

# 既設道路橋に接続する新設橋梁の 施工計画について

山森 章雄<sup>1</sup>・内海 紀彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 道路部 道路工事課 (〒540-8586大阪府大阪府中央区大手前3-1-41)

<sup>2</sup>近畿地方整備局 奈良国道事務所 工務課 (〒630-8115奈良県奈良市大宮町3-5-11)

京奈和自動車道・大和御所道路は、橿原高田ICにおいて既設供用中の大和高田バイパスとランプ橋により接続する計画である。奈良中南部と大阪都市圏を連結する幹線道路である大和高田バイパスは、交通量が46,880台/日<sup>1)</sup>と非常に多く、施工時の現道交通への影響を最小化する必要がある。また民家等が近接して連坦する沿道環境下にあり、環境保全や施工ヤードの確保にも課題があった。このような環境の中、本稿では既設橋梁の改築を伴う接続部の施工について、施工計画や関係機関協議で露呈した施工時の課題、制約条件を整理するとともに、安全で確実な施工実施に向けて取り組んだ検討内容について報告するものである。

キーワード 既設橋、既設壁高欄撤去、施工計画、交通規制

## 1. 大和御所道路（5工区 橿原高田IC部）の概要

大和御所道路は、大和区間と御所区間とで構成される延長約27kmの高規格幹線道路で平成29年8月までに大和区間の橿原北ICから橿原高田IC（5工区：延長4.4km）を除いた専用部が供用されている。（図-1）

未供用区間のうち橿原高田ICでは、橿原JCT（仮称）大阪方面接続ランプの令和8年春開通に向け、国道165号大和高田バイパス（以下、大高BPと記述）と接続する橋梁工事を進めている。橿原JCT（仮称）大阪方面接続ランプは、南北方向に走る大和御所道路と東西を走る大高BPとを大阪方面に向けて連結するランプであり、全区間橋梁構造により国道24号や近畿日本鉄道：南大阪線を横断し、大高BPに合流する計画である。（図-2）

大高BP接続部付近の沿道状況は、現側道に沿って民家等の建屋が連坦する狭隘環境にあり、沿道民家と極めて近接した施工となるため、騒音振動等の沿道環境への配慮が不可欠な地域にある。（図-3）

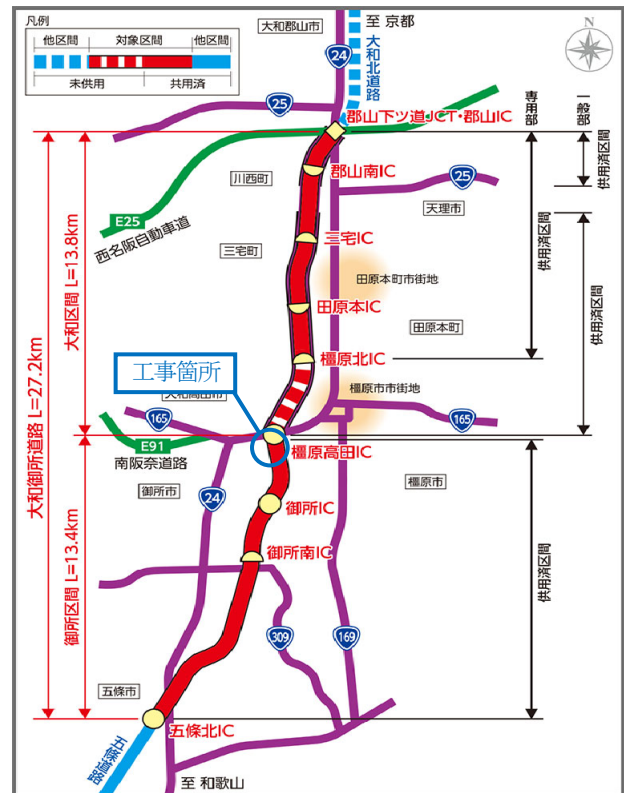


図-1 大和御所道路の概要

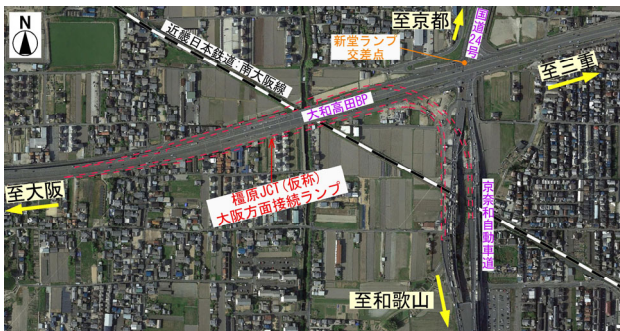


図-2 橿原 JCT（仮称）大阪方面接続ランプ全景



図-3 大和高田バイパス接続部付近の沿道状況

2. 既設橋梁および新設橋梁の計画概要

(1) 既設橋梁及び新設橋梁の計画概要

大高BP接続部の既設橋梁は、3径間連結PCプレテンT桁連結橋（径間長18.5m）を中心に、中間の交差点部には鋼単純鉄桁（橋長30m）が混在する構成であった。新設橋の支間割は既設橋との横並び整合を念頭に橋脚配置を計画したが、沿道からのアクセス確保に向け橋脚位置の調整を要したため、既設橋と整合させることができず縦目地を配置した新旧分離構造を採用している。

また、上部工形式は鉄桁形式とし、合流ノーズから加速車線に向けて減少する幅員の変化（8.6m～2.7m）に合わせて主桁本数を3本から2本に変化させる変断面構造を採用している。

表-1 新旧橋梁の構造概要

	既設橋梁（大高BP）	新設橋梁（ランプ橋）
幅員	9.05m（上り線）	8.63m～2.73m
形式	PC連結プレテンT桁	鋼7径間連続鉄桁橋
交差点部	鋼単純鉄桁	
支間長	PC18.5m, 鋼30m	26m～40m
竣工年度	昭和50年頃	建設中
設計荷重	TL-20	B活荷重
下部工	RC張出し式橋脚	RC張出し式, 一部鋼製
基礎工	杭基礎	場所打ち杭φ1.2m

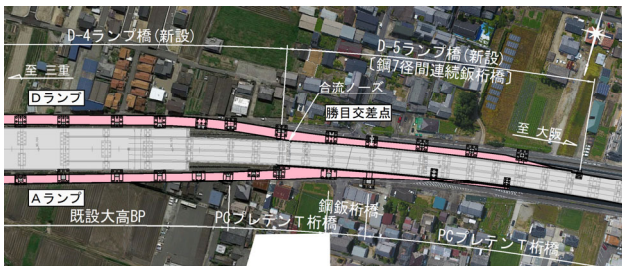


図-4 大和高田バイパス接続部付近の状況

(2) 施工計画に係る検討条件

施工時に影響を受ける既設大高BPの諸元、ランプ接続部の改築に要する施工工種を表-2に、これらの施工を行うに際しての配慮事項を表-3に示す。

表-2 施工計画に係る検討条件

項目	施工検討条件	
大高BP諸元	現況交通量 <sup>1)</sup> 24時間 : 46,880台（大型車 5,912台） 昼12時間 : 36,295台（大型車 4,639台）	
	車線数（車線幅） 上り2車線+下り2車線=計4車線 (2×3.50m) (2×3.5m)	
施工工種	既設部 ① 接続部の壁高欄撤去 ② 床版端部(張出し部)の補強	
	新設部 ③ 鋼桁の架設 ④ 床版・壁高欄工の施工	
	橋面工	⑤ 縦目地ジョイントの敷設
		⑥ 橋面排水（鋼製排水溝）の敷設

表-3 施工に際しての配慮事項

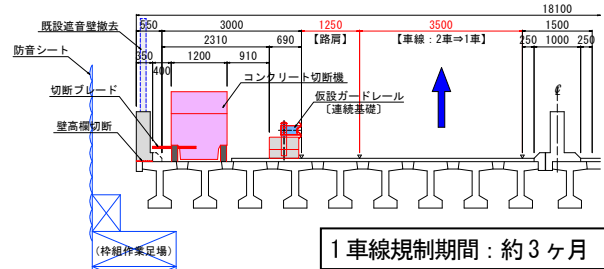
項目	配慮事項
交通への配慮	大高BPの施工時通行帯の確保
環境への配慮	既設遮音壁の撤去 → 仮設遮音対策
安全への配慮	既設壁高欄の撤去 → 仮設防護柵の設置

3. 施工計画案の立案と課題の整理

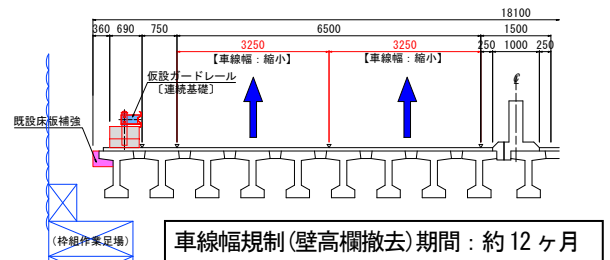
(1) 施工基本計画と施工上の課題

まずは各施工工種の標準的な施工スペースを確保した施工手順【基本計画】を策定し、これらの手順を図-5に整理した。また、本施工計画における課題をa)～c)に示す。

STEP-1：既設壁高欄切断撤去（大高BP：1車線規制）



STEP-2：既設床版補強（大高BP：車線幅規制）



STEP-3：新設桁架設（大高BP：車線幅規制）

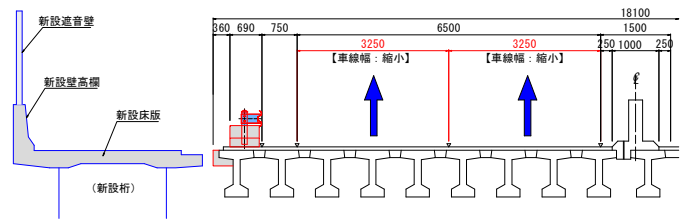


図-5 施工手順【基本計画】

a) 課題①：1車線規制による交通渋滞、事故発生懸念

日当り4.7万台の交通量がある大高BPを約3ヶ月間にわたり常時片側1車線規制する必要があるため、交通渋滞の発生や交通事故の発生が懸念される。

b) 課題②：既設遮音壁撤去後の施工中の防音対策

既設壁高欄の撤去に伴い壁高欄天端に取り付く既設遮

音壁が撤去されるため、施工中の周辺住民への防音対策が必要となる。足場等を利用して防音シート等による対策を行っても既設遮音壁と同等の防音機能は確保し難い。

c) 課題③：仮設防護柵による耐荷性能の低下

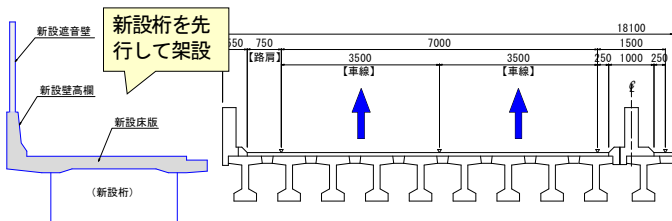
既設壁高欄の撤去に伴い仮設防護柵を設置するが、現況壁高欄より耐荷性能が低下する。また、大高BPの高架下には現道があり、事故発生時に仮設防護柵等が転落すると重大事故に繋がりがかねない。

このような長期間の規制・環境変化について、道路利用者及び関係行政機関の理解を得がたいことは言うまでもなく、施工計画を再検討する必要があった。

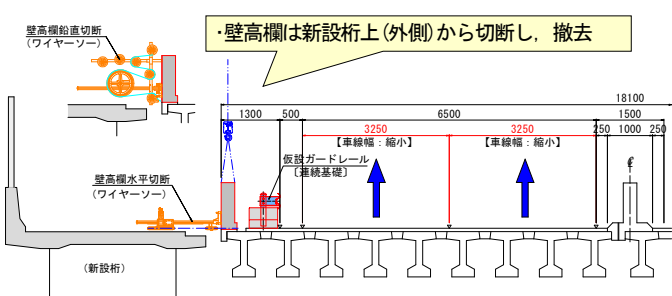
(2) 課題解消に向けた代替案の立案

前項で挙げられた課題①～③を解消する施工手順として、新設桁を先行して施工することで大高BPの外側に作業ヤードや剛性防護柵・遮音壁を確保する代替案を立案し、施工手順【変更計画】を図-6のとおり策定した。また、【変更計画】による課題の改善効果を表-4に示す。

STEP-1：新設桁架設（大高BP：現況）



STEP-2：既設壁高欄撤去（大高BP：車線幅規制）



STEP-3：既設床版補強（大高BP：車線幅規制）

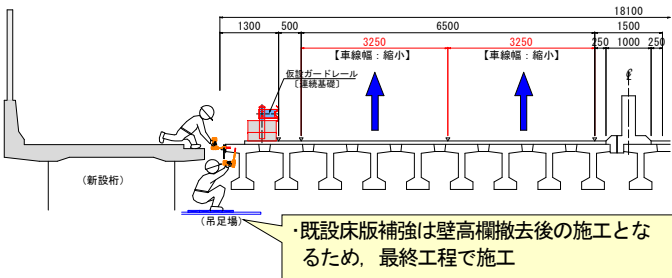


図-6 施工手順【変更計画】

表-4 【変更計画】による課題①～③の改善効果

課題	【変更計画】による改善効果
①車線規制による交通渋滞、事故発生懸念	新設橋を既設壁高欄切断撤去時の施工ヤードとすることで、大高BPの常時1車線規制を回避し、常時2車線を確保
②既設遮音壁撤去後の施工中の防音対策	新設橋側に遮音壁を先行して設置することで、現況と同等の防音施設を確保
③仮設防護柵による耐荷性能の低下	新設橋の壁高欄設置後に既設壁高欄を切断撤去することで、仮設防護柵設置時の重大事故発生リスクを軽減

4. 変更計画の実現に向けた検討

(1) 変更計画の実現に向けた課題

新設桁を先行架設することで【基本計画】の課題は解消できるものの【変更計画】の採用にあたっては表-5に示す新たな課題に対する解決を要した。

表-5 変更計画の実現に向けた新たな課題

課題内容
課題④. 既設橋床版補強の施工スペースの減少による施工実現性の確認
課題⑤. 新設桁の残存キャンバーによる施工セット面の上昇に対する施工実現性の確認
課題⑥. 施工中の大高BPの車線幅規制に係る関係機関との調整

(2) 課題の解決に向けた検討および確認

a) 課題④：狭隘空間での既設床版補強施工の確認

既設床版補強は壁高欄撤去後の施工となるため、新旧の桁に挟まれた狭隘な作業空間での補強施工を要した。

そのため、詳細な施工ステップ図と実際の施工条件を反映したBIM/CIMモデル（図-7）を作成し、クリティカルとなる作業について施工業者とともに綿密な調整を行い、施工の対応可否を確認した。

その結果、補強鉄筋取付け用の削孔作業が狭隘な作業空間で最も厳しい工種との指摘を受けたが、実業者も含めた施工業者との複数回にわたる打合せにより、ハンマドリルによる人力施工で対応すれば施工可能との意見を得たため、施工実現性を確認した。

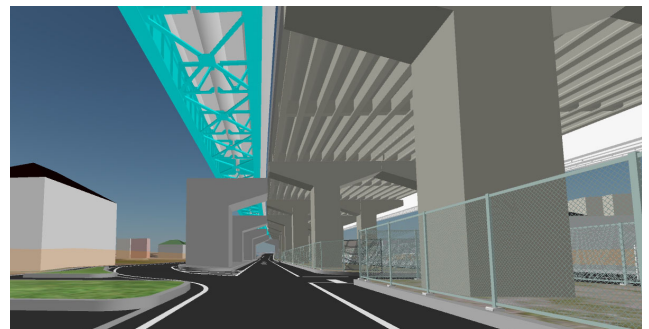


図-7 施工箇所のBIM/CIMモデル

b) 課題⑤：施工セット面の上昇に対する施工影響確認

新設桁架設段階では舗装等橋面工荷重が載荷されない状況にあり、製作キャンバーの残留による壁高欄切断面の波打ちが懸念された。この残留キャンバーに対する施工への影響について、設計段階では判断が付きなかつたため、想定されるキャンバー量を発注者にて整理した上で施工業者へ対応方法等について確認した。

その結果、施工に影響するキャンバー量ではなく、外側からでも壁高欄の切断撤去は可能との意見を得たため、施工実現性を確認した。

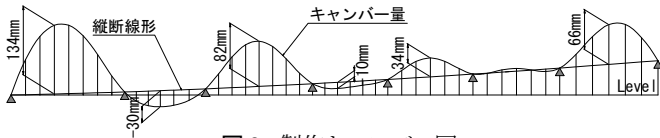


図-8 製作キャンバー図

表-6 製作キャンバーと残留キャンバー量

支間	1	2	3	4	5	6	7
キャンバー	134mm	-30mm	82mm	-10mm	34mm	4mm	66mm
残留値	14mm	-2mm	7mm	1mm	3mm	4mm	9mm

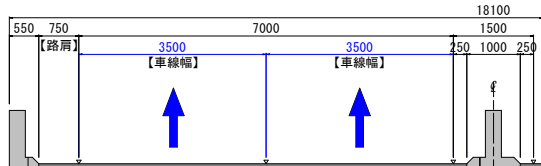
※キャンバー値は既設桁に近い、右側主桁の値を示す

c) 課題⑥：大高BPの車線幅規制に係る関係機関調整

施工時は約8ヶ月間、大高BPの常時車線幅縮小に伴う交通規制が必要となるが、大高BPの現況車線幅員は車線幅3.5m×2車線+路肩0.75mであり、第3種第1級の道路規格に対して最小幅員となっていた。そのため、施工時に限り道路構造令第3条第2項のただし書きの規定<sup>2)</sup>を踏まえ、第3種第2級相当として車線幅員3.25m×2車線、路肩0.5mに縮小する規制計画を作成(図-9)し、奈良県警察本部と協議を行った。

奈良県警察本部との協議の結果、車線幅規制箇所(図-10)は直線区間でありスピードの早い車両の通行が多いため、シフト長を長めに確保(図-11)することにより車線幅規制については了解を得ることができた。

【現況：第3種第1級】



【施工時：第3種第2級相当】

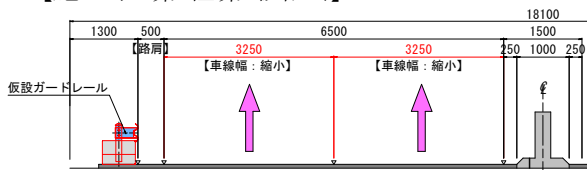


図-9 大高BPの現況幅員と施工時規制幅員



図-10 大高BP車線幅規制箇所

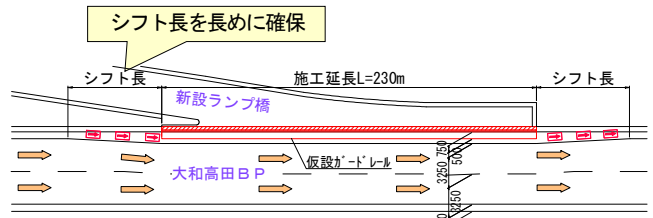


図-11 施工時の車線シフト

5. おわりに

本検討は、大高BPの既設橋梁と新設橋の接続部の施工計画について、現道交通や沿道環境等の施工条件を踏まえ最も合理的な施工方法を検討したものであり、検討した施工手順を細かく精査することで新たな課題やその解決策に気づくことができ、設計段階より綿密に議論することの重要性を改めて認識することができた。机上の検討のみでは施工実現性の確認が難しい特殊な施工条件下による施工方法については、一つ一つの作業を分解して施工ステップ図やBIM/CIMモデルにより見える化し、発注者、設計業者、施工業者と議論を深めることで、本施工方法を採用することができた。

また、当初の【基本計画】に比べて【変更計画】を採用したことにより、現道への交通影響を最小限とすることができ、交通事故のリスクが低減されより安全・安心な施工方法を選定することができた。

本稿は、施工方法の検討経緯及び施工実現性の確認方法についてとりまとめたものであり、今後の施工にあたっては、より安全・安心な施工となるよう現道交通に配慮した交通規制計画を立案するとともに、長期間の交通規制に伴う道路利用者への適切な周知方法等について、引き続き検討して参りたい。

謝辞：本稿の作成にあたり、ご助言、ご協力いただいた(株)総合技術コンサルタント及び宮地エンジニアリング(株)の方々へ心より感謝申し上げます。

付録

- 1) 全国道路・街路交通情勢調査 (R3)
- 2) 道路構造令 (昭和四十五年政令第三百二十号)

## 「史跡」及び「名勝」嵐山地区における河川整備の課題への取り組みについて ～一の井堰及び派川の変遷と価値の考え方の整理～

徳野 峻治<sup>1</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 淀川河川事務所 流域治水課 (〒573-1191大阪府枚方市新町2丁目2-10)

桂川嵐山地区は、文化財保護法上の「史跡及び名勝」に指定されており、加えて、ユネスコが世界遺産のバッファゾーンにも設定している。一方、当該地区は桂川の中で最も治水安全度が低い地区でもある。こうした背景より、当該地区では3つの治水対策（可動式止水壁による左岸溢水対策（2022年3月完了）、一の井堰改築、堰改築を含む派川改修）を行うこととしている。

本稿は、嵐山の重要な景観要素である一の井堰及び派川の改築検討の基礎資料とすることを目的に、文書・絵葉書・地形図に基づき現在までの一の井堰及び派川の変遷を明らかにした上で、嵐山における一の井堰及び派川の景観価値について報告する。

キーワード 嵐山、歴史的変遷、景観価値

### 1. 桂川嵐山地区の概要

桂川嵐山地区は、直轄河川では唯一文化財保護法上の「史跡及び名勝」に指定されており、加えて、世界遺産である天龍寺、西芳寺に挟まれた地区であることから、ユネスコがこれらの世界遺産のバッファゾーンにも設定している。また、山・川及び歴史的構造物が一体となって、景観と環境を楽しむ空間が形成されており、四季を通じて多くの観光客で賑わう歴史的な景勝地である（写真-1）。



写真-1 桂川左岸側からの嵐山

一方、当該地区は、流下断面が不足しており、桂川の中で最も治水安全度が低い。特に渡月橋上流左岸では、現在固定堰である一の井堰の堰上げにより浸水被害が発生している。近年では、2004年台風23号洪水では10戸、2013年台風18号洪水では93戸の浸水被害が発生しており、迅速な治水対策が必要である。

そのため、桂川嵐山地区に甚大な浸水被害を与えた2004年台風23号洪水をH.W.L以下で安全に流下させる治水対策について検討を行ってきた。議論の結果、「史跡及び名勝」への影響を極力抑制し、浸水被害を速やかに軽減する「可動式止水壁による左岸溢水対策」「一の井堰改築」「堰改築を含む派川改修」の3つの治水対策について、設計、検討を進めることとなった（図-1）。そのうち「可動式止水壁による左岸溢水対策」が2022年3月に完了した。残る2つの「一の井堰改築」「堰改築を含む派川改修」の実施に向けて具体的設計検討を進める予定であるが、「史跡及び名勝」である嵐山の価値を減じないものとするためには、これまでの一の井堰及び派川の変遷や改築経緯を把握することが不可欠である。しかし、一の井堰及び派川の変遷や景観価値については十分に明らかにされていない。

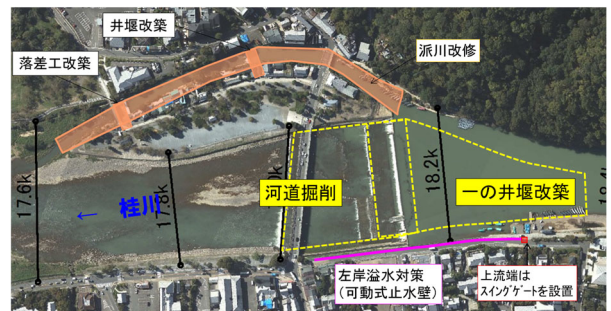


図-1 桂川嵐山地区における3つの治水対策

## 2. 一の井堰改築

### (1)一の井堰の概要

一の井堰は固定堰であり、左右岸に土砂吐き用可動ゲート、左岸端に取水路、右岸端に魚道が設置されている。堰表面は石張りとなっており、水が流れることにより白波が形成される落水表情を有している。なお、京都市内にかんがい用水を供給するための農業用用水施設であり、洛西土地改良区が維持管理及び運用を行っている。

また、当該施設は、桂川の水の流れに変化を与え、渡月橋等から嵐山とセットで眺められる施設であり、桂川嵐山地区の景観を構成する重要な要素でもある。

一方で、現在固定堰である一の井堰の堰上げにより、浸水被害が発生している。そのため、治水対策を行う必要があるが、「桂川嵐山地区河川整備検討委員会（2012年7月設立）」（以下検討委員会という。）の委員から「一の井堰改築」の検討にあたり、一の井堰の価値を深く議論することが重要。堰構造の変化等を総括し、関係者で共有する必要がある。」との助言があった。上記の助言を踏まえ、嵐山の価値を減じないような対策を行う必要があるため、一の井堰の変遷を総括し、景観価値を整理する。

### (2)一の井堰の変遷

#### a)江戸時代以前

古墳時代に嵯峨・嵐山近辺を治めていた秦氏が5世紀末に現在の一の井堰の原型となる葛野大堰を築造したとされる。

9世紀頃には宇多天皇が嵐山付近の桂川で遊覧し歌を詠んだとされ、平安時代中期に編集された延喜式には筏通しに関する記録があり、一の井堰周辺が古代より賑わっていたことが垣間見られる。

近世(江戸時代中期)になると、天龍寺などの桂川沿いに茶屋を出すようになり、嵐山周辺は一般庶民の物見遊山の名所となった(図-2)。

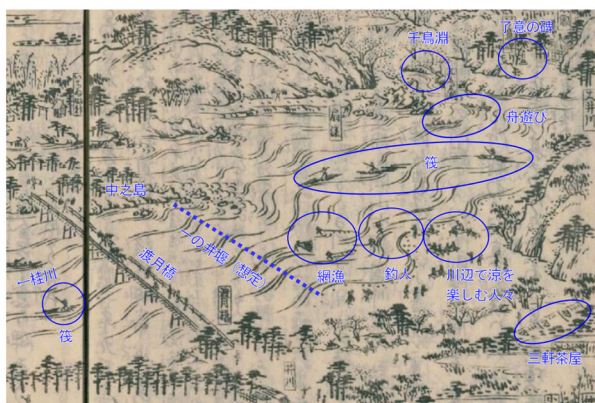


図-2 近世（江戸中期）の一の井堰周辺の様子<sup>2)</sup>加筆

#### b)「史跡及び名勝」指定頃

「史跡及び名勝」指定当時(1927年)の一の井堰は、桂川の流向に対して斜めに角度がついた斜め堰であった(図-3)。堰の構造は、木杭の隙間を石で間詰めしたものであり、木杭の間から白波がランダムに落下する落水表情を有していた(写真-2)。



図-3 「史跡及び名勝」指定頃の一の井堰周辺の地形図<sup>3)</sup>加筆



写真-2 昭和初期の一の井堰<sup>4)</sup>加筆

堰上流の湛水面では舟遊びが行われ(図-4)、堰の中央付近から左岸側に向けて設けられた筏通しは筏流しの航路として使われていた。



図-4 「史跡及び名勝」指定頃の舟遊びの様子<sup>5)</sup>加筆

「史跡及び名勝」指定時の説明文のうち、嵐山を構成する重要な景観要素は自然対象として川の流れ、舟遊び、及び嵐山の森林が挙げられ、著名な施設として渡月橋、大堰(一の井堰)及びその堤防が挙げられ

ている。そのため、一の井堰は「史跡及び名勝」指定時から著名な施設として位置づけられていたことが読み取れる。

c)一の井堰改築前

「史跡及び名勝」指定頃(図-3)と現在の一の井堰に改築する前(図-5)の平面図を比較すると、旧一の井堰や桂川の平面形状に変化は見られないため、写真-2と同じ木杭の間から白波がランダムに落下する落水表情を有していたと思われる。図-5では筏通しの航路が示されており、筏通しの機能が継続されていたことが読み取れる。

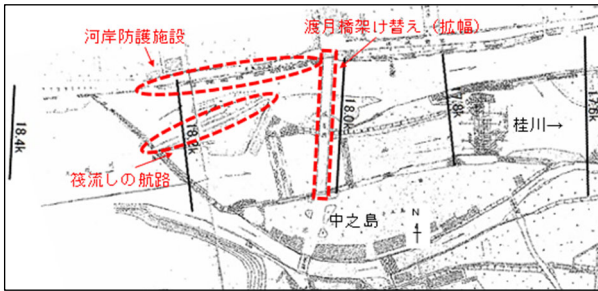


図-5 一の井堰改築前(1936年)の平面図加筆  
(赤字：図-3からの主な変化)

d)一の井堰改築直後

現在の一の井堰へと改築されたのは、1951年で、戦後の食糧不足に対応するためのかんがい用水の安定確保の目的であった。一の井堰の構造案は判斜め堰型の折線案、曲線型の弧状案、直線案の3案あり、直線案が他案と比べて施工性や維持管理性で有利であり、さらに下流護岸の安全性が向上するという理由で採決された(図-6)。また、文部省からの意見としては、「雑割石張を自然石張に変更されたい」とあり、雑割石張による平滑で白波が立ちづらい落水面よりも、自然石張の凹凸により「史跡及び名勝」指定当時と同じような白波が立ちやすい落水面の方が嵐山の景観になじみやすいと考えていたことがうかがえる。

排砂門(土砂吐き)の当初設計は、門柱と操作台がある引き上げゲート形式であったが、学識者からの「風致上見られたものでない」との意見等を踏まえて、角落とし形式に変更された。このことから、当時の学識者は、堰天端から鉛直方向に突出する施設がない水平な堰の姿が嵐山の風致を保全するためにも重要であると考えていたことがうかがえる。

筏通しについては、堰改築前と同様に左岸寄りに復元されている。ただし、筏流しの仕事は1948年になくなっているため、生業のための運搬流路としての役割は小さく、「史跡及び名勝」指定当時の堰の状況やかつて筏流しが盛んであったという河川文化の名残を継承する上で重要であったと考えられる。

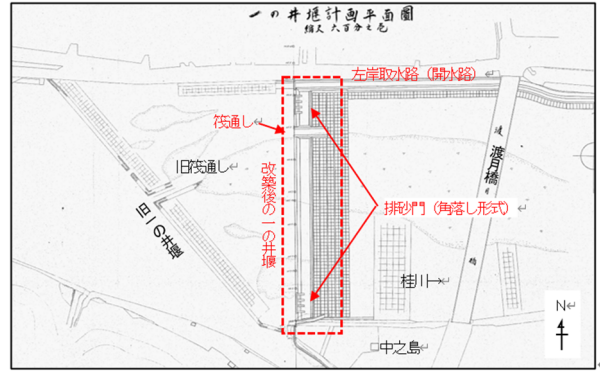


図-6 一の井堰改築直後(1951年)の平面図加筆  
(赤字：図-5からの主な変化)

e)現在

1963年に排砂門が可動形式の土砂吐きゲートに改修されたものの、主要な視対象である堰本体や筏通しは1951年の一の井堰改築後から現在までに至るまで維持されている(図-7)。したがって、一の井堰の落水表情は堰改築直後から変化していない(写真-3,4)。

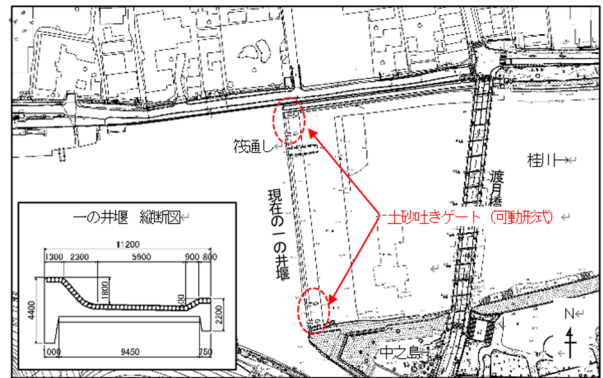


図-7 現在(2013年)の平面図と一の井堰の縦断面図加筆  
(赤字：図-6からの主な変化)



写真-3 1955年前後(推定)の一の井堰加筆



写真4 現在の一の井堰

(土砂吐きゲートの堰柱は昭和26年当時のものを活用)

e)一の井堰の変遷の整理

「史跡及び名勝」指定以降の一の井堰の変遷について、堰位置・堰構造・付帯施設に変化が見られるものの、嵐山の重要な景観要素である舟遊びが可能な湛水面、筏流しの歴史を想起させる筏通し、白波を含む水平な落水表情、及び川・橋・山のある風景を阻害しない堰の姿は現在も継承されていることがわかる(図-8)。

表-1 「史跡及び名勝」指定以降の一の井堰の主な変化

年代	全般	筏通し	排砂門(土砂吐き)	左岸取水路
古墳時代(5世紀頃)	葛野大堰築造	-	-	-
平安時代(800年頃)	↓	筏通し設置	-	-
昭和2年	「史跡及び名勝」指定【木杭による斜め堰】	↓	-	-
昭和23年	一の井堰改築着手	木杭の筏通しの撤去	-	-
昭和26年	一の井堰改築完了【自然石張り固定堰】	石張りの筏通しの設置	角落し形式の排砂門の設置	左岸取水路(開水路)の設置
昭和38年	↓	↓	可動形式の土砂吐きに改修	↓
現在	↓	↓	↓	↓

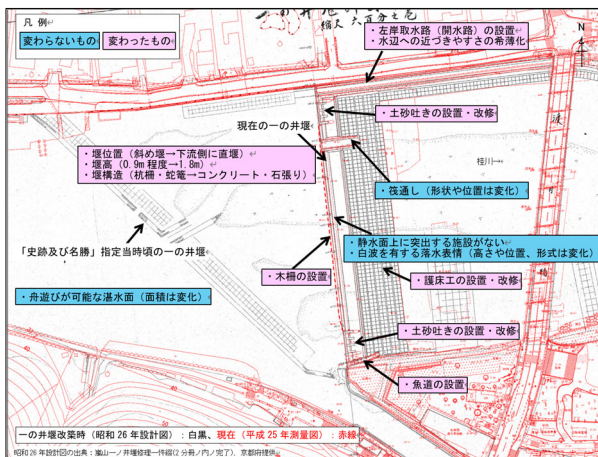


図-8 一の井堰の主な変化

(3)一の井堰の景観価値

前述の内容を踏まえると、一の井堰の景観価値について、下記のとおり考察できる。

- ・自然景を水平に縁取る

桂川嵐山地区全体における俯瞰的な観点から一の井堰を見た場合、堰天端から鉛直方向に立ち上がる施設がない水平性が卓越した堰の姿が印象的であり、これにより「史跡及び名勝」指定時から現在まで継承されている“川・橋・山(森林)がセット”となった嵐山らしい景観を阻害していない。また、斜め堰から川の流向に対して直角に配置された直堰に改築されたことで、嵐山を眺める主要な視点場である渡月橋から見たときに、概ね高さが揃った周辺建物との調和が感じられるとともに、背後の森林を中心とする自然景を引き立て、縁取る水平な舞台として機能している。

- ・静水面・しぶき・流れといった水の動き

一の井堰単体を見た場合、水平でありながら細かくランダムに変化する白波が堰本体の表面を伝い落ちる落水表情が景観的な特徴として挙げられる。嵐山において近世から現在に至るまで継続的に鑑賞されてきた“大堰川の水の流れや水面”や“河川構造内により生じる「流れ」や「しぶき」”は、先代の木杭による斜め堰と現在の直堰に共通する白波による落水表情を含む水の流れを一の井堰が創出していることに起因している。

- ・人工物でありながら嵐山の自然景と共存

「嵐山らしい景観」とは、「主役である森林を中心とする自然景と、それを引き立て、水平に縁取る一の井堰が共存している景観」であると言える。ここで、人工物である一の井堰が“自然景と共存”する要因としては、「静水面・しぶき・流れといった水の動き」という自然現象により人工物の印象を和らげていることが挙げられる。



写真5 渡月橋から眺めた現在の一の井堰と嵐山

3. 堰改築を含む派川改修

(1)派川の概要

一の井堰上流右岸より分派する派川では、一の井堰湛水面を活用し、2基の固定堰で取水を行っている。派川は、桂川本川と比べ、河床が高く、2基の固定堰による堰上げにより、浸水被害が発生している。派



川を含む嵐山地区全体が「史跡及び名勝」に指定されており、一の井堰と同様に嵐山の価値を減じないような対策が必要である。そのため、派川の変遷を総括し、景観価値を整理する。

(2)派川の変遷

「史跡及び名勝」指定頃の派川は、当時の鳥瞰図や「史跡及び名勝」指定頃の1923年の地形図と2013年の測量図の重ね合わせ図(図-9)より、派川沿いの土産物屋や食事処などの建物の配置や規模、戸数などの状況に変化はみられるものの、現在と同様に沿川に建物が建ち並んでいること、河岸の構造は桂川本川からの分派部から合流部までの全区間を通して左右岸ともに石積みを基本としてものであり、変化が確認されなかった。

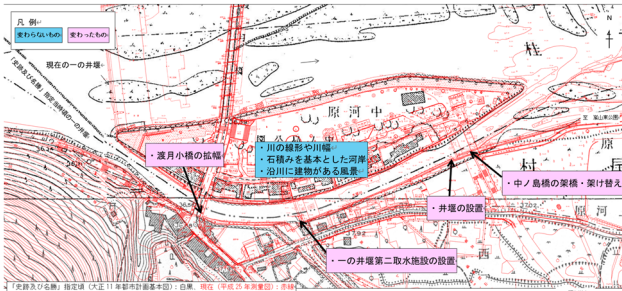


図-9 派川の主な変化

「史跡及び名勝」指定後の派川は、1930年の阪急嵐山駅の開業に合わせて派川下流部に中ノ島橋が架けられ、1935年頃には渡月小橋の拡幅工事が行われた。1940年に派川合流部下流での嵐山東公園の整備に合わせて公園用水の取水を目的とした井堰が設置された。1951年に一の井堰改築に合わせて渡月小橋下流にかんがい用水の取水を目的とした一の井堰第二取水施設が設置され、それぞれの堰上流において湛水区域が創出された。



写真-6 派川の現在の姿

(3)派川の景観価値

「史跡及び名勝」指定以降の派川の変遷について、取水施設の設置により湛水区間の創出はみられるものの、川の線形や川幅に変化はなく、石積みを基本とした河岸や沿川に建物がある風景は現在も残されていることがわかる。

このことから、派川の景観価値について、下記のとおり考察できる。

- ・森林や水面を中心とする自然景

派川は、代表的な視点場である中ノ島橋や周辺建物からの派川の景観を重視する必要がある。嵐山の重要な構成要素である森林や水面を中心とする自然景の一部として溶け込み、嵐山と同化した穏やかな風景を呈している。

- ・石積みを基調とした昔ながらの川の姿

こうした景観価値を継承する上では、石積みを基調とした小規模な河川施設を主体に、水面の動きと奥行きのある落ち着いた景観としての価値を継承する工夫が求められる。

4. 今後の一の井堰改修にあたって

本稿で報告した一の井堰の景観価値を保全するために「一の井堰改築」に求められる要件は、「水面上への構造物突出の抑制」と「白波の再現」である。

「水面上への構造物突出の抑制」についての課題は、水面上に堰柱やスポイラ等の構造物が突出することで、自然景が分断される景観となることであり、構造物の突出を抑える工夫が必要となる。今後設計を進める上で、工夫を検討していく。

「白波の再現」についての課題は、一般的な堰構造では、堰天端から水が落下する流れとなり、現在の白波とは異なる落水表情となることである。この課題に対応するために、現地写真から検討を行うことが求められる。そのため、現地写真から現在の一の井堰の石張り状況と落水表情の関係について、確認を行った。

- ・一の井堰本体の石張りの諸元の推定

一の井堰本体の石の張り方について確認を行った。

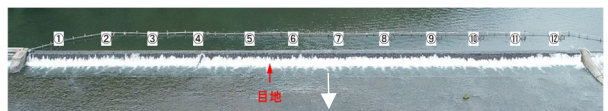


図-10 現在の一の井堰の落水表情

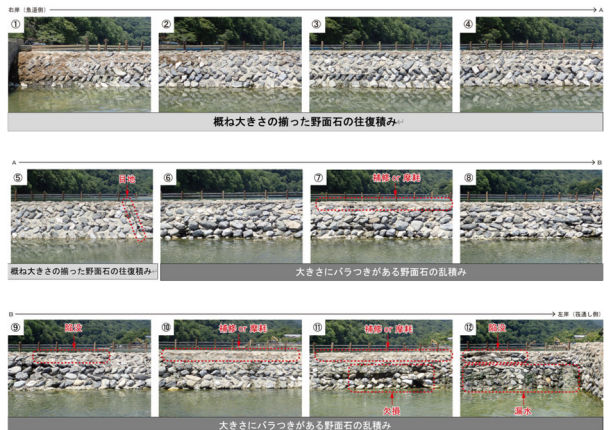


図-11 一の井堰本体の石張りの諸元の推定

図-11 より右岸側(写真①～⑤)では、概ね大きさの揃った野面石の往復積みで、表面の欠損や漏水は見られない。左岸側(写真⑥～⑫)では、大きさにばらつきがある野面石の乱積みで、筏通しに近い箇所(写真⑨⑩⑫)で天端の陥没や落水面の欠損、漏水が見られる。左右岸とも練石張りで、堰中央付近(写真⑤)に目地がある。この目地は、半川締切りで工事を行った際の施工目地と思われる。目地を境に積み方が異なるのは、施工業者(石積み職人)が左右岸で異なるためと思われる。左岸側(写真⑦⑩⑪)の天端で見られる石の突出高が小さく平滑な箇所は、1951年堰改築後に石と石の隙間をモルタル補修した箇所、もしくは石が摩耗した箇所と思われる。

・石張り状態と白波の関係

石の張り方・大きさ・密度が異なる右岸側(写真①～⑤)と左岸側(写真⑥～⑫)で、白波に大きな違いは見られない。

・石の突出高と天端形状

天端の石の突出高が小さく平滑で曲線半径が小さい箇所(写真⑦⑩⑪)は、白波の発生位置が低くなる。

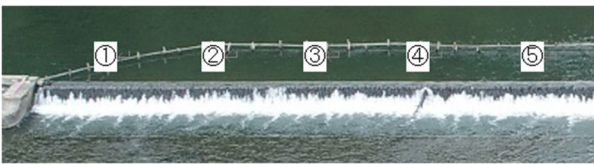


図-12 現地写真(左岸側)

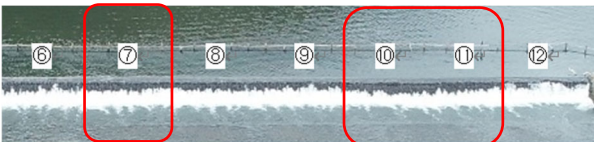


図-13 現地写真(右岸側)

よって、上記二つの観点から一の井堰の石張り状況と落水表情の関係について下記のように総括できる。

・現在の一の井堰の白波の発生には、落水面の「石の張り方・大きさ・密度」よりも、天端の「石の突出高と曲線半径」の影響が支配的である。

・したがって、白波再現に向けては、天端の「石の突出高と曲線半径」の設定が最重要事項であり、落水面の凹凸と合わせて模型実験で検証する予定である。

## 5. 終わりに

以上のように桂川嵐山地区の河川改修に当たっては、一の井堰及び派川の変遷を整理し、景観価値を総括した上で、景観価値を減じないような検討を進めている。「史跡及び名勝」は現状の保存が原則であるため、河川整備等の現状を変更する行為にあたっては、文化庁の文化審議会での審議を経て文化庁長官の同意が必要となる。そのため、施工に向けては、検討委員会の委員から助言いただき、本稿で明らかにした変遷や景観価値を踏まえて、文化庁と協議を行う。

また、地元関係者と京都府、京都市等の合意が得られるよう今後も多数の関係者と桂川嵐山地区における河川整備について丁寧に説明を行っていく所存である。

**謝辞:** 本稿作成にあたりご教授いただいた全ての方々、本事業に関わった全ての方々に心から感謝します。

## 参考文献

- 1) 三宅純：嵐山の一の井堰の景観価値に関する研究
- 2) 吉野屋為八：都名所図会(巻之四)嵐山・法輪寺・渡月橋，国立国会図書館デジタルコレクション，1780
- 3) 国土地理院：都市計画基本図(T11 測T14 発)，京都府京都学・歴史館，1911
- 4) 黒川翠山：黒川翠山写真資料，京の記憶アーカイブ，京都府京都学・歴史館
- 5) 京都嵐山渡舟場，絵葉書，大正初期～昭和初期(推定)
- 6) 京都府：昭和11年災害復旧図面，1936
- 7) 京都府：「嵐山一ノ井堰修理一件綴(二分冊ノ内ノ一)」『嵐山一の井堰打合せ』，1958
- 8) 国土交通省淀川河川事務所：測量図，2013
- 9) 京都府農林水産部耕地整備室：風景・風土を守る洛西用水「嵯峨嵐山 一の井堰」，2006

# 凍害によるコンクリート二次製品の損傷について（報告）

杉若 圭一郎<sup>1</sup>・齋藤 明宏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>兵庫国道事務所 工務第一課 (〒650-0042兵庫県神戸市中央区波止場町3番11号)

<sup>2</sup>豊岡河川国道事務所 朝来国道維持出張所 (〒669-5211兵庫県朝来市和田山町平野504)。

豊岡河川国道事務所では国道9号の70.8kmの維持管理を行っている中で、整備した歩道用の歩車道境界ブロックをはじめとするコンクリートプレキャスト二次製品が、凍害が原因と思われる損傷が見られる箇所がある。

本稿はその損傷について、現況調査及び対策について試験施工を行ったので、その結果を報告する。

キーワード 凍害、積雪寒冷地、道路調査

## 1. はじめに

兵庫県北部の幹線ネットワークである国道9号において、豊岡河川国道事務所では1958年より管理を開始し、現在では延長70.8kmの維持管理を行っている。今後、国道483号（E72北近畿豊岡自動車道）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、寒冷地特有の問題である、凍害が適切な維持管理の支障の一つとなっている。

## 2. 現状と課題

コンクリート構造物の凍害については、従前より、様々な研究が行われてきており、対策もとられている。その成果として、凍害が疑われる構造物の調査対策手引書(案)<sup>1)</sup>（以後、対策手引書と略）が国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所によってまとめられている。

### (1) 凍害の発生について

コンクリート構造物の凍害は以下のように定義されている。

凍害とは、コンクリート中の水分が0度以下になった時の凍結膨張によって発生するものであり、長年にわたる凍結と融解の繰返しによってコンクリート組織が徐々に劣化する現象である。

ただし、対策手引書にまとめられているとおり、現象の原因については、水圧説、浸透圧説等がある。

また当事務所が管理している国道9号は冬期に凍結防止作業として、塩化カルシウム、塩化ナトリウムの散布を行う区間であるため、塩化物によっても複合的に、

コンクリートに作用し、損傷を与えることが想定される。

### (2) 凍害劣化過程と性能低下

凍害による劣化現象は主に、コンクリート断面の減少であり、その程度によって鉄筋構造物の場合、鋼材腐食が発生する場合もある。凍害による構造物の性能低下は、凍害深さによって異なる。

凍害深さの増大と部材の性能劣化の関係を以下の図-1に示す。また劣化過程と期間を示す要因を表-1のように考えられている。

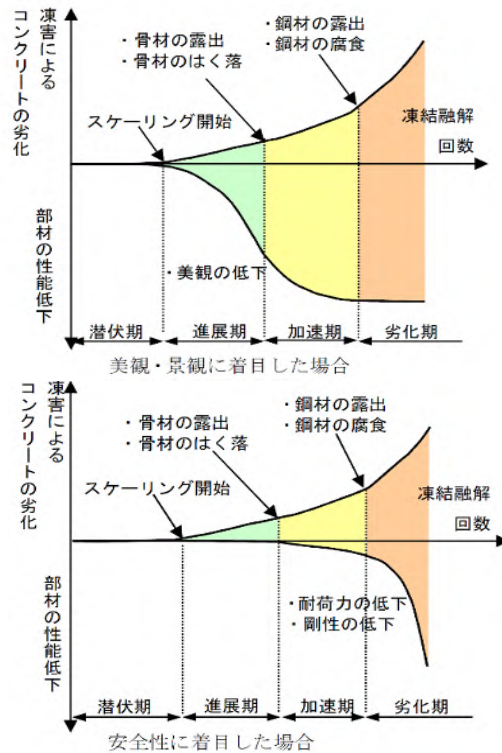


図-1 凍害劣化過程の概念図

表-1 凍害劣化過程の定義と期間を決定する要因

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	凍結融解を受けスケーリングが発生するまでの時間	凍結発生の可能性の有無, 最低温度, 凍結水量, 凍結融解回数
進展期	コンクリート表面の劣化が進行し, 骨材が露出, もしくは剥離するまでの期間	最低温度, 凍結水量, 凍結融解回数
加速期	鋼材が露出したり, 鋼材腐食が開始するまでの期間	凍害深さ, 鋼材の腐食速度
劣化期	鋼材の腐食が進行し耐荷性の低下が顕著な期間	凍害深さ, 鋼材の腐食速度

ここで、凍害の発生原因である温度について、国道9号での路面温度観測地点の代表的なデータとして養父市関宮町八井谷地点での2023年度冬期の日最高路面温度と日最低路面温度の推移を以下に示す。

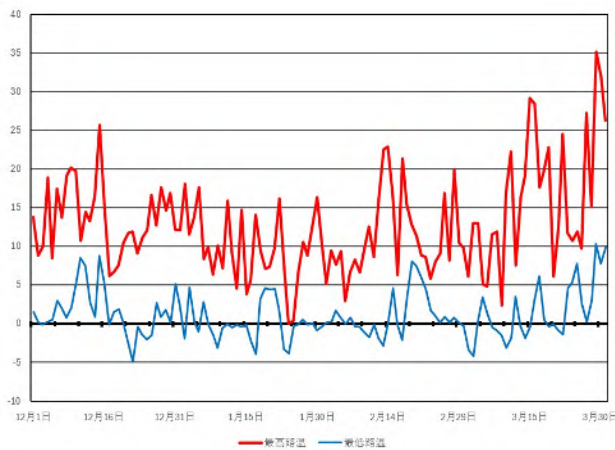


図-2 養父市関宮町八井谷地点での路面温度の推移

2023年は近傍に設置されているアメダスでの過去48年のデータの中で11番目に高い日平均気温を観測した年で、平均よりも少し暖かな年のデータである。

2023年12月1日から、2024年3月31日までの122日間において、最低路温が0度以下になったのは49日あり、その中で最低路温は-4.9度、平均最低路温は-1.4度であり、あまり凍結が急速に進行するところまで路温は低下しないが、継続的、経年的には凍結被害が進行する温度でもある。

このため、豊岡河川国道事務所の各種のコンクリート構造物は様々な凍害を受けていることが想定される。

凍害によるコンクリートの損傷は、大きく分けて、スケーリング、ひび割れ、ポップアウトが代表的な損傷としてあげられる。

○スケーリングとは、コンクリート表面のモルタル部分がフレーク状に剥げ落ち症状であり、進行すると粗骨材を含めて表層コンクリートの剥離・崩壊に至ることもある。

○ひび割れとは、凍結による膨張が大きい空隙中にでき

た氷晶により膨張が拘束され、大きい静水圧が空隙の壁に作用し、引張強度に達したときにひび割れを生じると考えられている。凍害によるひび割れ形状の特徴はひび割れ、地図状ひび割れ、長手方向ひび割れ、斜めひび割れの4つであり、ひび割れへの水の供給がある場合にはエフロレッセンスを伴うこともある。

○ポップアウトとは、骨材中に存在する水分の凍結によって膨張し、表面モルタル層をはく離させることによって生じる。コンクリート表面化の骨材粒子の膨張による破壊でできたクレーター状のくぼみであり、吸水率の大きい骨材や品質が悪い場合によく観察される。

豊岡河川国道事務所では、継続的に構造物点検等を行う中で、橋台、法面構造物、擁壁等の大規模構造物について調査、点検を行っており、現時点で管理区間内に大きな問題点はない。

本稿で問題としているのは、歩車道境界ブロックにおいて、散発的に発生しているスケーリングについてである。

なお、豊岡河川国道事務所管内において、コンクリート舗装を行っている区間はトンネル内がほとんどであり、ポップアウトは管理区間内ではいまのところ確認できていない。

### 3. 道路巡視による調査

豊岡河川国道事務所では週3回の巡視のほか、直営巡視等も行う中で発見した、代表的な劣化期の凍害箇所状況は以下のとおりである。

#### (1) 美方郡香美町岡区八井谷でのスケーリング発生状況

この地点では2000年～2001年にかけて歩道工事が行われており、供用開始から23年が経過している箇所である。

歩車道境界ブロックのスケーリングが進行し、崩壊が進むブロックが散発的に発生している。なお、凍害による崩壊が進むブロックと、そうでないブロックの間で融雪設備や道路勾配、車からの損傷などの差はない。



図-3 八井谷でのスケーリング発生状況



図4 八井谷でのスケーリング拡大状況写真

(2) 美方郡香美町村岡区<sup>おおめが</sup>大糠でのスケーリング発生状況

この地点では1983年～1984年にかけて歩道工事が行われており、供用開始から39年程度が経過している箇所である。

ここでも、歩車道境界ブロックのスケーリングが進行している箇所が散発的に見られる。



図5 大糠でのスケーリング発生状況



図6 大糠でのスケーリング拡大状況写真

(3) 美方郡香美町村岡区黒田でのスケーリング発生状況

この地点では1990年～1991年にかけて道路工事が行われており、供用開始から32年程度が経過している箇所である。

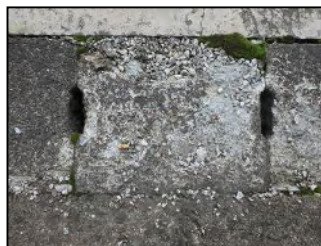


図7 黒田でのスケーリング状況写真

ここでは歩車道境界ブロックよりも側溝のコンクリート蓋のスケーリングが発生している状況である。なお、本箇所のコンクリート蓋は無筋と思われる、鉄筋の腐食等は見られない。

(4) 朝来市和田山町宮田でのスケーリング発生状況

この地点では1984年に道路工事が行われており、供用開始から39年程度が経過している箇所である。ここではL型側溝ブロックにスケーリングが発生している。



図8 宮田での一リング発生状況

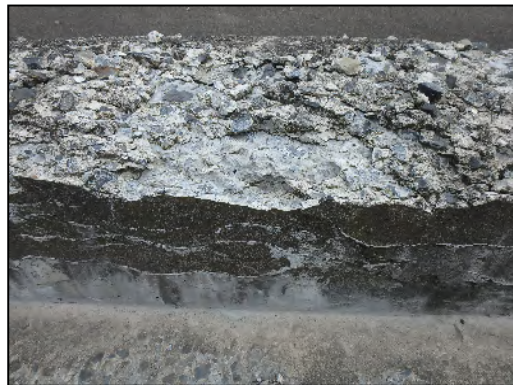


図9 宮田でのスケーリング拡大状況写真

(5) 美方郡香美町村岡区黒田でのポップアウト発生状況

参考までに国道9号の隣接民地で発生しているポップアウトの状況を掲載する。



図10 黒田でのポップアウト発生状況



図-11 黒田でのポップアウト発生状況

コンクリートの平面上に直径2～4cm、深さ1～2cmの凹みが発生している。

#### 4. 道路巡回支援システムの活用

##### (1) 道路巡回支援システムの概要

国道9号の管理のため、当事務所では定期的に路面の舗装状況等について調査を行っており、近年では2023年度に実施した。

調査に使用したシステムは、パトロール車にスマホを設置してデータを収集し解析するものであり、舗装の状況として、路面のひび割れ、わだち等、IRI等の状況の調査をしたが、さらにその舗装点検システムを用い、ポットホール、路面の段差、路面標示、道路附属施設、標識、スノーポール、縁石の損傷等、道路の異常をAIによる自動判別で検知した。

##### (2) 調査結果

AIによる歩車道境界ブロックの損傷判定の例を以下に示す。



図-12 AIによる損傷状況の認識結果

このような損傷箇所を70.8kmの管理総延長に対して285箇所を拾い上げ、台帳化することができた。

この結果は、パトロールにより把握した損傷を受けている縁石の箇所数とほぼ合致していた。今回、報告した損傷箇所は日々のパトロール等の中で発見し、経過観察している箇所であるが、台帳化したことで今後の管理に資することができる。

##### (3) AIの課題

現状のAIの問題点として、AIでは縁石の異常を検知するところまでで、凍害と擦過損傷の違いまでを判別することはできない。

また、路面のひび割れは検知できるが、凍害によるクラックは微少であるため認識ができず、劣化期に入った損傷しか認識できないため、進展期、加速期のスケーリングを発見するために現時点では、これまでどおりのパトロールが必要である。

本稿では劣化期のスケーリングについて報告したが、図-13に進展期、図-14に加速期のスケーリングの例を示す。



図-13 進展期のスケーリングによる劣化状況



図-14 加速期から劣化期のスケーリングによる劣化状況

## 5. 凍害に対する対策の一例

豊岡河川国道事務所では凍害に対する対応として、凍結融解及び塩害に対する抵抗性を高めた歩車道境界ブロックを用いた施工を試験的に始めている。

コンクリート内の水の凍結時に水の圧力膨張から、その圧力の逃場があればコンクリートに作用する圧力が緩和されるため、コンクリート内の空気量を4~7%確保するためのAE剤の追加、高性能減水剤の使用による密実なコンクリートを目指した凍害対策品を使用した。

また塩害対策として、高炉スラグ微粉末の使用による潜在水硬性により、さらに密実なコンクリートを目指した、耐塩害凍結対策型歩車道境界ブロックを使用した歩道の工事を行った。

同じ施工現場において比較のため、この2種類の歩車道境界ブロックを設置しており、今後、その経過観察を行い、追跡調査を行っていく予定である。

以下に代表的な標準品と凍害対策、塩害凍害対策型品の歩車道境界ブロックのコンクリート示方配合について記載する。なお、示方配合は業者独自の取組みも含まれるため、一部は概数での記載とする。

表-2 塩害凍害対策型品・凍害対策品と標準品の示方配合の例

	単位	標準品	凍害対策品	塩害凍害対策品
粗骨材最大寸法	mm	20	20	15
スランプ・スランプフロー	cm	8±2.5	20~15±2.5	70~50±10
空気量の範囲	%		4.5±1.5	2.5±1.5
水セメント比・水結合材比	%	50~45	50~45	30~20
減水剤	kg	○		
高性能減水剤	kg		○	○



図-15 耐塩害凍害対策型歩車道境界ブロック

## 6. おわりに

本稿は国道9号での凍結被害、特に歩車道境界ブロッ

クについて調査結果を報告した。

豊岡河川国道事務所の管理区間70.8kmの中で、歩道は上下線合せて約86kmあり、仮に縁石全てを取替えようとした場合、工事費は1m当り15000~20000円が必要なため、総計17億円以上の費用が必要となるだけでなく、通行者などの付近住民に迷惑をかけることになる。

だからこそ、損傷したからといって簡単に更新が可能なものではなく、適切な管理手法が求められる。

そのため、様々な取組みが今後とも必要となる中、いくつかの方法が考えられる。

一例として、どのような条件でスケーリングが発生するのか等について、スケーリング抵抗性試験、凍結融解試験、超音波伝播速度試験、非破壊及び局部破壊調査など、各種の物理調査を実施していく事が考えられる。

またGIS上でデータ整理を行い、スケーリング発生箇所の統計分析を行う手法も有効であると考えられる。

道路管理を担当している国道維持出張所としては、簡易、早期にひび割れを発見し、コンクリート補修剤を塗布することにより、早期、安価、簡易に維持・補修が出来る方法を模索することも重要と考える。

JISの『A5371プレキャスト無筋コンクリート製品』に性能試験方法の記載はあるが、空気量についての記載はなく、『性能照査方法は設計図書及び実績による』との表記があるだけである。一般論としてコンクリートの凍害対策には2~4%以上の空気量が有効である、という知見はあるものの、それを発注時、現場管理時にどのように生かすか、今回報告した実例がある中で、事務所全体での今後の取組みが求められる。

今後とも、予防保全を行いつつ、コスト縮減に努めながら適切な管理に努めて参りたい。

## 参考文献

- 1) 凍害が疑われる構造物の調査対策手引書(案) 平成29年5月 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所

# 京都府管理河川の洪水予報の高度化について

國貞 佳那<sup>1</sup>・坂根 大介<sup>2</sup>

<sup>1</sup>京都府 建設交通部 砂防課 (〒602-8570京都府京都市上京区下立売通新町西入藪ノ内町)

<sup>2</sup>京都府 建設交通部 砂防課 (〒602-8570京都府京都市上京区下立売通新町西入藪ノ内町)

近年の激甚化する浸水被害において、短時間で急激に水位上昇する中小河川については、避難に要するリードタイムの確保が実況水位の観測のみの判断では困難となる状況が増加している。そこで京都府では全府管理河川について6時間先までの水位及び浸水区域を予測するため、令和3年度に降雨氾濫流出(RRI)モデルによる「水位・氾濫予測システム」の構築に着手し、令和5年度から市町村防災部局向けに試験配信を行っている。過去出水時のデータをもとに予測精度の検証を行ったところ、1時間程度のリードタイム確保において本システムが特に有効であることが分かったため、中小河川の水位予測を実施したい他の参考になると考え、紹介する。

キーワード 中小河川, 水位予測, 氾濫予測, RRIモデル, 早期避難

## 1. はじめに

近年の災害や豪雨は頻発・激甚化しており、全国の河川において氾濫等による浸水被害が多発している。加えて線状降水帯などの局所的集中豪雨が増えてきており、どこで浸水被害が起こるのか予測が困難である。中でも中小河川は特に水位上昇が速く、実況水位の観測情報だけでは避難に必要なリードタイムの確保が難しい状況が増加している。実際に令和2年7月豪雨時において危機管理型水位計を設置している岩倉川(京都市左京区)では、約1時間で観測開始水位(0.84m)から危険水位(断面の7割水深である1.53m)を超過し最高水位(天端高から0.2mほどの1.80m)に達したという事例(図-1.2)がある。



図-2 岩倉川最高水位時の現地状況

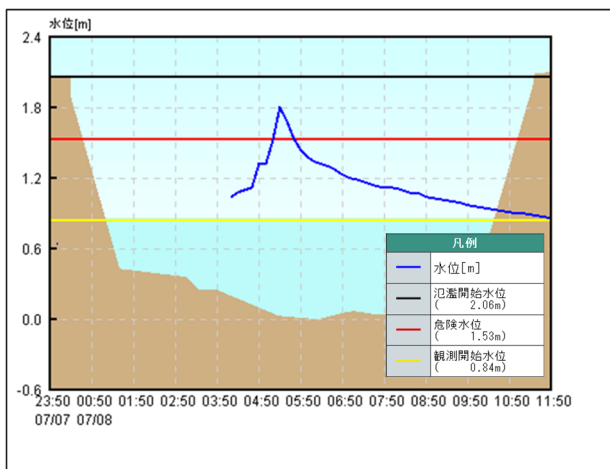


図-1 岩倉川の水位グラフ(令和2年7月8日)

このように急激に水位の上昇する中小河川で避難に必要なリードタイムを確保するためには、実況水位の観測情報だけでなく水位の予測情報も兼ね合わせて提供することが必要である。しかし京都府では鴨川・高野川、桂川・園部川といった比較的大規模な河川については以前より3時間先までの洪水予測を実施しているが、府管理河川の多くを占める中小河川については予測を実施していなかった。そこで京都府では令和3年度から府全域において6時間先までの水位及び浸水区域を予測する「水位・氾濫予測システム」(以下、「本システム」という。)の構築に着手し、令和5年6月から府内市町村の防災部局及び気象台に向けて試験的に配信を行っており避難行動の参考として活用されている。



## 2. 水位・氾濫予測システムについて

### (1) 概要

水位・氾濫予測システムとは国土地理院の地形データ等をもとに構築したモデルに気象庁が配信している降雨予測情報を入力して、京都府全域において水位及び浸水区域を10分ごとに6時間先まで予測するシステムである。府管理河川のうち中規模な37河川(洪水予報河川・水位周知河川)については避難判断水位、氾濫危険水位を、小規模な133河川については氾濫開始相当水位の超過予測をしている。水位については観測局(対象170河川)ごとに予測しており、本システムの画面上で水位予測グラフ(図-3)及び予測値(図-4)を確認することが可能である。浸水区域については地図上の全エリアで浸水深を予測(図-5)し本システムの画面上に表示している。

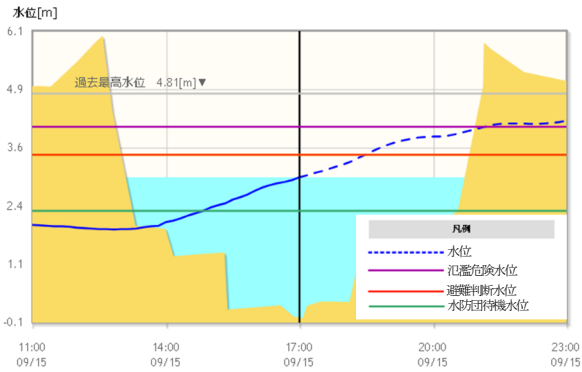


図-3 水位予測グラフ表示イメージ

時刻	水位 [m]	10分雨量 [mm]	累加雨量 [mm]
17:00	3.02	2.7	89.2
17:10	3.06	2.7	91.9
17:20	3.11	2.7	94.6
17:30	3.15	2.7	97.3
17:40	3.20	2.7	100.0
17:50	3.25	2.7	102.7
18:00	3.30	2.7	105.4
18:10	3.36	4.0	109.4
18:20	3.44	4.0	113.4
18:30	3.51	4.0	117.4
18:40	3.59	4.0	121.4
18:50	3.66	4.0	125.4
19:00	3.72	4.0	129.4
19:10	3.77	2.3	131.7
19:20	3.81	2.3	134.0

図-4 水位予測値表示イメージ

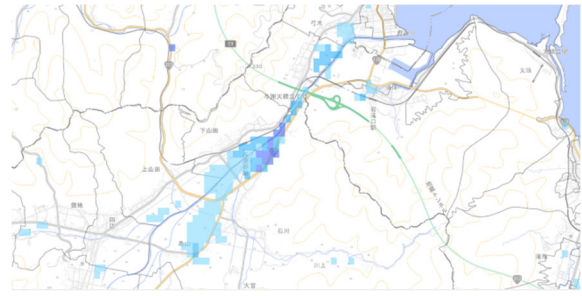


図-5 浸水深予測表示イメージ

また、レベル3以上の水位(避難判断水位、氾濫危険水位、氾濫開始相当水位)超過が予測された際にはアラートメールを送信し、危険な状況が迫っていることを本システム利用者に通知することができるようになっている。

### (2) モデルの詳細

試験配信開始当初のモデル詳細を以下に示す。

#### a) モデルの分割

水位及び浸水区域の予測のために京都府全域を12分割(図-6)した降雨流出氾濫モデル(RRIモデル)<sup>1)</sup>を構築した。

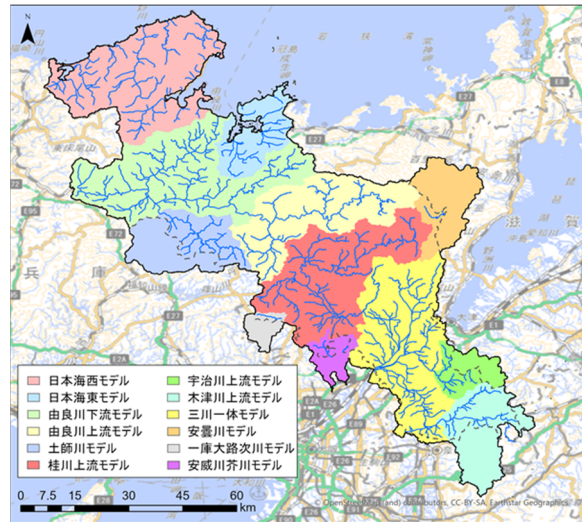


図-6 京都府分割RRIモデル

#### b) RRIモデル

RRIモデルとは降雨を入力条件として河道流量から洪水氾濫までを一体で解析できる流出解析モデル(図-7)であり、国立研究開発法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センターが開発し一般公開されているものである。一般的な分布型流出モデルと異なりRRIモデルではメッシュの浸水位と周辺の浸水位を比較しながら水面勾配より流下方向を逐次意思決定することが可能なため、流域に降った雨が河川に集まる現象・洪水が河川を流下する現象・河川を流れる水が氾濫原にあふれる現象を流域一体で予測することができる。

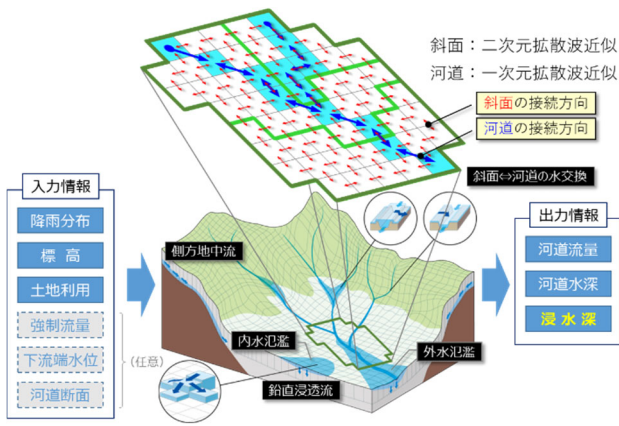


図-7 RRIモデル概念図

表-1 試験配信後の改良点

項目	詳細
排水機場のモデル化	約10m <sup>3</sup> /s以上の排水機場についてモデル化し、操作規則に基づく排水操作を再現可能とした。
樋門箇所の調整	本川水位が支川水位より高くなった際に、本川から支川へ河川水が流れ込まないように変更した。
入力降雨の追加	高解像度降水ナウキャスト(1時間先までの予測)と速報版降水短時間予報を組み合わせて入力できるようにした。
潮位データの追加	日本海に流出する河川があるため、日本海側の潮位データを取得し予測計算の入力条件となるようにした。

c) メッシュサイズと地形データ

本システムではメッシュサイズを約100m×125mとし、京都府内を約43万メッシュに分割した。地形データについては必要となる地盤高データ・流下方向データ・上流集水メッシュ数データが整理された日本域表面流向マップ<sup>2)</sup>を活用して京都府内の均質なメッシュデータを作成し、土地利用については国土数値情報土地利用細分メッシュデータ<sup>3)</sup>を参考に5分類(水田、畑地、山地、都市、水域)の土地利用定数を調整した。河川断面については実断面の横断データがある箇所はそれを採用し、河道メッシュ内に横断が存在しない場合は上下流の断面から内挿断面を作成し採用した。

d) ダム

府内のダム6箇所については操作規則に基づく排水操作について再現できるようモデルを構築した。

e) 管理区間外との境界条件

京都府では国直轄管理区間との境界地点があるため、国直轄管理河川の実況水位値を取得し境界条件として反映した。

f) 降雨プロダクト

本システムに入力する降雨プロダクトは予測雨量として速報版降水短時間予報(6時間先までの予測)を入力し、実況雨量として解析雨量を入力することとした。

g) 計算予測水位の補正方法

モデルの計算により求められた予測水位については降雨誤差や計算誤差を軽減するために、各時刻において現時刻の観測値と計算値との差分を予測時刻に加えるフィードバック補正を行うこととした。

(3) システムの改良(改良モデル)

a) 試験配信後の改良

令和3年度から構築に着手した本システムであるが、試験配信後の市町村要望等をふまえ、令和5年度により精度の高いシステムとするため表-1に示すとおり改良している。

b) 今年度の改良

より精度の高いモデルとするため今年度も改良を予定している。排水機場について既にモデル構築済のものより小規模なものについても追加するため、モデルを構築中である。また、計算により求められた水位の補正方法についても変更を検討している。毎時刻に引き継ぐ計算水位を観測水位で面的に補正し、計算の初期値をデータ同化させることで予測結果の精度を向上させるフィードバック補正(共分散行列補正)に改造中である。その他システムの表示方法などを変更し、利用者にとって操作性の良いシステムとなるよう改良している。

(4) モデルの精度

改良モデルにおいて、過去の出水を再現させた際の実績水位とモデルで計算された水位について精度検証を行った。改良モデルについて、実績値がない等比較が困難な観測所を除いた99観測所におけるピークの水位誤差平均値は0.23m、相関係数は0.874であり、モデルとして高い精度を確保できている。なお、試験配信時のモデルでは水位誤差平均値が0.26m、相関係数は0.868(図-8)であったため、水位誤差平均値が小さくなっていることからその後の改良でモデルの精度が向上していることがわかる。

	改良モデル				試験配信時のモデル				
	水位誤差		相関係数		水位誤差		相関係数		
	平均値	0.5m達成率	平均値	0.8以上達成率	平均値	0.5m達成率	平均値	0.8以上達成率	
1	日本海西	0.18	96.5%	0.91	89.6%	0.19	95.7%	0.91	89.6%
2	日本海東	0.16	100.0%	0.93	92.7%	0.16	100.0%	0.93	92.7%
3	由良川	0.35	82.7%	0.90	88.6%	0.51	80.5%	0.89	84.8%
4	桂川上流	0.23	88.5%	0.85	75.0%	0.20	92.7%	0.85	75.0%
5	宇治川上流	0.21	100.0%	0.93	100.0%	0.21	100.0%	0.93	100.0%
6	木津川上流	0.23	92.6%	0.90	96.3%	0.23	92.6%	0.90	96.3%
7	桂川下流	0.20	93.1%	0.84	87.0%	0.20	93.1%	0.84	87.0%
8	三川合流 宇治川下流	0.17	96.1%	0.84	77.9%	0.18	93.5%	0.84	79.2%
9	木津川下流	0.24	91.4%	0.84	83.8%	0.27	85.2%	0.81	73.8%
10	安曇川	-	-	-	-	-	-	-	-
11	一庫大路次川	-	-	-	-	-	-	-	-
12	安威川芥川	-	-	-	-	-	-	-	-
	モデル全域	0.23	91.7%	0.874	85.7%	0.26	90.7%	0.868	83.9%

図-8 水位誤差平均値と相関係数

3時間では約0.4程度である(図-9)。このことから流域面積が大きいほど予測精度が高くなることが分かった。また、大河川だけではなく中小河川においてもリードタイムが1時間の予測では捕捉率が0.8以上と高くなっており、1時間程度のリードタイム確保において本システムは特に有効であると考えられる。

令和5年度の改良や今後の改良により、予測精度の向上が期待できるため、改良後のモデルについても精度検証を行う予定である。また、検証を行う際のリードタイム、流域面積、降雨成因、降雨規模等を変化させて精度検証を行い、本システムの活用方法について検討していく予定である。

表-2 予測モデル評価の手法

観測 \ 予測	超過	超過無し
超過	真陽性 (TP)	偽陰性 (FN)
超過無し	偽陽性 (FP)	真陰性 (TN)

### 3. 予測の精度検証について

#### (1) 概要

本システムは最新の技術であることから、中小河川を対象とした河川水位の予測精度に関する検証や分析、それらを踏まえた精度向上については全国的にも事例がない。そのため RRI モデルの開発及び研究の実績がある京都大学防災研究所と連携して共同研究を行い予測の精度検証を行っている。

#### (2) 共同研究の内容について

共同研究では令和3年度から流域面積や降雨の成因、リードタイムによって水位予測の精度がどのように異なるのかを定量的に分析している。令和5年度の研究において、過去4出水の降水短時間予報を試験配信時のモデルに入力し、避難判断水位の予測精度を検証し適中率と捕捉率(表-2)を計算した。その結果、適中率はリードタイム1~6時間の順で0.84, 0.73, 0.63, 0.33, 0.33, 0.33(表-3)であり、捕捉率は0.93, 0.76, 0.60, 0, 0, 0(表-4)であった。本システムのモデルは降雨予測の精度にも影響されるため予測時間が長くなればなるほど適中率、捕捉率ともに低下する傾向が見られた。特に4時間以降は適中率、捕捉率ともに低下しており予測精度の向上は今後の課題となる。

また、流域面積を分類して検証したところ、大河川(流域面積500km<sup>2</sup>~1250km<sup>2</sup>)ではリードタイムが1時間から3時間まで捕捉率が1であり、中河川(流域面積100km<sup>2</sup>~500km<sup>2</sup>)ではリードタイムが1時間の場合捕捉率が1であるが、2時間では約0.8、3時間では0.7未満である。また、小河川(流域面積5 km<sup>2</sup>~100km<sup>2</sup>)ではリードタイムが1時間の場合、捕捉率が0.8以上であるが、2時間では0.7以下、

$$\text{適中率} = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN}$$

$$\text{捕捉率} = \frac{TP}{TP + FN}$$

表-3 4出水のリードタイムごとの適中率

時間	平成 25年 台風 18号	平成 30年 7月 豪雨	平成 26年 台風 11号	平成 26年 8月 豪雨	4 出水 平均
1	0.81	0.79	0.95	0.8	0.84
2	0.64	0.67	0.95	0.67	0.73
3	0.5	0.48	0.95	0.6	0.63
4	0.19	0.19	0.59	0.33	0.33
5	0.19	0.19	0.59	0.33	0.33
6	0.19	0.19	0.59	0.33	0.33

表-4 4出水のリードタイムごとの捕捉率

時間	平成 25年 台風 18号	平成 30年 7月 豪雨	平成 26年 台風 11号	平成 26年 8月 豪雨	4 出水 平均
1	0.87	0.86	1	1	0.93
2	0.63	0.69	1	0.71	0.76
3	0.43	0.41	1	0.57	0.60
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0

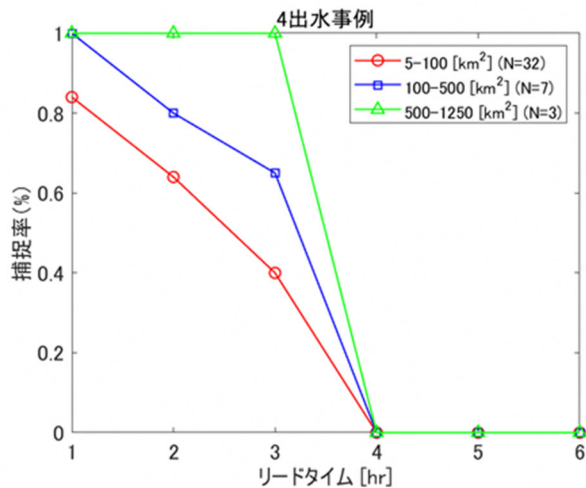


図-9 流域面積とリードタイムによる捕捉率

#### 4. システムの活用について

##### (1) 令和5年度の予測実績

市町村防災部局向けに配信を開始した令和5年において、超過を予測したのは106回であり、その中で実超過があったのは38回であった。そのうち氾濫危険水位は超過予測が25回で実超過は12回、氾濫開始相当水位は超過予測が81回で実超過は26回であった。予測成功時には10～360分ほどのリードタイムを確保できていた。

##### (2) 市町村の活用状況

現在京都府内の全26市町村のうち21市町村が本システムからのアラートメールを受信して本システムを起動し、避難行動の参考として活用を始めている。しかし防災担当者に変更があればシステムの操作方法等がわからなくなり、本システムを活用してもらえない可能性がある。そのため毎年出水期前にはシステムの操作説明会を行っている。合わせて過去の出水時のデータをもとに作成したデモサイトのURLを事前に周知し、平常時からシステム操作の訓練ができるようにしている。

合わせて出水期明けには市町村と本システムについて意見交換を実施している。昨年度の意見交換では本システムをどのような場面で活用したいかについて「避難所開設の事前準備」、「ポンプ場やポンプ車を操作する作業職員の出勤判断」、「庁内の待機体制の人員検討」等の意見があった。避難所の開設やポンプ稼働のような作業は時間や手間を要するが遅延できないものである。そのような作業の準備に本システムの予測情報を活用すれば、よりきめ細やかな避難・防災活動が期待できる。

また、本システムはリードタイムを考慮した避難判断水位だけではなくリードタイムの無い氾濫開始相当水位

についても予測しているため、予測情報を有効に使えば今までリードタイムが確保できていなかった河川についても確保していくことが可能となる。

#### 5. 今後の展望について

本システムは降雨予測の精度にも影響されるため水位超過の予測時刻に差が生じたり、空振り(システムで超過予測していたが観測水位は超過以下)や見逃し(観測水位は超過していたがシステムでは超過予測無し)も生じることがある。そのため避難行動においては超過予測を機械的に処理するのではなく、避難行動開始の一つのきっかけとして柔軟に活用していくことが重要であり、それこそが本システムの意義であると考えられる。今後は本システムの予測情報をもとに、降雨予測の精度によって生じる予測時間等の幅を織り込んだ避難行動タイムラインの構築に向けて各市町村とともに取り組んでいきたい。

また、システムとしての精度向上や活用方法の拡大のために、予測実績については出水ごとに整理を行い水位予測が的中しなかった原因を推定し、もしモデルに問題があると判明した場合は改良を実施していきたい。

そして、現在は市町村防災部局向けに限定して試験配信しているが、将来的には中規模河川から水防法に基づく洪水予報河川の指定を進めた後に一般に向けて本システムの予測に基づく情報提供を行うことで、府民自らの避難スイッチの一つとして本システムを活用してもらいたい。

**謝辞:** 本論文の執筆にあたり、共同研究を実施している京都大学防災研究所様、本システムの構築及び改良を実施している三井共同建設コンサルタント株式会社様を始め、関係者の皆様にお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 国立研究開発法人 土木研究所：降雨流出氾濫モデル(RRIモデル) ([https://www.pwri.go.jp/icharm/research/rri/index\\_j.html](https://www.pwri.go.jp/icharm/research/rri/index_j.html))
- 2) Institute of Industrial Sciences, The University of Tokyo：日本域表面流向マップ (<http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/JapanDir/>)
- 3) 国土交通省：国土数値情報土地利用細分メッシュデータ (<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>)

# 紀南河川国道事務所における ドローン隊の活動と運用について

吉田 大唯<sup>1</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 紀南河川国道事務所 田辺国道維持出張所 (〒646-0024和歌山県田辺市学園24-17)

国土交通省近畿地方整備局紀南河川国道事務所において、南海トラフ地震等が発生した場合を想定し、被災情報を速やかに収集することを目的に令和5年度にドローン隊を結成したが、マニュアルと呼べるものが作成されていない。そのため、ドローンの活用事例やドローン訓練を基にマニュアル作成が必要であり、その際に必要となる項目について検討した。その結果、定期的なドローン訓練の実施や法令等知識レベルによる階級区分の設定、班構成の見直しなど多くの課題や、ドローン隊員リスト・緊急連絡先など必要項目の欠落があり、それを明確にした。

キーワード 広報、災害対応、現地調査、ドローン訓練

## 1. はじめに

わが国は、地形や気象、4枚のプレートにまたがる南北に長い国土等のさまざまな条件により、多くの災害が発生しており、また気象災害の激甚化・頻発化が進んでいる<sup>1)</sup>。

このような現状の中、我々国家公務員は被災状況の迅速な把握・情報発信、応急・恒久復旧を行うことが必要である。国土交通省近畿地方整備局紀南河川国道事務所(以下、紀南河川国道事務所という)では、総延長 209.9kmの紀伊半島沿岸部をカバーする長大な管理延長、また今後起きる可能性が高いと予想される南海トラフ地震等に対応するため、被災状況把握といった災害対応の効率化が必要である。

そのため、紀南河川国道事務所では令和5年度から職員自らの力で被災状況の迅速な把握・情報発信を行う能力を身につけるべく、被災箇所を迅速かつ安全に調査し、離れた場所において被災情報を効果的・効率的に取得することができるドローンの活用を進めている。従来であれば、応急復旧のための現地調査等で、被災箇所に近づき原因究明をする必要があり、災害に巻き込まれる可能性があったが、ドローンを活用することで安全な場所から従来以上に容易に被災状況を確認ことができ、また写真や動画等で情報共有が容易になる。

また、災害対応以外にも、これまで以上に伝わりやすい写真・動画を撮影することが可能になるため、広報活動や工事進捗の把握等多くの場面での活用が期待できる。そのため、ゆくゆくは紀南河川国道事務所だけでなく、他事務所でもドローン操作に習熟した職員が異動等に伴

い活躍の場を広げることで、ドローン隊の活用が広まっていこうと考えられる。

しかしながら、ドローンを操縦するには継続的な訓練が必要であり、また各種手続きや関係法令の遵守など、誰もが容易に扱えるものではない。そのため令和5年度では定期的なドローン操作練習や勉強会、実験的な運用を行い、紀南河川国道事務所職員の技術力向上を図ってきた。その中で、より効率的にドローンを活用することを目的に、継続的に訓練に参加していた職員を中心とした「ドローン隊」を1月に結成した。ただし、現在マニュアルと呼べるものが作成されておらず、資料と言えどドローン訓練時に配布するプリント類程度である。そのため、ドローン隊員のリストや運用するドローン(図1に示す)の取扱説明書、運用方針など重要と考えられる多くの項目が欠落しており、マニュアルの作成が必要である。

本研究では、具体的なマニュアル作成に寄与するため、



図1 運用するドローン

マニュアル作成時に必要と考えられる項目を明確にすることを目的とする。

## 2. 検討方法

本研究では、過年度に実施した紀南河川国道事務所におけるドローンの活用事例やドローン訓練の内容を基に、マニュアル作成時に必要と考えられる項目について検討した。

### (1) 運用するドローンについて

紀南河川国道事務所では、回転翼航空機（マルチローター）であるSOTEN（蒼天）を2機保有しており、写真・動画の撮影が可能である。また附属のコントローラーでは、職員の携帯電話（スマートフォン等）を使用しなくてはならないため、産業用スマートコントローラー「Hedwig」を使用している。SOTEN（蒼天）の仕様を表1に示す。

表1 SOTEN(蒼天)の仕様諸元<sup>2)</sup>

型式		L14 (LTE 非装備モデル)
		L22 (LTE 装備モデル)
寸法	アーム展開時	全長 560 mm / 全幅 637 mm / 全高 153 mm (ロータ含む)
	アーム収納時	全長 363 mm / 全幅 162 mm / 全高 144 mm
質量 (バッテリー/カメラ非搭載時)		L141 (LTE 非装備モデル) : 約 1,050 g
		L221 (LTE 装備モデル) : 約 1,070 g
ロータ数		4 枚
最大離陸重量		2,000 g
飛行時間	大容量バッテリー	29 分 (条件: 標準カメラ非搭載時、風速 8m/s)
運用限界高度		2,000 m
保護等級		IP43 (カメラ、ジンバル、バッテリー搭載時)
動作環境温度		-20~40° C
障害物検知システム		ステレオカメラ 3 方向 (前方・上方・下方)
レーザー距離センサ		Class1 レーザー機器
外部給電能力		USB type-C® 5V 500mA 以下

### (2) 実施した訓練内容

令和5年度では4回訓練を行っており、それぞれ目的を明確に示し、参加者を募って実施した。

#### a) 第1回ドローン訓練 (令和5年4月27日)

第1回ドローン訓練では「ドローンを安全に運用する」を目的とした。8名が参加し、最初ではどのような訓練を行えば良いか分からなかったため、民間企業の方を講師に招き、機体基礎知識講習・基本操作訓練（離着陸や上昇下降、前後左右移動、左右旋回）等を実施した。また、ドローンを飛行させる際に気をつけなければならない関係法令手続き（航空法や小型無人機等飛行禁止法、地方公共団体が定める条例等）の学習を行った。

#### b) 第2回ドローン訓練 (令和5年9月1日)

第2回ドローン訓練では「被災時に迅速に対応できる」を目的とした。12名が参加し、第1回ドローン訓練参加者やドローン経験者を中心に、職員指導による訓練を実施し、ドローンの組立や基本操作訓練、またドローンの関係法令手続きの説明等を、参加者を2グループに分け行った。

訓練後、訓練参加者から、「災害現場で迅速に調査するためには定期的な訓練が必要」という意見がであった。

#### c) 第3回ドローン訓練 (令和5年10月25日)

21名が参加した第3回ドローン訓練では「チームとして演習課題を撮影する」を目的とし、第2回ドローン訓練参加者と初参加者をグループ分けして訓練を行った。第2回ドローン訓練参加者のグループは3人1組となり、目的物を設定し、被災したと仮定して、ドローンで指定の角度・距離の写真を撮影する訓練を行った。3人1組となったのは、班長(作業状況や周辺状況、天候を常に監視し、作業・退避等の指示を行う)、操縦者(常に機体又はモニターを確認し、機体の操作を行う)、操縦監視者(飛行中の機体を目視により監視し、飛行の状況を班長及び操縦者に伝達する)の編成とするためである。また初参加のグループは、第2回ドローン訓練と同様の訓練を行った。また、訓練参加者全員に航空法違反事例を紹介するなど、訓練参加者の意識を高めた。

#### d) 第4回ドローン訓練(令和6年1月11日)

第4回ドローン訓練では「飛行計画を各班で立案し、演習課題を撮影する」を目的とした。10名が参加し、第3回と同様に過去にドローン訓練に参加した者と初参加の者でグループ分けし、それぞれで操作訓練や学習を行った。その後、被災箇所を想定した課題を与え、3人1組になって実習を行った。第3回ドローン訓練では想定被災箇所との角度や距離はある程度指定されていたが、今回の課題では飛行前にどのような撮影を行うことで被災箇所を正しく把握できるかを考え、飛行計画を立てることも課題に含めることで、より実際の被災状況把握に近い形とした。その結果、過去にドローン訓練に参加した職員が操縦した班は課題をクリアできたが、訓練初参加者が操縦した班は、目的物に近づきすぎてしまうなど、危うい場面もあ

った. 第4回ドローン訓練での訓練課題を図2に示す.

(3) ドローンの活用事例

令和5年10月12日に和歌山県東牟婁郡那智勝浦町浦神で発生した落石において, 迅速な被災状況把握を行うために, 試験的にドローンによる状況把握調査を実施した(ドローンで撮影した画像を図3に示す). 従来の現地調査では, 近接目視のため落石箇所近く必要があり, また被災状況を把握するための写真を複数枚撮影したり,

②ボックスの近望

・本線が崩れたと考えた場合, 置道ボックスが埋まって, 被災者がいないか。



図2 訓練課題(抜粋)

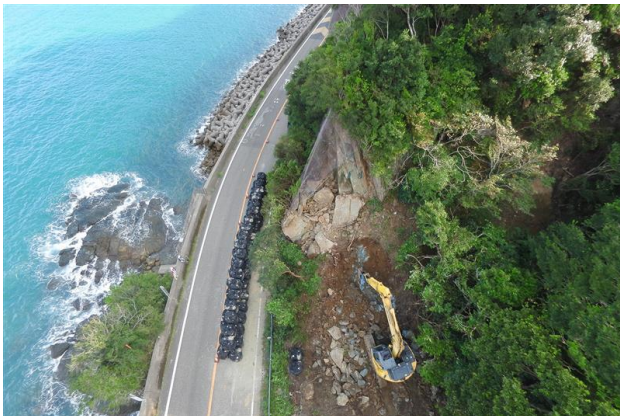


図3-a 全景

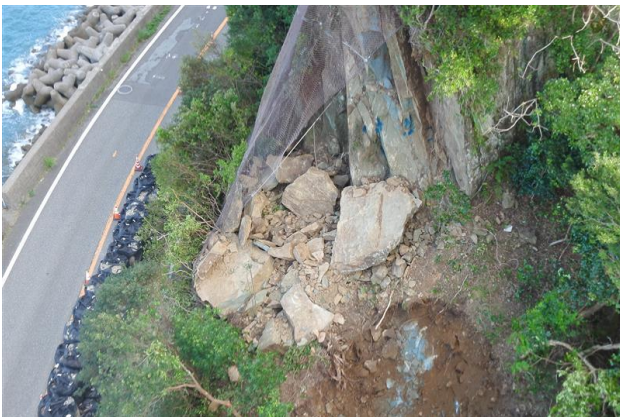


図3-b 落石箇所拡大

図3 ドローンが撮影した画像

特定の角度からしか撮影できないため原因がつかみづらい等の懸念点があった. しかしドローンによる被災状況把握においては, 目視できる範囲ならどこからでも飛行させることが可能なため再び落石が起きても調査員が負傷するリスクを減らせる. また, 上空から撮影することで被災箇所の全体像を撮影することができ, 従来より情報共有が迅速かつ正確にできる.

3. 検討結果

2. 検討方法より, 各節よりマニュアルに必要と考えられる項目について述べる.

(1) 運用するドローンについて

SOTEN(蒼天)の機能について正しく知るため, SOTEN(蒼天)の取扱説明書をマニュアルに組み込む必要がある. また異常発生時の操作方法等について, 操縦者は吐嗟にその行動ができるよう取扱説明書を読み込む必要がある.

(2) 実施した訓練内容

ドローン訓練を4回に分けて段階的に難易度を上昇させていった結果, 過去2回以上訓練に参加したことがある職員, 1回参加したことがある職員, 初めて参加した職員の操作技術に違いがあった. 過去2回以上参加した職員はドローン操作が落ち着いていたが, 1回参加した職員や初めて参加した職員は操作が覚束なかったり, 行いたい操作と違う入力をしてしまったりすることが多々あった.

a) 基本操作訓練

ドローンの基本操作訓練(離着陸や上昇下降, 前後左右移動, 左右旋回)は必要不可欠であり, 訓練初参加であ

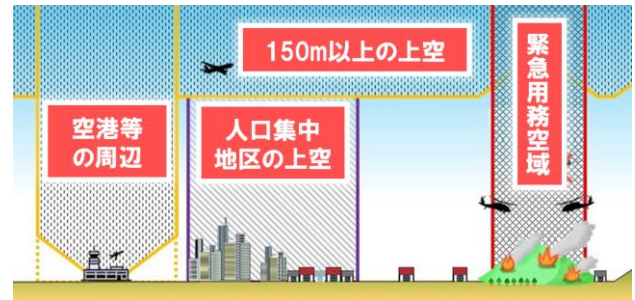


図4 無人航空機の飛行の許可が必要となる空域<sup>3)</sup>

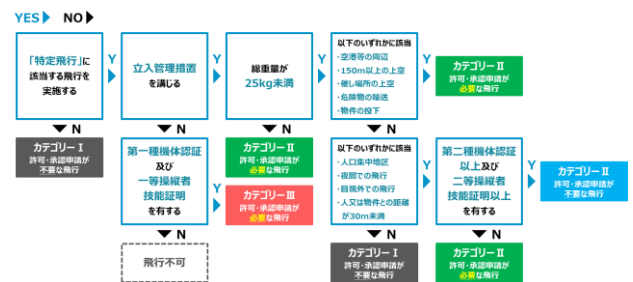


図5 飛行カテゴリ決定のフロー図<sup>3)</sup>

ったり操縦が不安な場合は特に重点的に行う必要がある。

#### b) 関係法令手続きの学習

訓練時に関係法令手続きの学習を毎回行っているが、訓練前ではそもそもドローンを飛行させる際に手続きが必要となる場合があることなど知らない職員もいた。そのため訓練の際に学習する必要があるが、またドローンを飛行させる際に必要な手続きや関係法令を学習することで、現場でどのような手順を踏む必要があるのかを理解し、訓練参加者一人一人が現場で行動できるようになることができる。具体的には、ドローンを図4に示す空域で飛行させる場合はあらかじめ国土交通大臣の許可を得る必要があるが、また飛行方法によっても必要な手続きが異なる（フロー図を図5に示す）。また、飛行計画の通報や飛行日誌の作成については、義務付けられていない場合でも行うことを推奨されているため、ドローン隊ではどのカテゴリーであっても、ドローン情報基盤システム（以下、DIPSという）を用いて飛行計画の通報を行う。そのためドローン訓練参加者をDIPSに登録し、DIPSの使い方についても訓練を行う。また飛行日誌を各自作成する訓練も行う。

#### (c) ドローンの使用制限

これまでのドローン訓練より、ドローン訓練に参加していない職員がドローンを使用するのは危険であり、航空法に違反したり、事故を起こしたりする可能性が高いと考えられる。そのためドローン訓練に参加していない職員がドローンを使用したい場合は、ドローン隊員を同行させ、ドローン隊員の指示に従って使用する、あるいはドローンを飛行させる日より前にドローン操作練習を行う等、ドローン隊員以外の職員のドローンの使用に制限をかける必要がある。

#### (3) ドローンの活用事例

ドローンによる被災状況調査において、一・二級無人航空機操縦士を持たない職員が突発的に発生する災害に迅速に対応するためには、カテゴリーⅠによる飛行である必要がある。そのため被災箇所が人口集中地区（以下、DID区間という）や空港等の周辺であったり、夜間での飛行となったりする場合はカテゴリーⅡ飛行となり、迅速な対応は難しい。今回の活用事例ではカテゴリーⅠによる飛行であり、ドローン本体やバッテリーの点検を日頃から行っていたため迅速に対応できた。

ドローン飛行時は、被災箇所が国道と非常に近かったため、通常時は片側交互通行としていた所を一時的に全面通行止し、第三者の立ち入りを制限しつつ調査を行った。そのため迅速な調査が求められ、ドローン操作に慣れた職員でないと調査は難しいと考えられる。ただし迅速な調査と分かりやすい被災状況を撮影した写真とその共有等、今後より迅速な応急・恒久復旧対応ができることを期待できる結果だった。

#### 4. まとめ

本研究では、令和5年度に結成されたドローン隊のマニュアル作成する際に必要と考えられる項目について、ドローンの活用事例や実施したドローン訓練の内容・効果等を基に検討した結果、以下の項目が必要であるとした。

また定期的な訓練の重要性、ドローンによる効果的な被災状況把握などドローンの有効性が証明された。

##### (1) SOTEN(蒼天)の取扱説明書

扱うドローンの取扱説明書を組み込む必要があると考えられる。

##### (2) 実施した訓練内容

第2回ドローン訓練での参加者の意見や、複数回実施した訓練による段階的な技術力の向上が見られたことから、定期的なドローン訓練を実施することが必要であると考えられる。また関係法令手続きの学習もドローン訓練時に行う必要があると考えられる。

なお参加者がほとんど同じ技術力だからか、課や世代を超えて教え合い、親睦を深める場面もあった。ドローン訓練中の風景を図6に示す。

##### a) ドローンの使用制限

ドローン訓練未経験者の使用を制限する必要があると考えられる。

##### b) 技術的資料

ドローンを飛行させる技術は訓練することで向上できるが、技術的資料や緊急時の対応方法を読み込むことでより安全・効率的な飛行が可能になると考えられる。また紀南河川国道事務所で発生した活用・損傷事例等を記載することでどのようなことに気を配らなくてはいけないのかが分かるようになる（鉄筋コンクリートや金属製の手すりの付近で飛行させない、第三者の上を飛行させない、飛行時刻の記録やチェックリストの活用を行う等）。

##### c) 班員の構成



図6 訓練風景



第3・4回ドローン訓練では3人1組で班を作り、それぞれに役割を持たせたが、現在の構成ではタイムキーパーや記録者がおらず、また操縦監視者については班長と役割が重複している部分がある。特にタイムキーパーについては、ドローンの飛行可能時間は限られているため、効率的な調査・飛行を行うためには必要と考えられる。そのため、今後は操縦監視者を抜いてタイムキーパーや記録者を入れる、また4人1組にするなど最適な班構成を探る必要がある。

#### d) ドローン隊員の階級区分

ドローン訓練に参加し、十分な操作技術があると考えられる職員はドローン隊員になることができるが、現在は具体的にどのようなことができればドローン隊員になれるのかは詳細に定めてはいない。そのため、関係法令手続きの理解度やドローン操作の習熟度を計ったり(例えば、特定飛行に該当するのはどのような場合か答えられる、ドローンを飛行させ指示した通りの操作ができる等)、ドローン訓練の参加回数を記録したりすることで、職員を階級により区分することができ、それによりドローン隊員になることができる条件を決定する。

#### e) ドローン隊員のリスト

ドローン隊員となった職員のリストや緊急連絡先、連絡体制が必要であると考えられる。

### (3) ドローンの活用事例

#### a) 管理範囲における特定飛行となる区域の明示

紀南河川国道事務所管内における人口集中地区(以下、DID区間という)や空港等の周辺等、特定飛行となる地域を明示することで、迅速に行動できるため必要であると考えられる。紀南河川国道事務所管内のDID区間は御坊市、田辺市、新宮市の一部で、また白浜空港周辺<sup>4)</sup>も特定飛行となる。ドローン訓練時には、広さや環境、特定飛行となる地域かどうかを考慮した結果、紀南河川国道事務所の出張所である紀勢線出張所の駐車場や工事現場のスペース等で行っており、訓練時の候補として記録しておく後に便利と考えられる。

なお一時的に緊急用務空域に指定されている可能性があるため、飛行させる前に緊急用務空域の確認は必要である。

#### b) 飛行前点検や備品点検

ドローンを飛行させる際に必要な物(回転翼がきちんとついているか、バッテリーの充電は十分か等)が揃っているか、飛行できる環境(鉄筋が近くにないか、風速はどうか、第三者がいなか等)かどうか、また飛行計画や飛行日誌の準備はできているか等、飛行させる前にチェックすべき点が多くあり、チェックリストを作成して飛行前にチェックする必要がある。また定期的に備品全体の点検を行い、予備バッテリーの充電や紛失している物は

ないかのチェックを行う必要がある。

紀南河川国道事務所管内においては、山や谷が多く、工事現場もまた山や谷に集中しているため、飛行させる際にはマルチパスや突風、上昇気流に気をつける必要がある等、特徴的な地形に合わせた注意点をマニュアルに記載する必要がある。

ドローンは災害対応以外にも、工事進捗把握や広報写真などにも効果的であり、幅広く扱うことでより強みを発揮するが、それと同時に事故や違反などが起きる可能性も高くなる。そのため訓練やマニュアルが必要不可欠であると考えられる。

## 5. 今後の課題・展望

今後の課題として、マニュアルの作成に必要な要素は明らかにしたが、実際に作ってはいないためマニュアルを作成する必要がある。またドローン隊を継続的に運用するためにドローン隊員が積極的に訓練・活動していく必要があり、その際に発生した新たな問題についても解決していかななくてはならない。

今後の展望としては、紀南河川国道事務所ドローン隊員であった職員が他事務所へ異動になった際にその事務所でもドローンの活用を広め、ゆくゆくは近畿地方整備局全体で、職員によるドローンの活用を進めていくことが望ましい。

#### 参考文献・出典

- 1) 内閣府: 令和5年版防災白書,  
([https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r05/honbun/t1\\_2s\\_01\\_00.html](https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r05/honbun/t1_2s_01_00.html) 2024年5月10日取得)
- 2) 株式会社ACSL:SOTEN 取扱説明書 v3.1,  
([https://www.acsl.co.jp/admin/wp-content/uploads/2024/06/SOTEN%E5%8F%96%E6%89%B1%E8%AA%AC%E6%8E%E6%9B%B8\\_v3.1.pdf](https://www.acsl.co.jp/admin/wp-content/uploads/2024/06/SOTEN%E5%8F%96%E6%89%B1%E8%AA%AC%E6%8E%E6%9B%B8_v3.1.pdf) 2024年7月2日取得)
- 3) 国土交通省, 無人航空機の飛行許可・承認手続き,  
([https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_fr10\\_000042.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000042.html) 2024年7月2日取得)
- 4) 国土地理院, 地理院地図,  
(<https://maps.gsi.go.jp/#12/33.685496/135.435333/&base=std&ls=std%7Cdid2020%7Ckokuarea&blend=0&disp=111&vs=c1g1j0h0k010u0t0z0r0s0m0f0&d=m> 2024年7月2日取得)

# 瀬田川洗堰管理制御処理設備の更新について

竹内 誠道<sup>1</sup>・木下 浩一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 琵琶湖河川事務所 管理課 (〒520-2279 滋賀県大津市黒津4-5-1)

<sup>2</sup>近畿地方整備局 兵庫国道事務所 防災情報課 (〒650-0042 神戸市中央区波止場町3-11)

琵琶湖河川事務所が所管する瀬田川洗堰の堰管理制御処理設備について2000-2001年度において製作・据付が行われ、2012-2013年度においては機器取替等の改良工事を実施している。前回工事から10年が経過し、更新時期を迎えたため2022-2023年度において設備の据付工事以来となる全面的な設備更新工事を実施した。更新前の設備と比較して改良を行った箇所や施工時ににおける工夫点について報告する。

キーワード 瀬田川洗堰、ダム・堰管理用制御処理設備、設備更新

## 1. はじめに

瀬田川洗堰は瀬田川に設置されている琵琶湖河川事務所が所管する可動堰である。放流設備として本堰ゲート（鋼製二段式ローラーゲート：10門）、流量調節ゲート（鋼製三段式ローラーゲート：2門）、流量調節バルブ（ジェットフローゲート：1門）を備えている。これら設備を稼働させることにより、平時は琵琶湖の水位調節並びに下流淀川における流水の正常な機能維持及び水道用水・工業用水の供給を行い、大規模な降雨などが発生した際には琵琶湖周辺の洪水防御及び下流淀川の洪水流量調整などを行っている。



写真-1 瀬田川洗堰放流設備

堰管理制御処理設備（以下、「堰コン」とする）とは堰に設置された管理設備と接続し、堰操作員に対して管

理・運営に必要なデータを適切に提供するとともに、放流設備の制御を行うことを目的とし、瀬田川洗堰を運用していくに当たって欠かすことのできない設備である。本報は2023年度において実施した堰コンの更新およびその工事に関して報告を行うものである。

## 2. 設備概要

今回更新を行った堰コンは「ダム管理用制御処理設備標準設計仕様書・同解説（平成28年8月国土交通省）」に基づいて設計・製作されたものである。

### (1) 設備構成及び機側～遠方間の接続方式

放流設備の遠方操作は、琵琶湖河川事務所3階にある操作室に設置されている遠方操作卓及び放流操作装置から行う。遠方操作卓は鋼製コントロールデスク型専用卓の形態をとっており放流設備の手動操作が可能なものである。放流操作装置はFA-PCの形をとっており、設定値操作の制御や観測した水文データから演算した堰水文データや放流設備の操作記録のデータベースとしての役割を担っている。

入出力装置1～3の収容架は事務所4階にある電算室に設置されている。入出力装置1は操作卓や放流操作装置に対する信号の入出力を、入出力装置2は観測した水位や流量などから演算された堰水文データの入出力を、入出力装置3は機側装置に対する信号の入出力をそれぞれ行うための装置である。



写真-2 堰操作卓

本堰ゲートの機側伝送装置PLC (Programmable Logic Controller) は機側操作盤に実装されており、スター型接続 (FL-net伝送) にて堰コンと接続されている。

(2) 洗堰放流量の把握方法について

堰コンを運用する上で必要となる水文観測所は瀬田川洗堰上流側にある千町水位観測所と下流側にある瀬湊水位観測所、瀬田川洗堰より約1.5km上流に設置されている橋本流量観測所 (流速換算値、HQ換算値の2系統) である。

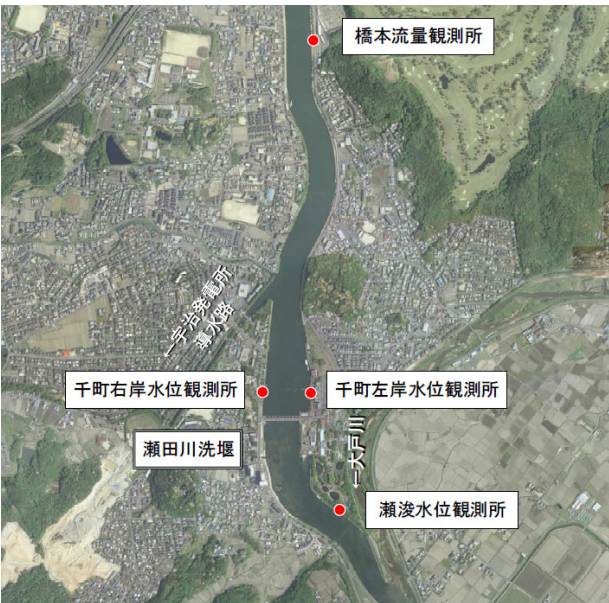


図-1 水位・流量観測所位置図

本堰ゲートは、5つのゲート状態 (全閉、越流、ドン付、潜流、全開) を使い分けることで放流量を調節している。越流時とドン付け時においては千町水位観測所で観測される千町水位と現在のゲート開度との差を基に越流量を演算することで一門あたりの放流量を算出し、全てのゲートから放流されている放流量を合計することで

洗堰放流量を算出している。このとき橋本流量観測所で観測される流量については前述の通り洗堰の上流1.5km地点に存在することからリアルタイムの放流量とはいえないため使用していない。

一方で、潜流時、全開時においてはゲートからの越流だけでなくゲート下の潜流も放流量に含まれることから千町水位を基に正確な洗堰放流量を演算することができないため、橋本流量観測所により観測されている橋本流量から洗堰放流量を算出している。



図-2 本堰ゲート状態図

3. 更新に伴い改善した点

(1) 二重化による信頼性の向上

更新前の堰コンは各ゲート機側操作盤・機側伝送装置から、入出力用/遠方手動用インタフェース装置に2系統でFL-net接続されているため、いずれかのインタフェース装置に障害が発生した場合は、全ゲートの操作系統に影響が及んでしまう状況にあった。例えば、入出力用インタフェース装置が故障した場合は、全ての放流設備に対して設定値操作ができなくなる構成であった。ただし、遠方手動操作用インタフェース装置により遠方手動操作によるバックアップは可能であった。

今回の更新によって、入出力装置1及び遠方手動操作卓の処理部については、運用系と待機系の2系統を実装することにより冗長化を図っている。これにより入出力装置1や遠方手動操作卓が何らかの要因で故障した場合でも、運用系と待機系を切り替えることにより、通常通りの運用を可能にしている。

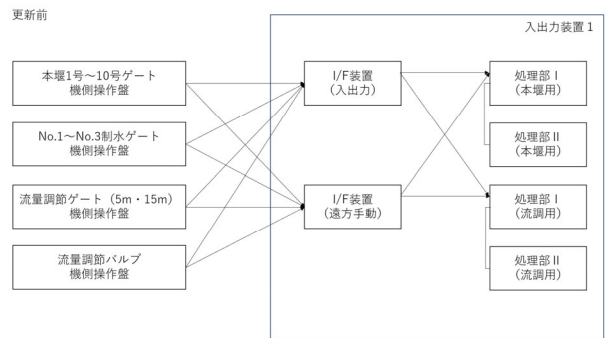


図-3 機側・遠方接続系統図 (更新前)

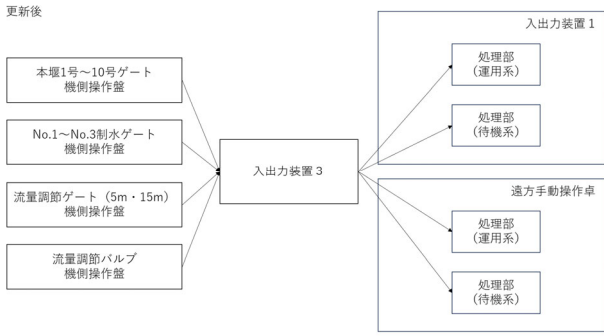


図4 機側・遠方接続系統図 (更新後)

また今回の更新工事により新しく設置した放流操作装置は、放流操作装置1と放流操作装置2の2系統を実装することにより二重化を図っている。前述したとおり、放流操作装置は演算結果から得られた堰水文データやゲート操作記録を保存するデータベースとしての機能を備えており、そのため常に稼働していることが求められるため、二重化により信頼度を向上させた。

放流操作装置は主系と従系の二つの運転モードがあり、これは二重化運用状態表示器により確認することができる。設定値操作など堰コンの運用に係わる操作は主系からのみであるが、データの閲覧などは従系からでも行うことができるようになっている。

運転モード (主系/従系) の切り替えは手動で行うことができるほか、LAN通信及びシリアル通信によりシステムの稼働状態を監視し、双方の通信が途絶えた場合においてはシステム異常とみなし、運転モードの切り替えを実施する。

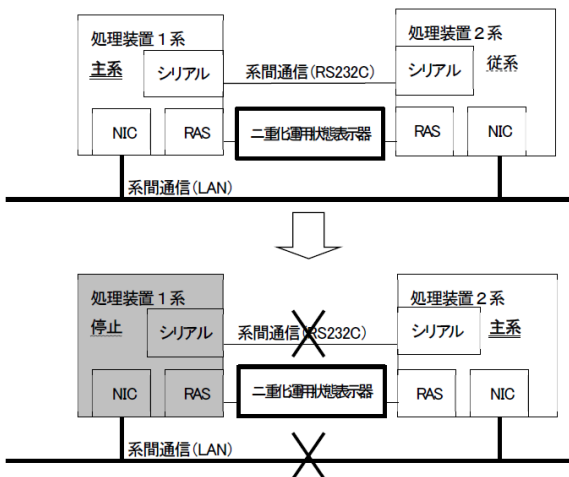


図5 システム停止による二重化切り替え図

また、データベース機能の二重化も行っている。リアルタイム等価とロギング等価を実施することで、系の遷移時においては即時データの引き継ぎを行うことができる。長期における放流操作装置の停止が発生した場合においては、停止時間分のすべてにおいて二重化の片系装

置により全等価が行われ、データは自動的に補填されるようになっている。

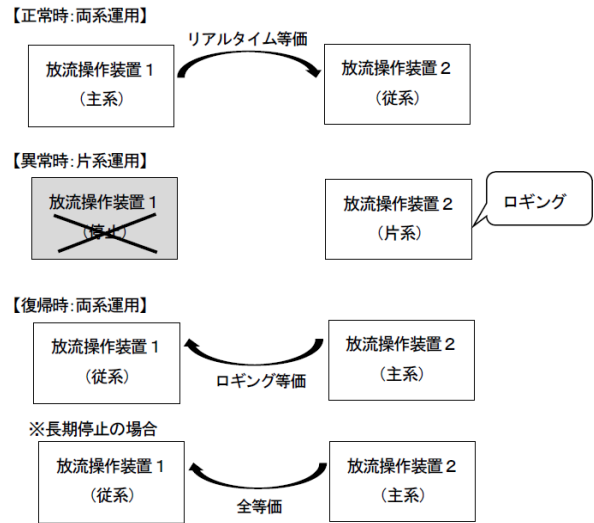


図6 二重化データベース引き継ぎ処理図

また、機側データは入出力装置、遠方手動操作装置に集約された後、放流操作装置に取り込まれる。入出力装置と遠方手動装置はノードの二重化を図っており、優先ノードである入出力装置が異常になった場合は、遠方手動操作装置よりデータを入力する。機側データに限り、優先ノードでのデータ読込の際、入出力装置の機側伝送装置異常フラグを参照し、異常であれば遠方手動操作装置からのデータ入力を試みる。遠方手動操作装置データも欠測の場合は該当データは欠測とする。これにより入出力装置と放流操作装置間のケーブルが切断されてしまった場合においても、機側データを放流操作装置に入力することができる構成となっている。

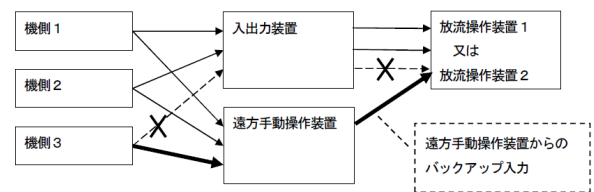


図7 機側データのバックアップ図

## (2) 省力化について

更新前の堰コンにおいては、帳票出力機能があるが、出力される帳票がゲート操作記録表を出力するのに対応していなかったため、堰管理を行う上で別途操作表を作成する必要があり、堰管理業務を行っていく上で負担となっていた。堰管理員からの要望を踏まえた結果、更新後においては堰コンに蓄積された操作記録から自動で堰操作日報を作成することができるように改良を施した。

### (3) 開度一回限り操作

更新前の堰コンについては遠方操作卓でのみ手動操作を行うことができ、操作卓に備え付けられているスイッチを押下することでゲート開度を調節し放流量の調節を行っていた。

今回更新の堰コンも同様に遠方操作卓による手動操作を行うことができるが、今回更新により新しく追加された放流操作装置の機能の一つである開度一回限り操作を使用することで堰操作の簡易化を図っている。

開度一回限り操作においては直接機器に目標となる開度を入力することで、設定した開度までゲートが自動的に動くことによりゲート操作を行うことができる。これにより、複数のゲートを動作させる際の操作職員の負担を軽減させることができる他、入力内容を複数人で確認できるため誤操作のリスクを低減できるようになった。

### (4) 入力信号の系統整理と計測装置の集約化

前述の通り、瀬田川洗堰においては上流の千町水位観測所と橋本流量観測所、下流の瀬流水位観測所からそれぞれ観測した水文データを入力している。更新前においては入力系統が入出力処理装置と情報伝達処理装置にそれぞれ分かれており、システムが複雑になっていた。それに加えて、それぞれの水文データに一つ一つに対応する専用の計測装置 (PLC) が設置されていたため、保守費用が装置数に依存する関係から過分にライフサイクルがかかっている状態であった。

今回更新においてはダムコン標準設計仕様書に則り、制御系LANに接続される装置にリアルタイムの水文量演算処理情報を入力し、定時データを情報入力提供装置 (=入出力装置 2) から入力する方法をとることで、入力系統を単純化している。また、計測装置の機器集約のために、水位計測処理部 1 と水位計測処理部 2 の二つの計測装置に集約することで、左右岸の 2 箇所から計測している千町水位等のデータは計測装置を二つに分けることにより信頼性の向上を図りながら、装置数を減らすことにより費用を抑えることができた。

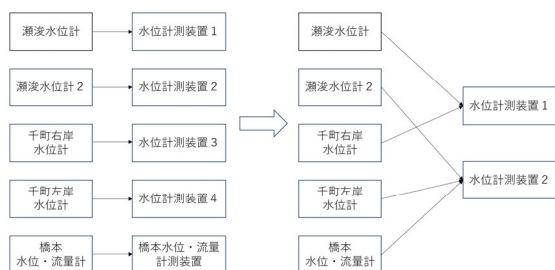


図-8 計測装置の接続系統図

### 4. 更新時における切り替え

今回の堰コン更新工事を行うに当たっての障害として堰コンが堰水文データの演算や放流設備の遠方操作を行う設備である関係上、常時稼働することが求められる設備だということがあげられる。もし、堰コンが機能しなくなった場合、事務所操作室から流入量や放流量をはじめとした堰水文データの把握と遠方操作が不可能になる。また、2023年度における琵琶湖水位の大幅な低下傾向も障害となった。この水位低下傾向により、琵琶湖水位は最大で-78cmまで下降した。新堰コンへの切替作業および対向試験を行ったのが2023年12月から2024年2月にかけてであり、この期間が最も琵琶湖水位が低く推移していた時期でもあった。これにより普段から気を配って洗堰の操作を行っているところではあるが、より一層きめ細やかな放流量調整が求められたため、ほぼ毎日放流量の調節のために堰操作が必要となる状況になったのである。以上の観点から、機器の据付と調整にあたっては、いかに堰コンの機能が停止している期間を短くするかという工夫が必要となった。

そのため、まず作業工程としては旧堰コンを空きスペースに仮設し、旧堰コンで洗堰を運用しながら新堰コンの据付作業を行った。その上で新堰コンによる対向試験を終えたゲートから順次新堰コンへの接続切替を行い、すべてのゲートにおいて接続切替が終了した後に仮設してあった旧堰コンを撤去するという流れである。さらに、水位計や開度計の点検時でも、計測値を手入力できる保守設定機能を併せて使用することで新堰コンの試験中においても、設定入力値を元に堰水文データの演算を旧堰コンで行うことができた。

また、機側装置と通信を行っている入出力装置 3 との接続を試験用の仮配線を残しておくことで新堰コンと旧堰コンとで随時切り替えることができ、旧堰コンによる設定値操作を更新工事期間中も可能な限り継続することができた。



写真-3 新旧操作卓併設時

## 5. 設計時からの変更点について

今回の更新工事においては設計当初では更新、改良予定であったいくつかの設備については既設踏襲、または設置を見送っているものがいくつか存在する。

一つ目は千町流量観測所の設置についてである。当初は橋本流量観測所よりも正確な流量を観測できる千町地点に新たな流量観測所を設置する計画であった。しかし、設置に当たっては電気通信的な設計だけではなく土木的な設計も必要であった点や、限られた予算の中で他機能を優先したため今回は見送ることとした。今回更新において千町流量計のデータを取り込む機能は実装しているため千町流量観測所の設置が完了すればすぐにでも運用が可能な状態となっている。

二つ目が簡易シーケンス型の採用である。通常の仕様であれば機側操作盤PLCは、アンサー処理、妥当性判定、起動指令の送受信処理等を行った上で、開度制御処理を実施するという比較的複雑な通信や処理を行うことになる。本堰ゲートに上屋がない瀬田川洗堰においては機側操作盤に機能分担するのは信頼性の向上につながらないとして開度制御機能は入出力装置に実装し、遠方から開閉指令のみのオンオフ制御に簡素化する簡易シーケンス型の採用を検討していた。しかし、簡易シーケンス型を採用するに当たっては機側盤と堰コンの更新を同時に行う必要があり、機側盤の更新と足並みが揃わなかったため今回は簡易シーケンス型は採用しないこととした。

最後に操作室に設置されている大型表示装置についてだが、設計当初はコスト削減の観点からディスプレイを4枚組み合わせた4面マルチディスプレイではなく大型ディスプレイ1面の構成へと更新する計画であった。しかし、外部からの訪問者への説明や堰操作を行う上で再

検証を行った結果、大きな画面構成を用いた方がより効果的に運用できると判断したため、今回の更新工事においては更新前と同様に4面マルチディスプレイを採用した。

## 6. 終わりに

今回の更新工事により堰コンの重要箇所において二重化を行うことでより信頼性を確保することができた。堰コンの安定稼働という側面においては効果的な設備を導入することができたと考えている。

一方で全開放流時などにおいては流量計算を橋本流量観測所に依存している状態であるので、より効果的な全開時放流量の計測方法や、瀬田川における琵琶湖河川事務所管轄流域の水位データを取り込むことで、放流量変更による上下流への影響をよりわかりやすく可視化できるようなシステムの構築など、観測データをより一層活用できるような「効果的な運用の行える堰コン」について考察と検証を行っていきたいと考えている。

最後になるが、本報がダムコン、堰コンの更新における参考になれば幸いである。

### 関連論文

瀬田川洗堰管理制御処理設備の課題解決に向けた検討について  
(2021年度)

# 小曲線橋の耐震設計における 支承構造の技術的工夫

雨宮 智久<sup>1</sup>・田中 大樹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 大和川河川事務所 流域治水課 (〒582-0009 大阪府柏原市大正2-10-8)

<sup>2</sup>近畿地方整備局 紀南河川国道事務所 工務第三課 (〒646-0003 和歌山県田辺市中万呂142) .

近畿自動車道紀勢線のハーフインターで計画されていた「すさみ南IC」において、当IC付近に位置する防災道の駅「道の駅すさみ」から広範囲かつ迅速な被災箇所へのアクセスを可能とし、地域の防災能力向上に向けオンランプの追加の事業が進められている。

本橋は地形的条件や周辺環境の制約などから鋼3径間連続箱桁橋の橋梁形式が採用され、本線との接続などを踏まえ曲線橋となった。しかし地震時の支配的な挙動方向が下部構造ごとに異なることなどから、限定した方向にのみ移動する支承は不向きで、全方向に移動と回転が可能な支承を用いることが求められた。そこで、常時機能を満足する免震支承に加えて、地震時の変位追従機能を補完する免震支承を追加することにより、橋脚柱規模及びび杭を最小化した合理的な設計を実現した。さらに、全方向免震構造を採用することで、震災直後の緊急点検の着眼点は基柱部から支点部となり、緊急点検の容易性も確保した橋梁設計を実現した。

キーワード 曲線橋, 耐震設計, 支承設計, 免震支承

## 1. はじめに

近畿自動車道紀勢線（以下：紀勢線）は大阪府松原市から和歌山県南部を通り三重県多気郡多気町までを結ぶネットワークを構成する高規格道路である。紀勢線は、大規模災害時における緊急輸送道路など災害時の交通確保、救急医療活動の支援、地域相互の振興と発展に寄与するために整備を進めている。「すさみ南IC」は、事業化当初はハーフインターチェンジ（大阪方面へのオンランプ、大阪方面からのオフランプ）で計画されていたが、地域の防災能力向上に向け串本方面へのオンランプの追加が令和4年に事業化された（事業主体：和歌山県）。事業主体は和歌山県であるが、紀南河川国道事務所が建設を進めている「すさみ串本道路」（図1）へ接続することから、本線およびオンランプにおいて一連の設計、施工が求められるため（図2）、当事務所が和歌山県からの受託事業として設計・施工を行っている。

## 2. すさみ南IC串本方面オンランプの事業化の背景

すさみ串本道路は、紀勢線の一部を構成する和歌山県東牟婁郡串本町サンゴ台から和歌山県西牟婁郡すさみ町江住に至る延長19.2kmの自動車専用道路である。平成26年度事業化当初はすさみ南ICより以南にすさみ南ICと



図-1 すさみ南 IC の位置図



図-2 すさみ南 IC 完成イメージ



図-3 すさみ南ICと道の駅すさみの位置関係

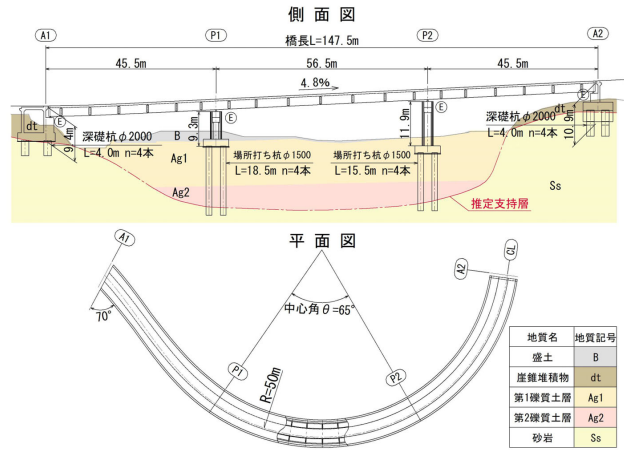


図-5 概要図

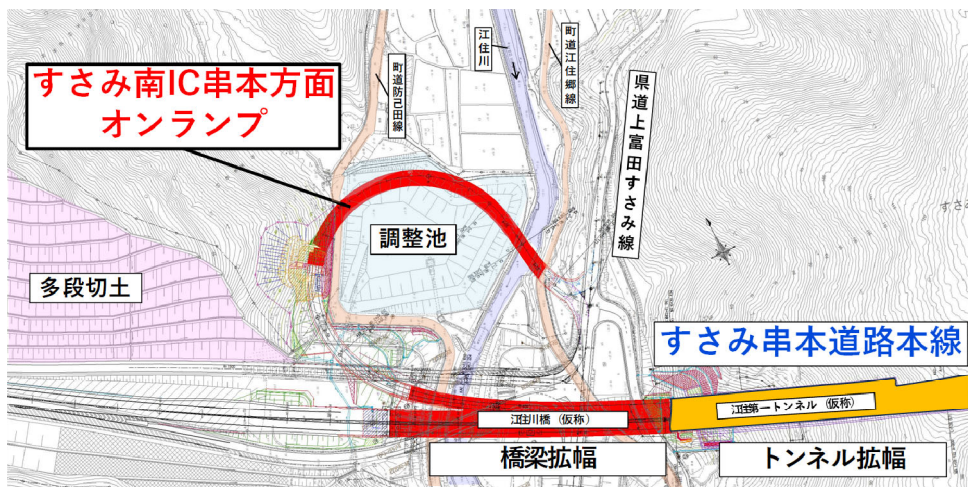


図-4 追加オンランプに伴う周辺条件

逆方向のハーフランプとして和深IC (仮称) (串本方面へのオンランプ, 串本方面からのオフランプ) を整備する計画であった。

すさみ南ICの近くに位置し, 令和3年6月に「防災道の駅※」として選定された道の駅「すさみ」(図3)は, 広域的な防災拠点機能を期待できる一方で, ハーフインターでは, 道の駅から紀勢線を活用しアクセス可能なエリアが限られていた。大規模災害時における防災機能の強化, 観光振興及び地域活性化などを目的に, 串本方面への追加オンランプの整備<sup>3)</sup>を令和4年に和歌山県により事業化されたが, 追加オンランプの接続先であるすさみ串本道路本線の橋梁・トンネルの拡幅の必要があり, 一連の設計, 施工が求められることから, 当事務所が和歌山県からの受託事業として設計・施工を行うこととした。

※「防災道の駅」は自衛隊, 警察, テックフォース等の救援活動の拠点, 緊急物資等の基地機能, 復旧・復興活動の拠点等となり, 広域的な防災拠点機能を持つ道の駅である。

### 3. 追加オンランプの設計検討

#### (1) 追加オンランプの構造形式

すさみ南ICは狭隘な谷谷に位置しており, 追加オンランプは県道上富田すさみ線からすさみ串本道路の串本方面へ乗り入れるオンランプとなる(図4)。県道上富田すさみ線の対岸に位置する斜面は本線で多段切土になっており, 追加オンランプ施工に伴う掘削時の地山挙動への影響が懸念された。そのため平面線形はR=50mの小曲線半径とし, 大規模な切土を回避した。河川部の横断を除き追加オンランプ全線を盛土構造にした場合, 本線位置が高くオンランプの盛土が高盛土なる, オンランプの設置個所の調整池・町道の機能を大幅に阻害することから, それら施設の代替え機能の確保が必要となるが, 周辺に新たに計画整備することが困難であったため, 橋梁形式を採用することとした。橋梁の支間割については, 調整池の機能阻害を考慮した橋脚配置にする必要があり, 施工性や経済性なども踏まえ, 鋼3径間連続箱桁橋が合理的で経済的となった。



表-1 支承条件の比較

支承条件	多脚固定構造	全方向分散構造	全方向免震構造	剛結構造	
	A1 P1 P2 A2	A1 P1 P2 A2	A1 P1 P2 A2	A1 P1 P2 A2	
	E + F + F + E	E + E + E + E	E <sub>m</sub> + E <sub>m</sub> + E <sub>m</sub> + E <sub>m</sub>	E + R + R + E	
略図					
塑性部位	橋脚基部	橋脚基部	免震支承	橋脚の上下	
橋脚	柱径	φ3.6m	φ3.5m	φ3.0m	φ4.0m
	杭	φ1.5m 6本	φ1.5m 5本	φ1.5m 4本	φ1.5m 6本
構造性	全方向免震構造に比べると、橋脚柱規模が大きく、杭本数も多い	全方向免震構造に比べると、橋脚柱規模が大きく、杭本数も多い	減衰効果により、橋脚柱規模が最も小さく、杭本数も最も少ない	橋脚の柱高が低く支持層も浅いため、剛結構造にとっては不向きな構造系	
	△	△	○	△	
経済性 (橋全体)	約4千万円不経済	約6千万円不経済	最も経済的	約3千万円不経済	
	△	△	○	△	
維持管理 (定期点検)	2点沓で沓座周りがシンプルのため点検しやすい	支承数が多く沓座周りが煩雑で点検しにくい	支承数が多く沓座周りが煩雑で点検しにくい	中間支点は支承がなく維持管理対象が少ない	
	○	△	△	○	
震災対応 (緊急点検)	柱基部と支定点の着眼が必要である	柱基部と支定点の着眼が必要である	主に支定点に着眼すればよい	剛結部と柱基部の着眼が必要である	
	△	△	○	△	

(2) 本橋の特徴と支承部の検討

鋼3径間連続箱桁が選定され、橋長147.5m、最大支間L=56.5m、中心角θ=約65°の曲線橋となった。(図5) 本橋はR=50mと小さい曲線半径となる曲線橋であることに加え、縦断勾配が4.8%であり下部構造ごとに柱高が大きく異なる特徴がある。本橋のような場合、地震の影響により下部構造ごとに挙動方向が異なるとともに伸縮方向も一致しないため、支承条件は、限定した方向にのみ移動する支承は不向きで、全方向に移動と回転が可能な支承条件を用いることが求められた。支承条件としては限定したい方向のみに移動可能となるような可動支承(サイドブロックで拘束)は不向きであり、任意の加振方向に同様な支持機能で変位追従できる構造(固定F、弾性固定E、剛結R)が適切となる。弾性固定構造には通常のゴム支承による反力分散構造(E)と、衰弱機能を付加した免震構造(E<sub>m</sub>)があり、それらを組み合わせた4案を比較検討した。

総合的な対比結果を表-1に要約・整理する。多脚固定構造、全方向分散構造、橋脚部剛結構造は、図-6(上段)に示すように耐震設計において柱基部を塑性化させる必要があった。一方で、全方向免震構造は減衰効果により地震時のエネルギー吸収することにより、柱基部の塑性化を制限させることができる。(図-6(下段)) これにより、橋脚柱規模及び杭本数が最小となって合理的であるため最適な構造であると考えた。

しかし、曲線半径が小さい本橋では、断面方向のねじりによる負反力の影響が大きく、全方向免震構造を採用する場合、負反力(上揚力)を解消する必要が生じた。

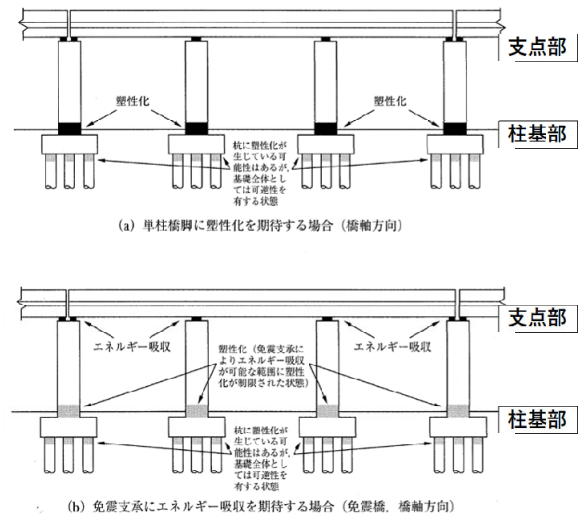


図-6 塑性化を期待する部材等の組み合わせの例<sup>2)</sup>

負反力作用を抑えるため、図-7のように「アウトリガー方式」を採用することで左右の鉛直荷重バランスを調整し、負反力を抑えた。

本橋は縦断勾配が4.8%であり、橋脚高が大きく異なるため、積層ゴム支承の剛性及び減衰性能は、橋脚に作用する水平力を想定値になるよう調整が必要である。しかし、負反力を抑えるため、支承寸法に制約<sup>3)</sup>を受ける本橋の場合、常時機能と大地震時における減衰性能を併せ持つ免震支承は構造成立しなかった。そこで図-8に示すように、「常時機能を満足する免震支承」と「大地震時に必要となる変位追従機能を補完する免震支承」に機能分離をすることにゴム支承の設計収束を図った。機能

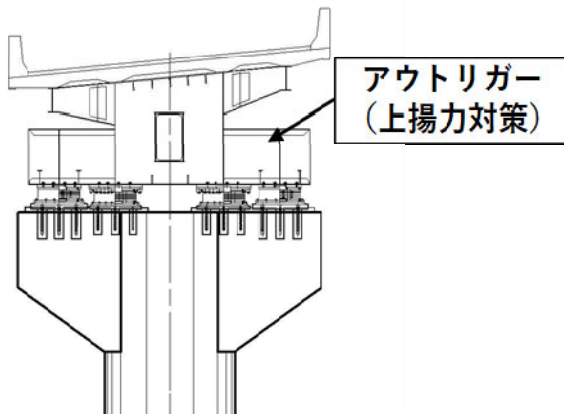


図-7 アウトリガー方式

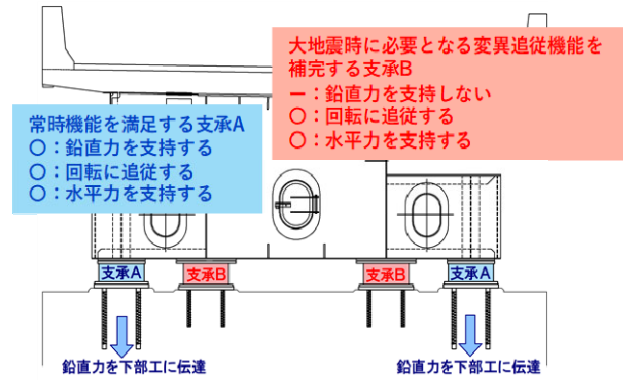


図-8 機能分離したゴム支承

分離構造では、支承数を増やすことで水平剛性を大きく設定できるため、橋梁全体の地震時移動量が300mm程度となって設計収束して構造成立している。なお、曲線橋では、地震力の加振方向が各支点の橋軸及び直角方向が異なるため、「4支点×2=8方向」を考慮している。

下部工あたりの支承設置個数が4基と多く、橋座が非常に煩雑になってしまうことから、支点部構造の簡素化を目的に、1ボックス1沓の検討も行ったが、道路橋支承便覧における寸法制限を満たす最大限設定可能なゴム沓形状を用いても、地震時移動量が大きく生じて橋梁全体系の構造成立が不可となったため、4点沓を採用した。

### (3) 維持管理面での優位性

前述したように、全方向免震支承以外の3つの支承構造の場合は柱基部に塑性化が生じる。そのため、地震時などの緊急点検時の着眼点は柱基部と支点部の着眼が必要である。一方で、全方向免震構造は、地震時の大変形は支承のみであり、緊急点検の着眼点は支点部が主になるため、震災直後の緊急点検の容易性の確保に繋がる利点もある。防災拠点の道の駅すさみから大規模災害時における緊急輸送道路になる紀勢線への交通機能を迅速に確保する点からも緊急点検の容易性は大きな利点となり、全方向免震構造を当橋梁の支承構造として採用した。

## 5. おわりに

紀勢線のすさみ南ICでは、当初のハーフィンターでの計画から、串本方面へ追加オンランプが事業化されたことにより、災害時に防災拠点となる「道の駅すさみ」から広範囲かつ迅速な被災箇所へのアクセスを可能となり、地域の防災能力向上が期待される。当該箇所は地形条件や周辺に位置する調整池への配慮から小曲線橋を鋼3径

間連続箱桁橋で設計する計画となった。

選定された橋梁構造においては、地震時のエネルギー吸収ができ、橋脚柱規模及び杭本数が最小となり、合理的であるため全方向分散構造を採用した。しかし、曲線半径が小さい本橋では、断面方向のねじりによる負反力が働くため、構造成立が難しい条件となるが、「アウトリガー方式」を採用することで左右の鉛直荷重バランスの調整が可能になったほか、「常時機能を満足する免震支承」と「大地震時に必要となる変位追従機能を補完する免震支承」に機能分離をすることで、曲線橋に対応した免震構造の成立を可能とした。

維持管理の面からも、全方向免震構造を採用することで、震災直後の緊急点検の着眼点は基柱部から支点部となるため、緊急点検の容易性を確保した。

小曲線橋の支承構造に上記の技術的工夫を施すことによって、大規模災害時に防災拠点の防災道の駅「すさみ」から緊急輸送道路である紀勢線へアクセスすることが想定されるオンランプの設計において、地形や周辺環境の制約を受けながらも、必要な耐震性能、緊急点検の容易性の確保し、合理的で経済的な設計を両立した橋梁の設計を実現した。

**謝辞:** 本論文作成にあたり、多大なるご協力を頂きました皆様に感謝を申し上げます。

### 参考文献

- 1)和歌山県：わかやま県政ニュース すさみ南インターチェンジ串本方面オンランプ設置について、2022.2.27
- 2) (社団法人) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、2017.11.
- 3) (社団法人) 日本道路協会：道路橋支承便覧、2018.10.

# 水海川導水トンネル2期工事の温見断層及びその影響区間における施工状況に関する報告

渡邊 吉晃<sup>1</sup>・栗田 将和<sup>2</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 足羽川ダム工事事務所 工事課 (〒918-8239福井県福井市成和1-2111)

<sup>2</sup>株式会社安藤・間 水海川トンネル作業所 (〒910-2556福井県今立郡池田町松ヶ谷22字-11)

足羽川ダム建設事業では、足羽川下流域における洪水被害軽減を目的として、洪水調節専用のダム及び分水堰と導水トンネルから構成される水海川分水施設の整備を進めている。水海川導水トンネルは、足羽川の支川である水海川から、同じく足羽川支川の部子川に構築される足羽川ダムへ導水するためのトンネルであり、2017(平成29)年2月より1期工事が開始され、2024(令和6)年3月に2期工事を完了、2024(令和6)年7月現在は3期工事を施工中である。2期工事以降は脆弱な地山状況が続き、特に温見断層の破碎帯区間に到達してからは、切羽の安定性を確保するため前方に水抜きボーリングを実施する等の対策を行った。本稿では、水海川導水トンネル工事の温見断層及びその影響区間における地質状況や掘削方法、水抜きボーリング等による対策について報告する。

キーワード 導水トンネル、自破碎状溶岩、断層破碎帯、長尺ボーリング

## 1. はじめに

福井県は滋賀県の最北端から日本海に抜ける約10kmの稜線を境に嶺北と嶺南に分けられ、嶺北地方はさらに、北東を石川県境の加越山地、南を岐阜県境の越美山地、西を日本海に接する丹南山地と、三方を山に囲まれた大きな盆地地形をしている。このような地形上の特徴から、嶺北地方における降雨の大部分は、九頭竜川・足羽川・日野川で集積されたのちに福井市の市街地付近で合流し、九頭竜川河口から日本海へ向けて流れ出る。嶺北地方を流れる三大河川の下流域は過去、洪水被害に見舞われてきた歴史があり、洪水による被害の軽減を目的とする足羽川ダム建設事業が今立郡池田町で進められている。

本事業では、ダム本体を足羽川支川の部子川に構築するとともに、足羽川支川の水海川からダムへトンネルで結び導水する。将来計画では、さらに足羽川本川上流部等の3河川からも導水する予定である(図-1参照)。

水海川導水トンネルは、洪水時に水海川からダムへ導水するための全長4,717mの長大トンネルであり、福井県今立郡池田町と福井県大野市の境界に位置する部子山(標高1,464m)から北西に延びる尾根を貫く。この尾根は、足羽川支川の部子川流域と水海川流域を分ける分水嶺となっている。水海川導水トンネル工事においては、吐口にあたる金見谷川側から呑口にあたる水海川側へ全長4,717mの長距離を片押しによって施工していく。

トンネル中央付近の尾根部の直下においては、脆弱な自破碎状溶岩地山が広がっている。このうち吐口側坑口

から約3,200m付近では、自破碎状溶岩地山が、大規模活断層である「温見断層」によって破碎されていることが確認された。

本稿では、水海川導水トンネル2期工事における最難関施工箇所である温見断層の地山性状及び断層区間でのトンネル対策工、また温見断層の主要部通過後に続いた温見断層の影響区間における施工状況について述べる。

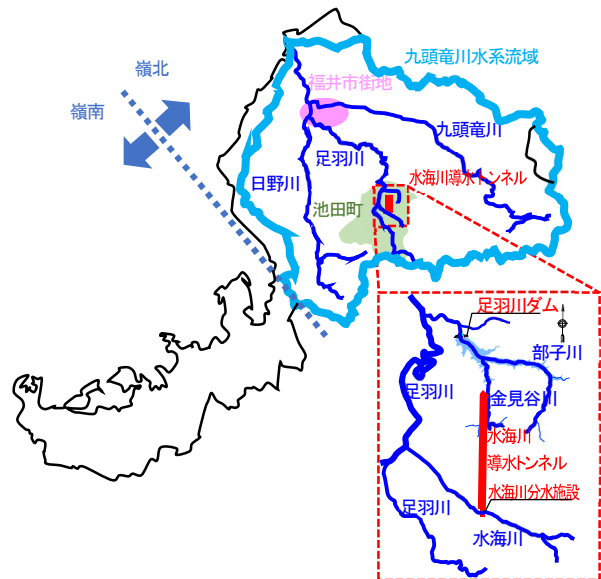


図-1 足羽川ダム事業全体平面図

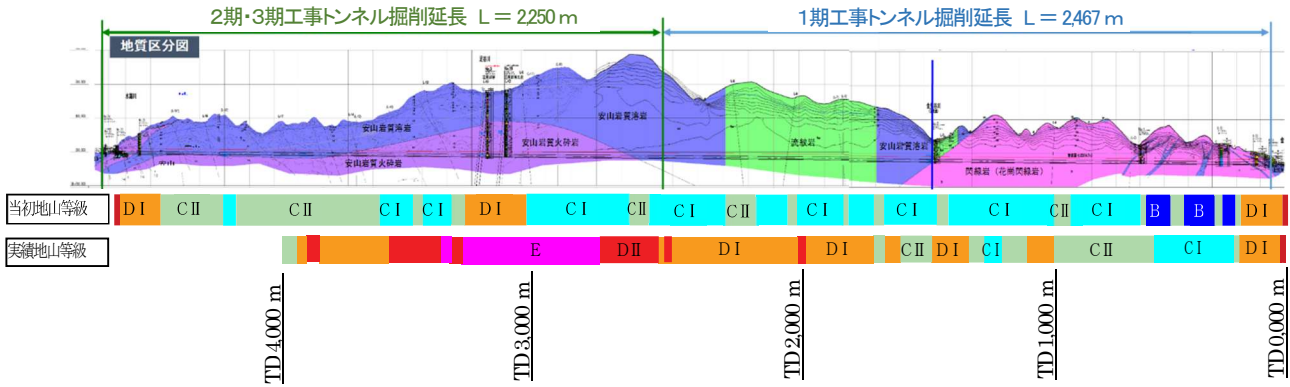


図-2 地質区分及び当初・実績の地山等級

## 2. 水海川導水トンネルの概要

### (1) 導水トンネル概要

水海川導水トンネルは、全長 4,717 m、内径 8.5 m、縦断勾配 1/170 のトンネルであり、仕上がり内径は直径 8.5 m の円形、底部は管理車両が通行できるように床板コンクリートを設置する。図-2 に地質縦断面図及び当初設計と工事实績による地山等級、図-3 にトンネルの標準断面図を示す。ここで、トンネルの掘削は、吐口側(図-2 右側)から呑口側(図-2 左側)に向かって片押しで行っている。

### (2) 地形地質・地質概要

トンネル部の地質は大きく 2 種類に分けられ、吐口側より約 1,500 m が船津花崗岩(花崗閃緑岩)、呑口側より約 3,200 m が糸生累層(安山岩溶岩、火砕岩類)を主として構成される。船津花崗岩は、1 億 7000 万~1 億 9000 万年前の中生代ジュラ紀に形成された花崗岩層で、糸生累層によって広く不整合に覆われている。糸生累層は、1800 万~2000 万年前の第三紀の早期に広範な火山活動によって形成されたグリーンタフと総称される火山岩類であり、下部は主に安山岩、上部は主にデイサイト(石英安山岩)からなる。

部子山山稜の尾根の呑口側には、尾根と並行して、北西-南東方向に伸びる温見断層が分布している。

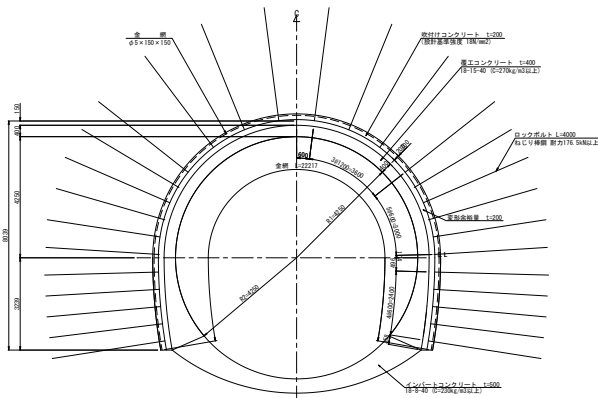


図-3 トンネル標準断面

## 3. 温見断層の概要

### (1) 温見断層概要

温見断層は、濃尾断層帯(福井県~岐阜県)を構成する活断層のひとつであり、福井県今立郡池田町から大野市を経て岐阜県に本巣市北部に至る。左横ずれを主体とし、北西部では北東側隆起成分、南東部では南西側隆起成分を伴う、長さ約 36 km の断層である(図-4)。

断層活動は約 200 万年前に始まったとされ、トレンチ調査等から、活動間隔は 2200~2400 年と推定されている。直近の活動は 1891 年の濃尾地震で、北西部の約 20 km 区間が活動し、最大 3 m の左横ずれと北東側 1.8 m の隆起が記録されている。

### (2) 温見断層の事前評価

水海川導水トンネルは、温見断層の端部付近にあたり、大規模断層が末端付近でどのような形態で分布しているか等、不明な点も多い。当該箇所付近には、温見断層と平行する複数のリニアメント(地表に現れた直線的地形)が認められ、どのリニアメントが温見断層の主断層に該当するのか文献においても意見が分かれている。

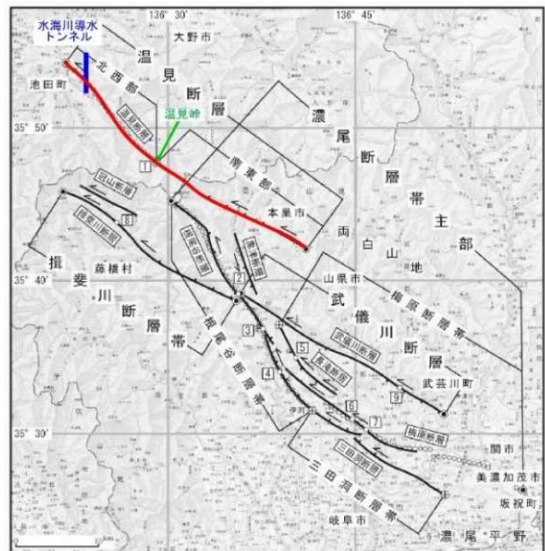


図-4 濃尾断層帯の構成断層<sup>1)</sup>に加筆

トンネル設計時の事前調査においては、文献調査、地表踏査、ボーリング調査などから、トンネル吐口より3.1~3.2 km 地点を横切る最も明瞭なリニアメントが主断層にあたるものと判断した(図-5)。さらに、これより呑口側には、幅 500~1,000 m にわたる派生断層をともなった影響区間が続くものと想定した。

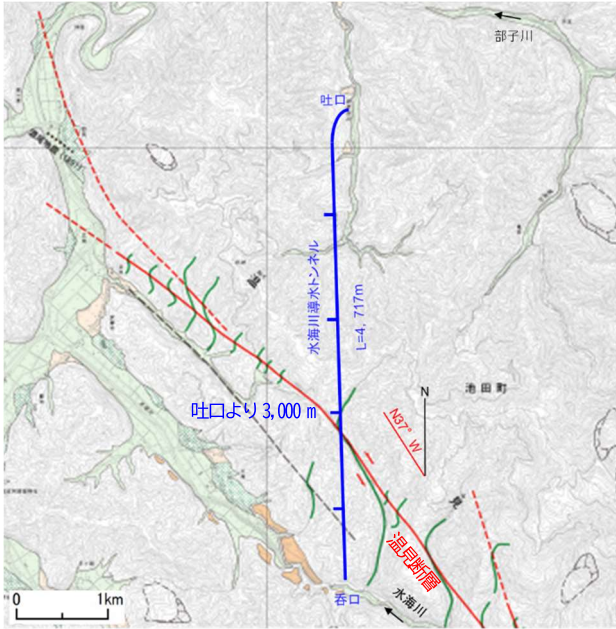


図-5 水海川導水トンネルと温見断層の位置関係<sup>2)</sup>に加筆

#### 4. 温見断層の出現と分布状況

##### (1) 温見断層到達前の地質

当初、断層周辺の地質は比較的硬質な安山岩を想定しており、トンネル切羽も想定ほど硬質ではないものの、通常の安山岩が出現していた。

しかし、TD (トンネル吐口からの距離) 2,500m 付近から安山岩に脆弱な自破碎部が混在するようになった。自破碎部は、安山岩中の溶岩が自らの流動作用で破碎されながら固化したのものである。固化した溶岩片の間を埋める細粒物質の固結度が高いものは堅固な岩盤になることもあるが、溶岩片間の固結が弱いと、本区間のように脆弱で細片化しやすい岩盤となる。

さらに、TD2,800 m 以降は、自破碎部が熱水の影響を受けて脆弱化し、切羽の大半を占めて出現することもあった。

自破碎状溶岩出現区間では、最大土被りが約 300mの強土圧と脆弱な地山により、トンネルの大きな変形が発生し、H200 のトンネル支保工が大きく座屈する場面もあった<sup>3,4)</sup>。写真-1 に TD2,887m 付近で自破碎状溶岩地山の施工中に発生した支保工の座屈状況を示す。

図-6 に自破碎状溶岩出現区間から温見断層にかけての地質状況、破碎帯の分布とその地山等級を示す。

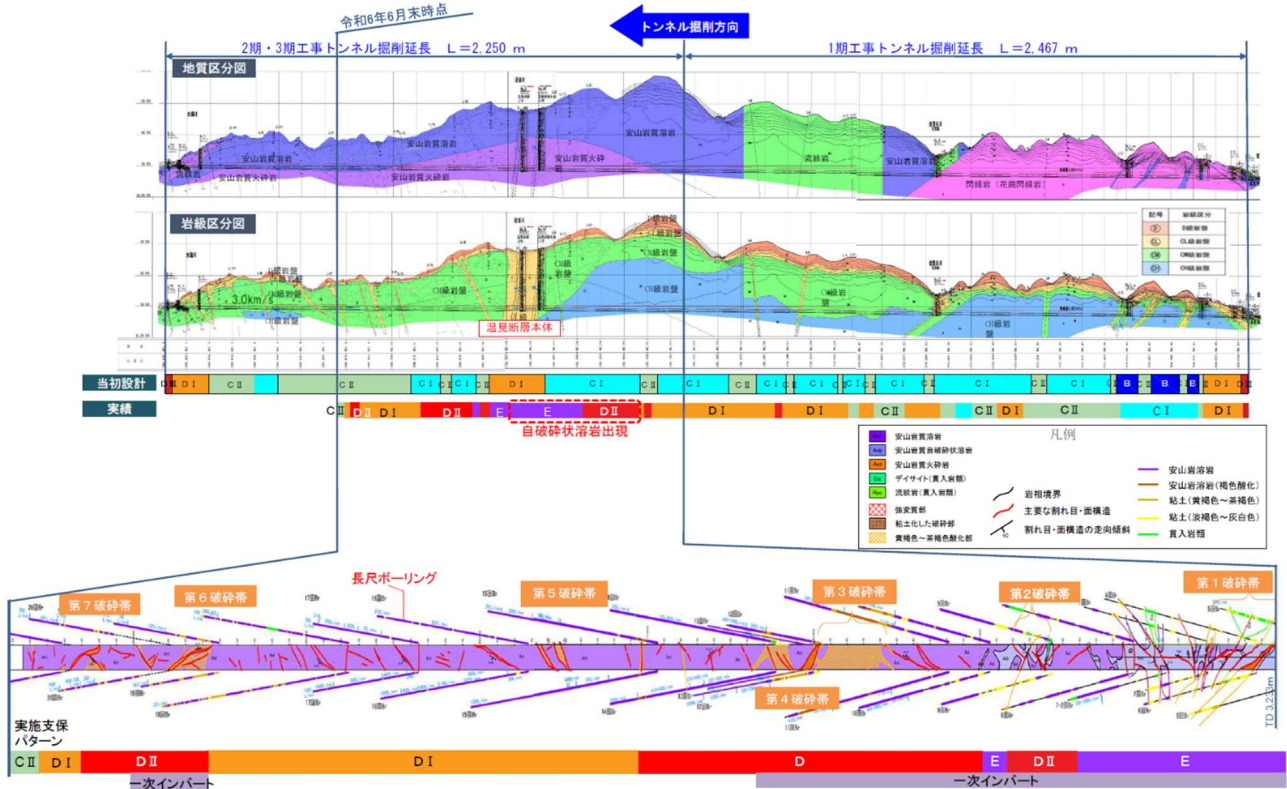


図-6 温見断層及びその影響区間における地質状況、破碎帯の分布及び地山等級

(2) 温見断層の主要部 (第1破碎帯)

2022 (令和 4) 年 10 月時点でトンネルの掘削長は TD3,220m 地点に達したが、この辺りから破碎帯が出現し、温見断層の主要部 (第1破碎帯) に達したと考えられる (写真-2 参照)。



写真-1 自破碎状溶岩区間における支保工の変状と切羽状況 (TD2,887m)

この破碎帯は、突入した直後の TD 3,220 m 付近では粘土が主体であったが、次第に砂状～細片状へと変化した。TD 3,265 m 付近までは、断層破碎の影響が強く認められた。TD 3,265 m 以降も、岩盤形成時の自破碎と断層破碎が混在する状況が続いたが、断層破碎による影響は小さくなり、破碎の程度が最も激しい第1破碎帯を突破したものと判断している。

(3) 温見断層の影響区間 (第2～7破碎帯)

第1破碎帯突破後、100mほど、断層破碎の影響が認められるものの比較的破碎の影響が小さい地山が続いたが、TD3,370m付近で、再び脆弱な破碎帯が出現した。その後も、繰り返し破碎が明瞭な破碎帯が出現し、TD4,000mまでに、第1破碎帯から第7破碎帯までを定義している。

比較的規模の小さい第2破碎帯に続いて出現した第3破碎帯 (写真-3参照) は、破碎の程度も大きく、区間長も40m程度に達した。図-7に第1破碎帯～第7破碎帯の分布について示す。



写真-2 第1破碎帯の切羽状況 (TD3,231m)



写真-3 第3破碎帯の切羽状況 (TD3,461m)

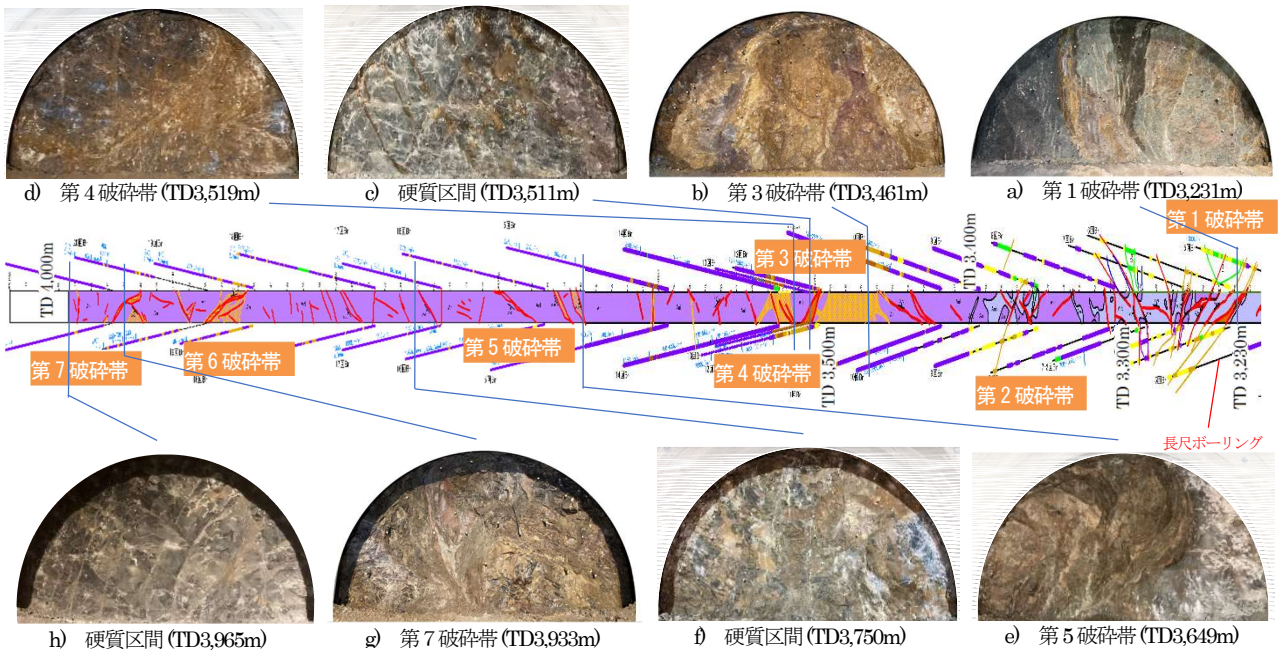


図-7 第1破碎帯～第7破碎帯の分布

## 5. 温見断層及びその影響区間の施工

### (1) 施工手順

温見断層区間については、破碎が著しく粘土化が進んで遮水ゾーンとなっている区間と、破碎の程度が比較的小さく、一定の岩盤強度を有しつつ、発達した割れ目に高压の大量湧水を賦存した透水性の高い区間が繰り返し出現した。

施工に当たっては、軟弱で遮水ゾーンとなっている破碎帯を掘削する際に、背面に帯水している高压大量湧水を切羽に回さないことを目的に、長尺水平ボーリング及び中尺水抜きボーリングにより、遮水層背面の湧水を事前に抜くことを基本とした。その上で、鏡面の安定状況等を確認して、適宜補助工法を採用した。

図-8に断層区間での対策工概要図、図-9に断層区間の施工フローを示す。

### (2) 地質等の評価と支保パターン

温見断層到達後の地質等の評価として、①土被り、②自破碎状溶岩の出現状況、③断層破碎帯の出現状況、④長尺ボーリングの湧水量で判断した。また、切羽等の状況を⑤地質平面図、評価結果を⑥切羽評価点、⑦実施支保パターンとして図-10に整理した。

2024(令和6)年7月現在の評価について以下に述べる。

①土被りについては、断層突入直後は200m程度あり、大きな地圧がトンネル支保工にかかっていたが、掘削が進むにつれて低下傾向にあり、地圧も低減している。

②自破碎状溶岩の出現頻度は徐々に低下し、風化・変質した劣悪な自破碎状溶岩の出現は見られない。

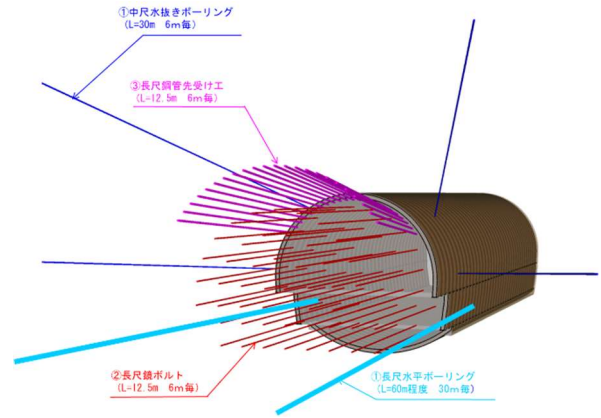


図-8 断層区間での対策工概要図

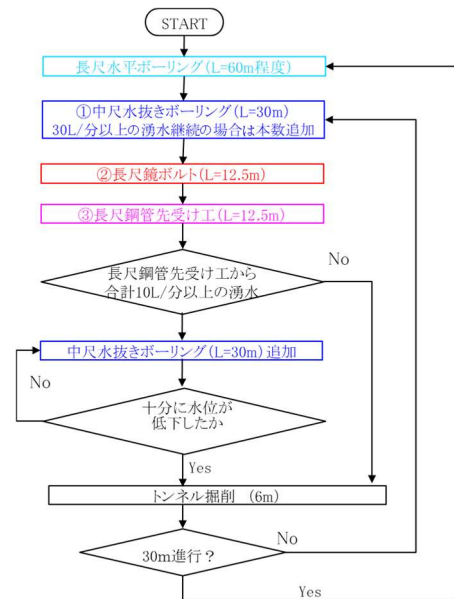


図-9 断層区間の施工フロー

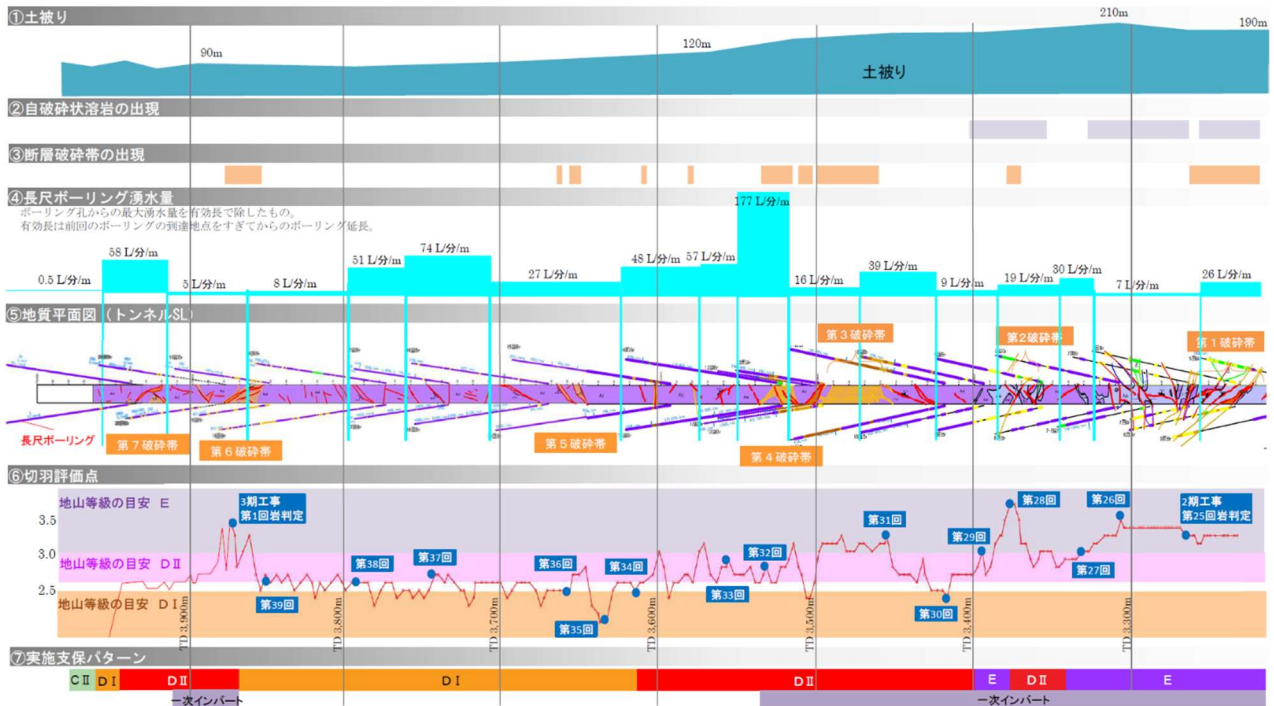


図-10 断層区間における湧水量、地質状況と評価、対策支保工のまとめ

表-1 断層区間での主な支保パターン

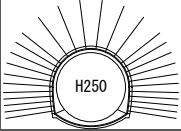


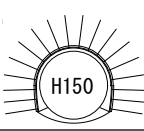

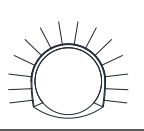
地山等級	E		DII	DI		C II
支保パターン	EII-h' 	En 	DII-hmi 	DII-h 	DI-h 	C II-h 
吹付け	t=300 mm (36 N/mm <sup>2</sup> )	t=250 mm (36 N/mm <sup>2</sup> )	t=200 mm (36 N/mm <sup>2</sup> )	t=200 mm (36 N/mm <sup>2</sup> )	t=150 mm (36 N/mm <sup>2</sup> )	t=100 mm (18 N/mm <sup>2</sup> )
鋼製支保工	H250@1.0m	H200@1.0m	H150@1.0m	H125@1.0m	H125@1.0m	H125@1.2m (上半のみ)
ロックボルト	注入式 6m×28本	ねじり棒鋼 4m×18本	ねじり棒鋼 4m×18本	ねじり棒鋼 4m×18本	ねじり棒鋼 4m×18本	異形棒鋼 3m×14本
一次インバート	切羽から 6m 程度で閉合	切羽から 1D 程度で閉合	切羽から 1D 程度で閉合	なし	なし	なし
支保内圧 (Hoek Brown)	2.8	2.2	1.8	1.4	1.4	0.6
吹付け	2.1	1.8	1.4	1.1	1.1	0.4
鋼製支保工	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1
ロックボルト	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
補助 工法	φ114.3mm 23本 6m シフト	—	φ76.3mm 23本 6m シフト	—	—	—
	φ76.3mm 50本 6m シフト	φ76.3mm 36本 6m シフト	φ76.3mm 36本 6m シフト	φ76.3mm 14本 9m シフト	—	—



写真-4 長尺ボーリング湧水状況 (TD3,497m)

③断層破碎帯は繰り返し出現しているものの、頻度は低下傾向であり、破碎帯間の地山状況は改善傾向にある。

④長尺ボーリングの湧水量は、各ボーリング孔からの最大湧水量をボーリングの有効長で除したもので表している。ここに、ボーリングの有効長は、ひとつ前のボーリングの到達地点を過ぎてからのボーリング延長としている。ボーリング湧水量は、破碎帯を突破し、岩盤が比較的硬く透水性の高い区間に到達した際に、大量に発生する傾向がある。特に第4破碎帯に到達した際には、ボーリング1本当たり 2,000 L/min を超える大量湧水が発生した (写真-4)。

以上の情報に加え、⑥切羽判定時の切羽評価点、計測データ等を用いて⑦支保パターンを選定している。表-1に断層区間での主な支保パターンを示す。

上記の評価指標を用いて適切に支保パターン、補助工法を選定することで、安全かつ経済的なトンネル構造を選定できているものと考えている。

## 6. 今後の地山状況と施工方針

第7破碎帯突破後、約60mに渡り破碎の程度が小さく、風化や変質の少ない良好な地山区間が出現している。そ

のため、TD3,964mからは、C II パターンの支保工を実施している。ただし、直近の長尺ボーリング結果からは、新たな破碎帯の出現も予想されており、今後も予断を許さない地山状況が続く。引き続き、長尺ボーリングによる前方地山の状況予測と水抜きを行い、切羽の状況を見極めながら適切な対策をとり施工を行っていく。

## 7. 終わりに

トンネル掘削の事前調査や施工中に長尺及び中尺ボーリングによる水抜きを行い、必要に応じて補助工法を実施し、切羽の安定性を確認しながら施工を行うことにより、温見断層及びその影響区間における破碎部の施工を安全に進めることができた。温見断層の影響区間を抜けた今後の施工区間においても、安全に掘削を進めるため、長尺ボーリングを実施して切羽前方の地質状況を予測しつつ、適切な工法を選定していくことが必要である。

謝辞：本稿の作成にあたり、本工事関係者の方々から様々なご助言、ご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 地震調査研究推進本部：ホームページ  
[https://www.static.jishin.go.jp/resource/regional\\_seismicity/katsudanso/f060\\_ichi.jpg](https://www.static.jishin.go.jp/resource/regional_seismicity/katsudanso/f060_ichi.jpg) (2024年7月20日に利用)
- 金田, 杉戸, 田力, 中田：1:25,000活断層図「大野」, 国土地理院, 2018
- 角田, 福井：水海川導水トンネル2期工事の脆弱部施工に関する報告について, 令和5年度近畿地方整備局研究発表会 論文集 一般部門 (安全・安心) I
- 川端, 堀, 多宝, 河合：大規模活断層を先進ボーリングと高剛性支保工で突破 -足羽川ダム 水海川導水トンネル2期工事-, トンネルと地下, Vol. 55, No. 1, pp. 7-18, 2024



# 足洗川渡河橋梁工事着手前における 振動伝播状況の結果報告について

水野 雄介<sup>1</sup>, 茨 和希<sup>2</sup>

<sup>1</sup>高島土木事務所 道路計画課

<sup>2</sup>大津土木事務所 道路計画課

県道伊香立浜大津線道路整備事業は、比叡山の麓である大津市坂本八丁目から千野一丁目までのL=1.7kmに及ぶ道路バイパス事業である。本工事区間は、地すべり等防止法第3条で指定された地すべり等防止区域「雄琴地区」を縦断する計画のため、一部の区間において、工事中及び道路供用後の地すべりや振動等による住環境の悪化が懸念された。そのため、住宅地に最も隣接する区間において、従来の環境影響検討による調査と合わせて、工事中の振動の影響（バックホウ及びロードローラ）や地盤による振動伝播特性を把握する調査、振動が伝わりやすい地盤を通過して周囲より振動が大きくなるホットスポット現象の確認調査を実施した。上記の調査結果とその対策方法について報告する。

キーワード 環境調査, 工事振動, 伝播実験, 地すべり

## 1. はじめに

県道伊香立浜大津線道路整備事業（千野・坂本工区）は、湖西地区に位置し、起点を大津市千野一丁目から終点を大津市坂本八丁目までの延長L=1.7kmの道路バイパス整備事業である。



図-1 位置図

本事業区間は、急峻な地形を有するとともに、図-2に示すとおり、地すべり等防止法第3条により地すべり防止区域「雄琴地区」に指定された地域を縦断する。当該区間内に9か所の地すべり箇所を有し、その中で、高さ10m前後の高盛土・切土、谷部を延長100mを超える長大橋で渡る計画となっていることから、施工順序、施工計画、施工方法等に十分な配慮が必要となる事業である。



図-2 地すべり防止区域

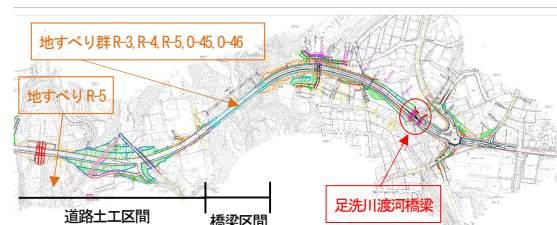
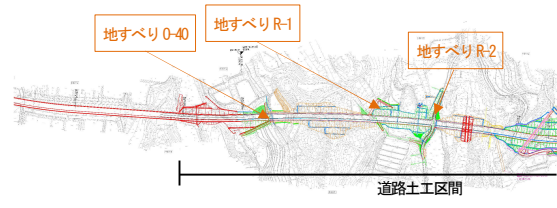


図-3 事業計画図



図4 地すべり防止区域を示す看板

当該事業区間の一部には住宅地が存在し、周辺には、地すべり防止区域であることを示す看板が複数個所、設置されている(図-4)。そのため、地元住民の地すべりや軟弱地盤に対する問題意識は強く、特に当該事業区間の沿道となる住民にとっては、本事業による工事及び道路供用後の地すべりへの影響、また騒音や振動といった住環境悪化への懸念から、長期間にわたり本事業に対する理解が得られない状況であった。

## 2. 調査の目的

従来の環境調査(振動, 騒音, 大気質等)と併せて、坂本八丁目13区付近の工事予定区間において、振動を試験的に発生させ、住宅地への振動伝播状況、振動に対する影響を把握し、住民の懸念を払しょくすることを目的として振動伝播調査を実施した。併せて本調査により、地盤変動影響調査(工損調査)の実施範囲を確定する基礎資料を作成することを目的とした。

## 3. 調査の内容

### (1) 現地調査日

2022年(令和4年)11月7日(月)9時~16時

### (2) 起振源

道路工事予定地に建設重機(バックホウ, ロードローラ)を起振源として配置し、それらを試験的に稼働させ、周辺での振動レベル等を測定することとした。図-5に起振源設置地点の状況を示す。また、現道部では通常の道路交通(自動車)とともに、ユニックを走行させて道路敷地境界の振動レベルを測定した。さらに、試験的に振動を発生させることから、実際の工事や道路交通による振動より大きな振動を加えた。



図5 起振源(バックホウ, ロードローラ)

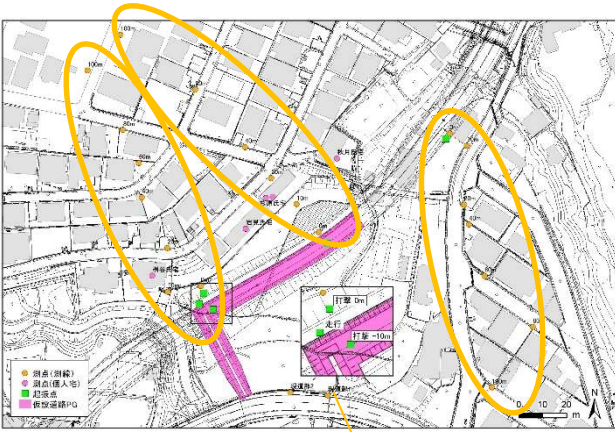
### (3) 現地調査地点

測定地点の配置は、振動発生源からの振動の距離減衰を把握するため3測線を設定した。各測線の測定地点(測点)の配置を図-6に示す。測線1と測線2については、道路計画区域に調査用道路として砕石敷を行い(図-7)、調査用道路上で起振源を稼働させた。また、現道部においても、振動レベル等の測定を行った。

- 測線1 : 擁壁の変位監視位置(No.9+94付近, 西側)
- 測線2 : 計画道路が沖積層を通過する位置(No.9+40付近, 西側)
- 測線3 : 計画道路が切土となり東側に地すべり地形を有する位置(No.8+80付近, 東側)
- 現道部1: 大津市道幹 1073号(横断側溝あり, 横断側溝上り・下りの舗装面にひび割れあり)
- 現道部2: 大津市道幹 1073号(横断側溝なし)



図6 起振源設置地点の状況



(現道部1:横断側溝及び舗装面ひび割れの状況)

図-7 振動伝播の把握地点位置

測線 1~3 に関しては、振動伝播把握地点で測定し、地元住民から要望があった場所については、住宅地内での追加測定を行った。

振動伝播把握地点：0m(道路敷地境界),10m,20m,40m,60m(測線2を除く),80m,100m

なお、調査地点の地形は、北西から南東に向けて低くなる傾斜地となっている。各測線の断面標高を図-9に示す。測線1と測線2においては測点10mから25mの間に擁壁があり、標高が急に高くなる位置関係である。

#### (4) 測定方法

振動測定は、JIS Z 8735「振動レベル測定方法」に定める方法によるものとした。測定に用いた振動レベル計と測定条件を表-1に、測定機材の接続系統を図-8に示す。

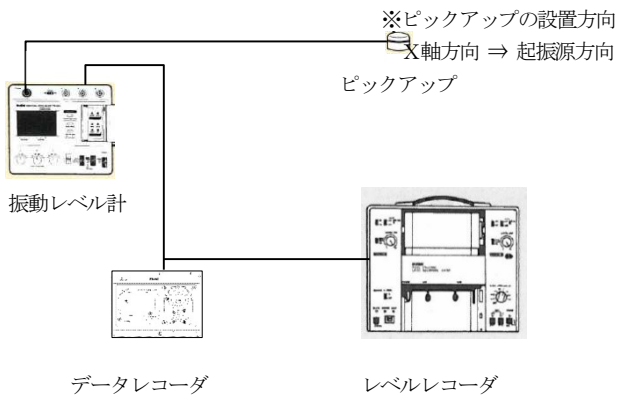


図-8 測定機材の接続系統

表-1 測定条件と測定器

項目	内容
振動	測定項目:振動レベル 振動レベル計の補正回路:感覚補正あり 振動レベル計のメモリーに0.1秒間隔でレベル瞬時値を記録し、後日コンピュータ処理により統計値(Lx値)等を算出
使用測定器	振動レベル計:リオン株式会社 VM-52A, VM-53A, VM-55 データレコーダ:リオン株式会社 DA-20, TEAC株式会社 ES8, グラフテック株式会社 GL980 (一部の地点でデータレコーダにより周波数分析用に振動レベル計のAC出力を記録) レベルレコーダ:リオン株式会社 LR-20,LR-06 (一部の地点でレベル波形のモニター用)

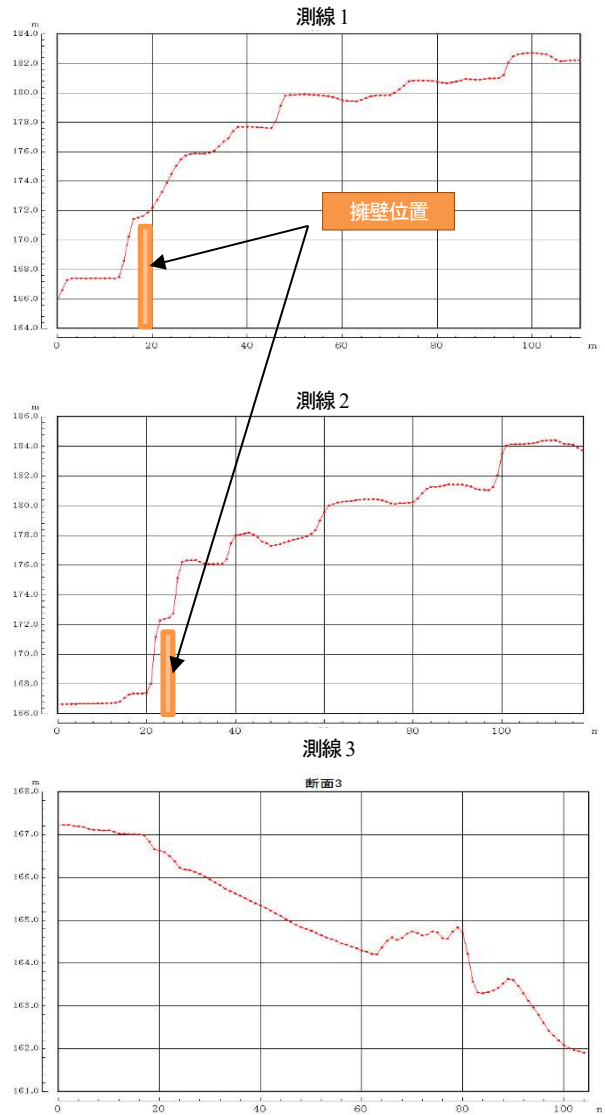


図-9 測線の断面標高

### 4. 振動の環境保全目標

振動の大きさを評価する指標は、「振動規制法の規制基準・要請限度」が一般に用いられている。なお、振動の環境基準は定められていない。そのため、環境保全目標としては、振動規制法に基づく規制基準・要請限度が適用される。振動規制法の規制基準は、表-2に示す。

表-2 振動の規制基準・要請限度

●道路交通振動																	
<p>道路交通振動の要請限度(昭和51年・総理府令) (単位:デシベル)</p> <table border="1"> <tr> <th rowspan="2">時間の区分</th> <th rowspan="2">区域の区分</th> <th>第1種区域</th> <th>第2種区域</th> </tr> <tr> <td>昼間</td> <td>午前8時～午後7時</td> <td>65</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>夜間</td> <td>午後7時～翌日午前8時</td> <td>60</td> <td>65</td> </tr> </table>				時間の区分	区域の区分	第1種区域	第2種区域	昼間	午前8時～午後7時	65	70	夜間	午後7時～翌日午前8時	60	65		
時間の区分	区域の区分	第1種区域	第2種区域														
		昼間	午前8時～午後7時	65	70												
夜間	午後7時～翌日午前8時	60	65														
第1種区域	第1種低層住居専用地域、第2種低層住居専用地域、第2種中高層住居専用地域、第2種中高層住居専用地域、第1種住居地域、第2種住居地域、準住居地域、市街化調整区域、都市計画区域外の一部																
第2種区域	近隣商業地域、商業地域、準工業地域、工業地域、工業専用地域																
出典：大津市の環境（令和2年度版）																	
●建設振動																	
<p>振動規制法に係る特定建設作業の振動規制基準（概要）</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>敷地境界線で75デシベルを超えるものでないこと。</li> <li>除外の場合を除いて、第1号地域（静寂、住宅地域等）では19～7時、第2号地域（第1号地域以外）においては22～8時、までに発生するものでない。</li> <li>除外の場合を除いて、第1号地域では1日10時間を超えない、第2号地域では1日14時間を超えないこと。</li> <li>除外の場合を除いて、連続して8日を超えないこと。 除外の場合を除いて、日曜日その他の休日でないこと。</li> </ol> <p>出典：地方公共団体担当者のための建設作業振動対策の手引き（環境省水・大気環境局）</p>																	
●環境振動																	
<p>振動規制法に係る特定施設の規制基準 (単位:デシベル)</p> <table border="1"> <tr> <th rowspan="2">時間区分</th> <th colspan="2">区域区分</th> </tr> <tr> <th>昼間</th> <th>夜間</th> </tr> <tr> <td>第1種区域</td> <td>午前8時～午後7時</td> <td>午後7時～翌日午前8時</td> </tr> <tr> <td>第2種区域</td> <td>60</td> <td>55</td> </tr> <tr> <td>第3種区域</td> <td>65</td> <td>60</td> </tr> </table>				時間区分	区域区分		昼間	夜間	第1種区域	午前8時～午後7時	午後7時～翌日午前8時	第2種区域	60	55	第3種区域	65	60
時間区分	区域区分																
	昼間	夜間															
第1種区域	午前8時～午後7時	午後7時～翌日午前8時															
第2種区域	60	55															
第3種区域	65	60															
<p>工場等に係る振動規制と騒音規制の区域区分との関係</p> <table border="1"> <tr> <th>地域</th> <th>振動規制区域区分</th> <th>騒音規制区域区分</th> </tr> <tr> <td rowspan="2">住居系地域</td> <td rowspan="2">第1種区域</td> <td>第1種区域</td> </tr> <tr> <td>第2種区域</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">商業系・工業系地域</td> <td rowspan="2">第2種区域</td> <td>第3種区域</td> </tr> <tr> <td>第4種区域</td> </tr> </table> <p>出典：大津市の環境（令和2年度版）</p>				地域	振動規制区域区分	騒音規制区域区分	住居系地域	第1種区域	第1種区域	第2種区域	商業系・工業系地域	第2種区域	第3種区域	第4種区域			
地域	振動規制区域区分	騒音規制区域区分															
住居系地域	第1種区域	第1種区域															
		第2種区域															
商業系・工業系地域	第2種区域	第3種区域															
		第4種区域															
●測定処理（評価対象）																	
<p>本調査では、「道路交通振動測定マニュアル（2022年8月環境省水・大気環境局自動車環境対策課）」に示された、L<sub>10</sub>を評価対象とした。</p>																	

ただし、規制基準・要請限度を遵守していても、振動に関する苦情が寄せられる場合があることから、人が振動を感じるはじめるといわれている55dBや50dBにも注視することとした。

規制基準・要請限度の評価は、発生する振動の状況で次のとおり評価指標が決められている。道路交通振動及び建設作業振動は変動する場合が多いので、L<sub>10</sub>測定結果が評価指標としてよく用いられる。

- (a) 定常振動：測定器の指示値が変動せず又は変動が少ない場合は、その指示値。
- (b) 間欠振動：周期的又は間欠的に変動する場合は、その変動ごとの指示値の最大値の平均値。
- (c) 不規則大幅に変動する振動：不規則かつ大幅に変動する場合は、測定値の80パーセントレンジの上端値(L<sub>10</sub>)

### 5. 調査の結果

#### (1) 分析対象と実験内容

測定分析の対象とした振動分析対象と試験内容を表-3に示す。

表-3 分析対象と試験内容

測線部1	測線部2	時刻	実験内容	測点											
				0m	10m	20m	40m	60m	80m	100m	1E				
10:48:00	10:53:00	10:53:00	バックホウ(叩き)、仮設道路中央(10m)	○	○	○	○	○	○	○	○				
10:59:00	11:04:00	11:04:00	バックホウ(叩き)、道路境界(0m)	○	○	○	○	○	○	○	○				
11:09:00	11:14:00	11:14:00	バックホウ(移動ない)、道路境界～仮設道路中央(0m～10)	○	○	○	○	○	○	○	○				
11:21:00	11:26:00	11:26:00	バックホウ(移動ない)、道路境界～仮設道路中央(0m～10)	○	○	○	○	○	○	○	○				
11:35:00	11:40:00	11:40:00	バックホウ(L0)、道路境界～仮設道路中央(0m～10)	○	○	○	○	○	○	○	○				
11:40:00	11:45:00	11:45:00	バックホウ(Hi)、道路境界～仮設道路中央(0m～10)	○	○	○	○	○	○	○	○				
11:45:00	11:50:00	11:50:00	バックホウ(高回転)、道路境界～仮設道路中央(0m～10)	○	○	○	○	○	○	○	○				
測線2-1回目				測点											
				0m	10m	20m	40m	60m	80m	100m	A宅	S宅	T宅	F宅	
10:53:00	10:58:00	10:58:00	バックホウ(叩き)、仮設道路中央	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10:58:00	11:03:00	11:03:00	バックホウ(L0)、仮設道路中央	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10:58:00	11:03:00	11:03:00	バックホウ(Hi)、仮設道路中央	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11:03:00	11:08:00	11:08:00	バックホウ(高回転)、仮設道路中央	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
測線2-2回目				測点											
				0m	10m	20m	40m	60m	80m	100m	A宅	S宅	T宅	F宅	
11:29:00	11:34:00	11:34:00	バックホウ(叩き)、仮設道路中央	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11:34:00	11:39:00	11:39:00	バックホウ(L0)、仮設道路中央	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11:34:00	11:39:00	11:39:00	バックホウ(Hi)、仮設道路中央	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11:39:00	11:44:00	11:44:00	バックホウ(高回転)、仮設道路中央	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
測線3				測点											
				0m	10m	20m	40m	60m	80m	100m	A宅	S宅	T宅	F宅	
10:26:00	10:31:00	10:31:00	バックホウ(叩き)、道路境界(0m)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10:31:00	10:36:00	10:36:00	バックホウ(L0)、道路境界(0m)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10:31:00	10:36:00	10:36:00	バックホウ(Hi)、道路境界(0m)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

備考1) 表中の○印は測定したことを示す。一印は測定なしを示す。

備考2) バックホウ(叩き)は、バックホウのショベルで地面を打撃した。

備考3) ロードローラとは、ローラを振動させて路面を締め固める重機である。

ロードローラ(L0)・・・加振周波数：33.3Hz 加振力：172kN

ロードローラ(Hi)・・・加振周波数：28.3Hz 加振力：255kN

#### (2) 振動レベルの距離減衰

##### a) 各起振源による距離減衰

起振源から遠くなるほど振動レベルが低下していることが確認された。また、擁壁の位置で減衰量が大きくなることが確認された(図-10)。

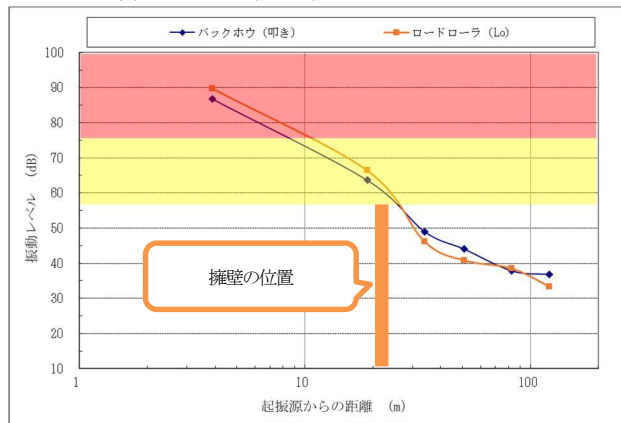


図-10 測線2における起振源からの距離減衰

##### b) 各測線による距離減衰

工事振動の予測式と比較して、本調査箇所では傾向として実測値の距離減衰が大きかったことが確認された(図-11)。

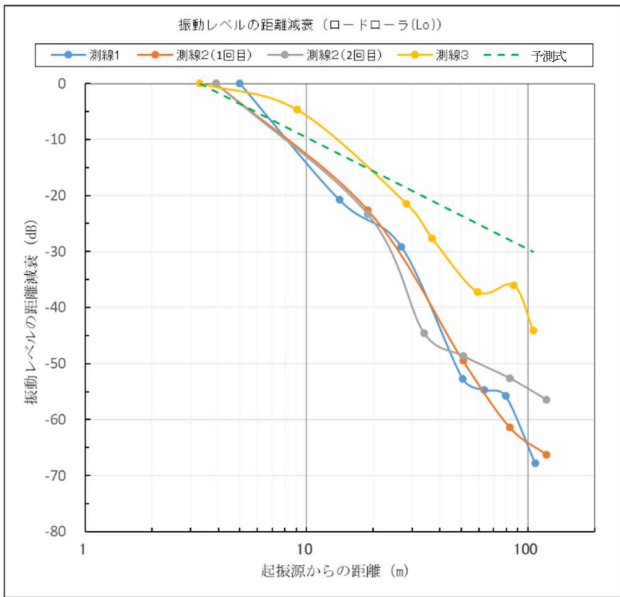


図-11 各測線における距離減衰と予測値との比較

また、測線1及び測線2が近い減衰を示し、起振源から20m付近までの初期の減衰が大きい。これは、擁壁や高低差を有し、地表面の長さが水平距離より長くなっているためと考えられる。一方、測線3は20m以上で、工事振動の予測式より大きな減衰を示した。

工事振動の予測式（「道路環境影響評価の技術手法」）

$$L(r) = L(r_0) - 15 \cdot \log_{10} \left( \frac{r}{r_0} \right) - 8.68\alpha(r - r_0)$$

ここで、

- $L(r)$  : 予測地点における振動レベル (dB)
- $L(r_0)$  : 基準点における振動レベル (dB)
- $r$  : ユニットの稼働位置から予測地点までの距離 (m)
- $r_0$  : ユニットの稼働位置から基準点までの距離 (5m)
- $\alpha$  : 内部減衰係数 ( $\alpha = 0.01$ とした)

**c) 振動レベルを規制基準 (75dB) に抑えた場合**

振動レベルの距離減衰の結果から逆算し、0m (道路敷地境界) での振動レベルを規制基準 (75dB) に抑えた場合の振動レベルの距離減衰状況の想定を図-12に示す。その結果、住宅の位置では、50dB以下と想定される。

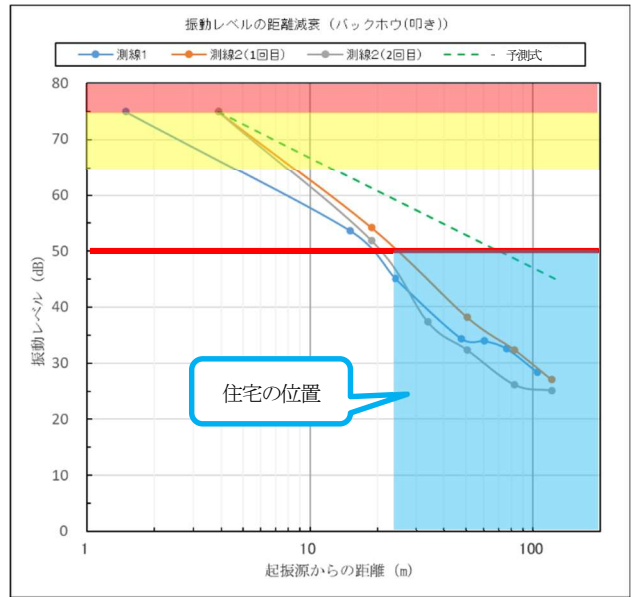


図-12 規制基準 (75dB) に抑えた場合の距離減衰

**(3) 住民アンケート結果**

調査当日における地域住民の振動の感じ方について地元住民アンケート調査を行った。地元住民アンケートの回答を図-13に示す。

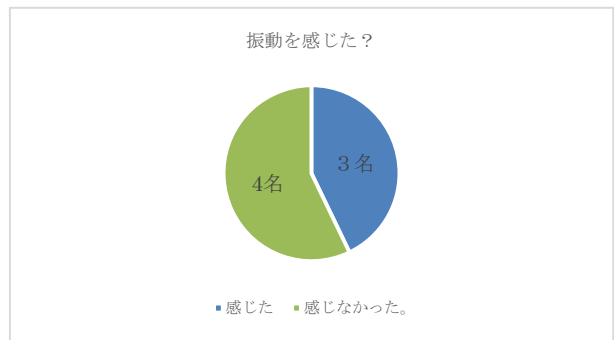


図-13 地元住民アンケート結果

7名から回答があり、3名から「振動を感じた」との回答が寄せられた。「振動を感じた」と回答された方はいずれも計画道路に面した住宅地からであった。計画道路に面していない住宅地では、「振動を感じた」との回答は無かった。「振動を感じた」と回答のあった時点での、起振源での振動レベルを表-4に示す。その結果、起振源での振動レベルが75dBを超える時に50dBを超える振動（騒音の影響も加わっている可能性あり）を感じている可能性がある。

表-4 振動を感じたと回答された時点での起振源の振動レベル

(単位: dB)				
道路敷地境界での振動レベル		住宅地での振動レベル		備考 (側線、起振源等)
Lmax	L10	Lmax	L10	
91.2	89.2	52.4	46.9	側線2 (1回目)、ロードローラー (Hi)
84.3	75.7	51.6	44.2	側線2 (1回目)、バックホウ (叩き)
91.5	82.2			側線3 (1回目)、ロードローラー (Lo)
82.0	71.4			側線3、バックホウ (叩き)
91.5	82.2			側線3、ロードローラー (Lo)
82.0	71.4			側線3、バックホウ (叩き)
96.6	91.3	54.6	52.0	側線1、ロードローラー (Hi)
76.7	64.5	53.0	44.2	側線1、バックホウ (叩き)

※: 住宅地での振動レベルが最も大きい試験と、道路敷地境界で振動レベル (L<sub>10</sub>) が70dB前後の試験をまとめた。

#### (4) 家の中における振動レベル

起振源で75dB以上の振動を起こすと、振動に対する苦情が多くなるとされる50～55dBの値が一部の住宅地で確認された。

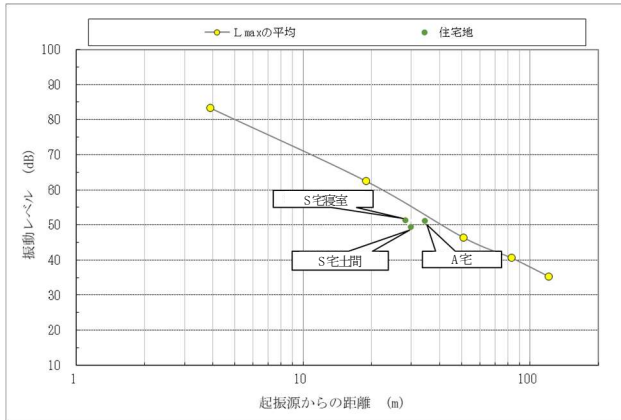


図-14 家の中における振動レベル（起振源：バックホウ）

## 6. 評価・考察

今回の調査結果により、道路敷地境界付近で振動の規制基準・要請限度を超えなければ、工事期間中及び道路供用後に、特別な対策は不要と結論づけた。また、振動は主に地表面を伝達していると考えられることから、懸案事項の一つとなっていたホットスポット（振動が伝わりやすい地下地盤を通過して地表面に振動が伝わり周囲より振動が大きくなる現象）の出現は確認されず、地下地盤での振動伝播を遮断するなどの特別な対策を行う必要はない。

万が一、道路敷地境界付近で振動の規制基準・要請限度を超える場合には、振動に対する苦情が多くなる50dB以上の振動が住宅地で発生することも想定されるため、各期間におけるリスクと対策を次に示す。

### (1) 工事期間中のリスクと対策

ロードローラ（加振時）などの振動発生が想定される重機を使用する場合、一時的に大きな振動が生じる可能性があることがリスクである。その対策として、以下の2点を挙げる。

#### ① 観測体制の構築

75dBを超える可能性のある重機を使用する場合には、振動レベルの観測体制を構築し、逐次発生振動状況を把握し、75dBを超えた場合には、速やかに出力の低下や工法の検討等の対策を行う。



図-16 騒音・振動計

### ② 地盤変動影響調査（工損調査）の実施

本調査で最も大きな振動が発生したロードローラ（Hi & Lo）使用時に住民からの苦情が発生する可能性のある50dBを超える範囲で、地盤変動影響調査（工損調査）を行い、住宅への影響を調査する必要がある。

道路敷地境界からおおむね40mの範囲で地盤変動影響調査（工損調査）を行う。

### (2) 道路供用時のリスクと対策

舗装や道路構造物の劣化により、段差等が生じ、道路敷地境界付近で60dBを超える振動が生じる可能性があることがリスクとして考えられる。その対策として、以下の2点を挙げる。

#### ① 維持管理体制の構築

コンクリート構造物と盛土部などの道路構造の変化点では、埋戻土等の相違の観点から、特に盛土部でやや沈下する可能性があり、段差や舗装面のひび割れが発生する可能性が考えられる。このため、沈降の差異を早期に発見するための定期的な管理や適切な補修が必要である。

#### ② 占用物件埋設時の舗装復旧指示

水道管等の占用物件が埋設される場合の舗装復旧の際に、各占用者に対し、段差が生じないように指示を行うなど、維持補修係、管理調整課など横断的に適宜適切に情報提供を行う体制が必要である。

## 7. 謝辞

今回の調査には、本調査の受注者であるアジア航測株式会社様を初め、調査用道路の設置、ロードローラやバックホウ等の重機の準備・調達を行った有限会社滋賀総業様など多くの方々のご協力により、調査を行うことができた。その中でも、特に藤森茂之先生（中央復建コンサルタンツ株式会社）には、本調査方法の計画段階から、ご助力を頂くとともに、地元協議にも、発注者とともにご参加いただきました。この場を借りて、深く感謝いたします。

# 木ノ川高架橋におけるひびわれに対する 最終報告について

藤谷 俊希<sup>1</sup>・田中 富博<sup>2</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 紀南河川国道事務所 道路管理課 (〒646-0003和歌山県田辺市中万呂142)

<sup>2</sup>近畿地方整備局 奈良国道事務所 工務課 (〒630-8115 奈良市大宮町3丁目5番11号)。

木ノ川高架橋は、国道42号那智勝浦新宮道路にあり、供用後まもなく、上部工のコンクリートひび割れ損傷が確認された。本報告では、補修・補強の概要およびその後の木ノ川高架橋の現状を述べ、今後の橋梁設計に向けての留意事項について述べる。

キーワード デザインビルド、コンクリートひび割れ、補修・補強、橋梁設計

## 1. はじめに

木ノ川高架橋は、設計・施工一括発注方式により行われ、「技術検討委員会」と「施工管理検討会」での審議と並行しながら進められた。上部工形式は国内初となる「ウェブに鋼管を用いたPC橋(鋼・コンクリート複合トラス橋)」であり<sup>1)3)</sup>、2003年6月に完成した。

2008年3月に供用が開始されたが、同年10月にコンクリートひび割れ等の変状が確認されたため、全橋に渡って詳細点検を実施し、その結果を基に補修を行った。その後、本橋の特殊性を鑑みて、損傷原因の究明と対策効果の検討が必要との判断から、「木ノ川高架橋モニタリング検討会」が設立された。計6回の検討会を行い、推定損傷原因<sup>4)</sup>、補修補強工事、モニタリングを行った。

その結果2022年3月に最終となる第7回検討会を開催し、今後の維持管理手法が策定された。本報では、検討会で決定された内容や検討会後の点検結果にも触れ、今後の橋梁設計に向けての留意事項を報告する。



図-1 位置図

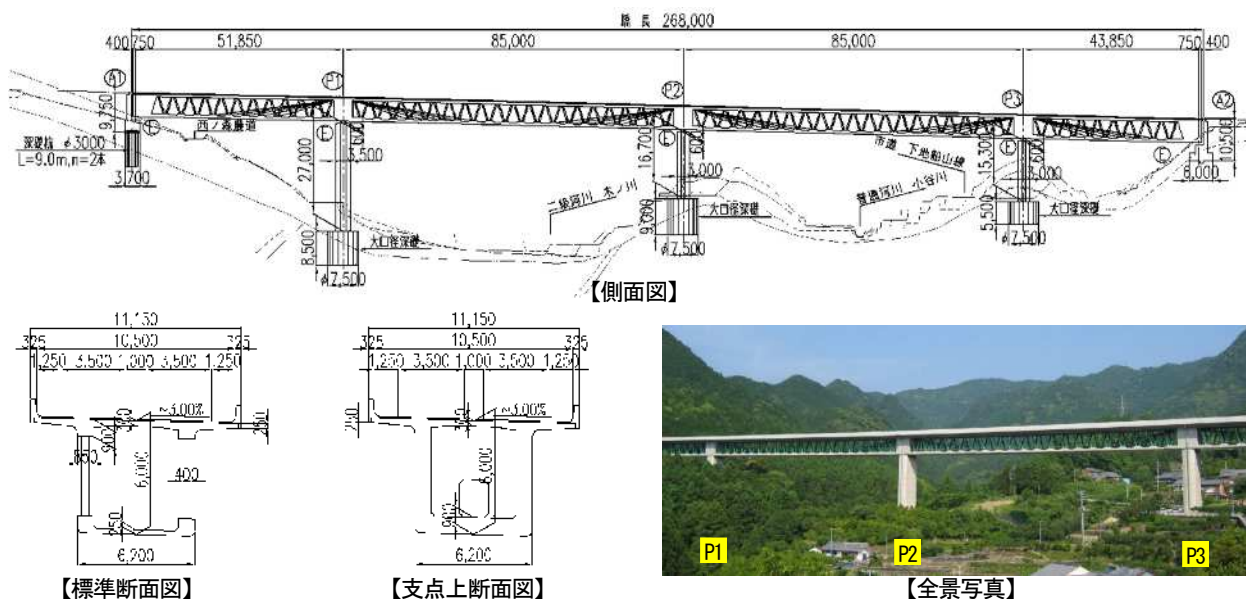


図-2 橋梁一般図および全景写真

2. 過去の状況

(1) 木ノ川高架橋の現在までの経緯

木ノ川高架橋の大まかな過去から現在までの経緯を、表-1の通り示す。

(2) ひび割れ損傷状況と桁内状況

本橋上部工における特徴的な損傷はコンクリートひび割れであり、代表的な発生箇所は外ケーブル定着部、格点部、支点上横桁部である。桁内の状況と各部の名称を写真-1に、代表的なひび割れ状況を図-3に示す。

(3) 本橋の構造と挙動の特徴

本橋の構造と挙動の主な特徴は以下のとおりである。

- ・ウェブを鋼管によるトラス構造とした断面で、横桁は支点上のみに配置され、一般的なPC箱桁橋に比べてねじり剛性が小さい。
- ・現地計測から、活荷重偏載及び温度差・温度変化の影響により、桁断面は僅かではあるが日々平行四辺形的な動き(桁断面のねじれ)をしている。

- ・ウェブが開放された構造のため、桁内外のコンクリート、斜材、外ケーブルとも外気温の影響に加え、日射や乾湿の繰り返しの影響を受ける構造である。

(4) 推定損傷原因

竣工直後には少なくとも顕著なひび割れはなく、供用後の作用によりひび割れは顕在化したと思われた。調査によれば、無応力状態から確認されているひび割れ状況を引き起こすような大きな作用が供用後に生じた可能性は低く、竣工直後に内在していた応力に、種々の荷重による応力(温度差・温度変化、活荷重等)が加わることによって、ひび割れの多くは発生したと考えられる。

これらの状況を踏まえ、死荷重応力の大きさや向きとひび割れ方向との関係を整理し、ひび割れの発生・進展を助長する原因を推定した。結果を以下に述べる。

- ・ひび割れの発生・進展が顕著な部位・部材では、死荷重時の引張応力が比較的高いレベルにあることが確認され、温度差・温度変化の影響により死荷重時の引張応力を助長させることが確認された。
- ・多くの部位では活荷重がひび割れ挙動に与える影響は、温度差・温度変化が与える影響より小さいが、横桁張

2008年 3月	供用開始
2008年 10月	国総研・土研による変状確認
2010年 10月	施工業者による自主的補修(ひび割れ注入、表面含浸工など)
2018年 8月～	補修補強工事(P2～A2)
2019年 3月	(炭素繊維シート補強工やコンクリート増し厚強工など)
2018年 11月	モニタリングの開始
2019年 8月～	(モニタリング項目は表-3参照)
2020年 3月	補修補強工事(A1～P2)
2021年 8月	モニタリングの終了
2022年 3月	第7回木ノ川高架橋モニタリング検討会 ・定期点検に向けた申し送り事項を作成 ・初期状態調査と中間点検を提言
2023年 2月	初期状態調査 (中間点検と損傷の状況を比較のため実施)
2023年 12月	中間点検
2024年 3月	座長への最終報告

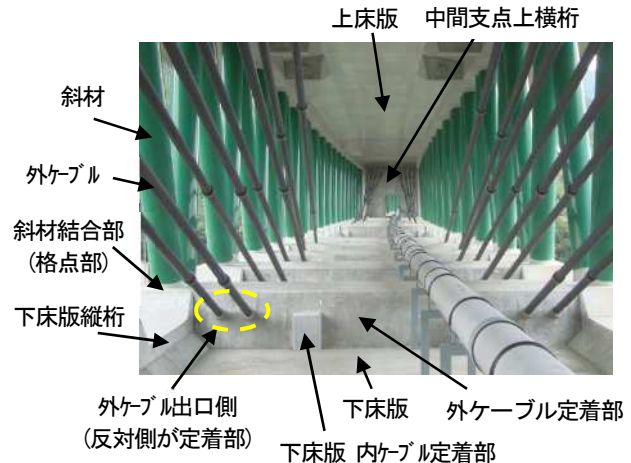
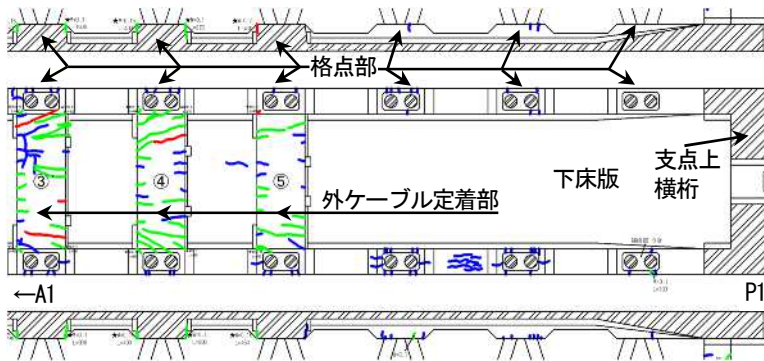
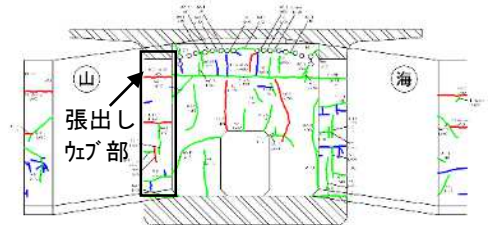


写真-1 桁内状況および部位名称(写真はP1付近から終点側を望む)



【下床版上面のひび割れ状況(A1～P1の一部を抜粋)】



【支点上横桁のひび割れ状況(P1橋脚起点側面)】

- 【凡例】コンクリートひび割れ
- 0.1mm未満 (青線)
  - 0.1～0.2mm未満 (緑線)
  - 0.2mm以上 (赤線)

図-3 上部工における代表的なコンクリートひび割れ状況 (第1径間を代表として示す)



出しウェブでは、活荷重の影響は温度差・温度変化によるものと同程度のレベルであることが確認された。

- ・ひび割れの発生・進展に影響する可能性のある温度差・温度変化として、コンクリート表面と内部の温度下降差(もしくは収縮差)、上下床版間の温度差、外ケーブルの温度変化などが考えられた。

### 3. 検討会の提言

#### (1) 中間報告(2018年3月)

##### a) 現状の評価

現状(2018年3月)の評価のまとめは以下のとおりである。

- ①少なくとも橋の耐荷性能が大きく低下している可能性は小さい。
- ②一方、現状のまま放置すれば、ひび割れの増加や鉄筋とコンクリートとの一体性の低下などに至る可能性が高い。

##### b) 維持管理方法と補修補強対策

前述を踏まえ、本橋を通常の橋梁定期点検により維持管理を行える橋へ移行するために、①～⑤に述べる対策が必要である。

- ①耐久性能確保のため、現時点で生じているひび割れに対する補修は必須である。
- ②耐荷性能の確保のためには、橋全体の構造強化と、部材・部材毎の断面強化が考えられる。ただし、構造強化を伴う抜本的な対策は非常に大規模になることが想定されるため、部材毎の断面強化による対策を優先的に実施する。具体的には、ひび割れが多く発生している外ケーブル定着部と中間支点上横桁張出しウェブ部

は死荷重の増加が少ない炭素繊維シート補強を行う。

- ③ひび割れが生じると致命的な構造欠陥となる可能性のある格点部への炭素繊維シート補強と、ひび割れが多数生じており構造欠陥に繋がる懸念が考えられる中間支点上横桁本体へのコンクリート増厚補強を、予防保全の観点から行う。
- ④現時点(2018年3月)では、各部の応答を抑えて変状が進展しないことを目標とした対策を取るものの、採用する対策は橋全体の挙動を抑制するような抜本的な対策ではないため、ひび割れの進行・橋全体挙動の変化等についてモニタリングし、その効果を検証する。
- ⑤上記①～③の対策を行った上でモニタリングを行い、橋全体の構造強化対策はモニタリングの結果により実施の有無を判断するという段階的な対策とする。

#### (2) 提言を踏まえた補修・補強対策とモニタリング

##### a) 補修・補強対策

提言を踏まえ、2018年度・2019年度にかけて補修・補強工事を行った。工事内容は、ひび割れ注入工、表面含浸工、炭素繊維シート補強工、コンクリート増厚補強工である。

外ケーブル定着部では、炭素繊維シート補強工で部材全体を覆うとひび割れ状況を確認できなくなるため、死荷重時の引張応力が小さい箇所の一部では補強を施さずにコンクリート表面を露出させてひび割れ状況を確認できるようにした。また、中間支点上横桁部では、張出しウェブ部に断面強化対策としての炭素繊維シート補強工を行い、ねじり剛性が小さいという本橋の特徴から、ねじり剛性向上のためコンクリート増厚補強を行った。

また、橋の剛性を高めることで複雑な応答への抑制が期待されるものの引張応力の発生を完全に排除することができないため、桁内部に変形を拘束する構造を設けなかった。

##### b) モニタリング

補修・補強工事前(2018年11月)から工事完了後の翌年(2021年8月)まで、12回のモニタリングを行った。モニタ

表-2 推定損傷原因

格点部および外ケーブル定着部	外ケーブル力により生じる引張応力、温度差・温度変化、活荷重(外ケーブル張力の作用)、乾燥収縮、など
支点上横桁	橋軸方向のトラス作用による引張応力、水和熱、温度差・温度変化、活荷重(トラス作用による引張応力)、など

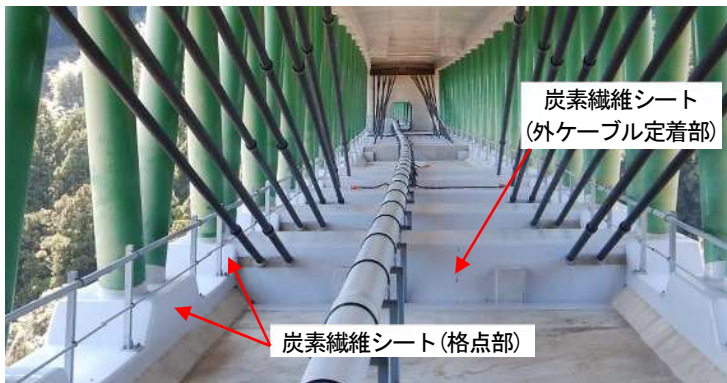


写真-2 補修補強工事の体表的な状況

リングの内容は表-3のとおりであり、定期的に機器を搬入して調査計測する定期計測(表-3に示すモニタリング項目のうち①③⑥)と、計測機器を現地に常設する常時計測を行った。いずれも四季毎(3ヶ月毎)に計測を行った。モニタリング結果に対する評価の基本方針は以下のとおりとした。

- ①ひび割れ調査はひび割れ状況図を作成してひび割れの進展の有無をモニタリングして行く。それ以外の項目に関しては計測結果の個々の数値を追うことは避けてそれらの経時的な推移傾向を整理して変化の兆候を評価の指標とする。
- ②補強による狙いどおりの傾向(例えば、短周期化や変形の抑制)が得られているか、あるいは、損傷が進行していない傾向など、大きな傾向や変化の兆候を評価する。

(3) 第7回モニタリング検討会(2022年3月)

a) 検討会審議結果

過去のモニタリング及び調査を整理し、2022年3月に第7回検討会を開催した。

その結果、外ケーブル定着部のコンクリート表面の一部にひび割れの進展や新たなひび割れパターン(図4: C9, C10)が認められたが、ひび割れ調査以外の7項目の計測結果から橋全体の耐荷性能低下の進行を示す兆候は認められず、部材断面補強後は「橋全体の耐荷性能低下の進行を抑止する」という初期の目標が達成していると考えられることから、今後は道路橋定期点検要領に基づき管理していくことを基本とする決定がなされた。ただし、本橋の特殊性を鑑み、3点の留意事項が挙げられた。

表-3 モニタリング項目と調査方法

①ひび割れ調査	外ケーブル定着部のうち炭素繊維シートを貼付していない箇所、ひび割れの進展状況を近接目視調査
②ひび割れ挙動計測	外ケーブル定着部のうち炭素繊維シートを貼付していない個所で、ひび割れにπゲージを設置してひび割れ開閉量を計測
③内部ひび割れ状況確認	外ケーブル定着部で、定着部を橋軸方向に挟み込む方向に超音波を透過させて、その伝搬速度を計測
④炭素繊維シートひずみ計測	外ケーブル定着部上面の炭素繊維シート上面にひずみゲージを貼付して炭素繊維シートのひずみを計測
⑤炭素繊維ロッドひずみ計測	中間支点上横桁張出しウェブ下端の炭素繊維ロッドにひずみゲージを貼付してひずみを計測
⑥キャンバー計測	桁内(下床版上面)で橋全体のキャンバーを計測
⑦橋全体の振動計測	下床版上面に加速度計を設置して、橋全体の振動加速度を計測
⑧外ケーブル振動計測	外ケーブルに加速度計を設置して、外ケーブルの振動加速度を計測

- ①5年後の定期点検を待たず、2年後の冬季に「中間点検」を行う。中間点検では上部構造を対象としたひび割れ調査を行う。
- ②これまでのひび割れ調査では対象外としてきた部位・部材においても、留意すべき箇所では、中間点検に先立ち、初期状態調査を行う。
- ③初期状態調査、中間点検、定期点検に向けての、本橋特有の留意事項を取り纏めた申し送りを作成すること。なお、検討会提言を踏まえた本橋特有の留意事項に関しては、後述する「4. 提言を踏まえた調査」にて詳述する。

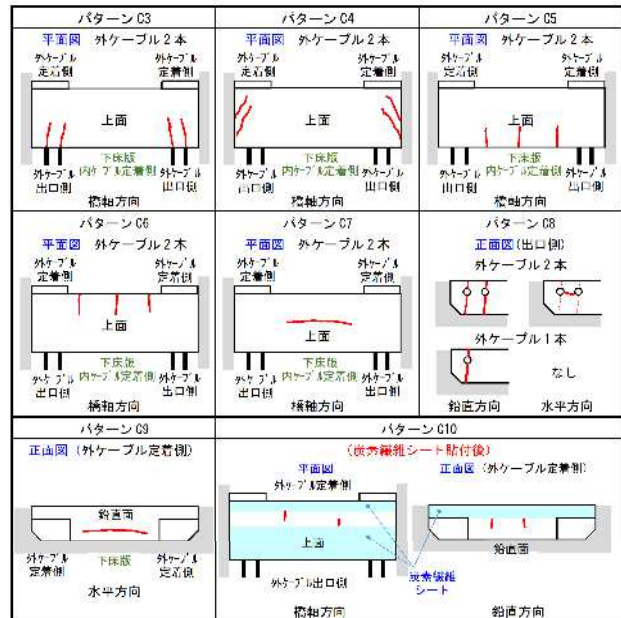
4. 提言を踏まえた調査

(1) 初期状態調査(2023年2月)

a) 初期状態調査における本橋特有の留意事項

初期状態調査における本橋特有の留意事項の概要は以下のとおりである。

- ①初期の記録が必要な箇所のひび割れ調査を行う。ひび割れ調査では、ひび割れが現れたか否かが重要であるため、ひび割れの幅に関係なく行う。
- ②補修・補強工事(2018~2019年度)における補修痕の記録(中間支点上横桁コンクリート増厚部下端部)



- ①死荷重時に引張応力が高いレベルにあると想定されたひび割れ(パターン C3, C4, C5, C8) → 炭素繊維シート補強済
- ②死荷重時の引張応力は①より小さいが温度変化・温度差の影響によりそれが助長されたと推定されたひび割れ(C6, C7) → 一部で炭素繊維シート補強済
- ③第6回検討会以降の新たなひび割れ(C9: 側面水平方向ひび割れ, C10: シート端からのひび割れ)

図4 外ケーブル定着部のひび割れパターン

写真-3に初期状態調査における留意箇所を例を示す。

**b) 調査結果**

初期状態調査結果の概要は次のとおりである。

- ①補修補強工事以降で、初期状態の記録が必要な箇所のひび割れ調査を行い、ひび割れ状況図を作成した(ケーブル定着部保護コンクリート部、中間支点上横桁コンクリート増厚部、下床版上面)。
- ②外ケーブル定着部側面の水平方向ひび割れがケーブル保護コンクリートや下床版縦桁に進展していないこと、保護コンクリート下端部の水平方向にひび割れが生じていないことを確認した。下床版格点部付近の断面急変部における炭素繊維シート下側では2箇所で0.1mm未満のひび割れが認められた。
- ③外ケーブル定着部における2022年2月からのひび割れの経時変化として、幅0.1mm以下の新たなひび割れの発生や既存ひび割れの延長・幅の進展を11箇所の定着部で確認した。いずれもこれまでと同様なひび割れパターンであり新たなひび割れパターンは認められない。

**(2) 中間点検(2023年12月)**

**a) 中間点検における本橋特有の留意事項**

中間点検における本橋特有の留意事項の概要は次のとおりである。

- ①桁内下面側、中間支点上横桁コンクリート増厚部を対象としたひび割れ調査を基本とする。実施時期は、これまでのひび割れ状況の経年変化を整理するため冬季

が望ましい。

- ②外ケーブル定着部コンクリート露出部では、これまでのモニタリングと同様な手法でひび割れ調査を行い、ひび割れ状況図を経時的に整理する。
- ③初期状態調査におけるひび割れ調査箇所についても、同様な手法でひび割れ調査を行い経時変化を整理する。

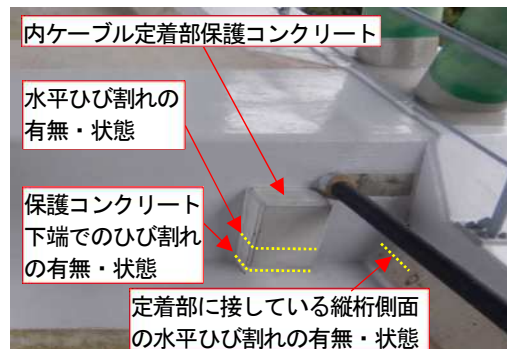
**b) 調査結果**

中間点検結果の概要は以下のとおりである。

- ①初期状態調査で新たに記録したひび割れ調査箇所の経時変化として、外ケーブル定着部保護コンクリート部では2箇所の保護コンクリート部で幅0.1mm未満の新たなひび割れが確認された。中間支点上横桁コンクリート増厚部では最大0.15mmの新たなひび割れが認められたが既存ひび割れの進展は認められなかった。下床版格点部付近の断面急変部におけるひび割れは進展していないことを確認した。
- ②初期状態調査時にひび割れが確認されなかった、外ケーブル定着部側面の水平方向ひび割れがケーブル保護コンクリートや下床版縦桁への進展がないこと、保護コンクリート下端部の水平方向ひび割れが生じていないことを確認した。
- ③外ケーブル定着部における初期状態調査からのひび割れの経時変化として、幅0.1mm未満の新たなひび割れの発生や既存ひび割れの延長を4箇所の定着部で確認した。いずれもこれまでと同様なひび割れパターンであり新たなひび割れパターンは認められない。



a) 外ケーブル定着部(外ケーブル定着側)



b) 外ケーブル定着部(外ケーブル出口側)



c) 格点部(下床版側)



d) 中間支点上横桁

写真-3 初期状態調査において留意すべきひび割れ調査箇所の例

## 5. 今後の維持管理について

調査結果を検討会座長に報告した上で、今後も本橋特有の留意事項を踏まえつつ「道路橋定期点検要領」に基づく定期点検により管理することとした。なお、定期点検に対して、以下のとおり申し送り事項を作成した。

- ①橋梁定期点検の実施時期は5年後(2028年度)とするが、これまでのひび割れ状況の経年変化を整理する必要があるため、点検の実施は冬季(1月～2月)が望ましい。
- ②本橋の特殊性を鑑み、通常の定期点検要領の調査内容の他、中間点検に関する調査内容に加えて、下記事項に留意し実施する。
  - ・外ケーブル定着部直下付近の下床版下側に橋軸直角方向にひび割れが生じていないことを確認する。
  - ・下床版下面に斜めのひび割れが生じていないことを確認する。
  - ・桁の最外縁にあり橋の挙動による変状が現れやすい部位として、壁高欄上部の垂直方向ひび割れが進展していないことを確認する。
  - ・橋脚は施工中に水和熱によるひび割れが生じた履歴があることを念頭に、ひび割れが進展していないことを確認する。
  - ・炭素繊維シートにうきが生じていないことを確認する。
  - ・伸縮装置の遊間に異常が生じていないことを確認する。

## 6. 本案件を踏まえた橋梁設計に向けての留意事項

本橋梁はデザインビルド方式で発注され、上部工形式は国内初となる鋼・コンクリート複合トラス橋が採用された。複合トラス橋は、PC箱桁においてウェブのコンクリートを鋼トラスに置き換えることで、活荷重に対する高い剛性を保持したまま、自重を軽量化し、橋軸方向プレストレスを上下床版に有効に導入できる他、コンクリートの打設等が削減されることで施工の省力化、主桁自重の軽量化によるスパンの長大化、基礎や下部工を含めた橋梁全体のコスト縮減が図れる特徴を有しているとされた。

国内初となる特殊な形式であるため、技術検討委員会や施工管理検討会における審議と並行しながら設計・施工が進められた。設計・施工に際しては、本橋を模したモデルを用いた格点部の実物大静的載荷試験も実施している。それでもなお、本橋には多数のひび割れが発生するなどの問題が発生した。

事象の発生から長期に渡り原因究明、各種検討・調査、補修補強対策、モニタリングなどを行ってきた過程で、

多くの知見を得ることができた。

上記を踏まえつつ、新規構造の橋梁では設計段階で留意すべき内容を以下にまとめる。

- ①材質の異なるものを一つの構造とするとき、その材質の耐久性(引張強度や圧縮強度など)や環境への変化(温度による体積変化など)を踏まえて、互いにどのような影響を及ぼし合うのかを十分に考慮されたい。
- ②少数部材化されていたり、極端に剛性が異なるもの同士が組み合わされたりしている橋梁は、橋の挙動を捉えることが難しいことがある。そのため、接合部の安全性を評価できるような荷重の組み合わせや、架設応力を十分に考慮した設計を行う必要がある。
- ③設計段階では死荷重や活荷重に加えて、環境の影響を十分に考慮されたい。乾湿や風、温度変化は短期では大きな影響を表さない場合も多いが、長期ではその影響を無視できない場合がある。
- ④新規構造の橋梁は本橋のように技術検討委員会や施工管理検討会における審議を経ても問題は発生する可能性がある。よって、設計時に致命的となるような損傷や想定される損傷を予測し、維持管理の場へ引き継いでいくことも考えられたい。
- ⑤新規構造では設計時点では想定しきれない損傷や施工箇所独自の環境条件が損傷の原因となることが考えられる。そのため、発生した損傷の早期の原因究明や安全性の調査を円滑に進められるようにしておくことが望ましい。例として振動計測やひずみ計測などの計測を行える機器の設置を検討されたい。

本橋で得た知見が今後の橋梁設計や新しい橋梁形式の活用に向けての一助となれば幸いである。

**謝辞:** 本検討に際し、「木ノ川高架橋モニタリング検討会」(座長: 鎌田大阪大学大学院教授)の委員の方々に多大なるご協力とご助言を賜りました。深く感謝致します。

### 参考文献

- 1) 木村, 山村, 本田, 山口, 南: 那智勝浦道路木ノ川高架橋の設計, 橋梁と基礎, 2002.10
- 2) 前田, 南: 木ノ川高架橋における鋼・コンクリート複合トラス構造の採用について, 平成14年度近畿地方整備局管内技術論文, 技術 I 7, 2002
- 3) 小野: 木ノ川高架橋(鋼・コンクリート複合トラス)の施工について, 平成15年度近畿地方整備局管内技術論文, 施・安10, 2003
- 4) 三宅, 森: 木ノ川高架橋におけるひびわれに対する調査・解析を踏まえた補修・補強について, 平成29年度近畿地方整備局管内技術論文, 防災・保全部門: No.06, 2017

# ワイヤロープ式防護柵設置区間における 新たな事故対策について

松尾 卓<sup>1</sup>・村田 嘉彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 大阪国道事務所 西大阪維持出張所（〒551-0002大阪府大阪市大正区三軒茶屋5-6-4）

<sup>2</sup>近畿地方整備局 和歌山河川国道事務所 道路管理第二課（〒640-8227和歌山県和歌山市西汀丁16）

京奈和自動車道の暫定2車線区間では、ワイヤロープ式防護柵の設置により対向車線への飛び出し事故が減少し、一定の効果が発現している。一方、ワイヤロープ式防護柵への接触事故が増加傾向にあり、対策が急務となっていた。

本稿では、京奈和自動車道におけるワイヤロープ接触事故の特性を踏まえ、新たな事故対策を試行的に実施したので報告する。

キーワード 暫定2車線区間、ワイヤロープ接触事故、事故対策、効果検証

## 1. はじめに

高速道路の暫定2車線区間では、対向車線への飛び出しによる重大事故が多く、対策としてワイヤロープ式防護柵の設置が進められている。和歌山河川国道事務所管内の京奈和自動車道においても長大橋梁、トンネル区間を除く全ての区間でワイヤロープ式防護柵の設置が完了し、事故削減効果が発現している。一方、ワイヤロープ式防護柵への接触事故が増加傾向（図-1）にあり、事故に伴う通行規制や維持管理コストの増大など喫緊の課題となっている。これまで、車道中央側へのドットラインやランブルストリップスの設置、防護柵支柱への反射材取付等の対策を実施しているものの、依然としてワイヤロープ接触事故が多く、対策が急務となっている。

本稿では、ワイヤロープ接触事故を削減すべく、京奈和自動車道におけるワイヤロープ接触事故特性を踏まえ、新たな事故対策を試行的に実施したので、その対策内容を報告する。

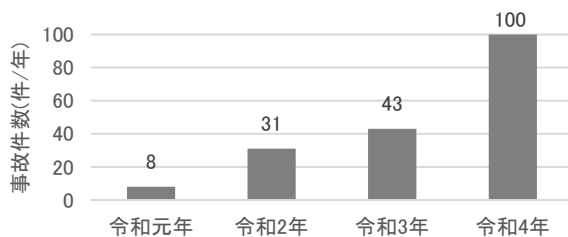


図-1 ワイヤロープ接触事故件数の推移

## 2. 京奈和自動車道のワイヤロープ接触事故特性

和歌山河川国道事務所管内の京奈和自動車道では、令和元年から令和5年7月までにワイヤロープ接触事故が206件発生している。これらの事故は発生日時や発生地点、車種等をデータベース化し、事故情報が蓄積されている。このデータを用いて、“誰が” “どのような状況で” “どのような場所” でワイヤロープ接触事故が発生しているか分析し、事故発生要因を考察する。

図-2は当事者別事故発生割合を示したものである。当事者は乗用車が約80%以上を占め、大型車の割合が少ない。当事者は乗用車が多く、日常的に自動車を運転する大型車ではなく、運転頻度が比較的少ない乗用車が引き起こしていることがわかる。

図-3は平休別時間帯別事故発生件数を示したものである。ワイヤロープ接触事故は、全206件のうち平日129件、休日77件であり、平日の事故が約60%を占める。発生時間帯は、平日・休日ともに14時から16時の間に多発しており、前方が視認しにくい夜間ではなく、比較的交通量

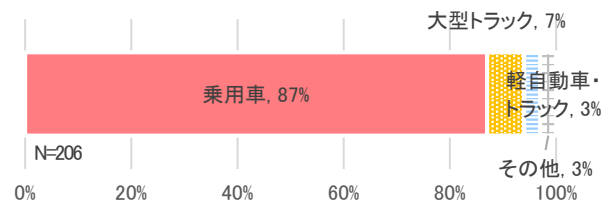


図-2 ワイヤロープ接触事故の当事者

が少ない昼間に多いことがわかる。

次に、ワイヤロープ接触事故発生地点の平面線形別事故発生割合を図-4、縦断勾配別事故発生割合を図-5に示す。本データは事故発生地点の道路台帳附図から道路線形情報を読み取ったものである。事故発生地点の平面線形は直線区間が半数以上を占め、右カーブや左カーブでも発生している。また、縦断勾配は上り勾配が53%、下り勾配が41%で大部分を占める。事故発生地点は、対向車線にはみ出しやすいカーブ区間で少なく、速度超過となりやすい下り勾配も極端に多くない。このため、ワイヤロープ接触事故は、カーブや下り勾配等の道路構造で発生している訳ではなく、どの地点でも発生していることがわかる。

以上から、管内のワイヤロープ接触事故は、ドライバーが漫然運転中、道路構造の変化に対応できず、ハンドル操作を誤ること要因と推察される。

### 3. 新たな事故対策の立案

ワイヤロープ接触事故対策は、事故要因が漫然運転の中で走行が不安定となることとし、ドライバーの走行位置を安定させる方針で対応策を検討する。

ワイヤロープ設置区間における漫然運転防止策は、国土交通省東北地方整備局で先進的な取り組みが実施されている。秋田自動車道では令和4年度にワイヤロープ設置区間において車線中央を走行させる対策として車線中央ドットラインや立体路面標示を設置し、ドライバーに走行位置を意識させる効果やハンドル操作を促すことによる漫然運転防止効果<sup>1)</sup>を確認している。令和5年度にはドライバーに跨いで走行させる緑色の車両誘導線を試行的に設置している。これらの先進事例を踏まえ、京奈和自動車道ではドライバーの走行位置を安定させる対策（車線中央ドットライン、車両誘導線）とワイヤロープに接近しないよう距離を取る対策（既設の車道中央側ドットラインの幅広化、車道中央側への立体路面標示）を比較検討し、和歌山県警察高速隊とも協議を行い、車両誘導線を試行的に設置することとした。

図-6は新たなワイヤロープ接触事故対策の概要を示したものである。本対策はドライバーの走行位置を安定させることを目的とし、ワイヤロープ接触事故件数が最も多い京奈和自動車道紀の川IC～紀の川東IC間（4.5km）において車両誘導線を設置する。車両誘導線は先進事例を参考に緑色、幅20cmとし、連続性や施工性も考慮し、切れ目がない実線で設置することとした。なお、車両誘導線の位置は、車線中央右側に配置し、運転席にあわせて車両誘導線を跨いで走行することとした。また、車両誘導線の走行方法は、走行方法を示す現地周知看板や広報チラシを作成し、和歌山河川国道事務所HPや公式SNSも活用して一般道路利用者に幅広く周知した。

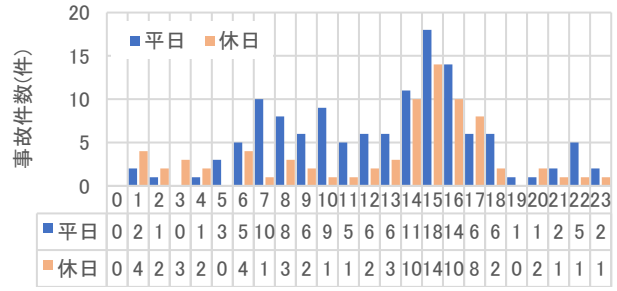


図-3 ワイヤロープ接触事故の発生時間帯

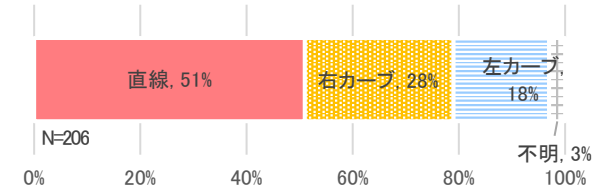


図-4 ワイヤロープ接触事故発生地点の平面線形

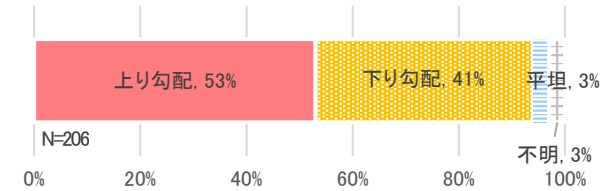


図-5 ワイヤロープ接触事故発生地点の縦断勾配

目的	ドライバーの走行位置を安定させる。
対策	車線中央寄りに誘導線を設置する。
区間	京奈和自動車道紀の川IC～紀の川東IC間(4.5km)
期間	令和5年11月22日～

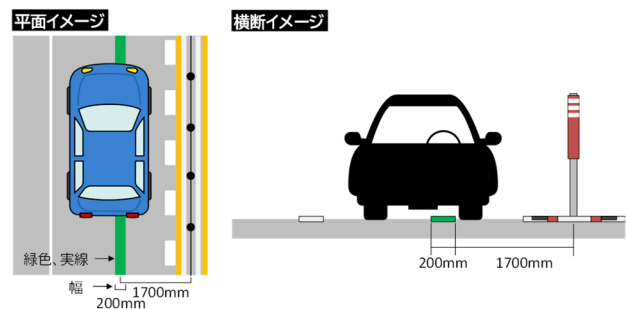


図-6 新たなワイヤロープ接触事故対策の概要

4. 事故対策の効果について

(1) 期待される効果

表-1は、緑色車両誘導線により期待される効果項目を示したものである。対策区間では、ドライバーが緑色の車両誘導線を意識し、車線中央を走行するようになり、ワイヤロープへの接触事故が減少することが期待される。

(2) 対策による変化

a) 車両走行位置の変化（走行調査）

対策前後における奈良方面の車両走行位置を図-7、和歌山方面の車両走行位置を図-8に示す。走行位置は道路管理カメラ画像からワイヤロープ式防護柵に近い側のタイヤ位置（車両右側）を計測した。対策後は車両走行位置が全体的に路肩側に移動し、奈良方面で平均7cm、和歌山方面で平均10cm変化している。特にワイヤロープ

表-1 事故対策効果

効果	対策による変化
交通挙動、事故件数	・車両の走行位置 ・ワイヤロープ接触事故件数
利用者意識	・認知度、走行方法 ・走行性、安心感、有効性

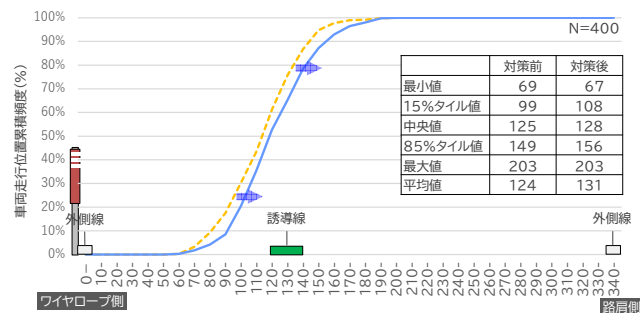


図-7 対策前後の車両走行位置（奈良方面）

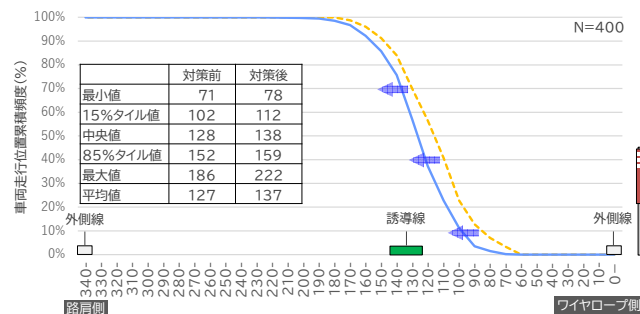


図-8 対策前後の車両走行位置（和歌山方面）

式防護柵から近い側の車両走行位置が路肩側に奈良方面9cm、和歌山方面10cm移動した。一方、ワイヤロープ式防護柵から遠い側の車両走行位置も路肩側に奈良方面7cm、和歌山方面7cm移動している。対策後は車両誘導線を跨ぐ車両の他、車両誘導線を避ける車両もみられた。ドライバーがこれらのハンドル操作を行ったため、車両走行位置が全体的に路肩側に移動したと考えられる。

b) 利用者意識の変化（アンケート調査）

図-9は対策後のドライバーの走りやすさ、図-10はドライバーの安心感、図-11は対策の有効性を示したものである。対策後はドライバーの約半数が車両誘導線により道路が走りやすくなったと感じ、約60%が車両誘導線により安心して道路を走れるようになったと感じている。また、ドライバーの約60%は車両誘導線が走行位置を安定させるのに有効と感じている。対策後はドライバーが「ラインが目印となりわかりやすい。」や「不安定な車が減った。」と感じており、対策により走行位置が安定し、走行性や安心感が向上しているものと考えられる。

問:「緑色」の誘導線により対策前に比べて道路を走りやすくなったと思いますか。

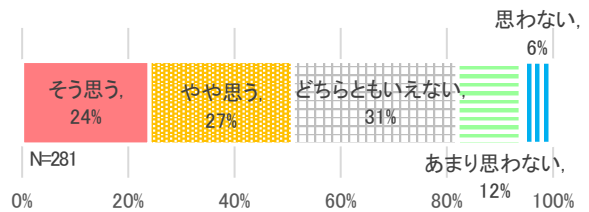


図-9 ドライバーの走りやすさ

問:「緑色」の誘導線により安心して道路を走れるようになったと思いますか。

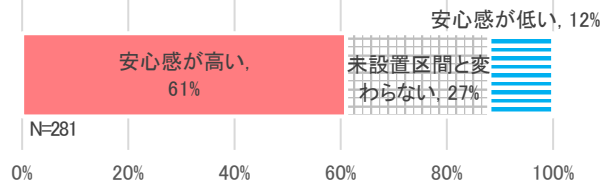


図-10 ドライバーの安心感

問:「緑色」の誘導線は走行位置を安定させるのに有効と感じましたか。

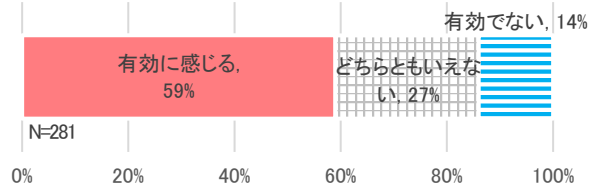


図-11 対策の有効性

c) ワイヤロープ接触事故件数の変化

図-12は、車両誘導線設置区間の京奈和自動車道紀の川ICから紀の川東IC間で発生したワイヤロープ接触事故の推移を示したものである。対策直前は事故が7件/6ヵ月発生している。これに対し、対策直後は事故が4件/6ヵ月発生し、対策前後で約40%減少している。このことから、対策後は、ワイヤロープ接触事故が減少傾向であることがわかる。

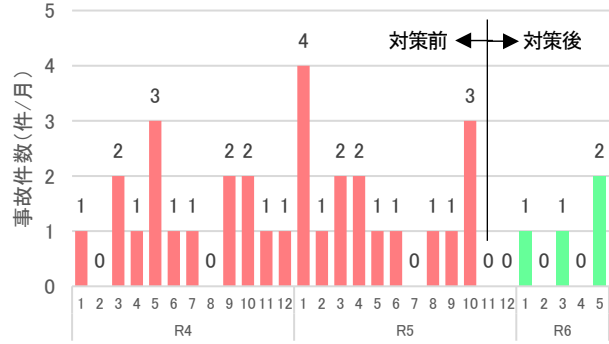


図-12 対策前後のワイヤロープ事故件数の推移

d) 対策の認知度・走行方法

車両誘導線の認知度を図-13、車両誘導線設置区間の走行方法を図-14に示す。ドライバーの約60%が走行中に車両誘導線に気づいている。車両誘導線に気づいたドライバーの約60%が誘導線を運転席（右側座席）の位置にあわせて走行し、約40%が誘導線を車の中心にあわせて走行している。このことから、多くのドライバーが対策で狙った車両誘導線に運転席を合わせる方法で走行しているが、想定外の方法で走行しているドライバーも存在している。また、車両誘導線に気づいたドライバーが比較的多いものの、気づかなかったドライバーも一定数存在しており、更なる車両誘導線及び走行方法の周知が必要である。

問:「緑色」の誘導線に気づきましたか。

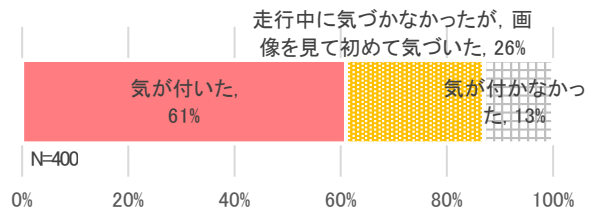


図-13 車両誘導線の認知度

5. おわりに

本稿では、管内の京奈和自動車道で増加傾向であるワイヤロープ接触事故を対象に、事故特性を踏まえてドライバーの走行位置を安定させる車両誘導線を試行的に設置し、効果検証を行った。効果検証の結果、ドライバーの走行性や安心感の向上や車両走行位置が路肩側に移動する変化が見られ、一定の事故削減効果も確認された。一方、車両誘導線に気づいていないドライバーや外側線寄りを走行するドライバーも存在し、走行方法を周知していくことが必要であることも確認した。

今後は、概ね1年間の交通挙動調査、事故分析を行い効果検証を進めていくとともに、その結果を踏まえ、今後の方向性・展開を検討していく予定である。

問:「緑色」の誘導線を設置した区間の走行方法をお聞きます。どのように走行しましたか。

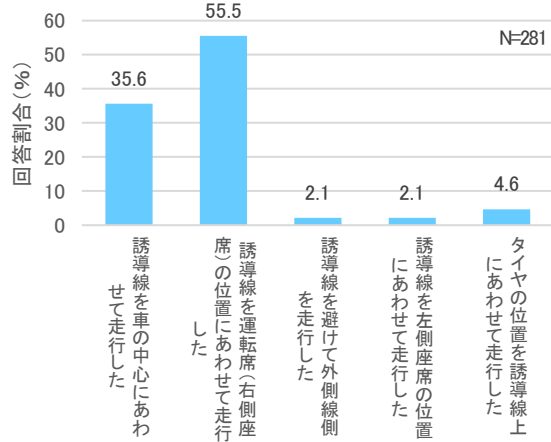


図-14 対策後の走行方法

参考文献

- 1) 第43回交通工学研究発表会：ワイヤロープ設置区間における新たな接触事故対策の効果検証



# 琵琶湖後期放流時における瀬田川流量観測の高度化と実運用に向けた考察

佐々木 彩華<sup>1</sup>・川西 英司<sup>1</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 琵琶湖河川事務所 流域治水課 (〒520-2279 滋賀県大津市黒津4丁目5-1)

瀬田川洗堰は琵琶湖の水位と瀬田川の流量を調節している重要な河川施設である。後期放流量(1,500m<sup>3</sup>/s)の超過は、天ヶ瀬ダム洪水調節容量の減少、淀川水系の治水安全度の低下、逆に過少になれば、琵琶湖沿岸域の浸水被害の長期化につながる。一方、計画流量を安全に流下させるために鹿跳溪谷の河道整備(狭窄部の掘削)が進められており、瀬田川洗堰からの放流量と大戸川流量の合流量を把握することは河川管理上重要な課題である。そこで本稿では大戸川合流直後の関ノ津水位流量観測所において画像解析法による試験観測を実施し、流量観測の高度化を図るとともにその実運用に向けた検証および考察を行った。

キーワード 非接触型流速計測法, 流量観測, STIV解析, 遠赤外線カメラ, 治水安全度

## 1. はじめに

瀬田川洗堰の通過流量の把握は通常、越流公式によって求めているが、洪水後の放流においては全開の操作となるためH-Q式から流量を把握する。瀬田川洗堰の全開操作は、平成4年から令和4年までの間に86回、年平均2.8回実施されている。平成23年には最多の9回の全開操作が実施されている。

ただし、後期放流量は琵琶湖水位、大戸川の合流の影響、下流狭窄部などにより複雑な水理現象となっているため、全開操作時の流量を正確に把握するには、過年度のH-Q式では捉えきれず、流量観測を実施して把握することが望まれる。

関ノ津水位流量観測所(以下関ノ津観測所とする)は、瀬田川洗堰下流の大戸川合流直後の瀬田川68.8kmに位置する第2種の観測所である。ここに非接触流速計測法である画像解析用のカメラを観測所左岸に設置し、画像解析法により流量を求め、その実運用に向けて観測精度の検証と考察を行った。

kmの地点である。関ノ津観測所の位置を図-1に示す。

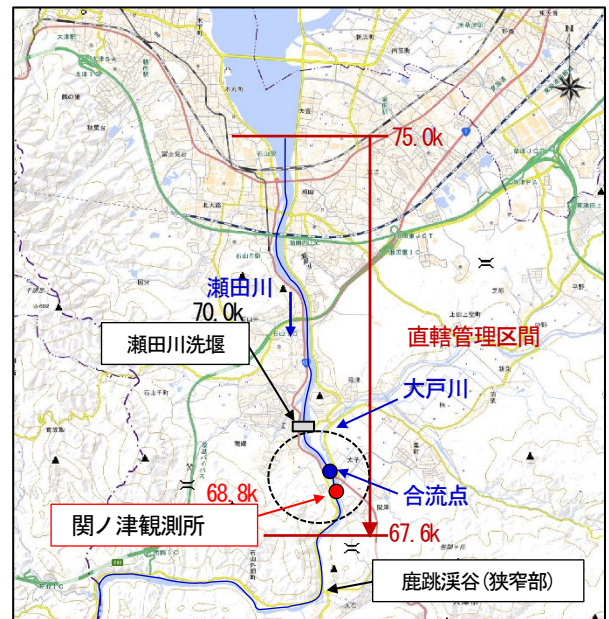


図-1 関ノ津観測所位置図

## 2. 対象地の概要

### (1) 観測地点

関ノ津観測所は瀬田川洗堰下流の大戸川合流点より0.2km下流に位置する。下流の鹿跳溪谷までは約1

### (2) 高度流量観測手法

高度流量観測手法のうち試験観測で使用した画像解析法には以下の特徴がある。

- ・カメラで録画した動画データを画像解析して波紋、ゴミ等の流下物の速度を計測し、表面流速を求める。
- ・基本的には記録データ(動画)の解析を観測後に実施

- して流量を算出する（自動化事例有り）。
- ・垂直流速分布を考慮して区分流速を算出する。（通常は校正係数0.85を使用）
- ・流速測定可能範囲：0.1～5.0m/s 以上。
- ・表面流速は風の影響を受けるため、補正が必要となる。

### 3. 試験観測の実施

#### (1) 機器の設置位置

画像解析用のカメラ機器は、図-2に示す関ノ津観測所左岸に設置されたCCTVカメラの支柱に固定した。

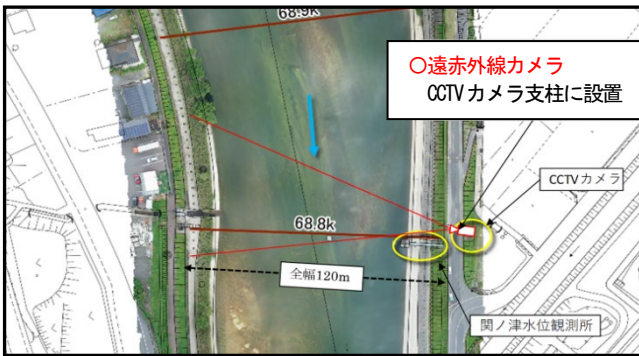


図-2 観測機器（遠赤外線カメラ）の設置位置

#### (2) カメラの設置とレンズ選定

予め実施した画角確認により赤外線カメラのレンズ焦点距離は19mm川幅全体を把握でき、また空間解像度も十分であった。設置高は4.8mとして試験観測を実施した。



図-3 観測機器の設置状況

#### (3) 流速解析手法

画像解析による流速測定法は、洪水流を撮影した映像を解析することで流速を計測する手法である。ここでは標定測量による幾何補正後に、洪水流量観測事例の多いSTIV法を用いて解析を実施した。

##### 【STIV法の観測原理】

画像解析法による流量観測では、画像から流速を算出する手法として、STIV (Space-Time Image Velocimetry) 法によって解析を実施する。STIV法はPIV法の一様であるが、PIV法が2枚の連続画像から二次元の瞬間速度場を求めるのに対し、STIV法は連続する数十枚の画像から一次元（主流方向）の平均速度場を求めるのが特徴である。STIV法は、数秒間のビデオ画像の数十枚のフレーム画像の情報から流れ方向の速度成分を求める。具体的には

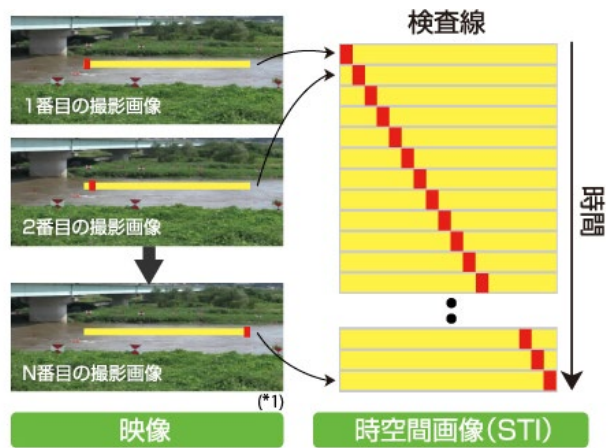


図-4 STIVにおける検査線のイメージ

画像の中で検査線を設定し、その細長い画像を切り出して時系列に並べていくイメージである。

図4の黄色線は検査線、赤四角は表面波紋等の輝度値の特徴を表している。時空間画像 (STI) は検査線上の輝度値を時間方向に並べることで生成され、図-5のような流速に応じた輝度分布の縞模様が現れる。

流速は時空間画像 (STI) の縞模様の傾き ( $\phi$ )、長さ、および時間から計算される。右下図は、 $\phi$  が小さい場合には流れが遅く、 $\phi$  が大きい場合には流れが速いことを表す。

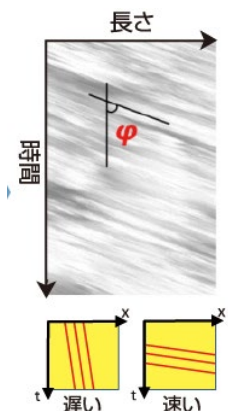


図-5 流速の測定原理

(出典:KU-STIV開発の背景とその応用<sup>3)</sup>)

## 4. 試験観測結果

観測結果の解析対象は、観測期間中において水位が最も高かった台風7号の出水とした。

### (1) 台風7号の気象概況

令和5年台風第7号は、8月8日9時、南鳥島近海で発生した。その後小笠原近海をゆっくりと西に進み、8月11日には、父島の東海上を北上、8月14日には、八丈島の南西海上に進み、8月15日5時前に和歌山県潮岬付近に上陸、その後北上し日本海へと通過した。

### (2) 観測対象の出水と解析期間

関ノ津観測所においては、降雨を伴う増水のうち、観測期間中最も水位が高かった台風7号の8月15日出水を対象とし解析を実施した。解析対象とした出水について、関ノ津観測所の水位・雨量グラフを図-6に示す。

なお、8月16日の瀬田川洗堰放流量は250m<sup>3</sup>/s、8月19日の放流量は300m<sup>3</sup>/sであった。

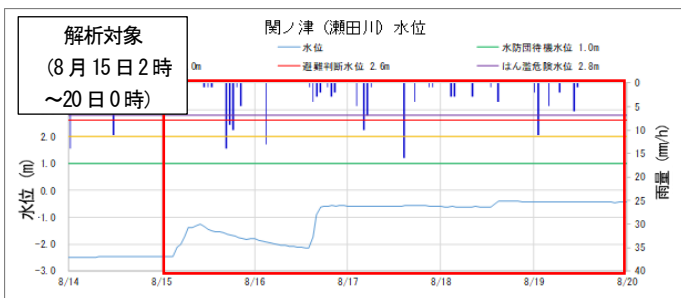
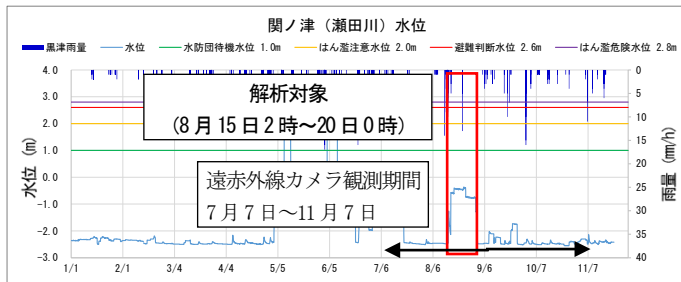


図-6 関ノ津観測所水位・雨量グラフ

### (3) 流速解析結果

表面流速の解析は、標定測量データを用いてSTIV解析により実施した。関ノ津観測所における8月19日後期放流時(300m<sup>3</sup>/s)の解析例を図-7に示す。



図-7 STIV解析画像 ピーク時8月19日14:00

### (4) 変数の整理

STIV解析に使用した変数は以下のとおりである。

水位：関ノ津観測所水位

横断形状：R4定期横断測量(68.800：基準断面)

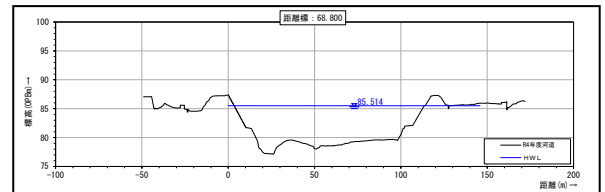


図-8 R4定期横断測量図(68.800km基準断面)

## (5) 流量の整理

本検討では本川上流1.0kmの瀬田川洗堰放流量と支川の大戸川上流1.1kmの黒津観測所の令和4年度HQ式から求めた流量を合算し評価の基準とした。

到達時間の補正については、観測所間の距離と断面平均流速より流下時間を求めて補正した。

具体的には黒津観測所8月15日出水におけるピーク時の平均流速は1.53m/s（浮子流量観測結果より）、関ノ津観測所までの距離は1.1kmである。これらより流下時間は12分程である。関ノ津地点では黒津観測所流量の10分前の流量を適用した。また瀬田川堰も1.0kmとほぼ同等の距離にあるため10分前のデータを採用した。図-9に放流量+黒津流量と観測流量のグラフを示す。

8月15日出水、また後期放流での水位は、水防団待機水位に達していない。観測期間中の放流量は、瀬田川洗堰のゲート操作により8月16日14:00～16:00に250m³/s また、8月18日13:00～14:00に300m³/sとなっている。遠赤外線カメラによる流量観測結果は、流量の変動は同じ傾向であった。なお、100m³を超える流量ではやや低い値を示している。

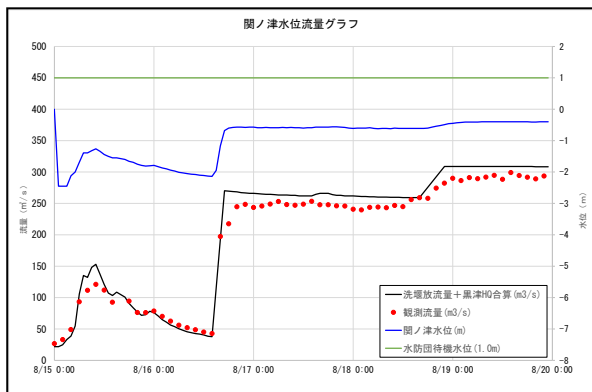


図-9 放流量+黒津流量と観測流量

## 5. 精度検証

### (1) 浮子観測データとの整合性の確認の実施方針（案）

非接触型流速計測法による観測データと浮子測法による観測データとの整合性については以前より課題になっているところである。非接触型流速計測法データと浮子観測データとの整合性の確認にあたっては令和5年3月29日の事務連絡により実施方針（案）が示されている。

令和元年度～3年度にかけて実施された革新的河川技術プロジェクト第4弾等河川流量観測の高度化に関する検討等によって蓄積されてきた観測データを整理した結果、浮子観測データと非接触型流速計測法データの相対差について、図-10に示すとおり、低い水位では乖離やバラツキがあるものの、十分高い水位（重要度の高い領域）では-20%から0%の範囲に収束し、浮子測法を持つ不確実性程度（±20%程度）に収まることがわかってきた。

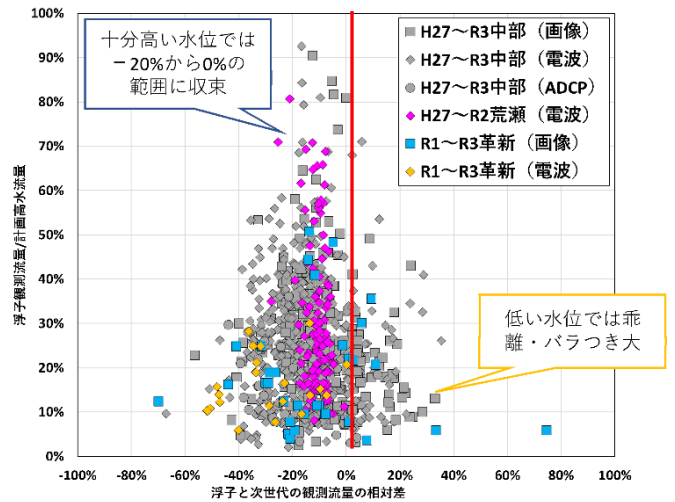


図-10（観測流量の相対差）－（出水規模）

$$\text{（浮子測法と非接触型流速計測法の観測流量の相対差）} = \frac{\text{（非接触型流速計測法－浮子観測流量）}}{\text{浮子観測流量}}$$

- 浮子測法との同時流量観測が実施されている観測所については、図上に同時流量観測データをプロットする。
- 同時流量観測データが概ね相対差-20%から 0%の範囲に収まっている場合には、「浮子観測データとの整合性」が保たれていると判断し、当年の水位流量曲線の作成に非接触型流速計測法データを使用することができる。

## (2) 検証方法

関ノ津観測所での今回の観測においては、浮子流量観測を行っていないこと、またR4年度のH-Q式も適用範囲外であるため浮子測法との比較検証は行っていない。

図-11に示すとおり、95%予測区間を利用した「非接触型流速計測法による観測データの妥当性」（「水文観測データ品質照査の手引き」参照）の照査を実施した。

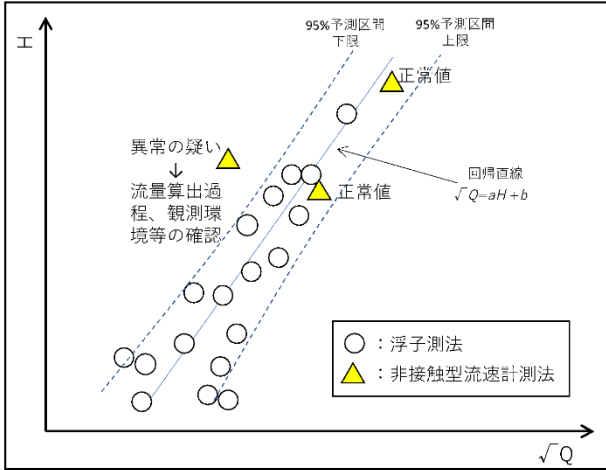


図-11 浮子観測データによる95%予測区間と非接触型流速計測法データ

## (3) 検証結果及び考察

観測結果は、±95%予測区間内に収まることから、観測流量は妥当と判断される。

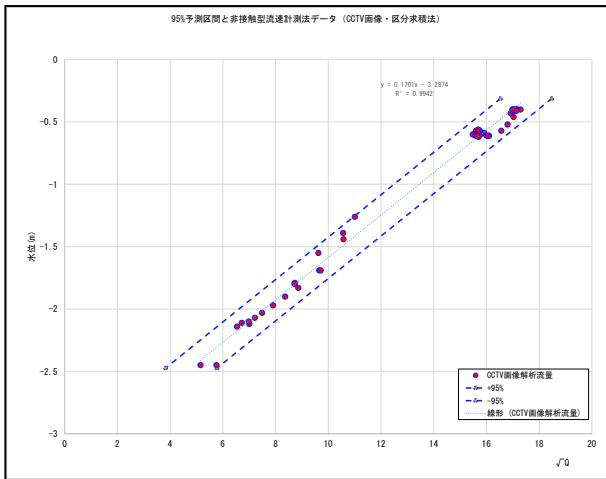


図-12 95%予測区間による検証結果

なお、令和5年3月に改訂された水文観測データ品質照査の手引き（改定案）においては、AQCでの検出の目安としてより寛容な99%予測区間が設定されている。

次に関ノ津観測所では8月15日出水時に浮子流量観測

を実施していないが、代替の指標として瀬田川洗堰放流量と黒津観測所令和4年度H-Q式の合算流量から求めた合成H-Q曲線作成したものを図-13に示す。

8月15日7:00から8月16日の5:00までの2日間のデータでは、流量規模が大きい場合は、（瀬田川洗堰放流量）+（大戸川黒津流量）と画像解析方式による流量の差は小さくなる傾向となった。

一方、流量規模が小さくなるほどバラツキが大きくなる傾向があり、これは浮子測法との相対差（図-10）でも同様であった。流量規模が5倍程度の後期放流においてはバラツキは小さくなると思われる。

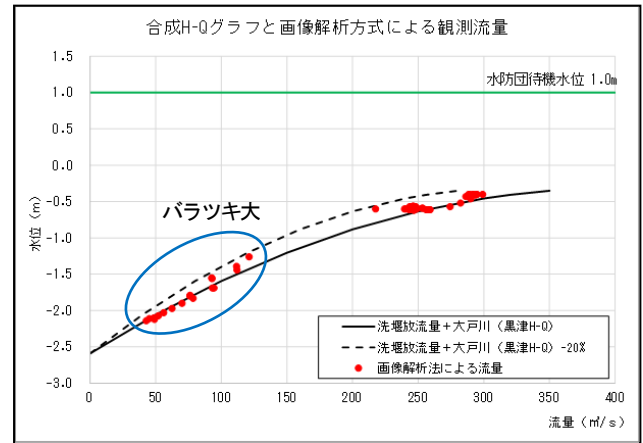


図-13 合成H-Qと観測流量

## 6. 実運用に向けた課題

関ノ津観測所で行った今回の試験観測では水防団待機に達しない300m³/s程度の出水規模であったが、十分な観測精度が確保できることが確認できた。

今後は実用に向けた以下の検討が必要である。

a) 関ノ津観測所の計画流量は1,500m³/sであり、より流量規模の大きな出水の観測を実施し、浮子観測との比較検証を行うことにより、精度検証を実施していくことが重要である。

b) 瀬田川洗堰の通過流量を正確に把握するためには、大戸川黒津観測所と関ノ津観測所の同時流量観測を実施することが必要である。

現在、瀬田川洗堰の通過流量はH-Q式により把握されている。一方、鹿跳溪谷の掘削工事の進捗により、下流の水理条件（背水の条件）が変化し、H-Q関係も変化することが予想される。関ノ津観測所における非接触の観測手法による流量観測が可能となれば、河道改修の途中段階においても正確な流量の把握が期待できる。

## 7. 観測精度向上のための 今後の課題

### a) 標定点の追加と横断観測

今回の試験観測結果は非接触型流速計測法の手引き(案)では検証範囲に収まり妥当とされるが、堰放流量との比較では一定の差異がみられる。これらは、洪水観測前後の横断測量の実施、標定測量点の追加等を実施することにより精度向上が望めると考えられる。

### b) 観測精度維持のための植生管理

画像解析法においては、死角が発生することが大きな障害となる。また、試験観測では、対岸の植生により遠赤外線が障害され画像が不明瞭になることが確認された。このため両岸における植生の管理は必要となる。

### c) 自動解析について

STIV解析ソフトには、自動解析による流速解析が選択できるが、今回の観測では精度が高いとは言えないため、手動による解析を実施した。「ディープラーニング法」は、今後観測を継続して教師データを増やすことで精度向上が期待される。

### 参考文献

- 1) ISO748 : 2021 (Hydrometry - Measurement of liquid flow in openchannels - Velocity area methods using point velocity measurements)
- 2) 萬矢敦啓・後藤功次・山本品：異なる計測手法から得られた河川流量値の違いに関して，土木技術資料 63-5, 2021
- 3) 藤田，河川表面流速の画像計測ソフトウェア-KU-STIV 開発の背景とその応用，2015ハイドロ総研 HP, HydroSTIV
- 4) 非接触型流速計測法の手引き(案)，2023
- 5) 水文観測データ品質調査の手引き(改定案)，2023

# 柘榴5号線跨道橋下部工施工に伴う地下水への影響把握

古満 菜摘<sup>1</sup>

<sup>1</sup>紀南河川国道事務所 工務第一課 (〒646-0003 和歌山県田辺市中万呂142)

京都府相楽郡精華町柘榴地区の山間部には地下水が豊富にあり井戸が多く農業用などに地下水が利用されている。柘榴地区では柘榴5号線跨道橋の設置が計画されており、橋梁下部工では掘削を伴う工種が含まれていることから、工事に伴う既設井戸の地下水位変動等が危惧される。本研究では、地下水位に留意して行った掘削工に着目し、施工前後の地下水変動を調査した。掘削を伴う工種を地下水位の最も低い渇水期に行ったことにより地下水への影響を最小限に抑えることができたと考えられる。

キーワード 地下水観測、水質分析、地盤変状

## 1. はじめに

京都府相楽郡精華町柘榴地区の山間部には地下水が豊富にあることから、井戸が多く、農業用などに地下水が利用されている。また、当該箇所の地盤は地下水位が高いことから軟弱であり、山が貯留した水が地下水へ流れる地形になっていることから降雨の影響を受けやすいという特徴がある。このため、国道163号の精華拡幅事業では、地下水の傾向や道路建設による地下水の影響を把握する目的で地下水調査を実施してきた。

柘榴地区では柘榴5号線跨道橋の設置が計画されており、橋台のフーチング設置や地盤改良のため掘削を伴う工種が含まれている。地下水位が高いことから掘削により地下水の水みちが変化し、ボーリングなどの地盤崩壊現象が懸念されるとともに既設井戸の地下水位変動が危惧される。柘榴5号線跨道橋の下部工では、地下水対策として渇水期施工を前提に地盤改良や鋼矢板土留めを実施した。

本研究では、地下水位に留意して行った掘削工に着目し、施工前後の地下水変動を調査した事例について紹介する。

## 2. 精華拡幅事業

### (1) 全体概要

国道163号の精華拡幅事業は、交通混雑の緩和や交通安全の確保、関西文化学術研究都市をはじめとする京都府南部地域の活性化を目的として、京都府相楽郡精華町柘榴を起点とし、京都府木津川市相楽ま

での延長4.6kmを現況2車線から4車線に拡幅する事業である。2023年3月には京都府相楽郡精華町乾谷大崩から京都府相楽郡精華町乾谷金堀までの延長0.7kmのバイパス区間が暫定2車線で開通した。

2023年10月から柘榴地区の施工に着手し、国道を横断する柘榴5号線跨道橋の橋梁下部工を行っている。



図1 位置図

### (2) 柘榴5号線跨道橋

#### a) 柘榴地区

柘榴地区は、奈良県との府県境である京都府相楽郡精華町柘榴から京都府相楽郡精華町乾谷大崩までの延長1.1kmの区間である。工事進捗に合わせ、数回の交通切替を経て、現況2車線から4車線の道路に拡幅する計画としている。

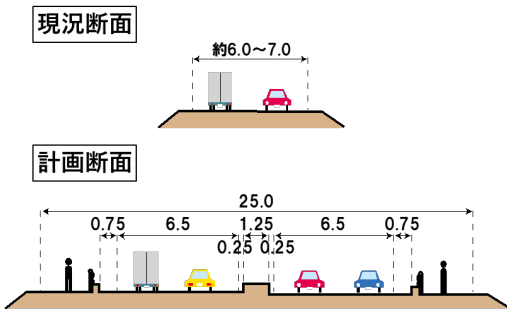


図 2 現況断面・計画断面

b) 柘榴5号線跨道橋施工の背景

柘榴5号線跨道橋は、国道163号と交差する町道柘榴5号線の機能復旧を目的として施工する。

現況は国道と町道が十字に交差しており、柘榴地区の住宅地側から町道柘榴5号線（写真1青破線部）を通り山田川側へ国道を渡ることができる。山田川側には神社や田畑があり、地元の方が自宅と田畑を往来するなど町道の利用者は多い。

4車線化に伴い、中央分離帯が設置される事で現況の町道柘榴5号線から国道163号を横断することはできなくなることから、柘榴5号線跨道橋を整備することになった。（写真1赤ハッチ部）跨道橋の完成イメージは、図3のとおりである。



写真 1 柘榴5号線跨道橋付近状況写真



図 3 柘榴5号線跨道橋完成イメージ図

c) 柘榴5号線跨道橋下部工の工事概要

2023年10月より、跨道橋下部工に着手した。工事として、道路土工、橋台工、RC橋脚工、仮設工、地盤改良工、擁壁工、石・ブロック積工、カルバート工、排水構造物工、舗装工、防護柵工、構造物撤去工が含まれている。

(3) 地下水調査概要

a) 地下水調査業務概要

精華拡幅事業において、地下水の傾向や道路建設による地下水への影響を把握するため地下水位及び地下水水質の調査を行っている。

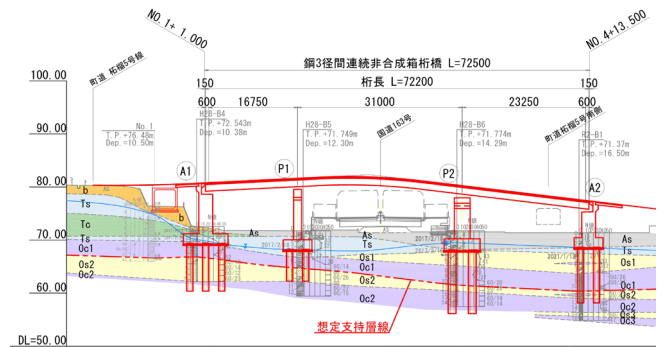
b) 地形概要

当該エリアは、奈良盆地北西部の京阪奈丘陵にあたり、山田川沿いに広がる標高40～70m程度の平坦地に位置する。山田川は、生駒山脈北側に広がる田辺丘陵とその南側に位置する西の京丘陵との間を東流し、精華町を通過した後、京都府木津川市にて木津川へと合流する。

山田川周辺はかつて旧低湿地が広がっていた。現在の山田川周辺の丘陵地は住宅地として整備されている箇所が多いが、昔は水田として利用されていたと考えられる。

c) 地質概要

地質調査結果より良質な支持層に該当するのは、大阪層群砂質土層〔Os〕である。しかし、大阪層群砂質土層〔Os〕の層厚は1.15～4.48mしかなく、不規則に大阪層群粘性土層〔Oc〕を挟んでいる。当該地域は、砂質土層と粘土層が交互に断続することが特徴的で、砂質土層のみで安定的に連続する支持層圧を確保することが難しいことが推測される。



地質時代	地質名	地質記号	層相・土質名
新 第 生 四 代 紀	完新世	盛土	b 粘性土・砂質土および礫
		崖錐	dt 崖錐堆積物
		沖積層	As 沖積砂質土層
	更新世	段丘堆積物	Ts 沖積砂質土層
更新世 後期	大阪層群	Oc	粘土層
		Os	砂質土層

図 4 柘榴5号線跨道橋付近地層断面図



d) 柘榴5号線跨道橋施工箇所付近の地下水位

2022年度まで当該箇所直近では継続的な地下水位観測を実施していない。当該箇所と比較的近い地下水位観測位置 (H28-B3) での2017年~2023年までの地下水位と雨量に着目する。

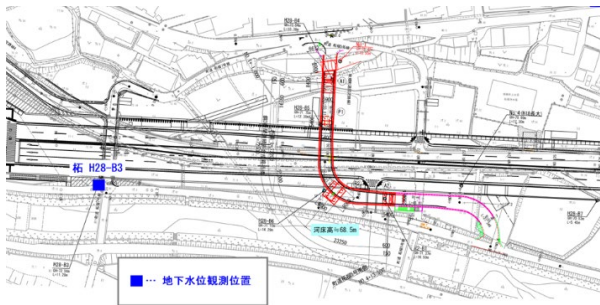


図 5 H28-B3 位置図

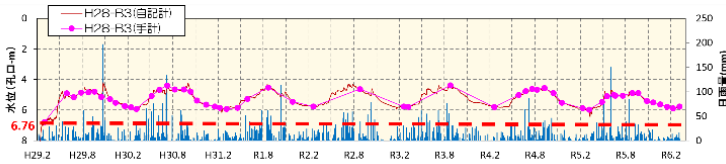


図 6 地下水位観測結果 (H28-B3)

地下水位観測位置 (H28-B3) は地質調査ボーリング孔を水位観測に活用したものである。ボーリング削孔直後の孔内水位は地表面より-6.67 mであった。水位は徐々に上昇し、概ね孔口-4~6mの範囲で変動している。当該エリアの地下水位は夏場と冬場で水頭差が約1.5mに達し、夏場に高い傾向が見られる。

ボーリングを実施した2017年以降、地下水位は孔内水位が低くなる冬場の水位が-6m以下とならなかったことからボーリング直後に観測した孔内水位よりも1~2m上昇している可能性がある。また、地下水位の変動は降雨による影響を受けやすいことがわかる。

e) 地下水位上昇による施工の影響

跨道橋のA1橋台、P1橋脚部は地下水位が高いことが確認できているが、地下水位が計画時点よりも上昇した場合は以下の課題が考えられる。

鋼矢板土留めでは、土圧や水圧の増加で矢板の変異量、切梁・腹起しの変形が大きくなることや掘削底面の破壊現象としてボーリング、パイピング、ヒービングが生じる可能性がある。

杭基礎打設では、杭先端が深層地下水の帯水層に達するため、杭周辺に水みちが形成された場合は、杭の摩擦力の低下が懸念されるほか、杭打設本数が18本と比較的多いため、深層地下水を対象とした井戸水位の長期的低下が危惧される。

これらの懸念点とd)の結果を踏まえ、跨道橋周辺部で新たな地下水位観測点の追加を検討した。

f) 柘榴5号線跨道橋下部工施工影響範囲の検討

地下水位変動による影響範囲の影響半径は、揚水による水位低下量や揚水時間および透水係数などと比例関係にあり、次のような経験式※がある。

※Siechardtの提案式

$$R = 3000s\sqrt{K}$$

s: 揚水による井内水位低下量 (m) K: 透水係数 (m/s)

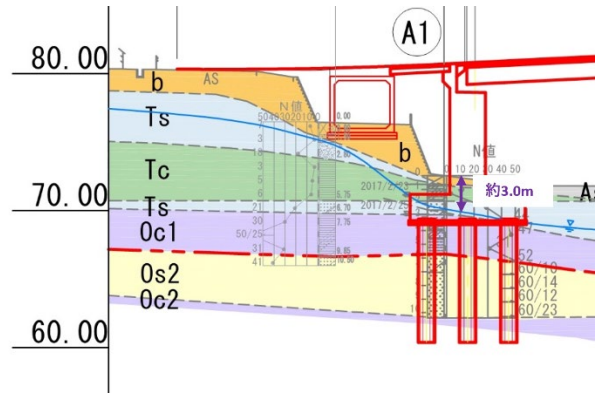


図 7 揚水による井内水位低下量 (m)

図7より、s=3.0mとする。A1橋台付近の地質調査結果によると、20%粒径 $D_{20}=0.18\text{mm}$ であることから、透水係数は $k=0.0000685\text{m/s}$ とする。

$$R = 3000 \times 3.0 \times \sqrt{0.0000685} = 74.49 \approx 80.0\text{m}$$

つまり、影響半径は80.0mとなる。

A1橋台を中心とし、半径80mの円を描くと柘榴1、柘榴10の井戸が影響範囲に含まれる。

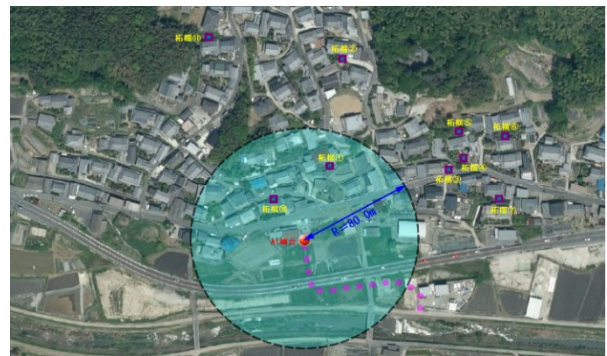


図 8 A1 橋台施工時影響範囲

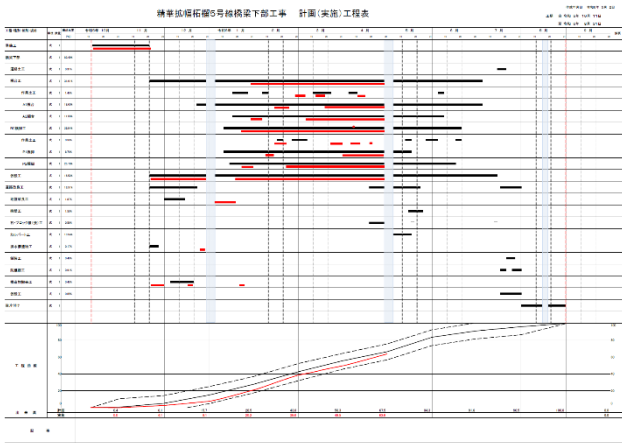
本研究では、柘榴1、柘榴10の2地点を下部工施工影響を確認するための地下水位観測地点とする。下部工事の中でも地下水位が計画より上昇した場合課題が考えられる地盤改良、鋼矢板土留め、杭基礎打設の施工前後の地下水位、水質に着目し、施工と地下水の変動との関係性について考察する。

### 3. 方法

#### (1) 期間

下部工事の工程は表1のとおりである。2023年10月から2024年3月まで柘榴1, 柘榴10の2地点の地下水位を毎月1回観測した。また、2023年10月と2024年2月には水質測定を行った。

表 1 柘榴5号線跨道橋下部工 工程表



#### (2) 観測方法

地下水位観測は触針式水位計を用いて、基準点から水面までの距離を測定した。



写真 2 地下水位観測状況

観測箇所にて採水した試料に対して、水質分析を行った。調査地点は飲用に使用している井戸であるため、水質分析項目は飲用12項目とした。飲用12項目は、一般細菌、大腸菌、硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、塩化物イオン、全有機炭素、pH、味、臭気、色度、濁度、鉄の12項目である。

### 4. 結果

#### (1) 工事施工状況

##### a) 地盤改良

地盤改良機で割付図の順番にセメント系固化剤を混ぜ込んでいった。地下水の湧出などはなかった。



写真 3 地盤改良施工状況

##### b) 鋼矢板土留め

はじめに矢板を入れる位置まで掘削した後、矢板を圧入した。掘削時、矢板圧入時ともに地下水の湧出などはなかった。



写真 4 鋼矢板圧入状況

##### c) 杭基礎打設

ケーシングを圧入し、ハンマー掘削を行った。鉄筋籠立て込み後、コンクリート打設をした。掘削時には地下水の湧出などはなかった。



写真 5 杭基礎打設状況

(2) 地下水調査結果

柘榴1, 柘榴10の水位, 日雨量の関係は以下のとおりである.

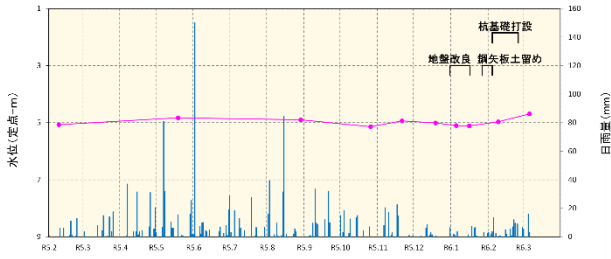


図 9 柘榴1 地下水位観測結果

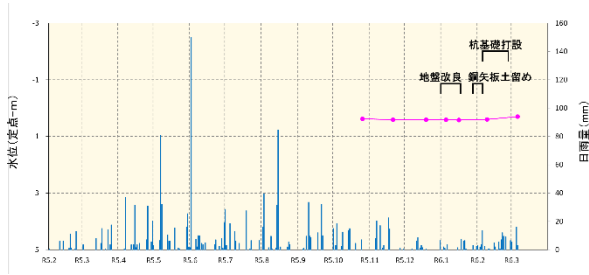


図 10 柘榴10 地下水位観測結果

柘榴1の2023年10月から2024年3月までの水位変化に着目する. 水位は地表面からほぼ-5mを維持している. 2024年3月など観測日前日に降水があった場合は水位が上昇している. 地盤改良, 鋼矢板土留め, 杭基礎打設を行っていた時期も施工前の水位と比較して大きな水位変動はない.

次に, 柘榴10の2023年10月から2024年3月までの水位変化に着目する. 水位は地表面から-0.5mを維持している. 観測日前日に降水があった場合はやや水位が上昇しているがほとんど変動はない. 地盤改良, 鋼矢板土留め, 杭基礎打設を行っていた時期も施工前の水位と比較して大きな水位変動はない.

柘榴1, 柘榴10のpH値は以下のとおりである.

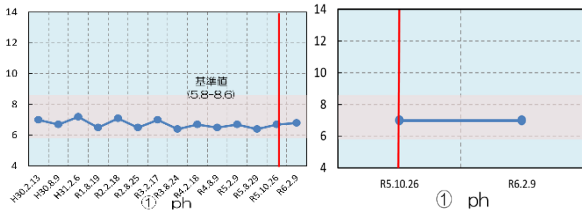


図 11 柘榴1 の pH 測定結果

図 12 柘榴10 の pH 測定結果

多少の変化はあるもののpH値は一定であり, 施工前と比較して大きな変動は見られなかった. その他11項目についても工事施工前後で大きな変動は見られなかった.

5. 考察

柘榴1, 柘榴10について, 地盤改良, 鋼矢板土留め, 杭基礎打設の施工期間中と施工前の水位を比較すると, 2地点とも水位はほぼ一定であり施工の影響を受けていないと考えられる. また, 観測日前日に降雨があった場合は水位上昇の傾向がみられることから降雨による影響は受けていると思われる. 本工事は例年水位の低下する渇水期に実施した. このため水位変動が小さかったといえる.

また, 水質については, 多少の変化はあるもののpH値は一定であり, 地盤改良の影響が2024年2月末時点で地下水に及んでいるとは考えられない.

これらより渇水期に施工をしたことによって地下水への影響を最小限に抑えることができたと考えられる. このことから, 地下水調査は重要であり, 施工時期を工夫することによって, 円滑に事業を進められたといえる.

謝辞: 本稿の執筆にあたり, 吹上技研コンサルタントの皆様をはじめ, お力添えいただいた関係者の皆様に感謝の意を表します.

補足: 本論文は2023年度京都国道事務所計画課在籍時に執筆したものである.

# 一般国道169号(小口第二トンネル) 補修工事について

田村 太一

奈良県 県土マネジメント部 吉野土木事務所 工務第二課

(〒639-3701 奈良県吉野郡上北山村河合420-1)

近年、道路施設の予防保全として補修工事が行われる中で、工事着手前、着手後の補修工法の選定及び安全対策の立案は非常に大切である。ただし、コスト面や現地状況により設計には精査を用いる。また、安全対策の面では、近年奈良県内でのトンネル内で起こった人身事故を繰り返さないように、より綿密な精査が必要となった。

このような中で、事故、苦情なく工事を完了させることを目的として、トンネル補修工事におけるソフト面及びハード面での一般通行車両に対する安全な通行を確保するための検討や取り組みを行った内容について報告する。

キーワード トンネル, 点検, トンネル補修, 通行規制, 安全対策, 注意喚起

## 1. はじめに

道路施設のインフラメンテナンスにおいて、2013年の道路改正法を受け2014年にすべての道路管理者は、橋梁、トンネル等の道路施設について、5年に1度、近接目視で点検を行い、点検結果として、健全度を4段階で診断することになっている。(表1)

奈良県吉野郡下北山村下桑原地内(図1)にある一般国道169号の小口第二トンネル(写真1)は2019年に実施した点検結果において、コンクリート片のはく落や漏水により利用者被害が懸念されるとして「早期措置段階」と診断されたトンネルである。本発表では、小口第二トンネルの補修工事の概要の紹介と共に、工事施工中、完了後の一般通行車両に対する安全な通行を確保するための検討や取り組みについて併せて述べる。

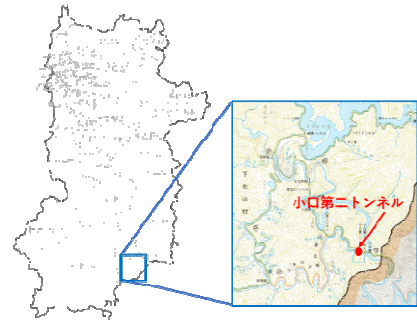


図1. 位置図(下北山村下桑原)

写真1. 小口第二トンネル坑口付近



表1. トンネル点検 健全度評価<sup>1)</sup>

区分	定義
I判定 健全	道路トンネルの機能に支障が生じていない状態
II判定 予防保全段階	道路トンネルの機能に支障が生じていないが、予防保全の段階から措置を講ずることが望ましい状態
III判定 早期措置段階	道路トンネルの機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態
IV判定 緊急措置段階	道路トンネルの機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態

写真2. 小口第二トンネル内部



写真6. 打音調査の実施状況



## 2 補修工事の概要

### (1) 補修内容について

一般国道169号の小口第二トンネルは、完成年度1960年(63年経過)、延長271mの素掘りのモルタル吹付のトンネルであり、坑内の側面において凹凸が多く確認される。主な変状として、モルタル吹付のうき・ひび割れ・剥離(写真3)、漏水(写真4、5)及び測面への車両接触痕などが見られ、材質劣化対策(はく落防止対策)、漏水対策が求められた。

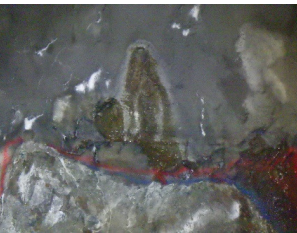
写真3. うき・ひび割れ・剥離



写真4. 漏水(側壁部)



写真5. 漏水(天端部)



### (3) 施工フローについて

- うき、ひび割れ、剥離が確認される既設モルタル吹付をブレーカで撤去。(写真7)
- 側面部漏水対策として地山に排水マットの設置。(写真8)
- はく落防止対策として、地山を補強するモルタル吹付を実施。(写真9)
- 天端部の漏水対策として、天端の漏水箇所から道路側溝に水を流すことが出来るように線導水工を施工。(写真10)

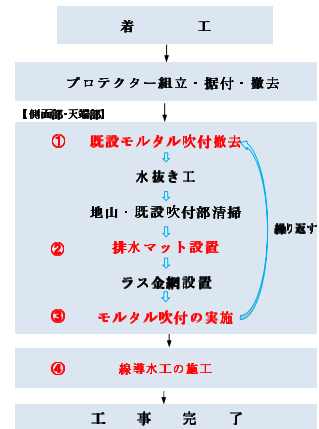


図2. 施工フロー

写真7. 既設モルタル撤去



写真8. 排水マット設置



### (2) 工事着手前の調査について

工事着手前に調査、設計段階に求められた補修範囲と相違がないかを確認するための事前調査を行った。本工事では上記の内容の補修範囲の再精査を行うために目視に加え“うき”が想定される箇所では打音調査を行って想定される箇所を叩き、軽い音が鳴る箇所についてはうき(はく落)が新たに想定されるため、当初予定区間外でも、うきが想定される箇所は本工事での施工範囲をして追加で工事を行った。

写真9. モルタル吹付



写真10. 線導水工の施工



(4) 工事期間中の通行規制について

一般国道169号は平常時・災害時を問わず安定的な輸送を確保するための物流上で重要な路線（重要物流道路）であることから大型車両の通過交通が多く、全日通行止めを行う影響が大きい。そのため、夜間時間に通行止めにて規制を行い、トンネル内の仮設物によってトンネル内が狭くなっていることから、通行止め時間外は、片側交互通行により通行車両の誘導を行っている。また、過年度のトンネル補修工事の事例から、通行できない時間帯での苦情が多い経緯より、迂回路を設定し、一般通行車両（大型車を除く）の誘導を行っている。（写真11）

写真11. 通行規制状況



3. 安全な通行を確保するための検討や取り組み

(1) プロテクターを用いた一般通行車両の保護について

本工事では、各箇所既設モルタルの撤去後にモルタル吹付を行うため、工事直後においてトンネル天端付近からモルタルや地山が剥がれ落ちる可能性がある。そのため規制解除時において一般通行車両の安全確保の観点から、トンネル坑内にプロテクター（写真12、13）の設置を行った。

写真12. 車両防護のためのプロテクター



写真13. プロテクター坑内での使用



(2) トンネル坑内のレーンマークの検討について

小口第二トンネルは前段で述べた通り、坑内の側面部において凹凸が多くみられ、大型車両が通行する高さの側面での接触が思いがけない事故となる可能性がある。事故を未然に防ぐためにトンネル坑内の視覚的な対策として、設計段階において3D点群データを用いて、トンネル坑内の突出部の解析を行い、レーンマークの位置を検討した。

a) 最突出部の解析

3D点群データにおいて、路面から高さ4.0m以内（大型車両の高さを想定）の範囲で、最もトンネル中心に向かって突出している点の解析を実施。採用断面の決定する。

b) 最突出部の車道幅員、側溝・舗装境界の計測

断面（最突出部）の車道測定、側溝境界などを計測し、レーンマークの最適位置を決定している。

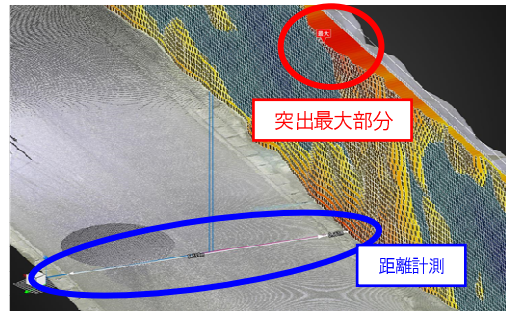


図3. 測量計測、概要図

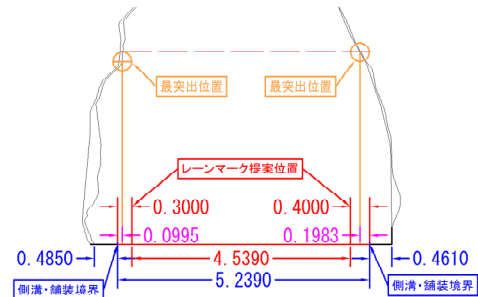


図4. レーンマーク位置検討結果

(3) 規制区間内の交通誘導の工夫について

本工事南側の規制区間内では、一般国道169号と村道の分岐があり、奥にはレンタルボート店が位置している。(図5)(写真14)



図5. 規制区間、位置図

写真14. 国道と村道の位置関係



ここで問題となるのは、この箇所から規制区間内に合流する車両であり、国道方向の車両誘導をしながら村道の側の車両を意識しなければいけない。誤って村道側からの流入を許すと規制区間内の車両と接触事故の危険性がある。

そこで、村道から出てくる車両を誘導員が確実に把握し、一旦停止を促しながら、誘導できるよう「車両感知センサー」を設置した。センサーは車両が通ることを感知すると、誘導員近くの受信チャイムが反応し出入口に誘導員が立たずとも迅速な対応が可能になり確実な安全誘導できた。(写真15、16)

写真15. 感知センサー



写真16. 受信チャイム



(4) トンネル坑内の注意喚起について

小口第二トンネルでは側面の一部が道路の建築限界を犯している箇所があり、大型車両が対向する際に思いがけず側面へ接触する可能性がある。またトンネル坑内では視界が悪く、二輪車などがトンネル坑内の落下物に接触し転倒する恐れがある。坑内における事故を未然に防ぐための注意喚起を目的として、トンネル坑口付近に注意喚起看板(写真17)を設置している。

写真17. 注意喚起看板



4. さらなる安全な通行を確保するために

トンネル内での事故が多く発生する中、どのようにして事故を未然に防ぐかが今後の課題となっている。奈良県内のトンネルでは、道路構造令上の建築限界が確保されていないトンネルが多く存在し、通行車両の安全対策が検討すべき最優先事項である。坑口付近における注意喚起看板設置などは安価なソフト対策であり、事故の事前予防として有効である。また、トンネル内における注意喚起として、高輝度反射テープ(写真18)や光る塗料(写真19)などをトンネル側面に施工し、トンネル側面と車両との距離を視覚的に伝えることによって、より事故の件数は減らすことが可能だと考える。管轄内ではこのような事例がないため今後、要望として挙げていきたい。

写真18. 高輝度反射テープ

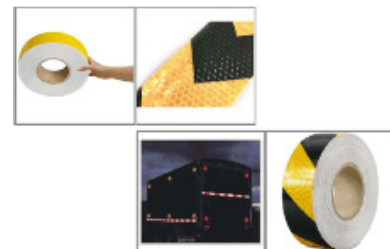


写真19. 光る塗料<sup>2)</sup>



## 5. おわりに

今回のトンネル補修工事にかかわらず、どの道路工事でも共通して必要なことは、工事期間中に無事故で終わり、最終的には安全な通行を可能にした道路環境を構築することであると考えます。このような道路環境を構築していくためには、設計段階、工事施工中及び完了後における精査は非常に重要である。また、今回の工事を実施するにあたり、地元への周知だけでなく、奈良国道事務所、近隣県（三重県、和歌山県）及び運送業者への連絡や、周知ビラの配布によって、通行者に工事の存在を伝えていることが注意喚起となっており、工事中に大きなトラブルがない大きな要因となった。常に、設計会社

施工業者及び行政が一体となり道路環境に目を向けていくことが大切である。

**謝辞：**本取組みに多大なるご尽力をいただいた関係者の皆様、本工事を施工いただきました北山工業様及び下請け業者様、本工事の設計をいただきました国際航業様に深く感謝の意を表し、本報告の結びとさせていただきます。

### 参考文献

- 1) 国土交通省 道路局 国道・技術課：道路トンネル定期点検要領
- 2) (株) シンソク HP



# 中央分離帯等における 効果的な雑草対策手法の検討

高松 綾子

兵庫県 阪神北県民局 宝塚土木事務所 道路第1課 (〒665-8567宝塚市旭町2丁目4番15号)

限られた予算の中で効率的に雑草対策を行うため、兵庫県宝塚土木事務所では道路除草に関する様々な課題解決に向け、試行錯誤を繰り返している。その結果、縁石に被せて目地をずらす工夫をした張りコンクリートや、目地シート、アスファルト接合補修材による隙間からの雑草対策等の有効性を確認した。今後、これらの手法を維持管理や道路パトロールに積極的に取り入れていくとともに、引き続き、より大きな費用対効果が得られる新たな手法の試行にも取り組んでいきたい。

キーワード 隙間除草，維持管理，負担軽減

## 1. はじめに

道路上の雑草対策は、交通安全の確保、沿道の景観向上、種子の飛散や害虫の発生による周辺への被害防止のため、維持管理上必要不可欠である。道路の除草作業は年2回以上の実施が望ましいが、予算の確保が難しくほとんどの路線で1回除草しかできないため、苦情対応や緊急の出動に追われ、業務に支障をきたしているのが現状である。このような状況から、限られた予算内での効率的、効果的な雑草対策が求められている。

宝塚土木事務所では、特に対応に苦慮している中央分離帯や歩道の雑草、隙間からの雑草への対策として、中央分離帯への張りコンクリートや歩道狭小箇所における植栽帯の撤去等による除草面積の削減、目地シート等による隙間からの雑草対策等に実験的に取り組んでいる。本稿では、当事務所における雑

草対策にかかる近年の取り組みとそれらの経過状況について報告する。

## 2. 宝塚土木事務所における道路除草の課題

宝塚土木事務所では、交通量が多く中央分離帯のある路線を複数管理している。中央分離帯における雑草の繁茂は車両への接触や視距の悪化など交通への影響が特に大きいため、計画的な除草が必要である。しかし、作業員の危険性が高く、作業に伴う車線規制により渋滞が発生しやすいため、迅速かつ効果的な雑草対策の検討が求められる。

また、歩道の植栽帯からはみ出して伸びる雑草は、歩行空間を狭めるとともに景観を大きく損ねるため、苦情・要望にも繋がりがやすい。さらに、車両交通量の多い路線においては歩道を通行する自転車も多く(図-1)、植栽帯からの雑草のはみ出しは、自転車と歩行者の離合を困難にするため危険である。

さらに、近年特に目立っているのが張りコンクリートや舗装と縁石との境目に生える『隙間からの雑草』である。除草業務の範囲から外れている箇所のため除草を免れて大きく成長してしまうことに加え、通行空間に近接しており、車両への接触や通行空間を狭めるなど交通の支障となり、道路の維持管理上問題である。

このように、当事務所は道路除草に対し多くの課題意識を持っており、それぞれの課題に対する効果的な雑草対策手法を検討し、試行している。



図-1 自転車が歩道を走る様子(米谷昆陽尼崎線)

### 3. 各課題への対策

#### (1) 張りコンクリート等の被覆による対策

##### a) 張りコンクリート等の施工による除草面積の削減

中央分離帯や歩道の雑草対策として、雑草が繁茂する中央分離帯への張りコンクリートの施工や、歩道狭小箇所を中心とした植栽帯の撤去及びアスファルトの舗設に取り組んでいる。除草費用に対策費用が上乗せされるため、実施年度の植栽管理・除草費用の合計は一時的に例年より高額となるが、将来的には除草面積が減ることによる維持管理費の削減を見込んでいる。

張りコンクリートの施工と歩道の植栽帯撤去により、除草面積の削減、除草業務及び苦情対応にかかる職員の負荷軽減等、多くの効果が認められる。また、交通の安全性と景観の向上にも寄与(図-2)し、なおかつ将来的な除草コストの縮減も期待できることから、県民ニーズの高い雑草対策として非常に有意義な取り組みであると考えられる。

ただし、植栽帯には本来、緩衝帯、防眩、地球温暖化対策、大気汚染の緩和、景観の調和、火災遮断などの機能があり、むやみに撤去すべきものではない。当該路線の状況や周辺の環境、地域住民の意向等を踏まえ、総合的に判断する必要がある。

なお、費用面を重視し、コンクリートやアスファルト合材を用いているが、各現場のニーズによって、土系の舗装材や歩道と同様の材料による復旧も選択肢に入ると考える。また、植栽の撤去が妥当ではなく、雑草の繁茂が問題になっている箇所については、和歌山河川国道事務所管内で実施された、土系舗装にマルチングを組み合わせた施工方法を、今後検討する予定である。

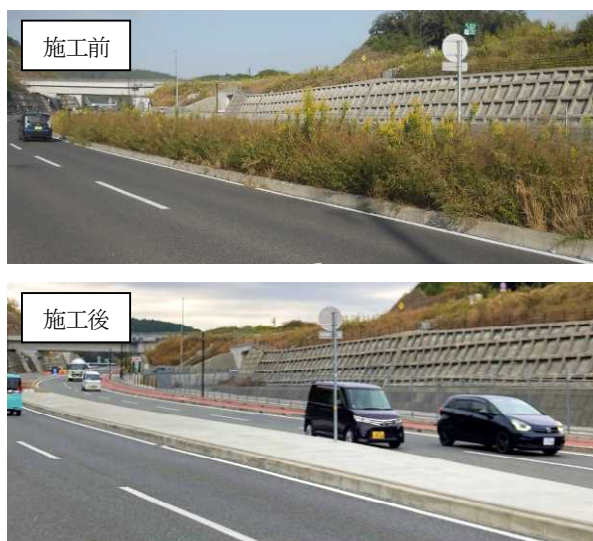


図-2 張りコンクリート打設前後の写真

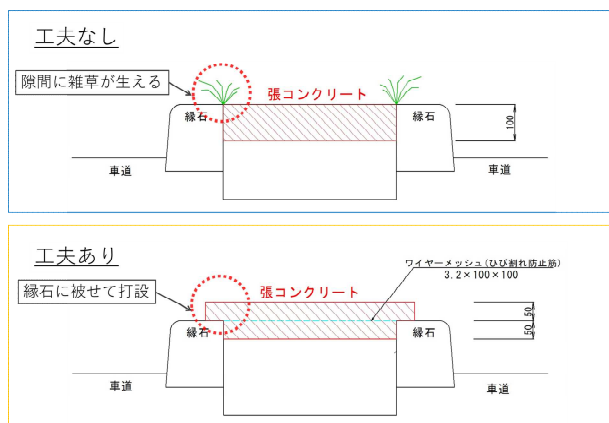


図-3 張りコンクリートの工夫内容

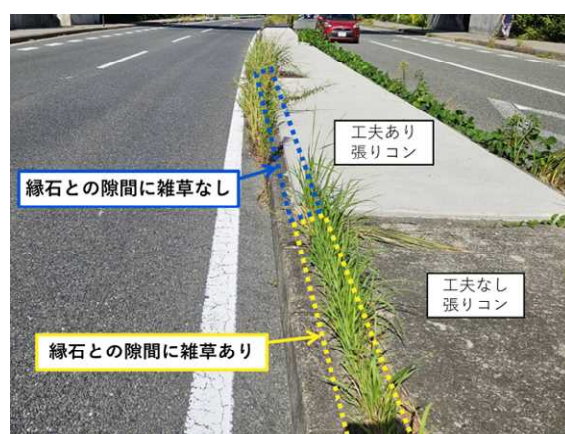


図-4 張りコンクリート工夫有無の比較

##### b) 張りコンクリート施工時における工夫

張りコンクリートの施工や植栽帯のアスファルト舗装により一定の効果は得られたが、張りコンクリートと縁石との隙間からの雑草が生え、視距を遮る、見栄えが悪いなど複数の苦情・要望を受けている。川西市及び伊丹市内においては、隙間からの雑草を抑制することを目的として、令和3年度から試験的に縁石に少し被せ、目地をずらす形での張りコンクリート(図-3)を施工している。施工後約3年が経過しているが、境目部分への雑草はほとんど確認されおらず(図-4)一定の効果を見込んでいる。

#### (2) 国道176号における雑草抑制対策の実証実験

隙間からの雑草に対し経済的かつ効率的な雑草対策方法を検討するため、令和5年度に実際に問題の生じている現場で実証実験を行った。実験箇所の国道176号小浜陸橋は、交通量が非常に多く(47,568台/日)、路肩が狭い(約50cm)箇所である(図-5)。このため、路肩に雑草が繁茂すると交通への影響が非常に大きく、こまめな除草が必要である。しかし、現場条件により除草作業による渋滞等の社会的影響は大きく、



図-5 国道176号小浜陸橋の様子

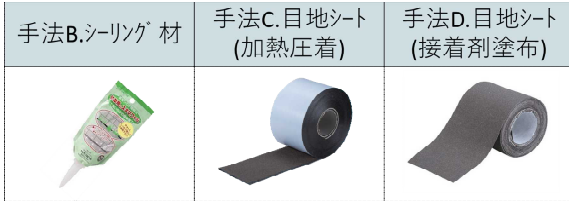


図-6 国道176号対策材料の写真

表-1 対策工法の比較検討

除草の手法	100mあたりの比較		目標年数※
	日数 (施工性)	直接費 (経済性)	
手法A. 除草のみ 土砂除去+除草+除草剤塗布	0.3日	4万円	—
手法B. シーリング材注入 (Aの作業)+シーリング材注入	2.9日 ×	57万円 ×	18年
手法C. 目地シート(加熱圧着) (Aの作業)+シートを加熱+貼付け	1.8日 △	35万円 △	
手法D. 目地シート(接着剤塗布) (Aの作業)+接着剤塗布+貼付け	1.7日 ○	32万円 ○	8年

※手法Aの作業と比較し、直接費が同等となる年数

除草する作業員の危険性も他の区間より高いため、できる限り雑草を生やさない工夫が求められる。

そこで実験として、これまで兵庫県内の他の土木事務所で検討されてきた雑草対策方法を参考に、シーリング材注入及び目地シートの貼付けを選定した(図-6)上で、地域の企業に相談し、容易に手に入る製品を使用した手法B~Dにより施工した(表-1)。

施工後10ヶ月経過した時点で、手法Bの施工箇所には背の低い雑草が複数見られており、期待した効果は得られないと思われる。手法C, Dの施工範囲では、雑草の抑制効果が続いており(図-7)、快適な道路空



図-7 手法C, D施工箇所の対策前後の写真

間を維持している。今後も継続して定期的に雑草の有無を確認し、経済性の精査を行っていく。ただし、結果として目標とする耐用年数に至らず、経済的に多少不利であっても、苦情の減少や道路利用者の安全・安心の向上といった様々な視点から効果を整理した上で妥当性を評価することが重要であると考えている。

(3) 職員による直営作業

a) 除草作業

川西篠山線及び米谷昆陽尼崎線の一部区間において、張りコンクリート施工箇所等における隙間からの雑草が目立ち、住民からの苦情や議員からの要望を幾度も受けていた。当該箇所は防草処置済の箇所であるため除草業務の範囲に入っておらず、必要範囲を追加で実施できるほど予算の余裕もなかったことから、職員による直営での除草を実施した。内容は表-2のとおりである。実際に作業を行ったところ、多年草の巨大化や木本類の定着が見られ、作業量の多さが明確になった。

苦情・要望内容や、現状をよく理解した職員自らが除草作業を実施することにより、無駄や漏れなく作業ができ、必要な効果が得られやすい。また、現場に職員が出向いて作業をすることで県民へのアピールになるとともに、雑草対策を始めとする道路維持管理業務への職員の理解が深まり、道路の現状も正確に把握できることから、以後の苦情等への対応がスムーズになるという利点もある。

ただし、職員の時間と体力を大幅に消耗することは避けられず、他業務への支障の大きさは言うまでもない。これを通常管理手法とすることは妥当ではないが、のんびきならない事情がある際の「最終手段」としては有効であった。

b) 除草作業に合わせた隙間からの雑草対策

直営の除草作業においては除草のみを実施し、隙間からの雑草対策は行わなかったため、程なくしてアスファルト舗装と縁石の隙間から雑草が生え始め

表-2 直営の除草作業実施内容

回数	路線	除草箇所	作業延長(m)	人数(人)	時間(h)	除草量2tダンプ(台)
1	川西篠山線	中央分離帯 張コンと縁石の隙間 車道と縁石の隙間	300	6	2	1
2	川西篠山線	中央分離帯 張コンと縁石の隙間 車道と縁石の隙間	150	6	2	1
		歩道 車道と縁石の隙間 植樹帯低木	50			
3	川西篠山線	中央分離帯 張コンと縁石の隙間 車道と縁石の隙間	200	9	2	2
		歩道 車道と縁石の隙間 植樹帯低木	100			
4	米谷昆陽 尼崎線	歩道 Asと縁石の隙間 (植樹帯撤去部)	50	6	2	1

表-3 直営の隙間対策材料

材料	単価 (円/m)	施工性 (min/m)	効果
アスファルト接合補修材	326	9	○
シリコーン	39	5	×
常温合材	458	1	×



図-8 隙間対策材料の写真

た。そこで、次の段階として、直営の除草作業に合わせて実施できるように、隙間を埋める方法をいくつか試行し、雑草の再生防止効果を検証した。

試行した方法は表-3および図-8のとおりである。ホームセンター等で入手できる材料を中心に、職員自らが容易に作業できるものとした。施工性は常温合剤が最も優位であったが、その効果は限定的であった。最も効果が認められたのはアスファルト接合補修材で、施工箇所には3ヶ月経過後もほとんど雑草が見られなかった(図-9)。ただし、手持ちのバーナーを用いての手作業は作業効率が悪く、長い区間を施工するためには、業務用のバーナーを用いる等の工夫が必要であるとともに、縁石やエプロン等が焦げ付くため、美観に配慮が必要な箇所には不向きである。

本実験により有効性が示されたため、アスファルト接合補修材を道路パトロール車の備品に加え、特に防草効果が求められる現場において使用している。

#### c) 多年草、木本類の表作成

直営除草において作業効率を著しく低下させたのが、セイタカアワダチソウ等の巨大化した多年草や、センダン、ナンキンハゼ等の木本類である。これら

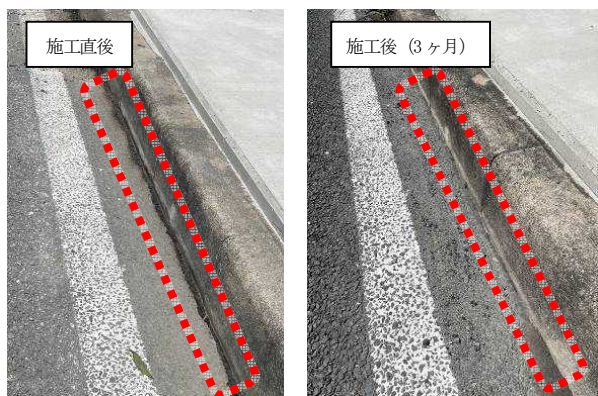


図-9 アスファルト接合補修材施工箇所の様子



図-10 優先して除去すべき種のリスト (一部)

は縦横に大きくなって視距や通行を妨げるため、日々寄せられる苦情の主たる原因でもある。根系が発達し深く根付いた後では、根こそぎ除去するには相当な労力を要するため、早期の発見・除去が重要である。そこで、日々のパトロール業務の中でこれらの種を見分け、比較的除去が容易な時期に除去し、未然に道路環境の悪化を防ぐことができるよう、優先して除去すべき種のリスト(図-10)を作成し、パトロール隊に配布した。全てを除去することが目的ではなく、別件の対応の「ついで」に、見かけた分を除去していくことで、近い将来の負荷を部分的にでも軽減させることが狙いである。

#### 4. 雑草対策の負荷軽減に向けた今後の展開

##### (1) 除草面積削減の継続実施と除草業務等の見直し

中央分離帯への張りコンクリート施工等の取り組みは、道路環境の向上や作業面積減による除草費用の削減及び職員の負担軽減に効果的であることから、引き続き必要箇所に実施していく。

試行結果より、隙間雑草の対策においては縦の隙間を埋めること、及びその密着度が重要であるということが分かった。この点に留意し、今後もより必要性が高い路線、箇所から順次、効果的な対策を図っていきたい。

また、大きく成長し問題となりやすい種への早期の対応や、アスファルト接合補修材のように有効性の示された手法の導入など、日々の道路パトロールにおいても工夫し、効果的な対策を模索していく。

##### (2) 道路新設及び改良時の工夫

既に雑草の繁茂している箇所における後手後手の対策には、多大な労力が必要となることが明確にな

った。今後、改良工事等の際には、雑草対策の必要性に留意し先手を打った工夫を行うべきである。まず、隙間からの雑草の抑制効果が期待できるため、今後の張りコンクリート施工においては、縁石に被せる形で施工することを推奨したい。防草シール等を使用した隙間対策方法についても、道路改築時に設置すれば除草の手間が省け、シールの張り付きもよく、より効果的であると考えられる。また、維持管理のことを考慮し、雑草抑制型側溝等の新技術を積極的に採用するなどの工夫も、現状を改善するには必要である。

このように、管理者ならでの視点や維持管理で苦労した経験を生かし、施工段階で管理のしやすさに配慮した施設をつくることで、将来の維持管理にかかる負荷を軽減するべきである。

## 5. まとめ

道路の維持管理の中でも、雑草の繁茂は苦情や要望になりやすく、多くの土木事務所が対応に苦慮し

ている。雑草への対応にかかる負荷を軽減するため、計画的な除草面積の削減と追加の雑草対策を組み合わせ、初期投資に予算を費やしても雑草の総量を減らす工夫をするとともに、ゆくゆくは除草回数や体制の見直しなども実施し、無理のない維持管理が行えるような基盤を整えていくことが望ましい。

ただし、予算の大幅増は見込めず、当面は引き続き、現場ごとの工夫や努力によって現状に対応していく必要があり、新技術や、各現場の取り組み等の先進事例等がその一助になる。そのため、今後も様々なプラットフォームで、各土木事務所の取り組みや成果を共有し、引き継いでいくことが重要と考える。状況に応じた最適な手法を用いて、限りある予算と労力の中で効率的かつ効果的に雑草対策を実施できるよう、協力し、知恵を出し合っていきたい。

## 6. 引用文献

- 1) 和歌山河川国道事務所道路管理第二課（2019）：  
土系舗装実施による中央分離帯での防草対策の紹介について

# UAVを用いた砂防設備点検の 自動化に向けた検討

小林 正直<sup>1</sup>・岸本 優輝<sup>1</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 大規模土砂災害対策技術センター (〒647-5302和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

現在、砂防堰堤といった砂防施設の点検においては、定期点検・臨時点検の別なく、人力を基本とする点検調査と手動による点検調査報告様式へのとりまとめが必要となっている。一方でUAV、いわゆるドローンを用いた各種計測技術およびその利活用手法の展開はめざましいものがある。本研究においては、山間地域等に多く位置することと、その結果のとりまとめ量が膨大であることなどから多大な労力を要していると考えられる、砂防施設の点検作業及びその点検結果のとりまとめにおける省人化および自動化の取り組みについて、UAVによる砂防施設の点検自体に関する手法の高度化と、点検結果とりまとめ手法の高度化について検討する。

キーワード UAV, 砂防施設, 維持管理, 3次元モデル, DX

## 1. はじめに

近年、建設DXに関する社会的要請が強くなってきており、インフラメンテナンスに関する各領域においても、ICT技術等を活用した省人化が急務となっている。砂防分野においては、砂防堰堤等の砂防施設の維持管理について、その環境的・社会的等の各要因から、UAVによる省人化が検討されてきた。

砂防施設点検については、砂防施設の機能維持のための技術的判断の観点から、定期点検のほか・暴風雨及び台風などの風水害発生後の臨時点検・地震発生後の臨時点検が必要で、場合によっては損傷箇所を詳細に追加点検し、施設の部位毎の変状レベルを評価した上で、施設周辺の状況も踏まえ、総合的に健全度が評価されることとなる。これらにおいて、砂防関係施設点検要領(案)<sup>1)</sup>では、定期点検は目視点検もしくはUAV点検を基本とし、臨時点検においても定期点検に準じて目視点検もしくはUAV点検による点検を基本とするとされている。一方で、UAVの活用ポイント(表-1)として挙げられている観点としては、外観からの変状把握の代替、点検作業が危険な箇所における写真撮影または、広範囲を短時間で撮影した写真によって効率的に全体像を把握すること、などがあり、光学カメラ画像による点検手法が主となっている。即ち、現状想定されているUAV点検の適用範囲や利点としては、目視点検でも実施されてきたような作業の代替等に主眼が置かれ、UAVにより砂防施設点検の手間自体が削減されるような手法、たとえば3次元デ

ータによる点検等の自動化や高度化、あるいは、UAV点検データを用いることによる調査報告の省人化といった要素については確立されていないのが現状である。砂防施設の維持管理という課題に対して、デジタル技術を活用して事業全般のモデル変革を行うデジタルトランスフォーメーションの段階に至るには、これらの確立されてきた技術をさらに適用し、推進を図っていくのと同時に、データ取得から変状把握・解析・調査報告に至る各段階のデジタルイゼーションが不可欠であると考えられる。

本研究では、UAVを活用した砂防施設点検または維持管理の効率化に関し、以下の2つの観点について技術開発を行い、報告する。

### (1) 2時期の点群データを自動で比較し、変状や堆砂量を自動で抽出する手法の確立に向けた検討

UAVに搭載された各撮影機器により、点群による砂防施設の3次元モデルを得ることができる。この点群データを2時期で比較することにより、砂防施設の各種変状を把握する技術が開発されている。本研究においては、その比較や差分解析の自動化を目指し、ICPと呼ばれる点群同士の位置ずれを最小化する手段について検討するとともに、RANSAC法と呼ばれる手法で点群データ中の砂防施設を自動抽出する技術について検討した。加えて、砂防堰堤堆砂域における土砂の堆砂量算出についても自動化に向けた検討を行った。

表-1 現行要領案における砂防関係施設点検でのUAV活用ポイント<sup>1)</sup>

施設(種類)		活用ポイント
砂防設備	砂防堰堤等	UAV点検では、UAVが飛行可能な空間であれば、点検作業が危険な場所、高低差が大きい箇所、着目する部位が地上から見えにくい箇所、設備全体像を把握する場合において効率的に画像を得ることができ、変状の変化を的確に比較できる。また、施設の周辺状況(渓岸浸食、斜面崩壊、堆積地の変化等)も効率的に情報を得ることが可能である。 ただし、樹木の繁茂やGPS情報の取得困難箇所、あるいはコンパス・ジャイロ等に影響がでる飛行困難空域、猛禽類の保護エリアでの点検や詳細な計測が必要な場合は目視点検が必要となる。 なお、「目視外飛行」となる場合は、改正航空法に伴い、点検ごとの飛行許可申請等の手続きが必要となる。
	溪流保全工	UAV点検が効果的な砂防施設で、広範囲を短時間で確認できる。施設の変状、河道の異常堆積や浸食等の全体像を把握することが可能(ウェイポイントフライト)で、変状がみられる施設、箇所については、垂直写真、水平写真、俯瞰写真などの画像により、時期的な変化を的確に比較できる。ただし、都道府県条例の空域制限、人口密集地上空、コンパス・ジャイロ等に影響がでる飛行困難空域である場合や、詳細な計測が必要な場合は目視点検が必要となる。なお、「目視外飛行」となる場合は、改正航空法に伴い、点検ごとの飛行許可申請等の手続きが必要となる。
	山腹工	UAV点検が効果を発揮する施設で、広範囲を短時間で確認でき、効率的に全体像を把握することが可能である。アンカーキャップや法枠の変状がみられる箇所については、垂直写真、水平写真、俯瞰写真などの画像を得ることができ、時期的な変化を的確に比較できる。なお、「目視外飛行」となる場合は、改正航空法に伴い、点検ごとの飛行許可申請等の手続きが必要となる。
地すべり防止施設	抑制工	地下構造物のUAV点検は不向きである。ただし、地表面の施設や斜面、滑落崖周辺の状況については広範囲を効率的に把握できるとともに、変状がある箇所などは水平写真、俯瞰写真などから時期的な変化を的確に比較できる。また、集水井工や排水トンネル工では、照明装置を設けることで構造物内の状況を把握することができる。
	抑止工	地下構造物のUAV点検は不向きであり、施設のほとんどが地下構造物となる抑止工は、原則として目視点検が必要となる。ただし、アンカー工の受圧板やアンカーキャップ等の露出部については広範囲を効率的に把握できるとともに、変状がある箇所などは水平写真、俯瞰写真などから変化を把握することができる。
急傾斜地崩壊防止施設(雪崩防止施設含む)	擁壁工等	擁壁工等は家屋に隣接し、家屋の上空を近接して飛行するため、安全性の課題とともに飛行許可申請等の手続きが煩雑となりUAV点検は不向きであるため、目視点検が必要となる。
	法面工	UAV点検が効果的な施設で、施設や斜面の全体像を効率的に把握することが可能である。また、アンカーキャップや法枠など施設の変状がみられる箇所については、家屋から適切な距離をとった上で、水平写真、俯瞰写真などを撮影することにより、時期的な変化を的確に比較できる。なお、都市部での飛行では、改正航空法に伴って点検ごとの飛行許可申請や地元住民の理解を得る措置などが必要となる。
臨時点検		地震・豪雨後に実施される臨時点検はUAV点検が効果を発揮するケースで、広範囲を短時間で、かつ安全に被災状況等を確認できる。飛行では、ウェイポイントフライトによって、垂直写真、水平写真、俯瞰写真、パノラマ写真などの画像を得ることができる。ただし、「目視外飛行」となる場合は、改正航空法に伴い飛行許可申請等の手続きが煩雑となる。

(2) 点検データを一元管理すると共に、点検データの整理や調査報告様式への出力を容易にする電子台帳の開発

砂防施設の点検台帳は多くが紙媒体でのデータ管理となっており、電子化が必要である。一方、各種点検データ取得はデジタル写真データや動画データ、あるいは点群データなどの3次元データなど、電子化が進んできたが、調査報告のとりまとめ様式は紙媒体での出力を想定したものとなっており、データ管理状況とちぐはぐであるだけでなく、とりまとめに人的な手間を要しており、省人化のためにはこれらデータの取り扱いや台帳とりまとめにかかる手間を排す必要がある。そのため、過去の砂防施設台帳データや新規に取得したUAV等による点検データを蓄積・管理する電子プラットフォーム(台帳)について試行的に作成し、省人化寄与度について検討を行った。

2. 点群データを用いた変状自動抽出の検討

変状を自動で抽出するシステムを後述するデータプラットフォームに実装することを目的として、2時期点群の差分解析により、砂防施設の欠損や摩耗・洗掘を自動抽出する手法について実験を行った。

(1) 変状自動抽出の流れ

点群を用いた変状の自動抽出の流れを図-2、図-3に示す。まずUAVによる撮影により得られた画像データから、SfM処理によって点検対象となる砂防施設を範囲に含んだ3次元モデルを作成する。次に、2時期のデータ間で不動点となる平面、即ち砂防堰堤の部分をRANSAC法と呼ばれる手法で推定し、当該部分を分割して抽出する。次に、点群を2時期のデータで比較するために、ICP法での位置合わせ(レジストレーション)を行う。最後に点群

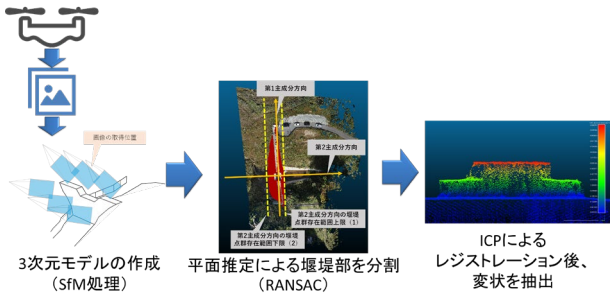


図-2 UAV点検の流れ

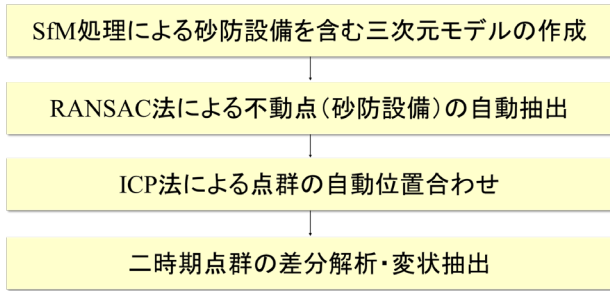


図-3 UAV点検における変状自動抽出のイメージ

同士の差分を解析し、変状部分を抽出する。これらの流れを自動で行うことが可能かどうか、検討を加えた。なお本研究においてはこれらの第1段階となる3次元モデルの作成自動化については、十分に実用化が可能な既知の技術として、検討を行わない。

**(2) RANSAC法とICP法による砂防施設の自動抽出と点群の位置合わせ**

まず、2時期の点群で小さな変状を正確に抽出するためには、差分解析の前に、点群同士の位置ずれを最小化しておく必要がある。本研究においてはこの作業を自動で行うことができるかどうか、データ処理方法としてICP (Iterative Closest Point) 法を採用した。これは、3次元空間中の点の集合が2つ与えられた時について互いに重なるように各点を移動(レジストレーション)させるもので、最近接点との平均二乗誤差が最小になるように、回転と平行移動を繰り返し、自動で位置合わせを行うものである。なお、本手法で位置合わせを行う際には、2時期でほぼ変化のない不動点を指定する必要があることから、砂防施設の構造体がそれにあたると考え、点群から人工的な平面形状を抽出可能なRANSAC (Random Sample Consensus) 法により、砂防堰堤の特に人工物平面を自動抽出することとした。本手法は、観測地に外れ値が含まれているときに、外れ値の影響を抑えることを目的としたロバスト推定と呼ばれる方法の一つで、観測値からランダムにサンプリングを行ったデータの中から最適なパラメータを推定する処理を繰り返し、その中で最良の推定結果を出力する方法である。本研究では人工物平面を抽出するため、多数の点群の中から平面の存在を仮定した上で、ランダムに抽出した3点から仮の平面を生成し、



図-4 RANSAC法による砂防設備の抽出結果

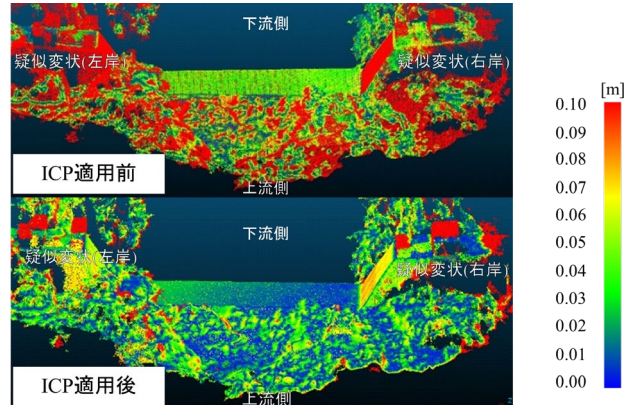


図-5 点群を回転させた場合の差分解析結果 (上段:ICP適用前, 下段:ICP適用後)

その平面から一定距離内の点数を数えることを繰り返し、点群内における平面を高速に得る処理を行った。得られた抽出結果の例を図-4に示す。

また、本研究では作成された2時期の点群の位置情報が大きくずれていた場合にも、同手法が有効であることを示すため、元の点群の3次元位置を手動で1.6°回転させ、擬似的に変化のある点群を作成した。この点群データを用いてICP手法により位置合わせ及び差分解析を行った結果を図-5に示す。ICP手法による位置合わせを行わなかった場合には全体的に0.1m以上の差が生じているのに対し、ICP適用後には全体的に誤差が軽減されていることが確認された。

これらの点群に対する処理は機械的に実施される手法であることから、後述するデータプラットフォーム等における処理ソフトウェア等に組み込むことにより、自動化が可能であることが確認された。

**(3) 2時期点群の差分解析による変状抽出**

砂防堰堤周辺に変状(袖部の欠損等)を想定した段ボールを配置した状態と、配置前の状態とで、点群を作成し、上記の処理を行った上で差分解析による変状抽出をテストした。図-6に差分解析結果を示す。点群同士の差が10cm以上ある部分を赤色で着色しているが、疑似変状に見立てた段ボールが正確に抽出されており、加えて、前後で変化がないと思われる周辺の部分について、若干の着色がある部分も見受けられるが、概ね変化がない平面として抽出されていることが分かる。これにより、前



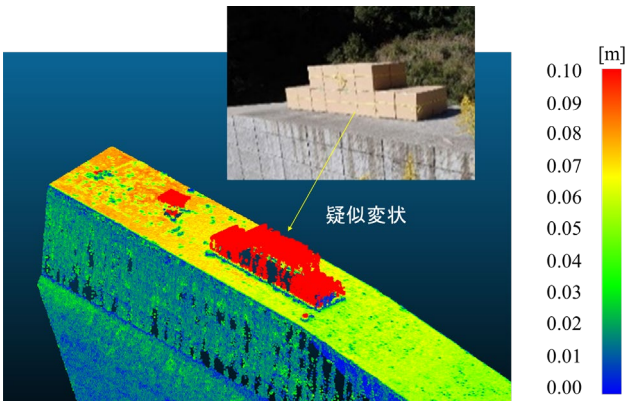


図-6 2時期点群データの差分解析結果

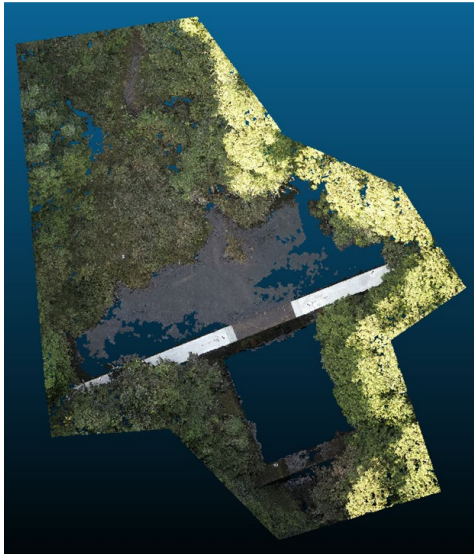


図-7 堆砂敷変化抽出に使用した点群

後の点群をほぼズレなく、自動的に処理する手法により比較し、変状を抽出することが可能であると確認された。

### 3. 点群データを用いた堆砂量自動算出の検討

#### (1) 解析手法

砂防堰堤における堆砂敷の変化について、点群データから自動で抽出・算出するための実証を行った。解析手法は、第2章に示す、変状の抽出手法と同様に、「UAVによるデータ取得」、「SfM処理による3次元モデルの作成」、「2時期点群の位置合わせ」、「差分解析」の順とした。

#### (2) 解析結果

解析には、第2章第2節で砂防施設を自動抽出した点群を使用した。簡単のため手動で範囲を区切った後、解析に使用した点群を図-7に、ICPレジストレーションを行った後に差分抽出を行った解析結果を図-8に、ICPレジストレーション後の断面図の例を図-9に示す。なお、今回は堆砂域に擬似的に段ボールを設置することにより精

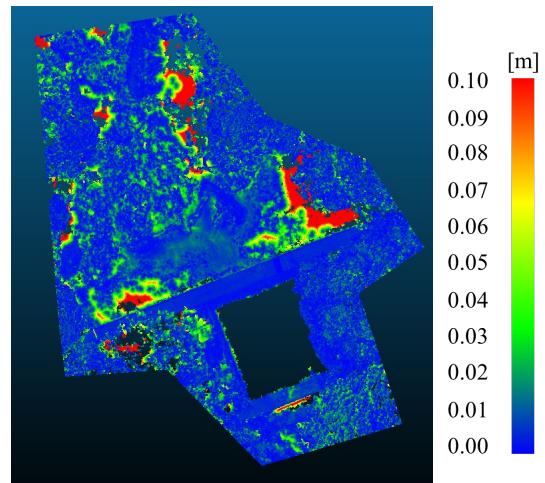


図-8 ICPレジストレーション後の差分抽出結果

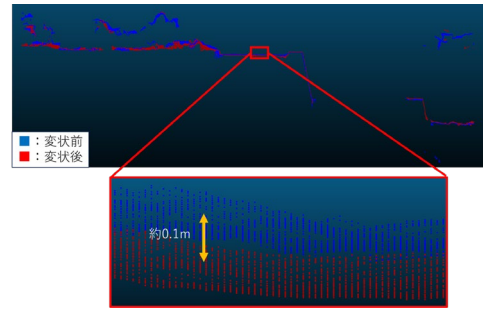


図-9 ICPレジストレーション後の断面例

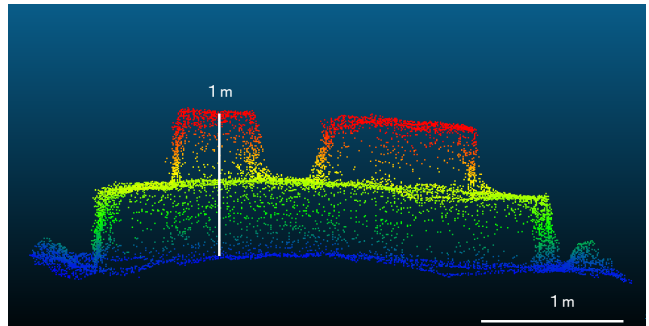


図-10 疑似変状の抽出状況の例

度を検証した。疑似変状の抽出状況を水平で見た図の例を図-10に示す。結果として、ICPレジストレーションを行った点群の比較では、2時期点群の不変化点の差分は数cmオーダーと、十分に小さくなることが分かり、加えて堆砂域における地形変化、即ち堆砂量変化をほぼ正確に把握することが可能であることが分かった。

### 4. UAV点検データを一元管理する電子台帳の開発

現在主流である目視点検による砂防施設の巡視データと、UAV点検による巡視データの双方を蓄積させるためや、維持管理上比較的頻繁に参照すると思われる砂防施設台帳等の情報を一元管理し効率的に活用するための、電子台帳の開発を行った。電子台帳の様式作成にあつ

ては、過年度に実施された設備点検台帳の様式を参考にした。

(1) 台帳により蓄積される情報の整理

UAV概略点検、即ち画像による点検に際し、取得されることが必要かつ蓄積されることが望まれる情報を整理した。整理にあたっては、SfM解析による点群データやオルソ画像作成を視野に、近年のUAV汎用機における自動操縦ルート設定方法も踏まえ検討を加えた。電子台帳の様式としては、砂防設備点検票、異常箇所概要図、写真帳、変状進行性確認票のほか、フライト諸元等とし、フライト諸元には、写真撮影の際の3次元座標とカメラ方位角のほか、オルソ撮影のためのオーバーラップ率・サイドラップ率・カメラ角度・飛行高度・地上解像度を記録するものとした。これにより、過年度に撮影された画像と画角その他情報が同等の画像を蓄積することが可能となり、効率的になると考えられる。

(2) 電子プラットフォームの試作

前述した電子台帳を自動で出力可能かつ、点検結果の蓄積・閲覧が可能となる電子プラットフォームを試作した。UAV画像を取り込んだ際に、画像の位置情報EXIFデータ・飛行ログデータの取り込みが可能であり、画像の位置情報と過年度の類似画像抽出機能やユーザーによる分類機能を実装した。また、既往の3次元データビューアの機能も活用し、点群を表示し、画面分割による比較、標高色分け等が可能にした(図-11)。加えて、砂防施設の3次元モデルを表示すること及び、モデル上に3次元ピンを設定し、変状の状態、変状写真をピンと紐付けて管理できる機能を開発した(図-12)。さらに、写真情報は整理して管理され、過年度または多時期の画像を比較して閲覧できる機能を実装した(図-13)。最後に、施設毎の台帳をXLS形式で出力することで、手作業による点検台帳に比べ効率性・性能・安定性・視認性が高まるかどうか検討した。

結果として、砂防設備の点検とデータ整理・台帳作成にかかる時間を1施設あたり約70分低減することができた。これは、従来手法によるものと比べ、約37%の時間短縮に相当するものと試算された。また、点検台帳作成労力についてはシステム操作の習熟につれ向上されること、台帳作成・出力の前段階として写真取り込みを行った際に適切に写真をグルーピングし、グループ名を適切に設定しておくことなどの習熟性が重要であることが分かった。また、実際に運用を見越してシステム構築する際には、扱うデータの重さが問題になる可能性があることから、端末性能に留意することや、サーバを設置するなどして適切にデータ管理を行うことなどが必要であることが明らかになった。視認性については、3次元空間で砂防施設や変状等を可視化することで、点検情報や変状の視認性が高まり、変状の把握や過年度の結果との比

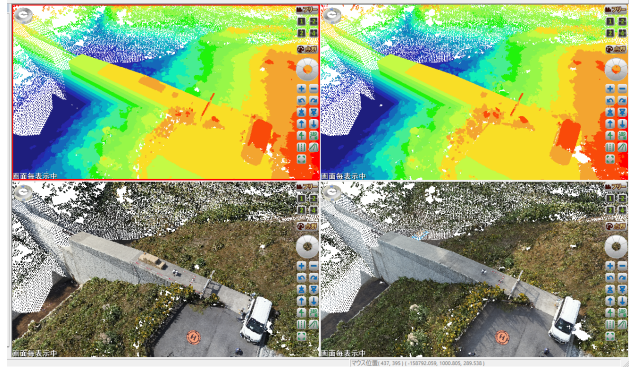


図-11 点群表示機能の例

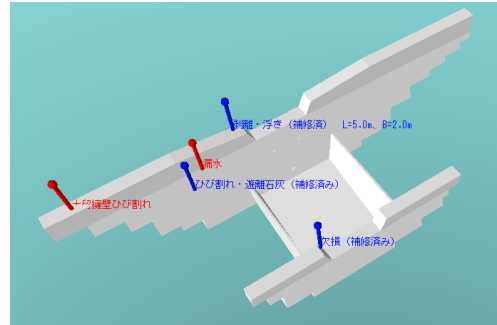


図-12 砂防堰堤表示と3次元ピン表示の例



図-13 写真比較表示画面

較に有効であることが明らかとなった。

5. おわりに

本研究によりUAV点検を効率化するためのデータプラットフォームならびにICPを用いた変状自動抽出技術の有効性を確認できた。今後の課題として、事務所実装のためのシステム開発、運用を想定したデータプラットフォームの機能改善、GNSS精度の低い点群への対応検討や堆砂敷の実際の変化に対して本手法を適用し実用性の確認をすることなどが考えられる。

謝辞：本検討課題においてはアジア航測(株)に受託いただきご尽力いただいた。また、国土技術政策総合研究所土砂災害研究部の竹下航氏(現：紀伊山系砂防事務所)、水流竜馬氏に有益なご意見をいただき検討を進めることができた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1)国土交通省砂防部保全課：砂防関係施設点検要領(案)；令和4年3月

# GNSSとUWBによる屋内外測位法の融合による位置検知

中川 豊<sup>1</sup>・東野 武史<sup>1</sup>

<sup>1</sup>奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 (〒630-0912 奈良県生駒市高山町8916番地の5)

**概要:**ヒトやモノの位置を測定するReal Time Location System (RTLS) には, Global Navigation Satellite System (GNSS)衛星の電波を使用するものと, GNSS衛星の電波が届かない場所で使われるIndoor Positioning System (IPS: 屋内位置測位) などがある. IPSで活用されている通信規格の一つであるUWB (Ultra Wide Band) は, その広い帯域幅と短いパルスにより高い時間分解能をもち, 省電力で屋内環境での精密な測距と測位を可能にした. 本稿ではGNSSとUWBを融合することで屋内の位置をGNSSと互換する座標系に合わせる方法を示す. 提案法により屋内ナビゲーションやスマートビルディング, 救急救命, ユーザ参加型屋内ゲームなど多岐にわたる応用分野において, 新たな体験と可能性を提供することが可能になる.

キーワード RTLS, GNSS, IPS, UWB

## 1.はじめに

位置情報サービスlocation-based services (LBS)は,主にスマートフォンやタブレットなどの携帯機器に搭載されここ数年で急速に広まっている. UAV とUWBを融合した空中ロボットのローカライゼーションの精度を分析した研究なども見られる<sup>1)</sup>. 著者らが提案する位置情報のプラットフォームでは,シームレスな測位を実現するために,従来の全地球航法衛星システム (GNSS) に超広帯域 (UWB) 屋内測位システムを追加し,2つの同期データを取得するデータフュージョンにより,ナビゲーションソリューションを継続的に地図上で提供することができる.本稿では特に,UWB測位システムとその環境に対する挙動に注目する.取得されたデータとリアルタイムの測位推定を詳細に分析・比較を行う.GNSSとUWBを融合した屋内/屋外歩行者ナビゲーションに関する研究はあるが,ToA (Time of Arrival) 測位を利用している<sup>2)</sup>.一方著者らの提案する測位アルゴリズムは,到着時間差 (Time Difference of Arrival: TDoA)を算出・統合して高精度位置測位を行う手法で構成される.実機での評価を通じて,UWB信号に用いたTDoA方式による測位に致命的な劣化を与えることなく実現し,地図アプリケーション上に表示可能であることを示す.

## 2. 提案手法

### (1) GNSS座標系

GNSSの代表的なGPSで採用されている座標系はWGS-84と呼ばれる座標系である.WGS-84系は(X, Y, Z)で表され

る3軸の直交座標系で一般的には地球中心・地球固定 (ECEF: Earth Centered Earth Fixed)座標系に分類される.主な座標系としてECEF座標と平面直角座標があるが,受信機(ユーザ)の位置を表すような場合は直交座標系よりも測地座標(緯度, 経度, 高度)で表したり,ある地点からの位置ベクトルとして表した方が便利な場合が多い.このため本稿では屋内測位において地図上,つまり測地座標で表現することとする.なお直交座標系と測地座標は相互に変換が可能である<sup>3)</sup>.

### (2) 屋内座標と平面直角座標

屋内測位とはGNSSの電波が届かない施設内や地下街などでも現在地の情報を取得できる技術のことをいう.屋内測位の主な手法にはWi-Fi, ビーコン, RFID, IMES, UWB, 地磁気, 音波, 歩行者自律航法, 可視光などがあり,位置情報の精度向上やスムーズな測位のために複数の手法を組み合わせる場合もある.一般に屋内測位で得られた座標は任意の原点を基準にした座標であり,GNSS座標系とは互換しない.一方,平面直角座標系は,日本国内を測量するために策定された系であり,位置・方向・距離を平面上に投影することで測量計算を簡易にする.全国を19に区分した系をもつ.屋内測位で得られたローカル座標を平面直角座標系に互換させることで,屋内座標をGNSSを使用するアプリケーションで直接利用可能となる.

### (3) UWBを用いた屋内測位

UWBは幅広い周波数帯を利用した無線通信規格である,3.4~4.8GHzのローバンドから7.25~10.25GHzのハイバンドまでの周波数帯を使用する.UWBは電波の届く時間を

計測するため、設置台数が少なくても高精度な計測が可能である。UWBによる屋内測位の精度はデバイス間の距離をパルス波を用いて数cmから十数cmの精度で測距を行う事ができる<sup>4,5)</sup>。UWBはナノ秒オーダーのインパルス信号であり、信号伝搬の往復時間から距離を推定する。また他の無線通信との干渉が少なく消費電力も少なくて済む、絶対位置を持つ複数の地上センサと移動端末がUWBで測距を行い、高精度に移動端末の位置を検知する位置検知システムが検討されている<sup>6)</sup>。

### 3. 実験方法

屋内と屋外での位置測位には、異なる技術が必要である。リアルタイム位置測位システム (RTLS) には、GNSS衛星からの電波を使用する屋外位置測位と、その電波が届かない屋内領域で使用される屋内位置測位がある。本稿ではGNSS測位によって得られた受信信号を前提にして、UWBによるTDoA方式を用いた測位について計算機シミュレーションと実測を行った<sup>7),8),9)</sup>。

#### (1) 構成

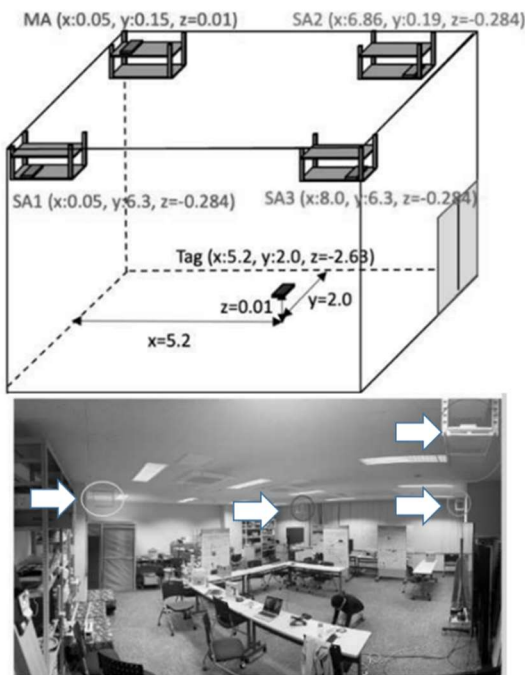


図 1 実験環境の構成

表 1 UWB モジュールの諸元

UWB module	LBUA0VG2BP
Standard, channel	IEEE802.15.4a, ch9
Wired interface	USB-serial
Wired bit rate [Mbps]	3

実験環境の構成を図1に示す。図1の上は所属研究室の天井に設置した4つのAnchorと、床の上10cmに設置したTagの配置状況を示す。各Anchor およびTag に示す数字は座標 (x, y, z ; 単位 m) であり原点を左上の隅とする。図1の下は実験環境の写真であり4つの矢印がAnchorである。実験に使用したUWBモジュールの諸元は表1のとおりである。

#### (2) UWBによる屋内測位の特徴

UWBはナノ秒オーダーのインパルス信号であり、通信の往復時間から伝搬距離を高精度に推定できる。この特長を活かし、絶対位置を持つ複数の地上センサと移動端末がUWBで測距を行い、高精度に移動端末の位置を検知する位置検知システムが検討されている<sup>10)</sup>。

#### (3) UWBを用いた屋内3次元測位

ToA 測位の場合、三次元空間の位置と、送受信機間の時計誤差の4個が未知数となる。このため、最低4個の距離観測値を使用して、重み付き最小自乗法により、これら4個の未知数の値を推定する。

一方、TDoA 測位では、3 個以上の送受信機間の距離差を使用して、三次元の位置を推定する。なお、TDoAでは送受信機間の時計誤差は、距離差算出の過程で相殺されるため、推定する必要がない。すなわち、TDoAでは、三次元空間の位置からなる3 個が未知数となる。また、距離差のみの観測の場合でも、TDoAでは測位可能である<sup>6)</sup>。

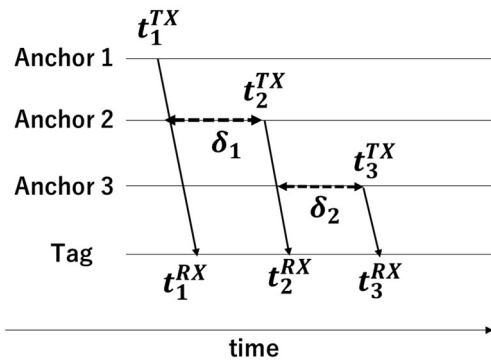


図 2 TDoA 方式におけるAnchorとTag間のメッセージング

図2に複数のAnchorとTag間のメッセージングを示す。Anchor群は、共通の時間軸で動作し、Tagの時間軸とは非同期である。送信時刻  $t_1^{TX}$  を記録したAnchor1のメッセージは、TagとAnchor2で受ける。Anchor2は待機時間 $\delta_1$ の後、送信時刻  $t_2^{TX}$  を記録したメッセージを送信する。以上を繰り返すことで得られた時刻から、Anchor1とTag およびAnchor2とTagの間の伝搬にかかる時間差は、 $t_2^{RX} - t_1^{RX} - (t_2^{TX} - t_1^{TX})$  と表せる。簡単

のためクロック周波数 オフセットを無視した。

Tagで到着時間差を観測した後、ガウス・ニュートン法 (GN) を用いて測位解を算出する。GN法ではアンカーの配置による二乗誤差の勾配の分布形状や雑音を含む観測値を入力とすることで、不確定な跳躍が測位解に発生することが知られる。そこで、反復計算に用いる初期値として直前の測位解を採用することで、応答時間を短縮した。さらに、反復計算中の修正ベクトルの大きさを監視し、跳躍・収束・その他の3つの状態に分ける。跳躍が発生した時に初期座標に変位量を付加して反復計算を再開することでその発生を抑制した。

(3) ローカル座標と平面直角座標の融合

GNSSで得られる座標値は、一般には地球の重心に原点を置いたWGS84座標系が使用されており、地球の重心を原点とする三次元直角座標で表現する。しかし、近似した回転楕円体を採用しなければならないほどの広大な屋内領域を対象にすることはないため、本稿では平面直角座標系を採用する。本稿ではまず、屋内測位の原点となるAnchorのGNSS座標系における座標を定め、平面直角座標に変換する。さらにUWBで求めた屋内測位のローカル座標(x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>)を平面直角座標に変換したのち地理座標で表現する。

ここで、平面直角座標とローカル座標の軸が一致しない場合は、適当な回転と対称変換を施す必要がある。図1に示す実験環境におけるローカル座標は、真西方向にx軸、真南方向にy軸を設定したため、平面直角座標系（真北方向にx軸、真東方向にy軸）に合わせるには、90度回転の後、x軸のみ対称変換を行うか、y軸のみ対称変換の後、-90度の回転を行うかの二通りの方法がある。後者を数式で表現する。原点の平面直角座標を(x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>)とし、屋内測位で得られた座標を(x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>)とすると、変換後の平面直角座標(x<sub>3</sub>, y<sub>3</sub>)は以下の式で表される。

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$\theta = -\frac{\pi}{2}$  とすると

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} y_2 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

4. 屋内測位結果と地図座標での表現

図3にUWBを用いた屋内測位の測位結果例を示す。細かな偏差はみられるものの、Tagが部屋内を一周する様子がわかる。GN法においては、不確定な跳躍によって得られた測位解を排除している。図4にローカル座標に座標変換を処理を与えて、平面図に表示した。実験室内を1

周し、部屋のドア付近に滞在していることがわかる(破線部分)。 図5に地図表示アプリケーションで表示した例を示す。

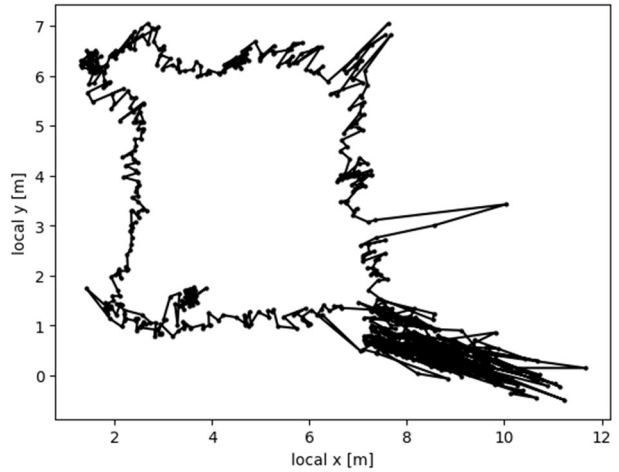


図 3 測位結果例

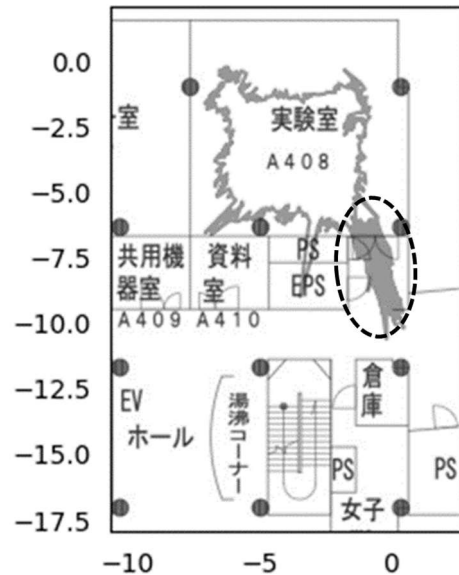


図 4 平面図への表示結果



図 4 地図アプリへの表示, Leaflet©OpenStreetMap

## 5. まとめ

既存の一般的な屋内位置推定手法は、あらかじめ屋内環境のサイトサーベイを行い、その環境の信号強度マップなどを作成しておく必要があるため、その導入コストは非常に大きい。対して本研究では、モバイル端末のGNSS および UWB電波送受信機を用いることで、事前のサイトサーベイの必要がなく、特定の環境に依存しない正確な測位とナビゲーションを実行する手法を提案した。UWB 測位システムは、コストと信号伝送の両方の面で多くの利点があるため例えば、屋内と屋外の両方の限られた環境での視覚障害者向けの歩行者ナビゲーションなどの分野 図 5 地図アプリへの表示 Leaflet©OpenStreetMap

## 4. 今後の研究課題

本研究では測位解をGN法を用いて推定した。今後さらにカルマンフィルタ(KF)を適用し、精度を評価する予定である。本稿では位置推定の際に高さ方向は考慮しなかった。今後高さ方向を考慮した位置推定を行うことも検討している。またインパルス方式 UWBはIEEEのBAN規格にも採択されており体装着型の心電計や脈拍計など医療分野での生体計測データ収集のための通信インフラとしての期待が大きい。すでにスマートフォンにも搭載されはじめており災害時に対象空間での人体検知などの有効性の検証も検討している。

## 参考文献

- 1) Queralta, J. P., Almansa, C. M., Schiano, F., Floreano, D., & Westerlund, T. (2020, October). Uwb-based system for uav localization in gnss-denied environments: Characterization and dataset. In 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 4521-4528). IEEE.
- 2) Di Pietra, Vincenzo, Paolo Dabove, and Marco Piras. "Loosely coupled GNSS and UWB with INS integration for indoor/outdoor pedestrian navigation." *Sensors* 20.21 (2020): 6292.
- 3) 杉本, 尾崎[編著], GPS ハンドブック, 朝倉書店, 2010
- 4) 立本航平, 北之馬貴正, & 滝沢泰久. (2022). IR-UWB を用いた SmartFinder に関する精度検証と考察. 研究報告マルチメディア通信と分散処理 (DPS), 2022(25), 1-9.
- 5) 森流星, 北之馬貴正, 川田千尋, & 滝沢泰久. (2020). IR-UWB を用いた集約型自己組織化ノード位置推定方式とその実装評価. 情報処理学会論文誌, 61(7), 1238-1248.
- 6) 梅田周作, 平明徳, 栗田明, & 佐野裕康. (2021, August). UWB を活用した位置検知システムの位置検知頻度改善法. In IEICE
- 7) 徳永凜 (奈良先端大) ほか, ガウス・ニュートン法による IR-UWB を用いた動的測位, 電子情報通信学会, 2024 年総合大会
- 8) 依岡寛人 (奈良先端大) ほか, ガウス・ニュートン法による IR-UWB を用いた静的 3 次元測位, 電子情報通信学会, 2024 年総合大会
- 9) 中村康一郎(奈良先端大)ほか, カルマンフィルタによる IR-UWB 高精度測位, 電子情報通信学会 2024 年総合大会
- 10) 小菅義夫, 古賀禎, 宮崎裕己, 秋田学, & 稲葉敬之. (2015). TOA 測位と TDOA 測位の関連. 電子情報通信学会技術研究報告; 信学技報, 114(397), 79-84.