

# 松山外環状道路インター東線における 3次元情報活用モデル事業の取り組み

守田 銀二<sup>1</sup>・宗光 太助<sup>2</sup>・梶原 一慶<sup>3</sup>

<sup>1</sup>四国地方整備局 松山河川国道事務所 工務第二課（〒790-8574 愛媛県松山市土居田町797-2）

<sup>2</sup>四国地方整備局 松山河川国道事務所 計画課（〒790-8574 愛媛県松山市土居田町797-2）

<sup>3</sup>四国地方整備局 松山河川国道事務所 計画課（〒790-8574 愛媛県松山市土居田町797-2）

松山河川国道事務所で行中の「松山外環状道路インター東線」がモデル事業に認定された。これを受け初年度として、当事業に対するBIM/CIMモデル活用基本方針を作成した。さらに、これに基づきBIM/CIMモデル作成仕様案の策定と情報共有環境を整備した。本稿では、この取組について報告を行う。

キーワード：i-Construction, BIM/CIM, 事業情報プラットフォーム

## 1. はじめに

四国地方整備局の松山河川国道事務所で開催されている松山外環状道路は、松山市中心部周辺を循環し、松山自動車道（松山IC）、松山空港、松山港などの交通拠点を連結する延長約20kmの路線である。この内、平成30年4月に事業化された松山外環状道路インター東線（L=2.0km）が、「3次元情報活用モデル事業」（以下、「モデル事業」と示す）に認定された。このモデル事業は調査・設計から維持管理までBIM/CIMを活用しつつ、3次元データの活用やICT等の新技術の導入を加速させることが求められている。

本事業は高架橋が主体の道路事業で橋梁予備設計段階であり、モデル事業に認定される以前より3次元測量（写真測量）を行うとともに、橋梁予備設計に対してCIM活用業務に指定し、BIM/CIMに対応してきた。

モデル事業に認定されたことを受けた初年度として、令和元年度はBIM/CIMモデル活用基本方針を作成するとともに、これに基づきBIM/CIMモデル作成仕様案の策定と情報共有環境を整備した。ここでは、この取組について報告を行う。

## 2. BIM/CIM活用基本方針の策定

### (1) BIM/CIM活用基本方針策定の目的

まず、本事業に対しモデル事業としてのBIM/CIM活用

基本方針を定めた。対象事業が予備設計段階であるため、各フェーズでの検証が可能となるが、取り組み当初に効率化を図るべきターゲットを明確にすることが重要である。なお、基本方針は国土交通省の推進するBIM/CIM施策を念頭に効率化手法や対象を選定し策定した。今後、この方針に従ってBIM/CIMに取り組み、得られた知見や課題への対応を取り纏め提言することにより、国交省のBIM/CIM推進に寄与することを目的とする。

### (2) 事業状況の整理

基本計画を策定するに先立ち、以下の整理を行った。

#### a) 事業の特徴および進捗状況

対象事業の特徴及び進捗状況を以下に示す。

1. 病院や民家の密集する地域で高架橋が主体の道路事業である。
2. 道路予備設計が完了し、橋梁予備設計に着手する段階である。
3. 写真測量から3次元地形モデルを作成した。

#### b) BIM/CIMの状況

国土交通省のBIM/CIMの推進状況を以下に示す。

1. 大型構造物は原則適用、予備設計や港湾等、適用範囲を拡大
2. 各事業フェーズを跨いでの計画的な効果や課題について検証した事例が少ない。

### (3) BIM/CIM活用基本方針

事業が計画の段階であることから、「モデル事業として予備設計から詳細設計、施工段階へとフェーズを跨いでBIM/CIMの効果検証を行うフィールドがある」、「現段階で施工現場でのICT活用というフィールドがないが、今後増加していく事業関連情報を共有することで、事業の効率化が期待できる」という2点に着目した。これらは国土交通省のi-ConstructionやBIM/CIMの施策に含まれるものである。

これを元にBIM/CIM活用基本方針として、「実業務を通じた知見のCIM導入ガイドラインへのフィードバック」と「事業情報プラットフォームの構築と情報の可視化による効率化」という大きな2つの柱を掲げた。

### 3. 実業務を通じた知見のCIM導入ガイドラインへのフィードバック

#### (1) フィードバック方法

CIM導入ガイドラインは平成28年度に策定されてから毎年工種の拡大や改訂を行ってきている。ただし、フェーズを跨いでモデルを活用した事例のガイドラインへの反映が十分になされていない。ここでは、モデル事業内で積極的にBIM/CIMを活用して得た知見をガイドラインへの提言として取りまとめる方針とした。この際、下流フェーズでの具体的な活用方法を想定し、これを元に必要となるモデル化の範囲や精度、付与すべき属性情報を規定するCIMモデル作成仕様（案）を作成する。実際に下流フェーズにモデルが渡った際には、対象者にヒアリングを行い、仕様書の妥当性や活用の可否、課題を抽出しモデル作成仕様（案）を改訂する（表-1参照）流れを規定した。

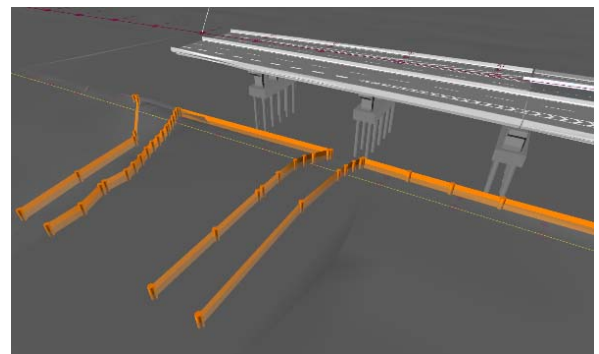
表-1 CIMモデル作成仕様の作成と改訂

フェーズ	対応	改訂
予備設計	CIMモデル作成 ←予備設計段階のCIMモデル作成仕様の策定	↻
詳細設計	CIMモデル活用 →詳細設計者にヒアリング調査 妥当性・課題点・効果の確認	
	CIMモデル修正 ←詳細設計段階のCIMモデル作成仕様の策定	↻
施工	CIMモデル活用 →施工者にヒアリング調査 妥当性・課題点・効果の確認	↻
CIM導入ガイドラインへの提言として取りまとめ		↻

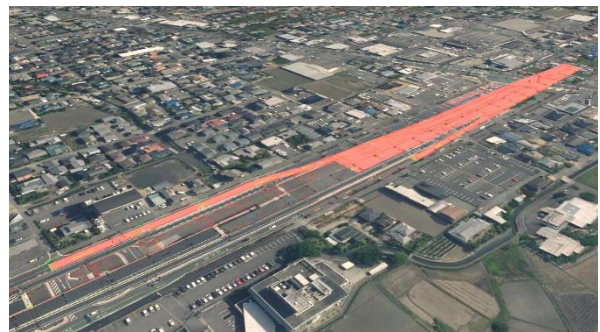
#### (2) 予備設計段階のCIMモデル作成仕様（案）の特徴

初年度は予備設計段階のモデル作成仕様（案）を作成した。CIMモデル作成仕様（案）の作成目的はフェーズを跨いで活用効果を検証するとともに、事業関連のCIMモデルを統合し事業マネジメントでも活用することを想定している。そのため、各活用業務で作成するCIMモデルを一定以上の水準とすることを目的として、以下に示す方針で作成した。

- ・ 活用目的に応じた詳細度を定め、必要以上に細かいモデルにならないように、サンプルを添付した。
- ・ 各活用業務で必要な場合には詳細度を高めることを妨げないことを示した。
- ・ 予備設計段階での属性情報は、課題箇所や設計意図、申し送り事項を中心とした。
- ・ 事業監理に必要な、用地境界や設計範囲のモデルの作成を求めた（図-1参照）。



用地境界のモデル化の例



設計範囲を示す用地境界のモデル化の例

図-1 モデル作成仕様を示したモデル化のサンプル

#### (3) CIMモデルの統合・活用

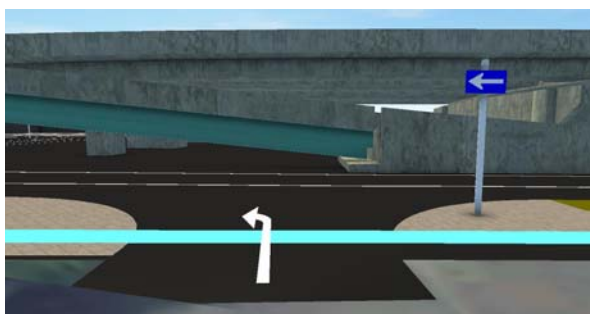
昨年度は写真測量から地形の3次元モデルを作成しており、さらに橋梁予備設計および対象路線の景観検討の各業務で3次元モデルを作成した。これらのモデルを統合し、地元協議に用いた。統合するにあたっては地元協議に用いることから一部違和感のある部分については橋梁予備設計のモデルに合わせて、テクスチャや表示の統一などの調整を行った。

地元協議では対象道路に並行する現道の交差部に対して地元の興味が強かったことから、この3次元モデルを

元に運転手目線での動画を作成した。これを地元協議で活用した結果、桁下空間や交差点視距・標識視認性が理解しやすい点が、評価された（図-2参照）。



合流部の視距確認



交差点部の標識の視認性

図-2 地元協議に用いた3次元統合モデル

#### 4 事業情報プラットフォームの構築と情報の可視化による効率化

事業に関する情報を一元管理し、関係者が共有することでの効率化を目的として、事務所職員以外もアクセスが可能な事業情報プラットフォーム（以下、「事業PF」と示す）を2つのクラウドサービスを用いて構築した（図-3参照）。CIM活用業務成果もこのプラットフォームに統合して管理し、事業での活用を図ることとする。

##### (1) 情報共有システムの役割

情報共有システムは関係者が共有すべき事業関連情報を一元管理することに用いられる。承認された最新ファイルを情報共有システム上に保存することで関係者が共有された同一のファイルを各々の業務に活用することが可能となる。これによって、古いファイルを取り扱うことによる最新情報の共有エラーおよびデータ受け渡しの遅延によるタイムロスの削減等に効果が期待できる。

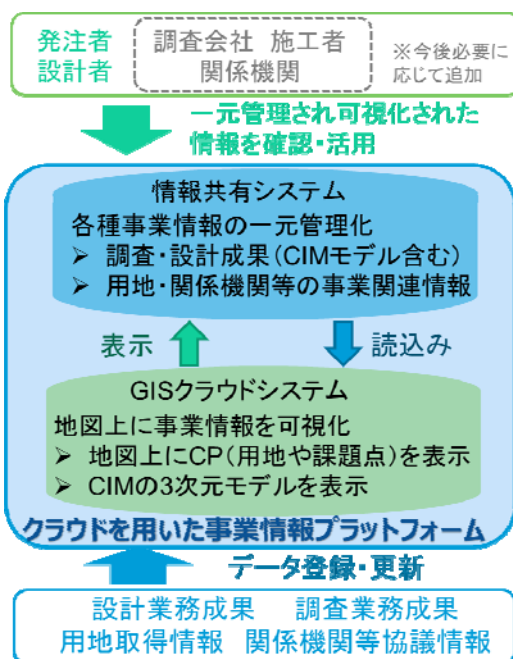


図-3 事業情報プラットフォームの構成

これまで、各業務で作成したCIMモデルやこれらを統合した3次元モデルは打合せ時にしか確認できない課題があった。これを逐次確認することが可能となるため、適切なタイミングで確認や修正依頼が可能となり、事業の進捗確保に寄与することが期待できる。

##### (2) GISクラウドシステムの役割

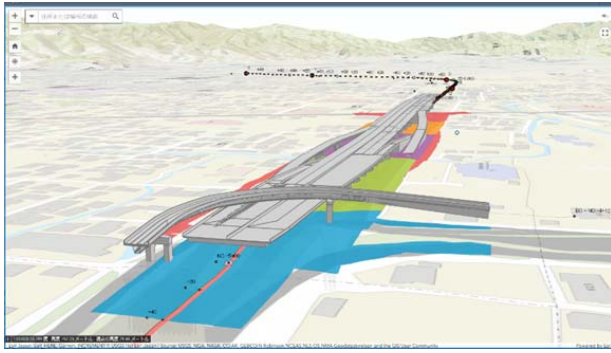
用地や協議情報等の情報共有システムに登録したデータを可視化することで効率化を図ることが期待できる情報については、GISクラウドシステムを用いて可視化する方針とした。

CIMツールでは情報の管理・活用が困難であるため、位置情報と属性情報の管理や解析、可視化に優れるGISを活用する。近年3次元モデルの取り込みも可能となってきたことから、今後CIMとの親和性が広がり、より効率的な活用ができるものと考えている。特に用地取得状況や各種協議の進捗状況等の事業推進に必要な情報を地図上で確認できることは事業監理に効果があると期待している。（図-4参照）。

##### (3) 事業情報プラットフォームによる効率化に向けた取り組み

初年度は、情報共有システムやGISクラウドシステムを基本とした事業PFを構築し、そのPFに事業関連情報を登録した。さらに、事務所職員に向けて事業PFの説明会および意見交換を行った。





今回実施した意見交換会では表-2に示した活用方法が得られた。ただし、抽出した活用場面については、現状の業務での情報の流れを把握し、効率化するための可視化方法と具体的情報の活用方法等、プラットフォームの運用方法を具体化しなければ目的を達成できない。今後、さらに意見交換を行って現場の意見を元に事業情報PFの活用方法について具体化を行っていく必要がある。

表-2 可視化による効率化場面の意見

活用場面	可視化する情報	付与する情報
埋設物・電柱移設依頼の確認	埋設物・架空線の3次元モデル	管理者、移設依頼対象、移設時期
最新の用地取得状況を共有し、発注計画に活用	筆ごとの土地区分(2次元)	所有者(番号)、取得予定時期、用地買収の未・完
協議事項の進捗状況を可視化し、引継ぎ等の効率化、協議漏れ防止	協議が必要な場所を平面上にマーカで表示(2次元or3次元)	協議先、協議の未・完、完了予定時期、協議資料・書類
設計対象箇所を表示し、設計未実施部や、修正設計箇所を確実に把握する	過年度調査・設計箇所を平面上に配置	設計業務名、設計項目、修正の要否

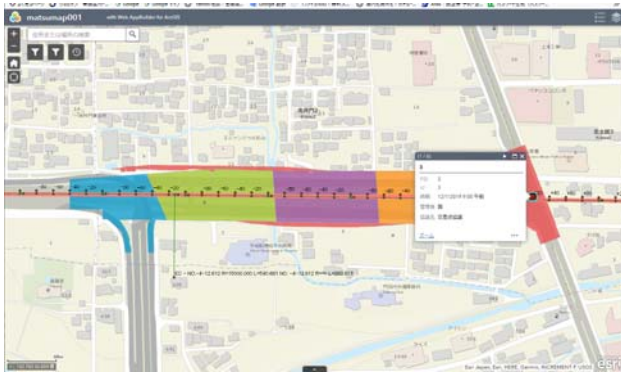


図-4 GISによる事業情報の可視化のイメージ

## 5. おわりに

今回は、現在橋梁予備設計を複数実施している段階の本道路事業において、今後BIM/CIMの効果をj得るための基本方針を定めた。これにより国交省のBIM/CIM推進に寄与するとともに事務所職員の業務効率化にも着目した。さらに基本方針に沿って事務所の環境整備も行った。

本事業がまだ予備設計段階であることから、モデル事業として計画的かつ積極的にBIM/CIMを活用することで、様々な課題や効果が得られることが想定される。これらをBIM/CIM施策に反映させるための情報発信を行ことがモデル事業の役割である。

さらに、今回整備した事業情報プラットフォームやCIMツールの活用方法について、具体化し現場で検証するPDCAサイクルを作り、改善していくことが重要であると認識している。

## 参考文献

- 1) 国土交通省 BIM/CIM 基準要領等



図-5 事業情報プラットフォームの説明・意見交換会の様子

この事業PFを活用することで、発注時の関連資料収集の省力化、発注計画立案、協議計画の補助、担当職員交代時の引き継ぎでの効率化などを期待している。この意見交換では、事務所内の各課からCIMやGISを用いて可視化した具体的な活用方法について意見を抽出し、具体化することで事務所の業務効率化を図ることを目的とした。



# ムカシヤンマ幼虫の移殖に向けた 産卵・生息に必要な環境に関する実証調査

○大崎 愛<sup>1</sup>・梶谷 隆志<sup>2</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人水資源機構 思川開発建設所 ダム工事課（〒322-0305 栃木県鹿沼市口栗野 839-2）

<sup>2</sup>独立行政法人水資源機構 思川開発建設所 道路工事課（〒322-0305 栃木県鹿沼市口栗野 839-2）

ムカシヤンマの幼虫は、湿地や斜面の湧水地の土やコケの間に穴を掘って生活し、3～4年かけて羽化する珍しい特徴を持つ。ダム湛水区域内に生息する幼虫の移殖に当たっては移殖地の選定が重要となるため、思川開発建設所では、2009年度からムカシヤンマの生息状況調査を実施している。既生息地については個体数の遷移を継続的に調査するとともに、2016年度には移殖候補地を選定し、環境要因について分析した。移殖候補地とした「保全整備地」と既生息地の大きな違いは植生密度であった。ムカシヤンマはコケが繁茂しすぎていると産卵が阻害されるため、2017年3月に保全整備地のコケを除去する等の試みを行ったところ、2017年6月以降継続してムカシヤンマの産卵と幼虫の出現を確認することができた。

キーワード：ムカシヤンマ、環境保全対策、湧水地、生息環境

## 1. はじめに

思川開発建設所では、事業実施区域及びその周辺における環境を把握する目的で1978年度から環境調査を行っている。1993年度には環境影響評価を実施し、その後、1999年12月には各分野の学識者による思川開発事業生態系保全委員会（以下、「委員会」という。）が発足した。2009年3月に南摩ダム周辺の動植物リストを公表するとともに、これまで実施してきた環境調査結果を再整理し、専門家の指導・助言を得ながら事業の実施に伴う影響予測・評価・環境保全対策について再検討した「思川開発事業における環境保全の取組」を公表した。

現在、思川開発建設所では、本体発注、試験湛水を睨み、環境保全対策を実施しているが、その環境保全対策の一環として、ムカシヤンマ（幼虫）の移殖適地の選定・検討及び生息環境の整備を進めているところである。

## 2. ムカシヤンマについて

ムカシヤンマは、原始的なトンボの特徴を持ち、ジュラ紀の遺存種（=生きた化石）と考えられており、日本の固有種であるとともに、栃木県版レッドリストでは準絶滅危惧種のカテゴリに分類されている。他の種と大きく異なる特徴としては、幼虫（ヤゴ）時の生活環境が挙げられている。他のトンボ目が幼虫の状態で1年生活するところ、3～4年トンネル状に掘った土の中で生活する珍しい生活史を持つ。



写真-1 事業地内で撮影したムカシヤンマ  
（左：成虫（産卵中の雌）、右：幼虫）

### 3. 環境保全対策調査について

ムカシヤンマの移殖に関しては、図-1 に示すフローに従い必要な調査を進めているところである。

まずは、湛水区域外の移殖候補地の選定・検討を行い、植生環境、水分環境等が、既生息地の環境と類似している可能性がある移殖候補地（以下「保全整備地」という）の抽出を行った。その後、既生息地の生息環境要因との比較を行い類似性の検討を行い、必要に応じて整備を実施することとした。

なお、整備後に成虫の産卵や継続的に幼虫が確認できればムカシヤンマの移殖候補地として適合していると考えられた。

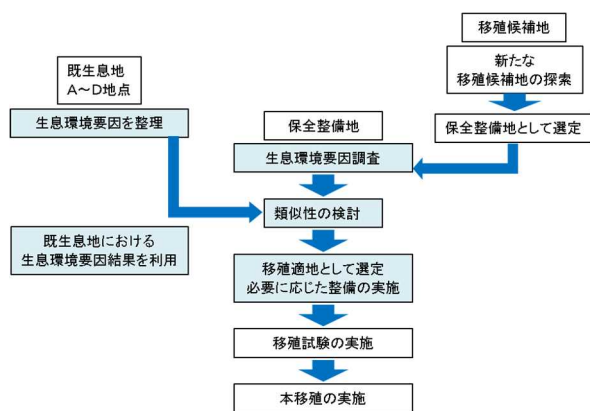


図-1 ムカシヤンマ移殖に向けたフロー  
(着色部が本論文の記載範囲)

#### (1) 生息状況調査

既生息地の環境を把握するために、その生息地が継続的に利用されているかを調査した。調査に関しては、2009年度から実施しており、体長・頭幅、翅芽長（孵化後翅になる部分）、性別を調査し、確認位置を記録した。図-2 は、ムカシヤンマの頭幅と齢数を参考に取まとめを行ったものである。ムカシヤンマの幼虫は孵化するまでに数年かかるため、毎年産卵が行われている場合1年目2年目3年目の様々なサイズの幼虫が同時に観察できる。この調査結果から、C地点は2015年度から3ヶ年連続で幼虫が確認されなかったが、これまで確認されていた状況を踏まえ、生息環境要因の調査は実施することとした。

なお、既生息地の位置情報等に関しては希少種保護の観点から記載していない。

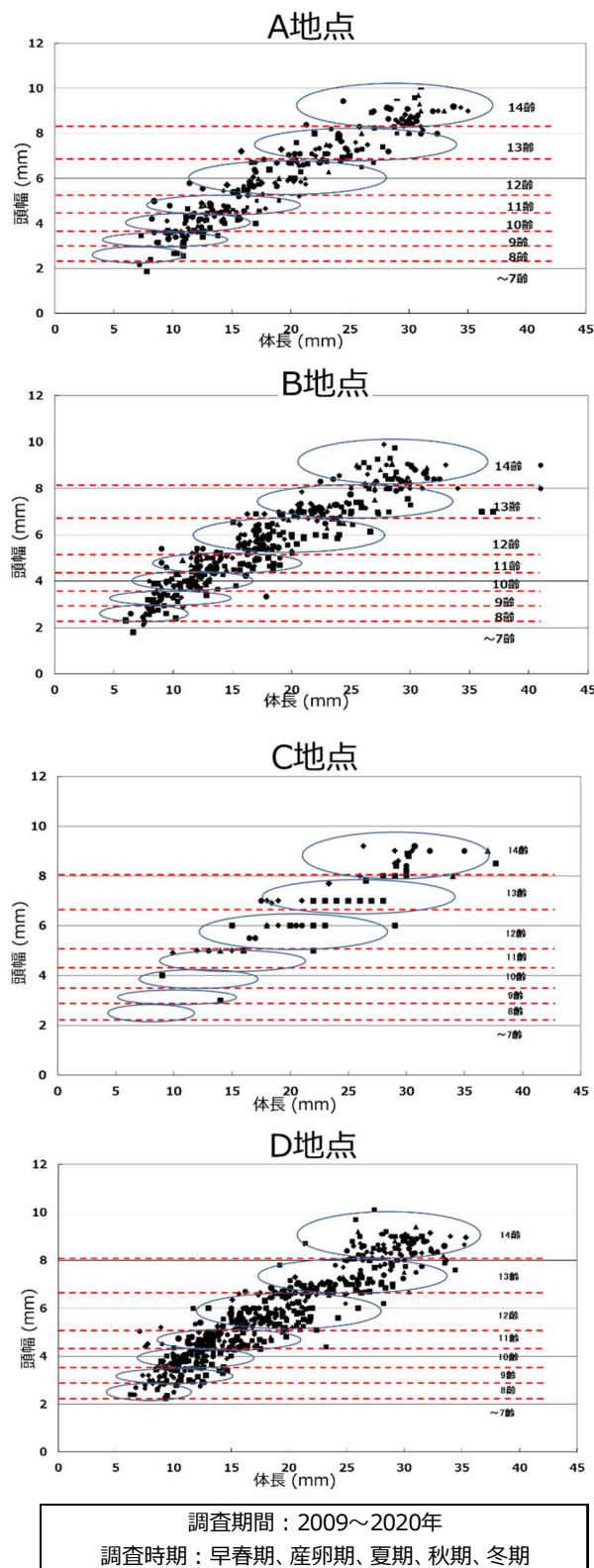


図-2 ムカシヤンマの幼虫体長と頭幅の関係

#### (2) 生息環境要因調査

生息状況調査により継続的に生息が確認された既生息地及び保全整備地の環境要因の調査を2016年度に実施した。調査内容に関しては表-1 に示すとおりである。

表-1 生息環境要因調査項目

調査項目	調査内容・調査方法	調査回数
地形	斜面方位、傾斜角度等を計測。	1回
植生	生息場所および周辺の植生を記録。詳細な植生図・コケ分布図を作成。	1回
空隙率	全天写真を撮影し、空隙率を求めた。	4回
土壌温度	表面温度計・棒状温度計により計測。	4回
水温	水温計により水温を計測。	4回
pH・EC	pHメータ及び電気伝導計により計測。	4回
含水率	土壌水分計により含水率を計測。	4回
土質	土の粘土試験（ふるい分析 試料0.5~2kg）を実施。	1回
餌動物	表層部の土壌を採集し、生息する生物（動物）調査。	2回

(3) 生息環境要因調査結果

各調査等を実施した結果、保全整備地と既生息地の環境要因との比較により差異が認められた項目は水温、土質、植生等であった。傾斜方向等その他の項目の調査結果を表-2に示す。既生息地の生息環境については、空隙率、土壌温度、土壌含水率、餌動物量で同様の傾向を示していることから、これらがムカシヤンマの生息環境として重要な条件であると考えられた。

表-2 その他の項目の状況

	A地点	B地点	C地点	D地点	保全整備地
傾斜方位	N70°W	N40°W	S70°W	N30°E	S60°E
傾斜角度	82	44	2	45	69
空隙率 (%)	14.05	16.65	20.3	25.55	14.75
土壌温度 (°C) (表面,5cm)	14.42 13.93	15.03 15.03	15.49 15.43	16.35 15.70	16.36 16.44
土壌含水率 (%)	67.59	69.78	74.15	64.84	67.19
pH / EC (µs,cm)	6.66 1.85	6.26 2.08	6.03 6.41	6.32 1.78	7.09 14.58
餌動物量 (g/0.06㎡)	0.713	0.116	0.266	0.185	0.486

a) 水温

図-3に各地点の水温状況を示すが、早春期、産卵期、秋期は既生息地との間に差異は生じていなかったが、夏期のみ突出して高い値を記録した。一般的に、ムカシヤンマの幼虫は低水温できれいな水質を好むとされており、夏期の水温の上昇は懸念材料の一つと考えられる。

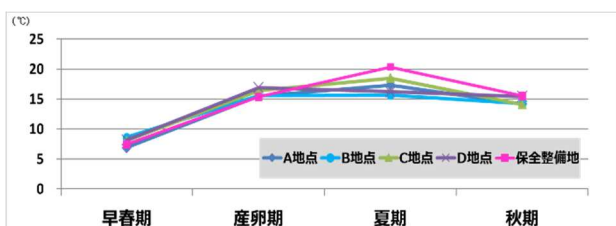


図-3 各地点における水温

b) 土質

図-4に各地点の土質の状況を示すが、既生息地に比べてシルト分・粘土分の比率が高く、礫分の比率が低い傾向が確認された。

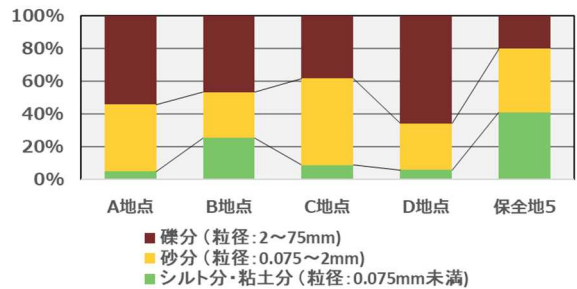


図-4 各地点における土質

c) 植生

保全整備地の植生については、コケ等の繁茂もみられ非常に良好なようであったが、岩壁全体をコケが覆っており、成虫の産卵の障害になる可能性が考えられた。

表-3 各地点の植生状況

項目	A地点	B地点	C地点	D地点	保全整備地
植生	露岩部全体に草本やコケが散在	露岩部や湧水の流れ周辺の土壌部にコケが生育	植生・コケの生育がほとんど無い	土壁を中心にコケが生育	露岩全体をコケ類が覆っている

(4) 環境保全対策調査のまとめ

生息環境要因の調査結果から保全整備地は移殖候補地としての可能性があると考えられる。

なお、既生息地と差異が認められた要因のうち、夏期の水温の上昇については、この値が一時的なものか、恒常的なものかを確認する必要がある。また、土の状態を確認すると共に、岩壁全体を覆うコケについても、ムカシヤンマの産卵を阻害しないように、一部のコケを除去する必要があると考えられた。

4. 環境保全対策調査結果を踏まえた追加調査

(1) 継続した土壌温度測定

2016年度4月から湿地A~Dおよび保全整備地の土壌温度を継続して測定している。その結果を図-5に示す。2017年9月の最高温度が既生息地よりやや高かったが、全体としては既生息地と特段の差は確認できなかった。最大値22.11°C (A地点、2016年7月) 最小値-1.14°C (A地点、2017年2月) が今回の調査におけるムカシヤンマ幼虫の生息できる温度条件と考えられる。



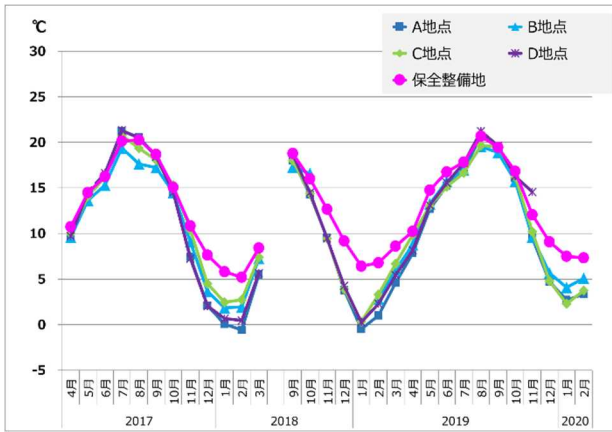


図-5 各地点の土壤温度（日平均）

(2) 植生遷移を促す整備

写真-2 に示すよう、ムカシヤンマの産卵を阻害しないように、2017年3月に一部のコケを除去し、ムカシヤンマが産卵しやすい環境を創出した。その後はコケの大きな繁茂は見られなくなった。



写真-2 保全整備地の整備前後

(写真左：2016年6月、写真右：2017年3月)

5. 保全整備地のモニタリング調査結果

保全整備地の整備後も継続したモニタリング調査を実施していたところ、2017年6月に、成虫の産卵と幼虫の生息が初確認された。また、2019年6月調査時には産卵が確認され、今年度も産卵と幼虫8個体が確認され、保全整備地が継続して利用されていることが確認できた。

以上のことから、整備した保全整備地が移殖地として適合していることが証明された。

以下に調査結果をまとめる。

- ①ムカシヤンマの産卵・生息に必要な環境について詳細に調査を行った。その結果、空隙率は14～25%、表面の土壤温度は-1.14～22.11℃、含水率は64～74%、餌動物量は0.1～0.7g/0.06㎡ということが条件として考えられる。
- ②上記①を踏まえ、ムカシヤンマの幼虫の移植候補地を選定し、既生息地の環境により近づけるように、コケの剥ぎ取りを施してモニタリング調査を継続した。
- ③上記②の結果、2017年6月に成虫の産卵と幼虫の出現を確認した。

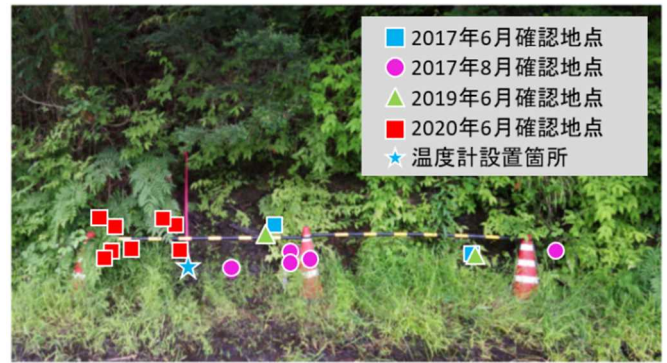


写真-3 幼虫確認位置（2017年度～）

6. 今後の課題

整備した保全整備地において、ムカシヤンマが継続して繁殖した場合は、移殖地として適さなくなる恐れもあることから、保全整備地の拡大等を検討していく必要がある。また、最終的には、移殖先におけるムカシヤンマの定着状況を確認する必要があることから、移殖した個体の定着をどのように確認していくか検討が必要となる。

7. おわりに

今後、工事が最盛期を迎えるが、引き続きムカシヤンマの生息環境への影響がないように監視をしていく。また、試験湛水をにらみ、今回得られた知見をもとに詳細なムカシヤンマの移植計画等について検討していくこととしている。

参考文献

1) 安藤 裕・宮川幸三 ムカシヤンマ *Tanypteryx pryeri* Selys (Odonata, Petaluridae) の幼虫期について、菅平高原生物実験所業績 第13号、1969年

# 大規模土工における土砂運搬マネジメント ～ 土量配分の最適化へのアプローチ ～

奥尾 展保<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 関東地方整備局 常総国道事務所 調査課 (〒300-0033 茨城県土浦市川口 1-1-26 アーバンスクエア土浦ビル 4F)

東関東道水戸線(潮来～銚田)では、土工事で発生する大量の土砂流用が事業遂行上のリスクの一つとなっている。これは、土砂置場の不足や遠隔化に伴う運搬費や環境負荷の増加がある。一方、これまでの土工計画は、計画段階での工事進捗に伴う土砂需給量や時期の変化の把握が困難なため、経験や主観的な判断に依存しているところが多い。また、土砂需給量と運搬費の管理に関する具体的な計画手法が確立していないことから、計画策定や工事間調整に多くの労力と時間を費やしている実態がある。そこで本稿では、事業計画を見直しつつ、複数工事間の土砂流用を合理的に行うための土量配分計画を提案する。

キーワード 土量配分計画, 数理最適化手法, 段階的詳細化, 総仕事量最小化, コスト縮減

## 1. 背景

東関東道水戸線(潮来～銚田)は、茨城県潮来市を起点に同県銚田市に至る延長 30.9km の道路建設事業である。(図-1 参照) 事業を工種別にみると、切土区間延長は約 5 割、盛土は約 4 割、残り 1 割は構造物となっている。また、土工事で発生する土砂は、東京ドーム 3 杯分に相当するため、多量の土砂流用が事業遂行上のリスクとなっている。これは、土砂の需給時期のずれによる外部搬出量の増大、発生地から使用地までの運搬距離の遠隔化、大型車運搬による騒音振動などの社会問題や受入地周辺住民からの苦情といった多くの問題点を指摘できる。

一方、適時適切な土砂需給のための土量配分計画は、これまで工事工程を調整しながら運搬距離が最短となるように繰り返し検討が行われてきた。しかしながら、土砂需給量と運搬費の管理については最適かつ具体的な計画手法が確立されていないため、担当者の主観や経験に依存するところが多い。また、複数工事間の土量調整や土量配分検討に多くの時間と労力を費やしている実態がある。

以上を踏まえ、本稿では土砂需給を当該事業の多くの工事を統括、調整する立場で解決すべき問題としてとらえ、建設生産システムのさらなる高度化と土工事に欠かせない土砂運搬の効率化を目指し、土量配分を最適化した結果について述べる。

## 2. 目的

検討の目的は、第一に、土工の実態把握と事業遂行上のリスク要因の抽出である。従前は、年度単位の土収支整理であったが、月次単位のより細かな整理を行い土の動きを詳細に把握する。

第二に、合理的な手法による土量配分の導出である。具体的には、経済的かつ環境負荷を最小にする最適な土量配分計画となるように数理最適化手法<sup>1)</sup>(以後、線形計画法と称す)の適用可能性を探る。さらに、土砂運搬が沿道環境に与える負荷を定量的に把握する。

第三に、今後、本手法を用いて実際の複数工事間の土量調整を行うにあたっての課題を整理する。

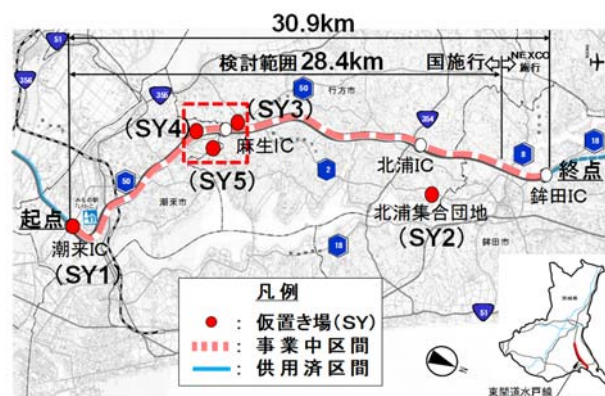


図-1 検討範囲と土砂仮置き場

### 3. 土工の平準化

検討の対象範囲は、**図-1** に示す国施行区間の 28.4km である。その区間で発生する土砂は約 360 万 m<sup>3</sup> におよぶが、全て事業地内の工事に流用するため、発生土と使用土の土収支のバランスは概ね取れている。

しかし、事業の初期段階では構造物掘削や工所用道路の切土工事が先行するため、余剰土が増えて土砂仮置き場の容量を圧迫する懸念があった。そこで、土工事で発生する土量の実態を把握するため、事業工程の計画期間を月次単位に細分割し、外部に搬出する累積土量の変化を**図-2** に示ように可視化した。なお、累積土量は、切土工事での切土量、構造物工事での掘削土量、埋戻し工事での埋戻し土量と盛土工事での盛土量を計画期ごとに集計し、発生土量から使用土量を差し引いた累積土量で表示している。また、図中の実線は仮置き場の容量の上限値を累積して表示している。

その結果、当初事業計画における累積土量の変化はピーク時に 100 万 m<sup>3</sup> を越え、現存する仮置き場の容量を超過することが判明した。この容量超過対策としては、用地未買収箇所や工事工程上の制約に考慮しつつ、盛土工事の着手時期を早め、切土工事の工程を後ろ倒しにする措置をとった。その結果は図中の丸印に示す通り、土量のピークを緩和し平準化を図ることができた。ただし、一時的に 10 万 m<sup>3</sup> ほど容量不足になるため、新たに仮置き場を整備するべく準備を進めている。

### 4. 土量配分の最適化

#### (1) 基本的な考え方

本稿で述べる土量配分の最適化とは、土砂が発生する複数の工事から盛土用資材として土砂を使用す

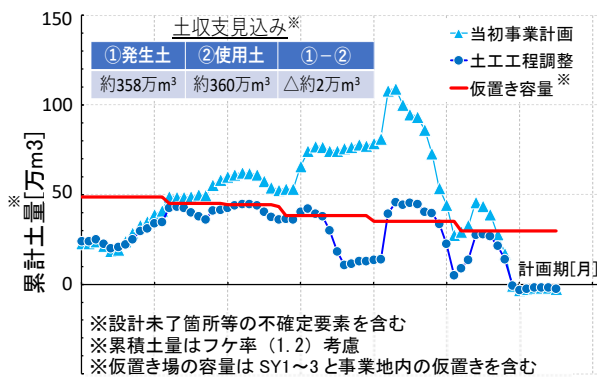


図-2 土収支見込みと土量の変化

る複数の工事への合理的な土量配分計画のことである。検討にあたっては、運搬に要する総仕事量（運搬費）の最小化を目指すとともに、計画そのもの自体を客観的に評価できるように、線形計画法の適用を試みた。なお、本手法は、特定の目的である運搬土量と運搬距離の積の総和を目的関数として定式化し、複数の手段である各工区間の土砂需給の配分パターンの中から目的関数が最小になるケースを見出すものである。

土量配分計画への線形計画法の適用は、これまで多くの学識経験者らが取り組んできた問題であり、数理最適化モデルに関する様々な提案<sup>2)~6)</sup>がなされている。しかしながら、当該と同規模以上の土工事に適用された事例は見あたらず、また、それら提案の全てを取り込んだ検討には、実行可能性の面から課題があった。例えば、土質改良プラントの処理速度や運搬車両の回転率などである。さらには、工区数や計画期の細分化による計算処理上の課題もあった。

#### (2) 段階的詳細化

以上を踏まえ、土量配分計画への線形計画法の適否判断と、意思決定を円滑にするため、数理最適化モデルは**表-1** に示すように段階的に詳細化した。

第一段階では、土量配分の巧拙による運搬費のバラツキを把握するため、事業延長を3つの工区に大分割し、時間軸を考慮せずに運搬費が最大もしくは最小となる土量配分を試算した。その結果、運搬費の最大は81億円、最小は46億円となった。土量配分の仕方によっては35億円の範囲でばらつくことが判明した。

第二段階は、仮置き場の必要性和効果、沿道環境に与える影響を定量把握するため、事業延長を21工区、計画期を四半期に分割して試算した。なお、試算条件と結果については次項で詳述する。

第三段階は、実際の複数の工事間の土量調整への適用を想定している。事業延長は120程度の工事ロット相当に細分化し、計画期についても月次単位に細分割して試算する予定である。

表-1 数理最適化モデルの段階的詳細化

段階	分割数		目標
	工区	計画期	
1)大工区	3	なし	土砂運搬費の実行可能解の範囲を把握
2)中工区	21	四半期	仮置き場の位置影響と運搬台数の定量把握
3)小工区 (今後予定)	120	月次	複数の工事間の土量調整に用いることを想定

※太線図は本稿4(3)~(5)項で詳述



### (3) 検討条件

中工区の検討に用いる数理最適化モデルは、土砂を搬出する発生工区、土砂を搬入する使用工区と仮置き場を考慮して図-3に示すようにモデル化した。なお、工区分割は本線を主要幹線道路で区切った21工区とし、土砂配分パターンは発生工区から使用工区への直接運搬、発生工区から仮置き場を介して使用工区へ運搬する場合に考慮した。なお、土質改良プラント<sup>7)</sup>などは、次段階で考慮する予定である。

仮置き場は、現存する潮来 IC(SY1)、北浦複合団地(SY2)の2箇所に加え、麻生 IC 付近に新設予定の3箇所(SY3~5)を考慮した。(図-1 参照)

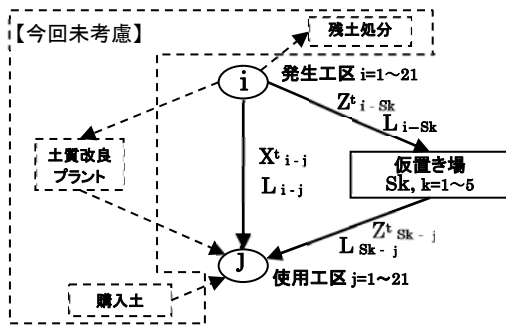


図-3 数理最適化モデルのイメージ

#### a) 目的関数

目的関数は、計画期における発生土量と運搬距離の積として(a)式に示ように定式化し、その総和である総仕事量(運搬費)の最小化を目指す。

$$\sum \{ \sum [(X^t_{i-j} \times L_{i-j}) + (Z^t_{i-Sk} \times L_{i-Sk}) + (Z^t_{Sk-j} \times L_{Sk-j})] \} \Rightarrow \min \quad (a)$$

ここに、X：発生工区から使用工区への搬出土量  
Z：仮置き場を介した搬出土量、L：運搬距離  
発生工区：i = 1~21、使用工区：j = 1~21  
仮置き場：k = 1~5、計画期：t = 全期間/四半期

#### b) 制約条件

土量の制約条件は、(b)式に示ように計画期毎の発生工区側の総土量と使用工区側の総土量が等価となる。仮置き場の制約条件は、仮置き容量に制限値を設けて(c)式に示すように定式化した。なお、検討の前提となる土量は、土工平準化後の事業工程に基づいている。(図-2 参照)

$$\begin{aligned} (\text{発生土量の合計}) &= (\text{使用土量の合計}) \\ \sum X^t_{i-j, i=1-21, j=1-21} + \sum Z^t_{i-Sk, i=1-21, k=1-5} \\ &= \sum X^t_{j-i, i=1-21, j=1-21} + \sum Z^t_{Sk-j, j=1-21, k=1-5} \end{aligned} \quad (b)$$

(仮置き土量)

$$\begin{aligned} &= (\text{一期前までの残土量}) + \sum Z^t_{i-Sk} + \sum Z^t_{Sk-j} \\ &\leq \text{仮置き容量} \quad (c) \end{aligned}$$

### (4) 土量配分の最適化結果

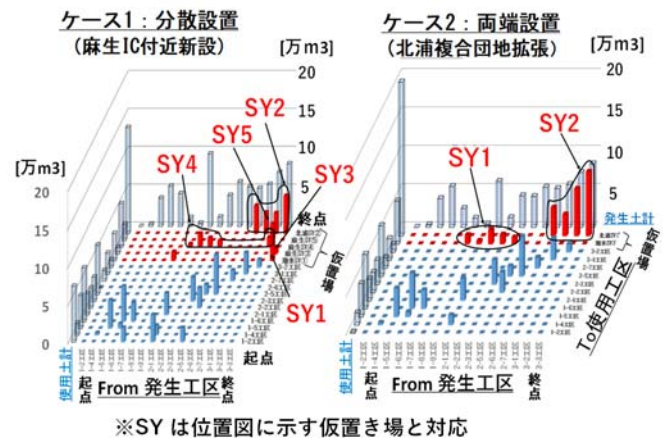
試算ケースは、仮置き場の活用による運搬費の削減効果を把握するため、表-2に示すように麻生 IC 付近に仮置き場を新設(SY3~5)した場合、現存する北浦複合団地(SY2)を拡張して利用する場合の2ケースについて実施した。

表-2 試算ケース

試算ケース	仮置き容量 [万 m <sup>3</sup> ]			備考
	潮来 SY1	北浦複合 SY2	麻生(新) SY3~5	
ケース 1	8	21	40	麻生 IC 付近に新設
ケース 2	8	無制限	-	北浦複合団地を拡張

累積土量が最も多くなる計画期に着目した土量配分結果を図-4に示す。土の運搬先の選択はマクロに確認する限り、できるだけ近くに運搬されている。具体的には、麻生 IC 付近に仮置き場のあるケース 1 では、新設の仮置き場(SY3~5)が活用されている。麻生 IC 付近の仮置き場がないケース 2 では、起点側寄りで発生した土砂は潮来 IC の仮置き場(SY1)、終点側よりで発生した土砂は北浦複合団地の仮置き場(SY2)を活用している傾向を確認できる。また、仮置き場の容量制約は満たされているので、計算としては問題のない結果が得られている。

両ケースの総運搬費を表-3に示す。総運搬費の差は0.5億円であり仮置き場の設置箇所による差が出にくい結果となっている。これは、ケース 2 では北浦 IC よりの工区で発生土量が多くなる時期に距離の近い北浦複合団地の仮置き場(SY2)に搬出された



※SYは位置図に示す仮置き場と対応

図-4 土量配分の最適化結果

ことによる。つまり、発生箇所と時期、仮置き場所により土量配分が最適化されたためと考えられる。

一方、発生土量が多くなる時期の交通集中路線の平均運搬台数は、仮置き場を分散させたケース1と分散させないケース2とでは、平均運搬台数に163台/日の差がついた。よって、仮置き場は分散して設置した方が工事用車両の集中を緩和できることが判明した。なお、対象路線は、北浦 IC 付近の主要幹線道路である。（図-5 参照）

表-3 中工区の試算結果

試算 ケース	総運搬費*1 [億円]	運搬台数*2 [台/日]	備考
ケース 1	39.5	751	麻生 IC 付近に新設
ケース 2	40.0	914	北浦複合団地を拡張
差	-0.5	-163	(ケース1)-(ケース2)

※1)  $\Sigma$  運搬土量  $\times$  運搬距離の最小値。同一工区内の運搬費は除く。  
 ※2) 国道 354 号の土量の多くなる計画期 (24 ヶ月) の平均日運搬台数

### (5) 土量配分結果に基づく運搬予測

発生土砂の運搬計画にあたっては、運搬車両の走行が沿道環境に与える影響の把握が重要となるため、土量配分の最適化結果をもとに運搬経路別の運搬台数をシミュレーションした。なお、運搬車両1台あたりの運搬土量は  $6\text{m}^3/\text{台}$  ( $\approx 10\text{トン} \div 1.6\text{t}/\text{m}^3$ ) とした。運搬台数は各計画期の土量を運搬経路別に集計して日当たり台数にて計上し、環境アセスメント (以後、アセスと称す) で想定している工事用車両の走行台数との比率で整理した。

その結果は図-5 に示す通り、一部の路線でアセスの想定台数を超過している。特に朱塗りの路線では、運搬土量の多くなる計画期に約 2,600 台/日となり、アセスの想定台数の 4 倍以上である。この交通集中は、沿道環境はもとより旅行速度の低下を招き、運搬効率が低下する。よって、次段階では代替経路の選択、車両台数の制限、運搬経路に応じた運搬サイクルにも考慮して検討すべきという課題が明らかになった。

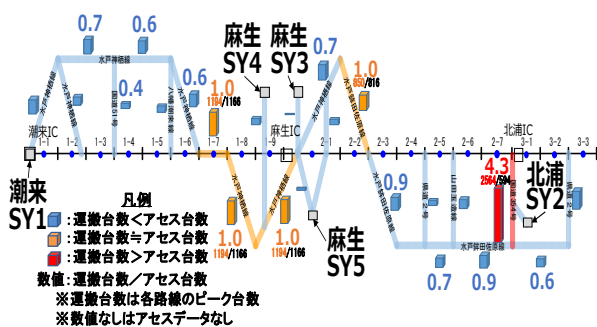


図-5 土砂運搬シミュレーション

## 5. まとめ

本稿では、大規模土工に潜在する課題を抽出するとともに、土量配分計画への線形計画法の適用性について検討した。新たに得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 土の動きを可視化することで土量配分に起因する事業遂行上のリスク要因を抽出し、土工事平準化の目標を明確にすることができた。
- (2) 数理モデルの段階的詳細化により、線形計画法を本事業の土量配分計画に適用できた。
- (3) 線形計画法の適用により、土砂運搬の総仕事量 (運搬費) を最小化する合理的な土量配分計画を導出することができた。
- (4) リスク低減策である仮置き場の位置が運搬費と運搬台数に与える影響を定量的に把握できた。
- (5) 土砂運搬シミュレーションにより沿道環境面の課題を抽出できた。

上述より、線形計画法を用いた土量配分計画は、事業計画の策定に対して有効なツールになり得ることを明らかにできた。

## 6. 今後の課題

今後、当該事業では工事量と運搬土量が多くなる。土工事は多数におよぶと想定され、複数の工事現場における調整が必要となる。ここでいう調整とは、土の情報のトレーサビリティ<sup>8)</sup>、土砂の需給調整、使用土の土質条件、運搬車両の調達台数、走行経路などである。この現場調整には多大な労力を費やすことが想定される。また、工事工程は工事発注時期や機械、労務、材料の調達状況によっても変わる。工事工程に変更があれば土砂需給のタイミングがずれるため、土量配分の再調整が必要になる。よって、この動的な工事工程に対応できるシステムの構築が急務である。

次段階では図-6 に示すような土量配分最適化システムを構築し、土量管理の効率化、省力化を目指していきたい。

今後の汎用策としては、対象範囲の広域化があげられる。当該事業にとどまらず複数の事業者間の土砂需給調整に適用し、最適な土量配分情報の提供が可能になれば、運搬に要す総仕事量 (運搬費) を縮減し、もって生産性向上に貢献できると考えている。さらに将来的には、運搬車両の日々の運行管理<sup>9)</sup>にまで活用の幅を広げれば、さらなる施工の合理化が可能となるであろう。

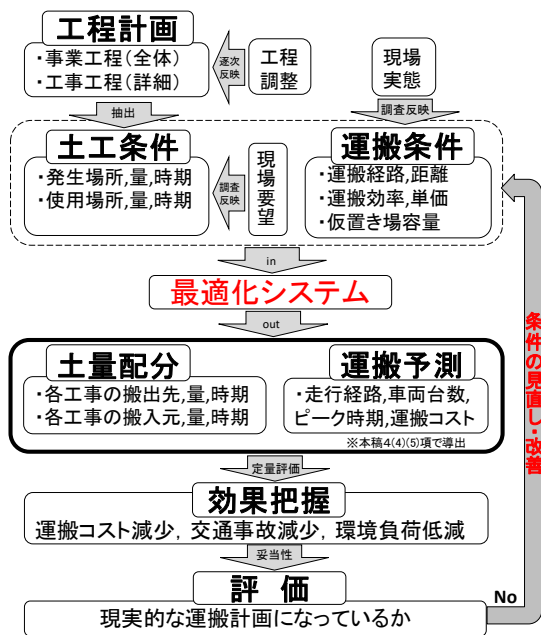


図-6 土砂運搬マネジメントシステム

### 参考文献

- 1) 藤井聡, 改訂版 土木計画学 公共選択の社会科学, 学芸出版社, 2018.08.31.
- 2) 見波潔・嶋津晃臣: 建設残土の有効利用のための土量配分計画モデル, 土木学会論文集第 395 号/IV-9, 1988.7.
- 3) 富田安夫・寺嶋大輔: 工事開始時期と工期の調整を考慮した建設残土輸送計画モデル, 土木計画学研究・論文集 No.13, 1996.8.
- 4) 和田かおる・山本幸司: 建設残土再利用計画システムの構築に関する一考察, 建設マネジメント研究論文集 Vol.4 1996
- 5) 富田安夫・寺嶋大輔: Dantzig-Wolfeの分解原理を用いた時間軸階層化による工事間土量配分モデルの計算方法, 土木計画学研究・論文集No.14, 1997.9.
- 6) 富田安夫・徳永大輔: 工事開始時期・工期・土量の不確実性を考慮した建設発生土の工事間土量配分モデル, 土木計画学研究・論文集No.17, 2000.9.
- 7) 建設発生土利用技術マニュアル(第4版): 独立行政法人 土木研究所 編著, 2013.12.1.
- 8) 丸田知也: 圏央道盛土区間における現場マネジメントについて, 平成28年度スキルアップセミナー関東, 2016.6.23.
- 9) 三浦剛志・樺澤孝人・八木勝良, 土砂運搬車両運行管理システムの導入(試行)について—システムの導入目的と活用効果—, 第53回(平成21年度)北海道開発局技術研究発表会, 2010.2.25.



# うねり性波浪を考慮した防波堤の安定性について

福島 純平<sup>1</sup>・橋本 順二<sup>1</sup>・吉本 幸太<sup>1</sup>・鳥居 雅孝<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 設計室

(〒750-0025 山口県下関市竹崎町 4-6-1 下関地方合同庁舎 2階)

近年、国土強靱化に向けた施策の展開と検討が進められている。防波堤の被災に着目すると、従来の設計波とは異なる波高が低く周期が長いうねり性波浪（以下、うねり）による事例が確認されており、長期的な安定性を確保するため、対策を講じなければならない重要性が指摘されている。本稿は、うねりを考慮した設計の九州における必要性を明確にするため、志布志港を対象とし、うねりに関する①設計波の設定方法、②防波堤の安定性照査に関する検討結果を取りまとめものである。安定性照査の結果において、従来の設計波と同程度となる被災リスクが示されたことで、九州においてもうねりの影響を考慮した方策を急ぐことの責務を確認した。

キーワード うねり性波浪、設計波、統計解析、防波堤、安定性照査

## 1. はじめに

### (1) 背景及び目的

近年、自然災害の頻発・激甚化により、これまで想定外としていた自然災害への対応として、国土強靱化に向けた施策の展開と検討が強力に進められている。

一方で、港湾施設の防波堤の被災に着目すると、従来の設計波とは異なる波高が低くて周期が長いうねり性波浪（以下、うねり）による事例が確認されており、長期的な安定性を維持するため、抜本的対策を講じなければならない重要性の指摘が広範になされている。これらを受け、2018年改正の港湾施設の設計基準にも、うねりに対する検討必要性が明確化された。

また、既往の研究によると、平山ら<sup>1</sup>は、うねりが防波堤に与える影響をシミュレーションすることで、うねりの地域特性を考察し、特に太平洋側の海域である高知港においては、海底地形の地域特性に起因して、うねりが従来の設計波よりも防波堤へ与える影響が大ききことを示している。

しかしながら、九州に位置する港湾を対象とした場合、その地域特性として、実際にうねりを考慮した設計波を導入すべきかはその取扱いが明確ではない。また、うねりの影響を検討するにあたっては、うねりによる設計波の設定方法として統一的手法は未だ示されていない。

そこで、本研究は、うねりを考慮した設計の九州

における必要性について明確にするため、うねりに関する①設計波の設定方法、②防波堤の安定性照査について検討した。なお、本研究の対象として、九州の中でも特にうねりが卓越する志布志港の防波堤を選定した。

### (2) 従来の設計波（風浪）とうねり

従来の設計波である風浪とは、海域で吹いている風によって生じる波であり、図-1のように波高が高い特徴がある。一方で、うねりとは、風浪が風の吹かない領域にまで伝わった波である。つまり、志布志港に台風が到達する前あるいは過ぎた後に、遠く離れた海域で台風により発生し、伝播した風浪が志

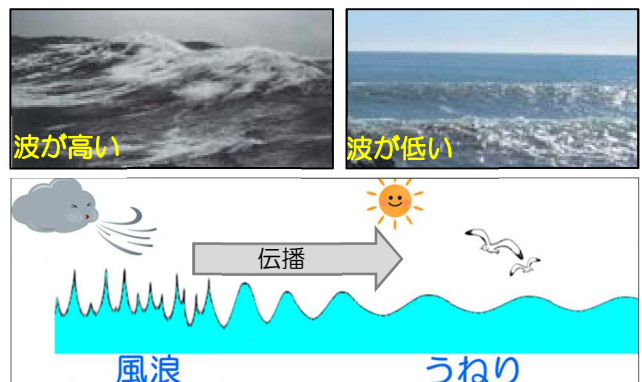


図-1 従来の設計波（風浪）とうねりの違い

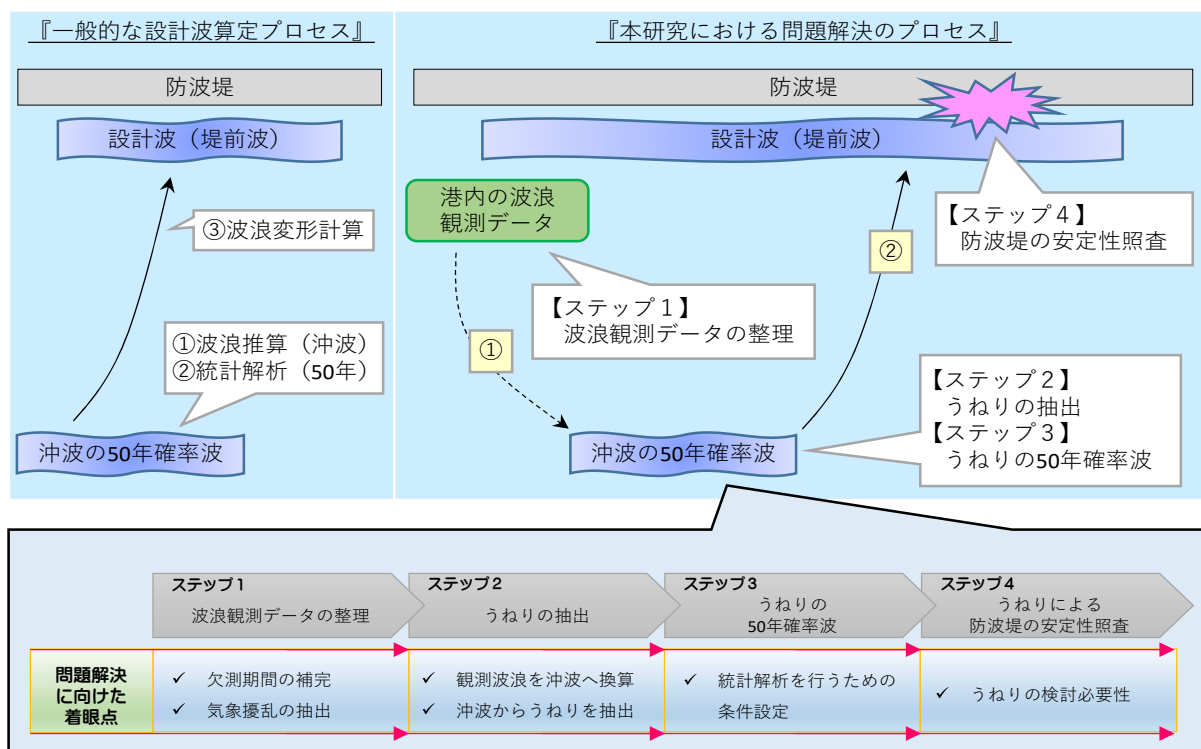


図-2 『本研究における問題解決のプロセス』

布志港に入ってきたものである。うねりは減衰しながら伝わるため、図-1のように、穏やかに見えることもあるが、風浪よりも波長や周期が長いために海底の影響を受けて波が高くなりやすい性質もある。なお、本研究で対象とするうねりは、平山ら<sup>1)</sup>の示す「周期8秒以上、波形勾配0.025未満」とした。

### (3) うねりによる設計波の算定方法

波浪は一定の水深より浅くなると海底地形の影響を受けて変化していく特性がある。そのため、一般的な防波堤前面の設計波（堤前波）の算定プロセスとしては、『水深の影響を受けない沖合地点の波浪（以下、沖波）を算出』、次に『沖波から海底地形を考慮した波浪の変形計算（以下、波浪変形計算）により設計波（堤前波）を算出』の2段階で構成される。

具体的なプロセスとしては、図-2に示すように①風のデータから時々刻々とした『沖波』を波浪推算、②統計解析により『沖波』による『50年確率波』を算定、③『50年確率波』に対して、海底地形による波浪の変化を考慮すべく波浪変形計算により防波堤前面の設計波（堤前波）を算出といった流れで検討する。なお、50年確率波とは、施設の供用期間50年間で、発生する確率がある波高の高い波浪のことである。これは、過去に発生した波高の高い波浪データを元に統計解析により求められる。

一方で、波浪データが十分に観測されている場合には、実測値を用いた沖波の設定が可能である。志布志港では、港内の波浪データとして、1980年からの観測値があるため、うねりの設計波の算定にあた

っては、図-2に示すように、①『観測データ』から『沖波』とその『50年確率波』を算出し、②『50年確率波』の波浪変形計算により『設計波（堤前波）』を算出するという手順で行った。なお、①については従来設計波にも適用可能な手法であるが、本研究では、一般的な算定プロセスと異なり、観測値をベースにうねりを算定した場合のケーススタディとしてその内容についても併せて報告する。

以上に示す、本研究における問題解決のプロセスを踏まえ、本稿では、1) 波浪観測データの整理、2) うねりの抽出、3) うねりの50年確率波について各々で明らかになった課題とその解決方法について報告するとともに、最終的な結論である4) うねりによる防波堤の安定性照査についてその結果を考察する。

## 2. 波浪観測データの整理

志布志港では、防波堤から沖合約3kmの地点において、1980年～現在までの波浪観測が行われている。なお、観測地点は、前述した海底地形の影響を受けて波浪が変形する地点に位置する。

本章では、うねりの設計波を算定するにあたって、観測データを使用することとしているが、波浪観測データの整理における課題として明らかになった1) 欠測している期間の補完方法、及び2) うねりの中でも防波堤に影響を与える気象擾乱の抽出方法について報告する。

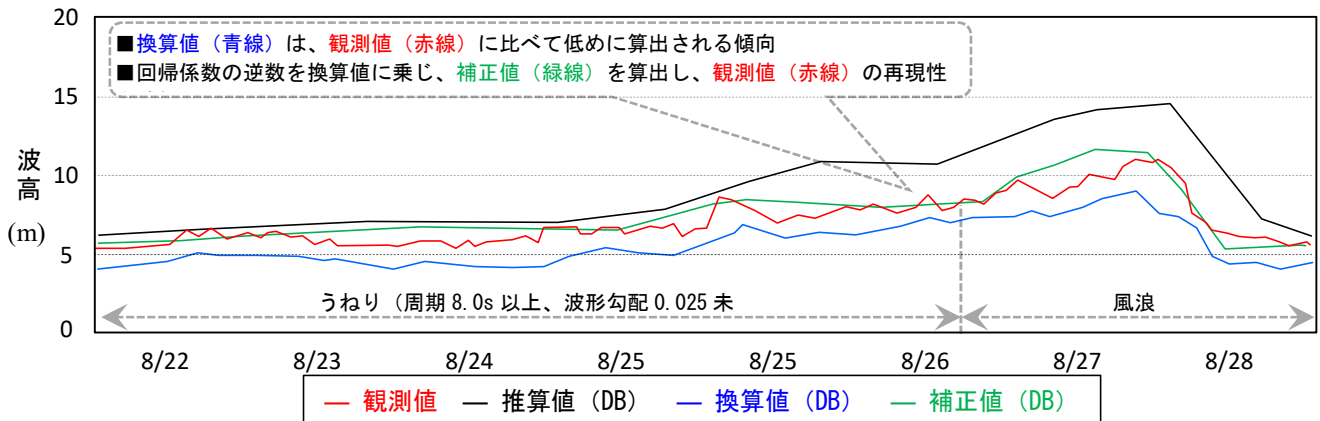


図-3 推算値 (DB) から観測値を再現した結果の例説図

### (1) 欠測期間の補完方法

欠測期間の補完方法として、日本気象協会が保有している既存の沖波地点の波浪推算 DB (以下、DB) の利用可能性を検討した。

前述したとおり DB は、海底地形を考慮せず算定された波であるが、観測データは海底地形の影響を受ける地点に位置する波浪である。また、DB の推算値と観測値はそもそも地点が異なるため、推算値をそのまま観測値の欠測期間に補完することはできない。

そこで、沖波地点である DB の推算値に対して、波浪変形計算を行い観測地点での欠測を補完する方法を検討した。検討にあたっては、補完の再現性を確認すべく図-3 に示すとおり波浪変形計算結果 (以下、換算値) と観測値の比較を行った。その結果、換算値は、観測値に比べて波高が低めに算出される傾向になった。

なお、換算値と観測値の差を解消すべく、補正する係数として換算値から観測値を求めるための回帰係数を算出し、その逆数を換算値に乗じることで、観測値の再現性を確保した。

以上を踏まえ、推算値 (DB) に対して、波浪変形計算及び回帰係数による補正を行い、観測値を再現した結果の例説図を図-3 に示す。図中赤線が観測値、黒線が DB の推算値、緑線が補正值 (波浪変形計算及び回帰係数を考慮) となっており、観測値を精度よく再現できたことが確認できる。なお、前述したとおり、本研究では、周期 8 秒以上、波形勾配 0.025 未満より、図-3 に示すようなイメージでうねりと風浪を区分する。

### (2) 気象擾乱の抽出

本研究では、図-3 のように波高の高い気象擾乱の前後期間から、うねりを抽出後、設計波を算定する。そこで、上述の方法にて欠測期間の補完を含めたすべての観測値から、防波堤の安定性に影響のある気象擾乱を抽出した。抽出基準としては、1980 年以降の各年における最大波高を抽出し、その中で最小となる 2008 年の 2.63m 以上の波高を有している擾乱とした。なお、擾乱の期間設定としては、国土交通省

で構築する波浪観測網で指定される志布志港の高波抽出基準である 1.0m として、図-4 に示すとおり、時系列で波高が 1.0m を超えてから、次に 1.0m を下回るまでを 1 事例とした。その結果、うねりによる設計波算定のベースとなる観測地点での擾乱として、197 ケースを利用可能なデータとして抽出した。

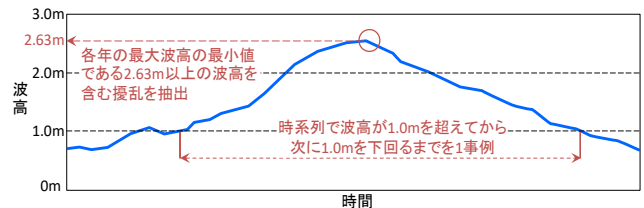


図-4 気象擾乱の抽出 (イメージ図)

## 3. うねりの抽出

設計波の算定においては、前述の図-2 にも示すとおり、沖波の 50 年確率波から波浪変形計算を行うことで、設計波 (堤前波) を算出することになる。特に沖波においては、本研究で対象としているうねりを抽出し、その上で、うねりの中でも波高が大きくなる極大値を波別別に整理し、それらの統計処理により 50 年確率波を算定することになる。

そこで、本章では、次の課題として 1) 抽出した観測地点での擾乱期間における波浪を沖波地点の値へ換算する方法、2) 換算された沖波地点の波浪からうねりを抽出し極大値を整理した内容について報告する。

### (1) 観測地点の波浪を沖波地点へ換算

観測地点の波浪を沖波地点に換算するには、沖波地点での波高、周期、波高が未知となる。そこで本研究では、図-5 に示す手順で観測地点の波浪を沖波へ換算する。

具体的には、①沖波地点 (赤丸) の仮の沖波を作成する。仮の沖波とは、沖波地点における既往の波



浪推算 DB (気象庁) から現地で発生すると想定される入射波高 (2.0m~14.0m) , 入射周期 (4.0s~16.0s) , 入射波向 (NE~WSW) を複数の組み合わせで仮定したものであ

る。次に、②仮の沖波を観測地点 (青丸) まで波浪変形計算し、観測地点の波浪を算出。最後に③『算出された観測地点の波浪』を前章で抽出した擾乱期間の観測値と比較し、観測値の波浪に最も近づく (波高、周期、波向の誤差が最小) 『算出された観測地点の波浪』の波浪変形計算前の沖波を、観測値に対する沖波と判定した。以上の方法にて、観測値を沖波へ換算した。

## (2) 沖波からうねりを抽出・極大値の整理

次に、換算された沖波地点の波浪からうねりを抽出する。具体的には前述したとおり、波形勾配が 0.025 未満かつ周期が 8.0s 以上に該当する波浪をうねりとした。

さらに、抽出したうねりの中から 50年確率波を算定するための統計解析に用いるデータとして、気象擾乱 197 ケースを対象に志布志港で発生する E~S の波向別の波高が高くなる極大値を整理した。

## 4. うねりの 50 年確率波算定

前章において 50年確率波を算定にするにあたっての極大値データを整理した。以降は、極大値のデータから 50年確率波を統計解析により算出する必要があるが、通常的设计波とは異なるうねりの特性を考慮した統計解析の条件を設定することが課題としてある。

そこで、本章では、統計解析の条件設定として考慮した 1) 波向の重ね合わせ、2) 足切り値の設定、3) 統計解析の結果 (従来との比較) について報告する。

### (1) 波向の重ね合わせ

50年確率波については、波向毎に極大値を統計解析することで、波向毎の 50年確率波を算定する。その際、従来の方法であれば、例えば、表-1 に示すとおり、SE 方向の極大値を整理する場合、その両隣の方向も合わせて、3 波向の中から、最大値となる波高を SE 方向の極大値として抽出 (3 波向の重ね合わせを考慮した極大値の抽出) する。その結果、黄色ハッチングを使用して SE 方向の統計解析を行うこととなる。これは、従来の設計波である風浪は、その場で多方向の風が吹いて発生するため 360 度の波向が発生する可能性があるためであり、安全側の設計として、この方法が採用されている。

一方でうねりは、遠くから伝播して来る波であり、ある一つの対象地点 (志布志港) に入ってくるうねりは、対象地点に入ってくる波向のうねりしか発生しないため、対象地点で発生するうねりの方向集中度が高くなるという特性がある。

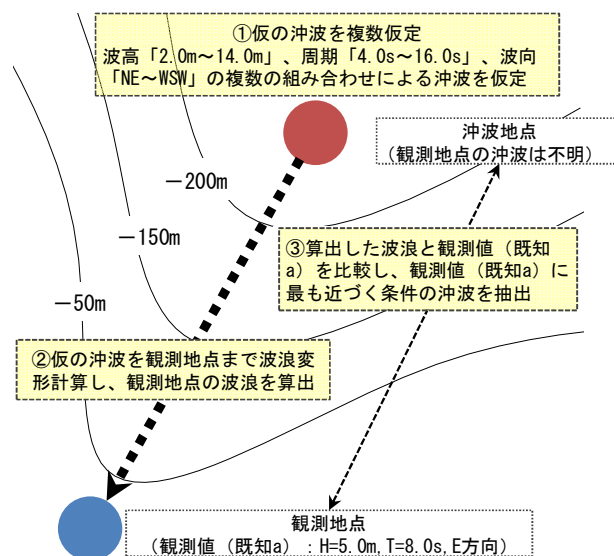


図-5 観測地点の波浪を沖波地点へ換算 (イメージ図)

表-1 『3波向の重ね合わせ』を考慮した極大値の抽出例

開始	終了	ESE	SE	SSE
1980/5/12 ~	1980/5/24	4.64	4.60	0.78
1980/9/9 ~	1980/9/12	3.24	3.56	3.13
1980/10/10 ~	1980/10/14	4.49	2.71	1.62
1981/3/12 ~	1981/3/14	-	2.54	-
1981/8/19 ~	1981/8/22	4.34	3.31	-
1981/8/29 ~	1981/9/4	-	3.93	4.88
1981/9/29 ~	1981/10/2	5.53	-	-
1981/10/18 ~	1981/10/23	5.99	4.54	-

赤字: 1波向の抽出波高、黄色ハッチング: 3波向の抽出波高

3 波向を考慮すると SE の波がほとんど抽出されない

また、図-6 に示した志布志港の平均波向の経年変化図 (波高 1m 以上) によると、観測される平均波向は SE 方向が支配的であるにも関わらず、表-1 に示すとおり、3 波向で極大値を整理した場合、ESE 方向の波高を抽出している箇所が多く、SE 方向については 2 ケースしか抽出されない。

以上を踏まえると、うねりはその特性として、方向集中度が高い上に、志布志港におけるうねりの実態としても SE 方向に集中することから、3 波向で極大値を整理する方法は 1 波向と比較して、50年確率波高を必要以上に高めに算定すると考えられる。

そこで、うねりの 50年確率波の精度をより確保できるものと考え、本研究では、志布志港におけるうねりの特性を考慮して、1 波向で極大値を整理する方法を採用した。

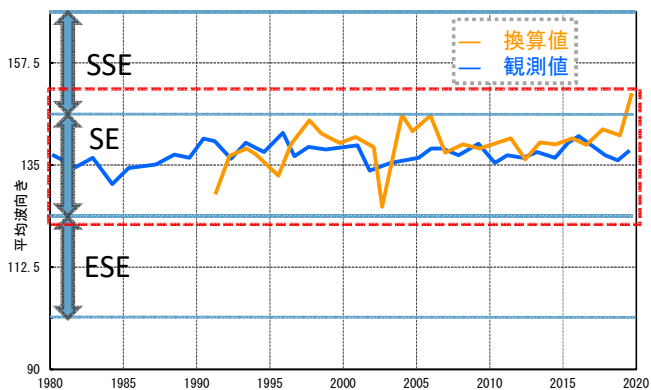


図-6 志布志港の平均波向の経年変化図

## (2) 足切り値の設定

次に 1 波向で整理された極大値により波向毎に統計解析を行って、50 年確立波を算定することになる。従来この統計解析においては、整理された極大値の全てを統計解析に使用することにはならず、志布志港では 3m 以上の極大値のみを抽出（足切り値 3m）していた。

一方、今回の研究対象であるうねりの特性を踏まえた 50 年確率波の算定について考慮すると、従来の設計波（風浪）と比較してうねりは周期は長い、波高が低くなる特徴がある。そのため、従来の足切り値 3m の場合、統計解析に使用する極大値のデータ数が少なくなることに加え、本来残すべき低波高のデータを算定対象から除外し、確率波高を高め設定してしまうという課題があった。

そこで、本研究においては、足切り値の設定として、波向別に、各年における最大波高を抽出し、その中で最小となる値（年最大波高の最小値）を足切り値として、設定することとした。

## (3) 統計解析の結果（従来との比較）

以上に示したように、本研究においては、うねりの特性を考慮した統計解析の条件設定として、波向の重ね合わせを『3 方向⇒1 方向』、足切り値を『3m⇒年最大波高の最小値』を設定することとした。それらを踏まえて行った統計解析の結果（50 年確率波）について、従来の設定条件の結果と比較したものを図-7 に示す。

波向として支配的である SE 方向の波高に着目すると、今回の設定条件では 10.60m、従来の設定条件では 10.84m となり今回の設定条件は、波高が低めに算定されている。また、SE 方向以外の波向でも従来の設定条件に対して -0.29m～-3.03m と今回の設定条件が低い傾向となった。

この比較結果は、足切り値を 3.0m とすると本来残すべき低波高のデータを除外するため、うねり性波浪の確率波高が過大に算定される可能性がある。

しかしながら、うねりの特性を考慮した今回の設定条件とすることで、より精度の高いうねりの 50 年確率波を設定できたと評価できる。

また、参考として図-8 に従来とうねりの 50 年確

率波の比較を示す。波高は全体的に 5～7 割程度低くなっている。また、周期は ESE～SSE で 1～2 割程度長くなるが、波向 E と S ではほぼ同じ周期となった。うねりは方向集中度が高いため、波向により周期の差が顕著に表れていることが分かる。また、波向によって、確率波高値や周期値の傾向がかなり特徴的である。

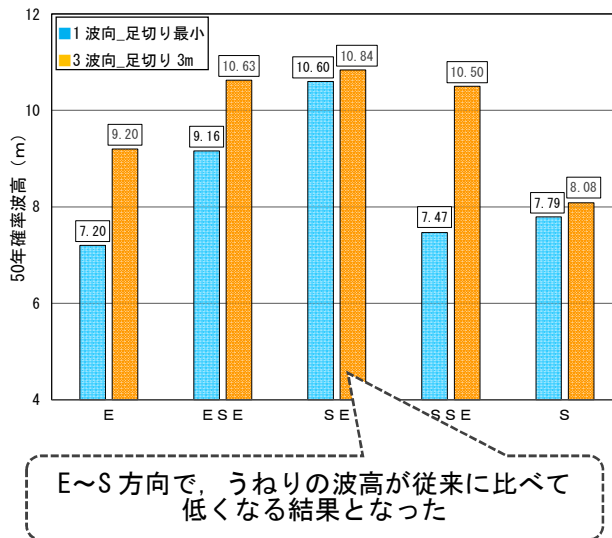


図-7 統計解析の結果（従来との比較）

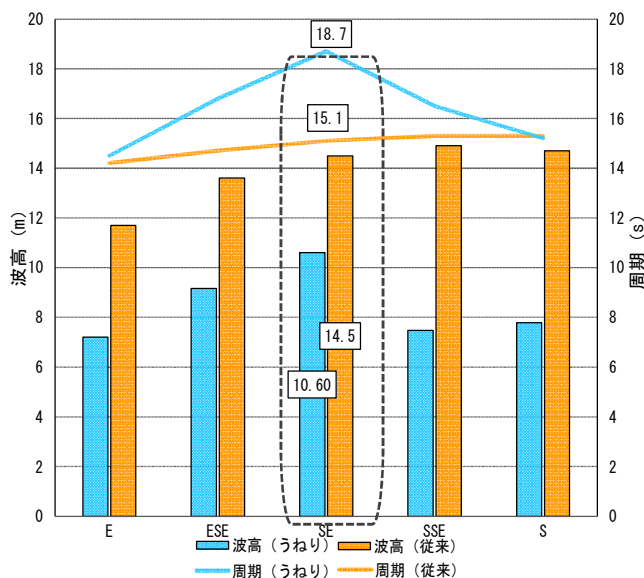


図-8 従来とうねりの 50 年確率波の比較

表-2 従来とうねりの設計波（堤前波）による防波堤の安定性照査の比較結果

うねりは従来の設計波に比べて Hmax が 0.8m 低く、周期は 6.1s 長い

工区		I-1		工区		I-1	
設計波 (従来)	Hmax (m)	11.6		Hmax (m)	10.8 (-0.8m)		
	H1/3 (m)	7.7		H1/3 (m)	6.5 (-1.2m)		
	T1/3 (s)	14.0		T1/3 (s)	20.1 (+6.1s)		
潮位		HWL+2.4m	LWL±0.0m	潮位		HWL+2.4m	LWL±0.0m
作用耐力比 ≤1.0	滑動	1.06	1.04	作用耐力比 ≤1.0	滑動	1.05	0.97
	転倒	0.46	0.43		転倒	0.45	0.40
	基礎の支持力	0.84	0.83		基礎の支持力	0.82	0.77

従来とうねりの滑動の作用耐力比は同等の値となった

## 5. うねりによる防波堤の安定性照査

うねりの 50 年確率波を算定できたことから、図-2 に示すように 50 年確率波に対して、波浪変形計算を行って防波堤前面の設計波（堤前波）を算出後、それにより防波堤の安定性を照査した。

志布志港の防波堤の各工区の堤前波を波向別に算定したところすべての工区において波向 SE における最高波高（堤前波）が最大となったため、うねりによる設計波の波向は SE 方向とした。

また、志布志港の防波堤延長は 4200m と長大であるため、既設断面で滑動安全率が最も小さい断面を対象断面とし、従来とうねりの設計波による安定性照査を行った。

対象断面における従来とうねりの設計波（堤前波）による防波堤の安定性照査の比較結果を表-2 に示す。まず、設計波（堤前波）を比較すると、うねりは従来の設計波に比べて Hmax が 0.8m 低くなっているが、周期が 6.1s 長くなっている。

その設計波を用いた安定性照査結果を示すのが作用耐力比の『滑動』、『転倒』、『基礎の支持力』である。作用耐力比は、構造物の耐力に対して設計波の波圧による作用の比率を示すものであり、1 未満になれば、安定性は確保できていることを示す。

結果として、従来、うねり共に『滑動』で安定性を確保できないことが判明し、特に HWL（最高潮位）時の作用耐力比は、従来が 1.06、うねりが 1.05 となり同等の値となっている。

うねりは波高が低いにも関わらず、安定性を確保できていない結果となっているが、その理由としては、波圧の算定式で説明が可能である。波圧の算定式では、直接的に T（周期）は入力値とはならないが、L（波長）を入力する必要があるが、波長が長くなるほど、波圧が大きくなる算定式となっている。さらに、波長は周期の 2 乗として算出されるため、周期が長いほど、波圧としては大きくなるためである。

以上のように本研究では、安定性が危惧されるデータを所得するに至った。これまで想定外としてい

た自然災害に対する国土強靱化を図る上では、重要インフラの機能維持の新たな視点として、九州の防波堤においても、うねりの影響を考慮した方策の必要性を確認し、そのための設計手法の確立が急務であることの検討課題を得た。

## 6. おわりに

うねりの影響は、海域の地域特性にも大きく起因すると考えられる。そのため、本研究で得られた課題に対する今後の具体的な検討プロセスとしては、①海域の位置・形状や、発生するうねりの頻度・特徴（波高、周期、波長）等を踏まえ、明確な設計対象海域を設定した上で、②それらの設計対象海域の地域特性に応じたうねりの設計波算定手法の確立を急ぐ必要がある。

本検討で得られた主要な成果は以下の通りである。

- うねりに関する設計波の設定方法
  - うねりによる 50 年確率波を算出するための統計解析において、うねりの特性を考慮した条件設定として、『波向の重ね合わせ』や『足切り値』について従来と異なる手法を示した。
  - うねりの設計波を算出するにあたり、1980 年以降の波浪観測データの利用について検討し、欠測期間の補完方法について示した。
  - うねりの沖波を算出するにあたり、防波堤の前面付近に位置する波浪観測データを沖波へ換算する方法について示した。
- うねりに関する防波堤の安定性照査
  - 従来とうねりの設計波では、同程度となる被災のリスクを示した。

## 参考文献

- 平山克也, 加島寛章, 伍井稔, 成毛辰得: うねりによる高波の発生確率とその他地域特性に関する考察, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.7, No.2, 1\_85-1\_90, 2015.



# 異なる計測手法から得られた河川流量値の違いに関する検討

萬矢 敦啓<sup>1</sup>・後藤 功次<sup>2</sup>・山本 晶<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立開発研究法人土木研究所 水工研究グループ水文チーム (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

<sup>2</sup> 国土交通省中部地方整備局河川環境課 (〒460-8514 愛知県名古屋市中区三の丸 2-5-1)

著者らは中部地方整備局管内の 36 箇所の水位流量観測地点において、5 ヶ年にわたり、従来型及び新手法を用いた洪水流量観測を実施してきた。一方で我が国の河川は流砂系であり、いろいろな種類の河床波が条件に応じて発生し、それにより流況が大きく影響を受ける。そのため異なる手法から得られた流量値に違いが出ることは否めない。本稿は河床波による流れへの影響を概説する。また得られた計測結果から従来型・新手法による流量の相対差が水位が低い場合は数 10%になること、水位が高い場合は 10%程度であること、その差は流量の不確実性を考慮することで無視できるほど小さくなることを示した。

キーワード 高水流量観測、浮子測法、河床波、非接触型流速計、流量の不確実性

## 1. はじめに

国土交通省による水文観測は昭和 25 年の水理調査として体制が確立され、それ以降観測が継続されている。現在の年表として継続されている観測所は 28 カ所であり、これらは 70 年に及ぶ歴史を持つ<sup>1)</sup>。このようなデータは地球温暖化の検討、河川計画の立案等を実施する中で大きく貢献してきている。例えば河川砂防技術基準の計画編第二章計画編<sup>2)</sup>では基本高水の設定に関して概説している。ここでは複数の流量算定結果を算定しているが、それらは直接的に計測された流量値や、降雨流出解析から間接的に得られたものがあるが、直接的にも間接的にも浮子測法で得られた結果が採用されている。

近年、音響<sup>3)</sup>・電波<sup>4)</sup>・画像技術<sup>5)</sup>を用いた流量観測手法が実用に資する技術として紹介されてきている。これらの新しい技術は近年の UAV 技術の発達と共に計測手法に広がりを見せている<sup>6)</sup>。これらは浮子測法と比較すると、無人又は省人化であることが優位である一方で、測定結果に関して、従来型の観測手法と比較すると同時に計測した結果であったとしても異なる値が得られていることを示す報告が出てきた。例えば原田ら(2006)<sup>8)</sup>は浮子と ADCP による流量値を比較して、浮子測法が 30%程度大きい流量を計測していることを報告している。また木下は ADCP 流量に対する現行流量の差の頻度分布を出し、その差が最大で 40%程度であることを示している<sup>9)</sup>。

これらの報告は水位が低い条件で計測されていたことが特徴的である。

平成 28 年 8 月北海道豪雨は災害を伴う出水となった。その中の一つの空知川幾寅水位流量観測地点近傍の橋梁が被災し、浮子測法が困難となり、従来型の代替として新技術を用いた実績結果が紹介されている<sup>10)</sup>。その後も代替として新型流速計を使用する機会が増えてきているようであるが、原田らや木下の指摘したように異なる手法から得られた流量値に違いがあるのであれば、その原因を解明しておく必要がある。

著者らは中部地方整備局管内の合計 36 箇所、5 出水期において複数の手法で流量観測手法を試行すると共に、新手法と従来型により計測された流量値を比較した。また我が国の河川は流砂系の自然河川である。このような河川において流量値を計測することは簡単ではない。本稿は流況に及ぼす河床波に関する概説から始め、各計測手法の特徴、合計 394 箇所の観測データから得られた計測結果の違いとそれに対する考え方を概説する。

## 2. 流況に影響を及ぼす自然現象

我が国の河川は流砂を伴う河川であり、土砂輸送を伴う。それにより川幅のスケールで説明されるような河床形状がつくる波(以後、河床波)、水深規模のスケールの

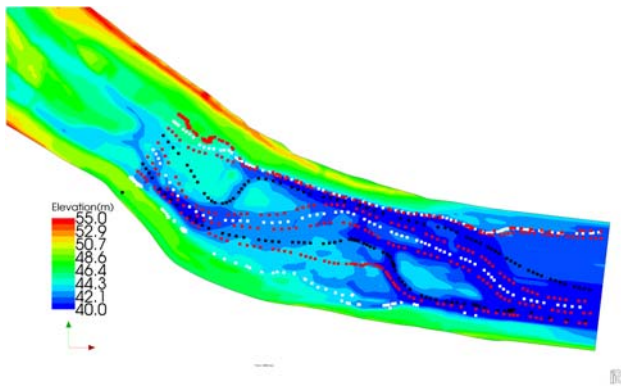


図-1 河床高と平面流況（低水位の場合）

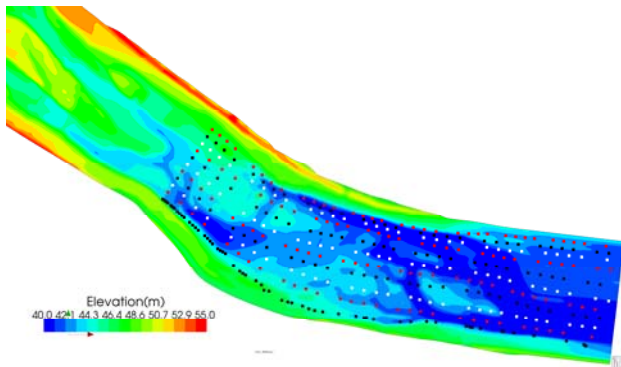


図-2 河床高と平面流況（高水位の場合）

河床波(以後、小規模河床波)が発生する。また我が国の洪水を引き起こす気象現象の一つは台風であり、強風を伴う場合がある。これらの現象は独立して河川水の流況に影響を及ぼす。

### (1) 河床波による平面流況

図-1 及び図-2 はある河川の河床形状とトレーサーを用いた流況を示す。流況は同河床形状を用いて平面二次元計算により再現されたもので、それをパーティクル解析を実施し図化したものである。これらの一連の作業では iRIC の Nays2DH を採用した<sup>11)</sup>。図-1 が示すように本計算で採用した河道は河床波が良く発達していて複雑な流路が存在する。この河床形状に対して砂州の波高と同等の水位を持つように流量を上流端から与えると、図-1 のパーティクルが示すような流況となる。すなわちパーティクルは砂州の形状に従い、その縁を沿うように流れる。また流路が左岸から右岸へ移動した場合、パーティクルもそれに従い流れる。一方で図-2 は本河道における計画規模の流量を用いたときの計算結果である。ここでは局所的な河床形状の影響を受けることなく、堤防ラインと並行に流れるようになる。図-1 及び図-2 から理解できることは水位が低い場合は横断方向及び縦断方向の流れが発生するが、水位が高くなるに従い、縦断方向の流れが卓越することである。

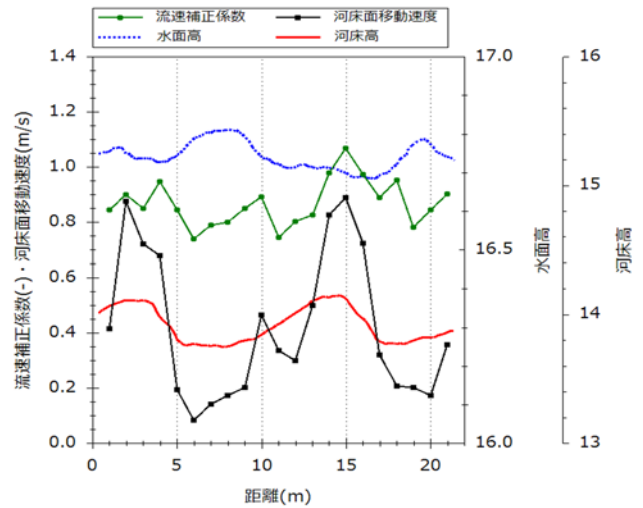


図-3 ADCPにより計測された河床高、水面高、流速補正係数<sup>13)</sup>

### (2) 小規模河床波による水深方向の流速分布

水深方向の流速分布は小規模河床波の影響を強く受ける。出現する小規模河床波の種類は掃流力により異なり、またそれぞれの河床の凹凸の程度もその種類により異なる。中でも岸・黒木の分類<sup>12)</sup>による砂堆Ⅱの凹凸が大きく水深方向の流速分布に最も影響を及ぼす。例えば図-3 は ADCP により計測された小規模河床波上の河床、水面、流速補正係数<sup>13)</sup>を示す。この流速補正係数は ADCP により計測された水面近傍の流速と鉛直方向の平均流速の比である。

図-3 が示すものは二つの河床波により形成された水理量である。河床高に着目すると横軸が 3m, 14m 近傍で河床波の凸部となる。この位置においては水面が凹部となる。一方でこの位置における流速補正係数は 1 程度となる。また横軸が 6m 近傍では河床波の凹部となり、流速補正係数は 0.8 以下となる。また 9m 近傍では 0.85 程度となる。流速補正係数が 1 となる場合は表面付近と河床近傍の流速値がほぼ一緒になることを意味している。一方で 0.8 以下に関して、発生箇所は凹部の河床近傍で、この内部では逆向きの流れも発生する。その結果、表面付近の早い流速と河床近傍の遅い又は逆向きの流速があることで、流速値が広く分布する。他方、0.85 となる場合、一般的な対数分布で近似できるような流れであり、このような流れは河床が平坦なときに特にみられる。

また小規模河床波の波長は水深の 6 倍程度であることが報告されている<sup>14)</sup>。また砂堆の伝播速度は 1cm/s 程度であることも報告されている<sup>15)</sup>。このように河床波に関する研究が進むことで、今後、流量観測の高精度化のヒントになる可能性がある。

### (3) 風による表面付近の流速の影響

鉛直方向の流速分布に大きな影響を与えるものとして風の存在は無視することができない。特に台風等の影響

で一定方向の強風が長時間卓越した場合には表面流速が強く影響を受ける。それは風速の割合として評価され、複数の報告がある。例えば土木研究所ら(2006)<sup>16)</sup>は 1.6%、恩田ら(2016)<sup>17)</sup>は 8.2%、本永ら(2013)<sup>18)</sup>は 7.4%、柏田ら(2012)<sup>19)</sup>は 4.4%と報告している。

### 3. 各計測手法の特徴

流量観測は大きくわけて二つに分類できる。これらは区分求積法とベクトル解析の一つである線積分から算定する方法（以後、線積分法）である。

区分求積法は流量観測地点の川幅から断面数を決定し、河道に垂直な流速成分である流速値を計測し、別途得られた水深、各断面幅の情報から流量値を算出するものである。水深に関して測定した水位と河床高から各断面ごとの水深を求める。河床高に関しては洪水前後で計測し、河床変化が認められた場合は河積が最大となるように河床高を採用する。またここで必要な断面数は川幅に応じた数が基準化されていてそれらは水文観測<sup>2)</sup>等に詳しい。流速値に関してはいくつかの手法があるが、ここでは従来手法である浮子測法、非接触型流速計(電波測法、画像手法)が実用に資する技術として紹介されている。

一方で線積分法は ADCP 法のみの特化した手法で、これは ADCP が河川の流況と ADCP を搭載した舟艇そのものの移動ベクトルを計測することで数学的に厳密な流量値を得る手法である。また ADCP 法は流況に応じて変化すると考えられている鉛直方向の流速分布、その時の水深を計測していることから水理学的に最も仮定の少ない手法であると言える。

流量観測で最も重要なのは河道内の流れの理解と、その理解に応じた各手法による計測値の代表性である。以下、これらの手法の流速値を得る方法を概説する。また以降、浮子測法を従来型、非接触型及び ADCP を新手法とする。

#### (1) 浮子測法：従来型

浮子測法を概説するが、詳細は参考文献<sup>1)</sup>を参照されたい。同手法の特徴は、二つの見通し線の設定と修正係数である。見通し線に関しては、浮子の投入地点から 50m 程度の助走区間をへて 100m 程度離れた第一見通しと第二見通しの間の流下時間を計測し、その結果から流速値を算定する。ここでは直線的に流れることを前提としていることが特徴的である。また各水深に応じて浮子の長さが規定され、大雑把に考えると水深の 4 から 8 割程度を代表した流れの計測となる。また浮子の長さに応じた修正係数を用いることで修正流速(一般的には鉛直方向平均流速)を算定している。

#### (2) 非接触型流速計(電波・画像)：新手法

電波式流速計は山口ら(1994)<sup>9)</sup>に紹介され以降、我が国においてもいくつかの観測所において計測結果を蓄積してきた。本手法はマイクロ波を利用した CW レーダ技術の活用例で、送・受信波の周波数差から流速値を算定するものである。同手法は表面流速を計測する手法であること、観測対象は 10m 程度の楕円領域であり、その内部の最大値を観測することが特徴的である。

画像解析手法による手法で、流量観測に最適な手法は Space Time Image Velocimetry (STIV)<sup>20)</sup>である。本手法は流量観測対象水位における流れと並行に検査線を引き、検査線上の対象物質の動きを時間展開することで流速値を得る。検査線の長さは計測時間によるが、大雑把に考えると 10m 程度である<sup>21)</sup>。

これらの非接触型手法は、表面流速を計測していること、流速成分は計測者の意図に応じて抽出される。

#### (3) Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)：新手法

ADCP を活用した一つの計測方法は本機器を専用ポートに搭載し、水面から川底に向けてるように設置をし、橋からロープを用いて横断方向に操作する方法である<sup>21)</sup>。この手法の特徴の一つは、川底の形(河床形状)、三次元的な流速分布を計測することである。これらの情報を用いて得られた流量値は水理学的に仮定を用いることなく流量値を得ているために、得られた結果に対して不確定要素が少ないことである。一方で流況によっては計測が困難になる場合がある。特に水面に波が発達し、大きく振動するような場合には計測を実施することは簡単ではない。

## 4. 比較観測の結果

### (1) 観測概要

本章では異なる手法により得られた流量値の違いを考察する。本稿で採用した中部地方整備局管内の水位流量観測所は 36 地点であり、流量観測を実施した期間中に一時間に一度の二つの手法による比較流量値を取得した。このような観測をこれまで 5 年間実施し、394 点の比較観測値が収集された。また一つの比較観測値は、3 章で示した従来型と三つの新手法から選択された一手法の組み合わせとなる。新手法に関しては電波が 247 点、画像が 123 点、ADCP が 24 点となった。なお、本観測値の中には明らかに間違った計測を実施しているものも混在していた。その理由は画像解析に関しては画角の設定が適していなかったこと、局所的な渦の発生により流況が計測に適していなかったこと等であった。それらを精査



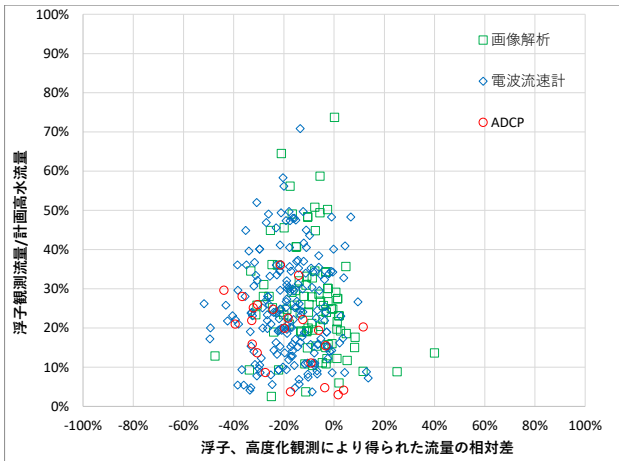


図-4 従来型と新手法で計測した流量値の相対差と流量規模の関係

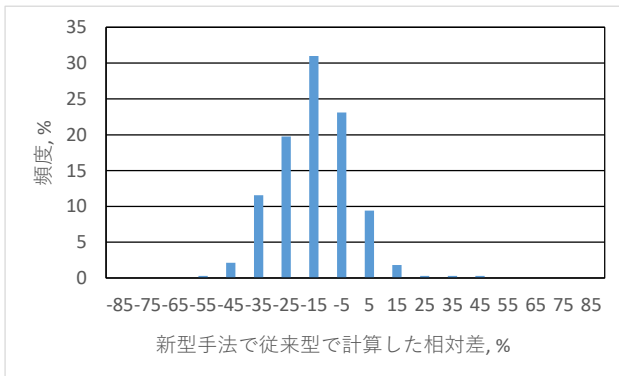


図-5 従来型と新手法で計測した流量値の相対差と頻度分布の関係

した上で合計 324 個の比較流量値を採用した。また非接触手法である電波式流速計、STIV 法に対しては流速補正係数を 0.85、風による影響に関しては 1.6%を採用している。

## (2) 観測結果

図-4 は異なる手法で得られた流量の相対差と流量規模を示すものである。横軸の相対差は{(新手法-従来型)/従来型}で算定される。縦軸は従来型で計測された流量値を計画高水流量で無次元化したものである。図-4 が示すように、流量規模が小さい時、相対差は大きく幅を持った数値となり、数十%の差を持つこともある。一方で流量規模が大きくなるとその差は小さくなり-10%程度を中心とした幅の狭い領域に収束する。

図-5 は同じデータを使用して算出した頻度分布である。横軸は図-4 と同様に新手法と従来型で得た観測結果の相対値、縦軸はその頻度の割合である。例えば横軸の-15 は-20%から-10%の間になる頻度の割合となる。図が示すようにに負を持つ値が全体の 90%を超えることが理解できる。

## (3) 結果の考察

本稿において、2 章では流砂系における河床波による流況を平面方向及び鉛直方向の流速分布として概説した。3 章では各流量観測手法の特徴を概説した。また本章では 324 個の比較流量値を採用し、議論した。以降、これらをまとめ、以下のように考察する。

### a) 水位が低いときの相対差

図-4 が示したように流量規模が小さいとき(例えば 10%)の相対差は、流量規模高いとき(例えば 60%)とくらべると大きく、多くは-40%から+10%に分布している。これは図-1 で示したように浮子測法の特徴とそのときの河床形状、それによる流況が強く影響している。すなわち、水位が低いときは浮子は河床形状に沿って流れるため、浮子測法的前提である直線的に流れることを期待することが難しい。このような形状も河道特性により大きく異なり一般性を求めることも困難である。また新手法は取得したい流向を計測者が選択することができるために河床波による横断方向の流速の影響を受けない。このように横断方向流速の影響を受ける従来型とそうでない新手法の差を検討しているために、このような水位条件の下では相対差は大きくなるのが推測される。また図-5 が示したように相対差は負の値を持つ場合が 90%近くをしめる。これは浮子が滞筋上の早い流れに引張られ、想定以上の早い流速を取ることになり、このような傾向が出るのではないかと推察する。

### b) 水位が高いときの相対差

図-4 が示すように流量規模が大きいとき(例えば 60%)の相対差は-20~0%程度の範囲の値を持つ。これは図-2 が示すように流況が河道に対して平行であることから、河道には縦断方向の流れが卓越する。このような条件においては横断方向の流れを考慮する必要はなく、鉛直方向の流速に対する各計測方法の違いだけを議論する必要がある。なお、水位がさらに上昇し流量規模が 100%近くに到達するとさらにその傾向が顕著となり、相対差は-15~5%程度の範囲を持つ値になることが想定される。

浮子測法は吃水率が 0.4~0.8 程度の値を持つことから水面から 4~8 割水深の流れを代表した流速値を得る。また、例えば水深が 3m 程度あれば小規模河床波の波長は 18m 程度となることを考慮すると両見通し間である 100m という意味は、浮子が 5 波長程度の河床波の上を流下することになる。図-3 が示したようにその間に鉛直方向流速が大きく変動することから、浮子測法が算定する流速値はそのような流況で得られた結果である。

一方で非接触型流速計は表面流速の計測である。そのためにも風も含めて鉛直方向の流速分布の影響を直接的に受ける。本観測では風の影響を 1.6%とし、流速補正係数を 0.85 としている。それぞれの小規模河床波の位置は

観察されていないこと、図-3 で示した数値を一般化することは難しいため、厳密な流速補正係数を設定することは困難である。また前述のように風の影響評価は文献によって多少のバラツキがある。

本節では浮子観測と非接触型測法に関して両者の計測結果に与える鉛直方向の流速分布に関して想像を膨らませた。しかしながら小規模河床波に対する記録がない以上、それぞれに使用しているパラメータの妥当性を議論することができない。いずれにしても最も重要なことはこのような条件において計測結果があること、その差が10%程度であったという事実である。このような結果を受け、以下の二点を重要な結論と考えている。1) 両者の差は10%程度であること、2) 計測結果の善し悪しを評価することはできないことである。

## 5. 流量値の不確実性

### (1) 国際基準による定義

国際基準機構(International Standard Organization; ISO)は工業分野の国際規格を策定するための組織であり、その中の技術委員会(Technical Committee; TC)の一つである TC113 が水文計測を担当している。ISO の技術基準の一つである ISO/TS25377: Hydrometric Uncertainty Guidance (HUG)が不確実性を規定し、ここでは「計測結果の品質に関する記述は、技術基準で決められたすべての測定で記述され、このような記述がないような状況で二つの計測を比較することができない」とある。ここでいう全ての計測とは3章で示したように区分求積法であれば、流速、水位、河床高、川幅となる。品質は一般的には計測精度のことであるが、これらを考慮すると計測結果の真値は幅を持つ値となり、以下の式で示される。

$$Q = \bar{Q} \pm u(Q) \quad (1)$$

ここで  $Q$ : 真値,  $\bar{Q}$ : 計測結果,  $u(Q)$ : 流量の不確実性で数学的には  $2\sigma$  程度となる。複数の流量観測値がある場合、それぞれが示す値の範囲が部分的にでも一致する場合、両者は等しいと考えることができる。

### (2) 不確実性を考慮した流量値の算定

これまでの知見を基に不確実性を考慮した流量値を算定してみる。ISO/TR8363 によると浮子測法の不確実性は10%としている。今、式(1)の  $\bar{Q}$  を  $3,000 \text{ m}^3/\text{s}$  とすると  $u(Q)$  は  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  であることから  $Q_{\text{浮子}} = 2,700 \sim 3,300 \text{ m}^3/\text{s}$  となる。一方4章で記述したように新手法から得られた値は浮子測法と比較して10%程度低いことが統計的に理解されている。また新手法の不確実性を10%と仮定する。それらを勘案すると式(1)のそれぞれの値は  $\bar{Q} = 2,727 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $u(Q) = 272 \text{ m}^3/\text{s}$  となり  $Q_{\text{新手法}} = 2,455 \sim 2,999 \text{ m}^3/\text{s}$  となる。

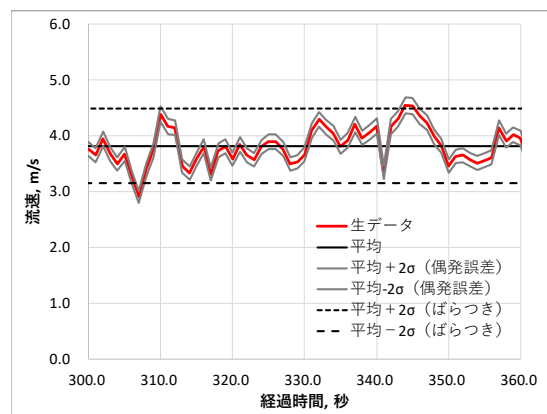


図-5 電波式流速計により計測された流速値の時間変化

よってこれらは同じ範囲の値となることから両者は正しいと言える。この議論において、浮子測法及び新手法の不確実性を10%として計算した。この値に関しては今後も検討する必要がある、それには河床波に関する研究が一つのヒントになりえる。

### (3) 計測結果のバラツキと不確実性の違い

我が国の河川は流砂系であり河床波の発生により流況に大きな影響が及ぶこと、乱流場であることを考慮するとISOが算定する不確実性よりももう少し大きいバラツキが発生する可能性が高い。特に小規模河床波による流速分布の変化はその代表例であるが、それは流速計測のみならず水位変動にも影響を及ぼす。このような変動がある場合、変動の一波長程度分の時間平均が必要となる。このように小規模河床波の理解とそれに応じた計測手法の工夫がバラツキの小さい結果を得ることになる。

例えば図-5 は電波式流速計の定点観測の結果の一部を標記している。横軸が経過時間で縦軸が流速である。データとしては生データ、同期間の平均値、偶発誤差としての平均  $\pm 2\sigma$ 、ばらつきを考慮した平均  $\pm 2\sigma$  を示す。ISOの規定する不確実性はこの偶発誤差と同値である。この偶発誤差は仕様に精度定格として記述され、例えば横河電子機器の電波式流速計の場合は「 $\pm 2\%$  of R<sub>dg</sub>  $\pm 0.05 \text{ m/s}$ 」とある。例えば流速値が  $4 \text{ m/s}$  であるとする精度規格は  $0.13 \text{ m/s}$  となる。一方でここで示すばらつきは図-5 の観測期間における生データの統計値として算出したものである。図が示すようにバラツキは  $0.6 \text{ m/s}$  となる。このようにこのバラツキと不確実性は大きく異なる。前述のようにこの計測の代表性は平均時間を長くすることで担保される。逆に長すぎる場合は時間変化が混ざる。流速の代表値を取得するためには、十分長い計測を最小取得間隔で計測して、平均の仕方を工夫する必要がある。その平均の仕方を一般化することは簡単ではない。

## 6. まとめと今後の検討

本稿で議論した内容をまとめとして以下に列挙する。

- 1) 砂州や複列砂州の河道における流況を平面二次元計算により再現した結果、a) 水位が低い場合、横断・縦断方向の流れが発生するが、一方で b) 水位が高くなるに従い、縦断方向の流れが卓越する。
- 2) 小規模河床波が発生する場合は鉛直方向流速又は流速補正係数が河床の凹凸に応じて変化する。
- 3) 中部地方整備局管内の合計 36 箇所 で 5 ヶ年 に わた り 従 来 型 と 新 手 法 の 比 較 観 測 を 実 施 し た 。 両 者 の 相 対 差 は 1)a) の 条 件 で は 数 十 % と な る 一 方 、 1)b) の 条 件 に お い て は 10% 程 度 と な る 。
- 4) 今後 3) の 10% の 違 い を 評 価 す る た め に は 小 規 模 河 床 波 に 関 す る 検 討 が ヒ ン ト と な る 可 能 性 が あ る 。 現 状 で は 、 そ の よ う な 情 報 が な い 以 上 、 1)b) の 条 件 に お い て は 計 測 手 法 の 善 し 悪 し を 評 価 す る こ と も 出 来 ない 。
- 5) 4) の 差 に 関 す る 解 釈 を 流 量 観 測 の 不 確 実 性 か ら 議 論 し た 結 果 、 こ の 差 は 無 視 で き る ほ ど 小 さ く な る こ と を 示 し た 。

最後に今後検討すべき項目を以下に列挙する。

- 1) これまで流量観測による観測値は一つだけであった。しかしながら異なる手法が出てくることにより、比較できるようになってきた。
- 2) そのためには流量観測の不確実性を取り入れる必要がある。一方でそれらを算定する必要がある。
- 3) 近年の大規模出水の頻発と社会情勢の変化により流量観測の無人化・省人化は必須となる。
- 4) 著者らの実施した観測では残念ながら 70 個の観測値を欠測扱いとしている。
- 5) 今後は 3) の理由により新手法を採用すべきであるが、データ欠損をなくすためにも、観測手法、得られたデータの解釈、データ欠測時の取扱い等を含めて技術を習熟する必要がある。

**謝辞：**本稿の4章で用いた観測データは中部地方整備局が開催した流量観測高度化検討会の成果です。この場をお借りして歴代の主たる担当者である河川部総合土砂管理官、小野秀樹殿、庄内川河川事務所副所長、村田智孝殿、河川部河川計画課課長補佐、原幹彦殿に対して、この場を借りて深く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 水文観測：建設省、平成 14 年
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準計画編、2020。

- 3) 例えば木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案、水文・水資源学会誌、Vol.11, No.5, pp.460-471, 1998.
- 4) 例えば山口高志・新里邦生：電波流速計による洪水流量観測、土木学会論文集、No.497/II-28, pp.41-50, 1994.
- 5) 例えば藤田一郎・河村三郎：ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み、水工学論文集、第 38 巻、pp.733-738, 1994.
- 6) 藤田一郎ら：マルチコプターから撮影されたブレ動画の高精度補正に基づく Aerial STIV の開発、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.71, No.4, I\_829-I\_634, 2015.
- 7) 小関博司ら：UAV 搭載型電波式流速・水位計を用いた流量推定手法の提案、河川技術論文集、pp.219-224, 2019.
- 8) 原田靖生ら：浮子観測の洪水流量計測精度に関する基礎的検討、水工学論文集、第 51 巻、pp.1081-1086, 2007.
- 9) 木下良作：ADCP(超音波流速計)による流量と流れの構造について、第 4 回河川環境管理財団研究発表会講演録、2006.
- 10) 佐藤匡ら：平成 28 年台風 10 号空知川上流における画像処理型流量観測の適用性—大規模出水に対応した流量観測高度化(その 2)—、第 60 回(平成 28 年度)北海道開発技術研究発表会、2017.2.
- 11) iRIC: Nays2DH, <https://i-ric.org/solvers/nays2dh/>
- 12) 岸力、黒木幹男：移動床流における河床形状と流体抵抗 (I)、北海道大学工学部研究報告、67, pp.1-23, 1973.
- 13) 橘田隆史ら：流況河床高同時観測システムの構築と観測から得られた河床波の挙動、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.73, No.4, I\_535-I\_540, 2017.2
- 14) Yalin, M.S. and Bishop, C.T.: On the physical modeling of dunes, Proc. 17th Cong. IAHR, 1. 1977.
- 15) 小関博司ら：砂堆の伝播速度に着目した掃流砂層表面の速度の推定法、土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.5, I\_805-I\_810, 2018.
- 16) 土木研究所ら：非接触型流速計を用いた開水路流量観測方法及びその流量、特許第 3762945 号、2006.4.
- 17) 恩田実之留・平川隆一、非接触型流速計測法の流速計測精度が受ける風の影響、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 71, No. 4, pp. I\_901-I\_906, 2016.
- 18) 本永良樹ら：河床変動及び強風に伴う河川表面流速の特性と風による影響の補正に関する検討、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 69, No. 4, pp. I\_745-I\_750, 2013.
- 19) 柏田仁ら：電波流速計による表層流速計測と DIEX 法に基づく流量推定手法の提案、河川技術論文集、Vol. 18, pp. 393-398, 2012.
- 20) Fujita et al.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The Space-Time Image Velocimetry (STIV). International Journal of River Basin Management. 5. 105-114 2007. 10.1080/15715124.2007.9635310.
- 21) 例えば土木研究所水文チーム：流量観測の高度化マニュアル(高水流量観測編) Ver1.2 : [https://www.pwri.go.jp/team/hydro\\_eng/manual.htm](https://www.pwri.go.jp/team/hydro_eng/manual.htm)



# 大河津分水路山地部掘削における BIM／CIMの取組状況報告

小幡 淳<sup>1</sup>・田澤 信行<sup>2</sup>・片野 智博<sup>3</sup>・吉田 幸矢<sup>4</sup>

<sup>1</sup>災害対策マネジメント室長（前信濃川河川事務所 副所長）（〒950-8801 新潟市中央区美咲町1-1-1）

<sup>2</sup>信濃川河川事務所 副所長（技）（〒940-0098 長岡市信濃1-5-30）

<sup>3</sup>信濃川河川事務所 計画課 専門官（〒940-0098 長岡市信濃1-5-30）

<sup>3</sup>信濃川河川事務所 計画課（〒940-0098 長岡市信濃1-5-30）

信濃川河川事務所は、i-Constructionモデル事務所として指定されており、大河津分水路改修事業が3次元情報活用モデル事業として選定されている。i-Constructionモデル事務所としての主たる検討事項である「監督・検査でのBIM/CIMの活用検討」、「3次元データを契約図書として扱う工事の施工検討」、「統合CIMモデル活用のフォローアップ」の3項目について大河津分水路改修で実施する山地部掘削の測量、設計、工事の各段階で導入しているBIM/CIMの取り組み状況について報告する。

キーワード BIM/CIM, i-Construction, 監督検査, 3次元データ

## 1. はじめに

国土交通省では、平成28年度より「ICTの全面的な活用（ICT土工）」、「全体最適の導入（コンクリート工の規格の標準化等）」、「施工時期の平準化」を代表とするトップランナー施策を中心に各種施策を建設現場に導入することで、建設生産システム全体の生産性向上を図り、より魅力ある建設現場を目指す取組の一つであるi-Constructionを進めている<sup>1)</sup>。

さらに、平成31年度には、i-Constructionを一層促進し、「貫徹」に向け、設計から維持管理までの先導的な3次元データの活用やICT等の新技術の導入を加速化させることを目的とし、これらの取組をリードする直轄事業を実施する事務所を各地方整備局に1事務所を決定した<sup>2)</sup>。

信濃川河川事務所（以下、当事務所）は、北陸地方整備局のi-Constructionモデル事務所として指定されている。そのうち、3次元情報活用モデル事業として、大河津分水路改修事業が位置付けられ、本事業で実施する業務・工事において3次元データの活用を進めているところである。

現在、河口部では、流下能力の強化を目的として山地部を掘削しており、川幅を拡幅する河川改修工事を行っている。並行して、河床の洗堀を防止する床固工、新たな橋梁の構築等、複数の工事を同時に進めているところである（図-1）<sup>3)</sup>。

当事務所では、今年度、i-Constructionモデル事務所としての主たる検討事項である、「監督・検査でのBIM/CIMの活用検討」、「3次元データを契約図書として扱う工事の施工検討」、「統合CIMモデル活用のフォローアップ」の3項目がある。

本報告では、これら検討項目を踏まえ、山地部掘削工事における測量、設計、工事の各段階で行っているBIM/CIMの取り組み状況について報告するものである。

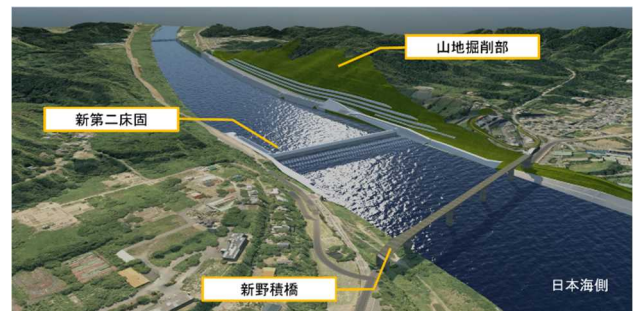


図-1 統合CIMモデル（完成予想図）

## 2. 「監督・検査でのBIM/CIMの活用検討」における取組

### (1) 3次元データとVR技術を活用した出来形検査

出来形検査を行う際、検査官は現場に臨場し、検査対象物を基準に則り、検測する必要がある。一方、受注者は検査実施にあたって、現場の段取りや必要となる書類の準備をする必要がある。

当事務所では、対象構造物を3次元レーザースキャナで計測し、統合CIMモデルに取り込み、そのモデル空間にVR（バーチャルリアリティ）技術を活用し、出来形検査の試行を行った。

検査官は、事務所内にてVRゴーグルを装着し、ゴーグル内に表示される検査対象構造物の3次元モデルに計測ツールのカーソルを合わせ、長さや幅等の出来形を計測したり、鉄筋の本数や間隔をあたったりした。

一方で、使用するハードやソフトにも依存する部分ではあるが、バーチャル空間内に表示される構造物の端点をしっかりとグリップする等、VR機材のコントローラーを操作して、カーソルを合わせることが操作する職員の感覚で異なる等、使用に際し困難な点もあることが確認できた。また、本来であれば一人で対応可能な検査でもパソコンを操作する職員も補助として必要になることも確認できた。一般化していくには、誰が操作しても同様の品質で成果を出せる必要があり、職員の習熟度の向上に合わせ、ハード・ソフトの機能改善も必要であることが確認できた。今後、これらが改善されれば、さらなる生産性向上が期待できる。



写真-1 事務所職員によるVRによる検査の状況

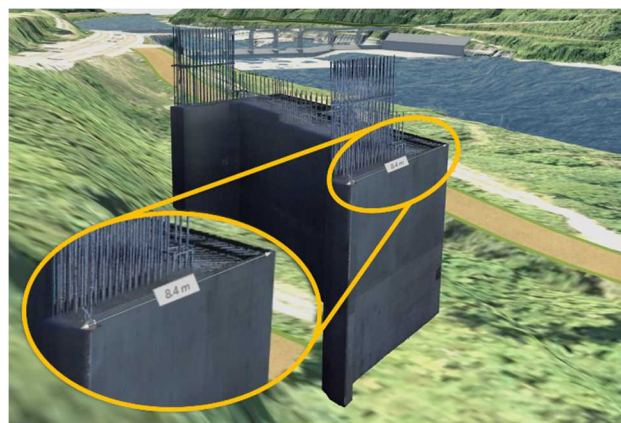


図-2 バーチャル空間に表示される検査対象の3次元モデル

### (2) ウェアラブルカメラとウェブ会議による遠隔臨場検査

現在、実施中の「大河津分水路山地部掘削その8工事」において、ウェアラブルカメラとウェブ会議の併用による遠隔臨場検査を実施した。

対象工種は協議のうえ法面保護工とした。現場では、ウェアラブルカメラを装着した施工受注者が施工個所に赴き、大河津出張所において検査官と施工受注者が立会のもとウェブ会議により、検査官指示のもと施工個所の立会検査を行った（写真-2）。

これにより検査官は現地で立会うことなく検査を実施できるため移動時間を削減できる。一方、施工受注者は検査に際し、現場を止めることなく検査を受けることができ、さらに立会う人員の抑制や検査時間の抑制が可能となった。施工受注者からは、人工、工数で概ね50%程度の削減効果があったとの報告を受けており、遠隔臨場検査による効果を確認した。

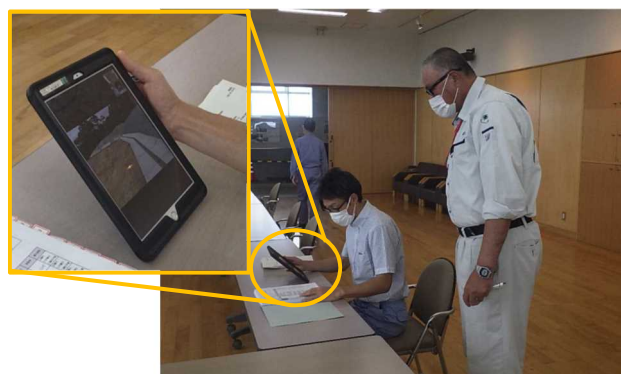


写真-2 検査官による立会検査の状況

### (3) ウェアラブルカメラとMR技術を活用した段階検査

現在、実施中の「大河津分水路山地部掘削その6他工事」において、ウェアラブルカメラとMR技術の一つであるMicrosoft社のHololensを活用して、ICT法面出来形確認を対象とし、受発注者間の作業効率化を図り、契約の適正な履行として施工履歴を管理できるかの可否を確認することを目的として、遠隔での書類検査と臨場立会を年内に試行する予定である。

MR技術を活用することで、Hololensを装着した複数の担当者が、クラウド上で共有された書類や現地の情報をHololens越しに目の前で閲覧、確認できるため、あたかも臨場しているかのような環境で各種情報を確認することができるようになる。以下、試行内容について述べる。

#### a) 遠隔書類検査

当事務所、大河津出張所、施工受注者の現場事務所の3地点、もしくは2地点からHolostruction（小柳建設）<sup>4</sup>を使用し、書類検査（出来形ヒートマップ等）を実施する予定である。

試行の概念図を図-3に示す。試行手順は、下記の通りである。

- ①現場事務所にて、施工受注者からアバターで書類（出来形ヒートマップ等）の説明を実施。
- ②当事務所、大河津出張所の担当職員がHolostruction上で確認を実施。
- ③問題がなければ受発注間で合意。

#### b) 遠隔臨場立会

当事務所、大河津出張所、現場の3地点、もしくは2地点からウェアラブルカメラとHolostructionを使用し、遠隔にて現場検査を実施する予定である。

試行の概念図を図-4に示す。試行手順は、下記の通りである。

- ①当事務所、大河津出張所のいずれかの担当職員が、確認箇所をHolostruction上で決定する。
- ②測定箇所を現場事務所から施工受注者がウェアラブルカメラを通して現場の別の担当者に測定箇所の指示する。
- ③指示を受けた現場の担当者が指示された場所に移動し、GNSSローバーで測定する。
- ④測定結果（GNSSローバーの画面）をウェアラブルカメラで受発注間で遠隔共有し、閲覧する。
- ⑤測定結果をウェアラブルカメラを通して監督職員が確認し、合否を判断し、その後、結果を施工受注者に伝える。

なお、a) 遠隔書類検査、b) 遠隔臨場立会の試行内容及び結果の詳細については、実施内容の進捗にもよるが、「令和2年度 北陸地方整備局 事業研究発表会」にて報告する予定である。

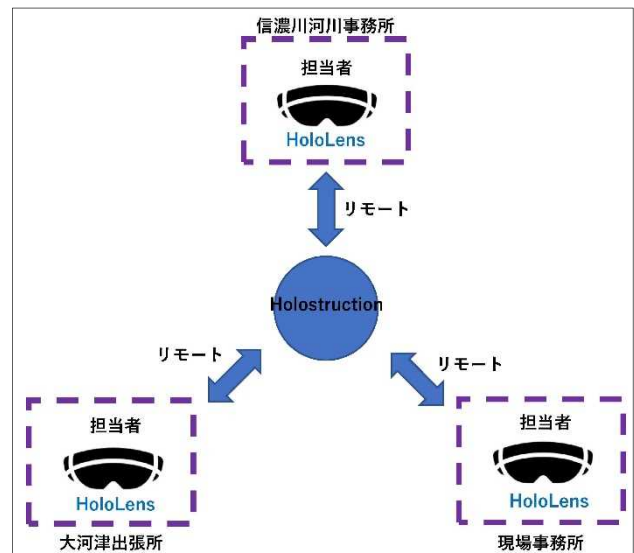


図-3 Holostructionを用いた遠隔書類検査の概念図

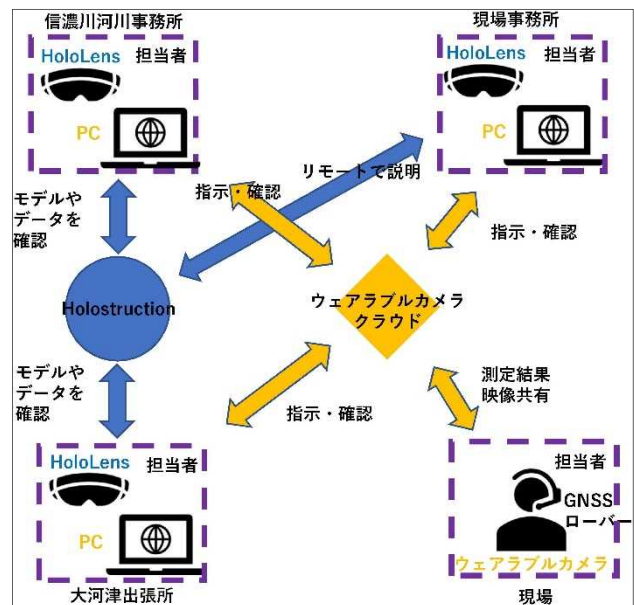


図-4 Holostructionを用いた遠隔臨場立会の概念図

### 3. 「3次元データを契約図書として扱う工事の施工検討」における取組

当事務所は、ICT土工を兼ねてより取り組みを進めてきている。ICT施工の履歴により取得された点群データを3次元モデル化して出来形を確認し、次工程での起工測量の有無を判断するために取得データの精度が、起工測量で必要となる精度を保持しているか確認するために、数量算出による精度誤差の検証を行った（図-5）。

一部の工事において、BIM/CIM活用業務・工事のリクワイアメントに示される「CIMモデルによる数量、工事費、工期の算出」において、土工事（盛土）における土量算出結果の比較を行った。





図-5 出来形の3次元データの統合CIMモデルへの組み込み例  
(茶色い部分が出来形の3次元データ)

土量の算出は、現況地表面から盛土天端までの盛土量を2次元図面の平均断面法による算出結果と3次元モデルを基にしたメッシュ土量を算出し、比較した。その結果、表-1に示すように従来方法による算出結果を100とした場合、差異123m<sup>3</sup>、誤差約0.3%とわずかであり、3次元モデルによる数量算出も有効であることを確認し、3次元モデル（測量による点群データ）の精度の確認を行った（図-6）。

今後、今年度下期に発注予定の山地部掘削工事において、起工測量の有無による工数削減の効果検証について試行予定である。

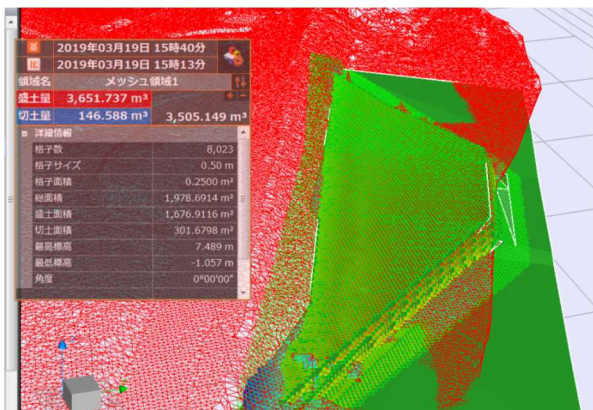


図-6 3次元モデルによる数量算出

表-1 従来方法と3Dモデルによる算出結果の比較

方法	体積 (m <sup>3</sup> )	差異 (m <sup>3</sup> )	誤差率 (%)
平均断面法（従来）	3,664.0	12.3	0.3
3Dモデルによる算出	3,651.7		

さらに今年度は、山地部掘削工事において3次元データを契約図書として扱う工事を発注予定である。これにより施工受注者は着手前により正確に完成形の形状を把握でき、施工計画の立案が可能となり、着工時のフロントローディングにつながる事が期待できる。

なお国土交通省大臣官房技術調査課から、令和元年5月にBIM/CIM活用業務およびBIM/CIM活用工事において、3次元データを契約図書とした試行を行うために必要な

事項を定めたガイドライン<sup>9</sup>が公開されているが、ガイドラインには、「試行で利用する3次元データは、3次元モデル表記標準（案）に基づき作成された3DAモデルを基本とする」とあり、かつ「3次元データを使用する範囲、作業を明確化するため、試行を実施する際は、従来の2次元図面のうち、どの部分を3次元データによる契約図書として試行するかを受発注者間の協議で明確にすること」とある。

本取組では、このガイドラインに準拠しつつ、当事務所での当面の方針として、従来の2次元図面から得られる情報の漏れがないこと、基準となる断面図及びその寸法値が受け取った側が読み取れるよう3DAモデルの作成を行うとともに、閲覧に際し、特別なソフトに依存しないよう3D-PDF形式での作成とした（図-7）。また、その他、ICT建機との連携、次章で述べる統合CIMモデルとの連携も念頭にLandXML形式でのモデル作成も行った。

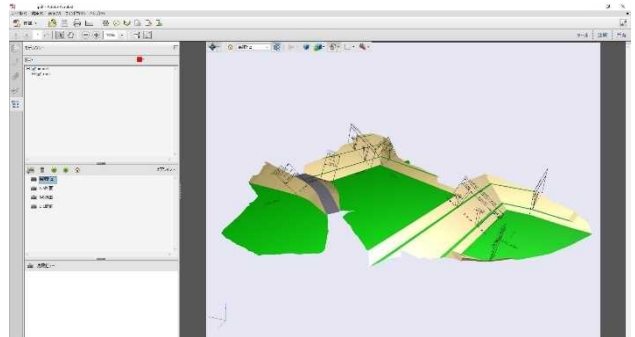


図-7 3DA/3D-PDFによる3次元データによる契約図書の作成例

#### 4. 「統合CIMモデル活用のフォローアップ」における取組

当事務所は、全国に先駆け、平成28年度より統合CIMモデルの構築を行ってきた<sup>6</sup>。取組当初は、設計段階のモデルだけであったが、事業が進捗するのに合わせ、設計段階でのCIMモデルだけから、現在では、施工段階でのCIMモデルの組み込みも行っている（図-8）。



図-8 統合CIMモデル（令和2年7月現在）

統合CIMモデルには、過去から現在、そして竣工時の完成形の情報まで保持しているため、関係機関協議、地元説明や現場見学会等において必要な箇所を切り出し、説明のためのキャプチャ図の作成や全体の位置関係の把握や今後の進捗状況の把握が可能となる。

また、これらのモデルを大河津分水路改修事業に従事する設計受注者や施工受注者と共有することで、当事務所の3次元活用に対する取組方針や意向を正確に共有・伝達できるとともに、受注者側のモチベーション向上にも繋げることができ、その結果、受注者側の3次元データの活用やICT技術の導入の機運も向上にも繋がっているようである。

その実現においては、受発注間の統合CIMモデルの共有が重要となるため、当事務所では情報共有システムを活用し、受発注間での統合CIMモデルの共有環境を構築し、運用を進めている。



図-9 情報共有システムの活用

令和2年7月時点で、稼働中の工事、業務の11プロジェクト、約110名が参加している。

事務所職員は、2-3年程度で異動すること多いため、情報共有システム上で行われた意見交換や情報共有の履歴をアーカイブとして残すことは重要であり、ここで培われたノウハウやハウツーを受発注間で共有することで、次の工程や、維持管理段階にも活用ができる。さらには今後の局内の新規事業にフィードバックすることで、より質の高い事業執行も期待できる。

統合CIMモデルの活用は、こうした大きな取組となるため、その活用においては事務所職員のスキルアップや意識向上も必要である。また、学識者の意見を聞きながら進めていくことも重要であると考え、昨年度より事務所職員を対象としたBIM/CIM研修の実施(写真-2)や、i-Constructionモデル事務所アドバイザーでもある熊本大学大学院先端科学研究部の小林特任教授を委員長とする勉強会の開催(写真-3)も始めたところである。



写真-3 BIM/CIM研修の様子(令和元年11月開催)



写真-4 大河津BIM/CIM勉強会の様子(令和2年2月開催)

今後、これらの取り組みを継続的に実施していくことで、維持管理段階を見据えた統合CIMモデルの活用について、引き続き検討を進めていくこととしている。

## 5. おわりに

本報告では、大河津分水路改修事業において、i-Constructionモデル事務所としての主たる検討事項である「監督・検査でのBIM/CIMの活用検討」、「3次元データを契約図書として扱う工事の施工検討」、「統合CIMモデル活用のフォローアップ」の3項目について取組内容を述べた。

これまでの取組の成果もあり、受発注間ともに3次元データおよびICT技術の活用の機運が高まっていると感じているところである。

これらは、新しい取り組みであるがゆえに、具体的な進め方について検討に時間を要することも多々あり、いい成果が出るものばかりではない。しかしながら、当事務所が試行錯誤しながら行った取り組みが、他事務所

におけるBIM/CIM活用への参考，今後の局内の新規事業にフィードバックされ，参考となれば幸いである。

なお，今年度中に取り組む内容も多くあるため，執筆段階で本報告書に記載できていないものも幾つかあるが，事業研究発表会では，可能範囲で具体的に報告する予定である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省 i-Construction : <https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html> (2020年7月現在)。
- 2) 国土交通省報道発表資料 : [https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08\\_hh\\_000562.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000562.html) (2020年7月現在)。
- 3) 大河津分水路情報館：分水路だより第61号，<http://www.hrr.mlit.go.jp/shinano/bunsui/event/dayori.html> (2020年7月現在)。
- 4) 小柳建設 Holostruction : <https://n-oyanagi.com/holostruction/> (2020年7月現在)。
- 5) 国土交通省 BIM/CIM ポータルサイト【試行版】 : <http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/bimcimindex.html> (2020年7月現在)。
- 6) 南健二・若杉匠・福田紗央：大河津分水路の改修事業におけるC I Mの導入について，平成28年度 北陸地方整備局 事業研究発表会，平成28年7月26日。



# 明石海峡大橋塔外面作業車製作における 課題への対応

岡村 英史<sup>1</sup>・香川 晃<sup>1</sup>・東 秀樹<sup>1</sup>

<sup>1</sup>本州四国連絡高速道路（株） 神戸管理センター 機械課  
(〒655-0852 兵庫県神戸市垂水区名谷町549)

長大橋の点検や補修等の保全作業を行うためには、高所での安全かつ効率的な近接手法が必要になる。しかし、主塔高さが300mに達し、かつ高さに応じて塔柱断面が大きく変化する明石海峡大橋(以下「明石」という)では、既存の技術を用いて塔作業車を安全かつ効率的に運用するには多くの課題があった。このため、これまでに得られた知見を元に塔柱用外面作業車(以下「明石塔作業車」という)を新たに製作した。本稿では、製作にあたり実施した形式検討、吊下げ用ワイヤロープの振れ止め対策、段差乗り越え性能の確保、軽量化対策などの課題に対する検討内容と実橋での運用結果について報告する。

キーワード 明石海峡大橋、近接手法、高所作業、ゴンドラ、磁石車輪

## 1. 背景と課題

### (1) 長大橋の主塔壁面への接近方法の変遷

本州四国連絡橋の吊橋や斜張橋の主塔は高層の鋼構造物であり、その点検や塗替塗装に対応する近接手法は建設時から検討がなされている。例えば、屈曲した主塔を有する岩黒島橋、櫃石島橋及び生口橋の斜張橋では塔壁面にレールを設け、塔柱の断面形状に合わせたコの字型又はデッキ型の専用の作業足場を塔頂に常設した巻上装置によりワイヤロープで吊り上げる塔作業車(以下「レール式塔作業車」という)を開発し設置している(写真-1)。しかし、レール式塔作業車は、汎用のゴンドラに比べ塔柱の屈曲及び変断面に対応できること、積載荷重が大きく取れること、風に対する安全性が高いなどのメリットがある一方、建設コストが高騰する、主塔構造への影響が大きい、休止期間が長い場合は再使用の整備に手間を要するなどの課題があった。

このため、多々羅大橋の建設にあたり、磁石車輪と汎用ゴンドラを用いてレール設置を不要とした磁石車輪式塔作業車が開発された。これにより明石海峡大橋の主塔近接手法もレール式塔作業車から磁石車輪式塔作業車に計画が見直された。

### (2) 磁石車輪式塔作業車の運用実績

磁石車輪式塔作業車は、磁石車輪が鋼壁面に強力に吸着することで負傾斜面や添接ボルト上でも連続的に壁面に吸着する(写真-2)。また通常の汎用ゴンドラで危険を感じる風速下においても揺動することなく安定した昇降及び斜行移動ができ、かつ作業反力を得ることができる。このため、大鳴門橋及び因島大橋の主塔塗替塗装工事では通常ゴンドラと比べ安全性及び施工効率が向上し、問題なく使用された(写真-3)。



写真-1 櫃石島橋レール式塔作業車



写真-2 磁石車輪式塔作業車(生口橋)



写真-3 大鳴門橋の主塔塗替塗装(斜材用)



表-1 明石海峡大橋主塔の作業別近接方法(案)

作業名	現状の近接手法	今後の近接手法(案)	今回対象
基本点検 (近接目視)	高性能カメラ	点検ロボット, ドローン	
詳細点検 (付着力試験等)	無し	塔作業車	○
部分補修 (3種ケレン程度)	無し	塔作業車	○
全面塗替塗装 (1種ケレン)	無し	昇降式ステージ等	

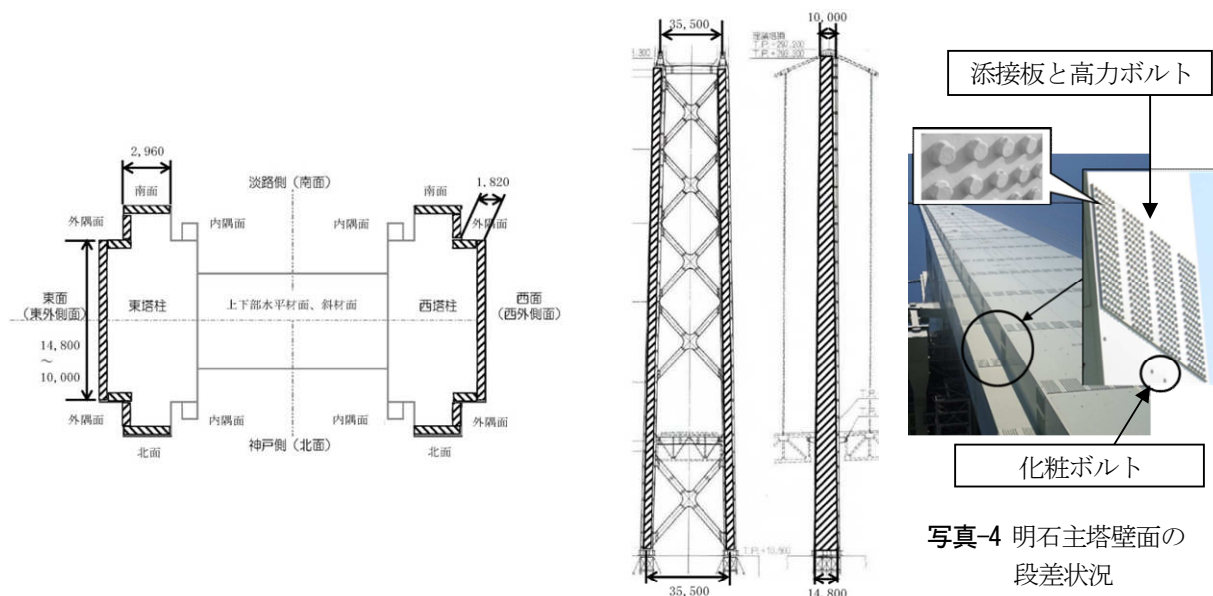


図-1 明石塔作業車が検討対象とする塔柱外面

### (3) 明石海峡大橋主塔における作業別近接手法の整理

明石主塔は完成後25年が経過し、保全作業に対応した近接手法が必要となった。このため、作業種別ごとに現状と今後の近接手法(案)を整理した(表-1)。

### (4) 明石海峡大橋塔作業車の製作における課題

表-1で整理した作業のうち、主塔を保全する上での当面の課題は、詳細点検と部分補修の実施であり、本作業で使用するための塔作業車が必要となった。しかし、主塔は東西外側面、外側面、南北面と、路面上の内側面、上部・下部水平材面、斜材面(図-1)があり、接近する箇所ごとに課題と対策が大きく異なる。このため、実際に明石用の塔作業車を製作して点検員及び作業員が不安無く作業が行えるようにするため、塔作業車の検討は主塔全面に展開せず塔柱外側面から実績を重ねて塔柱内側面、斜材面へ発展させることとした。

#### a) 主塔形状への対応

明石主塔の特徴は、高さが約300mと高所でかつ東西2つの塔柱が十字断面で内側に1.1度傾斜している斜塔であるほか、塔柱の塔基部と塔頂部では東西面及び外側面の橋軸方向長さが変化する変断面である。また、塔柱は高さ約10mの塔ブロックを添接板と高力ボルトで接

続している。その添接板の大きさ及び板厚は、本州四国連絡橋内で最大級であり、長さは最長1.54m、板厚は最大22mmである。加えて、建設時に仮設足場や工用エレベータ等を設置したボルト孔を化粧ボルト(トルシアボルト)で塞いだ箇所が点在している(写真-4)。これらの段差への対応が必要である。

#### b) 主塔高さへの対応

一般に高所になるほど風速が早く乱れも大きい。明石主塔の高さは約300mであり、明石塔作業車の検討では、風荷重の増大や乱れによる影響、及び作業足場を吊り下げる吊下げ用ワイヤロープ(以下「吊ワイヤ」という)や作業足場への給電ケーブルなどの重量が増えることで巻上機能力や積載荷重への制約が大きくなる。

このため、明石塔作業車を製作する上で解決すべき課題を以下の通り整理した。

- ① 主塔高さ及び段差に対応した磁石車輪の吸着力の確保
  - ② 主塔変断面に対応して塔壁面に接近できる作業床
  - ③ 吊ワイヤの風による揺動対策
  - ④ 吊ワイヤ等の安全対策
  - ⑤ 巻上機能力と積載荷重を満足する作業車総重量
- 次章ではこれらについて詳しく述べる。

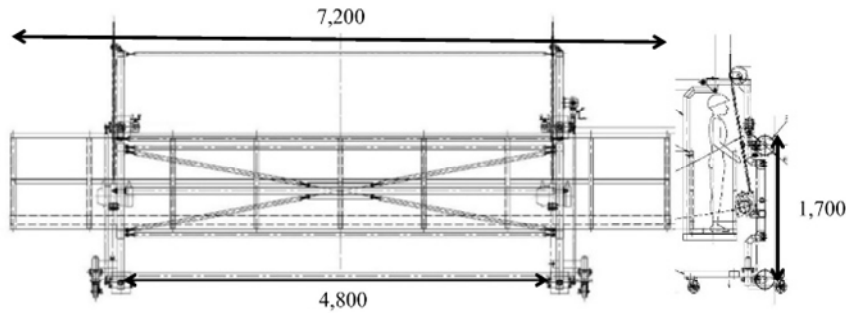


図-2 明石塔作業車(東西面用)の磁石車輪の配置

## 2. 明石塔作業車の設計及び運用計画

### (1) 主塔傾斜及び段差に対応した磁石車輪の吸着力確保

明石添接板に対応した磁石車輪式塔作業車を検討した結果、次のような対応を行えば安定して運用できることが分かった。

#### a) 傾斜及び添接板乗り上げ時の重心移動への対応

明石塔作業車の下降時において、磁石車輪が添接板に乗り上げるときは、塔作業車の自重が一瞬段差に預けられ吊ワイヤの張力が抜ける。このとき明石塔作業車の重心は塔側の磁石車輪が支点となり、壁面から離れる方向（以下「後方」という）に移動する。このため、重心移動の影響が小さくなるように次に挙げる設計上の配慮が必要になる。

- ① 塔作業車の重心を吊点より若干前方(オフセット)にする。
- ② 主塔の傾斜や積載物の影響を調整できる重心調整機構を設ける。
- ③ 磁石車輪の吸着力は、下側車輪が添接板の段差を乗り越えしやすいう必要最小限に抑え、上側車輪は重心移動に対向できるよう余裕を持たせる。

なお、これらの配慮は常に後方傾斜姿勢となる塔柱道路側の負傾斜面での吸着力確保にも有効である。

#### b) 添接板長さへの対応

明石塔作業車(東西面用)の磁石車輪の配置を図-2に示す。明石添接板長さへの対応として磁石車輪の配置を検討し、次の理由により作業足場の上下左右に各1個の計4個とした。

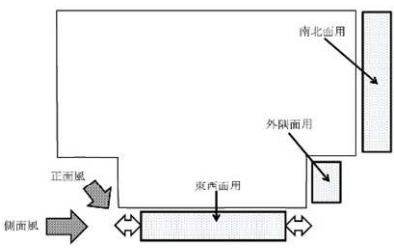
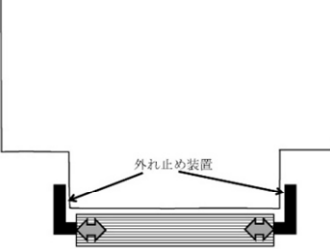
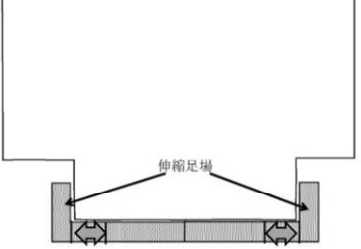
磁石車輪が添接板上にあるとき吸着力は7割低減する。計算上、磁石車輪を4輪として全車輪が添接板上に乗った状態では風速14m/s程度で滑動し、設計風速である16m/sを満足しない。このため、明石塔作業車の磁石車輪のホイールベースは1.7mとし、必ず上下の磁石車輪のどちらかが添接板上ではない平滑面にあるように配置した。

また、左右方向の磁石車輪は、作業床端部に正面風を受けた場合などに磁石車輪が支点となって壁面から引き剥がされることが想定される。このため、磁石車輪は作業足場の左右に取り付け、ホイールトレッドは出来る限り広くとるものとした。ただし、左右の磁石車輪位置を作業床幅の最大に設定するとフレームが大型化して重量が過大となるため、ホイールトレッドとワイヤロープの吊芯間隔を合わせることで懸架フレームを簡素化した。なお、吊芯間隔は空中姿勢において作業床端部に搭載荷重が集中しても水平を保つ位置に設定されている。

#### c) 化粧ボルトなどの不陸への対応

主塔壁面の添接板に磁石車輪が斜めに進入したり点状の化粧ボルト上に乗り上げると、4輪ある磁石車輪のうち1輪が段差上にある状態となる。このとき磁石車輪がラーメン（剛接）構造の作業床に直接固定され、仮に上側の1輪が段差に乗り上げた場合には、隣接した1輪は反力で完全に浮き、もう1輪も傾いた状態となる。よって4輪中3輪が浮いた状態となる。このときの下側1輪でしか有効に吸着しないものとする。この対策として、磁石車輪をブレース（ピン）構造のフレームに固定し、作業床と構造上分離する不陸追従型フレームを採用することとした。

表-2 磁石式塔作業車として想定される形状

	A形状	B形状	C形状
			
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>汎用昇降機が使用できる</li> <li>初期コストと製作・開発期間が短縮できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ステアリング操作による斜行が不要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>主塔断面に対応した足場を有する</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>ステアリング操作が必要</li> <li>各面に対応した作業床を製作する必要がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>軽量化のため作業性が犠牲になる</li> <li>外れ止め装置の開発が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>強風時の安定性確保に課題がある</li> </ul>
評価	○	△	×

(2) 主塔変断面に対応した作業床の検討

明石主塔は変断面であり、塔柱幅は図-1のように塔頂が塔基部と比べて4,800mm減少する。この変断面への対応及び風による塔壁からの離壁対策として、明石塔作業車が最も大型となる東西面を対象に表-2に示す3種類の作業床の形状及び構造で検討した。

表-2におけるA形状は、建設時に計画された明石塔作業車の形状である。B形状は東西面の最大全幅12mに対応した作業床に「外れ止め装置」を設置したものである。C形状は塔柱断面に対応した伸縮足場を有するコの字形状である。

A形状は、作業床長さが小さいためステアリング操作による横シフトが必要であるが、汎用昇降機が使用できかつ初期コストと製作・開発期間が短縮でき有利となる。なお、離壁防止対策は汎用ゴンドラで多く採用されているガイドワイヤで対応する計画とした。B形状は、軽量化のため作業床幅奥行きを450mmと狭くする必要があり、昇降高さに応じて外れ止め装置をスライドシフトさせる機構の開発や汎用昇降機では能力不足等の適用における課題があり、初期コストの増加、正面風への対策等が必要であり不利となる。C形状では、車輪が添接部や化粧ボルト上の横風並びに正面風に対して磁石車輪の必要吸着力が大きく安定度が不足し、強風時の安定性を確保する方法を開発する必要がある。以上から総合評価が最も優れるA形状にて明石塔作業車を製作することとした。

(1) 巻上機の能力と積載荷重を満足する作業車総重量

市販のゴンドラに使用する汎用巻上機の巻上性能は、定格荷重800kgが最大である。明石塔作業車は巻上機を2台使用するため、総重量を1600kg未満にする必要がある。この重量を確保するには、明石塔作業車の重量と積載荷重を同程度にしても作業床の大きさや給電ケーブルの長さなどで規定重量以下にできないことが考えられる。このため、作業床が大きくなる東西面用の明石塔作業車には次の対策を実施した。

- ① 作業床をアルミニウム合金製とし軽量化を図った。
- ② 給電を塔柱中間にある航空障害灯開口から行うことで、ケーブル延長の短縮による電圧降下の低減と小径化により軽量化した。

(2) 吊ワイヤの揺動対策

過去明石主塔におけるゴンドラ作業においては、吊元設備とゴンドラ間の吊ワイヤに揺動が生じることが報告されている。この揺動は高さ150m以上、風速4m/s程度の比較的低い風速で発生する事が調査結果<sup>1)</sup>から分かっている。吊ワイヤの揺動は、主塔壁面を叩き相互に損傷させる危険性があるほか、塔作業車の上下動を誘発し、作業員の安全性や想定しない段差への乗り上げによる滑動の要因となる危険性がある。吊ワイヤの揺動は、吊ワイヤに振れ止めロープを接続し固有振動数を抑えることで改善されることが分かっており、揺動対策は過去の実績も踏まえ吊ワイヤに振れ止めロープを30m～50mピッチで設置することとした。

3. 明石塔作業車の運用計画

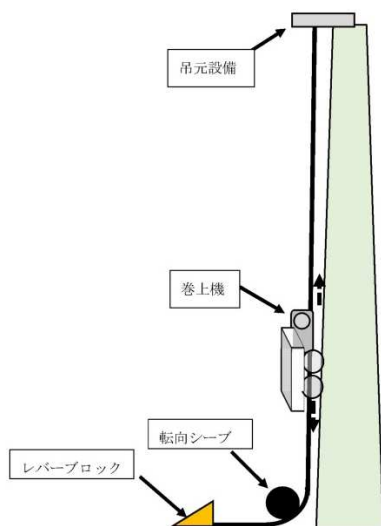


図-3 吊ワイヤの安全対策

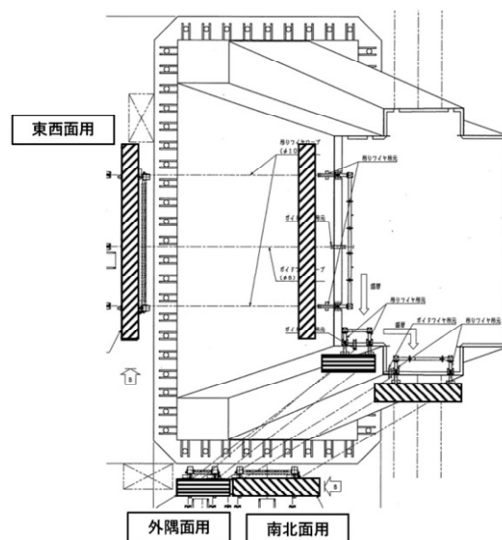


図-4 明石塔作業車の配置

表-3 明石塔作業車の諸元

	東西面用	南北面用	外隅面用
積載荷重	350kg	340kg	330kg
種別	新規製作		
材質	アルミ合金	アルミ合金	鋼製
長さ	7,200mm	3,600mm	1,800mm
幅	600mm		
自重	1,234kg	1,243kg	1,213kg
巻上機能力	定格荷重800kg × 1.5kw × 2台		
昇降速度	10m/min (実測：上昇8.9/下降9.8程度)		
磁石車輪	上輪250kg × 2 + 下輪200kg × 2		



写真-5 製作した明石塔作業車(東西面用)

### (3) 吊ワイヤの安全対策

吊ワイヤ架設後の安全対策として、吊ワイヤ等の尻手を風により流されないよう、塔基部に転向シーブとレバーブロックを設置して移動を制限した(図-3)。ただし、過大な張力を加えると吊元に負荷を与えるため吊ワイヤをゆるませない程度に張力を調整した。

### 4. 塔外面作業車の製作

以上の検討結果に基づき製作した明石塔作業車の諸元を表-3に示す。製作は東西面用、南北面用、外隅面用の3タイプ(図-4・写真-5)を製作する必要があったが、作業内容や給電条件から2タイプ以上を同時に使用することが当面想定されないため、磁石車輪などの同一部材を共用することで初期コストの低減を図った。

ゲージは積載荷重を満足するために、東西面用につ

いては材質をアルミ合金製とすることで軽量化を図り、南北面用については、東西面用を流用した。

### 5. 実橋での運用

2019年9月～11月にかけて、製作した明石塔作業車を明石2P東側塔柱に架設して、試運転を行い使用性に問題ないことを確認した。その後、近接目視点検と補修塗装などの実運用に使用した。作業は、2P東側塔柱の東面、南側外隅面、南面の順番で共用部品の組み換えと盛り替えを行いながら実施し、延べ25日、25往復(約15km)の昇降を行った。以下に実運用の結果と改善点などを次に示す。





写真-6 東西面用の運用



写真-7 外隅面用の運用



写真-8 南北面用の運用

- ① 昇降時は、どのタイプも風等による影響はなく安定した作業の実施を確認できた。
- ② 東西面用は、塔壁と比べ短い作業床であり、ステアリング操作により横移動しながら作業を行う必要があるが、横風等が作用しても安定して使用できた(写真-6)。
- ③ 外隅面用は、作業床の幅と走行面の幅がほぼ同じであり、塔の傾斜に合わせたステアリング操作と壁面の接触や脱輪が懸念されたが、問題なく走行できた(写真-7)。また、外隅面では風の影響も小さく、振れ止めロープ、ガイドワイヤの設置を省略できた。
- ④ 南北面用は路面に近い場所であるため、ガイドワイヤを海側(外側)に設置した。更に振れ止めロープもガイドワイヤに単独で設け、万一ワイヤが離壁した場合でも路面側へ移動しないように制限する配慮を行った(写真-8)。また、主ケーブルとワイヤ類が干渉しないようにゴムホースで保護した。
- ⑤ 吊ワイヤの振れ止めロープの設置は、当初アイボ

ルトで計画したがワイヤ類が引っ掛かる不具合があったのでワイヤ式に改良した。

## 6. まとめ

従来安全に運用していた磁石車輪式塔作業車でも、明石海峡大橋で安全に運用するためにはクリアすべき多くの課題があることが今回の検討及び実橋での運用で分かった。特に、主塔高さ、断面形状、添接板の大きさ及び厚さ、高力ボルト及び化粧ボルトによる段差、吊元の設置位置などの条件は橋梁毎に違いがあり、橋梁毎の条件に合致した磁石車輪式塔作業車の設計・製作が必要となる。今後も、得られた知見を基に高所作業の安全・安心な施工に繋げる所存である。

### 参考文献

- 1) 土山正己, 坂本光重: 磁石車輪ゴンドラの開発, 本四技報, Vol.22, No.88, 1998.1



## 2. 環境保全について

竹富南航路はサンゴ礁海域の中を浚渫し求められる航路幅と水深を確保する事を目的に施工を進めるが、その航路の位置設定に当たってはサンゴの個体数が少ない場所（サンゴ礁の切れ間等）を考慮して、施工にあたりサンゴ移設を極力行わなくても良いルートを検討し、周辺海域を利用する事業者や一般市民からの意見を取り入れた上で事業化を行った。

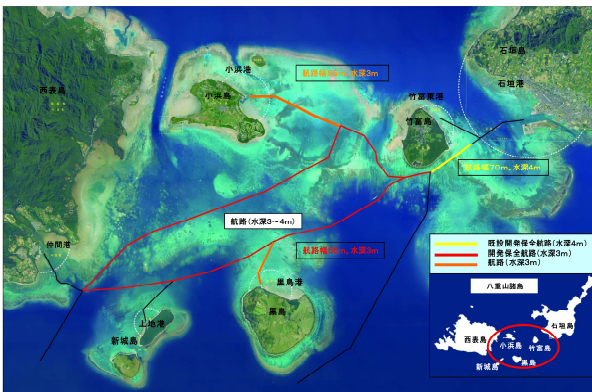


図1 竹富南航路ルート

施工にあたり移設が必要なサンゴについて、元の生息状況に近い海域を選定し移設作業を行いその後のモニタリング調査を合わせて実施している。

また、浚渫工事にあたっては海底の底質状況にもよるが浚渫施工時に土砂に含まれる微細粒子が巻き上がり海中の濁度が悪化する事が多い。このような粒子は沈降するまで時間がかかり周囲の海域へ流出すると海底に生息するサンゴに降り積もりサンゴの生育に悪影響を与える懸念があるため、施工時に発生する濁度をどう低減するか、施工時の周辺海域への影響をどのように管理するかが問題となる。

## 3. サンゴ移設について

ルート設定時に行ったサンゴ調査によりサンゴの生息状況や生息箇所を把握し、航路上に生息し施工時に影響の出るサンゴについてサンゴ

移設を行った。サンゴ移設の検討に当たってはサンゴの生息していた水深や生息箇所を参考に移設前の環境に極力近い条件の箇所を周辺海域から選定しサンゴ移設を実施した。

サンゴはデリケートな生物なため移設前と異なる環境に移設を行った場合、移設当初は良好であっても長く生育できる事は少なく、移設箇所の検討はサンゴ移設の中で非常に重要な作業の一つでもある。

また、サンゴ移設作業の際にもサンゴに損傷を与えるような移設を行うと移設後の生育に支障が出るため丁寧な作業が求められる。

サンゴの種類により適切な移設方法も異なり基盤に固着する固着性サンゴであれば生育している基盤毎撤去を行い、移設先の基盤に水中ボンドを用いて固定を行い、基盤に固着しない枝状サンゴであれば移設先で枝状サンゴ同士を密接して移設し群集として波浪等の影響に耐えられるように移設を行うなど、サンゴ毎に異なる特性に対し移設後の生育や安定化に悪影響を及ぼさないように検討して実施を行っている。



サンゴ移設概念図

## 4. 浚渫時の濁り対策について

浚渫に当たり発生する水質汚濁への対策として浚渫施工箇所の周囲に汚濁防止柵を二重に展開し周辺海域への濁度流出を防止する対策を講じている。



(写真 汚濁防止柵 展張状況)

基本的には上記の手法により水質汚濁の原因となる微細粒子は汚濁防止柵内に残留する事となるが、粒形が細かいため自然に沈降するまでにはかなりの時間を要し長時間航路に作業船舶が滞在する事になる事、沈降し海底に堆積した微細粒子が海流により巻き上げられ拡散する事で施工後に改めて水質汚濁を引き起こす可能性等が考慮されたため、施工後に水質汚濁が発生しない対策も含めて検討を行った。

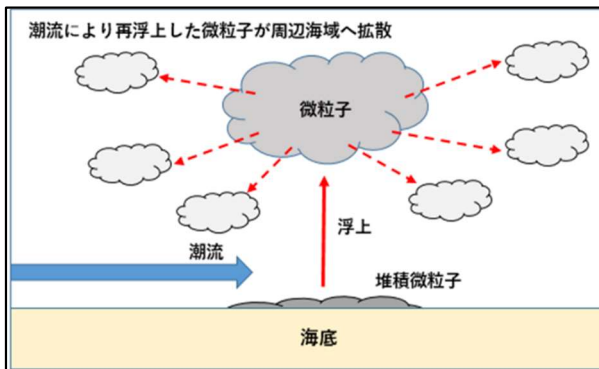


図 水質汚濁発生メカニズム (再浮上)

浚渫により発生する微細粒子への対策として台船上に鋼製の大型水槽を設置して汚濁防止柵内の微細粒子を含んだ海水をポンプで吸い上げ、吸い上げる過程で凝集剤を添加し水槽内で幾重にも循環を行い、微細粒子を取り除いた上澄みの海水のみを汚濁防止柵内に戻し、汚濁防止柵内の濁度が規定値以下になるまで継続して濁度

低減に対応する。

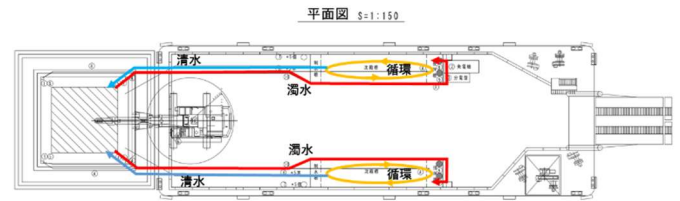
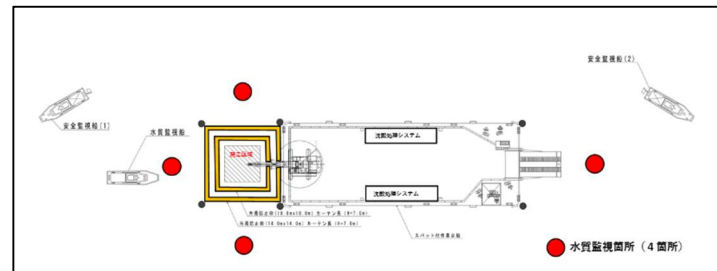


図. 沈殿処理システム概念図

また、汚濁防止柵の外では水質監視を行い周辺海域の濁度や水質に変化が無いかを施工中に確認を行い、変化がある場合は施工を一時中断し汚濁防止柵の外側からダイバーによる目視確認を行い汚濁防止膜の破損(岩礁等により破損していないか)や海底との接地面からの流出が無いを確認し、問題がある場合は補修を行い濁度対策を講じたうえで施工を再開する事としている。



施工状況 概念図

## 5. 移設後のモニタリング調査結果について

施工前に行った移設サンゴについて、最新のモニタリング調査の結果をご紹介します。

石西礁湖の移設サンゴについて平成28年以前までは移設サンゴの調査結果としては移設後の成長により概ね増加する傾向がみられてきており移設後の生育状況は良好だと判断されてきたが平成28年に発生した高水温により石西礁湖に生息していた天然サンゴ、移設サンゴで大規模な白化現象が確認され、その後はサンゴ被度



が低下するなど白化現象の後も影響が継続して見られてきた。

最新のサンゴ調査として令和元年度に行った調査では枝状サンゴではアナサンゴモドキ類が立体的に成長、固着サンゴではハナヤサイサンゴ等が成長してきており被度は未だ低いが白化後に生残していた個体が成長している傾向が確認された。

また、サンゴを利用する生物についても調査を行っており、白化後の確認では生息種の大きな変化等は見られなかったものの生息数について減少する傾向がみられてきたが、上記のサンゴ調査に合わせた確認では回復傾向にある種とそうではない種が確認されている。

## 6. まとめ

竹富南航路整備事業にて施工時に浚渫により発生する濁度を軽減するために汚濁防止柵や濁水処理システム等の対策を講じて周辺環境に及ぼす影響を極力低減できるように対策を行った上で事業の実施を図っている。

また、施工時の水質監視や移設サンゴのモニタリング調査等を通じて周囲のサンゴ礁への影響も継続して調査を行い、環境負荷を極力低減した施工が出来ていると考える。

# 大規模土砂災害における ICT技術の活用検討について

松岡 和行

近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所 豊岡出張所 (〒668-0026兵庫県豊岡市元町13-32)

近年、豪雨や地震に伴う大規模な土砂災害が数多く発生し、国土交通省では防災ヘリ等により迅速に状況を把握し、必要に応じてTEC-FORCE（緊急災害対策派遣隊）による緊急調査を実施している。また、その調査結果を踏まえ、警戒避難や応急対策について熟慮し、二次災害の防止も図っている。しかしながら、発災直後の初動対応や緊急調査には、迅速性・安全性の確保など、未だ多くの課題があり、本検討ではこれらの課題を最新のICT技術を使って解決する方策について検討した。また結果として、ICT技術を活用する事で非常に効果的・効率的に緊急調査が実施できることを確認し、新たな初動対応の手引きとしてとりまとめたので紹介する。

キーワード 大規模土砂災害、ICT、無人航空機、初動調査、河道閉塞

## 1. はじめに

近年我が国では、豪雨や地震に伴う大規模な土砂災害が数多く発生している。例えば、近畿地方では、平成23年の紀伊半島大水害の際に、大規模な深層崩壊等が発生し、崩壊土砂が河道を閉塞して多くの天然ダムが形成されたことが記憶に新しい。一般に、形成された天然ダムは降雨や溪流の流水により次第に侵食されることが多いが、天然ダムが決壊すると上流に溜まった水を含む大規模な土石流が発生し、下流域の人家等に甚大な被害を及ぼす危険性がある。このため、天然ダムが形成された際に実施する緊急調査については、「緊急調査実施の手引き（河道閉塞による土砂災害対策編）平成23年4月<sup>1)</sup>」が策定されている。また、本手引きでは、地上またはヘリコプターでレーザー距離計による計測等を行って緊急調査の必要性を判断すること、緊急調査では天然ダムの形状の計測結果等を踏まえて被害のおそれのある区域及び時期を推定することなどが定められている。

本検討では、上記手引きに定められた大規模土砂災害

発生時に必要となる初動対応のうち、最も重要と考えられる「Ⅰ.緊急調査着手の判断」、「Ⅱ.初動期における被害の生じるおそれのある区域および時期の想定に関する調査」について、既往資料を基に課題を整理した上で、無人航空機やICT機器（砂防調査・管理効率化ツール「SMART SABO」）を活用してそれらの課題を解決するための実証実験を行い、その有効性を検証した。

## 2. 大規模土砂災害における初動対応の課題と対応の方向性

我が国の近年の大規模土砂災害における緊急調査の実績の記録、調査に関する研修・アンケート結果等の資料を整理し、大規模土砂災害における初動対応の課題を抽出した。その結果、初動対応の主な課題は、緊急調査の迅速性・安全性・正確性の確保であった。

そこで、これらの課題を解決する方策として、無人航空機やICT機器を活用する調査方法について、その有効性を検証することとした（図-1）。

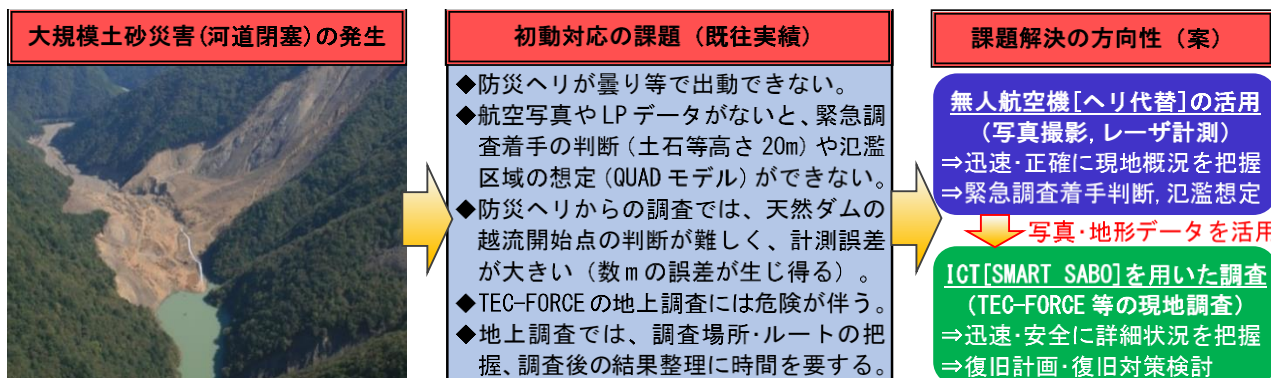


図-1 大規模土砂災害発生時の初動対応の課題と課題解決の方向性(案)

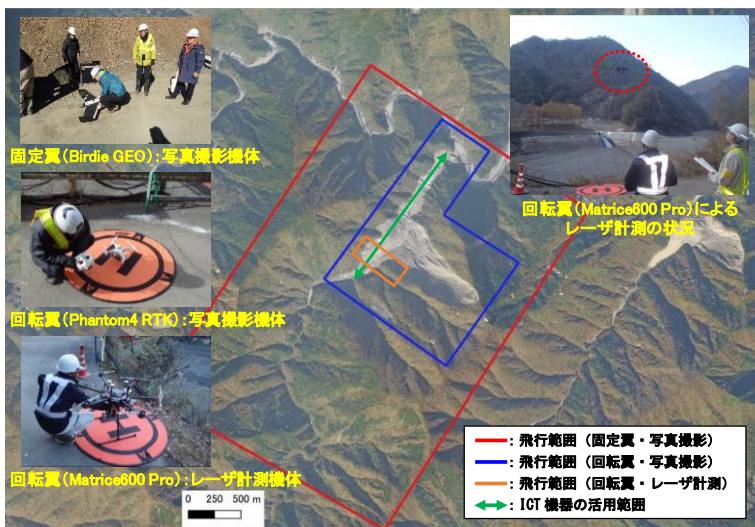


図-2 ICT技術を活用した初動対応の実証実験（奈良県五條市赤谷地区）



### 3. 無人航空機やICT機器を活用した初動対応の実証実験の概要

前述の課題と課題解決の方向性(案)を踏まえ、平成23年の紀伊半島大水害で大規模な河道閉塞が発生した奈良県五條市赤谷地区で、無人航空機やICT機器を活用した初動対応の有効性を確認するための実証実験を行った。

実証実験では、初動対応の内容を大きく3ステップに分け、各ステップで調査項目と調査対象を分けて、ICT技術の活用の有効性を検証することとした(図-2)。

最初に、Step1で無人航空機(固定翼)を用いた災害箇所全体の把握(写真撮影・オルソ作成)により、前述の手引きの「Ⅰ.緊急調査着手の判断」に必要な天然ダムの高さや河道閉塞箇所の下流域の居室数を把握できるか検証した。

次に、Step2で無人航空機(回転翼)を用いた災害箇所の詳細把握(写真撮影・オルソ作成・レーザ計測・解析)により、手引きの「Ⅱ.初動期における被害の生じるおそれのある区域および時期の想定に関する調査」で必要となるQUADモデルを用いた天然ダム決壊時の氾濫シミュレーションに必要なデータ(①天然ダムの位置、②天然ダム比高、③天然ダム下流側水平長、④天然ダム越流までの水位差、⑤天然ダム湛水長)を計測できるか検証した(図-3)。

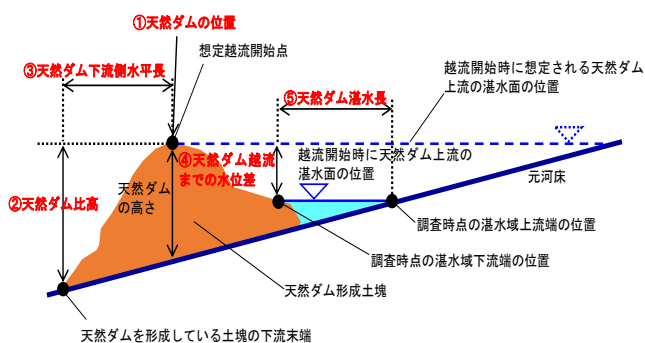


図-3 天然ダム調査の計測箇所概念図

最後に、Step3でICT機器(砂防調査・管理効率化ツール「SMART SABO」)を用いて現地調査を行うことで、TEC-FORCE等が行う現地の詳細調査の迅速性及び安全性を向上させることができるか検討した。

### 4. 初動対応の実証実験の結果

#### (1) 緊急調査着手の判断

Step1の固定翼(Birdie GEO)を用いた広域調査(撮影高度:海拔1,648m、撮影範囲:3.0km×4.4km)の結果、赤谷地区の大規模崩壊地の10倍程度の広さを撮影でき、天然ダムや周辺の崩壊地を含む災害箇所周辺の全容を把握することができた。また、撮影写真からPPK(Post Processing Kinematic:後処理キネマティック方式)で位置情報を取得して3次元点群モデルを作成することにより、1日以内に仮想天然ダム(実験では尾根部を設定)の概略形状(天然ダムの高さ等)を計測できた(図-4)。これより、防災ヘリ調査を実施できない場合も、固定翼を用いた調査を行うことで、緊急調査着手の判断が可能になると言える。ただし、写真から作成した3次元点群は樹木を含んだ地表のデータであるため、樹木の高さ程度の誤差を含むことに留意が必要である。

#### (2) 初動期における被害の生じるおそれのある区域および時期の想定に関する調査

Step2の回転翼(Phantom 4 RTK)を用いた垂直写真撮影により、天然ダム周辺の詳細なオルソ画像を作成し、天然ダムの湛水長を計測することができた。また、回転翼(Matrice 600 Pro)を用いたレーザ計測(計測誤差:30cm未満)により、QUADモデルによる天然ダムの決壊シミュレーションに必要な数値データ(天然ダムの位置・比高・下流側水平長・越流までの水位差)を全て半日以内に計測することができた(図-5)。これより、防災ヘリ調査を実施できない場合も、回転翼を用いた写真撮影・



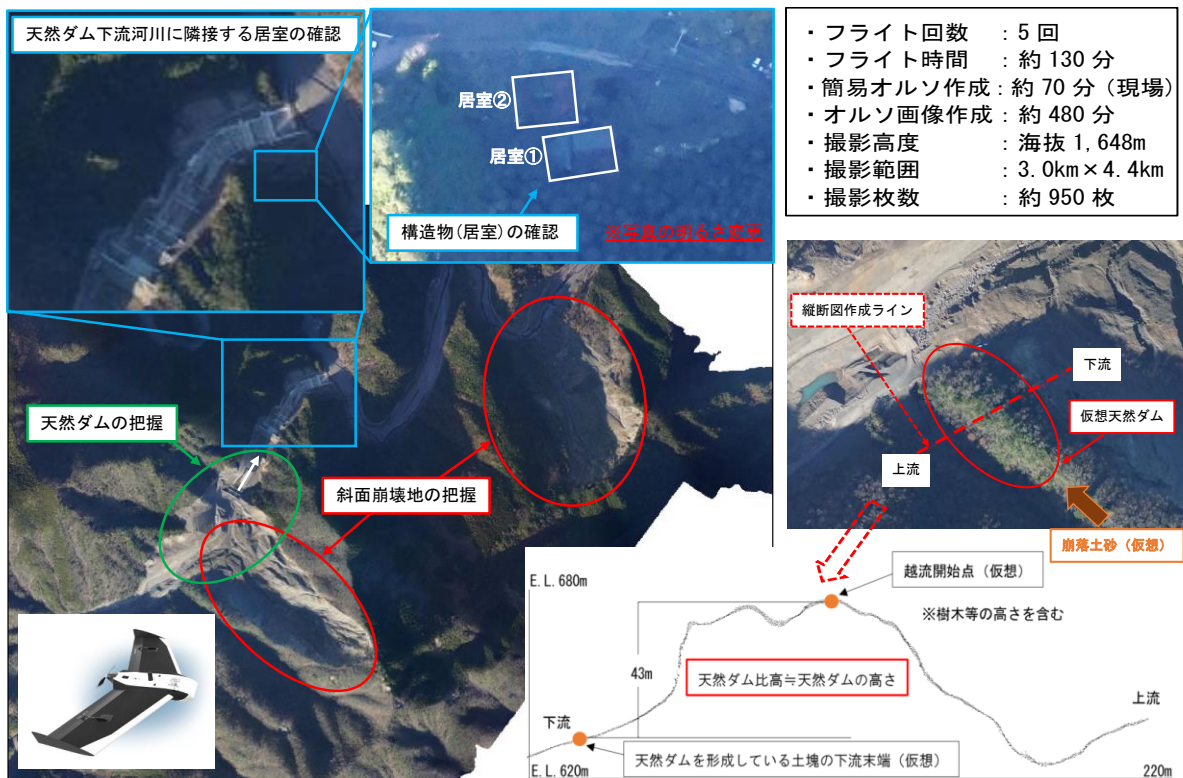


図-4 固定翼を用いた災害箇所の全容把握 (Step1)

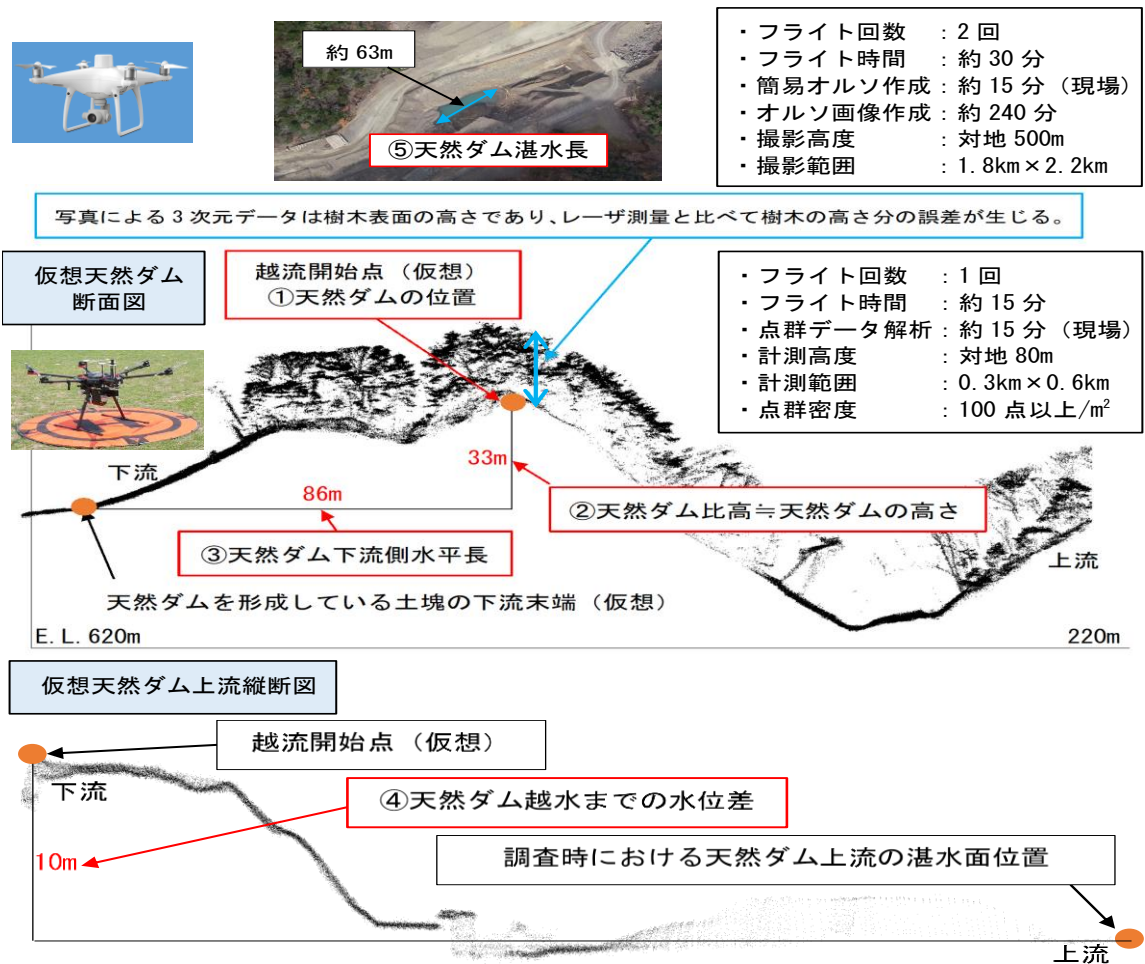


図-5 回転翼を用いた天然ダム形状の詳細把握 (Step2)

レーザ計測を行うことにより、従来より迅速かつ高精度で天然ダム決壊に係る被害区域や決壊時期のシミュレーションを実施できると考えられる。

### (3) 砂防調査・管理効率化ツール「SMART SABO」を活用した現地調査

Step3では、(2)で作成した天然ダム周辺のオルソ画像を「SMART SABO」の背景図として取り込み、TEC-FORCEの初動対応を想定した地上での緊急調査を実施した。その結果、調査場所・調査ルート of 把握、調査員の安全確認、調査の進捗管理、調査完了後のデータ整理等において、従来の調査方法と比べて格段に負荷を軽減できることを確認した。また、「SMART SABO」は別途作成した復旧計画(案)のCAD図面や国土数値情報の土砂災害警戒区域等のGISデータを取り込めるため、復旧計画と現地の各種情報を確認しながら現地調査を行うことができるなど、TEC-FORCEの初動対応のみならず、その後の復旧計画・復旧対策の検討等にも非常に有益であることを確認した(図-6)。

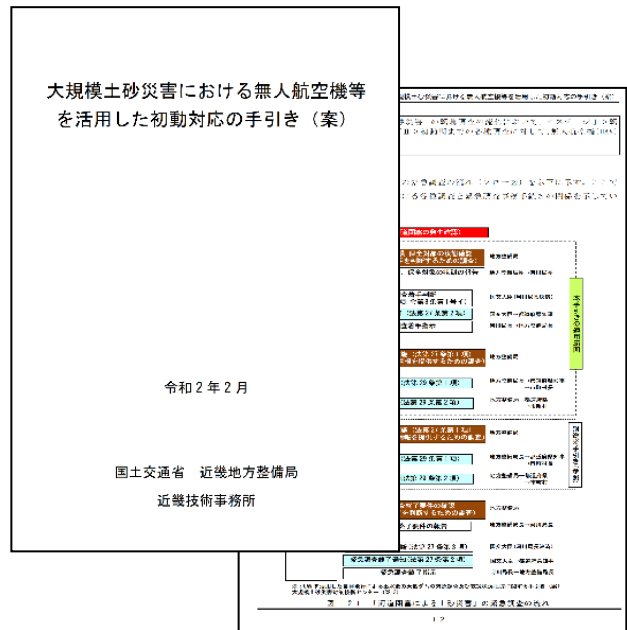


図-7 大規模土砂災害における無人航空機等を活用した初動対応の手引き 令和2年2月

無人航空機による撮影

オルソ画像

地上調査班

ICT機器を活用した調査

現在地

復旧計画(CAD)

**SMART SABO 本部画面イメージ**

リアルタイムで情報共有・活用

危険箇所数(現地調査結果)

調査予定箇所数

調査完了箇所数

調査進捗率

試行近畿v01 本部画面			
調査箇所(判定危険度)		進捗率	
調査結果(写真)		80%	
写真撮影場所		調査結果リスト	
移動軌跡		背景地図：地理院地図にUAV空撮により作成したオルソを重ね合わせて表示	

調査予定箇所	調査完了	
15	12	
評価A	評価B	評価C
6	4	2

ID	箇所番号	班名	日時	評価
8	赤谷01	TEC01	12/10/2019 11:28 午前	A
9	赤谷02	TEC02	12/10/2019 11:35 午前	A
10	赤谷04	TEC04	12/10/2019 11:50 午前	A
11	赤谷03	TEC03	12/10/2019 11:50 午前	A
12	合流部 本川	-	12/10/2019 1:56 午後	B
13	1号堰堤下流 流路工	-	12/10/2019 2:02 午後	B
14	1号堰堤下流 流路工2	-	12/10/2019 2:09 午後	B
15	1号堰堤堆砂敷	-	12/10/2019 2:21 午後	A

図-6 SMART SABO を用いた現地の詳細把握 (Step3)

## 5. おわりに

本検討では、既往の大規模河道閉塞の発生箇所（奈良県五條市赤谷地区）で大規模土砂災害発生時の初動対応の実証実験を行い、無人航空機及びICT機器（砂防調査・管理効率化ツール「SMART SABO」）を活用することにより、従来より初動対応を格段に迅速、安全かつ高精度で実施できることを確認した。また、この結果を踏まえ、新たに「大規模土砂災害における無人航空機等を活用した初動対応の手引き(案) 令和2年2月」(図-7)を作成した。さらに、本手引きは、別途紀伊山系砂防事務所で開催されたUAVを用いた自動巡回・画像取得の実証実験の結果を踏まえ、さらに包括的な初動対応の内容を含む「UAVの自律飛行による天然ダムの緊急調査及び被災状況把握に関する手引き<sup>2)</sup>」として統合し、国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センターのホームページにて公開されている。本手引きに示した手法は、当該地区のみならず他の多くの大規模土砂災害の初動対応に活用できると考えられるため、今後大規模

土砂災害が発生した際は、本手法を参考にして初動対応を実施されることを期待する。

謝辞：本稿の執筆にあたっては、検証フィールドの提供をいただいた紀伊山系砂防事務所、並びに、自らのノウハウに基づく助言や検証機体候補を拡大するなど、積極的に取り組んでいただいた中電技術コンサルタント各位に、深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1)国土交通省砂防計画課 国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ：土砂災害防止法に基づく緊急調査実施の手引き（河道閉塞による土砂災害対策編），平成23年4月
- 2)国土交通省近畿地方整備局 大規模土砂災害対策技術センター：UAVの自律飛行による天然ダムの緊急調査及び被災状況把握に関する手引き, 令和2年3月  
<https://www-1.kkr.mlit.go.jp/kiisankei/center/research1.html>



# 倶知安余市道路におけるi-Constructionの 取組について

## — 3次元データの活用やICT等新技术導入により 事業の効率化を目指して—

大谷 篤嗣<sup>1</sup>・桑原 隆宏<sup>2</sup>・久保田 良司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北海道開発局 建設部 道路計画課 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

<sup>2,3</sup>北海道開発局 小樽開発建設部 小樽道路事務所 第1工務課  
(〒047-0036 北海道小樽市長橋四丁目14-34)

国土交通省生産性革命プロジェクトにおいて2019年度は生産性革命「貫徹の年」に位置づけられていた。この貫徹に向け、小樽開発建設部はi-Constructionモデル事務所に位置づけられ、「3次元情報活用モデル事業」に決定された「倶知安余市道路」での昨年度の取組状況について報告するものである。

キーワード i-Construction, 生産性革命, 貫徹の年, BIM/CIM

### 1. はじめに

国土交通省が2016年度より推進する生産性革命プロジェクトにおいて、4年目の2019年度は、「貫徹の年」に位置づけられていた。本プロジェクトは、その目標として、建設現場の生産性を2025年度までの10年以内に2割向上させることが掲げられている。

こうした全国的な取り組みの中、小樽開発建設部は2018年度に、全国10カ所の「i-Constructionモデル事務所」のうちの一つに、北海道で唯一選定された。小樽道路事務所が担当する一般国道5号倶知安余市道路(図-1参照)の改築事業についても、同年度に「3次元情報活用モデル事業」に指定され、事業の効率化を図るために、集中的、継続的にBIM/CIMを活用し、3次元データの活用やICT等の新技术の導入を加速することとなった。

そこで、本論文では小樽道路事務所が2018年度から継続的に実施しているICTの取り組みについて報告する。

### 2. 既出の課題への対策

#### (1) 機器スペックに関する課題への対策

2018年度銀山大橋 P3 橋脚工事及び銀山大橋 P2 橋脚外一連工事において聞き取り調査を実施したところ、発注者と工事受注者との間で PC の機器スペックに大きな差異があることが明らかとなった。このため、昨年度

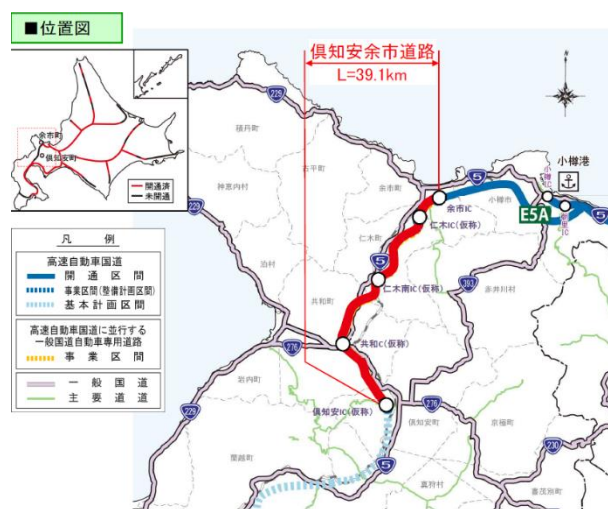


図-1 倶知安余市道路位置図

は BIM/CIM 用の PC を 1 台導入し、発注者として機器スペックの向上を図った。また、この PC 導入に伴い PC 形式がノート型からデスクトップ型になったことから、31.5 型ワイド液晶ディスプレイを導入した。

さらに、オートデスク(株)の Autodesk Civil 3D, Revit, 福井コンピュータ(株)の TREND-CORE CIM ビューア Free 版、川田テクノシステム(株)の V-nas 3D Viewer など 3 社の代表的なソフトウェアを導入した。

このように、PC 本体だけでなく、モニターやソフトも含めた機器スペックを向上したことで、取り扱うデー



タの大容量化と、視認性の向上が同時に実現した。また、複数のソフトウェアに対応できるようになったことは、工事受注者のソフトウェアの選択肢をできるだけ狭めないことにも繋がったと考えられる。こうした機器の機能を十分に活かせれば、関係者全体の生産性向上が期待できると考えられる。

## (2) 標準ファイル形式に関する課題への対策

国土交通省が定める「CIM事業における成果品作成の手引き(案)」(2019年5月)では、BIM/CIM事業における成果品納入の際に、オリジナルファイルを必須としている。その上で、国際標準の採用を念頭に、ソフトウェア製品が対応している場合、3Dデータの受け渡しに用いる標準ファイル形式として、IFC 2x3(構造物モデル)、LandXML(地形モデル等)での納品を求めている<sup>3)</sup>。

このうちIFCについては、2018年度の調査時点において、あるソフトウェアでIFC形式に変換して出力したデータが、異なるソフトウェアで読み取れるかどうかが保証されていなかった。

しかし、一般社団法人building SMART Japanが2019年3月に「土木IFC検定」の結果を公表し、5本のソフトウェアが出力検定と入力検定の両方に合格している<sup>3)</sup>。

また、LandXMLについても、一般社団法人OCFが「LandXMLに準じた3次元設計データ対応検定」の結果を公表しており、2020年4月30日時点で22本のソフトウェアが認証を得ている<sup>3)</sup>。

このように、標準化ファイル形式に関しては、対応ソフトウェアを検定・公表することで標準化ファイル形式が利用できることを保証する仕組みが機能し始めており、ソフトウェア開発者と検定組織の今後の更なる取り組みの進展に期待したい。

## 3. BIM/CIM活用工事における取り組み(事例紹介)

### (1) BIM/CIMモデルの施工への反映とWebカメラの活用

銀山大橋P6橋脚外一連工事において、3次元モデルを全面的に活用し、施工ステップに関する合意形成や、フォーミング打設計画のシミュレート(図-2参照)、鉄筋の自動数量算出等を実施した。

また、Webカメラを用いた出来形確認を試行した。動画の通信にはSkypeを利用した。

試行の結果、写真-1のように、出来形確認に必要な数値の読み取りは問題なく行えることが確認できた。Webカメラを用いた出来形確認の対象ではなかったが、コンクリート表面なども、写真-2の画質で確認することができたため、現場状況の確認など、他の用途においても積極



図-2 BIM/CIMモデルを活用した施工シミュレート



写真-1 Skypeの画質(数値)

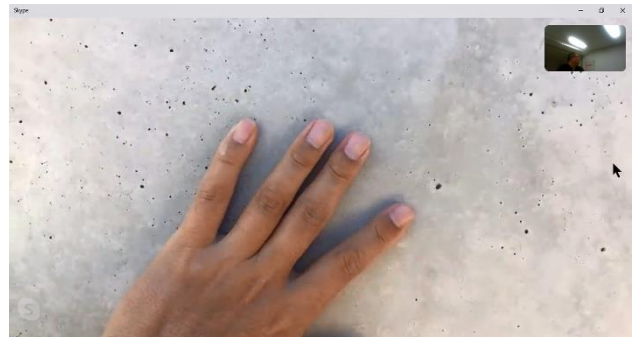


写真-2 Skypeの画質(コンクリート表面)

的に活用できる可能性が示唆された。

試行の効果として、現場までの移動時間が削減できることが示されたことが挙げられる。なお、小樽道路事務所から本工事の現場までの移動時間は往復1時間30分である。

今後、倶知安余市道路の事業進捗に伴い、共和～倶知安間など、事務所から現場までの距離がより長い工事が増えることから、発注者自前のWebカメラで通信が可能となれば、工事受注者と発注者双方の移動時間の削減によって、生産性がより向上することが期待できる。

### (2) 点検への活用を考慮したBIM/CIM納品の試行

登川大橋(B橋)上部工事において、維持管理と点検への活用を考慮したBIM/CIM納品を試行している。維持管理に関連する図面などの資料へのリンクを3Dモデル上に併記するとともに、5年ごとの法令点検の結果をディレクトリ内に記録できる形式とした。

イメージ図を図-3に示す。「主構造」「付属物」といった部材ごとのリンクにはそれぞれの図面を格納しつつ、「点検ポイント」には注意して点検すべき箇所の図等をリンクさせ、また「維持管理」にリンクさせたディレク

トリには今後の管理記録などを格納できるようにした。

本試行により、定期点検などで仮に鋼部材の損傷を発見した際にも、細かな構造ディテール等の見たい情報に素早くアクセスできるようになると考えられる。

こうした取り組みは、施工時の生産性のみを個別最適化することに捕らわれず、維持管理や点検に加え、災害などでの破損をも考慮した上で、ライフサイクル全体で発生する作業の効率化に寄与するものであると考えられる。換言すれば、生産性の全体最適化に寄与し、維持管理や点検時の効率性を向上させるという点で、「+α」をもたらす取り組みと言える。

なお、本工事における3Dモデルは、工事受注者がAutodesk社のNavisworksによって作成しているが、モデル作成・納品においては、前述した異なるソフトウェア同士で標準化ファイル形式に出力・活用できる範囲が限定的であるということもあり、オリジナルファイル(NWDファイル)のみで納入されている。この場合、今後モデルに舗装の情報を加える際にも、同じソフトウェアを使用することが必要となる。将来的に異なるソフトウェア同士でやりとりできるデータの範囲が広がることで、モデルの内部参照で維持管理に必要な情報をやりとりできるようになることを期待したい。

### (3) AIによる切羽判定

新稲穂トンネルR側仁木工区工事において、AIによる切羽判定を実施した。各断面の切羽の写真と現場職員が入力した点数をクラウドサーバーに格納し、AIの学習モデルが切羽の評価点と地山強度を算定、切羽観察簿として出力する仕組みである。これにより、前方探査の精度向上と断層の出現などの事前予測を図るとともに、切羽断面の確認や情報共有を容易にすることを目的とする。

これまで熟練技能者の経験に頼るところの大きかった

切羽の判定だが、現場外でも確認できるAIを介した切羽観察簿は、技術者の育成に役立ち、長期的な視野で見た際の生産性向上にも寄与すると考えられる。これもまた、施工時だけでなく生産性の向上を図るという点で、「+α」の取り組みと言える。

### (4) ICT土工による丁張のない曲線路の造成

ワイス改良外一連工事においてICT土工を実施し、マシンコントロール油圧ショベルによって、工事用道路を造成した。S字状に湾曲した道路構造に合わせた切土と盛土が必要となるため、従来工法では丁張りに神経を使う工事だが、TLSで取得した点群データによって3次元データを作成できたため、丁張りが不要となり、作業工程を縮減できた。更に、重機作業に必要な重機合図者の配置も不要となり、接触事故のリスク低減を図ることができた。福井コンピュータ(株)のTREND-POINTビューアを用い、図4に示す3次元モデルを閲覧することができたため、経験の乏しい1年目職員でも掘削土量などが一目で確認でき、従来の平均断面法を用いるのに比べ、設計変更の際の数量確認が省力化された。

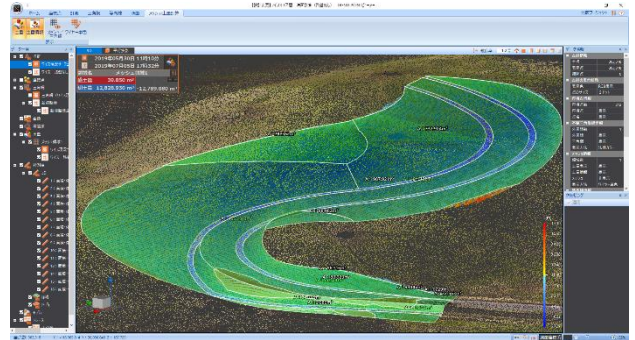


図4 工事用道路の3次元モデル

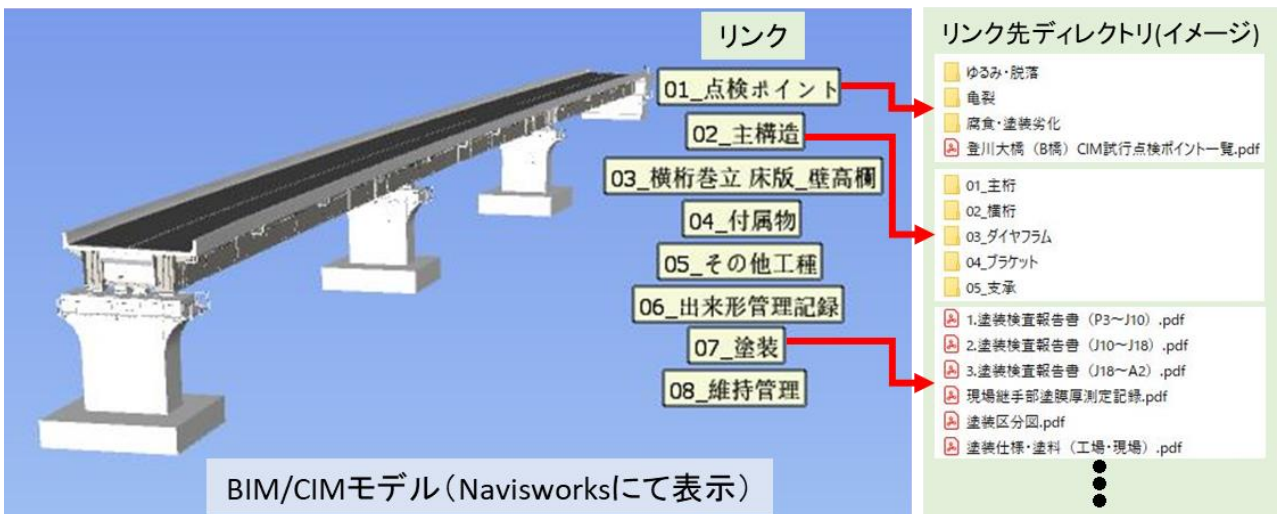


図3 登川大橋 (B橋) BIM/CIMモデル イメージ図

## 4. 今年度の課題と今後の展望

### (1) 積算基準のさらなる拡充

新たにICTが活用できる工種が毎年増えるなど、積算に関する基準に関しては、国も積極的に取り組んでいるところであるが、すでに基準が制定された工種についても、より一層の取り組みが求められる。例えば、生産性革命元年から行われているICT土工でも、幅が4.0m未満の盛土工など、一部において単価が制定されていない項目がある<sup>4)</sup>。今後も引き続き各種調査を通じて積算基準を充実させることで、北海道開発局及び各地方整備局発注の工事においてより実態を反映した積算に努めるとともに、都道府県や市町村の発注工事においてもi-Constructionを推進しやすい環境を構築していく必要がある。

### (2) 通信環境の確保

特に山間部の改築事業において、現場の工事事務所の通信環境がi-Construction推進のネックとなることがある。3次元データのやりとりには、大容量のデータ通信となることから、光回線などが望ましいと考えられる。

### (3) 新技術（Webカメラなど）へのキャッチアップ

Webカメラを用いた通信については、2019年度は工事受注者の全面的な協力により実現したが、他の工事においても移動時間の縮減が期待できることから、今後は工事受注者によらず、我々発注者側で対応できる環境を整えることが望ましいと考えられる。

そこで、将来的に発注者がWebカメラを用いた通信を自前で行えることを視野に入れ、出来形確認の試行後に小樽開発建設部と小樽道路事務所間で、Skype for Businessの練習を行った。当初は操作に慣れず、お互いの顔が映らない状態もあったが、最終的には同日中にお互いの顔

が表示された状態で通信できた。今後、より多くの職員がWebカメラに慣れていけば、本部と事務所など、これまで移動を要していた打ち合わせの効率化が期待できる。

### (4) 「+α」を取りこぼさない環境の構築

前章でも紹介したように、現場でのICT活用は、「自分たちの施工段階だけの生産性向上を求める」のではなく、「維持管理や点検、技術の承継も効率化する」など、生産性の全体最適化に寄与する「+α」の取り組みが行われている。

我々発注者には、3次元データが適切に引き継がれる環境を構築する責務があると考えられる。施工—維持管理間の情報連携を深めるためにも、電子納品の際に既存の竣工書類と作業が重複するという事態を解消できるよう、今後はICT活用工事の動向を踏まえつつ、納品に関する基準の見直しが必要であると考えられる。最終的には、設計—施工—維持管理（点検）に至るまで、貫徹した形で3次元データを適切に引き継ぐことができ、「+α」の気配りが取りこぼされない環境を構築できれば、建設業全体の生産性が飛躍的に向上できると考えられる。

**謝辞：**工事受注業者である協成建設工業(株)、(株)日立造船、西松・草分JV、(株)長組の皆様には写真等を提供して頂き、取材に快く応じて頂くなど、多大なご協力を賜った。皆様のご協力に対し、ここに謝意を示す。

### 参考文献

- 1) CIM事業における成果品作成の手引き（案）2019年5月 国土交通省大臣官房技術調整課 2019年5月、p14
- 2) IFC検定合格ソフトウェア一覧（一社）buildingSMART Japan
- 3) OCF認証ソフトウェア一覧（LandXML）（一社）OCF
- 4) 土木工事標準積算基準書（共通編）2020年度（4月版）国土交通省