

令和 5 年度
国土交通省 国土技術研究会

概要論文集
～イノベーションⅡ部門～

研究会 1 日目（12 月 7 日（木））

10：15～15：15

自由課題（イノベーション部門Ⅱ）

12月7日（木）10:15～15:15 ②B会場

発表 順序	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
1	10:15～10:30	(仮称)上曾トンネルにおけるNATM工法～フルオートドリルジャンボ導入による発破掘削の最適化に向けた取り組み～	茨城県 筑西土木事務所	大科 憲人
2	10:30～10:45	自動運転の早期実現に向けた高速道路合流支援情報提供の効果検証実験	国土技術政策総合研究所 道路交通研究部 高度道路交通システム研究室	石原 雅晃
3	10:45～11:00	外装型軸用漏水漏油防止装置の開発	独立行政法人水資源機構 筑後大堰管理所	高山 大希
4	11:00～11:15	CM方式を用いた公共建築工事5事例における発注者とCMRの連携に関する比較分析	国立研究開発法人建築研究所 建築生産研究グループ	田村 篤
5	11:15～11:30	難工事指定工事における取組(妓王井川)	滋賀県 南部土木事務所 河川砂防課	奥田 大祐
6	11:30～11:45	高精度なGNSS軌道情報(暦・れき)の算出による測位基盤の強化	国土地理院 測地観測センター 電子基準点課	大野 圭太郎
7	11:45～12:00	信州BIM/CIM推進協議会の取組について	長野県 建設部 建設政策課 技術管理室	黒岩 楠央
～	12:00～13:00	休憩		
8	13:00～13:15	【i-Snow】ロータリ除雪車の装置自動化に向けて	北海道開発局 事業振興部 機械課	諏訪 光星
9	13:15～13:30	美和ダム再開発事業におけるストックヤード施設の試験運用	中部地方整備局 三峰川総合開発工事事務所	藤井 美有
10	13:30～13:45	コンクリートの品質向上に向けたAR管理システムの活用	中国地方整備局 山陰西部国道事務所 工務課	三好 拳士郎
11	13:45～14:00	マルチビーム測深を活用した基礎捨石工の出来形計測に関する検討	国土技術政策総合研究所 港湾情報化支援センター 港湾業務情報化研究室	川上 司
～	14:00～14:15	休憩		
12	14:15～14:30	首里城公園におけるBIM/CIMを活用したDX推進の取組みー首里城デジタルツインの効果と課題ー	内閣府 沖縄総合事務局 国営沖縄記念公園事務所	勝美 直光
13	14:30～14:45	吉田川河道掘削工事におけるAI等を活用した施工プロセスの視覚的評価に向けた取り組み	東北地方整備局 北上川下流河川事務所 吉田川緊急治水対策出張所	三浦 英晃
14	14:45～15:00	DX活用による水中可視化事例の紹介(大河津分水路新第二床固改築工事)	北陸地方整備局 信濃川河川事務所	難波 佑弥
15	15:00～15:15	VTOL機を用いた長距離河川巡視実証実験	九州地方整備局 企画部 情報通信技術課	山田 英幸

(仮称) 上曽トンネルにおけるNATM工法 ～フルオートドリルジャンボ導入による 発破掘削の最適化に向けた取り組み～

大科 憲人

茨城県 筑西土木事務所 (〒308-0841 茨城県筑西市二木成615番地)

近年のICT技術の発展により建設機械の自動化が進んでいる中、建設業界における担い手不足の解消や働き方改革の推進を背景として、現場の生産性向上に向けた取り組みが注目されている。本トンネルでは、発破掘削において爆薬装薬孔の削孔作業を自動化したフルオートドリルジャンボを導入することによって、省人力化及び作業員の経験値に依らない発破掘削を実現した。さらに、3次元測量により掘削断面を評価することで、正確な位置に削孔可能な本建設機械の利点を最大限に活かし、余掘り量を低減させることにも成功した。本稿では、これらの発破掘削のICT施工に向けた取り組み成果について報告する。

キーワード トンネル, NATM, フルオートドリルジャンボ, ICT, 余掘り低減

1. はじめに

(仮称) 上曽トンネルは、茨城県石岡市と桜川市を結ぶ上曽峠（主要地方道石岡筑西線）の下を延長3,538m、最大土被り400mで貫く道路トンネルで、完成すると県内最長の道路トンネルとなる。施工は、石岡市と桜川市の両側から掘削し、本工区は桜川市側の約1.6km区間を施工している(図-1)。本トンネルの整備により、県西地域から茨城空港までを国道50号や国道125号を経由せずに、最短で結ぶ東西の基軸が形成されることから、県南・県西地域間の連携強化を図り、交流促進や地域振興に寄与することが期待されている。

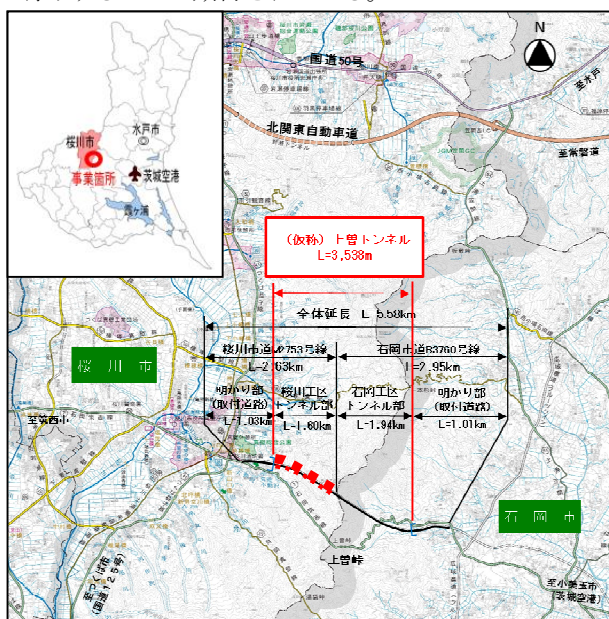


図-1 位置図

2. 工事概要

工事概要を表-1に示す。また、本トンネルの標準断面図を図-2に示す。本トンネルを貫く区間の地質は、大部分が加波山花崗岩類から成り、風化の無い極めて堅硬な地山(図-3)であり、NATM工法(発破掘削方式)により施工している。

表-1 工事概要

工 事 名	(仮称) 上曽トンネル本體工事 (桜川工区)
受 注 者	大成・岡部・白田特定建設工事企業体
施工箇所	茨城県桜川市真壁町山尾
概 要	掘削延長 : L=1,649m 覆工延長 : L=1,599m 内空断面積 : A=60.2㎡ (標準部) ~82.6㎡ (非常駐車体部) 幅 員 : W=8.0/6.5m

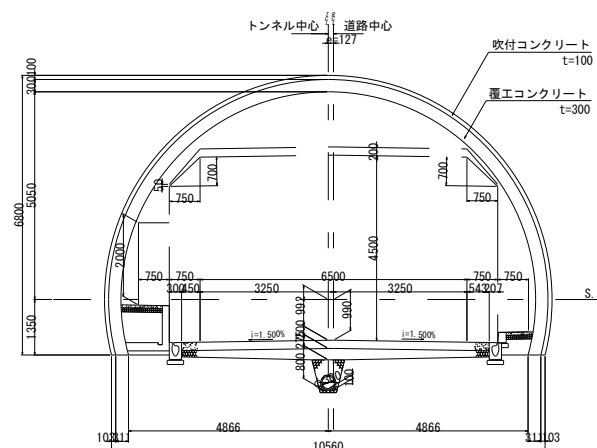


図-2 標準断面図 (支保パターンCI)

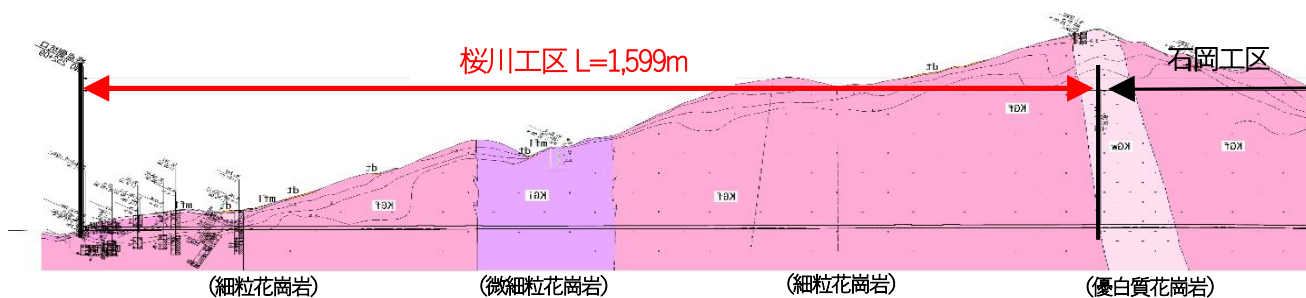


図-3 地質縦断面図

3. 発破掘削における課題

(1) 熟練した土木技術の継承

発破掘削においては、爆薬を装填する装薬孔の削孔位置や角度が掘削断面の出来に直結するため、削孔作業はとても重要な要素である。そのため、地山の地質条件、風化具合、地下水、断層の有無等、常に変化する切羽面の状態を観察し、熟練作業員の経験値により、適切な削孔位置や角度を見極めて施工している。

近年の少子高齢化の影響は、建設業界でも深刻であり、将来の担い手不足が懸念される中、このような熟練した土木技術の継承が大きな課題となっている。

(2) 掘削断面の評価と余掘り量低減

トンネル掘削では、設計段階で予め余掘り（図-4）を見込んでおり、断面不足にならないよう少し大きく掘り上がるように見込んで施工している。しかし、余掘り量が多いほど、発破後により生じるズリ（発破掘削により生じる岩塊）の搬出量の増加や、その後に施工するコンクリート使用量の増に繋がるため、受注者としては、コスト削減をするために、余掘り量を極力抑えた掘削を目指している。

一方で、覆工コンクリートの巻厚不足が供用後に発覚するなどの施工不良の問題が生じる危険性もあるため、余掘り量を低減した理想の発破掘削を行うためには、覆工コンクリート打設後には見えなくなってしまう掘削断面を記録し、削孔位置と掘削断面の出来形との関係性を評価する必要がある。

しかし、発破掘削のサイクルタイムにおいて、発破前後に測量を毎回行うには、時間ロスが大きいと、工期が優先される工事現場では、掘削断面の評価を行い余掘り量の低減を目指すことが厳しい状況である。

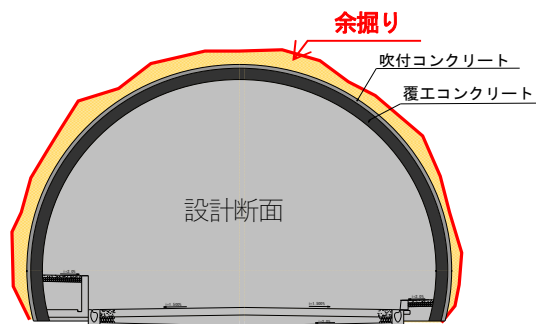


図-4 余掘りの概略図

4. 発破掘削の最適化に向けた取り組み

(1) 発破掘削の最適化について

これらの課題を踏まえて、発破掘削の最適化に向けたフロー案を図-5に示す。

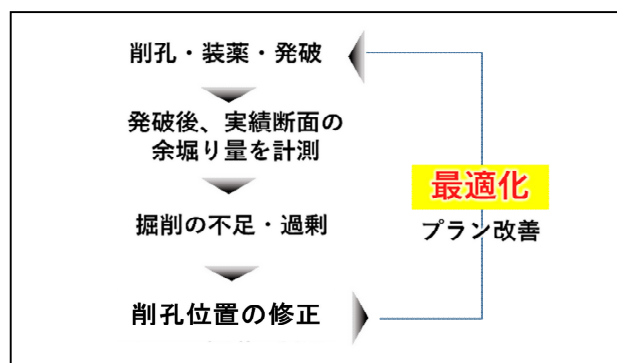


図-5 発破掘削の最適化フロー図

(2) フルオートドリルジャンボの導入

本現場では、発破掘削の最適化に向けて、フルオートドリルジャンボ（図-6）を導入した。

ドリルジャンボのブームは3本あり、通常は複数の作業員が手動でそれぞれのブーム操作を行うが、フルオートドリルジャンボは、予めCAD上で作成されたドリルプランに従って、切羽の削孔位置、削孔長、進入角度等を自動で正確に削孔してくれる。さらに、削孔工程時は1人のオペレーターにより、モニター操作、緊急停止等を一括で担うことができるため、削孔工程において大幅な省人化を図ることが出来る。

また、作業員の経験値、技術等によるばらつきが生じない事が本機械の最大のメリットであり、図面通りの正確な削孔を本機械が行ってくれることで、発破前の削孔位置の計測が不要となる。



図-6 本現場で使用したフルオートドリルジャンボ

(3) 掘削断面の評価（見える化）について

次に、発破後の掘削断面の評価（見える化）であるが、断面を立体的に可視化できる3次元測量を導入した。掘削断面の3次元測量にあたり、最も重要とした事は、1000回以上繰り返す発破掘削のサイクルタイムへ影響させない最短かつ正確な測量を実現する手法である。

なお、トンネル内は地下空間でGPSを受信することができない空間であることから、座標計測はトラバース測量（TS測量）を前提として検討を進めた。さらに、今回の測量対象物となる切羽面は掘削の度に進行し、発破による爆風等の衝撃を考慮すると、測量機器を常時安定して切羽面付近に固定しておける場所が無いいため、発破を行うたびに機器の設置～測量・計測～撤去をスムーズに短時間でなければならぬ。これを解決するために本現場で取り入れた測量手法は次のとおりである。

まず、掘削断面を3Dスキャンするための測量機器は、最速でスキャン可能なレーザートラッカー（以下、LT）を導入した。また、LTの座標位置を確定するために行うTS測量の時間短縮を実現するため、測量機器を三脚に据え付ける固定概念を捨てて「水平器搭載の車載型」に改良し、LTとプリズムが常に定位置となり、どの方向からもプリズムが測定できる様に4個のプリズムを車両のルーフバーへ固定した（図-7）。

この結果、通常的手法では18分程度見込まれていた測量時間を、本現場では4分での実施を可能とし、1サイクルあたり14分の大幅な時間短縮（約8割短縮）を実現した（図-8）。

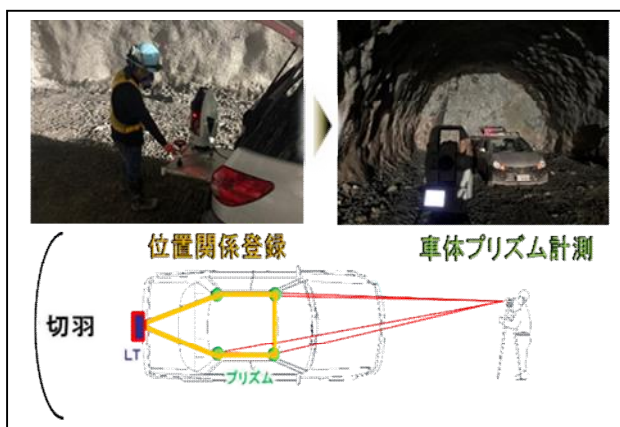


図-7 測量機器設置の工夫

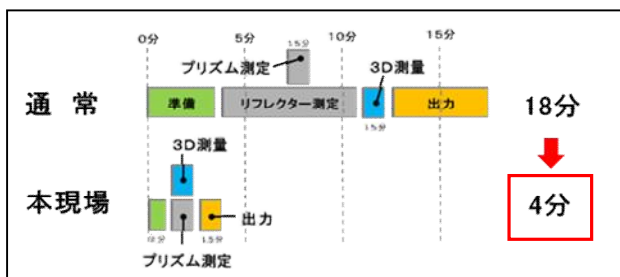


図-8 時間短縮効果（1サイクルあたり）

(4) 発破後の掘削断面の3次元データ

測量時間を大幅に短縮することで、全断面を計測しても掘削工程に影響を与えず3次元データを取得することが可能となる。ここで得られた3次元データをヒートマップ化し、掘削断面の実績（出来形）を可視化した3次元データを図-9に示す。

暖色系が掘削不足で設計よりも内側に入っている箇所であり、寒色系が余掘りの部分を示している。この図においては、TD（トンネル延長）875m地点での平均余掘り量が、73.1mmであることが確認できる。この断面における支保パターンはCIであることから、設計の余掘り量は220mmであり、約7割の余掘りを低減できた事が数値として可視化できた。

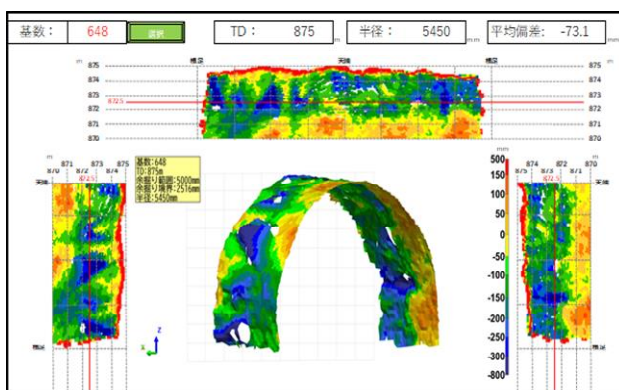


図-9 掘削断面の3D画像

また、本現場の発破毎の余掘り量の分布は、図-10に示すとおりであった。

余掘り量は、50mm～100mmの間に収まるものが最も多く、平均余掘り量は、72.1mmという結果になった。

また、最大で余掘りが生じた断面でも、178.1mmであり、全体を通して余掘り量の抑制につながったことが確認出来、結果としてずりの搬出量や吹付・覆工コンクリート使用量の低減に繋がった。

なお、掘削断面の3次元化を可能とした事は、トンネルの施工管理を行う上で、不可視部分を可視化し、今後のトンネル工事の現場において、施工段階でのBIM/CIMモデル活用を推進していく上でも、非常に有効な事例になると考える。

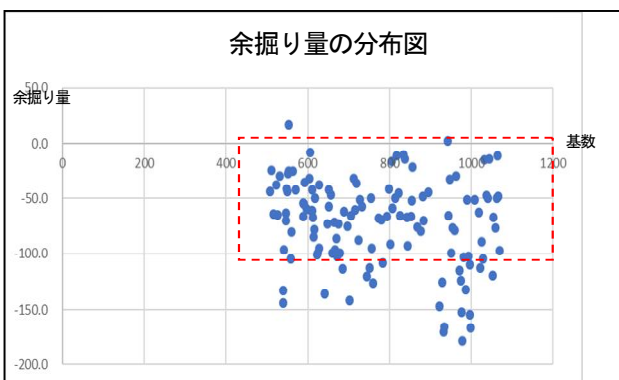


図-10 発破毎の余掘り量の分布図



図-11 発破掘削の最適化システムの構想

(5) 3D画像を活用した発破掘削の最適化について

掘削断面の3D画像の取得が全断面で可能となれば、それを同測点のドリルプランと重ね合わせることで、削孔位置と余掘り量の関係性を評価する事が可能となり、次の削孔位置に向けて修正を加えるなど、発破掘削の余掘り低減に向けた最適化システムの構築が可能となる。フルオートドリルジャンボと3D画像を活用した発破掘削の最適化システムの構想を図-11に示す。

フルオートドリルジャンボは、正確な位置に削孔する技術だけでなく、人の操作では硬い、軟らかいという感覚的な表現しかできないものを、ドリル回転数、穿孔速度、抵抗値、使用水量など、削孔に関する詳細なデータを数値化して毎回記録することが可能である。これらの蓄積されたドリルデータと掘削断面の3Dデータをコンピューターの人工知能(AIシステム)に学習させることで、完全に自動化した最適なドリルプランを作成することが可能と考える。

また、詳細なドリルデータで地山の地質の変化を敏感に捉える事により、地質の変化点における掘削後の予期しない岩塊の崩落等による事故を未然に防ぐ事も可能と考える。

5. 成果

本現場における、フルオートドリルジャンボの主な導入成果は以下の3つである。

① 省人化

フルオートドリルジャンボの導入により、トンネルの掘削作業において、50% (通常3人→1.5人) の省人化を図ることができた。

本工事では、試験的な段階であったため、1.5人となったが、将来的には3人→1人まで削減が可能と考える。

② 余掘り量低減

全体を通して余掘り幅の平均が72mmまで削減でき、標準の余掘り幅と比較して約7割削減することが出来た。また、余掘り量低減により、掘削土の運搬量で約3,500 m³、コンクリートの使用量で約7千トン削減出来た。

③ 環境負荷低減

運搬土量の低減は、10t ダンプ運搬で約900台の削減となり、CO₂排出の環境負荷を軽減した。また、生コンの使用量の削減により、建設資源の節約にも貢献することが出来た。

6. おわりに

現在、建設業界における高齢化、将来の担い手不足は大きな課題である。加えて、働き方改革による時間外労働の縮減や、週休2日の確保のため、建設現場における生産性向上の取り組みは必須であり、IT化やAI導入などで労働環境を改善させる事は、将来の担い手を確保するためにも大変重要である。

このような中、本現場のように発破掘削の最適化システムの実用化に向けて、フルオートドリルジャンボの導入、3次元測定の時短を可能とした取り組みなど、受注者の積極的な取り組みは高く評価することが出来る。発注者としてもこれを広く情報発信をしていく事が建設業界全体の持続的発展に寄与するものと考え、本工事の取り組み事例を本稿でまとめた。

特に掘削断面の3Dデータを全断面で得られる事が出来れば、覆工コンクリート等の巻厚を3次元管理する事が可能となる。今後の展開として期待することは、フルオートドリルジャンボなどの自動化機械の導入により、山岳トンネル工事のICT施工を進めるとともに、BIM/CIMモデルの拡充に向けて、施工管理における3次元測定の標準化を進め、官民連携して現場へ導入出来る環境を整える事が重要であると考え。

謝辞： 本稿を作成するにあたり、ご協力をいただいた大成・岡部・白田JV作業所長をはじめ、現場関係者の方々にこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) (一財) 建設物価調査会：国土交通省土木工事標準積算基準書 (河川・道路編)

自動運転の早期実現に向けた 高速道路合流支援情報提供の効果検証実験

石原 雅晃¹・中川 敏正¹・井坪 慎二¹

¹国土技術政策総合研究所 道路交通研究部 高度道路交通システム研究室

(〒305-0804 つくば市旭1番地)

高速道路合流部には、高低差や壁等により車載センサで事前の本線交通状況を把握することが難しい場所、また、加速車線が短く本線車間への調整余裕が少ない箇所が存在する。このため、早期の自動運転の実現に向けて、合流部で自動運転車が事前に速度調整するための情報提供を求められている。本研究では、路側のセンサで本線の交通状況を把握し、合流支援に必要な情報を合流車に提供し、その効果検証実験を行った。本実験では交通状況や道路構造の違いによる効果の差異を把握するため、本線車の速度、加速車線長等を複数パターン設定した。その結果、情報提供により加速車線長50mの場合でも本線合流が可能となることを明らかにした。

キーワード 自動運転、合流支援、情報提供、効果検証実験、DAY2システム

1. はじめに

自動運転の普及により、交通事故の削減、渋滞の緩和、環境負荷の軽減等の効果が期待されている。「官民ITS構想・ロードマップ」¹⁾では、自動運転の実現に向けた目標が掲げられており、自家用車について2025年を目途に高速道路での自動運転（レベル4）の実現を目指している。

高速道路での自動運転については、高速道路本線への合流が、大きな課題とされている。特に都市高速道路では、高低差や壁等により連結路から本線への見通しが悪く、かつ加速車線長が短い合流部が存在する。ドライバーが目視で周囲の情報を取得するのと同様に、自動運転では車載センサで周囲の車両の情報を取得するため、見通しが悪い箇所では合流部に到達するより前に合流のための速度調整をすることができず、加速車線長が短い合流部では速度調整を短時間で実施することが求められる。そのため、道路構造を変更することなく早期に自動運転を実現するには、本線上流の交通状況を路側インフラで把握し、合流する自動運転車に情報提供する合流支援情報提供システムが必要となる。

国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）では、路側インフラと協調した合流支援情報提供システムの実用化を目指し、官民共同研究にて実証実験等を行い、合流支援情報提供システムの技術仕様²⁾を作成してきた。国総研が技術仕様を作成することで、自動車会社、センサメーカ、道路管理者等による技術開発が促進され、実用性の高い合流支援情報提供システムの実装が期待される。

本稿では、試験走路での合流支援情報提供システム（DAY2システム）の効果検証実験³⁾の概要を紹介する。

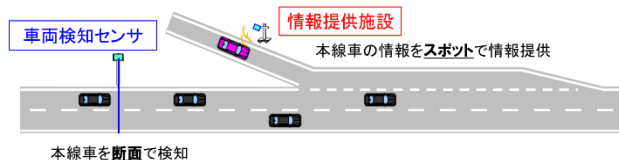
2. 合流支援情報提供システムの概要

合流支援情報提供システムは、合流部上流を走行する本線車の位置、速度、車長、車間時間等の情報について、連結路を走行する合流車（自動運転車）に対して提供することにより、合流車が本線車の情報をもとに本線車と横並びとならないように自車の位置取りを連結路を走行している段階で調整し、本線合流することを支援する。

合流支援情報提供システムは、大別して「DAY1システム」と「DAY2システム」に分類される（図-1）。

「DAY1システム」は、本線上流部の特定断面で車両の速度、車長等を検知し、合流車（自動運転車）にスポットで情報提供するシステムである。本線車は合流部まで等速度で走行すると仮定して、合流部に到達する時間を算定する。当該システムは、既存の要素技術を用いて構築することが可能である。ただし、本線車が車線変更したり、速度を変更したりする場合、合流支援情報提供システムが提供する到達計算時刻と実際の到達時刻に差異が生じる。一方、「DAY2システム」は、車両検知センサが合流部の一定区間の車両の速度、車長等を0.1秒間隔などで複数回検知し、自動運転車に連続的に提供するシステムである。これは、「DAY1システム」の弱点を解決するものであり、これまでにセンサの精度確認を行ってきた⁴⁾。そこで、実道路への実装が可能なDAY2システムの実用化に向けて、DAY2システムによる合流支援

DAY1 システム



DAY2 システム

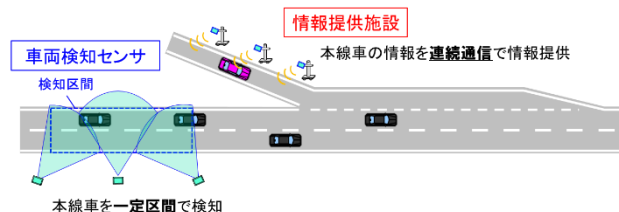


図-1 合流支援情報提供システム (イメージ)

情報提供の有効性について、試験走路で検証することとした。

3. DAY2システムの効果検証実験

(1) 実験の目的

本実験の目的は、DAY2システムによる合流支援情報提供の有効性の検証である。本実験においては、本線車の速度、加速車線長等を複数パターン設定し、これらの実験条件の違いによる合流支援情報提供の効果の差異も明らかにすることとした。

(2) 実験の方法

a) 機器配置レイアウト

試験走路に高速道路の合流部を模した区間を整備し、本線側に車両検知センサ、連結路側に情報提供施設 (ITSスポット) を配置した (図-2, 図-3)。車両検知センサの機種は、センサAとセンサBがLiDAR、センサCはレーダーであり、本線側の台座 (高さ5m) に設置した。

車両検知センサは、本線車がセンサ検知区間を通過している間の速度、位置、車間時間等を0.1秒間隔で検知した。ITSスポットは、本線車の速度、位置、車間時間等を0.1秒間隔で合流車の車載器に情報提供した。なお、センサ検知区間長及び情報提供区間長は、国総研が作成している合流支援情報提供システムの技術仕様²⁾を踏まえて設定した。具体的には、センサ検知区間長は126mと209m、情報提供区間長は120mに設定した。加速車線長は都市高速道路の加速車線長や、都市間高速道路の加速車線の標準値 (設計速度100km/hでは180m)⁵⁾を参考に50mと200mに設定した。

b) 合流車への情報提供方法

自動合流のための車両制御システムは開発中であるため今回の実験では用意できず、本実験では、ドライバーの運転により、自動運転を模した走行を実施した。合流車には合流支援情報を受信できる車載器と、ドライバーが合流支援情報を目視で認識できるよう、本線車の「速度」、「位置」、「車間時間 (センサ検知区間内に存在する本線車列の最大車間時間のみ)」を表示するディスプレイを設置した (図-4)。合流車のドライバーは、最



図-3 実験で使用した機器

(左：車両検知センサ、中：ITSスポット、右：路側処理装置)



図-4 合流車への情報提供方法

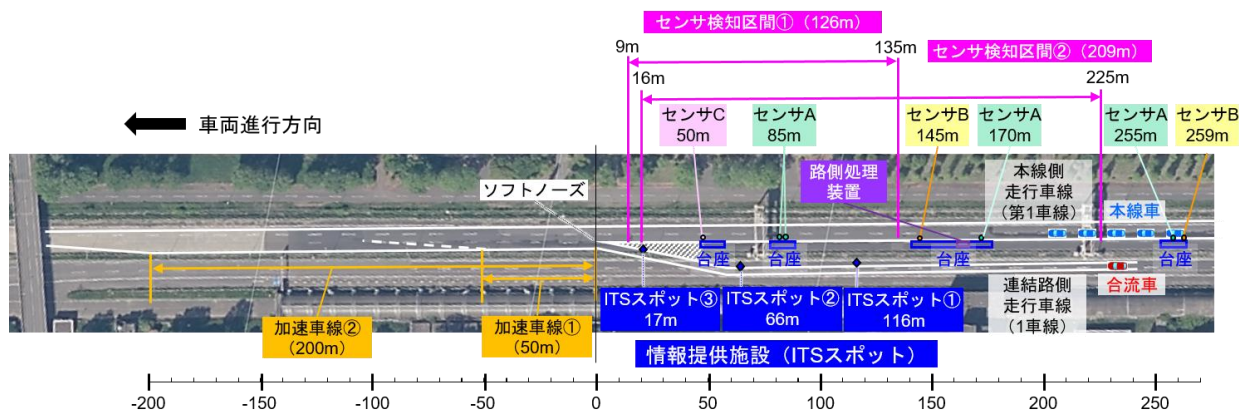


図-2 機器配置レイアウト

出典：国土地理院地図をもとに作成

大車間時間の本線車間を見ながら、連結路上で速度調整を行い、ソフトノーズ端到達後に本線合流を実施した。

c) 本線車の走行方法

本線車（乗用車）は、5台の車列で走行した。また、本線車は走行開始地点で前方車との車間時間が2秒になる距離（速度に応じて距離を設定）に配置後、一斉に走行を開始し、指定された速度に到達した時点で走行開始時の車間時間を極力維持できるように運転した。なお、本線車のドライバーには実験前に上記の運転方法を繰り返し練習させて、指定された速度と車間時間での走行を実現した。また、本線車の速度は、センサ検知区間長が209mの場合は4速度帯（40km/h～90km/h）とした。

4. 実験結果

(1) 合流成功割合

合流成功割合とは、各実験条件における総走行回数に対する合流が成功した走行回数の割合である。全体でも特に加速車線長が50mの場合、「情報提供あり」では全数が合流成功であったが、「情報提供なし」では本線車の速度が大きい場合に合流失敗が多発した（図-5、図-6）。これは、「情報提供なし」では合流車がソフトノーズ端への到達時に本線車と横並びとなり、短い加速車線のみでは本線車との相対的な速度と位置の調整が完結できなかったためであることを撮影動画等で確認している（図-7）。

(2) 合流車の加速度

合流車の加速度について、センサ検知区間長が209m、

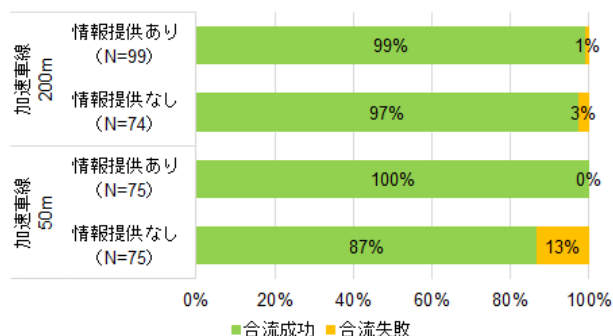


図-5 合流成功割合（全体）

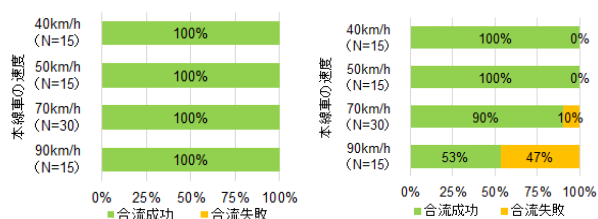


図-6 合流成功割合（本線車の速度別）※加速車線長50m
（左：情報提供あり、右：情報提供なし）

本線車の速度が70km/hの場合の結果を図-8に示す。「情報提供あり」では最大加速度は連結路、「情報提供なし」では最大加速度は加速車線で発生した。特に加速車線長が50mの場合にこの傾向が顕著であり、「情報提供あり」では加速度の最大値が0.2G程度に留まったのに対し、「情報提供なし」では加速度の最小値が-0.4Gを超えていた。これは、情報提供により合流車が連結路の段階で加速を開始し、ソフトノーズ端に到達した時には本線車と同等の速度に達していたことを示唆している。

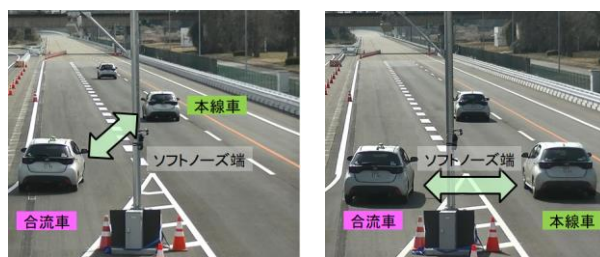
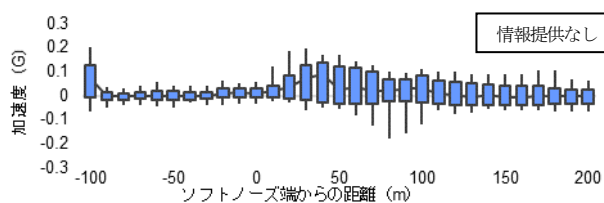
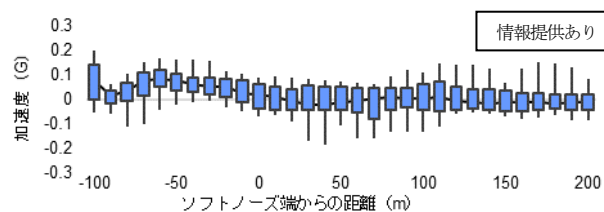


図-7 ソフトノーズ付近での合流車と本線車の位置関係
（左：情報提供あり、右：情報提供なし）

加速車線長が200mの場合



加速車線長が50mの場合

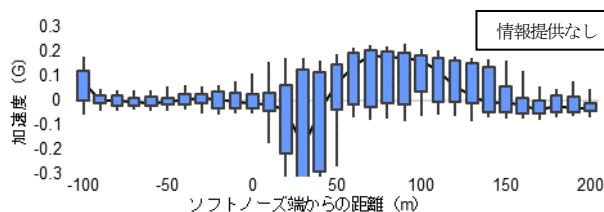
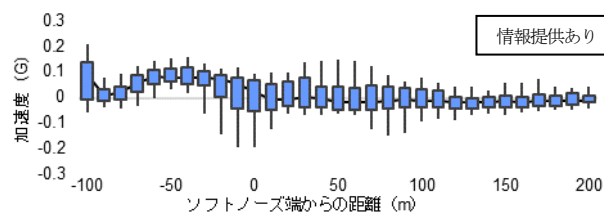


図-8 合流車への情報提供方法

※ 横軸の負の値は連結路、正の値は加速車線～本線である。

※ 縦棒の上端は最大値、下端は最小値、箱の上端は85%タイル値、下端は15%タイル値、折れ線は中央値である。

(3) 合流車の角速度

合流車の本線合流時の角速度（センサ検知区間長209m）を図-9に示す。加速車線長が200mの場合は角速度が小さく、情報提供の有無による差異も小さかった。一方で、加速車線長が50mの場合、「情報提供なし」では大きな角速度が発生したのに対し、「情報提供あり」では小さく抑えられており、急ハンドルが抑制されていた。

(4) 回避行動（避走）の発生状況

合流車の本線後方車の避走（車線変更）の発生割合は、図-10の通りである。本線合流前後での本線後方車の回避行動（避走）は、限定的であった。これは、実験上の安全確保のため、合流車の本線合流が困難な場合は無理な本線合流を行わず、加速車線をそのまま走行したことが影響しているためであることを撮影動画等で確認している（図-11）。

5. おわりに

合流支援情報提供システム（DAY2システム）について、情報提供による多くの評価指標の改善を確認した。合流車が合流支援情報をもとに連結路の段階で本線車との相対的な位置と速度の調整を行った結果、加速車線内での運転に余裕ができ、より安全・円滑な本線合流が実現したものと考えられる。

自動運転の早期の実用化のためには、車両単体のみではなく、道路との連携により道路インフラと車両が相互に情報共有出来る仕組みを整備することが重要である。引き続き、国総研では、共同研究等を通じて、自動運転の実用化、安全・安心・円滑な道路交通の実現に寄与していきたい。

謝辞：本研究は、国総研が民間企業等30者ととともに、「次世代の協調ITSの実用化に向けた技術開発に関する共同研究」での調査研究にて取得したデータについて、分析及び取り纏めを行ったものである。関係各位のご協力に深く感謝の意を表す。

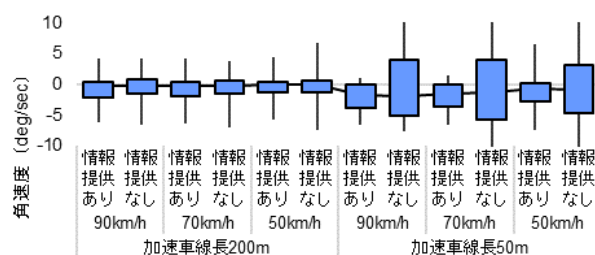


図-9 合流車の角速度の例

※ プラスの角速度は右旋回、マイナスの角速度は左旋回である。

※ 縦棒の上端は最大値、下端は最小値、箱の上端は 85%タイル値、下端は 15%タイル値、折れ線は中央値である。

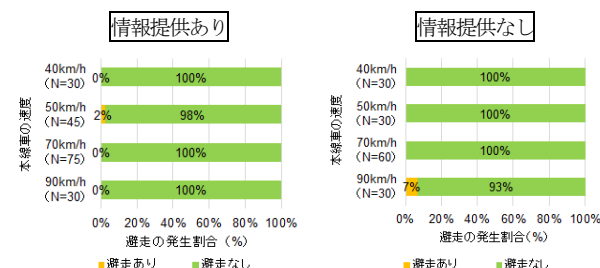


図-10 本線後方車の避走の発生割合



図-11 本線後方車の避走の例

参考文献

- 1) 官民 ITS 構想・ロードマップ，2021 年 6 月 15 日，https://cio.go.jp/sites/default/files/uploads/documents/its_roadmap_20210615.pdf(閲覧年月日：2023 年 11 月 7 日)。
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：合流支援情報提供システム仕様書原案 Ver0.1, 2023。
- 3) 中川敏正，井坪慎二，関谷浩孝，石原雅晃，湯浅克彦，花守輝明，中田諒，藤村亮太：合流支援情報提供システム（DAY2 システム）の効果検証実験，土木計画学研究・講演集，Vol.66, 2022。
- 4) 中川敏正，関谷浩孝，中田諒，藤村亮太：合流支援情報提供システム（DAY2 システム）の車両検知センサの計測精度に関する基礎検討，交通工学論文集，8 巻 1 号，pp.49-58, 2022。
- 5) 公益社団法人日本道路協会：道路構造令の解説と運用（令和 3 年 3 月版），2021。

外装型軸用漏水漏油防止装置の開発

高山 大希¹・岩松 裕二²・吉成 佑太³

¹(独)水資源機構 筑後大堰管理所 (〒830-0071 福岡県久留米市安武町武島 1063-2)

²(独)水資源機構 中部支社 事業部 設備課 (〒460-0001 愛知県名古屋市中区三の丸 1 丁目 2-1)

³(独)水資源機構 香川用水管理所 施設管理グループ (〒766-0004 香川県仲多度郡琴平町榎井 891-2)

1993 年に岩屋ダム利水放流設備副ゲート開度計用シリンダロッド (以下「シリンダロッド」という.) の水密部より漏水が確認された。漏水を止めるためには水密パッキンの交換が必要となるが、岩屋ダムの場合、水密パッキンの交換を行うために大規模な工事や発電事業者との調整が必要となる。そこで、大規模工事を行わなくても、止水ができるように外付けの漏水漏油防止装置を開発した為、本稿にて報告を行うものである。

キーワード 利水放流設備, 漏水, 応急対策, 損失回避, 外装型軸用漏水漏油防止装置

1. はじめに

岩屋ダムは木曽川の中流岐阜県美濃加茂市で合流する飛騨川の上流支流、馬瀬川に建設された多目的ダムであり、木曽川河口からはおよそ 140 km 上流に位置し、1977 年の管理開始から 46 年が経過している。

ダムの諸元は次の通りである。

型 式：傾斜土質遮水壁型ロックフィルダム
堤 高：127.5 m
堤頂長：366.0 m
計画洪水流量：2,400 m³/s
有効貯水容量：150,000,000 m³

岩屋ダムは治水において、計画洪水流量のうち 2,100 m³/s の洪水調節を行い、利水では最大 45.69 m³/s の水を愛知県、岐阜県、三重県へ農業、水道、工業用水として供給している。

また、発電事業者によりダム右岸側地下（馬瀬川第一発電所）とダム下流（馬瀬川第二発電所）で合わせて最大 354,400 kW の水力発電を行っている。

2. 対象設備概要

本稿で対象とする設備は写真-1 で示す利水放流設備副ゲートである。利水放流設備の仕様は次の通りである。

形式：主ゲート ジェットフローゲート
副ゲート リングホロワゲート

口径：φ1,860 mm

開閉方式：油圧シリンダ式

最大放流量：83.11 m³/s

岩屋ダムの利水放流設備は図-1 のように選択取水設備から放流管が馬瀬川第一発電所の発電放流設備へと伸びており、その内、発電放流設備 2 号に続く放流管から分岐する形で利水放流設備が設置されている。

発電放流設備は 167.5 m³/s/台の放流が可能で、2 台合わせると 335 m³/s の放流ができる。このため、利水放流設備は常時、全閉状態で待機しており、発電放流設備の整備や故障等で停止した際に運用する設備である。

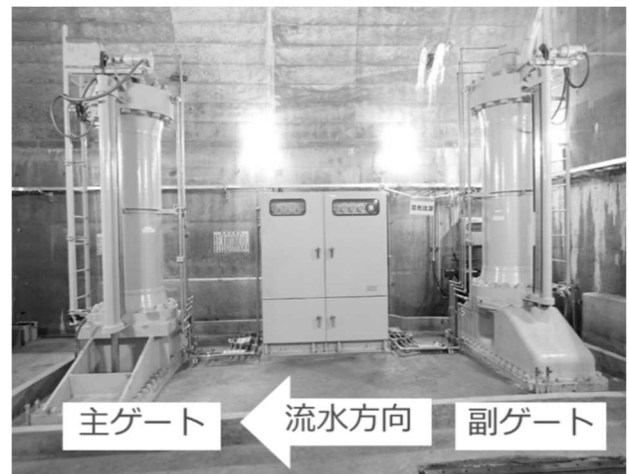


写真-1 利水放流設備

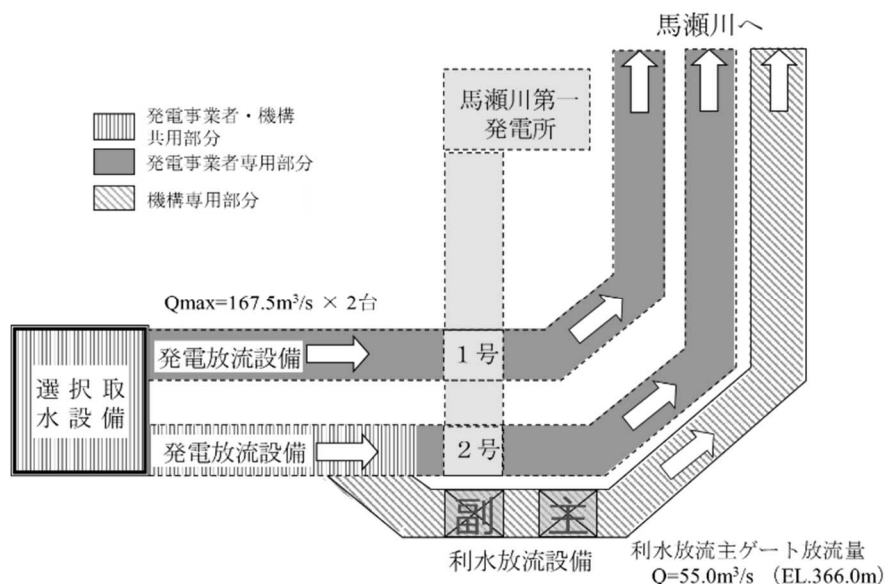


図-1 利水放流設備と発電設備の位置関係

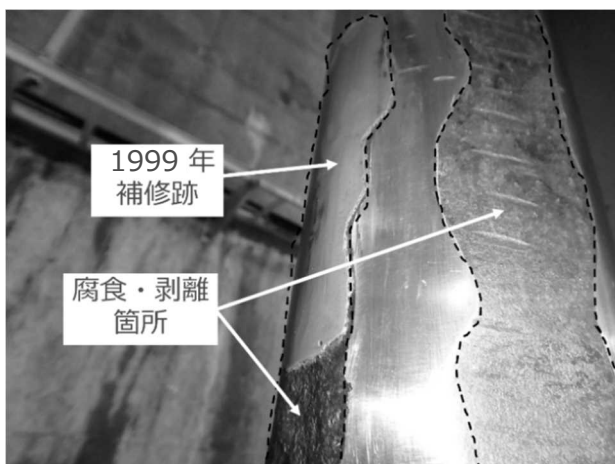


写真-2 シリンダロッドの腐食及び剥離状況

3. 漏水の発生

1993年にシリンダロッドの水密部から漏水が確認された。漏水は写真-2のようなシリンダロッドの腐食による凹凸部が水密部を通過する際に発生するものであった。

1999年に金属パテで腐食部の補修を行ったが、2004年に補修部が剥離し、再度漏水が発生した。現在は腐食部が水密部を通過したときのみ漏水が発生している。

利水放流設備副ゲートは主ゲートの点検のため年に数回動作させており、腐食部が水密部を通過する度に水密パッキンを損傷させている。このままの状態で使用し続けると水密パッキンの損傷が進行し、常時、漏水が発生することとなる。また、高水圧のため大事故につながる恐れもある。シリンダロッドは金属パテでの補修で水密パッキンのさらなる損傷を防止できるが（2021年度に実施）、損傷の進んでいる水密パッキンについては交換が必要となっている。

4. 問題解決のための検討

水密パッキンの交換には利水放流設備の分解整備を伴う。一般的な利水放流設備の分解整備は、放流管吞口を制水ゲートにより閉塞し、利水放流管内を抜水して行うこととなるが、岩屋ダムには制水ゲートが設置されていない。そのため、以下の方法により止水を行う必要がある。

(1) 制水ゲートの新規設置

一度設置すれば今後の利水放流設備の整備時にも利用する事ができるが、大規模な工事となり、膨大な予算と時間を要する。

また、工事中は通水ができない為、発電事業者による発電収入は見込めないこととなる。

(2) ダム貯水位の低下

設計上はダム貯水位をE.L. 368.0 mまで下げ、選択取水ゲートで止水して管内を抜水するものであるがその間は発電が停止することとなり、この方法も発電事業者による発電収入は見込めないこととなる。

このことから水密パッキンを交換するという目的に対して膨大な予算と時間をかける事は現実的ではないといえる。そこで、応急的に止水できる外付けの水密パッキン（以下「外装パッキン」という。）を取り付ける装置を考案することとした。

5. 装置開発時の検討事項

装置を考案する際は、設置箇所のスペース、取付・取外の容易さ、装置にかかる水圧、止水性能、について検討した。

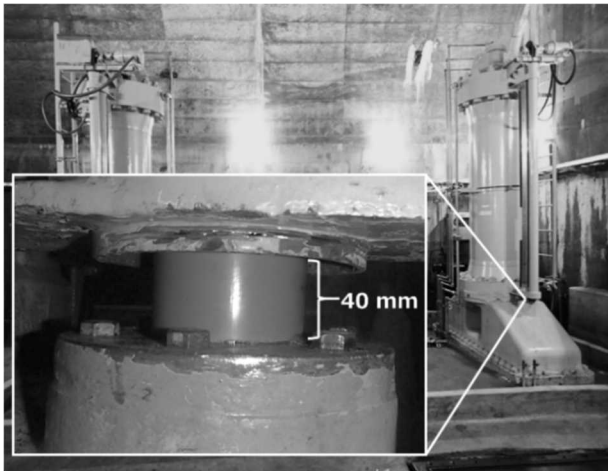


写真-3 装置の設置箇所



写真-4 装置の設置の様子



写真-5 部品一覧

(1) 設置箇所のスペース

装置を設置する箇所は写真-3 で示す通り狭小であり、その高さは僅か 40 mm である。横幅もあまり余裕がない為、装置の形状や部品の分割を工夫する必要がある。

(2) 取付・取外の容易さ

この装置の目的は既存の水密パッキンに代わる外装パッキンを取り付け、容易に交換できるようにするものであり、維持管理性を考慮して装置自体の取付・取外もできるだけ容易にしなければならない。

(3) 装置にかかる水圧

装置を設置する箇所は洪水時最高水位から約 91 m の水位差があり、ここにかかる水圧は約 0.89 MPa である(1a)。

$$\begin{aligned}
 p &= \rho h g \\
 &= 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 91 \text{ m} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\
 &\approx 0.89 \text{ MPa}
 \end{aligned}
 \quad (1a)$$

ここで、 p : 水圧、 ρ : 水の密度 (25 °C)、 h : 高さ、 g : 重力加速度とする。

(4) 止水性能

シリンダロッドの摺動によるズレ及び摩耗も考えられる。適切な水密を常に保てるように、装置や外装パッキンの固定方法を考える必要がある。

6. 検討事項に基づいた装置の製作

各検討事項に基づいて装置を製作した。以下に各検討事項に対する結果を示す。

(1) 設置箇所のスペース

狭小な箇所に設置する為、装置の形状は薄い円盤状とした。装置は大まかに 2 分割構造となっており、シリンダロッドを横から挟むように設置する(写真-4)。ボルトなどの各部品も基本的に横から差し込むように組み立てる為、上部に隙間が無くても設置が可能となる。

(2) 取付・取外の容易さ

装置を構成する主要な部品数は僅か 9 点であり、これらをボルトとナットで締結する事で完成する(写真-5)。取り付けには特殊な工具や治具が不要であり、複雑な工程も無い為、職員 1 人での作業も可能である。これにより、経年による外装パッキンの劣化や摩耗の際に容易に交換が可能となり、維持管理性が向上する。

(3) 装置にかかる水圧

装置設置箇所には約 0.89 MPa の水圧がかかる為、このような高水圧下でも装置が耐えられるか、確実な止水が可能か、機械設備施工管理基準¹⁾に基づいて写真-6 のような耐圧試験を行った。機械設備施工管理基準には、小容量放流ゲート・バルブの管理項目の耐圧試験について「設計水圧の 1.2 倍で 10 分間保持し、水密構造部以外から漏水のないことを確認する。」とある為、この基準を準用し 1.1 MPa で 10 分間の試験を行った。耐圧試験は装置をシリンダロッドに見立てた専用の治具に設置し、耐圧試験用の



写真-6 耐圧試験の様子



写真-7 固定に使用するボルト穴

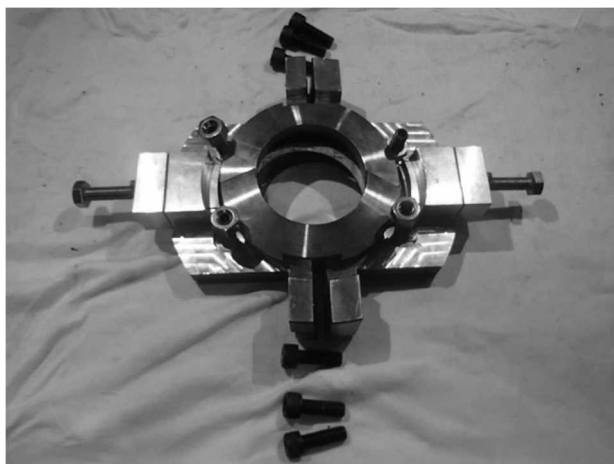


写真-8 外装型軸用漏水漏油防止装置

ハンドポンプで圧力をかけて行った。

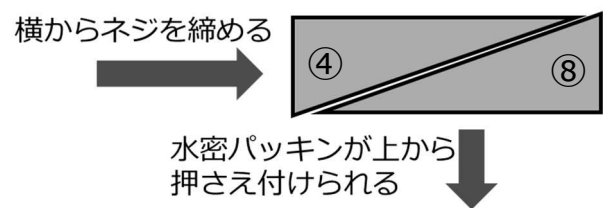
なお、耐圧試験では装置の異常及び漏水は確認されなかった。

(4) 止水性能

高水圧がかかる環境で止水しなければならない為、装置の確実な固定が必要である。これに対しては利水放流設備の既存のボルト穴4箇所を用いて固定する事とした(写真-7)。これによりシリンダの摺動によるズレ及び摩耗にも対応でき常に適切な水密を保つことができる。

また、この装置は部品を横から差し込む構造であるが、外装パッキンを上から押さえ付けなければ高い水密は得られない為、一部の部品(写真-5の④、⑤、⑧、⑨)をテーパ形状とし、図-2のように横からの力で外装パッキンを押さえ付けられるようにした。外装パッキンについてもメーカーのノウハウに基づき適切な材料や形状を選定し、重ねて複数個取り付ける事で高い水密を確保した。

以上の検討事項を満足した装置が完成した(写真-8)。この装置は漏水を防止する目的で開発したが、構造的に漏油にも対応できることから、名称を「外装型軸用漏水漏油防止装置」とした。



※番号は写真-5参照

図-2 水密パッキンの押さえ付け

年	取水日数 (日)	年間発電量 (MWh)
2020	289	242,294
2021	295	227,405
2022	321	234,671

図-3 岩屋ダムの直近3年の年間発電量

7. 装置採用による損失回避

岩屋ダムでは、上述の通り、利水放流設備の水密パッキンの交換だけで大規模な工事が予想される。さらに下流では、おおむね1年を通して水力発電を行っており、その発電量は平均して毎年約 230,000 MWh といった大規模なものである(図-3は直近3年の年間発生電力)。仮に水密パッキンの交換を工期1年で行った場合、発電停止により多大な損失が発生する。ここで本装置を採用した場合、取付の容易さによる工期の短縮、施工中も発電が可能であるという点から、損失の回避が可能となる。

また、本装置は岩屋ダム以外の他施設でも活用できる。昨今では施設管理予算が少なくなってきており、僅かな漏水のために設備を分解し、水密パッキンだけを取換えるという事が難しくなっている。その点、本装置は設備の分解を行う必要が無いため、

低予算でも漏水の対応が可能となっている。

8. まとめ

岩屋ダムの利水放流設備は、その構造上、整備等を行おうとすると大規模な工事や発電事業者との調整が必要となり、安易に実施できないのが現状である。水密パッキンの交換だけで、大規模な工事を行う事は現実的ではない為、利水放流設備の本格的な整備を行うまで、応急的に漏水を防止する装置として外装型軸用漏水漏油防止装置を開発した。

この装置は 2021 年 3 月にシリンダロッドに設置し、現在まで漏水を防止できている。今後も漏水が発生しないか経過観察を続け、装置の効果を検証していく。

また、岩屋ダム以外の現場でも漏水が発生しているかつ、修繕が困難であるといった箇所には、この装置を使用することができないか積極的に検討を行いたい。

なお、本装置は現在、特許出願中である。

参考文献

- 1) 独立行政法人水資源機構. 2012. 機械設備施工管理基準. p. 154.

CM方式を用いた公共建築工事5事例における発注者とCMRの連携に関する比較分析

田村 篤¹

¹ 国立研究開発法人建築研究所 建築生産研究グループ（郵便番号 305-0802 茨城県つくば市立原1番地）

地方公共団体では庁舎建替等の公共建築工事が増加しているが、技術職員が少ない中で、発注関係事務の適切な実施が困難な状況にある。こうした状況に対し、建築工事の初期から発注者に対して技術的な助言・支援を行うコンストラクション・マネージャー（CMR）と契約する、コンストラクション・マネジメント（CM）方式を活用する事例が増えている。しかし、CM方式の適切な運用のためには、発注者のCM方式への理解および発注者とCMRの連携が不可欠である。本研究では、契約形態の異なる5つのプロジェクトについて、発注者とCMRの連携に着目して比較分析し、現状の課題を明らかにすることを目的とする。

キーワード 公共建築工事、多様な入札・契約方式、CM方式、ECI方式

1. はじめに

東日本大震災以降、施設の老朽化や耐震性の不足を是正するため、庁舎等の建替・新築工事が活発化している。一方で、総務省「令和4年地方公共団体定員管理調査」¹⁾によれば、政令指定都市を除く地方公共団体（全1,721団体）の内、建築技師が0人の団体が656団体（約38.1%）、建築・土木技師双方が0人である団体が430団体（約25.0%）あるとされている。こういった小規模の地方公共団体では専門的知識や技術を持つ技術職の職員が発注組織内にいない中で、一般職の職員が日々の改修業務等の発注関係事務を行っている状況であり、いざ高度経済成長期以来数十年ぶりに建替工事を行うとなった際に、適切に発注関係事務を行うのは困難な場合があると推測される。

こうした状況に対応するために、国土交通省を中心に多様な入札・契約方式の導入が進められており、プロジェクトの特性に応じた方式の活用が図られている。

特に方式の一つである「CM方式」は、コンストラクション・マネージャー（CMR）発注者の発注関係事務を支援する方式であり²⁾、設計施工分離発注方式をはじめとする他の契約方式と組み合わせて活用されている。

一方で、CM方式と組み合わせる多様な契約方式に応じてCMRの業務内容や他の関係主体との関係性は異なるため、CM方式を初めて活用する発注者の中で、プロジェクトに応じたCMRとの連携を模索する必要がある。

本研究ではCM方式と多様な契約方式を組み合わせ活用した公共建築工事5事例に対してヒアリング調査を行い、各段階における発注者とCMRの連携とその課題について明らかにすることを目的とした。

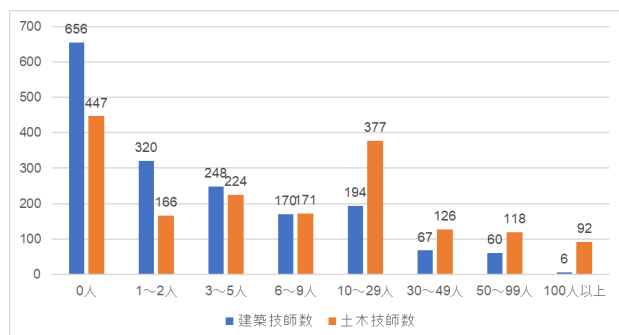


図-1 政令指定都市を除く市町村の建築・土木技師数

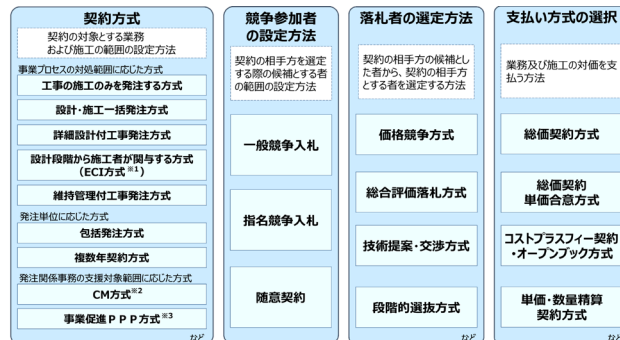


図-2 多様な入札契約方式の分類²⁾

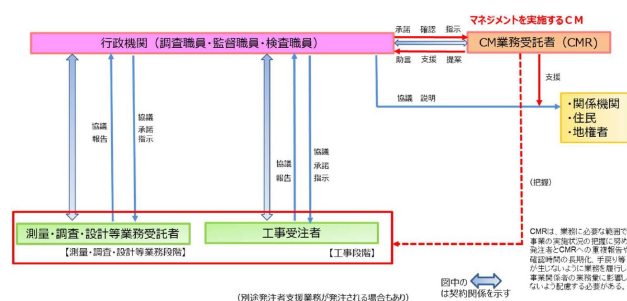
2. CM方式の概要と問題意識

(1) 公共工事におけるCM方式の定義

現状の公共工事におけるCM方式は2020年9月に国土交通省から公表された「地方公共団体におけるピュア型CM活用ガイドライン（以下「CMガイドライン」という。）」³で規定されている。

CMガイドラインでは「CM方式では、CMRは、従来の発注方式において発注者が担っていた企画、設計、発注、施工に関連する各種のマネジメント業務の全部又は一部を、発注者の補助者・代行者として行う業務契約を発注者と締結し、その対価を得る」、「CMRの立場は発注者の補助者・代行者であり、最終的な判断については、発注者が責任を負う」方式と定義されている。

よって、ガイドライン中には「CMRがその責任を負うのは、あくまでコンストラクション・マネジメントの専門家としての業務範囲に対してであり、その業務範囲において善管注意義務を尽くす」と明記されている。さらに図-3にある通り、CMRは発注者以外の各主体の業務を「把握」するのみで指示・命令は直接行わず、あくまでCMRの報告のもと発注者が指示・命令を行うと規定されている。また、図-4にある通り、CM業務の有無にかかわらず、発注者以外の各主体の役割は変わらないと明言されている。また、事業計画の決定等、予算執行に関わる部分もCMRに権限を渡すことはできない。



(2) 土木事業・建築事業におけるCM方式の違い

CMガイドラインは土木事業と建築事業の性質の違いを念頭に置いて策定されており、あらゆる記述で土木事業と建築事業を分けて整理されている。

建築事業は設計業務および工事監理業務を独占業務とする建築士制度があるため、図-3および図-4における事業関係者の役割分担が土木事業と全く異なる。

特に、土木事業の場合は工事の監督員の中にCMRの名前を連ね、工事監理の権限も含めた代行者とするケースもある一方で、建築事業では図-4（右）に示す通り、従来から存在する工事監理者と業務が重複しないように調整されている。また、同様に建築士業務の範囲内とされている基本計画策定業務も役割が分けられている。

(3) ヒアリング調査における問題意識

公共建築工事におけるCM方式は、指示・命令権限等との発注者の代行者としてではなく、あくまで発注者の補助者としての役割が強い。こうした背景を踏まえ、ヒアリング調査にあたり以下の問題意識を設定した。

- ・ 発注者とCMRが役割や権限等の適切な分担の下で連携が行われているか
- ・ 図3にあるCMRによる他主体への「把握」とはどのように行われているのか
- ・ 設計者や工事監理者、基本計画策定者とCMRの役割分担はどのように行われているか

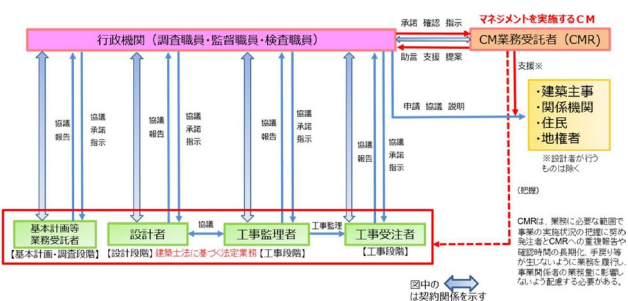


図-3 （左）土木事業におけるCMRの立ち位置、（右）建築事業におけるCMRの立ち位置³

委託者	CMR	測量・調査・設計等業務受託者	工事受注者
事業計画	全体工程管理支援 事業費管理支援 各種関係管理支援 関係者会議運営支援 他機関等調整支援（業務・工事間含む）		
測量・調査・設計等業務発注	入札・契約方式提案 契約関係図作成支援 技術提案等の評価支援		
測量・調査・設計等業務監督	発注者の意思決定支援 各種技術的助言	調査・設計の実施	
測量・調査・設計等業務完了検査、部分払検査	検査に係る支援	受検	
工事発注	入札・契約方式提案 契約関係図作成支援 技術提案等の評価支援		工事の施工
工事監督	発注者の意思決定支援 各種技術的助言		
完成、部分払、中間技術検査	検査に係る支援		受検

CMRが実施する支援・助言・提案は委託者に対して行う
CM業務の有無に関わらず、測量・調査・設計等受託者、工事受注者の役割は変わらない

委託者	CMR	基本計画等業務受託者	設計者	工事監理者	工事受注者
事業計画	全体工程管理支援 事業費管理支援 各種関係管理支援 関係者会議運営支援 他機関等調整支援（業務・工事間含む）				
基本計画等業務発注	発注者の意思決定支援 各種技術的助言	基本計画・調査の実施			
基本計画等業務監督	発注者の意思決定支援 各種技術的助言	検査に係る支援			
設計業務発注	入札・契約方式提案 発注関係図作成支援 技術提案等の評価支援				
設計業務監督	発注者の意思決定支援 各種技術的助言		調査・設計の実施		
設計業務完了検査、部分払検査	検査に係る支援		受検		
工事発注	入札・契約方式提案 契約関係図作成支援 技術提案等の評価支援				工事の施工
工事監督	発注者の意思決定支援 各種技術的助言		（設計意思伝達）	設計関係図作成・総合工程表・施工計画の検討等継続検査	
完成、部分払、中間技術検査	検査に係る支援			支援	受検

CMRが実施する支援・助言・提案は委託者に対して行う
CM業務の有無に関わらず、設計者、工事監理者、工事受注者の役割は変わらない

図-4 （左）土木事業におけるCMRの業務内容、（右）建築事業におけるCMRの業務内容³

3. ヒアリング調査の概要

(1) ヒアリング調査対象の選定

ヒアリング調査を実施するにあたり、2022年6月に国土交通省が発行した「CM方式活用事例集⁴⁾」や、2022年6月に日本コンストラクション・マネジメント協会が協会員向けにアンケート調査し、2023年1月に公表した「公共事業CM方式導入実績リスト⁵⁾」をもとに、近年CM方式および多様な契約方式を活用した公共建築工事を収集した。

次に、ヒアリング調査を行う公共建築工事の候補を選定した。選定方針としては、建物用途は庁舎を中心とし、CM方式と組み合わせた発注・契約方式は国土交通省の示す多様な契約方式を可能な限り網羅することとした。

その中から現在発注者・CMR双方の担当者に対して、ヒアリング調査に対応可否について問い合わせた結果、表-1に示す公共建築工事5事例においてヒアリング調査を実施することができた。

(2) 調査対象とした公共建築工事の概要

ヒアリング調査対象とした公共建築工事の概要は表-1に示すとおりである。2021年度に調査したA村～C市工事はα社、2023年度に調査したD市、E市工事はβ社が共通してCMRを担当している。C市工事のみ再開発事業であり、厳密に言えば再開発組合が行う民間建築工事であるが、建物用途の大部分が公共施設である市民会館である点、C市の設計者選定段階までC市が主導的に事業を進めていた点、後段階においてもC市の関与が大きい点を鑑み、調査対象に含めることとした。

(3) ヒアリング調査の実施形式と調査項目

ヒアリング調査は発注者とCMRの担当者双方が同席のもと、Web会議システムを用いて実施した。調査項目は表-2に示す通りであり、事前に質問内容と対応する回答対象者を示した上で、Web会議において双方に回答を求めた。この際、回答が困難であったり認識の相違がある場合は、他の回答者が適宜回答を補足することとした。

表-1 ヒアリング調査対象とした公共建築工事の概要

調査日	発注者	CMR	用途	構造	階数	延床面積	発注・契約方式	CM業務期間
2022/2/3	A村	α社	庁舎	RC造 一部S造 及び木造	地上2階	約1,000㎡	設計施工一括発注方式（設計・施工JV）+CM方式	基本計画～施工段階
2022/2/8	B市	α社	庁舎	RC造 一部S造	地下1階 地上6階	約10,000㎡	設計施工分離発注方式+CM方式	基本設計～施工段階
2022/2/9	C市※	α社	市民会館等	RC造 一部S造 及び木造	地下2階 地上4階	約23,000㎡	ECI方式+CM方式	基本設計～施工段階
2023/5/29	D市	β社	庁舎	RC造 一部S造	地上7階	約6,000㎡	ECI方式+CM方式	基本計画～施工段階
2023/7/3	E市	β社	庁舎	S造 一部RC造	地下1階 地上6階	約13,000㎡	実施設計技術協力・施工一括発注方式+CM方式	基本設計～施工段階

※ C市工事は再開発事業であり、実際の発注は再開発組合が担当している。

表-2 ヒアリング調査における調査内容の概要

番号	調査項目（大分類）	調査項目（小分類）	
		回答対象者	質問内容
質問1	プロジェクト構造について	発注者・CMR	調査者側が作成した各段階におけるプロジェクト構造の図（後述）の確認
		発注者・CMR	発注体制・構成や、工事に至った経緯
質問2	発注者とCMRの連携について	発注者	CM方式を導入した目的や経緯、期待
		発注者・CMR	発注者・CMR間の連携の具体例
		発注者	実際にCMRを活用したメリット
		発注者	次回CM方式を活用すると仮定した場合の要望
		CMR	発注者と連携する上で実践した工夫等
質問3	多様な入札契約方式について	発注者	当該発注・契約方式を導入した目的や経緯
		発注者	当該発注・契約方式を活用したメリット
		CMR	当該発注・契約方式の際のCMR立ち位置や注意点

(1) プロジェクト構造の比較

a) A村工事

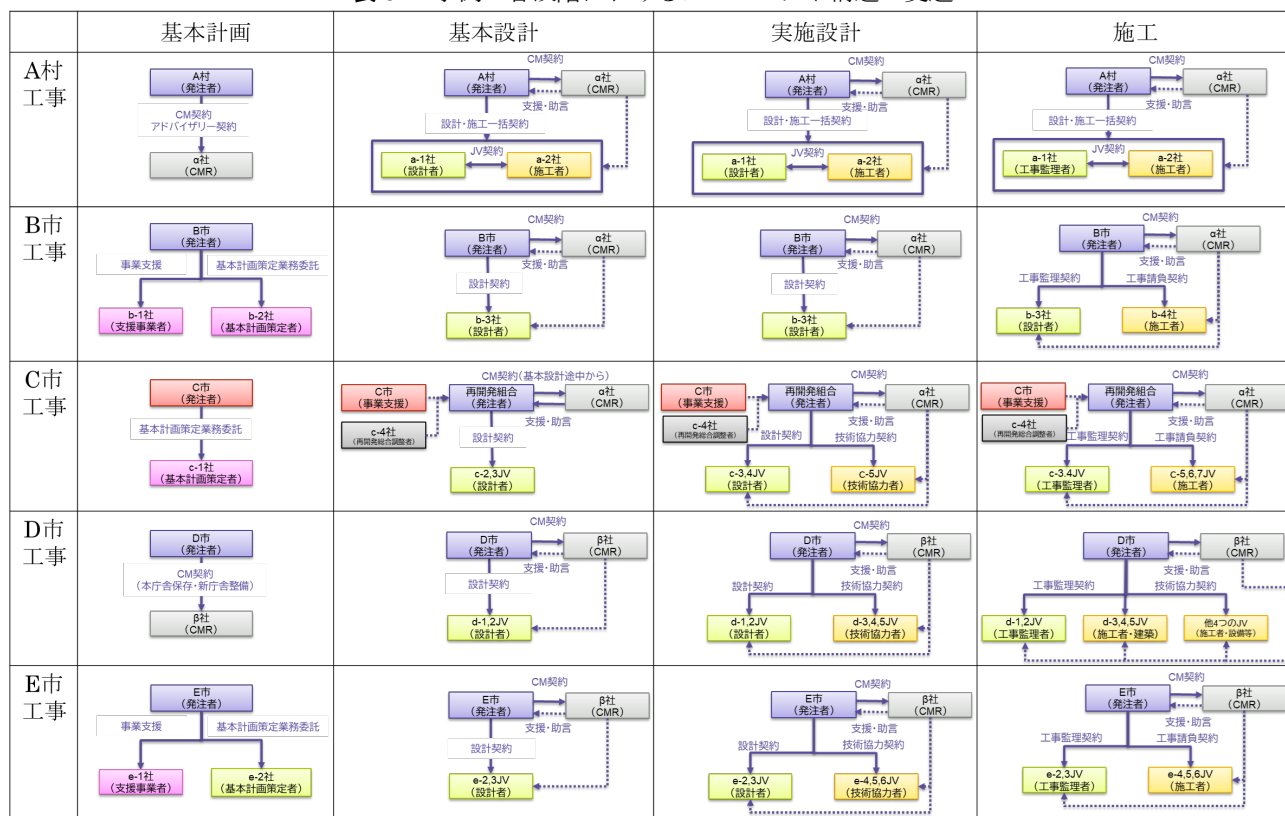
b) B市工事

B市は耐震性の不足から庁舎建替を企画したが、当初技術職員が一人しかおらずマンパワーが不足していたため、b-1社から事業に対する助言を受けつつ、b-2社に基本計画策定を委託した。後にb-1社からの助言に従いCM方式の導入を決め、設計前段階からα社と契約し、設計者選定から施工段階まで支援を受けた。また、設計施工分離発注方式を用いて、設計段階にb-3社、施工段階にb-4社と契約した。

c) C市工事

C市は東日本大震災で被災した市民会館を再開発事業で建て替えるためc-1社に基本計画策定を委託した。その後、設計コンペでc-2社、c-3社を選定し、2社JVを設計者として再開発組合に推薦した。基本設計段階からは再開発組合が発注者となり、C市は再開発事業を監督・支援する立場に変わった他、再開発総合調整者としてc-4社が加わった。また、基本設計段階途中に、消費税増税までに工事を発注して工事金額を抑えるため、施工者の技術を活用して設計を前倒しする目的でECI方式の活用することとなり、同時に技術協力者選定と三者協議会の運営のためCM方式を導入が決定し、α社と契約した。α社の支援の下、実施設計段階に技術協力者としてc-5社を選定し、施工段階にはc-5社に加えてc-6,7社がJVを組み、c-5,6,7JVとして工事を行った。

表-3 5事例の各段階におけるプロジェクト構造の変遷



凡例 : 契約上の主体 : 発注者との契約関係 : CMRとのマネジメント関係

d) D市工事

D市は庁舎の老朽化により、歴史的価値の高い本庁舎の保存と別館の建替を企画したが、技術的難度とマンパワーの不足により、基本計画段階からCM方式の導入を決め、β社と契約した。β社の支援の下、ECI方式の導入を決め、基本設計段階に設計者としてd-1,2JVと契約した。また、実施設計段階に技術協力者としてd-3,4,5JVを選定し、施工段階に引き続き建築工事を発注した。なお、各種設備等の工事（4工種）はそれぞれ別の施工者JV4団体に発注した。

e) E市工事

E市は耐震性の不足から庁舎建替を企画したが、耐震補強では費用が掛かりすぎることが判明し、e-1社から事業に対する助言を受けつつ、e-2社に基本計画策定を委託した。後にe-1社からの助言に従いCM方式の導入を決め、設計前段階からβ社と契約し、設計者選定から施工段階まで支援を受けた。基本設計段階ではe-2社がe-3社とJVを組んで設計者となった。また、e-1社からは実施設計段階から意匠以外の設計と施工の一括発注を提案されていたが、CMRが行ったサウンディング調査により施工者側の受注が逼迫して当初計画は難しいことが判明し、代わりに技術協力業務と施工を一括で発注する「実施設計技術協力・施工一括発注方式」というECI方式に近い独自の契約方式としてe-4,5,6JVに発注した。

(2) CM方式に関する調査項目の比較

表-4、表-5（次ページ）は、A村～E市工事の5事例における各質問項目に対する回答を比較したものである。

a) 発注者がCM方式を導入した理由

導入利用の多くにマンパワーの不足や専門的な知識の不足が挙げられている。一方で、建築事業全体の知識不足の場合から、技術的難度の高い特定工種に関する知識不足まで幅がある点に留意する必要がある。また、ECI方式等を導入したC市、D市（およびECI方式に近い独自の方式を使用したE市）の内、C市のみECI方式の適用による三者協議会の運営を目的に基本設計段階の途中からCMRに参加させている。

b) CMRが行った特筆すべき工夫

CMRの工夫はコスト管理の支援や全体スケジュールの作成、関係主体間の調整等、工事の特性ごとに様々である。特にA村およびE市では工事特性に合わせた契約方式の提案を行っており、工事全体のプロセスを大きく左右する意思決定にCMRが関わっているといえる。

c) 発注者の感じたCM方式のメリット

CM方式の導入理由に対応した形で専門的な知見や技術的助言の提供、およびコストやスケジュール管理がメリットとして挙げられた。一方、業者選定委員会の運営支援やECI方式における三者協議会の適切な運営等による発注者の負担減に関する部分も多く挙げられていた。

表-4 CM方式を導入した目的と実際のメリット

	CMR	CMRの参加時期	発注者がCM方式を導入した理由	CMRが行った特筆すべき工夫	発注者の感じたCM方式のメリット
A村	α社	基本計画～施工段階	・マンパワーの不足 ・専門的な知識の不足 ・事業者との交渉力不足	・村の他施策との整合性を考慮したプロジェクト運営 ・都心部から離れた村の立地に対応した契約方式の提案	・専門的な知見や技術的助言の提供 ・事業者との交渉力の強化
B市	α社	基本設計～施工段階	・マンパワーの不足 ・専門的な知識の不足（免震構造等）	・各主体の役割分担表の活用 ・設計者との目標コストの共有とコスト管理の支援 ・全体スケジュールの確認 ・鉄骨等の調達リスクの明示	・専門的な知見や技術的助言の提供 ・特に建築部分に関する免震構造等の確認
C市	α社	基本設計～施工段階	・工期対策に導入したECI方式に伴う三者協議会における第三者的な調整役の必要性	・パートナーシップ協定における役割と責任の明確化 ・デザイン力のある設計者と技術力のある技術協力者の間の適切な調整	・三者協議会の適切な運営 ・全体スケジュール管理
D市	β社	基本計画～施工段階	・マンパワーの不足 ・専門的な知識の不足（免震構造および歴史的建造物）	・免震構造および歴史的建造物に関する各段階における重点管理事項の設定 ・技術提案の適切な取り入れ ・コスト増減の原因別の対処	・事業者選定の支援による発注者の負担減 ・三者協議会の適切な運営 ・免震構造および歴史的建造物に関する技術的な助言
E市	β社	基本設計～施工段階	・マンパワーの不足 ・技術的難度及び短工期 ・総合評価審査委員会の運営役の必要性	・施工者へのサウンディングおよび当初想定した発注・契約方式からの変更提案 ・項目別の懸案事項の整理 ・コスト増減管理表の作成 ・全体スケジュールの作成	・総合評価審査委員会の役割分担による発注者負担軽減 ・三者協議会の適切な運営とコスト増減管理表による当初契約金額の維持

d) 各段階におけるCMRの役割の変遷

各段階におけるCMRの役割は、適用した契約方式および表-3に示すプロジェクト構造の変遷に対応して、表-5の通りに変化している。

CM方式としてのCMRの役割は、各種技術的助言および、コスト増減表の作成や全体スケジュールの策定といった「発注者の意思決定支援」である。基本的には定例会議の運営を通じて、発注者の同席のもとで設計者や施工者の状況を「把握」し、発注者を通じてマネジメントを行うとのことだったが、工事を円滑に進めるため、あくまで発注者の了解のもと、設計者や施工者に対して直接マネジメントする事例もあるとのことであった。

他方、ECI方式等を導入したC市、D市（およびECI方式に近い独自の方式を使用したE市）の場合、実施設計段階に発注者・設計者・施工者の三者間で締結する協定書内において、CMRは三者間の調整者として明確に位置づけられるため、他の契約方式・段階における支援者・助言者とは異なる役割・権限を担っていた。

また、法定業務である建築士業務と、任意の業務であるCM業務の線引きには注意を払っているとの意見が多かった。例えば基本計画段階からCMRが参加している場合でも、CMRが行うのはあくまで基本計画策定「支援」としているが、実質上は契約方式の選定等、プロジェクトの根幹部分を提案していた。また、場合によっては他社が策定した基本計画を見直す場合もあった。さらに、施工段階において工事監理者とCMRとの間で業務内容の住み分けや線引きについて打ち合わせを行う場合もあるとのことだった。

5. まとめ

本研究では公共建築工事における発注者とCMRの連携に着目して調査・分析を行った。結果として、発注者の経験・能力や、選定された契約方式とそれに伴うプロジェクト構造の変遷、他の主体との役割分担によって、CMRの行うべき役割が変化することが分かった。

今後の展望として、ヒアリング調査を継続的に実施し、発注者・CMRの連携の課題を体系的に整理し、建築研究所の発行する「建築研究資料」として研究成果を報告する予定である。

謝辞：本研究においてヒアリング調査にご協力いただいた地方公共団体およびCM事業者のご担当者の方々、および論文執筆に当たりご助言いただいた広島大学の平野吉信名誉教授、建築研究所の眞方山美穂建築生産研究グループ長、国土技術政策総合研究所の高橋暁シニアフェローに、この場を借りて深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 総務省: 第4表 職種別職員数（総職員）（北海道～沖縄県）, 令和4年地方公共団体定員管理調査関係データ, 2022.4, (https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/jichi_gyousei/c-gyousei/teiin/)
- 2) 国土交通省: 多様な入札契約方式の活用に向けて, p.3, 2017.12(<https://www.mlit.go.jp/common/001215612.pdf>)
- 3) 国土交通省: 地方公共団体におけるP2A型CM方式活用ガイドライン, 2020.9()
- 4) 国土交通省: P2A型CM方式活用事例集, 2020.9()
- 5) 日本コンストラクション・マネジメント協会: 公共事業CM方式導入実績リスト, 2023.1 (<https://cmaj.org/index.php/ja/site-pages/2144-cmsystem-list>)

表-5 各段階における発注者とCMRの連携の変遷

	契約方式	基本計画段階	基本設計段階	実施設計段階	施工段階
A村	設計施工一括発注方式（設計・施工JV）	・ 基本計画策定支援 ・ 契約方式提案	・ 意思決定支援 ・ 各種技術的助言 ・ 定例会議の運営	・ 意思決定支援 ・ 各種技術的助言 ・ 定例会議の運営	・ 意思決定支援 ・ 各種技術的助言 ・ 定例会議の運営
B市	設計施工分離発注方式		・ 基本計画の見直し ・ 設計者選定の支援 ・ 定例会議の運営 ・ 各種技術的助言	・ 意思決定支援 ・ 各種技術的助言 ・ 定例会議の運営 ・ 施工者選定の支援	・ 意思決定支援 ・ 各種技術的助言 ・ 定例会議の運営
C市	ECI方式		・ 技術協力者選定の支援	・ 三者協議会の運営 ・ 三者の利害調整 ・ 各種技術的助言	・ 意思決定支援 ・ 各種技術的助言 ・ 定例会議の運営
D市	ECI方式	・ 基本計画策定や計方式の選定を支援 ・ 設計者選定の支援	・ 意思決定支援 ・ 各種技術的助言 ・ 定例会議の運営 ・ 技術協力者選定の支援	・ 三者協議会の運営 ・ 三者の利害調整 ・ 各種技術的助言	・ 意思決定支援 ・ 各種技術的助言 ・ 定例会議の運営
E市	実施設計技術協力・施工一括発注方式		・ 各種技術的助言 ・ 施工者へのサウンディングと契約方式の変更提案 ・ 技術協力者選定の支援	・ 三者協議会の運営 ・ 三者の利害調整 ・ 各種技術的助言	・ 意思決定支援 ・ 各種技術的助言 ・ 定例会議の運営

難工事指定工事における取組

ぎおいがわ (妓王井川)

奥田 大祐

南部土木事務所 河川砂防課

野洲駅前市街地の人家連坦地、かつ各種地下埋設管が輻輳する狭隘道路沿いの、妓王井川を函渠化する工事における仮設工法（オープンシールド工法）が、滋賀県下では施工実績が少なく技術的に困難なものであった。そのため、当河川工事については、滋賀県初の「難工事指定」を受けた。

本稿では、当該工事における「オープンシールド工法の採用」、「関係機関および地元との調整」および「長期にわたる通行規制」の3つの視点から課題解決に向けた取組について報告するものである。

キーワード 難工事指定、関係機関協議、地元調整、オープンシールド工法、通行規制

1. はじめに

妓王井川は、図-1のように野洲市の中心市街地を北東に向かって流れる川で、中ノ池川、童子川、家棟川に合流して琵琶湖に流入している。流域面積約3.9km²、延長約2.1kmの一級河川である。

流下能力が著しく低いため、頻繁に浸水被害が起きているが、市街地であることやJR琵琶湖線を横過しているため、JR協議や用地買収には相当の時間を要し、また、莫大な費用が掛かることから、事業化が進んでいなかった。そのような中、2013年の台風18号により、野洲駅前で50cm以上の床上浸水する被害が発生し（写真-1）、野洲市および地元自治会から、浸水対策を実施するよう強い要望があった。

そこで、現況のJR横過部の最大流量を目標とした暫定的な改修計画を検討した。野洲市とも協議し、特に流下能力が低い区間については、2014年から「緊急的な対策」として、5年かけて河床掘削工事を実施した。

また、「当面できる最大の対策」として、2020年より特に狭隘な野洲駅前交差点部から改良工事に着手した。

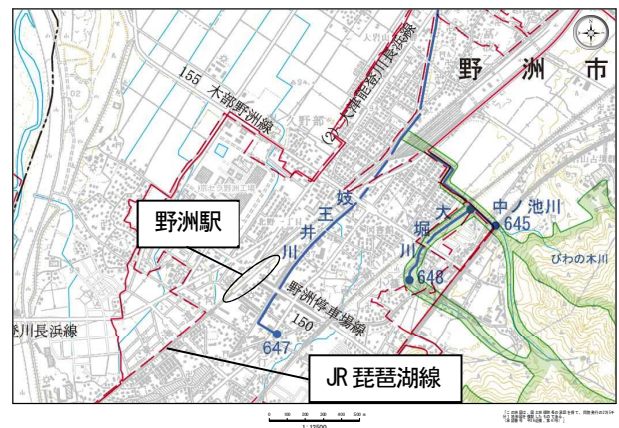


図-1 妓王井川位置図



写真-1 2013年台風18号による駅前交差点の浸水状況

2. 姦王井川河川改良工事の概要

姦王井川河川改良工事は、2013年の台風18号のような甚大な浸水被害を軽減すべく、河積を拡大し、流下能力を向上させる工事である。市街地の中、既設の橋梁や護岸を取壊し、ボックスカルバートに置き換えた。施工範囲は、野洲駅前交差点部（約23m）であるⅠ期工事とその下流約70m区間のⅡ期工事に分割発注し、2年で施工した（図-2）。交差点部や狭隘地において工事を行うため、交通渋滞の発生を抑制する対策を実施した。

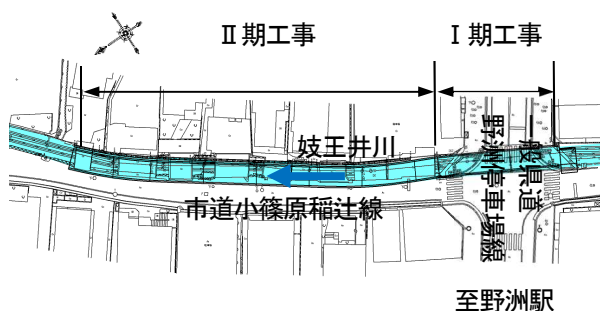


図-2 施工範囲平面図

(1) Ⅰ期工事：野洲駅前交差点部（写真-2）

野洲駅前交差点部のみを施工。施工延長約23m。

Ⅰ期工事の特徴として、通行車両が集中する野洲駅前交差点部において、施工に支障となる交差点信号を移設し、終日片側交互通行規制を行いながら仮設鋼矢板による開削工法を用いてボックスカルバートを敷設した。

ボックスカルバートを設置する交差点部は道路が橋梁構造となっていたため、橋梁を撤去しなければならなかった。現場は市街地であることから橋梁撤去時の騒音・振動を軽減しながらの施工が必要となった。

また、野洲駅前の市有地に仮設ロータリーを設置し、バスを含めた一般交通が工事箇所を迂回するよう、交通渋滞の発生抑制対策を講じた。



写真-2 Ⅰ期工事施工状況

(2) Ⅱ期工事：駅前交差点下流部（写真-3）

Ⅰ期工事より下流部を施工。施工延長約70m。

Ⅱ期工事の特徴は、河川右岸側に人家が連坦し、左岸側に市道が並走する狭隘な現場であった。また、市道を

通行止めにできないことから最小限の幅員による施工を余儀なくされた。

そのため、鋼矢板による仮設工としていた当初詳細設計を大幅に見直すことにより、工事を実施した。



写真-3 Ⅱ期工事施工状況

3. 難工事指定

滋賀県では、「滋賀県難工事指定制度」が2021年2月24日に創設された。これは、交通量が非常に多く、かつ作業ヤードが狭隘であるなど、「社会条件」または「マネジメント特性」等において、厳しい制約を受ける工事を難工事として指定するものである。そして、当該工事を一定の条件で完了した実績を、以降の総合評価方式により発注する工事において評価することで、工事施工者の入札参加意欲を高めることを目的としている。

Ⅱ期工事の現場状況は前述のとおり、姦王井川の右岸側は河川際を人家が連坦しており、左岸側は河川際を市道小篠原稲辻線が並走している（写真-4）。その市道下には上下水道管やガス管などの埋設物が密集して配置されており、兩岸共に施工余裕幅が確保できない厳しい現場条件下での施工であった。

この河川改修を行うため市道に複数配置された電気、ガス、上下水道、通信等、人家への引込みも含めたライフラインを移設しなければならず、各管理者との設計・施工に関する協議および移設期間の調整を綿密に行う必要があった。

さらには、当該地の市道は駅前へ至る抜け道であるため、一般車両が離合できないほど、幅員が狭小であるにも関わらず、交通量が多く、工事の実施には終日通行規制が必要であった。

これらのことから、Ⅱ期工事は総合評価方式の工事難易度がⅣとなり、県下初の難工事指定工事に指定された。



写真4 II期工事の現場状況

打込みや引抜きが周辺の状況から物理的に困難と言った3つの施工条件から、今回は最も厳しい現場条件の場合に用いる「NOS I 型」を採用した。



写真5 オープンシールド機 概要

4. 発注にあたっての課題と対応策

(1) 工法および構造等の検討

a) オープンシールド工法の採用

オープンシールド工法とは、市街地の狹隘箇所や軟弱地盤などの厳しい施工条件下で、オープンシールド機（写真-5）を用いて土留めをしながら函渠や開渠を地中に埋設する特許工法である。

オープンシールド機が移動する土留の役割となり、土留の中に函体を据付け、それに推進反力をとりシールド機が掘進していく。（図-3）

当工事におけるオープンシールド工法の採用理由は、①設計業務では函渠工を施工するための仮設工法として、妓王井川右岸側における人家連坦部において仮設鋼矢板を残置する計画としていたが、近隣地権者の同意が得られない状況が工事発注前に想定されたこと ②妓王井川左岸側に位置する市道では、沿道に店舗や多くの駐車場があり、工事のための通行止めは、地元の理解を得られず通行規制を見直す必要が生じることが想定されたことから通行規制を見直し、類似工法と比較検討した結果、厳しい条件の中、確実に施工できる工法であると判断したからである。

オープンシールド工法には4つのタイプ（表-1）があるが、①住宅に近接している箇所での函体敷設 ②既設護岸を取壊しながらの函体敷設 ③開削による土留めの

表-1 オープンシールド工法

タイプ		特徴
NOS I 型	函体反力型（裏込注入タイプ）	・ 函体と地山の空隙部に裏込注入材を充填しながら掘進 ・ 近接構造物や埋設物に接近している箇所でも適応可能
NOS II 型	函体反力型（裏込注入なしタイプ）	・ 函体と地山の空隙部に土砂等で埋戻しを行いながら掘進 ・ 近接構造物や埋設物のない箇所でも適応可能
NOS III 型	元押し推進型（推進タイプ）	・ 発進部に函体を据付け、元押し設備にて推進 ・ 超低空頭部での施工に適している ・ 推進線形は原則として直線
NOS IV 型	函体非反力型（自走タイプ）	・ 地山との周辺摩擦を反力として推進 ・ 近接構造物や埋設物のない箇所でも適応可能 ・ 4つのタイプで最も安価

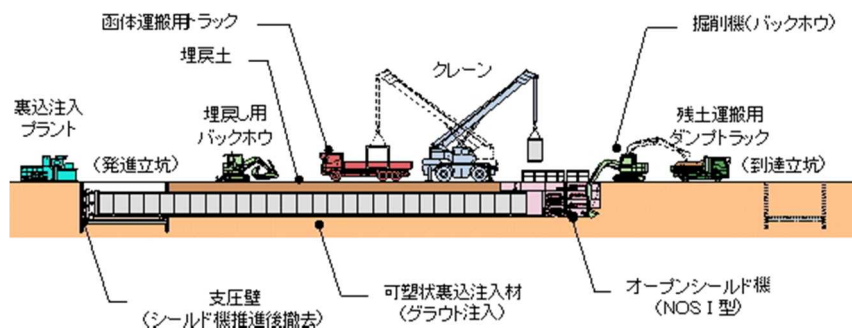


図-3 オープンシールド工法 配列図

b) 発進・到達立坑についての検討

施工にあたっては事前にオープンシールド機を地下に埋設し、掘進後には撤去する必要がある。そのため、マシンを投入する発進立坑および解体・撤去し引き上げるための到達立坑が必要になる。

このことについて、オープンシールド協会に相談しながら検討を行った。

c) ボックスカルバート構造についての検討

当初設計では、地下水位による函体の浮き上がり防止を目的とした現場打ちによる張り出し部を設けた構造としていた。

しかし、現地が狭隘地であり張り出すことができないため、ボックスカルバート側面に浮き上がり対策としてウィープホールを設ける構造(図-4.5)へと見直した。また、オープンシールド工法による施工時にはボックス背面への裏込め材のグラウト孔をウィープホールの設置位置として利用可能となるよう再考した。

さらには周辺への影響を考慮し、最小掘削幅にて施工するため、掘削幅と躯体との間に転圧機が入らない狭小部については、流動性に優れている豊浦標準砂を用いた水締めにより埋戻しを実施することとした。

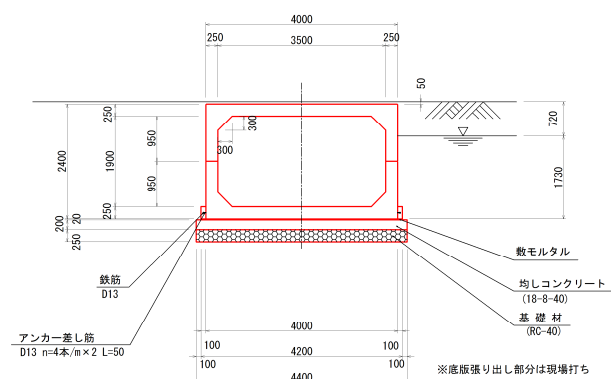


図4 ウィープホール設置検討前

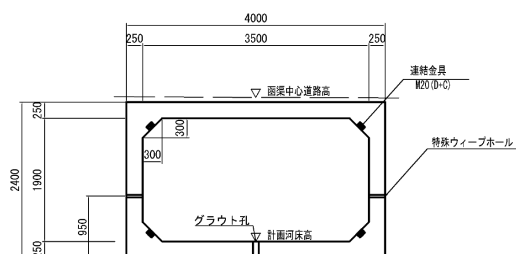


図-5 ウィーブホール設置検討後

(2) 関係機関および地元との調整

a) 支障電柱の移設

関西電力送配電株式会社（以下「関電」という。）ならびに日本電信電話株式会社（以下「NTT」という。）所有の電柱が工事に支障となるため、関係機関と協議し

た結果、NTT柱は単独柱から既設の共架柱への変更で調整できた。一方、関電柱については、構造的に共架できないことから、近隣住民に対して民地への建立を打診したが、協力を得られず、関係機関と再協議し、移設位置についても再検討することとなった。

5. 工事施工時における課題と対応策

(1) 関係機関および地元との調整

発注前はもちろんのこと、施工中においても適宜、多岐に渡る関係機関（表-2）と協議や調整をしながら、工事を進めた。

表-2 関係機関一覧表 (※は連絡調整会議に出席)

関係機関	主な協議内容
野洲市道路河川課※	道路拡幅計画
野洲市環境課	妓王井川の環境保全
野洲市上下水道課※	上下水道の移設
関西電力送配電(株)※	電柱，連系管路，架空線の移設
NTT※	架空線の移設
ZTV※	架空線の移設
オプテージ※	架空線，連系管路の移設
大阪ガスネットワーク(株)※	ガス管の移設
守山警察署	信号移設，交通規制等
県警本部	交通規制方法
文化財保護課	文化財調査
タイムズ24(株)	駐車場の一時閉鎖
野洲川土地改良区	水替工
環境団体	妓王井川の環境保全
駅前自治会	地元調整
大篠原自治会	上流の水門管理

a) 連絡調整会議の開催

工事の工程の「見える化」を行うため、月1回程度の連絡調整会議を実施することにより、埋設物管理者と常に最新の情報共有を行うとともに、課題等の早期発見と解決に努めた。

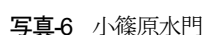
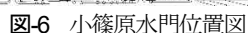
関係機関との協議内容を地元で説明し一定の理解は示してもらえたが、時には厳しい意見をいただくこともあり、再度、関係機関との工程や工法の再検討が必要な場合も多々あった。

b) 流量調整に伴う協議

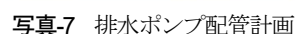
工事区間上流には小篠原水門があり（図-6、写真-6）、
普段は大篠原自治会で管理されている。

工事期間中は米井井川を経由し当該現場の下流において妓王井川に流入するよう、野洲川土地改良区と協議し小篠原水門で調整していた。ところが、妓王井川に生息している鯉やスッポンを保護している環境団体から、下流域で生息する生物への影響が大きいと、水門から妓

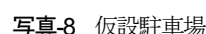
いち早く野洲駅前の浸水被害を軽減することが最重要であることを説明したうえで、野洲市環境課も交えて協議し、工事に支障のない範囲で、水門から妓王井川方面の河川内をドライにする範囲および時期を最小化することにより、最大限配慮することで理解を得た。



発注当初の水替えは最下流端に仮設調整池を設置し、ポンプ排水により対応する計画であった。工事に着手すると、河川の流水量がかなり多く、また、耕作期には更なる増水が見込まれることが判明した。このままでは掘進することが困難であることから、φ200mmの仮設配水管を4本設置し、流水を常時迂回させる方法（写真-7）に変更した。



沿川には店舗や住宅に付随する駐車場が多くあり、施工時には利用できなくなることから、仮設駐車場が必要となった。そのため、野洲駅東口ロータリー横に設置した仮設駐車場（写真-8）を使用してもらうよう、近隣の方々に協力いただいた。



オープンシールド工法の発進・到達立坑箇所は現況幅員が狭いため、公安委員会との協議の結果、市道に終日一方通行規制をかけることとなった。そのため、守山警察署と協議し標識の追加設置、補助標識のマスキング等の対策を講じたうえで地元回覧板、市の広報誌および地元説明会を通じて、通行規制について周知徹底したが、逆走車が絶えなかった。そのため、追加の対策として、市道入口部において県道の右折レーンをクッションドラムにより塞ぐ対策（写真-9）、そして交通誘導員を終日配置し、道路幅員を減少させることで逆走防止措置を図った。



写真-9 クッションドラム設置状況

b) 通行規制等に対する地元の理解

通行規制の対象範囲には、歯科医院や薬局などの店舗もあり、当初は通行規制を伴う事業に反対されていたが、浸水被害軽減のための工事であることを地元説明会にて丁寧に説明し、どうにか理解いただけた。

6. おわりに

Ⅱ期工事が県下初の難工事指定工事に指定されたことから、工事発注ならびに施工にあたっての課題や対応策について論文にまとめた。

これまで県が発注主体となる河川工事において、施工

場所が十分に確保できていたり、車道などが近接していなかったりする事例は数多く存在しているが、本工事のように人家が連坦する狭隘地、かつ一般車両を通しながらの状態で行う事例は少ない状況にある。

今後、本工事と同様の難工事指定工事が増えていく中で、本論文がその一助となれば幸いである。



写真-10 施工状況

謝辞：本論文の作成において、オープンシールド工法に関して御指導いただいたオープンシールド協会様に御礼申し上げます。また、地元調整および事業推進に御尽力いただいた野洲市ならびに駅前自治会の役員の皆様にこの場を借りて感謝申し上げます。

高精度なGNSS軌道情報（暦：れき） の算出による測位基盤の強化

大野 圭太郎

国土地理院 測地観測センター 電子基準点課

（〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番）

米国のGPSや日本の準天頂衛星システム「みちびき」をはじめとしたGNSS衛星の精密な軌道情報（暦：れき）は、位置情報の基盤の整備のために不可欠である。国土地理院では、海外機関へ依存していた高精度な暦を国内独自に算出するため、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と共同で技術開発を行い、運用体制を構築した。この取組がGNSSに関する国際機関（国際GNSS事業）に認められ、2023年7月、我が国で初めて同事業に対し暦の定常的な提供・公開を開始した。国際基準に準拠したGNSS衛星の軌道情報を自律的に管理することで、より安定的な位置の基準の維持・管理、測地・測位分野の研究活動の促進が期待される。

キーワード GNSS, GPS, 衛星, 測位, 測地, 基準点

1. はじめに

GNSS (Global Navigation Satellite System) は、衛星から送信される電波信号を用いて地上の位置を決定する衛星測位システムで、米国のGPS、日本の準天頂衛星システム「みちびき」(QZSS)、ロシアのGLONASS、EUのGalileoが代表的である。

GNSSは受信機を地表に固定することで、その地点の座標値や地殻変動を観測する技術として用いられる。国土地理院では、全国約1,300か所でGNSS連続観測点「電子基準点」を管理・運用しており（図-1）、電子基準点は測量のための国家基準点として国内の測地基準系の維持・管理に用いられている。また、GNSSで得られる位置情報は観測時におけるもので、過去のある時点の位置を基に作られた地図と整合させるには、累積した地殻変動を補正する仕組みが必要となる。国土地理院では、電子基準点の毎日の位置情報である「電子基準点日々の座標値」(F5解)¹⁾を算出し、これを用いて測位と地図を整合させる仕組みを整備している。

日常生活においても、スマートフォンやカーナビゲーションの普及により、GNSSは既に必要不可欠な移動体の測位技術となっているが、今後、ICT施工、



図-1 電子基準点「つくば1」の外観。約5mのピラーの上部にGNSSアンテナが設置されている。

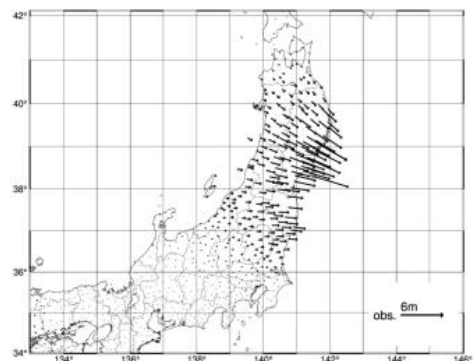
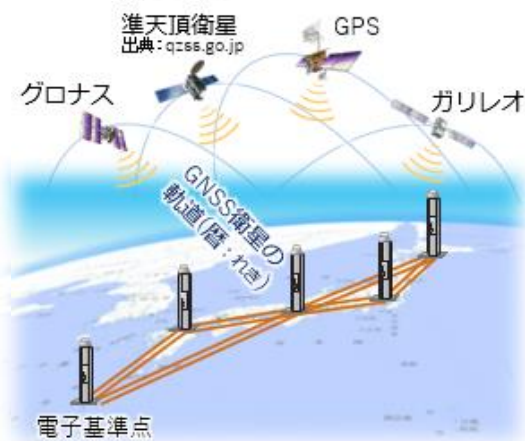
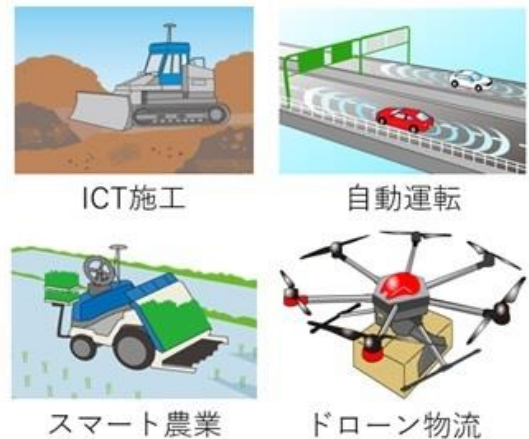


図-2 2011年東北地方太平洋沖地震時に、全国の電子基準点で観測された地殻変動。



精密な衛星軌道情報を整備



高精度測位社会を推進

図-3 精密暦。

自動運転、スマート農業、ドローン物流等への活用拡大が見込まれている。これらの分野では、より高精度なcmレベルでの測位が要求され、多様な高精度測位サービスが開発・展開されている。前述の「電子基準点日々の座標値」は、近年ではセンチメートル級測位補強サービス (CLAS)²⁾ に代表されるリアルタイム高精度測位サービスの基盤としても活用されている。

2. 高精度なGNSS軌道情報(精密暦)の課題

衛星の軌道情報は暦(れき)と呼ばれる。GNSSによる位置決定では、ある時刻における衛星の位置を基に地上の位置を決定するため、暦の精度は測位の精度に直結する。

暦は、衛星からの測位信号に含まれる「放送暦」と、大量の地上観測データを解析して求める「精密暦」の2種類に大別される。それぞれ入手の容易さや精度の高さに特徴があり、衛星測位ユーザは自らの用途により使い分ける。「電子基準点日々の座標値」をはじめとした高精度な位置決定には精密暦が使用されている。

このように精密暦は高精度測位の基盤として不可欠であるにも関わらず、これまではその算出を海外機関へ依存していた状況にあった。精密暦は衛星測位に関する国際機関である国際GNSS事業 (IGS) が認めた北米、欧州、中国の計12の解析センター (表-1) において算出され、IGSがそれらを統合処理した精密暦 (IGS暦) が国際標準として広く利用されてきた。日本は、これまで解析センターへの参画ができておら

表-1 IGS解析センター一覧(<https://igs.org/acc>を基に作成)

プロダクト識別子	組織名	国名
EMR	Natural Resources Canada	カナダ
WHU	Wuhan University	中国
GOP	Geodetic Observatory Pecny	チェコ
GRG	Space geodesy team of the CNES	フランス
ESA	European Space Agency/ESOC	ドイツ
GFZ	GeoForschungsZentrum	ドイツ
COD	Center for Orbit Determination in Europe	スイス
JPL	Jet Propulsion Laboratory	米国
MIT	Massachusetts Institute of Technology	米国
NGS	NOAA/National Geodetic Survey	米国
SIO	Scripps Institution of Oceanography	米国
USN	U.S. Naval Observatory	米国

ず、国際標準に準拠した精密暦を自律的に算出できていない状況にあった。

また、みちびきは現在4機体制であるが、2024年度にかけて7機体制へ向けた打上げが進む予定であり、みちびき単独での持続測位が可能となる見込みである³⁾。複数種類のGNSS (マルチGNSS) を利用することで、GPSだけでは測位が困難な都市部や山間部等でも測位が可能となる⁴⁾等、みちびきを含むマルチGNSSの効果が期待されているところである。しかし、みちびきの精密暦は現在IGSから公式プロダクトとして公開されておらず、準天頂衛星はアジア・オセアニア地域を中心にカバーしているという事情もあり、算出している解析センターは少ない。

これらの課題を解決するため、本論文は、精密暦を国内で独自に安定的に算出し、高精度測位社会の基盤を整備することを目的とした(図-3)。

3. 国内で精密暦を算出する協力体制

国土地理院では宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と共同で、国内独自の精密暦算出に向けて、技術開発を進めてきた。JAXAは国産のGNSS軌道計算ソフトウェアであるMADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis)³⁾を開発し、軌道決定における豊富な知見を有している。また、国土地理院は、「電子基準点日々の座標値」の算出を25年以上にわたって安定的に実施してきた。今般、両機関が連携し、国土地理院がMADOCAを用いて精密暦を算出し、JAXAがその運用結果に基づきMADOCAを改良する協力体制を構築することで、精密暦の安定的な算出が可能となった。

この取組がIGSにも認められ、2023年7月以降、我が国では初めてIGSに精密暦を定常的に提供することとなった⁶⁾。

4. 運用の概要

解析には、複数GNSS対応高精度軌道時刻推定ツールMADOCAを用いる。これはマルチ GNSS に対応して、個々の衛星の精密暦と搭載されている原子時計の誤差(衛星時計誤差)を、地球自転のゆらぎなどの地球物理学的な効果も加味して高精度に推定するためのソフトウェアである。地球を周回している測位衛星の暦を推定するためには、全球的に分布する地上観測点のデータが必要であるため、観測データをIGSや電子基準点から取得し、解析に使用する(図-4)。

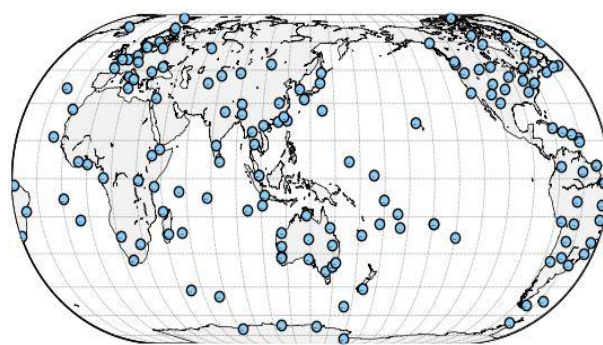


図-4 使用したGNSS観測点の配置。

表-2 国土地理院で運用している精密暦。精度は、IGS最終暦を基準とした3DRMSの概略値。

	速報性	精度	外部提供
リアルタイム暦	即時	～ 10 cm	気象庁
超速報暦	1 時間後	～ 5 cm	(現在開発中)
速報暦	1 日後	～ 2.5 cm	IGS
最終暦	5 日後	～ 2 cm	※識別子：JGX

国土地理院とJAXAでは、速報性に応じて4種類の精密暦を算出している(表-2)。リアルタイム暦は拡張カルマンフィルタで即時的に推定されるもので、気象庁において、気象予報の水蒸気量推定に用いられている。そのほかの精密暦は最小二乗法により後処理的に算出されるもので、2023年12月現在、最終暦と速報暦の2種類を「JGX」というプロダクト識別子でIGSに提供している。

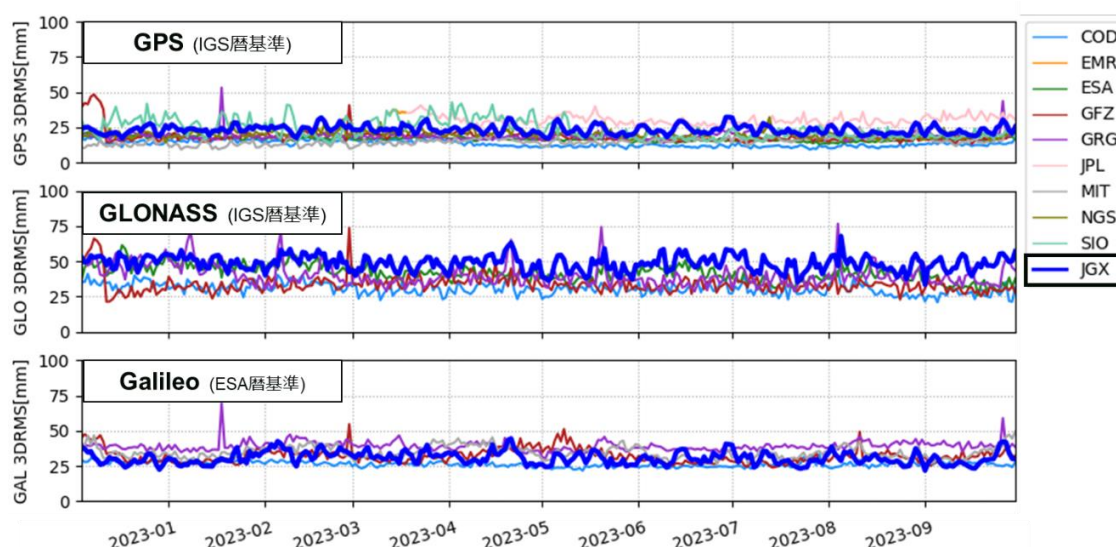


図-5 精密暦の評価。基準との差の3DRMS。

5. 性能評価

2022年12月から2023年9月までを対象期間として、JGX最終暦と関連するプロダクトを評価した。衛星系は、各解析センターが対象としているGPS、GLONASS、Galileoとした。推定した精密暦、衛星時計誤差、地上観測点の位置、地球回転パラメータについて、IGS及び各解析センターによる解析結果と比較した。

(1) 精密暦

IGS暦を基準として、暦の精度指標として3DRMS (3D Root Mean Square) を計算した(図-5)。GalileoはIGS暦に含まれないため、各解析センターの中で精度が良いESAによる精密暦を基準とした。各解析センターの中では中程度の結果であること、またGalileoの結果も他の解析センターと比較して遜色ないことから、適切な精度でマルチGNSSの精密暦を生成できていることが分かった。

(2) 衛星時計誤差

IGSによる衛星時計誤差を基準とし、標準偏差・RMSE (Root Mean Square Error) を計算した(図-6)。9月10日を境にRMSEが他の解析センターと同程度のレベルまで改善していることが分かった。これは、観測データの処理を他の解析センターに準拠させる改修を施した結果である。この技術課題の解消により、標準偏差・RMSEとも他の解析センターと遜色ない精度を達成した。

(3) 地上観測点の位置

IGSによる地上観測点の位置を基準とし、平均値・標準偏差・RMSEを計算した(図-7)。いずれの統計値も他の解析センターと同程度の結果であった。

(4) 地球回転パラメータ

IGSによる地球回転パラメータとの差を計算した(図-8)。地球回転パラメータは、地球自転の日々のゆらぎを表現する変数である。こちらも他の解析センターと同程度の結果であった。

6. 「みちびき」の精密暦の評価

みちびきの推定結果については、地上から見て日本の上空を準天頂軌道(8の字軌道)及び静止軌道で周回する特殊性から、他のGNSSと比較して地上観測か

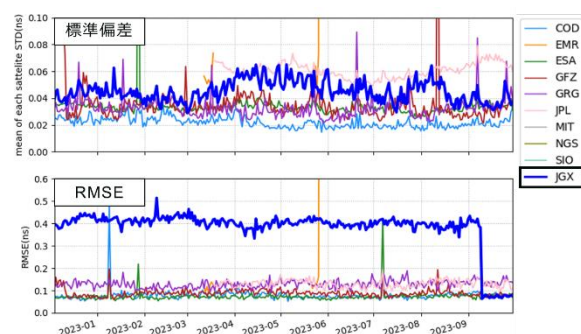


図-6 GPS衛星時計誤差の評価。IGS最終プロダクトとの差の標準偏差・RMSE。

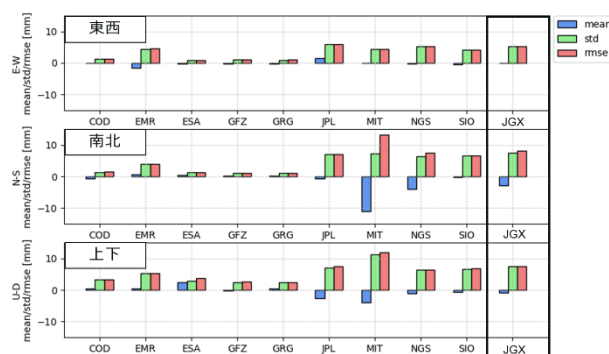


図-7 地上観測点の位置の評価。IGS最終プロダクトとの差の平均値・標準偏差・RMSE。

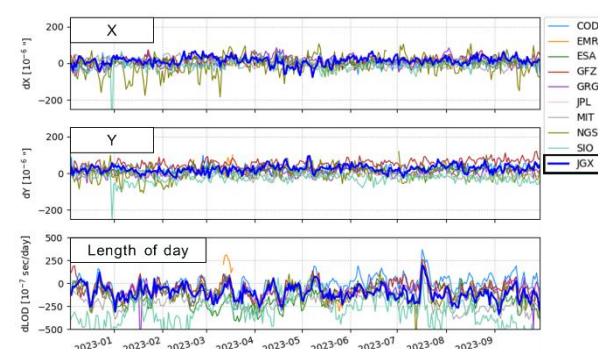


図-8 地球回転パラメータの評価。IGS最終プロダクトとの差。

ら幅広い観測条件のデータを収集することが難しく軌道の変化を捉えづらい推定困難性があるとともに、精密暦を算出している解析センターが少なく、推定結果の差異が大きいといった開発途上段階にある。そのため、特定の精密暦を基準とした評価ではなく、レーザ光による衛星-地上局間観測であるSLR (Satellite Laser Ranging) を基準とした差分を図-9に示す。静止軌道衛星は、上記の理由から他の解析センター同様に標準偏差が大きい一方、準天頂軌道衛星は、他の解析センターのSLR残差と比較して整合性が高いことが分かった。今後も観測/力学モデルを高度化し、準天頂衛星の精密暦の更なる推定精度向上を目指す。

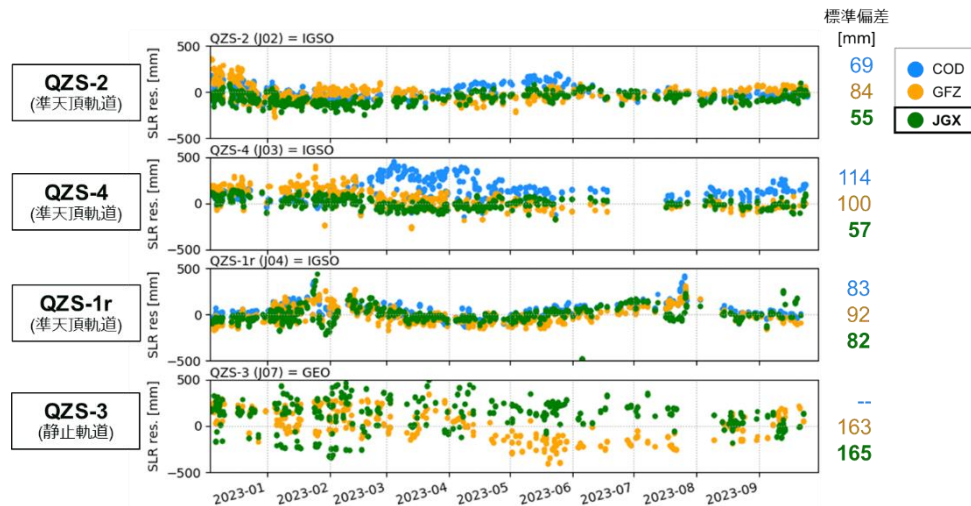


図-9 準天頂衛星の精密暦の評価. SLR残差

7. おわりに

今後、IGSに提供する精密暦は、IGSの準備期間を経て、統合処理に組み込まれ、正式にIGS暦の算出に活用される予定である。また、精密暦の公開環境を国土地理院で整備し、みちびきを含む精密暦及び関連プロダクトを公開する予定である。これらの取組を通じて、以下の効果が期待できる。

① 測位基盤の強化

海外機関の精密暦への依存度を低減し、高精度測位社会における日本の位置の基準・移動体の測位を、より自律的に維持・管理することが可能になる。

② 国際的なプレゼンス向上

IGS解析センターへ日本として参画を目指すことで、衛星測位分野へより貢献できる。また、国際的なGNSS開発競争の中で、我が国の準天頂衛星システムも十分に考慮された国際規格の策定がなされるなどの効果も期待される。

③ 準天頂衛星の精密暦算出をリード

国際標準に準拠した準天頂衛星の精密暦を自律的に算出し、自国で率先して精度改善の技術開発を進めることができる。

④ 測地・測位分野の研究活動の推進

国内で整備された公開環境の下、解析の素性が明瞭で算出タイミングも柔軟な精密暦を用いることで、関連研究が発展する。

参考文献

- 1) Takamatsu et al. (2023) New GEONET analysis strategy at GSI: daily coordinates of over 1300 GNSS CORS in Japan throughout the last quarter century, *Earth Planets Space* 74:49, doi:10.1186/s40623-023-01787-7
- 2) 内閣府 (2022) センチメートル級測位補強サービス, <https://qzss.go.jp/technical/system/16.html>, 2023年10月30日閲覧
- 3) 内閣府 (2023) 宇宙基本計画 (令和5年6月13日閣議決定), https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy05/honbun_fy05.pdf
- 4) 酒井ほか (2016) マルチ GNSS を情報化施工に利用するための技術解説, 国土地理院時報, 128集, 95-103
- 5) Kawate et al. (2023) MADOCA: Japanese precise orbit and clock determination tool for GNSS, *Advances in Space Research*, 71(10), pp. 3927-3950, 2023, doi: 10.1016/j.asr.2023.01.060
- 6) 国土地理院 (2023) 報道発表資料「国内初！衛星測位分野の国際事業に国土地理院とJAXAが共同で参画～高精度な軌道情報の提供を通じた測位基盤の強化～」, 2023年6月30日, <https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi65010.html>, 2023年10月30日閲覧
- 7) JAXA (2023) 報道発表資料「国内初！衛星測位分野の国際事業にJAXAと国土地理院が共同で参画～高精度な軌道情報の提供を通じた測位基盤の強化～」, 2023年6月30日, https://www.jaxa.jp/press/2023/06/20230630-1_j.html, 2023年10月30日閲覧

信州BIM／CIM推進協議会の取組について

黒岩 楠央¹

¹長野県 建設部 建設政策課 技術管理室（〒380-8570 長野県長野市大字南長野字幅下692-2）

国土交通省が推進している BIM／CIM について、長野県建設部では、令和元年度より「信州 BIM／CIM 推進協議会」を発足し、「民・学・官」共同で知識の習得と若手技術者の育成に取り組んでいる。

2023年度から、国土交通省においてBIM／CIMが原則適用されたことを踏まえ、長野県における信州BIM／CIM推進協議会のこれまでの取組を紹介することで、地方自治体における取組の現状と課題の共有を図るとともに、行政間での課題解決や、よりよい取組・体制構築への一助としたい。

キーワード BIM／CIM, 体制構築, 官民共同, 普及・推進, Web会議

1. はじめに

BIM／CIM とは、「測量・調査・設計」、「施工（着手前）」、「施工（完成時）」、「維持・管理」の各段階で3次元モデルを導入し、各段階における情報を充実させ、活用を図るとともに、3次元化により情報共有を容易にし、品質確保と業務の効率化・高度化を目指すもの。

国土交通省（以下、国という）では、2023年度から原則適用を開始しており、地方自治体としても、推進のため知識の習得や機器の配備、体制の構築など対応が求められている。

本稿では、長野県建設部と県内建設業界団体、学校関係者等で構成される「信州BIM／CIM推進協議会」について、これまでの活動を整理し、今後の課題をまとめた。

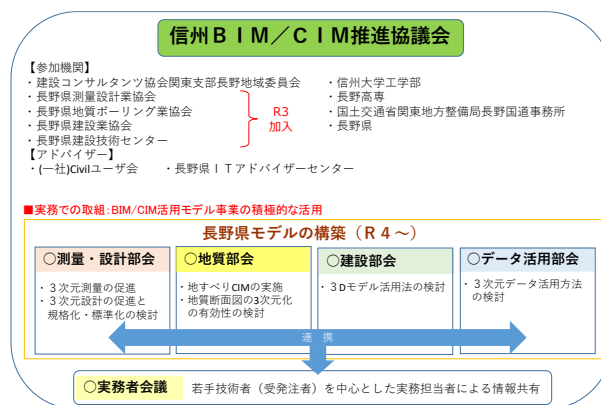


図-1 BIM／CIM推進協議会体制図

各テーマ別の部会を設置し、基準等の学習や、事例の共有など取組みを増やし、活動を活発化している。（図-1）

2. 信州BIM／CIM推進協議会とは

「信州 BIM／CIM 推進協議会」は、「民・学・官」の各組織が協力して BIM／CIM について学び、知識を共有し、技術力の向上を目指すとともに、若手技術者の育成を図ることで、地域の守り手である県内建設産業の持続的な発展に資することを目的としている。

本協議会は令和元年に発足し、令和3年度までは主に建設コンサルタントを中心に、年数回程度 BIM／CIM に関する講習会や研修を開催し、業界全体のスキルアップ及び若手業界関係者の育成に取り組んできた。

令和3年度末に参加団体が増え、県内の建設業に関わる主だった業界団体の参加を得たことから、協議会内に

3. 令和3年度までの取組について

(1) 令和元年度（設立）

令和元年の発足当初は、外部から講師を招いてBIM／CIMに関する講演を行っていたほか、民・官参加による6日間に及ぶハンズオン研修会を開催し、若手技術者の3DCADの操作習熟を図った。

(2) 令和2年度

令和2年度からは、国の基準に準じた「BIM／CIM活用業務実施要領(案)（長野県建設部：令和2年4月1日適用）」を発出し、長野県発注業務において、モデル事業

として取組を開始した。

年度末には、協議会として「成果発表会」を開催し、各建設コンサルタント会社が実際に取り組んだ事例の共有と、実務担当者同士の意見交換を行った。この取組が盛況であったことから、協議会の中に若手部会（実務者会議）を組織し、実務者同士が交流できる体制を作ることとなった。

また、このほかにも発注者側で納品成果のチェック等に対応可能な機器や環境の整備に取り組み、「自治体ネットワークの三層分離」に基づく行政環境の見直しを踏まえ、各部署に個別のインターネット回線を新設し、スタンドアロンで用いる高性能パソコンを配備するなど、発注者側での体制構築を行った。

(3) 令和3年度

令和3年度は、令和2年度に引き続き発、注者側の体制整備を進めるとともに、県のBIM/CIMモデル事業の取組を強く推進し、見込みを含む取組数が約100件に上った。（表-1）

また、協議会の組織改正に先立ち、実務者会議（若手部会）を開催した。

広く参加者を募集した第2回実務者会議（Web）では、各参加者が感じるBIM/CIMに関する課題や疑問点について事前アンケート形式で収集し、県の担当が答えられる範囲で個別に回答するほか、会議の中で取組事例の紹介を行ったところ、100名を超える多くの方が参加し、好評価を得た。（写真-1）

表-1 R03_BIM/CIM取組数

	測量	調査	設計	工事	小計
道路	24	1	38	1	64
河川	5		2	1	8
砂防	24	2	10		36
小計	53	3	50	2	108

※業務件数ではない。予定数（測量＋設計は2カウント）。



写真-1 R03_第2回実務者会議

4. 令和4年度取組

令和4年度からは、「各部会の活動」が増えたほか、定期的にBIM/CIMや推進協議会に関する話題の共有や話し合いを行う「信州BIM/CIMトークライブ」、「第3回実務者会議」、「BIM/CIM活用現場見学会」、「県職員向け3DCAD操作研修」など、これまでと比べて多くのイベントを企画・実施しているため、各取組の具体的な様子について紹介する。

(1) 信州BIM/CIMトークライブ

信州BIM/CIMトークライブは、2週間に1度開催するWeb会議形式の打ち合わせを兼ねた意見交換の場である。

当初は、開催頻度が少なく規模の大きい実務者会議や部会に代わり、県と協議会の担当者数名が、次のイベントや協議会の活動についてWeb上で打ち合わせを行うものであったが、BIM/CIMに関して実用的な意見交換や情報共有が行われていたことから、「どうせならもっと色々な人にも参加してもらい、話題を共有しましょう」との参加者のアイデアにより、協議会の参加者に広く案内を送付し開催するようになった。

開催スタイルは「できるだけ参加者と主催者の負担を少なく、希望者の都合がつくときに参加できる緩い感じで」を基本とし、事前の出欠を取らない会議形式としている。

メインMCは筆者が務めており、後述する部会や推進委員のメンバーとの意見交換を中心に、開催回数は20回に上った。（写真-2、表-2）

開催時間は概ね60～90分程度であり、毎回内容をレコーディングし、議事録と併せて協議会関係者に共有している。

長野県においては、令和4年7月からNDW（ながのデジタルワークプレイス）として業務体制の改革が行われ、職員の業務データを全てクラウド環境に移し、全職員にMicrosoft 365が適用された。これにより「TeamsによるWeb会議の開催」や「チャット機能による協議会関係者とのグループでのやりとり」、「Outlookのスケジュール機能によるトークライブリンクや資料の共有」など、



写真-2 R05_第5回トークライブ

表-2 信州BIM/CIM推進協議会 活動履歴

日付	取組
令和元年8月27日	長野県が進める BIM/CIM に関する講演会（※設立準備会として実施）
令和元年10月31日	「信州 BIM/CIM 推進協議会」設立
令和元年12月24日～令和2年2月18日	長野県が進める BIM/CIM ハンズオン講習会（全6回）
令和2年11月1日～11月30日	令和2年度 長野県の BIM/CIM を推進するための Web 研修会（※CAD 研修）
12月2日	長野県が進める BIM/CIM に関するオンライン研修会
令和3年2月19日	BIM/CIM の最新動向と令和2年度成果発表会【ライブ配信】
4月21日	BIM/CIM 推進協議会 実務者会議（第1回）オンライン座談会
12月22日	令和3年度第2回信州 BIM/CIM 推進協議会 実務者会議（意見交換会）
令和4年1月28日	信州BIM/CIM推進協議会 勉強会in松本
3月25日	信州 BIM/CIM 推進協議会 第1回総会（※体制強化規約改定）
4月28日	信州BIM/CIMトークライブ（第1回）
5月25日	「 トークライブ（第2回）
6月9日、29日	「 トークライブ（第3回、4回）
7月14日	第3回 信州BIM/CIM推進協議会 実務者会議
27日	信州BIM/CIMトークライブ（第5回）
8月10日、24日	「 トークライブ（第6回、7回）
9月5日	第1回 推進委員定例会
7日	信州BIM/CIMトークライブ（第8回）
12日	第1回 測量設計部会
14日	第1回 地質部会（3回目）
21日	信州BIM/CIMトークライブ（第9回）
27日	第1回 建設部会
10月5日、19日	信州BIM/CIMトークライブ（第10回、11回）
11月1日	「 トークライブ（第12回）※部会意見交換
15日	BIM/CIM現場見学会（上田BP・長野国道事務所）
17日、30日	信州BIM/CIMトークライブ（第13回：事例紹介、14回）
12月14日	「 トークライブ（第15回）
23日	第2回 BIM/CIM推進委員会
1月11日、25日	信州BIM/CIMトークライブ（第16回、17回）
26日	第1回 データ活用部会
31日	信州BIM/CIM推進協議会 第4回実務者会議
2月1日	第2回 建設部会
15日	信州BIM/CIMトークライブ（第18回）
3月1日、15日	「 トークライブ（第19回、20回）
8日	第2回BIM/CIM活用現場見学会（安曇野・黒沢川園地）
27日	信州BIM/CIM推進協議会 第2回総会
4月12日、26日	令和5年度信州BIM/CIMトークライブ（第1回、2回）
5月10日、24日	「 トークライブ（第3回、4回）※第4回から事例紹介
6月7日、21日	「 トークライブ（第5回、6回）※
7月5日、19日	「 トークライブ（第7回、8回）※

DX による各種作業の簡略化が図られ、コロナ禍においても活発に協議会の活動を進める一助となっている。

9月からは、協議会で情報共有システム「basepage（川田テクノシステム（株））」を利用し、クラウド上でトークライブや実務者会議、各部会などの動画や資料の共有を行っている。「basepage」は、BIM/CIMに対応したクラウドサービスであるため、今後、実際に作成したBIM/CIM 3次元モデルの事例共有に活用することを検討している。

(2) 各部会とBIM/CIM推進委員

前述のとおり、信州 BIM/CIM 推進協議会では、「測量・設計部会」、「地質部会」、「建設部会」、「データ活用部会」の4つの部会を組織し、各部会において、それぞれのテーマに関する事例の共有や課題の検証を行うこととしている。

具体的には、「測量・設計部会」は BIM/CIM に関する取組の上流に位置付けられる「測量」や「設計」について、事例や課題の収集・共有を目的とし、「地質部会」は地質調査に伴う3次元モデルの作成等について、事例や課題の収集・共有を行っている。

「建設部会」は、まだ BIM/CIM を活用した工事の実施事例がほとんどないため、国の工事や県の ICT 施工工事から BIM/CIM に関連性の高い取組を共有し、BIM/CIM 工事の実施に向けた基準の周知・学習など、実際の工事発注に備えて情報の共有を行っている。

「データ活用部会」については、県を主体とした BIM/CIM 関連データの取扱いに関する話題を担当しており、各部会などから共有される事例や課題をもとに、県事業

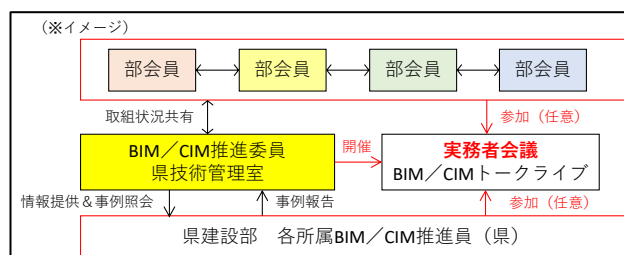


図-2 BIM/CIM推進委員・実務者会議イメージ

における3次元モデルデータの仕様や成果データの取扱いについて、検討することを目的としている。

各部会の構成員については、協議会の各参加団体から横断的に人選しているが、それぞれは BIM/CIM に関して詳しいというわけではなく、知識や経験に大きなばらつきがある。そのため、部会のみでは活動が停滞してしまう可能性を考慮し、各部会の活動や部会同士の連携をサポートする立場として、「BIM/CIM推進委員」を設けている。

BIM/CIM推進委員についても、各参加団体の協会員で構成されていることに変わりはないが、各協会の中でも BIM/CIM に率先して取り組んでいる若い実務者を中心に人材を集めており、協議会のイベント企画や、国や外部での BIM/CIM に関する話題の共有など、協議会活動に積極的に協力いただけるメンバーで構成されている。

現在の信州BIM/CIM推進協議会の活動は、主にBIM/CIM推進委員のアイデアや協力によって成り立っており、今後の協議会においても欠かせない存在となっている。

（図-2）

また、協議会における BIM/CIM 推進委員のほかにも、県建設部内にも「BIM/CIM推進員」を設置している。

県 BIM/CIM 推進員は、県庁と建設部の各現地機関に勤務している技術系職員で構成され、BIM/CIM 関連の情報の窓口として定めているものである。各現地機関における BIM/CIM の取組みの先駆者となるほか、事務所内における BIM/CIM 関連情報の指導を行える立場となることを期待し、各職員の任意活動としている。

現状では、まだ職員や現地機関ごとの温度差が大きく、県職員の知識の習得や技術力向上が課題となっているが、今後、県BIM/CIM推進員を軸として、職員全体へBIM/CIMに関する理解が進むよう取り組んでいくことを予定している。

(3) 第3回実務者会議

令和4年7月14日に、通算3回目になる実務者会議を開催した。

第3回の実務者会議は、全てWeb参加の会議形式とし、下記のとおり4つの内容を軸として開催した。

- ① 国や県の状況の共有（表-3）
- ② 県内事例の紹介
- ③ テーマ別意見交換

表-3 信州BIM/CIM推進協議会_活動履歴

事務所名	R2	R3	R4	実績	事務所名	R2	R3	R4	実績
	件数	件数	うち繰越	(R2~R4)		件数	件数	うち繰越	(R2~R4)
佐久	1	2	1	4	大町	1	3	2	6
上田	4	14	8	21	千曲	0	2	0	4
諏訪	1	3	2	4	須賀	0	2	0	2
伊那	3	4	2	8	長野	1	2	0	5
駒田	2	56	13	73	北信	0	9	3	9
木曽	0	5	3	5	墨川	2	2	1	5
松本	0	3	1	4	墨川	2	4	1	9
安曇野	7	5	4	17	土佐	0	2	0	3
※ 太特をR4の取組数としてカウント					合計	24	118	41	188

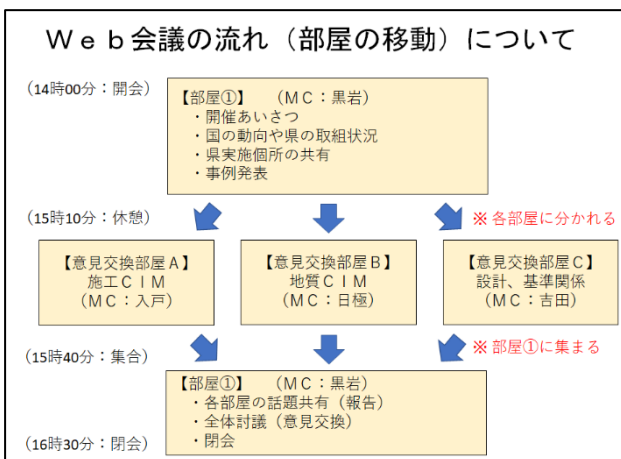


図-3 R04_第3回実務者会議の流れ

④ 事前アンケートと回答の共有

前回の実務者会議の教訓として、「参加者が多くなり、1会場での意見交換では、話題も発言者も限定的になる」ということを踏まえ、会議の途中でWeb上の会議室を、テーマ別に「施工CIM」、「地質CIM」、「設計、基準関係」の3つに分散させるよう工夫した。(図-3)

結果、全体として120名以上の参加に対し、30~50人ごとに分散して意見交換を行うことができた。

また、Web会議の各部屋の様子についてもレコーディングし、あとから全体と合わせて各部屋の会議状況を見返すことができるようにして、関係者に共有した。

(4) BIM/CIM活用現場見学会

令和4年11月15日に、国土交通省関東地方整備局長野国道事務所協力のもと、BIM/CIM活用工事現場の見学会を実施した。

関東地方整備局長野国道事務所は国土交通省が定めるi-Constructionサポート事務所に位置付けられており、信州BIM/CIM推進協議会の見学会要望についても、快く引き受けていただいた。

長野県では、まだBIM/CIMデータ作成から工事活用に至った現場がなく、今回、上田市内の「国道18号上田バイパス神川橋上部工事(施工：清水建設(株))」の現場について、BIM/CIM活用を試行する現場として見



写真-3 R04_BIM/CIM現場見学会

学した。(写真-3)

見学させていただいた感想として、県発注工事とは規模が桁違いだったこともあり、県としてすぐに同様の取組を普及させることは難しいように思えたが、具体的な取組事例としてとても参考になった。

(5) BIM/CIM関連ソフト使用状況アンケート

各部会の活動を開始し、建設業界を横断的に意見交換するようになって出てきた業者意見の一つに「どんなソフトウェアを使えばよいのか分からない」というものがあった。

従来の2次元のCAD利用では、最終的に共通拡張子である「SXFファイル形式(P21, SFC)」に変換するため、利用ソフトによる差はなかったが、3DCADソフトでは「地形、線形、土工形状モデル」の共通データ形式「J-landxml」に、作成ソフトによる互換性の課題があり、また、「その他のモデル」については、各3DCADソフトの「オリジナルデータ形式」若しくは、Excel・PDFなど「CAD以外のデータ形式」となってしまうことから、業者間で利用している3DCADソフトに互換性がないと、業者が切り替わる際に既存のデータが活用できなくなってしまう恐れがある。

このような3DCADソフトの互換性に関する問題は、新技術普及の過渡期に起こりうることだが、信州BIM/CIM推進協議会においても、これからBIM/CIMに取り組む業者としては「どんなソフトを導入すべきか」判断材料として関心が高く、県としても建設部で運用している3DCADソフトと他社ソフトとの互換性について認識する必要があり、傾向を把握する内容であった。

そこで、協議会の活動として業界向けに3DCAD等のBIM/CIM関連ソフトについて、利用状況のアンケートを実施することとした。

対象者が多いため、回答は任意としているが、Webのアンケートフォームを作成し、収集した回答をもとに、結果を整理している。(図-4)

アンケート結果は、協議会の中で共有し、今後各部会

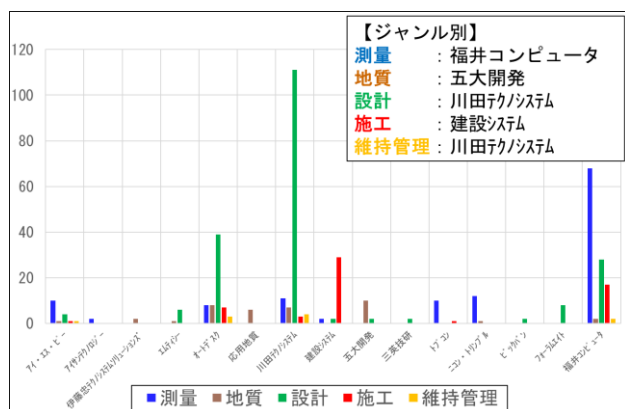


図-4 R04関連ソフト使用状況アンケート

のデータ互換に関する検証や、3DCADソフトの導入を検討している業者の判断材料の一つとして、活用を図ることを予定している。

(6) 県職員向け3DCAD操作研修

県のBIM/CIM活用事業が増えていることに伴い、協議会の中で「県担当者によってBIM/CIMに関する知識レベルに大きな差があり、対応に苦慮している」という意見が目立つようになってきた。

実務者会議や信州BIM/CIMトークライブによる情報発信は、業者からは好評いただいておりますが、県職員



写真-4 3DCAD操作研修（座学・MR体験）

側では「業務多忙」や「3Dに対する職員の苦手意識」が障害となって、なかなか浸透していない状況である。

これを踏まえ、まずは実務で関わる3DCADソフトについて、職員自ら3Dデータに触れられるだけのスキルを身につけることを目標とし、3DCADソフト操作研修を企画した。

より多くの職員が受講できるよう、同じ内容を長野、松本、飯田の3会場で、別日に開催した。

研修ソフトは、長野県の契約している3DCADソフト「V-nasClair」とし、対面式の実地研修を基本としつつ、昨今のコロナ対策等を踏まえ、Web受講併用とした。また、Web受講の内容については録画し、アーカイブとして職員に共有している。これにより、受講した職員の復習はもちろん、都合がつかず受講できなかった職員へのサポートを図っている。

年末も差し迫る12月中下旬の開催となったが、実地とWeb合わせて120名超の参加者を記録した。（写真-4）

研修に伴いWebのアンケートも実施しており、今後の研修の希望の把握や、内容の改善に繋げていく予定としている。

(7) 第4回実務者会議

第3回実務者会議に引き続き、2023年1月31日に令和4年度2回目の実務者会議を企画した。

年度中に、各部会やトークライブにより関係者が増えたことと、第3回の感想として一部から「物足りない」という意見が出たことを踏まえ、開催時間を150分から450分に大幅に増加させた。

各部会ごとの意見交換を追加したが、丸一日の会議となってしまったこともあり、高評価いただいた反面、事後アンケートでは「時間が長い」との意見も多くいただくこととなりました。また、参加者が増えるにつれて、知識レベルの差も出てくることから、会議内容をレベルに合わせて分けて企画するなど、今後は工夫が必要になると考えている。（図-5）

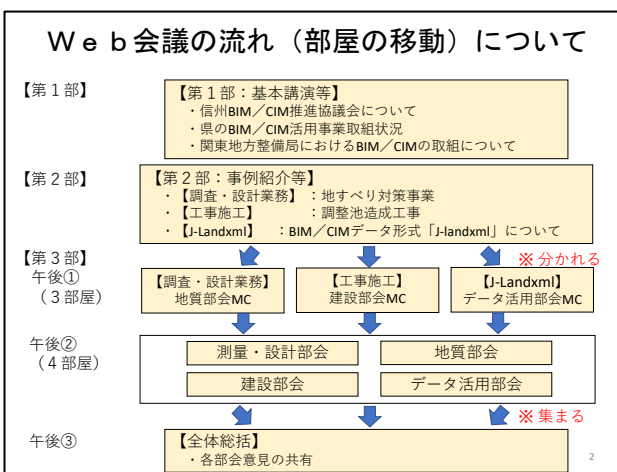


図-5 R04_第4回実務者会議の流れ

(8) 建設ITガイド2023への寄稿

建設業界全体でBIM/CIMへの関心が高かったことと、協議会の取組が進むにつれて、参加者からその話題が外部にも少しずつ広まっていったことから、地元新聞や業界誌で協議会について取り上げていただく機会を得ることができた。特に、一般財団法人経済調査会が年に1回発行している「建設ITガイド」は、国土交通省や、先進的な企業の取組を紹介しており、そこから信州BIM/CIM推進協議会の取組について寄稿依頼をいただいたのは、協議会の認知度を上げ、参加者の増加や意欲向上など、活動の後押しとなるよい契機となった。

(9) 取組のアーカイブ化

ここまで紹介したとおり、令和4年度から活動と参加者が増えたことで、協議会として各取組の資料や記録を効果的に共有する環境の整備が必要になった。特に、信州BIM/CIMトークライブについては、任意参加の定期開催であるため、欠席や途中参加のメンバーが話題についてこられず、疎遠となってしまうことが懸念された。トークライブ初期の段階で、そういった課題を話題としていたところ、前述のとおり情報共有システムの「basepage」を用いて、各取組の資料や記録（レコーディング動画）を蓄積し、メンバー内で共有する体制を構築するに至った。

5. 令和5年度の取組

令和5年度は、紹介した令和4年度の各取組が好評だったことから、各取組の継続を予定している。あわせて、それぞれの取組をより良いものとするための新たな試みや方針をご紹介する。

(1) トークライブでの事例紹介

トークライブの定期開催を重ねるにつれて、話題が深まる反面、メンバーが固定化され、BIM/CIMに関する相談や、新たな話題での意見交換が少なくなってきた。そこで、受発注者共にBIM/CIMに関する取組をもっと身近に感じていただくための新たな試みとして、トークライブの中で県内の各発注機関の実施事例を順番に紹介することを開始した。

受注者側で「BIM/CIMの具体事例」に対する関心が高かったこともあり、トークライブの参加者が5割程度増加することに繋がった。また、発注者においても、自所属の事例紹介がノルマ化されるため、予めトークライブに参加し、他所属の取組や紹介の様子を確認するなど、トークライブへの参加者が増えることに繋がった。

(2) 取組のさらなる周知と意見交換

協議会の取組について、各参加団体の主要なメンバーは関わっていただいていたが、末端の構成員や業者には、まだ認知されていないこともあり、BIM/CIMの普及推進に向け、さらなる情報発信が課題となっている。

令和4年度の「建設ITガイド2023」への寄稿を節目に、業界紙からの取材依頼や、講演の依頼が来るようになったため、それら貴重な機会を協議会の取組周知の場として活かしていくことを予定している。また、他の自治体から協議会の取組についてお問い合わせや意見交換の申し出をいただくこともあり、長野県としての協議会設立・運営に関するノウハウほか、協議会で話題となっている課題についてなど、積極的に情報交換を行っていきたい。また、これらの取組を通じて、県内外問わずBIM/CIMに関わる人の輪をさらに広げ、建設業界全体として意見交換のしやすい環境・雰囲気を作っていきたい。

6. 今後の課題

これまでは、BIM/CIM に関して県内の各業界団体と「①情報を共有」し、「②意見を交わし」、「③課題を整理」できる「④体制づくり」のため、取り組んできた。協議会の体制が構築・浸透してきた今、実際に協議会の枠組みを「⑤課題解決に活かす」とことと「⑥継続させる」ことが大きな課題だと考えられる。

これまで紹介した取組のほとんどは、行政的な企画以上に、協議会に参加している業者の方々の熱意と協力により成り立っている部分が大きく、筆者を含めた担当者の異動等により、一気に取組が減速してしまうことが懸念されている。

7. おわりに

信州 BIM/CIM 推進協議会は、発足から5年を迎えようとしており、国土交通省ではとうとう BIM/CIM の原則適用を開始した。これまで、毎年国の指針や要領が見直されるたび、協議会として情報の共有や、勉強を行ってきたが、まだまだ地方の建設業界に BIM/CIM の取組が浸透するには時間がかかるものと考えられる。地方自治体の枠組みとして、協議会がこれからもどこまで建設業界の BIM/CIM 推進に寄与できるか、さらなる取組について試行錯誤を続けていきたい。

最後に、信州BIM/CIM推進協議会の活動にご尽力いただいた全ての方々に感謝の意を表するとともに、引き続き、地域の守り手である長野県の建設業界の持続的な発展に向けて鋭意取り組んでまいりたい。

【i-Snow】ロータリ除雪車の 装置自動化に向けて

諏訪 光星¹・小野寺 敬太¹・貫田 大輔¹

¹北海道開発局 事業振興部 機械課 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

北海道の除雪現場においては除雪機械オペレータの確保や高齢化が課題となっている。北海道開発局では、i-Constructionの取組として、産学官民が広く連携し除雪現場の省力化に関する活動を行う場として「i-Snow」を設立し、ロータリ除雪車の投雪作業自動化等の検討・実証実験を行っている。令和4年度の実証実験では、シュート投雪自動制御改良やみちびき不感地帯対策等を行い、一定の精度で除雪装置が動作することが確認できた。令和5年度は実働配備を進め現場適用性の検証を行うほか、引き続き自動制御改良、みちびき不感地帯対策について検討を進め、除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上の取組を推進していく。

キーワード i-Snow, ICT, 省力化, 生産性向上, ロータリ除雪車

1. はじめに

近年の建設現場では、技能者不足や就業者の高齢化などによる担い手不足が大きな課題となっている。北海道の除雪現場においても除雪機械オペレータの確保や高齢化が課題となっており、近い将来、除雪作業が困難になる恐れがある。(図-1)

また、積雪寒冷地特有の冬期災害が発生する北海道では、近年、大雪や暴風雪などの影響により国道の冬期間の通行止めが多く発生し、人の移動、物流など地域経済活動に大きな影響を与えている。

北海道開発局では、担い手不足や積雪寒冷地特有の課題解決に向け、i-Constructionの取組として、ロータリ除雪車の投雪作業自動化(生産性向上)に向けた実証実験による省力化を進めている。

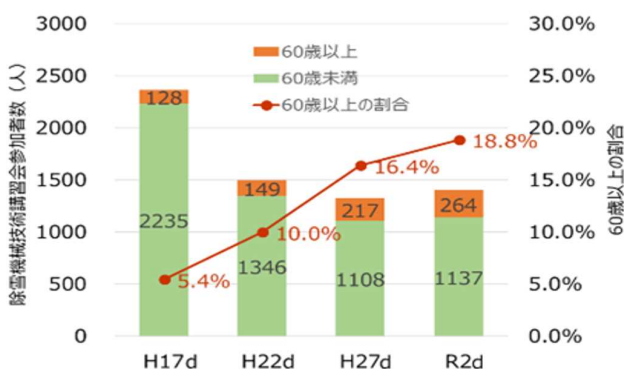


図-1 除雪機械オペレータの状況

2. i-Snowこれまでの取組

(1) 活動概要

北海道開発局では、平成28年度より北海道におけるi-Constructionの取組として産学官民が広く連携し、除雪現場の省力化に関する様々な取組を行う場として、「i-Snow (除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上に関する取組プラットフォーム)」を設立した。

i-Snowは、北海道における除雪関係者が除雪現場、除雪技術等に関する横断的な連携・情報共有・技術開発を図ることで除雪現場の省力化を進め、生産性・安全性を向上させると共に、人口減少下でもヒトとモノの交流・対流を活性化できる産業構造、経済活動を維持・発展させるものである。(図-2)

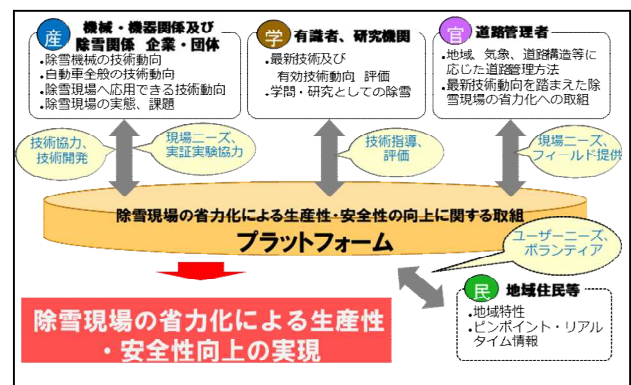


図-2 i-Snowの活動イメージ

(2) ロータリ除雪車での実証実験

i-Snowの取組として、北海道開発局ではロータリ除雪車の投雪作業自動化の検討を進めており、従来、2名体制で行っていた除雪作業を、準天頂衛星「みちびき」を活用し、走行位置の把握や作業装置操作の自動化をすることで、熟練技術や経験が少なくても1名で作業が可能となるよう実証実験を行っている。（図-3）



図-3 ロータリ除雪車投雪作業の自動化

実証実験は、平成30年度から令和元年度までは、一般交通がなく道路付属物の設置も少ない冬期通行止め区間内（一般国道334号知床峠）で行い、令和2年度以降は一般交通があり道路付属物の種類や数も多く設置されている一般道（一般国道38号狩勝峠）にて行っている。

投雪作業の自動化については、ロータリ除雪車にセンサー内蔵油圧シリンダー・GNSSアンテナ・3D-LiDAR等の機器を設置し、ブロワ・シュート・シュートキャップの各装置の自動制御（投雪方向や投雪距離）について検討を行っている。（図-4）



図-4 自動化に関する設置機器

(3) 令和4年度の実証実験

実証実験は、シュート投雪自動制御改良やみちびき不感地帯対策等について、前年度に引き続き南富良野町の一般国道38号狩勝峠で実施した。

a) シュート投雪自動制御改良（ならい制御）

シュート投雪自動制御として、オペレータの実際の作業データを取得し、そのデータを使って自動制御を行っている。（ならい制御）

前年度までは、ならい制御のデータ取得間隔を1Hzとして記録していたが、ロータリ除雪車は作業速度が数km/hと遅く、除雪オペレータの操作地点と自動制御地点に数十cmのずれが見られた。このため令和4年度の実証実験ではデータ取得間隔を1Hzから10Hzに改良し、ならい制御データの取得とそのデータによる自動制御を行い、動作検証を行った。

データの取得が10Hzで記録されること、取得した習い制御データを用いた自動制御が問題なく動作することを確認した。（図-5）

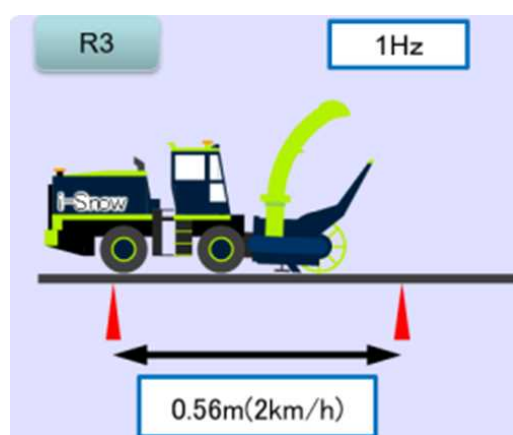


図-5 データ取得間隔の改良

b) シュート投雪自動制御改良（微調整機能の追加）

風向や雪質等の現地条件の変化により、投雪精度に誤差が生じ、道路付属物に接触する事例が見られたため、自動制御中においても、自動制御を解除せずに装置を微調整できる機能（ガイダンス装置にタッチキー機能を設置）を追加し、投雪精度が向上することを確認した。（図-6）



図-6 微調整機能の追加

c) シュート投雪自動制御改良（雪堤高さ検知制御）

雪堤の頂上中央付近に自動制御で雪を積み上げるために、3D-LiDARで雪堤の高さを計測し投雪位置の制御を行っている。その際に、シュートキャップが頻繁に動いてしまう事例が見られた。頻繁動作が長時間続くことにより、機械側に悪影響（機械寿命の短縮など）を及ぼす懸念があるため、計測メッシュと制御間隔を拡大し制御回数を抑制する改良を行い、頻繁動作が少なくなった事を確認した。（図-7）

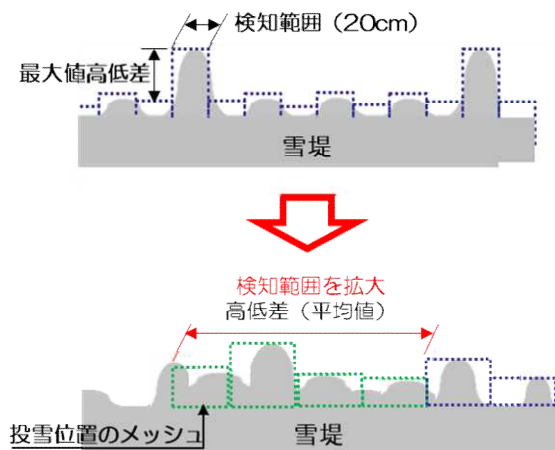


図-7 雪堤高さ検知制御の改良

d) みちびき不感地帯対策

ロータリ除雪車の自動制御を行う際に、準天頂衛星システム『みちびき』より車両の位置情報を取得しているが、トンネルや覆道、南側の急斜面、道路に覆いかぶさる樹木などにより、位置情報の受信状況が悪くなる場合があった。1度Floatになると新たに位置情報（CLAS）取得する為に1分～2分の時間を要するため、除雪作業の中断が懸念された。そのような場合でも継続して作業を行うために、車両の位置を把握できるように磁気マーカとRFIDを組み合わせたシステムによる位置情報の補完方法の検討を行った。（図-8）

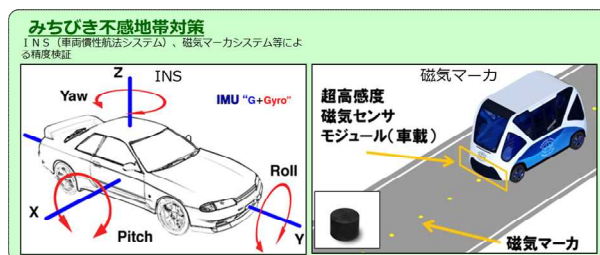


図-8 みちびき不感地帯対策

狩勝峠の直線区間やカーブ区間に、磁気マーカ及びRFIDを設置し検知状況の検証を行った。車両側のアンテナは、除雪作業時の影響を考慮し設置高さを極力高い位置とし、路面から240mmの位置に取り付けることとした。（図-9）（写真-1）

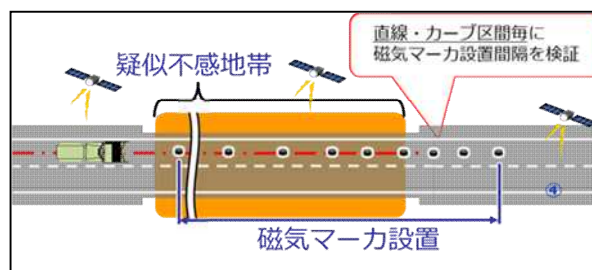


図-9 磁気マーカ及びRFID設置状況



写真-1 車両側のアンテナ設置状況

磁気マーカについては9割ほど検知できていたが、RFIDの検知率は2割～4割と少なく、車両位置情報の補完作業には至らなかった。検知率が低かった原因は、アンテナの設置高さによるものと考えられるため、今後、適正な設置高さの検討が必要と考える。

3. 一般道への実働配備拡大に向けて

令和4年度までの、知床峠や狩勝峠での実証実験で自動制御の改良等を進めてきた結果、一定の精度で除雪装置が動作することが確認できた。

令和5年度は、札幌開発建設部深川道路事務所及び釧路開発建設部中標津道路事務所に新たに除雪装置自動制御付ロータリ除雪車の実働配備を行った。（図-10）様々な現場状況での適用性の検証や課題検討を進め、さらなる自動制御の高度化に努めていく。



図-10 実働配備の状況

深川道路事務所では、高規格幹線道路である深川留萌自動車道の深川西ICから北竜ひまわりICの約24kmの区間に配備となる。

当該区間の特徴として、道内でも特に降雪量の多い地域であり、除雪作業は深夜や早朝の時間帯に通行規制を行い実施することが多い区間である。また、道路付属物や橋梁部が多いことから頻繁に除雪装置の操作を行うことが特徴として挙げられる。

投雪作業の自動化により、道路標識や防雪柵といった道路付属物や、橋梁下の交差道路や河川などへの投雪回避の活用が期待される。（写真-2）



写真-2 道路付属物等の設置状況

中標津道路事務所では、国道334号知床峠（羅臼側）の約13kmの区間に配備となる。峠の反対側（斜里側）には、令和4年度に実働配備となっており峠の両側に配備されることとなった。

当該区間の特徴として、国道では北海道内唯一の冬期通行止め区間であり、通行止め期間内には道路の位置も分からなくなるほどの積雪がある地域である。

例年、3月以降に春山除雪（図-3）を開始するが、道路の位置等を確認しながら行う除雪作業には、道路形状や地形の熟知、或いは周辺状況をこまめに確認しながら除雪するといった長年の経験が必要とされており、3次元地図データやみちびきの位置情報を活用することにより効率的で安全性の高い除雪作業が期待される。



写真-3 春山除雪の状況

4. まとめ

今年度は、2箇所の事務所（深川道路事務所、中標津道路事務所）への実働配備のほか、引き続きシュート投雪自動制御改良（車両停車時の挙動対策やブロワ装置の走行制御機能追加）、みちびき不感地帯対策についても検討するとともに、今後の自動操作対象機械拡大の検討（除雪トラック、小形除雪車）を行っていく。

また、実運用時に必要不可欠となるアフターサービス・メンテナンス体制の構築、除雪装置自動化導入マニュアルの策定等を進め、除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上に向け、除雪装置自動化の取組を推進していく。

謝辞：実証実験にあたり多大なご協力いただいた、富良野道路事務所及び株式会社山伏パコムの皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) プラットフォーム『i-Snow』<第13回>：令和4年度の実証実験結果、令和5年度の取組〔資料A〕，2023年7月26日
<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/jg/gijyutu/splaat0000010dmm.html>

美和ダム再開発事業における ストックヤード施設の試験運用

藤井 美有¹

¹三峰川総合開発工事事務所 工務課（〒396-0402 伊那市長谷溝口 1527）

美和ダムでは、出水による大量の土砂流入により堆砂が進行しており、1989年より再開発事業に着手している。再開発事業における貯水池堆砂対策の一つである湖内堆砂対策施設（以下「ストックヤード施設」という）は、ストックヤードに貯めた土砂を洪水時に土砂バイパストンネルによりダム下流に排砂する我が国では前例のない施設である。ストックヤード施設は、2021年5月に完成したところであるが、運用においてはできるだけ下流への環境負荷を軽減させる運用方法を確立する必要がある。そのなかでも本稿では、ストックヤード施設の試験運用及びモニタリング調査結果について報告する。

キーワード：堆砂対策、湖内堆砂対策施設、ストックヤード、美和ダム

1. はじめに

天竜川の最大支川である三峰川に1959年に完成した美和ダムは、洪水調節、発電及びびかんがいを目的とした多目的ダムである。ダムの位置と諸元を図-1.1に示す。



図-1.1 美和ダム位置図

三峰川は、南アルプス仙丈ヶ岳（標高3,033m）を源に、急峻な地形を流下する河川である。流域内は中央構造線に代表される複雑な地質構造を有するため土砂生産量が多く、洪水時に大量の土砂が流出する。美和ダム完成直

後の1959年、1961年と大洪水が発生し、当初の計画堆砂量を超える約680万 m^3 の土砂が貯水池に堆積した。その後も1972年、1982年、1983年と大洪水が発生し、約790万 m^3 の土砂が貯水池に堆積したことから、1989年に美和ダム再開発事業に着手し、洪水調節機能強化とともに、貯水池堆砂対策を実施している。

貯水池堆砂対策は、土砂バイパス施設とストックヤード施設から構成されている。土砂バイパス施設は、2005年に完成し現在は本運用されており、ストックヤード施設は2021年度に完成、現在は試験運用とモニタリングを実施している。

本稿は、2021年の第1回試験運用結果、2023年の第2回試験運用状況について報告するものである。

2. スtockヤード施設の概要

ストックヤード施設の概要を図-2.1、2.2に示す。施設は、ストックヤード内に高さ約4mで土砂を集積し、さらに水深約1mの浸水状態にしておくもので、1列あたりの集積量は約15,000 m^3 である。非洪水期に貯水池内の堆積土砂を浚渫し、ストックヤード内に送泥・集積しておき、出水時の土砂バイパス運用時に貯砂ダムから導水し、掃流力でストックヤード内の土砂をバイパストンネルへ排砂させる施設である。ストックヤード施設は、自然の出水状態をそのままバイパスさせるのではなく、人為操作を加えて排砂させる施設であるため、できるだけ下流への環境負荷を軽減させる運用方法を確立する必要がある。

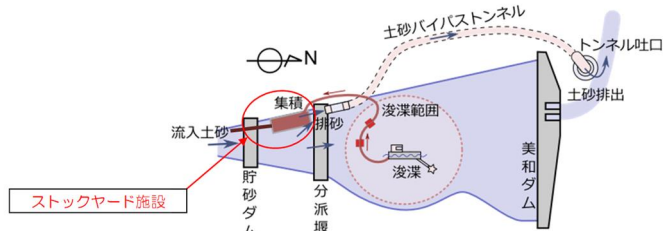


図-2.1 貯水池堆砂対策イメージ図

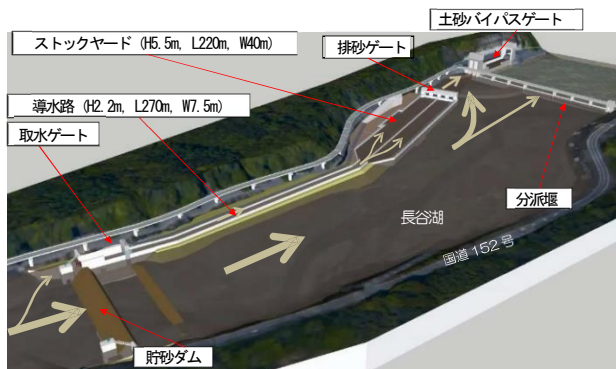


図-2.2 スtockヤード施設概要図

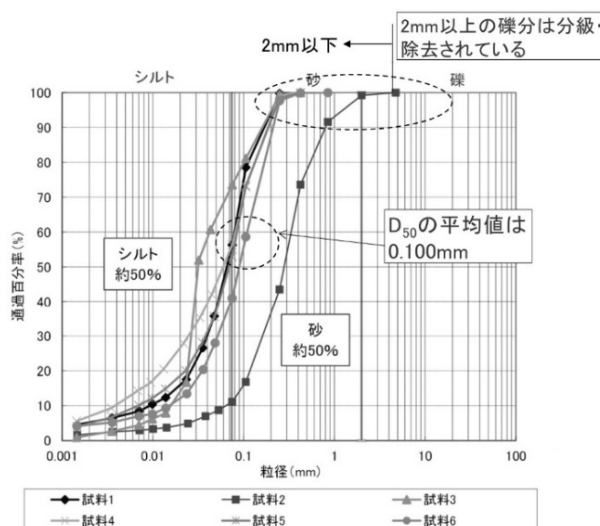


図-3.1 スtockヤード内土砂の粒度分析

表-3.1 環境に関するモニタリング調査項目

調査項目		
物理 環境	河床材料(面積格子法)	
	出水時 SS	
	濁度	
	定期 SS	
	DO(簡易計測)	
	アンモニウム態窒素(NH ₄ -N)	
生物 環境	附着 藻類	クロロフィルa 量・率
		無機物量・率
	底生 動物	出水後調査
		年間定期調査
	魚類	忌避行動
		体長別個体数
		個体数

3. スtockヤード施設の第1回試験運用

(1) 第1回試験運用の概要

ストックヤード施設の第1回試験運用としては、

- ・運用方法の確認
- ・排砂時のストックヤード内土砂流出状況の確認
- ・排砂時の下流水質状況の確認・モニタリング
- ・排砂後の下流河道環境の確認・モニタリング

を主な目的としている。

運用開始の基準は、美和ダムへの流入量100m³/s以上の継続時間が5時間程度以上の予測かつ土砂バイパストンネルが運用中であることとしている。

(2) 流下させる土砂

ストックヤード内に集積した土砂は、粘土・シルトが主体であり、D50粒径は概ね0.1mmである。土砂の投入過程で分級施設により2mm以上の礫分・流木などは除去している。(図-3.1)

(3) モニタリング計画

モニタリングの項目は大きく分けて、①施設の運用に関する項目、②環境に関する項目となる。(表-3.1)

施設の運用に関するモニタリングとしては、運用手順に伴う施設全体の状況把握や管理上支障となる点がないか、排砂ゲートを開けることによるストックヤード内の土砂流出状況・残土状況の確認などである。

初回の試験運用は、一気に土砂が流出する環境への過負荷を考慮し、排砂ゲートは3段階で全開となるような操作とし、その都度状況確認することとした。ストックヤード施設を運用することにより、濁水濃度が上昇するため、その点の把握が重要である。

魚類については、運用中の影響を把握するため、出水時の魚類の行動(忌避行動)に注視した調査を実施する。調査は、比較的緩流となっている地点で実施するが、出水時に水位が上昇する際に緩流部を確認する必要があるため、現地状況を確認しながら魚類が忌避していると予想される箇所調査する。河道内の変化については、運用直後だけでなく運用後6ヶ月間の定期調査により、運用後の変化を把握することとしている。

流域概略図とモニタリング調査地点を図-3.2に示す。

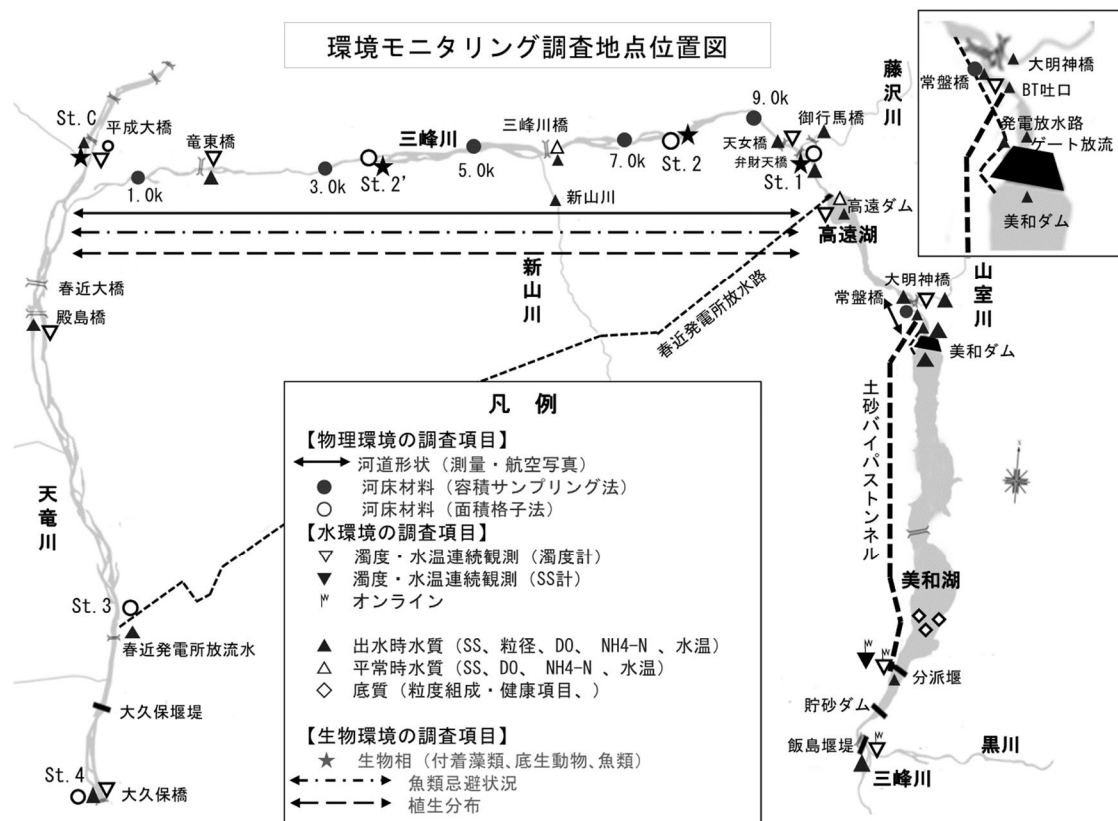


図-3.2 モニタリング調査地点位置図

4. 試験運用状況とモニタリング結果

(1) 出水状況

2021年7月出水では、2日8時頃から流入量が増加。15時に一山目のピーク (124m³/s) を迎え、一旦低減した後、3日4時から再び増加し、3日8時に二山目のピーク (221m³/s) を迎え、美和ダムでは洪水調節となった。ゲート放流と併用して使用した土砂バイパストンネル放流量のピークは、美和ダム流入量のピークから1時間後の9時で、土砂バイパストンネルにあわせ、ストックヤード施設は9時半から試験運用を開始した (図-4.1)

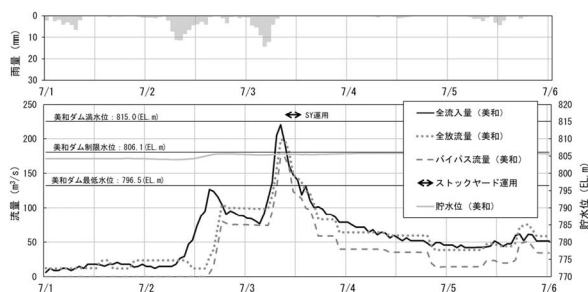


図-4.1 2021年7月出水ハイドログラフ

(2) 試験運用状況

7月3日9時半に取水開始し、ストックヤード施設 (2列) の山側1列の排砂ゲートの開操作を実施した。

濁度・SSの変動の把握のため、ゲート操作は3段階で実施し、1段階目は排砂ゲートを65cm開け、下流の水質に顕著な変化が見られなかったことから、25分後に2段階目として排砂ゲート開度を110cmにした。

2段階目も下流状況に特に大きな変化がなかったため、開操作開始から1時間後の10時半に排砂ゲートを全開にした。

運用時に土砂バイパストンネル内の水位に大きな変化はなく、ダム管理側で問題になるようなことはなかった。

(3) スtockヤード内排砂状況

1段階目として、排砂ゲートを65cm開けた際、集積土はストックヤード内の流水にすこしずつ削られるように流下していくような状況であり、2段階目・全開と段階的に開度を大きくするのに伴い流出土砂も増加したが、流出する土砂量が一気に増えるような現象はなかった。

ゲートが全開になり、ストックヤード内の流量が最大となった際に土砂流出量が一気に上がるような現象も発生しなかった。排砂ゲートを全開後の調査では、700m³ほど残留していることが確認されたが、概ね流出しており、運用としては問題ないと考えられる。

残留した原因としては、出水継続時間が短く、運用終盤では流入量が低下してきたことで、取水ゲートからの取水量が低下したことが影響したと考えられる。

(4) 環境モニタリング結果

A) 下流河川の濁度・SSの状況

土砂バイパストンネル呑口におけるストックヤード運用前後のSSは、設定した運用上限基準値89,000mg/Lを大きく下回り、土砂を流したことによる影響は少ないと考えている。

また、土砂バイパストンネル吐口部における過去の出水と第1回試験運用時のSSを比較した際、バイパストンネル直下のSSの数値は、既往出水におけるSSが大きかったものと同程度の数値となっており、経年データのばらつきの中に収まっている。

B) 出水時の魚類の動態

魚類忌避行動調査結果を表-4.1に示す。

投網・たも網・さで網を使い捕獲調査を実施し、10種類、約500個体の魚類を捕獲した。

各地点で複数の魚種が確認されており、調査地点は効果的な箇所を選定できたといえる。

表-4.1 忌避行動調査 個体数一覧

種名	個体数				
	1.2kp 左岸	1.6kp 右岸	2.0kp 左岸	7.0kp 左岸	7.6kp 左岸
ギンブナ	0	0	0	1	0
オイカワ	3	17	0	15	3
アブラハヤ	2	18	0	4	7
ウグイ	21	9	8	27	9
カマツカ	0	0	0	1	0
シマドジョウ種群	56	5	7	4	27
アカザ	5	0	1	0	0
アユ	0	0	0	1	0
ニジマス	0	1	0	0	0
カワヨシノボリ	139	69	23	8	4
計	226	119	39	61	50

試験運用時に捕獲した個体の体長別個体数一覧を図-4.2に示す。調査では、25～125mm程度の個体が採捕され、出水中は水際部や分水路へ忌避していることが確認された。それぞれの個体にへい死や衰弱はなく、土砂のえら詰まりも確認されなかった。

以上の結果から、一時的に土砂量が大きくなる運用をしても、下流河道でのストックヤード運用における短期的な魚類への影響は少ないと考える。

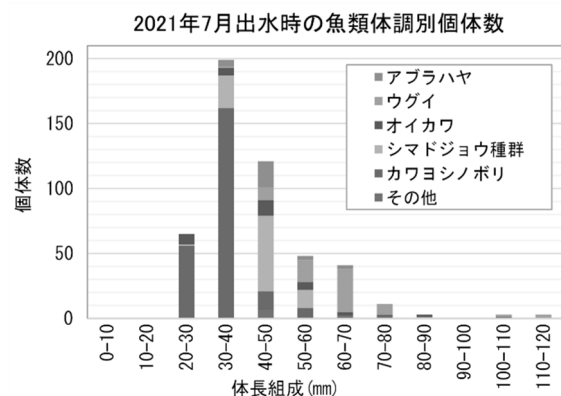


図-4.2 魚類体長別個体数一覧

C) 下流河床材料

出水後の河床材料調査における粒径分布のグラフを図-4.3に示す。

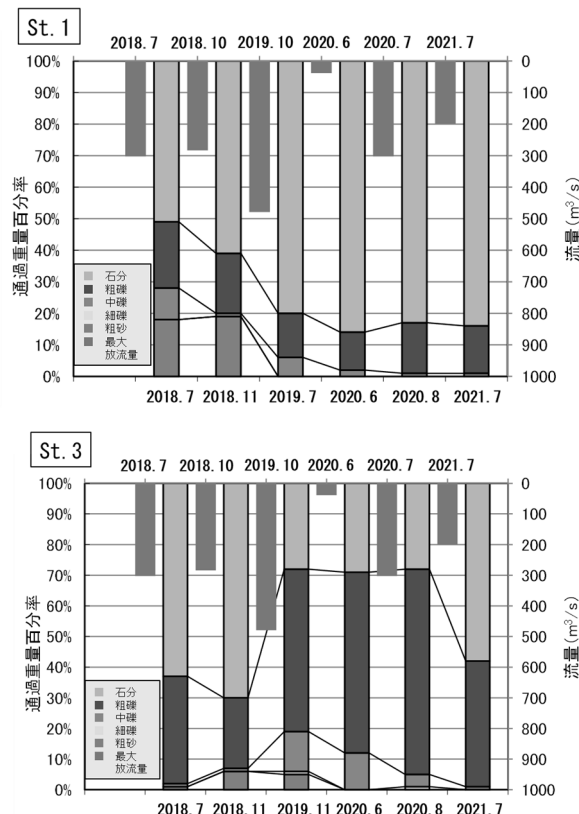


図-4.3 河床材料の粒径分布経年変化

2021年7月（試験運用後）では、St. 1の三峰川本川ではほとんど変化が見られないが、天竜川本川のSt. 3では石分・粗砂の割合が高くなり、砂（2mm以下）の堆積はほとんど確認されていない。

D) 礫表面の付着藻類の状況

2018年以降の定期調査におけるクロロフィルa量の変化を図-4.4に示す。

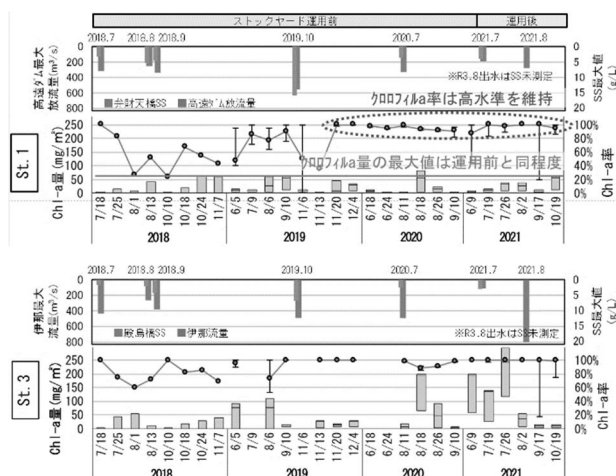


図-4.4 付着藻類（クロロフィルa）の経年変化

試験運用後の三峰川におけるクロロフィルaは、St. 1では試験運用前と同程度であり、出水ピークから20-30日程度での回復状況も試験運用前と比較して日数が遅れることはなかった。

また、試験運用後に回復した後のクロロフィルa量は試験運用前より低くなる傾向はなかった他、付着藻類の量や回復速度の低下は確認されなかった。

E) 底生動物の状況

三峰川St. 1、天竜川本川St. 3における底生動物の生活型個体数割合等の経年変化を図-4.5に示す。

試験運用後の総個体数は、運用前の2018年度や2019年度と概ね同程度で推移しており、試験運用後に大きく減少することはなかった。

生活型別の割合を見ると、試験運用後に河床の細粒化を示す傾向（造網型の減、掘潜型の増）は見られなかった。また、出水後の個体数は、出水から約30日で回復し、試験運用前の調査結果と比較して回復が遅れる傾向はなかった。

回復後の個体数の推移は、前年度出水後と同程度であり、試験運用後に減少するような影響は確認されなかった。

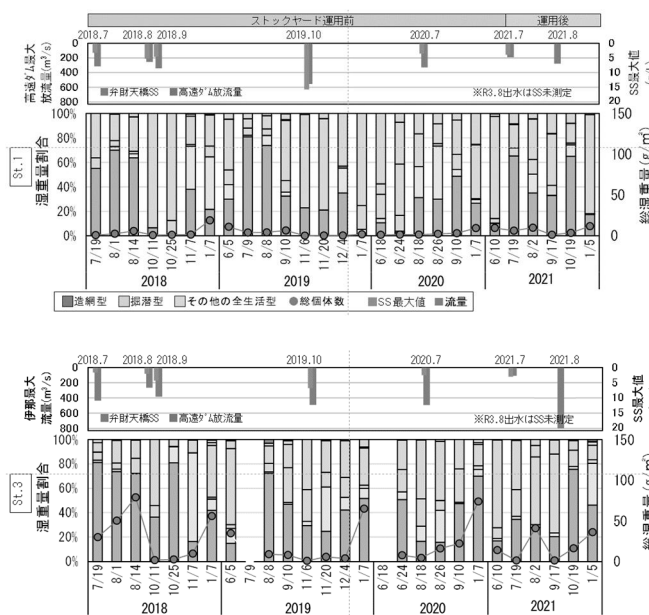


図-4.5 底生動物生活型個体数割合

F) 魚類の状況

魚類については、遊泳魚と底生魚それぞれで個体数を調査しており、その調査結果を図-4.6, 4.7に示す。

種構成は試験運用後に遊泳魚でオイカワが増加しており、今後の調査でその後の推移を確認していく。底生魚は大きな変化はなく、運用による影響は見られない。

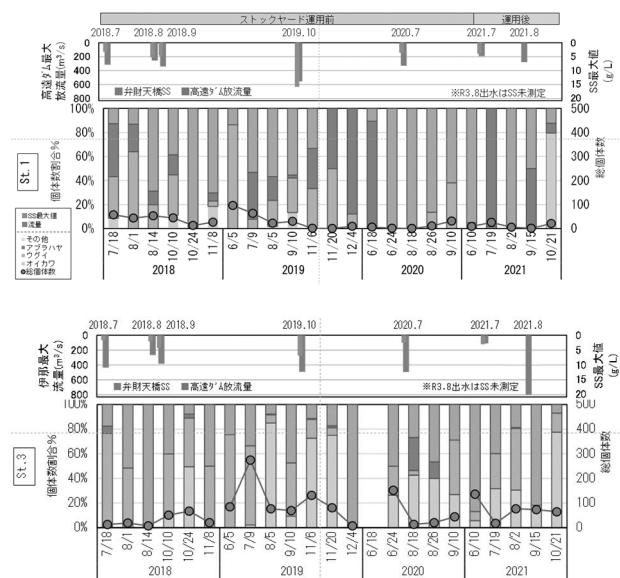


図-4.6 遊泳魚個体割合と総個体数

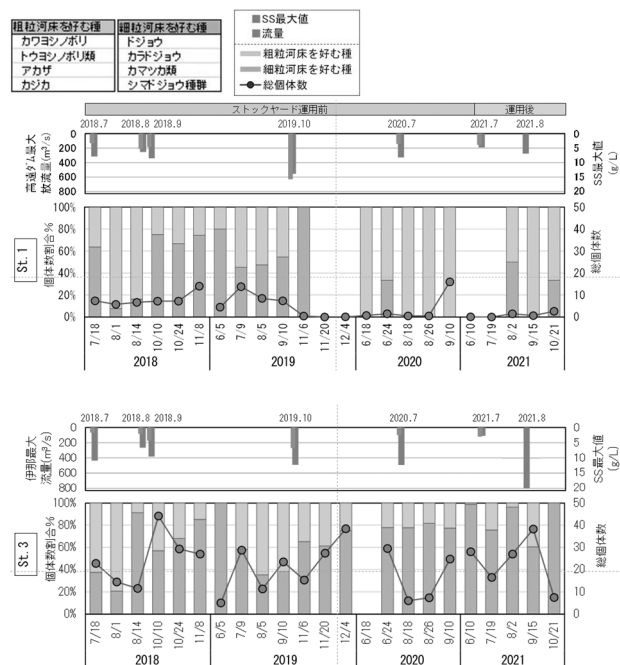


図-4.7 底生魚個体割合と総個体数

5. 関係機関との連携

ストックヤード施設は出水時に人為的に流下させる土砂を増加させる施設であることから、事業計画の段階から下流域の関係機関には丁寧な説明を実施し、施設の効果を説明するだけでなく、モニタリングに関する意見交換やアドバイスをいただいていた。

試験運用後も、漁業協同組合との意見交換・三峰川及び天竜川での合同現地視察を実施し、下流河道の状況や今後のモニタリングについて意見をいただいた。

こういった取り組みにより、定点以外で河道内の環境の変化についても定期的に確認するなど、顕著な変化があった場合にもいち早く情報を入手することが可能となり、モニタリングの精度向上が期待できるとともに、事業に対する理解の促進も期待できる。

6. 第1回試験運用の課題と第2回試験運用計画

(1) 第1回試験運用の課題

初の試験運用を実施したことで、新たな課題が明らかになった。2回目の試験運用では以下に示す課題の遂行に向けた対応が必要となる。

- ・試験運用開始の判断について、出水ピーク前からの運用ができる対応とする
- ・排砂ゲートの操作を一度に全開とすることで、下流の濁度や稼働への影響を把握する
- ・運用するレーン（列）の違いによる排砂状況の確認、土砂バイパストンネルへの流入状況
- ・集積土砂の存置期間（ストックヤード投入から流出までの期間）が異なることによる流出への影響把握
- ・運用後も下流河川の流量が多くなることによる河床材料・魚類・付着藻類・底生動物の変化の有無
- ・魚類忌避行動の調査地点の設定

(2) 第2回試験運用計画

第2回の試験運用は以下の通りとしている。

A) 運用開始時間を出水ピーク前にする

土砂流出後も美和ダムからの放流量が多い状況になることで、土砂の流下・拡散が進み環境への影響が小さくなると考え、出水のピーク前に運用を開始する。

B) 排砂ゲートの運用

排砂ゲート操作は、環境への影響が少なくかつ操作が容易な運用方法とする必要がある。

第2回試験運用では、運用開始から排砂ゲートを全開とし、土砂の流出が初回とどのように異なるか、流出スピードや下流河川への影響がどの程度か環境モニタリングを含めて確認する。

また、ストックヤード内土砂の浸食の推移を定点カメラで記録し、初回の浸食状況と比較し、土砂流出メカニズムを把握する。

C) 環境モニタリング

排砂ゲートの運用方法が異なることで、下流への影響が大きくなることが予想される。特に土砂濃度の指標となる濁度・SSの推移については、各観測地点における時間経過と観測数値の変化をしっかりと把握する必要がある。

また、三峰川だけでなく天竜川合流点より下流での時間経過における変化も重要なポイントとなる。

出水ピーク前からの試験運用を考えているため、ストックヤード内の土砂流出が終わった後も、下流河道は流量が多い状態を維持することが予想される。それによって環境モニタリングの項目ごとに変化が生じるかどうかにも注目していく。

魚類の忌避行動については、河道内の流量によって緩流となる場所が変化し忌避できる場所も変化するため、支川合流点などを含め調査の効果がある場所の選定が必要となる。

7. 第2回試験運用

2023年6月出水では、2日12時頃から流入量が増加した。13時頃に美和ダム流入量が100m³/sを越え、土砂バイパス放流量が約100m³/sとなった14時頃（出水ピーク前）より運用を開始した。

運用するレーンは川側とし、排砂ゲートは運用開始から全開操作とした。土砂バイパストンネル呑口地点でのSSは最大で約28,000mg/L（14時40分頃、美和ダム流入量：約220 m³/s）であり、運用上限基準値89,000mg/Lを大きく下回ることから、土砂を流したことによる影響は少ないと考えている。

約1時間半で概ね全ての土砂排出が確認されたが、具体的な数量や試験結果、運用による下流への影響などのモニタリングについては現在とりまとめ中である。

8. おわりに

国内初のストックヤード方式による堆砂対策の下流河川への影響は、長期間にわたる確認が必要と考えられることから、令和6年度の本格運用移行後も継続して下流河川への影響を把握し、必要な対応を取りつつ、下流河川への影響の軽減、ダムの洪水調節機能の維持、土砂移動の連続性の確保など図っていくことが重要と考える。

引き続きこれらの視点で検討を進め、美和ダム貯水池堆砂対策の効果的且つ効率的な機能発現を目指していく所存である。

参考文献

- 1) 小林賢次, 尾畑伸之, 福本晃久(2017), 美和ダム再開発湖内堆砂対策施設の試験運用計画と環境調査計画について, ダム技術No.375
- 2) 小林賢次, 伊吹孝之, 渡辺裕昭, 佐藤康晴(2018), ダム貯水池における通年施工の取り組み, ダム技術No.383
- 3) 岩田伸隆, 岡本明(2022), 美和ダムの堆砂対策: 国内初のストックヤード方式の試験運用及びモニタリング調査結果, ダム技術No.435

コンクリートの品質向上に向けた AR管理システムの活用

三好 拳士郎¹・河上 伸一¹

¹中国地方整備局 山陰西部国道事務所 工務課 (〒758-0041 山口県萩市大字江向318-2)。

コンクリート構造物施工には技術者の十分な知識および経験が必要な中、年々高年齢化が進んでおり次世代への技術継承が大きな課題になっている。

その中でも減少傾向にあるコンクリート構造物施工のバイブレータ作業について、本事務所発注工事での工事現場にてコンクリート締固めAR管理システムを活用し、結果及び評価を報告するものである。

キーワード AR, 締固め管理, バイブレータ, コンクリート, 品質向上

1. はじめに

山陰西部国道事務所は、山口県内の山陰道を整備する事務所として2020年に設立された事務所で、現在、益田・田万川道路、木与防災、大井・萩道路、三隅・長門道路、俵山・豊田道路の5事業区間を推進している。

今回、俵山・豊田道路の下関市豊田町内に位置する栗野川橋PC上部工事の施工において、コンクリートの品質向上を目的とし、AR技術を取り入れたコンクリート打設を実施したので報告する。

施工の良否は施工者の経験や資質等の人的要因に大きく左右されるため、コンクリート施工に関して十分な知識および経験を有する技術者の指示の下実施することが極めて大切である。

(3)施工不良の影響

コンクリート構造物において、施工不良が原因で起こりうる代表的なコンクリートの欠陥には、ジャンカ(写真-1)、ひび割れ、表面気泡(写真-2)があげられる。これは、バイブレータのかけ過ぎによるコンクリートの分離、締固め不足による型枠への充填不足が原因である。施工不良による初期欠陥によって構造物の耐久性や耐荷性が低下することとなる。

2. コンクリート品質概論

(1)コンクリートの材料品質

一般的にコンクリートの品質とは、品質のばらつきが少なく、作業に適するワーカビリティを有するとともに、硬化後は所要の強度、耐久性、水密性、ひび割れ抵抗性ならびに鋼材を保護する性能等をもつものでなければならない。

(2)コンクリートの施工方法について

コンクリート施工方法についてコンクリート標準示方書によると下記の通りとされている。

- ① 施工者は、施工計画に従ってコンクリート構造物を施工する。
- ② 施工者はコンクリート構造物施工に関して十分な知識および経験を有する技術者を現場に常駐させ、その指示の下で施工する。
- ③ 施工において施工計画を遵守できない場合、施工者は、責任技術者の指示に従い、構造物に設計で要求される性能が確保されるように適切な措置を講じる。



写真-1 ジャンカ



写真-2 表面気泡

3.コンクリート打設作業の現状について

現在のコンクリート打設作業の課題について下記があげられる。

- ① 締固めの時間の記録はされていない。
- ② 締固め時間は、5秒～15秒とされており、バイブレータの挿入位置や時間は作業員の感覚に委ねられている。
- ③ コンクリートの成型後は内部の状態を把握することが困難である。
- ④ 高齢化が進んでおり、打設者の減少が危惧される。人的要素が多くを占めており、コンクリート構造物の締固め施工方法については、標準示方書では定まった基準が定められていないため、熟練作業員の経験により現場施工が成り立っている。

4. コンクリート締固めAR管理システム

(1)活用の背景

2章でも記載したとおり、コンクリートの品質は締固め作業者の技量に左右される。

したがって、コンクリートの締固め施工はバイブレータ間隔や時間を現場監督者が管理し、締固め不良の発生を抑制する必要がある。しかしながら、従来の施工管理では締固めに関する施工記録は無いに等しく、バイブレータの挿入位置や時間を把握し記録することはなかった。これは、締固めを行った位置や締固め都度の時間を管理することは重要であるが、連続的に作業が進行するコンクリート締固め作業においては測定および管理作業が合理的ではなかったためと考えられる。また、コンクリートの成型後は内部の状態を把握することは困難であるためこれまでの作業性を確保しつつ、コンクリート締固め施工の作業効率・品質の向上を目的に、コンクリート締固め位置や時間などの施工情報を記録し、施工記録をARで視認できるコンクリート締固めAR管理システム（以下、締固めARシステム）を活用した。

(2)締固めARシステムの概要

図-1に締固めARシステムの概要を示す。締固めAR管理システムはバイブレータに取り付けたモーションセンサー内蔵のスマートフォン（以下、スマホ）、バイブレータにスマホを装着する制振治具、バイブレータの駆動電流を測定するマイクロコンピュータ（以下、マイコン）、スマホやマイコンの記録情報を統括管理するパソコン（以下、管理PC）、現地座標を構築するQRコード、コンクリートを感知して駆動するバイブレータおよびローカルネットワークを構築するWi-Fiルータで構成される。バイブレータの自己位置はスマホによって計測され、センサーが設定コンクリート高さよりも低く、駆動電流を

検知すればバイブレータ挿入時であると判断する。管理PCでは、図面・画像・モデル、デジタル施工マップ、スマホ位置・軌跡、締固め位置・時間、バイブレータの駆動状態を統合・表示し、帳票出力が可能である。スマホ画面では管理PCから送信された締固め情報がARで表示され、締固め作業位置・時間が可視化される。

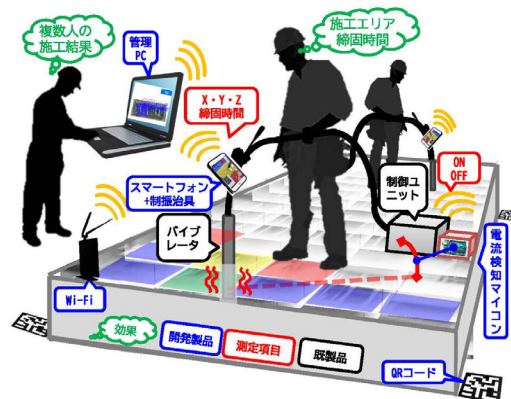


図-1 締固めAR管理システム

(3)実施工への適用

現場は俵山・豊田道路栗野川橋PC上部工事で、PCコンボ橋床版部の場所打ちコンクリートの打設へ適用した。

（写真-3）床版はW17m、L35m、H0.2mで、コンクリート打込み数量は128.4m³である。



写真-3 工事全景

ARを用いた締固め施工状況として、打設管理者のスマホ画面を写真4に示す。現実世界に対して格子状のデジタル施工マップが重畳され、施工対象の区分けが明瞭になっている。さらに、締固め情報は締固め時間に応じた配色（グラデーション配色：目安として5秒未満が緑色、5～10秒が水色、10～15秒が青色、15～20秒が赤色）でプロットされるため、締固め位置や締固め時間が可視化されていることが良くわかる。したがって、締固め不足箇所や長く締固めした箇所に対してリアルタイムで対処を施すことが可能となる。次に、締固め打設者のスマホ画面について、写真5に示す。(2)にて示したとおり、バイブレータ位置がコンクリート設定高さより低く、マイコンによる駆動電流を検知すれば締固め施工情報が更新

される。

したがって、複数人で施工した場合であっても締固め位置や時間が共有され、更新がされていることが確認できる。

また、打設者のスマホだけでなく打設管理者がPC画面(写真-6)から締固め時間・箇所を目視でき作業状況の確認を行うことができる。

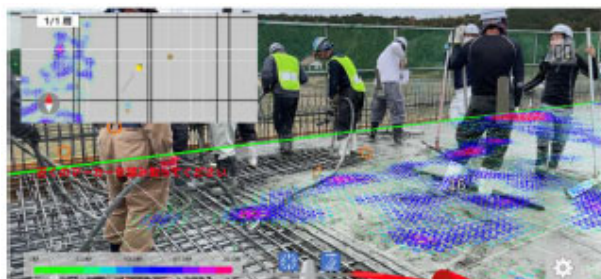


写真4 打設管理者スマホの画面



写真5 締固め打設者スマホの画面 (締固め中)

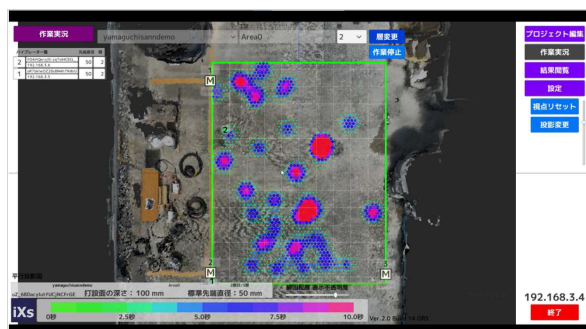


写真6 打設管理者PC画面

(4)締固めARシステムの結果・評価

締固めARシステムの精度について、延長40mの直線上を10m間隔でスマホを移動計測し、比較を行った。精度比較結果を図-2に示し計測値は図中に数値で示した。結果として、40m範囲内における計測値と設計値の誤差は概ね1%の誤差であった。

コンクリート打設作業については、従来の打設作業と比較結果、打設管理者2名の削減を行うことができたが、施工時間については施工計画より遅くなった。

施工時間が長くなった原因として締固めARシステムの接続及び設定に時間を要したことが原因である。

締固めARシステムを活用した施工では、施工完了時また完了から半年経過後コンクリート構造物に問題が確認されなかった。(写真-7)

実際に作業を行った打設者より下記の意見が挙げられている。

メリット

- ① スマホの画面を見るだけでどこを何秒バイブレーター挿入を行ったか、締固め忘れが無いかの確認が自分で行える。
- ② 5秒の挿入時間は感覚的に長く感じた。これまでは5秒以上バイブレーターを挿入していたつもりであったが、締固め時間が不足していたかもしれない。
- ③ スマホの画面で自分の範囲だけでなく、他の作業員の締固め具合も明確に確認でき締固め作業の重複や作業進捗を確認出来る。

デメリット

- ④ 日光の関係や、生コンがスマホにかかり、画面が見えなくなる。
- ⑤ スマホが付いているだけで打設作業の負荷になっている。

経験を積んでいる打設者でも締固めの恐れ及び、挿入時間について可視化してみるとこれまでの感覚とのずれが認識された。また、作業性について、締固め時間等を確認することができるスマホ画面がコンクリートや日光で見えづらくなってしまうことや、作業を行う手元にスマホ等がつくことによる作業性の低下など締固めARシステムの機材関係に不満がでている。

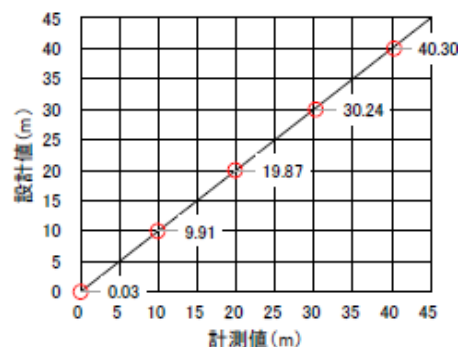


図-2 距離精度の検証結果



写真7 仕上がり写真

5.まとめ

今回、締固めARシステムを活用した施工を行うことにより、施工済のコンクリート構造物で損傷が起きた際、締固めの施工に関する記録が残るため、施工が損傷の要因ではなかったことを証明できる。

また、施工不良が確認された場合、施工データの蓄積により、コンクリート構造物の品質を向上させることができる。

また従来施工では、締固め箇所・時間は経験により、作業が行われてきたが、可視化することで経験の少ない作

業員でもベテラン作業員と同レベルの作業を常に確保でき、人材不足の解決になる。

また安定して高品質のコンクリートを造ることが可能である。

しかし、締固めAR管理のシステム設定・接続による施工時間の増等主に締固めAR管理システムの作業性について改善する必要がある。

今後AR管理システムにて、施工現場のデータを蓄積し解析することによって、現在のコンクリート標準示方書に定められている基準より正確な基準を定めることが可能ではないかと考えている。

マルチビーム測深を活用した 基礎捨石工の出来形計測に関する検討

川上 司¹

¹国土技術政策総合研究所港湾情報化支援センター（〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

国土交通省では、2025年までに建設現場の生産性を2割向上させるi-Constructionの取組を推進している。港湾分野では、2017年度よりマルチビーム測深の導入が進められており、浚渫工、床掘工の出来形管理等に活用されている。一方、基礎捨石工については、精度等の課題によりマルチビーム測深による出来形管理が未だ導入されていない。本稿では、マルチビーム測深による基礎捨石工の出来形計測手法として、評定点を用いた潮位補正及び標準偏差による最浅値算出を提案し、現地試験にて計測精度を評価した結果を報告する。

キーワード i-Construction, マルチビーム測深, 出来形計測, 基礎捨石工

1. 研究の背景

国土交通省では、2025年までに建設現場の生産性を2割向上させるi-Constructionの取組を推進している。港湾分野では2017年度から浚渫工事を対象にマルチビーム測深を導入し、2021年度には対象を床掘工に拡大するなど、浚渫工事以外へのICTの導入が進められている。

対象工種拡大の取組として、潜水土が水中スタッフやスチールテープを用いた基礎捨石工の出来形管理について、マルチビームの導入が2018年度に検討された¹⁾が、基礎捨石工の出来形管理基準に対するマルチビーム測深の精度等の課題もあり、マルチビーム測深の利用は起工時の深浅測量及び捨石投入数量算出の要領が策定されたものの出来形管理への導入には至らなかった。

そこで本稿では、マルチビーム測深の精度の課題を解決する出来形計測手法を提案し、現地試験によってその効果を検証する。

2. マルチビーム測深による基礎捨石工の出来形計測の課題

港湾工事におけるマルチビーム測深はすでに浚渫工、床掘工に導入されているが、基礎捨石工への導入にあたって課題となるのが厳格な出来形管理基準である。基礎捨石工の本均し部分には、ケーソン等の構造物が据え付けられることから、施工の要求精度が高い。基礎捨石工の出来形管理基準²⁾を表-1に示す。天端高では測定単位が1cm、許容範囲が±5cmとされている。

表-1 基礎捨石工本均しの出来形管理基準

	管理項目	測定密度	測定単位	許容範囲
本均し	天端高	測線間隔10m以下	1cm	±5cm
	天端幅	測線間隔10m以下	10cm	＋側:規定なし －側:10cm
	延長	法線上又は監督職員の指示	10cm	＋側:規定なし －側:10cm

2018年度に検査合格済みの本均し施工面を用いてマルチビーム測深の現地試験が行われた際は、天端高の計測値が出来形管理基準値内に収まったのは施工範囲の40～60%に留まる結果となった。また、天端幅・延長について、計測値から作成したTINによる計測断面の作成・評価が行われたが、出来形管理基準の作成には至らなかった。この原因として、(1)現地潮位と検潮所潮位の誤差、(2)捨石の凹凸形状を考慮した天端高の算定、(3)捨石の凹凸形状を踏まえた施工境界部分の評価の3つの課題が考えられる。

(1) 現地潮位と検潮所潮位の誤差

マルチビーム測深によって得られるのは計測時点の潮位を含んだ水深であり、基準面からの水深を求めるためには計測結果から潮位の値を差し引く必要がある。この際、潮位は近隣の常設検潮所もしくは簡易検潮器を使用した臨時検潮所の潮位計測結果を用いている。しかし、検潮場所とマルチビーム測深位置が離れている場合、検潮所の潮位と現地潮位に差が生じてしまうことが考えられる。上述のとおり基礎捨石工の天端高は許容範囲が±5cmと厳格であることから、現地潮位と検潮所潮位の差を補正することが必要となる。

(2) 捨石の凹凸形状を考慮した天端高の算定

基礎捨石工の天端面の模式図を図-1に示す。図に示す通り、天端面は捨石を並べたものであるため凹凸を含む形状となる。従来の計測手法では、潜水土が捨石の最も浅い部分に水中スタッフ等の計測機器を設置して計測を行うが、マルチビーム測深の場合、捨石の窪み部分までデータを取得することとなる。このため、従来手法とマルチビーム測深による計測手法を比較した場合、マルチビーム測深の方が深い値となることが考えられる。

なお、マルチビーム測深結果から一定の範囲ごとの最浅値を抽出することも可能だが、個々の計測値はノイズや計測誤差を含むことがあるため、これらの影響が生じない手法で捨石の最浅値を算定する必要がある。

(3) 捨石の凹凸形状を踏まえた施工境界部分の評価

マルチビーム測深結果を用いた天端幅・延長の出来形計測手法として、2018年度に実証が行われた際には施工境界部分を目視で確認する手法が用いられた。当該手法を参考にマルチビーム測深結果から作成した計測断面を図-2に示す。

縦に引いた黒線が本均し設計範囲、水平に引いた赤い線が本均しの設計天端高であるが、設計範囲の外側まで設計天端高付近の値が続き、青色の破線付近から計測値が急激に深くなっていることがわかる。ただし、計測値をそのまま用いて計測断面を作成した場合、捨石の形状やノイズ等により天端高の設計基準値を超える凹凸が生じることから、施工境界部分を目視で判断することは困難であり、作業者によって天端幅・延長の計測値のばらつきが生じることが懸念される。

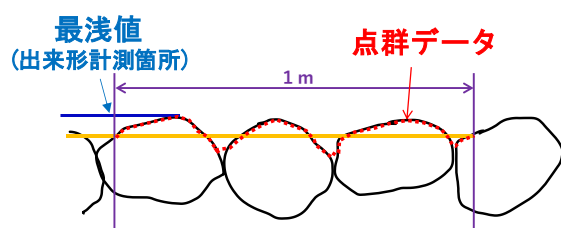


図-1 基礎捨石工天端面の計測イメージ

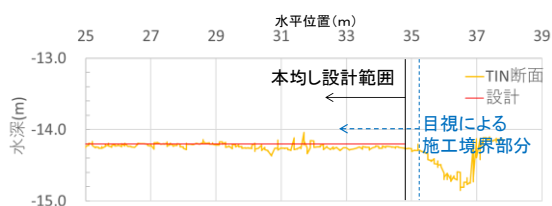


図-2 マルチビーム測深結果から作成した計測断面

3. マルチビーム測深における課題を踏まえた計測手法の提案

第2章で述べた通りマルチビーム測深により基礎捨石工の計測を行うには3つの課題がある。これらを踏まえた計測手法について以下(1)～(3)でそれぞれ提案する。

(1) 現地潮位と検潮所潮位の誤差

現地潮位と検潮所潮位の差は、計測地点で水深が既知の点をマルチビーム測深で計測し、検潮所潮位で補正した計測値と既知の水深を比較することで求めることができる。

そこで、本稿では基礎捨石工の施工面上に基準となる平面（標定点）を設置し、従来手法とマルチビーム測深結果の差分を現地潮位と検潮所潮位の差として補正を行う。

マルチビーム測深結果において標定点の位置を明確にするため、本稿では図-3に示すような1m×1mのコンクリート平板を設置し、従来手法（水中水準測量）で9か所測量した平均値とマルチビーム測深値の平均値の差分を求め、潮位誤差としてマルチビーム測深結果全体を補正することによる精度の影響を検証する。

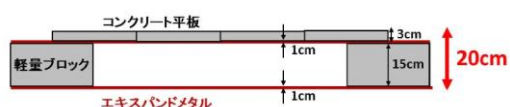
なお、平板はマルチビーム測深で取得した点群を明確にするため、軽量ブロックでかさ上げしている。

(2) 捨石の凹凸形状を考慮した天端高の算定

マルチビーム測深では捨石の窪みの影響で従来手法より深い値が計測されることが考えられるが、捨石の窪みは用いられた捨石の大きさや施工管理の度合いによって変化するため一様ではない。

このため、捨石の天端高の算定には窪みの大きさに応じて変化する指標を用いることが望ましい。辰巳ら³⁾は

(水平図)



(平面図)

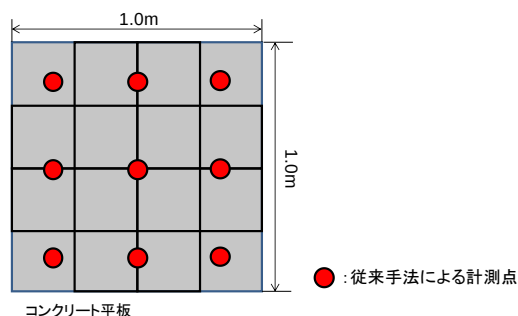


図-3 潮位誤差の補正に用いる標定点（模式図）

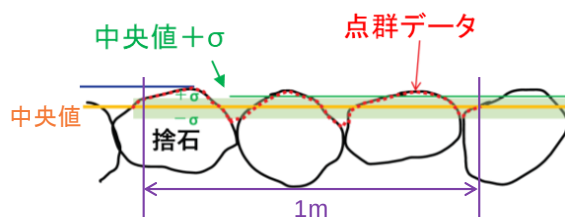


図-4 捨石の天端高の算定イメージ

一様な楕円体で模擬した捨石を配置した施工面上に対する音線追跡シミュレーションによって、図-4に示すように1m平面格子の中央値に格子内の計測値の標準偏差を加算することで、捨石の天端高を再現できることを確認している。

そこで、本稿では基礎捨石工の本均し範囲全体を対象としたマルチビーム測深結果においても、同様の手法で捨石の天端高の算定が行えるかどうか現地試験により検証する。

(3) 捨石の凹凸形状を踏まえた施工境界部分の評価

天端幅・延長の出来形計測にあたり、マルチビーム測深結果の点群を直接使用すると捨石の凹凸形状等により施工面の境界部分の判断が困難となることから、点群を平面格子に分割し、各平面格子の統計値を用いて施工境界面を評価する。

平面格子の大きさは天端幅・延長の出来形管理基準の測定単位と合わせ10cm四方とした。天端高の算定では統計値として中央値を用いたが、平面格子の大きさを10cm四方とした場合、各格子内の点数が少なくなることが想定され、中央値では値が偏る可能性があることから、天端幅・延長の評価では平面格子内の平均値を用いることとした。

計測範囲を10cm四方の平面格子で分割し、天端高の出来形管理基準を満たした平面格子の位置関係から天端幅・延長の施工境界部分を確認できるかを検討する。

4. 現地試験における提案計測手法の評価

第3章で提案した手法による計測精度の変化を確認するため、基礎捨石工本均しの施工が完了した範囲を対象に現地試験を実施した。現地試験の概要を表-2に示す。また、計測範囲は図-5の赤枠に示す通りである。マルチビーム測深手法は第3章で提案した手法を除き浚渫工の計測手法⁴⁾に準じて計測を行った。図-6にマルチビーム測深結果の鳥観図を示す。赤い枠内が計測範囲であり、赤色から青色になるにつれて水深が深くなることを示している。なお、計測範囲は現行の出来形管理基準に基づいて出来形計測を行っており、本均しの出来形管理基準値内であることを確認している。

表-2 現地試験の概要

実施場所	高知港
実施時期	2023年 1 月
設計水深	-14.2m
計測範囲	約33.0m × 46.0m
基礎捨石の規格	200～500kg/個

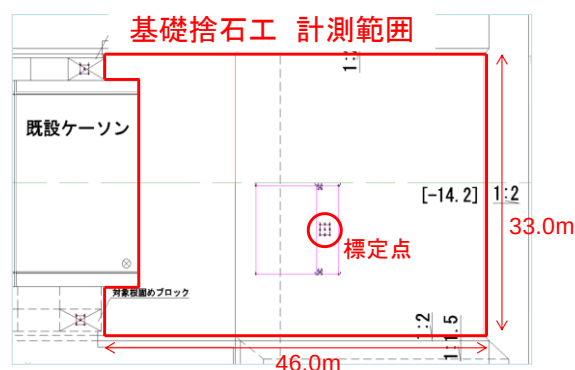


図-5 現地試験の計測範囲

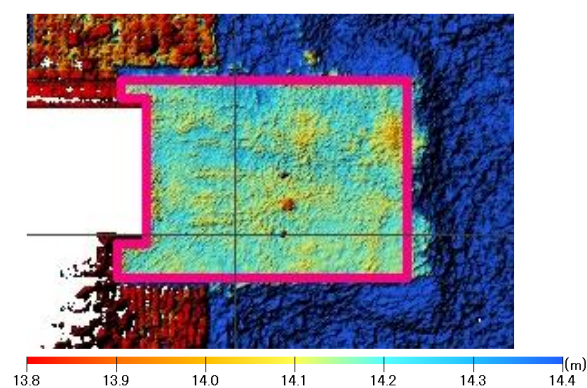


図-6 マルチビーム測深結果の鳥観図

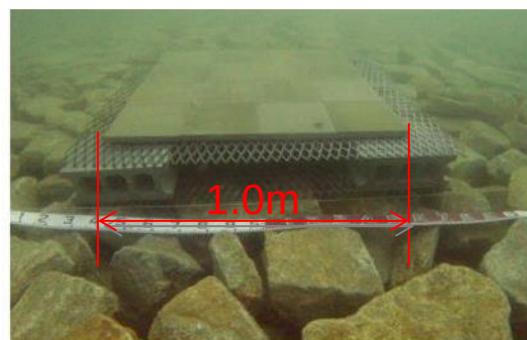


図-7 標定点の設置状況

マルチビーム測深の計測精度の評価にあたり、浚渫工の計測手法に準じてマルチビーム測深結果を1m四方の平面格子で分割し、代表値を抽出する。本稿では、マルチビーム測深時のノイズ等による特異値の影響を小さくするため中央値を代表値とした。代表値が設計値に対して出来形管理基準の許容範囲内に収まっている平面格子

数の割合を達成率と定義し、計測精度を評価する。

(1) 現地潮位と検潮所潮位の誤差

潮位誤差補正に用いる標定点は図-5に示す通り施工範囲中心付近に設置した。施工面に標定点を設置した状況を図-7に示す。

標定点の平板の水深は水中水準器を用いて計測し、測点の間隔を0.5m程度として平板の四隅・各辺の中点・平板の中心の計9点を計測した。

水中水準器による測深結果とマルチビーム測深結果を表-3に示す。水中水準器の計測結果の平均は-13.99mとなった。設計水深-14.20mの施工面に0.20mの高さの評定点を設置しているため、概ね妥当な値と考えられる。マルチビーム測深結果の平均は-14.06mとなり、水中水準器による測深結果より0.07m深い値となった。

水中水準器とマルチビーム測深の差分の0.07mを検潮所潮位と現地潮位の誤差としてマルチビーム測深結果の補正を行い、達成率への影響を検証する。

計測範囲全体におけるマルチビーム測深による計測水深の平均値と達成率について、標定点による補正の前後の値を表-4に示す。

計測範囲全体におけるマルチビーム測深による計測値の平均は-14.31mとなり、設計水深である-14.20mより0.11m深い値となった。これは設計値に対する出来形の下限值である-14.25mを超過しており、出来形管理基準値内となった平面格子の割合である達成率は2.4%に留まる結果となった。

ここで、標定点の計測結果はマルチビーム測深結果の方が0.07m深かったことから、計測範囲全体のマルチビーム測深結果を0.07m浅くなるよう補正する。その結果、計測値の平均は-14.24mと出来形管理基準である±5cm以内に収まり、達成率は70.6%に向上した。このことから、標定点における測定差を用いることで潮位誤差を適切に補正できたと考えられる。

表-3 標定点の計測結果

	水中水準器	マルチビーム測深
取得点数	9	572
平均水深(m)	-13.99	-14.06

表-4 標定点補正による達成率の変化

標定点	無	有 (0.07m)
計測値の平均(m)	-14.31	-14.24
達成率(%) (中央値)	2.4	70.6

表-5 標準偏差の加算による達成率の変化

標定点	無	有 (0.07m)
計測値の平均(m)	-14.31	-14.24
標準偏差の平均(m) (全平面格子)	0.033	
達成率(%) (中央値)	2.4	70.6
達成率(%) (中央値+標準偏差)	40.8	85.9

(2) 捨石の天端高の算定

捨石の天端面の算定には各平面格子の標準偏差を中央値に加算する。このため、標準偏差は平面格子ごとに異なるため参考値となるが、全格子の標準偏差の平均は0.033mとなった。

マルチビーム測深結果に各平面格子の標準偏差を加算した場合の達成率の変化を表-5に示す。標定点による補正前の計測値に標準偏差を加算した場合、達成率は2.4%から40.8%に向上した。このことから、中央値に各平面格子の標準偏差を加算することで、適切に天端面の算定が行えたと考えられる。

また、標定点補正を行った計測値に標準偏差を加算したところ、達成率は85.9%まで向上した。潮位による誤差の補正と天端面の算定を合わせて行うことで、計測精度が向上したと考えられる。

なお、現行の出来形管理基準で合格となった施工面において達成率が85.9%に留まった理由としては、基礎捨石工の均し面の不陸が考えられる。現行の出来形管理基準では、計測間隔は10mに1点程度となるが、宮田ら⁵⁾が本均し済みの厚さ3.5mと1.5mの実験マウンドにおいて計測間隔0.1mで水中スタッフによる計測を行ったところ、厚さ3.5mの実験マウンドでは標準偏差が3.7cm、厚さ1.5mの実験マウンドでは標準偏差が3.9cmとなった。この時、計測値の分布が正規分布とすると、計測値が出来形管理基準の±5cmを満たす割合は厚さ3.5mの例で82.3%、1.5mの例で79.9%となる。

計測値のばらつきは施工管理や捨石の規格等で変わることが予想されるが、高知港の事例において潮位誤差補正及び天端高算定後の達成率が85.9%となったのは、上記実験マウンドにおける計測例を踏まえると概ね妥当な値と考えられる。

(3) 施工境界部分の評価

天端幅・延長の出来形計測にあたり、マルチビーム測深結果の点群を直接使用すると捨石の凹凸形状等により施工面の境界部分の特定が困難となることから、点群を10cm四方の平面格子に分割し、天端高の出来形管理基準を満たした平面格子による施工境界部分を評価する。

図-8は、各平面格子の天端高をヒートマップで示したものである。出来形管理基準値内の格子は橙色、出来形管理基準値より深い格子は黒色、浅い格子は灰色で示している。図-8の赤枠内が計測範囲、緑の線は従来手法で天端幅・延長を計測した際の測線であるが、計測範囲の半分以上が出来形管理基準より深い黒い格子となり、出来形管理基準を満たした橙色の格子から天端幅・延長の施工境界部分を特定することはできなかった。

1m四方の平面格子の天端高では達成率85.9%に達した施工面において、10cm四方の平面格子では基準値より深い格子が多くなった理由としては、①格子当たりの点

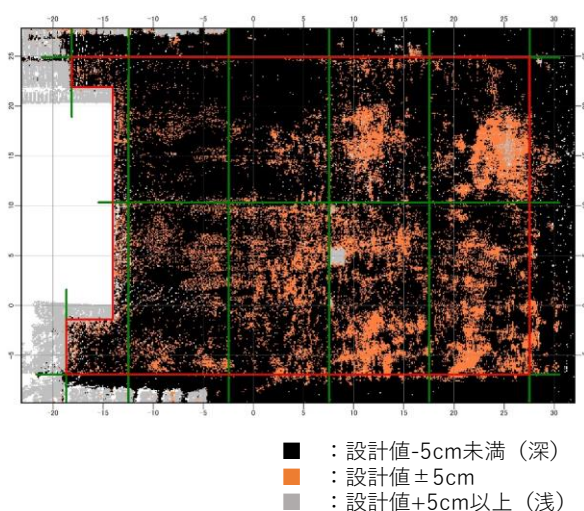


図-8 10cm 平面格子における出来形基準のヒートマップ

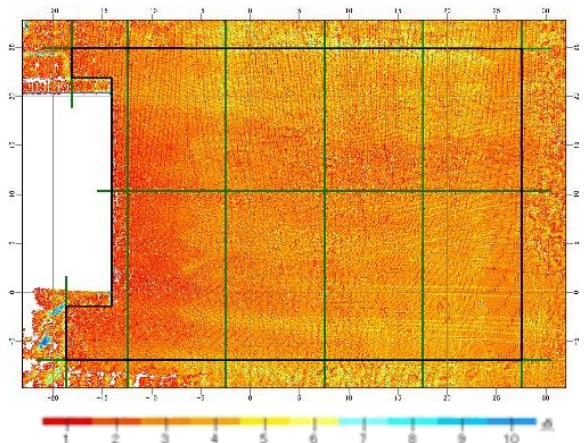


図-9 10cm 平面格子における取得点数のヒートマップ

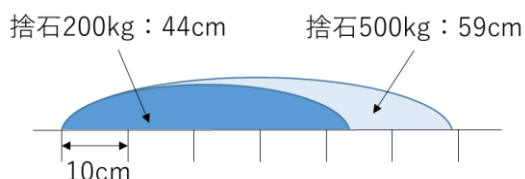


図-10 10cm 平面格子と捨石の大きさの関係

群数が少なかったこと、②格子が捨石より小さくなったことの2点が考えられる。

10cm四方の平面格子において各格子内の点数をヒートマップで示したものを図-9に示す。計測範囲内の格子の大部分で、点数が3点未満である赤色から橙色であった。このため、格子内の標準偏差を算出し中央値に加算する手法による天端高の算出が行えなかったことにより基準より深い結果となったことが考えられる。

図-10に平面格子の大きさと現地試験の捨石の大きさの模式図を示す。1個当たり200～500kgの捨石が用いられているが、捨石の形状が立方体の場合でも200kgの捨石は1辺約44cm、500kgも捨石は約59cmと平面格子よりも大きくなる。この場合、捨石の頂部が含まれない平面格子が発生し、出来形管理基準より深い値となったことが考えられる。

今回提案した手法では天端幅・延長の施工境界部分を特定することができなかったため、引き続き基礎捨石工の特性に応じた評価手法を検討する。

5. 結論

本稿では、基礎捨石工の本均しを対象としたマルチビーム測深による出来形計測手法について、3つの課題と対応手法を提案し、現地試験において効果を検証した。その結果を以下に記す。

天端高計測の課題に対して、(1)潮位誤差の補正と、(2)捨石の天端高の算定を行ったところ、現地試験での天端高の出来形管理基準に対する達成率は2.4%から85.9%まで向上し、達成率は既往の実験の成果と比較しても概ね妥当な値となった。

天端幅・延長の計測課題である施工境界部分の評価のため、10cm四方の平面格子を用いて検討を行ったが、境界部分を特定することはできなかった。その理由として、取得点数や捨石の大きさの影響が考えられる。

今後の課題として、天端高は今回提案した手法により他の現場でも同等の精度で計測が行えるか適用性を確認し、計測手法として取りまとめを進める。天端幅・延長については、今回提案手法では施工境界部分が特定できなかったことから、引き続き基礎捨石工の特性に応じた評価手法の検討を行う。

参考文献

- 1) 国土交通省：第7回港湾におけるICT導入検討委員会，2019，<<https://www.mlit.go.jp/common/001274017.pdf>>，（最終閲覧日 2023.11.17）
- 2) 国土交通省：港湾工事共通仕様書（令和5年3月），2023，pp3-37～3-38.

- 3) 辰巳大介，小川雅史，川上司：基礎捨石工の出来形計測を対象としたマルチビーム測深の適用性に関する研究，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），78 巻，2 号，2022
- 4) 国土交通省：マルチビームを用いた深浅測量マニュアル（浚渫工編）（令和 4 年 4 月改訂版），2022，<<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001475803.pdf>>，（最終閲覧日 2023.11.17）
- 5) 宮田正史，森屋陽一，長尾毅，菅野高弘：均し精度がケーソン底版断面力に及ぼす影響について～その 2～，国土技術政策総合研究所資料，No.93，2003.

首里城公園におけるBIM/CIMを活用した インフラDXの推進 —首里城デジタルツインの効果と課題—

勝美 直光¹・新垣 博愛¹

¹内閣府沖縄総合事務局 国営沖縄記念公園事務所（〒905-0206 沖縄県国頭郡本部町字石川424番地）

内閣府沖縄総合事務局国営沖縄記念公園事務所では、火災により焼失した首里城正殿の復元整備を進めており、その過程を来園者の方々に楽しんでいただく「見せる復興」に取り組んでいる。公園事務所では、BIM/CIMを軸に「首里城デジタルツイン」を作成し、工事関係者間が工事中・完成後の建物のイメージを共有するツール、来園者の事業への理解を促進する情報発信ツール等として活用した。本稿では、これまでの公園事務所の取組を紹介するとともに、その効果や課題について報告する。

キーワード BIM/CIM, 国営沖縄記念公園, 首里城, 見せる復興,
デジタルツイン, i-Construction/インフラ DX

1. はじめに

内閣府沖縄総合事務局国営沖縄記念公園事務所(以下「公園事務所」という)では、2019年10月31日未明に発生した火災で焼失した首里城の復元整備を推進している。公園事務所では、首里城復元に向けた「三本柱」として、正殿を皮切りとした「首里城復元」、復元の現場や過程を一般へ公開・発信する「段階的公開」、それらの実施を通じた「地域振興・観光振興への貢献」を据え、2026年までの正殿復元を目指している。その一環として、長い時間を要する正殿完成までの過程を、その時々でしか見られない観光資源と捉え、来園者に間近で見て楽しんでいただく「見せる復興」に取り組んでいる。そのためには、円滑な工事の進捗と来園者の安全な見学動線の確保、そして事業への理解を促進する適時適切な情報発信という複数の要素を加味しながら取組を進める必要があった。そこで、復元中の正殿を雨風から保護する「素屋根」、木材の保管や加工を行う「木材倉庫・加工場」、

実物大の図面を描く「原寸場」といった工事建屋(図1)を、城郭に囲われた狭い首里城内で建築しつつ、安全な見学動線を確保するための見学デッキを建設することとした。しかし、未建設の「木材倉庫・加工場」等の来園者からの見え方や景観上の配慮、効果的な見学動線をイメージすることは難しく、3D動画等を作成しながら検討を進めた。結果的に、この取組は、二次元図面からだけではイメージしにくかった「木材倉庫・加工場」等の完成後の姿を、関係者全員が視覚的に理解しながら検討を進めることにつながり、非常に有益な経験となった。この経験を踏まえ、公園事務所では、本来建物の設計のために製作されるBIM(Building Information Modelling)¹⁾に、工事関係者間が工事中・完成後の建物のイメージを共有するツール、来園者の事業への理解を促進する情報発信ツール等、多様な用途への活用可能性を感じ、BIMを軸にバーチャル空間で首里城を再現した「首里城デジタルツイン²⁾」を作成して様々な活用を試みている。本稿では、これまでの公園事務所の取組を紹介するとともに、その効果や課題について報告する。



図1 正殿周辺の工事建屋等

2. 既往事例

国土交通省ではBIM/CIM利活用促進のためBIM/CIMポータルサイト³⁾を公開し、BIM/CIMの活用事例を紹介している。その多くは橋梁や道路、河川における設計・施工・検査の事例であり、国営公園におけるBIM活用の事例はない。また橋梁等の事例でもBIMデータからデジタルツインを作成し、設計・施工以外の業務で活用する事例は

見当たらない。

3. 首里城デジタルツインの作成及び活用

(1) 首里城デジタルツインの作成

国土交通省は、2023年度までに小規模を除く全ての公共工事においてBIM/CIMを原則適用することとしている。2022年より実施された首里城正殿復元設計業務においても、設計図書はBIMモデル（以下、設計BIM）で作成・納品され、本デジタルツインはその設計BIMを軸に作成を進めた。さらに、公園事務所では、本デジタルツインを「見える復興」に活用するため、設計BIMに加え、異なる視点からの複数枚の写真を元に3次元形状を復元するSfM（Structure from Motion）手法で作成した世界遺産「首里城正殿基壇遺構」や周辺地形等の3次元データを、株式会社パスコが提供する「TerraExplorer Pro（日本語版）」等のソフト上で合成し、本デジタルツインを作成した。

(2) 首里城デジタルツインの活用

a) 復元までの首里城正殿の可視化

本デジタルツインは、正殿復元の前段階である素屋根設置時の検討から活用した。素屋根は大規模な建築物であり、周囲の景観に及ぼす影響を検討する必要がある。特に首里城公園に近接する県指定史跡「龍潭」等からの眺望景観への影響を抑えるよう、外壁色の検討に本デジタルツインを活用した。本デジタルツインには、周辺の地形情報も盛り込んでいることから、実際に人が龍潭脇に立つアングルからの素屋根の見え方等を確認しながら検討した（図2）。通常であれば特定の画角からのパネ

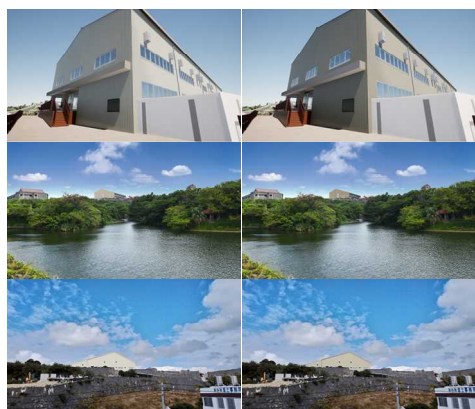


図2 素屋根外壁色検討時の景観検討

（左行：アイボリー、右行：ゴールド、1列目：見学デッキからの見え方、2列目：龍潭からの見え方 3列目：崎山公園からの見え方）

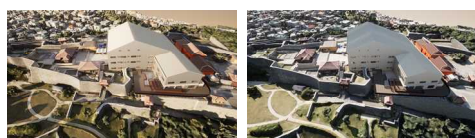


図3 素屋根外壁色検討時の景観検討

（左：午前7時30分頃の見え方 右：午後1時頃の見え方）

ス図を作成して検討するが、周辺地形を含めて3Dモデル化した本デジタルツインでは自由に画角を調整しながら見え方の検証が可能となった。また色の変更、日照状況の変化等による見え方の細かい条件変更も容易に画面を見ながら行うことができたため、外壁色の検討を短時間で行うことが可能となった（図3）。

次に、素屋根内に建設される正殿を本デジタルツインに反映した。他の民間や研究機関において、焼失前の正殿をメタバース等に構築した試みはあるが、本デジタルツインは平成復元後に得られた新たな知見等に基づく変更点を反映した「完成予想の正殿」である点で類例がない。具体的には、「首里城復元に向けた技術検討委員会」等で委員より細部に至るまで学術的な検討を頂いた結果として、向拝奥の彫刻物の文様を「1つの牡丹と唐草」から「3つの牡丹と唐草、1対の獅子」に変更、向拝奥の彫刻物に施されている獅子を約1.3倍大きくし、その顔の向きをやや上向きに変える等の変更を予定しており、それらの意匠の変更も反映している（図4）。

また、今般の復元では、火災を二度と起こさないよう、様々な出火要因に対応した防火対策を講じることとしている。具体的には、焼失前の正殿には設置していなかったスプリンクラー等を設置することとしたが、可能な限り正殿の歴史的空間・景観を損なわないよう、本デジタルツインで防災・防火設備の見え方や設置箇所を確認することで、防災の専門家にも、歴史の専門家にも理解を頂きながら検討を進めることが可能となった（図5）。

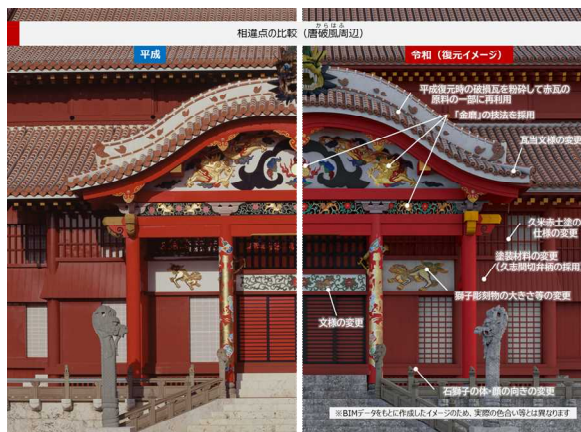


図4 変更箇所の可視化



図5 防災設備設置箇所イメージ

このように、詳細な意匠、防災・防火対策を反映した本デジタルツインは、どのような正殿ができあがるのか、関心を寄せる多くの人々の理解を促進するツールとしても活用した。具体的には、2023年3月に開催した「首里城復元に向けた技術検討委員会第2回報告会」において、復元後の首里城正殿の姿を可視化した複数の3Dモデル映像と焼失前の正殿とを比較する資料を作成、配布した。報告会後に行ったアンケート結果では、9割以上の方が満足と回答し、「令和の防災対策と平成の復元との相違点、現在復元に向けた研究が進んでいることをよく理解できる良い報告会でした」等の意見も多数頂いた。

b) 消防訓練時の火災シミュレーションへの活用

公園事務所では、火災対策として、ハード面だけでなく、消防訓練等のソフト面の対策も強化しているが、その訓練にも本デジタルツインを活用した。具体的には、木材倉庫の初期消火訓練において、訓練を行った一部の参加者より、資機材搬入前の広大な空間が広がる倉庫内では火災の広がり方に対するイメージが持ちにくかった、との指摘を受けたことから、本デジタルツインを用いて木材搬入後の木材倉庫等での火災シミュレーション動画を作成（図6）し、訓練に用いた。その結果、訓練参加者の火災に対するイメージが持ちやすくなり、この取組は、消火訓練に協力頂いた那覇市消防局からも評価する声をいただいた。

c) 園内展示コンテンツへの活用

本デジタルツインを、来園者向けの園内展示コンテンツとしても活用した。具体的には、本デジタルツインから画像や映像、3Dコンテンツを出力し、以下の3つの活用を行った。

- 1) 公園内の休憩施設「世誇殿」に大型タッチパネルを設置。来園者が自由にタッチしながらデジタルコンテンツ映像等を閲覧。
- 2) 解説員が公園内を案内する「首里城60分 ぐるっとツアー」での活用。解説員がタブレット端末を用いながら、本デジタルツインで作成した首里城復元の工程等を映像で解説。
- 3) VRコンテンツでの活用。来園者の方々に体験していただく実証実験を2023年3月10日～12日及び4月21日～23日にかけて実施。首里城の中庭に当たる御庭（ウナー）から完成後の首里城を見渡すことできるコンテンツや、世界遺産のため決して立ち入ることができない基壇遺構に降り立ったかのようなコンテンツ等を用意し、全編にわたり本デジタルツインを活用して没入感のあるVRコンテンツを作成（図7）。

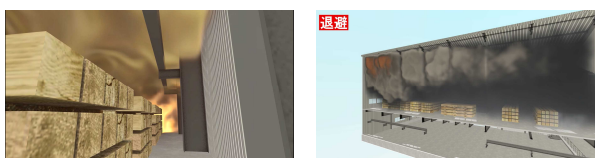


図6 火災シミュレーション

実証実験では、海外の方を含め、日平均150名程の方が体験された。実証実験は無料で行ったが、参加者を対象に行ったアンケートでは8割以上の方が「有料でも体験したい」と回答しており、満足度が高かった。なお、一般的なVR体験ではゴーグル着用者のみが映像を見るケースが多く、着用者以外は退屈であること、着用者が見ているシーンが分からず解説員による説明のタイミングが難しいこと、着用者自身も自分だけ反応するのが恥ずかしいこと等の課題があった。そこで公園事務所では、着用者が見ている映像を大型モニターにも投影し、ゴーグル着用者だけでなく、家族等のグループも一体感を持って楽しめるように工夫した点も高評価につながったと考える（写真1）。

4. 設計BIMを軸にデジタルツインを作成する際の課題

上述のように、公園事務所では、設計BIMを軸に本デジタルツインを作成し、多様な用途に活用したが、その際に明らかになった課題として以下の2点が挙げられる。まず、設計BIMはあくまで建物の設計・施工のために作成されたものであるため、映像制作ソフトウェアやゲームエンジンに取り込んでもそのまま展示用コンテンツ等として活用できない、という点が挙げられる。首里城の設計BIMでは彫刻物や瓦等の細部は反映されていないこ

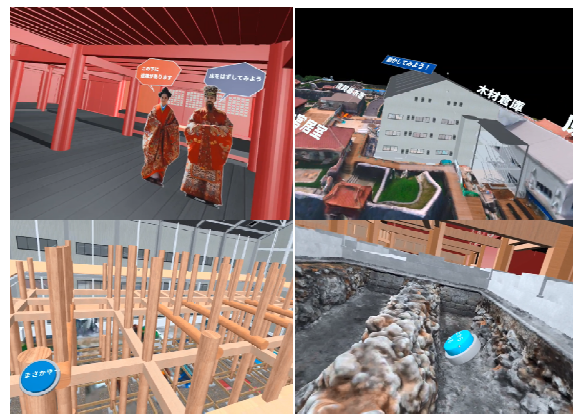


図7 園内展示コンテンツ画面

（左上：操作方法のチュートリアル、右上：鳥瞰的に園内の構造を見渡す、左下：素屋根内での復元工事の様子、右下：世界遺産の遺構内部に降りる）



写真1 VR実証実験を体験している来園者

（VR体験者の様子をモニターに表示された画面と共に家族がスマホで撮影。VR体験者は足元に広がる遺構を覗き込むように下を向いている。）

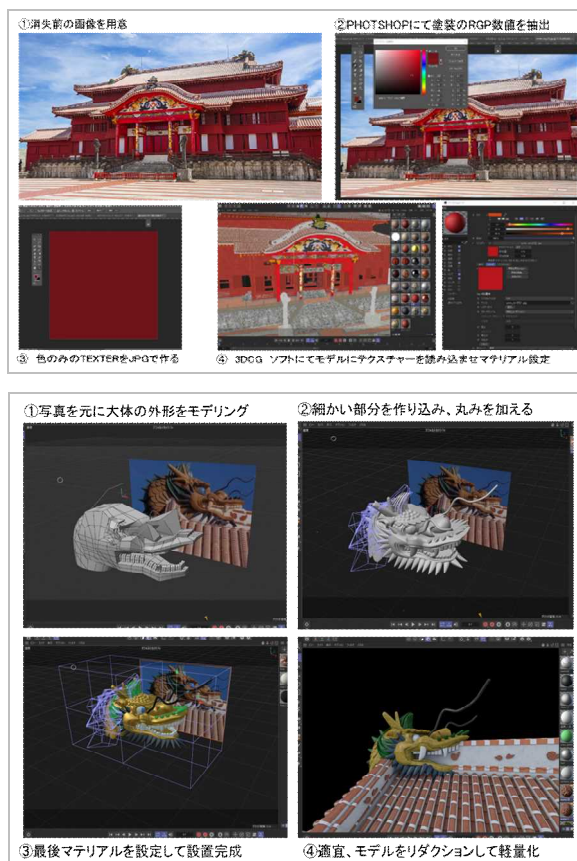


図8 デジタルツインの作り込み作業の一例

(上：色のみを設定すれば良い場合の手順、下：別途モデルを作成し差し替える場合の手順)

と、25,000を超えるオブジェクトで構成されているためその一つ一つの色味等の確認が必要であること等の限界があることから、正確かつリアルな首里城のイメージ作成のためには更に手間をかける必要があった。具体的には、複雑な形状の彫刻物等は別途モデルを作成し、それぞれのオブジェクトを実際に手作業で確認しながら色味等がリアルなものとなるように検証を繰り返す等の対応を行い、来園者の方々がVRゴーグルで見ても違和感を抱かない品質まで作り込んだ(図8)。設計業務で作成されたBIM/CIMデータは、形状の正確性には疑義が無い点では有意義であることが確認できた一方、目的に応じて追加の加工作業等が必要となることが明らかになった。2点目に、BIM/CIMデータを扱えるスペックのPC、人材を行政側で用意することが困難な点が挙げられる。これからの公共事業では、BIM/CIMでの設計データ納品が一般的になってくるが、納品されたデータが一元化されていなければ、そのデータを十分に活用することは出来ない。しかしながら、膨大なオブジェクトで構成されるBIM/CIMデータを的確に処理するためには相応のスペックを有するPCが必要となる。また、BIM/CIMの設計デー

タに付与される属性情報等は設計者により異なることから、様々な業務での納品データを一元的に管理するためには、各業務の受託企業から納品されたデータの属性情報等を整理する必要がある。それらのデータを様々な検討に活用したり、内部構造の確認・分析等に活用したりするためには、一般的な技術職公務員のみでは対応が困難で、専門的な技能を有する者が行うことが必要となる。今後、BIM/CIMを十分に活用し、DXを推進するためには、所謂発注者支援業務のように、外部人材を活用することも検討が必要と考える。

5. おわりに

公園事務所では、本稿で紹介した事例を含め、本デジタルツイン作成に当たって得られた知見を「首里城公園BIM/CIM 活用の手引き」として整理している。今後は、本デジタルツインを活用しながら、正殿完成後の北殿や南殿等の復元スケジュールの検討等に活用するとともに、施設の維持管理の効率化にも繋げていきたいと考えている。

参考文献及び補足

- 1) コンピュータ上に作成した主に3次元の形状情報に加え、室等の名称・面積、材料・部材の仕様・性能、仕上げ等、建築物の属性情報を併せ持つ建物情報モデルを構築するものをいう。(国土交通省「官庁営繕事業におけるBIMモデルの作成及び活用に関するガイドライン(令和4年改定)」, 2018)
- 2) デジタルツインとは、現実空間の情報をサイバー空間内に再現することで、現実世界と対になる双子をデジタル空間上に構築し、モニタリングやシミュレーションを可能にする仕組みのことを指す。
- 3) <http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/bimcimsummary.html> (令和5年5月1日閲覧)

参考文献及び補足

- 1) コンピュータ上に作成した主に3次元の形状情報に加え、室等の名称・面積、材料・部材の仕様・性能、仕上げ等、建築物の属性情報を併せ持つ建物情報モデルを構築するものをいう。(国土交通省「官庁営繕事業におけるBIMモデルの作成及び活用に関するガイドライン(令和4年改定)」, 2018)
- 2) デジタルツインとは、現実空間の情報をサイバー空間内に再現することで、現実世界と対になる双子をデジタル空間上に構築し、モニタリングやシミュレーションを可能にする仕組みのことを指す。
- 3) <http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/bimcimsummary.html> (令和5年5月1日閲覧)

吉田川河道掘削工事におけるAI等を活用した 施工プロセスの視覚的評価に向けた取り組み

三浦 英晃¹・下田 一朗²・高橋 哲矢³・相澤 秀行³・安住 祐人³

¹東北地方整備局 北上川下流河川事務所 吉田川緊急治水対策出張所

(〒989-4102 宮城県大崎市鹿島台木間塚字小谷地496-1)

²大臣官房 参事官(イノベーション)グループ 施工企画室(〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

³株式会社 丸本組(〒986-0868 宮城県石巻市恵み野三丁目1 番地2)。

本報告は、令和元年東日本台風により甚大な被害を受けた鳴瀬川水系吉田川で災害復旧として実施している「吉田川河道掘削工事」で想定された各種課題の解決を目的とし、建設DXの一環としてAIカメラ等の活用により施工プロセス全体を数値・グラフ等で視覚的に評価し、作業上のボトルネック対策を検討して工事の全体最適化を図った事例の報告を行うものである。

一連の施工プロセスを視覚化し工事の全体最適化を行った結果、施工段取り改善による作業効率の向上や、書類作成手間縮減等の効果が得られた。

キーワード 建設DX, 工事の全体最適化, 施工プロセスの可視化, AIカメラ,
重機の稼働状況把握, 施工段取り改善, 生産性向上, ICT施工StageII

1. はじめに

2019年(令和元年)東日本台風によって、宮城県を流れる鳴瀬川水系吉田川では1箇所破堤、33箇所越水が発生した。その結果、浸水家屋678戸、浸水面積約5,538haに及ぶ甚大な被害が生じた(図-1)。

現在、再度災害防止を目的として、吉田川全体で約150万m³に及ぶ大規模な河道掘削工事が実施されている。

本報告では、河道掘削工事を実施している「二子屋地区」にて、大量の土砂掘削により想定された課題に対し、AI等を活用した施工プロセス全体の視覚化を行い、作業上のボトルネック対策を図った事例を報告する。

2. 二子屋地区工事における課題

今回、施工プロセスの視覚的評価を行った二子屋地区工事の概要と、現場で想定された課題を以下に示す。

(1) 二子屋地区河道掘削工事の諸元

工事名 : 吉田川二子屋地区外掘削護岸工事

工期 : 2022. 4. 1~2023. 3. 31

施工場所 : 宮城県松島町竹谷地内(図-2)

掘削土量 : 約3.0万m³

残土運搬 : 約13.5km



図-1 東日本台風 被災状況



図-2 二子屋地区空撮

(2) 二子屋地区河道掘削工事で想定された課題

本工事は、約3万m³の河道掘削と一般公道を利用しての土砂運搬が主の作業であり、日々複数台のダンプトラック（以下DT）が頻繁に走行することから、以下課題が想定された。

課題1：渋滞の発生、交通事故の発生

近傍の掘削工事も含めたDTの走行増加により、渋滞の発生や交通事故の発生が懸念される。

課題2：掘削作業効率の低下

施工途中に岩掘削必要箇所が確認され、掘削作業全体の作業効率が低下する可能性がある。

課題3：道路汚損による周辺環境の悪化

DTのタイヤに付着した土により、運搬経路の路面が汚損し、周辺環境の悪化に伴う苦情発生が懸念される。

工事用車両対策は事業を進めていく上で重要な要素であるため、工事箇所のみならず地域全体で工事用車両の対策について考える必要がある。

上記より、掘削積込作業の効率化や土砂運搬時における交通安全管理・運行管理、さらに作業環境の整備、現道環境の保全も重点的に行う必要があった。

3. AIカメラ等を活用した課題解決の検討

前項の課題を解決するため、「掘削積込→運搬→残土処理」という河道掘削工事の一連の施工プロセスに着目し、「掘削積込」、「運搬」、「残土処理」の個々のプロセスを見直しすることで課題の解決を図るとともに、データ活用による書類作成手間の縮減など、工事全体の最適化を図ることとした。

個々のプロセスの見直しにあたっては、施工実態を数

値・グラフ等の定量的なデータで可視化し、その結果に基づき施工プロセス上のボトルネックの評価・分析を行い、対策検討を行うことを計画した。

施工プロセス全体の可視化を行うため、AIカメラによる重機の稼働状況の観測データと、DT運行管理システムによる残土運搬状況の観測データを組み合わせることで分析することとした。AIによる画像認識技術や機械学習技術などを用いて生成されるデータにより、施工プロセスの実態を可視化・統計化することが可能になる。

(1) 使用した機器の概要と全体構成

河道掘削箇所と残土受け入れ地に重機解析AIカメラ4台と車両認識AIカメラ4台を設置し、これらの映像から得たAI解析データを活用して、重機の稼働状況や作業内容の解析、DTナンバーの自動読み取りによる入退管理等を行い、さらにDTには運行管理システムを設置した。システム全体構成は図-3のとおり。

(2) 施工プロセス可視化の事例

工事全体の施工プロセスを可視化するため、AIカメラ等を活用して以下項目についてデータ取得を行った。

項目1：重機稼働状況のモニタリング

掘削・積込の作業効率やサイクルタイム状況の把握という観点から、AIカメラが重機を捕捉し（図-4）、積込作業の都度、「積込回数」、「DT1台あたりの平均積込時間」を集計する。



図-4 重機稼働状況モニタリング画像



①重機解析 AIカメラ



②車両認識 AIカメラ

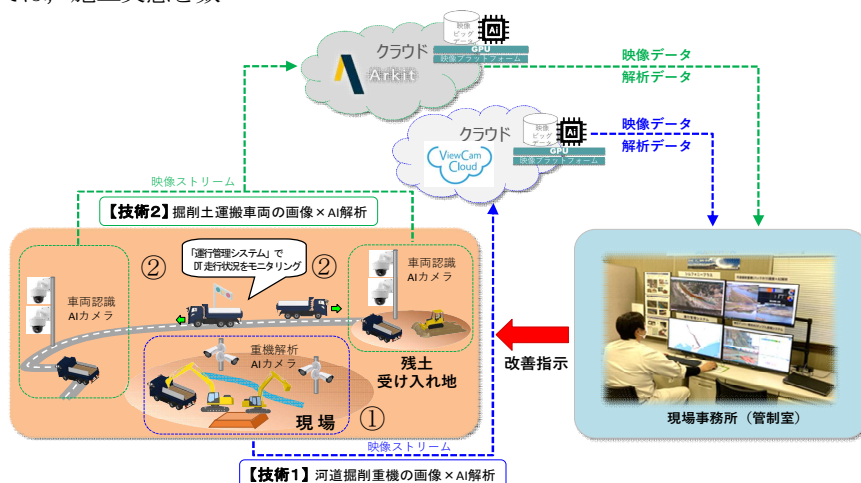


図-3 システム構成図

また、「掘削重機の作業状況判断」を行い、積込作業・集積などその他作業・停止の3つの状況に仕分けし、それらのデータをグラフで可視化する(図-5)。

項目2：DT車両番号の自動読み取り

現場と残土受け入れ地に設置したカメラで現場に入退出するDTの車両番号を自動的に読み取り、通過時刻を判定し、運搬日報として記録する。

また、タイヤに付着した土を確実に落とすという観点から、AIカメラがタイヤ泥落とし装置の使用時間を観測し、必要な時間未満の場合には回転灯により運転員に警告を発報するほか、運搬日報に使用時間不足を記録する(図-6)。

項目3：DT走行状況のモニタリング

運搬車両の運行状況把握の迅速化の観点から、DTに「運行管理システム」を搭載して運搬経路上の走行状況を連続的に記録し、経路上の渋滞状況等の把握を行う。

上記により、施工プロセス全体の連続的な稼働状況を把握することを可能とした。

4. 課題解決策検討と得られた効果

3.(2)で得られた重機の稼働状況や、DTの入退管理データ等の稼働記録の視覚的評価に基づき、熟練技術者の意見を踏まえて以下に示す作業上のボトルネック対応策を検討し、工事全体の最適化を行った。



図-5 集計グラフ



図-6 DT車両番号の自動読み取り・記録

(1) 施工段取り改善による効果

① 渋滞発生状況を考慮した運搬サイクルの見直し

入退管理記録や運搬路の通行履歴から、通勤時間帯の渋滞に伴う遅延発生を確認し、作業開始時間の変更を行った(表-1)。

その結果、一日の総作業時間は維持したまま、DTの日往復回数を1回追加することができた。

(運搬量 元：5m3×9台×7回=315m3

→ 見直し後：5m3×9台×8回=360m3)

② 作業定着状況を踏まえたDT運搬台数の最適化

工事着手後一定期間の作業経験を積むことにより、作業に習熟することで、作業手順定着に伴う無駄な動作が無くなり、作業の所要時間が短縮するものと想定し、日数経過とバックホウ(以下BH)稼働率の変動に着目した。その結果、日数経過に伴いBHが停止、DTの到着待ちをする時間が増える傾向があることを確認し、DT運搬台数を増強してBHがDTを待つ状況を解消することができた(図-7)。

(運搬量 元：5m3×9台×8回=360m3

→ 見直し後：5m3×11台×8回=440m3)

③ 掘削条件の変化に応じた施工体制の見直し

施工途中に露岩が確認され、岩掘削の必要が生じた。BHの稼働状況から岩の破碎作業待ちに伴う積込み時間の増加を確認したため、破碎作業用のBHを増強することで積込み時間を半減することができた(図-8)。

(破碎量 元：50m3×1台=50m3

→ 見直し後：50m3×2台=100m3)

表-1 運行サイクル

巡回数	当初 (勤務時間：7:40から16:40)		見直し後 (勤務時間：7:00から16:00)	
	出発時刻	経過時間	出発時刻	経過時間
1	8:20		7:40	
2	10:00	1:40	8:35	0:55
3	11:00	1:00	9:35	1:00
4	13:15		10:35	1:00
5	14:15	1:00	11:35	1:00
6	15:15	1:00	13:20	
7	16:15	1:00	14:20	1:00
8	-	-	15:20	1:00

ダンプ9台体制(停止率15.7%)

ダンプ11台体制(停止率12.0%)

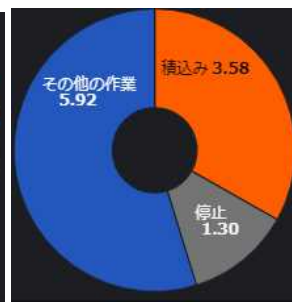


図-7 稼働率の変化

施工プロセスの視覚的評価に基づく全体最適化の結果、日施工量が当初予定を約13%上回り（表-2）、岩掘削等を考慮した計画工程より20日短く工事完了できた。

(2) 書類作成手間等縮減による効果

①DT運搬日報の自動生成

これまでは毎日の作業完了後に約20分かけてDTの運搬日報を手作業で整理していたが、AIによるDTナンバーの読み取り・様式自動作成により、書類作成手間を削減することができた（図-9）。

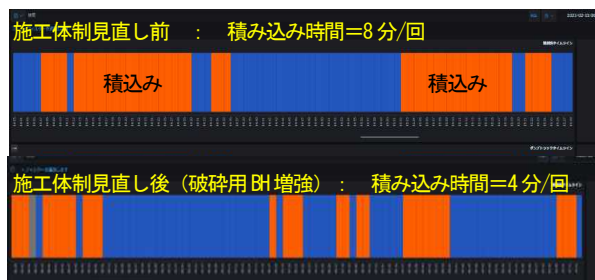


図-8 待ち時間の変化

表-2 日施工量

作業月	計 画		実 績 (AI解析使用)		備 考
	計画掘削 施工量	計画日進量 (硬岩合算)	AI解析による 見直し後施工量	実績日進量 (硬岩合算)	
12月	掘削土 6,891m ³ 硬岩 795m ³	370m ³ /日	8,245m ³	393m ³ /日	稼働日数 21日
1月	掘削土 8,355m ³ 硬岩 765m ³		5,810m ³ 1,270m ³	443m ³ /日	稼働日数 16日
2月	掘削土 4,894m ³ 硬岩 824m ³		6,085m ³ 1,700m ³	433m ³ /日	稼働日数 18日
3月	掘削土 硬岩 586m ³		—	—	—
合計	23,110m ³	370m ³ /日 (1.00)	23,110m ³	420m ³ /日 (1.13)	
完了（予定）日	2023/3/20		2023/2/28 (-20日)		

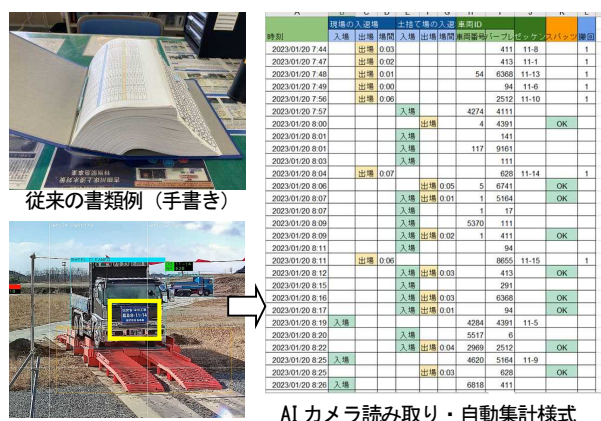


図-9 運行管理表の自動生成

表-3 タイヤ泥落し時間の合否判定

作業月	対象全台数	合格	不合格	合格率
1 2 月	754	573	181	76.0%
1 月	835	782	53	93.7%
2 月	757	746	11	98.5%
平均	2,346	2,101	245	89.6%

② タイヤ泥落し装置の稼働状況監視

DTナンバーの読み取りと併せて、タイヤ泥落とし装置の稼働時間をAIカメラで監視し、泥落とし時間不足の際は回転灯による警告や運搬日報に明示するほか、管理者から該当者に是正を指示した。泥落としに必要な時間が適正に確保されたことにより、当該工事では道路汚損の苦情発生が無かった（表-3）。

AIによる読み取り・監視により書類作成手間や、苦情対応のために必要となる時間の削減効果が確認された。

5. おわりに

AIカメラ等を活用した施工データの可視化と定量的なデータに基づく対策実施により、「施工段取りの改善」や「資料作成（書類作成・苦情対応）」に伴う負担の軽減」という成果が得られた。

上記成果を踏まえ、令和5年度は「工事の全体最適化」を一層推進するため、隣接する複数工事で連携した生産性向上策を試行している。

将来のICT施工StageIIの実現に向け、今後も事例集積・分析の継続を行い、AIカメラによる施工管理支援の一層の高度化を図るほか、最終的には工事計画立案にも活用できるような展開を目指したい。

今回の試行では、AIの活用により熟練技術者の経験値や暗黙知といった施工管理のノウハウを「数値・画像・グラフ」などの形で視覚化し、形式知として記録することができた。将来想定されている担い手不足や若手技術者への技術伝承対策としての活用も有効であると考える。

AIカメラは現地に設置するだけで運用可能であることから、重機へのセンサー追加設置等の設備投資が不要で、一般的な重機もそのまま稼働状況の可視化が可能であり、中小建設業でも運用が容易と考える。

2024年4月には「働き方改革関連法」に関わる時間外労働時間の上限規制の猶予措置が終了し、各現場では一層の生産性向上が必要となる。

今回実施したAI等の新技術活用により、建設業界の高効率化・高収益化を実現し、インフラ整備や災害復旧の要として地域を支えている建設会社の安定した事業継続に寄与するほか、若手・ベテランを問わず建設業に携わる全ての方々が、誇りと活力を持って働ける「魅力ある建設現場」を実現するため、官民連携して努力していきたい。

謝辞：本論文の作成にあたり、AIに関する技術的な支援を頂きましたトライポッドワークス(株)、アーキット(同)の両社に御礼申し上げます。

DX活用による水中可視化事例の紹介 (大河津分水路新第二床固改築工事)

難波 佑弥¹・酒向 秀典²

¹信濃川河川事務所 工務課 (〒940-0098 新潟県長岡市信濃1丁目5番30号)

²信濃川河川事務所 (〒940-0098 新潟県長岡市信濃1丁目5番30号)

河川工事における水中施工は、安全や品質の確保にあたり、流れや視界、水温など配慮すべき条件が多い。中でも水中の視認性は、作業を円滑に行う上で重大な要因であるが、河川内は浮泥等の濁りが多く、視界不良な状況下での施工は作業員の負担となっている。

大河津分水路において現在施工中である新第二床固改築工事は、水中施工を主とする工事であるが、デジタル技術の取り入れにより水中を可視化し、関係者に対し円滑な情報共有と現地状況の事前確認による安全管理を実現したことから、本稿にて紹介する。

キーワード 大河津分水路改修, DX, 潜水作業, 水中掘削

1. はじめに

大河津分水路は新潟県燕市において信濃川から分岐し日本海へ注ぐ人工河川である。1922年の通水から100年を経過しているところであるが、その形状は河口へ向かうにつれて川幅が偏狭になっており、洪水処理能力の不足等の課題を抱えている。信濃川河川事務所では、2015年より「令和の大改修」と称し、大河津分水路左岸側山地部掘削及び低水路掘削による水路の拡幅と、それに伴う施設の改築等の事業を実施している(図-1)。

河口部より約730m上流に位置する第二床固は大河津分水路の河床低下を抑制する要の施設であるが、本施設においても1931年の完成から90年を経過しており、老朽化が進行している。このため、新たな川幅に併せた新第

二床固の新設を目的とし、既設の施設より約200m下流地点において、大河津分水路新第二床固I期工事及び大河津分水路新第二床固I期その2工事(以降、新第二床固改築工事)が現在稼働中である。

また、信濃川河川事務所は2019年度より、国土交通省の「i-Constructionモデル事務所」に指定され、調査・設計段階から継続的に3次元データを活用することで、建設生産・管理システム全体の効率化に向けた改善に努めている。特に、大河津分水路改修事業は「3次元情報活用モデル事業」(施工段階)として位置づけられていることから、大規模な河道掘削や構造物の改築を伴う本事業において、生産性向上や確実な安全管理、品質確保を図るべく、現場作業のDX化を積極的に推進しているところである。

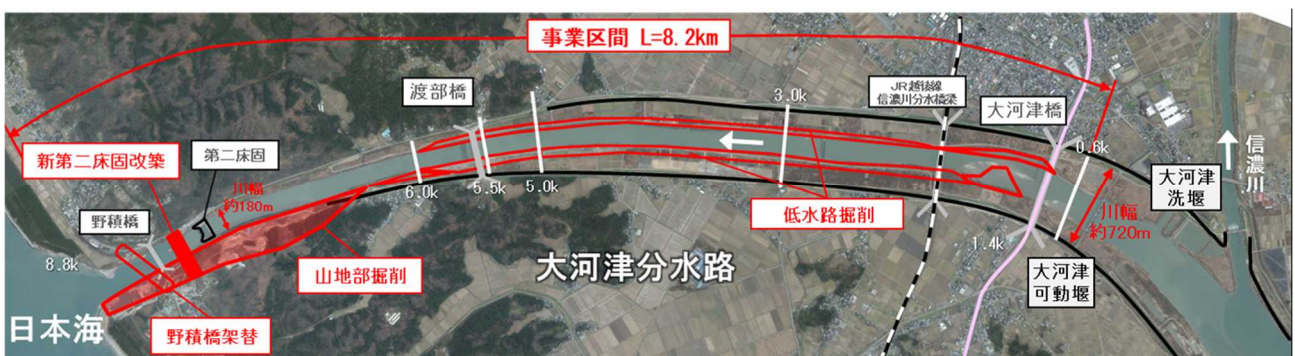


図-1 「令和の大改修」概要図

2. 新第二床固改築工事とDX

(1) 工事概要

大河津分水路は信濃川の洪水から越後平野を守る機能を果たしており、工事施工中も洪水に備え常に流下能力の維持が必要なことから、河川内に仮締切を設けたドライ施工を採用することができない。このため、新第二床固改築工事における本体工は、工場で製作した鋼殻ケーソンを1函ずつ順次曳航し、水中にて沈設する設置ケーソン工法を採用している。また、本体工の下流部では減勢工（バップルピア）の設置及び護床工のコンクリート打設を水中で施工する（図-2）。

施工箇所は洗掘による河床低下傾向であることから、複雑な河床形状を有している他、信濃川本川より分岐した河川流水に加え、海側からの波浪の影響を受ける厳しい環境でありながらも、潜水作業や水中土工が工事の主体となっている。

水中作業は、作業員同士の情報共有や連携が難しく、出来形管理や安全性の確認に時間を要するケースが多い。しかし、本工事においては施工に用いられる大型船舶等の使用期限や、季節的な出水や冬期風浪が予測されることにより、生産性向上と工期短縮が常に求められている。

(2) 水中作業における作業員の負担

本工事で行われている潜水作業は、現況調査や作業位置の目印設置に始まり、構造物設置時の基面整正や岩盤清掃、水中コンクリート打設などと多岐に渡ることから、常に潜水土の人員を確保しながら工事を行っている。しかし、現場独自の作業基準として、河川の流速や、水中の濁り、冬期間中の波浪や水温等の特殊な条件に配慮が必要であり、安定した作業時間を確保することが困難となっている。

また、出水が発生した場合、浮泥により視認性の確保が出来ないことから濁りが改善するまでの間は作業が行えない他、土砂堆積や河床洗掘による現地状況の



図-2 新第二床固改築工事概要図

変動が発生し、その形状は気中から不可視となる。このとき、いづれの作業においても再開には改めて潜水による現地調査や目印の設置が必要となるが、不明瞭な視界且つ地形状態の確認が取れていない水中での作業は重大なリスクを伴う。また、潜水土と連絡員の情報共有方法は、潜水土による撮影画像を他の作業員がモニターで確認を取り、口頭伝達によって作業を指示を行うものである（図-3）。しかし、水中カメラやモニター上だけでは現地状況が伝わりづらく、円滑な連携がとれないことから作業員にとってストレスが多くなっている。

水中掘削においても潜水作業と同様の条件下での施工となるが、その作業はオペレーターの技能や経験によるところが多い。さらに、作業後は潜水土の現地確認による追加作業や仕上げ段階での手戻りが度重なり、負担の多い作業となっていた。

(3) 水中作業におけるデジタル技術の採用

本現場ではこれらの課題を解決すべく、「水中可視化」をテーマとし、積極的にデジタル技術の採用を行っている。

今回採用した水中ソナーによる河床の点群データ取得技術は、水中の可視化を実現し、水中作業における視認性の負担を解消した。

また、情報伝達面においては、多人数同時参加型VRソフト「リコーバーチャルワークプレイス（以降、RVP）」を採用している。これにより、VR空間や360度カメラのライブ映像空間における情報共有技術により、立ち入りが困難な箇所の臨場体験や、合意形成を可能とした。

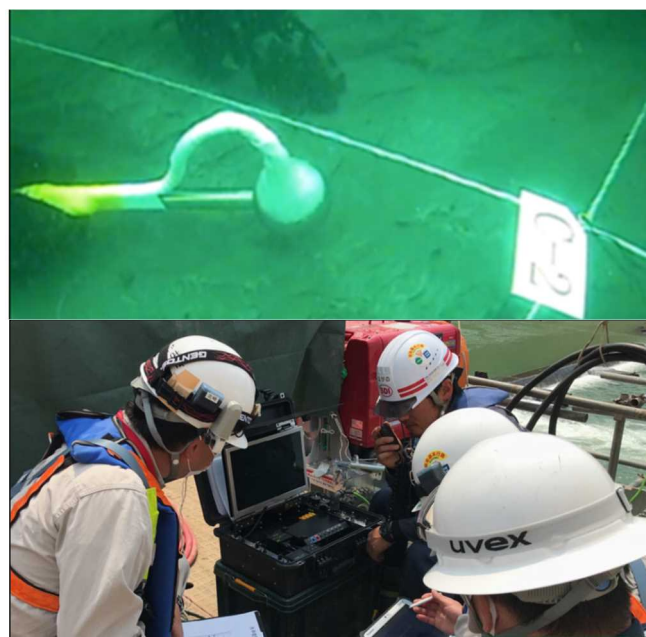


図-3 潜水作業（上）と気中での作業伝達状況（下）

3. 水中ソナーとRVPによる潜水作業の安全確保

本現場では作業船の航路浚渫や鋼殻ケーソンの設置時において、河床形状を把握するため、台船に設置された水中ソナーで河床の点群データを取得している。これを3次元モデルへと変換することで、そのデータをRVP上でVRとして表示が可能となる。

RVPでは参加者が共通のモデルを同時に閲覧出来る他、仮想のモデルに対し、指をさしたり印をつける機能、延長や距離を測定する機能を有している。これにより複数の作業員が同時にRVP上でモデルを確認することで、事前の河床形状のイメージを共有することが可能となる。作業員の新規入場時や出水等による河床が変動発生した際などの水中の状況が把握出来ていない場合において、施工計画の検討が容易となった（図-4）。

また、この技術は水中作業の安全確保においても活用されている。

2021年8月の前線豪雨に伴う出水により、撤去準備中であつた鋼殻ケーソンの止水壁が倒壊した（図-5）。本来であれば倒壊した止水壁に玉掛けし、分割揚重により撤去する手順であつたが、止水壁は水中で不規則に折り重なった状態での倒壊が予測されていたが、気中ではその全景を確認することが出来なかつた。潜水士による撤去作業は非常に高い危険性が予測されたため、作業は計画段階から難航していた。

そこで、該当箇所において水中ソナーによる点群データの取得いモデル化を行うことで、複雑に折り重なった止水壁の全体形状を可視化することができた（図-6）。



図-4 VRによる河床の確認状況

このモデルをRVP上でVRとして確認することで、潜水士を含む作業員全員が水中の疑似体験をすることが可能となった。これにより、関係各者との施工計画の策定について円滑に合意形成を得ることで安全性を確保した撤去作業を完遂することが出来た。

4. リアルタイムでの河床形状の把握

河床掘削における従来のデジタル技術は、施工前に水中ソナーで取得した点群データをマシンガイダンスに取り込み、バックホウのバケットの軌跡を反映させることで水中での画像を更新していく。しかし、この技術はバケット通過後の掘削形状がそのまま維持されることが前提となっているが、実際は流況によるバケットからのこぼれや、背面からの土砂の回り込みが多く発生していることから、施工後に再度ソナーで確認した後、追加作業を行う必要があつた。

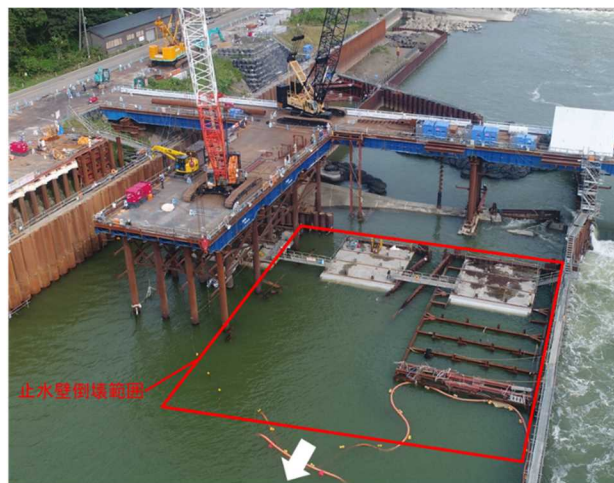


図-5 止水壁の倒壊状況

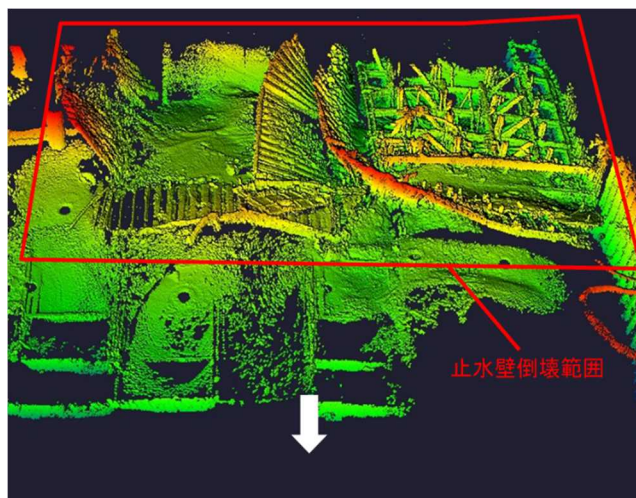


図-6 水中ソナーによりモデル可した止水壁の倒壊状況

この課題を解消するため、本現場ではバックホウ浚渫船に水中ソナーを装備し、水中掘削作業中に発生する河床変動の形状を点群データとして取得し、リアルタイムに可視化できるシステムを構築した（図-7）。

本システム構成はバックホウ本体のマシンガイダンスとバックホウ浚渫船の船首・船底側に取り付けられた水中ソナーの2つに大別される。マシンガイダンスによるバケット刃先位置情報と水中ソナーで取得した点群データを高性能PCによって統合し、運転席に設置したモニターに表示させる。また、水中ソナーによる測量結果は、クラウドアプリを経由して関係者へリアルタイムで情報共有される。これにより、掘削状況に応じた施工方法の検討や設計値に対する過不足の把握をオペレータと共に確認することが可能となる。

また、本システムで使用する水中ソナーは任意のタイミングでの測量が可能であり、その都度河床の形状が更新されリアルタイムで運転席のモニターに表示される（図-8）ため、精度の高い施工と作業の効率化を実現できた。

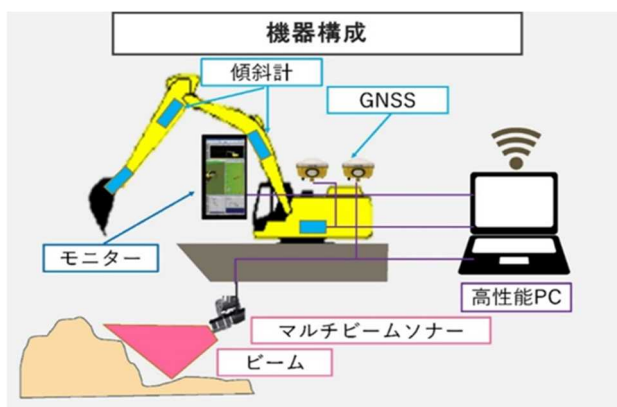


図-7 システム構成図

5. おわりに

本稿ではデジタル技術の取り入れにより水中の見える化を実現することで、水中施工における負担の軽減に成功した事例を紹介した。現場では本取り組みに留まらず、“ケーソン沈設時の動態観測の可視化”や“ドローンとAIを用いた現場資機材の管理”など、従来不可視であったり、確認に時間を要してきた事案に対し、積極的にデジタル技術を取り入れることで、生産性向上を図っている。

建設現場において、特殊な条件下での施工や非効率的な施工を強いられるケースは往々にして存在する。従来では“仕方ない”とされてきたそれらについて、改めて、デジタル技術の活用等による新たな改善の可能性を検討し、ニーズや実例を1つずつ増やしていくことが、建設業界全体の大きなイノベーションにつながっていくと考える。

謝辞：日々工夫を重ねながら先進技術の活用に積極的に取り組んでいる受注者の皆様へ、感謝と尊敬の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 「大河津分水路新第二床固改築Ⅰ期“OX（大構図DX）”でこれからの100年を造る」（令和3年度土木学会「i-Constructionの推進に関するシンポジウム」講演論文 鹿島建設株式会社）

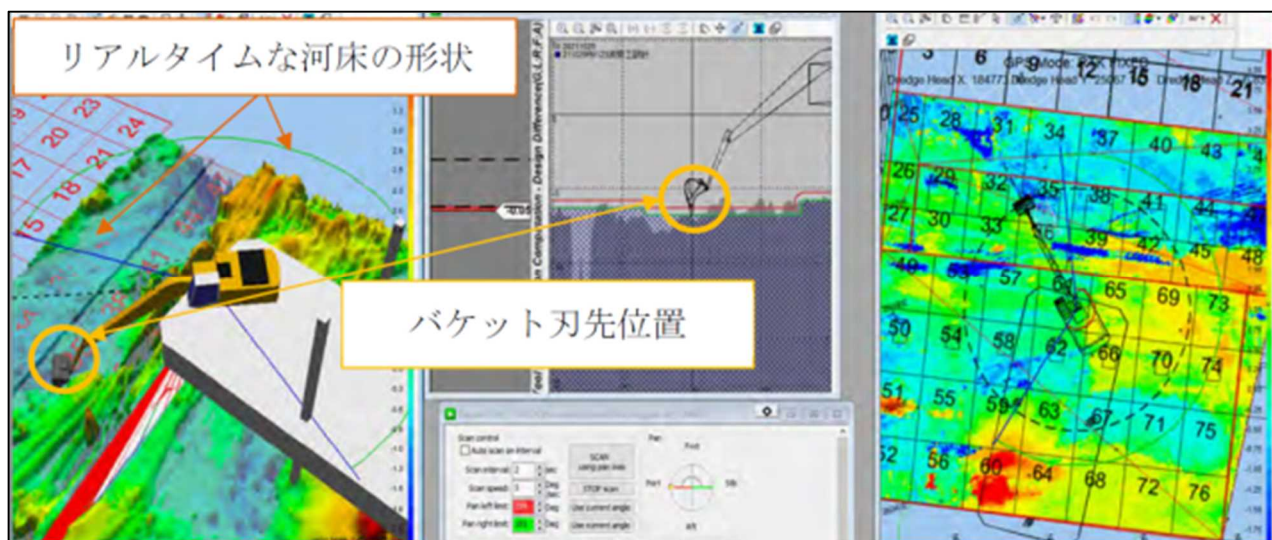


図-8 運転席モニターでの表示

VTOL機を用いた長距離河川巡視実証実験

山田 英幸¹・南竹 知己²・北森 誠³・房前 和朋⁴・TAC⁵

¹九州地方整備局 企画部 情報通信技術課 計画係長（〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東2-10-7）

²九州地方整備局 インフラDX推進室 課長補佐（〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東2-10-7）

³九州地方整備局 企画部 情報通信技術課 課長補佐（〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東2-10-7）

⁴九州地方整備局 インフラDX推進室 建設専門官（〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東2-10-7）

⁵TAC（九州地整・関東地整UAV講習団体登録教官チーム）

河川巡視において、UAVによる上空からの巡視・点検が有効であることは様々な実証で明らかとなっている。一方、現在用いられているマルチコプター型の電動UAVは、河川巡視のような「管理区間を長距離かつ連続」して飛行する用途で用いる場合、航続距離の短さや通信距離の限界により、複数回離着陸を繰り返す必要があるため、巡視に時間を要することが課題となる。今回、これらの課題を解決する手法として、連続して高速・長距離航行が可能かつ、垂直離着陸やホバリングが可能なVTOL機と管理用光ファイバを用いた施設管理用無線LANシステム（K-PASS）を用いて迅速かつ効率的に巡視する実証実験を実施したので報告する。

キーワード DX, UAV, VTOL, K-PASS, 河川巡視

1. 河川巡視・点検の現状と課題

現在の河川巡視・点検は、河川砂防技術基準（維持管理編）に基づき実施されており、内容や頻度が各河川に応じて設定され、河川パトロールカーやバイク、徒歩等によって実施されている。現在の河川巡視やダム放流巡視における課題について、九州地方整備局の河川系事務所職員約60名にアンケート調査をしたところ、図-1のような結果が得られた。

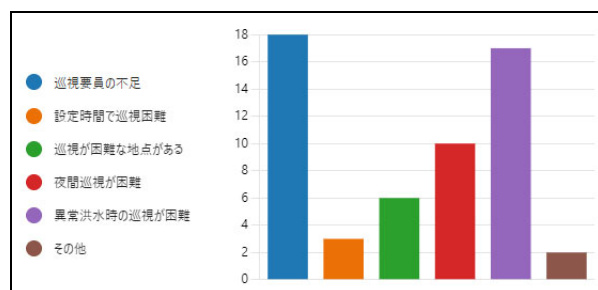


図-1 河川巡視・ダム放流巡視についての課題

最も多い意見は「巡視要員の不足（56%が選択）」であり、現状において人員の確保に不安を抱えていることが伺える。二番目は「異常洪水時の巡視が困難（53%が選択）」であり、「人員不足」に加えて洪水時

における「巡視の安全性」や「巡視の確実性」に懸念を抱いていることがヒアリング結果と併せて伺える。

なお、これらの課題に対して求められる対策としては、図-2のような回答が得られた。

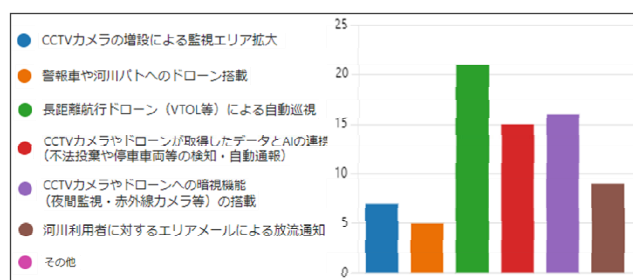


図-2 将来の河川巡視について、早急に実現してほしい内容

最も回答が多かった「長距離航行ドローンによる自動巡視」は66%の職員が選択している。ただし、同じドローンの利活用にあっても「警報車や河川パトへのドローン搭載」については最もニーズが低く、ドローンという同じツールであっても背反する回答となっている。この点について回答者にヒアリングをしたところ、人手不足や安全性への対応として自動巡視は有効だが、河川パトロールカーへのUAV搭載では、機体の組み立てや操縦が必要であるなど、手間だけが增える懸念があるとのことであった。なお、「長距離航行ドローンによる自動巡

視」と「CCTV カメラやドローンが取得したデータと AI の連携」のクロス集計では、両方を選択した者が52%となり、単に巡視用のツールとしてドローンを利活用するのではなく、人員不足や洪水時の巡視の安全性に対応するための自動化や効率化を求めていることが明らかとなった。

2. 長距離航行可能な UAV 「VTOL 機」

災害時の被災状況調査において、ドローン（以下「UAV」(Unmanned Aerial Vehicle: 無人航空機)と記述）は非常に有効な手段として広く用いられており、特に構造物点検や砂防巡視、河川巡視で地上からの視認が困難な場所などで UAV の利活用が進みつつある。一方、活用されている多くの UAV は、操縦や映像伝送の通信手段にマイクロ波による一対一通信を用いているため、見通し範囲外における通信は困難であり、技術的にも法令上においても長距離の目視外飛行は困難とされてきた。また、多く用いられているマルチコプター型の UAV は、ホバリング等の低速飛行が容易であるため施設点検のような特定地点の詳細な調査には適している一方、バッテリー消費が大きい長距離の飛行には不向きで、数 km を超えるような長距離飛行、例えば出張所の管理区間を無着陸で連続して巡視するような用途には使用することが出来なかった。しかし近年、長距離航行が可能な UAV として、従来のマルチコプター型の機体にエンジン駆動の発電機とバッテリーを搭載したハイブリッド型マルチコプターや、高速・長時間の飛行が可能な固定翼型の機体が開発されており、離島での配送用として既に実運用が開始されている。このように、従来の UAV の弱点を克服する新しい形態の UAV が登場しつつある。

今回、従来の河川巡視の課題を解決すべく、新型の UAV を用いて河川を連続して無着陸で上空から巡視・点検する実証実験を実施した。実験には「VTOL (Vertical Takeoff and Landing: 垂直離着陸) 機」と呼ばれる高速・長距離航行が可能な固定翼型と、垂直離着陸とホバリングが可能なマルチコプター型の両方の長所を兼ね備えた電動の機体を用いた(写真-1 e-VTOL 機)。

VTOL 機には V-22 オスプレイのようなティルトローター機などいくつかの形態があるが、本実証実験で選定した機体は、離陸時には4機の垂直プロペラを備えたマルチコプター機として垂直上昇し、障害物のない上空まで上昇した後、機体後方の推進用プロペラを始動して前進を開始し、大気速度が上がり主翼が十分な揚力を得て失速速度を上回ると垂直プロペラを停止、固定翼機として飛行する形態となっている。巡航時(時速70 km/h)は、専ら固定翼機として飛行し、揚力を主翼のみで得ることから、マルチコプター型と比較してバッテリー

の電力消費が少ない。ホバリングに移行する場合や、着陸する場合はマルチコプターモードへ遷移するため、着陸のための滑走路やキャッチネットが不要であるなど両方の機体の特徴を兼ね備えている。また、何らかのトラブルにより機体の失速速度を下回る恐れが生じた場合は、自動的にマルチコプターモードへ遷移し着陸する機能を有しており、安全性についても優れた機体となっている。

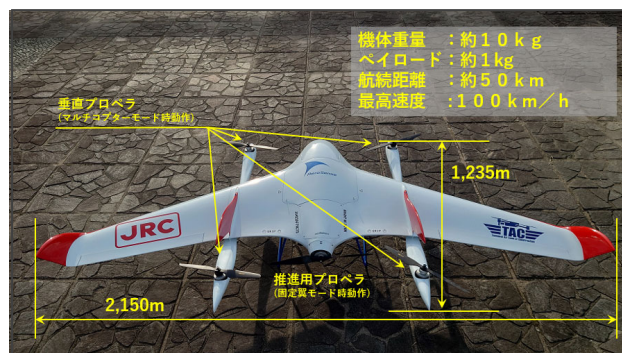


写真-1 試験に用いた e-VTOL 機 (エアロボウイング AS-VT01)

3. 施設管理用無線 LAN システム

UAV による長距離飛行を実施する上で、航空法上の課題となるものの一つが、「通信の確保」である。航空法の規程に定める「無人航空機の飛行に関する許可・承認の審査要領(カテゴリーⅡ飛行)」によると、「4-1 無人航空機の機能及び性能」の項目において、「4-1-1 (5) 抜粋: あらかじめ設定した飛行プログラムにかかわらず常時不具合等において・・・強制的に操作介入が出来る設計であること・・・」とあり、自律航行可能な機体であっても、遠隔操縦に切り替えられる事が必須であると解釈されることから、機体と操縦者の間において、無線通信は常時保たれている必要がある。見通し外の距離における機体との通信を確保する手段としては、携帯電話回線が多く用いられる(携帯電話は陸上移動局であるため、上空で使用する場合は特別に許可された SIM: 通信カードが必要)。ただし、携帯電話のサービスエリアは地上での利用を前提(陸上移動局に対する通信用)に構築されているため、上空での回線利用においてはサービスエリアが限定されたり、データ伝送の遅延が発生したりする場合があります。UAV の遠隔操縦やデータ伝送に制約が生じる事が知られている。河川巡視に利用する UAV の用途では、自動航行のみではなく、映像を見ながら遠隔での操縦を行う可能性があることから、サービスエリアの制約や通信の遅延の課題を解決する必要があった。

そこで今回の実験で、これらの課題を解決する手段として用いたのが施設管理用無線 LAN システム(以下「K-PASS」(仮称)と記述)である。K-PASS (Kokudokoutsusyo-Patrol Support System) は、直轄河川や直轄国道に敷設

された施設管理用光ファイバ網を利用している CCTV カメラや観測所、情報板等に無線LAN基地局を設置し、巡視する区間に無線による自営通信網を構築するシステムである。巡視する区間に設置された複数の基地局を自動的に切り替えながら通信する(＝ハンドオーバー)ことで、河川や道路における巡視端末や将来の無人除草機械、巡視ロボットの監視制御、現場からのリアルタイム映像や点群データの伝送等に必要な通信について、管理区間内で連続的に利用することが可能であり、インフラ管理のDXを実現する「デジタル基盤」の一つであるとみなすことが出来る。本システムは、既存の管理用光ファイバ回線と複数の基地局、それらを制御する無線LANコントローラから構成される(図-3)。写真-2 は CCTV カメラポールへ設置された、K-PASS 基地局である。

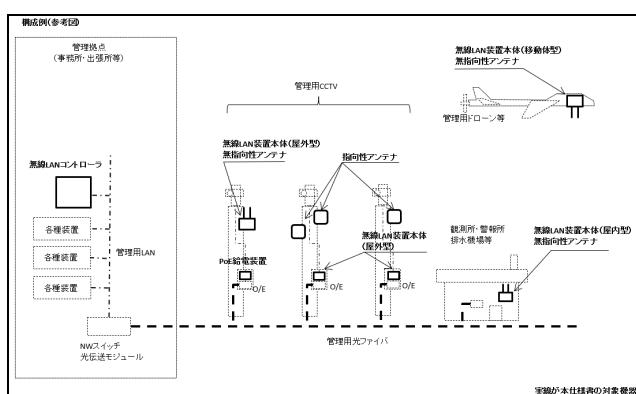


図-3 K-PASS システム系統図 (案)



写真-2 現地に設置された K-PASS 基地局

4. 長距離河川巡視実証実験フィールドの選定

長距離航行可能な UAV を用いた河川巡視の実証実験を実施するフィールドは、九州地方整備局河川部河川管理課と協議し、以下のような条件に基づいて選定した。

- ・機体の航続距離内(概ね50km)で実施可能であり、かつ、平均的な出張所管理区間延長をカバー出来ること(概ね20km程度)
- ・都市部(DID地区)の区間を避けること

- ・UAV による河川巡視では、道路や鉄道の橋梁横断が避けられないことから、橋梁横断について法令上の手続きを含む、管理者との調整が実証できる区間であること
- ・ダム放流警報巡視で活用することを考慮して、可能であればダム放流警報区間が含まれること
- ・管理用光ファイバが敷設され、K-PASS 基地局が容易に設置できる管理施設が数キロメートルピッチで配置されていること
- ・固定翼モードでの旋回特性等を検証出来る狭隘な区間があること

これらの条件を検討した結果、複数の候補の中から、福岡県と大分県の県境を流れる山国川を選定し、耶馬溪ダム管理支所から山国川河川事務所の25km区間を実証実験フィールドとして設定した(図-4)。飛行のレベルとして、実際の長距離河川巡視では、目視外飛行でかつ補助者を配置せず、立入が規制された区域内を飛行する(河川の場合は水面上)「レベル3」飛行を実施する必要があるが、今回の公開実証実験では安全に配慮し、飛行する全区間に補助者を配置して水面上空のみを飛行させる「レベル2」(レベル3相当)で実施することとした。また、通信手段の比較を行うために、上流3/4区間を携帯電話回線、下流1/4区間を K-PASS 網における通信区間とした。



図-4 山国川に設定された実証実験区間

5. 山国川における実証実験

実験にあたっては、目視外の長距離飛行でかつ、橋梁を横断することや、初の自営通信網による制御であることから安全に最大限配慮する必要がある、以下の手順に従って、各段階で確認された課題を慎重にクリアしながら、徐々に飛行距離を伸ばし、25km全区間での公開実証実験に向けて準備を進めた。

- ① テストコースによる周回運用試験
- ② シミュレータによる現地を想定した事前検証
- ③ 現地上空での携帯電話エリア電界強度測定調査
- ④ 携帯電話回線区間での飛行テスト

- ⑤ K-PASS 区間での飛行テスト
- ⑥ 携帯電話回線←→K-PASS の切り替えテスト
- ⑦ 全区間（2.5 km）通しでの飛行テスト
- ⑧ 公開実証実験（2023年3月16日（木））

シミュレータによる事前検証では、狭隘な溪谷での旋回において、斜面との離隔に安全上の懸念が持たれたことから対地高度を見直して（70m→100m）、より安全マージンを確保した。現地での携帯電話回線の電界強度測定調査では、予想されたとおり地上に比べて電界強度が低い状況が確認され、実際の飛行においても30秒程度、映像伝送が切断される地点や映像の遅延が大きい地点が確認された。2月からスタートした実証実験は、徐々に距離を伸ばし、3月の初旬には2.5 kmの試験区間を通して飛行する試験を開始し、K-PASS のアンテナ方向調整や MCS (Multi Code Scheme/適応変調) の設定、使用 CH の調整等を入念に実施した。また、実験にあたっては、高速道路や国道の橋梁横断があるため、道路管理者および所轄警察署と協議し、橋梁通過時間について道路管理者及び河川事務所の工事受注者に対して事前通告する手段を整えた。

なお、VTOL 機の遠隔操縦は、山国川河川事務所から遠隔監視画面（図-5）を見ながら実施した。



図-5 機体監視制御(GCS)画面

2023年3月16日（木）公開実験当日は、テレビ局3局、新聞社3社が取材する中、10:30 に耶馬溪ダムを離陸して実験が開始された（写真-3）。テレビ局の取材では、ヘリによる追尾撮影の依頼があり、安全離隔や追尾位置、飛行予定時間について入念な協議を実施した。当日、風速は微風、天候は曇りという飛行には支障が無い状況で離陸したが、経路上の補助者から雨が降り出したとの連絡があり、約8 kmを過ぎたあたりから機体カメラの映像にも雨滴が付き始め、小雨の中を飛行する状況となった。当該機体はある程度の降雨までは運用出来る仕様となっていることから大きな懸念はなかったが、長距離航行では従来の UAV 運用と異なり、離着陸場所だけでなく、経路途中の気象についても十分配慮する必要があることを痛感した。なお、経路途中の気象情報については、ウェザーニュース(株)から提供されている

UAV 向けの気象サービスを状況把握の手段の一つとして利用した。本サービスは、対地高度150 mまでのウィンドプロファイルを7つの高度で1 km毎に提供するサービスであり、UAV の運用には有効なサービスである。その他、飛行中に機体の不具合や天候急変などが発生し飛行を中止させた場合、従来の UAV で用いる単に直線で離陸場所へ帰還する RTH (Return to home) では、山岳等への衝突や帰還途中でのバッテリー切れが懸念されたため、対策として飛行位置毎に予め設定した最寄りの不時着地点に着陸（帰還）させる運用とした。実験区間が残り5.5 kmとなり、K-PASS 区間の目安となる東九州自動車道の橋梁通過後には自営通信網への切り替えに成功、10:50 分過ぎには山国川河川事務所から機体が視認可能となり、減速して高度を下げながら平成大堰上空に到達、マルチコプターモードに切り替えて、ホバリングで平成大堰の施設点検（デモ）を上空から実施しつつ、10:54 頃に着陸し、実験は無事に成功した。飛行距離は2.5 km、時間は約24分であった。



写真-3 離陸上昇中の VTOL 機（耶馬溪ダム）

6. 実証実験において取得された成果

本実験の目的の一つであった自営通信網である K-PASS を使用した UAV の遠隔操縦、映像伝送は成功し、携帯電話回線に比べて、通信の安定性や低遅延の特性について優位性が確認された。この成果に基づき、他の河川においても施設管理や巡視に利用出来る自営通信網の仕様として「施設管理用無線 LAN システム(K-PASS)機器仕様書(案)」を作成した。

次に、VTOL 機運用の実験結果としては、2.5 km 飛行後のバッテリー残量が約50%であり、設計どおり余裕を持って管理区間を運用出来ることが確認された。なお、事前の試験飛行では最大、風速 7m/s までの離発着試験を実施したほか、追い風及び向かい風時においても試験飛行を実施し、向かい風でバッテリー消費が多い条件であっても、十分な安全マージンを持って2.5 kmを飛行可能であることが確認出来た。

今回の実証実験では、搭載センサーとしてリアルタイ

ムの映像を撮影するFPVカメラに加えて、垂直写真用のデジタルカメラを搭載しており、撮影したデータを用いて飛行終了後、約40分で SfM (Structure from Motion: 写真測量) による三次元点群モデル(図-6)及びオルソモザイク画像を作成した。



図-6 VTOL機により取得した25km区間の三次元点群データ

このような短時間でかつ自動航行で約25kmの三次元データが取得出来たことは、従来から整備局で運用しているマルチコプター型 UAV を用いて実施する場合と比較すると、現地での作業時間に限っても約10倍の時間短縮・効率化(DX)を実現している(図-7)。

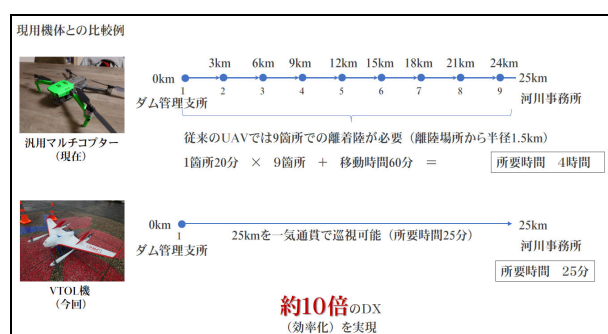


図-7 従来型 UAV と VTOL 機での 25km 巡視比較

7. 課題と今後の展望

実証実験の主目的の一つであった施設管理用の自営通信網である K-PASS は、管理用光ファイバやこれに接続された CCTV カメラ、観測所等、既存のインフラを利用して比較的容易に無線基地局を設置することが可能であり、国土交通省が管理する河川や道路空間において様々なDXを実現するためのデジタル基盤として活用出来る。ただし、既存設備の配置がサービスエリアを構築するのに必要な無線基地局の配置として必ずしも最適とは限らないため、場所によっては新たな無線基地局を設置する必要がある。その場合は管理用光ファイバへのクロージャ追加や配管配線、基地局用ポールの新規設置等が必要となる。今回のように UAV だけでなく、河川巡視端末 RiMaDiS や内線通話用ソフトフォン等、屋外で汎用の Wi-Fi 機器も利用することを考慮すると、2.4GHz 帯 ISM

バンドを利用することとなるが、電波の特性上、1つの基地局がカバーする範囲は見通し区間でかつ基地局から距離が最大約2km程度となる。狭隘な山間部の現場等では、さらに短い間隔での基地局設置を要するが、汎用機器の利用を考慮せず、UAV の航行支援や無人重機の操縦などへ特化するのであれば、旧アナログTVのV-Hi帯域である169MHz帯の利用により、基地局数を減らすことが可能である。なお、都市部区間での都市雑音への対処や、省内ネットワークへの接続に対するセキュリティの確保などについては、さらなる追加検証が必要である。

本実験のもう一つの目的である VTOL 機の実証については、想定通りの性能が確認され、K-PASS と組み合わせることで安定した長距離航行・巡視が可能であることが実証された。なお、現場への実装・実運用にあたっては、河川巡視に用いるセンサーとして以下のものを搭載する必要があり、現在検討を進めているところである。

- ・ジンバル搭載型ズームレンズカメラ
(カメラチルト角及び、レンズズーム比の可変)
- ・放流警報巡視等、夜間飛行に必要なIRカメラ
- ・LED投光器の搭載
- ・河川利用者に対する情報提供用スピーカの搭載

一方、若干の課題として、実験に使用した VTOL 機の形態では、マルチコプターモードでの運用時に電力消費がやや大きいことが判明している。対策として、離陸時に消費するエネルギーを節約するため、マルチコプターモードでの垂直離陸・上昇は最小限の高度までに留め、早めに固定翼モードに切り替えてから巡航高度まで上昇させる運用や、機体の強度が許せば、物資輸送用(固定翼)UAV で実現しているカタパルトを用いた発進方法等も検討する余地がある。その他、運用上の課題として長距離航行に必要な区間全域の風況や降雨の有無を把握するための風速計の設置や CCTV カメラの映像活用、占用地上空におけるイベント実施の状況(イベント上空の飛行は予め航空局の個別許可承認が必要)について河川利用者と情報の共有が必要であり、他の UAV の飛行情報共有や運航調整を実施する UTMS (UAV Traffic Management System: 運航管理システム)の構築や運用、三次元管内図との連携が必要である。その他、操縦資格として河川上空の長距離航行では、レベル3運用に必要な二等若しくは一等無人航空機操縦士の養成あるいは、運航業務委託が必要であり、今年度さらに検討を進めることとしている。UAV で取得したデータはAIと連携させて異常箇所を自動的かつ効率的に検出することが出来れば、インフラ管理の効率化、高度化がさらに進むものと考えられる。

また、現在 K-PASS の多目的利用として、陸上での様々な利活用の検討も進めているところである。すぐにも利活用できるのが、災害時の利活用である。K-PASS

は専用の自営通信網であるため、事業者回線のように利用者が急激に増加するということはなく、輻輳によりネットワークが接続しづらい状況は発生せず、安定した通信を行うことができるというメリットがある。

陸上における通信について、実際に試験を行ったところ、通常業務で使用するパソコンを利用し、現場から1ギガバイトのデータを所内のネットワークサーバ内に約2分でアップロードすることが可能で、また、OCTVカメラと同程度の画質による映像伝送やオンプレミスのWEB会議(写真-4)についても問題無く実施することが可能であり、災害時において安定した通信により現場状況の情報共有等に利活用可能と考える。

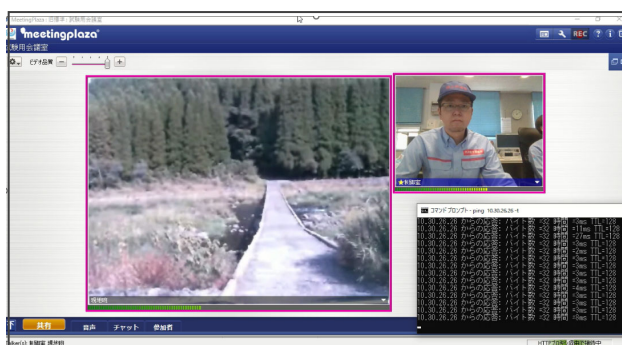


写真-4 K-PASSエリア内におけるWEB会議接続状況

ただし、陸上は上空に比べ障害物となる樹木や建物が

あるため、見通し外となるエリアがあり、不感地帯が生じやすいことも判明している。K-PASSの整備の際は、陸上における通信エリアを考慮した基地局配置の検討が必要である。

河川や道路空間のDXを実現するためのデジタル基盤としてあらゆる利活用が可能となるよう今後も引き続き検討を進めたい。

8. まとめ

今回の実証実験で新型UAVを活用した河川巡視については法的・技術的な検証が概ね完了し、今後は巡視手段の一つとして活用出来るものとする。また、今回検討したK-PASSやUTMSなどのUAV航行支援設備は将来、上空の民間利用が進む際に新たな社会インフラとして利活用することも考えられる。UAVの機体そのものや通信方式、取得したデータの処理等は、AIやクラウドの利用などと併せて、技術の進歩が著しい分野であるため、引き続き、関連する分野で開発をアジャイルに進め、社会の役に立つDXを推進する所存である。

謝辞：本実証実験にご協力頂いた(社)建設電気技術協会、日本無線株式会社、エアロセンス株式会社の皆様に深謝いたします。