

**令和6年度  
国土交通省 国土技術研究会**

**概要論文集  
～一般部門＜安全・安心Ⅱ＞～**

**研究会1日目(12月5日(木)):A会場**

**16:00～18:15**

**研究会2日目(12月6日(金)):A会場**

**9:45～12:00**

令和6年度 国土交通省 国土技術研究会 プログラム

1日目(12月5日(木))			
研究発表会場			
会場	A 2号館共用会議室2A・2B	B 2号館共用会議室3A・3B	C 2号館共用会議室5
区分	○自由課題 ・一般部門(安全・安心Ⅰ) ・一般部門(安全・安心Ⅱ) ※国土技術開発賞受賞 技術報告含む	○自由課題 ・イノベーション部門Ⅰ ・一般部門(活力) ※SBIR建設技術研究開発 助成制度成果報告および 国土技術開発賞受賞 技術報告含む	○自由課題 ・アカウントビリティ部門 ・イノベーション部門Ⅱ ※SBIR建設技術研究開発 助成制度成果報告および 国土技術開発賞受賞 技術報告含む
9:00			
10:00	9:45～ 受付開始		
11:00	A1 10:15～12:00 一般部門 (安全・安心Ⅰ) ・審査課題:6本 ・報告課題:1本	B1 10:15～12:00 イノベーション部門Ⅰ ・審査課題:6本 ・報告課題:1本	C1 10:15～12:00 アカウントビリティ 部門 ・審査課題:7本
12:00			
13:00	A2 13:00～14:15 一般部門 (安全・安心Ⅰ) ・審査課題:4本 ・報告課題:1本	B2 13:00～14:15 イノベーション部門Ⅰ ・審査課題:5本	C2 13:00～14:15 イノベーション部門Ⅱ ・審査課題:4本 ・報告課題:1本
14:00	休憩(15分)	休憩(15分)	休憩(15分)
15:00	A3 14:30～15:45 一般部門 (安全・安心Ⅰ) ・審査課題:5本	B3 14:30～15:45 イノベーション部門Ⅰ ・審査課題:4本 ・報告課題:1本	C3 14:30～15:45 イノベーション部門Ⅱ ・審査課題:4本 ・報告課題:1本
16:00	休憩(15分)	休憩(15分)	休憩(15分)
17:00	A4 16:00～17:00 一般部門 (安全・安心Ⅱ) ・審査課題:4本	B4 16:00～17:00 一般部門(活力) ・審査課題:4本	C4 16:00～17:00 イノベーション部門Ⅱ ・審査課題:4本
18:00	休憩(15分)	休憩(15分)	休憩(15分)
18:00	A5 17:15～18:15 一般部門 (安全・安心Ⅱ) ・審査課題:4本	B5 17:15～18:15 一般部門(活力) ・審査課題:4本	C5 17:15～18:15 イノベーション部門Ⅱ ・審査課題:4本

2日目(12月6日(金))				
研究発表会場			特別講演会場	
会場	A 2号館共用会議室2A・2B	B 2号館共用会議室3A・3B	C 2号館共用会議室5	D 3号館10階共用会議室
区分	○自由課題 ・一般部門(安全・安心Ⅱ) ※SBIR建設技術研究開発 助成制度成果報告および 国土技術開発賞受賞 技術報告含む ○各局等提案課題	○自由課題 ・一般部門(活力) ※SBIR建設技術研究開発 助成制度成果報告含む ○各局等提案課題	休憩スペース ※14:00まで	○特別講演 ○表彰式
9:00				
	9:15～ 受付開始			
10:00	A6 9:45～10:45 一般部門 (安全・安心Ⅱ) ・審査課題:3本 ・報告課題:1本	B6 9:45～10:45 一般部門(活力) ・審査課題:4本		
11:00	休憩(15分)	休憩(15分)		
12:00	A7 11:00～12:00 一般部門 (安全・安心Ⅱ) ・審査課題:3本 ・報告課題:1本	B7 11:00～12:00 一般部門(活力) ・審査課題:3本 ・報告課題:1本		
13:00	A8 13:00～14:00 各局等提案課題 ・2本	B8 13:00～14:00 各局等提案課題 ・2本		
14:00				14:00～ 受付開始
15:00				15:00～16:00 特別講演
16:00				16:05～16:35 表彰式
17:00				16:35～16:50 受賞者記念撮影
18:00				

自由課題(一般部門<安全・安心Ⅱ>)

A会場 : 12月5日(木)16:00~18:15

セッション	発表順序	課題区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
A4	1	審査課題	16:00~16:15	令和6年能登半島地震TEC-FORCE派遣における災害調査のDX ~UAVを用いた三次元点群データ取得とその情報共有について~	九州地方整備局 福岡国道事務所 用地第二課	宮崎 優真
	2		16:15~16:30	火山噴火時の緊急調査プロセスに関するDXの推進	九州地方整備局 九州技術事務所 火山防災減災課	福永 みり
	3		16:30~16:45	気候変動による非超過確率1/10の湧水流量の発生頻度の変化の計算	国土技術政策総合研究所 河川研究部 水循環研究室	西村 宗倫
	4		16:45~17:00	電子国土基本図の3次元化に向けた取組	国土地理院 基本図情報部 地図情報技術開発室	長野 玄
A5	5	審査課題	17:15~17:30	平成30年北海道胆振東部地震後の厚真町における緊急対応タイムラインの取り組みについて	北海道開発局 函館開発建設部 今金河川事務所 美利河ダム管理支所	大川 紘
	6		17:30~17:45	能登半島地震の道路啓開における初動対応の記録 ~半島地域の道路特性を踏まえて~	北陸地方整備局 能登復興事務所	田中 義太郎
	7		17:45~18:00	河川護岸の変状や空洞化対策の検討について	中国地方整備局 太田川河川事務所 管理課	川本 優汰
	8		18:00~18:15	滝沢ダム放流設備遠隔操作の試行について	独立行政法人水資源機構 荒川ダム総合管理所 第一管理課	大崎 愛

自由課題(一般部門<安全・安心Ⅱ>)

A会場 : 12月6日(金)9:45~12:00

セッション	発表順序	課題区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
A6	9	審査課題	9:45~10:00	鉄筋コンクリート造建築物の躯体改造技術に関する研究	国立研究開発法人建築研究所 構造研究グループ	中村 聡宏
	10		10:00~10:15	宅地擁壁の耐震性能評価手法の開発のための有限要素法に基づく数値解析モデルの構築	国立研究開発法人建築研究所 国際地震工学センター	的場 萌子
	11		10:15~10:30	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	近畿地方整備局 琵琶湖河川事務所 流域治水課	佐々木 彩華
	12	報告課題	10:30~10:45	【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】 ※論文掲載なし 水ガラスを用いた木質内装の木目が見える準不燃塗装仕上げの開発	株式会社竹中工務店 技術研究所	杉田 敬太郎
A7	13	審査課題	11:00~11:15	道路管理の実務におけるDXの取組について 3次元点群データと統合型GISの活用	東京都 建設局 道路管理部 保全課	横山 隼佑
	14		11:15~11:30	那覇空港(A-7)誘導路改良工事について	沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所 空港工務課	山城 京大
	15		11:30~11:45	直轄国道におけるコンクリート舗装の追跡調査と設計法への示唆	国立研究開発法人土木研究所 道路技術研究グループ 舗装チーム	横澤 直人
	16	報告課題	11:45~12:00	【国土技術開発賞受賞技術報告】 ※論文掲載なし 高耐久超低騒音舗装 ~損傷対策型小粒径ポラスアスファルト混合物の開発~	首都高速道路株式会社 技術部 技術推進課長	藤治 賢太郎

# 令和6年能登半島地震 TEC-FORCE 派遣における災害調査のDX ～UAVを用いた三次元点群データ取得と その情報共有について～

宮崎 優真<sup>1</sup>・南竹 知己<sup>2</sup>・米元 博之<sup>3</sup>・猪井 知明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>九州地方整備局 福岡国道事務所 用地第二課 用地第二係員（〒813-0043 福岡県福岡市東区名島3-24-10）

<sup>2</sup>九州地方整備局 九州技術事務所 副所長（〒830-8570 福岡県久留米市高野1-3-1）

<sup>3</sup>九州地方整備局 延岡河川国道事務所 河川管理課 課長（〒882-0803 宮崎県延岡市大貫町1-2889）

<sup>4</sup>九州地方整備局 熊本河川国道事務所 建設監督官（〒861-8029 熊本県熊本市東区西原1-12-1）

令和6年能登半島地震により被災を受けた自治体に対し、国土交通省九州地方整備局より延べ2,270名のTEC-FORCEが派遣された。2024年1月14日（日）～1月20日（土）に派遣された九州地方整備局のUAV航空隊（いわゆるBlueHawks）による被災状況調査班（ドローン（砂防））が取得した三次元点群データ、オルソモザイク、スフィア（360°）画像並びに現地動画のデータと情報共有にかかるDXの効果について報告する。また、被災地の迅速で正確な状況把握を可能にしたUAVの運用及び取得したデジタルデータの共有方法について解説する。

キーワード UAV, 能登半島地震, DX, 災害復旧, 三次元点群データ, スフィア（360°）画像

## 1. はじめに

### (1) 令和6年能登半島地震の概要

2024年1月1日16時10分頃、石川県能登地方（輪島の東北東30km付近）深さ16kmでM7.6の地震（最大震度7）が発生し、石川県輪島市及び志賀町で震度7を観測したほか、能登地方の広い範囲で震度6弱以上の揺れを観測するなど甚大な被害が発生した。

### (2) 被害状況（人的・住家）

令和6年能登半島地震により、死者401名、負傷者1,740名（消防庁情報：2024年10月1日14:00時点）、住家被害においては全壊6,421棟、半壊22,823棟、一部破損103,768棟（消防庁情報：2024年10月1日14:00時点）避難者数348名（内閣府情報：2024年10月1日14:00時点）<sup>1)</sup>。

## 2. 被災状況調査の概要

2024年1月14日（日）～1月20日（土）に北陸地方整備局を通じて国土交通本省より、能登半島にてUAV（Unmanned Aerial Vehicle（無人航空機））を用いた被災状況調査の依頼があり、TEC-FORCE（ドローン班（砂

防））として派遣された。

依頼内容は3ヶ所6地点の砂防・河道閉塞調査。また、派遣期間中に海岸津波調査としてさらに3地域が追加された。（図-1）



図-1 調査箇所

市ノ瀬町（輪島市）・寺地川（輪島市町野町）・鈴屋川（輪島市町野町）・金蔵川（輪島市町野町）においては、法面崩落、河道閉塞ならびに湛水状況の調査。（金蔵川（輪島市町野町）においては土砂崩落により調査箇所への到達不可のため未調査。）

清水町（珠洲市）・仁江町（珠洲市）においては、国

道249号沿岸部の海岸隆起,大規模土砂崩落地,逢坂トンネル崩落地の調査.

宝立正院海岸(珠洲市)においては,堤防被災状況調査及び津波被害調査.

各地区,三次元点群データ(sfm),スフィア(360°)画像,遠景・近景動画の3種での撮影を行った.

### 3. 現地の状況

七尾市,穴水町より家屋倒壊・損壊が見られ,輪島市,珠洲市では木造建物は全壊または半壊.非木造建物においても1階部分が潰れるなど,交通状況は非常に悪く,道路の陥没・崩落,橋梁すりつけ部分の段差,被災現場へ向かう車両の渋滞などの影響により活動拠点(富山県高岡市内)から現場まで片道4~5時間を要した.(写真-1)



写真-1 被災状況(珠洲市某所)

### 4. 調査に向けて

作業期間は移動日を除き4日.ただし,悪天候の影響により,実質の調査可能日数は2.5日の見込みと非常に厳しい状況であり,移動時間や燃料,撮影箇所の優先順位等総合的に鑑みて,以下行程にて調査を実施した.(図-2)

2024年1月16日(火)	現地調査1日目	輪島市被災箇所調査・道路状況確認
2024年1月17日(水)	現地調査2日目	珠洲市被災箇所調査・海岸調査
2024年1月18日(木)	内業	SVT作成・動画伝送
2024年1月19日(金)	現地調査3日目	輪島市被災箇所調査・道路被災調査

図-2 調査実施行程

## 5. 調査内容・実施

### (1) 現地スケジュール

調査箇所における基本的な作業ルーティンは以下のとおりである.

- ・フライト箇所の安全性確保.
- ・機体準備(組立,点検),撮影対象の把握
- ・フライト
  - 1.全体俯瞰空撮・現況把握のための偵察フライト
  - 2.動画(遠景)
  - 3.動画(近景)
  - 4.スフィア(360°)画像
  - 5.三次元点群データ(sfm)及びオルソモザイク用画像
- ・片付け,最終確認

### (2) 調査内容

#### a) 2024年1月16日(火)

- ・鈴屋川(輪島市町野町)

悪天候が予想されていたが,辛うじて天候が回復し,飛行可能な状況となったため近景・遠景動画,スフィア(360°)画像,三次元点群データの取得を行った.

法面崩落が広範囲にわたって発生し,鈴屋川上流では河道閉塞の確認.土砂が田に流れ込み湛水被害も見られた.

- ・寺地川(輪島市町野町)

法面崩落が各地で発生し,土砂・立木流出により道路の寸断を確認.また,山腹において複数のクラックをスフィア(360°)画像で確認.(図-3)



図-3 鈴屋川(左)・寺地川(右)のスフィア(360°)画像

#### b) 2024年1月17日(水)

- ・宝立正院海岸(珠洲市正院,直地区・上戸地区・宝立地区)

国土交通本省治水課海岸室による権限代行区間の調査依頼.津波による浸水範囲の確認並びに堤防護岸・消波ブロックの被害調査.約5,100mにおいて堤防護岸損壊を確認.(図-4)



図-4 宝立地区および見附島（写真右奥）のスフィア（360°）画像

c) 2024年1月18日（木）

- ・市ノ瀬町（輪島市）

山頂から約1,000m、幅約300mという大規模土砂崩れが発生。複数箇所において、土砂ダム、河道閉塞ならびに湛水被害を確認。（図-5）



図-5 市ノ瀬町の三次元点群データ

- ・長橋漁港（珠洲市）

国道249号沿岸部清水町・仁江町へ向かう道中にて、海岸隆起の激しい長橋漁港を通過したため追加調査。

最大4mほどの隆起による海岸や漁港の干上がりを確認。震源地から約2kmと非常に近いが、地盤が強い地域のため家屋被害はほぼ見られなかった。（図-6）



図-6 長橋漁港のスフィア（360°）画像

- ・清水町（珠洲市）・仁江町（珠洲市）

国道249号沿岸部における大規模土砂崩れ・地すべり並びに道路崩落箇所調査。

飛行距離は約2,800m、高さ約200mという長距離かつ高さのある現場であり、海岸沿いの影響による強風、付近

では家屋が土砂に流され捜索活動中という、UAVの運用としては非常に厳しい状況であった。（図-7）



図-7 国道249号（清水町～仁江町）の三次元点群データ

## 6. 取得データの処理・作業について

今回取得した各データの処理、作業の流れ、所要時間、特徴は以下のとおりである。（図-8）

### (1) 三次元点群データ

数百枚の静止画（約 0.8GB）を携帯電話回線を用いてクラウドサービスへアップロードすると、AI による三次元化処理が開始され、処理が完了すると閲覧・計測が可能な URL が発行される。所要時間は約 1 時間であり、関係機関への URL の送付により三次元点群データが共有される。

なお、被災地は通信事情が厳しいという情報を得ていたため、調査箇所に向かう途中、3 キャリアの通信可能エリアを予め把握、帰還時に通信可能エリアへ戻って、データのアップロード処理と確認を実行した。

### (2) オルソモザイク画像

三次元点群データの処理と同時にクラウドサービスでデータ処理される。完了後に URL が返送され、閲覧が可能となる。

### (3) スフィア（360°）画像とSVT

複数枚のスフィア（360°）画像（約0.1GB）を用いて上空から複数視点で360°を見渡せるSVT（Sky Virtual Tour）を作成し（約1GB）、大容量ファイル転送システムで事務所PCへ送付。整備局ホームページサーバへのアップロードにより、インターネットからSVTの閲覧が可能となる。

所要時間は約3時間。内訳は作成に約1.5時間、転送・ホームページアップロード作業に約1.5時間（通信状況による）。ホームページへのアップロード作業を職員ではなく企業等に委託している場合は、ホームページの作成や修正を行うため追加で1～2日を要する可能性がある。

#### (4) 動画 (HD)

現地で撮影した複数の動画データは、被災地の通信事情が悪かったことから、記録媒体で北陸地方整備局 金沢河川国道事務所へ持込み、DXネットワークを経由して、国土技術政策総合研究所DXデータセンターへ保存することにより、取り急ぎ省内で動画ファイルを共有した。

動画データは容量が重く、HD画質・15分程度のフライトでも10GB以上となるため、通信事情が悪い被災地からのデータ伝送は非常に困難である。複数の動画データを関係機関で共有するには半日以上の時間が必要であり、4Kなどの高画質動画ではさらに時間を要する。また、ダイジェスト版作成等の編集作業にも時間を要するため、例えばスターリンク衛星等、被災地から高速通信が可能な手段が求められる。

	三次元点群データ	360° 画像(スフィア)	動画(HD)
データ取得 所要時間	約1時間	約3時間	半日~1日
サイズ	約0.8GB (数枚の静止画)	約1GB (数枚の360° 画像)	約14GB (数個のHD動画)
作業	三次元化処理(Pix4D) ↓ クラウドサーバのURL共有	SVT作成(1.5時間) ↓ 大容量システムにて 事務所PCへ送付 ↓ アップロード(1.5時間)	事務所へ持込み ↓ DXデータセンターへ送信
特徴	・AIによる三次元化自動処理 ・携帯回線でクラウド送付可	・SVT作成に時間を要する ・個人でアップロード可能であれば早い	・メモリ等を利用して事務所へ持込み必要 ・ダイジェスト等の編集作業に時間を要する

図-8 各データ処理・作業の特徴

## 7. DXの効果

### (1) 迅速な情報共有

災害時において、上空からの被災状況把握は極めて有効であり、従来から防災ヘリコプターを用いたリアルタイム映像の共有やオルソモザイク画像の取得など、特に人が立ち入れない場所や広域の状況把握などについて大きな成果が得られていた。

その一方で、応急復旧や仮設に必要な「距離・高さ」「面積」や崩落土砂量などの「体積」などについては、人が現地に立ち入って計測を実施する必要があり、時間や費用がかかることや調査の安全性の担保についてが課題とされてきた。また、従来の動画による被災状況の調査についても、「任意の場所を任意の時間に確認できない」「被災箇所の全容を把握するために動画全ての確認が必要」「距離や面積、体積などの定量的に把握したい」などの意見が出るようになった。(図-9)

	従来	今回
方法	地上踏査・計測	UAV(ドローン)
データ	・三次元点群データ ・動画	・三次元点群データ ・スフィア(360°)画像 ・動画
利点	・手法が確立されている ・詳細な調査が可能	・短時間 ・安全 ・俯瞰視点
データ取得 所要時間	数日~数週間	20~60分
課題	・時間を要する ・立入制限区域では調査不可	・詳細調査は不可 ・電波状況に影響

図-9 従来手法との比較

それらの課題やニーズに対して、TEC-FORCE隊員がUAVを直接運用することで「短時間でデータ取得が可能」「三次元のデジタルデータが取得出来る」「組織内職員で手配が完結し、情報共有も迅速に出来る」など高度なデジタルデータ取得に至るまでのハードルが低くなった。UAVの運用により、ヘリコプターから取得した広域での被災状況に加え、被災箇所の近景動画や三次元点群データ、オルソモザイク画像、スフィア(360°)画像など様々なデータ取得が可能となり、全体把握だけでなく面積や体積の計測・土量算出・断面図作成・標高や勾配測定・任意視点での状況確認など用途に合わせた利活用が可能となった。

さらに、動画に比べて容量の小さな三次元点群データやスフィア(360°)画像を、現地や移動車両の中で作業・処理し、AIによる三次元化自動処理ソフトを使用することで、当日中のデータ共有を行えるようになった。(図-10)

利点	計測	面積・体積・土量算出 断面図作成・標高・勾配測定など
	短時間	取得: 20~60分 処理: 60分

図-10 三次元点群データの利点

今回の災害派遣においては、通信事情が非常に厳しい被災地でありながら、現地調査終了後わずか3時間半で被災地の三次元点群データを国土交通省内及び自治体・捜索救助等関係機関へ情報提供し、二次災害の防止等に活用された。(図-11)

### 調査期間中 ある一日の例

15:30	当日最後の現地調査開始
16:00	調査終了
帰還中の車内にて	・三次元点群データをクラウドサーバ(Pix4D)へアップし処理 ・スフィア(360°)画像によるSVT作成
19:20	宿着。三次元点群データ処理完了確認
19:30	三次元点群データURLを関係機関に送付共有完了

図-11 現地調査後3時間半で全国にデータ共有

### (2) 北陸地方整備局 能登復興事務所での活用例

九州地方整備局から出向した職員を通じて、北陸地方整備局 能登復興事務所において、取得データの活用例・利点等の聞き取りを行った。以下は職員の声である。

#### a) 被災状況の把握

スフィア(360°)画像を用いて、立入りが厳しい箇所の現地イメージの把握や、三次元点群データの計測機能による地形の把握、発注予定箇所の崩壊土量の算出等に活用した。操作も直感的にできるため、大いに役立った。

## b) 現地調査

未開の岬の調査（踏査）は非常に不安だったが、三次元点群データ等をあらかじめ閲覧することにより、通行可能なルートを事前にイメージでき、現地でも映像を確認しながら啓開できた。

## c) 地元説明会

資料が何もない状況だったが、俯瞰的な視点による写真のため、住民の方に対して工事用道路の応急復旧イメージを持ってもらえ、スムーズな説明を行えた。（図-12）

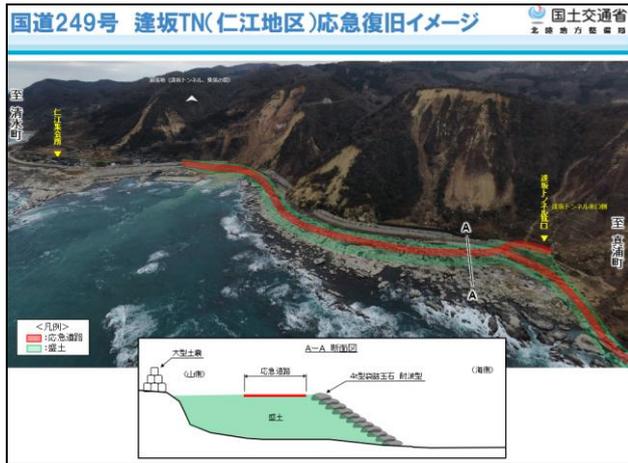


図-12 実際に使用した地元説明会資料

今回の災害派遣では災害対策車を九州から陸路で運び、データ処理や機体・システム整備で常に使用した。

## d) 三次元点群データの処理・作業を最優先に

動画に比べて大幅に容量の小さい三次元点群データは、全体把握だけでなく計測・土量算出・断面図作成・標高や勾配の測定など様々な場面で利活用がなされる点、処理スピードが非常に短時間である点を踏まえると、最優先に作業すべきである。リアルタイムを除く動画データの伝送など、容量が大きく時間を要する作業は後回しにすることでデータ共有を早く行える。



写真-2 現地調査中に遭遇した他機関より情報収集を行う

## 8. 災害調査のDXにおけるポイント

### (1) いち早いデータ共有のために

#### a) 被災地へ到達するためのルート選定

道路状況把握のため、北陸地方整備局との打合せで現地調査班から情報収集を行い、トヨタ通れた道マップ、複数ナビ（Google, Yahoo! 等マップ）の活用, X（旧 Twitter）等での関係機関の情報を用いて、被災地までのルート選定を行った。

また、既に現地入りしていたUAV部隊からの渋滞状況・所要時間などの聞き取り、現地調査中に遭遇した他機関（消防、警察、自衛隊、自治体）から直接情報を聞き取る手段も有効的であった。（写真-2）

#### b) 調査不可日でのデータ処理・作業

UAVは天候に左右されやすく、また北陸という地域柄降雪も発生していたため、調査前の天気予報では終日調査不可日が予測できた。終日作業日に充てることで、その日までに必要な調査箇所・データを隊員内で認識し、効率的に調査・データ取得を行った。

#### c) 機体整備・WEB会議が可能な車両の用意

移動中や天候回復までの待機中、天候不良日などに、車両内にてUAV機体の整備やデータ処理・編集、WEB会議などの作業が行える環境整備は非常に重要である。

### (2) UAV運用のコツ

#### a) UAV部隊の個別編成・運用

道路・河川被災調査部隊と合同で編成し、併せてUAV調査を行う方式は、一見効率が良い手段かと思われるが、UAVの飛行にあたっては「全体が俯瞰可能な見晴らしの良い場所」「調査箇所の真横ではなくやや離れた箇所」「付近に木々がない場所」など、地上からの調査班とは踏査箇所がやや異なってくるため、地上班とは分けてUAV部隊単体として個別の編成・運用が効率的である。

#### b) 緊急用務空域のフライトの理解

緊急用務空域とは、警察・消防活動等緊急用務を行うための航空機の飛行が想定される場合、UAVの飛行を原則禁止する空域を指定し、インターネット等に公示するものである。緊急用務空域での飛行にあたっては航空局への個別許可・承認（緊急時は電話可）の取得が必要であり、災害時であれば誰でも飛行可能ではない点を理解する必要がある。

緊急用務空域での飛行許可の取得により、通常では不可能なフライト方法（対地高度150m超, DID, 空港周辺など）にも対応可能である。

## 9. まとめ

従来、上空からの被害状況の把握においては、広域から狭域まで一元的にヘリコプターがリアルタイム映像の提供により担ってきたが、今回の災害派遣のようにTEC-FORCE隊員がUAVを運用することで、三次元点群データの取得による被災状況の定量的な把握や、ヘリコプターと比較して狭域なエリアでの上空調査部分をUAV部隊が受け持つことにより、ヘリコプターが得意な広範囲かつ概括的な被災状況調査について、より効率的に専念することが出来るようになると考えられる。

また、ヘリコプターによる広域の動画に加えて、近景動画・三次元点群データ・オルソモザイク・スフィア（360°）画像を組み合わせたSVTなど、多種のデータの取得により、様々な用途に合わせた利活用が可能となった。中でも三次元点群データについては、クラウドサービスによる三次元化自動処理ソフトにより、調査を実施した当日中の三次元点群データ共有が可能となり、今まで数週間掛かっていた被災箇所の距離や面積、体積のデータがわずか数時間で共有可能となり、大幅な災害調査のDXを達成した。

一方、いくつかの課題も明らかとなった。そのうちのひとつで大きかったものが、寒さによる機器への影響である。現地の平均気温は0℃～8℃と非常に寒く、降雪する場面もあったため、九州地方整備局が保有する機材では、周囲環境温度が運用限界に近く、送信機のバッテリー残量減少や、点群取得に使用する自動航行ソフトが起動できず、やむを得ずマニュアル操縦で点群取得を実施する等の問

題が発生した。そのほか、雪の反射光によるカメラ調整、寒さによるUAV送信機の操作のしづらさが挙げられる。

また、被災地ということもあり、現地では捜索・救助のヘリコプターが頻繁に飛行しており、場合によっては調査中のUAV付近を通過するため、航空機優先・無人航空機が回避のルールに基づき、途中でフライトを中断するような場面が時々あった。これらの課題についてはADS-B受信機搭載の機体への更新等が有効であると考ええる。

さらに、2024年2月のUAV調査班では、点群取得中で機体の機動が制限される状態において猛禽類に襲撃されたことから、やむを得ない場合に限り、対策として本務機とチェイス機との2機同時運用で、鳥類を牽制しながら飛行する方法が有効であったという連絡を受けている。これらの課題や改善策を踏まえ、さらなるDXの推進に努めていく所存である。

**謝辞：** 今回の取り組み及び本論文の執筆にあたり、助言・指導頂いた皆様、そして業務多忙の中快く送り出していただいた福岡国道事務所の皆さまに、改めてここに感謝の意を表す。

最後に、能登半島地震により被害を受けられた方々に心よりお見舞いを申し上げます。

## 参考文献

- 1) 「令和6年能登半島地震に係る被害状況等について」（内閣府ホームページ, [https://www.bousai.go.jp/updates/r60101notojishin/r60101notojishin/pdf/r60101notojishin\\_51.pdf](https://www.bousai.go.jp/updates/r60101notojishin/r60101notojishin/pdf/r60101notojishin_51.pdf), 2024年10月28日閲覧）。

# 火山噴火時の緊急調査プロセスに関する DXの推進

福永 みり<sup>1</sup>・矢野 敦久<sup>1</sup>・井上 遥<sup>1</sup>・木下 響<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州地方整備局 九州技術事務所 火山防災減災課 (〒830-8570 福岡県久留米市高野1-3-1)

火山噴火に起因する土石流による大規模な土砂災害が急迫している場合、市町村が適切に住民の避難指示の判断等を行えるよう、国は土砂災害防止法に基づく緊急調査<sup>1)</sup>に着手し、被害が予想される区域や時期の情報を市町村に提供することになっている。その緊急調査においては迅速な対応が求められるが、従来は現地調査や情報共有等に多大な労力を要していた。そこで、スマートフォンによる現地調査状況のリアルタイム伝送や、現地調査結果の一元的管理、緊急調査対象溪流の自動抽出等が可能な「緊急調査支援ツール」を開発した。このシステムを活用することで、現地調査班と対策本部が連携して、現地調査から土石流氾濫計算までの一連の作業をより効率的に実施することができる。

キーワード 火山噴火、降灰後土石流、緊急調査、支援ツール、一元管理、DX

## 1. はじめに

火山噴火が発生した際、危険なのは溶岩流や火砕流、噴石等だけではない。噴火から時間がたっても、火口から離れた場所でも、注意が必要な現象「降灰後土石流」がある。降灰後土石流とは、火山灰が降り積もった地域に雨が降ると、火山灰と水がまじりあって、一気に流れ下ってくる現象である。降灰後土石流による大規模な土砂災害が急迫している場合、ひとたび発生すると広範囲に多大な被害が及ぶとともに時々刻々と変化するリスクの把握が必要となるため、国は土砂災害防止法に基づく緊急調査<sup>1)</sup>（以下、「緊急調査」という）を実施し、降灰後土石流による被害が予想される区域や時期に関する情報を土砂災害緊急情報として、県や市町村に通知することとしている。

緊急調査では、定規やカメラ、GPS、野帳等様々な機器を現場に持参し、火山灰等の堆積厚さを測る降灰量調査や、土壌の浸透能の低下状況を確認する浸透能調査を実施する。従来は、計測結果は野帳へ、調査状況はデジタルカメラへ、計測結果を用いた計算は観測地点調査票（台帳）へといったようにそれぞれ別々の媒体に記録していた。

そのため、計測結果を記載した野帳等を本部に持ち帰る、計測結果を集約する、アイソパック（等層厚線図）を描くなどの一連の調査結果とりまとめ作業が迅速性に欠けている状況に加え、作業ミスが発

生する恐れがあった。また、調査の手順が多く、複雑であることから、調査職員によって結果が変わる恐れもあったため、結果精度の統一化も求められていた。

そこで今回、これらの課題に対し、現地調査の実施から調査結果の整理、本部との情報共有、危険溪流の抽出、解析計算まで一連の作業それぞれを効率化し、リアルタイムでのデータ連携を可能とするシステム「緊急調査支援ツール」を開発した。

## 2. 緊急調査支援ツールの開発

### (1) 全体機能の構成

緊急調査は、現地調査班と対策本部に分かれて行うため、現場と本部それぞれの業務を効率化するためのツール（以下、「現場ツール」「本部ツール」

表-1 緊急調査支援ツールの概要

ツール	概要
現場ツール	スマートフォン等を用いて、現場における調査結果の入力や調査手順の確認を支援するとともに、リアルタイムに本部と情報共有を行うツール
本部ツール	現場からリアルタイムに伝送された情報を読み込み、調査結果の整理や一元管理、計算・解析の実行、調査結果・解析結果の表示を行うツール

という)を構築した。現場ツールと本部ツールの概要を表-1に示す。

## (2) 現場ツールの構成

「土砂災害防止法に基づく緊急調査実施の手引き実務マニュアル」<sup>2)</sup>を基に、緊急調査の内容を確認した。現場では、降灰量調査及び浸透能調査を実施するため、それぞれの作業フローを確認し、現場ツールを構成する機能について整理した(表-2)。

表-2 現場ツールを構成する機能

機能	概要
ログイン機能	調査実施者(関係者)のみが調査結果を入力可能とするためにアクセス制限する機能
調査結果入力機能	スマートフォンを用いて、取得すべきデータの自動取得や調査結果入力を簡素化する機能
調査支援機能	スマートフォンを用いて、複雑な現地調査の手順や方法を表示し、現地調査から結果の入力までのサポートを行う機能
調査結果送信機能	スマートフォンに記録した情報を本部へリアルタイムに情報共有する機能
調査結果記録機能	オフライン時に記録した情報をオンライン復帰時まで端末で保持する機能

ここで、現場では、現地調査手順の明確化や情報入力への簡素化、調査結果精度の統一化、支援ツールの一元化を念頭に置き、コンパクトかつ機能性の高いスマートフォンを用いたツールの開発を行うこととした。図-1に現場ツールの調査結果入力画面を示す。調査日時、調査位置、降灰厚、浸透能の現地調査結



図-1 現場ツール調査結果入力画面

果をスマートフォンに入力することとし、日時、調査位置(緯度経度)、調査写真等はスマートフォンの時計、GPS、カメラ機能と連携することで自動入力可能とし、記録した情報を本部へリアルタイムに情報共有する機能を設けた。また、調査時のミス防止や結果精度の統一を目的として、現地調査の手順・方法を説明する機能も設けている。

スマートフォンを活用するにあたっては、山間部(通信サービス提供範囲外)における利用も考えられることから、携帯回線が使用できない場合でも、支援ツールが使用可能となるよう、オフライン時に記録した情報をオンライン復帰時まで端末で保持する機能を設けた。さらに、スマートフォンを用いてデータ入力、送信等を行う方法として、アプリを用いる場合とWebブラウザを用いる場合が想定されるが、各機器の特性(特にオフラインでの利用可否)を踏まえ、アプリを用いることとした。

## (3) 本部ツールの構成

本部ツールでは、現場からリアルタイムに送信されるデータを受信し、降灰の面的分布の計算やアイソパック(等層厚線図)の描画等を行うことで、降灰後土石流の急迫性がある溪流の抽出および氾濫解析計算へとつなげる機能を実装した(表-3)。

表-3 本部ツールを構成する主な機能

機能	概要
調査結果読込機能	現場ツールから送信される調査結果を取り込む機能
調査結果表示機能	調査結果を地図・グラフ・一覧表示する機能
面的分布推定機能	堆積状況など現地調査結果を用いた空間補間により面的分布データを作成する機能
建物集計機能	指定範囲内の建物件数を集計する機能
堆積厚線生成機能	堆積厚の等値線を生成する機能
河床勾配計算機能	溪流の河床勾配を計算・表示する機能
堆積面積計算機能	河床勾配10以上の流域内の1cm以上の火山灰の堆積面積を計算する機能
緊急調査対象判定機能	緊急調査対象溪流の自動抽出を行う機能
入力データ作成補助機能	流出計算や氾濫計算用入力データを作成補助する機能
計算実行機能	流出計算や氾濫計算を実行する機能

計算結果表示機能	流出計算や氾濫計算結果を表示（図表形式）する機能
プロジェクト管理機能	作業プロジェクトを作成・保存する機能
ファイル読み込み機能	地形、建物などのGISデータを読み込み・表示する機能

本部ツールの主な役割は、以下の4つである。

#### a) アイソパック自動作成

降灰範囲の調査は、現場のみではなく、ヘリ調査によって降灰厚が1cm以上となる範囲を把握しとりまとめることがあることを踏まえ、システム上の地図をベースにアイソパックを手描きで入力する機能と、現地にて調査した1点～複数地点の降灰厚データを用いてアイソパックを自動描画する機能の2種類を設けた。アイソパック作成は、TAJIMA et al.<sup>3)</sup>による楕円近似による推定方法を用いた。これにより、任意の範囲の層厚において、指定した値の等分でアイソパックを描くことも可能となった。

平成23年の新燃岳噴火時の降灰状況を基に、本手法により自動描画した結果について、実績との比較検証を行った(図-2)。新燃岳火口及び、都城市役所の位置関係から、平成23年新燃岳噴火時に記録された降灰厚1cmの線と本手法で自動描画した降灰1cmの線はほぼ同じ範囲を示していることが分かる。

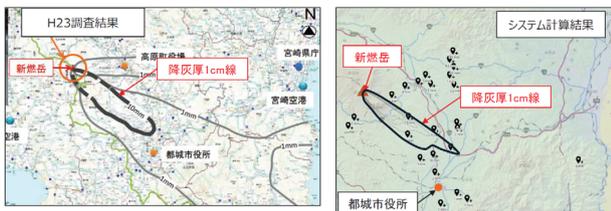


図-2 アイソパック自動描画の計算結果の検証

また、将来的に、火山観測を行っている研究機関や大学などの他機関と降灰量調査結果を火山観測データ一元化共有システム（JVDNシステム）を通じて共有することを想定し、本部ツールに組み込む機能も付加した。

#### b) 緊急調査対象溪流の抽出

緊急調査の対象溪流（降灰後土石流の急迫性がある溪流）の判定要件のひとつに、火山灰等が1cm以上の厚さで堆積している範囲が、河床勾配10度以上である部分の最も下流の地点より上流の部分の流域の概ね5割以上を占める場合、がある。その要件を踏まえて、自動描画や手描き入力により作成したアイソパックの降灰厚1cmの線データと流域地形情報を基に、

対象溪流を自動抽出する機能を設けた（図-3）。

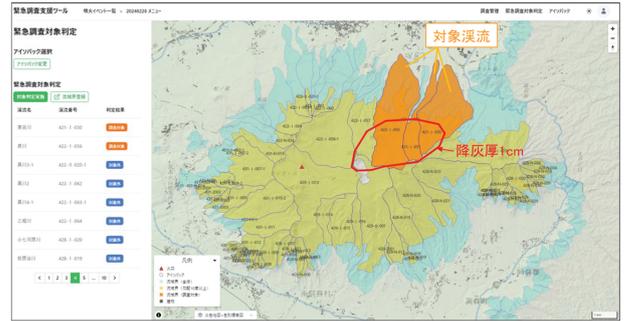


図-3 調査対象溪流の抽出機能

#### c) 調査結果の保存・管理

緊急調査にて実施する降灰量調査や浸透能調査は、複数地点において、複数班で実施することが想定される。また、浸透能調査は、同一箇所での経時的な変化を把握することが重要である。そのため、各調査結果は、本部ツールに一元的に保存・管理し、位置情報と計測結果、現地状況（写真）を紐づけられるものとした。さらに、調査結果の経時的な変化をグラフ表示できるようにした（図-4）。

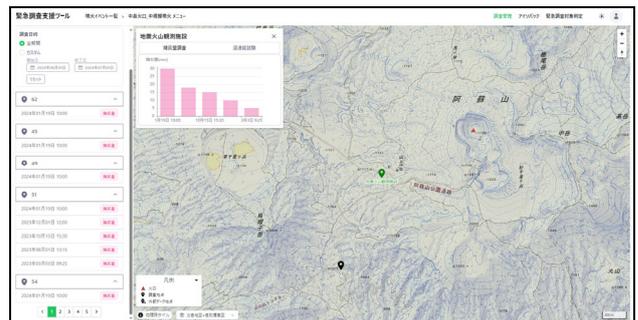


図-4 調査結果のグラフ表示

#### d) 氾濫解析計算システムとの連携

緊急調査においては、火山灰等の堆積に起因する土石流によって被害の生じるおそれのある区域を想定するため、緊急調査の対象溪流について、分布型流出計算及び、2次元氾濫計算が実施される。なお、分布型流出計算～土石流氾濫計算の一連の作業を効率的に実施する土石流氾濫計算システムは、別途既に構築されている。

分布型流出計算においては、現地調査等から得られた降灰厚に基づくアイソパック等を基に設定された、火山灰等の堆積範囲の境界線を用いて、流域区分を行う必要があるが、調査結果とそこから得られるアイソパックの情報と流出計算を連携することで、より効率的に解析を行うことが可能となる。そこで、別途既に構築されている土石流氾濫計算システムと

連携する仕組みとした。緊急調査支援ツール側が算出したアイソパックを土石流氾濫計算システムへ受け渡しする機能、土石流氾濫計算システム側で計算された氾濫範囲の結果を緊急調査支援ツールへ受け渡しする機能等を設けた（図-5）。



図-5 土石流氾濫計算結果の共有イメージ

なお、両システムのデータ連携は「火山噴火イベント」として紐づけ、緊急調査支援ツールから土石流氾濫計算システムへイベント情報を提供する仕組みとした。

#### (4) 緊急調査プロセスのDX

2. (2)の通り現場ツールによって、現地調査状況のスマートフォンによるリアルタイム伝送等が可能となる。2. (3)の通り本部ツールによって、従来は別々の媒体に記録されていたデータの一元管理や、従来は職員が手作業で実施していた緊急調査対象溪流抽出の自動化等が可能となる。このように現場ツールと本部ツールから成る緊急調査支援ツールを活用することで、作業時間の大幅な短縮や作業ミスの防止、結果精度の統一につながり、緊急調査プロセスのDXが実現する。

### 3. 現場検証

熊本県の阿蘇山を管轄する阿蘇砂防事務所の職員を対象に、現場でのツールの活用及び、現地調査結果を用いたアイソパックの作成、緊急調査対象溪流の判定までの一連の流れを現場検証した（図-6）。

現場検証の結果、概ね問題なくスムーズに実施できたものの、本部ツールへ伝送する情報が一部正常に伝送されないといった運用上の課題や、本部ツールへの伝送の前にデータを修正したい等の改善要望

があげられた。これらについては、今後のシステム改良内容として、対応していきたい。



図-6 現場検証状況（実施場所：阿蘇砂防事務所管内、実施者：事務所職員・発注者・受注者）

### 4. 終わりに

火山噴火時に実施する現地調査～流出計算・氾濫計算の一連の作業を効率化し、調査結果や解析結果を一元管理するシステムの構築を行った。この緊急調査支援ツールを活用することで、火山噴火後の緊急調査の一連の作業の迅速かつ効率的な実施に寄与することが期待される。

今後は、より使い勝手のよいシステムとするための改良や、その他システムとの連携を進めるとともに、現場実装に向けて周知や訓練等に努めていく。

#### 参考文献

- 1) 土砂災害防止法に基づく緊急調査実施の手引き（噴火による降灰等の堆積後の降水を発生原因とする土石流対策編）、平成28年3月一部改訂
- 2) 土砂災害防止法に基づく緊急調査実施の手引き 実務マニュアル（噴火による降灰等の堆積後の降水を発生原因とする土石流対策編）、平成31年3月
- 3) Yasuhisa TAJIMA et al. : Ellipse-approximated Isopach Maps for Estimating Ashfall Volume at Sakurajima Volcano, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol.58, No.1, 2013

# 気候変動による非超過確率1/10の 渇水流量の発生頻度の変化の計算

西村 宗倫<sup>1</sup>・竹下 哲也<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国土技術政策総合研究所 河川研究部 水循環研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

気候変動による水資源への影響を評価するため、利水安全度の基準である10年に1回の確率規模の渇水が、気候変動下でどの程度増えるのかを数値シミュレーションした。その結果、2℃上昇下では10年あたり2.2回、4℃上昇下では10年あたり4.8回に増加することが確認された。この結果は、緩和策として温室効果ガス排出抑制の必要性を示す重要なエビデンスと考える。一方で、パリ協定の目標である2℃上昇に抑制したとしても、渇水の発生頻度が相当に増加することから、緩和策と並行して適応策を進める必要性を示す重要なエビデンスと考える。

キーワード 気候変動, 水資源, 渇水流量, 数値シミュレーション

## 1. はじめに

IPCC第6次評価報告書の統合報告書<sup>1)</sup>では、世界平均気温が2011～2020年に1.1℃の温暖化（1850～1900年が基準）に達したこと、最良推定値で短期のうちに1.5℃に達すること、更には、地球温暖化が更に進むごとに、極端現象の変化の拡大が予測されている。

気象庁による日本の気候変動2020<sup>2)</sup>では、全国の日降水量1.0mm以上の年間日数は100年間で約9.5日間の減少していることが報告されている。また、政府の気候変動影響評価報告書<sup>3)</sup>では、水資源分野における気候変動による影響として、無降水日数の増加や積雪量の減少、蒸発散量の増加による河川流量の減少が指摘されている。

このように、気候変動による水資源への影響の存在は、観測・予測の両面から指摘されている。

一方で、気候変動による水資源への影響に際しては、令和2年12月の気候変動影響評価報告書<sup>3)</sup>では、水資源分野の将来予測される影響として、「現時点で定量的に予測をした研究事例は確認できていない」と記載されている。また、令和5年10月の国土審議会水資源開発分科会調査企画部会の提言<sup>4)</sup>では、「依然として予測の不確実性が大きく、計画に反映できるような定量的な評価を行うまでの精度には至っていない」と記載されており、現状では定量的な予測がされておらず、その事情として定量的な評価の難しさの指摘がある。

このような状況を鑑み、筆者らは、個別水系の具体的な計画を定めるような精度には至らないとしても、マクロ的な評価は可能であるし、進めるべきと考えた。その際、

流出解析の再現性の確認が重要となる。

そのため、本研究においては、我が国の109の1級水系のうち、研究実施時点で我が国における最新の高解像度・高アンサンブル数の地域気候モデルであるSI-CAT DDS5TK<sup>5)</sup>を用いて、これがカバーしている96の1級水系を対象に、流出解析モデルを構築した。その際、流出解析モデルの再現性を複数の統計指標で確認した。

その上で、これにバイアス補正した地域気候モデルの出力を入力し、非超過確率1/10の渇水流量の発生頻度の変化を計算した。

## 2. 計算方法と再現計算

### (1) 計算方法

気候変動の影響に対し異なる立場の関係者から共通的な理解を得るには、計算手法の信頼性・客観性・追跡可能性・全国的な同一性が重要と考えた。また、非公表資料を用いた場合、流域毎で計算条件が異なること、データの提供者から非公表を求められる可能性を危惧した。そのため、計算方法を選択する際には、①書籍や論文等で情報収集が可能な方法を組み合わせて計算すること、②技術者の主観的な判断に基づくパラメータ設定や非公表資料の利用等の第三者による検証や追跡が困難となる方法は採用しないこと、③全流域を同一方法で計算することを方針とした。

地域気候モデルの出力は、SI-CAT DDS5TKの気温・降水量データを用いた。SI-CAT DDS5TKは、その計算対象エリアには、全国109の1級水系のうち、東北から九州

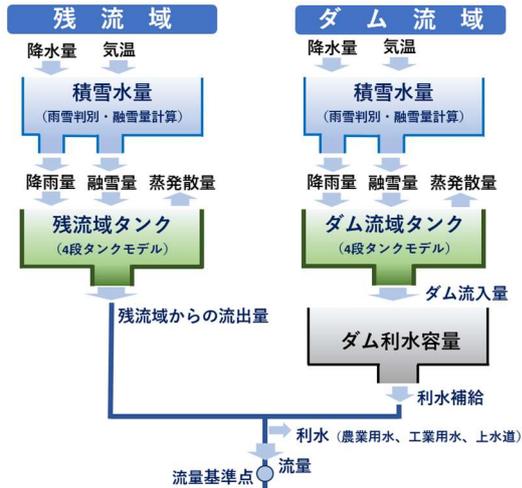


図-1 流出解析モデルのモデル構造の概念図<sup>6)</sup>

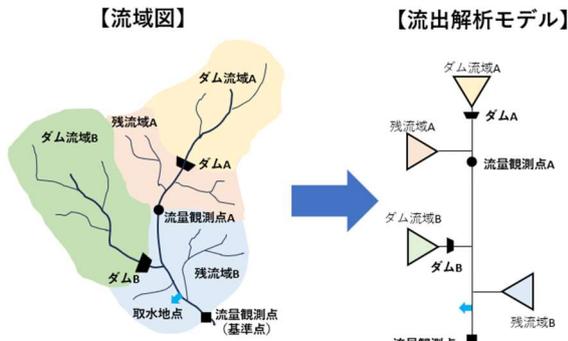


図-2 流出解析モデルの平面分割の概念図<sup>6)</sup>

表-1 流出解析モデルに用いた入力・出力データの概要<sup>6)</sup>

水文要素	利用データ		空間補間方法	補正率
	再現計算	地域気候モデルを用いた試算		
ダム流入量・河川流量	水文水質データベース	—	—	—
降水量	アメダス観測値	アメダス観測点のバイアス補正済データ	ティーンセン法	設定
気温	—	—		—
蒸発散量	気温との相関式*	モデル出力値		設定

\*地域気候モデルの過去実験データの気温と上向き潜熱フラックスの関係の部分流域毎の整理結果

表-2 流出解析モデルに設定した水文プロセスの概要<sup>6)</sup>

水文要素	推定方法
積雪水量	気温に基づく雨雪判別式
融雪量	菅原の式
取水量	用途（農業、工業、上水道）別に水利権量に対する補正率を設定
利水補給	ダム操作規則に基づいて設定

図-3 96の1級水系の渇水流量比（計算値/観測値）の度数分布

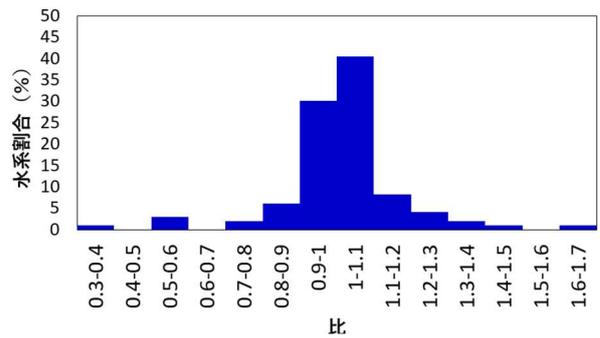


図-3 96の1級水系の渇水流量比（計算値/観測値）の度数分布<sup>6)</sup>

表-3 96の1級水系の観測値と計算値の比の統計量<sup>6)</sup>

	計算値/観測値			
	豊水流量	平水流量	低水流量	渇水流量
平均値	0.99	0.98	0.97	1.01
標準偏差	0.10	0.10	0.11	0.17
第三四分位数(75%値)	1.03	1.01	1.01	1.06
第一四分位数(25%値)	0.98	0.96	0.94	0.96

の96の1級水系が含まれており、全球平均気温が産業革命以降2℃及び4℃の上昇した気候下での各360年分の通年の気象データからなる。

これをS. Watanabe et al.(2020)<sup>7)</sup>が提案したDual-Window補正法を用いてバイアス補正を行った。バイアス補正の参照データは、過去実験の計算期間を含む期間で観測されている約840の気象庁アメダス観測データ及び国土交通省雨量観測データにより日単位で補正した。

流出解析モデルのモデル構造の概念図を図-1、流出解析モデルの平面分割の概念図を図-2、流出解析モデルに用いたデータの概要を表-1に、流出解析モデルに設定した水文プロセスの概要を表-2に示す。流出解析モデルはタンク型（4段）の流出解析モデルを用いて、入力データを降水量・気温、出力データをダム流入量・河川流量とし、その途中に、蒸発散、積雪・融雪、取水、利水補給の水文プロセスを表現した。

モデルの平面分割については、上流から流量観測地点毎にタンクを設定した。ただし、利水基準地点より下流部はモデル化していない。また、流域面積が50km<sup>2</sup>未満かつ利水容量10,000千m<sup>3</sup>未満のダム流量観測地点、流域面積100km<sup>2</sup>以下の流量観測地点では分割していない。その上で、20カ年の観測データを用いて、計算機によって広域的に最適解を探索可能なSCE-UA法<sup>8)</sup>で、観測と計算の豊・平・低・渇の各流量について式(1)で定義される誤差の算術平均値が最小となるように、田坂ら(2020)<sup>9)</sup>の方法を参考に、水収支から各水文量を推定した。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{Q_o(i) - Q_c(i)}{Q_{op}} \right\}^2 \quad (1)$$

E：誤差 Q<sub>op</sub>：観測流量の最大値 n：データ年数

Q<sub>c</sub>：計算流量 Q<sub>o</sub>：観測流量

これらは、技術者の主観的判断による同定を回避する考えと、計算の対象は渇水流量であるものの、流況の全体的・調和的な再現性が重要と考えたことに因る。なお、パラメータは一部の流域へのしわ寄せを回避するため、平面分割された流域毎に上流側から順に設定した。

## (2) 再現計算

再現計算は2000年～2019年の20年間を基本とし、その中で水文水質データベースに日流量データが公開されている期間で実施した(計算期間7年～20年 平均：19年)。再現結果について、渇水流量の「計算流量と観測流量の比」の度数分布図を図-3に示す。また、豊平低渇流量の平均値、標準偏差、第三四分位数(75%値)、第一四分位数(25%値)を表-3に示す。なお、渇水流量の96水系の「計算流量と観測流量の比」の平均値は1.01、第三四分位数(75%値)は1.06、第一四分位数(25%値)は0.96となった。これらの結果から、一部の水系の再現性には課題があるため、個々の水系の評価や極値的な扱いには慎重になる必要があるものの、全体的には高い再現性が確認されたと判断した。その結果、96水系の平均値を始めとして相当数の度数が対象の統計指標による評価は可能と判断した。

## 3. 計算結果

気候変動の影響を俯瞰的に把握する観点から、計算結果は度数(水系数)と平面分布で整理した。具体的な手法と結果を以下に示す。まず、過去実験の渇水流量に対し、96の1級水系それぞれで非超過確率1/10の渇水流量を順序統計量(ノンパラメトリック法)で求めた。次に、過去実験及び将来実験の各360年の渇水流量が上述の非超過確率1/10の渇水流量以下となった回数をカウントし、その比を計算した。計算式を式(2)に示す。

$$\frac{N(q_f \leq q_{p10})}{N(q_p \leq q_{p10})} \quad (2)$$

N(A)：Aの条件を満たすデータの数

q<sub>p</sub>：過去実験の渇水流量 q<sub>f</sub>：将来実験の渇水流量

q<sub>p10</sub>：過去実験の年非超過確率1/10の渇水流量

表-4 渇水流量が過去実験の年非超過確率1/10の渇水流量以下となる頻度の過去実験に対する将来実験の比の平均値等や一定以上の比となる水系数<sup>⑥</sup>

	2°C上昇実験 /過去実験	4°C上昇実験 /過去実験
平均値	2.20	4.84
標準偏差	0.83	2.05
第三四分位数(75%値)	2.76	6.24
第一四分位数(25%値)	1.58	3.33
比が1.0倍以上の水系数	90 (94%)	94 (98%)
比が2.0倍以上の水系数	58 (60%)	85 (89%)
比が3.0倍以上の水系数	13 (14%)	75 (78%)
比が5.0倍以上の水系数	0 (0%)	49 (51%)

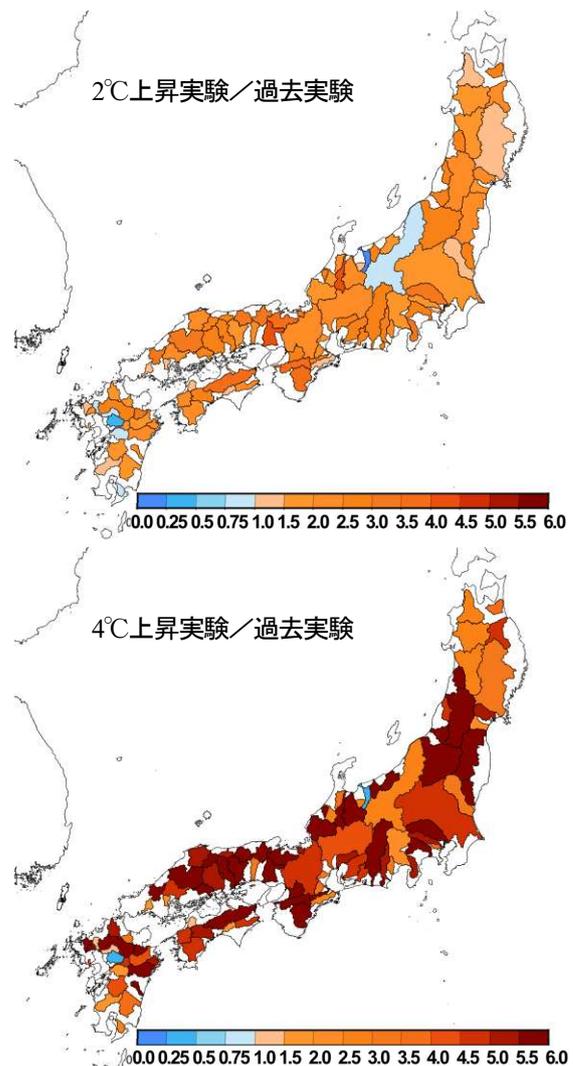


図-4 渇水流量が過去実験の年非超過確率1/10の渇水流量以下となる頻度の、過去実験に対する将来実験の比の96の1級水系の平面分布図<sup>⑥</sup>

(上図:2°C上昇実験/過去実験, 下図:4°C上昇実験/過去実験)

これら96水系の比の平均値等や一定以上の比となる水系の数を表-4に、平面分布図を図-4に示す。なお、過去実験と将来実験の比で整理した理由は、流出解析におけるバイアスの一部の相殺の期待したことと、無次元化により、水系を跨いだ横断的な統計的整理を可能とする

ためとなる。これらの結果、発生頻度の変化は、96水系の平均値で、2°C上昇実験では過去実験の2.20倍となり、4°C上昇実験では過去実験の4.84倍となった。また、発生頻度の変化が1倍以上となる水系の数は、2°C上昇実験では90水系(94%)、4°C上昇実験では94(98%)となった。これらの計算結果は、気候変動下では、ほぼ全国的に発生頻度は増加し、その程度は、現状の利水安全度の確率規模を大きく低下させる蓋然性が確認されたものと考えられる。

#### 4. 本研究の課題（今後の研究展開）

##### (1) 総合的な評価

本研究は、利水安全度に着眼する観点から、その基準である10年に1回の確率規模の頻度の渇水の評価した。一方で、影響を総合的に評価するには、渇水の頻度だけでなく、強度、時期、継続性、広域性などの評価が必要と考えており、今後の課題と考えている

##### (2) 人口減少を踏まえた評価

我が国の水資源管理に考慮すべき主要な外的要因は、気候変動のほかに、人口減少が挙げられる。両者の水資源への影響は相反すると想像する。今後、気候変動と人口減少の両者を加味した水資源への影響評価を進めたいと考えている。

##### (3) オープンデータ化

地域気候モデルの出力は、気候変動の影響評価を行う上で必要不可欠なデータと考える。しかし、バイアス補正に専門的な知識が必要なため、各機関による影響評価の支障になっていると考える。本研究で用いたDual-Window補正法は汎用的と考えており、十分な照査や関係者の了承が得られればバイアス補正データのオープンデータ化を進めたいと考えている。

#### 5. まとめ

本研究では、気候変動による水資源への影響を評価として、我が国の利水安全度の基準である10年に1回の確率規模の渇水が、2°C上昇下では10年あたり2.2回、4°C上昇下では10年あたり4.8回に増加することを確認し、緩和策及び適応策の双方の必要性を示す重要なエビデンス

を得ることが出来た。その上で、本研究の課題について、今後の研究展開として、総合的な評価、人口減少を踏まえた評価、オープンデータ化についてまとめた。

水資源はいうまでもなく、社会経済の最も重要な要素であり、それが将来に渡り安定的に供給されるよう、引き続き、政策研究を進めて参りたい。

**謝辞：**本研究では、文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)により地球シミュレータを用いて開発されたd4PDFを力学的ダウンスケーリングしたデータを使用させて頂いた。降水量の補正方法や蒸発散量の推定方法については、京都大学防災研究所田中賢治教授の論文を参考にさせて頂くだけでなく、ご助言を頂いた。ここに深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：土木学会論文集の完全版下印刷用和文原稿作成例。環境省：AR6統合報告書「政策決定者向け要約」文科省、経産省、気象庁、環境省による暫定訳【2023年4月17日時点】、<https://www.env.go.jp/content/000127495.pdf>、(2024年10月28日閲覧)
- 2) 文部科学省、気象庁：日本の気候変動2020、<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>、(2024年10月28日閲覧)
- 3) 環境省：気候変動影響評価報告書、<https://www.env.go.jp/content/900516664.pdf>、(2024年3月29日閲覧)
- 4) 国土審議会 水資源開発分科会 調査企画部会：「リスク管理型の水資源政策の深化・加速化について」提言、[https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/water02\\_sg\\_000164.html](https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/water02_sg_000164.html)、(2024年10月28日閲覧)
- 5) 大気近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ（東北から九州）by SI-CAT、[https://search.diasjp.net/ja/dataset/SICAT\\_DDS\\_5kmTK](https://search.diasjp.net/ja/dataset/SICAT_DDS_5kmTK)、(2024年10月28日閲覧)
- 6) 西村宗倫他：気候変動による非超過確率1/10の渇水流量の発生頻度の変化の計算、河川技術論文集、第30巻、pp.363-368、2024。
- 7) S. Watanabe, M. Yamada, S. Abe, and M. Hatono: Bias correction of d4PDF using a moving window method and their uncertainty analysis in estimation and projection of design rainfall depth, Hydrological Research Letters, 14(3), p117-122, 2020.
- 8) 杉原他：SCE-UA法を用いたタンクモデルの最適構造構築に関する一考察、土木学会論文集F3（土木情報学）、Vol.70, No.1, 12-17, 2014
- 9) 田坂彰英、田中賢治、田中茂信：水収支から推定される流域平均降水量の特性、土木学会論文集B1（水工学）、Vol.76, NO.2, I\_31-I\_36, 2020

# 電子国土基本図の3次元化に向けた取組

長野 玄<sup>1</sup>・大久保 弘樹<sup>1</sup>・野口 真弓<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国土地理院 基本図情報部 地図情報技術開発室 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

デジタル社会に向けてDX（デジタルトランスフォーメーション）の取組が進み、様々な3次元の地理空間情報の利用が進んできた中で、国土のデジタルツインを構築するためには、誰もが利用できる新しい国の基本図として国土全体の3次元地図を整備する必要がある。国土地理院では、様々な地図の基盤であり、ベース・レジストリに指定されている電子国土基本図（地図情報）について、2028年度までに国土全体の3次元地図として初期整備するための取組を行っている。本発表では、電子国土基本図（地図情報）の3次元化のうち、2次元の建築物の地図情報に対して3次元点群データから高さの情報を付与する手法の検討状況及び今後の展望を報告する。

キーワード 3次元、電子国土基本図（地図情報）、地図作成

## 1. はじめに

政府は我が国が目指すべき未来社会の姿として「Society 5.0」を提唱しており、その実現に向けては「サイバー空間とフィジカル空間の高度な融合」、いわゆるデジタルツインの構築を目指している<sup>1)</sup>。このような中で、デジタルツインの基盤とするため3次元の地理空間情報を整備し、多方面への利活用を促進する重要性はますます高まっている。国土地理院の取組としては、「作業規程の準則」における「地形測量及び写真測量（三次元点群測量）」の編に係る一部改正を順次行い、3次元点群データ（以下「点群データ」という。）を取得するための新しい測量の標準的な規格を整備してきた。点群データは、静岡県による「VIRTUAL SHIZUOKA」<sup>2)</sup>のようにオープンデータとして公開する先駆的な地方公共団体も現れるなど、公共測量において広がりを見せている。一方、従来2次元の情報として整備されてきた地図データを3次元化したものである「3次元地図」については、国内外、官民ともに様々な形式での整備・作成が進められている段階にある。国土地理院では、行政機関等で登録・公開されている、正確性や最新性が確保された社会の基盤となるデータベースであるベース・レジストリ（デジタル社会形成基本法第31条に規定する「公的基礎情報データベース」）に指定されている「電子国土基本図（地図情報）（以下「電子国土基本図」という。）」について、2028年度までに国土全体の3次元地図として初期整備するための取組を行っている。

こうした背景を踏まえ、国土地理院では2023年度に、点群データから2次元の地図情報（以下「地図データ」

という。）へ標高値を付与することで3次元地図を整備する手法の検討及び国土全域の3次元化を見据えて標高値付与を自動で行うツールの作成を実施した<sup>3)</sup>。本稿では、このうち2次元の建築物の地図情報に対して点群データから高さの情報を付与する手法の検討状況及び今後の展望について報告する。

## 2. 標高値付与による地図情報の3次元化

### (1) 概要

国土地理院では、以前から3次元地図整備のための基礎調査と基盤地図情報への高さ情報付与による試作<sup>4)</sup>及びLiDARセンサとオプティックカメラの計測による3次元建築物モデルの作成<sup>5)</sup>などを実施してきた。本章ではこれらを踏まえた上で、国土全域を対象に3次元地図整備が行えるよう検討を進めた内容について報告する。全国整備を効率よく実施するには、新しい計測を行うことは極力避け、既存の材料を利用しシンプルな手法で3次元地図作成ができることが望ましい。そこで、航空レーザ測量などにより整備された点群データから取得可能な標高値を、2次元の電子国土基本図へ高さ情報として付与することで3次元化を試みた。高さ情報付与の対象となる地図データとして、先行する試作では基盤地図情報が使用されていた。本検討でも初期段階においては基盤地図情報を使用していたが、電子国土基本図から基盤地図情報項目を抽出した基盤地図情報では、利用できる地物種別や属性が限られている。そのため今回は、数値

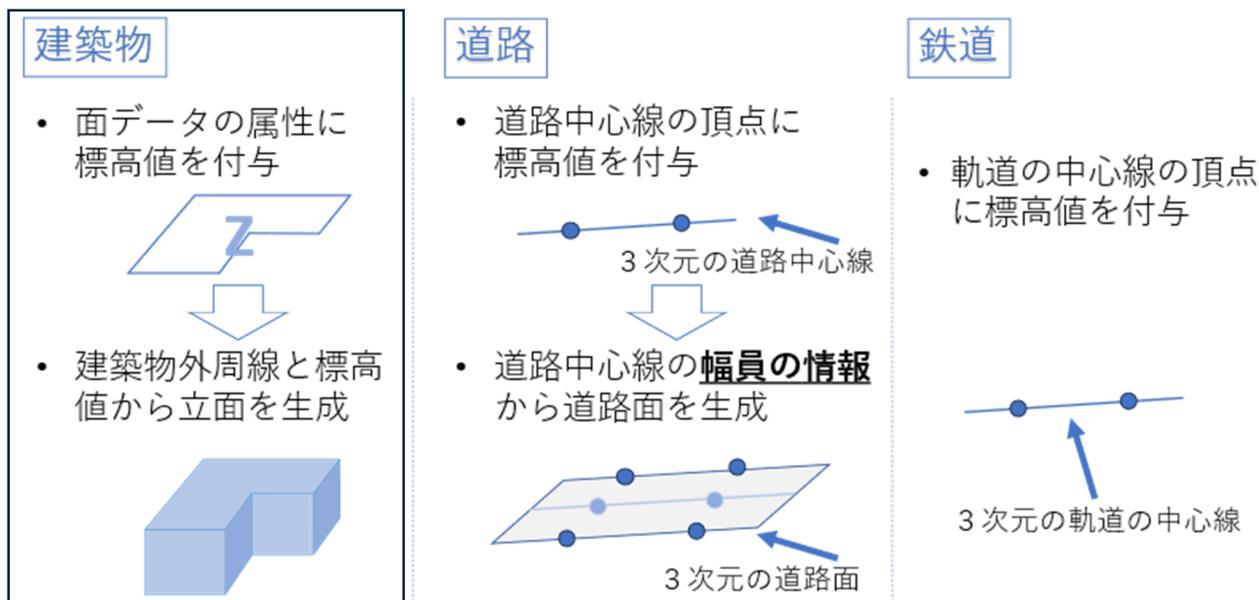


図-1 本検討における3次元地図作成の概略図

地図（国土基本情報）に含まれるシェープファイル形式の地図データを使用した。3次元化の対象とする地物は建築物と、道路中心線及び軌道の中心線（以下両者をまとめて「中心線」という。）を選定した。図-1に、本検討における建築物・中心線への標高値付与と3次元化の構想について概略図を示す。次節以降では、このうち建築物への標高値付与の詳細について述べる。

## (2) 建築物への標高値付与

建築物などの3次元化に関連し、先行する代表的な事例としては、国土交通省都市局の主導で2020年にスタートした「Project PLATEAU」<sup>9)</sup>（以下「PLATEAU」という。）がある。PLATEAUでは地方公共団体が作成している都市計画基本図をベースに「3D都市モデル」の整備・活用が進められており、2024年3月末時点で全国200都市を超える自治体のデータが公開されている。本検討における建築物の3次元化では、PLATEAUとの相互利用も視野に入れることにした。

3D都市モデルの標準規格としてPLATEAUが採用しているCityGML 2.0<sup>7)</sup>には、地物の詳細度を示したLOD（Levels Of Detail）という概念がある。建築物におけるLODごとの表現イメージを図-2に示す。LOD0は上方から正射影した面で表す、従来の地図データと同様の建築物形状である。LOD1では建築物面に一律の高さを与え、箱モデルとして表現する。LOD2及び3では屋根の形状、窓などの開口部といった、より詳細な情報が表現される。本検討では、建築物について高さ情報のみを付与するLOD1相当の3次元化を目指すことにした。

PLATEAUの「3D都市モデル整備のための測量マニ

ュアル」<sup>8)</sup>では、LOD1の建築物モデル作成において「建物接地面の高さ」と「建物高さ」を取得するよう定めている。その具体的な取得方法は次のとおりである。

- 建物接地面の高さの基準はグリッドデータ又はグラウンドデータからTINを発生させ、建物外形の中で最も高さの低い地点を建物接地面の高さとして決定する。（第46条4）
- 建物高さは数値地形図データの建築物の屋根面に含まれる点群データの高さ情報を用いて、建物高さの中央値を算出する。ただし、ユースケースに応じて建物高さの取得基準が明確になっている場合はその限りではない。（第48条）

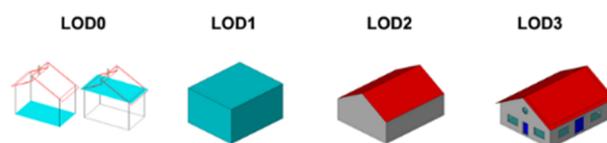


図-2 LOD0~3における建築物の表現

また、PLATEAUのLOD1の東京都内の建築物モデルでは、航空写真から生成したDSMによって取得した建物図形内の点群データのうち、ノイズ除去のために最高値以下5%を除去した点群データの最高値を「計測高さ」として取得している。

本検討においても建築物接地面の高さ（以下「接地面高さ」という。）の取得は上記のとおりとした。また、建築物高さとしては建築物面内に含まれる点群データのオリジナルデータのうち、中央値に相当する標高値（以

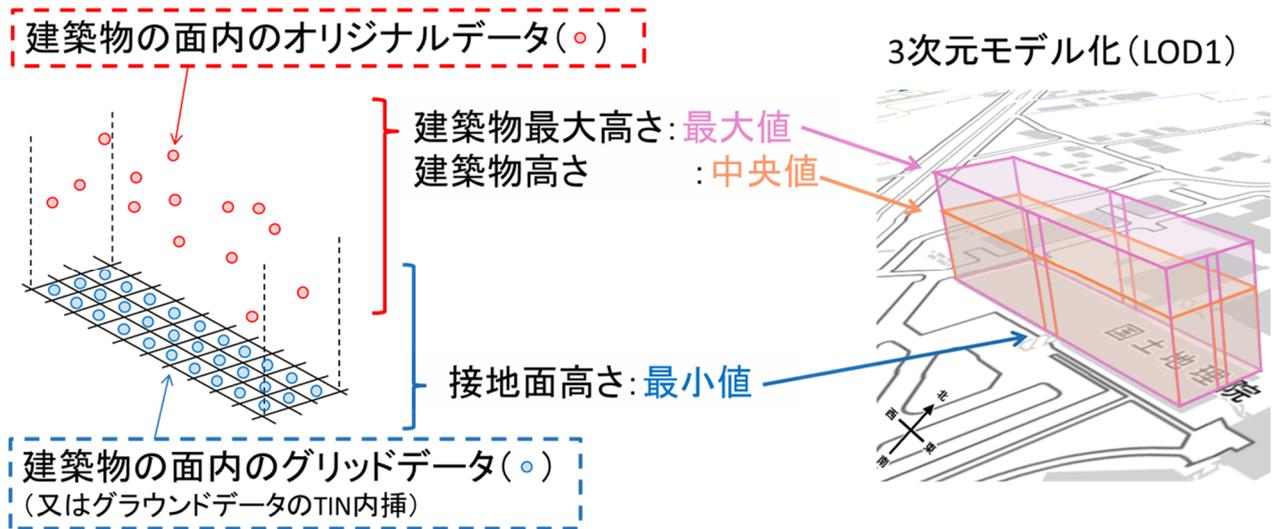


図-3 建築物の標高値取得と3次元化の概略

下单に「建築物高さ」という.)と、PLATEAUの「計測高さ」に相当する標高値(以下「建築物最大高さ」という.)もPLATEAUと同様の手法により取得することにした。

図-3に、建築物の標高値取得と3次元化の概略を示す。

### 3. 試作データの作成

前章で述べた手法を用い、地図データへの標高値付与による3次元化を試行した。テスト範囲としては、航空レーザ測量で取得された点群データが利用可能であった、関東地方北東部(関東地方整備局, 2008)及び東京都多摩地域(東京都, 2023)から、数km四方の地域10か所程度を抽出した。図4のように、地図データへの標高値付与によって3次元地図の試作データの作成がおおむね達成された。



図-4 土浦駅北側地域の3次元化初期試作データ(地理院地図Globeでの表示)

### 4. 建築物への標高値付与に関する検証

建築物への標高値付与が2章2節で述べた手法によって適切に行えているかを検証するため、点群データから付与された標高値と設計図面上の高さの違いを検証した。

#### (1) 対象地域

3章で試作したデータのうち、東京都小平市に位置する国土交通大学校において、建築改修時の工事設計図面(国土交通大学校より提供)から建築物高さを読み取ることが可能な4つの建築物(研修棟、管理厚生棟及び宿泊棟A・C)を検証対象とした。各建築物の平面位置を図5に示す。



図-5 国土交通大学校における建築物位置(図6~8の撮影位置を矢印で示す)

#### (2) 使用データ

各建築物の高さの比較にあたって、それぞれ以下のデータを用いた。

- ・建築物面：電子国土基本図
- ・「建築物高さ」及び「建築物最大高さ」の標高値付与に用いる点群データ：東京都デジタルツイン実現プロジェクトで公開されている、航空レーザ測量により取得された点群データ（2023年度）
- ・「接地面高さ」の標高値付与に用いるデータ：東京都デジタルツイン実現プロジェクトで公開されている、グリッドデータ（0.25m）
- ・設計図：国土交通大学の設計図面

### (3) 結果

国土交通大学の各建築物において、建築物面内に含まれる点群データから取得した高さ及び設計図から読み取った建築物高さに関する値を比較した結果を表-1～3に示す。なお、設計図との比較を容易とするため、各表中では点群データから取得した「建築物最大高さ」及び「建築物高さ」と「接地面高さ」の差を示している。

表-1 点群データから取得した高さ与设计図から読み取った高さの比較（研修棟）

建築物	点群データ (m)		設計図 (m)			
	「建築物高さ」 - 「接地面高さ」	「建築物最大高さ」 - 「接地面高さ」	西部	中央部	東部	最大の高さ
研修棟	17.76	22.52	13.90	17.50	18.20	22.85

表-2 点群データから取得した高さ与设计図から読み取った高さの比較（管理厚生棟）

建築物	点群データ (m)		設計図 (m)	
	「建築物高さ」 - 「接地面高さ」	「建築物最大高さ」 - 「接地面高さ」	パラペット天端	階段
管理厚生棟	8.91	13.31	8.85	13.81

表-3 点群データから取得した高さ与设计図から読み取った高さの比較（宿泊棟A・C）

建築物	点群データ (m)		設計図 (m)		
	「建築物高さ」 - 「接地面高さ」	「建築物最大高さ」 - 「接地面高さ」	軒高	ハト小屋天端	最大の高さ
宿泊棟 A	16.12	21.79	16.35	17.70	21.90
宿泊棟 C	16.08	21.81	16.35	17.70	21.90

また、各建築物において、点群データから取得した高さを付与して試作したLOD1建築物モデルと、東京都都市整備局が整備し、東京都デジタルツイン実現プロジェクトで公開されているLOD1建築物モデル<sup>9</sup>を重ね合わせて表示した様子を図-6～8に示す。各図を撮影した位置及び方向は図-5中に矢印で示す。

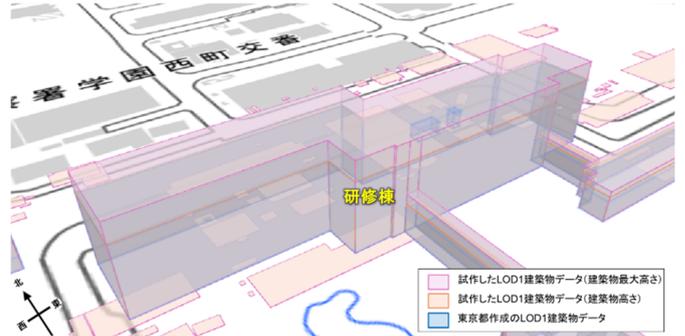


図-6 試作データと東京都作成のLOD1の建築物モデル比較（研修棟. 図上側が北）

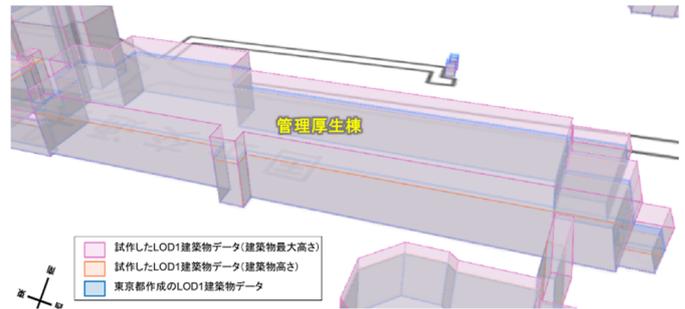


図-7 試作データと東京都作成のLOD1の建築物モデル比較（管理厚生棟. 図上側が南）

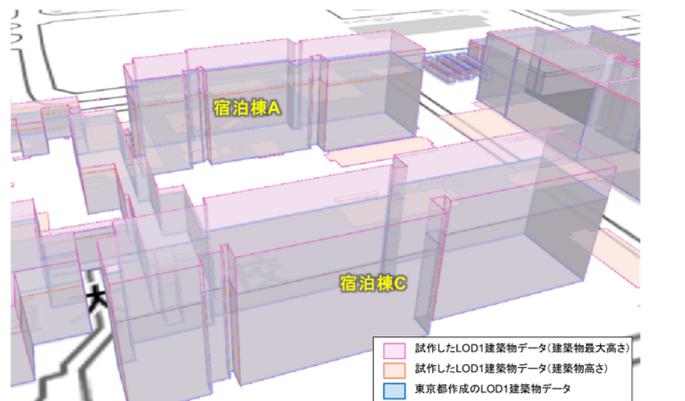


図-8 試作データと東京都作成のLOD1の建築物モデル比較（宿泊棟A・C. 図上側が北）

### (4) 考察

表-1～3及び図-6～8より、各建築物における「建築物高さ」（＝点群データの中央値）の標高値付与の状況について考察する。研修棟では、屋根は大きく西部・中央部・東部に分かれている。点群データから取得された「建築物高さ」は、中央部と東部の中間の値を反映している。管理厚生棟では、高さの異なる4つ以上の平面から屋根が構成されているが、「建築物高さ」はパラペット天端付近の高さを反映している。宿泊棟は、軒高の高さの平面の上にかまぼこ状のハト小屋が建っているが、

「建築物高さ」は軒高よりやや低い値を反映している。これは、宿泊棟の建築物面の形状が複雑であり、建築物面内の点群データ取得時に、地表面に近いデータも含めて処理したことによるものと考えられる。

図-6～8に示す点群データを統計処理して作成されたLOD1の各建築物のモデルは、いずれも東京都作成のLOD1の建築物モデルと近い形状として表示されることが確認できた。

また、点群データからの「建築物最大高さ」の付与について考察する。2章2節の手法では、点群データのノイズ除去のため、「建築物最大高さ」の算出の際に建築物面内の点群データの上位から5%を除外した上での最高値を取得しているが、各建築物における点群データから取得した「建築物最大高さ」－「接地面高さ」の値と設計図の最大高さと比較すると、その差はそれぞれ80cm以下の値となっている。よって、今回検証した建築物の屋根形状においては、「上位5%」の除外により、点群データを過剰に排除しているとは見られず、5%の除外は妥当であると考えられる。

以上より、今回、検証に用いた建築物においては、2章2節で示した標高値付与の手法により、建築物を代表する高さが付与されたことを確認できた。今回は設計図を入手することができ、設計上の高さを把握することが可能な国土交通大学を対象としたものの、屋根の形状や面構成によって、標高値付与の状況は変化することが想定される。引き続き、異なるパターンにおいても検討を進めることが重要である。

## 5. 建築物の3次元化におけるその他の課題

3章で作成した試作データにおいて、作成された3次元の地物を詳細に見ると、3次元上の表現として不自然になっている箇所が存在した。試行段階で確認できた、建築物の標高値付与と3次元化における課題を挙げる。

### (1) データ間の整備時期の違いに起因する課題

地図データの整備時期と点群データの取得時期の差による経年変化を原因とする、3次元形状の不良が目立った。地図データに含まれている地物と、取得された点群データの時期に差異がある場合、データの新旧に応じて、不自然な高さの建築物が生じる。点群データが地図データより古い場合の事例を図-9に示す。ここでは点群データ取得より後に建築物の新設（移転）が行われたために、建築物の「比高」（建築物最大高さ－接地面高さ）が異常に小さな値となった。

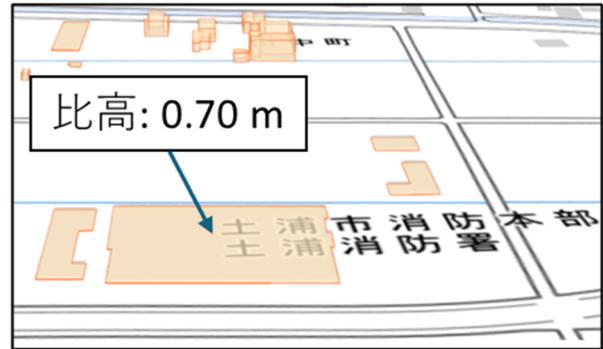


図-9 地図データの時期と点群データの取得時期の違いにより不自然な形状の建築物が生成される事例

この課題の解決策として、地図データの整備時期と点群データの取得時期を可能な限り近づける。また、比高が異常値となった建築物を、一定のしきい値（例：比高が1m未満）を設けて検出する等の対応が考えられる。いずれの対応を行うとしても、活用可能なデータに起因する検出には限界があるため、最終的には、活用する既存データの整備時期が異なることに応じて、不自然な形状の建築物データが作成されてしまう点を利用者に強調し、利用者が前提条件として理解した上で活用することができる体制を整える必要がある。

### (2) 建築物上の地物（送電線や植生等）に起因する課題

点群データの上位から5%を除外する処理は行っているものの、建築物の上方にある送電線や植生の高さなど、建築物の屋根面以外の地物を建築物最大高さとして取得してしまう事例が確認された。

こうした事例は特に建築物上部に送電線等がかかる箇所において確認されるものであるため、この課題の解決にあたって、現状5%で設定している除外割合を一律でより高い割合の値に変更することは適当でない。建築物と送電線等が交差する箇所を効率的に抽出し、該当箇所のみ除外割合を変更する処理を実施することや、点群データから建築物や植生を分別して、建築物のみに由来する点群データを活用する等の対応が考えられる。

## 6. まとめと今後の展望

本稿では、電子国土基本図の3次元化のうち、2次元の建築物の地図情報に対して点群データから高さの情報を付与する手法の検討状況を述べ、現段階での3次元地図データ作成における課題を明らかにした。

現在残っている課題については、解決に向けた技術的な試行を引き続き実施する。また、作成した3次元地図データについては、その公開・提供手法や精度管理に関

する調査・検証も必要である。国土地理院としては2028年度までに、国土全域を対象とした電子国土基本図の3次元化の達成を目指していく。

#### 参考文献

- 1) 内閣府：第6期科学技術・イノベーション基本計画（令和3年3月26日閣議決定）。
- 2) 静岡県：VIRTUAL SHIZUOKA | 静岡県全域を3次元点群データでデジタルアーカイブ，<https://virtualshizuokaproject.my.canva.site> (accessed 7 Oct. 2024).
- 3) 大久保弘樹，吉高神真利子，南秀和（2024）：3次元点群を用いた地図データへの標高値付与ツールの作成，国土地理院令和5年度調査研究年報，58-67.
- 4) 茶谷隆行，笹川啓，関口泰徳，宮之原洋，田代ゆかり，菅井秀翔，澤可那子，片山理佐子（2020）：3次元データの取得・活用による地図情報整備に関する検討—3次元地図作成の効率化・高度化手法の検討—，国土地理院令和元年度調査研究年報，78-81.
- 5) 佐々木励起，稲澤保行，新藤昭彦，岸本紀子（2023）：3次元地図情報整備に関する検討—LiDAR センサとオープンカメラにより整備した3次元地理空間情報の検証—，国土地理院令和4年度調査研究年報.
- 6) 国土交通省：PLATEAU[プラトー]|国土交通省が主導する、日本全国の3D都市モデルの整備・オープンデータ化プロジェクト，<https://www.mlit.go.jp/plateau/> (accessed 7 Oct. 2024).
- 7) Kolbe, T.H., Kutzner, T., Smyth, C.S., Nagel, C., Roensdorf, C., and Hazel, C. (2021): OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard, Open Geospatial Consortium, 20-010, <https://docs.ogc.org/is/20-010/20-010.html> (accessed 7 Oct. 2024).
- 8) 国土交通省 都市局，協力) 国土地理院：3D都市モデル測量マニュアル（第2.0版），[https://www.mlit.go.jp/plateau/file/libraries/doc/plateau\\_doc\\_0010\\_ver02.pdf](https://www.mlit.go.jp/plateau/file/libraries/doc/plateau_doc_0010_ver02.pdf) (accessed 7 Oct. 2024).
- 9) 東京都：東京都デジタルツイン実現プロジェクト，<https://info.tokyo-digitaltwin.metro.tokyo.lg.jp/> (accessed 7 Oct. 2024)

# 平成30年北海道胆振東部地震後の厚真町における 緊急対応タイムラインの取り組みについて

大川 紘<sup>1</sup>・中村 洋祐<sup>2</sup>・法村 賢一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>元北海道開発局 室蘭開発建設部 治水課 (〒051-8524 北海道室蘭市入江町 1-14)

現北海道開発局 函館開発建設部 今金河川事務所美利河ダム管理支所 (〒049-4151 北海道瀬棚郡今金町字美利河)

<sup>2</sup>北海道開発局 室蘭開発建設部 治水課 (〒051-8524 北海道室蘭市入江町 1-14)

厚真地区緊急対応タイムラインは、平成30年北海道胆振東部地震後における台風・前線性の降雨等に伴う洪水・土砂流出等を対象に、関係機関による情報提供や助言等の側面支援、意思決定に伴う避難誘導等の直接支援等の項目をとりまとめた事前防災行動計画である。

本報告では、これまで経験のない状況下におけるタイムラインの策定経緯、緊急対応時における関係機関との協議・協働によるトリガー設定と対応支援等について論ずる。

キーワード：タイムライン、水害対応、北海道胆振東部地震、土砂災害

## 1. はじめに

2018年9月に発生した北海道胆振東部地震により、厚真川の上流域を中心に大規模な河道閉塞や山腹崩壊が発生<sup>1)</sup>した(図-1)。河道閉塞部の浸食や崩壊土砂の再移動により、下流の厚真町市街地等で二次災害のおそれがあることから、緊急的な対策が必要となった。そこで北海道知事からの要請を受け、国が直轄で砂防施設などの整備を行うこととなった。地震発生翌月から実施した緊急的な対策工事に続き、恒久的な対策工事を約5年間かけて行った。

また、地震発生が出水期であったことから、二次災害の発生に備え、ソフト対策も講じる必要があった。そのため、厚真川流域において、降雨が予測された段階で早期に防災体制が確保できるよう、厚真地区緊急対応タイムライン(以後、厚真地区緊急対応 TL)の策定支援を行った。タイムラインは、関係機関との連携・調整が不可欠である一方、台風や融雪等に備え、早期に策定される必要があった。

厚真地区緊急対応 TL を早期に策定できるよう、他のタイムラインの策定事例を参考とした。他の事例では、河川の洪水を対象としてタイムラインを作成したものが多いものの、土砂災害を対象とした事例は少なく、特に融雪等の影響も考慮したタイムラインはないなどの課題があった。

本稿では、室蘭開発建設部として支援してきた<sup>2)</sup>厚真地区緊急対応TLについてとりまとめる。また、緊急性や各機関の体制等を勘案し、関係機関と協議を進めながら、適時、厚真地区緊急対応TLの更新を行ってきた。こうした、実効性等を確保するための検討や試みについても合わせて紹介する。



図-1 大量の流出土砂による河道埋塞

## 2. 緊急対応タイムラインの検討内容

タイムラインとは、防災に関わる関係機関や自治体、組織等が、災害リスクや地域の現状を認識・共有した上で、災害対応において「いつ」「誰が」「何を」するかをとりまとめた事前防災行動計画<sup>3)</sup>である。

厚真町では、平成30年北海道胆振東部地震とその後の余震によって、地盤が緩んでいることによるさらなる土砂災害の発生、河道へ土砂が流出したことによる流下能力の低下、天然ダム内に地すべりが発生することによる段波の発生、対策中の天然ダムの決壊等が懸念された。その一方で、地震の被害が広範囲かつ大規模であったため、ハード整備が完了するまでに多くの時間を要すること、北海道胆振東部地震発生後まもなく北海道に台風が襲来する可能性があったこと、これまで経験のない大地震後の大雨によりどのような現象や被害が発生するか予測できなかったことから、地震の被害状況や復旧復興の進捗状況を踏まえた、より早めの準備・対応を徹底したソフト対策の強化が急務であった。

そのため、厚真町が緊急的な対応として、関係機関

と連携した町民の命を守ることを最優先とした厚真地区緊急対応TLを策定することとなった。

(1) 地震発生後の台風に備えた「厚真地区緊急対応TL（台風対応編）」の策定と試行運用

a) 厚真地区緊急対応 TL（台風対応編）の策定経緯

厚真町はタイムライン策定に向けて、関係機関や有識者（表-1）が参画する「意思決定ワーキング（以下、意思決定WG）」を設置し、地震後の被害・復旧状況や災害対応時の判断基準・支援体制、各機関の役割等について共有・検討が行われた。

2018年9月18日に第1回意思決定WGを開催後、台風第24号が発生し、北海道に影響がある見込みがあったことから、同月27日に第2回意思決定WGを開催し、洪水・土砂災害を対象とした「厚真地区緊急対応TL（試行運用版）」が策定された。

台風第24号対応後の10月5日に第3回意思決定WG、台風第25号対応後の11月7日に第4回意思決定WGを開催し、台風対応のふりかえりを行った。そこで、防災対応及びタイムライン運用における課題とその対応案を検討し、「厚真地区緊急対応TL（台風対応編）」が策定された。（図-2、3、4）

表-1 TL策定に向けた参画機関

機関名及び有識者名		備考
参画機関	厚真町総務課	
	胆振東部消防組合消防署厚真支署	
	北海道開発局室蘭開発建設部	
	北海道胆振総合振興局	
	気象庁室蘭地方气象台	
	北海道警察	
	陸上自衛隊	
有識者	NPO法人 環境防災総合政策研究機構	
	東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター 松尾 一郎 各員教授	
	愛知工業大学 横田 崇 教授	
	北海道大学農学研究院国土保全学研究室 小山内 信智 特任教授	策定当時
	東邦大学 村中 明 非常勤講師	策定当時



図-2 厚真地区緊急対応TL（台風対応編）の策定までの流れ



図-3 第1回意思決定ワーキングの様子（被災状況の確認）

図-4 厚真地区緊急対応TLの構成

b) 早期避難に向けた土砂災害のトリガー設定

北海道胆振東部地震の影響により、地盤が非常に不安定な状況となっていることから大雨警報（土砂災害）や土砂災害警戒情報等の発表基準が引き下げられ、町が意思決定するためには、より専門的な知見を必要とした。また、地震後も住民が土砂災害の危険エリアに暮らしていたことから、避難情報が発令される場合（もしくはされた場合）は、消防や消防団が危険エリア住民一人ひとりに避難の声掛けを行っていたため、地震前よりも早めに避難情報発令を判断することが求められた。

このことから、土砂災害も見据えた早期対応を実現するため、町と消防、消防団で住民への避難の声掛けやその準備に要する時間を整理した上で、それら対応を安全に遂行するために必要な意思決定支援について、町と气象台や関係機関が意見交換を行い、土砂災害に対する判断基準（トリガー）を設定した。

c) 緊急対応として実施したタイムラインの試行運用

2018年9月から10月にかけて立て続けに襲来した台風第24号と台風第25号では、各機関が連携し、厚真地区緊急対応TLの試験的な運用を行った。

北海道胆振東部地震の影響で地盤が緩み、通常よりも少ない降雨で土砂災害が発生するおそれがあったことから、雨が降る前に住民を避難させる必要があった。一

方で、町が住民への避難の呼びかけを行うには最低2時間を要し、そのための準備を含めると降雨が始まる3～4時間前には避難情報を発令する必要があったことから、気象台は常に最新の気象情報を町に提供するとともに、避難情報発令に向けた意思決定の支援を行った。

厚真町北部の山間部には、主要な避難路となっている道道があり、その道道で土砂災害が発生した場合の避難中の被災や避難の遅れによる孤立が懸念された。そのため、台風対応においては、町・消防・消防団と道が連携し、住民への避難の声掛け（住民の追い出し）と通行止めのタイミングや範囲を事前に調整した上で、大雨や暗くなる前に住民の避難を完了し、現場対応者を退避させる等、十分、安全確保に配慮した対応が行われた（図-5）。

さらに、土砂災害が発生した場合、迅速かつ確実に救援・救助活動を行うため、自衛隊の協力のもと、避難する人とその場所、避難しない人とその家屋（当時、家畜等の理由により避難しない人もいた）を完全に把握できるように地図を活用した避難状況の確認・共有が行われた。



図-5 災害対策本部の様子（地図を活用した状況確認）

## (2) 融雪期に備えた「厚真地区緊急対応TL（水害対応編）」への改善と全国初の運用

### a) 厚真地区緊急対応 TL（水害対応編）への改善経緯

台風第25号対応後に開催した第4回意思決定WGにおいて、台風対応をふりかえり、「来年の融雪期も、融雪出水によって土砂災害や洪水災害が発生する危険があり、その対応をどうするか」との課題が挙げられた。

そこで、2019年1月30日に第5回意思決定WG、同年2月28日に第6回意思決定WGを開催し、融雪期における判断基準と避難対応等について検討を行い、出水期の対応に加え、融雪期にも対応した「厚真地区緊急対応TL（水害対応編）」の改善を図った（図-6）。

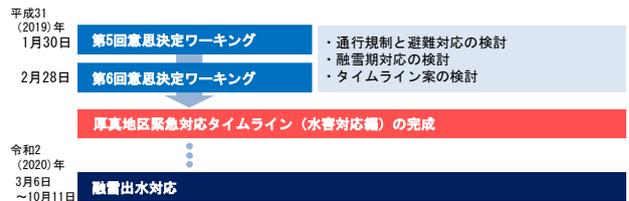


図-6 厚真町地区緊急対応 TL（水害対応編）に改善までの流れ

### b) 先進的な融雪期のトリガー設定

融雪期にも対応した「厚真地区緊急対応TL（水害対応編）」に改善を図るにあたり、融雪出水による土砂災害の判断基準に関して指標はなく、全国でも前例がないことから、気象台の協力のもと、「24時間雨量と気温から予測される融雪量」と「過去の土砂災害発生時の降雨量」を照らし合わせるとともに、「想定される避難情報の発令回数」を鑑みて、厚真町独自の「融雪期における土砂災害のトリガー」が設定された（図-7、8）。

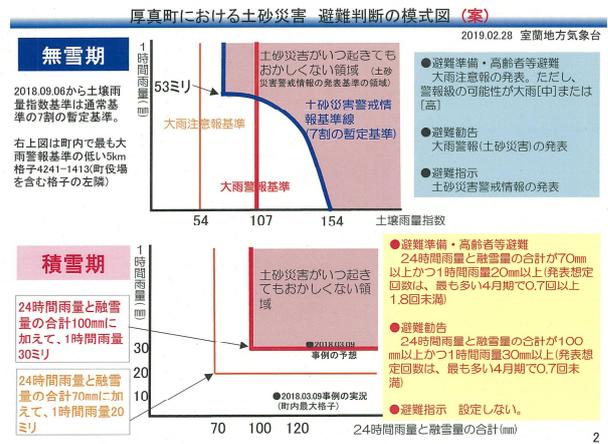


図-7 融雪期における判断基準案（室蘭地方気象台提供）

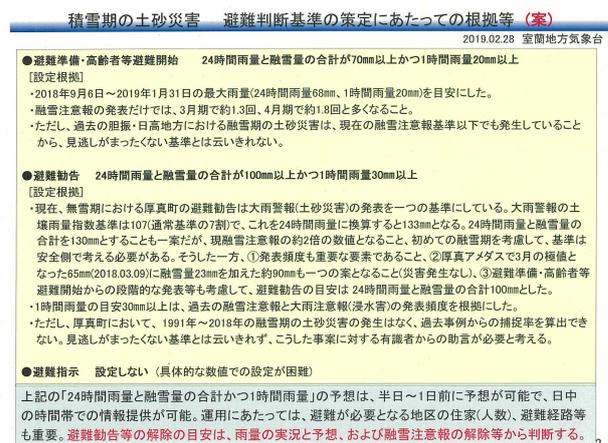


図-8 融雪期における判断基準案の根拠（室蘭地方気象台提供）

### c) 全国初となる融雪期におけるタイムラインの運用

「厚真地区緊急対応TL（水害対応編）」に改善を図ったおよそ1年後となる2020年3月に、全国初となる融雪期におけるタイムラインの運用を行った。

2020年3月10日に気温が上昇し、まとまった降雨が見込まれたことから、6日に厚真町、室蘭地方气象台、胆振総合振興局、室蘭開発建設部、NPO法人環境防災総合政策研究機構でテレビ会議を実施し、タイムラインの判断基準に基づきタイムラインの運用を開始することとなった。その後、10日14時に、厚真町は70世帯151人を対象に避難準備・高齢者等避難開始を発令した（図-9）。

この降雨及び融雪出水により、厚真町では民家の裏山から土砂流出等が発生したが、住民や建物に被害はなかった（図-10）。

このタイムライン運用にあたっては、各機関によるテレビ会議を7回開催し、気象の見込みや対応の状況等の最新情報を共有するとともに、降雨がほとんどない中で暗くなる前の早め早めの避難情報発令の後押しを行っている。



図-10 融雪出水による厚真町高岡地区の土砂流出  
(厚真町提供)

### (3) 天然ダムの段波に備えたタイムラインの策定

地震発生後の台風による大雨や融雪による出水によって、日高幌内川で形成された天然ダムの湛水が進み、天然ダム内に地すべりが発生した場合、下流の幌内地区に日高幌内川の流下能力を超える段波が発生する危険があった。

そのため、天然ダムの対策を進めていた国・道と協力し、雨量予測やダム水位を主な判断基準とした「幌内地区住民の避難に着目したタイムライン」が策定され、町的意思決定支援が行われた（図-11）。

**タイムライン行動概要**

**【運用会議】**  
厚真町、室蘭地方气象台、胆振総合振興局、室蘭建設管理部、CeMi（事務局）でテレビ会議により7回実施。

★関係機関と検討した「土砂災害判断基準」により「**避難準備・高齢者等避難開始**」を発令することとなった。

---

■3/6(金) 15:30  
・气象台: 週明け10日の降雨予報によると「避難準備・高齢者等避難開始」の発令基準に該当する可能性がある。

●●3/6 16:00TLステージ1●●

■3/8(日) 15:45  
・气象台: 10日朝から11日朝にかけて融雪が進みまとまった降雨の見込み。

■3/9(月) 11:00  
・气象台: 10日15:00~24:00に20mm/hr程度の降雨がある。  
・厚真町: 今晚より防災無線により注意喚起を行う。

●●3/9 11:40TLステージ2●●

■3/9(月) 16:00  
・气象台: 気象の見立て変わらず  
・厚真町: 13時より地区連絡員を土砂災害危険箇所関係住宅に情報連絡。不在宅はホスティング

■3/10(火) 9:00  
・气象台: 気象の見立て変わらず  
・厚真町: 避難準備・高齢者避難開始発表を午後から予定  
避難所開設準備は午前中に終了予定

**★★3/10 14:00 避難準備・高齢者避難開始発表★★**  
●●3/10 14:00TLステージ3●●

■3/10(火) 16:00  
・气象台: 気象の見立て変わらず  
・厚真町: 避難準備・高齢者避難開始対象地区は16地区 70世帯 151人  
・管理部: 午前中に通常パトロール実施

■3/10(火) 21:00  
・气象台: 気象の見立て変わらず  
・厚真町: 明日の朝にパトロール実施予定

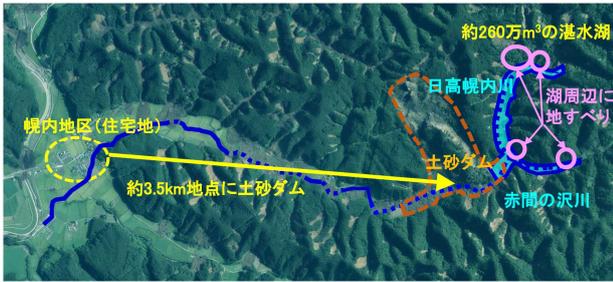
**★★避難状況★★**  
・福祉センター4世帯8人、厚南会館 2世帯11人

■3/11(水) 6:00  
・厚真町: パトロール実施

**★★3/11 8:15 避難準備・高齢者等準備解除★★**  
●●3/11 16:00TL終了●●

厚真町 積雪期における土砂災害避難判断基準

図-9 2020年3月の融雪出水対応の状況



危険度	水位	気象情報	道	厚真町	住民等
レベル1		大雨・洪水警報発表	情報収集	情報収集 情報提供・共有	避難所・ルート確認 情報収集
レベル2	98.4m 高齢者等避難準備水位超過	24h雨量予報80mm以上	第1非常配備 関係機関に連絡	第1非常配備 避難所開設 避難準備発令 避難誘導等	約2時間前 避難準備開始
レベル3	99.6m 避難勧告水位超過	3h雨量予報10mm以上3時間又は24h雨量予報60mm以上	関係機関に連絡	避難勧告発令 避難誘導等	約1時間30分前 全員避難開始
レベル4	100.5m 避難指示(緊急)水位超過	3h雨量予報5mm以上3時間又は24h雨量予報40mm以上	第3非常配備 関係機関に連絡 交通規制開始	第3非常配備 避難指示(緊急)発令 避難誘導等	約1時間前 全員避難徹底・避難完了
レベル5	水位に関わらず24h雨量予120mmの時、降雨・水位状況を勘案し避難指示(緊急)を検討				
レベル5	段波発生危険水位到達		退避確認 交通規制完了	状況により 災害派遣要請	
レベル5	危険水位102.2m以下	以後、雨が降らない場合	現地調査 安全確認	避難勧告等解除	帰宅

図-11 日高幌内湖の段波を対象としたタイムラインの概要  
(胆振総合振興局室蘭建設管理部提供)

### 3. 厚真地区緊急対応TL運用の検証

厚真地区緊急対応 TL の運用について検証するため、「2018年の台風第24号・第25号対応のふりかえり」、「2020年3月の融雪期対応のふりかえり」を行い、当時の防災対応について「うまくいったこと」、「うまくいかなかったこと・懸念すること（以下、課題）」とその課題に対して「今後も引き続きやるべきこと・改善アイデア（以下、対応案）」の意見出しを行った。

#### (1) 2018年の台風第24号・第25号対応のふりかえり

2018年の台風第24号・第25号対応で、うまくいったこととしては、消防職員・消防団が、日没前や大雨前の安全な状況で避難の呼びかけや避難誘導等を実施することができたこと、タイムラインの取り組みを通じ、円滑に通行止めと避難を実施できたこと、事前に各避難場所への物資等の配分・搬送を実施できたこと等が挙げられた。

課題としては、避難場所が定員オーバーになったときの対応が挙げられ、その対応案として、各避難場所の収容人数と想定避難数の再確認を行うとともに、避難所開設から運営まで住民が行えるよう地域で議論することとした。その他、今後、各機関が一斉に集まるのが難しいため、離れたところにいる場合どのように対応するのが挙げられ、その対応案として、TV会議のシステムを整備し、TV会議を開催することとしている（表-2）。

なお、本対応で消防団が厚真地区緊急対応TLに基づき、

町や関係機関と連携して避難勧告の周知や避難誘導を行い、人的被害を未然に防いだ功績から、「平成30年度水防功労者国土交通大臣表彰」を受賞した。

表-2 台風第24号・第25号対応のふりかえり結果（抜粋）

項目	うまくいかなかったこと 懸念すること	対応案 (今後も引き続きやるべきこと、 改善アイデア)
避難・避難支援	避難者の避難予定時刻を聞かなかった。【消防】	事前に避難対象者の避難予定時刻を確認し、記録・共有する。【消防】
	避難を拒否し、避難しなかった人がいた。【厚真町】	逃げないことで消防団などが被災するということを認識してもらう。【松尾氏】
	避難支援の要請に対し、人員を割いていなかったため予備の救急隊で対応を行った。【消防】	避難支援の体制を強化・計画する。【消防】
避難場所の開設・運営	避難場所が定員オーバーになったときの対応。【青森県】	各避難場所の収容人数と想定避難数の再確認を行う。【事務局】 避難所開設から運営まで住民が行えるよう地域で議論する。【松尾氏】
TL運用会議	今後、各機関が一斉に集まるのが難しいため、離れたところにいるどう対応するのか【室蘭建設管理部】	TV会議のシステムを整備し、TV会議を開催する。【事務局】
リエゾン・資機材支援	いきなりリエゾンで自治体へ入り、オペレーションをすることは困難である。【北海道開発局】	組織内の横展開を行う。【北海道開発局】
融雪洪水対応	来年の融雪期対応をどうするのか。【室蘭建設管理部】	融雪洪水に対応したTLを策定する。【事務局】

【】意見発表機関・発表者

#### (2) 2020年3月の融雪期対応のふりかえり

2020年3月の融雪期対応で、うまくいったこととしては、週明けの3月9日（月）～10日（火）に大雨や融雪による出水が見込まれたことから、6日（金）にTL運用会議を行い、今後のTL運用を判断し、早期対応を実施することができたことが挙げられた。

課題としては、気象現象が当初の想定より下回る結果であったが、町内各地で土砂の流出が発生したことが挙げられ、その対応案として、大きな被害が発生していないことから、現行の判断基準は変更しないものとするが、今後、判断基準の数字にとらわれることなく、幅広に（安全側に）判断するものとする（図-12）。その他、災害警戒時には各関係機関から町長に、様々な基準で多くの情報がホットラインで提供されることから町長に負担がかかることや全体の状況把握が困難になることが挙げられ、その対応案として、町長の負担軽減や全体の状況把握のため、ホットラインの内容や実施基準等を取りまとめた「関係機関から首長へのホットラインの実施基準」を作成することとした（表-3）。

表-3 融雪期対応のふりかえり結果（抜粋）

うまくいったこと		
連明けの3月9日（月）～10日（火）に大雨や融雪による出水が見込まれたことから、6日（金）にTL運用会議を行い、今後のTL運用を判断し、早期対応を実施することができた。そのため、現在の運用の流れで問題はないと考え、引き続き、各関係機関が積極的に情報共有を行い、運用する。		
項目	うまくいかなかったこと 懸念すること	対応案 (今後も引き続きやるべきこと、 改善アイデア)
融雪対応の判断	今回の出水は、当初の想定（TLステージ3の基準）より下回る結果であったが、町内各地で土砂の流出が発生した。  土砂災害警戒区域等の指定が進んでいることから、避難対象者が増加している。そのため、避難の声をかける個別訪問の件数も増えることから、より早めの対応が求められる。	大きな被害が発生していないことから、現行の判断基準は変更しないものとするが、今後、判断基準の数字にとらわれることなく、幅広く（安全側に）判断するものとする。  避難の声をかける個別訪問の件数も増えることから、より早めの対応が求められる。現状を把握するため、土砂災害の避難対象となる世帯数と人数を関係機関で共有する。
ホットライン	災害警戒時には、各関係機関から町長に、様々な基準で多くの情報がホットラインで提供されている。	町長の負担軽減や全体の状況把握のため、ホットラインのルール（情報の内容、実施基準等）関係機関で共有する。
町のポスティング対応	融雪時の避難について住民から理解を得るため、事前にポスティングによる避難周知を行った。今後もポスティングによる周知を行うことが想定される。	TLにポスティングによる周知の項目を追加する。

厚真町 積雪期における土砂災害避難判断基準

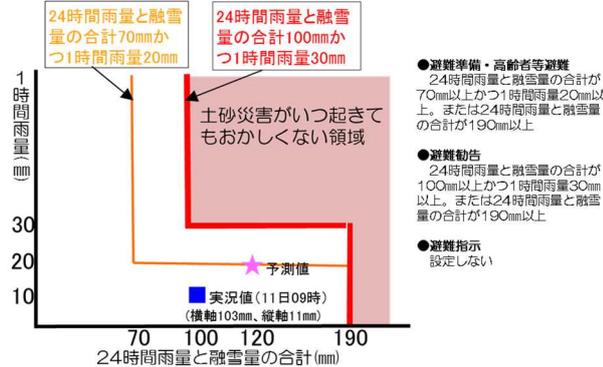


図-12 2020年3月の融雪期対応における予測値と実況値  
(室蘭地方気象台提供)

#### 4. 今後の取組

タイムラインをより実効的な計画とするためには、繰り返しタイムラインを運用し、運用後にふりかえりを行い、タイムラインを改善することが不可欠である。厚真地区緊急対応 TL の取り組みにおいては、意思決定 WG のみならず、各機関の担当者による事務局会議をこれまで8回開催しており、人事異動後の防災対応の確認や対応後のふりかえりを行い、タイムラインの改善を図っている。

地震発生からおよそ6年が経過し、恒久的な対策工事が完了したことや各機関の防災体制や連携内容が変更されていることから、現状に沿ったより実効的なタイムラインとするため、2023年12月に、町災害対策本部の各部長と関係機関とで意見交換を行い、町災害対策本部各部の役割と関係機関との連携内容を現状に合わせ整理したタイムラインへ改善を図り、名称も「厚真町水害対応タイムライン」に改めている。

また、厚真町では、タイムライン文化の醸成とともに、住民が主体となった防災対応の強化を図るため、住民を対象とした防災セミナー等を行い、コミュニティタイムラインの策定を促し、町と地域が一体となったさら

なるタイムラインの展開を目指している。

#### 5. まとめ

本稿では、2018年9月に発生した北海道胆振東部地震をうけ、室蘭開発建設部として策定支援を行った厚真地区緊急対応TLについて紹介した。

地震発生後、台風の接近に備え、タイムラインや実際の対応について意思決定WGを開催できるよう支援するとともに、対応後には、実効性を確保するため、関係機関が集まり振り返りが行われた。また、融雪期前には、融雪を考慮したタイムラインのトリガーを設定するなど、地域の実情に合わせた内容となるよう助言を行ってきた。

これまでの緊急対応タイムラインの取り組みを通じて、住民の避難を支援する厚真町と町の意思決定を支援する関係機関が、日頃から「顔の見える関係」を築き、ともに課題を共有し検討した上で、災害時に「タイムライン」を核に連携して対応することが、未曾有の災害に対しても有効であることが明らかとなった。

厚真町では、恒久的な対策工事の完了によりハード整備が強化された一方で、地震後時間とともに進む住民の防災意識の希薄化など、防災上の課題が存在する。そのため、コミュニティタイムラインなどの新たな取り組みを促進するとともに、引き続き厚真町が中心となって関係機関と連携し、「タイムライン」を核とした、防災体制の充実が図られることを期待する。

**謝辞：**厚真地区緊急対応 TL の策定及び運営に当たっては、厚真町のほか、東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター松尾一郎客員教授、愛知工業大学横田崇教授、北海道大学農学研究員国土保全学研究室小山内信智特任教授（当時）、東邦大学村中明非常勤講師（当時）に多大なご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献：

- 1) 北海道総務部危機対策課：平成30年北海道胆振東部地震による被害の状況について（令和4年8月1日現在）  
[https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/7/1/0/9/9/2/1/\\_/被害状況\\_R4.8.1.pdf](https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/7/1/0/9/9/2/1/_/被害状況_R4.8.1.pdf)
- 2) 北海道開発局室蘭開発建設部：厚真地区緊急対応タイムライン意思決定WG  
<https://www.hkd.mlit.go.jp/mr/tisui/a00ihh000000bc8z.html>
- 3) 松尾一郎/CeMIタイムライン研究会：タイムライン日本の防災対策が変わる，廣済堂出版，2016

# 能登半島地震の道路啓開における初動対応の記録 ～半島地域の道路特性を踏まえて～

田中 義太郎<sup>1</sup>・奥村 忠史<sup>2</sup>

<sup>1</sup>能登復興事務所 道路計画グループマネージャー（〒926-0852石川県七尾市小島町西部2七尾地方合同庁舎3F）  
前 金沢河川国道事務所 建設専門官

<sup>2</sup>富山河川国道事務所 地域防災調整官（〒930-8537 富山県富山市奥田新町2番1号）  
前 金沢河川国道事務所 輪島国道出張所長

令和6年能登半島地震では、石川県で初めて震度7を観測し大規模な斜面崩落により道路が寸断され孤立集落が発生した。また、金沢と能登を結ぶ大動脈である「能越自動車道」や「のと里山海道」の通行止めにより、被災地に向かう車両が国道249号や一部の県道など限られた道路へ集中したため、避難や救助、物資搬送に支障が生じる著しい交通渋滞が発生した。本稿では、三方が海に囲まれ陸路によるアクセスが限られる能登半島地域の道路特性を踏まえて、発災直後の現地の状況や行動履歴を紹介するとともに、道路啓開の初動対応について報告する。

キーワード 能登半島地震、道路啓開、初動対応、権限代行、半島地域の道路特性

## 1. はじめに

2024年1月1日16時10分に発生した令和6年能登半島地震（以降、能登半島地震）では、石川県で初めて震度7を輪島市や志賀町で観測し、2011年の東日本大震災以来の大津波警報が発表された。この地震では災害関連死を含む333名の尊い命が失われたほか、1,300名を超える方が負傷され、12万棟を超える住宅被害が生じるなど未曾有の大災害となった（2024.7.1時点）。発災当初は、能登半島の北側、外浦の国道249号や山間部の県道などで大規模な斜面崩落により道路が寸断され、孤立集落が発生した。また、金沢と能登を結ぶ大動脈である「能越自動車道」や「のと里山海道」の通行止めにより、被災地に向かう車両が国道249号や一部の県道など限られた通行可能な道路へ集中し、避難や救助、物資搬送に支障が生じる著しい交通渋滞が発生した。

「半島地域」は半分は島という文字通り地形的な様々な制約条件がある。本稿では、三方が海に囲まれ陸路によるアクセスが限られる能登半島地域の道路特性を踏まえ、発災直後の現地の状況や行動履歴を紹介するとともに、道路啓開の初動対応について、現場で直面した課題と当時の具体的な対応を報告し、今後の記録としてとりまとめるものである。

## 2. 能登半島の地形・地質

### (1) 地形・地質

能登半島北部は、海拔300～400mの山地が河川の浸食作用によって各地で谷地形が形成され、沿岸部は海岸段丘が分布しており、最高峰は輪島市東の高洲山（標高567m）となっている。能登半島北西部の輪島市門前町周辺は主に中新世前期の砂岩・泥岩・礫岩が分布する。また、東部には中新世前期のデイサイト質火砕岩が分布し、北部には中新世前期の泥岩層が分布する。輪島市町野町曾々木から珠洲市側に向けては、流紋岩溶岩や緑色凝灰岩が分布している<sup>1</sup>。これらはいずれも日本列島が大陸から分離し日本海ができた約2,000万年前に形成された地質構造であり、地殻変動により地表部に露出すると強風化作用により脆弱な土質になるため、能登半島各地では地すべり地形が多数認められる。

### (2) 能登半島隆起の歴史

能登半島北部の海底活断層は半島に沿うように東北東～西南西方向に存在しており、この断層が数十万年前から地震とそれに伴う隆起を繰り返し起こすことで現在の能登半島が形成されてきた。この断層は半島側が盛り上がる逆断層であるため、今回の地震でも奥能登の北の外浦は最大約4m隆起した場所がある一方で、南の内浦はわずかな沈降や地震動による埋め立て地の沈下が発生している。能登半島は過去にこのような地震活動が繰り返された結果、外浦の標高が高く内浦に向かって緩やかな傾斜地形となっている<sup>2</sup>。能登地域のインフラ整備や災

害復旧はこのような山間部や沿岸部で進める必要があり、特徴的な地形・地質条件を計画・設計に考慮する視点は欠かせない。

### 3. 発災直後の状況と初動対応

#### (1) 発災直後の輪島市街地

1月1日に筆者の一人は輪島市の宿舎に滞在し、弾き跳ばされるような激しい揺れに遭遇した。今後の対応のため、携帯等で情報収集しながら迎えた夕方、輪島朝市側の夜空が真っ赤に燃え上がる炎に包まれていた。輪島国道出張所が入る輪島地方合同庁舎は、津波避難所に指定されていることもあり、近隣住民や火災現場からの避難者は庁舎フロアを滞在スペースとして活用していただいた。執務室隣の地質調査ボーリングコア保管室では、冷たく硬い床では横になりづらいため、木製のコア箱を簡易ベッドにして過ごす様子が見られた(図-1)。



図-1 宿舎から見た輪島朝市周辺の火災(左)、近隣住民が避難する地質ボーリングコア保管庫(右)

#### (2) 家族の安全確保と出動の記録

地震発生時、筆者は富山県氷見市の富山湾に面する海岸部にある実家に滞在していた。昨年完成した新居が倒壊するのではと危険を感じるような揺れの中、子供たちとテーブルの下に身を潜めた。その場で地震情報を確認すると能登半島沿岸部に大津波警報が発令されていた。能登半島の付け根に位置する現在地は、津波到達の危険性が高いことは東日本大震災を見聞きした家族全員が直感的に感じ取り、高台への避難行動を取ることができた。最寄りの高台である阿尾城跡へ帰省していた兄弟も含め家族13人で移動した直後、海岸を見下ろすと見たことがない景色が広がっていた。見慣れた波打ち際は突然、海底がのぞいたかと思うとその直後、次々に波が押し寄せてきた(図-2)。外気温0℃の中、92歳の祖母や0歳の姪が凍える中、恐る恐る高台から降り自宅の様子を見に行ったところ、幸い我が家の高さまで津波があがっていないことを確認したのは、元旦の20時を回っていたころであった。地元の避難所へ向かう道は混雑し始めており、電気・水道もつながらないままであるとともに、次はさらに大きな津波が押し寄せることも想定された。このため、速やかに弟夫婦5人は居住地の京都へ帰るよう声をかけ、残る家族8名は富山市にある筆者の官舎へ避難す

ることとした。家族全員の安全を確保し着替えや飲食物を準備した上で、地震対応のため再び能登方面へ1人車を走らせたのは1月2日午前2時過ぎであった。途中、最寄りの官署である富山河川国道事務所で能登へ向かう通行可能な経路を確認した後、まずは石川県七尾市にある能登国道維持出張所へ向かった。



図-2 高台から見えた氷見海岸の津波

#### (3) ドライバーの救援

最初の職務は能越自動車道のと里山空港IC～穴水IC間に取り残された車両の確認とドライバーへの救援物資の配布であった。現地へ行く物資支援隊が七尾市に到着したことから、速やかに配布物資の確認とドライバーへの対応方針について打合せし、現地対応の把握と状況報告を行う役目を担った。国が管理する能越自動車道の当該区間(延長6.2km)で取り残された車両の数は20台。うち8台は物資支援隊の誘導などにより脱出し、残り12台は車両に残る、もしくは住所・連絡先をメモシカギをつけたまま歩いて脱出していた(図-3)。これらのドライバーの親切な行動により道路管理者から車両所有者への速やかな連絡が可能となり、この後の能越自動車道のスムーズな緊急復旧工事着手に役立った。



図-3 ドライバーに支援物資を届ける様子(左)、1月2日の能越自動車道の被災状況(右)

#### (4) 初期の道路啓開

1月2日夕方からは、最初の道路啓開における現場監督の任務に従事した。道路啓開とは、崩落した土砂を撤去したり陥没した道路に碎石を敷均すなどを行い、被災地へのアクセスルートを確保することをいう。主要都市間の接続と孤立解消を優先させなければいけないため、幅員4m程度の1車線を確保しつつ国道249号や県道について、七尾市から穴水町を經由し輪島市・珠洲市へ向かって前進することとした。その過程では、電線を巻き込ん

だ土砂をどのように撤去するかや、険しい谷地形やロックシェッド出入り口の落石に対しどのようにして幅員を広げるかなど、監督職員として施工者とやりとりする事項は多くあった（図-4）。最低限の資材と作業量で都市間交通ルートを最速で確保しなければならないため、大規模な崩落を前にしたときは、場合によっては現道を諦め旧道を活用した別ルートを選択するなどの即時判断が求められた。このような道路啓開によって、消防や救急、自衛隊が被災地へ移動することが可能となるため、施工者とともに「能登の被災者の皆さんの救助や支援物資の輸送につなげる」という強い意識で作業にあたった。



図-4 電線を巻き込んだ落石撤去方針の判断（左）  
道路啓開幅員約4mの確認（右）

#### 4. 初期の道路啓開における課題

##### (1) 早期救援ルートの確保

人命救助のタイムリミットの指標として、一般的に被災後3日を過ぎると生存率が著しく低下すると言われている。少しでも早く緊急車両や救援物資を被災地に送り届けるために、地震災害時の道路啓開は何よりも優先される。そこで、能登半島地震の道路啓開で最初に立てた目標は「3日以内に輪島・珠洲方向に大型車も含む緊急車両が通行できる1車線程度の道路を確保する」こととした。東日本大震災では震源から遠い内陸部の東北自動車道等が発災から20時間後には緊急交通路を確保し、被災地を南北にアクセス可能となったが、能登半島地震では能越自動車道やのと里山海道が大きく被災し速やかな復旧は困難となっていた。能登半島を縦貫する国道249号や珠洲道路など県道の道路啓開は、被災した市街地と金沢・富山を結ぶアクセスルートの早期確保につながるるとともに、この後同時に取り組むこととなる孤立解消に向けた「くしの歯作戦」を実行に移すための根幹ルートを形成する上でも重要なミッションであった。

##### (2) 限られた幹線道路で効率的に交通を流す

半島地域は三方を海に囲まれており、陸続きの一方のみで接続しているため、通常時から都市間をアクセスする幹線道路の数に限りがある。災害時にこれらの幹線道路で大規模な損傷が発生すると、半島地域への陸路でのアクセスルートがさらに限定されてしまう可能性が高い。能登半島の場合は、能越自動車道・のと里山海道（自動車専用道路）と国道249号・県道（一般道）の2

路線が南北に移動する唯一の幹線道路であった。発災直後は特に前者で通行不能となる被害が発生したため、国道249号へ交通が集中し著しい渋滞が発生していた。アクセスする幹線道路に限りがある能登半島地域では、比較的損傷が小さく通行可能な幹線道路でいかに効率的に交通を流すかが大きな課題のひとつとなった。

#### 5. 現場で直面した問題点

##### (1) 自動車専用道路で発生した大規模な被災

アクセス制限された自動車専用道路は通常時であれば高いサービス速度と快適性から多くの交通を常時流すことができるが、被災直後はそのアクセス制限という特徴からIC間に1箇所でも大規模な被災箇所が確認されると全区間で通行止めとせざるを得なくなる。能登半島地震では能越自動車道・のと里山海道で全178箇所が被災し、うち34箇所で盛土が崩壊するなど応急手当だけでは通行可能にできない大規模な損傷が発生したり、橋梁接続部で鋼製ジョイントが折れる損傷が発生したため、速やかな交通開放を行うことが困難となった（図-5）。



図-5 能越自動車道の大規模な盛土崩落（左）、  
橋梁鋼製フィンガージョイントの破断（右）

##### (2) 一般国道で発生した著しい交通混雑

被災直後の道路啓開は、能登半島を南北に結ぶ唯一のアクセスルートとなった国道249号・県道で実施し、約4m程度の1車線確保を進めた。しかし、段差や地割れ、碎石舗装など悪化した路面状態により著しく走行性が悪化しているだけでなく、避難車両や緊急車両の急増や大型車混入率の増加、停電による道路照明の消灯、県外ドライバーが流入することによる運転者の走行経験の変化など、あらゆる条件が加わり交通容量が極端に低下し、著しい渋滞が発生した。その結果、徳田大津ICから珠洲市までの平均所要時間は、地震前後で約1時間から約3.5時間、輪島市までの平均所要時間は、約40分から約2.5時間かかるなど被災地へのアクセス時間が通常時の約3～4倍となり迅速かつ効率的な救援・復旧に支障がでた（図-6）。

#### 6. 実施した具体的な対応

### (1) 道路啓開する路線の抽出

地震直後の情報が少ない中でも、能越自動車道の被災状況は、CCTVやドライバーからの通報で大規模な被災

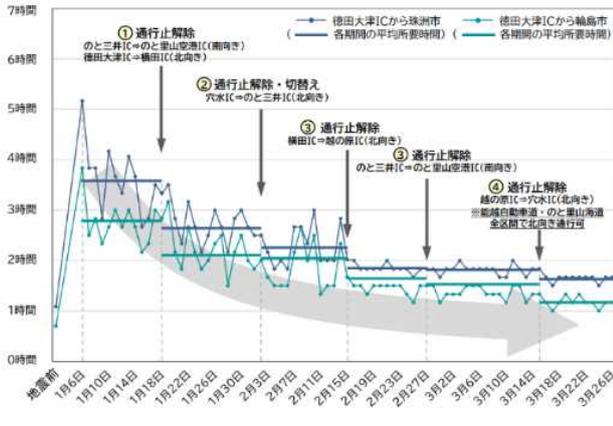


図-6 七尾市から奥能登方面の所要時間の推移<sup>3)</sup>

災を受けていることを確認した。自動車専用道路はIC間の5~10kmすべてを補修して初めて交通開放することができる一方、一般国道は10mでも補修した延長だけ沿道利用者の避難を開始でき、能登半島を縦断するアクセスルートとして活用できる。そこで、1月2日に結集した日建連との道路啓開では、能越自動車道やのと里山海道ではなく、国道249号や幹線道路となる県道を対象とすることとした。能登半島の脆弱な地形・地質条件から、道路の切土部・盛土部の崩落や橋梁部前後の不等沈下が事前に想定されたため、初動の道路啓開では、重機による土工事で応急対応することとし、崩落土砂の撤去、亀裂・段差の造成を繰り返しながら北上した(図-7)。

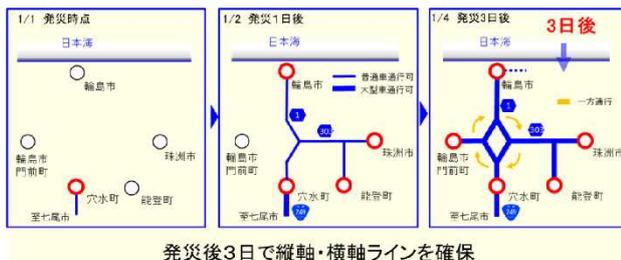


図-7 発災直後の道路啓開ルート

具体的には、まず道路パトロールカーで都市間を接続する最短ルートとなる国道249号や県道1号線、珠洲道路を先行調査し、補修必要箇所の緊急復旧方針を事前に確認した(図-8)。その後、駆けつけた(一社)日本建設業連合会のバックホウおよび碎石を積載したダンプトラックを随行し、再度主要な被災箇所の補修方法を現場で指示しながら、輪島市方向は清水建設(株)と、珠洲市方向は鹿島建設(株)と両市街地を目指して進んだ。その結果、1月4日までに両市まで大型車が走行可能な1車線4mの幅員を確保した道路啓開が完了した。



図-8 道路啓開前に先行調査で復旧方針を確認する様子(石川県輪島市三井町本江)

### (2) 電線管理者との連携

輪島と珠洲の両方向からのアクセスルートが交わる県道303号線の大規模崩落箇所では、土砂崩落とともに立木が電線と接触している状況が認められた。電線と接触した立木は感電の危険が高く土木工事での撤去作業の着手が困難となった。そこで電柱番号を写真で災害対策本部へ送付し、北陸電力送配電(株)へ立



図-9 電線管理者による立木切断  
電力送配電(株)へ立木撤去協力要請を行うことで、1月4日までの道路啓開に間に合うよう、切断作業を行うことができた。

### (3) 緊急アクセスルートの効果を最大限発現させる交通誘導

前述したように道路啓開した各被災箇所は、1車線かつ幅員約4mで復旧し、輪島市や珠洲市などを結ぶ緊急アクセスルートとした。しかし、これでは各箇所毎に対向車が譲り合う必要があり、実質的な片側交互通行となった。このため、通行車両が正面同士で干渉した際は、一時的に交通が停滞するなど、著しい旅行速度の低下を招くことになった。加えて、渋滞中の車両の中には、引き返して別ルートを探すドライバーも多数見られ、不要な交通を生み出していた。

そこで今回、奥能登地域を行き来するすべての車両が通過する穴水町~輪島市境の地域では、県道が環状に1車線で道路啓開を完了したことから、巨大なサークル上の時計回りの一方通行で被災地を行き来するような交通誘導を実施した(図-10)。この交通誘導により、経路

によってはわずかに遠回りとなるものの迷走車を排除でき、1車線確保した啓開道路を停止することなく通過する緊急アクセスルートの確保を可能とした。



図-10 巨大な環状の交通誘導（黄色矢印）

## 7. まとめ

本稿では、元旦の能登半島地震発災時に輪島が勤務地であった筆者の初動対応の中から、特筆すべき現場の課題と具体的な対応の概要を報告した。

国道249号や県道の緊急1車線復旧直後から、能越自動車道の道路啓開にも速やかに着手し、わずか2週間後の1月18日には能越自動車道のと三井IC～のと里山空港IC間を1車線で交通開放した。この区間は令和5年9月16日に開通した区間で、最新の土工指針に基づき、盛土の適切な締め固めや排水機能を持つ施工がされており、震源地に近い区間にもかかわらず能越自動車道の中で最も早く交通を開放した。また、当該道路は暫定2車線でありながら中央分離帯があるため大型車が停車してもその横を大型車がすり抜けられる2.5mの広い路肩を有する「完成度の高い暫定2車線」整備<sup>9)</sup>がされていることや、用地を将来の4車線化に必要な広さで買収済みであることなどが災害に強いレジリエンス（強靱化）な高規格道路として機能した。

奥能登地域は、震災前から過疎化や人口流出が大きな問題となっており、復興にあたっては、単に被災前の姿に復元するのではなく、未来志向に立って、以前よりも良い状態へと持っていく「創造的復興」が必要となる。先月石川県が策定した「石川県創造的復興プラン」の中でも、幹線道路の強靱化や機能強化に加え、金沢と能登の移動高速化など創造的復興に資する道路整備方針が盛り込まれている。

## 8. おわりに

今回の地震災害は、陸路のアクセスが制限される能登半島地域で発生した。半島地域では、災害に強いもしくは早期復旧可能な道路はもちろん、平常時より港湾や空

港を活用した航路や空路による物流を確保することが、災害時の対応に役立つものと考えられる。また、指摘されている南海・東南海トラフによる巨大地震の発生確率が高い太平洋側にも多数の半島が存在する。今回の道路啓開や復旧・復興活動が半島地域における今後の防災・減災計画に役立てるきっかけとなると幸いである。

現在能登復興事務所では、7月17日の能越自動車道のとと里山海道における全線対面通行をきっかけに、復旧から復興へと新しいフェーズへ移行することを促進するため、写真とメッセージを主体としたキャッチーなポスターを各地の道の駅などの施設に掲示を広めている（図-11）。日本の原風景という言葉がふさわしい能登地域の美しい風景を1日も早く全国の皆さんにお届けできるよう、今後も地域の皆さまの声を聞きながら復旧・復興を進めていきたい。



図-11 復旧・復興を伝えるポスター

**謝辞：**発災直後から現場の判断を最優先で後押ししていただいた本省、北陸地方整備局、事務所等の災害対策本部職員の皆さまに改めて感謝申し上げます。そして何より、過酷な被災状況の中、不眠不休で困難な課題を使命感を持って一緒に道路啓開にあたっていただいたすべての建設業の皆さまに心から御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 田村敬一. 平成19年能登半島地震被害調査報告. 国総研資料第438号. (2007年)
- 2) 北國新聞社. 特別報道写真集令和6年能登半島地震. (2024. 2. 15)
- 3) 北陸地方整備局HP. 発生から6ヶ月の取り組みのとりまとめ (2024. 6. 28) .  
<https://www.hrr.mlit.go.jp/bosai/index.html>
- 4) 田中義太郎. 完成度の高い暫定2車線整備指針について～地域需要に沿った社会資本整備の早期発現とコスト縮減～.国土政策技術研究発表会論文要旨(2003)

# 河川護岸の変状や空洞化対策の検討について

川本 優汰<sup>1</sup>・重宗 宏次<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国地方整備局 太田川河川事務所 管理課 (〒730-0013 広島県広島市中区八丁堀3-20)

河川護岸の変状や空洞化は、変状が顕在化するまでは目視確認が困難である。一方で、これらの変状は進行性を有することが多く、放置しておく大きな変状に進展し、場合によっては護岸が崩壊し、地域住民に被害が及ぶ可能性があるため、このような変状特性を踏まえた適切な点検・評価の実現が喫緊の課題となっている。太田川河川事務所では、三次元測量結果の二時期比較、地中レーダー探査、簡易測量手法などの最新のDX技術を駆使して堤防点検の高度化を図り、変状が顕在化する前の予兆把握、早期対応による地域住民への被害の回避や補修コスト縮減を検討している。本稿では、これらの取り組み事例について報告する。

キーワード 河川護岸, 変状, 空洞化, 堤防点検, 変状評価, DX技術

## 1. 太田川水系の特徴

<sup>1)</sup>太田川は中国・四国地方唯一の百万都市である広島市を流下する河川である。この川の歴史は、水害との戦いの歴史でもあり、有史以来、幾多の洪水被害を繰り返してきた。干潟の干拓や埋立てにより下流デルタ域にゼロメートル地帯が形成されたことも、洪水や高潮被害を拡大させる原因の一つとなっており、1932年～1968年にデルタ域における放水路建設工事、1948年～1980年に下流域で改修工事が行われている。その結果、2005年9月出水(戦後最大流量)では、下流域とデルタ域では太田川の氾濫による被害が生じなかった一方、中流部では浸水被害が発生し、床上浸水対策事業の契機となった。さらに、平成26年8月豪雨では、支川の根谷川で外水氾濫や内水による家屋等の浸水被害、平成30年7月豪雨では三篠川における越水・溢水及び内水により家屋等の浸水被害が発生したほか、堤防の欠損・護岸侵食等による被害が発生した。

以上より、太田川では出水に伴う河川管理施設の破損による地域住民への被害の発生リスクが存在するため、適切な維持管理によるリスク低減が重要である。

## 2. 太田川水系における維持管理状況

太田川水系の維持管理は、「堤防等河川管理施設評価・点検要領」<sup>2)</sup>(以下、「評価要領」という)に基づいて点検評価を行い、維持工事による補修実施を基本として運用されている。太田川水系の点検・評価・検討フロー図を図-1に、年間点検スケジュールを表-1に示す。

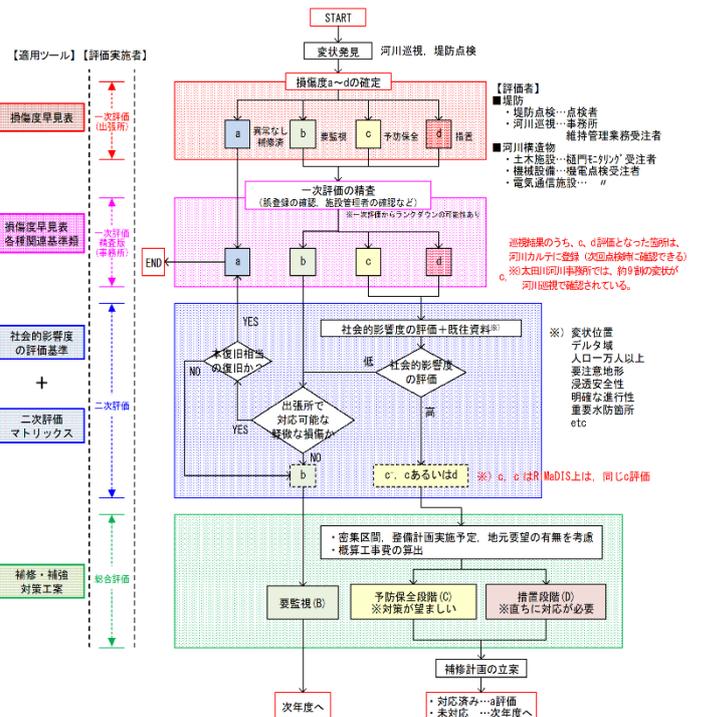


図-1 太田川水系における点検・評価・検討フロー図

表-1 「評価要領」に基づいた年間点検スケジュール

年月	2022年			2023年				2024年			
	11月~	1月	2月	3月	4月~	6月10日	6月11日	8月~	10月25日	10月26日	11月~
堤防点検	令和5年度出水期前点検				令和5年度重点点検(c評価)			令和5年度台風期点検(土堤)		令和6年度出水期前点検	
機械点検					令和5年度電気・機械点検(構造物点検)						
巡視	堤防・構造物に関する変状報告(点検結果ではない)					堤防・構造物に関する変状報告(点検結果ではない)					
取りまとめ					d評価箇所について、応急対策を実施し、c評価として出水期を迎える。			構造的な課題を整理し、公的機関へ提出する。			重点点検箇所

**(1) 点検と評価**

目視点検は、河川巡視員と職員により実施している。

変状種別とその評価については、表-2に示す太田川水系独自の「点検評価早見表」を用いて、定量的に変状種別と評価区分ができるように工夫している。

総合的な評価については、事務所内の横断的連絡調整会議に諮問したうえで、決定している。

表-2 点検評価早見表の一例（土堤、護岸）

工程	護岸
変状種別	[13]護岸の破損 鉄線型壁護岸以外の護岸
a 異常なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>変状なし</li> <li>クラックや目地開きの幅が2cm(裏込材の粒径相当)以下、あるいは、2cm以上であっても損傷部から裏込材が視認できない。</li> <li>部分的に、目視で分かる程度の段差、沈下、陥没、欠け(背面土は視認できない)、湧水がある。</li> <li>打音検査においては空洞化が懸念される雑音は発しない。</li> <li>ブロックマットに陥没・沈下が発生しているもの、破損は見られない。</li> </ul>
b 要監視段階	<ul style="list-style-type: none"> <li>クラックや目地開きの幅が2cm(裏込材の粒径相当)以上、かつ、損傷部から裏込材が視認できる。</li> <li>隣接する部材との段差、沈下、陥没(部材厚の1/2以上)、ゆるみ(遠くから見て分かる程度)がある。</li> <li>部材の欠けており、損傷部から背面土が視認できる。</li> <li>打音検査あるいは目視により、空洞化が確認できる。</li> </ul>
c 予防保全段階	<ul style="list-style-type: none"> <li>背面土の露出する部材の欠け、欠損が生じている。</li> <li>裏込め材の露出に起因する段差、沈下、段差(部材厚以上)が発生している。</li> <li>部分的に護岸が流出、破壊しており、護岸の機能が失われた状態である。</li> <li>陥没箇所から護岸背面の空洞化状況が確認できる。</li> </ul>
d 処置段階	<ul style="list-style-type: none"> <li>背面土の露出する部材の欠け、欠損が生じている。</li> <li>裏込め材の露出に起因する段差、沈下、段差(部材厚以上)が発生している。</li> <li>部分的に護岸が流出、破壊しており、護岸の機能が失われた状態である。</li> <li>陥没箇所から護岸背面の空洞化状況が確認できる。</li> </ul>

**(2) 変状が進行して補修を行った事例**

太田川では、横断的連絡調整会議において目視点検では適切に評価できないと判断された変状に対して、目視点検以外の点検評価方法を立案し、次年度以降の評価に反映する方針としている。

後述する3事例は、点検時の評価が「a(変状なし)」または「b(要監視段階)」であったにもかかわらず、一気にd評価相当の変状に発展し、補修対応を行った事例である。

**a) 事例① 市内派川の護岸背面空洞化**

経過観察(b評価)していた市内派川の護岸背面の空洞化箇所において、護岸の変状(はらみ出し)が顕在化した。そのため、地域住民の被害防止を目的に、薬液注入工法による広範囲の空洞充填を実施した。(図-2参照)

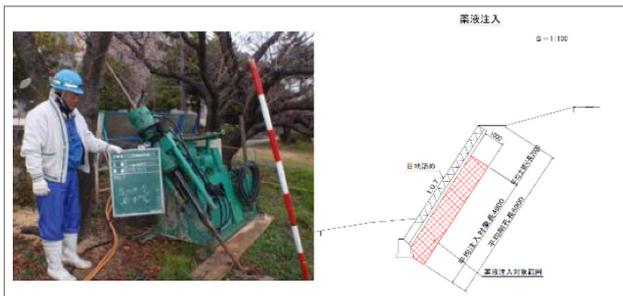


図-2 薬液注入による護岸背面空土化対策実施状況

**b) 事例② 太田川放水路低水護岸の護岸背面空洞化**

太田川放水路の低水護岸では、潮位変動に起因する護岸背面の空洞化の恐れがあり、経過観察(b評価)を行っていたが、法枠コンクリート護岸の大きな沈下変形が顕在化したため、鋼矢板と捨て石による補修を余儀なくされた。(図-3参照)

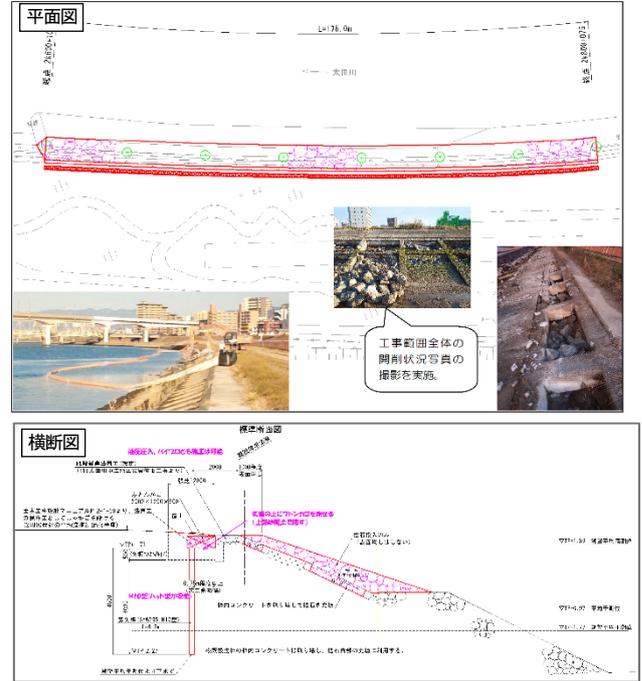


図-3 太田川放水路の低水護岸 補修状況

**c) 事例③ 中流域の河床洗掘に起因した護岸背面空洞化**

太田川中流域の低水護岸部では、河川水による護岸前面河床の洗掘の予兆を目視点検では確認できず、変状なし(a評価)となっていたが、出水に伴う洗掘による河床低下により護岸基礎が被災したため、護岸の復旧を行った。一部区間では、護岸背面の空洞化も確認されたため、モルタル充填による補修も実施した。(図-4参照)



図-4 太田川中流域における護岸基礎の被災状況

**(3) これらの事例を踏まえた課題抽出と対応方針**

上記事例は、経過観察のみで対応をしていたが、結果として補修対応が必要となった事例である。これらに共通する変状特性は、目視点検による変状状況の把握が困難であったという点である。

そこで、太田川河川事務所では、DX技術を用いて目

視困難な変状を可視化し、変状箇所のモニタリングを行って予防保全を図る取り組みを行っている。

### 3. 太田川河川事務所での取り組み

市内派川では、景観に配慮した石積み護岸が多く、また堤防の地域住民による利用が活発で、河川管理施設の破損が発生すると地域住民への被害が及ぶ可能性が大きい。そのため、主に市内派川において、表-3に示すようなDX技術を活用し、堤防点検の高度化を図り、早期に河川管理施設の変状を把握する取り組みを2020年度より行っている。以降に取り組み事例を示す。

表-3 変状特性に応じたDX技術の適応事例

変状特性	適用するDX技術
進行性の疑われる護岸変状	三次元測量成果の二時期比較
護岸背面の空洞化	地中レーダー探査
目視困難箇所の護岸変状把握	UAV写真測量による点検
小規模樋管等の函体点検	360°カメラを用いた点検
変状状況の把握精度の向上	モバイル端末を用いた簡易測量

#### (1) 三次元測量結果の二時期比較による進行状況の把握

市内派川の石積み護岸区間において、石積みのずれが確認された。そこで、同時期に同様な構造で築造された区間を対象に、複数年にわたる三次元測量を行い、二時期比較の結果から変位有無の確認および変位箇所のモニタリングを行ったものである。

##### a) 調査内容

UAVによる三次元測量（1回/年）を行い、竣工図や測量結果同士の重ね合わせにより変状箇所の把握(形状分析)とモニタリング（進行性評価）を実施している。

##### b) 整理方法と代表的な調査結果

点群データから切り出した任意断面と竣工図の比較、二時期の測量結果の差異のコンターマップによる表示を行い、変状位置や進行状況を視覚的に把握している。当該区間では、図-5に示すように、コンターマップから若干のはらみ出し部を確認することができた。この変状は、開始当初において進行が確認されたが、近年では収束傾向にあることが確認できており、経過観察（b評価）を継続中である。

同様な手法を用いて、これまで市内派川の石積み護岸を中心に全4箇所の変状進行状況を調査中である。このうち、旧太田川の護岸背面の空洞化箇所では、本調査結果に基づき「c評価（要保全段階）」と判断し、現在補修計画を立案中である。

##### c) 維持管理への反映方法

今後も調査を継続する事としている。さらに、調査結果を踏まえ、下記事項を点検等に反映している。

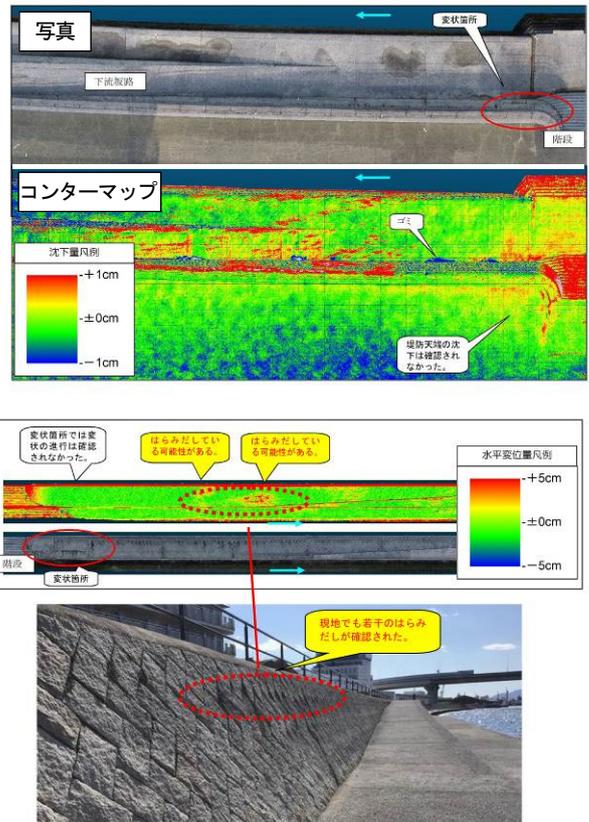


図-5 三次元測量結果の二時期比較による分析例

- ・河川巡視時の着目点の明確化。
- ・継続的なモニタリングとしての活用。

#### (2) 地中レーダー探査による護岸背面空洞化把握

護岸背面の空洞化が顕在化している太田川放水路や太田川中流域の低水護岸部において、地中レーダー探査とファイバースコープにより空洞箇所の把握を行ったものである。

##### a) 調査内容

地中レーダー探査とファイバースコープを用い、目視では確認できない空洞化箇所の平面分布と空洞化深さを把握する。地中レーダー探査により空洞の有無を確認し、代表的な空洞箇所においてファイバースコープによる状況把握と空洞深さの計測を行っている。

##### b) 整理方法と代表的な調査結果

空洞化の反応が確認された箇所を平面的にプロットするとともに、ファイバースコープで確認した空洞化深さをを用いた定量評価を行っている。定量評価は、対象護岸の部材厚の1/2以上の空洞が生じている場合を「c評価（要保全段階）」としている。（図-6参照）

##### c) 維持管理への反映方法

「c評価箇所」では、補修計画を立案し、計画的に対応している。なお、地中レーダー探査は高価であることから、年間予算を固定したうえで、堤防点検結果から優先度を決めたとうえで計画的に実施している。

「b評価（要監視段階）」と判断した箇所については、河川巡視時の着目点として情報共有するとともに、近傍

の護岸補修時に合わせて補修するなど予防保全へ寄与している。

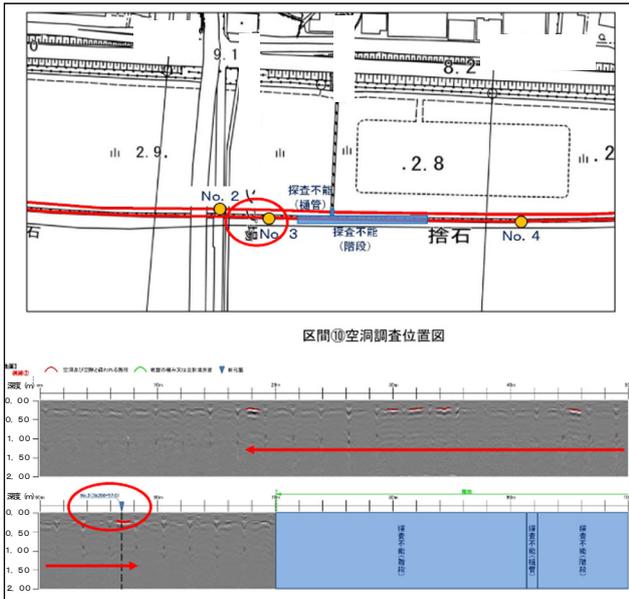


図-6 太田川放水路低水護岸における地中レーダー探査実施例

**(3) 目視点検困難箇所のUAV写真測量を用いた点検実施**

市内派川のような市街地の護岸では、高水敷が無く河道内の徒歩移動が困難なため、護岸前面を連続的に目視点検できない箇所が多い。そのため、UAV写真測量を用い、点検精度の向上を図ったものである。

**a) 調査内容**

UAVを用いて護岸前面を空中より撮影（写真測量）し、その結果を机上で確認することで、変状やひび割れ位置を確認している。

**b) 整理方法と代表的な調査結果**

確認できた変状箇所やその範囲を平面図上で正確に特定するとともに、撮影した写真を三次元化することで、目視では把握困難な微小な変状の発生状況も確認している。進行性が疑われる区間については、測量結果の重ね合わせによる時系列分析（二時期比較と同様）も行い、変状評価や要因分析に反映している。

元安川の事例では、石積み護岸部にL=20mを超える水平クラックを確認できた。（図-7参照）

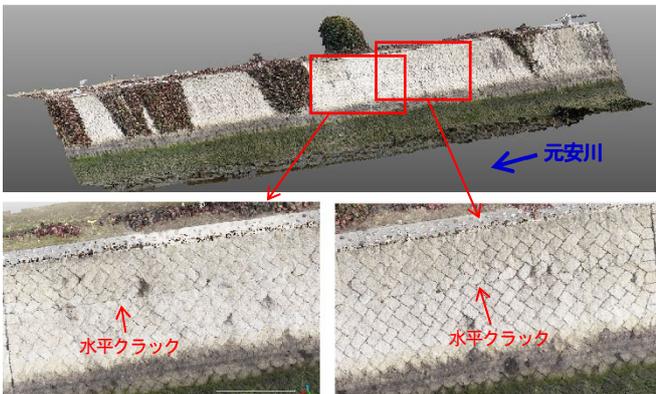


図-7 元安川石積み護岸における変状状況把握事例

**c) 維持管理への反映方法**

確認された変状箇所は天端部にマーキングするなどして河川巡視時の着目点として情報共有するとともに、二時期比較のモニタリングによる進行性の確認を行って、変状評価に反映している。さらに、一度の計測で広い範囲をカバーできることから、堤防点検の省力化にも寄与している。

**(4) 360°カメラを活用した函渠内の変状調査**

直径の小さい樋門・樋管等の管渠内も目視点検が困難な箇所である。そこで、360°カメラを用いた函体内の点検を行ったものである。

**a) 調査内容**

360°カメラを用いて小口径の樋門・樋管の管渠内の変状を点検する。特に、人間の進入が困難であるφ80cm以下の樋門・樋管に有効であり、机上で臨場感のある目視点検が可能となる。

**b) 整理方法と代表的な調査結果**

撮影した画像を整理し、机上にてクラックや段差（継ぎ手のずれ）などの変状発生状況を三次元的に把握する。

下記の調査結果事例では、本手法により管渠継ぎ手のずれやクラックを鮮明に確認できている。（図-8参照）



図-8 360°カメラを用いた函渠内調査結果事例

### c) 維持管理への反映方法

管渠の継手のずれやクラック部を放置した場合、管渠背面の堤体盛土の空洞化やみずみちの形成につながる可能性がある。変状が確認された施設と同年代、類似構造の施設を抽出し、事前に同様の点検を行うことで予防保全を図っている。

### (5) モバイル端末を用いた簡易測量による変状状況の把握の精度向上

NETIS登録技術の活用として、モバイル端末（iPhone ProやiPad）とGNSS（衛星による全世界測位システム）を用いた三次元測量を活用したもので、手軽に点群データの取得や三次元測量を行えるため、顕在化した変状箇所の大さなどを簡易に把握することが可能である。

#### a) 調査内容

太田川河川事務所では、「LiDARスキャナ付きタブレット等を活用した3次元測量アプリケーション(OPTIM Geo Scan)」（NETIS：QS-210050-VE）を使用している。iPadを用いて変状箇所周辺の現地状況をスキャニング（点群データの取得）するとともに、GNSSで位置情報を補正して公共座標と関連付けている。

#### b) 整理方法と代表的な調査結果

三次元点群データであるため、現地の形状と植生・護岸の構成物など高効率・高精度で把握することができる。さらに、比高や変状箇所の高さ・深さ・幅等をデータ上で計測することができる。

旧太田川の陥没部では、本技術を活用して変状箇所と背後地の状況や比高等を把握し、対策工の検討に用いている。（図-9参照）

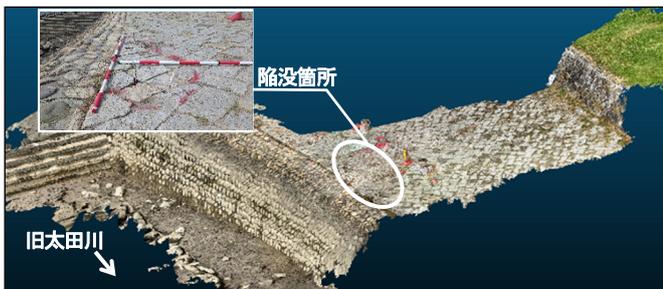


図-9 旧太田川の陥没部における簡易三次元計測

### c) 維持管理への反映方法

変状箇所の状況把握のツールとして、現地踏査時に活用し、対策工の検討精度の向上等を図っている。さらに、現地状況の共有化にも効果的である。

## 4. 取り組みの効果と今後の展望

### (1) 取り組みの効果

本稿で報告した取り組み事例は、現時点において変状が顕在化した箇所の周辺での実施にとどまっているものが多いが、その他河川管理施設の潜在的な変状箇所の抽出方法として非常に有効であると判断している。

これらの手法は、可視化ツールとしても有効活用が可能であり、「堤防点検や河川巡視時の着目点の共有化」、「打合せ時や横断的連絡調整会議等における評価判定時の根拠資料」、「予算要求時における状況説明用資料」としての活用が可能と考えている。

### (2) 今後の展望

将来的には、これらの手法の活用範囲を直轄区間の河川全体へ広げ、堤防点検の効率化と予防保全推進の両立を図りたいと考えている。そのためには、整理作業等の更なる効率化が必要で「二時期比較整理の自動化手法」、「地中レーダー探査結果のAIによる判断手法」、「AI画像認識による河床侵食や堆砂量の判断手法」等、AIを活用した判断の自動化を行うことにより、職員の判断に左右されない統一された判断基準の確立が必要と考えている。

さらに、遠隔臨場のツールとしての利用も期待できるため、積極的に活用して、移動時間縮減による効率化、現地踏査の省力化を図るとともに、三次元管内図との連携についても今後の課題と考えている。

### 参考文献

- 1)国土交通省 中国地方整備局 太田川河川事務所：太田川水系河川整備計画，2023年7月
- 2)国土交通省 水管理・国土保全局河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領，2019年4月

# 滝沢ダム放流設備遠隔操作の試行について

大崎 愛<sup>1</sup>・栗秋 顕二郎<sup>2</sup>・佐々木 勝人<sup>2</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人水資源機構 荒川ダム総合管理所 第一管理課（〒369-1801 埼玉県秩父市荒川久那4041）

<sup>2</sup>独立行政法人水資源機構 荒川ダム総合管理所 滝沢ダム管理所（〒369-1901 埼玉県秩父市大滝3021）

滝沢ダムでは令和4年度にダム管理用制御処理設備（以下、「ダムコン」という）の更新に伴い、常用洪水吐きゲートに新たに遠隔操作機能を実装した。これにより、市街地から離れた滝沢ダム管理所（以下、「管理所」という）への通勤ルートが土砂災害等で遮断されるような場合に、荒川ダム総合管理所（以下、「総管」という）からの遠隔操作が可能となった。

今回、常用洪水吐きゲートの遠隔操作の機能確認と、職員が“慣れる”事を目的とし、常用洪水吐きゲート及び利水放流主管主ゲートの遠隔操作を訓練として実施した。本稿では、訓練に向けた計画・準備、訓練結果、今後の課題と取組について報告する。

キーワード 遠隔操作、試行、訓練、常用洪水吐きゲート、利水放流主管主ゲート

## 1. はじめに

滝沢ダムでは、これまで利水放流設備（利水放流主管主ゲート、利水放流分岐管主ゲート）を対象に、総管からの遠隔操作を実施してきた。今回、管理開始以来初のダムコンの更新に伴い、常用洪水吐きゲートも遠隔操作可能となるよう、機能が付加された。その機能を実際確認する他、職員が遠隔操作に慣れておく必要がある事等から、非洪水期から洪水期に移行するに際し、水位を制限水位へ低下させる操作（以下、「ドローダウン」という）時において、常用洪水吐きゲートの遠隔操作の試行を初めて行った。

本稿は、遠隔操作の試行に向けての準備や結果、今後の課題等についてとりまとめたものである。

遠隔操作とは、開閉装置室にて手動で行う機側操作及び、管理所の操作室で複数の施設を集中的に操作する遠方操作以外のもので、遠隔地から操作するものをいう。本稿での遠隔操作は、総管からの操作をいう。

### (2) 遠隔操作の必要性

滝沢ダムは、管理所職員の宿舍や寮がある秩父市街地から車で約50分、総管から約40分の移動時間を要する。

秩父市防災ハザードマップ<sup>3)</sup>によると、滝沢ダムまでの通勤ルート上は「土砂災害特別警戒区域等」が広く分布し、万一の際に、滝沢ダムに到達できない可能性がある。その場合、管理所には職員が不在でかつ移動手段が無いというリスクが発生しうる。そのようなリスクに備え、滝沢ダムの遠隔操作は必要と考えられる。

## 2. 遠隔操作とその必要性

### (1) 遠隔操作とは

### (3) 遠隔操作の対象者

出水に伴うゲート操作が必要、かつ土砂災害に伴い管理所へ移動できないときに、管理所に職員が不在の場合が想定される。この場合、管理所職員は、総管から遠

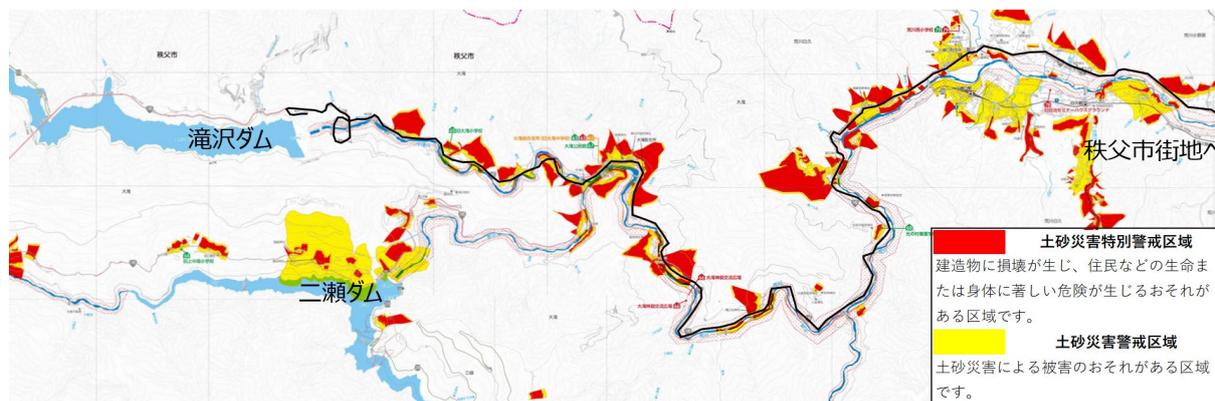


図-1 滝沢ダム通勤ルート沿いの土砂災害特別警戒区域等

隔操作を行う者と、時間を要してでも迂回して管理所へ向かう者に大別されるものと想定される。

管理所職員は現状 5 名（所長，所長代理，土木職 2 名，機械職 1 名）である。人数が少なく，万一の際，管理所職員は極力管理所へ向かうと想定されるため，管理所職員のみならず，総管職員も遠隔操作ができるようにしておく事が必要である。

以上より，滝沢ダムの遠隔操作の対象者は管理所及び総管に所属する技術系職員全員とする。

### 3. 遠隔操作の試行における対象設備の諸元

遠隔操作の試行では，常用洪水吐きゲート及び利水放流主管主ゲートとした。以下に各設備諸元と設備構成を示す。



写真-1 滝沢ダム放流設備の構成

### 4. 遠隔操作試行に向けた準備

#### (1) 常用洪水吐きゲートが使用可能である事の確認

従来，ドローダウンは，発電放流及び利水放流設備を使用していたが，今回，ドローダウン時に常用洪水吐きゲートを用いた遠隔操作に当たり，滝沢ダムに関する施設管理規程（以下，「規程」という）と同細則（以下，「細則」という）における規定内容を確認した。

細則第 17 条（常用洪水吐きゲートの操作）の第 6 号に「規程第 24 条第 1 項の規定によりダムから放流するとき。」を除き，常用洪水吐きは常に全閉しておくものとする，とある。つまり，この規定によりダムから放流する場合は，常用洪水吐きを開ける事が可能である。

また，規程第 24 条第 1 項第 1 号に「非洪水期から洪水期に移行するに際し，水位を制限水位に低下させるとき。」の記載があるため，ドローダウン時に常用洪水吐きゲートから放流できる事を確認した。

#### (2) 常用洪水吐きゲート遠隔操作試行の意義

滝沢ダムは管理開始以降，15 年間で 17 回の洪水調節を行っており，その頻度は概ね 1 年に 1 回である。洪水調節の発生要因は台風がほとんどである。多い時は年に 3 回，少ない時は年に 1 回もないという状況である。

滝沢ダムでは概ねの目安として，放流量が  $40\text{m}^3/\text{s}$  以上となる場合に常用洪水吐きゲートを開けているが，年によっては点検を除き，防災操作が無いために実放流で 1 回も開けない事がある。近年では，令和 3 年と令和 5 年は実放流で常用洪水吐きゲートを開ける機会が無かった。そのため，管理所に配属になっても，常用洪水吐きゲートの操作を経験しないまま転出する職員もいる。

このような状況では，出水対応における確実な操作の障害となる可能性があるため，遠隔操作の試行は，洪水期を迎える前の訓練も兼ねるものとして訓練計画を立てた。

この訓練の対象者は，2. (3)に記載のとおりである。

#### (3) 遠隔操作訓練内容の検討・整理

訓練の目的や訓練内容，スケジュール等を検討し，訓練計画として整理した。

##### a) 目的

遠隔操作の機能確認に加え，職員が遠隔操作に慣れる必要があることを踏まえて，操作訓練を行う。

##### b) 遠隔制御システム

ダムコン更新後は，手動操作及び開度設定操作が遠方・遠隔ともに可能となった。また，常用洪水吐き設備の電源の入・切も遠隔から可能となった。遠隔操作に使用するモニター及び操作卓を写真-2 に示す。

##### c) 操作訓練概要

ドローダウンは，流入量に上乗せした量の放流を行い，1 日当たり 1 m を目標に水位低下をさせる。従来は発電放流と利水放流主管主ゲートで行っているが，今回の訓練では，これらに常用洪水吐きゲートを加え，実施する計画とした。また，この訓練中の発電放流量は滝沢ダム貯水位に対応した一定量とした。

以下の操作を遠隔操作で行う。

なお，本訓練での遠隔操作とは，総管のダムコン操作卓での操作，及び監視制御端末上での操作である。

○利水放流主管主ゲートから常用洪水吐きゲートへの切替操作

○上記切替操作後，常用洪水吐きゲートの操作

○常用洪水吐きゲートから利水放流主管主ゲートへの切替操作

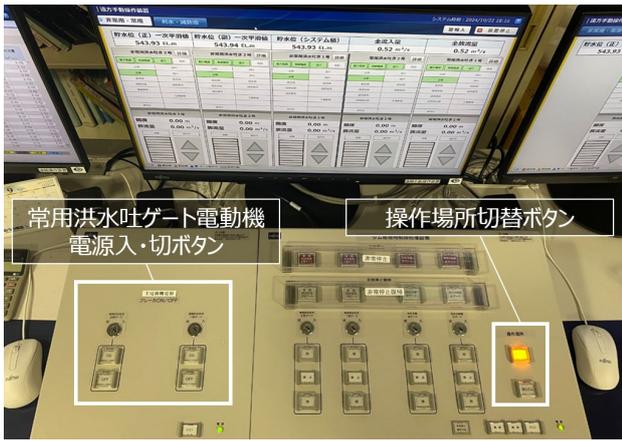


写真-2 ダムコン更新後のモニター・操作卓外観(総管)

d) 操作訓練計画の作成

遠隔操作訓練実施前の設備運用状態は、ドローダウン中であるため、発電放流3~4m<sup>3</sup>/sに加え、利水放流主管主ゲートにて概ね10m<sup>3</sup>/s程度の放流をしている状況である。貯水位はEL.540m前後を想定した。

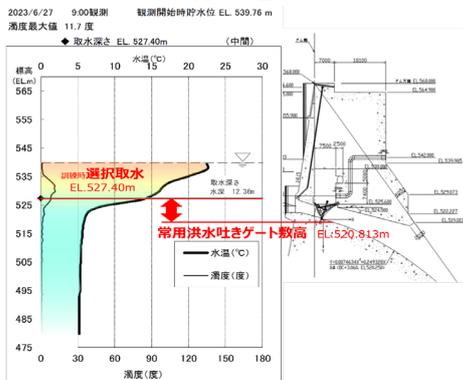


図-2 常用洪水吐きゲート敷高と取水深さの位置の違い<sup>2)</sup>

常用洪水吐きゲートの最小開度は5cmであり、想定水位では約3.5m<sup>3</sup>/s/門である。2門で放流しても7m<sup>3</sup>/s程度となるため、遠隔操作では2門使用する事とした。

また、この時期の水温鉛直分布は表層と中層で大きく変化し、発電や利水放流は選択取水設備を介して放流し流入水温にほぼ等しい水温で放流できるが、常用洪水吐きゲートは、低い標高に位置していることから、放流水温が低くなる事が想定されたため、放流水温に留意する事とした。

その他、遠隔操作の試行状況をドローンで撮影する等、映像、画像で記録する事とした。

以上の内容を遠隔操作訓練(案)として取りまとめ、令和5年6月22日(木)に総管内で操作訓練説明会を実施した。

また、具体的な操作フローは図-3のとおりである。計画書作成にあたっては、遠隔操作対象設備毎に開度0.01[m]変化にかかる操作所用時間が異なる点にも留意した。(常用洪水吐きゲート：約2秒、利水放流主管主ゲート：約6秒)

5. 遠隔操作試行訓練結果

遠隔操作の試行訓練は、令和5年6月27日(火)に行った。設備別の放流量と貯水位、放流水温の経時変化を図-4に示す。また、状況写真も写真-3に示す。

滝沢ダム管理所 ドローダウン時における操作訓練(案)								
6. 作業手順②~④ 操作フロー ステップイメージ(※当日の貯水位により変化)							操作時の貯水位	操作時の発電水量
▼日中の時間(11:00~12:00)帯で下記の作業を行う。							: 539.68[m]	: 3.95[m <sup>3</sup> /S]
ステップ	主管主G開度 [m]	主管主G放流量 [m <sup>3</sup> /S]	常用1号G開度 [m]	常用1号G放流量 [m <sup>3</sup> /S]	常用2号G開度 [m]	常用2号G放流量 [m <sup>3</sup> /S]	発電放流量 [m <sup>3</sup> /S]	全放流量 [m <sup>3</sup> /S]
操作権を(荒川総管)にとる。								
操作は2名で行う (利水放流設備主管主G操作者1名+常用洪水吐き設備操作者1名)								
①	0.40[m] ↓	11.18	0.00[m] ↓	0	0.00[m]	0	3.95	15.13
②	0.28[m] ↓	6.68	0.07[m] ↓	4.31	0.00[m] ↓	0	3.95	14.94
③	0.10[m]	1.68	0.07[m] ↓	4.31	0.08[m] ↓	4.90	3.95	14.84
(切替完了)	0.00[m]	0	0.09[m] ↓	5.49	0.08[m]	4.90	3.95	14.34
操作権は(荒川総管)のままとし、2門の常用洪水吐きゲートを閉操作・開操作する。								
例その1: 常用1号(0.09m⇒0.06m)の操作と同時に、常用2号(0.08m⇒0.11m)の操作								
例その2: 常用1号(0.06m⇒0.09m)の操作と同時に、常用2号(0.11m⇒0.08m)の操作								
※上記操作を荒川総管にて、参加者数名で順番に行う。								
ステップ③の状態に戻したことを確認後、操作権が(荒川総管)であることを確認する。								
③	0.00[m] ↓	0	0.09[m] ↓	5.49	0.08[m]	4.90	3.95	14.34
(切替完了)	0.10[m] ↓	1.68	0.07[m] ↓	4.31	0.08[m] ↓	4.90	3.95	14.84
⑤	0.28[m]	6.68	0.07[m] ↓	4.31	0.00[m]	0	3.95	14.94
⑥	0.40[m]	11.18	0.00[m]	0	0.00[m]	0	3.95	15.13
ステップ①~②: 赤枠内の操作から行う。一定時間後、青枠内の操作を行う。 ステップ②~③: 上記同様に主管主Gの開操作から行う。一定時間後、緑枠内の操作を行う。 ステップ③~④: 上記同様に主管主Gの開操作から行う。一定時間後、黄色内の操作を行う。 ステップ④~⑤: 青枠内の操作から行う。一定時間後、赤枠内の操作を行う。 ステップ⑤~⑥: 緑枠内の操作から行う。一定時間後、主管主Gの開操作を行う。 ステップ②~③: 黄色内から行う。一定時間後、主管主Gの開操作を行う。								

図-3 訓練時の操作手順

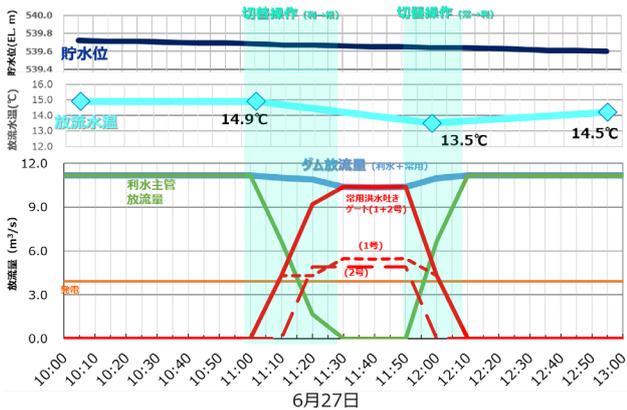


図-4 遠隔操作試行時における各設備の放流量と貯水位、放流水温の経時変化



写真-3 遠隔操作試行状況

遠隔操作の試行訓練では、利水放流主管主ゲートから常用洪水吐きゲートへの切替、並びにその逆の操作において、操作1回あたりの動作制限内での操作であったため、特に問題なく実施できた。その理由は、今回は少ない放流量のため、操作量も少なかったためと考えている。

ただ、実際の洪水調節にかかわる操作時に利水放流主管主ゲートから常用洪水吐きゲートに切替操作する際(放流量  $40\text{m}^3/\text{s}$ )、切替における放流量の増減が少ないように配慮する必要があることがわかった。

また、遠隔操作での操作権の切替(管理所⇄総管)や常用洪水吐きゲート油圧ポンプ電動機電源の入・切、操作卓上での手動操作及び監視制御端末上での開度1回限り操作パターンを実施し、操作対象設備稼働までの一連の流れを訓練参加者全員(9名)が経験する事ができた。訓練中の放流水温は、 $14.9^\circ\text{C}$ から $13.5^\circ\text{C}$ まで $1.4^\circ\text{C}$ 低下した。これは利水放流主管主ゲートでの取水位置(操作訓練時の取水位置: EL. 527.40m)に比べて、常用洪水吐きゲートの設置標高(ゲート敷高: EL. 520.813m)が低い事が一因である。

なお、訓練終了の約1時間後には、 $14.5^\circ\text{C}$ まで回復した。



写真-4 遠隔操作訓練状況

## 6. 今後の取組

遠隔操作の試行は特に問題なく実施できたが、総管での操作を容易にするために、以下の取組が必要である。

### ○遠隔操作をより円滑に行うための設備整備

訓練中での意見として総管には、滝沢ダム遠隔操作用のモニターが1つしかないため、利水放流主管主ゲートと常用洪水吐きゲートの操作状態画面を切り替えながら確認しなければならないという不便さがある事が分かったため、令和6年1月にモニターを増設した。

### ○下流巡視・放流前点検の代替案の検討

洪水調節時に遠隔操作を行うにあたり、下流巡視ができないことを想定し、巡視の省力化も視野に入れ、巡視区域をCCTVカメラ等の設備整備により代替することを検討中である。また、放流前点検についてもゲート室へカメラを整備する等の代替を検討中である。

### ○ドローダウン時における遠隔操作訓練のルーチン化

今回の訓練を基に、今後もドローダウン時における遠隔操作訓練を毎年行い、職員の操作経験値を高める。

なお、今回の遠隔操作訓練において常用洪水吐きゲートからの放流時間は約1時間を要した。放流水温への影響を少なくするため、今後、ドローダウン時に遠隔操作訓練を行う際は、全体で10分～15分程度の放流時間短縮につながるよう訓練計画を見直していく必要がある。結果を踏まえ、令和6年度の訓練は手順を見直して実施し、常用洪水吐きゲートからの放流時間短縮及び水温低下幅の低減に努めた。

○今回のような遠隔操作訓練実績や、洪水調節後の後期放流における遠隔操作試行実績の積上を踏まえた、「滝沢ダム常用洪水吐き設備遠隔操作要領(案)」の作成が不可欠である。

## 参考文献

- 1) 秩父市役所HP:「秩父市防災ハザードマップ」
- 2) 滝沢ダム管理用制御処理設備工事 完成図書
- 3) 国土交通省:ダム・堰施設技術基準(案)平成28年3月改正

# 既存鉄筋コンクリート造建築物の躯体改造技術に関する研究

中村 聡宏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国立研究開発法人建築研究所 構造研究グループ (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

本研究では、既存のRC造共同住宅の戸境壁を対象として、1層のみに新設開口を設け、周辺部材に耐震補強を施した場合の耐震性能を明らかにすることを目的として、新設開口を設けた実大のRC造連層耐力壁試験体および開口横の片側柱付き耐力壁試験体の構造実験を実施した。新設開口周辺の耐力壁の補強部には曲げ補強筋としてあと施工アンカーを用いた。実験結果より、十分な埋め込み長さを確保したあと施工アンカーが曲げ補強筋として有効であることが確認された。また、1層のみに開口を設けた場合に、上部耐力壁の転倒モーメントによる変動軸力が、1層壁の破壊性状に影響することを確認した。

キーワード 鉄筋コンクリート造、躯体改造、あと施工アンカー、構造実験

## 1. はじめに

災害に強い持続可能な都市の構築が求められている一方で、2050年カーボンニュートラル社会を実現も標榜されている。建築物の長寿命化はその一端を担うものであるが、長く使い続けるためには利用者のニーズに応じた増改築に対して柔軟に対応できる仕組みが必要である。建築研究所においては、既存ストックの有効活用を目的として、増改築に際して構造躯体を改造するための技術の提案や改造後の構造物の性能評価手法の提案を行ってきた。

本研究では、都市郊外に数多く存在する中低層鉄筋コンクリート造（以下、RC造）共同住宅について、利用者のニーズに合わせた躯体改造ケースとして、水平2戸1化やEV増設に伴う廊下の新設等を目的とした戸境耐力壁への新設開口の設置を検討対象とした。戸境耐力壁に新設開口を設ける場合には、開口周辺の補強は必要不可欠であり、有効な補強方法として開口周辺の曲げ補強筋としてあと施工アンカーを用いることを検討している。令和4年3月31日に平成13年国交告第1024号の一部が改正され、鉄筋コンクリート造等の部材と構造耐力上主要な部分である部材との接合に用いるあと施工アンカーについて強度指定を行うことができるようになり、接着系あと施工アンカーについて強度指定ガイドライン<sup>1</sup>（以下、ガイドライン）が示されている。

本稿では、RC造共同住宅の戸境耐力壁の1層のみに新設開口を設ける場合を想定し、実大2.5層連層耐力壁架構試験体の構造実験および新設開口横の壁部分を模擬した部材実験を実施し、補強工法の施工性を確認するとともにあと施工アンカーの有効性および改造後の構面の性能評価手法の提案を行う。

## 2. 実大2.5層耐力壁架構実験概要

### (1) 試験体概要

対象建築物は、1960年代に設計された5階建てRC造連層耐力壁を有する共同住宅であり、その戸境耐力壁を対象とした。本検討では、1層部分に新設開口を設けることを想定し、図-1に示すような、戸境耐力壁の1層から3層中央部までを模した実大試験体を製作した。

面内壁厚さは120mmであり、壁筋は9φ@250mmのシングル配筋とした。また、直交梁を片側1mずつ設け、2層および3層には厚さ110mmの床スラブを設置した。

使用コンクリートは、呼び強度18N/mm<sup>2</sup>（実強度21.1～26.0N/mm<sup>2</sup>）の普通コンクリートである。鉄筋は、壁筋に使用した丸鋼φ9がSR235（実降伏強度345.7N/mm<sup>2</sup>）、D10はSD295（実降伏強度362.3N/mm<sup>2</sup>）、D16・D19は

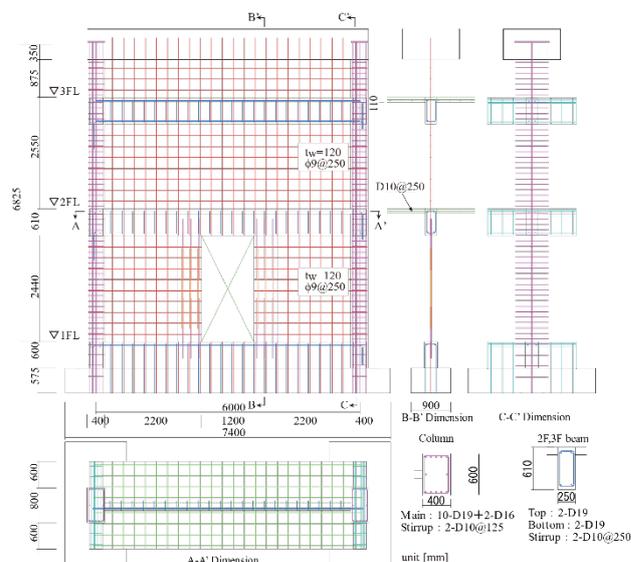


図-1 実大2.5層連層耐力壁架構試験体 概要

SD345（実降伏強度はそれぞれ 361.0N/mm<sup>2</sup>、398.2N/mm<sup>2</sup>）とした。

## (2) 新設開口・補強概要

既存耐力壁試験体に対し、1層に新設開口を設け、周辺部材の補強も施した。補強後の試験体の新設開口周辺の配筋図を図-2に示す。

新設開口の大きさは、幅を 1.2m とし、高さは基礎梁上端から 2 階梁下端まで (2.44m) とする。この場合、平成 19 年国交省告示第 594 号第 1 第 3 項では、当該壁を一の壁として取り扱ってはならないものとされている。これは、縦長開口を設けた壁が、開口部の左右 2 つの壁とそれらを連結するはりからなる並列壁の形式となるためであり、文献 2) の解説では、縦長開口が 1 層のみであり、その上下が剛強な無開口壁や基礎ばりで拘束されている壁等について、1 枚の耐力壁として取り扱ってよいとされている。告示に従って算定される等価開口周比は 0.4 となり、1 枚の開口付き耐力壁として設計する場合には、開口部周囲には、耐力壁の負担するせん断力に対して支障のないものとするよう開口補強を行う必要がある<sup>2)</sup>。本研究では、当該補強に関して、鉄筋コンクリート造計算規準・同解説<sup>3)</sup>（以下、RC 規準）19 条の開口補強の検討を参考にした。短期許容せん断力時の有開口耐力壁の短期許容せん断力に対する必要開口補強量は、水平補強筋断面積 283mm<sup>2</sup> 以上、鉛直補強筋断面積 573mm<sup>2</sup> 以上となる。また、Ds を 0.55 とし保証設計安全率を 1.25 と仮定した場合の作用せん断力を設計用せん断力として、RC 規準<sup>3)</sup>を参考に必要開口補強筋量を算定した場合、水平補強筋断面積 542mm<sup>2</sup> 以上、鉛直補強筋断面積 642mm<sup>2</sup> 以上となる。水平補強筋については、2 階梁下端筋および基礎梁上端筋が 2-D19 (A=573mm<sup>2</sup>) であり、必要量が配筋されているため、鉛直補強筋について、接着系あと施工アンカーを用いて 3-D19 (A=861mm<sup>2</sup>) を配筋した。

新設開口の施工状況を図-3に示す。開口部を湿式のウォールソーで切り出し、鉛直補強筋としてあと施工アンカーを設置する耐力壁端部について、既存壁横筋を研り出した。補強部材との打継面となる部分について、目荒らしを施した。あと施工アンカーについては、穿孔は湿式コアドリルにより行い、穿孔径はひずみゲージ付きのアンカーは 28mm、ゲージなしのアンカーは 24mm とした。接着剤はエポキシ樹脂系を使用し、アンカー筋は D19(SD345)を用いた。埋め込み長さは 20d<sub>e</sub>(d<sub>e</sub>は鉄筋径)とした。また、あと施工アンカーの施工にあたっては、ガイドライン<sup>4)</sup>に従って品質管理を行った。耐力壁補強部の横筋については、180 度フック加工した D10 を、既存部横筋に片面フレア溶接した。また、補強部の縦筋は、あと施工アンカーと重ね継手とし RC 規準<sup>3)</sup>における大地震時の安全性確保のための必要継手長さを満足するように設計した。耐力壁補強部には、呼び強度 45N/mm<sup>2</sup>（実強度 70.8N/mm<sup>2</sup>）の普通コンクリートを打設した。

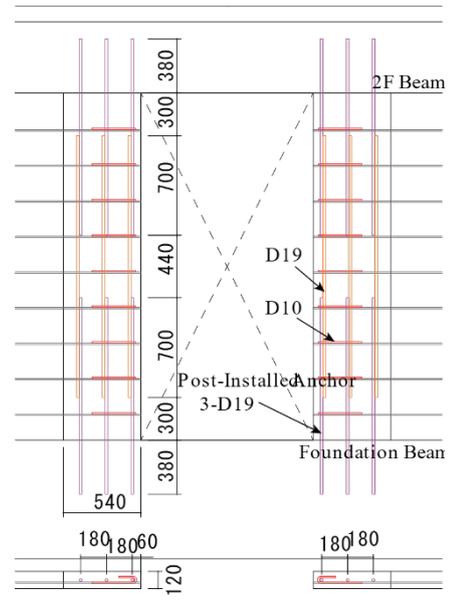


図-2 補強部配筋図

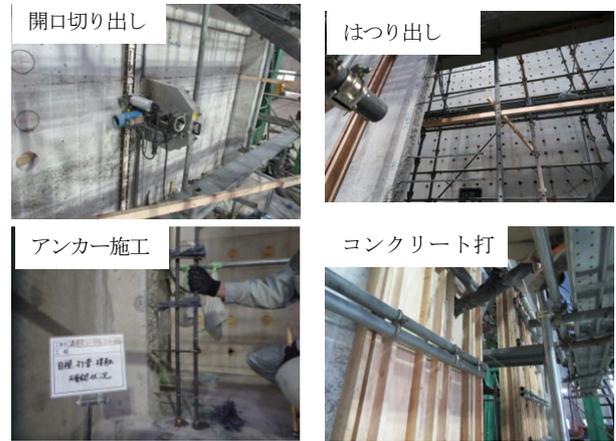


図-3 新設開口部の施工

## (3) あと施工アンカーの設計

あと施工アンカーの付着強度を確認するため、参考文献<sup>5)</sup>に従い、コンクリートスライス供試体に打ち込んだアンカーの拘束引張試験を実施した。スライス供試体は、基礎梁施工時および 2 階梁施工時に内径 200mm（鋼管厚 8.2mm）の鋼管に施工した供試体であり、施工位置ごとに 5 体ずつ用意した。スライス供試体中央部に試験用のあと施工アンカーを施工し、図-4 に示すように拘束引張試験を実施した。

スライス供試体の拘束引張試験を実施した結果について、次式により計算した基準付着強度  $\tau_n$  の平均値  $\tau_{ave}$ 、および、95%信頼付着強度  $\tau_{0.95}$  を算定した。

$$\tau_n = P_{max} / (\pi \cdot d_a \cdot l_e) \cdot \sqrt{21 / \sigma_B} \quad (1)$$

$$\tau_{0.95} = \tau_{ave} - t \cdot s \quad (2)$$

ここに、 $P_{max}$ : 最大耐力、 $d_a$ : アンカー径、 $l_e$ : 埋め込み長さ、 $\sigma_B$ : コンクリート強度、 $t$ :  $t$  分布による係数（試験体数 5 であるため、 $t=2.132$ ）、 $s$ : 標準偏差

95%信頼付着強度  $\tau_{0.95}$  は、2 階梁コンクリートに対して 24.4N/mm<sup>2</sup>、基礎梁コンクリートに対して 21.1N/mm<sup>2</sup> となり、ガイドライン<sup>4)</sup>に従って強度指定可能な上限値

15N/mm<sup>2</sup>を超える結果となった、

想定するアンカーの破壊モードとしては、鉄筋降伏、コーン破壊、付着破壊の3種とした。鉄筋降伏強度  $T_{a1}$  は材料試験結果に基づき算定し、コーン破壊強度  $T_{a2}$  は文献<sup>4)</sup>に従って式(3)で算定した。なお、コーン投影面積  $A_c$  については、隣接するアンカーのコーン面積の重複を勘案している。

$$T_{a2} = \sigma_t \cdot A_c = 0.31\sqrt{\sigma_B} \cdot A_c \quad (3)$$

付着破壊強度  $T_{a3}$  については、文献<sup>4)</sup>に従って、へりあき、はしあき、ピッチによる付着強度の低減を考慮して、次式で算定した。なお、基準付着強度  $k$  については、アンカー拘束付着試験結果を参考に15N/mm<sup>2</sup>とした。

$$T_{a3} = \phi_a \cdot \tau_a \cdot \pi \cdot d_a \cdot l_{ce} \quad (4)$$

$$\tau_a = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \tau_{ave}$$

$$\alpha_n = 0.5(c_n/l_e) + 0.5 \quad \tau_{ave} = k\sqrt{\sigma_B/21}$$

ここに、 $l_{ce}$ : 有効埋め込み長さ ( $=l_e - 2d_a$ )、 $c_n$ : へりあき寸法

各破壊モードの耐力と、アンカー埋め込み長さの関係を図-5に示す。埋め込み長さは $20d_a$ としたため、鉄筋降伏 ( $T_{a1}$ ) が先行する計算結果となった。

#### (4) 加力方法

加力装置セットアップ図を図-6に示す。軸力は導入せず、自重のみ作用するものとした。水平力は、加力スタブの東側に設置した2000kN油圧ジャッキ2本により導入した。加力スタブには、直交方向に1000kNジャッキを2本設置し、加力スタブのねじれ挙動を抑制した。

加力は、水平力  $Q$ 、および、ジャッキ位置の相対変位 (ジャッキ位置と下スタブ位置の相対変位) を高さ7425mmで除した全体変形角  $R$  で制御する。加力サイクルは、 $Q=588\text{kN}(1)$ ,  $R=1/1600(1)$ ,  $1/800(1)$ ,  $1/400(2)$ ,  $1/200(2)$ ,  $1/133(2)$ ,  $1/100(2)$ ,  $1/67(1)$ を行った。(1)内は繰り返し回数を示す。

### 3. 実大2.5層耐力壁架構実験結果および考察

#### (1) 破壊性状

水平荷重—全体変形角関係を図-7に、水平荷重—層間変形角関係を図-8に、 $R=1/200$  サイクル終了時および加力終了時のひび割れ図を図-9に示す。

$Q=+341.9\text{kN}$  および  $Q=-290.5\text{kN}$  で、1階壁脚部での初期曲げひび割れの発生を確認した。 $R=1/800$  サイクルでは、1階および2階壁のせん断ひび割れの発生が確認された。また、負荷荷時に、開口側補強部端部のあと施工アンカーの1階壁脚部位置での引張降伏が確認された。 $R=1/400$  サイクルで、正負荷ともに、開口両側の壁の引張鉄筋となる柱主筋、補強部あと施工アンカーの1階壁脚部位置での降伏が確認された。また、2階壁についても、引張側の柱主筋および壁縦筋の引張降伏が確認された。また、基礎梁に施工した下向きあと施工アンカーの埋め込み最下部付近を起点として、コーン状のひび割れが生じた。 $R=1/200$  サイクルで、ピーク時に圧縮側端部でのコ

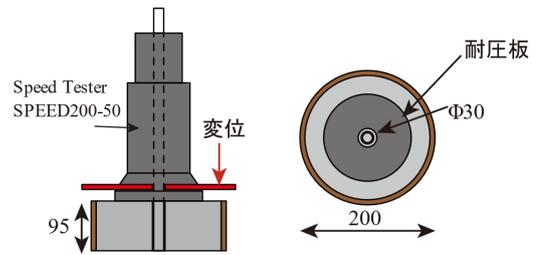


図-4 アンカー拘束付着試験方法

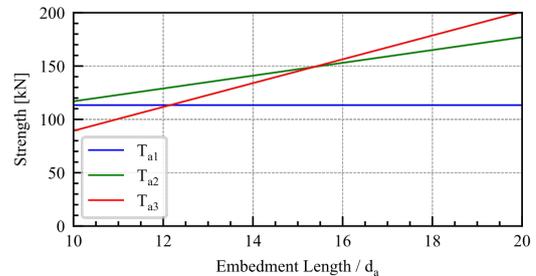


図-5 アンカー耐力算定結果

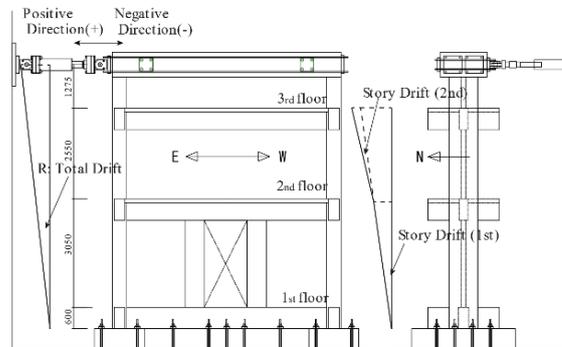


図-6 加力セットアップ

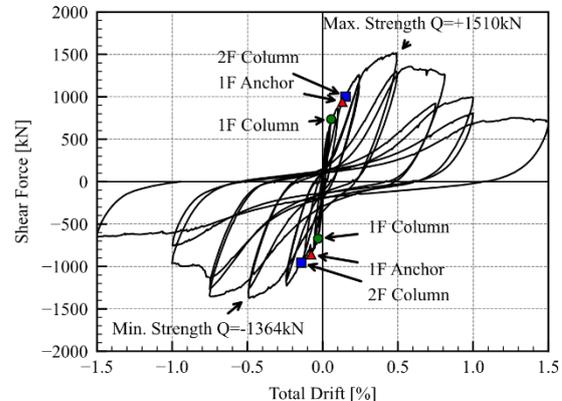


図-7 水平荷重—全体変形角関係

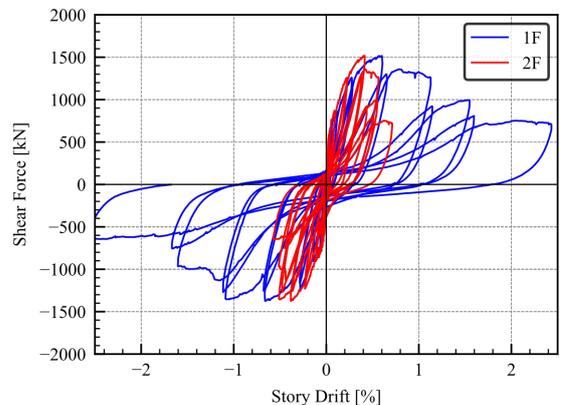


図-8 各階の水平荷重—層間変形角関係

ンクリートの圧壊が生じ始め、最大耐力に達した。最大耐力は正載荷で  $Q=+1516\text{kN}$ 、負載荷で  $Q=-1364\text{kN}$  である。最大耐力時のひび割れ状況を見ると、2階より上の壁の転倒モーメントにより、圧縮の変動軸力が作用する壁（以下、圧縮側壁）と、引張の変動軸力が作用する壁（以下、引張側壁）で、せん断ひび割れの角度が異なり、引張側壁の方が角度の浅いせん断ひび割れが卓越していることが分かる。最大耐力以降、圧縮側壁はせん断ひび割れの拡幅やせん断ひび割れ周辺コンクリートの剥落が見られ、引張側壁は徐々に曲げよりもせん断ひび割れが卓越する傾向が見られた。また、1階への変形集中は最大耐力以降に顕著となり、全体変形角  $R=1\%$ 時に1階層間変形角は1.5%程度、 $R=1.5\%$ 時に2.5%程度に達していた。 $R=1\%$ サイクルでは耐力は最大耐力の65%程度、 $R=1.5\%$ サイクルでは50%程度まで耐力低下した。最終破壊性状は、1階の圧縮側壁、引張側壁それぞれのせん断破壊と推察される。

### (2) あと施工アンカーの挙動

あと施工アンカーの埋め込み部分に貼付したひずみゲージの計測値から、材料試験におけるヤング係数、降伏強度を用いてアンカー筋の負担応力を換算し、計測位置間での応力差から平均付着応力度を算定した。1階壁脚部位置のアンカーについて、正載荷において引張側となる西壁端部および負載荷において引張側となる東壁端部のアンカーの、各サイクルピーク時の付着応力度分布を図-10に示す。図より、全体変形角が小さくアンカー筋の降伏が生じる前は、浅い範囲に付着応力が集中しているのに対し、アンカー筋の降伏以降は、比較的深い位置に付着応力が集中する傾向が見られる。いずれにおいても、付着応力は付着強度に到達しておらず、設計の通り鉄筋降伏が先行する結果となった。

### (3) 最大耐力評価

1層のみに新設開口を設け、開口周辺補強をした連層耐力壁の耐力を、現行の基規準<sup>23)</sup>に示される終局強度式により評価する。

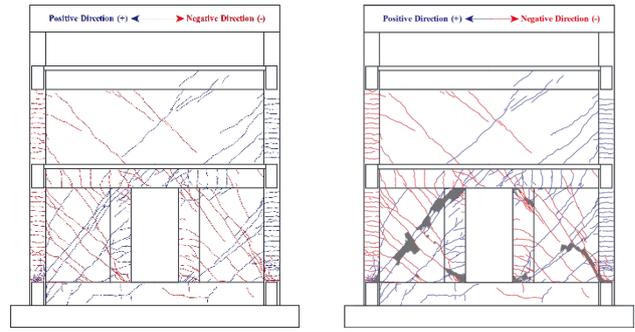
耐力壁の曲げ強度  $M_u$  は、文献<sup>2)</sup>に示される曲げ強度式(5)を、せん断強度  $Q_w$  は、文献<sup>2)</sup>に示されるせん断強度式(6)を用いて算定する。

$$M_u = 0.9a_t l_w + 0.5a_w \sigma_{wy} l_w + 0.5Nl_w \quad (5)$$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{\sqrt{M/QD} + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{wh} \sigma_{wh} + 0.1 \sigma_\theta} \right\} t_e j \quad (6)$$

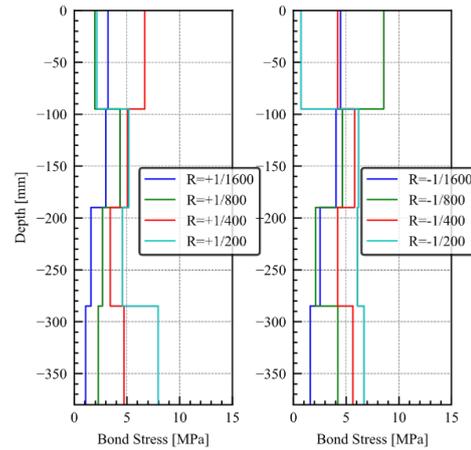
ここに、 $a_t$ : 引張側柱主筋の全断面積、 $\sigma_y$ : 引張側柱主筋の降伏強度、 $a_w$ : 壁縦筋の全断面積、 $\sigma_{wy}$ : 壁縦筋の降伏強度、 $l_w$ : 両側柱中心間距離、 $N$ : 作用軸力、 $t_e$ : 等価壁厚（壁厚の1.5倍以下）、 $p_{te}$ : 等価引張鉄筋比、 $F_c$ : コンクリート強度、 $D$ : 耐力壁全長、 $j$ : 応力中心間距離、 $p_{wh}$ : 等価補強筋比、 $\sigma_{wh}$ : 補強筋等価降伏強度、 $\sigma_\theta$ : 平均軸方向応力度

耐力計算にあたり、以下の仮定を設ける。1階壁に生じる変動軸力  $\Delta N$  は、2階耐力壁脚部に生じる転倒モーメント  $M$  を、1階壁のそれぞれの重心位置間の距離  $L$  で



(a)  $R=1/200$  サイクル終了時 (b) 載荷終了時

図-9 ひび割れ状況



(a) 西壁端部 (b) 東壁端部

図-10 アンカー付着応力分布

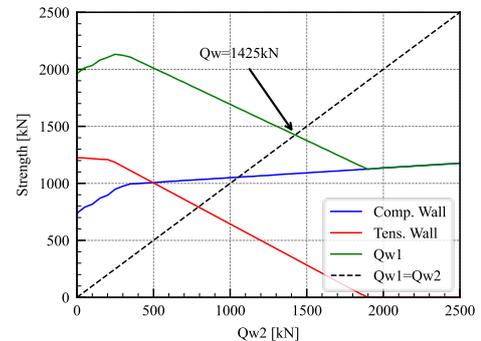


図-11 変動軸力を考慮した耐力計算結果

除すことで求める。開口両側の壁の反曲点高さ  $h_0$  は実験結果を参考に圧縮側壁は開口中央位置 ( $h_0=1220\text{mm}$ )、引張側壁は開口上部位置 ( $h_0=2440\text{mm}$ ) とする。2階壁に作用するせん断力  $Q_{w2}$  を変数として、1階壁に生じる変動軸力  $\Delta N$  を算定し、長期軸力  $N$  として1階壁脚部位置までの試験体重量を考慮して、1階壁に作用する軸力  $N \pm \Delta N$  を算定する。それぞれの壁の曲げ強度時せん断力およびせん断強度のうち小さい方の和として、1階の層せん断力  $Q_{w1}$  を算定し、 $Q_{w2}$  と  $Q_{w1}$  が一致する時点を最大耐力とする。

本試験体においては、引張側壁の作用軸力は引張軸力となる。文献<sup>2)</sup>においては、耐力壁の強度式(5)(6)について、引張軸力が作用する耐力壁に関する知見がほとんどないため、引張軸力下での適用の可否は言及されていない

い。本検討においては、引張軸力下における耐力壁の耐力について、軸力が全引張降伏に到達する時点での耐力を0として、軸力が0の時の計算値から直線補完することとした。各耐力を計算した結果を図-11に示す。計算耐力は1425kNとなり、実験値を安全側の評価する結果となった。また、それぞれの壁の破壊モードはせん断破壊型と判定され、実験結果と整合した。

#### 4. 片側柱付きRC壁部材実験概要

2.3章に示した実大2.5層RC造耐力壁架構試験体の実験結果より、新設開口横の片側柱付きRC耐力壁が個々に挙動する性状が確認されたため、それぞれの耐力壁の詳細な応力状態を確認するための部材実験を実施した。

片側柱付きRC壁試験体の配筋図を図-12に示す。新設開口横の耐力壁部分と同等の寸法・配筋とし、試験体スケールは1/2とした。試験体は同配筋で2体製作した。1体(RW-0.5-VN-S)は、実大2.5層実験結果から推定される軸力および反曲点高さとするため、軸力比 $-0.63 \sim +0.12$ (変動軸力)、反曲点高さ850~1220mmとする。もう1体(RW-0.5-VN-B)は、曲げ破壊型として、あと施工アンカーに繰り返し応力が作用するように、軸力比 $-0.63 \sim +0.12$ (変動軸力)、反曲点高さ2360mmとする。

加力セットアップ図を図-13に示す。両側の2本の鉛直ジャッキにより軸力および反曲点高さを制御しながら、水平ジャッキによりせん断力を作用させた。変動軸力の制御について図-14に示す。軸力が圧縮側となる方向を正載荷とし、変動軸力は正側でせん断力に比例したものとし、負側は正側の載荷で得られる変動軸力と変形角の関係を反転して適用した。

#### 5. 片側柱付きRC壁部材実験結果および考察

##### (1) 破壊性状

水平荷重—層間変形角関係を図-15に、加力終了時のひび割れ図を図-16に示す。

RW-0.5-VN-Sは、 $R=+0.25\%$ であと施工アンカーの引張降伏が確認された。正側は $R=+1.0\%$ で、負側は $R=-0.59\%$ で最大耐力に達し、最大耐力以降はせん断ひび割れが卓越した。 $R=+2.09\%$ でせん断破壊が生じた。損傷性状や破壊モードは実大2.5層RC壁架構試験体の新設開口横の壁と同等であり、再現されたものとする。

RW-0.5-VN-Bは、 $R=+0.2\%$ であと施工アンカーの引張降伏が確認された。正側は $R=+0.47\%$ で、負側は $R=-0.47\%$ で最大耐力に達し、最大耐力以降は曲げひび割れが卓越した。 $R=2.0\%$ サイクルで、あと施工アンカーと縦筋の重ね継ぎ手部での顕著な損傷が確認され、耐力低下した。破壊モードは曲げ破壊と考えられるが、重ね継ぎ手部の損傷が支配的となった可能性もある。

##### (2) 最大耐力評価

軸力—せん断力関係と計算耐力を比較した結果を図-17に示す。計算耐力は、3章で示した方法と同様とした。

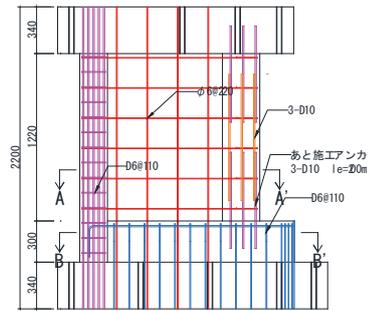


図-12 片側柱付きRC壁試験体 配筋図

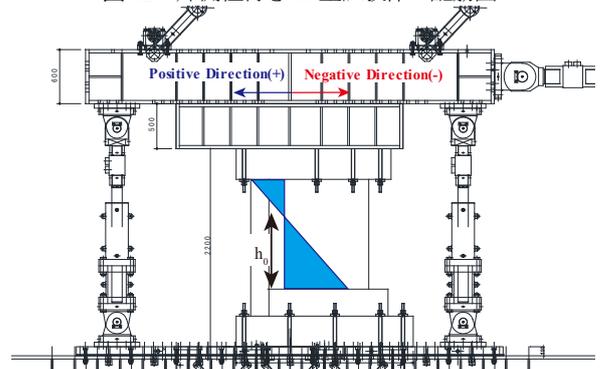


図-13 加力セットアップ図

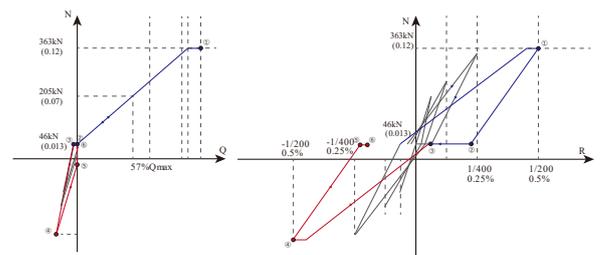
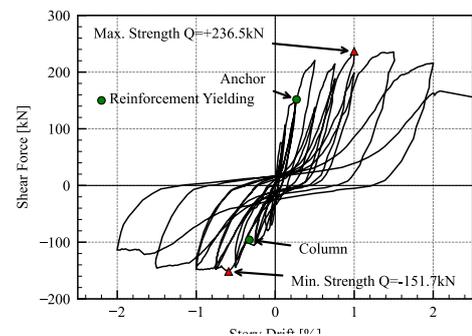
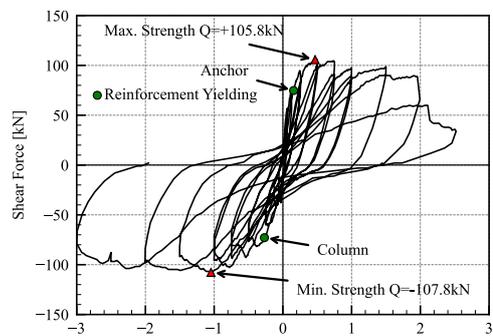


図-14 変動軸力制御



(a) RW-0.5-VN-S



(b) RW-0.5-VN-B

図-15 荷重変形関係

ただし、試験体が非対称断面であるため、特に引張軸力側で、引張軸力の中心が加力の軸心とずれていることによる偏心モーメントが作用し、見かけの反曲点高さが下がっているため、その影響も考慮した。図より、RW-0.5-VN-S の正側ではせん断耐力を安全側に評価されている。一方で、RW-0.5-VN-B の正側では曲げ耐力に到達していない。その要因については今後の検討課題である。負側では、両試験体とも反曲点高さの変動を適切に考慮することで、最大耐力やそれ以降の耐力低下傾向を捉えられている。

### (3) あと施工アンカーの挙動

あと施工アンカーの埋め込み部分に貼付したひずみゲージの計測値から、材料試験におけるヤング係数、降伏強度を用いてアンカー筋の負担応力を換算し、計測位置間での応力差から平均付着応力を算定した。RW-0.5-VN-B のあと施工アンカーの平均付着応力と層間変形角の関係を図-18に示す。埋め込み深さ $5d_a$ までの浅部で、最大耐力以前に付着応力の低下が見られ、付着応力の中心がより深い方向にシフトしている様子が確認できる。深い位置の付着応力は最大耐力以降も安定しており、定着は充分であったと判断できる。

## 6. まとめ

1層のみに新設開口を設けた実大2.5層RC造連層耐力壁試験体および新設開口横の壁を模擬した片側柱付きRC造壁試験体の構造実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 実大 2.5 層耐力壁架構試験体は、開口両側の壁のせん断破壊が確認され、最大耐力以降は新設開口を設けた1層への変形集中が顕著となった。
- (2) 2枚の耐力壁として評価し、2階より上の耐力壁の転倒モーメントによる変動軸力を考慮した場合に、最大耐力を安全側に評価できる。
- (3) 片側柱付き RC 壁試験体において、変動軸力と反曲点高さを制御することで実大 2.5 層壁架構の1階壁の挙動を再現できた。
- (4) 片側柱付き RC 壁の圧縮軸力側、引張軸力側の最大耐力は既往の評価式により適切に評価される。ただし、曲げ破壊型となった RW-0.5-VN-B の正側において、最大耐力は曲げ耐力に到達しなかった。その要因については今後の課題である。
- (5) 補強部のあと施工アンカーについて、アンカーの降伏が先行する安定した挙動を示すように設計することが可能であることを確認した。また、埋め込み浅部での付着応力の劣化を確認した。

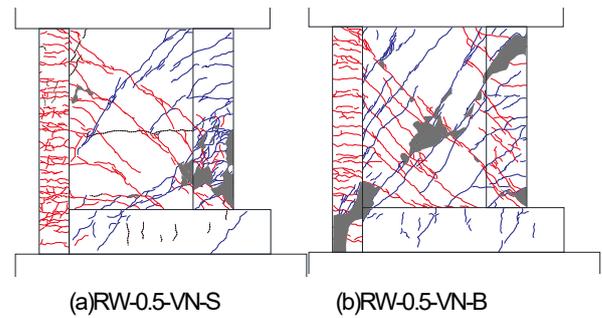


図-16 変動軸力制御

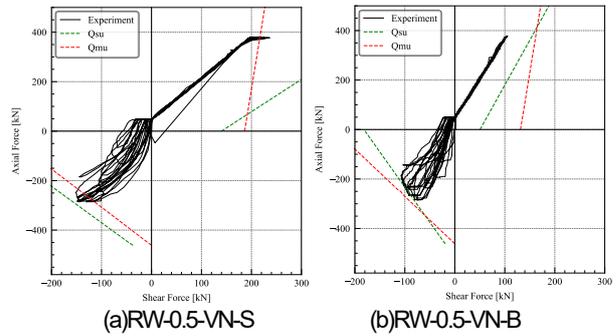


図-17 軸力-せん断力関係と計算耐力

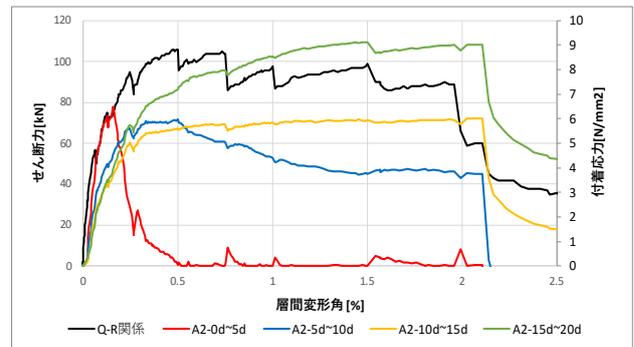


図-18 平均付着応力度と層間変形角の関係

## 謝辞

本研究は、(国研)建築研究所研究課題「増改築規模に応じて改修された既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能評価技術の開発」の一環として実施した。関係各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 日本建築防災協会：あと施工アンカーの強度指定ガイドライン, 2022.3
- 2) 国土技術政策総合研究所, 建築研究所監修：2020年版建築物の構造関係技術基準解説書, 2020.10
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018
- 4) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説, 2017
- 5) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説, 2010

# 宅地擁壁の耐震性能評価手法の開発のための 有限要素法に基づく数値解析モデルの構築

的場 萌子<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立研究開発法人建築研究所 国際地震工学センター（〒305-0802 茨城県つくば市立原1）

近年、大地震時における古い宅地擁壁の被害事例が数多く報告されている。宅地擁壁の地震被害の低減のためには、擁壁の老朽化による影響を考慮した宅地擁壁の耐震性能評価手法と合理的な補強工法が必要となる。本研究では老朽化した宅地擁壁の地震時挙動と破壊メカニズムを明らかにするため、練積み擁壁の極限状態として空石積み擁壁を想定し、空石積み擁壁－地盤・建物系の遠心載荷実験及びシミュレーション解析を行った。本稿では擁壁近傍に建物が設置された場合の縮小模型実験結果及びこれを再現する二次元有限要素解析結果について報告する。

キーワード 石積み擁壁，破壊メカニズム，遠心載荷試験，有限要素解析

## 1. 序

平野部に限られた我が国においては、都市化の進展に伴い丘陵部等でも宅地が造成されてきた。宅地造成時の斜面部においてはコンクリート擁壁や練積み擁壁が併せて築造されたが、近年では練積み擁壁の老朽化により、大地震時において宅地擁壁の損傷もしくは破壊事例が相次いで報告されている<sup>1)2)</sup>。都市の強靱化の推進のため、既存宅地擁壁の耐震化が重要な課題となっていることを踏まえ、建築研究所では国土交通省（令和2～5年度）総合技術開発プロジェクト「建築物と地盤に係る構造規定の合理化による都市の再生と強靱化に資する技術開発」と協働し、既存宅地擁壁の耐震性能評価手法の整備および補強工法の構築を目的とした検討を行っている。

老朽化した練積み擁壁は、胴込めもしくは裏込めコンクリートの経年劣化により積み石間の接着が不十分となり、耐震性能が低下していると考えられる。そこで本研究では、練積み擁壁の極限状態として空石積み擁壁を想定し、空石積み擁壁－地盤・建物系の地震時挙動と破壊時のメカニズムを明らかにすることを目的とする。本稿では空石積み擁壁－地盤・建物系の縮小模型を用いた遠心載荷実験及び2次元有限要素解析モデルによるシミュレーション解析を行い、大地震時における空石積み擁壁の崩壊形状と近傍建物が空石積み擁壁の地震時挙動に及ぼす影響について検討する。

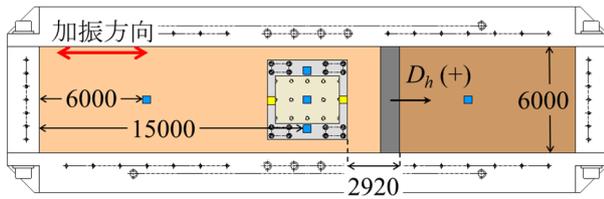
## 2. 空石積み擁壁－地盤・建物系の縮小模型を用いた遠心載荷実験

本章では遠心力載荷試験装置を利用し、空石積み擁壁－地盤・建物系の縮小模型振動台実験を行い、大地震時の空石積み擁壁の動的挙動を明らかにする。

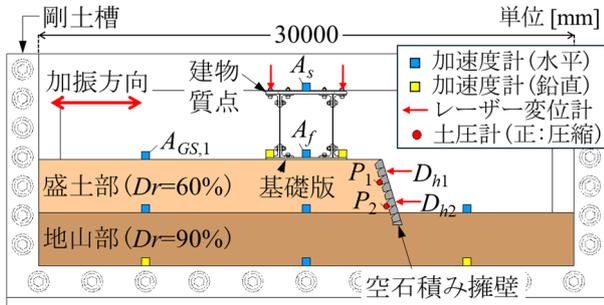
### (1) 遠心載荷実験概要

図1(a), (b)に実験試験体及び計測位置、写真1に建物模型、写真2に擁壁模型設置時の様子を示す。本章の実験は国立研究開発法人建築研究所の遠心力載荷試験装置を用いて30g場で実施した。土槽には剛土槽を使用し、土槽内に空石積み擁壁－地盤・建物系の30分の1縮小模型を設置した。剛土槽の形状は文献3)のものと同一である。

表1に模型及び実大スケールでの試験体諸元を示す。本研究では建物模型のプロトタイプとして直接基礎形式の木造戸建て住宅を想定している。建物模型は建物質点、板バネ、基礎版で構成されており、建物質点と基礎版の材料をアルミ、板バネ材料をステンレスとした。建物模型の形状は、模型スケールで高さ130mm、加振方向150mm、奥行方向150mmである。微小加振時の加速度フーリエ振幅スペクトルより推定された建物系の固有周波数（基礎固定時）は3.1Hzである。なお基礎版の底部にはサンドペーパー（240番）を貼付し、基礎版と地盤の摩擦抵抗を大きくしている。



(a) 平面図 (実大スケール換算値)



(b) 立面図 (実大スケール換算値)

図1 実験試験体 (Case 1-T, 建物模型あり)

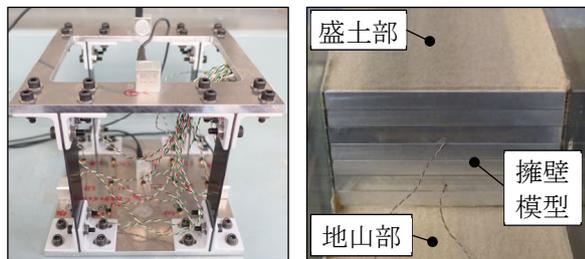


写真1 建物模型 写真2 擁壁設置時の様子

地盤模型は図1に示すように2層地盤で構成されている。本稿では地盤上層を盛土部、下層を地山部と呼ぶ。想定した地盤相対密度は盛土部で  $Dr=60\%$ 、地山部で  $Dr=90\%$  であり、空中落下法により乾燥豊浦砂を堆積させることで地盤模型を作成している。盛土部には傾斜角  $73$  度 (三分勾配) の傾斜部を設け、傾斜部には擁壁ブロックを模擬するアルミニウム棒 (密度  $\rho=2.5 \text{ g/cm}^3$ ) を設置する。建物と擁壁の離隔距離 (ここでは基礎版の擁壁側端部から擁壁前面の埋め込み上端までの水平距離) は実大スケール換算値で  $2.92 \text{ m}$  である。本研究では建物の法尻から  $30$  度の仰角線を引き、その擁壁側に建物の一部が含まれるように離隔距離を設定している。

図1に示すように土槽底部、地盤中、地表面、基礎版と建物質点頂部に加速度計、また擁壁ブロックと背後地盤の境界部に土圧計を設置し、さらに建物質点と擁壁ブロック前面にレーザー変位計の焦点を当てて計測を実施した。以下、本稿の内容は全て実大スケールに換算した値で示す。

表1 実験試験体諸元 (Case 1-T)

	重量: $m_1g$ [N]	模型 スケール	実大 スケール
建物質点		5.06	$1.37 \times 10^5$
板バネ	厚さ $t_b$ [mm]	1.5	45
	長さ $h$ [mm]	120	3600
基礎版	重量: $m_2g$ [N]	4.81	$1.30 \times 10^5$
建物固有振動数 (基礎固定時) $f_s$ [Hz]		93	3.1

表2 試験体パラメータ (実大スケール)

試験体	地盤 相対密度 $Dr$ [%]	建物の 有無	擁壁崩壊時の 入力波最大加速度 $A_{inp}$ [ $\text{m/s}^2$ ]
Case 1-T	60 (盛土部)	あり	8.2
Case 2-T	90 (地山部)	無し	8.2

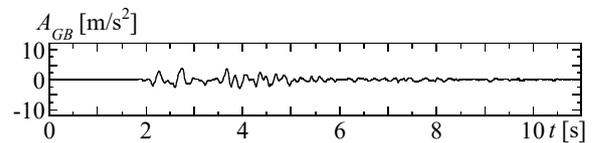


図2 振動台で計測された入力波水平加速度  
(最大加速度  $A_{inp}=4 \text{ m/s}^2$ )

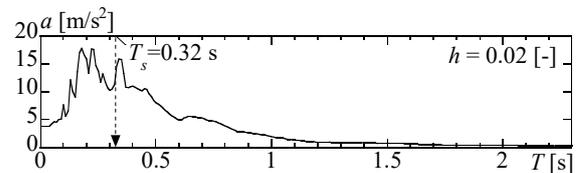


図3 入力波の加速度応答スペクトル  
(入力波最大加速度  $A_{inp}=4 \text{ m/s}^2$ )

表2に試験体パラメータを示す。本稿の実験では建物模型の有無をパラメータとしている。Case 1-Tは建物模型を付与した試験体 (以降、建物ありモデルと呼ぶ)、Case 2-Tは建物模型を付与せず地盤-擁壁系のみ (以降、建物無しモデルと呼ぶ) の試験体である。

図2に振動台で実測した入力波の加速度時刻歴、図3に一質点系の加速度応答スペクトルを示す。本実験では1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の強震記録 (NS) を入力波として用いた。ただし、建物 (基礎固定時) の固有振動数 ( $f_s=3.1 \text{ Hz}$ ) と地震動の卓越振動数を近づけるため、加速度強震記録の時間軸を1/2倍としている。また加振パターンは入力波の最大加速度  $A_{inp}$  を  $0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.2 \text{ m/s}^2$  とした漸増加振であり、擁壁が崩壊するまで連続的に加振した。なお表2には擁壁が崩壊した

ときの入力波の最大加速度, 図3中には黒破線で基礎固定時の建物系の固有周期 $T_s (=1/f_s)$ を示している。

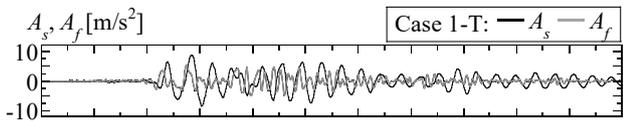
(2) 遠心载荷実験による空石積み擁壁の地震時挙動

図4(a)~(f)に入力波最大加速度 $A_{inp}=4\text{ m/s}^2$ 時におけるCase 1-T (建物あり), Case 2-T (建物無し)の遠心载荷実験結果を示す。図4の(a)はCase 1-Tの建物質点と基礎版の水平加速度( $A_s, A_f$ ), (b)は盛土部地表面(左端部周辺)の水平加速度 $A_{GS,1}$ , (c), (d)は擁壁の水平変位(上方部 $D_{h1}$ , 下方部 $D_{h2}$ ), (e), (f)は擁壁に作用する地震時土圧(上方部 $P_1$ , 下方部 $P_2$ )の応答時刻歴である。ここで, (c), (d)の擁壁の水平変位 $D_{h1}, D_{h2}$ は擁壁ブロックの上から2段目と6段目のブロック中央(それぞれ地山部地表面から2.37 m, 0.65 mの位置)の水平変位, (e), (f)の擁壁に作用する地震時土圧 $P_1, P_2$ は上から3段目と6段目(それ

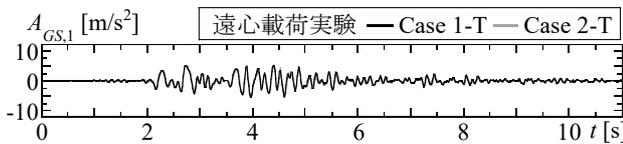
ぞれ地山部地表面から1.94 m, 0.65 mの位置)の擁壁ブロックに作用する土圧である。なお図中では圧縮側の土圧を正で表している。

図4(b)より, 盛土部地表面(左端部周辺)の水平加速度応答はCase 1-T, Case 2-Tで概ね等しく推移している。擁壁及び建物から離れた範囲では, Case 1-T, Case 2-Tの地盤挙動はほぼ等しいといえる。図4(c), (d)より, 擁壁の水平変位はCase 1-T, Case 2-Tともに加振開始後2.0s付近より増大し始め, 2.9s付近より正方向に片振りしている。擁壁の残留水平変位(以後, 残留変位と呼ぶ)は上方部 $D_{h1}$ , 下方部 $D_{h2}$ いずれもCase 1-T (建物あり)の方がCase 2-T (建物無し)よりも大きくなっている。図4(e), (f)より, 擁壁に作用する地震時土圧は擁壁上方部 $P_1$ よりも下方部 $P_2$ の方が大きい値となっている。各試験体の土圧応答を比較すると, 上方部 $P_1$ ではCase 1-T, Case 2-Tの違いはほとんど見られないが, 下方部 $P_2$ ではCase 1-T (建物あり)の方が大きい傾向にある。

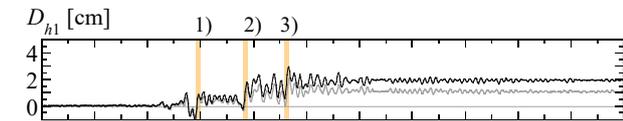
図5(a), (b), 図6(a), (b)に擁壁に作用する地震時土圧と擁壁の水平変位の関係を示す。図5, 図6の(a)は擁壁上方部, (b)は下方部における地震時土圧と擁壁水平変位の履歴である。図中の青実線は図4(e), (f)



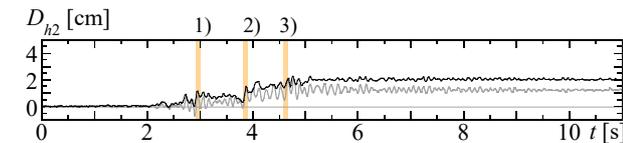
(a) Case 1-Tの建物質点及び基礎水平加速度



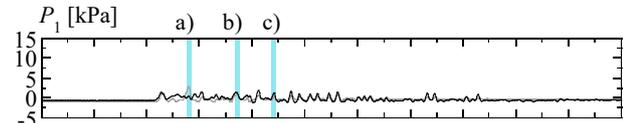
(b) 盛土部地表面水平加速度(左端部周辺)



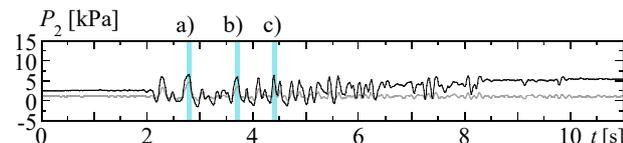
(c) 擁壁水平変位(上方部 $D_{h1}$ )



(d) 擁壁水平変位(下方部 $D_{h2}$ )

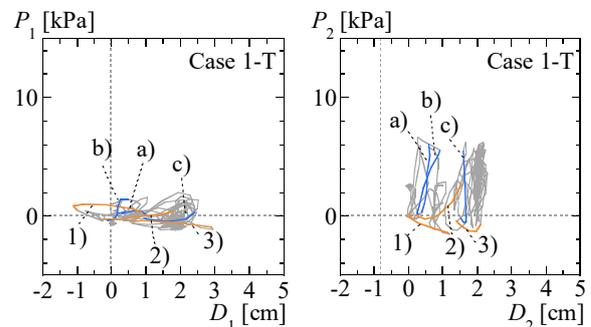


(e) 擁壁に作用する地震時土圧(上方部 $P_1$ )



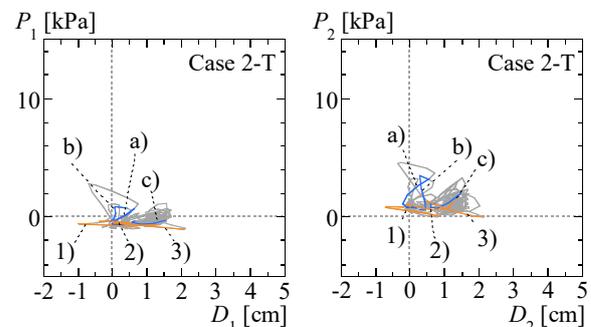
(f) 擁壁に作用する地震時土圧(下方部 $P_2$ )

図4 Case 1-TとCase 2-Tの応答時刻歴  
(入力波最大加速度 $A_{inp}=4\text{ m/s}^2$ 加振時)



(a)  $P_1 - D_1$ 関係 (b)  $P_2 - D_2$ 関係

図5 Case 1-T (建物あり)の擁壁に作用する地震時土圧と擁壁水平変位の関係



(a)  $P_1 - D_1$ 関係 (b)  $P_2 - D_2$ 関係

図6 Case 2-T (建物無し)の擁壁に作用する地震時土圧と擁壁水平変位の関係



写真3 Case 1-T (建物あり) 加振後の変形状態

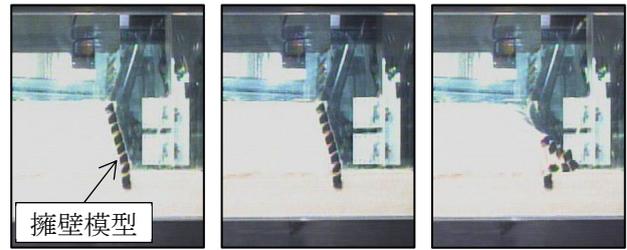


写真4 Case 2-T (建物無し) 加振後の変形状態

の擁壁に作用する地震時土圧応答が大きくなる時刻 (具体的には a) 2.7 s, b) 3.7 s, c) 4.3 s 付近), 橙色実線は図 4(c), (d)の擁壁の水平変位応答の中で水平変位の片振りが大きくなる時刻 (具体的には 1) 2.9 s, 2) 3.8 s, 3) 4.6 s 付近) の履歴を示している。

図 5, 6 より, 擁壁に作用する地震時土圧の値が大きくなる時刻 (図中の青実線) では擁壁の水平変位の変化は比較的小さく, また擁壁の水平変位が増加する時刻 (図中の橙色実線) では擁壁に作用する地震時土圧の値は小さくなる傾向がある。地震時土圧と擁壁の水平変位の応答には位相差が生じており, 擁壁に作用する地震時土圧は擁壁が背後地盤に押し付けられた際に増大したと推測される<sup>3)</sup>。

写真 3, 写真 4 の(a)~(c)に Case 1-T と Case 2-T の各加振後の擁壁の変形状態を示す。(a)は入力波最大加速度  $A_{inp}=0.5 \text{ m/s}^2$  (微小加振), (b)は  $4.0 \text{ m/s}^2$ , (c)は  $8.2 \text{ m/s}^2$  加振後の変形状態である。写真 3, 写真 4 より両試験体ともに  $0.5, 4.0 \text{ m/s}^2$  加振時における擁壁の残留変形は小さい一方,  $8.2 \text{ m/s}^2$  加振後では中央部の変位が大きくなり, 弓形に変形して擁壁全体が崩壊している。

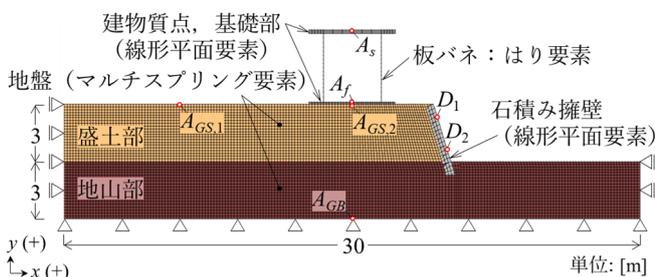


図7 数値解析モデル (Case 1-A, 建物モデルあり)

### 3. 空石積み擁壁—地盤・建物系の有限要素解析

本章では前章で実施した空石積み擁壁—地盤・建物系の遠心載荷実験結果を再現できる 2 次元有限要素解析モデルを構築し地震応答解析を行う。得られた解析結果に基づき, 擁壁近傍の建物が空石積み擁壁の地震時挙動に及ぼす影響について検討する。

#### (1) 2次元有限要素解析概要

図 7 に解析モデル概要を示す。本章の数値解析には FLIP 7.6.4 を用いた<sup>4)</sup>。解析ケースは Case 1-A (建物モデルあり), Case 2-A (建物モデル無し) である。実験試験体 (1/30 縮小模型) の各値を実大スケール値に換算した寸法で数値解析モデルを作成し, 地盤をマルチスプリング要素, 建物質点及び基礎部, 擁壁ブロックを線形平面要素, 板バネをはり要素でモデル化した。地盤のメッシュサイズは幅約  $0.15 \text{ m} \times$  高さ約  $0.15 \text{ m}$  である。なお, 板バネと建物質点及び基礎部との間には剛梁 (はり要素) を付与している。

表 3 に建物モデル諸元を示す。建物モデルは建物質点, 板バネ, 基礎部で構成されている。建物質点, 基礎部の材料はアルミ (密度  $\rho_a = 2.7 \text{ g/cm}^3$ , ヤング率

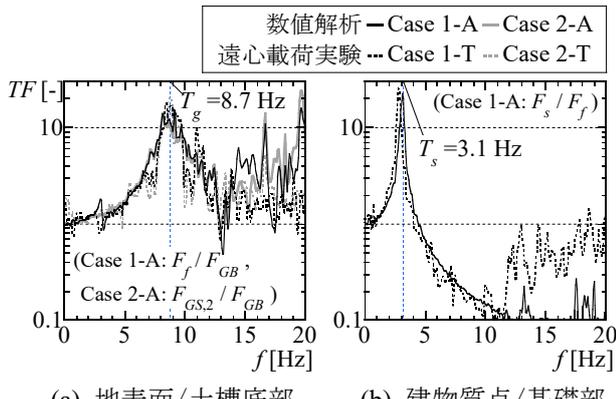
表 3 建物解析モデル諸元

建物質点	重量 $m_s$ [kg]	$1.39 \times 10^5$
板バネ	厚さ $t_b$ [mm]	45
	長さ $h$ [m]	3.6
基礎版	重量 $m_f$ [kg]	$1.27 \times 10^5$
建物固有振動数 (基礎固定) $f_s$ [Hz]		3.1

表 4 地盤解析モデル諸元

層	$l$ [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_{ma}'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$V_{s,ma}$ [m/s]	$G_{ma}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$m_G$ [-]	$\phi_f$ [deg]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$h_{max}$ [-]
盛土部	3.0	15.974	15.974	180	$5.28 \times 10^4$	0.5	40	5.0	0.25
地山部	3.0	16.954	16.954	180	$5.61 \times 10^4$	0.5	40	5.0	0.25

$l$ : 層厚,  $\gamma$ : 単位体積重量,  $\sigma_{ma}'$ : 各層中央における拘束圧,  $V_{s,ma}$ ,  $G_{ma}$ : 各層中央におけるせん断波速度および剛性,  $m_G$ : 拘束圧依存係数,  $\phi_f$ : 内部摩擦角,  $c$ : 粘着力,  $h_{max}$ : 最大減衰定数

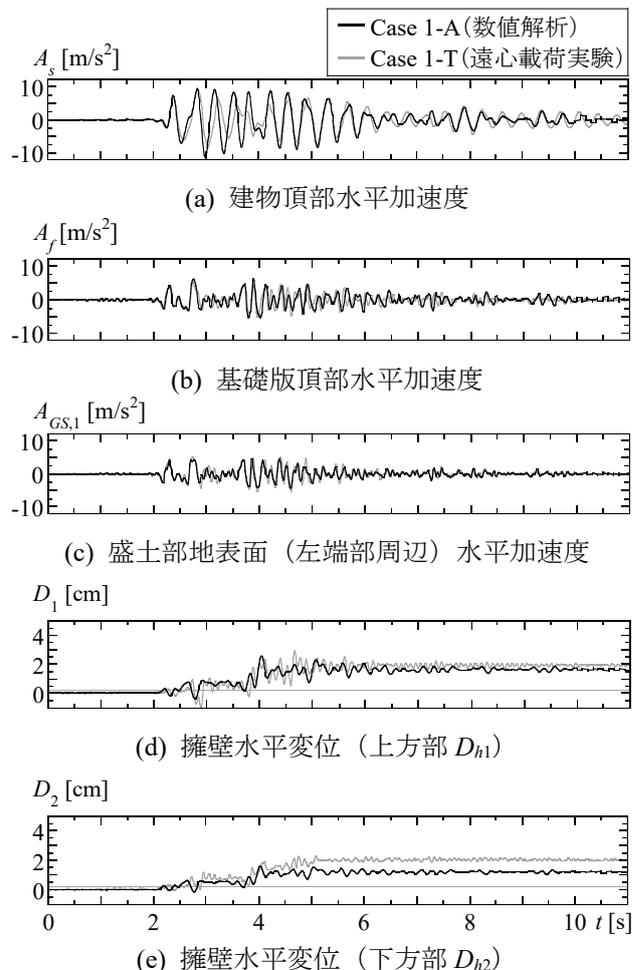


(a) 地表面/土槽底部 (b) 建物質点/基礎部  
 図 8 微小加振時のフーリエ振幅スペクトル比

$E_a = 65000 \text{ N/mm}^2$ ), 板バネ材料はステンレス ( $\rho_s = 7.9 \text{ g/cm}^3$ ,  $E_s = 193000 \text{ N/mm}^2$ ) である。基礎固定時の建物固有周波数が実験結果と同様 3.1 Hz となるようにモデルを構築している。

表 4 に地盤モデル諸元を示す。地盤の初期せん断剛性分布は微小加振時の遠心载荷実験結果に基づき設定した。内部摩擦角  $\phi_f$ , 粘着力  $c$ , 最大減衰定数  $h_{max}$  の値については既往の豊浦砂の動的変形試験結果を参照した。擁壁ブロックの材料はアルミとし, 遠心载荷実験試験体と同一の密度 ( $\rho_{a,r} = 2.5 \text{ g/cm}^3$ ) を与えた。また地盤-擁壁間にはジョイント要素 (摩擦角  $\phi = 20 \text{ deg}$ , 垂直方向及びせん断方向ばね剛性  $K_n$ ,  $K_s = 1 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ ) を付与した。地盤の境界条件について述べると, 実験で使用した剛土槽を再現するために地盤側方を水平移動固定, 地盤底面を鉛直・水平移動固定とした。減衰条件については建物質点と基礎部, 板バネには 3.1, 8.7 Hz で 1.0% となる Rayleigh 減衰, 地盤と擁壁には 8.7 Hz で 0.5% となる剛性比例型減衰を設定した。入力波には遠心载荷実験において振動台で実測された波形を用いており, 最大加速度を  $A_{imp} = 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.2 \text{ m/s}^2$  に調整した波形を独立に加振した。

図 8(a), (b) に各ケースの微小加振時 ( $A_{imp} = 0.5 \text{ m/s}^2$  入力時) における地表面  $F_{GS2}$  (Case 1-A では基礎部  $F_f$ ) と土槽底部  $F_{GB}$ , 及び建物質点  $F_s$  と基礎部  $F_f$  のフーリエ振幅スペクトル比を示す。数値解析結果の地盤卓越周波数 (8.7 Hz) および建物固有周波数 (3.1 Hz) のスペクトル比は遠心载荷実験結果と概ね対応しており, 建物と地盤解析モデルの初期パラメータの妥当性が確認された。



(a) 建物頂部水平加速度 (b) 基礎版頂部水平加速度  
 (c) 盛土部地表面 (左端部周辺) 水平加速度 (d) 擁壁水平変位 (上方部  $D_{h1}$ )  
 (e) 擁壁水平変位 (下方部  $D_{h2}$ )  
 図 9 Case 1-A と Case 1-T の応答時刻歴の比較 (入力波最大加速度  $A_{imp} = 4 \text{ m/s}^2$  加振時)

## (2) 空石積み擁壁-地盤・建物系の地震時応答性状

図 9(a)~(e) に Case 1-A の入力波最大加速度  $A_{imp} = 4 \text{ m/s}^2$  入力時における応答時刻歴を遠心载荷実験結果 (Case 1-T) と比較して示す。図 9 の(a)は建物頂部  $A_s$ , (b)は基礎部  $A_f$ , (c)は盛土部地表面 (左端部周辺)  $A_{GS,1}$  の水平加速度, (d), (e)は擁壁の水平変位 (上方部  $D_{h1}$ , 下方部  $D_{h2}$ ) の応答時刻歴である。図 9 より, 数値解析結果は遠心载荷実験より得られた各水平加速度及び水平変位応答時刻歴を概ね再現している。図 9(d), (e)より, 遠心载荷実験結果において擁壁上方部と下方部の残留変位は概ね等しい一方, 数値解析結果では上方部の残留変位が下方部よりも大きい傾向にある。

図 10(a)~(d) に  $A_{imp} = 3 \sim 6 \text{ m/s}^2$  加振後における各擁壁ブロック中央の残留変位分布を示す。図中には灰色プロットで建物モデル無しの場合の数値解析結果 (Case 2-A) 及び遠心载荷実験結果 (Case 2-T) を併せて示している。図 10(a)より  $A_{imp} = 3 \text{ m/s}^2$  入力時において, 各擁壁ブロック中央における残留変位は遠心

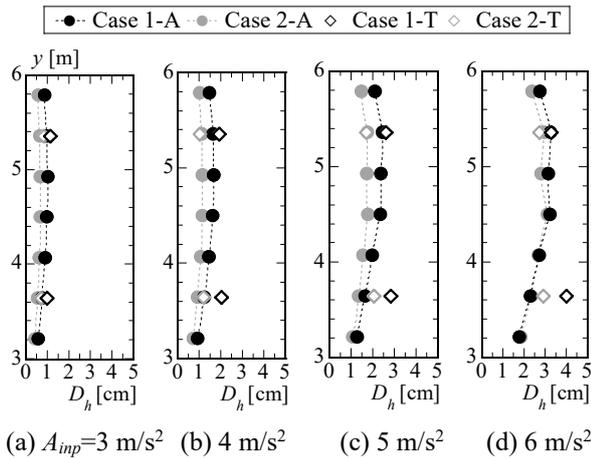


図 10 擁壁の残留変位分布

載荷実験結果、数値解析結果ともに  $y$  軸方向へ概ね等しく分布している。図 10(b)~(d)より  $A_{inp}=4\sim 6\text{ m/s}^2$  入力時において、数値解析結果では擁壁中央から上方部 ( $y=4.5\sim 5.4\text{ m}$  付近) にかけて残留変位が大きくなっており、Case 1-A (建物あり)の方が Case 2-A (建物無し)よりも大きくなっている。遠心載荷実験結果 (Case 1-T, Case 2-T) では下方部 ( $y=3.6\text{ m}$ ) において残留変位が大きくなっているが、これは連続加振により擁壁下方部でブロックのはらみ出しが進展したものと推測される。上方部 ( $y=5.4\text{ m}$ ) の残留変位は Case 1-T (建物あり)の方が大きくなっており、数値解析結果と同様の傾向を示している。

図 11(a), (b)に入力波最大加速度と擁壁残留変位の関係を示す。建物の有無による残留変位の増加量の違いは数値解析結果、遠心載荷実験結果ともに  $A_{inp}=4\text{ m/s}^2$  加振後より生じており、擁壁上方部 (図 11(a)) において顕著となっている。建物を有するケースでは近接する建物の地震時応答の影響により擁壁の残留変位が変化したと考えられる。

#### 4. 結論

本稿では空石積み擁壁の地震時挙動と破壊時のメカニズムを明らかにするため、空石積み擁壁-地盤・建物系の縮小模型を用いた遠心載荷実験及びそのシミュレーション解析を実施した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 遠心載荷試験装置を利用した縮小模型振動台実験により、空石積み擁壁は大地震時において擁壁の中央部で変形が増大し、最終的に崩壊することを示した。

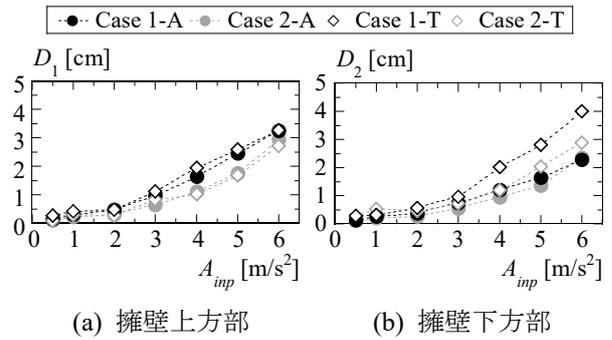


図 11 入力最大加速度と擁壁の残留変位の関係

- 2) 有限要素法に基づき構築した空石積み擁壁-地盤・建物系の2次元数値解析モデルによる地震応答解析結果は、本稿で実施した遠心載荷実験結果を概ね再現している。数値解析結果より得られた知見は、擁壁に近接する直接基礎建物の地震時応答の影響により、地震後における擁壁の残留変位が変化することを示した。

謝辞：本研究は、2020-2023年度に実施した国土交通省の総合技術開発プロジェクト「建築物と地盤に係る構造規定の合理化による都市の再生と強靱化に資する技術開発」における技術開発検討委員会 (委員長：勅使川原正臣中部大学教授) および宅地擁壁分科会 (主査：末政直晃東京都市大学教授) の下で実施されたものである。また本実験では気象庁により公開されている地震観測記録を利用した。さらに実験の実施には (株) ジオデザインの荒井郁岳、弓場将両氏の協力を得た。ここに深く感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 橋本隆雄，松下一樹：2016年熊本地震による被災宅地の被害分析，土木学会論文集 A1, Vol.74, No.4, pp.522-533, 2018.
- 2) 森友宏：松下克也，川崎淳志：平成28年熊本地震における熊本県益城町の建物被害および宅地地盤被害の悉皆調査，地盤工学ジャーナル, Vol.12, No.4, pp.439-455, 2017.
- 3) 秋月孝太，柏尚稔，的場萌子，井上波彦，竹谷修一，岩見達也：遠心振動実験に基づく古い練積み擁壁の地震時損傷メカニズム，日本建築学会構造系論文集，第89巻，第824号，pp.1147-1155, 2024.10
- 4) FLIP 研究会事務局：FLIP 研究会配布資料 FLIP (Ver. 7.4.1) 取扱説明書

# 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、1992年（平成4年）から2022年（令和4年）までの間に86回、年平均2.8回実施されている。2011年（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、出水中に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。

## 2. 観測の概要

### (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1kmの地点である。関ノ津観測所の位置を図-1に示す。

### (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、表面流速を算出。
- ・基本的には動画データの解析を観測後に実施して流量を算出（自動化事例有り）。
- ・垂流流速分布を考慮して区分流速を算出（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。

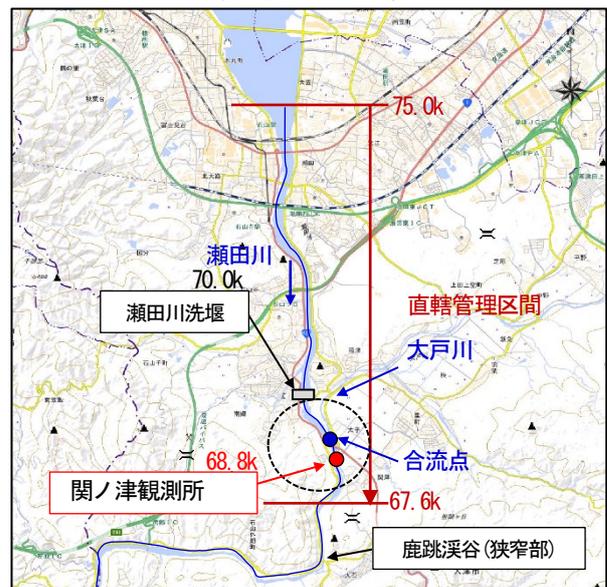


図-1 関ノ津観測所位置図



図-2 観測機器（遠赤外線カメラ）の設置位置



図-3 観測機器の設置状況

### 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、図-3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。

#### (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。

#### (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法的一种であるが、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

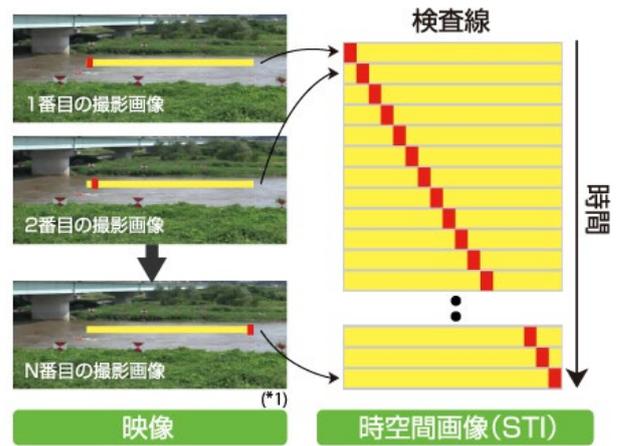


図-4 STIVにおける検査線のイメージ

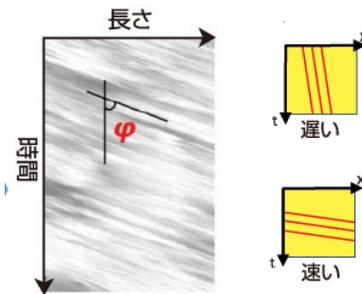


図-5 流速の測定原理

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。

流速は時空間画像の縞模様の傾き ( $\phi$ )、長さ、および時間から計算される。 $\phi$  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。

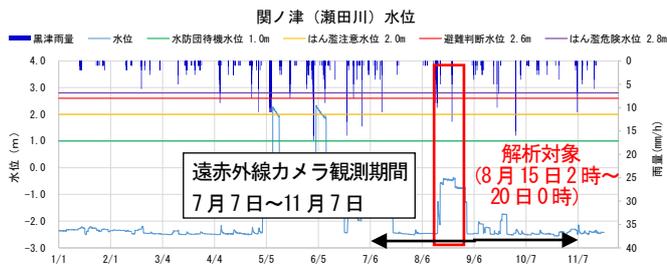
### 4. 試験観測結果

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

2023年（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



解析対象 (8月15日2時~20日0時)

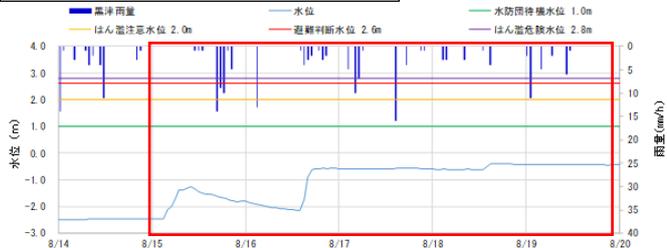


図-6 関ノ津観測所水位・雨量

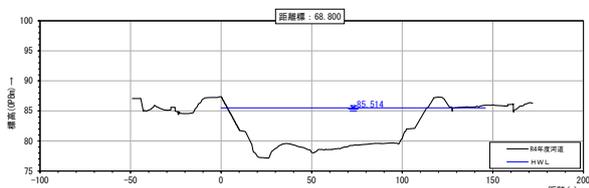


図-7 横断面 (68.8k)

観測期間中、関ノ津観測所の水位が最も高かった台風7号の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 $250\text{m}^3/\text{s}$ 、8月19日は $300\text{m}^3/\text{s}$ であった。

### (3) 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：68.8k、2022年度定期横断測量 (図-7)

### (4) 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 ( $300\text{m}^3/\text{s}$ ) の解析例を図-8に示す。

### (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2022年度 (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 $1.53\text{m/s}$  (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



図-8 STIV解析結果 (水位ピーク8月19日14:00時)

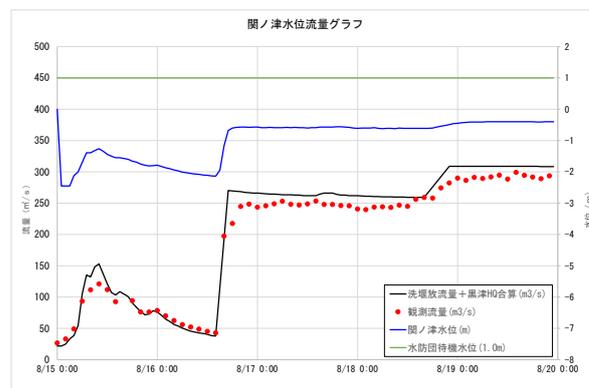


図-9 放流量+黒津流量と観測流量

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 $250\text{m}^3/\text{s}$  また、8月18日13:00~14:00に $300\text{m}^3/\text{s}$ 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、 $100\text{m}^3/\text{s}$ を超える流量ではやや低い値を示している。

## 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

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2023年 (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。

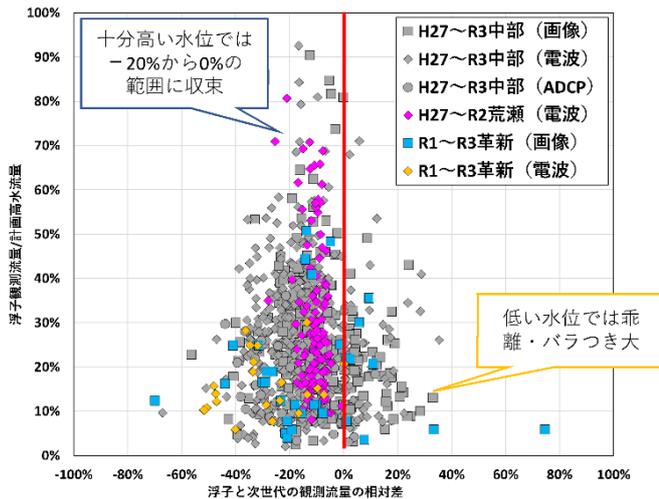


図-10 (観測流量の相対差) — (出水規模)  
 (浮子測法と非接触型流速計測法の観測流量の相対差)  
 = (非接触型流速計測法 - 浮子観測流量) / 浮子観測流量

- 【浮子観測データとの整合性の確認の実施方針(案)】
- 1) 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。
  - 2) 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。

2018年度(令和元年度)～2021年度(令和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)等の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、浮子測法の持つ不確実性程度(±20%程度)に収まることがわかってきた。

## (2) 検証方法

関ノ津観測所での今回の観測においては、浮子による同時流量観測を行っていないこと、また2022年度(令和4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えない。

そこで、図-11に示すとおり、2023年(令和5年)3月29日の事務連絡(浮子観測データとの整合性の確認の実施方針(案)について)3.審議方針3)「浮子観測法との同時流量観測が実施されていない場合」により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。

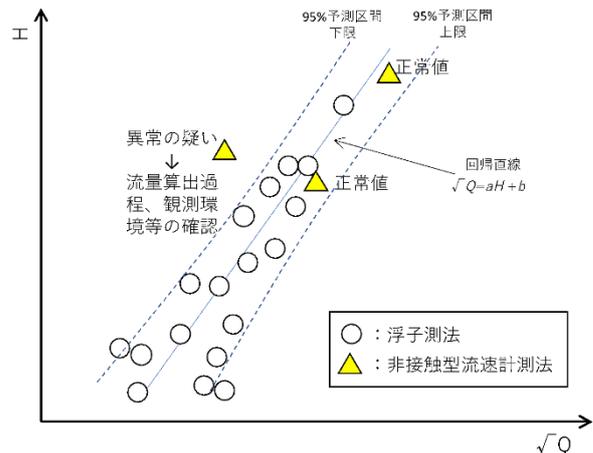


図-11 浮子観測データによる95%予測区間と非接触型流速計測法データ

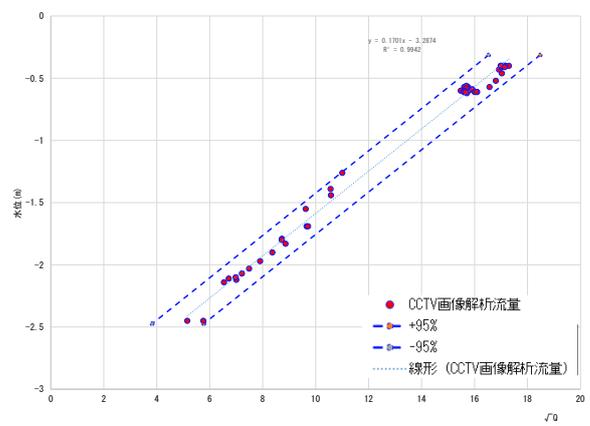


図-12 95%予測区間による検証結果

## (3) 検証結果及び考察

図-12に示すとおり、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。

なお、2023年(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台風7号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支川大戸川に位置する黒津観測所のH-Q式(2022年度)換算流量を合算して求めた合成H-Q曲線を作成した(図-13)。

8月15日7:00から8月16日の5:00までの2日間の観測データにおいて、低い水位で流量規模が小さな領域では「(洗堰放流量) + (大戸川黒津H-Q)」と「画像解析方式による流量」の差にバラツキが大きくなる傾向があったが、流量規模が比較的大きい場合は、バラツキが小さくなる傾向となった。この傾向は他河川で観測された浮子測法との相対差(図-10)でも同様の傾向が見られることから、十分高い水位となる後期放流時においてはバラツキが小さくなると推察される。

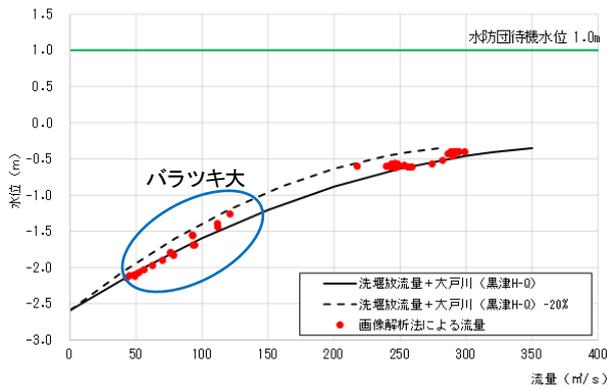


図-13 合成H-Qと画像解析方式による観測流量

## 6. 実運用に向けた課題

関ノ津観測所で実施し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。

- ① 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、0～-20%の範囲を検証することによって、観測データの整合性を担保していくことが重要である。
- ② 瀬田川洗堰の運用に資するためには、瀬田川洗堰の通過流量を正確に把握することが重要であり、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。具体的には大戸川黒津観測所における流量観測装置の設置等が求められる。

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

の水利条件（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

### ① 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。

### ② 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。

### ③ 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・山本晶：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

# 道路管理の実務におけるDXの取組について 3次元点群データと統合型GISの活用

石田 祐也<sup>1</sup>・横山 隼佑<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京都 建設局 道路管理部 保全課 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

近年、DXを梃子とした構造改革により都政はデジタル化を大きく推進している。道路管理分野においても、道路空間の3Dデータ取得や統合型GISの導入など、QOS（クオリティ・オブ・サービス）の飛躍的向上に向けた環境整備が着実に進展している。一方で、事業の主たる執行部隊である各建設事務所においては、新たなツールやシステムが十分に活用されておらず、実務における運用の具体化が急務となっている。

本稿では、東京都第二建設事務所における道路管理の実務として、設計及び情報管理の視点からDXに取り組み、実務の効率化・高度化を実現した事例について報告する。

キーワード 3次元点群データ、統合型GIS、業務の高度化・効率化

## 1. はじめに

東京都は、令和3年3月に「シン・トセイ 都政の構造改革QOSアップグレード戦略」を策定し、DXの推進を梃子として様々なプロジェクトを展開している。建設局では「3Dデータ等を活用したインフラの建設・維持管理の高度化」をリーディングプロジェクトに掲げるなど、業務の高度化・内部事務等の効率化を促進する新たなシステム・ツールの導入が進められている。

一方、現場で事業を執行する建設事務所では、各自が抱える個別課題に対するシステム・ツールの運用方法が具体化されておらず、取り残された課題も多い。真に構造改革を推進するためには、課題に直面する担当者の目線で新たなシステム・ツールを活用した解決策の検討も重要である。そこで第二建設事務所補修課では、道路管理における実務の効率化・高度化を目指して、「設計」と「情報管理」の視点でDXに取り組んだ。

## 2. 3次元点群データを活用した平面図作成

### (1) 工事発注図面作成時の課題と解決策

工事の発注プロセスは、要望・計画に対して調査・測量を実施した上で、設計、積算、施工とすることが一般的である。設計及び積算には現況を詳細に示す測量成果が必要となるが、交通事故を発端とした緊急の安全対策など、突発的に対応する業務では事前の測量成果がないことも多い。小規模工事の場合は職員が簡易計測を行うことで対応できるが、数量の精度が低く、また計測作業に時間を取られ職員の負担も大きい。さらに、交通量の多い路線や陸橋・アンダーパス等の歩行者立ち入り禁止

の箇所では測量委託から実施せざるを得ず、整備の遅れが課題となっていた(図-1)。

この解決策として、道路空間の3Dデータ(以下、「点群データ」という。)を活用した。点群データはMMS: Mobile Mapping Systemにより計測したもので、3次元の位置情報(緯度、経度、高さ)を持つ「点」の集合体として道路空間の地形や構造物を立体的に表現することができる(図-2)。都では、令和3年度から計測を開始し、令和5年度までに島しょ部を除く都管理道路の車道データを100%取得している。



図-1 突発業務における課題



図-2 道路空間の3Dデータ（点群）

本取組では、点群データを上空から平面的に見たときのオルソ画像（地物の位置ズレをなくし、地図と同じく真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示された画像）を作成し、CAD上で道路台帳図に重ね合わせた上で、道路台帳図に不足する路面標示等を描画する手法により平面図の作成を試みた。

## (2) 活用事例と効果

令和4年度には、本手法を用いて工事2件の発注図面を作成した。詳細を以下に述べる。

### a) 車道改良工事（すべり止め舗装）【職員対応】

本事例は、交通管理者からの要請を受け、山手通りのすべり止め舗装工を急遽行ったものである（表-1）。測量成果がなく、また交通量が多いことから簡易計測も困難であったため、職員が本手法を用いて発注図面及び数量調書を作成した（図-3）。

従来手法と比べて計測作業が省略されたほか、これまで職員では困難であった現場条件（交通量や供用環境等）の図面作成に対応可能であることを確認した。また、本事例では、設計と工事の数量誤差はなく、設計変更なしで工事を完了したことから、本手法は、従来手法と比べても十分な精度を確保できていると言える。

一方で、オルソ画像を目視により台帳図に重ね合わせるため、数cm程度の誤差が発生し、広範囲では位置ズレも大きくなる。この誤差を許容できる工種・数量に限定されるといった適用範囲の制限は課題である。

### b) 自転車通行空間整備工事【委託対応】

本事例は、令和4年5月に駒沢通りで発生した交通事故を契機として、交通管理者から早期の自転車通行空間の整備を要請され、急遽暫定整備の対応をしたものである。設計延長が約1kmと広範囲であったため、一般には測量の後に設計委託の手順が必要となるが、利用者の安全確保のため迅速な整備が求められている背景を踏まえ、測量業務を省略し、(1)点群データによる平面図作成+(2)自転車通行空間道の設計を行う業務を一つの委託とすることで整備効果の早期発現を狙った。

委託の概要を表-2に示す。委託箇所のような都市部での計測ではGNSS信号（観測点の位置情報）の受信状況が悪いことが想定された。そのため、補足的に調整点を設置した上で複数計測データの合成処理や点群データの精度管理等の調整処理作業を行った。（図-4、図-5）、その後、経年で形状が変化している歩道巻込み部や乗入部等を修正し、路面標示を書き加え、自転車通行空間の計画平面図を作成した（図-6）。

本事例を通して得られた効果と問題点・課題を表-3にまとめる。従来の測量業務と比べて現地作業を大幅に削減したことで工期短縮が図られた。加えて、測量業務自体の省略によって発注・契約の事務手続き等が圧縮され、4か月程度の早期整備を実現することができた。

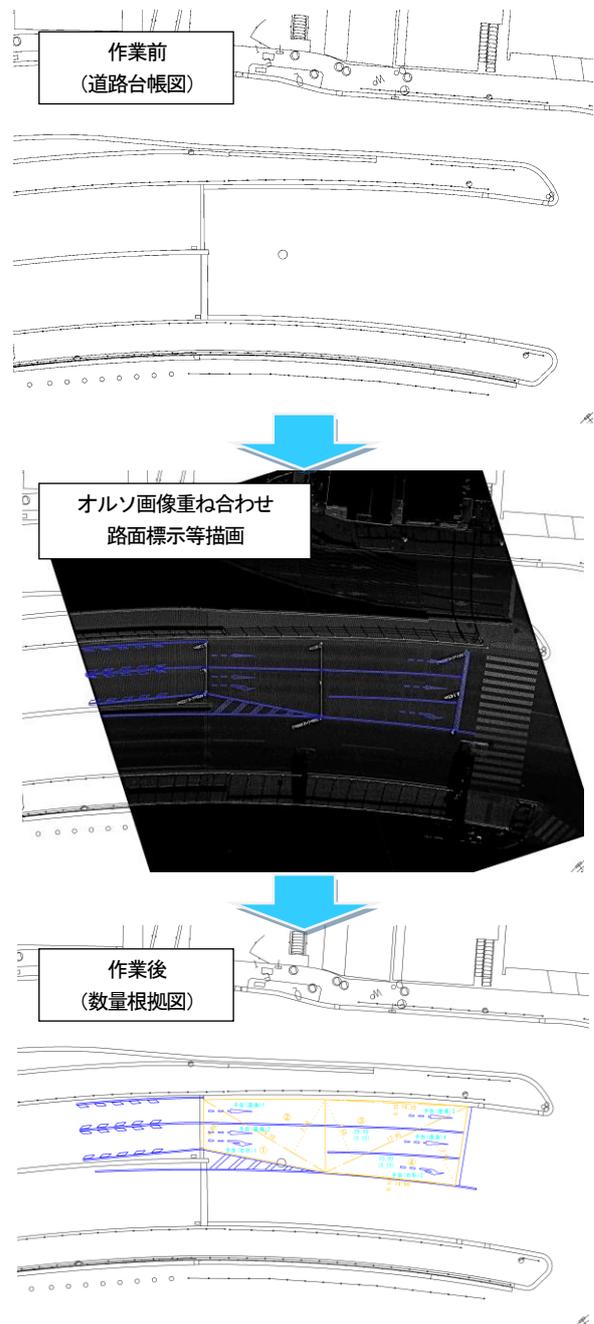


図-3 点群データを活用した図面作成の手順

表-1 【事例 a】設計概要

施工箇所	主318 山手通り 品川区大崎三丁目地内
施工範囲	延長 L=29.5m, 幅員 W=5.6m~9.1m
施工内容	薄層カラー(すべり止め)舗装工 A=192m <sup>2</sup>

表-2 【事例 b】委託業務概要

委託箇所	特416 駒沢通り 目黒区柿の木坂二丁目～東が丘二丁目
委託範囲	延長 L=0.99km, 幅員 W=9.0m
工期	R4.10.17～R5.1.31 (70日間)
業務項目	①業務計画書の作成, ②現地踏査, ③調整処理, ④平面図及び数量調書作成, ⑤報告書作成, ⑥打合せ

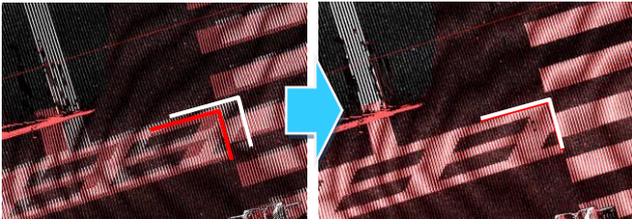


図-3 データ合成時の相対誤差の調整

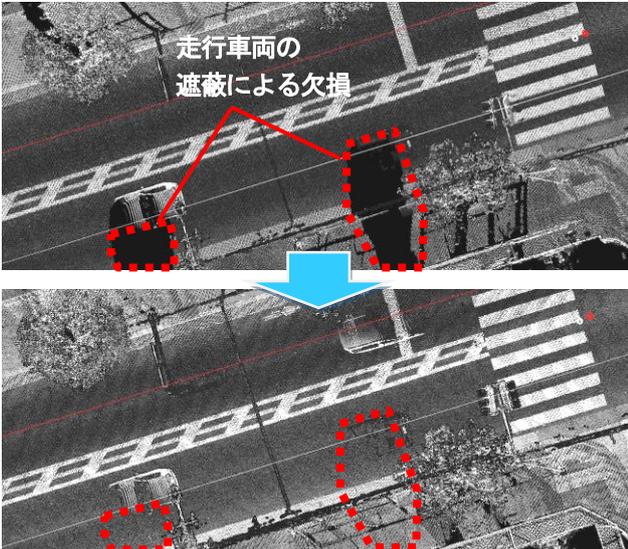


図-5 複数データの合成による補完

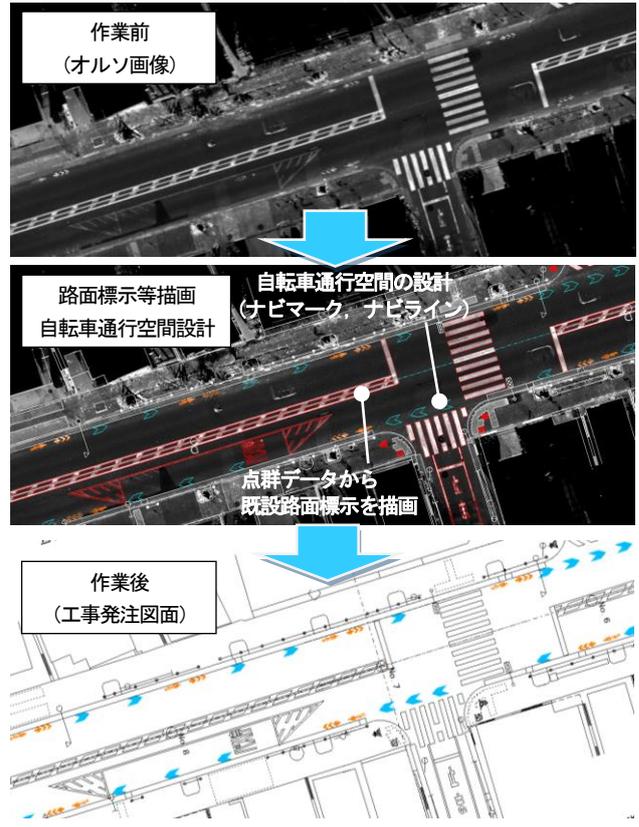


図-6 点群データを活用した図面作成状況 (自転車通行空間)

表-3 点群データを活用した図面作成業務の効果と課題

分類	問題点・課題	効果
データ	<ul style="list-style-type: none"> <li>本庁で一括してデータを保管しているため、各建設事務所での資料準備、貸与ができない</li> <li>各社の使用ソフトが異なるため、データ変換作業が必要 ⇒ 業務着手までに多少の手間がかかる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現在取得している点群データで本委託の遂行が可能であることを確認</li> <li>車道+歩道の点群データ取得箇所では、遮蔽物によるデータの欠損はほとんどない ⇒ 新たに計測が必要な項目はなし</li> </ul>
現場作業	<ul style="list-style-type: none"> <li>元図の道路台帳や点群データの精度・品質が悪い場合には必要な調整点が増加。作業量・日数増のリスク</li> <li>沿道に高層ビルが並ぶなど GNSS の受信状況が悪い箇所では調整点測量が困難 ⇒ データや沿道環境の適用制限がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来手法と比較して作業時間を削減 ※現地踏査：△5.5 人日 測量（調整処理）作業：△11.5 人日</li> <li>受発注者の現場立会が不要。業務範囲の確認は点群データで代用可能。 ⇒ 受発注者双方の業務を効率化、工期短縮</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>測量作業が省力化されるため、測量会社の受注機会が減少（本手法の適用範囲は限定的であり、影響は軽微と考えられる）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大手の空間情報コンサルの他、中堅・地方の建設コンサルも入札に参加（全 5 社）。一定程度の受け皿及び競争性の確保を確認</li> </ul>

### (3) 活用機会の拡大に向けて

本取組では、取得済みの点群データを活用することで、これまで職員の直接作業では困難であった現場条件への対応や測量業務の省力化による工事の早期着手を実現し、本手法の有用性を確認した。

一方で、現場条件による点群データの精度・品質や工種等の適用範囲制限のほか、道路空間は事業や沿道工事の影響で経年変化することから、点群データの鮮度を確保するための定期更新が必要といった課題も残されて

いる（令和6年度より2サイクル目の計測を実施中）。

なお、職員が点群データを閲覧するためのシステムである「3D都道管理支援システム」が令和6年1月より一部運用を開始している。加えて、令和6年度から各建設事務所への点群データの配備も完了しており、職員がより気軽に点群データに触れられるようになった。

今後は、職員が直接作業で対応している小規模工事設計も同手法を使って委託対応とするなど、更なるアウトソーシングによる業務効率化に取り組みたい。

### 3. 統合型GISを活用した工事履歴管理

#### (1) 工事履歴管理の課題

既設構造物に対する維持・補修を分掌とする第二建設事務所補修課では、定期的な健全度調査に加えて、過年度の詳細調査や工事履歴等の情報を参考に補修箇所及び補修方法を決定している。また、都道を使用した占用や工事の申請・許可を担当する同管理課では、復旧時の舗装構造として、直近の路面補修工事のしゅん功図を参照するなど部署を跨いだ利用場面も多く、工事履歴の情報管理は重要な位置付けにある。

他方で、同補修課では、路面補修工事の履歴を案内図、工事概要のリスト、紙のしゅん功図で管理していた。そのため、工事履歴を確認する際には、①案内図で年度及びキロポストを確認、②リストから件名を確認、③ロッカーからファイルを取り出してしゅん功図を搜索といった煩雑な手順が必要となり、非効率な管理状況となっていることが課題であった。

#### (2) 統合型GIS（K-Map）への情報一元化

この解決策として、建設局地理情報システム（K-Map）を活用した情報管理の高度化を行った。K-Mapとは、東京都建設局が所管する統合型GISで、地図とデータベースをリンクさせることによって、地図上で様々な情報を総合的に管理し、利活用を促進するシステムのことである。

本取組では、平成初期から令和3年度までの路面補修工事（約650件）のしゅん功図をスキャン、データ化し、点在していた各工事情報と合わせてK-Mapに集約させた（図-7）。工事範囲はラインで地図上に落とし込み、工事情報としゅん功図を紐づけることで、即時参照、ダウンロードができるよう整備した（図-8）。工事情報は文字検索や属性の絞り込みも可能としており、更なる情報の統合により補修箇所の分析機能も期待される。

#### (3) 効果と今後の取組み

新旧の管理方法で、必要な工事情報の取り出しにかかる時間を比較した結果、以前は点在する情報を順を追って確認していたが、整備後はK-Map上で作業が完結することから、およそ1/3の時間で対応可能となった。また、他部署の職員も含め自席のPCから工事情報及びしゅん功図を参照できるようになったことで、結果として補修課職員が受ける問い合わせの対応時間を削減することとなった。その他、全てPC上で作業が完結することで、テレワークにも対応したといった副次的な効果も得ることができた。

今後は更なる情報のアップデートとして、工事履歴と併せて情報の取り出し機会が多い舗装構造調査の結果や測量成果等も統合させることで、より利便性の向上を図りたい。

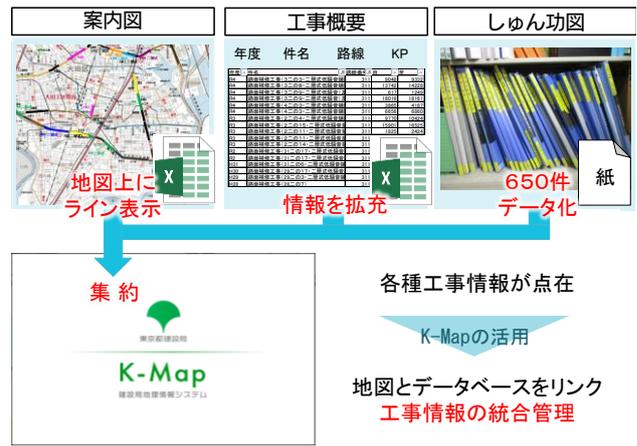


図-7 K-Mapへの情報一元化の概要

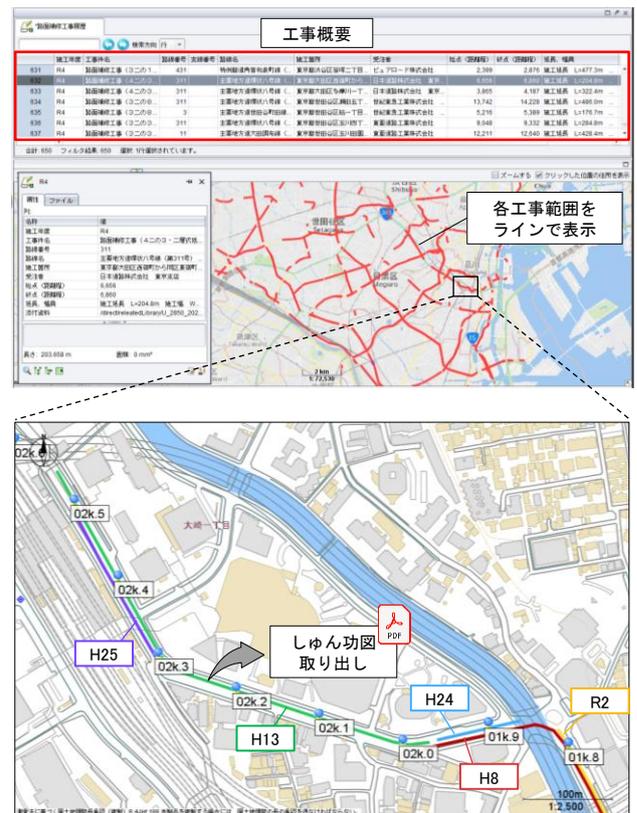


図-8 K-Map操作画面

### 4. まとめ

道路管理の実務における課題解決として担当者の目線でDXに取り組み、一定の効率化・高度化を実現した。

#### 【設計】3次元点群データを活用した平面図作成

- 職員による直接作業で対応可能な現場条件の拡大
- 作業の省力化等による早期の工事発注

#### 【情報管理】統合型GISを活用した工事履歴管理

- 工事情報の取り出しにかかる時間を1/3に圧縮
- 部署間の利用や作業場所を選ばない環境を整備

今後も加速するデジタル化の中で、更なるQOS向上に向けた道路管理を目指して、引き続き実務におけるDXに取り組みたい。

# 那覇空港（A-7）誘導路改良工事について

見城 栄治<sup>1</sup>・山城 京大<sup>1</sup>

<sup>1</sup>内閣府沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所 空港工務課（〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-6-11）。

昭和63年に整備された那覇空港A-7誘導路は、空港運用において重要な施設であり、「那覇空港維持管理・更新計画書」に基づく定期点検、巡回点検や点検結果を踏まえた緊急的な修繕により経常維持されている。そのような中、同誘導路は定期点検の結果、As舗装からCo舗装への改良が必要である事が判明し、PRC版Co舗装工事を実施する事となった。

本稿は、空港工事の特殊性（日々復旧による工事時間の制約）や那覇空港における特殊性（自衛隊機の緊急発進時の走行経路確保）に配慮しながら、空港運用の安全性や工事現場の安全を確保するために実施した関係者との調整内容について報告を行うものである。

キーワード 老朽化対策、Co舗装（PRC版）、As舗装、夜間作業

## 1. はじめに

那覇空港は、島嶼県沖縄の玄関口として国内外各地を結ぶ交通拠点であるとともに、県内離島と沖縄本島を結ぶハブ空港として重要な役割を果たしており、沖縄県のリーディング産業である観光・リゾート産業のみならず、生活物資や県産農水産物の輸送を通じ、県民の生活や経済活動を支える重要な社会基盤である。

那覇空港は、昭和8年に旧日本海軍により「小禄飛行場」として設置され、昭和20年に「那覇飛行場」として米国空軍の管理下に置かれ、昭和47年5月15日の本土復帰に伴い「那覇空港」となり、延長された滑走路(2550m→2700m)の供用も開始された。その後、昭和61年3月には延長された滑走路(2700m→3000m)の供用も開始され、近年においては、第1滑走路(A滑走路)から1,310m離れた沖合に飛行場用地の造成を平成26年1月に開始し、令和2年3月、延長2,700mの第2滑走路(B滑走路)の供用も開始された。

## 2. 老朽化対策（誘導路改良）の考え方

那覇空港全域とA-7誘導路の施工箇所を図-1に示す。

### (1) A誘導路の状況

A誘導路は、昭和50年の新設時にアスファルト舗装(As舗装)され、その後計画的な更新・整備が進められている。施工箇所A-7誘導路については、昭和63年の舗装改良以降、大規模改良は行われておらず、「那覇空港維持管理・更新計画書」に基づく定期点検(路面性状調査)や巡回点検による異常箇所に対する緊急的な修繕により経常維持が30年以上継続されている状況であった。



図-1 施工箇所

## (2) 誘導路改良の必要性

定期点検及び巡回点検において、舗装表面に航空機荷重によるわだち掘れやクラックが複数箇所確認された。(図-2、図-3)

「空港土木施設設計要領(舗装設計編)」<sup>2)</sup>では、As舗装の補修においては、既設舗装の走行安全性能等について、調査、評価、補修工法の選定を行うものとするとの記載があり、走行安全性能を評価するための路面の調査として、路面性状調査及びすべり摩擦係数調査を行うと規定されている。

「滑走路等路面性状及び滑り摩擦係数測定調査\_令和元年10月\_大阪航空局」によると、平坦性指標BBI(実測凹凸高さ/基準凹凸高さ)が1.0を超える箇所(図-4)があった。また、ひび割れ度がB3(補修優先度高)の箇所(図-5)、わだち掘れがB2(補修優先度中)の箇所(図-6)が確認されるなど、損傷や経年劣化が進行していることから、補修を行う事となった。



図-2 誘導路の劣化状況 (わだち掘れ)



図-3 誘導路の劣化状況 (クラック)

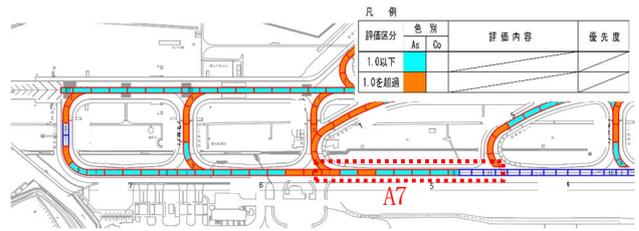


図-4 誘導路の平坦指標BBI状況

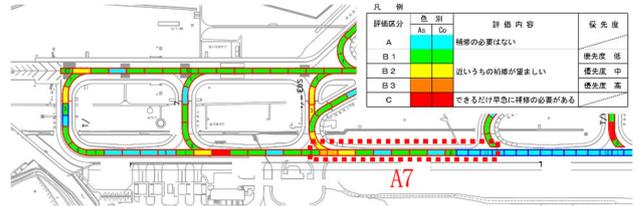


図-5 誘導路のひび割れ状況

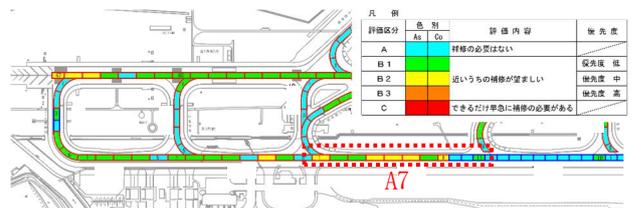


図-6 誘導路のわだち掘れ状況

## (3) 誘導路改良方法の検討

空港管理者である大阪航空局那覇空港事務所との調整の結果、舗装種別をAs舗装からCo舗装へ変更してほしいという航空会社からの要望に対応する方針となったため、Co舗装による改良工法について比較検討を行った。

Co舗装による改良としてプレキャスト鉄筋コンクリート版舗装(以下PRC版舗装)、プレキャストプレストレストコンクリート版舗装(以下PPC版舗装(大版組))、ノーマルCo舗装(以下NC舗装)の3案を比較した結果を以下に示す。(表-1)

表-1 Co舗装による改良工法の比較結果

項目	PRC版舗装 (プレキャストのRC(鉄筋コンクリート)版舗装) ・大版組	PPC版舗装(大版組) (プレキャストのPPC(プレストレストコンクリート)版舗装) ・大版組	NC舗装 (ノーマルCo舗装)
概説	プレキャストのRC(鉄筋コンクリート)版舗装 ・大版組	プレキャストのPPC(プレストレストコンクリート)版舗装 ・大版組	ノーマルCo舗装
概略図			
材料	2層(2層構造) (設計条件により異なる可能性がある)	2層(2層構造) (設計条件により異なる可能性がある)	1層(1層構造)
構造	高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート製のプレキャスト版舗装。コッターで型取りし、型枠で型取りし、コンクリートを流し込み、型枠を撤去して完成させる。	高強度コンクリートを使用したプレキャスト版舗装。コッターで型取りし、型枠で型取りし、コンクリートを流し込み、型枠を撤去して完成させる。	高強度コンクリート製の版舗装により高強度舗装を形成する。
施工	コッターで型取りし、型枠で型取りし、コンクリートを流し込み、型枠を撤去して完成させる。	コッターで型取りし、型枠で型取りし、コンクリートを流し込み、型枠を撤去して完成させる。	コッターで型取りし、型枠で型取りし、コンクリートを流し込み、型枠を撤去して完成させる。
工期	PRC版舗装は、現場での型取り、コンクリートの流し込み、型枠の撤去が必要である。工期が長い可能性がある。	PPC版舗装は、現場での型取り、コンクリートの流し込み、型枠の撤去が必要である。工期が長い可能性がある。	NC舗装は、現場での型取り、コンクリートの流し込み、型枠の撤去が必要である。工期が長い可能性がある。
コスト	PRC版舗装は、現場での型取り、コンクリートの流し込み、型枠の撤去が必要である。コストが高い可能性がある。	PPC版舗装は、現場での型取り、コンクリートの流し込み、型枠の撤去が必要である。コストが高い可能性がある。	NC舗装は、現場での型取り、コンクリートの流し込み、型枠の撤去が必要である。コストが高い可能性がある。
維持管理	PRC版舗装は、現場での型取り、コンクリートの流し込み、型枠の撤去が必要である。維持管理が難しい可能性がある。	PPC版舗装は、現場での型取り、コンクリートの流し込み、型枠の撤去が必要である。維持管理が難しい可能性がある。	NC舗装は、現場での型取り、コンクリートの流し込み、型枠の撤去が必要である。維持管理が難しい可能性がある。
結論	PRC版舗装は、現場での型取り、コンクリートの流し込み、型枠の撤去が必要である。コストが高い可能性がある。	PPC版舗装は、現場での型取り、コンクリートの流し込み、型枠の撤去が必要である。コストが高い可能性がある。	NC舗装は、現場での型取り、コンクリートの流し込み、型枠の撤去が必要である。コストが高い可能性がある。

比較の結果、NC舗装はプレキャスト舗装より安価であるが、養生期間が長期となり、施設の運用に影響を及ぼ



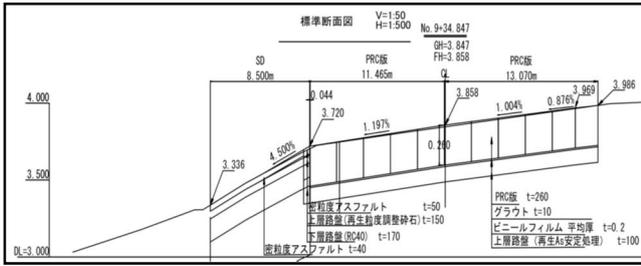


図-11 標準断面図(南側)

PRC版は事前に工場で製作し、施工日毎に施工箇所へ搬入した。施工箇所においては、既設As舗装及びAP版撤去、PRC版仮据付後、舗装復旧、仮マーキングを行った上で施設閉鎖を解除し、翌日以降のPRC版本据付、PRC版施工完了後のAs舗装、飛行場標識工までを順番に繰り返し行った。

工期は当初令和5年4月29日から令和5年11月2日の約6ヶ月間の予定であったが、自衛隊機による緊急発進に伴う作業中断方法の調整が難航し、約3ヶ月の間現場着手ができない状況が続いたため、工期を90日間延伸し、令和5年7月25日に工事着手、令和6年1月31日に工事完了とした。

一日の作業可能時間(23:00～翌6:00の計7時間)の内、入場から仮据付けまでの作業に約3時間、本据付け作業から退場に約5時間かかるため、作業可能時間内にPRC版を設置する事が不可能となる事から、プレキャスト版舗装工は以下の作業フロー(図-12)の通り、仮据付と本据付を別日で行う事となった。また、AP版は本据付と同日に完了する事とした。

PRC版仮据付けは1日につき2枚の施工、本据付けは1日に2～4枚の施工を行った。

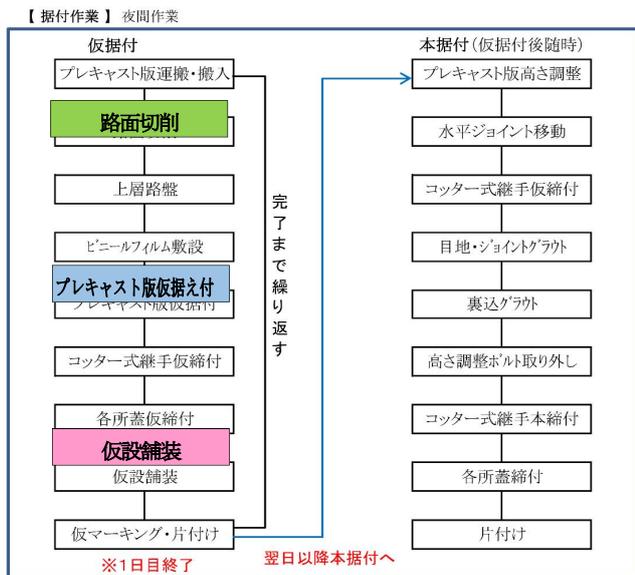


図-12 プレキャスト版舗装作業フロー

仮据付と本据付について施工フローを以下に示す。(表-2、表-3)

表-2 仮据え付け施工フロー (PRC版2枚/日施工)

プレキャスト舗装版工タイムテーブル 路面切削～PRC版仮据付～仮舗装 (スクランブルなしの場合)

作業内容	時間	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00
打合せ、朝礼	30分									
現場移動、準備工	100分									
路面切削 平均厚-32cm	60分									
2回切削	15分									
路面切削 出来形検測	15分									
上層路盤 (再生AS安)	40分									
仮据付 t=100	30分									
上層路盤出来形検測・舗装調整	30分									
ビニールフィルム敷設	15分									
PRC版仮据付	30分									
新設版仮据付 (必要な場合)	20分									
既設版 (AS仮据付) 3層	40分									
既設版 (仮据付) t=80 2層	35分									
既設版 (仮据付) t=80 2層	35分									
ジョイントコート (W=10cm)	15分									
仮マーキング	30分									
クレーン移動・紐立・解体	160分									
清掃、片付け	30分									
退場	30分									
累計										

備考  
 ・PRC版2枚から1枚に変更すると作業終了時間が30分短縮する。  
 ・PRC版据付け枚数を2枚から1枚にすることで、仮据付時間を30分から20分に短縮

表-3 本据え付け施工フロー (PRC版4枚/日施工)

プレキャスト舗装版工タイムテーブル 【本据付 (PRC版4枚施工)】

作業内容	時間	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00
打合せ、朝礼	30分									
現場移動、準備工	100分									
高さ調整工	60分									
目地グラウト 35m	60分									
裏込めグラウト 139m <sup>2</sup>	60分									
コッター本締め	6枚									
清掃、片付け	1式									
退場	1式									

## 5. 施工上の課題・解決策

### (1) 施工上の課題

施工箇所A-7誘導路は、A誘導路の中でも自衛隊格納庫の正面に位置し、自衛隊によるスクランブルの連絡があった場合、一時的に施設閉鎖を解除するため、30分以内に自衛隊機の走行ルートを確認すると共に制限表面(転移表面)の作業機械を退避させる事が必須となる。

本工事における転移表面について図-13に示す。



図-13 本工事における転移表面について

一方、仮据え付けの施工には組立・解体を含む長時間のクレーン作業が必要となり、クレーン作業に従事している最中は、転移表面に抵触、退避不可の状態であるため、スクランブル時の緊急対応が大きな課題となった。

また、スクランブルによる中断があった場合においても、空港運用開始に伴う飛行場側の点検が実施される6時までに作業完了(退避を含む)する必要があることから、作業の中止及び続行の判断を厳格に行う必要があり、判断基準の明確化が求められた。

## (2) スクランブル時の緊急対応

当初計画における一日あたりPRC版2枚施工した場合の、各作業段階におけるスクランブルへの対応について、以下に示す。(図-14)

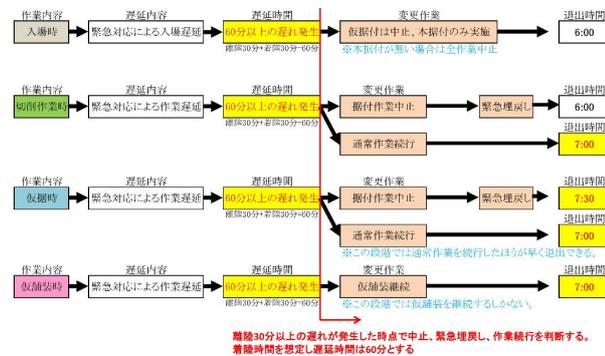


図-14 スクランブル時の緊急対応(PRC版2枚/日施工)

図-14の通り、仮据え付け作業以降にスクランブルの連絡が入った場合、退場完了時間の6時に間に合わない事が判明した。

スクランブルに対応するため、大阪航空局那覇空港事務所からクレーン作業に要する時間を削減する施工計画変更の提案があり、仮据付を一日あたりPRC版2枚施工とした場合と1枚施工とした場合の施工時間について比較検討を行った。比較した施工フローを示す。(表4)

表4 仮据え付け施工フロー(比較)

作業内容	開始時刻	終了時刻	PRC版2枚施工・1枚施工の比較															
			09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00				
仮据付	09:00	09:30																
組立	09:30	10:30																
解体	10:30	11:30																
仮据付	11:30	12:00																
組立	12:00	13:00																
解体	13:00	14:00																
仮据付	14:00	14:30																
組立	14:30	15:30																
解体	15:30	16:30																
仮据付	16:30	17:00																
組立	17:00	18:00																
解体	18:00	19:00																
仮据付	19:00	19:30																
組立	19:30	20:30																
解体	20:30	21:30																
合計																		

表-4の通り、一日あたりPRC版1枚施工とした場合、施工時間を累計30分短縮できる事が明らかとなった。

各作業段階におけるスクランブル時の作業一時中断対応について、図-15に示す。PRC版1枚施工とした場合であっても、仮据え付けのタイミングでスクランブルの連絡があった場合、6時退出に間に合わない事が検討の結果から明らかとなった。したがって、PRC版1枚施工とした場合であっても全ケースで条件をクリアできず、空港の運用に影響を与えてしまうリスクが残る検討結果となった。

また、自衛隊格納庫正面の施工期間を極力短期とする必要があり、PRC版1日あたり1枚施工を行う場合、2枚施工より施工期間が長期に及ぶ事になるため、PRC版1日あたり1枚施工は不採用とし、PRC版1日あたり2枚施工を採用した。

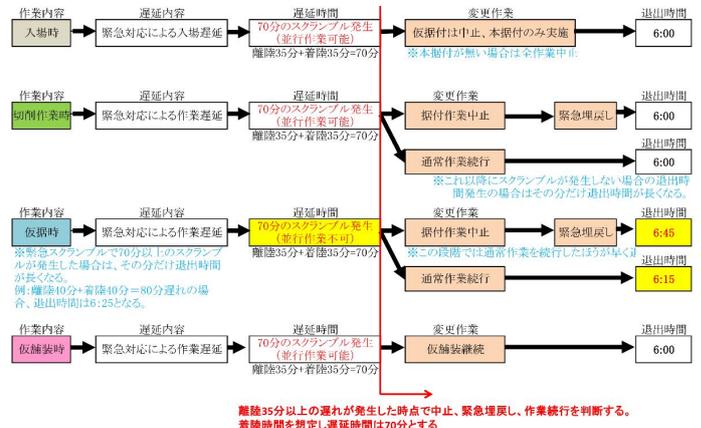


図-15 スクランブル時の緊急対応(PRC版1枚/日施工)

## (3) スクランブル時の作業一時中断の解決策

スクランブル時の緊急対応について、関係者との協議の結果、規定された緊急機走行経路を迂回する経路を設定する事により、スクランブル時に中断する事無く作業を実施する事が可能となった(一部作業を除く)。

スクランブル時における自衛隊機の対応の一部について、以下に示す。

### a) 固定翼機

エプロンにて迂回する事でA-7誘導路を走行せず、A誘導路とE-8が交差する箇所からA滑走路を横断し、B滑走路で離発着を行う。

### b) 回転翼機(ヘリコプター)

作業中のクレーンとの接触の危険性を回避するため、A-7に隣接する誘導路(A-5、A-6及びA-8、A-9)を一時的閉鎖解除した上で、離着陸方法の工夫を行った。

具体的には、R/W18（風向きが北から南）の場合、A-8で離陸、A-6で着陸を行う事とした。

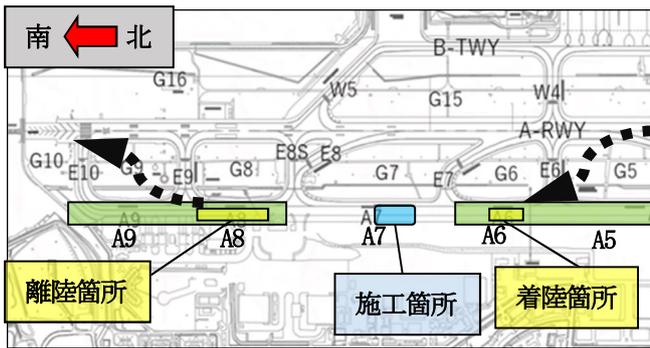


図-16 R/W18の場合の回転翼の運用方法

また、R/W36（風向きが南から北）の場合、A-6で離陸、A-8で着陸を行う事とした。

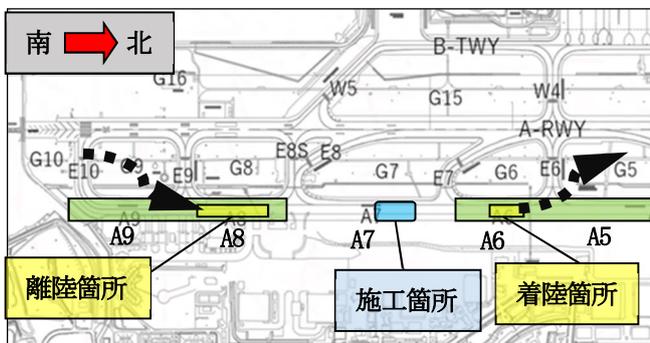


図-17 R/W36の場合の回転翼の運用方法

なお、回転翼機からのダウンウォッシュ(離着陸時の吹き下ろす風)により、カラーコーン等の保安用品や作業機器の飛散を防止するため、作業の一時中断時に、それらの回収及び退避可能な車両の移動を行う事とした。

これらの調整により、スクランブル時における自衛隊機の走行ルートの確保及び日々復旧工事が可能となり、安心安全な作業を行う事が可能となった。

## 6. まとめ

本工事は、空港工事における現場条件と那覇空港の特殊性を踏まえ実施する工事であり、数ある厳しい課題を解決し施工を行うためには、空港管理者は勿論、前述のように自衛隊やその他の組織と多くの調整を図る必要があった。

空港の安全・安心な定時運航を確保するためには、厳しい条件下において工事を行う事業者や空港管理者含めた関係者の協力が必要不可欠であると考えます。

**謝辞：**「那覇空港（A-7）誘導路改良工事」について報告を行うにあたり、大阪航空局那覇空港事務所、株式会社NIPPOの皆様には、情報提供等、多大なご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 那覇空港維持管理・更新計画書. 国土交通省大阪航空局那覇空港事務所. 令和6年4月1日. 那施企第8号
- 2) 空港土木施設設計要領(舗装設計編). 国土交通省航空局. 平成31年4月(令和6年4月一部改正). 第III章
- 3) 那覇空港制限区域安全管理規程. 大阪航空局那覇空港事務所 航空管制運航情報官. 令和4年7月26日. 那運情第193号
- 4) 航空法(航空路、空港等及び航空工保安施設)第四十九条(物件の制限等)
- 5) 国土交通省大阪航空局. 空港周辺における建物等設置の制限(制限表面). 国土交通省 大阪航空局 (mlit.go.jp). <https://www.cab.mlit.go.jp/wcab/measure/restriction.html>
- 6) 那覇空港共用規程. 国土交通省大阪航空局. 令和6年4月1日改正. 第一章第一条
- 7) 那覇空港における着陸帯、誘導路及びスポット誘導経路の夜間工事等に伴う空港運用の指針. 令和5年3月14日改正. 那調第3号

# 直轄国道におけるコンクリート舗装の 追跡調査と設計法への示唆

横澤 直人<sup>1</sup>・藪 雅行<sup>2</sup>・渡邊 一弘<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (国研) 土木研究所道路技術研究グループ舗装チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>2</sup> (国研) 土木研究所道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

コンクリート舗装はアスファルト舗装と比較して高耐久でライフサイクルコストに優れることから、適材適所での適用拡大が求められている。一方、コンクリート舗装の設計法には経験的な部分もあり、設計法の更なる合理化を図ることで、一層の適用拡大が期待される。コンクリート舗装の適用拡大や設計法の検証にあたっては、長期間にわたるモニタリングが必要である。(国研)土木研究所では、約四半世紀にわたり、直轄国道のコンクリート舗装区間の追跡調査を行っており、コンクリート舗装の長期供用性の推移や構造細目の効果に着目した検討を行ってきた。本文では、最新の調査結果を報告するとともに、追跡調査結果に基づく構造細目の設計法に関する今後の検討の方向性を示す。

キーワード コンクリート舗装、追跡調査、長期供用性、鉄網、設計法

## 1. はじめに

近年の厳しい財政状況をふまえて、舗装の新設や更新時には、初期費用に加えて、ライフサイクルコスト(LCC)の観点から舗装の種別選定を行うことが求められている。道路統計年報2023によれば、舗装道及び簡易舗装道におけるコンクリート舗装の占める割合は5%程度に留まっているものの、アスファルト舗装と比較して高耐久でLCCの点で優れていることから、近年では、大型車通行の多いバイパスの新設区間など、コンクリート舗装の利点が発揮されやすい箇所での適用拡大が期待されている。こうしたコンクリート舗装の適材適所での適用拡大にあたっては、コンクリート舗装の長期供用性の評価が重要となる。

また、コンクリート舗装の設計法には経験的な部分もあり、設計法の更なる合理化を図ることで、コンクリート舗装の適材適所での適用拡大が推進されるものと期待される。設計法の合理化の余地があると考えられるものの一つとして鉄網が挙げられる。鉄網は、コンクリート版の表面から版厚の約1/3の位置に設置され<sup>1)</sup>、疲労や温度変化等でコンクリート版に発生したひび割れが進展することを抑制する効果があると考えられている。一方、鉄網の効果については検討する余地があるという指摘<sup>2)</sup>や、コンクリートを2層に分けて打設するため施工性が低下するといった課題もある。そのため、鉄網の効果を改めて検証し、設置の要否を含めた設計法の再検討が求められている。

こうした背景の下で、(国研)土木研究所では、関係機関と連携しながら、岩手県内にある国道4号平泉バイパスにおけるコンクリート舗装の追跡調査を実施してきた。これまでに、供用9年<sup>3)</sup>、16年、18年<sup>4)</sup>、20年<sup>5)</sup>が経過した時点で調査を行い、コンクリート舗装の長期供用性を評価してきた。特に、平泉バイパスでは鉄網を使用した工区と省略した工区が隣接しており<sup>6)</sup>、鉄網の効果を検証することが可能となっている。

以上をふまえて、本文では以下の2点を目的として実施したコンクリート舗装の追跡調査の結果を報告する。

- ①コンクリート舗装の設計年数20年をこえた供用24年時点での調査を行い、コンクリート舗装の長期供用性の評価を行う。
- ②鉄網の有無が異なる隣接工区の供用性の比較を通じて、鉄網の効果を検証し、鉄網とコンクリート舗装の長期供用性の関係を考察する。

なお、本文は筆者らが公表した文献<sup>7)</sup>を元として、これに加筆したものである。

## 2. 追跡調査の方法

### (1) 調査対象区間

調査対象とした国道4号平泉バイパスのコンクリート舗装区間(上下各1車線)は、岩手県西磐井郡平泉町に位置し、全4工区から構成されている(図-1)。このうち、2工区下り線、3工区上下線及び4工区下り線が調査対象区間である。3工区及び4工区は一関遊水地堤防区間

と併設されており、最大14mの盛土高の区間が存在する。

調査対象区間の工区割を表-1に示す。コンクリート舗装は1998年から1999年にかけてスリップフォーム工法で施工された。設計交通量区分N<sub>7</sub>として舗装構成が決定され、3工区共通して、路床の設計CBR12以上、路盤(RC-40)15cm、再生密粒度アスファルト中間層4cm、コンクリート版厚30cm、横収縮目地の設置間隔は10mである。横収縮目地には、長さ700mm、直径25mmのダウエルバーが400mm間隔で配置されている。

各工区の調査版数は、2工区では27枚、3工区では66枚、4工区では19枚となっている(図-2)。4工区では、供用

後に町道の接続に伴ってアスファルト舗装で供用されている箇所があるため、路面がコンクリート舗装のまま供用されている19枚を調査対象とした。また、2工区では27枚中10枚の版のみで鉄網を使用し、残る17枚では鉄網を省略している。3工区では全ての版で鉄網を省略し、4工区では全ての版で鉄網を使用している。なお、本文では版を3桁の数字で表記し、百の位は工区、下2桁は1工区側から数えた版の枚数を示す。

## (2) 調査項目

2023年11月14日から16日にかけて、コンクリート舗装の路面調査及び構造調査を実施した。路面調査では、ひび割れ調査(スケッチ)、すべり抵抗性及びきめ深さの測定を行い、スケッチからひび割れ度を算出した。ひび割れ調査は全ての工区で実施し、すべり抵抗及びきめ深さの測定は、2工区及び3工区下りで実施した。各項目は、舗装調査・試験法便覧<sup>8)</sup>の「S029 舗装路面のひび割れ測定方法(1)スケッチによる方法」、 「S021-3 回転式

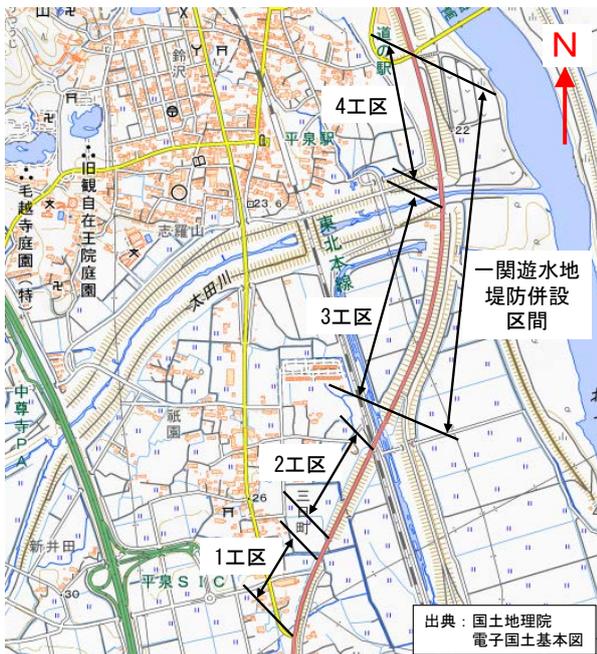


図-1 調査対象区間

表-1 調査区間の工区割

工区	2工区	3工区	4工区
総施工規模 (1工区含む)	L=2,020m, W=8.25m, A=12,640m <sup>2</sup>		
舗装構成	コンクリート版厚30cm, 中間層4cm 路盤15cm, 路床の設計CBR12以上		
目地	横収縮目地間隔10m, 縦目地: 突合せ目地		
施工延長	257m	655m	406m
調査版数	27枚	66枚	19枚
鉄網有無	No.201-210有り No.211-227無し	無し	有り
盛土施工時期	1987-88年		1998-99年
盛土高	H=6~14m		

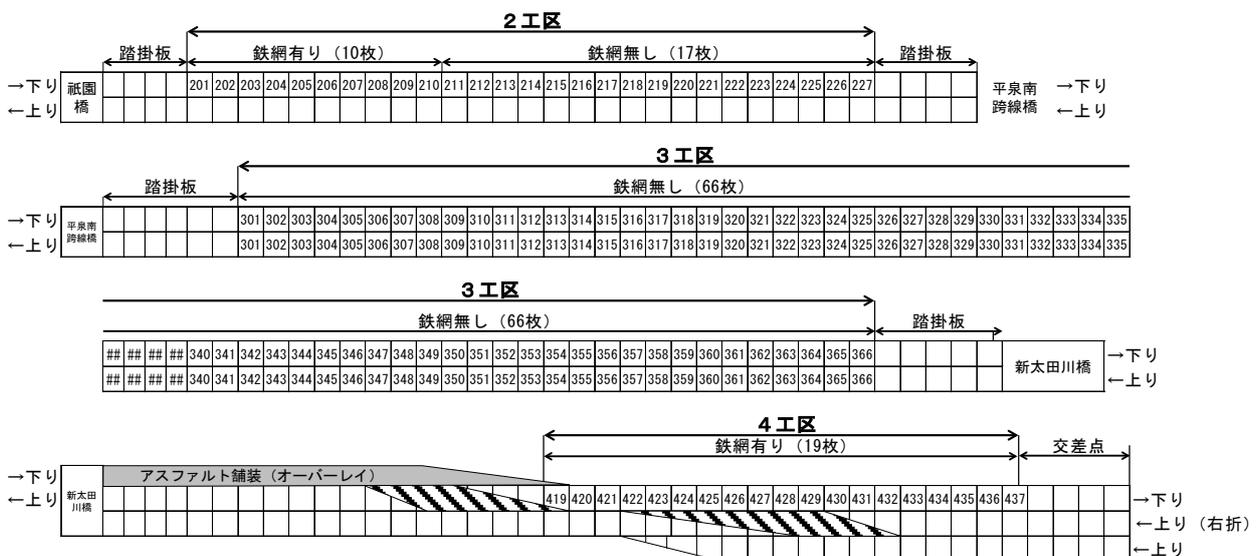


図-2 調査したコンクリート版

すべり抵抗測定機による動的摩擦係数の測定方法」，「S022-3 回転式きめ深さ測定装置を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法」に基づいて実施した。

構造調査では，FWD（98kN 荷重）を使用して，版の健全性を示す版中央部の  $D_0$  たわみ量と，目地部の荷重伝達の健全性を示す荷重伝達率を算出した。荷重伝達率  $E_{ff}$  は，BWP で測定した  $D_0$  たわみ量及び  $D_{300}$  たわみ量に基づき，式(1)から算出した<sup>9)</sup>。また，版を横断するひび割れが発生している場合には，ひび割れ部で測定を行い，別途荷重伝達率を算出した。

$$E_{ff} = \frac{D_0}{(D_0 + D_{300})/2} \times 100[\%] \quad (1)$$

前述のとおり，平泉バイパスでは，2008 年（供用 9 年），2015 年（供用 16 年），2017 年（供用 18 年），2019 年（供用 20 年）に追跡調査を行っている。しかし，調査時期によっては，調査対象範囲や調査項目が異なっている場合がある。そのため，本文では，ひび割れは 2015～2023 年（3 工区上り及び 4 工区は 2017～2023 年），すべり抵抗及びきめ深さは 2008～2023 年，構造調査は 2008～2023 年（3 工区上りは 2015～2023 年）の調査結果に基づき，供用性の変化を整理した。

また，鉄網の効果としては，ひび割れの進展抑制やそれに伴う構造性能の低下抑制が期待されていることから，ひび割れ及び構造調査の結果において，鉄網を使用した版と省略した版とで比較し，その効果を検証した。

### 3. 追跡調査の結果

#### (1) 路面調査の結果

##### a) ひび割れ調査結果

工区ごとに，ひび割れが発生した版数，横断ひび割れが発生した版数及びひび割れが発生した版の平均ひび割れ度を図-3 に示す。鉄網には発生したひび割れの進展を抑制する効果が期待されていることから，ひび割れの発生していない版も含めた工区全体のひび割れ度ではなく，ひび割れが発生した版ごとのひび割れ度をひび割れが発生した版の数で除した値である平均ひび割れ度を用いた。

図-3 からは，ひび割れが発生した版数及び横断ひび割れが発生した版数は増加傾向にあることが確認される。

これは，供用年数が長期化することに伴い，コンクリート版に蓄積した疲労が増大しているためであると考えられる。一方，平均ひび割れ度に関しては，経年変化や鉄網の有無による差異は確認されない。これは，ひび割れが発生した版数は増加しているものの，1 枚の版に発生したひび割れは小規模なものが多く，ひび割れが発生した版数で平均した場合には，ひび割れ度が経年に伴って増加しないためと考えられる。

また，3 工区上り線は，下り線と比較して横断ひび割れが発生した版数が多くなっている（図-3 (b)，(c)）。調査区間では，路肩を含む下り車線の版幅は 4.50m，上り車線の版幅は 3.75m であり<sup>9)</sup>，上り車線ではコンクリート版の弱部である縦自由縁部に近い位置に車両が走行し

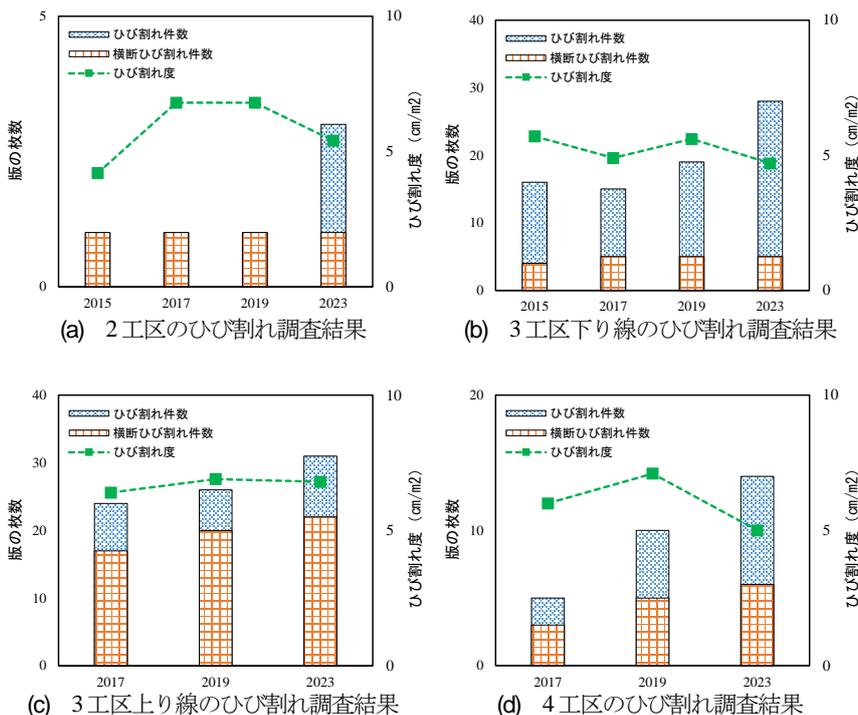


図-3 ひび割れ調査結果

表-2 鉄網とひび割れ幅の関係

		累計ひび割れ幅[mm]		
鉄網有無	工区(版数)	2017	2019	2023
有	2 工区 (10 枚)	0.45	0.45	2.40
有	4 工区 (19 枚)	1.45	1.65	3.05
鉄網有工区 (合計)		1.90	2.10	5.45
鉄網有工区 (版 1 枚あたり)		0.07	0.07	0.19
無	2 工区 (17 枚)	0.00	0.00	1.00
無	3 工区 (66 枚)	6.64	7.70	13.45
鉄網無工区 (合計)		6.64	7.70	14.45
鉄網無工区 (版 1 枚あたり)		0.08	0.09	0.17

ている。そのため、上り車線ではコンクリート版の疲労が蓄積しやすく、下り車線よりも損傷が進行したものと考えられる。

次に、鉄網の有無に着目し、ひび割れが発生した版を対象として、工区ごとの版1枚あたりのひび割れ幅を算出した結果を表-2に示す。なお、表-2では、版幅の相違による影響を排除するため、3工区上りは算出対象外とした。算出結果からは、鉄網を使用した工区と省略した工区とでひび割れ幅の有意な差は確認されず、平均ひび割れ度の結果と同様、鉄網がひび割れの拡大を抑制する効果があるとは言えない結果となった。

**b) 鉄網に起因するポットホールが発生**

2023年調査では、4工区の特定の版においてポットホールが多発していることが確認された。特に多数のポットホールが確認されたコンクリート版の損傷状況の例を写真-1(a)に示す。写真-1(a)の版では、補修済みの箇所も含めて多数のポットホールが確認された。ポットホールの内部を観察すると、路面から数cmの深さに設置された鉄網が腐食し、路面に露出している(写真-1(b))ことから、鉄網の腐食に伴い、ポットホールが発生したものと考えられる。施工状況を確認することができていないためあくまで推測の域ではあるが、設計上は路面から版厚の1/3の深さ(ここでは路面から10cmの深さ)に鉄網が設置されるはずであったが、何らかの要因で設計上の想定よりも浅い位置に設置されていたことがポットホールが発生した原因であると考えられる。

ポットホールが多数発生する状況は、2019年の調査では確認されておらず、鉄網の腐食が進んだ時点から急速に発生したと考えられる。耐久性に優れ、維持管理コストが小さいことがコンクリート舗装のメリットであるが、状況によっては鉄網を用いることでかえってコンクリート舗装の供用性が損なわれ、維持管理コストが増大する可能性があることが示唆された。

**c) すべり抵抗及びきめ深さの測定結果**

工区ごとのすべり抵抗及びきめ深さの測定結果(表-3)は、いずれも2019年の調査よりも大きな値となり、特

にすべり抵抗については修繕目標値 0.25<sup>10)</sup>を上回っており、経年による供用性の低下は確認されなかった。

**(2) 構造調査の結果**

**a) 版中央部のたわみ量の測定結果**

工区ごとの測定結果(図-4)では、概ね過年度の測定結果と同様の結果となり、鉄網の有無による差異も確認されなかった。また、全工区においてたわみ量の最大値は0.2mm程度以内であり、全体的に健全な状態を保持しているものと考えられる<sup>11)</sup>。一方、3工区下りの一部と3工区上り、4工区の一部では、過年度と比較して、たわみ量の大小関係は概ね一致しているものの、全体的にたわみ量が大きくなっている。特に3工区は堤防併設区間であり、高盛土上にあることから、舗装の支持地盤の不等沈下が影響している可能性がある。今後は、支持地盤の状態を示していると考えられるD<sub>200</sub>たわみ量やその他支持地盤に関する資料に基づき、たわみ量が全体的に大きくなった要因を分析していく必要がある。

**b) 荷重伝達率の測定結果**

工区ごとの目地部における荷重伝達率の推移(図-5)では、一部で低下している版が見られるものの、工区全体では経年による低下傾向は確認されず、鉄網の有無による差異も見られなかった。また、3工区では、上り車線の方が下り車線よりも荷重伝達率が低くなっており、ひび割れ調査結果と同様、コンクリート版の損傷が進展していることが示唆された。

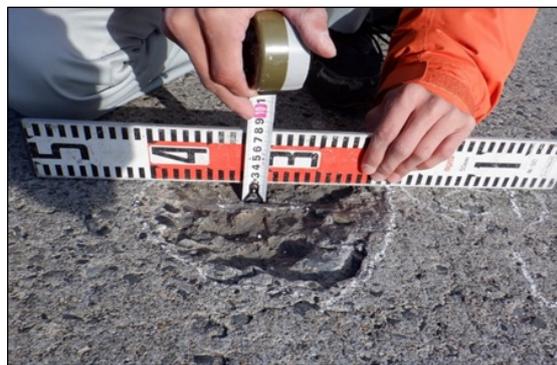
次に、工区ごとの横断ひび割れが発生した版における荷重伝達率の推移(図-6)を見ると、横断ひび割れが発

表-3 すべり抵抗及びきめ深さの測定結果

工区	すべり抵抗 $\mu_{60}$				
	きめ深さ MPD[mm]				
	H20	H27	H29	R1	R5
2工区	0.51	0.47	0.46	0.45	0.49
	0.45	0.39	0.40	0.47	0.50
3工区下り	0.53	0.50	0.49	0.49	0.50
	0.28	0.38	0.36	0.38	0.48



(a) ポットホールが多発したコンクリート版



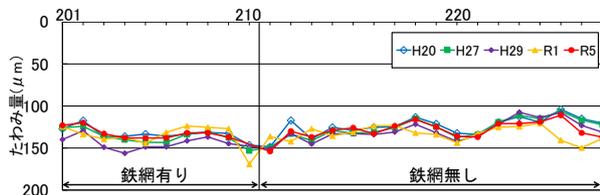
(b) ポットホール内部の鉄網の腐食及び露出

写真-1 鉄網に起因するポットホールの発生状況の例

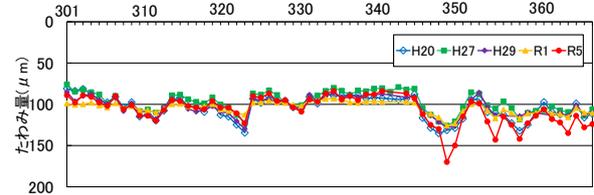
生した全 34 箇所のうち、33 箇所で荷重伝達率は 80% 以上であり、横断ひび割れが発生している箇所でも、骨材のかみ合わせによって荷重伝達機能が保持されていることが確認された。

以上の結果から、目地部、ひび割れ部ともに、いずれ

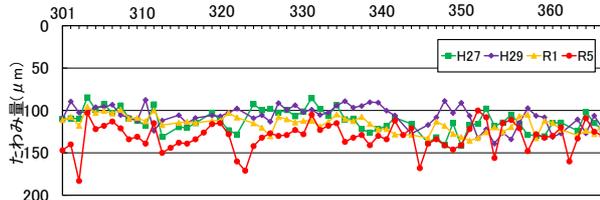
の工区においても全体的に健全な状態を保持していることが確認された。ただし、荷重伝達率が低下している一部の版については、数値解析等を通じた損傷メカニズムや損傷状況のさらなる検証が必要である。



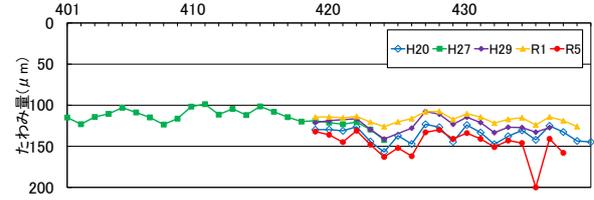
(a) 2工区の測定結果



(b) 3工区下り線の測定結果

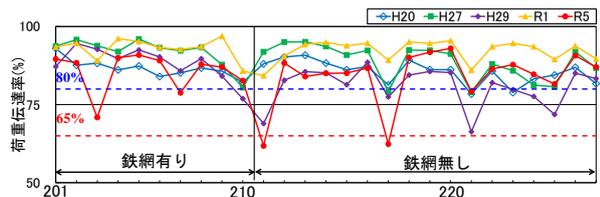


(c) 3工区上り線の測定結果

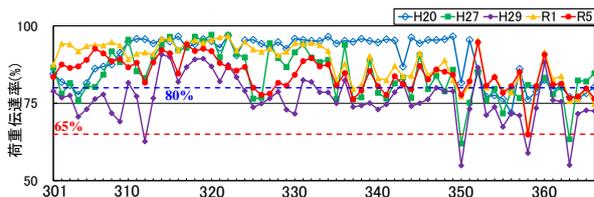


(d) 4工区の測定結果

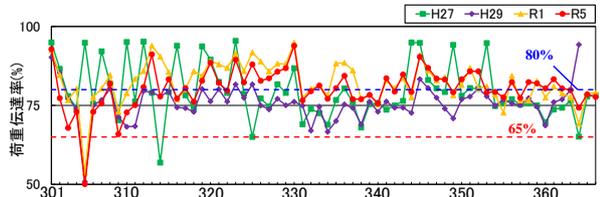
図4 版中央部のたわみ量の測定結果



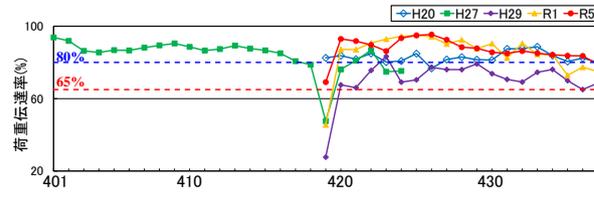
(a) 2工区の測定結果



(b) 3工区下り線の測定結果

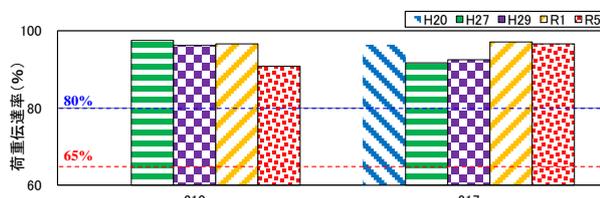


(c) 3工区上り線の測定結果

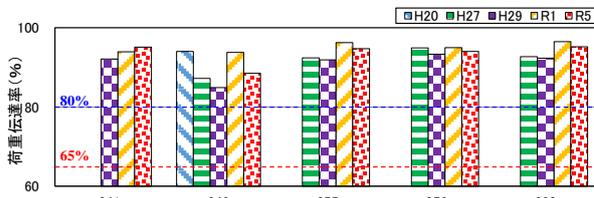


(d) 4工区の測定結果

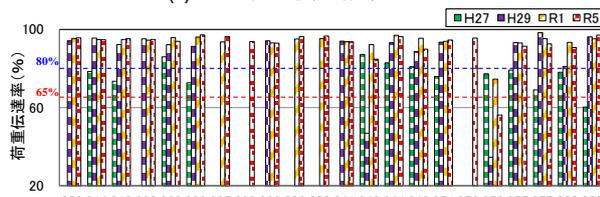
図5 荷重伝達率の測定結果



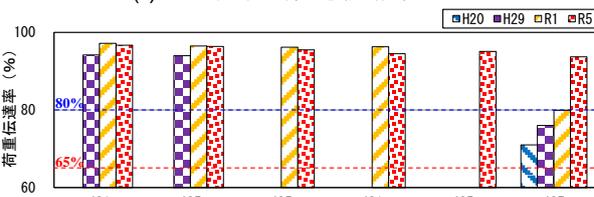
(a) 2工区の測定結果



(b) 3工区下り線の測定結果



(c) 3工区上り線の測定結果



(d) 4工区の測定結果

図6 横断ひび割れ部におけるコンクリート版の荷重伝達率の推移

## 4. まとめ

### (1) 調査結果の要約

本文で報告した追跡調査の結果は、以下のとおり要約される。

- ① 長期供用性の評価については、ひび割れ調査や構造調査の結果から一部工区で損傷が比較的進展していることが示唆されたものの、工区全体としては健全な状態を保持していると考えられる結果となった。また、路面のすべり抵抗及びきめ深さについても、健全な状態を保持していた。以上の結果から、設計年数を超過して供用されているものの、健全性が保持されており、コンクリート舗装が高い耐久性を有していることが改めて確認された。
- ② 鉄網の効果については、平均ひび割れ幅や版の構造調査の結果に大きな差異は見られず、発生したひび割れの進展及びそれに伴う構造性能の低下を抑制する効果が確認されなかった。また、鉄網の設置位置が設計よりも浅かったことが原因と考えられるポットホールが発生しており、供用性を低下させる場合があることが示唆された。

### (2) 鉄網の設計法への示唆

わが国では、第二次世界大戦前から鉄網の効果について様々な意見があり、特に重要性の高い路線や現地盤の条件が厳しい路線などで使用されてきたが<sup>12)</sup>、鉄網が本格的に使用されるようになったのは、1964年に改訂された『セメントコンクリート舗装要綱』において、鉄網の使用が原則化されたことに求めることができる。2001年に『舗装設計施工指針』が発刊され、横収縮目地の設置間隔に応じて鉄網の有無が規定されたが、現在までに多くのコンクリート舗装で鉄網が使用されてきている。

一方、1.で述べたように、近年では鉄網の効果に対して懐疑的な意見があるほか、施工性の観点から見直しを求める機運が高まっている。本文で報告した平泉バイパスにおける追跡調査からも、コンクリート舗装の長期供用性に対して、鉄網が有意な効果を有しているとは言えない結果が得られた。さらに、2023年調査では、鉄網の腐食に起因するポットホールの発生が見られ、鉄網を設置することで、かえって供用性が低下する場合があることが示唆された。あくまでも一つの路線での調査結果であり、結果の取扱いには慎重を期する必要があるものの、平泉バイパスにおける追跡調査の結果は、鉄網の効果を

改めて検証するうえで重要な資料となるものと考えられる。

今後も引き続き平泉バイパスにおける追跡調査を実施していくとともに、他の路線での調査結果や各種の実験結果などをふまえて、鉄網の要否に関する検討を行い、コンクリート舗装の適材適所での適用拡大に向けた設計法の更なる合理化を図っていく予定である。

**謝辞：**調査の実施にご協力いただいた国土交通省東北地方整備局岩手河川国道事務所水沢国道維持出張所の皆様、調査結果の整理にあたって貴重なご意見をいただいた石川工業高等専門学校西澤辰男名誉教授及び東京農業大学小梁川雅名誉教授、一部の調査項目を担当した寒地土木研究所寒地道路保全チームの職員に記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) (公社)日本道路協会：舗装設計施工指針（平成18年版），p.205，2006.
- 2) 福田正：コンクリート舗装構造の課題，セメント・コンクリート，No.770，pp.10-12，2011.
- 3) 泉尾英文，寺田剛，小梁川雅，西澤辰男：国道4号平泉バイパスにおけるコンクリート舗装の供用性調査，第28回日本道路会議，No.32093，2009.
- 4) 内田雅隆，藪雅行，若林由弥，岩永真和：供用18年経過したコンクリート舗装の追跡調査結果，第33回日本道路会議，No.3187，2019.
- 5) 寺田剛，内田雅隆，藪雅行：供用20年経過したコンクリート舗装の追跡調査結果，コンクリートテクノ，Vol.39，No.9，pp.16-20，2020.
- 6) 小松寿，飯田俊幸：コンクリート舗装の合理化施工 国道4号・平泉バイパスのスリップフォーム工法，セメント・コンクリート，No.638，pp.14-21，2000.
- 7) 横澤直人，藪雅行，渡邊一弘：供用24年が経過した国道4号平泉バイパスにおけるコンクリート舗装の追跡調査，土木学会舗装工学委員会 第29回舗装工学講演会，講演No.73，2024.
- 8) (公社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧（平成31年版）第1分冊，355pp，2019.
- 9) (公社)土木学会 舗装工学委員会：舗装工学ライブラリー2 FWD および小型 FWD 運用の手引き，p.56，2002.
- 10) (社)日本道路協会：道路維持修繕要綱，p.68，丸善株式会社，1978.
- 11) (公社)日本道路協会：コンクリート舗装ガイドブック2016，丸善株式会社，pp.287-288，2016.
- 12) 横澤直人，渡邊一弘：鉄網等の効果や諸元の変遷に関する文献調査，舗装，Vol.60，No.2，2025。（掲載予定）