

トンネル工事岩判定へのDX化に向けた取り組み

野口 将志¹・岩井 耀平²

¹株式会社オリエンタルコンサルタンツ関東支社 地下構造部
(〒151-0071東京都渋谷区本町3-12-1住友不動産西新宿ビル6号館)

²株式会社オリエンタルコンサルタンツ関西支社 地下構造部
(〒530-0005大阪府大阪市北区中之島3-2-18住友中之島ビル)

山岳トンネルの施工の際には、トンネル切羽に岩判定の判定員が参集して切羽の地山評価を行い、設計支保パターンの変更を行うトンネル切羽岩判定が実施されている。しかしながら、熟練した岩判定技術者の減少、若手技術者の経験機会の不足および山岳トンネル現場へのアクセスが困難という課題がある。解決策として「施工記録を活用した判定の自動化」、「通信技術を用いた判定の支援」、「人材育成」の3つの観点より岩判定のDX化に向けて取り組んだ。トンネル岩判定の高度化におけるAI、遠隔臨場、VRおよびアイトラッキングなど複数の検討・試行について報告を行う。

キーワード 岩判定、山岳トンネル、AI、VR、遠隔臨場

1. はじめに

山岳トンネル工事の施工にあたっては、切羽の観察・計測により地山等級の判定（以下、岩判定）を行い、安全性及び経済性を確保した合理的な施工を行う必要がある。岩判定は、トンネル工学および地質学に関する技術と経験が求められ、土木分野の中でも難易度が高い判定のひとつである。

近畿地方整備局においては、平成18年度に「トンネル地山等級判定マニュアル（試行案）¹⁾」を発刊し、判定指標や様式、判定の手順、データ蓄積の統一化をはかり、さらに平成28年度までに得られた近畿地方整備局管内におけるトンネル施工記録を元に、判定指標や判定時の留意事項を補完し、改訂をおこなっている²⁾。

一方で、岩判定を実施する熟練技術者は減少傾向にあるとともに、実際の切羽で経験を積む機会が限られており、若手技術者への技術伝承が行われにくい現状にある。この課題に対し、平成28年度から令和5年度の7年間にトンネル工事地山等級判定とりまとめ業務で取り組んだ、「施工記録を活用した判定の自動化」、「通信技術を用いた判定の支援」、「人材育成」の3つの観点から、トンネル工事岩判定（地山等級判定）のDX化（高度化）について報告する。

2. 施工記録を活用した判定の自動化

岩判定では、経験豊富な熟練技術者の減少などにより、判定員（近畿地方整備局では3名が標準）が揃わない状

況が生じつつある。このため、過去の切羽評価結果や、切羽写真、センサー等のデータを有効活用した判定の自動化を目指す取り組みが求められている。これらの背景から、令和3年度より、岩判定へのAIの活用、また、施工時に計測されている、もしくは簡易に計測可能であるが収集されていないデータの岩判定への活用について検討を進めた。

本論では、「岩判定へのAI試行」に加え「こそく音」と「赤外線サーモグラフィ画像」データに着目し、岩判定への活用について報告する。

(1) 岩判定へのAI試行

a) AIによる切羽評価

岩判定AIの構築においては、手振れ等の不良データを削除した4394枚の切羽画像を用いて、各切羽で判定された支保パターン、および9項目の評価区分を教師データとした。支保パターンを対象としたAIによる切羽評価の結果を表-1に示す。

表-1 AIの切羽評価結果

判定員の 岩判定	画像数	AIの回答（画像数）					判定員とAIの比較	
		C I	C II	D I	D II	D III	一致	1パターン 誤差
C I	62	30	23	2	0	7	48.39%	88.71%
C II	421	5	341	57	1	17	81.00%	95.72%
D I	261	3	79	132	17	30	50.57%	87.36%
D II	20	0	3	6	11	0	55.00%	85.00%

AIが判定員と同じ支保パターンを出した割合は、データ数の多いCⅡでは81%となるが、その他の支保パターンについては50%前後に留まる結果となった。ただし、判定員が判定する際にも3名の判定員が同一の判定結果とならない、あるいは判定員自身が2つの支保パターンのいずれにするか悩むことは多い。このため、AIが判定員と同じ支保パターンもしくは一つずれた支保パターンを選定した割合を確認した結果、一致率は90%前後となった。この結果からAIが判定した一致率の高い2つの支保パターン、および2つの支保パターンの一致率を踏まえて判定の参考にするという利用法であれば、現場での活用も視野に入れることが考えられた。

ただし、判定員は岩判定をする際、9項目の評価区分に対して4段階の評価を行い、その結果より算出される切羽総合点と過去の実績を比較して支保パターンを設定する。対して、本AIは切羽写真から直接支保パターンを判定するため、判定員の評価と対比することができない。このため、9項目4段階の各評価区分を判定するAIを作成した。この結果、データ数が豊富な項目は判定員とAIの一致率が60%以上あるが、データ数が10枚程度の場合は一一致率が20%と低い結果となった（(H)湧水、(I)水による劣化はデータ数が少ない）。

b) 判定の妥当性検証

9項目の各評価項目における判定では、「評価項目にのみ着目して判定する」という条件をAIに与えていないため、AIが判定の際に各項目のみに着目し判定しているか疑問視された。このため、AIが判定する際の着目点を可視化し、判定員の着目箇所と比較することで判定の妥当性を検証した。検証の対象は、9項目の判定項目の内、判定員とAIの判定結果が一致した割合が高い(A)切羽の状態：50断面、(E)割れ目の頻度：50断面の計100断面とした。検証方法は、切羽観察記録（切羽スケッチ）と可視化データを比較することで妥当性を確認した（図-1）。

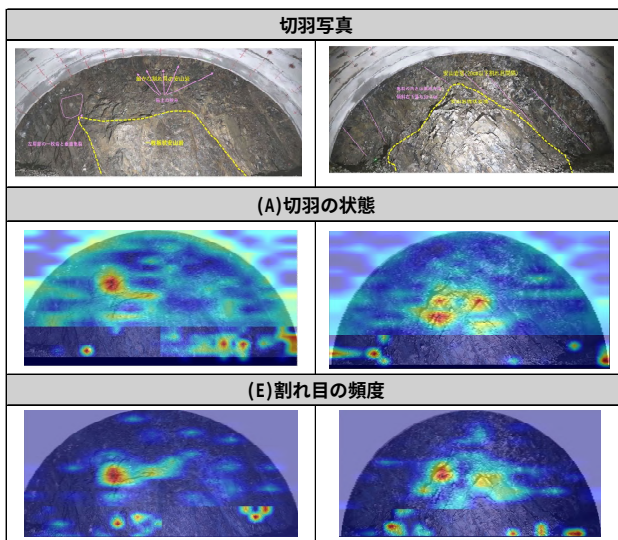


図-1 判定員とAIの着目点

判定員とAIの着目点の整合性は5段階で評価し、各断面

ごとに評価コメントを取りまとめ、判定員の見落としの可能性有無についても精査した。AIモデルは「天端」「右肩」「左肩」の3部位ごとに構築し、可視化した結果を1つの切羽として統合した。AIが切羽写真の背面に着目することを避けるため、背景をランダムパターン化し、切羽外に着目が及ぶことないよう配慮した。2項目（A・E）による妥当性評価の結果、(A) 6～8割以上の一致率：34%、(E) 6～8割以上の一致率：14%となり、8割以上は0%という結果となった（表-2）。いずれの結果でも判定員とAIの着目点の一致率は低い結果となった。

表-2 判定員とAIの着目点と一致率

評価(一致率)	各50断面	
	(A)切羽の状態	(E)割れ目の頻度
①8割以上（一致）	0%	0%
②6～8割程度	34%	14%
③4～6割程度	44%	56%
④2～4割程度	20%	30%
⑤1割以下（不一致）	2%	0%

(2) こそく音

こそくは、切羽判定前に必ず実施する浮石落としの作業であり（図-2）、こそく音を即時分析して切羽面の強度等に評価化することで、判定指標の一部を自動化できる可能性がある。また、現場作業員やサイクルへの負担をかけずに情報の取得が可能であるため活用を検討した。

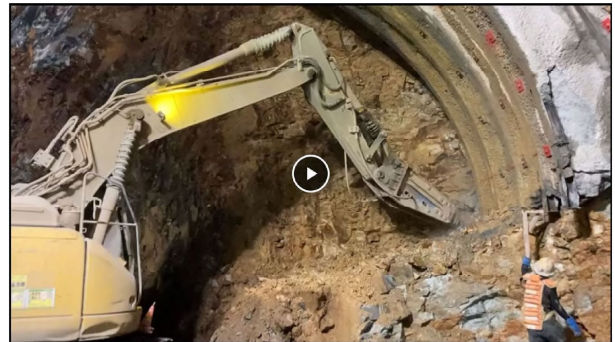


図-2 こそく音の撮影データ

a) データの取得

データの取得方法を表-3に示す。こそく音データは10断面を受領した。

表-3 データの取得方法（こそく音）

撮影	- こそく実施時 1日1回以上を目安に撮影 - トンネル一般部を対象（坑口部は除く） - こそく開始後の落下しやすい岩塊撤去後
作業内容	- 撮影方法：天端、左肩、右肩の3箇所ごとに10秒ずつ動画撮影（天端、左肩、右方の3箇所を加重平均し、圧縮強度を評価しているため） - 撮影位置：切羽から15m程度 - 撮影順序：天端・左肩、右肩の順序固定orファイル名に追記（ファイル名の例：天左右など）
機材	デジカメ、iPhone等（岩判定業務受注者所有）
受領データ	-施工者より受領- - 撮影データ - 切羽観察簿

b) 分析結果

こそく作業時の周波数域を図-3に示す。取得したデータは、約30Hz付近から400Hz付近にブレイカーのエンジン動作音が強く存在し、この範囲の音圧レベルが全体の大部分を占める。さらに3,000Hz付近にかけて一定レベルの動作音が続く傾向にあり、こそく音の集音に課題があることが判明した。動作音の軽減には、マイクロホンと切羽を一定距離にすること、直進性の高い高周波数の音を正確に捉えるため、音響分析方法の検討を行う必要がある。また、マイクロホンで捉える可聴域音、非可聴域音以外に、映像情報、必要に応じ、その他重機に取り付け可能なセンサ類などの利用も今後検討する。

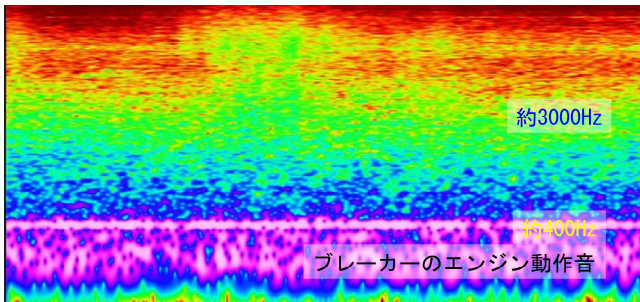


図-3 トンネル工事の周波数域（こそく作業）

上記に述べた通り、集音に関する課題はあるが、今回取得した周波数帯が似ているデータを取りまとめ、周波数帯の傾向を以下の3パターンに整理した（図-4）。

- Type1：健全な切羽：高周波数帯にピークが多い
- Type2：中間の切羽：高周波数帯ピークがやや少ない
- Type3：脆い切羽：高周波数帯ピークが明確でない

分析の結果、こそく音は、切羽の状況と相関性が高い可能性が確認できた。

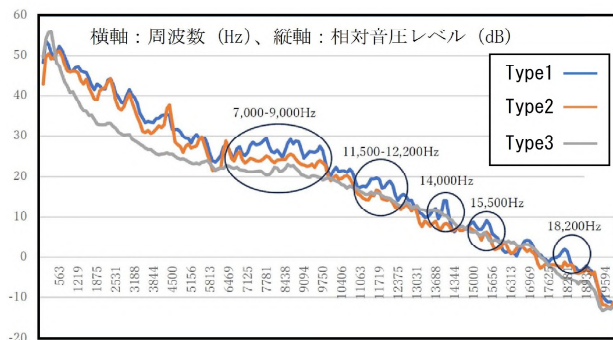


図-4 こそく作業音の周波数傾向

(3) 赤外線サーモグラフィ画像

赤外線サーモグラフィ画像は、主に温度の差を表すことから、切羽表面の湧水を捉えることが可能であるか検討した。また、水による影響以外についても画像と切羽観察簿のコメントを対比し、トンネル切羽評価に役立てることができるか確認した。切羽観察簿との対比作業は、トンネル工事経験者が実施した。

a) データ取得

データの取得方法を表-4に示す。赤外線サーモグラフィ画像は計13断面を受領した。

表-4 データ取得方法（赤外線サーモグラフィ画像）

撮影	・岩判定時 ・1日1回以上を目安に撮影 ・トンネル一般部を対象（坑口部は除く）	
作業内容	・撮影方法： ①撮影前にスマホアプリ起動、簡易な撮影設定【20秒程度】 ②切羽を1枚撮影【10秒程度】 ③デジカメ等で切羽を撮影【10秒程度】 ・撮影位置：上半切羽全体が映り込むように撮影（切羽から15m程度） ・切羽スケッチ：切羽の湧水箇所をスケッチ	
撮影機材	・デジカメ、iPhone等（岩判定業務受注者所有） ・赤外線サーモグラフィ付き ・アタッチメント（岩判定業務受注者所有）	
受領データ	-施工者より受領- ・切羽写真（通常カメラ） ※データ形式：JPG ・切羽写真（赤外線カメラ） ※データ形式：JPG ・切羽観察簿（湧水位置が明記されている資料）	

b) 分析結果

本分析では、赤外線サーモグラフィ画像と施工者が湧水位置を記載した切羽写真を比較した。この結果、赤外線サーモグラフィ画像は、一部切羽湧水と一致する箇所があるものの、大部分で乾湿状況を捉えていると言い難い結果であった（図-5）。

一方、赤外線サーモグラフィ画像は、亀裂や層理、褶曲等を可視化しているようにも見受けられる。

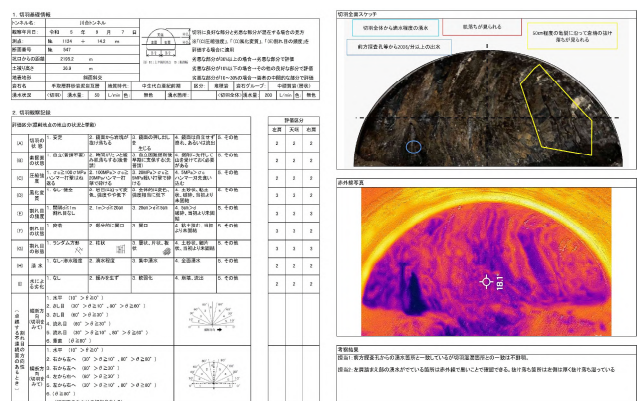


図-5 切羽観察簿と赤外線サーモグラフィ画像

3. 通信技術を用いた判定の支援

山岳トンネルは、発注者事務所から離れた遠方の山岳地に計画されることが多く、また岩判定の開始時間はトンネルの施工進捗により影響を受ける。さらに熟練の判定員が不足することから、現場で岩判定に参加することが困難な場合がある。このため、通信技術を用いた遠隔臨場による岩判定を試行した。

(1) 遠隔臨場の試行

遠隔臨場の試行は、令和3年から取り組み、計9現場にて実施した。令和3年にトンネル掘削現場と遠隔地（発注者事務所等）を無線通信等で接続させる遠隔臨場の検討、R4年度までに坑内・坑外Wi-Fi環境が確保されている現場での試行を完了した³⁾。

遠隔臨場の試行現場を表-5に示す.

表-5 遠隔臨場試行現場

施行日	発注事務所	トンネル名	遠隔臨場 実施延長
2021/9/14	国土技術政策総合研究所	実大トンネル	300m
2021/12/18	紀南河川国道事務所	江住第二トンネル	370m
2022/4/26	紀南河川国道事務所	高富トンネル	100m
2022/6/9	紀南河川国道事務所	奥瀬道路2号トンネル	240m
2022/9/30	紀南河川国道事務所	奥瀬道路2号トンネル	350m
2023/1/20	和歌山河川国道事務所	有田海南道路5号トンネル	765.5m
2023/6/2	紀南河川国道事務所	奥瀬道路2号トンネル	1140m
2024/2/28	福井河川国道事務所	川合トンネル	2500m
2024/3/6	兵庫国道事務所	炬口トンネル	900m

a) 遠隔臨場システムの選定

使用機器については、令和3年から令和4年において現場試行を通してトンネル切羽における岩判定に最適な機器選定をおこなった³⁾（表-6、図-6）。機器の選定にあたっては、現場でおこなわれる岩判定の質を落とさないよう現場での作業が再現されるよう配慮した。

表-6 使用機器（遠隔臨場）

機材名	機器写真	サイズ	数量	仕様・特徴
PTZ カメラ		30cm×30cm×30cm 程度	1	・ web カメラ ・ フル HD ・ ズーム倍率：30 倍 ・ 低被写体照度(0.05lux)対応
ウェアラブルカメラ		10cm×5cm×3cm 程度	1	・ ウェアラブルカメラ（判定員が所持） ・ フル HD ・ ズーム倍率：2～4 倍
骨伝導イヤホンマイク		26g	1	・ ノイズキャンセリングマイクイヤホン
坑内通信 (無線通信)		16.5cm×16.5cm×10cm 1.8kg	4	・ ミリ波通信、電波法の規制対象外 ・ 最大通信速度：1Gbps ※購入金額：120 万円程度(1 対向) レンタル費はメーカーによって異なる
坑外通信 (starlink)		57.5cm×51.1cm 約 20kg	1	・ 低軌道衛星通信 ・ 上り速度：25Mbps ・ 下り速度：150Mbps

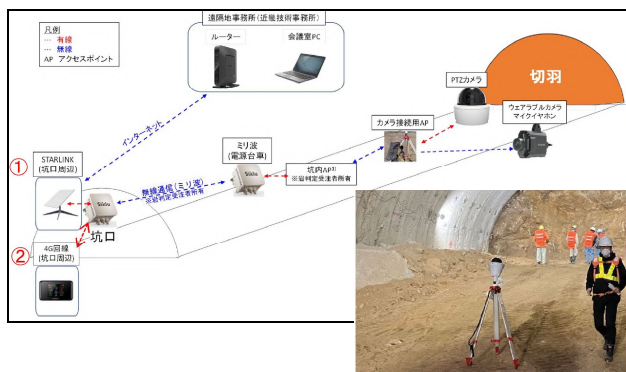


図-6 遠隔臨場システムの配置例

① PTZカメラ、ウェアブルカメラ

現場における岩判定では、判定員は自身で確認が必要と判断した箇所を自由に確認する。遠隔臨場の際しても切羽全体を遠隔者が拡大、上下、左右に自由に遠隔操作できるPIZカメラを採用した。また、PIZカメラだけでは側方や足元のずり等の確認ができないため、ウェアブルカメラを岩判定支援者が持つことにより、補完するものとした。なお、PIZカメラ、

ウェアブルカメラの画質については、現場での試行結果より、9項目の評価を画面上でおこなえる必要があるため、FHD以上、かつ暗所、及び切羽面での照度のばらつきへの追従性から低被写体照度を0.05lux以上を推奨スペックとした。

② 骨伝導イヤホン・マイク

現場での岩判定における判定員は、岩判定補助員に専門的な質問を行い、助言のもと判定を実施する。同じ環境を確保するため、骨導イヤホン・マイクにより騒音下でも明瞭に現場と遠隔地でリアルタイムでのやりとりできる環境を確保した。

③ 坑内外通信

山岳トンネルは、4G、5G等のWi-Fi不感地帯に計画されることも多い。また、延長が300m程度の場合、トンネル内にWi-Fiが設置されないこともある。このような環境下でも通信できる手段として、トンネル内についてはミリ波通信、LED通信の通信試験を実施した。結果、目視で投光部から受光部が確認できれば、発信機・受信機を数百m離してFHD配信に必要な通信量を確保可能であることを確認した。また、トンネル外通信については低軌道衛星通信(starlink)の施行を行い、衛星方向に支障物が無い環境であれば、FHDに必要な通信量が十分確保されることを確認した。

④ 遠隔地のモニター

50インチ、32インチ、24インチ、13インチ（ノートパソコン）について、複数の岩判定経験者で判定を試行した結果、24インチ以上が切羽の臨場感、切羽全体のひびわれや風化を確認する上で良好という結果となった。ただし、大型ディスプレイの場合、画質が粗くなる傾向にあるため、画素数に応じた選択が必要となる。また、PTZカメラとウェアブルの2画面構成が確認しやすく推奨される。

b) 現場臨場と遠隔臨場における判定のばらつき

トンネル切羽前における現場臨場および遠隔臨場の結果を切羽判定集計表に整理した(表-7)。

表-7 切羽判定集計表による判定のばらつき

[illegible]

遠隔地の判定員は、本現場での切羽観察経験者であり、切羽状況を把握した者が担当した。現場臨場と遠隔臨場

の判定結果は、概ね一致している。遠隔地の判定員に対する聞き取りにおいても、切羽確認は、PIZカメラを操作することで容易であり、現場臨場では確認できない粘土の介在状況をはっきりと確認することが可能という回答であった。ただし、(C)圧縮強度の判定は、現場でのマイクによる集音、遠隔地でのスピーカーの性能にも起因し、打撃感も得難いため、遠隔での判定をどのように行うかが課題として再認識された。

4. 人材の育成

トンネル工事岩判定は、トンネル工事に関する経験者・技術者が減少する中で、技術伝承を通じた人材の育成が求められる。したがって、本論では、現場以外でも切羽の確認が可能なVR活用、熟練の判定員の着目点可視化を目的としたアイトラッキングについて検討した。

(1) 切羽VR検討

VR（仮想現実）は、限りなく実体験に近い体験をすることができ、施工現場以外の場所で切羽観察が可能となる。このため、切羽がVRの活用により、亀裂や凹凸が再現され実体験と同様なレベルで再現され、人材育成への利用が可能か検討した。

a) VRのデータ作成

トンネル切羽VRを作成は、Matterportを利用した（表-8）。トンネル切羽をMatterportで撮影し、VR視聴した場合、岩判定に必要とされる3次元的な判断要素を補完することが可能であるかを検証した。

表-8 使用機材（VR）

製品仕様	
Matterport Pro2 3Dカメラ製品仕様（抜粋）	
・サイズ（mm）：111（奥行）×260（幅）×229（高さ） ・重量：3.4kg ・画像解像度（メガピクセル）：134メガピクセル ・レンズ：4Kフルガラス ・正確さ：範囲内で99% ・最大距離：4.5 m ・視野：360°（左右）×300°（垂直）	
Meta Quest 3製品仕様（抜粋）	
・サイズ（mm）：140（奥行）×184（幅）×94（高さ） ・重量：515g ・パフォーマンス：Qualcomm Snapdragon XR2 Gen 2 ・DRAM：8GB ・ストレージ容量：512GB ・ディスプレイ：2064x2208ピクセルInfinite Display（片目につき）	

a) 実施結果

VRデータ撮影時は、切羽面と撮影位置の距離が7m程度あると、切羽面の点群を十分に撮影できないことが判明した。切羽に近づくことで点群撮影が可能となり、ビューワー内で割れ目の間隔を計測することができるが、画像取得者の安全確保が必要課題となる。

撮影したデータを基に、VRを視聴した結果、亀裂や凹凸の確認が可能であり、VRにて切羽評価を行える精度であることを確認した。また、切羽観察は、VRの活用により時間制限なく行うことができることがメリットである。

図-7は、本業務で取得したVR空間に、複数者が同時にVR内に入り、模擬岩判定と勉強会を実施した際の例である。



図-7 VRデータ構築したトンネル切羽周辺のVR空間

(2) アイトラッキング

アイトラッキングは、視線を可視化する技術である。このアイトラッキングの試行によって、熟練の判定員が無意識に着目している点を可視化することが可能となることから、人材育成への活用を検討した。

a) データ収集

アイトラッキング機器は、トビーテクノロジー社のアイトラッカーを利用した（表-9）。データ収集は、岩判定時に熟練の判定員がアイトラッカーを着用して、切羽観察を実施した。

表-9 使用機材（アイトラッキング）

製品仕様	
・アイトラッキング技術：角膜反射、暗所瞳孔、ステレオ画像法 ・サンプリングレート：50Hzまたは100Hz ・視差補正：自動 ・瞳孔径出力：あり 単位（mm） ・両眼でのトラッキング：○ ・ガラスズレ補正：有、3Dアイモデル	
・キャリブレーションポイント：1点 ・正確度：0.6°	

b) 実施結果

アイトラッキングは、装着者の着目箇所のヒートマップ化、着目する順序や時間の記録が可能である。熟練の判定員による切羽観察を行う際の着目点を可視化したものを図-8、図-9に示す。

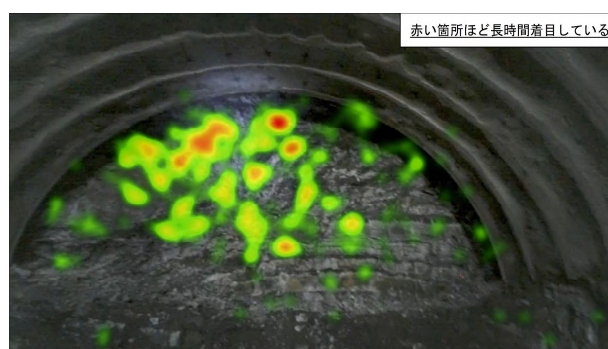


図-8 切羽着目点のヒートマップ



図-9 切羽着目位置および着目時間

このようなアイトラッキングは、熟練の判定員の解説を合わせることで学習教材として利用可能である。また、岩判定における切羽説明として、実際に観察した流れや気になる点を注視できるといった岩判定の高度化にも有効であると想定される。

5. まとめ

(1) 岩判定のAI試行

AIによる切羽評価は、AIが判定員と同じ支保パターンもしくは一つずれた支保パターンを選定した割合が、85%以上となった。判定員による判定は、1択の判定となることは少なく、AIと同様に1パターン程度の誤差を持った判定となる。このため、AIによる岩判定は、現場での活用が可能な段階であると判断できる。一方で、判定の妥当性は、9項目4段階による判定において、判定員とAIの着目点の一致率が少ない結果となった。ただし、切羽画像から支保パターンを選定するAIの場合には、判定者とAIの着目点が一致する可能性があるため、今後の検討で検証を進める予定である。

(2) こそく音

こそく音は、トンネル工事環境より集音に課題があるものの、切羽の状況と相関性が高いことが想定された。このため、今後データを追加し、岩判定の判定指標となるか検証していく必要がある。

(3) 赤外線サーモグラフィ画像

切羽の赤外線サーモグラフィ画像のみでは、湧水状況を捉えられない結果となった。一方、この画像は、湧水の他に、亀裂や割れ目と一致している可能性があり、データ数を増やし、他の評価項目への活用を検討予定である。

(4) 遠隔臨場の試行

令和3年より施行していた遠隔臨場は、現場臨場と遠隔臨場の判定結果が概ね一致しており、岩判定に活用可

能であることが確認できた。今後、岩判定の遠隔臨場は、本格運用に向けて、運用基準を作成する予定である。

(5) 切羽VR検討

切羽のVRは、亀裂や凹凸の確認が可能であり、切羽評価を行える精度である。トンネル工事に関する経験者・技術者が減少する中で、このVR技術を活用することにより、切羽観察を時間制限なく行うことができる。今後、社内の若手人材、あるいは大学等のタイアップにより学生を対象に教育効果に対する検証を進めていきたい。

(6) アイトラッキング

アイトラッキングは、熟練の判定員の解説を合わせることで、若手技術者の学習教材として利用可能である。また、岩判定の高度化として、観察した流れや気になる点を注視できる切羽説明として有効である。取得も比較的容易であることから、「(5)切羽VR検討」とあわせて、教育分野への応用について検討を深めていきたい。

6. おわりに

トンネル工事岩判定とりまとめ業務では、本報告の他、前方探査、先進ボーリング、コンピュータジャンボ等の先進データの活用、画像解析、切羽の3次元点群活用等にも取り組んでいる。今後、トンネル施工においてもDX化が求められる。本報告がその一助となれば幸いである。

謝辞：当検討の実施に際しては、ご指導、ご助言いただいた近畿地方整備局のトンネルアドバイザーの大西有三、京都大学名誉教授、神戸大学芥川真一、関西大学小山倫史教授、また、トンネル工事岩判定業務において現場試行の調整をいただいた近畿技術事務所、近畿地方整備局道路工事課、及び現場の提供をいただいた安藤ハザマ、前田建設工業、熊谷組、清水建設、青木あすなる建設の皆様には改めてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 近畿地方整備局道路工事課：「トンネル地山等級判定マニュアル（試行案）」，2006
- 2) 近畿地方整備局道路工事課：「トンネル地山等級判定マニュアル（試行案）（平成18年9月試行案の改訂版）」，2016
- 3) 山田・西尾：「トンネル岩判定における遠隔臨場の適用について」，2022

関連論文

- 山田・西尾：「トンネル岩判定における遠隔臨場の適用について」，2022

A I 画像解析及び自転車プローブデータを用いた自転車動向調査

田中 彩音¹・図師 友広²

¹近畿地方整備局 兵庫国道事務所 管理第二課 (〒650-0042 神戸市中央区波止場町3-11)

²近畿地方整備局 福知山河川国道事務所 (〒620-0875 京都府福知山市字堀小字今岡2459-14) .

本論文は、DX技術の進展を背景に、AI画像解析技術と自転車プローブデータを活用して、自転車の動向を調査する方法について紹介するものである。効率的かつ正確に自転車の動向を把握することで、今後の安全で快適な自転車通行空間の整備等に生かすことが期待される。

キーワード 自転車, DX, AI 画像解析, 人流データ

1. はじめに

数ある交通モードの中で、自転車は最もその利用実態や特性が把握しにくいもののひとつである。日々の通勤や通学のほか、レジャーやスポーツ、買い物など、様々な目的で自転車を使用する。また、自転車の移動経路は多様であり、道路や歩道、公園、さらには私有地など、指定されたルート以外の場所を含むことがある。他の交通モードと比べて非常に個別的かつ非計画的に利用される傾向から、自転車の動向を正確に追跡し、分析することが難しくなっている。挙動や軌跡も複雑で、交通状況把握の最も基礎的なデータである道路交通センサス調査においても自転車は計測対象外となっている。

一方、令和3年5月に第2次自転車活用推進計画が閣議決定されるなど、低炭素で健康的な移動手段として今後も自転車の活用が求められており、安全で快適な走行空間を確保するための実態把握が不可欠である。

本稿は、上記の背景を踏まえ、捉えにくい自転車の利用動向を、DX技術を活用してマクロな視点・ミクロな視点の両面から把握しようと試みた結果を報告するものである。

2. 自転車の利活用実態把握における課題

(1) 自転車の挙動把握における課題

従来、自転車の調査方法としては、調査箇所にビデオを設置、記録を行い、目視にて通行台数の計測及び衝突その他の利用上の問題を観測して実施していた。従来の

調査手法には非効率な面があり、より効率的に事象を計測できる手法が求められている。

(2) 自転車の交通量や経路・OD把握における課題

自転車の交通量は前項に挙げたビデオ調査や人手による観測により計測することができるが、あくまでも調査日一日の量しか把握できない。また、移動経路や発終点を把握する方法としては、アンケート調査が挙げられるが、アンケートに回答した限られた対象の傾向となってしまう。これをより網羅的に把握するための手法が求められている。

3. 調査対象箇所及び目的

国道171号甲武橋は、近傍に複数の中学校や高校が立地しており、周辺地域の学生が通学ルートとして使用している。しかし、自転車歩行者道幅員が上下線とも1.5m程度と狭く、図-1に示すように、朝夕の通勤通学時間帯は集中し危険な状態である（南側：1,468台/12h、R3.12.16交通量調査結果）。

国道2号武庫大橋は、付加車線が設置された区間において、歩道の有効幅員が1.8m（縁石を加え2.0m）と狭く、朝ピーク時自転車と歩行者、自転車同士の離合が難しいケースが生じている。

本稿では、両橋梁における課題を定量的に把握するため、AI画像解析技術を活用して、すれ違い・離隔の自動計測を実施した。また、当該区間課題の影響を受けている利用者の特性を把握するため、人流データを活用して利用経路や目的地等を分析した。



図-1 甲武橋における自転車同士のすれ違い状況

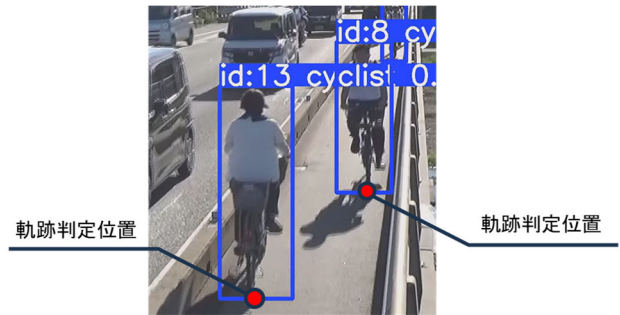


図-2 アノテーションボックスによる走行軌跡の判定

4. 自転車同士のすれ違い離隔計測（ミクロ視点）

(1) 解析モデルの選定

AI推測モデルは、汎用性の高いUltralytics社のYOLO11（2024/10リリース）を用いた。ライセンスはAGPL-3.0（<https://www.gnu.org/licenses/agpl-3.0.html>）が適用される（複製・改変・再配布・商用利用可）。

(2) 学習データの取得

AI識別に使う画像・映像は固定カメラから撮影されており、撮影位置や画角によって正面、側面、俯瞰など複数パターンの自転車画像の解析が必要となる可能性がある。このため、なるべく多くの学習データから汎用性の高い自転車識別モデルを作成することが重要と考えた。

ベースとした教師モデルは、Roboflow cyclistを活用した。これは、テーマに応じてユーザーが収集した数百～数千枚の画像をダウンロードして利用できる。

多くは識別のための枠の位置情報（アノテーション）が付随しており、学習データ作成時に大部分を占める作業を簡略化できる。アノテーションは、自転車+運転者を囲むボックスであり、下段中央が概ね自転車のタイヤが接地する位置となるため、ボックス下辺中央点の位置の自転車の走行軌跡点を示すことになる。厳密には、奥方向に向かう自転車は後輪の接地部分、手前方向に向かう自転車は前輪の接地部分を示している。（図-2）

しかし、Roboflowからダウンロードしたデータのみを用いて自転車（cyclist）認識モデルを作成し、実際の映像でテストした結果、2台がまとめられて1台となる検知をしたり、検知に著しい遅れが見られたりなど認識精度の低い箇所が一部に見られた。（図-3）

そこで、解析対象とは別日、別アングルで撮影した過年度撮影データを学習に用いて追加学習を行うことにより、精度向上を図った。（表-1、図-4）



図-3 認識精度が低いケースの例

表-1 学習データの画像数

種別	画像数	備考
標準モデル Roboflow cyclist	4,000	ダウンロードデータ
追加学習用画像	330	2022/12撮影データより抽出
合計	4,330	

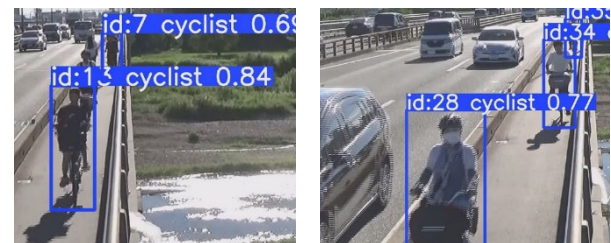


図-4 認識精度の改善例

(3) 自転車識別AIモデル評価

実際の映像の目視確認数との比較により追加学習後のモデルの適合率、再現率を算出した。検証データは、2024/10/1 7～19時のうち交通量の多い8時～8時30分の30分間データとし、歩道上り・下り自転車に対し、正しくIDが振られているかを確認した。表-2に検証結果を示す。適合率（AIの自転車検知数（正解）/AIの自転車検知数（正解+不正解））は、上下計で99%でありAIでの自転車検知の正確性は高いことが分かった。また、再現率（AIの自転車検知数（正解）/実際の自転車台数）は、上下計で97%であり、ほぼ漏れなく検知できていることが分かった。

(4) 平面投影手法の検討

解析に用いる映像は、歩道上を斜めから撮影した映像であり、すれ違い離隔を計測するためには平面投影が不可欠であった。映像画像上の画素単位での自転車位置情報を実際の位置や距離単位に換算するため、歩道を中心とした平面に投影を行うこととした。投影には実寸を計測したものや図面上の寸法値を基準とした。(図-5)

(5) すれ違い離隔の計測

認識された点の内、歩道内を通る自転車の軌跡点を平面上にプロットした。また点の移動方向分析から上下方向に分類し、方向別に着色を行った。(図-6)

ID別の最接近点をすれ違い離隔として以下のルールで算定を行った。なお、アノテーションボックスの中心間距離に加え、より利用者の実感に沿うように最少離隔測定位置での計測も行った。(図-7)

- ① 同一時間に存在する他IDに対し全時間で離隔距離を算定
- ② ①で得られた距離のうち各IDで最小のものを抽出

計測結果を図-8、9、10に示す。中心間は60～100cm、最小離隔は5～40cmの間に分布している。

表-2 モデル検証

計測方法		全体	上り	下り
実際の自転車数		179	65	114
AI検知	AIの自転車検知数(正解のみ)	173	63	110
	AIの自転車検知数(不正解のみ)	2	0	2
	AIの自転車検知数(正解+不正解)	175	63	112

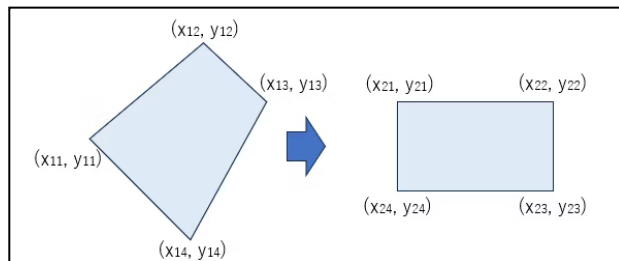


図-5 平面投影イメージ

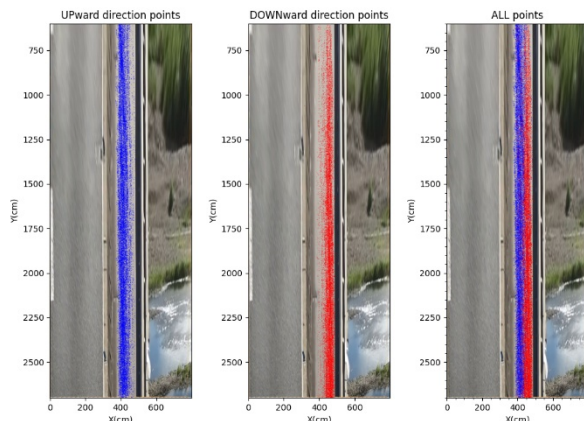


図-6 軌跡の取得状況

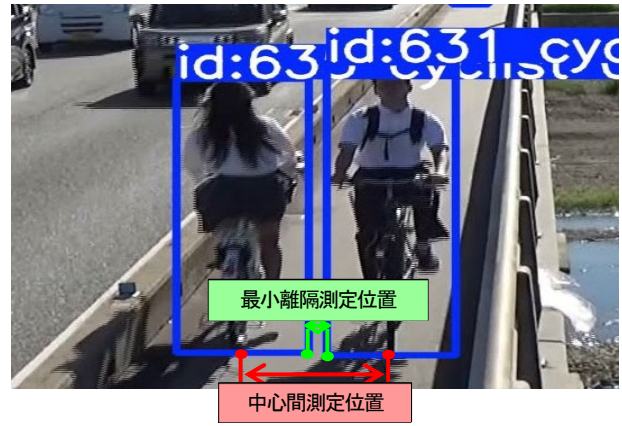


図-7 離隔計測イメージ

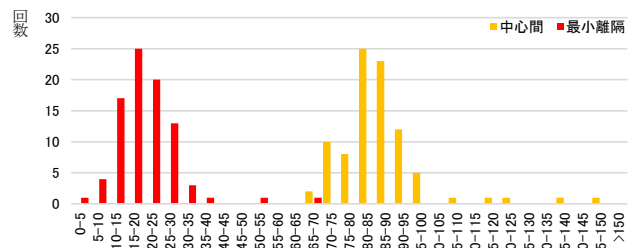


図-8 離隔計測結果(cm)

中心間: 67.0cm・最小離隔: 5.66cm 中心間: 71.1cm最小離隔: 10.6cm

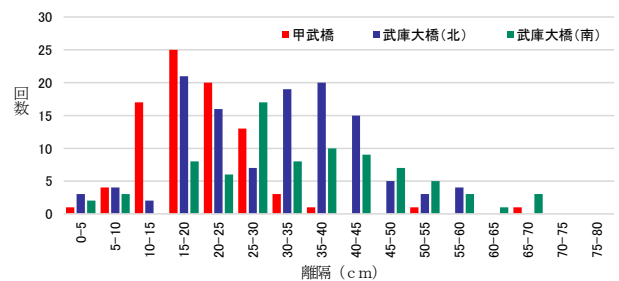


図-9 最小離隔の橋梁による差(cm)



図-10 離隔が小さいすれ違いの例

5. 人流データによる移動実態分析（マクロ視点）

(1) 活用するデータの選定

人流データは様々なデータベンダーが提供（販売）しているため、各ベンダーが提供するデータの仕様等を調査し、サンプル数が多く、交通モードで自転車を判別可能なデータであるブログウォッチャー株式会社の「ポイントデータ（行動ログ）」を採用した。当該データは、アンドロイドOSのスマートフォンで特定のアプリをインストールされ、かつデータ取得を許諾されたユーザーのみのデータとなっている。分析期間は令和6年5月7日～6月6日の1ヵ月とし、分析範囲は兵庫県に1度でも履歴が残った自転車ユーザーの期間中全データとした。本分析における仕様は表-3の通りである。

(2) 分析手法の検討

購入したデータは自転車以外を含む膨大な移動データであり、その中から甲武橋及び武庫大橋を通過する自転車移動のみを抽出する必要があった。分析手法が確立されていないことから、以下に示す独自の分析手順を検討した。（図-11）

(3) ステップ1：自転車ログの抽出

兵庫県内全データから、移動手段フラグが自転車となっているログのみを抽出（11,868,307ログ）した。また、作業性を考慮し、武庫川周辺エリアに絞り込み（2次メッシュ4つ分、約25km四方）を行った。その結果、2,348,807ログが残存した。（除去率；80%）

(4) ステップ2：武庫川渡河ログペア抽出

ステップ1で抽出したログについて、同一IDで武庫川を跨ぐログ2点を抽出（74,246ログペア）した。日を跨いだ2点は純粋な移動ではない可能性が高いため、異なる日付である場合を除去し52,783ログペアを抽出した。（除去率；29%）

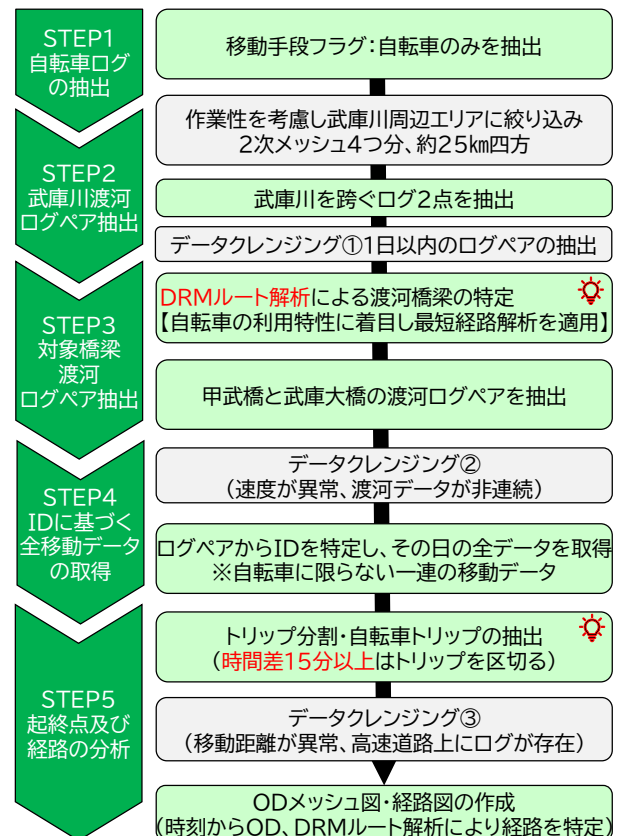


図-11 分析手順

(5) ステップ3：対象橋梁渡河ログペア抽出

ステップ2まででは、渡河した橋梁が不明瞭であるため、自転車が最短経路を選択する傾向にあることに着目し、DRMルート解析によって渡河橋梁を特定し、甲武橋または武庫大橋を渡河したと考えられるログペアを抽出した。最短経路探索には、ArcGISのネットワークアナリストを使用（図-12）し、道路データはDRMを使用した。なお、自転車の通行ができない高速道路等の自専道は除外し解析した。その結果、11,959ログペアが抽出された。（除去率；77%）

表-3 データ仕様

項目名称	概要
固定ID	ベンダーが付与するID（継続保持）
性別	男、女
年代	20代、30代、40代、50代、60代
取得時間	位置情報の取得時間を日本標準時で表示
緯度	汎化加工済み緯度
経度	汎化加工済み経度
推定居住エリア	緯度経度の8分の1地域メッシュ
推定勤務エリア	（一辺125m）
移動手段	徒歩/自転車/車/電車
移動目的	通勤、退勤、業務、観光、短距離観光、その他
速度	計測時点の瞬間的な移動速度を表す。



図-12 最短経路探索による解析

(6) ステップ4：IDに基づく全移動データの取得

データクレンジングとして、渡河データが非連続なもの、速度が異常なものを除去（図-13）し、残存した5,238ログペアのIDに紐づく全移動を抽出した。

(7) ステップ5：起終点及び経路の分析

自転車だけの移動を抽出し、ログ間隔が15分以上のものはトリップを切断した上で、自転車移動では考えられない挙動を示しているデータを除外した。最終的に、4,649トリップを抽出（表-4）し、起終点・経路を図化した。（図-14）

(8) 分析結果

検討した手順により、甲武橋2,089トリップ、武庫大橋2,560トリップを抽出した。両橋梁とも、平日朝7時～9時、夕方17時～18時にトリップ数が増加する傾向にあった。例として甲武橋の自転車の平日朝7時～9時の通学時間帯における起終点、主な経路を図-15に示す。自転車トリップの終点は、学校や鉄道駅周辺に集中していることから、学生や鉄道通勤者等が多いことが推測される。



図-14 抽出した自転車トリップの例

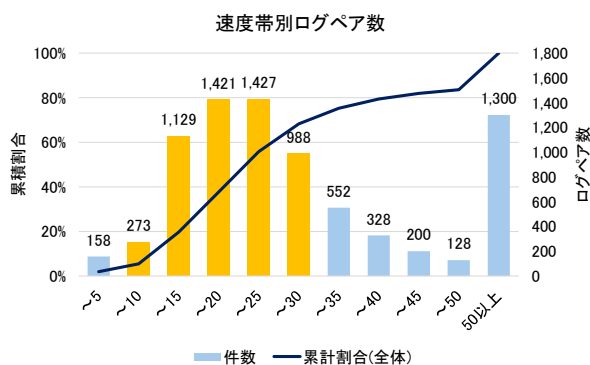


図-13 速度帯ヒストグラム

表-4 トリップ抽出結果

STEP	クレンジング内容	除去数	残存数	除去率
1	移動手段が自転車のみログ数		11,868,307	
	武庫川周辺に絞り込みログ数	9,519,500	2,348,807	80%
2	武庫川を跨ぐログペア数		74,246	
	一日以内で渡河するログペア数	21,463	52,783	29%
3	武庫大橋または甲武橋を渡河したログペア数	40,824	11,959	77%
4	渡河ログペアの間に他の移動手段が含まれない連続ペア数	4,055	7,904	34%
	渡河時のルート解析速度が5～30km/hのログペア数	2,666	5,238	34%
5	自転車のみの移動の15分区切りのトリップ数	486	4,752	9%
	自転車移動では考えられない挙動を省いたトリップ数	103	4,649	2%

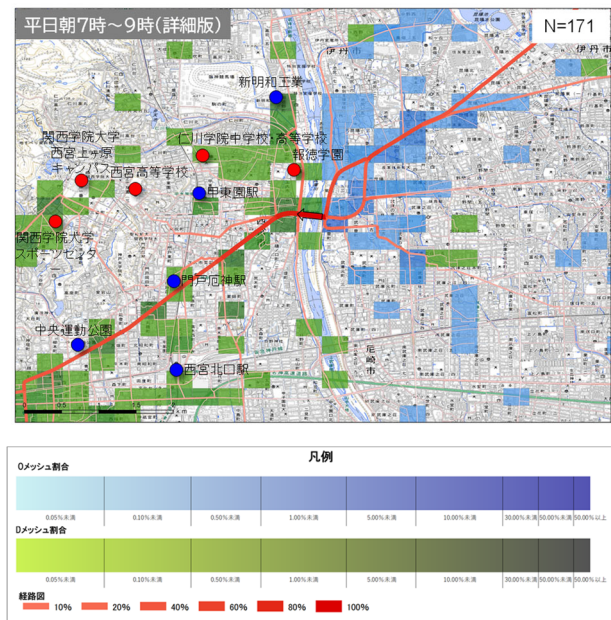


図-15 甲武橋を利用する自転車の経路やOD

6. 今後の課題

(1) 自転車同士のすれ違い離隔計測

図-16に示すように、日没後は著しく精度が落ちる。これは学習モデルが基本的に昼間を対象としているためと考えられ、夜間の画像を学習させることで精度向上が期待できる。平面投影手法は、カメラのパン・チルトやズームに非対応のため、カメラの視点移動があった場合に実距離変換の誤差が生じる。調査は、画角等が変化しないように慎重に実施する必要がある。

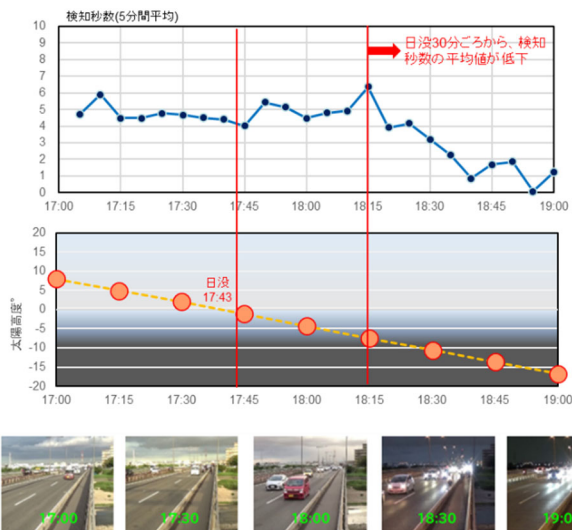


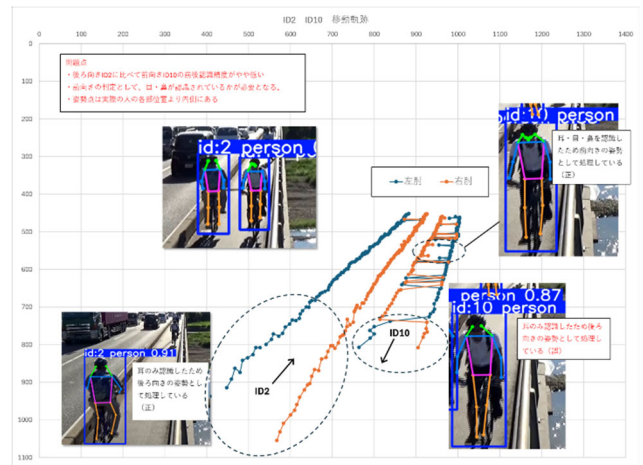
図-16 日没前後の平均検知秒数

(2) 姿勢推定poseモデルによる計測

poseモデルは、姿勢による左右（目、耳、肩、肘、手、腰、膝、足）を識別し、それらの座標が得られるため、より厳密なすれ違い離隔を計測することができる可能性がある。例えば、右肘と左肘の間隔を計測することで、より精度の高いすれ違い離隔が得られる可能性がある。

今回試行的に実施したところ、目・鼻がある場合は前向き、それ以外は後ろ向き判定を行っているため、右肘と左肘の関係が入れ替わるタイミング等が見られ、離隔計測が上手くいかないケースが多かった。（図-17）

計測精度を高めるうえで、poseモデルの適用可能性をさらに検証することが望ましい。



(3) 人流データによる移動実態分析

本分析を通じて得られた留意点を以下に整理する。

- 移動手段の区分がなされているが、速度に着目しクレンジングが必要
- 属性（性別、年齢層）の付与割合が低いため、詳細な属性別分析には適さない
- トリップに分割されていないため、OD分析時は、時系列で並べ替えてトリップ分割の上、起終点フラグを付与する必要がある
- 道路データにマッチングしていないため、経路分析を実施するためにはDRM等にマップマッチングが必要
- 起終点が同じ側になる移動のケースが含まれる購入データは、道路データに紐づけされていないことや起終点フラグがないことなどに留意と工夫が必要である。

謝辞：本論文の作成にあたり、ご助言、ご協力いただいた、（株）建設技術研究所、兵庫国道事務所の皆様に深くお礼申し上げます。

ダム建設現場におけるi-Construction 2.0 ～足羽川ダムの挑戦～

糸 純司¹・長谷川 悦央²

¹近畿地方整備局 足羽川ダム工事事務所 建設監督官 （〒910-8239福井県福井市成和1-2111）

²清水建設株式会社 北陸支店 足羽川ダム建設所 （〒910-2513福井県今立郡池田町寺島21-41-1）

足羽川ダム建設事業においては、ダム本体コンクリート打設が最盛期を迎え、特にダム本体工事の施工にあたっては、発注者と施工者が一体となってデジタル技術を活用して省力化・効率化を図り、施工の生産性を向上させながら進捗を図っている。

ダムコンクリート工においては、i-Construction2.0の柱の一つとなる施工のオートメーション化として、製造～運搬～打設までの自動化を行っている。熟練の技能が不要な袋状ベルトコンベアを実装するとともに、最新のICT、AI等を活用した品質管理、基礎処理工のDX等に取り組んでいる。本発表では、これら新技術の紹介ならびにその効果や今後の展望について報告する。

キーワード コンクリートダム、コンクリート運搬設備、生産性向上、i-Construction2.0、働き方改革

1. はじめに

(1) 足羽川ダム本体建設工事の概要と課題

足羽川ダムは、九頭竜川水系足羽川の支川部子川（福井県今立郡池田町小畑地先）（図-1）に建設する高さ96m、総貯水容量28,700千 m^3 、有効貯水容量（洪水調節容量）28,200千 m^3 の重力式コンクリートダムである。下流域の洪水被害軽減を目的としており、平常時は水を貯留しない洪水調節専用の流水型ダムである。2025年7月末時点における堤体工の進捗は、打設量52万 m^3 、打設高さ55mと全体の約75%の進捗となっている。



図-1 足羽川ダム位置図

近年、建設業における働き方改革が進められ、2024年度より労働基準法において時間外労働に上限が定められた。一方で社会から早期効果発現が求められており、品質を確保したうえでいかに生産性を向上させるかが課題となっている。

また、ダム工事特有の工種である基礎処理工においては技能者不足が顕著で、ICT等を活用して遠隔かつ一元的に管理するシステムの開発が急がれている。

本稿では、以上のダム本体建設工事が抱える様々な課題を解決するための取組を紹介するとともに、その効果や今後の展望について報告する。

2. ダムコンクリート全自動打設システムの導入

(1) 導入の背景

ダム工事においては、従来バッチャープラントやトランスファーカならびにケーブルクレーンの自動化技術が個々に開発されていた。受注者である清水建設（株）では2021年にこれらの技術を統合し「材料の供給～コンクリート製造～コンクリート運搬・打設」を完全自動で行うシステムを築川ダム（岩手県）で開発、実装していた。足羽川ダムでは、この技術にICT活用による遠隔管理機能等を付加したうえで、打設当初から導入し生産性向上を目指した。

(2) 本システムの概要

本システムは、下記3項目から構成される（図-2）。

- ・自動運転連携システム（赤枠）
- ・打設状況リアルタイム確認システム（緑枠）
- ・コンクリート注文システム（水色枠）

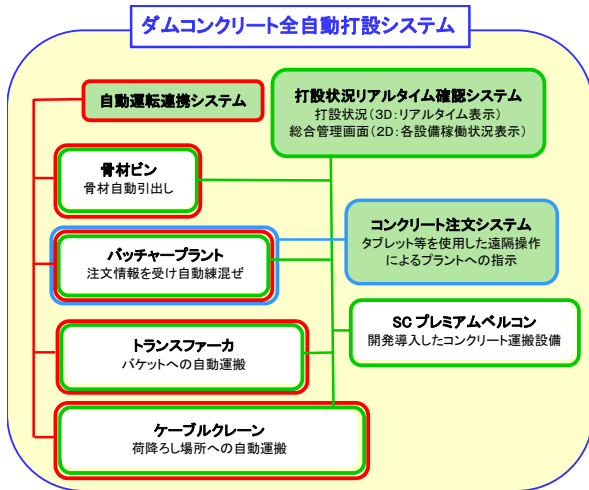


図-2 システム構成図

a) 自動運転連携システム

ケーブルクレーンの自動運転では、目標位置を設定して離床、コンクリート運搬、放出、その後バケットの制振制御を行いながら着床動作まで行う。本システムではトロリー及びフックブロックにGNSSを取付け、リアルタイムに位置情報を取得し、フックブロックの振れを計測している。この情報を分析・解析することで最適化したクレーン運転のアルゴリズムで制振制御を実施した。パッチャープラント他各機器には制御装置を付加したうえで、その自動運転の連携を構築した。

b) 打設状況リアルタイム確認システム

堤体の3次元モデルに各打設設備を追加し、上記のケーブルクレーンに取り付けたGNSSの位置信号をリアルタイムで取得、表示できるシステムとした。そこには、打設に関するさまざまな情報（打設量、打設時間、打設速度等）も表示される（図-3）。また、打設に関係する各設備の稼働状況、材料温度等をリアルタイムで確認、共有できる総合管理画面も有している（図-4）。

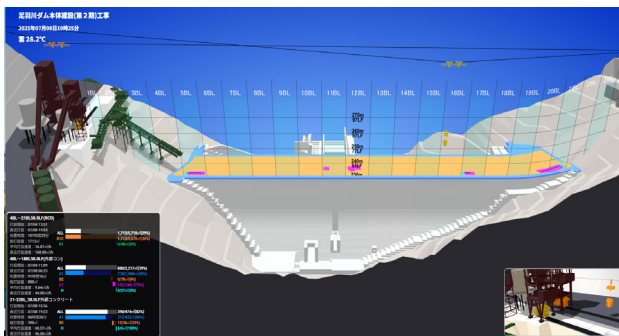


図-3 打設状況（3Dリアルタイム表示）

c) コンクリート注文システム

本システムでは、事前に注文計画（配合、数量、製造順序）を入力しておくことが可能となり、従来現場の担当者がパッチャープラントのオペレータと行っていた無線連絡手間が大幅に削減できる。さらに、担当者とオペレータとの無線の聞き間違いによる注文間違いの防止にも貢献している。追加、修正がある場合においても、現場でタブレットを操作し変更が可能である（図-5）。

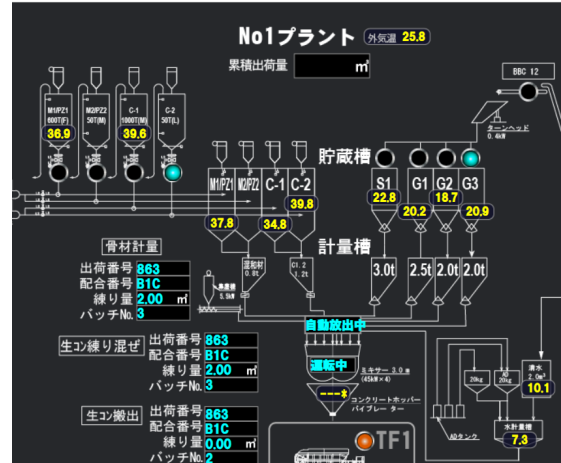


図-4 総合管理画面（2D：各設備稼働状況表示）



図-5 コンクリート注文システム画面

(3) 導入による効果

自動運転連携システムの導入により材料輸送設備の配置人員が減り、コンクリート製造設備や運搬設備では交代要員が不要となった。

打設状況リアルタイム確認システム、コンクリート注文システムの導入により受発注者誰でもネット環境さえ整えばこれらシステム画面をリアルタイムで共有でき、打設進捗状況の把握、設備トラブルの早期発見、早期対応等が可能となっている。さらにモニターカメラと併用することでその効果は向上した。また、コンクリート注文プロセスのスマート化が実現し、コンクリート製造に関する省人化が可能となり、生産性向上が図れた。

(4) 課題と今後の展望

ケーブルクレーンの自動化は、熟練運転手の技量の再現を目指しているが、特に「振れ止め」については課題が残っており、現時点においては再現速度に至っていない。本システムによって、その操作の分析、解析が可能となっていることから、現在地道な試行、改善を繰り返し、数秒ずつのサイクルタイム短縮を重ねているところである。

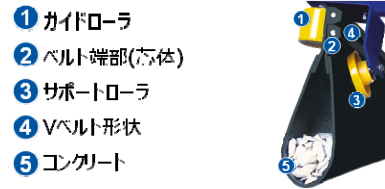


図-6 袋状ベルトコンベア

3. 熟練技能を不要とするダムコンクリート運搬設備の実装

(1) 開発の背景

コンクリートダム工事において、コンクリート工（製造～運搬～打設）はコスト・工期の大半を占めており、中でもコンクリート運搬はダム工事の生産性向上に特に重要である。清水建設(株)では2022年より、①熟練技能を不要としており、②ダムサイトの急傾斜面を直接運搬でき、③運搬能力が高く（200m³/h以上）、④材料分離等の品質への影響が少ないコンクリート運搬設備『SCプレミアムベルコン』の開発に取り組んでおり²⁾、これを足羽川ダムへ実装した（写真-1・図-6）。

(2) 実装概要

2024年9月に設置完了し、試運転調整を開始した。その際、RCD コンクリート運搬前後の品質（ α^3 値、VC 値、空気量、単位容積質量、圧縮強度）ならびに、打設場所での締固め後密度を測定した結果（図-7、表-1）、いずれも規格値内であることを確認でき、コンクリート運搬を本格的に開始した。打設箇所へは、SC プレミアムベルコンから堤体上に配置したグラントホップを介してダンプトラックに投入した後、堤体上を走行して運搬した（写真-2）。

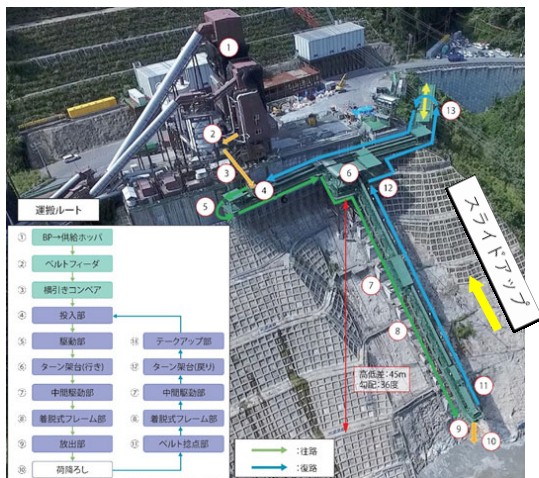


写真-1 SCプレミアムベルコン全景（足羽川ダム左岸）

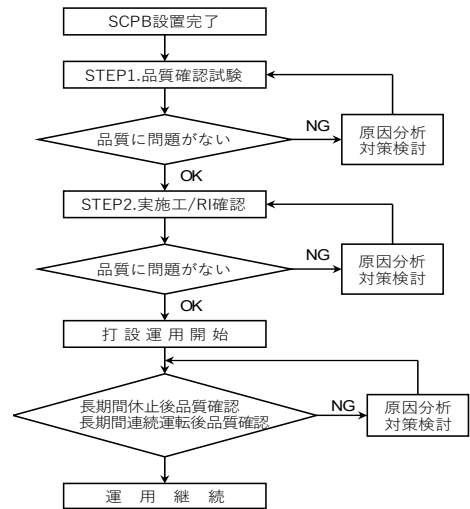


図-7 品質確認試験フロー

表-1 運搬前後の品質確認結果の例

	運転日	試験時間	VC値	空気量	単位容積質量	CT	α
			20±10 (s)	1.5±1 (%)	2.3以上 (t/m³)	(°C)	10以下 (%)
実装開始時	9/27	16:00	19	1.0	2.470	25	5.6
		16:30	25	1.3	2.456	24	
長時間休止 後再開時	11/19	14:30	19	1.7	2.464	25	5.0
		15:30	28	1.4	2.486	24	

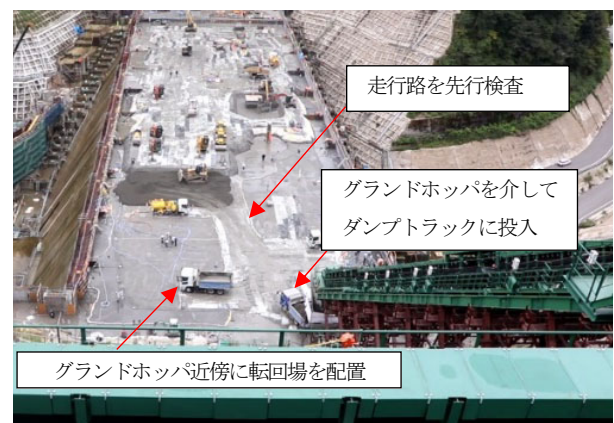


写真-2 ダンプトラックによる打設箇所への運搬状況

(3) コンクリート運搬実績とその効果

2024年10月の実装開始から12月冬期休止までに約1万m³を打設した。その際の運搬能力は最大180m³/h（バッチャープラント製造能力と同等）、平均約100m³/h（打設

の段取り替え等による停止時間含む)であった。SCプレミアムベルコンによる運搬時は2基あるケーブルクレーンをそれぞれ外部コンクリート打設と雑運搬に活用できるためコンクリート運搬だけでなく堤体工全体の効率化にも寄与した。

また、操作には資格が不要であり、熟練技能が無い担当者でもボタン一つで管理可能であったことから、施工のオートメーション化に寄与する技術であることが確認出来た。

(4) 今後の展望

本システムは乗継ぎなく角度を変更でき、上向き運搬試験も実施し品質変動がないことを確認している⁴⁾ことから、バッチャープラント等仮設備配置の自由度が高く、様々な条件の大型ダムへも展開も期待したい。

4. ICT・AI を活用したダムコンクリート製造 DX の導入

(1) 開発の背景

ダムコンクリートはマスコンクリートのため、夏期に打設したコンクリートの表面が秋冬に冷却されて表面と内部に温度差が生じ、温度応力によるひび割れが発生する。それを抑制する有効な方法のひとつが、夏期のコンクリート練上がり温度抑制である。現在まで、足羽川ダムにおいて、練上がり温度を制御、管理する技術を導入していたが、統合化されていなかった。そこで、近年急速に発達している、Big Data ならびに経験知の定量化に適している AI を活用して、各システムを連携、統合したダムコンクリート製造 DX の開発に取り組んだ。

(2) ダムコンクリート製造 DX (図-9)

a) 打設状況リアルタイム確認システムと AI を活用した練上がり温度予測システムの連携

前述の打設状況リアルタイム確認システム (図-2) で

収集、蓄積された1年分の Big Data を AI で学習するとともに、様々な予測手法を比較検証した結果、機械学習による予測精度が高いことが確認された。現場の担当者が容易に操作可能な GUI (図-8) も装備しており、収集データ増にとまなう再学習の繰返しも可能としている。

b) 定量的判断に基づくプレクーリングの運用

上記連携システムを活用した定量的判断に基づくプレクーリング稼働管理フローを図-10に示す。2024年度は6月1日から9月30日まで、練上がり温度が確実に管理値以下となるよう安全側の判断で、プレクーリング(粗骨材への冷水散水、骨材貯蔵ビンでの冷風冷却、バッチャープラントの冷風冷却)を全て稼働させていた。その状況を分析すると、6月は夏日でない日数が2週間程あり、その間プレクーリングを実施していなかった骨材温度等から AI 予測すると管理値内に収まる事が確認できた。さらに、2025年度は5月から練上がり温度の実測値と AI 予測値を比較検証し、ほとんどが $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 前後以内となった。これらをふまえ、警戒態勢から始まる3段階の稼働ステップで構成されるフローとした。

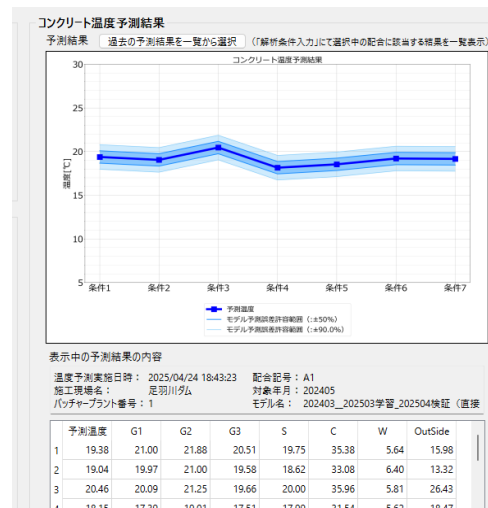


図-8 AIを活用したコンクリート練上がり温度予測システム画面 (GUI: GraphicUserInterface)

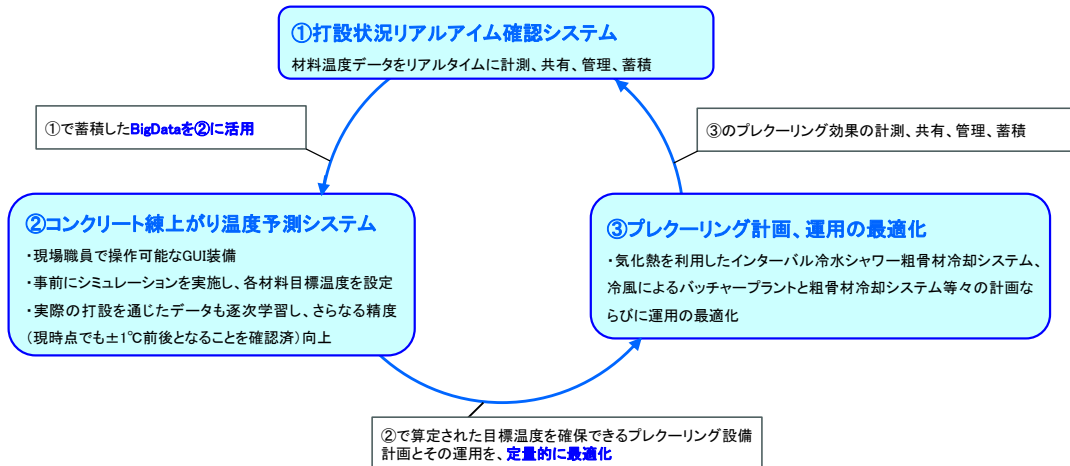


図-9 ダムコンクリート製造 DX のコンセプト

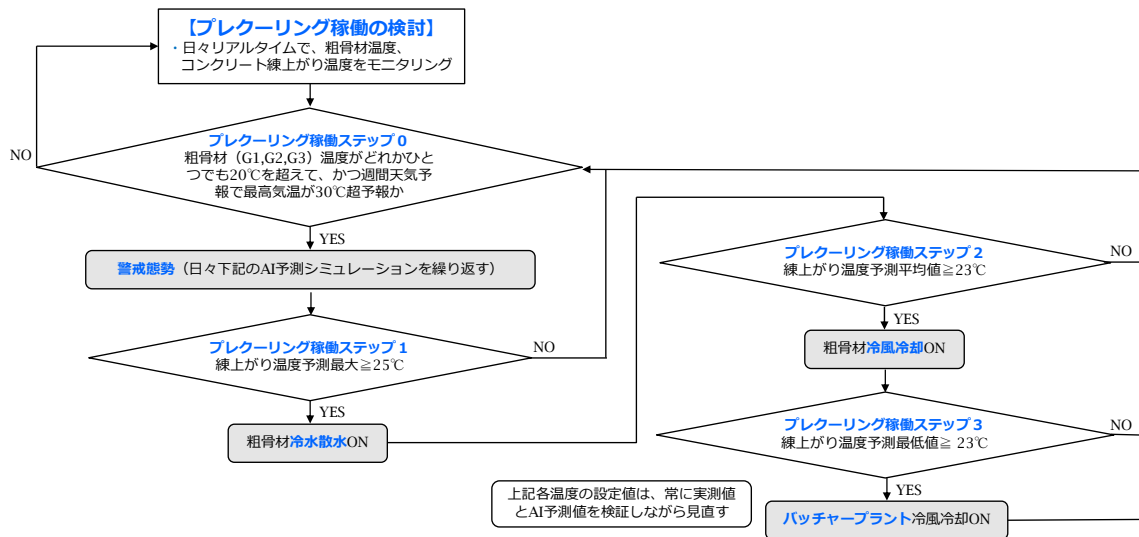


図-10 プレクーリング運用フロー

(3) 導入による効果

プレクーリングの稼働管理を定量的に判断することができるようになり、品質を確保したうえで確実に（練上がり温度管理値超えによる打設休止等なし）打設工程を進めることができています。

2025 年度 6 月に上記フローに基づき、日々管理した結果、6 月の 20 日間は冷水散水と骨材ビンへの冷風冷却の一時的使用で管理値以下とすることができた。これにより使用電力量は約 15 万 kWh 削減できた（一般家庭約 400 戸相当）。

(4) 課題と今後の展望

現時点では、AI を活用しているとはいえ、その操作ならびに各プレクーリング設備の ON/OFF は人が実施している。しかし、プレクーリング運用フローは定量的かつシンプルな判断基準となっている。将来的にはこれらを全てオートメーション化することも可能と考えられる。合理的かつ安定した暑中コンクリートの製造をカーボンニュートラルにも貢献しながら、自動制御できるシステムに発展させることを期待したい。

5. 基礎処理工における DX の導入

(1) 開発の背景

近年、基礎処理工における熟練技術者が不足しており、その構成も 60 歳以上が 30% 超と高齢化が顕著である。特に注入管理（機器制御含む）ができる技術者は全体の 20% 程度と少ない。一旦注入が始まると途中で中断することが困難な場合も多く昼夜連続作業となる。これらの基礎処理特有の課題がある中、働き方改革の推進が求められている。

昨今基礎処理工においても ICT を活用した省力化に資

するシステム開発が進んでおり、足羽川ダムにおいても遠隔グラウチング管理システムの導入した。

(2) 遠隔グラウチング管理システム

本システムは現場オペレーションと施工情報をシームレスに連携させ、熟練者のノウハウを若手に伝承し遠隔管理室で一括管理することを目指している。その特徴は「情報通信」「情報共有」「情報化施工」の 3 本柱に整理される。情報通信では、安定した LAN 環境を構築し、Ethernet・Wi-Fi 対応機材によるデータ通信を実現した。情報共有では、施工情報をウェブサイトでリアルタイム共有し、3 次元グラウチングマップを用いた可視化を行う（図-11、図-12）。

情報化施工の実現のためには、LAN 環境を活用した Web カメラによるリアルタイム監視ならびに注入の自動・遠隔制御システムを開発し、省力化と遠隔管理を可能とした。遠隔地から各種機材の制御画面を操作（写真-3）でき、注入材料の練り上げや注入プラントの管理、グラウトの流量・圧力調整までをタッチパネルで行うことができる。

(3) 導入による効果

a) 情報連携のスマート化、可視化と追加孔判断の効率化

これまで手渡しで行われていた作業予定や注入結果の報告を Web ブラウザでリアルタイムに確認可能となった。施工情報は管理室や現場で即時更新され、流量計の稼働状況と連動して自動更新される。施工状況マップは 2 次元ならびに 3 次元表示に対応し、クリックひとつで管理日報を即時確認可能である。これにより、関係者が迅速に施工結果を把握し、追加孔判断の効率化等に貢献できた。

b) 現場施工の一元管理

現在、右岸リムグラウチングに自動・遠隔制御システムを導入したことで、注入管理技術者を 4 名から 3 名

(1方施工)へ省力化が可能となった。2026年度高標高部(EL.250m程度以上)施工時には、全施工範囲に展開することを目指しており、その際2方施工となればさらに1名の省力化を図れる見込みである。

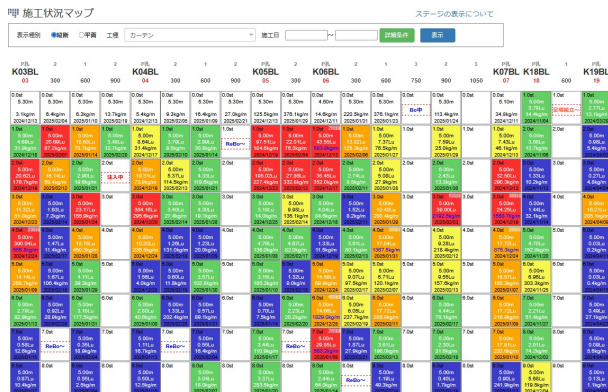


図-11 Web ブラウザでの平面管理マップ画面

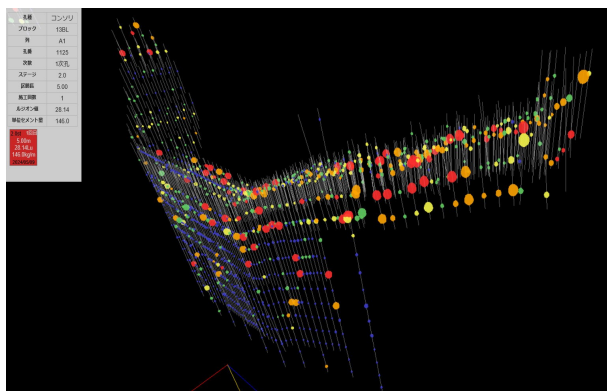


図-12 Web ブラウザでの3Dルジオンマップ画面

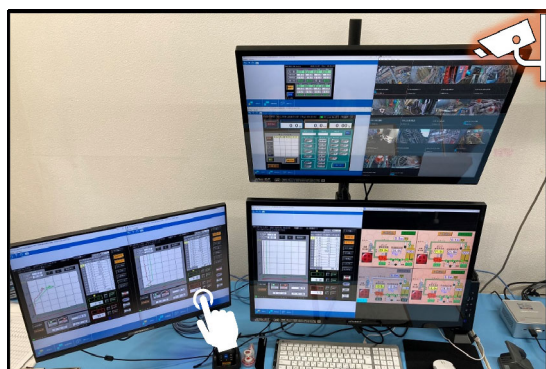


写真-3 遠隔注入管理システムの操作パネル

(4) 課題と今後の展望

a) 遠隔管理による現場管理室の無人化

配員不足により24時間連続作業できない場合にも遠隔操作、管理の活用で、柔軟な勤務体制と施工の安定性の両立が十分に見込まれる。

b) BIM/CIMへの対応

本システムでは、施工中リアルタイムで更新される

3次元マップを自動生成し、日報情報も同時に格納する。最新データはウェブブラウザでどこからでも閲覧可能である。納品時にはBIM/CIMフォーマットとの整合をとったうえで、工事完了後もオフライン環境で閲覧可能となる仕様を開発中である。

c) 若手技術者の育成

本システムの遠隔操作は、若手技術者にも違和感なく取り組んでいる。しかし、システムに依存することにより現場力が低減する恐れもあるため、熟練者による教育・技術伝承と併せて本システムを活用することで、技術者育成に期待したい。

6. おわりに

足羽川ダムでは、本稿で紹介した各技術の開発、実装を通じてi-Construction2.0の実現にむけた歩みを始めたところである。

今後は、各技術の課題解決に加え、ダム工事の特性である多岐にわたる工種全体を見据えた開発を進める必要がある。そのうえで、各技術についてマイルストーン(目標レベルの設定・スケジュールの可視化・リスク項目と対策等)を示したロードマップを整理し、官民一体となった取組が必要である。

最後に、本稿の作成にあたりご協力をいただきました清水建設株式会社の皆様に心より感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 立花すばる, 森山忍, 山下哲一, 森日出夫, 加瀬俊久: ダムコンクリート自動打設システム, 土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-712, 2019
- 2) 藤井攻, 三井智史, 長尾貴浩, 山下哲一: SC プレミアムベルコンの開発と実証(1), 土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-329, 2023
- 3) 田代民治, 大内斉, 坂田昇, 渡邊賢三: コンクリートダムの高速施工に対応する運搬方法, コンクリート工学, Vol.53, No.12, pp.1051~1057, 2015.12
- 4) 藤井攻, 山下哲一, 長尾貴浩: ダムコンクリート自動打設における ICT 技術の活用, 土木学会年次学術講演会概要集, VI-329, 2023
- 5) 荻野幹久, 樋川直樹, 山口浩, 山下哲一: SC プレミアムベルコンの開発と実証(2), 土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-329, 2023

すさみ串本道路下部工建設中に発生した 地盤ひび割れに伴う対応について

中西 悠太

近畿地方整備局 紀南河川国道事務所 紀勢線出張所 (〒649-2621和歌山県西牟婁郡すさみ町周参見2947)

本橋梁は、すさみ串本道路における、4径間連続RC床版鋼箱桁である。橋梁詳細設計段階における地質調査での鉛直ボーリングの結果、A1橋台部は、支持層となり得る泥岩主体の岩盤が浅層より確認できたことから直接基礎として計画していた。施工を進めていたところ、橋台の床付け面に鉛直方向の開口ひび割れが確認されたことから有識者からの助言を踏まえ、追加で水平ボーリングを実施した。その結果、鉛直方向の割れ目や角礫状となっている箇所が複数確認され、流入粘土等の狭径物が付着していることから、岩盤が緩んだ状態であると判断し、橋台基礎形式を直接基礎から組杭深礎基礎へと構造変更を行う方針とした。

キーワード 施工時対応、橋台構造変更、斜面上の橋台、組杭深礎

1. はじめに

紀南河川国道事務所では、一般国道42号すさみ串本道路事業を推進している。和歌山県東牟婁郡串本町から西牟婁郡すさみ町に至る19.2kmの自動車専用道路である。この道路が完成することにより、異常気象時の通行規制区間の解消、南海トラフ地震発生時においては、防災・災害時の代替路としての機能が発揮されることが期待されている。

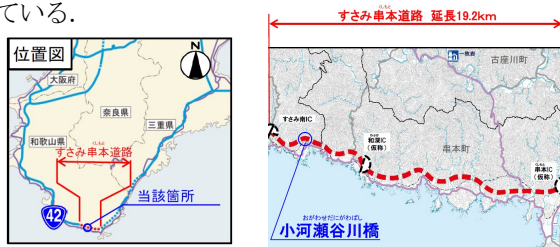


図-1 位置図

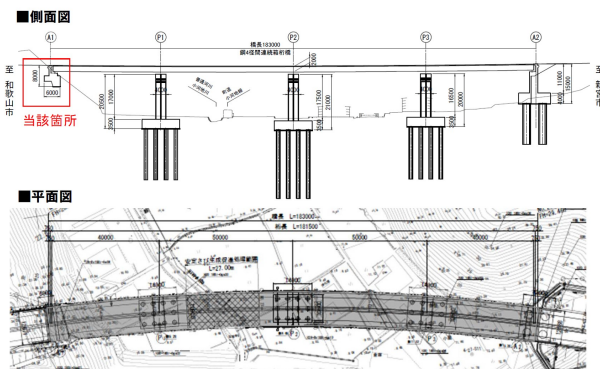


図-2 側面図および平面図

本事業の橋梁の一つ、小河瀬谷川橋は、4径間連続RC床版鋼箱桁橋であり、橋長は183m（支間40m+50m+50m+40m）である。2024年7月、施工中にA1橋台床付け面に鉛直方向の最大幅約25mm、長さ約2.5m程度の開口ひび割れが発見された。なお、ひび割れ深さは粘土などにより計測できない状態であった。

事象の発生を踏まえ、有識者検討会を開催し、設計の見直しが行われた。本稿では、検討結果を踏まえた開口ひび割れの分析・評価、本橋梁の設計における地質調査のあり方、今後の橋台の設計において留意すべき点について報告する。

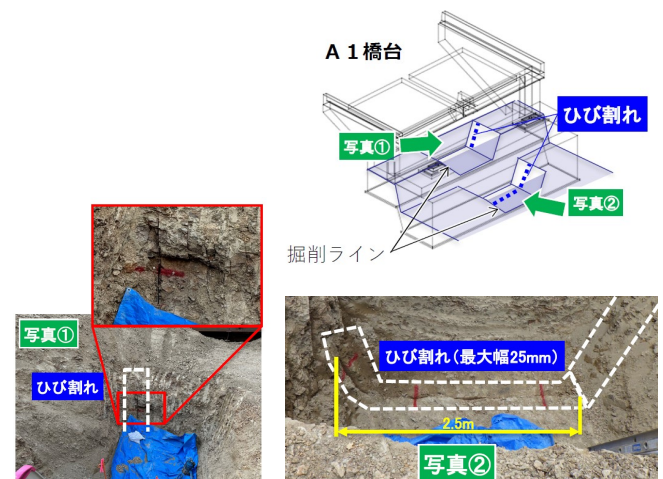


図-3 ひび割れ位置図および写真

2. ひび割れへの対応

(1) 追加ボーリング調査概要

小河瀬谷川橋A1橋台周辺では、平成28年度および平成30年度の地質調査業務にて、鉛直孔2孔のボーリング調査が実施されていた。その結果、橋台基礎の支持層となり得る泥岩のCL級の岩盤が浅層に分布すると評価されていた。

しかし、今回の事象により、開口ひび割れを含めた岩質状況を詳細に把握し、橋台設計の妥当性確認、必要に応じて再設計を行わなければならないことから、追加のボーリング調査を実施することとした。追加のボーリング調査は、ひび割れ状況を面的に把握するために、橋台の4隅や中心部で鉛直ボーリングを5孔、橋台側部と中心の情報を得るために水平ボーリング3孔を実施した。水平孔3本においては、ボアホールカメラでの解析を行った。ボーリング位置については、図4のとおりである。

(2) ボーリング調査結果

開口割れ目は水平孔No. 1～No. 3のボーリングコアを観察した結果、鉛直方向に割れ目が卓越していることが判明した。地表に近い深度で、開口割れ目や角礫状の割れ目が多い傾向にあり（水平孔No. 1：8.3m以浅、水平孔No. 2：10.55m以浅、水平孔No. 3：12.35m以浅）、この境界について、「ゆるみ範囲の下限」と設定した。

また、水平ボーリング結果を評価するにあたり、コアやボアホールカメラで確認された割れ目の性状を4つに分類した。分類表を表1に示す。

(3) ボアホールカメラ解析結果

a) 開口割れ目の連続性の分析

- ① 開口割れ目は、概ね南北方向、東側に80～90度に傾斜する傾向がある。
- ② 水平孔No. 1：深度5.32m（N25W85W）、水平孔No. 2：深度7.65m（N18W89E）、水平孔No. 3：深度7.33m（N7W79E）については、「平面上の位置関係」および「割れ目の方向」が連続していることから、開口割れ目が橋軸直角方向に連続していると判断した。

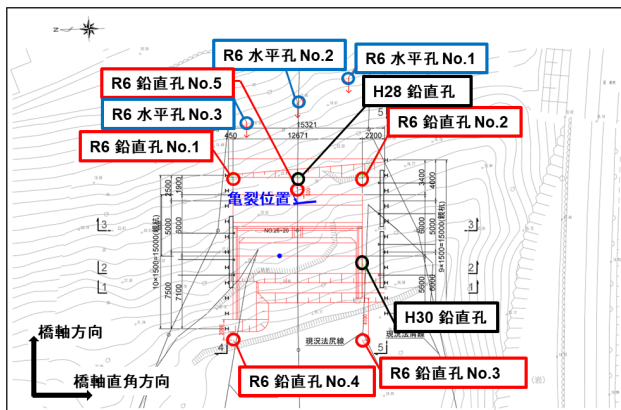


図4 A1橋台周辺のボーリング位置図

表-1 ひび割れ分類表

開口割れ目		密着性がなく、かみ合わせが悪い性状を示す。
角礫状部		開口割れ目より密着性があるが、かみ合わせが悪い亀裂であり、角礫状を呈する。
割れ目		密着性がよく、かみ合わせが良い性状を示す。 流入粘土が厚みを持って狭在する場合、フィルム状に付着する場合の二通りの性状が認められる。
黒色脈		初生的に泥岩（Mms）に含まれている薄層。 各種割れ目と組み合わさっていることが多く、そのような箇所では割れ目沿いの劣化や角礫状化が見られる。

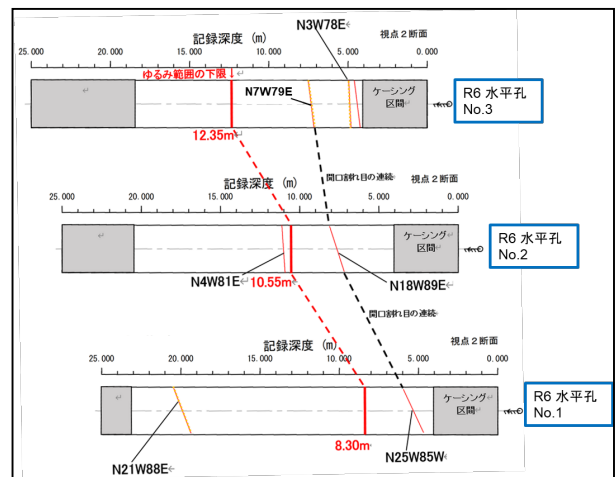


図5 開口割れ目の連続性（ボアホールカメラ解析結果）

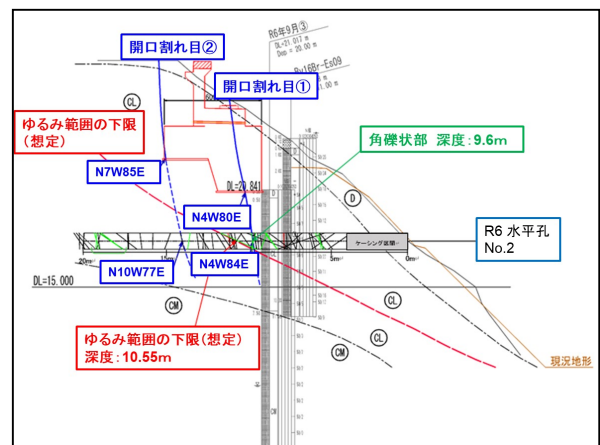


図6 地質断面図（水平孔 No. 2）

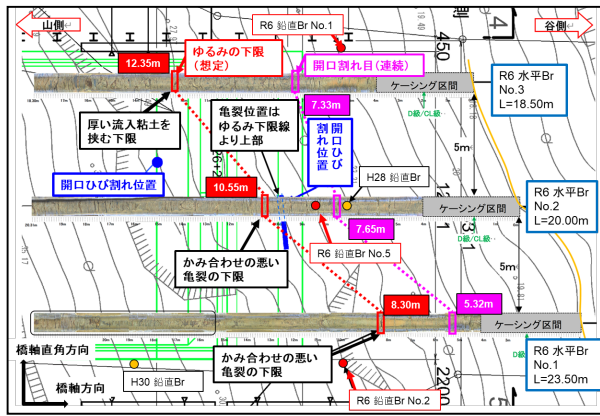


図-7 ゆるみ範囲の平面分布

b) 地質断面図を用いた分析

地質断面図により、ゆるみ範囲、各種割れ目の分布深度および「見かけの傾斜」を図化した。今回、ひび割れ位置の直下である水平孔No.2に着目した。

- ①開口割れ目、角礫状部、割れ目は、概ね東側の高角傾斜（85度～90度）で分布する傾向にある。
- ②深度9.6mで確認された角礫状部（N4W84E）は、ゆるみ範囲内（深度10.55mより浅い深度）に位置する。角礫状部（N4W84E）は、床付け面で確認された開口ひび割れの位置と平面位置、走行傾斜が一致していることから、ひび割れは深部まで生じている。
- ③角礫状部は、ゆるみ範囲内で分布頻度が高く、流入粘土が付着する傾向にある。一方、ゆるみ範囲外の角礫状部は、黒色脈沿いの地質要因で分布しているものであり、割れ目の発達等のゆるみが起因するものではない。

c) ゆるみ範囲の平面分布の分析

- ①ボアホールカメラで確認された性状や4種類の割れ目の構造（走行傾斜）から、ゆるみ範囲内において開口割れ目が橋軸直角方向に連続することが確認された。
- ②ゆるみ範囲の下限線と連続する開口割れ目は、橋台前面の地形にほぼ平行に分布している。したがって、当該地は地形の形状に沿って風化等が進行することで、ゆるみが生じたものであると想定される。

d) 各分析結果のまとめ

- ・地表から水平厚さ8～12m程度あり、その中には連続する開口割れ目がみられる（平面位置と割れ目が一致する）。ゆるみ範囲や各割れ目は、いずれも地形線と平行に南北方向に分布していることから、地表からのゆるみが要因で形成されたことを示唆している。
- ・「ゆるみ範囲の下限」と設定した深度までは、岩盤にゆるみが及んでいる状態と評価される。
- ・ゆるみ範囲とゆるみ範囲外では、割れ目の性状の程度が異なると考えられる。（ゆるみ範囲内：開口割れ目・角礫状部、ゆるみ範囲外：割れ目）。
- ・分析結果から、一般的なCL級岩盤に相当する範囲においても、ゆるみの有無による違いが生じていることが

判明した。

(3) 橋台基礎としての岩盤健全性の評価

解析結果を踏まえた橋台基礎としての岩盤健全評価は次のとおりとなった。

まず、岩盤状態の評価である。ゆるみ範囲内では、「鉛直方向の割れ目」が複数確認された。そのうち床付け面で確認された開口ひび割れは、位置と走行傾斜がほぼ一致するため、No.2孔の9.55mに連続すると考えられる。また、ボアホールスキャナの結果では、開口していないものの、ひび割れ沿いは岩片同士のかみ合わせが悪く、流入粘土等の挟み物が付着したり、角礫状を呈するため、岩盤がゆるんだ状態であると判定した。なお、当該地では、地すべりや崩壊といった、ある範囲でブロック状に変動するような現象は認められなかった。

次に、橋台基礎としての評価である。開口ひび割れの一つが施工基面で確認されているが、上記のとおり、「鉛直方向ひび割れ」が地山内に複数あり、かつ地盤が全体的にゆるんでいることから、ゆるみ下限線より上側には、同様の開口ひび割れが多く内在していることが想定される。このようなゆるみ岩盤は橋台直接基礎の支持層としては不適であると考えられる。

以上の評価結果を踏まえ、小河瀬谷川橋A1橋台については、ゆるみ岩盤より下層の安定した岩盤に支持させるため、基礎形式を直接基礎から組杭深礎基礎へと構造変更を行い対応する方針とした。

3. 調査結果を踏まえた基礎形式選定の妥当性

(1) 不適切な基礎形式を選定した場合

今回、小河瀬谷川橋A1橋台では、施工中開口ひび割れが発見されたことにより、再調査の上、構造形式を変更することとなったが、仮に直接基礎のまま供用した場合に想定されるリスクについて検討する。

例えば、豪雨や大規模地震が発生した場合、地盤変状に伴い、橋台の側方移動が懸念される。そして、最悪の場合、橋台が安定性を失い、傾くなどすることで落橋の危険がある。また、橋台が動くことと橋梁本体への影響だけでなく、橋台が動いた分、橋台背面盛土もずれるため、土工部の盛土が崩壊する可能性が考えられる。

また、橋台形式を深礎基礎に変更する際、仮に組杭配列ではなく、単列配列にしていた場合においても同様の橋台の変状被害が発生することが考えられる。

(2) 橋台の安定性が失われた事例

上記で述べたような被害が実際に発生した事例について以下に示す。

小河瀬谷川橋A1橋台と同様に、斜面上の直接基礎の被災事例として、H28熊本地震の阿蘇長陽大橋の直接基礎橋台があげられる。平成28年（2016年）熊本地震土木施

設被害調査報告^りによると、被害状況は次のように記録されている。「A1橋台は北側の地山は大きく崩壊していた。A1橋台は、中央部に損傷が生じており、基礎部分の直下も土砂が流出していた。A1橋台は2m近く下方に移動し、上部構造と橋台が衝突し橋台及び桁端部が破壊していることが確認された。またA1橋台周辺の土工部も大きく変状していた。」これは、大規模地震による斜面崩壊に伴い、直接基礎が大きく変位したものであり、小河瀬谷川橋においても同様の被害が発生する恐れがあった。

また、単列深礎基礎の被害事例として、能登半島地震の七海3号橋があげられる。七海3号橋の単列深礎基礎橋台では、地震による地盤変状に伴い、橋台が変状してしまう被害が発生した。一方で、組杭深礎基礎の此木高架橋においては、七海3号橋と同様に能登半島地震による地盤変状が発生したものの、橋台については、無傷であった。これらの事例は、組杭配列した深礎杭で支持させることの有効性が証明された事例と言える。

4. 地質リスクについて

(1) 地質リスクでの評価

すさみ串本道路においては、地質リスク検討業務が行われており、小河瀬谷川橋A1橋台においては、平成28年地質リスク検討業務において、地質リスク要因：風化帯、発生事象：支持層の不陸、施工時掘削背面の不安定化であるとして、リスク評価C（対応方針：リスク保有、施工時対応）との評価となっていた。その後、ボーリング調査結果を踏まえて、平成30年の再評価の調査結果は、風化帯（D級）の層厚は3mであり、その下位には軟岩（CL級）が分布していることから、支持層としては深度約3.5m以深に分布するCL級岩盤が適するというものであった。確認された風化帯の層厚は約3mと厚く、N値も3、13、23と低くなっており、対応方針として、橋台背面掘削時の法面対策が必要となるため、リスク再評価はBに変更されている。

(2) 地質リスクの有用性

地質リスクで実施した内容については、後続業務実施時に参考となっていることから有用性はあると考えられる。一方で、本来手戻りや問題を修正するためのコストや工期が縮減できるはずの地質リスク調査だが、今回の小河瀬谷川橋A1橋台において、橋台設計の見直しが必要となっている。しかし、今回の調査段階においては、周辺の地山が動く、地すべりや崩壊などに至るということもなく、岩盤のゆるみも調査時の鉛直ボーリングでは見つかっていなかったため、ひび割れの手がかりとなる情報を得ることは厳しいと考えられる。

今回の事象からもわかるように、設計や施工前の調査では得られる情報に限界があり、施工段階へと進むにつれて新たに判明する情報量が増加する。そこで、不確実

性を有する地質、地盤においては、今回の斜面上の橋台のように、過去の事例から災害時の弱点となりうる箇所、設計の見直しや手戻りが発生した箇所に類似している場合については、事業の初期段階である地質リスク評価時に、重点的な調査を行うことで、より適切な評価が可能となり、地質リスク調査の有用性が高まると考えられる。

5. 今後の橋台設計における留意点について

小河瀬谷川橋A1橋台においては、施工中に発見された開口ひび割れから、基礎形式の変更に至った。設計の見直しや工期の延長によるコストの増大、災害時の被災リスクの増大などの問題の発生を低減させるため、調査段階において次のような対策を講じることを提案する。

本橋台のように、斜面上の橋台であり、災害時に斜面変状の影響が考えられる場所については、基礎形式、設置位置等の選定が重要となる。そこで地質調査を行う段階においてボーリング調査の充実を図り、縦のひび割れが多いことを地質リスクと認識することが重要であると考えられる。小河瀬谷川橋A1橋台においては、地質調査段階では、橋台設置位置に2本の鉛直ボーリングを実施していた。しかし、それだけのボーリング調査では、十分な情報を得られない可能性がある。そこで、地質調査段階においては、次のような対策を提案する。

- ①岩盤の変化を面的に把握するため、鉛直ボーリングを橋台前面の2箇所、背面1箇所の合計3箇所以上で実施すること。
- ②岩盤の性状をよく把握するために、地すべり調査時のようにボーリング径をφ66からφ86に拡大すること。
- ③リスク要因となる縦方向のひび割れの見逃しを少なくするため、1箇所以上の水平ボーリングを実施すること。

これらの対策のうち、斜面での橋台基礎部においては③を優先し、これが難しい場合は、①、②を組み合わせることが効率的かつ、効果的であると考えられる。そして、その情報から考慮される地質リスクを設計に確実に反映させることが重要となる。

また、斜面上の橋台に関しては、前述した能登半島地震の事例をはじめとする、過去の大規模地震や豪雨災害などの被災状況を踏まえて、容易に直接基礎とするべきではないと考える。斜面上での橋台設置が避けられない場合については、変形等が生じにくいとされる、組杭深礎基礎を基本設計として採用することを提案する。

謝辞：本論文の執筆に際し、関係者の皆様には多大なるご助言とご協力を賜りましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所資料 土木研究所資料：平成 28 年（2016 年）熊本地震土木施設被害調査報

データ駆動型の交通需要マネジメントシステムの開発

兒玉 崇¹・中田 諒¹

¹阪神高速道路株式会社 保全交通部 交通技術課 (〒530-0005大阪府大阪市北区中之島3-2-4)

阪神高速では、阪神高速道路と周辺の主要道路を対象に、最新の交通情報を反映したリアルタイムでの交通影響予測を行う「交通デジタルツイン」を活用して、未来の交通状態を評価し、「行動変容訴求サービス」の利用を通じて、阪神高速道路の渋滞ボトルネック通過交通の分散を図り、阪神高速道路に加え、周辺道路全体のパフォーマンス向上につなげることを目指した「交通需要マネジメントシステム」を試作し、大阪・関西万博開催中に実証実験として同システムの社会実装を試行している。本稿は、実証実験中の、リアルタイム交通影響予測に基づく交通需要マネジメントシステムの概要とその利活用の可能性についてまとめたものである。

キーワード TDM, 行動変容, データ駆動型, 交通デジタルツイン, ICT交通マネジメント

1. はじめに

近年のIoTの進化やAIなどの情報処理技術の目覚ましい発展に伴い、旧来の交通マネジメントは大きく進化していくものと目されている。そのため、阪神高速では、情報社会のさらなる発展を見据え、デジタル技術を活用した新たな交通需要マネジメントの社会実装を目指し、2023年4月よりNTTグループとの共同検討を本格化させており¹、大阪・関西万博開催中の阪神都市圏において、開発技術を活用した実証実験を実施している²。

なお、現実の交通状況は目まぐるしく変化することや、交通マネジメントは道路交通全体に配慮したものでなければならないことなどを鑑みると、新たな交通需要マネジメントを実現するには、阪神高速道路に加え、周辺の主要道路を含む阪神都市圏を対象に、観測データをリアルタイムに反映した交通影響予測が行える交通デジタルツインを実装し、その活用によって、未来の交通状態を評価することが可能になっていなければならない。

加えて、TDMとして機能させていくためには、予測された交通状況の変化に応じた適切な行動変容を訴求できるサービスが十分に機能し、それを多くの道路ユーザが利用していることが条件となる。

以上から、これらをマネジメントシステムとして社会実装し、将来的に、多くのユーザ利用を実現できれば、阪神高速道路の渋滞ボトルネック通過交通が分散され、それにより整流化された阪神高速道路が大量の交通を捌けるようになることから、周辺道路全体のパフォーマンス向上といった恩恵にもつながることが期待される。

しかしながら、これらの社会実装にあたっては、大量のリアルタイムデータの取得や、膨大なデータを迅速に扱うための処理環境が前提であり、広範囲をカバーしていることなども鑑みると、特定路線のTDMなどにも活用するのではそのポテンシャルを活かしきれていない。

このような中、阪神高速は、NTTグループと共同で、交通デジタルツインRASiNと行動変容訴求サービス Welmos Agentを試作し、これらにより構成されたデータ駆動型の交通需要マネジメントシステム Welmos System (図-1)を活用して、大阪・関西万博開催中の阪神都市圏を対象に、Welmos Agentの有用性や、行動変容効果の検証を目的とした実証実験を実施している。本稿は、それらを踏まえ、従来のTDMの課題を解決する交通需要マネジメントシステム Welmos Systemの構成や特徴的な機能、その利活用の可能性についてまとめたものである。

2. 交通政策を取り巻く社会情勢の変化

国土交通省は、社会資本整備審議会道路分科会第76回基本政策部会（2021年12月）において、道路のパフォーマンスモニタリングとデータ駆動型マネジメントを軸としたICT交通マネジメントのフレームワーク（図-2）を提示した³。続いて第81回基本政策部会（2023年3月）では、道路のパフォーマンスを向上させる施策の方向性として「道路のパフォーマンス向上（動的料金の導入検討等）」「道路管理者がサービスレベルを把握・分析でき

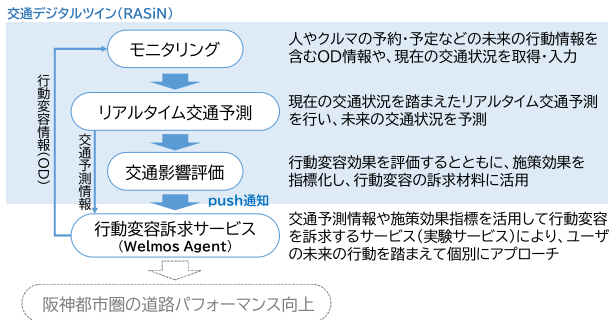


図-1 交通需要マネジメントシステムWemos Systemの構成

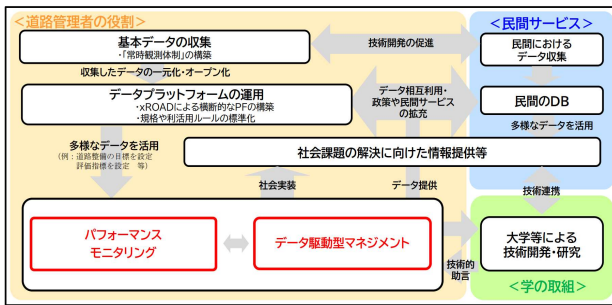


図-2 ICT交通マネジメントのフレームワーク

る手段の提供」 「渋滞によるロス時間を削減する各道路管理者・交通事業者・民間等が連携したソフト・ハード対策」を提示している⁴⁾。

これに先立ち、近畿地方整備局では、「近畿ブロック新広域道路交通ビジョン」（2021年7月）にて、ICT交通マネジメントの基本方針やその計画として「都市部における交通マネジメント」を掲げており、具体的には、「渋滞対策や生活環境対策としてICT・AI等の革新的な技術を活用して交通需要をマネジメントするための検討を推進」することが謳われている⁵⁾。

ここで、渋滞に関しては、従前より都道府県単位等で渋滞対策協議会が設置され、一般道路の渋滞多発箇所を対象に詳細要因分析や対策方針検討が進められている⁶⁾が、近年はハード対策の実施は予算的にも限界があり、今後はソフト対策（TDM）の重要度がより一層高まっていくものと予想されている。しかしながら、現状は、TDMとしての方策が、広報啓発や回誘導看板等を通じた協力要請以外には乏しいというのが実情である。

一方、南海トラフ地震等の災害などへの備えとして、近畿地方整備局管内における道路啓開計画の素案となる、近畿版道路啓開計画（案）が2025年3月にとりまとめられた⁷⁾。地震や風雪水害等の災害事において、道路は避難路であり、緊急車両の通行路でもあるため、道路の損傷や滞留車両の存在などによる道路機能の大幅低下、通常と大幅に異なる交通需要などについて、状況の迅速な把握が求められる。さらに、それらに基づく誘導や復旧の検討、それに伴う交通影響・効果等の予測が可能となれば、現場の対応判断の一助になり得ると考えられる。しかしながら、稀有な事案でもある災害に対して専用の

システムを整備することは現実的には難しく、また有事に十分に使いこなせない懸念もある。そのため、普段は複数の機関が共同で、モニタリングや政策判断に活用し、日常利用を通じて使い慣れておけるような兼用システムとして運用する形態が現実的な一方策として考えられる。

以上を踏まえ、災害時に、交通障害の検出やその影響評価、優先的に仮復旧すべき路線の抽出、さらに将来的にはサービスユーザーの誘導などに対応できるよう、段階的に機能拡充していき、平時には、交通のモニタリングやそれを踏まえた影響予測、それに対するマネジメントなどに活用できるようなデータ駆動型の交通需要マネジメントシステムを見据えて開発することにした（図-3）。

3. 交通需要マネジメントシステムの具現化

ここで、データ駆動型の交通需要マネジメントシステムを実現するには、変動の激しい交通状況を的確に捉えた予測が行える交通シミュレーションが必須であり、TDMに基づく行動変容（経路・出発時刻・交通手段）を反映した予測と、現実には発現しないwithout（行動変容なかりせば）との比較評価が必要となる（図-4 ①）。また、適切なタイミングで、対象ユーザーの行動変容をマネジメントするには、ユーザー任意のオンデマンド利用任せでは限界があり、push通知による直接アプローチが必須となる。但し、それにはユーザーの未来の行動（移動経路・時間）を事前に把握し、交通状況も踏まえた影響予測に基づく「ユーザーへの行動変容の個別アプローチ」を可能とする仕組みを構築する必要がある（図-1）。

このように、TDMシステムとして機能させるには、様々な変動を踏まえた行動変容効果の評価が可能な交通デジタルツイン（以下、交通DT）と移動（経路・出発時刻・交通手段）を選択・登録できる経路検索が連動し、日常的に利用される行動変容訴求サービスとして構成させることが鍵になると考えた⁸⁾。

(1) 変動を踏まえた行動変容の評価が可能な交通DT

a) 行動変容を評価できるシミュレータ・モデルの選定

TDMは、その大半が所謂広報に過ぎず、その実効性に加え、事前の見通しや、その効果検証なども不十分と

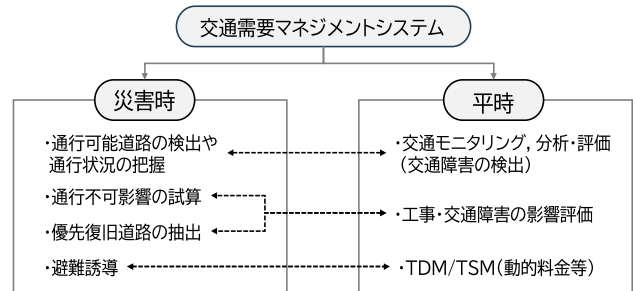


図-3 交通需要マネジメントシステムの平時・有事での役割

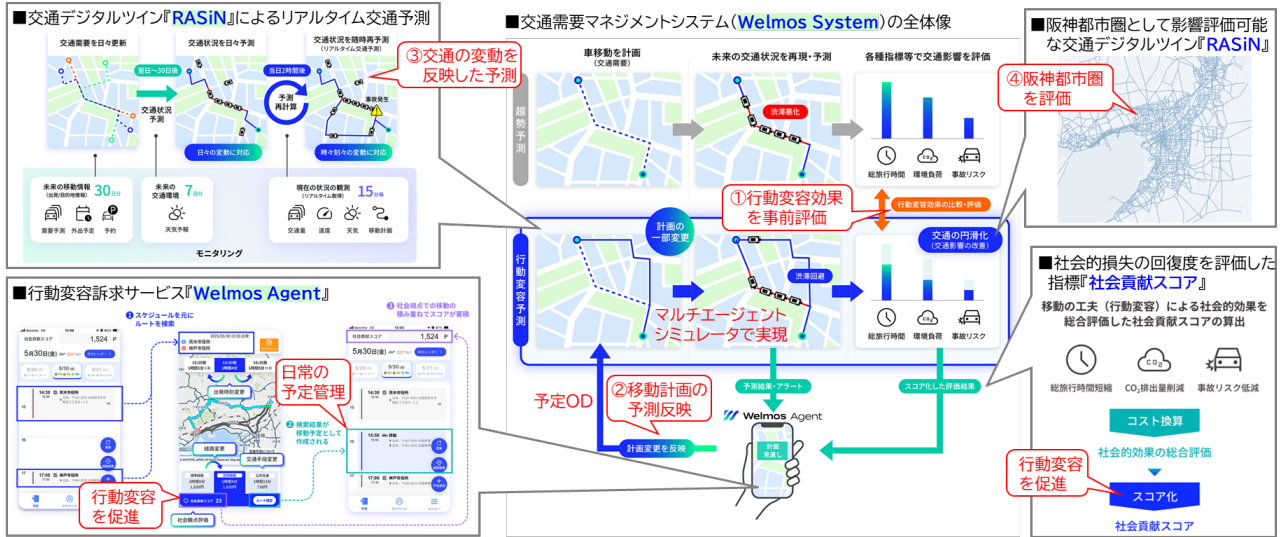


図4 交通需要マネジメントシステムWelmos Systemの全体像

というのが実状である。そのため、今回試作する交通需要マネジメントシステム（以下、Welmos System）では、予測した交通影響が反映された行動変容訴求サービス Welmos Agentの利用を通じ、ユーザの移動の計画やその変更を支援し、予定ODとして交通影響予測・評価に入力する仕組みを実装した（図-4 ②）。なお、交通DTの予測モデルには、機械学習のような過去の類似パターンに基づく予測ではなく、ドライバの行動変容を反映することを重視し、個別の行動内容を模倣できるマルチエージェント・シミュレータを採用することにした。

b) 交通の変動を踏まえた予測の具現化

交通影響は日々・時々刻々と変化している。このため、RASINでは、過去実績に基づき日々の交通需要の変動を予測し、観測データをもとに予測結果をリアルタイムに補正する仕組み（以下、データ同化）を実装している（図-4 ③）。具体的には、30日後までの24時間分の予測と、当日に15分毎に行う2時間分の予測を併用することとし、これにより近い未来であるほど、精度の高い予測結果が得られる仕組みを実現させた。ここで、日々の変動を考慮した交通影響予測を実現するには、日々の交通需要の変動を反映した予測ODデータの推定が必要となる。図-5にそのプロセスを示す。まず、R3交通センサスの日単位ODデータをETC2.0データの時間分布実績を参照して平日/週末/休日別、車種別に時間分解し、基準ODデータを作成する。次に、阪神高速道路出入口影響ゾーンに対し、ETCデータの変動傾向を参照して未来日の対象ゾーンの発生・集中量の変動を状態空間モデルにより推定し、それを各出入口の影響圏に対して適用することで予測対象日のODゾーン毎の変動率を算出する。最後に、フレータ法を適用し、基準ODデータの時間帯別の交通量比率を極力維持しつつ、各ゾーンの発生・集中量が所与の変動率になるように変換して予測対象日のODデータを作成する。なお、Welmos Agentユーザの行動変容等を反映した予定ODは外生の交通需要として扱い、行動変容による交通需要変動に対応させた（図-4 ②）。

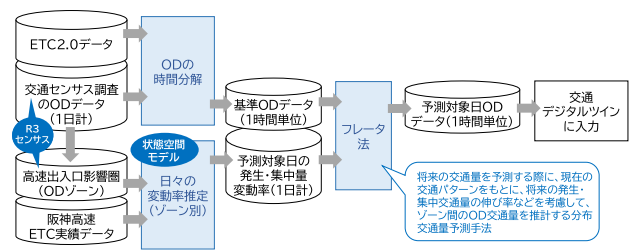


図5 日々変動する交通需要（入力OD）の生成フロー

また、データ同化については、渋滞の発生メカニズムが交通需要と交通容量のバランスによるものであることに着目し、需要と容量を観測データに基づき推定し、予測再計算を繰り返すことで予測結果の補正を実現させることにした（図-6）。ただし、時間交通量を実測できる高速道路とは異なり、一般道路はカープローブデータによる速度情報のみが実測値となるため、渋滞流を対象に、観測速度とそのサンプル数を鑑みた予測値との重みづけによって算出する手法で補正を実現させている。

c) 対象範囲と空間解像度の合理化

道路ネットワーク（以下、道路NW）は、全高速道路を対象とし、一般道路は阪神高速道路と密接に関連する路線を選定した（図-4 ④）。ゾーンは、阪神高速道路が位置する阪神圏都心部では細かく、阪神高速道路から遠い郊外では粗くした。ここで阪神高速道路は阪神都市圏の交通影響緩和を目的に計画された高規格道路なため、阪神高速道路のTDMは阪神都市圏で評価すべきであり、その観点でも本稿の道路NW・ゾーンは合理的と言える。

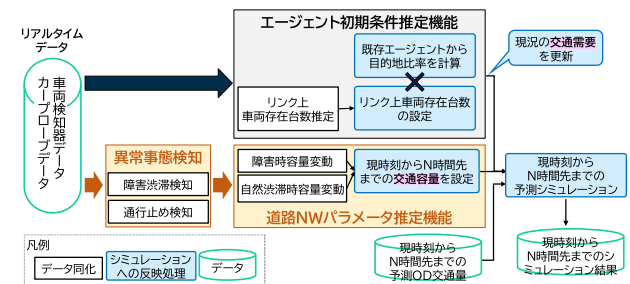


図6 交通状況の変化に対応するためのデータ同化の仕組み

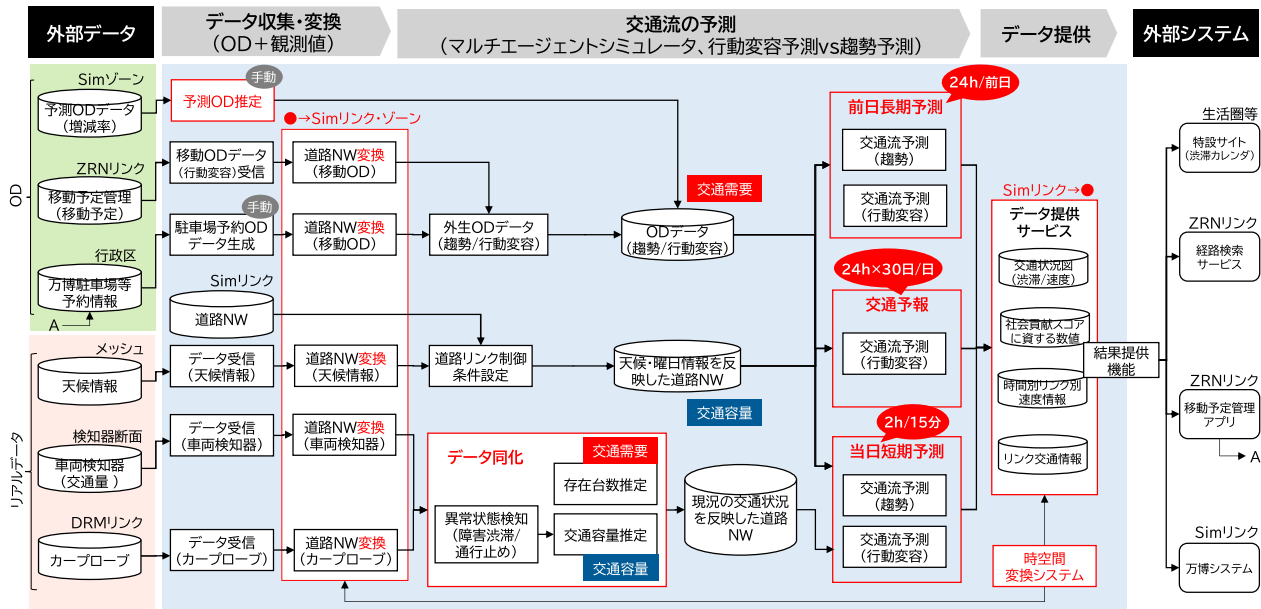


図-7 交通デジタルツインRASiNのシステムの全体構成

d) 全体の処理構成

処理の全体構成を図-7に示す。これにより、様々な位置表現の外部データを入力データとして採用し、民間サービスに適応した位置表現により外部提供していることがわかる。なお、これら様々な位置表現のデータを処理するための基準となる空間情報には、交通センサ番号、阪神高速道路上の検知器データなどの実証実験に必須のデータとの対応が既に存在していたシミュレーション用の道路NW（以下、Sim NW）を採用した。なお、メッシュ、ゾーンなどとの対応はSim NWの緯度経度情報を参照し、他の道路NWとの対応については対応テーブルを作成して処理することとしている。

(2) 行動変容を促進させる連携サービス

a) 行動変容促進サービスのあり方

現状の移動支援サービスはオンデマンド利用が多いが、慣れた移動の際には必要とされない。それどころか必要な際にも、高精度だが使い慣れていないナビ専用アプリより多用途で使い慣れたGoogleマップ等を利用する人が少なくない。このため、日常生活で使われない移動支援サービスをTDMとして機能させることは困難と考えた。とはいえ多用途に対応したサービスの追求には限界があることから、日常利用されやすいサービスをベースに移動支援機能を付加する形態が、TDMとして機能するサービスを生み出す近道と考えた⁸⁾。これにより、多くの人が日常利用するスケジュールアプリをベースに、外出先までの移動を経路・出発時刻などの比較を通じて選択連携で具現化した行動変容訴求サービス



図-8 行動変容促進サービスのあり方

・登録させ、登録経路で過度な渋滞発生が予測された場合にはアラートで回避を促すなど、行動変容を促進させるUI/UXでマネジメントとして機能させている（図-8）。

b) 社会視点の移動の価値化

移動においては、これまで、旅行時間・費用等の経済的価値が重視される傾向にあったが、それだけでは社会全体の生産性向上や環境問題の解決といった、社会的価値の高い交通状態の達成は望めない。そのため前述の経路検索を通じた移動の工夫（経路・出発時刻・交通手段の変更）で交通環境全体（総旅行時間・環境負荷・事故リスク）の改善に貢献（社会的価値）することを、交通DT算出の評価点（以下、社会貢献スコア）の付与によって実感させ、それによりスコア獲得がユーザにとっての価値と感ずるようになれば、自ら高スコアとなる移動を選択するようになると期待している。なお、社会貢献スコアは、個人単位の累計に加えて、所属組織単位でも集計可能とし、個人の獲得スコアが集まれば、所属組織の社会的評価の向上にも寄与する仕組みとした（図-9）。

c) 交通DTと連動した行動変容促進サービスの実装

本節では、TDMとして機能させる行動変容促進サービスについて必要となる具体的な機能について概説する。

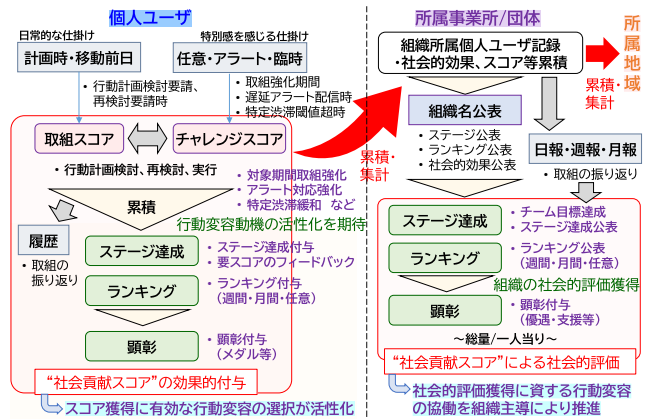


図-9 社会貢献スコアを活用した行動変容戦略イメージ

誰でも任意に利用できるオンデマンドサービスは取り組みの認知を広げるのには適しているが、マネジメントとして機能させるには限界がある。そのため渋滞回避に資するpush通知を実現するために、日常的に登録が為されるスケジュールアプリに着目し、経路検索サービス Welmos Route（図-10）や交通DTのRASiN と連動させて移動予定の自然な登録を図り、行動変容を促進させるUI/UXを備えたWelmos Agent（図-11）として具現化する。

Welmos Agentでは、スケジュールと連動した経路検索サービスWelmos Routeの操作を通じて、合理的な移動選択（経路・出発時刻・交通手段）を支援しており、旅行時間・高速料金、社会貢献スコアによって、経路は標準

的な経路と都心迂回を優先する経路との比較が、出発時刻は前後2時間までの間が30分刻みで比較できるUIとなっており、さらに、公共交通の標準的な旅行時間・料金（詳細は時刻表反映の無料サイトへのリンクにて対応）とも比較可能となるため、交通手段の変更の検討も可能な行動変容訴求サービスとなっている。なお、経路検索を通じて登録された経路において、RASiNにより渋滞発生が予測された場合には、該当ユーザへ渋滞予測アラートが配信される仕組みとなっており、このアラートを参考にユーザは渋滞を極力回避する移動を再検討できる。

加えて、RASiN算出の交通予測に基づき渋滞予測カレンダーとして提供することで、渋滞予測日の予定の日時変更などによる渋滞回避も後押しする（図-8）。

また、社会視点による行動変容が活性化されることを期待して、移動の工夫によって生み出された社会的価値を表す社会貢献スコアを獲得・蓄積することへの嗜好性を刺激するために、例えば、行動変容に資する操作によって獲得スコアが増える状況が実感できるUIとしている。さらに、個人が蓄積したスコアについては所属する組織単位でも集計ができるようにしており、組織保有のスコアが貯まれば組織のCSRとしても活かせるよう、スコアの公正性には留意しつつ、社会的浸透を図っていきたい。

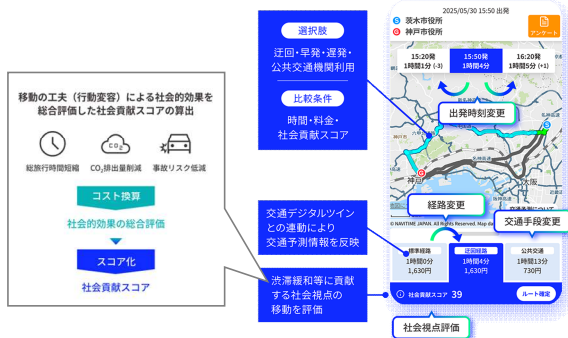


図-10 経路検索サービスWelmos Routeの概要



図-11 行動変容訴求サービスWelmos Agentの概要

2025年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
大阪・関西万博						大阪万博(4/13~10/13)				
会場の混雑予測				やや混雑	混雑	やや混雑	混雑	非常に混雑		
交通需要		日常交通		GW	働きかけTDM①			働きかけTDM②		
実証実験フェーズ		調整期(非公開)		準備期(非公開)	第1期 ※社会実装①		第2期 ※社会実装②			
検証内容				・万博来場交通の把握 ・予測の万博交通対応 ・各種閾値・変数検証	・予測精度検証・改善等 ・サービスの有用性の改善等 ・各種閾値・変数更新・精緻化	・予測精度検証・TDMシステム評価等 ・サービスの有用性の評価等 ・行動変容効果の評価等				
交通デジタルツイン(RASiN)		★アップデート	日常交通実証実験	日常交通+万博交通予備検証	日常交通+万博交通実証実験					
経路検索サービス(Welmos Route)			日常交通実証実験	事前検証(外部非公開)	実証実験(一般公開)					
スケジュール管理アプリ(Welmos Agent)			社内モニタ調査(外部非公開)	社外モニタ調査(外部非公開)	実証実験(一般公開)					

図-12 実証実験の概略スケジュール

4. 実証実験計画の概要

今回試作したWelmos Systemは、阪神都市圏の30日先までの交通状況を予測し、当日はリアルタイムの交通状況を踏まえた予測を随時更新して、予測に基づく行動変容を連携するWelmos Agentで促進させ、変容結果をさらに行動変容の訴求材料として活用するといった、TDMをデータ駆動型のマネジメントシステムとして具現化したものである。そのためWelmos Systemを用いた実証実験では、RASiNの予測精度の検証、Welmos Agentの有有用性や行動変容効果に着目した評価を行っている（図-12）。

ここで、実証実験は実践的な検証の場と捉えており、様々な条件下での予測精度の評価や、行動変容へ効果的に導くためのUI/UXの評価、各種パラメータの妥当性検証などを通じて、万博後にはより実用的なシステムとして機能するよう、段階的なアップデートを計画している。なお、博覧会協会の公表では8月後半以降が最繁忙期であることから、本実証実験としても、この期間を対象に、より多くの行動変容を実現させたいと考えている。

5. Welmos Systemの利活用の可能性

交通需要マネジメントシステムWelmos Systemは、TDMでの活用も含め、交通業務の高度化に資する様々な利活用が期待されている（図-13）。これは、RASiNが交通量を推定していること、データ同化により交通流の異常を検知する仕組みを具備していることによるものである。なお、これらは阪神高速道路だけでなく、他の高速道路や国道等にも準用できるものであることから、それらを踏まえた利活用の拡大も検討していきたい。

一方、都市の潜在力を評価する際には人流の把握が欠かせないが、Welmos Agentでユーザの行動パターンを把握することができるため、将来的にユーザが増加すれば、交通手段別トリップチェーン（TC）の拡大生成によるパーソントリップ調査の代替や、阪神都市圏の属性別の行動モデルの構築などを通じた需要予測¹⁰⁾などへの拡張も期待されるため、今後は検討の視野に入れていきたい。

また、RASiNでは、当面、交通容量の低下区間や通行止め区間のリアルタイム検出の精度向上を図っており、例えば、災害時に、救助対象エリアの孤立（アクセス不能）有無やアクセス時間、その属性構成（高齢者有無）等を鑑みた救助活動計画がシミュレートできれば非常に有用となるだろう。また、要支援対象への確実な物資支援を行うために復旧優先度の高い被災道路の選定や、緊急車両・支援車両以外の無秩序な現地入りの制限等に必要の制約条件を算出するためのシミュレーション機能としても有用となるポテンシャルを秘めている。

このように、Welmos Systemは、様々な活用性を秘めており、今後は、平時には、人流や交通状況のモニタリングや事故等の交通障害（車線規制・通行止め）の検出、道路工事の事前の影響把握や通行止め期間中の配送計画の支援など、日常利用システムとして充実を図る一方、災害時には、被害状況の把握や影響のシミュレーション、応急対応の優先度の選定への活用を見据えるなど、様々な場面に対応できる、平時・有事兼用の交通マネジメントシステムとして拡張していくことも検討していきたい。



図-13 交通需要マネジメントシステムの利活用イメージ

6. まとめ

本稿は、大阪・関西万博開催中の阪神都市圏で実施中の交通需要マネジメントシステムを活用した実証実験について、システムの構成や特徴的な機能、その利活用の可能性についてまとめたものである。今後は、実験の結果を踏まえ、機能改善の他、運営体制や運用費合理化の検討など、本格実装に向けた検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 阪神高速道路株式会社：NTTと阪神高速、都市の道路交通の整流化に貢献するデジタル技術を活用した新たな交通マネジメントの実装に向けた検討を共同で実施、2023.4.21.
- 2) 阪神高速道路株式会社：NTTグループと阪神高速、Well-Movingな移動社会の実現に向けた実証実験を開始、2025.6.18.
- 3) 国土交通省：社会資本整備審議会道路分科会第 76 回基本政策部会・資料 2-1 ICT 交通マネジメントの展開、2021.12.24.
- 4) 国土交通省：社会資本整備審議会道路分科会第 81 回基本政策部会・資料 3 今後の ICT 交通マネジメント、2022.3.23.
- 5) 国土交通省近畿地方整備局：近畿ブロック 新広域道路交通計画、2021.7.
- 6) 国土交通省近畿地方整備局：報道発表資料、「地域の主要渋滞箇所」の公表について ～官民一体で兵庫県内の主要渋滞箇所を選定～、2013.2.15.
- 7) 国土交通省近畿地方整備局：近畿版道路啓開計画(案)、2025.3.
- 8) 児玉崇ら：データ駆動型の交通需要マネジメントシステムの構想、第 21 回 ITS シンポジウム 2024、2024.
- 9) Welmos実証実験事務局：Welmos Agent、<https://agent.welmos.jp/>
- 10) 大竹司真、菊池輝：データ同化を実装した需要予測シミュレーションシステムの構築、土木学会論文集 D3（土木計画学）、Vol.75, No.5, I_697-I_613, 2019.

ドローンを活用した上野遊水地巡視の運用検討について

初田 健¹・橋本 広稔²

¹木津川上流河川事務所 伊賀上野出張所（〒518-0825 三重県伊賀市小田町242）

²木津川上流河川事務所 管理課（〒518-0723 三重県名張市木屋町812-1）。

木津川上流河川事務所では、4つの遊水地からなる上野遊水地を整備し管理運用している。遊水地は、農地や一般道として平時利用され、出水時には洪水の流入が予測される際は車両巡視を行い、退避を呼びかける。この巡視は事故防止の観点より、実効性が求められる一方で巡視者への責任・負担は極めて重い。

この巡視の負担軽減、より確実な実効性を期待し、ドローン活用の検討・実証実験を2020年から実施してきた。本稿はこの5年間で知り得た技術的知見をまとめたものである。なお上野遊水地の出水時巡視にドローン活用をする事は現状では、機体性能、法規制、操縦者の確保等の課題が確認され、運用に至っていない。しかし、平時の巡視等に有用な知見等も得ており、これら今後の展望を含めて報告する。

キーワード 出水時巡視, ドローン, 省人化, 効率化

1. はじめに

(1) 上野遊水地における出水時巡視の現状と課題

木津川上流河川事務所では、長田遊水地、木興遊水地、新居遊水地、小田遊水地からなる上野遊水地（248.5ha）

（図-1）を整備している。普段の遊水地は農地として利用され一般道も存在するため、越流が予想される場合は出水時巡視により遊水地内の安全確認を行っている。

現在の出水時巡視は、冠水する遊水地内に残る人がいないか、越流が始まるまでに計3回、2人組の2班体制で車両巡回しながら目視確認（図-2）を行っており、巡視員は参集から一連の作業終了まで約6時間を要している。また、越流が迫るなか自身の安全確保にも留意している。

出水時巡視の確認範囲は、車両移動ができる一部の道路沿いに限定され、特に夜間ともなると車のライトや懐中電灯が照射可能な一部の範囲に一層限定される。

出水時における確実な安全管理が求められる上野遊水地であるが、広域を対象とする出水時巡視は、多くの人員と時間を割きつつも限られた時間の中で確認できる範囲が限定的といった課題がある。

(2) 出水時巡視のDX検討

国土交通省では河川管理の効率化・高度化を進め、住民の安全・安心の向上につなげるDXに取り組んでいる。特に、広域管理が求められる河川分野では、ドローンの活用に着目している。

木津川上流河川事務所では、出水時巡視の省人化、効率化、遊水地内の人発見の確実性、及び安全性の向上を目指し、様々な巡視手法の選択肢の中から、自律飛行ドローンと赤外線カメラ等を組み合わせた技術について、2020年度より検討ならびに実証実験を行ってきた。

本稿では、これまでの技術的な検討成果を基に、運用面の検討を目的として、出水時本番を想定し行なった2024年度の現場試験結果および今後の展望について報告するものである。



図-1 上野遊水地

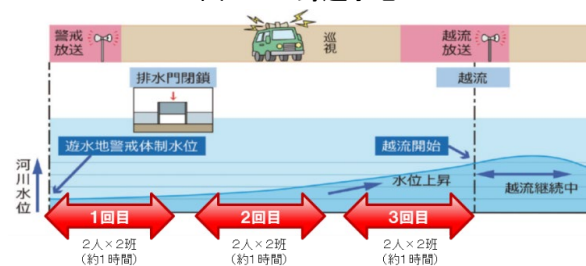


図-2 巡視スケジュール

2. これまでの検討で得られた知見

(1) ドローン巡視技術の性能検証（2020年度～2022年度）

2020年度から2022年度にかけて、現在市場に多く流通している、外国製の自律飛行ドローン（長時間・長距離飛行が可能、かつ、高防水性、強耐風性を有す）（図-3）に、可視および赤外線撮影可能なデジタルカメラと大音量スピーカーを搭載し、現場巡視員と各管理拠点の情報連携を可能とするリアルタイム映像配信技術（図-4）を組み合わせた新たなドローン巡視技術（表-1）を構築し、上野遊水地にて基本性能の検証や活用検討を実施した。



図-3 検証用ドローンと取得される赤外線画像

表-1 ドローン巡視技術の機材スペック

機材の要件		実験機材のスペック
自律飛行ドローン	長時間飛行	最大飛行時間：約25分（巡視運用時間）
	防水性能	保護等級：IP45
	耐風速性能	最大風圧抵抗：15m/s
	最大伝送距離	最大約8km（巡視エリア約1.6km）
カメラ	可視・赤外線撮影	可視・赤外線同時撮影
	高解像度	赤外線動画解像度：640×512@30Hz 温度分解能：≤50 mK @ f/1.0 可視カメラ動画解像度：3840×2160@30fps
スピーカー	音量	130dB
映像配信技術	低遅延配信	リアルタイム
	飛行位置情報	地図上に飛行経路表示

構築したドローン巡視技術は、上野遊水地における昼夜、及び様々な気象条件の下で行った実証実験の結果、表-2に示す知見を得た。

表-2 実証実験で得られた知見

項 目	実証実験結果
自律飛行の安全性	✓ ドローンの性能は出水時巡視に必要な飛行時間を満たす ✓ 現場の電波状態は安全飛行に影響なし ✓ 仮に機体性能の上限に達する風速(15m/s)が発生しても安定飛行を継続可能
赤外線カメラの特性	✓ 空撮した赤外線画像から人を周囲との温度差により容易に発見可能(特に夜間は有効) ✓ 15mm/h程度の雨であれば画像判読への影響は少ない
最適な撮影の方法	✓ 効率的かつ判読のし易さより効果的な撮影方法を設定(実験機材の場合、高度80m程度、速度8m/s、前方45°撮影) ✓ プログラム撮影により操縦者の負担の少ない撮影が可能
ドローン遠隔監視の方法	✓ リアルタイム映像配信技術との連携により、遠隔地から飛行位置を確認しながら現場への指示が可能 ✓ 飛行経路や撮影画像を記録し、事後検証が可能
避難誘導の方法	✓ 巡視員自身の安全を確保しつつ、上空からのスピーカー放送により、切迫状態の伝達、迅速な避難誘導が可能

これより、本ドローン巡視技術は、機体性能の最大風速（15m/s）以下、レンズ雨滴の影響が許容できる雨の強さ（15mm/h程度）、機体の状態が確認可能な視界など使用限界条件の中において技術的には出水時巡視の一選択肢となり得ることが確認できた。特に、ドローン巡視は、現在の出水時巡視の半分の人員体制で可能であり、上空からの撮影によって植生等の死角領域を最少化した網羅的な安全確認が、現在と同等の時間内で行える点は本技術の強みといえる。（表-3）

表-3 ドローン巡視により期待される効果

項 目	期待される効果
効率性	✓ ドローンは道路網に左右されず空中移動するため、出水時の限られた時間でも遊水地全体を巡視できる ✓ ドローンの自律飛行により巡視員の負担を軽減できる ✓ ドローン搭載のスピーカーにより退避を呼びかけできる
省人化	✓ 効率的な技術であるため、現在の巡視体制を半減できる
確実性	✓ 赤外線カメラにより夜間でも人を発見できる ✓ 空中監視により植生等の死角領域を最少化できる
安全性	✓ 巡視員の移動範囲が少なく、遊水地内への立入りは不要

(2) ドローン飛行困難時の対応検討（2022年度～2023年度）

2022年度から2023年度は、ドローン巡視技術を活用する場合に、台風接近時などドローンの機体性能を超える強風時や豪雨時においても出水時巡視の負担軽減が可能な連携技術として、赤外線カメラの地上利用について有効性を検証した。検証はドローン搭載カメラと同等の性能を有すハンディタイプの赤外線カメラを使用し、夜間に堤防上から人の判読可能な距離を確認した。赤外線カメラの視点場から被写体を移動させ検証した結果、人を判読可能な距離は約400mであった。

赤外線カメラによる判読可能距離より、上野遊水地を網羅的に確認可能な新巡視ルート案（図-4）を設定し、巡視体制、巡視の移動距離、巡視の所要時間を現在の巡視と比較すると、巡視体制は現行の半分、移動距離は現行の4割減、所用時間は現行と同等で網羅的な確認が可能であった。（表-4）

これより、ドローンが飛行困難時の併用技術として、赤外線カメラの地上利用は有効であることを確認した。

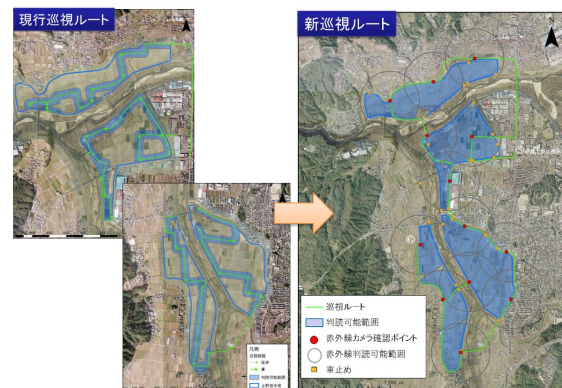


図-4 赤外線カメラを使用した巡視ルート案

表-4 赤外線カメラを使用した巡視ルートの効率化

巡視ルート	実施体制	総移動距離	巡視時間
現行巡視ルート (LEDサーチライト)	2人×2班 (計4名)	約20.6km	60分
新巡視ルート (サーモグラフィカメラ)	2人×1班 (計2名)	約13.0km	60分

巡視ルート	判読可能面積（遊水面積との比率）			
	小田	新居	木興	長田
現行巡視ルート (LEDサーチライト)	15.86ha (26%)	19.90ha (33%)	19.68ha (28%)	14.79ha (27%)
新巡視ルート (サーモグラフィカメラ)	59.84ha (98%)	57.80ha (97%)	69.25ha (100%)	53.81ha (97%)

(3) 国産ドローンの技術動向の把握（2022年度～2023年度）

将来的には政府調達案件の要件を満たす国産ドローンの活用を前提とし、海外への情報流出リスクを低減するため、出水時巡視に必要な機材要件を満たす国産ドローンを調査し、実証実験により出水時巡視への活用の可能性を検証した。

国産ドローンは、近年国内の技術開発が進んでおり、先行検証した外国製ドローンに近い性能を有している。国産ドローンの中には、遠隔操縦が可能なLTE回線を使用するドローンや、撮影画像から人・車両をAI判読する技術も開発が進んでおり、現場の負担軽減に繋げられる可能性がある。

実証実験の結果、技術的には出水時巡視手法の選択肢となり得ることを確認できた。ただし、市場流通が多く低価格で販売されている外国製ドローンに比べ、国産ドローンの市場流通は未だ少なく、同等スペックの外国製に比べると価格はやや高めであるため、機材調達の面で課題が残る。



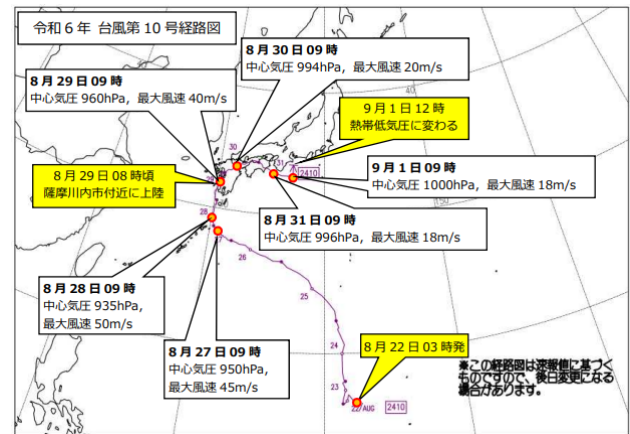
図-5 検証に使用した国産ドローン

3. 出水時本番を想定した現場試験結果

これまでの検証結果より、赤外線カメラ等を活用した

ドローン巡視技術は、飛行可能な条件下では現在の出水時巡視に比べ優位な技術であることが確認できた。2024年度は、これまでの技術検証結果を踏まえ、運用面の検討を目的として、出水時本番を想定した実運用レベルの現場試験を行った。なお、現場試験の機会として、気象予報をもとに2024年8月の台風10号を対象とした。

現場試験に使用するドローンは木津川上流管内界限にスピーカー等オプション機器を含めた機材保有者が現在存在していないため、やむを得ず「政府機関等における無人航空機の調達等に関する方針について」（2020年9月14日 関係省庁申合せ）で調達制限の対象となる製品となるが試験下に限定して使用することで対応した。台風10号は当初予測されたから大きくその軌道をたどったことから（図-6）、試験に使用するドローンの現場運搬時期の調整や、操縦者待機時間の長期化することになるなど、出水時本番を想定した気象条件下での試験が困難な状況となった。



出典：「令和6年 台風第 10 号による大雨、暴風及び突風」

(2024年10月8日 気象庁)

図-6 2024年(令和6年)台風10号経路図

(1) 現場試験の方法

現場試験の方法は、現在の出水時巡視と同様の工程（表-5）で行うこととした。上野遊水地は普段農地として利用されており、交通量は少ないものの一般道が存在しているため、ドローン巡視を効率的に行うには、航空法に則り、無人航空機の操縦ライセンス保有者を配置した「レベル3.5飛行」による目視外飛行を行う必要がある。しかし、無人航空機の操縦ライセンス制度は導入開始から間がなく、現時点では上野遊水地周辺にライセンス保有者が不在である。このため、現場試験は航空法による第三者の安全確保措置として、看板による周知、及び保安員を配置した「レベル3飛行」による目視外飛行により実施することとした。（図-7）これにより、レベル3.5対応のライセンス保有者数が充実するまで、現行の巡視体制以上の人員確保が必要となった。

(2) 現場試験結果

荒天時にドローンによる巡視を実験することを目的としたが、結果的には晴天時の実施となってしまった。現状、ドローン巡視の実施にあたっては、台風等の予測技術に加えて、ドローン操縦に関わるチームの出動・準備の見極めが重要である。

一方、無降雨での試験となったものの、ドローンの自律飛行により、小田・新居コース、長田・木興コースの巡視は、それぞれ現在の車両巡視と同等の所要時間で実施でき、技術的な有効性を再確認することができた。ただし、2回行った巡視のうち1回目は、不慣れな段取りや機材の調整に時間を要し、想定時間を大幅に超過する結果となった。（表-6）本ドローン巡視技術は、普段ドローンの操縦に慣れている技術者でも、ドローンの操縦技術に加え、豊富な出動前の段取り経験や、赤外線画像の判読技術も必要であり、ドローンを扱う巡視員の練度を高める日常的な訓練が重要という事が判明した。

表-5 出水時巡視の流れと現場試験工程（赤枠）

開始目安	指揮官（集中管理センター：CS）	遊水地巡視員（2名/1班）
平時		・ 機器のメンテナンス
大雨予報・河川水位上昇の恐れ		・ 使用機器の準備 ・ バッテリーの充電（12セット以上） ・ 機器の使用前点検 ・ 自律飛行設定の再確認
注意体制	・ 事務所集合	・ 事務所集合
第1警戒体制	・ CS到着 ・ 巡視配信映像の受信準備	・ CS到着 ・ 機器の使用準備・車両積み込み ・ 気象条件の確認（ドローン使用可否判断）
排水門警戒体制 目安水位2.0m	・ 巡視配信映像の確認及び現地への指示	・ 1回目巡視出動 ・ 小田離発着場所到着 ・ 現地気象条件の再確認 ・ 飛行準備（約5分） ・ 飛行開始をCSへ連絡 ・ 小田離発着場所からドローン巡視実施（弱風時約25分） ※自律飛行により小田・新居を飛行 ・ 離発着場所間の移動（5分） ・ 木興離発着場所到着 ・ 飛行準備（約5分） ・ 木興離発着場所からドローン巡視実施（弱風時約25分） ※自律飛行により木興・長田を飛行 ・ 飛行終了をCSへ連絡 ・ CSへ帰着、次回出動準備
越流の2時間前 非常体制 目安水位5.0m	・ 巡視配信映像の確認及び現地への指示	・ 2回目巡視出動 （1回目巡視同様）
越流直前 目安水位5.5m	・ 巡視配信映像の確認及び現地への指示	・ 3回目巡視出動 （1回目巡視同様）
警戒体制解除	・ 出水記録整理	・ 巡視報告整理 ・ 雨天飛行時の機器メンテナンス ・ 機器の使用後点検
平時		・ 機器のメンテナンス（以下繰り返し）

表-6 現場試験の所要時間

巡視一連作業	想定時間	1回目巡視	2回目巡視	※1 モニター接続の不具合、操縦方法の再確認 ※2 スピーカーアプリの不具合、操縦方法の再確認
機器の使用準備、車両積込（集中管理センター）	10分	8分	17分	
①巡視出動（小田離発着場所へ移動）	15分	5分	6分	
②飛行準備（小田離発着場所）		28分※1	7分	
③小田・新居巡視（小田離発着場所）	25分	26分	24分	
④機器撤収（木興離発着場所へ移動）	15分	8分	10分	
⑤飛行準備（木興離発着場所）		23分※2	8分	
⑥木興・長田巡視（木興離発着場所）	25分	22分	25分	
⑦機器撤収（集中管理センターへ移動）	10分	14分	13分	
巡視一連作業所要時間①～⑦	90分	126分	93分	

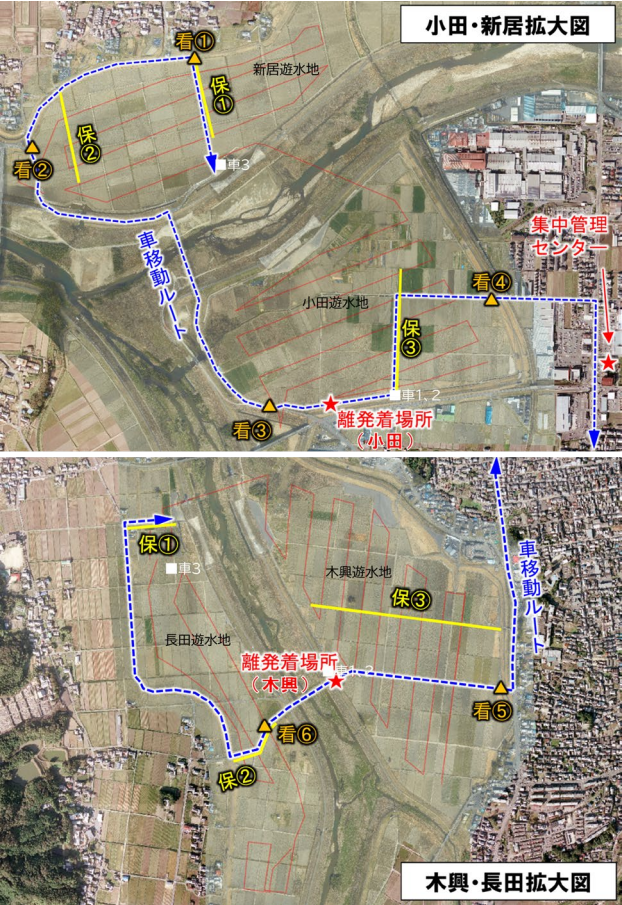


図-7 看板・保安員配置図



図-8 現場試験状況（2024. 8. 27）

4. 実運用にあたっての課題

(1) 航空法への対応（特定飛行）

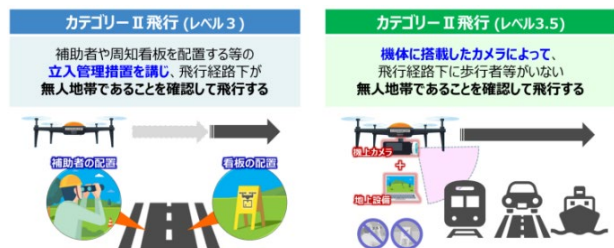
上野遊水地のドローン巡視は、目視外飛行・夜間飛行を行うため、航空法の「特定飛行」に該当し、事前に航空局へ許可承認申請が必要である。（10時間以上の飛行経験者と登録済みドローンが申請要件）また、出水時巡視は実施日程を予め定めることができないため、航空局の許可承認には数週間を要す。このため、飛行直前の申請は困難であり、1年を限度とする包括申請を行っておく必要がある。

また、許可承認申請は、予め操縦者と使用機体を特定して行う必要があり、許可承認期間中は、操縦者と使用機体が限定され、体制・機材の入れ替えには再申請が必要といったことが予想される。このため、現場対応を柔軟に行うためには、予備体制を確保しておくことも必要である。

(2) 航空法への対応（立入り管理措置）

上野遊水地では、越流前に道路管理者が遊水地内へ通じる道路の通行規制を行うが、規制箇所が多く存在するため規制完了までには時間を要している。ドローン巡視にあたっては、ドローンの飛行経路下に第三者が立ち入る可能性を排除できない場所においては、補助者の配置や看板の配置等の第三者の安全を確保するための立入管理装置を伴う「レベル3飛行」が必要となる。ただし、2023年12月に創設された「レベル3.5飛行制度」（図-9）では、夜間飛行の限定解除を行ったライセンス保有者の場合、立入管理措置は省略することが可能である。

上野遊水地におけるドローン巡視の省人化には、ライセンス保有者による「レベル3.5飛行」が必要不可欠であるが、操縦ライセンス制度新設後間もないため、現在はライセンス保有者が不足している。遠方からライセンス保有者を現場へ誘致する場合、出水時の緊急移動や出動待機の面で、出水時巡視にかかるコストは割高となる。また、職員によるライセンスの取得も選択肢となるが、人事異動等による操縦技能維持や、ライセンス取得のためのドローンスクール受講時間・費用の面で課題がある。このため、現在はドローン巡視の体制確保が難しい状況となり、操縦者の育成が今後の課題である。



出典：「カテゴリーⅡ飛行（レベル3.5飛行）の許可・承認申請について」（2024年2月 国土交通省航空局 無人航空機安全課）

図-9 新たに創設されたレベル3.5飛行

(3) 機材調達

出水時のドローン巡視には、これまでの検証結果より、市場に流通しているドローンの中でも比較的高性能なドローンが必要である。特注で機材を確保しても、メンテナンス等の課題があるため、使用機材は平常でも利用可能な汎用性も求められる。

現在、国産ドローンは市場流通が少ないことから、ドローン巡視の実現には、当面、セキュリティリスクを低減しながら外国製ドローンの活用を考える必要がある。国による外国製ドローンの調達には制限があるため、委託業務内で機材を確保した運用が考えられるが、上野遊水地の周辺では、高性能なドローンを保有している地元企業が少なく機材調達が難しい。高性能なドローンを活用する出水時巡視の実現には、国産ドローンの市場流通拡大がポイントとなる。

5. まとめと今後の展望

(1) 検討結果

これまで行ってきたドローンを活用した上野遊水地巡視にかかる各種検討及び実証実験では、自律飛行ドローン、赤外線カメラ、スピーカー、及びリアルタイム映像配信技術の組み合わせ技術は、昼夜問わず遠隔で遊水地内の現状把握、退避の呼びかけが可能となり、風速や降雨など一定の条件下において遊水地巡視の省人化・効率化・安全性の面において有効である。また、ドローンが飛行困難な気象条件下では、赤外線カメラの地上利用の有効性も確認できており、技術的には活用可能なレベルに達している。

一方で、ドローン巡視の現場実装に至るには以下に示す解決すべき課題があり、国産ドローンの普及、ドローン性能の一層の向上による運用機会の拡大、運用対応する人材の確保といった、出水時を含む緊急対応に対してドローンを柔軟に活用できる環境づくりが重要である。

(2) 今後の課題

現行の航空法のもとで出水時にドローン巡視を実施する場合、操縦ライセンス保有者が不足している現状では、第三者の安全確保に相当の体制を必要とするため、出水時巡視の省人化・効率化を加速的に推進することが難しい。当面は、「レベル3.5飛行」による効率的な巡視の実現を目指し、平常時の河川巡視などにおいて難易度の低い条件下でドローンの活用を図る予定である。

(3) 今後の展望

今後の上野遊水地の出水時巡視の負担を軽減する取り組みとして、ドローン飛行困難時の対応検討にて赤外線

カメラは夜間でも400mの距離から人物を確認可能である結果を踏まえて、赤外線カメラの地上活用をより詳細な運用検討を継続していく予定である。

これらの検討技術は、深刻化しつつある河川管理の担い手不足や高齢化において、現場作業の負担軽減や省人化に大きく期待されるものであるため、今後も最新の技術動向や制度の進展に注視しつつ、河川管理においても生産性向上が図れるように現場取り組みを進めていきたい。

謝辞：本論文作成にあたり多大なる御協力を頂きました皆様に心から感謝申し上げます。

関連論文

2022年度「ドローンを活用した上野遊水地巡視の実証実験」

2023年度「ドローンを活用した上野遊水地巡視の試行について」

流水型ダムにおける グラウト改良の工夫について

小波津 健太¹・一柳 知之²

¹近畿地方整備局 足羽川ダム工事事務所 工事課 (〒918-8203福井県福井市成和1-2111)

²株式会社ニュージェック 基盤技術部門地圏グループ グループ統括 (〒531-0074大阪府大阪市北区本庄東二丁目3番20号)。

足羽川ダムは、花崗岩を主体として、安山岩が複雑に貫入する基礎岩盤を持つ流水型ダムである。ダムサイトの左岸部では掘削面から深度20m程度、河床部では掘削面から深度10m程度、右岸部では掘削面から深度50mの範囲に高透水ゾーンが連続的に分布しており、グラウティングは改良が必要である。

一方、河床部では岩盤透水性を踏まえた規定孔の次数低減の見直しを行っている。さらに、右岸リム部には断層及び低透水性を示す白色変質部が存在しており、これらを考慮したカーテングラウティングの縮減、簡素化を行っている。

本論文では、他ダムの参考となるようこれらのコスト縮減策を紹介する。

キーワード グラウティング、流水型ダム、合理化、コスト縮減

1. 足羽川ダム建設事業の概要

足羽川ダムは、九頭竜川水系足羽川の支川部子川（福井県今立郡池田町小畑地先）（図-1）に建設する高さ96m、総貯水容量28,700千 m^3 、有効貯水容量（洪水調節容量）28,200千 m^3 の重力式コンクリートダムである。下流域の洪水被害軽減を目的としており、平常時は水を貯留しない洪水調節専用の流水型ダムである。

足羽川ダムは流水型ダムとしては国内初のゲート付きダムであり、河川整備計画に基づき足羽川ダム本体及び水海川導水施設（水海川分水堰及び水海川導水トンネル）を整備中である（図-2）。



図-1 足羽川ダム位置図

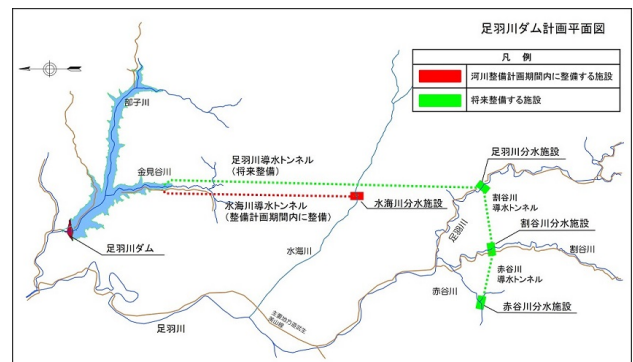


図-2 足羽川ダム計画平面図

2. 足羽川ダム基礎岩盤の特徴について

足羽川ダムの地質分布（図-3）は花崗岩（桃色）を主体として、安山岩（紫色および黄緑色）が複雑に貫入する基礎岩盤を有しており、花崗岩には、断層活動によって岩石が破碎を受けた、カタクレイサイトも見られる。

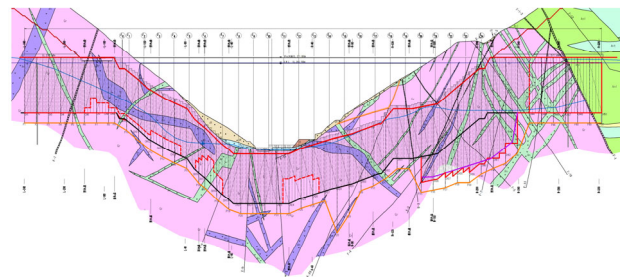


図-3 地質分布図

また、ダムサイトにはF-1断層～F-18断層の計18の断層があり、確認される断層の中で最大規模であるF-1断層を境に、花崗岩主体と安山岩主体の地質境界となっている。

岩級区分（図-4）について、全体として掘削面から深度50m範囲ではCML～CM級（黄緑及び緑色）の岩盤が主であり、河床部付近ではCH級（水色）も存在する。

岩盤透水性（図-5）の評価について、表-1に透水性区分の定義を示す。足羽川ダムの特徴的な部分として、河床部では掘削面から浅部10m～20m程度まで20Lu以上のⅢゾーンが存在し、20～70mの深さでⅡゾーンが存在する。右岸部では、掘削面以深にⅢゾーンが広く分布しているが、F-1断層より谷側に一部低透水のⅠゾーンも存在する。

次章では、河床部、右岸部について、グラウト改良にあたってのそれぞれの課題や工夫、実際の対応を紹介していく。

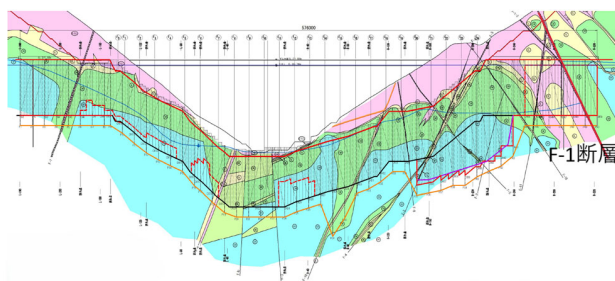


図-4 岩級区分図

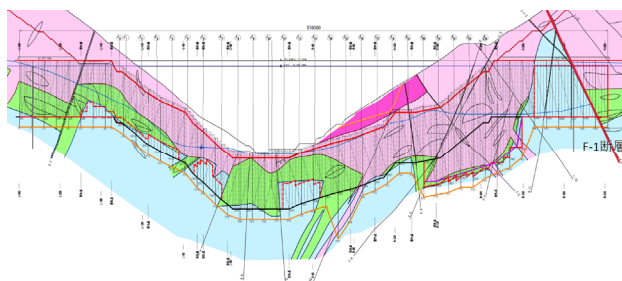


図-5 岩盤透水性区分図

岩盤透水性区分	内容
Ⅲ-2	地表から連続する風化・ゆるみの影響により高透水(100Lu以上)を示す区間
Ⅲ-1	地表から連続する風化の影響による高透水(20Lu以上)を示す区間
Ⅱ	低透水区間と高透水区間が混在し、水みちが連続する可能性がある区間
Ⅰ	地表から連続する風化・ゆるみなどの後天的な影響をほとんど受けておらず、かつ水みちが連続しない低透水区間

表-1 岩盤透水性区分の定義

3. 各岩盤における対応

(1) 河床部における対応

a) 設計段階の状況

設計段階において、河床部のカーテングラウチングの計画深度はパイロット孔60m、一般孔深度50mで計画されている。また、改良目標値はグラウチング技術指針に準拠し、深度0～50m（0～H/2）：2Lu、50～100（H/2～H）：5Luと設定している。孔配置については、①改良目標値を超えるゾーンについてはⅠパターン（最少孔間隔1.5m、規定3次孔）、②改良目標値を下回るゾーンについてはⅡパターン（最少孔間隔3.0m、規定2次孔）としている。

b) カーテングラウチング試験施工

カーテングラウチングの施工にあたり、注入圧力と規定回数の変更を行う。所定の改良度まで適切に改良できるか確認のため、最深河床部K21～K-22BLにて試験施工を行った（図-6）。試験施工範囲の深度50m区間は①Ⅰパターン（最少孔間隔1.5m、規定3次孔）に該当する。

試験施工で用いる注入圧力については、同種地質である舟川ダム等の事例を参考に当初仕様を設定しているところを、より効率的な改良を目指して高圧力仕様も設定（表-2）し、両者の改良度の比較を行った。

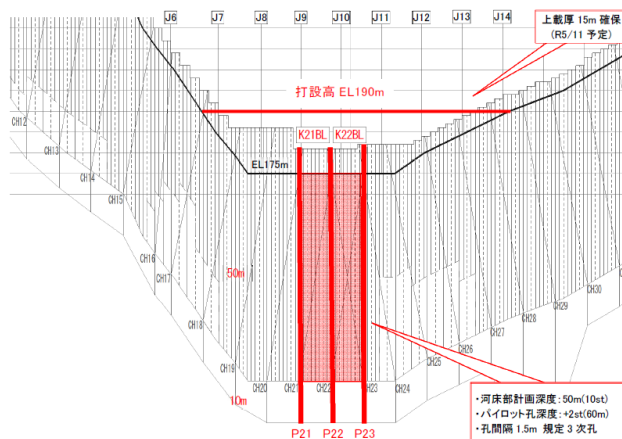


図-6 カーテングラウチング試験施工位置図

【左岸側 K21BL：高圧力仕様】

ステージ	1	2	3	4	5	6	7～
注入圧力 (MPa)	0.5	0.7	1.0	1.5	1.5	1.8	2.0

【右岸側 K22BL：当初仕様】

ステージ	1	2	3	4	5	6	7～
注入圧力 (MPa)	0.4	0.7	1.0	1.2	1.2	1.5	1.5

表-2 注入圧力仕様

c) 試験結果

河床部カーテングラウチング試験施工の結果を図-7に示す。岩盤透水性区分図より、施工範囲深部までⅡゾーンと評価されていた河床部であったが、安山岩貫入の影響範囲を除けば、初期から2Lu程度以下の低透水性岩盤が広がること、局所的な高透水部についても2次孔程度

までの施工で2Lu以下まで改良できることが確認された。

このことから、試験施工範囲両側における岩盤透水性区分Ⅱゾーンについては、岩盤透水性区分Ⅰゾーンと同等であると評価し、河床部におけるⅡゾーンの規定次数を見直し（最少孔間隔3.0m、規定2次孔）の対象とした。

なお、堤敷面から浅部は止水上の重要度が高く、また、地表面からの風化による影響等が懸念されるため、見直しの対象はH/4（25m）以深とし、浅部H/4（25m）範囲までは当初計画通り規定3次孔とした。

規定次数の見直しにあたっては、カーテングラウチング施工時に2次孔の透水性から適用の可否を判断する。具体的には、2次孔全体のルジオン値の非超過確率85%値が2Lu未満である場合に規定次数を2次孔に見直すこととし、3次孔以降は追加孔として扱う。

規定次数の見直しにより、岩盤透水性区分のみで判断するのではなく、実績による柔軟な対応が可能となり、必要以上の改良を縮減することが可能となる。

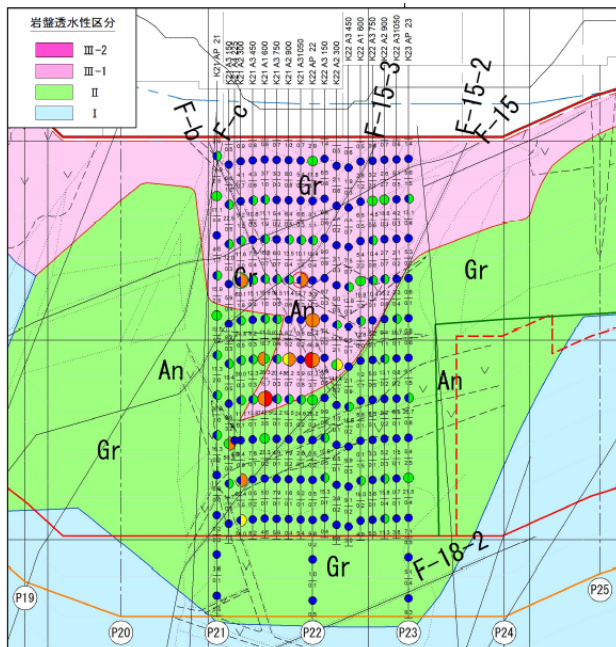


図-7 カーテングラウチング試験施工結果

また、注入仕様の違いによる改良度の比較については、左岸側K21BLは右岸側K22BLと比較して部分的に透水性が高い傾向にあるため、仕様の差異の判断が難しいが、高圧力仕様でセメント注入量が多いことから、注入効率が高くなり、透水性低減に効果があったと評価している。

K21BLおよびK22BLにおける注入状況を図-8-1、図-8-2に示す。

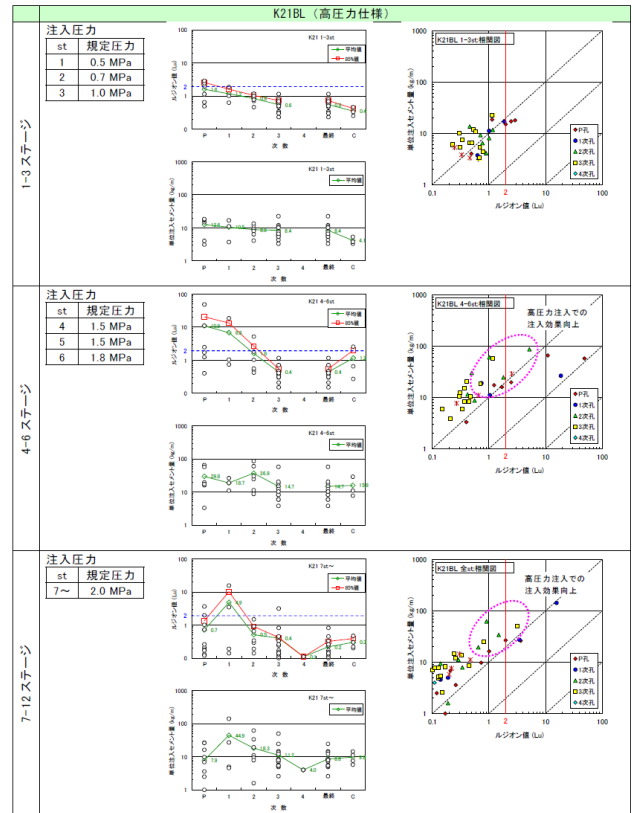


図-8-1 K21BL注入状況

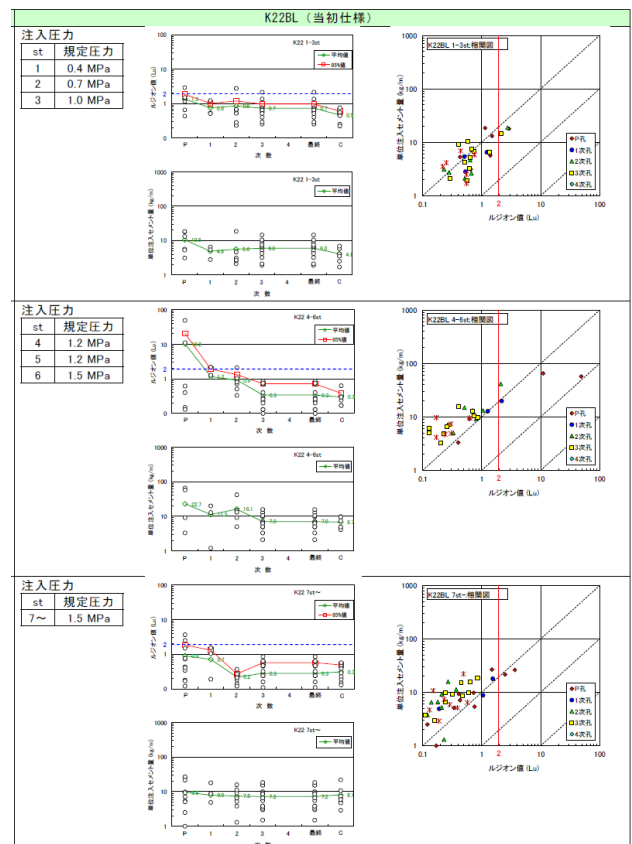


図-8-2 K22BL注入状況

浅部1～3stについて、当初仕様、高圧仕様のセメント注入量に大きな差異はなく、両BLとも適切に改良が進んでいる。なお、コンソリデーショングラウチングによる先行改良の影響もあったと考えられる。

4～6st, 7～12stにかけては高圧力仕様においてセメント注入量が多くなっており、2次孔、3次孔で注入効率が高くなる傾向がみられ、3次孔でルジオン値が低減している様子が明瞭であり、2次孔段階で低減目標値2Lu以下を満たし、チェック孔段階において高透水箇所を残さないための適切な設定と考えられる。

以上のことから、高圧力仕様の妥当性に問題はないと評価した。

(2) 右岸部における工夫

a) 設計段階の状況

右岸リム部には、ダムサイトで確認された断層の中で最大規模であるF-1断層が存在し、その下盤には厚さ20m程度の白色変質部を伴い低透水性を示すことが調査時のルジオンテストで確認されており、Iゾーンとしている。

設計時には、「F-1断層と周辺の白色変質部は天然の遮水ゾーンを形成していると推定されるが、現状地下水位が低いため、調査で未確認の漏水経路が潜在している可能性も残り、2Lu以下の難透水ゾーンではあるが確実を期して改良対象とする」としていた。

なお、低透水性を示している白色変質部は岩盤がもろいことから、カーテングラウチングによる透水試験や注入によって局所的に高い圧力を作用させると岩盤を痛め、逆に水みちを形成してしまう可能性が懸念された。

b) カーテングラウチング試験施工

先述の懸念より、白色変質部における規定孔廃止のため、試験施工では次の方針をとることとした。

①白色変質部を含むF-1断層の影響により低透水が分布すると想定される範囲は、F-1断層にかからないパイロット孔3孔（P44, P45, P46）で透水性を確認し、2Lu程度以下の低透水性が確認された場合は、規定孔を実施しない。

低透水性の確認については、カーテングラウチングの完了基準に則り、各パイロット孔（P44, P45, P46）の透水性が「2Lu非超過確率85%」を満足するか否かで判断する。

②F-1断層より山側の範囲については、地下水位がサーチャージ水位付近以上に分布し、川側への遮水構造が構築されているため、グラウチング対象外とする。

③右岸リム部谷側に広がるⅢゾーンについては、深部かつ広域に分布するため、先行して施工着手するP41～P44区間において、改良目標値2Luまでの改良進行具合と適切な孔配置及び注入仕様の確認を行う。

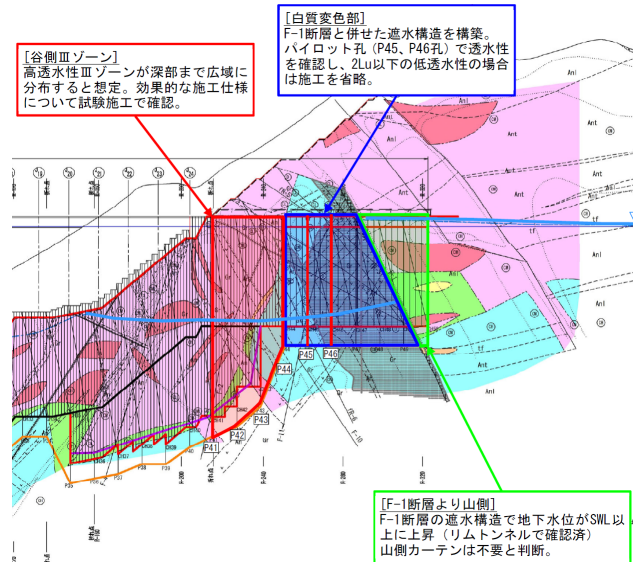


図-9 右岸部試験施工方針

c) 試験結果

白色変質部を含むF-1断層の影響による低透水範囲は、調査時のボーリング等から、白色変質部周辺範囲厚みをもって存在していることを確認した。

表-3に各パイロット孔の試験結果を示す。P44～P46の3孔において、大半が2Lu以下であること、2Lu超過ステージは3箇所のみであることを確認した。

P44について、10stまでの規定孔範囲において、超過ステージは1ステージのみ、P45, P46においても1ステージのみ、全体として非超過確率が90%であることが確認できた。

なお、規定孔範囲外ではあるが、P46の12, 13stに存在する高透水部はボーリング掘削時のコア写真（図-10）の状態より、白色変質や風化の影響、挟在物のない割れ目であったことから、水みちの形成には影響のないスポット的な高透水箇所として判断した。

以上のことから、P44から山側をカーテングラウチング範囲から除外とした。

st	P44			P45			P46		
	Lu	Pc	Ce	Lu	Pc	Ce	Lu	Pc	Ce
1	5.54	—	23.4	0.74	—	2.0	0.48	—	0.6
2	1.28	—	9.5	1.79	—	1.9	1.24	—	2.0
3	1.40	—	10.1	1.70	—	3.4	1.80	0.24	5.0
4	0.14	0.78	9.3	0.93	—	1.3	1.61	—	1.2
5	1.22	—	223.9	1.54	—	11.5	1.74	—	5.8
6	1.22	—	26.6	1.25	—	6.0	1.82	—	10.1
7	1.08	0.88	17.0	1.54	—	4.6	1.62	—	9.1
8	1.85	—	53.8	0.58	—	3.1	2.78	—	5.7
9	1.52	—	6.1	1.00	—	4.5	1.57	—	13.0
10	1.10	—	17.3	2.16	—	4.5	1.39	—	3.7
11	1.20	—	10.9	1.63	—	7.3	0.86	—	1.3
12	1.36	—	17.6	3.02	—	6.3	130.01	—	94.1
13							132.62	—	411.0
14							2.60	—	4.2
規定孔範囲での評価	超過率 10%(1/10): OK			超過率 10%(1/10): OK			超過率 10%(1/10): OK		
	P44～P45超過率			10%(2/20): OK					
				P45～P46超過率			10%(2/20): OK		
				P44～P46超過率			10%(3/30): OK		

表-3 白色変質部含むIゾーンにおけるパイロット孔の透水性



図-10 P46コア写真 (10~14st)

4. まとめ

本稿では、足羽川ダムにおけるカーテングラウチングの工夫を紹介した。

現状として、基礎岩盤の評価は事前のボーリング調査だけでは困難なところであるが、詳細調査による地質特性の正確な把握、特性を活用する工夫、試験施工結果の評価、及びその対応によってコスト縮減へとつなげることが可能となる。

さらに、流水型ダムにおいては、湛水期間が一時的であるといった点の評価への反映によって、より効率的、合理的な施工が可能になると考える。

謝辞： 本稿の作成にあたって適切な助言をいただきました、株式会社ニュージェックおよび関係各位に深く感謝申し上げます。

佐野トンネル坑口における 白色凝灰岩と地すべり地形への対応について

山岡 晋¹・寺田 哲也²

¹豊岡河川国道事務所 計画課 (〒668-0025兵庫県豊岡市幸町10-3)

²滋賀国道事務所 工務課 (〒520-0803滋賀県大津市滝が丘4-5)

佐野トンネルは、2024年9月23日に開通した豊岡道路のトンネルの一つである。トンネル坑口部の施工において、切土時における法面崩壊やトンネル施工時における天端崩落、覆工コンクリートのひび割れ発生等問題が生じた。本稿は、佐野トンネル坑口部における施工時に発生した課題とその対策について報告するものである。

キーワード 法面変状、トンネル施工、坑口対策

1. はじめに

豊岡道路（延長約2.0km）は、北近畿豊岡自動車道（延長約73km）を構成する道路で2024年9月23日に開通した。

北近畿豊岡自動車道は、豊岡市から丹波市に至る自動車専用道路で京阪神都市圏と連結を深めることによる但馬地域の活性化や、冬季積雪時や洪水等の災害時における円滑な交通確保を目的としている。

今回開通した豊岡道路の佐野トンネルは、2022年3月に工事着手したが、坑口部の法面崩壊、トンネル掘削時の天端崩落、さらに覆工コンクリートのひび割れが発生する等工事が難航した。

これらの要因となったのが、この豊岡地域に分布する白色凝灰岩と風化した礫岩であり、またトンネル坑口付近においては過去に発生した地すべり地形が確認されている不安定な地山であったことが挙げられる。

本稿は2024年秋の開通に向けて、施工業者・設計コンサルタント・学識経験者・発注者が一丸となって難題に取り組んだ過程をとりまとめたものである。

北近畿豊岡自動車道では、延伸事業として豊岡道路（Ⅱ期）事業を本格的に着手しており、今回課題となった白色凝灰岩等の地層が同様に分布することからも、今後の検討に資する資料として報告する。

2. 佐野トンネルの概要

(1) 佐野トンネルの工事概要

佐野トンネルは延長189m、内空断面積74m²、地山区分を坑口部、DⅢ、DⅡの3パターンとしたトンネルであり、掘削方式はNATM（上半先進掘削）を採用している。

(2) 地質の概要

地質は、礫岩、砂岩、酸性火山岩、火砕岩類からなる新生代新第三紀中新世の北但層群豊岡類層に属する「礫岩および砂岩」の分布域に位置しており、今回法面変状が発生した佐野トンネル南側坑口は、地山が風化した「強風化礫岩」が広く分布し、全体的にDL～DH級の土砂状で、粘土分～砂分を含む角礫分を主体とした地層である。また、大きな地すべり地形であることも確認されている。

豊岡地域に分布する豊岡累層には白色凝灰岩の薄層が含まれており、この白色凝灰岩は掘削によるゆるみや応力解放、含水量の変化によって粘土化し強度低下を起こすため、掘削完了後に法面崩壊が発生する事例が報告されている。



写真-1 佐野トンネルで確認された白色凝灰岩



写真-2 切土施工中の県道での法面崩壊

(3) 工事の経緯

工事着手から法面変状が発生し、対策を完了するまでの経緯を表-1のとおり示す。

表-1 工事着手から対策完了までの経緯

2022年3月	南側坑口切土工事着手
2022年5月	切土の法面に白色凝灰岩確認
2022年7月	追加地質調査 坑口からトンネル掘削方向への白色凝灰岩の連続的な面的分布を確認
2022年10月～ 2024年5月	道路防災ドクター打合せ 追加地質調査 坑口部の前出し・押え盛土の検討 法面の恒久対策（地すべり対策）の検討
2022年12月	トンネル掘削開始
2022年12月～	トンネル天端・切羽崩壊 坑口部法面崩落
2023年8月	トンネル掘削完了
2024年3月	覆工コンクリート完了 覆工コンクリートにクラック発生 坑口部法面の変状確認
2024年3月～ 2024年6月	法面对策（グラウンドアンカー等）施工 地下水位低下方策施工 施工後法面変状収束
2024年8月	佐野トンネル完成
2024年9月	豊岡道路供用 トンネル坑口部のモニタリング開始

3. 法面局部崩落・トンネル変位の発生と対応

(1) 坑口法面崩落

明かり掘削する坑口部の地山は風化した礫岩が土砂化していることに加え、地下水位が高く、至る箇所から湧水が発生し、局所的な法面崩壊が生じていた。さらに、切土法面には地すべりの原因となる白色凝灰岩が確認された。

白色凝灰岩の分布が不明であったため、追加の地質調査ボーリングを実施した結果、坑口部に厚い白色凝灰岩の層がトンネル掘削方面に2層分布していることが判明した。

この状況で坑口付を行うと大規模な法面崩壊を誘発する恐れがあったため、計画していた坑口位置よ

り15m手前からトンネル支保工を組み立て法面の土塊を残したままトンネル掘削に着手した。



写真-3 トンネル坑口の15m前出しの状況

(2) トンネル掘削時における崩落・変位について

白色凝灰岩と未固結な土砂が分布する不安定な地山でのトンネル掘削は、切羽の崩落や内空変位が著しく発生し困難を極めた。その対応として上半を先進させて加背を小さくし、切羽の安定性を確保した。トンネル補助工法も実施していたが、切羽の天端崩落の発生や鏡面の押し出しが顕著であったため、当初設計では千鳥に配置していた多段式長尺鋼管先受工のピッチを細かくして連続的に配置する工法に変更し、また注入式フォアポーリングを追加、鏡面には長尺鋼管鏡ボルトを施工した。結果、当初設計でトンネル延長の約3割で計画していた掘削補助工法を全線で施工することとなった。

しかし、上半掘削時に大きな天端・脚部沈下が確認され、トンネル内空断面を確保できなくなる可能性があったため、鋼製支保工の上げ越し量を当初計画の30mmから80～100mmへと増やした。

また、沈下抑制対策として上半仮インバートをトンネル延長の約7割の区間で実施、下半掘削時はトンネル全線の鋼製支保工の左右側壁部に平鋼（PL-200, t=22mm）を溶接固定し、上からロックボルトを打設することで変状の影響範囲外である地山深部の支保工との一体化を図った。



写真-4 掘削時における沈下抑制対策

トンネル坑口部は地すべり地形で工事による地山への影響が特に懸念されたため、挙動の確認を強化するため地表変位計や地中変位観測用のパイプピuzzi計及び地下水位計を設置し、地すべりの兆候を自動観測した。なお、作業員の安全確保のため、変位量が一定の基準に達した場合に作動する警鳴装置を設置し、緊急避難できる体制を整えた。

結果、トンネル延長189mと比較的延長が短いトンネルであったが、掘削の施工で約8か月もの期間を要した。

(3) 坑口部の法面对策について

トンネル坑口部は、未固結の土砂山であることに加え追加の地質調査において白色凝灰岩の分布が確認される等非常に不安定な地山である。追加の地質調査データに基づく解析を行った結果、当初設計のまま施工した場合、法面設計で必要とされる安全率を確保できないことが判明した。

一方で、白色凝灰岩を起因とする法面崩壊の対策は、分布状況や物性値の強度低下等から対策に慎重を要するため、過去の崩壊事例や対策を参考に検討を進めるものの、重要な高規格幹線道路の安全性を確保するため、学識経験者の助言を受けながら進めることにした。

学識経験者との相談の上、今後の対応方針として決まったのは次の3点である。

①崩壊メカニズムについて

- 過去の崩壊事例から、流れ盤になっている白色凝灰岩の層をすべり面とした椅子型すべりを想定して検討を行う。

②白色凝灰岩の分布について

- 白色凝灰岩がある地層は極力改変を抑えるべきである。
- 白色凝灰岩は連続層ではなく点在している可能性があるため、白色凝灰岩を想定した設計を行うと過大になる場合があり、白色凝灰岩の分布を明らかにするための追加地質調査が必要である。

③物性値（粘着力、せん断抵抗角）について

- 白色凝灰岩の強度について、過去の崩壊事例における崩壊前後の地質調査に基づく物性値データや現地の状況、スレーキング試験結果等から、切土による上載荷重除去による著しい応力低下が確認されている、ため粘着力を0kN/m²とする。
- 風化した礫岩についても、白色凝灰岩と同様に上載荷重除去による強度低下が確認されたため、調査データに基づき、粘着力については低減係数をK=0.75、せん断抵抗角の低減係数をK=0.8の定数を設定し、佐野トンネル坑口付近の地質デ

ータの物性値に低減率を乗じて設定する。

これらの方針に基づきトンネル坑口付近の設計を以下のとおり進めた。

a) 坑口の設計について

地山崩壊の恐れがあったため、計画していた坑口位置より15m手前から支保工を組み立てトンネル掘削に着手している。学識経験者の意見を踏まえ、地山の改変を極力抑えるため、施工着手した15m手前の位置をそのまま坑口位置とし、15m延伸した支保工に押え盛土（D=3.4m）を施工することで、背面の脆弱な地山滑り崩壊を抑制し、地山の安定化を図った。

工法検討にあたっては、この他にも抑止杭案もあったが、コストや当時の工事施工状況、トンネル直上部でのトンネル本体への影響や効果等を比較し、トンネル延伸案（押え盛土案）とグラウンドアンカーを併用する案が総合的に優位となったため採用した。

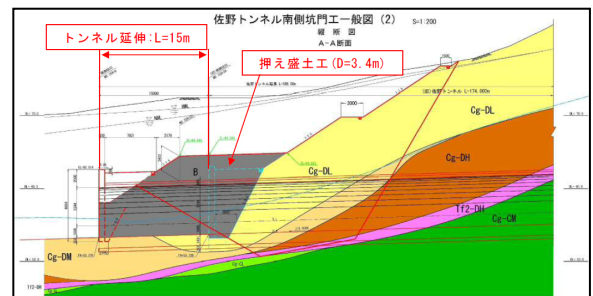


図-1 トンネル坑口の延伸と押え盛土工

b) 坑口部を含む周辺法面一体の設計について

坑口部における白色凝灰岩の存在は確認されていたが、白色凝灰岩の分布と連続性について、既存データだけでは把握できなかったため、追加地質調査を実施した。

得られた白色凝灰岩の分布状況等の特性から、坑口周辺の法面を8ブロックに分けて対策を検討した。

解析に適用する物性値については、上述した上載荷重除去時の強度低下を想定した低減率を乗じ、白色凝灰岩の層をすべり面とした椅子型すべりによる安定解析を実施した。

結果、8ブロックの内4ブロックで法面安定指標上必要とする安全率1.2を下回るためグラウンドアンカーが必要となる結果となった。

グラウンドアンカーについては、その打設方向が法面変位の方向が異なった場合、抑止力が低下するため、アンカー打設方向や打設角度に配慮して設計を行った。

また、グラウンドアンカー施工範囲以外においても現地調査を行った結果、切土後の法面に常態的に

湧水が確認された箇所には、表層崩壊の対策として法枠工を施工する設計とした。

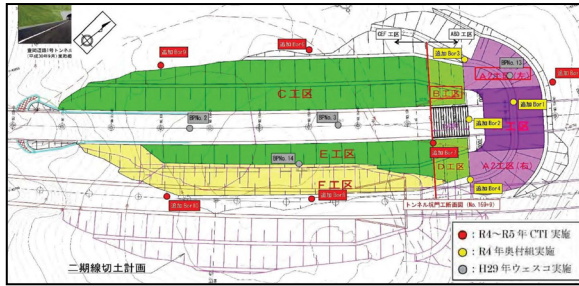


図-2 法面のブロック割り

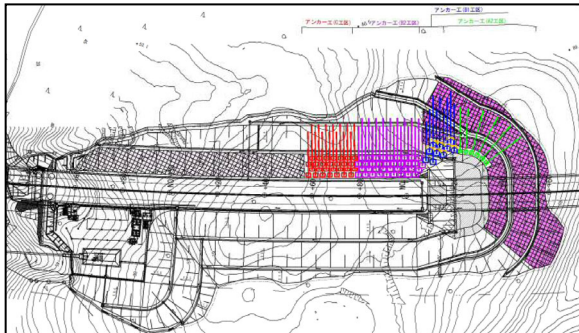


図-3 アンカー工平面図

(4) 覆工コンクリートのクラックについて

2023年8月にトンネル掘削が完了し、トンネルの内空変位も落ち着いたため、2023年11月に覆工コンクリートの施工に着手した。法面変状が発生した南側坑口とは反対の北側坑口から着手し、覆工と南側の坑門工が2024年3月14日に完成した。

ところが完成の翌日、トンネル内の覆工コンクリートのうち南側坑口から2つ目と3つ目のブロックにおいて、左側壁面にトンネル北側に向かってクラックが多数発生した。

地すべり方向側のトンネル壁面にクラックが発生したことで、壁面以外にも坑口法面に施工した側溝にも複数クラックが発生し、設置していたパイプひずみ計の値からも地山の挙動に変状があったことは明らかであったことから、要因分析と対応を早急に求められる緊急事態となった。

クラック発生時は、法面对策で計画していた「押え盛土＋グラウンドアンカー」の内、押え盛土は2023年11月に完成していたが、グラウンドアンカーは未着手だったため早急に施工する準備を整えた。

要因分析として施工中継続していたパイプひずみ計の値や地下水位データを整理し、地山の変位方向や地下水位の観測地点毎の時系列データからクラックが入った左側壁面の地山が地すべり方向に変位している兆候がみられ、地下水位においても同様に左側の地山の水位が2024年1月頃から急激に高くなっ

ていることが確認された。

地下水位の上昇は、このトンネル坑口付近が沢部で水が集まる地形であるため、冬期に積もった雪が溶けて地下水位が高くなっていることが原因の一つと考えられた。学識経験者に相談の上、取り急ぎトンネルへの応力負荷を軽減するために地下水位を低下させる対策に着手した。

内容としては、地下水位の上昇が確認された箇所に向けて放射状に水抜きボーリング33本（最大で1本あたり延長44m）を打設した。施工業者の尽力により、クラックが発生した3月15日から僅か1週間後に工事着手し、4月上旬までに全て施工を完了することができた。排水量は多いときで1分間あたり約50Lにもなった。

この水抜きボーリングの効果もあって、施工後から地下水位が低下し、これに伴い地山の挙動や覆工コンクリートのクラックの進行も収束した。

3月下旬から着手したグラウンドアンカーの施工についても地山の早期安定を図るため施工体制を拡充し、複数班で施工することで当初予定していた7月の完成を5月に前倒し完成することができた。

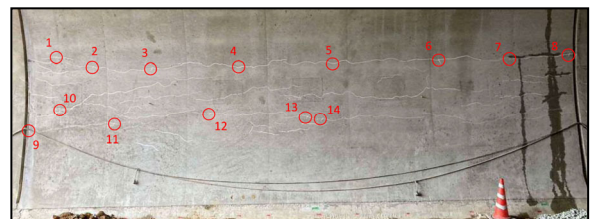


写真-5 覆工コンクリートのクラック

(5) モニタリングについて

完成直後の法面における長期の安定した健全性を客観的に判断できるデータが少ないことから、学識経験者から今回の水抜きボーリングによる地下水位低下対策やグラウンドアンカーによる法面对策の検証に関する意見を頂いた。

結果、道路の開通後において法面のモニタリングを実施することにした。モニタリングの項目については表-2のとおりであり、モニタリング期間は3年とした。

表-2 モニタリングの項目と頻度

観測対象	計測機器及び手法	計測値	頻度
のり面	地表 ①地盤伸縮計	地表移動量	リアルタイム
	②地表面傾斜計	地表移動量	リアルタイム
	③移動杭測量 (光波測量)	地表移動量	1回/月
	地中 ④孔内傾斜計	地中移動量	1回/月
	⑤地下水位計	地下水位	リアルタイム
構造物	アンカー ⑥センターホール型荷重計 温度計	緊張力	1回/月(※)
	トンネル ⑦クラックゲージ	亀裂の変位	リアルタイム

(※)異常時発生時はリアルタイムに移行

管理基準については関係図書や過去の実績等を参考に設定し、注視が必要となる基準（管理基準①）と何らかの対策が必要となる基準（管理基準②）を設けた。特に道路通行そのものが危険と判断する基準として、地盤伸縮計が1時間4mm以上を2時間計測した場合とし、即座に通行止めするものとした。

表-3 モニタリングの管理基準

（注視が必要となる基準）		
計測器及び手法	管理基準値①	計測頻度
移動杭測量	移動量2mm/月	1回/月
アンカー荷重計	残存引張力が80%未満 設計アンカー力を越えた状態が継続	1回/月
クラックゲージ	ひび割れが3mmを越えた場合	リアルタイム
（対策が必要となる基準）		
計測器及び手法	管理基準値②	対 策
地盤伸縮計	1mm/日、10mm/月 1時間4mm以上を2時間連続	対策工検討 通行止め

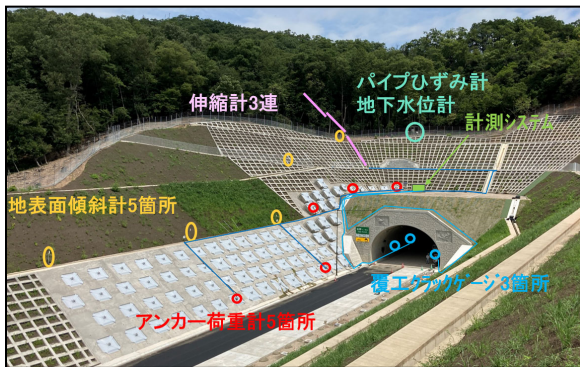


写真-6 佐野トンネル坑口付近のモニタリング

4. 今後の設計についての留意事項

豊岡道路は、2024年9月に無事開通することができた。今後は北近畿豊岡自動車道の最後の事業区間である豊岡道路(Ⅱ期)事業（延長約5.1km）を進めていく。

既に地質調査や予備設計を進めているが、豊岡道路と同様に法面崩壊の要因となる白色凝灰岩や風化礫岩の存在が確認されている。今回の佐野トンネルのように工事着手しからの対応では安全面において地すべりや地山崩壊等のリスクが非常に大きく、また設計見直しによる手戻りや工事工程の遅延等現場の負担が大きい。

今回の事案も踏まえてリスク回避に向けた設計を進めていく必要があり、豊岡道路(Ⅱ期)においては、2022年度に「凝灰岩設計施工マニュアル」を作成している。10ブロックある切土区間を調査し得られた地質データや地形の特性から地質のリスクランク付けを行っており、最もリスクの高いAランクのブロックにおいては、何らかの対策が必要となる。

一方で、今回の件で学識経験者からいただいた意

見の一つである「白色凝灰岩の連続性と面的な分布の確認」については、予備設計時点の調査では把握できていないため、Aランクのブロックにおいて追加調査を実施する必要がある。

また、対策工法を検討するにあたっての安定解析に用いる白色凝灰岩の物性値について、極度の強度低下を考慮し、粘着力を $C=0\text{kN/m}^2$ としたが、せん断力については佐野トンネル坑口も含めて既に変状が起きてからの対策検討であったため、崩壊発生安全率を $F_s=0.95$ として逆解析によるせん断角度を採用していた。

豊岡道路(Ⅱ期)事業においては、これから実施する追加調査で得られた白色凝灰岩の供試体を使って繰り返し一面せん断試験を実施し、せん断力の強度低下も見込んでより現況地山の応力解放後の実態に近い形で安定解析を進めていく計画である。また、工事中の安全確保として施工手順やモニタリング計画も設計段階で計画していく。

工事着手後の現場での負担を極力減らし、かつ過度な対策にならないようこれまでの経験を活かして地質調査をしっかりと行い必要な対策を実施していきたい。

5. おわりに

佐野トンネルは2022年3月に工事着手し、2024年8月に舗装や照明等の設備も含めてようやく完成した。豊岡道路は豊岡中心市街地に繋がる区間であり、豊岡を訪れる人への玄関口として佐野トンネル壁面には豊岡市を象徴するコウノトリをデザインしている。2024年9月6日に佐野トンネルの完成を記念して近隣の小学生を招き完成除幕式を開催し、2024年9月23日に豊岡道路は無事開通することができた。



写真-7 佐野トンネルの完成除幕式

今回の佐野トンネル坑口の問題を乗り越えられたのは、貴重なご意見・ご指導を賜りました学識経験者の皆様や対策を講じた施工業者、設計コンサルタントの皆様と連携し一丸となって取り組んだ結果である。携わった関係者の皆様には心から敬意と感謝の意を表すとともに、今回の件で得た知見が今後の同様の事業計画における対策の一助となれば幸いである。

抑草ネットによる維持管理の省力化について

眞鍋 温機

近畿地方整備局 木津川上流河川事務所 名張川出張所（〒518-0441三重県名張市夏見字下川原307-1）

豊岡河川国道事務所では国道483号の維持管理を行っている中で、法面での除草作業に多額の維持費を割いている。その問題を解決するために、マルチングによって法面の強度を維持しながら省力管理を実現できるとされている抑草ネットに着目した。

本稿はその効果について、国道483号内の道路法面にて試験施工を行ったので、その結果について考察する。

キーワード 除草，法面，コスト削減

1. はじめに

道路の維持管理における除草は、雑草の繁茂による交通標識等の視距確保や道路交通の安全確保、通行車両からの視認性の確保、景観の確保等重要である。兵庫県北部の幹線ネットワークである国道483号において、豊岡河川国道事務所では延長約73kmの維持管理を行っている。今後、豊岡北JCT・ICへの延伸など周辺地域へのアクセス向上が予定されており、今後とも兵庫県北部の発展に寄与していくため、その基礎となる道路管理は重要となる中で、道路両側にある法面に繁茂する雑草が、適切な維持管理の支障の一つとなっている。（写真-1）



写真-1 国道483号法面の雑草

2. 現状と課題

(1) 道路法面における雑草の役割

道路内における雑草は、中央分離帯、植栽帯においては放置すると樹木の生育が阻害され、枯損する他、草丈の伸長により視距や建築限界が損なわれ、道路交通の安全性を損なう要因となる。道路法面においては、点検の障害、景観悪化、さらに雑草が雑木に成長して倒木のリスクが生まれるなど、除草が推奨されることに変わりない。しかし、降雨等による滑り破壊を防ぐため、法面の強度を保つことができる植生を確保する必要がある。だが除草剤等の使用による伐根除草は、環境への影響だけでなく地中の根の張りまで弱めてしまう問題がある。そのため、法面表面部の草の伸長だけを抑えるよう、維持業者には毎年何度も草刈りを依頼するというのが現状である。

(2) 維持管理の省力化

伸長した法面の雑草は、通行車両の視距や車両、歩行者の通行空間の阻害の要因となるほか、沿道住民や営農者より景観、害虫駆除等の理由による除草が求められる。そのため、管内の維持管理費はこの除草作業費が大部分を占めている。特に自動車専用道路においては夜間通行止めによる作業、現道上においては通行車両、沿道家屋への飛び石対策等のため、片側交通規制などを行いネットによる防護を行うことになり、非常にコストが高くなる。今後も国道を延伸するにつれ、道路の法面も広くなり、除草必要箇所はますます増えていく一方である。雑草管理が現状のままだと、維持管理費は莫大になっていく。そのためには雑草の伸長を抑え、維持管理を省力化して、維持管理費を大きく削減する方法が必要となる。

3. 従来の雑草管理

前述で述べたように今後の道路維持管理には、法面の雑草の根を枯らさないよう、メンテナンス回数を少なくする方法が必要となる。それらを両立させる方法として、物理的に雑草の成長を阻害させる製品に着目した。その一つとして、庭や駐車場、空き地等によく使用されている防草シートが挙げられる。法面を遮光性シートで表土を密に覆い、太陽光を防ぐことで植生の成長阻害を図る製品である。だが、スギナやチガヤなど地下茎を持つ植物は、シートの覆われていない別の場所で光合成を行ってれば、シート下の地下茎から発芽する事が可能である。また、スギナやチガヤの鋭い先端の芽には強い貫通力がある。管内の氷上IC周辺の道路法面にて防草シートの試験施工を行った結果、チガヤがシートを貫通しながら生育し、伸長している様子が見られた。（写真-2）

そのため、定期的に行うメンテナンス回数はあまり変わらない結果となった。



写真-2 植生の防草シート貫通の様子

4. 抑草ネットによる抑制

維持管理の省力化においては、メンテナンスする回数を減らすことにある。前述で述べた防草シートは、植生によってはシートを突き破ってしまい、管内においてはメンテナンスの頻度を減らすことができなかった。そこで、既存の植生を生育しつつ、メンテナンスを行う頻度を減らせるように雑草を抑制する工法として、抑草ネットによる法面保護方法に着目した。

(1) 抑草ネットのメカニズム

雑草等は、発芽生育後の草根元が固いが、伸長に伴い先端になるほど柔らかくなる。この特性により、緩めに敷設したネットが、生育による圧力で押し上げを受け

る。これによりネット内で雑草の生育空間が生じ、ネットに直接触れるのが、草の柔らかい先端部分となる。（図-1）

ネットを突き抜ける力がなくなるため、法面のような斜め方向に生育した草だと、横方向または下方向に伸長するようになる。年数を追うごとに、一年性の雑草が冬場に枯れて、また春先に草が繁茂することで、ネット内部に一年生草が充満し、これから先の植物が生育しづらい環境になる。これにより植生を枯らすことなく植生自身によって植生の繁茂を抑えることができる。

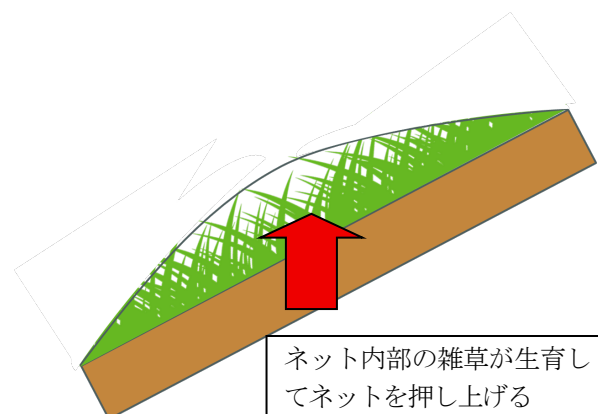


図-1 抑草ネットの仕組み

(2) 防草シートとの違い

抑草ネットと防草シートの比較を表-1に示す。抑草ネットは法面の強度を維持するため、雑草を枯死させないという点で防草シートと差異があり、草の伸長を抑圧的に防ぐのではなく、ネットをネット内部で植生の生育する空間を生じさせる。防草シートのように隙間なく法面を覆うと、3.(2)で述べた通り、発芽直後の固い雑草がシートを突き破るケースがあった。抑草ネットはその問題を解決しているため、メンテナンスする回数が減り維持管理の省力化が可能である。施工コストも防草シートより低く、耐風性においても、シートは隙間から徐々にめくれていく可能性があるが、ネットは通風性があるため、防草シートより高い。（表-2）

表-1 抑草ネット 対 防草シート 比較

	抑草ネット	防草シート
抑草効果	70-80%	100%
法面強度	植生を保持するため変化なし	植生がないため劣化の可能性あり
メンテナンス頻度	少	中
初期施工コスト	中	高
耐久性	8-10年	8-12年
耐風性	ネット状のため、風は通過する	シートに隙間があれば、めくれていく可能性あり

5. 試験施工結果

本稿では、国道483号上で特に利用者が多い和田山JCTに谷口産業株式会社の製品TS-抑草ネットを、氷上ICに大一工業株式会社の雑草抑制おまかせネットを令和6年4月に敷設した。（図-2）（表-2）



図-2 施工箇所位置図

表-2 使用した抑草ネットのデータ

敷設箇所	品番・名称	規格	色
①	TS-抑草ネット	1mm目合, 2m×50m	緑
②	雑草抑制おまかせネット (ラッセル編)	1mm目合, 1m×50m	緑

(1) 令和7年3月時点の結果

敷設後約1年経過したネットの状態及び雑草が繁茂する春前の植生の状態を確認した。

a) 和田山JCTの法面

想定通りネット内で植生が詰まっており、繁茂が抑えられているのが確認できた。（写真-3）

しかし、一部の箇所では、外来種のススキがネットを突き破り、そこから繁茂してあふれ出ている状態となっ

ていた。（写真-4）

b) 氷上ICの法面

ネットを貫通した植物は確認できず、想定通りに機能していた。また、防草シートを突き破る要因となったチガヤも抑え込めていることが確認できた。（写真-5,6）



写真-3 和田山 JCT ネット表面 3月



写真-4 和田山 JCT ネット全体 3月



写真-5 氷上IC ネット表面 3月



写真-6 氷上IC ネット全体 3月

(2) 令和7年6月時点の結果

前述と同様の箇所、雑草が繁茂する時期である夏頃のネットの様子を確認した。

a) 和田山JCTの法面

繁茂によりネットは3月時と比べて押し上げられている様子が確認できる。ネット上から観察すると、内部に一年生草が充満しており、新しく生えた雑草は目視できない。このことから、4.(1)で想定した雑草の抑制ができていた。（写真-7）

しかし、外来種のススキのみは3月頃と同様にネットを突き破る様子が見られた。3月の結果からして、貫通した箇所から他の雑草も繁茂し、あふれ出てしまうことが予測されるため、定期的なメンテナンスはまだ必要と言える。（写真-8）



写真-7 和田山JCT ネット表面 6月



写真-8 和田山JCT ネット全体 6月

b) 氷上ICの法面

生育期によってネットを押し上げられている様子が見られた。突き破った植生は見受けられなかった。ネット上から観察すると、やはり内部に一年生草が充満しており、新しく生えた雑草は目視できない。どの場所においてもネットを貫通した箇所は見られないため、今後数年はネット内部で過去に繁茂した雑草によって生育が阻害され、メンテナンスの必要がなくなっていくことが期待できる。（写真-9,10）

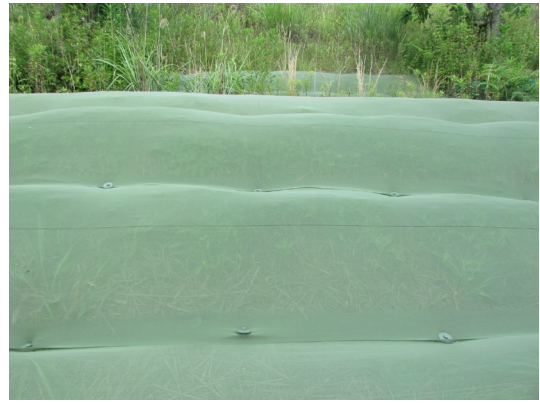


写真-9 氷上IC ネット表面 6月



写真-10 氷上IC ネット全体 6月

6. 考察

本稿では国道483号の道路法面に抑草ネットを試験的に敷設し、3月と6月時点の結果を比較した。

和田山JCTでの結果から、外来種のススキなど、さらに貫通力の高い植生ではネットを突き抜けるケースが確認された。ネットを敷設する際に要注意とされる植生をリストアップできれば、今後における抑草ネットの適切な使用箇所を選定できるのではないと思われる。

氷上ICでの結果から、適切に使用できる環境であれば、長期間メンテナンスする必要がなく、大幅な維持費削減が期待できる。

今後の課題として、今回よりさらに年数が経過した抑草ネットの状況を観察することに加え、ネットでも貫通の恐れがある植生をリストアップし、維持管理マニュアルを作成することが挙げられる。

7. まとめ

道路法面のメンテナンス頻度を減らすことは、今後の道路維持費削減の実現に貢献するものである。

今回の抑草ネットの検証で、耐久性・施工性について一

定の効果を確認できたと同時に、雑草に対する有効性を確認することができた。一方で、外来種のススキに対して効果がなかった点については、環境は敷設場所ごとに異なり、繁茂する植生も環境により異なることから、複数の道路法面で試験的な敷設を実施し、効果が見られない植生の調査データの収集を行う必要がある。これらの点について、今後も検証を重ねながら道路法面の維持費の削減に繋がるよう、維持管理マニュアル作成等に取り組むこととする。

※本稿の内容は、前所属である豊岡河川国道事務所朝来国道維持出張所での事業成果である。

謝辞：今回、抑草ネットを用いた実証実験を提案から施工、また各種資料提供して頂いた谷口産業株式会社のみなさま、そして本論文作成にあたりご鞭撻頂いた近畿地方整備局豊岡河川国道事務所のみなさまに感謝申し上げます。

参考文献

抑草ネット令和6年度カタログ 谷口産業株式会社

3次元測量データを活用した ICT建設機械による河床掘削について

上野 祐生¹・岡本 麻里²

¹大阪府都市整備部茨木土木事務所建設課（〒567-0034茨木市中穂積一丁目3番43号）

²大阪府都市整備部西大阪治水事務所神崎川出張所（〒532-0033大阪市淀川区新高五丁目18番25号）

本府では令和3年度から、3次元深浅測量など一部ICTを活用した河床掘削工事を実施してきた。出来形管理についても3次元深浅測量を実施することとしていたが、一級河川神崎川の河床材料はシルト、粘土が大半を占め、施工直後は浮泥が滞留することから音響探査による深浅測量が適応しづらいことがこれまでの施工状況から分かっていた。令和6年度には新たに、3次元深浅測量データを活用したICT建設機械による河床掘削を実施した。施工履歴による出来形管理を行い、その知見を得たので有用性、技術的課題と今後の発展について述べる。

キーワード ICT、河床掘削、浚渫、3次元深浅測量、泥質河床

1. 神崎川について¹⁾

神崎川は、摂津市の一津屋で淀川より分派し、安威川をはじめ糸田川、高川、天竺川を合流しながら西へ流下し、右支川猪名川を合流して南下すると共に、左門渡川、中島川を分派しつつ大阪湾へ注ぐ、流路延長が18.6kmの一級河川である。



図-1 神崎川の位置

(1) 地形・地質

地形は、上流の山地部は北摂山地、丘陵部は北大阪丘陵、平野部は大阪平野で構成されている。北摂山地は急峻な斜面が発達しているが、山頂部には定高性がみられ、

標高は700m以下で、全体としては高原状の地形的特徴を示している。上流の山間部では、砂岩・泥岩の互層、泥岩及び花崗岩質岩石等がみられ、低地部には未固結堆積物の砂や泥が広く分布している。西部の丘陵部の地質は、泥・砂・礫の互層となっている。

(2) 河川特性

全区間にわたり河床勾配が水平から1/6000程度と緩く、潮位の影響を受けやすい河川である。周辺は古くから開発が進み、市街地が形成されている。

a) 水質

公共水域の水質測定地点における平成23年度から27年度までの5年間のBOD75%値は3mg/L以下であり、B類型の環境基準を満足する良好な水質で推移している。

b) 底質

ダイオキシン類等による底質の汚染が確認されており、対策を行う必要があるほか、油流出などの水質事故が多発していることから、その対策も必要である。

(3) 治水の現状と課題

昭和9年の室戸台風と昭和25年のジェーン台風、昭和36年の第2室戸台風による高潮の被害を受けたため、昭和期から高潮対策を中心に堤防の整備が進められてきた。

昭和36年から神崎川改修事業が開始され、昭和42年7月豪雨（北摂豪雨）を契機に神崎川基本計画（昭和42年11月）が策定され改修が進められてきた。多数架けられている橋梁の橋脚への影響を考慮して神崎川全体計画（平成9年11月）が策定され、加島基準点での計画高水

流量を1,300m³/sとする改修が行われている。しかし、一部区間については、時間雨量50ミリ程度の降雨による洪水を安全に流下させることが出来ない区間がある。

a) 河道改修

現在、加島基準点（猪名川合流点）上流から新三国橋下流の2.7km区間において河床掘削を行っている。また、河床掘削に伴い環境基準を超過するダイオキシン類などが発見された場合には、適宜処理方法を検討し対処している。

2. 3次元深浅測量について²⁾

3次元深浅測量とは、船やボートにソナー（音響測深機）を取り付け、音波によって水中の地形を面的に測量することにより、水域の水底地形を3次的に計測する技術である。従来のレッド測量やシングルビーム測量に代わり、より高密度かつ高精度な地形情報を取得することが可能となっており、港湾、河川、湖沼、ダムなどの管理や整備、防災計画、環境モニタリングにおいて重要な役割を果たしている。

(1) 計測の原理

深浅測量は、扇状の音波ビームによって、ソナーから水底までの距離を計測している。この計測データに「水面の標高」や「水面からボートに取り付けたソナーまでの距離」を反映する補正を行い、正確な「水深」を取得している。また、水深データとGNSS測量で計測した位置情報（XY値）を合わせ、3次元測量データとしている。

(2) 使用機械

本府で実施した3次元深浅測量においては、マルチビームソナー搭載無人ボートを利用しており、遠隔操作、または有人ボートで牽引することで、効率的な計測が可能である。



図2 マルチビームソナー搭載無人ボート

(3) 従来手法の特徴と課題

従来の手法による深浅測量について特徴と課題を簡単に併記する。

a) レッド測量

1点ずつ紐の先端に重りを付けて水中に垂らし、河床に到達した時点での長さをもって、水面から水底までの深さを測定している。流速の速い箇所では誤差が大きくなる可能性がある。

b) シングルビーム測量

1点ずつ船やボートに取り付けられたソナーから垂直方向に音波を発射し、戻ってくるまでの時間を測定して水深を取得している。測定点が船の動きに依存するため、測定密度が不均一になる可能性がある。

3. 3次元深浅測量の利点と課題について

本府では令和3年度から起工及び竣工測量にて3次元深浅測量を活用してきた。ICT建設機械による施工と組み合わせることで3次元測量データを最大限活用できるが、従来の建設機械で施工する場合においても次に示す利点、課題があることが分かっている。

(1) 起工測量における利点と課題

起工測量においては、従来手法によって計測する浚渫土砂量と3次元測量データから得られる浚渫土砂量に若干の差があることが分かっている。これは従来の深浅測量によって得られる河床の高さがピンポイントであること、平均断面法による体積計算の中に誤差を落とし込んでいることが原因である。

a) 3次元深浅測量の利点

従来手法と比べてより正確な施工数量を把握することができ、滑らかな河床面を確認できるので、局所的な凹凸がある場合でも地形を正確に把握できる。

b) 3次元深浅測量の課題

取得したデータの解析、平面データの作成、土砂量の算定に従来手法よりも時間を要する。GNSSを活用していることから、橋梁下等使用の制限がかかる箇所がある。また、技術の醸成に資するため、通常積算している現場管理費に加えて先行投資的な工事費の積上げがあり、従前と比較して高額になる。

(2) 竣工測量における課題

従前から上流からの土砂流入による出来形不足を考慮し、施工直後に出来形確認を実施してきた。施工直後は底質がまき上がり浮泥層が厚くなるため、ICT浚渫工の導入に伴う浮泥堆積域におけるマルチビーム測深の効率化に関する検討³⁾でも述べられているように、音波が浮泥層上面で反射され浅く計測されてしまう場合がある。

（図-3）

本府ではレッド測量による出来形確認も平行して実施しており、レッド測量においては出来形管理基準内であることを確認している。しかし、図-4に示すようにレッド測量と3次元深浅測量には概ね200mmの差が生じており、出来形管理基準（+200mm以下）を満たさなくなるので、神崎川の竣工測量においては3次元深浅測量と併せて低周波のシングルビーム測量を実施し補完する等の工夫が必要になることが分かっている。

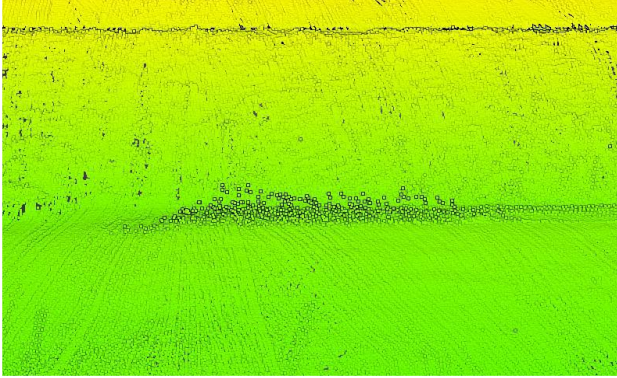


図-3 浮泥層の計測状況

表-1 竣工時のレッド測量と3次元深浅測量結果

事後レッド測量結果

	測点1	測点2	測点3	測点4	測点5	測点6	測点7	測点8	測点9	測点10
no.24+79	-3510	-3510	-3510	-3610	-3610	-3610	-3610	-3610	-3710	-3710
no.24+87	-3380	-3480	-3580	-3580	-3580	-3580	-3580	-3580	-3580	-3480
no.24+90	-3390	-3490	-3590	-3490	-3490	-3490	-3490	-3490	-3490	-3390
no.25+00	-3330	-3630	-3730	-3630	-3430	-3430	-3530	-3530	-3530	-3530
no.25+10	-3430	-3530	-3630	-3530	-3430	-3530	-3530	-3530	-3530	-3430
no.25+20	-3410	-3510	-3410	-3510	-3610	-3510	-3510	-3610	-3610	-3510

事後マルチ測量結果

	測点1	測点2	測点3	測点4	測点5	測点6	測点7	測点8	測点9	測点10
no.24+79	-3260	-3350	-3420	-3200	-3260	-3500	-3450	-3620	-3980	-3950
no.24+87	-3250	-3090	-3500	-3060	-3180	-3220	-3020	-3690	-3390	-3190
no.24+90	-3170	-3130	-3480	-3280	-2910	-3160	-3400	-3160	-3070	-2920
no.25+00	-3190	-3020	-3390	-3550	-2910	-3310	-3350	-3170	-3280	-3890
no.25+10	-3090	-3110	-3150	-3450	-3650	-3440	-3560	-3180	-3270	-3160
no.25+20	-3020	-3060	-3530	-3150	-3410	-3540	-3540	-3200	-3520	-3500

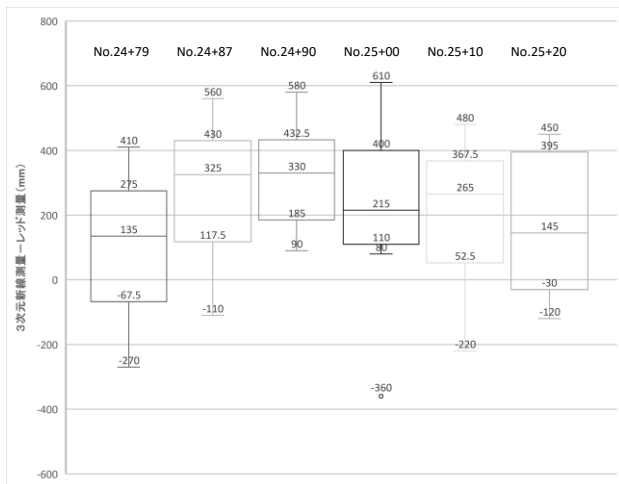


図-4 レッド測量と3次元深浅測量の差分箱ひげ図

4. ICT建設機械について

本施工で使用したICT浚渫船は神崎川の事情を考慮した特殊な仕様であり、一般的にICT浚渫工で利用されるバックホウ浚渫船と異なるため簡単に紹介する。

(1) 汚濁防止柵の使用

神崎川ではダイオキシン類等による底質の汚染が確認されているため、浚渫による拡散を防止するため汚濁防止柵を使用して河床掘削を行っている。このためバケットの可動範囲が限定され施工性が著しく低下する。

(2) 油圧クラムバケット

図-5に示すように、バックホウによる河床掘削では、ブーム・アーム・バケットを浚渫船方向に動かすため、掘削した土砂が浚渫船下に堆積し、汚染された土砂が残置する可能性がある。先述の汚濁防止柵によって可動範囲が限定されるため、より土砂が残置されやすい状態にある。一方で、図-6に示すように油圧クラムバケット（油圧クラムシェル）は、ブームの垂直方向に配置されたバケットで真下に向かって掘削を行うため、汚染された土砂を逃すことなく掘削することが可能であり、汚濁防止柵による可動範囲の制限についても影響を受けずらい。

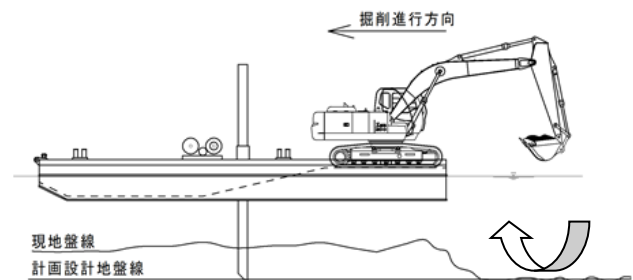


図-5 バックホウによる浚渫

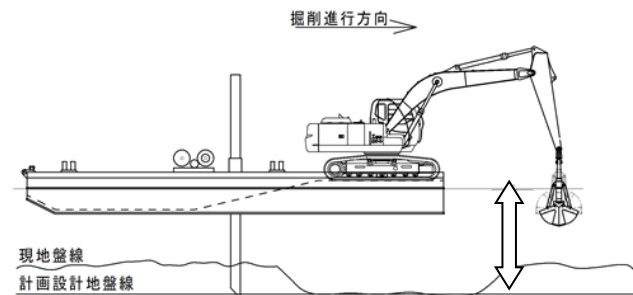


図-6 油圧クラムバケットによる浚渫

(3) 各種センサ類の概要

a) GNSS受信機

ICT建設機械の本体位置三次元座標と本体向き横軸に対する回転角を把握する。

b) コントロールユニット兼車体傾斜センサ

設計データとバケット位置との差異等を把握する。

c) 姿勢センサ

作業装置支点角度を把握する.

d) PC, モニター, ガイダンスソフト

設計とバケット位置との差異、現況データの表示等施工履歴データの蓄積とオペレータの作業補助を行う。

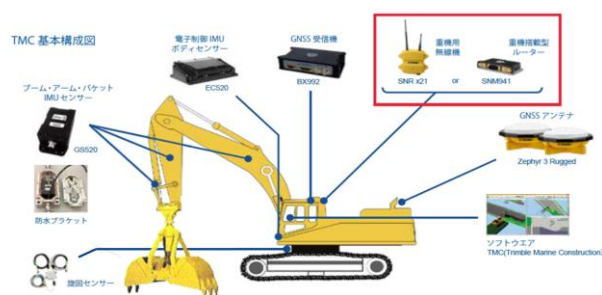


図-7 各種センサ類

5. 施工履歴による出来形管理の有用性

ICT浚渫船を導入し施工履歴による出来形管理を行うことで、次のような有用性があることが分かった。

(1) 不可視部の出来形確認

出来形確認においてはレッド測量により確認していたが、崎崎川においては潮位を把握し掘削した高さに換算する必要があるため非常に煩雑であるとともに、都度重機の作業半径に立ち入る必要があり、測量の都度、安全確保のための工程が発生していた。

ICT浚渫船を導入すると、計画河床と油圧クラムバケットの座標情報を参照して施工履歴を蓄積するため潮位の影響を受けずに出来形確認ができ、レッド測量が不要なため安全確保と測量の工程を省略できるので工期の短縮にも期待できる。

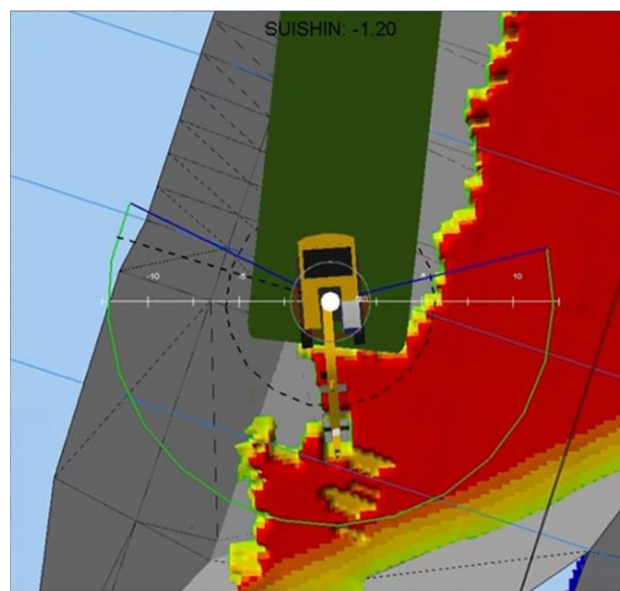


図-8 施工中の出来形確認

(2) リアルタイムの進捗管理

従来は縦断図、横断図をもとに全体の掘削範囲、施工済み箇所と未実施箇所を想像し、潮位の影響を考慮しながら掘削していた。しかし、バックホウ搭載PCの画面上に図-8に示すような掘削エリアを表示しているのでイメージしやすく、図-9に示すような画面に表示された現地盤、バケットの開閉位置、計画河床、余掘り線の視覚的な確認や、油圧クラムバケットの座標情報を用いて掘削状況のリアルタイム表示が可能となったため、熟練技術を有しないオペレータでも作業が可能となった。加えて、オペレーターが確認している画面を現場事務所等でも閲覧することが出来るため、掘削状況の遠隔確認も可能となった。

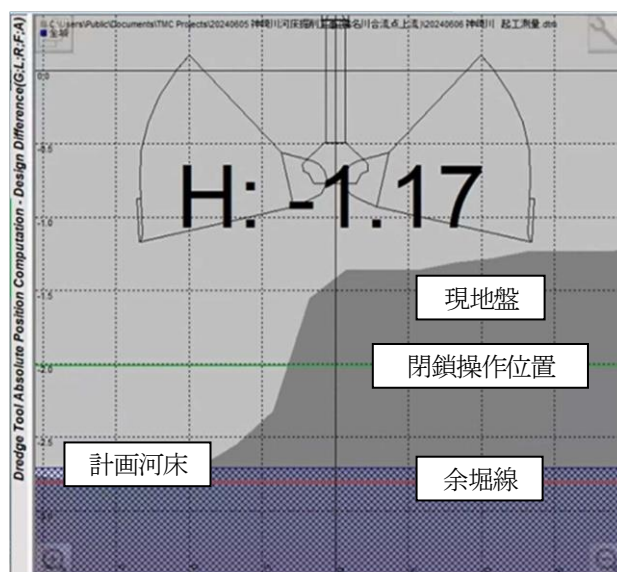


図-9 クラムバケットのリアルタイム表示

(3) 出来形確認の立会の削減

ICT浚渫船の施工履歴による出来形管理を実施する以前は、大雨等により掘削完了箇所を上流からの土砂が流入して堆積する可能性を考慮し、掘削が完了した箇所ごとに、随時施工業者による測量を実施した後に検査官による出来形確認を行っていたが、随時測量を行う必要がなくなり、施工完了後の検査のみで足りるようになった。

(4) 出来形管理図表の作成

従来は発注時の図表をもとに出来形管理基準に基づいて縦断面図、横断面図を作成し、平均断面法を用いて掘削土砂量を計算、整理していた。しかし、3次元測量をもとに掘削土砂量を算出しており、施工履歴をもとに図-10のような出来形合否判定総括表を作りまとめ、測定項目が規格値内に収まっていることを確認することで足りるため、図表の作成、計算に係る手間が削減できるのに加え、出来形の確認手間も削減することができる。

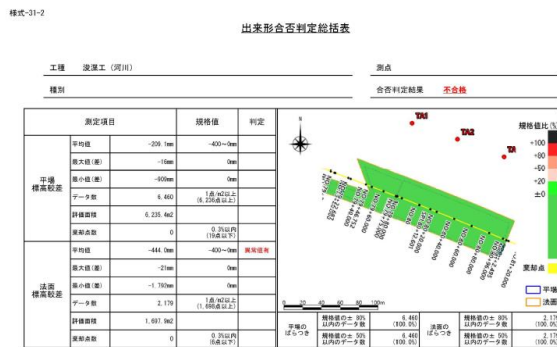


図-10 出来形合否判定総括表

6. ICT建設機械の技術的課題

ICT建設機械による河床掘削を実施したことで顕在化した課題を以下に整理する。

(1) データのリアルタイム通信

Wi-FiによりGPSの位置補正データをリアルタイムで取得、更新する必要があるが、基地局や橋梁などの構造物との離隔の関係でデータの送受信に不具合があると作業ができない。

(2) センサ、PCの不具合

不具合が発生すると原因究明及び解消に時間を要する上に作業を中断する必要があるため、工程管理が煩雑になる。

(3) 施工履歴の取得方法

バックホウによる河床掘削と異なり、油圧クラムバケットによる掘削の際には、レバーによるバケットの開閉操作に加えて、ボタン操作により開閉動作の履歴を取得

する必要がある。このため、ICT建設機械導入初期はボタンの押し忘れによる施工履歴の欠測があった。

(4) 掘削（開閉）方向の反映

油圧クラムバケットを360度回転させることができるので、開閉方向を自由に制御できるが、バックホウによる施工履歴を取得するシステムを改修して開発した現行のシステムでは画面上の表示及び施工履歴の取得にバケットの方向を反映することができない。最終的に施工履歴を1mメッシュで判定するため影響は軽微であるが、実際の掘削方向と施工履歴に差がある。

7. 今後の発展について

ICT建設機械による河床掘削は、特に神崎川のように水深が深く、潮の干満の影響を受け、常に土砂が移動している河川においては、出来形確認の立会の削減や不可視部の出来形が容易に確認できること、リアルタイムで進捗状況を確認、管理できるので熟練技術を有しないオペレータでも作業が可能になるなど、有用であることが分かった。

一方で、事例が少なくWi-Fiによるデータ通信やセンサ、PCの不具合について原因究明、解消に時間を要したり、施工履歴の取得方法がボタン操作によるなどの技術的な課題があり、今後も改善していく必要がある。

今後、ICT建設機械による河床掘削が一般化し、事例の蓄積による技術的な課題の克服を進めるために、以下のような発展が必要である。

(1) ICT建設機械の規格の拡充

神崎川に合わせたICT浚渫船の油圧クラムシェルはブーム長7.0m、アーム長3.4m、クラムシェルバケット1.4m³と大型である。例えば大阪平野には神崎川と比べると川幅、水深の小さな河川が多数あり、小型な機械であれば現場に適応できる。ICT建設機械の規格が拡充されれば適応できる施工箇所が増え、事例の蓄積を加速することができる。

(2) 河床掘削の自動化

ICT建設機械を利用すればオペレーターはガイダンスに従って河床を掘削できるので、河床掘削に係る技術の習熟に要する時間を削減できるが、ICT建設機械を無人化し河床掘削を自動化できると更にオペレーターの育成にかかる時間、費用を縮小することができる。

また、自動化することで施工に必要な人員を削減することができるので、人手不足の解消や河床掘削に係る工事費の圧縮にも対応できる。

謝辞：本論文の作成にあたり，施工に基づく資料の収集や図表の作成については野田興業株式会社を始め関係各社に様々なご協力をいただいたので，ここに厚く御礼を申し上げます．

参考文献

- 1) 大阪府，淀川水系神崎川ブロック河川整備計画，2018
- 2) 株式会社ワキタ CSS 技術開発，マルチビーム深淺測量，<https://service.css24.jp/column/1637/>，2023.
- 3) 坂田憲治，井山繁．ICT 浚渫工の導入に伴う浮泥堆積域におけるマルチビーム測探の効率化に関する検討．国土技術政策総合研究所資料．No.1079，2019

河川堤防におけるロボット除草機の実用と 今後の展望について

岡野 健大¹・川畑 陽一²

¹近畿地方整備局 福井河川国道事務所 河川管理課 (〒918-8015 福井県福井市花堂南2-14-7)

²近畿地方整備局 足羽川ダム工事事務所 (〒918-8239 福井県福井市成和1丁目2111)。

福井河川国道事務所では、河川巡視や堤防点検のための環境整備や堤防の保全を目的として、堤防除草を行っている。堤防除草には、多くのコストや人手が必要となるため、省コスト化・省人化が求められており、その対応策として2020年からロボット除草機の試行が行われている。

本稿では、5年間のロボット除草機の試行を踏まえた堤防植生の管理状況や不具合の発生状況を整理し、また効率的なロボット除草機の運用方法の検討結果についてとりまとめた。そして、これらを踏まえた堤防除草におけるロボット除草機の適用性について論じた。

キーワード 新技術、堤防除草、維持管理、コスト削減

1. はじめに

洪水を安全に流下させるためには、堤防の状態を適切に把握し、所定の機能を維持できるよう、変状を早期に発見して必要な対策を早期に講じることが重要である。国土交通省では、河川砂防技術基準 維持管理編（河川編）に基づき、出水期前、台風期前、出水及び地震後に堤防の点検を実施しており¹、福井河川国道事務所管内においても、九頭竜川水系及び北川水系において堤防の点検及び評価を行っている。

堤防の点検は、一般的に目視により行うため¹、変状の把握を容易にするためには堤防の除草を定期的に行い、堤防法面の視認性を確保する必要がある。福井河川国道事務所管内では、出水期前後に各1回ずつ堤防の除草を実施しているが、この除草にかかる費用は事務所の維持修繕費の大部分を占めており、労務単価の上昇や少子高齢化等に伴う除草作業の担い手不足等により今後も増大が見込まれることから、除草方法の省コスト化・省人化が求められる。

福井河川国道事務所では、堤防の除草にかかる費用の削減に向けた取組の一環として、九頭竜川及び日野川の一部において2020年からロボット除草機を試験的に導入している。今吉(2021)²は³、2020年に九頭竜川及び日野川で実施したロボット除草機の試行結果を踏まえ、ロボット除草機による芝草の保持状況や不具合の発生状況及びその種別について報告している。また、従来の除草方法と比較したロボット除草機のコスト的な優位性について検討している。しかし、芝草の保持状況などは、単年の

結果を踏まえた報告であるため、中長期的な運用による知見は不足している。また、コスト的な優位性に関しても、ロボット除草機がハンドガイド式や遠隔操縦式よりコスト的に劣位であり、ロボット除草機の効率的な運用方法を検討する必要がある。

九頭竜川及び日野川において、ロボット除草機の試行は試行開始した2020年から現在まで試行を続けている。本稿では、2021年から2024年のロボット除草機の試行を踏まえた芝の生育状況（芝丈や根系強度）や不具合の発生状況に関する知見の収集、除草コスト改善に向けた効率的なロボット除草機の運用方法の検討結果を整理した。また、これまでの試行結果等を踏まえ、ロボット除草機の堤防除草への適用について今後の展望を論じた。

2. 試行方法

(1) ロボット除草機の概要

ロボット除草機は、境界ワイヤーで規定したエリアを



図-1 ロボット除草機の外観

自律走行して除草を行うロボットである（図-1）。除草に際して従来の除草方法のように人が作業または操作をする必要がないため、天候や時間帯にかかわらず効率的に除草が可能である。

福井河川国道事務所管内では、ハスクバーナ社製のAUTOMOWER 435X AWDを試験的に導入している³⁾。

(2) 試行地点

九頭竜川は、福井県と岐阜県の県境の油坂峠に発し、その流域は九頭竜川流域、日野川流域及び足羽川流域に区分される（図-2）。

ロボット除草機の試行は、2020年と同様に九頭竜川の山岸地区（左岸4.6k～5.2k）及び江上地区（左岸10.6k～10.8k, 11.0k～11.4k）、日野川の下市地区（左岸4.0k～4.4k, 4.4k～4.8k）の5地点で実施した（図-3）。ただし、後述するポータブルバッテリー及びポータブル太陽光パネルの試行は、堤防天端に充電機器の設置箇所が確保できる日野川の西下野地区（右岸6.4k～6.6k）で行った（図-3）。

各地区におけるロボット除草機の試行面積についても、2020年と同様に試験導入しているロボット除草機の1日の除草可能面積を踏まえ約3,500m²とした。なお、除草可能面積はロボット除草機の作業範囲を規定するガイドワイヤーの性能に準ずるものである。

(3) 試行期間

ロボット除草機は2021年から2024年にかけて試行した。各年のロボット除草機の試行期間は、ロボット除草機による除草の効果を把握しやすくするため、芝の生長期である4月から11月までとした⁴⁾。

(4) 環境整備

ロボット除草機は、内臓バッテリー（リチウムイオンバッテリー）により稼働するため、定期的に充電を行う必要がある。そのため、作業範囲周辺に充電用のためのチャージステーションと電源装置（商用電源、太陽光発電装置）の設置が必要となる（図-4）。また、ロボット除草機の作業範囲は、ガイドワイヤーにより規定されるため、その敷設が事前に必要となる。

ロボット除草機の試行地点は、西下野地区を除き今吉(2021)に²⁾と同様であることから、チャージステーション、電源装置及びガイドワイヤーは、既設のものを使用することができる。そのため、新たにポータブルバッテリー及びポータブル太陽光パネルの試行を行う西下野地区にガイドワイヤーを新たに敷設した。

(5) 試行内容

a) 芝の生育状況の確認

ロボット除草機により、堤防法面の植生高が堤防点検に際して変状を把握しやすい高さに保たれているか把握



図-2 九頭竜川流域図

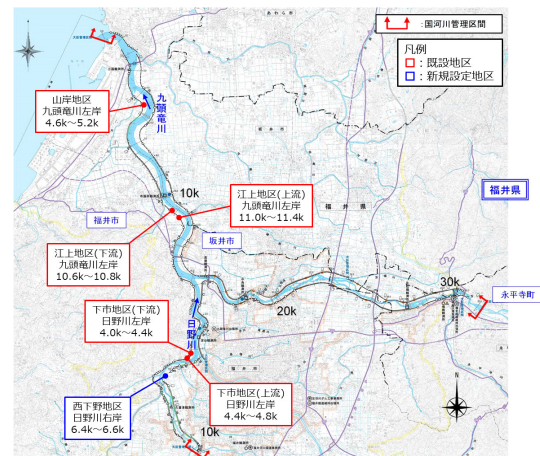


図-3 ロボット除草機の試行箇所

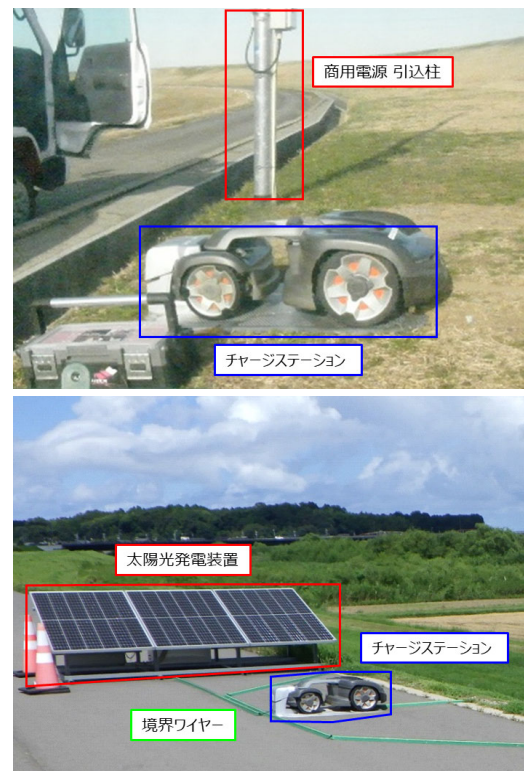


図-4 ロボット除草機の充電装置
（上段：商用電源、下段：太陽光発電装置）

するため、目視により芝丈の高さを確認した。また、芝が堤防植生として耐侵食性を十分に発揮しているか確認するため、ベーン式根系強度計により、各地点において芝の根系強度を測定した。このとき、根系強度は1箇所あたり10回計測し、最大値と最小値を除いた8回の計測値の平均をとった。

b) 不具合の発生状況の確認

ロボット除草機の導入または運用時に課題となり得る事項を把握するため、2021年から2024年までに発生した不具合の発生数及びその種別を整理した。結果の整理に際しては、参考として2020年に確認された不具合の発生状況とその種別も示す。なお、不具合の種別は、今吉(2021)⁹⁾で用いられていた「ガイドワイヤー」「巻き込み」「段差」「いたづら」「その他」に加えて、今回の試行で多くみられた「エラー・誤作動」の6種類とした。

c) 除草コスト改善に向けたロボット除草機の効率的な運用方法の検討

今吉(2021)⁹⁾において、ロボット除草機が遠隔操縦式等の従来法よりコスト的に劣った要因としては、単位面積あたりの除草機器の導入に必要となる初期費用（以下、「イニシャルコスト」という）が、他の除草方法と比較してロボット除草機が高いことが挙げられる。そこで、1地点あたりで負担するイニシャルコストの低減を目的とし、ロボット除草機1台を複数地点でローテーションして運用可能か検討した。このとき、一定期間（5日間）のロボット除草機の稼働を停止し、その間に伸びた草体を刈るのにかかる日数を計測することで、ロボット除草機1台の適用可能地点数を算定した。なお、本試行は、別地点の除草中に伸びた草体を適切に刈り取ることが可能か確認するため、芝の生育が顕著である6月～7月（2021年）にかけて実施した⁴⁾。

ロボット除草機1台を複数地点でローテーションする場合、地点によっては商用電源や太陽光発電装置が使用できないことが考えられる。そこで、持ち運びが可能な電源として、ポータブルバッテリー及びポータブル太陽光パネルがロボット除草機の充電装置として適用可能であるか検討した。今回の試行に用いたロボット除草機は、これまでの試行での実績値より1週間あたり3.5～4.9kWhの電力を消費することが確認できている。そこで、ポータブルバッテリーを週に1度交換することを前提として、バッテリーは1.5kWh蓄電が可能なもの、太陽光パネルは1.0kWh発電が可能なものをそれぞれ2つずつ用意した（図-5）。なお、本試行は、通常の試行の妨げとならないよう、芝の生育が緩やかな4月（2022年）に実施した⁴⁾。

1地点あたりで負担するイニシャルコストの低減によるロボット除草機の除草コスト改善を踏まえ、肩掛け式、ハンドガイド式、遠隔操縦式及びロボット除草機の除草コストの比較を行った。このとき、肩掛け式、ハンドガイド式及び遠隔操縦式の除草単価には2024年の実績値を用いた。なお、除草単価の実績値は、九頭竜川下流、九

頭竜川上流及び日野川の実績値の平均値を用いた。ロボット除草機のイニシャルコスト及びラインニングコストには、2022年時点の各種費用を用いた。なお、ロボット除草機の除草コスト算定にあたっては、リースまたは購入して4年使用することを想定した。



図-5 西下野地区に設置したポータブルバッテリーとポータブル太陽光パネルの様子



図-6 ロボット除草機の試行地点の様子

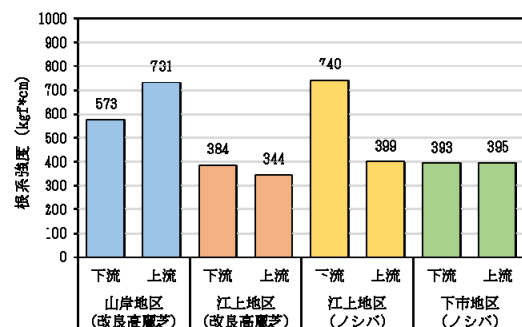


図-7 各地点における堤防植生の根系強度

表-1 試行期間に発生した現地対応を要するロボット除草機の不具合とその種別

種別	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	全体	年平均
巻き込み	18	24	21	53	5	121	24.2
段差	19	2	5	17	5	48	9.6
ガイドワイヤー	16	4	11	14	1	46	9.2
いたずら	3	2	2	2	0	9	1.8
エラー・誤作動	3	40	22	19	20	104	20.8
その他	22	14	36	8	8	88	17.6
計	81	86	97	113	39	416	83.2

3. 結果と考察

(1) 芝の生育状況の確認

図-6に、ロボット除草機の導入地点及び非導入地点の堤防植生の比較写真を示す。いずれの地点においても、ロボット除草機の導入箇所では、芝丈が10cm以下に保持されており、堤防点検において法面の変状の把握が容易な状況が確保できていると考えられる。また、導入箇所には雑草の侵入も確認されているものの、これらの草丈に関しても、芝と同様にロボット除草機による刈りこみにより低い状態が維持されていることを確認した。

図-7に、ロボット除草機の試行地点における芝の根系強度の計測結果を示す。一般的な芝の根系強度は400~600kgf/cmとされているが⁵⁾、おおよすべての地点において、芝の根系強度は目安となる強度と同程度またはそれ以上の根系強度を示した(図-7)。江上地区の上流側では改良高麗芝の根系強度が344kgf/cmと低い値を示したが(図-7)、芝と同様に堤防植生として用いられるチガヤと同程度の根系強度を示していることから、植生による耐侵食性の確保では問題ないと考えられる(一般的なチガヤの根系強度は250~400kgf/cm⁵⁾)。

(2) 不具合の発生状況の確認

表-1に試行期間に発生した現地対応を要するロボット除草機の不具合とその種別を、図-8及び図-9に不具合の種別または地区別の不具合の発生割合を示す。

2020年から2024年までの5年間における現地対応を要したロボット除草機の不具合の発生件数は全体で416件であった(平均83.2件/年)。そのうち、最も発生件数が多かった不具合の種別は「巻き込み」の121件であり、次いで「エラー・誤作動」の104件、「段差」の48件、「ガイドワイヤー」の46件であった。また、各年における不具合の発生件数を比較すると、2024年に不具合の発生件数が顕著に減少したことが示された。地区別の不具合の発生件数に関しては、それぞれの地点で80件前後であり試行地点によって顕著な違いはみられなかった。

a) 「巻き込み」による不具合

「巻き込み」で最も見られた事例としては、法尻付近で作業範囲外の雑草を巻き込んだことによる非常停止が挙げられる(計61件)。高水敷は、年2回の堤防除草を除いて除草は行われないため、草丈が高くなった植物が

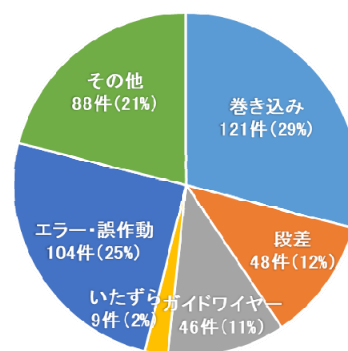


図-8 種別ごとの不具合の発生割合 (2020～2024年)

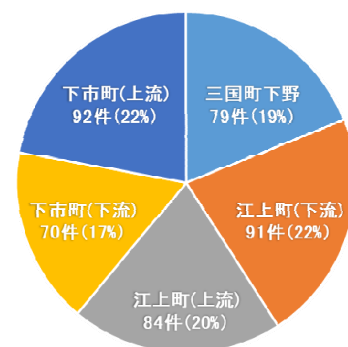


図-9 地区ごとの不具合の発生割合 (2020～2024年)

堤防側に倒れ、その草体をロボット除草機が刈りとりを試みることで「巻き込み」による不具合が発生していると考えられる。そのため、ガイドワイヤーを敷設するにあたっては、法尻より少し高い位置に設置することで「巻き込み」による不具合を低減できる可能性がある。また、法尻の雑草の巻き込みと同時に作業範囲外に機体が出る事例も確認されていることから、ロボット除草機の運用にあたっては注意が必要である。

b) 「段差」による不具合

「段差」で最も見られた事例としては、法面上の凹凸に衝突またははまることで移動ができなくなったことが挙げられる(計41件)。ロボット除草機を導入する際は、事前に予定作業範囲内に凹凸やロボット除草機の運行を妨げる障害物等がないか確認することで不具合の発生を低減することが可能であると考えられる。また、うち5件はイノシシやモグラなどの動物が掘った穴による不具合であることから、導入予定箇所付近で野生動物による変状

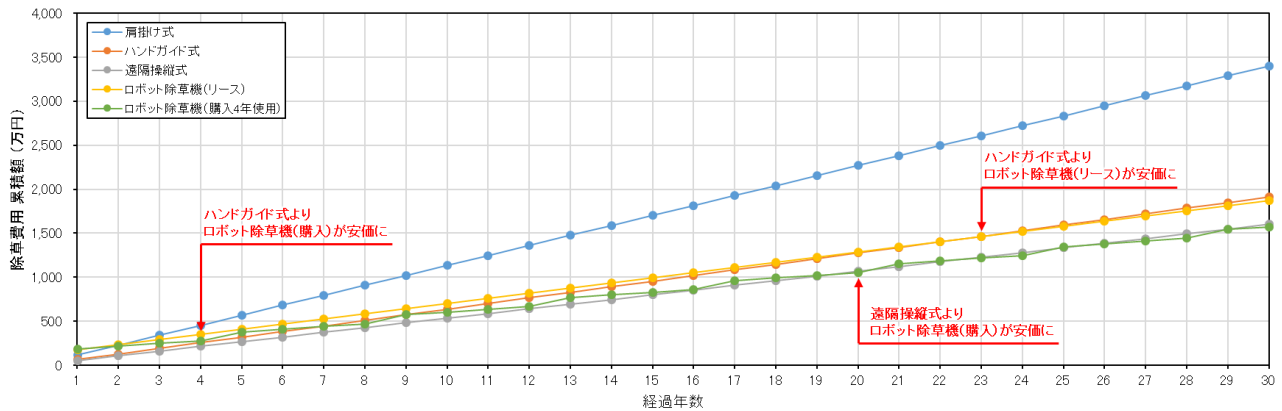


図-10 従来法とロボット除草機の除草コスト比較 (2地点ローテーションの場合)

がないか事前に確認が必要となる。

c) 「ガイドワイヤー」による不具合

「ガイドワイヤー」で最も見られた事例としては、ガイドワイヤーの断線が挙げられる(計26件)。そのうち、野生動物と劣化によるものがそれぞれ11件、測点の竹串の打ち込みなど堤防上での作業に起因するものが4件であった。これらは物理的なワイヤーを用いて作業範囲を規定することで発生した不具合である。しかし、福井河川国道事務所で新たに試行を予定する新型のロボット除草機(AUTOMOWER 435X AWD NERA)では、GPSによりアプリケーション上で除草範囲を仮想的に設定可能であり、このような機能を持つロボット除草機は導入によりイニシャルコストが既存のものより高くなるものの、断線に起因する不具合を低減できる可能性がある。

その他に、ロボット除草機がガイドワイヤーを発見できず、チャージステーションに帰還できない不具合も確認された(計8件)。ロボット除草機はガイドワイヤーに沿ってチャージステーションに帰還するが、その探索時間を短く設定してしまうと、ロボット除草機がガイドワイヤーを発見できなくなる。今回の試行地点では、ガイドワイヤーの探索時間を30分に設定すると、ロボット除草機がガイドワイヤーを発見できない不具合はみられなかった。しかし、この時間は作業範囲の広さや形状により変化することが考えられることから、導入した後に適切な時間を設定する必要があると考える。

d) 「いたずら」による不具合

「いたずら」では、ロボット除草機の持ち上げが発生した不具合の全体を占めた。そのうち、下市地区での「いたずら」の発生が9件中8件を占めていた。下市地区の試行地点周辺は、山岸地区及び江上地区と同様に平常時から人通りの多い場所ではないが、他2地区と異なり試行箇所が川裏側であったことから、他の地点に比べて人目に付きやすかった可能性がある。本試行より、人目の少ない場所でもいたずらが発生し得ることが明らかとなったため、ロボット除草機の導入にあたっては、いたずらの発生の抑止を目的とした立て看板による警告等の対応を行う必要がある。

(3) 除草コスト改善に向けたロボット除草機の効率的な運用方法の検討

a) 複数地点に対するロボット除草機の適用検討

ロボット除草機の稼働を5日間停止し、その期間中に伸びた芝や雑草が停止前の草丈に戻るまで約6～7日ほど時間を要した。植物の生長を考慮したとき、1週間程度を目安としてロボット除草機をローテーションして運用することで、ロボット除草機1台は2地点(約7,000m²)に適用が可能と考えられる。これにより、1地点あたりで負担するイニシャルコストは、1地点にロボット除草機1台を導入したときと比較して半分となることから、除草コストの低減につながる。また、ロボット除草機の性能向上により、草体の刈り取り速度が改善されれば、ロボット除草機を2地点以上に適用が可能となり、よりコスト縮減に期待できる。

b) ポータブル充電機器の活用性検討

ポータブルバッテリー及びポータブル太陽光パネルによりロボット除草機が運用可能であるか試行したところ、ロボット除草機の消費電力は当初の想定より多く、1日あたり4.0kWhの電力を消費することが判明した。対して、ポータブル太陽光パネルの発電量は晴天時で1日あたり約1.3kWhであり、ポータブルバッテリーの蓄電量を勘案すると、ロボット除草機を運用するためにはポータブルバッテリーを最低でも1日1回交換する必要があることが明らかとなった。また、バッテリー交換によるランニングコストも増大したことから、ポータブル充電機器によるロボット除草機の運用は現時点では困難であると考えられる。

c) ロボット除草機の2地点ローテーション化を踏まえた従来法との除草コストの比較

図-10に、ロボット除草機を2地点でローテーションで運用したときの肩掛け式、ハンドガイド式、遠隔操縦式及びロボット除草機の除草コストの比較結果を示す。

ロボット除草機をリースすることを想定したとき、ロボット除草機の除草コストは、23年目でハンドガイド式より安価となることが示された。また、ロボット除草機を購入し、4年ごとに故障によりロボット除草機を買い

替えることを想定したとき、7年目でハンドガイド式、20年目で遠隔操縦式より除草コストが安価となることが示された。現時点では、ロボット除草機の除草コストが従来法より経済的となるには時間がかかるが、ロボット除草機の性能向上等により除草適用面積が広くなれば、単位面積あたりの除草コストは減少するため、より早い段階でロボット除草機の方がコスト的に優位になることが考えられる。また、近年の傾向として直近10年で労務単価が約1.5倍に上昇するなど⁹⁾、人件費の高騰が著しいことから、将来的に労務単価の上昇に伴う従来法の除草単価の上昇により、ロボット除草機の方が除草コストが安価となることも十分に考えられる。

4. 結論

本稿では、ロボット除草機の導入を検討する上で参考となる芝の生育状況や不具合の発生状況等を整理した。また、除草コストの改善に向けて運用方法の検討を行い、それを踏まえて従来法とコスト比較を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 芝等の堤防植生は、草丈10cm以下に保たれており、堤防点検を行う際に目視の妨げとならない状態を維持できることが明らかとなった。
- 堤防法面の芝の根系強度は、おおよそ400kgf/cmと同等かそれ以上を示しており、芝による堤防法面の保護の観点から問題ない生育状況であることが示唆された。
- 今回の試行では、1地点あたり5年間で計83.2件の不具合が発生したことが明らかとなった。しかし、ロボット除草機の導入時に不具合が発生しにくい地点選定または環境整備を行うことで、不具合の発生を低減できる可能性が示唆された。
- 1地点あたりの除草に要する日数は、今回の試行地点では1週間程度であることが示された。これにより、ロボット除草機1台を2地点に適用可能であるため、コスト的に効率的な運用が可能となる。なお、ロボット除草機の性能向上により、さらに効率的な運用に期待できる。
- ポータブルバッテリーとポータブル太陽光パネルを電源として用いるとき、今回の試行条件では、1日1回以上のバッテリー交換が必要であることが示された。イニシャルコストやバッテリー交換のランニングコストを考慮したとき、コスト面ではポータブル機器の導入による電源の確保は困難であることが示唆された。

- ロボット除草機を購入し、4年ごとの買い替えを想定したとき、20年目にはじめて遠隔操縦式よりロボット除草機の除草コストが安価となることが示された。ただし、この期間は、将来的な機器の性能向上による除草適用面積の拡大や労務単価の上昇に伴う従来法の除草単価の高騰により、短くなることに期待できる。

5. 今後の展望

ロボット除草機は、現時点では不具合が多く発生しておりコスト面でも従来法より優れた手法とは言えない。しかし、今回の試行で確認された不具合のうち、多くは導入時の地点整備や環境整備を入念に行うことで回避が可能と考える。除草コストに関しても、機器の性能向上により除草適用面積が広くなれば、除草コストの低減に期待できる。

ロボット除草機の強みは、定期点検を除いて除草時に人の手が必要ないことである。現在の日本では、深刻な少子高齢化が進展しており、将来的には現在と比較して働き手が不足することは自明である。そのため、省人化を目指してロボット除草機の試行を続け、導入が可能となるようにすることが、今後より重要になると考える。

謝辞：最後に、本稿の執筆にあたってロボット除草機による効果検証に御協力いただいた皆様に謝意を表す。

6. 参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局：河川砂防技術基準 維持管理編（河川編），pp.38-44，2024。
- 2) 今吉 紘頌：ロボット除草機による堤防除草の効率化について，近畿地方整備局 研究発表会，イノベーション部門Ⅰ，No.15，2021。
- 3) 国土交通省 近畿地方整備局：現場ニーズと技術シーズのマッチング(第1回マッチング)，https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/i-construction/0l9a8v000001jzww-att/bessi-2_Automower.pdf (2025年7月14日閲覧)
- 4) 島田 直仁：コウライシバの年間生育サイクル，芝草研究，48(1)，pp.32-39，2019。
- 5) 宝藤 勝彦，塩見 真矢，石原 宏二，河崎 和明：堤防植生の機能保持に向けた低草丈草種等の導入について，河川総合研究所報告，第21号，pp.22，2016。
- 6) 国土交通省 不動産・建設経済局：令和7年3月から適用する公共工事労務単価について（資料2），2025年2月14日発表。

流域治水対策の周辺技術に関する研究

井上 靖生¹

¹一般社団法人 建設コンサルタンツ協会 近畿支部 河川研究委員会

(〒540-0021大阪府大阪市中央区大手前通1-4-10)

一般社団法人 建設コンサルタンツ協会 近畿支部では、2020年4月から「河川研究委員会」の活動を続けている。第二期委員会（2023.10～2025.3）の研究分科会で「流域治水対策の周辺技術に関する研究」として「河川分野によらない流域治水対策事例」を幅広く調査を行うとともに「特定都市河川浸水被害対策法等の一部を改正する法律（2021年）」（以降、法改正と称す）の後、初指定となる大和川を対象に「特定都市河川の指定」に関するヒアリング調査を行い、得られた知見等を整理した。また、第一期委員会の研究テーマであった「ワンコイン浸水センサ」に関し、追加調査を実施し、活用における留意点や今後の活用方法等を整理した。

キーワード 流域治水、特定都市河川、ヒアリング調査、浸水センサ、実証実験

1. はじめに

一般社団法人 建設コンサルタンツ協会 近畿支部では、支部活動の一環として、2020年4月から「河川研究委員会」（以降、「委員会」と称す）の活動を続けている。

委員会の目的は、豪雨災害の頻発、維持管理の効率化・高度化、気候変動の影響、技術継承や高度化等、河川に関わる建設コンサルタントの各種の課題や要望に迅速かつ的確に対応する必要があるとの認識のもと、短期的・長期的な将来を見据えた河川のあり方について、調査、研究することとしている。

2023年10月より開始した第二期委員会の研究分科会では、「流域治水対策の周辺技術に関する研究」をテーマに掲げ、これまで研究活動を行ってきた。

本研究では、まずは「河川分野によらない流域治水対策」について幅広く調査を行ったのち、令和3年（2021年）の法改正後、初指定となる大和川を対象として河川管理者および関係自治体のヒアリング調査を行い「特定都市河川の指定」に関する知見や課題を整理した。

さらに、第一期委員会の研究テーマでも取り扱い、現在、実証実験が進められている「ワンコイン浸水センサ」に関し、運用面や維持管理面について実証実験メーカーへのヒアリングを実施し、浸水センサ活用における留意点を整理するとともに、今後の活用方法等について検討を行った。

農林分野、都市分野、治山分野、防災分野等の河川分野によらない流域治水対策について、WEBサイト等で公表されている情報をもとに対策事例の収集を行った。

調査の結果、計47事例（農林：13事例、都市：24事例、防災4事例、その他：6事例）の取り組みを収集し、それぞれの概要及び効果・課題を整理した。

表-1 河川分野によらない流域治水対策の整理事例

分類	対策種別 対策実施箇所	対策事例	対策効果・課題等
氾濫を防ぐ・減らす	農林：田んぼダムによる流出抑制 小山市思川西部地区	 雨水を一時的に貯めて流出量を抑制することで排水路や河川の急激な増水を抑える。	【効果】 - 雨水を一時的に貯めて流出量を抑制することで排水路や河川の急激な増水を抑える。 - シミュレーション結果では、最大湛水深30cm以上の面積が289ha→191haに減少。 【課題】 - キャップ型は清掃などの維持管理上の負担が発生。 - 取組農家の直接的なメリットがない。
被害対象を減らす	都市：住まいの工夫（土地利用規制による工夫溢れる暮らし方） 伊豆市土肥地区	 観光地の特性を踏まえた防災まちづくりによる減災対策	【地元協働がうまくいった事例】 - 理解されやすい方策として「安全創出エリア」「安全避難エリア」等の区別を設定。 - 展望台商業施設、避難タワーの整備
被害の軽減・早期復旧等	その他：上下流の連携 福島市、伊達市	 下流自治体のイベントにおいて上流自治体の地産品をPR & 販売するなどの地域間交流を実施。	【効果】 令和元年東日本台風による甚大な被害を受けた阿武隈川流域では、上流地区での遊水地群の計画が進められており、一人ひとりの取組・理解・協力が、同じ流域の方々の人命・財産を水災害から守ることに繋がるの考えから、地域間で協力し合う相互尊重、流域連携意識を持ち、災害時に危険を回避するために助け合える信頼関係が結ばれた地域づくりに貢献。

2. 流域治水対策の周辺技術に関する研究

(1) 河川分野によらない流域治水対策の事例調査

(2) 特定都市河川の指定に関するヒアリング調査

a) 調査目的

「特定都市河川の指定」や「流域水害対策計画の策定」では、関係部局や特定都市河川流域内の関係自治体との調整が必要である。また、流域水害対策計画の計画目標達成に向けては「指定後の運用」等について関係自治体との連携が重要となってくる。このため、本研究では、今後、近畿地方整備局管内で進められる「特定都市河川の指定（流域水害対策計画の策定含む）」の一助となるよう、令和3年（2021年）の法改正後、初指定となる大和川を対象に河川管理者および自治体へのヒアリング調査を実施し、大和川での検討過程で得られた知見に加え、現状の運用状況を把握するために調査を実施した。

b) 調査対象および調査内容

調査対象および調査内容は、表-2に示す通りとした。

なお、調査にあたっては、大和川流域水害対策計画の各条文の記載内容に対応した質問事項を整理し、計画策定段階の「課題」や「うまくいった点」、「苦労した点」や「指定によるメリット」に加え、指定後の「進捗状況」、「運用上の課題」、「新たな課題」等についてヒアリングを実施した。

c) 調査結果

河川管理者においては、特定都市河川の指定により「事業予算の確保」、「治水施策への貢献」のメリットがあった。課題については、大和川では既往計画があり、計画策定において大きな課題は無かったものの、「制度上」、「運用上」の課題が確認された。

関係自治体においては、雨水貯留浸透施設に関して、指定による「補助率が上がったことにより整備を進めやすい」といった河川管理者と同様のメリットを感じている一方、課題として「予算化に係る要件」、「制度条件上の課題」、「維持管理の負担」等が確認された。また、貯留機能保全区域、浸水被害防止区域の指定に関しては、「住民意識の向上」、「まちのPR効果」等のメリットを感じている一方、「地元への説明・施策内容の理解」、「指定に関する手続き」等の課題があることが分かった。

表-2 特定都市河川の指定に関するヒアリング調査の概要

分類	調査対象	ヒアリング実施日	主なヒアリング内容
河川管理者	奈良県河川整備課	2024. 8. 15	「流域水害対策計画の策定」および「河川管理者で実施する（している）対策」に関する内容等
	大和川河川事務所	2024. 8. 21	
関係自治体	大和郡山市	2024. 10. 11	「雨水浸透貯留施設等の整備」「貯留機能保全区域、浸水被害防止区域の指定」に関する内容等
	田原本町	2024. 10. 11	

表-3 ヒアリング調査結果の概要

調査対象	意見分類	ヒアリング結果 (主な聞き取り内容)
河川管理者	メリット	- 指定により、補助率が上がった。 - 法改正後、初めての指定となったことで流域治水の概念を全国的にアピールできた。（流域治水の進展に寄与） - 全国初の貯留機能保全区域指定したことにより、先進的な取組みを全国的にアピールできた。
	デメリット	■流域水害対策計画の策定等に関する課題 - 雨水貯留浸透施設の目標容量が条例と法で異なる。（制度上の整合） ■その他運用等に関する課題 - 民間企業が雨水浸透貯留施設の補助制度を知らない。（法+αの部分の理解を得るのが課題） - 区域指定に関しては、地元の治水に関する理解の深さ、リーダー的存在が大きい。（流域内の防災意識格差がある） - 区域指定による利点（固定資産税の減免のみ）が少ない。 - 対策施設の維持管理に係る負担が大きい。
関係自治体	メリット	- 事業の補助率の向上で事業が加速化した。 - 住民の治水に対する意識は比較的あったが、指定により深められたと感じる。（降雨時に住民が自主的に土嚢を積む等、行政依存が減少） - 使わなくなったため池を町が治水施設として利用・管理することで、町は流域対策実施率の向上、地元は管理労力の軽減、安心・安全を得ることができた。（安全なまちという認知度が上がったことにより、子育て世代の移住者が増加） - 整備した雨水貯留浸透施設の竣工式の状況をWEBサイトに掲載したことで他自治体の視察や問い合わせがあり、PR効果が得られた。 - 貯留機能保全区域の指定に関する知見が得られた。
	デメリット	■雨水貯留浸透施設等の整備に関する課題 - 施設整備の予算化は、当該自治体にも内水対策に対する効果（メリット）がないと難しい。 - 水田貯留を「多面的機能支払交付金」で対応しているが、協定書の締結が義務ではない。協定書が無ければ、将来的に対策量に計上できなくなる可能性がある。（協定書の取得にかかる労力も課題） - 今後、水田貯留を増やす場合、市町と地権者の負担となるため、補助制度が望まれる。 - ため池のほとんどが水利組合の所有で対策にあたっては借地料が発生している。 - ポンプ施設等の維持管理に係る負担（費用）が大きい。特定都市河川の指定により整備はしやすくなったが、これら施設の増加による維持管理費の補助制度が望まれる。 ■浸水被害防止区域、貯留機能保全区域の指定に関する課題 - 住民説明の際には関連事業を理解したうえで協力をしてもらうようにしているが、国や県の事業の状況があまり把握できておらず、これらの情報共有が課題。 「貯留機能保全区域」といったワードになじみが無く、目的等の理解を得るのに苦労した。 「貯留機能保全区域」の同意書の取得に苦労した。（地権者が近畿圏外の場合、かなりの労力が懸念され、同意書取得の簡素化が望まれる。） 「貯留機能保全区域」は、メリットよりも地価の低下等のデメリットが大きいと認識されているようである。（営農者目線の補助制度が望まれる。） - 区域指定の推進のためには、「指定」による対価を得るといった思考にならないよう、如何に流域治水の考え方を広める（浸透させる）かが課題。

(3) ワンコイン浸水センサ追加調査

a) 調査目的

ワンコイン浸水センサについては、第一期河川研究委員会でも調査を行ったが、実証実験を開始して間もない時期であったことから、幅広い検知事例を得ることができなかった。

今後、流域治水対策を進める必要がある中、有用なツールと考えられるワンコイン浸水センサの更なる利用促進を図る上では、各センサの機器特性のほか、実運用を踏まえた維持管理等に関する情報について整理することが望ましい。

このため、本研究において実証実験に参加しているセンサメーカーを対象にヒアリング調査を実施し、実証実験での運用・検知事例で得られた知見について把握するために調査を実施した。

b) 調査対象および調査内容

調査対象および調査内容は、調査目的を踏まえ、表-4に示す通りとした。

なお、調査にあたっては、質問票によるヒアリング調査を基本とし、検知事例のあったメーカーについては個別ヒアリングを実施した。

c) 調査結果

現在のワンコイン浸水センサは、一般市街地等での浸水は問題無く検知できているものと考えられる。

その他想定される設置環境では、表-5に示す通り「流水部」や「浮遊物・濁水」での検知は一定の対処をすれば可能な状況である。「海水域」は、検知方式によって適用不可のものもあり、「下水道」への設置は難しい状況であった。

また、ワンコイン浸水センサ利活用における現状の課題として、表-6に示す通り「センサ設置」や「情報提供」に関する事項のほか、「初期投資や維持管理等の費用」に関する事項についての意見があった。

表-5 設置環境別の設置やメンテナンスにおける留意点

設置環境	検知方式	留意事項と対処策の概要 (斜体が対処策)
流水部 (流路・越流部)	フロー式	【設置】水流の変動の影響が少ない場所に設置が望ましい。 【メンテナンス】降雨期前に1度の目視点検等。
	接触式電極式	【設置】冬季に水しぶき等を浴びた際、電極間が凍結して誤検知の可能性あり。→ 電極部分に保護具を使用。(対処実績あり) 【メンテナンス】水路内は、台座等にセンサの固定。越流部は、杭タイプを利用する場合、上部に突出するため設置箇所の選定が必要。
	圧力式	【設置】特になし 【メンテナンス】水深が50cm程度以上の場合、中継装置との通信が途切れる場合あり。→ 上下に高さを変えて数10m間隔で、複数個のセンサを設置
濁水・浮遊物あり	フロー式	【設置】浮遊物によるつまり等の可能性。→ 冠水検知後は、動作確認。必要に応じてネット取り付け。 【メンテナンス】降雨期前に目視点検
	接触式電極式	【設置】浮遊物が付着・接触して誤検知・破損の可能性。→ 浮遊物接触防止の電極カバー設置等 【メンテナンス】出水前後の点検が必要。
	圧力式	【設置】特になし 【メンテナンス】浮遊物による圧力検知部の詰まり、接触による破損の可能性。→ 定期的な現場での点検とメンテナンス
海水域	フロー式	腐食が想定されるため、使用不可。
	接触式電極式	【設置】どの程度の精度で捉えられかについて実証が必要。※港近くに設置しているセンサは問題なく検知できている。 【メンテナンス】自然劣化のスピードが早まる可能性。→ 耐候性が高い素材の利用や、コーティングによる塩害対策。
	圧力式	【設置】理論的に海水/淡水の比重差（約3%）の誤差あり。※他の誤差影響が大きいいため特に対処せず 【メンテナンス】大きな問題は発生していない。
汚水（下水道）	フロー式	腐食性ガスが想定されるため、使用不可。
	接触式電極式	【設置】マンホール下は、通信が出来ない。通信可であれば、下水道内を捉えることは可能。※電極延長タイプ（センサ部と通信部は屋外）もあるが、ケーブルのためにマンホールを少し開ける必要があり設置は困難。 【メンテナンス】下水道内のため、専門業者によるメンテナンスが必要。（大がかりとなる）
	圧力式	マンホール内（地下設置）のため、地上の基地局と通信ができない。（現状では下水道は使用不可）

表-4 ワンコイン浸水センサ追加調査の概要

項目	内容
調査対象	令和6年度（2024年度）実証実験の参加メーカー：9社
調査内容	■機器特性に関する内容 - 浸水センサおよび検知システムの特徴および仕様の概要 ■維持管理に関する内容 - 機器更新の頻度やコスト - メンテナンス（日常や出水前後）等の留意事項 ■活用状況に関する内容 - 設置実績の確認 - 検知方式・設置環境（設置目的）別の設置やメンテナンス等の留意点（検知精度の担保やセンサ更新頻度等の視点） ※設定した設置環境：「流水部（流路、越流部）」、「濁水・浮遊物あり」、「海水域」、「汚水（下水道）」 - ワンコイン浸水センサ利活用における現状の課題

表-6 ワンコイン浸水センサ利活用における現状の課題

課題項目	内容
センサ設置	- 自治体の管理施設等、設置場所に指定があると、思うような検知が期待できない場合がある。 - 設置許可（特に民地への設置）や道路設置時の警備員の手配等、労力とコストがかかる。
情報提供	浸水開始ではなく、浸水予兆として道路側溝に設置しているものもあり、公開範囲は十分な検討が必要。（説明しないまま観測値をすべて公開すると住民がパニックになる可能性）
初期投資や維持管理等の費用	高齢化に伴う作業員不足を補うための活用等、センサのニーズは一定数あるが、市町の予算（初期投資及び維持管理）の問題があり、大量導入が難しく、メーカーとしてビジネスが成立するほど十分な数量が確保できていない。

3. 調査によって得られた課題への対応検討

(1) 特定都市河川の指定等の課題に対する対応

今回のヒアリング調査で確認できた課題を整理すると以下の通り分類できる。

- ・制度上の課題
- ・維持管理に関する課題
- ・区域指定等の手続きに関する課題
- ・実施対策の予算化に関する課題
- ・地元等への説明および施策理解に関する課題

1点目から4点目は、国や自治体の事務や手続き等に関する事項であることから、法制度・条例の見直し・調整等のほか、維持管理や施策推進、事務手続き等に関する支援制度の創設が望まれる。

5点目については、「地元住民や民間企業向けの流域治水対策の意義や支援制度等を分かりやすく周知している事例」や河川分野によらない流域治水対策「上下流連携のような取り組み」（表-1参照）が参考となると考えられる。また、流域水害対策計画の更なる推進においては、厚生労働省、文部科学省、こども家庭庁の所管事業での支援施策も存在することから、これら関係部局とも連携することも有効であると考えられる。

(2) ワンコイン浸水センサにおける課題への対応

現在のワンコイン浸水センサは、運用実績を蓄積しているフェーズであり、コスト面での課題等を踏まえると、ワンコイン浸水センサの需要を拡大させることが重要と考えられる。今後、以下に示すような活用方法を検討、さらなるワンコイン浸水センサの本格実装を進めることで流域治水が推進されることが望まれる。

- ワンコイン浸水センサの活用方法（案）
- ・広域浸水被害状況の把握（地形データと連携した検知データを活用した浸水範囲のリアルタイム推定）
 - ・検知データと気象データを活用した浸水予測システム
 - ・避難経路・緊急輸送路等の判断ツール
 - ・立地適正化計画における防災指針での活用（避難活動支援ツール）
 - ・施工現場や浸水公園での事故防止（当該地の上流側に設置、急な水位上昇をリアルタイムに警報）
 - ・設置の迅速性を生かした大規模災害地での復旧までの警報装置 等



出典：愛媛県WEBサイト
(<https://www.pref.ehime.jp/page/5041.html>)

図-1 地元住民や民間企業向けの周知事例

4. おわりに

特定都市河川について、法改正後、初指定となる大和川を対象に調査を行い、指定によるメリットのほか、制度や維持管理、手続き、地元等の施策内容の理解等の課題があることを確認し、課題に対する対応の方向性を示した。ただし、第二期河川研究委員会では大和川の下流自治体を主体としたヒアリング調査であったことや、大和川には既往の関連計画があり、計画策定における課題の情報が得られなかったことから、2025年4月に発足した第三期河川研究委員会において、大和川以外の新規流域を対象とした追加調査を行うとともに、大和川上流の関係自治体への追加ヒアリング調査を実施する方針である。

また、ワンコイン浸水センサについては、実証実験9社を対象としたヒアリング調査を行い、実証実験を踏まえた課題や設置に係る留意点等を把握、運用面や維持管理面についても整理し、今後のワンコイン浸水センサ活用に向けた成果としてとりまとめることはできたと考えている。

謝辞：委員会の活動にあたっては、近畿地方整備局 河川部の谷口 昭一 河川調査官、小寺 秀治 前河川情報管理官に貴重なご示唆、ご教示を頂きました。ここに深甚な謝意を申し上げます。また、委員会の研究活動を支えていただいた委員7名の方にも謝意を申し上げます。

（第二期河川研究委員会 研究分科会 委員）

秋田 善弘（国際航業（株）※2024年6月退会）、岸上直之（セントラルコンサルタント（株））、関本 大晟（三井共同建設コンサルタント（株）※2024年6月入会）、東出 唯（（株）日本インシーク）、山口 功人（（株）オリエンタルコンサルタンツ）、山下 大輔（日本工営（株））、吉田 和也（中央復建コンサルタンツ（株））

関連論文

- 1) 一般社団法人 建設コンサルタンツ協会 近畿支部 河川研究委員会：河川計画分野における災害に関する調査及びウィズコロナ・アフターコロナを見据えた新しい働き方のあり方に関する研究、令和4年度近畿地方整備局研究発表会、2022.6
- 2) 一般社団法人 建設コンサルタンツ協会 近畿支部 河川研究委員会：河川計画分野災害に関する調査及びアフターコロナの変化する働き方、変化する業務への対応に関する研究、令和5年度近畿地方整備局研究発表会、2023.6

非破壊検査によるコンクリート橋の 塩害点検について

森野 由愛

近畿地方整備局 近畿道路メンテナンスセンター 技術課 (〒573-0094 枚方市南中振3丁目2-3)

コンクリート橋を劣化させる主要要因である塩害を受けやすい構造物を早期発見し、予防保全的な補修を行うことを目的に、国土交通省は、塩化物イオン濃度の調査を、原則10年に1度行っている。従来の調査法は、コア抜きやドリル削孔等により試料を採取して調査する必要があるため、構造物を傷つけてしまう。本稿では、非破壊で測定できる装置として提案されている RANS- μ を用いた塩害点検の結果を示す。従来の調査方法と比較し、塩害点検における非破壊技術の活用による有用性を、橋梁長寿命化、点検効率化、維持管理費削減、省人化の観点で評価し、今後の展望を述べる。

キーワード 塩害、コンクリート橋、非破壊計測技術、点検支援技術、予防保全

1. 背景と検討の目的

我が国は、海に囲まれ長い海岸線を有しており、絶えず海からの潮風に含まれる塩分に加え、冬季に散布される凍結防止剤や融雪剤は、多量の塩分を含み道路橋の健全性に及ぼす大きな影響が報告されている。一方で、塩害の進行は目に見えにくいことから、多くは劣化が顕在化した後の対処となっているものの、いわゆる国土強靱化に資する観点で、より高度な橋梁点検の実施は重要な課題である。2024年7月の橋梁定期点検要領の改定では、塩害は「特定事象」に位置づけられ、取り組み強化の方向にある。¹⁾

鉄筋腐食による橋梁劣化の最大要因は塩害とされる。^{2), 3)} 鋼橋は別として、鉄筋には空気や外気に触れない上層のコンクリート被りがあり直接状態を目視できない。そのため、国土交通省は、塩害を受けやすい構造物を早期発見し、予防保全的な補修を行うことを目的に、原則10年に1度、塩化物イオン濃度を調査する特定点検を行っている。(以下、塩害点検という。) 塩化物イオン濃度の測定は、従来よりコンクリート層をコア抜きやドリル削孔で試料を採取して行っているが、構造を傷つけて痛めてしまう。特に橋梁の健全性において重要箇所である上部工に直接コアやドリルの穴を開けることは避けたい。そのためには壊さないで内部、特に鉄筋周辺の深さの塩化物イオン濃度がわかれば上記の本質的な問題は解決する。非破壊検査がもたらす恩恵は計り知れないと考える。

また、直轄国道の点検の一部項目においては、2022年度より点検支援技術の活用原則化を行っている。橋梁の点検における原則化している項目に「コンクリート構造の鋼材位置のコンクリート中に含まれる塩化物イオン量計測、又はかぶりコンクリート内の塩化物イオン量の深さ方向の把握」がある。

これらの背景により、私は、理化学研究所が開発した中性子を用いた非破壊塩分検査装置「RANS- μ 」が塩害点検に有効ではないかと考えた。昨年来、インフラ構造物の点検に関する点検支援技術性能カタログ⁴⁾に掲載されているコンクリート構造物に内在する塩化物イオン濃度を非破壊で測定できる唯一の装置である。

本稿は、2024年度に「RANS- μ 」を用いて実施した塩害点検の計測データに関する考察を行い、塩害点検における非破壊計測の有用性について述べる。

2. 非破壊塩分計測技術 RANS- μ

(1) 測定原理

「RANS- μ 」の塩化物イオン濃度の深さ分布の測定原理について、図-1を用いて紹介する。図-1にコンクリート橋を対象として、その内部の塩化物イオン濃度を測定するために設置した「RANS- μ 」の設置方法を示している。この図は上部工の下面から内部に向かって塩化物イオン濃度

の深さ分布を測定する配置とされる。計測の基本概念を以下に記述する。カリフォルニウム (Cf) 線源から打ち込まれた中性子がコンクリート内部に存在する塩素のうち質量 35 の ^{35}Cl と中性子捕獲反応を起こし、そこで放出される ^{35}Cl 由来のエネルギーの異なる数本のガンマ線を Cf 線源の横に置かれた高エネルギー分解能の Ge (ゲルマニウム半導体) 検出器で検出する。Ge 検出器の周囲に配置する BGO 検出器は、Ge 検出器のバックグラウンドを削減する機器である。以下に、「RANS- μ 」の特徴を箇条書きに整理した。

a) 放射性同位体 ^{252}Cf を中性子源として、中性子をコンクリートに照射し、発生するガンマ線 (中性子誘導即発ガンマ線) を利用した元素分析装置。

b) ガンマ線は、高いエネルギー分解能を持つ Ge 検出器により測定し塩素由来であることを同定してコンクリート中の塩化物イオン濃度を深さ方向 3 分割で推定、図-1 では表面から 9cm の深さの鉄筋を想定。①、②、③は表面から 3cm 厚さの層ごとの塩分の変化を導出することを表している。

c) 物質中の透過力が高い中性子で塩素と核反応を起こし、その際に放出する 3 本のガンマ線を利用しコンクリート中の塩分を完全に非破壊で計測。(原理：使用する 3 本のガンマ線が異なるエネルギーを持ち、コンクリート中の減衰率の差から深さ分布を導出する。検出器系は、あらかじめ深さごとに既知の濃度で一定の大きさの供試体を用いて各エネルギーの検出効率を校正しておき、各エネルギーガンマ線の検出感度係数を求める。)

d) 非破壊であるので、同一箇所を何度でも測定でき、補修箇所の経時変化をいつでも測定できる。

e) カリフォルニウム (Cf) 線源 (^{252}Cf という自発核分裂する放射性同位元素の中性子源) は表示付き認証機器として届け出され、RANS- μ の小型化の重要な要件。強度が最大で 3.7MGq と小さいため放射線取扱に関する資格は不要でポータブル性を高めている。

f) 安全な使用を確保するために、「RANS- μ 計測士」の資格認定を受けた者が取り扱う。⁷

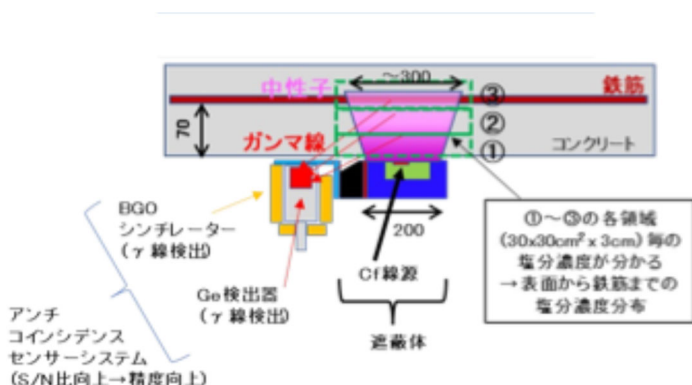


図-1 「RANS- μ 」の非破壊計測の仕組み^{3、5)}

(2) 計測器構成

図-2は対象コンクリート面に接触する部分の

「RANS- μ 」の配置がわかる写真である。上部工での計測においては、軽量で操作性が良い計測器が望ましい。「RANS- μ 」の主要機器は、Ge検出器、中性子源を埋め込んだ線源集合体ユニット、一体化筐体、設置架台などで構成され、要素毎の重量を約10kg程度とし、現場で容易に組み上げられる設計方針で作られている。

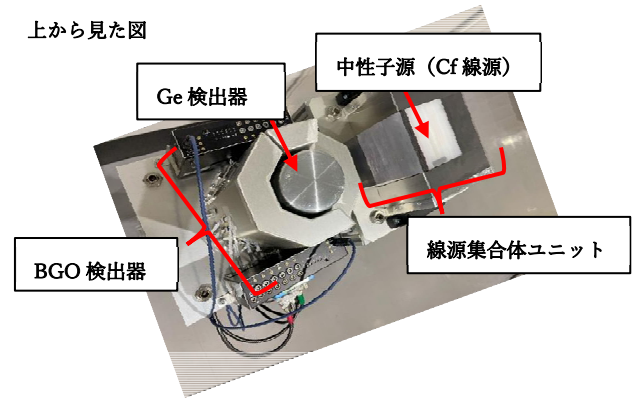


図-2 「RANS- μ 」の主要機器構成

(3) データの不確実性と検出限界

塩素由来のガンマ線エネルギーに対応したピークの計数率が塩素濃度に対応している。塩素含有量が少ないとガンマ線計数が小さくなる。限られた時間内で有意なピークを同定するために長時間測定が望ましいが、現状では1時間で打ち切っており、バックグラウンドと比較して計数率がない状態で、コンクリート表面から第1層では0.6 kg/m³、第2、第3層で1kg/m³をそれぞれの上限として検出限界としている。「RANS- μ 」の検出器感度の向上が今後の技術開発で進展すると不確実性は小さくなるであろう。

(4) 従来法

従来の塩化物イオン濃度を測定する方法として、内部分布にはコア抜き滴定法、ドリルを用いた微破壊化学分析、コンクリート表面に対してはX線やレーザーによる技術がある。塩害の実態の把握に必要な鉄筋位置の深さ(被り)までの表面データをもとに塩化物イオンの拡散を仮定して計算シミュレーション手法を用いたハイブリッドの試みは精力的に開発されている。⁹⁾

3. RANS- μ を用いた塩害点検の実施

(1) 対象橋梁

2024年度の塩害点検において、福井河川国道事務所管内の国道8号、27号において12橋、兵庫国道事務所管内の国道28号において2橋、紀南河川国道事務所管内の国道42号において3橋の合計17橋で実施した。実施した橋梁を表-1に示す。それぞれの橋梁構造、供用開始年とおおよその海岸からの距離を示す。福井河川国道事務所

管内において実施した国道 8 号の橋梁は、若狭湾沿岸に沿う海岸から数百 m の位置にある。敷設年は 1960 年前半で供用から 60 年程度経過している。青井橋は国道 27 号にあり、従来法の塩分測定も実施しているため「RANS- μ 」での計測データと比較し、考察を行った。

兵庫国道事務所管内において実施した橋梁は、明石市及び淡路市にある国道 28 号の 2 橋で、海岸から極めて近くに位置する。

紀南河川国道事務所管内において実施した橋梁は、串本町から新宮市にかけての国道 42 号の 3 橋で、海岸より数百 m の位置にある。

図-3 に福井河川国道事務所管内、兵庫国道事務所管内及び和歌山河川国道事務所管内のそれぞれの橋の位置を示す。

表-1 「RANS- μ 」による塩化物イオン濃度を測定した橋梁一覧

福井河川国道事務所管内 12 橋

路線	橋梁名	構造	計測部位	供用開始年	海岸からの距離 (m)
8	飛谷橋	PC 中空床版	主桁下面 (海側)	1962	800
8	元比田 1 号橋	PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1963	550
8	元比田 3 号橋 (下)	PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1963	250
8	大川橋	PCT 桁	主桁下面 (海側)	1962	400
8	竹鼻川橋 (上)	単純 RCT 桁	主桁下面 (海側)	1963	500
8	竹鼻川橋 (下)	単純 RCT 桁	主桁下面 (海側)	1962	500
8	杉津橋	単純 PC プレテン床版	主桁下面 (海側)	1963	300
8	阿曾 1 号橋	単純 PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1963	200
8	江良 1 号橋	単純 PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1962	50
8	江良 2 号橋	単純 PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1961	50
8	赤崎橋	単純 PC 中実床版	橋台側面 (海側)	1961	70
27	青井橋	単純 PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1961	500

兵庫国道事務所管内 2 橋

路線	橋梁名	構造	計測部位	供用開始年	海岸からの距離 (m)
28	中崎橋	単純 PC プレテン床版	主桁下面 (海側)	1964	0
28	灘川橋	PC ボステン I 桁	主桁下面 (海側)	1997	71

路線	橋梁名	構造	計測部位	供用開始年	海岸からの距離 (m)
42	新長野川橋	PC ボステン I 桁	主桁下面 (海側)	1980	200
42	二川橋	PC ボステン I 桁	主桁下面 (海側)	1966	150
42	里野橋	単純 PC 中実床版	主桁下面 (海側)	1960	100

和歌山河川国道事務所管内 3 橋



福井河川国道事務所管内



兵庫国道事務所管内



紀南河川国道事務所管内

図-3 「RANS- μ 」を用いて塩化物イオン濃度を計測した橋梁位置

(2) 計測実施状況

図-4に「江良2号橋」における計測状況を示す。橋梁上部工下面の計測で下から組み上げ設置した「RANS- μ 」の状態である。川に水があっても水位が20cm程度であれば通常の架台に固定し昇降機を使って床版桁下に検出面を接触できる。測定器が直接水に濡れなければ問題はないが、細心の注意が必要である。



図-4 「江良2号橋」における計測状況

4. 測定結果と考察

(1) 塩分由来のガンマ線スペクトル

図-5に今回実施した橋梁のうち「大川橋」で顕著な塩化物イオン濃度が観測された。観測結果から出力したガンマ線スペクトルを示す。どのコンクリートでも標準的に配合されているカルシウム由来のガンマ線ピークのすぐ左に塩素由来のガンマ線ピークが現れる。測定中に両者のピーク高さ比較から、直感的にどの程度の塩分が含有されているかの目安が得られる。他に1165keVと6111keVのピークにも着目し、塩化物イオン濃度の導出に用いる。

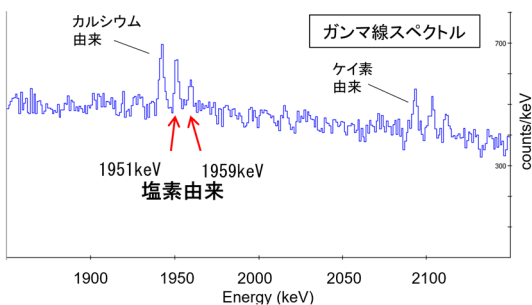


図-5 ガンマ線スペクトル（大川橋）

(2) 塩分濃度分布測定結果

図-6に福井河川国道事務所管内の12橋で「RANS- μ 」で計測した塩化物イオン濃度の測定結果を示す。12橋の測定データのうち、1橋（大川橋）から顕著な塩化物イオン濃度が検出された。表面からの深さ0-30mm（第1層）で $9.9 \pm 0.7 \text{ kg/m}^3$ 、30-60mm（第2

層）で $4.1 \pm 1.1 \text{ kg/m}^3$ 、60-90mm（第3層）で $1.2 \pm 1.8 \text{ kg/m}^3$ が計測された。各層において、鉄筋の腐食発生限界である 1.2 kg/m^3 を超える塩化物イオン濃度が観測された。本橋梁では、2024年度の定期点検でコンクリートの剥落、鉄筋露出が確認されていることから、高い塩化物イオン濃度が予想された。実際、第1層、第2層で高い塩化物イオン濃度が観測された。第3層においても、 1.2 kg/m^3 を超える値が観測された。今回計測した主桁は海側であるが、さらに海側に歩道橋が架橋されており、雨により表面に付着した塩分が流されることが少ないため、高い塩化物イオン濃度が観測されたと考えられる。かぶり代表値の19mmにおいて、塩化物イオン濃度が 1.2 kg/m^3 を超えているため、鋼材の腐食状況を調査するなど塩害による劣化の程度を明らかにし、補修方法等について検討が必要と思われる。

残りの11橋の測定データのうち、阿曾1号橋、赤崎橋、江良2号橋では、第1層において 1.0 kg/m^3 近傍と濃度は低いものの塩化物イオン濃度が観測された。それ以外は、1時間計測における検出限界以下となった。塩化物イオン濃度が観測された3橋のうち、阿曾1号橋及び赤崎橋は、前回の塩害点検において今回「RANS- μ 」での測定した箇所の近傍で測定しているため、測定結果の比較を行った。阿曾1号橋は、2014年に電位差滴定法で測定しており、各層における最大の測定値が 0.81 kg/m^3 （0-10mm）、 0.66 kg/m^3 （30-40mm）、 0.48 kg/m^3 （60-70mm）であったのに対し、今回の「RANS- μ 」での測定結果は第1層で 1.6 kg/m^3 、第2、3層で検出限界以下であった。赤崎橋は、2013年に電位差滴定法で測定しており、各層における最大の測定値が 0.97 kg/m^3 （0-10mm）、 0.39 kg/m^3 （30-40mm）、 0.3 kg/m^3 （60-70mm）であったのに対し、今回の「RANS- μ 」での測定結果は第1層で 1.4 kg/m^3 、第2、3層で検出限界以下であった。両橋とも、第2、3層での測定結果は、前回の塩害点検以降の塩化物イオンの進入を考慮しても、「RANS- μ 」との測定結果は整合のある結果であると考えられる。第1層での測定結果からは、前回の塩害点検以降、塩化物イオンの進入が進んでいるということが分かる。また、かぶり代表値における塩化物イオン濃度が 1.2 kg/m^3 以上となっているため、詳細調査による検討が必要ではないかと考える。

今回の計測計測箇所は橋梁毎に1箇所であるため、海岸からの距離、供用年数による相関データを分析することが難しい。地道な計測を一步一步確実に進めることの重要性を示している。

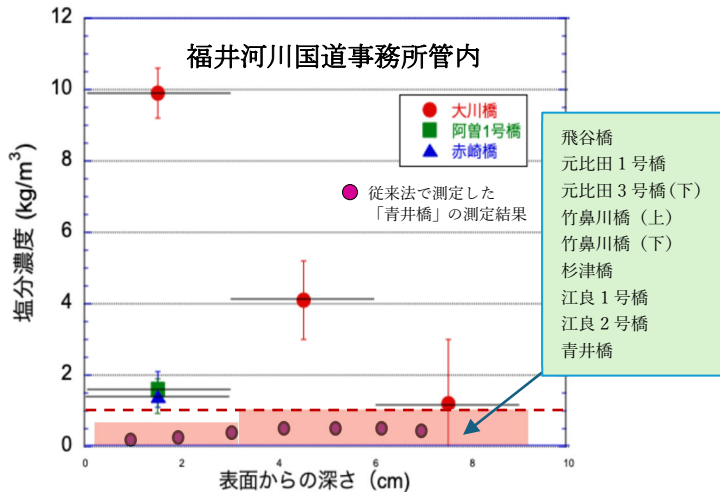


図-6 福井河川国道事務所管内で計測した塩化物イオン濃度測定結果

兵庫国道事務所管内で計測した2橋は、ともに検出限界以下であった。過去の塩害点検データがないため、直接比較できないが、直近の定期点検では、塩害による損傷は確認されていない。

図-7に紀南河川国道事務所管内の3橋で「RANS- μ 」で計測した塩化物イオン濃度の測定結果を示す。

二河橋での「RANS- μ 」の測定結果は、検出限界以下であった。前回の塩害点検（2014年）におけるドリル削孔による電位差滴定法結果を図-7に併せて示す。電位差滴定法の結果は、今回の「RANS- μ 」での測定箇所と最も近い位置の測定結果をプロットした。電位差滴定法の測定値とおおよそ合っており、前回の塩害点検以降の塩化物イオンの進入を考慮しても、「RANS- μ 」との測定結果は整合のある結果であると考えられる。

新長野橋での塩化物イオン濃度の測定結果を従来法（ドリル法）と比較する。図-7の「RANS- μ 」は上部工の表面から第1層では2.2kg/m³、第2層では1.7kg/m³、第3層では検出限界以下であった。前回の塩害点検（2013年）におけるA1橋台でのドリル削孔による電位差滴定法の計測結果は、0.37kg/m³以下と極めて低い。10年での変化量というよりも、地形的に上部工に潮風が付着しやすい場合も想定されるため、下部工と上部工という測定箇所による違いであると考えられる。

里野橋についても、新長野橋と同様ことが言える結果であった。ただし、いずれも、かぶり代表値において、1.2kg/m³以上の計測結果であるため、多数検体での測定や詳細調査による検討が必要ではないかと考える。今回の「RANS- μ 」での測定結果は、早期の塩害発見に警鐘を鳴らす効果があったと考える。

今回の試みでは計測箇所がそれぞれ1箇所であったため海岸からの距離や、供用年数により暴露期間など分かりやすい関連データを分析することが困難である。今後塩害点検データを地道に蓄積してゆくことが大事である。

また、現在のコンクリート橋の塩害に関する塩害点検

要領では、まず下部工において調査を行い、その結果塩化物イオン濃度が高い場合（1.0kg/m³以上）に、上部工を調査する2段階の調査手順となっており、効率的とは言えない。非破壊装置で最初から上部工の最も重要な箇所や、そのほか複数箇所において非破壊で計測することが望ましい。必要な橋梁の対応と並行して限られた予算で予防保全に切り替えていく上で、効率的な点検方法の確立が必要不可欠である。

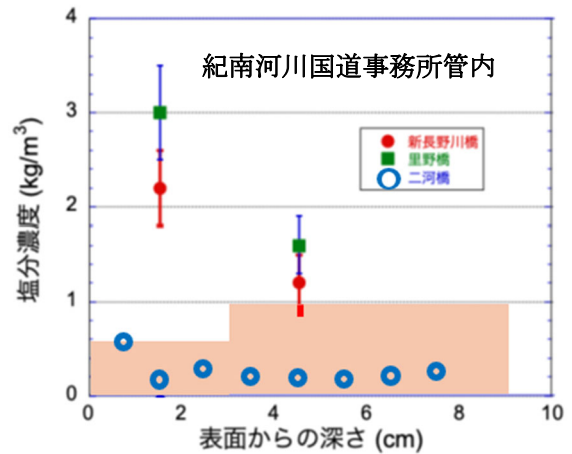


図-7 紀南河川国道事務所管内で計測した塩化物イオン濃度測定結果

(3) 塩素以外の元素について

「RANS- μ 」の計測では、塩素以外のコンクリート成分の元素（水素、カルシウム、ケイ素）の割合を同時に観測することができる。先に示した図-5では塩素以外にカルシウム、ケイ素に由来するガンマ線が示されている。

竹鼻橋(上)、大川橋で、他橋梁の主桁に比べ、水素とカルシウムのピーク量が1/2～1/3程度少ない結果が得られた。特に、竹鼻橋(上)は、竹鼻橋(下)が他橋梁と同程度であったのに対し、供用開始が異なる上下線で異なる結果が得られた。一方、ケイ素の量は、竹鼻橋(下)も、竹鼻橋(上)と同程度であった。さらに重要な知見として、竹鼻橋上下線、大川橋は鉄のピーク量は、他の橋梁よりも多く、かぶりコンクリートが薄いことを示唆している。

水素は水分、カルシウムはセメント、ケイ素は粗骨材に主に関係する元素であるが計測箇所での差が顕著に現れている。塩素以外の元素に関しても、重要な関連情報となるため「RANS- μ 」を用いる場合は、同時にデータを集約することが望ましい。

(4) 従来法との比較

「RANS- μ 」の塩化物イオン濃度の測定結果の妥当性検証は、従来法としてこれまで採用されてきたコア抜き試料から求めた塩化物イオン濃度との比較が有効と考えた。2024年度の対象橋梁のうち、青井橋においては、ドリル削孔による電位差液滴法でも測定したことから、データを直接プロットして比較を試みた。「RANS- μ 」の測定データ

と従来法での測定データを図-6に示す。測定箇所は、「RANS- μ 」と従来法ともに床版下面の同一箇所で測定した。「RANS- μ 」での測定結果は、第1～3層のどの層においても検出限界以下であった。また、従来法での測定結果については、「RANS- μ 」での測定時でいうところの第1層における最大の塩化物イオン濃度は0.39kg/m³、また第2層における最大の塩化物イオン濃度は0.46kg/m³、第3層における塩化物イオン濃度は0.37kg/m³であった。「RANS- μ 」との測定結果と矛盾がない結果であることが確認できた。

「RANS- μ 」での測定は、非破壊で行うことから、試料採取箇所から劣化が生じる可能性がないことや、多数検体での測定を行うことができ、橋梁全体の塩害評価を行うことが可能なことから、従来法に比べ、塩害による劣化を早期に発見し、予防保全的な補修が可能と考える。これらは、長期的に考えると橋梁の長寿命化や維持管理費の削減に繋がると期待できる。

(5)省人化

厳しい財政状況や、技術者の不足といった制約の中で、インフラの効率的な維持管理を実施するために、新技術を活用における「省人化」は重要な視点である。ここで①省人化率（作業開始から測定結果判明までの人工と、②生産性向上率（作業開始から測定結果判明までの時間）を総合的に評価し非破壊計測技術「RANS- μ 」と従来法（コア抜き、ドリル削孔）を比較した。一定の仮定をおいているが、現場作業は同程度、従来法では採取試料の化学分析手順を有することを考えると、大きな省人化効果、生産性向上が見込まれることが期待できる。

5. まとめ

本論文では、コンクリート構造物に内在する塩化物イオン濃度を非破壊で計測できる技術「RANS- μ 」を取り上げた。2024年度の近畿地方整備局における塩害点検対象の内の17橋の計測結果およびその結果について考察した。鉄筋の腐食発生限界である1.2kg/m³以下の判定が可能な測定感度を有しており、塩害点検の目的である塩害による劣化を受けやすい構造物を発見し、予防保全的な補修を行うために必要な計測結果が得られることが分かった。また、最大の利点である非破壊での計測に加え、今後、橋梁の長寿命化、点検の効率化、省人化等の観点でも期待ができる技術である。近畿地方整備局にとどまらず、全国に非破壊計測の価値が広がり、点検に革新をもたらすことを期待する。

謝辞:本論文作成にあたり、(株)ランズビュー様には、計測サービス等の実施にご協力賜りこの場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 橋梁定期点検要領（2024年7月 国土交通省 道路局）
- 2) 朝倉 啓仁他、「コンクリート橋の塩害損傷である錆汁と食ひび割れの発現順序に関する一考察」土木学会第71年次学術講演会（2016年9月）
- 3) 古賀裕久他、「塩害を受けるコンクリート橋の維持管理手法に関する検討」土木技術資料48-11（2006）
- 4) 点検支援技術性能カタログ：一技術番号：BR020032-V0124
- 5) 若林泰生，吉村雄一，水田真紀，大竹淑恵，池田裕二郎：
“小型中性子源および即発 γ ガンマ線分析を用いたコンクリート構造物内塩分濃度分布の屋外利用非破壊診断技術の開発”，日本材料学会 コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集，Vol.18，pp.635-640，（2018）.
- 6) 塩害特定点検要領「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）」（2015年3月 道路局国道・防災課）
- 7) 若林泰生：RANS- μ RI 中性子源を利用したコンクリート構造物の塩害に対する非破壊検査装置の開発”，日本コンクリート工学会「中性子線を用いたコンクリートの検査・診断に関するシンポジウム」論文集，pp.202-209，（2021）.
- 8) 点検支援技術性能カタログ：一技術番号：BR020032-V0124
一国土交通省点検支援性能カタログ非破壊検査技術（橋梁）BR020032-V0225 非破壊塩分検査装置「RANS- μ 」
- 9) T-RANS ホームページ、計測士認定制度，
URL <https://t-rans.or.jp>
- 10) 中村文則、下村匠、大原涼平、細山田徳三、「飛来塩分の予測シミュレーション技術の開発と構造物の長期的な塩害環境作用の評価への適用」、土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造）、Vol. 75、No. 2、60-79、2019.