

既設CCTVカメラを活用した逆走・誤進入検知システムの開発

鈴木 季弘¹

¹中部地方整備局 道路部 交通対策課（〒460-8514 愛知県名古屋市中区三の丸2丁目5-1）

近年、自動車専用道路では、車両の逆走や歩行者・自転車等の誤進入が問題視されており、中部地整管内では逆走防止のリーフレットの配布、案内板やラバーポール設置等の予防的対策を実施中であるが、逆走・誤進入発生時に早急に事象を検知し事故を未然に防ぐ対策も求められている。当発表では、既設の道路管理用CCTVカメラに着目し、AIを導入した移動体検知・画像解析による逆走・誤進入検知システムの開発及び検証結果を報告する。

キーワード：逆走，CCTVカメラ，AI，画像解析，交通安全対策

1. はじめに

国土交通省及び高速道路管理会社の調べによると、平成23年度から平成28年度の6年間で高速道路において事故または確保に至った逆走事案は1,283件、原付・自転車・歩行者による誤進入は18,443件発生している。

中部地整管内の自動車専用道路においても平成24年から平成29年までの6年間に16件の逆走事案、平成29年4月から平成30年12月までの21ヶ月間に212件の誤進入が発生しており、最近では令和元年5月4日に静岡県沼津市内の東駿河湾環状道路において、交通事故に至った逆走事案が発生している。（図-1）

いち早く対策を行っている東・中・西日本高速道路株式会社においては、国土交通省が平成27年11月に公表した「2020年までに高速道路での逆走事故ゼロをめざす目標」達成の取り組みの一環として、民間企業等からの逆走対策技術の公募・選定を行い、既に逆走・誤進入の予防的対策に加えて、逆走検知・警告システムの導入事例があるものの、ものによっては規模の大きなシステム整備が必要であり、導入コストが大きな課題となっている。

そこで、中部地整管内に約2,000台設置済みの道路管理用CCTVカメラに着目し、新たな逆走・誤進入検知装置の導入に比べて低コストでの整備効果が期待できる、既設CCTVカメラを活用した、AIによる移動体検知・監視、及び通知機能を備えた逆走・誤進入検知システムを開発し検証を行った。



図-1 東駿河湾環状道路での逆走発生状況。

2. 逆走・誤進入を検知する試行システムの開発

(1) 試行システム開発の目的・基本方針

a) 開発の目的

逆走・誤進入対策として、可能な限り短期且つ効率的に逆走等を監視するために低コストでの対策を実現する。

b) 基本方針

既設の道路管理用CCTVカメラを活用し、車種判別には映像蓄積データから作成する教師データで学習させたAI技術を導入した画像解析を行うことで移動体を検知・監視し、管理者へ通報するシステムを開発し検証を行う。

(2) 試行システムによる監視の要件

試行システムの監視要件について以下にまとめる。

- ・通常時は道路管理用として使用中のカメラを用いる。
- ・事務所の監視職員に対して通知が出来ること。

- ・道路利用者への警告，注意喚起ができること。
- ・検知対象は逆走の自動車（大型車、普通車），自動二輪，及び誤進入の自転車，歩行者とすること。
- ・逆走・誤進入の監視以外に，停止車両検知，落下物検知等も可能とする拡張性を備えていること。

(3) 移動体検知の方法

移動体の検知には，首都高速道路株式会社等の異常検知で実績のある時空間MRF（Markov Random Field）モデルを用いた。

時空間MRFモデルは，時空間画像を領域分割するための確率モデルであり，時空間画像の時間軸方向の相関関係に着目したモデルである。

8画素×8画素で定義されるブロックを単位として領域分割を行うこととし，画像フレーム間で有するブロック毎の動きベクトルを参照した時間軸方向の相関を定義している。（図-2）

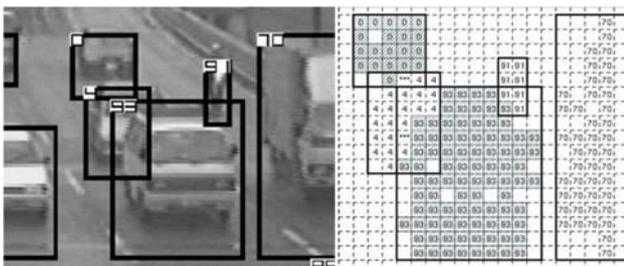


図-2 時空間MRFモデルの概要。

(4) 逆走・誤進入検知の方法

前述の時空間MRFモデルを活用し，検知領域内に存在する移動体を検知し，移動方向が通常の走行方向と反対方向である場合，逆走と判定する。また，原付・歩行者・自転車を検知した際は誤進入と判定する。（図-3）

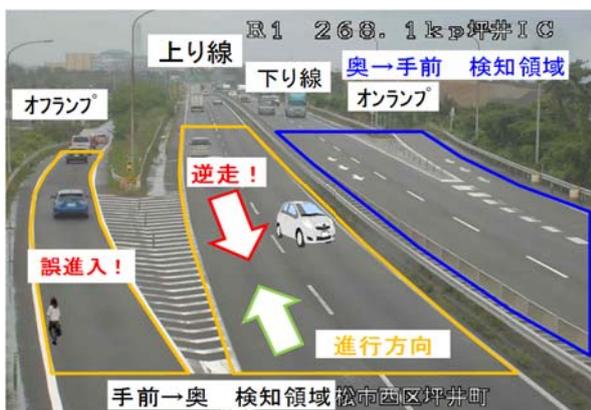


図-3 逆走・誤進入判定のイメージ図。

(5) 車両の車種判別，歩行者・自転車の判別方法

事前にCCTVカメラ蓄積映像から歩行者，自転車，原付，自動二輪，バス，乗用車，貨物車等の画像を切り出し，AIモデルへ学習させる教師データを作成する。

AIモデルを構築し，AIモデルが移動体の検知により切り出した画像と，事前に作成した教師データを比較させることで移動体が何であるかを判別する。本モデル構築において，様々な移動体サンプルを教師データとして作成するため，動物や落下物などその他の物体は「車両又は歩行者・自転車ではないもの」として判定される。

3. 開発した試行システムの概要

(1) 試行システムの構成

試行システムは，今回開発した①画像処理装置，②GPUボードを，L2スイッチを介して局内カメラネットワークと接続して映像を取得・解析し，監視結果を③表示用パソコンに表示する構成となっている。（図-4）

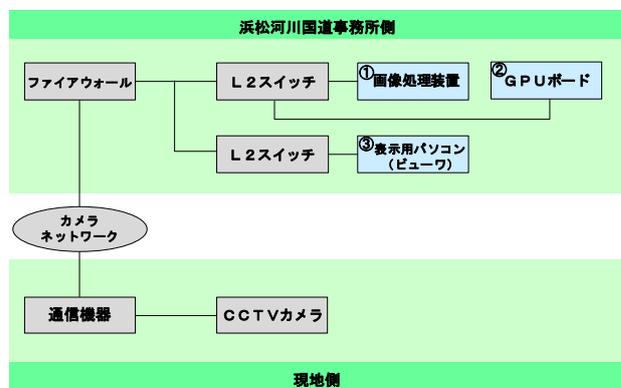


図-4 試行システムの構成図。

(2) 試行システムの主な機能

試行システムの主な機能を以下にまとめる。機能の検討では，実際に監視業務を行っている国道事務所の道路情報センター監視員の意見等も参考にして決定した。

a) 映像入力

既設CCTVカメラからH.264動画圧縮ファイルの映像を取得し映像解析アプリケーションにて映像入力を行う。

b) 画像解析

映像解析アプリケーションにて，移動体の検知を行う。

c) 逆走通知

基幹アプリケーションにて，逆走・誤進入の検知時に自サーバへアラーム通知を行い，表示用パソコンの画面を赤黄で反転させる。（図-5）

d) 蓄積映像出力

基幹アプリケーションにて，逆走検知時の映像を発生時の前後30秒間蓄積し，蓄積映像の出力を行う。



図-5 試行システムの画面と異常通知方法。

(3) 蓄積映像での検証

平成29年度に静岡県富士市の西富士道路で発生した、原付（図-6の赤枠内）による逆走・誤進入の蓄積映像を使って教師データを作成し、試行システムでの検証を行った。原付を逆走する移動体として検知することができたが、画角が道路に対して斜めなため移動体を検知できる範囲が狭くなり判断時間を短く設定せざるをえず、カメラの画角により誤検知が発生する可能性が残った。



図-6 逆走・誤進入発生時の蓄積映像での検証。

4. 実地検証

(1) 実地検証を行うCCTVカメラの選定

試行システムの実地検証を行うカメラを選定するにあたり、①過去に逆走事案が発生していること、②オフランプ出口までを見通せる画角となっていること、③直線区間に設置されていること、等の条件を満たしている浜松河川国道事務所管の一般国道1号浜名バイパス、カメラ名「坪井IC」を選定した。諸元を表-1にまとめる。

表-1 カメラ名「坪井IC」の諸元。

項目	規格等
仕様書	CCTVカメラ設備 機器仕様書(案) H27.3
設置時期	平成29年3月
形式	ドーム型HD旋回カメラ(簡易型)
性能	有効画素数約214万画素, 30fps, 逆光補正圧縮方式H.264, オートアイリス機能

(2) 検知範囲等の設定

坪井ICのCCTVカメラ画像に、図-7のように検知範囲を設定した。カメラは上り線路肩に設置されており道路に対してやや斜め上方からの画角となっている。進行方向に対して逆方向に移動体を感知すると逆走と判断し、歩行者・自転車・原付を検知すると誤進入と判断する。



図-7 坪井ICのカメラ画角と検知範囲。

(3) 実地検証の実施

浜松河川国道事務所道路情報センター内に試行システムを設置し、実地検証を行った。

検証は2週間（平成31年2月15日～平成31年2月28日）行い、以下の項目について検証した。

- CCTV映像の取得、蓄積状況
- システムの処理状況
- 逆走検知の精度低下の発生状況および要因
- 監視員へのヒアリング

5. 検証結果

(1) 実地検証の結果

実地検証の結果を以下にまとめる。なお、実地検証期間中に実際に逆走・誤進入の事案は発生しなかったため検知することはなかった。

a) CCTV映像の取得、蓄積状況

カメラネットワークを経由してCCTVカメラの映像を正常に取得できていることを確認した。

ただし、後述する検知精度の低下への対策として行ったパラメータ設定により映像解析アプリケーションに負荷がかかったことで、映像のとび、遅れが発生し検知精度が低下してしまった。なお、検証期間後にシステム改修を実施し、この問題は解決することができた。

b) システムの処理状況

検証期間中にシステムのCPU、メモリ、ハードディスクの使用量、単位時間当たりのデータ容量を確認した。

CPUの使用率は通常時30%、最大時50～60%、メモリの使用率は40%であり、特に異常は見られなかった。

ハードディスクは500GBの容量のうち390GBが移動体検

出映像の保存用に割り当てられているが、1日あたりのデータ増加量は約500MBであり、約2年間はデータ保存が可能であることが確認できた。

c) 逆走検知の精度低下の発生状況および要因

検知精度の低下による誤検知が複数回発生したことから、誤検知の発生状況と原因について(2)において詳しく記述する。

d) 監視員へのヒアリング

道路情報センターに駐在する監視員に対して、試行システムの利用についてヒアリングを行った。意見としては、「業務中に試行システムの表示用パソコンを常時見ていることは困難なため、異常発生時の通知方法として画面の反転のみによる通知は気付きにくい。」との回答であった。

(2) 誤検知の発生状況とその原因の検証

(1)-c)において記述した、実地検証中に発生した誤検知について、発生状況と原因をまとめる。

a) 大型車の荷台のはみ出しによる誤検知

上り線の追越車線を走行する大型車の荷台が下り線の検知領域にはみ出している状態を逆走と認識してしまい誤検知が発生。(図-8)



図-8 大型車の荷台のはみ出しによる誤検知。

b) 対向車線の車両のヘッドライトによる誤検知

対向車線を走行する車両のヘッドライトのハレーションにより移動体のサイズを過大認識し、反対車線の検知領域を逆走していると判断してしまい誤検知が発生。(図-9)



図-9 対向車線のヘッドライトによる誤検知。

c) 逆光による誤検知

坪井ICのカメラは東向きのため、朝日が差し込む時間帯は逆光となり移動体を画面上で正確に認識できないことによる誤検知が発生。(図-10)



図-10 朝日の逆光による誤検知。

d) カメラレンズカバーに付着した水滴による誤検知

雨天時、カメラレンズカバーに水滴が付着することで映像がぼやけてしまい、移動体を正確に認識できないことによる誤検知が発生。(図-11)



図-11 カメラカバーに付着した水滴による誤検知。

(3) 精度低下への対策と対策後の結果

検証期間中に発生した(2)-a)～d)の誤検知への対策として、AIの教師データの追加、移動体や検知エリア等の検知条件の設定変更、昼と夜で移動体検知のパラメータ設定を変更することで誤検知発生を概ね解消することができた。(図-12)

ただし、(1)-a)に記述したように、パラメータ設定変更によって映像解析アプリケーションへ負荷が発生し、映像取得に悪影響を与えてしまったことから、追加措置としてシステムの改修を行うことで問題を解消している。

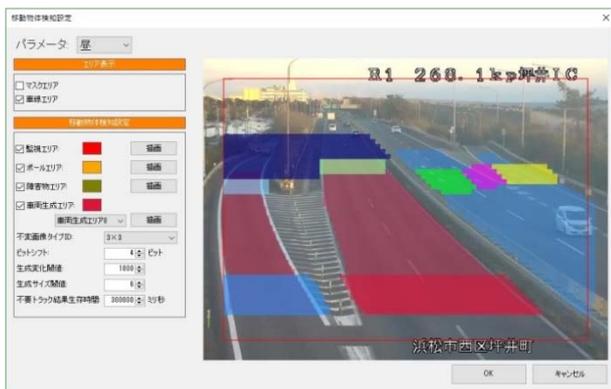


図-12 移動体検知パラメータ設定画面。

6. 課題の整理と改善策の検討

検証結果を踏まえ、課題が生じた事項について改善策を検討した。

(1) CCTVカメラの画質について

実地検証に使用したCCTVカメラには、逆光補正、オートアイリス機能、カメラレンズカバーの親水コーティングが備わっていることから、水滴の付着や汚れによるじみを防ぎ、ハレーションや逆光に対してはカメラ側で補正が加わることで高画質な映像が取得できることを想定していたが、実地検証ではそれらの補正機能がうまく機能していないことが要因と考えられる誤検知が発生した。

改善策としては、カメラの各種設定を現在の設定から逆走・誤進入システムに適した状態へ設定変更する、カメラメーカーの取扱説明書に従い、定期的カメラレンズカバーの清掃等のメンテナンスを行うこと、があげられる。

(2) CCTVカメラの画角について

カメラの画角を調整し、検知システムにとって最適な条件の画角とすることで、車両の重なりや逆光といった誤検知の要因を減らすことが可能である。しかし、既設のCCTVカメラの位置を変更したり、新たにCCTVカメラを設置したりすることは容易ではなく、工事費用も発生するため、当初の目標である、既設のカメラを利用した低コストのシステムを開発する、という方針に反する。

改善策として、教師データの追加によりカメラの画角を変更しないまま検知精度を向上させることは可能であるが、その場合は莫大な量の映像データが必要となる。

また教師データ作成を外部へ委託することで追加費用も発生することから、コストの面での課題が残る。

(3) 監視員への異常発生の通知方法

本試行システムでは、監視員への異常発生の通知方法

として、異常検知時に表示用パソコンの画面を赤黄で反転させることで視覚的に通知する方法とした。理由としては、逆走・誤進入検知とは別のシステムで異常発生時に警報が鳴るタイプのものが既に設置されていることから、警報音の重複を避けるためである。

しかし、実施検証の際に行った監視員へのヒアリングでは、業務中、常に表示用パソコンへ気を配っていることは困難であり、画面の変化による通知は気付きにくい、との回答であった。

改善策としては、別のシステムと混同しない音色での警報音を発生させることや、表示用パソコンと道路監視モニターとを連動させ、異常検知時には道路監視モニターが自動で検知箇所のカメラに切り替わり、且つ画面枠を赤黄で反転させる機能を追加する、といった対策が考えられる。

7. 今後の展開について

(1) 設置条件による既設CCTVカメラ整理

開発したシステムを管内で実装していくにあたり、管内既設CCTVカメラのうち逆走・誤進入の検知に適した画角のものがどの程度存在するかを整理した。

抽出条件は、①逆走・誤進入が発生しやすい自動車専用道路のランプ・分合流部付近に設置されているCCTVカメラであること、②検知に適した画角であること、として抽出した結果、①に該当するカメラが管内に124箇所あり、更に②の条件で絞り込んだところ、現状のまま高精度で検知が可能と見込まれる箇所が12箇所、少し精度は落ちるがAI教師データの集積により精度に改善が見込まれる箇所が97箇所という結果となった。(図-13)



図-13 逆走・誤進入の検知に適した画角の例。

(2) 導入コストの概算について

今回開発した仕様による逆走・誤進入検知システムを調達する際の導入コストの参考として、高速道路会社等へ同様の検知システムの導入実績がある企業3社を選定し、検討したシステム仕様(案)を踏まえた技術的対応レベルや概算費用についてヒアリングを行った。

ヒアリングの結果、当該システムを1基のみ調達した場合では3社ともに1,000万円/基を超えてしまうが、20基以上を同時調達することで、約400～550万円/基で調達可能であることがわかった。

よって、低コストでの整備という目標達成のためには管内で複数基を一括発注する方法が効果的であり、実現するための整備計画案を以下にまとめる。

- ・(1)において抽出したCCTVカメラ109箇所について、国道事務所と連携して現地踏査等を行い、設置効果が見込める箇所として更に半分程度に整備箇所を絞り込み優先順位を付ける。

- ・仮に50箇所に整備するとした場合、全体事業費は約2.5億円となり、年間1億円の事業費を投じた場合、3年間で整備できる試算となる。

8. まとめ

今回の開発によって、当初の目的である低コストで導入できる既設CCTVカメラを活用した逆走・誤進入検知シ

ステムの整備について概ね実現可能であることがわかった。

しかし、検知精度低下に関する課題が複数見つかったことから、次年度以降の開発においては、更なる改善策を施すことで検知精度を向上させる必要がある。

また、昨年度は試行システムの開発に時間を要してしまい検証期間を十分に確保できなかったことから、今年度は十分に検証期間をとり、PDCAを繰り返すことでシステムの精度向上を実現するとともに、落下物検知等の機能拡張についても開発を進めたい。

管内において当該システムの整備が進むことで、仮に逆走や誤進入が発生してしまっても、早期に事象を検知するとともに道路利用者へ情報提供を行い、事故の発生を未然に防ぐことができる体制を整えることで、数年以内には管内直轄国道の自動車専用道路における逆走・誤進入に起因する交通事故ゼロを実現したい。

参考文献

- 1) 時空間MRFモデル 東京大学 生産技術研究所 上條研究室
<http://kmj.iis.u-tokyo.ac.jp/research/stmrf.html>

航空レーザを使用した防災点検手法の 検討について

新倉 功也¹・大谷 浩一²

¹中国地方整備局 岡山国道事務所 管理第二課 (〒700-8539 岡山市北区富町二丁目19-12)

²中国地方整備局 岡山国道事務所 管理第二課 (〒700-8539 岡山市北区富町二丁目19-12)

道路防災点検作業は人的な労力に頼っており、落石発生源の目視点検作業では、位置精度の不良や調査漏れが発生する問題も多く発生している。このような背景を鑑み、本検討では、航空レーザ測量データの活用を考え、等高線図、傾斜量図およびウェーブレット解析図を重ね合わせた微地形強調図を作成し、落石発生源を効率よくかつ確実に机上抽出する手法を考察した。当机上調査結果を現位置踏査で確認し、目視点検が必要な落石発生源（急崖）の抽出が可能であり、本提案手法が有用であることを明らかにした。ここでは、どの程度の仕様の航空レーザ測量が、どのくらいの落石源を抽出できるのかを定量的に示して、その成果を報告する。

キーワード 航空レーザ測量データ、道路防災、落石発生源、微地形強調図

1. はじめに

日本列島は構造運動や火山運動の影響を受けた複雑かつ脆弱な岩盤から構成されており、また台風、梅雨あるいは集中豪雨や冬季の凍結融解が頻発することによって、斜面災害による被害が全国的に多発してきた。このような現状において、限られた財源と管理体制のなかで、効率的かつ効果的な防災管理を行っていく必要があるが、潜在的に斜面災害を起こす危険のある箇所が多数あり、すべてに対して抜本的な対策工を早期に実施することが困難である。また、モニタリングにより斜面を監視していく必要があるものの、これまでの計測手法では、点的な計測で監視密度が粗いため斜面全体の変状を捉えにくいといった問題を抱えている。また道路防災総点検以降の検討では、災害が発生した多くの箇所は、発生そのものや形態、規模が想定外であった事例が多いというデータも出されている。特に岩盤崩壊・落石現象により、毎年人的あるいは経済的な被害が発生しているにもかかわらず、点検・調査作業が人的労力に頼っていることから、危険箇所の見逃しが多く、点検を実施している着目点以外の箇所からも新たな落石・崩壊等が発生しているのが実情である。

なかでも落石の調査作業においては、図-1に示すような5000分の1の精度の森林基本図や道路台帳といった落石発生源が表現されていない図面が使用されている。斜面の多くは樹木が繁茂した状態であり、実測による現況の平面図作成は困難であり、前述の精度の低い図面が使用されてきた経緯から、現地調査においても、落石発生源の位置把握が困難となっている。落石発生源の多くは

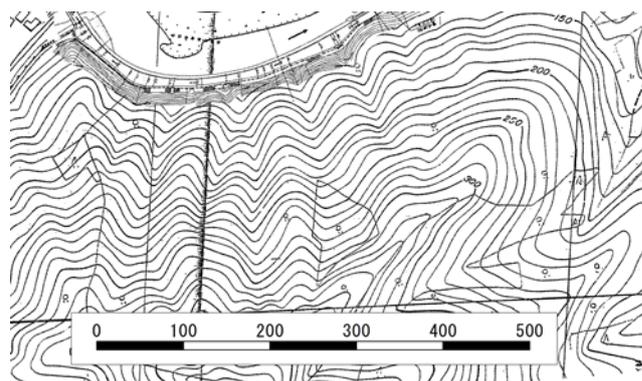


図-1 森林基本図の例

露岩状態の急崖であり、岩盤で標高下方が急勾配のものである。防災点検は、技術者による目視によって行われているが、対策が必要となる範囲の絞り込みを効率的かつ的確に行う目視点検の実施が求められている。そこで本検討は、広範囲の斜面に対して3次元地形の詳細を高精度調査することが可能な、航空レーザ測量データを活用し、点検対象の周辺斜面も含めた災害に関連する微地形の把握、特に現位置調査で安定性を確認する必要のある落石源を机上調査で抽出する手法の開発を試みた。この航空レーザ測量データの活用では、各種形表現手法の組み合わせにより、的確に落石発生源の机上抽出する手法を開発すると共に、どのくらいのレーザ点群密度であれば、どこまでの大きさの落石源を机上で抽出可能であるかを現地での踏査結果により確認し、本手法の有用性を定量的に評価することを試みた。本検討の成果は、今後の技術者不足にも対応する効果的かつ効率的な斜面防災点検の実現に寄与できるものと考えられる¹⁾。

2. 航空レーザ測量データによる微地形強調図

航空レーザ測量では、固定翼あるいは回転翼の航空機に搭載したノンプリズム型レーザ測距儀から、飛行しながら地上に向けてレーザパルスを照射し、地表面や地物から反射するリターンパルスにより、3次元座標データを取得する。航空レーザ測量は、樹木のある山地であっても、地表面を直接計測することができる。航空レーザ測量から得られるものは、計測した座標点からなるオリジナルデータである。オリジナルデータをフィルタリングにより地表面のみに分類したものをグラウンドデータと称する。さらにグラウンドデータから面を作り、内挿補完により等間隔のデータに作り変えたものをグリッドデータという。さらにこのデータを加工することにより、さまざまな地形表現が可能となる。地形を表現する手法として、図-2に示す等高線図、傾斜量図およびウェーブレット解析図等がある。しかしながら、これらの手法単体では、落石発生源の抽出は難しいことが報告されている。そこで、複数の地形表現手法を組み合わせ、地形の凹凸を強調して表現し、それに色彩表現の工夫を凝らして、机上調査時に急崖部をより把握しやすくする試みがなされている。本検討では、等高線と斜面の傾斜の変化を表現する傾斜量図、および尾根・谷の区別を明確にするウェーブレット解析図を透過合成することで、斜面を尾根から見下ろしたとき、急に傾斜がきつくなる地点（以下、遷急線と称する）を明確にし、微細な地形を強調した図-3に示す表現（以下、微地形強調図と称する）の活用を試みる²⁾。各地形表現の特徴は次の通りである。

a) 等高線図

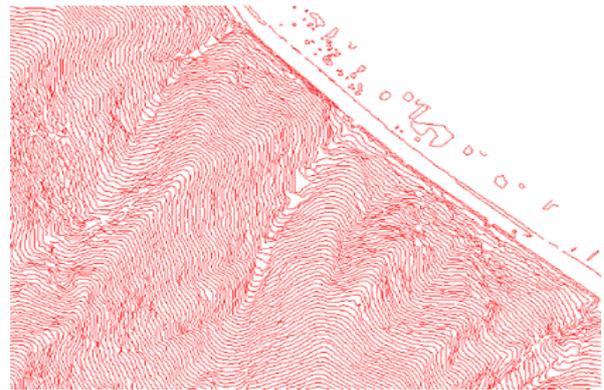
同一標高の点を結んだ曲線であり、粗密により傾斜の程度が把握できる。低角から中角の斜面は比較的分かりやすいが、複雑な地形に対しては凹凸部が判断できないことがある。

b) 傾斜量図

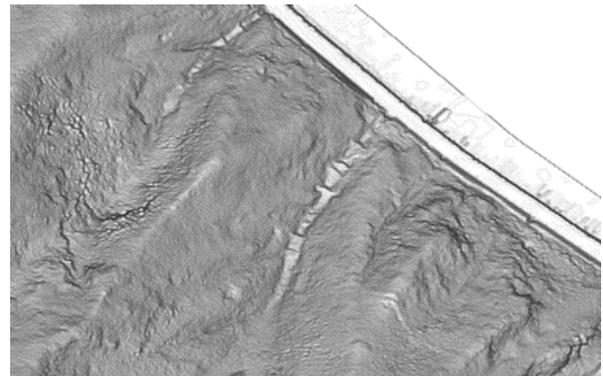
グリッドデータに対して、隣接する点間の傾斜量を計算したものである。ある点での傾斜量は、隣接する9点の標高を最も良く説明する平面を最小自乗法で当てはめた場合の、最大傾斜方向の傾斜となっている。緩斜面は明るく（例えば白色）、急斜面は暗く（例えば黒色）表現することで、落石発生源となる急崖の抽出が容易になる。しかしながら、高低差を示す情報がないために、尾根や谷の区別がつきにくい。

c) ウェーブレット解析図

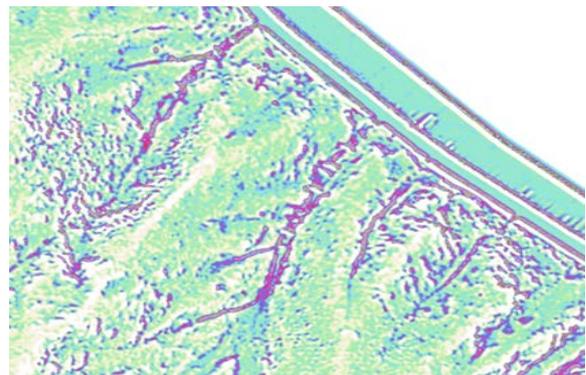
微地形の凸凹の変化が有る場所を強調する手法である。地形変化の特徴と似た形状の「メキシカンハット」関数を連続的に地表の起伏にあてはめ、その波と地表の起伏との畳込み積分を行ってウェーブレット係数を求める。係数を大から小に、白→黄→緑→青→赤と多色で強調することにより、尾根谷の凸凹具合が明確になる。



a) 等高線図の例



b) 傾斜量図の例



c) ウェーブレット解析図

図-2 各種地形表現図の例

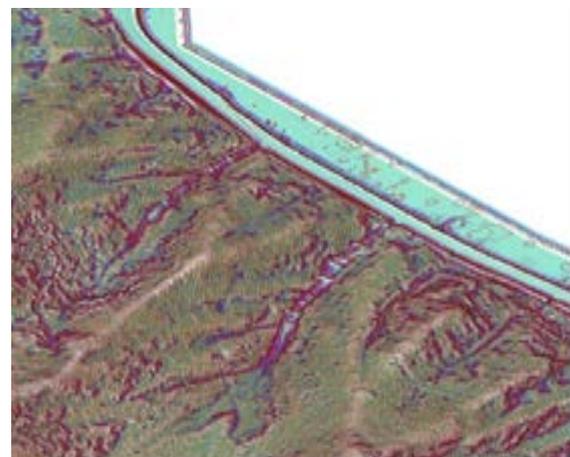


図-3 微地形強調図の例

上述のように、各地形表現には長所と欠点がある。本検討では、各表現の欠点を補うために、それらを組み合わせることで微細な地形を強調した表現（以下、微地形強調図と称する）を行う。具体的な微地形強調図の作成手順は次の通りである。

- ・航空レーザデータのオリジナルデータよりグラウンドデータを作成する。
- ・グラウンドデータから0.5m間隔のグリッドデータを作成する。
- ・0.5m間隔のグリッドデータを使用して、等高線図、傾斜量図およびウェーブレット解析図を作成する。
- ・前記各種地形表現図を透過合成することにより重畳させ微地形強調図を作成する。

3. 航空レーザ測量活用の有用性の検証

本章では、前章で作成した微地形強調図により落石発生源の机上抽出を検討し、現地調査を行うことで急斜面を表現した箇所との整合性を確認し、本検討で提案する微地形強調図の有用性を検証する³⁾。対象とした斜面は、防災カルテが作成された箇所であり、岡山県一般国道53号線岡山市北区御津草生付近である。本計測に使用した航空レーザ測量システムの性能を表-1に、計測用ヘリコプターの概観を図-4に示す。道路縦断方向のみの航空レーザ測量では、植生繁茂状況により地表面点群が粗くなる懸念があったため、横断方向も計測し、格子状のレーザデータを取得した。測密度は、1コース3.5 (点/m²) に対し、50%ラップで計測することにより7.0 (点/m²) となり、格子状に計測することにより14.0 (点/m²) となる。

まず航空レーザ測量データから作成した図-5に示すエリア1の微地形強調図と防災カルテとして使用されている図面を図-6にて比較する。道路防災点検の際に作成された防災カルテは、必要最低限の落石発生源や対策工が示されているだけで、高低差や地表面の起伏等が明確に示されていない。そのため、現地調査の際に位置関係が不明瞭であることから、目的とする落石発生源に到達するまでに時間を要する、あるいは見逃しが発生する危険性がある。一方、ウェーブレット解析図による地形表現例で示した通り、落石発生源である可能性のある、赤色で示される箇所に着目して調査対象箇所を抽出したものを黄色の丸で示したものが微地形強調図である。このように、微地形表現手法の組み合わせである微地形強調図により、落石発生源となり得る急崖箇所を効率よくまた的確に抽出を容易に実施でき、本結果を活用することで、効率的な現地調査を行うことができると考える。

次に、微地形強調図による調査対象箇所の抽出の有用性を検証するため、現位置踏査を実施した。エリア1における現地調査結果を図-7に示し、以下にそれぞれの番号に対応する箇所の状況の一部を図-8～10に示す。1

表-1 航空レーザの仕様

LiteMapper6800-400		
運用対地高度	30 - 1600m	
スキャン角	45° - 60°	
パルスレート	80,000 - 400,000Hz	
スキャン回数	10Hz - 200Hz	
ビーム径	0.5 m rad	
レーザの安全基準	クラス 3R	
公称眼障害区域	>1.5m (NOHD), >10m (ENOHD)	
計測可能高度	パルスレート	最大運用対地高度 AGL
	80,000Hz	1600m
	200,000Hz	1100m
	300,000Hz	950m
	400,000Hz	800m
装備	GNSS/IMU : IGI AEROcontrol-II デジタルカメラ : DigiCAM-50	



図-4 航空レーザ測量用ヘリコプター（回転翼）

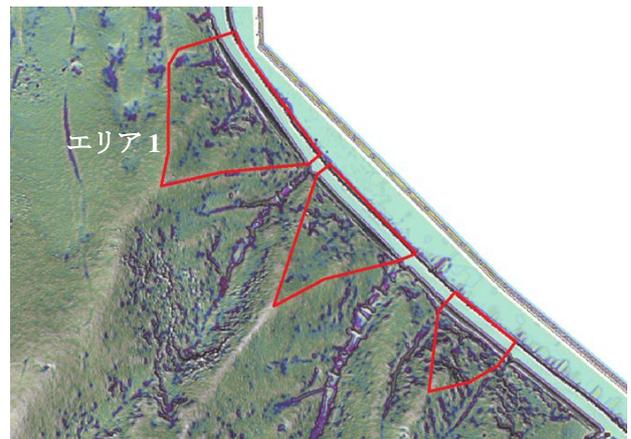
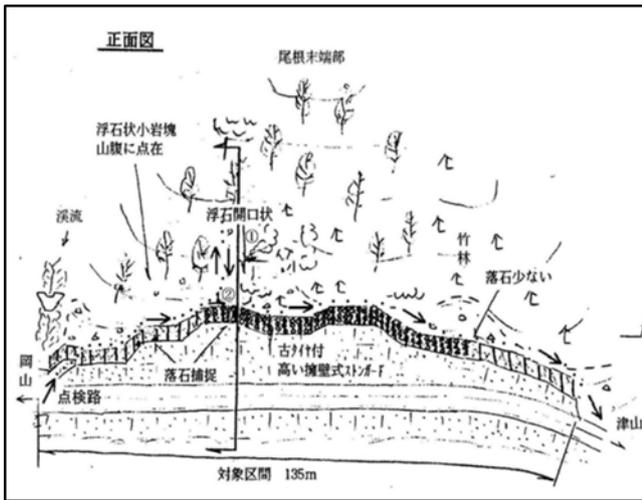
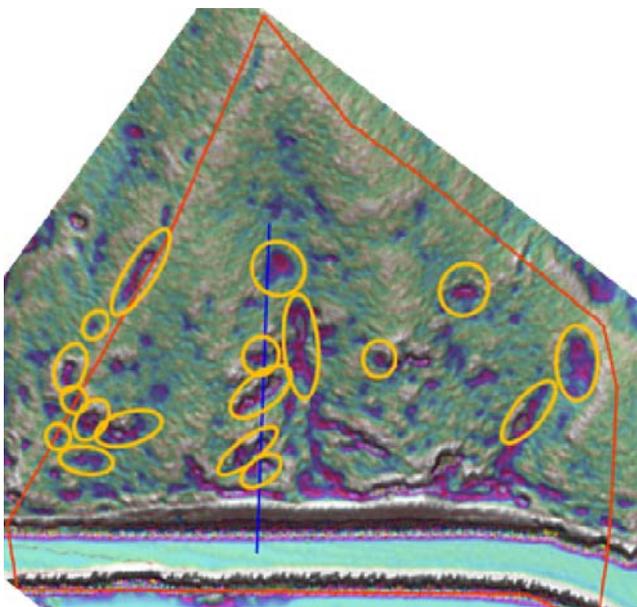


図-5 航空レーザ測量を実施した箇所：国道53号線沿いの斜面

番は急斜面、2・3・4・5・6・12・14・15・16・17番は抽出できた落石発生源、7・18・19番はくぼみ地形、8・13・20番は谷地形、9・10番は現位置踏査では確認できなかったが、机上調査では抽出できなかった落石発生源、11番は常緑樹を示す。急斜面は遷急線、遷緩線によって凹部ができ、赤く表現される。落石発生源となる急崖の高さ



a) 防災カルテでの斜面の表現



b) 微地形強調図での斜面の表現

図-6 防災カルテで使用されている図面と微地形強調図による斜面表現の比較

は、一番低いもので4番の1.2m、一番高いもので2・14番の3.0mであった。亀裂の入っている岩石が多く、2・14・16番においては剥がれ落ちの跡が見られ、すでに落石が起こっていたことがわかった。また、14番においては直径30cmの岩石が剥がれ落ち、樹木の根元で止まっていることを確認できた。15番においては、樹木の根が露岩を貫き非常に危険な状態である。地震や降雨等の自然災害によるものではなく、樹木の生長に伴って岩盤の崩壊が進行し落石が発生すると考えられる。そのため、このような箇所は特に変状観察が必要である。15番は山地の下方に位置するため、落石防護工で道路への落石を防ぐことができ予防工は施工されていなかった。くぼみ地形は土砂崩れによって作られたと考えられる。18番においては、くぼみ地形の10m下方に土砂が堆積し、小さな

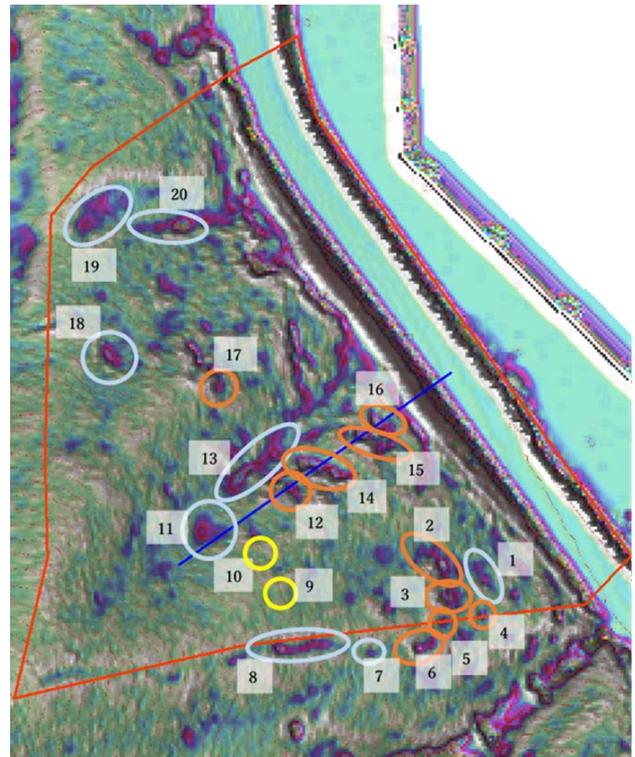


図-7 微地形強調図による急崖箇所の机上抽出結果
 橙色：急崖箇所 青色：谷部 黄色：抽出困難な箇所



a) 2番の箇所の状況 (高さ3.0m)



b) 3番の箇所の状況 (高さ1.6m)

図-8 現位置調査による調査対処箇所の状況



a) 5番の箇所状況 (高さ1.6m)



b) 9番の箇所状況 (高さ1.2m)



c) 10番の箇所状況 (高さ1.2m)



d) 12番の箇所状況 (高さ2.4m)

図-9 現位置調査による調査対処箇所の状況



a) 11番の箇所状況



a) 18番の箇所状況



b) 20番の箇所状況

図-10 現位置調査による調査対処箇所の状況

岩石が点在していた。谷地形は、雨水により浸食されていることを8番で確認した。9・10番はともに急崖高さ1.2mの落石発生源であるが、微地形強調図により表現さ

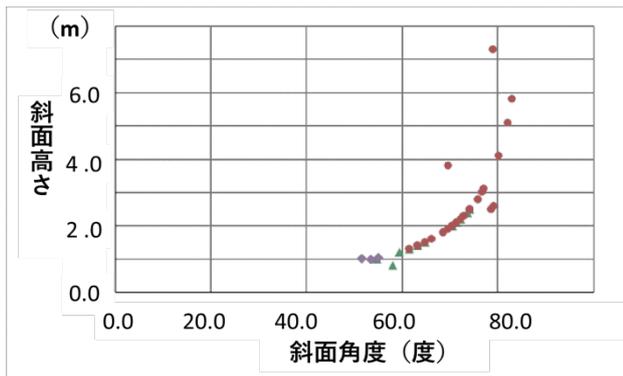


図-11 現位置調査による調査対処箇所状況

れなかった。9番の上空は植生により覆われており、植生の影響でレーザが地表面に届かず、正確な地表面を捉えることができなかったことが考えられる。また、10番は、グリッドデータに変換する際、写真の通り傾斜が大きいとは言えないため、平坦な斜面として表されたと考えられる。11番は常緑樹の上部と地表面との高低差が微地形強調図によって表現されている。常緑樹の葉の密度が高かったため、レーザが地表面に届かず、常緑樹の上部を地表面と捉えたと考えられる。

図-5に示す赤枠で囲った箇所に対して、同様に航空レーザ測量データから作成した微地形強調図により机上調査と現位置踏査の結果をまとめたものが図-11である。赤が机上抽出できた落石発生源、緑が谷地形やくぼみ地形、紫が机上抽出できなかった落石発生源を示す。図より、青色部分で示した高さ1.0m以上かつ角度60度以上の落石発生源は抽出可能であったことが示された。なお抽出できなかった落石発生源は、高さ1.0mかつ角度50～55度であり、植生の影響でレーザ密度が低くなったことが考えられるが、潜在的な危険性を重要視する必要のない箇所であった。このように、本提案の微地形強調図により、1m程度の急崖も抽出可能であり、現位置調査で確認しなければならぬ箇所を見逃しなく抽出できると考える。

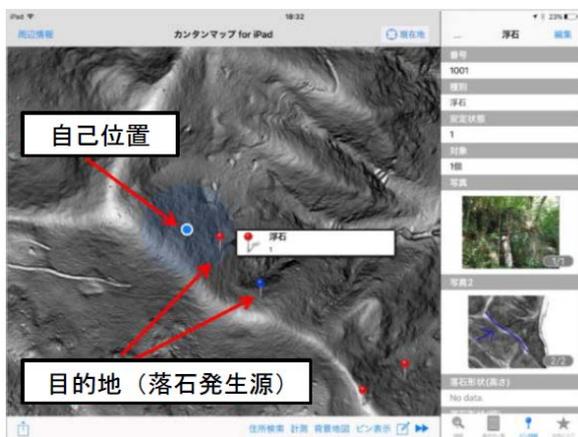


図-12 GNSS機能付きタブレット型GISツールの画面例

5. 結論

本検討では、航空レーザ測量データを活用して、見逃しの無い落石発生源を机上抽出する手法を提案するとともに、抽出精度の検証を実施した結果を報告した。本検討でのレーザ点群密度は、グランドデータで約6.86点/m²である。これは一般的に植生に覆われた斜面において、ここで用いた回転翼を使った航空レーザ測量データにて14点/m²の仕様のスキャナを使用して冬季に測量した場合に得られるレーザ点群密度である。植生の繁茂状態が異なる夏季では、レーザ点群密度が異なるので、ここで示した結果も異なることに留意が必要である。用いた回転翼の航空レーザ測量データの仕様は一般的なものであるため、冬季の道路縦断方向計測データと格子状計測データを使用すれば、微地形強調図により落石発生源急崖は、ほぼ抽出できると言える。

また机上抽出した落石源の安定性を確実に現位置踏査によって把握するため、図-12に示すようなタブレット型GISを用いたツールを活用した。これは斜面での自己位置をGNSSによって取得可能なツールであり、当ツールが点検作業者の位置を明示する。これにより、このタブレット端末上で示される微地形強調図で抽出された落石源の箇所へ、迅速かつ確実に点検作業員が誘導される。さらに防災カルテ更新に必要な情報収集や更新作業では、このツールを用いて現地の写真・情報を位置情報と関連させて蓄積できる。防災カルテをクラウド化し、調査データをリアルタイムにアップロードするシステムと連動させて、現地での作業員と道路管理者の意思疎通を容易に図ることも可能である。このようなICT機器の利用と組み合わせることで、本検討の成果を活用することで、さらに見落とし・見逃しの無い効率的な道路防災点検が可能になると考える。

謝辞：本検討を遂行するにあたり、岡山大学との包括協定に基づき、鈴木茂之教授、西山哲教授および、岡山理科大学佐藤文晴准教授のご協力を頂きました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム：土木研究所資料，地すべり地における航空レーザ測量データ解析マニュアル(案)，p11-12，2009。
- 2) 国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム：土木研究所資料，航空レーザ測量データを用いた地すべり地形判読用地図の作成と判読に関する手引き(案)，p38，2016。
- 3) 宮下征士，今西将文，宮田真考，西山哲：異なる2時期の航空ヘリレーザデータを使用した落石発生源抽出の基礎的検証，第69回土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp.373-374，2017。

BIM/CIMの活用報告 （小禄道路橋梁詳細設計）について

松川 剛¹・原田 圭大²

¹沖縄総合事務局 南部国道事務所 調査第一課 課長 （〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-8-14）

²沖縄総合事務局 南部国道事務所 調査第一課 調査係長 （〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-8-14）

小禄道路の内，終点側約1.1km区間（沖縄県那覇市瀬長～同県豊見城市名嘉地）は，既存道路である国道331号一般部の上空に架かる橋梁であり，その橋脚は国道331号一般部の中央分離帯に設置される計画となっている。従って，交差点や沿道施設との橋脚位置の取り合いや，施工時における現道交通や沿道施設に対する負荷軽減が大きな課題であり，関係機関とのスムーズな合意形成が事業推進の上で特に重要となる。また，早期供用につなげるため，工事段階での手戻りを防止し，かつ，設計自体を迅速に行うことも重要である。本稿では，これらの課題について，BIM/CIMを活用した事例と今後の展望について報告を行う。

キーワード BIM/CIM，関係機関協議，広域統合モデル，施工ステップモデル

1. 事業概要

国道506号那覇空港自動車道小禄道路は，沖縄県那覇市鏡水と豊見城市名嘉地を結ぶ延長約5.7kmの高規格幹線道路である（図-1）。



図-1 国道506号那覇空港自動車道小禄道路路線図

小禄道路と並行する国道331号は，那覇市内と沖縄本島南部地域を結ぶ唯一の直轄国道であるため，那覇市内へ向かう交通が集中し，渋滞の著しい区間となっているが，小禄道路の開通により，国道331号および周辺地域の渋滞緩和が期待される。

また，小禄道路の開通により，那覇空港と沖縄自動車道が接続され，広域交通ネットワークを形成することで本島北部および中南部から那覇空港間の定時性，高速性を確保するとともに都市部の交通混雑緩和，沿道環境の改善，観光支援等が期待されている。

2. BIM/CIM活用の目的

小禄道路の内，終点側約1.1km区間（沖縄県那覇市瀬長～同県豊見城市名嘉地）は，国道331号一般部上空に路線が計画されていることから，全長にわたり橋梁区間となり，橋脚の殆どは現道中央分離帯内に設置する計画となっている。

そのため，橋梁計画に際しては，交差点および沿道施設と橋脚位置の取り合いや，工事段階での施工重機配置や現道切り回し形態等において，警察，交差道路管理者（豊見城市），地元関係者（沿道施設，地元自治会）等多くの関係者と協議を重ねていく必要がある。また，早期供用につなげるため，工事段階での手戻りを防止し，かつ，設計自体を迅速に行うことも重要である。ここでは，これらの課題に対し，BIM/CIMを活用し取り組んだ事項を紹介する。

3. BIM/CIMモデルの作成

(1) BIM/CIMモデル種類

本事業では，以下2種類のBIM/CIMモデルを作成する。

1) 広域統合モデル

橋梁と交差点や沿道施設の取り合いを確認するため，また関係機関協議にて事業計画をスムーズに伝達するため，広域統合モデルを作成する。

2) 施工ステップモデル

施工時の現道切り回しや沿道施設の出入口との取り合いを確認するため、また関係機関協議にて施工計画をスムーズに伝達するため、施工ステップモデルを作成する。

(2) BIM/CIMモデル作成範囲

小禄道路の内、国道331号一般部上空に路線が計画されている沖縄県那覇市瀬長〜同県豊見城市名嘉地（区間長約1.1km）を対象とする（図-2）。



図-2 BIM/CIM活用範囲

(3) BIM/CIMモデル作成対象

BIM/CIMモデルの作成する対象物は、表-1および図-3に示す通りとする。

表-1 BIM/CIMモデル作成対象

統合モデルの構造	備考
線形	道路中心線
地形	国土地理院・基盤地図情報(5mメッシュ)
オルソ画像	航空写真
構造物	橋梁上部構造、下部構造、基礎構造
仮設物	ベント、重機(クレーン等)
周辺構造物	周辺の家屋、国道331号一般部他



図-3 BIM/CIMモデル作成対象

(4) 構造物の詳細度

BIM/CIMモデルにおける設計対象構造物（橋梁）の詳細度は、広域統合モデルおよび施工ステップモデルともに詳細度300とした。表-2のとおり。

表-2 橋梁構造物における詳細度

詳細度	共通定義	工種別の定義	
		構造物(橋梁)のモデル化	サンプル
300 鋼橋上部工構造物	付属物等の細部構造、接続部構造を除き、対象の外形状を正確に表現したモデル。	主構造の形状が正確なモデル(橋梁)計算結果を基に主構造をモデル化する。主構造は鋼板桁であれば床版、主桁、横桁、横構、対傾構を指す。	
300 RC下部工構造物		主構造の形状が正確なモデル 下部工は外形形状及び配置を正確にモデル化。橋台(下部工)であれば、壁、底版、翼壁、パラペット、基礎(杭)を指す。(踏掛板を含む) 橋脚(下部工)であれば、柱、底版、はり、基礎(杭)を指す。 鉄筋についてはモデル化しない。	

4. BIM/CIM活用内容

橋梁計画に際し、警察、交差道路管理者である豊見城市、沿道の商業施設、地元自治会等、多くの関係者と議論を重ね合意形成する必要がある。関係者の多くは、土木専門知識を有さない一般の方であり、専門的な図面等では橋梁計画を理解するのに時間を要すこと、更には、誤解が生じることが懸念される。そこで、BIM/CIMによる統合モデルを作成し、視覚的に橋梁計画を理解してもらうことを試みることにした（図-4）。

また合せて、事業者や設計コンサルタントにおいても、橋梁計画の妥当性確認にBIM/CIMモデルを活用した。

(1) 広域統合モデルの作成

モデル利用の主目的は関係者協議であり、横断歩道や停止線等の交差点形状と橋脚位置の取り合いについては、特に留意し精度よくモデル化した（図-5）。また、協議時によりスムーズに橋梁計画の理解を得るため、事業計画の全体概要が分かるアニメーションも作成した。

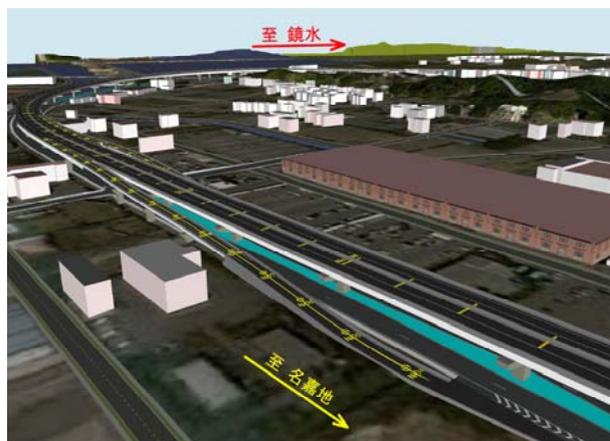


図-4 広域統合モデル（鳥瞰）



図-5 広域統合モデル（交差点部）

供用中である既存構造物を実構造物からモデル化することにより、より現実性の高いBIM/CIMモデルを可能とし、関係者協議への活用、施工段階へのスムーズな引継ぎに努めた。

(2) 施工ステップモデルの作成

小緑道路は、供用中の国道331号一般部上空に架設される橋梁であり、施工段階において現道利用者や沿道の商業施設、周辺の住民に与える影響が大きい。前述の通り、国道331号一般部はその位置付けや利用状況より、通行止めや大規模な規制は現実的ではない。施工計画の立案に際しては、現道切り回し等を行うことで極力4車線を確保するものとし、交通規制は限定的なものに留める計画としている。施工計画についても、関係者との合意形成は必須であり、施工状況を正確かつ明瞭に伝達する手法としてBIM/CIMモデルを活用した。

また合わせて、事業者や設計コンサルタントにおいても、施工計画の妥当性確認にBIM/CIMモデルを活用した。

(3) 施工ステップモデルの事例

図では、施工ステップモデルの一例として、基礎工および下部工施工ステップを紹介する。

ステップ1は、現道4車線を外側に切り回し、中央部分を施工ヤードとして張出式橋脚の基礎・柱施工を行っている状況を示す（図-6）。ステップ2は、現道4車線を内側に切り回し、両外側部分を施工ヤードとして門型橋脚の基礎・柱施工を行っている状況を示す（図-7）。

また、モデル内のオレンジ色帯部分は、用地境界を示しており、施工時における資機材配置が用地内に収まっていることを視覚的に検証・説明できるように工夫している。

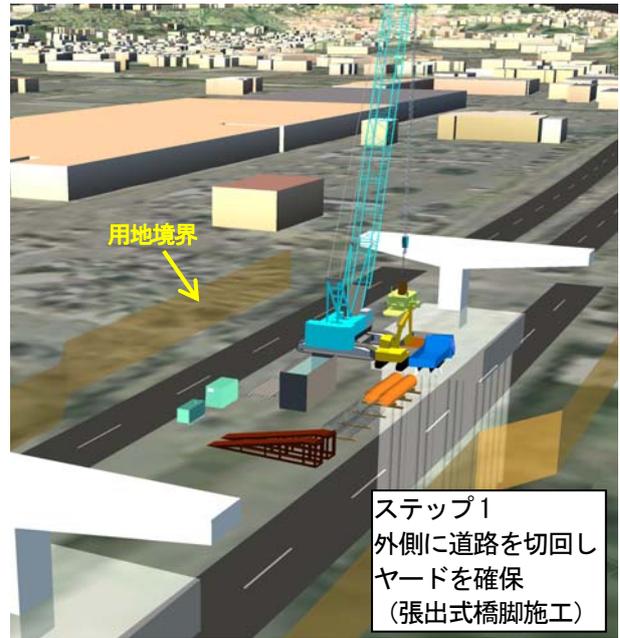


図-6 施工ステップモデル（ステップ1）

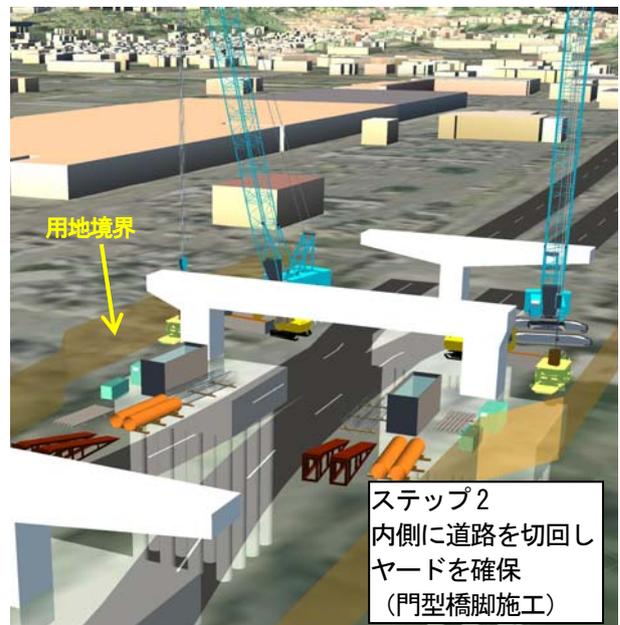


図-7 施工ステップモデル（ステップ2）

5. BIM/CIM活用による効果と今後の展望

本設計業務における効果として、まずはBIM/CIMモデルを活用することで受発注者間協議においてスムーズに共通認識を得ることができた。今後行われる関係者協議においても、BIM/CIM活用の効果が大きいと期待できる。

また、施工段階においても、より事業がスムーズに進むよう以下事項についても取り組んだ内容・今後取り組みたいと考えていることについて紹介する。

(1) AR (Augmented Reality) を用いた関係機関協議

現場映像と仮想映像を融合させたアニメーション等を用いることで、関係者により現実的な事業計画を伝達することを試みた。

(2) 交通シミュレーションの反映

施工時の渋滞予測を交通シミュレーションにて実施し、その結果をCIMを用いたアニメーションで表現することにより、施工時状況について視覚的に第三者に伝達することが期待される。また、切り回し道路から交差道路への右折行為をドライバー視点のアニメーションを作成することで、迂回道路の安全性検証に利用できる。

(3) 4D施工モデル

本路線は早期供用を目指し、短期に集中し工事を発注する計画であり、多くの工事が錯綜することが懸念される。路線全体の施工ステップモデルに時間軸を持たせた4D施工モデルを作成し、工事間の錯綜を未然に把握し対策を講じることで、スムーズな事業推進に繋げる。

(4) 埋設管情報のBIM/CIMモデル反映

施工中の埋設物（占用物等）確認は、深さ等不確実なものが多く非常に困難である。今後は、地中の3D化も維持管理面として取り組む。

参考文献

- 1) 国土交通省：CIM導入ガイドライン（案）第5編 橋梁編。

ASRにより劣化したPC構造物の調査と対策

金田 泰明

本州四国連絡高速道路（株） しまなみ尾道管理センター 橋梁維持課
(〒722-0073 広島県尾道市向島町6904)

3径間連続複合箱桁斜張橋である生口橋のPC桁ケーブル定着部の側面において、亀甲状のひび割れや白色の析出物の発生を確認した。床版上面舗装の一部を撤去したところ、多数の橋軸方向のひび割れを確認したことから、アルカリシリカ反応(以下、ASRという)によるひび割れと推定された。長大斜張橋では、桁に生じる軸力が大きく、この卓越した橋軸方向の拘束力により、橋軸方向に方向性のあるひび割れが生じたと考えられる。劣化原因を特定するために、コアを採取し詳細調査を実施した結果、反応性骨材を使用したASRによる劣化である可能性を確認した。実施した詳細調査の結果をもとに、各種対策を実施した。

キーワード ASR、反応性骨材、遅延膨張性、プレストレスコンクリート、斜張橋

1. はじめに¹⁾

わが国では、1980年代に近畿、中国および北陸の各地域にて、主として安山岩砕石を使用したコンクリート構造物でASRによる劣化が確認された。わが国のASRに対する対策は、1986年の建設省通達「アルカリ骨材反応暫定対策について」およびJIS A 5308「レディーミクストコンクリート」より開始され、その後は、新設構造物でのASRの発生は大きく減少している。しかしながら、これら抑制対策の導入後もASRの発生は完全になくなったわけではない。現在の知見ではASRによる劣化は、限られた骨材を使用した限られた地域の構造物に発生するというものではなく、全国の幅広い地域で発生し、反応性骨材も火山岩系、変成岩系および堆積岩系など多種多様なものが存在することがわかっている。

生口橋は1991年に供用を開始しており、ASR抑制対策



写真-1 生口橋

の導入後に建設された橋梁であるが、2010年の点検でPC桁側面にASRによる劣化と考えられる亀甲状のひび割れと、それに伴う白色の析出物を確認している。

本論では、ASRによる劣化を念頭に詳細調査を実施し、劣化機構の推定を行うとともに劣化原因について考察を行う。また、補修工法の選定についてその考え方を示す。

2. 劣化状況と補修履歴

(1) 劣化状況

2010年に、PC桁側面および下面において、亀甲状のひび割れと白色の析出物を確認した(写真-2)。床版上面からの水分の浸入が疑われたため、2017年に現況調査としてケーブル定着部の舗装の一部を撤去したところ、床版コンクリート上面において橋軸方向に方向性のあるひび割れを多数確認した(写真-3)。ここで、写真のひび割れ部分は、補修までの期間に雨水の浸入を防ぐため、エポキシ樹脂パテで簡易的に止水処理を施したものである。確認されたひび割れ幅は、最大で0.85mmであった。

ASRが発生したコンクリート構造物は、軸方向鋼材やPC鋼材などにより膨張が拘束されている場合、拘束方向に直行する方向のひび割れは発生しにくい。そのため、軸方向鋼材やPC鋼材に沿った方向性のあるひび割れが発生する¹⁾。長大斜張橋では、桁に生じる軸力が大きくなることが知られており²⁾、この卓越した橋軸方向の拘束力により、橋軸方向に方向性のあるひび割れが生じたと考えられた。



写真-2 PC桁側面の変状



写真-3 PC桁上面の変状

(2) 補修履歴

生口橋のPC桁における主な補修の履歴と経緯を下記に示す(図-1)。

a) はく落防止対策(2005年および2006年)

2005年11月の巡回点検において、PC桁側面にある床版横締め鋼棒の跡埋めモルタルに浮きを確認した。これを受け緊急的に、モルタル片はく落による第三者被害を防止する目的で、断面修復およびはく落防止対策(表-1)を施工した。施工範囲は、国道や県道上であるP2-2P間およびP3-3P間、公園や農道上である3P-P3間およびP4-4P間であった。

b) 床版防水(2009年)

予防保全の観点より、床版上面からの水分の浸入を防

止する目的で、車道にシート系、原自歩道に塗膜系の防水工を施工した(表-2)。この際、床版上面の端部であるケーブル定着部側の防水は施工されていない。

c) コンクリート表面含浸(2018年)

2010年4月に上下線全てのケーブル定着部保護コンクリートにおいて、ひび割れ幅0.2mm以下の亀甲状のひび割れを確認した。この後、2018年にひび割れの進行を確認したため、上面および側面からの水分の浸入を防止する目的で、エポキシ樹脂系注入材によるひび割れ注入に加え、シラン・シロキサン系含浸材によるコンクリート表面含浸を施工した。この際、補修したひび割れ幅は、最大で1.0mmであった。

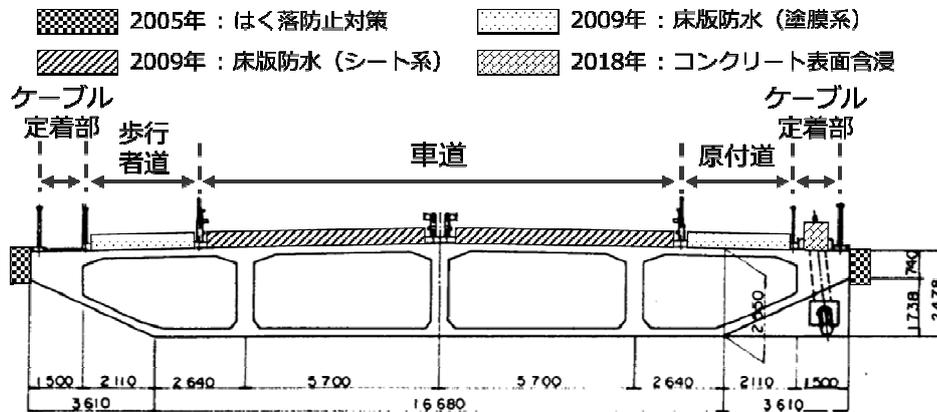


図-1 補修履歴と施工位置(PC桁断面図)

表-1 はく落防止対策の仕様

工程	はく落防止対策	kg/m ²
1層	エポキシ樹脂プライマー	0.15
2層	エポキシ樹脂パテ	0.5
3層	連続繊維シート	1.1
4層	エポキシ樹脂パテ	0.5
5層	柔軟型エポキシ樹脂塗料中塗	0.35
6層	柔軟型ふっ素樹脂塗料上塗	0.12

※表中のkg/m²は標準使用量

表-2 床版防水の仕様(車道部)

工程	床版防水(シート系)	L/m ²
1層	ゴムアスファルト系溶液型プライマー	0.4
2層	常温粘着型シート系防水層	—

※表中のL/m²は標準使用量

表-3 床版防水の仕様(原自歩道)

工程	床版防水(塗膜系)	kg/m ²
1層	ゴムアスファルト系溶液型プライマー	0.4
2層	加熱塗布系アスファルト防水材	1.2
3層	珪砂	0.7

※表中のkg/m²は標準使用量

3. 骨材調査

生口橋は、粗骨材に広島県蒲刈産の採石を使用しており岩種は変成岩である。この変成岩は、ASR原因物質である微小な石英が含まれており、遅延膨張性のASRが生じることが知られている。遅延膨張性のASRとは、玉随、隠微晶質または微晶質な石英を含む骨材に生じ、一般的なASRに比べ反応が非常にゆっくりと進行するASRである³⁾。これらの反応性鉱物の特徴として、アルカリシリカ反応性を判定する現行の化学法やモルタルバー法によって適切に評価できないことが問題となっている¹⁾。

生口橋は、建設時にアルカリシリカ反応性を確認する試験として化学法を用いており、試験結果は判定基準値に近い値であったものの「無害」の判定であった(図-2)。

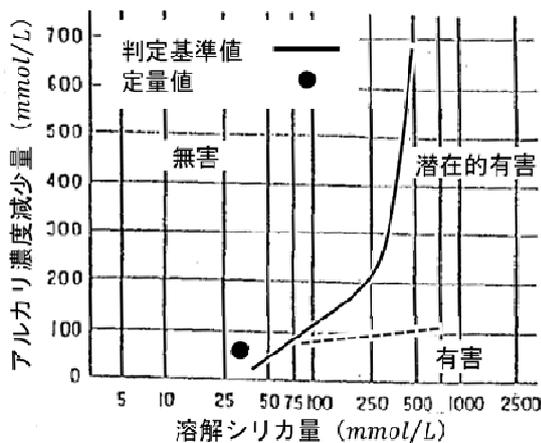


図-2 建設時の化学法による試験結果

4. 詳細調査

劣化原因の特定および今後の劣化進行程度の把握を目的に、コアの採取による詳細調査を実施した。コアの採取位置は、2. (1)の現況調査で確認された床版上面のひび割れの近傍と、比較用にPC箱桁内面の横桁の2箇所とした。以下にその調査結果を示す。

(1) 調査項目

a) コア観察

コア表面の外観目視調査から、ASR特有の劣化である粗骨材の割れ、粗骨材外縁部の反応リムおよび白色の析出物を確認した(写真4,5)。

b) 走査型電子顕微鏡(SEM)およびエネルギー分散型X線分析(EDX)

SEMによる観察により、粗骨材外縁部に生じた白色の析出物に、乾燥収縮したアルカリシリカゲルの典型的なひび割れを確認した(写真6)。また、白色の析出物をEDX定性分析した結果、アルカリシリカゲルの元素組成に類似した成分を確認した(表-5)。以上の事実から、骨材上に析出した白色の析出物はアルカリシリカゲル(アルカリ-カルシウム-シリカ型³⁾)と断定された(図-3)。

c) 岩種判定

粗骨材の主な岩種は、変成岩の一種である泥質ホルンフェルスであり、構成鉱物として微晶質石英、石英、斜長石、黒雲母を確認した。微晶質石英が含まれることか

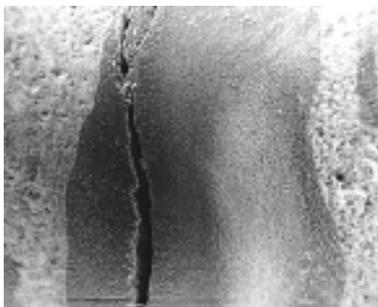


写真-4 粗骨材の割れ

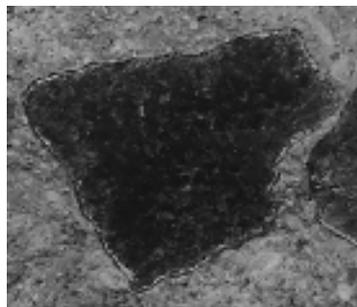


写真-5 反応リム

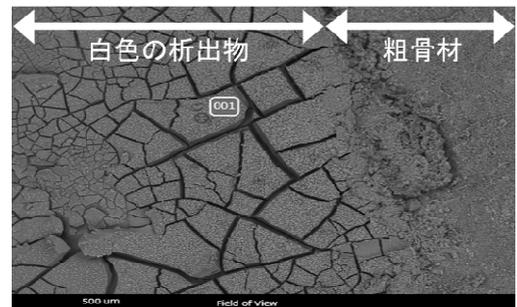


写真-6 白色の析出物 (SEMによる観察)

表-5 白色の析出物の主成分表

主要成分 (%)	元素	試料-1	試料-2
	SiO ₂	42.91	60.8
	Na ₂ O	6.85	5.52
	K ₂ O	13.18	9.19
	CaO	29.93	21.51
計		92.87	97.02

	①	②	③
典型的形態			
主要成分範囲 (wt%)	SiO ₂ : 60~90 Na ₂ O: 5~30 K ₂ O: 5~30 CaO: 5以下	SiO ₂ : 35~75 Na ₂ O: 3~15 K ₂ O: 3~15 CaO: 10~55	SiO ₂ : 45~75 Na ₂ O: 10以下 K ₂ O: 10~25 CaO: 10~30
組成タイプ	アルカリ-シリカ型	アルカリ-カルシウム-シリカ型	アルカリ-カルシウム-シリカ型 (K濃度大)
骨材の特徴	火山岩系骨材		堆積岩系骨材

図-3 アルカリシリカゲルの組成タイプ³⁾

ら、遅延膨張性のASRを生じる可能性があることを確認した。

d) 水溶性アルカリ量分析 (総プロ法)

コンクリート中の水溶性アルカリ量は、2002年の国交省通達によるアルカリ総量規制値(3.00kg/m³)に近い値の2.90kg/m³であった。

e) 塩化物イオン濃度測定

ASRによる劣化は、日射および雨掛かり、あるいは海水、凍結防止剤(NaCl)等の影響を受けやすい箇所ですぐ進行する⁴⁾。生口橋は冬期に多量の凍結防止剤を散布していることから、ASRへの影響を確認するために塩化物イオン濃度を測定した。測定の結果、コンクリート表面から約1cmの箇所ですぐ多い0.48kg/m³の濃度を確認した(図-4)。この結果は、建設時に適用した1986年のJIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の塩化物総量規制値0.30kg/m³を上回ることから、塩化物イオンが供給される環境であることを示す。

また、該当コンクリートの腐食発生限界塩化物イオン濃度(1.68kg/m³)以下であったことから、塩害による劣化の可能性はないと判断した。腐食発生限界塩化物イオン濃度C_{lim}の計算は、早強ポルドラントセメントの場合、C_{lim}=2.2(W/C)+2.6より求められる⁴⁾(水セメント比は0.42)。

f) 促進膨張試験 (デンマーク法)

促進膨張試験により得られた残存膨張量の結果を図-5に示す。通常、デンマーク法による促進膨張試験では、試験材齢13週での膨張量で判定を行うが、遅延膨張性のASRが生じる可能性があることから、長期の挙動を確認するために反応期間を長く取り61週まで測定を行った。

試験結果は、膨張率が0.1%未満と、膨張性なしの領域ではあるものの長期的な骨材の膨張を確認した。

g) 圧縮強度、静弾性試験

採取したコアによる圧縮強度は54.1N/mm²と設計強度40.0N/mm²を満足する結果となったが、静弾性係数は23.1kN/mm²と設計値30.4kN/mm²に比べて低い結果となった。

通常、ASRの進行に伴うひび割れの進展によりコンクリートの圧縮強度および弾性係数は低下し、特に圧縮強度と比較して弾性係数の低下が著しいことが知られてい

る⁴⁾。上記の試験結果から、圧縮強度の低下は確認されないものの、弾性係数が低下していることから、ASRによる劣化の可能性が考えられた。

(2) 詳細調査のまとめ

上記の調査結果から、ASR特有の劣化である骨材の割れと反応リムに加え、骨材上に見られた白色の析出物はアルカリシリカゲルと断定されること、粗骨材の構成鉱物としてASR原因物質である微晶質石英が含まれることから、PC桁側面の亀甲状のひび割れはASRによる劣化と判断した。また、促進膨張試験による残存膨張量は小さいものの、骨材に遅延膨張性がある微晶質石英を含んでいたことから、今後もASRによる長期的な劣化を否定できない結果となった。

劣化が確認された箇所は、水分とアルカリ(凍結防止剤等)が供給される環境であり、ひび割れからアルカリシリカゲルの滲出は見られるが、鋼材の腐食や錆汁は確認されなかったことから、ASRの劣化過程は進展期³⁾と推定された。

5. 補修

(1) 基本方針⁴⁾

ASRによる劣化を受けた構造物の補修・対策の基本は、外部から構造物へ水分が供給されないように、水処理(止水、排水処理)や表面処理(被覆、含浸)、ひび割れ注入を行うことである。

表面処理の際には、コンクリート外部からの浸入を防止するだけでなく、コンクリート内部から外部へ水分の逸散が期待される工法・材料の使用を検討することが重要である。補修にあたっては今後予想される膨張量を踏まえ、コンクリートの残存膨張性が認められる場合、ひび割れ追従性の良い補修材料で表面処理を実施するのが一般的である。

生口橋のPC桁では、ASRの劣化過程が進展期³⁾であることから、ケーブル定着部の床版コンクリート(上面、側面)に、ひび割れ注入および表面処理(被覆、含浸)

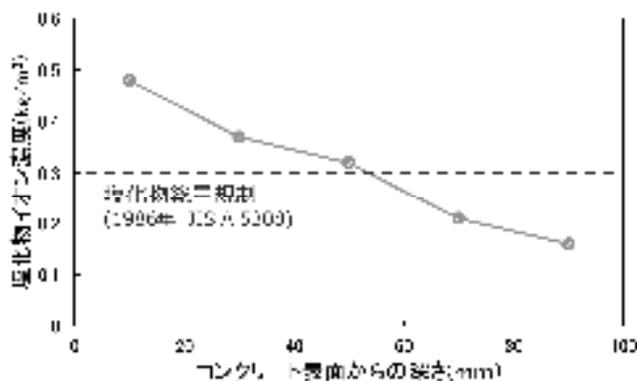


図-4 塩化物イオン濃度

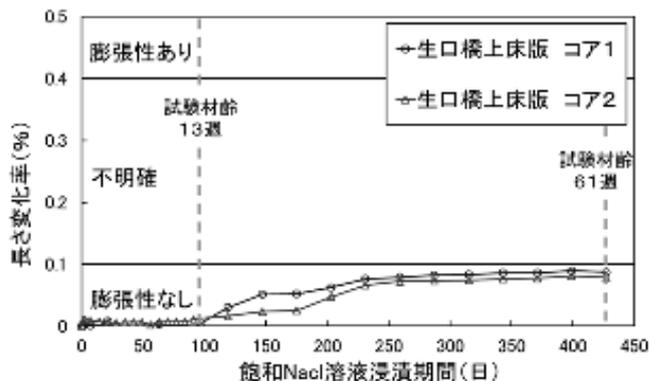


図-5 促進膨張試験の結果 (デンマーク法)

を実施した(写真-7, 8, 9)。

ひび割れ注入は、防水の観点からひび割れ幅0.2mm以上のひび割れを対象とし、ひび割れ注入材としてエポキシ樹脂系注入材を低圧注入により施工した。表面処理の仕様を表-6に示す。表面処理は桁上面と側面で材料を分け、水分の供給が多い桁上面では遮水性を期待する表面被覆材を施工した。桁上面に比べ水分の供給が少ない桁側面には桁内部の水分の発散と、桁側面の表面に撥水性を期待する表面含浸材を施工した。

(2) コンクリート表面のひび割れ

補修に先立ち、補修箇所であるケーブル定着部の床版上面、側面および下面のひび割れ調査を実施した。

a) ひび割れ調査結果

2017年の現況調査で、床版上面の一部で確認された橋軸方向に方向性のあるひび割れが全長に渡って発生していた(表-7, 図-6)。ひび割れは、生口島側のPC桁に多く発生しており、因島側のPC桁ではほとんど確認され

なかった。因島側と生口島側のPC桁は、コンクリートの使用材料が異なっており、この影響により劣化の程度に差が生じたと考えられた。

b) はく落防止対策部のひび割れ

PC桁側面の既設のはく落防止対策部で、塗膜にひび割れ状の汚れを確認した(写真-10)。はく落防止対策部を撤去しコンクリート表面の状況を確認したところ、撤去前に確認された塗膜の汚れと撤去後に確認されたひび割れの位置が一致していることがわかった。また、撤去した一部の箇所ではひび割れからの漏水を確認した(写真-11)。

表面被覆材が、コンクリートの部材全面を覆うことができていない場合には、かえって部材の内部に水分を閉じこめ蓄積させるおそれがあることが知られている⁴⁾。このことから、過去の補修で床版防水が未施工であったケーブル定着部の床版上面から浸入した水分が、はく落防止対策の表面被覆により、コンクリート内部に滞留し、ASRによる劣化を促進させた可能性が考えられた。



写真-7 ひび割れ注入 (エポキシ樹脂系)



写真-8 表面被覆 (アクリルゴム系)

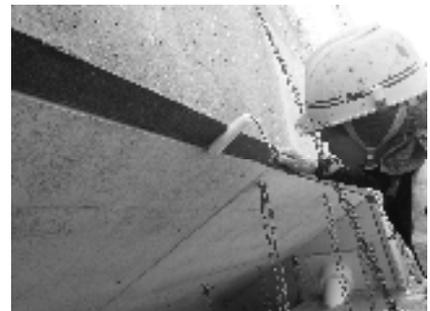


写真-9 表面含浸 (シラン・シロキサン系)

表-6 表面処理の処理

工程	表面被覆材	表面含浸材
1層	エポキシ樹脂プライマー (一)	シラン・シロキサン系含浸材 (0.2kg/m ²)
2層	アクリルゴム系塗料中塗 (791μm)	/
3層		
4層		
5層	アクリルゴム系塗料上塗 (86μm)	
6層		

※表中のμmは乾燥塗膜、kg/m²は標準使用量

表-7 ひび割れ調査の結果

	因島側		生口島側	
	上り線	下り線	上り線	下り線
最大ひび割れ幅 (mm)	0.5	0.7	0.6	1.0
ひび割れ総延長 (m) ※2	18.30	15.80	276.40	247.79

※1 表は、ケーブル定着部の床版上面・側面・下面の全てを含む

※2 0.2mm以上のひび割れ

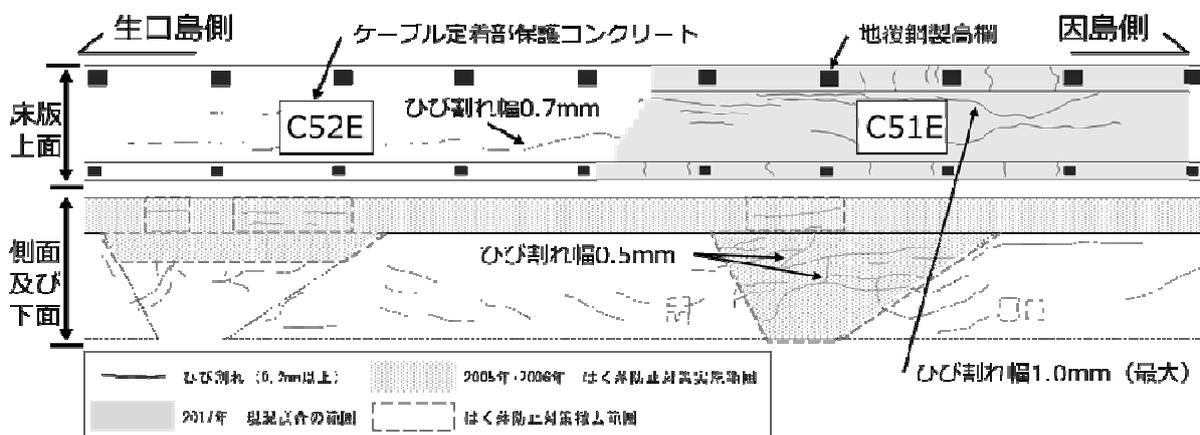


図-6 生口島側PC桁のひび割れマップ (一部抜粋)



写真-10 はく落防止対策部の塗膜の汚れ



写真-11 はく落防止対策撤去後のひび割れ

6. まとめ

生口橋のPC桁に生じた亀甲状のひび割れと白色の析出物について、劣化機構の特定を目的にコア採取による詳細調査を実施した。

調査の結果、生口橋のPC桁に生じた変状は、ASRによる劣化と判断した。その理由として、ASR特有の劣化である骨材の割れと反応リムが確認されたこと、骨材上に見られた白色の析出物はアルカリシリカゲルと断定されること、粗骨材の構成鉱物としてASR原因物質である微晶質石英が含まれること、の3つが挙げられる。また、ASRの劣化過程は進展期⁴⁾と判断した。

以下に、詳細調査の結果から考察した劣化原因と補修方針について示す。

(1) 劣化原因

ASRの劣化要因とその浸入経路は、以下が考えられる。

- 反応性骨材は、岩種判定より、反応性鉱物である微晶質石英を確認したことから、建設時に反応性骨材を使用している。この微晶質石英は、遅延膨張性のASRを生じさせることが知られている。
- アルカリは、建設時にアルカリ量の多い早強セメントを使用していることに加え、冬期に凍結防止剤を散布していることから、供用期間を通してASRに必要なアルカリが供給されている。
- 水分は、建設時に床版防水を施工していなかったことに加え、2009年に床版防水を施工した際に一部で施工していない箇所があり、床版全面を覆ってなかったことから、供用期間を通してASRに必要な水分が供給されている。加えて、床版上面から浸入した水分が、はく落防止対策の表面被覆によりコンクリート内部に滞留し、劣化を促進させた可能性がある。

(2) 補修方針

補修工法の選定は、以下の方針により実施した。

- 外部からの水分の浸入を防止する目的で、ひび割れ幅0.2mm以上のひび割れを対象にひび割れ注入（エ

ポキシ樹脂系）を施工した。

- 水分の供給が多い桁上面では、床版からの水分の浸入を防止する目的で、遮水性に期待する表面被覆材を施工した。その際、今後のコンクリートの残存膨張性を考慮し、ひび割れ追従性のある補修材料（アクリルゴム系）を選定した。
- 桁上面に比べ水分の供給が少ない桁側面には、桁内部の水分の発散を期待する撥水性の表面含浸材（シラン・シロキササン系）を施工した。

7. おわりに

ASRによる劣化では、生口橋のように、建設時のアルカリシリカ反応性試験で「無害」と判定されていながら、現在の知見を踏まえればASRによる劣化の可能性を否定できない結果となることがある。

現在の知見ではASRによる膨張の進行は、骨材中の反応性鉱物の種類や量、部材の配筋状況、環境条件（温度や水分の供給状況）等種々の要因が複雑に影響しあい、これを定量的に予測することは困難である⁴⁾。加えて、補修に関してもASRによる劣化を確実に抑制できるような補修技術は確立されていない⁴⁾。補修を検討する際には、複合劣化の可能性を十分に考慮した上で、劣化要因および劣化機構を特定することが重要である。

今後、今回実施した補修について期待された効果が得られているか、継続的に構造物の状態を把握する予定である。

参考文献

- 公益社団法人日本コンクリート学会：コンクリート診断技術19, 2019.2
- 本州四国連絡橋公団：多々羅大橋の技術, 2009.5
- 社団法人日本コンクリート工学会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書, 2008.9
- 公益社団法人土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2018.10

フレックス工期を活用した工事の円滑な施工 ～名2環PC床版工事～

兼松俊成¹・古田智菜実²

¹⁻²愛知県道事務所 工務課 (〒464-0066 名古屋市千種区池下町2-62)

名古屋環状2号線の未開通区間は事業終盤の最盛期を迎えている。令和元年度は事業工程短縮が期待されるPC床版工事が全面展開されるが、床版製作工場・技術者が逼迫し、事業進捗が遅延する可能性が生じたため、工事の発注方針を大幅に転換する必要が生じた。「着実な事業推進」と「工事の良好な働き方」を両立するための“フレックス工期”の活用について、その取組みを報告する。

キーワード：働き方改革、フレックス工期、円滑な施工、事業最盛期

1. はじめに

建設業に限らず、あらゆる産業分野において“働き方の改善”は喫緊の課題である。建設業は他の産業に比して「時間外労働・休日出勤」が多いとともに、「就業者数の減少・高齢化」が進んでいる状況であり、“人が足りないから残業する ⇔ 残業が多いから就業しない”という負の連鎖が継続している(図-1, 図-2)。

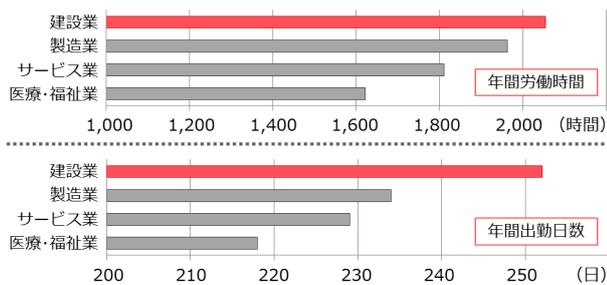


図-1 産業別年間労働時間・出勤日数(平成29年度)¹⁾

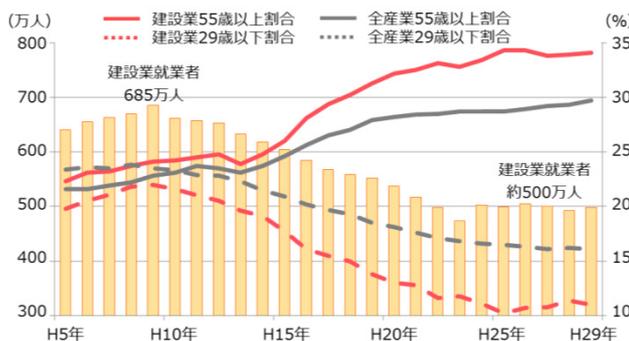


図-2 建設業における年齢別就業者の推移²⁾

建設業は社会資本整備の担い手であるとともに、地域防災における重要なパートナーであるが、人手不足が進む状況は、公共事業の各シーンにおいて様々な問題を生じさせている。受注企業の減少による地方部工事の入札不調、1社入札、資機材不足などは顕著な例ではないだろうか。また、工事元請け企業の職員不足により、照査・材料調達・現場確認・安全管理等を1人の職員が行うマルチワーク化は時間外労働・休日出勤を助長する事例である。

このような状況を改善するため、国土交通省では「建設業働き方改革加速化プログラム(平成30年3月)」を策定し、建設業における働き方改革を一段と強化して進めている。加速化プログラムでは「長時間労働の是正、給与・社会保険、生産性向上」の3分野を重点課題として位置づけるとともに、個々の対策として週休2日の確保による長時間労働の是正、ICT導入による生産性向上等を進めている。地方整備局の各事務所では、工事発注段階においては週休2日の適正工期での発注を行うとともに、工事実施段階においても書類削減による負担軽減等を実施しているところである。

本件は、愛知県道事務所が事業を進める名古屋環状2号線のプレキャストPC床版工事(以下、「PC床版」と称する)を事例に、工事最盛期における「着実な事業推進」と「工事の良好な働き方」を両立させるための手法として、「フレックス工期」を活用した工事発注・実施について検討したものである。

また、実施後の結果および工事工期のあり方について考察したものである。

2. 名古屋環状2号線における工事特性

(1) 事業概要

名古屋環状2号線（以下、「名2環」と称する）は名古屋市周辺の10km圏内に位置する延長約66kmの環状道路である。名古屋市を中心として、放射状に延びる幹線道路や名古屋高速道路と主要地点で連絡しており、都市部に集中する交通の迂回・分散による交通混雑の緩和や、総取扱貨物量日本一の名古屋港からの円滑な物流交通を実現し、社会経済活動の発展に寄与するものと期待されている。自動車専用道路（専用部）は延長約54kmが開通しており、未開通区間である名古屋西JCT～飛島JCT（仮称）間の延長約12kmについては、令和2年度内の開通を目指して事業を進めている（図-3）。



図-3 名2環の路線概要

未開通区間である約12kmは、平成25年度より橋梁下部工事に着手し、令和元年現在は橋梁上部工（鋼橋橋体工事）および床版工事の最盛期を迎えている。事業箇所沿線は市街化が進んでいる箇所であり、名古屋市内は住宅地や商業施設、沿岸部の飛島村は日本有数の工業地帯であり、並行する国道302号（約17,000台/日）の交通を抱えながら、限られた作業ヤードで施工を行う必要がある（図-4）。

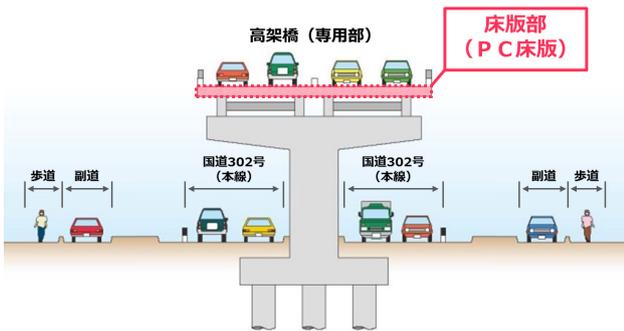


図-4 名2環の代表構造（完成時）

(2) PC床版工事の特性

橋梁における床版部の施工方法は主に3種類存在し、最も施工事例が多いのはRC床版である。RC床版は施工箇所に足場を設置した後、型枠や鉄筋を搬入・加工し、フレッシュコンクリートを打設する工法である。次いで事例が多いのはPC床版や鋼床版であり、名2環未開通区間では、ほぼ全ての橋梁でPC床版を採用している。PC床版は、床版の大部分を工場で製作し、現場搬入した床版をクレーンで架設する工法である（図-5）。



図-5 PC床版の施工方法

PC床版は床版本体を工場で製作するため、施工進捗が天候に左右されることが少なく、また均一な品質を有している。コストはRC床版より高価となるものの、現場にて足場・型枠支保工の設置がほとんど必要なく、クレーンによる架設も数週間ですべて完了するため、都市内の大規模な交通規制が伴う工事に於いては、工程・安全面等に優れている。また、RC床版は橋体工事の完了後からの施工開始となるが、PC床版は橋体の施工途中から並行して床版製作が行えるため、工程をラップさせることにより全体事業工程の短縮が可能である（図-6）。

工事段階	⇒ ⇒ ⇒ 橋体工事 ⇒ ⇒ ⇒ 床版工事 ⇒ ⇒ ⇒
鋼橋橋体工事	橋体製作 → 現地架設
RC床版工事	現地施工
並行作業可能	
鋼橋橋体工事	橋体製作 → 現地架設
PC床版工事	床版製作 → 現地施工
工程短縮	

図-6 PC床版の施工工程イメージ

愛知国道事務所では、平成29年度より名2環のPC床版工事を開始し、PC床版の特性を生かして順次施工を進めてきたところであるが、事業終盤の最盛期を迎えるにあたり、“最盛期ならではの課題”に直面し、打開策を見いだすべく検討を重ねてきた。

3. 事業終盤の“最盛期”における課題

(1) PC床版工事における入札状況

平成29年度より開始したPC床版工事の発注にあたっては、週休2日相当の期間を加味するとともに、不明確であるPC床版の製作期間については関係業団体への意見聴取等を踏まえて全体工期を設定してきた。平成29年度から平成30年度上半期の工事について順調に工事発注・契約を進めてきたものの、平成30年度下半期に差し掛かり工事入札者数が減少傾向となった(図-7)。



図-7 工事入札者数の変化

(2) PC床版工事における情勢変化

工事の入札者数が減少した要因を分析すべく、工事受注者・関係業団体から意見聴取を行った結果、主に以下の情勢変化が確認された。

- ① 名2環のPC床版工事のうち、NEXCO施工区間工事が平成30年6月に契約となり需要が急増した。
- ② 全国的な橋梁老朽化の架け替え工事に伴い、PC床版製作の需要が増大している。
- ③ PC床版型枠の製作企業が全国的に少なく、需要対応に時間を要する。
- ④ 東海環状自動車道をはじめとする橋梁工事が先行施工されており、先行工事の工期延期等により元請け技術者が不足している。

意見聴取より浮かび上がった個々の課題について考察した結果、各事業・各工事の需要重複が根本原因であると分かった(図-8)。工事発注にあたっては、個々工事について最適な時期・工期を見定める必要があるが、他工事との競合状況などについては、概ねの想定が出来ても、時々刻々と変化する情勢を網羅的に把握することは難しく、異なる発注者間で調整を図ることも困難である。

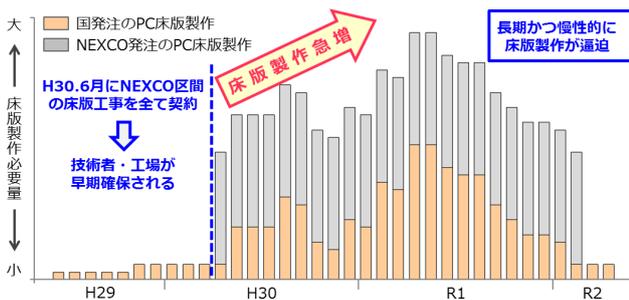


図-8 PC床版工事の情勢変化イメージ

(3) 事業を着実に進める上での課題

PC床版製作および技術者不足における課題解決において、まず重要であることは“着実な事業推進”を行うことと位置づけた。国民の負託に応える発注者として、最も懸念すべき事項は事業進捗に遅れが生じることである。床版製作・技術者不足が事由となり、工事の入札参加者が不在となれば事業進捗に大幅な遅れが生じる事となる。また、工事契約は成されるものの入札参加者が少なくなれば、経済性と品質を考慮した“競争性”において疑念が残る。しかし、名2環の事業も開通を2年後に控えた事業終盤であるが故に、適当な時期までPC床版工事の発注を見送り、床版需要のピークをずらすことも出来ない状況である。また、橋梁老朽化に伴う架け替え工事も床版需要の一つであるため、床版製作の逼迫が長期化する可能性は高い。

事業全体の軌道修正や抜本的対策が非常に困難であることから、現状を許容した上で、床版製作逼迫と技術者不足の双方に追従・対応出来る工事へと、発注方針を転換することとした。その上で、工事入札者が情勢変化に柔軟に対応出来る工事とするために、PC床版工事の工期設定について検討・改善することとした。

4. PC床版工事における発注方針の転換

(1) 余裕のある床版製作期間への見直し

PC床版の製作期間については、関係業団体への意見聴取等を加味して設定していたが、需要増大の情勢を鑑み、平成31年1月契約の工事から製作期間を長めに見直すこととした。しかし、床版製作に関わる各企業の生産能力・工場の稼働状況については想定が困難であるとともに、協力企業となる型枠製作企業の逼迫状況も不明確である。関連業団体から一定の情報は得られるものの、今後の更なる情勢悪化等の不確定要素を考慮する必要があったため、床版製作期間を従前の1.5倍(3.0ヶ月⇒4.5ヶ月)に大幅に見直して発注を行うこととした。

また、床版製作期間を長くして工期設定する一方、事業進捗に影響を与えることは出来ない状況である。工事受注者の施工期間が延びることについては、発注者側の公告手続きの前倒しを行い、受注者への負担と事業進捗の遅延が生じないように実施した(図-9)。

契約時期	⇒⇒準備⇒⇒床版製作⇒⇒現地施工⇒⇒
(従前) ~H30.12月	準備(1.5) 床版製作(3.0ヶ月) 現地
(見直し) H31.1月~	準備(1.5) 床版製作(4.5ヶ月) 現地

前倒し発注・契約

現地着手は変更無し
⇒事業進捗遅れ無し

図-9 床版製作期間の見直し

(2) フレックス工期を活用したさらなる対策

平成31年1月契約の工事から床版製作期間の見直しを行い、実質製作期間を1.5倍にしたものの、平成31年4月以降はさらに床版製作が繁忙となることが予想された。床版製作期間をさらに見直して延長することを検討したが、単純に契約工期を延伸することは“監理技術者の専任期間”についても延伸することとなるため、技術者不足に拍車をかける恐れがある。そこで“フレックス工期”を採用して、床版製作期間のさらなる対策と技術者不足の問題に対応することとした。

フレックス工期は、実質の必要工期に加え“工事始期の余裕”および“工事終期の弾力期間”を設定した工事工期である。発注者が全体的に余裕を付加した工事工期を設定し、受注者が着手日（始期）と工期末（終期）を任意で選択出来るものである。受注者にとっては技術者・機材の効率的配置が可能となるとともに、資材や労働力確保についても社内事情を柔軟に反映した計画準備が可能となる（図-10）。

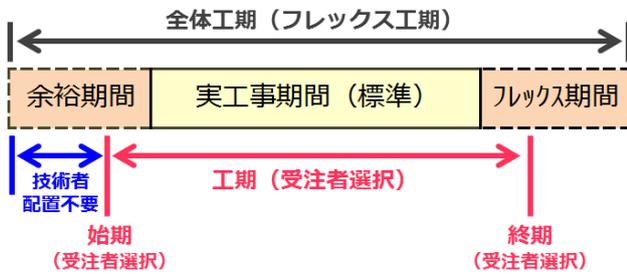


図-10 フレックス工期の概要

フレックス工期では工事始期・終期に余裕を付加することが可能であるが、名2環の事業においてはPC床版工事の後に舗装や電気設備工事が控えており、開通に向けた事業工程に余裕が無い状況である。今回の事案は主に床版製作の繁忙に焦点をあてる必要があるため、フレックス工期の採用にあたり、工事始期のみを対象として設定することとした。工事始期に概ね1.5ヶ月の余裕期間を付加することにより、従前より大幅な床版製作期間を確保することが可能となった。一方、課題が技術者不足である入札参加者に対しても、技術者配置に対しての余裕が生じるため、他工事の配置状況を加味した、入札要件の緩和措置が図られると想定した（図-11）。

契約時期	⇒ 準備 ⇒ ⇒ 床版製作 ⇒ ⇒ 現地施工 ⇒ ⇒
(従前) ~H30.12月	
(見直し) H31.1月~	
(フレックス付加) H31.4月~	

前倒し発注・契約
任意選択 技術者配置不要

図-11 フレックス工期を採用したPC床版工事工期

5. 発注方針の転換による効果

(1) 入札状況の変化

床版製作および技術者の逼迫に対して“余裕を持った工期設定”という対策を実施した結果、工事の入札状況には一定の改善が見られた。床版製作期間を見直すのみでは入札参加者数に改善は見られず、むしろ減少傾向を示した。企業側の入札については様々な要因が複合しているため、一概には判断出来ないが、製作期間の見直しのみでは対処出来ないほどの工場逼迫状況か、またはその時点において技術者の不足状況がより著しいものであったと推察される。一方、平成31年4月に契約した工事については、フレックス工期を採用することにより入札参加者数の増加が見られた。床版製作と技術者配置の双方にメリットがある対策の結果、一定の効果があったものと考えられる（図-12）。

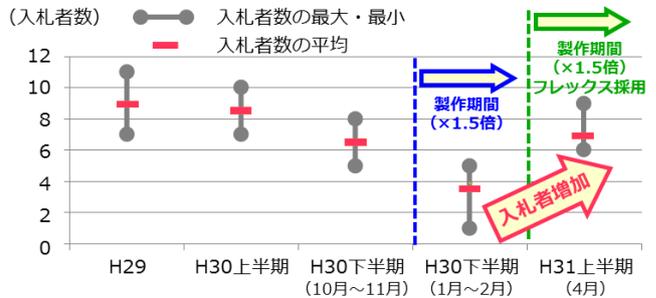


図-12 工期見直し後の工事入札者数の変化

(2) フレックス工期の活用状況

平成31年4月契約の工事より、床版製作期間の見直しに加えフレックス工期の採用を行ったが、半数以上の工事で活用されることとなった（図-13）。工事受注者への活用理由のヒアリング結果は以下のとおりである。

- ① 配置技術者が他工事に従事している（2工事）
- ② 技術者重複は無いが社員負荷を考慮（2工事）

活用理由のうち、半数は当初想定していた技術者配置に関することであったが、それ以外に社員の負荷を考慮して活用選択がなされていることが確認された。フレックス工期は“働き方改善”の対策として、受注者側のニーズを捉えていることが再確認された。

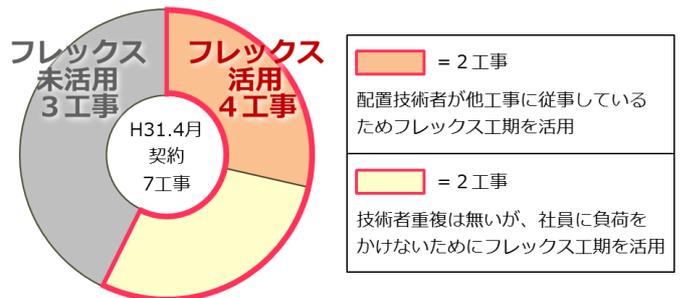


図-13 フレックス工期の活用状況

(3) 床版製作工場への影響

PC床版については工場で作成するため、取り扱い上は二次製品と位置づけられている。そのため工事元請け企業の自社工場製作を限定するものではなく、協力企業製作にて調達することも可能である。PC床版工事の受注企業の大半は、製作可能な自社工場を保有しており、多くの受注者は自社工場での製作を行っている。一方、自社工場に余裕が無い場合は製作可能な協力企業に外注して調達している事例も見られる。床版製作期間の見直しの前後で製作工場を比較した結果、他社外注の割合が減少していることが確認された(図-14)。

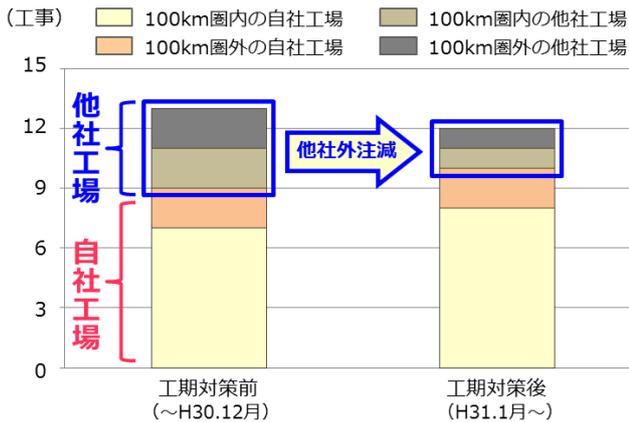


図-14 床版製作工場の状況

自社製作工場に余裕が無い場合は他社工場に外注して調達せざるを得ないが、他社に依頼する場合は外注手数料などが生じるとともに、製作を丸投げ出来ない以上、品質管理においても手間が掛かると考えられる。さらに、遠方の他社工場の場合は製品輸送費も多くかかることから、経済性や元請け受注者の手間を考慮すれば、可能であれば近隣の自社工場が最良と言える。工期対策後の方が床版製作は逼迫している状況であることから、対策後には、受注者の裁量による調整のもと、床版製作の進め方が良い方向に改善されたのではないかと考えられる。

(4) 事前調整の充実

床版製作期間の見直しは、現地施工にも影響を及ぼしている。名2環事業は並行する国道302号の交通を抱えながら施工を進める必要があるとともに、施工ヤードも狭く住居や工場も多い。床版製作期間を長くしたことにより、製作中に細かな現場条件の取得・調整が可能となり、工期見直し後に契約した工事の大半は、床版製作の段階から現場の工程調整会議に毎週参加している。

また、受注者だけでなく発注者側にもメリットが生じている。全体工期を長くすることにより、受注者からの設計質疑に対応する時間が増えるとともに、各工事共通する質疑については先行してマニュアルを取りまとめることが出来、結果として全体質疑量が減少している。

6. まとめ

今回実施した対策は“工期を伸ばし余裕を生み出す”という単純なものである。結果を見る限り、抜本的な改善が図られたとは言えないが、工事の入札不調対策としては、現状維持か回復傾向の応急措置として一定の効果があつたのではないだろうか。工事に対する各入札者の背景は様々であり、今回の対策がポイントを捉えて有効であつたかの検証は簡単ではない。しかし、対策後に契約した工事受注者からは、今後もフレックス工期を適用した工事があれば非常に良いとの声もあがっている。

今回の検討で再確認出来たことは“時間は短いよりは長い方が良い”ということである。従前の建設業であれば“短時間で多く稼ぐ”ことに重きを置かれていたが、昨今の社会情勢を鑑みると“余裕のある時間内で効率よく稼ぐ”ことにシフトする必要があるのではないだろうか。その意味で、工期確保と効率性を生み出す“フレックス工期”は建設業に有効な手法ではないかと考える。

名2環のPC床版工事については、これまでに約7割の工事発注・契約がなされた。今後契約を進める工事においても、情勢をつぶさに捉えるとともに、フレックス工期を活用して、「着実な事業推進」と「工事の良好な働き方」の両立に取り組んでいきたい。

7. おわりに

公共事業において、工事工期は働き方そのものを決定する重要な要素であると考えられる。そのため、工事発注にあたっては積算基準等に示される日当り施工量から標準工期を設定する事が重要とされる。しかし、今回のPC床版工事のように、二次製品の工場製作(材料調達)期間については、過去から積み上げられた経験則が希薄な領域であり、今後の課題と考える。

また、公共事業は本質的には計画的に仕事出来る数少ない職業領域と考えられる。医療・福祉業における緊急対応や、アパレル産業のようにトレンドに左右されることも少ない。しかし、公共事業は数多くの業種が密接に関連しているとともに、屋外での現地施工を要するため、仕事を進める上で“不測・不合”は必ず生じると言える。ならば、公共事業を進める上では、計画的な事業期間の中に、あらかじめ“不測・不合”に対処すべき余裕を組み込んで、弾力的に工事・事業を進めていくことが重要ではないかと考える。

参考文献

- 1) 「厚生労働省 毎月勤労統計調査」を元に国土交通省で算出
- 2) 「総務省統計局 労働力調査年報」を元に国土交通省で算出

日下川新規放水路における コスト縮減方策と事業進捗（中間報告）

穴山 光太・畑本 浩之

四国地方整備局 高知河川国道事務所 工務課（〒780-8023高知県高知市六泉寺町96-7）

現在、床上浸水対策特別緊急事業（日下川）では床上浸水被害を防止するため、放水路トンネルを整備中である。約5.3kmと長大な放水路トンネルであり、多大な事業費が必要となることから断面的なFEM解析を行った構造の変更及び出水の実態を踏まえた放水路呑口部の設計を行うことで事業費コストの縮減を図った。コスト縮減方策の結果と鋭意施工中である新規放水路工事における現在までの進捗状況について報告を行う。

キーワード 検討部会有限要素法解析（FEM），コスト縮減，事業進捗

1. 床上浸水対策特別緊急事業（日下川）の概要

高知県内を流れる一級河川仁淀川の河口から14.3kmの右岸に合流する日下川沿いに位置した日高村では、度重なる浸水被害が発生しており、これまでに派川日下川放水路（高知県）及び日下川放水路（国土交通省）の整備を行っている。しかし、平成26年8月に発生した台風12号により、国道の冠水や村の駅浸水など甚大な被害を受けたため、翌年「床上浸水対策特別緊急事業（日下川）」が採択され、床上浸水対策を行うこととした。また、国・高知県・日高村が連携して総合的に治水対策を推進するため平成27年3月に「日下川総合治水対策計画」を策定し、三者が連携した浸水対策を実施することとなった（図-1）。国では新たな放水路の整備を行うこととし、再度、台風12号と同等規模の洪水が発生した場合、想定される109戸の床上浸水が事業完成により解消することを目的とし、地域住民の安全で安心な生活のために一日でも早い整備を実施している。

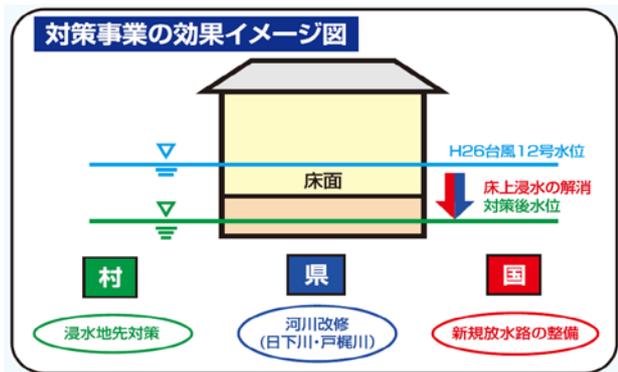


図-1 国・県・村が連携した総合治水対策計画

2. 日下川新規放水路工事の概要

通常の出水時には、日下川を流れる水は仁淀川本川に合流する。一方、洪水時に仁淀川本川の水位が上昇した場合は日下川へ逆流することを防止するため、仁淀川との合流部に整備されている神母樋門を閉鎖する必要がある。日高村の中央を流れる日下川の河床勾配は1/3,000程度と極めて緩やかな勾配であることから水はけが悪い傾向にある。また、氾濫域である平地部についても仁淀川合流部から上流にいくほど低い低奥型地形を形成しているため、内水氾濫を引き起こしやすい地形特性を有している。このような特性がある日高村は樋門の閉鎖により日下川を流れる水の逃げ道が無くなることで浸水被害を受けているため、仁淀川本川まで放水路を整備することによって浸水被害が軽減されることを目的としている（写真-1）。

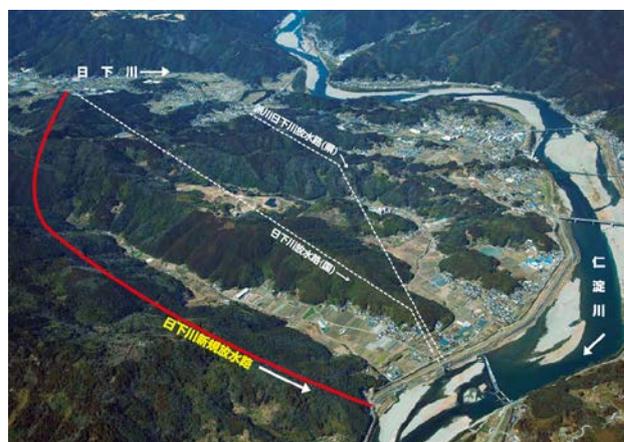


写真-1 既設放水路（2本）と新規放水路ルート写真

総合内水計画で国が整備することとした日下川新規放水路は全長約5.3kmにわたる水路トンネルである。新設の放水路は呑口側と吐口側の2件工事によって整備されており、NATM工法を用いて施工を行っている。両工事ともに作業坑を設置し、放水路本坑に向かって掘削を行い、本坑からは両サイドに2パーティで作業を進めることで効率的な施工を実施している。掘削は地質状況により適宜変更しており、岩質が硬い地層ではダイナマイトによる発破掘削を実施している。また、特に坑口に近い箇所や土被りの薄い箇所においては近隣の建築物に対して騒音や振動が大きな値を示しており、高性能な仮設備を設置し、騒音を抑制したり発破時には制御発破を実施し、発破音を分散させることで住民等へ配慮した施工を行っている。

また、放水路全長においてほとんどの区間で地山が悪いことが想定されており、補助工法の併用で安全に施工を進めているとともに吐口側には地元の生活用水として高知県が整備した鎌田用水が放水路に対して直角に通っているため、工事中に悪影響を与えないための保護目的としてパイプーフ工を用いた施工を実施する計画としている（写真-2）。



写真-2 新規放水路と鎌田用水路の位置関係

3. 放水路工事におけるコスト削減内容

全長5kmを超える水路トンネルであり前述したとおり様々な配慮を実施しながらの施工となれば、多大な整備費用となるため、施工性に配慮しつつ可能な限りコスト削減を実施する必要がある。そこで仁淀川流域学識者会議をもとに設計に対する削減策の提案・助言を行う「仁淀川床上浸水対策特別緊急事業検討部会」を設け、学識者と意見を交わした（図-2）。検討部会は計2回行われ、1回目は事業の概要・課題の説明を行い、2回目においてコスト削減策の検討を行った。一方で削減策の提案以外に設計、施工計画の妥当性についても検討し、施工面での配慮や安全性も同時に適切な事業進捗となるための管理を行った。

検討部会では、トンネル断面のアーチ部に採用してい

た鉄筋構造とインバート部のコンクリート強度について当初設計内容からより高度な検討を行うことで無筋化が実現する可能性があるとの助言を受けた。また、検討部会後には近年の出水における実態を踏まえた放水路の呑口側の構造についても平面形状及びスクリーン面積の精査を行うことでコスト削減を可能とする設計が実現した。

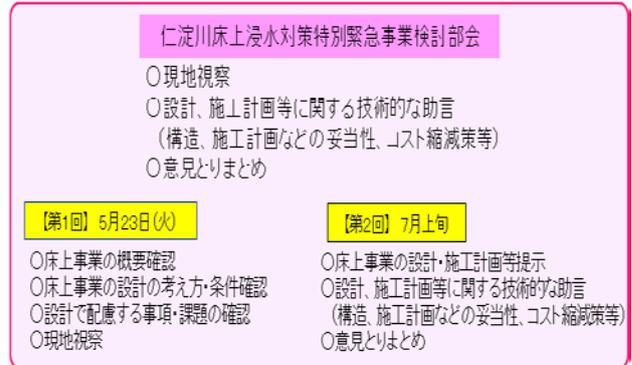


図-2 床上検討部会の内容の流れ

(1) トンネル断面の両端下部における無筋化の検討

昭和57年に国が整備した日下川放水路トンネルについて、水枯れが発生し農業用水や飲料水等、トンネル周辺の水利用に大きな影響を与えた過去がある。そのため、トンネル工事中は中央排水を設けて施工するものの整備後は、水枯れを防ぐため中央排水を閉めて地下水位を元の状況まで回復させる設計が必要であった（図-3）。

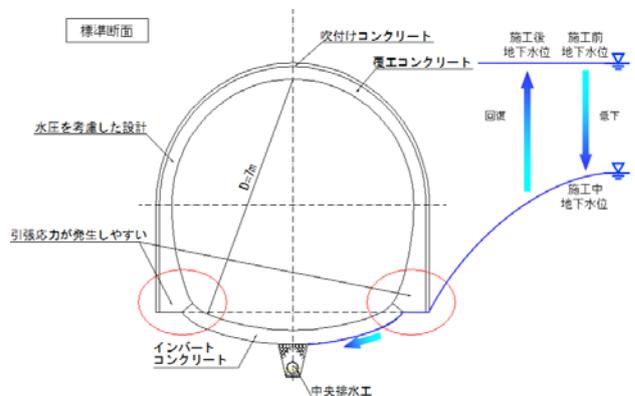


図-3 当初設計における有筋構造断面

放水路トンネルは道路トンネルよりも一般に施工基盤が低いいため周辺から地下水圧の影響を受け、断面の両端下部において引張応力の発生が考えられた（図-4）。当初設計段階では内水圧に対する断面検証を行う際に、覆工厚と内空幅の比及び岩盤の弾性係数から引張応力を算出し、鉄筋の必要性について照査を行った。また、外水圧に対する断面検証としては骨組解析を用いて鉄筋照査を行い、引張応力が作用するアーチ部とインバート部の接続部において鉄筋が必要との結果になった。

上記の設計思想について第1回検討部会で討論を行った結果、学識者から骨組解析よりも精度が高い有限要素法解析（FEM）を用いて軸方向力や圧縮力等も解析する

ことで鉄筋が不要となり、コスト縮減が図れる可能性があるとの技術的提言を受けたことため、FEM解析を行い有筋構造から無筋構造に変更するためにアーチ部及びインバート部のコンクリート厚の検討を行った。なお、アーチ部については施工中の工事車両の離合幅を考慮し、両端下部において地盤面に直線的に掘削する計画であったためコンクリート厚が他の部分より強靱な構造となっていることから厚さの変更はせずにFEM解析を行った。一方、インバート部は当初の設計条件である35cmから40cmに変更し、有筋構造時より許容応力を大きくして解析を行ったが外力のほうが大きくなりNGとなった。その後、インバートは45cmで解析を行うと満足する結果となり、断面構造が確定した。断面の変更に伴い、インバートの打設厚は10 cm増え、コンクリート量が追加となったものの鉄筋量が約2,800t削減され、約500百万円の縮減に繋がったと考えられる。

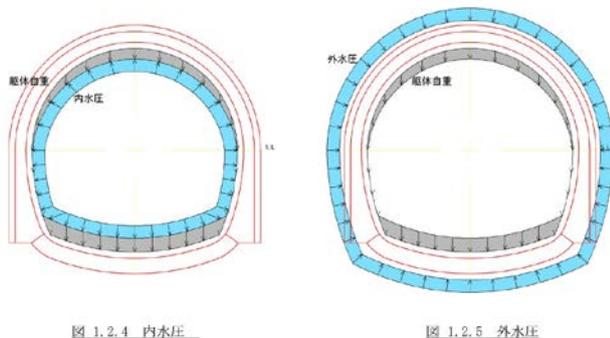


図4 作用する荷重モデル

(2) 放水路呑口部の平面形状の検討

放水路呑口部の導水路箇所について、設計思想としては、既設放水路の構造に倣った設計条件を基本としている。また、平面二次元の流量解析を行い洪水時の水の流れや流量・流速等の検討を行った結果、呑口護岸形状については八の字形にすることで既設放水路と一体化され、より安全に水を流せる計画とした。加えて護岸線形を広げることによって隣接する地山に近づくことになり、山側に近づくにつれて支持層が浅くなることから固い地盤を活かした基礎構造とし岩着させることでコストを抑えた設計が可能との思想であった。しかし、当初計画段階からコスト縮減に配慮した設計を実施してきたが、同時に呑口部で行っていた地質調査において指定基準値を超えるヒ素、フッ素、鉛の重金属が確認された。重金属を含んだ土砂は当時の土壤汚染対策法に基づき適正に処理する必要があるため、処分場へ搬出することで計画段階では予想できなかった多大なコストの増大に繋がることが判明した。現計画段階では8万m³の掘削を予定していたが、地質調査の結果を踏まえ発生土砂の処分量を減らし、事業全体のコスト縮減を図る必要が生じた。

処分量を減らすための設計案として八の字で開いていた護岸形状を左右ともに約20°ずつ縮めて正面スクリー

ンに対して直角にすることによって発生残土量を削減することができると考えた。しかし、同時に水利上の制約条件にも留意する必要があるため、再度流況解析を行い精査しながら検討を進めた(図-5)。

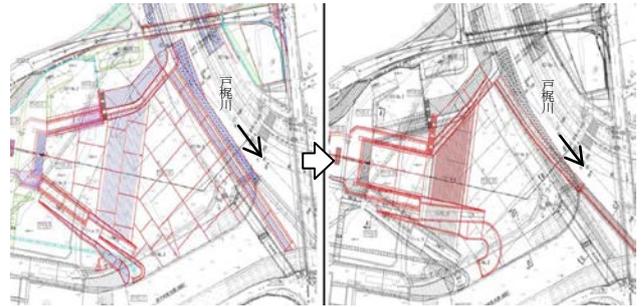


図-5 呑口部の平面形状変更図

流況解析の精査内容としては、当初の八の字形の護岸に対して流入河積が減少することから新規及び既設放水路の分派直後断面及びスクリーン流入の直前断面において評価を行った。当事業で設定されている許容湛水位以下の流入口の河積は約538m²となっているが、分派直後の断面では約554m²の河積が確保できており満足する結果となった(図-6)。また、スクリーン直前断面においても導水路幅を既設と同じ20mで設定しているため、流入河積も同じになり問題ないと考えた。

直角形状の護岸に変更することによって約10,000m³の発生土量を削減することができ、重金属を含んだ土としての処理費用も抑えられることから約170百万円のコスト縮減が図れる見込みである。

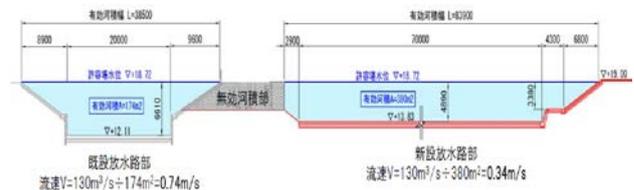


図-6 分派直後の河積検断面

(3) サイドスクリーン面積縮小の検討

通常時は水が流れていない導入路部であるが、洪水時には河川の水位が上昇し、上流から多くの塵芥が流れてくる。既設の放水路には入り口部に塵芥の混入を防止するためにスクリーンを設置しており、除塵機により塵芥を集積できる構造としている(図-7)。

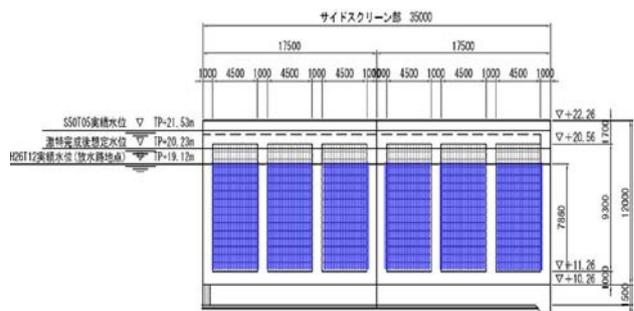


図-7 水路のサイドスクリーン展開図

新規放水路についても今後の大規模な出水に備えて既設のスクリーンに合わせた設計をしていたが、平成26年台風12号の洪水で既設放水路のスクリーンに流入した洪水は実績最高内水位以下で約590m²であった。また、この台風12号が襲来した際には、除塵機が一時的に停止していた時間があったことが判明し、本来の放流能力よりも低い状態が続いていたことが予想される（図-8）。このような水位が上昇しやすい状況であり、浸水被害を出したにも拘わらず、既設のスクリーン面積の全体が浸水したわけではないことが明らかとなった。また、新規放水路に計画しているスクリーン全体の面積が640m²であることに対して既設放水路のスクリーンに流入した洪水の浸水面積の方が小さいことを考えると新規放水路のスクリーン面積について縮小できる可能性があるとして検討を行った。

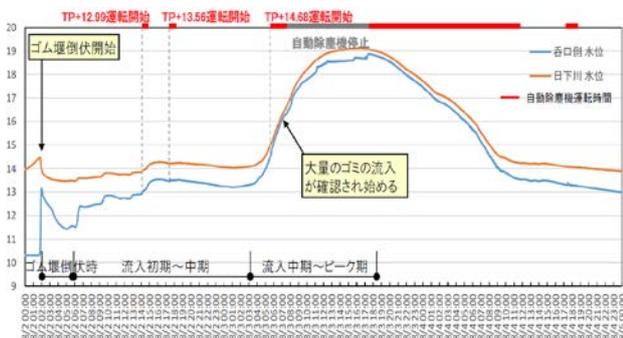


図-8 H26.8 台風12号流入部における水位グラフ

新規放水路が整備されることによって塵芥の流入も配分されることから放流能力の向上が期待された。また、台風12号時の実態から塵芥等が本格的に流入し始める水位はTP+14.5m程度であることが判明し、当時に自動除塵機が運転を開始したTP+13.0m程度の水位から塵芥が詰まったとしてもTP+13.0m以下の部分から通水は可能である。上記の条件を踏まえ、当初設計ではサイドスクリーンは17.5m×2スパンの全長35mであったが1スパンのみとした時のTP+13.0m以下のスクリーン面積を算出すると約126m²となる（図-9）。これはトンネル断面積の40.6m²以上確保できており、1スパンのみでもスクリーン部においてボトルネックになることはないことが想定された。

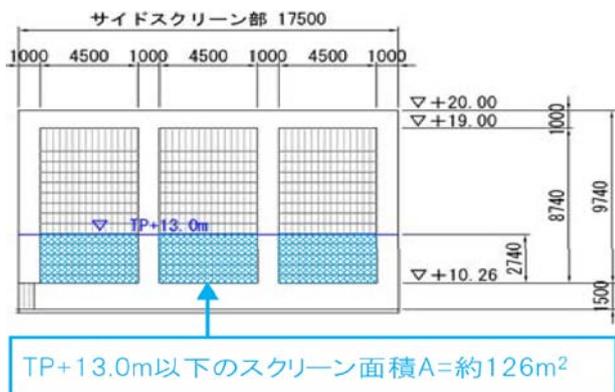


図-9 H26.8 台風H2612号流入部における水位グラフ

この結果、当初設計からサイドスクリーンの施工面積の半減により、約93百万円の削減が実現したと考えている。

4. 現在までの事業進捗

日下川新規放水路は、令和元年10月中旬時点において呑口部作業坑が完了し、本坑は呑口側に185m、吐口側に751mまで掘削している。また、吐口部は作業坑を7月29日から着手しており43m掘削が完了している。着手前の懸念事項であった呑口側の騒音・振動対策については、防音パネル等で仮設備ヤード全体を囲んだり、トンネル作業坑口に高性能な二重の防音パネルを施工し、周囲の住民に対して配慮しながら施工を実施している。近年ではあまり例が見られない施工であることから地元高校、大学などの教育機関や、JICA、建設業に従事する方々の勉強の場として活用されている。そして、地元に対しての説明会や近傍幼稚園児との交流なども積極的に実施し、地域の理解を得ながら事業を進めている（写真-3）。



写真-3 新規放水路呑口部における現場見学会の様子

5. まとめ

日下川新規放水路では設計段階に加え、受注者からの提案により、施工段階においてもトンネル坑外のLED照明化や車両回転場掘削断面の見直しが図られており、より一層のコスト削減に務めている。また、自動停止油圧ショベルの導入を行い効率的な工事の推進に努め、工期短縮につなげることで機械のリース費用の低下などにも配慮している。

放水路トンネルは、施工位置が地中深くになることや、一般的な道路トンネルより断面が小さく、作業スペースが十分に確保できないことから、突発的な湧水による崩落や作業効率の悪化が懸念されている。地盤や地質の状況を確認しつつ専門家などの意見を伺いながら安全で効率的な施工に努めていく。

参考文献

平成27-28年度 新日下川放水路詳細設計業務
仁淀川床上浸水対策特別緊急事業検討部会 報告書

ロックフィルダムの盛立工における挑戦 — ICT施工の全面展開 —

福島 雅人¹・坂本 博紀¹・奈良 洋幸²

¹独立行政法人水資源機構 朝倉総合事業所 工事課 (〒838-0019 福岡県朝倉市上秋月1373-1)

²独立行政法人水資源機構 ダム事業部 事業課 (〒330-6008 埼玉県さいたま市中央区新都心11-2)

福岡県に建設中の小石原川ダムでは、i-Construction & Managementの推進を背景として、ICT (Information and Communication Technology) 施工を全面展開し、施工管理・品質管理の合理化・高度化を図っている。本稿は、盛立工の各施工段階(材料採取・選別～材料製造・調整～盛立面施工)において活用されている種々のICT施工を紹介するものである。また、紹介するICT施工の一部は、フィルダムのコア材への適用事例がなく、技術的課題が残されていたことから、それらへの取組についてもあわせて報告する。

キーワード ICT施工、フィルダム、盛立工、施工管理、品質管理

1. はじめに

国土交通省では、建設現場の生産性向上の取組として、i-Constructionが推進されており、(独)水資源機構では、維持管理の効率化・高度化も視野に入れたi-Construction & Managementを推進している¹⁾。フィルダム建設の分野では、殿ダムや大分川ダムをはじめとして、GNSS測量機、UAV、MG・MC (Machine Guidance・Control) 建機などを活用したICT施工が導入され、生産性向上に係る様々な成果が報告されている²⁾。

福岡県に建設中の小石原川ダムは、洪水調節・水道用水・不特定用水を目的とし、堤高139m、堤体積約870万m³、堤頂長約550mと九州一の規模を誇るロックフィルダムであり、2019年9月に盛立完了した(写真-1参照)。

本稿では、小石原川ダムの盛立工を対象として、各施工段階で活用されているICT施工を紹介するとともに、その技術的課題への取組について報告する。



写真-1 小石原川ダム上流面(盛立完了)

2. 盛立工で活用したICT施工の紹介

(1) 小石原川ダムにおけるICT施工の導入実績

フィルダムの盛立工は、①材料採取・選別、②材料製造・調整、③盛立面施工の3つの施工段階に大別される。

表-1及び図-1に、小石原川ダムの盛立工におけるICT施工の導入実績を示す。例えば、ダム軸に曲率を有する小石原川ダムでは、GNSS建機の導入により、コア・フィルター境界の効率的な施工ができています。

次節では、ロック材の品質管理の高度化に貢献した帯磁率計 (No.①-2) について紹介する。

表-1 小石原川ダムにおけるICT施工の導入実績

No.	項目
① 材料採取・選別	
1	「GNSS測量システム」による三次元測量
2	「帯磁率計」によるロック材の岩種判別
3	「風化度判定システム」によるコア細粒材と廃棄岩の選別
② 材料製造・調整	
4	「GNSSブルドーザ」による薄層スツガ 仮造成・切崩管理
5	「近赤外線水分計」によるコア材の含水比の管理・調整
6	「画像粒度解析システム」によるコア材の粒度管理
③ 盛立面施工	
7	「GNSSバックホ」によるコア材のまき出し時の分離防止
8	「UAV空撮画像」によるまき出し状態の品質保証
9	「GNSSブルドーザ」によるまき出し厚管理
10	「自動化重機(A-CSEL(ケッドアケル))」による無人化施工
11	「ICT転圧管理システム」による転圧回数・軌跡の管理
12	「CCV」による盛立面の遮水性の面的管理
13	「FEM情報化施工」による盛立時の間隙水圧の管理

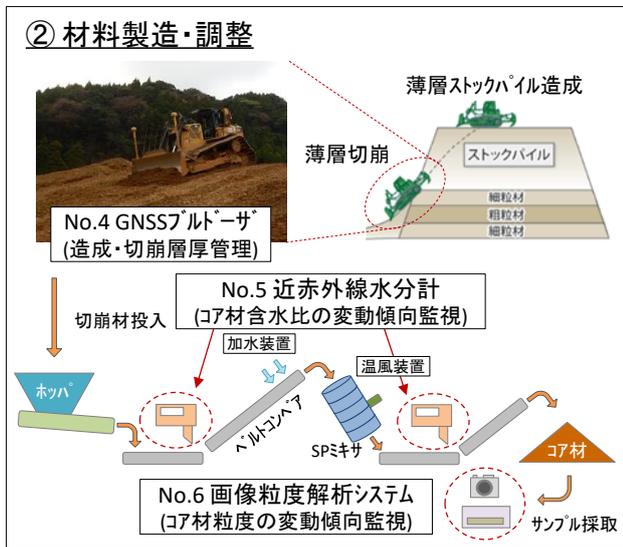
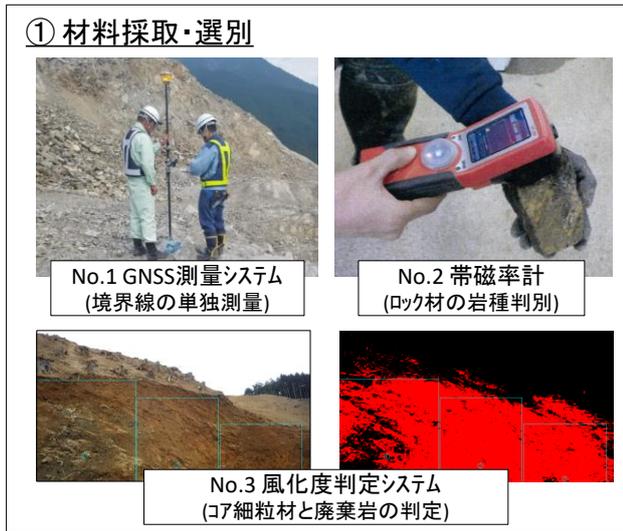


図-1 小石原川ダムにおけるICT施工の導入実績

(2) 帯磁率計による岩種判別

ロックゾーンの要求性能は、①重量・強度（比重・吸水率、内部摩擦角）、②圧縮抵抗性、③排水性（透水係数）、④耐久性（乾湿繰返し、凍結融解）が挙げられる。そのため、原石山の地質とその物理的・力学的特性に基づき、堤体の適切な位置に適切な品質のロック材を配置する必要がある。

小石原川ダムの原石山では、古生代末～中生代初期に変成作用を受けた三郡変成岩類が分布しており、表-2に示すように、塩基性片状ホルンフェルス（以下、bHfという）と互層様片状ホルンフェルス（薄層の頁岩と砂岩が互層状をなすもの）（以下、aHfという）が主に賦存している。耐久性に劣るaHfは、新鮮な状態であっても、外部ロックとしての使用が困難な材料であるため、岩種の判別を確実に行うことが重要である。

材料判定は、①岩種、②割れ目の間隔（粒径）及び③割れ目の状態（風化度）を目視により、④硬さを打音等により実施している。このうち、岩種以外の項目については、監督員間の目合わせが比較的容易であったが、岩種については、写真-2に示すように、aHfとbHfの混在・挟在、天候、風化、粉塵の影響等により、判別が困難な場合があった。

そこで、岩種判別の補助を目的として、帯磁率計を導入した。帯磁率計とは、磁場と誘導磁気との比で定義される物理量であり、主に岩石に含まれる磁性鉱物の量と種類により定まる。帯磁率計は、①非破壊測定である、②軽量小型で持ち運びが楽、③リアルタイムで結果が得られるなど、非常に簡便な計測機器である。

図-2に、熟練者2名の目視による岩種判別結果と帯磁率計による計測結果の関係を示す。岩種毎に帯磁率の値域が異なっているため、 $0.3 \times 10^{-3}(\text{SD})$ 程度を目安として、帯磁率に基づく岩種判別の定量化が可能となった。

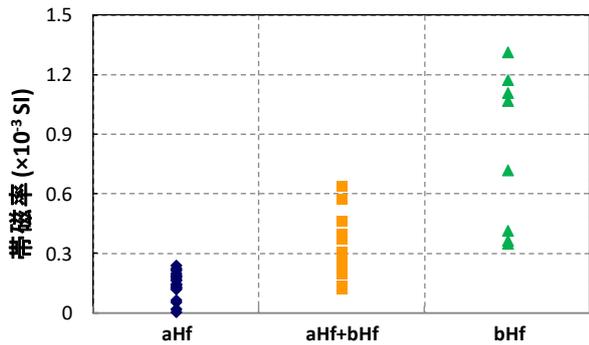
最終的な岩種の判断は監督員の目視によるが、帯磁率計の導入により、監督員の習熟度の違いによって生じる岩種判別結果の差を低減し、品質管理の高度化を図ることができた。

表-2 小石原川ダムにおける原石山の主な岩種と特徴

岩種	互層様片状ホルンフェルス(aHf)	塩基性片状ホルンフェルス(bHf)
外観		
特徴	黒色で片理が卓越する	緑色で比重が大きい
賦存量	○	△
強度	△	○
耐久性	×	○



写真-2 発破後の切羽の外観（岩種判別が困難な例）



(熟練者2名の目視による判別結果が異なる場合を「aHf+bHf」とした)

図-2 目視による岩種判別結果と帯磁率の関係

3. ICT施工の技術的課題への取組

(1) 小石原川ダムにおけるコア盛立の品質管理目標

締固め土の工学的特性（乾燥密度，変形係数，透水係数）は，粒度，含水比，締固めエネルギー（以下，CELという）の3つで規定される．これに基づき，より良い締固めを行うことで，高密度・高剛性・低透水のコア盛立を実現するため，小石原川ダムにおけるコア盛立の品質管理においては，以下3つの目標に挑戦した⁴。

- ① 現場の締固めエネルギーに基づく管理含水比の設定
- ② 飽和度の管理下限値の設定
- ③ ICT施工を用いた粒度，含水比，CELの全量管理

フィルダムの施工管理においては，上記3要素を均一化するような施工努力がなされている．特に，含水比が最適含水比 w_{opt} より乾燥側になると，透水係数が急増し，水浸によるコラップス沈下，強度・剛性の低下が生じるため， w_{opt} から湿潤側に+2~3%程度の範囲で管理するのが一般的である．この場合， w_{opt} はCELを1.0Ec（標準プロクター）とした室内締固め試験で求める場合が多い．一方，転圧機械の大型化・高性能化に伴い，現場の締固めエネルギー（以下，CEL_Fという）が向上していることを考慮すると，1.0Ecに対する w_{opt} を基準に管理含水

比を設定した場合，CEL_Fの w_{opt} に対しては3%以上湿潤側での施工を許容していることになり，エネルギーの有効利用ができておらず，場合によっては過転圧の恐れがある．

そこで，小石原川ダムにおけるコア盛立の品質管理においては，盛立試験により現場で用いる転圧機種種のCEL_Fが1.5Ec相当であることを明らかにし，CEL_Fに基づく含水比の管理範囲を， $w_{opt@1Ec}-0.8\% \sim w_{opt@1Ec}+2.2\%$ と定めた．

また，龍岡が提唱する飽和度管理⁵に基づき，従来の締固め度D値による管理で許容していた低飽和度の領域を排除するとともに， w_{opt} から乾燥側の領域を広げるため，飽和度の下限値（ $S_r \geq 85\%$ ）を設定した．

図-3に示すように，上記の設定により，管理範囲は左上にシフトしている．これは，締固め後の平均的な乾燥密度が高くなることを意味しており，従来よりも高品質なコアが期待できる．

以上の品質管理手法の前提条件は，粒度，含水比，CELが適切に管理されていることである．そこで，小石原川ダムでは，表-1及び表-3に示すように，粒度に対して画像粒度解析システム，含水比に対して近赤外線水分計，CELに対してICT転圧管理システムを導入することにより，これらを全量管理に近づける試みを行っている．

次節では，このうち，画像粒度解析システムに残された技術的課題への取組について報告する．

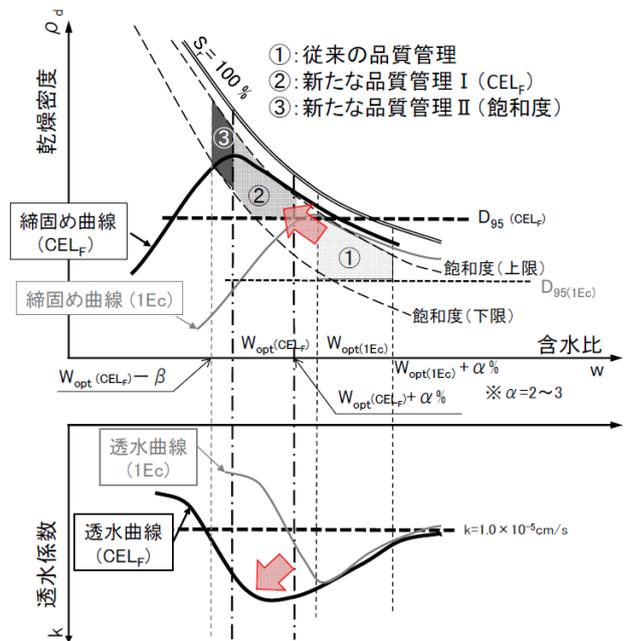


図-3 小石原川ダムのコア盛立の品質管理目標⁴

表-3 粒度，含水比，CELの全量管理に向けた取組

項目	従来	小石原川ダム
粒度	JIS法：1回/日	JIS法+画像粒度解析システム(1回/30分)
含水比	JIS法：3回/日	JIS法+近赤外線水分計(全量)
CEL	施工仕様規定	施工仕様規定+ICT転圧管理システム

(2) 画像粒度解析システムによる粒度推定精度の向上

a) システム概要と技術的課題

画像粒度解析システム[®]とは、図-4に示すように、デジタルカメラで撮影した土質材料の二次元画像から粒子輪郭を識別し、粒度インデックス I_i （撮影対象の全面積に対する監視対象粒径以上の粒子の投影面積の総和の割合）と各粒径の加積通過率の相関式から粒度分布を推定する簡易粒度測定法である。

フィルダム建設の分野では、ロック材やフィルター材への適用事例はあるが、コア材への適用事例はない。これは、コア材のような粘性材料は、同一粒度でも含水状態によって団粒化の程度が異なるためである。写真-3に示すように、低含水比では団粒化は生じないが、高含水比では、細粒分の団粒化、粒子同士の付着、大礫への細粒分のへばりつきなどが視認される。したがって、相関式設定時の含水比と、実運用時の含水比が異なると、図-5に示すように、推定される粒度分布に誤差が生じるため、団粒化の影響を補正することが課題となっていた。

b) 補正方法とその結果

既往事例では、粒度インデックス I_i と加積通過率の相関式を求めるキャリブレーションにおいて、試験材料の含水状態は任意に設定されていた。そこで、コア材を対象とする本検討では、細粒～粗粒の5パターンの粒度分布に対して、最適含水比 w_{opt} -1%～+2.5%程度の範囲で含水調整しながら、 I_i の変化を調べた。

図-6(a) (b)に、粒径9.5mm及び19.5mmを対象とした場合における含水状態に応じた I_i の変化を示す。 w_{opt} より乾燥側においては、 I_i はほぼ変わらない。これは、 w_{opt} は w_p と概ね等しいことから、 w_{opt} から乾燥側では、塑性体状ではなく半固体状となり、団粒化が生じにくくなったためと考えられる。また、 w_{opt} より湿潤側においては、 w_n の増加に伴い団粒化が進行した結果、 I_i は大きくなっている。一方で、図-6(c) (d)に示すように、大粒径（37.5mm以上）を対象とした場合では、 I_i は含水状態にほとんど依存していない。これは、37.5mm以上となる大粒径の団粒が生じなかったためと考えられる。したがって、大粒径に対する含水状態の補正は不要である。

これらの結果を用いて、画像粒度解析システムの補正フローを以下のとおりとした。

- ① 撮影日の締固め試験から得られる w_{opt} と近赤外線水分計からリアルタイムで得られる w_n を用いて、 $\Delta W (= w_n - w_{opt})$ を算出する。
- ② キャリブレーション結果を利用して、 ΔW に対応する I_i と加積通過率の相関式を得る。
- ③ 画像粒度解析システムにより、各粒径の I_i を取得し、上記の相関式に代入して、加積通過率を得る。

以上の結果から、 I_i と加積通過率の相関式を逐次補正することで、粒度分布の推定精度が向上した。

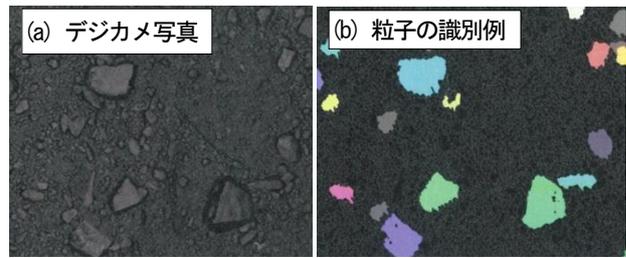


図-4 画像粒度解析システムによる粒子の識別例



写真-3 含水状態による団粒化の影響（同一粒度）

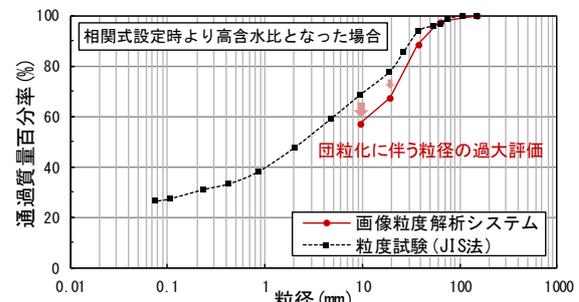


図-5 団粒化により生じる粒度分布の誤差（イメージ）

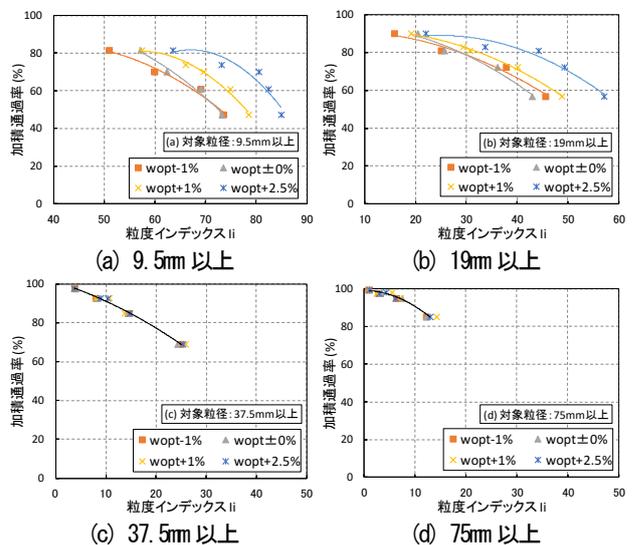


図-6 各粒径における含水状態に応じた I_i の変化

(3) CCVを用いたコア材の遮水性の面的管理

a) CCVの定義と技術的課題

CCV (Compaction Control Value) とは、振動ローラの加速度波形を信号処理して得られる地盤の締固め状態を表す指標であり、式(1a)のように定義される⁷⁾。

$$CCV = \frac{S_{1/2} + S_{3/2} + S_2 + S_{5/2} + S_3}{S_{1/2} + S_1} \times 100 \quad (1a)$$

ここで、 $S_{1/2} \sim S_3$ は、基本振動数 $f_0 \times 1/2$ の整数倍に対する加速度スペクトルである ($S_1 = f_0$)。

図-7に、軟らかい地盤と硬い地盤における振動ローラの加速度波形と周波数特性を示す。軟らかい地盤では、振動ローラの仕様毎に定まる基本振動数のみが計測される。硬い地盤では、振動輪の跳ね上がり～着地により高周波成分が増加するため、一般にCCVは剛な地盤になるほど大きな値をとる。

大規模土工工事では、CCVとGNSSを併用することにより、締固めの進行に応じた地盤剛性と転圧回数を面的に管理した事例が報告されている⁸⁾。しかしながら、一般的なCCVの管理手法は、地盤剛性の下限値管理であり、フィルダムのコア材のような高含水比の粘性材料は、締固めの進行に伴う剛性の変化が許容下限値周辺で小さいことや、剛性・密度に加えて遮水性が要求されることから、適用が困難とされてきた。したがって、これまでのフィルダムのコア盛立における面的な管理記録は、施工層厚や転圧回数の記録に留まっており、従来の管理手法の代替とされる状況には至っていなかった。

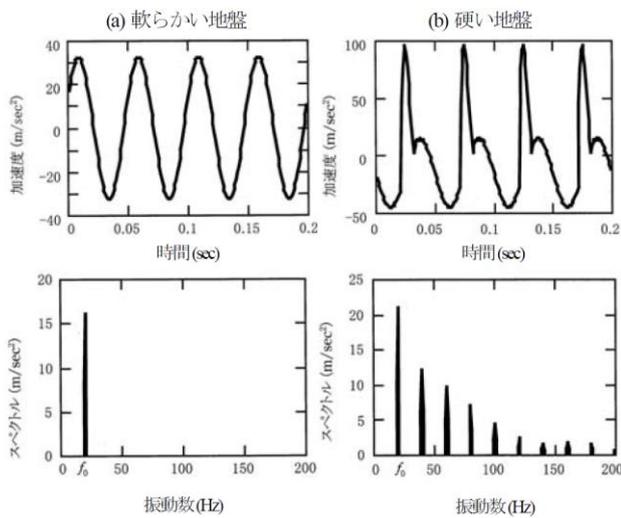


図-7 地盤剛性による加速度波形・周波数特性の変化⁷⁾

b) CCVによる遮水性の評価方法

表-4に示すように、遮水性の管理手法のうち、現場透水試験が直接的な手法であるが、概ね1日の時間を要する。そのため、日常管理としては、粒度、含水比、CELが適切に管理されていることを前提に、乾燥密度と透水係数の間接的な関係を用いて、迅速法 (RI法) による乾燥密度の計測が実施されてきた。

図-8に、小石原川ダムの盛立試験に基づく含水比と乾燥密度・透水係数・変形係数の関係を示す⁴⁾。この結果は、一般的な締固め土の工学特性と含水比の関係⁷⁾と一致する。小石原川ダムの含水比の管理範囲 ($w_{opt@1Ec} - 0.8\% \sim w_{opt@1Ec} + 2.2\%$) において、含水比の増加に伴い変形係数は減少しており、この間透水係数は規定値を下回っている。したがって、変形係数の上限値管理を用いれ

ば、乾燥密度と同様の管理がより迅速に可能となる。

CCVと変形係数は、ともに地盤剛性の指標であり、線形関係にある⁹⁾。そこで、変形係数による管理手法をCCVに置き換えて、盛立面で計測されたCCVが、管理含水比の乾燥側 ($w_{opt@1Ec} - 0.8\%$) と湿潤側 ($w_{opt@1Ec} + 2.2\%$) で計測されたCCVの範囲内であれば、遮水性を評価できていると考えられる。

ただし、CCVによる盛立面の遮水性評価は、乾燥密度・変形係数の場合と同様に、前提条件に基づく間接的な方法であるため、現場透水試験の代替にはなりえない。したがって、CCV管理は、遮水性評価のための密度管理 (RI法など) を代替するものとして位置付けている。

また、CCVを導入する意義は、以下のとおりと考える。

- ① 施工と同時に品質管理ができる (合理化, 高度化)
- ② 面的管理で盛立面の均質性が確認できる (高度化)
- ③ 抜取検査型の試験位置の決定に寄与する (高度化)

表-4 遮水性の管理手法の一覧

管理項目	試験方法	管理手法		計測時間
透水係数	現場透水試験	直接	点管理	1日/層
乾燥密度	RI法	間接	点管理	2時間/層
変形係数	落球探査法	間接	点管理	15分/層
CCV	(実施工=試験)	間接	面的管理	自動計測

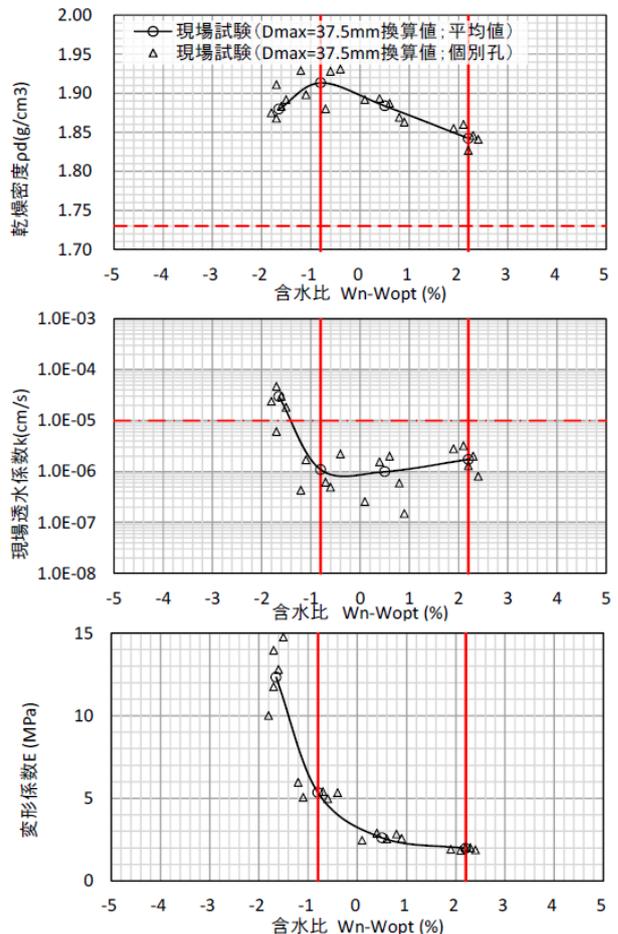


図-8 含水比と乾燥密度・透水係数・変形係数の関係⁴⁾

c) CCVの運用ルール の策定

図-9に、3ケースの盛立試験で得た計測面におけるCCVの累積発生確率分布を示す。含水比の低下に対してCCVは単調増加しており、図-8と同様の関係が得られている。

この結果に基づき、CCVの運用ルールを図-10に示す評価フローのように定め、品質管理基準に位置付けた。

- ① 盛立面におけるCCVの計測値が、盛立試験で得られた乾燥側～湿潤側の計測範囲（塗りつぶし範囲）内であることを確認する（所要品質の確認）。
- ② 分布の偏り（グラフ形状の乱れ、CCVマップ）やロット間の相異もあわせて確認する（均質性の確認）。
- ③ 異常が検出された場合は、CCVマップにより、特に上下流方向への異常箇所連続性を確認する。
（異常箇所の特定、品質への影響度把握）
- ④ 連続性がない場合は、異常箇所への目視・触診、連続性がある場合は、RI法などの簡易試験を実施し、正常値が得られることを確認する。
- ⑤ ④において異常が確認された場合は再施工を行う。

以上より、CCVの導入により、品質管理試験の実施時間を大幅に短縮するとともに、遮水性の面的管理を実現できた。

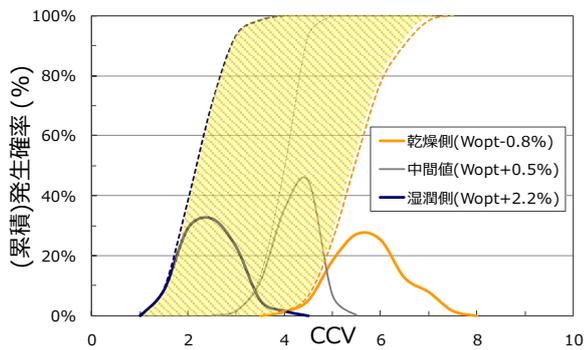


図-9 CCVの累積発生確率分布（盛立試験）

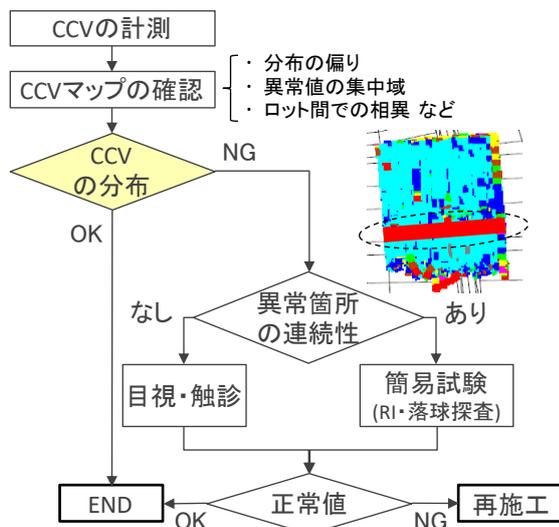


図-10 遮水性の面的管理に向けたCCVの運用ルール

4. まとめ

本稿では、小石原川ダムの盛立工において活用されている種々のICT施工を紹介するとともに、適用事例に乏しいICT施工の技術的課題への取組について報告した。

本検討を通じて得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) 帯磁率計の導入により、ロック材料の岩種判別を定量化することで、監督員間の習熟度によって生じる判別結果の差を低減し、ロック材料の品質管理を高度化した。
- 2) 画像粒度解析システムにおけるコア材の団粒化に対して、自然含水比と最適含水比を用いて、その影響の補正手法を示し、粒度分布の推定精度を向上させた。
- 3) CCVによる遮水性の評価方法及び運用ルールを構築し、品質管理基準に位置付けることで、品質管理試験の実施時間を大幅に短縮するとともに、盛立面の遮水性の面的管理を実現させた。

謝辞：小石原川ダムの堤体盛立は無事完了し、今年度事業完了予定です。各種の難題を解決し、盛立完了を迎えることができたのは、地元やユーザーの皆様のご理解・ご協力、有識者検討会の委員をはじめとする専門家の皆様によるご指導、関係者の皆様のご尽力によるものであり、ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宮崎 智也, 有馬 慎一郎, 定宗 幸雄：小石原川ダム建設工事におけるCIMの活用状況。
- 2) 日下 雅史, 米田 昌史, 下山 茂ら：殿ダム本体工事における情報化施工の導入。
- 3) 酒井 正二郎, 後田 浩二：大分川ダム建設事業におけるICTの活用事例。
- 4) 坂本 博紀, 福島 雅人, 日野 浩二：小石原川ダムにおけるコア盛立の品質管理の合理化・高度化に関する検討。
- 5) 龍岡 文夫：土の締固めにおける飽和度管理の重要性。
- 6) 藤崎 勝利, 黒沼 出, 川野 健一ら：デジタルカメラ画像を用いたCSG材の粒度監視システム。
- 7) 公益社団法人地盤工学会：土の締固め。
- 8) 高倉 敏, 北村 佳則, 大谷 茂ら：盛土地盤における締固め品質管理手法の開発。
- 9) 坂本 博紀, 小林 弘明, 龍岡 文夫ら：フィルダムコアゾーンにおける現場透水係数と地盤剛性に関する検討。

ICTを活用した職員支援システムの導入効果とさらなる利活用

中嶋 恵美¹

¹独立行政法人水資源機構 琵琶湖開発総合管理所 総務課 (〒520-0243滋賀県大津市堅田2-1-10)

独立行政法人水資源機構琵琶湖開発総合管理所（以下「琵琶湖総管」という。）では、2013年9月の台風18号による防災業務での課題に対応するため、防災業務における効率化・高度化を目指し、¹⁾ ICTを活用した排水機場運転支援システム及び不具合対応支援システム（以下「職員支援システム」という。）を2015年から2箇年をかけて構築し、2017年度より本格運用を開始している。本稿では、職員支援システムによる導入効果及び2017年10月に襲来した台風21・22号による防災業務での運用実績、防災業務以外での利活用及び他事務所で展開の可能性について報告するものである。

キーワード ICT, AR, HMD, タブレット端末, 防災業務における効率化・高度化

1. はじめに

琵琶湖総管では、沿岸域の治水のため、琵琶湖一円にわたり多数の施設を維持管理している（図-1）。防災業務時には、職員及び継続雇用従事者（以下「職員等」という。）で防災班を9班編成し、職員等が琵琶湖周辺の巡視や水門等の操作にあたり、請負業務の運転操作員が排水機場の運転操作を行うことで琵琶湖からの逆流を防ぎ、水田などにたまった水をポンプで吐き出すことにより、浸水被害の防止及び軽減に努めている。

2013年の防災業務時において、公共交通機関の麻痺や道路冠水による通行止め等により、請負業務の運転操作員の初期配置が不十分な状況が発生した。幸い排水機場の運転に支障はなかったが、このような状況下では職員等が排水機場の運転操作を行う必要があり、「職種を問わず全ての職員等による迅速かつ安全・確実な運転操作」が課題となった。

また、琵琶湖総管における防災業務はダム等と比較すると長期間に及ぶため、長時間の運転により発生したポンプ設備等の重軽様々な故障や不具合に対し、広範囲な移動を伴う中で、少人数の設備系の職員等（以下「専門技術職」という。）のみで全てを対応するには限界があり、「全ての職員等による最低限度の不具合対応」を可能にする必要性が浮き彫りとなり、職員支援システムを構築するに至った。

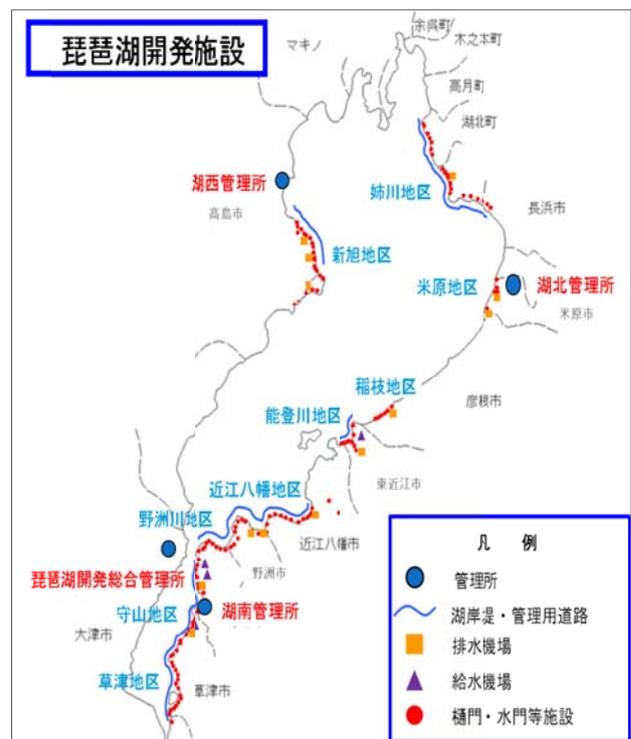


図-1 琵琶湖開発施設配置図

2. システム概要

琵琶湖総管で構築した職員支援システムは、次のとおりである（写真-1）。



写真-1 職員支援システム使用状況

(1) 排水機場運転支援システム

これまでの排水機場の運転操作は、設備毎に写真や図を多用し、専門用語を排除した紙媒体の操作マニュアルを使用してきた。しかし、排水機場の運転操作は水門設備と比較すると数多くの確認や移動、操作が必要となり、年に数回、操作訓練を実施しているものの、専門技術職以外は普段操作をしないため分かりづらく、また紙媒体の操作マニュアルでは雨天時の使用にも問題があった。

そこで、拡張現実（AR：Augmented Reality）を活用し、タブレット端末を用いて画像と音声により操作や確認、写真撮影等をナビゲーションすることで排水機場の「迅速かつ安全・確実な運転操作」ができるシステムを構築した。操作終了後には操作記録が自動で作成される。

(2) 不具合対応支援システム

不具合対応支援システムは、インターネット回線を利用し、現場（作業）からの映像送信と音声による双方向通信（6者同時）を行うことにより、支援者も不具合発生現場の状況をリアルタイムで確認できるシステムである。作業者のヘルメットに装着したヘッドマウントディスプレイ（以下「HMD」という。）のカメラで捉えた映像と音声は、支援者側のPC・タブレット端末で共有でき、これまで専門知識を有する専門技術職やメーカーの熟練技術者等を現場に派遣せざるを得なかった不具合内容についても本システムの導入により、遠隔地からの作業指示で対応可能となった。

本システムは、上述したように映像と音声により故障・不具合情報の共有や作業指示を行うこととなるが、ポンプ運転時の騒音により作業側で音声が聞き取れない場合を想定し、支援者側から文字による指示も可能である。また、HMDのカメラで撮影した静止画像を通信上で共有することで支援者側から書き込みによる指示も行うことができる。加えて、HMDのカメラに写った映像を支援者側から遠隔操作し、写真撮影できる機能も有している。さらに支援者側から図面等の資料送付が可能

であり、作業者が資料を持ち合わせていない場合でも支援者から必要な資料を送付することで、不具合原因の究明や不具合対応の確実性が向上する。

3. システム運用状況と導入効果

2017年4月から運用を開始した職員支援システムの防災業務での運用状況及び導入効果は、次のとおりである。

(1) 排水機場運転支援システム

排水機場運転支援システムの導入効果として、2017年の防災業務時にポンプ運転ができない排水機場に対し、本システムを使用した結果、操作漏れのブレーカを発見し、排水機場の安全・確実な運転操作を行うことができた。また、別の排水機場では、新規採用職員2名での運転操作にあたり、迅速かつ安全・確実にポンプ運転を行うことができた（写真-2）。

そして、その操作記録は自動作成され、操作報告書の作成時間の大幅な短縮に繋がった。



写真-2 新規採用職員による運転操作状況

(2) 不具合対応支援システム

不具合対応支援システムについては、同じく2017年の防災業務時に排水機場スクリーン前面部に大量の流木が集積した際、専門技術職が現地に向かわずとも現地班から送信された画像等の情報により遠隔地から対応を指示し、ポンプを停止するに至らず、運転を継続することができた（写真-3）。



写真-3 流木集積時の対応状況

また、適宜、琵琶湖総管の防災本部や各管理所の班長等が現場状況の確認等に本システムを使用することにより、現場までの移動時間の削減、移動に伴う事故のリスク減に繋がり、その効果を確認した（写真-4）。



写真-4 防災本部での通信状況

4. さらなる利活用

職員支援システムは、防災業務での排水機場の運転操作及び不具合に対応するための支援を行うものであるが、琵琶湖総管の防災業務は1992年4月の管理開始以降、27年間で9回（2019年3月末現在）と非常に少ないため、職員等のシステム習熟度維持やシステムの陳腐化が懸念される。そこで、琵琶湖総管内において「職員支援システム活用チーム」を発足させ、システム操作訓練の軸として活動するとともに、システムの利活用について検討を行い、施工管理を中心に、可能な限り様々な業務で活用していくこととした。

(1) 建築工事

琵琶湖総管では2017年4月以降、建築担当の職員（以下「建築職」という。）が不在となり、建築工事が必要な都度、関西・吉野川支社淀川本部（大阪市）の建築職により積算や監督を実施している。宿舍等における簡易な修繕は通常、琵琶湖総管の総務課で監督を行うが、2017年9月に発注した大規模な改修工事においては、専門知識が必要な材料確認や段階確認等が必要であった。発注当初は建築職が監督員として現地に臨場することを想定していたが、現地までの移動時間と現地での確認時間を勘案し、試行的に不具合対応支援システムの活用を取り入れることとした。

建築職による確認が必要な施工内容や受注者の要望により立会いが必要な場合には、監督員である琵琶湖総管の総務課員がHMDを装着して現地へ向かうことで建築職は現地へ臨場せず、淀川本部で現場状況の把握や確認を行った。立会い等が必要な都度、不具合対応支援システムを使って現地確認することで、受注者の作業手戻りの発生を防ぐとともに、建築職以外では判断が困難な事項について遠隔地から指示を受け、判断をすることが可

能となった（写真-5）。

試行の結果、本工事においては計12回の現地確認や立会いのうち、8回を不具合対応支援システムで対応し、建築職の移動時間及び旅費の削減による業務の効率化に繋がった。

関西管内の機構事務所においても琵琶湖総管と同様、移動に時間を要することから、建築工事における不具合対応支援システムの活用は有効であると言える。

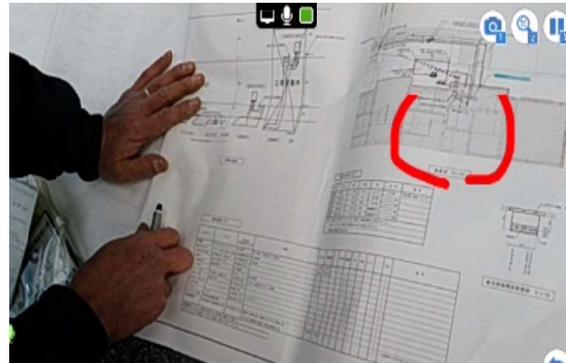


写真-5 遠隔地からの指示状況

(2) 工場における段階確認

機械設備や電気設備の工場製作を伴う機器更新において、重要な機器や低入札の場合、品質確保として工場における段階確認を実施する。その場合は通常、複数の監督員が工場に出向き検査を実施するが、試行として不具合対応支援システムを活用し、HMDを装着した監督員1名のみが工場へ出向き、残りの監督員が遠隔地から確認することとした。

2017年度は水門設備の開閉装置仮組立について段階確認を行った結果、カメラの映像を通して数値等も確認でき、これまでと相違なく適正な検査を行うことができ、旅費の削減及び業務の効率化に寄与した（写真-6）。

時間 (hrm)	温度測定(℃)					時間差	開始値	終了値	差	時間
	①	②	③	④	⑤					
0:00	7.1	7.1	6.8	6.8	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0:10	7.2	7.1	6.9	6.9	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0:20	7.3	7.1	7.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0:30	7.3	7.1	7.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0:40	7.3	7.1	7.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0:50	7.3	7.1	7.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1:00	7.3	7.1	7.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7:00	7.3	7.1	7.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7:10	7.3	7.1	7.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7:20	7.3	7.1	7.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7:30	7.3	7.1	7.0	7.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

写真-6 工場検査状況

(3) 抜き打ちパトロール

工事現場の安全管理への利活用の一つとして琵琶湖総管の安全協議会では不具合対応支援システムを活用し、抜き打ちパトロールを実施した（写真-7）。

HMDを装着した職員が現地へ行き、安全協議会委員が総合管理所でHMDからの映像を通し、受注者の不安

全行動を指摘した。

このように少人数で実施する抜き打ちパトロールでありながら、多くの目で指摘できることから効率的なパトロールと言える。また、HMD装着者を若手職員とし、支援者（総合管理所）側から不安全行動を指摘することで、若手職員の安全教育ツールとしても期待できる。



写真-7 抜き打ちパトロール状況

(4) 事故等の確認

広大な範囲を管理する琵琶湖総管では、湖岸堤や道路等で交通事故や火災が発生した場合、管理者である機構に連絡が入るよう所轄警察署や消防署等と連携している。一報が入ると各管理所の職員が現場へ出向くが、警察や消防等からの情報だけでは機構の管理範囲であるかどうか不明な場合が多い。通常であれば、交通事故や火災が発生した現場周辺の資料を持参し現地確認を実施するが、近くを巡視していた職員が現場へ直行し、不具合対応支援システムを活用し通信することで、管理所にいる職員が資料を確認しながら機構の管理範囲であるか否かの早急な判断をするとともに、現場で必要となる対応を判断することができた。

8. まとめ

琵琶湖総管では、2013年の防災業務での課題を解決するために職員支援システムを構築・導入した。

しかしながら、防災業務の頻度から職員等の本システムの習熟度を維持できない恐れがあるため、所内で本システムの利活用について検討・試行した結果、業務の効率化に繋がる利活用方法を数多く確認することができた。

特に不具合対応支援システムについては、HMDのカメラがヘルメットに固定されていることで、支援者からの指示を受けながら作業者はハンズフリーで作業ができ

ること、作業者のモニターには作業者自身の見ている状況が映っており、支援者もその映像を確認しながら指示ができ、リアルタイムで双方が確認し合いながら対応できる点がその他の類似システムと異なり、非常に有効であることが確認できた。立会い等で使用する場合にはHMD装着者以外には支援者の音声共有できない課題があるものの、琵琶湖総管の限られた人員の中で効率的かつ適切な管理業務を行うには本システムは有効なツールである。2018年度以降も引き続き、職員支援システム活用チームの活動を継続しており、さらなる業務の効率化、高度化を目指し、様々な業務へ利活用を検討している。

このように、防災業務による課題から構築・導入した職員支援システムであるが、防災業務に限らず用途は多岐にわたり、不具合対応支援システムにおいては、移動時間削減に伴う作業の効率化及びコスト削減による効果は大きい。また、排水機場運転支援システムについてもシナリオを応用することにより、直営点検や人材教育、技術伝承等に活用できる。

他事務所への展開の可能性については、琵琶湖総管のように広大な管理範囲かつ多数の設備を維持管理している管理所等での本システムの利用は有効である。具体では、延長の長い水路施設の巡視やダム管理所での放流警報時の巡視への利用、設備の直営点検などに活用できると考える。また、宿泊を伴うような移動距離が長い現場への立会い等にも有効である。

さらに、異常気象と言われる事象が頻繁に起こり、地震・風水害など様々な自然災害が起こる昨今において、不具合対応支援システムを用いて現地と各事務所、さらに各支社・局や本社とが通信することで映像と音声によりリアルタイムで被災状況の把握や確認を行うことができ、大いに利活用の可能性を秘めていることから、機構内で拡大導入されればさらなる発展が見込まれる。

最後に、本システムは、国内における既設公共インフラ施設の長寿命化や機能の最大活用が求められる中、限られた人員体制による効率的かつ的確な操作・維持管理を行う手段として幅広い分野への利活用の期待ができるものと高く評価され、平成29年度土木学会技術賞を受賞したことを報告する。

参考文献

1) H29 国土技術研究会論文：ICTを活用した排水機場運転支援・不具合対応支援システムの構築

熊本地震により被災した大切畑大橋の復旧について

岩下 光司朗¹・増尾 明彦²・橋爪 隆介³

¹～³九州地方整備局 熊本復興事務所 工務第二課 (〒869-1404 熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字河陽3574番地)

2016年4月に発生した熊本地震により被災した鋼5径間連続非合成鈹桁橋「大切畑大橋」は、上部工の横ずれや下部工の移動、主桁の座屈や床版のひび割れ等の複雑な損傷を受けた。座屈した主桁の復旧にあたっては、損傷部材を取り替える方法ではなく、座屈した主桁を撤去せず横に主桁を追加する方法を用いている。また、施工時には、損傷箇所の応力状態を計測しながら復旧を行った。本稿では、追加主桁の効果について考察し報告する。

キーワード 主桁の座屈、主桁の追加、モニタリング、震災復旧

1. はじめに

熊本市～阿蘇郡高森町を結ぶ主要地方道「県道28号熊本高森線」の山間部に点在する橋梁群は、2016年4月に発生した熊本地震により被災し、通行不能となった。橋梁群の中には、甚大な被害を生じている箇所があり、復旧には、原因究明、対策検討、及び効果確認等、多岐にわたり高度な技術が必要であった。

2016年5月10日、熊本地震を大規模災害復興法の定める「非常災害」に指定する閣議決定が行われ、同年5月13日に熊本県知事から要請を受け、国が代行して「県道28号熊本高森線」の災害復旧事業に取り組むこととなった。被災した橋梁およびトンネル・土工の復旧方針については、それぞれ国土技術政策総合研究所や土木研究所から成るプロジェクトチームを設置し、その中で技術支援を受けるとともに、必要に応じて学識経験者の意見をj得て決定した。

ここで、県道28号熊本高森線の復旧状況を図-1に示す。

2016年12月24日に、復旧に時間を要する橋梁部を避けトンネル・本線土工部と旧道迂回路を利用した暫定供用を、翌年12月14日には、復旧が完了した橋梁と仮橋を利用した鳥子地区の交通切替を行い、段階的に着実に復旧を行ってきた。その後も、2018年7月20日に桑鶴大橋の

復旧、2019年8月3日に俵山大橋の復旧、2019年9月14日に大切畑大橋の復旧が完了し、「県道28号熊本高森線」の全線復旧が完了した。

本稿で報告する大切畑大橋は、橋長265.4mの鋼5径間連続非合成鈹桁橋である。同橋は、地震の影響で上部工の横ずれ等大きな被害を受けた。特に、P2橋脚付近では、主桁の座屈や下部工の損傷など被害が集中しており、慎重な復旧方針の検討が求められた。

中でも、座屈した主桁は、主桁の変形の程度が大きく、床版にも損傷を生じており、変形矯正等が難しく地震後の残留応力も不明であることから、主桁を撤去した場合に他の部位に変形を生じる可能性があった。また、座屈した主桁は、損傷しているものの、主桁としての耐荷力を少なからず保有していると考えられた。したがって、座屈桁を撤去せずに存置させたまま新設主桁を追加することで、応力を分担する復旧工法を採用した。また、施工段階毎の部材の応力変化を計測し、その応力状態を確認することで、追加した新設主桁が座屈桁の応力を分担して受け持っていることを確認し、復旧設計に内在する不確実性を補完しながら復旧を進めてきた。本稿では、このような計測（以下、モニタリング）を実施しながら復旧を行った大切畑大橋の追加主桁の効果について、考察し報告する。

2. 被災の特徴と復旧内容

(1) 大切畑大橋の諸元

本橋の諸元は、下記のとおりである。

支間長 : 44.9m+3@58.0m+44.9m

上部工形式 : 鋼5径間連続非合成鈹桁

下部工形式 : 逆T式橋台、張出し式橋脚

架設年次 : 2001年3月

適用示方書 : 平成8年道路橋示方書

図-2 に大切畑大橋の復旧後の橋梁一般図、図-3 に大切畑大橋の上部構造平面図を示す。

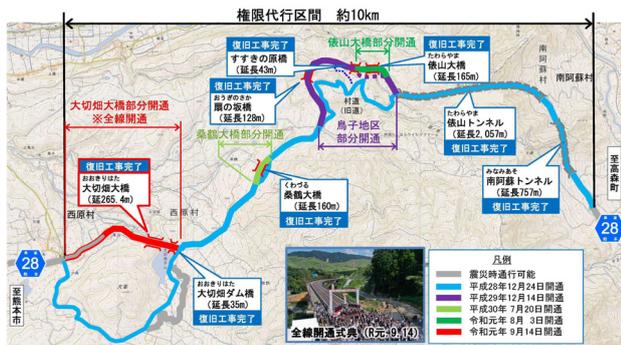


図-1 県道28号熊本高森線の復旧状況

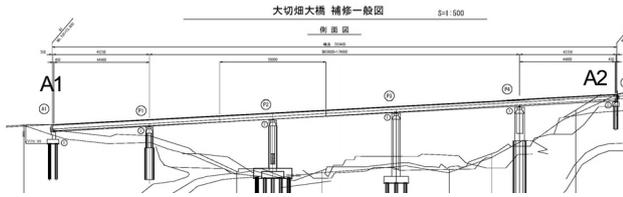


図-2 大切畑大橋橋梁一般図



図-3 大切畑大橋の上部構造平面図

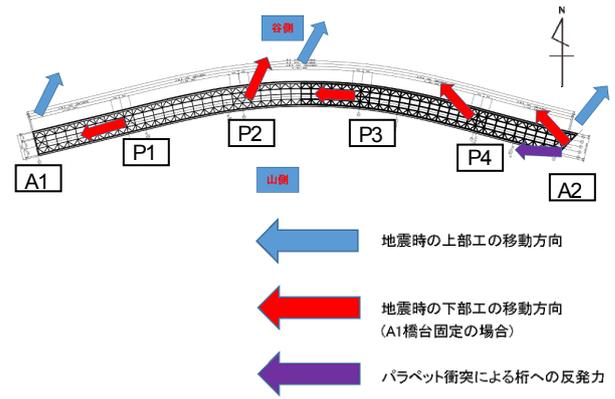


図-4 上下部工の各々の移動方向

(2) 被災状況 [地盤変状による上下部工の移動]

上下部工の各々の移動方向を図-4に示す。

下部工の移動量については、大座標系により座標管理した被災前のデータがなく、被災前後での移動量を正確に計測できないため、地震による移動が最も小さいと推定されたA1橋台を基準として、相対移動量で計測した。結果として、P1橋脚が28cm～32cm、P3橋脚が25cm～45cm、P4橋脚が50cm、A2橋台が29cm～52cmといずれも地盤変動に合わせてA1橋台側に詰まるように移動していた。一方で、P2橋脚は、A1橋台から反対方向の北東側へ21cm～25cm移動していた。

また、上部工は、P2橋脚上を除く支承の破断により水平方向の力に抵抗できなくなった主桁が支承から脱落したことで、最大で約1.1m北東側へ移動した。

(3) 被災状況 [P2橋脚付近における各損傷]

特に被害が集中したP2橋脚付近の損傷状況は、下記 [i]～[iv]の通りである。

- [i] 基礎工（場所打ち杭）に最大幅10mmのひび割れ
- [ii] P2橋脚柱部（中空断面）に貫通ひび割れ
- [iii] 床版にP1-P2間で最大幅1.5mm、P2-P3間で最大幅3.0mmひび割れ（写真-1参照）
- [iv] P1-P2間の主桁腹板で最大74mm、下フランジで最大52mmの面外変形を伴う座屈（写真-1参照）

(4) 被災状況による損傷要因の考察

図-4より、上部工は、同じ北東方向に移動しているが、下部工の移動方向は、同じではないことが確認できる。また、前述 (3) のようにP2橋脚付近に被害が集中した要因は、前述 (2) のように上下部工の動きに関連していると推測される。つまり、P2橋脚の支承のみが破断せず、上下部が支承を介して連結されたまま移動したことで、P2橋脚付近に大きな応力が作用し、主桁や脚部に損傷等が集中したものと推測される。



写真-1 大切畑大橋の被災状況

(左：P2橋脚付近の床版ひび割れ、右：P1-P2間の座屈)

(5) 主桁の座屈箇所付近における復旧課題と工法検討

P1～P2間の座屈した主桁については、構造上重要な部材であり、迅速かつ安全な復旧が求められた。また、座屈した主桁は、耐荷力が大きく喪失していると考えられるが、損傷箇所の部分的な耐荷力の低下の程度を正確に把握することは困難であり、どのように復旧設計を行うかが課題であった。

工法については、橋梁の性能を地震前の状態まで回復させることを目的として検討した。まず、座屈した主桁を撤去しパイパス材で代替させながら主桁を交換する工法を検討した。しかし、座屈桁が現存し落橋等していない点から何らかの残留応力が座屈桁に生じていると考えられるが、その応力が不明であること、ならびに座屈桁を切断後、死荷重によるひずみが他の部材に集中し、変形を生じることが懸念された。そこで、座屈桁を撤去せずに復旧させる方法を検討することとし、災害復旧への迅速性、経済性、施工性、及び安全性の観点から総合的に判断した結果、座屈桁を撤去せずに、横に主桁を追加する工法を採用した（写真-2、写真-3参照）。加えて、追加主桁近傍に対傾構及び横桁を追加して補強を行うこととした。図-5に本橋における座屈箇所の復旧方法（追加主桁及び追加補強材）の概要を示す。



写真-2 追加主桁設置状況について



写真-3 追加主桁設置後のP2橋脚付近の航空撮影

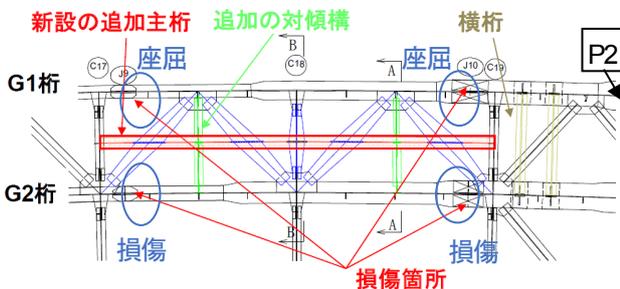


図-5 本橋における座屈箇所の復旧方法の概要図

(6) 鈹桁橋における追加主桁の優位性について

追加主桁は、座屈により鉛直方向に対する耐荷力が著しく低下し剛性が低下したと推測される主桁（G1-J9～J10）を存置させたまま、G1、G2桁間に主桁を追加し、応力を追加主桁に代替させることで橋梁全体の性能を回復させることを目的に設置した。

追加主桁は、座屈した主桁を撤去しないことから、現状で残っている応力を解放させることがない。そのため、橋梁全体の応力バランスが崩れず、施工性や安全性に優れ、復旧設計特有の不確実性も排除できる。また、損傷桁の撤去時に主桁の代わりとして必要となる仮設材（バイパス材）も不要なため、経済性にも優れる。

3. モニタリング調査

(1) モニタリングの目的

追加主桁による復旧方法は、今までにない知見が必要であるため、各施工段階においてモニタリングを行い、追加主桁や損傷部材の応力状態を「見える化」することで、安全性を確認しながら施工を進めることとした。

(2) モニタリングの概要

モニタリングは、各施工段階において実施している。本稿では、追加主桁の設置による効果に着目するため、「追加主桁等の補強部材設置時」と「部材設置後に行うP2橋脚部のジャッキダウン時」のモニタリング結果を比較する。なお、ジャッキダウンとは、施工用に持ち上げた桁を所定の位置に降ろす作業であり、主桁に応力変化が現れる施工段階である。

図-6にて、モニタリング調査位置及び計測断面（A～D）を示す。ここで、追加主桁をNG（New Girder）と称する。

(3) 事前解析と施工時モニタリングによる確認項目

まず、格子モデル解析を行い、各施工段階の各部材の応力状態を事前に把握した。その後、実施施工段階でのモニタリングによる各部材の応力変化と比較することで、想定した解析通りに追加主桁で応力を負担できているかを確認した。本工事では、モニタリングしたひずみ量を基に応力換算を行い、各計測点の変化（応力方向）について確認した。

(4) 追加主桁設置前後のモニタリング結果

モニタリングした応力値の評価は、計測前段階の値から計測時のひずみの変化量を応力換算して行った。本項では、追加主桁設置時のひずみゲージを基準として、追加主桁設置後の施工段階（ジャッキダウン時）のひずみゲージの差分を求め、ひずみ量を応力換算することにより考察する。また、解析値については、G1、G2桁の「損傷あり」、及び「損傷なし」の両方の解析値を算出し、モニタリングで実測した挙動が、どちらの挙動に近似するかを確認する。

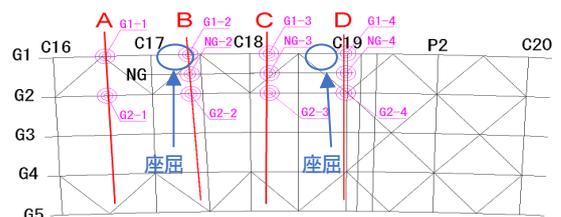


図-6 モニタリング調査位置及び計測断面図

ここで、「損傷あり」の解析値とは、G1、G2桁の損傷を考慮することで、損傷断面を抵抗断面としない場合の解析値である。また、「損傷なし」の解析値とは、G1、G2桁の損傷を考慮しないことで、損傷断面を抵抗断面とする場合の解析値である。

a) 格子モデルによる解析結果

格子解析によるP2橋脚部ジャッキダウン時の応力の変化を示す。図-7に「損傷あり」の解析値、図-8に「損傷なし」の解析値を示す。

図-7の結果より、損傷断面を抵抗断面としない場合は、座屈桁（G1桁）に応力の変化がほとんど現れないことが分かる。

b) モニタリングによる調査結果

次に、モニタリングによる各断面位置の応力の変化を図-9に示す。

図-9の結果より、追加主桁（NG）に応力が伝達していることを確認できた。さらに、損傷したG1、G2桁でも応力の変化が見られることを確認できた。

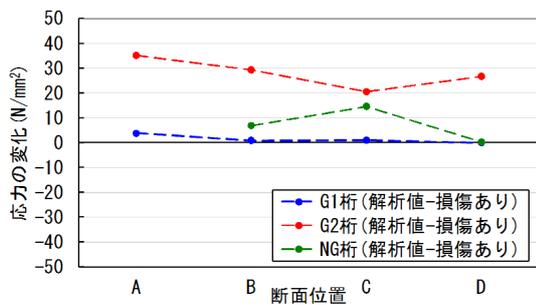


図-7 P2橋脚部ジャッキダウン時の解析値（損傷あり）

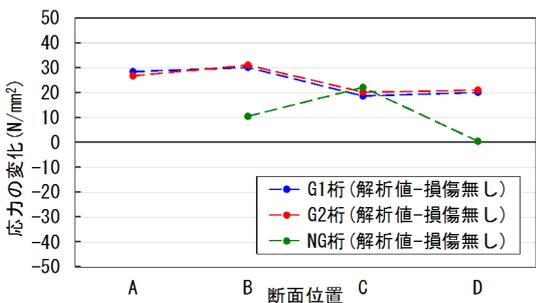


図-8 P2橋脚部ジャッキダウン時の解析値（損傷無し）

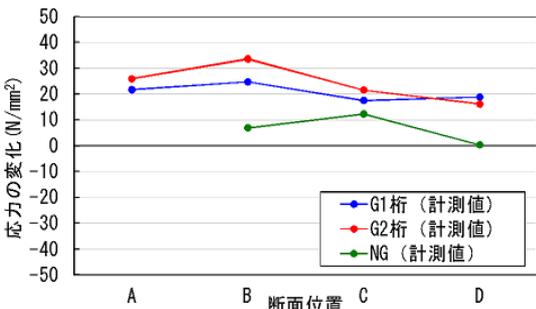


図-9 P2橋脚部ジャッキダウン時のモニタリング結果

4. 考察

3章(4)のモニタリング結果より、下記の点を確認できた。

- 1) モニタリング結果より、座屈桁（G1桁）の応力を補うように追加主桁に応力が発生していること
- 2) 解析値と計測値との比較により、「損傷無し」（G1、G2桁の損傷を考慮しない場合）の解析値とモニタリング結果の発生応力の傾向が近似しており、G1桁は座屈しているものの幾分の耐荷力を有すること

以上により、損傷桁も幾分の応力を負担しているが、追加主桁の設置により応力が分担されたため、損傷桁の負担が軽減されたと考えられる。

5. 結論

本稿では、熊本地震で被災を受けた大切畑大橋の座屈した主桁の復旧にあたり、変形した主桁を存置させたまま新設主桁を追加設置し、性能の回復を図る施工を実施した事例についてまとめた。

モニタリング結果より、追加主桁（NG）が座屈桁（G1桁）の応力を分担していること、ならびに存置した座屈桁（G1桁）も、抵抗断面として幾分の機能を有していることを確認できた。

さらに、万が一G1桁の損傷が進行して抵抗断面として機能しなくなっても、追加主桁（NG）のみで耐荷力を確保できるように構造設計を行っており、橋梁全体としては安全側に働くものと考えられる。

以上により、本橋の復旧対策が設計の目的に沿った役割を果たしていることを確認でき、機能回復として確実に安全確保を図れたと言える。

6. 今後の展望

熊本地震では、構造物の損傷が多く見られ、広域にわたり甚大な被害を生じた。我が国は世界有数の地震大国であり、今後同様の被害が各地で生じることも想定され、災害復旧でより迅速性、安全性が求められている。本稿で示した追加主桁による復旧は、確実に安全性を確保したことが確認された事例であり、今後、同様の鉸桁橋の災害復旧及び維持修繕に対して、主桁が損傷した場合の補修方法を検討するうえで、参考事例の一つとなれば幸いである。

謝辞：これらの設計および工事の実施にあたっては、国土技術政策総合研究所や土木研究所より多大な技術支援、並びに設計コンサルタントや施工業者等の関係者の努力により遂行されたものであり、ここに感謝の意を示す。

3次元モデルを活用した維持管理への取り組み

中日本ハイウェイ・エンジニアリング 東京(株) 経営企画部 谷野 知伸
中日本高速道路(株) 技術・建設本部 環境・技術企画部 西岡 幹雄
中日本高速道路(株) 東京支社 環境・技術管理部 前田 憲治

1. 目的

本取り組みは、高速道路の橋梁における点検結果を3次元モデルと重ね合わせることで、「見える化」による道路管理者間の円滑な合意形成と、点検結果をふまえた橋梁の効率的かつ効果的な診断および変状の判定の支援などを可能とし、維持管理における生産性の向上につなげることを企図したものである。

2. 背景

中日本高速道路(株) (以下、NEXCO) 東京支社管内の橋梁数は約1,300橋(上下別)に及び、2014年からの5年において、近接目視による点検を進めてきた。点検の結果はNEXCOの点検・補修業務支援システムに登録・保存され、一元的なデータ管理が可能である。点検データの出力様式はNEXCO全社的に統一されており(図1参照)、点検対象物の位置や構造に関する基本的な情報のほか、変状の内容や程度、補修の必要性の有無などが記載されている。また点検を実施した記録としてのスポット的な写真も添付されるようになっている。

このような点検結果の記録をもとに、NEXCOでは変状の判定を決定する集合会議を定期的に行っているが、判定や補修方法決定の拠りどころは、図-1のような情報および橋梁の場合は橋梁一般図等に旗上げされた変状位置が分かるもののみとなっている。上記会議には点検実施者が出席しているものの、周辺の状況や橋梁であればその構造上の特性など、必ずしも出席者全員によって十分把握されていない中、結果として適宜確認作業や補足説明が必要となり、効率的な会議運営が阻害される。また、円滑な合意形成にも支障が生じかねない。

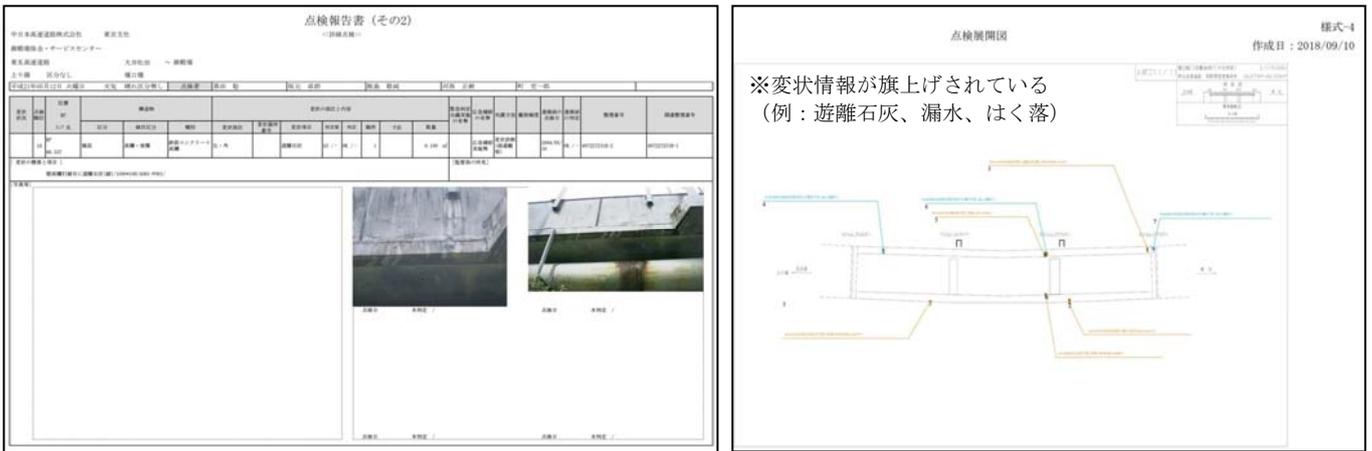


図-1 点検データの出力様式の例

3. 今回の取り組み①(橋梁の3次元モデル作成)

上記のような課題を解決するため、NEXCO 東京支社管内のそれぞれ形式の異なる3つの橋梁を対象に、まずは3次元モデルを試行的に作成した。3次元モデルといっても、国土交通省のCIM導入ガイドライン(案)で定義されているモデルの詳細度によって出来栄が大きく異なることから、点検実施者が最低限必要とする再現性のレベル、モデル作成にかかるコスト・労力なども考慮した。今回対象としている橋梁については、上記諸条件をもとに、実際に点検実施者の意見も聞きながら、図-2のように部材ごとに適用する詳細度をそれぞれ

れ決定した（太枠）。この決定ルールは、今後 3 次元モデルの作成を NEXCO 全社に水平展開する際の標準パターンとする。なお、3 次元モデルの作成にあたっては、Autodesk 社の AutoCAD Civil 3D 2018 を採用し、図-3に示すように、橋梁本体、附帯工、周辺の現況地形のそれぞれのモデルを統合した。

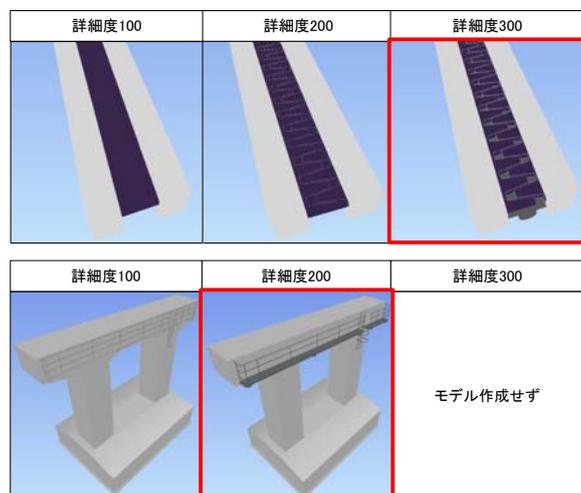


図-2 詳細度適用例（上:伸縮装置、下:橋脚）

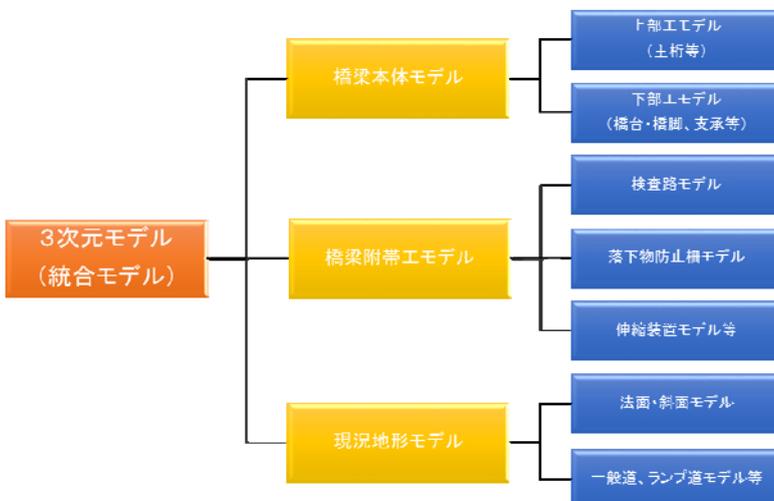


図-3 今回の 3 次元モデルの構成

4. 今回の取り組み②（作成した橋梁の 3 次元モデルと点検データとの紐付け）

実際に作成した橋梁の 3 次元モデルは図-4 のとおりであり、点検での着目部分のほか、周辺の状況も含めて、非常に分かりやすいものとなっている。このモデルの中に、図-5 に示すような、変状の箇所およびその区分（損傷の程度を色で分類）が分かるマーカーを設け、そのマーカーをクリックすると図-1 にあるような点検結果の概要が現れる形とした。ここでは紹介しないが、モデルの画面の中に、構造図面集や変状リスト等の必要情報に遷移できるボタンも作成しており、3 次元モデルと点検等に関するさまざまな詳細データをリンクさせることで、橋梁の統合的な維持管理が可能となり、業務の効率化・生産性向上につながると考えられる。

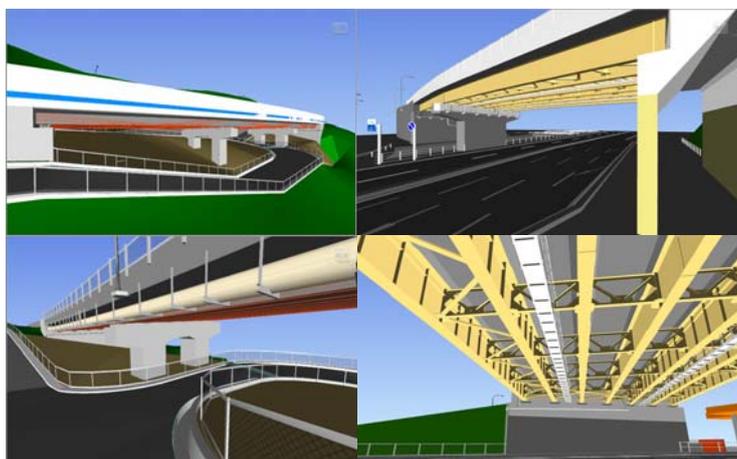


図-4 橋梁 3 次元モデル作成例

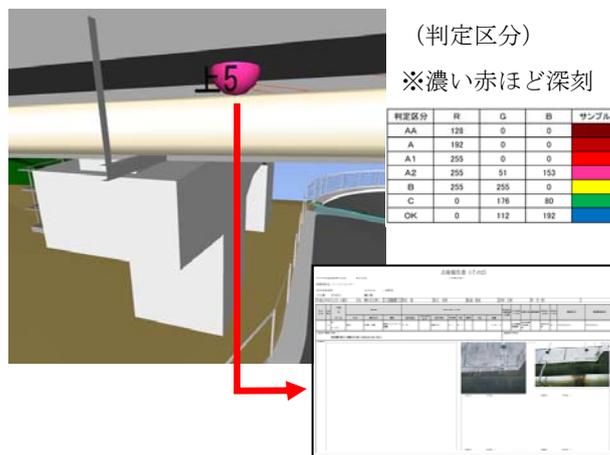


図-5 変状マーカーと点検データへの遷移

5. おわりに

今回は一部の橋梁のみを対象に、試行的な位置づけで実施したが、今後は今回対象外の形式の橋梁や、土工部（切盛土のり面）、トンネルなどについても同様の 3 次元モデルを作成したいと考えており、最適なモデル作成にあたってのルール化や、点検データの紐付けにおける部分の工夫など、さらなる改善を加えながら、モデル全体の高度化を図っていきたい。

参考文献

- ・国土交通省 CIM 導入推進委員会、CIM 導入ガイドライン（案）、平成 30 年 3 月