令和 8 年度

建 設 技 術 報 告 会

報 文 集

令和 8 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	3D LiDARと高解像度カメラを併用した切羽監視システムの開発	大江　隆史	佐藤工業株式会社	1
2	共通	環境認識システム等を実装した自律施工型ブルドーザ(SmartDozer®)	前﨑　貴博	清水建設株式会社	5
3	共通	統合施工管理システムによる土工事の自動化と災害復旧工事への展開	岡本　邦宏	株式会社大林組	9
4	港湾	重錘均し管理システム「４D-G・Ｖｉｓｉｏｎ」	安藤　恭平	株式会社本間組	13
5	砂防	i-Construction2.0×遠隔施工　～遠隔施工における現場の生産性向上～	上田　悠輔	株式会社岡部	17
6	道路	橋梁予備設計における三次元モデルの活用	高橋　英樹	東京コンサルタンツ株式会社	21
7	道路	山岳トンネル覆工コンクリート施工における生産性向上に関する技術開発	松本　隆太郎	株式会社奥村組	25
8	道路	能登半島地震復旧工事で遠隔操作システムによる施工を実証	吉成　健吾	前田建設工業株式会社	29
テーマ：② 社会資本の的確な維持管理・更新					
9	共通	ベルリプレイス工法（改築推進）に関する地中拡径の実証実験についての報告	光嶋　真由	真柄建設株式会社	33
10	道路	アスファルト層下面補強用ジオシンセティックスの開発	本間　圭一	北川ヒューテック株式会社	37
テーマ：③ 雪に強い地域づくり					
11	道路	路面照射装置を活用した除雪編成見直しによる作業の安全性,経済性及び生産性の向上について	近藤　伶	株式会社ネクスコ・メンテナンス新潟	41
12	道路	登坂不能対策と地下水保全を両立する消雪パイプ DX	大橋　勝人	株式会社興和	45
テーマ：④ 自然災害からの安全確保					
13	共通	セメントスラリー式噴射撹拌処理工法「PJ工法（タイプⅢ）」	平良　早弥香	株式会社不動テトラ	49
14	港湾	人工排水材を用いたボイリング被害抑止工法 SBDS工法	片山　遥平	五洋建設株式会社	53
15	道路	アスファルト舗装の地震対策段差抑制工法「ＨＲＢ工法」	栁澤　淳史	株式会社NIPPO	57
16	道路	能登半島地震復旧工事におけるプレキャスト踏掛版の有用性について	橿山　尚久	株式会社ガイアート	61
テーマ：⑤ 環境の保全と創造					
17	共通	フライアッシュを高置換した環境配慮型コンクリートの開発	濱田　洋志	東亜建設工業株式会社	65
18	港湾	バイオマス燃焼灰を活用した低環境負荷型藻場基盤材	水野　健太	若築建設株式会社	69
19	道路	高速道路支障木発生材の循環型現地処理による作業効率化とコスト削減 ～循環型社会の形成に向け～	稲田　玲夏	株式会社ネクスコ・メンテナンス新潟	73

①生産性向上、インフラ分野の DX

3D LiDARと高解像度カメラを併用した切羽監視システムの開発

佐藤工業株式会社　技術センター　土木研究部　研究員○大江　隆史
技術センター　土木研究部　上席研究員　小山　広光
技術センター　土木研究部　上席研究員　中谷　幸一
シャープ株式会社　研究開発本部　Physical AI 基盤技術研究所　主任研究員　大森　圭祐
研究開発本部　Physical AI 基盤技術研究所　研究員　水木　健光

1　はじめに

山岳トンネル工事の切羽では、機械化や自動化が進む現在においても、装薬作業などで作業員が切羽近傍に立ち入る必要があり、肌落ちや崩落による重篤な災害が懸念される[1)]。切羽監視は、これまで主として切羽監視責任者の目視確認により行われてきたが、肌落ちの前兆となる微小な変位や局所的な変状を目視のみで常時把握することには限界があるため、切羽変位を定量的かつ連続的に把握し、切羽監視責任者の判断を補助する技術が求められる。

これまで著者らは、ステレオカメラを用いた切羽監視システムを開発してきたが、トンネル坑内の照度変化などにより3次元データの取得率が低下し、計測が不安定になる場合があった[2)]。そこで、坑内環境の変化による影響を低減し、切羽面に生じる3次元的な変位を把握するため、3D LiDAR（以下、LiDAR）と高解像度カメラ（以下、カメラ）を併用した切羽監視システムを開発した。

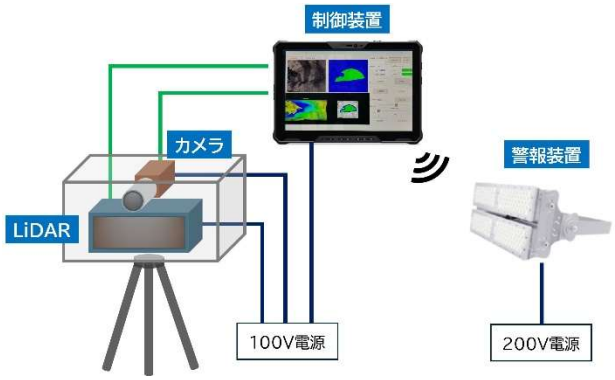
本報では、システムの概要を示すとともに、模擬切羽を用いた変位検出実験について述べる。さらに、実トンネル工事現場における実証試験の結果に基づき、切羽監視責任者による目視監視を補助するシステムとしての適用可能性および今後の課題を示す。

2　切羽監視システムの概要

2．1　システム構成

図－１に本システムの構成概要を、図－２に計測システムの外観を示す。本システムは、LiDAR、カメラ、タブレットPCおよび警報装置で構成される。切羽から7～10m離れた位置にLiDARとカメラを設置して切羽面を連続的に計測し、取得した点群データおよび画像データから算出した変位量をタブレットPCにリアルタイムで表示する。また、変位量があらかじめ設定した閾値を超えた場合には、警報装置の赤色灯を点灯させ、作業員に切羽近傍からの退避を促す。

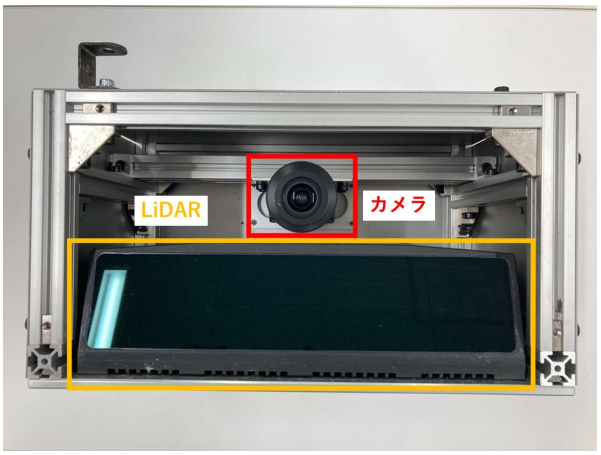
本システムでは、LiDARにより取得した切羽面までの距離情報から切羽軸方向の変位を算出し、カメラにより取得した切羽表面の画像特徴から切羽面内方向の変位を算出する。これらを組み合わせることで、切羽面に生じる前後、上下および左右の3方向の変位を監視する。



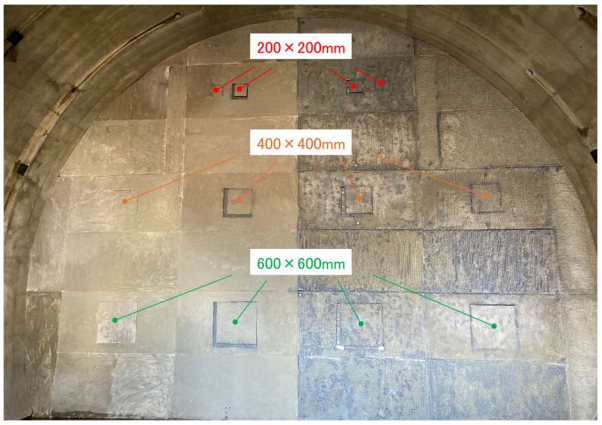
図－１　切羽監視システムの構成概要

２．２　変位検出および障害物除外

変位の算出では、計測開始時または任意の時刻に取得したデータを基準とし、その後に取得したデータとの差分を評価する。点群データには空間方向および時間方向の平均化処理を行い、計測値のばらつきを低減する。また、作業員や施工機械の写り込みによる誤検知を防ぐため、点群データから切羽面とは異なる位置に存在する領域を障害物として判定し、変位算出の対象から除外する。さらに、LiDARとカメラのキャリブレーションを行うことで、障害物領域をカメラ画像上にも反映した。



図－２　計測システムの外観



図－３　模擬切羽と変位部寸法

３　模擬切羽を用いた変位検出実験

３．１　実験方法

実トンネル工事現場への適用に先立ち、制御された条件下における本システムの変位検出性能を確認するため、当社技術センター内に構築した模擬切羽を用いて変位検出実験を行った。図－３に模擬切羽と変位部寸法を、表－１に主な実験条件を示す。模擬切羽は、木製型枠と発泡スチロールを基材とし、その表面に薄層のモルタルを施工した構造である。また，向かって右側にはウレタンを配置することで起伏条件を異ならせた。変位部の背面にはモーターを設置しており、上下、左右および奥行方向に独立した変位を与えることを可能とした。

LiDARによる切羽軸方向変位の算出では、前述のとおり、計測値のばらつきの低減を目的として、平均化処理を行った。表－２に空間方向の平均化処理の条件を示す。なお、平均化実寸法は、LiDARから計測対象までの距離を7.8mとした場合の平均化範囲の実寸を表す。また、時間方向の平均化については、ばらつきの低減効果と変位検出の遅延を考慮して4フレームとした。

表－１　実験条件

項目	条件
変位部寸法	200×200, 400×400, 600×600 mm
変位方向	上下, 左右, 奥行
変位量	10, 30, 50 mm
変位速度	5, 10, 15, 20 mm/s
計測距離	約 7.8 m
平均照度	約 200 lx

表－２　空間方向の平均化処理条件

パターン	平均化サイズ	平均点群数	平均化実寸法(mm)
平均①	1.8° ×1.8°	98.9	245.1×245.1
平均②	2.6° ×2.6°	206.3	354.2×354.2
平均③	3.4° ×3.4°	352.8	463.4×463.4

３．２　実験結果

表－３に切羽面内方向変位の検出結果を、表－４に切羽軸方向変位の検出結果を示す。検出結果は、変位部のみを検出した場合を○、変位部以外の領域を誤検出した場合または変位部を検出できなかった場合を×として整理し、軸方向変位については検出閾値を10mmとした。なお、変位速度による検出結果の差は限定的であったため、全変位速度の結果をまとめて示す。

表－３より、カメラによる切羽面内方向変位については、上下および左右のいずれの方向においても、変位部寸法および表面の凹凸によらず、変位を検出できた。

表－４より、LiDARによる切羽軸方向変位については、変位部寸法が400×400mm以上の場合、多くの条件において変位部を検出できた。一方、変位部寸法が200×200mmの場合には、平均化寸法が大きい条件で不検出となった。これは、変位していない周辺領域の点群が平均化処理に含まれ、算出される変位量が小さくなったためと考えられる。また、変位量10mmでは多くの条件で不検出となり、検出閾値と同程度の変位は、計測誤差や平均化処理による変位量の低減の影響を受けやすいことを確認した。

以上の結果より、切羽軸方向の変位検出では、検出したい変位の規模に応じた平均化サイズおよび検出閾値の設定が必要であると考えられる。

表－３　切羽面内方向変位の検出結果

変位部寸法	凹凸	変位量	変位方向	検出結果
600×600mm	大	50mm	上下	○
			左右	○
	小		上下	○
			左右	○
400×400mm	大		上下	○
			左右	○
	小		上下	○
			左右	○
200×200mm	大		上下	○
			左右	○
	小		上下	○
			左右	○

表－４　切羽軸方向変位の検出結果

変位部寸法	凹凸	変位量	平均①	平均②	平均③
600×600mm	大	50mm	○	○	○
	小		○	○	○
400×400mm	大	50mm	○	○	○
		30mm	○	○	○
		10mm	○	○	×
	小	50mm	○	○	○
		30mm	○	○	○
		10mm	○	×	×
200×200mm	大	50mm	○	○	×
		30mm	○	×	×
		10mm	×	×	×
	小	50mm	○	×	×
		30mm	○	×	×
		10mm	×	×	×

４　実トンネル工事現場における実証試験

４．１　実証試験方法

実施工環境下における本システムの適用性を確認するため、当社施工中の山岳トンネル工事において、装薬作業時を対象とした実証試験を行った。図－４に計測システムの配置状況を示す。切羽から7～10m程度離れた位置にLiDARおよ



図－４　システムの配置状況

びカメラを設置し、切羽面を連続的に計測した。取得した点群データおよび画像データをタブレットPCに入力し、切羽軸方向および切羽面内方向の変位を算出して画面上に表示した。また、作業員や施工機械が計測範囲内に写り込んだ場合には、障害物除外処理により該当領域を変位算出の対象から除外した。

４．２　実証試験結果

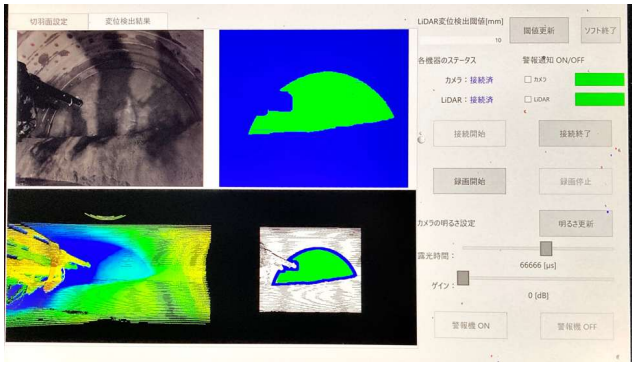
図－５に変位表示画面の例を示す。装薬作業時において点群データおよび画像データを連続的に取得し、切羽軸方向および切羽面内方向の変位算出結果をタブレットPC上に表示できることを確認した。これにより、切羽監視責任者が切羽の変位状況を把握するための補助情報を提供できると考えられる。

また、装薬作業中には、作業員やドリルジャンボなどの施工機械が計測範囲内に写り込む場面が確認された。図－６に障害物除外処理の例を示す。障害物除外処理により、作業員や施工機械に対応する領域を変位算出の対象から除外し、これらの写り込みを切羽面の変位として扱わずに、切羽変位を算出できることを確認した。

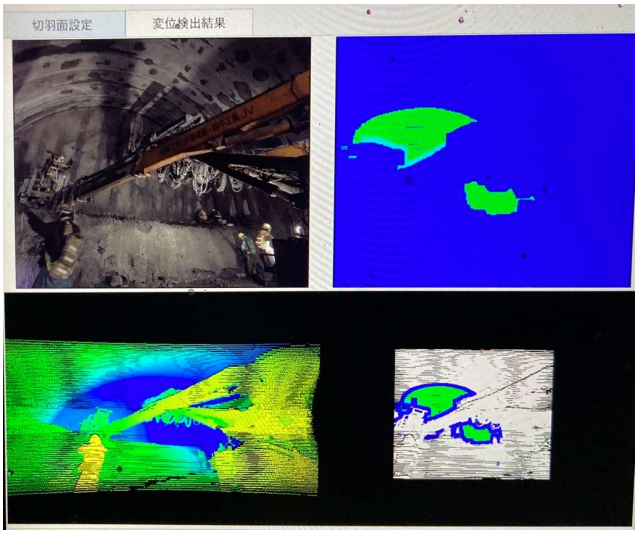
以上より、本システムは、実施工環境下において切羽変位を連続的に表示するとともに、作業員や施工機械の写り込みによる誤検知を抑制できることを確認した。本システムを装薬作業時の切羽監視に導入することで、切羽監視責任者に変位の位置および方向に関する定量的な情報を提供し、異常箇所の早期把握や退避判断を補助できると考える。

５　おわりに

本報では、切羽監視責任者による目視確認を補助するため、LiDARとカメラを併用した切羽監視システムを開発し、模擬切羽を用いた変位検出実験および実トンネル工事現場における実証試験を行った。その結果、本システムは、切羽監視責任者による目視確認を補助するシステムとして、実施工環境下への適用可能性を有することを確認した。今後は、現場計測データを蓄積し、監視目的に応じた異常変位の検出閾値の設定方法を検討するとともに検出精度の向上を図る。また、現場作業への負担を低減するため、設置性および操作性の改善を進める。



図－５　変位表示画面の例



図－６　障害物除外処理の例

参考文献

1)　吉川直孝，他：トンネルの切羽からの肌落ちによる労働災害の調査分析と防止対策の提案，労働安全衛生総合研究所技術資料，JNIOSH-TD-No.２（2012）

2)　大江隆史，他：ステレオカメラを用いた切羽監視システムの開発，土木学会全国大会第80回年次学術講演会，Ⅵ-562，2025.９

環境認識システム等を実装した自律施工型ブルドーザ(SmartDozer®)

清水建設株式会社　土木技術本部　イノベーション推進部　鈴木　正憲
大山　春太郎
○前﨑　貴博
岡田　育也

1　はじめに

わが国の建設現場では、技能労働者の高齢化と若年入職者の減少が同時に進み、オペレータの確保が年々難しくなっている。限られた人員で施工をするには、これまで人手に頼ってきた判断や操作をいかに機械側へ移すかが鍵となる。当社はこの観点から、デジタル技術を活用した施工の自動化・省人化に取り組んできた。

その一環として、当社は現場環境を認識するアルゴリズム[1)]と、施工に必要な走行経路を自動で生成するアルゴリズム[2)]をブルドーザに実装し、無人化施工につながる自律施工型ブルドーザ「SmartDozer®」を開発した。本機は、造成工事等で発生する土砂山の敷均し作業を、人の介在を極力無くし、自律的に施工することを目指したものである。

本稿では、SmartDozer®の開発の背景とシステムの構成を整理するとともに、実際の土木現場に本機を適用して行った敷均し作業の実証内容とその結果について報告する。

2　自律施工型ブルドーザの概要

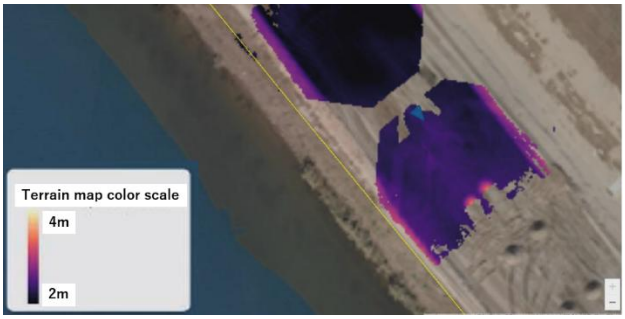
2．1　ハードウェア構成

SmartDozer®は、ブルドーザ上部に外付けのセンサ群を後付けした構成とした（図－１）。周囲の物体や地形の把握にはLiDARとカメラを、車体の位置・姿勢の計測にはGNSSとIMUを用いている。



図－１　ハードウェア構成

これらの機器から得られる情報をもとに、環境認識システムが周辺環境の認識や物体の検知・分類を行い、障害物が接近した際には減速・停止するなどの安全管理を実現している。また、認識結果を用いて自機周辺の地形の高さを表す地形マップ（図－２）を生成し、施工の判断に利用している。



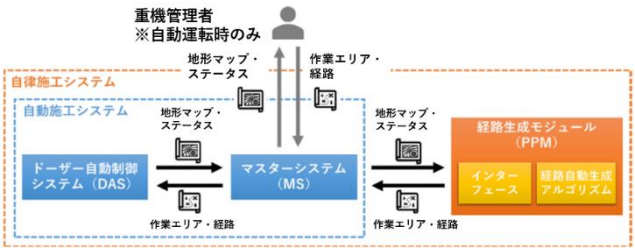
図－２　地形マップ

環境認識システムは、LiDAR で取得した点群とカメラ画像を組み合わせて物体の検知・分類する方式を採用しており、カメラ画像のみを用いる方式に比べて認識性能の向上を図っている。

検知・分類の対象は「人」「車両」「物体等」であり、その結果は操作端末に表示されるとともに、障害物への接近時の減速・停止といった安全制御にも利用される。

２．２　システム構成

自律施工システムは、「自動施工システム」と「経路生成モジュール（PPM）」の２つで構成される（図－３）。



図－３　システム構成

自動施工システムは、ブルドーザ本体の車両制御を担うドーザー自動制御システム（DAS）と、DAS と連携して管理者からの入力指示を受け付けるマスターシステム（MS）から成る。DAS は、車両を運転制御する機能に加えて環境認識システムを搭載し、LiDAR やカメラを通じて周辺を認識しながら、障害物が近接した際に停止する安全機能と、周辺地形の地形マップを構築する機能を備える。MS は、DAS との通信状況や位置情報、認識・識別結果、地形マップを重機管理者に提示するとともに、管理者が指定した作業エリアや移動経路の指示を DAS へ伝える役割を担う。この自動施工システムのみでは、作業エリアや経路の指定は人が判断して行う必要がある。

これに対し、自動施工システムに経路生成モジュール（PPM）を追加した構成が自律施工システムである。PPM が地形マップやステータス等の情報をもとに施工に必要な作業エリアや経路を自ら決定し、MS へ指示を行うことで、従来オペレータが行っていた判断の大部分を代替し、管理者の介在なく敷均し完了まで連続して自律動作することが可能となる。

建設機械の自動化には、個々の動作の自動化から、一連動作の自動化、さらに周辺状況を検知して最適動作を自動で判断・実行する段階まで、複数のレベルが存在する[3)]。従来の自動施工システムは、人が最適動作を指示する段階に相当する。SmartDozer® は、周辺状況の検知と動作の判断までを自動化する段階（自動化レベル３）（表－１）であり、施工の進捗や土砂山の配置が刻々と変化する現場において、周辺環境をセンシングしながら走行経路や作業計画をリアルタイムに自律的に決定することができる。

表－１　建設機械の自動化レベル

自動化レベル	定義	備考	備考
Level 0	自動化なし		
Level 1	個別動作自動化	各動作個別の自動化 最適動作は人が指示する	ICT建機（MC）など
Level 2	Level 1 ＋一連動作自動化	一連動作の自動化 最適動作は人が指示する	
Level 3	Level2＋検知と判断の自動化	周辺状況を検知し、最適動作を自動で判断し実行する	
Level 4	Level3＋トラブル対応の自動化	トラブル対応を自動で実行する	
Level 5	Level4＋現場条件限定の解放	地形、地盤、天候、材料などに限定されない自動化システム	

２．３　経路生成モジュール（PPM）

PPM は、MS と情報をやり取りするインターフェース部と、走行経路を生成する経路自動生成アルゴリズムの２部で構成される。インターフェース部は、入出力情報のデータ形式の変換や、連続動作・待機制御といった自律動作の動作フロー制御を担う。アルゴリズム部では、まず地形マップ上から敷均しの対象となる土砂山を抽出する。

続いて、土をどの方向に敷均すかを『周囲より低い方向へ』『指定した方角へ』といった方針から定め、対応する作業エリアを設定する。最後に、車体の最小旋回半径などの制約を満たすように、この作業エリアに対する走行経路を生成する。

２．４　敷均し自律動作の流れ

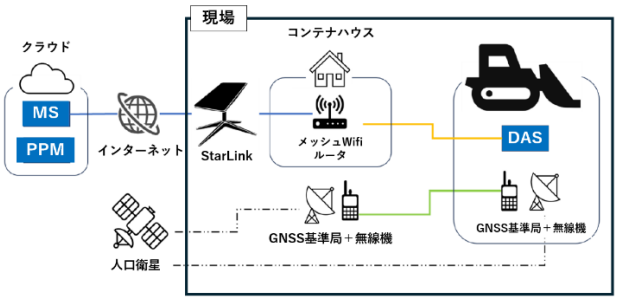
PPM による敷均しの自律動作は、次の流れで進む。まず、LiDAR で計測した地形マップから、設計高さより高いグリッドを抽出し、クラスタリング手法を用いて敷均し対象となる土砂山の位置と個数を推定する。次に、ブルドーザの現在位置に最も近い土砂山を選択し、その周辺に敷均し作業エリアを設定する。作業エリア内では、設計高さに達していない方向を敷均し方向とし、前進と後退を組み合わせた敷均し経路を計画する。

続いて、ブルドーザの現在位置から作業エリアの開始地点までの移動経路を、進入禁止エリアや静的な障害物を回避しつつ生成する。敷均し走行の完了後は、更新した地形マップから設計高さより高い箇所が残存していないかを判定し、残存する場合には追加の敷均し経路を再生成して敷均し作業を繰り返す。この一連の処理を、対象の土砂山が検出されなくなるまで連続して実行することで、管理者の介在なく敷均しを完了する。

３　実現場での実証施工

３．１　実証概要

2025 年に、一級河川の築堤工事における河道掘削エリアの敷均し作業にSmartDozer® を適用し、実現場での有用性を検証した。実証にあたっては、ブルドーザの自己位置推定のための GNSS 基準局・移動局を設置するとともに、衛星通信（Starlink）とメッシュ Wi-Fi（PicoCELA）を組み合わせた通信環境を構築した（図－４）。





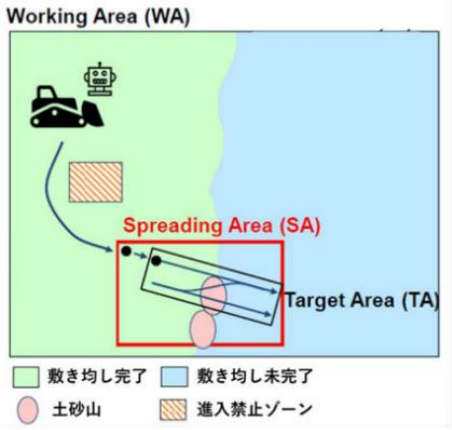
図－４　通信環境

実証施工の評価にあたっては、経路を自動生成して敷均しを実行できることを最低条件（ミニマムサクセス）、複数の土砂山に対し連続的に自動生成・敷均しを行えることを目標（フルサクセス）、敷均し後に土砂山が残らず施工品質が確保されることを上位目標（エクストラサクセス）とする達成基準を設定した。

３．２　施工手順

施工は次の手順で行った。まず、重機管理者が操作端末で施工箇所を作業領域（Working Area）として設定し、有人ダンプにより作業領域内に土砂山を配置する。次に、自律ブルドーザが土砂山を認識し、その周辺に敷均し作業エ

リア（Spreading Area）を設定したうえで、実際に敷均す対象領域（Target Area）とそこまでの経路を経路自動生成アルゴリズムにより生成する。以降、敷均し完了の判定と再敷均しを、対象の土砂山がなくなるまで繰り返す。



図－５　施工手順（イメージ図）

３．３　実証結果

高さ約1.5m、体積約3.5m³の土砂山4つを対象に、土砂山の検出、作業エリアの設定、経路生成・敷均し動作および敷均し完了判定までの一連の自律的連続動作を検証した。マスターシステムから土砂山のおおよその位置を入力するだけで、以降はPPMが最適な走行経路を自動生成し、土砂山の敷き均しから次の土砂山への移行までを連続的に実行した。その結果、自律施工時間約12分で約1,000m²を敷き均し、施工精度は±4～5cmを確保した。また、土砂山を残さず敷均すという最上位の達成基準（エクストラサクセス）を満たした。

続いて、河川敷のうち約120m×20mの範囲の床均し作業を対象に実施工へ適用した。範囲を指定するだけで、施工位置への移動からブレード操作までを自律で行い、自律稼働時間約20分で約2,400m²の床均し作業を完了した。ここでも施工精度は±4～5cmを確保することができた。



図－６　敷均し作業状況

４　おわりに

本稿では、環境認識システム等を実装した自律施工型ブルドーザ SmartDozer® のシステム構成と、実現場での敷均し作業の実証及び床均し工への適用結果について報告した。実証を通じて、環境認識から敷均し動作までの一連の自律施工が実現場で成立し、省人化に寄与することを確認した。今後の建設現場における省人化および施工効率の向上に寄与することが期待される。

謝辞

本研究開発のうち「環境認識基盤システム」の開発は、国土交通省「宇宙無人建設革新技術開発」の助成を受け、ボッシュエンジニアリング株式会社と共同で実施したものである。ここに関係各位に深く感謝の意を表する。

参考文献

１）大貫奈々美 他：自律施工の実現に向けた環境認識基盤の開発と検証，土木学会第 80 回年次学術講演会，VI-524，2025.

２）山本真哉 他：ブルドーザーの自律施工に向けた経路生成アルゴリズムの開発，土木学会第 80 回年次学術講演会，VI-525，2025.

３）橋本 毅 他：建設機械自動化レベル策定に向けて，建設ロボットシンポジウム，04-1，2019.

統合施工管理システムによる土工事の自動化と災害復旧工事への展開

株式会社大林組　西日本ロボティクスセンター　技術開発課係長　　岡本　邦宏

1　はじめに

建設業では、担い手が減少する中でも、災害対応を含むインフラの整備・維持管理に必要な施工力を確保することが求められている。国土交通省は、i-Construction 2.0により建設現場のオートメーション化を進めている[1)]。2025年度の国直轄工事では、自動施工の実施件数が9件（前年度4件）、遠隔施工が41件（同21件）に増加し、自動施工の対象もダム工事以外の河川、道路、海岸工事等へ広がり始めている[2)]。

自動施工を多様な工事へ広げ、土工事全体の生産性を高めるには、建機単体の自動化だけでなく、自動・自律建機を遠隔操縦建機や有人建機と組み合わせ、施工計画に基づいて一体的に運用する必要がある。また、施工実績や品質情報を次の計画へ反映するため、建機の位置・状態及び施工進捗を適時把握するには、これらの情報を継続して授受できる通信基盤が必要となる。

当社は、これらの課題に対応するため、施工計画、複数建機による施工及び品質管理を連携する統合施工管理システムを開発した。2023年の新丸山ダム盛土実証では、施工計画に基づいて複数建機を運用し、施工実績を次の施工計画へ反映するとともに、品質管理帳票を出力した[3)]。その後、適用範囲の拡大に向けて構成技術の高度化を進めている。

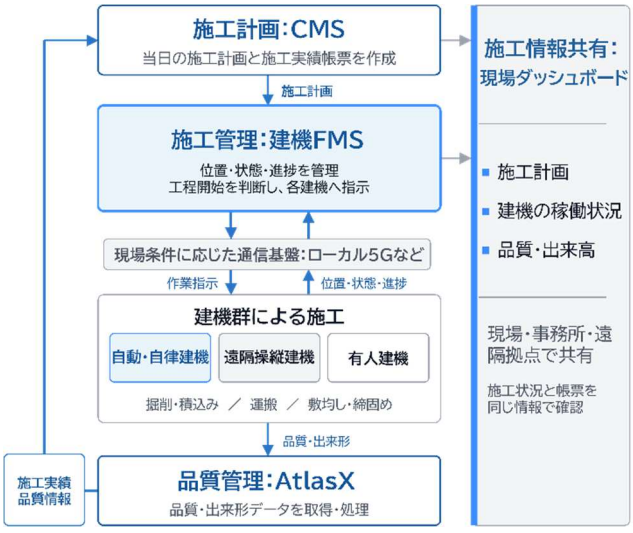
本稿では、統合施工管理システムの構成、新丸山ダム本体建設工事で実施した盛土実証の結果、実証後に進めている構成技術の高度化及び災害復旧工事への展開方針について述べる。

2　統合施工管理システムの概要と実証成果

2．1　開発の目的

土工事は、掘削・積込み、運搬、敷均し・締固め等の複数の作業工程からなり、品質及び出来形を管理しながら進める。土工事全体を自動化するには、施工計画に定めた作業内容と順序に沿って各工程を進め、工程の完了と品質・出来形を確認して次工程へ移行しなければならない。さらに、自動・自律・有人建機など運転方式の異なる建機が混在する場合は、各建機の位置・状態及び作業進捗に応じた作業調整が必要となる。

統合施工管理システムは、施工計画、複数建機による施工及び品質管理を連携し、施工実績を次の施工計画へ反映する仕組みである。図－1に本システムの全体構成を示す。



図－1　統合施工管理システムの全体構成

2．2　新丸山ダム盛土実証の成果

新丸山ダムでは、コンクリート用骨材の製造からコンクリート打設までの一連の工程を集中制御する「自律型コンクリート打設システム」

の導入を目指している。その導入に向けた先行検証として、2023年に土砂をコンクリートに見立てた盛土実証を実施した。

本実証では、統合施工管理システムの主要な構成要素として、当社が開発したConstruction Management System（以下、CMSと称す）、建機Fleet Management System（以下、建機FMSと称す）、AtlasX及び現場ダッシュボードを使用した。各システムは、それぞれ施工計画、施工管理、品質管理及び施工情報共有を担う。また、自動・自律建機と有人建機を組み合わせ、遠隔操縦も実施した。写真－1に新丸山ダム盛土実証の実施状況を示す。



写真－１　新丸山ダム盛土実証の実施状況

元請職員1名がCMSを用いて約20分で施工計画を作成し、作成した計画に基づき、自動・自律建機4台と有人建機6台の計10台を建機FMSで連携させ、1名のシステム管理者が運用した。施工後は、建機FMSで取得した施工実績を次の施工計画に反映した。また、AtlasXで取得した品質管理データを自動処理し、帳票を作成した。以上により、施工計画に基づく複数建機の運用、施工実績の計画への反映及び品質管理帳票の作成までの情報連携を確認した。

施工情報共有は現場ダッシュボードを用い、発注者事務所から施工状況や品質管理・出来高管理の帳票を確認した。また、実証現場から約150km離れた拠点においてバックホウ及びブルドーザを遠隔操縦し、遠隔地からでも建機FMSによる管理と遠隔操縦が可能であることを確認した。写真－２に建機FMSによる施工管理状況を、表－１に盛土実証の運用実績及び生産性向上効果を示す。



写真－２　建機FMSによる施工管理状況

３　工事への適用に向けた技術の高度化

３．１　自動・自律建機の高度化

盛土実証施工での成果を基盤として、個々の建機の機能向上に加え、現場条件に応じて選択

表－１　盛土実証における運用実績及び生産性向上効果

システム名称	機能	生産性向上効果	
		対象	内容
CMS	施工計画	施工管理者(元請)	元請職員1名が20分程度で実施
	帳票自動作成	施工管理者(元請)	労働時間ベースで約0.13人/日削減
AtlasX	盛土品質管理	施工管理者(元請)	品質管理業務1回当たり1名削減
建機FMS	複数建機・車両の施工管理・工程連携	施工管理者(元請)	元請職員1名で建機10台管理
		技能者	自動・自律運転の建機・車両を4台導入し、オペレーターを4人削減
現場ダッシュボード	遠隔臨場 施工情報共有	施工管理者(元請) 発注者ほか	現場移動2カ所/日削減の場合、 一人当たり22時間/月の業務時間削減

できる建機と施工方法の拡充を進めている。

自律バックホウでは、ナンバープレート認識によりダンプごとの積載条件を判別し、必要に応じてトラックスケールと連携することで、積込み量を調整する機能を追加した。また、複数方向の掘削、土砂の横寄せ・引寄せに対応し、材料の仮置きなど、対応可能な作業を増加した。さらに、大型機を用いた2号機を開発し、適用できる機種の範囲を拡大した。写真－３に自律バックホウを示す。



写真－３　自律バックホウ

自動ブルドーザは、設定した施工条件に基づいて走行とブレード操作を自動で行う。現在は、あらかじめ定めた動作を行う自動運転から、地形の状態等に応じて作業を調整する自律運転への高度化を進めている。写真－４に自動ブルドーザを示す。



写真－４　自動ブルドーザ

また、現場ごとに必要となる建機構成が異なることから、自動施工に対応する建機の拡充を進めている。その一環として、自動ホイールローダと自動アーティキュレートダンプを新たに開発し、現場条件に応じた建機構成の選択肢を広げた。

３．２　建機FMSの高度化

建機FMSは、施工計画に基づいて各建機に作業を指示し、位置・状態・作業進捗及び工程の開始条件を一元管理することで、自動・自律・遠隔操縦・有人建機など、運転方式の異なる複数建機の作業工程を連携させる施工管理システムである。現場条件や利用可能な建機に応じて建機を組み合わせ、前後工程をつなぐ役割を担う。

建機FMSでは、これまでの実証で個別に整備してきた機能を見直し、建機や現場が変わっても共通して利用できる基本機能と、現場条件に応じて変更する設定機能に整理した。具体的には、機種ごとに異なる制御指令や状態情報を共通の仕組みで扱うとともに、管理対象建機、作業場所、走路及び工程の組合せ等を現場ごとに設定できる構成とした。併せて、管理対象建機の追加や初期設定を容易にし、多様な施工条件に対応できるよう高度化を進めている。

適用範囲の拡大に向け、建機FMSと外部システムで設備状態や作業条件を共有し、建機以外の設備を含む施工にも対応できる構成とした。また、長距離を移動する自動アーティキュレートダンプを管理対象に加え、効率的な運用を検証している。写真－５に建機FMSで管制中の同ダンプを示す。



写真－５　自動アーティキュレートダンプ

３．３　通信技術の高度化

統合施工管理システムで複数建機を連携させるには、建機FMSからの作業指示と、各建機の位置・状態・作業進捗を安定して授受できる通信環境が必要となる。

新丸山ダム盛土実証では、自動・自律建機及び遠隔操縦建機の通信手段として、実証環境におけるローカル5Gの適用性を確認した。その後は、施工の進行に伴って変わる打設箇所へダムコンクリートを自律的に運搬・打設するため、自律運転ケーブルクレーンの通信基盤にもローカル5Gを適用している[4)]。

当社の自動運転開発では、建機の配置・移動範囲、地形及び周辺の電波利用状況を踏まえ、適用する工事ごとに通信基盤を構築している。通信速度、必要な通信範囲及び移動中の通信継続を技術面の設計条件とし、現場条件に応じて通信方式を選定するとともに、基地局、アンテナ、車載端末及び有線ネットワークを組み合わせている。運用面では、通信状態の監視方法と、通信断を検知した場合の連絡・復旧手順を整備している。

４　災害復旧工事への展開

災害復旧工事では、地形や施工範囲等が変化することに加え、余震や豪雨による二次災害への警戒が必要となる。また、人員や建機が限られ、作業場所、道路及び通信環境にも制約が生じやすい。このため、人が危険区域に立ち入る機会を抑えながら、限られた人員で施工を継続できる仕組みが求められる。

そこで、人が二次災害のおそれがある施工区域に立ち入る機会を抑えるため、自動・自律建機及び遠隔操縦建機の導入を進めている。あらかじめ作業内容を設定できる作業には自動・自律建機を、現場の状況に応じた判断を要する作業には遠隔操縦建機を用いる。これらの建機を施工区域外の安全な管理拠点から運用するため、長距離無線通信を構築するための通信技術の導入も進めている。

今後は、能登半島地震に伴う災害復旧工事を対象に、統合施工管理システムによる自動施工の現場検証を行う。省人化、生産性及び安全性の観点から実用性を評価し、得られた知見を災害復旧工事への展開に生かす。

５　おわりに

本稿では、統合施工管理システムの構成、新丸山ダム盛土実証の結果、実証後に進めている構成技術の高度化及び災害復旧工事への展開方針について述べた。同実証では、施工計画に基づいて複数建機を運用し、施工実績を次の施工計画へ反映するとともに、品質管理帳票を出力した。実証後は、建機の機能向上と対応機種の拡充、建機FMSの機能拡張及び通信技術の高度化を進めている。今後は、統合施工管理システムを様々な現場条件でも活用できるよう、適用対象を広げて検証を重ねる。

参考文献

1）国土交通省：i-Construction 2.0～建設現場のオートメーション化～，2024.4
2）国土交通省：i-Construction 2.0の主な取組成果と今後の予定〈詳細〉（別紙2），2026.4
3）岡本邦宏ほか：統合施工管理システムの導入による土工事の自動化と生産性向上，建設マネジメント技術，No.565，pp.59-66，2025.6
4）間地健太：ケーブルクレーンによるダムコンクリート打設作業の自律化，クレーン，第64巻，第3号，2026.3

重錘均し管理システム「４D-G・Ｖｉｓｉｏｎ」

株式会社本間組　土木事業本部技術部　技術開発研究室　係長　○安藤　恭平
土木事業本部土木部　工事課　係長　　佐藤　駿
土木事業本部土木部　工事課　係長　　近藤　礼侑

１　はじめに

国土交通省は，建設現場における少子高齢化に伴う労働者減少を上回る生産性向上を目指し，i-Constructionを推進している．陸上分野では2016年度からICT土工が開始され，港湾分野でも2017年度からICT浚渫工を皮切りに，2020年度よりICT基礎工等へと対象工種を拡大している．現在，ICT建設機械による施工履歴データを用いた出来形管理が推進されており，陸上分野では「土工」「河川浚渫工」などで基準類が整備され，港湾分野でも2024年度より「海上地盤改良工」「基礎工」で運用が開始されている．

施工履歴データは，施工中の作業装置位置をGNSSやセンサー，TS（トータルステーション）等によりリアルタイムに計測・記録するもので，このデータを活用することで出来形の面的把握や数量算出が容易になり，従来の人力による直接計測が不要となる．また，施工と同時にデータが記録されるため，結果がただちに確認でき，次工程へと進めることが可能となる．

本報告では，自社開発した重錘均し管理システム「４D-G・Ｖｉｓｉｏｎ」の施工履歴データを用いた，港湾工事における基礎工の出来形管理事例を報告する．

２　基礎工の施工方法

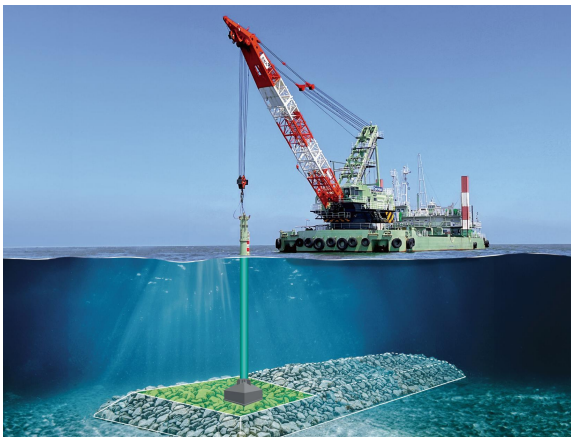
港湾工事において，防波堤や岸壁のケーソンを据え付けるための基礎工は，ガット船や起重機船で基礎捨石を海上運搬し，GNSSの情報をもとに投入位置や投入量を管理しながら水中に投入する（写真-１）．

基礎捨石は投入しただけでは不陸があり，ただちにケーソンを据え付けることができないため，潜水士による均しや機械式均し船による重錘（機械）均しを行い，捨石の天端を平坦に仕上げる必要がある．

機械式均し機による施工は，起重機船で吊り下げた重錘をクレーン操作で自由落下させ，基礎捨石天端を締固め所定の高さに均す方法であり，人力均しと比較して広範囲を効率的に施工することができる（図-１）．



写真－１　捨石投入状況



図－１　重錘均し施工イメージ

捨石均し完了後には水中で出来形確認が必要であり，従来は潜水士による計測作業が不可欠であった．このため，出来形管理の省力化が課題となっている．

3　基礎工における出来形管理手法

従来の出来形管理手法では，天端高はレベルや水中水準器を用い，幅・延長はスチールテープ等で計測するが，いずれも潜水士による作業であり，潜水士の負担が大きく施工管理にかかる労力の削減が課題となっている．

近年，港湾土木工事の大型化・大水深化に伴い，港湾構造物の大量急速施工や潜水作業時間が制限される大水深への適応が求められている．そのため，作業効率の向上，厳しい気象海象条件下の施工，潜水作業時間削減への対応等が要求されており，本工法では，施工時の自動追尾式TSにより記録された施工履歴データを出来形管理に活用することで，施工および出来形管理の効率化を図ることとした．

4　現場適用事例

4．1　工事概要

施工履歴データを用いた出来形管理手法を適用した工事を表―１に示す．

表―１　工事概要

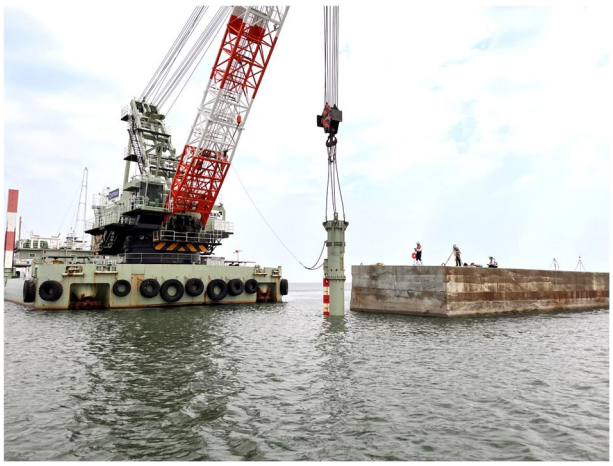
工事名	令和６年度　新潟港（西港地区）航路泊地付帯施設築造工事
工　期	令和７年３月26日から令和７年12月19日
発注者	国土交通省北陸地方整備局
受注者	本間・不動テトラ特定建設工事共同企業体
主要工種	基礎工，堤体工，根固工，消波工，上部工
施工数量	施工延長 L≒100m 基礎工　捨石投入 V=2,073m^3 基礎工　捨石均し（本均し）A＝1,355m^2 基礎工　捨石均し（荒均し）A＝547m^2 本体工　ケーソン据付 N=3 函

本工事では，基礎工のうち本均し（±5cm）を対象に施工履歴データを活用した出来形管理を実施した．

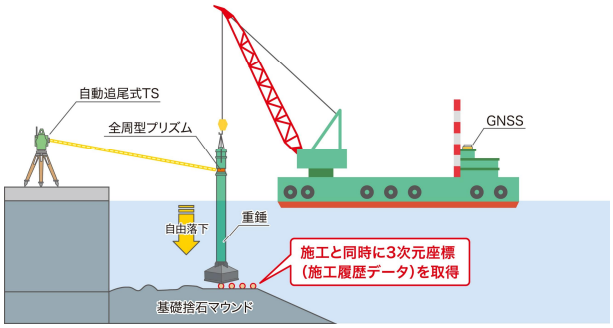
本工事はICT活用工事（発注者指定型）として発注され，当初設計では基礎工は人力均しだったが，前記の理由から機械均しを採用し，施工履歴データによる出来形管理要領を適用し，施工を実施した（写真-２）．

4．2　施工方法及び管理手法

基礎工の施工には，重錘均し管理システム「４D-G・Ｖｉｓｉｏｎ」を活用した．これは陸上に設置した自動追尾式TSと重錘の全周型プリズムを用い，リアルタイムに転圧時の重錘底面の3次元座標（施工履歴データ）を取得するものである（図-２）．



写真－２　施工状況

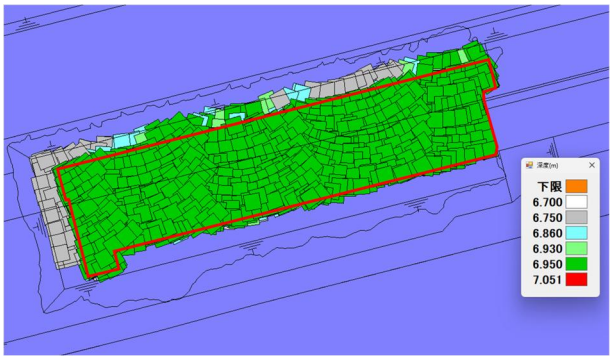


図－２　システム概要図

本システムでは，自動追尾式TSにより取得した重錘底面中心座標を施工履歴データとして記録する．機械均し作業では重錘底面が捨石マウンドに接触した状態で転圧を行うため，取得された座標は均し後の地盤高を表すデータとして活用できる．

しかし，取得されるデータは重錘中心位置のみであるため，出来形評価に利用するには重錘底面形状を考慮した補正処理が必要となる．そこで本システムでは重錘底面寸法を考慮して座標を面的に展開し，出来形評価用点群データを生成した．

なお，基礎工における出来形管理項目は「幅」「延長」「基準高」である．このうち基準高は生成した出来形評価用点群データから評価を行い，幅および延長は施工管理システム上に表示される施工履歴を用いて確認した．施工履歴が設計施工範囲を不足なく覆っていることを確認することで，幅および延長の出来形管理を行った（図－３）．これにより，全ての出来形管理項目を施工履歴データに基づいて確認することが可能となった．

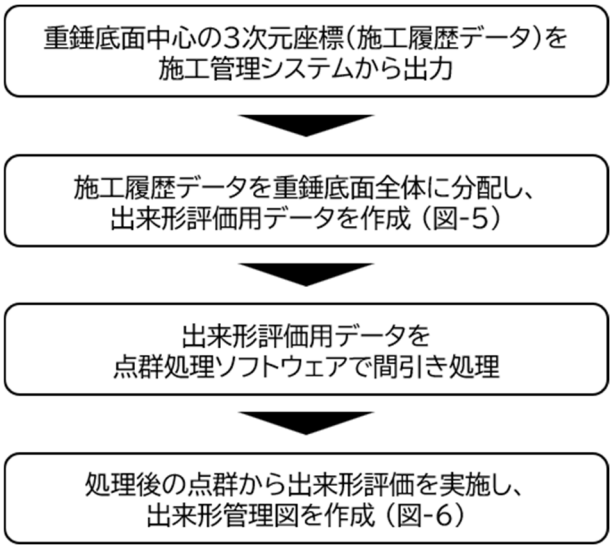


図－３　施工管理システム画面（完了時）

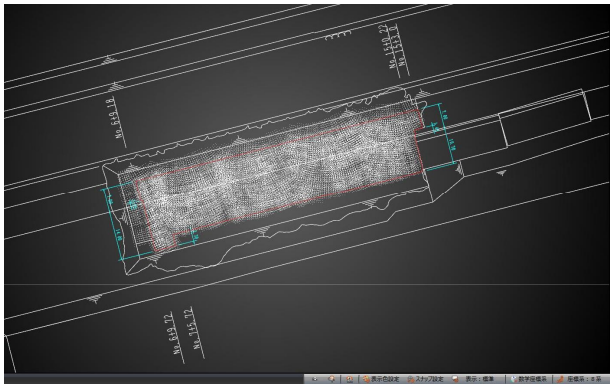
４．２．１　出来形評価用データ作成

出来形管理要領では，施工履歴データを用いた出来形評価において，施工範囲を面的に網羅する十分なデータ密度が求められる．本システムでは，取得した施工履歴データを出来形評価用点群データへ変換し，欠測箇所や異常値の有無を確認した上で出来形評価を実施した．

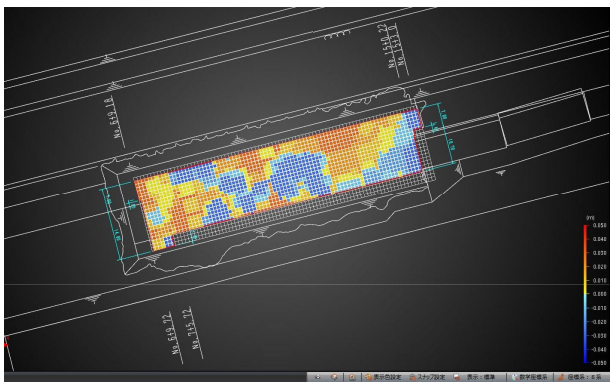
取得された座標は図－４に示す手順で処理し，出来形評価用データとして活用した．



図－４　施工履歴データ処理フロー



図－５　出来形評価用点群データ



図－６　出来形評価結果

また，出来形評価用データの作成により，施工範囲全体を面的に評価することが可能となった．従来の管理手法では代表点による確認が中心であったが，本手法では施工全体の標高分布を可視化できるため，局所的な凹凸や未施工箇所の確認が容易となった.

４．３　適用効果

本工事での施工履歴データを活用した出来形管理方法と従来の出来形管理を比較した結果を表-２に示す.

表－２　従来手法との比較

項目	従来手法	施工履歴ﾃﾞｰﾀ活用	増減
出来形計測	2 日	0 日（不要）	-2 日
出来形調書の作成	2 日	1 日	-1 日
発注者検査	1 日	0 日（机上検査）	-1 日
合計	5 日	1 日	-4 日

施工面積にもよるが，従来は施工完了後に潜水作業を伴う水中水準器による出来形計測に2日，出来形調書の作成に2日，発注者検査に1日と，施工完了から次工程までに5日程度の期日を要していた．本手法では，出来形計測および発注者現場検査が不要（机上検査）となり，出来形調書の作成も1日（実作業時間5時間）程度で完了することができた.

また，本手法では施工中に管理画面上で施工状況をリアルタイムに確認できるため，均し不足箇所や過転圧箇所を即座に把握することが可能であった．その結果，施工完了後の手戻り防止にも寄与した.

さらに，従来必要であった潜水士による出来形計測作業を削減できたことから，安全性向上および潜水作業時間の縮減という効果も確認された.

また出来形評価用データによる判定の結果，出来形管理基準を満足したことを確認できた.

４．４　考察

本工事では，施工履歴データを活用することで潜水士による出来形計測を省略し，施工と出来形管理を一体化することができた．特に施工完了後すぐに出来形確認が可能であり，次工程への移行判断を迅速に行えたことは大きな効果であった.

一方で，施工履歴データを活用した出来形管理を適切に実施するためには，TSの視通確保や計測精度の維持が重要となる．特に港湾工事では施工機械や作業船の配置により視通条件が変化するため，計測環境に応じた機器配置の検討が必要である.

今回の適用により，施工履歴データを活用することで施工と出来形管理を一体的に実施できることを確認した．今後は適用事例を蓄積し，さらなる運用効率化と適用範囲の拡大を図っていきたい.

５．まとめ

本報告では，重錘均し管理システム「４Ｄ-Ｇ・Ｖｉｓｉｏｎ」を活用した施工履歴データによる出来形管理の事例を紹介した．施工と同時に出来形計測が可能となり，従来手法と比べ約4日の工程短縮を実現できた．今後もこれらの実績を踏まえ，建設現場での更なる生産性向上に向けてICT活用の取り組みを継続していきたい.

謝辞

本稿を執筆するにあたり，本工事の施工に携わった協力会社をはじめとする関係者の皆様，またお忙しい中ご協力を頂きました国土交通省北陸地方整備局の皆様に心より感謝申し上げます.

i-Construction2.0×遠隔施工
～遠隔施工における現場の生産性向上～

株式会社岡部　土木ソリューション部　主任　　上田　悠輔

1　はじめに

建設産業では、生産年齢人口が2040年度には2020年度比で約2割減少すると予測されているほか、近年では、自然災害の激甚化・頻発化や社会資本の老朽化が顕著となっており、建設現場を取り巻く環境は一層厳しさを増している。こうした背景を踏まえ、国土交通省が提唱するi-Construction2.0では、国民生活や経済活動の基盤となるインフラ整備・維持管理を将来にわたって持続的に実施していくため、2040年度までに建設現場の省人化を3割、すなわち生産性を1.5倍向上させることを目標として掲げている。

本工事ではi-Construction2.0の根幹である「建設現場のオートメーション化」の一環として「建設機械の遠隔施工」を砂防工事において行ったことから、遠隔施工に係る生産性向上に資する取組みを本稿により紹介する。

2　遠隔施工における問題と課題

遠隔施工は、遠隔用建設機械に装着したカメラから伝送された映像を操作室内のモニターディスプレイに表示させ、操作者が伝送映像を視認しながら操作リモコンにより建機を遠隔操縦するものである。（図-１）

人の立ち入ることのできない危険な条件化で作業員の安全を担保した上での建機作業が可能という利点がある一方、オペレーターが建機キャビン内から目視で施工対象を視認できる通常の有人施工に比べ、遠隔施工は映像を介した操作となるため奥行きや距離の把握がしづらいなど、施工時の視認性に制約が生じる。特に、建機の転倒災害防止を考慮すると、建機足元の地形や姿勢を十分に確認しながら、より慎重な操作が求められることとなり、作業速度や施工精度が低下するという問題が現状残っていることも事実である。

前述より、本工事では「作業速度及び施工精度低下の抑制」を課題に据え、遠隔施工の効率化に資する取組みを検討・実施した。事項より、その内容を記述する。



図-１　遠隔操作室からの建機遠隔操作風景

3　遠隔施工における視認性の強化

遠隔用建機に装着するカメラは、アーム部及びキャビン内に装着し、両カメラの伝送映像を基にバケット位置や作業対象箇所までの距離を視覚化するものが基本である。しかし、前述2点のカメラのみでは、建機前方の視認は可能となるが、建機左右及び後方の視認ができない。そこで、本工事ではアーム部及びキャビン内のカメラ装着に加え、以下の対策により視認性を強化し、効率化の向上及び安全性確保に努めた。

３．１　サラウンドビューカメラの導入

建機四方にサラウンドビューカメラを装着し、全方向の視覚補助として活用。俯瞰的な映像を取得することができ、アーム及びキャビンカメラのみでは網羅しきれなかった左右後方の視覚化を可能とした（図-２）



図-２　遠隔用建設機械　装着カメラ詳細

３．２　移動式映像専用建設機械の活用

遠隔用建機に装着された各種カメラで伝送可能な映像は建機周辺の映像に限られ、死角が発生する。本工事では、遠隔操作用0.45m3級バックホウのバケット部に固定カメラを設置し、移動式映像専用機として使用。人の立ち入ることのできないエリア内における任意箇所の映像取得が可能となり、視認性の強化に効果を発揮した。（図-３）（図-４）



図-３　移動式映像専用機(0.45m3級バックホウ)



図-４　移動式映像専用機　取得映像

４．ICT併用による遠隔施工の取組み

本工事において遠隔施工の対象となる工種は、「掘削工」「異形ブロック据付工」「巨石積み」の3工種であった。2項で記述したとおり、遠隔施工により施工速度や精度の低下が懸念される中、本工事ではICTを全面活用することで問題の解決を図った。

４．１　MCを併用した土工・巨石積み

掘削工及び巨石積みにおいてMC（マシンコントロール）技術を導入し遠隔施工と併用。MC技術は、施工したい箇所の設計データと現地盤データとの差分に基づき、油圧の制御により操作を半自動で行う技術である。油圧の制御により、過掘りを防ぐことができ、オペレーターの熟練度を問わず精度の高い施工が可能となる。（図-５）

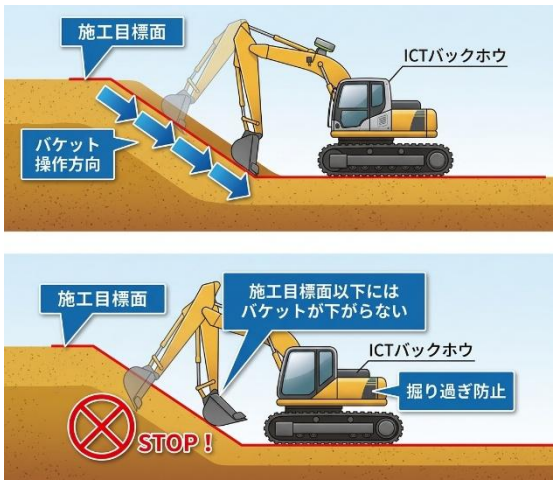


図-５　マシンコントロール　概要図

人の立ち入ることができない危険エリアという条件下で、丁張の設置が不可能である中、規格を満足する施工を行うため今回ＭＣ技術の導入に至った。効果として、掘削工については、バケット爪先が設計面に到達した段階で油圧が制御されるため、遠隔施工においても有人施工と遜色ない出来形を確保することができた。（図-６）

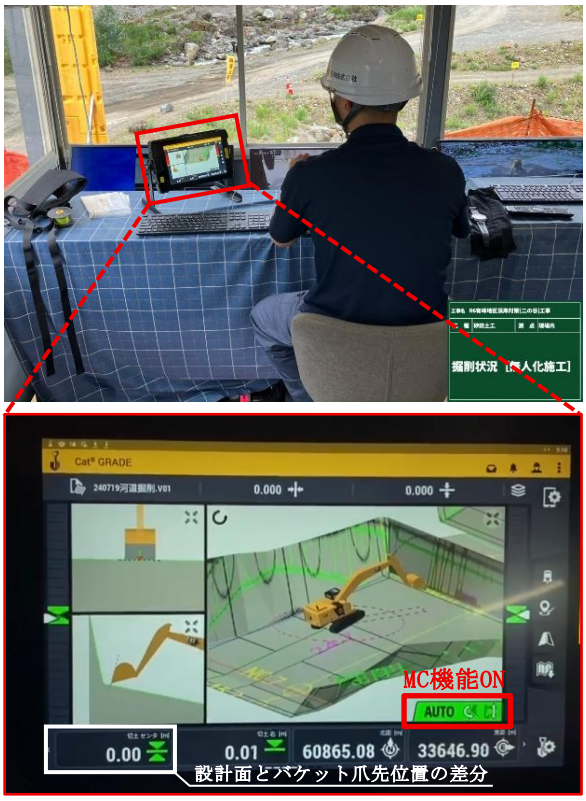


図-６　MC技術を活用した掘削工(遠隔施工)

巨石積みついては、有人施工でも難易度が高く熟練したオペレーターが必要であり、遠隔施工となるとより高度な技術力が求められる。本工事では、掘削工同様MC技術を活用し、巨石の表面（最突出部）で構成した3次元設計面に巨石を合わせながら施工。実施効果として、遠隔施工による巨石積みにおいても遠隔操作者の熟練度に左右されず、作業の簡易化・作業効率の向上に寄与した。又、巨石の不揃いもなく見栄えの良い巨石積みが可能となり、施工精度低下の抑制に効果を発揮した。（図-７）

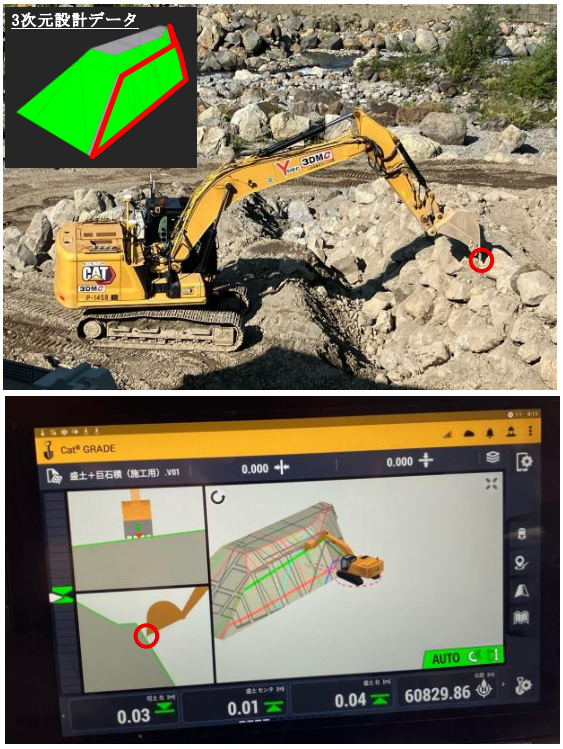


図-７　MC技術を活用した巨石積み(遠隔施工)

４．２　異形ブロック据付(遠隔施工×MG)

異形ブロックの据付箇所は、遠隔施工エリア内であり、異形ブロックの据付機械及び運搬車両のオペレーター、吊り作業のための手元作業員は施工箇所に立ち入ることができない。よって、施工時は遠隔建機に専用把持装置を装着し、対象箇所へ据付を行う。（図-８）



① 専用把持装置　② 把持装置挿入・吊込

③ 所定位置へ誘導　④ 方向調整・据付

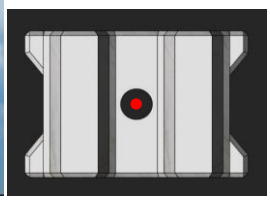
図-８　異形ブロック据付手順（遠隔施工）

もちろん、据付位置の測量作業も不可能であることから、本工事ではブロック据付精度や作業効率を確保するため、「ポイント誘導ガイダンス」及び「方向誘導ガイダンス」2点のMG（マシンガイダンス）技術を導入し施工を行った。

「ポイント誘導ガイダンス」は、ICT活用により把持装置先端にXY座標を取得させ、事前登録した設計座標位置へ把持装置先端を誘導するシステムである。（図-９）



●位置のXY座標を取得。







○ICT専用モニターに表示されるガイダンスに従い、所定の位置にブロックを誘導。

図-９　ポイント誘導ガイダンスシステム

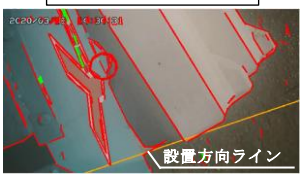
2点目の「方向誘導ガイダンス」は、ポイント誘導により中心位置を合わせた後、ブロック自体の回転方向を誘導するシステムである。

事前設定した設置方向ラインとブロック各辺の方向が合致しているかを判定するもので、一致すると緑色、不一致だと赤色で表示され、回転方向が一目瞭然となる。（図-１０）

以上、2点のガイダンスシステムにより、測量作業を要することなく所定の位置へ異形ブロックを据付けることが可能となり、据付精度の確保、作業効率の向上に寄与する技術であった。

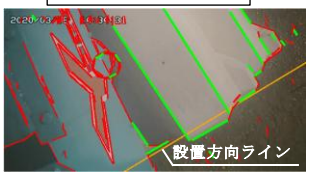


設置方向　不一致時



✓ 直線部の輪郭が“赤色”に

設置方向　一致時



✓ 直線部の輪郭が“緑色”に

図-10　方向誘導ガイダンスシステム

５．終わりに

ここまで紹介した遠隔施工における視認性の強化及びICT併用の取組みは、課題として挙げていた「作業速度及び施工精度低下の抑制」の達成に大きく貢献するものであった。

加えて、本工事ではBIM/CIMの運用や電子化・ペーパーレス化を推進し、工事全体としての生産性向上を強く実感できる工事であった。

今後もi-Construction2.0が掲げる理念に沿って、更なる生産性向上を図るとともに安全意識をより一層高め、次のプロジェクトに臨む所存である。

参考文献

1）国土交通省：i-Construction2.0
～建設現場のオートメーション化～

橋梁予備設計における三次元モデルの活用

東京コンサルタンツ株式会社　富山支店　構造部　高橋　英樹

1　はじめに

令和6年能登半島地震により，のと里山海道をはじめとする主要な道路網に甚大な被害が生じ，緊急輸送路としての幹線道路の重要性が改めて認識された。本業務で対象とする主要地方道 金沢田鶴浜線 徳田１号橋は，のと里山海道の4車線化事業に位置づけられる橋梁であり，山岳部の複雑な地形条件下で，走行の安全性を確保しつつ構造・施工・コストの観点から最適な橋梁計画を検討することが求められた。

しかし，山岳部特有の地形条件は二次元図面のみでは関係者間でのイメージ共有が難しく，本業務ではCIMによる三次元モデルを活用し，発注者との合意形成の迅速化を図った。

2　徳田１号橋の概要

徳田１号橋は，石川県羽咋郡志賀町に位置する主要地方道 金沢田鶴浜線（のと里山海道）の4車線化事業の一環として計画される橋梁である。本路線は既に2車線で供用中のⅠ期線に隣接して，4車線化のためのII期線を新設するものであり，徳田１号橋はこのII期線区間に架かる橋梁として位置づけられる（図－１）。

架橋位置は山岳部の谷部にあたり，Ⅰ期線施工時に形成された盛土上にⅡ期線の橋脚を設置する計画となっている。そのため，現況の地形はⅠ期線盛土により改変されており，橋脚位置直下には，施工前の原地形，支持層および盛土構造が複雑に重なり合っている。

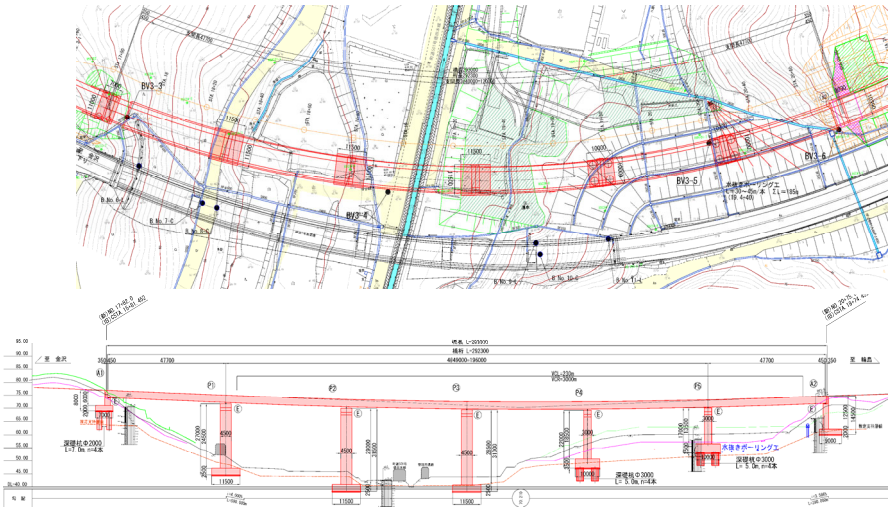
道路線形は平面曲線半径R＝410m程度の曲線区間に橋梁が位置し，縦断勾配は最急4%区間を含む線形となっている。橋梁内の道路縦断線形のサグの修正を指摘し，道路設計と同時進行で設計した。

橋台は起点側が逆Ｔ式橋台（深礎杭），終点側は原地形の傾斜と支持地盤を踏まえた位置・構造形式とし，橋脚は谷部の町道と徳田川の制約条件を満たす高さ30mを超える高橋脚である。道路や河川の制約条件と現況地形，Ⅰ期線盛土および道路線形との関係を的確に把握し，橋梁の構造形式や施工方法を考慮することが，本業務における予備設計上の重要な課題となった。

3　設計での三次元モデルの活用

3．1　盛土上の下部構造の支持層への根入れ

徳田１号橋の橋脚は，Ⅰ期線施工により形成された盛土上に設置する計画である。橋脚位置



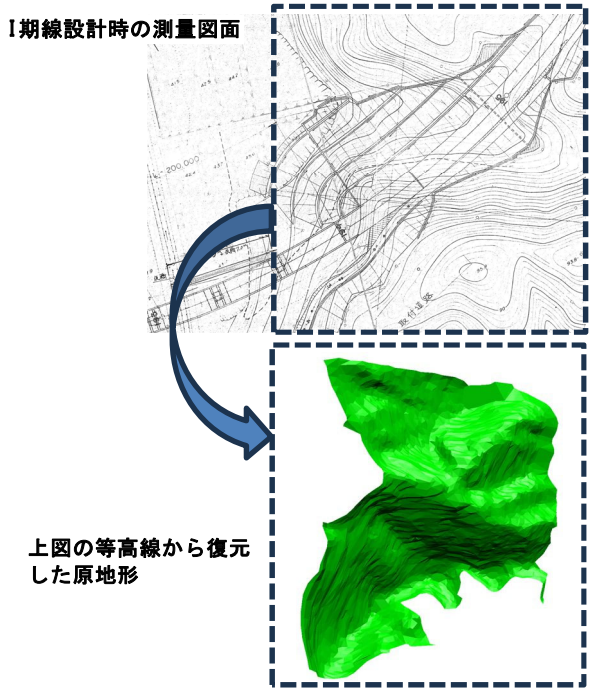
図－１　橋梁一般図

直下には，現況地形（Ｉ期線盛土），Ｉ期線施工前の原地形および支持層が複雑に重なっており，二次元図面（平面図，縦断図，横断図およびＩ期線図面）を個別に確認するだけでは，基礎杭の根入れ状況を正確に把握することが困難であった。

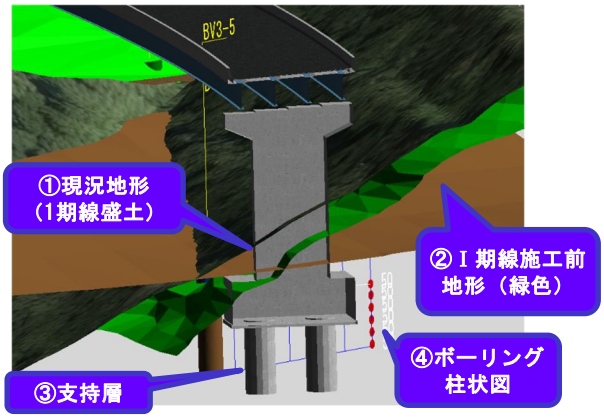
そこで，Ｉ期線設計時の測量図面の等高線より，のと里山海道ができる前の地形を三次元モデル化し（図－２），さらに，ボーリング柱状図に基づき支持層を三次元モデル化して，地盤の状態を視覚的に確認した。

Ｉ期線施工時の盛土は，想定外の大規模地震時に崩壊する可能性があることから，橋脚フーチング底面はＩ期線施工前の原地盤地形以下となるよう設計した。したがって，基礎杭の設計にあたっては，橋脚フーチング底面を原地盤面（Ｉ期線施工前の地盤）以下とすること，原地盤面に対する斜面上の杭として設計することの２点を条件とした。

これらの検討の結果，三次元モデルにより複数の図面情報を１つのデータに統合して確認する（図－３）ことで，現場条件の共有および確認作業を短縮できた。



図－２　原地形の三次元モデル化

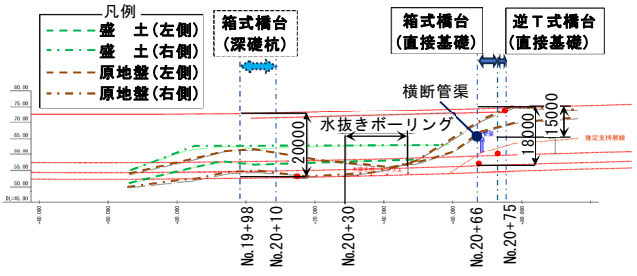


図－３　盛土上の橋脚（横断図）

３．２　橋長検討

起点側のA1橋台はＩ期線橋台に近接するので，既設橋台に対して，近接施工の影響がない位置かつ既設橋台の安定性に影響しない位置とし，逆T式橋台（深礎杭）が採用された。

終点側は原地盤面をもとに橋台の高さで橋台位置が決まる。橋台は高さ15m以下を逆T式橋台とし，高さ15～20mを箱式橋台とする。原地盤は，図－４のとおり，No.19+98付近で高さ20mとなり，盛土部で箱式橋台が適用できる。原地盤高はNo.20+10背後で高さ20mを超えて推移した後，終点側に向けて橋台高が次第に低くなり，No.20+75付近で橋台高15m以下となることから，逆T式橋台が採用できる。No.20+30からNo.20+66の間の盛土内には既設横断管渠や盛土の安定を保つための水抜きボーリングが設置されており，その機能の確保が必要である。橋長の決定にあたっては，全区間を橋梁とする案（全区間橋梁案　A2橋台No.20+75）と終点側を盛土構造とする案（終点側盛土案　A2橋台No.19+98）の２案を比較検討した。



図－４　A2橋台が設置できる範囲

全区間橋梁案は起点側を逆Ｔ式橋台（深礎杭），終点側を逆Ｔ式橋台（直接基礎）とする構造であり，終点側盛土案は終点側橋台を箱式橋台（深礎杭）とし，橋軸直角方向への地形の傾斜に対応する構造とした。

両案を盛土の安定性，耐震性，施工性，維持管理，周辺環境および経済性の観点から比較した。経済性はほぼ同等であり，盛土の安定性と

耐震性から全区間を橋梁とする案を選定した。Ⅰ期線の橋梁より橋長がかなり長くなることから，両案について三次元モデルを作成し，現地の地形と重ね合わせて可視化した（図－５）。終点側盛土案は，建設発生土を有効利用できる一方，広範囲の用地取得が必要となる。この用地境界の位置や盛土による周辺への圧迫感を三次元モデルにより可視化したことで，関係者間で現場条件を共有し，橋長に関する迅速な合意形成につなげることができた。



（a）全区間を橋梁とする案（全区間橋梁案）



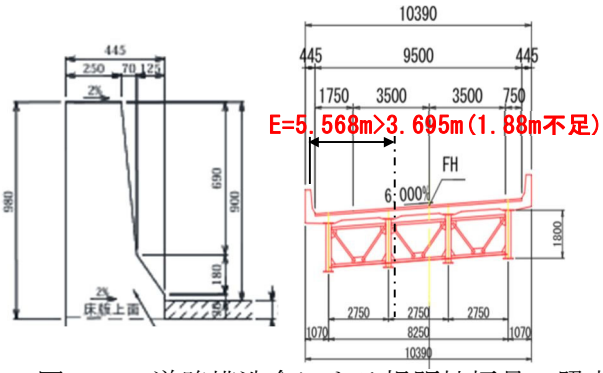
（b）終点側盛土案

図－５　三次元モデルによる橋長比較

３．３　曲線橋における視距の視覚化

本橋は平面曲線区間に位置することから，道路構造令に基づく視距の確保について検討した。道路構造令の視距算定式は平面線形を基準とした二次元的な評価であるため，本橋のように縦断勾配および横断勾配（片勾配）が複合する区間では，過大な視距拡幅を要する結果となる場合がある。実際に，本橋区間では必要な拡幅量E=5.568mに対し，確保できる拡幅量は3.695mにとどまり，1.88mの不足が生じる算定結果となった。算出結果を図－６に示す。

そこで，縦断勾配および横断勾配が合成された実際の幾何構造を踏まえ，三次元モデルにより視距を直接確認する方法を採用した。道路構造令に定める視距の定義に基づき，第1走行車線において走行車線中心（路面高Ｈ＝1.2ｍ）の視点から，湿潤状態で110ｍ以上，積雪寒冷地では135m以上先にある高さＨ＝0.1ｍの目印の頂点が見えるかを，視線および目印を三次元モデル化して確認した。確認対象は，縦断勾配が最急と



図－６　道路構造令による視距拡幅量の照査



図－７　三次元モデルによる視距の照査

なる下り4%区間とした。

確認結果を図－７に示す。縦断勾配（下り4%）と横断勾配（6%）の複合により視線先の剛性防護柵の天端高が低くなり，剛性防護柵越しに135m先の目印を視認できることを確認した。ただし，落下物防止柵を設置した場合は視線が遮られることも判明した。以上により，実際の縦横断線形を考慮した三次元モデルにより，合理的な設計根拠に基づく視距の確保を確認できた。

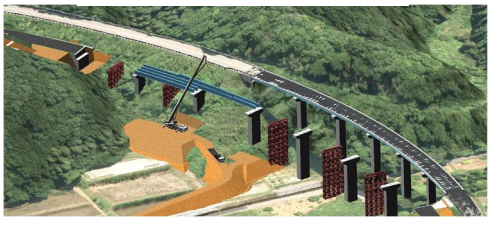
３．４　施工計画

下部構造の施工にあたっては，橋台・橋脚ごとに異なる現場制約への対応を検討した。Ｉ期線に近接するA1橋台や盛土上の橋脚は，アンカー付き土留め工により切土・盛土の安定処理を行い，河川堤防部の橋脚は自立式鋼矢板により掘削範囲を境界内に抑える計画とした。いずれも，狭隘な施工ヤードや近接構造物への影響を踏まえた工法選定が必要であった。

上部工の架設工法については，本橋が平面曲線部（R=410m）に位置し，橋梁内に縦断変化区間があったことから，送出し架設は横取りの併用や桁のねじり対策が必要となり，施工難易度が高いと判断した。概略工事費を比較検討した結果，送出し架設と同程度の工事費であったベント併用トラッククレーン架設（360t吊り）を採用し，2パーティでの並行架設とした。



（a）下部工ステップ図



（b）上部工架設図

図－８　三次元モデルによる施工ステップ

下部工では橋脚設置位置の盛土を掘削し，上部工架設時にはベント設置等のため盛土を復旧する必要があり，掘削と盛土を繰り返す施工計画となっている。この施工手順は施工費に直結し，橋種比較の判断材料となることから，発注者との理解共有が重要である。

そこで，下部工から上部工に至る一連の施工手順を三次元モデル化し（図－８），掘削・盛土の状態や施工ヤードの配置を関係者間で視覚的に共有したことで，施工費の考え方を発注者と共有し，橋種比較の検討を円滑に進めることができた。

４　おわりに

本業務では，山岳部に架橋する橋梁予備設計において，CIMによる三次元モデルを活用し，支持層への基礎杭の根入れ確認，橋長比較，曲線橋における視距の検証および施工計画の検討を行った。二次元図面では把握が難しかった複雑な現場条件を関係者間で正確に共有できたことで，発注者との設計協議および合意形成を迅速化し，研究成果を現場に速やかに反映することができた。

一方で，支持層の精度向上には多数の調査ボーリングが必要なこと，道路線形等の修正時にはモデル修正が頻発するなどの課題も明らかとなった。今後は，パラメトリックモデリングの活用等によりモデル修正作業を効率化するとともに，本業務で作成した三次元モデルを詳細設計および施工段階のBIM/CIMモデルへ引き継ぎ，維持管理段階まで活用していくことが望まれる。

本業務の実施にあたり，石川県様には貴重な資料をご提供いただくとともに，設計協議を通じて多大なご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

山岳トンネル覆工コンクリート施工における生産性向上に関する技術開発

株式会社奥村組　技術本部技術研究所　土木研究グループ　主任研究員　○松本　隆太郎
グループ長　　齋藤　隆弘

1　はじめに

山岳トンネルにおける覆工コンクリートの施工は、一般に、移動式型枠（以下、セントル）を用いたコンクリートの打込み、養生、セントルの脱型および次の施工位置への据付け（以下、セット）からなる施工サイクルを繰り返して行われる。これらの作業は専門性が高く、施工管理や品質確保において熟練技能労働者の経験や判断に依存する部分が多い。一方、建設業では技能労働者の高齢化や若手人材の不足が顕在化しており、今後、熟練技能に依存した施工体制の維持が困難になることが予想される。このため、覆工コンクリート施工では、施工の再現性と品質を確保しつつ、作業の省力化および省人化を図り、生産性を向上させることが喫緊の課題となっている。

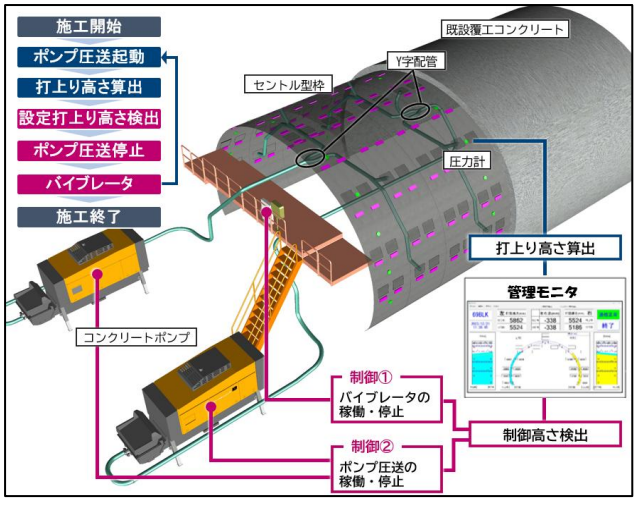
そこで、覆工コンクリート施工の生産性向上を目的に、IoTや計測・制御技術を活用したコンクリートの打上り高さに基づいて圧送ポンプおよび型枠バイブレータを制御する「自動打設システム」、若材齢時の積算温度と圧縮強度の関係に基づいて加温養生を制御する「養生温度制御システム」および既設覆工コンクリートに損傷を与えることなく、セントルを所定位置に自動でセットする「セントル自動セットシステム」の開発に取り組んだ。

2　生産性向上に資する技術開発

2．1　自動打設システム

自動打設システムの概要を図－1に示す。本システムは、セントルの周方向に配置した複数の圧力計、データロガーおよび制御用PCで構成される。圧力計で計測したコンクリート圧力を用いて打上り高さを連続的に算出し、設定した打上り高さに応じて圧送ポンプおよび型枠バイブレータを制御するものである。

コンクリートの打込みは、施工の高速化を目的としてセントルの左右を同時に打込む方法（NETIS登録番号：KK-190025-A）と、打込み口からの圧入を併用している。圧送ポンプは2台配置を標準とし、それぞれから圧送されたコンクリートがセントルの前後から打ち込まれる。配管はY字管で分岐して左右を同時に打ち込むことによる左右のコンクリートの打上り高さの均一化と、時間あたりの圧送量の増加による打込み時間の短縮が期待できる。圧入併用は、打込み口からコンクリートを下方に流し込んだ後、同一の打込み口から上方空間に圧送し押し上げるように打ち込む手法である。1箇所の打込み口から打ち込む範囲を拡大することで、配管切替え作業削減による省力化と打込み時間の短縮が期待できる[1)]。



図－1　自動打設システムの概要

実現場に適用するにあたり、自社の技術研究所の屋外ヤードにて実大規模の模擬セントルを製作し、本システムを用いた覆工コンクリートの施工実験を行った。施工条件を変えた計4回の施工実験を行った結果、計画どおりに制御でき天端部の充てん完了までコンクリートを打ち込めることを確認した。また、施工した技能労働者からは、作業負担が軽減されたとの肯定的な意見が得られた。

２．２　養生温度制御システム

２．２．１　養生温度制御システムの概要

セントル脱型前の養生において、覆工コンクリーの養生温度や養生期間の過不足による覆工コンクリート表面の剥離やひび割れなどの不具合を防ぐことを目的に、若材齢の積算温度によってコンクリートの圧縮強度を非破壊で推定し、各種の環境に応じて適切な加温を行う養生温度制御システムを開発した。

養生温度制御システムの概要を図－2に示す。本システムは、コンクリートおよび面状発熱体の温度を計測する熱電対、データロガー、制御用PCおよび電源制御装置で構成される。コンクリート温度から積算温度を算出し、圧縮強度をリアルタイムに推定するとともに、所定時刻までに脱型に必要な強度を確保できるよう、面状発熱体への給電を自動制御する。

積算温度管理UIの設定例を図－3に示す。各時間ステップで設定した目標積算温度に対し、未達時は給熱を継続し、超過時は停止することで、過剰な給熱を抑制しながら効率的な強度発現とセントル存置期間の最適化を図る。

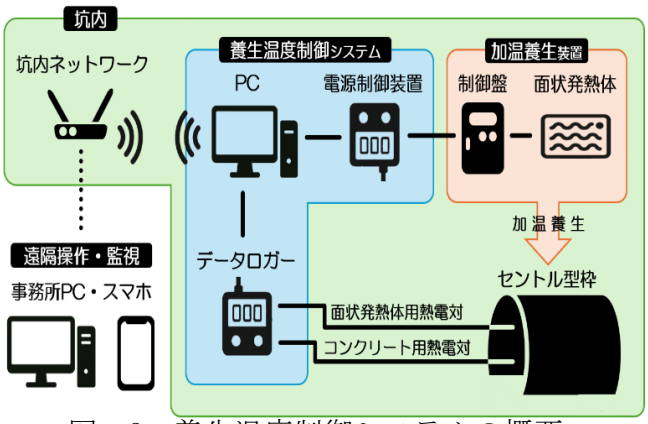
２．２．２　若材齢における強度推定精度向上

覆工コンクリートは打込み後1日未満の若材齢で脱型される場合が多く、脱型時には2～3N/mm^{2}程度の圧縮強度が必要とされる。しかし、一般的に用いられる積算温度と圧縮強度の関係式は長期材齢を前提とするため、若材齢での推定精度に課題があった。そこで、室内に置いてコンクリートの練上り温度5～30℃、養生温度10～40℃の条件を組み合わせた12パターンの供試体を用いてコンクリート温度の測定と圧縮強度試験を実施し、若材齢域（6N/mm^{2}程度以下）に適用可能な推定手法を検討した。積算温度関係式を式－1に示す。

$$M = \int (\theta - \alpha) \cdot \Delta t \qquad \text{式－1}$$

ここに、M：積算温度（℃・h）、θ：時間tのコンクリート温度（℃）、α：基準温度（℃）、t：時間（h）

実験の結果、一般的に用いられる式－1における基準温度α＝－10℃では、積算温度と圧縮強度の相関は低く決定係数R^{2}は0.36であった。一方、相関が最大となる基準温度を検討した結果、α＝3℃とすることでR^2＝0.92が得られ、圧縮強度を高精度に推定できることを確認した。なお、



図－2　養生温度制御システムの概要



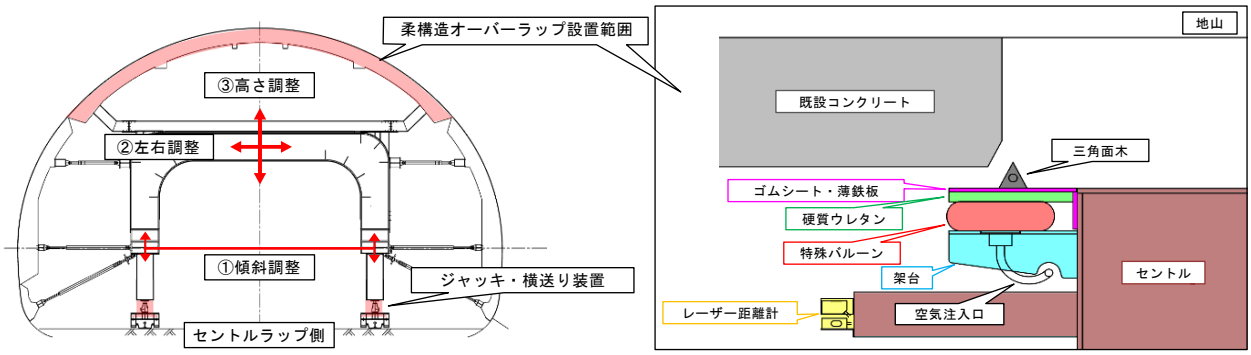
図－3　養生温度制御システム管理UI

適切な推定式はコンクリート配合によって異なるため、養生温度制御システムでは積算温度関数式および圧縮強度推定式を任意に設定できる仕様となっている。

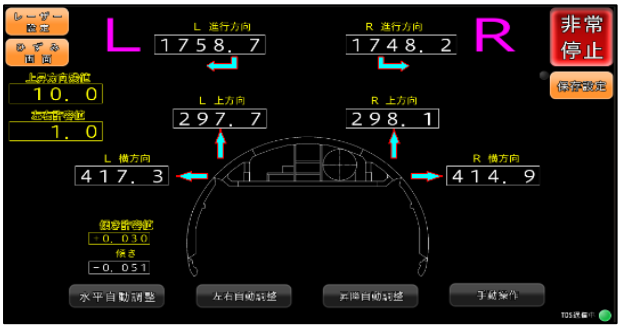
２．３　セントル自動セットシステム

既設コンクリート側のセントルをセットするときは、セントルが既設コンクリートに接触する部分（以下、オーバーラップ）に損傷を与えないよう、測量を繰り返し複数の人員で行う。これを省人化するため、セントルのオーバーラップ部を柔構造にするとともに、レーザー距離計に基づいてラップ側のセントルを自動でセットするシステムを開発した。概要を図－4に示す。本システムは、セントルのラップ側に設置したレーザー距離計および傾斜計、これらから得られる計測値に基づきガントリー（セントルの支持架台）のジャッキを制御ならびに管理UI（図－5）を搭載したPC、柔構造を有するオーバーラップ（写真－1）で構成される。本オーバーラップは、既設コンクリート側からゴムシート、薄鉄板、硬質ウレタン、特殊バルーン、架台で構成される。薄鉄板は、セントル端部妻面を固定端とし片持ち梁のように張り出している。セントルセットの際は既設コンクリートに接触するなど荷重を受けるとたわみ、コンクリートを打ち込む際は、薄鉄板下の特殊バルーンを膨らませることで、打ち込まれるコンクリートの荷重を受けてもたわまない構造となっている。

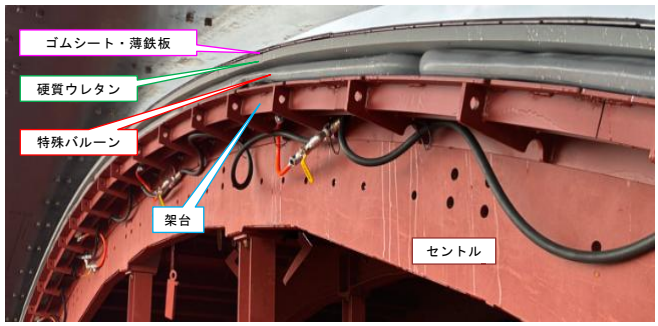
自動セットの手順は、セントルの切羽側をセットした後、管理UIパネルで水平自動調整ボタンを押下し傾斜計に基づき左右の水平を自動で調整する。その後、左右自動調整ボタンを押下すると、既設覆工コンクリート壁面に向けて水平にレーザー距離計を照射し左右の位置を自動で調整する。最後に昇降自動調整ボタンを押下すると、上方に向けて鉛直にレーザー距離計を照射し所定の位置まで自動でジャッキアップする。一般には、既設覆工コンクリートへの損傷を防ぐため、セントルを所定位置より低めにセットするが、オーバーラップ部が柔構造であるため、既設覆工コンクリートに対してセントルを離隔なくセットできる。薄鉄板にはひずみ計



図－4　自動セットシステムと柔構造オーバーラップ概要図



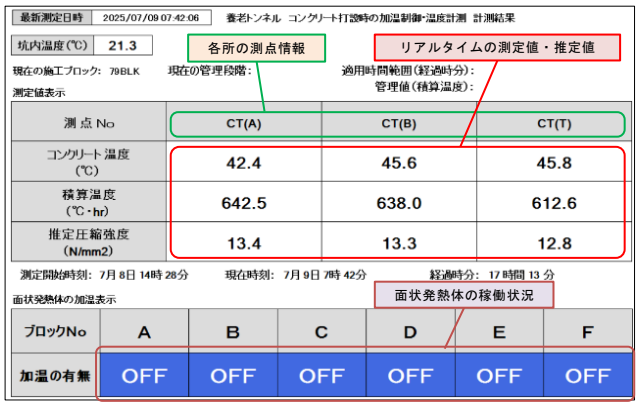
図－5　自動セットシステム管理UI



写真－1　柔構造オーバーラップ



写真－2　自動打設システムの運用状況



図－6　養生温度制御システムの管理UI

が設置されており、セントルを過剰にジャッキアップしても物理的接触により停止することで、既設コンクリートの損傷を防止する。

3　現場適用事例

自動打設システムと養生温度制御システムを実際の覆工コンクリートの施工に適用し、生産性の向上に取り組んだ。トンネルの内空断面積は約84.8m^2、覆工コンクリートは設計厚さ300mm、セントルの延長は12.5m、1回の打込み量は約100m^{3}で、圧送ポンプ2台で打ち込む計画とした。

自動打設システムの管理UIで打込みを管理している状況を写真－2に示す。ポンプ圧送担当者は通常2名のところ、自動打設システムによって1名で運用できた。打込み作業を指揮する技能労働者は、切羽側ステージ上に設置した管理モニタの位置から打込みの進捗や妻板の管理、コンクリートの荷下しなど作業全体を把握でき、コンクリート打込口の左右切替えや状況把握のために狭隘なセントル内を頻繁に往来するような負荷の大きい作業が削減でき、省力化の効果を得た。覆工コンクリート施工にかかる時間は、コンクリートの打込みの高速化に加え、片付け作業を打込みと並行して行えるようになったことから、通常6～7時間となるのに対し約5時間に短縮された（約20%削減）。

セントルの脱型管理に用いる養生温度制御システムの管理UIを図－6に示す。コンクリートと坑内の温度、面状発熱体の稼働状況とコンクリートの推定圧縮強度を、遠隔地から確認できる。脱型に必要な圧縮強度として定めた目標値2N/mm^{2}は養生開始から10～12時間程度で発現しており、目標値を上回っていることを確認し脱型した。

覆工コンクリートの施工は2日に1サイクルであることが一般的であるが、今回開発した技術を適用することで、打込みの高速化やセントル脱型前の養生時間の適正化が図れ、1日に1サイクルの施工が可能となった。

4　おわりに

覆工コンクリート施工の生産性向上を目的として、自動打設システム、養生温度制御システムおよびセントル自動セットシステムを開発した。実施工に適用した自動打設システムおよび養生温度制御システムでは、省力化、省人化および施工サイクル向上の効果を確認した。自動セットシステムについては今後現場適用を行い、覆工コンクリート施工サイクル全体の効率化を図ることで、更なる生産性向上を目指す。

参考文献

1）齋藤ほか、分岐配管を用いた圧入による覆工コンクリートの実大打設実験、トンネル工学報告集、28巻、p. Ⅰ-3、2018

能登半島地震復旧工事で遠隔操作システムによる施工を実証

前田建設工業株式会社　本店　土木事業本部土木技術部主任　○吉成　健吾
本店　土木事業本部土木技術部G長　今井　崇満
本店　土木事業本部土木技術部主任　片桐　智浩
北陸支店　珠洲真浦作業所　作業所長　関根　智之

1　はじめに

建設分野における重機の遠隔操作技術は、地震、豪雨、噴火災害など大規模災害の復旧や、社会インフラの構築において重要な役割を果たしている。また、災害復旧時の危険作業における安全確保のみならず、災害対応の効果・効率を高めること、社会インフラの老朽化の進行と少子高齢化に伴う労働人口の減少に対応した社会インフラの合理化が期待されている。しかし、重機の遠隔操作は、安定した通信環境の整備が不可欠であり、リアルタイムでの機械制御ができないと安全性や作業効率が失われる。本稿では、能登半島地震で崩壊した斜面復旧工事において実施したバックホウ遠隔操作の実証試験について報告する。

2　工事概要

R6 249号珠洲地区道路復旧その2工事は、令和6年能登半島地震および能登半島豪雨により被災した国道249号ハ世乃洞門新トンネル坑口部における法面崩落箇所の復旧工事である。国道249号は能登半島の物流や生活を支える重要な幹線道路であり、本工事箇所では崩落土砂によりトンネル坑口が埋塞し、一時的に地域の孤立が発生した。（図―1）

本工事では、落石から国道を防護するとともに、崩壊した法面の掘削・整形、法面補強および浸食防止対策を実施した。工事内容は国道防護工49m、保護盛土7600m³、法面復旧工9700m³である。施工箇所はトンネル坑口に近接しており、迂回路の設置が困難なことから、交通への影響を最小限に抑えながら施工する必要があった（写真―１）

工事着手時には法面上部に大量の崩落土砂や転石が堆積しており、直径2mを超える転石も多数確認された。（写真―２）また、当該法面は高低差約180m、最大勾配約45°の急峻な地形であり、上部法面の掘削に伴う落石リスクが高かった。このため、上部法面での掘削と下部法面での排土を安全に並行施工することが課題となり、本工事では各種落石対策と併せてバックホウの遠隔操作を適用した。



図―１　工事位置図



写真―1　工事着手前全景



写真―２　工事着手前法面上部全景

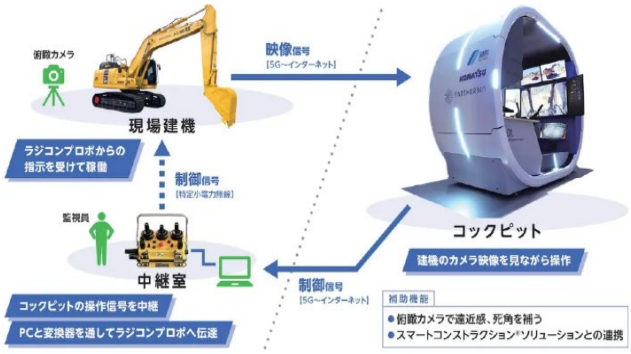
３■重機遠隔操作の適用

３．１遠隔操作導入の目的

上部法面ではRCM（ロッククライミングマシーン）による掘削作業を実施しており、下部法面では排土作業を並行して行う必要があった。しかし、上部から土砂や転石が落下する危険性があり、下部法面でオペレータが搭乗した状態で施工することは安全上のリスクが高かった。また、上部作業を停止して排土作業を行う場合、工程の長期化につながり、早期復旧を求められる災害復旧工事において大きな課題となる。そこで、本工事ではバックホウの遠隔操作を採用し、オペレータを危険区域外に配置した状態で施工を実施した。これにより、オペレータの安全確保と施工継続を両立しながら、災害復旧工事の効率的な施工を図った

３．２遠隔操作システム

本工事で採用した遠隔操作システム（EARTHBRAIN社製：Smart Construction Teleoperation）は、茨城県取手市に設置した遠隔操作室から、石川県珠洲市の施工現場に配置したバックホウを操作する構成となっている。遠隔操作室と現場の直線距離は約500kmであり、オペレータは現場に立ち入ることなく建設機械の操作を行った。遠隔操作システムの概要を図―2に示す。現場に設置した複数のカメラ映像を遠隔操作室へ伝送し、オペレータは映像を確認しながらバックホウを操作した。遠隔操作室には実機と同様の操作レバーおよびモニタを備えたコックピットを設置した。



図―２　遠隔操作システム概要図

本工事箇所は能登半島北部の沿岸部に位置しており、被災直後は通信インフラも大きな被害を受けていた。このため、安定した通信環境の確保が遠隔施工を実施する上で重要な課題であった。そこで通信手段には衛星インターネットサービス「Starlink」を採用した。現場と遠隔操作室の双方に通信設備を設置し、映像伝送および操作信号の送受信を行うことで、長距離通信環境下においても施工可能なシステムを構築

した。

また、遠隔施工時は通信障害や機器異常が発生した場合の安全確保が重要となる。そのため現場には監視員を配置し、常時バックホウ周辺の状況を確認できる体制とした。さらに、異常発生時には直ちに機械を停止できる緊急停止装置を設置し、通信断や機器故障などの不測の事態に備えた。これにより、現場周辺で作業する施工関係者および一般車両の安全を確保しながら遠隔施工を実施した。

４　実証試験方法

４．１試験概要

本工事では、遠隔操作技術の災害復旧工事への適用性を検証することを目的として、バックホウによる掘削・集積作業およびダンプトラックへの積込み作業を対象とした実証試験を実施した。実証試験では、オペレータが搭乗して操作する通常施工と、茨城県取手市の遠隔操作室から操作する遠隔施工について比較を行い、作業効率および通信性能を評価した。



図―３　遠隔操作実施全景図

試験対象は、上部法面から落下した土砂の集積および搬出作業とし、遠隔操作バックホウにより土砂を掘削・集積した後、10tダンプトラックへ積込みを行った。対象作業は実際の施工条件に近い環境下で実施し、遠隔施工時における実用性の確認を行った。

４．２評価項目

遠隔操作による施工性を評価するため、掘削・集積作業時間、積込み作業時間、通信遅延時間およびオペレータ評価を計測した。

４．３試験方法

試験は有人施工および遠隔施工について同一条件で実施し、各作業を15回繰り返して測定した。作業効率は、有人施工の平均作業時間を基準値（1.0）とし、遠隔施工時の所要時間との比較により算出した。また、通信遅延については遠隔操作システムを構成する通信機器から取得したデータを用いて評価を行った。

さらに、定量的な評価に加え、遠隔操作を実施したオペレータから操作性に関する意見を収集し、作業効率に影響を与える要因の分析を行った。特に、掘削作業時およびダンプ積込み作業時における視認性や距離感の把握について重点的に評価した。

４．４実証試験結果

実証試験の結果を表―1に示す。有人施工時の作業効率を1.0とした場合、遠隔操作による掘削・集積作業の作業効率は0.6倍、10tダンプトラックへの積込み作業の作業効率は0.4倍となった。

表―１　有人作業の遠隔操作の作業効率

作業内容		sec	時間比	作業効率
掘削・集積作業	有人作業	290	1.0	1.0
	遠隔作業	450	1.6	0.6
10tダンプ積込作業	有人作業	130	1.0	1.0
	遠隔作業	310	2.4	0.4

また、遠隔操作時に計測した通信遅延時間は約120msであり、遠隔施工において一般的に操作可能とされる200ms以下であることを確認した。

（表―２）試験期間中、通信遅延や通信断による施工停止は発生せず、安定した遠隔施工を継続することができた。

表―２　遠隔操作時の遅延速度

通信方法	ダウンロード速度	遅延時間
スターリンク	264Mbps	120ms

オペレータへのヒアリング結果では、機械操作に対する遅延の影響は比較的小さく、操作に慣れることで施工可能との評価を得た。一方で、ダンプトラックへの積込み作業時には奥行方向の距離感を把握しにくく、慎重な操作が必要となることが確認された。

写真―３　オペレータの作業状況



表―３　オペレータのヒアリング状況

オペレーターの感想	
肯定的な意見	改善点
・操作の遅延が少なく、慣れてくれば違和感なく作業することが可能 ・現場で搭乗して作業を行うより作業環境がよい ・危険作業でも安全に作業可能	・奥行き方向の距離感が分かりにくいため重機同士が近づく作業では接触しないように注意する必要がある ・直射日光や影など環境によって視認性が低下し作業しにくい ・俯瞰カメラと車載カメラでの遅延時間に差がある

５　考察

本実証試験では、通信遅延は約120msであり、バックホウの遠隔操作に大きな支障を与えるレベルではなかった。一方、作業効率は掘削・集積作業で0.6倍、積込み作業で0.4倍となり、有人施工と比較して低下する結果となった。

掘削・集積作業は、対象となる土砂を中心に作業が行われるため、遠隔操作においても比較的安定した施工が可能であった。一方、ダンプ積込み作業では、荷台位置との相対関係を正確に把握する必要があり、遠隔操作時には奥行方向の認識が難しいことから、接触防止のため慎重な操作となり作業時間が増加したと考えられる。

また、複数のカメラ映像を用いて施工を実施したものの、実際の現場で得られる立体的な視覚情報と比較すると取得できる情報量が限られており、特にバックホウとダンプトラックとの離隔確認に時間を要する傾向が確認された。これらの結果から、遠隔操作における作業効率向上には通信性能の改善だけでなく、カメラ配置やオペレータへの情報提示方法の改善が重要であることが分かった。

一方で、本工事のような落石危険箇所においては、作業効率の低下が生じた場合でも、危険区域からオペレータを離隔できる安全面での効果は大きい。災害復旧工事などの高リスク環境において、遠隔操作技術は有効な施工手段の一つであると考えられる。

６　終わりに

本工事では、能登半島地震および能登半島豪雨により被災した国道249号法面復旧工事において、バックホウの遠隔操作を適用した実証試験を実施した。その結果、約500km離れた遠隔操作室から衛星通信を利用した施工が可能であり、通信遅延についても施工上大きな支障がないことを確認した。

また、遠隔施工は有人施工と比較して作業効率が低下する傾向が見られたものの、落石の危険がある施工環境においてオペレータの安全を確保できる有効な手法であることを確認した。今後は操作性および視認性の改善を図るとともに，災害復旧現場における遠隔施工技術の実用化と適用拡大を進めていく。

② 社会資本の的確な維持管理・更新

ベルリプレイス工法（改築推進）に関する
地中拡径の実証実験についての報告

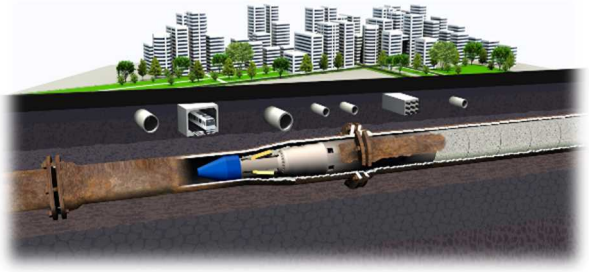
真柄建設株式会社　土木事業本部　土木技術部　主任　光嶋　真由

1　はじめに

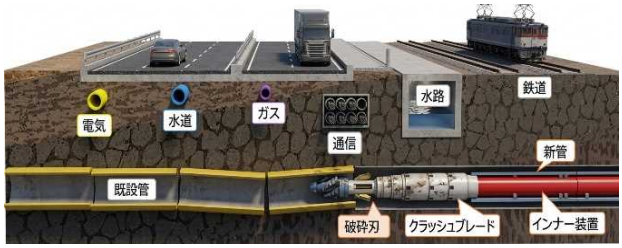
近年、様々な社会資本の中で耐用年数を経過した管路が増加しており、今後加速度的に老朽化が進行していく見通しである。管路の老朽化に起因する道路陥没やライフラインの分断が毎年発生しており、持続的な機能確保やライフサイクルコスト（LCC）の低減が求められている。また、2025年１月に発生した八潮市での道路陥没事故以降、老朽管問題への対応は全国の自治体で喫緊の課題となっており、管路更新は急務である。このような背景の中、当社では、非開削でダクタイル鋳鉄管を破壊しつつ同時にダクタイル鋳鉄管の更新ができる、静的破砕改築推進工法（水道用）【ベルリプレイス工法】（以下、本工法）の開発を進めている。これにより、老朽水道管の更新工事のイノベーションを図り、わが国の老朽水道管更新問題を解決し、長期的に事業継続できる水道事業の実現に貢献することを目標にしている。

2　ベルリプレイス工法

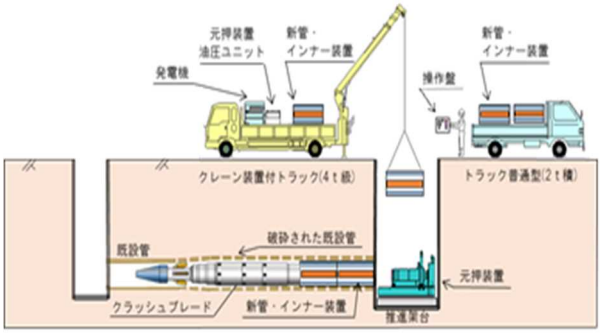
本工法は、改築推進機の前方の破砕刃（4枚刃）を開閉させ、既設ダクタイル鋳鉄管を破砕・拡径しながら前進し、順次、新しいダクタイル鋳鉄管に置き換えていく工法である。開発した改築推進工法のイメージを図－１に、施工例、施工概念図を図－２、図－３に示す。また、水道管路の更新における従来工法である開削工法と本工法の比較表を表－1に示す。



図－１　ベルリプレイス工法　イメージ図



図－２　ベルリプレイス工法　施工例



図－３　ベルリプレイス工法　施工概念図

表－1　開削工法と本工法の比較

比較項目	従来工法(開削工法)	開発工法(ベルリプレイス工法)
工法概要	道路掘削・撤去 ⇒ 旧管撤去 ⇒新管布設	非開削で既設水道管を内側から破砕・拡径し、同時に新管に入替える工法
環境負荷	重機稼働＋既設道路撤去・復旧 ⇒ CO2排出量 大	CO2排出量 50%以上削減
社会的影響	交通規制・振動・騒音問題	非開削工法の利点 ⇒ 交通影響を最小限抑制
技術的課題	埋設物の輻輳化により施工困難	周辺地盤への影響が不明確

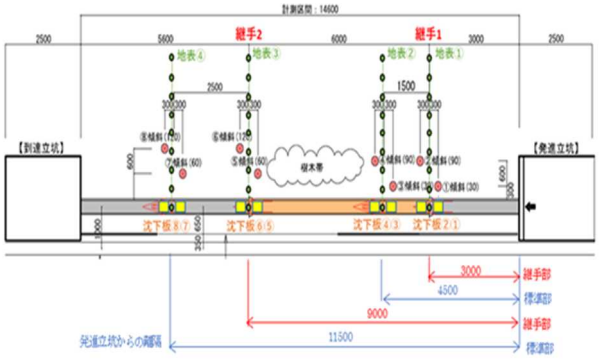
3　実証実験

3．1　実証実験の目的

本工法は、地中における強制拡張により周辺地盤や近接埋設管に影響を及ぼすことが予想された。そのため地中における挙動を把握することを目的とした、実証実験及びFEM解析による再現解析を実施した。

3．2　実証実験概要

実験概要の平面図を図-４に示す。実証実験ヤード（写真－1参照）は地下水位がない粘性土地盤の現場にて、旧工業用水道のダクタイル鋳鉄管（φ350）を既設管として破砕・拡張を行った。現場には、既設管近傍にガス管が存在しており、ガス管への影響を防止するために防護壁として軽量鋼矢板を設置した。改築推進機の後方に接続する新設ダクタイル鋳鉄管は、地中で破砕された既設管から新設管の表面を保護するため、実証実験用に製作したコンクリート外装のダクタイル鋳鉄管（内径φ350，外径φ450，外装厚47.2mm）（写真－４参照）を用いた。計測は、鉛直変位量測定のため既設管の管頂から直上に0.3m毎に4箇所沈下隆起板（写真－２参照）を設置し、水平変位量測定のため既設管の側面から0.3m毎に4箇所挿入式孔内傾斜計（写真－３参照）を設置した。挿入式孔内傾斜計は、深さ250mm間隔で測定できる小型の測定機を使用した。



図－４　実証実験平面図



写真－１　実証実験ヤード



写真－２　沈下隆起板



写真－３　小型孔内傾斜計



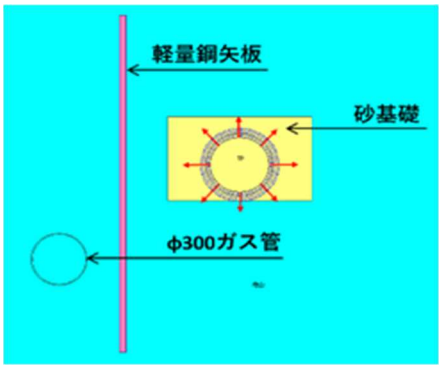
写真－４　コンクリート外装　ダクタイル鋳鉄管

4　FEM再現解析方法

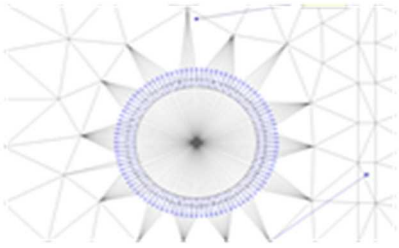
有限要素法（FEM）を用いて再現解析を行った。解析モデルを図－5、地盤の土質定数を表－２に示す。通常、水道管の周囲は砂基礎として埋め戻されていることから、モデルにも砂基礎を入れている。管内面に放射状に強制変位を与えることで、既設管の拡径を再現する。改築推進機の最大径はφ465mmであり、既設管の内径はφ350mmであるため、強制変位は半径57.5mmとし、弾性解析と弾塑性解析（Drucker-Pragerモデル）を行った。

表－２　土質定数

	砂層	地山
湿潤単位体積重量γt(kN/m3)	18	15
N値	5	4
弾性係数E(kN/m2)	14000	11200
ポアソン比ν	0.3	0.4
粘着力C(kN/m2)	0.1	18
内部摩擦角φ(°)	30	17
静止土圧係数K0	0.5	0.5



図－５　FEM解析モデル



図－６　管周辺のメッシュ分割図と強制変位方向

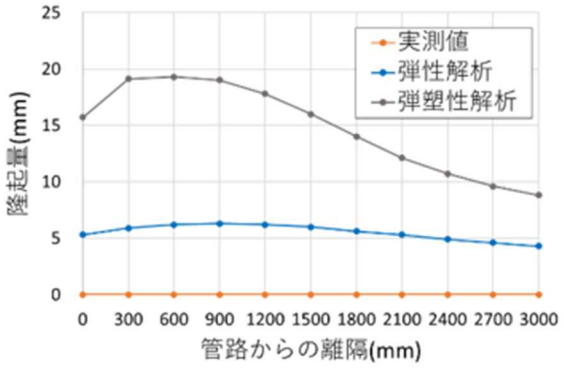
５　実験結果および解析結果

管直上の隆起板の地中変位（鉛直変位）と解析結果を表－３に示す。弾性解析値が弾塑性解析に比べ実測値と近い結果となった。

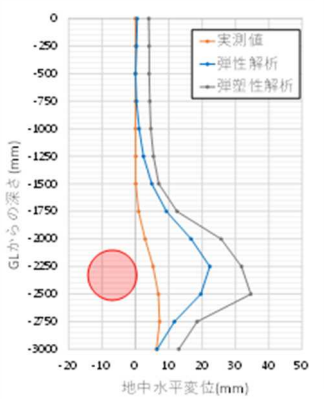
地表面隆起量について、FEM解析値と最大拡張時における実測値を比較したグラフを図－７に示す。実測では、どの地点でも隆起は見られなかったため、土被りが2.0mあれば地表面への影響がないものと予想される。解析値については、弾塑性解析が弾性解析値と比べて大きい値となった。実測値が解析値に比べて小さい値となったのは、地中での強制変位が地盤の空隙に吸収され、全体的な変位が抑制されたためと予想される。管側面から300mm、600mm、900mm、1200mmの離隔での水平変位量のグラフをそれぞれ図－８～図－１１に示す。水平変位では、どの計測位置でも弾塑性解析値＞弾性解析値＞実測値となり、鉛直変位に比べ実測値と解析値の差が大きい。これは、挿入式孔内傾斜計のステンレス製計測孔による影響により、実際の地中変位より小さい値が計測された可能性がある。

表－３　管直上の隆起量

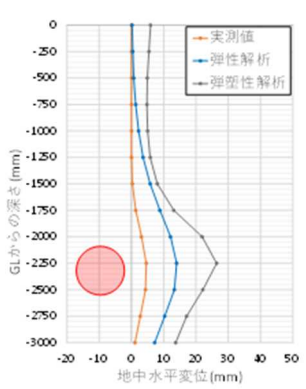
隆起板の位置	実測値	弾性解析	弾塑性解析
管頂+300mm	30mm	27mm	34mm
管頂+600mm	11mm	15mm	25mm
管頂+900mm	3mm	10mm	22mm
管頂+1200mm	0mm	8mm	21mm



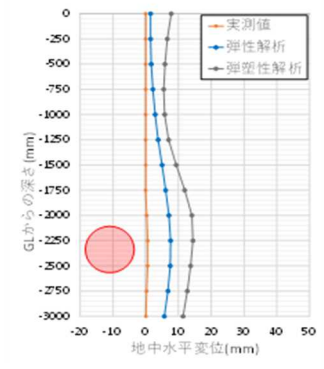
図－７　地表面変位量



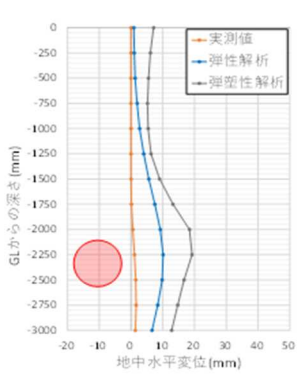
図－８　水平変位（離隔300）



図－９　水平変位（離隔600）



図－１０　水平変位（離隔900）



図－１１　水平変位（離隔1200）

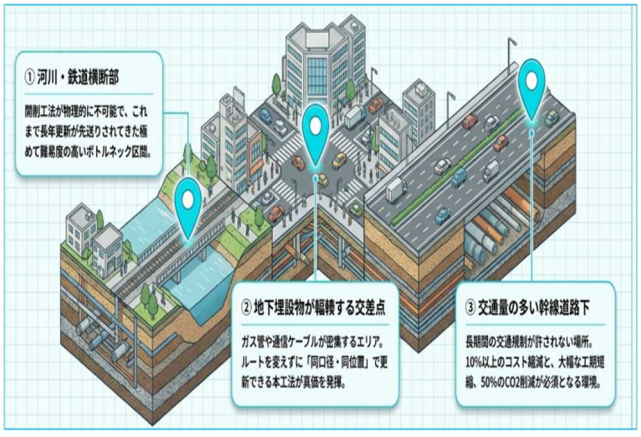
6　本工法の活用が期待できる条件

水道管路の更新率は低く、老朽化の進行速度に対して更新が著しく追いついていない状況にある。財政不足・人員削減・地下埋設物の輻輳等の制約条件で、従来の開削工法のみでは、更新の遅れによる問題の発生が懸念される。そのため、本工法の技術的課題を解決し、開削工法の適用が困難な条件下での活用を目指していきたい。その中でも、特に活用が期待できる条件としては、

① 鉄道・河川横断部
② 地下埋設物が輻輳する交差点部
③ 交通量の多い幹線道路下

などが挙げられる。

これらの活用条件においては、交通規制や周辺インフラへの影響を最小限に抑えつつ、確実な管路更新を実現できるため、本工法に優位性があるので、このような条件下で実績を積み上げていきたい。



図－12　本工法の活用イメージ図

7　おわりに

今回は、2次元FEMを用いて実証実験の再現解析を行い、拡張に伴う周辺地盤への影響を検討した。その結果、弾性解析の方が弾塑性解析より実測値に近い値となった。今後、2次元FEM解析により、様々な土質、土被り深さおよび埋設管路の離隔幅をパラメーターとした影響評価手法（地表面や埋設管への地中変位による安全性評価）を確立し、実現場への適用を目指す。

一方、ベルリプレイス工法は既設管を地中に存置する工法であるため、廃棄物処理法の観点から施設管理者の理解を得ることが課題とされてきた。しかしながら、環境負荷低減の観点において、本工法は開削工法と比較して外部費用および産業廃棄物の削減ができるため、カーボンニュートラルの実現が求められる中、その意義は一層高まるものと考えられる。老朽水道管路の更新市場において、本工法が実用的かつ持続可能な解決手段として社会実装されることにより、老朽化問題の抜本的解決と、ライフライン機能の長期的確保に寄与したい。今後も変化する社会的ニーズを的確に捉え、本工法の特長を生かした継続的な改善を重ねることで、管路の維持更新技術の発展に貢献していく所存である。

謝辞

本研究は国土交通省 SBIR建設技術研究開発助成制度JPJ000094の助成を受けて行った。ここに記して感謝する。

参考文献　1)光嶋 真由ら，静的破砕推進工法のダクタイル鋳鉄管への適用に関する実証実験とその FEM 解析，令和７年度土木学会中部支部研究発表会，2026.

アスファルト層下面補強用ジオシンセティックスの開発

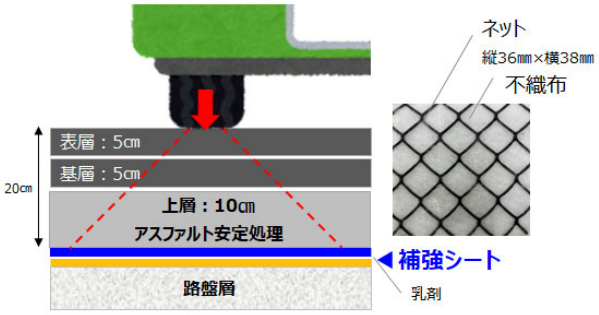
北川ヒューテック(株)　技術部　技術研究所所長　○本間　圭一
前田工繊産資(株)　埼玉事業所　技術開発部ＧＬ　　松本　七保子
金沢工業大学　工学部　環境土木工学科教授　　高橋　茂樹

1　はじめに

近年，交通量が多い国道や高速道路では長期供用に伴う表基層の損傷に加え，アスファルト層下面からの疲労ひび割れや路盤の脆弱化が確認されている[1)]．これらを解決する手段の一つとして，疲労ひび割れの起点となるアスファルト層下面を補強することを検討している．先の報告では，舗装下面にアスファルト舗装用に製品開発したジオシンセティックス（以下，補強シート）を貼り付けることで荷重が分散され，かつ押抜きせん断力を高められる効果が得られた[2)]．本稿では、室内試験結果より開発した補強シートの補強効果と補強シートの現場への導入方法について報告する．

2　補強シートについて

開発した補強シートはネットと不織布で構成された2層構造で，アスファルト層の下面補強を目的としてアスファルト層と路盤層の間に敷設する（図－１）．



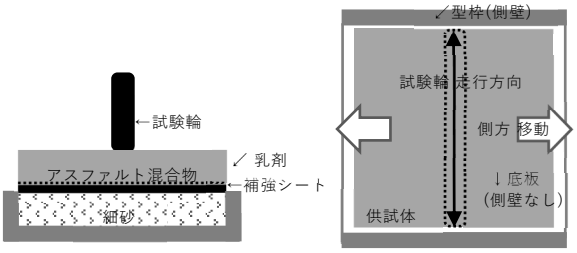
図－１　概要図

補強シートは，アスファルト層と一体化し路盤と密着することで，アスファルト層下面に発生する引張応力を分担，ひずみを緩和し，更には浸入水に対し不織布が排水材・吸出し防止材として機能することで舗装の延命化を期待するものである．

3　ホイールトラッキング促進試験

３．１　試験概要

補強シートによる補強効果を確認するために，ホイールトラッキング促進試験(以下，WT促進試験)を行った．本試験は一般的なWT試験と異なり，走行方向の側面にあたる2面の型枠を外し，混合物の側方移動を促すことで，補強シートによる補強効果を表現した．図－２にWT促進試験装置の概要を示す．



断面図　　平面図

図－２　WT促進試験装置の概要

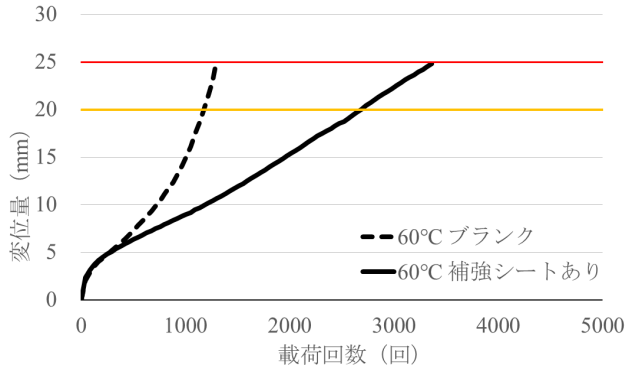
補強シートを入れた供試体の作製方法は，WT供試体を作製した後に，舗装版下面に速分解型アスファルト乳剤を1.5L/m2散布して補強シートを貼り付けた．試験の実施は，細砂を設置した模擬路盤上において繰り返し載荷を行い，わだち掘れ量20mm到達時の載荷回数を測定して比較した．表－１に，この時の試験条件を示す．

表－１　試験条件

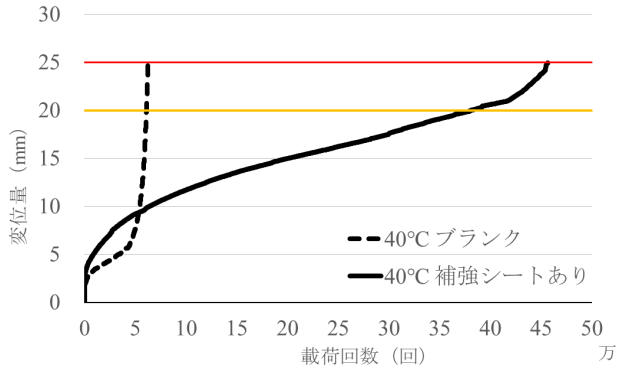
項目	内　容
試験機	ホイールトラッキング試験機
載荷速度	21 往復/min
接地圧	0.63MPa
試験温度	40，50，60℃
供試体	密粒アスファルト混合物 20F 幅 30cm×長さ 30cm×厚さ 5cm

３．２　試験結果

試験温度60℃の結果を図－３に，40℃の結果を図－４に示す．温度条件に関わらず，ブランクと比較して補強シートありの載荷回数が多くなる傾向にあった．また，ブランクにおける変形量の形状は，温度域に関わらず載荷回数の増加に伴い増加する傾向を示し，終局手前で急激に増加する傾向(変曲点)が確認された．



図－３　WT促進試験結果(60℃)



図－４　WT促進試験結果(40℃)

WT促進試験（40℃）後のブランク供試体に見られる形状変化として，表層から下層に向かって貫通ひび割れが発生していた（写真－１）．このことからブランク供試体では，繰り返し載荷により構造体として維持できる限界点を超え，押し抜きせん断力が働いたと考えられた．



ブランク



補強シートあり

写真－１　WT促進試験後の供試体

一方，補強シートありでは，緩やかに一定の傾きで変位し，40万回を過ぎるまでは変曲点が現れず，貫通ひび割れも確認できなかった．表－２に示した試験温度と載荷回数の結果からは，試験温度60℃ではブランクが1,386回，補強シートが3,391回となっており，ブランクと比べ2.4倍の増加，試験温度40℃では，ブランクが62,496回，補強シートありが456,756回とブランクに比べ7.3倍の増加となった．

表－２　試験温度と載荷回数

試験温度	載荷回数		ブランク対比
	ブランク	補強シート	
60℃	1,386	3,391	2.4
40℃	62,496	456,756	7.3

以上より，補強シートは温度条件に関わらず荷重を分散させる効果を発現し，構造体としての限界点を先送りする効果が伺え，かつ試験温度40℃付近では，約7倍の繰り返し荷重耐性を得

られる可能性が示唆された．

4　底面形状変化から見える補強効果

4．1　計測方法と整理方法

次に，WT促進試験後の供試体底面の形状を確認することを目的に，地上レーザースキャナー（以下，TLS）による計測を行った．

供試体の底面部は，四隅を正方形の基準面としてTLSにより供試体底面の凹凸を3次元データとして取得した．このデータを基に，１cm四方のブロックを作成し，隆起を＋値、陥没を－値としてヒートマップ図を作成した（図－５）．表－３には，点群計測結果（最大値，最小値）を示した．

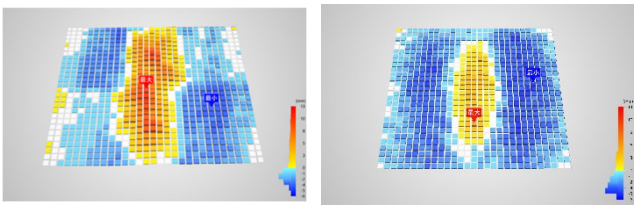
4．2　試験結果

表－３より，補強シートありの最大値は，ブランクの半分以下の値となった一方，最小値側が若干マイナス側に減少する傾向にあった．

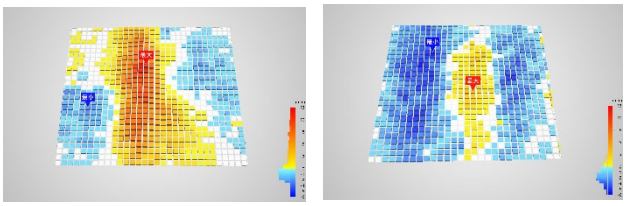
ヒートマップ図（図－５）からは，いずれの試験温度においても，ブランクの試験走行輪直下が顕著に隆起し、車輪通過中央部付近において隆起が最大となるのに対し，補強シートありでは，供試体底面部の変位が小さく、緩やかな勾配での変形が確認された．図－６に最大隆起断面図を示す．この下面の断面図からは，載荷下面の補強シートに張力が加わることで，載荷端部が引き上げられるようにマイナス側に変位していると推察された．

表－３　点群計測（最大値，最小値）

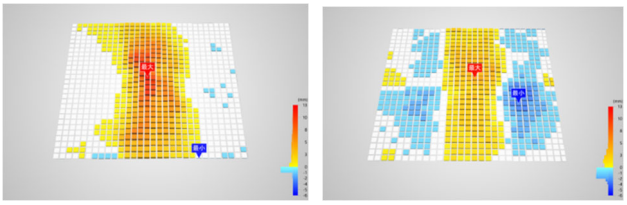
試験温度	最大箇所(mm)			
	ブランク		補強シートあり	
	最大	最小	最大	最小
60℃	12	-1	5	-3
50℃	13	-3	4	-6
40℃	11	-4	5	-5



ブランク　＜60℃＞　補強シートあり

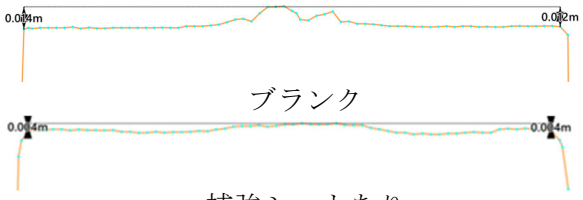


ブランク　＜50℃＞　補強シートあり



ブランク　＜40℃＞　補強シートあり

図－５　ヒートマップ図



補強シートあり

図－６　最大隆起断面図

5　補強シート導入方法と作業性の確認

5．1　補強シートを乳剤固定する施工方法

これまでのシート系材料を舗設する際の施工方法は，鉄ピンやアンカーピンなどで直接的に下地と打ち付けて物理的な固定を行うものが主流であった．ここでは，乳剤のみで補強シートを固定するための施工方法と作業性について言及する．一般的な施工では，路盤上に規定量1.2ℓ/ m2の乳剤（PK-3）を散布した後に，十分に乾燥するのを待ってから次工程へと移る．今回行った施工では，乳剤による補強シートの定着を促すため，散布完了後，直ちに補強シート

を設置している（写真－２）．補強シート敷設後は，小型搭乗式ローラーを用いて転圧し，補強シートと路盤を圧着する（写真－３）．

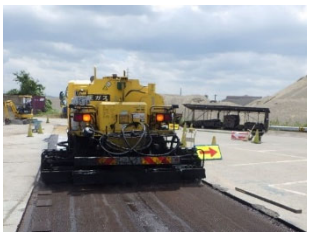


写真－２
PK-3の散布状況



写真－３
補強シートの圧着

次に補強シート上への乳剤散布を行うが，使用する乳剤は促進分解型乳剤（PKMT-Q）としている．これは乾燥を待つことなく次工程へスムーズな移行を促すほか，乳剤から分解した水分により，大型重機やダンプタイヤとの補強シート付着を防止する意味合いがある．今回の補強シート上への乳剤散布では，先の室内試験で求めた規定量1.0～1.5ℓ/m2のPKMT-Qをディストリビューターにて散布した（写真－４）．乳剤散布後はアスファルトフィニッシャーを補強シート上面へ移動させ，舗設を開始した（写真－５）．



写真－４
PKMT-Qの散布



写真－５
機械による敷均し

ホッパ内への材料供給時には，ダンプタイヤへの乳剤付着，ズレ等が発生していない（写真－６）．敷均し後の転圧作業は，一般的なアスファルト舗装と同じ機械編成で問題ない（写真－７）．以上のような施工方法により，時間ロスを最小限とし，かつ特殊な機械を必要とせず補強シートの導入することが可能となった．



写真－６
ホッパへの材料供給



写真－７
初期転圧

６　まとめ

今回開発したアスファルト層下面補強用ジオシンセティックスは，荷重分散効果を有することが解った．また路盤上への施工においては，一般的なシート系材料の固定にアンカーピン等を打ち付けるのに対し，促進分解型乳剤を補強シート上に最適量散布することで，固定器具を使わずとも導入できることが解った．

現在、試験施工区を設置して，路面性状調査，FWDによる構造調査等の追跡調査を行っている．設置から約１年経過した段階であるが，既に補強シートによる効果が確認されている．今後も追跡調査を通じて，アスファルト層下面補強シートの導入効果を検証し，補強シートの本格導入に向けた定量評価を進めていきたい．

参考文献

1) 髙橋ら：高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト，土木学会論文集E1.Vol.71，No.3，I-93-I_101，2015
2) 松本ら：アスファルト層の下面補強に寄与するジオシンセティックスの基礎検討，2025年度土木工学会舗装工学講演会，第30回舗装工学講演会講演集PL2025-051，2025

③ 雪に強い地域づくり

路面照射装置を活用した除雪編成見直しによる作業の安全性，経済性及び生産性の向上について

㈱ネクスコ・メンテナンス新潟　長岡事業所　保全第一課　　○近藤　伶
長岡事業所　保全第一課課長　　若杉　公彦
長岡事業所　工務課係長　　鶴巻　光

1　はじめに

NEXCO東日本　新潟支社　長岡管理事務所管内は豪雪地域に位置しており，雪氷期における高速道路の安全・安心・快適・便利な交通確保が命題となっている．㈱ネクスコ・メンテナンス新潟は,NEXCO東日本のグループ会社であり，新潟支社管内の雪氷対策作業を担っている．豪雪地域を多く抱える同管内では，冬期交通の安全性を確保するため，24時間体制で除雪作業及び凍結防止剤散布作業を実施している．

一方，近年は建設業就業者数の減少を背景に除雪作業に従事する担い手の高齢化や人材確保の困難化が進行している．そのため，従来の除雪体制を維持することが難しくなりつつある．また，近年の積雪傾向として，寒波の断続的流れ込みにより時間5cmを超える降雪が続くケースもあり，結果として除雪作業の長時間稼働を余儀なくされる状況もあった．（図－１）このような環境下では，作業従事者の疲労蓄積から安全性低下が懸念されるとともに，限られた人員で確実に除雪対応可能な体制構築がこれまで以上に重要となる．以上のことから，作業環境は年々厳しさが増すなか，限られた人員で除雪作業を継続しつつ，作業従事者とお客さま双方の安全性確保がより一層重要となっている．

このような背景を踏まえ，長岡管理事務所管内における除雪作業の現状を整理し，安全性向上と省人化の両立を目的とした除雪編成の見直しについて検討を行った．その検討内容と導入効果について報告する．



図－１　長岡IC閉鎖による集中除雪状況

2　除雪作業の現状と課題

従来の除雪編成は，最後尾に標識車を配置し，後方から接近するお客さま車両へ作業の注意喚起を行っている．しかしながら，過去に他管理事務所管内において，後尾警戒中の標識車に大型トレーラーが追突し，緩衝装置が著しく損壊したうえで前方の除雪車の作業装置との間に挟まれる重大事故が発生した（図－２）．標識車は，中型車両であるため大型車等との衝突により作業従事者の安全を十分に担保できない構造的リスクを抱えていることが明らかとなった．一方，除雪作業に使用する除雪トラックは大型車両であり，車両重量やフレーム構造から，万一衝突が発生した場合でも，標識車と比較して作業従事者の受動安全性が高い．以上を

踏まえ，標識車を後尾警戒車両として除雪編成に配備し続けることは，かえって事故時の人的リスクを高める可能性があると判断した．そこで，安全性向上と省人化の両立を目的として，除雪編成から標識車を廃止することを検討した．

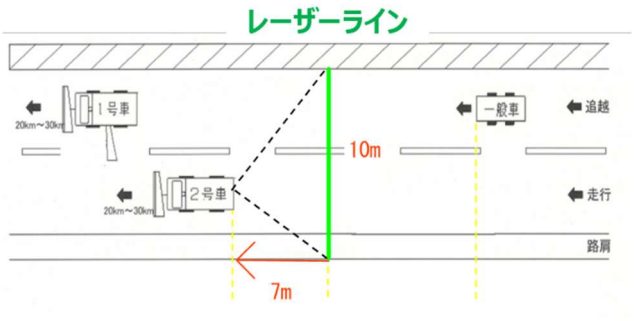


図－２　過去の事故事例

３　課題を踏まえた対策と試行

標識車を除雪編成から廃止するにあたり，新たな安全対策として路面照射装置の導入を検討した．　路面照射装置は，除雪車や標識車両に設置し，車両後方7mの位置に，最大幅10mの緑色レーザーラインを投影する装置である．これはお客さま車両に対して視覚的に明示し、除雪編成への接近・追い越しを抑制することを目的としたものである．特に夜間の降雪時や視界不良時に高い視認性を確保できる点が特徴である．

長岡管理事務所における除雪編成は通常，3台の除雪車と1台の標識車で構成され，1号車が追越車線の除雪，2号車が走行車線の除雪，3号車が路肩の除雪，標識車が後続車への注意喚起を担っている．今回の試行では，本装置を除雪編成の2号車に設置し，お客さま車両に対して明確な走行抑止範囲を示すことで，従来標識車が担っていた注意喚起機能を代替することを検討した（図－３）．



図－３　路面照射装置活用イメージ

４　導入に向けた課題抽出と解決策の検討

４．１　試行区間の検討

除雪編成から標識車を廃止するため，インターチェンジ（以下，IC），バス停，サービスエリア（以下，SA）等では，標識車によるお客さま車両先導固定のもと実施していたバック作業が不可能となった．そのため，試行区間の検討に先立ち，従来の除雪編成における作業経路を精査し，バック作業を伴わない区間の抽出を行った．その結果，前述条件を満たす区間として，北陸自動車道　上下線　中之島見附IC～三条燕IC間を選定した．当該区間は，長岡管理事務所管内において最も交通量の多い区間であり，日平均交通量は約37,000台に達している．なお，路面照射装置の活用事例については，湯沢管理事務所や東北支社　旧十和田管理事務所管内で活用事例があるものの，これは標識車に設置した事例かつ当該事例は断面交通量が日平均約12,000台を下回る区間での実施であった．これに対し，本検討で対象とした中之島見附IC～三条燕IC間は，これを大きく上回る交通量を有しており，これほどの交通量規模の区間における標識車無し除雪編成の試行は，NEXCO東日本管内では初の取り組みとなり導入にあたり作業従事者の安全性確保が命題となった．

４．２　作業経路の見直し

従来の運用では，標識車がICノーズ間に停車し，本線下流側から接近するお客さま車両およびICランプから本線へ合流する車両を標識車の運転手・助手が目視により確認したうえで，標識車からの合図により除雪編成を形成していた．しかし，標識車を廃止するため，ICノーズ部で本線下流から接近するお客さま車両の動向を直接確認する手段が失われ，従来と同様の方法による安全な除雪編成の形成が困難となった．この課題に対し，当該除雪編成が待機している三条燕IC周辺のUターン路を活用し，Uターン路から本線へ合流する位置で除雪編成を形成する作業経路変更を行った．Uターン路とは，高速道路の除雪作業・凍結防止剤散布作業を行う車両が安全に高速道路を転回するために設置された専用施設をいう（図－４）．　この作業経路の変更により，IC合流部に標識車を配置することなく，本線上で安全に除雪編成を形成可能となった．一方で，作業経路変更に伴い，ICランプ等の一部区間において除雪対応が手薄となる箇所が生じることが危惧された．そのため，隣接する基地の作業経路の照査により当該箇所の除雪は，隣接基地が分担対応する運用調整を行った．



図－４　Uターン路

４．３　渋滞の発生リスク

従来であれば，除雪編成待避所等において除雪編成を一時的に解除し，編成に後続するお客さま車両を先行させることが可能である．しかし，今回の編成見直しにより解除ができなくなった．そのため渋滞発生の懸念が生じた．その対応として交通量が著しく少ない時間帯22:00～5:00（時間交通量200台未満）での試行運用を実施し，交通流への影響を検証した．加えて，路面照射装置の効果を十分に発揮させるため，お客さまへの理解促進を目的とした広報活動を行った．公式SNSやSAなどでのデジタルサイネージを活用した情報発信（図－５）による周知を行い，「緑色のラインを越えてはならない」という安全走行の認知向上を図った．併せて試行当初の認知不足に備え，編成後方約30mの位置に標識車を配置し，広報支援を実施した．（図－６）



図－５　広報資料



図－６　広報支援用標識車標示内容

５　試行導入結果

図－７に路面照射装置の試行状況を示す．2025年度雪氷期において，7夜間全10回の試行を実施した．最大約70台程度の後続車両が確認されたが，前述の広報活動効果もあり，お客さま車両による除雪編成の妨害や追越しは発生せず，安全に除雪作業を実施できた．また，最終段階では広報支援の標識車を配置せずとも，問題なく除雪作業を実施できた．（図－７，図－８）

一方で安全性確保の観点から，従来運転手のみで作業を行っていた2号車に助手を追加した．2号車助手の役割は，従来標識車の助手が担っていた移動無線の開閉局・IP無線による除雪編成形成の合図・路面照射装置及び標識字幕操作などである．

以上の結果，編成全体で標識車1台と1名の人員が削減でき，約2割の生産性向上が実現できた．

６　おわりに

本稿では，標識車の削減と路面照射装置導入を中心とした除雪編成見直しについて報告した．設備対策に加え，運用改善および広報活動を組み合わせることで，安全性向上と省人化の両立が可能であることが確認できた．

今後は，交通量の多い時間帯での試行や運用ルールの見直し，適用区間の拡大について検討を進め，より安全で効率的な除雪体制の構築に取り組んでいく．

また，本取り組みは副次的効果として，お客様車両の速度抑制による事故防止，標識車削減によるCO2削減，車両削減による車両整備コストの削減といった効果が考えられるため，これらについても検証し，定量的評価を行っていく．

本取り組みは，人口減少及び高齢化が加速する日本社会において，高速道路の除雪車両自動運転技術が普及するまでの段階運用として持続可能な雪氷作業を実現する有効な選択肢の一つであると考える．



図－７　路面照射装置試行状況



図－８　お客様車両追従状況

登坂不能対策と地下水保全を両立する消雪パイプ DX

株式会社興和　中越支店　水工部 部長代理　〇大橋　勝人
株式会社興和　本社　技術開発室 室長　藤野　丈志
浅野金属株式会社　企画開発部 課長　金田　裕之

1　はじめに

一般国道　8 号（柏崎市青海川地内）の登坂区間では、過去に雪による登坂不能が発生したことから消雪パイプによる対策を行った。本地域は地下水が乏しいため、消雪設備の散水量は抑制して使う必要がある。対策延長　560　m　の範囲は全体として　S　字カーブの線形であり、縦断・横断勾配が複合する三次元的な路面形状であることに加え、交通量が多く轍の発生が予見される。このような道路条件のなか、限られた水量を的確に散水して残雪を抑え、登坂不能対策を図るため、特殊ノズルを開発・導入し、複雑な道路勾配とノズル種類を反映させた散水状況シミュレートに取り組んだ。本報告では、これらの技術的アプローチの概要と成果、および消雪パイプ　DX　への展開について報告する。

2　登坂不能対策消雪設備概要

2.1　対策位置と現場条件

登坂不能対策位置と現場条件　本対策の対象は、新潟県柏崎市青海川にある一般国道8号上り線 99.69～100.25　kp　の延長560　m　区間である。図2-1に対策位置を示す。対策区間の主な諸元を以下に示す。

- 気象条件：日降雪深　7.6　cm/day、設計時間降雪深　1.76　cm/h
- 消雪範囲：走行車線と右折車線の延長　560　m（散水面積　2,178　m²）
- 縦断勾配：上り勾配　2～4　%、左右カーブ・右折車線・登坂車線を含む　S　字カーブ
- 水源：地下水（凝灰角礫岩の裂か水）、井戸適正揚水量　420　L/min
- 設計散水量：400　L/min（0.165　L/min/m²、ノズル　1　個当たり約　1～2　L/min）

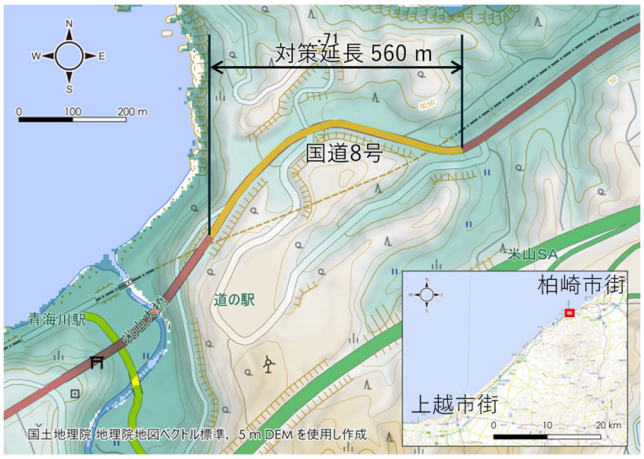


図　2-1　対策位置

2.2　技術要件

設計報告書では、散水量　400　L/min　で　560　m　の上り走行車線　1　車線を消雪する計画であった。通常のノズル間隔およびノズル孔数では散水量が過剰となるため、通常　1.38　m　のノズル間隔を 1.83　m　に広げ、走行車線のみ散水する区間では 2　孔片散水ノズル、走行車線と右折車線を散水する区間では　3　孔片散水ノズルが基本となっていた。本区間は、S　字カーブのなかに横断勾配の変換区間が存在し、さらに交通量が多い路線で轍の発生が予見されることから、轍に遮られて散水した消雪水が車線全体に広がらない恐れがあった。このような道路条件のなか、登坂不能対策として残雪箇所が出ないように、消雪水をなるべく均一に散水することが求められた。

3　ノズルの開発と散水シミュレート

3.1　ノズルの工夫

本区間に適用したノズルを図 3-1 に示す。通常ノズル（ 2 孔片散水、3 孔片散水）に加え、開発した特殊ノズルである轍散水ノズルおよび節水ノズルの計 4 種類である。轍散水ノズルは、縦断勾配が支配的な区間において散水した消雪水が轍を乗り越えられない問題に対応するために配置した。 1 孔から轍へ直接散水し、車両の通行を確保するものである。節水ノズルは、1 孔から広範囲に水を散らし、少ない水量でも隙間なく散水できるように開発したものである。地下水の節水を目的として開発したものであるが、本工区の広いノズルピッチに対しノズル間の残雪を防ぐ効果に期待して試験導入した。

散水性能の確認として、施工前に散水試験を実施した。図 3-2 に散水試験の状況を示す。轍散水ノズルでは、ノズルから遠い轍に届かせるために、1 L/min 程度の散水量で 2 m 程度の飛距離を確保し、走行の妨げにならないよう散水高さを 20 cm 程度までに抑えられるノズル口径と散水角度を確認した。節水ノズルでは、散水量と散水範囲の確認を行うとともに、冬期の消雪状況よりノズル間の残雪を抑制できることを確認した。

4 種類のノズルの配置図を轍散水ノズルと節水ノズルの配置を図 3-3 に示す。轍散水ノズルは横断勾配変換区間 22 m に、節水ノズルは対策区間の末端側 16.5 m に設置することとした。



図 3-1 適用した 4 種のノズル



図 3-2 散水試験

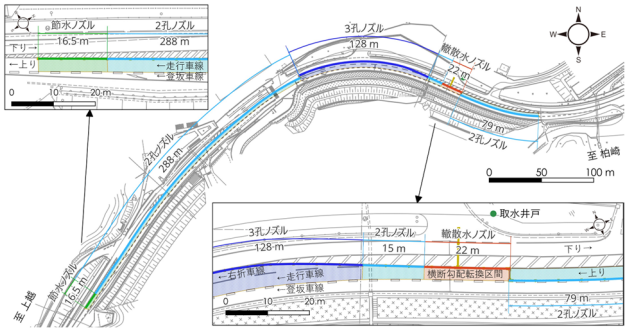


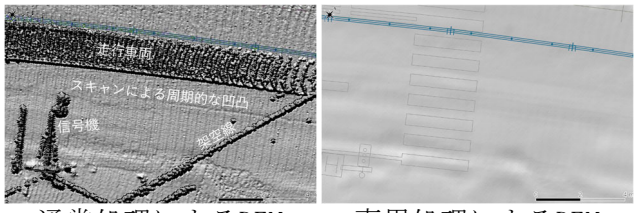
図 3-3 ノズル配置

3.2　散水シミュレート

4 種類のノズルの散水状況を事前に把握するため、点群データを用いた路面 DEM の作成と散水シミュレートを実施することとした。路面 DEM の作成にあたっては、（一財）日本デジタル道路地図協会より提供されている MMS による道路三次元点群を使用した。MMS 点群は、走行車両・不要構造物等のノイズを含むほか、スキャン特性による縦断方向に周期的な凹凸を持つ。そこで、これらの不要データおよびスキャン起因の周期変化を取り除きつつ、轍の形状を保持する専用処理プログラムを新たに作成し、轍を考慮した消雪水流下をシミュレートできる図 3-4 に示すような路面 DEM を生成した。

この路面 DEM をベースとして、GISアプリケーションQGIS[1)]の Flow accumulation プラグインを使用し、ノズル種の散水状況を考慮した散水シミュレートを実施した。図 3-5 に横断勾配転換区間における轍散水ノズルの散水シミュレー

ト結果、図 3-6 に節水ノズルの散水シミュレートを示す。色が寒色から暖色になるほど流量が多いことを示す。横断勾配転換区間では、轍散水ノズルを導入することにより、ノズルから遠い方の轍にも消雪水がいきわたることが確認できた。節水ノズル設置区間では、2 孔ノズルと比べてノズル間の隙間なく散水されることが確認できた。



通常処理によるDEM　　専用処理によるDEM

図 3-4 道路DEMの作成

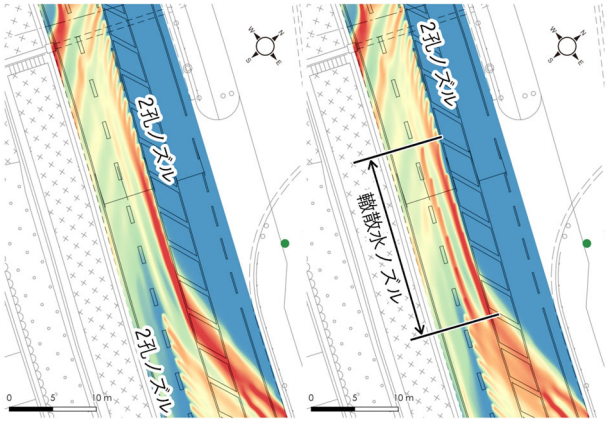


図 3-5 轍散水ノズルシミュレート

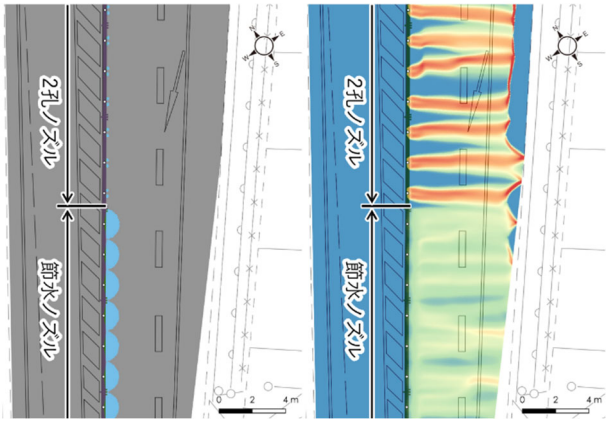
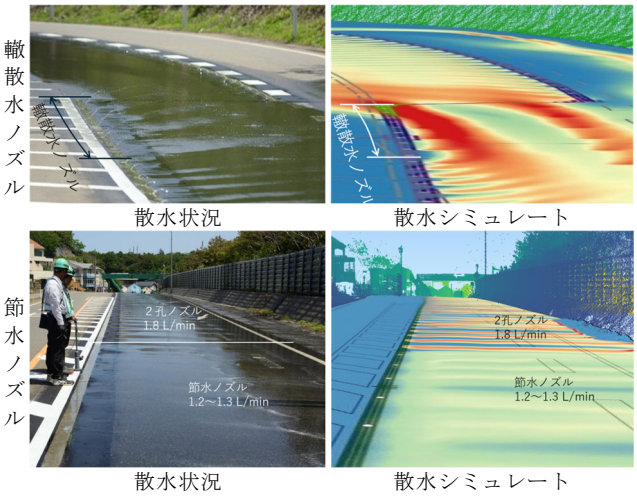


図 3-6 節水ノズル散水シミュレート

4　散水状況

消雪パイプ施工後に試験散水を実施し、散水シミュレートとの整合性を現地で確認した。試験散水状況と散水シミュレートの比較結果を図 4-1 に示す。横断勾配転換区間の轍散水ノズル、節水ノズルのいずれにおいても消雪水の流下方向がシミュレートと概ね一致しており、路面 DEM に基づく散水シミュレートの精度が実用レベルにあることが検証された。



散水状況　　散水シミュレート

散水状況　　散水シミュレート

図 4-1　散水状況と散水シミュレート

5　消雪パイプ DX

5.1　散水シミュレート導入による従来手法の転換とその効果

本取り組みにおける散水シミュレートの導入は、消雪パイプ設計の在り方を大きく転換するものである。従来は流下方向の確認を現地での確認と試験散水に委ねていたが、MMS 点群と専用処理プログラムによる路面 DEM の活用により、現場での確認から机上・事前確認への転換が実現できる。特殊ノズルを採用する場合にも対応できるので、従来であれば現場確認による試行錯誤が必要なところを、デジタル試験による設計段階での確認へと設計手法を転換できる。

気温低下時の消雪水や、散水停止後に排水が続く消雪水は、消雪範囲外へ流れていくと特に凍結リスクが高くなる。散水シミュレートを使うと、図 5-1 のように流下状況に基づく路面凍結リスクの可視化が可能となる。散水シミュレートによる散水状況の可視化は、冬期道路管理情報への付加価値を創出することも可能となる。

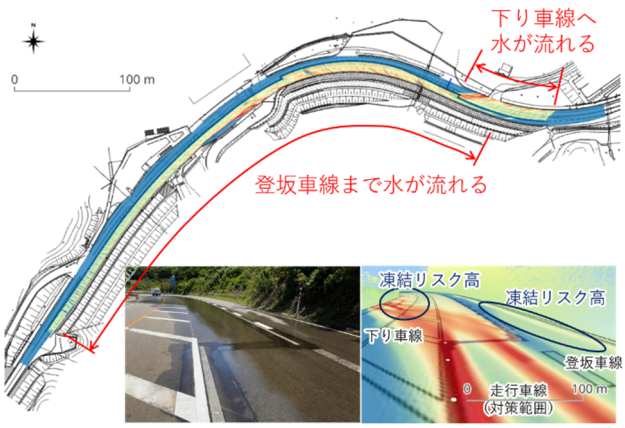


図 5-1 流下状況に基づく路面凍結リスクの可視化

5.2　遠隔制御システムとの連携

消雪施設には消雪パイプを遠隔で制御する遠隔制御システムが導入されており、稼働状況・消雪状況を冬期道路情報としてリアルタイムに提供が可能である。

今回実施した散水シミュレートは、消雪水の流下状況の可視化にとどまるが、消雪状況シミュレートへ発展させることで、どの程度の降雪まで交通確保できるかを予測することが可能となる。将来的には、降雪量・積雪状況・交通状況等のデータとの組み合わせ、交通リスク予測や防災情報の提供へと展開していきたい。

5.3　地下水節水

試験施工をおこなった節水ノズルは、地下水保全の観点からも有効である。図 5-2 に示すような交通量が少ない道路や狭い道路に適用することで、少ない散水量で残雪を抑制し地下水節水をおこなうことができる。本施設の冬期消雪効果を見たうえで、消雪パイプ普及地域への普及に努めたい。

また、散水設計の手法として散水シミュレートが浸透していけば、ノズルごとの散水量を道路状況に応じて細かく調整できるようになり、地下水保全に配慮した節水設計へのシフトも可能となる。



交通量が少ない道路　　幅員が狭い道路

図 5-2 節水ノズル設置による節水効果の高い道路

6　おわりに

本報告では、一般国道 8 号（柏崎市青海川地内）における登坂不能対策消雪設備の設計・施工を対象に、轍散水ノズル・節水ノズルの開発と適用、点群DEMに基づく散水シミュレートの実施、および消雪設備 DX への展開について報告した。

地下水取水量 400 L/minで延長 560 m の S 字カーブ・登坂車線・右折車線を含む複雑な路面条件のもと、特殊ノズルと散水シミュレートを組み合わせることで、良好な散水を実証できた。

散水シミュレートの導入は設計品質の向上と現場効率化をもたらすとともに、路面凍結リスクの可視化や持続可能な地下水利用に配慮した設計思想への転換という、消雪パイプ DX 実現に向けた重要な一歩となった。今後、遠隔制御システムとのさらなる連携を通じ、冬期道路管理の高度化・スマート化に向けた技術発展を図っていきたい。

謝辞

本報告にあたり、長岡国道事務所ならびに柏崎維持出張所の関係者のみなさまには、多大なご理解とご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

引用・参考

1) QGIS Development Team (2026). QGIS Geographic Information System. QGIS Association. https://www.qgis.org

④ 自然災害からの安全確保

セメントスラリー式噴射撹拌処理工法「PJ工法（タイプⅢ）」

株式会社不動テトラ　北陸支店地盤研究室　田口　雄一
北陸支店地盤研究室　高垣　修太
北陸支店地盤研究室　○平良　早弥香

1　はじめに

深層混合処理工法における格子状改良やブロック式改良では、改良体の一体化および遮水性を確保する目的で、隣接杭同士を重ね合わせるオーバーラップ施工が行われる。深層混合処理工法は機械式撹拌工法と高圧噴射撹拌工法に分類され、一般には経済性に優れる機械式撹拌工法が多く用いられている。しかし、施工間隔（ラップ期間）が長期化した場合、先行杭の硬化が進むことで、オーバーラップ部分の不具合や施工機械への負荷が問題となっていた。この背景から、機械式撹拌工法に軽微な仕様変更のみで確実なオーバーラップ施工に対応可能な複合撹拌工法（以下、「PJ工法」）を開発した。本稿では、PJ工法の技術的特徴ならびに代表的な適用事例について報告する。

2　PJ工法概要

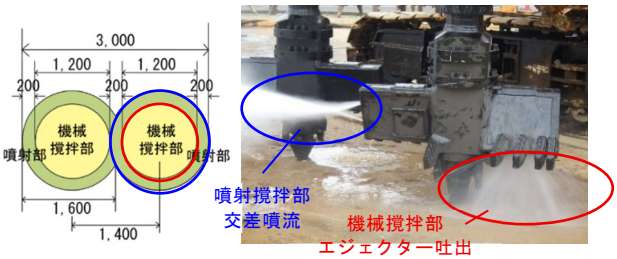
深層混合処理工法は機械式撹拌工法と高圧噴射撹拌工法に分類されるが、その両工法の利点を組み合わせたのがPJ工法である。

機械式撹拌工法は、安定した品質・工期・工費の面で優れているものの、改良体同士や既設構造物への密着施工においては撹拌翼の回転障害といった課題がある。一方、高圧噴射撹拌工法は、改良体同士や既設構造物との密着施工への適用性に優れる反面、複雑な地盤での一定な改良径の確保や工期・工費の面で課題があった。

PJ工法は中心部を機械撹拌、外周部を噴射撹拌とすることで、構造物や隣接杭との確実な密着性を確保しつつ、高い施工性と経済性を両立させることができる工法である。

3　PJ工法の特徴

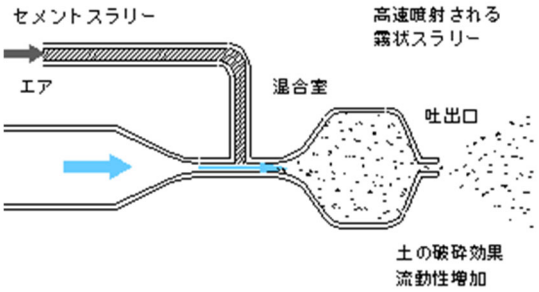
図-1に示す通り、PJ工法の撹拌翼は機械式撹拌工法の撹拌翼に高圧噴射ノズルを設けており、改良体中心部は機械撹拌で、改良体外周部は噴射撹拌で造成を行う。吐出方式として、機械撹拌部にはエジェクター吐出を、噴射撹拌部には交差噴流を適用している。



図－1　改良断面と撹拌翼

3．1　エジェクター吐出と交差噴流の併用による均質な改良体の造成

エジェクター吐出機構とは、固化材スラリーをエアに同伴させ、霧状に放出させる構造である。改良域全体に固化材を散布できるため、大径の造成であっても高い撹拌能力を発揮する。また、霧状スラリーが土を破砕して流動性を高めるため、貫入・撹拌時の機械負荷が低減する。



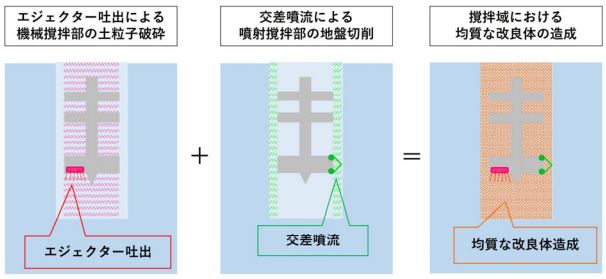
図－2　機械攪拌部エジェクター吐出説明図

交差噴流とは、写真-1に示すように上下2段のノズルから交差するようにセメントスラリーを噴射する方式である。高圧噴射撹拌工法で用いられる圧力（30～40MPa）と比較し、本工法では圧力を10～15MPaの中圧域に設定している。注入エネルギーを切削に必要な最小限に抑えることで、機械設備や施工コストの増大を抑制している。



写真-1　噴射部吐出口

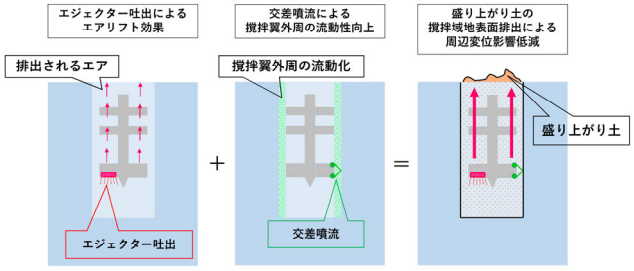
PJ工法はエジェクター吐出と交差噴流を併用することで、図-3に示すように、各撹拌域において、確実に地盤を切削し、また流動性を増加させることで、均質で高品質な改良体の造成を可能とする。



図－3　改良体造成イメージ

3．2　エアリフト効果による周辺への変位影響の低減

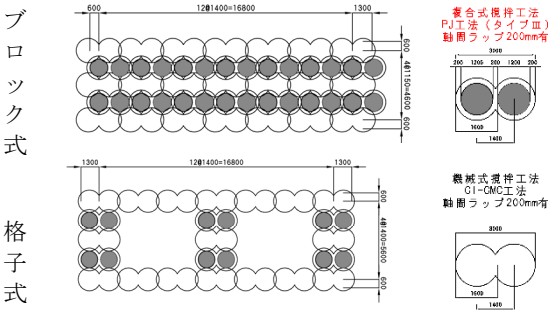
エジェクター吐出によるエア同伴スラリーにより、エアリフト効果が発生し、地中の土粒子が上方へ移動しやすくなる。さらに、外周部の交差噴流が撹拌翼外周の土塊を切削・流動化させることで、撹拌域内の余剰土が地表面へ排出しやすくなり、周辺地盤への変位影響を大幅に低減することができる。



図－4　エアリフト効果イメージ図

3．3　オーバーラップ施工の容易性

一般的なオーバーラップ幅（200mm）の範囲を撹拌翼外周部から交差噴流を吐出することで、撹拌翼自体を直接オーバーラップさせることなく施工が可能となる。これにより、機械式撹拌工法のみでは困難な、図-5に示すようなブロック式や格子式の改良体配置を円滑に施工ができる。



図－5　改良体配置例

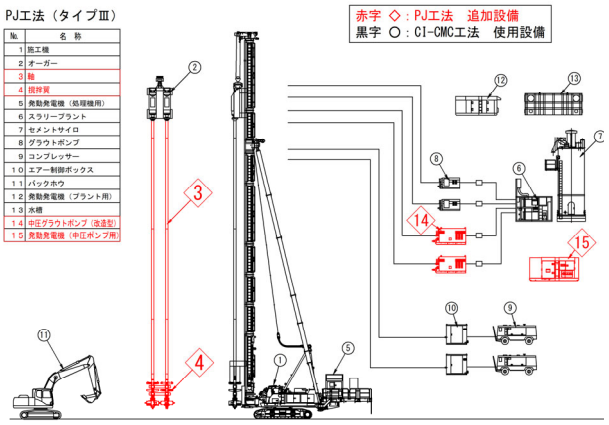
3．4　軽微な設備追加で施工可能

PJ工法は機械式撹拌工法（CI-CMC工法）に軽

微な設備（専用撹拌翼、専用撹拌軸、専用スイベル、中圧ポンプ設備）の追加で施工が可能である。

既存のオーバーラップ対応である先行空掘りや遅延剤の使用は、追加設備を必要としない反面、空掘りに伴う施工能率の低下や、対応可能なラップ期間の限定といった問題があった。また高圧噴射撹拌工法の併用は確実な密着施工が期待できる反面、別途機械の搬入が必要となり経済性・工期の面で問題があった。

PJ工法はこれら従来手法と比較し、施工性・経済性に大幅な変更を与えることなく、確実な密着性を確保できる施工が可能である。



図－6　追加施工機設備図

4　PJ工法の適用用途

以下にPJ工法の適用例を示す。

１）強度増加を目的とした改良：

支持力増加、すべりの安定、土圧バランス、横抵抗増加、液状化対策

２）変形対策を目的とした改良：

沈下低減、側方変位防止

３）止水、遮水を目的とした改良：

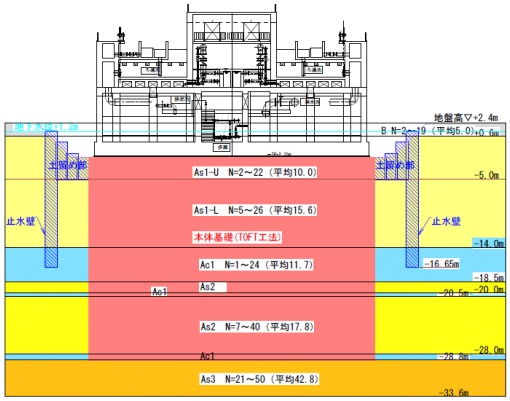
底盤改良、止水構造（止水壁、止水を伴う山留壁構築）

5　適用事例

徳島県におけるPJ工法の適用事例を示す。本工事は地表面から約3m掘削した施工基面において浄水施設を構築するにあたり、掘削法面の安定と地下水の止水を目的として、機械式撹拌工法とPJ工法を組み合わせた自立式土留め壁兼止水壁を施工したものである。

5．1　地盤条件

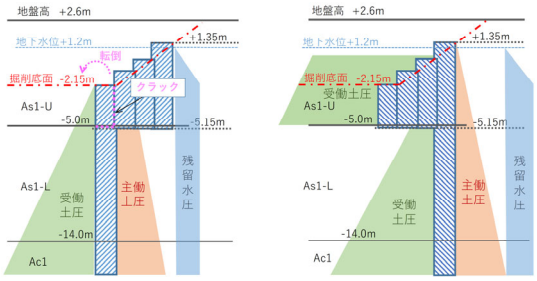
地盤条件と計画断面を図-7に示す。T.P.-33.6m付近まで沖積砂層が深く堆積しており、T.P.-14.0m～-18.5m付近には沖積粘性土層（Ac層）が存在する。なお、自立式土留め壁構築後にT.P.-2.15mまで開削し、これを施工基面として施設下部に支持力確保のための地盤改良（TOFT工法）が施工されている。



図－7　地盤条件と計画断面

5．2　自立式土留めの設計

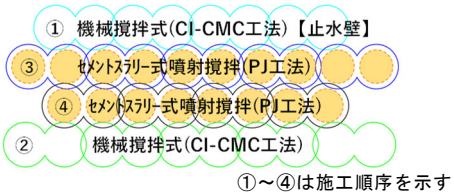
掘削深さ4.75mに対する照査では、無対策の場合に円弧滑りおよびボイリングの発生リスクが懸念されたため、止水壁を兼ねた土留め構造を計画した。階段状に設けた4列の改良体のうち、主働側の1列をT.P.-16.65mまで根入れして遮水壁とした。遮水壁は背後からの高い土圧・水圧を受けるため、受働側ではなく主働側に配置することで転倒に対する安全性を高めた。



図－8　改良体配置と改良体の安定性

5．3　改良体配置と施工仕様

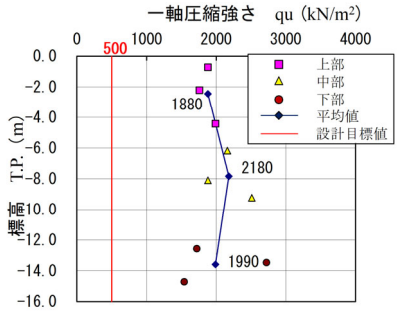
図-9に改良体配置図を示す。土留め壁の安定性確保には断面方向の一体化が必要で、止水壁の遮水性確保には延長方向の連続性が重要である。そこで4列の配置のうち、1列目と4列目を機械式撹拌工法とし、2列目と3列目にPJ工法を採用した。先行施工され硬化が進んだ機械式撹拌工法による止水壁（1列目）対し、PJ工法の交差噴流を用いることで機械的干渉を起こすことなく確実な密着施工が実現できた。



図－9　改良体配置図

5．4　改良体の品質確認

図-10に改良体から採取したコアの一軸圧縮試験結果を示す。目標強度500kN/m^{2}に対し、1,500～2,500kN/m^{2}が得られている。



図－10　品質確認結果

写真-2に施工完了後の掘削状況を示す。露出法面においても改良体が一体化している様子や、漏水することなく、断面の安定性を保っていることが分かる。



写真-2　掘削状況写真

6　おわりに

本稿では、機械式撹拌工法と高圧噴射撹拌工法それぞれの長所を併せ持つ複合撹拌工法PJ工法の特徴と、適用事例について紹介した。適用事例を通じ、PJ工法におけるオーバーラップ施工の容易性と、優れた品質・遮水性が確認された。今後は地盤条件に応じた翼径の変更や噴射エネルギーの最適化を進め、さらなる施工条件への適用拡大を図る所存である。

参考文献：

１）堀内滋人、尾形太、松本幸久、後藤田忠久、大藤泰彦：セメントスラリー式噴射攪拌処理工法による仮設土留めの設計と施工、第58回地盤工学研究発表会、13-4-4-04、2023

２）今井優輝、尾形太：機械式・噴射式複合撹拌工法の開発と止水壁を兼ねた仮設土留め壁への適用事例、第16回地盤改良シンポジウム論文集、2024年

人工排水材を用いたボイリング被害抑止工法　SBDS工法

五洋建設株式会社（DEPP工法研究会）　○片山　遥平
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　佐々　真志

1　はじめに

空港や港湾などの輸送拠点となる重要施設は，レベル2地震動などの災害時にもその機能を維持し続けることが要求される．このような施設では液状化対策が行われることが一般的である．

ここで，固化処理工法や過剰間隙水圧消散工法などは液状化の発生そのものを防ぐことを目的としている．広大な用地を有する施設全域に液状化対策を実施することは，対策コストや施工時の施設利用制限の面から現実的ではない．そのため，広域の液状化被害抑止を目的とした予防保全事業やBCP防災に対応した工法が望まれている．

このようなニーズに応えるため，港湾空港技術研究所とDEPP工法研究会では，表層地盤のボイリング現象を人工排水材の設置により抑制し，地震被害を最小限に抑えるSBDS工法（Sand Boil Damage Suppression Method）を開発した[1)]．本稿ではその内容について報告する．

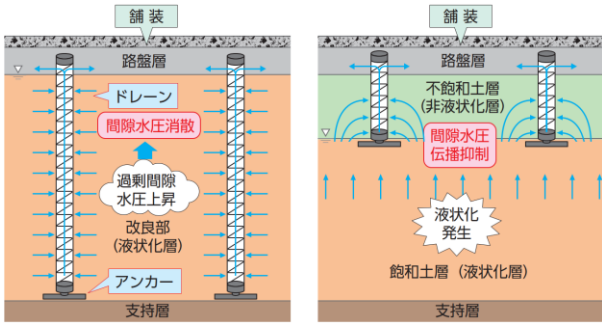
2　SBDS工法について

2．1　BCP防災

BCPの策定では，地震時の液状化現象に対してある程度の被害は許容しつつ，事業継続性の確保もしくは早期の復旧再開を可能とする対策が求められる．具体的には，空港であれば地震に伴い液状化が発生したとしても，地表面の変状が航空機や緊急車両・復旧工事車両の通行が可能な程度に収まること，港湾であれば集積した貨物などが荷崩れを起こさず，物資の移動・再配置の安全性が確保できることなどである．

2．2　SBDS工法の対策原理

人工排水材（ドレーン）を用いた新たな液状化被害抑止工法であるSBDS工法は，従来の液状化層ではなく，表層地盤の非液状化層にドレーンを敷設し，液状化層から非液状化層への過剰間隙水圧の伝播を防ぎ，もって液状化に伴う地盤内流動および噴砂・ボイリングを抑止するものである．図－1に工法概念図を示す．比較対象として，液状化対策工法であるDEPP工法（過剰間隙水圧消散工法）を併記している．



(a)DEPP工法　　(b)SBDS工法

図－1　DEPP工法とSBDS工法の概念図

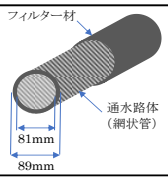
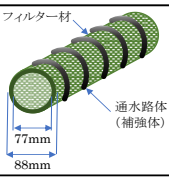
本工法は，対策範囲以深では液状化を許容するという点で，従来の液状化対策とは全く異なる概念で開発されたものである．液状化の許容によりある程度の地表面の沈下は生じるが，交通荷重や上載荷重に対する地盤支持力は確保され，施設機能の健全性は維持される．打設深度が20～30 mにも及ぶDEPP工法に比べ，対策範囲が表層地盤の3～5 m程度に限定されるため，小型の汎用地盤改良機を使用可能で，迅速な施工・大幅なコスト削減を実現できる．そのため，空港・港湾に限らず，一般道路など様々な場所に適用可能である．

3　ドレーン性能と工法の有効性

3．1　ドレーン材の仕様[2)]

本工法に用いられる人工ドレーン材の仕様を表－1に示す．強度や透水係数は一連の材料試験より求めている[2)]．外径が90 mm弱の中空円形断面で，1本当り3～5 m程度の短尺であるため，非常に軽量で作業者一人での取り回しが容易である．

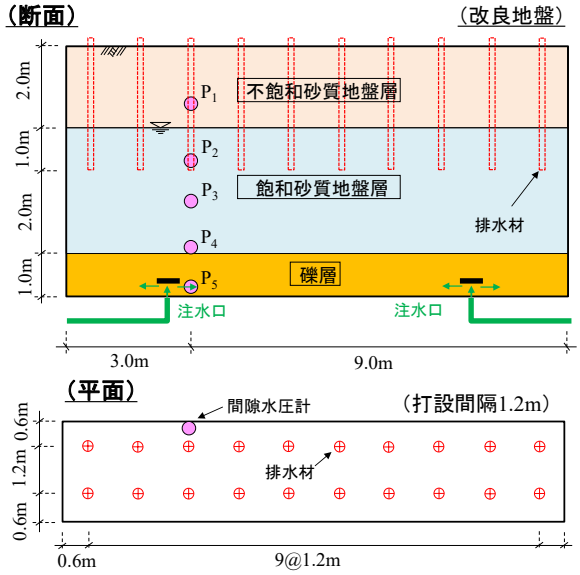
表－1　ドレーン材の仕様

ドレーンタイプ		パイプ状ドレーン	スパイラルドレーン
断面形状		中空円形断面	
材質	通水路体	高密度ポリエチレン	ポリプロピレン
	フィルター材	ポリプロピレン製繊維	ポリプロピレン製不織布
寸法	外径(mm)	89	88
	内径(mm)	81	77
	長さ(m/本)	3～5	
圧縮強度(N/100mm)		≧ 362	
引張強度(N/50mm)		≧ 245	
透水係数 (m/s)	i=0.25	≧ 6.0	
	i=0.5	≧ 4.0	
概要図			

3．2　遠心模型実験[3)]

実大応力場の断面図・平面図を図－2，実験ケースを表－2に示す（詳細は文献を参照[3)]）．土槽底面2か所の注水口から3 L/minで注水し，上向き浸透流によってボイリング現象を再現した．

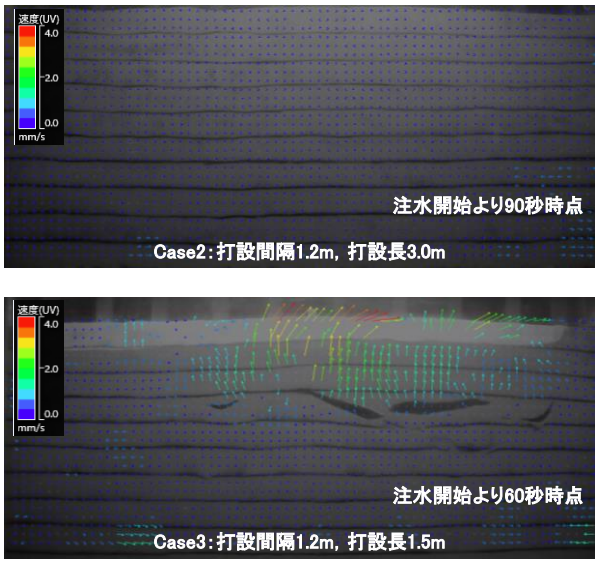
図－3にCase2，3のPIV解析結果を示す．打設間隔が狭く，打設長の長いCase2では改良層内の地盤流動は確認されなかった．打設長の短いCase3では，上向きの土粒子移動を伴う地盤内流動および噴砂が確認された．図－4に土槽中心測線で実験前後に計測した地表面の鉛直変位量を示す．ボイリングが発生したCase1，3，4では隆起と沈下で大きな不陸が生じた一方で，Case2では全体が一様に沈下しており，その沈下量もわずかである．本実験より，ドレーン材を適切な仕様で表層地盤に打設することで，地表面の不陸量を数cmレベルに抑制可能であることが示された．



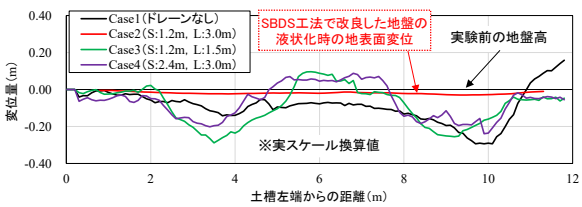
図－2　遠心模型地盤の断面図・平面図

表－2　実験ケース

Case	ドレーン	打設間隔	打設長	ボイリング発生の有無
1	無	-	-	有
2	有	1.2m	3.0m	無
3	有	1.2m	1.5m	有
4	有	2.4m	3.0m	有



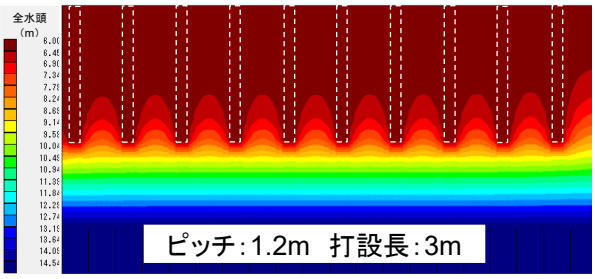
図－3　PIV解析結果



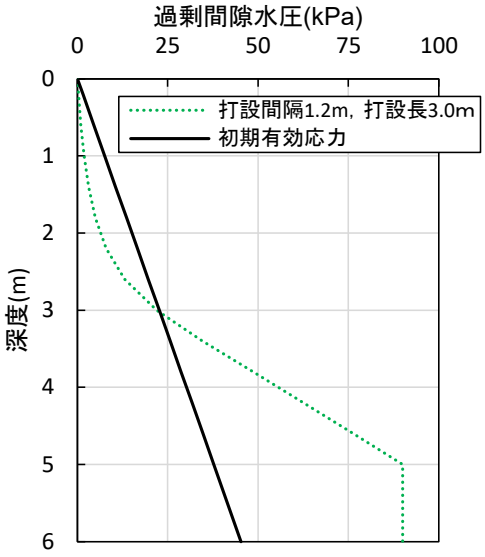
図－4　実験後の地表面変位量

３．３　浸透流解析[4)]

遠心模型実験だけでなく，3次元定常浸透流解析でもドレーン材の効果を確認している[4)]．遠心模型実験のCase2（打設間隔：1.2 m，打設長：3.0 m）に相当する解析モデルの全水頭コンター図を図－５に示す．また，ドレーン打設間隔の中間点における間隙水圧の値から静水圧を引いた値を過剰間隙水圧とし，その深度分布を図－６に示す．これらの図より，ドレーンにより地盤上層の間隙水圧の上昇が抑えられていること，ドレーン打設範囲で過剰間隙水圧が初期有効応力を下回っていることがわかる．浸透流解析においても，ドレーンの有効性を確認した．



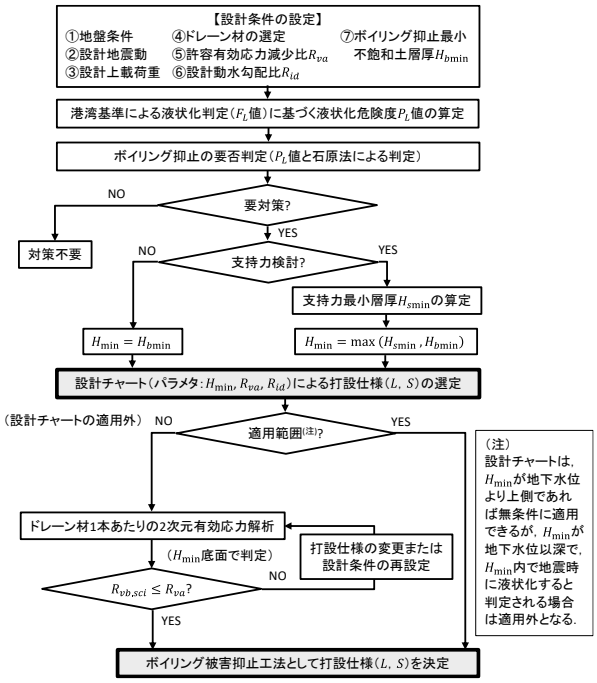
図－５　Case2の全水頭コンター図



図－６　過剰間隙水圧の深度分布

４　設計フロー[5)]

図－７に本工法の設計フローを示す[5)]．本工法は，港湾基準[6)]による液状化判定（液状化安全率F_L値）に基づく液状化危険度P_L値と石原法によるスクリーニングを経てボイリング抑止が必要と判断された場合に適用される．ボイリング抑止最小層厚H_{min}は，ボイリングを抑止するうえで必要な最小層厚H_{bmin}（標準は2.0 m），または必要に応じて車両荷重や荷役荷重等に対する地震時支持力に必要な最小層厚H_{smin}を考慮して決定する．この際，H_{smin}の算定においては，共同溝設計指針による浮上り安定計算法[7)]を参照し，車両や荷役等の設計上載荷重を受ける土塊の安定計算を行う．ドレーン材の打設仕様（打設長L，打設間隔S）は一連の定常浸透流解析に基づいて作成された設計チャートを用いて決定することができる．一連の有効応力解析により，当チャートはレベル2地震動に適用可能であることを確認している．なお，当設計チャートの適用外と判定される場合は，ドレーン材1本当りの2次元有効応力解析を用いて適用性を検証する[8)]．



図－７　SBDS工法の設計フロー

５　施工について

SBDS工法では，写真－１に示す小型の鋼管回転圧入機を使用する．フィールド打設実験を実施し，施工歩掛を確認した．その結果，従来の液状化対策であるDEPP工法で打設深度20 m，打設間隔0.75 mの改良を行った場合と比較すると，施工期間は40 %以上短縮され，打設コストは直接工事費ベースで1/3～1/5程度に低減されると試算される．

６　まとめ

本工法は，新たな概念に基づく液状化被害抑止技術である．巨大地震時に港湾・空港・海岸等施設における道路面ならびに地表の変状を抑制し，地震後の緊急車両の通行性や荷さばき地の利用性を大幅に高め，低コストで広域のボイリング・噴砂・舗装被害を有効かつ経済的に抑止できる．SBDS工法の実務適用に向けて技術資料および積算資料を整備しており，DEPP工法研究会のウェブサイト[9)]よりダウンロードできる．今後の幅広い普及・展開が期待されている．



写真－１　施工機械

参考文献

1）佐々真志，上野一彦，浅田英幸，グエン ビン，田代聡一，片山遥平，赤金秀孝，山内義文：人工排水材を用いたボイリング被害抑止工法の開発，港湾空港技術研究所報告，Vol. 64, No. 4，2025.

2）Nuradi, A.P., Nguyen, B., Ueno, K., Asada, H., Yamauchi, Y. and Suzuki, T.: Permeability behavior of drain materials used for preventing sand-boil due to liquefaction, JSCE 2021 Annual meeting, CS2-07, 2021.

3）Nguyen, B., 佐々真志，上野一彦，浅田英幸，田代聡一：人工排水材による液状化時のボイリング被害抑止工法の地表面変状抑制効果の検証，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.78, No.2, pp.I_577-I_582, 2022.

4）Nguyen Binh，佐々真志，山崎浩之，上野一彦：人工排水材による液状化時のボイリング被害抑止工法の解析と実験，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.75, No.2, pp.I_235-I_240, 2019.

5）DEPP工法研究会：SBDSボイリング被害抑止工法　技術資料，2025.

6）公益社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2018.

7）日本道路協会：共同溝設計指針，1986.

8）田代聡一，浅田英幸，上野一彦，片山遥平，佐々真志：人工排水材を用いたボイリング被害抑止工法の有効応力解析と設計フローについて，土木学会論文集，Vol.81, No.18, 25-18150, 2025.

9）DEPP工法研究会：https://www.depp-koho.jp/

アスファルト舗装の地震対策段差抑制工法「ＨＲＢ工法」

（株）NIPPO北信越支店　技術部長　　石垣　勉
（株）NIPPO北信越支店　技術担当課長　○栁澤　淳史

１　はじめに

近年、地震大国であるわが国では、大規模地震による道路インフラの被害が相次いでいる。特に北陸地方では、平成16年新潟県中越地震、平成19年能登半島地震、新潟県中越沖地震、さらに令和6年能登半島地震など、大規模地震が繰り返し発生している。これらの地震では橋梁、盛土部およびカルバート等の構造物周辺において、不同沈下や路面段差が発生し、緊急輸送路や避難路の通行機能低下、復旧活動の遅延等が社会的課題となっている。本稿では、これらの課題への対応策として、アスファルト舗装の地震対策段差抑制工法「HRB工法」について、開発の背景、工法概要、性能、施工方法および施工実績を報告する。

２　開発の背景

能登半島のように代替路が限られている地域では、一つの道路区間の寸断が集落の孤立を招き、救命・救援活動や物資輸送に大きな影響を及ぼす。このため、災害に強い道路を構築するには、緊急輸送路や避難路等の重要路線における車両走行機能を保持することが重要である。

令和6年能登半島地震では、道路交通が各地で寸断されたほか、橋梁本体の被害が比較的軽微な場合でも、周辺地盤の変形によって橋台背面に段差が生じ、道路の通行機能が低下する事例が確認されている。災害直後に路面段差が発生した場合には、車両の通行を確保するため、砕石やアスファルト混合物によるすりつけ等の応急復旧が必要となる。一方、限られた人員や資機材は、避難、人命救助、消火活動および物資輸送等の初動対応へ優先的に投入する必要があるため、道路の復旧作業を可能な限り縮減することが求められる。

そこで本工法は、地震による不同沈下が生じた場合でも、アスファルト舗装を緩やかに変形させ、車両通行の支障となる局所的な路面段差の発生を抑制することにより、地震発生直後における緊急車両等の走行機能を保持することを目的として開発された。

３　工法の概要

HRB工法は、面状補強材（以下、ジオグリッド）、拘束部材および粒状材で構成する複合剛性層を路床の上部に構築し、路床を補強するものである。構造は、図-1に示すとおり、密実に締め固めた粒状材を低ひずみ・高強度のジオグリッドを用いて補強するとともに、先端拡大型の拘束部材を用いて粒状材の層（以下、粒状層）に鉛直方向の拘束力を導入する構造となっている。補強のメカニズムは、3層の粒状層を4枚のジオグリッドで補強し、拘束部材を用いて鉛直方向に拘束力を導入することにより、粒状層のせん断変形を抑制するものである。

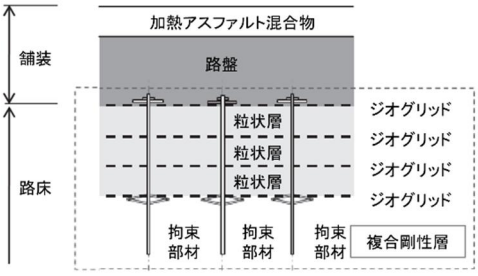


図-1　本工法の構造

構造上の特長としては、アスファルト舗装を複合剛性層によって直接支持することである。これにより、大規模な地震により発生する最大60cm程度の不同沈下に対して、地震発生直後から本復旧に至るまでの期間における車両の通行が可能となる。アスファルト舗装の特長のひとつである変形追随性と地震による舗装の崩壊を防止することで路面を滑らかに変形させる（写真-1）。地震時に生じる不同沈下に対して舗装路面を滑らかな変形とすることで路面への亀裂や段差の発生を抑制し、災害発生直後でも緊急車両の通行を可能とする。また、過去に実施した実物大実験において確認した車両の走行試験では写真-2に示したRV車のほか乗用車およびトラックにおいても車両底部と路面のクリアランスは70～100mm程度確保されていたことを確認している。一方、写真-1に示す未対策の舗装では200mmの沈下が発生した時点で局所的な路面段差が発生し、乗用車の走行は不可能となる。



写真-1　段差発生状況

（左：未対策　右：HRB工法）



写真-2　車両（RV）の走行試験状況

（沈下量55cm）

4　HRB工法の性能

HRB工法は、前述のとおり粒状層、ジオグリッドおよび拘束部材を用いた複合剛性層を路床の上部に構築する路床補強工法であり、その特長は、表-1に示す5つの性能である。

表-1　ＨＲＢ工法の性能

項目	内容
段差抑制性能	・アスファルト舗装の地震による段差の発生を抑制 ・複合剛性層で舗装を直接的に支持する構造であり、大規模な地震などにより発生する最大60cm程度の不同沈下に対して段差の発生を抑制し、車両の走行性を確保することが可能
適用性	・地震時の段差抑制のほか、軟弱地盤盛土部の不同沈下対策や構造物前後や埋設物周囲の陥没対策など、幅広い用途に適用可能
施工性	・従来の地盤改良工法と異なり、大型の機械を用いず施工が可能 ・大型機材の仮設ヤードも不要 ・施工は1車線規制内での作業など狭い用地でも可能 ・ジオグリッドの敷設と拘束部材の設置が容易 ・新設道路および供用中の道路を問わず、短期間での構築が可能
修復性	・面状補強材と拘束部材の撤去は容易であり、短期間で撤去･再設置が可能 ・再構築時、粒状材の再利用が可能
経済性	・地盤改良等の地盤耐震対策工法と比較して工事費が安価

本工法の目的は、大規模地震発生時に生じる最大60cm程度の不同沈下に対して、地震発生直後から舗装の本復旧に至るまでの期間における車両の通行を可能とすることであり、本工法の適用箇所と期待される効果をまとめると表-2に示すとおりとなる。

表-2　本工法の適用箇所と効果

適用箇所	効　果
重要路線 緊急輸送路線	・大規模地震に伴う道路の不同沈下対策として、舗装の崩壊を防止し、路面を滑らかに変形させることにより、通行の支障となる段差の発生を抑制
緊急車両基地	・災害時に重要拠点となる施設内道路の車両走行性の確保と構内ヤードの使用性を確保
切土／盛土境界部	・大規模地震に伴う道路の切土/盛土境界部の不同沈下対策として通行の支障となる段差の発生を抑制
構造物前後埋設物周囲	・大規模地震時における構造物前後、埋設物周囲の陥没や段差支障の発生リスクを軽減
重要施設内の構内道路	・大規模災害に対する事業継続計画(BCP)における対策ツールとして、消火活動や復旧作業の遅延などに伴う事業損失リスクの低減

4．1　本工法の適用タイプ

本工法は、路床上部に複合剛性層を構築するものであり、段差の発生が予想される埋設構造物前後に適用する。設置タイプは、次に示す埋設構造物直上に設置する埋設型と土被りの確保が困難な場合や橋台に設置する接続型がある。

1）埋設型

埋設型は段差の発生が予想される構造物前後の路床上部に図-2に示すように設置するものである。埋設構造物上の土被りが確保できる場合に適用し、当該構造物を跨ぐ形で設置する。

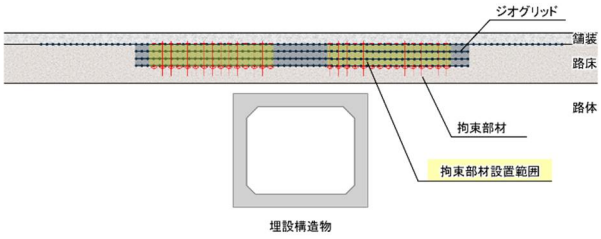


図-2　埋設型の適用イメージ

2）接続型

接続型は、橋梁前後における不同沈下対策として設置する場合、あるいは埋設構造物に所定の土被りが確保できない場合に適用するものである。図-3に接続型の設置イメージを示す。構造物との接続は写真-3に示す専用の固定部材を用いて行い、ジオグリッドを巻き込む形で設置する。上下2段に設置する固定部材ごとに接続し、4枚のジオグリッドと3層の粒状層を構築する。

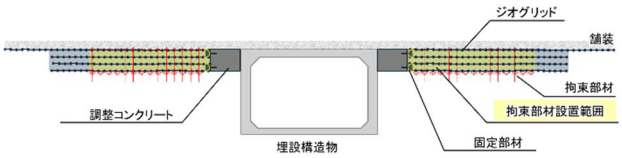


図-3　接続型の適用イメージ

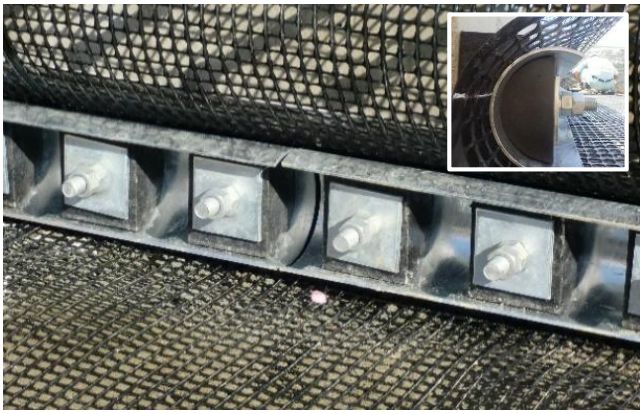


写真-3　専用固定部材による接続

5　施工方法

埋設型と接続型で手順に違いはあるものの、いずれも3層の粒状層、4枚のジオグリッドを構成しており、拘束部材を拡張し鉛直方向に30kNの軸力を導入することで複合剛性層を構築している（図-4）。

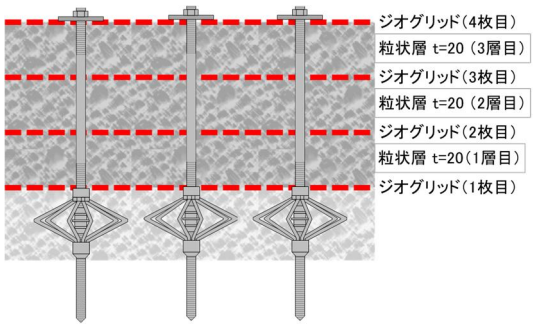


図-4　構築される複合剛性層

HRB工法の施工フローを図-5に、拘束部材の設置手順を図-6にそれぞれ示す。

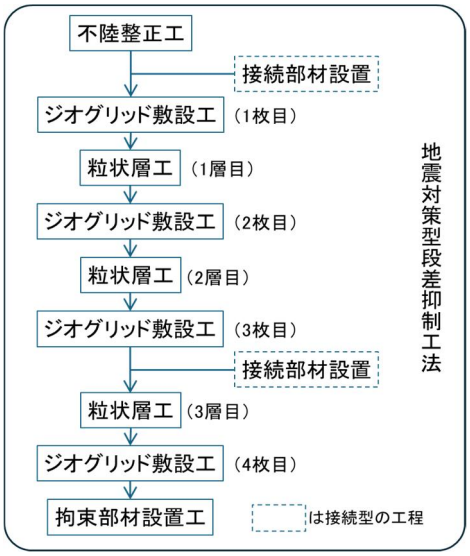


図-5　施工フロー

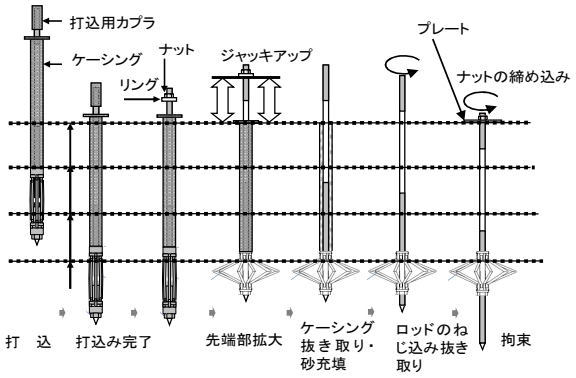


図-6　拘束部材の設置手順

なお、ロッドに導入する軸力の管理は軸力30kNに相当する締付けトルク値（140N･m）で行い、トルクレンチを用いて確認している。

6　施工実績

北陸地区では、これまでライフライン関連重要施設の構内重要道路にHRB工法が採用されている。また、令和6年能登半島地震による道路被害を受け、石川県七尾市内の道路災害復旧工事にも採用されている。令和7年度には、一般県道七尾鳥屋線を含む4工事で施工され、施工面積は合計2,740㎡である。いずれもカルバート前後における段差対策を目的とし、施工厚600㎜の複合剛性層を構築した。



写真-4　施工状況



写真-5　施工完了

7　おわりに

アスファルト舗装の地震対策段差抑制工法「HRB工法」の概要、段差抑制効果、施工方法および施工実績を報告した。今後、石川県内での施工実績を踏まえ、緊急輸送路や避難路等への適用を進めることで、HRB工法が北陸地方の道路機能の確保と、国土強靭化に向けた防災・減災対策の一助となることを期待する。

（参考文献）

1）石垣 勉、尾本志展、太田秀樹：アスファルト舗装の地震対策型段差抑制工法に関する実物大実験 舗装47-4(2012年) pp. 13-18

2）大西啓之：アスファルト舗装の震災前対策段差抑制工法　道路建設No. 813(2025)pp. 82-85

能登半島地震復旧工事におけるプレキャスト踏掛版の有用性について

株式会社ガイアート　北陸支店　石川営業所工事長　　橿山　尚久

1　はじめに

2024年（令和6年）1月1日16時10分に発生した令和6年能登半島地震により奥能登地域を中心に広範囲にわたるインフラ被害をもたらした。特に幹線道路の寸断により、被災の実相把握に時間を要するなど復旧作業が遅延する等、耐震性や復旧性を含めた災害時の道路機能に多くの課題が顕在化した。

本稿では、復旧工事において採用された「プレキャスト踏掛版」における工法の有用性について、その技術的意義を整理する。

2　橋梁部の被災状況

橋梁部の被災の特徴としては、平成7（1995）年の阪神・淡路大震災を契機とする道路橋示方書の改定により耐震性が向上したため、落橋や下部工の壊滅的破壊は発生しなかった。しかし、盛土崩壊が発生した箇所や踏掛版が無い箇所の橋台背面で大きな陥没が発生した。踏掛版が設置されていた箇所においても、橋台ウイングや擁壁の隙間から土砂が流出し、路面に段差や橋台背面に存在する踏掛版下に空洞が生じて沈下する箇所が見られた。また比較的古い橋梁では、踏掛版が設置されていない橋台が多く交通寸断の原因となった。

被災した踏掛版の復旧に関しては、一般車両・復興作業車両の交通への影響を最小限に抑えること、再度地震があっても復元が可能な工法の採用が検討された。

（写真-1 橋梁被災状況）



写真-1 橋梁被災状況

（現地調査速報：橋梁被害　土木学会地震工学委員会・令和6年度能登半島地震（M7.6）に関する速報会より引用）

3　プレキャスト踏掛版の提案採用

一般的な踏掛版は現場打ち鉄筋コンクリートで施工されているが、工場で製作した部材を使用することで交通規制を伴う現場作業を削減できるプレキャスト工法を検討対象とした。プレキャスト部材を使用した踏掛版工法の事例はまだ少ないものの、再び被災して破損した際に容易に補修・復旧できる復元性を持つことから「高強度PRC」の技術を応用した「プレキャスト踏掛版」が採用された。（図-1 踏掛版概念図）

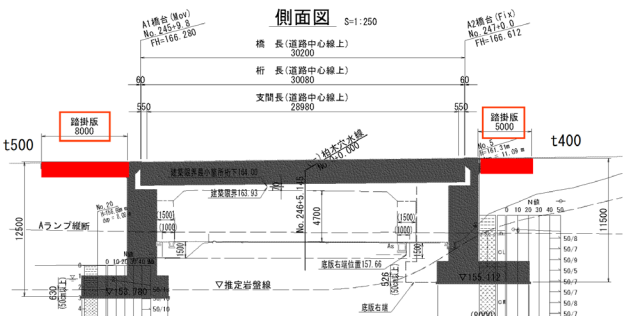


図-1 踏掛版概念図

「高強度PRC版」はプレキャスト部材の使用により急速施工が可能となることから、空港のエプロン部のリニューアルなどで広く利用されている。その技術を応用した「道路用PRC版」は即日開放が必要な箇所のコンクリート舗装としても幅広く普及している。「プレキャスト踏掛版」はこれらの基本構造を踏襲し、踏掛版として必要な耐力を持つRCコンクリート部材として設計している。

（図-2 プレキャスト踏掛版構造概要）

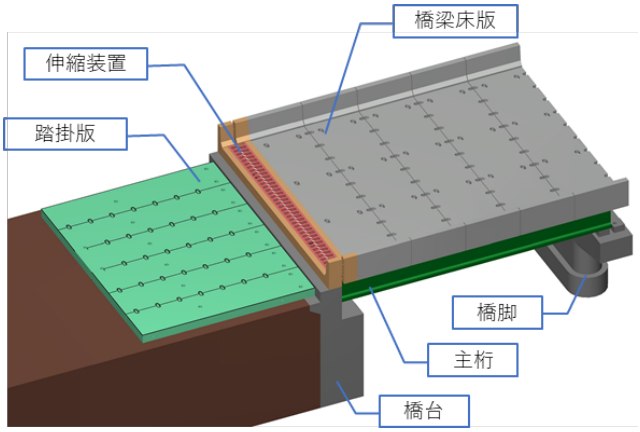


図-2 プレキャスト踏掛版構造概要

プレキャスト踏掛版の部材の接合は、「コッター式継手」をグラウト材と合わせて使用する。この継手構造により各部材の一体化を短期間で行うことができ、急速施工を実現している。また、継手構造により部分的な部材の取替が可能であることから、損傷発生時の復元性も確保されている。まとめると、プレキャスト踏掛版の主な特徴は以下の通りである。

３．１　高品質：

高強度コンクリートを用いた工場製作の部材を使用することで、現場の条件や天候に左右されることなく、安定した高品質な構造物を構築できる。

３．２　施工性：

プレキャスト部材を用いることで、現場養生期間が不要となる。また、部材の接合に用いる「コッター式継手」と、同時に開発された専用のグラウト材を使用することにより、現場打と比較し約70％工期短縮が可能となり短時間で交通開放が可能である。（表-1 工事日数比較）

表-1 工事日数比較

プレキャスト踏掛版		現場打踏掛版	
	日数		日数
舗装版取壊	0.5	舗装版取壊	0.5
現場打踏掛版取壊	2.0	現場打踏掛版取壊	2.0
下地路盤整形	0.5	下地路盤整形	0.5
プレキャスト版設置	1.0	型枠設置	1.0
グラウト表面処理	0.5	鉄筋組立	2.0
舗装復旧	0.5	ｺﾝｸﾘｰﾄ打設	1.0
合計	**5.0**	養生	7.0
		脱枠	0.5
		舗装復旧	0.5
		合計	**15.0**

３．３　メンテナンス性：

プレキャスト踏掛版は、コッター式継手の採用により、踏掛版の一部損傷が生じた場合の部分交換、また踏掛版下の部分的補修に対応できる構造である。（写真-2コッター式継手）

また、プレキャスト部材に内蔵された金具によりリフトアップが可能（写真-3リフトアップ状況）であり、軽微な変状に対して修正することが可能である。

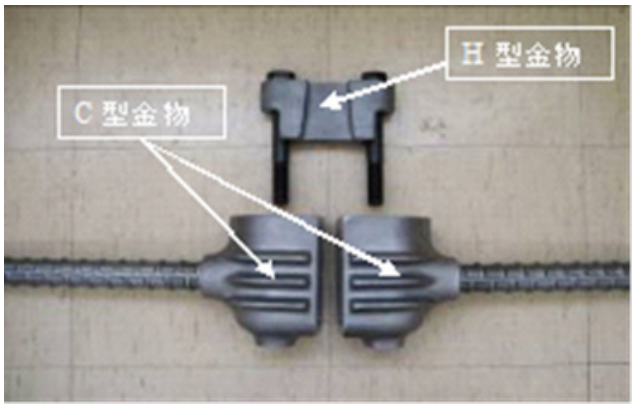


写真-2 コッター式継手



写真-3 リフトアップ状況

4　課題

プレキャスト製品は現場打ちコンクリートと比してイニシャルコストが高くなる傾向がある。また既設の橋梁は個別の形状であり、それに対応するプレキャスト部材の製造には個別の型枠を用意することが必要となりコストアップにつながる。

本工法の優位性を述べてきたが、現場打と比較し約8倍程度コスト高となり採用しにくい点が課題としてあげられた。震災時で無く普段でも踏掛版はプレキャスト工法を標準にする企工夫思案するなか「工法の標準化」を目標として、検討を繰り返し、以下の検討を行った。

（図-3 版製造提案事項）

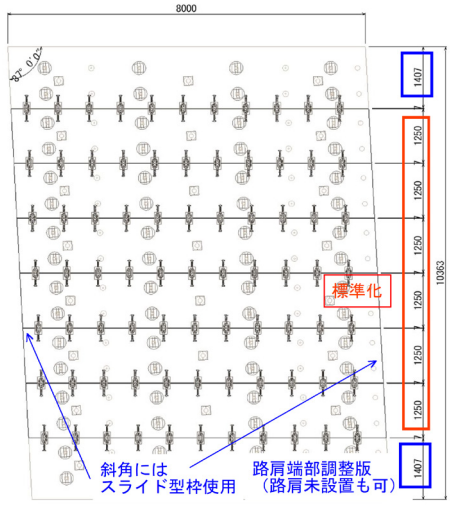


図-3 版製造提案事項

4．1　部材の定型化

プレキャスト部材の長さを8mと5mの2種類とし、部材幅を統一し定型化を図ることで型枠費用の削減を可能とした。

4．2　斜角の対応

各橋梁は地形に対応した斜角をもっており、プレキャスト部材は通常それに対応した個別の端部型枠を作成する必要がある。今回は可変式の端部型枠を採用することにより、定型化と合わせて型枠費用の削減を図った。

4．3　運搬費

コッター式継手を有するプレキャスト版の製造は限定された工場で製作されるため、現場近くに工場がないと運搬費が高騰する可能性がある。今回は運搬費の低減を目標として、発注者・メーカーと協議し近隣工場でのＯＥＭ製造を可能とした。

以上から初期提案時よりもコストを30%削減し、製品製造工程の短縮・製造の量産化、輸送コストの省力化に成功した。

5　施工

能越自動車道能登空港IC橋(下り線)のA1橋台の施工状況について報告する。

5．1　施工フロー図

以下に、標準的な施工フロー図を示す。なお、リフトアップの際の踏掛版の荷重を受け持つ「反力版」を設置し、アンカー筋については、既設アンカー筋を用いることとした。

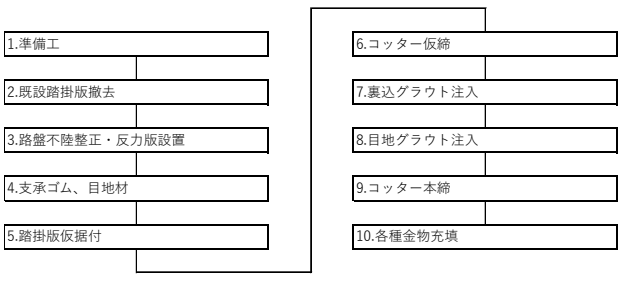


図-4 施工フロー図

５．２　断面図及び割付図

能登空港IC橋（下り線）のA1橋台踏掛版の断面図及び割付図を以下に示す。今回、施工する橋梁は、両側を砕石で埋めることとした。これは、路肩部は車両走行確率が低いことにあわせ、能登半島地震による橋台の詳細な損傷状況等が不明であることから、幅員方向の変形等を考慮して余裕幅を設けるため、このような構造とした。

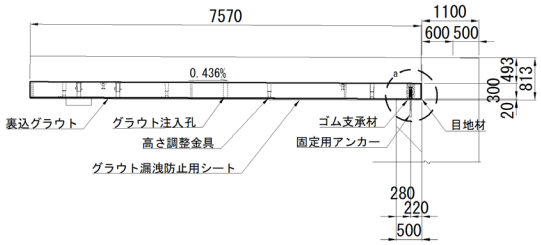


図-5 踏掛版断面図

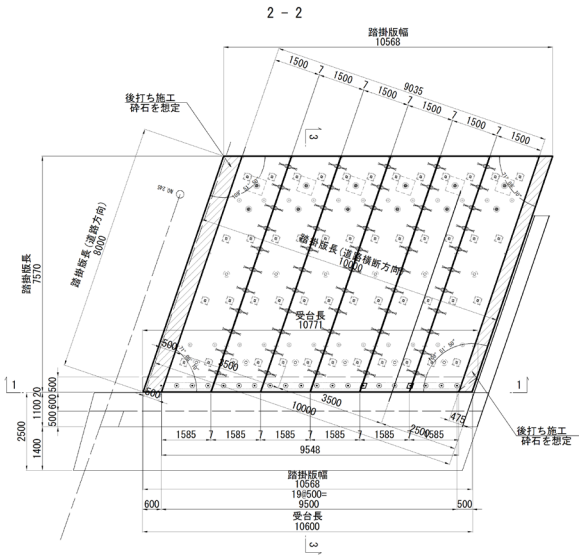


図-6 踏掛版割付図

５．３　施工状況

以下に、施工状況写真を示す。これまで既設踏掛版からプレキャスト踏掛版に取り替えた施工例がなく、既設橋台の施工精度が悪く、プレキャスト踏掛版とパラペットが競るなどの問題があり、プレキャスト踏掛版の設置位置方法を工夫するなどして、無事に据え付けることができた。




写真-4　施工状況・据付完了写真

５．４　既設踏掛版の被災状況

既設踏掛版においては、沈下により当初の勾配方向と逆の勾配になっている箇所や、版下の空洞が発生した箇所があった。いずれも、能登地震によって、橋梁背面の盛土が沈下したことがわかる。

６．　おわりに

令和6年能登半島地震では、被災した幹線道路において迅速かつ効果的な復旧が求められ、特に橋台背面の段差解消が重要な課題であることが明らかとなった。プレキャスト踏掛版の導入により、交通規制期間を最小限に抑えつつ、施工性やメンテナンス性を向上させることが可能であることが施工において実証できた。プレキャスト踏掛版は現場打ちと比較して数倍程度の工事費が必要であるが、能登半島の重要な幹線道路である能越自動車道において、交通規制を最小限とし、工期を短縮できる事は、道路利用者や地域への影響を少なくでき、経済価値は非常に大きい。今回の北陸地方での計画・施工を通じて得られたデータや経験を基に、さらなる改良、標準化を進め、大規模震災時の橋台背面盛土の補修を迅速に進める工法として確立するとともに、災害復旧能力の向上に寄与していくことにより、地域の安全性と交通の円滑性が確保されることを目指していきたい。

最後に多方面に渡りご指導いただいた国土交通省北陸地方整備局能登復興事務所の関係各位、ならびに業務受注者である㈱日本海コンサルタントの関係各位に深く感謝いたします。

⑤ 環境の保全と創造

フライアッシュを高置換した環境配慮型コンクリートの開発

東亜建設工業（株）　技術研究開発センター　新材料・リニューアル技術グループリーダー
○濱田　洋志
（株）JERA　国内事業運営統括部　石炭灰活用推進室　　松倉　隼人

1　はじめに

近年，カーボンニュートラル社会の実現に向けて，セメントの一部を混和材で置換した低炭素型コンクリートの研究開発および現場適用が進められている。フライアッシュは，石炭火力発電所で発生する副産物であり，流動性，水密性および耐久性の向上に寄与する。

一方，JIS R 5213に規定されるフライアッシュセメントの置換率は5%を超え30%以下であり，国土交通省が低炭素型コンクリートの要件とするポルトランドセメントに対する置換率55%以上に相当するCO_2排出削減効果を得ることは難しい。

そこで，産業副産物であるフライアッシュの有効利用とコンクリートの低炭素化を両立して循環型社会の形成に貢献することを目的に，JIS R 5213の規定範囲を超えるフライアッシュ置換率30～70%の環境配慮型コンクリートを開発した。適用対象は，所要強度を確保しつつフライアッシュを大量に活用できる単位粉体量の多い水中コンクリート（水中不分離性コンクリートを含む）および高流動コンクリートとした。

本稿では，フライアッシュを大量に混和した高流動コンクリートの諸特性を示すとともに，本コンクリートの適用によるCO_2排出量の削減効果について報告する。

2　フライアッシュの物性

表-1に使用したフライアッシュの代表的な物性値およびJIS A 6201に示すフライアッシュⅡ種の規定値を示す。フライアッシュの物性値（比表面積，強熱減量など）は，原料炭および発電所の燃焼条件により異なることが知られている[1)]。本検討では，産地の異なる3種類のフライアッシュを使用しており，産地による主な差異は，二酸化けい素が62.0～63.3%，強熱減量が1.5～2.6%，45μmふるい残分が1～22%，比表面積が3,200～4,440cm^2/g，活性度指数（材齢91日）が97～100%であった。

3　高流動コンクリートの諸特性

3．1　凝結特性

フライアッシュ置換率（F/B）が凝結特性に及ぼす影響を把握するため，W/B=33.3%を一定とし，F/Bを0～65%の範囲で変化させた高流動コンクリートを対象に凝結試験を実施した[2)]。図-1に試験結果を示す。図中の凡例に示した数値は，各配合におけるF/Bを示す。凝結時間は，F/Bの増加に伴って遅延する傾向を示した。特に，高

表-1　使用したフライアッシュの物性値の一例

項目		試験値	JIS規定値
二酸化けい素(%)		62.0	>45.0
湿分(%)		0.12	<1.0
強熱減量(%)		1.5	<5.0
密度(g/cm^3)		2.24	>1.95
粉末度	45μmふるい残分(%)	19	<40
	比表面積(cm^2/g)	3,560	>2,500
フロー値比(%)		105	>95
活性度指数(%)	材齢28日	85	>80
	材齢91日	97	>90

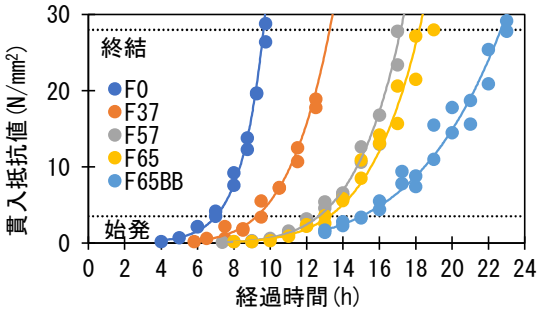


図-1　凝結試験結果（F/B比較）

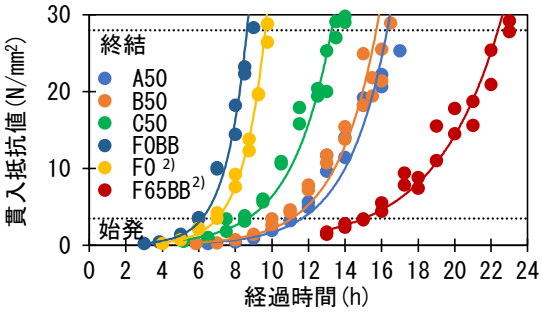


図-2　凝結試験結果（産地比較）

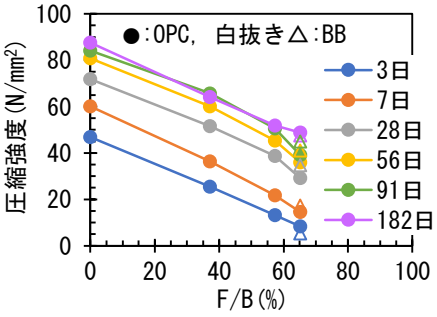


図-3　F/Bと圧縮強度の関係

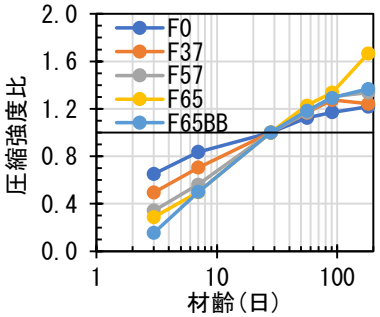


図-4　圧縮強度比の材齢変化

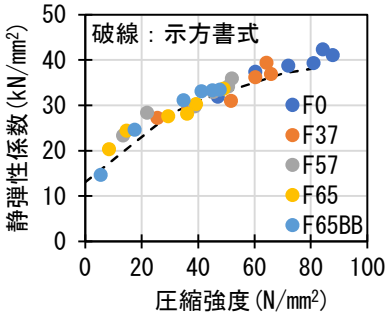


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

炉セメントB種を用いたF65BBでは，同一のF/Bで普通ポルトランドセメントを用いたF65に比べ，凝結の遅延が顕著であった。

また，産地の違いが凝結特性に及ぼす影響を把握するため，産地の異なる3種類のフライアッシュ（A，B，C）を対象に，F/B=50%の配合にて凝結試験を実施し，凝結時間を比較した[3]。図-2に試験結果を示す。フライアッシュの産地により凝結特性は異なり，始発時間はA，B，Cの順で短くなる傾向となった。これは，Cの比表面積が他に比べて大きく，水和生成物の析出サイトが増加して水和反応が促進されたためと考えられる。一方，AとBの始発時間の差は小さく，物性値の違いも限定的であった。

筆者らは，凝結遅延に対する改善策として，硬化促進剤（C-S-H系早強剤）の適用を検討しており[4]，硬化促進剤を一定量添加することにより，凝結時間が大幅に短縮され，始発時間はフライアッシュを混和していない配合と同程度まで改善することを確認している。

３．２　硬化特性

W/B=33.3%とし，F/Bを0～65.1%の範囲で変化させた高流動コンクリートを対象に，F/Bが硬化特性に及ぼす影響を検討した[2]。図-3にF/Bと圧縮強度の関係，図-4に材齢28日を基準とした圧縮強度比の材齢変化を示す。F/Bが大きいほど圧縮強度が小さいが，長期の強度増加割合が大きくなる傾向を示した。

図-5に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中には，コンクリート標準示方書［設計編］[5]に示される評価式を破線で併記した。圧縮強度と静弾性係数の関係は，F/Bの割合にかかわらず示方書式と概ね同様の傾向を示しており，本検討範囲では，同式を準用できると考えられる。

図-6に乾燥による自由収縮ひずみ試験の結果，図-7に質量変化率を示す。普通ポルトランドセメントを用いた配合では，フライアッシュを混和した場合の乾燥収縮ひずみは無混和の場合よりもやや大きくなった。一方，質量変化率は，フライアッシュ置換率の増加に伴って大きくなる

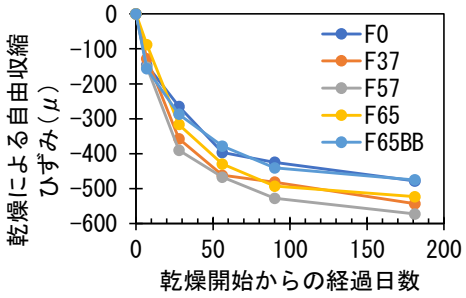


図-6　乾燥による自由収縮ひずみ

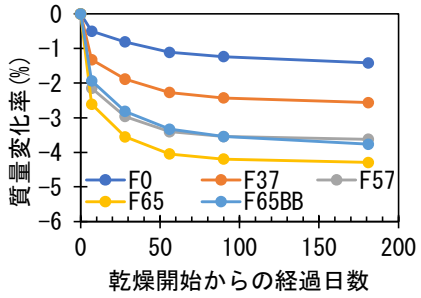


図-7　乾燥による質量変化率

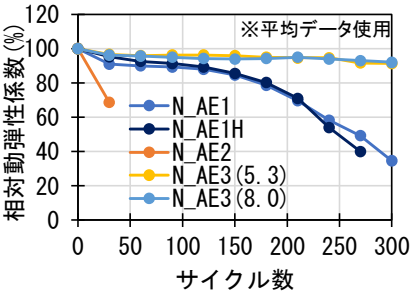


図-8　凍結融解試験結果

傾向を示しており，フライアッシュの混和によりコンクリート内部の水分が表層から逸散しやすくなったことが示唆された。さらに，既往の研究[6]では，直径3～6mm程度の微細な細孔容積が多いほど乾燥収縮ひずみが増大することが報告されている。本検討においても，細孔径分布の測定結果からフライアッシュを大量に混和した配合では30nm以下の微細な細孔容積が増加する傾向が確認されており，微細な細孔容積量と水分逸散量が乾燥収縮ひずみに影響を及ぼしたものと考えられる。なお，高炉セメントB種を使用した場合には，同じフライアッシュ置換率であっても乾燥収縮ひずみが若干低減する傾向が確認された。

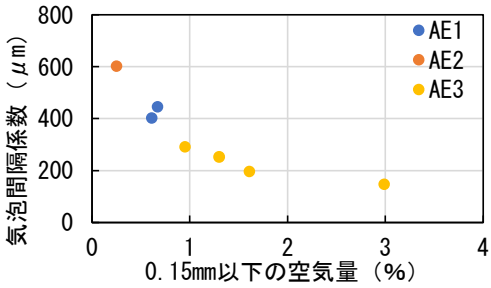


図-9　0.15mm以下の空気量と気泡間隙係数の関係

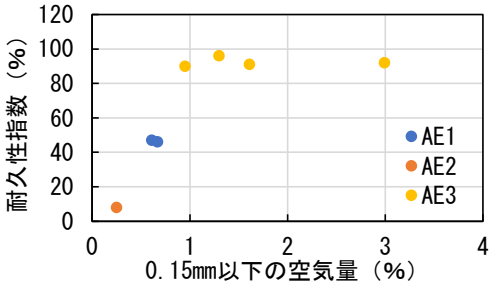


図-10　0.15mm以下の空気量と耐久性指数の関係

3．3　凍結融解抵抗性

フライアッシュを大量に混和した高流動コンクリートの凍結融解抵抗性を評価するため，F/B=57.3%，スランプフロー65±5cmの配合に3種類のAE剤（AE1～AE3）を用い，凍結融解試験および気泡組織評価を実施した[7]。図-8に試験結果を示す。AE2では60サイクル，AE1では150サイクル以降に相対動弾性係数が大きく低下した。一方，AE3では300サイクルまで顕著な低下は見られず，高い凍結融解作用抵抗性を示した。

気泡組織との関係を整理するため，既往の研究[8]を参考に，気泡径0.15mm以下の空気量に着目した。図-9に同空気量と気泡間隙係数の関係，図-10に耐久性指数との関係を示す。0.15mm以下の空気量と気泡間隙係数の間には高い相関性が確認され，微細な空気量が多いほど気泡間隙係数は小さくなる傾向を示した。特に，AE3を用いた配合では，気泡間隙係数が146～290μmと小さく，0.15mm以下の微細な空気量が多く確保された。また，0.15mm以下の空気量が0.95%を超える場合には，耐久性指数が90%以上となった。

以上の結果から，フライアッシュを大量に混和した高流動コンクリートにおいて，微細な空気泡を十分に連行させ，気泡間隙係数を小さくすることが，凍結融解抵抗性の向上に有効であると考えられる。

3．4　塩化物イオン浸透抵抗性

W/B=33.3%，F/B=0～65.1%の高流動コンクリートについて，材齢28日，91日にNT BUILD 492による非定常電気泳動試験を実施し，塩化物イオン拡散係数を測定した[2)]。図-11に結果を示す。

普通ポルトランドセメントを用いた配合（F0，F37，F57，F65）では，材齢28日にF/Bの増加に伴って拡散係数が増大し，初期材齢の塩化物イオン浸透抵抗性が低下した。

材齢91日ではポゾラン反応による組織の緻密化により拡散係数が低下し，F37はF0と同程度となった。また，高炉セメントB種を用いたF65BBはF65より拡散係数が小さく，材齢91日ではF0およびF37と同程度となり，塩化物イオン浸透抵抗性の向上が確認された。

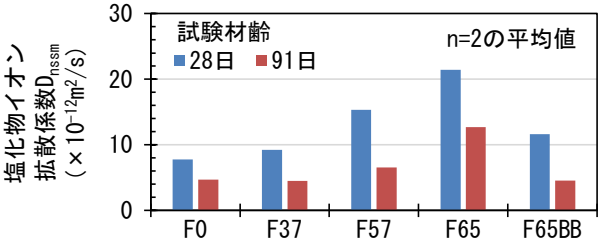


図- 11　塩化物イオン拡散係数

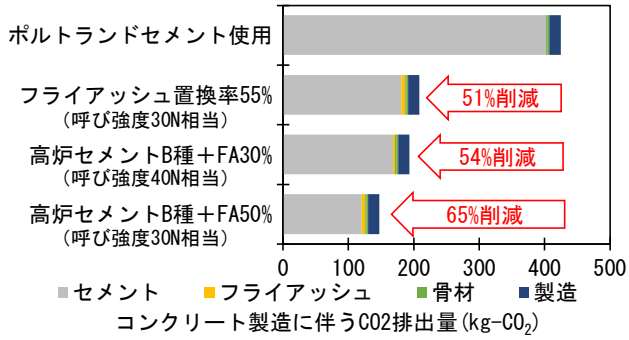


図-12　高流動コンクリートのCO_2排出量と削減効果

4　CO_2排出量の削減効果

図-12に，既往文献[9)]を基に算出した高流動コンクリートのCO_2排出量とフライアッシュ置換による削減効果を示す。セメントをフライアッシュで大量に置換した結果，コンクリートのCO_2排出量は大幅に削減した。また，本検討におけるF/Bは，国土交通省が公共工事で活用を進める低炭素コンクリートの要件（ポルトランドセメント置換率55%以上）を満足することを確認した。

5　おわりに

本検討により，フライアッシュ高置換高流動コンクリートは，硬化促進剤による凝結遅延の改善，適切なAE剤選定による凍結融解抵抗性および長期材齢での塩化物イオン浸透抵抗性の確保が可能であり，CO_2排出量も削減できることを確認した。以上より，本コンクリートは所要性能と環境負荷低減を両立する低炭素型コンクリートとして適用が期待できる。

参考文献

1)　（社）土木学会：循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術－利用拡大に向けた設計施工指針試案，コンクリートライブラリー132，pp.13-16，2009

2)　小林雄一，田中亮一，加藤誠司：フライアッシュを大量に混和した高流動コンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.925-930，2024

3)　平野夕焼，田中亮一，村瀬浩，櫻井友彰：高炉セメントB種に対してフライアッシュを高置換した高流動コンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.48，No.1，pp.918-923，2026

4)　平野夕焼，田中亮一，村瀬浩：フライアッシュ高置換高流動コンクリートにおける凝結遅延の改善検討，土木学会年次学術講演会，Vol.80，V-538，2025

5)　（社）土木学会：コンクリート標準示方書［設計編］，p.45，2022

6)　大石幸紀，藤井隆史，綾野克紀：高温で養生したコンクリートの乾燥収縮ひずみと細孔径分布に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.71，No.1，pp.288-294，2017

7)　平野夕焼，田中亮一，村瀬浩：フライアッシュ高置換高流動コンクリートの凍結融解抵抗性の改善検討，土木学会年次学術講演会，Vol.81，V-647，2026

8)　片平博，古賀裕久：振動締固めを行ったフレッシュコンクリートの空気量測定試験方法の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.22，pp.219-224，2022

9)　（社）土木学会：コンクリートの環境負荷評価（その2），コンクリート技術シリーズNo.62，pp.32-40，2004

バイオマス燃焼灰を活用した低環境負荷型藻場基盤材

若築建設　技術研究所　所長　水野　健太

1　はじめに

磯焼け対策やブルーカーボン生態系の創出を目的とした藻場造成に関する取り組みの一つとして、低環境負荷型藻場基盤材（以下、基盤材と略す）を開発した。本基盤材は、構成原料の全てを産業副産物および一般廃棄物起源で賄ったモルタルブロックである。本基盤材は、製作や設置に係る新たな二酸化炭素排出量を最小限に抑えるために、リサイクル材を積極的に活用している点が大きな特徴である。本稿では、基盤材の概要、配合設計、環境安全性について報告する。

表－１　低環境負荷型藻場基盤材の構成原料

項目	開発基盤材の構成原料	備考
結合材	高炉スラグ微粉末	
混和材	廃陶磁器粉、廃ガラス粉	結合材の代替
刺激剤	バイオマス燃焼灰（飛灰）	pH=13程度
細骨材	バイオマス燃焼灰（主灰）	廃流動砂
粗骨材	なし	
施肥材	廃鉄粉など	必要に応じて

表－２　構成原料の組成分析結果（酸化物換算）

構成原料	CO_2	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	Cl	K_2O	CaO	Fe_2O_3	TiO_2
高炉ｽﾗｸﾞ微粉末	4.0	－	5.4	9.6	26.8	－	3.6	－	0.3	49.4	－	0.9
廃ガラス粉	12.7	10.0	0.6	2.5	61.6	－	－	0.2	0.9	10.7	0.9	－
廃陶磁器粉	9.8	7.0	0.8	8.2	62.5	－	－	－	1.6	7.9	1.9	0.3
バイオマス飛灰	5.4	0.5	2.6	2.4	42.7	2.3	3.2	1.1	5.1	32.2	2.3	0.2
バイオマス主灰	6.5	0.4	1.8	2.3	62.1	1.5	－	－	4.5	19.0	1.9	－
廃鉄粉	7.8	1.2	2.5	1.3	4.0	－	－	1.3	0.5	－	81.4	－

2　低環境負荷型藻場基盤材の概要

2．1　使用材料

基盤材の構成原料を表－１に示す。表－１に示すように、結合材は一般的なセメントを一切使用せず、セメントよりも二酸化炭素排出原単位が小さい高炉スラグ微粉末を採用している。ここで、高炉スラグ微粉末は一般的なセメントよりも水和硬化が遅延する課題を有するため、硬化促進を目的としてアルカリ刺激剤を添加することが必須である。このアルカリ刺激剤には、pHが13程度と高いバイオマス燃焼灰（飛灰）を使用している。細骨材には同じく木質系バイオマス発電所から排出されるバイオマス燃焼灰のうち、主灰（廃流動砂）を使用している。一般的に、廃流動砂の再利用率は10%程度と低調であり、大半は燃え殻として扱われ埋立処分されている。この廃流動砂をモルタルブロックの骨材として再利用することにより、埋立処分地の延命化にも寄与できる。また、高炉スラグ微粉末の使用量を減らし、材料コストを低減させることを目的として、廃陶磁器や廃ガラスを粉砕加工したリサイクル材（埋戻材やサンドマット）を製造する過程で生じる細粒残渣（廃陶磁器粉や廃ガラス粉）を使用する。これを混和材と呼ぶ。さらに、細骨材の一部を廃鉄粉（使い捨てカイロの中身など）に置き換えて施肥材の機能を持たせたり、粉砕した貝殻片（二枚貝や牡蠣殻、ホタテ貝殻など）を混入して基盤材表面の粗度を改善したりすることもできる。

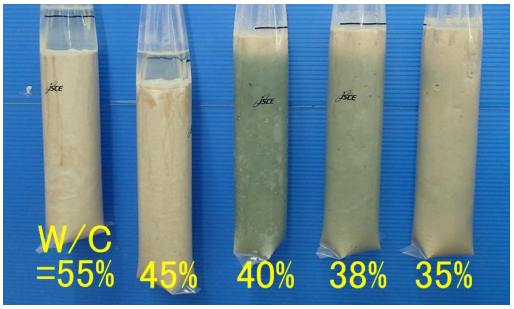
構成原料の組成分析結果（エネルギー分散型Ｘ線分析）を表－２に示す。バイオマス燃焼灰（主灰）は流動砂起源の珪砂が主体であるため、その成分はシリカ(SiO_2)が最も多い。廃ガラス粉および廃陶磁器粉もシリカ(SiO_2)が主成分である。また、バイオマス燃焼灰（飛灰）はカルシウム（CaO）を多く含む。

２．２　要求性能

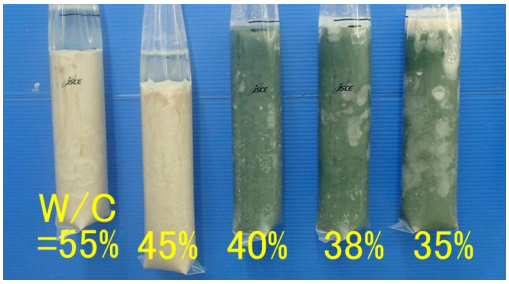
基盤材の配合設計にあたり、表－３に示すような要求性能を設定した。基盤材は準硬石相当の強度を有することを目指し、材令28日における目標強度（圧縮強度）を9.8 N/mm^{2}として配合設計を行う。結合材は高炉スラグ微粉末のみであり、単独使用では水和硬化が遅延するため、ブリーディングが大きく、かつ脱枠までの養生期間が長くなることが課題である。このため、アルカリ刺激剤の添加が必須であり、その適正量を予備配合試験で検討した。また、本基盤材のプロトタイプは、人力で設置することを想定し、重量20kg/個程度、容積10Lのサイズとした。環境安全性については、原料として産業副産物や一般廃棄物を使用しており、特にバイオマス燃焼灰（飛灰）単独からは重金属類の溶出が懸念されることから、製作した基盤材からの重金属類の溶出量が海域投入の基準値以下であることを確認することとした。

表－３　基盤材の要求性能

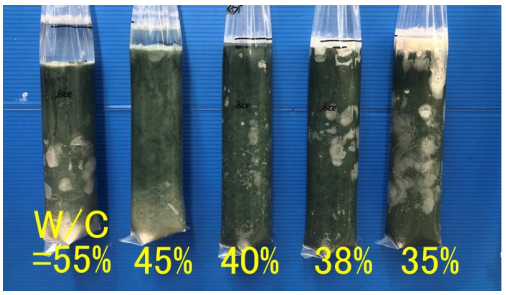
項目	要求性能	ポイント
目標強度	圧縮強度=9.8 N/mm^2	3年程度の海中安定性
ブリーディング	ブリーディング率＜1.0%	適切なW/Cと刺激材の量
ワーカビリティ	振動で締固め可能なこと	適切なW/C
養生期間	3日程度で脱型できること	適切な刺激剤の量
重量	20 kg/個程度の軽量	人力により設置できる
環境安全性	重金属溶出が基準値以下	港湾用途



(a)材令15日



(b)材令28日



(c)材令47日

写真－１　ブリーディング試験（刺激剤なし）

３　配合設計

３．１　予備検討

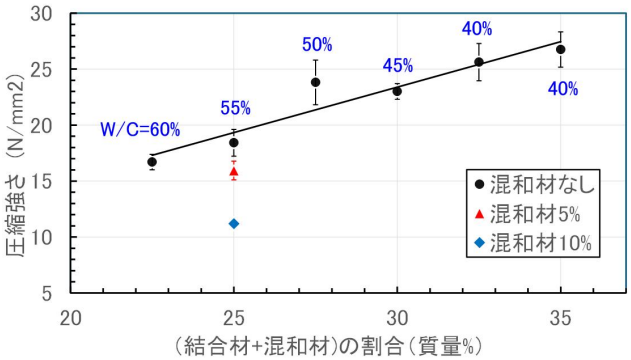
アルカリ刺激剤が無い場合のブリーディング試験状況を写真－１に示す。結合材の量は全てのケースで同じ条件（38%）とし、写真左から順に水固化材比W/Cを大きく、細骨材の量を小さくしている。最終的なブリーディング率はW/Cが大きい左から17%、11%、4%、3%、2%であった。材令47日（写真－１(c)）では全てのケースで高炉スラグ微粉末に特有の濃い青緑色となっているが、材令28日ではW/C=55%と45%のケースではほぼ変色していない。この結果から明らかなように、結合材として高炉スラグ微粉末を使用する場合は、アルカリ刺激材を添加し、硬化反応を促進させる必要があることがわかる。

次に、ブイーディング率を1%未満に抑えるためのアルカリ刺激材の適正量を検討した。その結果、アルカリ刺激剤の適正量は、結合材使用量の5%で十分であることがわかった。

３．２　基本配合の設定

結合材と混和材の合計量C（＝C1＋C2）と材令28日における圧縮強さの関係を図－１に示す。なお、ここでは混和材として廃陶磁器粉を使用している。図－１に示すように、Cが小さいほどW/Cを大きく設定し、W/Cは40%～60%の範囲としている。これはW/Cを一定として配合設計を行うと、Cが小さいほどWも小さくなり、全体として細骨材の量が増え、ワーカビリティ（型枠への投入時の流動性）が低下するためである。図－１より、Cに比例して圧縮強さは大きくなること、混和材を多く配合するほど圧縮強さは低下することを確認できる。混和材はカルシウム分（CaO）をわずかに含むが強度増加にはほとんど寄与していないことがわかる。しかし、廃ガラス粉および廃陶磁器粉いずれもガラス質（SiO_2）であるため、全体の10%を配合してもフレッシュ状態の流動性に悪影響はなかったと言える。すなわち、本基盤材における混和材は、強度調整材（結合材の使用量C1を削減するための調整材）として位置づけられる。

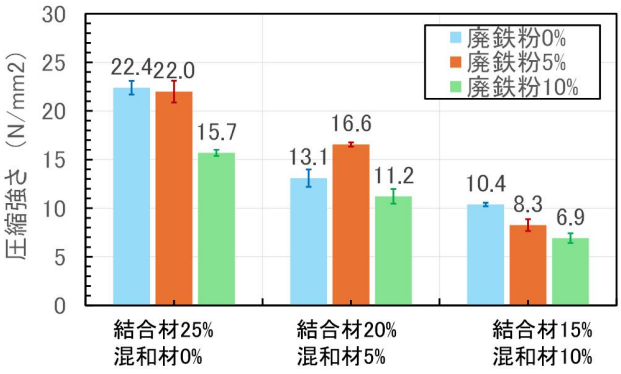
配合試験の結果、本基盤材の標準配合として、W/C=55%、結合材(C1)=20%、混和材(C2)=5%、アルカリ刺激剤(E)=1.3%、細骨材(S)=59.2%、混錬水(W)=14.5%と決定した。各構成原料の外観を写真－２に示す。



図－１　結合材・混和材の合計量と圧縮強さの関係



写真－２　基本配合の構成原料（混錬水を除く）



図－２　廃鉄粉混入が圧縮強さに及ぼす影響

３．３　廃鉄粉混入の影響

施肥材（本報告では廃鉄粉）の配合量Dが圧縮強さに及ぼす影響を調べた。結合材と混和材の合計量C（＝C1＋C2）を25%で固定し、ケースa（富配合：25%＋0%）、ケースb（標準配合：20%＋5%）、ケースc（貧配合：15%＋10%）の3ケース、廃鉄粉の配合量D（細骨材の置換）を0%、5%、10%の3ケース、計9ケースを設定した。材令28日における圧縮強さを図－２に示す。bケースで廃鉄粉0%の強度が廃鉄粉5%の強度より小さい逆転現象が生じているものの、廃鉄粉の混入量が多くなるほど硬化の進行が遅く、28日強度が小さくなることを確認できた。この結果より、廃鉄粉の混入割合の上限は、富配合で10%、標準配合で5%、貧配合では0%が適切と考えられた。

３．４　長期強度

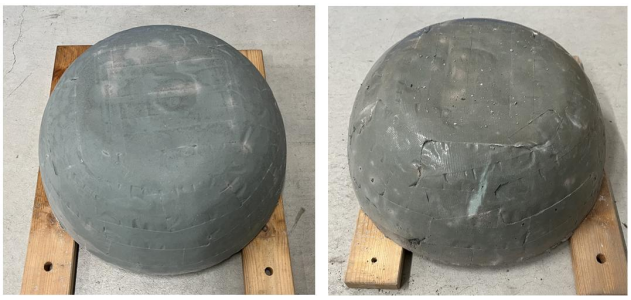
本基盤材は高炉スラグ微粉末を結合材として使用するため、潜在水硬性により圧縮強さが長期的に増進すると考えられる。標準配合ケース（結合材20%、混和材5%）で、廃鉄粉を0%および10%としたケースについて、脱イオン水および人工海水の2ケースで91日間水中養生し、長期強度を確認した。その結果、材令91日では材令28日よりも強度が大きく増加し、廃鉄粉なしのケースで強度増加率σ91/σ28＝1.4～1.5、廃鉄粉10%のケースでσ91/σ28＝1.7であった。今回の条件では養生水の違いが圧縮強度へ及ぼす影響は確認できなかった。長期的に強度が低下しなければ、結合材の量をさらに低減できる可能性もあるが、海水養生の場合は、硬化体のカルシウム分が海水中に溶脱し、長期的に強度低下することも指摘されている[1)]。この点に関して、室内環境で長期間暴露試験を実施中であり、その結果を踏まえて、配合設計を再考したいと考えている。

３．５　環境安全性

本基盤材の環境安全性を確認するために、スラグ類の化学物質試験方法（JIS　K0058-1）に準拠した溶出試験を実施した。試験結果を表－４に示す。重金属の溶出量は、定量下限値以下であり、港湾用途の基準値を全て満足していることを確認できた。

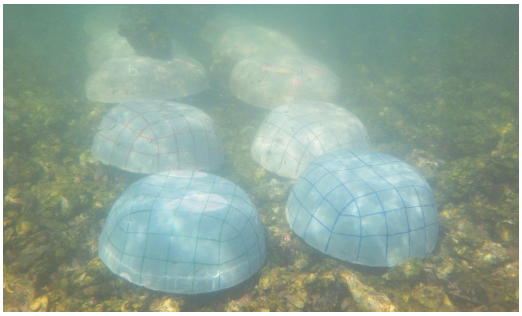
表－４　環境安全性（重金属類の溶出量）

重金属	基準値(港湾用途) [mg/L]	溶出量 [mg/L]
カドミウム	0.03以下	0.0003未満
鉛	0.03以下	0.001未満
六価クロム	0.15以下	0.005未満
ひ素	0.03以下	0.001未満
水銀	0.0015以下	0.0005未満
セレン	0.03以下	0.001未満
ふっ素	15以下	0.08未満
ほう素	20以下	0.1未満



(a) 廃鉄粉なし　　(b) 廃鉄粉あり

写真－３　基盤材の外観（脱型直後）



写真－４　実海域での設置状況（2025年10月）

４　実海域における実証

北九州市若松区脇之浦漁港近くの水深1mの岩礁海域に、基盤材を試験設置した。製作した基盤材の外観を写真－３、設置状況を写真－４に示す。設置月は2025年10月である。本海域は冬期から初夏にかけて、緑藻のアオサ、褐藻のワカメ、ヒジキ等が多く繁茂する。現在、海藻類や底生生物の付着状況、設置海域での波浪や潮汐に対する安定性、自己崩壊性をモニタリング中である。また、室内環境においても浸漬実験、長期強度試験を継続中であり、各種成分の溶出挙動や劣化の有無について検討を進めている。

参考文献

1)　佐藤研一・藤川拓朗：石炭灰系地盤材料の特性と長期安定性の評価にむけて，基礎工，Vol.50, No.2，pp.38-41，2022.

高速道路支障木発生材の循環型現地処理による作業効率化とコスト削減
～循環型社会の形成に向け～

㈱ネクスコ・メンテナンス新潟　長岡事業所　保全第一課　○稲田　玲夏
長岡事業所　保全第一課係長　　當重　太一
長岡事業所　副所長　　大竹　和伸

1　はじめに

高速道路植栽は，交通安全の確保，沿道環境の保全，景観形成およびお客様への快適な走行空間の提供など，多様な機能を有する重要な道路資産である．その機能を持続的に発揮させるため，計画的な維持管理が不可欠であり，当社は交通安全・防災，環境保全，景観・快適性の向上，生産性向上を目的とした緑地管理に取り組んでいる．

このような緑地管理業務の中でも，高速道路本線近傍に生育する樹木は，走行安全性の確保および快適な道路空間の提供の観点から適切な維持管理が求められる．特に，枝葉の張り出し等により標識類の視認性低下や視距不足を招く恐れのある樹木（以下「支障木」という）は，計画的な処理が不可欠である．（写真－１）

一方，支障木伐採作業により発生する植物発生材（以下「発生材」という）の処理は，細断・積込・処分場への運搬など多くの工程を要し，施工効率やコスト面での課題に加え，二酸化炭素（CO_2）排出量削減といった環境配慮の観点からも改善が必要である．

こうした背景を踏まえ，支障木処理においても，従来の処分前提の発生材処理から脱却し，資源の有効活用と環境配慮を両立させた効率的な施工手法の検討が必要である．



写真－１　支障木による標識視認性不良

本報告では木材破砕機（写真－２）を用いた発生材の循環型現地処理方式を導入し，その実施方法と効果について，作業効率・コスト縮減および環境負荷低減の観点から検討した結果を報告する．



写真－２　木材破砕機

２　従来の伐採作業方法と課題

２．１　作業概要

従来の伐採作業では，本線路肩規制を実施した上で支障木の伐採，細断および運搬車両への積込を行っている．（写真－３）作業完了後は次の施工箇所へ移動し，再度規制を実施した上で同様の作業を繰り返す施工形態となっている．



写真－３　運搬車両への積込

２．２　課題整理

前項で示した従来の施工方法は，発生材を細断・積込し，処分場へ運搬する工程が必要となる．細断・積込後の発生材は処分場へ運搬され再処理が行われる過程で運搬車両燃料および処分場設備の稼働に伴う電力消費が発生するとともに，一日当たりの施工量が制限される．従って，環境負荷と作業効率の両面で課題を有している．

また，高速道路本線上で木材破砕機を使用する場合は，木材破砕機を積載車で運搬し，積み降ろしスペースおよび木材破砕機を稼働させるための作業ヤードを確保する必要がある．加えて，破砕作業時の木片飛散リスクがあることから，安全対策及び沿道環境への配慮も求められる．

これらの課題に対応するため，当初は高速道路本線の走行車線規制を実施し，規制内で必要な作業スペースを確保する方法を検討した．

しかし，走行車線規制を伴う支障木伐採作業では，規制設置・撤去や木材破砕機の積み降ろしに要する時間が追加されることによる時間的制約が生じる．また，施工は１日１規制を基本とし，規制区間内での施工に限定されるため，施工箇所にも制約を受ける．さらに，交通規制費用の増加や規制に伴う使用車両の増台によるCO_2排出量の増加も課題となる．

本来，支障木伐採作業は点在する施工箇所へ機動的に対応することを目的としており，これらの課題を解決できる施工手法が求められた．

３　発生材の現地処理方法

３．１　作業方法

課題を踏まえ，木材破砕機を搭載した専用車（写真－４）を用いて伐採木を現地でチップ化（写真－５）し，その場で処理を完結させる循環型現地処理方式を採用した．トラック荷台搭載型とし，本線路肩規制内で積み降ろし作業を伴わずに施工を行った．



写真－４　木材破砕機を搭載した専用車



写真－５　伐採木を現地でチップ化

また，破砕作業時に発生する木材チップの飛散防止および騒音低減を目的として，木材破砕機を覆う特注小型倉庫（写真－６）を製作・設置した．これにより，作業時の安全性確保に加え，周辺環境および沿道環境への影響低減を図った．



写真－６　特注小型倉庫

３．２　現地処理の目的

破砕後の木材チップは，施工箇所付近の本線のり肩部（アスカーブより外側）へ吹き付けることとした．（写真－７，８）これは通年実施しているのり肩部の短草維持，草地管理作業の軽減を目的とした防草対策の一環として実施したものである．



写真－７　木材破砕機による吹き付け



写真－８　本線のり肩部吹き付け状況

４　期待される効果

従来方式と比較し，細断・積込・処分場への運搬工程を省略することで，作業全体の効率化と安全性の向上が期待される．木材破砕機をトラック荷台搭載型としたことにより，本線上で課題となる木材破砕機の積み降ろし作業が不要となるため，作業時間の短縮および施工時の安全性向上が図られる．

また，木材破砕機を本線路肩規制内で運用可能（写真－９）としたことで従来の支障木伐採作業と同様の施工形態を維持することができる．



写真－９　本線路肩規制内での運用

これにより，一日当たり施工量増加，維持管理作業の省力化および安全性向上に寄与する．さらに，発生材の場外運搬および処分が不要となり，運搬車両の走行距離および稼働台数の削減が図られ，軽油等の燃料使用量の抑制につながる．結果，発生材処理工程に伴うCO_2排出量について，１t/年の直接的な削減効果が期待される．加えて，処分場における再処理工程や設備稼働が不要となり，電力使用に起因する間接的なCO_2排出の削減にも寄与し，脱炭素及び循環型社会の実現に有効な取り組みである．

本手法は，木材破砕機を特注小型倉庫内に設置して作業を行うことで，木材チップ等の飛散防止対策を講じている．これにより周辺環境への影響低減を図るとともに，破砕作業時に発生する騒音の低減効果も得られ，沿道環境への配慮および作業時の安全性確保の両面において有効な施工手法となっている．さらには破砕後の木材チップを現地敷設し，防草効果による雑草発生抑制，除草剤散布作業の削減にも繋がり，間接的な環境負荷低減にも寄与すると考えられる．

５　コスト削減効果（試算）

木材破砕機導入による発生材現地処理について，従来の「発生材処理工」と比較した結果を整理した．

従来方式では，年間の発生材処理費用は約580万円と年間運搬費用で約68万円発生していた．一方，木材破砕機導入後は年間で約140万円の処理費削減および運搬費用も約50万円まで削減できる試算結果となった．

これらの試算結果を踏まえると，木材破砕機導入により，発生材処理に係る直接工事費は年間約195万円の削減効果が得られることが確認された．このことから，本手法はコスト縮減の面においても高い有効性を有し，循環型現地処理の有効性が定量的に示された．

なお，本試算は同一施工量・同一作業条件下での年間換算により算出したものである．

６　おわりに

本手法により，支障木処理作業における工程の簡素化が図られ，作業効率の向上，安全性向上，維持管理品質の安定化および環境負荷低減を同時に達成できる可能性が示された．特に，発生材の現地循環利用は，従来の処分中心の考え方から脱却した実践的な改善手法であり，維持管理業務における新たな選択肢として有効であると考えられる．

一定の初期投資を要するが，作業負荷軽減や安全性向上といった定性的効果に加え，コスト縮減やCO_2排出削減も確認されていることから，費用対効果の面においても十分に有効な取り組みである．今後は施工実績の蓄積を通じて本手法の有効性および汎用性を検証するとともに，維持管理業務全般の効率化および循環型社会形成への貢献を目指していく．本手法は発生材の有効利用による資源循環を実現するものであり，今後の高速道路緑地管理における持続可能な維持管理手法の一つとして期待される．