

令和 6 年度
建設技術報告会
報文集

令和 7 年 1 月

北陸地方建設事業推進協議会

令和 6 年度「建設技術報告会」実行委員会

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	港湾	海洋観測ドローン(Penta-Ocean Vanguard-DA)の開発	三宅 貴大	五洋建設株式会社	1
2	港湾	WIT-ec-CPT(電気伝導率コーン)によるセメント系地盤改良の品質確認	水野 健太	若築建設株式会社	5
3	港湾	プレキャスト上部工の鉄骨差込み接合技術「SFジョイント工法」	田中 亮一	東亜建設工業株式会社	9
4	道路	山岳トンネルにおける3D-LiDARを用いた計測技術各種	木下 勇人	大成建設株式会社	13
5	道路	AI 物体検出を活用した消雪パイプ点検業務の安全性向上への取り組み	木村 浩和	株式会社興和	17
6	道路	自己充填覆工構築システム	小山 広光	佐藤工業株式会社	21
7	共通	コンクリート打設統合管理システムの開発	今泉 克彦	株式会社奥村組	25
8	共通	CO ₂ 吸収コンクリートの技術を用いた建設用3D プリンティング	橋本 学	鹿島建設株式会社	29
9	共通	ICT土工・舗装品質管理システム「AtlasX」の開発	津田 啓史	前田建設工業株式会社	33
テーマ:② 社会資本的的確な維持管理・更新					
10	道路	橋梁レベリング層用グースアスファルト混合物『e グース・スーパー』	上地 俊孝	大林道路株式会社	37
11	道路	高浸透性改質アスファルト乳剤『プライムファイン』	高橋 昌史	東亜道路工業株式会社	41
12	道路	プレキャスト床版によるPC 合成桁の床版取替技術	富永 高行	株式会社大林組	45
13	共通	亜硝酸リチウムを用いたASR補修技術	片平 勝師	極東興和株式会社	49
14	共通	水道管(鋼管)専用の改築推進工法(ベルリプレイス工法)の開発	上田 信二	真柄建設株式会社	53
15	共通	STマイクロバイルを用いた基礎補強技術	鬼村 果穂	極東興和株式会社	57
テーマ:④ 自然災害からの安全確保					
16	道路	S・MIX工法～硬質地盤・低変位に対応した深層混合処理工法～	大古利 勝己	あおみ建設株式会社	61
17	道路	プレキャスト版を採用したトンネルインバートの製造・施工報告	飯塚 一成	日本サミコン株式会社	65
18	共通	災害廃棄物処理計画・処理実行計画作成支援システムの開発	今井 亮介	株式会社奥村組	69
テーマ:⑤ 環境の保全と創造					
19	港湾	環境対策型作業船「越後9000」の脱炭素化に向けた取り組み	鈴木 敦子	株式会社本間組	73
20	道路	舗装性能向上に資する廃PET の有効活用について	粕谷 一明	福田道路株式会社	77
21	道路	未利用バイオマスを活用することで炭素低減できる舗装技術	川村 修	日本道路株式会社	81
22	共通	建設発生土を活用した地盤改良工法「リソイルPro工法」	NGUYEN VAN THINH	株式会社不動テトラ	85

①生産性向上、インフラ分野の DX

海洋観測ドローン（Penta-Ocean Vanguard-DA）の開発

五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術開発部ICTGr ○三宅 貴大
五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術開発部ICTGr長 琴浦 毅

1 はじめに

五洋建設株式会社と株式会社プロドローンは共同で離着水ならびに海上航行が可能な海洋観測ドローン“Penta-Ocean Vanguard-DroneAqua”（以下POV-DA）を開発した。

POV-DAは、写真-1の全景に示すように、水面上で離着水が可能なフロートを有するドローンの内部に高精度GNSS、下部にスラスター、測深ソナーを搭載した構造となっており、着水したPOV-DAの現位置（X, Y, Z）と水深はリアルタイムに陸上の操作画面で把握することが可能である（写真-2）。

また、操作画面上で観測地点の平面位置（X, Y）を指定すると、水中のスラスターによりPOV-DAを観測地点まで移動する海上航行機能に加え、波や流れがある中で観測地点に定点保持する機能も有しており、これらの機能を用いることで陸上からの操作で手軽に効率的に水深測量や波浪観測を行うことが可能となった。

1. 1 開発の目的

海上工事は、海中での施工状況が直接見えないことや波浪・潮流・濁りなどの影響を受けることなどの陸上工事とは異なる特殊な条件下で実施されるため、進捗の確認を行う深浅測量や施工可否判断を行う波浪観測が施工管理では重要となる。しかし、海上工事では測量や移動に船舶を必要とすることや、施工箇所が陸から離れている場合は移動に多くの時間を費やすことも多いため、船舶を用いた従来の管理の効率化を可能とするドローンの開発を目的とした。



写真-1 POV-DA全景



写真-2 POV-DA着水時の計測状況

1. 1. 1 深浅測量

陸上工事では職員の目視確認で日々の進捗を確認可能であるが、海上工事では施工場所が水中であるため、潜水士による目視確認をもとに間接的に水中の施工進捗を管理しているが、施工管理をする職員自ら目視確認することができない。そこで、音響探査機器を船舶に取り付けて移動しながら測深する深浅測量や、船上からレッドと呼ばれる鉛を付けたロープを海底に向けて投下して、ロープに記載されている目盛りから水深を測深する方法などを用いた施工管理

が従来から実施されている。

しかし、深浅測量は計測機器の船舶への取り付けが必要であるのに加え、レッド測深も含めて観測場所までの船舶での移動が必要であるため、これらを解決する効率的な施工管理が求められていた。

1. 1. 2 波浪観測

海上工事の施工可否判断は、作業船舶の動揺への影響が大きい波高や周期が支配的である。主要港湾においては国土交通省港湾局が主体となり全国港湾海洋波浪情報網（通称 NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours）¹⁾が整備され、2019年4月現在、78観測地点において波浪の定常観測が実施されており、施工時の施工可否判断に活用されている。しかし、既設の波浪観測点から離れた位置を施工する場合には、施工箇所に独自の波浪観測機器を設置することもあるが、一般的な波浪観測は潜水作業を伴う海底設置式や係留設備が必要なブイ式の波高計を用いた観測方法のため、設置にかかる作業負荷やコストが大きく、限られた場所でしか実施できないのが現状である。また、施工前に海岸等から目視等で施工可否の判断を行うことも多いため、簡易に現地波浪を観測できる技術が求められていた。

2 POV-DAの機能

POV-DAはクアッドコプタータイプのドローンであり、本体の下部に2つのフロートを取り付けることで、水面上で離着水することが可能である。さらに、フロートの内側に2基のスラスターを搭載することで、最大速度約4ノットで水面上での水平航行が可能となっている。また、2基のスラスターの回転出力、方向を変化させることで前進、後進、旋回が可能である。

機体の下部に搭載した光学カメラ映像をリアルタイムに確認することで、飛行中や水上での水平航行中には、周辺状況を確認しながら操縦可能である。

計測機器は2種類あり、本体下部に単素子ソナーと、本体内部にRTK-GNSS端末を搭載している（表-1）。

表-1 POV-DAの仕様・性能

モーター軸間距離	1280mm (折りたたみ時860mm)
全高	600mm
機体重量	13 kg (バッテリーとカメラ含む)
最長飛行時間	20分
最高速度	60km/h
飛行可能風速	10m/s
着水時最長航行時間	60分
着水時航行最高速度	約4ノット
着水時航行可能波高	約2m
耐水性	IP 55相当
測深ソナー	BlueRobotics製 pingsonar

2. 1 深浅測量機能

POV-DAによる深浅測量時は、陸上でドローンの始業点検をした後に、計測対象海域まで飛行・着水し、GNSSの平面位置と測深ソナーにより機体直下の水深を計測しながら海上航行することで連続的な測深結果の取得が可能となっている。この結果、船舶での移動が必要なくなり、船舶、船員の手配や計測機器の船舶への取り付けを必要としないのに加え、移動時間の短縮が図れることで、測量に関わる一連の時間が短縮できる。また、測量データはデジタルで記録されるので、陸上でもリアルタイムに確認・共有されるので、現状把握や次作業のための判断の迅速化が可能となっている（図-1）。

図-2は従来の船舶を用いた深浅測量技術であるナローマルチビーム（以下NMB）測量結果の平面図上にPOV-DAの移動軌跡を重ねている。NMBは

測量船の横断方向に扇形の超音波発信しながら移動計測することで海底面の形状を面的に取得する手法であり、この図では100m弱の範囲内が8m程度の水深であるという面的結果が得られている。それに対し、POV-DAは水面上を移動しながら機体直下の水深を計測するため、ピンク色で示された移動軌跡の直下の水深の線的な計測結果が得られることになる。

つまり、POV-DAは広域な計測範囲を高密度に計測するというよりは、1週間分の施工進捗を管理するための広域な範囲の測線計測や、当日施工した範囲を管理するための狭域な範囲を重点的に計測するという施工管理に適していると考えられる。

図-3は、図-2の計測結果におけるPOV-DAの計測点と、その近傍のNMBの計測点との水深比較であり、図中の灰色の線は1:1の勾配を示している。今回の計測時は波がほぼない静穏な状況であったが、計測水深範囲である-3m~-8mのいずれの差水深においても灰色線を中心に±10cm程度の差異で点が分布していることが確認された。このことは、POV-DAの計測精度は各水深でNMBとほぼ同程度であり、施工管理に求められる精度は有していると考えられる。



図-1 POV-DAの深浅測量イメージ

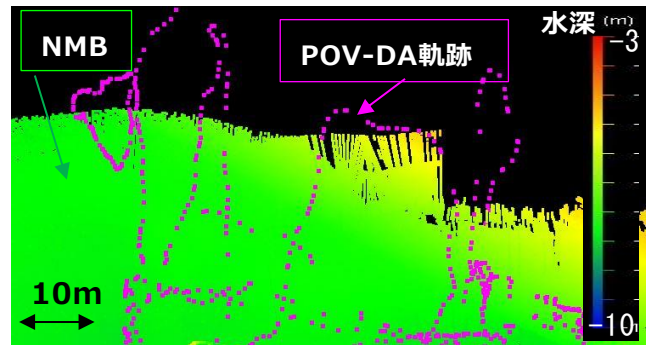


図-2 NMBとPOV-DAとの計測平面図比較

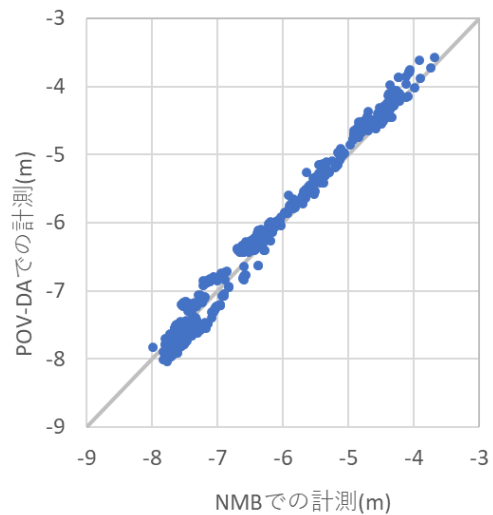


図-3 POV-DAの計測水深比較

2. 2 波浪観測機能

POV-DAによる波浪観測時は、陸上でドローンの始業点検をした後に、計測対象海域まで飛行・着水し、指定地点で機体内部のGNSSの高度情報を1~2Hzで取得し、クラウドを経由してリアルタイムに共有、保存したうえで、波高、周期の算出を行っている(図-4)。つまり、POV-DAの導入により、現地に船舶で移動することなく、現地の波浪状況を把握することができ、施工可否判断の迅速化を図ることが可能となる。なお、従来の波高計を用いた波浪観測手法は、2Hzで海面の変動を計測し、連続した20分間の計測結果から有義波高、有義波周期を算出することが一般的であるため、POV-DAでも同様の処理方法としている。

海上工事では波高1mを上回ると作業中止となることが多いのに加え、使用船舶によっては周期の影響も大きく受けて作業中止となることも多い。図-5は従来の波浪観測手法で有義波高0.8m程度、有義波周期8秒程度の観測結果が得られた時間帯における、従来の波浪観測結果に対するPOV-DAの波浪観測機能で算出した有義波高、有義波周期の比率となっており、いずれの時間においても±5~10%以内の精度であることが確認できる。

なお、搭載しているRTK-GNSSによる波浪観測は、NOWPHASのGPS波浪計でも採用されている手法であるが、RTK-GNSSの高さ方向の精度は数cm~10cm程度と想定され、波浪観測への適用性に懸念される。しかし、海の波を観測対象とする場合、有義波高・有義波周期を算出するための20分間には通常100波以上が観測されるため、高さ方向のばらつきは平滑化されるものと考えられる。図-6は、POV-DAで計測された20分間の時系列データから算出した周波数スペクトルである。周期8秒前後である0.125Hz付近のエネルギーが卓越した海の波の標準的なスペクトル形状であり、この結果からもGNSSの高さ方向の精度の影響は小さく、POV-DAの波浪観測機能は、波高、周期のいずれの施工管理において十分な精度を有していると考えられる。



図-4 POV-DAの波浪観測イメージ

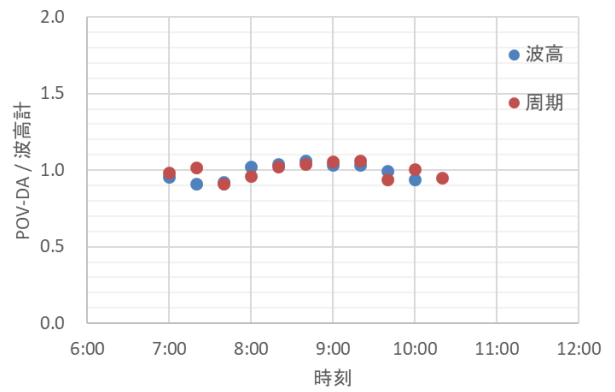


図-5 POV-DAの波浪観測結果比較

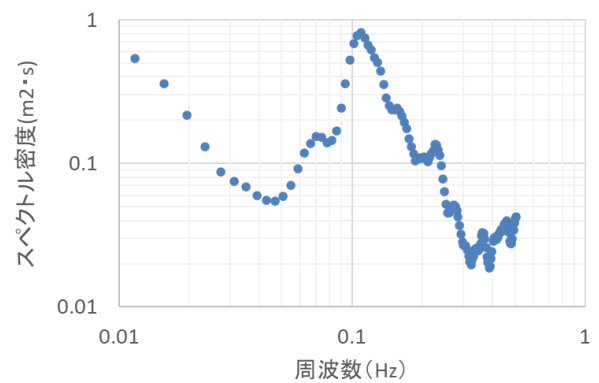


図-6 POV-DAによる波の周波数スペクトル

3 終わりに

POV-DAのような機能を有するドローンは今までなく、海上工事における施工管理の効率化や施工可否判断の迅速化が期待できる。

今後は多項目水質計や採水器の搭載など海洋計測機器としての機能拡張を進め、海上工事における海域環境の保全・調査にも活用を広げていく予定であり、海上工事現場の生産性向上に寄与する開発を継続する予定である。

【参考文献】

- 1: 全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 2022)
 : 港湾空港技術研究所 資料 1415 2024年03月
 : 川口 浩二, 藤木 峻, 田村 仁

WIT-ec-CPT(電気伝導率コーン)によるセメント系地盤改良の品質確認

若築建設株式会社 技術研究所 地盤・環境グループリーダー 水野 健太

1 はじめに

国土が軟弱で巨大地震が頻発する我が国において、セメント系固化改良工法は基礎地盤の支持力増加、液状化対策、耐震補強、災害復旧など多くの目的で適用されている。その品質検査は、オールコアボーリングで採取したコア供試体の連続性と一軸圧縮強さによって評価することが一般的である。しかしながら、オールコアボーリングは地盤が強固に硬化した後の確認行為であるため、要求品質を満足していないと判定された場合、改良仕様の変更など施工へのフィードバックや再施工を行ことは困難である。そこで、造成中や造成直後(硬化前)に所定の要求品質を満足しているかどうかを確認することができれば、施工の手戻りを防止でき、かつ品質向上にも寄与すると考えられる。

このような背景から、当社では、無線式多点温度計測システムによる高圧噴射攪拌工法の造成出来形の見える化¹⁾、試薬噴霧機構付き CPT ビデオコーン貫入試験器(WIT-video-CPT、NETIS:KTK-240001-A)^{2),3)}や電気伝導率コーン貫入試験器(WIT-ec-CPT)を活用したセメント系固化改良地盤の出来形・品質評価手法を開発し、実工事への適用を進めている。本稿では、電気伝導率コーン貫入試験器(WIT-ec-CPT)について、試験器の概要と室内試験によるセメント系固化改良地盤の電気的特性の計測結果例について報告する。

2 WIT-ec-CPT の概要

2.1 構造と仕様

WIT-ec-CPTコーンプローブの外観を写真-1に、貫入装置の外観を写真-2に、コーンプローブの仕



写真-1 WIT-ec-CPT プローブの外観



写真-2 自走式貫入装置(Compact CPT-Rig)

表-1 WIT-ec-CPT の仕様

項目	仕様	
TYPE	TE2: CPTu(先端抵抗, 周面摩擦抵抗, 間隙水圧)	
寸法, 質量	全長, 外径	720 mm, 44 mm
動作温度	0~60°C	
先端コーン	底部断面積	1500 mm ²
	先端角度	60 度
	有効断面積比	0.79
フリクションスリーブ	長さ	164 mm
	周面積	22500 mm ²
ロードセル容量, 精度	貫入抵抗	100 kN, 0.25% FS
	周面摩擦抵抗	100 kN, 0.5% FS
	間隙水圧	2 MPa, 0.5% FS
電気的特性計測モジュール	比誘電率	1~80, 0.5% FS
	電気伝導率	0~0.5 S/m, 0.5% FS
	温度	-10~+50°C, 1.0% FS
計測範囲, 精度	2 軸傾斜	
	範囲, 精度	最大 25°, 1°未満

様を表-1に示す。WIT-ec-CPTは、貫入試験中に深度10mm毎の間隔で8成分の計測値が同時に記録される。ここで8成分とは、写真-1に示すように、通常のCPTu主要3成分(コーン先端抵抗、周面摩擦抵抗、間隙水圧)に加えて、電気的特性の3成分

(比誘電率、電気伝導率、温度)、貫入中の2軸傾斜の2成分である。写真-2に示す貫入装置は、油圧シリンダーによる圧入機構を備えたもので、ロッドの貫入ストロークは50cmである。クローラ式で自走できるため機動性に優れているが、機体総重量が1ton程度なので、施工基面に4本のアンカーを打ち込むか、ワイヤーやチェーンブロック等を用いて堅固な鋼製足場等に機体を固縛して、貫入時の反力を確保する必要がある。

2. 2 計測原理

(1) 比誘電率

比誘電率は、「電気のためやすさ」を表す定量的な指標であり、真空の誘電率(=1)に対する測定対象の誘電率として、比(無次元量)で表す。空気が1、氷が4.2、水が80などである。土粒子の比誘電率は2~7程度と水よりも空気に近い。地盤は固相(土粒子)、液相(間隙水)、気相(空気)の3相で構成されるため、地盤の比誘電率は、間隙の大きさや間隙中の水分量、溶け込むイオンの種類や濃度に依存する。計測結果は土の体積含水率を推定することに用いられることが多い。

WIT-ec-CPTコーンでは静電容量法⁴⁾により2つの電極周辺の誘電率を計測している。具体的には、周波数20 MHzの電磁波パルス電極に供給すると、電極は周囲の媒体の誘電率に応じて帯電する。この時の帯電時間を計測して比誘電率が得られる。得られた比誘電率はバルク(見かけの)値である。

(2) 電気伝導率

電気伝導率は、「電気の流れやすさ」を表す定量的な指標であり、その逆数である電気比抵抗は電気の流れにくさを表す。電気検層や比抵抗探査といった地盤の物理探査分野において、地層区分、地下水探査、汚染調査などに広く利用されている。

地盤の電気伝導率の測定には、大きく分けて電極法と電磁誘導法がある。直流電流を流すと電気

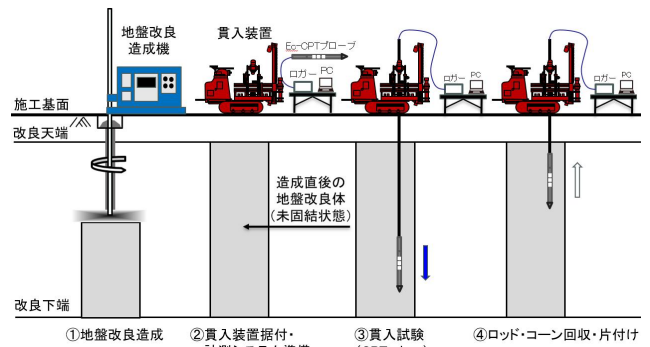


図-1 WIT-ec-CPT の調査手順



写真-3 WIT-ec-CPT 試験(社有地試験ヤード)

分解が生じるため、電極法では交流電流を用いる。電極数の違いにより2極、3極、4極法がある。WIT-ec-CPTは、2極法により電気伝導率を計測している。具体的には、2つの電極に交流電流を流し、電極間の抵抗を測定する。電気伝導率は抵抗の逆数にセル定数(電極間の距離と面積の比)を乗じることによって得られる。電気伝導率は温度に依存するため、温度も同時に計測される。一般的には+25°C時の値に補正されるが、WIT-ec-CPTでは+18°C時の値に補正される。得られた電気伝導率は、バルク(見かけの)値である。

2. 3 調査手順

施工現場における WIT-ec-CPT 試験の調査手順を図-1に示す。調査の様子を写真-3に示す。

①地盤改良前の任意の時期に、施工箇所近傍において事前値(造成前の値)を得る試験を実施しておく。

- ②地盤改良造成後直ちに、造成マシンを退避させ、貫入装置を造成箇所へ移動・据付ける。WIT-ec-CPT コーンプローブ、通信ケーブル、データロガー、制御・モニタリング PC の接続を行い、計測に備える。なお、通信ケーブルはあらかじめ貫入ロッド(1m)に通しておく。
- ③貫入ロッドを接続しながら、所定の深度まで WIT-ec-CPT プローブを貫入して試験値を得る。貫入速度は CPTu 試験と同じ 20 mm/sec である。貫入中の計測値(深度分布)は、制御・モニタリング PC でリアルタイムに確認することができる。
- ④改良下端到達後、計測データの保存を行い、ロッドおよびプローブを引き上げ、片付けを行う。
- ⑤複数の調査箇所がある場合は、②～④を繰り返す。
- ⑥WIT-ec-CPT 試験結果および品質評価結果は、帳票として整理する。品質評価の詳細については、後述する。

2. 4 地盤改良工事での活用する場合の特長

WIT-ec-CPT は、通常の CPTu 試験としても利用できるが、セメント系地盤改良工法の品質・出来形確認を目的として利用する場合、以下に示す特長を有する。

- ・ CPTu 試験をベースとしているため、調査の作業効率が良い。試験時間は、10m の調査深度のケースで、貫入装置の据付けから片付けまで 60 分～90 分程度であり、一日で複数個所の調査が可能である。なお、改良体の硬化が進行していないことが調査の前提条件であるため、造成翌日以降の調査は不可である。
- ・ 熱電対、光ファイバ温度計、マイクロフォンなど、測定管を事前に地中へ設置する必要がある計測モニタリング方法に比べて、事前準備が少なく済む。また、施工展開にも依存せず、任意の箇所で試験を実施できるため、調査の自由度が高い。
- ・ 造成直後における品質確認のため、品質不良時の再施工(再攪拌など)が可能であり、施工の手戻りが無い。
- ・ 深度的に連続的なデータを取得できるため、改良体全長にわたる品質確認を行うことができる。
- ・ 同時に三成分データ(先端抵抗、周面摩擦抵抗、間隙水圧)、地中温度、誘電率を取得できるため、総合的に品質確認を行うことができる。
- ・ 調査は貫入オペレーターとロッド作業者の 2 名体制で実施する。いずれも特別な資格を必要としないため、操作方法のトレーニングを事前に受ければ誰でも調査が実施できる。
- ・ 貫入装置は油圧シリンダーによる圧入貫入であるため、回転装置へのオペレーターの巻き込まれ災害の危険がなく、安全に作業できる。

3 室内実験による改良土の電気的特性

地盤の比誘電率や電気伝導率を指標として、セメント系改良地盤の品質を定量的に評価する場合、セメント系固化改良土が有する電気的特性を把握しておくことが重要となる。前述したように、地盤は土粒子、間隙水(改良後はセメントミルク)、空気の 3 相で構成されるため、原地盤の土質や初期含水比、セメントミルクの水固化材比、固化材の添加量といった様々な変動要因により、結果として得られる比誘電率や電気伝導率は異なる計測値を示すと考えられる。したがって、現場での WIT-ec-CPT 調査に先立ち、現場の土質条件や改良仕様に基づき、室内試験や実機を用いた確認試験を実施し、これらの計測結果から現場における管理値を規定しておく必要がある。

以下では、各種試験条件で実施した室内試験による計測例について報告する。表-2 に示す異なる土試料を用いて比誘電率と電気伝導率を計測した結果を表-3 に示す。固相(土粒子)と液相(水道水)

表-2 室内試験に用いた土試料の物性値

土試料	F_c (%)	w (%)	ρ (Mg/m ³)	備考
土試料 1	28.6	18.0	2.057	豊浦珪砂+カオリン
土試料 2	100	44.2	1.735	赤 7 号(含酸化鉄)
土試料 3	100	56.0	1.650	カオリン粘土
土試料 4	0	22.0	1.831	豊浦珪砂

表-3 土試料の比誘電率と電気伝導率

土試料	比誘電率	電気伝導率 (S/m)	比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
土試料 1	14.5	見かけ:0.019 間隙水:0.131	見かけ:52.9 間隙水:7.6
土試料 2	25.4	見かけ:0.067 間隙水:0.228	見かけ:14.9 間隙水:4.4
土試料 3	28.4	見かけ:0.037 間隙水:0.109	見かけ:27.0 間隙水:9.2
土試料 4	18.0	見かけ:0.008 間隙水:0.041	見かけ:129 間隙水:24.6
水道水	72.6	0.0272	36.8

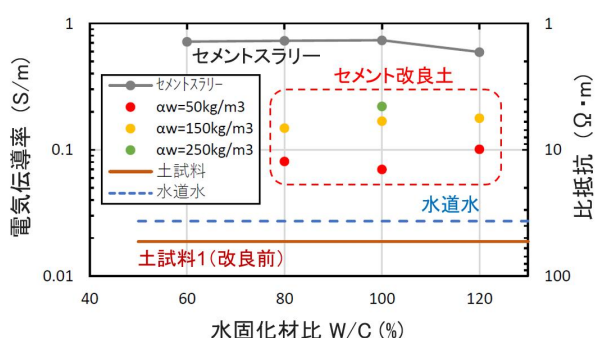


図-2 セメントスラリーおよび改良土の電気的特性

が反映された土試料の見かけの比抵抗は、14.9～129 の幅広い範囲にあることがわかる。

次に、水固化材比を 60%～120%の範囲で変化させたセメントスラリーおよび水固化材比を 80%～120%の範囲、固化材添加量を 50 kg/m³～250 kg/m³ の範囲で変化させた時のセメント改良土の比誘電率と電気伝導率の計測結果を図-2 に示す。セメントスラリーの電気伝導率は、 W/C が 100%より小さく(濃度が高く)なると、概ね 0.7 S/m(比抵抗 1.4)と一定値に収束していることがわかる。セメント改良土の電気伝導率に着目すると、セメントスラリーと土試料(改良前)の中間の値を示していることを確認できる。水固化材比と電気的特性の相関性有

無の判断は難しいが、固化材添加量が大きいほど電気伝導率は大きな値を示す傾向を確認できる。これらの室内試験の結果から、電気伝導率を指標として、未改良地盤とセメント改良地盤を明確に区別できると考えられる。

4 おわりに

WIT-ec-CPT コーンの利用の際は、事前の室内試験で得た結果をもとに、原位置で改良品質を判定する管理値を定めることが重要である。その結果、造成直後に、迅速に、連続的に品質確認を行うことができ、地盤改良のトラブル防止や品質向上を期待できる。

今後、WIT-ec-CPT を多くの施工現場で積極的に活用し、セメント系固化改良体に対する早期品質評価手法の精度を高めていく予定である。また、本稿で紹介した以外のサウンディング技術、センサリング技術、オンサイト分析技術の現場実装、ラボ試験技術の開発を積極的に進めており、地盤改良工事における施工管理の高度化、見える化、生産性向上、安全性向上を推進していく所存である。

参考文献

- 1)水野健太:無線式多点温度計測システムによる高圧噴射攪拌工法の造成出来形の見える化, 令和 3 年度中国地方建設技術開発交流会(山口会場), 2021.
- 2)一松駿斗・水野健太・有木高明:試液噴霧機構付き CPT ビデオコーンによる改良体の出来形確認, 第 59 回地盤工学研究発表会, 23-7-3-05, 2024.
- 3)一松駿斗・水野健太・有木高明:試薬噴霧付き CPT ビデオコーンによる高圧噴射改良体の造成径評価, 第 16 回地盤改良シンポジウム論文集, 2024(投稿中).
- 4)井上光弘:塩水を含んだ砂に対する誘電率水分計の測定精度の評価, 水文・水資源学会誌, 第 11 巻, 6 号, pp.555-564, 1998.

プレキャスト上部工の鉄骨差込み接合技術「SFIジョイント工法」

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 田中 亮一

1 はじめに

港湾においては、重力式防波堤や重力式係船岸に用いるケーソン等の大型なものから、消波ブロック等の小型なものまで、標準的にプレキャストコンクリートが採用されている。これは、海上・海中では場所打ちにてコンクリート構造物を構築することが難しいためであるが、コンクリート部材間の接合に関して設計的に配慮する必要がほとんどない、もしくは接合がないことも理由である。

一方、栈橋等の海上杭式構造物にプレキャスト工法を適用する場合、図-1に示すような鞘管が設置された上部ブロックを据え付けた後に、鋼管杭との隙間にコンクリートを充填して杭と上部工を接合させる鞘管方式が採用されることが多い。この方式では、設計上許容される鞘管内面と鋼管杭外面のクリアランスの確保が重要であるため、杭天端の測量結果に応じて、上部ブロックの製作途中に鞘管や鉄筋等の配置を微調整するなどの対応を強いられた事例が報告されている¹⁾。これは、上部ブロックは陸上で製作されるため、ほぼ設計図どおりの寸法で出来上がるのに対し、鋼管杭は海上で打ち込まれるため、高い精度の出来形（港湾工事における鋼杭の出来形管理基準の範囲：杭頭中心位置10cm以内、杭天端高±5cm、杭の傾斜2度以下）を要求することが難しいためである。

このため、栈橋のように複数のコンクリート部材と鋼部材を接合させる必要がある構造物では、大規模かつ急速施工が求められる場合を除

いて、プレキャスト工法の積極的な採用はこれまでされてこなかった。しかし、担い手不足への対応や働き方改革の推進といった背景や、潜水士等の特殊作業員の確保や潮間作業による工程の長期化、および安全性の確保などの課題から、近年ではプレキャスト工法の採用が増えてきている。そこで、従来の場所打ち工法における型枠支保工の組立・撤去作業を省略して、海上作業における工程短縮および省人化・省力化を実現するとともに、杭の施工誤差によらず、所要の耐力を満足する設計が可能、かつ上部ブロックを設計位置に据え付けることができる「SFIジョイント工法」を開発した。

2 工法の概要

本工法は、図-2に示すとおり、鋼管杭の内部に差込み鋼材を設置した後に、中詰コンクリートを打ち込むことで、杭と上部工を一体化させる接合技術である。この接合構造は、鉄道構造物等設計標準・同解説²⁾に記載されている鉄

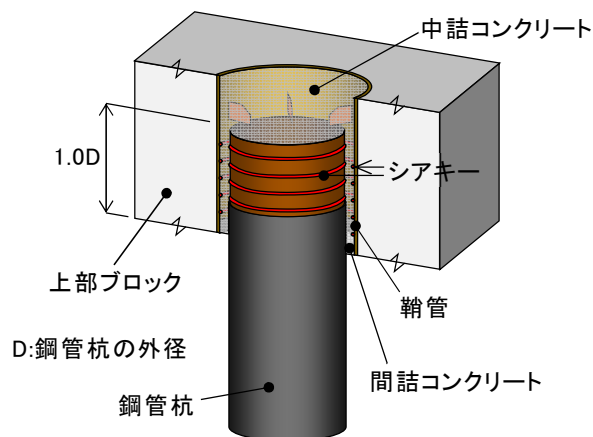


図-1 既存のプレキャスト工法（鞘管方式）

骨鉄筋差込み方式を参考に考案したもので、差込み鋼材と中詰コンクリートからなる差込み部材（鉄骨コンクリート）を介して、杭と上部工の荷重伝達がなされる。

図-3に平面位置における杭の施工誤差を吸収する概念図を示す。設計段階から、差込み鋼材と杭内面、および鞘管内側と杭外面の離隔を考慮しておくことで、上部ブロックの据付け時に杭の施工誤差を吸収できる（上部工を設計の位置に構築できる）。このため、杭の出来形に影響されずに、杭の打込みと並行して上部ブロックの製作が進められる。なお、杭の施工誤差が出来形管理基準の範囲内（杭頭中心位置 10cm 以内）であれば、設計上必要な杭頭接合部の耐力を確保できることを確認している³⁾。また、本工法は、図-4に示すように、鋼管杭頭部が上部ブロックに埋め込まれる構造となるが（一般には $0.4D$ 以上かつ 400mm 程度以上： D は鋼管杭の外径）、図-1に示す既存のプレキャスト工法（埋込み長の標準は $1.0D$ ）に比べて鋼管杭の長さを低減することができる。

本工法は直杭式の梁スラブ構造の栈橋、ドルフィン、PC 栈橋の受梁等に適用することが可能である。これは、直杭を模擬した試験体を用いた荷重実験によって設計の妥当性が検証できているためであるが、設計の妥当性や施工の確実性が確認できれば、斜杭式等への展開も可能と考えている。

3 施工手順

ここでは、梁スラブ構造の栈橋上部工の梁部材に SRC 構造を採用した場合を例に、図-5に施工手順を示す。なお、差込み鋼材は、現場条件に応じて、杭打込み後に事前挿入してからプレキャスト上部工を設置したり、プレキャスト上部工と同じタイミングで設置できるなど、自由

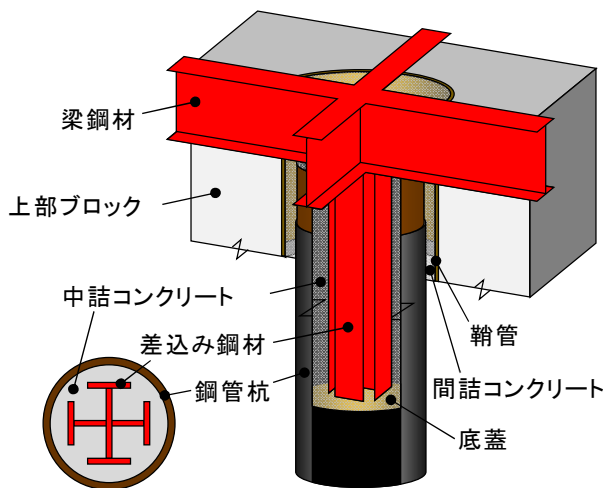


図-2 SFI ジョイント工法

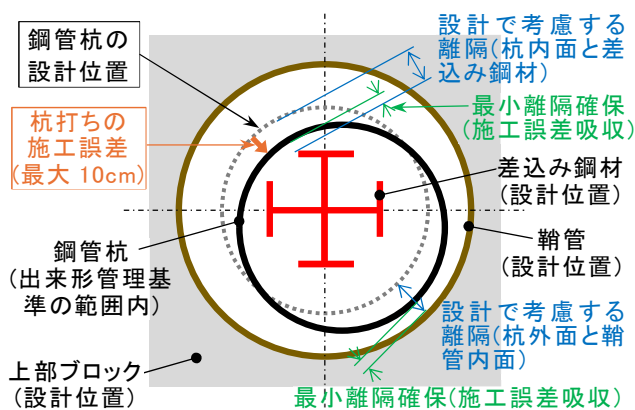


図-3 杭の水平施工誤差を吸収する概念図

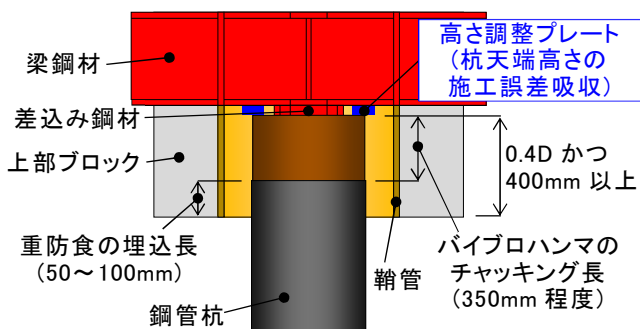


図-4 杭の高さ施工誤差を吸収する概念図

度の高い施工方法を採用できることも特長である。

- ①杭の打込み後、杭の出来形が管理基準の範囲内であることを確認する。
- ②杭天端の高さ測定の結果に基づき、図-4に示すように上部ブロック（杭頭）内の梁鋼材の下面に、高さ調整プレートを陸上にて溶接す

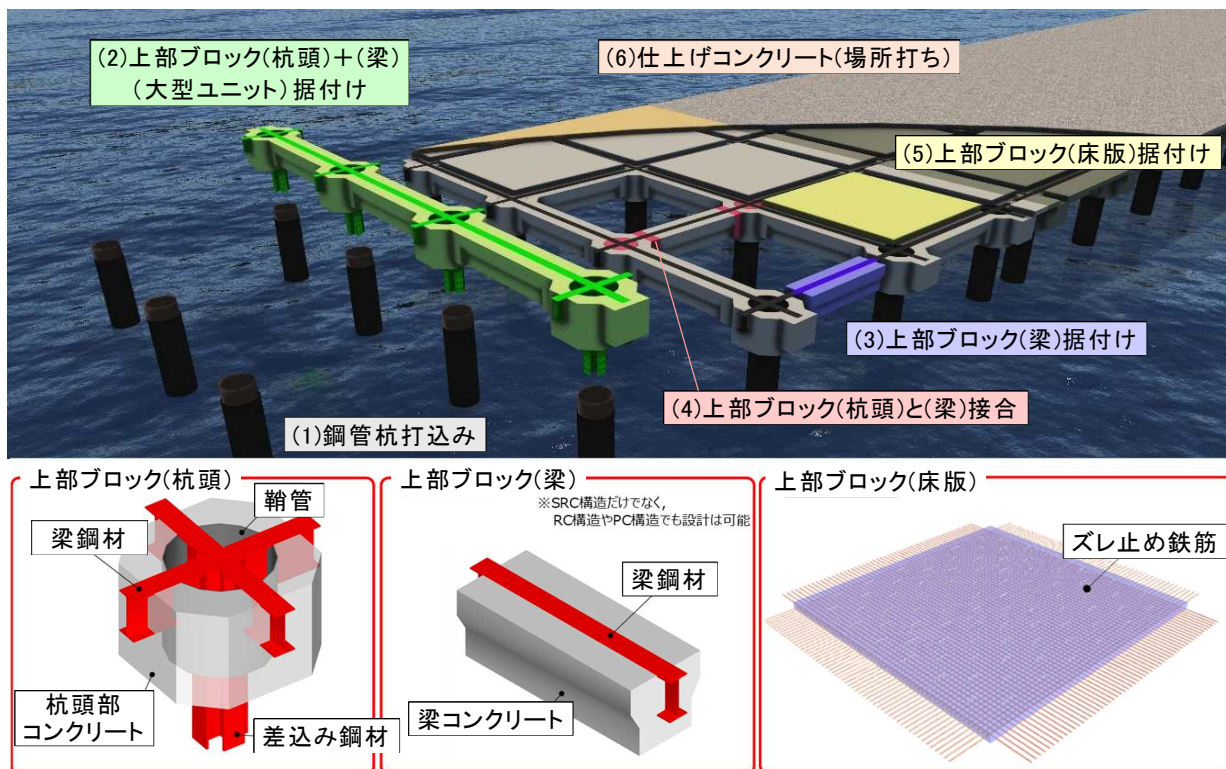


図-5 SFI ジョイント工法を用いたプレキャスト上部工の施工手順

る。これにより、杭天端高の施工誤差を吸収する。

- ③杭の内側に中詰コンクリートを打ち込むための底蓋を設置し、杭天端上の設計の位置に上部ブロック(杭頭)を据え付ける。なお、陸上にて図-5に示すように上部ブロック(杭頭)と上部ブロック(梁)の一部を接合し、大組ユニット化としておくことで、据付け回数の低減を図ることができる。
- ④上部ブロック(梁)を据え付け、図-6に示すように上部ブロック(杭頭)とボルト接合し、その間の鉄筋を組み立てる。なお、梁部材にSRC構造の採用することで、上部ブロック(杭頭)と(梁)の接合作業を簡素化できるとともに、杭間距離を大きくすることができるため、副次的に杭本数の低減も期待できる。
- ⑤④の上部ブロック(杭頭)と(梁)間、および杭外面と鞘管の隙間にコンクリートを打ち込むための型枠を設置し、杭内部とともにコンクリートを打ち込む。

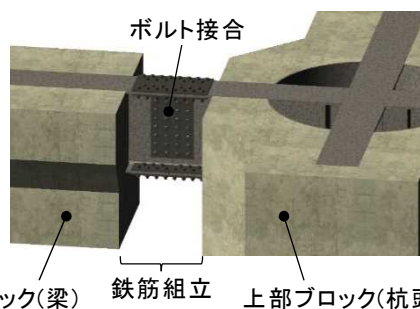


図-6 上部ブロック(杭頭)と(梁)の接合

- ⑥上部ブロック(床版)を据付け、床版の鉄筋を組み立て、最後に仕上げコンクリートを打ち込む。

4 適用の効果

ここでは、本工法を係留ドルフィンに適用した事例⁴⁾を紹介し、適用による効果について説明する。

施工状況と完成状況を図-7に、本工法の適用による効果を、従来の場所打ち工法を採用して上部工を構築する場合と比較して表-1に示す。上部工を構築する際に要する海上作業日数



図－7 本工法の適用事例（施工状況と完成状況）

は、従来の場所打ち工法では 11 日（当初計画）に対し、本工法の採用により 3 日まで短縮した。また、海上作業人員数については、従来の場所打ち工法では 102 人・日（当初計画）に対し、本工法の採用により 85 人・日まで削減でき、17%の省人化を実現したことを確認している。これら効果の要因は、上部ブロックの製作を鋼管杭の打込みと並行して進められたこと、海上における支保工の設置・撤去作業を省略できたことによるものであった。

5 おわりに

本工法は、海上杭式構造物の構築にあたり、設計・施工の肝である杭と上部工の接合に鉄骨差込み接合を採用したプレキャスト工法である。上部工の構築にプレキャスト工法を採用することは、海上作業の大幅な工程短縮や、安全性および品質向上に寄与できるため、今後、本工法の適用を増やし、工事の省人化・省力化に貢献していきたいと考えている。また、鉄骨差込み接合構造は、従来の場所打ち工法における杭頭接合としても活用できるため、調達可能な揚重機能力に応じてハーフプレキャスト構造の上部ブロックにするなど、任意の上部工形状とすることが可能である。なお、本工法は、2024 年 7

表－1 本工法適用による効果

工法	海上作業日数	労務
従来の場所打ち工法	11 日	102 人・日
本工法	3 日	85 人・日

月に、沿岸技術研究センターの港湾関連民間技術の確認審査・評価証（第 23003 号）を取得している。

参考文献

- 1) 川俣奨：栈橋上部工受梁のプレキャスト化施工について、*Marine Voice* 21, Vol.302, pp.12-15, 2018.8
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説－鋼とコンクリートの複合構造物, 2017
- 3) 濱田洋志ら：プレキャスト上部工の鉄骨差込み接合における鋼管杭と差込み鋼材の相対的位置のずれが杭頭接合部の耐力に及ぼす影響, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.46, No.2, pp.535-540, 2024
- 4) 桑原拓馬ら：鉄骨差込み接合方式を採用した海上係留ドルフィンのプレキャスト施工, 令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, VI-1048, 2023

山岳トンネルにおける 3D-LiDAR を用いた計測技術各種

大成建設株式会社 技術センター 生産技術開発部 ○木下勇人 竹中計行 古賀快尚
本社土木本部土木技術部 トンネル技術室 宮本真吾

1 はじめに

山岳トンネル工事では、岩石等の落下（肌落ち）による重篤な労働災害がたびたび発生しており、2024年3月改正の「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン¹⁾」には、切羽作業の自動化・遠隔化の推奨が明記された。また、2024年4月、国土交通省は、建設現場の生産性向上施策として「i-Construction2.0²⁾」を公表し、2040年までの建設現場のオートメーション化と、デジタル技術の利活用による省人化を掲げた。

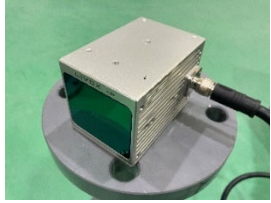
これらの発表に先駆け、当社では、安全確保を含めた山岳トンネル工事のDX開発に取り組んでおり、技術の進歩が著しい三次元計測機「3D-LiDAR」を用いた計測技術を開発し、現場に展開している。本稿では、山岳トンネル工事における3D-LiDARを活用した3つの計測技術について、技術概要と実証結果を報告する。なお、これらの計測技術には全て同じLiDARを採用しており、国内外の数種類の機種を比較検証して、高性能かつ費用対効果の高いLIVOX社製AVIAを選定している（表-1）。

2 切羽掘削形状の迅速計測技術「T-ファストスキャン」

2.1 開発背景と目的

山岳トンネル工事の掘削作業においては、現状の掘削計画に対する結果（掘削形状）を把握して、次回以降の掘削計画の適正化を図ることが重要となる。掘削形状を測定する技術としては、車載式の3Dレーザースキャナ等を用いた技術が既に実用化されているが、計測とデータ処理にかかる時間や、

表-1 採用した3D-LiDAR 諸元

機種名	LIVOX 社製 AVIA
外観	
波長・クラス	905nm・クラス1
反射率	190m@10%, 260m@20%, 450m@80%
視野角	H: 70.4度, V: 77.2度
距離精度	20mm@20m
点群密度	240,000点/秒

計測機の故障リスクと導入コスト等、山岳トンネル工事での現場運用には課題がある。そこで、このような課題を解決し、広く現場に普及することを目的として3D-LiDARを活用した切羽掘削形状の迅速計測技術「T-ファストスキャン」を開発した。

2.2 技術の概要

本技術は、3D-LiDARと測位用プリズムおよび通信設備をユニット化して機動性の高い小型車両に搭載することで、掘削直後の出来形を迅速に計測・可視化する技術である（図-1）。

3D-LiDARと3個の測位用プリズムは、計測用架台を用いて位置関係を固定しており、これにより、3D-LiDARで取得した点群は、プリズムの測量情報を基に絶対座標に変換される。さらに、ユニット化した機器類は架台を介して車両に固定するため、このユニットを移動用車両に搭載するだけで計測が可能となる。

ユニットを搭載する車両には、レジャー用小型バギーを選定した。このバギーは、凹凸路面の走行を前提に設計されており、走行時はサスペンショ

ンが計測機器への振動を抑える他、小型で小回りもきくため、路盤が悪くても迅速に切羽に到達できる。また、取得した出来形は速やかに、かつ現地で確認できるため、次の発破掘削における削孔パターンや装薬量の修正、掘り残しの除去（あたり取り）作業に反映させることが可能である。

2. 3 技術の効果

発破掘削のトンネル現場にて本技術の性能検証を行った結果を以下に示す。発破直後、ずりを凡そ搬出し終えた切羽から約 15m 後方に車両を停車して掘削形状を測定した。

本技術と車載式 3D スキャナのそれぞれで取得した掘削形状点群の比較結果を図-2 に示す。概ね数 cm 程度の差異はあるが、掘削形状からの大きな逸脱はなく、発破による余掘りや掘り残しの位置把握には十分に活用できると考える。

車載式 3D スキャナは車両の設置時間を含めて計測に 15 分を要したのに対して、本技術の計測所要時間は 2 分程度であり、3D-LiDAR 自体の計測時間の短縮と計測機器のユニット化により、計測時間を 87%削減できることを確認した（図-3）。

3 切羽鏡面のコンクリート吹付け厚計測技術 「T-ショットマーカー フェイス」

3. 1 開発背景と目的

山岳トンネル工事では、切羽の崩落・肌落ち防止のためにコンクリート吹付け作業を行う。従来の吹付け作業は、オペレータが切羽近傍で目視により厚さを確認しながら施工するものであり、吹付け厚さの定量的な管理が課題とされてきた。そこで、吹付け作業中に切羽鏡面のコンクリート厚さをリアルタイムかつ面的に把握できる技術「T-ショットマーカー フェイス」を開発した。

3. 2 技術の概要

本技術は、吹付け作業中の高粉塵環境下で切羽に吹付けられたコンクリートの厚さをリアルタイムに計測する技術である。これにより、オペレータは鏡面の吹付け厚さを定量的に把握しながら吹付けノズルを操作することができる。

全てのシステム構成機材は、吹付け機に搭載され（図-4）、吹付け機を切羽近傍にセットした後は操作スイッチを押すだけで計測を開始できる仕様とした。そのため、施工サイクルに影響を与える



図-1 掘削形状計測状況

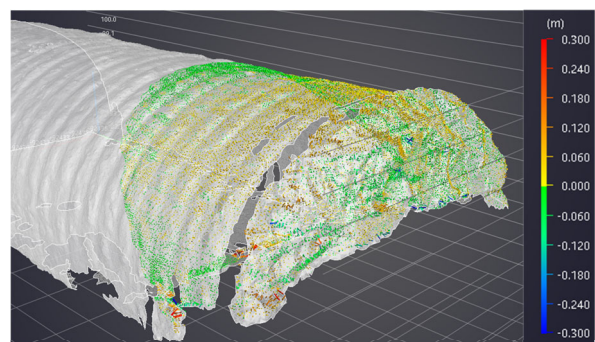


図-2 掘削形状点群の比較

	移動	計測器セット	3次元計測	機械点測量	計測器片づけ	撤収	所要時間
コンパクトスキャナ	バギー (30秒程度)	ユニット化で 省略	3D-LiDAR (10秒程度)	シャッタープリズム+TS (1分程度)	ユニット化で 省略	バギー (30秒程度)	合計2分 (87%削減)
車載式3Dスキャナ	ライトバン (30秒程度)	スキャナ設置 水平調整 (3分程度)	3Dスキャナ (8分程度)	球体ターゲット+TS (1分程度)	スキャナ撤去 (3分程度)	ライトバン (30秒程度)	合計15分

図-3 計測手順と所要時間

ことなく即座に吹付け作業を開始することができる。計測開始後は、装置のシャッターゲートが自動で開き、作業中の吹付け厚さは常時計測される（図-5）。取得した厚さ情報はモニタに約5秒間隔で更新・表示されるため、最新の吹付け状況をいつでも定量的に確認できる（図-6）。また、粉塵や吹付け材の跳ね返りなどの影響を低減する複数のフィルタ機能を装備しており、粉塵環境下でも吹付け厚を高精度に計測可能としている。

3. 3 技術の効果

作業中の吹付け厚さ表示画面の経時変化の一例を図-7に示す。(a)は作業開始前の初期状態の厚さを、(d)はアジテータ車1台分の吹付けコンクリート施工後の厚さを、(b)(c)は途中段階の厚さをそれぞれ示している。吹付け作業の進捗に伴って着色部が広がり、吹付け厚さが増加する様子が確認できる。複数回の吹付け作業中の計測実験から、本技術は高粉塵環境下においても安定的な面的計測が可能であること、また、吹付け厚さを高精度に評価できることを確認した。

4 切羽周面のコンクリート吹付け厚及び出来形計測技術「T-ショットマーカー アーチ」

4. 1 開発背景と目的

前述の「T-ショットマーカー フェイス」によりコンクリート吹付け厚の定量把握が可能となったが、一方で、吹付け厚の評価対象は切羽鏡面に留まり、アーチ側壁部の素掘り面（以下「アーチ面」）の計測・評価には適用できていなかった。特に鋼製支保工を施工しない区間において吹付け作業を行う場合は、目安となる対象物がないために目視で厚さを管理することは極めて難しく、アーチ面への適用範囲の拡大が望まれた。そこで、既存システムを機能拡張し、アーチ面のコンクリート吹付け厚を面的に把握できるシステム「T-ショットマーカー アーチ」を開発した。

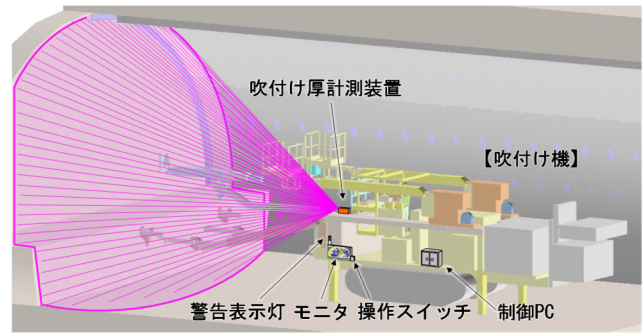


図-4 T-ショットマーカー フェイス概要図

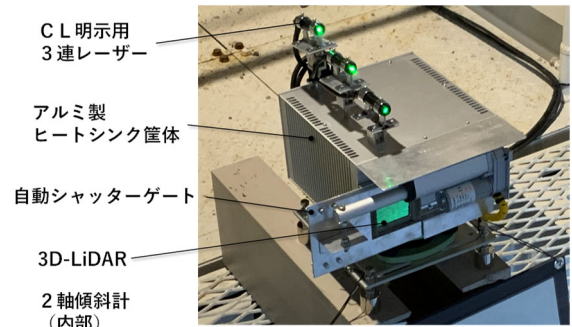


図-5 3D-LiDAR 内蔵の吹付け厚計測装置

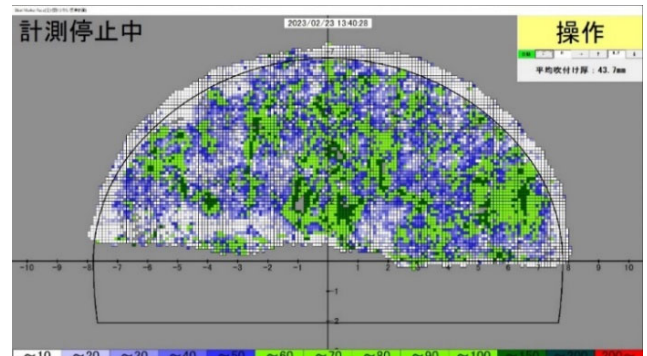


図-6 鏡面の吹付け厚表示画面

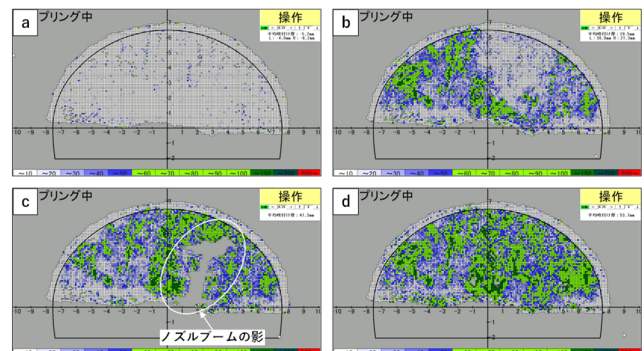


図-7 吹付け厚さ表示画面の経時変化の一例

4. 2 技術の概要

本技術は、吹付け機に搭載した2台の3D-LiDARによりアーチ面を座標化することで、アーチ面の「吹付け厚」と「出来形」を一括管理する技術である。吹付け機に測位用のシャッタープリズムを装備することで、吹付け面の絶対座標での管理を可

能としている。「フェイス」と「アーチ」の2種類のT-ショットマーカーを併用することで、切羽全体の吹付け厚を総合的に計測・管理することが可能となる（図-8、図-9）。

4.3 技術の効果

吹付け作業終了時点のモニタ画面と色表示ルール例を図-10に示す。モニタには出来形と吹付け厚の2種類のアーチ面の展開図を表示している。吹付け厚の展開図は、掘削素掘り面を基準とした現在の吹付け面の位置を色表示するため、アーチ面の各位置で所定の吹付け厚があるか否かを把握できる。対して、出来形の展開図は、設計吹付け仕上がり面を基準とした現在の吹付け面の位置を色表示しており、吹付け面が出来形基準面にあるか否かを把握できる。このように、吹付けの不足と過剰を同時かつ面的に把握することで、内空を侵した場合のハツリ作業の発生等の手戻りの防止と品質の確保が可能となる。また、本技術は、計測結果と設計断面情報を基に吹付け時のリバウンド量を加味した必要コンクリート量を自動算出する機能

も有する。作業進捗に伴って、残りの吹付け作業に必要なコンクリート量を再計算することで、コンクリート注文量の過不足を防止でき、CO2削減効果も期待できる。

5 おわりに

3D-LiDARを活用した山岳トンネル工事における3つの計測技術を開発した。従来、山岳トンネルの施工管理は個人の経験に依存する部分が多いが、これらの技術を活用することで、管理作業の定量化と省力化が可能となる。今後は、デジタル技術を活用したデータ駆動型の施工管理の取り組みを継続するとともに、山岳トンネル施工の完全自動化に向けた技術開発を推進していく所存である。

参考文献

- 1) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン，令和6年3月改正
- 2) 国土交通省：i-Construction 2.0，令和6年4月

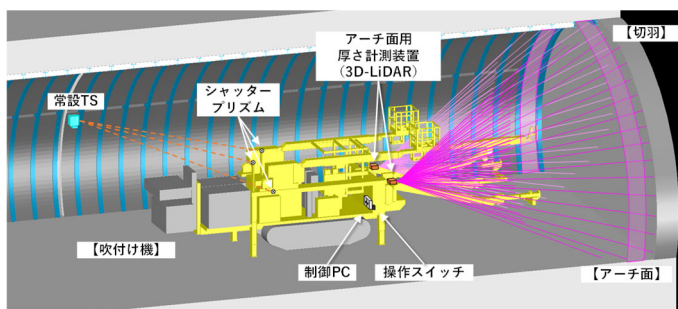


図-8 T-ショットマーカー アーチ概要図



図-9 2種類の3D-LiDARの設置状況

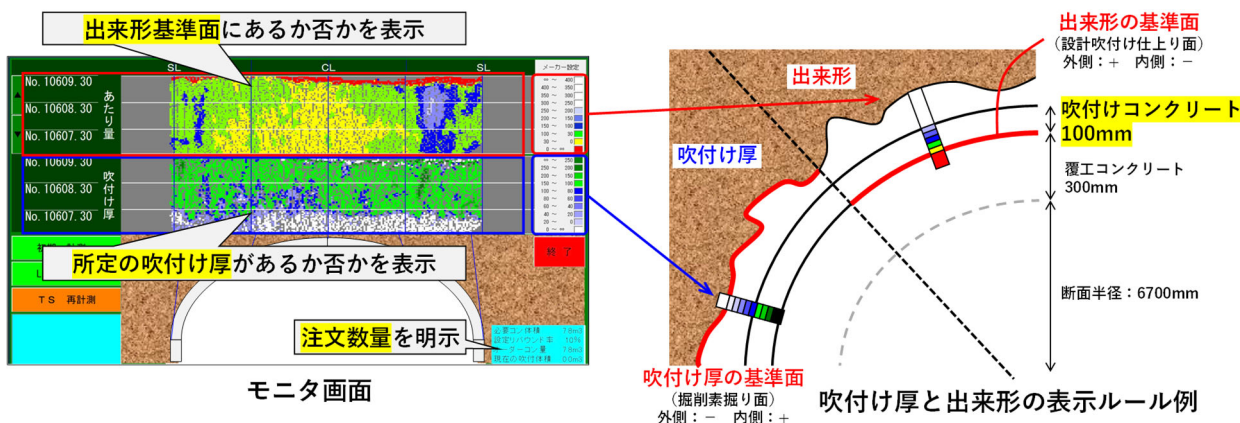


図-10 吹付け終了時のモニタ画面と色表示ルール例

AI 物体検出を活用した消雪パイプ点検業務の 安全性向上への取り組み

株式会社 興和 技術開発室課長 ○木村 浩和
株式会社 興和 水工部長 桑原 賢二

1. はじめに

雪国の道路における消雪パイプの点検作業は、道路上での作業員と交通誘導員の安全を確保することが重要な課題である。この度、点検作業の安全性と効率性を向上させるため、カメラ映像から AI を活用して消雪パイプやノズルを検出するモデルを構築し、それによって自律走行する台車を開発した。本論文では、この開発の経過と今後のノズル点検および清掃作業の自動化の可能性について報告する。

2. 消雪パイプの重要性と点検の現状

2.1 雪国における交通確保の重要性

雪国では積雪による交通障害が日常生活に直接的に影響を及ぼしかねない。融雪による道路交通の安定的な確保は交通事故リスクの低減をはじめ、通勤や通学など地域社会の日常を維持することはもちろんのこと、物流による経済活動や通院、救急搬送等の面においても冬期の最重要課題となっており、特に豪雪地帯では消雪パイプによる道路融雪が欠かせない手段となっている。

2.2 点検作業の課題

前述のように、雪国において消雪パイプは冬期の交通確保に不可欠なインフラ設備である。そのため降雪期の前に、消雪パイプを構成するコンクリートに巻きたてられた散水管の清掃を行い、個々の散水ノズル部分からの出水量を

確認したのち、詰まったノズル穴に対しては人力により専用工具を用いて砂や泥を取り除く作業が必要となる。

通常のノズル点検作業は、図-1のように数名の作業員が隊列を組んで行き、通行車両の流れを妨げずに作業を行う。作業員の前後に配置する交通誘導員は、通行車両への注意喚起を行いながら作業員の安全を守るとはいえ、常に危険な状況に置かれている。

一方、降雪期前は道路工事等の繁忙期と重なるため交通誘導員の人手不足が深刻な問題となっている。このような状況で作業員の安全を確保しつつ効率的に点検作業を行うための新たな手段が求められている。



図-1 消雪パイプノズルの点検状況

3. 自律走行型誘導ロボットの開発

3.1 ロボットの概要

今回開発した台車型の自律走行型誘導ロボットは、車いす用の 24V-DC モーターによる駆動

システムを採用し、図-2のように、作業員を挟むように前後に2台配置することで交通誘導員に代わって安全空間を提供する(特許第7154639号)。

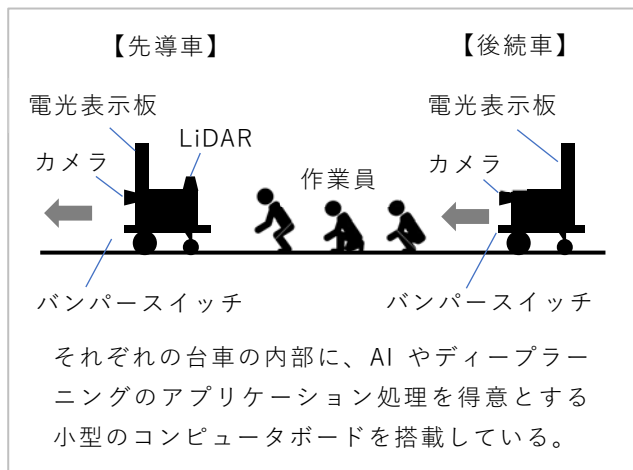


図-2 台車型自律走行誘導ロボットの構成

先導車(図-3)は、カメラ映像から得られるデータを AI でリアルタイムに処理し、消雪パイプノズル及びその位置を検出しながら移動方向や回転数をモーターに伝え、自律走行する仕組みであり、後続車(図-4)は作業員が装着した AR マーカーを認識しながら追従する仕組みとなっている。



図-3 自律走行台車(先導車)

また、前後の台車には通行車両への注意喚起を行うため、視認性が高い LED の電光表示板や

矢印板を備えるとともに、万が一の衝撃に備え強靱な筐体を持ちながら、物理的な接触が生じた際に台車を停止させるためのバンパースイッチや、作業員や周囲の障害物等と一定の距離を保つための LiDAR センサーを搭載している。



図-4 自律走行台車(後続車)

さらに、軽トラックやワゴン車に搭載できるサイズとし、可搬性を考慮した設計となっている。(図-5)



図-5 可搬性を考慮したサイズ

3.2 機械学習

今回の消雪パイプノズルの物体検出には、「YOLO」と言われる検出モデルを採用した。YOLOは「You Only Look Once」の略で、「一度見ただけでその物体を判別する」という意味のように、リアルタイムで物体検出を行うディープラーニングモデルで、画像を細かなグリッド

に分割し、各セルが物体を検出するかどうかを予測する。従来の物体検出モデルとは異なり、YOLO は画像全体を一度に高速で処理できるため、リアルタイムでのアプリケーションやビデオ処理等に適している。(図-6)

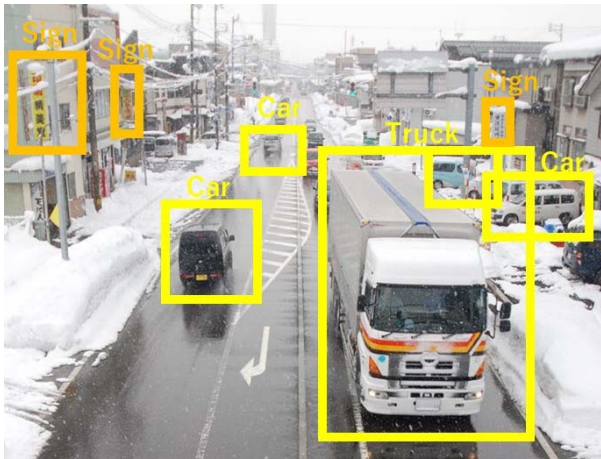


図-6 物体検出のイメージ

また、YOLO はディープラーニングを基盤とした物体検出モデルであるため、事前に大量のデータを用いて学習させる必要がある。

そのため、画像データの検出対象領域に対してラベル付けをする「アノテーション作業」と呼ばれる手作業を行う。具体的には図-7のように画像内に写っている消雪パイプノズル及びブロックの位置を、矩形領域(バウンディングボックス)で囲み、ラベルを付ける作業を行った。これを約 2,000 枚の画像に対して行った。

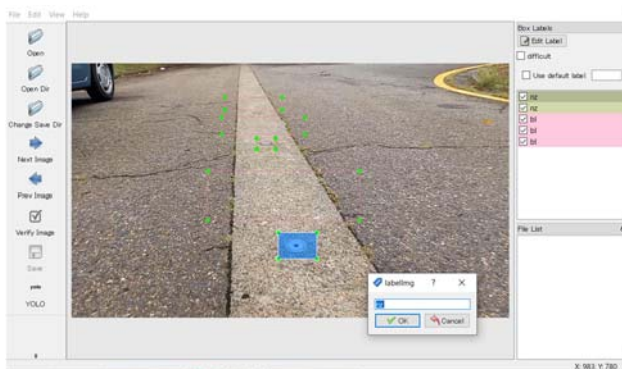


図-7 アノテーション作業

学習させた画像は図-8のように、消雪パイプノズルの乾燥状態、湿潤状態、散水状態、または単体、複数で写っている画像や、それらが消雪パイプブロック上で様々な形状で配置されている画像を選択した。



図-8 アノテーションした画像(例)

アノテーション後のデータを教師データとして、次に学習プロセスを完了させると、Yolo は新しい画像に対して迅速に物体検出を行えるようになる。

そして台車に搭載された小型のコンピュータボードに物体検出モデルを格納し、カメラから得られた映像を図-9のようにリアルタイムでノズルを検出しながらそれらの位置を特定し、随時台車の移動量を左右のモーターに伝えながら自律走行していく。

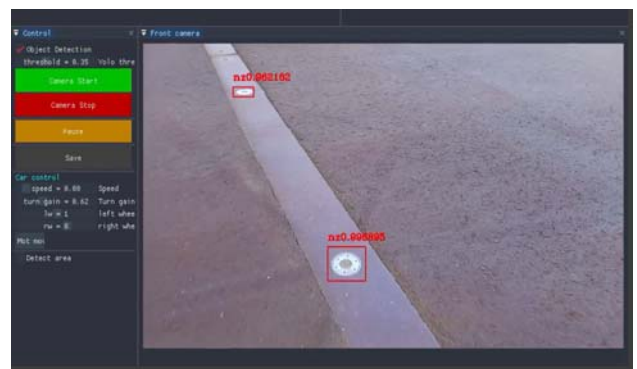


図-9 AIによるノズル検出中の状況

4. 走行試験

弊社の営業所内の駐車場及び長岡技術科学大学構内を利用し、実際の消雪パイプノズルの点検作業員を配置し走行試験を行った。

(図-10、図-11)



図-10 走行試験の状況(長岡技術科学大学構内)



図-11 走行試験の状況(長岡技術科学大学構内)

いずれの走行試験においても、試験を行った場所に設置されている消雪パイプとは異なる環境で撮影された画像を使って学習した物体検出モデルを使用しても、問題なく物体を認識し、自律走行を実行することができた。

今後は台車の走行速度の改善や作業員との距離を安定して維持する機能を充実させるとともに安全性を高め、実際の点検作業現場への

導入を目指していきたい。

5. 自律走行型誘導ロボットの可能性

5.1 多様な現場への適用

降雪地域に設置された消雪パイプの形状は多種多様であり、埋設されている道路線形も様々である。

今回開発した台車型の自律走行型誘導ロボットは、数千枚にわたる画像を機械学習させたことから、様々な現場にも対応できる設計となっており、特定の現場にとどまらず他の積雪地域に汎用的に稼働させることが可能となっている。

5.2 今後の展望

将来的には、この自律走行型誘導ロボットにノズル清掃の機能を追加し、点検作業全体を完全に自動化できるように発展させていきたいと考えている。これにより、人手を介さずにより効率的かつ安全な点検作業が実現できると期待している。

また、今回開発した AI による物体検出技術をさらに応用し、消雪パイプに限らず道路の維持管理やメンテナンス作業等、他の分野にも適用し、建設業界における一層の省力化と効率化を図ることを目指している。

このような技術の発展により、インフラ管理にかかる負担を大幅に軽減し、より持続可能で安全な社会を構築することが期待される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり技術指導を頂いた長岡技術科学大学機械系教授 上村靖司氏、同大学助教 杉原幸信氏、及び走行試験にご協力頂いた長岡技術科学大学 大学戦略課 企画・広報室の皆様には感謝いたします。

自己充填覆工構築システム

佐藤工業株式会社 技術センター 土木研究部 主席研究員 ○小山 広光
佐藤工業株式会社 技術センター 土木研究部 藤原 正佑
佐藤工業株式会社 北陸支店 輪島作業所 弘光 太郎

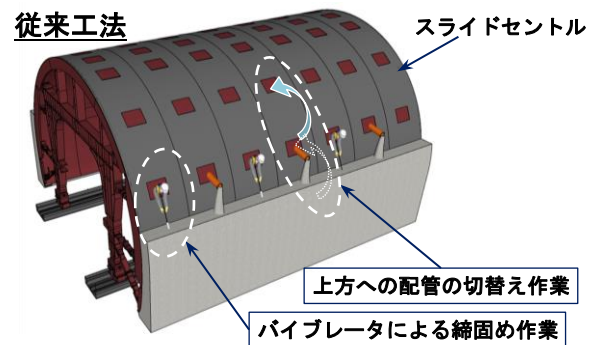
1 はじめに

山岳トンネルの覆工コンクリートの施工は、スランプ 15cm 程度のコンクリートを作業窓から打ち込み、配管を順次上部へ切り替えながらバイブレータで締め固めて充填させる方法で行われている。多くの作業が狭隘な空間で行われるため、作業員に掛かる負担は大きく、技量や経験に頼らざるを得ないのが実状である。近年の建設作業員の高齢化や熟練工不足により、近い将来に従来工法を継続することが困難となることが予想され、施工に起因する不具合発生が増加が懸念される。

このような背景から、筆者らは自己充填コンクリートを圧入して充填させる自己充填覆工構築システム¹⁾を開発した。本稿では、自己充填覆工構築システムの概要および現場適用について紹介する。

2 自己充填覆工構築システムの概要

自己充填覆工構築システムは、自己充填コンクリートの圧入のみにより覆工を構築するシステムである。スライドセントルの下端に設けた圧入口から自己充填コンクリートを型枠内に圧入し流動させることにより、従来工法では必須であったバイブレータによる振動締め固め作業および打込みの進行に伴う上方への配管切替え作業を行わずに、覆工の天端部までコンクリートを充填することが可能となる(図-1参照)。これらの狭隘空間での作業を省略する



自己充填覆工構築システム

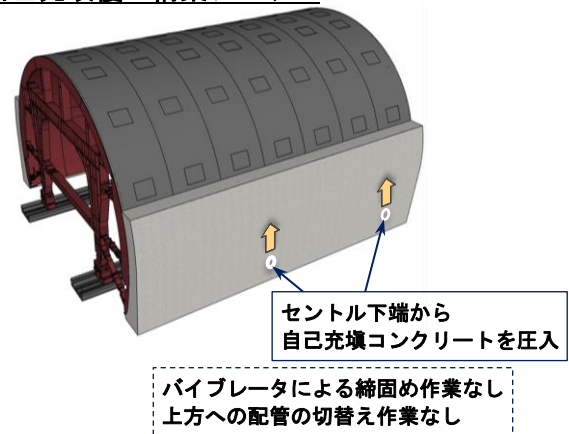


図-1 施工方法の比較



写真-1 実物大施工実験実施状況



図－2 現場位置および適用箇所

表－1 工事概要

工事名	令和3年度2災公共土木施設災害復旧工事 (足瀬トンネル)
工事場所	長野県下伊那郡天龍村足瀬
発注者	長野県
施工者	佐藤・木下特定建設工事共同企業体
工期	令和3年12月～令和5年9月
トンネル概要	延長：391m 全幅：7m，覆工内空：48m ² ，縦断勾配：1.1%

ことにより、覆工の省力化および省人化を図るとともに、施工時のヒューマンエラーに起因する品質低下を抑制することが可能となる。この自己充填覆工構築システムによる効果については、当社技術センターで実施した実物大施工実験で妥当性を実証している（写真－1参照）。

3 自己充填覆工構築システムの現場適用

3.1 現場概要

自己充填覆工構築システムを適用した足瀬トンネルの現場位置および適用箇所を図－2に、工事概要を表－1に示す。令和2年7月に発生した梅雨前線豪雨により、長野県下伊那郡天龍村足瀬では推定土量約2万m³の大規模な斜面崩落が発生し、崩落土砂により国道418号の通行止め等の措置が余儀なくされた。崩落箇所を迂回するバイパスを構成する足瀬トンネルは、

延長391m、全幅7mの2車線道路トンネルである。内空断面積が48m²と中小断面に分類されるため、作業空間が一般的なセントルよりも狭隘となることから、作業性や視認性の低下、および覆工コンクリートの充填不良等の品質低下が懸念された。そこで、型枠バイブレータの振動で締固めおよび充填が可能となる中流動コンクリートを採用し、覆工作業の作業性低下および品質低下の改善を図った。

今般、さらなる省力化と品質向上を目的として、全43ブロックの約1/4に相当する10ブロック（施工延長90m）の区間において自己充填覆工構築システムを適用し、その効果について現場における検証を行った。

3.2 コンクリート配合と施工方法

実物大施工実験の結果を踏まえ、自己充填コンクリートはスランプフローを600mm、自己充填ランクを3と設定した。設定した性能を満足する配合で練り混ぜた自己充填コンクリートは、水や骨材の分離がなく、適度な粘性を有していることを確認した（写真－2参照）。

図－3にスライドセントル概要図を、写真－3にスライドセントル内の設備を示す。自己充填コンクリートを用いているため、スライドセントルに作用する側圧としては液圧を考慮し

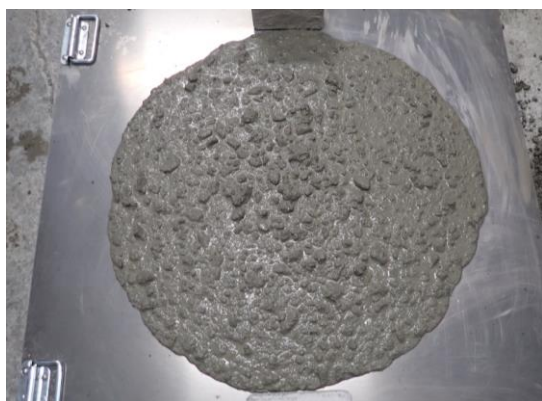


写真-2 自己充填コンクリートの性状

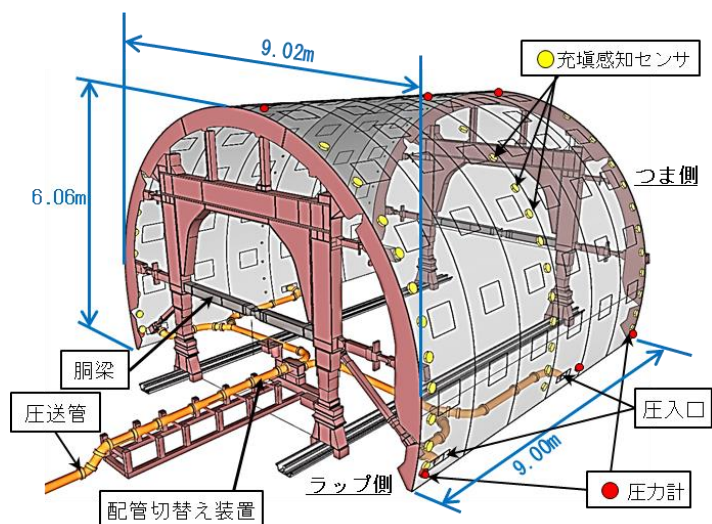


図-3 スライドセントル概要図



写真-3 スライドセントル内の設備

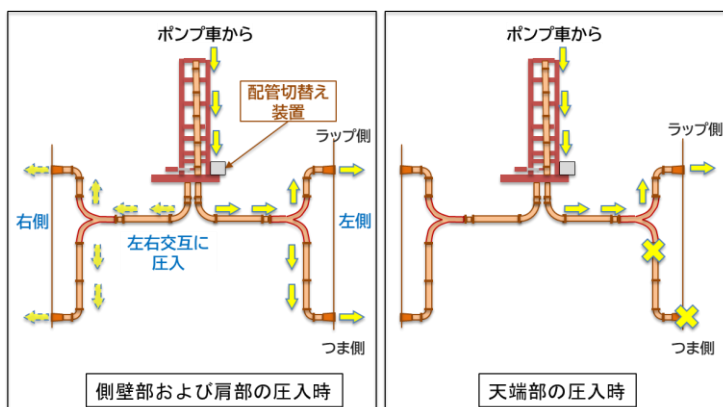


図-4 自己充填コンクリートの圧入方法

て設計を行う必要がある。セントルには液圧に耐えられる部材の選定や補強を行い、コンクリートを打ち込む際にはガントリー内部に胴梁を設置することとした。

コンクリートの圧入は、スライドセントル下端の圧入口からコンクリートポンプ車を使用して行った。圧入口は、左右それぞれ2箇所(計4箇所)設け、路盤上に設置した配管切替え装置で左右の切替えを行った。図-4に自己充填コンクリートの圧入方法を示す。側壁部から肩部にかけてのコンクリートの圧入は、片側2箇所の圧入口を同時に使用して行った。圧入時の左右の打上がり高さの差により偏圧が生じないよう、型枠内部の打込み高さを1層あたり

0.5m程度とし、左右交互に圧入を行った。天端部のコンクリートの圧入は、既設覆工コンクリート側(ラップ側)の空隙の発生を防止するため、片側のラップ側圧入口から行き、ラップ側からつま側の方向へ充填させることとした。

コンクリートの充填状況は、側壁部と肩部においてはスライドセントルに設置した充填感知センサとセントル下端部に設けた圧力計(図-3参照)を用いて確認し、天端部においては防水シートに設置した充填感知センサと、セントル天端部に設けた圧力計の値で確認した。

なお、コンクリート圧入時には棒状バイブレータや型枠バイブレータによる締固め作業を行わないこととした。

3. 3 現場適用結果

足瀬トンネルへの自己充填覆工構築システムの適用は令和5年3月～4月に行った。10ブロックすべてにおいて、上方への配管切替え作業およびバイブレータによる締固め作業を行うことなく、コンクリートの打込みを行うことができた。コンクリートの打込みに要した時間は平均3時間3分で、中流動コンクリートの打込み時間よりも1時間20分ほど短縮した。

打込みは、型枠面に設置した充填感知センサーによってリアルタイムに充填状況および充填高さを確認しながら行った（写真-4参照）。写真-5にコンクリート打込み状況を示す。コンクリート打込み作業は充填確認および配管切替え操作1名と、打設状況確認およびつま型枠監視2名の計3名で行うことができた。また、狭隘空間での作業の省略や、バイブレータによる騒音が発生しないことにより、コンクリート打込み時の作業環境が大幅に改善した。

写真-6に覆工の出来映えを示す。硬化後の覆工表面の性状は良好であり、側壁部のスプリングライン下方の表面気泡の発生が抑制されることを確認した。

4 おわりに

足瀬トンネルにおいて自己充填覆工構築システムを適用し、覆工品質を確保し、施工の省力化および省人化が可能であることを実証した。しかしながら、今回のシステムは胴梁と配管切替え装置をスライドセントル内に配置するものであったため、車両や重機の通行止めが必要であった。また、経済性や汎用性の観点から、自己充填コンクリートの配合や製造方法等においてもさらなる検討が必要であると考えられる。今後、これらの課題を解決し、自己充填覆工構築システムの汎用化を目指す。

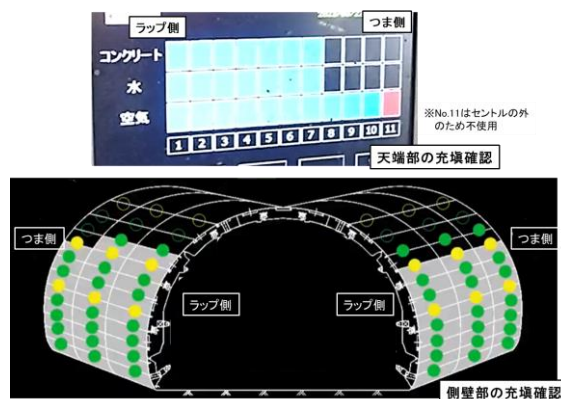


写真-4 コンクリート充填確認状況



写真-5 コンクリート打込み状況



写真-6 覆工コンクリートの出来映え

参考文献

- 1) 弘光太郎, 藤原正佑, 小山広光, 小野知義: 自己充填コンクリートの圧入によるトンネル覆工構築, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 334-339, 2023年

コンクリート打設統合管理システムの開発

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 〇今泉 克彦
副所長 廣中 哲也

1 はじめに

コンクリート構造物の品質を確保するために、施工管理者は打設計画の立案や、施工時のコンクリートの出荷・運搬情報とその時間経過、下層のコンクリートに上層のコンクリートを打ち込むまでの打重ね時間間隔等の情報を収集、分析し、適切に管理する必要がある。これらには、多くの時間と労力を費やすことになり、施工時の判断・指示の遅れが品質に影響を及ぼす可能性が生じる。そのため、施工情報を連続的に共有し、早期に施工にフィードバックすることにより、適正な品質管理を実現すること、および打設管理業務負担を低減することが望まれている。

そこで、コンクリート構造物の品質管理の適正化および打設管理業務の効率化を目的に、コンクリート打設統合管理システムを開発した。

2 コンクリート打設統合管理システム

2.1 システムの概要

図-1にコンクリート打設統合管理システムの概要を示す。本システムは、「打設計画・運行計画機能」、「運行管理機能」「打設管理機能」の3つの機能で構成する。また、将来の発展性、汎用性を考慮した自由度の高いシステムとするため、クラウド上に、コア機能となる「打設統合管理サーバ」を設け、「3Dモデルクラウド」「OCR文字認識クラウド」「AI車番認識クラウド」と組み合わせて、各種データを管理する。

これにより、CIMモデル、モニタリング技術およびクラウドを活用したネットワークが構築でき、レディーミクストコンクリート工場(以下、生コン工場)、打設場所、現場事務所等で計画から施工までの情報をリアルタイムに共有するとともに見える化して一元管理できる。

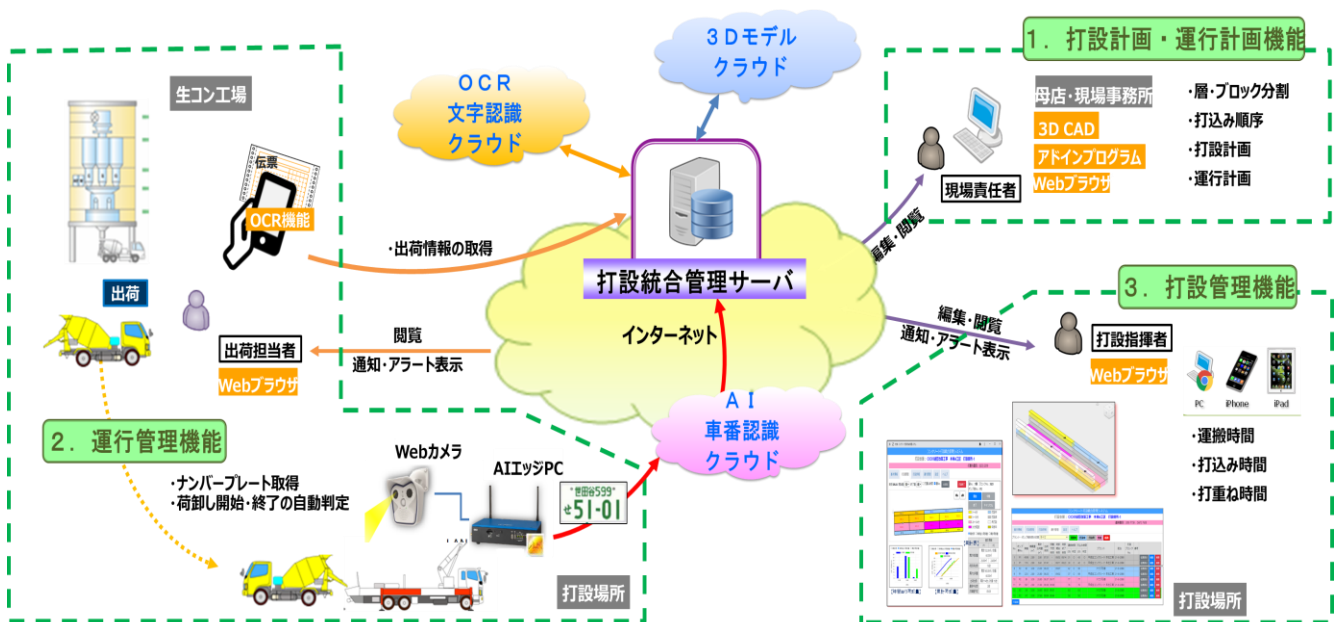


図-1 コンクリート打設統合管理システムの概要

通信端末は、スマートフォン、タブレットおよびPCを使用する。

2. 2 打設計画・運行計画機能

打設計画・運行計画機能は、3DCAD上で3Dモデルにコンクリートの打込み箇所を水平方向と鉛直方向に分割（以下、ブロック分割）した図の作成後、打設条件設定や打重ね時間間隔¹⁾の照査等の打設計画の作成を管理している。また、コンクリートの配合、総出荷台数や時間あたりの出荷台数等の運行計画の作成も管理している。

図-2に3Dモデルのブロック分割例を示す。3DCADソフトの追加機能により、水平・鉛直方向の分割条件を入力することで、3次元座標軸で分割したブロックの3DCADデータが作成される。次に、この3DCADデータを打設統合管理サーバに登録することで、3Dモデルクラウドサービスを利用して、3Dモデルが自動作成される。これにより、3Dモデルが3次元座標を持つブロックで管理でき、打設・運行計画業務を短時間で行える。

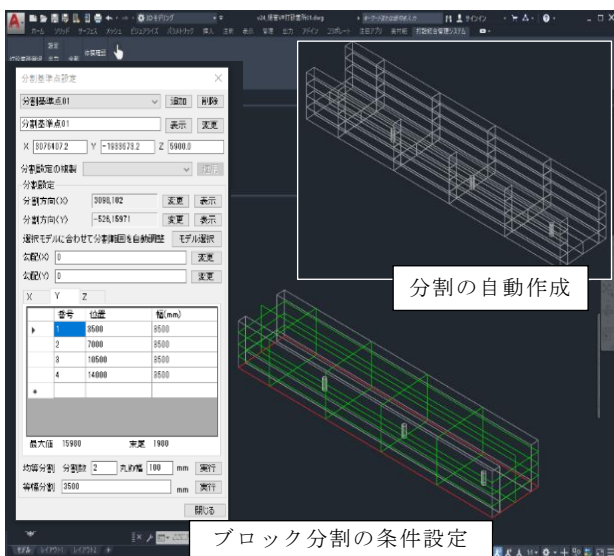


図-2 3Dモデルのブロック分割例

図-3に打込み順序の入力と打重ね時間の照査例を示す。打設量、打設速度、ブロック分割番号、打込み順序等の打設計画条件の入力に

より、打重ね時間表、平面と立体図の打重ね時間マップが自動作成される。この結果を元に条件を変更してシミュレーションすることで、適切な打設計画を容易に、また修正を簡易に立案できる。

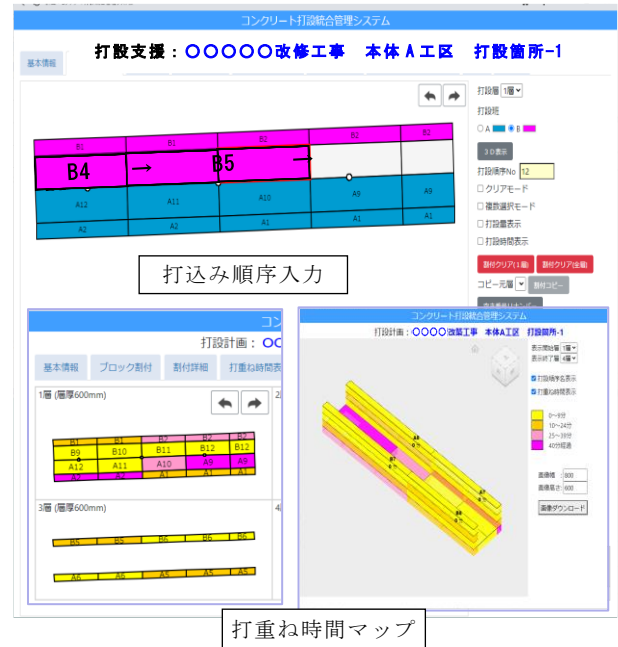


図-3 打込み順序の入力と打重ね時間の照査

2. 3 運行管理機能

運行管理機能は、コンクリートの種類、出荷時刻、トラックアジテータ（以下、アジテータ車）の車番や積載量等のコンクリート納入書（以下、生コン伝票）の内容や、受入れ場所のコンクリートの荷卸し開始・終了時刻等の情報を管理する。

図-4にOCRクラウドサービスを利用した生コン伝票情報の読み込み例を示す。生コン伝票の初期登録として、通信端末カメラで読み取った生コン伝票の画像データに検出範囲を指定する。この作業後、生コン工場でのコンクリート出荷時に、通信端末カメラで生コン伝票を読み取るごとに、情報が文字コードに電子化され、打設統合管理サーバに登録、共有化される。この機能により、生コン工場ごとに異なる伝票情報を読み取ることができるようになる。

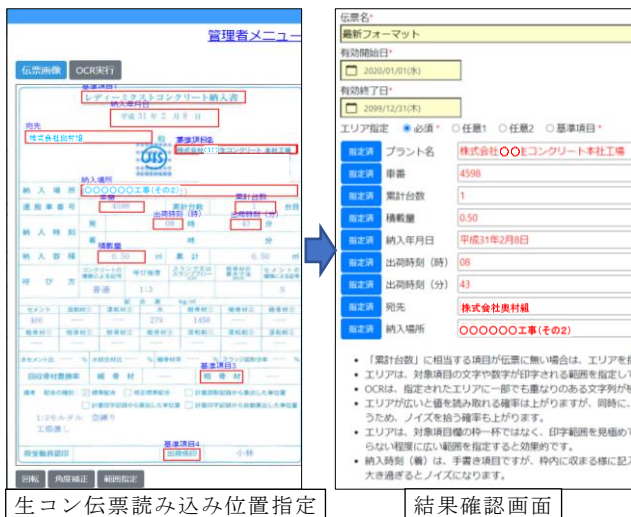


図-4 OCRによる伝票情報の読み込み例

受入れ場所の荷卸し開始・終了時刻の検出には、使用機器の故障、システム不具合、操作ミスなどに対する保守性、信頼性を向上するために、「タブレット画面上の開始・終了ボタンをタップする単純な方法」と、「タップ忘れの人為的ミスを排除できるAI処理による車番認識方法」の2種類の方法を併用した。

図-5にネットワークカメラ映像のAI処理によるアジテータ車の車番認識機能の構成を示す。AIクラウドサービスを利用して、現地でネットワークカメラ映像をAI処理できるAI処理端末(以下、AIエッジPC)を用いて、受入れ場所での荷卸し時のアジテータ車の後面の車番と時刻を一定の間隔で検出している。検出した車番の有無と時刻のデータをもとに、打設統合管理サーバにて、コンクリートの荷卸し開始・終了時刻が算出され、登録、共有化される。なお、通信環境が悪い建設現場でもAI処理を有効に利用するため、クラウドAIに比べて、送信するデータ量を少なく抑えられるAIエッジPCを使用した。

図-6にタブレットの運行管理画面例を示す。既開発の2Dモデル版の画面表示と同様²⁾に、打設統合管理サーバに登録された生コン伝票およびコンクリート荷卸し開始・終了時刻等

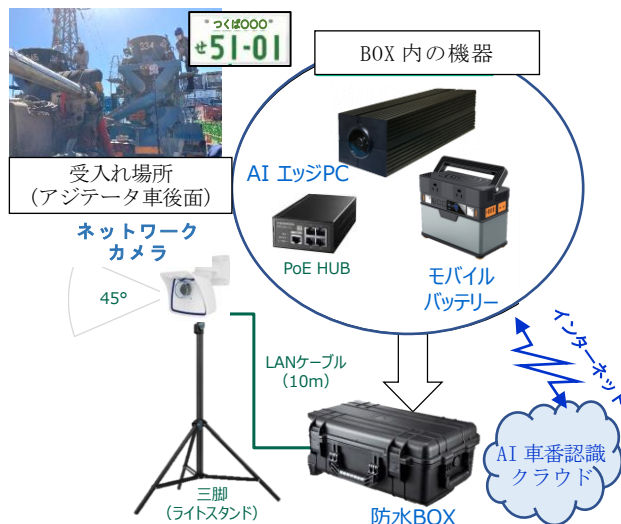


図-5 映像によるAI車番認識機能の構成

の情報から、コンクリートの運搬の進捗情報(出荷済み、運搬中、荷卸し中、荷卸し終了等)を通信端末の画面上に数値、色分け表示および警告バナー・メール通知等に見える化してリアルタイムに表示する。運搬情報を生コン工場と打設現場の両方で視覚的に確認することにより、コンクリートの出荷調整が容易になったため、アジテータ車の待機時間が短縮され、コンクリートの経時変化による品質低下を防止できる。また、コンクリートの運搬時間と打込み時間を自動計算して見える化することで、時間管理を確実にできるため、JIS規格等の規定時間の超過を防止できる^{1),3)}。さらに、打設場所ごとに、生コン伝票の情報、運搬時刻および打込み時刻

コンクリート打設												
打設支援: ○○○○改修工事 本体A工区 打設箇所-1												
運搬警告: (89)77分、(567)76												
基本情報		打設管理		打設詳細								
運搬・打込み時間の警告バナー												
運搬中		打設中		打設済		警告		超過				
No.	ポンプ車No.	車番	積載量 (m³)	累計出荷量 (m³)	出荷時刻	到着予想時刻	荷卸開始時刻	荷卸終了時刻	運搬時間 (分)	判定	打込み時間 (分)	判定
1	P1	4598	2.80	2.80	07:31	-	08:02	08:14	31	○	43	○
2	P1	176	2.80	5.60	07:41	-	08:11	08:23	30	○	42	○
8	P2	83	3.00	23.00	08:25	-	09:07		42	○	89	
9	P1	233	2.80	25.80	08:25	-	09:02		37	○	89	
10	P2	89	3.00	28.80	08:37	09:17			77		77	
11	P1	567	2.80	31.60	08:38	09:08			76		76	
12	P2	34	3.00	34.60	08:51	09:31			63		63	
13	P2	47	3.00	37.60	09:04	09:44			50		50	

図-6 タブレットの運行管理画面例

等の運行情報が打設統合管理サーバに登録、電子化されることで、運行実績等の書類作成が容易になる。

2. 4 打設管理機能

打設管理機能は、打設計画、コンクリート打込み位置・順序と時刻の打込み状況および打重ね時間の情報を管理している。以下に打設管理機能の特徴を示す。

図-7にタブレットの打設管理画面例を示す。図-7 a. に示すように、打設統合管理サーバに登録された打設・運行計画と、タブレット画面上で打設指揮者による各ブロックの打込み開始・終了の位置指定の情報によりコンクリート打込み後からの経過時間を自動計算して平面と立体図で色分け表示することができる。煩雑な打重ね時間の計算を自動化し、視覚的に確認することにより、打重ね時間の管理を確実に進めるため、土木学会コンクリート標準示方書施工編（以下、示方書）の許容打重ね時間間隔（以下、制限時間）を遵守し、コンクリートのコールドジョイントを防止できる³⁾。

図-7 b. に示すようにコンクリート打設中に計画変更が生じた場合でも、層分割の厚さを入力するだけで、3Dモデルクラウドによりブロック分割の変更を自動作成後、打設統合管理サーバにより打重ね層厚・層数および打込み順序を自動作成することで、計画変更が容易になる。これら一連の機能と操作により、打設管理業務を効率的に行える。そのうえ、打設場所ごとに計画から打設・運行実績の施工情報が打設統合管理サーバに電子化されることで、書類作成業務の効率化や施工情報のトレーサビリティによる維持管理業務への活用が可能になる。

3. おわりに

本システムは、4件の現場適用（高速道路橋

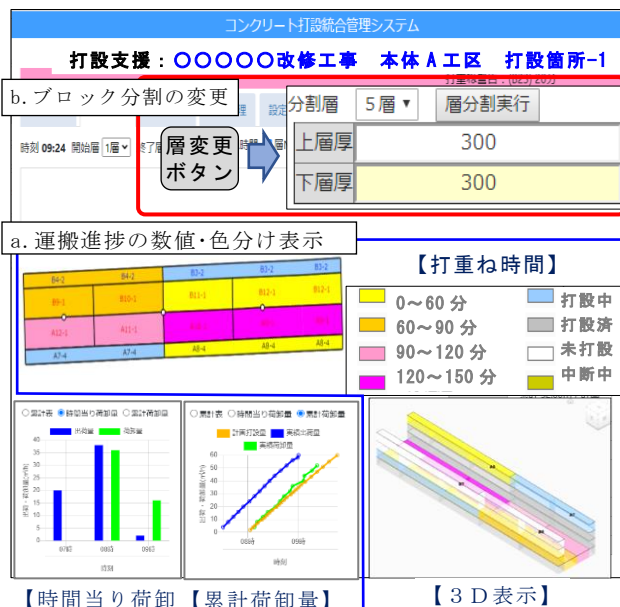


図-7 タブレットの打設管理画面例

脚2件、国土交通省堰堤1件、地方自治体擁壁1件）が行われており、コンクリート工事における運搬、打込み、および打重ねに関する品質確保、また、打設計画の立案、運搬・打込み・打重ねに関する時間管理、および書類作成等の打設管理業務の効率化が確認されている。今後使用性、適用効果および運用方法を検証し、システムの利便性の向上を図るとともに、コンクリート工事の施工と品質に役立つ技術として、土木・建築の両分野に展開していきたい。

【参考文献】

- 1) 土木学会、「2023年制定 コンクリート標準示方書 施工編」、pp. 80-81、pp. 111-113、pp. 120-122、2023.9
- 2) 廣中哲也、石井敏之、「ICTを活用したコンクリート打設支援システムの開発とその適用」、電力土木、No. 348、pp. 76-78、2010.7
- 3) 日本規格協会、「JIS A 5308:2019 レディーミクストコンクリート」、JISハンドブック 10 生コンクリート、pp. 17-95、2022.7

CO₂吸収コンクリートの技術を用いた建設用 3D プリンティング

鹿島建設(株) 技術研究所 上席研究員 ○橋本 学
鹿島建設(株) 技術研究所 主席研究員 坂井 吾郎
金沢工業大学 工学部 環境土木工学科 教授 宮里 心一

1 はじめに

建設分野向けのセメント系 3D プリンティングと、CO₂を材料として固まるコンクリート「CO₂-SUICOM®」(CO₂-Storage and Utilization for Infrastructure by Concrete Materials)の技術を組み合わせた「カーボンネガティブ 3D プリンティング」(以降、カーボンネガティブ 3DP と称す)に関する研究開発を鹿島と金沢工業大学の共同で進めている。両者は今般、研究開発の一環として行った公共物製作プロジェクトの成果としてこの技術を用いてベンチを製作し、金沢市内の公園(外濠公園二号地)に設置した(写真-1)。本報では、カーボンネガティブ 3DP の特徴とプロジェクト(以降、金沢ベンチプロジェクトと称す)の概要について報告する。



写真-1 金沢ベンチ設置状況

2 金沢ベンチプロジェクトの背景

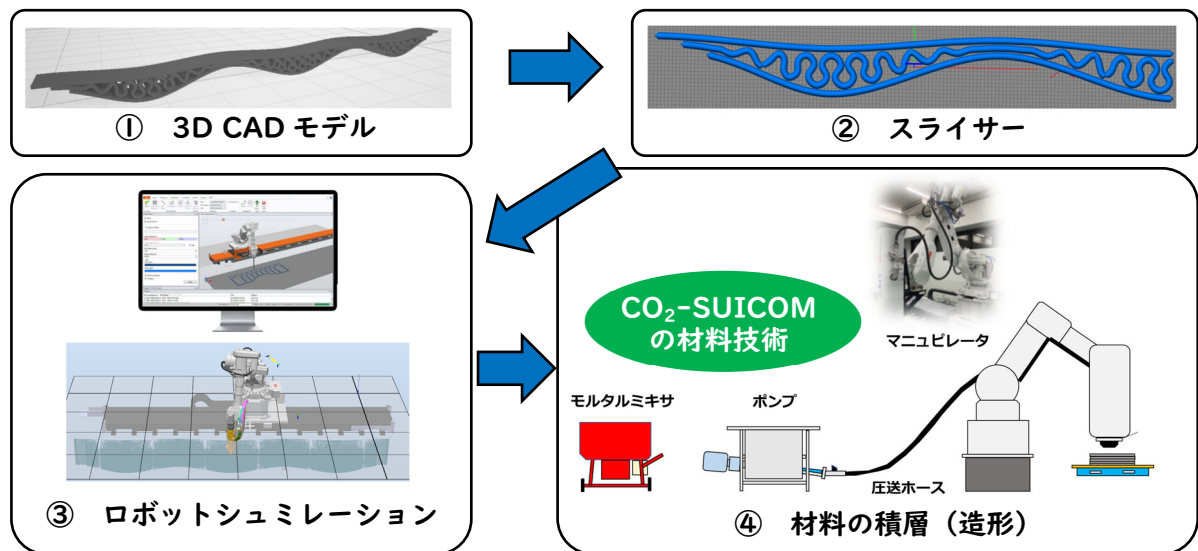
3D プリンティングの技術は、従来の型枠を用いた施工方法では実現が困難な造形を可能にするとともに、建設の生産性向上に資する技術として建設分野においても注目を集めており、研究開発が進められている。また、2050年カーボ

ンニュートラル社会の実現に資する技術として、CO₂-SUICOM をはじめとした環境配慮型コンクリートの開発も各研究機関で急ピッチに進められている。そこで、建設の生産性向上と環境負荷低減を早期に実現し、社会実装を進めることを目的とした。また、両技術を用いて実用的な構造物を製作し、できるだけ多くの人々が触れられる場所に設置する試みを行った。ベンチを実際に使ってもらうことでフィードバックを得て、さらなる改良・改善を図ることが可能となる。本プロジェクトでは、計画当初から成果物を公共の場へ設置することを目標とし、金沢市の協力を得て産官学が連携した取組みとして検討を進めた。

3 カーボンネガティブ 3DP の特徴

3.1 3D プリンティングの流れ

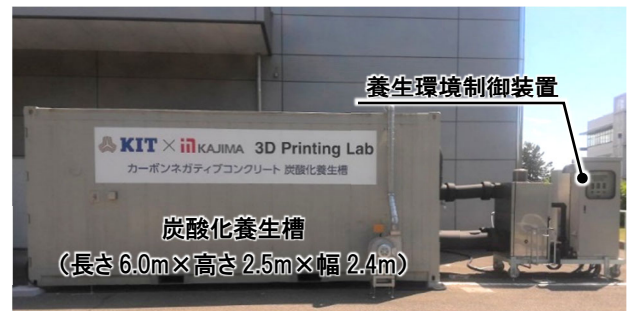
図-1に、3D プリンティングの流れを示す。3D プリンティングでは、3D で作図した CAD モデルを基に(①)、一筆書きができるようにスライサーモデルを構築し(②)、モデルに従いロボットシミュレーション上でロボットアームを動かしながら動作確認を行う(③)。シミュレーションにおいてエラーが発生した場合は、②のスライサーモデルの再構築と③のシミュレーションを繰り返す。シミュレーションで正常に動作することが確認できた後に、実際の材料を使って積層を行う(④)。カーボンネガティブ 3DP では、積層する材料に CO₂-SUICOM の材料技術を用いており、CO₂を吸収・固定できるのが特徴の一つである。



図－1 3Dプリンティングの流れ

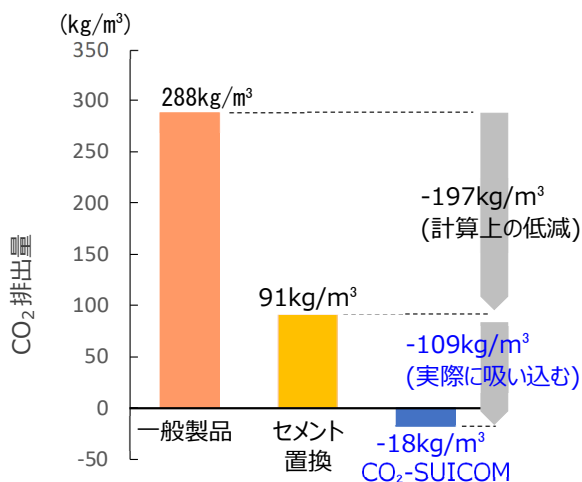
3. 2 CO₂吸収コンクリート「CO₂-SUICOM」

CO₂-SUICOM は、製鉄時に生成される高炉スラグ微粉末や、火力発電所燃焼時の副産物であるフライアッシュをセメントの一部と置き換えることでセメント量を低減し、さらに、CO₂を吸収・固定する特殊混和材（2CaO・SiO₂（ γ 相）、 γ C₂S」と称す）を使用したものである。CO₂-SUICOMによるカーボンネガティブ（CO₂排出量ゼロ以下）の概念図¹⁾を図－2に示す。なお、 γ C₂SによるCO₂の吸収・固定は、写真－2に示す炭酸化養生装置を用いた強制炭酸化養生によって実現可能となる。炭酸化養生装置は、密封式の炭酸化養生槽（長さ6.0m×高さ2.5m×幅2.4m）と養生環境



写真－2 炭酸化養生装置

制御装置で構成され、温度・湿度・CO₂濃度を調整した空気を養生槽内に吹き込み、CO₂を強制的に供給することで部材内に炭酸カルシウム（CaCO₃）を生成させ、CO₂の吸収・固定化を図る。

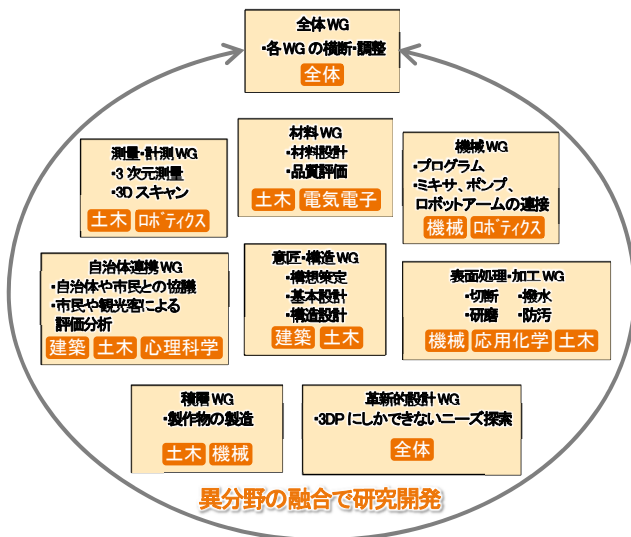


図－2 CO₂-SUICOMによるカーボンネガティブの概念図¹⁾

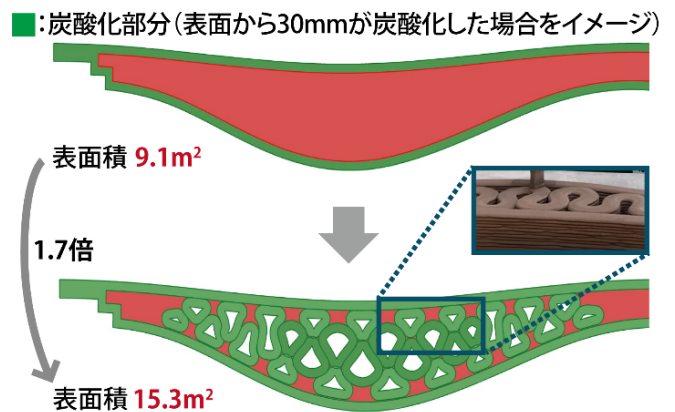
4 金沢ベンチプロジェクトの概要

4. 1 プロジェクトの体制

本プロジェクトを遂行するにあたり、3Dプリンティングに最適な材料の選定やロボットの制御のほか、構造成立性の検討、解析によるシミュレーションなど、検討が多岐にわたることから、土木、建築、機械、電気、情報を専門とする研究者および技術者が参画した。また、周辺環境と調和した意匠の検討やベンチ使用者への影響を分析するために、景観計画や心理学といった建設の枠を超えた異分野からも参画し、プロ



図－3 プロジェクトの体制



図－4 ヒダ形状によるCO₂吸収量の比較

プロジェクトチームとして集結・融合することで(図－3), 早期のプロジェクトの完遂を目指した。

4. 2 ベンチの意匠の検討

本ベンチは、金沢市内の公園という公共の場に設置するため、市民や観光客に受け入れられる意匠を目指し、歴史都市である金沢にゆかりのある加賀友禅の製作工程である「友禅流し」をモチーフとした。全長5m、幅0.7mの大きなベンチの座面は、友禅流しの壮大さを表現している。波型形状の座面には白色系の塗装を施すことで加賀友禅が河川に漂う様子をイメージするとともに、ベンチ脚部は褐色系のカラーモルタルを使用することで暗めのトーンとし、友禅流しを模した座面を引き立たせる意匠を採用した(写真－1)。

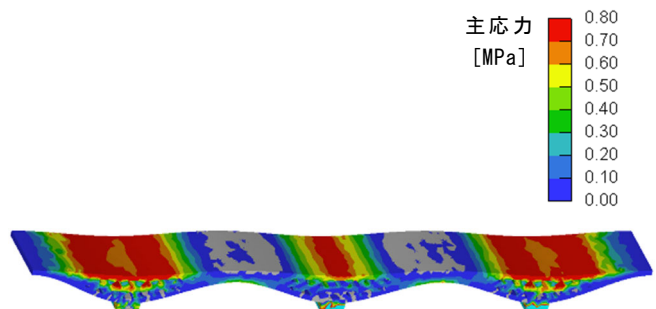
4. 3 CO₂の吸収効率の向上

CO₂-SUICOMは、外部からCO₂を強制的に供給することで部材の表面からCO₂を吸収して固まるため、CO₂を効率的に吸収・固定化させるためには、CO₂との接触する面積を増やすことが有効である。今回製作したベンチは、3Dプリンティングの複雑な形状の造形物を製作できるという特徴を活かし、ベンチ脚部をヒダ形状にすることで、空隙が無いベンチと比べ接触する面積を約1.7

倍に増大させ、CO₂吸収割合を2倍以上に向上できる意匠を採用した(図－4)。

4. 4 安全性の検証

安全性の検証として、ベンチに人が満載(大人が32人)で腰掛ける状況を想定した構造(FEM)解析を実施して安全性を確認した(図－5)。また、実際に製作したベンチで載荷実験(写真－3)を実施し、解析の妥当性を確認した。



図－5 FEMによる解析結果



写真－3 構造実験による安全性の確認

4. 5 ベンチの製作および設置

ベンチの製作に関し、金沢工業大学のやつかほりサーチキャンパス内の「KIT×KAJIMA 3D Printing Lab」に設置したロボットアーム式の3Dプリンティング²⁾(写真-4)を用いて製作した。ベンチの製作状況を写真-5に示す。3Dプリンティングで製作したベンチは、炭酸化養生槽に入れ、CO₂を強制的に供給し、吸収・固定化させた。その結果、最終的なCO₂排出量を-9.7kg/m³とすることができ、カーボンネガティブを達成した。

製作したベンチは、3Dプリンティングの機械的な制御や構造成立性、ベンチとしての安全性、CO₂の吸収効率まで配慮した意匠性を有し、また、プリンティングに資する材料および配合の選定などの種々の検討を経て、金沢市内の外濠公園二号地への設置を終えた(写真-1)。現在は、



写真-4 ロボットアーム式3Dプリンタ²⁾



写真-5 ベンチ製作状況

憩いの場として多くの市民の方々に利用されている。

5 今後の展望

カーボンネガティブ3DPを用いた将来の絵姿を図-6に示す。将来的に同技術が世界中に普及することで、3Dプリンティングで製作するスライサーモデルデータの送受信のみによって、どこでも・誰でも、同一形状かつ同品質の建設物の構築を可能となる。さらに、世界中の公共インフラ施設や様々な建築物においてCO₂が吸収・固定化され、地球規模での脱炭素に寄与できるものとする。

今後、このような社会を実現していくためにも、3Dプリンティングでしか実現できない高度なユースケースの探索とその実現に向け、引き続き検討していく所存である。

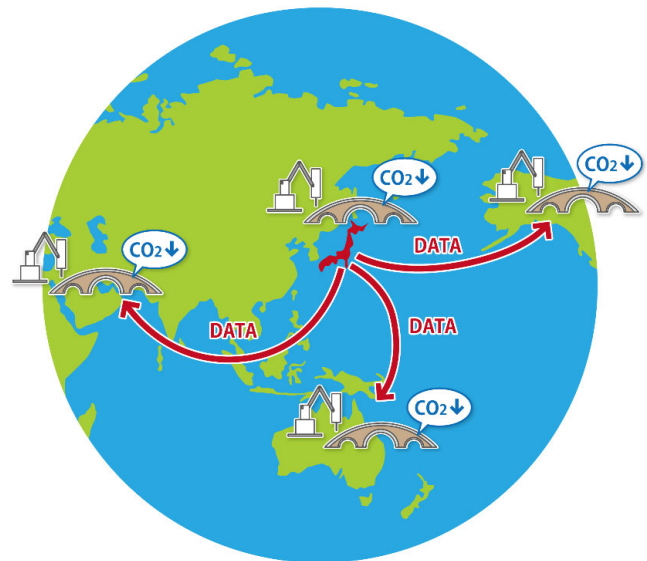


図-6 カーボンネガティブ3DPを用いた将来の絵姿

【参考文献】

- 1) 取違 剛, 森泰一郎, 河内友一: CO₂吸収型カーボンネガティブコンクリート CO₂-SUICOM, 土木施工, VOL. 62, No. 11, pp. 79-82, 2021. 11
- 2) 鹿島プレスリリース: 金沢工業大学と鹿島がセメント系3Dプリンティングに関する共同研究を開始, <https://www.kajima.co.jp/news/press/202205/pdf/23c1-j.pdf>, 2022. 5

ICT 土工・舗装品質管理システム「AtlasX」の開発

前田建設工業株式会社 土木技術部施工 DX 推進グループ 担当 ○津田 啓史
 ICI テクノロジーセンター地盤グループ 主幹 平田 昌史
 土木技術部施工 DX 推進グループ 主査 岩谷 隆文
 ICI テクノロジーセンター地盤グループ 主幹 石黒 健

1. はじめに

土工現場では、各土構造物に要求される性能を現地確認するための現場品質管理が行われているが、広大なエリアを対象とする大型土工現場などではその品質管理は「点」かつ「事後的な」管理となるため施工中のリアルタイム管理を行うことができない。さらに、他工種に比べと機械化、デジタル化も進んでおらず、取得された品質管理データのデータベース (DB) 蓄積や様々な利用者によるデータ共有・連携等の業務改革 (DX 化) が進まないことも課題となっている。

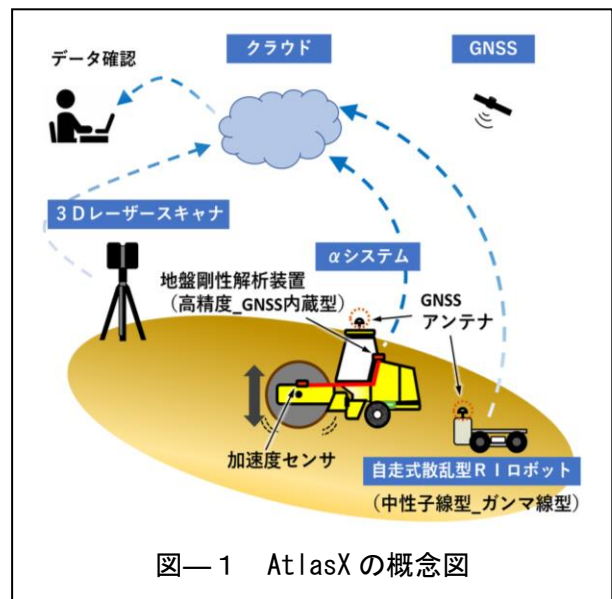
当社は、これらの課題を解決し、現場土工品質管理の高度化・精緻化と現場管理業務の生産性向上、そして本格的な DX 化を目指し、現場 ICT 土工・舗装品質管理システムである「AtlasX (アトラスエックス)」を大林組と共同で開発した。本報では、この「AtlasX」の概要と現場試験の一部を紹介する。

2. AtlasX とは

AtlasX は、表-1 に示すように当社保有の既往開発技術である振動ローラ加速度応答法「 α システム」に対して、「自走式散乱型 RI ロボット」や「3D レーザースキャナ」といった最新の IoT 計器を追加導入することで、現場品質管理の計測をより高度化、精緻化した。さらに、取得データをクラウド上にリアルタイム送信、蓄積・処理できる「データ統合解析システム」を構築することで、現場管理業務の本格的な DX 化 (業務改革) も可能とした (図-1)。以下に、構成技術の詳細を述べる。

表—1 AtlasX の構成

項目	概要	
α システム	地盤剛性の計測	
自走式散乱型 RI ロボット	中性子型	地盤の含水比計測
	ガンマ線型	地盤の湿潤密度計測
データ統合解析システム	計測データの統合管理・蓄積・分析	



3. AtlasX の各構成技術

3.1 α システム

α システムは、振動ローラ振動輪の加速度応答が地盤の締固めに応じて変化する現象を利用して転圧中の地盤剛性を求め、締固めの進行を自動判定するシステム「振動ローラ加速度応答法」の一つである。 α システムは振動輪に加速度計を取り付け、転圧に伴う加速度波形の変化を定量化した独自指標「乱れ率」をリアルタイムに算出する。さらに α システムでは、藤山・建山による理論式¹⁾を採用し、

乱れ率から力学指標である地盤変形係数 E_{roller} に換算しており、盛土の性能に直結する物理的指標を提示することが可能となる。もう一つ特徴として、GNSS モジュール (GNSS) を併用する事で、転圧面の面的な剛性分布を施工しながら自動取得する事が可能となっている (図-2)。これにより、施工時にリアルタイムに施工面の地盤剛性を面的に取得することが可能となり、計測管理の高度化・緻密化と省人化・省力化を可能にしている。



図—2 振動ローラ加速応答の計測状況

3. 2 自走式散乱型 RI ロボット

現在、地盤の乾燥密度を求める手法として透過型 RI が一般的となっているが、透過型 RI は線源孔の削孔が必要なため計測に時間と労力がかかるといった課題がある。そこで、RI 法の中でも線源孔を必要としない完全非破壊で迅速に測定が可能な散乱型 RI を地盤の密度と含水比の計測に利用した。散乱型 RI は、湿潤密度を計測できるガンマ (γ) 線源を使用した RI と含水比を測定できる中性子線源を使用した RI の 2 種類を用いた。2 種類の散乱型 RI により含水比と湿潤密度を計測し、従来指標である乾燥密度の算出も可能である。この散乱型 RI を自動走行が可能なロボットに搭載し、自走式散乱型 RI ロボットを開発した (図-3)。自走式散乱型 RI ロボットは α システムと同様の GNSS を搭載しており、汎用自動操縦用アプリケーションを利用することで前後進や反転など、事前にエリア内を指示した走行条件で走行できるようになっている。散乱型 RI は、計器と地表面との不陸 (凸凹) の影響を

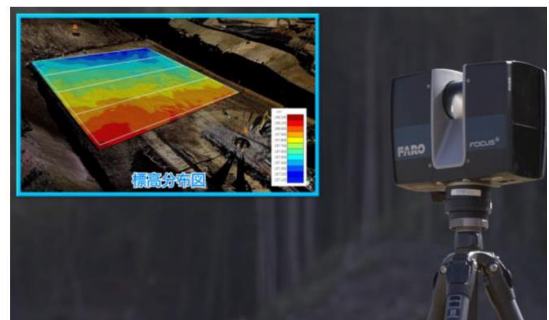
受け測定誤差を生じやすいことから、計測点で停止 \Rightarrow 自動で散乱型 RI 計器を地表面に接地 \Rightarrow ロボット自重により RI 計器を地表面に押し付けて一定時間計測 \Rightarrow 次の計測点に移動の走行パターンを採用した。



図—3 自走式散乱型 RI ロボット (γ 線型)

3. 3 3D レーザスキャナ

3D レーザスキャナは、市販品を用いている。計測では、敷き均し前、敷き均し後、転圧回数ごと (試験施工時のみ) に施工面の標高を連続計測し、施工面の標高変化を抽出することで、撒出し厚、沈下量などの面的な傾向を把握することができるほか、沈下の収斂傾向も把握することができる。また、計測データをもとに締固め密度を間接的に評価する事も試行²⁾している。計測精度は転圧に伴う施工面の沈下量を計測できる精度とするため計測距離 10m 以内で $\pm 1\text{mm}$ 以内としている。計測した。点群データは、後述のデータ統合解析システムへデータを送信することで、自動処理が可能である。



図—4 3D レーザスキャナ

3. 4 データ統合解析システム

データ統合解析システムは α システム、自走式散乱型 RI ロボット、3D レーザスキャナのデータを

集約し、可視化を行うことができるアプリケーションとして開発を行った。各機器から送信されてきたデータは外部クラウドサービス (AWS) の DB にストレージされ、その後各種計算処理、可視化が行われる (図-5)。データ統合解析システムは「ヒートマップ」、「統計分析」、「転圧収斂分析」、「相関分析」という4つの分析・出力機能を持たせており、転圧回数、乱れ率、地盤変形係数、含水比、乾燥密度、圧縮率の施工情報を、各層、各転圧回数毎に可視化することができる。以上のように、計測データの一元管理をクラウド上で行うことでデータ連携・共有化を図り、自動分析機能を利用することで、従前人が行っていたデータ移動から整理までの管理業務のDX化が可能となる。さらに、蓄積された施工時の品質情報を維持管理部門に継承し、維持管理の効率化と高度化を図る事も可能となる。

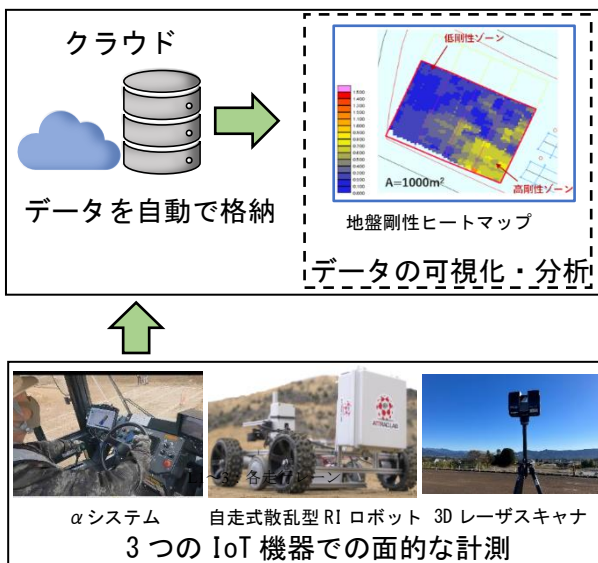


図-5 データ統合解析システムの概要

4. AtlasX の現場試験の事例紹介

AtlasX の開発において、国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト (PRISM)」などの現場試行機会を活用し現場試験を実施した。現場試験では、通常の試験盛土により転圧に伴う物性値の変化や従来手法との比較などから AtlasX の精度

や性能を確認している (図-6)。今回は、現場試験で得られた成果の一部を紹介する。

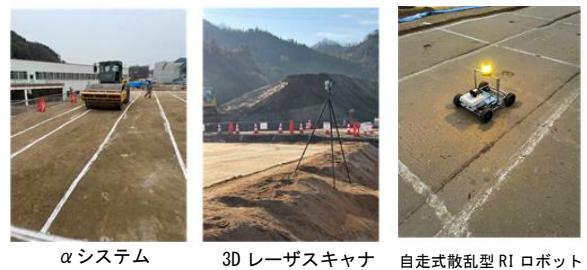


図-6 AtlasX の計測状況

4.1 αシステムから得られた結果

加速度応答値「乱れ率」の転圧回数毎の変化をヒートマップ (図-7) で示す。転圧と共にピーク乱れ率 (地盤剛性) が増大して行く様子が確認した。また、転圧回数が増えると初期不均一性は次第に解消され、均一的な剛性地盤が形成されていく様子も確認できた。αシステムでは、このような施工時の地盤剛性の変化を施工中にリアルタイムに取得することが可能なため、施工時に追加手間なく品質管理を精緻化・高度化することが可能である。

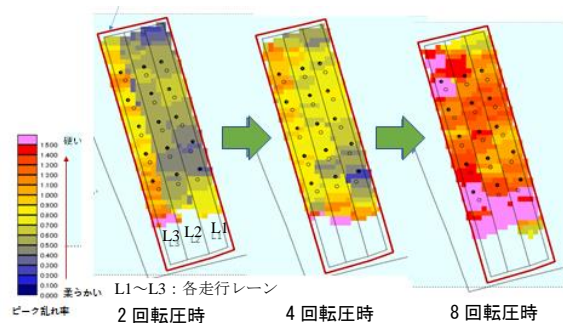
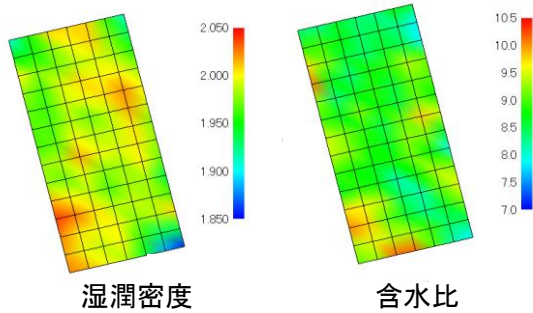


図-7 各転圧回数の乱れ率分布

4.2 自走式散乱型RIロボットから得られた結果

現場試験では、自走式散乱型RIロボットはその特性を活かし、多点計測による面的計測を検証した。図-8には計測結果をヒートマップとして示す。湿潤密度には施工面の多少のばらつきが確認できるが、含水比は湿潤密度ほどばらつきが生じていないなど、施工品質のばらつきの実態を把握・確認し、適切な対応が可能となる。一方、自走式散乱型RIロ

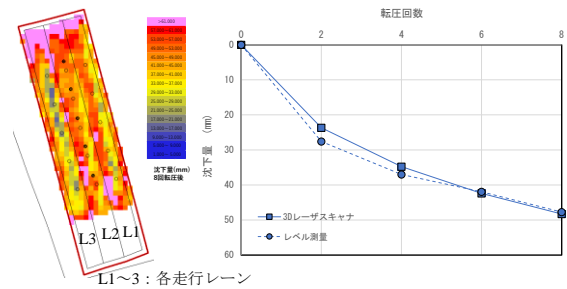
ボットの計測データ（湿潤密度/含水比）は主に表層10 cm以浅の密度を反映している。そのため、現場使用時は事前に試験盛土で通常土工事に使用される透過型 RI とのキャリブレーションを行い使用することが望ましい。



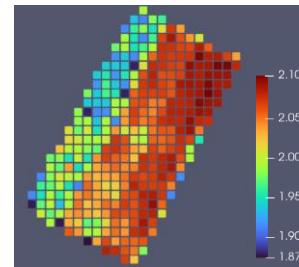
図—8 自走式散乱型 RI ロボットの計測結果

4.3 3D レーザスキャナから得られた結果

3D レーザスキャナでは、敷き均し前、敷き均し後、各転圧後に施工地盤の点群データを取得することで撒き出し厚、沈下量や圧縮率（＝沈下量/撒き出し厚）などを算出した。図-9 は、3D レーザスキャナで計測した 8 回転圧後の沈下量のヒートマップと各転圧後沈下量のレベル測量との比較結果を示す。図では、転圧レーン中央や施工端部の沈下量が大きくなる傾向を確認できる。レーン中央はラップ施工が影響したと考えられる。また施工端部は振動ローラが反転する際に、短時間停止したまま振動が加わったことが影響したと考えられる。このように、沈下量分布からも盛土全体の施工状況が推定できる。また、図-10 のように圧縮率から湿潤密度を推定することで、施工面の湿潤密度を管理することができ、3D レーザスキャナを使用した品質管理への適用性の可能性を確認することができた。



図—9 沈下量ヒートマップと転圧収斂



図—10 3D スキャナデータからの湿潤密度推定図

以上、現場試行の一部ではあるが AtlasX の計測事例を紹介した。計測データは統合解析システムの機能であれば、紹介した各物性値の「ヒートマップ」容易に作成できる。また、ヒートマップ等で確認した品質データのばらつきなどの原因についても「相関性分析」の結果から推察可能である。

5. おわりに

本報では、最新の IoT・DX 技術を活用した現場土工品質管理システムである「AtlasX」について簡単に紹介した。今後は本格的な現場導入を行うことで、現場の生産性向上、業務改善（DX 化）を目指して行く所存である。

参考文献

- 1) 藤山哲雄, 建山和由: 振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土木学会論文集 No.652III-51,115-123, 2000.
- 2) 津田啓史ら: CSG 工法に対する次世代 α システムの適用性実験 (その 2) ~地盤剛性とレーザスキャナの評価~, 土木学会第 78 回年次学術講演会, 2024.

② 社会資本の的確な維持管理・更新

橋梁レベリング層用グースアスファルト混合物『e グース・スーパー』

大林道路（株）技術研究所 上席主任研究員 ○上地 俊孝
同上 副所長 東本 崇

1 はじめに

NEXCO では橋梁を保護する観点から、RC 床版に「床版防水グレードⅡ」が標準使用されている。しかし、当該防水工は多層構成であり、各層の施工にも時間を必要とすることから、施工時間に制約のある補修工事への適用に課題があった。橋梁レベリング層用グースアスファルト混合物（Bridge Levelling Guss asphalt 以下 BLG）は、そのような課題を解決すべく、橋梁レベリング層に「床版防水グレードⅡ」相当の防水性を付与するコンセプトで開発され、運用を開始している¹⁾。これを受け、筆者らは一般的なグースアスファルト混合物の代替混合物として展開していた改質グースアスファルト混合物『e グース』を改良することで橋梁レベリング層用グースアスファルト混合物『e グース・スーパー』を開発した²⁾。e グース・スーパーは、BLG の要求性能を満足しつつ、プラントミックス方式を採用することで通常の BLG の工程調整面での課題に対応している。

本報では、e グース・スーパーの概要、ベースアスファルトの適用種の検討結果および高速道路本線への施工事例について報告する。

2 e グース・スーパーの概要

2.1 特徴

通常の BLG と比べた e グース・スーパーの特徴はプラントミックス方式を採用していることである。舗装工事ではさまざまな理由により急な工程変更が余儀なくされるが、プレミックスタイプの場合、ローリー車の確保を含めた日程の再設定が難しいのに対し、プラントミックス

であれば添加材以外の材料はプラントに常備されているため工事からの要求に答えやすく、

“工程調整の融通性”で優位である（図-1 参照）。また、アスファルトの最小発注数量の制約もないため、小規模施工や試験練り・試験施工におけるアスファルトの無駄も削減される。

一方で e グース・スーパーのアスファルトの性状には NEXCO が規定する基準値を満たさない項目がある。このため、現状は BLG からの設計変更により採用されている。

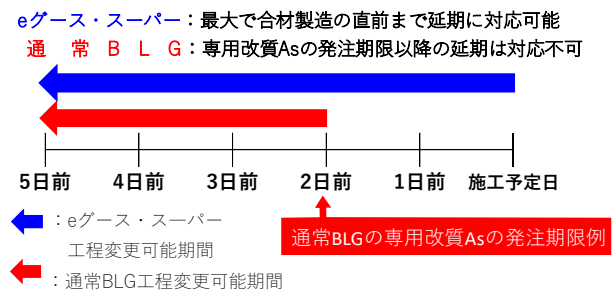


図-1 工程調整の融通性のイメージ

2.2 材料および配合

e グース・スーパーのアスファルト構成は、ベースアスファルトであるポリマー改質アスファルトⅡ型が 84%、特殊添加材が 16%である。また、標準アスファルト量は 12.0%であり通常の BLG の 9.5%と比べて多い。その他の材料構成、骨材粒度範囲、配合設計手順等は一般的な BLG と同様である。e グース・スーパーの材料構成を図-2 に示す。

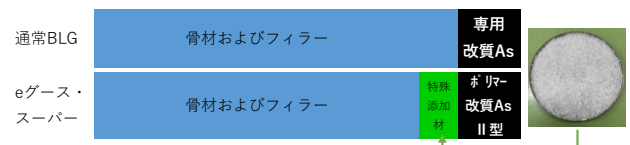


図-2 e グース・スーパーの材料構成

2.3 アスファルト性状

e グース・スーパーのアスファルト性状例を表-1に示す。アスファルト性状は概ねBLG用改質アスファルトの基準値を満足している。しかし、針入度(25℃、60℃)はともに基準値より小さく、基準外である。ただ、針入度(25℃、60℃)は、低温脆性や流動変形抵抗性の指標であり、より詳細に評価している曲げ仕事量と曲げスティフネス、 $G^*/\sin\delta$ は基準値と比べて高い水準である。また、また、伸度(15℃)はバイндаの改質程度が非常に高く、試験途中で治具から試料が剥脱してしまい評価が出来ない。しかし、これについても曲げ仕事量が十分に高い水準である。以上のように、一部基準値を満足しない項目はあるが、e グース・スーパーのアスファルト性状に問題はないと考えている。

表-1 アスファルト性状例

試験項目	試験方法	eグース・スーパー	BLG用改質アスファルト基準値	
針入度(25℃)	1/10mm	JIS K 2207	18	20~40
針入度(60℃)	1/10mm	JIS K 2207	79	100~200
軟化点	℃	JIS K 2207	110	80以上
伸度(15℃)	cm	JIS K 2207	測定不能*2	30以上
引火点	℃	JIS K 2265	344	260以上
薄膜加熱質量変化率	%	JIS K 2207	0.04	0.6以下
薄膜加熱針入度残留率	%	JIS K 2207	72.2	65以上
密度(15℃)	g/cm ³	JIS K 2207	1.025	報告
曲げ仕事量(-5℃)	×10 ⁻³ MPa	試験便覧A063T	1,424	750以上
曲げスティフネス(-5℃)	MPa	試験便覧A063T	11	80以下
$G^*/\sin\delta$ *1	Pa	試験便覧A062	17,436	5,000以上

*1 試験条件は次の通り 試験温度：60℃、平行円盤直径：25mm、試料厚さ：2mm、周波数：1.2rad/s、ひずみ量：1%

*2 アスファルトの凝集力が高く、試験途中で治具から試料が剥脱するため伸度試験は実施できなかった。

2.4 混合物性状

e グース・スーパーの混合物性状例を表-2に示す。e グース・スーパーのリュエル流動性、動的安定度は、BLGの基準値を満足しており、通常BLGと同水準である。また動的安定度が基準値を満足していることから、塑性変形抵抗性はBLGの要求性能を満足している。

表-2 混合物性状例(実機製造品)

出荷工場	A工場	B工場	C工場	BLGの基準値
骨材粒度	下方粒度	中央粒度	中央粒度	
アスファルト量 (%)	12.0	12.2	11.3	
リュエル流動性【測定温度】 (秒)	12.7 【182℃】	6.1 【187℃】	11.7 【191℃】	3~20
動的安定度 (回/mm)	1400	1400	2170	1000以上

2.5 その他要求性能

BLGは、要求性能のうち塑性変形抵抗性以外の項目は「床版防水グレードII」の性能照査試験を実施し確認することとなっている。田中らのBLGの防水性の評価方法³⁾を参考に、eグース・スーパーがBLGの要求性能を満足することを確認した。結果を表-3に示す。

全ての項目で目標値を満足しており、塑性変形抵抗性以外の要求性能も満足することを確認している。このため、寒冷な地域およびそれ以外の地域共に適用が可能である。

表-3 要求性能の確認結果(防水性関連)

試験項目	eグース・スーパー	目標値*1	可否
基本負荷試験(舗設負荷II)			
引張接着強度(23℃)	N/mm ²	1.21	0.6以上 ○
せん断接着強度(23℃)	N/mm ²	0.45	0.15以上 ○
防水性試験II	漏水なし	漏水しないこと	○
温度変化および薬品負荷(-10~50℃)、ホイールトラッキング負荷後の試験 寒冷地以外			
引張接着強度	(-10℃) N/mm ²	1.92	1.2以上 ○
	(23℃) N/mm ²	1.34	0.6以上 ○
	(50℃) N/mm ²	0.56	0.07以上 ○
せん断接着強度	(-10℃) N/mm ²	1.39	0.8以上 ○
	(23℃) N/mm ²	0.36	0.15以上 ○
	(50℃) N/mm ²	0.05	0.01以上 ○
ひび割れ開閉負荷**2	漏水なし	漏水しないこと	○
温度変化および薬品負荷(-30~50℃)、ホイールトラッキング負荷後の試験 寒冷な地域			
引張接着強度	(-30℃) N/mm ²	1.50	1.2以上 ○
	(23℃) N/mm ²	0.88	0.6以上 ○
	(50℃) N/mm ²	0.53	0.07以上 ○
せん断接着強度	(-30℃) N/mm ²	2.38	0.8以上 ○
	(23℃) N/mm ²	0.48	0.15以上 ○
	(50℃) N/mm ²	0.10	0.01以上 ○
ひび割れ開閉負荷**2	漏水なし	漏水しないこと	○
負荷を与えない試験			
耐薬品性	飽和CaOH (aq)	異常なし	異常のないこと ○
	3%NaCl (aq)	異常なし	異常のないこと ○
	3%CaCl ₂ (aq)	異常なし	異常のないこと ○
膨れ抵抗性	異常なし	異常のないこと	○
はがれ抵抗性	異常なし	異常のないこと	○

*1:目標値はグレードIIの基準値に準拠

*2:ひび割れ開閉負荷試験は参考文献3)の方法による

3 ベースアスファルトの適用種の検討

3.1 検討概要

使用するポリマー改質アスファルトⅡ型の製造会社や品番の違いで、最適アスファルト量（以下、OAC）や OAC における混合物性状が大きく異なるようであれば、本混合物に適したものを把握しておく必要がある。

そこで、4種類のベースアスファルト A、B、C、D を使用して e グース・スーパーの配合設計を行い、OAC および動的安定度を確認することでベースアスファルトの適用種を検討した。ここで、ベースアスファルト A～C は一般的なポリマー改質アスファルトⅡ型を選定し、ベースアスファルト D には施工性改善性能を有したものを選定している。本検討ではベースアスファルト種による OAC と動的安定度の傾向を把握することが目的であるため、決定配合になることが多い中央粒度のみで実施した。検討で使用した骨材配合の合成粒度曲線を図-3 に示す。また、アスファルト量は標準アスファルト量としている 12% を中心として ±1% で実施した。

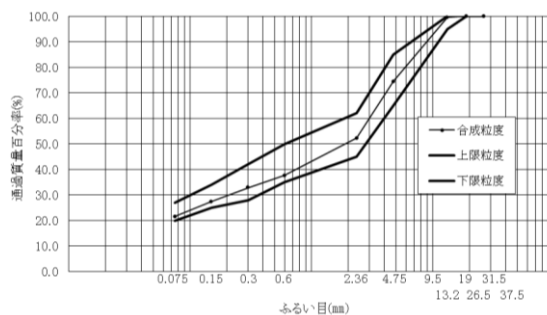


図-3 合成粒度曲線図

3.2 検討結果と考察

アスファルト量とリュエル流動性（180℃）の関係から求めた OAC を図-4 に示す。ベースアスファルトの種類により、アスファルト量 11.0% におけるリュエル流動性に違いがみられた。一方で、アスファルト量 12.0%、13.0% におけるリュエル流動性は概ね同程度であり、OAC は全て 12.0% となった。このことからベースアスファルトの種類により、少ないアスファルト量においてリュエル流動性に影響するが、標準アスファルト量以上では概ね同程度であり、OAC は同程度になるものと考える。

ベースアスファルト A、B、C、D の OAC にお

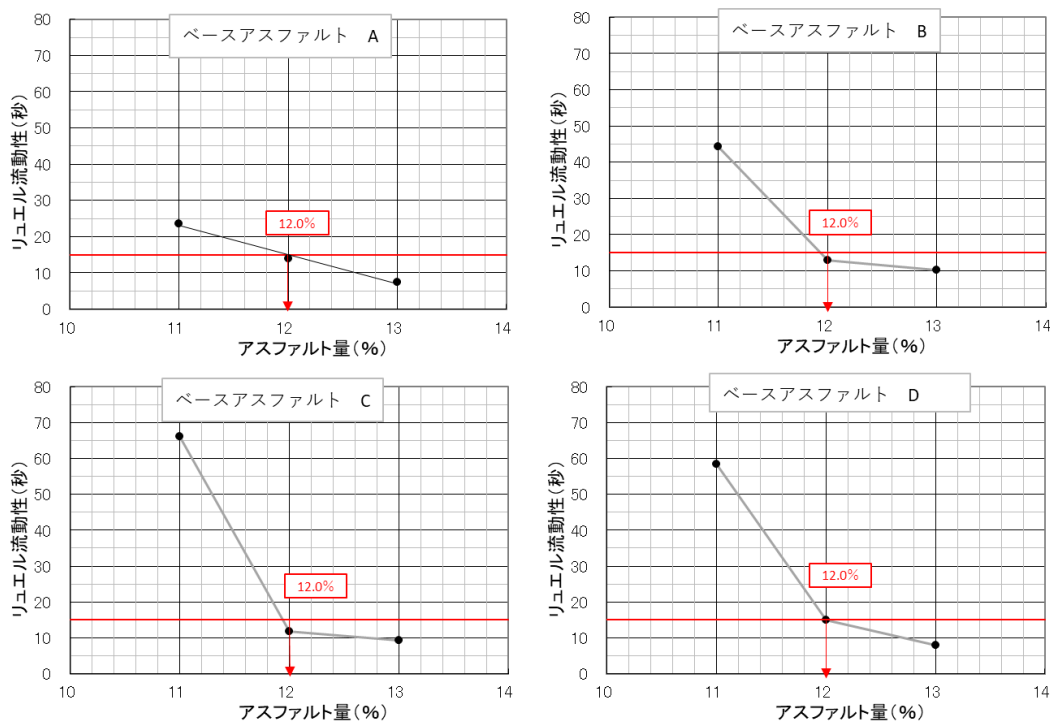


図-4 ベースアスファルト A、B、C、D の最適アスファルト量

ける混合物性状を表-4に示す。いずれのベースアスファルトにおいても動的安定度の目標値である1000回/mm以上を満足していた。しかしベースアスファルトA~Cは目標値に対して十分に高い値であったが、ベースアスファルトDは1180回/mmと目標値は満足するものの少し低い水準であった。これはベースアスファルトDが施工性改善性能を有しており、一般的なポリマー改質アスファルトⅡ型と材料構成や配合が異なるためと考える。

通常BLGも含め、改質グースアスファルト混合物は試験室と実機で製造したもので動的安定度に違いが発生する場合が見受けられる。このため製造方法の違いによる性状の変動も考慮し、eグース・スーパーのベースアスファルトとして施工性改善性能を有したポリマー改質アスファルトⅡ型の使用は控えるべきと考えた。一方で一般的なポリマー改質アスファルトⅡ型であれば概ねどの製造会社でも配合設計が可能であり、同様の結果が得られる。

表-4 OACにおける混合物性状

ベースアスファルト種	A	B	C	D
OAC	12.0%	12.0%	12.0%	12.0%
リュエル流動性 (180°C) (秒)	13.9	13.0	11.8	15.0
動的安定度 (回/mm)	2250	2250	1570	1180

4 施工事例

BLGから設計変更を提案し、採用・施工に至った東北自動車での施工事例を報告する。

本工事は施工日が夏場で、施工箇所も山間部であったため天候が安定しておらず、施工予定日の前日に施工を延期する必要があった。しかしeグース・スーパーを採用していたことから、工程の変更にも柔軟に対応することが可能であった。また、施工は2日間で1日当たりクッカ車2台分と小規模であったが、最小発注数量に伴うアスファルトの無駄も発生しなかつ

た。本施工では、道路管理者と関係者が参加する現場見学会を実施したが、施工性および仕上がり状態に関して問題ないとの評価を受けた。



写真-1 施工状況

5 まとめ

eグース・スーパーの“工程調整の融通性”が実施工においても確認された。また、ベースアスファルトは一般的なポリマー改質アスファルトⅡ型であれば製造会社を問わず適用が可能であることを確認した。

今後も長期供用性や適用条件等の確認を続け、道路管理者、施工管理者、合材工場で「三方よし」なBLGとして、更なる普及拡大に努めたい。また、鋼床版への適用性についても検討し適用範囲の拡大を目指す所存である。

参考文献

- 1) 橋梁レベリング層用グースアスファルト混合物設計・施工管理要 設計施工マニュアル, 令和2年7月, 中日本高速道路株式会社
- 2) 上地俊孝, 東本崇ほか, プラントミックスタイプのコンクリート床版用グースアスファルト混合物の開発, 道路建設, 2023, 48号, p. 83-88
- 3) 田中敏弘, 鎌田修, 丸山陽, 床版防水性能を有する橋面舗装の開発, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), 2016, 72巻, 3号, p. I_69-I_75

高浸透性改質アスファルト乳剤『プライムファイン』

東亜道路工業株式会社 技術研究所
東亜道路工業株式会社 北陸支店

○高橋 昌史
中西 太

1 はじめに

近年、日本のアスファルト舗装の損傷部位は、供用年数の増加に伴い、より深層化していることが報告されている¹⁾。このような損傷は、切削目地や施工目地、ひび割れなどから浸入した雨水が路盤や路床に滞水することで、路盤が泥濘化し、交通荷重に伴う路盤の永久変形が促進されることで進展する。そのような状況で、表層や基層の修繕のみが繰り返されているため、残置された深層部がさらに脆弱化している。

アスファルト舗装の長寿命が求められている現在、路盤や路床に永久変形を生じさせないことや、路盤の洗掘、路盤内部への浸透を防止する雨水の滞水対策を行うため路盤にアスファルト乳剤を散布するプライムコートを行っている。

従来、プライムコートにはPK-3が使用されてきたが、路盤への浸透性が低く使用しているアスファルトが柔らかいため路盤が変形しやすい、養生砂を散布しないと施工機械のタイヤへ付着するなど問題があった(写真-1)。また、高浸透性アスファルト乳剤(PK-P)においても、アスファルトを軟質化させ浸透性を向上させるため、油分を添加している場合もあり、路盤を安定化させる効果はあるものの、強化するまでの性能は有していない。



写真-1 PK-3の散布状況

以上の背景から散布した乳剤が路盤表面に浸透し、その部分を強化する、降雨から路盤の洗掘、路盤内部への水の浸透を防止することなどを目的として、高浸透性改質アスファルト乳剤『プライムファイン』を開発した。本論文では、プライムファインの概要、効果、および、施工事例について紹介する。

2 プライムファインの概要

プライムファインは、特殊樹脂を添加し被膜結合力、浸透性を高めた改質アスファルト乳剤であり、路盤上部に強固な含浸層が形成される。このため、PK-Pより工事車両等のタイヤに付着しにくく、より堅固なアスファルト舗装の施工基盤を構築することができる。

よって、大規模施工の施工性改善や駐車場、軽交通路線などアスファルト混合物層が薄い舗装の耐久性を向上させるだけではなく、重交通路線においても路盤自体が強化されることで、舗装の維持修繕におけるLCC低減に貢献することができる。

3 プライムファインの代表性状

プライムファインの代表性状を表-1に示す。浸透時間は路盤の状況により変化するが、従来の高浸透性アスファルト乳剤と比較しても非常に優れている。また、プライムファインの性状として施工時のタイヤ付着を評価する浸透性試験後のアスファルト付着率試験を規格値として設定した。

表-1 代表性状

試験項目	標準的性状	社内規格	
エングレー度 (25℃)	2	1~6	
ふり残留分 (質量%)	0.0	0.3以下	
付着度	3/3	2/3以上	
粒子の電荷	陽(+)	陽(+)	
浸透性試験 (秒)	33	100以下	
浸透性試験後のアスファルト付着率 (質量%)	0	1以下	
蒸発残留分 (質量%)	41	40以上	
蒸発残留物	針入度[25℃] (1/10mm)	52	60以下
	軟化点 (°C)	49.0	42.0以上
留出油分(360℃までの) (質量%)	0	1以下	
貯蔵安定度 (質量%)	0	1以下	

4 路盤への浸透性能とタイヤ付着抑制効果

プライムコートの路盤への浸透性能を確認するため、JEAAS 2020 6.7 浸透性試験方法に準拠し、浸透性を測定した。アスファルト乳剤の供試体への浸透状況を写真-2 に示す。プライムファインは、PK-3 よりも優れ、PK-P と同等以上の浸透性を有していることが分かる。

また、プライムコートが施工機械等のタイヤに付着しにくいことを確認するため、JEAAS 2020 6.7 浸透性試験方法および JEAAS 2020 6.20 分解性能試験方法を参考にプライムファインのタイヤ付着抑制効果について評価した。

試験後のろ紙状況を写真-3、ろ紙へのアスファルト付着率を表-2 に示す。プライムファインは、PK-3 やPK-P より、ろ紙に対して付着しにくいことからダンプトラック等施工機械のタイヤにも付着しにくいことが予想される。

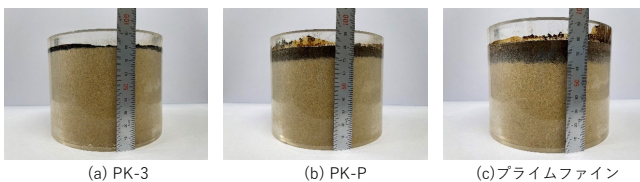


写真-2 乳剤の供試体への浸透状況

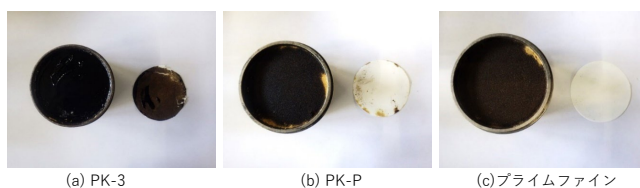


写真-3 試験後のろ紙状況

表-2 ろ紙へのアスファルトの付着率

項目	PK-3	PK-P	プライムファイン
アスファルト付着率 (質量%)	7	1	0

5 粗骨材との付着性能

プライムファインの硬化物の骨材への付着性・耐水性を評価するため、A017 粗骨材の剥離抵抗性試験方法を参考に、アスファルト乳剤と粗骨材の付着性能を評価した。

試験後の供試体状況を写真-4 に、試験結果を表-3 に示す。プライムファインの供試体には、剥離が認められず、剥離面積率は 0%と評価され、PK-3 やPK-P よりも粗骨材との付着性能に優れていることが分かった。

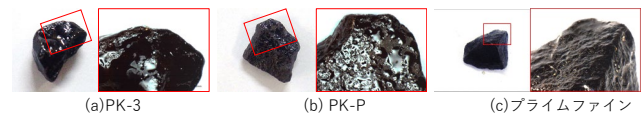


写真-4 粗骨材の剥離抵抗性試験後の粗骨材

表-3 各アスファルト乳剤の剥離面積率

項目	PK-3	PK-P	プライムファイン
剥離面積率(%)	30	70	0

6 路盤の評価

6.1 変形抵抗性試験

プライムコートを散布した路盤の変形抵抗性を評価するため、ホイールトラッキング試験を参考にし、20℃における走行輪荷重に対する変形量を測定した。供試体は 5 cm 厚の型枠を用いて、粒度調整砕石 (M-25) を最適含水比で締固め度 95%になるように締固め、その後、各種プライムコートを 1.2L/m² 散布し作製した。試験結果を図-1、写真-5 に示す。

試験開始 1 分後における変形量をそれぞれ比較すると PK-3、PK-P は、10mm 以上であるのに対し、プライムファインは 1mm 以下であった。プライムファインを散布することで路盤上部に堅固な含浸層が形成され、変形抵抗性が大きく向上することがわかった。

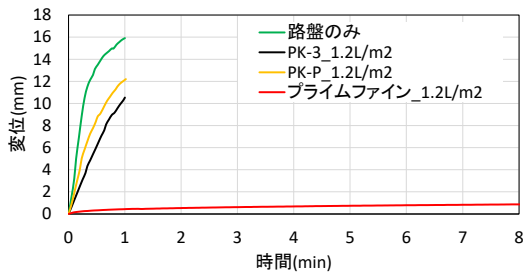


図-1 ホイールトラッキング試験による変形量

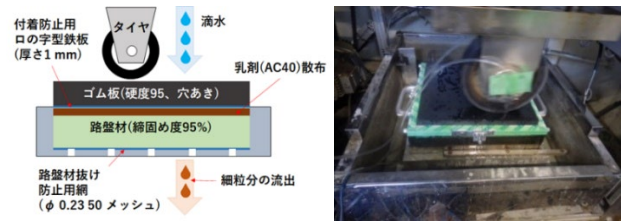


図-2 試験模式図

写真-6 試験状況

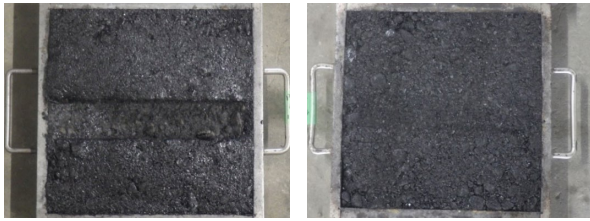


写真-5 試験後の供試体の表面状態

6. 2 洗掘抑制効果

プライムコートの雨水による路盤の洗掘抑制効果を評価するため、ホイールトラッキング試験機を用いた評価試験を実施した。試験の模式図を図-2、試験条件を表-4、および、試験状況を写真-6に示す。本試験は締固め度 95%の路盤にプライムコートを散布した上部に穴の開いたゴム板を設置した供試体に対して、散水しながら走行輪をトラバース走行させる試験で、散水および走行に伴い流出する細粒分の質量を測定し路盤中の細粒分の流出を評価するものである。

試験結果を図-3に示す。プライムファイン散布量 0.6L/m²と0.8L/m²を境に路盤材細粒分の流出量の減少が確認された。また、0.8L/m²以上の散布量では、概ね流出量が収束することが分かった。

試験後の供試体を写真-7に示す。PK-3を用いた供試体(散布量 1.2L/m²)は、プライムコートの一部が剥がれ、路盤が泥濁化している状態が確認した(細粒分の流出量 108g)。このことから従来のプライムコートに比べ、プライムファインを用いた供試体は、プライムファインが形成する堅固で耐水性に優れた被膜と浸透性の相乗効果により、散布された路盤の変状が起りにくいことが確認された。

表-4 試験条件

項目	試験条件
荷重(N)	686
温度(°C)	20
滴水量(L/h)	2.4
トラバース	有り
試験時間(h)	3

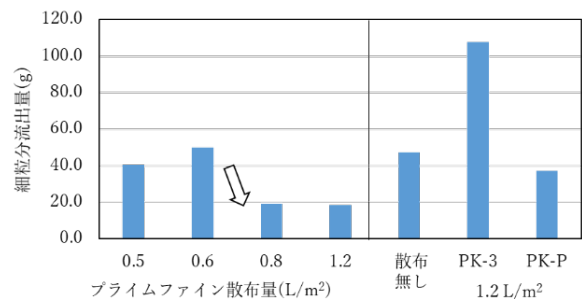
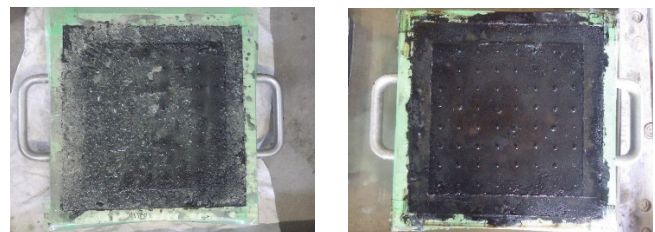


図-3 プライムファインの細粒分流出量試験結果



PK-3 (剥離・路盤材の泥濁化) プライムファイン (損傷なし)

写真-7 試験後の供試体状況

6. 3 接着性能

プライムファインの接着性能を評価するため、EU式せん断試験機を用いた試験を実施した。EU式せん断試験の試験状況を写真-8に、試験条件を表-5に示す。せん断試験の試験結果を表-6に示す。

プライムファインはPK-3と同等以上のせん断接着性能があり、路盤とアスファルト混合物を一体化していることが分かった。

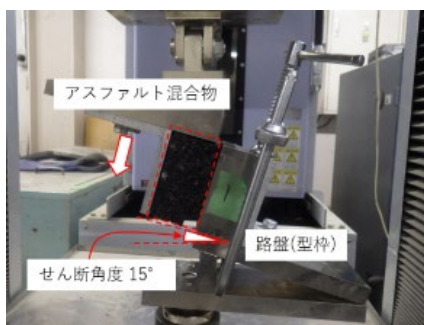


写真-8 EU式せん断試験状況

表-5 試験条件

項目	試験条件
載荷速度(mm/分)	1.0
試験温度(°C)	23
せん断角度(°)	15

表-6 試験結果

プライムコート材料	なし	PK-3	プライムファイン
せん断接着強度(MPa)	試験前に破壊*	0.016	0.022

* アスファルト混合物と路盤材が接着していないため測定不能

7 施工事例

施工概要を表-7、プライムファインの散布状況を写真-9、および、ディストリビュータ走行後の路面状況を写真-10に示す。

プライムファインは構築された路盤に速やかに浸透することを確認した。更に、プライムファインの分解を確認後、ディストリビュータを走行させたところ、アスファルト被膜の剥がれなど路盤の乱れは発生しなかった。

表-7 施工概要

工期	2022年3月～2023年3月
施工場所	新潟県岩船郡関川村下川口地先
現場名	R3新発田維持管理内舗装修繕工事
散布面積	2300㎡



写真-9 プライムファイン散布状況

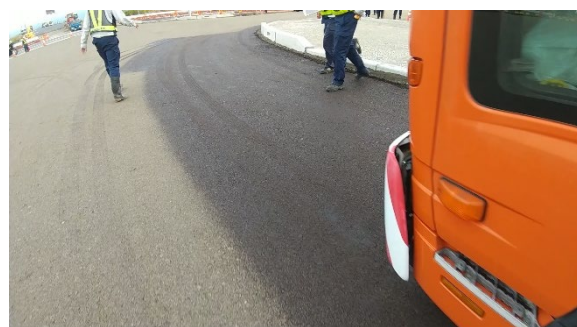


写真-10 ディストリビュータ走行後の路面状況

8 まとめ

プライムファインの性状を下記にまとめる。

①路盤表面を堅固に安定化させる

被膜結合力の強いプライムファインが路盤に深く浸透し、堅固なアスファルト含浸層が施工基盤となるため健全なアスファルト混合物層が構築できる。

②施工機械による路盤の乱れを抑制する

堅固なアスファルト含浸層が形成されることからタイヤなどに付着、剥がれが生じ難く、砂散布などによる養生作業を大幅に軽減できる。

③交通荷重による変形を抑制する

供用後、堅固なアスファルト含浸層により交通荷重による変形が生じにくく、支持力低下を抑制する。

④浸透水などによる洗掘を抑制する

アスファルト舗装のクラックなどから浸透した雨水による路盤の細粒分の流出を抑制し、支持力低下を抑制する。

⑤路盤とアスファルト混合物を一体化する

剥離抵抗性に優れたアスファルト含浸層とアスファルト混合物層が一体化することでアスファルト混合物層下面の剥離の進行を抑制する。

参考文献

1) 高橋茂樹, 小野義道, 佐藤正和: 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 (舗装工学), Vol. 71, No. 3, pp. I_93-I_101, 2015.

プレキャスト床版による PC 合成桁の床版取替技術

株式会社大林組 生産技術本部橋梁技術部 富永 高行

1 はじめに

高度経済成長期に整備された多くの高速道路橋梁において、大型車交通量の増加や経年劣化などによる床版損傷が著しく、速やかなリニューアル工事の必要性が高まっている。これまでプレストレストコンクリート（以下、PC）合成桁橋の床版リニューアルは、現場打ち床版による打替えが主流であったが、既設床版の鉄筋の斫り出しに時間と労力を費やすこと、新設床版の現場施工が天候に左右されることなど、限られた交通規制期間内に完了しなくてはならないリニューアル工事には適さない工法であった。

本稿は、中央自動車道の大規模更新事業において新たに開発したプレキャスト（以下、PCa）床版による PC 合成桁の床版取替技術の適用事例について紹介するものである。

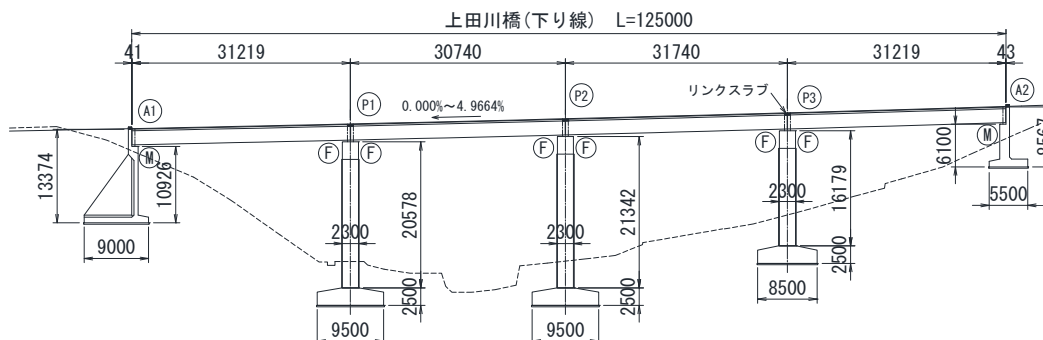
2 工事概要

表－1 に工事概要および対象となる上田川橋の橋梁諸元、図－1 に橋梁概要図を示す。本工事は上田川橋を含む全 8 橋の床版取替えや付属物等を更新する工事であり、1 回 70 日間の対面通行規制期間ごとに各橋の床版取替えを順次実施したものである。

表－1 工事概要と上田川橋の橋梁諸元

工事名称	中央自動車道（特定更新等） 柳樽川橋他 9 橋橋梁補修工事
発注者	中日本高速道路株式会社
施工場所	自) 長野県下伊那郡阿智村 至) 岐阜県中津川市
床版取替工期 (上田川橋)	下り線Ⅰ期：2019年5月～7月 下り線Ⅱ期：2019年10月～12月 上り線Ⅰ期：2020年5月～7月 上り線Ⅱ期：2020年10月～12月
橋長	L=125.0m (PC単純合成桁橋×4連)
支間割	30.4+29.9+31.3+30.4m
有効幅員	9.610～9.843m
構造形式	PC単純合成桁×4連 ⇒PRC4 径間連結合成桁橋
床版取替	場所打ちRC床版 (t=210mm) ⇒PCaPC床版 (t=220mm)
壁高欄取替	場所打ち壁高欄⇒プレキャスト壁高欄
橋梁付属物	支承・伸縮装置・排水装置取替え、 落橋防止装置設置

上田川橋は上下線が近接する支間長約 30m×4 連の PC 単純合成桁橋であり、合計 4 回の規制期間に分けて床版リニューアルを実施した。なお、PCa 床版による床版取替えに加えて床版連結によるノージョイント化を行うことで、工程短縮と走行性の向上および維持管理の改善も図っている。



図－1 橋梁概要図（上田川橋 下り線）

3 PC 合成桁への PCa 床版の適用

3. 1 PCa 床版による床版取替え概要

当初発注時の床版更新方法は、標準的な現場打ち RC 床版に打替えるものであった。その場合、既設 PC 桁から突出しているスターラップとずれ止め鉄筋をウォータージェットで研り出して再利用し、ハンチ筋については床版撤去とともに切断してエンクローズ溶接により復旧する必要がある（図-2）。しかしながら、この方法では床版撤去に多大な時間と労力を要し、限られた対面通行規制期間内に床版打替えを完了できないことから、PCa 床版を用いる計画に変更した。PCa 床版による床版取替え手順を図-3に示す。

Step 1：既設 RC 床版を既設 PC 桁の上フランジに沿ってスラブカッター（鉛直方向）とワイヤーソー（水平方向）で切断・撤去する。PC 桁から突出しているずれ止め鉄筋等も合わせて切断する。

Step 2：既設 PC 桁の上フランジ天端に無機系あと施工アンカーでずれ止め鉄筋を設置する。

Step 3：PCa 床版を架設し、主桁上フランジとの隙間とずれ止め鉄筋用の孔に超速硬性の無収縮モルタルを充填して一体化する。

3. 2 PCa 床版の構造的特徴

PCa 床版と既設 PC 桁との接合部の概要を図-4に示す。主桁上フランジに設置するあと施工アンカーは D22 とし、上フランジへの定着長 7d を確保している。また、既設 PC 桁の上フランジを取り囲むように無収縮モルタル（標準厚さ 40 mm）を充填することとした。

既設 PC 桁は上フランジの一部が床版ハンチ内に埋め込まれた形式であった。主桁上に PCa 床版を設置する場合、図-5の A または B の床版形状が挙げられるが、A 形状の場合は主桁近傍で負曲げに対する床版厚が不足、また B 形状の場合はハンチ厚分だけ既設に比べて橋面高が高くなるために縦断線形への影響が大きく、いずれも

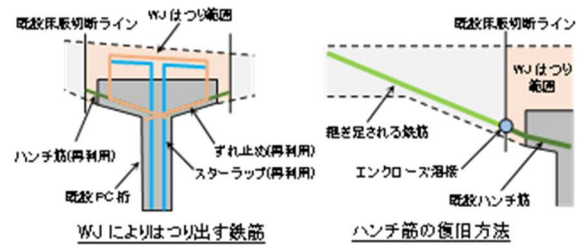


図-2 床版打替え時の鉄筋研り出し

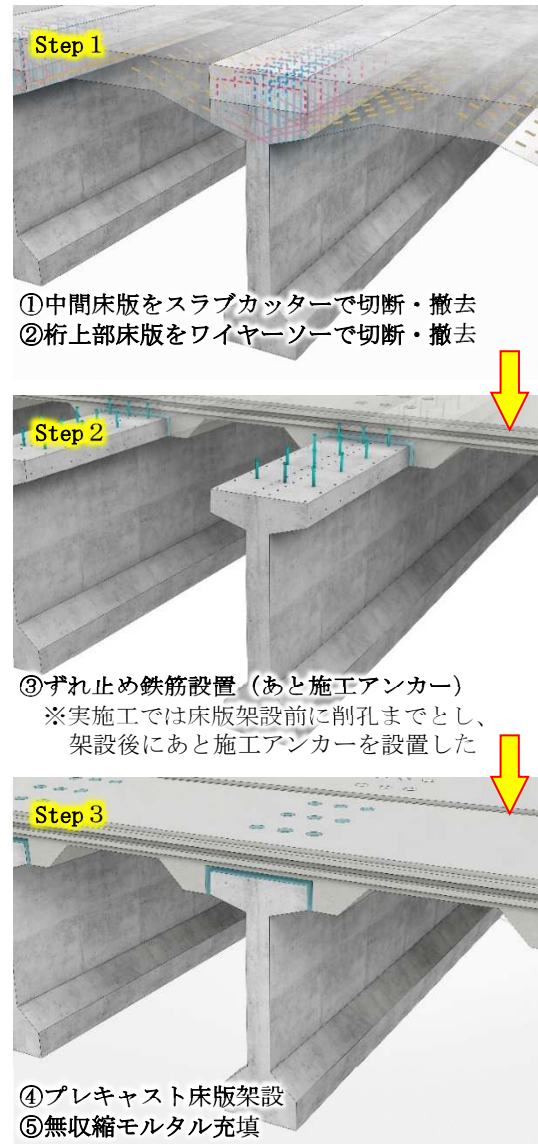


図-3 PCa 床版による床版取替え手順

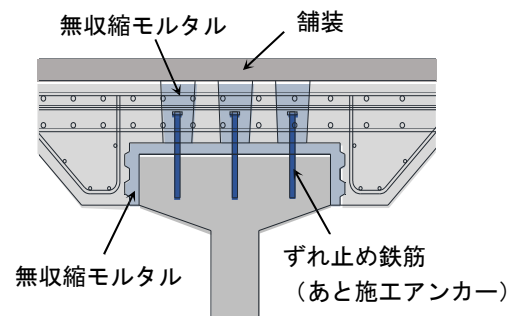


図-4 接合部概要図

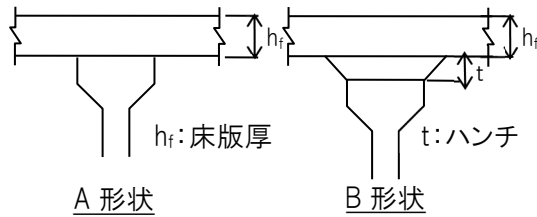


図-5 一般的なPCa床版の形状

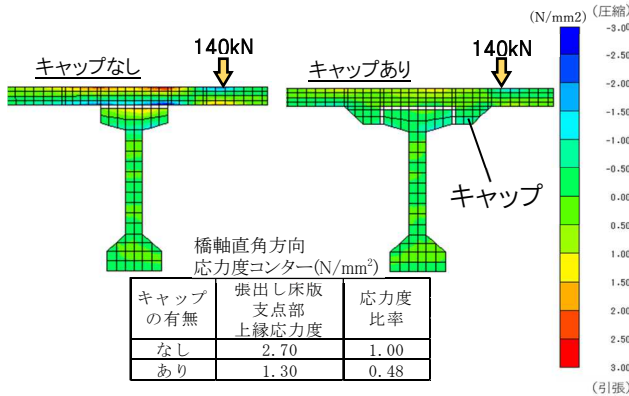


図-6 床版キャップ形状の効果

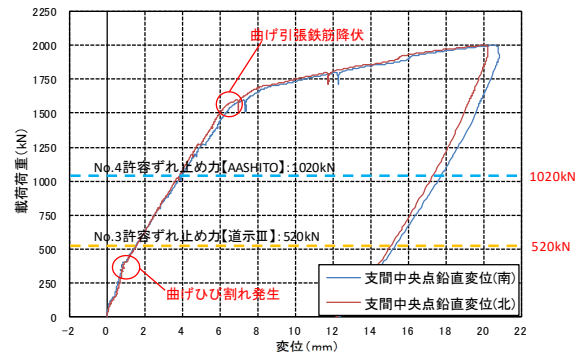
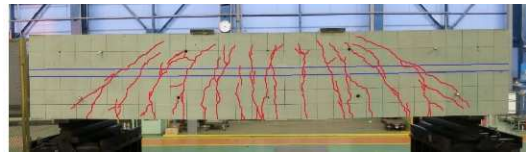
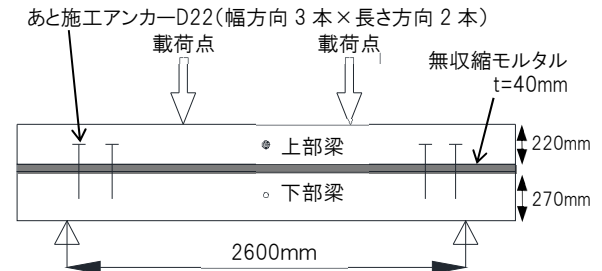
適用困難であった。そこで、標準の 220 mm厚を確保した床版の下側に突起を設け、既設 PC 桁の上フランジを帽子（以下、キャップ）のように取り囲む形状とした。この形状により、キャップがストラットとして機能し、負曲げによる床版の変形を抑制する。その効果については FEM 解析により床版上縁の引張応力度（橋軸直角方向）を約 50%低減できることを確認している（図-6）。

4 荷重試験による性能確認

4.1 ずれ止め性能の確認

あと施工アンカーおよび無収縮モルタルによるずれ止め性能を荷重試験により確認した。PCa 床版と主桁上フランジを模擬した上部梁と下部梁の試験体を別々に製作し、無機系あと施工アンカーと無収縮モルタルで接合して合成梁とした。上部梁底面は実際の PCa 床版の底面と同じ目粗し仕上げ、下部梁上面は現場での切断面を模擬した滑面仕上げ（木ごて仕上げ程度）とし、ずれ止めの設計せん断耐力を評価することとした。

合成梁の 4 点曲げ荷重結果を図-7 に示す。設計で見込んでいる H14 道示Ⅲの許容せん断力や (1) 式的设计せん断耐力に相当する荷重レベル



$$V = c \cdot A_{cv} + \mu (A_{vf} \cdot f_y + P_c) \quad (1) \text{ AASHTO より}$$

ここに、 V : 設計せん断耐力、 c : 粘着力 (=0.52MPa)、 A_{cv} : せん断伝達面の面積 (mm^2)、 μ : 摩擦係数 (=0.6)、 A_{vf} : せん断伝達面に配置される鉄筋量 (mm^2)、 f_y : 鉄筋の降伏点 (N/mm^2)、 P_c : せん断伝達面に作用する圧縮力 (N)

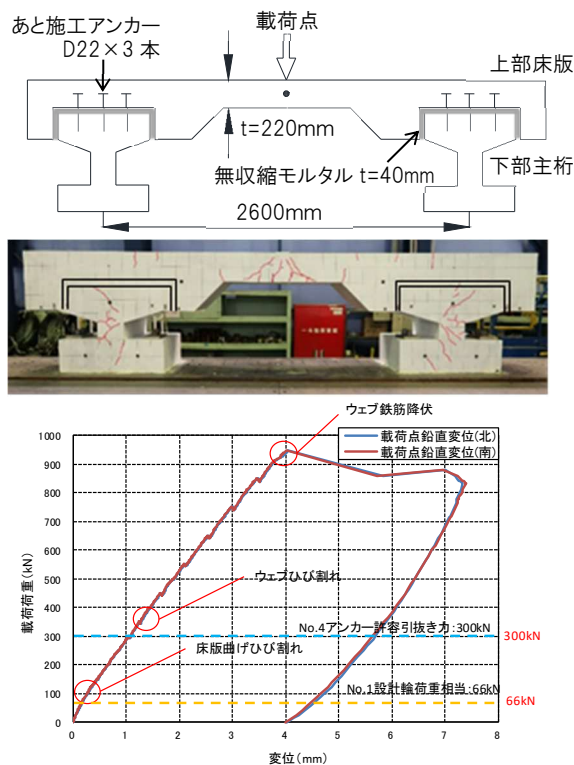
図-7 ずれ止め性能確認試験

においても上下梁の相対ずれやモルタル層でのすべりは見られず、滑面仕上げであってもモルタルが十分な付着性能を有しており、ずれ止め構造の安全性を確認した。

4.2 接合部の荷重伝達性能の確認

PCa 床版に配置したキャップの拘束効果や接合部の荷重伝達性能を、主桁間隔や床版厚などを実寸法で再現した荷重試験により確認した。PCa 床版と主桁を模擬した上部試験体と下部試験体とを別々に製作し、無機系あと施工アンカーと無収縮モルタルにより上下部を接合することで実施工の状態を再現した。

合成梁の 3 点曲げ荷重結果を図-8 に示す。設計荷重や解析で得られたアンカー許容引抜力相



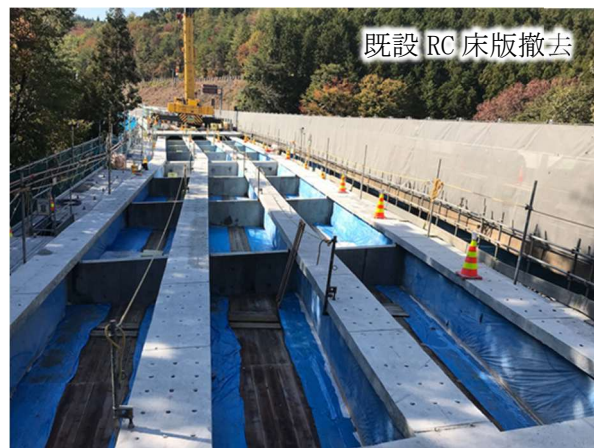
図－8 荷重伝達性能確認試験

当の荷重レベルでも、アンカー引抜けや無収縮モルタルの変状は発生していない。接合部は完全に一体化され、床版に作用する荷重が主桁に伝達され、キャップ構造の安全性を確認した。

5 PC 合成桁の床版取替施工

上田川橋の床版取替えは、1回の規制ごとに2径間分（L=約 60m/回）の両端に大型クレーンを2台配置して、全ての既設床版撤去の後に新設PCa床版を架設する手順を合計4回行った（写真－1）。従来工法における床版打替えの施工実績（L=約 20m/回）に比べて、PCa床版による床版取替えによって約3倍の施工速度を実現し、工事全体の規制期間を3分の1に短縮できた。

PCa床版の製作には事前の3Dスキャナ計測による実際の既設PC桁の位置と形状を反映し、施工時の無収縮モルタルの最小厚さ20mmを確保した。また、PCa床版がキャップ形状であるため、事前のモックアップ試験と床版に設けた排出孔による目視確認を行い、主桁周りのモルタル充填



写真－1 PC 合成桁橋の床版取替え状況



写真－2 PC 合成桁橋の床版取替え完了を確認した。

6 おわりに

本稿は、既設PC合成桁の大規模更新に向けて新たに開発したPCa床版を用いた床版取替技術の適用事例であり、限られた規制期間内における急速施工を実現したものである。本事例が今後の床版取替工事の参考となれば幸いである。

亜硝酸リチウムを用いた A S R 補修技術

極東興和株式会社 営業本部 営業部 補修営業課 片平 勝師

1 はじめに

戦前、戦後を通じて蓄積された膨大な量の道路橋は年月とともに老朽化が進んでおり、「建設の時代」から「維持管理の時代」へ移行しつつあり、近年では多くのコンクリート構造物の補修工事が行われている。

コンクリートの劣化と言えば、疲労、塩害、アルカリシリカ反応（以下、A S R と呼ぶ）がコンクリートの3大劣化機構と呼ばれており、そのまま放置していると数年で安全な通行が困難になるなど、深刻な事態が発生する可能性があるため、早急に対策を行う必要がある。

本稿では、A S R 対策に亜硝酸リチウムという補修材料を用いた補修技術（内部圧入工：A S R リチウム工法）の開発について紹介する。

2 開発の経緯

A S R は、反応性骨材、アルカリ金属イオン、および十分な水分供給の3つの条件が揃ったときに発生することが知られているコンクリートの劣化の1つである。

その劣化のメカニズムは、反応性骨材とコンクリート中のアルカリ金属イオン（ Na^+ 、 K^+ ）が化学反応を起こし（反応リング）、骨材の周囲にアルカリシリカゲルという吸水膨張性のゲル状物質を生成する（反応生成物）（図-1、写真-1、2）。

このアルカリシリカゲルが水分の供給を受けることにより局部的容積膨張を生じ、その膨張作用によりコンクリート表面に亀甲状あるいは部材拘束方向のひび割れを発生させる（写真

-3）。

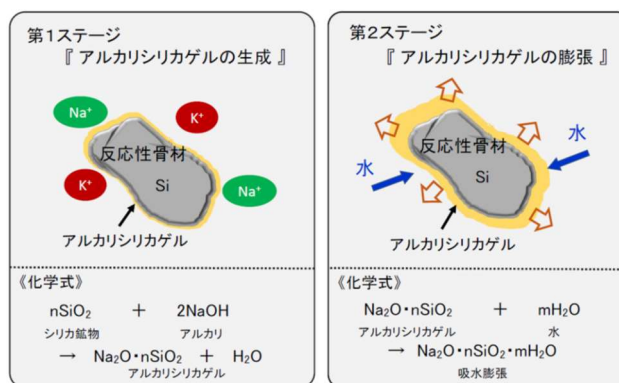


図-1 A S R のメカニズム



写真-1 反応リング



写真-2 反応生成物



写真-3 A S R によるひび割れ

このA S R を起こす3つの条件のうち水分の供給を遮断する対策としてコンクリート表層部分に対する補修対策が行われることがあるが、水分を完全に遮断することは容易ではなく、補修効果が十分に得られずに再劣化を生じているものも見られる。

このような厳しい条件においてもA S R 膨張性を消失させる効果のあるリチウムイオンをコンクリート中に供給する対策を行うことができれば、以後のA S R 膨張の進行を抑制でき、既

設構造物の長寿命化を図ることが可能となる。そこで構造物に削孔した小径の孔（圧入孔）より、亜硝酸リチウムを主成分とした抑制剤を加圧注入（圧入）し、浸透拡散させることで以後のASR膨張を抑制するリチウムイオンの内部圧入工法（ASRリチウム工法）の開発を行った（図-2）。

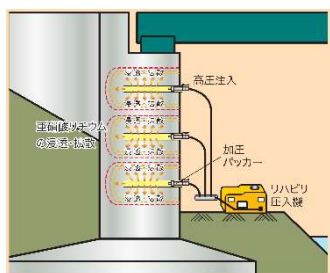


図-2 工法概要図

3 リチウムイオンによるASR抑制メカニズム

リチウムイオンによるASR膨張抑制メカニズムは諸説あるが、現時点ではアルカリシリカゲル ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) にリチウムイオン (Li^+) が供給されることにより水に対する溶解性や吸湿性を持たないリチウムモノシリケート ($\text{Li}_2 \cdot \text{SiO}_2$) またはリチウムジシリケート ($\text{Li}_2 \cdot 2\text{SiO}_2$) に置換され、アルカリシリカゲルが非膨張化される（図-3）。この反応によりアルカリシリカゲルの吸水膨張反応は収束し、以後のコンクリートの膨張は生じないという考え方が一般的である。

4 リチウムイオン内部圧入によるASR抑制効果の確認

リチウムイオンの内部圧入によりASRの膨張が抑制できることを確認するため、反応性骨材を用いたASRを起こしているコンクリート供試体に対しリチウムイオンを内部圧入する実験を行った。

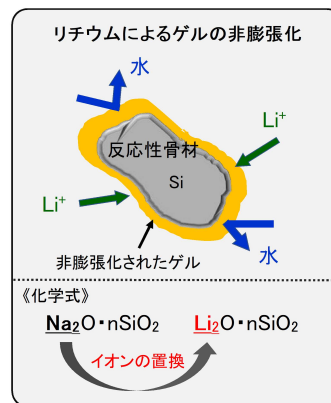


図-3 リチウムによるゲルの非膨張化

4. 1 供試体

供試体は 1000mm×1000mm×2000mm の矩形供試体とし（図-4）、配合を表-1 に、使用材料を表-2 に、亜硝酸リチウム 40%水溶液を写真-4 に示す。

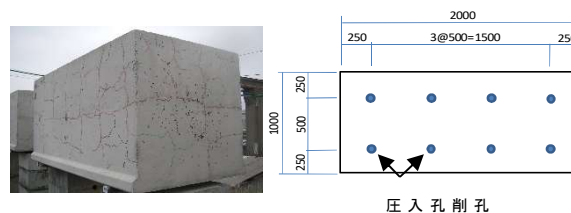


図-4 供試体外観と形状寸法（単位:mm）

表-1 供試体の示方配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	水 W	セメント C	単位量(kg/m ³)				添加アルカリ NaCl	
						細骨材		粗骨材			
						反応性 Sr	非反応性 Sn	反応性 Gr	非反応性 Gn		
15	63	4.5	45.7	183	290	796 (Sr+Sn)	239	989 (Sr+Sn)	493	495	10.55

表-2 使用材料一覧

セメント	普通ポルトランドセメント（住友大阪セメント社製）
細骨材	健全骨材：野洲川産川砂 反応性骨材：北海道産安山岩砕砂
粗骨材	健全骨材：上山産砕石（コンクリート用砕石 2005） 反応性骨材：北海道産安山岩砕石（反応性骨材）
練混ぜ水	水道水
AE 減水剤	AE 減水剤標準型（1 種）：リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体（BASF ポゾリス社製ポゾリス No.70 標準型）
NaCl	食塩（日本海水社製並塩）
リチウム化合物	亜硝酸リチウム 40%水溶液（田島ルーフィング社製プロコン 40）
グラウト材	非金属骨材系無収縮グラウト材料（BASF ポゾリス社製マスターフコー-870 グラウト Y タイプ）



写真-4 亜硝酸リチウム 40%水溶液

4. 2 内部圧入工

内部圧入工の実施時期は、供試体表面のASRによるひび割れが幅0.2mm程度にまで進展した自然暴露385日で実施した。

内部圧入工は、供試体側面から直径20mm、深さ800mmの圧入孔を500mm間隔で8箇所、ダイヤモンドコアドリルにて削孔し、そこから亜硝酸リチウム40%水溶液を油圧式圧入装置にて加圧注入した。亜硝酸リチウムの圧入量は、Li/Naモル比1.0となる量とし、注入圧力は0.6~0.8MPaとした。内部圧入工を実施する際に亜硝酸リチウムがひび割れから漏出することを防止するために、圧入に先立って幅0.2mm以上のひび割れに超微粒子セメント系ひび割れ注入材を注入した後、供試体表面をポリマーセメントモルタル系表面被覆材にてシールした。内部圧入工が完了した後、圧入孔を無収縮グラウト材にて充填して再び自然暴露環境に置いた。供試体への内部圧入工の状況を写真-5に示す。



写真-5 内部圧入実施状況

4. 3 施工後の膨張率

内部圧入工は、自然暴露385日目に実施し、圧入後、供試体は再び自然暴露環境に置いた。亜硝酸リチウムを供給しない基準供試体および内部圧入工を実施した供試体のコンクリート表面における促進期間と膨張率との関係をそれぞれ図-5、図-6に示す。

亜硝酸リチウムを内部圧入した385日目を基準とすると、亜硝酸リチウムを供給しない供試体は、385日から511日目までに2,000~3,000 μ

という大きな膨張を生じているのに対し、内部圧入した供試体の膨張は、内部圧入実施を境に収束しており、内部圧入後のASR膨張が抑制されていることが分かる。

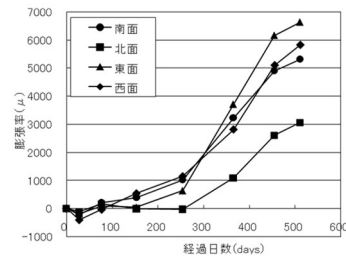


図-5 膨張率（亜硝酸リチウム供給なし）

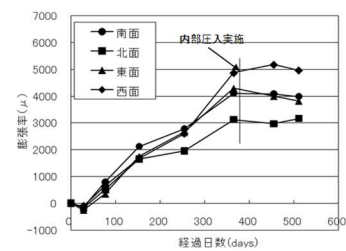


図-6 膨張率（亜硝酸リチウム内部圧入）

4. 4 リチウムイオンの浸透状況

内部圧入を実施し、126日後に供試体コンクリート内部のリチウムイオン浸透状況の確認試験を実施した。まず、供試体内部を露出させるためにワイヤーソーを用いて図-7に示す2断面にて供試体を切断した。

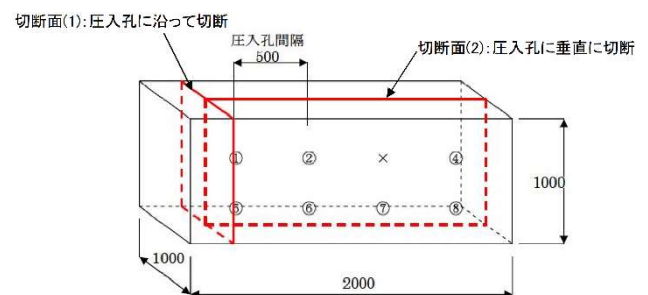


図-7 供試体切断位置

切断面(1)は、圧入孔①、⑤の深さ方向に沿った断面で、長さ800mmの圧入孔全長を露出させるとともに、その上下方向への浸透状況の確認を目的としている。切断面(2)は、全圧入孔を垂直に切断する断面で、各圧入孔から全周方向への浸透状況の確認を目的としている。

切断した供試体には、洗浄した後、露出面に呈色反応試薬 TDI (トルエン・ジ・イソシアナート) を噴霧した。TDI は、無色透明の液体で、亜硝酸リチウムのうちの亜硝酸イオンと反応して茶褐色に変色する性質を持つため、切断面に TDI を噴霧して茶褐色に変色した範囲を亜硝酸イオンの浸透範囲と見なすことができ、浸透範囲は図-8、図-9 の通りであった。

また、呈色反応の濃淡とリチウムイオン含有量との関係を把握するために、反応大、反応中反応小の位置からコアを採取し、それぞれを粉砕して作製した各粉末試料中に含まれるリチウムイオン量を ICP プラズマ発光分光分析法により定量分析した。結果を表-3 に示す。

また、表-3 より、茶褐色の呈色反応の濃淡とそこに含まれるリチウムイオン量との間には相関関係があることが分かり、分析に用いた試料中の範囲内では試薬 TDI による呈色反応が最も薄かった反応小の位置であっても、実際に圧入したリチウムイオン量の理論値に相当するリチウムイオン分析値が得られている。このことから、一定の圧入孔間隔を定め、それを順守することの重要性が示された。

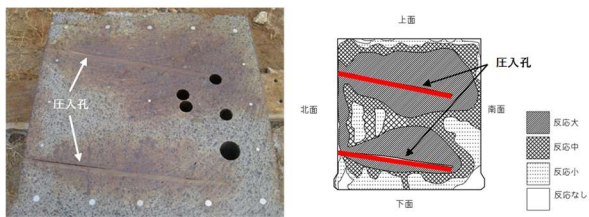


図-8 切断面(1)の呈色反応状況 (圧入孔に沿った断面)

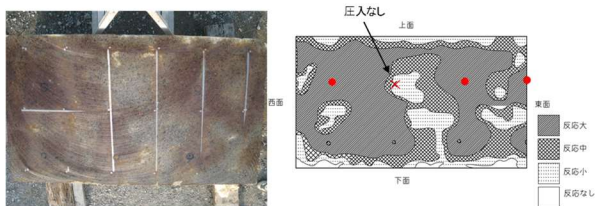


図-9 切断面(2)の呈色反応状況 (圧入孔に垂直な断面)

表-3 呈色反応の濃淡とリチウムイオン含有量との関係

呈色反応の度合い	リチウムイオン含有量の分析値 (kg/m ³)	実際に圧入したリチウムイオン量の理論値 (kg/m ³)	分析値 / 理論値	備考: 切断面(1)での面積割合
反応大	3.71	1.79	2.07	53%
反応中	2.92		1.63	25%
反応小	2.04		1.14	18%

5 おわりに

リチウムイオンの内部圧入を用い、A S R劣化が顕在化したコンクリート供試体の膨張挙動および浸透状況の確認を行った結果、リチウムイオンの内部圧入工法は、A S Rの膨張抑制に有効な技術であると考えられる。

以上の結果を基にリチウムイオンの内部圧入工法の設計方法ならびに施工方法に関する技術資料が整備され、同工法を用いたA S R対策が行われるようになり、北陸地方でも施工された事例がある。

本稿が今後の北陸地方のA S R対策技術の参考となれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 江良和徳：リチウムイオン内部圧入によるA S R抑制効果に関する研究，2010.3
- 2) 江良和徳：リチウムイオン内部圧入によるアルカリシリカ反応の抑制について，コンクリート工学 Vol.50 No.2，2012.2
- 3) A S Rリチウム工法協会：アルカリシリカ反応抑制工法 A S Rリチウム工法 技術資料 改訂版，2017.11
- 4) 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会：コンクリート構造物の維持管理～塩害・中性化・A S R補修の考え方～技術資料 ver.4.3，2020.4

水道管（鋼管）専用の改築推進工法（ベルリプレイス工法）の開発

真柄建設株式会社 土木事業本部 土木技術部 部長 上田 信二

1 はじめに

現在、わが国では高度経済成長期に布設された水道管の老朽化が加速度的に進行している。70万km以上存在する水道管を開削工法にて更新するのは無理があり、早急に効率的な改築工法の開発が望まれている。そのため、当社では、水道管更新手法として水道用の静的破碎改築推進工法【ベルリプレイス工法】（以下、本工法）の開発を進めている。本工法は、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を更新する工法を目指しており、実現すればライフサイクルコスト（LCC）の低減やCO2排出量削減等の様々な効果が期待できる。これにより、老朽水道管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していきたいと考える。

2 工法概要

2.1 本工法の分類

本工法は、劣化した既設管（老朽管）を新管に布設替が可能な改築推進工法のひとつである。（表-1）

表-1 改築推進工法の分類

推進工法名	方式		備考
静的破碎推進工法	牽引式	ロッド方式	既設管を内側から拡張破碎し、新管を布設する推進工法
		チェーン方式	
衝撃破碎推進工法	元押し式 （※ベルリプレイス工法）		既設管の管端部に衝撃を加え破碎し、新管を布設替える推進工法
	空力式	打撃式	
切削破碎推進工法	泥土圧式	圧送排土方式	既設管を切削破碎しながら新管を布設する推進工法
		吸引排土方式	
		スクリュ排土方式	
引抜推進工法	オーガス式	スクリュ排土方式	既設管を鋼管で抱き込みながら新管を布設する推進工法
	一重ケーシング方式 （大口径ケーシング）	二重ケーシング方式	

※推進工法用設計積算要領「改築及び管敷設替改築推進工法編」（公社）日本推進技術協会（2020年4月1日発行）を参考に作成

2.2 本工法の施工方法

本工法は、破碎機（クラッシュブレード）を既設管に据付したあと、搭載された破碎刃で既設管を破碎拡張し、新管を順次接続しながら破碎推進する工法である。概念図を図-1に示す。

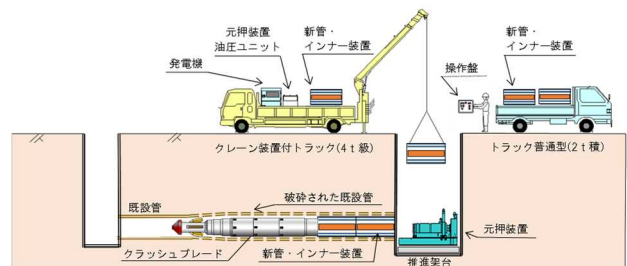


図-1 施工概念図（クラッシュブレードタイプ）

2.3 本工法の特長

本工法は非開削工法であり、埋設物が多い施工条件下での更新工事においては、様々なメリットが期待できる。（図-2、図-3参照）現在は、老朽化した水道管は、開削工事で更新するのが基本となっているため、本工法と開削工法を比較した場合の、本工法の特長を以下に示す。

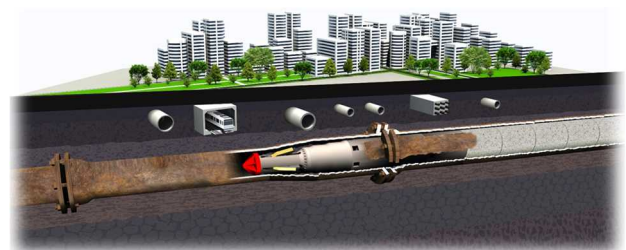


図-2 ベルリプレイス工法 イメージ図

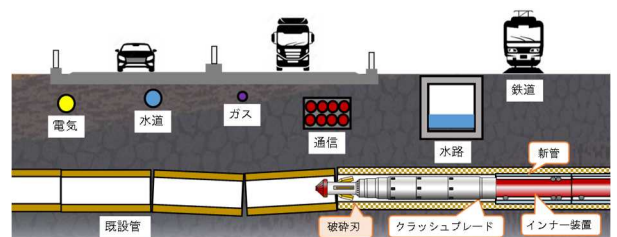


図-3 ベルリプレイス工法 施工例

2.3.1 工程短縮の実現

本工法は非開削工法であることから、開削工法の8割程度を占める時間『管路布設以外の作業時間（舗装撤去復旧・掘削・埋戻等）』を大幅に短縮できるため、交通規制下の条件における水道管更新工事においては工程短縮が期待できる。

2.3.2 コスト削減効果

本工法は、開削工法と比較して、管路布設工事費の内部コストは高くなるが、付帯工事・交通渋滞・工事騒音等の外部コストを抑えることができる。そのため、ソーシャルコスト(社会的費用)が増大となる条件においては、総合的にはコスト削減が期待できる。

2.3.3 施工時の安全性向上

本工法は、交通規制範囲を最小限に抑えることができるため、掘削時の地中埋設管破損事故や架空線損傷事故などの発生リスクが低い。また、第三者災害リスクも低くなる。

2.3.4 CO2削減による環境負荷低減

本工法は、交通規制作業の縮小に伴う工期短縮や、重機使用量の削減等によるCO2排出量削減が見込まれる。また、付帯工事(路面復旧等)が少ないため、資材製造時・廃棄物処理時等に発生するCO2排出量削減も期待できる。

2.3.5 産業廃棄物削減による環境負荷低減

本工法は、掘削土や既設管等の産業廃棄物が発生しないため、大幅な産業廃棄物削減に繋がる。

2.4 本工法の適用管種・適用呼び径

本工法の適用管種・適用呼び径を表-2に示す。

表-2 適用管種・適用呼び径

		適用	今後の対応
適用管種	既設管 (旧管)	鉄筋コンクリート管 (開削用・推進用)	※各種継手にも 対応予定
		硬質塩化ビニル管 (開削用・推進用)	
		陶管	
		ダクタイル鋳鉄管 (K形、NS形、GX形)	
新管	【さや管内】	硬質塩化ビニル管 (推進用)	※さや管方式にも 対応予定
		ダクタイル鋳鉄管 (K形、NS形、GX形)	
		ポリエチレン管	
呼び径		250~450 (アタッチメント方式で対応)	※今後、対象管径 を増やしていく
段差施工		11cm以下	—

3 水道管改築への対応

3.1 破砕機の改良

本工法の開発当初は、下水道管更新を主として進めていたためコンクリート管や塩化ビニル管の破砕を中心に破砕機の開発を進めてきた。その後、水道管更新の要望が増えてきたことから、水道管(ダクタイル鋳鉄管)を効率的に破砕するため、以下の改良を行った。(表-3)

(パイロットタイプ【下水道用】 ⇒ クラッシュブレードタイプ【上水道用】)

表-3 ベルリプレイス工法 破砕機の改良

型式	パイロットタイプ	クラッシュブレードタイプ
特許	特許第6479892	特許第7011244
呼び径	300	250~450 (※アタッチメント方式で対応)
破砕刃 開閉方式	2点スクロール方式 (破砕刃：N=6枚)	楔(面受)スクロール方式 (破砕刃：N=4枚)
破砕能力	60t	150t
止水装置 (地下水対策)	有(パイロット破砕機に装着)	無

3.2 破砕機の拡張・破砕機構

ダクタイル鋳鉄管を破砕する機構は、図-3に示すように、楔(面受)スクロール方式とした。楔の背面に1500kNの油圧ジャッキを配置し、ジャッキにより楔を前後させることで、4枚刃のクラッシュブレードを開閉させる機構である。

(図-4)

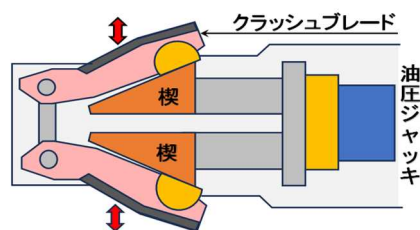


図-4 破砕機の拡張・破砕機構

3.3 破砕機(水道用)による地中破砕実験

ダクタイル鋳鉄管の地中での破砕を確認するために、ダクタイル鋳鉄管(φ300K形)の既設管を新管に布設替する改築推進(延長12

m、土被り1.1m)の地中破碎実験を行った。現場は、地下水位がない砂質土地盤であり、ダクタイトル鉄管(φ300)を図-5に示すよう地中部に設置した。今回の実験では、開発した破碎機での地中部における拡張・破碎の適用性を確認することを目的とし、現場での計測としては、ダクタイトル鉄管上面の隆起量および地表面挙動の目視確認のみに留めた。

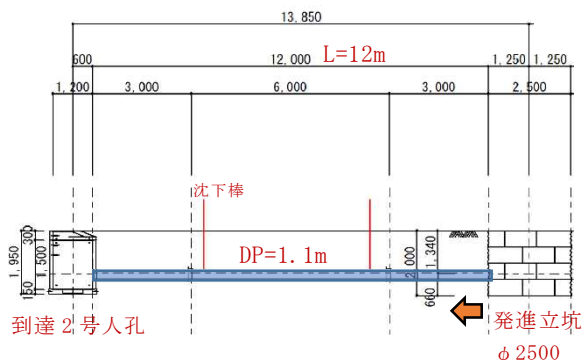


図-5 地中実証実験 概要図



写真-1 地中破碎試験状況

実験後、開削により地中での状況を確認したところ、ダクタイトル鉄管は、破碎刃の位置(上下左右)で拡張・破碎され、短冊状に4枚で分割されていた。よって、本工法は現場でも適用性が高いことを確認することができた。

(写真-2、写真-3)



写真-2 ダクタイトル鉄管 破碎状況



写真-3 短冊状に分割されたダクタイトル鉄管

地表面変位については、沈下や隆起といった変位は見られなかった。また、地割れ等の地盤の破壊現象も地表面からではあるが観察されなかった。ダクタイトル鉄管は、水道管の50%以上を占めるため、今後もダクタイトル鉄管の更新を主体に開発を進めていく予定である。

4. 実施工を想定した破碎機の改良

地中破碎試験で使用した破碎機は、油圧(油圧ホースで接続)で破碎するため、施工時における油漏れ等が懸念された。そのため、新設水道管への油漏れリスクの軽減を目的として、油圧ユニットを破碎機後方に装着できる構造に変更した。また、破碎機における既設管破碎状況をより把握するために、破碎刃の『押出圧力』『破碎刃のストローク量』等を制御できる機能を追加し、地中内での破碎拡張方法に柔軟に対応できるように改善した。(写真-4)



写真-4 改良型破碎機(クラッシュブレードタイプ)

4.1 改良型破碎機による室内破碎試験

改良型破碎機において、ダクタイトル鉄管(φ350NS形)の室内破碎試験を行い、標準部・継手部の破碎を確認した。(写真-5~8、図-6参照)また、改良型破碎機は、破碎刃の押出圧力・ストローク量を計測できるため、破碎時の押出圧力とストロークとの相関を

STマイクロパイルを用いた基礎補強技術

極東興和株式会社 営業本部 営業部 補修営業課 鬼村 果穂

1 はじめに

国土が4つのプレートの境界に位置し、多くの活断層を有する日本は世界有数の地震多発国である。令和6年1月1日に発生した能登半島地震は最大震度7に及び、本稿執筆時点においても被災した住居やインフラ等の復興事業は未だに途上段階にある。まずは本地震の被害に遭われた皆様に心からお見舞い申し上げますと共に、お亡くなりになった方々へ謹んでお悔やみ申し上げます。

災害発生時の被害防止対策として既設建造物の耐震補強は必要不可欠だが、中でも基礎の補強は低空頭や狭隘箇所など厳しい制約の中での施工が求められる。そこで、既設基礎の耐震補強を中心とした複雑な施工条件に柔軟に対応できる小口径杭工法として開発されたのがSTマイクロパイル工法である。

2 STマイクロパイル工法の概要

2.1 マイクロパイルの種類

マイクロパイルとは、杭径300mm以下の場所打ち杭・埋込杭の総称である。マイクロパイルには高耐力マイクロパイル工法、ねじ込み式マイクロパイル工法などいくつかの種類がある。

グラウトの加圧注入技術や高圧噴射攪拌による地盤改良技術を取り入れ、補強材として節突起加工を施した高張力鋼管を用いたものがSTマイクロパイル工法である。杭の構造や支持力の算定方法等が異なるタイプIとタイプIIの

2種類が存在するが(図-1)、紙面の制約上今回は適用性がより広く施工事例が多いタイプIに絞って紹介する。

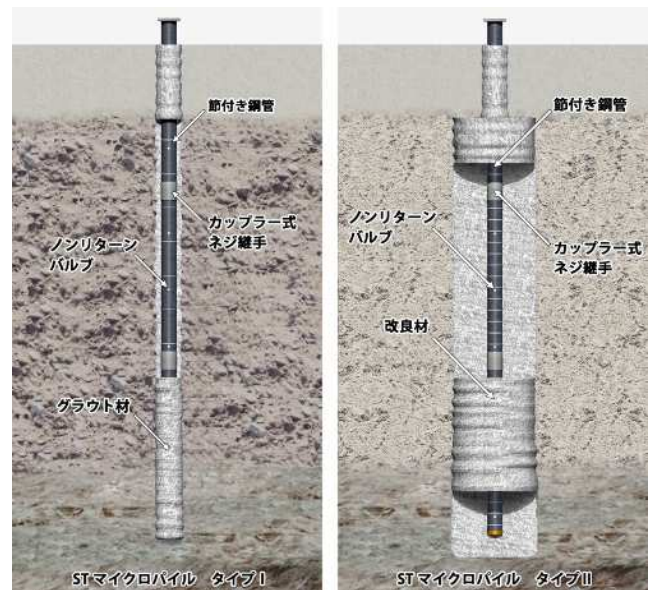


図-1 STマイクロパイル工法の概要図

2.2 STマイクロパイル(タイプI)の構造

STマイクロパイル工法(タイプI)は、小口径鋼管をケーシングとして用いて削孔し、パッカーによるグラウトの段階加圧注入によって地盤中に全面定着させるものである。構造を図-2に示す。使用する鋼管には付着性能を高めるための節突起と、グラウトを地盤に加圧注入するノンリターンバルブ(鋼管内への逆流を防ぐ逆止弁構造)が設けられており、設計条件に応じて高張力鋼管を用いることで小口径でありながら大きな杭体の耐力を確保することができ

る。標準的な杭諸元を表-1に示す。

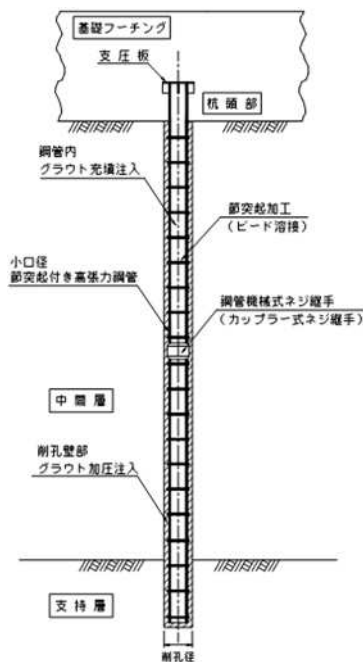


図-2 STマイクロパイル工法 (タイプ I) の構造図

表-1 STマイクロパイル工法 (タイプ I) に用いる標準的な杭諸元

項目	諸元	備考
鋼種の適用範囲	一般構造用炭素鋼管 (STK540)	JIS G 3444
	高張力鋼管 (STKT590)	JIS G 3474
鋼管径の適用範囲	$D_s = 165.2\text{mm}$ $t = 7.1\text{mm}$	
	$D_s = 216.3\text{mm}$ $t = 12.0\text{mm}$	
	$D_s = 267.4\text{mm}$ $t = 12.0\text{mm}$	
標準的な削孔径	$D_g = 185\text{mm}$	
	$D_g = 239\text{mm}$	
	$D_g = 292\text{mm}$	

注) 標準鋼管以外は別途協議

支持機構は、地盤と加圧注入したグラウト間での周面摩擦抵抗と杭先端の先端地盤抵抗を期待する支持杭であり、良質な支持層に 1m 以上の根入れを確保することを標準としているが、支持層が大深度にしか出現せず不経済となる場合は摩擦杭としての適用も検討することができる。

2. 3 STマイクロパイル (タイプ I) の施工

施工フローを図-3に示す。削孔はダウンザホールハンマ方式による回転打撃削孔を標準と

しており、礫や玉石、岩盤といった硬質な地盤でも削孔可能であることが特徴である。鋼管をケーシングとして用いた二重管削孔のため、削孔と鋼管の建て込みを同時に進めることができる。写真-1に杭打設状況を示す。

削孔が完了したら削孔ツールの回収と孔内洗浄ののち、鋼管内にパッカーを挿入してグラウトを注入し地盤中に全面定着させる。最後に杭頭処理として支圧板を取り付けて、完成となる。

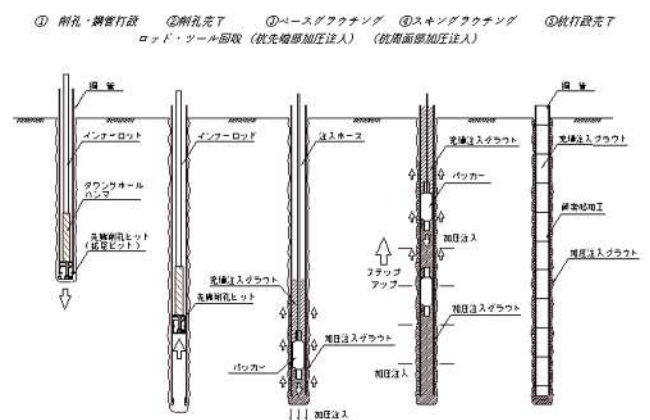


図-3 STマイクロパイル工法 (タイプ I) の施工フロー



写真-1 杭打設状況

3 STマイクロパイルの性能の検証

3. 1 検証項目

STマイクロパイル工法 (タイプ I) を開発・実用化するにあたり、各種試験を実施しそ

の性能を検証している。ここではその中から代表的な試験結果を2例紹介する。

- ① 極限押し込み支持力の検証（鉛直載荷試験）
- ② 鋼管継手の耐荷性能の検証（軸方向引張試験・曲げ試験）

3. 2 極限押し込み支持力の検証

S Tマイクロパイル工法（タイプ I）の地盤から決まる極限押し込み支持力は、杭の周面摩擦抵抗および先端地盤抵抗を考慮して次の式により推定する。

$$R_u = U_g \sum L_i \tau_{gi} + q_d A_g$$

ここに、

R_u : 地盤から決まる杭の極限押し込み支持力 (kN)

U_g : グラウト体の周長 (m) = $D_g \times \pi$ (D_g : グラウト体の外径 (削孔径) (m))

L_i : 周面摩擦力を考慮する層の層厚 (m)

τ_{gi} : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度 (kN/m²)

q_d : 杭先端における単位面積当たりの極限支持力度 (kN/m²)

A_g : グラウト体の先端面積 (m²) = $\frac{\pi D_g^2}{4}$

以上の推定式で求めた極限押し込み支持力が妥当なものであるか確認するため、鉛直載荷試験を実施して極限支持力を測定した。鉛直載荷試験の状況を写真-2に示す。

表-2は4カ所で行った鉛直載荷試験の結果をまとめたものである。いずれも試験結果の支持力は推定した支持力を上回っており、推定式は妥当なものであることを確認することができた。



写真-2 鉛直載荷試験の状況

表-2 鉛直載荷試験結果と推定した極限支持力の比較

場所	土質		杭諸元	載荷試験による極限支持力 (kN)	推定した極限押し込み支持力 R_u		
	中間層	杭先端			周面摩擦力 (kN) 式(3.3.2)	先端支持力 (kN)	計 (kN)
① 兵庫県西宮市 ¹⁰⁾	砂礫シルト粘土	シルト (N=2~6程度)	鋼管φ165.2mm,t=11mm 削孔径φ203.2mm 杭長L=11.5m	340	320	—*	320
② 茨城県鹿島郡 ⁹⁾	細砂層	砂礫層 (N=30程度)	鋼管φ165.2mm,t=11mm 削孔径φ203.2mm 杭長L=6.0m	450	283	97	380
③ 茨城県鹿島郡	細砂層 砂礫層	細砂層 (N=50以上)	鋼管φ216.3mm,t=12mm 削孔径φ232mm 杭長L=10.0m	1,200以上	930	127	1,057
④ 愛媛県上浮穴	礫質土	混在岩 D~CL	鋼管φ165.2mm,t=9.3mm 杭長L=3.5m(上段) L=5.0m(下段)	1,300以上	488	798	1,286
				1,700以上	877	798	1,675

* 支持層に根入れさせていない摩擦杭

3. 3 鋼管継手の耐荷性能の検証

S Tマイクロパイル工法（タイプ I）は、写真-3のような機械式ネジ継手（カップラー式ネジ継手）で鋼管を接続しながら杭を打設する。継手の耐荷性能を確認するため、母材鋼管



写真-3 機械式ネジ継手（カップラー式ネジ継手）

のみと鋼管にカップラー式ネジ継手を含んだ2種類の部材に対して軸方向引張試験・曲げ試験を実施した。

図-4、図-5の結果に示す通り、カップラー式ネジ継手は母材鋼管と同等の耐荷性能を有することが確認できた。

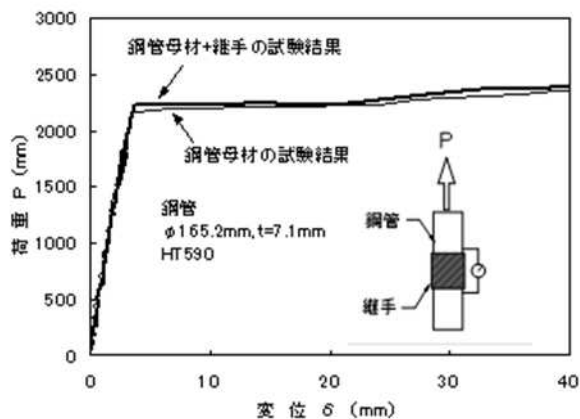


図-4 カップラー式ネジ継手の引張試験

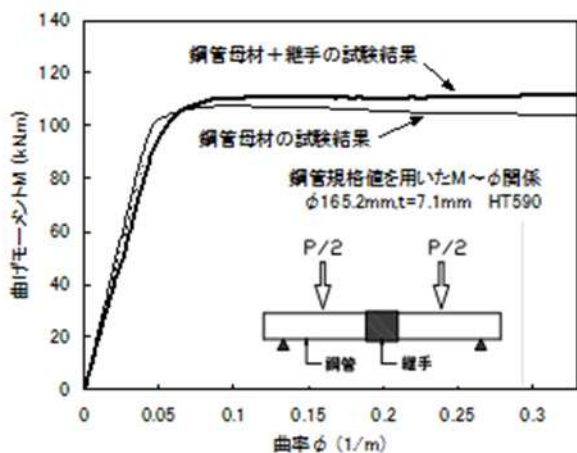


図-5 カップラー式ネジ継手の曲げ試験

4 STマイクロパイルの活用事例

STマイクロパイル工法は既設構造物に近接して打設できる小口径杭であることに加えて、削孔機も小型で狭隘な施工ヤードや搬入路にも対応できることから、一般的な杭基礎工法では施工が難しい条件の現場で採用されている。写真-4は既設道路橋の桁下で施工している状況で、空頭制限4.0m程度まで適用可能である。

また、削孔機の種類によっては写真-5のように杭打設位置との距離や高低差がある場合でも重機足場の造成を省略することができる。その他にも斜面上や河川締切内など様々なシチュエーションの施工実績があり、補強だけでなく新設構造物への適用も多くなっている。



写真-4 道路橋橋台基礎補強（斜杭）



写真-5 新設水管橋橋台基礎

5 おわりに

既設の土木構造物の老朽化が進み、耐震補強の需要は益々増加する見込みである。今後も本工法が有効な対策として広く活用されることを期待したい。

参考文献

- 1) NIJ研究会：STマイクロパイル工法タイプI設計・施工マニュアル（2016年9月）

④ 自然災害からの安全確保

S・MIX工法～硬質地盤・低変位に対応した深層混合処理工法～

○あおみ建設株式会社 技術事業本部技術開発部 大古利 勝己

1 はじめに

深層混合処理工法（スラリー攪拌工）は代表的な軟弱地盤対策工法の一つであり、セメントスラリー（水とセメント系固化材）と軟弱地盤の土を混合処理機で攪拌混合し、原位置で所定の強度に固化する工法である。近年は、地盤の安定・変形や耐震、液状化対策、硬質地盤への対応を求められる一方で、工期短縮やコスト縮減のため大口径化も求められており、多様な工法が開発されている。

S・MIX工法は、 $\phi 1600\text{mm}$ ～ $\phi 2000\text{mm}$ の大口径相対攪拌深層混合処理工法であり、本工法は、



写真-1 S・MIX工法の施工機と攪拌翼

攪拌翼が外翼と内翼で構成され、外翼に2枚の鉛直翼を取り付けたことで、外翼と内翼が相対的（正転・逆転）に回転した時に改良体部がカゴ状となり、その中で原位置土とスラリーを攪拌混合できることが特長であり、バラツキのない高品質な改良体の造成を可能にした。

また、独自に開発した特殊攪拌翼の効果により貫入抵抗を減少させ硬質地盤が介在しても削孔が可能となり、周辺地盤への変位も低減させることができた。

2 施工フロー

S・MIX工法の施工フローを図-1に示す。

- ① 施工位置（杭芯座標）に攪拌翼の中心を移動する。なお、位置誘導は、ICT管理装置による誘導も可能。
- ② 攪拌翼を回転させながら、所定の速度で地中に貫入し、所定の改良深度上端に達したら攪拌翼下端の吐出口からスラリーを吐出する。なお、貫入速度は 0.5m/分 （引抜速度は 1.0m/分 ）を標準とし、スラリー添加量を考慮して施工速度を管理する。
- ③ 所定の改良下端深度に達したらスラリーの吐出を停止する。
- ④ 先端処理（攪拌翼を回転させながら所定長往復させる）を行う。
- ⑤～⑥ 攪拌翼を回転させながら所定の速度で引抜きを行う。
- ⑦ 打設完了を確認して、次の杭芯位置に施工機を移動する。

なお、施工中の補助作業として、盛上り土の

処理が必要となる場合がある。

確実な品質管理、施工管理を行うために、施工中は専用の施工管理装置によりリアルタイムに管理を行う。

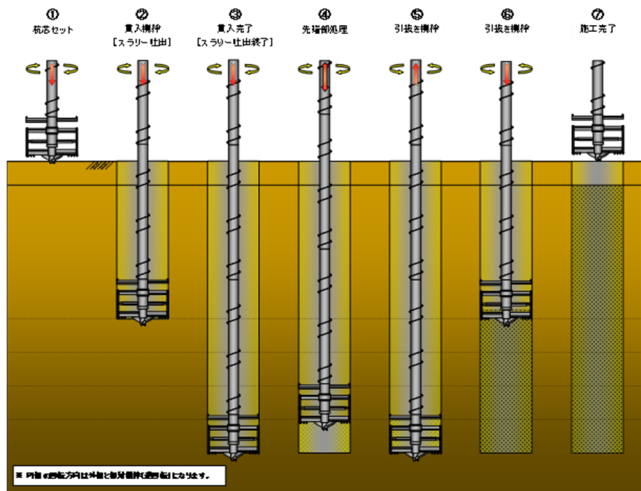


図-1 施工サイクル

3 工法概要

攪拌翼の効果の概略図を図-2に示す。

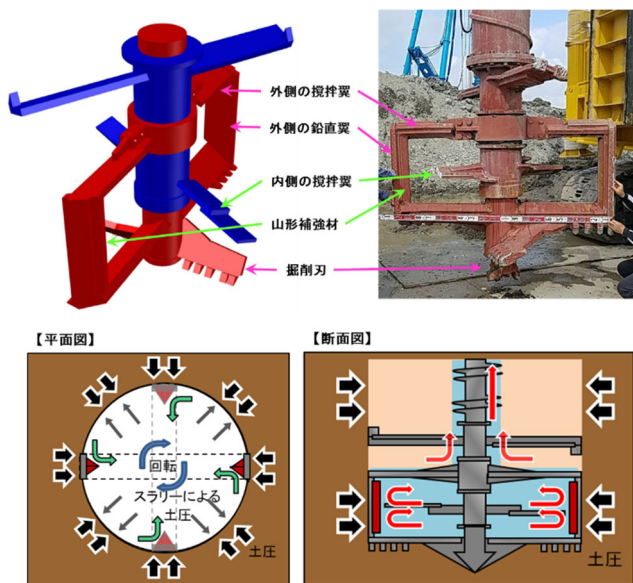


図-2 攪拌翼の効果の概略図

3.1 品質の確保

図-2の攪拌翼の外翼（赤色）と内側（青色）が相対的に回転し、攪拌翼先端の掘削刃によって掘削された掘削土が、回転するカゴ状の攪拌翼内でスラリーとともに相対攪拌されるため、

混合土が攪拌翼と供回りしスラリーと混合されない現象を防ぎ、バラツキのない改良体が造成できる。

3.2 硬質地盤への対応

外翼鉛直翼を2枚で構成し、削孔壁面との接触面を小さくすることで周面摩擦を低減させた。また、外翼鉛直翼の内側に設置した図-2の山形補強材（△部）による外翼鉛直翼の強化に加えて、先端の掘削刃を強化したことで、中間層に硬い地盤が介在しても先行削孔が不要となり一台の施工機で施工が可能となる。

表-1に適用地盤を示す。

表-1 適用地盤

砂質土	
標準値	最大値
$N \leq 40$	N50程度 【層厚2.0m程度】
粘性土	
標準値	最大値
$C \leq 120 \text{ kN/m}^2$ ($N \leq 12$)	$C \leq 150 \text{ kN/m}^2$ ($N \leq 15$) 【層厚2.0m程度】

3.3 低変位への対応

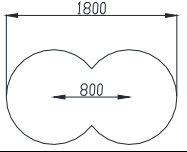
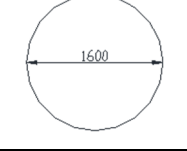
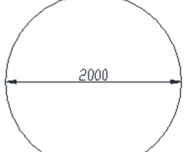
外翼鉛直翼が回転時にカゴ状となり、外側の原地盤との縁切りを行い、山形補強材（△部）が取り込んだ混合土を中心に誘導するため、周辺地盤に与える影響を低減することができる。

4 改良径

表-2に従来工法と本工法との改良径の比較を示す。

従来の深層混合処理工法は、 $\phi 1000 \text{ mm} \times 2$ 軸（改良面積 1.5 m^2 ）が主流であったが、S・MIX工法は改良径を単軸の $\phi 1600 \text{ mm}$ （改良面積 2.01 m^2 ）、 $\phi 2000 \text{ mm}$ （改良面積 3.14 m^2 ）と大きくすることにより、施工本数を少なくすることができる。

表-2 改良径比較表

	改良径	断面積	形状
従来工法	φ 1000mm × 2軸	1.5m ²	
S MIX 工 法	φ 1600mm	2.01m ²	
	φ 2000mm	3.14m ²	

5 変位計測

施工する3本の中央の改良体の杭芯から4m離れた地点に地中変位観測孔を設置し、孔内傾斜計にて施工時の変位量（施工前後）を測定した。

地中変位の測定結果は、直角方向、水平方向とも、最大変位量は地表面付近で3mm程度であり、施工による変位は極めて小さかった。

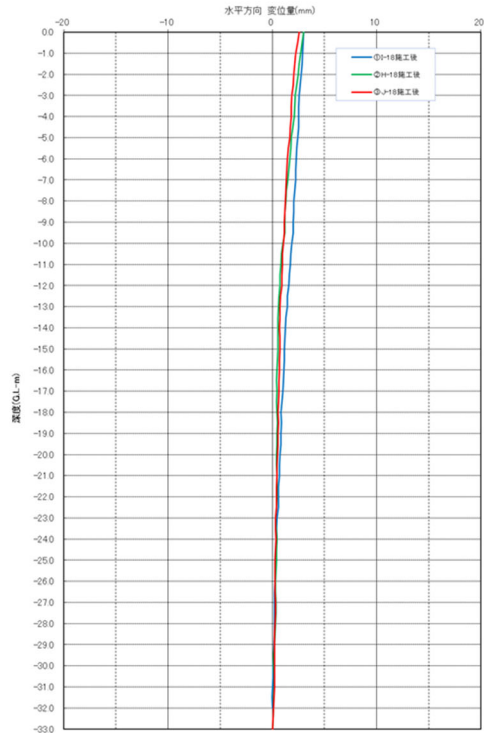


図-4 地中変位観測結果（水平方向）

6 ICT施工について

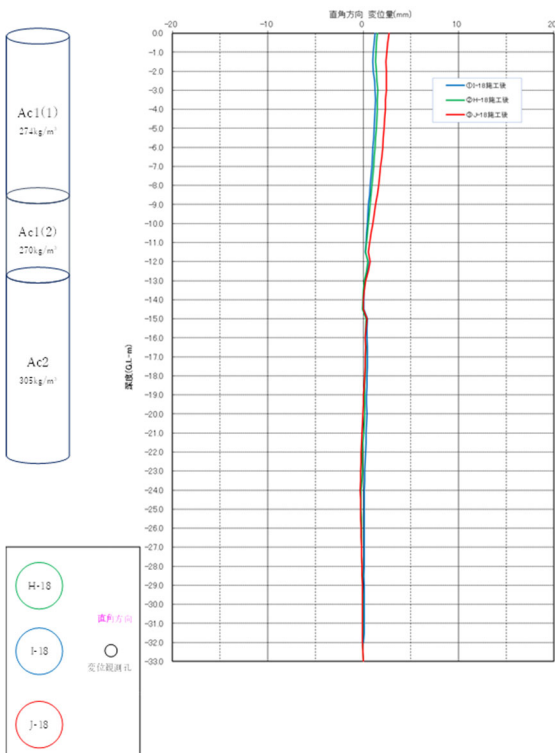


図-3 地中変位観測結果（直角方向）



図-5 位置誘導（オペレータ画面）

深層混合処理工法等の地盤改良工事は、原地盤の中を改良するため施工状況を目視で確認することができないうえに、施工状況はオペレータ室内の施工管理装置でしか確認ができなため、オペレータに依存していた。また、これまでは施工位置から次の施工位置への移動は、杭芯測量により確認した杭芯に目串などの目印を設置し、誘導員の合図を確認しながらオペレータが施工機を移動させていた。

そこで、地盤改良機にICT技術を活用した施工管理装置（位置誘導システム・施工管理システム）を搭載した。

6. 1 位置誘導システム

位置誘導システムは、GNSSを利用して施工機を施工位置に誘導するシステムである。これまでは、誘導員の指示により施工機を誘導していたが、位置誘導システムを用いることで、オペレータがモニターを確認し、誘導の指示がなくても自らの判断で移動することが可能となった。

また、施工済箇所が位置誘導システム画面に反映されるため、進捗状況を確認できるとともに同じ杭を施工する等のヒューマンエラーを防ぎ、確実に次の施工位置に誘導することが可能となった。

6. 2 打設管理システム

打設管理システムは、打設に必要な情報をモニターに表示し進捗状況をオペレータがリアルタイムに確認できる。なお、位置誘導と打設管理の画面が自動で切り替わり一つのモニターで管理できるので、管理装置からのガイダンスに従い正確な手順での施工が可能となった。

6. 3 クラウド管理

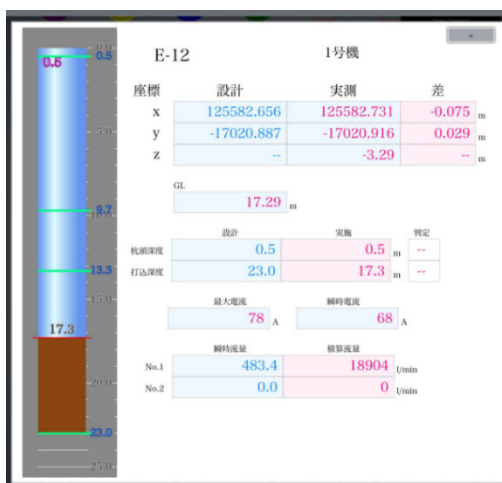


図-6 打設管理画面 (iPad)

位置誘導システムおよび打設管理システムから出力される施工情報（移動状況、施工位置、打設状況）は、クラウド管理することで、現場

や現場事務所で外部端末（iPad等のタブレット端末やPC）から状況をリアルタイムで管理・確認することが可能となった。これまでは、必要に応じて施工管理者がオペレータ室内のモニターを目視で確認していたが、施工機に近づくことなく安全に確実な施工情報を確認することができる。

6. 4 進捗・出来形管理

施工情報をクラウド管理することで、施工情報を共有することができ、施工完了後は進捗状況（2D）・出来形（3D）を外部端末で確認が可能となった。進捗状況は、施工した曜日ごとに着色し日々の進捗を確認したり、出来形表示は、電流値や流量等により着色することができる。

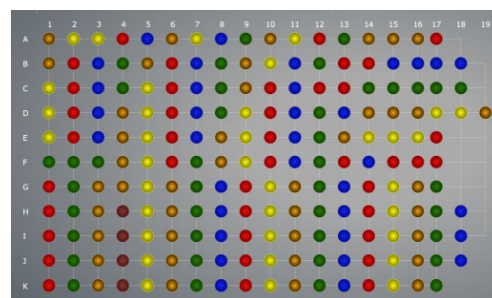


図-7 進捗画面 (2D)

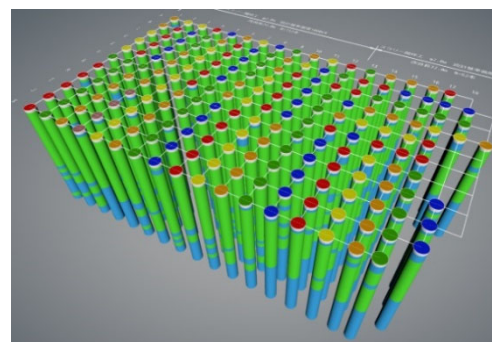


図-8 出来形確認画面 (3D)

7 おわりに

深層混合処理工法は、工期短縮、コスト削減だけではなく、硬質地盤対応、低変位化が求められている。また、ICT技術の活用による生産性向上の要求も高まっている。S・MIX工法はこうしたニーズに対応する工法として、今後も高品質化・高精度化をさらに図り、信頼性の高い地盤改良を提供していきたい。

プレキャスト版を採用したトンネルインバートの製造・施工報告

日本サミコン株式会社 技術部設計開発課 ○飯塚 一成
 工務部工事課 安部 雅詩
 工務部工事課 田中 勇平
 技術部製造管理課 波形 武晴

1 はじめに

県道 45 号線は、佐渡島の海岸沿いを一周する道路であり、住民や観光客に広く利用され、重要な役割を果たしている。

この道路における全長 1759m の内海府トンネルは平成 21 年に竣工し、平成 30 年の点検時にトンネル内で路面の隆起が確認されている。なお、隆起は最大の箇所でも 20cm を超えていた。本トンネルは、地質条件及び掘削切羽の状況に応じて施工パターンを修正しており、インバート設置区間と未設置区間とが混在する。隆起が確認されたのはインバート未設置区間で、調査から地山が膨張性地盤であることによる外力影響が確認されている。

盤ぶくれの対策工としては、インバートの設置が最も有効である。

インバートを現場打ちで施工した場合、養

生期間が必要となるが、迂回ルートが確保できないため、昼夜連続における片側交互通行の規制が長期となり、交通への影響が大きくなる。

一方、プレキャストインバート(以下プレキャスト版と呼ぶ)で施工した場合、現場打ちと比較して養生期間を大きく短縮でき、交通への影響も小さくなる。また、プレキャスト版をトンネルセンターで分割することにより、片側毎の施工が可能で、プレキャスト版設置時の全面通行止の規制を 5 時間に短縮でき、なおかつ設置後は直ちに片側交互通行が可能とした。

トンネル補強の断面図を図-1、平面図を図-2 に示す。

本稿では、このプレキャスト版の製造・施工について報告を行う。

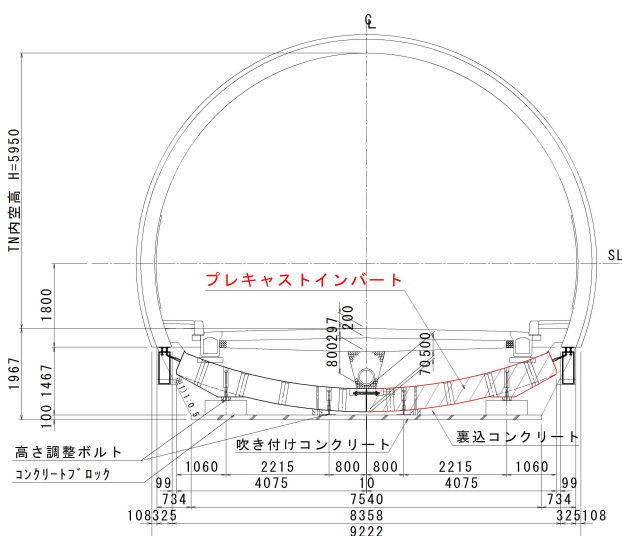


図-1 トンネル補強断面図

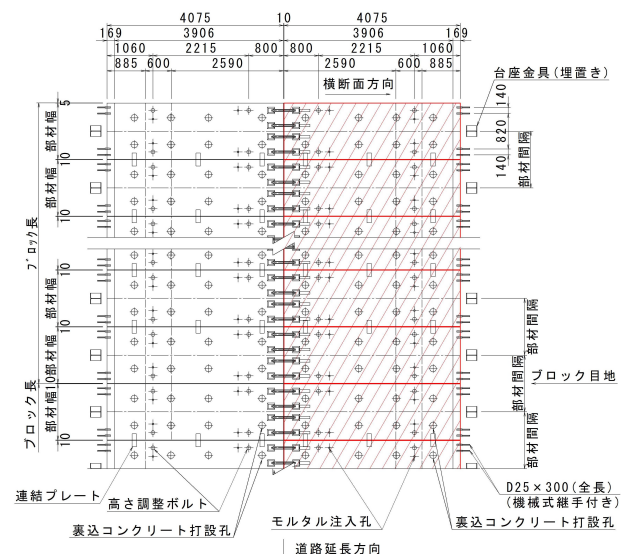


図-2 トンネル補強平面図

2 プレキャスト版

2.1 構造

工場内で仮置き中のプレキャスト版を、写真-1 に示す。

構造は RC 構造とし、主鉄筋 D19 を ctc200mm、配力筋 D16 を ctc300mm に配置し、高さ調整用インサート、連結金具、モルタル注入孔、裏込コンクリート充填用ダクトなどを設置した。

2.2 型枠構造

型枠は、同一形状のプレキャスト版を複数枚製作することから鋼製で製作を行った。

型枠の構造は脱型が容易に行える事を考慮して、側壁・妻枠はボルトによる脱着方式を採用した。鋼製型枠を写真-2 に示す。

2.3 コンクリートの品質

設計基準強度 $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$ とし、スランプ 12cm、粗骨材の最大寸法を 20mm、空気量は $4.5\pm 1.5\%$ に設定した。

2.4 製造工程

型枠清掃後、型枠外にて組み立てた鉄筋を型枠内に配置し、付属物の設置完了後にホッパーにてコンクリートの打設を行った。打設面はプレキャスト版の側面側とし、打設後は一晩蒸気養生し、翌日脱型を行った。上記サイクルの繰り返しにて 1 日 1 枚の製作を行っ



写真-1 プレキャスト版

た。

3 施工概要

施工は片側車線毎で行った。プレキャスト版設置の前工程としては、インバート設置範囲における片側車線分の通行帯幅員を確保できるように、センターラインに沿って H 形鋼の土留めを設置した。その後、片側交互通行で掘削、基礎コンクリートの施工を行った。

前工程終了後、プレキャスト版設置、後打ちコンクリート打設、埋め戻しの繰り返し作業を行った。

プレキャスト版設置は夜間全面通行止めで行い、規制時間は現地状況より 23 時から翌日 4 時までの 5 時間の工程であった。設置完了後は片側交互通行にて交通開放を行った。プレキャスト版同士の縦断方向の連結は金具により行い、目地間には速硬型の無収縮モルタルを充填した。その後、基礎コンクリートとプレキャスト版の空隙部及び、覆工コンクリートとの連結部を早強コンクリートで充填した。上記作業完了後に埋め戻しを行った。

なお、1 日の設置範囲は 60t 吊りラフテレーンクレーンの作業半径から 4 枚 ($L=4.84\text{m}$) とし、運搬車から 1 枚ずつ吊り上げ、そのまま設置する方法で施工を行った。



写真-2 鋼製型枠

4 施工上の課題

施工サイクルタイムを表-1 に示す。またプレキャスト版設置の施工概要図を図-3 に示す。狭隘なトンネル内での施工で、さらに掘削により運搬車がトンネルセンターに配置できないため、クレーンの揚程、旋回など作業範囲の制限が課題となった。

また全面通行止めの規制時間が5時間と短時間であり、プレキャスト版設置を交通規制時間内に終わらせる必要があるため、資機材の選定及び工程の検討も課題となった。加えて裏込め材の施工性及び経済性も課題となった。

表-1 施工サイクルタイム

サイクルタイム	作業内容
	※路盤掘削、ベースコンクリート打設
23:00～	全面通行止め規制開始
	プレキャスト版設置
4:00～	全面通行止め規制解除
8:00～	裏込めコンクリート打設
	埋め戻し

※路盤掘削、ベースコンクリート打設は先行して完了させる

5 課題への対策・対応

トンネル内でのクレーン作業の課題については、プレキャスト版の吊り上げを玉掛けワ

イヤーで行うと、巻きしろ不足となるため、H形鋼を用いた専用水平治具を採用することで解決した。

また、片側車線の掘削により、運搬車がトンネルセンターに配置できないため、揚程の確保が課題であったが、図-3 に示す様に、盤下げを行う事で揚程を確保した。

規制時間内に作業を終わらせるため、所定の計画高にプレキャスト版を迅速に設置できるよう、高さ調整部材を設け、高さ調整ボルトによる調整時間の短縮を図った。

従前の工事においては、プレキャスト版設置の数時間後に、一般車両がその上を通行することから、空隙部に充填する裏込め材は、超速硬小間隙用無収縮グラウトを使用していたが、材料が高価なことが課題であった。本現場では片側車線毎の施工を可能としたため、設置後直ぐの一般車両の通行が無くなり、裏込め材として早強コンクリートの採用を可能とした。

また、高さ調整ボルトが埋め戻し土や翌日のプレキャスト版設置におけるクレーン荷重を負担するが、ボルト周辺を速硬型の無収縮モルタルで充填し固めることで、設置後のプレキャスト版の安定性をより高めた。

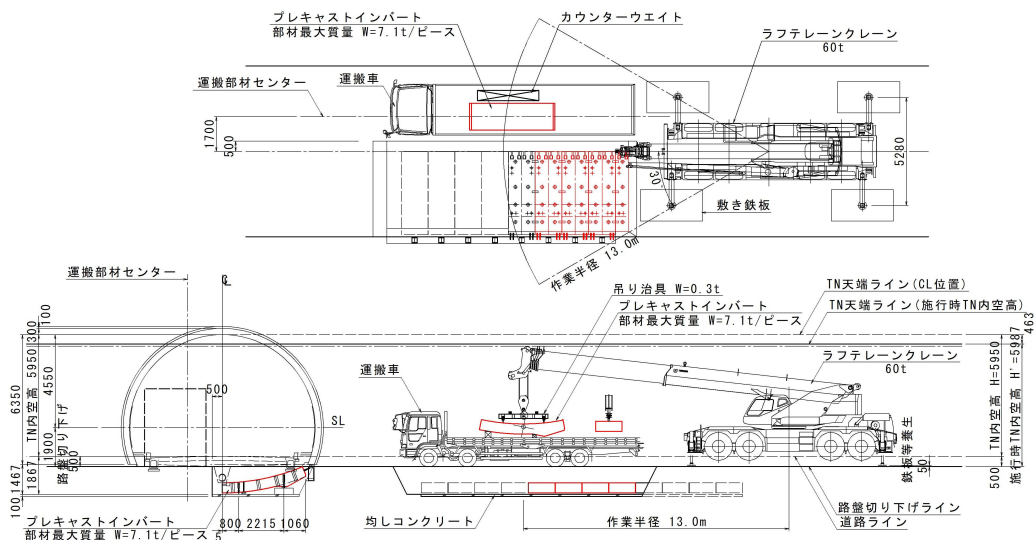


図-3 施工概要図

以上により、全面通行止めの規制時間の短縮と、工事費の縮減を図ることが出来た。

写真-3、写真-4 にプレキャスト版設置状況を示す。

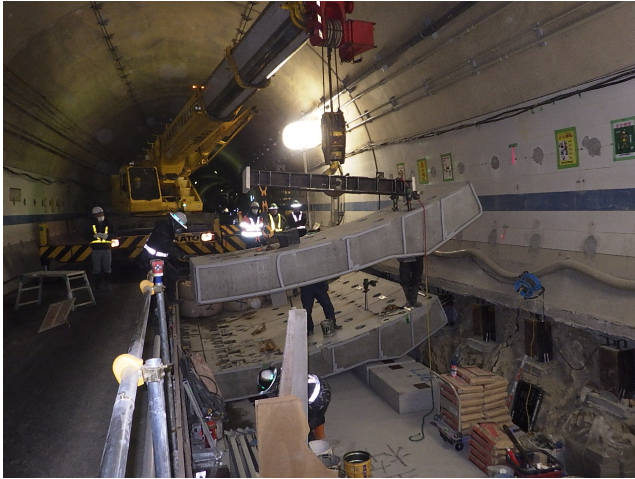


写真-3 プレキャスト版設置状況 1

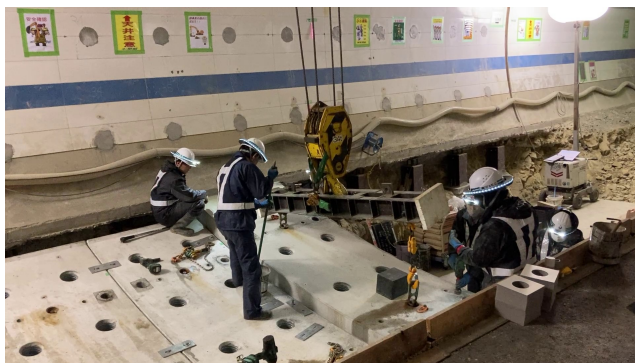


写真-4 プレキャスト版設置状況 2

6 今後の展望

本工事におけるプレキャスト版の架設は、令和5年3月に無事完了した。

ここで、残った課題を以下に示す。

- 1) クレーンの揚程に制限があり、必要に応じて盤下げを行わなければならない。
- 2) クレーンの作業時は、アウトリガーの張り出しにより全面通行止めが必要となる。

これらの課題に対応するために弊社では、専用のインバート架設装置の開発を行っている。インバート専用架設装置の概要を図-4、写真-5 に示す。

本装置は、片持ち梁を本体フレームから張り出し、前後両方向からの施工を可能とした機構を持っており、自走できることが特徴である。前後方向のみで作業を行うため、インバートの設置作業を片側交互通行で行え、またクレーン設置における揚程の課題を改善しているため盤下げが不要となり、施工性の向上が図れる。

狭隘なトンネル内で、全面通行止めの規制時間に制約のあるプレキャスト版の設置工事において、有効な架設装置であり、この装置を使用することで、終日の片側交互通行における施工を目指したいと考えている。

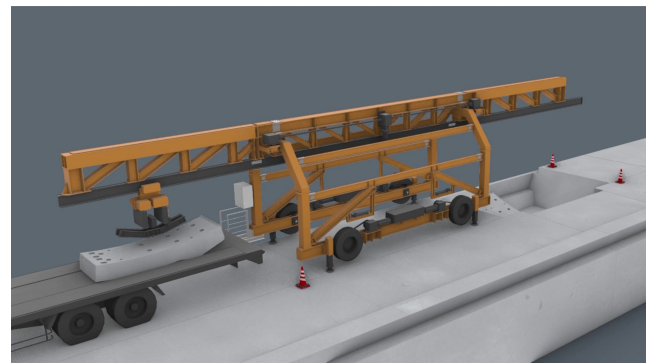


図-4 インバート専用架設装置概要図



写真-5 インバート専用架設装置

7 おわりに

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

災害廃棄物処理計画・処理実行計画作成支援システムの開発

株式会社奥村組技術本部 環境ソリューション室長 ○今井 亮介
環境専門部長 大塚 義一

1 はじめに

令和6年1月1日に石川県能登地方でマグニチュード7.6の地震（以下、「能登半島地震」という。）が発生し、最大震度7の揺れに伴い、建物に大きな被害が発生したほか、輪島市街地では延焼火災、沿岸部では津波被害、山間部では土砂災害が発生した。「令和6年能登半島地震に係る石川県災害廃棄物処理実行計画¹⁾」では、解体棟数は約22,000棟、災害廃棄物発生量は約244万トンと推定されている。また、近年、気候変動に起因し、大規模化している台風や豪雨災害においても、1自治体が処理するには困難な災害廃棄物が発生している。

災害廃棄物の処理・有効活用を早期に進めるためには、災害を想定した平時の事前計画および発災後に速やかに災害廃棄物の処理を実施できる体制整備が重要となる。前者を計画策定したものが災害廃棄物処理計画（以下、「処理計画」という。）であり、後者を発災規模に応じて計画策定したものが災害廃棄物処理実行計画（以下、「処理実行計画」という。）である。しかし、市区町村の処理計画の策定率は72%に留まっている（R4.3時点）。また、激甚化する近年の災害時には、処理実行計画の策定に多くの時間を要し、初動対応が遅れ、処理業務が円滑に進まないなどの課題が山積している。

これらの課題を踏まえて、処理計画の策定率の向上と発災時の処理実行計画の迅速な策定の支援を目的として、災害廃棄物処理計画・処理実行計画作成支援システム（以下、「支援システム」という。）を開発した。²⁾

2 災害廃棄物処理計画・処理実行計画作成支援システムの機能について

2.1 システムの概要

支援システムの開発は、独立行政法人環境再生保全機構の環境研究総合推進費による研究（【1-2004】AI等の活用による災害廃棄物処理プロセスの最適化と処理計画・処理実行計画の作成支援システムの構築、令和2～4年度）にて行われたものである。この研究は名古屋大学（研究代表機関）、京都大学、大阪大学、和歌山大学、明治大学、岩手県、奥村組により共同で行われた。研究の全体像を図-1に示す。

なお、支援システムは試作段階であり、今後、実際に運用を行い、実装する機能の拡張を目指している。

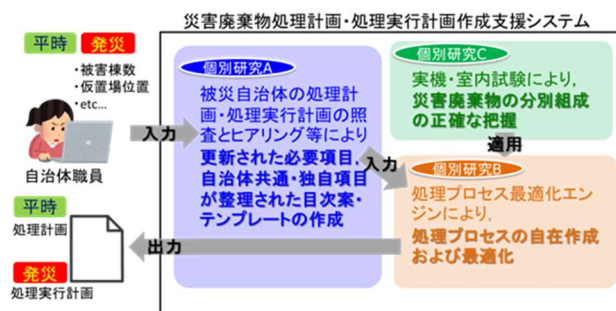


図-1 研究の全体像

支援システムのユーザーインターフェースについて以下に述べる。図-2に開発したシステム全体の流れ（画面遷移図）を示す。処理計画については、平時に作成するなど逼迫した状態ではなく、また自治体に依らない共通項目が多いことから、サンプルテンプレートを作成し、自治体独自の項目を修正できるものとした。一方、災害直後に逼迫した状況で作成する処理実

行計画においては、システムによる支援が重要であることを自治体ヒアリングからも確認した。そこで、処理計画はシステムからテンプレートをダウンロードすることとし、処理実行計画の作成について注力して開発を進めた。²⁾

2. 2 処理計画作成支援システム

災害廃棄物処理計画については、環境省が平成 31 年に作成した市町村災害廃棄物処理計画策定ワークシート（案）³⁾を基準に据え、被災経験のある 20 自治体が被災後に改訂した処理計画を参考に、自治体に依らない共通項目、自治体に応じて変更する独自項目を整理、また追加すべき必要項目を抽出し、目次案（章立て構成）とテンプレートを作成した。災害時の迅速な対応のためには、平時の準備が重要であることから、その点を強調した構成になっている。

なお、作成の際、被災経験のある 5 自治体にヒアリングし、意見を参考にしている。²⁾

2. 3 処理実行計画作成支援システム

処理実行計画作成支援システムの機能について、以下の①～⑥に示す。

① 作成済の計画を確認・編集する機能

処理実行計画一覧画面で、新規作成や、作成途中の処理実行計画を閲覧・編集することができる。また、被災時にシステムで作成した過去の災害の処理実行計画や、机上訓練で作成した処理実行計画を参考にして計画を作成できる。

② 災害種別サンプルの閲覧と利用

地震、水害、高潮などの災害種別に応じた処理実行計画のサンプルを閲覧・利用できる。

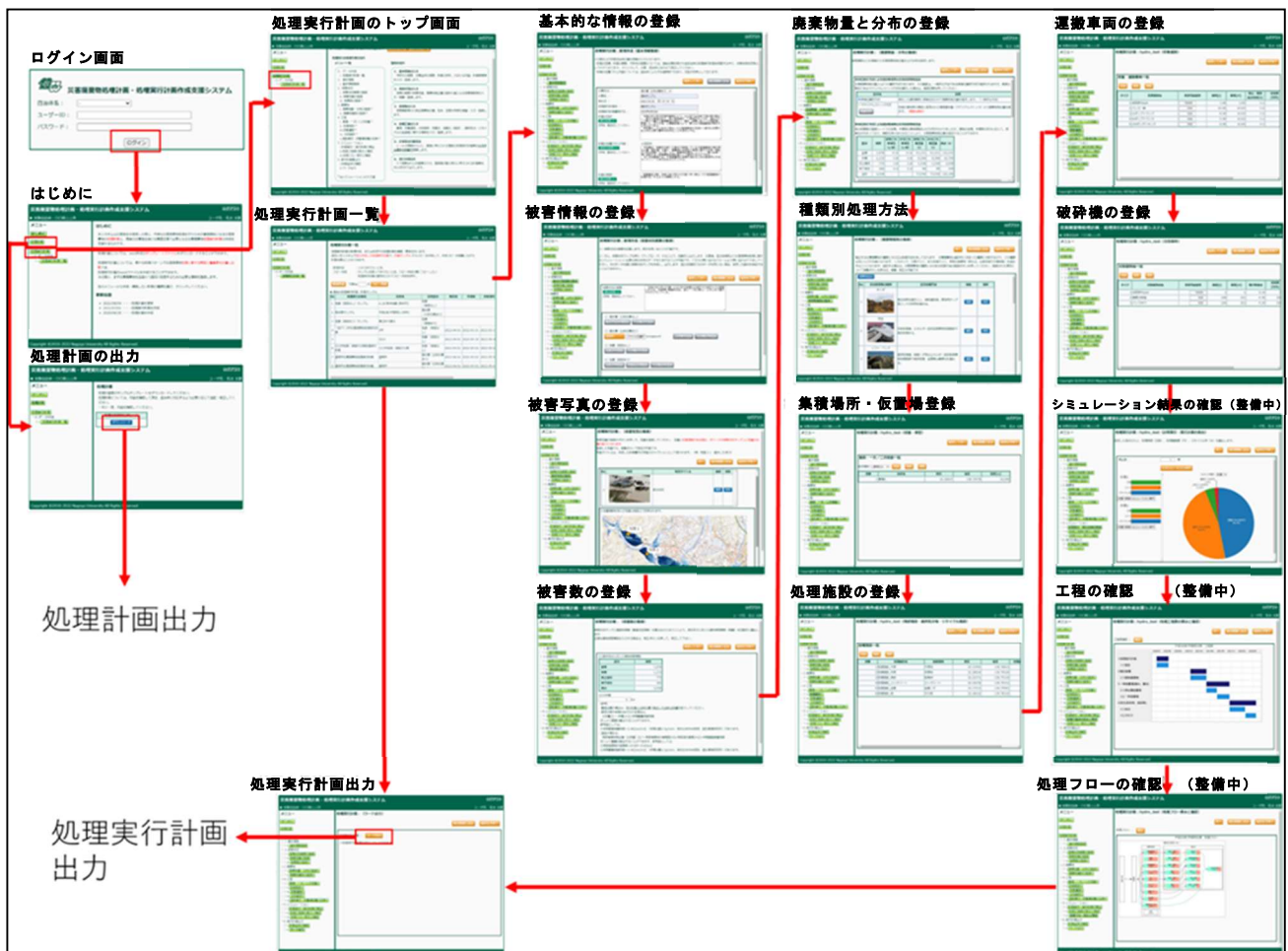


図-2 システム全体の流れ（画面遷移図）

③ 処理実行計画書の基本情報の登録

処理実行計画書の基本的な情報（災害の情報、処理目的、期間、位置づけ、自治体の説明など）を登録できる。また、計画目的や位置づけなどには定型文があり、これに修正を加えて説明文などを作成することができる。

④ 被害状況の概要を登録する機能

被害状況の登録は GIS データをクラウド上にアップすることで実装した。後述する災害廃棄物発生量の早期推計システム（以下、「推計システム」という。）との連携により、被害状況の迅速な数量計算が可能となる。現状では風水害の時のみ自動で、浸水深のデータより、建物被害棟数や災害廃棄物の発生量と分布を自動的に計算することができる。

⑤ 災害廃棄物処理に関する情報の登録

災害廃棄物の種類や量・写真、集積場所・一次仮置場・二次仮置場・廃棄物の処理施設などの情報を登録できる。

⑥ 災害廃棄物処理プロセスを複数示す機能

多目的遺伝的アルゴリズムを用いて、処理期間や費用などを最適化した複数の災害廃棄物の処理プロセス案を示すことができる。²⁾

2. 4 災害廃棄物の発生量・組成・発生場所の推計システムとの連携

推計システムの風水害における計算手順を以下の①～④に示す。

- ① 浸水深マップ（国土地理院発行）と建物 GIS ポイントデータを重ね合わせ、既設建物と浸水域の関係を算出。
- ② 浸水深と建物の全壊・半壊・床上浸水・床下浸水の関係から被災レベルを判定。
- ③ 被災レベルに基づいて災害廃棄物の発生原単位より、各組成種別廃棄物発生量を推計。
- ④ 大字または 5 次メッシュ（概ね 250m 四方メッシュ）ごとに災害廃棄物の発生量を集

約し、マップ形式および表形式で出力。

推計システムを用いて、令和元年東日本台風における長野市の災害廃棄物の発生量と空間分布を推計し、実績値と比較することで妥当性を検討した。長野市の被災の中心地であった長沼地区・豊野地区の災害廃棄物発生量（全種別の総量、土砂を含む）マップを図-3に示す。この図と実際の発生量を比較したところ、若干多めに算出されたものの、実際の傾向を捉えていることが明らかになった。また勝手仮置場ができた場所と災害廃棄物が多く発生したところには強い相関があることがわかった。²⁾

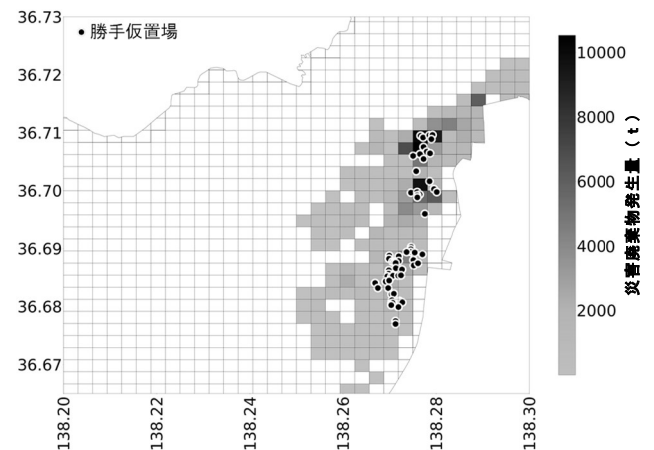


図-3 長野市北東部・5次メッシュごとの災害廃棄物発生推計量と勝手仮置場の位置関係

3 令和6年能登半島地震の強震による災害廃棄物の量・組成・空間分布の検証

支援システムの開発チームは推計システムの地震災害への拡張を進めている。地震災害での災害廃棄物量の推計フローを図-4に示す。また、推計システムを用いた輪島市、志賀町、能登町の全壊・半壊の被災棟数の推計値、2月29日公開の石川県処理実行計画¹⁾の推計値、および5月23日に石川県災害対策本部より公開された被害棟数実測値（第134報）⁵⁾の比較を表-1に示す。輪島市の合計棟数は、石川県処理実行計画の推計値と実測値とがほぼ同じになっているが、推計システムでは過小評価してい

る。一方、能登町では、推計システムの推計値は実測値の6割強で過小評価がみられるものの、石川県処理実行計画では約5倍もの過大評価がみられた。このことより、全体の精度としては推計システムの方が高いと推定される。

この推計システムの開発により、災害廃棄物の偏在する地域の特定や、組成を瞬時に把握でき、処理実行計画における仮置き場や処理方法の選定、収集・運搬計画といった処理プロセスの迅速化につながることが可能となる。4)

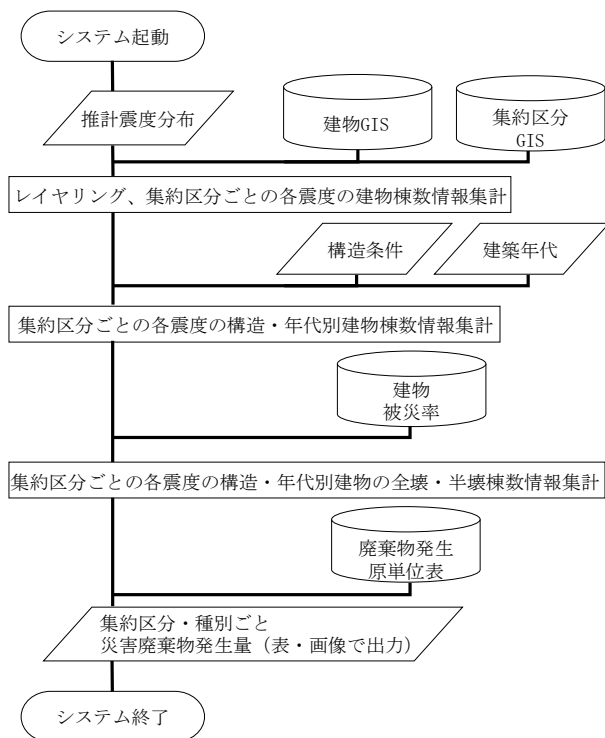


図-4 地震災害での災害廃棄物量推計フロー

表-1 推計システムと石川県処理実行計画での推計値、および実測値の被災レベル別棟数

区分		市町村		
		輪島市	志賀町	能登町
推計システム 推計値 (1/1)	全壊(棟)	2,698	1,904	142
	半壊(棟)	2,445	2,708	668
	計(棟)	5,143	4,612	810
	合計比率[%]	59.29	162.46	65.30
石川県 処理実行計画 推計値 (2/29)	全壊(棟)	2,837	2,037	2,494
	半壊(棟)	5,825	2,962	3,551
	計(棟)	8,662	4,999	6,045
	合計比率[%]	99.86	176.08	487.11
実測値 (5/23)	全壊(棟)	4,007	534	306
	半壊(棟)	4,667	2,305	935
	計(棟)	8,674	2,839	1,241

4. おわりに

支援システムは、研究者グループの考えだけではなく、実際に災害廃棄物処理に携わった地方自治体の方からの声を聞き、実効性のあるものへと修正を加えている。現在、システムは試作段階であり、今後、実際に運用を行うとともに実装する機能の拡張を目指している。

今後は自治体の方の処理計画の策定率向上、発災時の迅速な処理実行計画の策定に支援システムを活用いただけるよう技術の普及展開にも注力し、増々激甚化する自然災害からの復興に貢献していきたい。

最後に、本報告の執筆にご指導をいただいた名古屋大学の中野教授、酒井助教、和歌山大学の田内准教授に感謝の意を申し上げる。

参考文献

- 1) 石川県、「令和6年能登半島地震に係る石川県災害廃棄物処理実行計画」令和6年2月29日
- 2) 環境研究総合推進費終了研究成果報告書(1-2004)、AI等の活用による災害廃棄物処理プロセスの最適化と処理計画・処理実行計画の作成支援システムの構築(JPMEERF20201004)、令和2~4年度
- 3) 環境省、「市町村災害廃棄物処理計画策定ワークシート(案)」、平成31年3月
- 4) 丸山結貴弥・田内裕人・江種伸之、令和6年能登半島地震の強震による災害廃棄物の量・組成・空間分布の予測、第49回土木情報学シンポジウム、令和6年9月26日
- 5) 石川県、被害等の状況について(第134報)[令和6年5月23日15時00分現在]、<<https://www.pref.ishikawa.lg.jp/saigai/202401jishin-tai-sakuhonbu.html#higai>>、(入手令和6年5月27日)

⑤ 環境の保全と創造

環境対策型作業船「越後9000」の脱炭素化に向けた取り組み

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 ○鈴木 敦子
株式会社本間組 土木事業本部 機電部 機電部長 澁谷 雄司
株式会社本間組 土木事業本部 機電部 担当課長 小崎 孝一

1 はじめに

2020年10月、日本政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする「カーボンニュートラル」を目指すことを宣言した。現在、日本は年間で12億トンを超える温室効果ガスを排出しており、この目標を達成するために再生可能エネルギーの導入拡大や省エネルギー技術の革新が求められている¹⁾。

港湾工事においてもCO₂の削減や脱炭素化の実現を図ることは重要な課題となっている。「港湾工事における二酸化炭素排出量算定ガイドライン（施工段階編（試行工事用）令和5年11月）」には、港湾工事におけるCO₂排出量削減の方策として、建設機械・作業船の稼働時における燃料消費量削減に伴う排出量削減に向けて、作業船のハイブリッド化・蓄電システムの導入や水素・アンモニア燃料の使用の検討が進められている²⁾。

当社はD6,000PSポンプ浚渫船「第五越後」を保有し、新潟港をはじめ日本海側主要港湾の泊地・航路維持事業に携わってきた。ポンプ浚渫では、土砂処分場に限られる現況においてあらゆる浚渫工事仕様に対応できるよう、新たに環境対策型作業船「越後9000」を建造した（図-1）。

本報告では、今後、港湾工事におけるCO₂の削減や脱炭素化への対応として期待される環境対策を施した作業船「越後9000」の取り組みについて紹介する。

2 船舶概要

環境対策型作業船「越後9000」（以下「本船」という。）は、船体が全長56.00m、幅20.00m、深さ4.00m、排水トン数が1,980tの規模で専用の中継ポンプ船としては大型となる（表-1）。中継ポンプ船は、ポンプ浚渫船から土砂処分場へ浚渫土砂をポンプ圧送する際、排送に用いられる排砂管の経路中に組み入れ、中継圧送することにより排送距離を延伸させ、安定的に土砂処分場への投入を可能とする船舶である。主機関には9,000PSのディーゼル機関を搭載し、弾性継手および減速機を介して中継ポンプを駆動する。なお、本機関はディーゼル機関に適應される国際海事機関（IMO）のNO_x（窒素酸化物）規制対応型である。



図-1 「越後9000」全景

3 環境への配慮

本船は脱炭素化に向けた取り組みとして、リ

チウムイオン蓄電システムおよび水素発電機を導入し、ディーゼル発電機とのハイブリッド化を推進した。特に、夜間停泊時のCO₂排出量をゼロにする取り組みを紹介する。

3. 1 運転中の余剰電力の蓄電および再利用

従来の船舶では、船内で使用する電力をすべてディーゼル発電機によって賄っており、運転作業中だけでなく夜間停泊時においても電力供給用に常にディーゼル発電機を駆動させるため、発電に伴うCO₂や有害排気ガス（NO_x、SO_x）を24時間排出しているのが現状である。

また、ディーゼル発電機が安定して運転するためには、最低負荷率を維持する必要がある。使用電力が少ない場合でも発電機は最低負荷率を維持して発電を行うため、必要以上の電力（余剰電力）を作り出す。船内では、この余剰電力が常に発生していた。

そこで、本船では夜間停泊時の照明、給水、冷暖房等の生活電力用に、運転作業中のディーゼル発電機（主発電機または補助発電機）から発生する余剰電力を蓄えるリチウムイオン蓄電システムを導入した（図-2）。搭載したリチウムイオン蓄電池の蓄電容量は176kWhであり、一般家庭1日あたりの電力消費量（10.5kWhと想定）の約16日分に相当する。

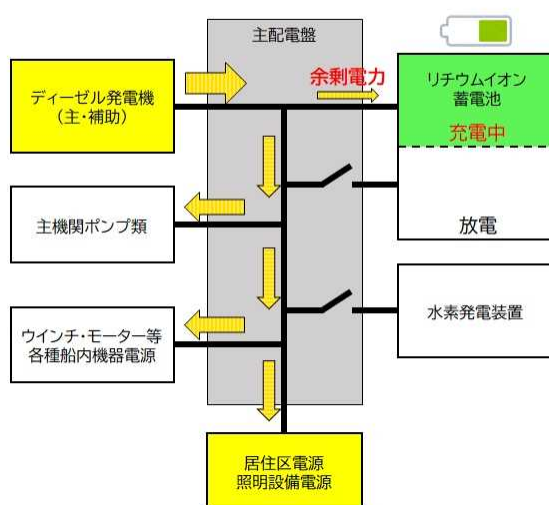
3. 2 水素発電機の導入

リチウムイオン蓄電システムの補助として、FC（燃料電池）モジュール（図-3）を使用した水素発電機を搭載した。FC（燃料電池）は空気中の酸素と水素カードル（図-4）から供給される水素との化学反応により発電するもので、CO₂や有害排気ガス（NO_x、SO_x）を排出せず水のみを排出することから、環境に配慮したクリーンなエネルギー源である。

表-1 「越後9000」主要諸元

【船体主要寸法】		【主機関】 型式12PC2-6V	
全長	56.00 m	定格出力	6,600 kW
長さ	49.80 m	馬力	9,000 PS
幅	20.00 m	【中継ポンプ】 型式KSP-850DH	
深さ	4.00 m	排送距離（細砂）	7.0 km
喫水	2.00 m	排送距離（シルト）	16.0 km
排水トン数	1,980 t	【発電装置】	
【発電装置】		【環境対応設備】	
主発電機	500 kVA	リチウムイオン蓄電システム	176 kWh
補助発電機①	400 kVA	水素燃料発電機 発電能力	60 kW
補助発電機②	125 kVA	低周波除去装置付サイレンサー	

運転作業中 発電機から給電、リチウムイオン蓄電池に充電



夜間停泊時 リチウムイオン蓄電池から給電

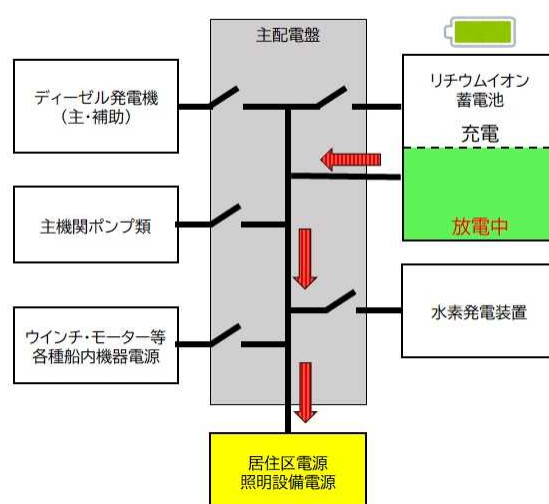


図-2 船内の電力供給模式図

水素発電機により発電した電力は、生活電力に利用できるほか、リチウムイオン蓄電池に蓄電することも可能である。

3. 3 船内電力の可視化

船内の発電状況および電力使用状況をリアルタイムに把握するために「電力見える化システム」を導入した(図-5)。このシステムは、ディーゼル発電機(主発電機, 補助発電機)および水素発電機の運転状況やリチウムイオン蓄電池の充電・放電状況, リチウムイオン蓄電池残量, 現在の消費電力(船内負荷)などの情報をリアルタイムにグラフや数値で可視化し, 1つの管理画面でまとめて確認できる。このシステムにより, いつ, どれだけ電力を消費しているかを把握することで, 電力供給源のディーゼル発電機とリチウムイオン蓄電池, 水素発電機を適切に切り替え, 効率的なエネルギー管理を行っている。

4 環境負荷低減効果

夜間停泊時の生活電力をすべてリチウムイオン蓄電池に溜めた電力で賄った場合のCO₂削減量を算出した。

【算出条件】

補助発電機②(125kVA, 50%負荷)の使用時と仮定

- ・使用時間: 13時間/日
- ・燃料使用量(軽油): 15.4ℓ/時間³⁾
- ・稼働日数: 25日/月
- ・燃料の使用に関する排出係数(液体化石燃料—軽油): 2.62tCO₂/kℓ⁴⁾

上記の算出条件より1か月に消費する軽油量を計算すると約5,000ℓとなる。これにより, 補助発電機で夜間停泊時の生活電力をすべて賄った場合, 1か月あたり約13.1tのCO₂排出量となる。したがって, リチウムイオン蓄電池に溜めた余剰電力を夜間停泊時に使用することで, 1年間で約157.2tのCO₂排出を削減できる。



図-3 FCモジュール



図-4 水素カード



図-5 「電力見える化システム」画面

このリチウムイオン蓄電池に溜めた余剰電力分で削減できるCO₂排出量約157.2tCO₂/年を樹木の吸収により削減しようとした場合, どのくらいの森林面積が必要になるかを算出した。森林の条件を「樹齢40年の杉の木が1ha

あたり 1,000 本生えている」と仮定すると、この森林が 1 年間に吸収できる CO₂ 量は約 8.8t/ha⁵⁾ である。これより、本船がリチウムイオン蓄電池に溜めた余剰電力で削減できる CO₂ 排出量約 157.2tCO₂/年を森林で吸収するためには、約 17.9ha (17,900 本) の森林が必要となる (図-6)。

以上の結果から、夜間停泊時の生活電力をリチウムイオン蓄電池に溜めた余剰電力で賄う取り組みは、CO₂ 排出の削減に大変有効であると言える。

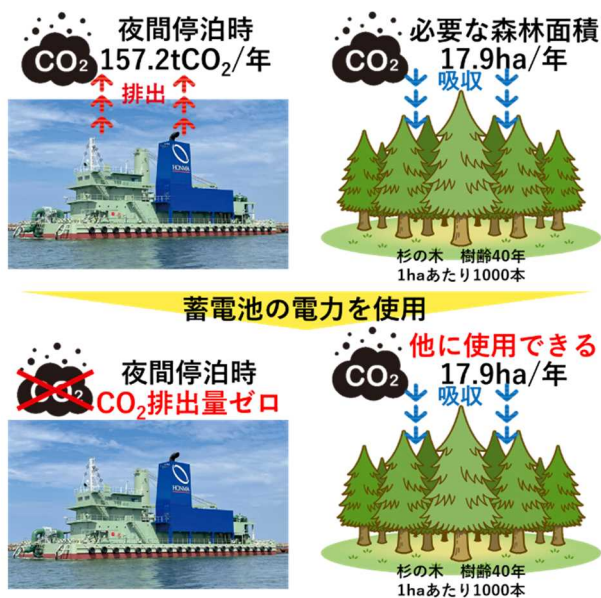


図-6 環境負荷低減効果

5 おわりに

本報告では、今後、港湾工事における CO₂ の削減や脱炭素化への対応として期待される環境対策型作業船「越後9000」の取り組みを紹介した。

2050年カーボンニュートラルの実現を図ることは社会全体の重要な課題となっており、建設業界においても、港湾工事で使用する作業船舶のハイブリット化や蓄電システムの導入、水素・アンモニア燃料の使用など、CO₂削減・脱炭素化に向けた取り組みが加速するものと考

える。

今後も、自社作業船舶の CO₂ 排出量削減に向け、太陽光や風力等の再生可能エネルギーの活用やハイブリット化による船舶の電化等の方策を検討し、港湾工事における環境負荷の軽減や脱炭素化への取り組みを進めてまいりたい。

参考文献

- 1) 環境省. “国の取組”. 脱炭素ポータル.
https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/road-to-carbon-neutral/,
(参照 2024-08-23)
- 2) 国土交通省. “第7回 港湾工事における二酸化炭素排出量削減に向けた検討WG”.
https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk5_000046.html, (参照 2024-08-23)
- 3) デンヨー. “ディーゼルエンジン発電機 DC A シリーズ (カタログ)”. p18
- 4) 環境省. “算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧”. 温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度.
<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc>, (参照 2024-08-23)
- 5) 農林水産省林野庁. “よくある質問：森林吸収量はどのように算定するのですか”.
https://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/ondanka/con_5.html#Q1%20%E6%A3%AE%E6%9E%97%E5%90%B8%E5%8F%8E%E9%87%8F%E3%81%AF%E3%81%A9%E3%81%AE%E3%82%88%E3%81%86%E3%81%AB%E7%AE%97%E5%AE%9A%E3%81%99%E3%82%8B%E3%81%AE%E3%81%A7%E3%81%99%E3%81%8B, (参照 2024-08-23)

舗装性能向上に資する廃PETの有効活用について

福田道路株式会社 技術研究所 研究開発課長代理 渡辺 直利
新潟本店 技術課長 吉井 哲男
本社 技術部長 ○粕谷 一明

1 はじめに

国際的な課題として、環境問題は喫緊の課題であり、気候変動や森林破壊、プラスチック汚染等に国レベルで対応している。なかでもプラスチックは軽量で耐久性が高く、安価であることから広く使用されているが、その耐久性が故に自然界では分解されにくく、マイクロプラスチックとして長期間残存し、海洋汚染や誤飲による生体系への影響等の深刻な問題となっている。対策として、使い捨てプラスチック製品の使用制限や、廃棄プラスチックの適切な回収と原材料としてのリサイクル等に取り組んでいる。

一方、道路舗装は我々の生活に欠かせない身近なインフラのひとつであり、時代に応じて様々な性能が要求されてきた。古くは耐久性として、上層から下層にかけて適切な荷重分散を図り、車両輪荷重を安定して支持する性能が挙げられ、大型車両の増加に伴い、わだち掘れが深刻化すると、わだち掘れが起きにくい、耐塑性変形性が要求された。また、車社会の到来により、交通量が増大すると交通事故も増加し、安全な交通の確保として、路面に水が溜まらない路面排水性能が要求され、それに伴い舗装には高い

耐水性能が求められた。最近では、舗装路面の温度上昇抑制性能や発電性能などを有する舗装も施工されている。また、環境面で考えると他産業における発生材の有効利用も期待されており、多様なニーズに対応することが求められている。

本報では、廃プラスチックに含まれる廃PET（ポリエチレンテレフタレート）を舗装用改質材としてマテリアルリサイクルし、それにより得られた舗装性能の向上と現場への適応事例について報告する。

2 舗装用改質材

本検討に用いた舗装用改質材は、粉碎廃PETを原料に特殊添加剤やアルコール、脂肪酸等を添加し化学処理したポリエステルである。舗装用改質材の仕様を表-1に、製造過程を図-1に示す。

PETの融点は250℃以上であるが、化学処理した改質材の融点は150℃以下となっており、アスファルトに溶解し易くなっている。ポリエステル系改質材をアスファルト混合物に添加することで、アスファルトと骨材の親和性が向上し、変形抵抗性やはく離抵抗性の向上が期待できる。



図-1 舗装用改質材の製造過程

表-1 舗装用改質材の仕様

項目	性状
組成	ポリエステル(原料の約40%に廃PETを使用)
外観	粉末固体
色	白色～茶褐色
密度	1.2g/cm ³
軟化点	約110℃

3 室内による性能評価

舗装用改質材による性能の変化を室内試験にて確認した。試験に用いた混合物は密粒度アスコン(13)であり、ストレートアスファルトをベースにした配合(配合①)とその再生材入りの配合(配合②)、及び改質Ⅱ型をベースにした配合(配合③)の3配合である。さらに、各々の配合に対して舗装用改質材を添加した配合としない配合の計6種類の配合を比較検討した。なお、舗装用添加剤の添加量は、これまでの実績を参考に、ストレートアスファルトをベースにした配合にはアスファルトに対して外比で6%を、改質Ⅱ型ベースの配合には20%を添加している。

試験結果を表-2に示す。

表-2 性能評価試験結果

項目	配合①		配合②		配合③	
	0%	6%	0%	6%	0%	20%
使用アスファルト	St.As.60-80				改質Ⅱ型	
改質材の添加	0%	6%	0%	6%	0%	20%
再生材添加量	0%		40%		0%	
密度(g/cm ³)	2.378	2.374	2.375	2.377	2.377	2.320
安定度(kN)	7.98	11.15	9.86	11.81	11.00	29.88
フロー(1/100cm)	31	31	35	32	37	28
残留安定度(%)	94.4	91.1	93.5	94.0	94.5	94.2
動的安定度(回/mm)	543	1,575	1,465	5,250	9,000	21,000
はく離面積率(%)	20.9	0	1.8	0	0	0
油浸残留率(%)	—	—	—	—	37.0	95.5

3.1 マーシャル安定度試験結果

マーシャル安定度試験結果として安定度とフローの結果を図-2に示す。

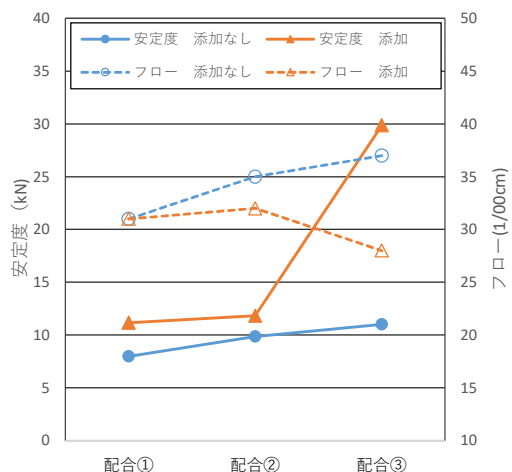


図-2 マーシャル安定度試験結果

一般的に、安定度はストアスペースより改質Ⅱ型ベースのほうが高くなる傾向をもち、本検討でも同様の傾向がみられる。(青実線参照)舗装用改質材を添加することで、安定度の増加が確認され、改質Ⅱ型に関しては、大きく増加することが確認された。(橙実線参照)

フロー値も改質Ⅱ型ベースが大きくなる傾向を示すが(青点線参照)、舗装用改質材をいれると大きく減少する結果であった。(橙実線参照)混合物は、固く変形し難い性状に変化する。

3.2 残留安定度試験結果

残留安定度試験結果を図-3に示す。

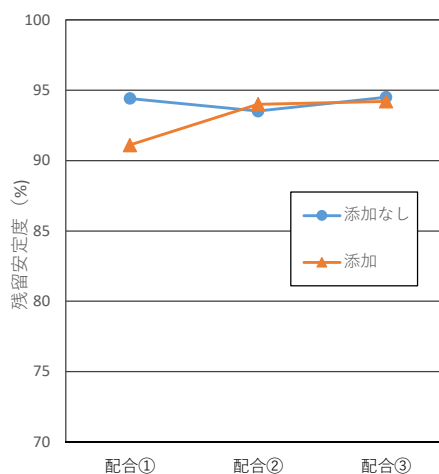


図-3 残留安定度試験結果

残留安定度は、耐水性を評価する試験であり、水の影響を受けやすい場合は75%以上であることが望ましいとされている。本検討結果では、いずれも75%以上確認されており、使用アスファルトの種別や舗装用改質材の有無に影響されない結果である。

3.3 ホイールトラッキング試験結果

ホイールトラッキング試験結果を図-4に示す。

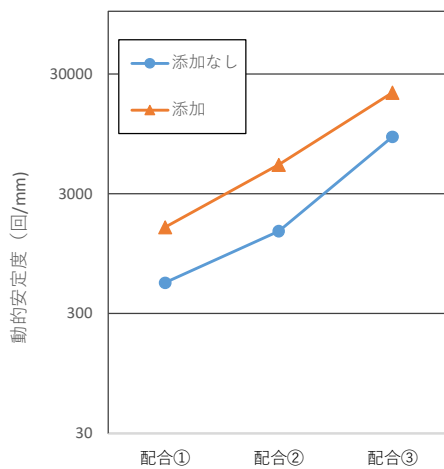


図-4 ホイールトラッキング試験結果

ホイールトラッキング試験は、耐流動性を評価する試験であり、改質Ⅱ型ベースの配合は動的安定度で3,000回/mm以上と規定されている。本検討結果でも、改質Ⅱ型は3,000回/mm以上が確認されている(青線参照)。舗装用改質材を添加することで、各配合とも動的安定度の増加が確認され、改質Ⅱ型に関しては、20,000回/mmを超える非常に大きな結果であり、大型車両が著しく多い箇所である超重交通に対応できる可能性を示す結果である。

3.4 水浸ホイールトラッキング試験及び油浸試験結果

耐水性の評価として、水浸ホイールトラッキング試験を実施し、剥離面積にて骨材の剥離抵

抗性を評価した。なお、配合③の改質Ⅱ型ベースでは、無添加でも剥離しないことから、さらに過酷な条件である油浸試験により耐油性を評価した。試験結果を図-5に示す。

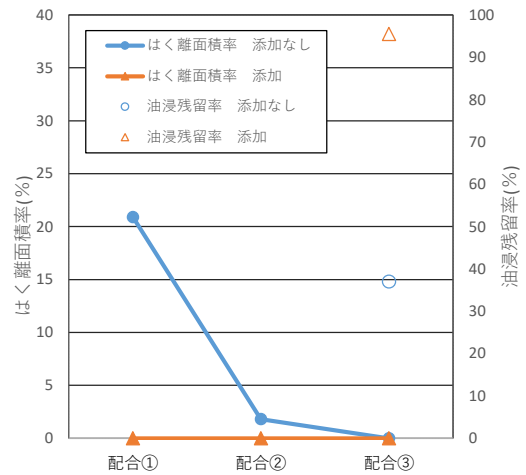


図-5 水浸ホイールトラッキング試験及び油浸試験結果

水浸ホイールトラッキング試験において、配合①では舗装用改質材を添加することで20.9%から0%と剥離面積が大きく低下しており、再生材入りの配合②でも同様の結果が得られた。

油浸試験は油浸残留率で評価し、60℃の灯油48h時間浸し、油浸前の質量に対する油浸後の質量比で算出する。舗装用改質材を添加することで、灯油で崩壊した試験体がほぼ原形をとどめており、耐油性能が向上した事が確認できる。

(写真-1参照)



写真-1 油浸試験結果

4 北陸地区での施工事例

4. 1 除雪基地構内での施工事例

工事名；令和4・5年度国府交差点外改良工事
発注者；北陸地方整備局 高田河川国道事務所
場 所；新潟県上越市大潟区渋柿浜
面 積；約4,500m²

除雪基地構内で、高い耐久性を期待して改質Ⅱ型ベースを施工した。現場は大型の除雪車が冬季に頻繁に通行し、チェーンによる路面損傷が懸念されるため耐久性が要求された。



写真-2 除雪基地構内での施工事例

4. 2 消雪パイプ区間での施工事例

工事名；ふるさと道第2号市道旭町上町線ほか
舗装工事
発注者；南魚沼市建設部建設課
場 所；新潟県南魚沼市六日町
面 積；約1,700m²

消雪パイプが設置している車道で、耐水性を期待してストアスペースの再生材入りを施工した。同時に、廃PETを有効活用した環境負荷低減も期待している。現場は、積雪時に消雪パイプにより散水が行われるため、再生密粒度アスコン(新20FH)改質Ⅰ型で設計されていたが、耐水性の高いストアスペース(再生材入)の舗装に変更した。



写真-3 消雪パイプ区間での施工事例

5 まとめ

環境にやさしい廃PETを活用した舗装改質材を用いる事で、舗装性能の向上が室内試験により認められた。確認された事項を以下に示す。

○ストアスペース

(当社工法名；ファインPET-Eco)

向上する性能；耐水性

適用箇所の例；消雪パイプ区間、橋梁部

○改質Ⅱ型ベース

(当社工法名；ファインPET-S)

向上する性能；耐塑性変形輪数、耐油性

適用箇所の例；超重交通路線、トラックヤード、
半たわみ性舗装の代替

適用箇所に関しては、現場条件や交通条件で様々な性能が要求されると考えられ、舗装性能に応じてさらなる適用箇所の拡大も考えられる。

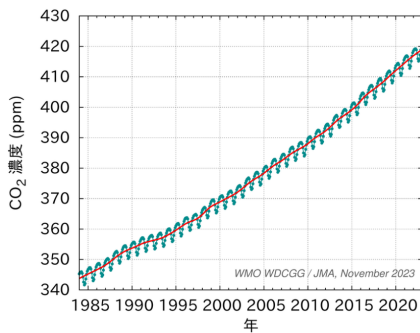
舗装は再資源化率が非常に高く、スラグをはじめとする他産業から発生材も積極的に活用してきた経緯もあり、他産業と比較して環境面でもかなり貢献している。本検討が更なる環境負荷の低減につながり、同時に舗装性能の向上により、舗装インフラの効率的な運用の一助になることを期待する。

未利用バイオマスを有効活用することで炭素低減できる舗装技術

日本道路(株) 総合企画部 川村 修

1 はじめに

近年、猛暑、台風、線状降水帯、ゲリラ豪雨等が頻発しているが、これらの異常気象は、地球の温暖化が原因とされている。大気中のCO₂の濃度は年々増加しており、地球温暖化が深刻化している(図-1)。



(青線:月平均濃度、赤線:季節変動を除去した濃度)

図-1 大気中のCO₂世界平均濃度の推移 ※1

2050年のカーボンニュートラルに向けて、産業や人間の活動により排出されるプラスのCO₂を削減するとともに、森林の保全、植林等による、マイナスのCO₂の効果も重要であり、トータルでゼロになるよう取り組みを進めているところである。(図-2 参照)。

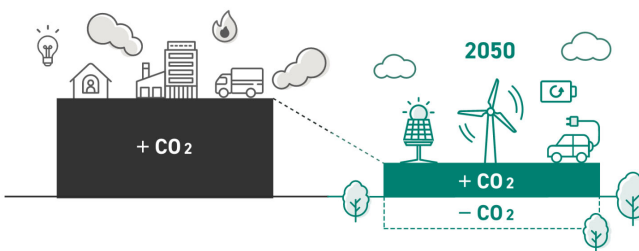


図-2 カーボンニュートラルのイメージ※2

日本の国土の約7割が森林で占められており、森林面積はほとんど変わっていない状況にあるにもかかわらず、図-3に示す通り、熟した樹木を放置したことで森林の老齢化の進行と、林業の衰退もあり、全森林が吸収する温室効果ガスの量は、減少傾向を示している(図-3)。

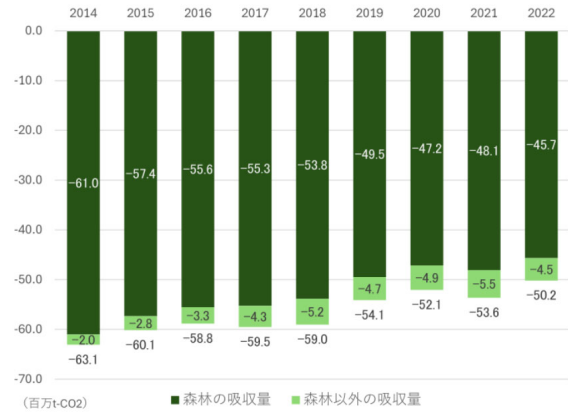


図-3 森林による温室効果ガス吸収量※3

森林資材の循環利用のイメージを図-4に示す。森林は、「植林」→「育成」→「間伐」→「伐採」→「利用」→「植林」と、適正に管理して循環させるとことで維持される。



図-4 森林資源の循環利用のイメージ

また、炭素固定の面では、以下に示す取り組みが重要となる。

- ・ 間伐材等の不要な木材を利用せず、燃やして大気にCO₂として戻さない
- ・ 木材として長期にCO₂を固定する
- ・ 炭化等による高濃度に炭素吸収する

本報告では、舗装分野におけるカーボンニュートラルに向けて、未利用バイオマスを活用した舗装技術について紹介する。

2 未利用バイオマスを活用した舗装技術

(その1:木煉)

「木煉」は、炭素を吸収した間伐材を細かく破碎した木質チップと特殊添加剤を混ぜ合わせ、高圧なプレスにより締め固めた木質成型ブロックである(写真-1)。



写真-1 間伐材のブロック化(木煉)

大型トラックや航空機、工場などが排出するCO₂に関しては、様々な削減の取り組みが行われているが、限界がある。図-5に示す通り、木煉は、大気中に浮かぶ同じ量のCO₂を樹木がバイオマスとして回収し、舗装用のブロックとして固めて利用することで、CO₂を長期間貯蔵し続けることが可能となる。

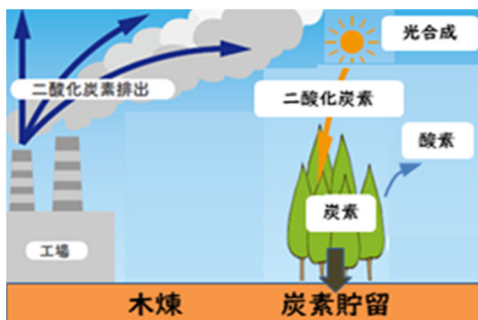


図-5 木煉の炭素貯留のイメージ

2.1 特長

2.1.1 炭素低減

100m²分の木煉を製造する時に、1,165 kgのCO₂が排出される。これに対し、原材料の木質チップ材のCO₂吸収量が2,878 kgと、排出量より上回ることから、木煉はカーボンネガティブな舗装材である(図-6)。工場等で削減しきれないCO₂排出量をオフセットすることができる、ネガティブエミッション技術である。

2.1.2 温度低減

アスファルト及びコンクリートは、表面温度が高くなるだけではなく、熱伝導率が高いため内部にまで多くの

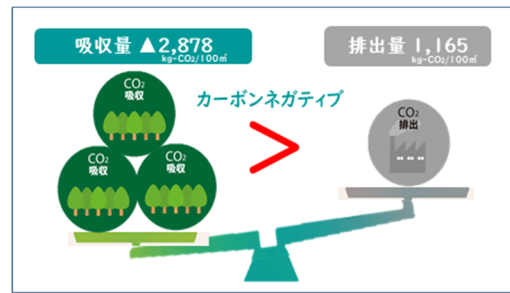


図-6 木煉の炭素固定イメージ

熱を蓄えます。木煉を夏期に屋外の舗装上に置いた時の温度分布を写真-2に示します。アスファルト舗装は、表面温度の上昇に伴い内部(側面)の温度の上昇もみられますが、木煉は熱伝導率がコンクリートの約1/10と断熱性に優れているため、表面の熱をブロック内部(側面)にまで伝えません。

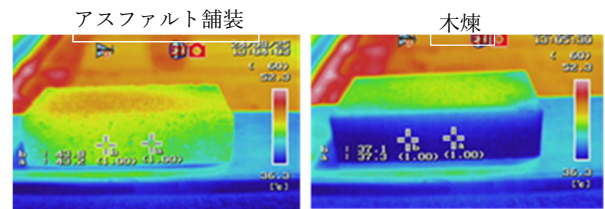


写真-2 舗装体の温度変化

コンクリート面の温度上昇の低減が図れ、夏期のビルの屋上に設置した場合、階下の室温を下げ、冷暖エネルギーの削減によるCO₂削減を図るとともに、ヒートアイランド抑制効果が期待できる(写真-3)。



写真-3 屋上に木煉を設置した事例

2.1.3 歩きやすさ

木煉の弾力性をGB係数により衝撃吸収性で評価した。図-7に示す通り、木煉のGB係数はコンクリートブロックに対して、約半分と衝撃吸収性が高く、足や膝への負担が軽減され、歩行性が向上するとともに、転倒時によるケガを軽減できる(写真-4)。

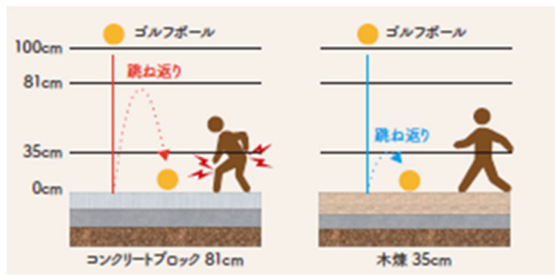


図-7 弾力性試験(GB 係数)



写真-4 木煉の公園での施工事例

2.1.4 木煉の強度

木煉の強度を、曲げ試験で評価した。試験はインターロッキングブロックの曲げ強度試験法に準拠して実施した。木チップを使用した標準仕様の木煉の結果と、2.2で述べる樹皮と竹の強度も併せて示す(図-8)。インターロッキングブロックの基準値である歩道用3MPa以上、車道用5MPa以上に比べて、木煉の強度は十分強度が得られている。

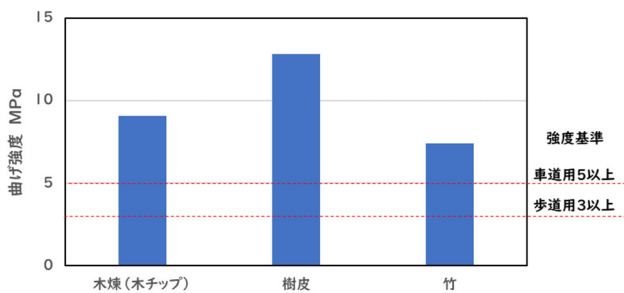


図-8 木煉の曲げ試験結果

2.2 未利用バイオマスのブロック化の事例

2.2.1 樹皮

木材工場で発生する樹皮は、一般的に燃料や堆肥として利用されるが、処理費が負担となっている。写真-5は、樹皮を細かく破碎して、ブロック化し有効活用した事例である。



写真-5 樹皮のブロック化の事例

2.2.2 竹

竹は他の木より成長が早いため、多くのCO₂を吸収するが、近年、竹林の利用価値は低く、放置が増えている。写真-6は、竹材を木煉として有効活用した事例である。



写真-6 竹材のブロック化の事例

3 未利用バイオマスを活用した舗装技術

(その2: バイオ炭アスコン)

バイオ炭アスコンは、製材所から出るおが粉を炭化した材料を舗装材に用いた技術である。

おが粉を限りなく無酸素状態で800℃の高温で炭化すると、空気の流入を最小限とすることで、完全に燃焼することを抑えることが可能となる。これにより炭化温度の上昇と共に揮発分が大きく減少し、炭素濃度が50%から90%へと大幅に増加しバイオ炭となる(図-9)。

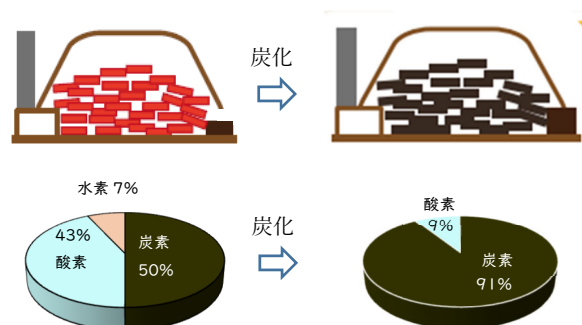


図-9 上図:炭化のイメージ、下図:炭素濃度の変化

この高濃度に炭素吸収したバイオ炭を、アスファルト混合物の砂の代替で使用したものがバイオ炭アスコンである。バイオ炭は、炭素が高温下で結合し安定な結晶構造が形成されるので、長期間にわたって舗装内に炭素を保持することができる。

3.1 特長

3.1.1 炭素低減

バイオ炭アスコン 1t を製造する時の CO₂ 排出量を図-10 に示す。一般的にアスファルト混合物の CO₂ 排出量が 56.2kg に対し、中温化技術の排出量は 7.3% 程度の削減効果であり、バイオ炭アスコンは、バイオ炭の添加率が 3.0% の場合、排出量と吸収量が均衡した 100% 削減が可能となる。「アスファルト混合物製造時の排出量」と「添加したバイオ炭の吸収量」がオフセットされ「カーボンニュートラル」なアスファルト混合物といえる(図-11)。

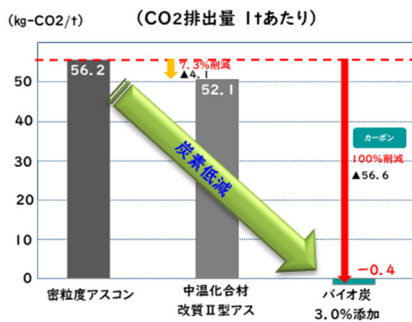


図-10 バイオ炭アスコンの CO₂ 削減効果

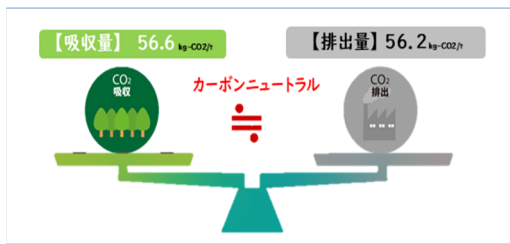


図-11 バイオ炭アスコンの炭素固定のイメージ

CO₂ 排出量を 1kg 削減するために必要なコストは、バイオ炭アスコンは中温化合物のわずか 10% 程度に抑えられる(図-12)。効果的に CO₂ 排出量の削減が可能な舗装材料である。

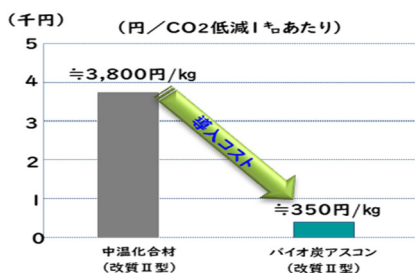


図-12 バイオ炭の CO₂ 排出量削減コスト

3.1.2 バイオ炭アスコンの性状

バイオ炭アスコンの耐流動性について、ホイールトラック試験で評価した。図-13 に示す通り、バイオ炭を使用することで、動的安定度の増加がみられ、5,000 回/mm 以上と高い耐流動性を示している。

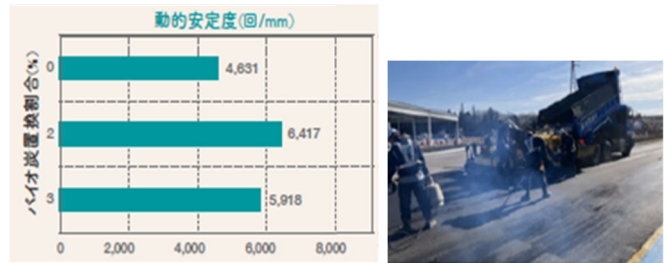


図-13 バイオ炭の耐流動性 写真-7 施工状況

3.1.2 施工性

舗設時にも特殊な機材・重機を使用せず、通常の機械編成で施工可能である(写真-7)。

4 まとめ

森林を伐採した後に、植林して将来に向けた木質資源を次の世代のために育てることが大切である。新たに幼木の植林を行い、その木が成長に伴い光合成をすることで CO₂ の吸収能力が高まる。そして成長した後に資源(木材)へと形を変えて利用され、森林ではまた植林を行う。このサイクルを続けることで、持続可能な地球環境の創造につながると考えられる(写真-8)

伐採した後には、森林資源の循環利用を高めながら、CO₂ を固定した材料を公共空間にできるだけ多く利用することで、大気中の CO₂ 固定・削減に貢献するとともに、産地である森林と都市空間の繋がりの強化が図れます。



写真-8 植林活動

[参考文献]

- ※1 気象庁ホームページから引用
- ※2 環境省ホームページから引用
- ※3 国立研究開発法人国立環境研究所「2022 年度の温室効果ガス吸収・排出量」

建設発生土を活用した地盤改良工法「リソイルPro工法」

株式会社不動テトラ 北陸支店地盤研究室
北陸支店地盤研究室

○NGUYEN VAN THINH
田口 雄一

1 はじめに

近年の社会の重要な地盤環境技術課題のひとつに、土木・建築基礎掘削、トンネルなどの建設時に排出される建設発生土、コンクリート殻、石炭火力発電所から発生する石炭灰などの処理問題がある。また、締固め砂杭工法に必要な透水性の良い自然砂の量に限界があり、材料の採取に際して環境への負荷が大きくなってしまふことが懸念される。この背景から、建設発生土類を砂杭の中詰め代替材料として利用する静的締固め砂杭工法（以下、「リソイルPro工法」という。）を開発した。本稿では、リソイルPro工法の特長と地盤改良効果について紹介する。

2 静的締固め砂杭工法の概要

締固め砂杭工法は、軟弱地盤に対して良質な砂・碎石またはリサイクル材（再生碎石、転炉スラグ、建設発生土など）による締固め杭を造成することによって、密度を増大させて液状化抵抗を高める地盤改良工法である。当初の締固め砂杭工法の代表的なサンドコンパクションパイル工法（SCP工法）は、施工に振動機を用いている。これまでに多くの使用実績を積み重ねてきており、特にSCP工法により改良された砂質地盤の液状化抵抗は、1995年兵庫県南部地震等の大規模な地震において改良効果が実証された。

その後、市街地や既設構造物に近接した地盤改良の施工が求められるケースが急増し、低振動・低騒音タイプのSCP工法として、静的締固め砂杭工法（SAVEコンポーザー工法）が開発された。静的締固め砂杭工法は従来のSCP工法と同等

の効果が確認され、多数の実績を積み重ねており、2011年東北地方太平洋沖地震等でその効果が実証されている。写真-1に静的締固め砂杭工法の施工機を、図-1に振動・騒音の距離減衰を示す。



写真-1 静的締固め砂杭工法施工機

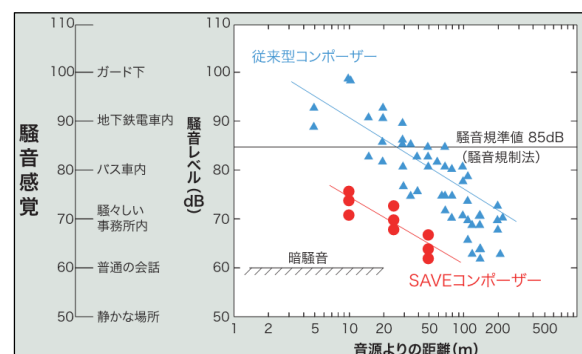
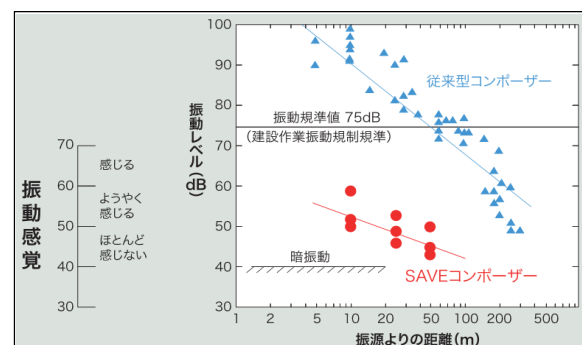


図-1 振動・騒音の距離減衰図

従来の中詰め材料の適用範囲：

静的締固め砂杭工法の材料は細粒分（粒径0.075mm以下）が少なく、かつ施工により土粒子が細粒化しないものが適している。基本的にサンドコンパクションパイル工法に使用する砂、および碎石コンパクションパイル工法として使用する碎石と同様のものとする。図-2に材料の粒径加積曲線を示す。

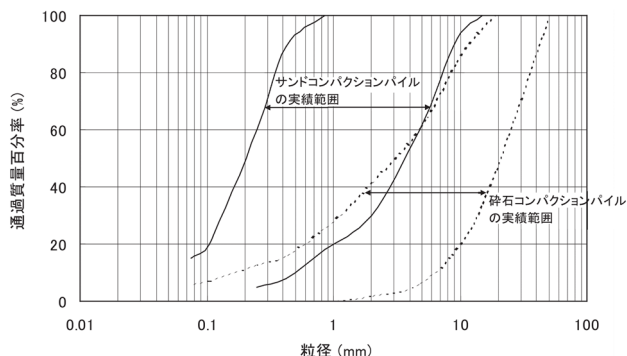


図-2 使用材料の粒径加積曲線

静的締固め砂杭工法に使用する中詰め材料は粒度が適用範囲内であることに加え、ホッパーからの排出が容易であることが求められる。これまでの施工実績より、中詰め材料の含水比 $w \leq 15\%$ 、細粒分含有率 $F_c \leq 10\%$ 程度となっている。

3 リソイルPro工法の概要

リソイルPro工法は、建設現場で発生する土（建設発生土）を地盤改良工事に活用する工法である。本工法は、施工機に新たな材料供給システム導入することによって、発生土の改質[※]を必要とせず、静的締固め砂杭工法の中詰め材料としてそのまま利用できる。

（※改質とは、建設発生土にセメント、石灰、礫材などを混ぜて性状を変えることを指す。）

4 リソイルPro工法の特長

① 新たな材料供給システム

砂杭材料は、施工機械の昇降バケットに投入

され、ホッパー、ケーシングを通過して地盤内へと運搬されるが、各部材を改良して通過性を向上させることで、そのままでは施工できなかった材料での施工が可能となった。

バケットには、ホッパーへ投入するときの閉塞を防ぐために低部からエアーを吹き付ける機構を設けた。図-3に新しいエアレーションバケットを示す。

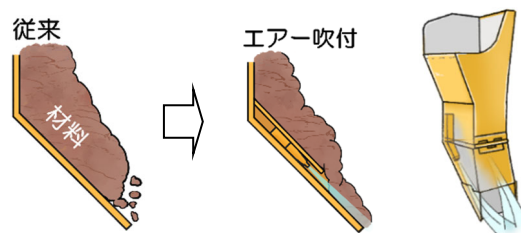


図-3 エアレーションバケット

ホッパーには内部での閉塞を防ぐために排出機能としてスクリューを装置した。図-4に新しいスクリューホッパーを示す。

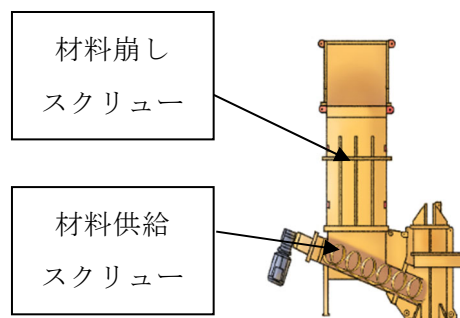


図-4 スクリューホッパー

ケーシングにはその内部での閉塞を防ぐために、ケーシング内配管をケーシングの断面内に埋め込んだ。図-5に従来のケーシングとインラインケーシングを示す。

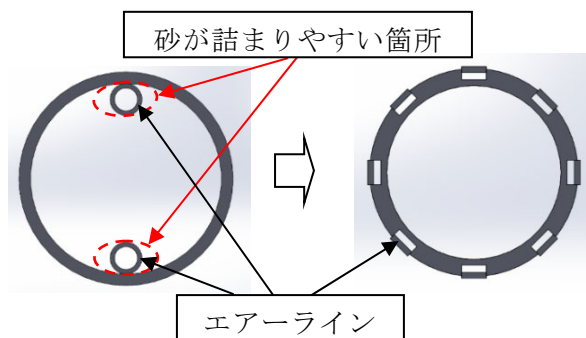


図-5 ケーシングの変更

② 建設発生土の中詰め材としての適用範囲拡大

従来の締固め砂杭工法における中詰め材料は、含水比 $w \leq 15\%$ 、細粒分含有率 $F_c \leq 10\%$ であったが、「新たな材料供給システム」を導入することにより、 w 並びに F_c が30%以下の発生土であれば改質せずに直接利用することが可能となった。更に、この範囲外の発生土でも粒度調整や石灰改質によって適用範囲内に調整すれば材料として利用が可能である。図-6に中詰め材料の適用範囲を示す。

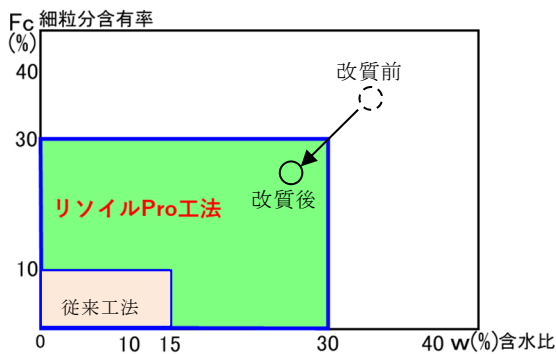


図-6 中詰め材料の適用範囲拡大

③ 環境負荷低減

中詰め材料は従来、砂山からの自然材料を採取および運搬され、施工中に発生する盛り上がり土（建設発生土）も運搬処分しており、その間で排気ガスを含む環境負荷が生じる。図-7に従来工法の排気ガス発生状況を示す。

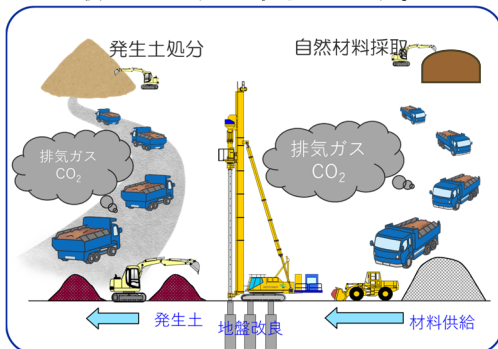


図-7 従来工法の排気ガス発生状況

しかし、リソイルPro工法では建設発生土の再利用を通して、材料運搬・処分に発生する CO_2 を大きく低減でき、環境負荷低減を図れる。図-8にリソイルPro工法の排気ガス低減を示す。

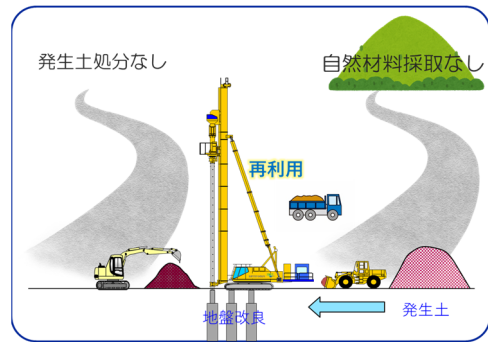


図-8 リソイルPro工法の排気ガス低減

④ 施工費用低減

建設発生土を再使用することで施工能率低下の可能性はあるが、自然材料の使用量低減や発生土運搬処分の削減によって、工事費低減を図れる。図-9に想定費用の比較を示す。リソイルPro工法は従来工法と比べて約20~30%の工事費を低減することが期待できる。

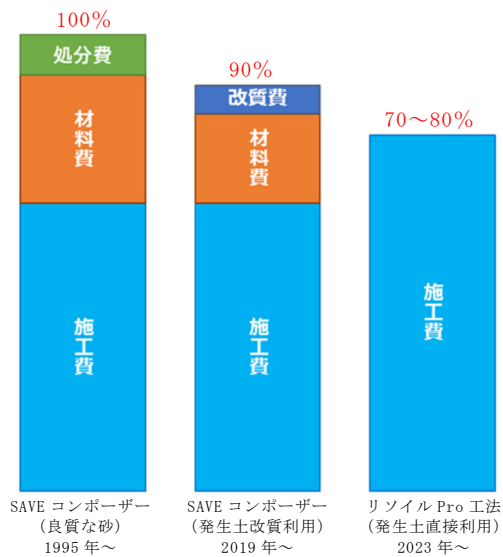


図-9 静的締固め砂杭工法の工事費比較

5 リソイルPro工法の改良効果

5.1 改良効果検証の概要

リソイルPro工法の施工効果を確認するため、実物大土槽で施工検証を行った。実物大土槽は長さ：23.4m、幅：12.2m、深さ：7.5mの仕様で作製した。土槽内に材料（行方砂）を30cm層厚毎で埋め戻して土層を作成した。土層作成後、下部から通水飽和して飽和砂地盤を作成した。

土層作成完了後、土槽内において、杭を打設ピッチ数 $\square 1.7\text{m}$ で造成する。中詰め材料は、従来材料（行方砂）、建設発生土、改質土の3種類で実験を行った。材料の物性値を表-1に示す。

表-1 使用中詰め材料の物性値

材料名	ρ_s (g/cm^3)	Wn (%)	Fc (%)
行方砂	2.678	8.6	7.1
建設発生土	2.684	21.6	
改質土	2.627	40.1	61.4

静的締固め杭を造成した後、標準貫入試験を実施し、各中詰め材料の地盤改良効果を検証した。締固め杭の平面配置図及び標準貫入試験の調査箇所を写真-2に示す。

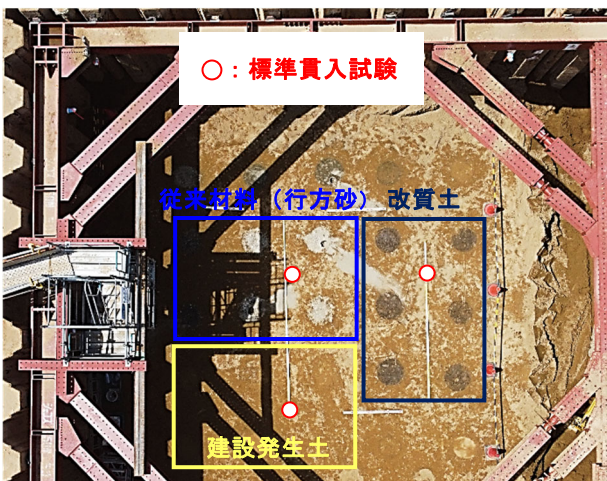


写真-2 試験平面配置図

5. 2 改良効果の確認

締固め杭の打設完了後に掘削して出来形径を確認した。写真-3に示すように、どの材料も通常の杭径 $\phi 700\text{mm}$ を確保することが確認できた。

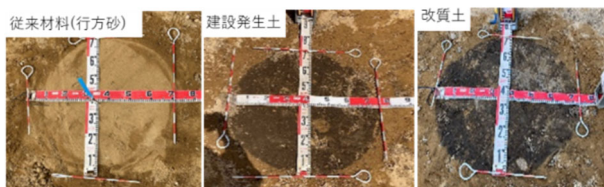


写真-3 締固め杭の出来形径確認

改良効果は、事前・事後調査標準貫入試験により確認し、各杭材料による施工結果の杭間N値を比較した。図-10に改良前後の杭間N値と

その値を基に「建築基礎構造設計指針」に沿って算出した設計水平加速度 200gal に対する液状化安全率（以下FL）を示す。結果より、どの材料で行っても改良後の杭間N値は改良前より上がったが、従来材料より建設発生土および改質土が全体的に小さい値であった。また、FL値は全ての材料で1以上であったため、液状化に対する効果が確認された。

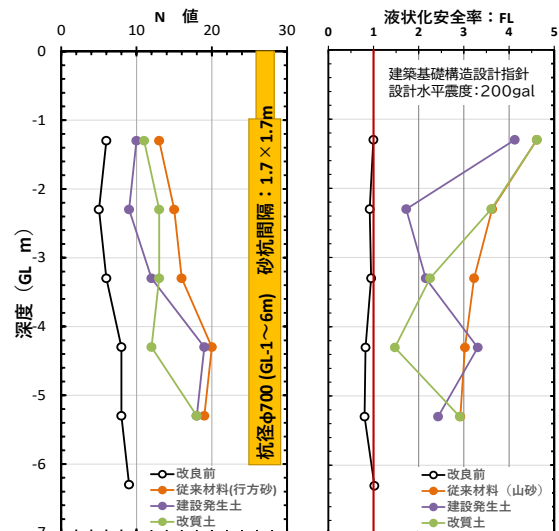


図-10 改良前後のN値及びFL確認

6 おわりに

本稿では、新たな材料供給システムを導入することによって、建設発生土の適用範囲を拡大したリソイルPro工法の概要と特徴を紹介した。施工検証において、従来材料と同様な改良径を施工できた。改良効果は、従来材料より少し小さい結果となったため、今後は追加調査と検証実験を実施して原因を解明する。リソイルPro工法で建設発生土を有効的に再利用することにより環境負荷低減へさらなる貢献をしていきたい所存である。

参考文献：矢部浩史、伊藤竹史、竹内秀克、高田英典、永石雅大、富田晃弘：建設発生土を利用した砂杭工法の開発（その1：施工検証）、第59回地盤工学研究発表会、2024.7