方向（4 ノズル）とし、圧縮空気量は 10Nm³/min 程度の一定とした。実験はロッドを静止させた状態で 1 方向の値を計測し、ロッドとロードセル間の噴射距離を変化させ荷重の減衰過程を調べた。またノズル寸法・形状に関しては、図-3 に示す従来工法で使用されるノズルを参考にし、ノズル吐出口径は一定（D=φ2.95mm）として、実験用に寸法や形状の異なる多数の噴射ノズルを試作した。

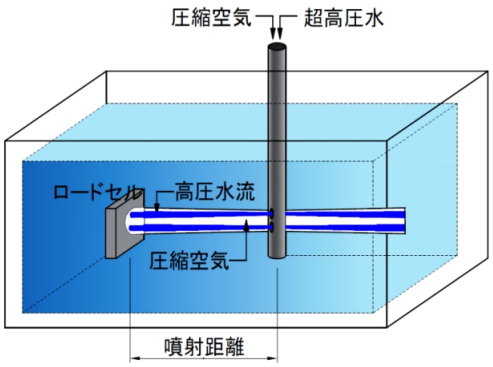



図-2 水中噴射荷重の測定方法

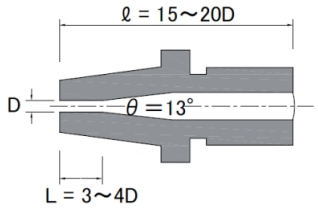



図-3 従来工法で使用される噴射ノズル [2)]

#### 3．1．2 実験結果

噴射圧力を 40MPa の一定に調整した場合の噴射量（合計）は 420～440L/min であった。この時の代表的な実験用ノズルの噴射荷重（平均値）の結果を図-4 に示す。噴射荷重に関しては、これまでの経験から実地盤を切削できる下限値として 0.4kN 程度を想定していたが、あるノズル（図-4 では typeD）を使用した場合、噴射距離 1.8m 地点において、その下限値を上回ることが確認できた。この結果から開発目標である改良体径がφ3.5m（直径）の造成が可能であると判断した。

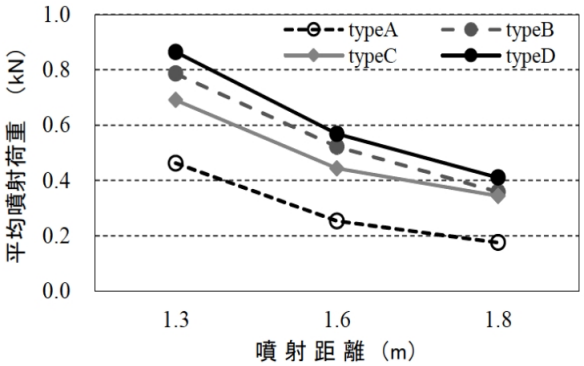



図-4　水中噴射荷重計測結果

### ３．２　野外での改良体造成実験

#### ３．２．１　実験１：砂質土地盤での実験

##### （ａ）実験概要

更新統からなる関東地方某所を実験地として選定し、砂質地盤（細砂）を対象とした造成実験を行った（図-5）。実験は 2 本の改良体を表-4 に示す仕様で、ステップ間隔及びロッド回転速度が改良体径に及ぼす影響を確認する目的で行った。なおロッド回転数は、各ステップにおいて 1 回転に設定した。

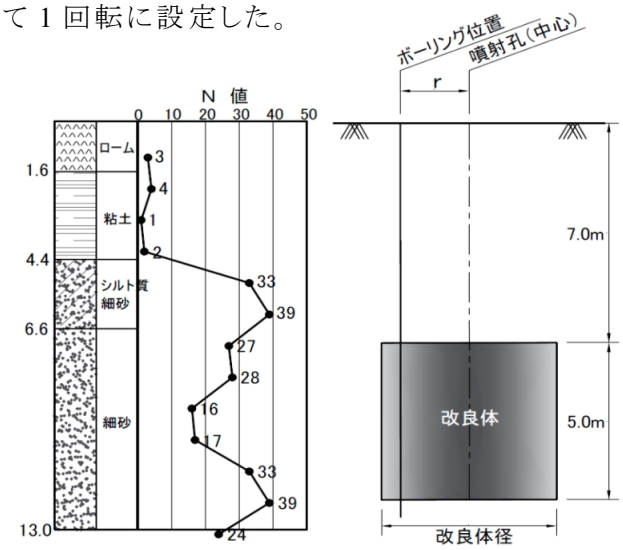



図-5　地盤概要と改良深度

表-4　実験の噴射仕様

| 噴射仕様 | CASE 1 | CASE 2 |
|---|---|---|
| 計画改良体径 | φ 3.5 m | |
| 噴 射 圧 力 | 40 MPa | |
| 噴 射 流 量 | 360 L/分 | |
| 引上げ速度 | 8 分/m | |
| ステップ間隔 | 5.0 cm | 2.5 cm |
| ロッド回転速度 | 2.5 rpm | 5.0 rpm |

##### （ｂ）実験結果

改良体径および改良体強度を確認するためにボーリングを実施した。改良体径の確認においては CASE1 で 4 本、CASE2 で 3 本を実施した。採取されたコアの一例を写真-2 に示す。コア写真は改良部分を明確にするためにフェノールフタレイン溶液を噴霧しているため、改良部分は赤色に発色している。また今回、改良全長のうち実際に改良されたコア長の割合をコア改良率と定義し、噴射孔中心からボーリング位置までの距離を r として関係を調べた。その結果を図-6 に示す。CASE1 では中心より r=1.80m 以内まではコア改良率が 90%以上の高い値を示し、ほぼ全長が改良されていることを確認した。一方 CASE2 では r=1.75m の位置で改良率が 60%～85%程度に留まり、CASE1 よりも改良体径が小さいと推定される結果を示した。

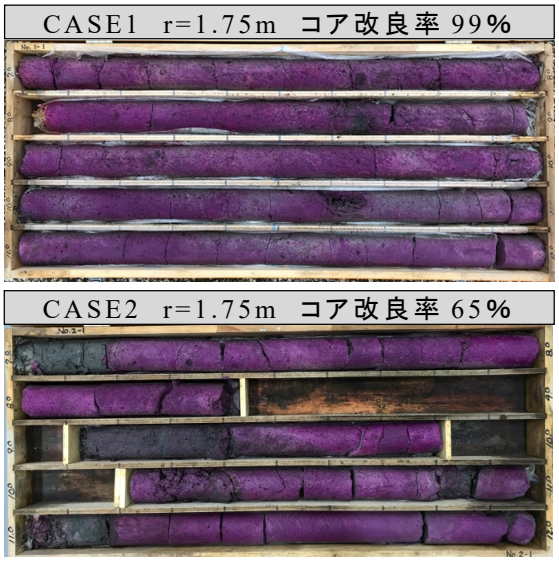



写真-2　ボーリングコアの一例

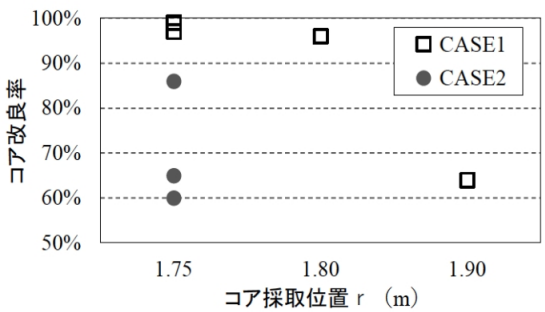



図-6　コア採取位置とコア改良率

改良体の強度確認のために CASE1 の r=0.90m の位置で 1 本のボーリングを行い、コア整形後、一軸圧縮試験を実施した。その結果を図-7 に示す。目標強度を σ=3.0MN/㎡と設定していたが、概ね改良深度の全長で目標強度を上回り、平均は $\bar{\sigma}$ =3.3MN/㎡であった。

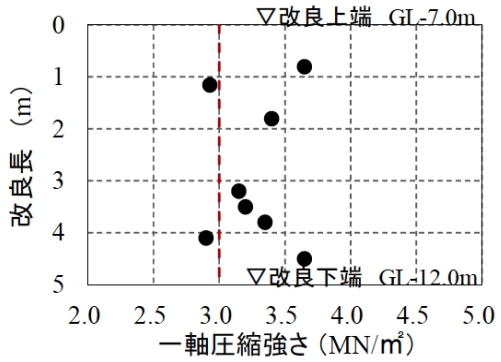



図-7 改良深度と一軸圧縮強さ

### ３．２．２ 実験２：粘性土地盤での実験

#### （ａ）実験概要

関西地方某所の粘性土を主体とする地盤において造成実験を行った。地質調査を実施した結果、対象地盤の N 値は N=6～24 程度の地盤であることが判明している（図-8）。地盤が高圧噴射撹拌工法が対象とする粘性土としては硬質であるため、上部（N=6～9）、中部（N=11～12）および下部（N≧18）に 3 区分して評価するものとした。

実験時の噴射仕様については、表-4 における CASE1 と同一とした。ただし排泥の粘性が高かったため、硬化材を噴射して改良体を造成する前に高圧水を噴射してあらかじめ地盤を切削するプレジェットを実施した。

#### （ｂ）実験結果

造成完了後の養生期間を経た後、r=1.40m の位置においてボーリングを実施した。採取されたコアを写真-3 に示す。上部はコア改良率が高く改良体が造成されたと確認できたが、N 値が高い中部、下部は改良率が極端に低く未改良と判断した。この実験結果から、粘性土において 7＜N≦9 の場合、造成可能な改良体径（直径）は φ2.8m であると判断した。

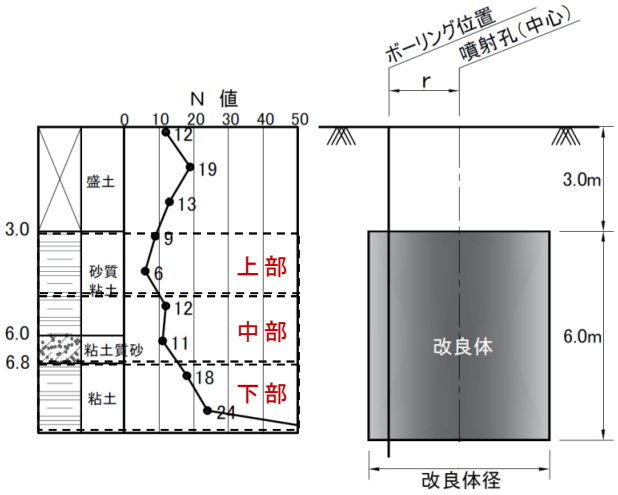



図-8 地盤概要と改良深度

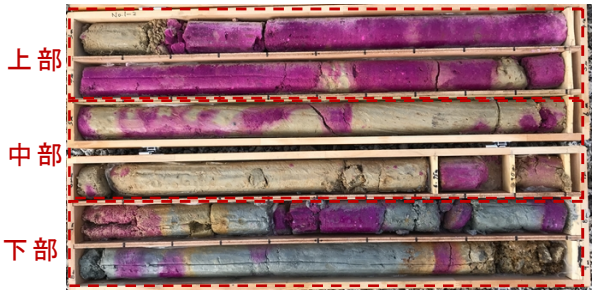



写真-3 ボーリングコア写真

## おわりに

今後も実験や実際の現場施工を通じて、工法としての精度、信頼度を高めてゆく必要があると考えている。また、さらなる改良体の大口径化や施工機械の小型化、施工管理装置の高度化などの課題に対しても改良・改善に取り組んでゆく予定である。

## 参考文献

1）N-Jet 工法協会：N-Jet（N1 ジェット），工法カタログ

2）日本ジェットグラウト協会：技術資料（第 27 版），p.6，2019

# 第Ⅱグループ

# ＡＩ搭載ステレオカメラによる人検知型
# ロードローラ転圧機　自動停止装置　「EyeThink」の開発

○日本道路㈱　北信越支店　技術センター所長　工藤　朗
生産技術本部　機械担当部長　上田　剛
北信越支店　機械課係長　小野寺　旭
〃　機械課　太田　孝信

## １　はじめに

建設業においては、建設機械との接触事故防止のため監視警報装置が開発・実用化されている。しかし、舗装業では車線規制内の限られた空間に、作業従事者やロードローラなどとの混在作業が余儀なくされ、接触災害は今なお根絶されていない。

特に、舗装の品質（締固め度・平たん性）の確保のため、ローラの転圧作業は時速６～１０km の前後進を繰り返して舗装体の締固めを行い、最終的には平たんな舗装表面に仕上げる必要がある。

そのため運転員は、前後進ともに直進度を意識した運転操作が求められ、後退するときは運転員が振り返って後方の安全確認とハンドル操作を行っている。

後方視認状態の運転員の視野および視界は狭まるため、危険回避行動をとるためのレバー操作の誤操作や判断ミスによる遅れを生じさせる懸念がある。それゆえ、ローラ転圧作業中の接触事故が絶えないのが現状である。

## ２　自動停止装置「EyeThink」の開発

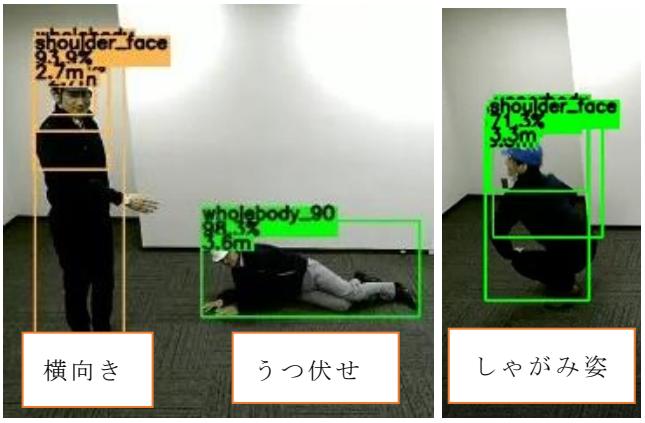
### ２．１　人口知能ＡＩによる人の識別

建設現場において、運転員の判断に代わり建設機械の動きを自動的に停止する、安全確実な安全補助装置は実用化されつつある。

舗装業では、限られた空間内に複数の作業従事者・重機が混在し、作業範囲や作業姿勢の変化も大きく、監視対象物である「人」とモノを区別する必要がある。当社は、この課題を解決するためＡＩ技術（人工知能）を採用し、ステレオカメラを利用した自動停止装置を開発し社有機械に導入した（写真－１）。

写真－１「EyeThink」搭載のタイヤローラ

ＡＩ技術の活用により、作業中の複雑な動きや作業姿勢を学習（ディープラーニング）させたことで「人」の識別性能を大幅に向上することができた。（写真－２）




写真－２　学習姿勢画像例

これにより、検知エリア内の検知物が「人物」「物体」であるか否かをＡＩが判断する。

なお、ＡＩには自己学習機能を有しているが、当該「EyeThink」の自己学習機能は停止している。これは誤った自己学習により「人」への誤認識をさせないためである。

また、自己学習機能を有効とした場合、実際に現場へ導入する際の信頼性・安全性の検証が必要である。

２．２　停止させる制御

２．２．１　距離計測

本システムは、双眼レンズ構造のステレオカメラの左右レンズにて撮影された画素数の差異から対象物までの距離を正確に計測する。測距性能は概ね１５ｍであるが、検知可能距離の上限を１０ｍとしている。当該ステレオカメラを写真－３に示す。

写真－３　ステレオカメラ

２．２．２　ブレーキ制御方式

ロードローラ転圧機を停止させるための制御の方法は、走行用油圧ポンプのサーボソレノイド（可変容量ポンプ）を中立化することにより制動をかけるＨＳＴ（油圧）ブレーキを作動せるものである。

駆動部分に改造や加工を加えた場合、道路交通法等の法律に抵触する恐れがあるため、運転員が操作する前後進レバーに着目し、強制的に前後進レバーを動かし、ローラのブレーキ動作を操作する方式とした。ブレーキ制御装置の外観を写真－４に示す。

写真－４　制御装置

２．３　システムの装着性や可搬性

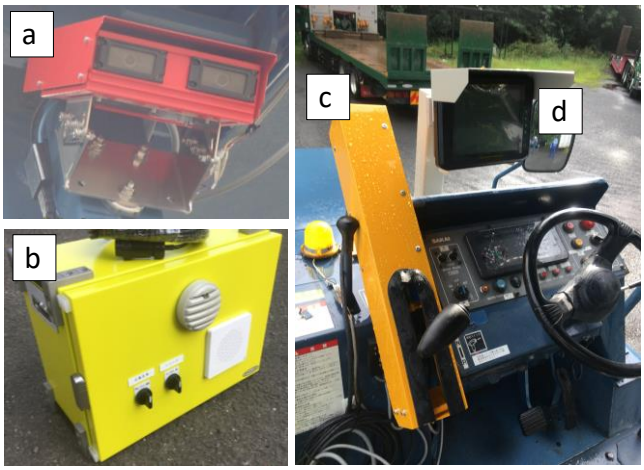
「EyeThink」システムは６つのユニットから構成され、ロードローラ側の改造は不要である。電源供給用の配線を車両バッテリーに接続するだけで装着することが可能である。

これにより各現場で使用するレンタル機械への装着も容易に行うことが出来き、可搬性の高いシステムである。

３　システム概要

３．１　構成機器

「EyeThink」システムは４つの主要な機器構成となる（写真－５）。




写真－５　機器構成

a)ステレオカメラ

ＡＩを搭載したステレオカメラで人やモノの検知および距離計測データを制御盤ボックスに転送する。

b)制御盤ボックス

カメラからのデータに基づき、検知エリア内における人の有無の検知、予め設定された警報領域ごとの検出、制動装置を即座に制御する。また、システムによる自動停止措置時、警報ブザーおよび警報ランプにて注意喚起情報を発信する。

c)制御装置

制御盤ボックスからの信号制御に応じて、操作レバーを動作させ減速・停止させる。

d)パネル PC

リアルタイムにカメラの検知状態を表示し、運転員が「EyeThink」システムの動作状態の把握および検知距離・範囲等の設定を行う。

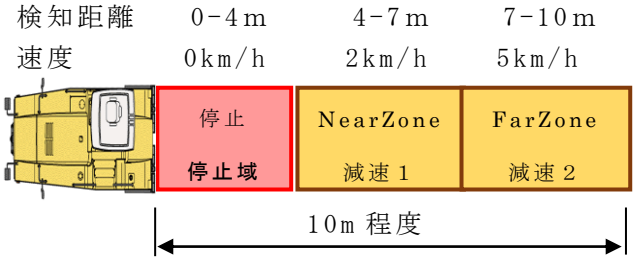
３．２　自動停止操作の原理

検知エリアは、ステレオカメラにて撮影されている範囲内で任意に設定することが可能で、施工現場条件や機種などに応じて幅および距離（奥行）の範囲が設定できる。

更にエリアの中で３つの異なる検知範囲を設定することが可能である。ローラからの近距離の Near Zone と遠距離の Far Zone を設定することもできる。

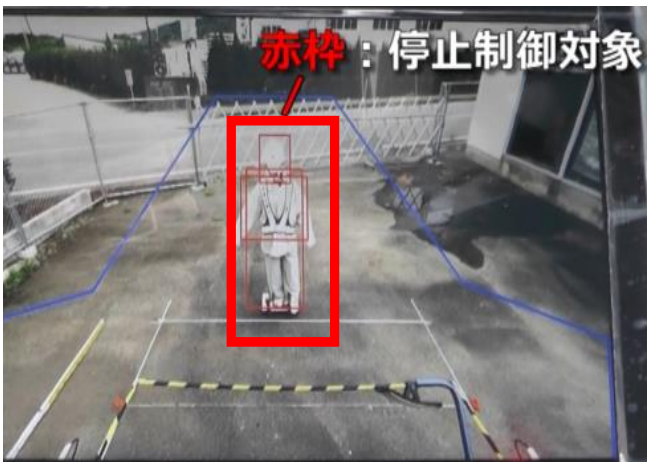
これにより「停止域」「減速域１」「減速域２」と段階的に作業速度が減速し、舗装表面の仕上がりに影響を与えることなく自動停止でき、ロードローラの急制動により舗装の仕上げ不良やローラーマーク発生を防止する。

検知範囲の概念図を図－１に、検知画像を写真－６および写真－７に示す。




図－１　検知範囲の概念図(例)

写真－６　検知画像　減速域




写真－７　検知画像　停止域

人を検知すると瞬時に制御装置が作動して、減速位置や停止位置にロードローラの制動動作を制御する。

人検知は、人間が行う様々な体勢を概ね、８万枚以上の画像データとしてＡＩに学習させたことで識別性能を向上させている。

また、人物と物体を個別に検知認識でき監視対象物か否かの判断も可能なため、狭小現場でも有効であると考えている。

３．３　自動停止後のシステム復旧操作

作業従事者とローラなどとの近接・混在作業中にシステムにより自動停止した場合、制御装置のシリンダーがロックされロードローラの前後進ができない状態となる。

また自動停止後、検知物の「人」が検知エリアを出たとしてもシリンダーロックは継続

される。

そこで、運転員の直接目視による後方の安全確認した後、自動停止装置「EyeThink」システムを迅速に復旧できる機構を設けた（写真－８）。復旧ボックスには、押しボタンスイッチを設置し、ボタンを押すことで「EyeThink」システムのロック状態を迅速に解除し通常監視状態にするものである。

写真－８　システム復旧ボックス

施工端部での転圧時に作業従事者と十分な距離を確保できず、「人」を検知・自動停止し後退できない場合を想定し設置したものである。これにより、「EyeThink」システムのメイン電源を切断することなく自動停止装置を迅速に復旧でき、システムを常に有効な状態で保持できる。

４　施工現場での適用

自動停止装置「EyeThink」」を搭載したタイヤローラを大規模現場を中心に導入した。導入した現場を表－１に示す。

表－１　導入した現場

| 導入年度 | 発注者 | 施工区分 | 導入場所 |
|---|---|---|---|
| 2018年6月 | NEXCO西日本 | 昼間施工 | 三重県 |
| 2019年8月 | NEXCO東日本 | 昼間施工 | 新潟県 |
| 2019年10月 | 国土交通省　北陸地方整備局 | 夜間施工 | 新潟県 |
| 2020年8月 | 国土交通省　北陸地方整備局 | 夜間施工 | 富山県 |

2018 年 6 月より、新設高速道路舗装工事を皮切りに現場運用を開始した（写真－９）。2019 年 10 月より北陸地方整備局管内の夜間修繕舗装工事の安全対策技術として同システムを導入し、稼働している状況である（写真－１０）。夜間工事において、一般走行車のライトにより発生したカラーコーンの影を「人」と認識し数回停止した事例が報告され、今回の事象をＡＩに学習（ディープラーニング）させた。それ以降、昼夜問わず、人検知への検出動作に問題がないことを確認した。

写真－９　高速道路舗装工事の転圧作業

写真－１０　夜間修繕舗装工事の検知状況

５　おわりに

今後、本システム導入により、建設現場での接触災害を撲滅でき、作業従事者を守ることができる。開発したシステムの構成はシンプルで可搬性もあり、各現場でレンタルされたロードローラへ容易に装着可能である。

今後、「EyeThink」の活躍の場を広げ転圧機以外の汎用建設機械への搭載を目指していきたい。

# 3眼カメラを用いた配筋検査システムの妙高大橋架替下部その4工事における有効性評価

清水建設株式会社　技術研究所　社会インフラ技術グループ長　吉武　謙二
清水建設株式会社　北陸支店　足羽川ダム原石山他工事主任　中野　貴公
清水建設株式会社　北陸支店　足羽川ダム原石山他工事工事長　山田　一宏
シャープ株式会社　研究開発事業本部　通信映像技術研究所係長　有田　真一

## 1　はじめに

配筋検査は、検査帳票作成や検査用具準備、自主検査および段階確認など複数人で多くの時間を要するため、検査の精度維持と省人化・省力化の両立が課題であった。また、新型コロナウイルス感染症発生を契機とし、公共工事の現場において非接触・リモート型の働き方に転換するインフラ分野の DX（デジタル・トランスフォーメーション）の推進も新たな課題となっている[1)]。

配筋検査システムに関しては、従来から各機関で開発が進められているが[例えば 2)、3)、4)]計測精度、計測時間やシステムの大きさ・重量などの使い勝手の要因から実用化には至っていない。筆者らは、これらの課題を解決するため、3 眼カメラ配筋検査システムを開発し（写真 1、写真 2）、「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」[5)]を含む、15 現場以上で 30 回以上試行した。試行を通じ技術的課題の抽出・改善を重ね、国土交通省発行の土木工事施工管理基準及び規格値（案）[6)]の規格値との比較を実施しシステムの適用性を検証した。また、土木工事共通仕様書（案）[7)]に鉄筋組立完了時の段階確認を実施すると規定されている監督員の労働生産性向上のために、クラウドによる情報共有システムを提案した。上記、プロジェクトでは、A（試行は十分な成果があり、技術の導入効果　や社会実装の実現性について高く評価できる）と評価され、令和元年度の追加公募にも採択されている。

本報では、システム機能、試行時の計測精度、写真 3 に示す妙高大橋架替下部その 4 工事での自主検査時における生産性や新型コロナウイルス感染を含む安全性に及ぼす効果について記す。

## 2　システムの機能

本システムの寸法は、幅 300×高さ 200×奥行 150(mm)、重量は 3kg 程度と可搬性を有する。3 つのカメラで異なる方向から同時に

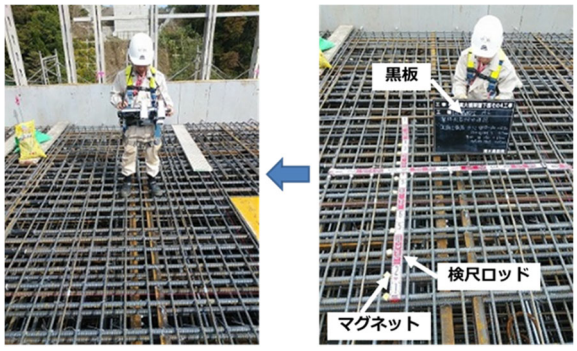


写真 1 配筋検査(左:システム，右:従来)

写真 2　計測結果の例

写真 3　妙高大橋現場状況

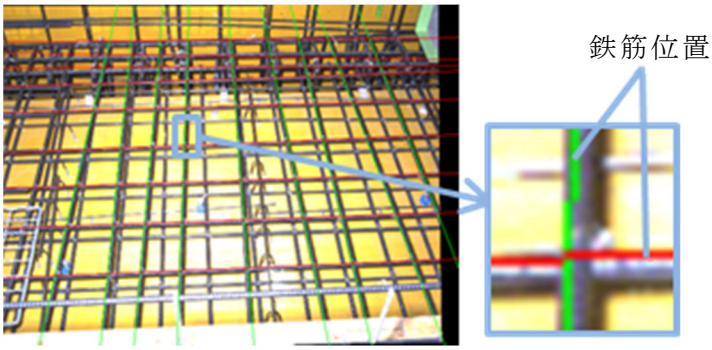



写真 4　鉄筋位置抽出例

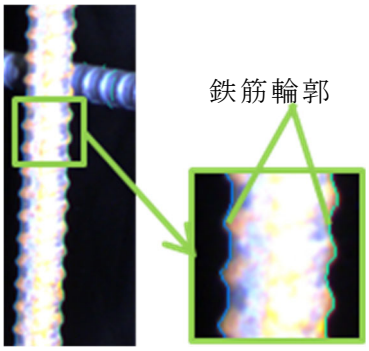



写真 5　鉄筋輪郭抽出例

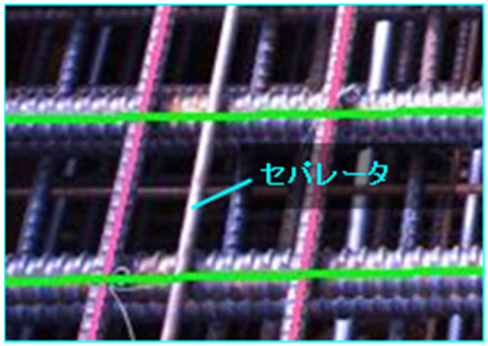



写真 6　セパレータ除去状況

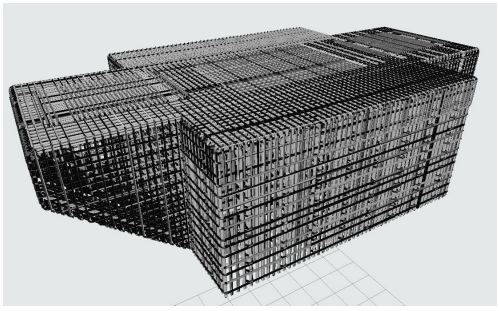


図 1　脚頭部鉄筋 CIM モデル

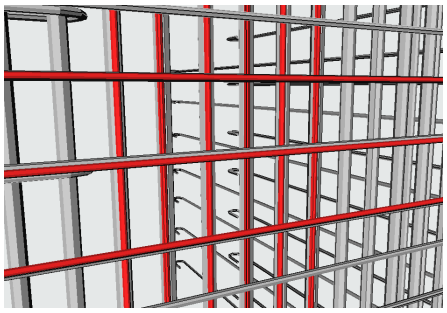


図 2　計測結果と CIM モデル比較

鉄筋を撮影することにより、鉄筋位置や鉄筋の輪郭を抽出し、鉄筋径と間隔を算定する（写真 4、写真 5）。写真 6 のようにセパレータや足場のブレースなどの鉄筋以外の異物を自動除去し、上下 2 段の縦・横方向配筋、計 4 段の同時計測や複数の検査結果を自動で重ね合わせた広域な面の配筋検査も可能である。画像内の任意の 2 点間距離が計測できるため、重ね継手長やかぶりも計測できる。配筋検査は雨天時にも実施するため、防水機能も有する。

配筋ミスの早期発見のため、図 1 のような鉄筋 CIM モデルから抽出した任意の場所における計測結果と、CIM モデルとの比較も可能である（図 2）。

検査結果を施工計画時の情報とともにクラウドサーバーで監督員や施工管理者などの関係者と共有することで、遠隔地からでも施工状況の把握ができるため、施工品質の向上が期待できる。また、検査結果は 3 枚の元画像を用いた算定値であるため、元画像を変更すると検査結果も異なる。3 枚の元画像を改ざんして任意の検査結果を得ることは極めて困難なため、改ざん防止が図れ、高い信憑性を有する。

## 3　計測精度および生産性・安全性の評価

試行の結果、鉄筋径や間隔、本数が 7 秒程

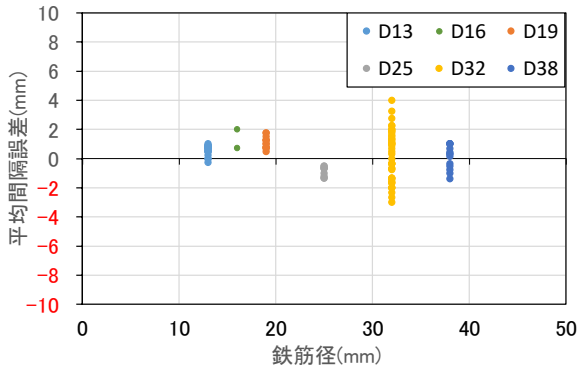



図 3　鉄筋径計測結果の例

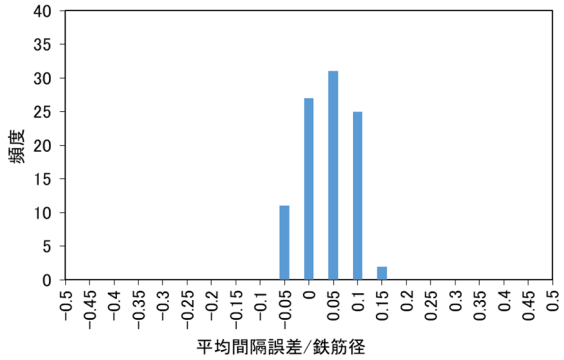



図 4　平均間隔誤差のヒストグラム

度で算出可能であり、現場での運用上、支障がないことを確認した。スケールとシステムを用いた平均間隔の誤差と鉄筋径との関係を図 3 に、鉄筋径で正規化した平均間隔の誤差と頻度の関係を図 4 に示す。鉄筋径によらず平均誤差のばらつきに大きな差異は見られなかった。また、平均間隔誤差を鉄筋径で正規化した値の最大値は 0.125 であり、土木工事施工管理基準及び規格値（案）[6]の平均間隔の規格値±Φを計測可能であることを確認した。鉄筋径の判定については、計測した鉄筋全体での鉄筋径判別精度は 88%であった。誤判断の要因は写真 7 のように本来計測すべき鉄筋と平行にスターラップが配置される場合などに、スターラップも同時に計測し鉄筋径を太く判断するなど、鉄筋輪郭検出の誤りに起因すると考えられる。

従来検査とシステム検査による検査時間の比較を表 1 に示す。従来は自主検査の際に、

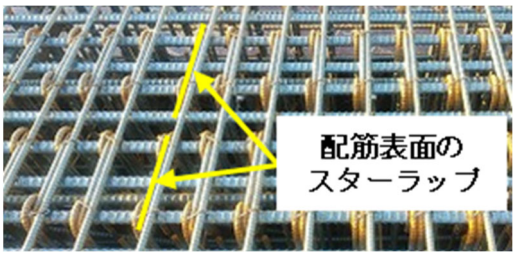



写真 7　配筋表面のスターラップ

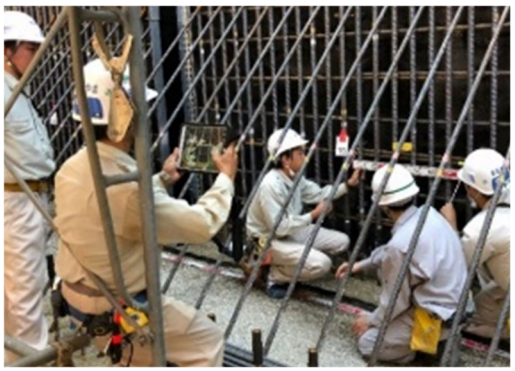


写真 8　段階確認検査状況

配筋調書のひな型を事務所で作成し、検尺ロッドやマグネット、黒板などを準備し、現場でスケールを用いて計測し、黒板に計測結果を記入し、写真撮影をして、事務所に戻って帳票を整理していた。自主検査は計測やマグネットの取付の必要があるため 2 名で、立会検査は 3 名で実施していたが、本システムを使用することにより、1 名で対応可能であることを確認した。システムを用いることにより、現場および事務所での作業時間が 17 時間 30 分から 5 時間 10 分と 70%削減できる見込みとなった。

現状では写真 8 のように監督員による現場での段階確認が行われているが、本システムでは、情報共有が可能であるため、遠隔地からの検査ができることを確認した。表 1 には監督員の現場への移動時間や検査時の時間短縮などの効果は含まれていないため、遠隔での段階確認が可能になれば、さらなる生産性向上効果が期待できる。

生産性の向上により高所作業時間は、15

表 1　生産性評価

| 作業場所 | 作業時間 | 従来検査 | | 作業内容 | システム検査 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 人工 | 人工・時間 | | 人工 | 人工・時間 |
| 事務所 | 1:00 | 1 | 1:00 | ・配筋調書ひな型作成 | 1 | 1:00 |
| 現場 | 4:00 | 2 | 8:00 | ・自主配筋検査 | 1 | 1:30 |
| 事務所 | 1:30 | 1 | 1:30 | ・自主配筋調書記入 | 1 | 1:00 |
| 現場 | 2:00 | 2 | 4:00 | ・検尺ロッド設置、黒板記入 | 1 | 0:00 |
| 現場 | 1:00 | 3 | 3:00 | ・立会配筋検査、写真撮影、片付け | 1 | 1:40 |
| 小計 | | | 17:30 | | | 5:10 |
| 削減率(%) | 70 | | | | | |

写真 9　配筋検査状況

時間を 3 時間 10 分に、さらに、写真 9 のように足場など鉄筋から離れた安全な位置からの検査が可能になること、マグネットや検尺ロッドなどの設置の必要がないため、それらの落下の危険性が除去でき、安全性の向上にも寄与することも確認した。また，本システムは、遠隔臨場システムとの親和性も高いため，少人数かつリモート・非接触での配筋検査が可能となるため，新型コロナ感染対策にも貢献できると考えられる。

## 4　まとめ

検査の精度維持と省人化・省力化の両立という課題を解決するために、3 眼カメラ配筋システムを開発し、日射や天候、配筋仕様などの異なる様々な条件での試行を通じ、妙高大橋架替下部その 4 工事での自主検査時における計測精度と生産性や安全性の評価を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

①システムは可搬性を有し、鉄筋径や間隔、本数が 7 秒程度で算出でき、現場での運用上、支障がないこと。

②平均間隔誤差を鉄筋径で正規化した値の最大値は 0.125 であり、規格値±Φを計測可能であること。

③配筋検査時間の 1/3 程度への削減による生産性向上効果、高所作業の短時間化などによる安全性向上効果を有すること。

④遠隔臨場との組合せにより，少人数かつリモート・非接触での配筋検査が可能となり，新型コロナ感染対策にも貢献できること。

⑤鉄筋の径判別精度は 88%であり、鉄筋輪郭検出などの改善が必要であること。

今後、さらなる軽量化、高速化、高精度化を図るとともに、受発注者で配筋検査システムの現場実装に必要となる技術基準の整備などを図っていきたい。

謝辞：本研究の一部は、国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000074.html
2) 竹内啓五、太田達見：鉄筋観測のための小型形状スキャナの適用性評価、日本建築学会学術講演梗概集(東海)、材料施工、pp.193-194、2012.
3) 蔡成浩、中村隆寛：配筋検査システム、コンクリート工学、Vol.55、No. 9、pp. 840-843、2017.
4) 森本直樹、後閑淳司、酒匂智彦、早川 博久、平陽兵、吉田裕亮、桑島奨：ステレオカメラを活用した自動配筋検査システムの実証、土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会、VI-1102、2019
5) https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000062.html
6) 国土交通省：土木工事施工管理基準及び規格値（案）、2018.
7) 国土交通省：土木工事共通仕様書（案）、2018.

# ＩＣＴ活用による除雪トラックのマシンコントロール化

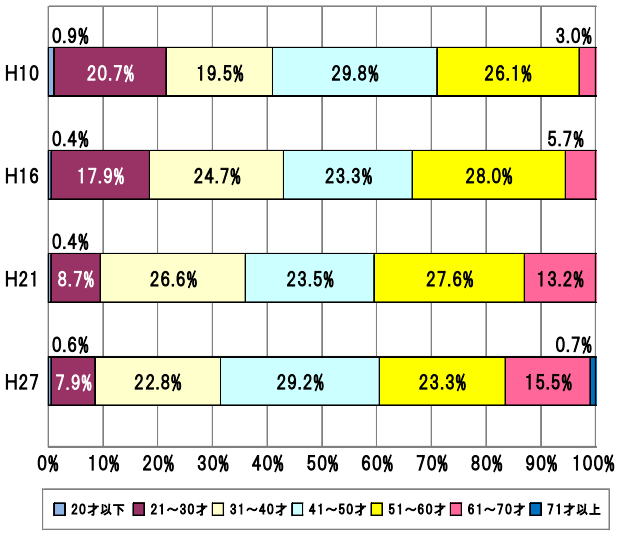
北陸技術事務所　施工調査・技術活用課課長　　小泉　倫彦
施工調査・技術活用課専門官　〇小浦方　一彦

## １　はじめに

北陸地方整備局では、管内（新潟県・富山県・石川県）の直轄国道管理区間14路線、合計約1,076kmの冬期道路交通を確保するため、約500台の除雪機械を配備し、除雪作業を実施している。

除雪機械の運転は、作業装置を路面状況、道路構造の変化に応じて操作する必要があり、経験と熟練した技術が必要であるが昨今、熟練技能を持つオペレータの高齢化に伴う引退や新規入職者の減少により、担い手の確保が重要な課題となっている。（表－１）

表－１　除雪機械オペレータ年齢構成
（新潟・富山・石川）直轄及び地方公共団体




資料：一般社団法人日本建設機械施工協会北陸支部調べ

このような背景のもと、北陸技術事務所ではＩＣＴ（情報通信技術）を活用した除雪機械の作業装置自動化に取り組んでおり、現在、除雪トラックのマシンコントロール（以下「ＭＣ」という）化の検討を進めている。

## ２　除雪トラックＭＣ化の検討

### ２．１　検討方針

除雪トラックの作業装置は、交差点や乗り入れ部といった雪を置いてはいけない区間において、一時的に雪を抱え込む「サイドシャッタ」、新雪除雪を行う「フロントプラウ」、圧雪などの路面を整正する「グレーダ装置」で構成される。（写真－１）

写真－１　除雪トラックの作業装置

作業装置は、８本のレバーと20個のスイッチによる操作を除雪トラックの運転と並行して行っており、それら作業装置の操作（動作）について、ＭＣ化を目的として検討に着手したものである。（写真－２）

写真－２　除雪トラック作業装置操作レバー

## ２．２　検討スケジュール

ＭＣ化を行うためには、次の技術を組み合わせたシステムを構築する必要がある。（表－２）

表－２　ＭＣ化に必要な技術

| No. | 要素技術 | 候補技術 | 要素技術から得られる情報 | 要素技術による操作制御 |
|---|---|---|---|---|
| ① | 精度の高い自車位置情報 | VRS受信機<br>準天頂衛星システム「みちびき」<br>慣性計測航法（INS）　等 | 自車及び作業装置の位置情報の把握 | 車両位置情報での作業装置制御（誤差は数cm） |
| | 精度の高い地図データ | MMSデータ<br>ダイナミックマップ<br>除雪作業用地図データ | | |
| ② | センサー技術 | 傾斜計<br>ストローク計　等 | 路面積雪量<br>雪抱え込み量<br>作業装置の状況等の把握 | 雪の量に合わせた作業装置の角度，押付力等の動作制御 |

精度の高い自車位置情報、精度の高い地図データ（①）、センサー技術（②）は既存技術の組み合せで対応可能と推察されることから、各技術を組み合わせたＭＣ化の検討を行うこととした。（表－３）

表－３　検討スケジュール

| 開発技術・作業装置 ＼ 検討年度 | H30（2018） | R1（2019） | R2（2020） | 将来 |
|---|---|---|---|---|
| ① 位置情報と合わせたマシンコントロール化 | ― | ― | ― | 自動運転化 |
| サイドシャッタ | ― | ― | | |
| フロントプラウ | | ― | ― | |
| グレーダ装置 | | | ― | |
| ② センサー技術を融合したマシンコントロール化 | 数年後に実用化の可能性 | | | |

## ２．３「サイドシャッタ」のＭＣ化検討

サイドシャッタは、グレーダ装置で除雪した雪を交差点内などに残さないよう、シャッタを閉めることで一時的に雪を抱え込む装置である。（写真－３）

交差点等、特定の区間における開閉動作であれば位置情報のみで制御が可能であるほか、動作時の安全性等も考慮し、表－２に示した技術のうち、精度の高い自車位置情報、精度の高い地図データを使用し、ＭＣ化に取り組んだ。

写真－３　サイドシャッタ動作状況

### ２．３．１　自車位置情報

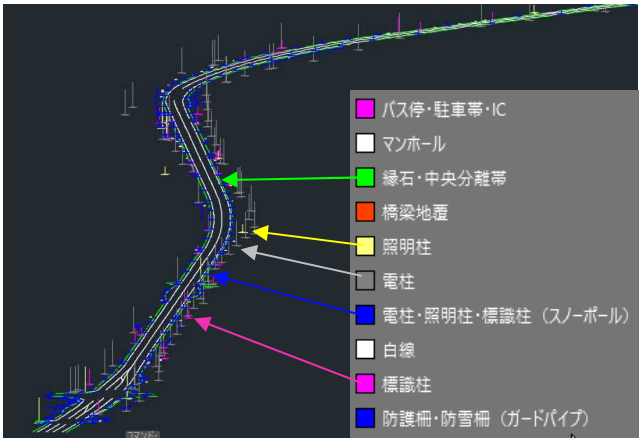
ＭＣ化の検討に際し、自車位置情報の取得に関しては、精度、費用等を考慮した結果、2018 年 11 月より運用が開始された準天頂衛星システム「みちびき」のセンチメータ級測位補強サービス（ＣＬＡＳ）を採用することとし、その公称精度は、水平誤差 12cm、垂直誤差 24cm である。

衛星受信機の精度を検証するため、一般国道49号福島・新潟県境から新潟県新潟市までの片道68kmについて、「みちびき」の受信機とＲＴＫ－ＧＮＳＳ（ＶＲＳ方式）とを搭載した試験車両で走行した結果、誤差30cm以下が走行した区間の6割程度という結果であった。上空が開けた平野部では公称精度内に収まるが、トンネル等の上空遮蔽物、山間部や樹木が密生しているような衛星を捕捉しにくい区間においては誤差が生じていた。

また、トンネル出口から衛星を捕捉するまでに数十秒を要する場合もあり、常時、精度の高い自車位置情報を取得するために準天頂衛星システムを補完する技術の検討が課題として残った。

### ２．３．２　地図データ

ＭＭＳ（モービル・マッピング・システム）で取得したレーザー点群データから、除雪トラックの作業装置の制御に必要となる地物等の情報を抽出し、地図データを作成した。（図－１）




図－１　ＭＭＳから作成した地図データ

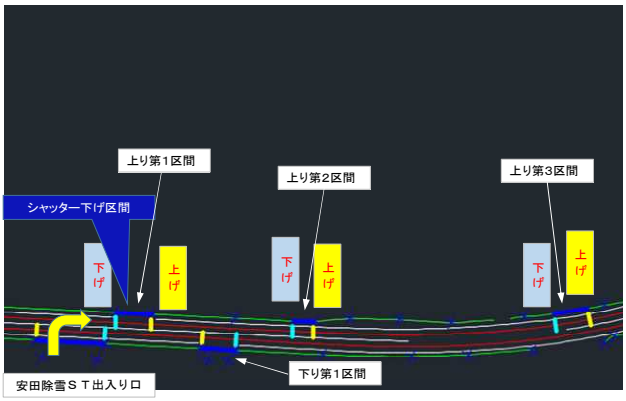
ＭＭＳの公称精度は、水平・垂直誤差ともに 25cm であるが、今回作成した地図データは、水平誤差 5cm、垂直誤差 6cm となった。

### ２．３．３　運転技術データ

サイドシャッタの自動制御を行うため、ドライブレコーダー、データロガーといった記録機器を除雪トラックに搭載し、実際の除雪作業におけるオペレータのサイドシャッタ操作等、運転技術データを収集、解析した。

解析したデータをＭＭＳから作成した地図データに反映させ、除雪作業用地図データを作成した。（図－２）

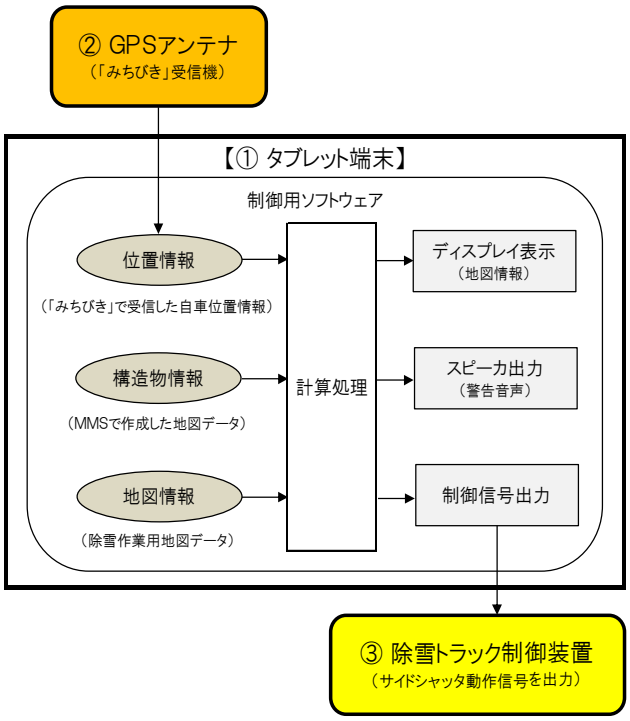
「みちびきの受信機」「ＭＭＳから作成した地図データ」「除雪作業用地図データ」を組み合わせることで遮蔽物等が無い区間においては、ＭＣに必要な精度の高い自車位置情報を取得することが可能となった。




図－２　除雪作業用地図データ

### ２．３．４　制御ユニット

サイドシャッタをＭＣするための制御ユニットは、ＭＭＳから作成した地図データと除雪作業用地図データをインストールしたタブレット端末（図－３①）、「みちびき」の受信機（図－３②）、制御装置（サイドシャッタへ動作信号を出力する機器）（図－３③）で構成されており、各機器をＬＡＮ通信で交信することで制御を行い、自車位置と地図の基準点が一致した際に動作信号を出力する仕様で製作した。（図－３）




図－３　制御ユニットイメージ

２．３．５　サイドシャッタ現道試験

除雪トラックに制御ユニットを搭載し、実際の除雪作業と同様にサイドシャッタが開閉することを確認するため、現道に試験区間を設定し、動作確認試験を行った。

サイドシャッタの動作位置は、除雪作業時に操作するオペレータ（助手）からの聞き取りに基づき、乗り入れ部（サイドシャッタを閉める区間）の始まりまでに全閉、通過後に全開となるよう設定した。

試験の結果、ほぼ設定どおりの位置で動作していることを確認したほか、除雪トラックを担当するオペレータ（助手）同乗のもと、動作状況を確認してもらったところ、実際の操作と違和感のない位置で開閉しているとの評価をいただいた。また、2020 年 2 月 7 日夜間の降雪に際し、一般国道 49 号において、ＭＣを使用した除雪作業を行い、実際の除雪作業にも問題なく使用できることを確認した。（写真－４）

写真－４　サイドシャッタＭＣの動作状況

３　まとめ

これまでの検討結果から、サイドシャッタのＭＣは実用域に達したと判断する。

2020 年 2 月 20 日には、報道機関、関係機関、除雪作業従事者を対象に現道での公開試験を開催するなど、除雪トラックＭＣの現状を報告（広報）したところである。

ただし、衛星の不感帯における自車位置情報の測位等について課題が残るなど、他の作業装置のＭＣ化と合わせて、課題解消に向けた検討の継続が必要であると考えられる。

４　おわりに

引き続きフロントプラウ、グレーダ装置について検討することで、除雪トラックの作業装置ＭＣ化を進める。また、ＩＣＴ（情報通信技術）は日進月歩であることから、将来的には市場の技術開発動向等を踏まえ、自車位置情報以外の要素を取り入れた作業装置の高度なＭＣ化の検討を進め、除雪作業の安全性、施工性、生産性の向上に努めていきたい。

参考文献

（一社）日本建設機械施工協会北陸支部
「道路除雪オペレータの実態調査報告」
2018 年 3 月

# i-Construction　施工段階での３次元データの利活用

株式会社　植木組　新潟本店　土木部　河村　昭

## １　はじめに

本工事は大河津分水路改修事業に伴う、新野積橋のＰ２橋脚を構築する工事で、橋脚基礎はニューマチックケーソン工法にて施工しました。また、国土交通省が提唱する i-Construction の取り組みにおいて、BIM/CIM を導入し、建設生産プロセス全体でＣＩＭモデルを活用することにより、問題解決および業務効率化を図る発注者指定型ＣＩＭ活用工事でした。

本事例では、新たな取り組みである３次元データの活用による施工の効率化、安全性向上について報告致します。

## ２　概要（実施目的）

BIM/CIM とは２０１２年国交省によって提言された建設業務の効率化を目的とした取り組みのひとつです。３次元モデルを中心に関係者間で情報共有することで、一連の建設生産システムの効率化・高度化を図るものです。ＣＩＭモデルとは、対象構造物の形状を３次元で表現した「３次元モデル」と「属性情報」を組み合わせたものを指します。

BIM/CIM の導入においては、２次元図面から３次元モデルへの移行による業務変革や、フロントローデイングによって、合意形成の迅速化、業務効率化、品質向上、生産性向上などの効果が期待されます。

当現場では、ＣＩＭモデルの作成・更新を自社で行い、そのモデルを現場において様々な場面で活用し、その効果や技術的改善点、要望事項を整理しました。

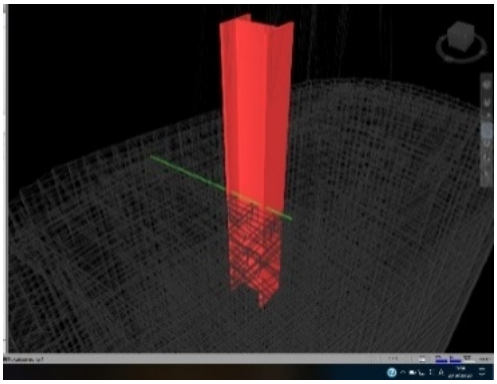
## ３　取り組み内容とその効果

設計業務から、ＣＩＭにかかわる３次元データを引継ぎ、施工者の視点に立ったモデルを追加し、以下の項目にＣＩＭモデルを活用し、その効果を確認しました。

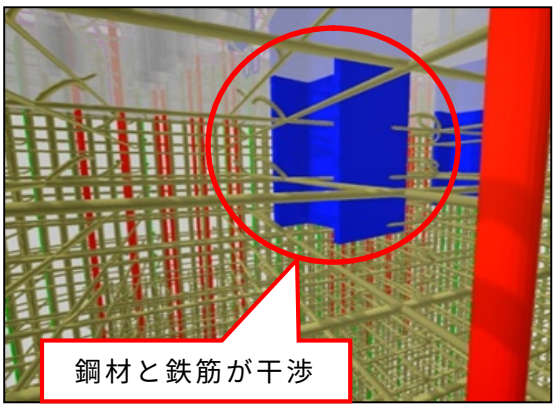
①　鉄筋干渉チェック
②　設計照査
③　４Ｄモデルによる施工方法の共有
④　出来形管理の実施
⑤　維持管理への情報共有
⑥　工事数量の算出
⑦　安全教育でのＶＲ活用
　　その他

### ３．１　鉄筋干渉チェック

橋脚の主鉄筋は、D51 が 150mm ピッチ、ダブルで配筋されています。また、橋脚上部には、上部工柱頭部の仮固定部材（H 型鋼）が鉄筋と干渉する恐れがあったため、３次元モデルを活用し、過密配筋による鉄筋同士および鉄筋と鋼材の干渉チェックを行いました。（図－１・図－２）結果として、部材の干渉が早期に確認でき、事前に対処法を定め、協議することで手戻りを防止できました。



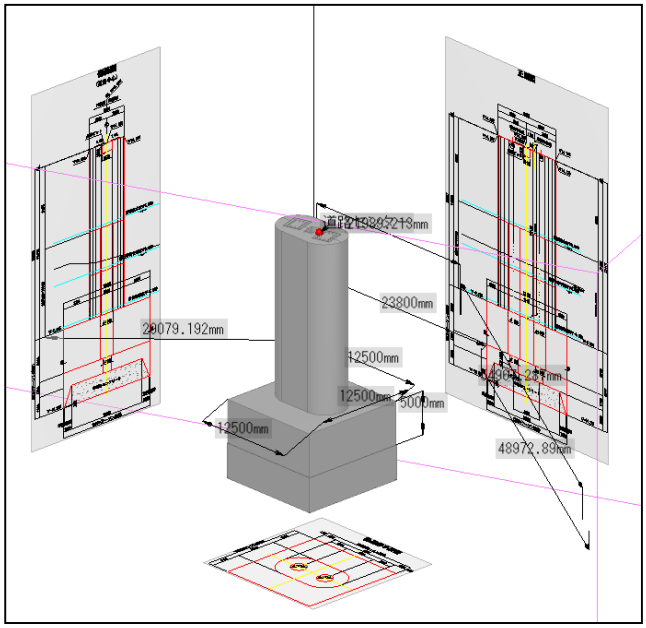
図－１　干渉チェック




図－２　干渉部を VR で確認

３．２　設計照査

CIM モデルを活用した設計照査では、２次元図面との整合について３面図（図－３）を活用したり、ICT 土工の起工測量を実施して現況地形を確認、ＶＲ機器を活用した照査を行いました。

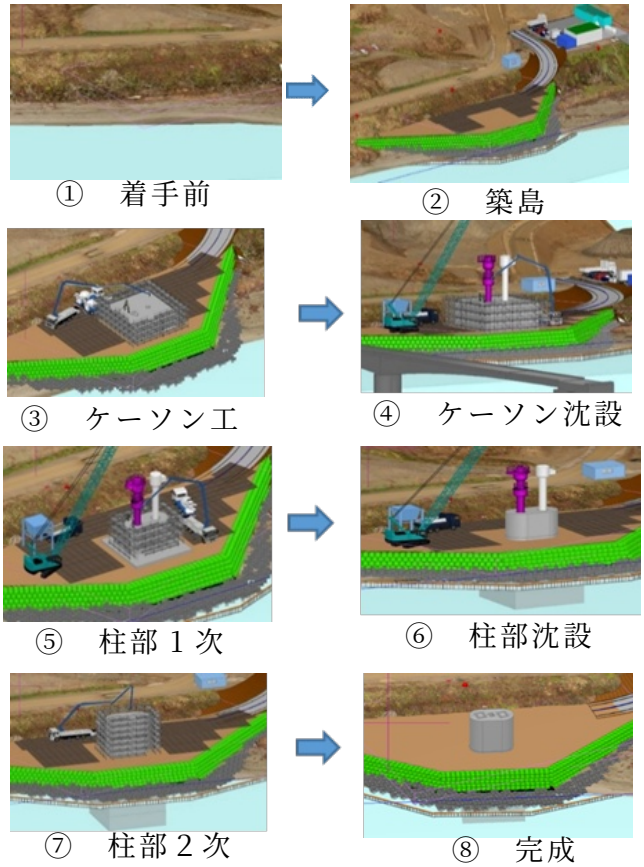



図－３　３面図による設計照査

効果としては、関係者間でモデルを共有し、モデルを自由に動かしながら、各々気づいた点を照査項目として確認できました。また、２次元図面では、見落としがちな現況地形の変化を３次元的に表示することで、計画段階のあいまいな点が確認できました。さらに、２次元図面では判断しづらい干渉箇所をピックアップし、ＶＲ機器を使うとより鮮明に干渉が把握できました。

３．３　４Ｄモデルによる施工方法の共有

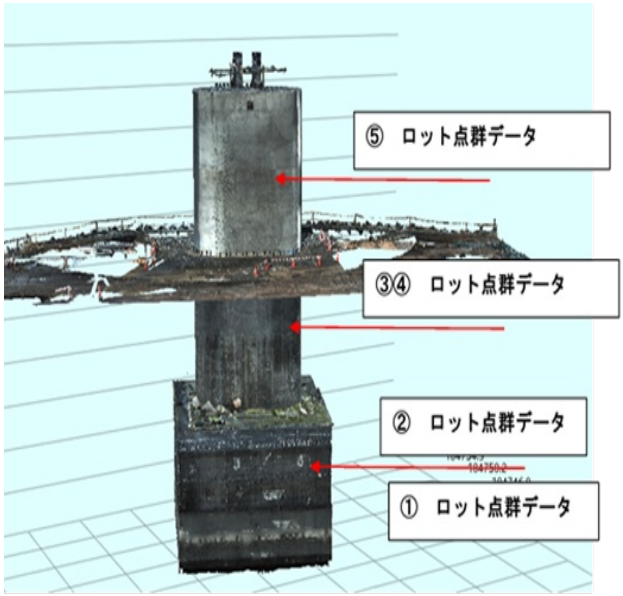
事業全体の進捗ステップによる事業効果の理解に加えて、施工者独自の仮設計画を加えた各段階モデルに時間軸を付与し、「施工方法・工程等の実現性」について確認しました。（図－４）



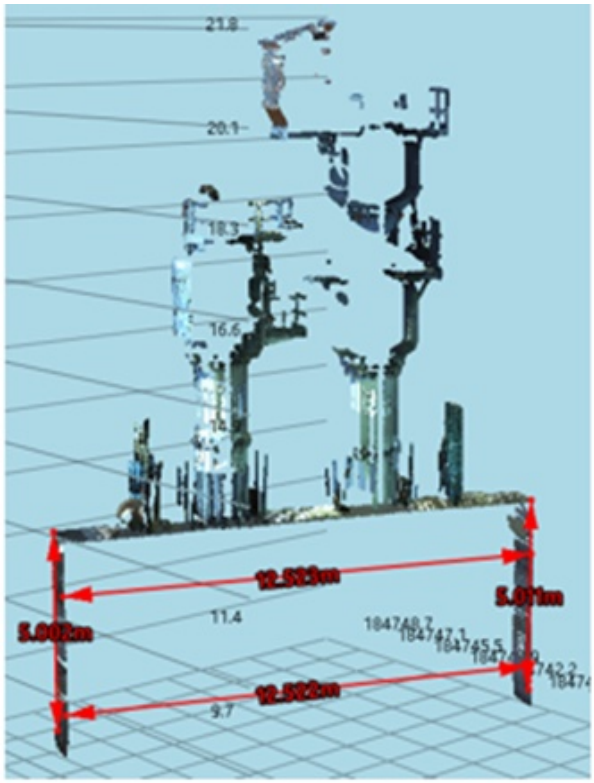

図－４　施工ステップのモデル化

３．４　出来形管理の実施

計測機器と連携し、施工時に取得した３次元点群データをもとに現場での実測とＣＩＭによる比較にて管理の効率性を確認しました。地上波レーザースキャナーを用いて、出来形の形状を計測しました。計測結果から、地上型レーザースキャナーを用いた出来形計測は、構造物の施工管理手法の一つとして採用できる精度と考えられます。（図－５・６）



図－５　ロット別３次元点群データ測定結果

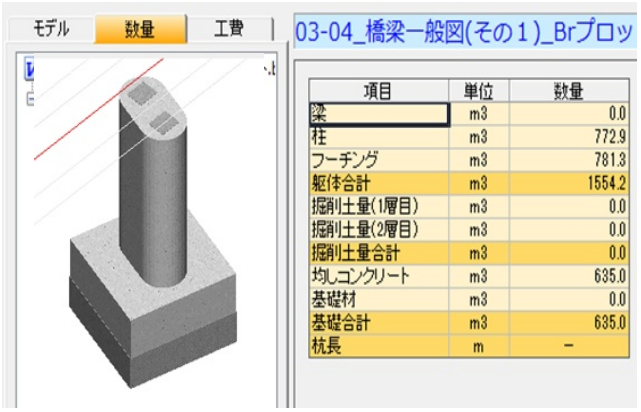

図－６　点群スライス断面（橋軸直角方向）

３．５　維持管理への情報共有

今後の構造物を継続的に維持管理していくうえで必要になる属性情報を付与しました。例えばコンクリートにおいては、規格、打設時の性状試験結果、圧縮強度試験結果、セメント種別、骨材種別、混和剤配合量、生産プラント名を記録します。鉄筋であれば、材質、規格、ミルシート情報を記録しました。また、災害発生時に橋脚の移動量を把握するための監視基準点を設置し、位置情報、座標値を記録し、外部参照方式によるリンク（関連付け）としました。

３．６　工事数量の算出

ＣＩＭモデルより、施工順序や区割り等と連動する形で数量が算出できるよう取り組みました。コンクリートの体積算出では、モデルのプロパティから算出した数量と数量計算書を比較し整合していることを確認しました。



図－７　３ＤＣＡＤによる数量算出

３．７　安全教育でのＶＲ活用

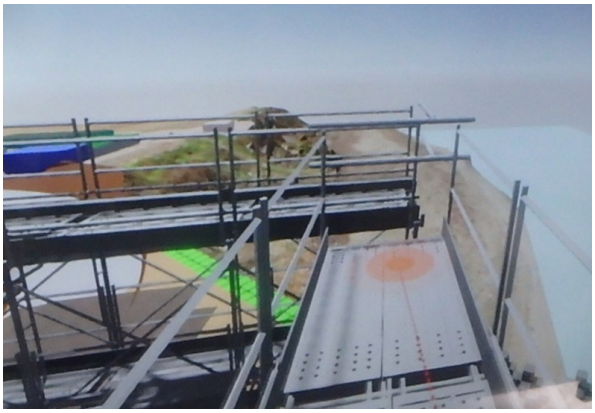
安全教育では、ＣＩＭモデルで作成した施工現場を、ＶＲ（仮想現実）で体験しました。作業前に施工箇所のイメージを共有し、危険個所、危険要因を事前に体感することで、安全性向上に役立ちました。

作業員からは、現地の地形上に組み立てられた足場やトラッククレーンの動きのリアルさに驚き、危険個所を事前に把握できたことや、鉄筋の組み立て状況が施工前に３次元的に把握できたことは、非常に良かったとの意見がありました。

今後は、ＶＲを使った危険予知訓練等のプログラムが普及することを望むところです。

写真－1　ＶＲを用いた安全教育

写真－２　ＶＲ空間内の足場状況



３．８　活用見学会の実施

発注者をはじめ、施工業者のかたにも、取り組み、効果を説明し、ＣＩＭ活用の普及に貢献できたと考えます

写真－３　活用見学会の実施状況

４　考察及びまとめ

ＣＩＭを活用することで、業務の効率化に大きく貢献できたと思います。過密配筋の干渉チェックにおいては、２Ｄでは表現できない部分を可視化させたことで、事前協議に大いに役立ちました。また、施工ステップを考慮した４Ｄモデル化により、仮設工及び施工計画・協力業者との事前打合せ及びＶＲ体験による安全教育や合意形成により、手戻り防止等に効果がありました。

工事完成後は３Ｄモデルに属性情報を付与することで、維持管理に役立てることができます。　また、情報はクラウド上で共有でき、発注者、設計者、施工者間の情報共有が瞬時で行え、時間ロスを最小限にできました。

５　あとがき

ＣＩＭ活用における課題を挙げるとすれば、ＣＩＭの実施にあたり、コストがかかるという現状があります。今後、さらにシステムの改善、開発を進め、より少ない費用で実施する必要性を感じます。ただし、作業の円滑化・安全性・よりよい品質・継続的なメンテナンスの簡略化によりコスト以上の費用対効果が見込まれます。ＣＩＭ活用を実践した感想として、業務改善の立役者になる技術だと感じました。

今後、５Ｇ時代の到来、ＩＯＴ、ＡＩ、そして新しい技術やツールＶＲ・ＡＲ・ＭＲなどを取り入れ発展させることで、３Ｄモデルを「作る」時から施工段階で如何に「使い・活かす」ことに向かっています。そして現場作業のさらなる生産性向上を期待します。

謝辞

最後に本工事の施工にあたり、ご指導、ご助言いただきました関係各位に厚く御礼申し上げます。

# 第Ⅲグループ

# 流電陽極方式鋼材腐食緩和工法(Znカートリッジ)の実装研究

株式会社国土開発センター　グループリーダー　○亀田　浩昭
株式会社ピーエス三菱　主任研究員　青山　敏幸

## 1　まえがき

塩害劣化したコンクリート構造物に対し、従来からの外部電源方式電気防食工法よりも設置費が安価で維持管理も容易な、流電陽極材を用いた鋼材腐食緩和工法を開発した。流電陽極材をコンクリート表面もしくは内部に設置することにより、陽極材近傍の鉄筋の腐食を緩和することができ、鉄筋構造物の長寿命化対策として期待できる。本稿では、地方自治体が管理する小規模橋梁の延命化を目的に流電陽極材を実装した結果について報告する。

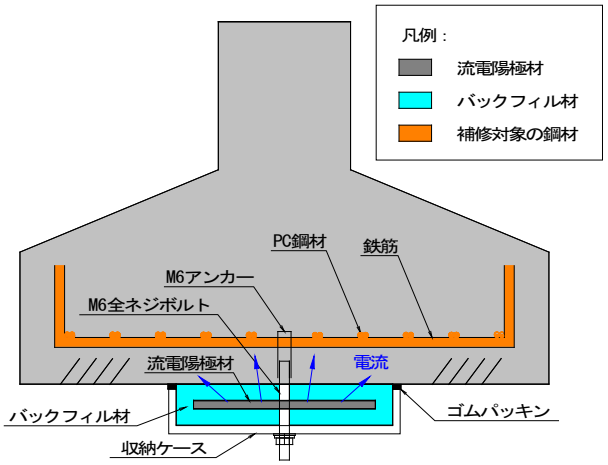
## 2　鋼材腐食緩和工法の概要

### 2．1　工法概要

開発した鋼材腐食緩和工法（「本工法」という）の概要を図－1に示す。本工法では、流電陽極材に直径 110mm×厚さ 5mm の亜鉛板を用い、亜鉛板とベントナイト系バックフィル材を充填した収納ケースを後施工アンカーでコンクリート表面に取り付ける簡易な構造を適用している。これにより、外部電源を必要とせず、コンクリート内部の鋼材に防食電流を供給し、鋼材腐食を抑制することができ、さらに取付作業や将来の交換作業が容易となる。

### 2．2　腐食緩和工法の概念

従来の電気防食工法による防食基準は、復極量 100mV を確保することと規定されている。これに対し本工法は、復極量 25～50mV を確保することで鋼材の腐食反応を 8 割程度遅らせることが確認されているため、無対策の構造物と比べ鉄筋構造物の長寿命化が可能となる。




図－1　鋼材腐食緩和工法の概要

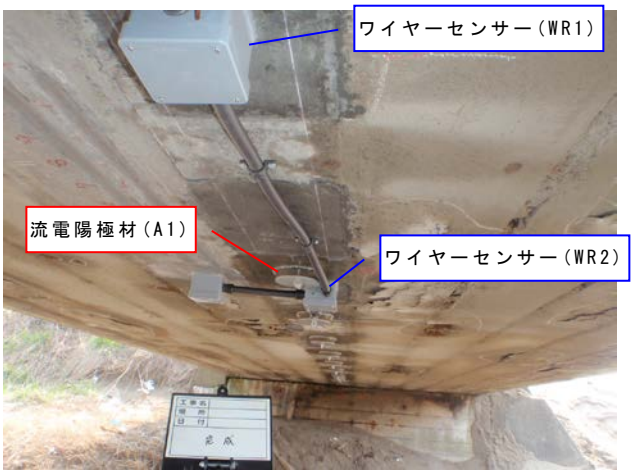
## 3　実装試験

### 3．1　試験の概要

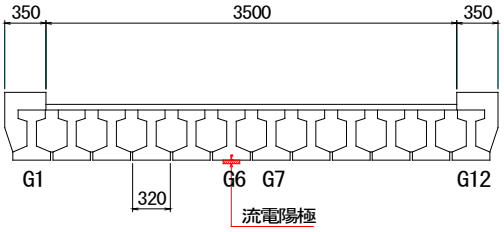
対象構造物は、塩害劣化が見られる橋長 10m の小規模プレテンション方式 PC 床版橋である。日本海の海岸線沿いに 1986 年に建設され、自転車道として利用されている橋梁である。PC 桁には、飛来塩分により約 3.0kg/cm$^3$ の塩化物イオンの付着が確認され、鋼材腐食も見られたため、塩害劣化が進行している状態であった。

道路としての利用頻度は少ないものの、架け替えや大規模補修を実施すると膨大な事業費を要することから、安価な補修で延命化が可能な塩害対策が有効と考え、本工法を適用した。今回の実装では、PC 桁下面に流電陽極材を 9 個設置した。その状況を写真－1 お

よび図―２に示す。




写真－１　実装試験状況

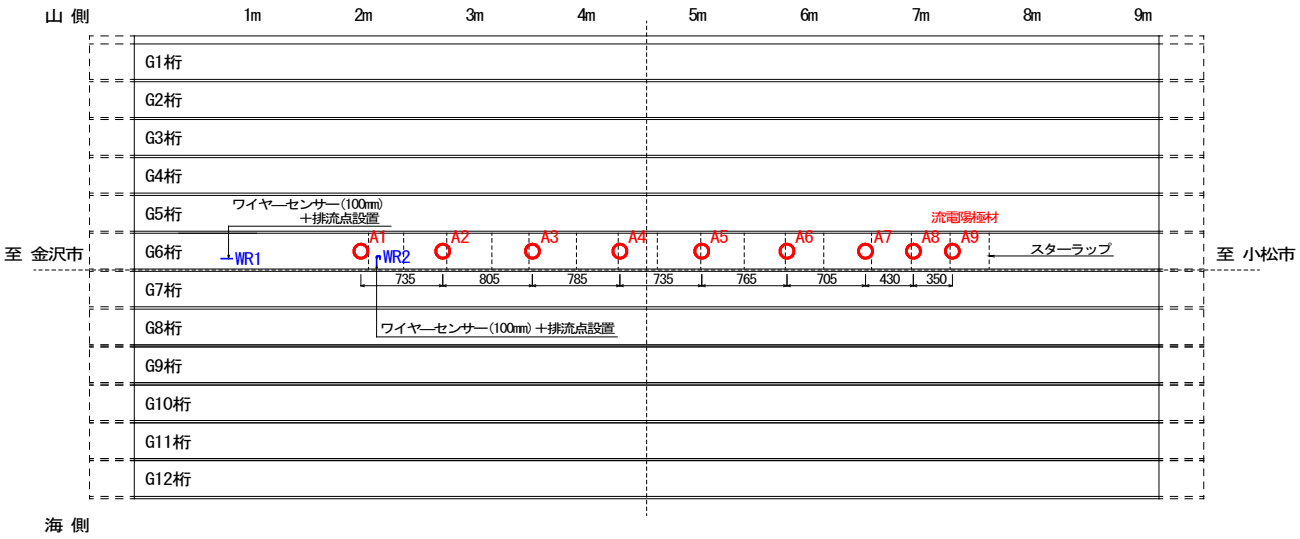



図－２　流電陽極材設置箇所

３．２　流電陽極材の配置と計測

これまでに供試体を用いた室内試験や実物大供試体を用いた屋外暴露試験[1)2)]などを行い、補修効果に影響を及ぼす因子（コンクリート中の塩化物イオン量、鋼材量、鋼材かぶり）と、流電陽極材による腐食緩和効果が発揮される範囲について、検証してきた。その結果、塩化物イオン量が 10kg/cm$^3$ を超えるような非常に厳しい環境下や鋼材量が非常に多い RC 桁以外では、流電陽極材から 250～300mm 程度の範囲まで腐食緩和効果が認められた。本試験においての流電陽極材の設置間隔は、既存スターラップの間隔に合わせて約 350～800mm とし、図―３に示す合計９箇所（A1～A9）に設置した。

流電陽極材を設置後、補修効果の確認のため定期的に復極量を計測している。復極量は、通電遮断直後の鋼材電位と遮断から 24 時間後の自然電位との差であり、復極量 25～50mV 以上が腐食緩和の目安となる。流電陽極材 A1、A2 は、通電のオンオフの切り替えができる構造とし、流電陽極材付近の復極量を計測した。また流電陽極材 A3～A9 は常時通電しているため、復極量の計測はできないが、通電中の鋼材電位を計測した。また、図－３の青色箇所には鋼材電位をモニタリングするためのワイヤーセンサーを埋め込み、４回／日の頻度で鋼材電位を計測した。

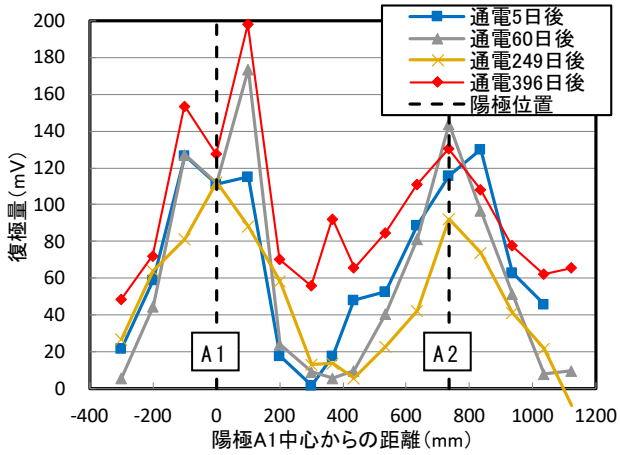



図－３　流電陽極材の配置図

３．３　試験の結果と考察

図－４に、流電陽極材 A1 と A2 位置近傍で通電開始から 5 日後、60 日後、249 日後、396 日後に計測した復極量の結果を示す。復極量は、陽極材からの距離ごとに桁中心、海側、山側で計測した３点の平均値とした。腐食緩和効果の目安である復極量 25～50mV を確保できる範囲は、通電開始から 249 日後までは陽極材中心から 200mm 程度までの距離であり、これまでの研究結果よりも若干小さくなった。これは陽極材と鋼材との接続状態が不安定であったと考えられたため、通電開始 396 日の計測前に陽極を一旦取り外し、鉄筋とボルトをリード線で接続するように変更した結果、陽極材から 300mm 程度の範囲まで復極量 25～50mV が確保された。

一方、復極量を計測することができない陽極 A3～A9 付近では、通電開始 396 日の鋼材の通電時電位と通電遮断から 24 時間後の自然電位との差（電位変化量）を計測し、陽極 A1 と A2 のそれと比較した。




図－４　陽極付近の復極量の推移

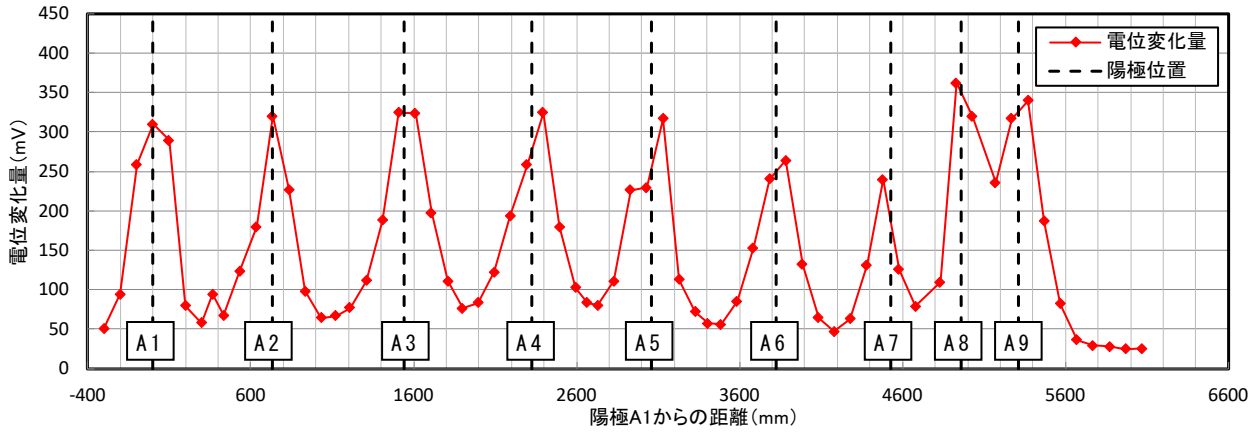
図－５には、陽極 A1 の位置を基準とした通電 396 日後の鋼材の電位変化量（参考値）の計測結果を示す。これより、電位変化量は陽極 A6 と A7 位置で若干小さくなるものの、陽極 A1～A2 近傍のそれと概ね同じ傾向を示していることから、すべての陽極設置位置近傍で鋼材の腐食緩和効果があるものと推定される。

図－６には、陽極材から離れた位置に設置したワイヤーセンサーで計測した鋼材の自然電位（WR1）と、陽極 A1 近傍に設置したワイヤーセンサーで計測した鋼材の通電時電位（WR2）の経時変化を示す。前者の自然電位は、陽極材から離れているため時間の経過とともに卑化し、鋼材の腐食傾向が確認された。一方、後者の通電時電位は、陽極材近傍の鋼材に防食電流が供給されたため電位が卑化し、約 500 日間の計測データから腐食緩和の効果が確認された。

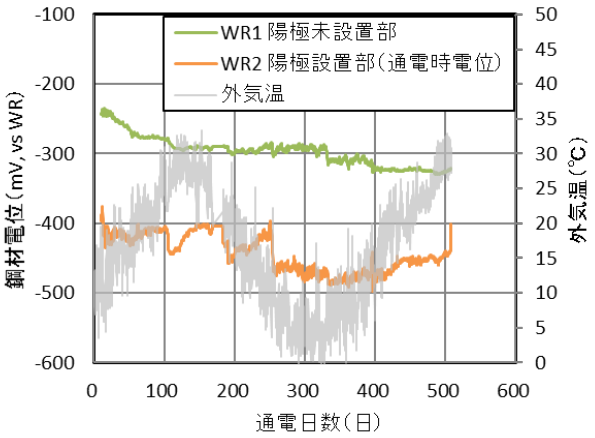
また、陽極材からの発生電流量と外気温の経時変化を図－７に示す。通電初期は、流電陽極材の特徴で多くの電流量が発生するが、徐々に低下し約 50 日以降は外気温に応じて変化する傾向が確認された。これは、外気温が高いほど鋼材の腐食反応が進むため、陽極材の発生電流量も大きくなる流電陽極の特徴が表れている。現在のところ約 500 日経過し陽極材の発生電流量は増減しているものの、図－６に示す G6 桁の陽極設置部の鋼材の通電時電位（WR2）は概ね一定の電位を保っているため、腐食緩和の効果が持続していると考えられる。

３．４　今後の課題

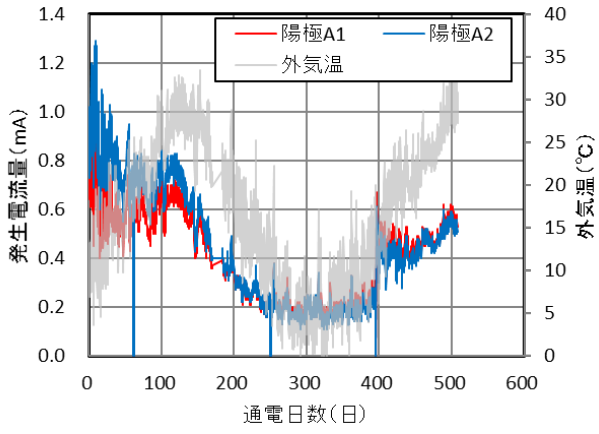
電気防食工法では防食基準が明確であるが、本工法では腐食緩和させた時の構造物の健全性の経時変化が不明確であるため、長期的な健全性を把握することが必要となる。




図－５　通電開始 396 日後の電位変化量




図―６　鋼材電位の経時変化




図－７　陽極発生電流量と外気温の経時変化

## ４　まとめ

本試験より、塩害劣化した PC 桁において、鋼材腐食緩和工法による補修効果を確認することができた。その補修効果は、流電陽極材から 300mm 程度の範囲で確認されたことから、同様な塩害劣化橋梁においても流電陽極材を 600mm 間隔程度で設置することで、構造物の延命化が可能と考えられる。

最後に、本研究は SIP 戦略的イノベーション創造プログラム「コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネージメントシステムの開発」の一環として実施したものである。また、試験にあたり道路管理者である石川県のご協力を頂いた。ここに関係各位に感謝申し上げる次第である。

## ５　参考文献

1) 亀田浩昭、青山敏幸、石井浩司、鳥居和之：積雪寒冷地に建設された塩害劣化 RC 床版の電気化学的補修工法の適用性、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第 18 巻、No.1、pp.453-458、2018.10

2) 亀田浩昭、青山敏幸、石井浩司、鳥居和之：塩害が生じた撤去 RC 床版への流電陽極工法を用いた鋼材の腐食緩和対策に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.40、No.1、pp.753-757、2018.7

# 傾斜監視クラウドシステム「OKIPPA104」の開発

西松建設　新規事業統括部　新規事業推進二課　課長　○鶴田　大毅
課長　永山　智之

## 1　はじめに

傾斜監視クラウドシステム OKIPPA104（NETIS 登録番号：KT-190097-A）は、センサ Box だけで監視が始められる傾斜監視システムである。データ伝送を省電力広域無線通信 LPWA （Low Power Wide Area）の Sigfox（シグフォックス）を採用することで、現場への設置が必要な設備を最小限にでき、極めて『手軽かつ安価』な監視システムを構築し、実用化している。

## 2　OKIPPA の開発目的と経緯

OKIPPA は施工中及び供用中の様々なインフラ施設監視の導入ハードルを下げることをコンセプトとし、巡視による目視点検が困難なインフラ施設のうち、傾斜を把握したい施設の監視・点検の省力化を目的に開発した。

例えば、斜面の目視点検は、広範囲で業務過多である上に、植生繁茂や悪天候などの影響により、変状の有無が不明確で、点検結果を定量的に判断しづらく、現場での適切な判断が困難であること等の課題があった。本システムの導入により、手軽かつ安価に点検結果の定量化が実現し、現場での適切な判断材料を得ることができる。また、建設業の担い手不足による生産性向上と省力化が求められる背景もあり、点検業務の省力化の実現を図ることも可能である。

## 3　OKIPPA の概要

OKIPPA の主な計測項目は、傾斜角度（精度：約 0.1°）、衝撃検知（2G～16G）、GPS（概略位置確認）である（表－1）。計測データを Sigfox を用いてクラウドサーバへデータ伝送し、管理画面にてデータを可視化させるシステムを構築した（図－1）。

図-1　OKIPPA のシステム概略図

屋外仕様のセンサ Box の大きさは 10 ㎝角程度で小型であり、２か所のビス止めで取付が可能である。

表－1　センサ Box の仕様

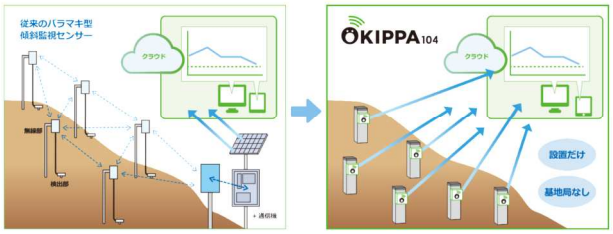
| 項目 | 内容及び仕様 |
|---|---|
| 寸法 | 10cm×10cm×4cm |
| 測定範囲 | ±180°（3軸方向の角度） |
| 傾斜角度 | 分解能:0.06°　精度:約0.1°<br>（標準:1時間/回。最小間隔15分） |
| 衝撃検知 | 2～16G |
| GPS測位 | 概略位置確認（1週間/回） |
| 防水防じん仕様 | IP67 |
| 使用温度範囲 | -10～60℃ |
| 使用湿度範囲 | 20～80%RH |
| 電源 | リチウムイオン電池<br>約2年間（1時間/回通信時） |

## 4　OKIPPA の導入による効果

OKIPPA は、従来の詳細な計測システムと比較し、「手軽かつ安価」な監視システムであり、インフラ施設の変状が懸念される箇所に網羅的に『バラまく』ことで変状箇所を見つけ出し、より詳細な計測（地中変位計や挿入式傾斜計）が必要な場所をスクリーニング

できるシステムでもある。

図－2 は、OKIPPA の導入効果のイメージを示したものである。




図－2　OKIPPA の導入効果イメージ

（１）点検業務の省力化

自営の基地局、通信や給電の配線等の設置及び保守の作業が軽減でき、内蔵電池で約 2 年間稼働（１時間/回通信時）するため、機器の交換頻度も軽減されることから、点検業務が省力化できる。

また、各計測項目の管理基準値を設け、その値を超過した場合には、あらかじめ登録されたメールアドレスにアラート通知するため、インフラ施設の見守りを代行することができ、点検業務の省力化が可能である。

（２）目視点検後の対策判断を明確化

定性的である目視の点検結果に定量的な傾斜データを加味することにより、点検者の目視判断だけでなく、計測値を踏まえた対策判断を定量的に実施できる効果がある。

（３）手軽かつ安価に傾斜監視が可能

インフラ施設の変状監視項目を傾斜角度に注目したことにより、監視システムの開発費用及びランニング費用を抑えたこと、また Sigfox の活用により簡易な設備としたことにで、手軽かつ安価に広範囲なバラマキ型のインフラ監視が可能である。また、利用単価が月額約１万円程度（１年間以上の利用時。本体リース、通信費、利用料込。経費除く）と極めて安価である。

５　Web アプリの管理システムの概要

センサ Box で計測したデータは、クラウドサーバ上に構築した Web アプリの管理システムにより確認する。管理システムにてデータの可視化やダウンロード、管理基準値や計測モードの設定変更などが可能である。

（１）傾斜角度データ（変状監視）

利用者は設置後、Web アプリの管理システムで初期設定を実施し、３軸方向の傾斜角度の差分値の変化を監視することで変状を監視する。この他、電池電圧や通信強度等も確認でき、各計測データを CSV 形式等でダウンロードすることが可能である。

（２）GPS データ（概略位置確認）

GPS データは、センサ Box の設置位置の把握や誤設置防止を目的に使用し、変状（変位）を確認するためには使用しない。

（３）センサ Box の姿勢表示

センサ Box の現在の姿勢（傾きの状況）を確認できる。

（４）管理基準値や計測モードの設定変更

管理基準値を変更したい場合や、悪天候予測時などで計測間隔を短くしたい場合、遠隔操作により設定変更が可能である。

６　導入事例、適用分類、計測事例

６．１　実証マッチングでの導入事例

OKIPPA は，国土交通省 大臣官房技術調査課の i-Construction 推進コンソーシアム事務局 技術開発･導入 WG により新技術の実証マッチングが行われ、「斜面の安定性を確認する技術」として九州地方整備局の宮崎河川国道事務所管内で試行導入されている（写真－1）。

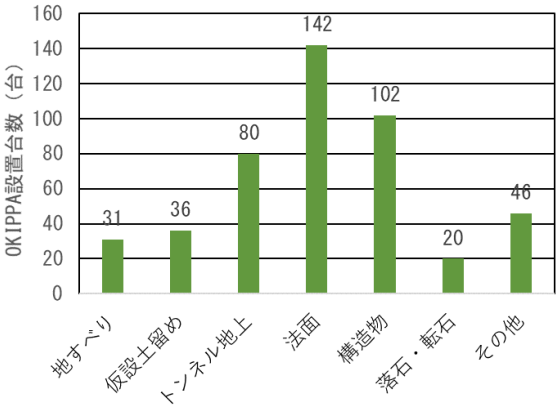
なお、同様の試行導入は、中部地方整備局管内においても 2 件実施している。

その他、国土交通省、地方自治体、高速道路、鉄道事業者、電力事業者の点検業務をはじめ、大学などの研究機関、建設コンサルタントの調査業務などで導入されている。

写真－1　切土斜面への導入事例

## 6．2　OKIPPA の適用分類（実績）

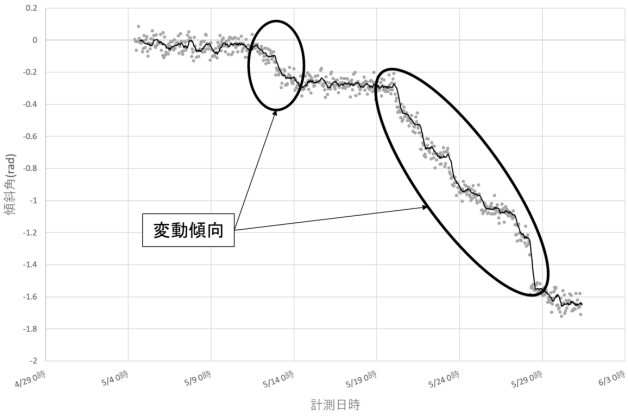
2020 年 4 月時点での OKIPPA の設置台数は総計 457 台である。OKIPPA の適用分類ごとに設置台数を集計したグラフ（図－3）から、法面への適用台数が多いことが理解でき、広範囲な場所や線状構造物で効率的に計測を行うことができる OKIPPA のメリットを最大限に生かす意図が見受けられる。




図－3　OKIPPA の適用分類

## 6．3　計測事例

OKIPPA で実際に計測した事例として、応急復旧工事施工中の道路法面における計測事例を図－4 に示す。本事例では、降雨に伴い徐々に計測値が変動していることが確認された。同図には 8 時間の移動平均線を追記しており、傾斜測定値にばらつきは認められるものの、任意の時間での移動平均線を示すことで、変動傾向にあるか、あるいは落ち着く傾向にあるかなど、計測値の傾向が確認できる。




図－4　OKIPPA の計測事例（道路法面）

# 7　OKIPPA 伸縮計

## 7．1　OKIPPA 伸縮計の開発

OKIPPA の要素技術を応用した地盤伸縮計を開発した。ワイヤーの巻取り機能があるリール台に OKIPPA104 を取り付け、リール台の回転盤が伸縮量に応じて回転する内角を傾斜センサで計測し、その伸縮量を計測する「OKIPPA 伸縮計」である。写真－2 は OKIPPA 伸縮計の設置事例である。

写真－2　OKIPPA 伸縮計

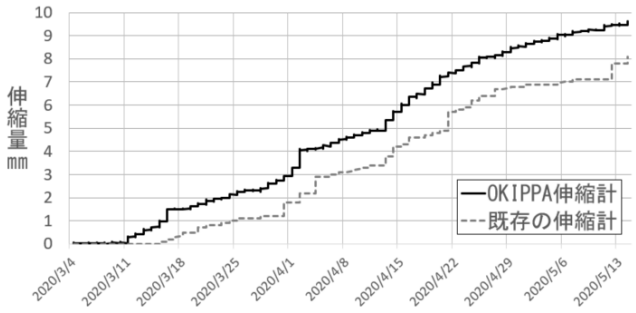
この OKIPPA 伸縮計は計測精度が「約 0.1 ㎜」であるため、地すべり地帯の地割れ幅の挙動の計測や、コンクリート構造物のクラックの監視にも活用できる。

## 7．2　OKIPPA 伸縮計の計測事例

図－5 は法面監視用の既存の地すべり伸縮

計の約１ｍ脇に OKIPPA 伸縮計を追加設置し、相互の計測データを比較した結果である（愛媛大学工学部岩盤工学研究室との共同実証）。

本計測結果によると、1～2mm 程度の差異はあるものの、既存の伸縮計とほぼ同様の変状傾向を測定しており、OKIPPA 伸縮計が相応の精度で問題なく法面挙動を計測可能であると評価されている。




図－5 OKIPPA 伸縮計と既存伸縮計の比較

７．３　クラック計測と橋台伸縮装置の計測

写真－3 のうち左図は OKIPPA 伸縮計によりコンクリートのクラック計測を実施した事例である。設置前はクラックスケールを用いて点検者による定期的な計測を行っていたが、OKIPPA 伸縮計によって連続的にクラック計測が可能となり、省力化につながった。

写真－3　クラック監視と伸縮装置の監視

写真－3 のうち右図は橋台の伸縮装置を計測した事例である。鋼製橋梁の温度変化による挙動であることを定量的に説明することに活用された。

８　おわりに

インフラ施設の監視について、手軽かつ安価な計測システムの導入により、点検業務の省力化を図ることが OKIPPA のコンセプトである。OKIPPA の要素技術を応用した追加のソリューションとして、雨量計（写真－4）や水位計による計測について実証中であり、常時確認可能な本システムに雨量計などを組み込む予定である。

地すべり地帯における変状計測と雨量計測をリンクさせることで、線状降水帯等の豪雨と地すべり挙動の関係性や変状範囲の特定に寄与できる可能性がある。

写真－4　実証中の OKIPPA 雨量計

また、本システムは約１ｍの積雪状態で計測および通信できる実績を得ていることから、より積雪高さのある北陸地方特有の豪雪地帯での計測を実証し、1 年を通じた豪雪地帯での計測を視野に入れている。

種々の計測実績を重ね、地盤や気象などの関連データと AI を掛合せ、本システムが CIM と同様、インフラ施設のライフサイクル全体を見通した情報マネジメントや情報の見える化に寄与できることを目指している。網羅的にインフラ施設を監視できる本システムが従来型の詳細な監視システムの導入箇所を効率的に抽出することで、インフラ施設監視の最適化につなげ、昨今の豪雨災害などに対する安全・安心の確保を目指している。

**謝辞** OKIPPA 伸縮計の比較検討及びご指導頂いた愛媛大学安原英明教授、愛媛大学大学院学生戸田光氏に御礼申し上げます。

# 専用架台と2種類のカメラを用いた集水井内の点検

株式会社　興和　調査部　係長　　○高澤　忠司
技術開発室技師長　　堀松　崇
調査部　　志太　智春

## 1　はじめに

集水井は井戸内に設置した集水管から地下水を排除し、地下水を低下させることで地すべり活動の抑制を図る地すべり対策施設である。一方で、集水井は全国に１万基を超える施設があるといわれており、近年施設の老朽化に伴いライナープレートの腐食や集水管の閉塞などによる地下水の集水機能低下が問題となっている。集水井の機能を維持し、地すべり活動を抑制させ、国民の安心・安全な生活を守るためには、施設の定期的な点検、維持管理が必須となっている。なお、最新の点検要領[(1)]によれば、対象施設の定期点検実施時期の間隔は、最長 10 年以下とすることとし、健全度評価により「経過観察」、「要対策」と判定された施設については５年以下を原則として、点検を実施することとされている。集水井の点検は、従来以下の手法により行われていた。

①人が集水井内に直接侵入し点検する方法
②集水井の上蓋を削孔し点検孔を設け、点検カメラを挿入し地上から点検する方法

写真-1 従来手法①[(2)]

写真-2 従来手法②[(3)]

このうち、①手法の場合には、上蓋や昇降梯子の腐食による落下事故、有毒ガスや酸欠などの危険性が伴っていた。さらに、施工後数十年が経過化した集水井は、施工当時の仮設道路などが消失しているケースが多く、上蓋撤去のためのクレーンや送風装置運搬に困難が伴っていた。

また、②手法の場合は、上蓋の腐食が進んでいるケースでは安全性に問題があり、仮設足場を設ける必要があった。

## 2　開発の概要

### 2．1　開発の経緯と目的

集水井の機能低下が問題となっている現状と、従来の点検手法における課題を鑑み、従来の点検手法よりも効率的且つ安全性に優れた、集水井の点検装置を開発するに至った。

点検装置の開発にあたり、上蓋の撤去、点検するために必要な仮設、人の井戸内への侵入など、経済性や安全性に劣る作業をすべて排除することを目指した。そのため、集水井侵入口に専用架台を設置し、集水井中心部にカメラを懸架させ、カメラを昇降させるという撮影方法を採用した。開発は、平成 25 年より開始し、現在も現場からの意見を集約しながら改良を続けている。

### 2．2　専用架台の開発

専用架台は進入角度の変更などができる形式とし、様々な侵入口の形状や昇降階段の形状に適応可能なものとした（写真-3）。また

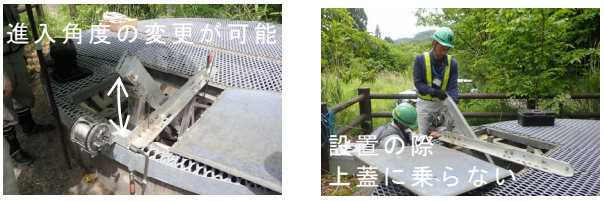



写真-3 専用架台【特許第 6089069 号】

上蓋に乗らずに専用架台の設置が可能となる。

２．３　２種類の撮影カメラの開発

集水井カメラは「全周撮影型」、「回転撮影型」の２種類の撮影装置からなる。

全周撮影型は全天球カメラを搭載する撮影装置であり、カメラ上部に照明装置を設けることで撮影範囲全体を照射させるものとした（写真-4）。また照明装置は照射角度の変更が可能であり、集水井壁面が濡れている場合に発生するハレーションによる撮影不良を防止できる。撮影の際には一度の上下運動だけで撮影が完了するため、短時間で集水井全体の状況把握が可能となる。

回転撮影装置は水平方向に 360 度回転し、また上下方向にも 90 度回転する機能を有しているため、撮影したい場所を確実に撮影できるものとした（写真-5）。また、カメラをズームすることで集排水ボーリングの排水状況等、細部を撮影することが可能となる。これら操作の全ては地上部で行うことができる。

一方、2 種類の撮影カメラはそれぞれ短所があり、全周撮影型は回転撮影型と比較して、撮影された動画は若干粗くなり、回転撮影型は、集水井の壁面が湿っていると、ライトの光が反射しハレーションを引き起こすことがある。ここで、全周撮影型を概査用とし、回転撮影型を精査用として、用途に応じて使い分けることでお互いの短所を補った使い分けをしている。

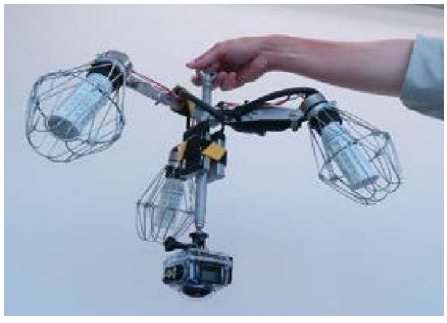


写真-4 全周撮影型カメラ
【特許第 6596042 号】

写真-5 回転撮影型カメラ
【特許第 6089069 号】

３　集水井内の点検方法

３．１　使用資機材

撮影装置に必要となる電源は、100V であり、家庭用のポータブル電源や小型発電機で賄うことができる。撮影装置全体はライトバンや運搬機、人肩で運搬することがで、現地で装置の組み立てができる簡易な構造となっている（写真-6）。

①専用架台及び懸架装置
②専用架台のアーム
③全周撮影型カメラ
④回転撮影型カメラ
⑤タブレット
（リモート操作
・動画確認）
⑥リボンロッド
（深度管理）
⑦バッテリー
⑧電源ケーブル

写真-6 撮影装置一式

３．２　撮影方法

集水井の昇降口に専用架台を設置し、専用架台のアームを調整することにより集水井の中心を確保した上で、ワイヤーと複数の滑車が取り付けられた懸架装置により撮影カメラを垂直に降下させる（図-1、写真-7）。何れの撮影カメラにおいても、操作は地上で行うほか、撮影動画をその場で確認することが可能となる（写真-8）。この手法により、点検に伴う作業は全て地上部で完結する。

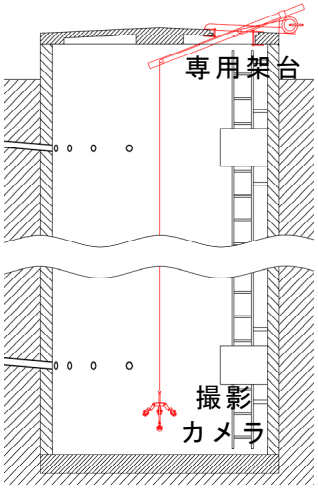



図-1 撮影状況模式図

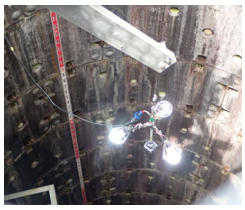


写真-7 カメラの降下状況

写真-8 撮影動画確認状況

## 4 点検実績と事例紹介

専用架台と集水井カメラを用いた集水井の点検手法を用いて、現在までに新潟県内を中心に、154 地すべり防止区域で約 700 基以上の集水井の点検を実施した。本節では、滝坂地すべり地に施工された集水井の点検事例を紹介する。

### 4．1 滝坂地すべりの概要

滝坂地すべりは、福島県西部の耶麻郡西会津町豊洲地内にあり、阿賀野川水系阿賀川右岸部に位置している（図-2）。滝坂地すべりの大きさは、南北約 2.1km、東西約 1.3km、地すべり層厚最大約 140m で、推定地すべり移動土塊量は約 4,800 万 m3 であり日本最大級である。滝坂地すべりでは、地すべり活動に起因する地下水の低下・排除を目的とした、排水トンネルや集水井といった地下水排除工が、鋭意進められている。

### 4．2 点検対象となった集水井

滝坂地すべりでは、現在までにおよそ 50 基以上もの集水井が施工されており、今回の点検では、地すべりブロックの南側に平成 10 年～14 年に施工された集水井 4 基と 5 基の連続集水井郡計 9 基である。これらの集水井の深度は 22.5m～60.7m である。

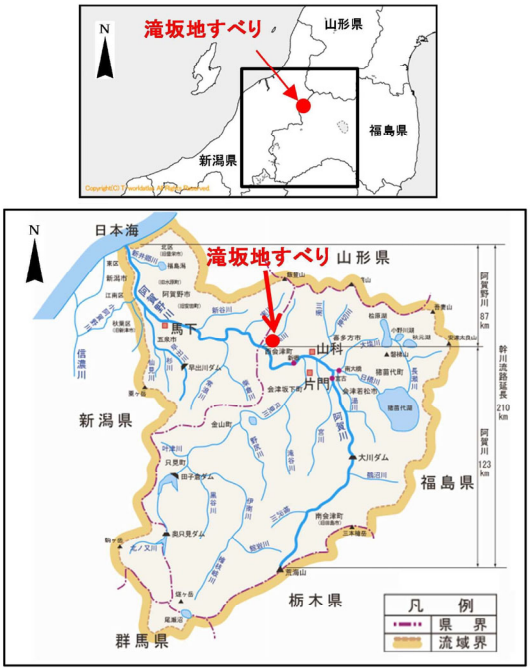



図-2 滝坂地すべり位置図（4）

これまでの点検実績では、最大 30m程度であるため、通信ケーブルと懸架装置を最大 90m 程度まで対応できるように改良し点検を実施した。

### 4．3 点検結果

ここでは、5 基の連続集水井の中心に位置する、滝坂地すべりで最も深い深度（60.7m）での集水井工の点検結果を述べる。

点検は全周撮影型及び回転撮影型カメラの 2 つを用いて実施した。全周撮影型カメラを用いた点検では、井戸の内部を地上部から底盤まで撮影することで、機能低下を伴う大きな変状が無いことを確認することができた。また、連続集水井の吐口から、円滑に排水が行われていることを確認した（写真-9）。

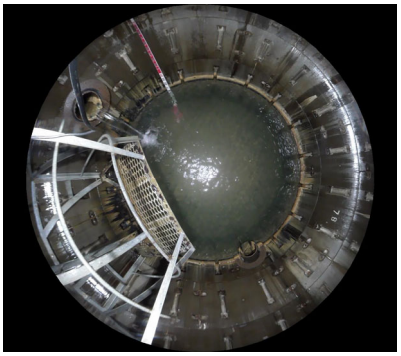


写真-9 全周撮影型カメラの点検結果

回転撮影型カメラを用いた点検においても同様に、井戸の内部を地上部から底盤まで撮影することができた。さらに、集水ボーリングや排水ボーリングの集水管細部を確認することができ、閉塞物の付着が認められないことを確認した（写真-10）。

全周撮影型及び回転撮影型カメラの何れの点検においても、深度 60m 付近までの撮影が可能であり、これまでの深度実績を大きく更新することができた。

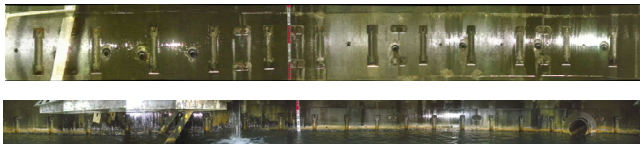


写真-10 回転撮影型カメラの点検結果
（上：集水ボーリング,深度 50m 付近）
（下：排水ボーリング,深度 60m 付近）

## 5　今後の課題

現段階において、2 種類のカメラを用いた集水井の点検には、ハード面、ソフト面にそれぞれ課題がある。

①回転撮影型の照度不足

今回の点検で対象となった集水井の蓋は、鉄網であったため常に日光が供給されたことにより撮影が可能であったが、集水井の蓋がコンクリート蓋の条件下では照度が不足し、照度を強くすれば、ハレーションの原因となる。今後は、回転撮影型の精度向上のために、照度不足を改善することが課題となる。

②写真整理ソフトウェアの開発

現段階では、撮影した動画をパノラマ画像に出力する過程において、複数のソフトウェアを経由しパノラマ画像を作成している。今後は作業の省力化を考慮し、動画から画像の出力までを一元管理することが可能なソフトウェアの開発が必要であると考えられる。

③VR の作成

全周撮影型カメラで撮影した動画を基に、VR を作成することで、点検者があたかも集水井内にいるかのように状況確認が可能となる。

## 6　まとめと考察

滝坂地すべりにおいて、2 種類の集水井カメラを用いた集水井の点検により、深度 60m程度の大深度集水井に対しても、点検を行うことができた。

専用架台と 2 種類のカメラを用いた集水井の点検手法は、従来の点検手法から危険を排除するだけでなく、効率的に点検を行うことで生産性の向上を実現するための有益なツールであるものと考えている。

## 参考文献

(1)国土交通省砂防部保全課,砂防関係施設点検要領（案）,平成 31 年 3 月

(2) 農林水産省,地すべり防止施設の機能保全の手引き～総合版～農村振興局農村環境課,平成 29 年 3 月

(3) 国立研究開発法人土木研究所ら, 地表からの効率的な集水井内点検手法共同研究報告書,令和元年 6 月,p43

(4)国土交通省ホームページ,平成 28 年度滝坂地区直轄地すべり対策事業事業評価カルテ,位置図

## 謝辞

本研究にあたり、「令和 2 年度滝坂地すべり観測及び自動観測システム保守点検業務」における集水井の点検成果を御提供賜りました、国土交通省北陸地方整備局阿賀野川河川事務所様へ深く御礼申し上げます。

# コンクリートのひび割れ画像解析技術
# t.WAVE（ティー・ドット・ウェーブ）

大成建設　技術センター　材工研究室主席研究員　○堀口　賢一
材工研究室　　研究員　　本澤　昌美

## 1　はじめに

橋梁定期点検要領では5年に一度の点検が義務化され、近接目視を代替できる調査方法や調査結果の定量化などが求められている。また、建設生産プロセスの各段階において、ICT 等を活用する i-Construction が国土交通省により取り組まれており、構造物の点検においてもドローンや画像解析技術の活用による効率化が期待されている。

筆者らは、「ウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術 t.WAVE®（ティー・ドット・ウェーブ）」（以下、t.WAVE）を開発し[1)]、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）のインフラ維持管理・更新・マネジメント技術開発での取組みを通じて実用性を高め[2)]、コンクリート構造物のひび割れ調査への適用実績を積み重ねつつある。

このような成果により、本技術は平成 30 年度第2回インフラメンテナンス大賞優秀賞、ならびに令和元年度エンジニアリング奨励特別賞を受賞した。また、国土交通省が取りまとめた、「点検支援技術性能カタログ（案）2020.6」にも技術内容が掲載されている。

本稿では、t.WAVE の技術概要と道路橋床版下面を撮影するための上向きカメラを搭載したドローンの開発、ならびにコンクリート構造物のひび割れ調査への活用事例について紹介する。

## 2　コンクリートのひび割れ画像解析技術 t.WAVE の概要

図-1 に t.WAVE によるひび割れ画像解析の実施手順を示す。t.WAVE では、コンクリートのひび割れを撮影したデジタル画像を入力画像として、①ひび割れ位置の大まかなトレースを人が行ってひび割れ候補領域画像を作成し、②そのトレース範囲について画素単位でウェーブレット変換を行う。さらに、③その結果得られる画素単位のウェーブレット係数から、ひび割れである画素を客観的に判別して、ひび割れ画像などの結果を出力する。ひび割れをトレースすることにしているのは、その領域に限定してウェーブレット変換を行うことで、解析結果を得るまでの時間を短縮できることと、ひび割れでない箇所のノイズ除去が不要となることで、画像全体をウェーブレット変換するよりも効率的なためである。

ウェーブレット係数とひび割れ幅は高い相関性を有することから、ひび割れと判別された画素ごとにひび割れの幅を定量的に評価できる。そのため、図-1 に示すとおり、ひび割れ幅ごとにひび割れ長さを集計したヒストグラムや、ひび割れ総延長、平均ひび割れ幅、さらに単位面積当たりのひび割れ長さであるひび割れ密度を出力することも可能である[1)]。

さらに t.WAVE では、撮影画像の1画素の大きさに対して、およそ 1/4 の幅以上のひび割れを検出できることから、例えば、撮影した画像の空間分解能が 0.8mm/画素の場合

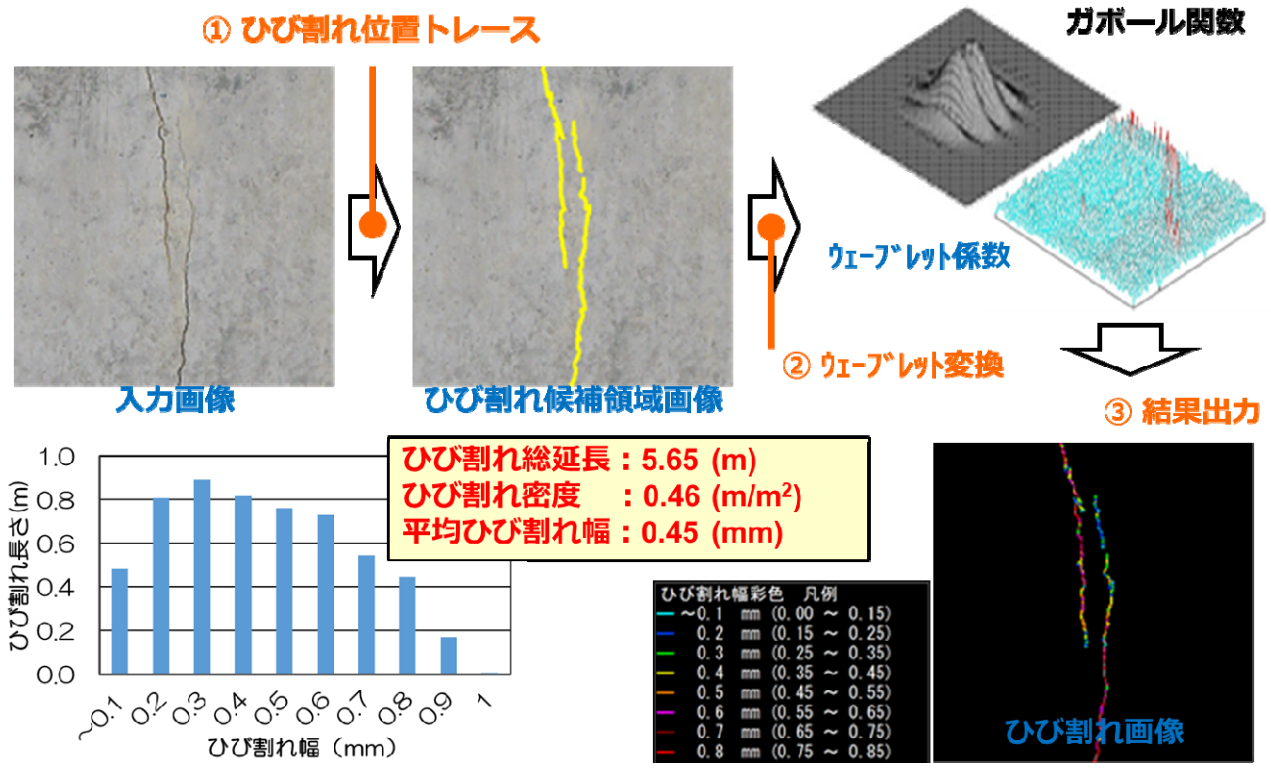



図-1　t.WAVE によるひび割れ画像解析の実施手順

であれば、幅 0.2mm 以上のひび割れをほぼ全て検出できる[1)]。このため、広い範囲を一度の撮影で済ませることができるため、撮影作業の効率化も図れる。

なお、現在はひび割れの大まかな位置を人によるトレースで指定しているが、将来に向けて AI による自動抽出化を図っており、さらなる効率化を目指しているところである。

## 3　道路橋床版下面のひび割れ撮影用ドローンの開発

SIP における研究開発は、平成 26 年度から平成 30 年度の 5 か年にわたって取り組んだが、研究開発に着手した平成 26 年頃は、まだドローンによるインフラ構造物の撮影が本格化しておらず、特に道路橋床版下面を撮影するのに必要な上向きのカメラを搭載したドローンは殆ど市販されていなかった。このようなことから、上向き撮影が可能なドローンの開発に取り組んだ。

写真-1　開発した上向き撮影可能なドローンと道路橋床版の撮影状況

写真-1 に開発した上向き撮影可能なドローンと道路橋床版の撮影状況を示す。試作したドローンは、実際の道路橋床版の撮影を行い、ひび割れを定量的に評価するのに必要な画質での撮影が可能であるかを確認した。このようなドローンの試作や改良は、要求する画質の画像の撮影が行えるようになるまで、最終的に 5 機を試作した。なお、ここでの要

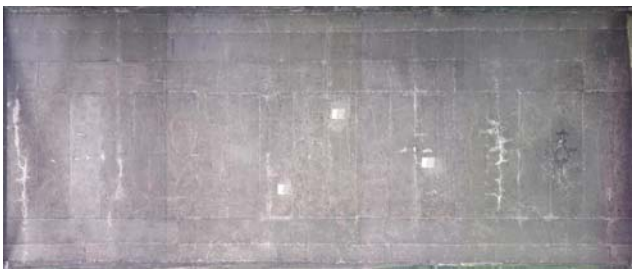


写真-2　開発したドローンによる道路橋床版の撮影画像

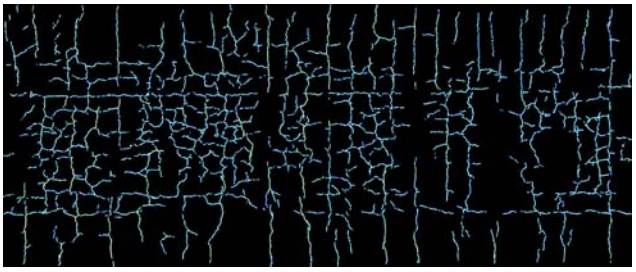


図-2　道路橋床版の撮影画像から t.WAVE を活用して得られたひび割れ図

求する画質の画像とは、揺れや振動の影響を殆ど受けない三脚固定したカメラによる撮影画像と同程度の画質の画像のことであり、これはすなわち、ひび割れ画像解析により得られる結果がほぼ同等となる画質の画像である。

写真-2 に開発したドローンによる道路橋床版の撮影画像を、図-2 にこの撮影画像から t.WAVE を活用して得られたひび割れ図を示す。写真-2 の撮影画像は、撮影範囲の床版を 4 つに分割撮影して、画像を合成したものであるが、t.WAVE のシステムには、あおり補正や複数画像の合成を行う機能も組み込まれており、接合部分のずれの少ない合成画像を生成することができる。また、この画像を t.WAVE により画像解析した結果である図-2 のひび割れ図では、撮影画像の空間分解能 0.6mm/画素に対して、幅 0.15mm 以上のひび割れをほぼ全て検出できている。

## 4　コンクリート構造物のひび割れ調査への活用事例

SIP では、このような成果を点検事業者などが積極的に活用することを促すために、主に全国各地の大学が拠点となって、地域実装支援を通じた実用化が取り組まれた。本開発技術については、琉球大学、沖縄県、沖縄県内の構造物点検事業者らとともに、沖縄県の離島海上橋での点検に適用することを試みた。ただし、撮影に使用するドローンについては、市販のドローンを使用することにした。これは、最近市販されているドローンに高精細な画像を撮影できるカメラを搭載したものが普及してきていることや、上述のような床版下面の撮影用途に製作した専用のドローンでなくても高精細な画像を撮影できることが、開発技術の普及のために望ましいと考えたためである。この試行では、陸地から数百メートル離れた海中の橋脚や上部工の高精細な画像を得ることができ、複数画像の正確な合成やそれを用いたひび割れ画像解析も適切に行えることが確かめられた。このような実証を通じて、次に記すような海上橋の点検業務などに活用している。

写真-3、写真-4 に海上橋においてドローンによる画像撮影と三次元レーザースキャナによる計測を同時に実施した状況を示す。この橋梁は、沖縄県北西部の海岸に位置しており、1998 年に竣工した橋長 360m の 6 径間連続ポステン箱桁橋である。この橋梁の位置する地域は、沖縄県内でも塩害による鉄筋コンクリート構造物の劣化が発生しやすい環境にあり、従来から橋梁点検車や船を用いた海上からの目視点検が継続的に実施されていたが、特に船上からの目視点検は多大な労力と費用を要することから、ドローンによる外観の点検が実施された。また、点検記録を三次

写真-3　海上橋のドローン撮影状況

写真-4　海上橋の三次元レーザー計測状況

元のデジタルデータで保管することを目的に、試行的に三次元計測による記録も同時に実施された。図-3 に三次元計測結果に t.WAVE によるひび割れ画像解析で得られたひび割れ図を重ねて示す。図-3 では、データを軽くするために、ひび割れの発生が認められた部分にのみひび割れ画像を貼付しているが、t.WAVE によるひび割れ画像解析の結果は、あおり補正や画像合成が正確にできるため、三次元計測の結果に貼付しても正確な位置で表示することができる。そのため、任意の方向から点検結果を三次元で鳥瞰でき、ひび割れの発生状況を視覚的にも的確に把握することができる。

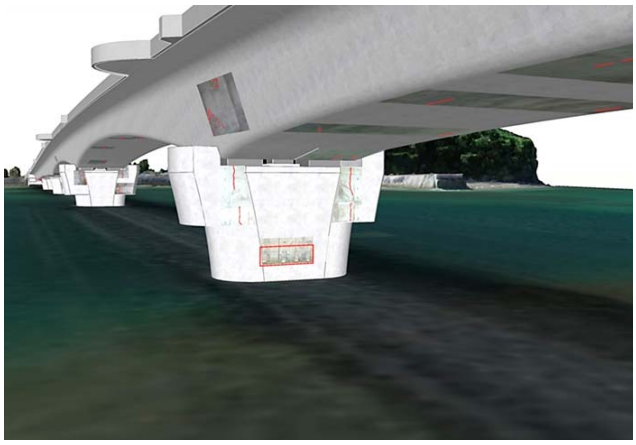


図-3　三次元計測結果にひび割れ図を重ねた表示結果

## 5　おわりに

橋梁定期点検要領が改訂され，SIP で開発された技術など，インフラ点検を目的とした先駆的な技術や新しい機材を構造物の点検に活用しやすい環境が，徐々にではあるが整えられてきた．また，CIM などと連携して，点検記録も三次元計測データと一緒に記録，保管され，設計から施工，維持管理にわたる三次元情報が一括管理されることにより，さらに効率的な維持管理が行えると期待される．

## 参考文献

1） 小山哲，丸屋剛，堀口賢一，澤健男：ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.68，No.3，p.p178-p.p194，2012.

2） 内閣府 HP：SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）インフラ維持管理・更新・マネジメント技術研究開発計画，http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/7_infura.pdf，（参照 2014-11-13）

# 第Ⅳグループ

# 桟橋鋼管杭補修技術「タフリードPJ工法」の改良

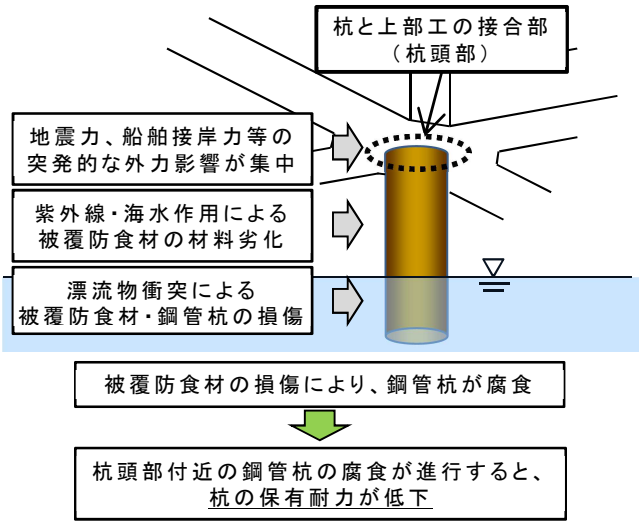
東亜建設工業株式会社　技術研究開発センター　主任研究員　田中　亮一

## 1　はじめに

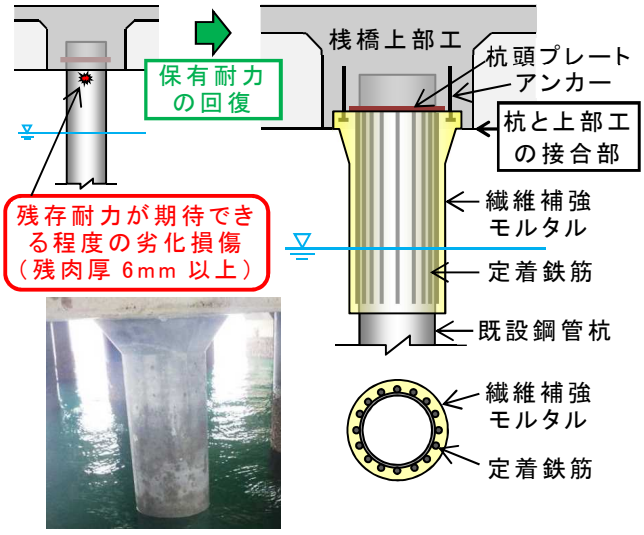
桟橋鋼管杭に適用される被覆防食工は、図－1に示すような様々な要因によって劣化損傷する。被覆防食工の劣化損傷は鋼管杭の腐食進行を促進させるが、特に桟橋構造上の要である鋼管杭と上部工の接合部（杭頭部）で腐食が進行した場合、杭の保有耐力は低下する。

このような背景から、筆者らは桟橋鋼管杭補修技術「タフリード PJ 工法」を開発し[1)]、現場に適用している（図－2）。この工法は、既設鋼管杭の残存耐力と繊維補強モルタルの巻立てにより断面耐力の回復を図る工法で、巻立て補修部の自重増加や剛性増加が課題であった既存の鉄筋コンクリート巻立て工法を改善したものである。しかし、この工法は、既設鋼管杭の残存耐力が期待できない程度まで劣化損傷した場合、適用が難しいという課題が残されていた。また、近年になって、老朽化桟橋においては鋼管杭の著しい劣化損傷が生じた報告[2)]もあり、このような劣化損傷に至った桟橋に対しては、これまで桟橋上の使用方法の変更や大規模な改修工事の検討等がなされてきた。しかし、既存桟橋の供用を止めずに継続利用したいというニーズは高く、財源確保の観点からも補修・補強による延命措置が望まれることも多い。

そこで、既存の鋼管杭補修技術である鋼板接着工法と併用し、杭の部材耐力を確実に回復させることのできる改良工法の開発に着手した。本報告では、「タフリード PJ 工法」の改良工法の概要と載荷実験により曲げ耐力の回復効果を検証した結果を報告する。




図－1　桟橋鋼管杭の劣化損傷要因




図－2　タフリード PJ 工法

## 2　改良工法の概要

杭頭部付近の鋼管杭が著しく劣化損傷した場合の既存の補修技術としては、劣化損傷部以外の健全な杭を活用した鞘管方式（劣化損傷した杭を切断して桟橋上部工を撤去し、健全な既存杭の外周に鞘管を挿入してグラウト

接合した後、上部工を再構築する方法）か、大規模な構造変更を伴う水中格点工法しかなかった。しかし、これらの補修技術では施設を供用しながら補修することは難しい。一方、鋼板接着工法は施設供用しながら施工することが可能であるが、杭頭部付近の鋼管杭が著しく劣化損傷していると、新規に設置する補強鋼板の上部の溶接長が確保できないため、適用が困難であった。

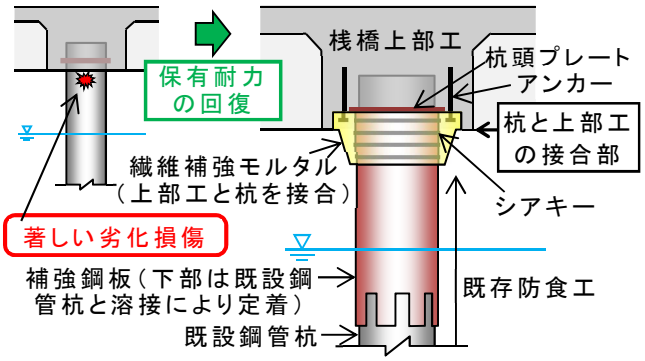
そこで、「タフリード PJ 工法」を改良し、鋼板接着工法における補強鋼板上部の定着の課題を、図－３に示すように繊維補強モルタルを介した接合により解決した工法を開発した。本工法では、高強度・高靭性・高耐久性を同時に併せ持つ繊維補強モルタル使用して、補強鋼板との定着構造をシアキーの配置（フープ鉄筋等の省略）のみで簡素化し、また、繊維補強モルタルを上部工に根入れさせる巻立て形状とすることで、根入れとアンカー配置の両方の効果により上部工と巻立て部の一体性を確保することを特長とする。

図－４に本工法で用いる繊維補強モルタルの特長を示す。繊維補強モルタルはひずみ硬化型セメント系材料の一種で、水粉体材比 0.22、またシリカフュームの混和により非常に緻密なマトリクスを形成する。また、単位体積当たり 1.5%の高強度ポリエチレン短繊維を混入し、引張ひずみ硬化性およびひび割れ分散性を付与した。なお、この繊維補強モルタルは現場製造が可能なため、実施工では桟橋上で製造し、モルタルポンプにより圧送、型枠内に注入する。

## 3　曲げ耐力検証実験

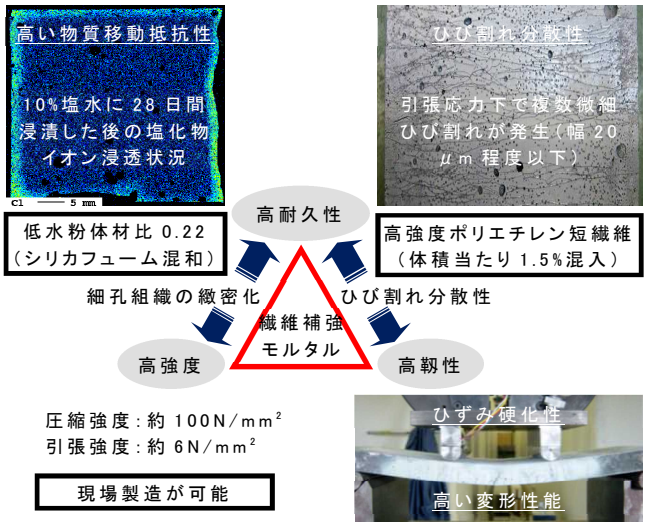
### 3．1　実験概要

本工法の適用による曲げ耐力の回復効果を




施工手順：①上部工はつり（繊維補強モルタルを根入れさせる形とするため），②アンカー設置（上部工と繊維補強モルタルの定着のため），③補強鋼板設置（下部を既設鋼管杭と溶接），④繊維補強モルタル施工（シアキーを介して補強鋼板と一体化）

図－３　改良工法



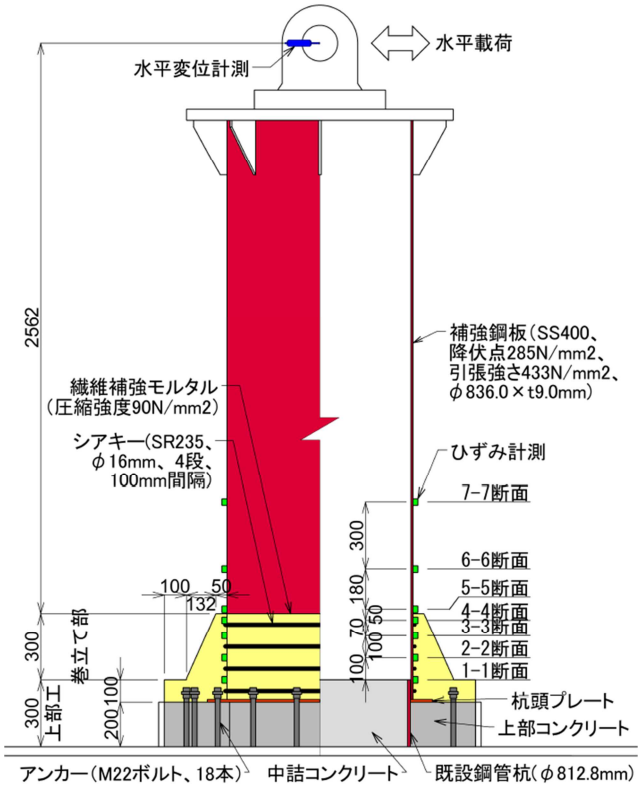

| 繊維補強モルタルの配合例 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| W/P | SF/P | EX/P | LP/P | S/P | F.vol (%) |
| 0.22 | 0.15 | 0.027 | 0.17 | 0.10 | 1.5 |
| P=C+SF+EX+LP、F.vol：繊維混入率<br>混和剤量は適宜調整 | | | | | |

図－４　繊維補強モルタルの特長

検証するため、載荷実験を実施した。載荷試験体の概要を図－５に示す。本試験体は、古くに築造された桟橋の杭頭部を模擬したものであり、既設の鋼管杭（外径 812.8mm）の外周に補強鋼板（外径 836.0mm、板厚 9mm）

を設置する構造とした。補強鋼板の上端（図－５では下端）は実施工を想定し、杭頭プレートに隅肉溶接（サイズ 8mm）で固定した。補強鋼板と繊維補強モルタルの定着用シアキーは４段配置し、繊維補強モルタルと上部工の定着用アンカーは周方向に 18 本配置した。

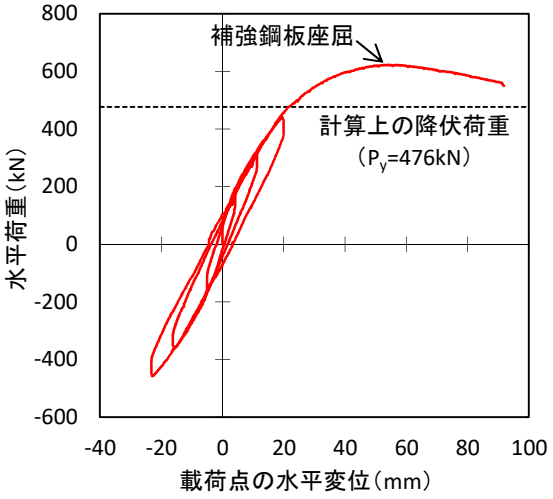
曲げ載荷は、試験体の上部工側を反力床に固定し、補強鋼板の下部（図－５では上部）を水平ジャッキで正負交番水平載荷することで行った。計測項目は水平荷重、載荷点水平変位、補強鋼板の鉛直ひずみとした。計測位置は図－５に示すとおりある。なお、本実験では軸力は作用させずに行った。また、載荷実験終了後には試験体を切断し、繊維補強モルタル断面のひび割れ発生状況を確認した。




図－５　載荷試験体の概要

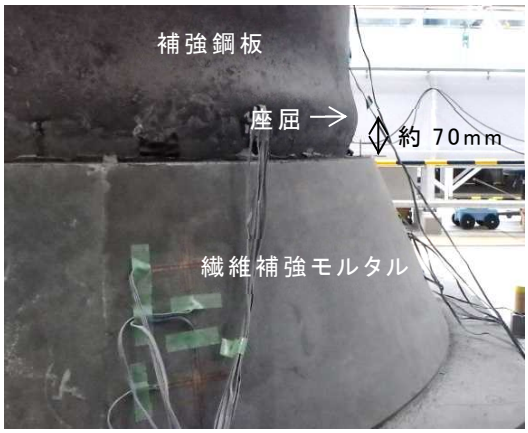
## ３．２　実験結果

水平荷重と載荷点水平変位の関係を図－６に示す。実験結果は、計算上の補強鋼板降伏荷重（通常の桟橋構造のように補強鋼板単体を片側固定端としてたわみ計算したときの降伏荷重）を超え、補強鋼板が座屈（図－７）した後に荷重の低下が見られた。また、載荷実験終了までに 1-1 断面引張側の繊維補強モルタル表面（巻立て部と上部工の接合変断面）に微細なひび割れが発生したが、それ以外の変状は確認されなかった。




図－６　荷重－変位曲線

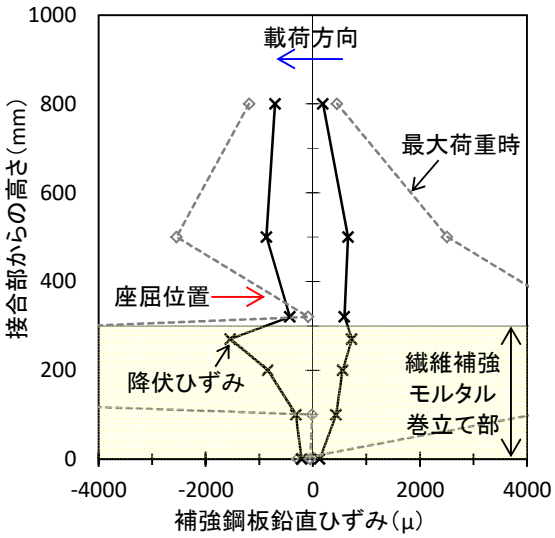
補強鋼板の鉛直ひずみ分布を図－８に示す。これを見ると、繊維補強モルタル巻立て部の上端付近でひずみが大きくなり、下端付近ではひずみは小さかった。これは、繊維補強モルタル巻立てにより断面剛性が大きくなったためと考えられる。また、4-4 断面（巻立て部の最上段）の圧縮側が最も早く降伏ひずみに到達し、その後のひずみの増加も顕著であったが、繊維補強モルタル巻立てによるフー




図－７　補強鋼板の座屈状況

プテンション効果により、巻立て部での補強鋼板の座屈は抑えられたと考えられる。

載荷実験終了後に試験体を切断した結果を図－９に示す。なお、ここでは最終載荷サイクルにおける引張側のみを示した。繊維補強モルタル断面に発生したひび割れは幅0.05mm 未満と微細であり、一部表面まで到達したものも確認されたが、大きな変状は確認されなかった。このことからも、繊維補強モルタルのひび割れ分散性、高い変形性能が発揮されたと考えられる。



図－８　補強鋼板の鉛直ひずみ分布

## ４　おわりに

本工法は、桟橋の供用停止や制限、さらには大規模な構造変更を行うことなく施工でき、杭頭部付近における劣化損傷を対象にした鋼管杭の補修技術である。補修すべき杭を対象に施工できるため、桟橋上部工を撤去・更新するような場合に生じる一時的な補修コストを抑制でき、さらに年間の補修費用の平準化のための方策を検討できるなど、戦略的な維持管理にも寄与できる有用な技術と考えている。今後は施工実績を積み上げ、本工法による補修効果の持続性など情報収集に努め、更なる開発に繋げていきたいと考えている。

図－９　試験体切断断面

参考文献

1）網野貴彦、國枝稔、岩波光保、加藤絵万、田中亮一：劣化損傷した既設桟橋の鋼管杭と上部工の接合部に対する新しい補強技術「タフリード PJ 工法」の開発、セメント・コンクリート、No.826、pp.16-22、2015.12

2）日経 BP 社：日経コンストラクション、No.633、pp.18、2016 年 2 月 8 日号

# 遺構に配慮した金沢城公園　鼠多門・鼠多門橋の復元整備

石川県　土木部公園緑地課　専門員　　中垣　学

## 1　はじめに

金沢城公園では、平成８年に金沢大学跡地を取得し、公園整備が始められ、平成１３年に都市公園として開園した。また、平成２０年には国史跡に指定され、都心部に残された貴重な緑を保全しながら、江戸時代後期の城郭の地割りを基に、史実を尊重した整備を進めてきた。直近では、平成２７年３月の北陸新幹線の金沢開業に合わせ、金沢城三御門の一つである橋爪門を復元し、玉泉院丸庭園を整備した。

本稿では、このほど７月に完成した、金沢城公園の「鼠多門・鼠多門橋」の復元整備工事について、報告する。

図-1　金沢城公園　位置図

## 2　鼠多門と鼠多門橋の概要

鼠多門は、金沢城の西側の郭(くるわ)である玉泉院丸に位置し、木橋（鼠多門橋）により接続される金谷出丸（現在の尾山神社境内）からの出入口として機能していた。

鼠多門は石垣の間に設けられた大扉の上に櫓が作られた櫓門形式の城門で、幅は約２２ｍ、奥行きは約７ｍあり、創建年次は明らかになっていないが、江戸時代前期には既に存在していたことが絵図等から判明しており、1884（明治 17）年に焼失するまで、およそ２５０年間の長きに渡り使用されてきた。

また、鼠多門橋は、橋長約２９ｍ、全幅５.５ｍ　城内最大規模の木橋だったと言われ、老朽化によって 1877（明治 10）年に撤去されるまで、何度も架け替えられながら使用されてきた。

写真-1　明治初期の鼠多門・鼠多門橋
（金沢市立玉川図書館蔵）

## 3　鼠多門の設計

平成２６年から実施した埋蔵文化財調査や絵図・文献調査の結果に基づき、復元設計を行った。

埋蔵文化財の発掘調査では、建物の位置や大きさ、柱の位置などを確認。特にこの門の最大の特徴である「黒い海鼠漆喰」は、発掘調査により発見された。（写真-2）

写真-2　発掘調査状況

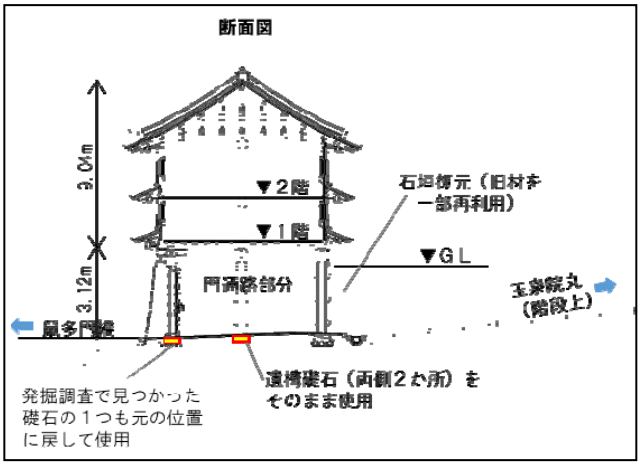



図-3　鼠多門断面図

古写真では、門の正面や側面の意匠などを読み取り、江戸後期の絵図により、遺構や古写真と矛盾がないかを確認した。判断がつかない箇所は、江戸時代に建てられ、現存する石川門や三十間長屋を参考にした。

復元にあたっては、遺構を保護するとともに、発掘された石垣や門の礎石は原位置で使用することとした。（写真-2）

鼠多門の石垣は、発掘された往時の石材と新たに加工した石材を使い、往時の積み方で復元し、破損した石材も補修をして再利用することとした。

また、門部の柱の礎石については、櫓の荷重が直接礎石にかかり、破損しないように、鋼材で補強したケヤキの梁と鉄筋コンクリート版の基礎により、荷重を分散させ、遺構の保護に配慮した。（図-1, 2）

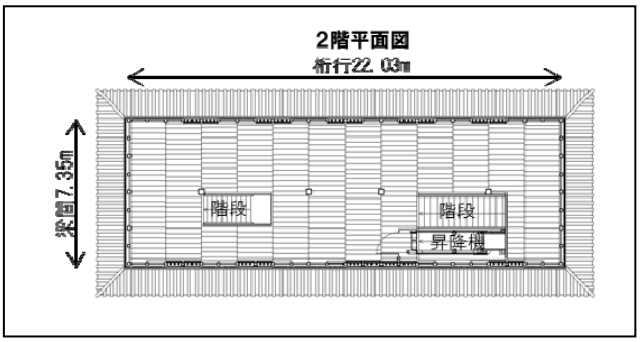



図-4　鼠多門平面図

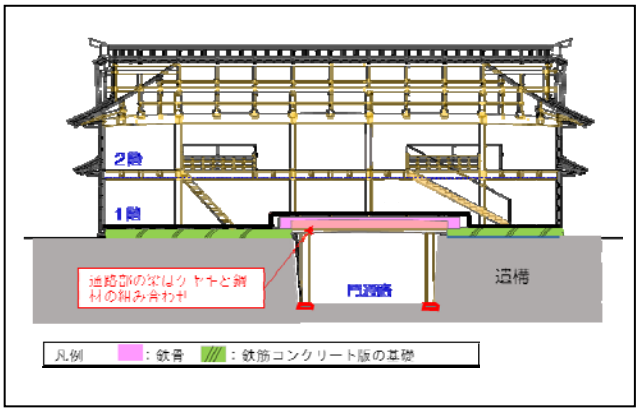



図-2　鼠多門立面図

## 4　鼠多門橋の設計

鼠多門橋においても、門同様に、埋蔵文化財調査や絵図・文献調査の結果に基づき、復元設計を行った。

発掘調査では、橋脚の位置や堀底の位置などが確認され、明治初期に鼠多門と一体的に撮影された古写真からは橋の高欄の形状などを読み取った。橋の寸法などについては、江

写真-3　鼠多門橋発掘調査状況

戸後期の絵図に記載されていることが確認された。これらから、江戸後期の橋を推定し、平面図、側面図を作成し、設計のベースとした。

ここで、鼠多門橋を設計するにあたり、整理した設計方針を示す。①江戸期の遺構の保護を最優先した計画とする。②発掘調査や史料により判明した史実を尊重する。③道路機能や安全基準等を満足する跨道橋として整備する。④復元する鼠多門と現存する石垣の歴史的景観と調和した意匠とする。これらの方針を踏まえ、設計を行った。

まず、①については、道路として埋め立てられる前の堀底が遺構面となり、その江戸期の遺構を保護する必要があるため、文化庁から、遺構となる地盤の掘削は認められていない。そのため、本来であれば、橋梁の場合、杭基礎を採用するところであるが、今回は採用できないため、橋脚基礎を連結させ、直接基礎形式を採用した。

さらの遺構面上部の土砂をエアモルタルに置き換え、荷重分散を図るとともに。さ不等沈下をさけるため、上部工の構造を３分割とした。

鼠多門の構造形式は下記のとおりである。A1～P4：４径間張出し式鋼床板ラーメン構造、P4～P5：鋼床板ラーメン構造、P5～P7：２径間張出し式鋼床板ラーメン構造。

次に②については、公園側の P1～P3 の橋脚は発掘調査から判明した、江戸期の橋脚の位置に再現した。また、絵図や古写真より、橋の幅員、高欄の意匠についても往時の姿を再現した。

③については、鼠多門橋は往時と違い、水堀では無く、市道に架かっており、車両の通行に支障が無いようにすることが必要であった。そのため、橋脚の位置を車道と歩道の間に配置し、大型車が通れるように舗装面から橋桁までの高さを４．７ｍ確保した。これにより、往時の橋長よりも長くなり、２ｍ高い位置で尾山神社にとりつくこととなった。

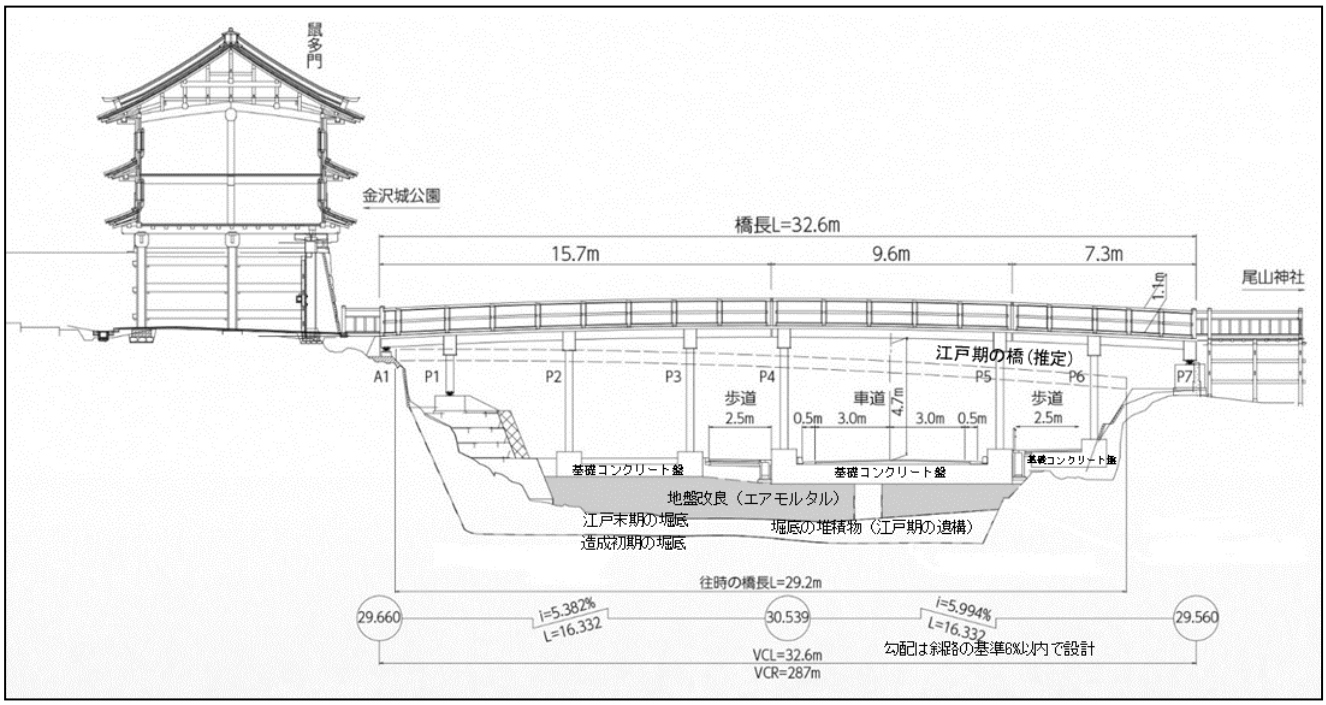



図-5　鼠多門橋側面図

また、耐震性能を確保するため、橋本体は鋼構造とした。さらに高欄の高さは、転落防止柵の基準を満たすため、１．１ｍとした。

④については、高欄や床板を木製とし、鋼材部は木の板で覆うことで、城郭景観と調和した木橋の意匠とした。この木の板による化粧は、定期的な橋梁の点検にも配慮し、点検時に板を外しやすいようにしている。

## ５　鼠多門・鼠多門橋の工事

鼠多門の復元工事においては、「石川の伝統的建造技術を伝える会」の職人により、伝統工法が使われており、伝統技術の継承にも寄与している。

また、施工時には、文化財担当部局と協議しながら工事を進めるとともに、掘削時には現地立会いにより、遺構の確認を行い、遺構の保護には万全を期している。

写真-4　鼠多門施工状況（黒漆喰塗り）

写真-5　鼠多門橋施工状況（木装）

## ６　おわりに

国史跡に指定されている金沢城公園の整備においては、遺構の保護が大前提となっており、今回の橋の基礎のように、土木の常識が通用しない状況に直面することもある。一方で、遺構を保護することは、金沢城公園の復元事業に付加価値が加わる事を意味し、また、それが魅力向上の一助となっていることをつけ加える。

県では今後も、金沢城公園の復元整備を通じて、史跡金沢城の価値と魅力向上を図ることとしている。

写真-6　完成した鼠多門・鼠多門橋

写真-7　ライトアップされた門と橋

# PlusStop縁石（バス停専用縁石）

公益社団法人日本交通計画協会　交通計画研究所　技師長　萩原　岳
主任研究員 近藤　翔平
株式会社ブリヂストン　Bridgestone T&DPaaS　技術企画部　第1ユニット
リーダー　大野　浩昭
先納　義和
信長　祐輔
株式会社アドヴァンス　事業本部　開発部　部長　○ 細野　義則

## 1　はじめに

超高齢化社会が急速に進む中、公共交通機関の重要度はますます高まっているが、バリアフリー化は十分に進んでおらず、誰もが移動しやすい交通環境整備の実現が課題となっている。欧州の先進国では、既にBRTやLRTに着目し多くの都市で様々な形式の車両が導入され基幹的な公共交通軸として機能している（写真－１）。

写真－１　フランス ナント市のBRT

また、乗降時にバスと停留所との離隔を出来る限り少なくし、快適に乗り降りできるバス停が整備されている。これは、側面・底面が特殊な形状をした縁石に、タイヤを擦り付けるように停車させることでバスと停留所との隙間を極力少なくし停車できるという仕組みだ（写真－２）。バスをバス停に対して並行に隙間無く停車することをわが国では「正着」と呼んでいるが、この正着により乗降容易性が向上することは、バス交通の定時性・速達性にも大きく貢献することになる。この欧州での取組みを日本でも普及させるために、日本の道路構造令に適合した国産のバス停専用の正着縁石（PlusStop 縁石）の開発に着手。

写真－２　フランス ルーアン市のバス停

## 2　開発の経緯

「PlusStop 縁石」は、国産初のバス停専用の正着縁石として平成 27 年度から開発が開始され、同年度の１月にドイツ製品と２種類の正着縁石による実証試験が新潟交通㈱の協力のもと、同社南部営業所敷地内において行われ、その機能・各種効果を検証している。また、平成 28 年度以降は横浜国立大学（「交通と都市研究室」中村文彦教授）、公

益社団法人日本交通計画協会、株式会社ブリヂストンと共同研究・開発を進めてきた形状（写真－３）にて、同年の３月に新潟市秋葉区役所庁舎前バス停に導入され実証試験が行われ、正着の容易性、ドライバーや利用者へのヒアリングの検証結果から「PlusStop 縁石」の有用性が確認された。（写真－４、－５）

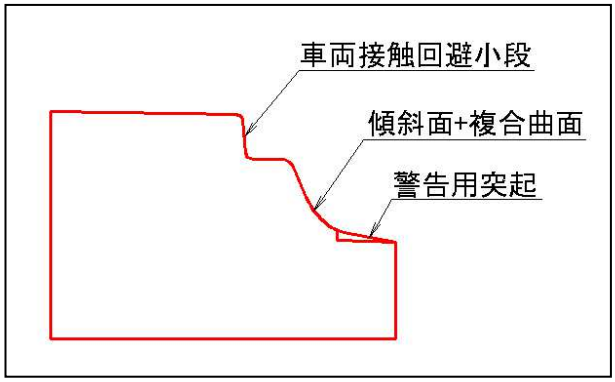
写真－３　PlusStop 縁石

写真－４　導入前のバス停

写真－５　PlusStop 縁石導入後のバス停

３　製品の特徴

「PlusStop 縁石」は、通常の歩車道境界ブロックと異なり車道側の縁石側面が傾斜面と複合曲線で形成され、縁石天端に向かって後退している。これはドライバーの技量に関わらず容易に正着できるように誘導する効果があり、タイヤサイドの磨耗を軽減し、車体の接触が生じないように設計されている。また、タイヤトレッド部が接する縁石張出部には警告用突起として連続的な凹凸を施し、ドライバーはその上を走行したときに発生する微振動によって正着位置を認識できる構造となっている。縁石の天端肩部には、車両停車時のノーズダウンあるいは、発車時のテールダウンの際に車体が接触することが無いよう小段を設けている。また、縁石天面には特殊な形状をした微小な突起が多数あり、雨天で縁石天面が濡れている場合でも安全に乗降できる。（図－１）これらの機能を有していることでバスの正着を実現し、利便性・安全性の高いバスの利用が可能となった。




図－１　PlusStop 縁石断面図

４　実績

平成 27 年度、28 年度の実証試験後、平成 28 年 9 月には新潟市秋葉区程島ショッピングセンターの上下線の 2 箇所（写真－６）で導入されたのを皮切りに、姫路駅南駅前広場、

岡山市後楽園前バス停（写真－７）、岡山市駅前通他 4 箇所、東京 2020 オリンピック・パラリンピック選手村トランスポートモール、東京都聖蹟桜ヶ丘駅前バス停、福岡県大野城市と全国で計 54 箇所のバス停に導入された。

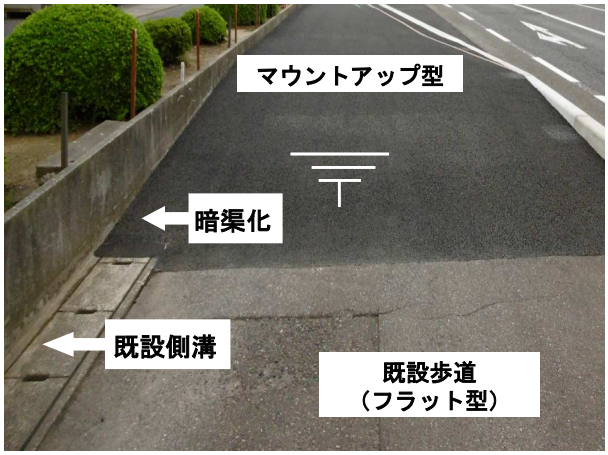
写真－６　新潟市秋葉区程島ショッピングセンター前バス停（三角形切れ込み型バスベイ）

写真－７　岡山市後楽園前バス停

## ５　今後の課題

「PlusStop 縁石」の導入検討段階における課題点として計画路線を運行する対象車両（連節、大型、小型等）に応じた設置延長、縁石高さ、バス停構造等の規格化を行う必要があると考える。既設のバス停への導入の際、歩道構造がフラット型あるいは、セミフラット型の場合にはマウントアップ型の高さまで前後にスロープを設けて摺り付けを行う必要がある。（写真－８、－９、－１０）

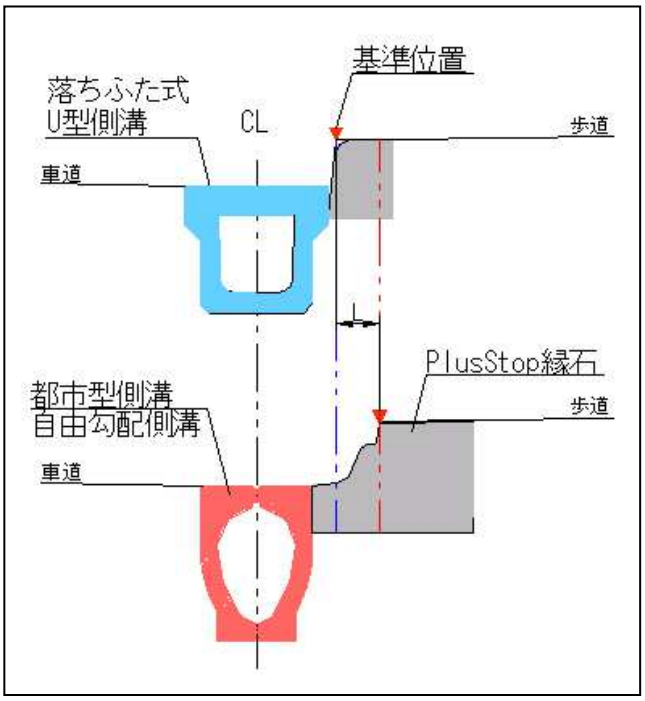
写真－８　導入前（フラット型）




写真－９　導入後（その１）

写真－１０　導入後（その２）

また、排水構造物の有無によっては、縁石の基準位置が異なるため、歩道幅員の確保が必要である。




図－２　前面に側溝がある場合の基準位置

縁石の前面に側溝が有る場合には、バスが正着時に側溝上部を走行するため、これに耐えうる構造の側溝への改良または入替えを行う必要がある（写真－１１）。十分な歩道幅員が確保される場合には、側溝の暗渠化が最適である。前述の留意点や課題を含め、様々な計画箇所に応じて設計段階・導入段階でのコスト削減を図るため、計画・設計方法を規格化・標準化を行い、より良いバス交通の発展並びに、「PlusStop 縁石」の普及に向けた体制を整えたいと考える。最後に、ご協力いただいた関係各位に感謝の意を申し上げる。

写真－１１　既設側溝の入替え例

【参考文献】１）鈴江早紀子、大蔵泉、中村文彦、矢部努：新形状のバスベイの設計と評価に関する研究、第２８土木計画学研究発表会講演集、２００３　２）公益社団法人日本交通計画協会：都市と交通、通巻９６号、２０１４

# 金沢港機能強化整備事業

石川県金沢港湾事務所　次長　甲部　正章

## １　はじめに

昭和 45 年に開港した金沢港は、その後も整備を進めており、貨物の利用が伸びない時期もありましたが、平成 19 年に世界的な建設機械メーカーのコマツが金沢港に立地したことや北陸新幹線の金沢開業が転機となり、利便性が見直され、金沢港は大きく変貌しハード面での新たな整備が求められていました。

## ２　機能強化整備事業の目的

近年のコンテナ貨物やクルーズ船の急増に対応するため、貨物・クルーズ両面における機能強化を図るとともに、新たな賑わいも創出し、さらなる金沢港の発展を目指します。

## ３　現状の問題点と課題

### ３．１　現状の問題点

無量寺ふ頭では、岸壁はクルーズ船対応になっていましたが、背後のふ頭はクルーズ・賑わいイベント、コンテナ貨物などに使用していました。

問題点は、コンテナ貨物は御供田岸壁から輸出しており、岸壁とふ頭の間にミスマッチが生じていること、アクセスが悪いこと、そして、最も深刻なことは、岸壁の水深が浅いことや老朽化したみなと会館では十分なスペースがないため近年増加している大型クルーズ船が受け入れができないことでした。

戸水ふ頭では、岸壁は定期航路のある RORO 船が主に使用していますが、背後のふ頭は RORO 貨物に加えコンテナ貨物も扱い、さらに、無量寺ふ頭で対応できない大型クルーズ船も受け入れていました。

問題点は、コンテナ貨物は無量寺ふ頭と同様にミスマッチが生じていたこと、クルーズ乗船客は CIQ 仮設テントを使用し利便性が低いこと、そして最も深刻なことは、RORO 貨物、コンテナ貨物、クルーズによりふ頭が非常に混雑（３密状態）しておりパンク寸前の状態となっており、これ以上の貨物やクルーズの受け入れが困難なことでした。

御供田ふ頭では、岸壁は定期航路のあるコンテナ船が主に使用しており、背後のふ頭もコンテナを扱っており一体となって利用されていました。

問題点は、コンテナ上屋は各ふ頭にも点在しているため効率的な荷役作業ができないことや、コンテナ貨物の増加に合わせて、既に未整備の岸壁背後までヤードを拡張しているため、これ以上のコンテナターミナルの拡張は困難な状況となっていました。

### ３．２　機能強化に向けた課題

クルーズについては、大型クルーズ船の受け入れもスムーズに対応するため、ふ頭の機能を強化し乗船客の利便性を図ります。

パンク寸前の戸水ふ頭については、早急に混雑（３密）を解消し、増加する貨物やクルーズ船への対応を図ります。

コンテナ貨物については、増加する貨物にも対応するため、岸壁と背後のふ頭（上屋）のミスマッチを解消するなど、ふ頭の機能を強化し、荷役作業の効率化を図ります。

## ５　課題を解決するための対応方針

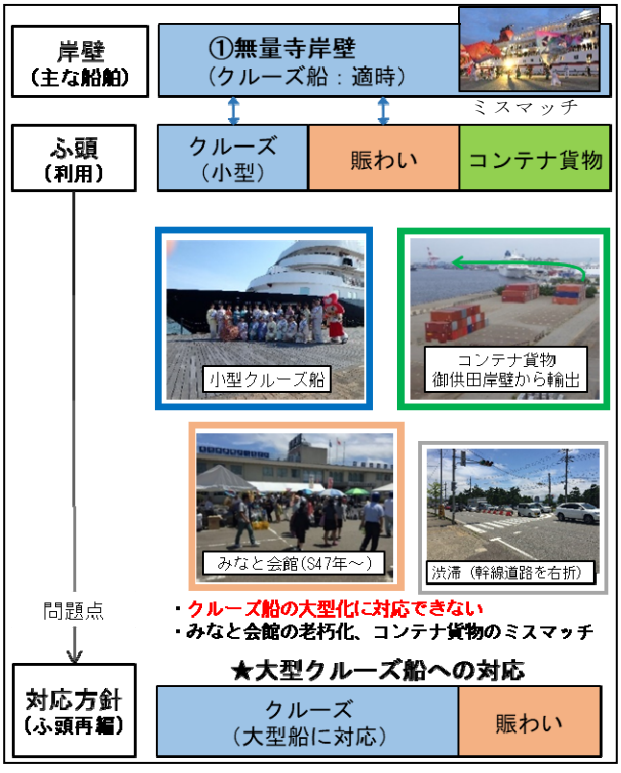
５．１　ふ頭の再編

機能強化の手法としては、例えば、①新ふ頭の増設、②幹線道路を移設しふ頭を拡張、③岸壁法線の直線化、④内貿エリアの移設、⑤低利用ふ頭の活用などが考えられるが、今回は、ミスマッチ問題の特性や既存ストックを最大限活用するため、ふ頭の再編をベースに検討しました。

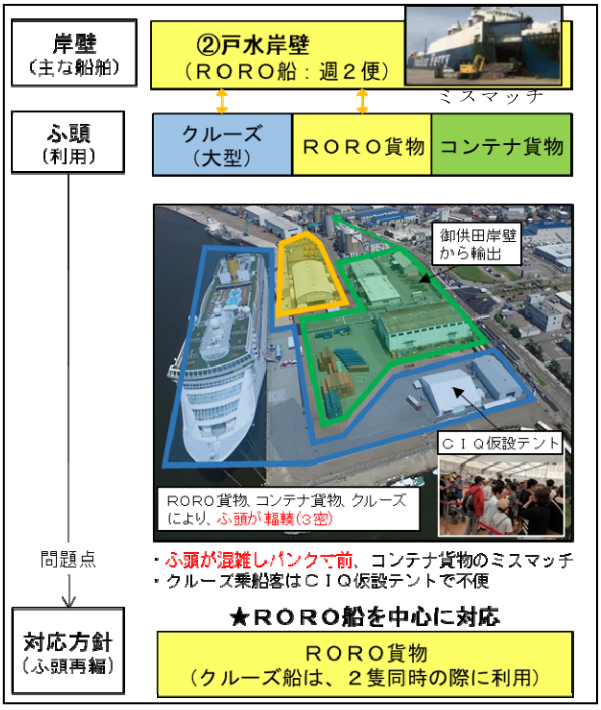
まずは、現状のふ頭の多目的利用を見直し、ふ頭ごとにクルーズ、RORO、コンテナの役割を明確に設定し、開港以来の大改修となる目的に特化したふ頭の整備を行い、ふ頭の再編を図ります。（図―１）（図―２）

次に、このふ頭の再編だけでは対応しきれないコンテナ貨物の対応については、未利用の港湾関連用地を活用し、コンテナターミナルの拡張を図ります。（図―３）

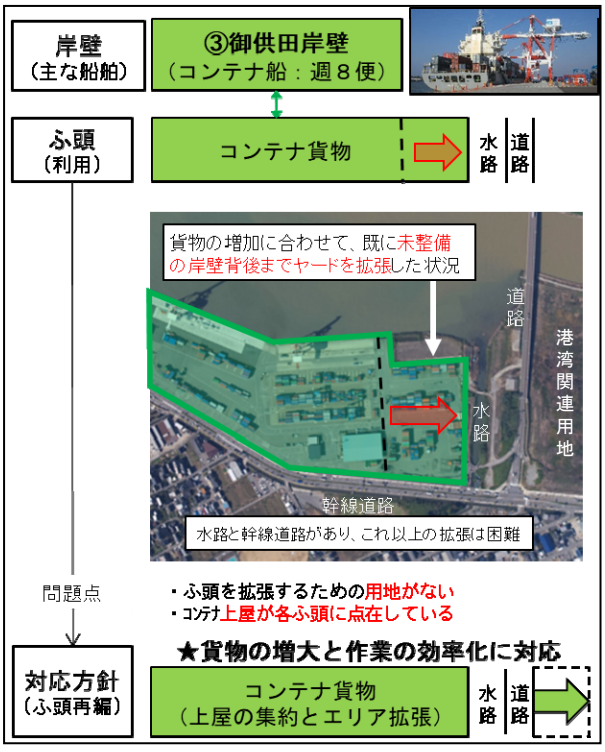
これにより、貨物・クルーズの異なる課題を同時に解決し、深刻な戸水ふ頭の混雑状況を早期に解消し港湾の機能強化を図ります。




図―1　無量寺ふ頭の問題点・対応方針




図―２　戸水ふ頭の問題点・対応方針




図―３　御供田ふ頭の問題点・対応方針

なお、ふ頭再編の実施における問題については、供用中の輻輳しているふ頭に大規模な工事を行うことから、施工ヤードの確保などが困難となるので、ふ頭外に港湾機能を一時的に移し、ヤードを確保するなどの工夫を行いました。

５．２　各ふ頭の役割分担と必要な整備

無量寺ふ頭は大型クルーズ船に対応することとし、岸壁の再整備やクルーズターミナル、道路、駐車場などの整備やコンテナ上屋の撤去を行います。

戸水ふ頭は、コンテナ貨物、RORO 貨物、クルーズの３密を解消するため、RORO 船を中心に対応することとし、ミスマッチとなっているコンテナ上屋の撤去を行います。

御供田ふ頭は、コンテナ貨物に対応することとし、今後の貨物の増大への対応と作業の効率化を図るため、上屋の集約やふ頭の拡張を行います。

なお、ふ頭の拡張については、連続した用地がないため新たなヤードを造成しアクセス道路と連結し一体化を図ります。

５．３　具体の計画における課題や工夫など

５．３．１　クルーズ船について

無量寺岸壁の対象船舶を１０万トン級としたところ、岸壁延長が不足しました。

このため、岸壁に連続する埋立護岸に係船柱などを設置しました。また、ビジュアル操船シミュレーターによる検証や関係機関による委員会を開催し安全性を確認しました。

５．３．２　乗船客の受け入れについて

クルーズ船が２隻同時に寄港した場合は、２隻目は戸水ふ頭で受け入れることになりますが、無量寺ふ頭と戸水ふ頭は船だまりで分断されているので、ターミナルを利用できず従来どおり仮設テント対応になります。

これを解消するため、船だまりを埋め立て連続したバースにすることで、戸水ふ頭からターミナルへの動線を確保するとともに、クルーズターミナルの CIQ・待合エリアや駐車場についても２隻同時接岸時の４千人を想定した整備をしました。

５．３．３　コンテナヤードの拡張用地

拡張用地は水路や道路で分断されており、コンテナターミナルと連続性がないと判断され、指定保税地域の指定が困難でした。

このため、水路と道路の間地もヤードとしまた、連続性を保つためアクセス道路について一般車両と混在せずに往復できる動線とすることで、既コンテナターミナルと一体化する計画として指定保税地域の指定を得ました。

６　金沢港機能強化整備事業の概要

平成 29 年 9 月に整備内容や配置計画をまとめ機能強化整備計画を策定しました。

・無量寺岸壁の再整備（国：着工済み）
・金沢港クルーズターミナルの整備
・アクセス道路、駐車場、緑地の整備
・無量寺・戸水に点在する上屋の集約

工期は計画策定から２年半の令和元年度

総事業費は約８０億円（県）（図―４）

図―４　金沢港機能強化整備計画

６　新たな賑わいの創出

６．１　賑わい創出計画と課題

クルーズターミナルを活用して賑わい創出を目指すため、ターミナルには、レストラン、セミナールーム、学び体験ルームを設けるとともに、ＣＩＱ・待合エリアの多目的活用や港湾関係機関の入居などを計画しました。

しかし、金沢港は人工的に建造された掘込港湾で歴史が浅いこともあり、港湾自体にシンボルとなるような建物や景観、町並み、出来事がないため、賑わいを創出するためには、ゼロから目玉となるものを創作する必要がありました。

６．２　賑わい創出への工夫

海の玄関口となるクルーズターミナルの待合エリアについては、人間国宝の方々による「海」をテーマとした伝統工芸品で装飾した柱を設置し、インスタ映えするスポットにしました。（写真―１）

写真―1　伝統工芸品で装飾した柱

まなび体験ルームについては、国内最大級の画面でクルーズ船を操作し、金沢港への入港から岸壁への接岸までを体験できる操船シミュレーターなどを設置し、大人から子供まで楽しめるエリアとしました。（写真―２）

写真―２　操船シミュレーター（荒天時）

また、ライトアップを行うこととし、港内を囲むように石川らしい「加賀五彩」の色で照らし幻想的な夜景景観を創出し、ターミナル前のふ頭においては、加賀五彩の色ごとに動きのある模様を演出します。（写真―３）

写真―３　港内のライトアップ

さらに、核となるターミナルはガラス張りの建物を内部から照らすことにより際立たせ、夜のランドマークにします。（写真―４）

写真―４　ターミナルのライトアップ

最後に、これらの施設を最大限に活かし、賑わいを創出するためには、集客力の高いイベントの実施など、ソフト面でも様々な工夫が必要なことから、民間の創意工夫を活用するため指定管理者制度を導入しています。

８　おわりに

金沢港機能強化整備事業は令和２年３月に完成しましたが、残念ながら新型コロナウイルスの影響で金沢港クルーズターミナルは、６月１日のオープンとなりました。

このターミナルは、臨場感あふれる操船シミュレーターや、地元の海産物を提供するレストランやベイコンサートなどの各種イベントなどが好評を博し、大きな賑わいを見せており、今回の整備が金沢港のさらなる発展にもつながるものと期待しています。

最後になりますが、本事業の整備に多大なご尽力をいただいた国をはじめ関係機関の皆様に感謝申し上げます。

# 掲 載 技 術

# 斜め往復撮影による標定点不要の造成地UAV写真測量手法の開発

株式会社フジタ　土木本部土木エンジニアリングセンター企画部　　松岡　祐仁

## 1　はじめに

UAV 空中写真測量は、国土交通省が推進する「i-Construction」において、広範囲を効率的に計測できる手法として広く普及している。しかし、事前に設置する標定点の測量、工事進捗による標定点更新に膨大な労力、時間を要しており、タイムリーかつ有効に活用する上で現場実装の隘路となっていた。

「斜め往復撮影」は、標定点を完全に省略した上で、鉛直誤差を抑制して計測の高精度化を図ることのできる造成地を対象とした空中写真測量手法である。本報では、本技術の開発経緯、及び現場検証の結果について報告する。

## 2　開発の背景

近年、高精度 GNSS 測位が可能な自己定位型 UAV が低廉な価格で導入可能になり、写真測量の更なる効率化・高精度化が期待される。令和 2 年 3 月改訂「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）」では、SfM の利用においてカメラ位置を直接計測できる手法（自己定位型 UAV）を併用する場合の標定点設置は任意となった。

しかし、標定点を全く設置しない場合、従来から行われている鉛直直下向き撮影では、自己定位型 UAV を用いても、水平方向は高い精度が確保できるが、鉛直方向に一律にオフセットされた大きな誤差が生じる課題がある。SfM では、カメラのレンズ特性や撮像面との位置関係等の幾何学構造の校正作業である内部標定が行われる。この一律の誤差は、完全に鉛直直下向きの画像セットのみでは、SfM 解析時に内部標定要素の内、焦点距離に代表される奥行き方向のスケールが幾何学的に求まらず誤推定されることに起因した系統誤差[1)]である（図-1）。このため、従来は、標定点の設定や調整点での誤差のオフセットが必須であった。

この解決策として、多視点から撮影した画像セットを用いて SfM 解析を行うことで、奥行き方向のスケールを幾何学的に安定して求めることができると考え、鉛直精度の改善を図ることとした。

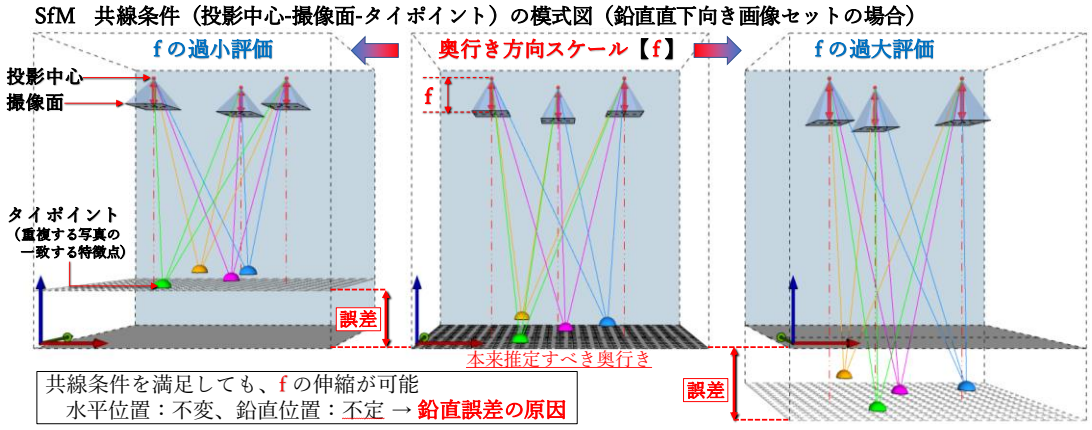



図-1　奥行き方向のスケール誤推定

## ３．多視点飛行撮影の導入[2)]

### ３．１　飛行実験

従来の鉛直直下向き撮影画像セット（高度 73m：GSD20mm/画素、ラップ率 80×60%、122 枚）を基本ケースとし、以下の別高度や斜め向きの多視点撮影画像を取得した。撮影には自己定位型 UAV「Phantom 4 RTK」（以下、P4RTK と称す）を用いた。

① 高度 55m（鉛直直下向き）　1 枚

② 高度 73m（30° 斜め向き）　26 枚

### ３．２　検証点誤差

表-1 に多視点飛行撮影画像を追加して SfM 解析（Pix4D Mapper 使用）を行った検証点 14 点の RMS 誤差を示す。いずれも、水平方向は高精度の結果を得られている。しかし、基本ケースでは、鉛直成分に約 1.1m の系統誤差が確認できる。

ケース 1～6 の鉛直誤差は、多視点飛行画像追加により標定点の設定なしで工事測量要求精度 100mm を確保した。次に、SfM 解析の過程でノイズとなり、画像間マッチング、内部標定要素の推定に悪影響を与える可能性がある領域周辺の植生が写る割合の大きな画像、抽出タイポイント数が少ない画像を段階的に除去して解析を行った。ケース 4～6 では、1～3 枚と少数の多視点飛行撮影画像を加えることで出来形計測要求精度 50mm 以内となった。

表-1　多視点飛行撮影　検証点誤差

| ケース | 基本＋追加(枚数) | | X誤差(m) | | Y誤差(m) | | Z誤差(m) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ①鉛直 | ②30° | 最大 | RMS | 最大 | RMS | 最大 | RMS |
| 基本 | - | - | 0.021 | 0.009 | 0.017 | 0.008 | 1.127 | 1.097 |
| 1 | 1 | - | 0.034 | 0.012 | 0.019 | 0.008 | 0.052 | 0.028 |
| 2 | - | 26 | 0.037 | 0.013 | 0.015 | 0.008 | 0.079 | 0.060 |
| 3 | - | 6 | 0.035 | 0.012 | 0.018 | 0.008 | 0.083 | 0.065 |
| 4 | - | 3 | 0.037 | 0.013 | 0.020 | 0.008 | 0.046 | 0.031 |
| 5 | - | 1 | 0.035 | 0.012 | 0.018 | 0.008 | 0.024 | 0.011 |
| 6 | 1 | 1 | 0.037 | 0.012 | 0.018 | 0.008 | 0.025 | 0.011 |

※各誤差の最大は絶対値

以上より、鉛直直下向き撮影画像セットに多様性飛行撮影画像を追加することで鉛直誤差を大幅に抑制する効果が得られたと考える。一方、多視点飛行撮影画像は、単に枚数を加えるだけでは、十分な効果が得られない可能性があり、少数でも画像同士のマッチングに有利な画像の追加が重要であることが示唆された。

## ４．斜め向き撮影

### ４．１　撮影方法の検討

多視点飛行撮影画像追加の実験では、鉛直誤差の抑制効果を確認できたが、有利な画像を取得するためには、対象領域に応じて事前に検討された適切な位置、高度・角度からの撮影が必要となることが示唆された。多数の画像を撮影して SfM 解析時に有利な画像を都度選定する方法も考えれるが、実運用では、追加飛行、解析回数・時間を要するため、手法としての一般化は難しい。

そこで、従来の鉛直直下向き撮影の軌跡は変えず、カメラ角度を進行方向に対して一定角に固定した斜め向き重畳画像を取得する手法（図-2）を試行することとした。本手法であれば、隣接コース間の計測領域は 2 方向から撮影され、多視点飛行撮影による効果が期待できる。

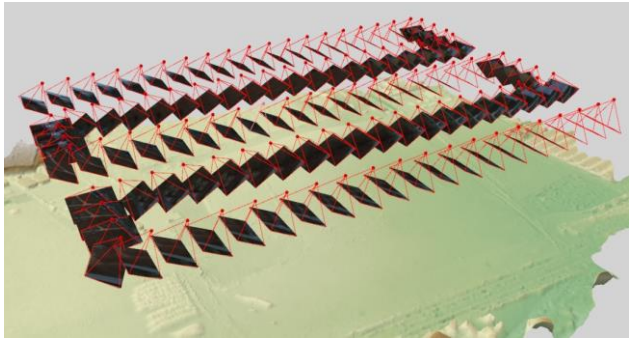


図-2　斜め往復撮影　飛行経路・軌跡

## ４．２　飛行実験

飛行実験は、100×100m の領域に検証点 9 点を配置して行った。対象領域は、一部植生が分布しているものの大半は裸地の造成地である。撮影には P4RTK（RTK-GNSS 測位）を用い、以下の組み合わせで計 30 ケースの飛行実験を実施した。

・高　度…73、55、36.5m（3 種類）
・天底角…0, 10, 20, 30, 40°　（5 種類）
・ラップ率…80×60%, 80×75%（2 種類）

## ４．３　検証点誤差

表-2 にラップ率 80×60%時の斜め往復撮影画像による SfM 解析時の検証点誤差を示す。いずれのケースも天底角 0° の場合、50mm 以上の鉛直誤差が生じた。高度 73m、天底角 10° のケースで最大 62mm の鉛直誤差が生じているが、それ以外のケースも含め、斜め往復撮影により鉛直精度の改善が確認できる。ラップ率 80×75%の場合も、ほぼ同様の傾向であった。

表-2　斜め往復撮影　検証点誤差

| 天底角（°） | X誤差(m) | | Y誤差(m) | | Z誤差(m) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 最大 | RMS | 最大 | RMS | 最大 | RMS |
| **高度73m** | | | | | | |
| 0 | 0.016 | 0.009 | 0.034 | 0.022 | 0.072 | 0.046 |
| 10 | 0.017 | 0.012 | 0.027 | 0.021 | 0.062 | 0.046 |
| 20 | 0.029 | 0.020 | 0.024 | 0.017 | 0.028 | 0.016 |
| 30 | 0.020 | 0.011 | 0.028 | 0.017 | 0.014 | 0.008 |
| 40 | 0.013 | 0.008 | 0.024 | 0.015 | 0.017 | 0.012 |
| **高度55m** | | | | | | |
| 0 | 0.030 | 0.021 | 0.034 | 0.023 | 0.077 | 0.060 |
| 10 | 0.026 | 0.017 | 0.027 | 0.017 | 0.040 | 0.028 |
| 20 | 0.019 | 0.011 | 0.026 | 0.018 | 0.029 | 0.018 |
| 30 | 0.017 | 0.011 | 0.020 | 0.013 | 0.044 | 0.034 |
| 40 | 0.023 | 0.012 | 0.026 | 0.018 | 0.041 | 0.035 |
| **高度36.5m** | | | | | | |
| 0 | 0.018 | 0.011 | 0.029 | 0.021 | 0.055 | 0.047 |
| 10 | 0.018 | 0.013 | 0.027 | 0.021 | 0.021 | 0.013 |
| 20 | 0.019 | 0.012 | 0.028 | 0.019 | 0.014 | 0.008 |
| 30 | 0.012 | 0.007 | 0.025 | 0.018 | 0.032 | 0.020 |
| 40 | 0.017 | 0.010 | 0.025 | 0.020 | 0.032 | 0.019 |

表-3　焦点距離　標準偏差（pixel）

| 天底角（°） | ラップ率80×60% | | | ラップ率80×75% | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 高度（m） | | | | | |
| | 73 | 55 | 36.5 | 73 | 55 | 36.5 |
| 0 | 6.552 | 4.649 | 2.028 | 4.611 | 3.894 | 3.039 |
| 10 | 0.510 | 0.433 | 0.467 | 0.413 | 0.513 | 0.511 |
| 20 | 0.182 | 0.155 | 0.180 | 0.137 | 0.181 | 0.240 |
| 30 | 0.104 | 0.084 | 0.108 | 0.082 | 0.099 | 0.129 |
| 40 | 0.067 | 0.059 | 0.079 | 0.062 | 0.077 | 0.128 |

## ４．４　焦点距離　標準偏差

表-3 に、全 30 ケースの SfM 解析により推定された奥行き方向のスケールを表す主要パラメータのひとつである焦点距離 f（focal length）の標準偏差を示す。値が大きいほど焦点距離 f の推定において不確実性が増すが、鉛直直下向き撮影（0°）では、数画素程度の大きな値となった。斜め往復撮影画像セットでは、全てのケースで 1/2 画素程度以下となり、天底角の増加に比例して焦点距離 f の推定が安定的になることが明らかになった。本手法の導入効果が顕著に表れたと考える。

今回の対象領域では、検証した各高度において天底角 20° 以上の斜め往復撮影であれば、鉛直精度 50mm の安定的な確保が確認できた。

## ４．５　「斜め往復撮影」手法

「斜め往復撮影」は、自己定位型 UAV による外部標定要素推定の高精度化と併せて、斜め向き撮影画像セットにより内部標定要素の内、奥行き方向のスケールを高精度に推定し、標定点を不要とした造成地等の土工を対象とした空中写真測量手法である。その特徴を以下に示す。

① 従来の鉛直直下向き撮影の飛行経路のままカメラを進行方向に傾けることで、

多視点飛行撮影画像を取得できる。

② 斜め往復撮影画像セットを SfM 解析することで、奥行き方向のスケールの誤推定が大幅に抑制できる。

③ 鉛直直下向き撮影の GSD20mm/pixel に相当する高度からの斜め往復撮影でも、i-Construction の出来形計測に相当する±50mm の高精度計測が標定点不要で達成可能である。

標定点が不要となり飛行撮影前の準備工程が大幅に軽減されることは、運用上大きなメリットである。この特徴を活かして、人の立ち入りが困難な場所、例えば近年頻発する災害時の初動調査等への展開が期待できる。一方、これまで標定点や調整点に頼っていた位置精度の確保が、撮影画像の情報のみとなる。本手法では、裸地が多くを占める造成地では良好な位置精度を得ているが、計測対象の植生被覆などの地表面状況、撮影画像の質等の状況に大きく依存することに留意する必要がある。また、これまでの蓄積データから、従来標準設定で行われることが多かった SfM 解析において、解析設定の変更が位置精度に大きく影響[2)]することが明らかになっている。計測対象の状況に大きく依存する本手法が、より安定して精度を確保するために適した解析設定についても継続して詳細検討を行いたい。

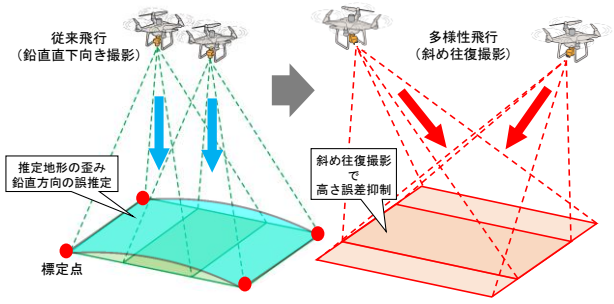



図-3 斜め往復撮影手法 概念図

写真-1 斜め往復撮影 カメラ角度

## ５．おわりに

現在、本手法は、主に標定点の設置に多大な労力を要していた広大な造成現場において着工前等の現況測量、土量変化率の把握による土配計画での運用を行うとともに検証実験を重ね事例を蓄積しているところである。今後は、斜め向き撮影で光軸が傾くことによる飛行高度と地上画素寸法、ラップ率の関係を明確にして ICT 基準類との整合性を図ることや、カメラ角度等撮影条件の最適化を行い、現場の生産性向上に資する技術として発展させていく所存である。

謝辞

本開発にあたり、ご指導、ご協力をいただいた山口大学大学院創成科学研究科准教授　神野有生先生、研究室各位に深く感謝申し上げます。

1) 神野有生・宮崎真弘・八田滉平・福元和真：UAV 写真測量の SfM における斜め撮影の導入に関する基礎的シミュレーション、日本写真測量学会 平成 30 年度秋季学術講演会、2018.

2) 高田雅也・水津佑輔・松岡祐仁・野末晃・神野有生：造成地の GCP 不使用型 UAV 写真測量の SfM 段階における撮影方法・解析設定の影響、日本写真測量学会令和 2 年度年次学術講演会、2020

# レーザースキャナによるトンネル施工管理

佐藤工業（株）　ICT推進部　須佐見　朱加
ICT推進部部長　京　免　継彦

## 1　はじめに

国土交通省は，建設現場の生産性向上を目指した取り組みとして「i-Construction」を推進している．特に山岳トンネル工事では，作業の効率化と安全性向上を目的として，レーザースキャナ（以下，LS）の活用が盛んである[1),2)]．これは LS が，トンネルのように明るさが十分でない場所においても，短時間で高精度かつ高密度な形状データを取得することができるためである．

しかしながら，市販の点群処理ソフトではトンネル計測点群の取り扱いが難しいことから，覆工コンクリートの出来形を評価できる処理システム（出来形マイスター・トンネル PKG[2)]）を開発した．本稿では，LS を利用したトンネル坑内の計測方法とそのシステムを利用した施工管理の事例を紹介する．

## 2　LS を用いたトンネルの施工管理

### 2．1　坑内の計測方法

坑内計測は，LS をトンネルの中心付近に設置して実施する（**図-1**）．計測データは，LS の器械中心を原点とする座標系であるため，複数のターゲットを配置し，後方交会により LS 設置位置を算出することで現場座標との関連付けや点群同士の合成が可能となる（**図-2**）．計測は，見通しがきく範囲のみで有効であるため，レーザー照射の障害となる資機材は事前に撤去し，1 回の計測で計測範囲を網羅できない場合には，異なる位置から複数回に分けて計測を行う必要がある．

**図-3** は，計測データの一例を示したものである．連続した 3D の面形状取得により，従来の単点測量では難しかったトンネル全体の形状を視覚的に把握することが容易となる．

**図-1**　坑内の計測状況

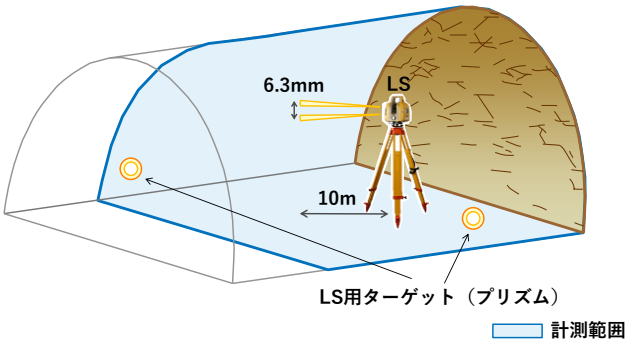



**図-2**　坑内計測の概略

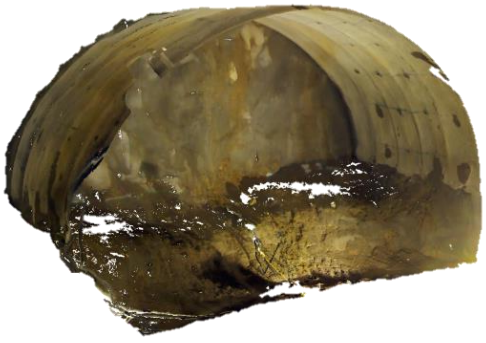
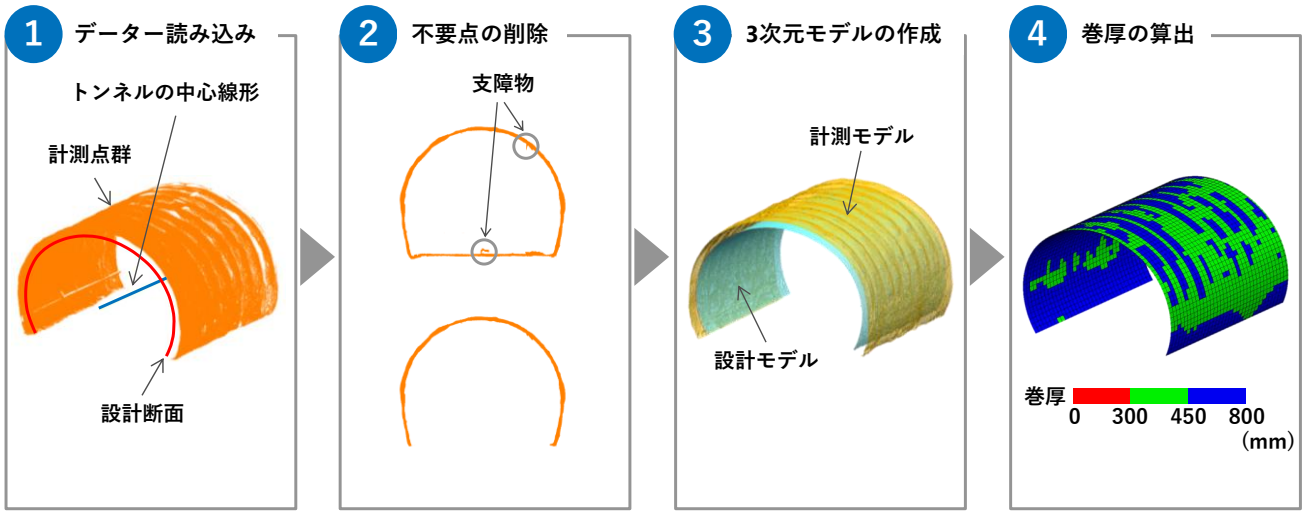


**図-3**　計測データの一例

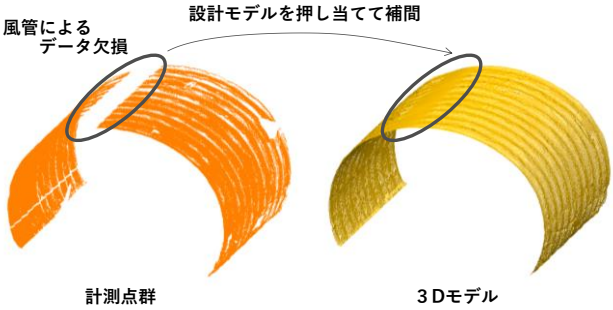



**図－4**　計測データの処理フロー（巻厚算出の場合）

２．２　トンネルの３次元出来形管理

計測データは，LS の器械点を原点とする座標系であるため，LS 専用のソフトウェアで現場座標に変換する．

計測点群の処理フローを**図－4** に示す．処理工程は 4 ステップに分かれており，ステップ 1 では，① トンネルの設計断面，② トンネルの中心線形，③ 内空計測点群の 3 種類のデータを読み込む．計測点群には，出来形評価に必要のない支障物等も含まれているため，ステップ 2 では，設計データを参照し，点群を残す範囲を指定することでトンネル壁面のみの点群を抽出する．ステップ 3 は，トンネルの設計断面と中心線形によって定義される理論的なトンネル形状のメッシュ（以下，設計モデル）を作成し，それをメッシュ化対象の計測点群に押し付けるように変形し，3 次元モデル（以下，計測モデル）を作成する．そのため，不要点削除により，点群に欠損が生じた場合でも，設計モデルの押し付け効果により自然なトンネル形状を得ることができる（**図－5**）．最後のステップでは，計測モデルと設計モデルを比較することで，その差分である厚さを算出する．その値は，数十 cm 四方の区画毎に色分けしたヒートマップにし，設計モデルに沿って表示する．

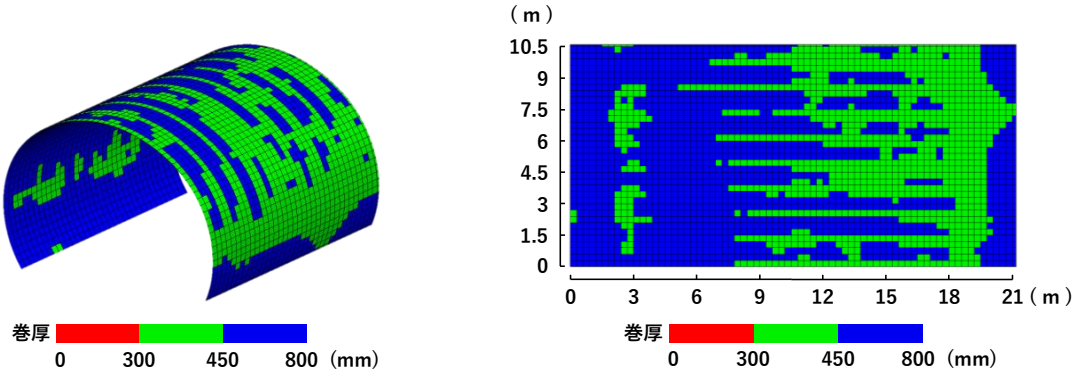



**図－5**　欠損部の補間

３　施工現場での LS 活用事例

３．１　実施工現場での坑内計測

実施工現場での計測は，1 秒間に約 12 万点の点群を取得し，器械点を中心に鉛直 270°，水平 360°の範囲を計測することができる TOPCON 社製（GLS-2000）の LS を使用する．この LS は，坑内基準点（プリズム）を LS のターゲットとして利用可能であることから，LS 計測のために基準点を新設する必要はない．なお，計測は，吹付けコンクリート施工後に計測密度 6.3mm@10m で実施する．




(a) 3D 図　　(b) 平面図

**図-6**　処理結果の一例（1 区画=300mm）

### 3．2　巻厚管理と打設数量の算出

現行の出来形管理は，一定区間毎に設定した管理断面において，内空高さや幅，巻厚を検尺やレベルを用いて計測し，その値が基準値を満たしているか確認を行う．特に覆工コンクリート打設前の巻厚確認は，狭隘なセントル（覆工型枠）内において，検査窓から吹き付けコンクリート面とセントルまでの距離を計測する必要があり，若手職員の作業負担が大きい．

そこで，吹付けコンクリート施工後に LS 計測を行い，1 打設長（=10.5m）毎に巻厚を算出した．**図-6** は処理結果の一例であり，3D 図および展開図で示す．ヒートマップの色分けは，設計値の巻厚に満たない場合は赤色，それ以外は値によって緑または青色と定義する．現行の出来形管理はピンポイントでの計測である一方，LS を用いた出来形管理は 3D の連続した面的データを管理することができるため，視覚的に施工範囲全体の巻厚を把握することが可能である．

また，ヒートマップの区画毎の値を積算することで，覆工コンクリート打設前に必要なコンクリート数量を推定することができるため，計測に要する時間と労力を大幅に削減することができる．

**表-1**　計測頻度

| 頻度 | 測定位置と切羽の離れ | 変位速度（内空変位） |
|---|---|---|
| 2回/1日 | 0～0.5D 未満 | 10 mm/日以上 |
| 1回/1日 | 0.5D～2.0D 未満 | 5～10 mm/日 |
| 1回/2日 | 2.0D～5.0D 未満 | 1～5 mm/日 |
| 1回/1週 | 5D 以上 | 1 mm/日以下 |

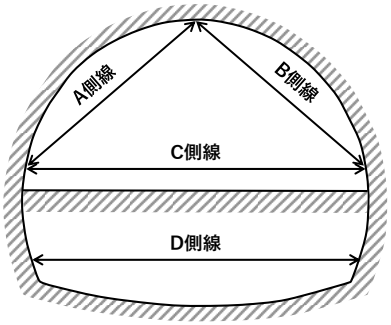



**図-7**　内空変位側線の配置例

### 3．3　変位計測

山岳トンネル工事の示方書等では，日々の施工管理業務として A 計測が規定されている．同計測では，数十 m の掘進毎に計測断面を設け，1～2 回/日の頻度で決められた測点をトータルステーションで変計計測し，地山の安定性や支保工の妥当性を評価している．**表-1** に計測頻度を，**図-7** に内空変位側線の配置例をそれぞれ示す．この方法では，規定断面の挙動しかわからず，トンネル全体の挙動を把握することは困難である．

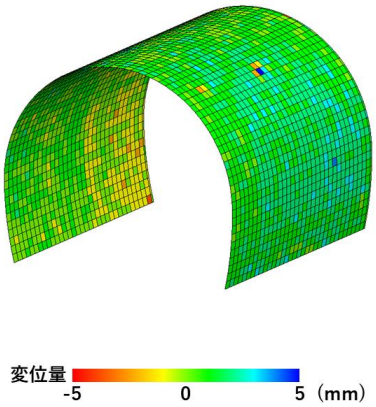


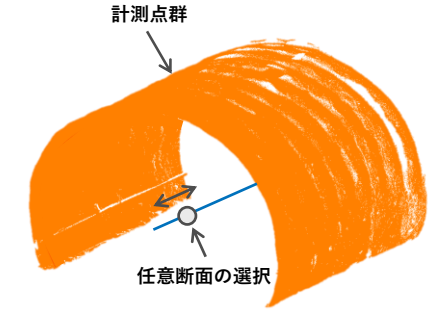

**図-8**　処理結果の一例

そこで，内空変位収束まで同一箇所で LS 計測を実施し，同一箇所の差分から変位を求めることで，その大きさと範囲を確認することができ，変位が大きい場合には，迅速に対策を講じることができる（**図-8**）．また，**図-9** に示すようにトンネルの線形上で自由に断面位置を選択することで変位の経時変化を表示し，収束状況の確認を容易にする．施工中の変位挙動だけでなく，施工完了後も定期的な計測を実施することで維持管理にも活用可能である．

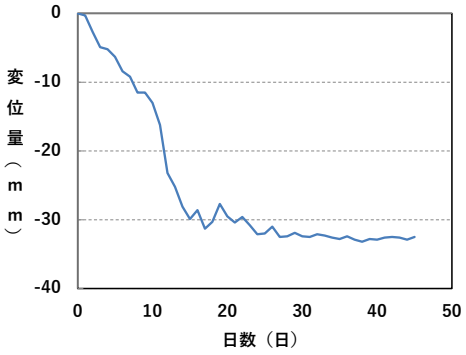
## 4．おわりに

今回，LS を用いた坑内の計測方法と自社開発のシステムを利用した施工活用事例を紹介した．

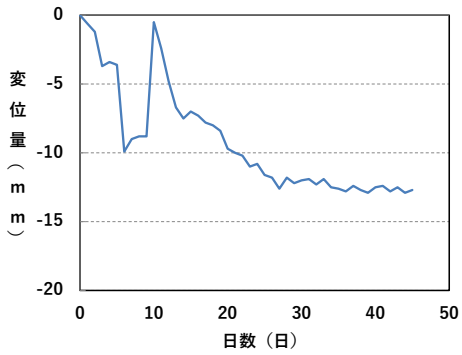
坑内の計測データには，その形状だけでなく，カメラ画像による色（RGB）や反射強度の情報も有していることから，これらを活用することでさらなるトンネル管理業務の効率化につながると考えられる．また，現状，各種結果を確認するには，計測したデータを現場事務所に持ち帰って処理を行う必要があるため，リアルタイムに確認作業が行えるような，簡易かつ迅速な計測方法の確立や処理の高速化の検討を行う予定である．




(a) 任意断面の選択




(b) 水平側線




(c) 斜め側線

**図-9**　任意断面における変位ベクトルの一例

参考文献

1) 山本悟，三井善孝：車載式トンネル 3D スキャニングシステムの開発，平成 30 年度土木学会全国大会 第 74 回年次学術講演会，2019.

2) 須佐見朱加，京免継彦，石井誠，辻本剛士：レーザースキャナを用いたトンネル出来形管理による生産性向上の効果，平成 30 年度土木学会全国大会 第 74 回年次学術講演会，2019.

# 次世代建設生産システムA$^4$CSELの開発

鹿島建設　技術研究所　　三浦　悟

## 1　はじめに

人手不足・熟練労働者不足への対応、建設生産性の向上、労働災害・事故の撲滅などの建設業界における重要な課題解決を目的として、建設機械の自動化による次世代建設生産システム A$^4$CSEL®（クワッドアクセル：Automated/Autonomous/Advaced/Accelerated Construction system for Safety 、Efficiency and Liability）の研究開発を進めている。本稿では、自律型自動建設機械を中核とした施工システムの実施状況を紹介する。また、本開発の最終目的として掲げている「現場の工場化」の実現に向けた課題や技術開発の方向性について考える。

## 2　A$^4$CSEL の開発コンセプト

A$^4$CSEL は、確実に進む現場作業者の不足や高齢化の状況下で、将来にわたり良質な社会資本を継続的に供給するため、現場作業の省人化と生産性向上を実現すると同時に、作業エリア内の人員を大幅に削減することによって安全性の向上を目指した建設生産システムである。図-1 に示すように、人が作業データを送ることにより、自動化された建設機械に定型的な作業や繰り返し作業を自動で行わせ、必要最小限の人員で多数の機械を同時に稼働させることを開発コンセプトとして、建設機械の自動化を核としたこれまでにない全く新しい建設生産システムを実現しようとするものである。汎用建設機械に自動化機能を付加すること、および熟練者の運転操作をデータ化し、それを基に自動運転させていることを特徴とし、単一作業に特化した自動化ではなく、製造業における産業用ロボットやCNC（Computerized Numerical Control）加工機のように多様な作業が可能な自動化機械を開発する。そして、それらに適切な制御信号を与えることによって思い通りに自在に作動する機械システムを構築し、それを活用することによって建設作業の自動化率を上げる。その結果、真に熟練の技が必要な作業だけを人が担当し、それ以外は自動機械が分担する施工システムが構築されることによって、「現場の工場化」の実現に繋がると考えている。これまでに振動ローラ、ブルドーザ、ダンプトラックの 3 種類の建設機械の自動化とそれらによって行う作業の自動化を進め、実ダム工事に順次適用している状況である。

図-1　A$^4$CSEL のコンセプト

A$^4$CSEL を構成する技術分野は、以下の 4 つにまとめられる。

① 汎用建設機械に計測/制御装置を搭載し、自動運転機能を有した機械に改造する技術

② 熟練オペレータの運転・操作データを定量化、基準化する技術

③ 基準化された運転データを基に作業条件、状況に適合させ、自律的に自動化建設機械を制御する計測・自動制御技術

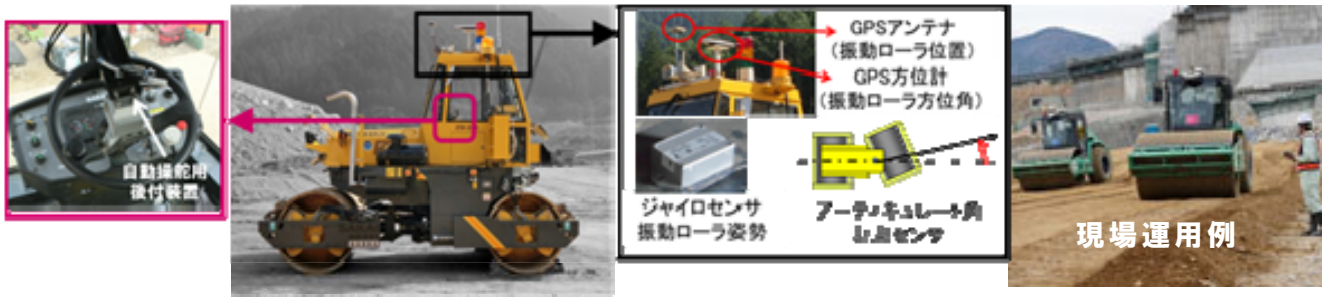



図-2 自動振動ローラの概要と運用状況例

④ 自動化機械を効率的、効果的に運用するための施工マネジメント技術

## 3 A⁴CSEL の技術概要

### 3．1 自動振動ローラの概要

汎用振動ローラに GPS、GPS 方位計、慣性装置をはじめとする計測機器、ハンドル駆動装置と前後進・エンジンスロットルをコントロールする電子回路に制御信号を送るインターフェース、および操舵、走行方向、走行速度を制御する制御用コンピュータ（制御 PC）を設置して、制御 PC の信号で作動する機能を有した振動ローラに改造した（図-2）。ステアリング操作についてはモータ駆動型の操舵装置を使用し、それ以外の操作は全て電子制御である。タブレットコンピュータから作業データを制御 PC に送れば、前後進、ステアリング操作、起振などの転圧作業に必要なすべての操作を自動で行うことができる。

熟練オペレータによる転圧作業時の操作データを基に制御法を構築して、これまでに、コンクリートダム（RCD）、ロックフィルダムで自動転圧作業に対する運用性を確認している。コンクリートダムの均一材料への適用後、ロックフィルダムにおいて、各種材料（コア材、フィルタ材およびロック材）に対して転圧性能の検証を行った。材料毎に運転特性が異なるため、材料毎に制御パラメータを変更することで、材料特性の影響を受けない運転操作を実現している。また、コア材転圧時には、埋設計器エリアなどによる形状変化にも柔軟に対応できる機能を追加している。これらの能力改善により、材料や作業手順の異なる転圧作業においても、複数台の振動ローラを同時に自動で作業させることが可能となっている。

### 3．2 自動ブルドーザの概要（小松製作所との共同開発）

自動化したブルドーザの外観を図-3 に示す。コマツ製 ICT ブルドーザをベースに、自動化システムとして振動ローラと同様の位置、姿勢計測装置・センサや制御用 PC を搭載している。計画および指示された走行・作業計画に沿って動作するように、車体位置や方位、姿勢角のデータを基に操舵量や速度指令値を演算し、自動化システムからブルドーザへ指令を与えることで車体動作の制御を行う。ブレード制御については自動化システムからの指令による“上げ／下げ”の他、ICT ブルドーザが備える設計情報に合わせてブレード高さを自動で調整する機能を利用している。ロックフィルダムでの導入試験では 19t ブルド

図-3 自動ブルドーザの概要

ーザに加えて 22t、41t の自動化ブルドーザを新たに開発し、それぞれフィルター材、コア材、ロック材の自動まき出し作業を行った。

自動ブルドーザによる材料のまき出し作業は、熟練オペレータのまき出し作業時の操作データ、および機体データを取得、分析し、得られた結果を基にブルドーザの制御法を作成し実施している。まき出し作業も振動ローラと同様、熟練オペレータは、材料によってまき出し運転・操作を変えている。それぞれの材料特性に合わせた運転方法と材料毎にまき出し仕様が異なるためである。すなわち、まき出し作業を自動化するためには、このような運転操作の違いを考慮した基準運転モデルを得ることが必要である。しかし、無数にある操作パターンを実作業で確認することは極めて効率が悪い。このため、ブルドーザの排土板が通過した後の材料の拡がり状態を材料毎に実験により求め、排土板の動きによる材料のまき出し形状を推定するコンピュータシミュレーションプログラムを開発し(図-4)、それを基に熟練オペレータの操作データから基準運転モデルを作成した。また、まき出し作業は材料を運搬するダンプトラックと連携し、例えば、材料の荷下ろし位置に合わせて運転しなければならない。これらロックフィルダムに適用するための運転・操作の自動化機能を備えることによって、連続して自動まき出しを行なうことが可能となる。まき出し結果の一例としてフィルター材 10m 幅まき出し時の出来形状況を図-5 に示す。

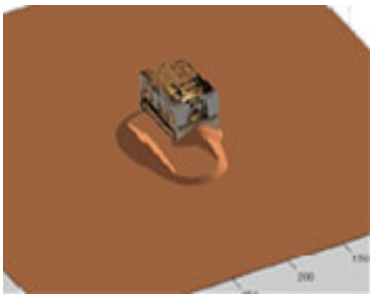


図-4 まき出しシミュレータ

図-5 自動まき出し作業結果例

## ３．３ 自動化ダンプトラックの概要（小松製作所との共同開発）

自動化したダンプトラック（55t 級）の外観を図-6 に示す。車体位置、車体方位角および姿勢角については、振動ローラやブルドーザと同種の装置・センサを用いて計測している。ダンプトラックへの制御指令値は、スロットル量、リターダ（ブレーキ）量、ステアリング速度やベッセル昇降速度であり、これらは制御 PC で計算され、各制御装置に送られる。

図-6 自動ダンプトラック

図-7 にダム工事でのダンプトラックの作業を示す。図に示すように、ダンプトラックは、①材料ヤードで材料を積み込み、②ダム堤体まで運搬し、③堤体上のまき出し領域で荷下ろしする。

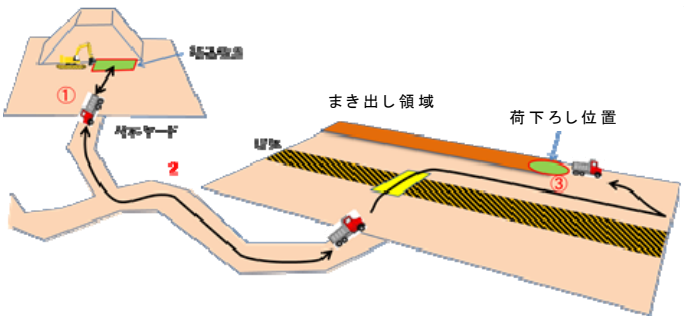



図-7 想定されるダンプトラック作業

これらの作業手順を自動化するために必要となる機能は次の 2 つである。

a.走行可能領域、積込み・荷下ろし位置の情

報から走行経路を自動で生成する機能、および他の機械など障害物を検知する機能

b.自動生成された走行経路に対して、走行路の勾配や不陸があっても精度よく追従できる走行制御機能

これに対しては、ダンプトラックの走行、停止、曲がる、荷下ろしの各基本動作の自動化を実現した上で、ダム工事での材料荷下ろし作業をターゲットに上記機能を搭載した。

自動ダンプトラックによる作業の現場適用性を実証するため、ロックフィルダムの堤体コア材盛立部において、自動ダンプトラックと自動ブルドーザを連動させ、運搬／荷下ろし／まき出し／整形という一連の作業の自動化試験を行った。 荷下ろし位置の精度は、次工程の自動ブルドーザ作業、出来形に影響しない範囲（概ね 30cm～50cm 以内という高精度）で実施でき、連携した施工が可能であることが確認できた（図-8）。

図-8 自動ダンプとブルドーザ連携作業

## 4 「現場の工場化」に向けて

開発コンセプトの項で述べたように、我々が目指す自動化を核とした建設生産システムを「現場の工場化」の実現に繋げるためには、①建設機械を自動化する技術、②重機作業の生産性を左右する上手な運転を実現する運転・操作のデータ化技術③上手な運転を自動化機械に移植するための計測・自動制御技術④それらの機械を効果的に効率良く稼働させる技術、であると考える。このうち①～③は自動化建設機械/システムの高度化に関わる項目であり、④はそれをどのように活用していくかという技術に関する項目である。

前者に関しては、AI や IoT など先進技術を導入し、継続的に施工技術の研究開発を進めていくことが今後の必須課題であると考えている。他方、自動化機械/システムだけでは現場の工場化には至らない。④の技術として下記に示す活用方法が重要と考えている。

① 自動化機械/システムを効率的、効果的に稼働させる施工方法と、その確認ができる管理方法の開発

② 自動化機械/システムを現場適用した場合の生産性、安全性、品質の評価方法の確立

③ 自動化できない部分の効率的な補完方法

④ 現場の変化に対応して機械の動きを短時間に変更できるシステムの開発とシステムオペレータの育成

総括すると、優れた生産技術とその技術を活用できる仕事のやり方を変えられるかどうかが、現場の工場化の重要な鍵となる。

## 5 おわりに

$A^4CSEL$ の現状紹介とに最終目標である「現場の工場化」に対しての課題と方向性について述べた。当然ながら、$A^4CSEL$ で使用される自動化機械はデータを与えなければ稼働させることはできない。これまでオペレータに頼めば済んでいた仕事を一つ一つデータに変換しなければならないことを意味する。製造工場で普通にやられているこれらのことができる仕組み、技術の実現のため、今後も努力していく所存である。

# 次世代油圧ショベルによる作業自動化

大成建設株式会社　技術センター　生産技術開発部　○青木　浩章
大成建設株式会社　技術センター　生産技術開発部　片山　三郎
大成建設株式会社　技術センター　生産技術開発部　遠藤　亮雄
キャタピラー　販売促進部　山本　茂太

## 1　はじめに

建設業界における就労者数は減少している上、全産業と比較して若年層の割合が低下し、高年齢層の割合が増加している（図-1）。今後は、新規入職者が減少し、高齢化した技能労働者が加齢等により一度に多く離職することにより、労働力不足が深刻な問題となることが懸念されている。本論で述べる建機の自動化技術は、近未来の労働人口減に備えて建設現場における利用シーンがイメージでき、ビジネス的にも発展が期待できるため、早々に確立が望まれる技術の一つであると考えている。

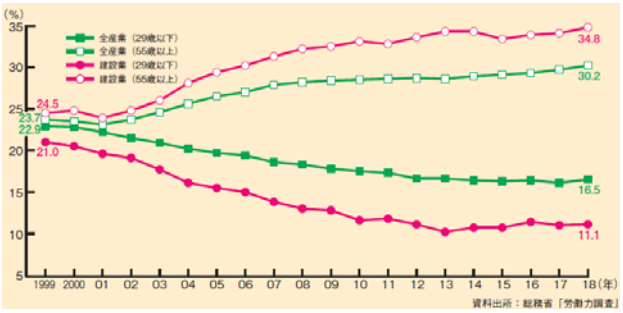



図-1　建設業就業者の高齢化の進行

建設以外の他産業、例えば自動車産業では生産ラインの一部が自動化されていることは有名で、資材移動や部品溶接等が人間からロボット等の機械に置換されている。ただし、生産ラインの全てではなく、人間からロボット等機械に置換して生産性が向上する等のメリットが有る部分が何かを長年研究・特定して置換しているものと考える。建設生産システムにおいても、人からロボット等に置換するメリットのある部分が何か。または、現在の技術で置換できる作業が何か。という両側から考えて、「どの作業現場でも行われがちな単純で繰返行われる作業」を自動化するとメリットがあるのではないかと着目し、油圧ショベルの土砂ピットの残土積込作業を自動化する事とした（写真-1）。

写真-1　土砂ピット残土積込作業

## 2　次世代油圧ショベル

油圧ショベルは多くの建設現場で土砂の積込み等で活用され、アタッチメントを交換すれば破砕・切断等にも活用できる多用途な建設機械である。近年では、GNSS等のICT機器等を搭載した情報化施工対応機械が増えている。建設機械を自動化するには、周囲の状況をセンシングし、そのセンシング結果に応じてコンピューターが演算し機械を動作・制御することである。センシングのためのセンサーは後付できるが、少なくとも、建設機械側

にコンピュータで演算した電文に基づいて、動作・制御する仕組み「電子制御対応」である必要があり、現在最先端の情報化施工対応機以上の機構が必要である。従来は、対応できる機械が無かったため、ハンドルやレバーにステッピングモーターやロボット機構を外付けして、それを電子制御していた時代があった。外付け機構を開発する費用や時間を要するため自動化システムとしてはこの部分がボトルネックの1つであった（写真-2）。

写真-2　外付機構による自動化の例
（左：レバー　右：ハンドル）

今回使用したキャタピラー製CAT320は2018年から商用化された機種で、燃費向上やメンテナンスコスト削減といった従来型の進化に加えて、操作支援や積載重量計測の進化を機体全体が電子制御化（以下、フル電制）された上で実装した次世代型の油圧ショベルである。従って、用途に応じた最小限のシステムを追加するだけで前述のような自動化を容易に開発する基盤が整っている機械であり、コンピュータと建設機械をコネクターで接続するだけで建設機械の自動化を可能とした機種である。

## 3　システムの概要

前述した通り、本開発ではフル電制対応機械を使用しているため新たに追加したセンサーは外界を認識するセンサ（土砂認識、ダンプ認識）のみである（写真-3）。

写真-3　追加したセンサー

土砂認識には車載ステレオカメラを用いて土砂の形状を認識し、油圧ショベルとダンプの位置関係はLiDARセンサを用いて距離を検出しダンプの有無を判断した。CAT320にこれらのセンサーを付加して土砂ピット残土積込み一連作業の自動化を以下のフローで実現した。

### 3．1　自動化アクションⅠ（ホームポジション及びセンシング）

自動運転開始後は、初期センシングを実施するため油圧ショベルがセンシングの邪魔にならないような姿勢（＝ホームポジション）を取る事としている。ダンプトラックは決められた積込み位置に向かって後退進入し、最適位置に達すると油圧ショベル側から警笛が鳴る仕組みになっている。

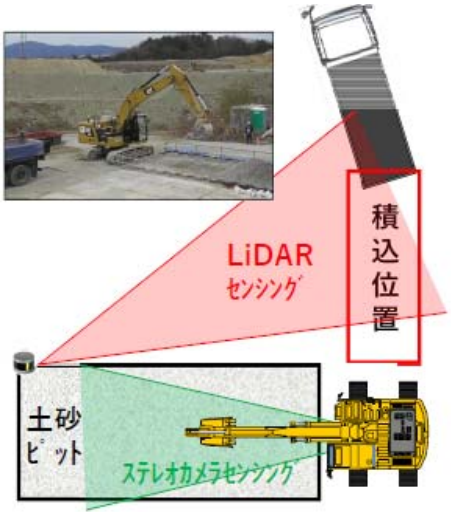



図-2　自動化アクションⅠ
（ホームポジション及びセンシング）

３。２　自動化アクションⅡ

（掘削及び旋回・積込作業）

アクションⅠの結果を踏まえ、土砂ピット内の「土砂のある位置」に向けて掘削動作を開始する。バケットの刃先は土砂に向けて適当な深さで貫入して、バケット適量となるようにバケット・スティック・アームの３連動が開始される。連動する際はその時々で土砂の硬軟・粘性等の違いにより掘削する際の作動圧等をモニタリングして、「一度の動作のみバケット適量に土砂を円滑に掘削する」という掘削動作制御をその都度実現している。掘削後は旋回してダンプが居ない場合は土砂を抱えたまま待機し、ダンプが居る場合は掘削時と同様にバケット・スティック・アームの３連動によりベッセルの奥手から積込みを開始する。

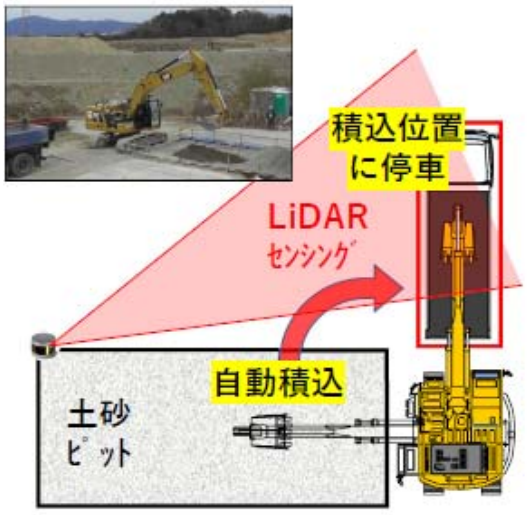



図-3　自動化アクションⅡ

（掘削及び旋回・積込作業）

３。３　自動化アクションⅢ

（2度目以降掘削及び旋回・積込作業）

CAT320 が標準的に搭載しているペイロード機能（バケットに入った土砂重量を算出できる機能）を本件でも活用している。すなわち、2 度目以降の作業は設定した重量に達する迄実施され、最後の積込みではダンプに積まれた山を平らに均し、終了の警笛を鳴らすといった、搭乗運転でも一般的に実施している事を自動化のアクションに取り入れている。

図-4　自動化アクションⅢ

（2 度目以降掘削及び旋回・積込作業）

３。４　自動化アクションⅣ

（ダンプ不在時の補助作業）

ダンプ不在時は、次の作業を円滑に行うための補助作業として搭乗運転でも一般的に実施している「山崩し作業」と「掃出し作業」も自動化のアクションに取り入れている。

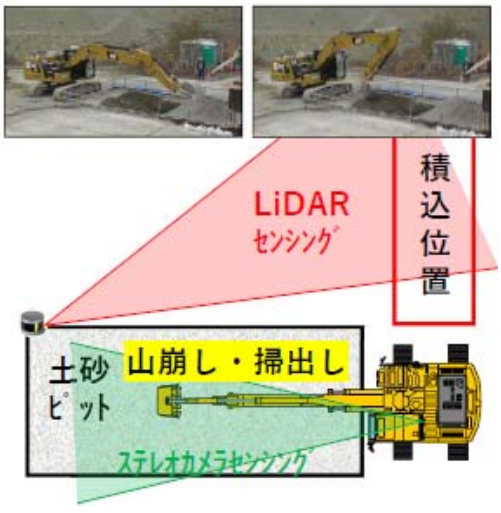



図-5　自動化アクションⅣ

（ダンプ不在時の補助作業）

左：山崩し、右：掃出し

## 4　自動化システムの能力実証

今回開発したシステムの能力を評価するため4 つの評価軸を用いて、ベテラン運転手による搭乗運転(1時間連続)と比較した。4 つの評価軸は以下の通りである。

① 積込量（t/h）：作業量
② 積込誤差（%）：目標積込量との比率
③ 荷こぼれ率（%）：ベッセル外に落としてしまった土砂量
④ エネルギー効率（t/ﾘｯﾄﾙ）：燃料1 ﾘｯﾄﾙ当たりの積込み量

試験状況を図-6、評価結果を図-7に示す。

図-6　自動化システムの能力実証試験状況

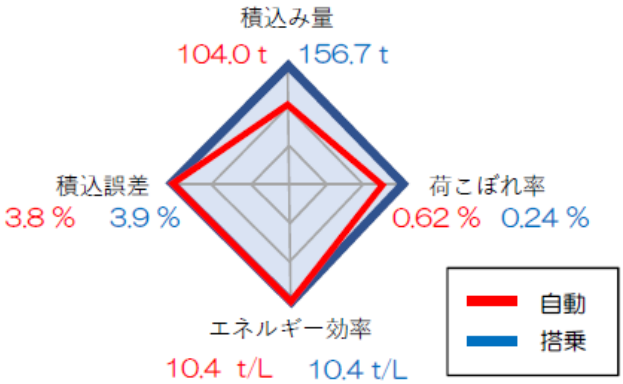



図-7　評価結果

今のところは搭乗運転に分があるという結果で、更なる洗練化は必要であると感じる。しかし、現場が最も気になる積込み量（作業効率）においては、搭乗者の66%という結果は一見すると低いようにも感じられるが、自動化に近しい工法で「建機の遠隔操作による無人化施工」では作業効率は50～60%程度といわれるので、自動化の第一歩としては非常に満足して良い結果と考えている。

## 5　まとめ

油圧ショベルは多用途で非常にニーズは多いが、自動化には作業対象となる土砂認識のためのセンシング技術、多関節で複雑な機構を制御する機械制御技術が求められ、自動化は非常に難度が高かい建設機械の一つであった。しかしながら、近年の技術革新の速度は目まぐるしく、数年前までは開発に時間を要した油圧ショベルの自動化を今回、約3 年で実用レベルの開発することができた。今後は現場での試行を通じてより実践的なシステムにしていく予定である。

なお、今回使用したCAT320は自動制御プログラムを自動掘削積込み用途で開発したが、著者らが過去に別途開発した自動割岩システムの制御プログラムに入れる替えることで簡単に別用途の自動化も確認した（写真-3）。このようにフル電制機械を用いればソフトウェアの入替のみで多用途の自動化を実現することも可能である。「次世代油圧ショベル」を使った作業自動化技術に、建設生産性向上の大きな可能性を感じている。

写真-3　CAT320による自動割岩システム

# 地盤改良の自動打設システム「GeoPilot®-AutoPile」

株式会社不動テトラ　北陸支店研究室　　田口　雄一
北陸支店研究室　　服部　貴洸

## 1　はじめに

建設業界では少子高齢化に伴う若手技術者の減少、熟練技術者の定年退職により近い将来の技術者不足が懸念されている。その対応として生産性向上が必要とされており、国土交通省では建設現場における生産性向上を目指して「i-construction」を推進している。その重要な施策の一つとして ICT の活用が挙げられる。土工や河川の浚渫工等では既に ICT が活用されており、生産性向上として成果が挙がっている。

地盤改良においても、ICT の活用による生産性向上が必要とされている。地盤改良の施工では施工機械のオペレーターが複雑な操作を行っており、操作技術を習得するためには長い期間が必要となる。そのため、生産性向上に加え、技術の伝承も課題とされている。

それらの課題への ICT を活用した対応として、これまで手動で行ってきた操作を自動化するシステム「GeoPilot®-AutoPile」を開発した。本稿では、このシステムの概要と特徴について紹介する。

## 2　システムの概要

GeoPilot®-AutoPile のシステム概要図を図-1 に示す。現状、適用可能となる工法は、機械撹拌式の深層混合処理工法の一種である CI-CMC 工法である。従来、深層混合処理工法の打設操作はオペレーターが管理計器を見ながら手動で行っていたが、本システムはコントロールユニットが施工機械を制御することで自動で打設を行う。

また、スラリープラントと施工機械本体は無線で交信でき、オペレーターが操縦席にいてもスラリープラントの状況を監視することが可能となる。

図-1　システムの概要

## 3　システムの特徴

### 3．1　操作の簡素化

従来行われてきた手動運転と本システムの自動運転の手順を表-1 に示す。手動運転では、撹拌軸の貫入・引抜速度や吐出するスラリー流量が適切となるように、オペレーターが管理計器に表示された値を確認しながらレバー操作やボタン操作を行っていた。これに対して、本システムはそれらの操作をコントロールユニットが制御することで自動で行い、オペレーターの操作は撹拌軸の貫入前後および引抜前後にモニターに表示されるアイコンをタッチするのみである。

そのため、オペレーターの作業負担が軽減するとともに、手戻り作業がなくなることで施工サイクルが効率化し、生産性の向上が見込める。

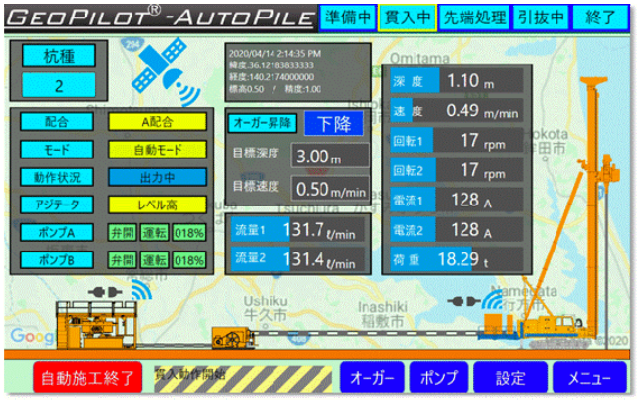



図-2　オペレーションモニター画面

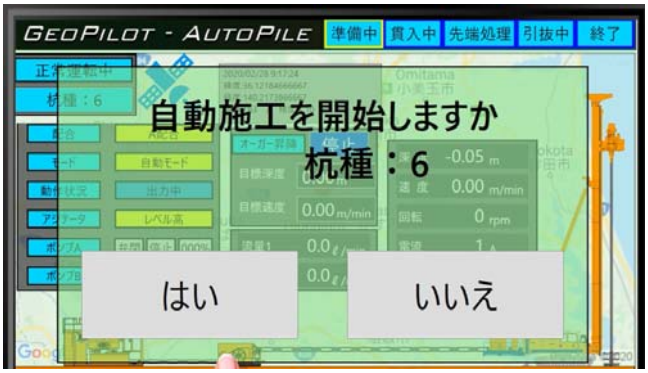



図-3　モニタータッチ画面

表-1　操作手順の比較

| 項目 | 内容 | 操作 | |
|---|---|---|---|
| | | 手動運転 | GeoPilot®-AutoPile |
| 貫入開始 | 開始信号の送信 | 開始アイコンタッチ | 開始アイコンタッチ |
| | オーガーモータの回転 | 制御ボタンON | 自動 |
| | 撹拌軸の貫入 | 速度を確認しながらレバー操作 | |
| セメントスラリー吐出 | 流量調整 | 規定量になるようにダイヤル調整 | |
| 貫入終了 | 撹拌軸の貫入停止 | レバー中立操作 | |
| | グラウトポンプの停止 | 制御ボタンOFF | |
| | 終了信号の送信 | 終了アイコンタッチ | 終了アイコンタッチ |
| 先端処理 | 撹拌軸の引上げ | 速度を確認しながらレバー操作 | 自動 |
| | 撹拌軸の再貫入 | 速度を確認しながらレバー操作 | |
| 引抜き開始 | 開始信号の送信 | 開始アイコンタッチ | 開始アイコンタッチ |
| | オーガーモータの停止 | 制御ボタンOFF | 自動 |
| | 撹拌軸の引上げ | 速度を確認しながらレバー操作 | |
| 引抜き終了 | 撹拌軸の引上げ停止 | レバー中立操作 | |
| | オーガーモータの停止 | 制御ボタンOFF | |
| 施工終了 | 終了信号の送信 | 終了アイコンタッチ | 終了アイコンタッチ |

３．２　習熟期間の短縮

地盤改良の施工における施工機械の操作は複雑であり、施工技術を習得するために約３年の期間が必要とされていた。しかし、本システムは打設中の操作がボタン操作のみに簡素化されるため、習熟期間を従来の約 1/3 に短縮することができる。

そのため、経験豊富な熟年オペレーターだけでなく、若手オペレーターや海外の現地オペレーターの活躍が期待でき、技術者不足の解消が見込める。

図-4　操作方法の指導

３．３　安定した品質の提供

深層混合処理工法では改良対象土層が深度方向に二種類以上に分かれている場合、土層毎に必要な固化材添加量を設定するため、スラリー吐出量の切替えが必要となる。手動施工では、スラリー吐出量の切替えをオペレーターの操作で行っていた。また、撹拌軸の昇降速度の管理もオペレーターの操作で行っていた。そのため、熟練オペレーターと若手オペレーターでは、改良体の品質に差異が生じることがある。

本システムでは、スラリー吐出量や撹拌軸の昇降を自動制御するため、オペレーターによる品質の差異が少なくなり、安定した品質の提供が可能となる。

熟練オペレーターが手動運転で造成した改良体の品質と本システムで造成した改良体の品質の比較について、図-5 に一軸圧縮強さの結果、図-6 にボーリングコア写真を示す。本システムで造成した場合、従来の熟練オペレーターと同等の品質を確保できることが確認できる。

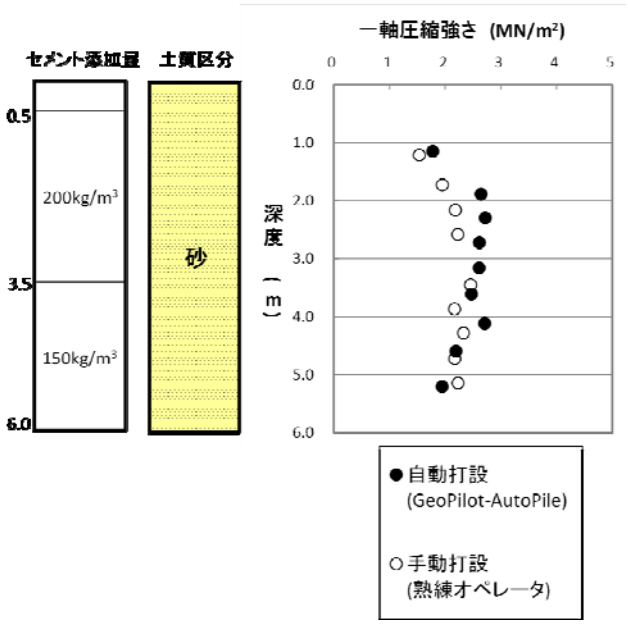



図-5　改良体の一軸圧縮強さ

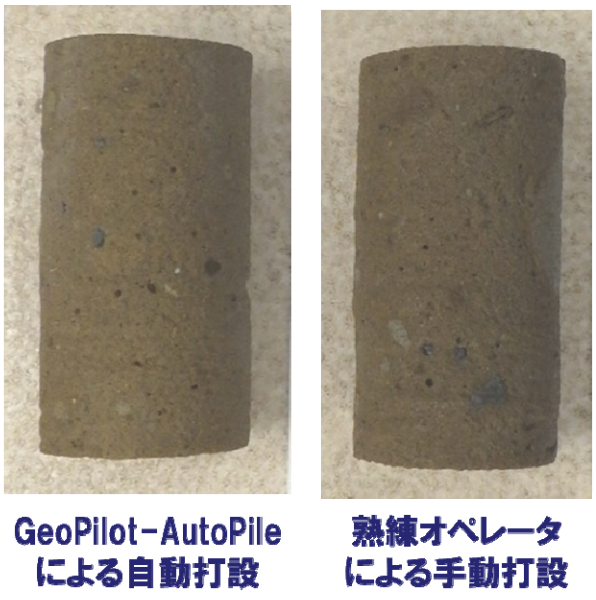



図-6　ボーリングコア写真

### ３．４　安全性の向上

従来の手動運転の場合、各機材の異常の有無はオペレーターの目視や聴音によって確認していた。例えば、打設中のオーガーモーターの昇降にはウインチワイヤーを使用するが、手動運転の場合はオペレーターがワイヤーの張り具合等を目視で確認しながら作業を行っていた。これに対して、本システムは施工機械に各種センサーを取り付け、オーガーモーターの昇降速度やロードセルによる荷重等のデジタル情報により、施工機の状態を監視することができる。センサーで得られた値が閾値を超えるとアラートが発せられる。

そのため、施工経験の少ないオペレーターでも注意喚起を図ることができ、適切な制御を行うことができるため、施工時の安全性の向上にも寄与する。

## ４　おわりに

本稿では GeoPilot®-AutoPile について紹介した。本システムにより、地盤改良工事における生産性向上が見込める。また、地盤改良工事における既存の ICT 技術として、リアルタイム施工管理システムや３次元モデル化システムを組み合わせた Visios-3D®、拡張現実技術を利用した多目的施工支援装置 Visios-AR がある。これらのシステムは本システムと併用することが可能であり、施工の見える化や省力化により、さらなる生産性の向上が期待できる。

現状、本システムは深層混合処理工法にのみ対応が可能である。地盤改良工法には他にも多様な技術があり、他工法への適用拡大を図り、更なる生産性向上へと寄与していきたい所存である。

図-7　オペレーターへの注意喚起

# トンネル地山ＡＩ評価システムの開発

前田建設工業㈱　土木技術部　小熊　登

## １．はじめに

トンネル施工は複雑な地山条件下でなされることが多く、切羽の的確な評価と前方地山の予測はこれまで難しいとされてきた。一方、インフラとしての品質確保や省人化、さらに施工中の安全性向上は必須となり、その打開策として AI・Iot の推進が図られつつある。

例えば、最近のセンシング技術の向上、掘削データや切羽写真等の施工時に得られるビッグデータを収集しやすい環境のもと、トンネル施工に関わる諸課題を AI を利活用することで解決できる可能性がある。

今回、トンネル切羽画像を AI 判定し現行の切羽観察簿を作成支援するツールを開発し、新技術（ハイパースペクトルカメラやジャンボ削孔データ、自由断面掘削機のマシンデータ等）を導入した各トンネル現場より施工データを常時収集するシステムと、地山の安定性評価を行えるように各種切羽前方探査データおよび計測データを含むトータルデータで地山評価を行うシステムを構築した。

本紙では、トンネル現場で運用中の切羽観察支援ツールについて報告する。切羽の状態，素掘り面の状態，風化変質，割目間隔，割目状態，割目の形態，湧水の各項目について地山を評価でき、事前設計と対比修正しながら施工を進めることが可能となる。システムをクラウド化することで、インターネット環境とタブレット等の端末さえあればどこでも利用でき、地質状況を既往の豊富なデータに基づき素早く評価することで、適切な支保・補助工法の選定や安全性が図ることができる。

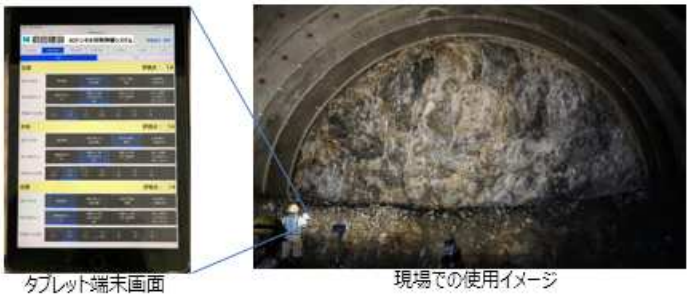



**写真-1　現場での使用イメージ**

## ２．システムツールの概要

AI 切羽観察支援ツールは、AI の画像認識技術を用いて、切羽写真等より切羽評価点を算出するとともに地山弾性波速度等の岩盤の工学的特性を評価できるものである。トンネル坑内で実施する弾性波探査手法 TSP 等による地山弾性波速度と、該当する切羽写真を教師データとして、両者の関係を CNN 法（畳み込みニューラルネットワーク）と呼ばれる AI の機械学習手法を適用し学習させている。タブレット上に新たな切羽写真をアップロードすると、AI が学習済み切羽画像と当該切羽の特徴の類似点を認識し、項目別に切羽評価点と弾性波速度を評価することができる。システムの開発には、当社施工トンネル切羽写真１万データ超を用いた。

解析手法としてホワイトボックス（予測結果を導出した理由が人が説明可能な手法。特に高技能者が着目している点を調整の上、分析に取込むなどチューニングの余地が多い）とブラックボックス（画像枚数が多い場合に、高い予測精度を持つ分析が可能な反面、なぜ画像の特定部分に着目し分析したのか説明が

困難な手法）の２手法を用いている。これらホワイトボックスとブラックボックスの両手法の関係はトレードオフの関係になる傾向があるため、業務要件を踏まえてどちらを優先させるかが手法選択の際の重要になる。今回は AI が学習に用いた画像の枚数、評価対象とする項目により両手法の使分けを実施した。

ブラックボックス手法のモデルとしては、画像認識に適した CNN を使用した。学習層の深さを変更した場合、事前学習済みモデルを使用した場合で比較検証し、精度の良いものを選択している。

結果出力は入力した切羽画像を元に、評価点を予測し、現場と親和性のある切羽観察簿形式で結果を表示できるようにした。分析は複数手法を選択でき、出力画面は切羽評価点の分布も併せて表示できるようにし現場職員の判断支援を行えることを目指した。

図-1　AI 切羽観察支援ツールの端末画面例

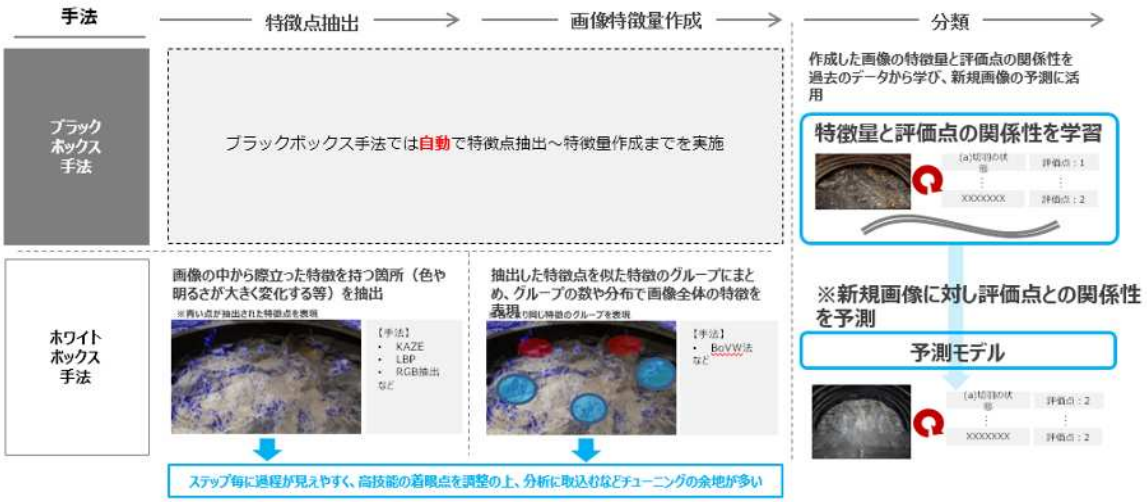



図-2　AI 切羽観察支援ツールの分類フロー

図-3　切羽 AI 分析モデル仕様

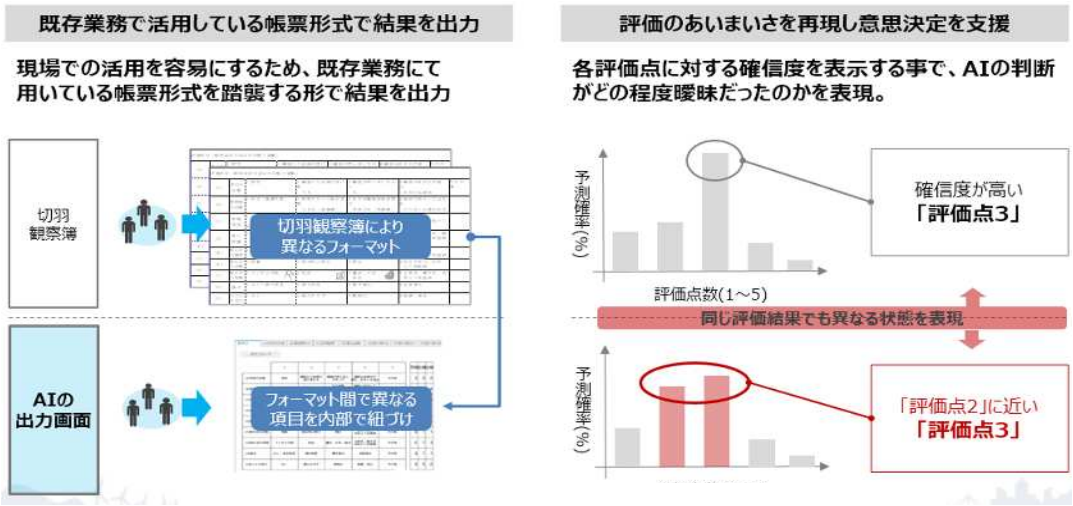



図-4　AI 切羽観察支援ツール出力イメージ

３．システムツールの検証

AI 切羽観察支援ツールの精度を検証するため、学習用の画像とは別に検証用データ（画像）を用意し、学習用データを用いてモデルを構築し、検証データに対して予測を実施し予測結果が正解か否かを判定することで行った。検証は、AI システムの解析プロセスが判るようなホワイトボックス手法も用いて検証し、高技能者が着目する点やプロセスが判るようにした。

ここに示した事例では、(A)切羽の状態，（F）割れ目の状態，（H）湧水が不正解となっているが、着目点をみると地質不連続面や色調の異なるように見える箇所を着目しているものの、吹付けが施工されている側壁にも強く着目し、誤答の一因になっていると思われる。一方、予測結果と実際の切羽評価正解率は高くないが、２番目に想定される評価結果も含めると予測できている結果とも評価でき、この画像を用いた技術だけでも経験の浅

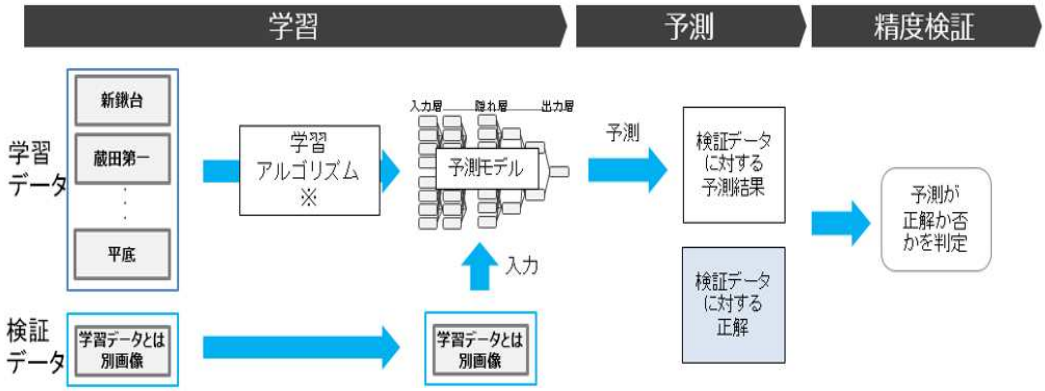



図-5　検証方法フロー

表-1　AI 支援ツール結果例

凡例：正解　不正解　予測対象外

予測結果

| | 左端 | 天端 | 右端 |
|---|---|---|---|
| (A)切羽の状態 | 1 | 1 | 1 |
| (B)素掘面の状態 | 2 | 2 | 2 |
| (C)圧縮強度 | | | |
| (D)風化変質 | 2 | 2 | 2 |
| (E)割れ目の頻度 | 3 | 3 | 3 |
| (F)割れ目の状態 | 4 | 2 | 4 |
| (G)割れ目の形態 | 3 | 3 | 3 |
| (H)湧水 | 1 | 1 | 1 |
| (I)水による劣化 | 1 | 1 | 1 |

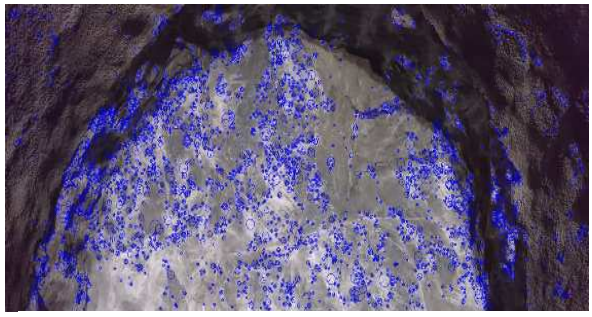


図-6　検証切羽写真と着目点

表-2　AI 支援ツールシステム予測率例

左端

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| (A)切羽の状態 | 57.8% | 10.7% | 10.4% | 10.6% | 10.5% |
| (B)素掘面の状態 | 24.4% | 67.6% | 3.3% | 2.7% | 2.0% |
| (C)圧縮強度 | | | | | |
| (D)風化変質 | 12.0% | 57.6% | 26.3% | 2.6% | 1.5% |
| (E)割れ目の頻度 | 4.4% | 36.1% | 46.3% | 11.8% | 1.4% |
| (F)割れ目の状態 | 16.0% | 25.6% | 18.6% | 37.8% | 2.0% |
| (G)割れ目の形態 | 17.7% | 16.7% | 60.7% | 3.1% | 1.8% |
| (H)湧水 | 84.5% | 11.6% | 1.8% | 1.1% | 1.0% |
| (I)水による劣化 | 85.5% | 9.8% | 1.9% | 1.4% | 1.4% |

天端

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| (A)切羽の状態 | 56.9% | 11.0% | 10.6% | 10.8% | 10.7% |
| (B)素掘面の状態 | 31.3% | 61.1% | 3.1% | 2.6% | 1.9% |
| (C)圧縮強度 | | | | | |
| (D)風化変質 | 23.2% | 52.3% | 19.9% | 2.9% | 1.7% |
| (E)割れ目の頻度 | 4.9% | 27.8% | 50.1% | 15.4% | 1.8% |
| (F)割れ目の状態 | 25.9% | 46.1% | 12.2% | 14.0% | 1.7% |
| (G)割れ目の形態 | 22.1% | 25.9% | 45.6% | 3.9% | 2.4% |
| (H)湧水 | 82.4% | 13.0% | 2.1% | 1.3% | 1.2% |
| (I)水による劣化 | 90.8% | 6.0% | 1.2% | 1.0% | 1.0% |

右端

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| (A)切羽の状態 | 56.6% | 11.0% | 10.7% | 10.9% | 10.8% |
| (B)素掘面の状態 | 40.4% | 52.5% | 2.9% | 2.4% | 1.8% |
| (C)圧縮強度 | | | | | |
| (D)風化変質 | 10.4% | 66.0% | 20.0% | 2.2% | 1.4% |
| (E)割れ目の頻度 | 4.5% | 40.4% | 42.6% | 11.0% | 1.5% |
| (F)割れ目の状態 | 16.7% | 26.3% | 18.6% | 36.3% | 2.1% |
| (G)割れ目の形態 | 20.8% | 31.3% | 41.1% | 4.1% | 2.7% |
| (H)湧水 | 84.2% | 11.8% | 1.9% | 1.1% | 1.1% |
| (I)水による劣化 | 83.0% | 11.2% | 2.4% | 1.8% | 1.7% |

い現場技術者支援ツールとして機能するものと判断できる。

## ４．おわりに

本報では、AI 切羽観察支援ツールについて紹介したが、現在 AI を用いたトンネル地山評価システムを試行中である。近い将来トンネル全自動化を目指す中で、地山を評価する「目」の高度化は必用不可欠であり、経験豊富な専門技術者の代わりになるばかりでなく、より高度化したレベルの評価ができる可能性が高い。施工途中に得られるビッグデータから地山評価に有効なデータを蓄積・抽出するとともに評価判定を高度化していくためには今後ますます AI を活用していく必要があると思われる。

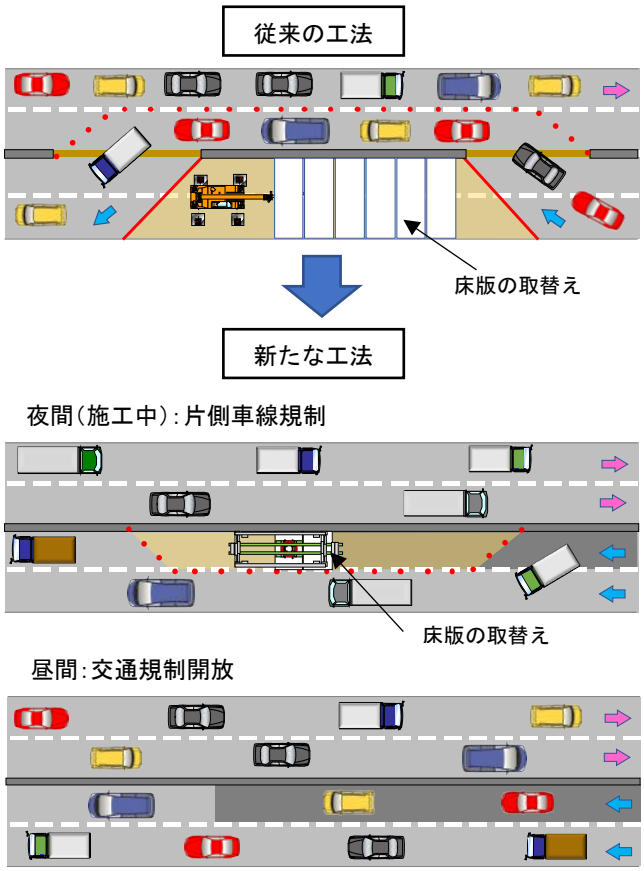
# 渋滞を抑制する新たな床版取替工法「ＤＡＹＦＲＥＥ」

株式会社大林組　土木本部生産技術本部　橋梁技術部 副部長　岩城　孝之

## １　はじめに

近年、全国的に増えている高速道路の橋梁リニューアル工事では、一旦工事を始めると橋桁上の床版の撤去、架設が完了するまで、上下線のいずれかを通行止めのうえ対面通行にするといった規制を行う（図－１）。現況の車線数を確保するために仮橋等によるう回路を設置する対策もあるが、都市部などでは土地の確保が困難なことから交通規制が避けられず、施工においては、規制期間をできる限り短くすることが求められている。

そこで、従来工法のように一定期間通行止めして行う床版取替工事の施工ステップを分割し、交通量が少ない夜間の車線規制のみで工事が可能な工法ＤＡＹＦＲＥＥを開発した（図－１）。ＤＡＹＦＲＥＥは、トレーラーで運搬でき、クレーン等の揚重機を使用することなく自動組み立て可能な半断面（2 車線道路の 1 車線）用の移動式床版架設機「ハイウェイストライダー™」や、「スリムクリート」で制作したプレキャスト板を床版同士の接合部に設置する「スリムＮＥＯプレート™」を活用することで、限られた時間内で既設床版の撤去から新たな床版の架設、路面復旧を行う。交通量の多い昼間は規制を解除することができるため、1 日数万台という交通量がある都市部におけるリニューアル工事においても、渋滞の発生を抑制する。ここでは、夜間半断面施工を実現するために開発した主な３つの技術概要について報告する。




図－1　従来工法と DAYFREE の交通規制形態

## ２　ＤＡＹＦＲＥＥの開発

### ２．１　開発の経緯

従来の床版取替工事は、床版を取り替える側の車線を長期間車線規制して、反対側の車線を対面で通行させることで施工を進めている（写真－1，図－1）。

そのため、特に東名高速道路・中央自動車道等の都心部を通過する高速道路や首都高、阪神高速など道路交通量が慢性的に多い区間では、工事に伴い渋滞が予想される時間帯を避けた利用や迂回誘導など、利用者に多大な負担がかかる影響が大きな課題となっており、渋滞を緩和しながら、床版を取替える新工法

の開発が急務である。

写真-1　床版取替工事(従来工法)

## ２．２　ＤＡＹＦＲＥＥ技術概要

「ＤＡＹＦＲＥＥ」は高速道路の床版取替工事において、交通規制による渋滞を抑制するために、夜間の車線規制のみで工事ができる新たな床版取替工法である。

従来の床版取替工事においては、交通規制をしたうえで、①既設床版の撤去→②鋼桁の研掃（ケレン）作業→③新しい床版の架設→④床版接合部のコンクリート打設→⑤防水・舗装工の５ステップを１サイクルとして昼夜間連続で施工するため、１サイクルが完了するまでの数日間連続して交通規制をする必要がある。

一方、ＤＡＹＦＲＥＥは、交通量の少ない夜間に１車線を規制したうえで、既設床版を撤去し、仮設床版を設置して一旦交通開放する。翌日の夜間以降、仮に設置した仮設床版の撤去、鋼桁上面の研掃作業・スタッドジベルの打設や、新しいプレキャスト PC 床版の架設を順次実施する。これらの作業工程を 1 サイクルとして繰り返し、床版取替工事を完成させることで、1 サイクルの途中でも、新設床版を設置するまでの間、昼間は仮設床版を設置し交通開放しているため、車両は問題なく通行可能となる(図-2)。

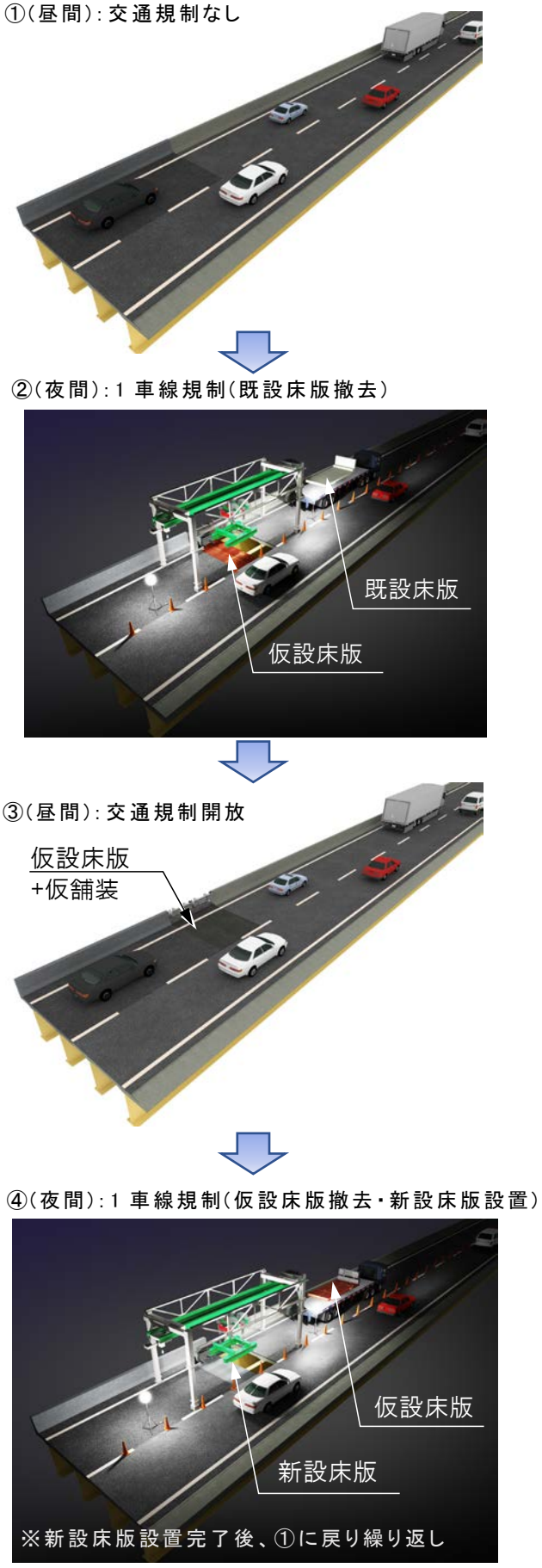



図-2 DAYFREE での施工ステップ

## ３　DAYFREE を実現可能とする技術

DAYFREE 工法を実現するには、夜間のみの交通規制で新しい床版に取替えて、日中は交通開放する必要がある。そのための課題は、以下の通り。

①夜間規制する車線内に収まり、かつ日中は交通開放するために、夜間規制中に速やかに設置・撤去可能な揚重機が必要

②接合部のコンクリートの強度発現を待たずに開放する必要があるため、接合部の急速施工方法が必要

上記の課題を解決するために、①移動式の床版架設機である「ハイウェイストライダー」を開発した。また接合部については、②プレキャスト床版間の接合部に工場製作したＵＦＣ板を架け渡すように設置することで、早期の交通開放を可能にする「スリムＮＥＯプレート」を開発した。

### ３．１　ハイウェイストライダー概要

図-3 に示すハイウェイストライダー（移動式床版架設機）は、鉛直・水平方向に伸縮可能な支柱を有し、コンパクトに折畳み可能なため施工地点までトレーラーで運搬が可能である。また、施工地点で支柱を伸縮することで、自ら自立し施工姿勢をとることができ、施工完了後も同様にトレーラーで搬出が可能となる。

架設機の組立・解体に一切の揚重機が不要なため、施工範囲での速やかな設置・撤去が可能である(図-4)。また、常設作業帯が設置できない都市部での床版取替え工事など、日々の設置、撤去にも適した架設機である。

その特長は以下の通り。

①架設機は揚重機を使用せずに規制帯内で自立展開・格納可能

②狭隘な規制範囲を超えることなく床版を搬入・搬出可能

③大型クレーンに比べて重量や反力が小さく、施工中の既設床版や既設桁への負担を軽減

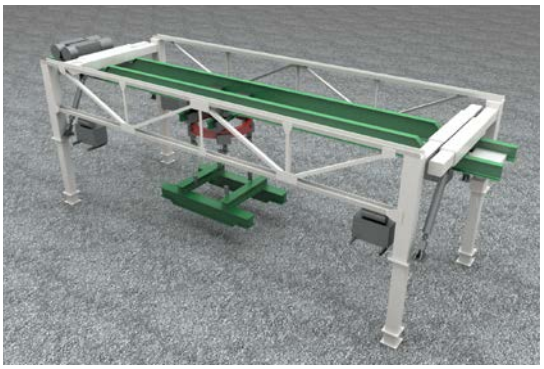


図-3 ハイウェイストライダー概要図

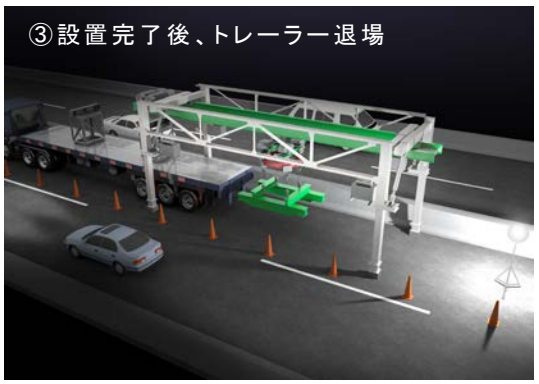



図-4 ﾊｲｳｪｲｽﾄﾗｲﾀﾞｰ設置手順

３．２　スリムＮＥＯプレート概要

スリムＮＥＯプレートは、プレキャスト（以下、PCa）床版の接合部に、当社で開発した超高強度繊維補強コンクリート(UFC)「スリムクリート®」を使用して工場製作したUFC板(W300mm×L1000mm×t35mm)を用いた工法である(図-5)。

従来のPCa床版間の接合部は、高強度コンクリートやUFCなどを充填して床版同士の一体化を図るが、その硬化に数時間～数日を要するため、短時間での交通開放ができない。スリムＮＥＯプレートは、圧縮強度180N/mm$^2$、ひび割れ発生強度8.0N/mm$^2$という非常に強度の高いUFCで作られていることから、プレート単体で車両の荷重を支えることができ、プレート設置・舗装後の速やかな交通開放を可能である(図-6)。

プレート設置後の下部の空隙は、長期耐久性を考慮してスリムクリートを充填します。この充填作業は、床版下面からできるため、プレート上の舗装を再び撤去する必要はなく、交通開放後に充填できるため、施工期間の短縮が可能となる。したがって、スリムＮＥＯプレートは、都市部の床版取替工事など、作業時間に制約がある場合に最適な工法である。

その特長は、以下の通り。

①スリムＮＥＯプレート設置後、本設舗装をすることで速やかな交通開放が可能

②床版下面からスリムクリートの充填が可能なため、PCa床版間の接合作業はいつでも施工可能

③輪荷重走行試験により100年間の疲労耐久性を確認

④上面をスリムクリート製のプレートで覆い、下部をスリムクリートで充填することで、床版継手部を高強度化、防水性能向上

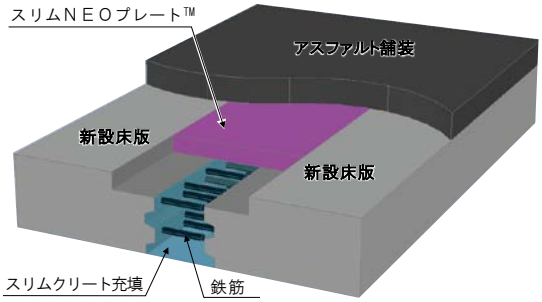



図-5　スリムＮＥＯプレート構造概要図

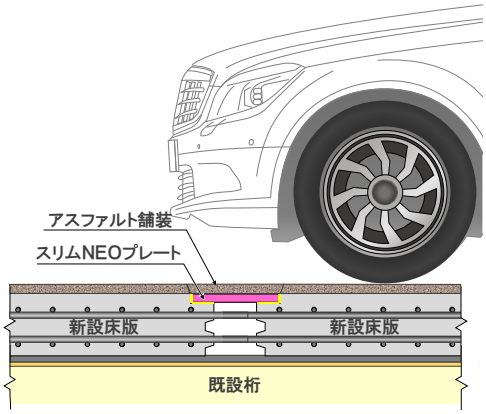



図-6　スリムＮＥＯプレートイメージ図

写真-2　弓振川橋床版取替工事施工状況

４．おわりに

都市内の床版取替工事では、渋滞対策が非常に重要であるが、本工法を開発したことにより、夜間の車線規制のみで床版取替工事が可能となった。また、「中央自動車道　弓振川橋床版取替工事」において本技術の適用性については実証済みである。更に「東名高速道路　東名多摩川橋床版取替工事」も受注し、本技術を採用する予定である。今後は、本工法の更なる生産性の向上や最適化を目指す。

# 木装橋における維持管理を見据えた構造細目

株式会社国土開発センター　技術開発研究所　設計1部　濱田　康行
用地部　呉座　教郎

## 1　はじめに

本報告は、金沢城公園整備計画により加賀藩ゆかりの歴史的回遊ルートを再現するために復元整備された鼠多門橋の、木装技術に関する報告である。

### 1．1　鼠多門橋復元整備の概要

鼠多門橋は金沢城内と藩主住居であった金谷御殿を結び、外堀を跨ぐ約 30m の木橋であったが、老朽化により明治 17 年に撤去された。現在、往時の外堀は埋め戻されて市道として利用されており、本橋の復元整備では市道を跨ぐ跨道橋としての建築限界や耐震性を確保する必要があった。このため、橋梁本体は鋼製としたが、往時の歴史的景観を再現するために、鋼材を木材にて覆う計画とした。

### 1．2　鼠多門橋の概要

新たな鼠多門橋は橋長 L=32.7m の橋梁である。旧外堀底部の軟弱粘性土層である江戸期堆積土は遺構に指定され、掘削および杭施工は不可とされた。そこで、荷重分散と不等沈下の防止を図るため橋梁を分割構造とし、基礎をコンクリート底版構造とした。図－1に示すとおり、橋梁は 3 分割しており、金沢城公園側から 4 径間張出し式鋼床版ラーメン構造、単径間鋼床版ラーメン構造、2 径間張出し式鋼床版ラーメン構造である。

## 2　木装の基本計画

歴史的景観を確保するため、鋼部材を全て木材で覆う木装とした。京都市の渡月橋や金沢市の梅ノ橋等が木装橋として供用されているが、これらの橋梁は渡河橋であるため、橋面および側面において木装されている。本橋は跨道橋であり、桁下からの景観も重視されるため、桁下面を含む全景観で木装する計画とした。

### 2．1　木装箇所

本橋は橋面の敷板や高欄以外に、桁側面の排水用鋼製側溝、主桁、横桁、橋脚等の全ての鋼材が外部から露出しないよう、木材で覆う構造とした。

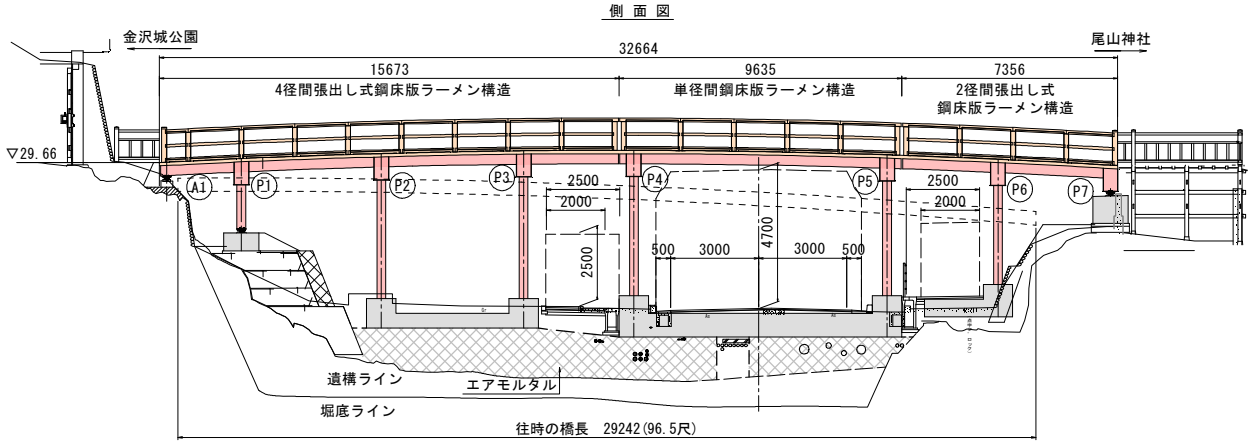



図-1　鼠多門橋の側面図

## ２．２　木装の材料

木装に用いる木材は、耐久性に優れる石川県産の能登ヒバを採用した。集成材や擬木シート等も検討したが、歴史的景観の復元性を鑑みて無垢の木材を採用した。なお、紫外線や風雨に晒される屋外環境下での供用となるため、耐朽性向上を目的として防腐剤の加圧注入処理に加え、無機系のガラスコーティング材による表面保護塗装を施した。

## ３　木装の詳細設計

### ３．１　橋面敷板の木装

上部工は市道の建築限界確保や鼠多門への取付け高より桁高抑制が必要であったため、鋼床版を採用した。写真－1 に示すとおり、鋼床版上に溶接したスタッドボルトで橋軸方向に設置する根太材を固定し、その上に敷板を敷設して、往時の歴史的景観を再現した。なお、橋軸直角方向幅は 5.5m あり、長尺の敷板は入手が困難なため、橋梁中心で 2 分割の構造とし、継手は合欠き継手とした。

写真-1　敷板の固定方法

### ３．２　木製高欄

高欄では木製支柱と鋼床版の固定が課題となった。景観上、敷板上面に固定金具を露出させないため、根太材厚 70mm で納まる柱材の固定方法を検討した。橋軸方向は笠木および中段の平木、最下段の地覆木を柱に差込むことで柱の横桟の剛性により安定させた。直角方向はリブ付きベースプレートを鋼床版に溶接し、柱を貫通させたボルトで固定する構造とした。しかし、固定材の高さが低く、高欄上部への水平荷重作用時に木材が局部破壊する恐れがあるため、図－2 に示すように柱中心に丸鋼 φ20 を埋め込むことで剛性を高めた。

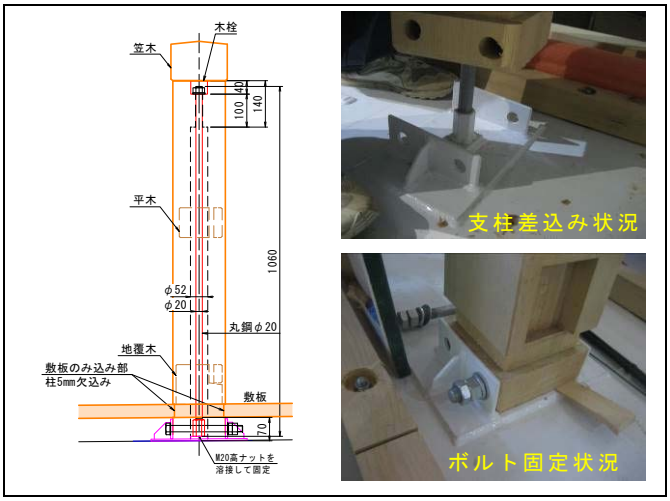



図-2　高欄の固定方法

### ３．３　鋼製側溝の木装

橋面上の排水を受けるため、路側両端に鋼製側溝を設置した。図－3 に示すとおり、上部工縦リブにボルトで固定した鋼製側溝が露出するため、外周面に木装を行った。上面および側面の木装板は、鋼床版に直接ドリルビスで固定した。下面は鋼製側溝にアングル材を溶接し、アングル材に設けたドリル孔にビスを貫通させて下面板を固定した。

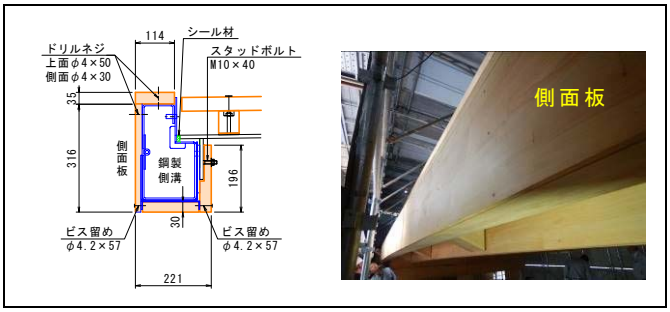



図-3　鋼製側溝の木装

３．４　上部工の木装

桁下からも、3 本の主桁上に敷板が乗る往時の景観を再現させる必要があり、鋼床版の主桁を角材に見せる木装構造とした。図－4 に示すように下フランジではフランジに溶接したスタッドボルトを用いて木材を固定し、ウェブには 2m 間隔で木材固定用の鋼材を溶接し、鋼材に溶接したボルトにより、木板を固定した。また、図－5 に示すとおり、鋼床版の縦リブと根太材をボルト固定し、根太材と下床版用の木板をボルト固定する構造とし、往時の主桁上の敷板構造を再現した。

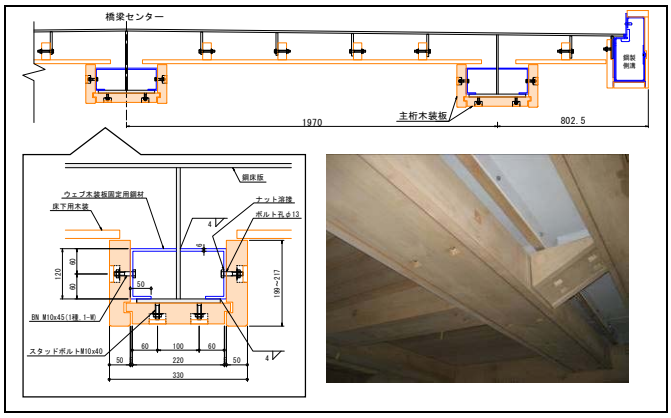



図-4　主桁の木装

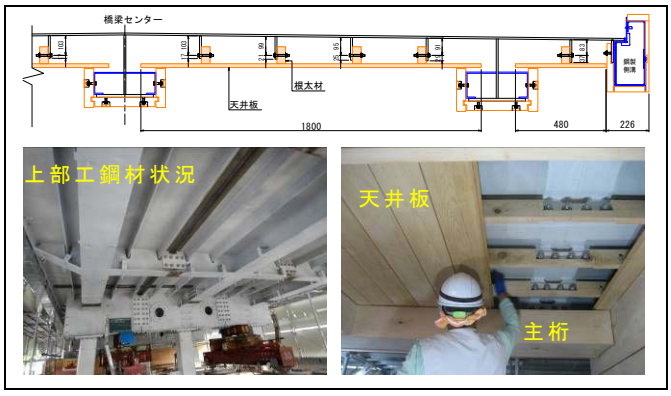



図-5　天井板の固定方法

３．５　下部工の木装

角型鋼管の橋脚支柱には、図－6 に示すとおり、四面に溶接したスタッドボルトにより木材を固定した。

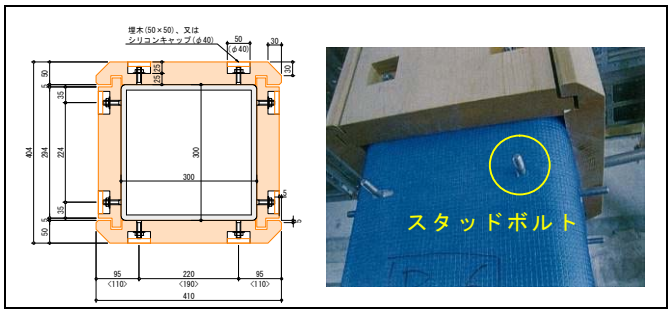



図-6　橋脚柱の木装

４　維持管理上の対策

木装橋は木材で主部材である鋼材を覆うため、鋼材に腐食が生じてもその確認が行えない。そこで、耐久性向上や点検を見据えた構造上の配慮を行った。

４．１　敷板の木装

鋼床版上面には防水層が設置できないため、より確実な止水が求められる。そこで、当初設計では橋軸方向の敷板の継手を合欠き継手としていたが、施工時に施工業者および発注者と設計監理協議を行い、より止水性能を向上させるために、図－7 に示す継手箇所に雇い桟を設け、排水する構造とした。

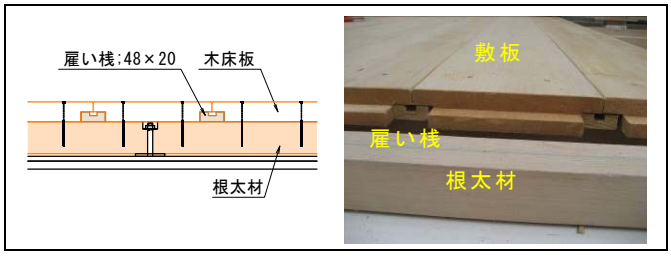



図-7　敷板の止水対策

４．２　天井部の点検対策

上部工全部材を近接目視する場合、天井板をすべて撤去する必要がある。しかし、5 年に 1 度の定期点検で全部材目視を行うために木装板の仮撤去復旧を行うには、多大な時間と費用が必要となる。そこで、仮撤去復旧を最低限とする間接点検手法を提案した。当初

案では、橋脚付近の天井板を取り外し可能な構造とし、事前に横リブに点検用の孔およびワイヤーロープを通しておき、ボアホールカメラを使用した点検手法を検討した。しかし、2m 間隔の横リブ全箇所に削孔および補強が必要となり、鋼材加工費が課題となった。そこで、図－8 に示すように、全部材の目視は行わず、腐食等の変状が生じやすい橋脚付近の局部的な点検を行える構造とした。

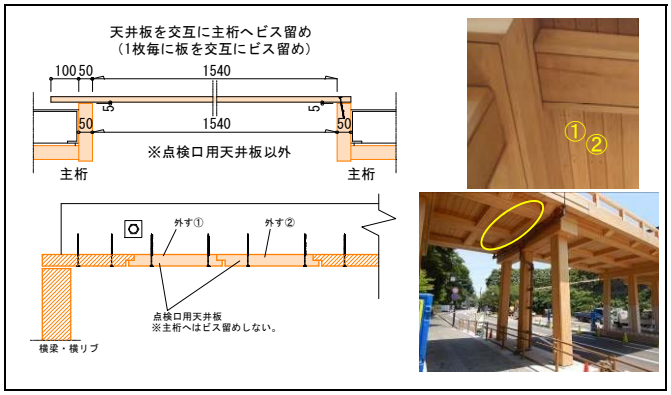



図-8　上部工の点検方法

## ４．３　橋脚柱の点検対策

上部工と同様、5m 程度ある橋脚柱すべての木材を仮撤去復旧することに多大な費用がかかる。そこで、風雨の影響を最も受ける柱基部の高さ 1m のみ、図－9 に示すとおり、取り外しが容易となるように木装板を分割し、当該部の木栓をシリコンキャップ材とした。

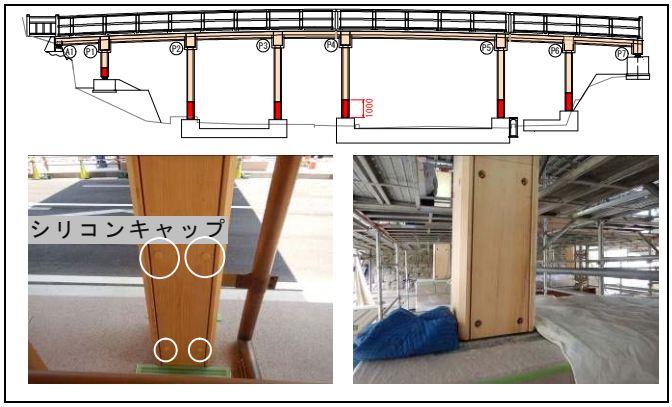



図-9　下部工の点検方法

## ４．４　鋼製側溝の清掃

終点側の尾山神社側には大木が多く、落ち葉の堆積が懸念された。そこで、排水不良を抑制するため、図－10 に示すように、流末部および流入部付近の鋼製側溝では定期的な清掃が可能な開閉構造とした。

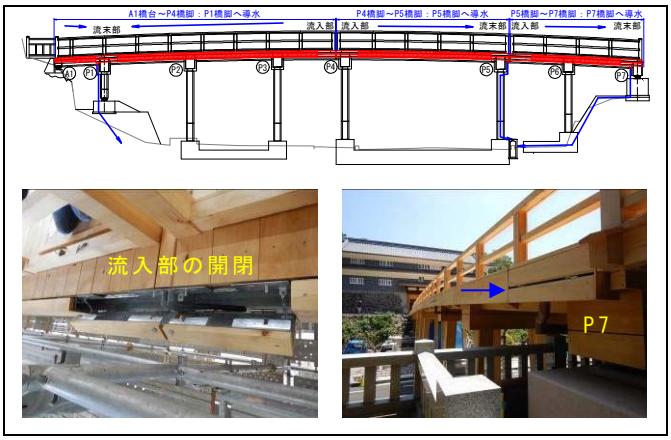



図-10　鋼製側溝の清掃

## ５　まとめ

本橋を木装するにあたり、歴史的な景観を確保し、かつ点検や維持管理を見据えて以下の対策を行った。

- 往時と異なる架橋条件に応じて橋梁形式を変更したが、歴史的景観を再現するため、全景観での木装を採用した。
- 鋼床版の腐食を抑制するため、止水性能を高めた敷板形式を採用した。
- 木材で覆われる上部工および橋脚柱において点検着目点を定め、着目点で木装の脱着が容易に行える構造とした。


## 謝辞

鼠多門橋の竣工まで、工程調整および技術検討会議等を通じてご指導いただいた施主の石川県土木部営繕課、公園緑地課、石川県県央土木事務所道路建設課、施工業者である兼六建設株式会社に感謝申し上げる。

# 非塩化物系凍結抑制剤を用いた物理化学系凍結抑制舗装「ツインメルトペーブ」


鹿島道路（株）技術研究所　○尾崎　風香
後志総合振興局　小樽建設管理部　共和出張所　主任　坂下　晃一
鹿島道路（株）北海道支店後志出張所　所長　芝本　直己
鹿島道路（株）　北陸支店　主任　阿部　昌徳


## 1　はじめに

我が国の寒冷地域は図-1に示すとおり総国土面積の60%を占めており，北陸地方もこれに含まれる。冬季は積雪および路面の凍結による車両事故の危険があり，冬季路面管理に対する重要度は高いものとなっている。[1)]

凍結抑制舗装とは，寒冷期における道路交通の安全確保や路面管理コストの低減を目的とした技術である。交差点部，山間部のカーブや坂，トンネル出口付近，橋梁部などの凍結しやすい箇所に多く採用されている。[2)]

ツインメルトペーブ（弊社名称。以下，ツインメルトという）とは，密粒度アスファルト混合物にゴムチップと化学系凍結抑制剤を混入した，物理化学系の凍結抑制舗装である（図-2）。

通常，化学系凍結抑制剤には塩化物系の材料が用いられることが多いが，塩化物系の成分が溶出した場合，周囲の道路構造物や鋼床版の金属腐食（発錆）を招くため，施工の適用範囲を狭めていた。しかし本工法では，凍結抑制効果を持ちながらも防錆性の高い非塩化物系材料を適用し，金属腐食が起きにくい，より環境に優しい舗装に改良した。

本報は，ツインメルトの室内での検討結果と，北海道倶知安町の実路での施工ならびに冬季・越冬後の追跡調査結果について報告するものである。

## 2　非塩化物系凍結抑制剤の特長

ツインメルトで用いる非塩化物系凍結抑制剤は，無害で環境に優しい材料を選定した。

外観は白色の粉末（図-2右）で，熱に強いためアスファルト混合物を製造する際に機能が損なわれず，水に溶けやすいため供用中に路面の雪に溶け出して凍結抑制効果を発揮する。

本添加剤の特長は，凝固点が塩化ナトリウムに近いため氷点降下作用による凍結抑制効果を有しながらも，塩化物系材料とは異なり防錆（錆の発生を抑制する）効果が高いため，道路構造物の発錆を抑制できる点である。

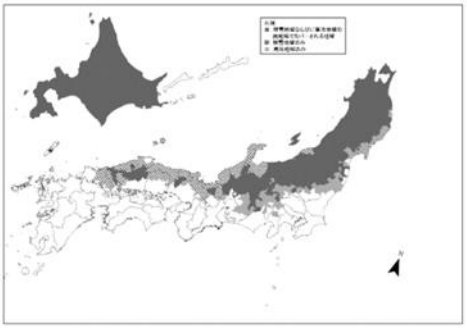


図-1　積雪寒冷特別地域略図（国土交通省）

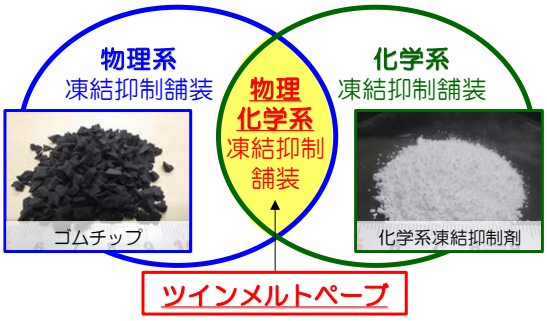



図-2　物理化学系凍結抑制舗装の概念図

当該材料の防錆効果を確認するため，一辺10cm 四方の鉄板を用いて発錆実験を行った。塩化物系材料の代表として塩化ナトリウムと，本工法で使用する非塩化物系材料で 2%溶液を作成し，鉄板の水浸と乾燥を繰り返した。1 日おきに繰り返して 2 日を 1 サイクルとし，1 サイクル終了ごとに錆を目視確認した。

その結果，写真-1 に示すとおり塩化ナトリウム水溶液では 2 サイクルで鉄板全体に発錆が確認されたのに対し，非塩化物系添加剤では 40 サイクルを超えても発錆せず，優れた防錆効果が確認できた。

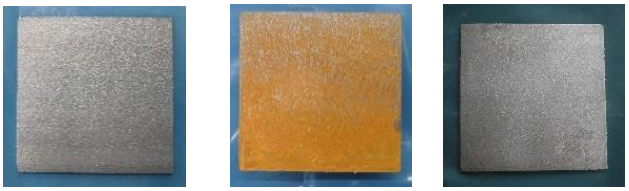
## 3　混合物の性状（室内試験）

ツインメルトの凍結抑制効果を氷着引張試験により確認した。環境温度との関係を確認するため，温度を変えて実施した。試験結果を表-1，図-3 に，試験の状況を写真-2 に示す。試験対象は表に示すとおり，通常の舗装を模擬した密粒度アスファルト混合物（13F）（以下，密粒 13F という），ゴムチップのみを添加したシングルメルト，ツインメルトの三種である。

ツインメルトは，シングルメルトに比べてすべての温度で氷着引張強度が小さく，凍結抑制効果に優れていることが確認できた。

## 4　実道での施工事例

北海道にて施工の機会をいただき，本工法の施工性および凍結抑制効果を確認した。施工の概要を表-2 に，施工箇所の様子を写真-3 に示す。ツインメルトと，比較のため通常の密粒舗装も施工した。当該箇所は国内外から訪れた観光客が往来する路線であり交通量が多いため，冬季は日常的に除雪や凍結抑制剤の散布などの管理がされている（写真-4）。



a)試験前 0cy　b)塩化物系 2cy　c)非塩化物系 40cy

写真-1　発錆実験の結果

表-1　氷着引張試験の試験水準と試験結果

| 試験温度 | | -8℃ | -5℃ | -2℃ |
|---|---|---|---|---|
| 氷着引張強度（MPa） | 密粒 13F（比較） | 0.62 | 0.54 | 0.43 |
| | シングルメルト（物理系のみ） | 0.47 | 0.43 | 0.37 |
| | ツインメルト（物理・化学系） | 0.36 | 0.33 | 0.17 |
| | 目標値 | — | 0.50 以下 | — |

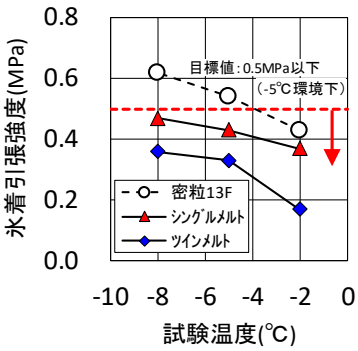



図-3　試験温度と氷着引張強度の関係

写真-2　氷着引張試験の状況

表-2　施工の概要

| | |
|---|---|
| 工事名 | 蘭越ニセコ倶知安線防災安全 B（公安）工事（電線共同溝）2・3 工区（補正） |
| 発注者 | 北海道後志総合振興局 |
| 施工場所 | 北海道虻田郡倶知安町山田地内 |
| 施工規模 | 延長 50m×幅員 3.5m×2 混合物 ＝350m$^2$(t＝5cm) |
| 混合物種別 | 密粒 13F(比較)，ツインメルト |
| 施工日 | 2019 年 9 月 25 日 |

写真-3　施工前の外観（ツインメルト施工箇所）

写真-4　施工箇所の冬季の様子

## ４．１　実道での施工の結果

合材プラントでの各種添加剤の投入状況を写真-5 に，出荷混合物の基本性状を表-3 に示す。基本性状，氷着引張強度による凍結抑制効果に問題はなく，良好な混合物が出荷されたことが確認できた。

現場の施工状況を写真-6 に示す。本工法の施工で通常の舗装と異なる点は添加剤を混入することのみであり，施工方法や機械編成の変更は必要ない。施工性は非常に良好で，施工は問題なく完了した。凍結抑制効果を含む路面性状も良好であった。（４．３で詳述）

写真-5　プラントでの添加物投入状況

表-3　出荷混合物の基本性状と氷着引張強度

| 評価指標＼混合物種別 | | 密粒 13F | ツインメルト | 管理目標値 |
|---|---|---|---|---|
| コアかさ密度 | (g/cm³) | 2.419 | 2.362 | － |
| 安定度 | (kN) | 9.5 | 8.2 | 4.9 以上 |
| 動的安定度 | (回/mm) | 3000 | 1800 | 1500 以上 |
| すり減り量 | (cm²) | 0.33 | 0.24 | 0.6 以下 |
| 曲げ強度 | (MPa) | 10.3 | 10.1 | － |
| 曲げ破断ひずみ | (×10⁻³) | 4.6 | 5.8 | － |
| 氷着引張強度 | (MPa) | 0.61 | 0.41 | 0.5 以下 |

写真-6　施工の状況

## ４．２　冬季追跡調査

冬季の凍結抑制効果を確認するため，追跡調査を実施した。調査の概要を表-4 に示す。

表-4　追跡調査の概要

| | 第一回 | 第二回 | 第三回 |
|---|---|---|---|
| 調査日 | 2019.11.15 | 2019.12.25 | 2020.1.22 |
| 積雪量 | 3cm | 5cm | 2～10cm |
| 天気 | 曇り | 曇り | 曇りのち晴れ |
| 外気温 | -1℃ | -2℃ | -5～-2℃ |

写真-7 は第一回調査時に，除雪後数時間経過し，車両の通行により車輪載荷位置の雪がやや融けている状況である。同時刻に撮影したものであるが，通常の密粒 13F 工区は路面の雪が圧密され路面が白くなっているのに対し，ツインメルトは雪が融けて路面が黒く露出していることが確認できる。

密粒 13F：圧雪状態　　ツインメルト：路面露出状態

写真-7　第一回 2019 年 11 月 15 日 8 時 10 分撮影

写真-8 は第二回調査時の状況で，対向車線の既設舗装および路肩は 5cm 程度の圧雪が見られるが，写真中央の凍結抑制舗装工区は路面が露出しており，凍結抑制効果が見られる。

写真-8　第二回 2019 年 12 月 25 日 10 時 8 分撮影

写真-9 の第三回は，同日に時刻を変えて撮影し，経過観察した。(1)10：55 の時点では双方とも同程度の圧雪であったが，(2)11：40 にかけて徐々にツインメルトの方が路面露出範囲が広がっていき，(3)12：55 には両輪とも路面露出した。また，このとき路面の雪を採取し成分分析を行ったところ，添加した化学系凍結抑制剤が検出され，当該添加剤が効果を発揮していることが確認できた。

## ４．３　越冬後追跡調査

本工法の供用性を確認するため，越冬後の 2020 年 7 月 1 日に追跡調査を実施した。写真-10 に越冬後の外観を，表-5 に測定項目および施工直後と越冬後の試験結果を示す。

目視観察の結果，全面にわたり健全で，ツインメルトはゴムチップの散逸もなく顕在しており，路面性状も問題なかった。

## ５　まとめ

本工法は，非塩化物系材料を用いた物理化学系の凍結抑制工法である。混合物製造時に添加剤を投入するだけで適用でき，施工方法や仕上がりは通常の舗装と同様である。冬季には凍結抑制効果が確認でき，越冬後の路面性状は良好であった。適用箇所は，薄い積雪と融解を繰り返すような箇所や，山間部のカーブ部などを想定しており，ブラックアイスバーンの抑制に貢献できる工法であると考える。今後は適用事例をさらに増やし，寒冷地域の安全確保と管理コスト削減に貢献したい。

1) 第三回 10 時 55 分撮影

2) 第三回 11 時 40 分撮影

3) 第三回 12 時 55 分撮影

写真-9　第三回 2020 年 1 月 23 日撮影

a) 施工箇所遠景
（車輪走行位置は黒く見えるが健全）
b) 接写

写真-10　施工箇所の越冬後の状況

表-5　施工箇所の路面性状

| 評価指標＼混合物種別 | | 密粒 13F | ツインメルト |
|---|---|---|---|
| IRI (mm/m) | 初期値 | 2.06 | 2.39 |
| | 越冬後 | 2.09 | 2.15 |
| わだち掘れ量 (mm) | 初期値 | — | — |
| | 越冬後 | 5 未満（なし） | 5 未満（なし） |
| きめ深さ (mm) | 初期値 | 0.54 | 0.49 |
| | 越冬後 | 0.61 | 0.55 |
| ひび割れ率 (%) | 初期値 | 0.0 | 0.0 |
| | 越冬後 | 0.0 | 0.0 |
| すべり抵抗値 BPN 値 | 初期値 | 75 | 81 |
| | 越冬後 | 89 | 81 |

参考文献

1) 国土交通省　積雪寒冷特別地域における道路交通の確保について
2) 凍結抑制舗装技術研究会：凍結抑制舗装ポケットブック

# AIを用いた1週間波浪予測の精度向上

東亜建設工業株式会社　技術研究開発センター
水圏技術グループ　　研究員　○　原　　知聡
同　　リーダー　　武田　将英

## 1　はじめに

波浪予測は，港湾・海洋工事，漁業，船舶運航，海水浴，サーフィン等に挙げられる海域利用の可否判断に用いられている．中でも，港湾工事は，波浪によって，安全性・施工性・経済性が大きく影響を受けるため，より正確な波浪予測が求められる．一般的には，数時間から1日程度の短期予報が重要とされる．しかし，作業船の長距離回航，ケーソンの据付作業，洋上風力発電施設の建造といった大規模海上工事では，数日間の連続した静穏日が必要で，この場合には，およそ1週間先までの中期予報の正確さも重要となる．

1週間先までの波浪予測に関しては，日本，米国，欧州の3つの気象機関がそれぞれ全球モデルによって実施している．表-1に各気象機関の全球波浪予報データの概要を示す．しかし，これら全球波浪予報データの空間解像度は粗く(JMA GWMとNOAA WW3は0.5度，ECMWF-WAMは0.125度)，中期予報の波浪情報を作業可否判断として利用するには精度が不十分である．

そこで，全球波浪予報データに，近年注目されているAI技術を取り入れ，作業可否判断として利用可能な予測精度の高いAI波浪予測モデルの構築を目指す．予測精度の向上を実現することによって，早期の作業可否判断が可能となり，工程管理が容易になることで働き方改革に結びつくと期待される．

本稿では，実用化に向けた開発段階にあるAI波浪予測モデルの概要と，全球波浪予報データとの予測精度の比較，有用性について報告する．

## 2　AIを用いた波浪予測の動向

これまでに金ら[1)]，Traceyら[2)]は，表-1で

表-1　全球波浪予報データの概要

| 気象機関 | 日本　気象庁 | アメリカ海洋大気庁 | ヨーロッパ中期予報センター |
|---|---|---|---|
| 全球モデル名称 | JMA GWM | NOAA WW3 | ECMWF HRES-WAM |
| 格子間隔 | 0.5°×0.5° | 0.5°×0.5° | 0.125°× 0.125° |
| 計算領域 | 全球75°N-75°S | 全球77.5°N-77.5°S | 全球(計算：90°N-78°S)<br>(出力：90°N-90°S) |
| 予報時間の長さ | 0時～264時 | 0時～180時 | 0時～240時 |
| 予報のサイクル | 1日4回 | 1日4回 | 1日2回 |
| 予報時間の間隔 | 3時間 | 毎時(0時～120時)<br>毎3時(123時～180時) | 毎3時(0時～144時)<br>毎6時(150時～240時) |
| 出力波高 | 有義波高($H_s$) | 有義波高($H_s$) | 有義波高($H_s$) |
| 出力周期 | ピーク周期($T_p$) | スペクトルの0次および2次モーメントから得られる平均周期($T_{m02}$) | スペクトルの0次および1次モーメントから得られる平均周期($T_{m01}$) |

示した全球波浪予報値を用いるAI波浪予報モデルを考えている．これらは，解像度の粗い複数機関の全球波浪予報値(入力変数)と波浪観測値(出力変数)との関係性をAI(機械学習)により導き出し，単一機関の全球波浪予報値よりも精度の高い予測を行うものである．全球波浪予報値を使うメリットとして，データの欠測がなく安定して予測できることが挙げられる．

機械学習の手法として，金ら[1]はGroup Method of Data Handling(以下GMDH)，Traceyら[2]はニューラルネットワーク(以下NN)を用いている．両手法の特徴として，NNはデータ間の因果関係が不明確で入出力関係のプログラム化が不可能であっても繰り返し学習することにより入出力関係をコンピュータにしかわからないマトリックス(ブラックボックス)で結びつけることができる．GMDHは，NNと同様に入力と出力の因果関係をマトリックスで結びつけることができる一方，入力変数が少ない場合には，関数式として入出力関係を表現(ホワイトボックス化)することができる．現場での利用を考えると，誰でも簡単に使える技術が前提にあり，その点でGMDHモデルは，得られた関数式に入力変数を代入するだけで波浪予測値を得ることができるといった利点がある．

以上を踏まえて，著者らはGMDHを用いた1週間先までの波浪予測モデルについて検討を進めている．

## 3　GMDHによる波浪予測手法

### 3.1　GMDHとは

GMDHは，発見的自己組織化の原理に基づき入力変数と出力変数の関係を式(1)で示す完全表現式としてモデル化する．

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{k} a_i x_i + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{N} a_{ijk} x_i x_j x_k + \cdots \quad (1)$$

ここで，$x_1$, $x_2$, $x_3$,…は入力変数，$a_0$, $a_i$, $a_{ij}$, $a_{ijk}$,…は定数，$i$, $j$, $k$は入力データの種類，$y$は真値である．

当社が用いるGMDHのネットワーク構成を図-1に示す．波浪予測に用いるGMDHは，中間層(いわゆる学習・訓練過程)において入力変数として最大3種類の全球波浪予報値から選択した2種類，出力変数として1個の波浪観測値で構成され，式(2)の部分表現式として表される．

$$y_n = a_0 + a_1 x_{i_n} + a_2 x_{j_n} + a_3 x_{i_n}^2 + a_4 x_{j_n}^2 + a_5 x_{i_n} x_{j_n} \quad (2)$$

ここで，$y_n$は推定値，$a_0$～$a_5$は定数であり，出力変数と推定値の誤差が最も小さくなる定数の時を最適な部分表現式とする．次に，中間層で作られた各組合せの最適な部分表現式から得られる推定値を新たな入力変数として，同様に部分表現式を作る．最終的に，各組合わせの中から最も誤差の小さくなる部分表現式を完全表現式として，これをAI波浪予測モデルとする．詳しい計算過程については金ら[1]を参照されたい．

実際の運用では，3種類の全球波浪予報値が配信される6時間ないし12時間毎に，予測

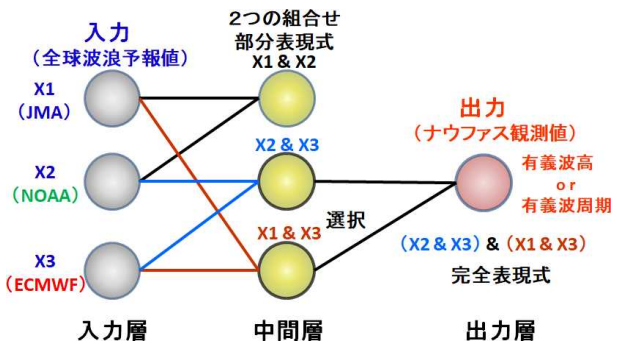



図-1　GMDHネットワーク構成

したい時点(例えば24，72，168時間後)における全球波浪予報値を指定し，構築したモデルに入力すればその時刻における波浪の予測を得ることができる．

### 3.2　GMDH波浪予測モデルの構築

前節で述べたことが可能であるか検証するために，過去の予報初期値と解析値(配信時刻における0時間後の予測値)を入力変数とし，ナウファス観測値を出力変数としてGMDHモデルを構築する．本技術の最終目標は1週間先までの波浪予測を精度良く行うことであるが，これが実現可能であることを確かめるためにまずは初期時刻を利用した．

検討対象とした地点は，ナウファスの観測地点の1つである常陸那珂を選定した．また，3種類の全球波浪予報値はできるだけナウファスの観測地点に近い格子点を選択した．

GMDHの学習と訓練に用いるデータ期間は2010年1月1日から2014年12月31日とし，予測値と観測値との比較検証は，2015年1月1日から2015年12月31日のデータを用いた．GMDHモデルには3種類の全球波浪予報値から4つの組合せ(表-2)を作り，それぞれの組合せについて有義波高Hsの予測モデルを構築した．最良の全球波浪予報値の組合せを探り，GMDHモデルの精度を検討する．

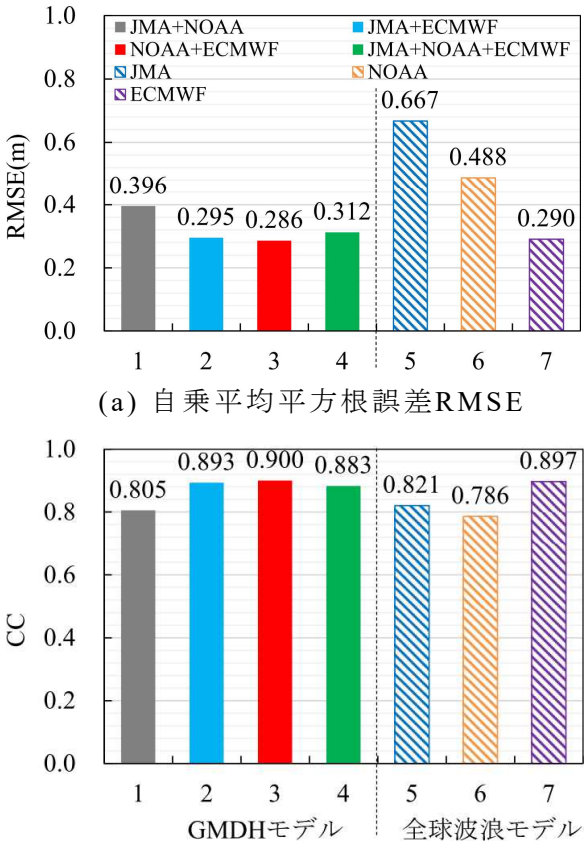
表-2　GMDHモデルの入力変数の組合せ

| Case | 入力変数<br>（波高，周期） | 出力変数<br>（波高，周期） |
|---|---|---|
| 1 | JMA+NOAA | ナウファス |
| 2 | JMA+ECMWF | ナウファス |
| 3 | NOAA+ECMWF | ナウファス |
| 4 | JMA+NOAA+ECMWF | ナウファス |

## 4　GMDH波浪予測モデルの精度検証

対象地点における波高の予測精度を評価する指標として自乗平均平方根誤差RMSEと相関係数CCの2つを用いた．GMDHモデルの4ケースと全球波浪モデルの3ケース(Case5:JMA，Case6:NOAA，Case7:ECMWF)についてRMSE，CCを比較したものを図-2に示す．

3種類の全球波浪モデルを比べると，ECMWFが最も高い精度のRMSE:0.290mとCC:0.897を示した．GMDHモデルの4ケースを比べると，最も高い精度を示したのはNOAAとECMWFを組み合わせたCase3であり，その精度はRMSE:0.286m，CC:0.900であった．また，全球波高予報値(JMA)と最良のGMDHモデルによる波高予測値との時系列(図-3)と




(a) 自乗平均平方根誤差RMSE

(b) 相関係数CC

図-2　全球波浪予報値とGMDHモデルの精度比較

相関図(図-4)を比較すると，GMDHモデルの予測値は低波高でよく一致していることがわかる．すなわち，GMDHを用いることによって，波高の予測精度は，全球波浪モデル単体よりも改善されている．

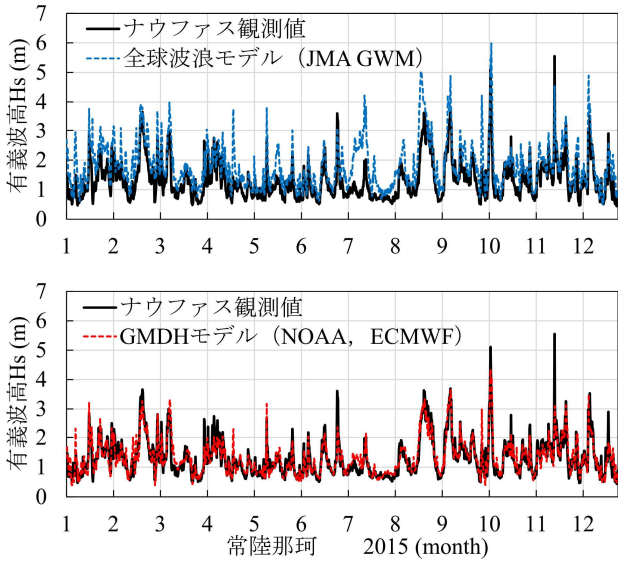



図-3　時系列の比較

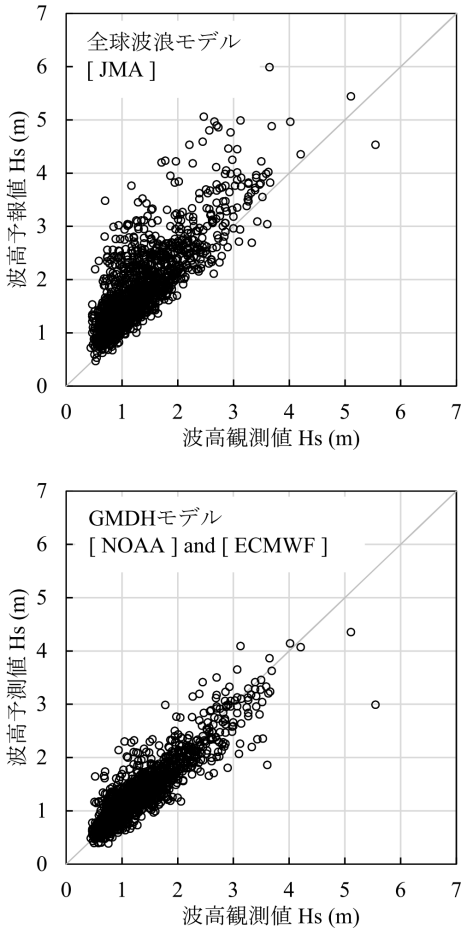



図-4　相関図の比較

## 5　まとめ

本稿では，機械学習手法にGMDH，入力に3種類の全球波浪予報値，出力にナウファス波浪観測値を用いて，常陸那珂のAI波浪予測モデルを開発し，その適用性を検討した．その結果，ナウファスの波浪観測値に対して，そのままの全球波浪予報値よりも，AI波浪予測モデルの予測値の方が精度がよくなることを示した．

今後，実際に配信される予報値を利用して開発したAI波浪予測モデルの検証を進めるとともに，実運用に向けて波浪データの蓄積と対象地点の拡充を図る所存である．

謝辞:本研究開発の一部は，(一財)港湾空港総合技術センターより研究開発助成を受けました．ここに記して謝意を表します．また，本研究開発成果に対して，令和2年度日本港湾協会論文賞を頂きました．関係者の皆様に改めて御礼申し上げます．

## 参考文献

1) 金 洙列，武田将英，間瀬 肇，倉原義之介，原 知聡，西山大和，川崎浩司，水谷英朗: 全球波浪予報値とGMDH部分表現式を用いた1週間波浪予測法とその精度検証，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol.75，No.1，pp.18-26，2019.

2) Tracey H.A.Tom，金 洙列，武田将英，倉原義之介，原 知聡，西山大和，川崎浩司，間瀬 肇: 全球波浪予報値のニューラルネットワーク変換による高精度1週間波浪予測の試み，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.75，No.2，pp.I_133-I_138，2019.

# 防災井戸バルブベント

（株）興和　水工部課長　石田　謙介

## 1　はじめに

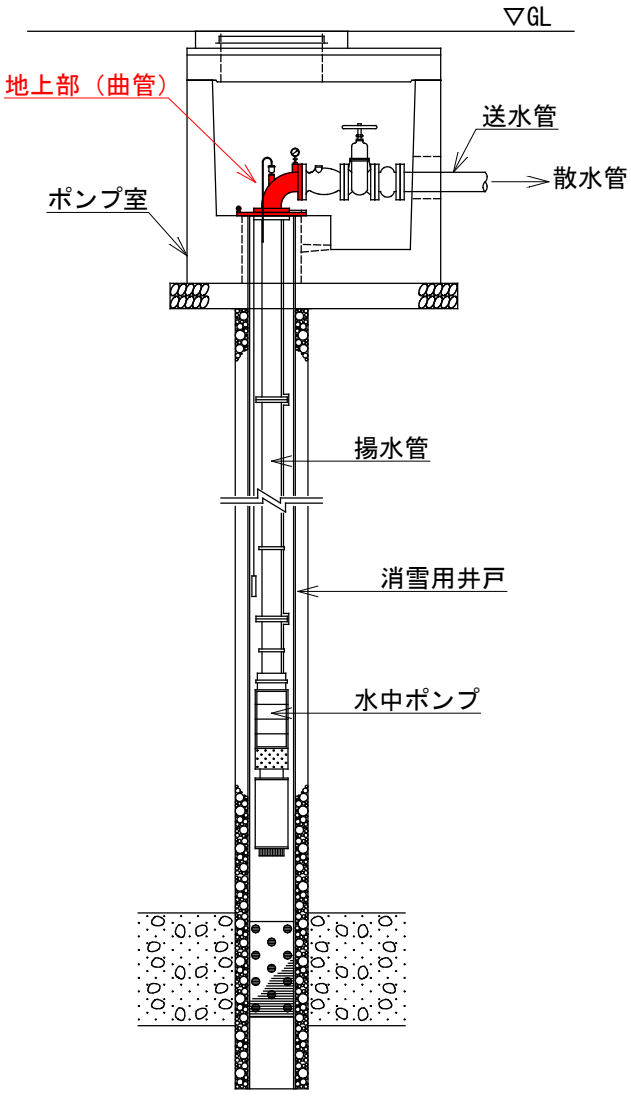
2016 年 12 月 22 日に発生した「糸魚川市駅北大火」において、応援部隊を含む多数の消防車両に対して、既存の消防水利では水が不足するという課題が生じた。この課題に対して融雪施設を利用した消火施設の検討が対策のひとつとして示されている。

本稿では、融雪施設（消雪パイプ）を消火施設（消防水利）として利用するために開発した「防災井戸バルブベント」について報告する。

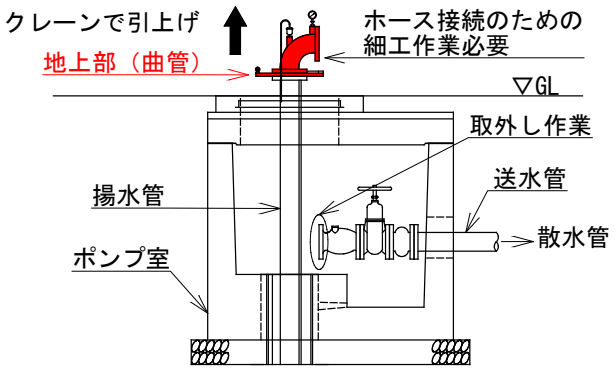
## 2　開発の経緯

新潟県をはじめとして北陸地方に普及している融雪施設は、その多くが地下水を道路に散水する「消雪パイプ」である。消雪パイプは、「井戸」、「水中ポンプ」、「揚水管」、「地上部」、「送水管」、「散水管」から構成され、標準的な施設では地下ポンプ室内で「揚水管」と「送水管」が「地上部」を介して強固に接続されている（図－1）。消雪パイプの井戸（以下、「消雪用井戸」という。）を消防水利に利用する場合、この「揚水管」と「送水管」の接続部（「地上部」）を取外し、クレーンで「揚水管」と「地上部」を地上まで引上げ、消防用ホースが接続できるように細工しなければならない（図－2）。

しかし、緊急的に消防水利が不足している状況において、このような作業は不適切であり、消雪用井戸を消防水利として簡便に利用できる方法の開発が必要であった。



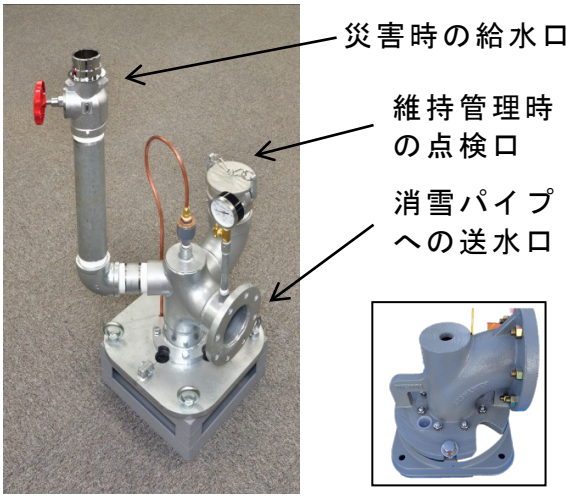

図－1　消雪用井戸概要図




図－2　開発前の消雪用井戸活用方法

## 3　防災井戸バルブベントの概要

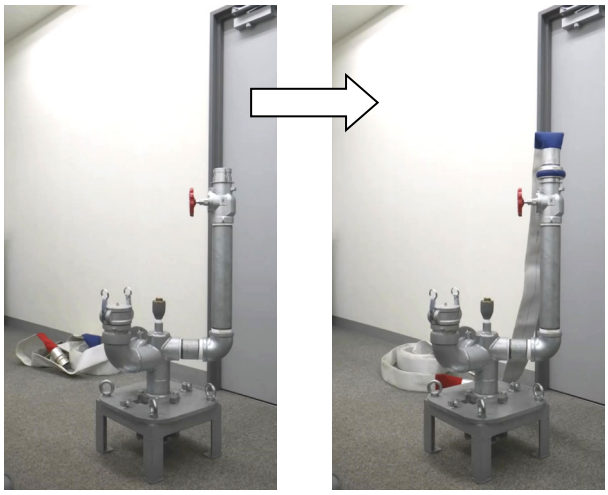
防災井戸バルブベントと従来品を写真－1に示す。従来、「揚水管」と「送水管」を接続する部分である「水中ポンプ地上部」は、水の吐出し口が1方向に限られていた。開発製品は、従来の水中ポンプ地上部の機能を有した状態で、水の吐出し口を3方向に増やした。




**写真－1　防災井戸バルブベント（左）と従来品（右）**

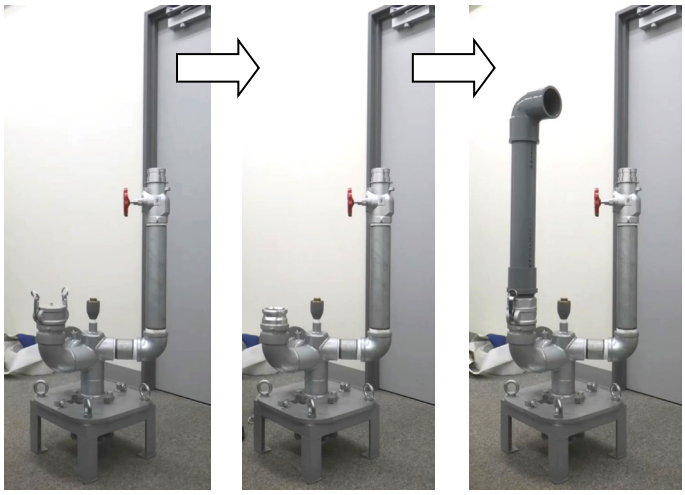
増設した吐出し口のうち1方向は、消防水利として利用するための給水口として開発した。消防用ホースを接続する際に接続作業員が地下ポンプ室内に降下しなくても接続できるように、吐出し口をポンプ室の上部まで鉛直方向に延伸させるとともに消防用ホースを直接接続可能とする消火栓バルブを設けた（写真－2）。消火栓バルブは、地下ポンプ室の開口部に収まり、地上から手が届く位置とした。また、鉛直方向に延伸させた配管が安定するように専用の架台も開発した。

増設した吐出し口のうちもう1方向は、消防水利以外にも簡便に井戸を活用できる点検口として開発した。消防水利用の給水口は消防用ホースの接続に特化した消火栓バルブとしているため、消防用ホースが無い場合の活用はできない。そのため、この点検口にはワンタッチ式の接続継手を設け、簡便に様々な用途に活用できる吐出し口とした。活用方法のひとつとして、井戸の維持管理に必要な揚水試験時の利用を想定している。従来の「水中ポンプ地上部」では、揚水試験時に送水管から取り外して「水中ポンプ地上部」をクレーンで地上まで引き上げる必要があったが、この点検口に試験用排水管を接続する（写真－3）ことにより引き揚げ作業不要で揚水試験が可能となる。また、災害時の雑用水とし



**写真－2　消防用ホース接続**

（消火栓バルブに接続）

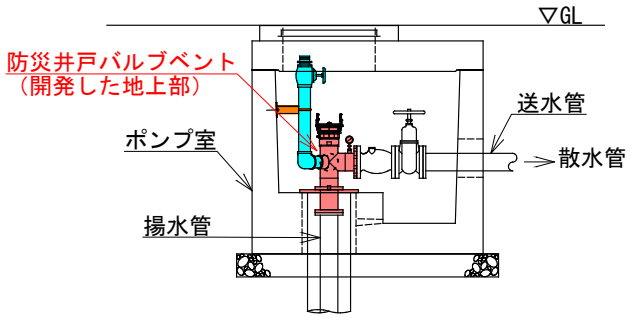


**写真－3　点検口カムロック接続**

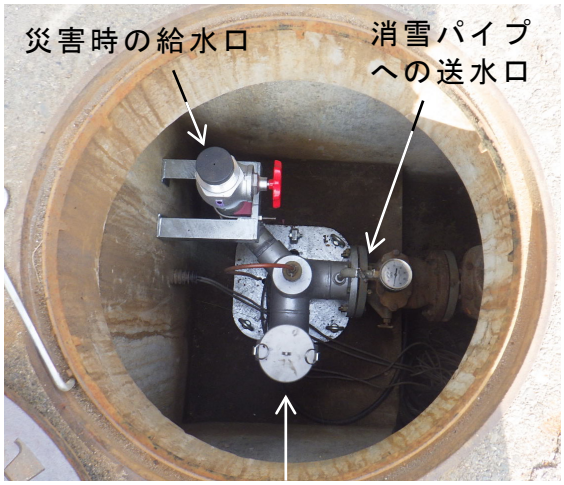
（蓋を外してカムロック機構にて配管接続）

ての利用も想定している。

なお、写真－4および図－3に示すように、開発した吐出し口を含めた 3 方向の吐出し口が相互に干渉することなくそれぞれ単独でも併用でも活用できるような形状としている。




図－3　防災井戸バルブベント設置断面図




写真－4　防災井戸バルブベント設置状況

## 4　防災井戸バルブベントの仕様

防災井戸バルブベントの仕様を表－1に示す。本体（消火栓バルブ以外）は、口径 80A～125A に対応していて、消雪用に使われている深井戸用水中ポンプの主要メーカー各社に対応できるように高さ調整スペーサーも開発した。消火栓バルブは、65A に統一されている。これは消防機関が使用している「スタンドパイプ」の口径に合わせたためである。

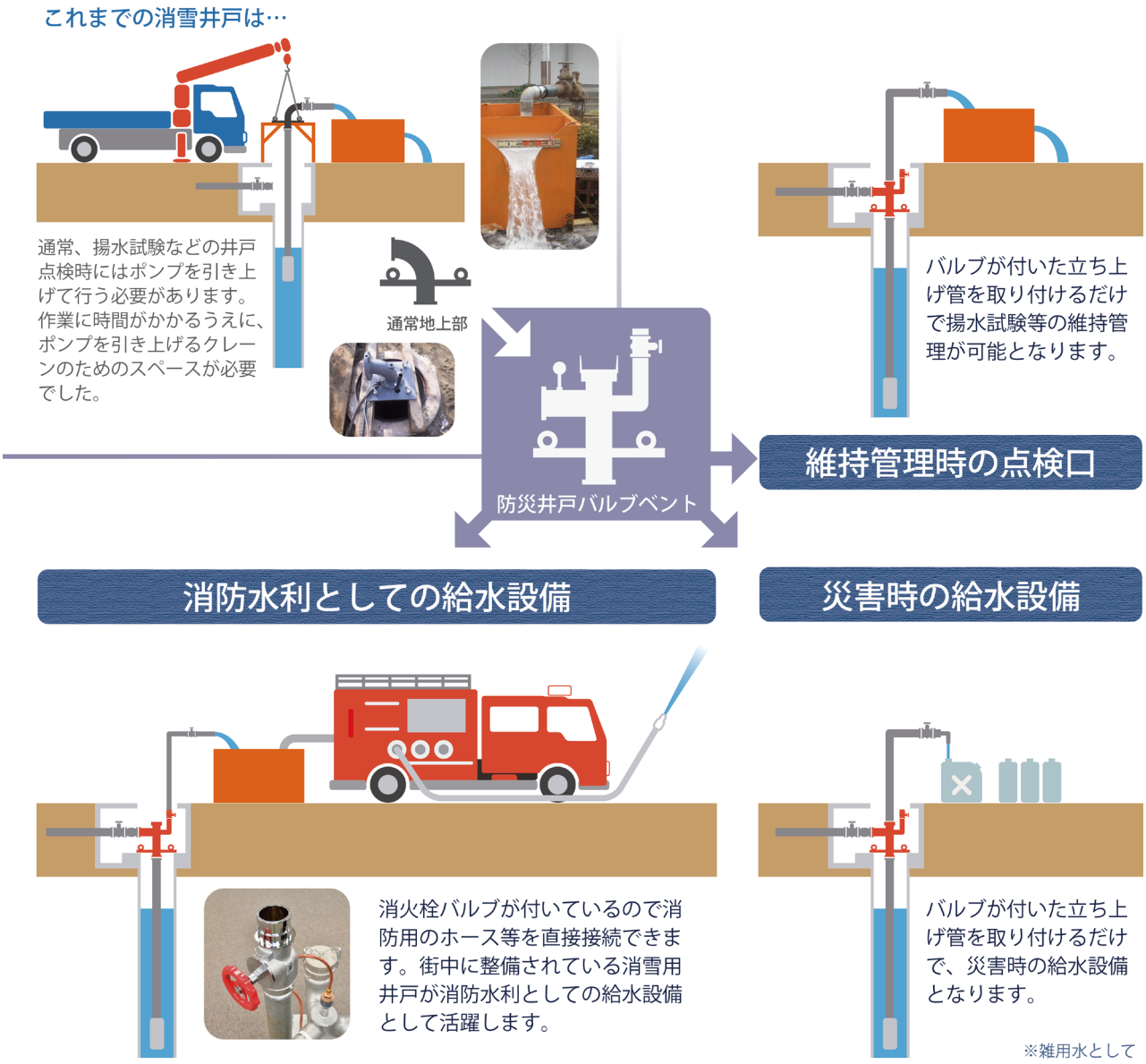
表－1　防災井戸バルブベントの仕様

| 項目 | 仕様 |
|---|---|
| 部位 | 本体 |
| 口径 | 80A/100A/125A |
| 材質 | SGP |
| 仕上げ | 亜鉛メッキ |
| 耐圧 | 0.7(100A)～0.9(80A)MPa |
| オプション | 高さ調整スペーサー |
| 項目 | 仕様 |
| 部位 | 消火栓バルブ |
| 口径 | 65A |
| 材質 | B.C. |
| 仕上げ | クロムメッキ |
| 耐圧 | 0.98MPa |

## 5　消雪用井戸の多機能化

これまで、消雪用井戸は、その名の通り「消雪」の水源としての役割しか求められてこなかった。しかし、防災井戸バルブベントを適用することにより、防災・減災の役割を付加することができる（図－4）。開発のきっかけとなった事象は「火災」であったが、それ以外の事象における活用も想定できる。震災や風水害時に水道が断水した場合には、雑用水としての活用が期待される。また、渇水時の農業用水としての活用も想定できる。

一方、消雪用井戸は設置環境に左右されるものの多くの施設が 20 年～30 年以上継続的に使用される施設であり、機能を維持するために定期的に点検を施している。井戸の点検は、「揚水試験」を実施することであり、前述したとおり、従来はクレーンによる引上げ作業が必要となっていた。防災井戸バルブベントを適用することによりクレーン作業は不要となるため、省力化と安全性向上を図れる。この揚水試験における作業の省力化と安全性向上も多機能化のひとつであると言える。




図－4 防災井戸バルブベントの活用イメージ

## 6 おわりに

防災井戸バルブベントは、消雪用井戸を防災・減災に役立つ多機能水源に改良することができる。しかし、消雪用井戸は、道路付属施設として整備されるものであり、消雪以外の目的として活用するには、道路管理者や消防機関、自治体、電力会社など様々な関係者の理解と連携が必要となってくる。

また、防災井戸バルブベントは、普段は見えない地下ポンプ室に設置されるため、有効に活用されるために設置場所の周知や見える化などの工夫が求められる。

今後、これらの課題を解決しながら、地域の防災・減災に資する防災井戸バルブベントの普及に注力していきたい。

【参考文献】

1）糸魚川市、糸魚川市駅北大火～1 年の記録～、2018 年 2 月