

令和 7 年度
建設技術報告会
報文集

令和 7 年 11 月

北陸地方建設事業推進協議会
北陸地方建設技術報告・広報委員会

目 次

■報告技術

技術 番号	区分	技術名	発表者	所属	頁
テーマ：① 生産性向上、インフラ分野のDX					
1	共通	建設現場のDXソリューション「A+CSEL」	出石 陽一	鹿島建設株式会社	1
2	共通	ヘッドマウントディスプレイによる遠隔無線操作システムの開発	京免 繼彦	佐藤工業株式会社	5
3	共通	クレーンAI監視システム「WIT 3rdEYE」の開発	壹岐 直之	若築建設株式会社	9
4	共通	地盤改良の位置誘導システム「Tarpos 3D」の開発と活用事例	高垣 修太	株式会社不動テトラ	13
5	共通	「DX体験」を通じたインフラDX推進への取り組み	田邊 剛	国土交通省北陸地方整備局 北陸技術事務所	17
6	河川	ローカル5Gを用いたケーブルクレーンの自律化技術	久保 貴士	株式会社大林組	21
7	道路	山岳トンネル発破掘削の自動化	加藤 謙吾	佐藤工業株式会社	25
8	道路	シミズ・スマート・トンネルの開発	平野 宏幸	清水建設株式会社	29
9	道路	山岳トンネルにおける全自動鋼製支保工建込みロボットの開発	春田 克樹	前田建設工業株式会社	33
10	道路	簡易路面点検技術『マルチファインアイ』	柏谷 一明	福田道路株式会社	37
11	道路	施工データの集約・分析とデジタル技術を融合した次世代型道路改良工事の実現	中川 拓	株式会社本間組	41
12	港湾	減揺タンクによる浮遊ケーソンの動揺低減技術	倉原 義之介	東亜建設工業株式会社	45
テーマ：② 社会資本の的確な維持管理・更新					
13	共通	ウォーターPPP事業における質の向上・効率化技術の開発	山口 治	株式会社奥村組	49
14	河川	UAV自律飛行を活用した手取川流域における砂防施設等の点検手法の構築	中野 光	国土交通省北陸地方整備局 金沢河川国道事務所	53
15	道路	スマートフォンを活用した道路点検DXシステム	雄谷 光	国土交通省北陸地方整備局 新潟国道事務所	57
テーマ：③ 雪に強い地域づくり					
16	共通	廃孔消雪用井戸を再利用した地中熱ヒートパイプ融雪の試行	水戸部 将人	株式会社興和	61
テーマ：④ 自然災害からの安全確保					
17	河川	梯川水系における内外水統合型水害リスクマップの検討について	徳坂 文音	国土交通省北陸地方整備局 金沢河川国道事務所	65
18	道路	UB-WALL工法（中空床版橋アンカー定着工法）の開発	雨宮 美子	ピース・コンストラクション 株式会社	69
テーマ：⑤ 環境の保全と創造					
19	道路	機械式フォームドアスファルトによる中温化舗装技術	石垣 勉	株式会社NIPPO	73
20	道路	スチームレスプレキャストコンクリート	椎野 碧	ピース・コンストラクション 株式会社	77
21	港湾	藻類増殖材（イオンカルチャープレート）を用いた藻場造成	廣瀬 紀一	株式会社不動テトラ	81
テーマ：⑥ その他					
22	港湾	可塑性グラウト増深入工法の紹介と実構造物への適用結果	小笠原 哲也	五洋建設株式会社	85

①生産性向上、インフラ分野の DX

建設現場のDXソリューション「A⁴CSEL」

鹿島建設株式会社 メトロニクス・ソリューション部 自動化施工推進室 室長 ○出石 陽一
技術研究所 先端・メトロニクスグループ グループ長 浜本 研一

1 はじめに

鹿島建設では「人手不足・熟練労働者不足への対応」、「生産性向上」、「労働災害撲滅」などの建設業界における重要な課題解決を目的として自動施工システムA⁴CSEL（クワッドアクセル）の技術開発を進めており、ダム現場や災害復旧現場に適用してきた。本稿ではA⁴CSELを建設現場の課題を解決するDXソリューション（DXS）と位置づけ、システムの概要、代表的な適用例である成瀬ダムでの実績、今後の展開および技術開発について報告する。

2 A⁴CSELの概要

2. 1 A⁴CSELの目的

A⁴CSELは、機械を自動で動かすこと自体が目的ではなく「自動機械による作業方法や手順を決め、機械の組合せを最適化し、自動機械に作業データを送ることで多機種・複数の機械を自律的に自動運転すること」、「施工計画および作業の最適化を追求し続け、それにより仕事のやり方を根本から変革すること」を命題としており、A⁴CSELが有する様々なソリューションを広く展開して建設業にDXをもたらすことを目的としている。

2. 2 A⁴CSELのシステム構成

A⁴CSELは、自動化された建機による自律自動運転システムとそれらを効率的に稼働させるために必要な施工計画、施工管制、重機管理のサブシステムを包含する施工マネジメントシステムで構成されている。（図-1）施工計画システムは、施工するエリア情報や作業に必要な機械台数およびまき出し層厚などの作業条件を指

定し、作業毎の詳細なタイムスケジュールを自動で作成するシステムである。施工管制システムは、施工計画システムで事前に計画した各作業を、作業順序や作業エリア等の制約条件に基づき、各重機の重機管理システムに作業データを指示するとともに、全ての機械の作業状態を監視し、計画との差や異常を判定する。重機管理システムは、施工管制システムで作られた作業データを自動重機に送信する機能と自動重機から機体のデータを受信する機能を有している。自動重機は、重機管理システムから送信された作業データを基に、作業エリアの不陸、材料の荷下ろし位置のズレなどによって生ずる施工誤差を自ら修正し、自律的に自動運転する。

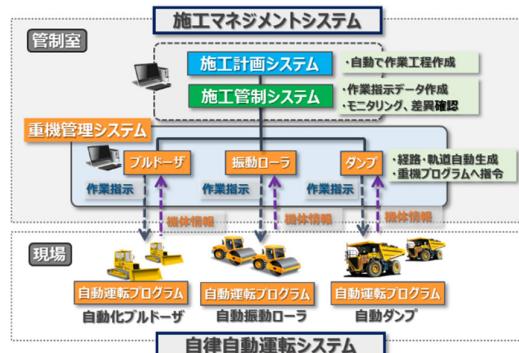


図-1 A⁴CSELのシステム構成

2. 3 A⁴CSELによるDXソリューション

2. 3. 1 施工のDXS：「現場の工場化」 作業の細分化と定式化、施工計画の最適化

A⁴CSELは、建設現場を生産工場のように変革することで、飛躍的な生産性の向上を目指しており、これを施工のDXと位置付けている。

建設現場の生産性が製造業に比べて低い要因として、進捗が作業員の能力に依存するため、事前に立てる施工計画、作業計画通りに仕事が進捗しないことがある。A⁴CSELでは、それらを変革する策の一つが作業の細分化、定式化、施工計画の最適化であると捉えている。全ての作業を一つ一つの動きまで細分化し、作業効率の高い一連の作業の繰り返しとなるように定式化する。次に多数の機械に定式化された作業を効率的に稼働させるための施工計画を作成し、シミュレーションにより実行可能か否を確認した後に実行する。

管制システムによるトータルコントロール

従来の建設施工と製造工程との大きな違いとして各作業時間のばらつきの大小がある。

A⁴CSELでは、細分化された施工データに基づく自動機械による作業であるためばらつきが無く、自動機械からの作業データにより計画に対する進捗を管制システムにて正確に把握することができる（図-2）。これにより、生産を自らのコントロール下に置くことが可能であり、自らの意思で現場を制御し生産性を維持することができる。技術者の経験値が重要な建設業において、より客観的に「データドリブン」な意思決定が行えている。

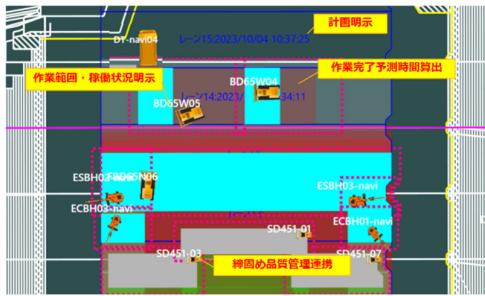


図-2 施工管制のイメージ

2. 3. 2 業務プロセスのDXS：遠隔集中管制

A⁴CSELでは、工事場所の異なる複数の導入現場を遠隔地から一括して管制する「遠隔集中管

制システム」を開発し現場導入している。建設産業は各現場に人を配置する「分散生産および分散管理」以外に選択肢を持ち得なかつたが、当システムの導入により「分散」と「集中」双方の長所を取り入れた最適な業務プロセスへの変革が可能となる。

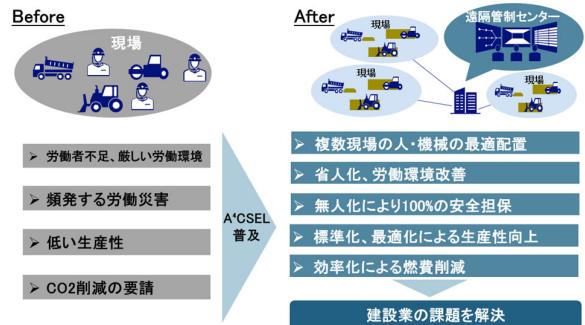


図-3 遠隔集中管制による効果概念図

2. 3. 3 技能伝承のDXS：「技能のコード化」

建設業のみならず他産業も含めて、熟練技能者の高齢化により若い世代へ技能伝承がされないまま退職を迎えててしまう、技能の伝承不足が深刻な問題となっている。

A⁴CSELでは、最適化された作業データを作成するプログラムにより熟練技能者に匹敵する技能をデジタル化、コード化し、ソフトウェアとしてコンピュータに伝承する「新たなかたち」を作ることで、多くの熟練オペレータを育成する必要はなくなり、A⁴CSELのソフトを使える管制員を育成することで対応可能とする。プログラムは無限にコピーできるので、自動重機は「熟練オペレータ付き機械」と同等以上のものとして価値の高いものになると考える。

3 A⁴CSELの現場適用 成瀬ダムの実績

成瀬ダムは、秋田県雄勝郡東成瀬村に建設される多目的ダムで、堤体積約485万 m³、堤高114.5mの国内最大級の台形CSGダムであり、豪雪地帯に位置することから堤体打設が4月～11月

に施工時期が限定されるため高速大量施工が求められた（900m³/h）。鹿島はこれに対応すべく堤体打設にA⁴CSELを導入し、2020年度から2024年度にかけ累計約269万m³の堤体CSGを自動施工により打設した。



写真一 2023年成瀬ダム自動施工状況

機械名	仕様	台数				
		2020年	2021年	2022年	2023年	2024年
自動ダンプトラック	HD465-7E1 (55t級)	8	10	11	7	11
自動ブルドーザ	D65Pxi-1B (24t級) WidePAT	2	3	3	3	2
仕上げブルドーザ	D65Pxi-18 (24t級) ストレートチルトドーザ型	1	1	1	1	1
自走式ロードマスク	ZX130K-5B	2	2	2	2	2
自走式ロードマスク	ZX110-1B					
端部整形パッカホウ	ZX135US-5B	2	2	2	2	2
端部締固め機	ZX135USK-5B	2	2	2	2	2
自動振動ローラ	SD45I (11t級)	3	4	4	4	4
自動仕上げローラ	TW504 (7t級) SD45I (11t級)	2*	2*	2*	2*	2*
合計		22	26	27	23	27
		(15+5)	(17+7)	(18+7)	(7+14)	(18+7)
						(16+6)

赤字で示す機械は、自動運転である。黒字で示す機械は、有人運転(ナビシステム搭載)である。

*自動運転可能であるがCSG表面平坦性自確認の必要性に応じ有人運転でも実施した

表一 1 機械編成一覧

項目	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	合計	平均
自動化打設数量 (m ³)	100,724	406,409	709,198	1,210,766	270,738	2,697,835	-
自動化施工率 ^{*1} (%)	54	94	97	98	98	-	-
最大値	16	62	41	48	50	-	-
最小値	37	80	79	86	83	-	73
平均値	264	273	280	287	257	-	-
打設速度 ^{*2} (m/h)	72	82	124	74	50	-	-
最大値	151	176	196	183	169	-	175
最小値							
平均値							

*1 各リフトで自動化施工を実施した割合(面積比)、2024年度は自動ブルドーザを使用した施工リフトまでの実績

*2 1打設当たりのブルドーザ1台当時の各種ロス時間を含む打設開始から終了までの自動化打設数量を打設所要時間で除した値

表一 2 自動施工実績

自動施工の管制は表一 1 に示す編成を、最小3名の管制員にて中夜勤体制で連続運転を実施した。管制は、遠隔管制室（神奈川県小田原市）もしくは成瀬ダム管制室のいずれかから実施し、自動施工による人員の削減率の最大値は、自動ダンプ運用時で79%であった。

自動施工率^{*1}は最大値が98%、全年度の平均値が73%であった。自動施工による打設速度^{*2}は

最大値が287m³/h、全年度の平均値が175m³/hと標準積算値の換算値（湿地16t級の103m³/hを湿地24t級に換算した154.5m³/hと比較した値）と同等以上で、生産性を大きく向上させ、2023年5月にはコンクリート月間打設量の日本記録28.1万m³を打ち立てるなど、生産性を大きく向上させた。

また、自動機械は最適化された経路により作業するため走行距離が低減でき、CO₂排出量が有人運転と比べ約40～50%の削減を達成した。



写真二 西湘からの遠隔管制状況

4 A⁴CSELの適用範囲の拡充

今後、ダム工事を中心に培った技術を進化させ、より多くの工種への普及展開を進める。その皮切りとして造成工事への導入を開始している。造成工事において生産性向上を図るために、造成工事特有の現場環境への対応した自動施工技術が必要である。以下に、2024年からA⁴CSELを導入している造成現場での実施事項および展開促進に向けた技術開発について概要を紹介する

4. 1 造成工事への導入

造成工事では、ダム工事と類似の作業においても工事進捗や場所ごとに変化する地形・地質など、様々に変化する現場条件への対応という技術的な課題がある。まずは、振動ローラの自動運転を皮切りに実現場で運用しつつ技術的課題の解決を図っている。

「岡崎市阿知和地区工業団地造成事業」（愛知県岡崎市）に自動化改造した振動ローラ2台を導入し、転圧作業の自動化施工の運用を開始した。導入に際し、造成工事に対応した自動振動ローラ用施工計画システムを開発し、これにより施工エリアなど日々変化する現場条件にあわせ、複雑な地形や高低差（排水勾配）を反映した最適な施工計画の自動作成を可能とした。



図一4 自動ローラ2台による連携作業

4. 2 適用範囲の拡充に向けた技術開発

4. 2. 1 新機種の開発：自動アーティキュレートダンプトラック

造成工事の仮設道路で運搬の自動化を目的とし、自動アーティキュレートダンプトラックの開発を進めている。アーティキュレートダンプトラックは、その特徴である中折れ式の機構を活かした自動制御により、悪路の走行、小範囲での旋回が可能であり造成工事の仮設道路を走行できる。ダム工事では自動リジットダンプによる堤体上での自動運搬を実現した。そこで培った最適な経路生成技術と、新たに開発した中折れ式の機構特有の後進操作の最適化により、最短距離で効率的かつ正確に材料を自動運搬することを可能とした。

4. 2. 2 対象作業の拡充：自動バックホウによる掘削、積込み

自動バックホウは、積込み箇所において、機体に搭載したセンサーから得るデータで材料山の形状をリアルタイムに認識し最適な掘削を行うと同時に、自動アーティキュレートダンプの停止位置を認識し最適な積み込を実施することを可能とした。

4. 2. 3 積込み、運搬、敷均し、転圧までの一連の盛土作業を全て自動化

自動バックホウによる積込み、自動アーティキュレートダンプによる運搬と荷下ろし、自動ブルドーザによる敷均し、自動振動ローラによる転圧にいたる一連の作業を各自動重機の連携により実施した。



写真一3 一連作業の自動重機による連携作業

6 おわりに

鹿島は、今後もA⁴CSELを進化・発展させることで「現場の工場化」を進め、建設生産システムの変革に挑戦する。建機の自動運転機能と性能の向上、ならびに自動化機種を増強すると共に、現場環境に合わせて柔軟に対応できる汎用性の高いシステムへ発展させ、適用可能な工種や作業を拡大することで、造成工事を始めとする多様な分野への普及展開を図る所存である。

参考文献

- 出石陽一ほか：自動化施工システム A⁴CSEL®によるDX ソリューション，土木施工 VOL. 65 No. 1, pp43–46, 2024
- 「自動化施工システム「A⁴CSEL」造成工事への本格適用を開始, 鹿島建設（株）プレスリリース. 2024.
- 「自動化施工システム「A⁴CSEL」4機種連携により盛土の一連作業を自動化」, 鹿島建設（株）プレスリリース. 2025.
- 菅井貴洋ほか：成瀬ダムにおける完全自動化システムの実現，土木学会第80回年次講演会, 2025.

ヘッドマウントディスプレイによる遠隔無線操作システムの開発

佐藤工業株式会社 ○ 技術センターICT推進部長 京免 繼彦
土木事業本部技術推進部長 中田 範俊
技術センターICT推進部 繩田 晃大

1はじめに

近年、新規就業者の減少、熟練技能者の大量離職により人手不足が深刻化し、多様な人材の活用と現場生産性の向上が求められている。このような状況の下、重機の遠隔操作は場所を問わず働く環境を構築でき、今後建設業界の有効な課題解決策となりうるものであると考えられる。一方、現状の重機の遠隔操作は、多数のディスプレイにて多数のカメラの映像を視聴しながら行うことが一般的である。この方法では、重機操作に加え映像の切り替え、画角調整を行う必要があり、距離感が肉眼と著しく異なるため操作に熟達が必要である。当社は、肉眼に近い操作の実現のため、最新のヘッドマウントディスプレイ（以下、HMD）を用いた映像支援システムを開発した。本稿は本システムの概要と無線通信への適用、トンネル現場での実証結果を報告する。

2本システムの概要

2.1 技術の特徴

本システムは、HMD を着用してドリルジャンボの遠隔操作を行う。視覚支援としては、ドリルジャンボに設置した 2 種類のカメラと、HMD のパススルーカメラによるシステムとしている。

①魚眼レンズカメラ

切羽の仮想現実の映像をヘッドトラッキング機能により 360 度見渡すことができる。これにより映像の向き（画角）、拡大縮小、映像の切

り替え操作が不要となるだけでなく、違和感のない距離感で実際のドリルジャンボの操作室にいる感覚で操作できることが特徴である。

②拡大縮小用 PTZ カメラ

操作時に切羽の部分拡大が可能なように PTZ（パン・チルト・ズーム）カメラを設置した。

③パススルーカメラ

HMD のパススルーカメラ機能（ユーザーの周囲の環境をリアルタイムで HMD 上に表示する機能）を利用して、ドリルジャンボ操作ユニットを表示する。これらの 3 つのカメラ映像を HMD に合成して表示することで、操作モニターは HMD のみでドリルジャンボを遠隔操作できる。

2.2 システム構成

本映像システムの構成は、図-1 の通りである。ドリルジャンボには、魚眼レンズカメラと PTZ カメラを搭載する。HMD を設置したまま切羽の仮想現実内でドリルジャンボの遠隔操作を行うには、操作ユニットや削孔時の圧力等の数値を表示するモニターを確認（操作者が目視）する必要がある。このため、パススルーカメラとして HMD に取り込めるカメラ付きの MetaQuest3 を採用した。

ドリルジャンボに設置したカメラ映像は、遠隔操作室の PC を経由して HMD に無線 LAN で伝送する。遠隔操作ユニットとモニターの映像は、パススルーカメラとして特定の領域を位置固定させて HMD に表示させる構成である。

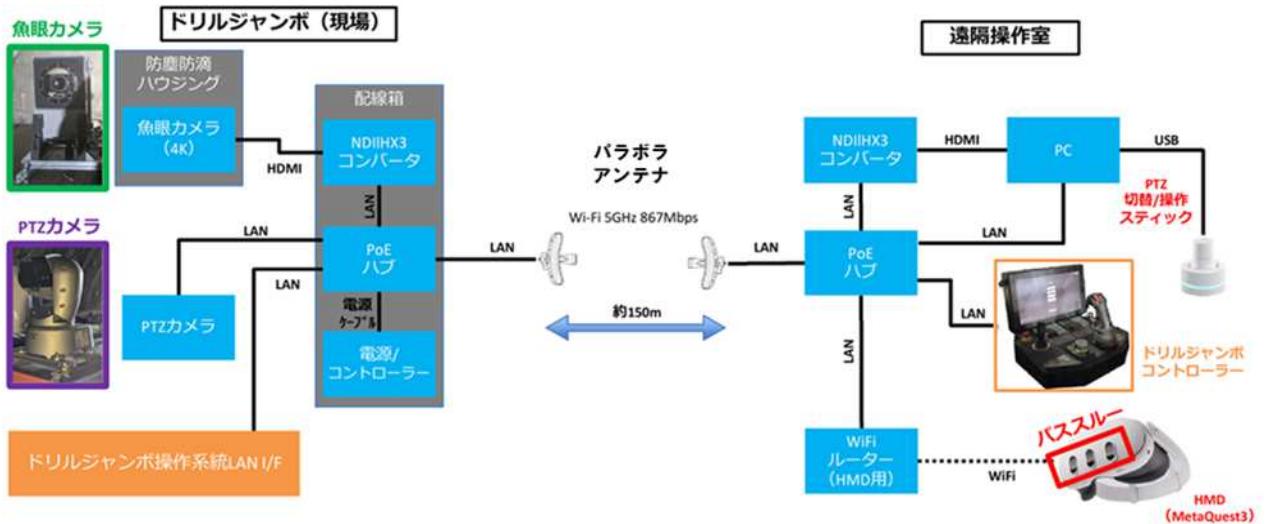


図-1 システム構成図

図-2 に HMD に表示される仮想現実とパススルー（遠隔操作パネルとモニター）の合成映像を、図-3 にヘッドトラッキング（左上部を見上げた）により得られる映像を示す。



図-2 HMD での表示映像（その 1）



図-3 HMD での表示映像（その 2）

また、拡大映像を視聴しながら操作した方が良い場合が想定できる。例えば、既削孔位置への再削孔など繊細なスティック操作が必要な場合は、映像を拡大させて視聴する方が有利である。

る。当シーンを想定して、HMD の仮想現実に PTZ カメラの拡大映像を合成させる機能を盛り込んだ。魚眼レンズカメラ映像の仮想現実内でヘッドトラッキングにより拡大したい位置を合わせ、PTZ カメラ映像の貼付けと拡大、縮小は PC に接続したスティックにて操作できる構成とした。図-4 に当機能で得られる映像を示す。



図-4 HMD での表示映像（その 3）

3 無線通信への適用

3. 1 無線通信への課題

遠隔操作の主目的は作業現場から離れて操作を行うことであり、その実現には通信の無線化が必須である。特に遠隔操作は、映像の視認性の確保が不可欠である。今回は、映像の視認性の確保の視点から 200 万画素 (1920×1080) の高画質 (FHD) PTZ カメラと 800 万画素

(3840×2160) の超高画質 (4K) 魚眼レンズカメラを使用した。これらのカメラ映像の無線通信に必要な通信速度は、200 万画素の高画質 (FHD) カメラで 15Mbps, 800 万画素の超高画質 (4K) カメラで 25Mbps である。映像の無線通信に 40Mbps を確保する必要がある。Wi-Fi 環境を使用した場合、同一チャンネルを使用する他の端末の通信の影響により映像伝送に必要な通信速度を確保できない可能性がある。無線通信は、2 台のカメラ映像を伝送できる通信帯域の確保が課題である。

3. 2 無線通信の課題解決策

パラボラアンテナ採用の中継機は、中継部分の伝送にのみ全帯域を使用する構成である。また、パラボラアンテナで双方のビームが絞られているので、周辺の他の 5GHz や 2.4GHz の Wi-Fi との干渉による速度低下も抑制できる（図-5 参照）。



図-5 パラボラアンテナ採用中継機
イメージ図

このため、通信規格 802.11ac、最大通信速度 867Mbps の屋外長距離通信用指向性アンテナをドリルジャンボと遠隔操作室間に配置することで、干渉による速度低下と安定した通信帯域を確保させた（写真-1、写真-2）。



写真-1 屋外長距離通信性アンテナ
配置状況(その 1)



写真-2 屋外長距離通信性アンテナ
配置状況(その 2)

3. 3 通信システムの構成

通信システムの構成も、前述の図-1 で示した構成に基づく。高画質 (FHD) の PTZ カメラの映像は、LAN 信号で屋外長距離通信用指向性アンテナ間を無線で通信させる。今回は HDMI 通信の超高画質 (4K) の魚眼レンズカメラを使用したため、屋外長距離通信用指向性アンテナ間を無線 LAN で通信するには NDI/HX コンバーターで HDMI から LAN 信号に変換させる必要があった。また、無線伝送後の遠隔操作室でも、NDI/HX コンバーターで LAN から HDMI 信号に再変換させて PC に接続して映像処理を行う必要があった。

ドリルジャンボの遠隔操作は、LAN I/F を用いた遠隔通信システムを採用しているため当

屋外長距離通信用指向性アンテナ間を無線通信させることができた。

4 現場実証

実際の現場にて、開発した映像システムを本通信システムのもとで使用しドリルジャンボの遠隔操作を実施した（写真-3）。NTP同期させた1/1000秒まで表示できる時計Appをドリルジャンボカメラ、HMD手元に配置し、映像の遅延時間を測定した（写真-4）。当無線環境下での映像の遅延時間は、魚眼レンズカメラ、PTZカメラでそれぞれ0.5秒、0.2秒であった。当遅延時間であれば、問題なくドリルジャンボを遠隔操作できることも確認できた。また、今回は3章に示す通り遠隔操作のメイン映像となる超高画質（4K）の魚眼レンズカメラをHDMI通信形式のものを採用したため、無線通信はHDMIからLAN信号に、映像の閲覧はLANからHDMI信号に変換させる必要があった。当信号変換に約0.2秒の遅延が発生すると推定される。よって、LAN通信形式の超高画質（4K）の魚眼レンズカメラを使用すれば、約0.3秒まで短縮可能と考える。



写真-3 現場実証状況



写真-4 映像遅延測定

5 課題と今後の展望

開発した本映像システムを無線通信のネットワーク環境を構築し使用した結果、現場でのドリルジャンボの操作に遜色がないことが確認できた。また、現場でのリアル操作では不可能な、映像の拡大機能も盛り込むことができた。しかし、操作性を左右する映像の遅延時間は、現場で構築するネットワークにより変動する。今後は映像の遅延時間を短縮できるネットワーク構成を模索し、インターネット経由での遠隔操作の実現とバックホー等の汎用重機への適用を目指す。

6 おわりに

当社では、安全性向上と労働時間短縮を目的にトンネル施工の省人化・自動化に取り組んでいる。最近では「発破パターン自動適正化システム」を実用化し効果を確認した。遠隔操作技術を組み合わせ、施工指令室（操作室）にいる「施工責任者」が発破パターンと装薬量を「発破パターン自動適正化システム」で決定して、施工指令室内のジャンボオペレータに指示するとともに施工指示データをジャンボに転送し、遠隔操作でフルオートせん孔作業を開始する一連の作業の自動化を目指している。最終的にはロボット化につながる基盤技術として今後も現場実証を重ねていく。

クレーンAI監視システム「WIT 3rdEYE」の開発

若築建設 技術研究所 所長 ○壹岐 直之
技術研究所 次長 土屋 洋

1 はじめに

クレーン作業時に発生する主な事故として、①吊荷の落下による災害、②吊荷との衝突による災害、③クレーンの倒壊による事故の三つが挙げられる。このうち、①と②の事故は、吊荷が地面から離れて目的地に到達するまでの間、吊荷周辺に人が近づかないよう徹底することで、ほぼ確実に防止できる。

これまで、吊荷周辺に作業員が侵入することを検知するシステムは存在しており、予め設定された警戒範囲内に作業員が入ると警報を発する仕組みとなっている。しかし、このようなシステムでは、吊荷の大きさに関わらず警戒範囲が固定されるため、作業内で最も大きな吊荷に基づいて警戒範囲を設定した場合、比較的小さな吊荷に対しても警報が頻繁に鳴るという問題が生じる。その結果、作業員が警報に対する注意を怠るリスクが高まることが懸念される。

さらに、合図者以外の作業員が、十分な安全確認を行わずに、クレーン運転手へ指示を出すことで、事故が発生した事例もある。

これらの課題を解決するため、吊荷の形状や寸法に応じて警戒範囲を動的に調整し、合図者からの指示を正確に伝達する機能を備えたシステム「WIT 3rdEYE」を開発した。

2 WIT 3rdEYEについて

2.1 システムの概要

WIT 3rdEYEは、人工知能(AI)による画像認識技術を活用し、作業員と吊荷の外形を同時に認識するとともに、吊荷の外形と作業員と

の離隔距離を算出する機能を有している。算出された離隔が、予め設定した安全距離を下回る場合には、作業員に対して腕時計型デバイスの振動による警報を発信できる。

さらに、合図者からの吊上げ作業開始の指示や、吊荷移動中における停止の指示を、合図者用デバイスを介して、クレーン運転手へ伝達する機能も組み込まれている。

WIT 3rdEYEの概念を図-1に示す。

2.2 システムの構成

WIT 3rdEYEの構成機器を図-2に示す。このシステムは、画像認識を行うためのEdgePC、

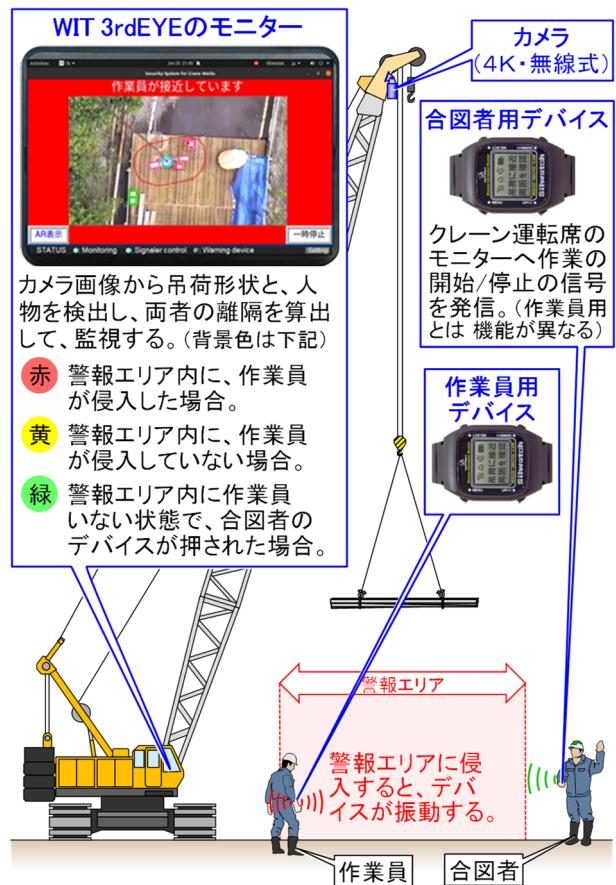


図-1 WIT 3rdEYEの概念図



図-2 WIT 3rdEYEのシステム構成

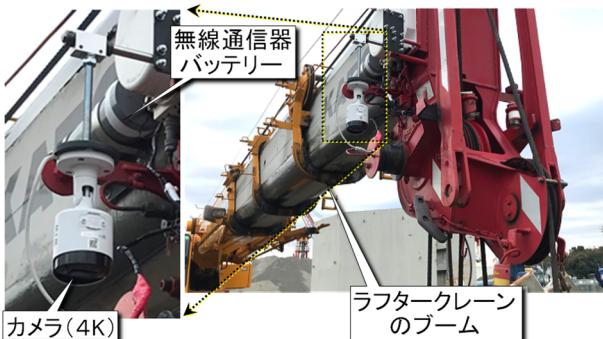


図-3 WIT 3rdEYE(カメラ)の取付状況

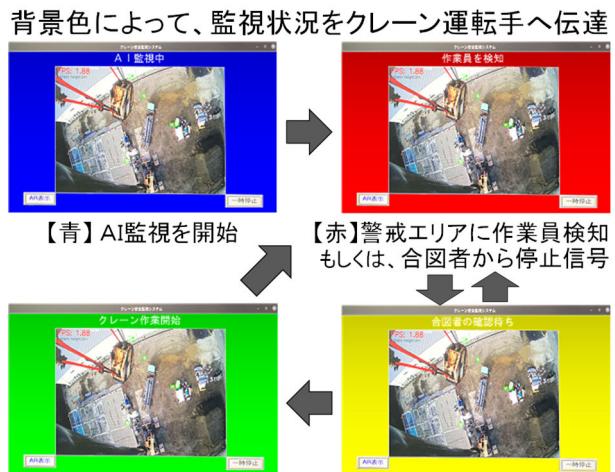
クレーン運転席に設置するモニター、作業員および合図者が装着する腕時計型デバイス、腕時計型デバイスとの通信を行う送受信機、およびクレーンブームトップに取り付ける4Kカメラで構成されている。

なお、腕時計型デバイスは作業員用と合図者用で機能が異なる。合図者用デバイスには、クレーン作業の開始および停止の指示を発信する機能が追加されている。

2.3 カメラの取付状況

カメラの取付状況を図-3に示す。本システムでは、4K画質で動画撮影が可能なカメラを採用している。カメラの取り付けに際しては、常に下方を撮影できるようジンバルを介してクレーンのブームに固定している。

また、ラフタークレーンなどブームが伸縮するタイプのクレーンにおいても、ケーブルが作業の妨げとならないよう配慮し、カメラは無線式とした。無線通信器とバッテリーは直径10cm×長さ30cmの防水容器に収納し、カ



【青】AI監視を開始
【赤】警戒エリアに作業員検知もしくは、合図者から停止信号
【緑】警戒エリアに作業員なし
【黄】警戒エリアに作業員なしつかし、合図者から開始信号
合図者からの確認待ち

図-4 WIT 3rdEYEの運用方法(モニターの背景色)

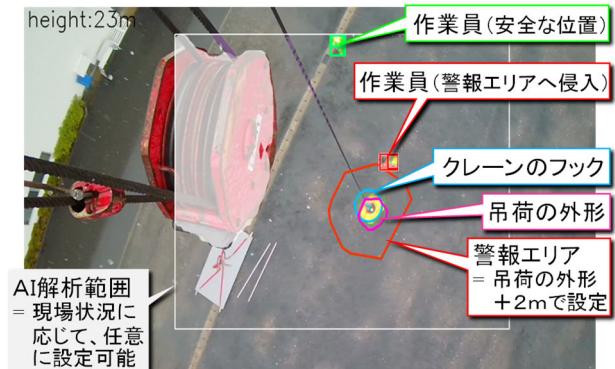


図-5 WIT 3rdEYEのモニター画面の説明

メラの近傍に固定する構造とした。これにより、安定した通信と電力供給を確保するとともに、現場での設置や運用の利便性を向上させている。

2.4 システムの運用方法

WIT 3rdEYEのモニターの説明を図-4と図-5に示し、現場での運用方法を以下に記す。

作業開始前に、クレーン運転手にはモニターの背景色が【緑】になった場合のみ操作を行い、【黄】または【赤】になったら停止するよう指示する。また、合図者には作業員が吊荷から完全に離れ、周囲の安全を確認したうえで「開始」ボタンを押すよう指示する。

WIT 3rdEYEを起動すると、AIによる監視が開始されたことを示すためモニターの背景色が【青】に変わる。玉掛け作業中は作業員が吊荷に近づくため、警報エリア内に作業員が

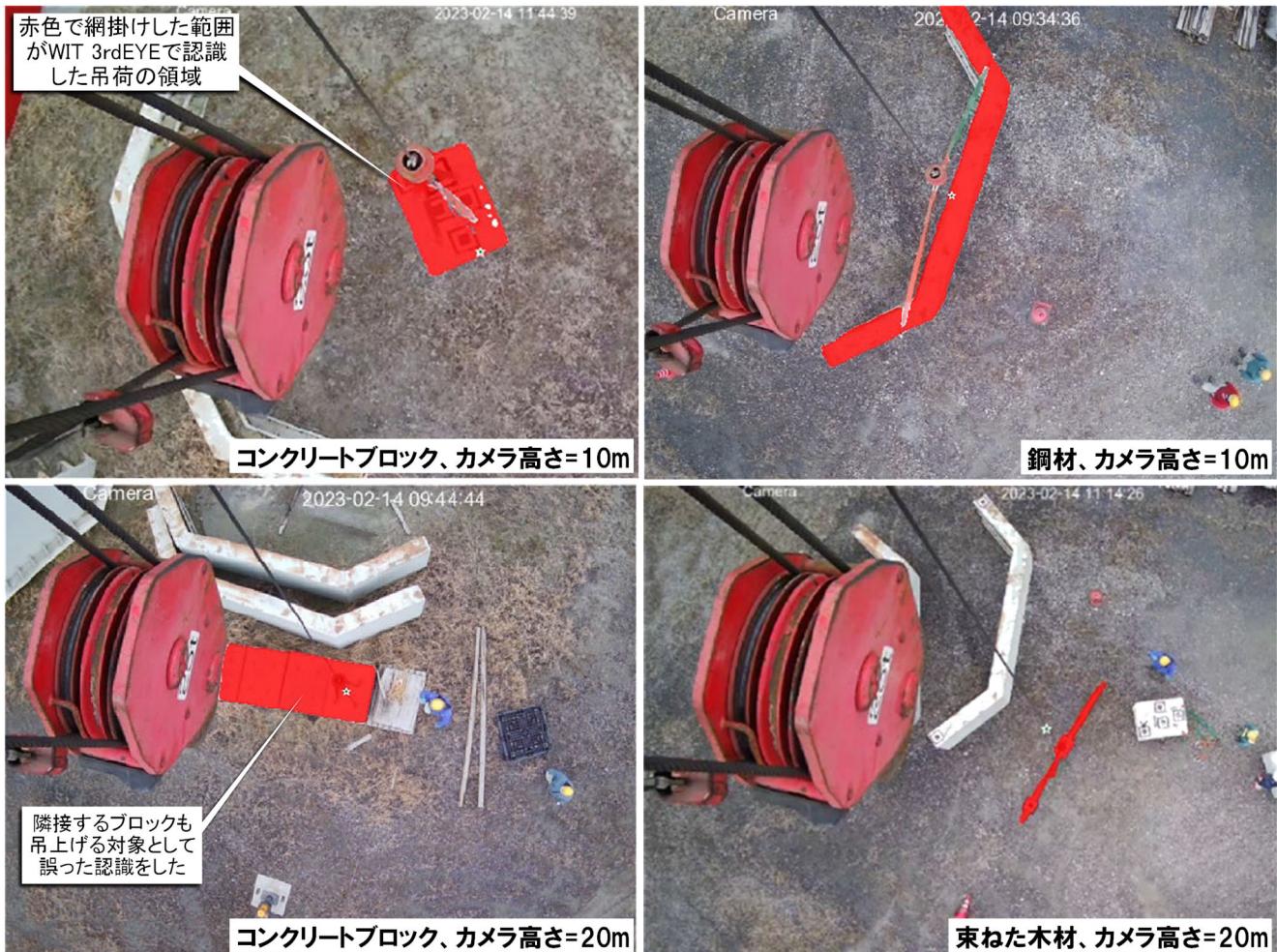


図-6 WIT 3rdEYEによる吊荷の認識例

検知され、モニターの背景色が【赤】になる。玉掛け作業が完了し、作業員が警報エリアから退出すると、背景色が【黄】に変わる。その後、合図者が「開始」の信号を発信すると【緑】になり、クレーン運転手は操作を開始する。吊荷の移動中に、AIが警報エリア内に作業員を検知した場合、または合図者が「停止」の信号を発信した場合、背景色は【赤】に変わる。なお、警報エリア内に作業員がいる場合は、「開始」の信号を発信しても背景色は【赤】のまま変化しない仕様になっている。

警報エリアは吊荷の外形からの離隔またはフックを中心とした半径で設定可能であり、吊荷落下時の影響範囲や、現場の状況を考慮して、稼働前に適切な値を設定する。

2.5 WIT 3rdEYEの吊荷形状の検出方法

施工現場では吊荷の形状が多岐にわたるため、すべての吊荷を事前にAIへ学習させることは現実的ではない。このため、WIT 3rdEYEは以下の方法で吊荷の外形を検出している。

まず、クレーンのワイヤーとフックを事前にAIへ学習させておく。ワイヤーは施工現場の他の物体と比較して極端に細長く、カメラの画角内ではほぼ一定の位置にあるため、認識が容易である。次に、認識したワイヤーの延長線上付近を検索対象として、フックを検出する。フックは形状が数種類に限定されているため、事前学習が容易である。また、検出範囲をワイヤーの延長線付近に限定することで精度を向上させている。最後に、認識したフックの周辺で色調や明度が同じ領域を吊荷



図-7 WIT 3rdEYEによる作業員の認識例

として認識し、その外形を検出するのである。なお、上述した吊荷の認識方法は、現在特許出願中である。

3 実証実験における吊荷と作業員の検出例

吊荷の外形を検出させた例と、作業員を検出させた例を、図-6 および図-7 に示す。なお、これらの図は実証実験中に取得した画面であるため、現場での運用画面（図-5）とは表示内容が異なる。

吊荷の外形検出では、コンクリートブロック（長さ1m×幅0.9m）、鋼材（長さ6m）、束ねた木材（長さ4m）を吊荷として使用し、カメラの高さを10mおよび20mに設定して実験を行った。この実証実験により、吊荷の外形とをほぼ正確に認識できることが確認された。なお、吊荷と地面に置かれた物体が重なり、人間の目でも識別が難しい状況下では、AIが吊荷の形状を誤認識が発生するケースも見られたが、吊荷が移動して重なった物体と離れると、吊荷の外形を正確に認識できることが確認された。

作業員の検出については、図-7 に示すように、カメラの高さに依存せず、ほぼ正確に行えることが実証された。



図-8 実現場におけるWIT 3rdEYEの運用状況

4 まとめ

通常は、クレーン運転手や合図者による目視で安全確認を行っているが、WIT 3rdEYEを運用することによって、吊荷と作業員に対する上空からの常時監視が加わるため、クレーン災害の防止効果が向上する。また、合図者の確認機能を組み込むことによって、クレーン作業時の安全確認手順が厳格化でき、クレーン災害の防止効果がさらに向上できると考えている。

現在（2025年9月）、WIT 3rdEYEは東北と九州の2か所の港湾工事で運用している（図-8）。これらの現場で撮影された画像を用いて、AIの追加学習を行い、吊荷と作業員の検出精度をさらに向上させる予定である。

地盤改良の位置誘導システム「Tarpos 3D」の開発と活用事例

(株)不動テトラ 北陸支店 地盤研究室 田口 雄一
地盤研究室 ○高垣 修太
地盤研究室 平良 早弥香

1. はじめに

「Tarpos 3D」は、GNSSから2D+3D位置情報を取得し、平面+3D表示で杭芯を誘導する地盤改良システムである。また、開発済みである3D施工状況管理システム「Visios-3D」と併用することで位置誘導と施工状況の双方をリアルタイムに確認することができるシステムを構築した。

本報では、「Tarpos 3D」の開発による施工技術の向上と、「Visios-3D」とのICT技術の連携による相乗効果について、活用事例を交えながら紹介する。



2. Tarpos 3Dの開発による効果

「Tarpos 3D」の開発により施工機械の位置誘導の技術が向上した。その効果について2つの観点から紹介する。

2. 1 施工性の向上

従来は作業員による測量と誘導で対応していた杭打機の位置誘導を、GNSSから得られる情報から誘導を可能とした。これにより、人為的ミスを防ぐことが可能である。また、オペレーターや誘導員の技量に関係なく位置誘導を行うことが可能となり、施工性の向上が図れた。

2. 2 安全性の向上

従来は改良位置を示す“目杭”まで杭打機を

誘導する誘導員が必要であった。固化工法の場合、施工直後の地盤改良の施工エリアは改良杭が固まるまで足場が悪く、誘導員が施工済みの改良杭に落ちる危険性があった。また、オペレーターとの連携ミスにより、誘導員と機械が接触する危険があった。「Tarpos 3D」の開発により、誘導員が危険な位置に立つ必要が無くなり、安全性が向上した。



図-1 Tarpos 3Dによる誘導

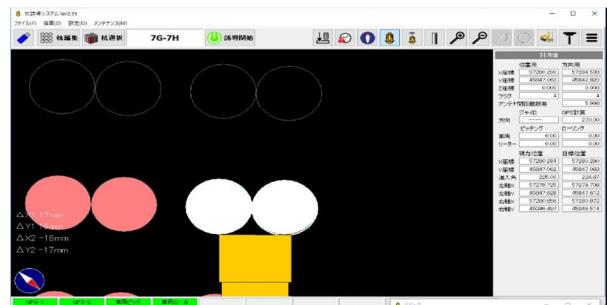


図-2 Tarpos 3Dによる誘導画面



図-3 従来の誘導

3. 「Tarpos 3D」と「Visios-3D」の連携

3.1 「Visios-3D」の概要

「Visios-3D」は地盤改良の施工状況をリアルタイムで可視化する3D施工状況管理システムである。「Visios-3D」の概要について図-4に、アニメーションの表示状況を図-5に示す。

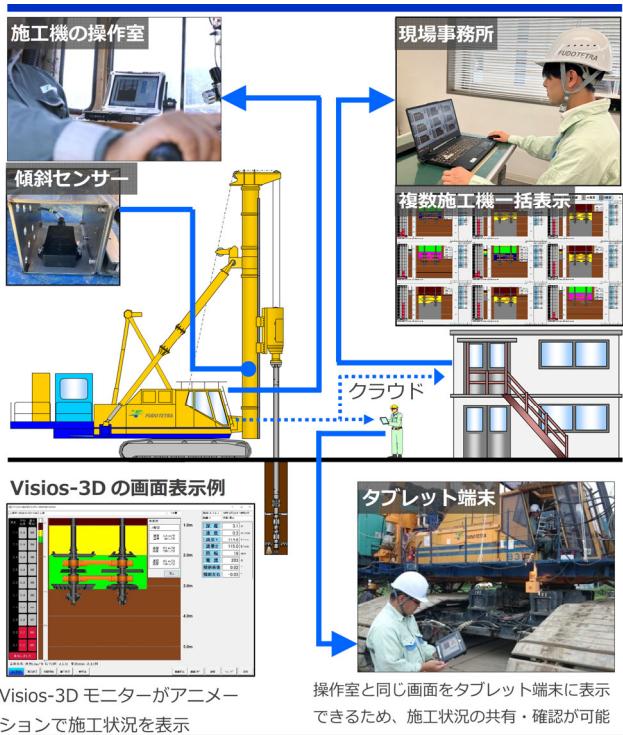


図-4 Visios-3Dの概要

Visios-3Dの画面表示（深層混合処理工法：CI-CMC工法）例

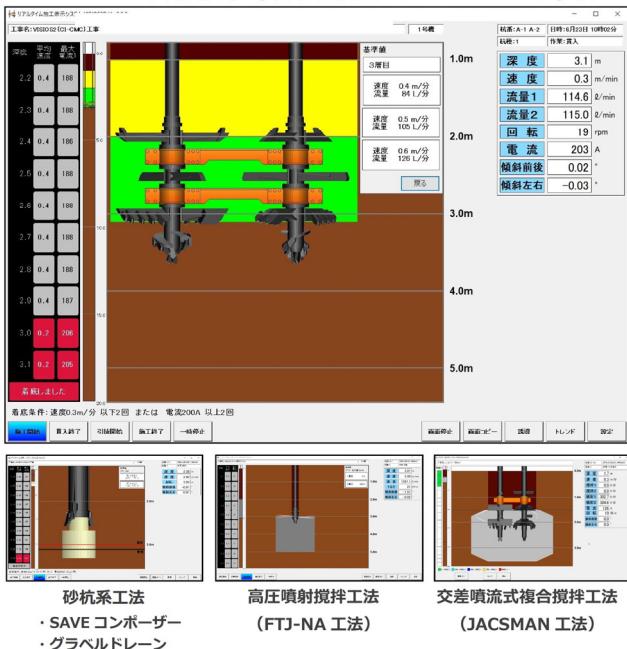
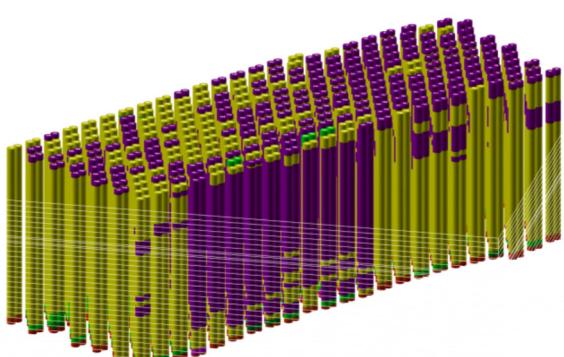


図-5 Visios-3Dのアニメーション表示

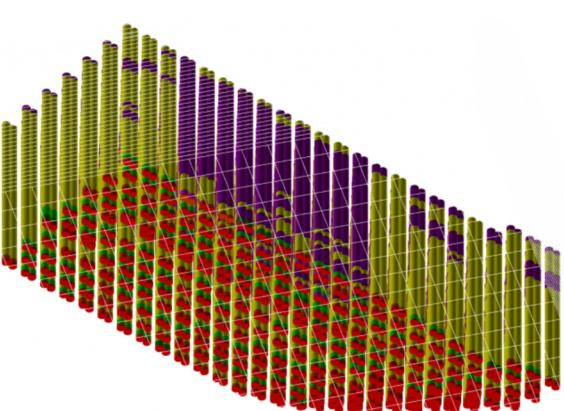
「Visios-3D」では、オペレーターの施工支援画面と同じ情報を、クラウドサーバーを用いてタブレット端末や事務所内に設置したパソコン等で複数の現場スタッフがリアルタイムに見ることができる。

また、地盤内の施工状況がリアルタイムにアニメーション表示されるため、離れたところにいる現場スタッフ同士でも施工状況の確認や共有を視覚的な情報を用いて行うことが可能である。

さらに、地盤改良の成果を従来の帳票（オシログラフと集計表）だけでなく、3D-PDFで3次元モデル化が可能であるため（図-6）、施工結果を直観的に確認することができるシステムである。



上から俯瞰した図



下から俯瞰した図

図-6 施工結果の3次元モデル化

3. 2 ICT技術の連携による相乗効果
 「Tarpos 3D」の施工機位置誘導システムに、「Visios-3D」のリアルタイム施工管理システムを併用することで、リアルタイムな施工状況を3D表示することが可能となる。

このため、地盤改良工事の進捗状況や施工状況を容易に把握することができるほか、支持層・地中埋設物・近接構造物を3D表示することができ、安全性と視認性が向上した状態で、地盤改良を施工することが可能となった。

以下に、システムの併用による相乗効果の詳細を示す（図-7）。

3. 2. 1 支持層や構造物などの3D表示

施工中は対象となる杭のみを表示し、設計情報は透過、実施情報は塗りつぶすことで視認性

の向上を図った。

また、支持層・地中埋設物・近接構造物を3D表示することで、施工機の軸先端が支持層に到達したかの確認や、地中埋設物と施工機の干渉チェックを行うことが可能となった。

3. 2. 2 進捗状況の見える化

施工前後で改良体を色分けすることで、工事全体の進捗を一目で把握することができる。

3. 2. 3 施工状況の共有と確認

現場内の無線LANやクラウドサーバーを用いて、運転席と同じ画面をタブレット端末に表示することができるため、現場内でリアルタイムの施工状況を共有することができる。

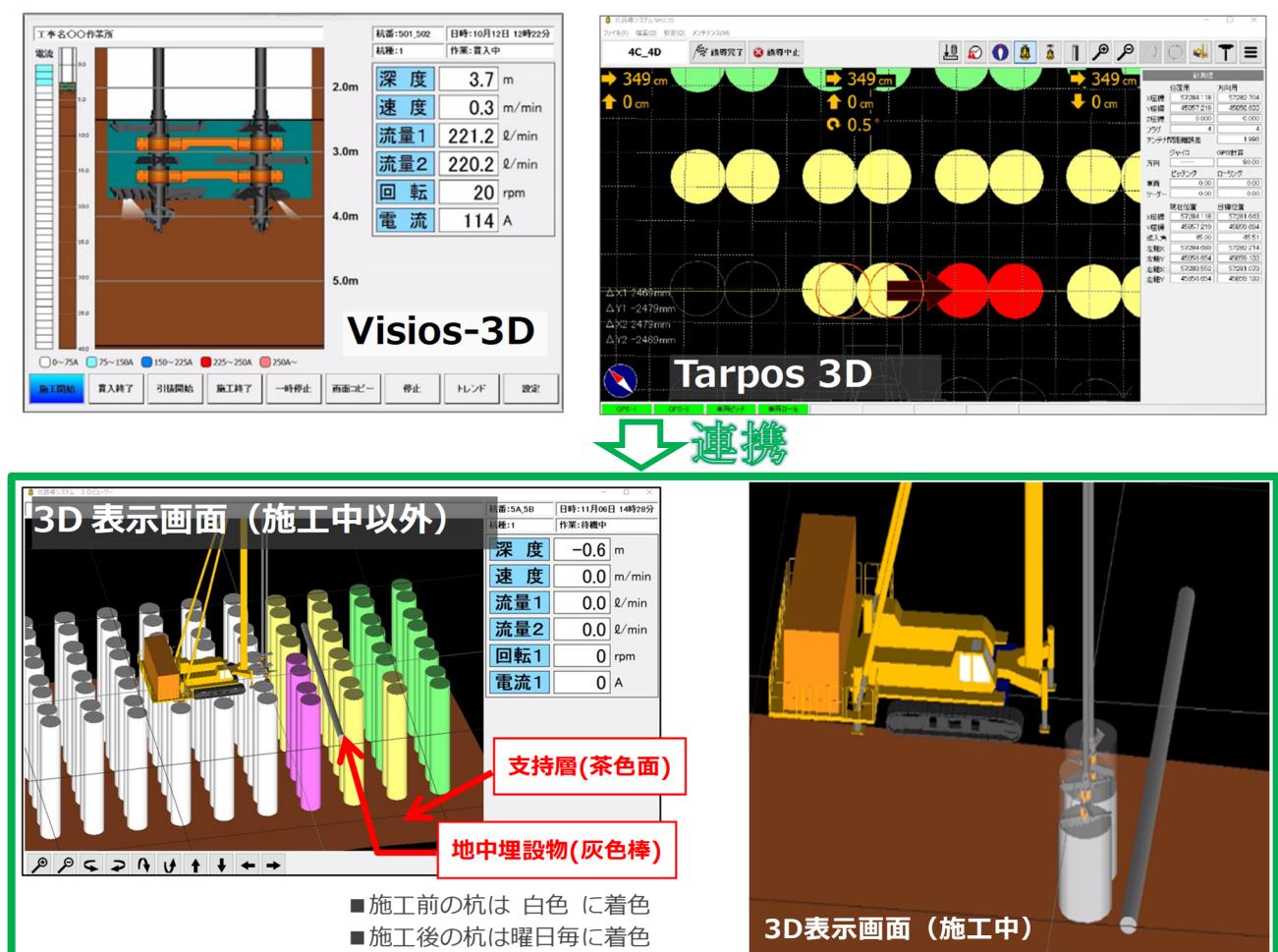


図-7 Tarpos 3Dによる陸上工事のリアルタイム3D表示

3. 3 活用事例

「Tarpos 3D」と「Visios-3D」を用いて深層混合処理工法を施工した事例を紹介する。現場概要を表-1に、改良平面・断面図を図-8、9に、「Tarpos 3D」を使った現場確認状況を図-10に示す。

表-1 現場概要

場所	新潟県 某所
工法	深層混合処理工法
改良仕様	設計基準強度：1600～2300kN/m ² 改良形式：ブロック式改良

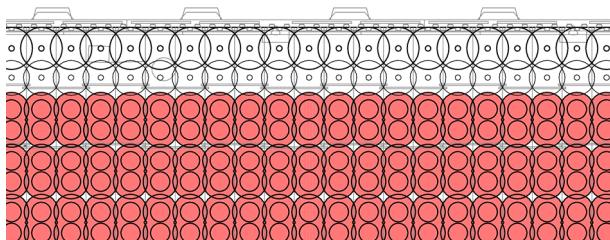


図-8 地盤改良平面図

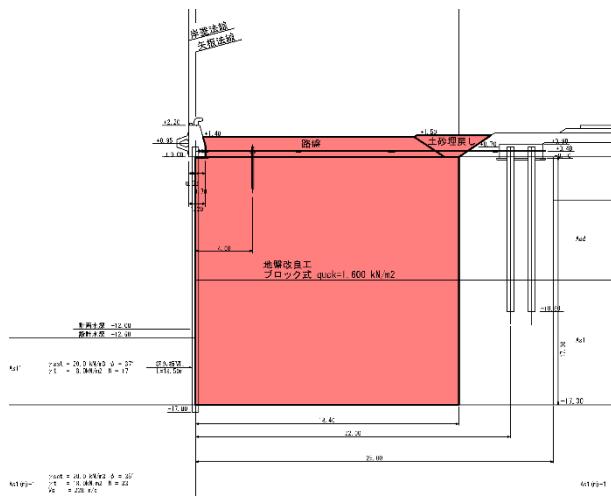


図-9 地盤改良断面図



図-10 Tarpos 3D 施工状況

4. BIM/CIMへの連携と今後の展望

地盤改良のBIM/CIM成果物作成を一貫して行うシステムパッケージとして「FUTEOS-CIM」を開発した。

本システムは「Tarpos 3D」ならびに「Visios-3D」等から得られる施工データ（属性情報）を自動で統合し、専用ツールによりCIMモデルを瞬時に作成することができるシステムである。概要図を図-11に示す。

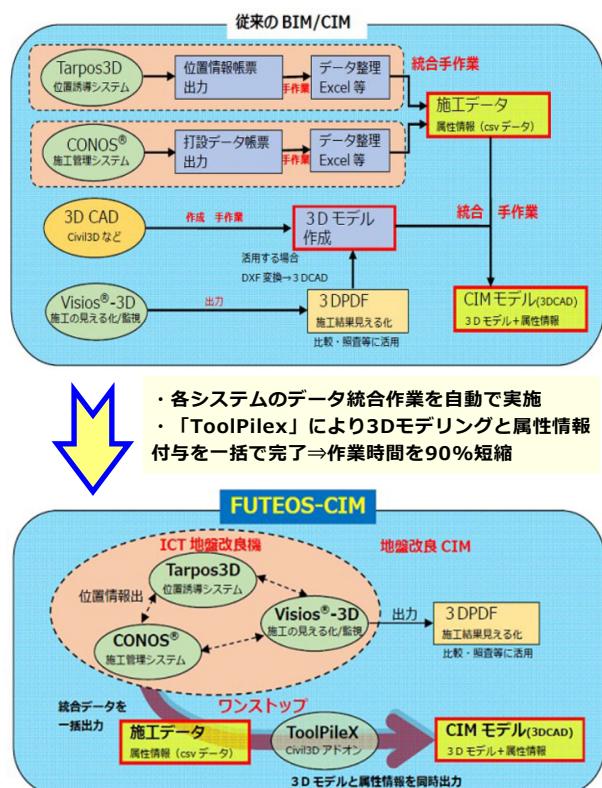


図-11 FUTEOS-CIMの概要図

「Tarpos 3D」を用いれば、現場での施工性や安全性が向上するとともに、「Visios-3D」と連携させることで、施工状況の共有や施工結果の可視化が可能となることを紹介した。

また、「FUTEOS-CIM」など他のICT技術と連携させることで、BIM/CIM業務への対応が可能となるシステムである。

ICT施工技術は普及段階であり、更なる省力化や合理的な運用が求められる。今回紹介したシステムの更なる発展を目指す所存である。

「DX体験」を通じたインフラDX推進への取り組み

北陸技術事務所 品質調査課長 佐々木 和仁
○品質調査課 専門職 田邊 剛

1 はじめに

北陸地方整備局では、北陸地方の建設業界におけるインフラDXの推進と、それを担う人材の育成を目的として、2024年3月27日に新潟市西区の北陸技術事務所敷地内に北陸インフラDX人材育成センターを開所した（写真-1）。同施設では、各種研修やDX機器体験を通じてインフラDX人材の育成に取り組んでいる。このうち主に北陸技術事務所で担っているDX機器体験について、2024年3月の立ち上げから約1年半に至る運営状況を報告する。

2 北陸インフラDX人材育成センターの概要

「DX体験」は、マスコミへの公開、内部関係者による試行運営を経て、2024年7月より一般の受け入れを開始し運営をスタートした。



写真-1 北陸インフラDX人材育成センター

同施設は、ウェアラブルカメラを活用した遠隔臨場の体験、VR体験、3次元測量、バックホウや除雪トラック、UAV（ドローン）の操作を習得するシミュレータを備えた「DXルーム（写真-2）」、3次元データモデルの作成やICT施工に関する研修を行うための「研修ルーム（写真-3）」、遠隔操縦対応型バックホウの遠隔操作実習や盛土施工体験ができる「屋外実習エリア（写真-4）」で構成されている。



写真-2 DXルーム 写真-3 研修ルーム



写真-4 屋外実習エリア

3 「DX体験」の運営

「DX体験」のメニューには、当初のメニューに加え、後に、学生等へのオプションとして、研修ルームでの「CIM操作体験」を取り入れた。

運営は開庁日を原則とし、毎週火曜（1時間×4回）を一般開放の日、それ以外の曜日を関係者対応の日として設定した。定員は最大8名を基本としていたが、団体の場合は8名を超える来場者になるケースが多くあり、臨機応変に対応していく必要があった。

3. 1 「DX体験」運営の立ち上げ

3. 1. 1 立ち上げ時の状況

「DX体験」の運営は、北陸地方整備局初の試みでもあり、職員・委託業者ともに運営の経験がない中で、ゼロベースから試行錯誤しながらの運営開始となった。

3. 1. 2 「DX体験」の運営体制

本施設の運営には、多くのスタッフによるオペレーションが必要になることが想定された。そのため、運営スタッフは、10名をコアメンバーとして選出し、加えて幹部職員・担当職員のマネジメントにより、事務所総力をあげて対応にあたった。

3. 1. 3 遠隔操縦対応型バックハウ操作見学の運営体制

屋外で行う遠隔操縦対応型バックハウ操作見学では、バックハウの操作に必要な資格が求められるため、職員が資格を取得しスタッフとして対応した。

3. 2 マニュアルの作成

3. 2. 1 運営マニュアルの作成

DXルームの運営を効率的かつ継続的に行うには、スタッフ間で運営ルールや手順を共有し、共通認識を持つことが重要なため「DX体験運営マニュアル」を作成した。

3. 2. 2 体験指導用マニュアルの作成

DXルームに設置されている各機器には、それぞれ操作説明書が付属しているが、専門的な内容が多くあった。そこで日々の運営を通じてスタッフが蓄積してきた知見をもとに、誰でも理解しやすく、現場ですぐに活用できる「DX体験指導用マニュアル」を作成した。

3. 3 オンライン受付の導入

体験会の参加受付は、利便性の向上と事務処理の効率化を目的として、事務所ホームページ内に専用のオンライン受付システムを導入した。これにより、従来の電話やメールによる受付対応に比べて、受付作業にかかる職員の負担

が軽減され、より迅速かつ正確な対応が可能となった。また、利用者にとっても、24時間いつでも都合のよいタイミングで申し込みができるため、利便性が大きく向上した。

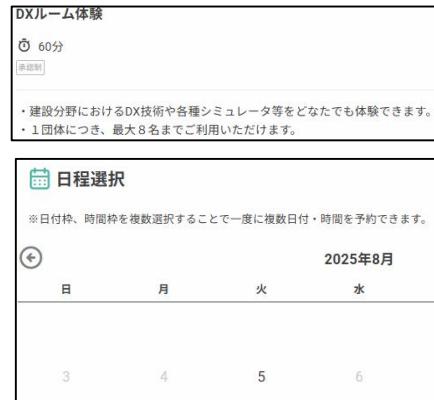


図-1 受付予約画面（イメージ）

3. 4 「DX体験」の来訪実績

「DX体験」には、2024年3月27日の開所以来、国土交通省職員、地方自治体職員、民間企業、高校生から未就学児まで、インフラ分野に関わる方々だけでなく、一般の方々にも多数ご来場いただいた結果、2025年10月には、来場者数1,000名を突破した。

3. 5 研修

研修ルームでは、建設分野の各段階におけるDX技術を学ぶことができる研修を行った。

4 北陸技術事務所独自の取り組み

北陸インフラDX人材育成センターによる「DX体験」の運営では、全国的にも例の少ない試みとして、出張体験会や防災施設見学会との連携イベントなど様々な取り組みを実施した。

4. 1 北陸地方整備局見学デーでの出張開催

北陸地方整備局では、地域住民、特に子どもたちやそのご家族に向けて、同局および関係機

関の業務を紹介し、防災意識の向上を目的とした「見学デー」を毎年開催している。このイベントでは、将来の建設業を担う子どもたちに関心を持ってもらうために、DXルームを出張開催し最新の建設技術に触れる機会を提供した。

2024年度、2025年度に1回づつ開催し合計で177名にDX体験へ参加していただいた。



写真-5 見学デーの状況

4. 2 西部地区への「出張DXルーム」

北陸地方整備局管内は東西に広く、北陸インフラDX人材育成センターが東側（北陸技術事務所）に設置されているため、西部地区の関係者にとっては来場し難い状況にあった。

こうした地理的な課題を踏まえ、西部地区からの開催要望に応える形で「出張DXルーム」を企画・開催した。

富山開催は自施設を会場とした。金沢開催は、会場を借り上げての開催となり、レイアウトや来場者の導線の検討などのほか、高校生39名の団体参加もあり、それらに対応するためのオペレーションも含め、入念に準備を行った。

「出張DXルーム」は多くの参加者から好評を得るとともに、北陸の地理的制約を克服した運営の成功事例となった。

4. 2. 1 出張DXルームin富山

■開催：2024年12月3日～5日の3日間
■会場：北陸技術事務所 富山出張所
■来場者数：合計113名

4. 2. 2 出張DXルームin金沢

■開催：2025年7月15日～17日の3日間
■会場：金沢流通会館
■来場者数：合計170名



写真-6 CIM体験



写真-7 DX体験

4. 3 高校生向けDX体験&災害対策用機械見学

建設業界では担い手不足が深刻な課題となっているなか、将来を担う若い世代に建設業への関心を持ってもらうことを目的として、高校生向けにDX体験会を開催した。このイベントでは、DX体験に加えて災害対策用機械の見学も組み合わせ、「建設業の防災への貢献」や「建設業で働く意義」などを感じてもらえる内容とし、2時間の体験プログラムとした。

開所から2025年11月までに新潟県立新発田南高等学校、新潟県立新潟工業高等学校、新潟県立塩沢商工高等学校を対象として5回の体験会・見学を実施し、243名に参加をしていただいた。

高校生にとっては、建設業の「今」と「未来」、その社会的意義と魅力を実感できる貴重な機会となった。



写真-8 DX体験



写真-9 遠隔BH見学

4. 4 イベントへの出張開催

2025年度は多数の出展要望が寄せられ、取り組みの更なる拡大に向けて、下記に出展した。

- けんせつフェア北陸2025in新潟
- 開催：2025年10月1日～2日
- 会場：新潟市産業振興センター
- 主催：実行委員会（事務局：北陸地方整備局）
- 来場者数：のべ272名



写真-10 DX体験 写真-11 遠隔BH見学
この他にも出展を行い、多数の方々にご来場
いただいた。



5 広報・記録

DX体験への来場を促進するため、さまざまな広報活動および情報発信を行うとともに、活動の記録にも取り組んだ。

5. 1 施設紹介動画の作成・活用

体験会への来場者に対し、北陸インフラDX人材育成センターの趣旨や施設内容をわかりやすく伝えることを目的に、約5分間の施設紹介動画を作成した。体験会の冒頭で視聴していただいている、YouTubeでも公開し、情報発信ツールとしても活用している。

5. 2 SNSの活用

DXルームの運営状況やイベント情報を広く周知するため、ホームページやSNS(X)を通じて定期的に情報発信を行った。

特にX(旧Twitter)による投稿は、2024年度において年間36回、2025年度は10月末現在で22

回の投稿を行った。

5. 3 小・中高生向けパンフレットの作成

将来の担い手である子どもたちに、社会インフラを支えるデジタル技術（例：ドローン、遠隔操縦対応型バックホウなど）の役割を伝え、建設や技術分野への関心をもってもらうことを目的として、来訪する児童・生徒向けにパンフレットを作成した。

5. 4 テレビ番組での特集

地元新潟県のテレビ局が北陸インフラDX人材育成センターを訪れ、情報番組で取材が行われた。2025年2月1日にNST新潟総合テレビ「潟ちゅーぶ」で放送され、地元タレントが実際にDX技術を体験する様子を通じて、建設業界で進むDX化の現状や防災分野での活用事例が紹介された。

6 おわりに

「DX体験」は、建設分野のDX技術に気軽に触れ、関心を持ってもらう「入り口」としての役割を果たしている。

今後も、建設技術者のスキル向上や、現場で即戦力となるDX技術の体験を可能にするため、「DX体験」の内容をバージョンアップさせながら、より魅力的で実効性のあるプログラムづくりと運営に取り組んでいく。

また、出張開催・建設業の担い手となる団体向け体験会の定例化・拡大を図り、インフラDX人材の育成と建設業界の担い手確保につなげることを目指している。

謝辞：北陸インフラDX人材育成センター・DX体験の運営に関わるすべての方々に深く感謝申し上げます。

ローカル5Gを用いたケーブルクレーンの自律化技術

株式会社大林組 土木本部生産技術本部ダム技術部 久保 貴士

1 はじめに

長きに亘り、建設業は「きつい」、「危険」、「汚い」うえに、休日が少ないというイメージを持たれており、若年層の入職者が減少している。ダム建設工事は、工事規模が大きいため多くの技能労働者を確保しなければならず、担い手不足が深刻化している。また、強度、耐久性、水密性、ひび割れ抵抗性など、ダムに求められる性能を確保するためには、高い施工技術が必要である。

特に、岐阜県加茂郡八百津町・同県可児郡御嵩町で施工中の新丸山ダムは、既存の丸山ダムの一部に重なる形で大規模な嵩上げを行う、難易度の高い工事である。また、新丸山ダム本体建設工事は、大河川である木曽川に築堤された丸山ダムで洪水調節を行いながら施工するため、大雨や洪水時の安全対策も考慮しなければならない。図-1に新丸山ダム本体建設工事の施工ステップ図を示す。

これらに対応するため、2024年に策定されたi-Construction 2.0の施策(施工のオートメーション化、データ連携のオートメーション化、施工管理のオートメーション化)に基づき、建設現場全体のオートメーション化の実現に向けて、コンクリート骨材の製造から打設までの一連の工程を自律化する「自律型コンクリート打設システム」の開発に取り組んでいる。

本稿では、自律型コンクリート打設システムの中核を担う「ケーブルクレーン自律運転システム」と複数の建設機械の連携に必要な映像受信や運転指示を行うための安定した無線通信「ローカル5G技術」について報告する。

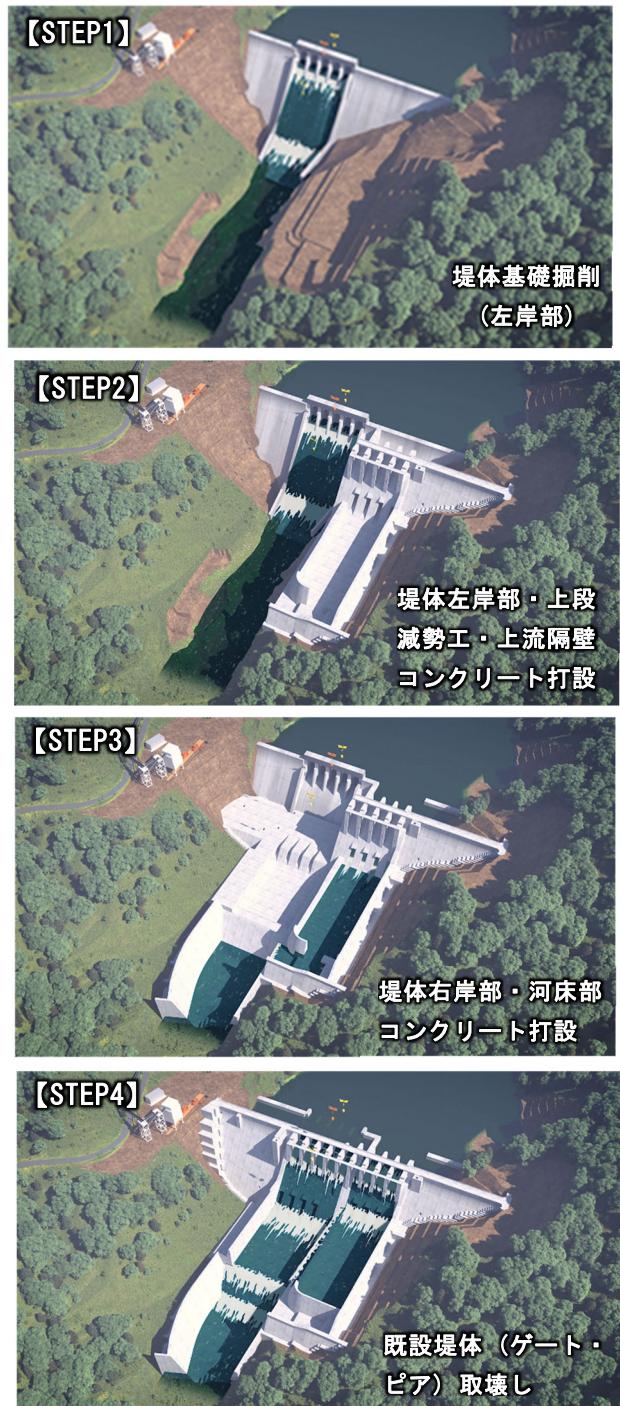


図-1 新丸山ダム施工ステップ図

2 開発概要

2. 1 ケーブルクレーン自律化

堤体コンクリートの運搬にはケーブルクレーンを使用している（写真－1）。ケーブルクレーンには、両端が固定された固定式や両端または片側の塔がレール上を移動する走行式などがある。

新丸山ダムで導入したケーブルクレーンは、主索を固定塔と移動塔に固定し、移動塔が固定塔側を中心に円弧状に移動する弧動式ケーブルクレーンである。走行装置が移動することに



写真-1 ケーブルクレーンによるコンクリート運搬

より、ダムの堤体全域にコンクリートを直接打設することが可能である。図－2に新丸山ダムのケーブルクレーンを示す。



図-2 新丸山ダムで導入した18t弧動式ケーブルクレーン

ケーブルクレーン自律運転システムは、プログラムからの指令によりGNSS等のセンサを用いて最適な振れ止めを行いながら、バンカー線から打設位置へ正確に移動し、打設場所の安全を確認してコンクリートを放出する。放出完了後はバンカー線まで戻り、往路と同様に振れ止めを行いながらバケット台車に着床する。施工計画で決められたスケジュールに従い、放出場所を順次移動しながら、コンクリート打設作業を自律的に行なう。実際の作業の状況に応じて放出箇所の修正や移動が必要になった場合は、システムを介して計画を修正し、自律打設を継続する。また、対人・対障害物検知や作業範囲規制・高さ検知装置などの安全機能を設け、異常



図-3 弧動型ケーブルクレーン自律運転システム

を検知した際には自動停止することで安全を確保している。システムは、オペレータのレバー操作により、いつでも即座に手動運転に切り替えることも可能である。図-3に弧動式ケーブルクレーン自律運転システム構成図を示す。

2. 2 ローカル5G技術

ケーブルクレーンの横行トロリとフックブロックは、構造上、有線による通信が不可能であるため、従来の自動運転装置では、運転席と横行トロリやフックブロックとの無線通信にWi-Fiを使用していた。しかし、Wi-Fi通信は安定性に欠けるため、これまでの自動運転技術は通信に依存しない機能開発にとどまっていた。新丸山ダム本体建設現場では、「接続安定性」、「広域通信エリア」、「高セキュリティ性」の観点から、従来の無線技術より優れているローカル5G通信を導入し、右岸側のコンクリート製造設備から左岸側堤体施工部までのケーブルクレーン動線をカバーする広範囲かつ立体的な通信エリアを構築した。

ローカル5Gは、4.5GHz帯および28GHz帯の2つの周波数帯を有し、通信事業者ではない企業や自治体が特定のエリア内で独自ネットワークを構築・運用できる。これにより、他の利用者の影響を受けず、高速かつ大容量の通信を安定的に利用することが可能である。建設機械の遠隔運転や複数台の同時制御には大容量の通信が必要となるため、ローカル5Gは建設DXの推進において極めて有効であると考えられる。ローカル5Gを活用することで、新丸山ダムのケーブルクレーン自律運転システムでは、これまで実現が困難だった、大容量データ通信や即時性が求められる機能の開発が可能となった。

3 ケーブルクレーンの技術的課題及び解決策

3. 1 水平方向の振れ止め制御機能

バンカー線を起点としたケーブルクレーンによるコンクリート運搬では、往路復路ともに、

最高速度まで加速後、等速運転を行い、目標地点到達前に減速運転を行う。この水平方向の加速・減速運転の際、コンクリートバケットが振り子状となって水平方向の荷ぶれが発生し、安全性やコンクリートの品質に不具合が生じる。

そこで、本システムでは、横行トロリおよびフックブロックにGNSS受信機を設置し、それぞれの絶対位置や相対角度を計測することで、荷ぶれの状態を把握できるようにした。検知した振れに対して適切な変位や加減速を加えることで、目標地点到達時には水平方向の荷ぶれを概ね収束させることができる。

また、目標点までの運搬においては、巻上げ・巻下げ動作、横行動作、走行動作を複合的に組み合わせることで、サイクルタイムの短縮が可能となった。水平方向の荷ぶれ発生状況及びGNSS受信機取り付け位置を図-4に示す。

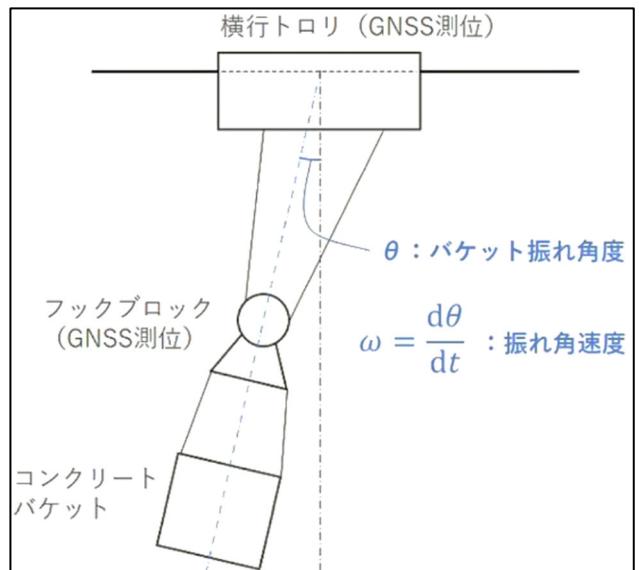


図-4 水平方向の荷ぶれ発生状況及びGNSS受信機取り付け位置図

3. 2 コンクリート放出時の垂直方向振れ止め制御機能

コンクリート放出時には、 $6m^3$ ものコンクリート荷重が一気に抜け、クレーン主索に大きく張力がかかった状態から元に戻ろうとする。この力によって、コンクリートバケットが上方に大

きく跳ね上がるため、放出時には適切な巻下げ動作を行い、振れを抑える必要がある。バケットの跳ね上がり速度は、配合やスランプ、気温などさまざまな要因によって異なる。そのため、バケット内のコンクリート残量およびバケットの位置をセンシングし、巻下げ動作の速度を調整する機能を追加した。放出時における揺動制御の有無の比較を図-5に示す。

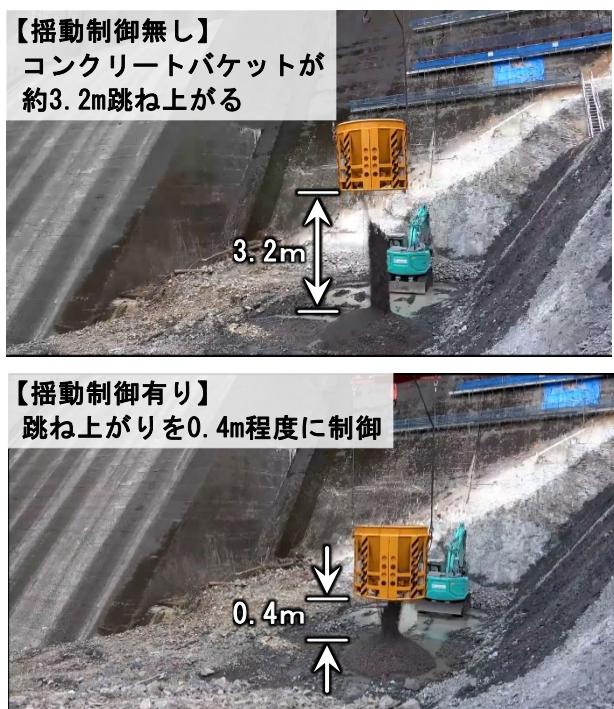


図-5 放出時における振動制御有無の比較

3. 3 任意点への自律打設機能

これまでに開発されていたケーブルクレーンの自動化は、両端固定式ケーブルクレーンを対象とすることが多く、運搬先はグランドホッパなどの固定点が一般的であった。しかし、新丸山ダムに設置されたケーブルクレーンは弧動式であり、コンクリートの運搬ごとに目的地が変化する。さらに、クレーンの特性により、走行動作に伴って主索張力が変化し、振れ止め制御の難易度が増すことになった。そのため、目的地ごとに異なる制御パラメータの調整が必要となり、実機で繰り返し検証を行った。その結果、最適な制御パラメータを算出することがで

きるようになり、任意点への自律打設が可能となつた。

4 技術的評価

ローカル5GとGNSSを活用したケーブルクレーンの自律運転により、打設位置の誤差を最小限に抑え、施工計画通りにコンクリートを打設することが可能となり、施工精度が向上した。また、対人・対障害物検知機能や振れ止め制御により、作業中の事故リスクが低減した。

ローカル5Gの導入により、従来のWi-Fi通信では困難だった広域かつ高セキュリティな安定通信が実現した。その結果、複数機械の連携やリアルタイム制御技術が確立され、ケーブルクレーンの自律化が可能となった。

これらの技術は、今後の大規模インフラ整備において、施工の効率化、安全性の向上、品質管理の高度化を実現するための重要なステップであるといえる。

5 まとめ

新丸山ダム本体建設工事における「自律型コンクリート打設システム」の開発は、i-Construction 2.0の理念に基づく建設現場の革新を象徴する取り組みであり、施工技術の自律化に向けて大きく前進したといえる。

ケーブルクレーンの自律化は、単独でも高い技術的価値を持つが、コンクリート製造設備や打設設備を含めて統合的に運用することで、省人化を図り、生産性を飛躍的に向上できる。

今後も、新丸山ダム本体建設工事における「自律型コンクリート打設システム」のさらなる進展を図るとともに、DX技術の発展を目指して研究開発や実証、導入を進めていきたい。

山岳トンネル発破掘削の自動化

佐藤工業株式会社 技術センター 加藤 謙吾

1 はじめに

佐藤工業株式会社技術センターでは、フルオートコンピュータージャンボの高度利用を目的に、山岳トンネル発破掘削自動化システムを開発している。本報では、自動化適正化システムの概要および現場実証結果について報告する。

2 発破掘削自動化適正化システムの概要

従来の山岳トンネルでの発破掘削では、支保パターンごとに発破パターン図を準備しておき、実際の穿孔に際して熟練した作業員が切羽の地山状況を確認した上で、その経験に基づく微調整を加えて穿孔および装薬を行っていた。一方、近年の技術進歩により、ドリルジャンボは多機能化し、穿孔時における岩盤の硬軟の記録ならびに自動穿孔等が可能となっている。この技術に基づき、装薬量や穿孔数などを地山状況に合わせて適正化した発破パターン図を作成し、効率的な発破掘削が可能になると考えられる。そして、作成した発破パターン図を全自动ジャンボへ転送し、自動穿孔を行うことで、熟練技能者に依存しない穿孔が実現できると考えられる。

これらのアイデアをトンネル現場で実現するためには、穿孔データを解析し、掘削断面ごとの発破パターン図を作成するソフトウェア、ドリルジャンボ専用のデータ作成、およびトンネル内外でドリルジャンボと通信できる環境などが必要となる。くわえて、発破掘削の出来形を確認するための測量方法や、穿孔データや余掘り量等の情報を発破パターンにフィードバックする方法も重要となる。

図-1に、提案する発破パターンの自動適正化システムにおける、発破パターン自動作成から

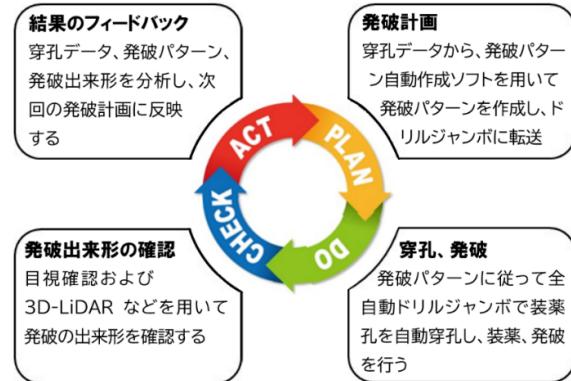


図-1 本システムにおける発破掘削のサイクル

発破掘削結果のフィードバックのPDCAサイクルを示す。

発破パターン図の作成には、穿孔の位置、穿孔数、差し角、装薬量などの穿孔および装薬に必要となる情報が必要となる。穿孔の位置や装薬量等の評価方法としては、経験的に用いられている値を用いる方法や、掘削対象の岩の物理的性質（例えば、圧縮強度、疎密波速度など）に基づき算定する方法などがある。本システムでは、穿孔時に得られた情報に基づく方法が最適な発破パターン図の作成を可能にすると考え、掘削対象の岩の物理的性質に基づく方法を採用了。

孔当たりの装薬量は、次式に基づき決定する。

$$C = q \cdot V \quad (1)$$

$$V = S \cdot B \cdot L \quad (2)$$

ここに、

C : 孔当たりの装薬量(kg)

V : 孔当たりの担当体積(m³)

q : 単位体積当たりの必要装薬量(kg/m³)

S : 孔間隔(m)、

B : 抵抗線長 (m)、

L : 進行長 (m)

これらのパラメータを評価する方法として、掘削断面を穿孔エネルギーの分布に応じて分割し、領域ごとに装薬量などを設定する方法、穿孔時のデータをAIで評価することにより装薬量等を設定する方法、モンテカルロ法を用いてパラメータを最適化する方法¹⁾などが提案されている。本システムでは、モンテカルロ法を用いて穿孔位置、穿孔数、装薬量等を自動決定する方法を採用した。決定方法の詳細については、加藤ら¹⁾に詳しい。

3 現場検証

山岳トンネル掘削現場において、支保パターン CII～D1 区間の発破掘削を対象に、本システムおよび PDCA サイクルの現場実証を実施した。本検証は 2 日間連続で行い、計 6 回の発破を対象とした。具体的には、下記の 4 項目を重点的に検証した。

- 1) 穿孔エネルギーデータの取得および発破パターンデータの作成
- 2) 全自動ジャンボ PC 上での発破パターンデータの読み込み
- 3) 発破掘削結果の確認
- 4) 発破掘削結果の次回発破パターンへのフィードバック

① 現場検証結果

図-2 に、発破パターン図作成に使用した穿孔エネルギー分布およびコソク後に撮影した写真ならびに 3D-LiDAR によりスキャンした切羽面を示す。

1 回目の発破では、先行する発破掘削に用いた発破パターン図に基づき、各種パラメータを調整した。その結果、穿孔エネルギー分布は 75～200J/cm³、穿孔数は 136 孔、総装薬量は 123.6kg であった。

2、3 回目の発破では、1 回目と比較して切羽全体の穿孔エネルギー値が小さく、特に右側の切羽面の穿孔エネルギー値の低下が目立った。2 回目の発破においては、その分布を反映し、さらに、装薬量を減ずる方向で適正化を目指して発破パターンを作成した。

4 回目の発破（3月 25 日朝）では、左肩付近において穿孔エネルギーが大きくなったものの、2、3 回目と比較して穿孔エネルギーの平均値に大きな差は認められなかった。このため、2、3 回目と同一の穿孔数、穿孔位置および装薬量で発破掘削が可能であると判断し、同一の発破パターンを適用した。

5 回目の発破では、2～4 回目の穿孔エネルギー分布と比較して顕著な差は認められなかった。しかし、さらなる発破パターンの最適化を目的として、穿孔位置、穿孔数および装薬量を再検討した上で、新たな発破パターンを作成した。

6 回目の発破では、左肩付近に高穿孔エネルギーの箇所が確認された。一方で、穿孔エネルギーの平均値は 5 回目の分布と比較して約 5% 増加した。これを踏まえ、穿孔数、孔間隔、装薬量を修正した発破パターンを使用した。なお、総装薬量が先行する発破掘削実績より減っている要因は、進行長が 1.6m から 1.4m に変更されたためである。

図-2 に示す写真およびスキャン画像による確認、ならびに現場での目視観察においては、1～4 回目の発破では十分な発破の効果が確認され、先行発破掘削時と比較してもアタリ取りに要した時間は同程度であった。これに対し、5 回目の発破では切羽右隅の一部に掘削不良が生じ、先行発破掘削時よりもアタリ取りに時間を要した。これは、後述するように穿孔エネルギーデータのフィードバックに問題があったことが原因と考えられる。

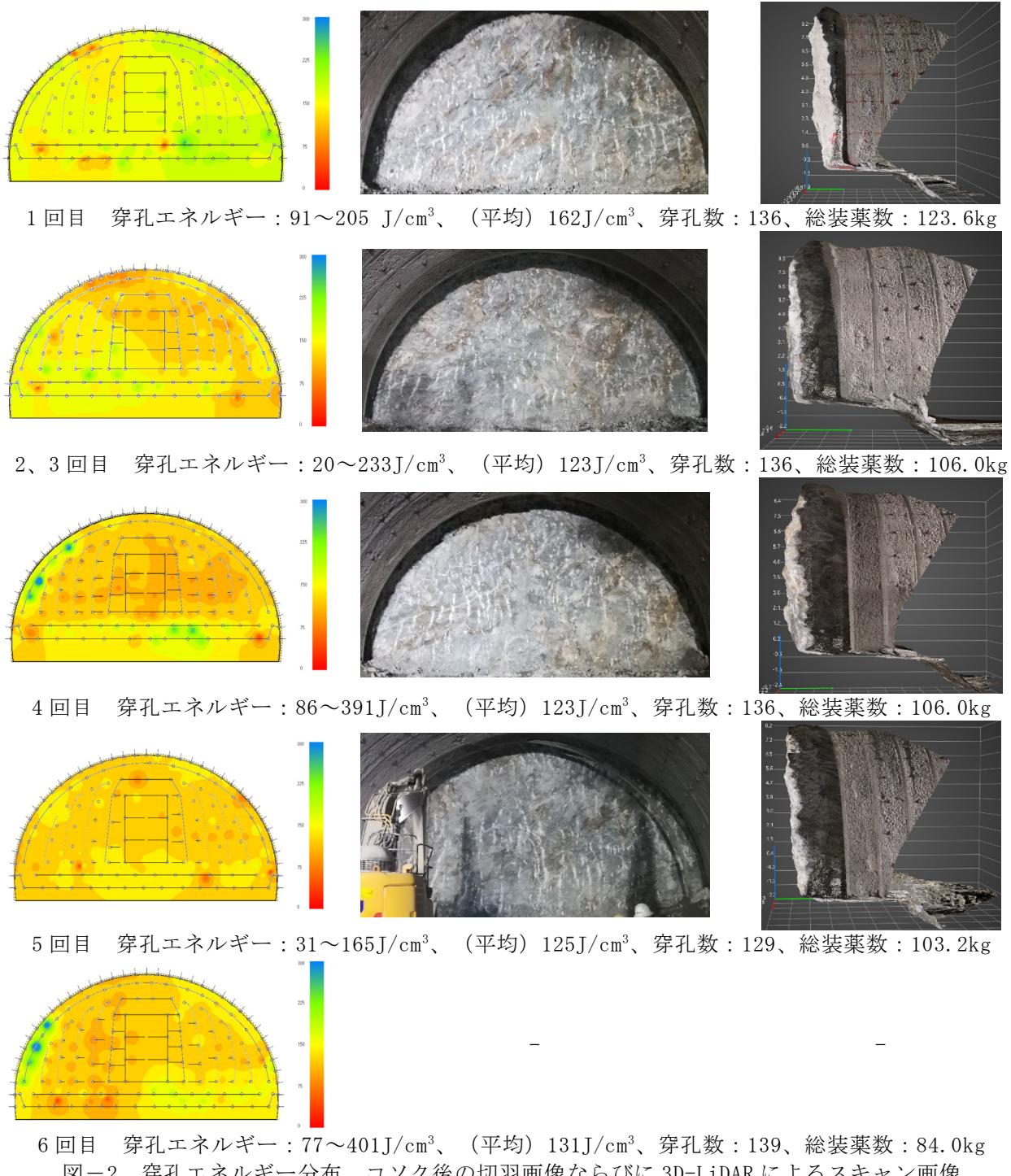


図-2 穿孔エネルギー分布、コソク後の切羽画像ならびに 3D-LiDAR によるスキャン画像

② 検証結果

検討事項 1) については、事務所および詰所に設置した全自动ジャンボ用 PC にリモート接続することにより、穿孔データを遠隔で取得できることを確認した。また、取得した穿孔データを用いて新しい発破パターン図を現場事務所において作成できることを確認した。データ取得か

ら発破パターン図作成までに要した時間は約 20 分であった。

検討事項 2) については、新しく作成した発破パターン図データを現場事務所から詰所 PC を介して全自动ジャンボに搭載された PC へ送信できることを確認した。また、全自动ジャンボ上の PC 画面において送信データが読み込まれている

ことを目視で確認した。

検討事項3)については、コソク後に3D-LiDARを用いて詳細な切羽形状を計測できることを確認した。得られたデータは、あたり量および余掘り量を算定する上で十分な精度を有すると考えられる。

検討事項4)については、穿孔エネルギー分布を本ソフトウェア上で容易に確認でき、切羽における岩の硬軟の比較が可能であった。さらに、前回の発破実績と比較することにより、穿孔位置、穿孔数、装薬量等の妥当性検討に活用できることを確認した。一方、3D-LiDARの使用については、余掘り量等の算定は行わず、切羽形状の確認に留まった。

検討事項4)については、穿孔エネルギー分布を本ソフトウェア上で容易に確認でき、切羽における岩の硬軟の比較が可能であった。さらに、前回の発破実績と比較することにより、穿孔位置、穿孔数、装薬量等の妥当性検討に活用できることを確認した。一方、3D-LiDARの使用については、余掘り量等の算定は行わず、切羽形状の確認に留まった。

③ 理論の検証

本システムでは、式(1)に基づき孔当たりの装薬量を計算する。孔当たりの単位体積装薬量は、穿孔エネルギーの大きさによって決定していることから、装薬量の調整を行うためには孔当たりの担当体積を調整することとなる。そして、孔毎の装薬量が一定である場合、単位体積当たりの装薬量と孔当たりが担当する掘削体積との関係は反比例の関係となる。本現場検証で用いた発破パターンにおける、穿孔エネルギーと孔当たりの掘削体積との関係を図-3に示す。最初の発破掘削では、穿孔エネルギーと体積との間に明確な反比例の関係は認められなかった。これは、先行する発破実績（過装薬の傾向）に

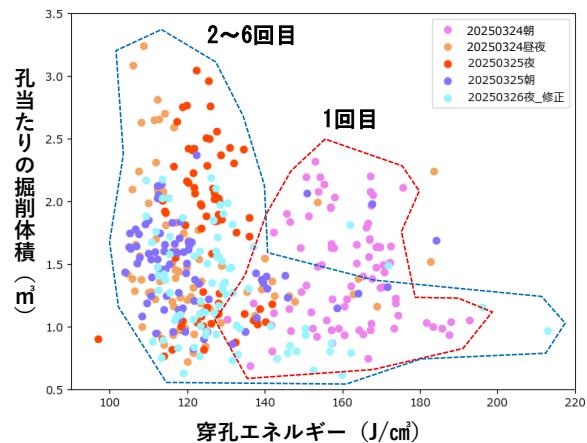


図-3 穿孔エネルギーと孔当たりの掘削体積との関係

基づいて孔当たりの装薬量を決定したためと考えられる。2回目以降の発破掘削ではばらつきが大きいものの、全般的な傾向として穿孔エネルギーが小さくなると、孔当たりの掘削体積も小さくなる傾向が認められた。これは、装薬量の最適化を図るために、穿孔数を変えずに孔当たりの装薬量の許容値を小さくしたためと考えられる。

4 おわりに

山岳トンネルの発破掘削現場において、支保工CII～D1パターンを対象に、自動最適化発破パターン作成ソフトウェアの現場実証を実施した。結果として、穿孔エネルギーデータの共有から発破掘削結果の確認のプロセスまで想定通りに行えることを確認できた。一方、発破掘削結果のフィードバック方法には課題が残った。今後は、本現場実証結果を踏まえ、ソフトウェアの更なる改良を行う予定である。

参考文献

- 1) Kengo Kato, Masami Seya, Masafumi Oe, Masanori Ono : Optimization of blasting pattern using Monte Carlo Method in tunnel excavation, World Tunnel Congress 2025, 9-15 May 2025, Stockholm, Sweden

シミズ・スマート・トンネルの開発

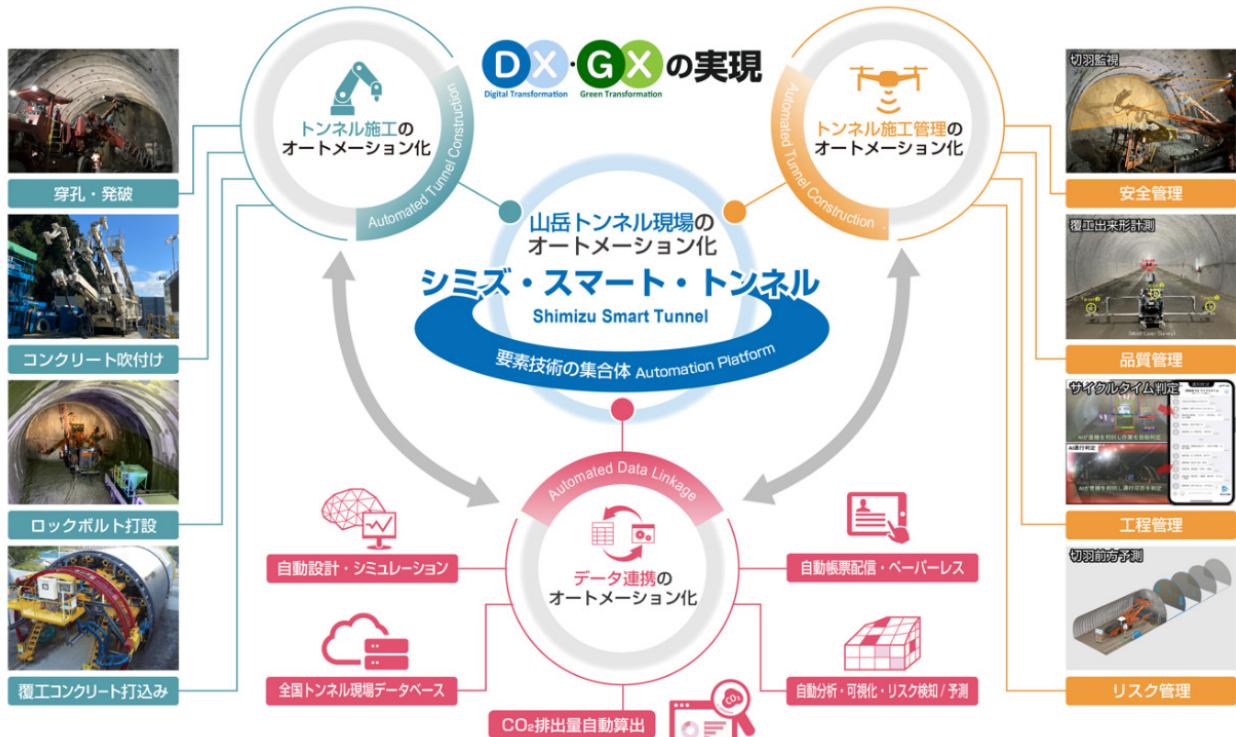
清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間統括部 部長 平野 宏幸

1 はじめに

近年、日本全体の生産年齢人口が減少する中、建設業においては担い手不足という深刻な課題に直面しており、国土、地域づくりの持続可能性が危ぶまれる状況にある。また、2024年4月から働き方改革関連法による時間外労働の上限規制が建設業にも適用されたことにより、建設業界全体で職場環境改善にも取り組んでいく必要がある。このような現状を踏まえ、国土交通省では建設現場の生産性向上を図るために2016年度よりICT施工をはじめとする「i-Construction」の取り組みを進めており、2024年4月にはさらに建設現場のオートメーション化へとステージアップを図る「i-Construction2.0」が策定・公表された。「i-Construction2.0」では、施工のオーバー

トメーション化、データ連携のオートメーション化、施工管理のオートメーション化を取り組むことで建設現場のオートメーション化を実現し、一人当たりの生産性を高めることで2040年までに建設現場の省人化3割達成を目指している。

弊社、清水建設においても現場の生産性を高める取り組みを進めてきたが、特に熟練技能者不足が深刻化している山岳トンネルの分野において、現場の生産性と安全性を飛躍的に向上できる技術である「シミズ・スマート・トンネル」が2025年3月に完成し、現場への標準適用を開始したところである（図－1）。「シミズ・スマート・トンネル」はICT、IoT、AI技術等のさまざまな要素技術で



図－1 シミズ・スマート・トンネル概念図

構成されており、「i-Construction2.0」の主な取り組みである施工のオートメーション化、データ連携のオートメーション化、施工管理のオートメーション化を網羅し、これらのオートメーション化を連動させることで山岳トンネルの生産性と安全性の向上が図れるとともに、施工の効率化、最適化によりカーボンニュートラルをも可能とする。

本報告では、技術開発を進めてきた「シミズ・スマート・トンネル」における施工のオートメーション化を実現する代表的な省人化技術について説明し、これらの技術について今後の現場への水平展開方針と展望について述べる。

2 山岳トンネルの省人化技術

山岳トンネルにおけるトンネル掘削の施工サイクルには、発破時の地山の硬軟に対応した穿孔の孔数や装薬量の決定、リバウンドを抑制するコンクリートの吹付けといった高い熟練度を要する作業がある。また、高濃度の粉塵にさらされる切羽周辺でのずり出し作業や吹付けコンクリート作業、重量物となるロックボルトをマンケージ上で取り扱うロックボルト打設作業等の苦渋作業が多い。さらに、切羽直下での作業は肌落ちのリスクが高く、危険作業となる。

「シミズ・スマート・トンネル」は、これらの作業をICTやDXを活用して遠隔化、さらには自動化することで、熟練作業の削減、および、苦渋作業や危険作業からの解放を実現する。

以下に、発破計画と穿孔の自動化、吹付けコンクリートの遠隔化、ロックボルトの遠隔化の技術について説明する。

2. 1 発破計画と穿孔の自動化（blastmaster II）

本技術は、これまで熟練技能者（坑夫）が経験で行っていた発破パターンの設計と穿孔作業

を自動で行うものである。具体的には、コンピュータジャンボにより各孔で計測された穿孔エネルギーデータから地山性状に応じた穿孔位置・穿孔間隔を算定し、3Dスキャナで計測した前回発破の掘削形状から最外周孔の穿孔角度（差し角）を最適化することにより、1孔あたりの装薬量を固定した条件下で余掘り量を最少化できる発破パターンを導出するものである（図-2）。同時に、導出した発破パターンに基づく穿孔作業において、コンピュータジャンボの複数のブームが干渉せずに最短ルートで移動できるシーケンスを独自のアルゴリズムで自動算出する¹⁾。

これにより、それぞれ数時間と数日を要していた発破パターンと穿孔シーケンスの修正設計を瞬時に完了させることが可能となるばかりか、発破の余掘りを低減できるため発破掘削の生産性が大きく向上する。

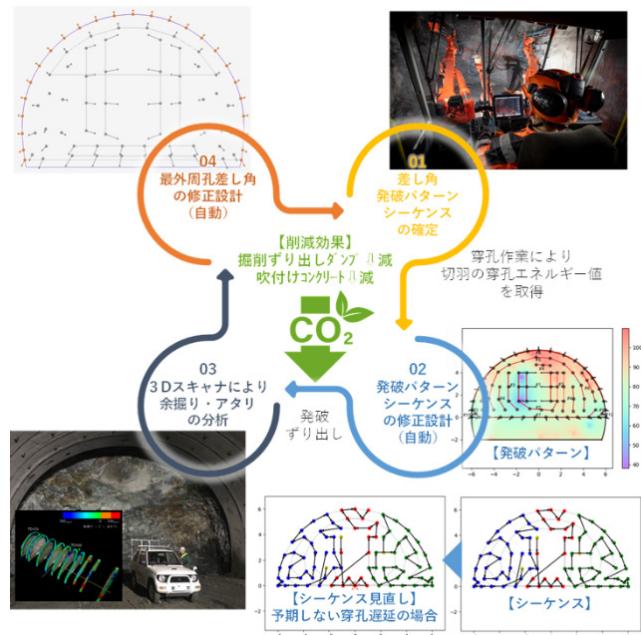


図-2 ブラストマスターII

2. 2 吹付けコンクリートの遠隔化

本技術は、清水建設が戸田建設株式会社、西松建設株式会社、前田建設工業株式会社、エフ

ティーエス株式会社と共同開発した吹付けナビゲーションシステムによる吹付けコンクリート作業の遠隔化技術である（写真－1）。オペレータがボタン操作するだけで、遠隔で吹付けコンクリートを施工しながら、吹付けノズルに設置したミリ波レーダで吹付け厚さをリアルタイムに管理できる。オペレータは粉塵がなく安全なキャビン内で吹付けコンクリートの施工状況や色別で見える化された出来形情報を確認し、修正の必要性がある場合は簡易なボタン操作をするだけである。また、吹付けコンクリートの出来形は、これまでの点の管理ではなく面的に管理できるため施工品質の均一化が図れ、施工管理のオートメーション化と連携することで施工管理の省人化も図れる²⁾。本技術は吹付けコンクリート作業の完全自動化を目指して、鋭意開発を進めている（写真－2）



写真-1 吹付けコンクリートの遠隔施工

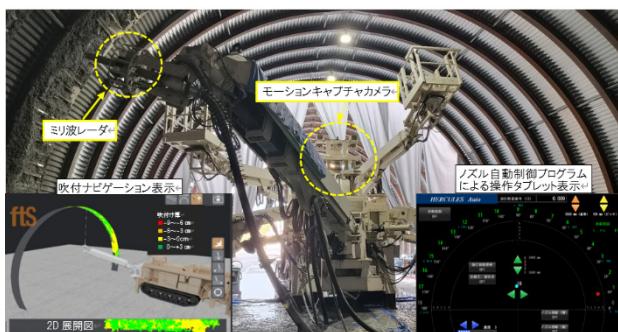


写真-2 開発中の吹付けコンクリート自動化システム

2. 3 ロックボルト打設の遠隔化

本技術は、ロックボルト遠隔打設装置であるボルティングユニット（図-3）を2基装備した2ブームロックボルト打設専用機により、ロックボルト打設作業を完全遠隔化するシステムである（写真-3）。ロックボルトの打設は、穿孔、モルタル充填、ロックボルト挿入の繰り返し作業であり、これまで穿孔以外の作業は人力に依存していた。これら一連の作業を機械施工とすることで重量物を扱う苦渋作業がなくなり、切羽直下への人の立ち入りを排除できるため、生産性と安全性が向上する³⁾。

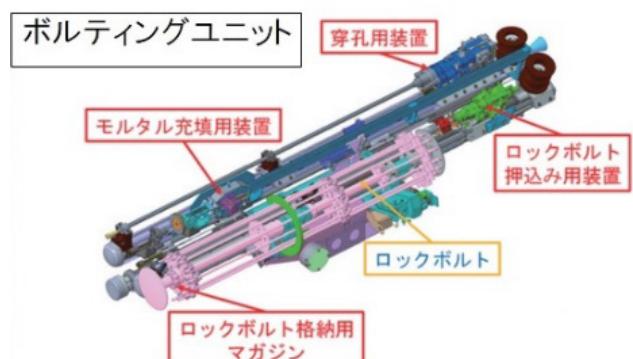


図-3 ボルティングユニット



写真-3 2ブームロックボルト打設専用機

また、穿孔位置やロックボルトの挿入位置・角度、モルタル注入量等の施工データがキャビ

ン内のコントロールパネル画面でリアルタイムに可視化され、計画値と照らし合わせながら作業を進められるため、出来形精度の向上や施工品質の均質化が図れるだけでなく、施工管理のオートメーション化にも貢献する。

3 今後の現場への水平展開方針と展望

以上のように、清水建設ではトンネル掘削におけるそれぞれの作業の省人化技術を確立し、現場に適用して実績を重ねてきた。それぞれの技術は完全自動化が早期に達成できるレベルにあり、開発の進展が期待される。しかしながら、個々の作業での省人化は図れても、実現場においてトンネル掘削の一連のサイクルで省人化が図れなければ意味をなさない。今後は、これらの全ての技術を現場に適用し、通常坑夫5人で行っているトンネル掘削作業を3人で行うこと、4割の省人化を目指す。さらに、次のステップとして作業する3人が坑夫ではなく、トンネル経験のない一般作業員でも施工できるまでに技術をプラスアップしていく。

4 おわりに

清水建設では山岳トンネルの施工のオートメーション化を実現する「シミズ・スマート・トンネル」を全現場への展開を開始し、山岳トンネルで働く人のウエル・ビーイング向上に取り組んでいる。2章で述べたように、施工のオートメーション化技術によりボタン一つで機械が、発破パターンを設計し自動で穿孔したり、出来形を計測しながら吹付けコンクリートやロックボルトを機械的に施工してくれる。また、今回紹介できなかったが、データ連携のオートメーション化と施工管理のオートメーション化的技術により施工で得られた測量、計測といったデータを自動的に処理し、出来形・品質管

理、測量管理、および、トンネルの安定評価等を自動で行い、発注者とも情報共有できる。これらの技術が成熟していけば、トンネル工事は熟練技能者を必要とせず、環境の整った管理室から機械操作だけで安全に施工できるようになる。しかしながら、これらのオートメーション化技術は、土木技術者が「楽」をするためのものではないことを付け加えておく。我々土木技術者は機械の始動ボタンを押すことが仕事ではなく、機械やAIが処理したデータが間違っていないか、現場状況に適しているかを高度な技術力を持って確認し、判断しないと施工は成り立たないのである。すなわち、建設現場のオートメーション化を進めるとともに、土木技術者の育成もこれまで以上の高いレベルで進めていかなければならない。良い職場環境で安全に仕事ができ、そこに仕事に対するやりがいがあつて初めて働く人たちのウエル・ビーイング向上を達成したといえる。

<参考文献>

- 1) 荒井匠、白井隆裕、大坪宏行、福田毅、垣見康介、菊池亮介、田中正敏、谷口俊一、青木蓮樹、伊藤文香、古後健太：最適発破パターン・削孔順序自動設計技術のセミオートジャンボへの実装と検証、令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会、VI-1208、2025.
- 2) 四塙勝久、白井隆裕、石川巧、浅井秀明：山岳トンネルにおける吹付けロボットのノズル誘導制御を用いた自動化技術、令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会、VI-1222、2025.
- 3) 大矢剛大、邊見涼、井手康夫、志澤俊哉、千葉稔：ロックボルト遠隔施工システムによるロックボルト打設作業の機械化、令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会、VI-939、2023.

山岳トンネルにおける全自動鋼製支保工建込みロボットの開発

前田建設工業株式会社 土木事業本部 春田克樹

1 はじめに

山岳トンネル工事において、掘削の最前線である切羽は岩盤が露出しており、岩石の落下等による肌落ち災害が発生する恐れがある。特に、鋼製支保工（以下、支保工）の建込み作業や火薬の装薬作業においては、切羽直下で作業を行うため、肌落ちが発生した場合、重篤災害につながる危険性がある。そこで、災害発生防止の施策として、厚生労働省から「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」が制定され、肌落ち災害を防止が図られている。同時に、施工会社は、切羽へ立ち入る機会が多いとされる支保工の建込み作業等の遠隔化・機械化を積極的に進めることができ求められている。また、昨今、建設業においては人手不足が深刻化しており、それに伴い熟練技能者の不足が問題視されている。そのため、熟練者から後世へ技能伝承できないといった懸念に対応した仕組みの構築が急務である。

2 システム開発の背景と課題

通常、支保工の建込み作業は、切羽作業員が切羽直下に立ち入って、目視と定規により確認しながら支保工の位置合わせを行うが、前述通り切羽直下での作業は大変危険である。そこで筆者らは、ナビゲーション画面を見ながら支保工の建込みができる「支保工位置ナビゲーションシステム（以下、支保工ナビ）」を開発し、現場導入を進めてきた¹⁾。支保工ナビは、設計の建込み位置と実際の支保工位置との差分が表示されたナビゲーション画面をオペレーターが確認しながら支保工を設計位置へ建て込むシ

ステムである。本システムを活用することで、切羽直下へ立入らずに支保工の建込みを施工できるようになっただけでなく、支保工の建込み位置をシステムで可視化できるため、建込み精度が向上した。

一方で、支保工ナビを活用した建込み作業においてオペレータは、支保工を把持しているブームの小さなたわみ量や支保工の微小なゆがみやねじれを鑑みて、操作レバーで位置を微調整しながら支保工を建て込む必要があった。そのため、技能者が培ってきた操作技術が求められ、熟練の技能者であっても操作習得に時間を要した。また、経験の浅い技能者においては、支保工ナビ操作を習得できず、支保工の建込み作業において、従来通り切羽直下に立ち入って目視等で位置合わせする様子が散見された。

そこで、筆者らは、技能者の経験に依らず支保工の建込みを安全に施工できる全自動鋼製支保工建込みシステム（以下、自動建込みシステム）を搭載した全自動鋼製支保工建込みロボットを開発した。

3 自動建込みシステム

自動建込みシステムは、ボタンひとつで支保工を把持した状態から設計位置に建て込むまでの一連の動作を行う。自動建込みシステムの概要図を図-3.1に示す。本システムは、（1）支保工位置追尾システムおよび（2）高性能エレクタを自動制御するプログラムのほか、切羽直下に立ち入ることなく作業を遂行できる（3）自動建込用鋼製支保工に加え、（4）自動建込み用操作画面と（5）ミラー自動回収機構で構成される。

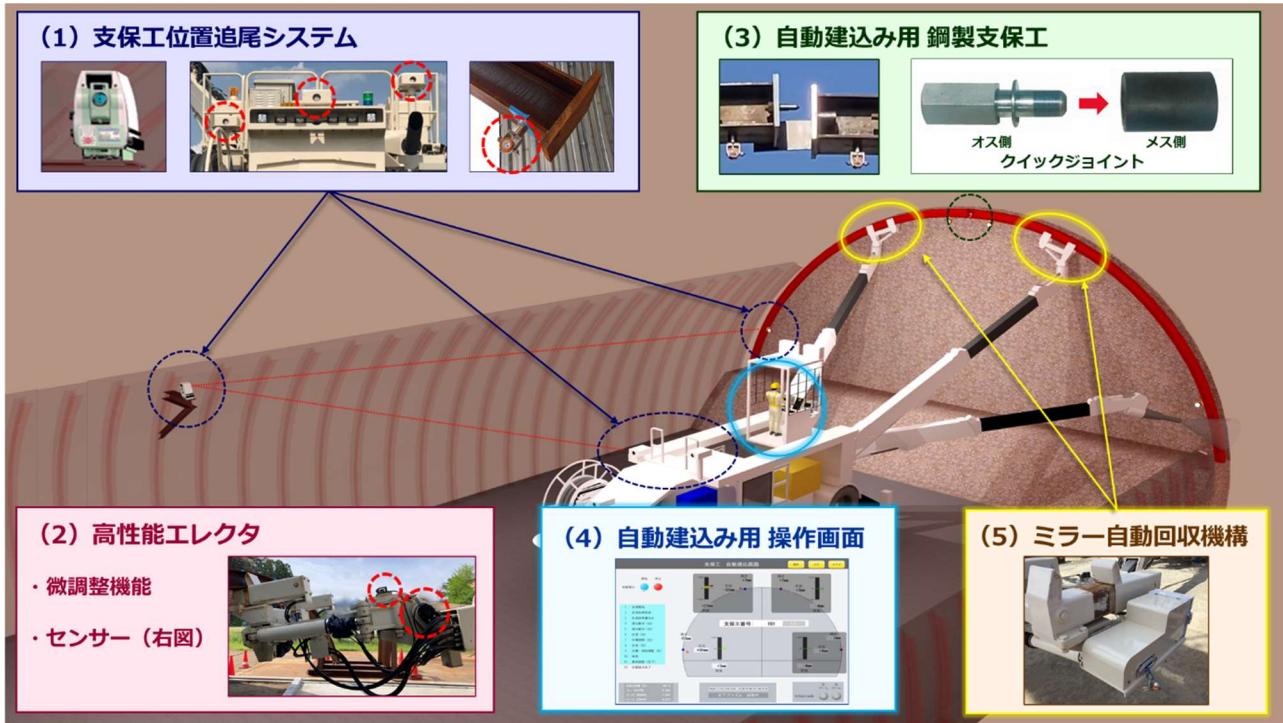


図-3.1 自動建込みシステム概要図

4 自動建込みシステムを構成する要素

自動建込みシステムを構成する要素の仕様を以下に示す。

(1) 支保工位置追尾システム

エレクタ一体型吹付け機（以下、エレクタ）や支保工の位置情報を把握するために、エレクタにはマシン姿勢測定用プリズム、支保工には位置測定用プリズムを設置する。切羽近傍にエレクタを設置後、切羽後方のトンネル壁面に設置された自動追尾型トータルステーション（以

下、TS）でマシン姿勢測定用プリズムを視準し、エレクタの機体中心座標を算出する。中心座標は、自動建込みシステムの制御パソコンに自動転送され、エレクタのブーム位置等の算出に用いられる。支保工の位置取得にあたっては、TSで支保工の天端と足元に設置したミラーを順番に自動追尾することで、支保工の座標をリアルタイムに取得する。

(2) 高性能エレクタマシン

開発に使用したエレクタには、ブームや機体

表-4.1 支保工仕様の対比表

項目	従来の仕様	自動建込み用の仕様
①天頂部の継手	ボルトナットによる手締め	ワンタッチ式の継手による締結
②奥行の確認	切羽直下に立入り、支保工の鉛直精度を確認しながら締結	天頂部に設置されたガイドプレートにスライドさせながら締結
③金網の設置	切羽直下に立入り、支保工背面に手作業で設置	支保工に金網を事前設置して建込み
④支保工の転倒防止	つなぎ材もしくはタイロッドを使用した転倒防止	頭付きアンカーと吹付けコンクリートを一体化することで転倒を防止

にセンサを取り付けており、そのセンサを使用することで、ブームの長さや高さ、傾き等を詳細に把握できる。

(3) 自動建込み用 鋼製支保工

自動建込みシステムに用いる支保工は、人が切羽に立ち入る必要が無い仕様である。表-4.1に一般的に用いられている支保工仕様と自動建込み用の支保工仕様を対比した表を示す。

表-4.1に示す通り、自動建込みシステムの適用にあたり、従来とは異なる支保工の仕様を考案した。以下に仕様の詳細を示す。

①天頂部の継手

従来、支保工天頂部の継手にはボルトナットが用いられており切羽直下で手締めしていた。そこで、天頂部の継手締結を人力作業なしで行うため、ワンタッチ式クイックジョイント（以下、QJ）を継手部に採用した。QJの構成部品を写真-4.1に示す。

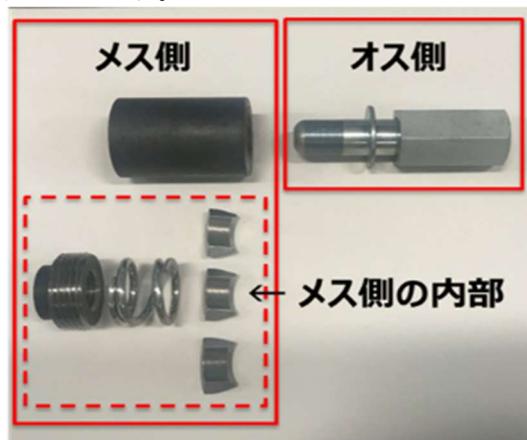


写真-4.1 ワンタッチ式クイックジョイント

②奥行の目安

自動建込みシステムは、天頂部の締結においては、高度な測量精度を要する。支保工が建込み時に揺れて、測量精度が低下することを防止するため、天端部に当て板を設置した。支保工を当て板に押し当てるながらスライドすることで、QJのピン先端がメス側に向くように設計した。当て板の活用状況を写真-4.2に示す。



写真-4.2 当て板を活用した建込み状況

③金網の設置

自動建込みシステムにおいては、溶接等により金網を支保工に事前設置（写真-4.3）することで、切羽へ立入ることなく金網設置を行う。



写真-4.3 金網の設置状況

④支保工の転倒防止

従来、支保工の転倒防止対策としてはつなぎ材が用いられている。つなぎ材の施工は、直近で建て込んだ支保工と1基手前に建て込まれた支保工を連結するが、本開発では、頭付きアンカーを支保工に事前設置（写真-4.4）することでつなぎ材の設置作業を不要にした。頭付きアンカーと吹付けコンクリートの連結構造を構築することで、支保工の転倒防止を図る。

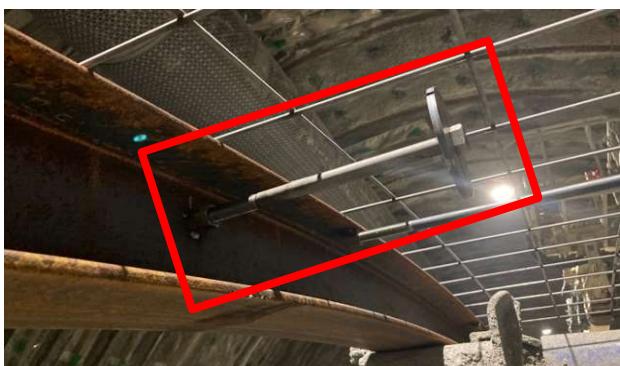


写真-4.4 頭付きアンカーの設置例

(4) 自動建込み用操作画面

自動建込み用操作画面を図-4.1に示し、各種表示を以下の①～③に示す。

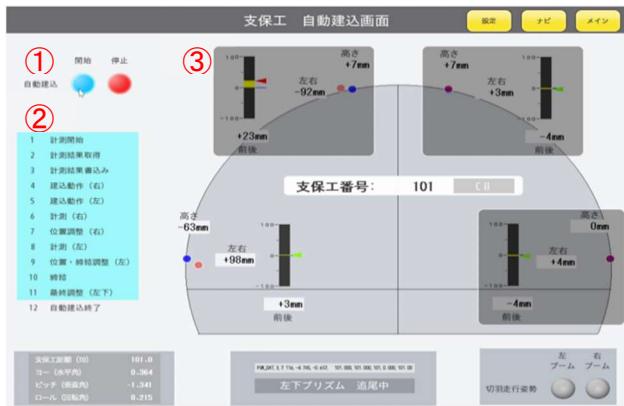


図-4.1 自動建込みシステム画面

①自動建込み開始ボタン

青いボタンが建込み開始ボタン、赤いボタンが停止ボタンである。建込み開始ボタンを押下すると、自動建込みが開始され、終了するまでの作業を一貫して行う。

②動作ステップ表示

自動建込みの動作ステップを示す。動作が終了すると、青くハッチングされ、建込み状況を逐次把握できる。

③建込み状況の表示

支保工の建込み状況を可視化する役割があり、画面内の赤丸が実測位置、青丸が設計位置を示し、実測と設計のずれを数値化する。

(5) ミラー回収機構

本機構の運用においては、エレクタで支保工を把持した状態でワインチからけん引ロープを引き出し、支保工の天端と足元にミラーを設置する。支保工建込み完了後、運転席のリモコンを操作して各ミラーを回収し、吹付けコンクリートの施工に移行する。ミラー回収機構の適用状況を写真-4.5に示す。



写真-4.5 ミラー回収機構適用状況

5 おわりに

本システムによる建込み方法を検討する上で、効率的に設計位置に支保工を建て込む方法や締結精度向上を図る方法を導くことができた。また、2025年9月時点での本技術を4つの山岳トンネル現場に導入し、その効果を確認した。結果としては、すべての現場において切羽への立ち入り行為を排除した施工が実現可能であることを確認した。しかし、切羽の掘削形状によっては、支保工等が地山に接触し、自動動作が停止する事象が発生した。そのため、現在は建込みシステムのアルゴリズム等を改良することにより地山への接触を回避可能な自動建込みロボットの改良と実証を実施している²⁾。今後は更なる生産性向上を目的とした支保工建込み作業の時間削減に取り組む所存である。

参考文献

- 賀川昌純、五對将之、水谷和彦、高原克己：偏圧地形坑口の斜め支保工を切羽無人化建込みロボットで施工、トンネルと地下、Vol. 51、No. 4、pp. 57-66、2020. 4
- 馬場雄大、水谷和彦、春田克樹：全自動鋼製支保工建込システムを用いた効率的な建込方法、土木学会全国大会第80回年次学術講演会、VI-1209、2025

簡易路面点検技術『マルチファインアイ』

福田道路㈱ 本社 技術部長 ○粕谷 一明
㈱インフラ・ディープサーバイ 新潟大学 中村 亮太
福田道路㈱ 本社 参与 田口 仁

1 はじめに

我が国のインフラは高度成長期に急速に整備され量的拡大を遂げたが、近年は既存インフラの老朽化が顕著となり、その対策が喫緊の課題となっている。一方で、人口減少に伴う技術者不足や、維持管理費の増加、さらには道路管理データの利活用など様々な課題を抱えている。近年、インフラ点検分野における技術は目覚ましく進歩しており、AI(人工知能)を活用した診断技術や、点群データを活用した3Dモデル解析など効率的な点検技術が進展している。

本報では、DXを活用した簡易路面点検技術である『マルチファインアイ』の概要について報告する。本技術は、汎用機材を用いて舗装の路面性状3要素(ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI)を高い精度で測定できる技術である。

2 使用機材

本技術で使用する機材は、①ビデオカメラ、②深度カメラ、③位置測位システムであり、いずれも汎用品であり、これらの機材を市販の計測用車両に取り付けて計測を行う。

2. 1 ビデオカメラ

ビデオカメラは、道路舗装面を撮影してひび割れ率の計測および路面状況把握に供し、SONY製のアクションカムを用いている(写真-1)。小型で扱いやすいように、防塵性・防水性に優れていることから、車外に設置しても撮影可能である。また、レンズとセンサーを一体として光

学ユニットを空間に浮かせる手ブレ補正機能を搭載していることから、計測用車両を走行しながら撮影しても安定した撮影が可能である。なお、SONY製のビデオカメラは現在生産終了となっているが、同等の画質が得られれば他社のビデオカメラでも代用できる。



写真-1 ビデオカメラ外観

2. 2 深度カメラ

深度カメラは、インテルのデプスカメラD455を使用している(写真-2)。IRプロジェクターから赤外線を投射し、左右に配置された深度センサーにより対象物までの距離差を計測し3D情報を得ることができる。また、RGBステレオカメラも搭載しており、カラー画像の取得も可能

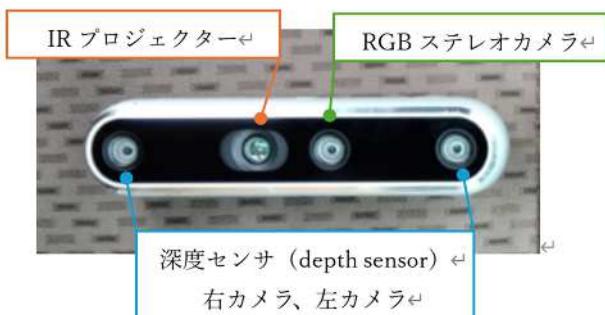


写真-2 深度カメラ外観

であることから、深度情報と合わせて色彩情報付き3Dデータを作成する事ができる。深度カメラにて路面を撮影し、得られた3Dデータから路面プロファイルを抽出して、わだち掘れ量やIRIの計測に用いられる。

2. 3 位置測位システム

位置測位システムは、SoftBank社のイチミルを使用している。イチミルはGNSSから受信した信号を利用して位置情報を取得しているが、精度を向上させるため独自の基準点を利用し補正情報を配信することで、正確な位置情報を得ている。位置情報は1秒ごとに取得され、ビデオカメラで取得された映像や深度カメラで取得された3Dデータと時間で同期され、位置情報が付与される。なお、秒間の位置は等速で移動したと仮定して線形補間を行い、任意の時間の位置情報を算出している。

3 解析原理

3. 1 ひび割れ測定

ひび割れ測定は、ビデオカメラにて対象路面を撮影した動画を1秒間に約10枚の静止画に切り出し、その画像をAIにより解析する。AIには事前に路面のひび割れを学習させており、対象画

像からひび割れを抽出し、その面積率によりひび割れ率を算出する。AIにより抽出されたひび割れを写真-3に示す。

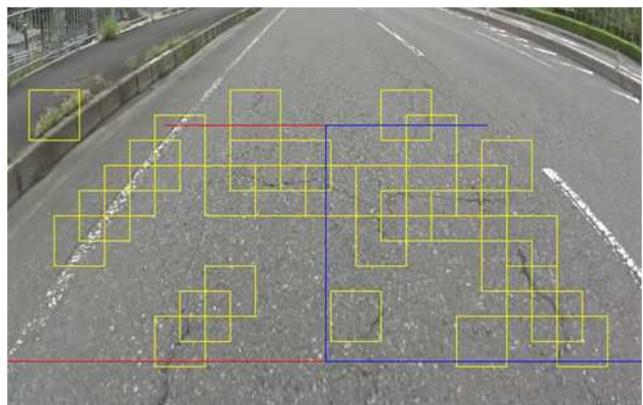


写真-3 AIによるひび割れ抽出

3. 2 わだち掘れ測定

わだち掘れは、深度カメラから得られる3Dデータから道路横断方向のプロファイルを切り出してわだち掘れ量を計測する。また、色彩情報から得られる白線は、わだち掘れ形状の起終点として利用されている。横断形状によるわだち掘れ計測の例を図-2に示す。

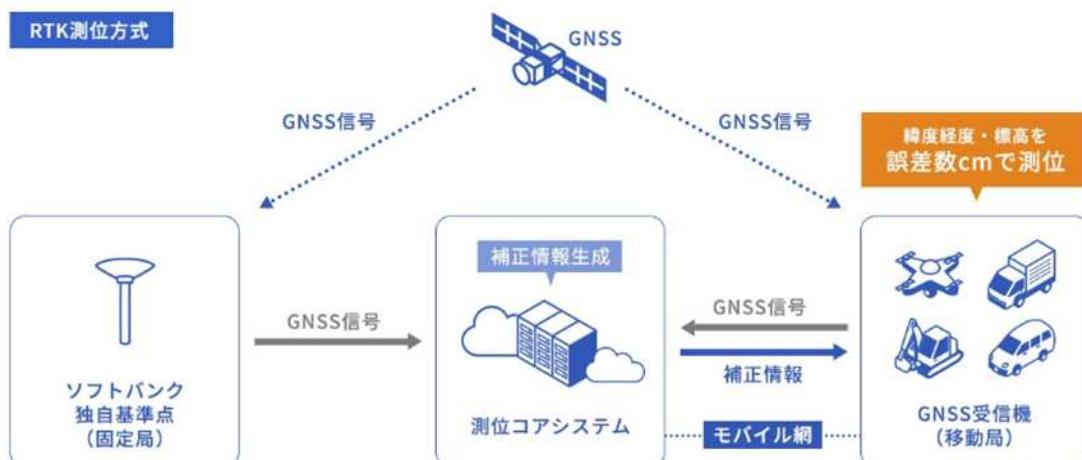


図-1 イチミル測位方式 (SoftBankホームページ抜粋)

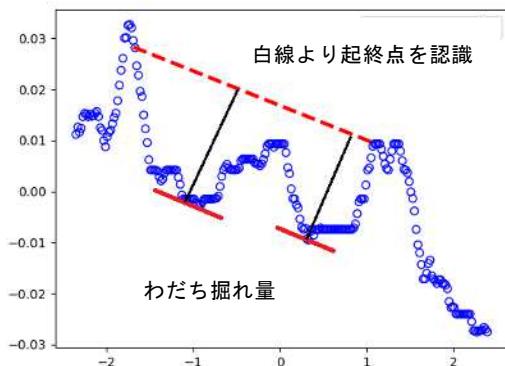


図-2 横断形状によるわだち掘れ量計測

3. 3 IRI測定

IRIも深度カメラから得られる3Dデータからを道路縦断方向のプロファイルを切り出し、QCミュレーションを用いて算出する。QCモデルは2軸4輪の車両の1輪だけをモデル化したものである。(図-3参照)なお、色彩情報から得られる白線は、IRIの側線を決定する際に利用する。

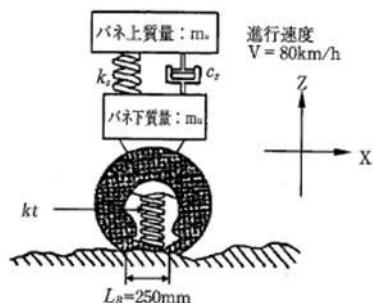


図-3 クオーターカー (QC) モデル

舗装調査・試験法便覧(平成31年版)抜粋

4 計測方法

4. 1 計測準備

事前準備として、対象路線の該当する車線およびその起終点を地図上の位置情報や現地踏査にて確認する。対象路線全体を通して、調査に先立ち不明な項目が無いか事前に確認を行う。

4. 2 計測

計測用の車両に、ビデオカメラ・深度カメラおよびGNSS受信機を設置する。設置例を写真-4に示す。



写真-4 計測機器の設置例

設置が完了したら、対象の車線を法定速度で走行し、路面の動画、3D情報および位置情報を取得する。測定路面は主にアスファルト舗装であるが、コンクリート舗装でもひび割れが確認できれば計測可能である。また、計測に際して交通規制は不要である。測定条件を表-1に整理する。

表-1 測定条件

推奨時間帯	日中の明るい時間帯 ひび割れが確認できる
対象舗装種別	主にアスファルト舗装 (その他の場合は技術者が画像を確認)
路面状況	濡れていない状態
撮影単位	1車線毎
速度	70km以下 * 標準は40km/h程度
交通規制	不要

4. 3 結果の整理

取得したデータは、3章の解析原理に従って、ひび割れ率(%)・わだち掘れ量(mm)・IRI(mm/m)の路面3要素として数値化される。さらに路面3要素は、位置情報とともに一般的には20mごとに整理を行い帳票を作成する。なお評価単位は20mに限らず、任意の長さで整理することは可能である。また、地図上に損傷の程度により色分けをして可視化し全体を俯瞰したり、任意の箇所をクリックしてポップアップ画像により損傷状況を確認したりして点検結果を数値だけでなく、視覚的に把握することができる。

アウトプットの一例を図-4に示す。

5. 測定の精度

本技術は、点検支援技術性能カタログ【舗装編（ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI）】に掲載されており測定の精度が確認できている。精度の確認結果を表-2に示す。ひび割れ率は令和4年の計測結果でわだち掘れ・IRIは令和6年に計測した結果である。

試験はテスト路面の路面3要素を損傷の程度に応じて3段階の損傷区分に分類し、正解値と照ら

し合わせ、損傷の見落としが無いか評価する検出率と検出精度を評価する的中率で評価した。本技術は、多くの項目で高い的中率、検出率を得ることができた。

表-2 精度確認試験結果

損傷度区分の 検出率及び的中率	Ⅱ以上 検出率 ¹⁾	Ⅱ以上 的中率 ²⁾	Ⅲ検出率 ¹⁾	Ⅲ的中率 ²⁾
ひび割れ率 令和4年計測	90~100%	90~100%	60~70%	90~100%
わだち掘れ量 令和6年計測	90~100%	90~100%	80~90%	90~100%
IRI 令和6年計測	90~100%	80~90%	90~100%	80~90%

1)検出率：損傷を発見できるか、見落としがないかを評価する指標

2)的中率：検出した結果の精度を評価する指標

6. おわりに

本技術は、AIによる画像解析および3Dデータを活用したプロファイル解析により、熟練の技術者に属人化していた作業が省力化され、さらには再現性や客觀性が向上し、従来の課題解決につなげることができた。舗装点検の必要性は今後もますます増加することが予想されることから、本技術を活用してその一端を担っていきたいと考える。



図-4 アウトプットの一例

施工データの集約・分析とデジタル技術を融合した 次世代型道路改良工事の実現

株式会社本間組 土木事業本部土木部 工事課 担当課長 ○中川 拓
東北支店土木部 工事課 担当課長 大島 英明
土木事業本部技術部 技術企画課 担当課長 神藏 昌士

1 はじめに

建設現場では i-Construction の取組開始以降、3次元データの活用や I C T 建設機械による施工等、デジタル技術の活用が一般化してきており、生産性の向上は一定の効果が確認されている。

しかし、従来の I C T 施工は現地測量を U A V やレーザースキャナ等で効率的に計測を行うことや、3次元設計データと I C T 建設機械を用いて土工等を効率的に施工することを主体とし、生産性の向上は作業単体レベルの効果に留まっていた。

また、3次元データの活用も単純な形状確認や数量算出に留まり、属性情報等の潜在的な価値の活用にまで達していなかった。

本稿は、部分的な作業を対象とした従来の I C T 施工から、一段階進化させた I C T 施工で工事全体の生産性向上を図るとともに、3次元データが持つ属性情報を施工管理に活用した事例について報告する。



図－1 施工位置図

2 工事概要及び課題

本工事は、茨城県潮来市小泉南および延方西において、東関東自動車道と潮来バイパス並走区間の道路土工、補強土壁工及び軽量盛土工を施工するものである（図－1）。

当初設計において、路体盛土及び路床盛土が I C T 土工の対象となっており、マシンガイダンスによる敷均し及び G N S S を用いた盛土の締固め管理を行う計画であった。

主たる工種の道路土工では、同地区だけでも 4 工事が輻輳して作業を行う現場条件であり、盛土材料は他工事とも共有することから、事業全体の土量配分に乱れが無いよう、精度の高い運搬量把握及び進捗管理が求められた。

また、他工事と共有のストックヤードから盛土材料を運搬する計画であったが、当該施工箇所から約 12 km（片道約 20 分）離れており、ダンプトラックの運行状況次第では、重機及び作業員に不要な待機時間が発生し、工事全体の作業効率低下が懸念された。

道路土工と並行して進める必要のある補強土壁工は、東関東自動車道と潮来バイパス並走区間による複雑な構造が原因で、盛土高の変化や平面線形の折れ点が多く、配置する壁材及びストリップの長さの種類が多いという特徴があった。

同じ段数においても隣り合うストリップの長さが異なる箇所もあり、従来方法では、2次元図面と現地測点との確認作業に時間を要すことや、2次元図面の読み違いによる手戻り等による工程遅延が懸念された。

3 デジタル技術の連携による課題解決

上記の課題を解決するため、以下の取り組みを実施した。

- ①荷重判定装置と運行管理の連携
- ②3次元モデルとAR技術の連携

3. 1 荷重判定装置と運行管理の連携

荷重判定装置は、バックホウによる積込作業時に、アームに取り付けたセンサーによりバケット内の重量を計測し、操作室のモニターに総重量を表示するシステムである。



写真-1 荷重判定装置取付イメージ

運行管理システムは、ダンプトラックに車載専用GNSS端末を取り付け、リアルタイムに位置情報を把握するシステムである。



写真-2 車載専用GNSS端末

本工事では、これら独立したシステムをクラウド上で連携させ、データ連携のオートメーション化を実現した。これにより、施工データの自動集約や、データの見える化、分析やリアルタイム進捗状況把握が可能となった（図-2）。

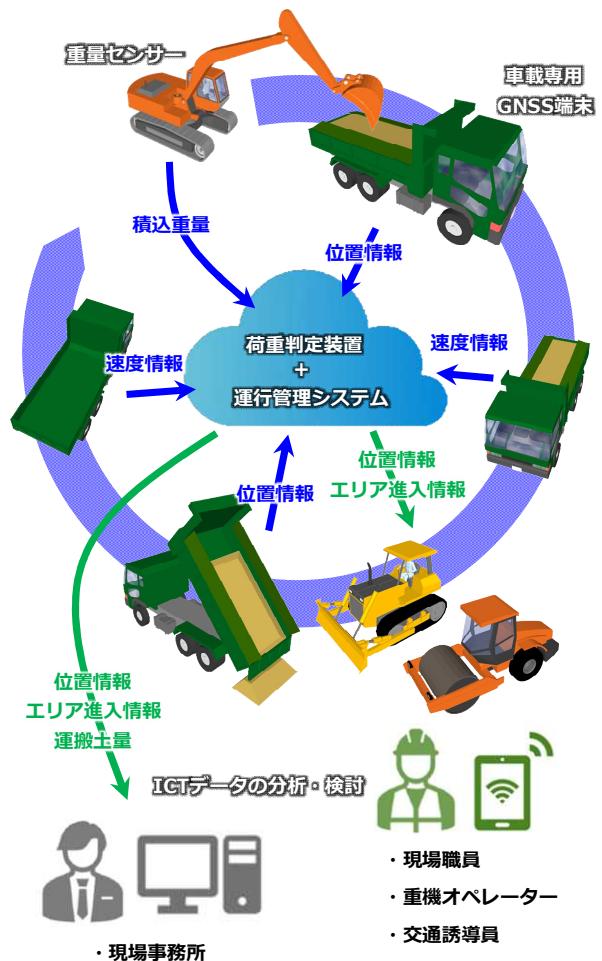


図-2 データ連携のオートメーション化イメージ図

3. 2 3次元モデルとAR技術の連携

3次元モデルの持つ属性情報を施工管理段階でも活用するため、作成した3次元モデルを現地映像にリアルタイムで表示させることができるAR技術との連携を実施した。

当該工事では、高精度のGNSSアンテナ一体型のAR機器であるSiteVision（写真-3）を採用し、スチールテープや光波測距儀を使用することなく、位置情報を持った3次元モデルを現地の設計位置にARで投影して、部材の配置確認に活用した。



写真-3 AR機器活用状況

また、部材設置時や設置後、3次元モデルの属性情報をSiteVisionにて手元モニターに表示することができることから、部材の種類や規格等を3次元モデルと見比べて確認でき、取り違えの有無等のチェックに活用した（写真-4）。

これにより、複雑な構造を持つ補強土壁工の施工精度向上と効率化を実現した。



写真-4 AR投影モニター映像

4 デジタル技術の連携による効果

①施工段取りの最適化

車載専用GNSS端末から発信される位置情報により、リアルタイムにダンプトラックの位置が確認できるようになった。これにより、重機オペレーターはダンプトラックが到着する直前まで別作業を行うことが可能となり、不要な待機時間が生じなくなった。

結果として、施工段取りの最適化が実現し、作業効率が大幅に向上した。

②ボトルネック把握や改善の検討

重機・ダンプトラックの稼働時間データが自動で集約され、グラフ化されることで、作業全体のボトルネックの把握や改善方法の検討が効率的に行えるようになった（図-3）。ダンプトラックの待機時間が長い区間や、積込作業に時間を要している箇所などが視覚的に把握できるため、ダンプトラック台数の増減や積込バックホウの規格変更等、迅速な対策の立案が可能となった。



図-3 重機稼働時間チャート図

③日々の書類整理業務を削減

ICT建設機械やダンプトラックの施工データがクラウド上で自動集約、見える化されることで、日報等の書類整理業務を大幅に削減することができた。具体的には、1日あた

り約1時間の業務時間削減効果があり、現場担当技術者の負担軽減につながった。

④進捗管理把握による予実管理

荷重判定装置との連携で、ダンプトラック1台毎の実積載重量(=実積載土量)がクラウド上での自動集計が可能となり、リアルタイムで実施運搬土量の把握が可能となった(図-4)。

従来は日報等を整理して事後的に行われていた予実管理が、作業の途中段階でもリアルタイムに進捗や計画とのズレを把握できるようになった。これにより、ダンプトラック台数の調整や積込機械の追加など、迅速なフォローアップが可能となり、工程管理の精度が向上した。

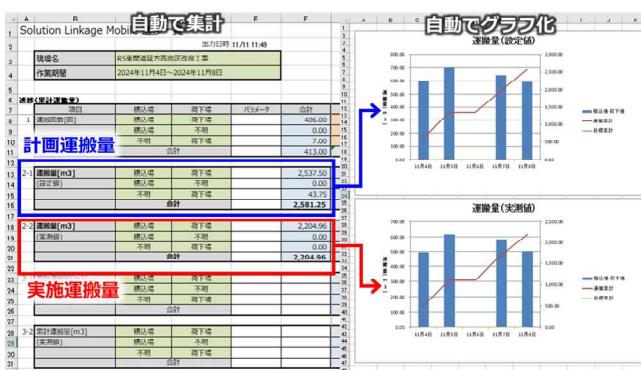


図-4 予実管理データ出力例

⑤施工管理の効率化

3次元モデルとARを連携させることで、補強土壁工におけるストリップの本数及び長さ確認作業が従来方法と比較して約70%の時間短縮となった。また、確認作業に要する人員も50%削減することができ、施工管理の大幅な効率化を実現した。

複雑な構造を持つ補強土壁工において、2次元図面の読み違いによる施工ミスや手戻りのリスクが大幅に低減され、品質向上と工期短縮の両立が図られた。

5 おわりに

本工事では、現場の課題解決のため、道路改良工事における次世代型施工管理の試行を行った。各種施工データの統合的活用とリアルタイム分析を実現することで、施工プロセス全体を通じたデータの一元管理による情報の分断化解消、クラウドプラットフォームを活用したリアルタイムデータ共有による現場判断の迅速化が可能となった。

これは、従来のICT施工から一段階進化し、国土交通省が推進するICT施工Stage II相当の管理を実現できたといえる。

ただし、現状では施工データの集約・整理・見える化されたデータの分析や改善方法の検討は、現場担当技術者が行う必要があり、その判断は技術者の経験に左右される面がある。

今後の発展として、経験の浅い技術者でも、迅速に最適な判断を行えるように、AI技術等で施工データの分析や改善方法の検討をサポートすることが可能となれば、更なる生産性向上が期待できる。

3次元モデルとAR技術の連携は、3次元モデルの持つ属性情報を最大限活用でき、施工管理の生産性向上に繋がった。今後、ARを投影する機器の性能・精度の向上が見込まれることから、今回の事例を発展させて、LiDAR等で取得したデータと、ARで投影した3次元モデルの比較による点検作業効率化など、維持管理分野への波及も期待できる。

本工事で得られた知見は、道路改良工事のみならず、土木工事全般におけるICT施工の高度化に寄与するものであり、今後も建設生産・管理システムの効率化・高度化を図り、より効率的で魅力ある建設現場の実現に貢献していく所存である。

減揺タンクによる浮遊ケーソンの動揺低減技術

東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 水圏技術グループリーダー 倉原 義之介

1 はじめに

港湾の防波堤や岸壁の構築に用いられるケーソンは製作後、大型の起重機船で吊られた状態、もしくは海に浮かべられた状態で運搬される。このうち、海に浮かべられた状態のケーソンを「浮遊ケーソン」と呼び、設置場所までタグボート（曳船）で曳航する。曳航後、ケーソン内部に注水を行ってケーソンの喫水を下げ、海底に築造したマウンドの上へ設置（据付）される。

この浮遊ケーソンの曳航・据付は、波浪の影響を最も大きく受ける工種のひとつである。特に、波の静穏な日が少ない外洋では、波の周期と同調して浮遊ケーソンが大きく動揺する問題がある。図-1に、鹿島港（茨城県）における浮遊ケーソン（2000 t級）の動揺の状況を示す。この日は有義波周期約8 s、有義波高0.5～0.6 mと、当海域の条件としては、波の静穏な日であった



図-1 浮遊ケーソンの動揺状況

が、浮遊ケーソンは、波と同調（共振）を起こしてRollとPitchの回転運動（図-2）が大きくなり、ケーソンの端部では、波高の倍以上の大きさで人の身長ほどの上下動が発生した。

浮遊ケーソンの動揺は、作業員の海中転落、マウンドとの接触によるケーソンの破損などの原因となる。さらに、ケーソンの据付精度や施工の可否（稼働率）にも大きな影響を及ぼす。

そこで、著者らは、浮遊ケーソンのRollとPitchを抑えるために、単純な形状の薄いFlume式（直方体）の減揺タンクをケーソン天端に設置する方法を提案し、これまでに室内水理実験と数値解析により、その効果を確認している¹⁾⁻⁸⁾。

本報では、その原理について概説するとともに、茨城港常陸那珂港区において実物の巨大ケーソン（8000t級）に減揺タンクを搭載し、実海域における不規則波中の浮遊ケーソンの動揺低減効果を確認したので、ここに報告する。

なお、実海域実験は、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所の革新的社会資本整備研究開発推進事業「浮遊ケーソンの動揺低減技術の研究開発」にて行ったものである。

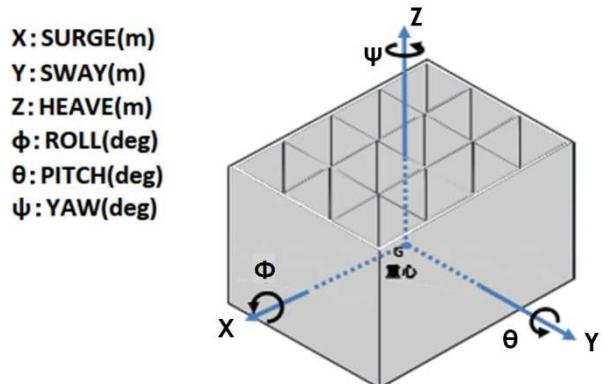


図-2 浮体動揺の定義

2 減揺タンクの原理

ケーソンは数百トン～数千トンの重量を有する巨大な構造物であるため、波が一波作用しても動揺量はそれほど大きくならない。しかしながら、浮力による復原力を有するHeave, Roll, Pitchは、振り子のように動揺に固有の周期を持ち、固有周期に近い波が数波続いて作用した場合に、共振して動揺が大きくなる。

これに対して、図-3に示すように、減揺タンクを設置したケーソンでは、動揺によって生じたケーソンの傾きからやや遅れて、減揺タンク内の水が移動し、動いた水の重量による回転モーメントがケーソンに発生する。この回転モーメントとケーソン動揺の位相差が -90° に近づくときに、ケーソンの回転動揺を減衰する力が作用する。図-4に示すような形で、ケーソンの幅方向と長さ方向に減揺タンクをそれぞれ設置することによって、ケーソンの回転運動のうち、Roll（幅方向の回転）とPitch（長さ方向の回転）を減少させることができる。

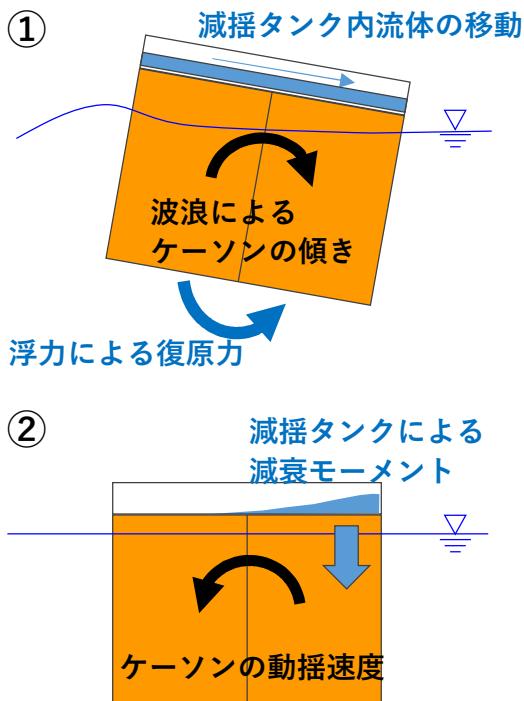


図-3 減揺タンクによる動揺低減の原理

3 実海域実験

3. 1 実験概要

茨城港常陸那珂港区で東防波堤の延伸に用いられる実物の巨大ケーソン（8000 t級）を用いて、2022年7月31日、8月3日の2日間に、実海域の不規則波中での減揺タンクによる浮遊ケーソンの動揺低減効果を確認する実験を行った。実海域実験は、国土交通省関東地方整備局の実海域実験場提供システムの適用を受け、茨城港常陸那珂港区を管理する茨城県への水域占用許可申請、茨城海上保安部への作業許可申請を行い、港湾利用者と調整を行いながら実施した。

本実験で用いたケーソン（図-4）は、2021年度に製作され、据付まで港内に仮置されていたものである。長さ28.7 m、幅24.3 m、高さ24.5 mの質量7927 tのRC製の矩形ケーソンであり、国内でも最大級の大きさである。

ケーソンの天端に設置した減揺タンクは、上段にRoll用が6本、下段にPitch用が5本である。減揺タンクは仮設鋼材を主要部材として、陸上ヤードで組立てた（図-5）。長さはRoll用が18.4 m、Pitch用が27.4 mで、どちらも幅が1.7 m、高さが0.6 mである。減揺タンクを、300 t吊の起重機船に積み込み、ケーソン仮置場所まで海上運搬後、ケーソン上に設置・固定した。

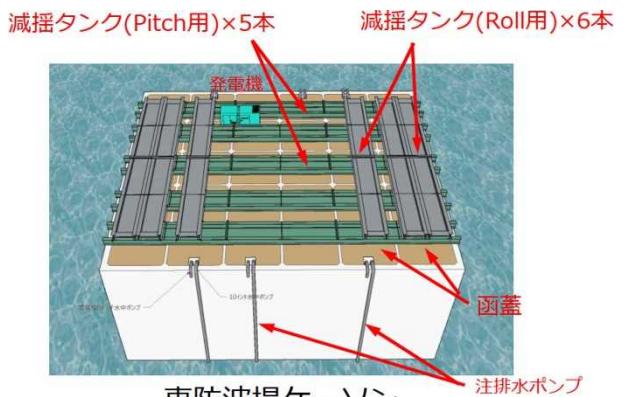


図-4 実海域実験で用いたケーソン
および減揺タンクの配置



図-5 実海域実験で使用した減揺タンク

減揺タンク内に水がない状態（減揺タンクなし）と減揺タンク内に0.25 mまで注水を行った状態（減揺タンクあり）で、それぞれ30分間の動揺計測を行った。また、動揆計測地点近くの海底に波高計を設置して、実験時の波浪を観測し、有義波高、有義波周期を取得した。

3. 2 実験結果

波浪中に静止浮遊させた状態でのケーソンの動揆を図-6、曳航中のケーソンの動揆を図-7に示す。これらは、減揺タンクなしと減揺タンクありでの1日目の計測結果である。

最初に、波浪中における減揺タンクによる浮遊ケーソンの動揆低減について述べる。この時、波はケーソンのPitch方向から入射しており、Rollは減揺タンクのありなしにかかわらず小さく、優位な差はない。Pitchは、減揺タンクなし

では波浪と共振して振幅が2倍程度大きくなる時間帯が存在し、振幅の時間変動が大きい。一方で、減揺タンクありでは、共振によるPitchの振幅増大が見られず、全体的にPitchが小さく抑えられることを確認できた。入射波高で除して無次元化したPitchの減揺タンクによる低減率は、1日目が37 %、2日目が29 %となった。

次に、曳航中の減揺タンクによる浮遊ケーソンの動揆低減について述べる。曳航中のケーソンは防波堤背後に位置しており、波の作用は小さかった。図-7から、曳航中のケーソンは、減揺タンクなしの状態では、曳航方向と直角の向きのRollがやや大きいことが分かる。この時のRollの周期は約13 sで、浮遊ケーソンのRollの固有周期13.7 sとほぼ一致した。このような、進行方向と直角方向に生じる動揆は、船舶でも発生する「パラメトリックロール」と呼ばれる共振現象の一種である。一方で、減揺タンクありでは、減揺タンクなしのような共振によるRollの振幅増大は見られず、全体的にRollが小さく抑えられることを確認できた。曳航時の減揺タンクによるRollの動揆低減率は、1日目が31 %、2日目が29 %となった。

以上より、波浪中と曳航中のいずれにおいても、著者らの提案する減揺タンクによる動揆低減効果を実海域実験によって確認できた。

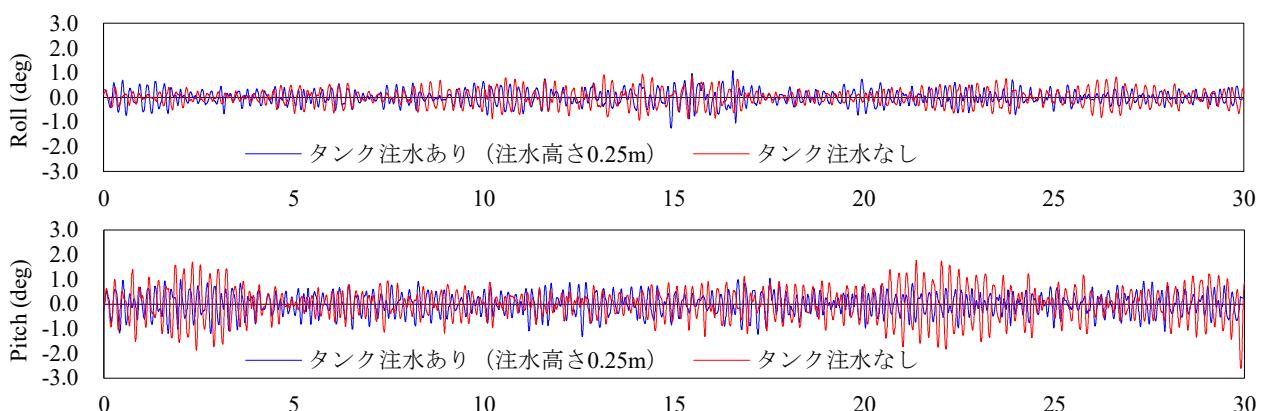


図-6 波浪中に静止浮遊させたケーソン動揆（上：Roll、下：Pitch）

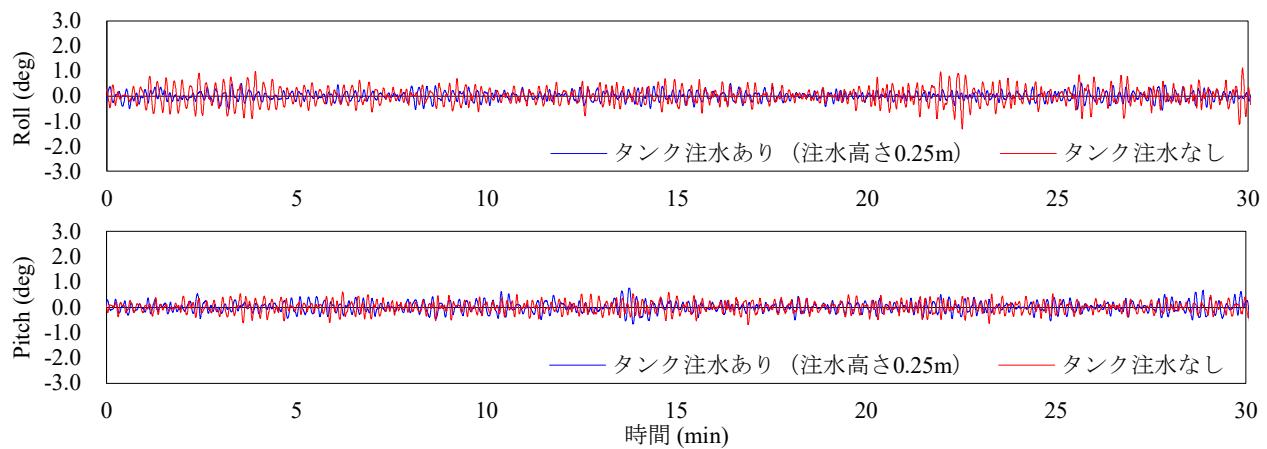


図-7 曜航中のケーソン動搖波形（上：Roll、下：Pitch）

4 おわりに

著者らが提案した減揺タンクによる浮遊ケーソンの動搖低減技術は、タンク内の水の移動によってケーソンの回転運動であるRollとPitchを低減できることが実海域実験にて確認された。動搖低減によりケーソンの曳航・据付における安全性が向上する。

本技術は、波の静穏な日が少ない外洋に面した港湾や長距離曳航が必要となる離島港湾で特に効果を発揮すると考える。将来的にはケーソン据付作業の稼働率の改善やケーソンの自動据付技術への応用などが期待される。

謝辞

革新的社会資本整備研究開発推進事業においては、委託元である港湾空港技術研究所をはじめ、委員会の先生方からは多くのご助言・ご指導を賜りました。また、実海域実験の実施にあたりましては、国土交通省港湾局、国土交通省関東地方整備局、鹿島港湾・空港整備事務所、茨城港出張所、茨城県土木部港湾課、茨城港湾事務所、茨城海上保安部、鹿島海上保安署の皆様に多大なるご協力をいただきました。ここに記して、関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 江口三希子、武田将英、岩本浩明、松田信彦：減揺タンクを用いた浮遊ケーソンの動搖特性に関する自由動搖実験、土木学会論文集B2（海岸工学）、Vol. 73, No. 2, pp. I-979-I-984, 2017.
- 2) 江口三希子、武田将英、倉原義之介、松田信彦、西山大和：減揺タンクを搭載した浮遊ケーソンの波浪中動搖低減に関する水理実験、土木学会第73回年次学術講演会、No. II-175, pp. 349-350, 2018.
- 3) 中村友昭、大沼史都、趙容桓、水谷法美、江口三希子、倉原義之介、武田将英：浮遊ケーソンの動搖に与える減揺タンクの効果とその簡易的な評価手法に関する研究、土木学会論文集B3（海洋開発）、Vol. 75, No. 2, pp. I-403-I-408, 2019.
- 4) 中村友昭、竹山俊介、白井開斗、趙容桓、水谷法美、倉原義之介、武田将英：減揺タンク付浮遊ケーソンの動搖に与える波浪諸元の影響に関する実験的研究、土木学会論文集B3（海洋開発）、Vol. 78, No. 2, pp. I-253-I-258, 2022.
- 5) 倉原義之介、武田将英、原知聰、中村友昭、水谷法美：減揺タンクを用いた浮遊ケーソンの動搖低減に関する数値解析手法の開発、土木学会論文集B3（海洋開発）、Vol. 78, No. 2, pp. I-259-I-264, 2022.
- 6) 倉原義之介、武田将英、原知聰、中村友昭、水谷法美：不規則波中における浮遊ケーソンの動搖および減揺タンクを用いた動搖低減効果の検討、土木学会論文集、Vol. 79, No. 17, 23-17121, 2023.
- 7) 倉原義之介、平林隆、八木久貴、武田将英、原知聰、中村友昭、水谷法美：実海域における減揺タンクを搭載した浮遊ケーソンの動搖低減効果、土木学会論文集、Vol. 79, No. 18, 23-18064, 2023.
- 8) Shirai, K., Nakamura, T., Cho, Y. H., Mizutani, N., Kurahara, Y., Takeda, M.: Development of Coupled Numerical Model between Floating Caisson and Anti-Oscillation Tanks. Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 11, No. 9, 1669, 2023.

② 社会資本の的確な維持管理・更新

ウォーターPPP事業における質の向上・効率化技術の開発

株式会社奥村組 投資開発事業本部 新事業開発部 インフラ事業推進課 ○山口 治

1 はじめに

我が国の下水道は、管路の整備延長約 50 万 km のうち、標準耐用年数である 50 年を経過した管路は約 4 万 km となり、20 年後には 21 万 km に達する¹⁾。近年では、管路の老朽化に伴う大規模陥没が発生するなど社会的損出が生じていることから下水道管路の老朽化対策が喫緊の課題である。

筆者所属会社では、公共インフラの維持管理・更新事業を官民連携手法等で実施する案件の受託・運営を目的として、令和元年に投資開発事業本部内に官民連携事業を推進する部署を設立して様々な取組みを進めている。下水道分野では平成 30 年より千葉県柏市、令和 6 年度から福島県いわき市において下水道管路の包括民間委託事業に携わり統括管理業務を担当している。統括管理業務は、維持管理と更新の一体的なマネジメントを行い、自治体との窓口を一本化する役割を果たしている。具体的な業務は受託した共同企業体全体の工程・進捗の管理、安全管理、技術指導、セルフモニタリング、定例会議の開催、課題解決など多岐にわたる。これらの業務は、現場に常駐する職員に加えて、本支社店に在籍する専門知識を備えた職員が参画し、連携して対応している。

これまでの維持管理業務は、年度単位の分割発注であったが、官民連携事業では事業規模が拡大するため、これまで以上の効率化やコスト縮減が求められており、新技術の開発や導入などの取組みを進めている。弊社では、下水道管路の点検・維持管理に資する新技術開発を積極的に取り組んでいる。包括委託業務を行ってい

る前述の二つの自治体のご理解とご協力のもと、供用中のフィールドでの実証実験を行っている。そのうち、本稿では光ファイバー水位計と LoRa 通信を組み合せた高耐久・低電力の「管路内水位モニタリング技術」と、「画像認識 AI を用いた損傷検出技術」の取組を記述する。

2 管路内水位モニタリング技術

2. 1 開発の背景

近年、下水道管路の老朽化等に伴って生じる損傷から地下水等が浸入する事象（以下、不明水）が増加しており、雨天時の下水処理場への流入量の増加（処理費用の増加）、処理水質の悪化等の問題が顕在化している。また、昨今では 1 km 四方程度のごく限られた場所で集中豪雨が発生することが多く、浸水被害も頻発している。発生原因を特定するには管路内の流下状況を把握する必要があり、下水道管路内に水位計を設置し、水位や流量をデータ化・可視化することが有効な対策となっている。

しかし、従来の水位計測機器はデータ取得のために道路規制をしてマンホールの蓋を開ける必要があった。その問題点を克服し、リアルタイムに水位監視を行う技術が普及しているが、機器の価格に加えて通信費用がかかることから設置数が限定的であった。また、水位計および通信装置を作動させる電力に関しては頻繁にバッテリー交換や機器の点検が必要であった。

そこで、従来のリアルタイム水位観測機を補完する技術として、下水管路内部で耐久性の高い光ファイバー水位計と低電力無線通信技術を組み合せた管路内水位モニタリング技術を開

発した。管理区域内で主要なマンホールにはリアルタイムに計測できる従来のLTE通信の測定器を設置してメイン機器とする。これを補完する位置に光ファイバー水位計（後述）を設置してバックアップ機器とした。これにより、双方の長所を活かして広範囲の水位モニタリングを効率的かつ詳細に実施する体制を実現した（図-1）。



図-1 管路内水位モニタリングの体制

2. 2 技術の概要

管路内水位モニタリング技術は、下水管路の課題を克服すべく以下の3点を改善している。

① センサー技術

水位測定センサーは、消費電力が少なく、耐腐食性や耐雷性に優れ、大量生産によるコスト縮減が見込める「ヘテロコア光ファイバー水位計」を採用した（図-2）。水圧により変形する薄膜金属（ダイヤフラム）の裏面に光ファイバーを設置し、微細な変化を捉え水深に変換することで水位測定が可能である。

② 通信技術

データ通信は、消費電力が少なくランニングコストが安いLoRa通信を採用し、マンホールの下に設置した送信機からマンホール蓋を開けずに受信機で計測データを取得できる方法を確立した（図-3）。運用方法として、受信機を搭載した点検車が走行しながら現在の水位データを取得する方法や、降雨後に行う地上巡視と同

時に過去の水位データを取得する方法がある。

③ 水位計の固定金具

ヘテロコア光ファイバーを用いることで水位計が小型化できる点を活かして、アンカーレスで固定し着脱が容易な「水位計一体型固定金具」を開発した。これにより、水位計の設置場所を頻繁に変更する不明水調査では、短時間での作業が可能となった（図-4）。

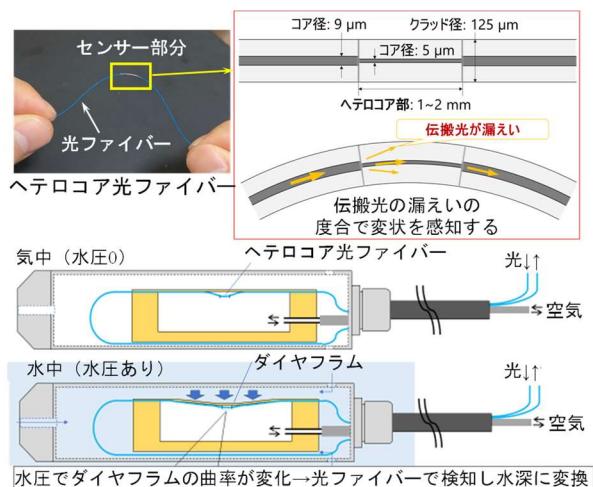


図-2 ヘテロコア光ファイバー水位計概念図

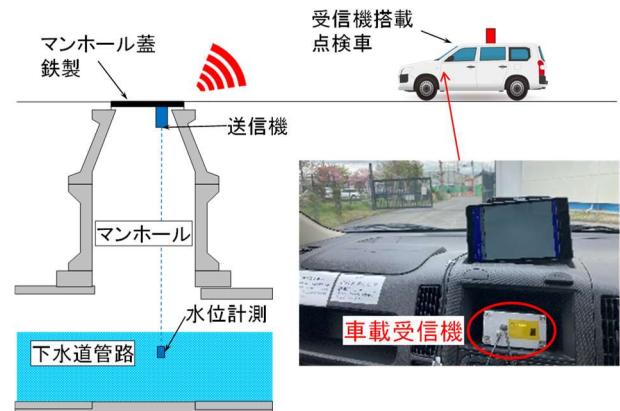


図-3 計測データ取得方法

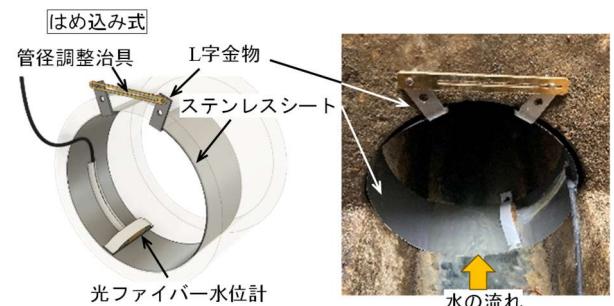


図-4 水位計一体型固定治具

2. 3 運用の効果

管路内水位モニタリング技術の効果として以下の事項が挙げられる。

- ①光ファイバーはガラス製で通電や腐食がないため耐雷性および腐食耐性が向上
- ②消費電力がLTE通信と比べて約50分の1となり市販乾電池で約2年の稼働が実現
- ③LoRa通信の採用により通信料が不要となり安価な運用が可能
- ④機器の小型化と固定金具の一体化が実現
- ⑤水位計固定金具の採用で、水位計測定機器の設置撤去の時間が1か所あたり15分程度(従来の25%程度:75%減)と大幅に短縮

3 画像認識AIを用いた損傷検出技術

3. 1 開発の背景

下水管路は、今後管路内の点検や調査の需要が増すが、対象となる延長が多く調査人員や費用に限りがあり効率的に進めなければならぬ。老朽化した管路の改築工事が必要か判定す

る詳細調査において、広角展開カメラ調査における展開画像を用いた損傷検出AI技術(以下、広角AI)の開発・運用に令和2年から取り組んでいる²⁾。また、詳細調査で多く用いられる直視・側視カメラ調査の動画から、損傷を検出するAI技術(以下、直側AI)を確立し、現在運用を目指している³⁾。本稿では、広角AI、直側AI技術概要と効果を記述する。

3. 2 技術概要

広角AIは、現地で撮影した動画を事務所に持ち帰り、展開して1枚の細長い画像を作成し、画像認識AIにより損傷を検出する技術である(図-5)。広角AIを構築する際、損傷種類毎の教師データを学習して精度検証を行っている。検出する対象は、管路の損傷(破損・クラック、浸入水等)に加えて、管路の構造情報(ジョイント、取付管)としている。検出にかかる時間は、管路の延長30m当たり15秒程度となり、技術者による目視確認作業の負担軽減と時間短縮を実現している。

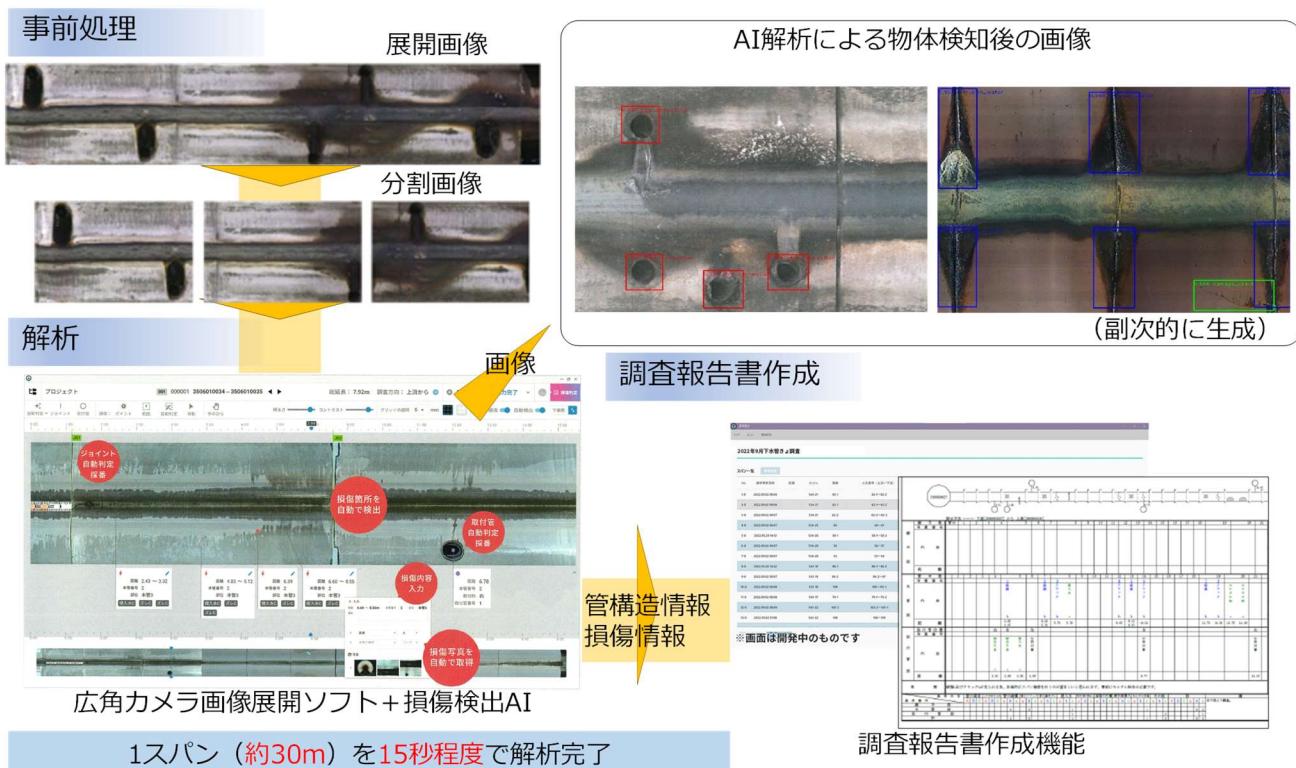
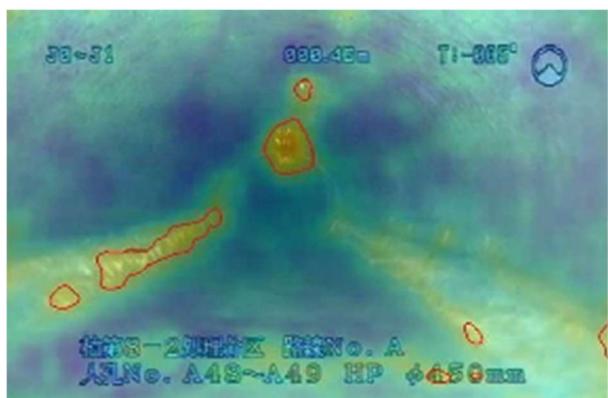


図-5 広角展開カメラにおける損傷検出AIの活用

直側 AI は、現地で撮影している最中に、地上で損傷の検出・判定をする専門技術者が見るモニターに、AI 解析した結果をタイムラグなくセンター図で投影する技術である（写真－1）。直側 AI を構築する際、損傷のない画像を学習する「教師なし異常検知」の手法を用いた。検出する基準は、学習した損傷のない画像との比較であり、異なる場合に着色して出力させる。これにより、通常の「教師あり異常検知」に比べて AI 構築の学習に要する労力を大幅に削減した。また、現地で AI 解析する時間が 0.0254 秒、1 秒間に 39 回更新する速さとなり、異常と疑われる場所を迅速に表示することが可能となった。



管路内点検動画



図－6 直視・側視カメラにおける
損傷検出 AI の活用

3. 3 運用の効果

広角 AI では、現地でのカメラ撮影時間の短縮、事務所での損傷検出時間の短縮が図れ、從

来と比べて同じ期間で多くの管路延長を調査できる。また、損傷の見落とし等の人的ミスを回避し、調査する技術者の負担軽減につながった。

直側 AI では、現地で瞬時に損傷が疑われる場所が明示されるため、見落としが回避でき経験の浅い技術者の育成、更生工事などの出来形確認等にも活用できる。また、管路調査を行う多くの企業が保有している直視・側視カメラ機器に導入できる汎用性を備えている。

どちらの AI 技術にも共通する項目として、管路調査業務全体の効率化、技術者・作業員の負担軽減、損傷検出の技術者間で生じていた結果の差の回避や平準化などが挙げられる。

4 おわりに

本稿で挙げた技術は、ウォーターPPP をはじめとする下水道施設・管路の維持管理やリスク管理において有効であると考える。これらの技術や取組が、質の高い官民連携事業の一助となれば幸いである。

最後に、実証実験のフィールド提供に賛同いただいた自治体に対し、感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) 国土交通省、「下水道の維持管理」, 2025. 06
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewerage_tk_000135.html
- 2) 南雲裕樹、山口治：下水管路内水位のモニタリング技術の開発、奥村組技術研究年報 No. 48、pp45-50、2022. 9
- 3) 檜崎雄一、山口治：教師なし異常検知モデルを用いた下水管路点検の AI 損傷検出技術、土木学会全国大会 第 79 回年次学術講演会、CS14-13、2024. 9
- 4) 亀谷佳宏、大久保忠彦、長和臣：ウォーターPPP 分野への投資開発、月刊下水道 Vol. 48, No. 2, pp45-49 2025. 2

UAV自律飛行を活用した手取川流域における砂防施設等の点検手法の構築

金沢河川国道事務所 流域対策課

○中野 光, 杉崎 亮太, 甚田 隆光

1 はじめに

砂防施設の点検について、これまでUAV点検は目視操縦を基本としていたが、手取川流域（図-1）においては、現場へのアクセスが困難で作業時の安全面でのリスクが高いという課題がある。これらの課題の解消を図るために実施した、ドローンポートを活用した自律飛行試験および高高度からの写真撮影での精度検証試験について実施概要を報告する。

また、今後実施予定の可搬式基地局による通信試験、VTOL機を用いた長距離飛行試験について報告し、UAV自律飛行を活用した手取川流域の砂防施設の点検手法の今後の展望を整理する。

2 砂防施設点検の概要

砂防施設点検には、計画的に定めた時期毎に実施する定期点検および豪雨や地震後に緊急的に実施する臨時点検がある。定期・臨時点検はこれまで、UAV点検の場合は目視操縦を原則としていたが、点検にかかるコストや時間、危険を伴う作業が多いことが課題となっている。技能保有者による目視外飛行であれば危険は回避できるが、人員体制の制約による労力や点検作業の時間的負担という課題が残る。これらの課題解消には、事前に飛行ルートを設定し、操縦者による操縦を行うことなくUAVが自律的に飛行し点検を行うことが必要である。

2025年4月に改訂された「砂防関係施設点検要領（案）ⁱ⁾」および「砂防現場におけるUAV自律飛行点検マニュアル（案）ⁱⁱ⁾」には最新のUAV技術を積極的に導入することと記され、効果的なUAV技術の検証を重ねることが重要となる。

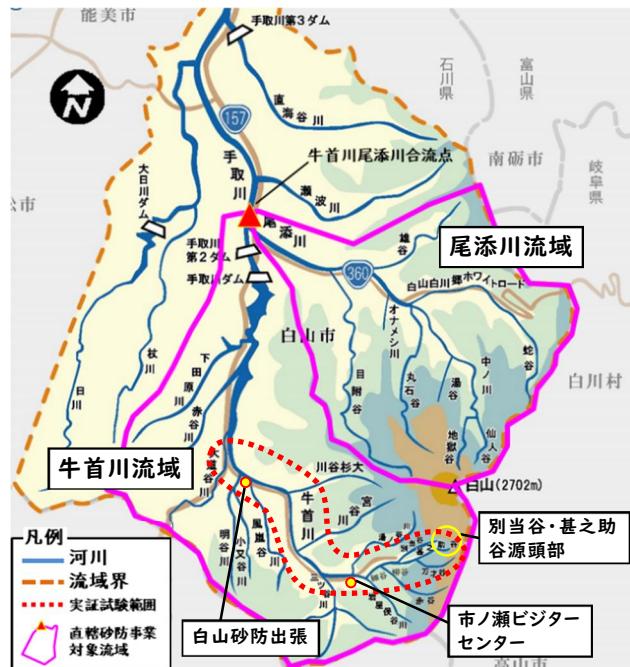


図-1 位置図（手取川上流域）

3 手取川上流域の課題

手取川上流域は、源頭部に大規模な崩壊地が存在し、流域内には多数の砂防施設が階段状に配置されており、市ノ瀬から甚之助谷上流までは約1,000mの標高差がある。これらの特徴によって生じる課題およびUAV通信環境における課題を以下に示す。

3. 1 アクセス困難な山間部

定期・臨時点検の課題として、アクセスの困難さがある。砂防施設の多くは山間部に配置され、特に甚之助谷や別当谷は渓流自体が急勾配であり落石の危険性が高く、人の接近が困難な環境である。

3. 2 交通途絶のリスク

臨時点検の課題として、交通途絶のリスクが

ある。源頭部までの道路が1本のみのため、大規模出水に伴う道路寸断より通行止めとなる。

3. 3 携帯電話不感地帯の存在

UAV点検の課題として、携帯電話不感地帯の存在がある。白山砂防出張所から市ノ瀬ビジターセンターまでの約10km区間は、携帯電話の電波が届かない不感地帯であり、UAV飛行の通信環境に制約が生じる。

4 実証試験の実施

4. 1 実証試験の目的と方法

手取川上流域におけるアクセス困難な箇所の点検を解消するために、近年のUAV技術から、電池交換も含めた連続点検を自動で実現できる

「ドローンポート」を用いる。自律飛行での空中写真の撮影および撮影画像から三次元形状を復元するSfMモデル化について検証する。また、高高度から撮影した写真の精度を検証する。

4. 2 対象箇所

源頭部に近く、渓流沿いの工事用道路脇に基地の配置が可能な「別当谷堰堤群」を選定した。当区域は電源が存在しないため発電機を使用する。現地地形および基地の位置との関係により、試験対象区間をA～Cに分けた（図-2）。

4. 3 実証試験の内容

試験の実施時期は、落葉後かつ降雪前の11月とした。

UAVの通信状態は、見通しが確保できない場合や基地より低い位置を飛行させる場合に通信が途絶する恐れがある。この特徴を踏まえ、各区間で試験項目を設定した（表-1）。基地より高標高の区間Aではドローンポートを用いたUAV自律飛行試験、基地より低標高の区間B、CではUAV

をマニュアル操作した飛行試験を実施した。



図-2 実証試験の対象箇所

表-1 各区間の試験項目

区間	試験項目	使用するUAV
A	ドローンポートを用いた自律飛行による点検・SfMの検証	Mavic2Pro
B	マニュアル操作による基地より低い標高の範囲での飛行試験	Mavic3E
C	マニュアル操作による見通し可能範囲の確認、ズーム撮影試験	Mavic3E

4. 4 ドローンポートの概要

急峻な地形に砂防施設が連続配置された砂防施設が存在し、アクセスが困難で人力点検に危険が伴う箇所は、ドローンポートを活用したUAV点検の有用性が発揮されると考える。

ドローンポートとは、電源とインターネット環境は必要になるが、基地内にUAVを格納し遠隔地からボタン1つで「自動離着陸」「自動充電」「撮影データの自動転送」を実現できる完全自動運用型システムである。本試験では、これまでの実績や汎用性からDronESTを選定した。

4. 5 実証試験結果（区間A）

区間A（別当谷上流域）での実証試験の検証結果について以下に示す。

4. 5. 1 成果

- ・基地の準備～撤収まで4時間で、補助者を配置しない目視外自律飛行による点検写真の撮影に成功
- ・約800m区間を2m/sで飛行し、3秒に1回のインターバルシャッターでの撮影に成功
- ・無電源状態での発電機を用いた運用
- ・撮影写真は過年度点検成果と同精度（図-3）
- ・SfM処理による三次元点群復元に成功（図-4）



図-3 実証試験成果（別当谷堰堤群）



図-4 SfM処理（別当谷堰堤群）

4. 5. 2 課題と対応策

UAV自動帰還後の着陸時に着陸用マーカーが認識されず、自動帰還からマニュアル操作に切り替えて着陸させる必要が生じた。これはGNSSの受信環境によりUAVと基地の位置情報に誤差が生じたことによるもので、状況・原因を踏まえた

解決策は以下のとおりである。

- ・当時のGNSSシミュレーターでは、GNSS捕捉数は10～13機と自律飛行に必要な10機以上ではあったが、谷の中のため上空の仰角が取れず、時間によるGNSSの捕捉数のバラツキから位置精度の低下に繋がった可能性がある。
- ・使用するUAV機について、GNSSの誤差をリアルタイムで補正する「RTK機能」を付与できる機体を使用することで、機体位置の精度を上げられズレを抑制することが考えられる。

4. 6 実証試験結果（区間B, C）

区間B, C（別当谷中・下流域）での実証試験の検証結果について以下に示す。

4. 6. 1 成果

- ・基地を設置した標高1,460mから+35mの高度で水平飛行させ、標高1,350m（対地高度135m）の施設を撮影
- ・光学7倍ズーム撮影により、施設より135m上空からでも過年度の点検成果と同様の精度で写真撮影が可能であることを確認（図-5）

4. 6. 2 課題と対応策

基地から400m下流の区間C途中まで通信可能であったが、更に下流の湾曲部では通信が途絶え、飛行の継続が不可能となった。今回配置した位置からの飛行限界の範囲が確認でき、下流からの飛行や中継機を活用する必要がある。

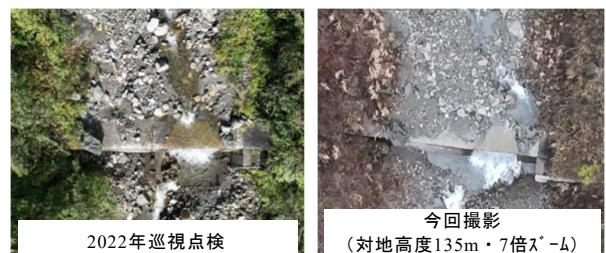


図-5 点検写真との比較

5 2025年の実証試験の計画

2025年には、砂防施設点検の更なる高度化と災害時対応能力の向上を目指し、可搬式基地局による通信試験およびVTOL機を用いた長距離飛行を実施する。

5. 1 可搬式基地局による通信試験

白山砂防出張所から市ノ瀬ビジターセンターまでの携帯電話不感地帯において、可搬式基地局のSmart River Spot (SRS) を活用し、通信試験を実施する。UAVはMatrice300RTKを使用し、上空の電波感度および照射範囲を確認する。

期待される成果として、UAVの飛行に必要な携帯電話の不感地帯が解消されることにより、下流域から源頭部までUAVの飛行が可能になる。

5. 2 VTOL機を用いた長距離飛行試験

LTE回線が整備されている市ノ瀬ビジターセンターから甚之助谷源頭部までの約13km（往復の飛行距離28km）を対象に、VTOL機（エアロボウイング）により、渓流および砂防施設の写真・動画撮影を行う。

期待される成果として、豪雨や地震後での臨時点検において、広範囲の被災状況等を迅速に把握することが可能になる。

6 おわりに

6. 1 考察

ドローンポートを活用した自律飛行試験により、山間部でもネットワーク環境が良好で着陸時を除き通信トラブルは発生しなかったことから、手取川上流域での有用性が確認できた。

上記点検に加えて、2025年に実証試験を計画している可搬式基地局を用いた点検、VTOL機を用いた長距離飛行点検が確立することで、定期・臨時点検の課題である手取川上流域の一部の現場のアクセスの困難さや、臨時点検の課題

である作業時の安全面のリスク、UAV点検の課題である携帯電話不感地帯の存在は解消につながる。また、別当谷の厳しい環境で確立した点検手法は他の渓流にも汎用可能であると考える。

6. 2 砂防施設点検の確立に向けて

今後は、効率的かつ安全に施設や周辺の状況を確認することに加え、点検結果の品質の均一化を図ることが求められる。そのために、地形条件や障害物等を踏まえた飛行ルート設定方法の標準化、地形条件の変化に合わせた飛行ルートのプログラミングの修正およびUAVの制御システムやAI統合等の技術革新が必要である。また、狭隘な谷地形や植生の被覆等により接近が危険な施設の点検には、カメラの位置と姿勢を同時に推定する技術「Visual SLAM」による障害物の回避性能の検証が効果的であると考える。

砂防施設点検の効率化による労働時間の減少および安全性の確保は、社会問題である扱い手不足の解消にも寄与されると考える。

UAV関連の技術や制度は日進月歩のため最新の動向を把握し、効果的な技術については積極的に検証し確実性を高めていくことが望まれる。

謝辞：本論文の作成にあたり、ご指導ご協力いただいた関係者の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- i) 国土交通省砂防部保全課：砂防関係施設点検要領（案），2025年4月
- ii) 国土交通省砂防部保全課：砂防現場におけるUAV自律飛行点検マニュアル（案），2025年4月
- iii) 株式会社建設技術研究所 笹山隆ら：UAV 基地と汎用機による砂防施設点検自動化の実証試験，令和6年度砂防学会研究発表会

スマートフォンを活用した道路点検DXシステム

新潟国道事務所 管理第二課 維持係長 大河 混典
新潟国道事務所 新発田維持出張所 出張所長 加藤 丈和
新潟国道事務所 新発田維持出張所 ○雄谷 光

1. はじめに

直轄国道の維持管理にあたっては、平成22年度より「国が管理する一般国道及び高速自動車国道の維持管理基準(案)」(以下、全国統一基準)を元に運用を行っている。

北陸地方整備局では、全国統一基準に基づき「道路の維持管理方針(案)を定め運用を行っているが、「国道(国管理)の維持管理等に関する検討会」にて、さらなる国管理道路の維持管理作業の高度化・効率化を図ることを目的に令和6年6月に全国統一基準が改定されたことを踏まえ、令和6年10月一部改定にて、「ICT・AI等の新技術を活用して、より効率的な維持管理を目指すものとする」との記載が追加された。

今回、道路巡回における支援技術活用に向け道路点検DXシステムを、平野部と山間部を有し、新新BPも管理する新発田維持出張所管内で試験導入し検証を行ったので、その活用効果について報告する。

2. 現在の道路巡回

現在の道路巡回では、「道路巡回支援システム」(写真-1)を活用している。巡回方法は、巡回員及び運転員の2人体制で目視による点検を行い、異常があればデジカメで写真を撮り、携帯する道路巡回支援システムに事象等を入力する必要がある。

なお、目視での点検では、悪天候などによる視界不良時の異常箇所の見落としや巡回員によって異常の判断にばらつきがある。また、巡回員は

前回の巡回とは異なる人が行うケースが多く、前回からの路面状況や道路付属物の損傷具合を確認するには巡回日誌のみでしか判断できない。また、現在の日誌作成では写真を登録する際はPCでの作業が伴うことが手間である。このような状況から現在の道路巡回では、道路維持管理作業の高度化・効率化が図れているとはいえない。



写真-1 道路巡回支援システム

3. 道路点検システムの活用

3. 1 スマートフォンを活用した道路点検システム

今回、高度化・効率化を目的に、活用する技術として、点検支援技術性能カタログから測定項目毎の検出率が高い「道路点検DXシステム(GLOCAL-YEZ)」を選定し試行導入することとした。

本システムは、舗装点検と道路巡視を同時に使う事が可能であり、AIカメラによるポットホールの検知、段差評価、路面標示のかすれ評価、道路付属物の不具合評価の機能がある。これを従来の2人体制に加え導入することで、不具合状況の定量的評価やデータ化により維持管理の高度化が期

待される。導入に必要なものとして、スマートフォン2台（常時録画用、事象入力用）と電源供給装置があれば、道路パトロールカーにスマートフォンを取り付けるだけでシステムを運用することができる（写真-2, 3）。また、GPSをONにしたもう1台のスマートフォンをカメラとして使用するとパトロール日誌も作成できるのが特徴である。本システムを一年間活用する場合、約360万円の使用料が必要となる。



写真-2 スマートフォン設置状況

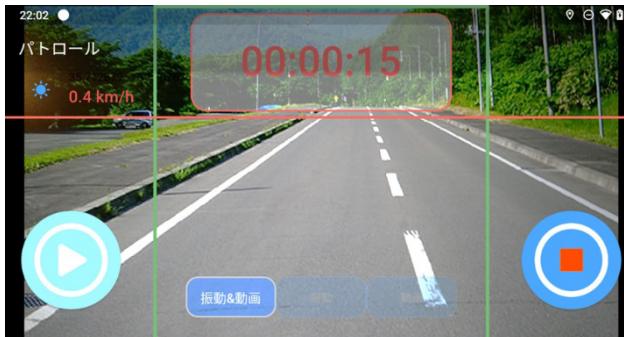


写真-3 道路点検DXシステム (GLOCAL-EYEZ)

3.2 施行状況

巡回を開始する前の操作は、従来システムと同じであり、コース選択・人員の登録を行い巡回が開始される。巡回開始後の操作においては従来システムと異なる点があった。本システム・従来システムどちらも事象の写真を撮影する事にはなるが、パトロール終了後の日誌作成時では従来は写真データの登録という手間があったが、本システムでは日誌に自動で反映してくれた。これによ

り、巡回終了後のパト日誌作成という事務作業が減少し、作業の効率化を図ることができた(図-1, 2)。また、走行中は、AIが路面状況の診断を色分けし、巡回後、システムで解析し、路面状態の判断が視覚的に可能となり、巡回時の見逃しをカバーしてくれる。(写真-4)。

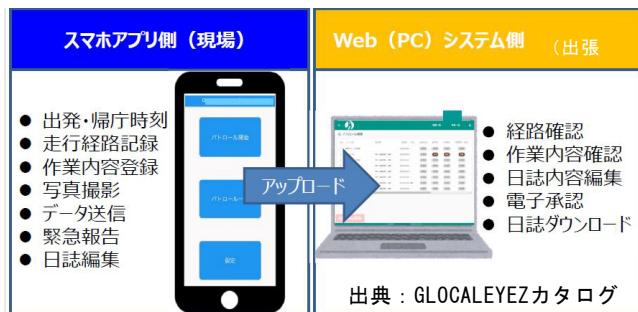


図-1 アウトプットイメージ

図-2 パトロール日誌

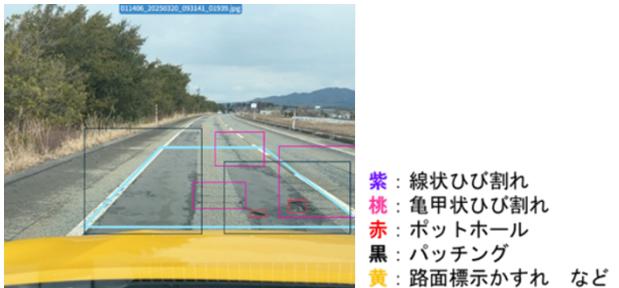


写真-4 A Iによる路面状況診断

3.3 試行結果

今回、本システムを試験導入したことでの以下のメリットが確認できた。

- ① ひび割れ、ポットホールの多い箇所が分かる
(図-3, 4)
 - ② AIが判定した路面状況をAI視点で確認し、システムで視認でき、次のパトロールに活かせる(図-5) .

- ③ カメラ撮影した点検箇所・修繕箇所が蓄積されるため、日誌より経過観察が行いやすい（図-6）。
- ④ 巡回後、管理瑕疵につながるような損傷の見逃しをシステムを介することで確認でき、対処が可能になる。
- ⑤ 従来システムから端末がスマートフォンになる事で巡回時の機動性と軽量化につながる。

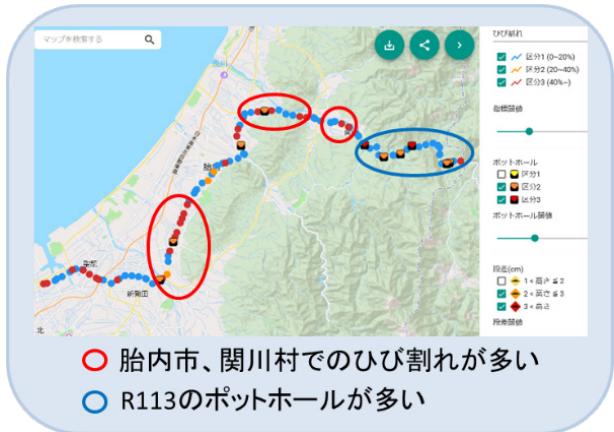


図-3 ひび割れ・ポットホール

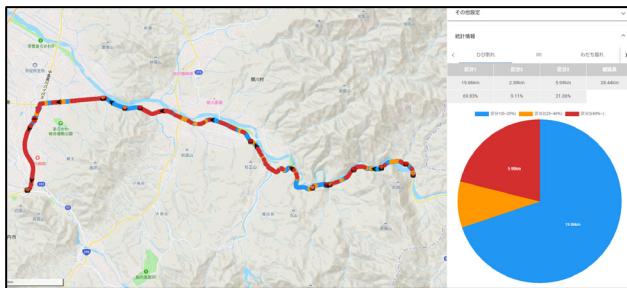


図-4 AI点検による統計情報



図-5 AI視点での確認

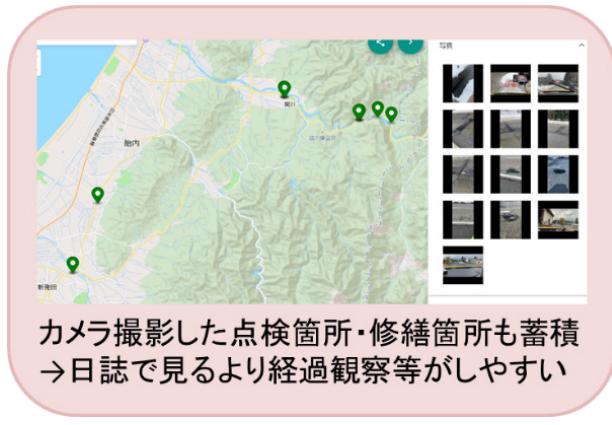


図-6 修繕箇所等の経過観察

試行後、開発企業と打合せを行い、改善事項について確認した。

- ① 事象登録の際、カメラ撮影前に必須入力の項目があるため危険な現場や落下物の回収遅れが生じる。
- ② 常時録画用カメラを起動してからは撮影範囲を途中で変えることができないため、多車線になった際に一車線しか写せない。
- ③ 路面や附属物が雪で見えないため降雪地帯には向いていない。
- ④ データファイルをアップロードするのに時間がかかるうえに容量が多いと失敗する。
- ⑤ システム上で巡回日誌を電子決裁できる機能を有しているが、不承認しか押すことができない。
- ⑥ 帳票出力や走行データを出力する際、「予約」しないと出力ができなく手間が生じる。

改善点に対する現時点の対応状況（R7.7 時点）
(開発企業への聴き取り結果)

- ① 事象登録用カメラ撮影前に生じる必須項目の入力においては、登録の順番をカメラ撮影前もしくは後に設定できるよう改良済み（図-7）。
- ② 常時録画用カメラ起動後に撮影範囲が変えられず、多車線で一車線しか映すことができなかった件については、現在は、広角撮影機能がリリース済みで、ユーザーによる

自由設定が可能となった。なお、走行レンジと比較すると解析精度が落ちるため、広角撮影でも高精度な解析ができるように改良中（写真-5, 6）。

- ③ 雪によりAIでの診断ができない等の問題においては、改善が難しい状態。
- ④ データファイルのアップロードに時間がかかるうえに容量が多いと失敗する問題は、数分おきにサーバへ自動送信する専用計測装置を開発中。
- ⑤ 電子決裁にて不承認しか押せない問題は、事前に承認者の名前を登録することで承認が可能であった。
- ⑥ データを出力する際の「予約」という一手間については改良済み。

上記の改善点以外に、この「道路点検DXシステム（GLOCAL-EYEZ）」を使用する際は、距離標の位置情報をGPSと紐付けする必要があり、GPSで距離標を特定し事象位置が把握できるように事前登録作業が必要となる。



図-7 必須入力の順番設定



写真- 5 改善前の画角



写真- 6 改善後の広角映像

4. おわりに

今回の試験導入では、降雪期を含んだ期間で実施し、路面に積雪がある状態では、AIによる適切な判断は厳しいことがわかつたが、降雪期で無ければ適切な判断による道路管理ができ、且つ、作業の効率化が図られることができた。

国土交通省道路局では、新技術を用いた定期点検の高度化・効率化を推進するため、令和4年以降橋梁・トンネル・舗装点検について点検支援技術活用の原則化を進めてきた。令和7年度より新たに「道路巡視工」におけるポットホールの特定及び区画線の摩耗の判定が原則化の取組対象となつたほか、道路巡視に関する点検支援技術カタログの拡充も行われている。本格的な活用にあたっては、前述のとおり積雪地での活用は厳しいが、路面に積雪がなければAIでの定量的な判定、記録による道路管理の質の向上が期待できると想定され、さらなる高度化・効率化が図られることを期待したい。

謝辞：本稿の執筆にあたり、ご協力をいたいたい関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

③ 雪に強い地域づくり

廃孔消雪用井戸を再利用した地中熱ヒートパイプ融雪の試行

株式会社 興和 水工部次長 ○水戸部 将人

1. はじめに

新潟県をはじめとした日本海側の地域では冬期の道路交通確保を目的として消雪パイプが広く普及している。消雪パイプの水源は井戸であるが、井戸を老朽化して更新する場合に埋め戻され廃孔とすることがほとんどである。廃孔予定の消雪井戸を利用した事例に、地中熱ヒートポンプ融雪の地中熱交換井とした融雪がある¹⁾が安定した採熱が確認されている²⁾。

今回、新たな試みとして冬期における歩行者の安全確保を目的に廃孔予定の消雪井戸を地中熱交換井として再利用した地中熱ヒートパイプ融雪設備を設置した。この施設について、融雪効果の確認と合わせて、舗装温度、地下温度、地下水位の測定を行ったので結果を報告する。

2. 地中熱ヒートパイプ融雪について

ヒートパイプは、パイプ両端の温度差を動力として熱を運ぶパイプである（図-1）。地中熱ヒートパイプ融雪では、この動作原理を利用して地中（採熱部）から舗装（放熱部）までヒートパイプを埋設することで、地中熱を舗装に伝え、舗装を暖めて融雪や凍結防止を行う（図-2）。消雪パイプやヒートポンプによる消融雪では、ポンプ運転のための動力などが必要でランニングコストがかかるが、地中熱ヒートパイプ融雪では、ヒートパイプ両端に温度差が生じると熱を運ぶことからランニングコストがかからない。また、設備がシンプルであることから点検する場合も目視のみで、消雪井戸のようにポンプを引き上げて井戸内を点検したり、ポンプの動作確認などをする必要もない。

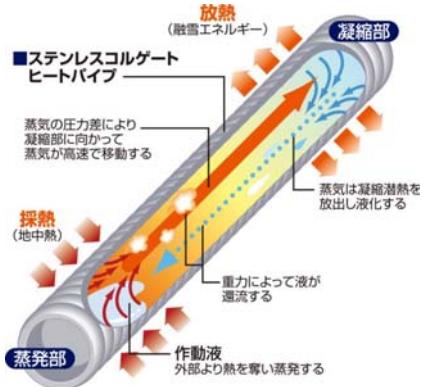


図-1 ヒートパイプ構造

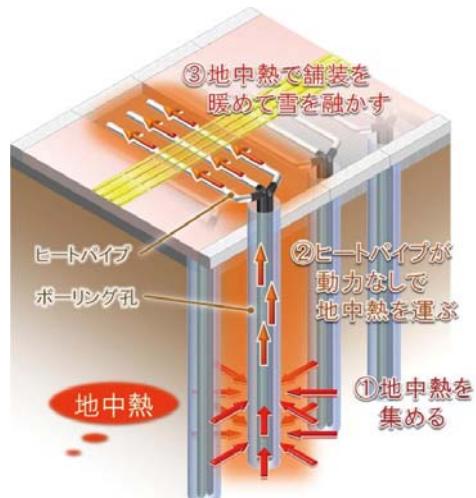


図-2 地中熱ヒートパイプ融雪

3. 融雪施設

3. 1 施工場所

本施設は新潟県阿賀野市内にある横断歩道の歩行者だまり（3.3 m²）に設置した。施工場所の車道には消雪パイプが設置されているものの、歩道においては冬期の降雪と路面凍結により歩行者のスリップ・転倒などの懸念される箇所である。既設井戸が設置されていた交差点付近

は、スクールバスの発着所となっており、特に朝夕の歩行者利用の多いスポットとなっている。このなかで、歩行者利用が多い交差点滞留部における歩行者のスリップおよび転倒防止を行うことを目的として、既設井戸を活用した地中熱ヒートパイプ融雪設備を約3.3m²を対象に設置することとなった（図-3）。

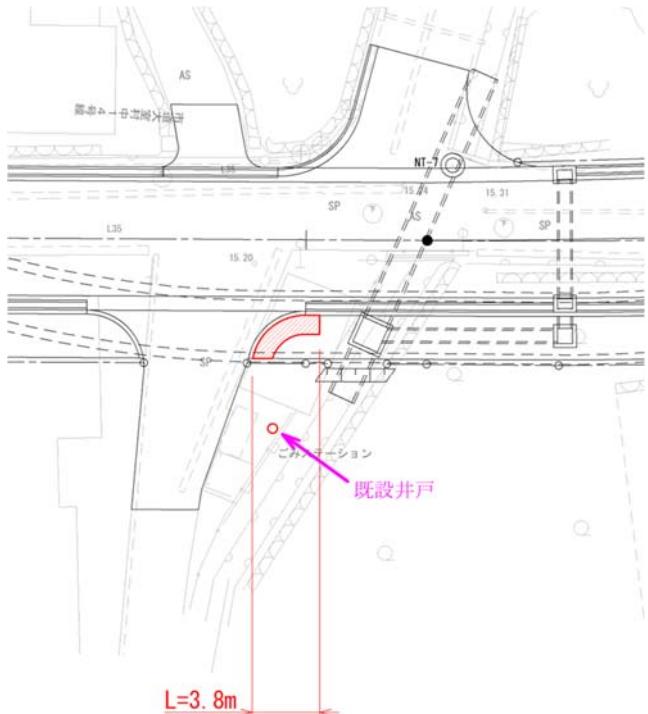


図-3 施工箇所概要

3. 2 施工内容

融雪施設は、熱源に採熱孔（SGP100A）を地表面（以下 G. L. と表記）-15 m～-20 m削孔して融雪している一般的な地中熱ヒートパイプ融雪システムとは異なり、廃孔予定の消雪井戸（口径250 mm, 深度40 m）にヒートパイプを5本挿入し、井戸内の地下水を介して地中熱を再熱し融雪する構造である。廃孔井戸のストレーナはG. L. -15.0 m～-9.5 mと-29.0 m～-23.5 mの位置に設置されており、井戸崩壊防止のため、下部のストレーナーを含みG. L. -20.0 mまで豆砂利にて埋戻しを行った（図-4）。

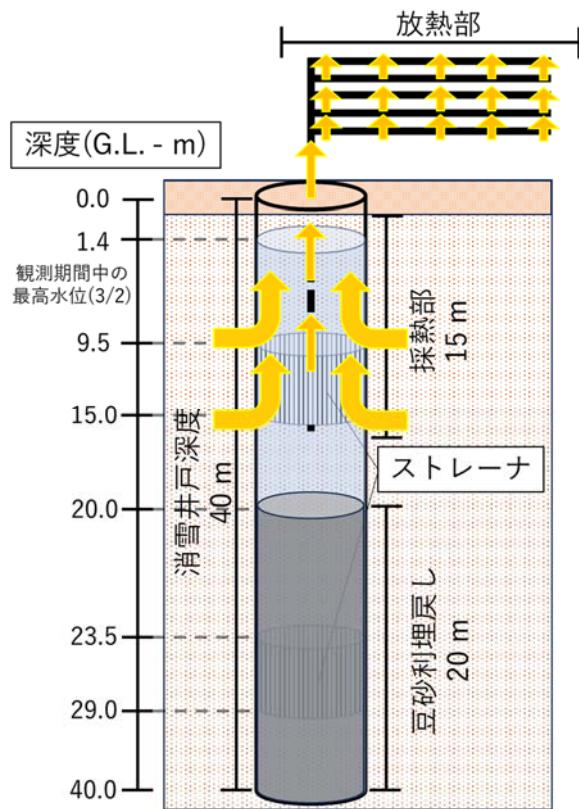


図-4 廃孔利用地中熱ヒートパイプ融雪概要図

4. 融雪効果観測方法

融雪効果確認のため、舗装温度（8箇所）（図-5）、地下水温（3箇所 G. L. -5.0 m, -10.0 m, -15.0 m）、ならびに地下水位の観測を行った。また、タイムラプスカメラにより融雪状況の撮影を行った。測定間隔は10分である。気象データについては最寄りがアメダス新津（施工位置からの直線距離は約15km）であるため、これを使用した。降雪深のみ1時間データである。



図-5 舗装温度測定箇所

本報告では舗装完了翌日の2025年2月16日からアメダス新津で最終降雪が観測された2025年3月3日までの観測結果を対象とした。

5. 融雪状況

観測期間中、最も1時間降雪量が多かった2月19日22時の融雪状況を図-6に示す。このときの時間降雪深は3.0cm/hであったが、地中熱ヒートパイプ融雪による融雪効果が確認できた。

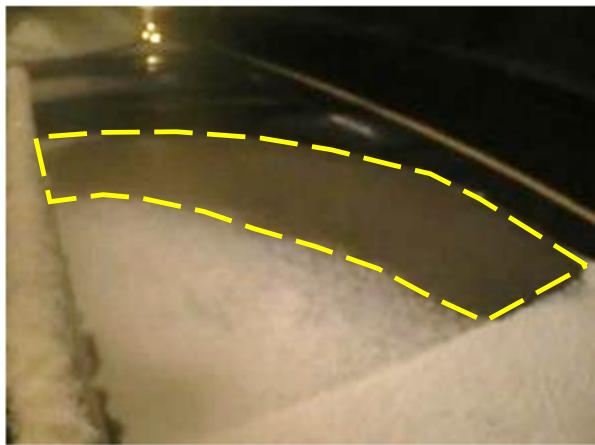


図-6 融雪状況（2025年2月19日 22:00撮影）

6. 観測結果

観測結果を図-7に示す。観測期間中の舗装温度は降雪時に最も下がったときで約7°Cであり、たびたび発生している降雪時でも10°C近い温度を保っている状況であった。

廃孔井戸内の温度は、最も低下した2月18日はGL-5mの深度で約8.5°C、GL-15mの深度で約11.5°Cであった。また、降雪によって地下水が最も低下した2/20のデータを見ると、降雪中は低下していた廃孔内の温度は24時間以内に回復した一方、地下水位は近隣消雪パイプの稼働による影響もあって低下した水位は数日かけて回復する傾向を示した。このことから、近隣の消雪パイプが稼働したときは地下水位の低下が大きく回復にも時間がかかるが、地中温度は1日で

回復していたことから、本施設における地中熱採熱による地中温度への影響は地下水位低下と比べると小さいと考えられる。

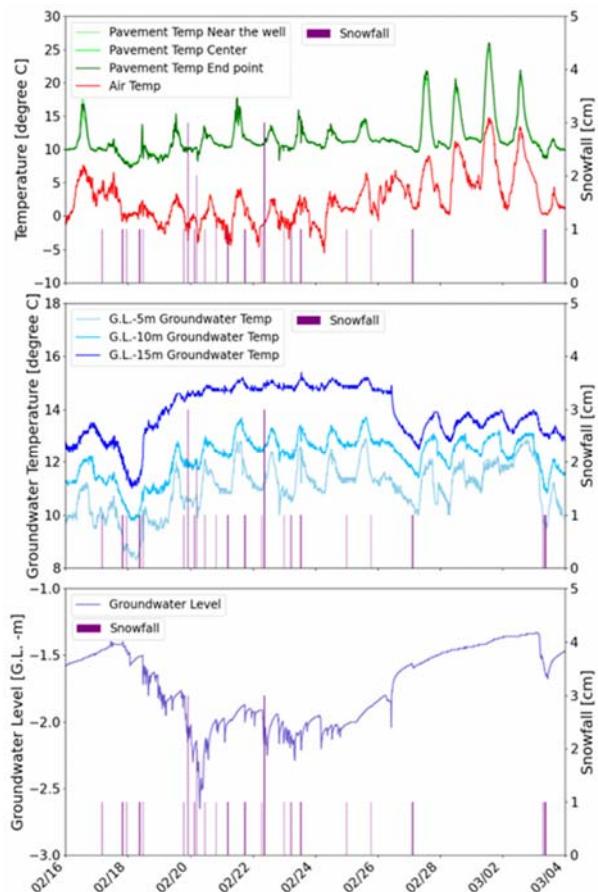


図-7 観測結果

廃孔内の温度変化が地下水位の低下に比べて小さいことをより具体的に示した観測結果を図-8に示す。2月19日22時にアメダス新津では降雪が見られているが、その2時間前の20時から地下水位の低下は始まっている。本地域から遠くない地域で降雪が始まっていた可能性がある。この日の22時頃は地下水位の低下も見られるものの、融雪されていることが確認できる。一方で、この状況でも廃孔内の温度はほとんど変化していない。このことより、地中熱ヒートパイプが使用する熱量は地下水の流れによって供給される熱量と比較して小さいことが分かる。

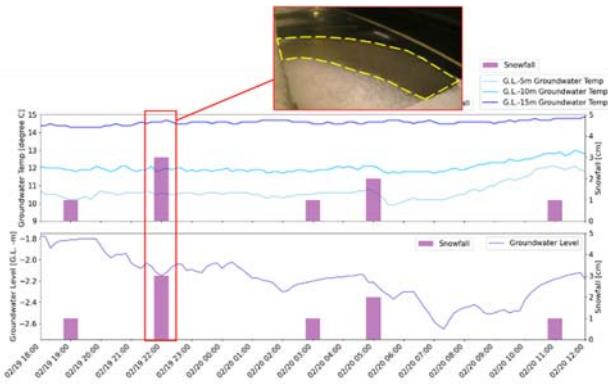


図-8 2/19 18:00～2/20 12:00の観測結果

7. 今後の展望

今回、不要になった消雪用井戸を利用した地中熱ヒートパイプ融雪施設を施工するにあたり、ケーシング口径250Aの消雪井戸にヒートパイプを5本だけ挿入した。そのため、融雪施設の施工面積が約3.3m²に限られてしまう結果となった。一方で、地中温度の変化をみるとヒートパイプが使用する熱量の影響は小さいことから、廃孔内に余裕があればもう少しヒートパイプ插入本数を増やして融雪範囲を増やして観測してみる手もある。

また、本施設では廃孔予定の井戸が融雪したい歩道の近くに設置されていたため、良い融雪効果を得られたものの、消雪井戸と融雪箇所が離れているとヒートパイプの製作長さにも限界があるため施工ができなかったり、採熱した熱を融雪部に送るまでに放熱ロスが発生し、融雪能力が減少したりしていた可能性がある。

しかし、本施設では一般的に施工している地中熱ヒートパイプ融雪で必要となる採熱孔の削孔が不要であり、施工費は採熱孔削孔費分が安価となったこと、また削孔が不要なことで工期も短縮出来たことなどから、廃孔予定の井戸の設置場所にもよるが、融雪範囲の小さい歩行者だまり部、バス停留所昇降口になるような箇所への導入に適していると思われる。

今後も観測を続け、井戸内の地下水の熱移流や地下水位と採熱量関係について詳細な解析を進めるとともに、冬期における歩行者の安全確保に対する効果などを検証する予定である。

謝辞

本施設の設置ならびに観測を実施するにあたり、発注者である新潟県新発田地域振興局地域整備部道路課様には施工調整のほか、観測機器設置などご快諾いただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 桑原賢二, 藤野丈志, 上田真典, 藤田義治, 2015: 消雪井戸リユース地中熱ヒートポンプシステムによる歩道スポット融雪－新潟県十日町市における事例－. 雪氷研究大会（2015・松本）講演要旨集.
- 2) 坂東和郎, 藤野丈志, 桑原賢二, 荒井輝行, 2016: 消雪井戸リユース地中熱ヒートポンプシステムによる歩道スポット融雪－消雪井戸再利用の有効性－. 雪氷研究大会（2016・名古屋）講演要旨集.

④ 自然災害からの安全確保

梯川水系における内外水統合型水害リスクマップの検討について

金沢河川国道事務所 流域治水課 ○徳坂 文音, 福嶋 祐樹, 北村 秀之

1 はじめに

1. 1 リスクマップの経緯

近年、気候変動の影響による水災害の激甚化・頻発化を踏まえ、上流から下流にわたる流域全体のあらゆる関係者が協働してハード・ソフトの治水対策を行う「流域治水」が推進されている。一方で、国や県において、河川管理者毎に公表している洪水浸水想定区域図は、想定最大規模の大雨が降った場合の、河川から水が溢れる外水氾濫による浸水深を示している。これは、浸水の発生頻度が示されておらず、早期の避難判断、住まい方の工夫、企業の立地選択等のためには使いづらいという課題があった。

以上を踏まえ、全国の河川において、比較的発生頻度が高い降雨規模に対する浸水範囲や浸水深を算定し、浸水の生じやすさや発生頻度を面的に示す「多段階の浸水想定図及び水害リスクマップ」が検討され、梯川については2022年12月に追加で公表した。

1. 2 現況水害リスクマップの課題

この「多段階の浸水想定図及び水害リスクマップ」は、梯川の大半管理区間からの外水氾濫のみを対象としており、支川からの氾濫や下水道等の排水能力を超える内水氾濫は考慮できていない。また、従来は河川管理者毎に個別に浸水域を設定しており、重複する地域における浸水リスクが明確でなく、流域全体のリスク把握が困難となっている。

このため、外水氾濫と内水氾濫による地域の浸水リスクを一体的に評価出来る内外水統合型氾濫解析モデルを構築し、国や県、自治体とい

った河川等管理者による区分けを意識せず、より実態に即した解析結果を表示できる「内外水統合型水害リスクマップ」の作成が必要とされている。

2 梯川流域の概要

梯川は、その源を石川県小松市の鈴ヶ岳に発し、郷谷川、津上川、鍋谷川等の支川を合流しながら日本海に注ぐ、流域面積271 km²、幹川流路延長42 kmの一級河川である。

2. 1 地形の特性

図-1 に示すように、梯川の地形は、上流域は急峻なV字谷で、中流域は、河岸段丘による平坦地があり、集落や水田として利用されている。下流域は、山間地と海岸砂丘に囲まれた低平地が広がっており、内水氾濫が発生しやすく、浸水が長時間継続する恐れがある。また、低平地には小松市街地が形成され、石川県加賀地域の社会経済基盤の中心となっている。このため、ひとたび浸水が発生すると人命や地域経済に甚大な被害が発生するリスクが高い。

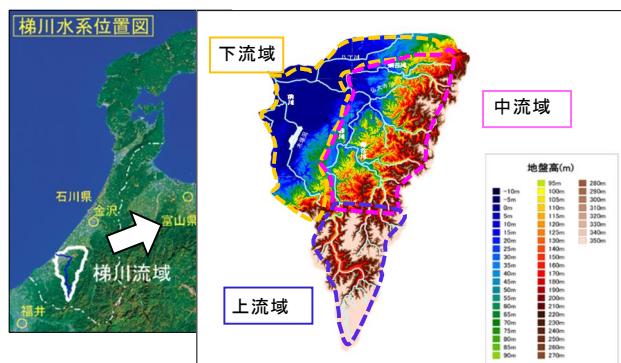


図-1 梯川流域の位置図（左）と流域地盤高
コンター図（右）

2. 2 過去の洪水実績

梯川では、過去から何度も内水氾濫による浸水被害に見舞われている。

特に2022年8月4日の豪雨では、梯川の主要な地点である埴田水位観測所で観測史上最高水位を記録し、梯川沿川で大規模な内水被害が発生し、約1,680 ha の浸水（図-2）が確認された。

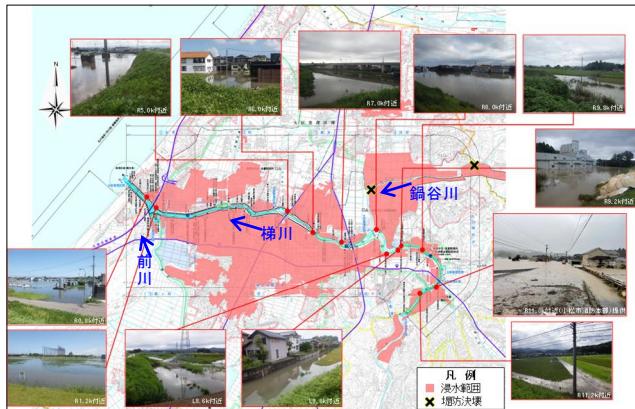


図-2 2022年8月4日洪水の実績浸水範囲

3 梯川における内外水リスク統合の重要性

過去の洪水実績や2022年8月洪水で生じた内外水が混在した氾濫による大規模な被害を踏まえると、前述した梯川流域の地形特性による危険性と、それに伴う比較的高頻度の降雨による浸水リスクを地域住民に認識して頂くことが重要である。

大きな浸水被害を受けた小松市では、「小松市雨水管理総合計画」を策定し、内水氾濫を対象に、段階的な浸水対策目標を設定することで、計画的な浸水解消を図っている。この段階的な対策方針の設定には、比較的高頻度の降雨による浸水リスクの評価が不可欠であり、内水氾濫解析モデルが事業計画検討の参考になることが期待される。

このような検討に資するため、梯川流域において、内外水統合型の氾濫解析モデルを構築することとした。

4 内外水統合型氾濫解析モデルの構築

内外水統合型氾濫解析モデルは、ガイドライン¹⁾に基づき検討した。

4. 1 降雨シナリオの設定

氾濫解析モデルの外力条件として与える降雨シナリオは、下記の三つのシナリオとし、それぞれを対象に降雨波形や確率規模別降雨量等を検討し設定した。

- ①主要河川の氾濫が卓越する降雨シナリオ
- ②その他河川の氾濫が卓越する降雨シナリオ
- ③下水道等の氾濫が卓越する降雨シナリオ

ここで、主要河川は梯川本川のほか県管理の洪水予報河川、その他河川は主要河川以外の一級河川、下水道等は用水路や各種排水路及び下水道とした。降雨の確率規模は、年超過確率1/10, 1/30, 1/50, 1/100とした。

4. 2 泛濫解析

4. 2. 1 流出解析

主要河川やその他河川、下水道等における各支川・水路の降雨条件については、梯川流域の雨量観測所から得られたデータを基に、流域平均雨量を算定した。そのうえで、主要河川の当該降雨を流域全体、その他河川及び下水道等の当該降雨を流出域及び氾濫域に与える。

そして、各降雨シナリオで設定した確率規模別雨量を対象に、本支川一体の外力による流出計算を行い、ハイドログラフを作成する。これを氾濫解析の境界条件とした。

4. 2. 2 泛濫解析モデルの概要

本検討で用いた内外水統合型氾濫解析モデルの概念図を図-3に示す。

今回のモデルでは、従来の外水氾濫解析モデルをベースに、流域内の梯川本川及び支川、幅

3m以上の用水路及び各種排水路を一次元不定流計算でモデル化し、氾濫域ではモデル化した河道からの越水、溢水、堤防の決壊を考慮する。これに加え、下水道等の排水区域における内水氾濫や地表への湛水を考慮できるよう内水解析モデルを追加した。

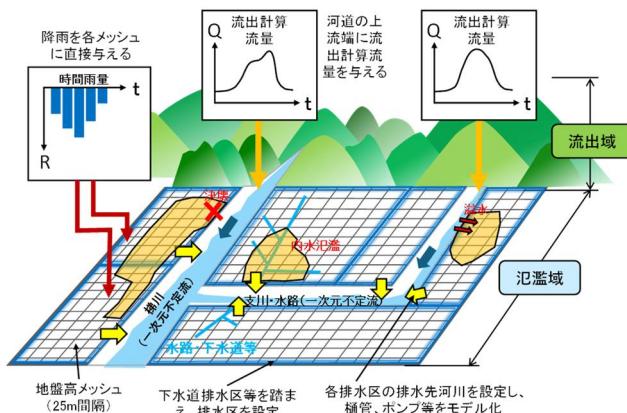


図-3 内外水統合型氾濫解析モデルの概念図

4.2.3 モデルの拡張

梯川流域には、前川、鍋谷川といった支川のほか、低平地には下水道排水幹線となる排水路、梯川本川右岸側では、宮竹用水が手取川から梯川へ流入している。このように梯川流域の内水排除は、梯川本川に限らず支川や用水路、排水路等の開水路へ分散して行われる。そのため、排水先河川の水位状況を精密に評価することが重要である。そこで、梯川本川に加え、県管理の支川及び川幅3m以上の排水路（9河川）、宮竹用水を一次元不定流でモデル化した。

4.2.4 内水氾濫モデルの解析方法

梯川流域の内外水統合型氾濫解析モデルを構築するためには、前述のとおり内水域の降雨が排水される過程で重要な排水先河川の水位を時系列で評価し、内外水を一体として解析する必要がある。

内水域の流出解析は、ガイドラインに準じて、簡便法を採用した。まず、各排水区から収

集した流量計算書に基づき、各排水区内の最小流下能力を設定する。設定した各排水区の排水能力を時間雨量に換算し、その値を差し引いた降雨量を直接内水域のメッシュに与えることで湛水量を算定する。

排水先河川の水位と内水モデルの関係は、図-4に示すとおりである。雨の降り始めは、排水ポンプの有無に関わらず各排水区の排水能力で排水できる。降雨時間が経過し、河道（一次元不定流）の水位が高い場合は、排水能力以下の降雨でも湛水が生じる。また、排水ポンプがある場合は、ポンプ能力分をメッシュの湛水量から控除し、河道へ排水される条件とした。

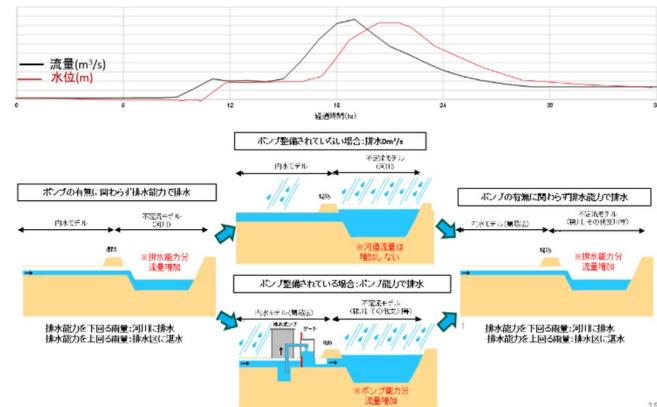


図-4 排水先河川の水位と内水モデルの関係

5 2022年8月洪水の再現計算

構築したモデルの精度検証のため、既往洪水のなかでも浸水被害の大きかった2022年8月洪水を対象とした再現計算を実施した。

検証材料として、罹災証明書及び町内会アンケートから実績浸水範囲を整理し、堤内地の浸水状況の現地写真から想定浸水深を推定した。

浸水実績区域と氾濫解析結果の重ね合わせは図-6に示す。

6 内外水統合型水害リスクマップの作成

6.1 浸水リスクの評価

構築した内外水統合型氾濫解析モデルに、確

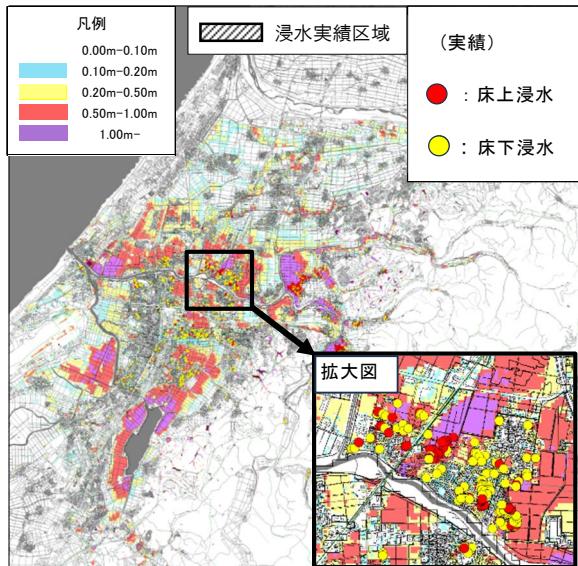


図-6 令和4年8月洪水実績浸水区域と氾濫解析結果の比較

率規模別の雨量を与え、氾濫解析を実施した。

その解析結果に基づき、各メッシュの最大浸水深（10cm以上）を表示した多段階浸水想定図を作成した。作成した主要河川の氾濫が卓越する内外水統合型の多段階浸水想定図（確率規模1/10）を図-7に示す。この多段階浸水想定図を用いて、浸水する区域を確率別に色分けすることで、内外水統合型水害リスクマップを作成し、現在公表に向けて作成中である。

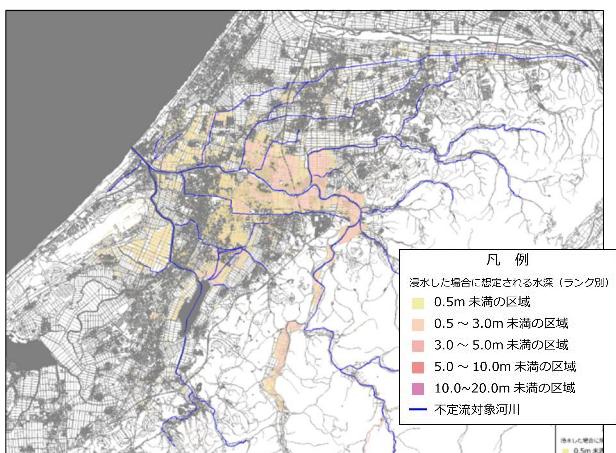


図-7 多段階浸水想定図（1/10規模）（案）

7 内外水統合型水害リスクマップの活用

梯川流域において、国管理河川に加えて支川

からの氾濫や内水氾濫を考慮した内外水統合型氾濫解析モデルを構築した。また、2022年8月洪水の浸水実績を十分な精度で再現できたことから、本モデルの妥当性を確認した。その結果、現状の多段階浸水想定図では把握できなかつた、排水先河川水位の影響を踏まえた浸水リスク示すことが出来た。

さらに、小松市の「雨水管理総合計画」の検討において、今回構築したモデルを基盤に、より高頻度な降雨確率規模の氾濫シミュレーションを実施され、小松市街地の内水対策に活用される予定である。そのほか、河川管理者毎に設定していた浸水区域を統一して表示することで、防災ガイドマップの更新や住まい方の工夫、企業の立地選択、詳細な避難計画等といった流域治水の進展に資する様々な減災対策に活用できる可能性を示すことができた。

内水被害が甚大化しやすい地形特性を持つ梯川流域では、地域住民や企業などが自らの水災害リスクを認識し、自分事として捉え、主体的に行動出来るようソフト対策に取り組むことが必要である。

そのため、引き続き関係自治体と綿密な情報共有・連携を行うことで、氾濫解析モデルの精度や信頼性の向上に努め、流域全体で水害に強い地域づくりに努めていきたい。

謝辞：本論文を作成するにあたり、ご指導・ご協力いただいた関係者の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室、国土技術政策総合研究所 河川研究部 水害研究室：多段階の浸水想定図及び水害リスクマップの検討・作成に関するガイドライン、2023.

UB-WALL工法（中空床版橋アンカ一定着工法）の開発

ピーエス・コンストラクション 技術本部 技術部土木技術グループ ○雨宮 美子
技術本部 技術部土木技術グループリーダー 桐川 潔

1 はじめに

橋梁上部工の耐震補強工事として、落橋防止システムや水平力分担構造の設置が近年数多く実施されている。

既存の中空床版橋では、ウェブ部にコア削孔し、アンカーフレームにて定着する工法がある。しかし、中空床版橋のウェブ部分には太径の鉄筋が密に配置されており（図-1）、コア削孔の施工が困難であり、場合によっては実施できないこともある。

また、従来工法としてボイド管部分のコンクリートをウォータージェット等ではり、開口部を設け、アンカーフレームを設置後、作業員が桁の内部に入り、ボイド管内部に型枠を組み、無収縮モルタルを打設しアンカーフレームを定着している事例もあるが（写真-2），時間やコストがかかり、作業によって生じる既設橋梁の損傷も大きい。

そこで、ピーエス・コンストラクション（株）、住理工商事（株）、およびフジモリ産業（株）は共同で「UB-WALL（ユービーウォール）工法」（特許第7496660号）を開発した。本工法は鉄筋配置の少ないボイド範囲にアンカーフレームを定着する工法である。本稿では、施工性確認試験について報告する。

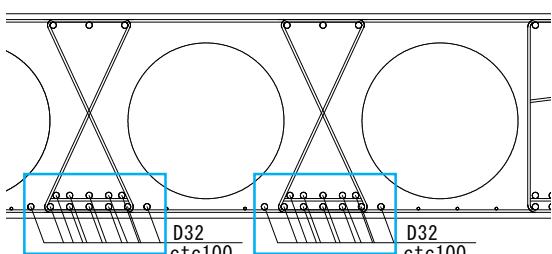


図-1 中空床版橋ウェブ部分の配筋



写真-1 ボイド管に開口部を設けた事例

2 施工手順

本工法は以下の手順で施工する。

- ①中空床版橋のボイド管下面に削孔したウレタン注入袋（内袋と外袋の2重構造）を挿入する。
- ②ウレタン注入袋にウレタンを注入して型枠を形成する。
- ③型枠と端横桁の間に無収縮モルタルを注入用ホースから排出用塩ビ管の高さまで注入して充実断面とし、落橋防止装置ブラケット用のアンカーフレームを定着する。

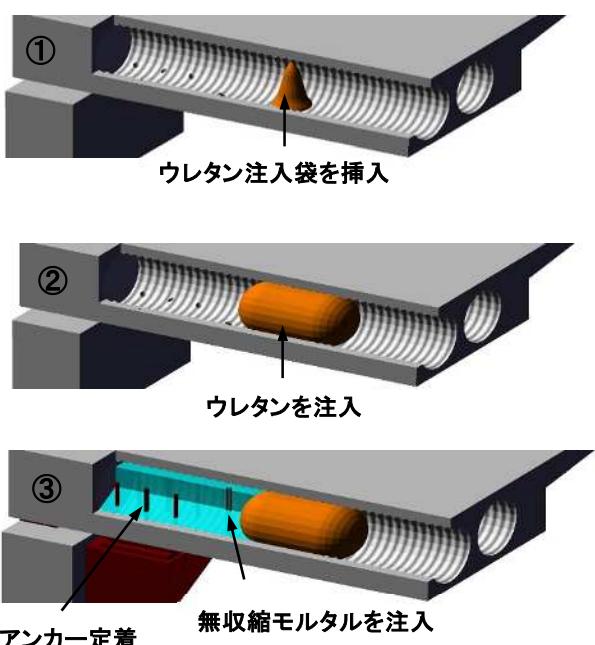


図-2 施工手順

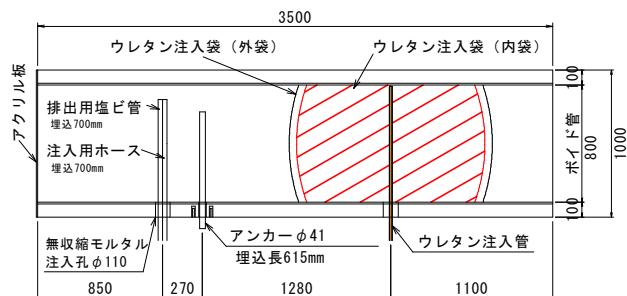
3 施工性確認試験

3.1 試験体概要

施工性確認試験の試験体概要を図-3に示す。本試験ではウレタン注入袋の設置から、無収縮モルタル注入までの一連の流れを実施し、問題なく施工できるかについて確認した。

試験体は $1.0 \times 1.0 \times 3.5\text{m}$ のコンクリート製で断面中心に $\phi 800\text{mm}$ のボイド管を設置した。試験体底面にウレタン注入孔とモルタル注入孔（通常は $\phi 100\text{mm}$ であるが、今回はコア削孔機入手の都合より $\phi 110\text{mm}$ とした）を設け、またアンカー鉄筋（ $\phi 41$ ）を挿入し、埋込長を 615mm （ 15ϕ ）とした。無収縮モルタルはアンカーの埋め込み長以上の高さまで注入できるよう、注入ホースおよび排出用塩ビ管の埋め込み高さを 700mm とした。

【側面図】



【断面図】

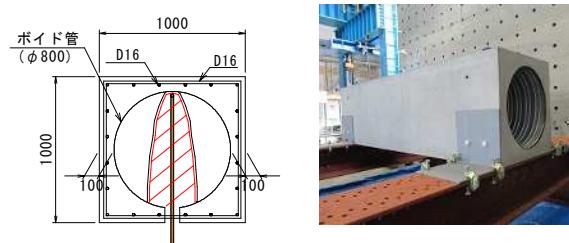


図-3 試験体概要

3.2 使用するウレタン

本試験は写真-2に示すUB-WALL工法用の特殊ウレタンを使用した（以降、ウレタンと表記する）。

ウレタンの種類等は事前にウレタン注入試験を実施し、袋への充填性より決定した。



写真-2 UB-WALL工法用ウレタン発泡状況

3.3 ウレタン注入袋

ウレタン注入袋の形状および組立状況を図-4および写真-3に示す。袋は内袋と外袋からなる2重構造とした。ウレタンは内袋に注入し、外袋は内袋がウレタンの発泡圧等で破れた際の漏れ防止やウレタン注入孔に挿入する際の引っかかりおよび膨張時における腐食したボイド管との擦り傷等から内袋を保護する役目もある。

注入袋の形状はウレタンの性能同様、事前のウレタン注入試験にて決定した。

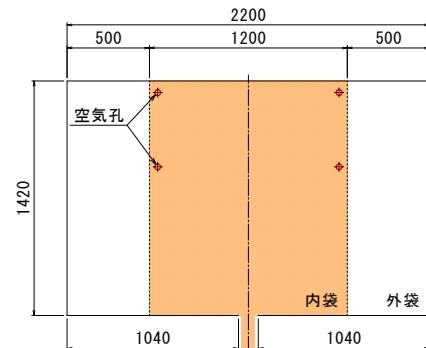


図-4 ウレタン注入袋の形状



写真-3 ウレタン注入袋の組立状況

3.4 ウレタンの注入方法

ウレタンの注入システムを図-5に示す。ミキシングユニットにてウレタンのA液およびB液を混合し、混合液と空気をウレタン注入管の先

端付近の孔から吐出する。管理方法は注入量（今回は16kg）による管理と合わせて、注入状況を無収縮モルタル注入孔から挿入したCCDカメラにより目視確認した（写真－4）。

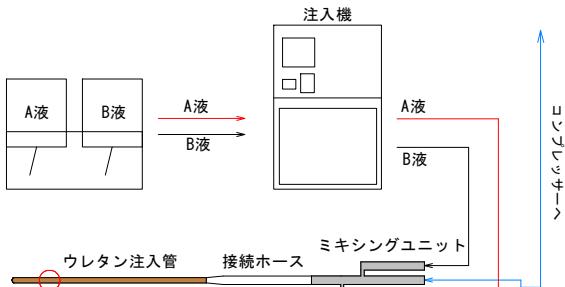


図-5 ウレタン注入システム

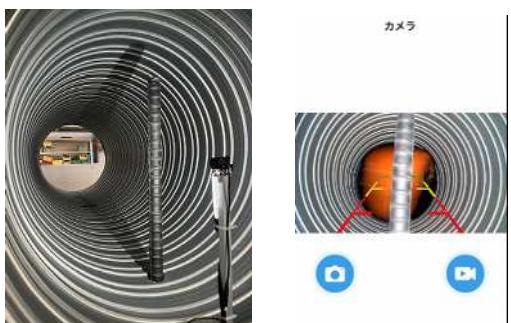


写真-4 CCDカメラによる内部確認状況

3.5 無収縮モルタルの練り混ぜと注入方法

無収縮モルタルは、アンカー設置時の中詰め用無収縮モルタルとして使用実績のあるものを使用した。無収縮モルタルの練り混ぜシステムを図-6に示す。グラウトミキサーとグラウトポンプを使用した。無収縮モルタルは3袋（75kg）練りとし、総練り混ぜ量は約0.9m³である。

無収縮モルタルは図-3に示した注入用ホースから注入し、排出用塩ビ管より無収縮モルタルが排出された時点で注入完了とした。

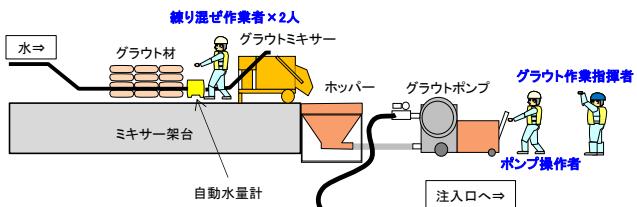


図-6 無収縮モルタルの練り混ぜシステム

3.6 注入孔キャップ

ウレタン注入孔および無収縮モルタル注入孔にはウレタンや無収縮モルタルが漏れないようゴム栓をキャップとして使用した（写真-5）。ゴム栓には孔をあけ、注入用および排出用の塩ビ管やホースを固定できるようにした。



写真-5 注入孔用キャップ（ゴム栓）の設置

4 施工性確認試験実施状況

4.1 ウレタンの注入状況

ウレタンの注入状況を写真-6および写真-7に示す。ウレタンの注入状況は良好であった（注入開始～完了までの時間は15分程度）。

後に無収縮モルタルの注入を実施した際、無収縮モルタルが漏れなかつたため、ウレタンは注入袋とボイド管との間に隙間なく充填できることを確認した。



写真-6 ウレタン注入状況



写真-7 ウレタン注入完了状況

4.2 無収縮モルタルの注入状況

無収縮モルタルの注入状況を写真-8および写真-9に示す。無収縮モルタルはどこからも漏れることなく注入できることを確認した（無収縮モルタル注入～完了までは2時間程度）。

今回の試験体では無収縮モルタル排出用の塩ビ管は注入ホースの隣に1本のみ配置した。無収縮モルタルは注入用ホースの付近から溜まり、また無収縮モルタルに粘性があるため、無収縮モルタル表面部は注入ホース位置を中心としたなだらかな丘状となった。実施工では排出管は注入ホースの近くだけでなく、縦断勾配の高い位置に設置するなど、設置箇所を増やして注入状況を確認することで、より確実な充填が可能であると考える。



写真-8 無収縮モルタル注入状況



写真-9 無収縮モルタル注入完了状況

5 まとめ

施工性確認試験を実施し、ウレタンおよび無収縮モルタルの注入状況は良好であることを確認した。ウレタンはボイド管との間に隙間なく注入することができ、また無収縮モルタルは漏れ出すことなく注入できた。

本工法は従来工法より工期が短縮でき、施工も容易で中空床版橋へのアンカ一定着工法として有用であると考える。またウレタンと無収縮モルタルの注入部はそれぞれ $\phi 100$ のコアを削孔すればよく、桁の損傷が少ない施工方法である。

施工性確認試験では、ボイド管 $\phi 800$ での実験であったが、ボイド管 $\phi 600$ と $\phi 650$ でもウレタン注入試験を実施し、ウレタンが問題なく注入でき、様々なボイド管径に対応できることについても確認している。

今後はアンカー筋のせん断耐力確認試験の実施や実橋への適用に取り組んでいきたい。

⑤ 環境の保全と創造

機械式フォームドアスファルトによる中温化舗装技術

(株)NIPPO 北信越支店 技術部長 石垣 勉
(株)NIPPO 北信越支店 試験所長 菅原 紀明

1 はじめに

北陸地方におけるアスファルト舗装事業の継続性を確保する上で、アスファルト合材工場数の減少や気候変動が新たな課題となってきている。そこで筆者らは、これらの課題への対応として、北陸地方に適した機械式フォームドアスファルト舗装技術を開発してきた^{1) 2)}。本論文では、本技術の開発背景、開発技術の概要について説明するとともに、実際の適用事例を通じて得られた新たな知見について述べる

2 開発の背景

北陸地方では1990年代をピークに道路建設投資が減少し、舗装の主要資材であるアスファルト混合物の生産量は大幅に減少している。これにより、北陸地方におけるアスファルト合材工場数も減少してきている。今後、北陸地方において更なるアスファルト混合物の需要減少が進展することになれば、合材工場の減少が進むことが課題としてあげられる。このことは、これにより生じる合材運搬不能地域に対して、運営を継続する合材工場よりアスファルト混合物を広域に安定的に運搬・供給する対策（以下、アスファルト混合物の広域安定供給対策）が必要となることを示している。

次に、気候変動の影響により北陸地方におけるアスファルト舗装の施工可能日数の制約がより大きくなることが課題としてあげられる。北陸地方の気候は日本海側気候の地域であり、平均気温は、季節変化とともに大きく上昇・下降することが特徴である。降水量は首都圏と概ね

同程度であるが、年間日照時間は首都圏の約7割となっている。具体的には、北陸地方の秋期から冬期は、平均気温が低下し、日照時間が少なく、降水量（降雪量）が多いことから、アスファルト舗装の施工可能日数は著しく減少する。したがって、秋期から冬期におけるアスファルト舗装の施工においては、品質確保の観点から、低温下における対策（以下、寒中アスファルト舗装対策）が必要になると考えられる。

春期から夏期は梅雨時期に降水量が多くなるものの、日照時間が大きく増加することから、北陸地方においてアスファルト舗装施工に適した期間となる。しかしながら、地球温暖化の影響予測では、北陸地方の真夏日（気温30°C以上）の年間日数は、20世紀末と比較して、21世紀末に4°C上昇シナリオで約53日、2°C上昇シナリオで約15日増加すると予測されている。近年においても、真夏日・猛暑日（気温35°C以上）や熱帯夜等の日数が増加する傾向しているほか、大雨や短時間強雨の発生頻度は増加する傾向にある。これらのこととは、北陸地方のアスファルト舗装の施工は、春期から夏期の施工可能日数内において、より効率的な舗装施工が求められていると考えられる。したがって、北陸地方の気候変動に対応したアスファルト舗装技術としてアスファルト舗装の夏期高温下における対策（以下、「暑中アスファルト舗装対策」）と、地球温暖化の追加的緩和策として「アスファルト舗装における温室効果ガス排出量削減対策」が必要となると考えられる。

3 機械式フォームドアスファルト舗装技術

3. 1 本技術の概要

機械式フォームドアスファルト技術（以下、本技術）とは、アスファルト混合物の製造時にフォームド発生装置を用いてアスファルトに少量の水を高圧に添加することにより発泡させたアスファルト（フォームドアスファルト）を骨材・フィラーなどとミキサで混合することで製造されたアスファルト混合物を使用する舗装技術である。

フォームドアスファルトには、高圧な水蒸気が充填された微細な気泡が多量に含有しており、これにより見かけの体積が著しく増加する。液体のアスファルト中に満たされた小さな気泡の気泡間接触面積は、大きな気泡の接触面積よりもはるかに大きくなる。この接触面積の増加により、フォームドアスファルトの見掛けの粘度は、同じ温度の液体のアスファルトの粘度よりも低下させることができる。当社の技術では水と少量の発泡補助剤の水溶液（標準水溶液量：アスファルトの2%）を高圧で添加することで、この効果の持続性をさらに向上させている。

フォームドアスファルト技術はこのような特性を活用することで、通常の製造温度と比較して約 20~30°C の温度低減を図る（中温化技術）ことができる。またフォームドアスファルト技術を用いて、アスファルト混合物を通常温度で製造した場合、寒冷期や広域供給にともなう運搬時間の延長によるアスファルト混合物の温度低下に対して、施工後のアスファルト混合物の締固め度の確保を可能とすることが特徴である。

3. 2 北陸地方における本技術の適用検討

北陸地方における本技術の適用を検討するため、フォームドアスファルト混合物の試験練りを実施した。試験練り結果の評価にあたっては通常の一般アスファルト混合物と比較した。一

例として改質密粒度アスファルト混合物(20F)の試験練り結果²⁾より、添加水量が標準添加水量(2%)の場合、動的安定度が一般アスファルト混合物(9,000回/mm)と比較して、大きく低下する(4,500回/mm)ことがわかった。

この傾向は、北陸地方における多くのアスファルト混合物において生じる現象であり、特に砂利を骨材に使用している地域の配合で見られる傾向であった。そこで、添加水量を標準添加水量の半分である1%の試験練りを実施した結果、動的安定度が一般アスファルト混合物と同等に回復した。

フォームドアスファルトはアスファルトの見かけの粘度を低下させる技術であるが、アスファルト混合物の締固め性は、アスファルトの粘度と骨材の噛み合せ（インターロッキング）に依存する。北陸地方において使用される砂利は一部丸みを帯びた粒形であることから、一般的な碎石と比較して、骨材の噛み合せ性がやや低下するものと考えられる。これらのことにより、標準添加水量(2%)のフォームドアスファルト混合物は、過転圧（オーバーコンパクション）になったものと筆者らは考えている。

そこで北陸地方におけるフォームドアスファルト技術の適用にあたっては、添加水量の決定において骨材の性状を把握した上で、試験練りによって確認するものとした。筆者らの推察では、この北陸地方の骨材に起因する現象をうまく活用することで、今後フォームドアスファルト混合物の製造時における更なる製造温度の低減と、寒冷期や広域供給にともなう運搬時間の延長を図るものと考えている。

4 北陸地方における本技術の適用事例

4. 1 アスファルト混合物の広域安定供給

本技術を用いて通常の混合温度で製造された

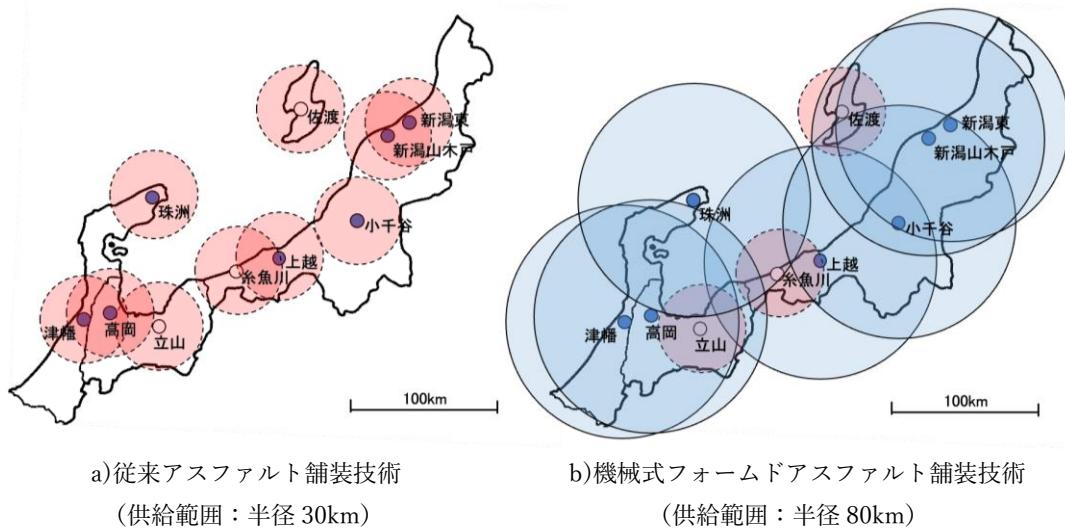


図-1 北陸地方におけるアスファルト混合物の広域安定供給範囲¹⁾
(当社グループのアスファルト合材工場による)

アスファルト混合物を用いた場合、その運搬時間（運搬距離）を大幅に延長させることができる。当社の研究事例³⁾によれば、寒冷期（気温4°C程度）において本技術を適用した再生アスファルト混合物による試験施工において、運搬時間4時間（運搬距離80kmに相当）が経過したアスファルト混合物においても、その施工性と品質が確保されたことを示している。

図-1に、北陸地方の当社グループのアスファルト合材工場における本技術を用いたアスファルト混合物の広域安定供給範囲を示す。2025年現在、当社グループのアスファルト合材工場10工場のうち、フォームド発生装置を実装した工場は7工場（図中の実丸）である（なお、立山合材工場は2026年に実装予定）。図-1より、本技術を適用することで、北陸地方全域においてアスファルト混合物の広域安定供給が可能となることがわかる。また各工場の供給範囲は重複しており、自然災害により被災地の合材工場が供給不能となった場合でも、他工場より広域供給を図ることが可能となる。

北陸地方における広域安定供給の適用事例と

して、能登半島地震の災害復旧工事における適用事例²⁾を示す。石川県津幡合材工場から七尾までのアスファルト混合物の運搬に本技術を適用した。実施時期は2024年10月であり、運搬距離は約60km（工事関係車両の交通渋滞や現場待機時間により、積込から荷卸までの時間は約2時間）であった。混合物の種類は、アスファルト安定処理、粗粒度アスファルト、改質密粒度アスファルト混合物(20F)であった。混合物の到着温度は、出荷温度より10~15°C低下したが、本技術による締固め性の向上効果により、現場採取コアの締固め度は98.8~99.4%であり規格値（96.5%以上）を満足した。

4. 2 暑中アスファルト舗装対策

夏期の高温下におけるアスファルト舗装の課題は、交通開放温度（50°C）まで低下するまでの交通規制時間を確保することである。当社の施工事例によれば、外気温30°Cにおけるオーバーレイ工の施工において、従来のアスファルト舗装技術を適用した場合、アスファルト舗装の施工開始から交通開放に至るまでの時間は3.5時間（施工時間0.5時間+養生時間3時間）であった。

次に、本技術を適用し、通常温度より30°C低減で製造させたアスファルト混合物を用いた場合、舗装の施工開始から交通開放に至るまでの時間は2時間(施工時間0.5時間+養生時間1.5時間)となった。つまり本技術を適用することで、交通開放温度に達するまでの養生時間を従来のアスファルト舗装技術よりも1.5時間短縮できることを示している。このことは、本技術の適用することで、夏期の舗装施工の効率化(日施工量の増加)を図ることができる。さらに交通規制日数の削減による道路利用者への負担軽減、熱中症対策として舗装作業従事者の健康安全性の確保などの効果も期待できる。

北陸地方における適用事例として、能登半島地震の発生直後、亀貝IC～新通IC間新潟西バイパスにおいてボックスカルバート前後に生じた段差解消を目的とした工事に適用した²⁾。実施時期は2024年5～6月であった。工事内容はボックスカルバートと土工部の境界部110箇所において発生した不同沈下部の全層打換であった。本技術を適用し、製造温度を20～30°C低下させた。これにより、開放温度時間の短縮を図ることで、日当り施工量が従来技術想定の3～4倍(4～5箇所)となり、施工日数の大幅な短縮を実現したとともに、道路利用者の円滑な交通の確保と安全性向上を図ることができた。

4. 3 寒中アスファルト舗装対策

寒冷期における従来のアスファルト舗装技術では、アスファルト混合物の運搬時における温度低下に備えて、製造温度を予め高温に設定するとともに、シートなどによる運搬時の保温などの対策を行っている。しかしながら、特に舗装端部や継目部は敷均したアスファルト混合物が低下しやすいことから、締固め度低下などの品質上のリスクがある。本技術を用いて通常温度または通常温度よりやや高い温度(10°C程度)

で製造されたアスファルト混合物を用いた場合、アスファルト舗装の締固め可能温度の範囲を広げることができる。運搬時にアスファルト混合物の温度が低下し、通常のアスファルト混合物の敷均し・締固め温度より低下しても、その施工性と品質を確保することができる。北陸地方における適用事例は豊富であり、これまで当社で使用されたフォームドアスファルト混合物は約5万トンである。秋期から冬期の限定された施工可能日数内におけるアスファルト舗装の施工において広く活用されている。

5 おわりに

本論文では、北陸地方におけるアスファルト合材工場の減少と北陸地方の気候と気候変動への対策として、北陸地方に適した機械式フォームドアスファルト舗装技術を開発した。北陸地方での適用事例より、本技術の有用性を示した。

本技術はアスファルト舗装における温室効果ガス排出量削減策にも有効であり、アスファルト混合物の製造温度を30°C低減した場合、従来の技術と比較して、製造時の燃料使用量(Scope 1 + Scope 2)を約20%削減できる。

なお、北陸地方において当社グループによる本技術の導入は2022年度より進めてきており、2025年9月までの適用実績は、約6万tである。北陸地方におけるアスファルト舗装事業の継続性を確保する更なる普及展開をすすめていきたい。(参考文献)

- 1) 石垣ら：北陸地方における機械式フォームドアスファルト舗装技術の適用性, 第16回北陸道路舗装会議, 2025.6
- 2) 菅原ら：フォームドアスファルト技術の適用事例と課題解決に向けた取り組み, 第16回北陸道路舗装会議, 2025.6
- 3) 文ら：フォームド技術を用いたアスファルト合材の広域安定供給の検証, 第16回北陸道路舗装会議, 2025.6

スチームレスプレキャストコンクリート

ピーエス・コンストラクション株式会社 技術研究所 材料研究G

○椎野 碧

ピーエス・コンストラクション株式会社 技術研究所 材料研究Gリーダー

中瀬 博一

1 はじめに

従来、プレテンション方式のプレキャスト・プレストレストコンクリート工法（以降、PCaPC工法）ではコンクリートの初期強度発現を促進する目的で蒸気による加熱促進養生（以降、蒸気養生）が施されてきた。蒸気養生の多くはボイラーの燃料として重油が使用され、燃焼時に多くのCO₂が排出される。このため、部材製造工程におけるCO₂排出量削減、部材製造工程の合理化などを目的として、蒸気養生を施さずに所要の初期強度を発現するスチームレスプレキャストコンクリート（以降、SLPC）を開発した。

本稿では、SLPCの圧縮強度発現性、収縮特性、耐凍害性および実部材への適用実績について報告する。

2 基礎物性の確認

2. 1 試験項目および試験方法

基礎物性は表-1に示す試験項目および試験方法により確認した。収縮ひずみは、日本コンクリート工学会「超流動コンクリート研究委員会報告書（II）」¹⁾に準拠し、幅10cm、高さ10cm、長さ40cmの角柱供試体の中央に設置した埋込み型ひずみ計により、打込み完了時から計測した。

2. 2 コンクリート

使用材料を表-2に示す。初期の強度発現性向上を目的に、カルシウムシリケート水和物のナノ粒子により水和反応を促進させる硬化促進剤（以降、AC）を用いた。その他の材料はプレキャスト製品工場の常用品を用いた。

表-1 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
圧縮強度	JIS A 1108
凝結試験	JIS A 1147
収縮ひずみ	日本コンクリート工学会 超流動コンクリート研究委員会報告書（II）
凍結融解	JIS A 1148(A法)
スケーリング	ASTM-C672

表-2 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	HC	早強セメント、密度3.14g/cm ³
	S1	陸砂、表乾密度2.58g/cm ³
	S2	碎砂、表乾密度2.62g/cm ³
細骨材	G	碎石、表乾密度2.64g/cm ³ 、 最大寸法20mm
粗骨材		
硬化促進剤	AC	カルシウムシリケート水和物の ナノ粒子により水和反応促進
化学混和剤	SP	高性能減水剤
	AE	AE剤

表-3 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	空気量 (%)	単位 水量 (kg/m ³)	単位 粗骨材量 (L/m ³)	硬化促進剤 添加量 (C×wt%)
P-32	32				—
P-36	36				—
P-41	41				—
AC2-36	36	4.5	157	373	2.0
AC4-32	32				
AC4-36	36				4.0
AC4-41	41				

配合を表-3に示す。配合Pは比較用のACを用いない一般的な配合であり、配合ACはACをセメント質量に対して2.0%もしく4.0%添加した配合である。すべての配合において、スランプ18cm、空気量4.5%を標準とした。

養生方法は配合Pは最高温度45°Cの加熱促進養生を施し、配合ACは20°C一定とした。すべての配合で打込みの翌日に脱枠し、その後は20°C一定で気中養生とした。

2.3 試験結果

2.3.1 凝結時間

凝結試験結果を図-1に示す。配合P-36と比較し、配合AC2-36およびAC4-36は凝結の始発時間が1~1.5時間早まる傾向があり、部材製造時における表面仕上げ終了時間も短縮が可能であると考えられる。

2.3.2 圧縮強度発現性

配合AC4のセメント水比C/Wと圧縮強度の関係を図-3に示す。圧縮強度の目標値は、プレテンション方式のPCaPC工法への適用を想定し、材齢15時間でプレストレス導入時強度の 35N/mm^2 、材齢7日で設計基準強度の 50N/mm^2 に、ばらつきを考慮して割り増した 40.3N/mm^2 および 57.6N/mm^2 とした。配合AC4は水セメント比を36%以下(C/Wで2.78以上)とした場合、加熱促進養生を施さなくても圧縮強度の目標値を満足した。

2.3.3 収縮特性

収縮ひずみの経時変化を図-3に示す。配合AC4-36の材齢1年における収縮ひずみは、45°Cの加熱促進養生を施したP-36と比較して約 100×10^{-6} 大きくなった。

2.3.4 耐凍害性

凍結融解試験およびスケーリング試験の結果を図-4に示す。配合AC4-32, 36, 41は凍結融解に優れた抵抗性を示し、300サイクル終了時の耐久性指数は100であった。また、50サイクル終了時のスケーリング量は、いずれの配合も国土交通省東北地方整備局における基準値²⁾とされる 0.5kg/m^2 以下を満足した。

2.4 基礎物性試験のまとめ

硬化促進剤を早強セメントに対して質量比で4.0%を添加し、水セメント比を36.0%以下とすることにより、蒸気による加熱養生を施すことなく所要の圧縮強度を満足した。また、耐凍害性についても所要の性能を有していた。

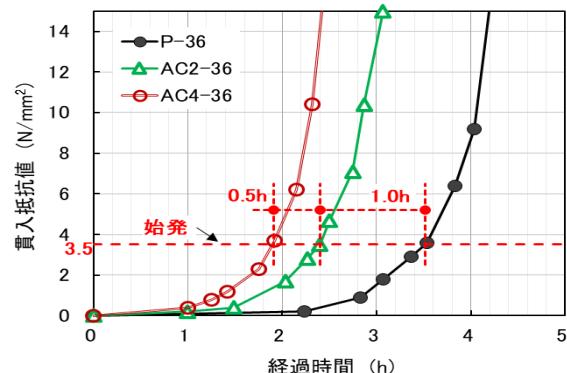


図-1 凝結試験結果

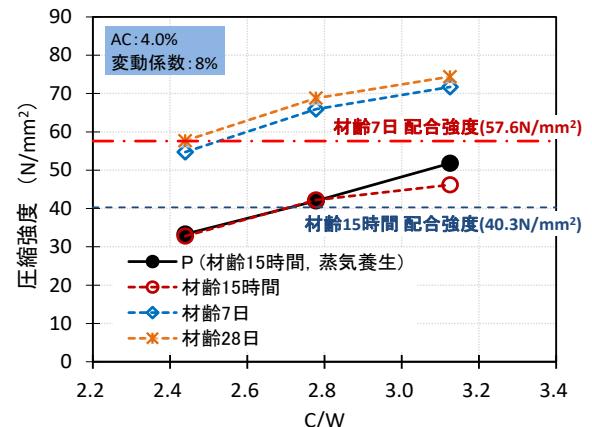


図-2 C/Wと圧縮強度の関係

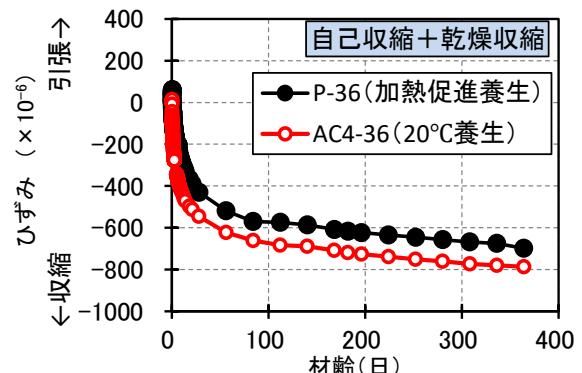


図-3 材齢と収縮ひずみの関係

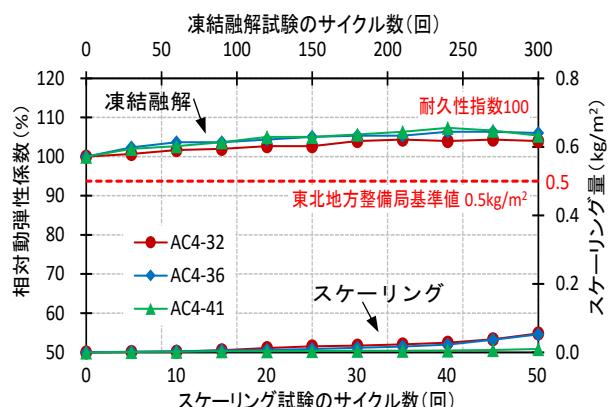


図-4 凍結融解およびスケーリングの試験結果

3 実橋梁への適用

3.1 橋梁諸元

橋梁諸元を表-4に示す。適用した橋梁はプレテンション方式PC4径間連結T桁橋であり、製造した桁部材は計40本であった。

3.2 コンクリート

3.2.1 仕様および配合

コンクリートの仕様は表-5に示すとおりであり、プレストレス導入時強度である 35N/mm^2 は材齢16時間で満足する計画とした。

水セメント比は、室内試験練りより得られたセメント水比と圧縮強度の関係から、表-5に示すプレストレス導入時強度に対する配合強度を満足するよう34.5%とした。本橋梁では、年間で最も低温となる1月末に桁部材製造を開始し、3月中旬に製造が完了したため、気温の上昇に合わせてACの添加率を桁部材製造1日目から10日目は4.0%，11～18日目では3.0%，19～20日目では2.0%とした。

3.2.2 養生

桁部材は表面仕上げ後、仕上げ面に保水シートを敷設後、外気が吹き込まないようビニールシートで桁部材を覆い翌日まで静置した。

3.3 試験結果

3.3.1 フレッシュコンクリート

スランプおよび空気量は、ACの添加率の影響は少なく、桁の製造期間中全ての打込み日において規定値を満足した。

3.3.2 打込みおよび表面仕上げ

SLPCの打込みは一般のコンクリートと同様の施工法で行うことができた。また、一般のコンクリートの場合、冬期における表面仕上げ作業完了までにコンクリートの打込み終了から2時間程度を要する場合が多いが、SLPCは1時間以内で完了し、作業時間を1時間以上短縮できることが確認された。

表-4 橋梁諸元

橋梁名	下庄跨線橋
路線名	主要県道 箕島高松線
上部工形式	プレテンション方式 PC4径間連結T桁橋
桁高、支間長	桁高1058mm、支間長19.45m
PC鋼材	SWPR7BL、15.2mm
T桁本数	40本(2本/日、20日間製造)

表-5 コンクリートの仕様

項目	実施時期	目標値
設計基準強度	材齢7日	50N/mm^2
プレストレス導入時強度	材齢16時間	35N/mm^2
スランプ	練上り直後	$18 \pm 2.5\text{cm}$
空気量	練上り直後	$4.5 \pm 1.6\%$

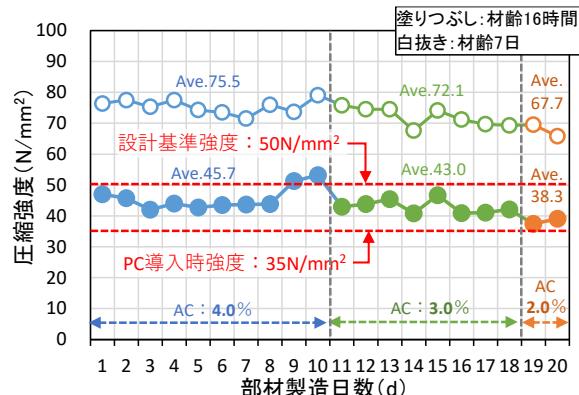


図-5 圧縮強度の試験結果

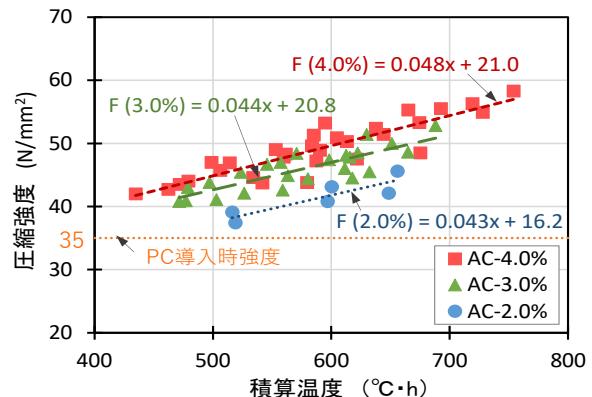


図-6 積算温度と圧縮強度の関係

3.3.3 圧縮強度

材齢16時間および材齢7日の圧縮強度試験の結果を図-5に示す。季節変化により外気温の上昇に合わせ、ACの添加率を4.0%から2.0%に減量したが、いずれの添加率でもコンクリートの仕様を満足した。

3.3.4 積算温度と強度発現の関係

ACの添加率ごとの材齢16時間、18.5時間およ

び20.5時間における部材同一養生を施した円柱供試体(直径10cm, 高さ20cm)の積算温度と圧縮強度の関係を図-6に示す。ACの添加率が4.0%, 3.0%, 2.0%いずれの場合も積算温度と圧縮強度には線形の相関が認められた。今後、これらのデータを蓄積し、円柱供試体の温度履歴をもとに強度発現を精度良く推定することにより、合理的な配合設計が可能となると考えられる。

3.3.5 表面美観および架設

桁部材架設状況を写真-1に示す。脱枠後の桁部材にはコールドジョイントや豆板などの不具合や色むらなどは認められなかった。また、現場での架設も問題なく実施された。

4 CO₂排出量削減効果

SLPCを用いて蒸気養生を不要とした場合のCO₂排出量削減効果を試算した。プレキャスト製品工場5工場における重油使用量から試算した結果を表-6に示す。調査結果より算出された重油燃焼によるCO₂排出量は年間約1380tであった。ボイラによる熱がすべて部材製造時の蒸気養生に使われた場合、使用したコンクリート1m³あたりの重油燃焼によるCO₂排出量は約48kg/m³となった。早強セメントを使用したW/C36%の一般的なコンクリート配合における材料由来のCO₂排出量は343kg/m³となっており、仮に蒸気養生を施さずに重油燃焼をゼロとした場合に、材料由来のCO₂排出量を含めた部材製造時のCO₂排出量の削減率は約12% [1-343/(343+48)] となった。

5 おわりに

SLPCの基礎物性試験と実橋梁への適用から以下の知見が得られた。

1) 硬化促進剤を適量添加することで、蒸気養生を施さずにプレテンション方式のPCaPC工法に適用可能な強度発現が得られる。



写真-1 桁部材架設状況

表-6 プレキャスト製品工場における重油燃焼によるCO₂排出量削減効果
(対象5工場2022年度調べ)

重油燃焼によるCO ₂ 排出量	1,380t/年
コンクリート1m ³ あたりの重油燃焼によるCO ₂ 排出量	48kg/m ³
コンクリート材料由来のCO ₂ 排出量	343kg/m ³ *
材料由来のCO ₂ 排出量を含めたCO ₂ 排出量削減率	12.3%

*W/C36%の一般HC配合の場合

- 2) 早強セメント単味の配合と比較して凝結の始発時間が1~1.5時間程度早まるため、部材製造時の仕上げ完了までの時間も短縮される。
- 3) 所要の耐凍害性を有している。
- 4) 一般的なコンクリートと同様の手法で部材の製造および架設が可能である。
- 5) 蒸気養生を施す一般的な部材製造方法と比較して、約12%のCO₂排出量削減が可能である。

謝辞：本技術の適用にあたり、岡山県備中県民局建設部様には多大なるご協力およびご指導をいただきました。ここに深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II), pp209-210, 1994年5月
- 2) 国土交通省東北地方整備局：東北地方における凍害対策に関する参考資料(案)2019年改訂版, pp18-19, 2019年3月

藻類増殖材（イオンカルチャープレート）を用いた藻場造成

(株)不動テトラ ブロック環境事業本部 ○廣瀬 紀一

(株)不動テトラ 総合技術研究所 研究開発室 専門役 青田 徹

東洋ガラス（株）開発本部 製品開発部 無機材料課 主任研究員 鈴木 太郎

東洋ガラス（株）開発本部 製品開発部 無機材料課 マネージャー 沢田 恒明

国土交通省 北陸地方整備局 敦賀港湾事務所 所長 坂井 啓一

国土交通省 北陸地方整備局 敦賀港湾事務所 副所長 竹内 悟

1 はじめに

2050年までにカーボンニュートラルを目指すことが政府により宣言されている。カーボンニュートラルの達成に向け、その手段の一つとして藻場などのブルーカーボン生態系に注目が集まっている。

また、港湾分野においても藻場・干潟及び生物共生型港湾構造物をブルーインフラと呼び、「命を育むみなどのブルーインフラ拡大プロジェクト」が推進されている。港湾構造物に用いられる消波ブロックには、海藻類が着生し、藻場が形成されることがあるが、今後はより確実、早期に藻場が形成されることが望まれる。

海藻類は窒素やリン、鉄などを吸収し、光合成によりCO₂を取り込んで生長する。この鉄やケイ素等を溶出し、海藻類の生長を促進する水溶性ガラスから成る藻類増殖材（イオンカルチャー）プレートを(株)不動テトラと東洋ガラス（株）は共同で製品化していたが、これまでの溶出期間10年の製品に加え、新たに溶出期間が3年の製品を開発した。新たに開発した製品の実証試験を福井県敦賀港にて行ったので、その結果を報告する。

2 藻類増殖材

2.1 藻類増殖材の特徴

藻類増殖材は、鉄やケイ素等を藻類が吸収可

能なイオンの状態で長期間にわたって溶出するガラス素材である。水との接触によって加水分解によりガラス表面が浸食され、ガラス中の元素がイオンの状態で放出される。ガラスの溶出速度は、ガラス組成や粒径によって制御可能である。

なお、藻類増殖材は海藻類の増殖だけでなく、珪藻等の微細藻類の増殖にも利用することができる。

2.2 藻類増殖材プレート

モルタルプレートの表面に粒径5mm程度のガラス粒を露出させたものが藻類増殖材プレートである。寸法は25×8×3cmで質量は約1.4kgである（写真-1）。



写真-1 藻類増殖材プレート

藻類増殖材プレートに用いるガラスは、従来、溶出期間が10年のタイプの1種類であった。ユーザーにより、早期に確実な藻場の造成のため

に単位時間当たりの溶出量が多いタイプを求める要望があったことから、ガラス組成を変えることで溶出期間3年の溶出速度が3倍のタイプを開発し、これを用いた藻類増殖材プレートも製品化した。

藻類増殖材プレートは接着剤を用いて、消波ブロック等に貼り付ける。アラメやカジメ等のコンブ類は、ブロックの稜角部や岩礁の凸部に着生しやすいことが知られているが、藻類増殖材プレートの稜角部にも海藻類が着生しやすく、着生した海藻類が藻類増殖材の効果で生長が促進され、早期に藻場が形成されることを期待している。

3 敦賀港における藻場造成実証試験

早期に海藻類の生長促進効果が得られることを期待した3年溶出タイプの藻類増殖材プレートの効果検証のため、国土交通省北陸地方整備局より福井県敦賀港において実海域実験場の提供を受け、藻場造成実証試験を行った。

3.1 試験場所

福井県敦賀港の鞠山防波堤の港内側に設置された消波ブロックを対象として試験を行った。試験場所を図-1に示す。

3.2 試験方法

3.2.1 調査測線と藻類増殖材の設置

図-2に示す2本の測線を設定し、測線Aには10年溶出タイプの藻類増殖材プレートと対照区としてモルタルプレート、測線Bには3年溶出タイプの藻類増殖材プレートとモルタルプレートを取り付けた。取付け水深は概ね1m、3m、5m、7mの太陽光が当たる部分とした。試験場所の標準断面図を図-3、プレートの取付けイメージを図-4、プレートの取付け枚数を表-1に示す。



図-1 試験場所（地理院地図を加工）

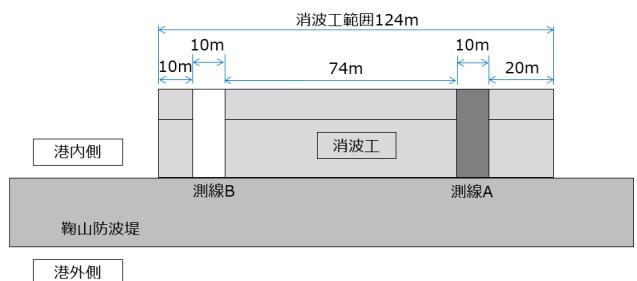


図-2 調査測線

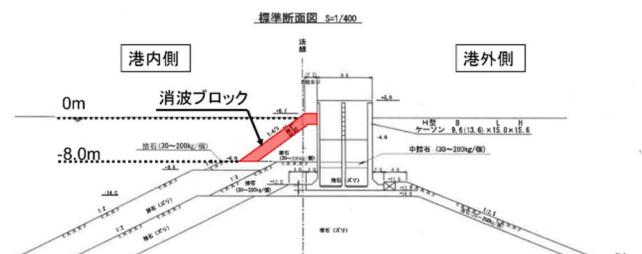


図-3 鞠山防波堤標準断面図

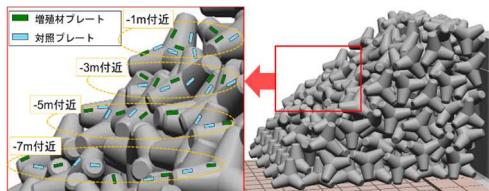


図-4 プレートの取付けイメージ図

表-1 プレートの取付け枚数

測線	測線A		測線B		
	プレート	増殖材 10年溶出	対照区	増殖材 3年溶出	対照区
貼付 枚数 (枚)	水深1m	8	5	8	5
	水深3m	7	5	7	5
	水深5m	7	5	7	5
	水深7m	8	5	8	5
	合計	30	20	30	20

3.2.2 調査実施月

事前調査を2022年6月、各プレートの取付けを2023年4月に行い、モニタリング調査を2023年10月、2024年4月、10月に実施した。

3.2.3 調査方法

調査はすべてのプレートを対象とし、プレートを中心として50×50cmの範囲に着生している海藻類の被度を測定した。

また、大型褐藻類のホンダワラ類の着生が確認されたことから、ホンダワラ類の上位5個体の全長の測定を行った。

3.3 試験結果

ホンダワラ類の幼体から成体への生長の推移を比較するため、2023年10月と2024年4月の結果を示す。

なお、ホンダワラ類は、一般に春に最も大きく生長し、卵を放出、秋に幼体が肉眼視できるようになる種が多い。

3.3.1 被度調査結果

図-5に各プレート上のホンダワラ類の被度を平均した結果を示す。2023年10月はホンダワラ

類の幼体の着生が見られ始めた時期であり、平均被度は大きくとも10%程度であった。2024年4月にはホンダワラ類が生長し、水深1mでは平均被度が概ね50%～70%であった。

両測線とも水深の浅い方が被度が高く、測線Aの方が測線Bより被度が高い傾向が見られた。水深での違いは光量、測線間の差は、測線Aの方が測線Bより早く据え付けられたこと、ホンダワラ類の種苗供給源との距離の違いによるものと考えられる。

同測線、同水深での藻類増殖材プレートと対照区での被度に明確な差は見られなかった。ホンダワラ類は上方へ生長する海藻であり、対象とする範囲への投影面積の割合を示す被度では明確な差が見られなかつたものと考えられる。



図-5 ホンダワラ類の平均被度

写真-2、写真-3に2024年4月の水深1mの代表的な各プレートの状況を示す。いずれもホンダワラ類が繁茂している。



写真-2 測線A水深1mの状況（左：藻類増殖材プレート、右：対照区、2024年4月）

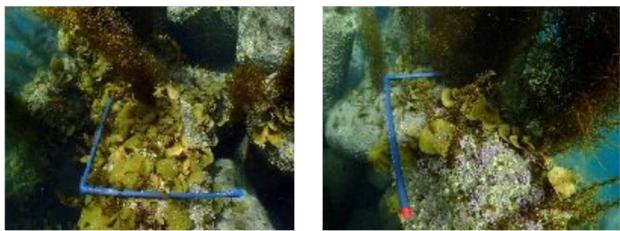


写真-3 漢字B水深1mの状況（左：藻類増殖材プレート、右：対照区、2024年4月）

3.3.2 全長の測定結果

各プレートに着生したホンダワラ類の上位5個体の平均全長を図-6に示す。なお、水深1mの測点では2m、その他の水深の測点では3mを超える個体については、それぞれ2m、3mと記録した。

2023年10月は、すべての測点で10cm以下であった。2024年4月には、最大で測線Aは160cm程度、測線Bは80cm程度の測点が見られた。

被度は水深が浅い方が高い傾向であり、測線Bは水深が浅い方が平均全長が大きい。しかし、測線Aは水深5mの平均全長が水深3mよりも大きくなっていた。この理由は不明である。

同測線、同水深の比較では、測線Aの水深1mは藻類増殖材プレートの方が全長が大きく、水深3m～7mでは対照区の方が全長が大きかった。測線Bでは、全水深で藻類増殖材プレートの方が全長が大きかった。

2023年10月と2024年4月の平均全長の割合を生長率とし、図-7にホンダワラ類の生長率を示

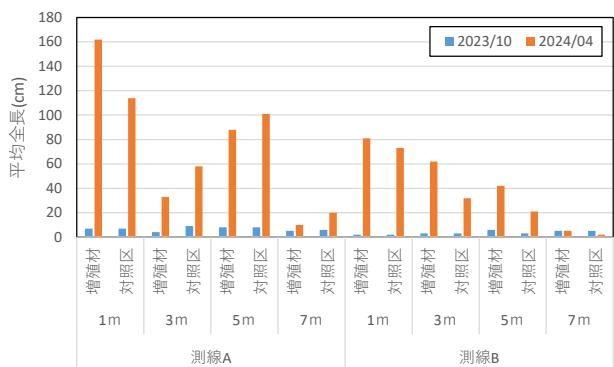


図-6 ホンダワラ類の上位5個体の平均全長

す。

概ね藻類増殖材プレートの方が生長率が高く、藻類増殖材の効果が現れていると考えられる。さらに、測線Aでは水深1mと3mで藻類増殖材プレートの生長率が高く、測線Bでは全水深で藻類増殖材プレートの方が生長率が高かったことから、単位時間当たりの溶出量が多い方が早期に効果が得られるものと考えられる。

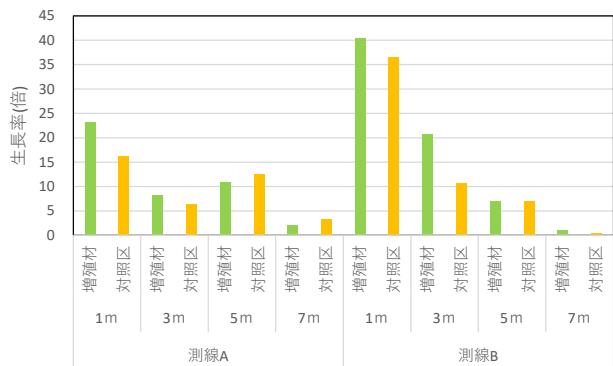


図-7 ホンダワラ類の生長率

4まとめ

溶出期間10年の藻類増殖材プレートに加え、溶出期間3年、溶出速度3倍の藻類増殖材プレートを開発した。

福井県敦賀港の鞠山防波堤の港内側に設置された消波ブロックにおいて、実証試験を行ったところ、ホンダワラ類が着生し、藻類増殖材プレートで良好な生長が見られ、特に3年溶出タイプの藻類増殖材プレートの方が早期に効果が得られる傾向が見られた。3年溶出タイプで早期に形成した藻場を10年溶出タイプで維持していく藻場造成・維持管理手法も可能になると考えられる。

藻類増殖材プレートを利用することで、消波ブロック等に、早期に藻場を形成することができ、今後の港湾構造物へのブルーカーボン生態系の創出、ブルーインフラの拡大に寄与できるものと考えられる。

⑥ その他

可塑性グラウト増深工法の紹介と実構造物への適用結果

五洋建設株式会社 技術研究所 専門副所長 小笠原 哲也

1 はじめに

可塑性グラウト増深工法は、既設重力式係船岸を対象とし、捨石マウンド内的一部分に可塑性グラウトを注入・固化した後、捨石を掘削して2~3 m増深する工法である（図-1）。本項では可塑性グラウト増深工法の概要と実構造物に適用した実績2例を紹介する。

1. 1 工法概要

1. 1. 1 開発の背景と目的

貨物船や客船の大型化が近年の国際的動向である一方で、既存施設の戦略的維持管理や有効活用が求められており、船舶の大型化に対しても既存の係船岸を増深する検討事例が増えている。重力式係船岸の安定を確保しつつ増深するには、前面海域に新規桟橋を構築するなど構造形式を変更して増深する工法を採用することが多く、このような従来工法では、前面海域に余裕がない場合や隣接バースと法線を合わせる必要がある場合には、法線を大きく変更できないため工法の適用自体が難しい。さらに岸壁法線を変更すると、岸壁上に設置されたガントリークレーンなどを再設置することとなり、大きな費用が発生する。また既設岸壁を供用しながら増深する必要がある場合にも、従来工法の適用は難しい。

以上のことから（国研）港湾空港技術研究所および（一社）日本埋立浚渫協会は、岸壁法線を変更せずに、かつ供用しながら重力式係船岸を増深できる工法を共同で開発した¹⁾。その後、五洋・東洋・東亜・若築・あおみ・本間・みらい・りんかい日産の8社で、（国研）港湾空港技術研究所の革新的社会資本整備研究開発推進事業（以下、革新的事業と略す）に応募し採択され、社会実装に向けて実構造物に適用した。その成果を受けて中国地方整備局発注の浜田港における実工事に適用した。

1. 1. 2 工法概要

可塑性グラウト増深工法は、図-1のように重力式係

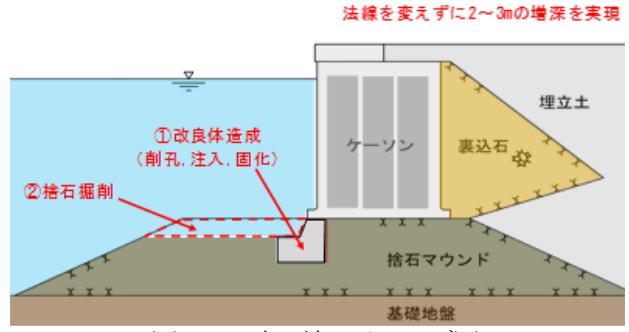


図-1 本工法のイメージ図

船岸の前趾直下の捨石マウンド一部を可塑性グラウトにより固化したあと、前面の捨石を掘削して増深する工法である。増深深さは2~3 mを標準とし、法線を変更せずに供用しながら施工できることが特長である。

本工法で増深する場合、図-1のように捨石マウンド全体ではなく、限定的な一部を固化することで、係船岸の偏心傾斜荷重に対する安定性を確保することが設計的には望ましい^{1,2)}。しかし通常のモルタルでは流動性が高すぎて、間隙の大きい捨石マウンド内部では自重により落下してしまい、限定的な範囲を固化できない。

そこで本工法では可塑性グラウトを使用する。可塑性グラウトは静置すると自立するが、力を加えると容易に流動する性質を有する（写真-1）。そのためポンプ圧力により圧入できるが、注入後は自立するので間隙の大きな捨石の一部を固化することに適する材料である。水



写真-1 可塑性グラウト

中不分離性を有するため、海中の捨石マウンド内部に注入しても水質汚濁を生じない。なおトンネルの裏込め注入材としても多数の実績がある材料である。

本工法の施工フローを図-2に示す。グラウトを捨石マウンド内部に圧入するため、捨石表層からでは外部にグラウトが漏出して注入できない。そのため捨石を削孔して注入管の先端を捨石内部に挿入する必要がある。ケーソンを損傷しないようにケーソン直下の捨石内に注入管を挿入するため、係船岸の海域前面から前方斜めに削孔する必要がある（後述の図-6、写真-5参照）。

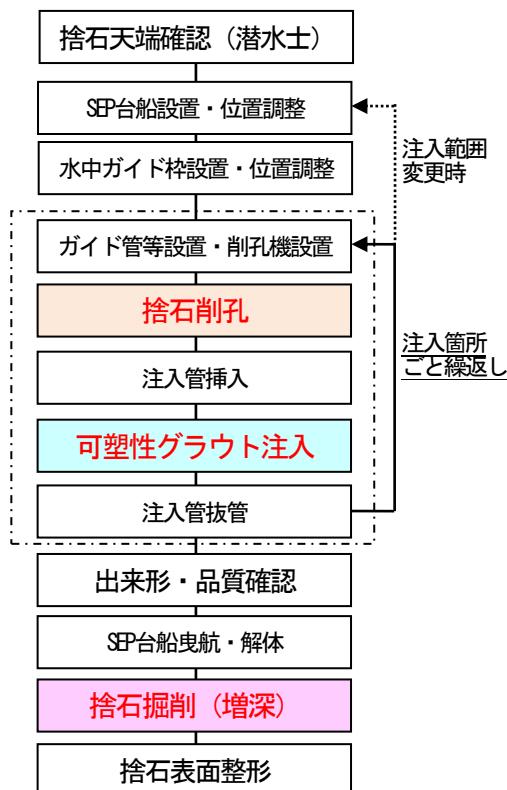


図-2 本工法の施工フロー

捨石の削孔はロータリーパーカッショントルク方式により行う。削孔途中に、潮位による高さ変化や波浪による動搖が生じると、ケーシング等の損傷が生じ削孔できなくなるため、陸上と同様の環境で削孔できるSEP台船上に削孔機を搭載することが標準である。

削孔時の位置だしを確実に行うために、係船岸前面の捨石天端上にガイド枠を設置し定規とする。また前面海域から斜めに削孔するため削孔長が長くなりやすく、ケーシング等の座屈を防止するためガイド管または座屈防止用の鋼材を設置する（後述の写真-4、5参照）。

表-1 可塑性グラウトの配合

基材			可塑材				圧縮強度 N/mm ²
セメント kg	水 リットル	減水剤 kg	可塑剤A (凝集剤) kg	可塑剤B (促進剤) kg	可塑剤C (不分離剤) kg	水 リットル	
1212	485	6.06	0.61	6.06	2.50	121	24以上

削孔機による捨石削孔後、注入管を挿入して可塑性グラウトを捨石マウンド内部に注入する。可塑性グラウトの配合を表-1に示す。本工法では可塑性グラウト単味の圧縮強度として24 N/mm²のものを使用している。セメントミルクである基材と可塑剤を各々のミキサで練り混ぜ、2系統でポンプ圧送し圧送中にスタティックミキサにより混合してポンプ圧入する。注入した時の形状は図-3に示すように球状となるため、球をラップさせて配置し必要な範囲を固化するように計画する。なお掘削（増深）する範囲の捨石を固化しないように注意する。

注入が完了すると注入管を抜管して、次の注入箇所に移動して同様の手順を繰り返す。係船岸法線方向にSEP台船の長さを超えて可塑性グラウトを注入する場合は、SEP台船およびガイド枠を移動し位置調整を行う。

必要範囲のグラウト注入完了後、ボーリングを行い充填状況と出来形を確認する。グラウトの充填状況は、捨石空隙に対してグラウトが80%以上充填されていることを、採取したコア表層の目視や画像解析等により確認する。このときフェノールフタレイン溶液を噴霧するとアルカリ性のグラウトが赤色化するので判別に役立つ（写真-3）。次に採取したコアに対して圧縮強度試験を行い、必要強度を満足するかを確認する。改良体の必要圧縮強度は係船岸の構造や水深等により異なるが、これまでの検討では概ね24~4 N/mm²であった。

出来形・品質確認後、係船岸前面の捨石を掘削し増深を行う。捨石掘削にはオレンジピールバケット等を用い、係船岸付近では係船岸本体を傷つけないよう潜水士等により掘削することを標準としている。

捨石掘削後、凹凸のある捨石表面に型枠を立て水中不分離性モルタル等を充填して表面整形を行う。

なお図-2の施工フローの最初にあるように、準備工として潜水士による捨石天端確認を行う。これは捨石天端に堆積物があるかを確認するもので、堆積物が多くあ

る場合には捨石マウンド内部に夾雜物（砂、粘土、貝殻等）が多く存在する可能性がある。夾雜物が多くある場合は、可塑性グラウトを充填する支障となることが考えられるので、別途夾雜物除去工法を適用する必要がある。この夾雜物除去工法については文献^{2),3)}をご参照願いたい。

2 実構造物への適用結果

2. 1 革新的事業での実構造物への適用³⁾

革新的事業では、川崎港東扇島の重力式岸壁（-4.5m）に本工法を適用した。ケーソン1函分を対象として前面を2.35 m増深することとした。港空研資料No. 1277¹⁾の検討手順に従って図-3、図-4のように増深および改良体の形状を決定した。改良体の必要強度は約4 N/mm²となつた。施工状況を写真-2に示す。可塑性グラウト注入時には注入量を30~50 l/分、岸壁上の注入圧力0.8~1 MPa程度（注入管接続部までの圧力損失：約0.7 MPa）で安定状態であることを管理し、球直径2 m、捨石間隙率40 %とした所定量2,050 l（ロス率20%）を概ね注入できた。

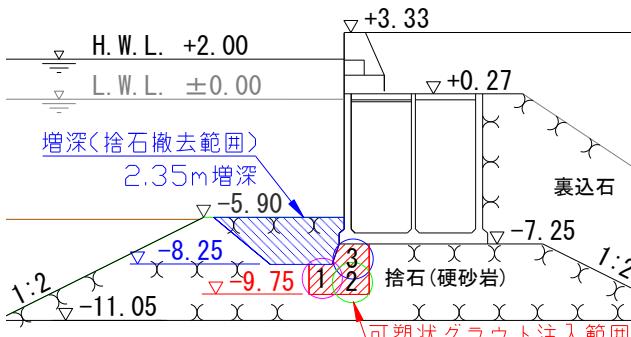


図-3 東扇島の増深断面と改良体の範囲(断面図)

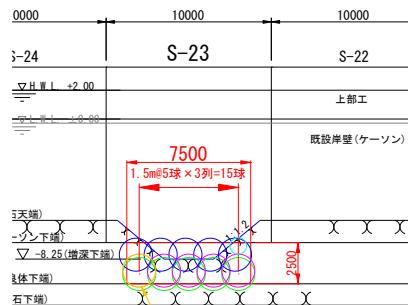


図-4 東扇島の増深断面と改良体の範囲(正面図)

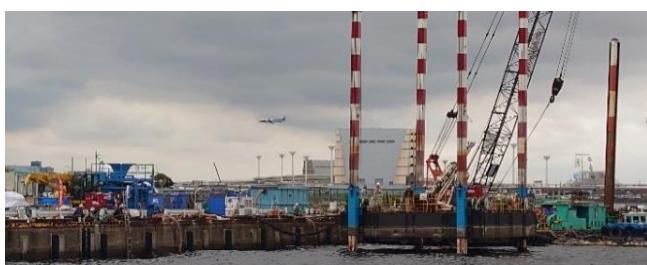


写真-2 東扇島の施工状況

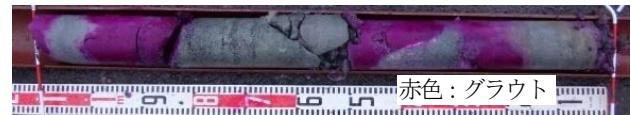


写真-3 東扇島の可塑性グラウト充填状況

可塑性グラウト注入後、鉛直コアボーリングおよび水中での水平コアボーリングにより、捨石間隙内のグラウト注入状況を確認した。写真-3に示すように捨石間の小さな間隙にも可塑性グラウトが十分充填されていた。採取コアに対して圧縮強度試験を行った。約7 N/mm²の圧縮強度を示し必要な圧縮強度約4 N/mm²を十分満足した。

本成果をまとめた論文³⁾は令和6年度の日本港湾協会論文賞を受賞し、知見をガイドライン²⁾としてまとめた。

2. 2 浜田港での実工事への適用⁴⁾

捨石を限定的に固結できるという本工法の特徴を生かして、既設護岸の前面にある捨石の一部を撤去することを目的として、浜田港において本工法が実工事に適用された。工事名称は浜田港福井地区仮係留施設築造工事

（中国地方整備局発注）である。図-5に示すように既設護岸のケーソン直下に可塑性グラウトを注入し、ケーソンの安定を確保したうえで前面捨石を撤去する工事である。まず準備工として捨石マウンドの状況を潜水士により目視確認した。写真-4のように捨石マウンド天端は非常に清浄で堆積物等は観察されなかった。この調査結果により捨石マウンド内部に夾雜物はほとんど存在しないと判断した。

次に近くの岸壁で組み立てたSEP台船を現場まで曳航

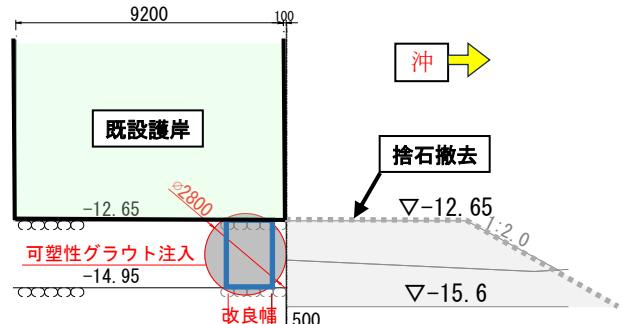


図-5 浜田港の施工断面図

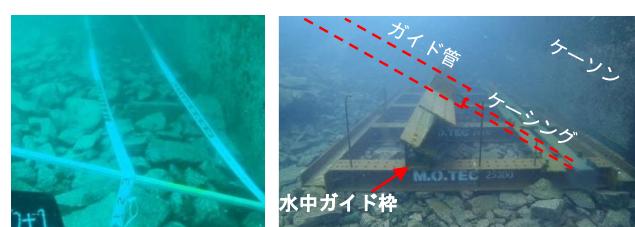


写真-4 浜田港の捨石天端とガイド枠

後、設置した。削孔位置を管理するためとガイド管を支持するために、捨石マウンド天端にガイド枠を設置した（写真－4）。削孔はロータリーパーカッショント方式により行った。図－6のようにケーン直下への削孔・注入となるため、水平に対して約30°の削孔角度となりケーシング全長は約40 mとなった。ケーシング等の座屈防止のためガイド管を使用した（写真－5）。

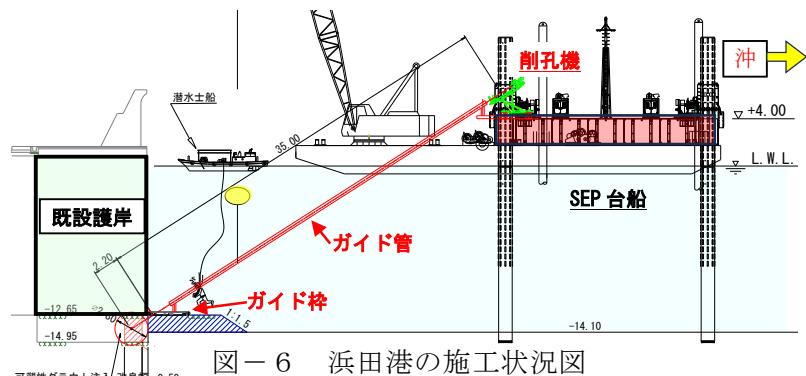
可塑性グラウトの配合は、革新的事業と同様に表－1の配合を使用した。革新的事業等で可塑性グラウトを注入した捨石重量は30 kg/個～200 kg/個であり、浜田港では10 kg/個～200 kg/個とほぼ変わらないため、従来から使用していた配合で注入可能と判断した。フレッシュ性状をフロー値で管理し、注入量、注入圧力を管理して所定量を注入できた。注入後、水中水平ボーリングでコアを採取したところ、写真－6のように充填度は非常に良好であり、圧縮強度についても改良体の必要強度である2.4 N/mm²を十分満足した。その後、前面の捨石掘削を完了した。

3　まとめ

本工法は公募による社会実装の事業を経て実工事に適用するに至った。また増深だけでなく捨石を限定的に固結できるという工法の特徴から耐震補強やその他に応用できる可能性がある。

本工法の設計、施工、維持管理に関する成果は可塑性グラウト増深工法ガイドライン（案）等としてまとめられている。詳細は各文献^{1), 2)}等をご参照願いたい。

本項は（国研）港湾空港技術研究所から公募された革新的事業において、五洋・東洋・東亜・若築・あおみ・本間・みらい・りんかい日産の8社で行ったものの成果を含む。



図－6 浜田港の施工状況図



写真－5 浜田港の削孔状況写真



写真－6 浜田港の可塑性グラウト充填状況

参考文献

- 水谷崇亮, 森川嘉之, 渡部要一, 菊池喜昭, 合田和哉, 加藤繁幸, 小笠原哲也：重力式係船岸の新しい増深工法の開発, 港湾空港技術研究所資料No1277, 2013. 12
- 五洋, 東洋, 東亜, 若築, あおみ, 本間, みらい, りんかい日産：可塑性グラウトを用いた重力式係船岸の増深工法（可塑性グラウト増深工法）ガイドライン（案）, 2024. 3.
https://www.penta-ocean.co.jp/business/tech/civil/oceanic/plastic_grout_deepening.html (2025年9月確認)
- 小笠原哲也, 合田和哉, 和田眞郷, 三枝弘幸, 壱岐直之, 橋本健：可塑性グラウト増深工法の実岸壁への適用と夾雜物除去工法の開発, 土木学会論文集, Vol. 79, No. 18, 23-18156, 2023.
- 安藤匠哉, 鶴田裕一郎, 長瀬光一, 小笠原哲也, 鯨田宏樹, 稲山聖也：浜田港の既設護岸における可塑性グラウト増深工法の適用, 第80回土木学会年次学術講演会, VI-19, 2025. 9