

**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 I＞～**

研究会1日目(12月5日(木)):A 会場

10:15～15:45

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 ・アカウンタビリティ部門 ・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 アカウンタビリティ 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			
15:00	休憩(15分)	休憩(15分)	休憩(15分)
	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			
17:00	休憩(15分)	休憩(15分)	休憩(15分)
	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	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		
	休憩(15分)	休憩(15分)		
11:00	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		
12:00				
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Ⅰ＞）

A会場：12月5日（木）10:15～15:45

セッション	発表 席順	質疑 区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
A1	1	審査 課題	10:15～10:30	山陽道トンネル火災事故に対する交通マネジメントの取り組みについて	近畿地方整備局 姫路河川国道事務所 調査課	高松 晋平
	2		10:30～10:45	国道32号 高知橋の補修・補強工事報告	四国地方整備局 土佐国道事務所 道路保全課	島村 佳汰
	3		10:45～11:00	トンネル内の自転車通行用照明の整備について	九州地方整備局 大分河川国道事務所 計画課	兒玉 威龍
	4		11:00～11:15	名古屋市大須地区における自転車通行空間整備事業 ～地元住民や関係機関との合意形成の取り組み～	中部地方整備局 名古屋国道事務所 交通対策課	柳 倅貴
	5		11:15～11:30	国道506号小禄道路事業における多軸台車を活用した上部工一括撤去事例	沖縄総合事務局 南部国道事務所 工務課	伊佐 奨真
	6		11:30～11:45	滞筋の平均河床を対象とした数値計算 ー河川橋梁の洗掘被害を未然に防ぐためにー	国立研究開発法人土木研究所 河道保全研究グループ	竹崎 奏詠
	7	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 後方回転・自走式手延機解体装置 ～重機が使用できない場所での手延機解体～	株式会社横河ブリッジ 大阪計画部 シニアマネージャー	加地 敦志
A2	8	審査 課題	13:00～13:15	阿蘇立野ダムの特性に配慮した試験湛水について	九州地方整備局 熊本河川国道事務所 河川管理課	藤村 晋吾
	9		13:15～13:30	踏切道における誘導表示等の設置方法及び構造に関する実験	国土技術政策総合研究所 道路交通研究部 道路交通安全研究室	久保田 小百合
	10		13:30～13:45	防波堤の気候変動適応策に関する検討	国土技術政策総合研究所 港湾・沿岸海洋研究部 港湾施設研究室	神保 壮平
	11		13:45～14:00	大正関東地震（1923）の津波発生メカニズムにおける海底地すべりの支配的影響について	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所海洋利用研究領域 海洋利用研究グループ	村田 一城
	12	報告 課題	14:00～14:15	【国土技術開発賞受賞技術報告】 ※論文掲載なし フラップゲート式可動防波堤の開発	カナデビア株式会社 開発本部 技術研究所 基盤技術研究センター 流体グループ グループ長	木村 雄一郎
A3	13	審査 課題	14:30～14:45	銅製砂防堰堤を対象としたUAV自律飛行による点検調査について	北海道開発局 室蘭開発建設部 苫小牧砂防海岸事務所	岩田 清徳
	14		14:45～15:00	TEC-FORCE活動支援アプリについての提案	東北地方整備局 郡山国道事務所 調査課	糸屋 玄貴
	15		15:00～15:15	災害対応業務の効率化について ～横浜国道事務所統合管理システムの導入～	関東地方整備局 企画部 情報通信技術課	内藤 智子
	16		15:15～15:30	防災カルテ点検における着目すべき落石の大きさの分析	国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ	坂本 尚弘
	17		15:30～15:45	木質空間の火災性状の把握に向けた火災実験結果とその性状予測	国立研究開発法人建築研究所 防火研究グループ	野秋 政希

山陽道トンネル火災事故に対する交通マネジメントの取り組みについて

高松 晋平¹・香山 卓也²

1. ²近畿地方整備局 調査課 (〒670-8504兵庫県姫路市北条1-250)

近畿地方整備局姫路河川国道事務所が管理する国道2号では、2023年9月5日に発生した山陽自動車道（以下、山陽道）の尼子山トンネル内の火災事故に伴う赤穂IC～播磨JCT間の通行止めにより、通行止め前に比べ約2倍の交通が流入し、交通集中による速度低下が発生した。

そこで、道路利用者団体、有識者、行政、高速道路会社などから構成される検討会を設置し、同年12月15日の下り線（岡山方面）の通行止め解除までの期間、包括的な交通マネジメントを実施した。本文では、姫路河川国道事務所の取組内容及び成果や得られた課題等について記する。

キーワード 交通マネジメント、広域迂回、国道2号

1. はじめに

2023年9月5日に発生した山陽道の尼子山トンネル（下り線）内の火災事故に伴う赤穂IC～播磨JCT間の通行止めにより、国道2号では、通行止め前に比べ約2倍の交通が流入し、交通集中による速度低下が発生した。

2. 事故の概要

2023年9月5日1時8分頃、山陽道尼子山トンネル（下り線）内において、火災事故が発生し、翌日17時30分まで消火活動が続き、鎮火までに約40時間を要した。人的被害は、8名（中等症1名、軽傷7名）、物的被害は、車両32台（焼損車両23台、事故車両9台）にのぼり、大規模な事故となった。これにより、山陽道赤穂IC～播磨JCTでは上下線とも通行止めとなり、一般道の迂回路となる国道2号へ交通量が流入し、交通渋滞が発生した。

上り線は、9月11日に通行止めを解除し、下り線は、NEXCO西日本による復旧作業により、12月15日に通行規制が解除となった。



図1 事故発生箇所及び交通規制区間

2. 交通マネジメント検討会の経緯

事故発生時における周辺の交通状況は、山陽道赤穂IC～播磨JCTでは上下線とも通行止めとなり、交通集中が発生することから、NEXCO西日本において、早期の通行確保及び復旧に向けた対応を進めるとともに、中国自動車道へ広域迂回を促した。

一方、並行する国道2号においては、通行止め前に比べ、約2倍の交通が流入しており、交通集中による速度低下が発生していることから、更なる広域迂回の強化や一般道の混雑緩和を図るため、有識者、行政、高速道路会社などから構成される「山陽道トンネル内火災事故に対する交通マネジメント検討会」を設置し、包括的な交通マネジメントを実施した。

以下、各検討会における検討内容を紹介する。

(1) 第1回検討会（2023年9月8日（金））

会議の設立、火災事故の概要、迂回案内、通行止めの交通状況及び今後の対応について、検討を実施し、以下の項目が決定した。

- 中国道への広域迂回の強化
- 並行する一般道の渋滞情報の収集、提供の強化
- ボトルネック箇所のマネジメントの強化
- 国道250号等の迂回路の見直し
- 山陽道の復旧が長期化する場合への対応検討
- 公共交通への影響や事故の発生状況の把握及び対策の検討

(2) 第2回検討会（2023年9月13日（水））

山陽道（上り線）の通行止め解除、交通状況、各機関での取り組み状況の報告、今後の対応について、検討を実施した。

山陽道（上り線）が通行止め解除となったものの、国道2号下り線（岡山方面）では約2倍の交通量が流入し、渋滞が発生している状況であった。

検討会においては、山陽道の休日交通量は平日に比べ多い傾向にあり、特に3連休は連休初日に交通量が大きく増える傾向であるため、国道2号への更なる影響も予想されることから、連休前に中国道への迂回や移動日・移動時間変更の協力呼びかけを強化することを確認した。

(3) 第3回検討会（2023年10月23日（月））

NEXCO西日本から山陽道（下り線）の復旧見通しが12月下旬と示されたことを踏まえ、交通状況、各機関での取り組み状況、大雪への対応の報告、今後の対応について、以下項目の検討を実施した。

検討会においては、国道2号の県境部は峠道の2車線道路であるため、大雪時には車両のスタックによる滞留等の交通障害が発生する恐れがあり、加えて、今回の火災事故に伴う車両の流入増加や、中国道が通行止めとなった場合に、膨大な車両が国道2号に流入することが見込まれ、大規模な交通障害が発生することも懸念されるため大雪への対応強化のため以下の取組を行うことを確認した。

- a) 鯉峠区間に新たに除雪者、大型トラック牽引用重機などを前線配備
- b) スタック対策のタイヤチェーンを除雪車等に携行
- c) 融雪剤を登坂部路肩に集中配置
- d) CCTVにAI機能を実装し、スタック車両の早期発見



図2 鯉峠前後区間におけるスタック対策

(4) 第4回検討会（2023年12月11日（月））

山陽道（下り線）の通行止め解除見込みが、NEXCO西日本より発表されたことを受け、これまでの対策について、以下の課題や意見が出された。

- a) 中国道への広域迂回に関し、インセンティブ措置の効果検証、物流事業者への全国的な呼びかけ、広報の対象範囲やより効果的な手法・取組が長期化する場合の検討が必要。
- b) 市民生活への影響を最小とするよう道路管理者が連携し、沿線自治体の意見も踏まえた上で迂回路を設定する必要。
- c) 混雑区間に交通量計測機器が無い場合、CCTV映像等による交通量把握の効率化や情報提供の迅速化が必要。
- d) 公共交通や救急搬送、交通安全への影響について、関係機関の平時からの連携による情報収集体制を確立すること、また、最終的に地域へ与えた影響を丁寧にヒアリングして把握することが必要。
- e) 同様の事象発生に備え、知識の蓄積や取組内容の発信が必要。

4. 取り組み内容及び成果

山陽道（下り線）の通行止め解除までに実施した姫路河川国道事務所の取組内容及び成果及び国道2号の事故発生状況について紹介する。

(1) SNSを用いた情報発信

国道2号は、山陽道通行止めの迂回路として、交通量が約2倍になり、交通渋滞が発生している状況であった。

そこで、利用者へ混雑状況を伝える目的として、姫路河川国道事務所の公式X（旧Twitter）では、国道2号の交通集中による速度低下のリアルタイムな状況を伝え、通行に際しての注意喚起を行うなどの情報発信を行った。

(2) 道路情報板及び路側看板等を用いた情報発信

道路利用者に対し、山陽道の交通規制情報等を情報発信した。

また、関係機関との協議・連携により、道路情報板や路側看板により、交通事故抑制に関する注意喚起や、中国道への広域迂回を促すため、国道2号バイパスに架かる歩道橋や跨道橋等に横断幕を設置し、利用者に対し視覚的に情報発信を行った。

●道路情報板の表示内容



図3 ボトルネック箇所のマネジメント強化



図4 国道2号における横断幕の設置状況

(3) 国道2号の交通規制時における代替迂回路設定と道路管理者間の連携

迂回路である国道2号で災害や事故等が発生した場合に備え、速やかに迂回誘導できるよう、道路管理者、交通管理者間で連絡体制を構築した。

山陽道トンネル火災事故後から、国道2号の交通事故による通行規制が、5件発生しており、例年と比べ、わずかに増加した。

11月26日(日)に発生した事故では、上下線を通行止めする事故ではあったが、道路管理者との連絡体制を構築したことにより、速やかな迂回誘導ができ、二次被害が発生しなかった。

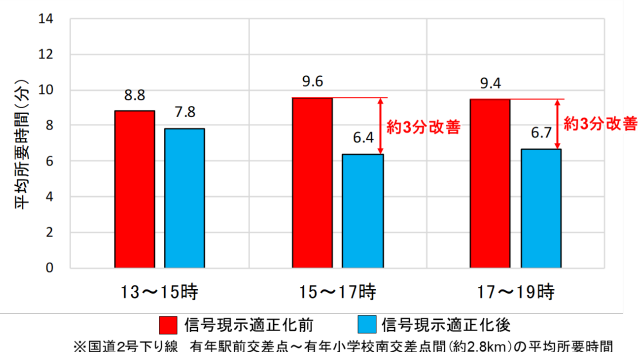
(4) 信号現示の適正化の実施

国道2号では、事故発生時より山陽道からの交通が流入し、渋滞が発生している状況であった。そこで、渋滞の緩和を目的として、渋滞の先頭となっている交差点において、現地調査により交差点の交通量等を把握し、関係機関と調整を行ったうえで、信号現示の適正化を実施した。

その結果、国道2号の下り線(岡山方面)の所要時間が最大約3分改善し、信号現示を適正化した交差点においては、平日日中の速度が向上した。



図5 信号現示適正化箇所



※国道2号下り線 有年駅前交差点～有年小学校南交差点間(約2.8km)の平均所要時間

図6 信号現示適正化後の所要時間変化

5. 今後の課題と検討事項

今後の検討事項について、本検討会で取りまとめたものを紹介する。

(1) 迂回路設定の手順

通行止め初期において、赤穂市街を通過する国道250号を迂回路として案内した結果、迂回交通の流入が通勤など市民生活に影響を及ぼした。

今後は、初動段階から道路管理者が連携し、沿線自治体の意見も踏まえた迂回路を設定する必要がある。

(2) リアルタイムの交通状況の把握と提供

国道2号の交通量把握において、混雑区間である赤穂市域に交通量計測機器が設置されておらず、岡山県側のデータでの把握となった。今後は、赤穂市域のCCTV映像等を活用した効率的な交通量把握が必要である。

また、通行止め区間周辺の交通状況の提供が事故発生後の6日後から開始と遅れた。通行止め初期においては、速やかな情報発信が円滑な迂回誘導に繋がることから、情報提供の迅速化に向けた検討が必要である。

さらに、交通状況を分析した結果、国道2号以外にも並行する県道5号(姫路上郡線)等に大型車両の重交通が流入していたことが判明した。今後は、面的な交通状況を関係機関で共有する必要がある。

(3) 公共交通や救命搬送、交通安全への影響

山陽道(下り線)の通行止め時に、国道2号への交通集中により、公共交通や救急搬送の定時性への影響について、沿線の消防部局や市役所にヒアリングを実施し、支障が出ていないとの回答を得たが、公共交通機関や消防部局と平時から連携し、速やかな情報収集体制の確立が

必要である。また、最終的に地域に与えた影響について丁寧にヒアリングし、把握する必要がある。

(4) 火災事故による通行止め時の交通マネジメントの知識の蓄積と発信

今回の検討会については、火災事故による通行止めや長期間の対応など、初めて取り組むものであった。今後、同様の事象が発生した場合に備え、知識の蓄積や取組内容の発信が必要である。

6. まとめ

本文では、山陽道のトンネル火災事故に対する姫路河川国道事務所の取組内容及び成果や得られた課題等について紹介した。

今回の取り組みで、交通渋滞の先頭となっている交差点信号現示の適正化を実施することで、交通渋滞の緩和を図ることができた。

一方で、通行止め初期の迂回路の設定で、沿線の市民生活への影響が生じたことから、道路管理者が連携し、沿線自治体の意見も踏まえた迂回路を設定する必要がある。

今回の検討会のような取り組みやその効果・課題を分析し、全国で情報を共有することで、様々な災害や大規模事故等に迅速に対応するための一つの事例として、今後のより適切な交通マネジメントにつながるであろう。

国道32号高知橋の補修・補強工事報告

土佐国道事務所	道路保全課	島村 佳汰
土佐国道事務所	保全企画係長	吉田 宏樹
土佐国道事務所	建設監督官	西森 敬洋

国道32号高知橋は、二級河川江ノ口川を渡河し、橋面中央には路面電車の軌道及び電停がある3径間単純鋼道路橋である。当該橋梁は感潮区間に位置しH.W.Lが高く、桁下クリアランスが干潮時でもH=2.0m程度しか確保できない。また、河川内の施工期間は非出水期の4ヶ月（11月～2月）に限定されるなど、厳しい施工条件を有する。このような状況下で全150基の支承取替え工事を実施した。尚、本工事は現在継続中であり、今年度内に完了する予定である。

キーワード 支承取替え, ジャッキアップ, CIM配筋モデル, 荷重制御型集中管理システム

1. はじめに

国道32号高知橋は、高知駅南側に架かり高知市の中心部を流れる二級河川江ノ口川を渡河する橋長L=34.0m、幅員W=36.7mの鋼道路橋である。当橋梁は1925年に架設（当時は中央部のみ）、1964年に上下流部が拡幅、1981年に中央部の架替え（上下部）工事が行われおり、主に3ブロックに区分される（写真-1参照）。

現場は、桁と川面のクリアランスが低く、中央部の橋面上には路面電車の軌道及び電停があり、周辺には、第3次救急医療施設や公共施設、多数の宿泊施設がある。これらの現場環境を踏まえて、第三者への影響を最小化した上で、施工の確実性かつ品質確保が可能な工法の選定を行い補修・補強工事を進めているところである。

本稿は工事の中でも「支承取替え工」に着眼し、施工中に直面した課題とその対応策、ジャッキアップ量の高精度管理による軌道への影響緩和策について報告するものである。

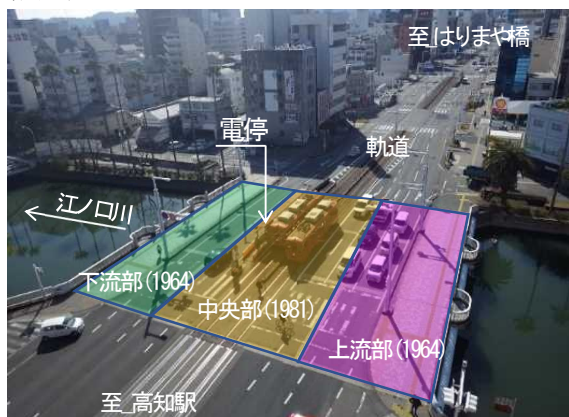


写真-1 高知橋の状況

表-1 橋梁諸元一覧表

橋 梁 諸 元	
荷重及び橋格	TL-20 1等橋
竣工年	上下流部：1964年 中央部：1981年
橋 長	34.00m
桁 長	11.30m+11.20m+11.30m
支間長	10.90m+10.80m+10.90m
全幅員	36.70m
構造形式	上部工
	下部工
	基礎工
	3径間単純合成鉄桁 逆T式橋台、パイルベント橋脚 鋼管杭φ700 L=30.70m



写真-2 桁下現況写真

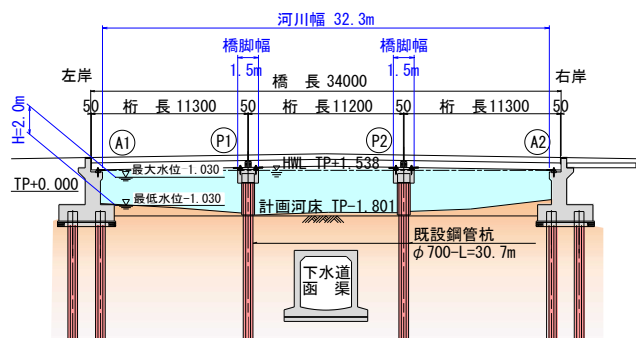


図-1 全体側面図

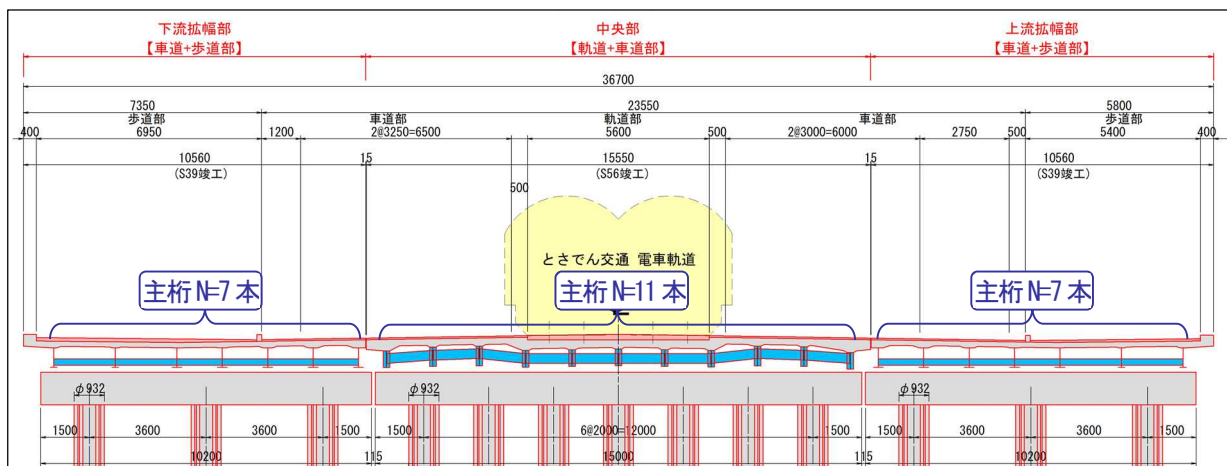


図-2 上部工断面図



写真-3 支承部の損傷写真

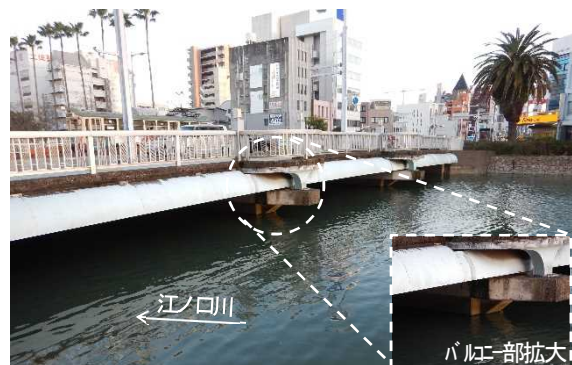


写真-4 満潮時桁下状況

2. 支承部の損傷状況

高知橋は単純桁であり、桁両端部に支承を要する（支承線数=6本）。主桁は1径間あたり25本（図-2）にのぼり、全支承数は150基（6支承線×25基）である。

直近の橋梁定期点検結果で、支承部に著しい腐食と機能障害が確認されており（写真-3）、対策区分判定はC1判定であった。また、現在の支承は現行基準に適合していないため、腐食等の経年劣化に伴う既設支承の機能回復や、耐震性能の向上を目的として、レベル2地震動に対応した支承への取替えを実施した。

3. 厳しい現場条件

高知橋は高知市中心部に架かる橋で、河川や鉄道の制約から、厳しい施工条件を有する。具体的には下記4項目が挙げられる。

- ・感潮区間に位置しH.W.Lが高い（写真-4）
- ・桁下クリアランスが干潮時でもH=2.0m程度しか確保できず、施工スペースが非常に狭隘
- ・桁下の施工期間は非出水期の4ヶ月（11月～2月）に限定される
- ・橋面上には路面電車の軌道及び電停があり、桁ジャッキアップ時の軌道及び電停への影響の最小化が求められる

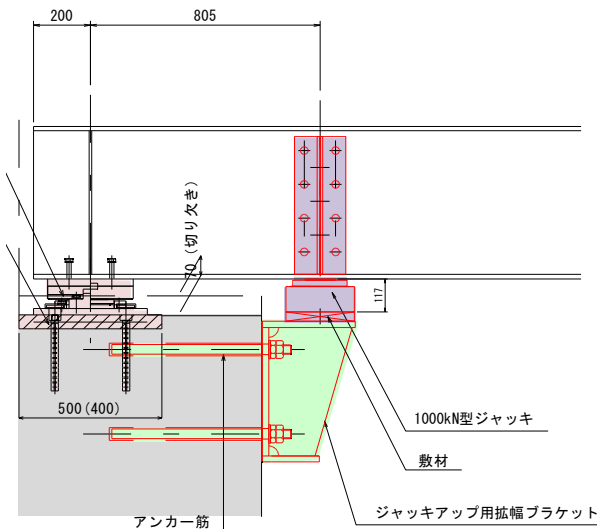


図-3 鋼製ブラケットを用いた支承取替え工法

4. 支承取替え工法

橋座部は既設支承前面にジャッキ設置スペース（B=300mm程度）が確保できない（後述のバルコニー部を除く）。また、桁下クリアランスが低く、河積阻害率の関係からベント等の仮受け材を設置することも出来ない。よって、支承取替えは下部工（支承前面部）に鋼製のブラケットを設置し、桁をジャッキアップした状態で既設支承を撤去し、新設支承を設置する計画とした（図-3）。



写真-5 鋼製ブラケットによる桁ジャッキアップ

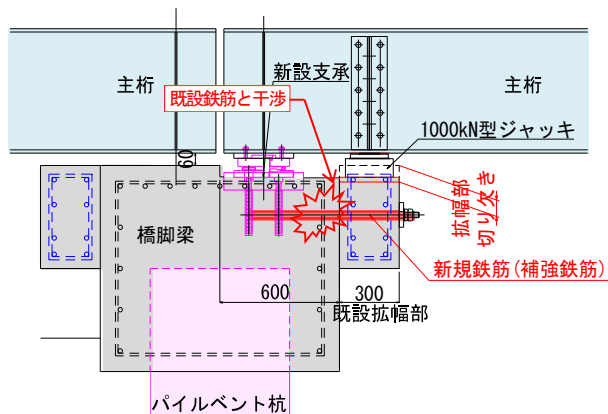


図-4 バルコニー部_当初計画側面図

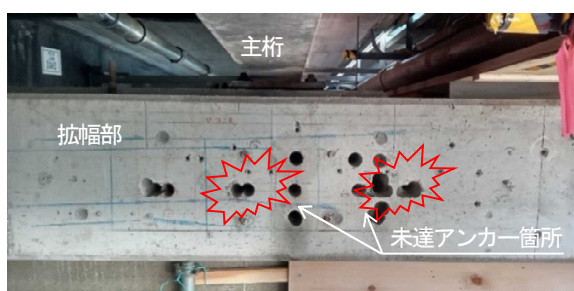


写真-7 バルコニー部アンカー削孔状況

支承取替えは3回の非出水期(11月～2月)に分けて行う計画で、4ヶ月内に吊足場の組立から解体までを実施する必要があります、工程厳守が求められた。

各年度ごとの工程計画は以下のとおり。

1年目：ブラケットアンカー削孔

2年目：3支承線のジャッキアップ・支承取替え

3年目：3支承線のジャッキアップ・支承取替え

5. アンカー削孔に対する取り組み

(1) 概要

前述の工事工程を遵守するため、1年目の非出水期(4ヶ月)にブラケットアンカーの削孔を終わらせる必要があった。ブラケットはパイラベント橋脚の梁前面に設置するが、梁内は既設鉄筋、パイラベント杭、新設支承アンカーボルト等が縦横に錯綜しており、アンカー削孔時の鉄筋干渉による工程遅延

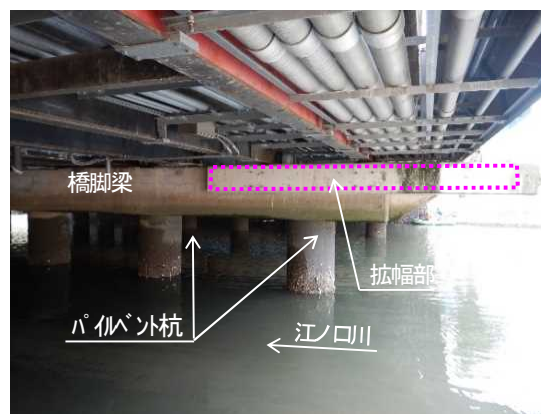


写真-6 バルコニー拡幅部

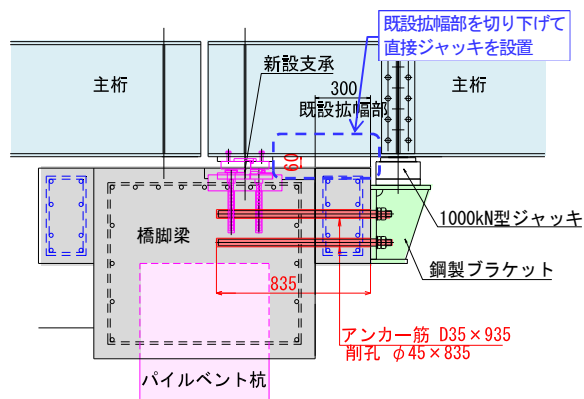


図-5 バルコニー部_変更案側面図

が懸念された。

(2) 現場における問題点

上下流部の橋脚梁にはバルコニー設置にともなう拡幅(以降、拡幅部)が行われている(写真-6)。

着工前に電磁波レーダーによる鉄筋探査を行い、鉄筋位置を把握した上でアンカー削孔を行った。結果、表面の拡幅部鉄筋は交差するが、内部の梁内鉄筋とどうしても干渉し、2段のアンカー削孔が困難な状況に直面した(図-4、写真-7)。

(3) 解決策の立案

バルコニー部はRC拡幅により支承前面にジャッキ設置スペースが確保できることに着目し、拡幅部をジャッキが設置可能な高さまで切り下げて、拡幅部自体にジャッキを設置する変更案を立案した(図-5)。

この案の採用には下記の3つの問題があったが、各問題点に対して検証を行い、変更案の採用に至った。

＜問題点①＞切欠後の拡幅部の安全性

＜問題点②＞ジャッキアップ時の拡幅部の安全性

＜問題点③＞切断した鉄筋の復旧方法

各問題点に対する検証結果は以下のとおり。

＜問題点①に対する検証＞

切断する鉄筋はバルコニー部の引張鉄筋であるため、切断する鉄筋を無視した応力照査を実施し、許容値に対し応力的に満足することを確認した。

＜問題点②に対する検証＞

ジャッキアップ時の鉛直反力を作用させた場合の拡幅部の応力照査した結果、せん断力に対する必要鉄筋量を満足しないため、新規にアンカー補強鉄筋を4本配置することとした。

＜問題点③に対する検証＞

機械式継手、ガス圧接継手は施工機器が設置できず、施工ができない。よって、溶接継手の中でも狭小空間での施工が可能な「新NT工法Ⅱ」（A級継手性能）を検討・採用し、切断箇所を復旧することが可能であることを確認した（写真-8）。

(4) 効率的な削孔に向けた工夫

前述の問題点②より、アンカー補強鉄筋の削孔を行う必要があった。当初のブラケットアンカー削孔を教訓に、無作為に削孔位置を設定するのではなく、完成図やレーダー探査、鉄筋干渉結果からの情報を基にCIM配筋モデルを作成し、削孔可能位置を割り出すことで施工の効率化を図った（図-6）。

結果、削孔ロスは最小限に抑えられ、施工の作業効率が上がったことで、非出水期に全てのアンカー補強鉄筋を配置することができた。

6. デジタル機器によるジャッキアップ量の高精度管理

(1) 概要

橋面上には路面電車の軌道や電停があり、広幅員で主桁数が25本と多い構造的な特徴を有するためジャッキ受け替え作業には、安全かつ効率的な施工手法が求められた。本作業では、ジャッキの選定から作業手順、トラブル予防策までを考慮し、最適な受け替え作業の実現を目指した。とさでん交通から提示された軌道部のジャッキアップ管理値3mmに対し、自主管理値としてジャッキアップ管理値1mmを

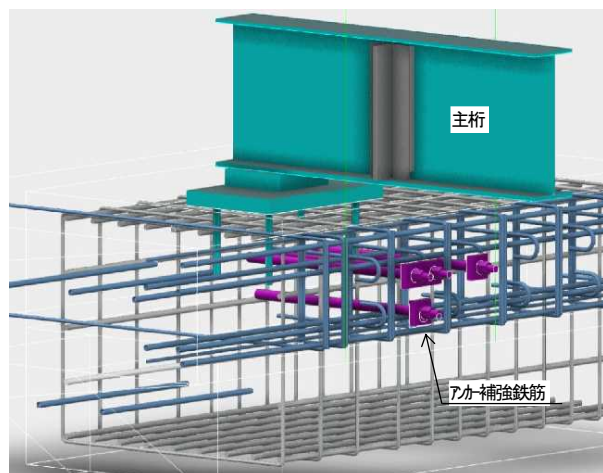


図-6 CIM配筋モデルを活用した削孔位置の選定

定め、ジャッキアップに伴う鈑桁の変状管理も行うこととした。

(2) 実施方法

支取替工にあたっては、ジャッキ受替（ジャッキアップ）が必要となる。ジャッキ受替には、ロック機能付き油圧ジャッキ（高知橋の最大設計荷重に基づき、ジャッキ能力1000kN）と、荷重制御型集中管理システム（1支点あたり油圧ジャッキ1台とし、各期施工分75支点を25支点×3回に分け、25系統の荷重自動制御ジャッキシステムを使用）による載荷・徐荷の制御を適用することとした。

また、管理方法として、応力導入時等の主桁挙動（変位量）を管理するためのデジタルダイヤルゲージ（測定精度1/100mm（印字表示は1/10mm）単位）、油圧ジャッキ出力の管理のための圧力変換式デジタル荷重計（測定精度は1kN）を使用した。

主桁の耐力確認と受替用ブラケットの健全性確認のため、先行プレロードとして、設計荷重の各20%ごとに載荷を行い、最大荷重を120%の設計荷重とし、主桁変位量が1mmとなるまで管理した。

当該確認を経て、改めて各支点で、設計荷重の100%を目標に、20%ごとに同比率で載荷を行い、上部構造物の自重が完全にジャッキに受け替えられ、かつ、支取替に必要な最小量である1mmとなるようジャッキアップし、ジャッキアップ完了後、安全ナットを閉めて固定した。



写真-8 新NT工法Ⅱによる切断鉄筋の復旧



写真-9 荷重制御型集中管理システム



写真-10 支承部のジャッキアップ状況



写真-11 ジャッキアップ状況管理画面

(3) 実施結果

ジャッキアップ管理値 3mm（自主管理値 1mm）に対して、最大押上量は概ね 1.2mm 以下で収束した。なお、自主管理の 1.0mm 以上の値が生じた理由は、ある支承を 1mm の押上げ量で停止させた場合でも、隣接する支承が最大設計荷重未滿かつ 1mm 未滿の押上げ量の場合に荷重をかけ続けるためである。一方で、1mm の押上量に達しない場合があったが、全体としては、集中管理システムによるジャッキ受け替えを実施した結果、問題なく受け替え作業を行うことができた。

7. 今後の課題

本稿にて紹介した 2 つの取り組みについて今後の課題を以下に示す。

(1) アンカー削孔に対する取り組み

鋼製ブラケットのアンカー削孔は、現場着工後、アンカー削孔位置を最終決定するまで、多くの確認作業が生じる。設計段階では、完成図から配筋図を復元し、これを回避した位置にアンカー削孔位置を決定した。施工時には、鉄筋レーダー探査を行い内部鉄筋位置を確認したにもかかわらず、既設鉄筋との干渉が生じた。原因としては、施工誤差（実際の構造物が配筋図通りに配筋されていないこと）や表面鉄筋より奥側の既設鉄筋が把握できてなかった事が挙げられる。

今後の取組内容として、設計及び施工時それぞれについて記載する。

<設計時>

- ・アンカー径を小さくして埋込み長（ $15 \times d$ （アンカー径））を短くすることで、表面より奥にある鉄筋と干渉させない。
- ・1箇所当りのブラケットアンカー本数を増やし、アンカー径を小さくすることで削孔長を短くする。
- ・事前調査（鉄筋探査）から、既設配筋を立体的に把握し、アンカー配置を計画する（本工事で活用した三次元モデルによる立体視）。

<施工時>

- ・鉄筋径の測定が必要な場合や複雑な配筋の場合は、鉄筋レーダー探査の他に、X線内部探査を併用し、鉄筋位置情報の精度向上を図る。

(2) デジタル機器によるジャッキアップ量の高精度管理

設計上では車両や鉄道が走行していない場合には死荷重だけで受け替えが可能だが、実際には死荷重と活荷重を合算しても 1mm の押上量に達しない場合があった。特に中央部（鉄道橋）の両端部ではこの現象が顕著に確認され、既存の伸縮装置などに問題がある可能性が考えられる。

また、隣接する支承の載荷状態や押上げ量によっては継続して載荷を行う支承があることで、管理目標値を超える箇所が発生した。

今後、設計要件と実際の受け替え量との差異については、さらなる検証が必要と考える。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・解説：2017 年 11 月
- 2) 日本道路協会：道路橋支承便覧：2018 年 12 月
- 3) 公益社団法人 土木学会：道路橋支承部の改善と維持管理技術：2008 年 3 月

トンネル内の自転車用照明の整備について

兒玉 威龍¹, 矢野 浩道¹

¹九州地方整備局 大分河川国道事務所 計画課 (〒870-0820 大分県大分市西大道一丁目1番71号)

近年、インバウンドによる外国人観光客の増加に伴い、自転車を活用した観光目的のサイクルツーリズムや国際的な自転車レースであるツールド九州、沿道の魅力を楽しむ体験型イベント、市民参加型のサイクルイベントなど、自転車活用による観光地づくりが進められている。これらは一般の道路で行われ、トンネル区間を通行することもあるが、トンネル区間は一般的に路肩の幅が縮小されており、また、トンネル内の照明は自動車の照明として設置しているため、自転車にとっては暗く、自転車で通行する場合、自動車との接触の危険性が高くなっている。本論文では、トンネル内の自転車走行環境の改善を目的とした自転車用照明の整備事例について、報告するものである。

キーワード 自転車、自転車用照明、トンネル、安全対策、自転車走行環境

1. はじめに

近年、インバウンドによる外国人観光客の増加に伴い、観光地づくりの要素として自転車が注目されており、自転車を活用した観光目的のサイクルツーリズムの発展や国際的な自転車レースであるツールド九州の開催、沿道の魅力を楽しむ体験型イベント、市民参加型のサイクルイベントなど、自転車活用による観光地づくりが進められている。そのため、国土交通省では、地域におけるサイクリストの受け入れ環境や走行環境の整備などを実施している。

しかしながら、このようなレースやイベントは、一般の道路で行われ、トンネル区間を通行することもあるが、トンネル区間は一般的に路肩の幅が縮小されており、また、トンネル内の照明は自動車の照明として設置しているため、自転車にとっては暗く、自転車で通行する場合、自動車との接触の危険性が高くなっている。

本論文では、これらの状況を踏まえ、国道210号水分トンネルにおいて、実施した自転車走行環境の改善を目的とした自転車用照明の整備事例について、報告するものである。

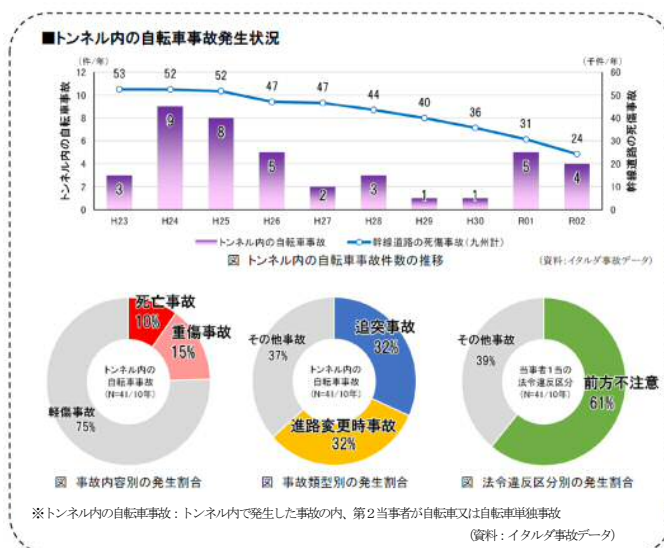


図-1 トンネル内の事故発生状況について

(出典: 九州のトンネル部における自転車のための照明ガイドライン (第2版))

2. トンネル内で発生した自転車事故

九州の幹線道路のトンネル内で発生した自転車事故は、直近10年で41件であり、約3割が重大事故(死亡・重傷事故)となっている。トンネル内で発生した死傷事故の約6割は自動車からの追突、追越追抜時の接触であり、事故発生時の第一当事者(自動車)の法令違反をみると前方不注意が約6割を占め、自転車に対する視認性不足が事故の要因と考えられる。(図-1)

また、トンネル内を自転車で走行する際、路面や周辺の状態把握が難しいことで、その他区間と比べ、転倒やふらつきにより、自動車と接触する危険性が増してしまう区間と考えられる。

3. 水分トンネルの諸元

3-1 水分トンネルの概要

水分トンネルは、国道210号の大分県由布市に位置し(竣工年1962年)、延長180 m、全幅7.5m、(車線幅3.0m、路肩部分0.25m程度 監査廊含む)の2車線トンネルである。

当該トンネルは、別府熊本を結ぶやまなみハイウェイのサイクリングロードに指定され、自転車の大会やイベント前の練習として、多くの自転車競技の選手や、サイクリストの方が利用しており、水分トンネルの自転車走行における安全対策が求められている。(写真-1)



写真-1 水分トンネル坑口付近（大分市側）



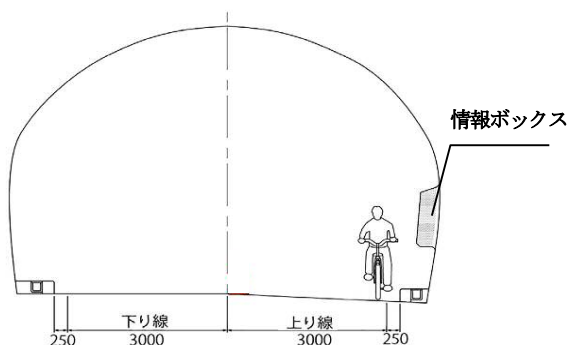
（写真-3 中間部分の状況（夜間））

3-2 水分トンネルの現状

水分トンネルにおける、各上下線の自転車通行空間における現状を整理した。

上下線ともに路肩の幅員は0.25m程度であり、自転車の通行空間は確保されておらず、車道内を通行する必要がある、自動車との接触の危険性が高くなっている。

なお、トンネル照明はLEDに更新されているものの、自転車で車道を走行する際に小さな段差など、路面状況の認識にはやや暗い状況である。（図面-2）（写真-2、3）



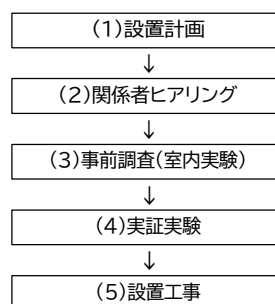
（図面-2 トンネル内の状況）



（写真-2 坑口付近の状況（夜間））

4. トンネル内の自転車照明設置までの検討フロー

トンネル内の自転車照明設置までの検討フローは、以下の流れで検討した。



(1) 設置計画

照明の設置位置は「縁石上」と「側壁部」、照明構造は「線状」と「点状」とし、各組合せによる特徴を整理した。

設置パターンは、以下の4パターンとした。

- ① 縁石上に線状照明を設置
- ② 縁石上に点状照明を設置
- ③ 側壁側に線状照明を設置
- ④ 側壁上に点状照明を設置

縁石上では、路肩に近いので照度を確保しやすいが、監視路上であり、幅員が狭くなることや、自転車のペダルが接触する可能性などが考えられる。

側壁部では、監視路の有効幅員は確保できるが、ドライバーの視線に光が入る可能性などが考えられる。（図-3）（図-4）（表-1）

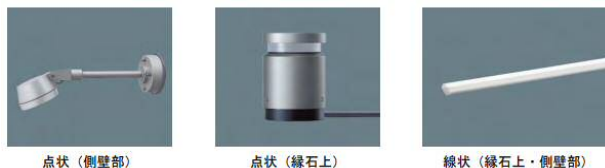
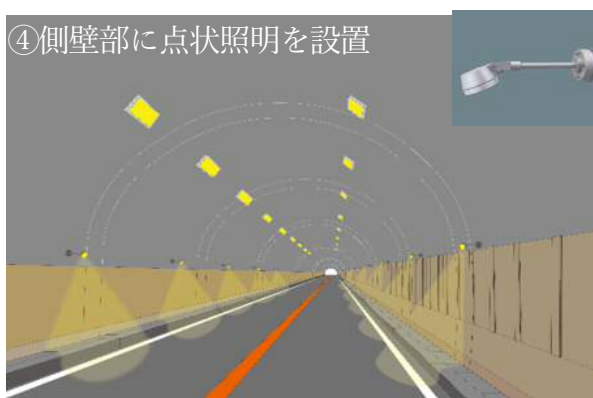
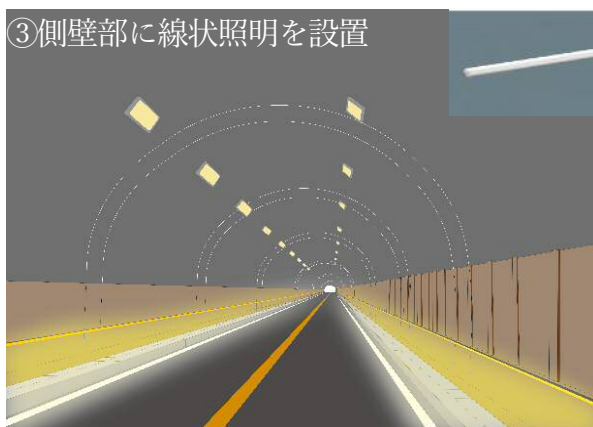
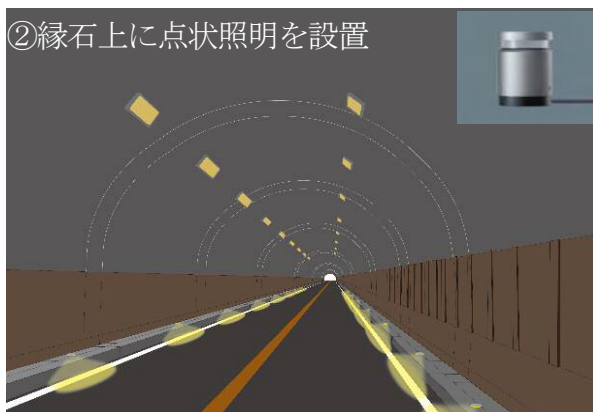
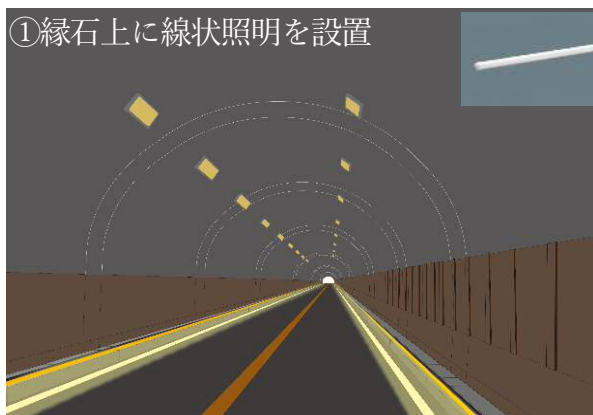


図-3 照明器具の種類



(図-4 照明の設置イメージ)

	縁石上	側壁部
照度	○ 路肩に近いため照度を確保しやすい	△ 路肩から離れるため照度がとりづらい
ドライバー目線	○ ドライバーの目線に光が入りにくい	△ ドライバーの目線に光が入る可能性がある
建築限界	△ 建築限界に影響する	照明を埋め込む場合は建築限界に左右されず、設置可能 ○ ※照明を埋め込む場合は、灯具や及び配線設置の側壁切削等が発生する一他の工法と比べると工事費が高くなる
有効幅員	△ 有効幅員が狭くなる（点状の場合は限定的） △ つまづく可能性がある（線状は全区間設置となるため点状よりもつまづく可能性が低くなる） △ 自転車のペダルが接触する可能性がある → 自転車利用者にヒアリング	○ 建築限界を考慮した設置により有効空間に影響しない
維持管理面	△ 路面に近いため、泥はねや凍結防止剤などで汚れやすい 一定期清掃が必要 △ 清掃の支障とはならない（水抜きがあるとよい）	△ 側壁補修の際に影響する可能性がある △ 高さによっては清掃の支障となる
監査廊	△ 点状照明で全周配光タイプを採用すれば対応可	○ 監査廊も明るくすることができる

(表-1 設置箇所毎の特徴)

(2) 関係者ヒアリング

検討した配置計画について、道路管理者や交通管理者、トンネル清掃を行う業者、サイクリスト等に事前ヒアリングを行い、意見収集を行った。(表-2)

関係者	主な協議・調整事項
道路管理者	①選定する照明器具について ②照明器具の設置位置（高さ等）について ③設置時の留意点（自転車からの視認性等）について ④維持管理について
交通管理者	①選定する照明器具について ②照明器具の設置位置（高さ等）について ③設置時の留意点（自転車からの視認性等）について
トンネル清掃業者	①選定する照明器具について ④維持管理について
サイクリスト	②照明器具の設置位置（高さ等）について

(表-2 ヒアリング時の意見収集事項)

各関係者の意見は下記のとおり。(表-3)

■ヒアリング結果

【交通管理者】

- ・照明器具の選定について、「点」で照らすと照明にムラができ、影の部分が濃くなるため、「線」で照らす照明器具がよい。
- ・自動車(対向車含む)から見て、眩感しないような対策を講じることがよい。

【道路管理者】

- ・設置後の維持管理(清掃活動への支障, 耐久性等)に配慮した照明器具を選定することがよい。
- ・設置場所は、縁石の上面は走行車両(自転車含む)が接触する可能性があり、歩行者(管理者含む)の歩行阻害となる場合もあるため、側壁がよい。

【トンネル清掃業者】

- ・側壁部は、清掃時に支障があるため、配線なるべく隠す、露出するボルト類を減らす等の対応が必要。

【サイクリスト】

- ・部分的なライト(点)は暗い部分が見にくいので、連続的な照明(線)にした方がよい。
- ・連続照明であれば、誘導の役割を果たすため走行性が向上する。

(表-3 ヒアリング結果)

(3) 室内実験

現地にて照明器具の選定や設置高さの検討を行うと、交通規制により、一般交通に影響が出るため、実際のトンネル構造を再現した室内で、照明器具選定、設置位置(縁石・側壁)および設置高の変化による視認性や安全性、自転車の発見し易さの違いを事前に確認した。

パターンは以下の4パターンで室内実験を行った。

- ①縁石上に線状照明を設置し、端部からの離れを5cmと10cmで比較
- ②縁石上に点状照明を設置し、設置間隔を2mと3mで比較
- ③側壁(上り線)に線状照明を設置し、縁石からの高さを50cmと90cm(情報ボックス下部)で比較
- ④側壁(下り線)に線状照明を設置し、縁石からの高さを0.5m～1.5mとして比較

■①縁石上に線状照明を設置し、端部からの離れを5cmと10cmで比較

縁石の端部より外側(側壁側)に設置すると、路肩に縁石の影が発生し視認性が低下する。縁石端部からの離れが5cmであれば、路肩の影の範囲も狭く、視認性が問題がないことを確認した。(写真-4, 5)



(写真-4 縁石端部から5cm)



(写真-5 縁石端部から10cm)

■②縁石上に点状照明を設置し、設置間隔を2mと3mで比較

設置間隔を広げることで灯具基数を減らし、コストを抑えることができるが、光のムラが発生し、視認性が低下する。設置間隔が3m以内であれば、視認性に問題がないことを確認した。(写真-6, 7)



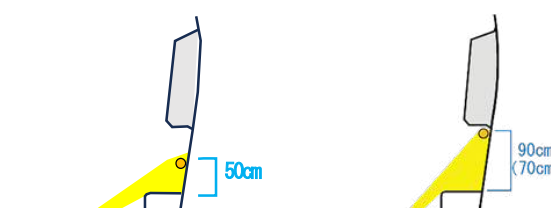
(写真-6 間隔 2m)



(写真-7 間隔 3m)

■③側壁(上り線)に線状照明を設置し、縁石からの高さを50cmと90cm(情報ボックス下部)で比較

設置高さが低いと、路肩に縁石の影が発生し、視認性が低下する。縁石からの高さ90cm(情報ボックス下部)であれば視認性を確保できることを確認した。また、高さ90cmは光源がドライバー目線にも影響がないことを確認した。(なお、実証実験では、情報ボックス及び取付金具それぞれの固定ボルトの干渉を避けるため、縁石より70cmの高さとした。)(写真-8, 9)





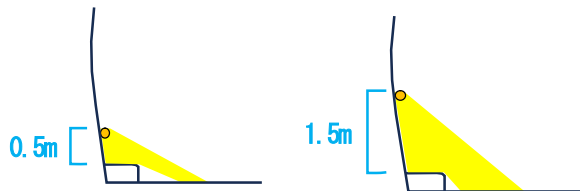
(写真-8 設置高さ50cm)



(写真-9 設置高さ90cm)

■④側壁(下り線)に線状照明を設置し、縁石からの高さ0.5m～1.5mとして比較

上り線と同様に、設置高さが低いと、路肩に縁石の影が発生し、視認性が低下する。縁石からの高さが1.0m以上であれば視認性を確保できることを確認した。また、高さ1.5m以上となると光源がドライバー目線の支障になる可能性があることを確認した。下り線は1.0m～1.5mの高さが考えられるが、自転車、ドライバーの双方の視点で決定する必要がある。(写真-10, 11)



(写真-10 設置高さ0.5m)



(写真-11 設置高さ1.5m)

■室内実験の結果

室内実験の結果、縁石上面は、自転車の接触の可能性や路肩を十分に照らすことが困難であったことから、「側壁部」「線状照明(テープライト)」を選定した。

設置高さについては、上り線は縁石から高さ70cm(情報ボックス下部)、下り線は、縁石から高さ1.0m～1.5mを選定した。

(4) 実証実験

(4)-1 実証実験

事前調査の結果を基に、現地(水分トンネル)に照明を配置し、サイクリストによる実証実験を行い、走行性や視認性等についてのアンケートにより最適な照明の設置高さを決定した。

自動車ドライバーにおける視認性は、運転席からサイクリストの視認性や、自転車走行状況等を確認した。

実験パターンとしては、上り線と下り線における以下の4つの比較パターンで実証実験を行った。

【上り線側】

- ① 消灯時の走行状況を確認
- ② 点灯時(照明の設置高さ0.7m)で走行状況を確認

【下り線側】

- ① 縁石からの照明の設置高さ1.0m時の走行状況を確認
- ② 縁石からの照明の設置高さ1.5m時の走行状況を確認

(上り線側)

① 消灯時



▲ 消灯時の現状

② 照明の設置高さ【H=0.7m】



▲自転車走行空間の見やすさ



▲自動車ドライバーからの視点

(下り線側)

① 照明の設置高さ【H=1.0m】



▲自転車走行空間の見やすさ



▲自動車ドライバーからの視点

② 照明の設置高さ【H=1.5m】



▲自転車走行空間の見やすさ



▲自動車ドライバーからの視点

(4)-1 アンケート結果

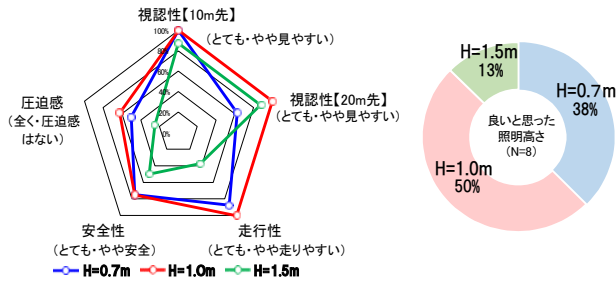


図-5 照明器具の設置高さに関するサイクリストの意見

<サイクリスト>

- 5割の人が照明設置高さH=1.0mの時に走りやすさを実感。
- H=1.0mの時では、視認性(10m先, 20m先), 走行性, 安全性で評価が高い。
- H=1.5mでは、視認性(10m先, 20m先)は評価が高いが、走行性や安全性, 圧迫感の評価が最も低い。

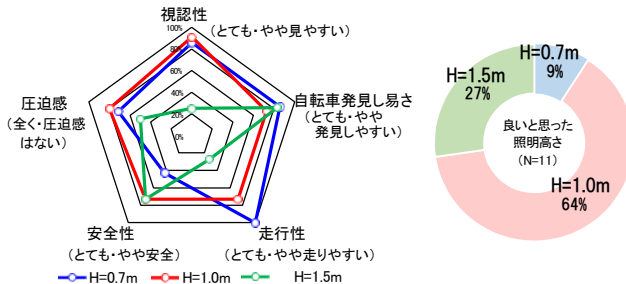


図-6 照明器具の設置高さに関する自動車ドライバーの意見 (出典：九州のトンネル部における自転車のための照明ガイドライン (第2版))

<自動車ドライバー>

- 6割の人が照明設置高さH=1.0mの時に走りやすさを実感。
- H=1.0mは、全ての項目で評価が高い。
- H=0.7mでは、視認性や走行性で評価が高いが、安全性では最も評価が低い。

■実証実験結果

実証実験後のアンケート結果より、照明の設置高さは縁石から1.0mが妥当であると、整理された。

5. 設置工事

実証実験の結果を踏まえ、2023年9月に側壁部に線状照明を、上り線は設置高さを縁石から0.7m、下り線は1.0mで設置工事を行った。(写真-12, 13)



(写真-12 上り線側の設置状況)



(写真-13 下り線側の設置状況)

6. 今後の事後評価について

今後の取り組みとして、2024年10月中旬から11月にかけて、供用後の自転車利用者と自動車ドライバーの評価を調査し、整備効果を確認することとしている。

評価内容は、実証実験におけるサイクリストの走行実験によるアンケート調査結果をもとに照明の設置構造を決定しているため、現状においても同様の視点として、「視認性」「走行性」「安全性」「圧迫感」とし、調査方法は、WEBによるアンケート調査および「道の駅ゆふいん」での直接のアンケート調査により実施する。

7. まとめ

今回、道路管理者として自転車走行環境の改善を目的とした、トンネル内における自転車用照明の必要性について確認できた。

しかし、今後の事後評価を基に、改善点などのあらいだしを行い、自転車走行環境におけるよりよい対策を行っていかねばならないと考えている。

今後も道路管理者として、自転車走行環境および通行空間における安全対策を進め、九州における自転車の安全対策が確立されるよう、対策を進めてまいりたい。

■謝辞

最後に、本論文の執筆にあたって、実証実験にご尽力いただいた、交通管理者の皆様、清掃業者の皆様、サイクリストの皆様、コンサルタントの皆様へここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 九州のトンネル部における自転車のための照明整備ガイドライン(第2版)

名古屋市大須地区における 自転車通行空間整備事業 ～地元住民や関係機関との合意形成の取り組み～

柳 倖貴¹

¹中部地方整備局 名古屋国道事務所 交通対策課 (〒467-0833 名古屋市瑞穂区鍵田町2-30)

国内において、自転車利用に関する社会的需要が高まっている一方、歩行者と自転車の事故件数が増加傾向であり、自転車の安全対策が喫緊の課題である。名古屋国道事務所では、2020年10月に「当面の名古屋市内における自転車通行空間の整備計画」を策定し安全で快適な自転車利用環境づくりを推進している。その対象路線の1つである国道19号大須地区において、安全・安心な歩行空間及び自転車通行空間の確保を目的に、地域住民及び学校関係者や有識者等と協議会を設立し、話し合いを重ね課題を抽出し、社会実験を実施した。社会実験後の本整備では、車道の車線削減を行い、自転車専用通行帯の整備を実施した。更に名古屋市とも連携して駐輪場の追加整備を行い、効果検証についても行った事例について本稿で報告する。

キーワード：自転車通行空間、自転車専用通行帯、歩行者自転車交通安全対策、社会実験

1. はじめに

国内の自転車施策においては、自転車活用推進法の施行や道路構造令の改正による自転車通行帯の新設など、自転車通行空間の整備を促進させる動きがある。

昭和35年に道路交通法が施行され、自転車は軽車両として車道の左側走行が原則となった。しかし昭和45年頃、全国的に交通戦争といわれる交通事故死傷者数がピークに達する状態となっていたことを受け、安全対策として自転車の歩道走行を可能とするルールが導入され、自転車は歩道を走行することが広く一般的となった。

その後約半世紀を経て、自転車利用率の増加等により歩道での歩行者と自転車の事故が増加したことを受け、平成23年に自転車は車道を走るよう警察庁より通達されたが、さほど浸透せず現在に至っている(図-1)。

昭和35年	自転車は軽車両として 車道の左側走行が原則 となる
昭和45年	自転車の 歩道走行を可能 とするルールを導入
平成23年	警察庁から自転車は 車道を走るように通達
令和元年	道路構造令 改正 自転車通行帯の新設・自転車道の設置要件明確化
令和6年	道路交通法改正法案 可決 交通反則通告制度(青切符)

図-1 自転車施策の推移

以上から、名古屋国道事務所管内においても、2020年10月に「当面の名古屋市内における自転車通行空間の整備計画」を策定し、安全で快適な自転車利用環境づくりを推進している(図-2)。



図-2 当面の名古屋市内における自転車通行空間の整備計画図
(2024年3月時点)

2. 国道19号大須地区の課題

愛知県名古屋市中区大須地区における国道19号は、「当面の名古屋市内における自転車通行空間の整備計画」

の対象路線の1つである。歩道上に駐輪された自転車により歩行空間が狭くなっており、また、歩道を通行する自転車が多く、一部区間は通学路に指定されているため、小学生も含めた歩行者と自転車が交錯する危険な状況であった（図-3）。そのため地域から、安全・安心な歩行空間及び自転車通行空間の確保が求められていた。



図-3 大須地区の歩道利用状況（朝ピーク時）

2018年6月に、地域住民及び学校関係者、学識者、行政機関がメンバーとなった「大須地区安全な自転車利用に関する連絡会」を設立し、課題を共有した上で対策案について議論し社会実験や協議会員と現地点検を行い、2022年12月に自転車通行空間等の整備に至った（図-4）。本稿は、社会実験等を踏まえて実施した整備事業のプロセスと効果について報告するものである。



図-4 大須地区安全な自転車利用に関する連絡会及び現地点検の様子

3. 社会実験の概要と実施プロセス

(1) 社会実験実施に関する経緯

【懸念事項】

本地区は歩行者及び自転車の交通量が多く、歩道上には電線共同溝の地上機器や横断歩道橋の階段等が設置されており、歩道上での連続した自転車通行空間の創出は

困難であった。そのため、車道削減による自転車通行空間の整備を行うこととなったが、国道19号は幹線道路で交通量の多い多車線道路であり、渋滞等自動車の円滑性への影響が懸念されていた。

【社会実験の目的】

自動車の渋滞状況の把握や整備効果の検証（自転車通行空間内の自転車走行の遵守率、歩道上の駐輪台数の減少に伴う歩行空間の拡大）を目的に社会実験を実施した。

(2) 社会実験の内容

自転車通行空間の創出については、車道の第一車線を自転車通行空間として活用し、矢羽根を設置した。

駐輪場については、本地区の歩道上に駐輪されている自転車台数を把握したうえで、需要をカバーできる規模の仮設駐輪場を追加整備した。また、小学校通学路指定区間に存在した既存の駐輪場については、小学生の安全性確保を目的に駐輪禁止区間とし、歩行空間を確保した。



図-5 社会実験の実施内容

(3) 社会実験の結果

自転車通行空間創出の社会実験により、自転車の車道走行の遵守率は、西側では整備前の9%から54%、東側では7%から18%と向上し、西側東側合わせて約340台〔6h計〕の自転車が歩道通行から車道通行へ転換した。その結果、歩道における歩行者と自転車及び自転車同士との交錯回数は13回から6回に減少し、歩行者の安全性が向上した。

また、駐輪禁止区間の路上駐輪台数は78台から30台に減少し、その結果、小学校の通学路指定区間の歩道有効幅員は、整備前の1.8mから2.2mに広がり、通学路区間の通行環境が向上した。

更に、懸念されていた渋滞は西大須交差点の北側流入部及び若宮南交差点の南側流入部の左折車線で発生せず、車線削減による交通影響が限定的であることが確認でき

た。以上より、多車線道路の車線を削減して創出した自転車通行空間において、自転車通行空間の利用ニーズを確認でき、歩行者や自転車の安全性の向上を確認できた。

- ・ 自転車通行空間内を誤って自動車が走行して危険であった。
- ・ 自転車通行空間内に荷捌き車両や観光バスの停車帯を設置してほしい。
- ・ 仮設駐輪場を本整備して今後も使用したい。

という意見があったことから、本地区の道路利用特性に合わせた自転車通行空間の整備形態や駐輪場の整備の再検討を行い、本整備を行うこととした。

4. 本整備事業の概要

(1) 自転車通行空間の整備形態

自転車通行空間を整備する際、単路部においては、車道一車線分を削減したため、幅広の自転車専用通行帯の整備が可能となった。誤って自転車通行帯を自動車が走行して危険であると連絡会メンバーからの指摘を受け、歩道寄り1.5mに対してカラー舗装を行い、更に車道側にラバーポールを設置し、自動車の誤進入を物理的に抑制した(図-6)。

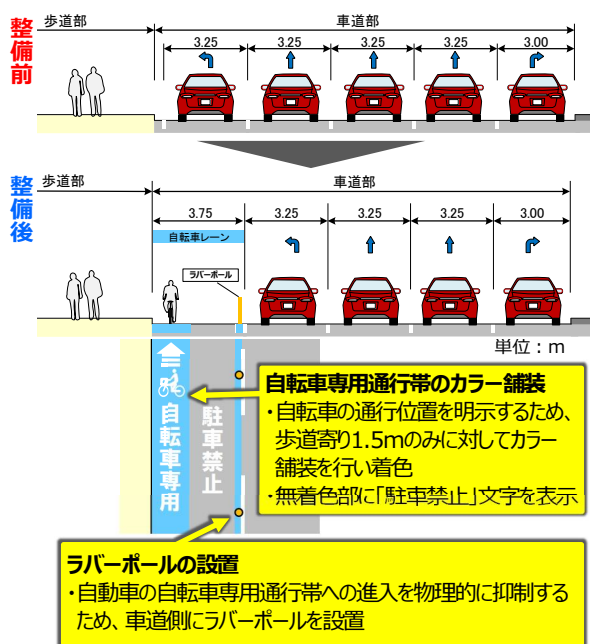


図-6 自転車専用通行帯の整備状況（単路部）

なお、交差点部は車線削減が困難であるため、植栽を撤去し自転車専用通行帯を整備した。その際、左折する自転車と直進する自転車が別々の信号現示(図-7)で通行する運用となっていたため、左折自転車による信号待ちの直進自転車の追い越し等が可能となるよう、自転車専用通行帯の幅員を2.0mに拡幅した(図-8)。

1Φ	2Φ	3Φ	4Φ	計
青:40 (西側歩行者青:38) (東側歩行者青:40)	①青:34 ②青:27 黄:3 赤:4 (歩行者青:34)	青:19 黄:2 赤:5 (歩行者青:19)	青:51 黄:4 赤:5 (歩行者青:49)	160

図-7 若宮南交差点の信号現示²⁾

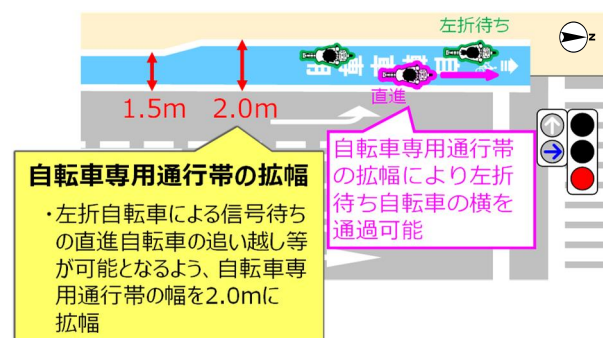


図-8 自転車専用通行帯の整備状況（交差点部）

(2) 荷捌き車両等の停車帯確保

大須地区は、周辺に商店街や観光スポットが立地することから、沿道施設の荷捌き車両や観光バスの停車ニーズが高い地区であった。

そのため、観光バスや貨物車の停車スペースと自転車通行空間を分離することを目的に、停車スペースを歩道寄りに確保し、自転車専用通行帯を停車スペースの右側にシフトする計画とした(図-9)。

停車帯の設置に伴う自転車専用通行帯のシフト

- ・ 停車スペースと自転車通行空間を分離するため、停車スペースを歩道寄りに確保し、自転車専用通行帯を右側にシフト



撮影日時：2023年1月13日(金)7:20

図-9 観光バスや貨物車の停車帯の整備状況

(3) 駐輪場の本整備の実施

歩行空間の確保及び駐輪環境の向上のため、名古屋市と連携し、あらかじめ把握した必要駐輪台数をカバーできるように、駐輪場を整備した(図-10)。

また、連絡会メンバーの大須小学校長やPTA会長と連携し、通学路区間に児童が作成したマナー向上の啓発ポスターの展示を行った(図-11)。



図-10 駐輪場の本整備の実施状況



図-11 啓発ポスターの展示状況

5. 本整備事業の効果

(1) 自転車通行空間の利用状況

社会実験の結果を受け、自転車通行空間の本整備を行ったことにより、自転車の車道走行の遵守率は、西側では整備前の9%から79%、東側では7%から61%と向上し、西側東側合わせて約570台〔6h計〕の自転車が歩道通行から車道通行へ転換した(図-12)。その結果、歩道における歩行者と自転車、自転車同士の交錯回数は13回から4回に減少し、歩行者の安全性が向上した(図-13)。

(2) 観光バスや貨物車の停車帯の利用状況

停車帯の整備により、西側では約20台〔4h計〕、東側では約70台〔4h計〕の車両が停車帯を利用するようになった。また、停車帯利用時の自転車走行状況をみると、停車帯を避けて設置した自転車専用通行帯を走行しており、安全が担保されていることが確認できた(図-14)。

また、路上停車台数も88台から72台に減少しており、

路上停車の抑制効果が見られた(図-15)。

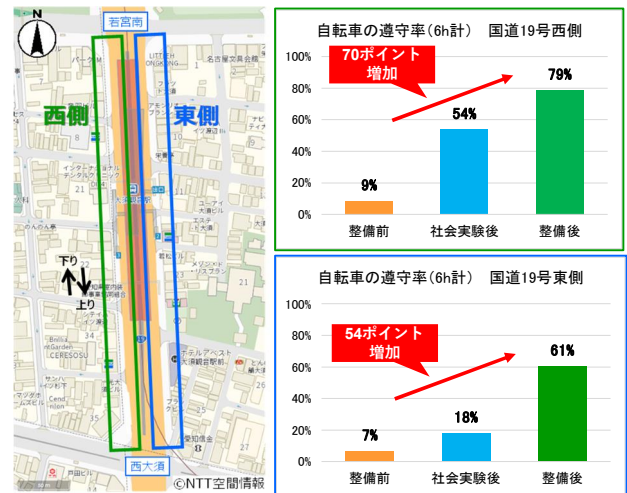


図-12 自転車の遵守率

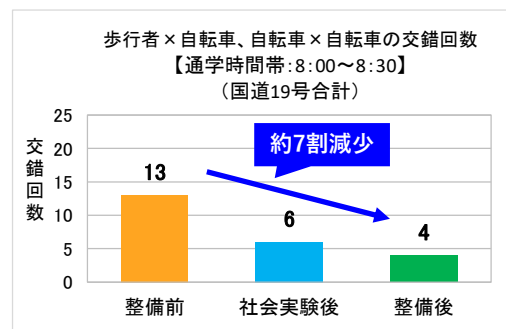


図-13 歩行者と自転車、自転車同士の交錯状況



図-14 停車帯利用時の自転車走行状況

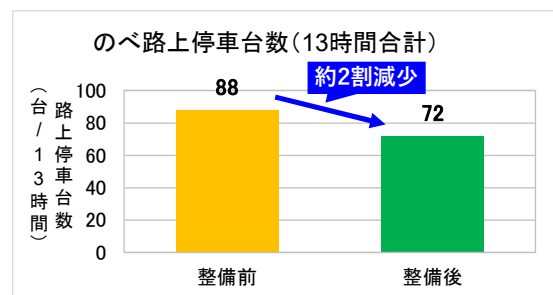


図-15 路上停車の利用状況

(3) 駐輪場の利用状況

駐輪場の整備により、歩道上に駐輪する自転車は約230台減少した（図-16）。

その結果、歩道上の駐輪自転車が原因で狭くなっていた区間における歩道有効幅員は、整備前の1.8mから2.9mに広がり歩行者の通行環境が向上した（図-17、図-18）。

6. まとめ・今後の課題

本事業で整備した自転車通行空間や駐輪場により、歩行者や自転車の安全性や快適性における効果を確認できた。また、車線削減に伴う整備により、自転車通行空間を幅員で確保でき、走行環境が向上したことにより、自転車通行空間の遵守率約90%〔ピーク8時台〕は同様の整備形態の他路線である国道19号桜通の約80%〔ピーク8時台〕（2018年11調査結果）を上回り、幅員の自転車通行空間の整備により安全性や走行環境良さに大きな効果が発現することも確認できた。

今後は、引き続き歩行者や自転車の安全性向上が求められている区間を抽出した上で、地域住民との合意形成を図り、必要に応じて自治体と連携しながら自転車通行空間の整備や駐輪状況の改善を進め、自転車ネットワークの形成を推進していきたい。

謝辞：本事業を検討するにあたり、貴重なご意見を頂きました大須地区安全な自転車利用に関する連絡会のメンバーをはじめ、地域住民の方々や道路管理者・警察の行政関係者の方々に感謝の意を表する。

参考文献

¹⁾愛知県内の交通事故死者数（愛知県警察本部）

²⁾2018年6月調査結果

³⁾名古屋市HP

https://www.city.nagoya.jp/ryokuseidoboku/cmsfiles/contents/0000013/13814/R5sakae_chiku_R50110.pdf

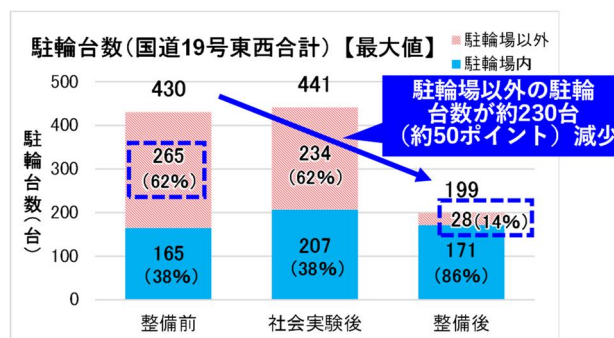


図-16 自転車駐輪場の利用状況

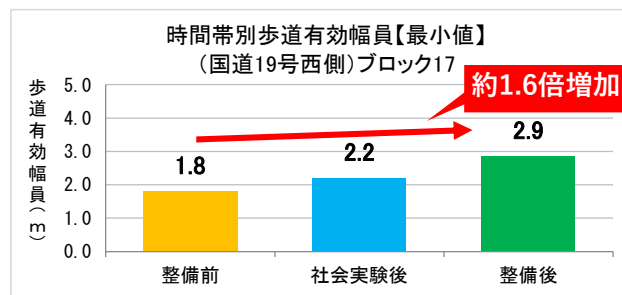


図-17 歩道有効幅員の変化



図-18 本事業整備前後の歩道区間の様子

国道506号小禄道路事業における多軸台車を活用した上部工一括撤去事例

城間 和樹¹・伊佐 奨真¹

¹内閣府沖縄総合事務局 南部国道事務所 工務課 (〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-8-14)

交通混雑緩和を目的として国道506号小禄道路を整備するにあたり、暫定ランプ橋（鋼5径間連続非合成少数I桁）が支障となるため撤去する必要があった。本ランプ橋は商業施設が隣接する地区内に位置し、終点側2径間は国道331号（現道）の上空に架設されている。施工に際して現道の昼間4車線の交通確保が必須であり、通常のベント&クレーンによる撤去では昼間に交通開放できず、現道に干渉しない門型ベントでは周辺民間施設の借地や地下埋設物への影響が懸念された。検討の結果、夜間通行止めの中、多軸台車を活用した一括撤去を採用し、交通ならびに周辺への影響を最小限として上部工の撤去を完了した事例を紹介するものである。

キーワード 多軸台車、一括撤去、門型ベント、交通確保

1. はじめに

小禄道路は那覇空港自動車道の一部を構成する道路であり、延長5.7kmの4車線自動車専用道路である。那覇空港自動車道は、沖縄自動車道、南風原道路、豊見城東道路と一体となって本島北部及び中南部から那覇空港間の定時性、高速性を確保するとともに都市部の交通混雑の緩和を図ることを目的としている（図-1参照）。

小禄道路を整備するにあたり、豊見城・名嘉地IC空港側出入口にある暫定ランプ橋が支障となるため撤去することとなった。施工に際して現道の昼間4車線の交通確保が必須であり、限られた期間内での撤去完了が求められた。本稿では、これらの課題に対して実施した多軸台車を活用した上部工一括撤去の事例について報告する。

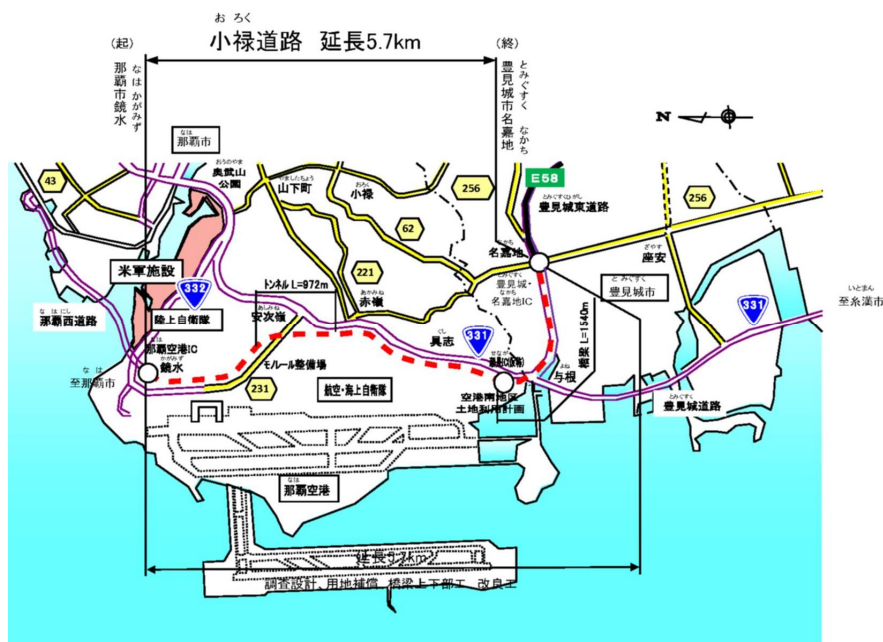


図-1 小禄道路路線図

撤去対象である暫定ランプ橋は、施工時には那覇空港までの整備計画が確定しておらず、名嘉地交差点の渋滞緩和を図るための暫定計画としてH23年度に供用された。H27交通量センサスでは上下線の合計で日あたり約3万台と観光目的だけでなく日常的に利用される区間となっている。概要（図-2、図-3参照）を以下に示す。

【暫定ランプ橋諸元】

橋 長：L=224.600m

支間割：43.500m+2@50.000m+43.700m+35.800m

上部工：鋼5径間連続非合成少数I桁

下部工：逆T式橋台1基，張出式橋脚4基

2. 撤去工法検討時の課題

撤去工事に伴う交通規制の概要は、豊見城・名嘉地IC空港側出入口が通行できなくなるとともに、現道の一部区間において一時的な車線数減少が発生する（図-4参照）。工事規制時の課題としては、まず現道の昼間の4車線交通の確保が絶対条件であり、この条件を満たす施工方法の課題が以下の通りである。

(1) 昼間の4車線交通の確保

当該箇所は市街地に位置し、高速道路 IC から空港へ向かう路線にあり交通量が非常に多い状況である。そのため、昼間に4車線交通を確保し、車両並びに歩行者の沿道施設への乗り入れも確保することに加え、極力短い期間で撤去できる工法を選定する必要があった。

上記を踏まえ、現道に干渉しない門型ベントによる撤去と夜間規制による多軸台車一括撤去を検討した。

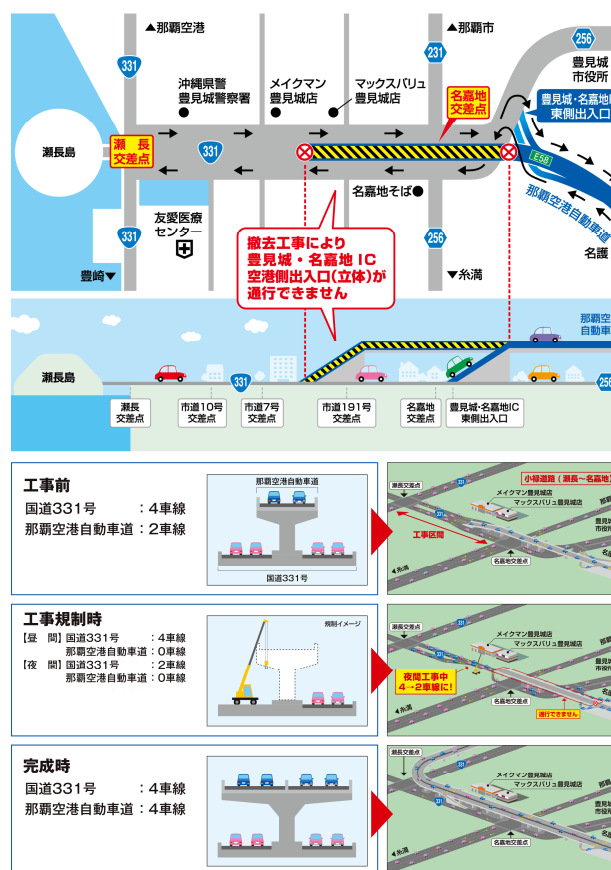


図-4 撤去工事パンフレット

撤去範囲

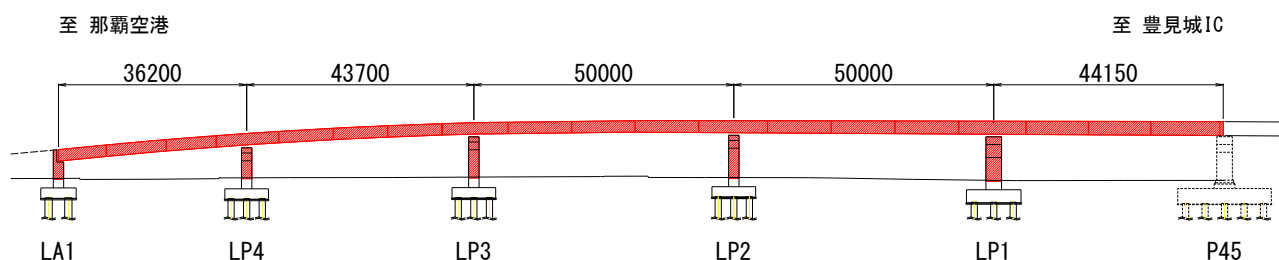


図-2 側面図

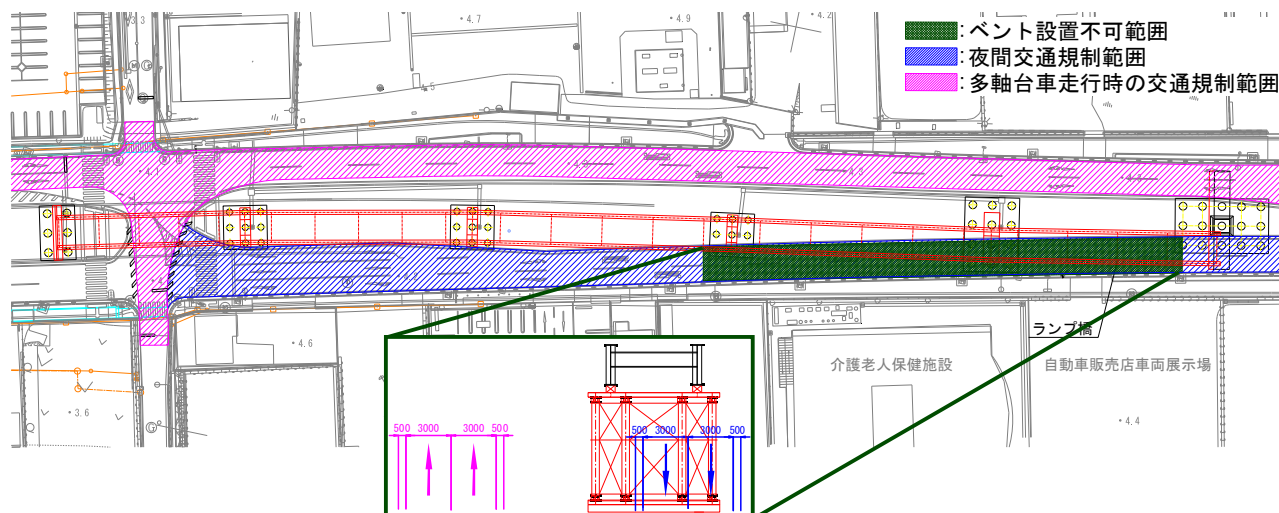


図-3 平面図

(2) 門型ベント設置時の周辺施設への配慮

図-3 に示す通り、暫定ランプ橋が現道の上空に来る区間があり、この箇所については図-5 に示す現道を跨ぐ門型ベント案を検討した。しかし、ベント基礎幅が歩道幅員（3.0m）以上必要であること、歩道下に既設排水路や雨水管などが埋設されていることが判明したため、ベント基礎は歩道部以外への設置を検討した。

しかし、既設構造物への影響を回避するためには、図-6に示すように歩道脇の民間施設敷地を借地する必要がある。門型ベント受梁が長くなるため地組みが必要となる。さらに、借地する場合は、地下埋設物の確認や地耐力調査・検討に不測の日数を要することが想定された。また、限られた空間で門型ベントの架設方法も非常に難易度の高い作業が求められた。

(3) 多軸台車使用時の留意事項

a) 運搬時の安全性

多軸台車で桁を運搬する際は、荷重軽減を図り1主桁ずつの撤去も検討したが、桁の横倒れが懸念されたため、横桁を残したままの2主桁一括撤去とすることで構造安全性を確保する必要がある。また、多軸台車で運搬距離を極力短くするために、図-7に示す橋台背面を桁細断ヤードとするL型擁壁の先行撤去などの運搬後の作業を踏まえた施工手順を検討した。

b) 走行時の支障物件

上部工を載せた多軸台車の高さは9.0m程度となるため、桁細断地点までに標識看板と信号機の干渉を回避する必要がある。標識看板については、F型標識柱であったため、横梁部分のボルトを外しての撤去と、信号機は設置されている向きを90度回転させる作業が求められた。

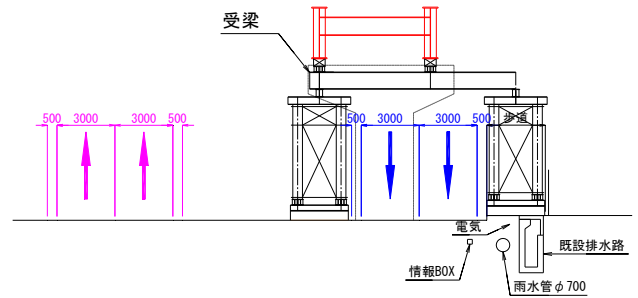


図-5 門型ベント設置断面図

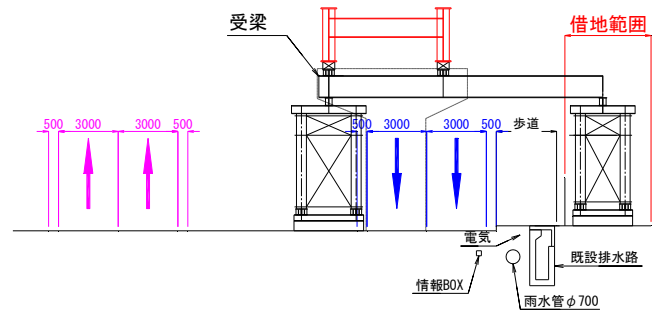


図-6 既設排水路を避けたベント位置断面図

3. 多軸台車による上部工一括撤去の概要

前述の門型ベントと多軸台車一括撤去の比較検討の結果、安全性に優れ2夜間で上部工の撤去を完了できる多軸台車一括撤去を採用した。

今回、CIMによる工事着手から完成までの施工順序をアニメーション化し、視覚的に重機・資材配置などを確認することで、施工確実性と安全性を検証した。図-7に撤去計画の平面・側面・断面図・動画キャプチャを示す。1夜間で1径間の撤去であり、桁細断・運搬を行い、桁細断地点を開けて2回目の撤去を行った。

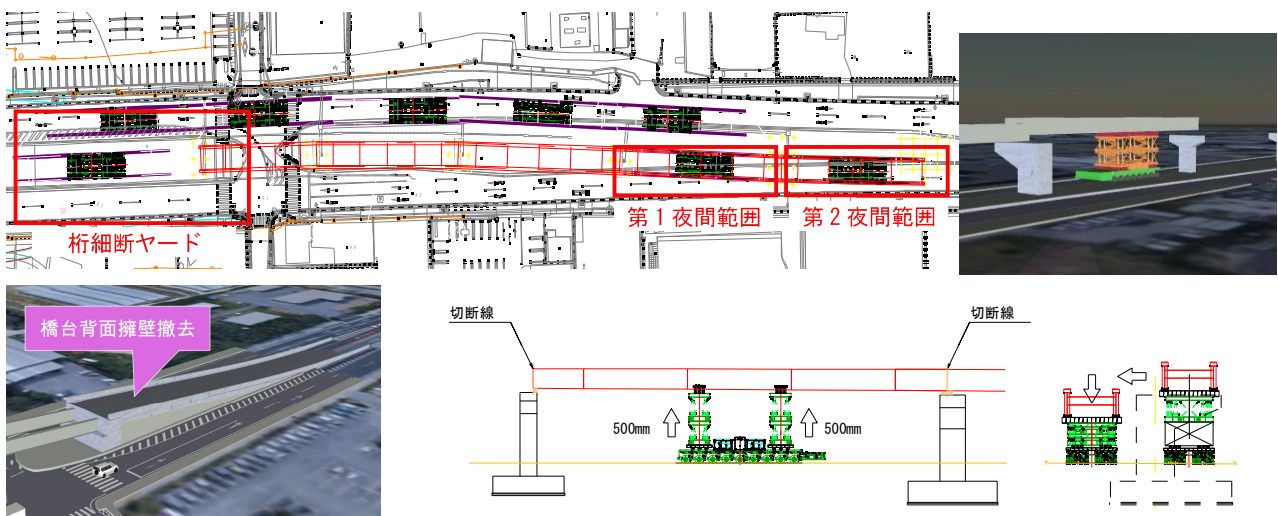


図-7 多軸台車による撤去計画

4. 撤去工事実施状況

本工事は、2024年2月13日（火）と17日（土）の2日間
で実施した（表-1参照）。まずは交通規制を完了させた
後、多軸台車の走行に支障となる標識看板と信号機の一
時撤去を開始した（写真-1参照）。その後、上部工2主
桁を多軸台車でリフトアップし、桁細断ヤードまで運搬
し（写真-2、写真-3参照）、クレーン2台の相吊りによ
って多軸台車から主桁を降ろした（写真-4参照）。最後
に信号機を復旧し交通規制を解除した。

5. おわりに

今回の工事は、交通量が多く、様々な施設が隣接し
ている地区内での撤去作業であった。狭小な施工ヤード
で交通規制は夜間のみに限られるなど厳しい制約条件の
中で、多軸台車の使用により、主桁を安全かつ迅速に撤
去することができた。

表-1 撤去スケジュール

2024年2月13日（火）		2024年2月17日（土）	
実施時間	内容	実施時間	内容
1:00	車線規制開始	1:00	車線規制開始
1:30	規制完了、標識看板・信号機の一 時撤去	1:30	規制完了、信号機の一 時撤去
2:00	多軸台車による移動開始	2:00	多軸台車による移動開始
2:30	桁細断ヤード到着、桁荷卸し開始	2:30	桁細断ヤード到着、桁荷卸し開始
4:00	信号機復旧、規制解除開始	3:30	標識看板・信号機復旧、規制解除開始
4:30	規制解除完了	4:00	規制解除完了

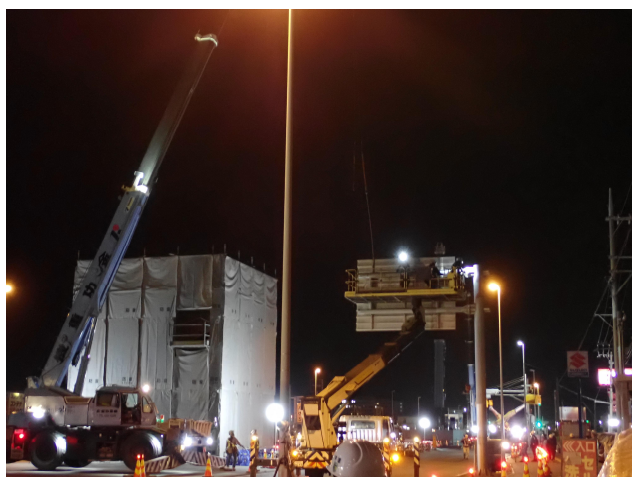


写真-1 標識看板の一時撤去状況



写真-2 多軸台車で桁のリフトアップ状況



写真-3 多軸台車走行状況



写真-4 多軸台車からの桁の荷卸し状況

滞筋の平均河床を対象とした数値計算 —河川橋梁の洗掘被害を未然に防ぐために—

竹崎 奏詠¹・猪股 広典¹

¹国立研究開発法人 土木研究所 河道保全研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1- 6)

洗掘被害を受けやすい全国の道路橋を効率的かつ適切に抽出するため、河川に架かる全国都道府県の道路橋を対象として、橋脚の構造諸元や架設年等の属性情報や河道の二極化の観点から設定した条件に該当する道路橋を抽出した。その結果、約580橋（都道府県管理の河川に架かる全道路橋の約1%）が該当した。その中から、近年の洪水中に洗掘で被災した道路橋を対象に数値計算を実施し、簡易的な洗掘深の推定を含む流況評価等を行った。最後に、河川道路橋の洗掘対策の検討・設計手法の確立に向けた主な技術的課題等を提示した。

キーワード 洗掘, 道路橋, 河道の二極化, 数値計算, 連携

1. はじめに

近年、毎年のように洪水中の洗掘により河川に架かる道路橋（以下、河川道路橋）橋脚が被災している¹⁾。これまでに被災した橋梁の中には、河道の二極化（河川区域内における植生・樹木が繁茂（樹林化）し、これに伴って水域部と陸域部における比高差が拡大すること）が進行している河川区間における被災事例が少なくなく、被災を未然に防止するための取り組みが求められている²⁾。このような中、これまでに洗掘で被災した橋脚の被災メカニズムを明らかにすることは、平時の点検中に着目すべき箇所や診断、措置段階で採るべき方法についての検討等を行うにあたって有益であると考えられる。一方、洪水中の洗掘で被災した橋脚を対象として、被災メカニズムを定量的に検討した事例は国内外含め限られているのが現状である。そこで本報文では最初に、二極化していると考えられる河道に架かる全国の河川道路橋を抽出する。その後、抽出した橋梁の中から実際に洗掘により被災した1事例を対象として、その被災メカニズム推定に資する流況評価等を行った。

2. 二極化河道に架かる橋梁の抽出

(1) 抽出方針

近年の河川道路橋の洗掘被災事例²⁾、および既往の研究³⁾等から、下記の3つの条件を満たす橋梁が洗掘被害を受けやすいことが示唆されている。

1. 架設年が河川管理施設等構造令（以降、「構造令」と呼ぶ）施行前

2. 基礎形式が直接基礎・ケーソン基礎

3. 架設位置周辺河道における二極化

また、近年洗掘で被災した河川道路橋の中には、国土交通省直轄河川（以下、直轄河川）に架かる都道府県管理（以降、「県管理」）の橋が複数存在する²⁾。直轄河川では河床の横断測量をはじめとして洗掘による被災メカニズムの推定に必要なデータが比較的豊富に存在するため、ここでは、3章において被災メカニズム推定に資する流況評価等を実施することを念頭に上記3条件に加え直轄河川に架かる県管理の道路橋を抽出した。

(2) 抽出方法

条件 1. 及び 2. については、全国道路施設点検データベース³⁾（以降、「点検 DB」と呼ぶ）の第 77 条調査データから判断した。一部橋梁については条件 1. または 2. の情報が無かったため、それらの橋梁については安全側に考え、条件 1. 及び 2. に該当しているものとして扱った。また、橋脚が無い橋梁を除外するため、径間数 2 以上を条件としているが、滞筋内に橋脚がない橋梁も含まれている可能性があるため、その詳細把握については今後の課題としたい。3. については、既往の研究²⁾で樹林化と河道の二極化の因果関係が指摘されていること、および近年洗掘で被災した多くの河川道路橋周辺で樹林化が見られていたことから設定した条件で、対象橋梁上から Google ストリートビュー等で確認できる範囲において、低水路内の砂州や砂礫堆の少なくとも一部が植生で覆われている場合には「河道の二極化」と分類した。

本報文では、上記の条件を全て満たす河川道路橋を要注意道路橋と定義する。なお、上記評価材料に乏しい直

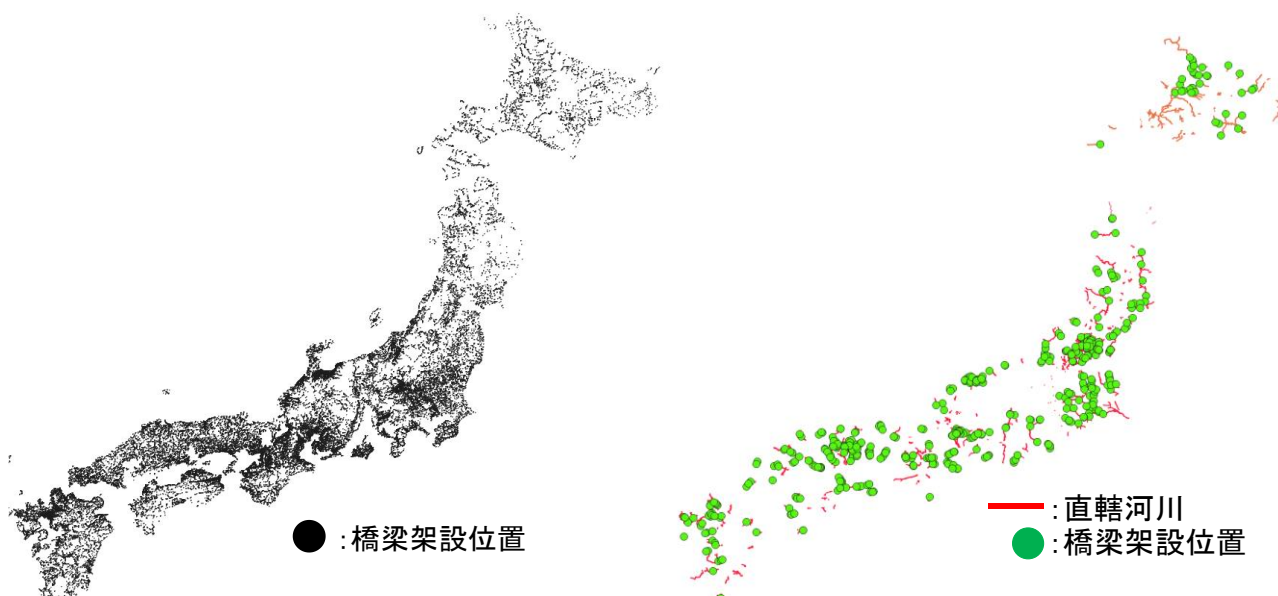


図-1 日本全国の河川道路橋（県管理）の分布（左）及び要注意道路橋の分布（右）を表した拡大図

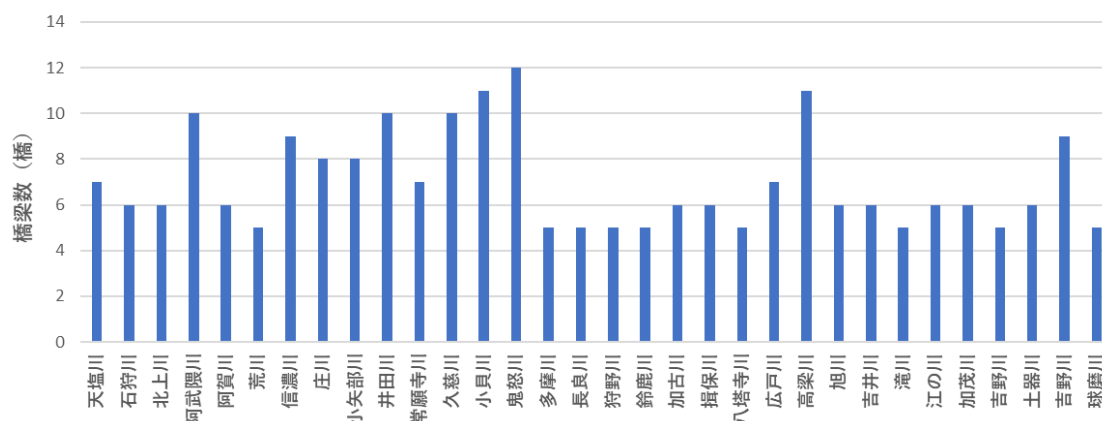


図-2 主要河川と要注意道路橋数の整理（要注意道路橋数が5橋以上の河川を記載）

轄河川以外の河川については、別途検討を進める必要があると考えられる。

(3) 抽出結果の整理

全国の県管理の道路橋（約 140,000 橋）を対象に、

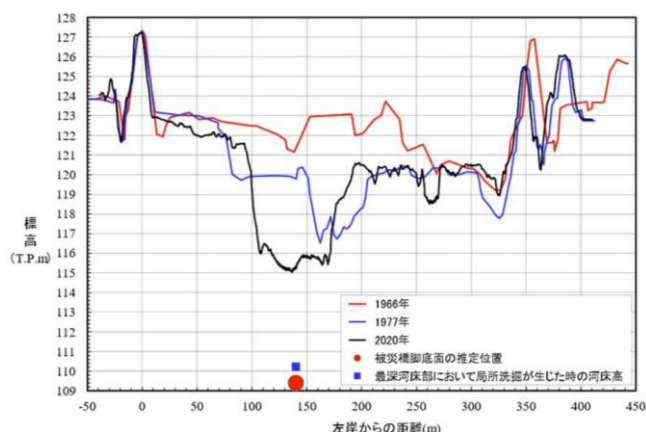


図-3 被災橋梁直下流における経年的な河道の二極化²⁾

GIS 上で目視で確認しながら抽出した河川道路橋（約 52,000 橋）を対象に要注意道路橋の抽出を行った。その結果、要注意道路橋数は約 580 橋（県管理の河川道路橋全体の約 1%）であった（図-1）。更に、数値計算の対象河川の選定上の参考とするため、河川毎に要注意道路橋数を整理した。図-2 に、要注意道路橋が 5 橋以上架かっている河川と橋梁数の関係図を示す。図より、要注意道路橋が 10 橋以上架かっている河川は、阿武隈川、井田川（神通川水系）、久慈川、小貝川、鬼怒川、高梁川、吉野川の 7 河川であった（図-2）。

以降は、一例として、図-2 に記載の河川に架かり、近年の洪水で被災した要注意道路橋を対象にその流況等を分析した結果を示す。

3. 要注意道路橋を対象とした数値計算⁴⁾

(1) 対象橋梁（被災橋梁）周辺の河道特性等

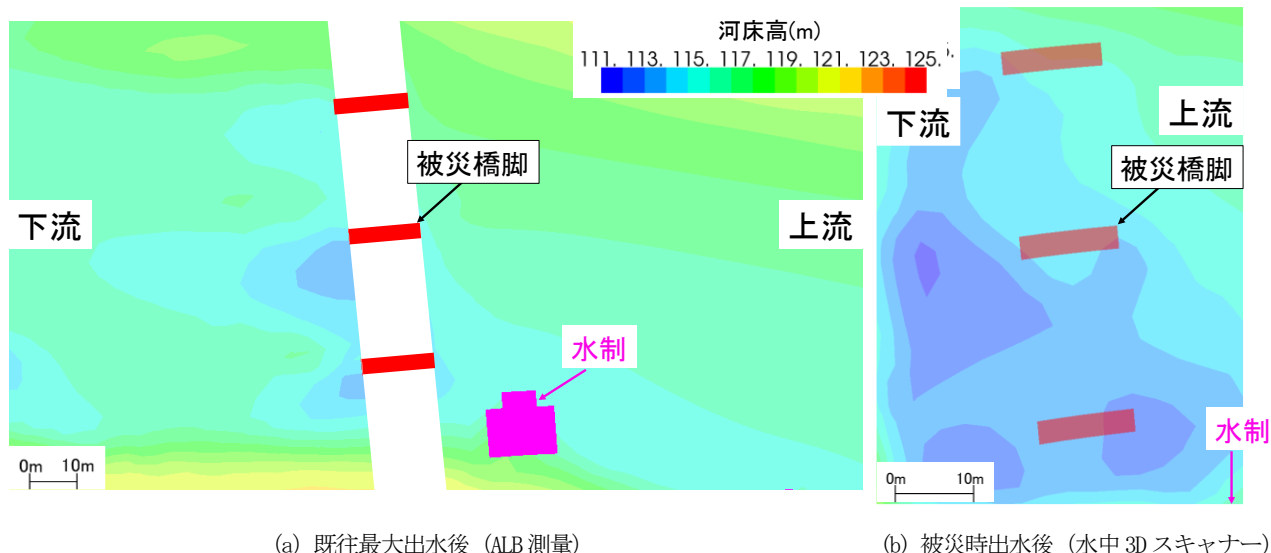


図-4 既往最大出水後および被災時出水後における被災橋梁橋脚周辺の実測河床高コンター図

表-1 計算条件

計算条件	計算範囲	68.8k~72.4k
	格子サイズ	約3m×3m
	掃流砂量式	芦田・道上式
	上流端境界条件	推定ハイドロ(RRIモデル)
	下流端境界条件	A水位観測所水位データ
	給砂条件	平衡給砂
	マニングの粗度係数 ($m^{-1/3} \cdot s$)	低水路：0.033 高水敷：0.08
	代表粒径(mm)	30
	初期地形	ALB測量結果
被災橋脚 構造諸元	基礎形状	小判型
	基礎幅(m)	3.0(躯体幅：約2.0m)
	基礎長(m)	12.2
	被災前根入れ深(m)	約5.0

対象橋梁（被災橋梁）の架設位置は河道の二極化が進んだ（図-3）セグメント2-1の河川区間である。低水路内の河床材料は主に砂礫³⁾で構成され、高水敷上には背丈が数十cm~1m超えの植生が繁茂している。対象橋梁の下部工は14基の小判型橋脚と2基の橋台で構成され、3基の橋脚が低水路内に位置しているが、その真ん中に位置する橋脚が洪水中に沈下した。被災橋脚の基礎形式はケーソン基礎および直接基礎の複合形式（橋脚上流側がケーソン、下流側が直接基礎）で、基礎幅（橋軸方向）は約3.0m、基礎長（橋軸直角方向）は約12.2mであり、基礎幅に対し基礎長が長いことが特徴である。また、対象橋梁は構造令施行前に建設され、河積阻害率が13%程度と高めである。ここで、図-4に、対象橋梁が被災する約2年前の既往最大出水後及び対象橋梁が被災した時の出水（以降、「被災時出水」と呼ぶ）後における対象周辺の実測河床高コンターを示す。なお、既往最

大出水後のALB測量では、被災橋梁架設位置真下の測量データが取得できなかったため空白にしている。また、被災時出水後の測量結果では、測量（3Dスキャナー）が実施された対象橋梁架設位置近傍のみの測量結果を示している。図より、両出水において、対象橋梁架設位置において低水路の広い範囲で河床低下が生じている。また、被災時出水前後（図-4(a)(b)の河床高の比較）において、被災橋脚とその左岸側に位置する橋脚との間から下流側にかけて河床低下が著しく進行したことが確認できる。ここで、被災橋梁の変状が確認された時刻は被災時出水のピーク流量時頃であったが、被災橋脚は鉛直下向きに沈下している状態であった。通常、洗掘によって河川橋脚が被災する際、最大洗掘深は橋脚上流側で生じるため、橋脚の傾斜方向は上流方向となる。このことは、被災橋脚の橋脚上流側に加え、下流側からも洗掘が進行した可能性を示唆している。なお、複合基礎による洗掘進展過程への影響については今後の課題としたい。

(2) 計算条件の概要

表-1に計算条件の概要を示す。ソルバーはiRIC Nays2DF³⁾を使用し、被災橋梁を含む河川縦断方向約3600m（被災橋梁架設位置は上流端から約900m下流）を計算領域として被災時出水を対象とした。計算条件やモデルの妥当性検証等の詳細については既往研究⁴⁾を参照されたい。

(3) 河床変動・流況評価

図-5（上）に、被災橋梁架設位置周辺における被災時出水前の河床高を基準とした河床変動量の平面分布（ピーク時）を示す。図より、橋脚近傍のみならず、被災橋梁架設位置の広い範囲で河床低下が見られる。また、実測データ（図-4）と同様に、橋脚間から下流にかけて大きな河床低下が生じており、その位置で流速が最大とな

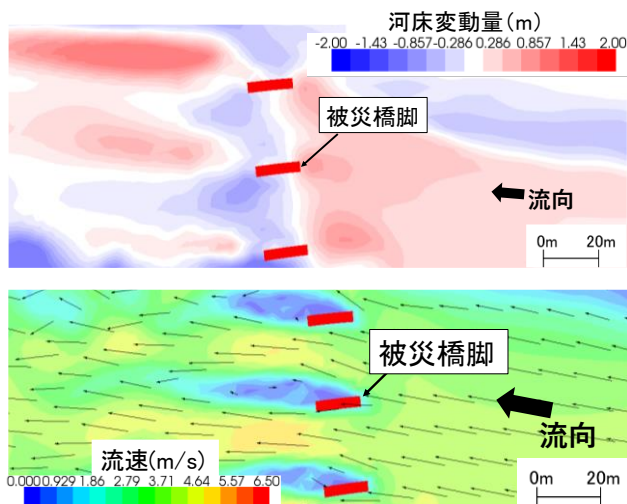


図-5 被災時出水ピーク時における河床変動量（上）と流況（下）

っている（図-5（下））。ここで、被災橋梁を含むその直上下流の水面形を見ると（図-6）、被災橋梁上流側で堰上げが生じており、その影響で水面が急勾配になっている。また、その急勾配の変曲点は被災橋梁直下流である。そのため、橋脚間で流速が増加し、その最大値を被災橋梁直下流で迎えたと推定される。

(4) 洗掘深の簡易推定

前述した通り、対象橋梁の沈下は被災時出水のピーク頃に確認されており、その時、被災前の根入れ以上の洗掘が生じていたことが推定される。図-5（上）より、対象橋梁周辺の低水路平均河床低下量は約 1.0m である。また、被災橋脚（基礎幅：約 3m）の（最大）局所洗掘深については、日本で広く用いられている $ds=1.45D$ （ ds ：最大局所洗掘深、 D ：躯体幅または基礎幅）を使用すると約 4.5m となる。したがって、被災橋脚の洗掘深は約 5.5m となり、被災前の残存根入れ深さ（=約 5m）を上回る結果となった。このことは、橋梁架設位置の河床低下量を見積もることができれば、橋脚の基礎幅から簡易的に推定した局所洗掘深と足し合わせることで、ある程度合理的に洗掘深を推定することが可能であることを示唆している。

4. 今後の展望

(1) 河道の二極化等による河床低下等を考慮した洗掘

前章で対象とした河川では、河道の二極化等により、滞筋（低水路）の河床が経年的に（5m以上）低下している状況を示した（図-3）。また、前章（4）では、橋梁架設位置付近において、1洪水時の低水路内の平均河床高が1m程度低下した可能性を示した。更に、今後も河道の二極化等による滞筋の河床低下が進行する可能性が考えられる。以上を踏まえ、橋脚の洗掘に係る点検・診断・措置を検討する場合、橋脚周りに生じる局所洗掘に

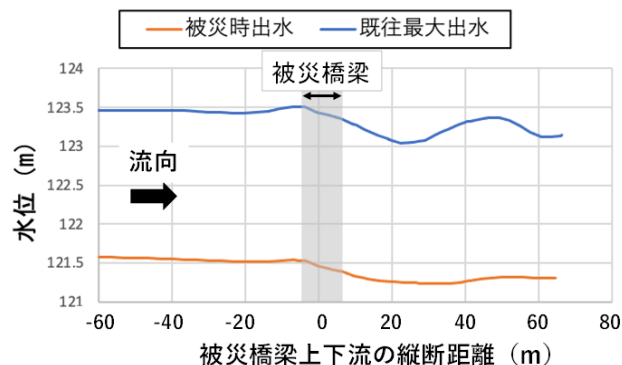


図-6 被災時出水ピーク時における河川縦断方向の水面形

加え、上述した経年的な河床低下や1洪水時の河床低下（以降、「河床低下等」と呼ぶ）も考慮することが重要と考えられる。そこで、本章では、現在土木研究所にて検討を進めている河川道路橋における河床低下等を含めた洗掘対策の検討・設計手法の確立に向けた主な技術的課題等を提示する。なお、点検手法に係る技術的課題等については既往文献⁷⁾を参照されたい。また、本論文では土被り厚や根入れ深が既知の橋脚を対象としており、土被り厚や根入れ深が不明な橋脚に対しては今後の課題と考えている。

(2) 洗掘対策の検討・設計手法の確立に向けた主な技術的課題等

図-7に、現在土木研究所 構造物メンテナンス研究センター（CAESAR）及び河道保全研究グループが連携して進めている河川道路橋における河床低下等を含めた洗掘対策の検討・設計手法の確立に向けた検討事項及び技術的課題等を示す。検討事項の前半には、前章で一例として示した数値計算等を通した低水路（滞筋）内の河床低下等の予測（①）及びその結果に基づく各橋脚周りの局所洗掘深の推定（②）を掲げている。①については、河道の二極化等の進行等を踏まえた河床低下等の推定手法の確立（①'）が技術的な課題として考えられ、②については、基礎と平均河床面の位置関係及び橋脚の構造諸元等の属性情報によって大きく変化し得る局所洗掘深の推定手法の確立（②'）が技術的課題として考えられる。なお、基礎と平均河床面の位置関係（図-8）に応じた局所洗掘深の推定手法については既往文献⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾にて既に整理がされてあるが、洪水中に生じる非定常流を対象とした洗掘孔内への土砂の再堆積が伴う場合や洗掘がZoneを跨ぐ場合の局所洗掘深の評価手法については十分検討が行われていないのが現状である。検討事項の後半には、②で推定した局所洗掘深を踏まえた各橋梁管理者による洗掘対策の必要性の検討（③）及び各洗掘対策工の選定に関する検討（④）を掲げており、③については、洗掘対策の要否の判断基準の確立（③'）が技術的課題として考えられ、④については、洗掘対策工の検討・設計手法の確立（④'）が技術的課題として考えられる。

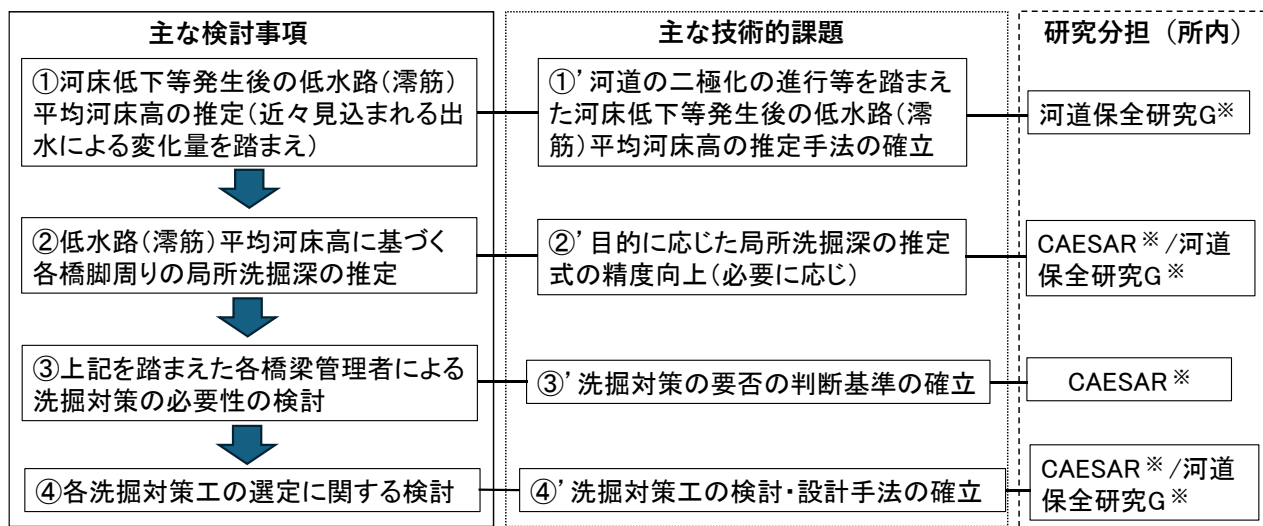


図-7 河川道路橋の洗掘対策の検討・設計手法の確立に向けた主な技術的課題等

（※CAESAR とは土木研究所 構造物メンテナンス研究センターを指し、河道保全研究 G とは土木研究所 河道保全研究グループを指す）

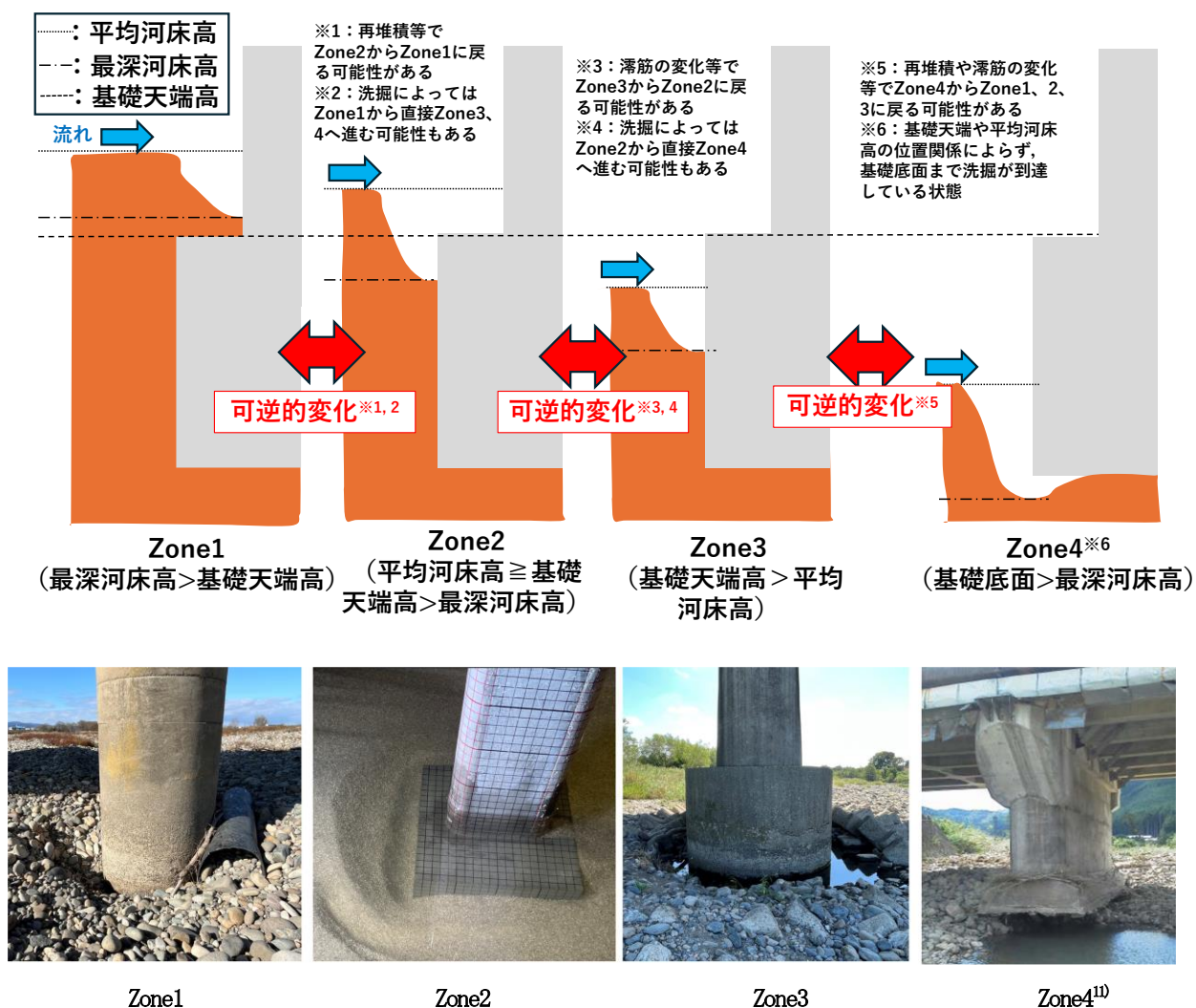


図-8 Zone の考え方を表した模式図（上段）、各 Zone に対応した橋脚の写真（下段）

5. おわりに

洗掘被害を受けやすい河川道路橋を効率的かつ適切に抽出するため、本研究では、全国の道路橋を対象として、橋脚の構造諸元や架設年等の属性情報や河道の二極化の観点から設定した条件に該当する河川道路橋を抽出した。その結果、約 580 橋（都道府県管理の全河川道路橋の約 1%）が該当することが分かった。その中から、近年の洪水水中の洗掘で被災した河川道路橋を対象に数値計算を実施し、簡易的な洗掘深の推定を含む流況評価等を行った。最後に、河川道路橋の洗掘対策の検討・設計手法の確立に向けた主な技術的課題等を提示した。今後も CAESAR 及び河道保全研究グループが連携することで、洗掘対策の検討・設計手法の確立に向けた取り組みを進めてまいりたい。

参考文献

- 1) 七澤利明、宮原史、藤田智弘、佐々木惇郎、山田薫、島田裕貴：道路橋の洗掘による被災リスク要因に関する研究、国総研資料、第1202号、2022
- 2) 猪股広典、小関博司、新保友啓：洪水時に橋脚洗掘被害を受けた近年の被災事例に関する調査報告、河川技術論文集、第29巻、pp. 115-120、2023
- 3) 全国道路施設点検データベース、<https://road-structures-db.mlit.go.jp/>、2024年8月閲覧
- 4) 竹崎奏詠、小関博司、猪股広典、工藤俊：中規模出水中の洗掘により被災した橋脚周辺の流況評価、河川技術論文集、第30巻、pp. 251-256、2024
- 5) 河川シミュレーションソフト iRIC: <https://i-ric.org/>、2024 年 8 月閲覧
- 6) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）基礎・抗土圧構造物、丸善、2007
- 7) 小関博司、田中一徳、猪股広典、藤田智弘：橋脚洗掘に対する予防保全に資する橋脚の点検方法、土木技術資料、66-9、pp. 16-21、2024.
- 8) Melville, B.W and Raudkivi, A.J. : Effects of foundation geometry on bridge pier scour, J. Hydr. Eng., vol.122, No.4, pp.203-209, 1996.
- 9) Lu, J.Y., Hong, J.H., Lee, J.J. and Shi, Z.Z. : Temporal variation of scour depth at nonuniform cylindrical pier with unexposed foundation, Proc. of 4th Scour and Erosion, pp.174-179, 2008.
- 10) Chabert, J. and Engeldinger, P. : Etude des affoulements autour des piles des ponts (study of scour at bridge piers), Rep., Laboratoire National d'Hydraulique, France, 1956.
- 11) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋の維持管理における洗掘に関する予備知識（案）、2021 年

阿蘇立野ダムの特性に配慮した 試験湛水について

藤村 晋吾¹・高場 悦郎¹・堀之内 亨太¹

¹九州地方整備局 熊本河川国道事務所 河川管理課 (〒861-8029 熊本県熊本市東区西原1-12-1)。

阿蘇立野ダムは直轄初の洪水調節専用（流水型）ダムとして2024年3月に完成したダムである。阿蘇立野ダムでは完成前の2024年1月15日から2月8日にかけて試験湛水を行った。試験湛水とはダムの運用、管理に移行する前に、サーチャージ水位以下の範囲内で、貯水位を上昇及び下降させ、ダム、基礎地盤及び貯水池周辺地山の安全性を確認することを言う。阿蘇立野ダムでは流水型の特性やダム上流側に広がる国の天然記念物に指定されている阿蘇北向谷原始林を始めとした豊かな自然環境への配慮を行いかつデジタル技術を積極的に活用した試験湛水を行った。本稿では、阿蘇立野ダムの試験湛水における先進的な取り組みについて報告する。

キーワード 阿蘇立野ダム, 試験湛水, BIM/CIM, 自動計測, 流水型ダム

1. 阿蘇立野ダムの概要

阿蘇立野ダムは、熊本県の中央を流れる白川沿川の洪水被害の防止・軽減を目的とした洪水調節専用（流水型）ダムである（図－1）。流水型ダムとは平常時に水を貯めず、河川の流れを維持し、洪水時のみに一時的に水を貯留するダムであり、一般的な貯留型ダムと比較し環境への負荷は小さいと考えられている（写真－1）。

一方、ダム建設地は多くの観光客が訪れる観光地阿蘇の玄関口に位置し、周辺には、「阿蘇くじゅう国立公園」や国の天然記念物に指定されている「阿蘇北向谷原始林」が位置するなど豊かな自然環境が存在する。また、立野峡谷は阿蘇ユネスコジオパークにおけるジオサイトの一つにも認定されている。このことから環境や景観への配慮が重要であった。



図－1 阿蘇立野ダム流域図



写真－1 ダム上流側から下流側を望む(平常時)

2. 阿蘇立野ダムの試験湛水における課題

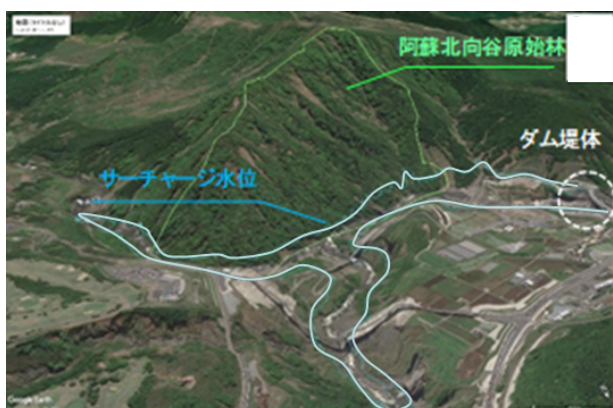
ダムは大規模な土木構造物であり、その安全性が社会に及ぼす影響は極めて大きい。よって、入念な地質調査、設計、施工を行うことは当然であるが、ダム運用、管理に移行する前には、試験湛水を実施して安全性を確認する必要がある。しかし、阿蘇立野ダムが試験湛水を行うにあたっていくつかの課題があった。

1つ目の課題は、実運用時と比較し、試験湛水時の貯水位変動が非常に遅くなってしまいう点である。ダム地点における洪水の継続時間は短く、かつ、自然調節であるため実運用時の水位の上昇・下降は1日程度の事象であ

る。これに対し一般的な手法による試験湛水（水位下降速度1m/日以下）の場合、70日程度時間を要することとなり実運用時の水位変動と乖離した条件での試験湛水となってしまう、ダム堤体、基礎地盤、貯水池周辺地山の確実な安全性の確認に対して懸念があった。

2つ目の課題は、国の天然記念物である「阿蘇北向谷原始林」を始めとした自然環境へ与える影響である。試験湛水を実施することで「阿蘇北向谷原始林」全体の植生のうち4%程度が冠水することとなり衰退や枯死する可能性があった（図－2）。実運用時は水位変動が1日程度の事象であるため自然環境へ与える影響は小さいが、試験湛水時は貯水期間が長くなるため実運用時と比べ自然環境への負荷が大きくなってしまう。

阿蘇立野ダムでは、これらの課題への対応が試験湛水を行う上で必要となった。



図－2 阿蘇北向谷原始林の冠水範囲

3. 阿蘇立野ダムの試験湛水計画

阿蘇立野ダムの抱える課題を考慮し、表－1に示す2つの基本方針をもとに試験湛水計画を立案することとした。

【阿蘇立野ダムにおける試験湛水の基本方針】

ダム・基礎地盤及び貯水池周辺地山の安全性を確実に確認する ダム、基礎地盤及び貯水池周辺地山の安全性を確実に確認するために、<u>実運用に近い水位下降速度による試験湛水計画とすることで安全性を確実に確認する。</u>なお、貯水位の上昇・下降範囲やサーチャージ水位における保持時間などは、「試験湛水実施要領（案）」に準じた方法を前提として、水位下降速度を速めることに対して、計器観測の充実を図りつつ、必要な計測体制を確保する。
自然環境（阿蘇北向谷原始林）への影響を極力低減させる 自然環境（阿蘇北向谷原始林）への影響を極力低減させるため試験湛水期間を<u>できる限り短くするものとし、</u>水位下降速度を、下流河川へ影響が無い範囲内で可能な限り速くし、試験湛水の長期化を回避する。

表－1 阿蘇立野ダムにおける試験湛水の基本方針

試験湛水計画の立案にあたっては、構造面、環境面の技術的な確認・評価を行うため、有識者で構成される『立野ダム試験湛水検討委員会（以下、委員会とす

る。）』を設立し、試験湛水の方法、結果について公開の場で計4回にわたって審議いただいた。

（1）実運用時との水位変動の乖離への対応

試験湛水を実施するにあたり遵守しなければならない事項が『試験湛水実施要領（案）（以下、要領とする。）』に定められている。要領では、貯水位の下降速度は観測・監視体制への負担軽減のため、一般的には1m/日を原則とされている（表－2）。しかし、貯水池周辺地山の安全確認のために必要がある場合には、万全の監視体制のもと適切な下降速度により水位下降を行い、その挙動を把握して安全性の評価を行うことが望ましいとされている。よって、貯水位変動時の監視体制の検討を行い、1m/日を超える下降速度で水位を下降させることで試験湛水期間をできる限り短くすることとした。水位下降速度はダム下流河川の安全を確保しつつ実施できる放流量（試験湛水時のみに使用する水位低下放流ゲートの最大貯水時の放流量：約64m³/s）による決まる速度とした。（写真－2）。1m/日を超える水位下降速度とすることで70日程度かかる試験湛水期間が20日程度となるシミュレーション結果を得られた（表－3、4）。試験湛水期間を20日程度とすることで実運用時の水位変動速度に近づけるとともに、阿蘇北向谷原始林の冠水日数を減らすことで環境負荷の軽減を行うことができる。しかし、水位下降速度を速めることによっていくつかの課題が生じた。

3.4 貯水位の下降速度

試験湛水中の貯水位の下降速度は、洪水処理後の水位低下等の止むを得ない場合を除き、1m/日以下とする。
ただし、必要があると認められる場合には、一定期間の範囲内でこれを超える速度で計画的に降下させるものとする。

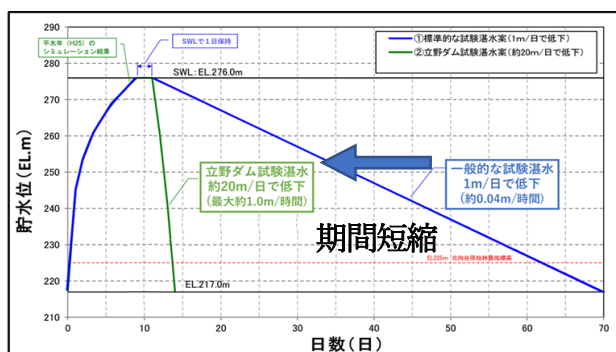
【解説】

非洪水期の貯水位の下降は、速度、実施時期などが制御可能な状態で実施できるほか、水位上昇時や水位保持時の観測・監視の結果を反映させた計画とすることができる。そのため、試験湛水中の観測・監視体制への負担を軽減するため、一般的には1m/日以下で水位降下を行っている。
しかしながら、実運用中に生じる可能性のある地すべり等貯水池周辺地山等の安全性を確認することが必要な場合には、適正な計画及び万全の監視体制のもと、必要な貯水位の範囲において、適切な下降速度により水位降下を行い、その挙動を把握して安全性の評価を行うことが望ましい。

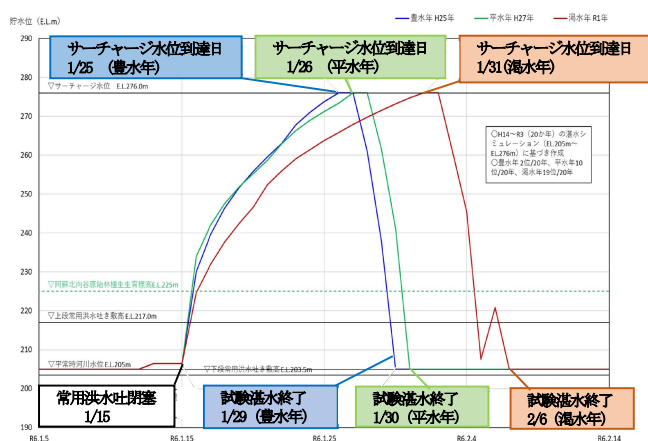
表－2 （試験湛水実施要領（案）抜粋）



写真－2 水位低下放流設備



表ー3 一般的な手法の試験湛水と立野ダムの試験湛水を比較したシミュレーション結果



表ー4 豊水年、平水年、渇水年毎の試験湛水シミュレーション結果

a) 水位下降速度を速めることによる課題

通常のダムでは、1m/日の速度で水位を下降させるため貯水位の変動が緩やかである。よって、ダム堤体や周辺地山に異常が起きていないかを巡視及びデータを蓄積するためのダム堤体内や周辺地山等に設置している計測機器のデータ計測頻度が1回/日となっている。

しかし、阿蘇立野ダムは20m/日以上で速度で下降させるため、1回/日の計測機器のデータ計測では、異常察知が遅れる可能性や蓄積データが不足してしまうといった課題が生じた。そのため、異常察知の遅れ防止及びデータが不足しないような取組を行う必要が生じた。

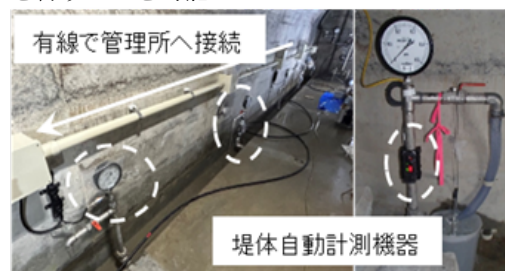
b) 対策① 他ダム同等の計測頻度確保(計測の全自動化)

異常察知が遅れる可能性及びデータ不足への対策として、計測頻度を1回/時間とすることで1回/日で下降する一般的な試験湛水と同等のデータを確保することとした。しかし、阿蘇立野ダムは計測機器を313個設置する計画としており、1回/時間の計測となると計測回数が膨大となり、従来どおりの手動計測では対応が不可能である。

そこで、阿蘇立野ダムでは、従来手動計測で行っていた基礎排水量、継目排水量、揚圧力を含む全計測機器の自動化及びデータの同期化を国内で初めて行った(写真ー3)。

計測機器の自動化を図り、かつ、計測データをリアル

タイムで管理所へ送信することで、計測機器の箇所まで行きデータを回収する必要がなくなり、1回/時間の計測を行うことを可能とした。



写真ー3 自動計測状況

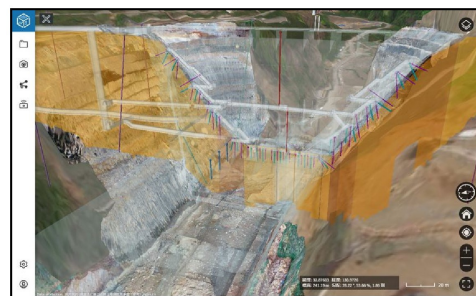
c) 対策② 試験湛水C I Mの構築

自動計測によって送られてくる膨大なデータを適切に管理、監視するために試験湛水C I Mの構築を行った。試験湛水C I Mの機能としてダム堤体や監査廊、堤体内の計測機器の位置、貯水池周辺地山の計測位置を3次元モデルで見える化を行った。試験湛水中は事務官や若手職員などのダム管理初心者も当番として、データの監視や巡視を行うこととなる。しかし、阿蘇立野ダムの監査廊は複雑で、かつ、計器の設置も横断方向だけではなく、上下流方向にも設置されているため、2次元断面図だけでは理解しづらい。C I Mを活用することで事務官や若手職員などのダム管理初心者でも各機器、設備の位置の確認が容易となった(図ー3)。

また、自動計測によって計測されたデータをシステムに自動で収集・蓄積するプログラムを作成することでデータを入力する手間が省けるうえ、誤入力の可能性もなくなった(図ー4)。

さらに、異常値が計測された場合、該当する計測器の色を変更する機能や設定した閾値を上回る値を計測した際には、あらかじめ設定したアカウントにメールを送信する機能を搭載することで異常察知の遅れ防止や確認漏れを防止することができ、データ管理の省力化及び高度化に繋がった(図ー5)。

試験湛水C I Mは、クラウドを基盤としたシステム環境で構築したことで、従来のように操作室等の限られた場所での確認ができなかった計測値等の情報をスマートフォンやタブレットがあれば、どこにいても、リアルタイムで確認が行える環境となり業務の高度化・効率化を可能とした(写真ー4)。



図ー3 B I M/C I Mモデルで計測機器を見える化

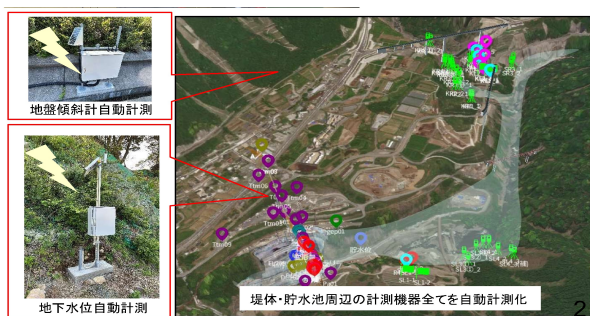


図-4 計測データ自動収集・蓄積

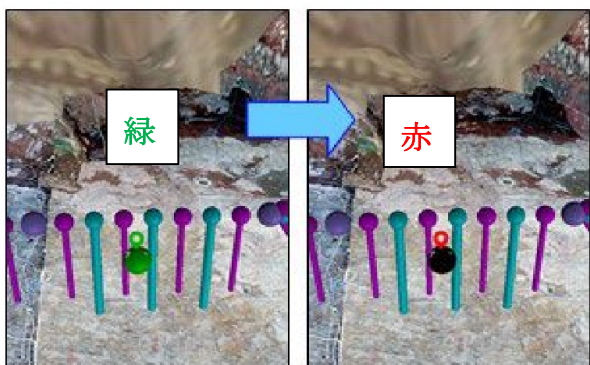


図-5 異常値計測時のモデル



写真-4 試験湛水C I Mによるリアルタイムデータ監視

のモニタリング調査（概況把握調査）に加えて、毎木調査を追加で行うこととした。

さらに、阿蘇立野ダムは流水型ダムであり、出水で貯留するたびに環境調査を行うとかなりの労力がかかるため、従来の調査方法である毎木調査に変わる新技術の試行を行うこととした。内容としては、現地で樹木を目視して活力度を評価する従来の毎木調査結果とドローン撮影にて樹木の活性度評価するNDV I 調査の関係性を解析し、NDV I 調査のみで冠水による影響評価を行えないかを検討するものである。NDV I 調査のみでの影響評価が可能となれば大幅な省力化や効率化に繋げることができる。

a) 毎木調査

毎木調査とは、調査対象となる樹木の樹種、樹高、活力度、位置等を現地で1本毎観察し、記録していく調査である(写真-5)。阿蘇立野ダムでは阿蘇北向谷原始林内外の樹高1 m以上の総計1,600本以上を対象に実施することとした。この調査を試験湛水前の2022年10月から年4回実施し、阿蘇北向谷原始林の環境変化のデータを事前に蓄積した。蓄積したデータと試験湛水後のデータを比較することで試験湛水による影響を把握することとした。



写真-5 毎木調査実施状況

(2) 自然環境（阿蘇北向谷原始林）への対応

水位下降速度を速め、試験湛水期間を短縮することは実運用時に近い貯水位変動速度とするだけではなく、自然環境（阿蘇北向谷原始林）への影響を減少させることにも繋がることとなる。さらに、阿蘇北向谷原始林EL. 225m以上の湛水日数が異常渇水等により25日を超過することが懸念される場合は試験湛水を中断するという中断基準を設定し、中断した場合は、それまでに取得した計測でデータや記録、阿蘇北向谷原始林のモニタリング調査結果等を整理し、総合的に判断したうえで再開の手順について検討することとした。中断基準を25日超過としたのは過去の事例で26日を超過すると半数以上の樹林が衰退、枯死していると考えられるからである。

また、試験湛水による阿蘇北向谷原始林への環境変化を詳細かつ適切に把握するため、一般的な試験湛水前後

b) NDV I 調査

急峻な地形である阿蘇北向谷原始林とその周辺地域において、現地への立ち入りが困難な箇所については、広域かつ高頻度のデータを取得するため、マルチスペクトルカメラを搭載したドローンで撮影した画像の解析による植生の活性度調査（NDV I 調査）を実施することとした(図-6)。NDV I 調査と毎木調査は同時期に行い、貯水池斜面全体のNDV I データの取得を行った。

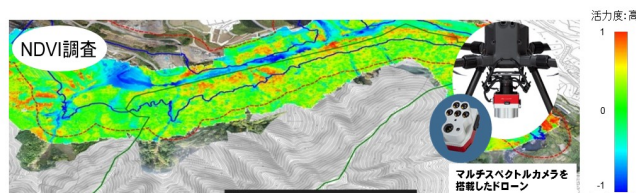


図-6 NDV I 調査

4. 阿蘇立野ダムの試験湛水の状況

2024年1月15日9時より試験湛水に伴う貯留を開始し、2月3日20時40分にはSWL 276mに到達（写真－6）、貯水位を一定の期間保持した後、2月5日10時から貯水位低下を開始し、2月8日12時に元の河川水位となり貯水位下降が完了した（表－5）。

阿蘇北向谷原始林の冠水日数は、最大で約23日間であった。令和5年度の白川は渇水傾向にあり、事前予測と比較し約3日間長い冠水となったが、異常渇水の場合の試験湛水中断基準（25日間以上）を上回ることにはなかった（表－6）。また、一般的な試験湛水（1m/日以下で下降）よりも水位下降速度を速めたことで、冠水期間は、約70日間から約23日間へ約47日間短縮されたと推定している。

また、流水型ダムは網場設備が計画されていないため、試験湛水時は仮設網場を設置し流木や塵芥の捕捉処理を行ったり、降雨による濁水流入により冠水した樹木についてシルト分などを洗い落とし植性への影響を抑えられないか試行するなど特性に配慮した丁寧な試験湛水を進捗した（写真－7）。



写真－6 ダム越流様子

標高範囲	シミュレーション結果(渇水年)	試験湛水実績
EL.270m～EL.276m	6日間	6日間(±0)
EL.260m～EL.270m	11日間	12日間(+1)
EL.250m～EL.260m	14日間	16日間(+2)
EL.240m～EL.250m	17日間	19日間(+2)
EL.230m～EL.240m	19日間	22日間(+3)
EL.225m以上	20日間	23日間(+3)

表－6 標高別冠水日数



写真－7 高圧洗浄機による樹木への散水

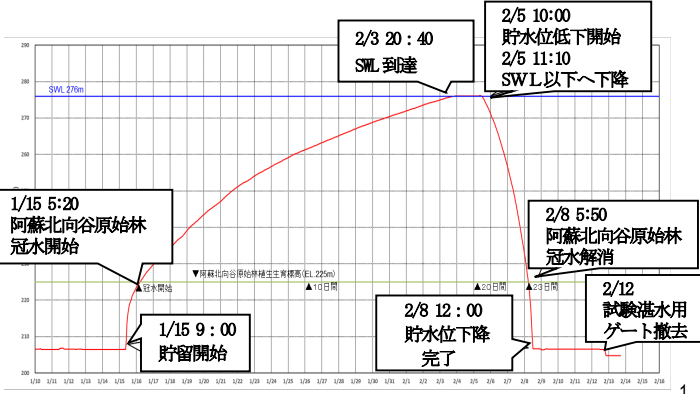
5. 試験湛水の結果

試験湛水中、各計測値と貯水位が線形関係を保てており、ダム堤体及び基礎地盤、貯水池周辺の安全性を確認することができた。自動計測においては、一部自動計測機器の観測値に異常値も確認されたが手動計測を並行して実施することで計測結果を補完し、適切に監視することができた。蓄積データに関しても1回/時間の計測としたことで解析に必要な計測データが不足することはなかった。今回の結果から、今後の環境モニタリングや維持管理の高度化や効率化につながることを確認できた。

試験湛水による阿蘇北向谷原始林への影響について、各影響調査の結果は以下のとおりである。

a) 毎木調査結果

試験湛水前後に行った1,600本以上の毎木調査結果のうち、試験湛水により冠水した範囲で、樹冠まで冠水した408本の調査結果を比較した。阿蘇北向谷原始林における湛水の影響を受ける主な群落である、ムクノキ群落、スダジイ群落に着目して、既存ダムの調査結果を活用し、冠水影響想定を作成した。作成した想定データと試験湛水前後の毎木調査で確認した活力度の維持割合を比較した結果、想定していたよりも活力度が維持されていることが確認できた（表－7）。今後も同様の手法でモニタリングを継続し、試験湛水による影響を観察していく。



表－5 試験湛水水位変動グラフ

第3回委員会にて提示した1月中旬開始ケースの冠水影響想定(スダジイ群落)					
標高範囲	冠水日数 1	阿蘇北向谷原始林 のスダジイ群落面積 (ha) 2	冠水日数に対し 活力度(1,2)が維持 される樹木の割合 3	阿蘇北向谷原始林のスダジイ群落で 活力度(1,2)が維持される面積・割合 面積(ha) 4	維持される割合 5
276m以下		2.02		1.73	85%
276m~270m	6日	0.63	91%	0.57	
270m~260m	11日	0.66	85%	0.56	
260m~250m	14日	0.36	85%	0.31	
250m~240m	17日	0.28	78%	0.22	
240m~230m	19日	0.08	78%	0.07	
230m~220m	20日	0.01	78%	0.01	

試験湛水前後のモニタリング結果			
冠水日数 (実績)	阿蘇北向谷原始林のスダジイ群落で 活力度(1,2)が維持された本数・割合		
	R5秋(R5.11) 試験湛水前	R5冬(R6.2) 試験湛水後	維持された割合
	139	133	96%
6日	17	17	100%
12日	28	28	100%
16日	18	18	100%
19日	36	33	92%
22日	40	37	93%
23日	—	—	—

第3回委員会にて提示した1月中旬開始ケースの冠水影響想定(ムクノキ群落)					
標高範囲	冠水日数 1	阿蘇北向谷原始林 のムクノキ群落面積 (ha) 2	冠水日数に対し 活力度(1,2)が維持 される樹木の割合 3	阿蘇北向谷原始林のムクノキ群落で 活力度(1,2)が維持される面積・割合 面積(ha) 4	維持される割合 5
276m以下		1.74		1.51	86%
276m~270m	6日	0.19	92%	0.18	
270m~260m	11日	0.42	90%	0.38	
260m~250m	14日	0.25	90%	0.23	
250m~240m	17日	0.11	83%	0.09	
240m~230m	19日	0.06	83%	0.05	
230m~220m	20日	0.70	83%	0.58	

試験湛水前後のモニタリング結果			
冠水日数 (実績)	阿蘇北向谷原始林のムクノキ群落で 活力度(1,2)が維持された本数・割合		
	R5秋(R5.11) 試験湛水前	R5冬(R6.2) 試験湛水後	維持された割合
	99	93	94%
6日	18	18	100%
12日	81	75	93%
16日	—	—	—
19日	—	—	—
22日	—	—	—
23日	—	—	—

表-7 活力度の維持割合比較表

b) NDVI 調査結果

試験湛水完了直後のNDVI 調査結果と前年同季の結果を比較したところ、試験湛水によって冠水した範囲はNDVI 値が低下していた。今回の結果から、冠水した範囲が一定程度植生の活性度が低下した可能性を示している(図-7)。ただし、NDVI 値は植物表面の分光反射より算出するため、試験湛水後は地表の水分や葉の表面のシルトの付着などがデータに影響を与えている可能性があるため、今後も、試験湛水前の同季節との比較を行うことで植生の活性度についてモニタリングしていく。なお、降雨により樹木表面のシルト分が流された3週間後に同様な調査を実施したところNDVI 値は回復傾向にあった。

今回の調査においては、抜本的な調査手法の変更に つながる結果は得られなかったが、調査の高度化、省人化を図る糸口を見出すことができた。今後、季節別や樹種別等用途に応じた対応等について検討を行っていく。

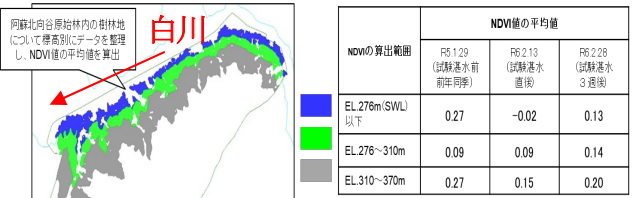


図-7 NDVI 調査による試験湛水前後のNDVI 値の変動

6. ダム完成式

試験湛水を終えた阿蘇立野ダムは2024年2月17日にダム完成式典を開催した。建設事業着手から41年の年月を経て阿蘇立野ダムは完成を迎えることができた。完成式には事業促進にご尽力いただいた多くの方へ出席いただいた。

また、完成式にあわせて「阿蘇立野ダム」という新名称を発表し、出席者全員によるダム式万歳で式を締めくくった(写真-8)。



写真-8 ダム式万歳

7. 最後に

流水型ダムである特徴と貯水池周辺の豊かな自然環境といった様々な条件がある中でデジタル技術の積極的な活用、試験湛水検討委員会や流域自治体、利水者、下流河川利用者、環境省・文化庁などの関連機関を始めとした多くの方のご協力の下、無事試験湛水を終え、管理へ移行することができた。

今回、阿蘇立野ダムの試験湛水で行った計測機器の自動化や管理CIMの構築は維持管理の高度化や省力化を行えることから、人手不足を解決する上で有効な手段となるため、今後のダム事業において阿蘇立野ダムにて得たデータや経験が活かされることを願う。完成に至るまで携わっていただいた多くの方に感謝を申し上げますとともに、みなさまの期待に添えるよう今後も維持管理及びモニタリングを丁寧実施していく。

踏切道における誘導表示等の 設置方法及び構造に関する実験

久保田 小百合¹ 池原 圭一¹ 池田 武司²

¹国土技術政策総合研究所 道路交通研究部 道路交通安全研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

²国土技術政策総合研究所 道路交通研究部（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

2024年4月に奈良県大和郡山市の踏切道において、自らが踏切内にいると認識できずに視覚障害者が列車と接触したとみられる事故が発生した。これを受け、踏切道での視覚障害者のための踏切手前部及び踏切内の誘導表示等の具体的な設置方法及び構造を検討するため、視覚障害者等を対象とした評価試験を実施した。評価試験の結果、踏切手前部は、50cm程度の隙間を設けた場合の評価が高く、特にこの隙間をゴムチップとした場合の評価が高かった。踏切内は、「エスコートゾーンの両端を切り取り、その両側に隙間を設けて1/4サイズの線状ブロックを付けた構造」及び「1/2サイズの線状ブロック」の評価が高かった。

キーワード 踏切道、視覚障害者、誘導表示、ガイドライン改定、屋外実験

1. はじめに

踏切道における視覚障害者の事故を受けて、2022年6月に、高齢者や障害者等をはじめとした全ての人が利用しやすいユニバーサルデザインによる道路空間のあり方の目安を示した「道路の移動等円滑化に関するガイドライン（国土交通省道路局）（以下「ガイドライン」という。）」が改定された。改定では、踏切道の視覚障害者の誘導のため、踏切手前部での視覚障害者誘導用ブロックの設置を標準的な整備内容とすること、視覚障害者が踏切の外にいと誤認することを回避するため、踏切内への「表面に凹凸のついた誘導表示等（以下「誘導表示等」という。）」の設置を望ましい整備内容とすることが規定された。しかしながら、誘導表示等の具体的な設置方法や構造は示されておらず、国土交通省の『道路空間のユニバーサルデザインを考える懇談会（以下「懇談会」という。）』において、踏切道におけるバリアフリー対策について議論された¹⁾。懇談会では、踏切道の視覚障害者誘導対策などの課題を検討するため、『踏切道等における視覚障害者誘導対策ワーキング・グループ（以下「WG」という。）』が設置され、誘導表示等の設置方法や構造について検討されることとなった²⁾。

国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）では、WGにおける検討に資するため、踏切手前部及び踏切内の誘導表示等の設置方法や構造を提示することを目的として、視覚障害者等による評価実験を実施したので、この結果を紹介する。

2. 評価実験の観点と手順

WGでは、踏切事故防止に向けた課題（＝踏切事故の原因）として、①踏切の存在を認識できない（認識性）、②踏切の中にいることを識別できない（識別性）、③線路側・車道側に逸脱するおそれがある（直進性）、④閉じ込められた場合の対処方法が分からないことが挙げられ、このうち①～③が誘導表示等による対策の検討課題とされた。踏切事故の対策に求められる誘導表示等の設置方法及び構造を検討するにあたり、国総研では、表-1に示す評価実験の観点を踏まえて、図-1に示す手順で視覚障害者等による評価実験を実施した。

表-1 評価実験の観点

	踏切事故対策に求められる機能	対策案
①	踏切に入ったこと／出たことを認識できる	踏切手前部の誘導表示等 踏切内の誘導表示等
②	踏切の中にいることを識別できる（横断歩道／歩道との識別）	
③	線路・車道に逸脱せずに踏切を通行できる	
④	踏切道内に取り残された場合に正しく対処できる	視覚障害者の対処方法の周知

予備実験	踏切手前部と踏切内の誘導表示等の通行体験 [対象：視覚障害者，場所：国総研]
↓ 本実験での実験パターンを選出	
本実験	踏切手前部と踏切内の誘導表示等の組み合わせの通行体験 [対象：視覚障害者及び車椅子使用者，場所：実際の踏切を模した施設]
↓ 課題等を把握	
最終確認	・本実験で把握した課題等に対応 ・踏切手前部と踏切内の誘導表示等の組み合わせの通行体験し，設置上の留意事項等を整理 [対象：視覚障害者及び車椅子使用者，場所：実際の踏切を模した施設]

図-1 評価実験の手順

なお、誘導表示等の凹凸は車椅子使用者やベビーカーなどにとっては通行の障害となる場合があると想定された。本実験及び最終確認では、車椅子使用者に意見を確認することとした。

3. 予備実験

予備実験では、本実験で評価する誘導表示等のパターンを選定するため、踏切手前部の誘導表示等4パターンと踏切内の誘導表示等5パターンそれぞれについて、屋外において、視覚障害者の通行体験による評価を実施した。

(1) 予備実験の概要及び方法

予備実験の概要及び方法を以下に示す。

【予備実験の概要】

実験日：2023年9月21日

実験場所：国土交通省 国土技術政策総合研究所敷地内
(茨城県つくば市)

実験参加者：視覚障害者4名（全盲者2名，弱視者2名）

実験パターン：踏切手前部の誘導表示等 4パターン
踏切内の誘導表示等 5パターン

【予備実験の方法】

- ・実験参加者に実験パターンの構造等を説明後に、「踏切手前部の誘導表示等」と「踏切内の誘導表示等」それぞれの通行体験により、評価実験の観点（認識性、識別性、直進性）に関する評価※や順位付け、コメントを聞き取った。
- ・誘導表示等の上に（視覚障害者ではない）立ち止まる人がいる状況を再現し、実験参加者が踏切内を通行途中で誘導表示等を見失い探索する状況の評価を求めた。[直進性]

※主な評価項目

①認識性

進入の確信度，退出の確信度

②識別性

踏切と横断歩道，踏切と歩道との違いの分かりやすさ，遮断かん作動時に踏切内又は踏切外にいることの判断のしやすさ

③直進性

通行しやすさ，誘導表示等の見つけやすさ，回避行動後の誘導表示等の再発見のしやすさ

(2) 予備実験のパターン

視覚障害者の踏切での事故後に国道事務所等が個別に検討して実施した対策及びWG委員の意見を基に、図-2及び図-3に示すパターンを設定した。

(3) 予備実験の結果

a) 踏切手前部の誘導表示等

認識性、識別性、直進性の観点で全体的に評価が最も高かったパターンは、④ゴムチップであった（順位付けでは、4人中4人が1位と評価した）。比較対象であるパターン①隙間なしと②隙間ありの認識性の評価は、50cmの隙間を有する②が高く、隙間のない①は全盲者の評価が低かった。このことから、視覚障害者は踏切に入ったこと／出たことを50cmの隙間により認識していることが窺えた。パターン②線状突起なしと③線状突起ありは、同程度の評価であったものの、③の線状突起を認知して評価した実験参加者は少なかった。

b) 踏切内の誘導表示等

認識性、識別性、直進性の観点で評価が高かったパターンは、パターン⑥線状突起＋隙間＋エスコートゾーンと同様の構造であった。パターン⑦2本の線状突起と⑧1本の線状突起を比較すると、⑧は全体的に弱視者の評価が低い傾向にあった。パターン⑨かまぼこ形の誘導物は白杖の空振りが多く、直進性の観点で特に評価者によるばらつき（評価の高低）が大きかった。なお、横断歩道と同様の構造の比較対象であるパターン⑤は、視覚障害者の評価は悪くなかったものの、横断歩道との混同のおそれがあった。

(4) 本実験パターンの選出

予備実験の結果を基に、実験参加者及びWGにより、踏切手前部は②の1パターン，踏切内は⑥，⑦，⑨，比較用として横断歩道と同じ構造の⑤の4パターンを、本実験のパターンとして選出した。なお、踏切手前部④ゴムチップは十分な効果が認められたため、改めて本実験で評価する必要はないと判断した。

踏切手前部			
①			隙間なし
②			隙間あり
③			50cmの隙間 + 点状ブロック に横方向の線状突起あり
④			50cmの隙間に ゴムチップシート

凡例

- 線状ブロック
視覚障害者に、主に誘導対象施設等の方向を案内する場合に用いるもの
- 点状ブロック
視覚障害者に、主に注意すべき位置や誘導対象施設等の位置を案内する場合に用いるもの
- エスコートゾーン
横断歩道上に設置され、視覚障害者が横断時に横断方向の手がかりとする突起体の列
- 遮断かん位置の想定（遮断かんは予備実験では設置しない）

図-2 予備実験のパターン：踏切手前部

踏切内の構造			
⑤			エスコートゾーン ＝横断歩道と 同様の構造
⑥			エスコートゾーン + 隙間 + 1本の線状突起
⑦			2本の 線状突起 (線状ブロック1/2)
⑧			1本の 線状突起 (線状ブロック1/4)
⑨			線路側(道路端)に かまぼこ型の誘導物(台形の突起)

凡例

- 線状ブロック
視覚障害者に、主に誘導対象施設等の方向を案内する場合に用いるもの
- 点状ブロック
視覚障害者に、主に注意すべき位置や誘導対象施設等の位置を案内する場合に用いるもの
- エスコートゾーン
横断歩道上に設置され、視覚障害者が横断時に横断方向の手がかりとする突起体の列
- 遮断かん位置の想定（遮断かんは予備実験では設置しない）

図-3 予備実験のパターン：踏切内

4. 本実験

本実験では、予備実験で選出した踏切手前部1パターンと踏切内4パターンの組み合わせについて、踏切を模した環境において、視覚障害者の通行体験による評価及び計測、車椅子使用者の通行体験による意見の確認を実施した。

(1) 本実験の概要及び方法

本実験の概要及び方法を以下に示す。

【本実験の概要】

実験場所：東鉄工業株式会社 東鉄総合研修センター
(茨城県つくばみらい市)

実験日：2023年10月3～5日

実験参加者：視覚障害者9名（全盲者9名）

うち、盲導犬使用者1名

車椅子使用者3名

（手動1名、簡易電動1名、電動1名）

実験パターン：踏切手前部と踏切内の誘導表示等の組み合わせ4パターン

【本実験の方法】

- ・実験参加者に実験パターンの構造等を説明後に、「踏切手前部の誘導表示等」と「踏切内の誘導表示等」の一連の通行体験により、評価の観点〔認識性、識別性、直進性〕に関する評価（予備実験の方法に同じ）や順位付け、コメントを聞き取った。
- ・誘導表示等の上に（視覚障害者ではない）立ち止まる人がいる状況を再現し、実験参加者が踏切内を通行途中で誘導表示等を見失い探索する状況の評価を求めた。（視覚障害者のみ）〔直進線〕
- ・踏切内外に実験参加者がいる時に、予告なしに警報器と遮断かんが作動した際の状況の評価を求めた。（視覚障害者のみ）〔識別性〕

(2) 本実験のパターン

予備実験で選出した踏切手前部1パターンと踏切内4パターンの組み合わせを図4に示す。

(3) 本実験の結果

a) 視覚障害者の評価

視覚障害者による順位付け結果を図5に示す。パターン①は、特に直進性（通行のしやすさ）において評価の

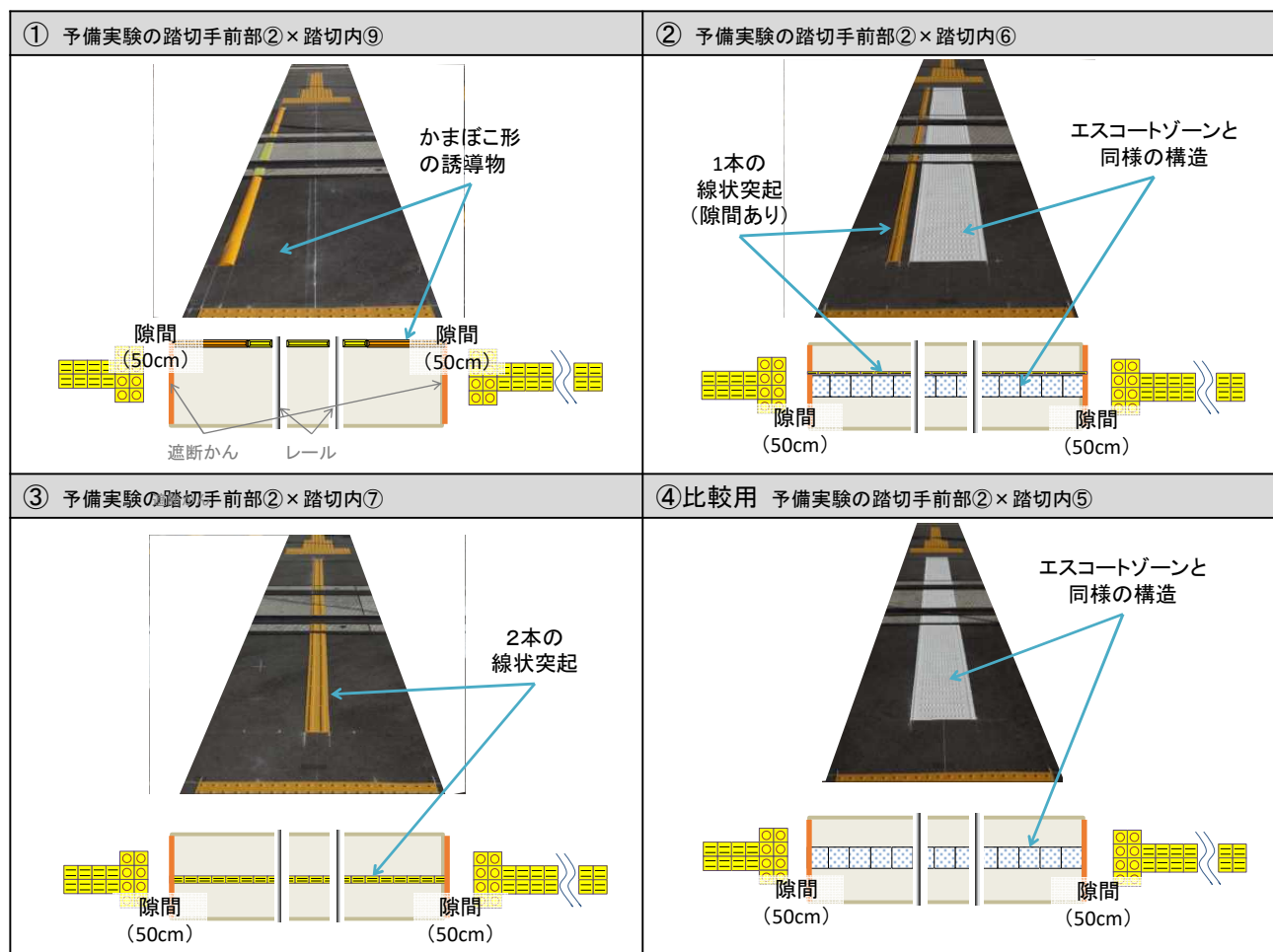


図4 本実験のパターン

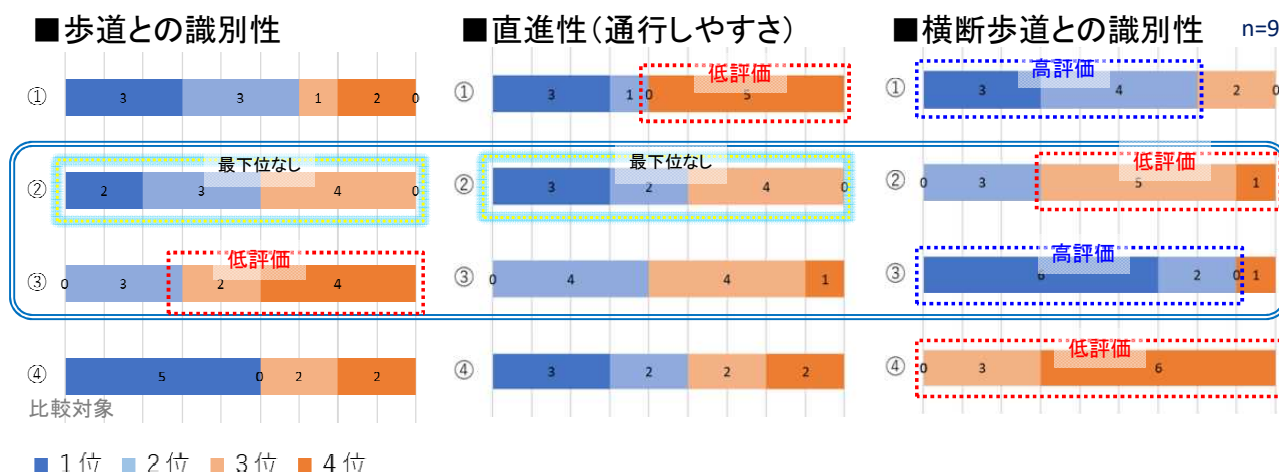


図-5 本実験の結果（視覚障害者による順位付け）

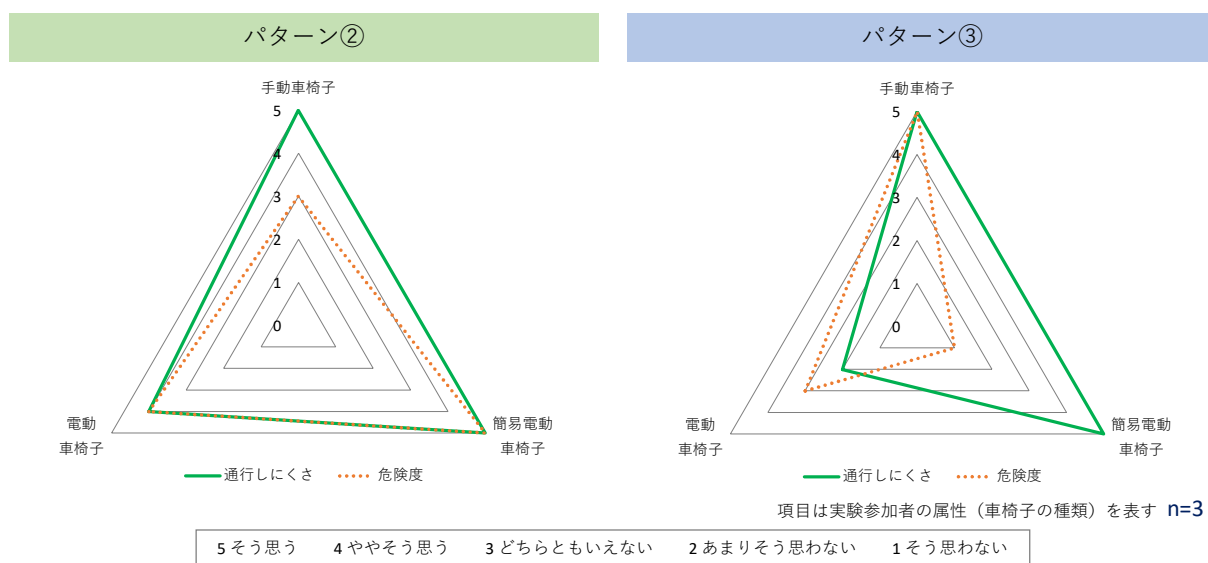


図-6 視覚障害者の評価が高かったパターンの車椅子使用者の評価

ばらつきが大きかった。最終確認の実験参加者の一部からは、かまぼこ形の誘導物はその先が危険であることが明確に分かって良いとの意見があった。一方で、実験において実験参加者の通行状況を確認すると、白杖ではなく、足でかまぼこ形の誘導物を捉えている参加者が多く、線路側に踏み外しそうになっている参加者もいたため、危険性があることが窺えた。なお、横断歩道との識別性においては高評価であった。

パターン②の順位付けでは、歩道との識別性及び直進性において最下位はなく、横断歩道との識別性はやや低評価であった。線状突起の位置については、線路側、車道側、両側のどの位置が良いか意見が分かれていた。

パターン③の順位付けでは、横断歩道との識別性は高評価であり、歩道との識別性は低評価であった。

比較用として設定した横断歩道と同じ構造のパターン④の順位付けは、横断歩道との識別性において低評価であった。

なお、遮断かん作動時の踏切内外の識別性は、全てのパターンにおいて高評価であった。

b) 車椅子使用者の意見等の確認

視覚障害者の評価が高かったパターン②と③の車椅子使用者の評価を図-6に示す。車椅子使用者の評価は全体的に低く、次に示す意見があった。パターン②は「踏切内の誘導表示の上を通行すると振動で足が落ちそうになる、（振動が）体の負担になる」、「振動を抑えるためにゆっくり通行する」との振動に関する指摘があった。パターン③は「2本の線状突起の間にタイヤが載ると線状突起で車輪が取られる」、「脱輪するかもしれないという感覚がある」との危険感に関する指摘があった。

(4) 最終確認のパターンの選定

本実験の結果を基に、視覚障害者の危険性が窺えたパターン①と比較用で想定通り低評価であった④を除いたパターン②と③について、課題等に対する確認を行うこととした。

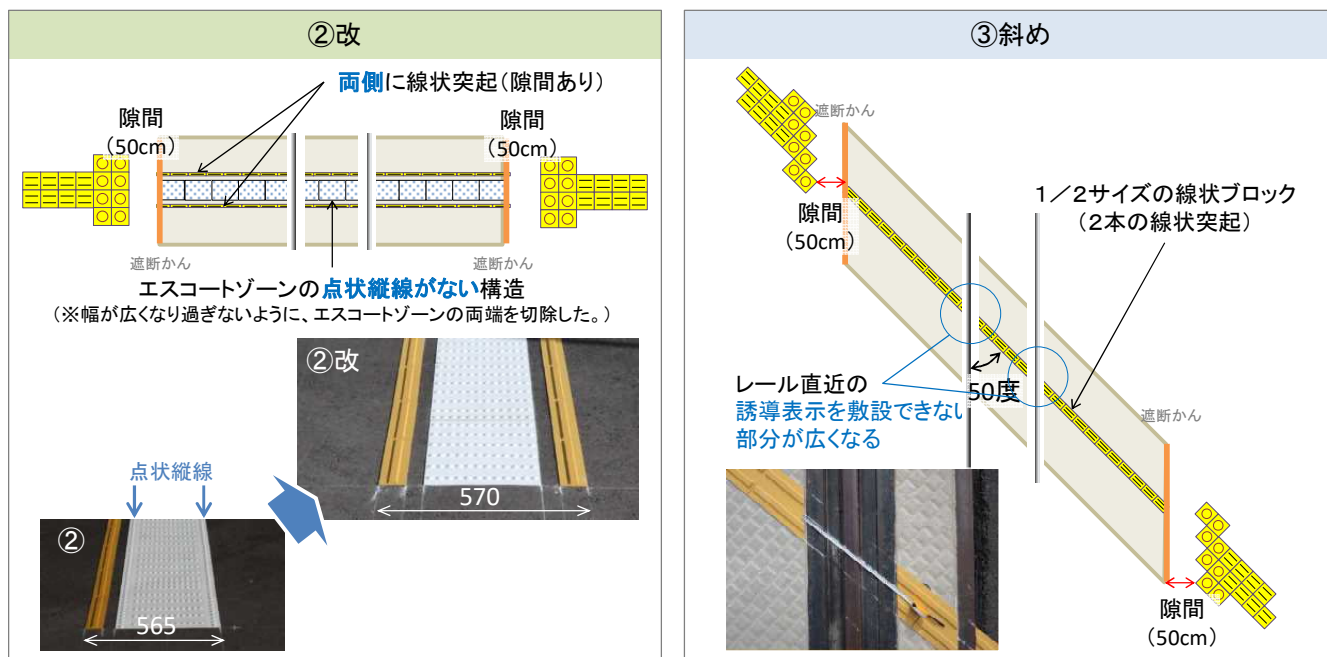


図-7 最終確認のパターン

5. 最終確認

最終確認では、踏切を模した環境において、本実験で選定したパターン②と③について、②は構造に改良を加え、③は踏切に対して斜めに設置して、視覚障害者の通行体験による評価及び計測、車椅子使用者の通行体験による意見の確認を実施した。なお、4(3)の結果を踏まえた最終確認の観点を表-2に示す。

表-2 最終確認における観点

	視覚障害者の評価	車椅子使用者の確認
②改	・線状突起を両側、左側、右側のどの位置に設置するのが良いか	・ゆっくり通行したときの振動による支障
③斜め	・斜めに敷設することによる支障（レール直近に誘導表示を敷設できない部分が広くなることで、幅の狭いパターン③の誘導表示を見失いやすくなるか）	・斜めに敷設することによる支障 ・跨いで通行することの危険度

(1) 最終確認の概要及び方法

最終確認の概要及び方法を以下に示す。

【最終確認の概要】

実験場所：本実験に同じ 実験日：2023年10月12日

実験参加者：視覚障害者6名（全盲者3名、弱視者3名）

車椅子使用者3名（手動2名、簡易電動1名）

実験パターン：踏切手前部と踏切内の誘導表示等の組み合わせ2パターン

【最終確認の方法】

- ・本実験の方法に同じ

(2) 最終確認のパターン

最終確認のパターンを図-7に示す。パターン②は、線状突起を両側に付け、全体の幅が広くなり過ぎないようにエスコートゾーンの両端の点状縦線を切り取った構造（②改）とし、パターン③は構造の変更はせずに、踏切に対して斜めに敷設した（③斜め）。

(3) 最終確認の結果

a) パターン②改の評価と意見

パターン②に改良を加えた②改の評価を実施した。視覚障害者の評価は、本実験で実施したパターン②の結果と比較して全体的に評価が高まった（図-8参照）。線状突起をどの位置に設置するかについては、両側が良いとする回答が多かった。

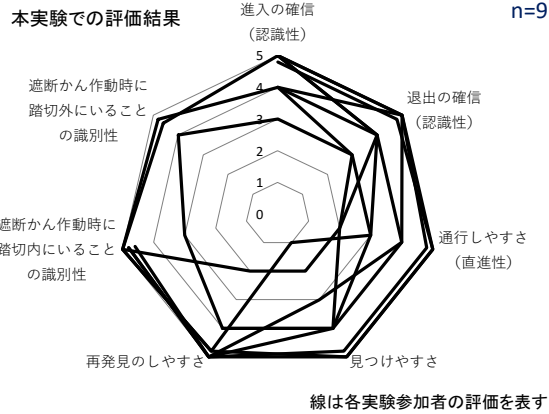
車椅子使用者は、ゆっくり通行することに支障はないものの、ゆっくり通行したときの振動による支障は、3名中2名が「ややそう思う（やや支障がある）」の評価となった（図-9参照）。

b) パターン③斜めの評価と意見

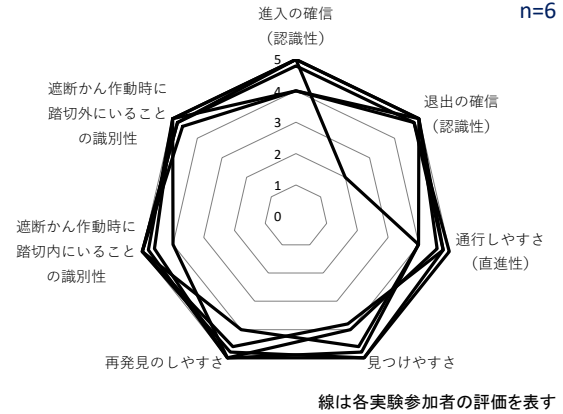
パターン③を踏切に対して斜めに敷設した場合の支障等を確認した。視覚障害者の評価は、2名が低評価であったものの（図-10参照）、その理由は、踏切内の誘導表示等の構造ではなく、踏切手前の点状ブロックと踏切内の誘導表示等との隙間が広くなることで進行する方向を特定（以下「方向定位」という。）しにくいとのことであった。

車椅子使用者は、斜めに敷設することによる通行上の支障は「なし」との意見であった。誘導表示等を跨いで通行したときの危険度は、3名中1名が「ややそう思う（やや危険がある）」の評価であったものの、危険度に関する意見はなかった（図-11参照）。

パターン② 片側（線路側）に線状突起



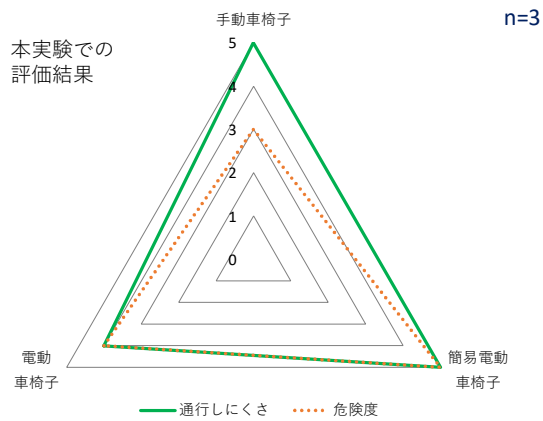
パターン②改 両側に線状突起



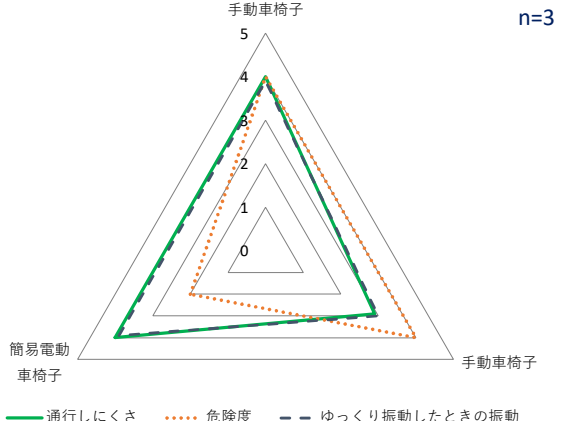
5 そう思う 4 ややそう思う 3 どちらともいえない 2 あまりそう思わない 1 そう思わない

図-8 視覚障害者によるパターン②と②改の評価結果

パターン② 片側（線路側）に線状突起



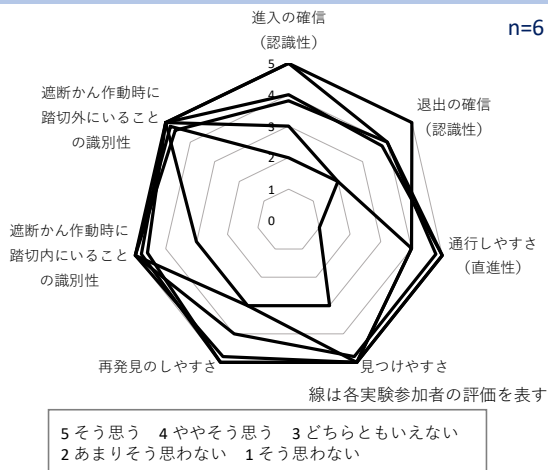
パターン②改 両側に線状突起



5 そう思う 4 ややそう思う 3 どちらともいえない 2 あまりそう思わない 1 そう思わない

図-9 車椅子使用者によるパターン②と②改の評価結果

パターン③ 斜め



踏切手前の点状ブロックと踏切内の誘導表示等との隙間

図-10 視覚障害者によるパターン③斜めの評価結果

パターン③ 斜め

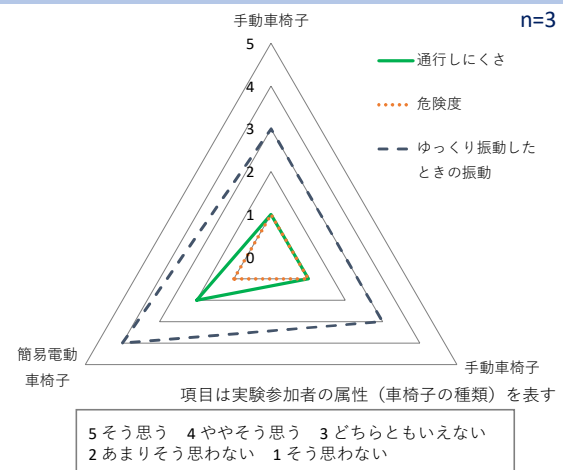
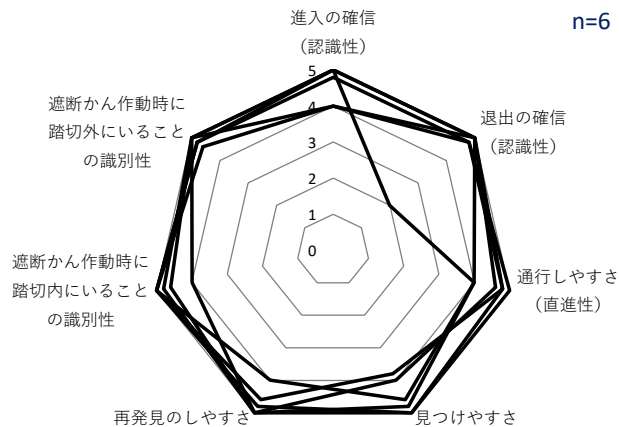


図-11 車椅子使用者によるパターン③斜めの評価結果

パターン②改

【図-8右側の再掲】

手前部:50cm隙間、踏切内:エスコートゾーンの点状縦線がない構造+両側に線状突起

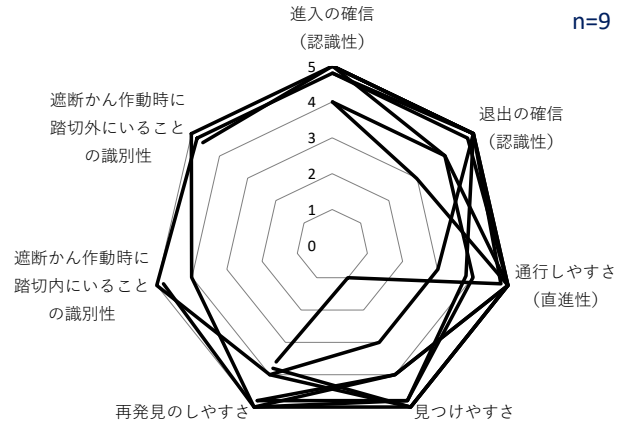


線は各実験参加者の評価を表す

5 そう思う 4 ややそう思う 3 どちらともいえない 2 あまりそう思わない 1 そう思わない

パターン③

手前部:50cmの隙間、踏切内:2本の線状突起



線は各実験参加者の評価を表す

図-12 視覚障害者の評価の高かったパターン②改と③の評価結果

(4) 最終確認のまとめ

視覚障害者の評価の高かったパターンは②改と次いで③であった(図-12)。なお、車椅子使用者にとっては、パターン②改は誘導表示等の上を通行すると振動等の支障があるため、広い歩道での適用が想定され、狭い歩道では、跨いで通行することの危険度は小さいと考えられるパターン③の適用が想定された。

また、最終確認の結果を踏まえた実験参加者及びWG委員の意見を基に、設置にあたっての留意事項を以下のとおりとりまとめた。

- ・視覚障害者のうち特に全盲者は、横断歩道と踏切の識別が難しいため、誘導表示等を設置する場合は、事前の周知が重要である。
- ・道路と斜めに交差する踏切は、垂直に交差する踏切に比べ、踏切道手前部の点状ブロックと踏切内の誘導表示等の隙間が広くなることにより方向定位がし難くなる場合がある。
- ・視覚障害者、車椅子使用者ともに、線路へ逸脱することを恐いと感じるとの意見が多く、誘導表示等の設置と併せて、線路への逸脱を防止する対策を検討する必要がある。

6. まとめ

本成果を踏まえ、国土交通省道路局における懇談会及びWGにおいて議論がなされ、パブリックコメントを経て、2024年1月にガイドライン³⁾が改定された。このうち、「7章 その他の施設等」の「⑥踏切道」に本成果が

反映されており、パターン②改は「歩道等又は自転車歩行者専用道路等の幅員が概ね 2m 以上の場合」、パターン③は「2m 未満の場合」の標準的な設置方法として示されている。また、望ましい整備内容として、踏切手前部50cm程度へのゴムチップ舗装が示されている。

なお、ガイドラインの改定を踏まえ、国土交通省は2024年1月に踏切道改良促進法に基づき特定道路上等のバリアフリー対策などについて、改良すべき踏切道として、新たに全国408箇所の指定を行い、踏切道のバリアフリー化など、地域の実情に応じた対策の促進を図っている。また、各地において設置や設置の検討が進められている。

謝辞：踏切を模した環境での評価実験に際し、施設の貸出し等にご協力いただいた東鉄工業株式会社東鉄総合研修センターの皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 道路空間のユニバーサルデザインを考える懇談会. 令和4年度第1回(令和4年12月2日), 国土交通省. 2024-09-12. <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/universal-design/index.html>, (参照 2024-10-29)
- 2) 踏切道等における視覚障害者誘導対策ワーキング・グループ第1回(令和5年6月26日), 第2回(令和5年8月21日), 第3回(令和5年12月4日). 国土交通省. 2024-09-12. <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/working-group/index.html>, (参照 2024-10-29)
- 3) 国土交通省道路局：道路の移動等円滑化に関するガイドライン, pp.7-45~59, 2024.1

防波堤の気候変動適応策に関する検討

神保 壮平¹

¹国土技術政策総合研究所 港湾・沿岸海洋研究部 港湾施設研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

気候変動による海面上昇や台風の強大化に伴い、将来的な港湾構造物の安定性低下や港湾での浸水被害拡大の可能性が指摘されている。これを受けて、令和6年4月、港湾局では技術基準告示において気象状況及び将来の見通しを勘案した作用を設定する旨を改訂し、港湾施設の気候変動適応策の枠組みとして事前適応策・順応的適応策の2つの方策を提示した。しかし、その具体的な設計方法については十分に検討されていない。本検討では、設計実務での港湾施設に対する気候変動適応策の参考となる資料を作成することを目的とし、モデル港湾における既設防波堤断面を対象として、将来気候における作用の設定方法、防波堤の性能照査及び2つの適応策に基づく試設計を行い、それぞれの特徴を整理した。

キーワード 気候変動，防波堤，事前適応策，順応的適応策

1. はじめに

地球温暖化の進展に伴う平均海面水位の上昇や、台風の強大化による高潮・高波の規模増大により、港湾構造物の安定性低下や港湾地域における浸水被害の拡大の可能性が指摘されている。これを踏まえ、港湾構造物に対して長期的な視点で対策を講じる必要があることから、国土交通省港湾局では、令和5年9月に「港湾における気候変動適応策の実装方針」¹⁾を公表し、将来の作用変化に対し施設の要求性能を確保する方策として、「事前適応策」と「順応的適応策」の2種類の適応策を提示した。さらに、令和6年4月には「港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示」²⁾において、施設の性能確保にあたり、気象の状況及び将来の見通しを勘案した作用を設定する旨の改訂が行われている。

これにより、今後の施設設計や性能照査にて設定する作用は、気候変動に伴う作用の時間変化を適切に考慮する必要がある。しかし、その設計条件に関する具体的な設定方法はこれまでに提示されていない。また、施設に対する要求性能を確保する手法として、上記2種類の適応策が示されているものの、設計実務における適用事例は十分に整理されていない。

このような背景を踏まえ、本検討では、今後の設計実務において参考となるよう、モデルの既設防波堤を対象として、将来気候場における作用の設定方法、防波堤の性能照査及び2つの適応策に基づく試設計を行い、それぞれの特徴を整理する。

2. 気候変動適応策の基本的な考え方

港湾構造物・港湾施設の気候変動適応策を講じる上では、設計供用期間の全ての時点において、要求性能を満足する設計断面を検討する必要がある³⁾。このため、施設設計に際しては、気候変動に伴い作用が時間的に変化することを前提とし、それに応じた対策を検討しなければならない。

一方、気候変動の影響を考慮した作用の将来予測に関しては、将来の温室効果ガスの排出量に応じた温暖化シナリオや、予測モデル毎に異なるバイアス等に起因する不確実性が潜在的に存在する。すなわち、ある特定の予測値を採用した場合、実際の作用がこれを上振れするリスク、あるいは下振れするリスクが存在する。よって、気候変動適応策の実装にあたっては、作用の予測値のばらつきを念頭に置き、上位予測（予測の90%ile値など）や中位予測（予測の平均値など）といった複数の状況を想定したものにする必要がある。

これを踏まえ「港湾における気候変動適応策の実装方針」¹⁾では、港湾施設の気候変動適応策に関する具体的な方策として、事前適応策と順応的適応策の2種類を提示している。図-1は両方策の内容を概念図として示したものである。

事前適応策とは、気候変動の影響に伴い時間的に増加する作用に対し、設計供用期間の全ての時点において要求性能を満足するよう、供用開始時点から予測上十分な設計断面とするものである。この時、実際の作用が予測を下振れした場合、断面諸元が過大となる可能性が存在

し、逆に作用が上振れした場合には、施設の耐力が不足して設計の手戻りが生じることが懸念される。

一方、順応的適応策とは、実際の作用の時間変化を逐次把握しながら、設計供用期間の全ての時点において要求性能を確保できるよう、段階的に対策を講じるものである。なお、その場合においても、設計に使用する部材の特性や構造的特性を勘案し、追加施工が容易にできるよう検討する必要がある。

順応的適応策の一例として、上振れリスクに対応する次の考え方が挙げられる。まず、実際の作用が予測を上振れるリスクに対応できるよう、作用の上位予測に対して要求性能を満足する対策断面（以降、上位対策断面とする）を検討する。一方で、実際の作用が必ずしも上位予測と合致しない可能性や、上位対策断面で設計した場合の下振れリスクを踏まえると、供用開始の段階では中位予測を想定した整備を行うことも考えられる。そのため、中位予測に対して要求性能を満足する対策断面（以降、中位対策断面とする）を次に検討する。中位対策断面の検討では、仮に作用が予測を上振れた場合を想定し、追加施工により上位対策断面への移行が容易にできるよう工夫する必要がある。また、中位対策断面から上位対策断面に移行させるための追加施工のうち、技術上困難であったり工費が高額になる工種に関しては、

供用開始時点から上位対策断面に対応する諸元として整備することが考えられる。

3. 将来気候における作用の設定

(1) 日本における気候変動の影響に関する概要

日本における気候変動による変化については、世界の気候変動に関する知見⁴⁾も踏まえつつ、各事象について日本周辺域における観測事実や将来予測、予測の確信度等が報告されている⁵⁾。この中で、港湾施設の設計において気候変動の影響を受ける作用は、主に天文潮位、沖波波高、潮位偏差の3つであり、本章ではそれぞれの作用の設定方法を提案する。天文潮位については、現在気候の設計潮位に対し、将来的に予測される上昇分を加算することで考慮する。沖波波高及び潮位偏差については、現在気候の設計値に対し、気候変動による作用の時間変化を考慮して算定した将来の変化倍率を乗じることで設定する。この時、現況の設計値を算定した年を定義する必要がある、これを「基準年」と呼ぶこととした。具体的方法を以降の節で述べる。

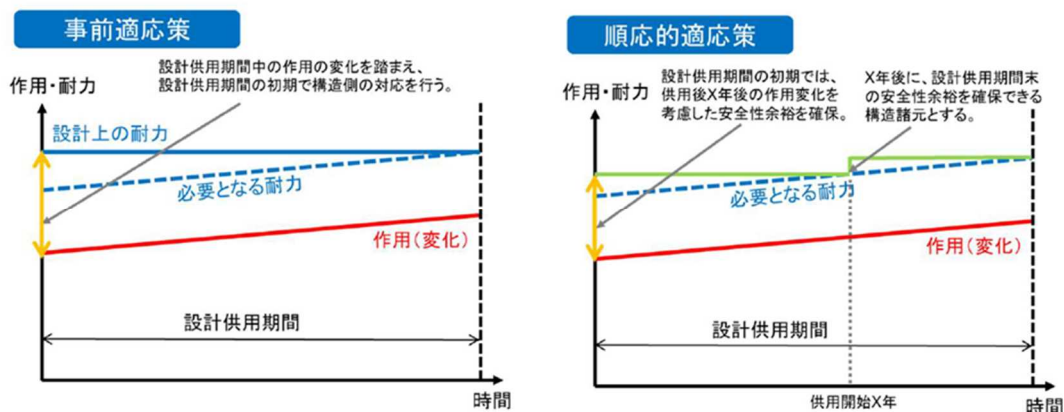


図-1 事前適応策・順応的適応策の概念図

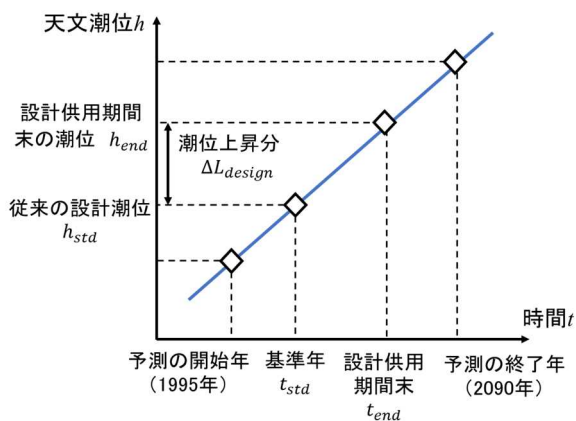


図-2 天文潮位の上昇量の設定方法

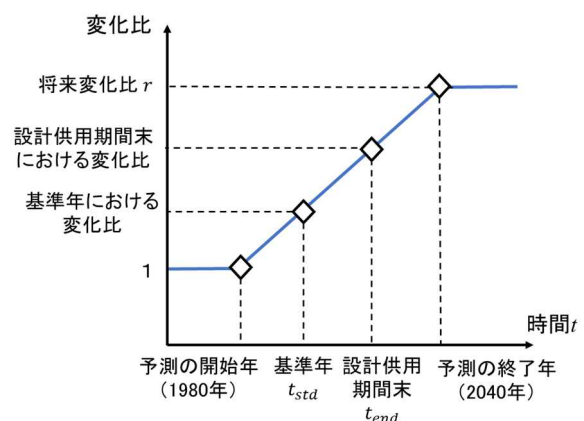


図-3 波高・潮位偏差の将来変化比の設定方法

(2) 天文潮位の設定

日本沿岸の年平均海面水位に関する観測事実を見ると、特に 1980 年以降において顕著な上昇傾向とされている。さらに将来予測としては、 2°C 上昇シナリオにおいて、21 世紀末（2081 年～2100 年平均）には 20 世紀末（1986 年～2005 年平均）と比較して日本沿岸で 0.22 ～ 0.55 m（95 % 信頼区間）程度の上昇幅と推定されており、その確信度は高い⁵⁾。

これを踏まえ、気候変動の影響を考慮した天文潮位の設計値は図-2に示すように設定する。天文潮位の上昇量は、前述の予測期間の中間年を利用して、1995 年から 2090 年までに線形的に ΔL [m] 上昇するものと仮定する。気候変動の影響を考慮した設計供用期間末 t_{end} における天文潮位 h_{end} は、基準年 t_{std} における天文潮位 h_{std} に、設計供用期間末までの平均海面水位の上昇量 ΔL_{design} を加算することで計算する。以上を数式に示すと以下ようになる。

$$h_{end} = h_{std} + \Delta L_{design} \quad (1)$$

$$\Delta L_{design} = \frac{\Delta L}{2090 - 1995} \cdot (t_{end} - t_{std}) \quad (2)$$

(3) 沖波波高及び潮位偏差の設定

沖波波高及び潮位偏差の将来変化は、主に来襲する台風の性質に応じて変化するものである。日本における台風強度の将来変化については、森ら（2021）⁶⁾によると、 2°C 上昇シナリオでは 2015 年から 2040 年頃までの間は台風強度が増加するトレンドであるが、その後は横ばい傾向が続くと予想されている。

この傾向を踏まえ、気候変動の影響を考慮した沖波波高及び潮位偏差の設計値は図-3に示すように設定する。日本周辺における沖波波高または潮位偏差は、前述の予測を踏まえて 1980 年から 2040 年までの間に線形的に r 倍になるとし、1980 年以前及び 2040 年以降は変化しないものと仮定する。気候変動の影響を考慮した設計供用期間末 t_{end} における沖波波高または潮位偏差の設計値 V_{end} は、基準年 t_{std} の設計値 V_{std} をもとに 1980 年時点の値 V_{1980} を推算し、図-3のように算出された設計供用期間末における変化比を乗じることで計算する。以上について、設計供用期間末 t_{end} の時期に配慮して

場合分けすると、以下のような式になる。

$$V_{end} = \begin{cases} V_{1980} & \text{if } t_{end} \leq 1980 \\ \left(1 + \frac{t_{end} - 1980}{2040 - 1980}(r - 1)\right) V_{1980} & \text{if } 1980 \leq t_{end} \leq 2040 \\ rV_{1980} & \text{if } t_{end} \geq 2040 \end{cases} \quad (3)$$

沖波波高及び潮位偏差の将来変化比については、 2°C 上昇シナリオでの将来の沖波波高及び潮位偏差の変化について、将来の 6 つの海面水温（SST）パターンを踏まえて各港湾の値を計算している²⁾。また、将来変化比の平均値に加え、10 %ile～90 %ile 値についても追って公表される予定であり、先行的に 3 大湾（東京湾・伊勢湾・大阪湾）の値については既に公表されている⁷⁾。なお、今回の検討では、国土技術政策総合研究所による内部検討での暫定値を使用した。

4. モデル防波堤に関する性能照査

(1) モデル防波堤の設計条件

本稿では、図-4に示す既存防波堤の断面（以降、モデル断面とする）を気候変動適応策の検討対象とした。モデル断面の構造形式は消波ブロック被覆堤である。

当該施設の設計供用期間は 2023 年から 2073 年までの 50 年間とし、設計供用期間末である 2073 年時点での作用について検討する。作用の設定は、 2°C 上昇シナリオに基づく予測の 90 %ile 値を上位予測、平均値を中位予測の値とし、前章で提示した方法に基づいてそれぞれ設

表-1 現在気候及び将来気候の上位・中位予測での設計値

作用	現在気候	中位予測	上位予測
沖波波高 (波向はSSE)	13.53 m	13.65 m (変化比:1.009)	14.12 m (変化比:1.044)
朔望平均満潮位 (H.W.L.)	D.L.+1.64 m	D.L.+1.903 m (上昇量:0.263m)	D.L.+2.073 m (上昇量:0.433m)
最高潮位 (H.H.W.L.)	D.L.+2.30 m	D.L.+2.632 m (変化比:1.014)	D.L.+2.801 m (変化比:1.049)

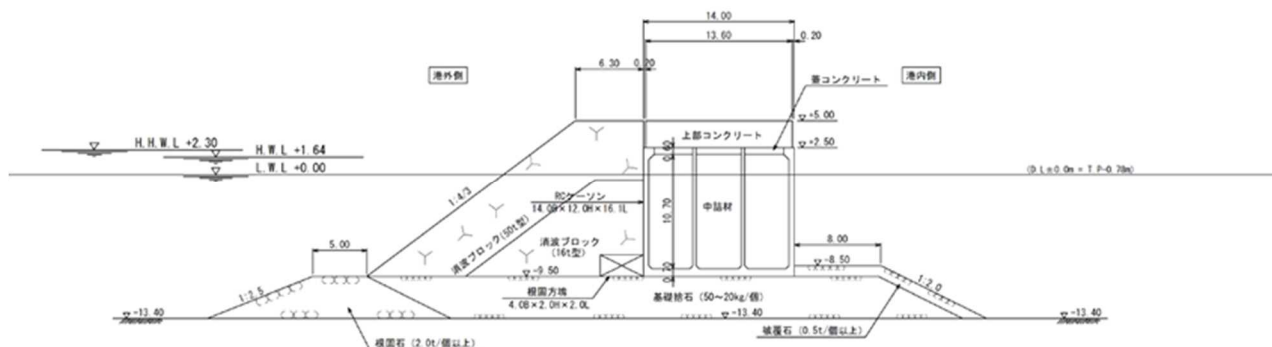


図-4 対象とするモデル防波堤の断面図

定した。設計供用期間末における沖波波高、朔望平均満潮位（H.W.L.），最高潮位（H.H.W.L.）について，現在気候及び将来気候の上位・中位予測の計算結果を表-1に提示する。基準年に関しては，天文潮位の場合は観測期間である 1987 年から 1991 年の中間年として 1989 年，沖波波高の場合は観測期間である 1955 年から 2019 年の中間年として 1987 年，潮位偏差の場合は既往最高潮位が観測された 2019 年として計算した。

(2) 性能照査の結果

前節で示した現在気候及び将来気候の上位・中位予測の 3 つの設計値を使用し，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成 30 年）³⁾に基づいて，モデル断面に関する性能照査を行った。照査項目として，(a) モデル断面における堤体の全体安定性，(b) 港内静穏度を確保するための堤体の天端高，(c) 消波ブロック及び被覆材の安定

性の 3 つに関して照査を行った。それぞれの照査結果を表-2に示す。なお，(a) での被災モードは滑動，転倒，基礎地盤の支持力の結果を示している。いずれの照査項目においても，将来気候の上位・中位予測に加え，現在気候でも同様に要求性能を満たさない項目が存在する結果となった。

5. モデル防波堤の気候変動適応策

(1) 対策断面の検討

前章の現在・将来気候における照査結果を踏まえ，モデル防波堤に対し必要となる対策をそれぞれ検討した。具体的な対策項目として，上部工の嵩上げ・拡幅，消波ブロックの規格変更，被覆材の材料変更，腹付工の設置

表-2 現在気候・将来気候における防波堤の性能照査結果

(a) 堤体の全体安定性

検討項目	現在気候		中位予測		上位予測	
滑動	1.101 > 1.00	NG	1.146 > 1.00	NG	1.18 > 1.00	NG
転倒	0.663 ≤ 1.00	OK	0.695 ≤ 1.00	OK	0.720 ≤ 1.00	OK
基礎地盤の支持力	1.118 > 1.00	NG	1.167 > 1.00	NG	1.206 > 1.00	NG

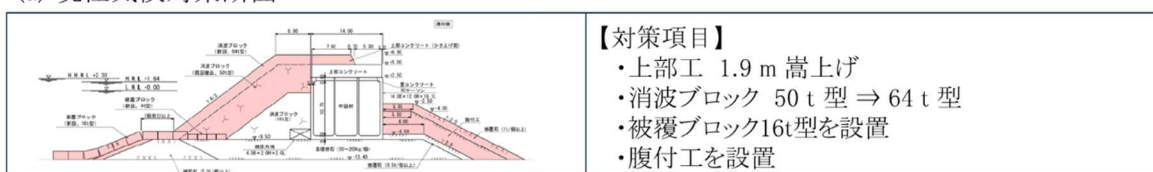
(b) 堤体の天端高

照査項目	現在気候		中位予測		上位予測	
堤体の必要天端高	D. L. +6.90 m	NG	D. L. +7.20 m	NG	D. L. +7.50 m	NG

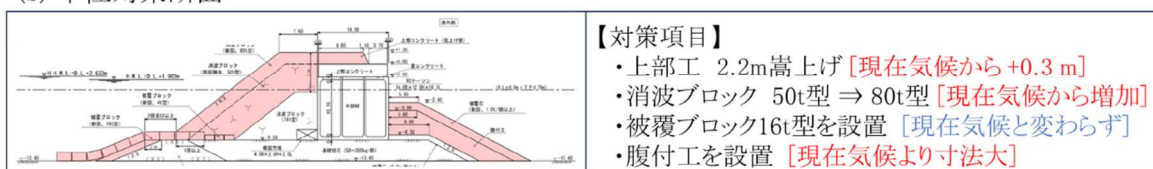
(c) 消波ブロック及び被覆材の安定性

照査項目	現在気候		中位予測		上位予測	
消波ブロックの必要質量	57.00 t	NG	59.43 t	NG	62.62 t	NG
被覆材の必要質量	石	14.85 t	13.41 t	NG	14.25 t	NG
	ブロック	—	18.69 t	NG	19.48 t	NG

(a) 現在気候対策断面



(b) 中位対策断面



(c) 上位対策断面

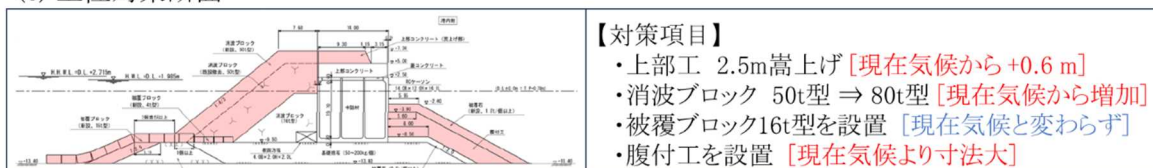


図-5 気候変動に対応したモデル防波堤の対策断面

(a)現在気候対策断面 (b)上位対策断面， (c)中位対策断面

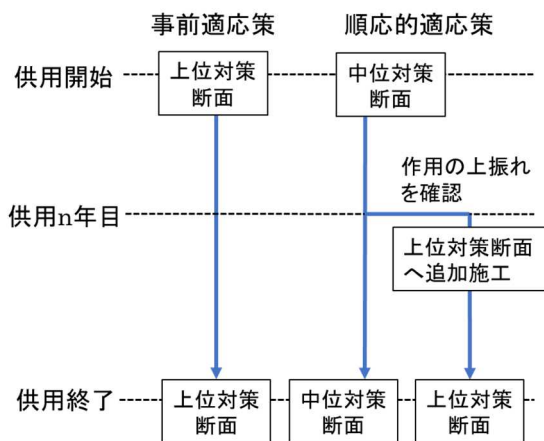


図-6 事前適応策・順応的適応策の対策フロー

が必要となる。これらの項目に関して、現在気候及び将来気候の上位・中位予測に対し要求性能を満足する最小の対策断面を検討した。各検討結果について、対策断面及び対策項目の詳細を図-5に示す。その結果、必要となる被覆ブロックの規格は現在気候と将来気候で変わらないものの、上部工、消波ブロック、腹付工の設置の3つの項目については、将来気候の方がより寸法・規格の大きい対策断面が必要となった。このように、気候変動の影響を考慮した作用の設定を行った結果、設計断面に違いが生じることが確認された。

(2) モデル防波堤の事前適応策・順応的適応策の検討

前節の上位・中位対策断面の結果に基づき、事前適応策と順応的適応策について具体的な検討を行う。各適応策の対策フローを図-6に示す。事前適応策に関しては、本検討では供用開始時点から将来気候の上位予測に対する要求性能を満足することとして上位対策断面を採用した。一方で順応的適応策に関しては、供用開始時点では中位対策断面での設計・施工を行い、その後のモニタリングにより作用が中位予測を超過した時点で、上位対策断面へと追加施工することが考えられる。しかし、追加施工を行う上では、その実行可能性について予め考慮し、それに応じて供用開始時点の設計断面を検討しなければならない。

そこで、前節での検討内容に基づき、中位対策断面から上位対策断面への追加施工の実行可能性について検討する。追加施工の項目として、(a) 上部工の嵩上げ (0.3 m)、(b) 上部工の拡幅 (1.7 m)、(c) 腹付工の嵩上げ (0.1m) 及び拡幅 (0.1m) の3つが考えられる。一つ目に(a) 上部工の嵩上げについては、コンクリートの打設厚さが0.3 mと薄く現実的ではないため、上位対策断面の寸法を採用することが望ましい。また、これに伴い必要となる消波ブロックの嵩上げ及び基礎マウンドの拡幅についても併せて行うことが妥当と考えられる。(b) 上部工の拡幅については、1.7 mという打設幅を考慮しても施工が比較的容易であるため、事後的な対応が可能

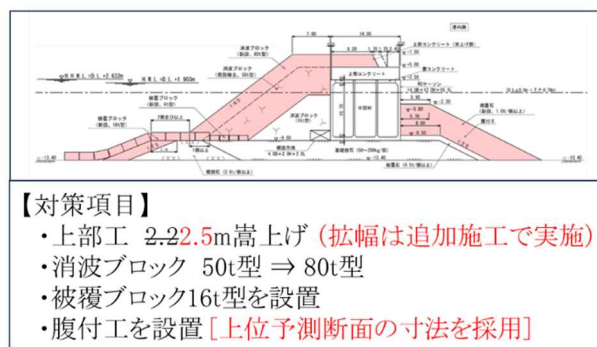


図-7 追加施工の実行性を考慮した順応的適応策における供用開始時点の対策断面

- 【対策項目】
- ・上部工 2.22.5m嵩上げ (拡幅は追加施工で実施)
 - ・消波ブロック 50t型 ⇒ 80t型
 - ・被覆ブロック16t型を設置
 - ・腹付工を設置 [上位予測断面の寸法を採用]

と判断した。(c) 腹付工の嵩上げは水中施工を伴い、複数回の施工は非効率であるため、上位対策断面を採用することとした。以上の検討結果を反映した、順応的適応策における供用開始時点での対策断面は図-7のようになる。

また、それぞれの気候変動適応策について直接工事費の概算を行った結果、供用開始時点では、順応的適応策は事前適応策に比べ、費用が2%程度減少することが分かった。一方で、実際の作用が予測を超過し、順応的適応策として追加施工が必要となった場合は、工費が1%程度増加する結果となった。このように、実際の設計実務においても、事前適応策・順応的適応策の両方に基づく設計断面を予め検討し、その施工性や工事費用等の観点から評価した上で、ケースごとに最適な対策断面を判断することが重要である。

6. まとめ

本検討の結果について以下にまとめる。

- 気候変動の影響を考慮した設計値として、天文潮位、沖波波高、潮位偏差の3つについて設定する方法を提案した。天文潮位は、現況の設計値に気候変動の影響による潮位上昇量を加算することで、沖波波高及び潮位偏差については、現況の設計値に将来変化比を乗じることで計算した。
- モデル防波堤を対象として、堤体の安定性、堤体の天端高、消波ブロック及び被覆材の安定性の3つの項目に関して、現在気候及び将来気候の上位・中位予測に対する照査を行った。その結果、現在気候・将来気候どちらにおいても要求性能を満足しない結果となった。
- 照査結果を踏まえ、現在気候及び将来気候の上位・中位予測に対するモデル防波堤の対策断面を検討した。その結果、現在気候と比較して、将来気候ではより寸法・規格の大きい対策断面が必要となり、今回の方法によって設計に気候変動の影響が反映され

ていることを確認した。

- d) 将来気候の上位・中位対策断面の検討結果を踏まえ、事前適応策及び順応的適応策に基づく具体的な設計方法を検討した。順応的適応策における追加施工の項目ごとにその実行可能性を考慮した設計方法を検討した。

本検討では、港湾施設の気候変動適応策を検討する上で参考となる事例として、防波堤の気候変動適応策に関する試設計を行った。実際の設計実務においては、施工性や工費に加え、施設利用の観点といった社会的条件等も踏まえて意思決定を行う必要があり、その評価方法については今後の課題である。また、今回取り上げた防波堤以外にも、護岸や栈橋等、気候変動への適応を必要とする港湾施設・港湾構造物が多く存在するため、これらについても今後個別に検討していく予定である。

謝辞：本論文は国土技術政策総合研究所資料 第1281号「気候変動適応策を踏まえた防波堤の設計手法に関する検討」を参考に執筆したものであり、著者である小林怜夏氏（港湾局 参事官（港湾情報化）室）・竹信正寛氏（国土技術政策総合研究所）らに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：港湾における気候変動適応策の実装に向けた技術検討委員会，https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fi7_000092.html，参照 2024-10-09.
- 2) 国土交通省：港湾の施設の技術上の基準について，https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fi5_000035.html，参照 2024-10-09.
- 3) 公益社団法人日本港湾協会（2018）：港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年）
- 4) 環境省（2019）：変化する気候下での海洋・氷雪圏に関する IPCC 特別報告書，<https://www.env.go.jp/earth/ipcc/6th/index.html> 参照 2024-10-09.
- 5) 気象庁：日本の気候変動 2020-大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書，<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>，参照 2024-10-09.
- 6) 森壮太郎，森信人，志村智也，宮下卓也（2021）：気候変動による日本主要湾における可能最大クラス高潮の長期変化，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.77, No.2, I_937-I_942.
- 7) 本多和彦，成田裕也，岡本侃大，百海郁弥，平山克也，高川智博，森信人（2024）：3大湾内の港湾における高潮・波浪への気候変動の影響評価，国土技術政策総合研究所資料，第1266号

大正関東地震（1923）の津波発生メカニズムにおける海底地すべりの支配的影響について

村田 一城¹

¹国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

海洋利用研究領域 海洋利用研究グループ（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

大正関東地震（1923）は、関東地方を中心に深刻な被害を与えた。この地震によって伊豆半島東岸から房総半島西岸までの沿岸各地において、津波が襲来し甚大な被害をおよぼした。本研究は、当時の津波の主因が、相模湾および東京湾口で発生した大規模な海底地すべりであった可能性について地震前後の海底地形記録等に基づき検証した。結果より、広域かつ長距離の海底液状化流動現象であった地震前後の水深変化記録の分析結果に基づいて、各沿岸地点の津波高さや時間波形等を用いた逆伝播解析等を実施するとともに、津波メカニズムの支配的要因が海底地すべりによって引き起こされたことを定量的な再現数値計算によって明らかにした。

キーワード 大正関東地震，1923年9月1日，津波，海底地すべり，連鎖複合災害

1. はじめに

1923年9月1日に発生した関東地震は、東京・神奈川・千葉・静岡等を中心に深刻な被害を与えた。この地震によって伊豆半島東岸から房総半島西岸までの相模湾沿岸各地において、津波が襲来し甚大な被害をおよぼした¹⁾（例えば、図-1a）。熱海沿岸の被害は特に甚大であり、津波の痕跡高は約12m、津波初動は地震発生後約5分で下げ波が生じ、その後上げ波が生じたとされている²⁾。観測された地盤変動は、房総および三浦半島南端、相模湾沿岸（特に神奈川県国府津付近）では顕著な隆起が、伊豆半島東部から南端にかけては沈降が生じることが記録された³⁾。陸域の変動のみならず、相模湾および東京湾口部海底でも、広範囲・大規模な水深変化が生じたことも確認され、その変化量は最大で約200mまで達し、陸域のそれと比較しても相当量の地形が変化したことが報告されている（図-1b）³⁾。

本地震は、Kanamori⁴⁾をはじめとする数多くの断層モデルが提案された⁵⁻¹²⁾。しかし、各断層モデルを用いたとしても、当時の沿岸地点で観測された津波規模とその初動等は十分に説明できず、当該津波の成因は未だ理解できていない点が多い¹³⁾。そこで、著者らはこれまでの取り組みの中で、水深変化記録と地震時海底地盤の詳細動態の関係性を理解するため、地震前後の水深記録と現在的水深データとの差分をそれぞれ取り、確率密度分布による統計分析を実施し、本水深変化記録が大規模な海底地すべり流動現象であることを明らかにした^{14),15)}。

本報では、系統的な取り組みとして、各沿岸地点の津波高さや時間波形等を用いた逆伝播解析と定量的な再現津波シミュレーション等を通じて、当該地震時の海底地すべりの支配的影響について評価・検討する。

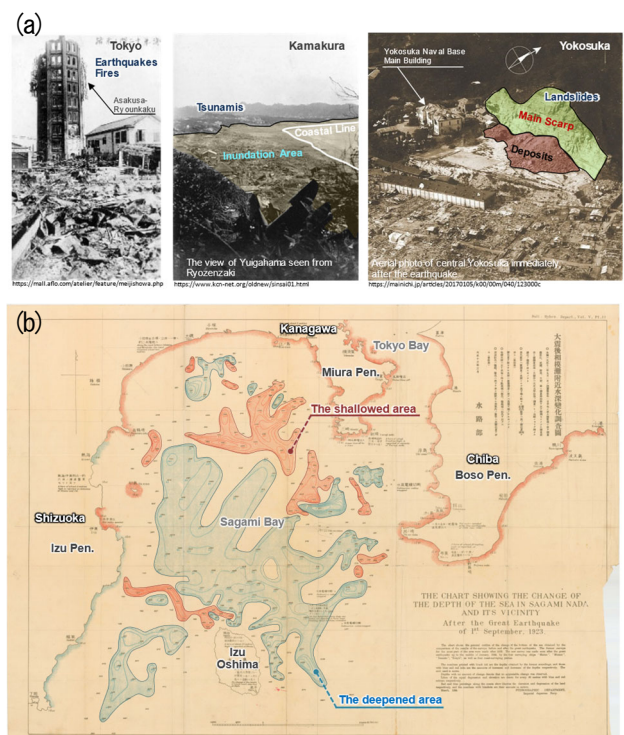


図-1 (a) 関東地震時の被害。(b) 地震前後で観測された水深変化記録（水路部による報告²⁾に一部著者が加筆）

2. 大正関東地震の津波波源分析

(1) 津波逆伝播解析に基づく地すべり津波波源分析

津波波源位置から観測距離までの双方に要する伝播時間が等価である仮定に基づき、津波の逆伝播解析を行う。具体的には、津波の観測地点の位置において仮想的な津波波源を定義し、その観測点から外洋までの逆方向に伝播する津波伝播線図を描画することで実行する。本解析は、津波波源を同定する手法として特に効果的であり、既存研究においてもその優位性は報告されている¹⁶⁾。

図-2(a)は、前章に示した熱海沿岸の津波記録²⁾と横須賀の時刻歴津波記録¹⁷⁾における断層モデルの比較・解析による情報(図-2b)から得られた逆伝播解析結果である。図中青線が熱海および横須賀から抽出された逆伝播図(熱海: 5 min, 横須賀: 29 min)を示している。両者の交わる領域(以降, ETS: Extracted Tsunami Source)は、真鶴岬沖南東域に位置することが分かった。換言すると、本領域が、既存断層モデルで説明できない二次的な津波波源域である可能性が高い。図中, ETSが水深変化記録で得た海底地すべりの広範囲流出域と対応することが見て取れる(図-2a)。

図-2(c)は、ETSと水深変化記録が重合する領域を詳細に可視化したものである。水路部(1924)の測点の位置を○印(青: 深化, 赤: 浅化, 白: 変化なし)で示し、黄色および緑色の網掛け域はこれまでに観測された海底地すべりの痕跡位置をまとめた^{18), 19)}。図から、相模トラフは南北に渡って相模湾を縦断しており、その西北端には、熱海湾から下刻する海底谷に沿って真鶴海丘および相模海丘が分布していることがよく分かる。海底地すべ

り痕跡記録(黄色網掛け域)によると、相模湾の海底斜面では恒常的に海底地すべりが多発していることが見て取れる。ETSは、海底地すべり痕跡との重なりを共有する領域が幾つか確認でき、ETS南西部では初島沖から続く陸棚斜面域でその重なりが確認できるが、本領域においては水深変化の記録は無い(白○印)ため、海底地すべりが発生した時間的整合性は低いと考えられる。他方、真鶴海丘南部斜面において、水深変化記録(青○印)と海底地すべりの痕跡(黄色網掛け域)との重なりが確認することができる(橙色網掛け域)。本重合領域は、大正関東地震時によって発生した海底地すべり現象であることが推察される。一般に、海底地すべりによる津波の発生には、急勾配および浅い水深であるほどその影響は強く^{20), 21)}、真鶴海丘南部斜面域(橙色網掛け域)においては、ETS内で特に局所的に海底地すべり津波が発生した海域であることを強く示唆している。真鶴海丘南部斜面(橙色網掛け域)の地盤角度を分析したところ、 $\theta = 8.45^\circ$ であることがわかった。

3. 断層モデルと海底地すべり津波波源モデルを用

いた1923年大正関東地震津波の再現

(1) 海底地すべり津波シミュレーション手法

ETSと重合する真鶴海丘南部斜面域で生じた海底地すべり性津波の影響について検討する。津波の数値伝播シミュレーションのパラメトリックスタディを実施し、各沿岸津波記録と比較する。津波シミュレーションにおい

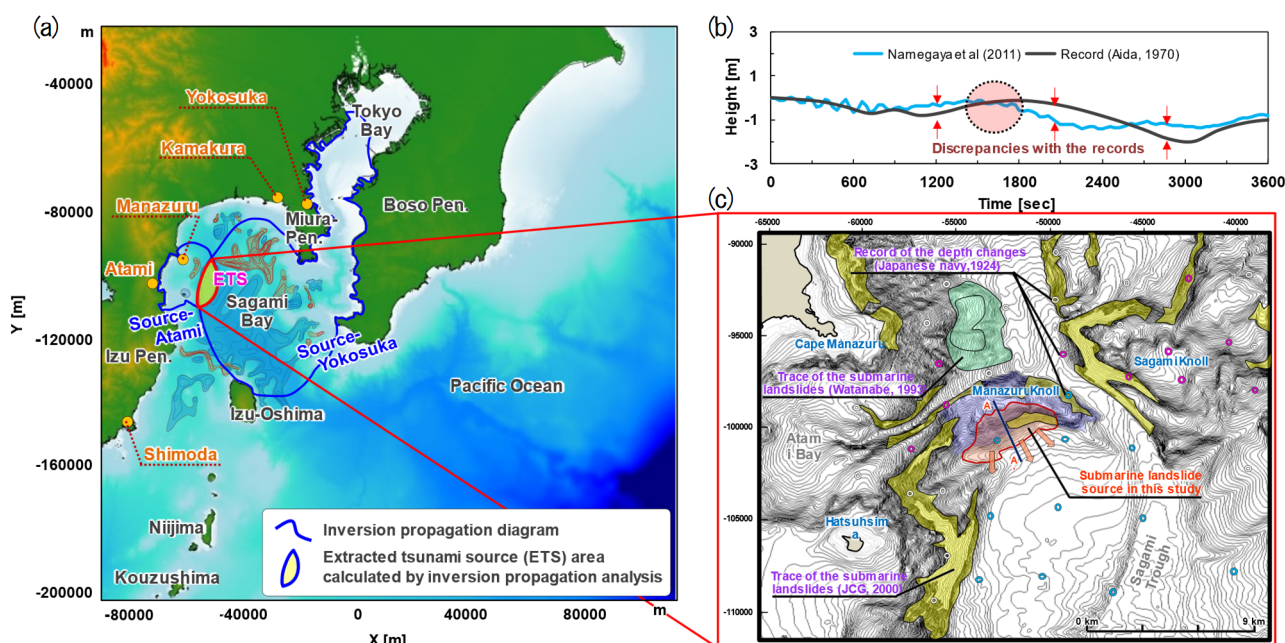


図-2 (a) 津波波源分析結果図。 (b) 横須賀の津波記録との比較から得た非地震性影響時刻。 (c) ETS領域中の海底地すべり詳細位置図。

ては、Porousモデル適用した3次元の連続方程式とReynolds方程式を基礎方程式とし、鉛直方向を数層に分割し各層に静水圧近似を適用したSTOC-MLを用いる²⁾。地すべりの規模および比重、流動地盤角度の各パラメータ等は重力流終端速度理論²³⁾および高密度液状化土の地盤密度特性²⁴⁾から求め、既存研究から提案される海底地すべりによって励起する津波波源モデル²¹⁾を用いて評価した。

表-1は、数値計算諸元（上段：数値計算シミュレーション条件、下段：海底地すべりパラメータ）を示す。海底地すべりの発生位置の水深は、水深変化記録（図-1b）によって報告された同座標位置の観測値（740 m）を採用している。数値計算領域は図-3(a)に示すとおりであり、均一な270 mの格子幅で構成した直交座標系である。津波伝播シミュレーションに用いる地形データは、内閣府中央防災会議²⁵⁾で公開されている現在地形を用いる。

沿岸地点の津波の観測記録は、海岸近くで観測された痕跡高（津波がない場合の潮位からの標高）であることから、本論では海岸前面で観測する水面変動量と同義として扱い、海域セルで解析した数値シミュレーション結果（水面変動量）と比較する。また、観測記録座標は局所的な地域や沿岸地の被害記述のみで座標が明記されていないことが多く、詳しい位置情報の決定が難しい。そのため、本検討では各沿岸地点前面海域の計算格子の隣接9セルの複数座標から得られた時刻歴波形における50パーセンタイル値（以降、%ileと表記）（中央値）の他、25%ileおよび75%ileなどを評価することで観測点のばらつきを考慮する。なお本報では、既存断層モデルにおける地盤変動量を精微に再現可能な代表モデル¹²⁾を用いる。

海底地すべりの流動規模は、津波励起への最も顕著な影響を評価するため、真鶴海丘南部斜面域の流動区間を緩傾斜の相模トラフまでとし、地形判読に基づきその流動距離を3300 mと仮定した。また海底地すべりの流動方

向は、北南方向を軸として75°とし、相模トラフ直下への流動の特性などを考慮するため、Case 1～5において形状パラメータ k を設定した。

表-1（下段）にWatts et al. (2005)²¹⁾モデルによって算出した地すべりの終端速度を示している。終端速度は $u_t = 31.48 \text{ m/s}$ であり、高密度海底液状化重力流の終端速度理論に基づき得られる解析値（ $u_t = 32.2 \text{ m/s}$ ）^{23), 24)}をよく説明していることがわかった。これらの結果から、大正関東地震時において相模湾海域の真鶴海丘南部斜面上で発生した高密度海底液状化重力流は、地震発生直後に終端速度に達したと考えられる。

(2) 結果および考察

図-3(b)は、各沿岸地点（No. 1～53）における最大津波高さであり、図-3(c)は、横須賀地点（No. 30）における

表-1 数値計算シミュレーション条件（上段）と海底地すべりパラメータの詳細（下段）

	Parameter
Simulation time [s]	10800.0
Simulation delta time [s]	0.1
Output simulation delta time [s]	30.0
Total mesh number	697,500
Simulation delta mesh [m]	270.0
Surface drag coefficient	0.0
Subsea friction coefficient	0.0
Coriolis coefficient	8.26×10^{-5}
Free surface calculation	ON
Turbulence model	OFF
Fault model (FLT)	Namegaya et al. (2011)

	Case 1~5	Notice
Length [m]	3000.0	Estimated from Fig. 2c
Width [m]	5000.0	Estimated from Fig. 2c
Thickness [m]	140.0	Referenced from Fig. 1
Slope angle [°]	8.45	Calculated from Fig. 2c
Water depth [m]	740.0	Referenced from Fig. 1
Flow distance [m]	3300.0	Estimated from Fig. 2c
Shape parameter	1.2, 1.4, 1.6, 1.7, 1.8	Watts et al. (2005)
Hydrodynamic drag coef.	0.0	Watts et al. (2005)
Hydrodynamic added mass coef.	1.0	Watts et al. (2005)
Specific gravity of SL	1.85	Sassa et al. (2001)
Landslide type	Slump	Watts et al. (2005)
Velocity [m/s]	31.48	

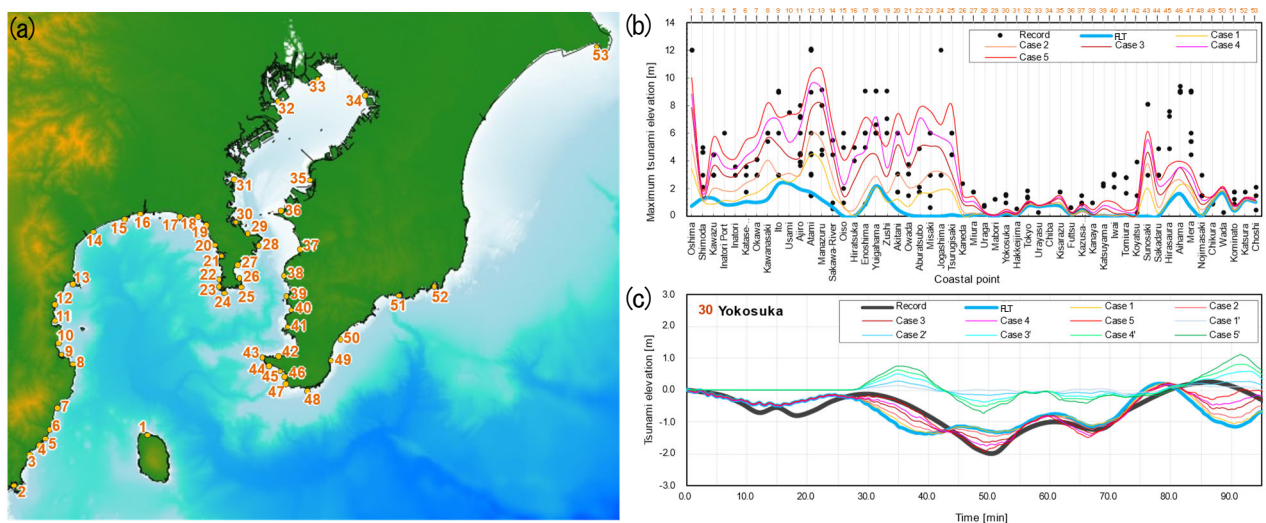


図-3 (a) 数値計算領域および各沿岸地点の解析点。 (b) Case 1～5 の検討結果（最大津波高さ）。 (c) Case 1～Case 5 の横須賀地点（No. 30）における時刻歴波形の比較結果。

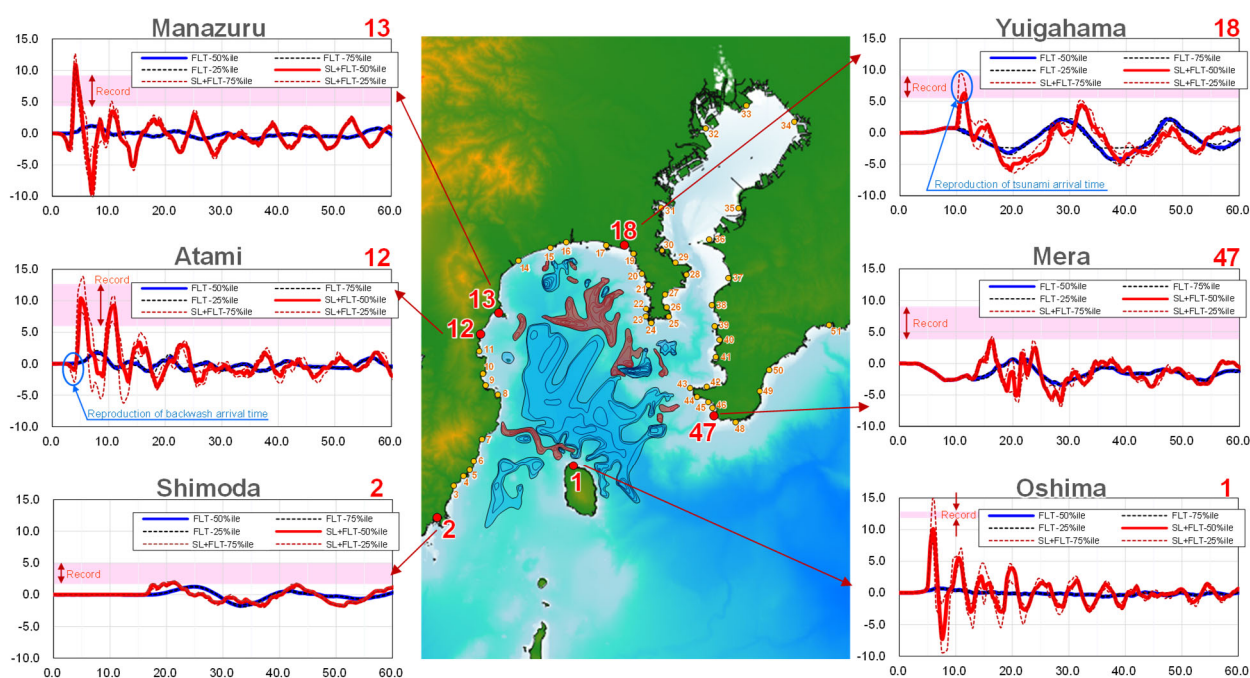


図-4 Case 5の真鶴(No. 13), 熱海(No. 12), 下田(No. 2), 由比ヶ浜(No. 18), 布良(No. 47)および伊豆大島(No. 1)の津波の時刻歴波形

る時刻歴波形 (Record: 黒実線) と既存断層モデル¹²⁾の比較結果を示している。図-3(b)(c)は、50%ile波形に基づく結果を描画している。各沿岸地点の津波記録は震災調査報告^{2,26-28)}、現地調査結果²⁹⁻³³⁾および津波痕跡データベース³⁴⁾に基づき整理している。なお、断層モデルによって算出される各地点の地盤変動量の影響は、津波解析時において差し引くことで考慮した。

図-3(b)中、青実線 (FLT) は、既往断層モデルの中で、地震後の陸域地盤変動量を精微に再現可能な断層モデル¹²⁾による計算結果を示す。図中、Case 1~5は、FLTに対して海底地すべり津波 (SL: Submarine Landslide) の影響を考慮した結果である (FLT+SL)。Case 1'~5' は、海底地すべり津波成分のみ (SL) を示している。

FLTによる最大津波高さ (図-3b, 青実線) は、熱海 (No. 12) から由比ヶ浜 (No. 19) の領域と布良 (No. 47) 周辺域で記録との顕著な乖離が認められる。海底地すべり成分を考慮した結果 (FLT+SL: Case 1~5) は、津波成分が増幅する傾向を各ケースから確認し、それらは熱海 (No. 12)、大磯 (No. 15) および由比ヶ浜 (No. 18) の領域と、洲崎 (No. 43) および布良 (No. 47) の房総南端部周辺域において確認できる。熱海 (No. 12) の津波記録は最大で12 m程度と報告されている²⁾。これに対して、各ケースの解析面域の50%ileの波形による最大値は、Case 1で4.46 m、Case 2で5.95 m、Case 5では10.35 mと上昇傾向を示し、津波高さ記録と概ね対応している。

東京湾内の各沿岸地点 (馬堀: No. 29~金谷: No. 38) では、FLT+SLとFLTのみによる結果はほとんど変わら

ない傾向を示した (図-3b)。これは、海底地すべりによって励起された津波の波長が、地震性によるそれと比較して短い成分が卓越した影響によるものであり³⁵⁾、東京湾口部、特に富津岬以北 (No. 36) の局所的な反射および屈折現象などに伴って津波の輸送エネルギーが低減したものと見える。

富津岬の南部に位置する横須賀 (No. 30) の時刻歴波形の比較結果から (図-3c)、海底地すべり津波の成分は押し波から伝播していることが確認できる (SL: Case 1'~5')。これは真鶴海丘南部斜面の海底地すべりにより沖合方向に発生した海底地すべり津波の押し波成分である。地すべり流下方向では、第一波が押し波成分として卓越するSL津波の特徴をよく説明している³⁶⁾。断層モデルと津波記録が顕著に乖離している時間 ($t=28\sim30$ min頃) でよく発達している。Case 1~5にかけて海底地すべり津波成分を考慮すると (FLT+SL)、その影響度は増大し、断層モデル (FLT) の再現性を飛躍的に向上させていることが分かる。これらは、断層モデル (FLT) と横須賀 (No. 30) の波形記録の間で、周期的に乖離が認められた区間のみに作用している。また、断層モデル (FLT) による時刻歴波形では、80~96 minにかけて逆位相の水面変動分布が示されているものの、本結果 (FLT+SL) は、それを打ち消すような形で記録と整合する傾向を示している。

一方、城ヶ島 (No. 24) や房総半島先端部 (No. 46~47) においては、津波記録と整合しない沿岸地点も確認できる。これは、真鶴海丘南部斜面域とは異なる海底地すべ

り津波波源の存在に起因する可能性が高い。当時相模湾一帯では、広範囲にかけて同時多発かつ複雑に海底地すべりが発生し、それに伴って相模湾および東京湾口部では津波が生起したと考えられる。図-1(c)の水深変化記録、および著者が行った本記録の海底地盤動態分析結果を踏まえると、地震に伴う海底地盤の流動現象は東京湾口部においても顕著に生じたと示唆されており、また、大正関東地震の震源位置の進展過程（相模湾西部域の第一震源地から三浦半島南部域の第二震源地への遷移）³⁷⁾を鑑みても、三浦半島南部および房総半島先端部沖においては、海底地すべりが真鶴海丘南部斜面域の地すべりに追従して連発した可能性を示唆している。

図-4は、津波初動の時間情報や津波高さがまとめられる代表的な地点の時刻歴波形を描画した（由比ヶ浜：No. 18, 布良：No. 47, 熱海：No. 12, 真鶴：No. 13, 大島：No. 1, 下田：No. 2）。図中、薄赤色の網掛け部は各沿岸地点の津波高さの記録を示す。結果より、由比ヶ浜（No. 18）と熱海（No. 12）では、順に、地震後およそ10～13 minののち9 mの津波高さ、地震後5～6 minにして引き波ののち、最大12 mの津波が来襲したと報告されている²⁾。図中、本モデル（FLT+SL）の結果は、由比ヶ浜（No. 18）において、11～12 minにかけて4.12 m（50%ile）および9.33 m（75%ile）を示し、熱海（No. 12）において、地震後4.5 minでの引き波（h50%ile=-1.3 m, h75%ile=-2.8 m）および、局所的な押し波（h50%ile=9.83 m, h75%ile=13.77 m）を示し、各地点における津波初動およびその規模について精度よく再現できている。また、真鶴（No. 13）、伊豆大島（No. 1）および下田（No. 2）の津波記録についてもその規模をよく表現することができている。特に、伊豆大島（No. 1）においては13 mの津波が来襲したとされ、断層モデルではその規模をほとんど再現することができていないのに対し（FLT）、本モデル（FLT+SL）においては、局所的な波高の高まりによりその規模を再現することができている。

以上の結果から、各沿岸地点で記録された津波高さおよび横須賀験潮儀の津波の時刻歴波形と数値シミュレーションの結果を比較し、海底地すべり津波波源を考慮した二重波源モデルの優位性を評価できたとともに、大正関東地震時における津波成因において、海底地すべり津波の影響が大きいことを本結果から明らかにすることが出来た。

4. おわりに

本研究は、1923（大正十二）年9月1日関東地震時における相模トラフの津波発生メカニズムについて、当時の津

波の主因が、相模湾および東京湾口海底で発生した大規模な海底地すべりであった可能性が高いことを、大正関東地震前後の旧水路部（1924）の記録等に基づき検証した。

- 1) 海底地盤動態の詳細分析を通じて、地震前後に記録された水深変化記録は地震液状化に伴う大規模な海底地すべり現象と密接に関係していたことを、100年経過した震災以降初めて明らかにした
- 2) 津波逆伝播解析に基づく評価および海底地すべり波源モデルに基づく定量的な津波数値解析を通じて、当時の津波成因に海底地すべりの影響が大きかったことを明らかにした
- 3) 本モデルと断層モデルとの重量の効果が、陸海の総合的な観測記録を定量的に説明できることを示し、津波被害の再現性において観測記録を整合的に表現することを可能にした

参考文献

- 1) 諸井孝文, 武村雅之 (2004) : 関東地震(1923年9月1日)による被害要因別死者数の推定, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, pp.21-45.
- 2) 水路部 (1924) : 大震後相模灘付近水深変化調査図水路要報, 第3年, 16号.
- 3) 陸地測量部 (1930) : 大正12年関東震災地垂直変動要図, 国土地理院地殻調査部複製版 (1976) .
- 4) Kanamori, H. (1971): Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol.49, pp.13-18.
- 5) Ando, M. (1971): A Fault-Origin Model of the Great Kanto Earthquake of 1923 as Deduced from Geodetic Data, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol.49, pp.19-32.
- 6) Matsu'ura, M., Iwasaki, T., Suzuki, Y. and Sato, R. (1980): Statical and dynamical study on faulting mechanism of the 1923 Kanto earthquake, Journal of Physics of the Earth, Vol.28, No.2, pp.119-143.
- 7) Matsu'ura, M. and Iwasaki, T. (1983): Study on coseismic and post seismic crustal movements associated with the 1923 Kanto earthquake, Tectonophysics, Vol.97, pp.201-215.
- 8) 石橋克彦 (1980) : 伊豆半島をめぐる現在のテクトニクス, 月刊地球, 第2巻, pp.110-119.
- 9) Isibashi, K. (1985): Possibility of Large Earthquake near Odawara, Central Japan, Preceding the Tokai Earthquake, Practical Approaches to Earthquake Prediction and Warning, Vol.3 pp.319-344.
- 10) Wald, D.J. and Somerville, P.G. (1995): Variable-slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan, earthquake: Geodetic and body waveform analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.85, pp.159-177.
- 11) Kobayashi, R. and Koketsu, K. (2005): Source process of the 1923 Kanto earthquake inferred from historical geodetic, teleseismic, and strong motion data, Earth, Planets and Space, Vol.57, pp.261-270.
- 12) 行谷祐一, 佐竹健治, 宍倉正展 (2011) : 南関東沿岸の

- 近く上下変動から推定した1703年元禄関東地震と1923年大正関東地震の断層モデル, 活断層・古地震研究報告, No.11, pp.107-120.
- 13) Murata, K., Sassa, S. and Takagawa, T. (2020): Tsunami Disaster caused by the 1923 Great Kanto Earthquake and the Importance of Submarine Landslides, Proceedings of the 5th World Landslide Forum, pp.280-285.
 - 14) 村田一城, 佐々真志, 高川智博 (2020) : 海底地すべり及び地すべり津波のリスク評価に向けた地震時海底地盤液状化危険度の検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 76 (2), p.I_1055-I_1060, https://doi.org/10.2208/jsecjoe.76.2_I_1055.
 - 15) Murata, K., Sassa, S., Takagawa, T., Ebisuzaki, T. and Maruyama, S. (2021): Pre- and Post-Tsunami Depth Changes of Submarine Topography for the Analysis of Submarine Landslide-Induced Tsunami: Proposal of Digitization Method and Application to the Case of the 1923 Great Kanto Earthquake Tsunamis, Proceedings of the 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2021-63096.
 - 16) Heidarzadeh, M., Gusman, AR. and Mulia, IE. (2023): The landslide source of the eastern Mediterranean tsunami on 6 February 2023 following the Mw 7.8 Kahramanmaraş (Türkiye) inland earthquake, Geoscience Letters, Vol.10, No.50.
 - 17) 相田勇 (1970) : 1923 年関東地震津波の数値実験, 東京大学地震研究所彙報, 第 48 巻, 第 1 号, pp.73-86.
 - 18) 渡辺一樹 (1993) : 相模湾西部の海底微地形, 水路部研究報告, 第 29 巻, pp.33-50.
 - 19) 海上保安庁水路部 (2000) : 相模湾の変動地形, 4 - 7, 地震予知連絡会会報, 第 64 巻, pp.209-215 (<https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/index64.html>) (参照 2024-10-29) .
 - 20) Grilli, ST. and Watts, P. (2005): Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. I: Modeling, Experimental Validation, and Sensitivity Analyses, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol.131, No.6, pp.283-297.
 - 21) Watts, P., Grilli, ST., Tappin, DR. and Fryer, GJ. (2005): Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Predictive Equations and Case Studies, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.131, No.6, pp.298-310.
 - 22) 富田孝史, 柿沼太郎 (2005) : 海水流動の 3 次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, Vol.45, No.2, pp.83-98.
 - 23) Ross, AN. (2000): Gravity Currents on Slopes, A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the University of Cambridge, p.191.
 - 24) Sassa, S., Sekiguchi, H. and Miyamoto, J. (2001): Analysis of Progressive Liquefaction as a Moving-boundary Problem, Géotechnique, Vol.51, No.10, pp.847-857.
 - 25) 内閣府中央防災会議 (2013b) : 首都直下地震モデル検討会 地形データ第 09 系, <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/1302> (参照 2024-10-29)
 - 26) 中央气象台 (1924) : 関東大震災調査報告, 地震編 1.
 - 27) 池田徹郎 (1925) : 伊豆安房方面津浪並ニ初島地變調査報告, 震災予防調査報告, 第 100 巻, 2 号, pp.97-112.
 - 28) 田中館秀三 (1926) : 関東大地震と海岸の昇降運動, 1 ~ 4, 地学雑誌, 38, pp. 130-135, pp. 188-201, pp. 324-329, pp. 374-390.
 - 29) 羽鳥徳太郎 (1976) : 南房総における元禄 16 年 (1703 年) 津波の供養碑-元禄津波の推定波高と大正地震津波との比較-, 地震研究所彙報, 第 51 巻, 第 2 号, pp.63-81.
 - 30) 羽鳥徳太郎, 相田勇, 梶浦欣二郎 (1973) : 南関東周辺における地震津波, 関東大地震 50 周年論文集, pp.57-66.
 - 31) 高山知司, 永井紀彦, 平石哲也 (1983) : 東京湾の津波計算, 港湾技研資料, No.454, pp.102.
 - 32) 相田勇 (1993) : 相模湾北西部におこった歴史津波とその波源数値モデル, 地学雑誌, 102 巻, 4 号, pp.427-436.
 - 33) 吉田明夫, 原田昌武, 小田原啓 (2012b) : 大正関東地震の際の海底地殻変動, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 44 巻, pp.17-28.
 - 34) 津波痕跡データベース (津波痕跡高情報) システム : <https://tsunami-db.irides.tohoku.ac.jp/tsunami/mainframe.php> (参照 2024-10-29) .
 - 35) Brink, US., Chaytor, JD., Geist, EL., Brothers, DS. and Andrews, BD. (2014): Assessment of tsunami hazard to the U.S. Atlantic margin, Marine Geology, Vol.353, pp.31-54.
 - 36) Haugen, KB., Løvholt, F. and Harbitz, CB. (2005): Fundamental mechanisms for tsunami generation by submarine mass flows in idealized geometries, Marine and Petroleum Geology, Vol.22, pp.209-217.
 - 37) 武村雅之, 池浦友則 (1994) : 短周期データから見た 1923 年関東地震の多重震源性一体験談と地震記象の解釈一, 地震, 第 47 巻, pp.351-364.

鋼製砂防堰堤を対象とした UAV自律飛行による点検調査について —目視点検調査との比較による課題抽出—

岩田 清徳¹・宮崎 亮直²・横尾 公博³

¹北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧砂防海岸事務所計画課（〒059-1362 北海道苫小牧市字柏原32-40）

²北海道開発局小樽開発建設部倶知安開発事務所河川課（〒044-0066 北海道虻田郡倶知安町北7条東1丁目4-9）

³八千代エンジニアリング株式会社九州支店ダム・砂防部技術第二課（〒810-0073 福岡県中央区舞鶴3-9-39）

砂防施設の長寿命化にはその健全度を評価するための点検が必要不可欠であるが、省力化・高度化を目的とした目視点検の代替手法として、樽前山の砂防堰堤では2022年よりUAV自律飛行による点検を試行してきた。本稿では、小泉の沢川・小糸魚川流域の鋼製砂防堰堤6基を対象としたUAV自律飛行による点検調査について、目視点検との比較を行い、UAVの適用性を検討することで、今後の点検計画立案にむけた取組事例を報告する。

キーワード 長寿命化、インフラメンテナンス、3次元モデル、生産性向上

1. はじめに

樽前山直轄火山砂防事業では、鋼材と中詰め材を用いた鋼製セル型砂防堰堤や鋼製ダブルウォール（DW）型砂防堰堤の整備を進めている。このような砂防施設は、火山噴火、土石流及び地震などの外的要因による損傷や経年劣化が生じることから、点検や現地確認によって施設状況を適確に把握し、求められる機能や性能を長期にわたって維持・確保していく必要がある。「砂防関係施設点検要領（案）令和4(2022)年3月」（以下、点検要領と記載する）では、実施時期や状況による点検種別が区分されており、砂防施設の点検の種類は定期点検、臨時点検、詳細点検から構成される。このうち、長寿命化計画策定を目的とした、経年的な砂防施設の機能及び性能の低下状況を把握するための調査としては、定期点検が該当する。点検要領によれば、定期点検の実施方法として目視点検もしくはUAV点検によるものが基本とされている。

樽前山直轄火山砂防事業における既存砂防施設（以下、直轄砂防施設と記載する）では、目視調査による定期点検が実施されており、点検結果に基づいて変状レベルや健全度が評価されてきた。定期点検の省力化や高度化を図るためには、目視点検の代替または補助手段として

UAVの利活用が有益と考えられる。このため、UAV点検によって得られる情報や精度を把握し、直轄砂防施設を対象とした最適な調査計画を立案する必要がある。

本稿では、直轄砂防施設のうち、小泉の沢川流域、小糸魚川流域の鋼製砂防堰堤6基を対象としたUAV自律飛行による定期点検の調査事例について報告する。

2. UAV自律飛行に向けた事前準備

(1) 対象砂防施設の概要

2023年において樽前山直轄火山砂防事業区域内の砂防施設は14基が完成している。

主な構造型式は鋼製砂防堰堤型式であり、このうち2022年は覚生川流域の鋼製セル型砂防堰堤3基を対象としてUAV自律飛行による点検を実施した。

本調査では、次項の表1に示す小糸魚川流域（小糸魚川遊砂地、小糸魚川流木捕捉工、小糸魚川砂防堰堤）および小泉の沢川流域（小泉の沢川遊砂地、小泉の沢川1号砂防堰堤、小泉の沢川左支川流木捕捉工）の6基を対象砂防施設とした。

表1 対象とした鋼製砂防堰堤の諸元

施設名 (構造形式)	堰堤長	堰堤高	竣工 年度
小糸魚川遊砂地 (鋼製セル+DW)	176.6m	6.0m	H21
小糸魚川砂防堰堤 (鋼製DW)	45.9m	4.5m	H21
小糸魚川流木捕捉工 (鋼製流木捕捉工)	110.0m	8.5m	R3
小泉の沢川遊砂地 (鋼製セル+DW)	95.1m	5.0m	H22
小泉の沢川1号砂防堰堤 (鋼製DW)	76.5m	4.5m	H22
小泉の沢川左支川流木捕 捉工 (鋼製流木捕捉工)	42.5m	3.5m	R1



写真1 小泉の沢川遊砂地



写真2 小泉の沢川1号砂防堰堤



写真3 小泉の沢川左支川流木捕捉工

(2) 飛行ルート検討

離発着地点は、現地にて上空の視界が良好であること、調査車両が安全に停車できる等、UAVの離発着に問題ないことを確認した上で図1に示す地点を選定した。小泉の沢川流域の飛行ルートは約2.3km、小糸魚川流域の飛行ルートは約2.5kmとなる。

(3) 飛行方法の検討

3次元モデルの精度はUAVによる空撮画像の解像度によって定まり、解像度は対地高度とカメラセンサーサイズによって影響を受ける。空撮画像は砂防施設に近接すればするほど高解像となるため、詳細な変状箇所も把握可能となる一方で、①撮影範囲が狭くなり往復回数が増加することでバッテリー交換が頻繁となること、②堰堤本体や樹木等の支障物に接触する危険性も増大することが懸念される。本調査は、樹木や植生等の繁茂状況を踏まえ、UAVが安全に飛行できることを前提としつつ、3次元モデルを高精度で作成するため、できる限り施設に近い対地高度・撮影角度にて空撮を行った(次項図2, 表2)。

本調査では、2022年実施した覚生川流域3基との比較・検証を行うため、2022年と同機種である「Matrice 300 RTK (表3)」を用いることとした。

なお、レベル3自律飛行(無人地帯での目視外飛行(補助者なし))申請時には、機体の初期故障期間の検証データが必要となるが、現時点で取得可能なメーカーは極めて少ない状況にある(聞き取り調査を実施したところ国内製1社のみ)。そこで本調査では、飛行の安全性を確保するため、各調査地点に補助員を配置したうえで、高高度での監視用機(目視飛行)による安全管理を実施した。

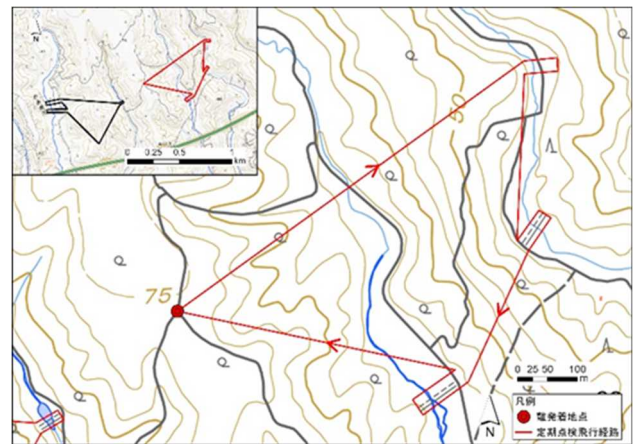
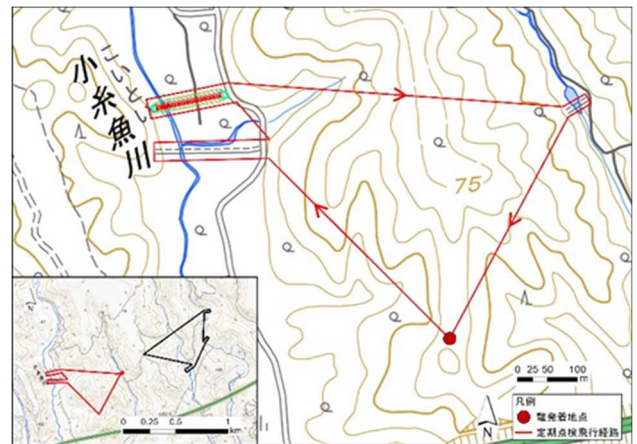


図1 定期点検飛行経路

(上: 小糸魚川流域, 下: 小泉の沢川流域)

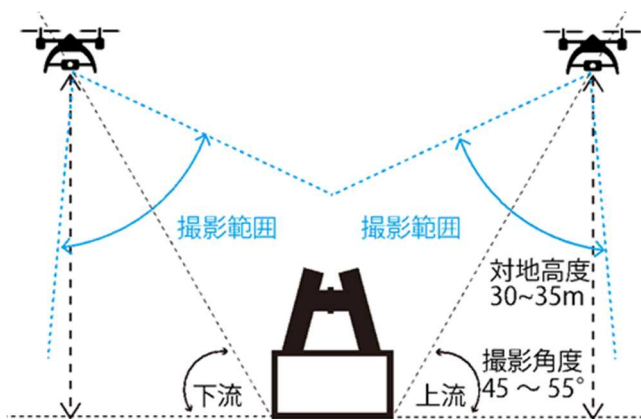


図2 撮影方法

表2 各施設の飛行方法

施設名	対地高度	撮影角度	飛行速度
小糸魚川遊砂地	約 35m	上流面：45° 下流面：55°	5.0m/s
小糸魚川砂防堰堤	約 30m	上流面：45° 下流面：55°	5.0m/s
小糸魚川 流木捕捉工	約 35m	上流面：55° 下流面：55°	5.0m/s
小泉の沢川遊砂地	約 30m	上流面：45° 下流面：45°	5.0m/s
小泉の沢川1号 砂防堰堤	約 30m	上流面：45° 下流面：55°	5.0m/s
小泉の沢川左支川 流木捕捉工	約 35m	上流面：45° 下流面：45°	5.0m/s

表3 使用機器詳細

機種名		Matrice 300 RTK
写真		
	種別	マルチコプター
機体仕様	重量	6300g
	最大積載量	2.7kg
	プロペラ枚数	4枚
	展開時寸法 (長さ×幅×高さ)	810×670×430mm
	対角線長・翼幅	895mm
	最大飛行速度	17.0m/s
	運用限界高度(海拔)	7000m
	最大風圧抵抗	15m/s
	動作環境温度	-20~50℃
自律飛行可否		可
LTE通信使用可否		可
GNSS	使用衛星	GPS+Galileo+BeiDou+GLONASS
	機種名	ZENMUSE P1
	センサーサイズ	フルサイズ
カメラ	有効画素数	4500万画素
	ジンバル	-
本体バッテリー	容量	5935mAh
	飛行時間	55分
航続可能距離		39.27km

3. UAV自律飛行による点検の概要

(1) UAVを用いた点検手法

小糸魚川流域（小糸魚川遊砂地，小糸魚川流木捕捉工，小糸魚川砂防堰堤）および小泉の沢川流域（小泉の沢川遊砂地，小泉の沢川1号砂防堰堤，小泉の沢川左支川流木捕捉工）の6基を対象としたUAV自律飛行による点検調査を実施した。調査時期は植生による点検精度への影響を評価するため，着葉期（7月）と落葉期（11月）の2度実施した。撮影した画像は，目視による定期点検との比較及び課題抽出のため，写真測量技術（SfM解析：重複した画像を用いた3次元モデル化技術）による3次元モデル化を行い，目視による定期点検結果との比較を行った。

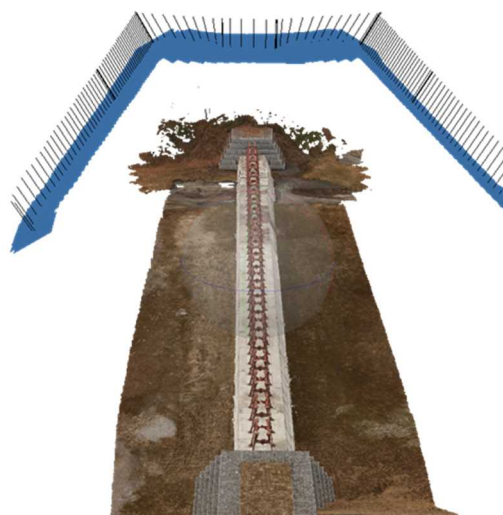


図3 撮影方法のイメージと3次元モデル

(2) SfM解析による3次元モデルの作成

UAV自律飛行による空撮データを用いて，図4～6に示すような3次元モデルを作成した。

なお，本稿では，Agisoft MetashapeにてSfM解析を実施した。



図4 小泉の沢川遊砂地:3次元モデル



図5 小泉の沢川1号砂防堰堤:3次元モデル



図6 小泉の沢川左支川流木捕捉工:3次元モデル

4. 目視点検との比較検討

(1)比較項目の抽出

砂防施設の健全度は、部位毎の変状レベルに応じて評価される。例えば、壁面材は中詰め材の流出を伴う変状が認められた場合、機能や性能が低下していると判断される。このため、壁面材の点検項目のうち、「中詰め材の流出」に直結すると考えらえる変状を点検項目として抽出した。他部位についても同様に点検項目を抽出し、目視点検との比較を行った。

(2)比較結果

従前の目視点検による点検調査票と同アングルでの画像データを今回のUAV点検結果から作成した3次元モデルより抽出し、各点検項目について比較・検証した。表4は目視点検による確認箇所数を基準とし、UAVによる確認可能箇所数を整理したものである。すなわち、表4の値が目視点検数に近いほどUAVが目視点検と同等の精度を得られたといえる。また、精度が低下した項目については、色別に原因を整理した。

a)比較結果①（壁面材）

着葉期と落葉期の3次元モデルを比較すると、可視範囲に差が認められ、落葉期では視認性は改善されるものの、目視点検の全項目を網羅するには至らなかった。壁面材の近傍に植生が繁茂しているため、UAVを用いた

施設点検には、壁面材周辺の植生を伐採する必要がある。

b)比較結果②（水通し天端）

鋼製セル+DW型砂防堰堤については、一部で植生の影響が認められるものの、目視点検の大部分の項目を網羅することができた。鋼製DW型砂防堰堤については、植生の影響による精度の低下が認められたものの、落葉期では改善する砂防施設も認められた。また、小泉の沢川1号砂防堰堤は落葉期において植生の影響が少ない砂防施設であったが、天端コンクリートと壁面材の接合部のモデル化精度が低くなった。

c)比較結果③（前庭部）

着葉期、落葉期ともに前庭部の点検項目について確認可能であった。

d)比較結果④（その他点検項目）

周辺の法面については、比較的新しい小泉の沢川左支流流木捕捉工を除き植生の影響による精度低下が認められた。また、水面やスリット等の狭窄部の3次元モデル化が困難であることによる精度低下も明らかとなった。

e)比較結果⑤（流木捕捉工）

流木捕捉工は鋼管の3次元モデル化が困難であったため、UAV点検が難しい結果となった。これを検証するため、図2に示した撮影方法に加えて、鉛直や水平からの撮影を試行したが、良好な結果は得られなかった。鋼管については、空撮画像による評価や目視点検との組合せが望ましいといえる。

表4 点検項目の比較結果一覧

凡例：評価箇所の減少理由			点検項目																	
			壁面材						水通し天端				前庭部				その他点検項目			
			摩耗・腐食	破損	変形	継手の開き	漏水	吸出し防止材の変状	沈下	摩耗	ひび割れ	目地の開き	流出	沈下	摩耗	ひび割れ	周辺の法面変状	護岸変状	河道洗掘	河道土砂堆積
施設名（構造型式）	調査日	撮影方法	目視点検数																	
小糸魚川遊砂地 （鋼製セル+DW型砂防堰堤）	R5.7月	自律飛行	10	10	10	4	6	6	19	16	16	16					6	4	6	6
	R5.7月	自律飛行	4	4	4	1	3	3	18	16	16	16					1	2	1	1
	R5.11月	自律飛行	4	4	4	1	3	3	18	16	16	16					1	3	2	2
小糸魚川砂防堰堤 （鋼製DW型砂防堰堤）	目視点検数		8	8	8	4	4	4	11	11	11	11	1	1	1	1	7		5	5
	R5.7月	自律飛行	0	0	0	0	0	0	7	7	7	7	1	1	1	1	1		3	3
	R5.11月	自律飛行	2	2	2	2	0	0	7	7	7	7	1	1	1	1	1		4	4
小糸魚川流木捕捉工 （鋼製流木捕捉工）	目視点検数																12	6	6	
	R5.7月	自律飛行															11	3	3	
	R5.11月	自律飛行															11	4	4	
小泉の沢川遊砂地 （鋼製セル+DW型砂防堰堤）	目視点検数		15	15	15	6	9	9	16	14	14	14					7	2	4	4
	R5.7月	自律飛行	7	7	7	2	5	5	15	13	13	13					4	1	4	4
	R5.11月	自律飛行	11	11	11	4	7	7	15	13	13	13					6	2	4	4
小泉の沢川1号砂防堰堤 （鋼製DW型砂防堰堤）	目視点検数		6	6	6	4	2	2	24	24	24	24					6		4	4
	R5.7月	自律飛行	3	3	3	2	1	1	18	18	18	18					0		2	2
	R5.11月	自律飛行	6	6	6	4	2	2	21	21	21	21					4		4	4
小泉の沢川左支流流木捕捉工 （鋼製流木捕捉工）	目視点検数																6	8	8	
	R5.7月	自律飛行															6		8	8
	R5.11月	自律飛行															6		8	8



図7 小糸魚川遊砂地3次元モデル（着葉期）



図8 小糸魚川砂防堰堤3次元モデル（着葉期）

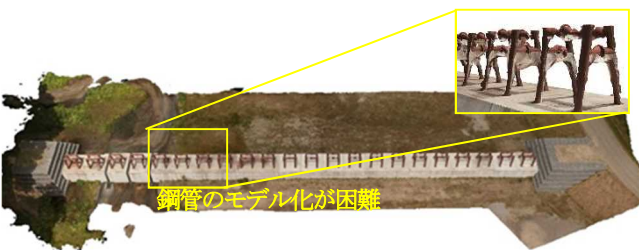


図9 小糸魚川流木捕捉工3次元モデル（着葉期）



図10 小糸魚川の沢川遊砂地3次元モデル（着葉期）

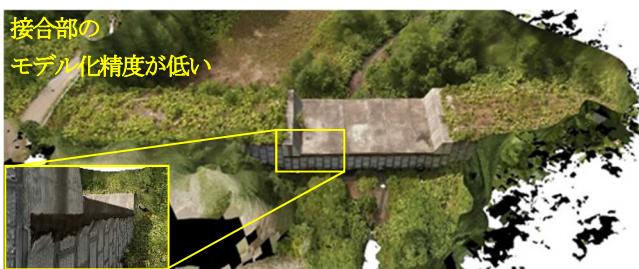


図11 小糸魚川の沢川1号砂防堰堤3次元モデル（着葉期）



図12 小糸魚川の沢川左支川流木捕捉工3次元モデル(着葉期)



図13 小糸魚川遊砂地3次元モデル（落葉期）



図14 小糸魚川砂防堰堤3次元モデル（落葉期）

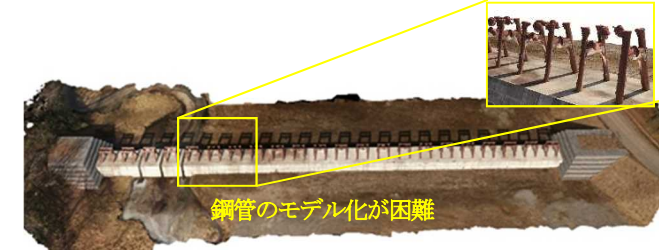


図15 小糸魚川流木捕捉工3次元モデル（落葉期）



図16 小糸魚川の沢川遊砂地3次元モデル（落葉期）

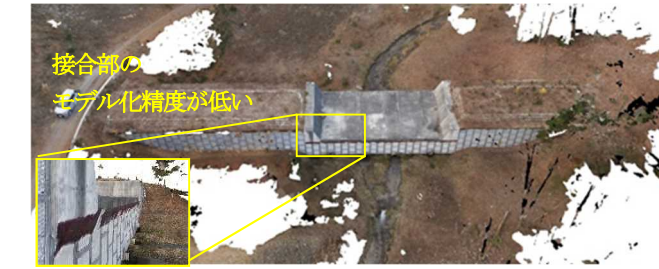


図17 小糸魚川の沢川1号砂防堰堤3次元モデル（落葉期）



図18 小糸魚川の沢川左支川流木捕捉工3次元モデル(落葉期)

5. UAVを用いた施設点検の効率化検証

樽前山直轄火山砂防事業では2015年より目視による砂防施設の定期点検を実施している。従前から実施している目視点検と、UAVを用いた施設点検との作業効率性を比較するため、2022年にUAV点検を実施した覚生川流域（覚生川1号砂防堰堤、覚生川2号砂防堰堤）、熊の沢川流域（熊の沢川2号砂防堰堤）、小糸魚川流域（小糸魚川遊砂地、小糸魚川流木捕捉工、小糸魚川砂防堰堤）および小泉の沢川流域（小泉の沢川遊砂地、小泉の沢川1号砂防堰堤、小泉の沢川左支川流木捕捉工）において、1フライト3施設の目視外自律飛行（補助員有）による各施設の砂防施設点検票を作成するまでの作業時間を算出し、目視点検との比較を行った。

なお、SfM解析ではアプリケーション上の自動計算に要した時間を算出している。

UAV点検では、SfM解析処理に時間を要するものの、目視点検と比べ、多くの施設で作業時間の短縮が確認できた。

特に現地での作業時間は、1施設あたり目視点検9時間に対し、UAV点検15分程度と大幅に短縮できたことから、作業効率と安全性は飛躍的に向上したといえる。

一方で、覚生川1号砂防堰堤は袖折れ構造となっていることから、写真枚数が増加し、SfM解析処理に特に時間を要した。このように、施設規模や構造によって施設点検時間に差異が生じる結果となった。

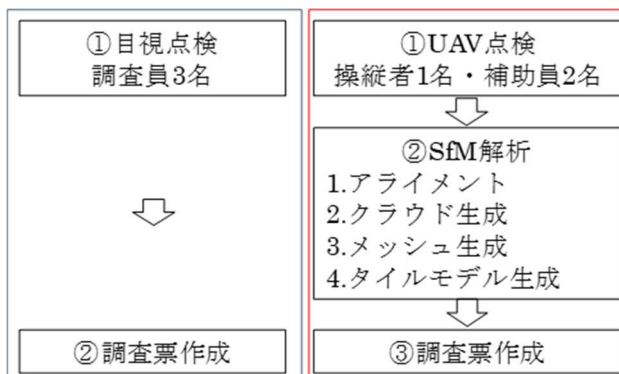


図19 各点検手法の作業手順

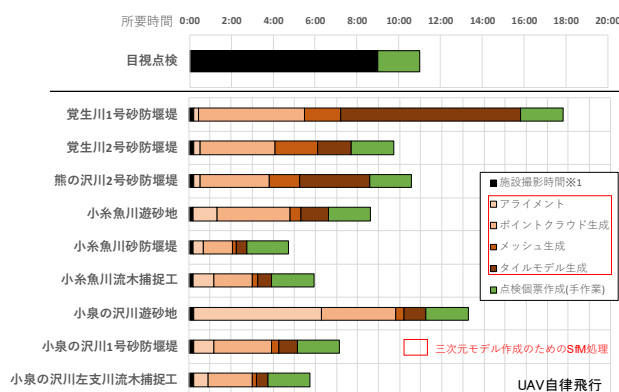


図20 各点検手法の作業時間

6. おわりに

2022年度から2023年にかけて実施したUAVを用いた施設点検について、現状の目視点検結果に基づく砂防施設点検票をアウトプットとした場合には、表5に示すような課題が挙げられる。

一方で、UAVを用いた施設点検では、目視点検に比べて「立入困難な高所でも安全に作業ができる」「施設の撮影時間が短い」「定期目視点検以外の異常が認められていない箇所でも、3次元モデルを保存することで定期的に記録として残しておくことができる」などの利点も多く認められた。

今後、これらUAVを用いた施設点検のメリットを最大限生かした施設点検を行う際には、①植生の定期的な伐採（落葉期の調査でも確認不可の項目が多く存在した）、②砂防施設点検票の見直し（劣化曲線に基づく点検の合理化や流域特性を加味した点検計画の立案）なども想定される。また、SfM解析に要する処理時間、モデル化精度等は今後改善される可能性もあり、動向を注視していく必要がある。

その他、今回の検討では、「中空構造を有する流木捕捉工等では完全な3次元モデルは生成ができない」ことが明らかになった。

したがって、現時点では植生が繁茂した砂防施設や、流木捕捉工などは目視点検とUAV空撮画像を用いた施設点検を併用するなどして、点検の効率化と高精度化を図っていく必要があると考えられる。

表5 各点検手法の長短

	目視点検	UAV 撮影+SfM 処理
メリット	- 気象条件に左右されず、植生下の施設でも確認することが可能。 - 変状箇所を直接計測することができ、近接写真の撮影も可能。	- 目視点検に比べて施設の撮影時間が圧倒的に短い。 - 高所作業を要しないので安全に施設を撮影可能。 3次元モデルを用いて各所の計測が可能。 - 施設をモデル化することで、定期目視点検以外の異常が認められていない箇所でも、定期的に記録を残しておくことが可能。
デメリット	- 施設全体をくまなく点検するには、時間を要する。 - 高所作業を要する立入困難な箇所の状況は確認することができない。	- SfM処理に時間を要する。 - 施設構造によっては写真撮影枚数が多くなり、目視と比較して効率性に劣る場合もある。 - 植生が繁茂した施設では、適切なモデル作成が困難。 - 中空構造を有する流木捕捉工等では適用不可。

TEC-FORCE活動支援アプリについての提案

糸屋 玄貴¹

¹東北地方整備局 郡山国道事務所 調査課（〒963-0117 福島県郡山市安積荒井一丁目5番地）。

令和6年1月1日に発生した能登半島地震に、TEC-FORCEとして派遣された。そこで災害対応に当たる際に、TEC-FORCE活動支援アプリというスマートフォンアプリを使用し、現地調査や資料作成を行った。そのスマートフォンアプリにより、作業の効率化・大幅な負担軽減ができた実感したが、調査報告書を提出する際に改善が必要と感じた点があったため、提案を行うものである。その提案内容は「TEC-FORCE活動支援アプリを県・自治体にも導入し、システム内で調査報告書を提出できるようにする」というものであり、国・県・自治体の全ての関係機関において、更なる作業の効率化・大幅な負担軽減が期待できる。

キーワード TEC-FORCE, 災害対応, スマートフォンアプリ, 効率化, 負担軽減

1. 「令和6年能登半島地震」について

令和6年1月1日（月）16時10分に、日本の石川県の能登半島で、内陸地殻内地震が発生した。震央は、珠洲市である。気象庁の情報では、この地震のマグニチュードは7.6であり、内陸部で発生する地震としては日本でも稀である大きさの地震であった。観測された最大震度は、石川県輪島市門前町走出と同県羽咋郡志賀町香能で観測された震度7である。気象庁により「令和6年能登半島地震」と正式名称が決まった。

本震により、日本海沿岸の広範囲で津波が観測されたほか、土砂災害・火災・液状化現象なども各地で発生した。地震による家屋の倒壊が相次ぎ、死者が200人を超えて交通網も寸断され、奥能登地域を中心に北陸地方の各地で甚大な被害が発生した。元日に発生した大地震ということもあり、社会的にも大きな影響があった。

2. TEC-FORCEについて

「令和6年能登半島地震」が発生し、日本海側に大津波警報が発表された。これに伴い、北陸地方を中心に43市16町4村とホットラインを構築し、被災地支援のために各地からTEC-FORCEを派遣した。本震に対する国土交通省の対応は、下記のとおりである。

- ・給水機能付散水車による給水支援や可搬式浄水装置の投入などによる物資支援
- ・電源車としての照明車派遣による被災者への電源支援
- ・防災ヘリ4機（ほくりく号、みちのく号、あおぞら号、きんき号）とCar-SAT 3台による広域被災状況調査
- ・建築物の応急危険度判定を実施

- ・道路、河川、砂防、海岸、鉄道、港湾、空港、地理情報などで被災状況調査を実施
- ・災害対策用機械（照明車、衛星通信車、対策本部車、待機支援車、排水ポンプ車、バックホウ、Ku-SAT）を派遣し、被害に対する応急対策などを実施

以上のとおり、様々な支援の実施により、被災地の早急な復興へ向けて尽力した。派遣実績としては、のべ派遣人数が22,331名で歴代2位であり、日最大派遣人数は555名で歴代3位となった。（表-1）

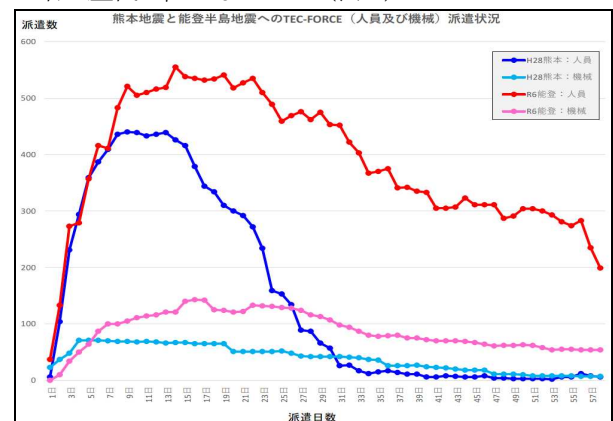


表-1 熊本地震と能登半島地震へのTEC-FORCE派遣状況

3. 「TEC-FORCE活動支援アプリ」について

(1) 「TEC-FORCE活動支援アプリ」とは？

TEC-FORCE隊員とリエゾンが行う被災状況調査などの各種作業の効率化により、各職員の負担軽減を目的として開発したスマートフォンアプリである。リアルタイムでの情報共有により、連携強化や対応迅速化を図ることで各種作業の効率化・各職員の負担軽減に資するものである。

(2) 「TEC-FORCE活動支援アプリ」のメリット

現場でTEC-FORCE活動支援アプリを使用し、TEC調査情報（テキスト・写真など）やTECログ報告（活動記録など）をクラウドシステムへ送信する。現場で調査した内容をその場でスマートフォンに入力し、調査報告書を即座に作成することが可能になったため、現地調査後の作業が大幅に軽減し、効率的に現地調査を進めれるようになった。これにより、本部・支部などにいる職員へ現場の状況がリアルタイムで情報共有されるため、現場の状況を把握して派遣の準備品を確認・追加したり、調査報告書のとりまとめ作業の支援を行うことが可能となる。本部や支部との連携強化に繋がり、対応を迅速化する役割もある。本部会議や様々な資料作成を行う際などに共有された情報を活かすことで迅速に対応を進めることが可能となる。

その他にも、大規模な崩壊により計測が困難な道路があった場合、以前までは計測不可であったり、後々に測量会社がドローンなどを使用して計測を行っていた箇所が、TEC-FORCE活動支援アプリを使用することによって、スマートフォンの簡単な操作だけで現場の点群データの取得が可能となった。そのため、大規模崩壊している道路でもその場で即座に計測が可能となったため、各職員の負担を大幅に軽減できる。

(3) 「TEC-FORCE活動支援アプリ」の機能

下記の5つの機能がTEC-FORCE活動支援アプリとして備えられている。

a) ログ報告支援ツール

調査開始、終了の定期的な報告などやTEC-FORCE各班の活動位置をリアルタイムで把握可能となる機能

b) 被災状況調査支援ツール

「(2) 「TEC-FORCE活動支援アプリ」のメリット」で示したスマートフォンでの入力による調査報告書の作成の効率化や調査結果の即時共有による外業・内業を並行実施できる機能

c) リエゾン情報共有ツール

リエゾン報告の際のテキスト・写真・ファイルなどを派遣先毎にとりまとめる機能

d) 写真・3Dデータ共有ツール

写真の整理・共有の作業の手間を軽減し、360度画像を表示できる機能

e) スマートフォンを用いた点群取得

「(2) 「TEC-FORCE活動支援アプリ」のメリット」で示した三次元点群データの共有や調査結果を整理して現場の計測を可能とする機能

以上のとおり、様々な機能があり、状況に合わせて各ツールを使用し、現地調査を行っていく。

4. 「被災状況調査支援ツール」について

私は「TEC-FORCE活動支援アプリ」の機能の中でも「b) 被災状況調査支援ツール」を使用し、現地調査を行った。その際に改善が必要と感じた点を現場での実体験を踏まえてピックアップし、その改善案を提案するものである。

(1) 「被災状況調査支援ツール」の詳細な機能

被災状況調査支援ツールとは、スマートフォンを使用して現地の被災路線や被災状況、調査内容や現地写真などの結果をその場で即座に記録・共有できるツールである。この機能で記録・共有した被災路線は、現地の位置情報が自動で入力されるので、被災路線の詳細な位置が即座に把握できるメリットがある。被災地の土地勘がなかった私にとっては、非常にありがたい機能であった。その他には、現地写真も被災箇所毎に即座にまとめられるため、非常に便利なツールである。（図-1）



図-1 「被災状況調査支援ツール」のスマホ版の画面

スマートフォンを使用して情報を入力した後、パソコンを使用して詳細な情報（例：概算額や技術的所見など）を追加で入力する。PC利用での便利な機能としては、現地で登録した被災路線が地域毎に分類されており、並び替えての表示も可能なため、被災路線の閲覧・編集がとても行いやすい点である。その他にも現地の三次元点群データがあれば、そのデータを閲覧できたり、現場の位置図を簡単に保存できるため、とても便利なツールである。（図-2）

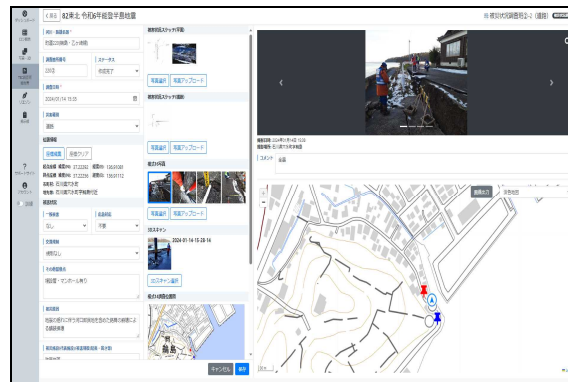


図-2 「被災状況調査支援ツール」のPC版の画面

前頁のツールを利用してまとめた内容を、Microsoft Excel（以下「エクセル」と称する）に帳票出力してダウンロードし、県や自治体に提出する。

(2) 「被災状況調査支援ツール」の問題点

下記のとおり、3点に改善が必要と感じた。

a) 帳票出力するのに時間を要する

県・自治体に提出するためにエクセルに帳票出力を行うのだが、この帳票出力を行うのに1回当たり最低30秒～最大5分程度かかってしまう。これは被災路線が少ない場合はあまり問題がないのだが、被災路線が多い場合は帳票出力を行うだけで大幅に時間を取られてしまうため、効率が非常に落ちてしまう。私の場合は、帳票出力を行うだけで1時間程度かかってしまった。

b) 帳票出力したエクセルに不備が多い

被災路線の情報が多い場合、内容が全て表示されないことがある。下の総括表の場合、被災箇所をNo.7まで登録しているのだが、No.6の情報までしか表示されていない。（図-3）

災害種別	被災施設（主要施設） 被災規模（延長・高さ等）	被災状況		
		一般被害	交通規制	応急対応
道路	上水道陥没 No.1 L=4m W=6m、 No.2 L=14m W=0.6m、No.3 L=25m W=0.6m、No.4 L=2.2m W=3m、No.5 L=30m W=1.7m、No.6 L=3.8m	なし	規制なし	不要

図-3 被災箇所が全て表示されていない状況

システムで図面を登録できるのだが、2枚以上の図面を登録してしまうと図面が重なり、下のように見えなくなってしまう。（図-4）

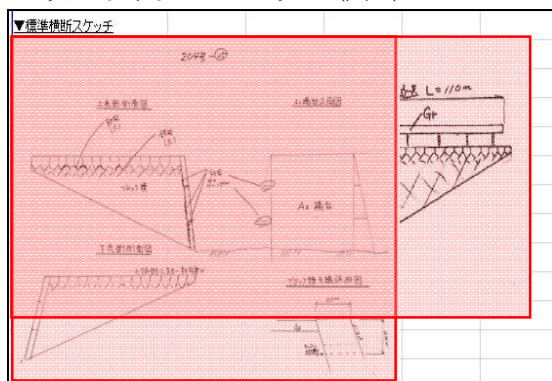


図-4 図面が重なって見えなくなっている状況

システム上で写真の順番を整理してから登録を行っても、右上の写真台帳のように、整理した写真の順番が反映されず、不規則に写真が添付されてしまうため、写真の再整理が必要になる。（図-5）



図-5 登録した写真が不規則に添付されている状況

班長の所属・役職・氏名を入力するのだが、帳票出力したエクセルでしか入力できないため、1被災路線毎に入力していく必要がある。（図-6）

F		G		H		I		J		K	
(被災市町村等: 石川県穴水町)											
班長: <所属 役職 氏名>											
被災施設 (主要施設) 被災規模 (延長・高さ等)				被災状況				概算被害額 (百万円)			
				一般被害		交通規制		応急対応		その他	
上水道陥没 No.1 L=4m W=6m、 No.2 L=14m W=0.6m、No.3 L=25m W=0.6m、No.4 L=2.2m W=3m、No.5 L=30m W=1.7m、No.6 L=3.8m				なし		規制なし		不要		砕石での 仮復旧箇 所有。埋 設管・マ	
										11	

図-6 班長の所属・役職・氏名を入力する箇所

以上の問題点に関して、エクセル上で修正が可能なのだが、システムで登録した内容をもう一度入力することになるため、2度手間になってしまい、効率が非常に落ちてしまう。私の場合は、エクセルを修正するだけで1時間程度かかってしまった。

c) 帳票出力すると三次元点群データが見せられない

三次元点群データは、「Pix4D Catch」というアプリを使用して取得する立体的なデータなのだが、こちらのデータは「被災状況調査支援ツール」か「Pix4D Catch」のアプリ内でしか見れないため、県や自治体には三次元点群データが見せられない。（図-7）

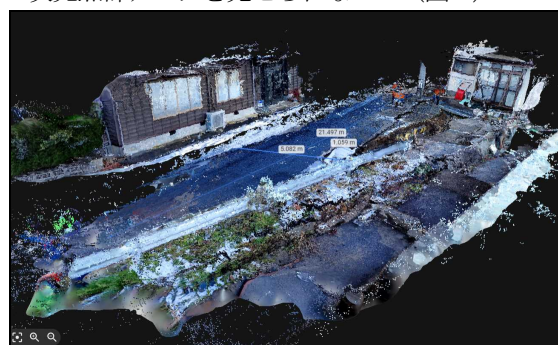


図-7 アプリを使用して作成した三次元点群データ

三次元点群データがあれば、テキストや図面だけでは分かりづらい被災箇所の規模や延長を立体的に把握することが可能となるのだが、帳票出力すると確認できなくなる。現地を非常に分かりやすく把握できるデータのため、データを見せられないと言うのは非常に不便である。

(3) 問題点のまとめ

上記の3点は、効率的に作業を進めることや正確な情報を迅速に伝えるためには、早急に改善すべき点である。そして、この3点に共通しているのが「県や自治体に帳票出力したエクセルデータを提出する」ことで発生している点である。そのため、私は県や自治体には「帳票出力したエクセルデータ」を提出するのではなく、別の手段で国が調査した報告書を提出できるようにすれば、より効率的になって良いのではないかと考えた。

5. 問題点を改善するための提案

(1) 提案内容

問題点を改善するため、私からは「TEC-FORCE活動支援アプリ」を県・自治体にも導入し、システム内で調査報告書を提出できるようにする」ことを提案する。

(2) 提案理由・採用することによるメリット

上記の提案を採用することで、国だけでなく、県・自治体でも更なる作業の効率化・大幅な負担軽減を行うことが可能となる。「国のメリット」と「県・自治体のメリット」は下記のとおりである。

a) 国のメリット

- ・問題点を全て早急に改善することができる

「TEC-FORCE活動支援アプリ」内のやり取りで全てが完了するため、エクセルを帳票出力・帳票修正するタイムロスがなくなる。それだけでなく、三次元点群データを見せられるため、県・自治体に立体的に現場を説明することが可能となる。

- ・内業を大幅に短縮することができるため、より外業を迅速に進めることができる

現地で困っている被災者の支援をより早急に行うことが可能となる。

b) 県・自治体のメリット

- ・リアルタイムで調査報告書を確認できる

例えば、迂回路がない集落があり、少しでも早く現地に行くために多くの現地調査の結果がほしい場合、「TEC-FORCE活動支援アプリ」を使用し、国が現地調査した内容を迅速に確認することが可能となる。

- ・エクセルや紙での管理よりも、調査報告書を管理しやすい

「TEC-FORCE活動支援アプリ」では自治体選択や箇

所番号順などで被災路線を分類して管理できるため、後からでも必要な被災路線の情報を早急に見つけることが可能となる。

(3) 徹底すべきこと

上記のとおり、国・県・自治体の全ての関係機関で更なる作業の効率化・大幅な負担軽減が期待できるのだが、そのメリットを失わないためには、1点だけ徹底すべきことがある。それは、調査箇所番号を統一して入力することである。（図-8）

ロジ報告	河川・路線名等	町道299号 下小路北線	ステータス
写真・3D	調査箇所番号		作成中
TEC調査班報告書	調査日時	2024年02月04日 16:02	更新日時
			2024年02月05日 22:18

図-8 調査箇所番号が入力されていない状況

「被災状況調査支援ツール」では、調査箇所番号を入力して被災路線を管理しているのだが、この入力が班毎で定まっていなかったり、入力されていないことにより、箇所番号順に表示しても順番が合っていない状態になってしまう。箇所番号順に調査報告書を表示できなくなるにより、県・自治体のメリットで示したリアルタイムでの調査報告書の確認や管理がしやすいことのメリットがなくなってしまう。そのため、調査箇所番号は統一して入力する必要がある。

6. 私見・まとめ

私は、今回の「令和6年能登半島地震」で初めてTEC-FORCEとして派遣され、被災地のために尽力した。TEC-FORCE隊員として、実際に被災地の方々の不安の声を聞いたり、被災した町を現地調査していく中で様々なことを学ぶことができた。私は、そのような経験を通して、災害時には迅速に現地調査を行い、現地状況を早急に県や自治体に報告することが非常に大切であると身を以て感じる事ができた。そのため、作業効率化に繋がる取り組みや工夫については積極的に取り入れるべきと考えている。

今回は、TEC-FORCE活動支援アプリの県・自治体への導入を提案したが、一度検討していただけるととてもありがたい。「TEC-FORCE活動支援アプリ」は非常に便利なスマートフォンアプリのため、ホットラインを構築した国・県・自治体の全ての関係機関で災害対応の際に共有して使用することが可能になると、更なる作業の効率化・大幅な負担軽減が期待できるため、改善の実施を提案する。

災害対応業務の効率化について ～横浜国道事務所統合管理システムの導入～

内藤 智子

関東地方整備局 企画部 情報通信技術課 (〒330-9724 埼玉県さいたま市中央区新都心2-1)

近年、気候変動の影響により、台風や豪雨による土砂災害等の気象災害が激甚化・頻発化している。また、今後南海トラフ地震や首都直下地震などの大規模地震の発生も想定されている。このような状況において、道路・河川等のインフラを管理する関東地方整備局では地域連携を含めた災害対応力の向上が求められている。横浜国道事務所では2023年7月に新庁舎へ移転したことを機に、災害対応の迅速化・効率化を目的とし、情報収集手法の見直しやこれまでの災害対応業務における課題の改善に取り組んだ。本稿では、横浜国道事務所統合管理システムの整備をはじめとした災害対応業務効率化の取組みについて述べる。

キーワード 災害対応, 防災, 業務効率化, 情報収集

1. はじめに

横浜国道事務所では過去に西湘バイパスにて越波による大きな被害を受けているほか、冬期には箱根新道での積雪による通行止めなど、迅速かつ効率的な災害対応が必要となっている。

また、首都直下地震発生時の道路啓開八方向作戦における南ルートの実行責任事務所となっており、災害想定訓練(図-1)を定期的を実施するなどして日頃より災害発生時の対応力の強化に取り組んでいる。



図-1 災害想定訓練の様子

2. 実働課題

2023年には関東大震災から100年を迎え、今後関東では首都直下地震の発生が想定されている中、道路管理事務所として地域全体での災害対応力を向上させるため、関係機関と連携し迅速かつ広域的な災害対応を行うこと

が求められている。

また、これまでの災害対応業務においては、情報収集をはじめとした各種課題が挙げられており、災害対応の見直しが必要とされていた。

(1) 情報収集における課題

災害対応時には、管内に整備した気象観測設備やCCTVカメラ等において、雨量や積雪などの現地の状況をリアルタイムで把握している。

気象観測設備をはじめとした各設備で得られる情報は、設備ごとに専用の個別システムを構築して情報配信を行っていたことから、災害対応時には複数のアプリケーションを立ち上げ、現地情報の収集・確認を行う必要があり、初動体制の確立及び情報収集に時間を要することが課題とされていた。

また、各アプリケーションごとにアクセス先・ID・パスワードの管理が必要であることや、システム操作の習得にも時間を要するといった課題があった。

(2) 災害対応業務における課題

台風や積雪により注意体制や警戒体制などの災害対応を開始した際には、事務所内の災害対策室に職員が参集し業務にあたっている。

これまでの災害対応では、災害対策室常設の共用PCを利用して災害対応業務を行っていたことから、普段使い慣れていないPCでの業務となり、作業効率が落ちるとの声が職員からあがっていた。

これまでの災害対応において前述した課題があったことから、新庁舎への移転に合わせて、課題解消を図ると

ともに、これからの広域的な災害対応を実現するための取り組みを実施した。

3. 課題解決への取り組み

前節で述べたように、災害対応に必要な情報が分断されていることで生じる課題のほか、執務環境の課題解消を図るため、「横浜国道事務所統合管理システム」の導入及び執務環境改善を図り災害対応の効率化に努めた。

(1) 横浜国道事務所統合管理システムの概要

横浜国道事務所統合管理システムでは、CCTVカメラ・気象観測設備・道路情報板・トンネル非常警報・道路規制情報の5つの情報を同一システム上で運用・確認することを可能とした。各設備において取得できる情報は、表-1のとおりである。

表-1 統合管理システムで取得できる情報

設備名称	情報内容
CCTVカメラ	現地のリアルタイム映像 画角やズーム機能の操作も可能
気象観測設備	気温・路面温度・路面状態・風向 風速・雨量・積雪深・視程
道路情報板	道路情報板の表示内容
トンネル非常警報	トンネル道路情報板の表示内容 冠水・蓄電池出力停止・停電等
道路規制情報	道路規制内容・場所・日時

統合管理システムの画面構成は図-2のようになっている。中央の地図上に表示されている各設備のアイコンをクリックすることで、現地の情報を確認することができる。

また、主要機能として下記項目をシステムに取り入れており、感覚的にシステム操作ができるよう工夫している。

＜主要機能＞

- ・チェックボックス機能による表示情報の選択
- ・プルダウンリストによる検索機能
- ・2次元地図による設備配置表示

このように、災害対応時に必要な現地設備の各情報を統合管理システムに集約したことで、情報収集の迅速化・簡素化を図り、初動対応をはじめとした災害対応力の向上に努めた。

また、リエゾン対応の迅速化を図るため、気象庁発表情報のリアルタイム連動を搭載した。この機能では、気象庁より注意報・警報・特別警報が発令された際、統合管理システムの地図上に気象警報の自動表示を可能としている。実際に警報が発令された場合の画面表示は図-3のようになる。警報発令地域が市町村ごとに色別表示（発令情報が注意報であれば黄色、警報であれば赤色、特別警報であれば紫色に色分けして表示）されるほか、マウスカーソルを合わせることで現在発令中の警報状況をひと目で確認可能としており、地域支援対応における情報収集機能の向上を図った。

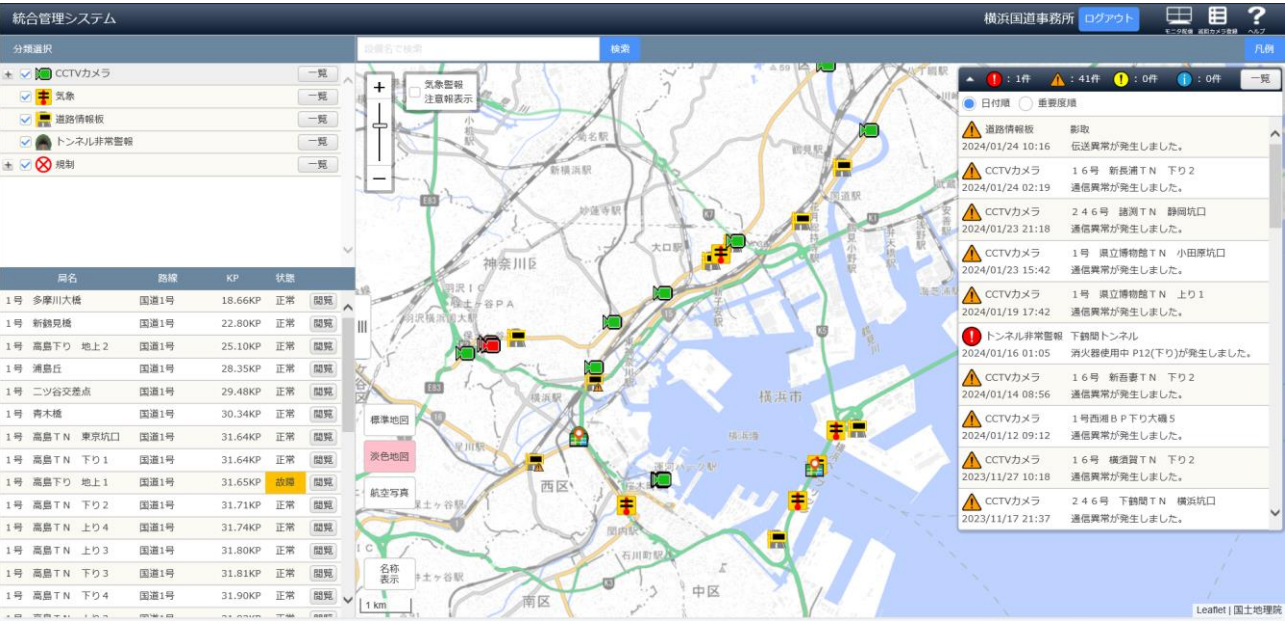


図-2 統合管理システム画面構成

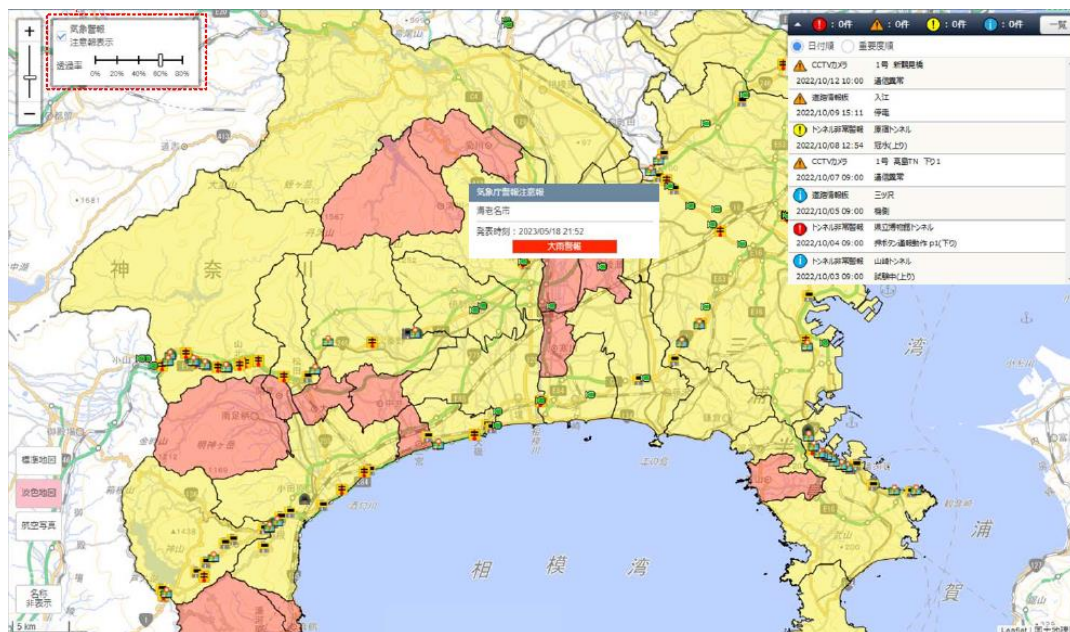


図-3 気象警報発令中の画面表示

(2) 横浜国道事務所統合管理システムの特徴

今回整備した統合管理システムの特徴を下記に示す。

a) 情報収集の一元化

前述のとおり、災害対応時に必要な情報がシステムに集約されているため、災害発生時の初動体制を迅速に構築できるとともに、情報収集の簡素化を図ることができる。

b) HTML形式のシステム構成

情報設備ごとの専用システム構築を廃止し、HTML形式でのシステム構築とすることで汎用性を向上させたほか、整備費用の軽減を図った。

これにより、インターネット上に発信されている気象庁発表情報のリアルタイム連動などの取り込みも容易に行え、リエゾン派遣やホットライン構築などの地域支援対応を効率的に行うことができる。

c) 関係機関へのシステム展開

前項で述べたように当システムはHTML形式でのシステム構成のため、他事務所へのシステム展開も容易に行えることから、災害対応業務の統一化を図ることも可能となっている。

d) スマートフォン等での情報閲覧

統合管理システムの情報は、所内PCだけでなくスマートフォンでも情報収集可能であり、業務時間外の災害発生時においても管内の最新情報をシームレスに入手することができる。スマートフォンでの実際の画面表示を図-4に示す。スマートフォンにおいてもPCと同様に、地図上の設備アイコンを選択するだけで情報閲覧ができるシンプルな構成としている。



図-4 スマートフォンでの画面表示

4. 無線LAN環境の整備

2. (2)で述べた災害対応業務における課題を解決するために、所内ネットワークの完全無線LAN化に取り組んだ。これは関東地方整備局の事務所では初の試みとなる。

無線LAN環境（図-5）を実現したことで、有線LAN環境では不可能であったPCの持ち運びが可能となり、災害対応にあたる職員は、普段使い慣れている行政PCを災害対策室に持ち込んで業務を行うことができる。これにより、作業効率の向上を図れるだけでなく、体制要員同士の情報共有を円滑にすることが可能となった。

さらに、無線機能により各PC画面を災害対策室モニ

タへ表示可能とし、各班の報告資料などのペーパーレス化も実現した。



図5 無線LAN環境

5. 災害対策室のシステム・運用改善

これまでの災害対応経験での課題から、より迅速かつ効率的な災害対応を行うために、災害対策室に備わっているシステムの見直しを行ったので本節にて紹介する。

(1) ワンボタンシステムによるモニタ起動

従来より災害対策室には大型モニタが設置されており、災害対応時には管内のカメラ映像やオンライン会議の様子、各班の報告資料を表示することで円滑な災害対応を図ってきた。

大型モニタの起動においては、従来は各モニタごとに個別リモコンで起動させていたが、新庁舎の災害対策室の大型モニタ（図-6）では、如何なる初動要員でも迅速に初動体制確立が可能となるようワンボタン（図-7）で全てのモニタ・システムを立ち上げることができるように機能改善を行った。

これにより初動対応にあたる職員の作業負担を減らせるだけでなく、スムーズに災害対応に移行することができる。



図-6 災害対策室大型モニタ



図-7 大型モニタ起動システム

(2) 災害種別に応じたカメラプリセット機能の採用

台風や雪害などの各災害対応時の重要地点については、現地のカメラ映像を大型モニタへ常時表示し監視を行っている。当事務所では、台風接近時には西湘バイパスでの越波状況、降雪の際には箱根峠での積雪状況の監視を実施して事態変化の注視に努めている。リアルタイムでの状況監視においては、台風や雪害等の災害種別ごとに監視すべき現地の映像が異なる。従来は大型モニタへ表示するカメラ映像をカメラリストより個別選択し表示操作しており、初動体制の構築に時間を要していた。

この課題をふまえ、新システムの大型モニタ表示ではプリセット登録機能を搭載し、各事象における標準カメラを登録できる機能を整備した。この機能では10パターンの表示内容の登録が可能となっており、当事務所では、「台風・越波対応用」「雪害対応用」「テレビ会議用」などの表示内容を事前に登録し災害対応に備えている。

プリセット機能の搭載により、初動体制時は事前に登録した表示項目をマウス操作のみでモニタ表示することが可能となり、職員の負担を軽減するとともに、初動体制の迅速な確立を実現している。

(3) Bluetoothの活用

災害対応時には隣接事務所や道路関係機関とのオンライン会議を行い、リアルタイムで状況共有を行っている。また、災害対応においては情報班や対策班といった班ごとに業務を行っており、個人の行政PC内の情報を大型モニタへ表示し、情報共有する機会が増えている。

今回、大型モニタへの画面共有についてはBluetooth 機能を採用した。無線機能の活用により、所内全てのPCをはじめ、官携帯等のスマートフォンの画面もシームレスに表示が可能となっている。

これにより災害対応時には、オンライン会議の様子や出張所や班ごとの報告資料を画面表示し、効率的に情報共有を行うことができるようになった。

(4) 災害対策室の有効活用

最後に災害対策室の運用面について、災害対策室を有事の際のみならず、平常時の業務においても活用するように見直しを行った。

これまで災害対策室は災害時のみの利用であったため、災害対策室に備わっている機器やシステムの操作をする機会が限られていた。

庁舎移転後は災害対策室の有効利用を含め通常業務での利用を可能とし、平常時から映像表示システム等の操作を使い慣れることで操作習熟度向上を図り、災害発生時には全ての職員が災害対策室システムの準備等を迅速に整えられることを目標としている。

また、災害対策室の予約についても、Teams内にて予約フォームを所内展開し汎用性を高めた。

6. まとめと今後の課題

庁舎移転に伴い統合管理システムの整備や無線LAN環

境の整備を行ったことで、災害対応業務の効率化を図った。災害発生時には今回整備したものを有効活用して迅速な初動体制の立ち上げ、効率的な災害対応に取り組んでいきたい。

今後の展望として、気象庁発表の地震情報を統合管理システムに反映することを検討している。首都直下地震をはじめとした大規模な地震が想定されている中で、システム内で取得できる情報の充実度を向上させ、あらゆる災害に対応できる災害対策システムの構築に努めていきたい。

さらに、地域全体の防災力・災害対応力を向上させていくために、神奈川県・横浜市など管内自治体情報（CCTVカメラや地方道路情報など）の取り込みを検討し、関係機関との連携強化をスピード感を持って進めていきたい。

また、今後も災害対応時における情報共有方法の操作習熟度向上を図り、所内・関係機関との情報共有の精度向上を継続していく。

防災カルテ点検における着目すべき 落石の大きさの分析

坂本 尚弘¹・川又 基人¹・倉橋 稔幸¹

¹国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区
平岸1条3丁目1-34)

防災カルテ点検における新たな斜面点検手法の一つとして、地表面形状の3次元的な把握に長けた高密度3次元点群データの活用が期待されているが、運用に重要な認識すべき落石の大きさが不明である。そこで本報告では、北海道内の国道における196箇所の防災カルテ点検結果の「着目すべき変状」欄等に記載された落石の大きさ及び比高の傾向を分析したほか、対象物の面積ごとにLiDAR機器の概算点密度を算出し、頻度分布からLiDAR機器が認識出来る落石の大きさについて考察した。その結果、点密度400点/m²を確保することで斜面上にある0.5m以上の大きさの落石を形状認識できると推定した。

キーワード 防災カルテ点検、高密度三次元点群データ、落石、点密度

1. はじめに

防災カルテ点検（以下、点検と略する）は土砂災害等の防止を目的として年に一度行われている。点検は目視、前回点検写真及びスケッチとの比較を主として行われるものの、前回点検写真等では正確な発生位置や落石の大きさ等を正確に記録することは難しく、変化に気がつかない見逃しリスクがある。また、高所など危険な箇所に着目点がある場合は、近接目視の実施は困難であり観察の限界がある。そのため、現状の点検精度を維持・向上させていくための新たな対応手法が求められている。その解決策の一つとして、Light Detection And Rangingを用いた計測機器（以下、LiDAR機器と略す）等による高密度三次元点群データの活用が挙げられる。これを用いることで、対象物が高所や遠方であっても位置や大きさを精度良く捉えることができる。また、既存のスケッチよりも圧倒的に情報量が多く落石の大きさなどを精度よく把握することができるほか、二時期の地形の差分等やその変動の解析・抽出も可能である。今後は防災カルテ点検を実施する技術者の「目視による観察・計測・記録」の助けになると期待される。

一方で、令和4年発行の「道路防災点検の手引き」においては、点群データ活用についての有効性とその重要性は説かれているものの¹⁾、出来型管理要領（土工編）²⁾等で示されている（表-1）ような具体的な運用は定め

られていない。斜面点検におけるLiDAR機器の運用の指針策定においてまず重要なのは、「着目すべき変状」の対象である落石等の大きさや形状を認識する上で、最低限必要な点密度を把握することにあると考えられる。

そこで本報告では、北海道開発局で管理する国道における、道路防災カルテの「落石・崩壊」を対象として、着目すべき落石（以下、落石と略す）の大きさと比高の傾向を分析し、対象物の面積ごとに必要な概算点密度を算出した上で、LiDAR機器が認識出来る落石の大きさについて考察した。

表-1 点密度による運用の一例²⁾

利用目的	要求点密度	(標準値)
出来形計測	1点以上/0.01m ²	(0.1m×0.1m メッシュ)
起工測量	1点以上/0.25m ²	(0.5m×0.5m メッシュ)

2. 分析方法

(1) 着目すべき落石の大きさと比高について

北海道開発局から提供を受けた国道の防災カルテ点検のうち「落石・崩壊」において令和2年度時点で要対策に判定された約300箇所のうち（図-1）、切土のり面・斜面において、防災カルテ様式（図-2）に着目すべき落石の大きさ及び比高が記載された196箇所を抽出し分析を行なった。

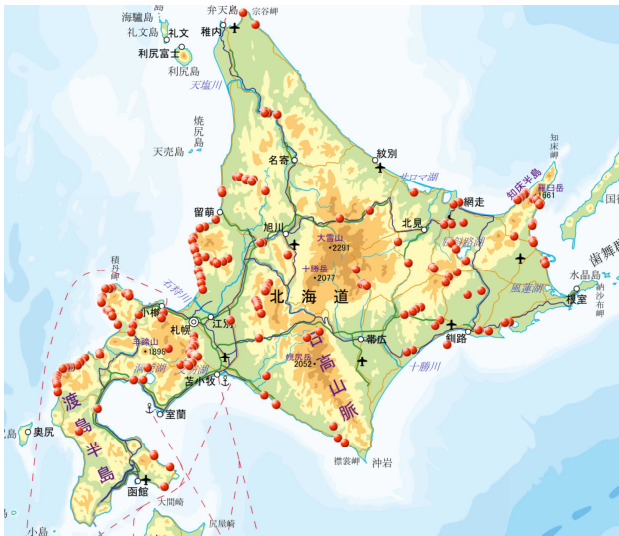


図-1 北海道における防点カルテ点検要対策箇所の分布
(地理院地図より作成)

着目すべき変状として挙げられている落石の大きさ及び道路からの比高を「防災カルテ様式」の表または図中から抽出した(図-2)。抽出情報の位置関係を図-3に示す。ただし、0.1 mから0.5 mのような幅を持たせた表記されている場合には、その中間値である0.3 mとした。

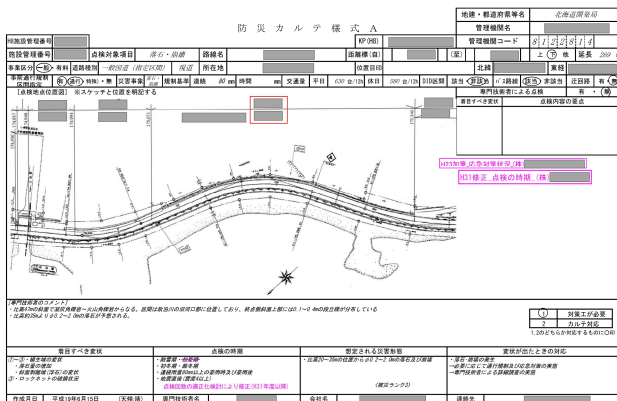


図-2 防災カルテ様式の例

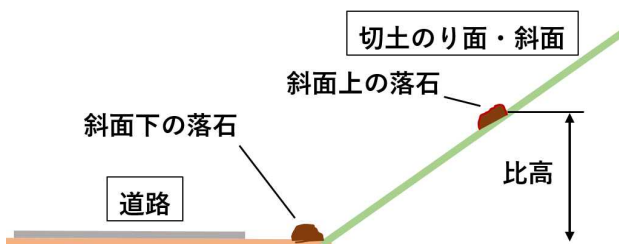


図-3 落石の抽出情報の位置関係

(2) 対象物の大きさごとの概算点密度

川又ら³⁾は、1 m×1 mの大きさの対象物において100点/m²以上の点密度があれば、その形状を約9割の面積再現率で把握できることを明らかにし、対象物を捉えるために必要な点密度を示した。

そこで本報告では、この結果を基に対象物面積に対して点群データを100点取得するために必要な点密度を算出する式(1a)を考案した。

$$\frac{1}{\text{対象物面積}} \times 100 = \text{概算点密度} \left(\frac{\text{点}}{\text{m}^2} \right) \quad (1a)$$

式(1a)を用いて対象物の大きさごとに必要な概算点密度を算出した(表-2)。例えば、0.5 m×0.5 m(以下、□0.5mと略す)の大きさの落石を把握したい場合、点密度は400点/m²以上を必要とする。この表をもとに、防災カルテに記載された着目すべき落石について、LiDAR機器が斜面上で認識できる落石の大きさを考察した。

表-2 対象物の大きさごとに必要な概算点密度

対象物	対象物面積 (m ²)	概算点密度 (点/m ²)	備考
□0.1m	0.01	10,000	
□0.2m	0.04	2,500	
□0.3m	0.09	1,200	1,111を繰上
□0.4m	0.16	625	
□0.5m	0.25	400	
□1m	1	100	
□1.5m	2.25	44	
□2m	4	25	
□3m	9	11	
□4m	16	7	6.25を繰上
□5m	25	4	
□10m	100	1	

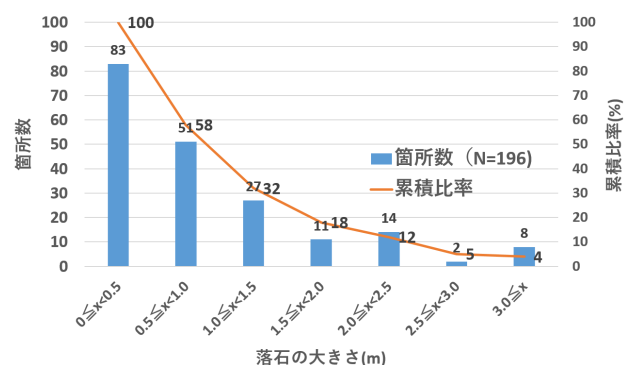


図-4 斜面上の落石の大きさの頻度分布及び累積比率

3. 結果

(1) 斜面上の落石の大きさ及び比高の傾向

防災カルテから抽出した斜面上の落石の大きさの頻度分布と累積比率を図-4に示す。累積比率は0 m-0.25 m区間で100%となるように示し、全体のうち0.5 m以上の落石が58%、1.0 m以上の落石が32%を占めている。落石の大きさが大きくなると箇所数も減少する傾向を示した。

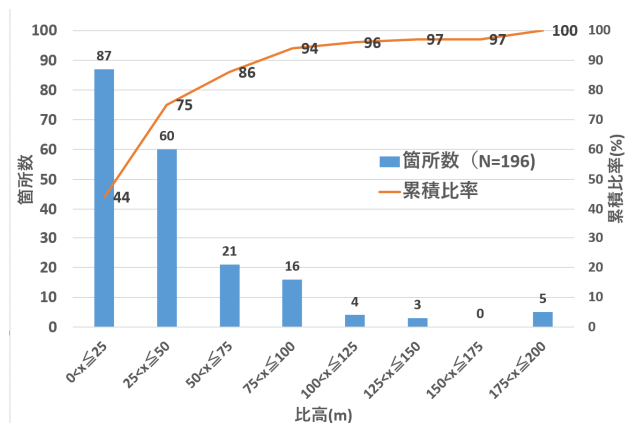


図-5 斜面上に落石が位置する比高の頻度分布及び累積比率

落石の比高の頻度分布及び累積比率を図-5に示す。累積比率は最も高い比高の区間175 m-200 mで100%となるように示し、25 m以下の比高が44%、50 m以下の比高まで含めると75%となった。頻度分布は比高が低いほど箇所数は多く、50 mを超えると箇所数は急減した。

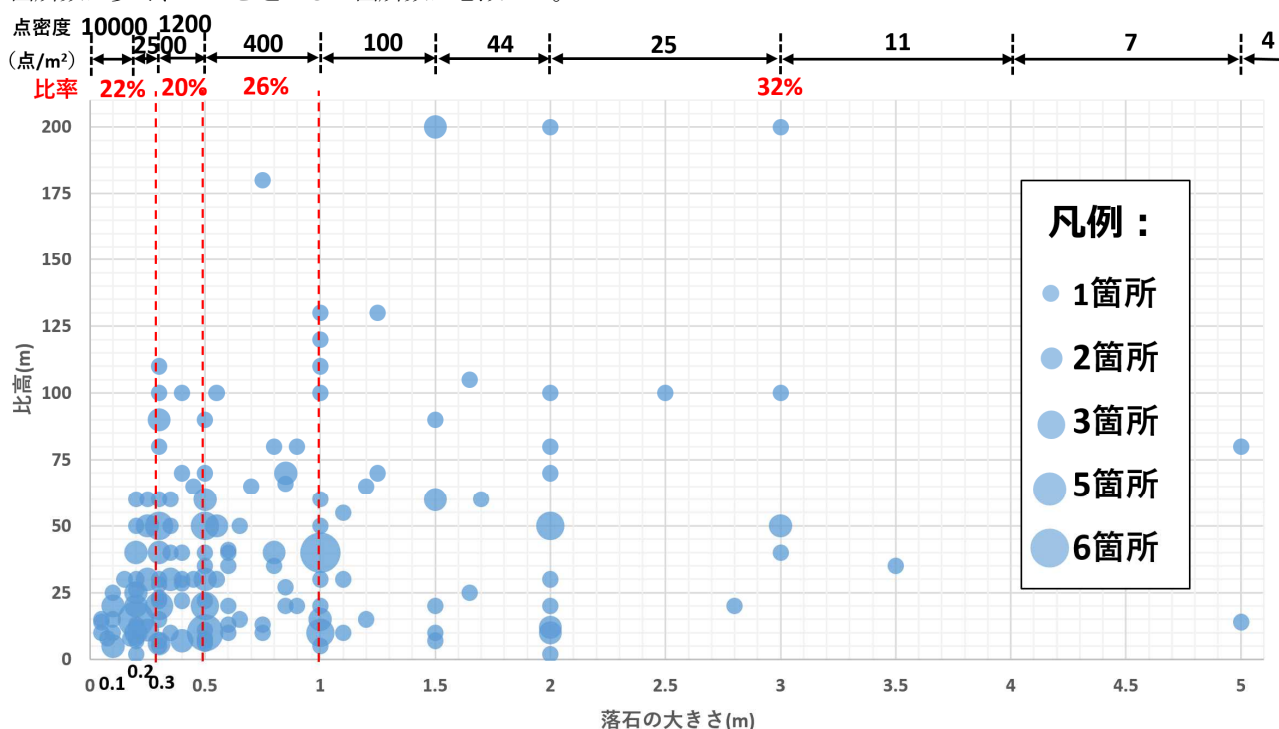


図-6 斜面上の落石の大きさと比高のバブルチャート

図-6に落石の大きさを横軸、比高を縦軸に、箇所数を丸印の大きさとしてバブルチャートを作成した。図の上方に表-2から算出した概算点密度及び落石の大きさに応じた全体の比率を記載した。1 m以下の大きさの落石が比高75 m以下の位置に多い傾向を示した。

(2) 斜面下の落石の大きさの傾向

斜面下の落石の大きさの頻度分布と累積比率を図-7に示す。0.1 m未満の落石は1箇所だけあるものの、箇所数は右肩下がりとなった。最大の大きさは1 mだった。累積比率は0 m-0.1 m区間を100%とした。0.1 m以上の落石で99%、0.2 m以上の落石で74%である。

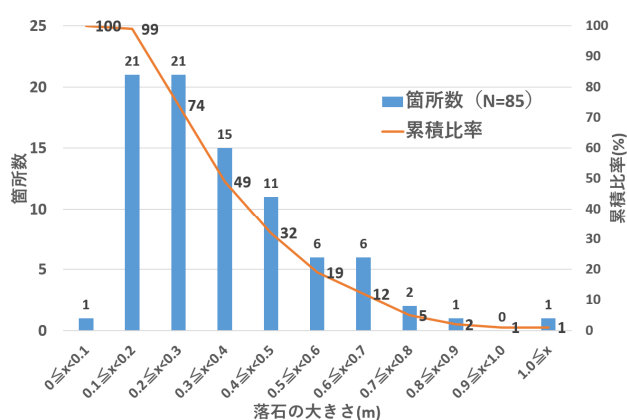


図-7 斜面下の落石の大きさの頻度分布及び累積比率

4. 考察

(1) 斜面上の落石の認識出来る大きさについて

斜面上の落石を捉えたい場合、UAV-LiDARを使用し上空から点群取得する方法が考えられる。作業規程の準則⁴⁾によれば、数値地形図データ地図情報レベル500 は点密度400 点/㎡以上とされ実運用されている点密度である（表-3）。この点密度なら大きさ□0.5 mの対象物を捉えられる（表-2）。一方、それは全箇所の落石のうち58 %を占める（図-4）。落石の大きさ□0.5 m未満は全体の42 %を占め、400 点/㎡よりも密な点密度の確保が課題となる。特に落石が小さくても比高が高い位置にある落石ほど運動エネルギーが大きくなる。そのため、より高い点密度により落石を捕捉する必要がある。そのためにはUAV-LiDARの点群照射時間を延ばす、地面に近接して飛行する等の方法が考えられる。ほかにも高い点密度でレーザ照射可能なLiDAR機器の開発が期待される。

表-3 作業規則の準則に示す点密度⁴⁾

成果品目	地図情報レベル	点密度 (点/㎡以上)	作業規程 の準則	想定点群取 得機器	形状把握可能な 対象物の大きさ
数値地形図データ	500	400	第483条	UAV-LiDAR	□0.5m
数値地形図データ	1000	100	第483条		□1m
等高線データ	1000	1	第567条	航空LP	□10m

(2) 斜面下の落石の認識出来る大きさについて

斜面下の落石は近接による計測が容易である。近接が可能であれば照射距離の短い点群取得機器でも高い密度で点群を得ることが期待できる。例えば、iPhoneProシリーズなどのLiDAR搭載モバイル機器がある。擁壁を対象に点群取得した事例を示す（図-8）と、点密度10,000 点/㎡以上を示す緑色が多く出現していた。このことは現在流通のあるモバイル機器を用いても、□0.1m以上の大きさの落石を形状認識（表-2）可能となることを示唆する。斜面下の□0.1m以上の大きさの落石は全体の99%を占めるため、ほぼすべての落石の形状認識が可能とな

ることが期待される。

(3) 今後の課題

落石をLiDAR機器で計測し、形状認識することにより新たな落石の発見や移動量の把握につながると考えられる。ただし、落石の移動量の読み取りは、ある程度の形状がわかればよく、形状認識するよりも点密度を減らせる可能性がある。そのため、必ずしも表-2に示す点密度を必要とする訳ではないと考えられる。今後は用途に応じた点密度を明らかにする必要があり、現地実験等により検証を重ねていきたい。

5. まとめと今後の課題

本報告の結果は、以下のようにまとめられる。

- ・196 箇所の防災カルテ点検結果を分析すると、落石の大きさは0.05 m～5 mだった。最も多い落石の大きさは0.5 m以下だった。一方、0.5 m以上の大きさの落石は全体の58%を占めていた。

- ・落石の大きさごとの概算点密度を明らかにした。それを基に、UAV-LiDARにより数値地形図データ地図情報レベル500 に相当する点密度400 点/㎡を確保することで、□0.5 m以上の落石の大きさを形状認識できると推定した。このことから斜面上の「着目すべき落石」の58 %を捕捉できる可能性がある。

- ・LiDAR搭載モバイル機器は点密度10,000 点/㎡以上を確保可能なため、□0.1 m以上の大きさの落石を形状認識できると推定した。このことから斜面下の「着目すべき落石」の99 %を捕捉できる可能性がある。

- ・今後は、形状認識だけではなく移動量等の変状に適用した場合の点密度との関係を明らかにするため、用途に応じた現地実験等で検証する予定である。

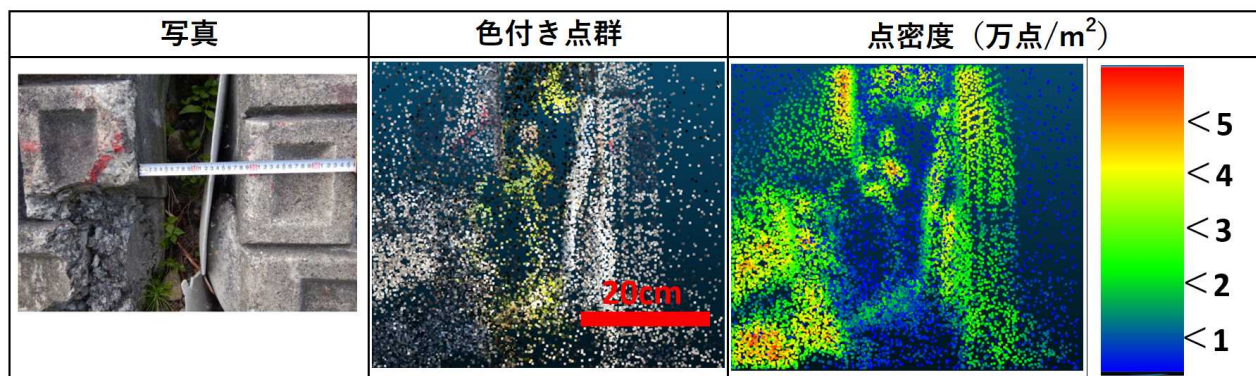


図-8 モバイル機器による点群取得の事例

謝辞：北海道開発局建設部道路維持課には、資料提供に快く協力していただいた。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

1) 一般社団法人全国地質調査業協会連合会：道路防災点検の手引き(豪雨・豪雪等)〔改訂版〕-DX 時代に向けたチャレンジ-, 145p. ,2022.

2) 国土交通省：レーザースキャナーを用いた出来型管理要領(土工編)(案), 24p. ,2018.

3) 川又基人, 坂本尚弘, 日外勝仁, 山崎秀策, 倉橋稔幸：道路斜面の点検における点群データの必要密度の検討, 日本応用地質学会研究発表会, 2023.

4) 国土交通省：作業規程の準則, 国土交通省告示第250号, 2023.

木質空間の火災性状の把握に向けた 火災実験結果とその性状予測

野秋 政希¹、鈴木 淳一¹

¹国立研究開発法人 建築研究所 防火研究グループ（〒305-0802 茨城県つくば市立原1）

本研究では今後さらなる利用促進が見込まれる厚板木質部材を利用した建築空間の火災性状の把握を目的とした実大規模区画火災実験の結果を報告した。換気支配型の火災においては、厚板木質壁の利用により発熱速度が増加し、区画内が高温となっている時間は長くなるものの、昇温過程における区画内温度は厚板木質壁が無い条件よりも幾分低くなった。これは厚板木質壁の利用により可燃物の量や表面積が増加し、熱分解ガスに伴い区画内の圧力が増加し、火災室に流入する空気量が制限されたためと考えられ、この影響を考慮した火災区画内の熱量・質量収支モデルを構築し、区画内温度性状について実験値と計算値の比較検証を行った。

厚板木質壁、区画内温度、発熱速度、炭化層の赤熱、熱分解ガス、内部圧力

1. はじめに

木造は建材製造時や施工時のCO₂排出が少なく、炭素が固定されることから、脱炭素社会の実現対策の一つとして有力視されている。また、木材利用量を増加できれば林業・木材産業の活性化を図ることができるほか、調湿効果や温もりなどの心理的効果も期待され、建築物への木材利用促進に対する機運が高まっている。2021年には木材利用促進法の適用対象が公共建築物から建築物一般にも拡大されている（都市(まち)の木造化推進法）。

しかし、木材は可燃物であるため火災安全性に十分配慮する必要がある。特に近年では、CLTやLVL・NLTといった厚板・大断面の木製パネル等を用いた部材が多用される建物が増加している。こうした厚板・大断面の木造躯体等が持ち込まれた建築空間では従前とは異なる火災性状となる可能性がある。

そこで、本研究では厚板木質部材を利用した建築空間に対する適切な火災安全対策の検討に向けて、その火災性状の把握を目的とした実大規模区画火災実験の結果およびその性状予測に関する検討について報告する。

下地に仕上げ材を貼った。壁および天井の仕上げ材は木造1時間耐火構造の壁に利用される強化石膏ボード（タイプV）21mm2枚張りとした。ただし、後述No.2およびNo.4の条件にあっては、一部の壁がCLT等の厚板木質部材となった状況を想定し、構造用合板24mmを5枚ビスで張り合わせた仕様とした。また、床の燃え抜けを防止する観点から床においてはAESファイバークラケット25mm厚を敷設した。

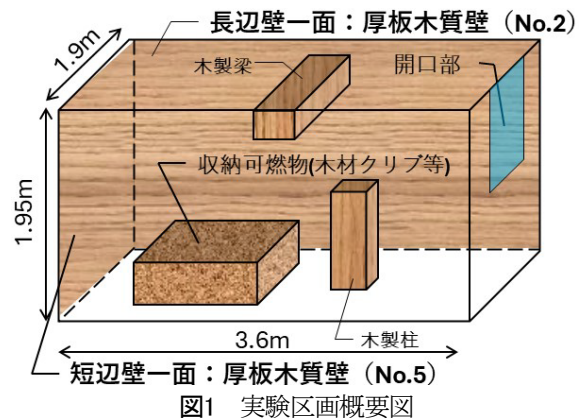


図2 実験前の区画内と実験中の状況

2. 実大規模木造区画火災実験

(1) 実験概要

内寸幅1.9m、奥行3.6m、高さ1.95mの区画内で模擬的な収納可燃物（木材クリブ等）を燃え尽きるまで燃焼させ、その過程における区画内温度、発熱速度、木造部材の内部温度等を計測した。実験区画の壁、天井、床は外側から鋼製フレーム、けい酸カルシウム板0.2TK25mm厚を2枚、鋼板1.6mm厚で構成され、鋼板に留め付けたLGS

また、いずれの実験においても、幅120mm厚さ30mmのラミナをレゾルシノール・フェノール系接着剤で張り合わせ、断面寸法を360mm角としたカラマツ集成材の柱および梁（1m長）を図1に示す位置に設置した。

(2) 実験条件

火災盛期時の区画内温度は区画内の可燃物量、開口の大きさ、周壁の面積や材質等によって異なるが、あらゆる条件を実大規模実験で再現することは困難であるため、本実験では、建築基準法で規定する耐火構造や準耐火構造等の性能評価試験で採用される標準加熱温度曲線（ISO834）と本実験の区画内温度が同程度となるよう予備実験の結果等を踏まえて、開口の大きさおよび可燃物量を調整した。

また、主な収納可燃物は木材クリブ（複数本の角材を井桁に複数段積み上げたもの）とした。標準加熱時における木材の炭化速度が毎分0.6～0.8 mm程度であることを考慮し、燃焼が一時間程度継続するよう木材クリブを構成する角材を75mm角または90mm角のスギ材（比重：0.4～0.5、含水率：10%程度）とした。

さらに、火災区画内の性状は、換気支配型火災（開口部から流入する空気量に比して可燃物の熱分解が多い条件）と燃料支配型火災（開口部から流入する空気量に比して可燃物の熱分解が少ない条件）によって大きく変わる可能性があったため、それぞれの条件に近い条件を再現すべく、開口部の大きさと収納可燃物の量を変化させた。具体的には大宮らによる研究¹⁾等を参考とし、開口因子 $A_{op}\sqrt{H_{op}}$ に対する収納可燃物の露出表面積 A_{fuel} の比（燃焼支配型因子 χ ）＝0.07を換気支配型火災と燃料支配型火災の境界と考え、換気支配型火災を想定したNo.1およびNo.2では床面積当たりの発熱量（発熱量密度）が約720MJ/m²となるよう木材クリブを投入し、開口の幅および高さをそれぞれ0.75m、1.0mとした。一方、燃料支配型火災を想定したNo.4およびNo.5では床面積当たりの発熱量（発熱量密度）が約280MJ/m²となるよう木材クリブを投入し、開口の幅および高さをそれぞれ0.75m、0.8mとした。それぞれの発熱量密度は平成12年建設省告示第1433号で規定される住宅、病室・博物館等と同程度である。なお、参考として発熱量密度を540MJ/m²程度（平成12年建設省告示第1433号における事務室想定）とした木材クリブを用いた条件（No.3）および事務所で想定される木製の事務机や書類、パソコン、椅子等を収納可燃物とした条件（No.6）も併せて実施した。

以上、実験条件の一覧を表1に示す。本報では、主に壁の木質化の有無の影響を比較可能なNo.1とNo.2、No.4とNo.5の違いについて報告する。

表1 実験条件

実験No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
収納可燃物の種類	木材クリブ					事務机
発熱量密度[MJ/m ²]	726	702	534	280	247	471
厚板木質部材 (構造用合板t24×5)	無し	長手壁 一面	無し	無し	短手壁 一面	無し
開口幅[m]	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
開口高さ[m]	1	1	1	0.8	0.8	0.8
開口因子[m ² (5/2)]	0.75	0.75	0.75	0.54	0.54	0.54
可燃物露出表面積[m ²]	18.2	18.2	13.8	6.6	6.6	10.2

木材現し部以外の壁・天井はGB-F(V)21mm×2、床はGB-R12.5mm+AES25mm×2
いずれの条件も木造模擬柱梁有り。可燃物露出表面積は収納可燃物のみ。

(3) 実験結果 — 区画内火災性状

図3および図4は区画内平均温度と発熱速度を厚板木質壁の有無別に比較した結果である。図3は木造躯体が無くとも換気支配型火災となる条件である（実験No.1（厚板木質壁無し）と実験No.2（厚板木質壁有り））。図より、No.2の発熱速度は木質壁の燃焼に伴い、No.1に比してかなり高い値で推移しているが、昇温過程における区画内温度はNo.1に比してやや低い値で推移している。ただし、No.2の方が区画内温度が高温となっている時間は長期に及び、点火から4時間が経過した時点にあっても区画内温度は750℃程度となっており、外殻の鋼板が高温となり安全上の配慮からこの時点で実験を中止した。

また、No.2にあつては点火後80分から120分の間、発熱速度が減衰しているにもかかわらず、区画内温度は上昇し続けた。これは、点火後120分時点における発熱速度（1MW程度）を超える発熱は開口から噴出する火災によるものであり、区画内の昇温に寄与していないことを示唆している。

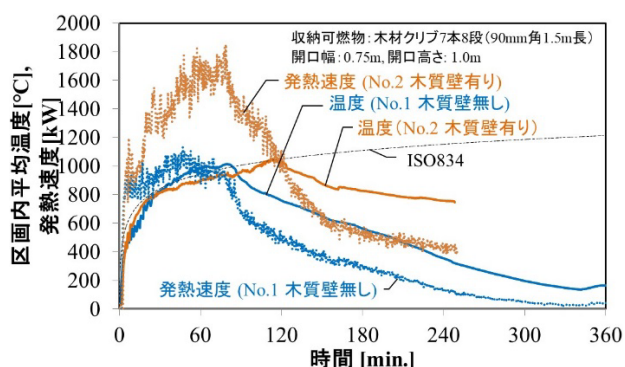


図3 No.1とNo.2の区画内温度と発熱速度の比較

図4は燃料支配型火災に近い条件における厚板木質壁の有無別の区画内温度と発熱速度の比較結果である。（実験No.4（厚板木質壁無し）と実験No.5（厚板木質壁有り））。図より、区画内温度、発熱速度ともに、厚板木質壁有りの方が高い値で推移しており、燃料支配型火災にあつては、木質壁の燃焼発熱が区画内温度の上昇に寄与していると考えられる。また、No.3に比べて、No.5の方が木質壁の設置領域や収納可燃物も少なく、木質壁

が全て熱分解した点火後80分以降に発熱速度が低下し始めると、区画内温度も低下し始めた。

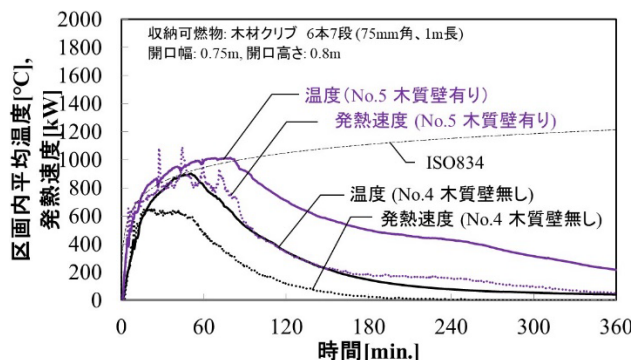


図4 No.4とNo.5の区画内温度と発熱速度の比較

なお、各条件の区画内平均温度と酸素濃度の経時変化はそれぞれ図5および図6に示すとおりである。

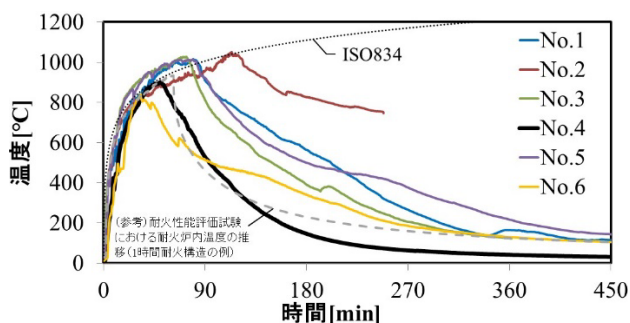


図5 各条件の区画内温度平均値の経時変化

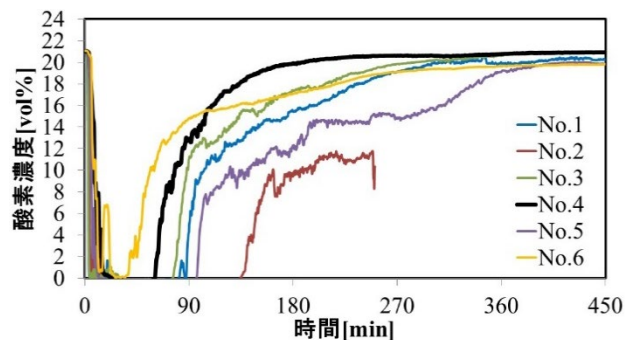


図6 各条件の酸素濃度の経時変化



(a) No.4(木造躯体無し) (b) No.5(木造躯体有り)

図7 No.4とNo.5の開口噴出火炎の比較

さらに、図7はNo.4とNo.5における開口から噴出する火炎の様子を比較した結果である。図より、No.5は木質壁の燃焼に伴い、開口から大きな火炎が噴出する様子が確認できる。

(4) 実験結果 — 木質柱・木質梁・木質壁の炭化性状

木質壁有りのNo.2、No.5は木質梁が最終的に焼失したが、木質壁無しのNo.1、No.4は図8の通り、未炭化部が残存していた。(ただし、No.1にあっては実験の制約上、点火後約10時間で終了する必要があるため、より長時間放置していれば焼失していた可能性はある。) なお、木質柱は途中で倒れたため、いずれの条件でも焼失した。



(a) No.1 (b) No.4

図8 実験後の木質梁の炭化状況

また、図9は木質柱・木質梁・木質壁の炭化深さの経時変化である。なお、図中の丸枠内のプロットは実験後に試験体を輪切りにした断面から目視観察して計測した炭化深さであり、それら以外のプロットは木質部材の内部に設置した熱電対の指示値が木材の着火危険温度の慣用値である260℃に到達した時点を示している。図より、区画内温度が昇温過程の時間帯では、木質柱・梁の炭化速度は標準加熱時の炭化速度の慣用値0.6~0.8 mm/minと同程度であるが、木質壁の炭化速度は1.1~1.2mm/minと木質柱や梁の炭化速度よりも早い。本来、木材は熱分解に伴い炭化層を形成し、この炭化層がいわゆる断熱材の役割を果たして未炭化部への受熱を低減するため、徐々に熱分解・炭化の進行が緩やかとなるが、今回採用した木質壁は合板を複数層貼り合わせた仕様であり、各層が炭化すると剥落してしまうため、炭化層による断熱効果を十分に得られなかったためと考えられる。これは木質部材の貼り合わせ方や接着剤の仕様等により変化すると考えられる。

また、木質壁は非加熱面(120mm)まで炭化しており、燃えぬけている。燃えぬけた時間と発熱速度が低下し始める時間は概ね等しい。

一方、図中の実線は、区画内温度の実験値を用いて、木材や炭化層内部の熱伝達モデルに基づき炭化性状を計算した結果である²⁾。当該モデルでは、熱分解開始以降の木質部材が炭化層と未炭化部の二層に分け、炭化層と

未炭化部の境界における熱収支は次式のように表わす。

$$\dot{q}_{char}'' - \dot{q}_{cond}'' = \dot{m}_p'' L_p \quad (1)$$

ここで、加熱側から炭化層を介して炭化境界面に入射する熱流束 $\dot{q}_{char}''$ と未炭化部に吸収される熱流束 $\dot{q}_{cond}''$ 、熱分解速度 $\dot{m}_p''$ はそれぞれ次式のように示せる。

$$\dot{q}_{char}'' = \dot{q}_{in}'' \exp(-\delta^a) \quad (2)$$

$$\dot{q}_{cond}'' = \sqrt{k \rho c / \pi t} (T_p - T_0) \quad (3)$$

$$\dot{m}_p'' = (1 - \phi) \rho_w \frac{d\delta}{dt} \quad (4)$$

なお、炭化深さ δ は炭化速度 $d\delta/dt$ の時間累積値である。

図より、いずれの条件においても昇温過程における炭化速度は実験値と計算値が概ね一致している。一方、降温過程においてはNo.4のように昇温期が短い条件では計算値と実験値がよく一致しているものの、昇温過程の時間が長い条件にあっては実験値が計算値を上回っている。これは、炭化層表面の酸化反応（赤熱）に伴う発熱が大きく寄与している可能性がある。実際に実験時には、区画内が比較的低温となっても、炭化層表面で赤熱する様子が観測されており、特に柱の脚部で赤熱による焼失が顕著であった（図10）。

なお、図11は木材小片を上から放射加熱した実験時における重量と燃焼熱（単位重量当たりの発熱量）の経時変化を示した一例である。図より、木材が炎を上げて燃焼している過程では燃焼熱は概ね12～13MJ/kgで推移しているが、木材の非加熱側まで炭化すると有炎燃焼より炭化層表面での赤熱が顕著となり、燃焼熱が30～35 MJ/kgと有炎燃焼時の値に比べ非常に高い値となるため、炭化層内部に供給される熱流に与える影響が少なくない。

他の研究により、この炭化層表面の赤熱は炭化層に与えられる加熱の強さのみならず、酸素濃度や気流の影響を受けることがわかっており³⁾、当該性状のモデル化と赤熱を考慮した炭化性状のモデル化が今後の課題である。

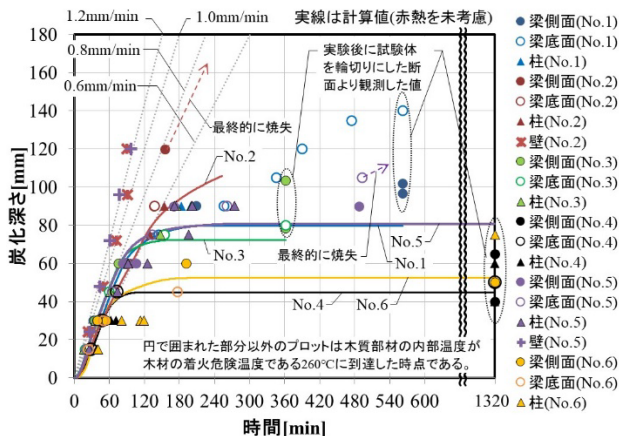


図9 実験後の木質梁の炭化状況

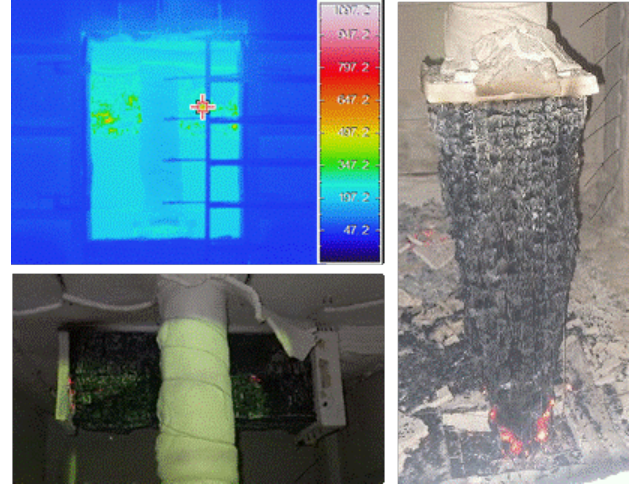


図10 火災減衰過程における木質柱梁表面の赤熱の状況

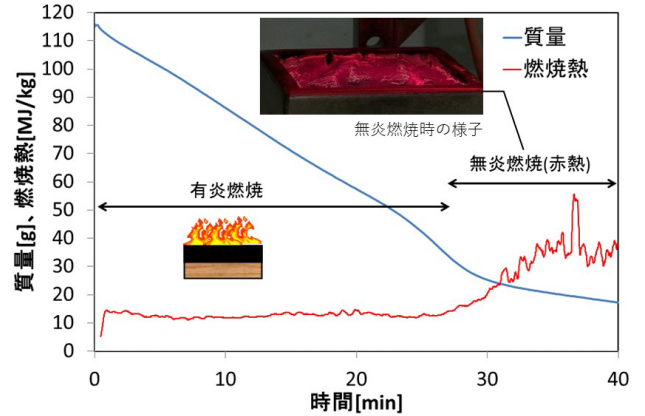


図11 放射加熱時における木材の重量と燃焼熱

3. 数値計算に基づく火災区画内温度予測

前節で示したNo.1とNo.2の実験の比較結果より、厚板木質壁が有る条件にあっては無い条件に比べて燃焼によって生ずる発熱速度が非常に高いものの、区画内温度がやや低くなることが確認された。これは、厚板木質壁が有る条件の方が区画内における可燃性ガスの発生量が多く、区画内の圧力が高くなったことにより、開口部から区画内に流入する空気量が制限されたためと考えられる。

そこで、この影響を考慮した区画内の質量バランスおよび熱量バランスをモデル化し、区画内温度を推定した。

(1) 計算概要

火災区画内の熱収支の概念を整理した結果を図12に示す。区画内では、燃焼により発生した熱 $\dot{Q}_{fire}$ は、周壁等へ吸収される熱 $\dot{Q}_{ab}$ 、開口から対流や放射によって排出される熱 $\dot{Q}_{ent}$ 、区画内を昇温させるための熱として消費される。この関係を定式化したものが式(5)である。

$$c_g \rho_g V_g \frac{dT_g}{dt} = \dot{Q}_{fire} - \sum \dot{Q}_{ab} - \dot{Q}_{ent} - \dot{Q}_{rad} \quad (5)$$

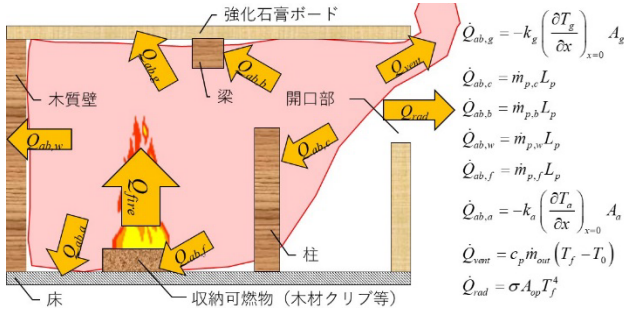


図12 火災区画内の熱収支

壁や柱・梁、木材クリブの木質部分へ吸収される熱量は大半が熱分解に伴う潜熱であるが、区画内で発生した全ての熱分解ガスの燃焼に伴う発熱は酸素消費法により実測されているため、この発熱速度 $\dot{Q}_{fire,tot}$ を木材の単位重量当たりの発熱量 ΔH で除し、木材の単位重量当たりの熱分解潜熱 L_p を乗じることで当該吸熱量を算定した。

$$\dot{Q}_{ab,c} + \dot{Q}_{ab,b} + \dot{Q}_{ab,w} + \dot{Q}_{ab,f} = \frac{\dot{Q}_{fire,tot}}{\Delta H} L_p \quad (6)$$

一方、非木質部分の壁や床への吸熱にあつては各材料の熱物性を考慮して次元熱伝導解析に基づき計算した。

また、火災区画内で燃焼する発熱 $\dot{Q}_{fire}$ は熱分解ガスが全て燃焼したと仮定した場合の発熱速度 $\dot{Q}_{fire,tot}$ と開口部から流入した空気が全て燃焼した場合の発熱のいずれか高い方で決定されるため、次式により求めた。

$$\dot{Q}_{fire} = \min(\dot{Q}_{fire,tot}, \dot{m}_{in} \Delta H_{air}) \quad (7)$$

開口部から区画内へ流入する空気量 $\dot{m}_{in}$ は自然換気に基づき算定できるため、次式により求められる。

$$\dot{m}_{in} = 2/3 \alpha B_{op} \sqrt{2g\rho_\infty \Delta p} Z_n^{3/2} \quad (8)$$

このとき、中性帯高さ Z_n は次式の通り算定できる。

$$Z_n = H r^{2/3} \left[r^{2/3} + \left\{ (r+1)^2 T / T_\infty \right\}^{1/3} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$r = \frac{\dot{m}_{in}}{\sum \dot{m}_p} \quad (9)$$

ここで、 r は流入空気量 $\dot{m}_{in}$ に対する熱分解ガスの総発生量 $\sum \dot{m}_p$ の比であり、熱分解ガスの発生量が多いほど、中性帯高さ Z_n が下がり、流入空気量が低下する(図13)。

(2) 計算値と実験値の比較

図14は区画内温度の計算値と実験値を、熱分解ガスの圧力増加の影響を考慮の有無別に比較した結果である。なお、熱分解ガスの燃焼に伴う発熱のうち区画内で消費される分(区画内発熱速度と呼ぶ)の計算値と熱分解ガスが全て燃焼した場合の発熱速度(実験値)を併記している。図より、いずれの条件においても区画内温度の計

算値は実験値と概ね一致している。特に熱分解ガスの発生が多いNo.2にあつては、熱分解ガスに伴う区画内圧力増加の考慮の有無により区画内温度の計算値に大きな差が生じており、考慮有りの方が実験値に近い結果となった。

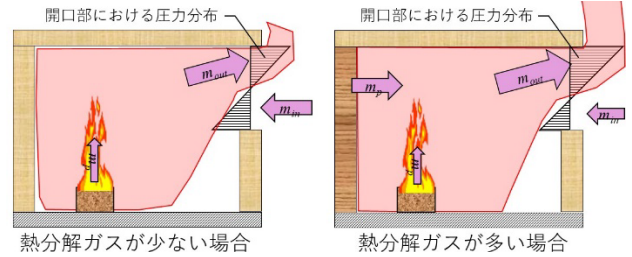


図13 熱分解ガス発生量の多さに伴う区画内圧の違い

4. まとめ

本研究では厚板木質部材を利用した建築空間の火災性状の把握を目的とした実大規模区画火災実験の結果を報告した。換気支配型となる火災においては、厚板木質壁の利用により発熱速度が増加し、区画内が高温となっている時間は長くなるものの、昇温過程における区画内温度は厚板木質壁が無い条件よりも幾分低くなった。これは厚板木質壁の利用により可燃物の量や表面積が増加し、熱分解ガスに伴い区画内の圧力が増加し、火災室に流入する空気量が制限されたためと考えられる。

また、この影響を考慮した火災区画内の熱量・質量収支モデルを構築し、区画内温度性状について実験値と計算値の比較を行い、その妥当性を検証した。現時点では木質部分の熱分解速度に実験値を用いているが、火災区画内の熱量・質量収支のモデルと木質部分の熱分解モデルを錬成させた解析を行っており一定の妥当性を確認している⁴⁾。

一方、木質壁が無い条件で燃料支配型となる火災においては、厚板木質壁の燃焼により発熱速度と区画内温度が高くなり、昇温過程も長くなった。

さらに、木質壁有りのNo.2、No.5は木質梁が最終的に焼失したが、木質壁無し No.1、No.4は図6の通り、未炭化部が残存していた。区画内温度の実験値を用いて、木材や炭化層内部の熱伝達モデルに基づき炭化性状を計算した結果、いずれの条件においても昇温過程における炭化速度は実験値と計算値が概ね一致していたが、昇温過程の時間が長い条件にあつては実験値が計算値を上回っていた。これは、炭化層表面の酸化反応(赤熱)に伴う発熱が大きく寄与していたと考えられ、当該性状のモデル化と赤熱を考慮した炭化性状のモデル化が今後の課題である。

なお、本報の研究内容は参考文献5)の成果を抜粋したものである。詳細にあつては当該文献を参照されたい。

謝辞：本報に示した実験は国土技術政策総合研究所のプロフェクト課題「新しい木質材料を活用した混構造建築物の設計・施工技術の開発」の一環として実施されたものである。

記号

q_{char}'' : 炭化境界面に入射する熱流束[kW/m²], q_{cond}'' : 未炭化部に吸収される熱流束[kW/m²], δ : 炭化深さ[m], k_{pc} : 木材の熱慣性[kW/(m² K)^{0.5}], t : 時間[s], ϕ : 収炭率[-], ρ_v : 木材の未炭化部の密度[kg/m³], L_p : 熱分解潜熱[kJ/kg], A_{op} : 開口面積[m²], H_{op} : 開口高さ[m], T_0 : 大気温度[K], c_g : 空気の比熱(≈1)[kJ/(kg K)], ρ_g : 区画内高温ガスの密度(=353/ T_g)[kg/m³], V_g : 火災区画内の容積[m³], T_g : 火災区画内温度[K], Q_{ie} : 火災区画内で消費される発熱速度[kW], Q_{out} : 開口部から換気により排出される熱量[kW], Q_{rad} : 開口部から放射により排出される熱量[kW], Q_{abc} : 木質柱への吸熱量[kW], Q_{abb} : 木質梁への吸熱量[kW], Q_{abw} : 木質梁への吸熱量[kW], Q_{df} : 収納可燃物への吸熱量[kW], Q_{ext} : 総発熱速度(区画外で燃焼する分を含む)[kW], m_{in} : 区画内への流入空気量[kg/s], ΔH_{air} : 空気の単位重量当たりの発熱量(≈3052)[kJ/kg], α : 流量係数[-], B_{op} : 開口幅[m], g : 重力加速度[m/s²], ρ_{∞} : 大気密度[kg/m³], $\Delta\rho$: 区画内高温ガスと大気密度差[kg/m³], Z_n : 中性帯高さ[m], $m_{p,c}$: 木質柱の単位面積当たりの熱分解速度[kg/(s m²)], $m_{p,b}$: 木質梁の単位面積当たりの熱分解速度[kg/(s m²)], $m_{p,w}$: 木質壁の単位面積当たりの熱分解速度[kg/(s m²)], $m_{p,f}$: 収納可燃物の単位面積

当たりの熱分解速度[kg/(s m²)], k_g : 木質壁以外の壁または天井(強化石膏ボード)の熱伝導率[kW/(m K)], T_g : 木質壁以外の壁または天井(強化石膏ボード)の温度[K], A_g : 木質壁以外の壁または天井(強化石膏ボード)の面積[m²], k_a : 床の熱伝導率(AES)[kW/(m K)], T_a : 床の温度(AES)[K], A_a : 床面積(AES)[m²], σ : ステファンボルツマン定数(=5.67 × 10⁻¹¹)[kW/(m² K⁴)]

参考文献

- Ohmiya Y., Tanaka T., Wakamatsu T.: Burning Rate of Fuels and Generation Limit of the External Flames in Compartment Fire, Fire Sci. and Tech, Vol. 16 No.1 & 2, pp.1-12, 1996
- Masaki Noaki, Jun-ichi Suzuki, Yoshifumi Ohmiya & Michael A. Delichatsios: Experimental Study on Thermal Insulation Properties of Charred Woods Under Radiative Heating, Fire Science and Technology, 2015, 695-703
- 野秋政希, 青木一真, 小檜山寛人, 大宮喜文: 「木材の炭化層の赤熱性状に及ぼす気流の影響～表面化学反応理論を用いた考察～」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.21-22, 2020年5月
- 野秋政希, 鈴木淳一: 「区画の周壁の材質が火災時の区画内温度性状に及ぼす影響」, 日本建築仕上学会大会学術講演梗概集, pp.141-144, 2021年10月
- Masaki Noaki, Jun-ichi Suzuki, Yoshifumi Ohmiya, Michael A Delichatsios: Fire Behavior in Compartment Containing Timber Constructions Focusing on Pressure Increase owing to Pyrolysis Gas, Fire Safety Journal, Vol.143, 104018, 2024.1

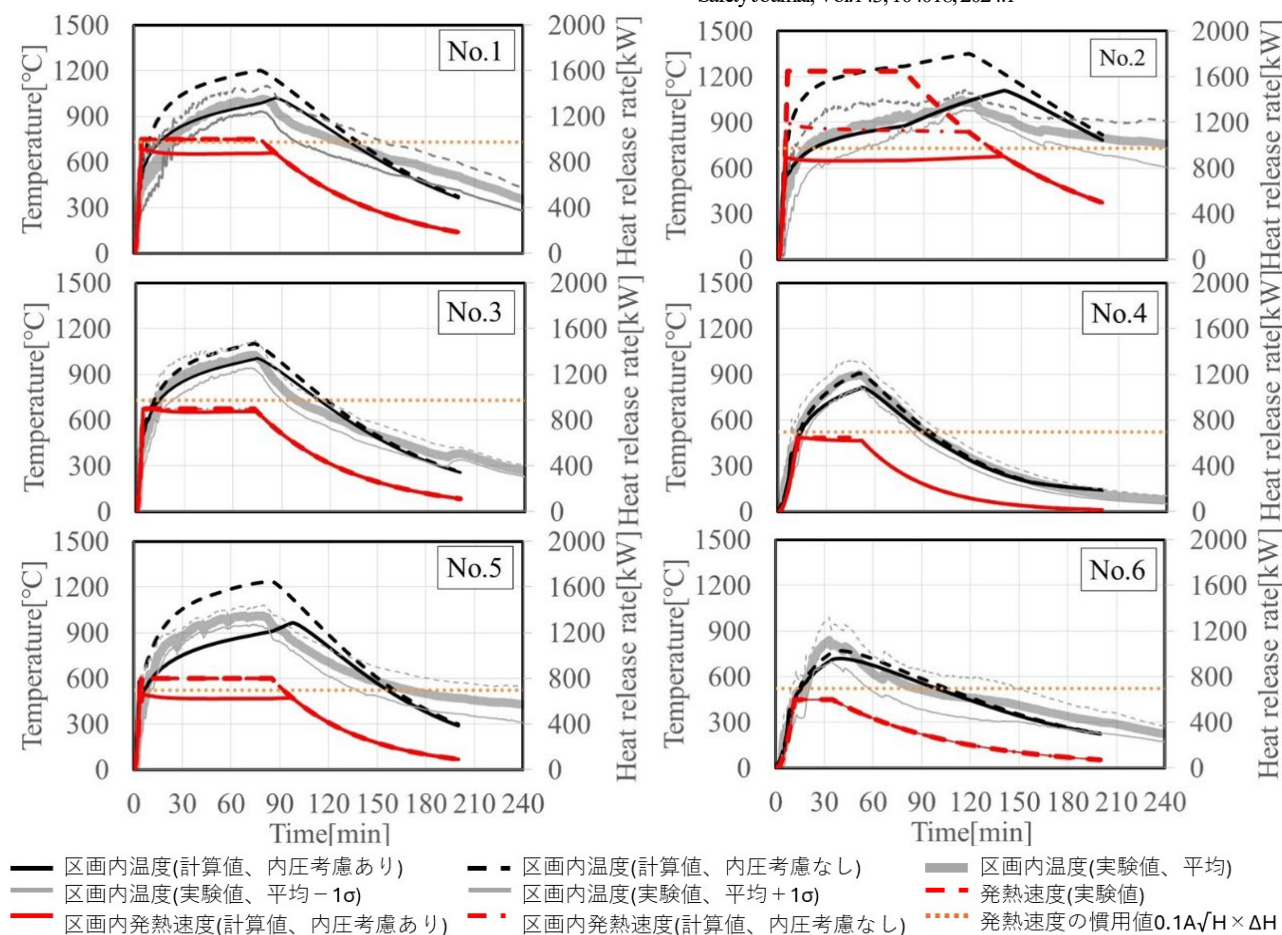


図 14 区画内温度の実験値と計算値および区画内での発熱速度 (熱分解ガスによる内部圧力の増加の考慮の有無)