令和７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（11月27日(木)）：A会場
9:45～15:45

令和7年度　国土交通省　国土技術研究会　プログラム

1日目（11月27日（木））

A会場

部門	セッション	発表順序	課題区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
一般部門（安全・安心Ⅰ）	A1	1	審査課題	9:45～10:00	大沼トンネル避難坑の施工について－熱水変質を受けた低強度地山と多量湧水への対応－	北海道開発局　港湾空港部　港湾計画課	宮澤　駿
		2		10:00～10:15	流域治水認知拡大のための住民参加型出前講座の取り組みについて	東北地方整備局　仙台河川国道事務所　流域治水課	三原　魁人
		3		10:15～10:30	地質リスクを考慮した道路災害復旧案の検討について	近畿地方整備局　奈良国道事務所　奈良南部災害復旧対策出張所	冷水　孝太郎
		4		10:30～10:45	桟橋上部工点検用ROV/ASVとその運用支援技術の開発	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 インフラDX研究領域　メタロボティクス研究グループ	田中　敏成
	A2	5		11:00～11:15	メンテナンスに優れた橋梁伸縮装置の研究開発について	福井県　産業労働部　工業技術センター　建設技術研究部	林　泰正
		6		11:15～11:30	オーバーツーリズム渋滞に対する社会実験の試行及び対策工の効果	山梨県　企業局　早川水系発電管理事務所	中沢　翔太
		7		11:30～11:45	地区全体を対象とした耐震改修による復興枠組みの提案～BBBから改修中心へ～	国立研究開発法人　建築研究所　所付	片山　耕治
		8		11:45～12:00	九州地方整備局管内の道路橋定期点検結果（1・2巡目）を踏まえたメンテナンスサイクルの留意点	九州地方整備局　九州道路メンテナンスセンター	萩原　頼徳
	A3	9	審査課題	13:00～13:15	木下川排水機場の耐震化について	東京都　建設局　江東治水事務所　特定施設建設課	福永　龍佑
		10		13:15～13:30	解釈可能AIを用いた木造建築物多目的最適設計に向けた基礎的研究	国立研究開発法人　建築研究所　材料研究グループ	難波　宗功
		11		13:30～13:45	氾濫シナリオ別水害ハザード指標分布を用いた地域の脆弱性評価に関する研究	国土技術政策総合研究所　河川研究部　水害研究室	大野　純暉
		12		13:45～14:00	無信号横断歩道における歩行者及び車両の挙動分析と対策の方向性	四国地方整備局　道路部　道路計画課	三嶌　晃平
		13	報告課題	14:00～14:15	**【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】ICTによる潜水士の労働負荷の実態把握と労務最適化による生産性向上に関する実証研究**	**星薬科大学**	**児玉耕太 藤山逸行**
	A4	14	審査課題	14:30～14:45	小開口付き面材耐力壁のせん断性能に関する研究	国土技術政策総合研究所　建築研究部　材料・部材基準研究室	酒井　優太
		15		14:45～15:00	吉野川水系における流域治水の自分事化に向けた取り組み～洪水と水害の「勘どころ」作成～	四国地方整備局　徳島河川国道事務所　流域治水課	高野　稜馬
		16		15:00～15:15	恵那市街地の水害軽減に向けた取り組み　～阿木川ダム下流残流域の流出特性～	独立行政法人水資源機構　木曽川上流ダム総合管理所　管理課	向井　健朗
		17		15:15～15:30	旭川水系における既存ストックの有効活用検証	中国地方整備局　岡山河川事務所　開発調査課	福井　文菜
		18	報告課題	15:30～15:45	**【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】液化炭酸ガスと3次元曲りボーリングを組み合わせた地盤凍結システムの高度化に関する研究**	**ケミカルグラウト株式会社**	**相馬　啓**

A会場

部門	セッション	発表順序	課題区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
一般部門（安全・安心Ⅱ）	A5	1	審査課題	16:00～16:15	肱川流域（水防災）緊急対応タイムラインの取組～水害の教訓から流域が一体となった防災対応を目指して～	四国地方整備局　大洲河川国道事務所　工務第一課	北島　瑛介
		2		16:15～16:30	寺内ダム再生事業　非常用洪水吐きゲート設備の改造	独立行政法人水資源機構　筑後川上流総合管理所　設備課	徳田　克也
		3		16:30～16:45	模型やボードゲーム活用の体験型学習による地域防災力向上の取組について	長野県　安曇野建設事務所　整備課	手塚　凱斗
		4		16:45～17:00	大谷トンネルの被災状況と応急復旧について	北陸地方整備局　能登復興事務所　工務第三課	高井　静也
	A6	5	審査課題	17:15～17:30	4脚4輪走行式油圧ショベルによる能登半島地震被災現場対応について	国土技術政策総合研究所　社会資本マネジメント研究センター　社会資本施工高度化研究室	矢野　祥吾
		6		17:30～17:45	室内試験と実橋応力計測に基づく床版の土砂化進展予測に関するケーススタディ	寒地土木研究所　寒地基礎技術研究グループ　寒地構造チーム	角間　恒
		7		17:45～18:00	3D都市モデル（PLATEAU）を活用した"動く"水害リスク情報による水災害の自分事化	北陸地方整備局　信濃川河川事務所　流域治水課	下村　魁晟
		8		18:00～18:15	ETC2.0を用いた渋滞情報提供の精度向上に関する取組	本州四国連絡高速道路株式会社　本州保全部　電気通信課	入江　桃子

SBIR建設技術開発助成制度とは

国や地域の諸課題（地球温暖化、社会インフラの老朽化、少子高齢化等）の解決に資するための技術開発テーマを国土交通省が示し、そのテーマに対し民間企業や大学等の先駆的な技術開発提案を公募し、優れた技術開発を選抜し助成する競争的資金制度です。
令和6年度に実施された研究開発等の成果について報告します。

令和7年度　国土交通省　国土技術研究会　プログラム

1日目（11月27日（木））

B会場

部門	セッション	発表順序	課題区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
イノベーション部門Ⅰ	B1	1	審査課題	9:45～10:00	除雪支援システムについて	岩手県盛岡広域振興局土木部　岩手土木センター　道路河川整備課	菊地　和久
		2		10:00～10:15	工事監督業務における生成AIの活用検討について	滋賀県　南部土木事務所　道路計画第二課	太田　宏生
		3		10:15～10:30	屋内無線LANの整備とデータ通信の高速化の検討	関東地方整備局　関東技術事務所　品質調査課	渡部　大輔
		4		10:30～10:45	SLAM技術を活用した効率的な河川管理について	中国地方整備局　岡山河川事務所　管理課	長屋　明里
	B2	5		11:00～11:15	CSGダムにおける規格外フライアッシュの活用について	東北地方整備局　成瀬ダム工事事務所　工事課	小田島　嵩
		6		11:15～11:30	ダム建設現場におけるi-Construction 2.0～足羽川ダムの挑戦～	近畿地方整備局　足羽川ダム工事事務所	粂　純司
		7		11:30～11:45	品川における重層的な制約条件下での国道上空の交通広場デッキの設計について	関東地方整備局　東京国道事務所　交通ターミナル整備課	岩柳　智之
		8		11:45～12:00	松沢川第2砂防堰堤におけるICT施工の取り組み	中部地方整備局　富士砂防事務所　調査課	舩橋　良太
	B3	9	審査課題	13:00～13:15	樋門改築工事におけるBIM/CIM技術の有効活用事例と課題について	北海道開発局 札幌開発建設部 千歳川河川事務所 第2工務課	大塚 康平
		10		13:15～13:30	大崎出張所管内におけるUAVを用いた河川巡視の試行について	東北地方整備局　北上川下流河川事務所　大崎出張所	太田　なお子
		11		13:30～13:45	徳島河川国道事務所における皆で早くお家に帰ろうプロジェクトの取り組み	四国地方整備局　香川河川国道事務所　工務第二課	岡井　大三郎
		12		13:45～14:00	トンネル内面調査の省人化・効率化に向けた実証試験	独立行政法人水資源機構　総合技術センター水路グループ	小林　志歩
		13	報告課題	14:00～14:15	**【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】 長期保証を見据えた地方建設会社による効率的な路面情報管理技術の構築 ー動画を活用した路面評価手法『路面情報カルテ』の開発ー**	**株式会社 建設IoT研究所**	**可児 憲生**
	B4	14	審査課題	14:30～14:45	XAI(Explainable AI)による道路附属物点検の高度化 ー北大との連携協定に基づくインフラ管理のイノベーション「NORTH-AI/Eye」の推進ー	北海道開発局　小樽開発建設部　小樽道路事務所	今西　将也
		15		14:45～15:00	のり面に繁茂した外来種「ヨシススキ」対策について	中部地方整備局　紀勢国道事務所　管理第二課	藤井　秀一郎
		16		15:00～15:15	水中ロボを活用した桟橋式岸壁における効率的な点検手法の検討	四国地方整備局　高松港湾空港技術調査事務所　調査課	中澤　祐飛
		17		15:15～15:30	長大トンネルへの坑内Wi-Fi導入による費用対効果の検証と総括	独立行政法人水資源機構　水路事業部設計課	渡辺　樹也
		18	報告課題	15:30～15:45	**【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】 GEOTETS工法（土留材引抜同時充填工法）を活用した環境保全技術の開発**	**株式会社CivilAssist**	**西　靖彦**

B会場

部門	セッション	発表順序	課題区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
イノベーション部門Ⅱ	B5	1	審査課題	16:00～16:15	最先端技術を体験出来る「中国インフラDXセンター」の開設と運営	中国地方整備局　中国技術事務所　品質調査課	小柳　忠史
		2		16:15～16:30	ドローン点群データによる道路施設管理	中部地方整備局　静岡国道事務所　管理第二課	加藤　歓大
		3		16:30～16:45	梯川水系における内外水統合型水害リスクマップの検討について	北陸地方整備局　金沢河川国道事務所　流域治水課	徳坂　文音
		4		16:45～17:00	暴風雪・大雪時の災害デジタルアーカイブを用いた道路管理判断支援システムの試作	寒地土木研究所　寒地道路研究グループ　雪氷チーム	原田　裕介
	B6	5	審査課題	17:15～17:30	徳山ダム・横山ダム連携による水位運用高度化の取組	独立行政法人水資源機構　揖斐川・長良川総合管理所	石黒　順司
		6		17:30～17:45	電子基準点リアルタイム解析システム（REGARD）の役割と発展	国土地理院　測地観測センター　電子基準点課	橋本 繭未
		7		17:45～18:00	令和6年能登半島地震後の道路橋点検における点検支援技術の試行と検証	国立研究開発法人　土木研究所　構造物メンテナンス研究センター	小林　巧
		8		18:00～18:15	空港（土木施設）のBIM/CIMの取り組みについて	国土技術政策総合研究所　空港研究部　空港施工システム室	久保田　皐

令和7年度　国土交通省　国土技術研究会　プログラム

1日目（11月27日（木））

C会場

部門	セッション	発表順序	課題区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
一般部門（活力）	C1	1	審査課題	9:45～10:00	道路空間を活用したEV路上カーシェアリング社会実験における効果検証（中間報告）	近畿地方整備局　浪速国道事務所　計画課	中世古　蓮汰
		2		10:15～10:30	効果的な合意形成を目指して ～BIM活用の検証と営繕事業の円滑化～	関東地方整備局　営繕部　整備課	小野塚　裕
		3		10:30～10:45	全国都市交通特性調査データを活用したアクティビティ・ベースド・シミュレータ（ABS）の開発と活用	国土技術政策総合研究所　都市研究部　都市施設研究室	小笠原　裕光
		4	報告課題	10:45～11:00	**【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】 カーボンニュートラルに資する火山ガラス微粉末コンクリートの実用化研究**	**金沢工業大学　工学部　環境土木工学科**	**花岡　大伸**
	C2	5	審査課題	11:00～11:15	歴まち都市への誘客に向けた観光連携事業～歴史と観光をつなぐ2つの要素～	中部地方整備局　建政部　計画管理課	深谷　有沙
		6		11:15～11:30	縦型密閉発酵槽を用いた下水汚泥の肥料化、エネルギー化技術実証と導入効果検討	国土技術政策総合研究所　上下水道研究部　下水処理研究室	青葉　隆仁
		7		11:30～11:45	企業のリクルート活動に着目した産官学協同の渋滞緩和プロジェクト松江Good Morning Projectについて	中国地方整備局　松江国道事務所　計画課	桃住　蓮太
		8	報告課題	11:45～12:00	**【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】 非構造部材を含めたBIMからFEMへの汎用変換システムの開発と検証**	**東京大学**	**浅井 竜也**
	C3	9	審査課題	13:00～13:15	次世代自動車の普及を見据えた走行時の二酸化炭素排出係数の試算	国土技術政策総合研究所　道路交通研究部　道路環境研究室	根津　佳樹
		10		13:15～13:30	マンション等を対象とした外装仕上材の劣化度判定支援AIの開発	国立研究開発法人　建築研究所　材料研究グループ	中田　清史
		11		13:30～13:45	国道41号名濃バイパス6車線化による整備効果	中部地方整備局　愛知国道事務所　計画課	澤　圭斗
		12		13:45～14:00	九州初の「道路シールドトンネルの中間報告（市街地部を通過）」 ～鹿児島3号東西道路シールドトンネル（下り線）新設工事～	九州地方整備局　鹿児島国道事務所　工務課	樋口　昌宏
		13	報告課題	14:00～14:15	**【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】 木材入りCFT部材の開発とその実用化**	**長崎大学**	**中原浩之**

C会場

部門	セッション	発表順序	課題区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
アカウンタビリティ部門	C4	1	審査課題	14:30～14:45	アイヌ文化振興に資する河川整備の取組～北海道特有の観光地域づくりを目指して～	北海道開発局　札幌開発建設部　夕張川ダム総合管理事務所　管理課	橋本　武幸
		2		14:45～15:00	地域や観光に配慮した公共工事　～建設業における「おもてなし」の心～	山形県村山総合支庁　建設部　西村山道路計画課	小山　祐伍
		3		15:00～15:15	都市河川における不法投棄0をめざした多面的なソフト対策について ～事務所と出張所　1年間の奮闘～	近畿地方整備局　淀川河川事務所　福島出張所	伊豆野　史皇子
		4		15:15～15:30	災害に立ち向かう"空の眼"九州地整UAV登録講習機関設立と挑戦	九州地方整備局　九州技術事務所　総務課	山本　伸也
		5	報告課題	15:30～15:45	**【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】 職人と小型ロボットが協働する新しい湿式施工法の開発**	**京都工芸繊維大学デザイン・建築学系**	**村本真**
	C5	6	審査課題	16:00～16:15	留萌地域における「ほっかいどう学」の実践と今後の展望―留萌地域のみち学習―	北海道開発局　留萌開発建設部　道路計画課	堀田　孝也
		7		16:15～16:30	首里城正殿の「見せる復興」 ～今しか見られない復元現場のPR～	沖縄総合事務局　国営沖縄記念公園事務所　首里出張所	内間　安朗
		8		16:30～16:45	「おかこくぼっけぇ教え隊！」の活動報告	中国地方整備局　岡山国道事務所　交通対策課	西海　こころ
		9	報告課題	16:45～17:00	**【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】 「改良前後の地盤の耐震性能評価ができる原位置繰返しプレッシャーメータ試験の実用化」**	**川崎地質（株）**	**風間　基樹**
	C6	10	審査課題	17:15～17:30	白川ダムのオープン化と地域の活性化	東北地方整備局　最上川ダム統合管理事務所　白川ダム管理支所	相馬　宏丞
		11		17:30～17:45	建設産業の魅力向上に向けたインフルエンサーとの協働 ～オフィシャル広報パートナー制度～	四国地方整備局　企画部　企画課	髙橋　加奈子
		12		17:45～18:00	「苦情」から「協力」へ！～VSPを活用した地域連携～	関東地方整備局　宇都宮国道事務所　管理第一課	三野　将明
		13		18:00～18:15	3次元モデルを用いた用地境界立会いについて	長野県　建設部　河川課	諏訪　有祐

令和7年度　国土交通省　国土技術研究会　プログラム

2日目（11月28日（金））

A会場

部門	セッション	発表順序	課題区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
一般部門（安全・安心Ⅱ）	A7	9	審査課題	9:45～10:00	大規模災害を想定した関係機関との合同訓練	九州地方整備局　宮崎河川国道事務所　防災課	西　晃希
		10		10:00～10:15	山岳トンネルの変状の診断精度向上に向けた施工時情報の活用と引継ぎ	国立研究開発法人土木研究所　道路技術研究グループ（トンネル）	菊地　浩貴
		11		10:15～10:30	長時間(168時間)運転可能な簡易型非常用発動発電装置について	沖縄総合事務局　南部国道事務所　防災情報課	内間　航一郎
		12	報告課題	10:30～10:45	**【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】 自治体間で円滑に機展開可能な共同利用型の地域デジタルツインの開発**	**一般社団法人 社会基盤情報流通推進協議会**	**関本 義秀**
	A8	13	審査課題	11:00～11:15	名古屋国道管内初！スムーズ横断歩道の整備とその効果	中部地方整備局　名古屋国道事務所　交通対策課	堤　悠大
		14		11:15～11:30	サザンゲートブリッジRC床板における詳細調査および補修方法の検討について	沖縄総合事務局　石垣港湾事務所　工務課	後上里　友晴
		15		11:30～11:45	災害リスク情報を企業活用へ～白川水害リスクマップ公表の取り組みと活用事例～	九州地方整備局　熊本河川国道事務所　流域治水課	齊木　愛菜
		16	報告課題	11:45～12:00	**【SBIR建設技術研究開発助成制度成果報告】 建物のライフサイクルマネジメントを目的とした3次元点群データを用いたBIMデータ自動構築システムの開発**	**株式会社エリジオン**	**渡辺友彦**

A会場

部門	セッション	発表順序	課題区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
各局等提案課題	A9	1		13:00～13:30	日本の現場力、世界へ。～ウクライナ復興に挑む遠隔施工～	国土交通省　大臣官房　参事官（イノベーション）グループ 国土交通省　総合政策局　海外プロジェクト推進課	中根　亨 松尾　健二
		2		13:30～14:00	PODに基づく縮約モデルの適用とそのAIC の提案 —重力式岸壁の2D地震応答解析への適用性評価—	港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震動研究グループ	福永　勇介

B会場

部門	セッション	発表順序	課題区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
イノベーション部門Ⅱ	B7	9	審査課題	9:45～10:00	ごみ処理施設(宮ノ陣・上津CC)で発電した電力の地産地消について	久留米市　環境部　施設課	鹿田　大貴
		10		10:00～10:15	地図作成における高分解能光学衛星画像の利用可能性	国土地理院　基本図情報部　地図情報技術開発室	神山　優恵
		11		10:15～10:30	UAV自律飛行を活用した手取川流域における砂防施設等の点検手法の構築	北陸地方整備局　金沢河川国道事務所　流域対策課	中野　光
		12		10:30～10:45	主ケーブル外装モニタリングシステムの開発	本四高速道路ブリッジエンジ株式会社　技術事業本部 技術開発部　技術3課	大淵 慶大
	B8	13	審査課題	11:00～11:15	AI技術を用いたCo吹付法面及び橋梁の健全度診断に関する技術手法について	北陸地方整備局　能登復興事務所　計画課	長谷部　佑太
		14		11:15～11:30	「だいち4号」を活用した地殻・地盤変動監視と地盤沈下調査への活用に向けた取組	国土地理院　測地部　宇宙測地課	室山　怜太郎
		15		11:30～11:45	沖縄管内における物流推進の検討	沖縄総合事務局　開発建設部　港湾計画課	山田　廉太郎
		16		11:45～12:00	床版コンクリート耐久性確保の取り組み～施工現場と取り組み内容の紹介～	東北地方整備局　岩手河川国道事務所　工務第二課	瀬倉　英

B会場

部門	セッション	発表順序	課題区分	発表時間	課題名	発表者所属	発表者名
各局等提案課題	B9	3		13:00～13:30	下水道等に起因する大規模な道路陥没事故を踏まえた管路マネジメントの動向や方向性等について	国土交通省（上下水道審議官グループ）大臣官房参事官（上下水道技術）付	辻　亮水
		4		13:30～14:00	群マネ、知ってる？新たなヒーローは動いている	国土交通省　総合政策局　公共事業企画調整課	伊藤　瑞基

D会場

15:00～16:00	**【特別講演】** 早稲田大学教授 土木学会第112代会長　佐々木 葉 様 「インフラの広がりと風景」
16:05～16:35	**【表彰式】**
16:35～16:50	受賞者記念撮影

大沼トンネル避難坑の施工について

－熱水変質を受けた低強度地山と多量湧水への対応－

宮澤　駿[1]・髙橋　民雄[2]・岡崎　雄一[3]

[1] 北海道開発局　港湾空港部　港湾計画課（〒060-8511 北海道札幌市北区北 8 条西 2 丁目）

[2] 北海道開発局　釧路開発建設部　道路整備保全課（〒085-8551 北海道釧路市幸町 10-3）

[3] 大林・岩田地崎・森川特定建設工事共同企業体

北海道縦貫自動車道七飯～大沼は、高速ネットワークの拡充による連絡機能の強化を図り、地域間交流の活性化及び重要港湾函館港、拠点空港函館空港等への物流の効率化等の支援を目的とした延長 10.0km の高速自動車国道である。大沼トンネル(仮称)は延長約 7km の長大トンネルのため避難坑が計画されている。本稿では、トンネル本坑に先立ち施工を行っている避難坑の施工状況と本坑施工における今後の課題について報告するものである。

キーワード：小断面山岳トンネル、低強度地山、多量湧水、円形二重支保

1. はじめに

北海道縦貫自動車道 七飯～大沼は、連絡機能の強化を図り、地域間交流の活性化や物流効率化等の支援を目的とした**図-1** に示す七飯 IC（仮称）から大沼公園 IC までの 10.0km の事業である。この事業には約 7km のトンネル区間が含まれており、大沼トンネル（仮称）は北海道開発局では初となる避難坑を有する長大トンネルである。

大沼トンネル避難坑は全長 7,041.8m であり、起点側（函館市側）と終点側（札幌市側）の両側から掘削を行っている。避難坑は本坑より先行して施工することで地質や施工情報を把握するとともに本坑設計へのフィードバックが可能となるため、本坑工事のリスク低減を図るパイロットトンネルとしての役割を担っている。

本稿では、終点側にあたる西大沼工区の施工に伴い、発生した事象および対策工について報告するとともに、現在施工に着手している本坑工事で生じる可能性のある課題について報告する。



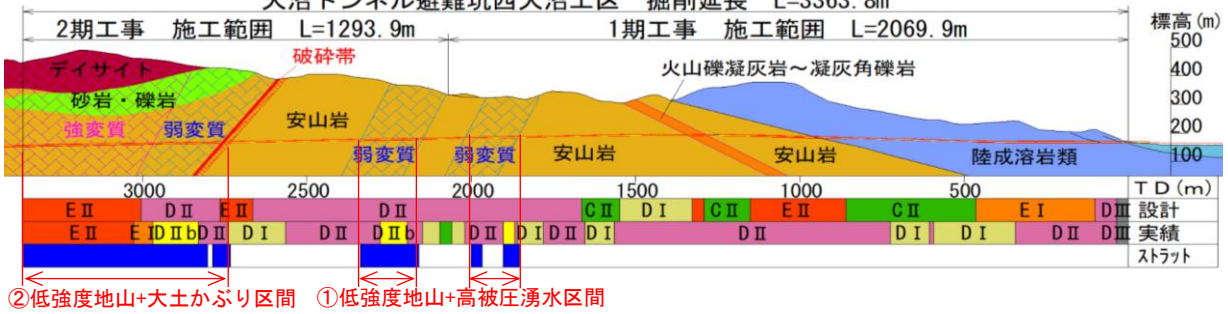
図－1　事業位置図

2. 工事概要

工事概要を**表-1** に示す。工事は 2 期に分かれており、掘削延長は 1 期工事が 2,069.9m、2 期工事が

表－1　工事概要

工事名称	北海道縦貫自動車道 七飯町 大沼トンネル避難坑 西大沼工区新設工事
発注者	国土交通省 北海道開発局 函館開発建設部
施工者	大林・岩田地崎・森川JV
施工場所	北海道亀田郡七飯町
工期	(1期) 2018年1月24日～2021年4月30日 (2期) 2021年4月29日～2025年3月19日
請負金額	(1期) ¥3,683,950,000 (税抜) (2期) ¥3,784,900,000 (税抜) ※2023年9月時点
主要工種	トンネル工（小断面NATM）※レール方式
諸元	掘削延長：3,363.8m 掘削断面積：標準部：20m²、拡幅部：40m²



図－2　地質縦断図および支保パターン

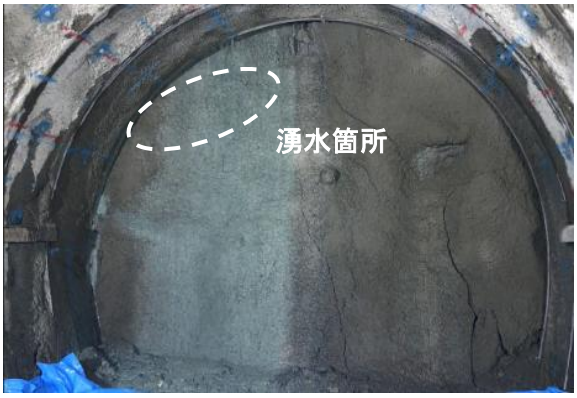
MIYAZAWA Shun, TAKAHASHI Tamio, OKAZAKI Yuichi

1,293.9m で、合計延長は 3,363.8m となっている。長距離かつ小断面のため、ずり出し方式はレール方式を採用している。地質縦断図と支保パターンを**図-2** に、各支保パターンの諸元を**表-2** に示す。トンネル周辺の地山は新第三紀の峠下火山砕屑岩類であり、熱水変質作用により粘土化や珪化を受けた脆弱な地質が広く分布する。また、TD=1,300m に火山礫凝灰岩～凝灰角礫岩層が分布し、坑口側の上位には非変質帯である陸成溶岩類が、下位には変質を受けた安山岩が分布することが想定されていた。そのため当初設計でも、円形断面である E パターンが設定されており、最も重い支保パターンとして円形二重支保となる EⅡパターンまで想定されていた。

TD=1,800～2,400m の区間では、熱水変質作用により粘土化した地質と高被圧湧水に対し、水抜きボーリングに加えて、DⅡb パターン（馬蹄形、高規格支保工、高強度吹付コンクリート）を採用し、インバートストラットによる早期閉合を実施することで対応した。TD=2,800m 以降の強変質安山岩区間では、低強度地山と土被りが 300m 以上と大きくなることから E I パターン（円形、高規格支保工、高強度吹付コンクリート）を採用したが、内空変位の増大により EⅡパターン（円形二重支保、高規格支保工、高強度吹付コンクリート）に変更し対応した。



写真－2　天端の抜け落ち



写真－3　突発湧水

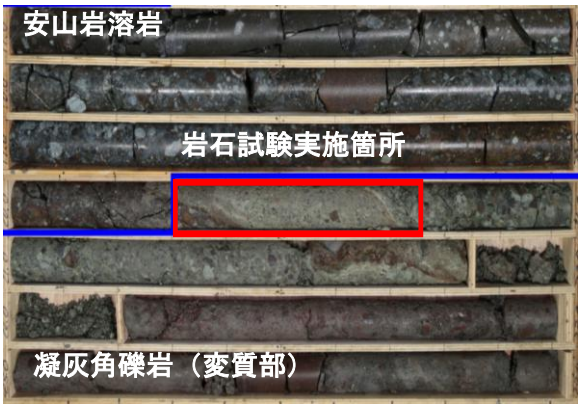
3. 低強度地山および高被圧湧水区間

(1) 発生事象と地山状況

低強度地山および高被圧湧水区間で発生した事象を**写真 1～3** に示す。TD=1,850m 以降から切羽面に



写真－1　鏡面の押出し



写真－4　凝灰角礫岩(変質部)コア

表－2　支保パターン諸元

支保パターン	断面形状	一掘進長	鋼製支保工	吹付コンクリート	ロックボルト	溶接金網	変形余裕量	
							全断面	ｲﾝﾊﾞｰﾄ
CⅡ	馬蹄形	1.2m	NH100	普通強度18N/mm²	2m×9本	上半のみ	-	-
D I	馬蹄形	1.0m	NH100	普通強度18N/mm²	2m×11本	上半のみ	-	-
DⅡ	馬蹄形	1.0m	NH100	普通強度18N/mm²	2m×11本	全周	-	-
DⅡb	馬蹄形	1.0m	HH108	高強度36N/mm²	3m×11本	全周	10cm	-
E I	円形	1.0m	HH108	高強度36N/mm²	3m×13本	全周	10cm	10cm
EⅡ	円形	1.0m	HH108(二重)	高強度36N/mm²	4m×13本	全周(1次側のみ)	10cm	10cm

表－3　岩石試験結果および地山定数

弾性波速度 Vp (km/s)	超音波速度 vp (km/s)	一軸圧縮強度 σc (N/mm²)	単位体積重量 γt (kN/m³)	亀裂係数 K (%)	地山定数			ｽﾒｸﾀｲﾄ含有量 (wt.%)
					準岩盤圧縮強度 σc* (N/mm²)	変形係数 Es* (N/mm²)	地山強度比 α*	
1.0	1.3	0.2	18.9	25.0	0.1	26	0.1	87

MIYAZAWA Shun, TAKAHASHI Tamio, OKAZAKI Yuichi

脆弱な粘土層が出現し始め、鏡面の押出しや天端部の抜け落ちが発生した。加えて、切羽面から突発湧水が発生し、粘土層の奥に被圧した帯水層の分布が確認されたため掘削を一時中断した。ボーリングコア写真と岩石試験結果を**写真-4**、**表-3** に示す。地質は熱水変質を受けた凝灰角礫岩であり、地山強度は低く、スメクタイト含有量は 87 wt.%と膨張性の指標となる 30 wt.%を超過するなど著しい膨潤性を有していた。

(2) 高被圧湧水への対策

対策工の内容を**図-3** に示す。高被圧湧水への対策として、ドリルジャンボによる小口径長尺鋼管水抜きを実施した。鋼管にはスリット加工が施されており、粘土層区間での孔壁の保持と粘土分の流出によるゆるみ領域の拡大を防ぎながらの排水を可能としている。なお、鋼管の打設位置は湧水が切羽に回らないよう、掘削断面内ではなく切羽から 3m 程度後方の側壁で SL より低い位置を基本とした。

また、長尺鋼管先受け工と長尺鏡ボルト工を天端の抜け落ちや鏡面の押出しによる地山のゆるみ抑制と地山改良を目的に追加した。

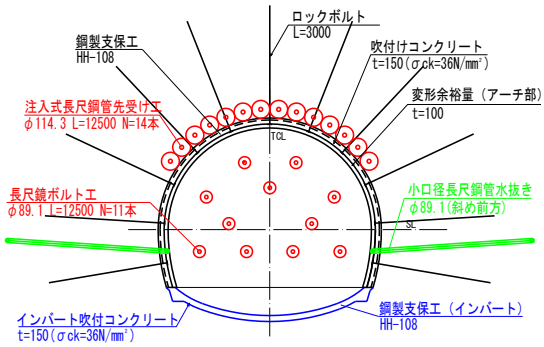
加えて、脚部沈下と地山の膨張に対する早期的な支保の安定性の確保を目的に、支保パターンをランクアップさせ、鏡面から 3m（0.6D）程度の位置でインバートストラットによる早期閉合を実施した。

(3) 対策工の効果

小口径長尺鋼管水抜きによる湧水量は合計 2.3t/min となり、水抜きボーリングの孔口で水圧を計測した結果、湧水圧は最大で 0.5MPa であった。また、補助工法の追加と支保パターンのランクアップ、ストラットの追加により内空変位を管理レベルⅠ以下に抑え、湧水圧は掘削再開時には 0.1MPa 以下まで低減でき、高被圧地下水による切羽の崩壊もなく、無事脆弱な粘土区間の掘削を終えることができた。

また TD=1,980m や TD=2,300m 地点においても、同様にコアボーリングにて厚さ 5～15m 程度の粘土層の分布が確認され、粘土層が遮水層となるためにその奥に高被圧湧水の分布が想定された。地下水圧による切羽の崩壊や支保の変状を防ぐために、切羽が粘土層に到達する前に再度コアボーリングによる地質の調査を行い、上記と同様の対策工を実施した結果、切羽の崩壊や大きな変状はなく安全に掘削できた。

各位置での水抜きボーリングの状況を**写真-5**、**6** に示す。TD=1,980m 地点ではコアボーリングで 3t/min、TD=2,300m 地点では小口径長尺鋼管水抜きで 3t/min の多量湧水が確認され、事前の水抜きと前方探査の追加により、早期に地質性状の把握を行ったことで、高被圧地下水による切羽崩壊を防ぐことができた。



図－3　対策工の内容（DⅡb パターン）



写真－5 TD=1,980m 多量湧水（3t/min）

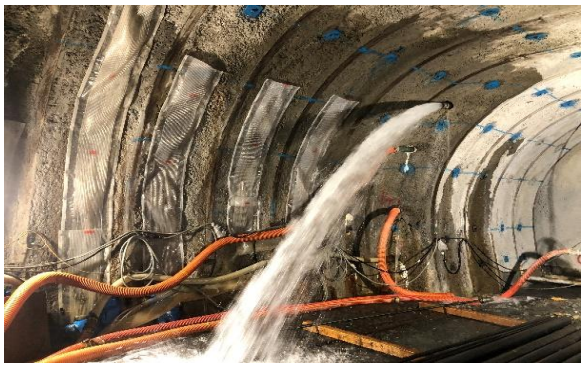
4. 低強度地山および大土かぶり区間

(1) 発生事象と地山状況

TD=2,800m から地質の変化と変位量の増加に伴い、順次支保パターンを DⅡ→DⅡb→EⅠとランクアップさせ、TD=2,970m から当現場では初となる円形一重支保 EⅠパターンにて掘削を進めていた。

EⅠパターン区間の A 計測の結果を**図-4** に示す。インバートストラットによる早期閉合前の内空変位が顕著であり、管理レベルⅡを超過し管理レベルⅢに近い値まで推移した。支保においては吹付コンクリートのクラックやロックボルトのプレートの変形等が発生した。

また、早期閉合実施以降の補助工法として、増しロックボルトや鋼材による鋼製支保工の連結などを実施したが、切羽後方の脚部においては切羽離れ 10D（50m）以降も収束に至らず、ロックボルトや鋼



写真－6 TD=2,300m 多量湧水（3t/min）

MIYAZAWA Shun, TAKAHASHI Tamio, OKAZAKI Yuichi

製支保工の破断が発生した。低強度地山区間の切羽状況と支保の変状状況を**写真-7～9** に示す。

これらの計測結果や支保変状を受け、対策工として円形二重支保である EⅡパターンの採用を決定した。しかし、レール方式による小断面 NATM での二重支保の採用事例は少なく、閉合距離の設定や二次支保の構築時期を含めた適切な施工方法を選定することが課題となった。

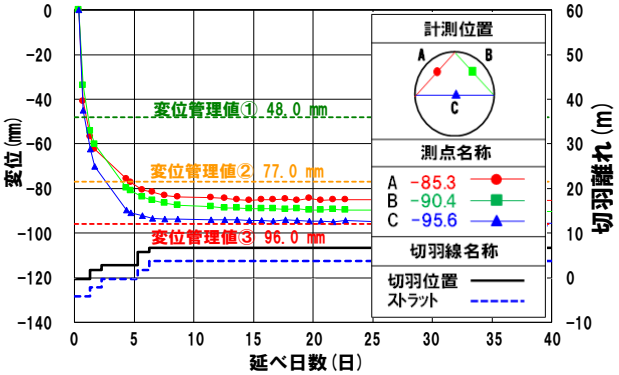
坑内から実施したコアボーリングの状況と岩石試験結果を**写真-10、表-4** に示す。地質は熱水変質を受けた安山岩溶岩であり、岩石組織を残すものの大部分が粘土化していた。一軸圧縮強度は 0.6N/mm^2 と指圧でつぶれる程度であった。粘土化部では地山強度比は 0.1 と 1 を大きく下回る値となっている。なお、スメクタイト含有量は 8wt.%＜30 wt.%と低く、膨潤性は低い結果であった。

(2) 円形二重支保の適切な施工方法の選定

二重支保の適用にあたり、現場の施工条件、施工事例および FEM 解析から最適な施工ステップを選定することとした。しかし、二次支保を構築するタイミングは、二重支保に求める効果の違いによって切羽からの距離には現場ごとに大きな幅がある。

一つ目の構築方法としては、一次支保での地山のゆるみと変位を許容し、地山の応力を解放する“いなし効果”を得た後に、二次支保を構築する方法である。地山をある程度ゆるませることを前提としているため、二次支保の施工は切羽から 2D～5D 程度と比較的大きい傾向にある。

二つ目の構築方法としては、地山のゆるみを最小限に抑え、切羽近傍で早期に二次支保を構築する方法である。二次支保の施工は 2D 以内と小さい傾向にある。



図－4　A 計測結果（E Ⅰパターン区間）



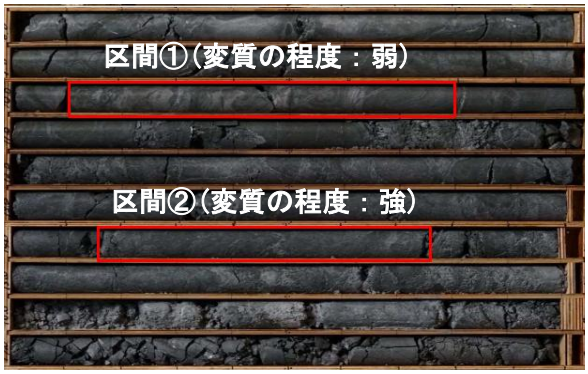
写真－7　切羽状況(TD=2,978m)



写真－8　ロックボルトの破断



写真－9　鋼製支保工の変形



写真－10　安山岩溶岩(熱水変質)コア

表－4　岩石試験結果および地山定数

区間	変質の程度	弾性波速度 Vp' (km/s)	超音波速度 Vp' (km/s)	一軸圧縮強度 σc (N/mm^2)	単位体積重量 γt (kN/m^3)	亀裂係数 K (%)	地山定数 準岩盤圧縮強度 σc* (N/mm^2)	地山定数 変形係数 Es* (N/mm^2)	地山定数 地山強度比 α*	スメクタイト含有量 (wt.%)
1	弱	2.1	4.1	26.4	24.6	74.1	13.4	356	1.9	－
2	強	2.1	0.7	0.6	23.1	0.0	0.6	356	0.1	8

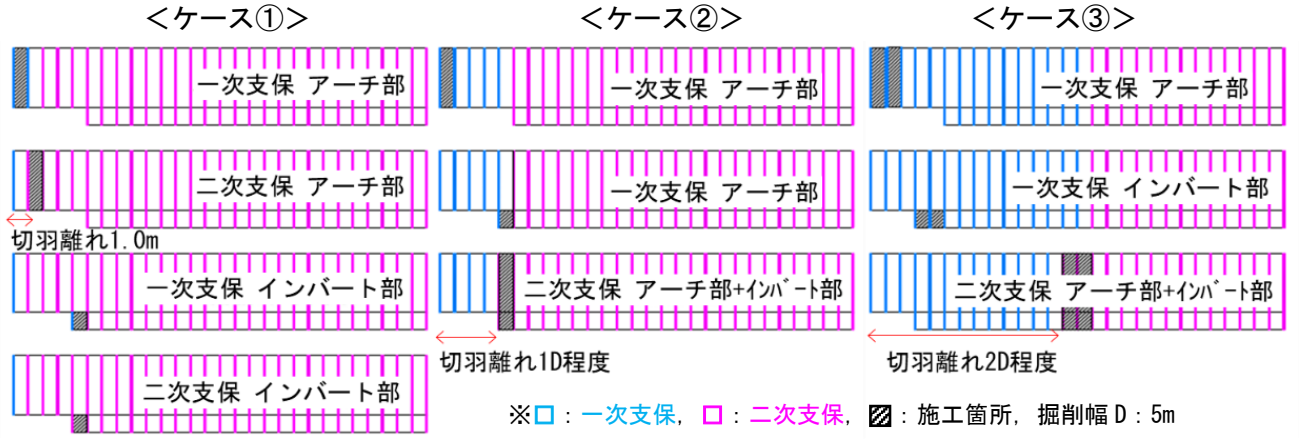
MIYAZAWA Shun, TAKAHASHI Tamio, OKAZAKI Yuichi

いなし効果には二次支保への荷重が減る効果があるとされているが、周辺地山にゆるみを生じさせており、本坑掘削でさらにゆるみが拡大する可能性がある。また、早期施工の方が地山のゆるみを小さくすることができるため、安全面でも有利であること、レール方式によるレールの盛替え作業において二次支保を切羽近傍で構築した方がレールの撤去や再設置による手間が少なく、サイクル向上と支保の早期構築が期待できることなどの理由から、本工事では早期の二次支保構築を主に検討することとした。

(3) ＦＥＭ解析による検証

最適な施工方法を選定するために、FEM 解析による検証を実施した。三次元解析時の検証ケースを図-6、ＥⅡパターンの支保諸元を表-6、支保パターン図を図-7、三次元解析の結果を表-7 に示す。すべてのケースにおいて一次支保の変位量と応力は同程度であるのに対し、二次支保の変位量と応力は二次支保の構築時期が遅くなるほど小さく、いなし効果が確認される。鋼製支保工応力においては、すべてのケースで一次支保は降伏点に達しているのに対し、ケース②と③の二次支保は降伏点以下である。吹付コンクリート応力においては、一次支保ではケース③では設計基準強度 36N/mm^2 を超えている一方、二次支保では全ケースで許容応力度 13.5 N/mm^2 以下である。

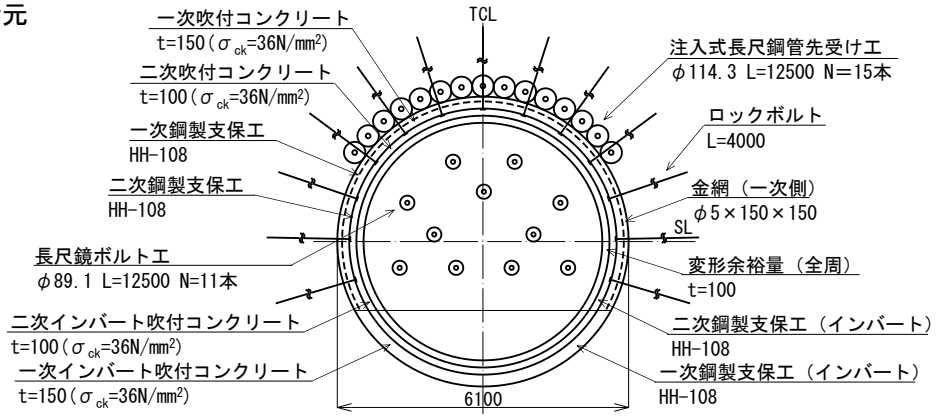
以上のことから、ケース①→②→③と二次支保の構築時期が切羽から離れるほど、二次支保の負担が小さいことが確認されるが、二次支保構築時期が



図－6　三次元解析 検証ケース（一次支保による閉合距離はすべて 1D 程度）

表－6　ＥⅡパターン支保諸元

断面形状	円形
一掘進長	1.0m
鋼製支保工	ＨＨ108（二重）
吹付ｺﾝｸﾘｰﾄ	高強度36N/mm^2 1次側15cm 2次側10cm
ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ	4m×13本
溶接金網	全周（1次側）
変形余裕量	10cm
掘削補助工法	AGF、長尺鏡ﾎﾞﾙﾄ



図－7　ＥⅡパターンの支保パターン図

表－7　三次元解析結果

検証ケース	閉合距離	一次支保 天端沈下 (mm) [－:沈下]	一次支保 内空変位 (mm) [－:沈収縮]	一次支保 支保工応力 (N/mm^2) [降伏点440]	一次支保 吹付応力 (N/mm^2) [設計基準強度36]	二次支保 天端沈下 (mm) [－:沈下]	二次支保 内空変位 (mm) [－:沈収縮]	二次支保 支保工応力 (N/mm^2) [降伏点440]	二次支保 吹付応力 (N/mm^2) [許容応力度13.5]
ケース①	1.0m	-40.2	-76.4	-440	-32.5	-26.9	-31.2	-440	-13.4
ケース②	1D程度	-41.4	-83.4	-440	-35.5	-11.3	+0.2	-439	-6.6
ケース③	2D程度	-43.6	-86.4	-440	-37.9	-1.0	-0.1	-29.9	-0.6

MIYAZAWA Shun, TAKAHASHI Tamio, OKAZAKI Yuichi

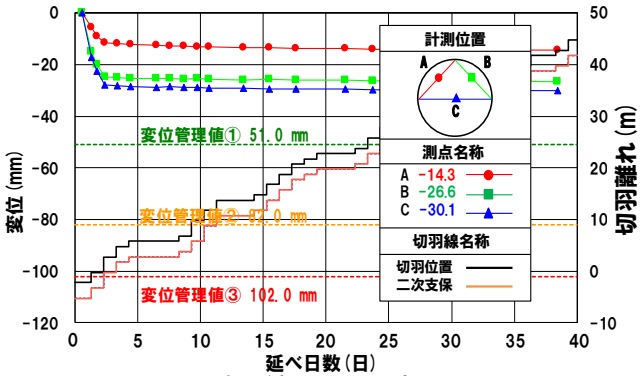
2D 程度のケース③では、一次支保の鋼製支保工降伏後の吹付けコンクリートの負担が大きくなることから、二次支保構築時期が 1D 程度のケース②が最適と判断した。

(4) 対策工の効果

二重支保区間の支保の妥当性を確認するために、A 計測に追加して B 計測を実施した。施工状況を**写真-11** に、A 計測と B 計測の結果を**図-8**、**表-8** に示す。図より、一次支保施工後の初期変位は大きいが、インバートストラットによる閉合+二次支保構築後に変位速度は大幅に減少し、切羽離れ 3D 以内で収束を確認できた。B 計測からも閉合前の一次側の鋼製支保工は降伏応力を超過しているが、二次支保はすべて許容応力内に収まっていた。前述した FEM 解析と同様に、一次鋼製支保工は降伏応力に到達しているが、二次支保は許容応力以下に収まっており、採用した支保構造および施工方法での妥当性を確認できた。



写真－11　円形二重支保施工状況



図－8　A 計測結果（EⅡパターン区間）

表－8　B 計測結果（EⅡパターン区間）

単位：N/mm²

位置	一次支保			二次支保		
	鋼製支保工		吹付 ｺﾝｸﾘｰﾄ 応力	鋼製支保工		吹付 ｺﾝｸﾘｰﾄ 応力
	縁応力（外側）	縁応力（内側）		縁応力（外側）	縁応力（内側）	
	降伏応力440		許容応力度 13.5	降伏応力440		許容応力度 13.5
天端	**-440**	**440**	9.9	77	283	1.9
右側壁	244	360	6.9	234	271	11.9
左側壁	196	169	6.9	176	-15	6.2
ｲﾝﾊﾞｰﾄ	37	219	10.2	176	301	13.0

MIYAZAWA Shun, TAKAHASHI Tamio, OKAZAKI Yuichi

5. 本坑工事における課題

避難坑工事から想定される本坑工事での課題を以下に示す。

(1) 掘削断面の増加による変位量の増加

本坑の掘削断面は約 80m² と避難坑掘削断面の 4 倍となるため、同一地山であっても切羽の安定性は低下し、支保の変位量が増加することが想定される。そのため、円形二重支保区間においてはインバートストラットによる閉合や二次支保の構築時期について十分に検討する必要がある。

(2) 本坑掘削による避難坑支保の変状

本坑と避難坑の離隔がトンネルセンターで 30m と比較的近い位置関係にあることから、低強度地山区間においては本坑および連絡坑の掘削による周辺地盤の変形により、避難坑の支保への影響が発生することが懸念される。

(3) 突発湧水の発生

本坑施工においても避難坑施工時と同様に、突発湧水が発生する恐れがある。避難坑が水抜きボーリングの役割を担っているため、規模は小さくなると想定されるが、突発湧水の発生による切羽や支保の変状がないよう、十分に注意する必要がある。

6. まとめ

今回、低強度地山区間での小断面山岳トンネルの掘削において発生した事象および対策工について報告した。

①想定されていない区間での多量湧水に対しては、ボーリングや小口径長尺鋼管による水抜きを実施することで切羽断面内からの湧水量を減少させ、切羽の安定性を確保することができた。とくに小口径長尺鋼管による水抜きは、掘削を進めながら切羽周辺の水抜きができる対策として非常に効果的であった。

②大土かぶり区間では、事例がほとんどない小断面での二重支保の施工において、二次支保の構築時期を 1D 程度とした方法を採用した。その結果、地山のゆるみを可能な範囲で抑えつつ、二次支保を許容応力以下に抑えることができた。また、各種施工機械を切羽から 1D～2D 程度で据えることで作業を二次支保施工済み区間で行うことが可能になり、施工性と安全性の両面から非常に有効であった。

上記の結果、2018 年 6 月から約 6 年かけて、無事掘削を終えることができた。今回の避難坑トンネルを施工するに当たって直面した事象は本坑工事においても生じる可能性があると考えられるため、避難坑での施工事例を本坑掘削に活用していきたいと考えている。

流域治水認知拡大のための住民参加型出前講座の取り組みについて

一井利光[1]・○三原魁人[1]

[1]仙台河川国道事務所（〒982-8566 宮城県仙台市太白区あすと長町４丁目１−６０）

近年取り組んでいる流域治水の認知拡大を目的とした住民参加型出前講座を実施した当事務所の取り組みを報告するもの。

キーワード　流域治水、住民参加型出前講座

１．　はじめに

近年、気候変動の影響により、日本各地で水害や土砂災害が頻発・激甚化しており、防災・減災に対する社会的関心が高まっている。その中でも「流域治水」は、河川区域だけでなく、集水域や氾濫域も含めた広域的な視点で治水対策を講じる新たな取り組みとして推進している。国土交通省が推進するこの取り組みは、行政だけでなく、地域住民や企業、学校などの多様な主体が連携して災害に備えることを目的としている。

しかし、流域治水という言葉や考え方は、未だ一般住民には十分に認知されていないのが現状である。特に、子どもや高齢者など幅広い層に理解を広げるためには、単なる情報提供のような出前講座ではなく、体験を通じた出前講座を行うことで、認知及び、理解度のさらなる向上が期待される。そこで本稿では、仙台河川国道事務所流域治水課が実施した住民参加型の出前講座を通じた取り組みについて紹介し、その成果と課題、今後の展望について報告する。

２．出前講座の概要と目的

出前講座は、流域治水の考え方をわかりやすく、楽しみながら学んでもらうことを目的として企画した。従来の出前講座では、実際に足を運び、出前授業や出前講義などを行っていたが、今回は従来と異なり、模型や 3D シミュレーション、映像資料などを用いて視覚的かつ体験的に内容を理解してもらうことに重点に置いて、出前講座を実施した。

出前講座の対象は、主に小学生やその保護者、高齢者、外国人を含む幅広い層の地域住民である。また、小学生の子供たちを対象に行った阿武隈川流域の上下流連携事業や、実際に仙台駅周辺で道行く人に出前講座を体験したもらった、「SDGs マルシェ」といった地域イベントへの出展を通じて、さまざまな年齢層への普及が図られた。

３．使用した教材とその効果

(1) 流域治水模型

治水上重要であるダムや流域治水の各取り組みの機能をわかりやすく体験してもらうために模型として作ることで、役割をわかりやすく楽しく体験しながら学ぶことができると考えた。この模型は実際のダム構造や流域治水に関する施設（田んぼダム、遊水地、河道掘削、砂防ダム等）を再現した。また、ＢＢ弾を水流に見立てて流すことにより、遊水地や田んぼダムなどの流域治水の機能を視覚的に体験

し、学ぶことができる。特に子どもたちから「見ていて楽しい」「役割がよくわかった」といった声が寄せられた。
この模型は、「自分事」として災害リスクを捉えるきっかけとなり、家庭での防災意識の向上にもつながるものと考えられる。



図 1 流域治水模型

(2) 3D シミュレーション

豪雨時の河川の危険な状態や実際の河川の様子を楽しみながらわかりやすく知ってもらうため、「河川空間再現シミュレーター」による 3D シミュレーションを教材として活用した。このシミュレーターでは、過去の河川環境を比較し、過去との違いを探すことができる。また、河川の水位を洪水時のように調節することができ、洪水時の河川の危険性をわかりやすく、確認することができる。また、住宅地も洪水時のように浸水水位を調節することができ、住宅浸水の時の危険性を再認識することができる。それに加えて、天気や時間帯も変えることができ、悪天候や夜間の状況を視覚化することで、洪水時の特性を学習し、実際の市街地における洪水時の浸水状況を仮想的に体験できる。特に、浸水被害が予想される地域に住む参加者にとっては、自宅周辺のリスクを実感できる貴重な体験となった。
また、シミュレーションの操作性も高く、イベント等で体験した方々からは「自分で動かして理解できた」「怖さを実感した」などの感想をいただき体験型学習の有効性が示された。

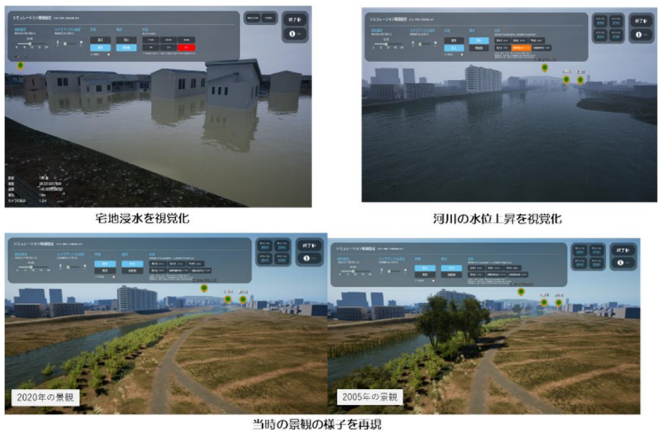


図２　河川空間再現シミュレーター①

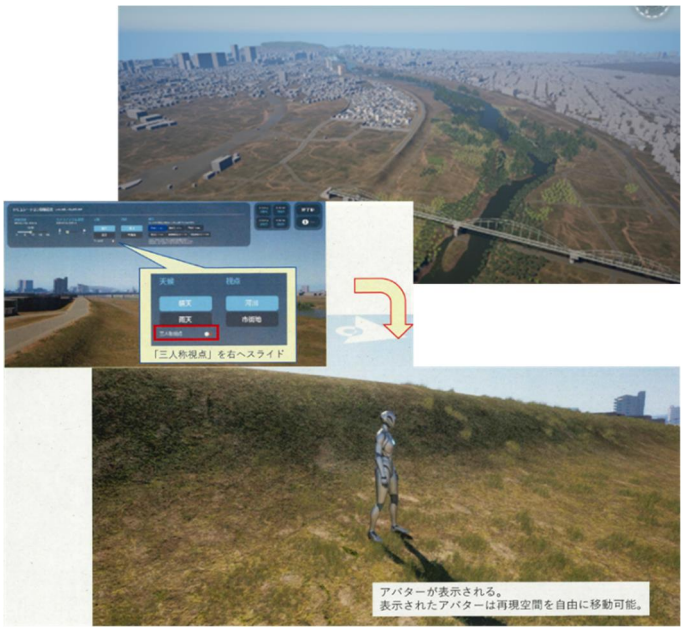


図３　河川空間再現シミュレーター②

(3) 映像教材

過去の仙台河川国道事務所での流域治水課の活動内容や、国土交通本省で作成されている映像素材を組み合わせて、映像を作成した。過去の災害事例や流域治水の取り組みを紹介する内容や、さらに水災害を妖怪に例えて解説するアニメーションなども活用した。映像を通じて、専門用語や難解なメカニズムを直感的に理解できるよう工夫されており、特に年齢層の幅広い参加者にとって有用であるだけでなく、流域治水のことをわからない方々にも認知してもらうきっかけになり、楽しく理解してもらうことができた。



図４　川の成り立ちの説明映像



図５　水災害を妖怪に例えた映像

(4) 流域治水ペーパークラフト

3.(1)の流域治水模型を参考にはさみを使わず組み立て可能な流域治水模型を縮小した流域治水ペーパークラフトを作成した。ダムや田んぼダム、遊水地などの治水施設の役割を一目で理解できるよう工夫しており、小学生を中心に好評を得た。実際に手を動かしながら河川構造物の機能を学ぶことで、参加者が「自分事」として災害リスクを捉えるきっかけとなり、家庭や地域における防災意識の向上にもつながったと考えられる。また、はさみを使わないというのも大きな利点であり、けがの危険性がなく組み立てを行うことができる。



図６　流域治水ペーパークラフト①

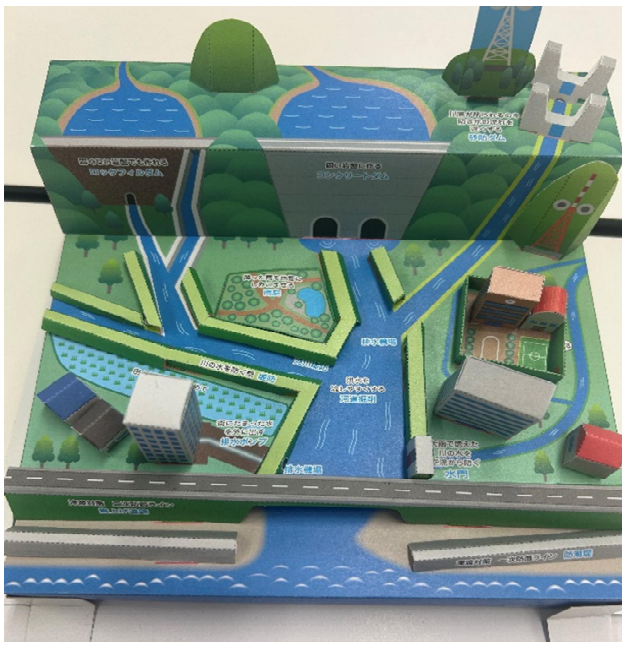


図７　流域治水ペーパークラフト②

４．出前講座の実施状況と参加者の反応

実際に３、で説明した教材を使用した、講座は、阿武隈川上流部（石川町）と下流部（角田市）の小学生の交流を目的とした防災教育イベントや、仙台市内で開催された SDGs マルシェなどでイベントにブースを出す形で参加をし、一般人の方々に向けて、前章で挙げた、教材を用いて流域治水の概要や、国土交通省での取り組みについて、楽しみながら体験していただいた。それぞれのイベントの参加者からは以下のような声が寄せられている。

- 「家が流される場所とそうでない場所の違いがわかった」
- 「洪水の時の怖さを実感できた」
- 「模型や映像が楽しかった」
- 「ダムの役割について積極的に質問ができた」

これらの反応から流域治水に対する住民の理解と関心が向上していることがわかる。また、楽しいという声や実感したという声から楽しみながら学んでいただいたこともわかった。他にも、外国人参加者からも関心が寄せられ、今後も幅広い層に対しての流域治水の出前講座を行う必要性があることが示唆された。



図８　実際の出前講座の様子①（防災教育イベント）



図９　実際の出前講座の様子②（防災教育イベント）



図１０　実際の出前講座の様子③（ＳＤＧｓマルシェ）



図１１　実際の出前講座の様子④（ＳＤＧｓマルシェ）

５．課題と今後の展望

出前講座の実施を通じて、参加者の理解度や関心は確実に高まったが、いくつかの課題も明らかになった。第一に、参加者数が増加することで、一人ひとりへの対応が手薄になる点である。講師の増員やサポーターの配置が求められる。

また、出前講座を一過性のイベントで終わらせず、継続的な学習につなげる仕組みも必要である。今後は、参加者へのアンケート調査を通じて、より具体的なニーズや課題を把握し、講座内容の改善に反映させていく予定である。

さらに、学校や地域施設だけでなく、駅前などの公共空間や外国人学校への出張講座、SNS 等による広報活動を強化することで、より多くの層にアプローチできると考えられる。

また、今年度の出前講座では参加者たちの反応や意見について、正確に統計をとる事ができていなかったため、体験していただいた方にアンケートを取り、数値化できるように工夫をしていきたい。これらの要素を取り入れ今後の出前講座をよりよくしていくために反映していきたい。

６．おわりに

本稿では、住民参加型出前講座を通じた流域治水の認知拡大に向けた取り組みについて報告した。模型や 3D シミュレーション、映像といった視覚的・体験的な手法が、住民の理解促進に寄与することが明らかとなった。方針・指針について住民の方々に流域治水とは何か知ってもらうという第一段階の方針は示唆できたと考えられる。だが、現段階では流域治水を知ってもらった上で最終的に住民の方々にどうしてほしいかという指針が形成されていない。そのため、今後は広報をした上での最終的な目標地点を決め、それに対してどう対応していくかを考えていく必要がある。加えて、広報内容に関しては参加者からのフィードバックを基に講座をさらに改善し、持続可能な防災教育のモデルとして発展させていくことが求められる。他にも、問題点を改善していくだけでなく今後も新しい教材を積極的に取り入れ、より楽しく学んでもらうために、尽力していく

必要がある。

　また、今後図 12 のようなアンケートフォームを利用し参加した方に何が一番理解しやすく楽しかったかや改善点をアンケートとして集約することで今後の新しい広報教材へつなげることができ、今ある教材をさらによくするために、機能を追加することや今後の出前講座のやり方の方針を定めていくことに適しているため、実施していこうと考えている。



図１２　アンケートフォーム

地質リスクを考慮した
道路災害復旧案の検討について

冷水　孝太郎[1]・中西　誠彦[2]

[1]近畿地方整備局　奈良国道事務所　奈良南部災害復旧対策出張所　（〒638-0821奈良県吉野郡大淀町下渕1000）

[2]近畿地方整備局　奈良国道事務所　奈良南部災害復旧対策出張所　（〒638-0821奈良県吉野郡大淀町下渕1000）

2023年12月23日（土），奈良県の管理する国道169号吉野郡下北山村上池原地先において，崩土被害が発生した．崩落原因を調査した結果，深層崩壊の可能性が高く，本復旧にあたっては，高度な技術力が必要であることから，国の権限代行による道路災害復旧事業となった．本論文では，被災箇所の早期復旧に向けて，被災地域及びその周辺の地質調査結果を念頭に，地質リスクの回避・低減の検討に加え，経済性，安全性，維持管理性等を考慮した道路災害復旧案を検討した経緯について報告するものである．

キーワード　道路災害復旧，地質リスク，深層崩壊

1. 概要

(1) 国道169号下北山村（前鬼～上池原）の概要

国道 169 号は，紀伊半島アンカールートの一部を形成するとともに，重要物流道路に指定されており，隣接県との連携強化を図り，観光，緊急医療，地域活性化の支援や大規模災害時の緊急輸送路として重要な役割を担う「命の道」となっている．現道の前鬼～上池原間は，池原貯水沿いに整備されており，崩土箇所の北側には，前鬼橋，南側には上池原交差点と，地域の観光拠点のひとつである下北山村スポーツ公園が位置する（図-1）．

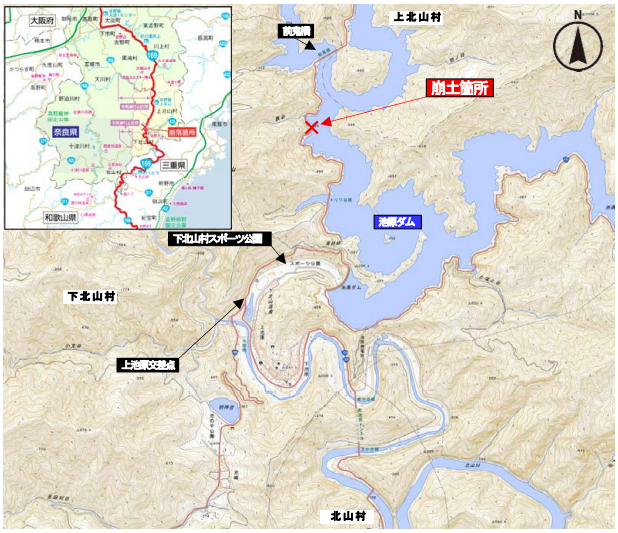


図-1　前鬼～上池原付近の状況

(2) 事故の概要

2023年12月23日（土），奈良県吉野郡下北山村前鬼～上池原間の国道169号沿いの吹付コンクリートで保護された尾根部の斜面が，幅約20m，長さ約40mにわたり崩落し，車両2台が巻き込まれ，1名が死亡，1名が重傷を負う事故となった．被災箇所の状況図を示す（図-2）．



図-2　2023年12月　被災箇所の状況

(3) 事故後の通行規制

一般車両の全面通行止め期間は，6ヶ月以上に及び，地域の生活，経済，観光に多大な影響を与えた．なお，現在は，道路管理者である奈良県が崩土箇所に仮桟橋を設けて迂回を行い，約160mの信号制御による片側交互通行を行っている．事故発生から現在における通行規制の変遷を以下に示す．

a) 2023年12月23日[事故発生]～

・一般車両面通行止め

・緊急対策　2023年12月 崩落直後着工 崩土除去等実施
・応急対策　2024年 1月 着工
仮桟橋[約160m]，モルタル吹付け工[t=8cm]，高エネルギー吸収型防護工[L=43m]，鉄筋挿入工[D19，L=5.0m 290本]

b) 2024年4月2日～

・消防，救急等の緊急車両限定での通行可（臨時措置）

c) 2024年6月28日～

・仮桟橋による一般車両の片側交互通行を開始
※通行止め規制基準値
雨量規制：時間雨量 25mm/hr，連続雨量 70 mm以上
斜面の異常検知：地盤伸縮計　2mm/hr以上（図-3）



図-3　仮桟橋による片側交互通行の状況と計測器

d) 2024年11月22日～

※通行止め規制基準値
・雨量規制：連続雨量 110mm以上に緩和

(4) 崩土の原因

a) 国道169号の過去の被災履歴

国道169号，及びその周辺での主な道路災害の事例を表-1に示す．落石，斜面，法面崩落，崩土，地すべり等により，人命に関わる重大事故も度々発生している．

表-1　過去25年間の国道169号，および近辺での道路災害事例

発生年月日	発生場所	被害概要
2000年6月	国道169号	落石により通行中の車が衝突，負傷者1名
2006年12月	国道425号	乗用車が川に転落して1人死亡
2007年1月	国道169号	通行中の車両が崩壊に巻き込まれ3名死亡
2011年9月	国道169号 川上村迫	台風12号紀伊半島豪雨　国道169号を横断して土砂が流下し，国道が分断
2018年12月	国道169号 川上村迫	高原トンネル南坑口付近の覆工に地すべりに起因する亀裂が発生
2020年4月	国道169号 下北山村上池原	法面の大規模崩壊が発生，全面通行止め
2023年12月 ※本報告	国道169号 下北山村 上池原	同地点で再発　1名死亡，1名重傷　現在も復旧工事継続
2024年4月	国道169号 下北山村西原	崩土を確認し，通行止
2024年4月	国道425号 下北山村大瀬	崩土を確認し，通行止

b) 地形・地質

周辺地域では，尾根が鋭く深い谷地形が特徴である．深い谷は，紀伊半島の隆起運動と多量の降雨の影響で，侵食作用が強く作用するために生じる地形である．南東方向から次々に岩が付け足される形で形成した地層であり「付加体」と呼ばれる複雑な地質構造が特徴で，砂岩，泥岩，チャートなどが不規則に分布する．岩自体は硬いが，亀裂が発達しており脆い部分がある（図-4）．

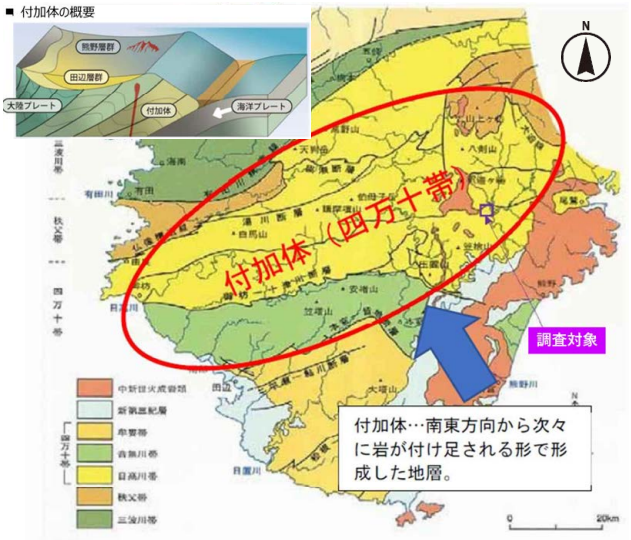


図-4 被災箇所の地質

c) 外的要因

当該箇所は，岩盤分類が確立されていなかった1970年代以前にダムの付替え道路として，発破などの旧来工法で構築された．そのため，現行の標準勾配の基準が施行される以前に施工された法面であり，非常に急勾配となっている．建設当初，法面は安定していたが，その後経年的に地山の風化と岩盤の緩みが進行し，最終的に凍結融解等をトリガーとして安定性が失われたと考えられる．

d) 地形，地質的要因

崩壊面に露出した岩盤の地質構造を調査した結果，当現象は3つの節理面に規制されたくさび状の岩盤崩壊（岩盤すべり）と考えられる．また，斜面に認められる層理面は高角度の受け盤構造を成しており，重力変形により岩盤に緩みが生じやすい地質構造であったと推察される（図-5，図-6）．

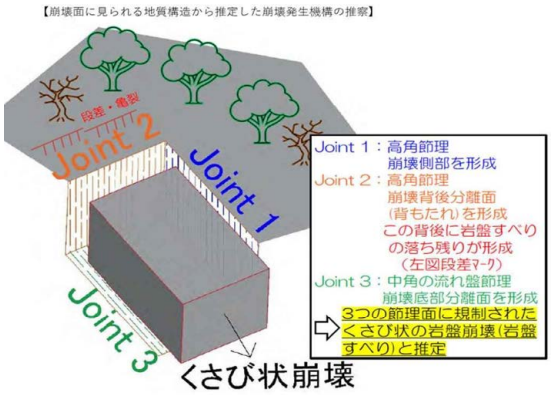


図-5　崩壊のメカニズム（模式図）

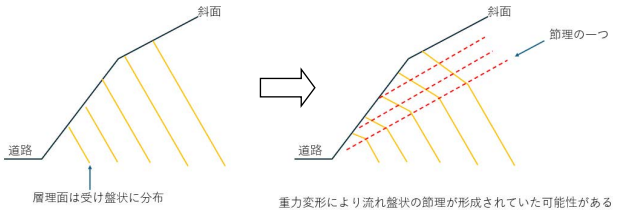


図-6　崩壊イメージ

本格復旧を検討するにあたり，奈良県により被災箇所周辺のボーリング調査が実施された．その結果，地表付近から深度30m付近までの間に，開口亀裂が発達していたり，風化が進行して緩んだ岩盤や，地下水の存在等の特徴が確認された．

一方，既往文献・調査結果レビューでは，2023年12月の崩土箇所を包括する流域は，深層崩壊危険渓流として抽出されていることが確認された．加えて，奈良県実施のボーリング調査結果から，深層崩壊の発生に寄与する可能性のある特徴が複数確認された．そのため，当該地域では今後，大雨や地震時に深層崩壊が発生し，甚大な被害が引き起こされる可能性が極めて高いと判断した．

(5) 直轄権限代行による事業化

現道復旧を行った場合，深層崩壊危険渓流の地形を改変するため，応力解放等により深層崩壊を誘発する可能性が避けられないと判断された．そのため，本格復旧には高度な技術力を要すると考えられることから，2024年3月27日に道路法　第13条第3項の規定に基づき，直轄権限代行により国土交通省が調査，設計，工事を進めることとなった．

2. 本格復旧に向けた地質調査

(1) 調査箇所の選定

被災箇所を包括する流域は，過去に深層崩壊危険渓流として抽出されており，付近にも同様な地形が認められる．そこで，周辺地域における，深層崩壊をはじめとした地質リスクの広域的な抽出を試みた．概略地形判読を行い，図-7 に示す青破線エリアを調査箇所として選定した．選定の根拠を以下に示す．

a) 崩壊が密集するエリア

・崩壊跡やガリーなどの地形が密集しており，周囲と比べて脆弱な地質工学的性質を有する可能性が高いと考えられる．

b) 半島状の尾根地形を呈するエリア

・尾根地形は元々硬質な岩盤から形成されていたと考えられるが，ダム建設時の切土以降，経年的な風化が進んだことから，次第に尾根全体が緩み，地盤の強度が低下している可能性があると考えられる．

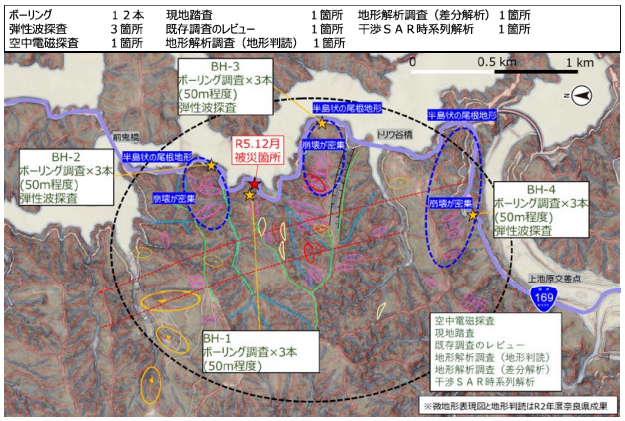


図-7　調査箇所と調査数量

(2) 調査概要

a) 地形解析調査（地形判読）

微地形判読図と現地踏査結果をもとに，地すべり，重力変形斜面等により地山が緩んだ地形（緩み地形）を抽出した．図-8，9に示すように緩み地形が多数抽出された．

b) 地形解析調査（航空レーザ測量データ差分解析）

2013年度と2020年度の航空レーザ測量データを用いて地上標高データの差分をとり，m単位で地形の変化状況を確認し，斜面が変動している可能性のある範囲を抽出した．図-8，9に示すように変動している可能性がある斜面が多数抽出された．

c) 干渉ＳＡＲ時系列解析

過去と約10年間のSAR衛星データを分析し，mm単位で地形の変化を確認した．図-8，9に示すように変動している可能性のある斜面が多数抽出された．

被災箇所周辺（BH-1）の平均年変動量は，他の調査箇所と比べて2mm/年と大きく，累積性が明瞭であった．また，調査箇所（BH-2～3）の平均年変動量は1mm/年であり，BH-1と同様に累積性が確認された（図-10）．

d) ボーリング調査（ボアホールカメラ撮影）

2-(1)で選定した調査箇所においてボーリングを実施した．コアやボアホールカメラ撮影結果をもとに，岩相や亀裂・風化度合等の状況から，「風化帯」や岩盤に亀裂が多数発達している「緩み域」を推定した．調査箇所 BH-1 は浅層 15m に強風化帯，層厚 30m 程度の深層に緩み域が確認された．また，調査箇所 BH-2 では 25m，BH-3 で層厚 40m の緩み域が確認された．

e) 弾性波探査

弾性波探査は，人工震源から弾性波を発生させ，地中を伝播するＰ波速度を計測し，地盤の強度を推定した．ボーリング結果とキャリブレーションを行い，BH-1～4の緩み域を把握した．

f) 空中電磁探査

空中電磁探査は，比抵抗分布を基に，広域的な地質状況や地下水等の分布状況を推定できる可能性がある．そこで，BH-1～4の調査結果の妥当性を含めた総合的な検

証を行った．平面的な比抵抗分布を確認した結果，BH-1周辺では，周囲と比較して比抵抗値が著しく低いことを確認した．BH-1孔では，地下水が確認されていないことを踏まえると，周辺よりも岩盤の風化が進行している可能性が考えられる．また，BH-1～4の各縦断方向の比抵抗分布を確認した結果，地質調査結果（ボーリング調査・弾性波探査）による緩み域の下端深度とおおよそ同じ深度に比抵抗値が急激に変化する領域が認められた．比抵抗値の変化には様々な要因が考えられるが，岩盤状態の変化として考えた場合，ボーリング調査結果と概ね整合する（図-11）．

(3) 被災箇所周辺の地質リスク

a) BH-1（被災箇所）

地表から深度15mまでの区間に強風化帯が存在していることに加え，干渉SAR時系列解析では平均年変動量が2mm/年と周囲よりも大きな変動傾向が示された．

また，地表から深度30m程度までの比較的深い区間において，深層崩壊の危険性がある緩み域を推定した．

これらを踏まえると，重力変形等による岩盤の緩みが進行している可能性があり，調査箇所の中では崩壊危険度が最も高い斜面と考えられる．崩壊を抑止するためには，浅層の強風化帯の対策が必要であり，浅層部と深層部の対策を併せて検討する必要がある．

一方で，BH-1周辺に着目すると，BH-1箇所で地質調査および地形判読により推定された緩み地形と，隣接する斜面において干渉SAR時系列解析で抽出された斜面変動の範囲が重複している状況を確認した．総合的な斜面対策を行うためには，一体の土塊として取り扱う必要があると判断した（図-8，図-11，図-12）．

b) BH-2～4（被災箇所外）

ボーリング調査により，BH-2～4 においても緩み域（層厚 25m～40m）が判明した．

干渉 SAR 時系列解析により，BH-2～3 では平均年変動量が 1mm/年を確認した．差分解析では，BH-4 周辺で変動傾向を確認した．これら調査結果を総合的に検討した結果，深層崩壊の危険性があると判断した．

一方で，各調査結果を踏まえると，BH-1 と比べて直ちに崩壊する可能性は低く，早急な対策の必要性はないと考えられるが，変動が進行すれば BH-1 同様に崩壊の危険性が高まるため，継続的な監視を行っていく必要があると判断した（図-8，図-9）．

c) 地質調査結果のまとめ

今回実施した現地踏査，地形判読，地形差分解析，干渉 SAR 時系列解析及び過去の被災履歴の確認の結果，前鬼橋から上池原交差点までの区間における国道 169 号の全線にわたり地すべりや重力性変形に伴う緩み地形が存在することが判明した．

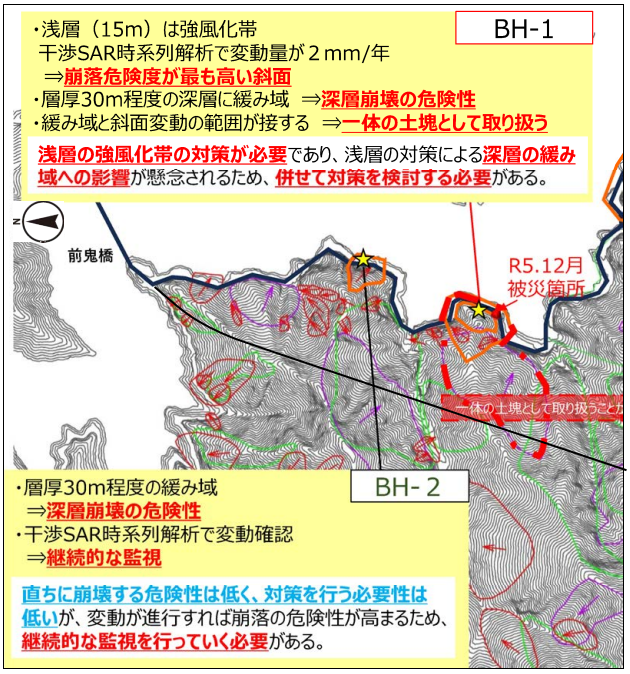


図-8　調査結果概要図（1/2）

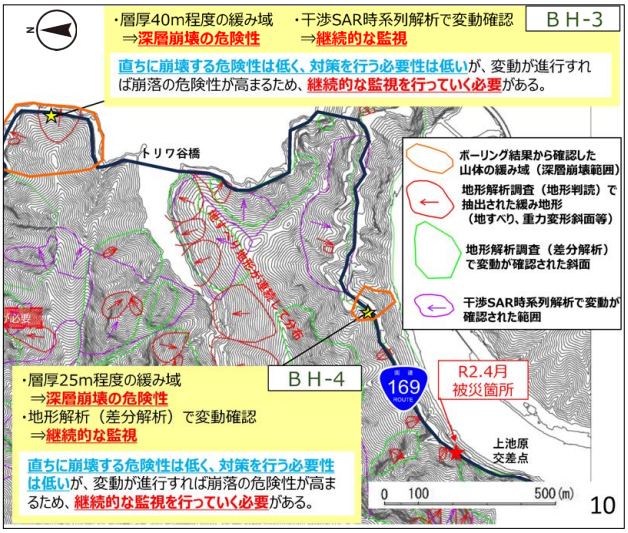


図-9　調査結果概要図（2/2）

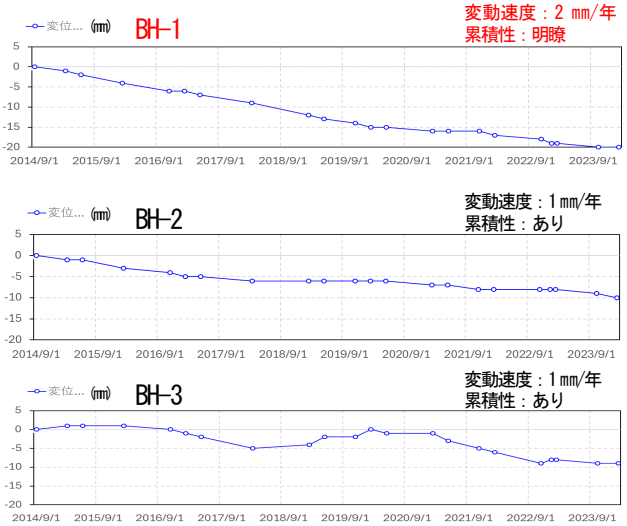


図-10　干渉SAR時系列解析
（BH-1～3）※BH-4は南向き斜面で解析困難

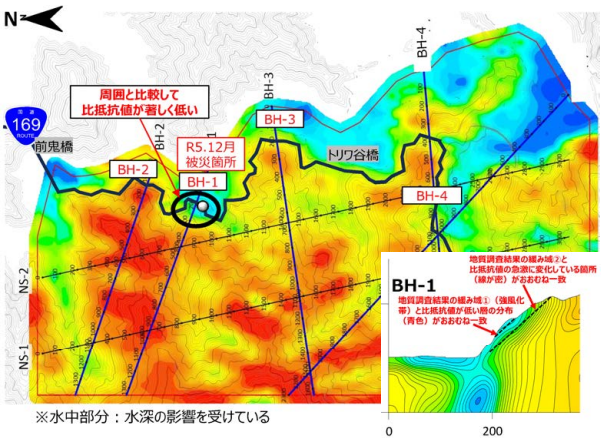


図-11 空中電磁探査結果　平面図及びBH-1断面の例

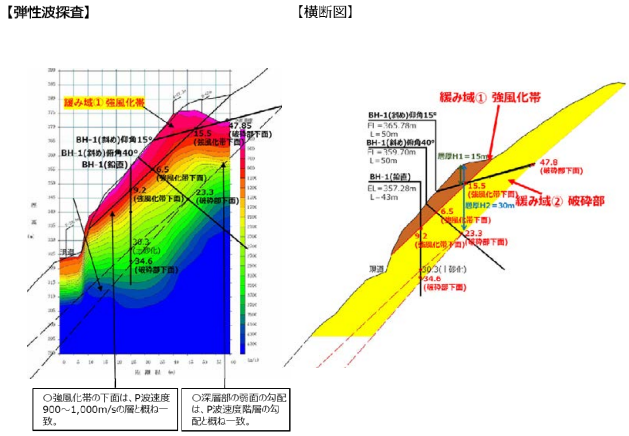


図-12 調査結果の概要(BH-1の例)

3. 本格復旧案の検討

(1) 検討方針及び配慮事項

比較案は，図-13 に示す崩壊箇所を対象とし，斜面崩壊を「抑止」，「回避」の２つの視点から立案した．

具体的には，図-13 に示す原位置復旧（アンカー工），別線（ダム湖側）橋梁，別線（山側）トンネルを立案した．

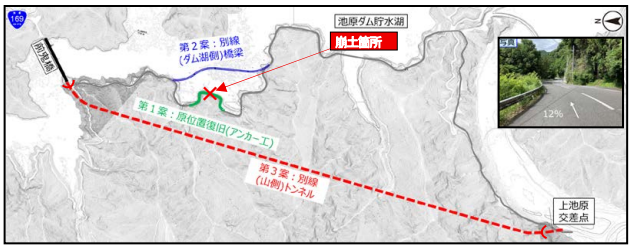


図-13 比較案ルート図

a) 原位置復旧（アンカー）

深層崩壊の危険性を有するブロックに対して，地山の切り取りによる応力解放を生じさせず，施工振動を最小限に抑制するためアンカー工により原位置復旧を行う案．アンカー施工面積：約33,000㎡（図-14）

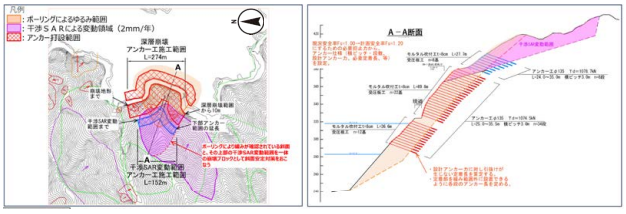


図-14 原位置復旧（アンカー）

b) 別線（ダム湖側）橋梁

深層崩壊が発生しても崩壊ブロックの土砂・岩塊が到達しない範囲を設定し，その範囲を避けた位置（崩壊ブロック下端から最小 50m 離れた位置）に橋梁を設置する案．　橋梁延長約 0.5km（図-15）

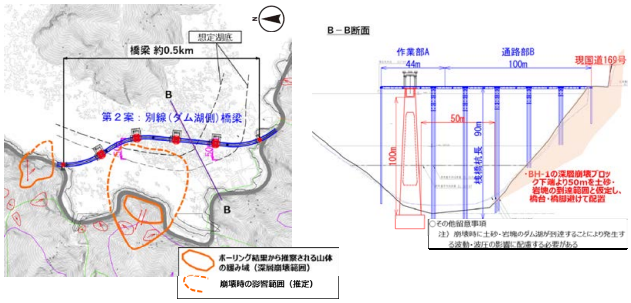


図-15 別線（ダム湖側）橋梁

c) 別線（山側）トンネル

斜面の危険性がないトンネル坑口位置で，深層崩壊が発生しても影響が及ばない離隔距離 2D（D：掘削径）以上を確保した位置（山側）をトンネルで通過する案．トンネル延長約 2.7km（図-16）

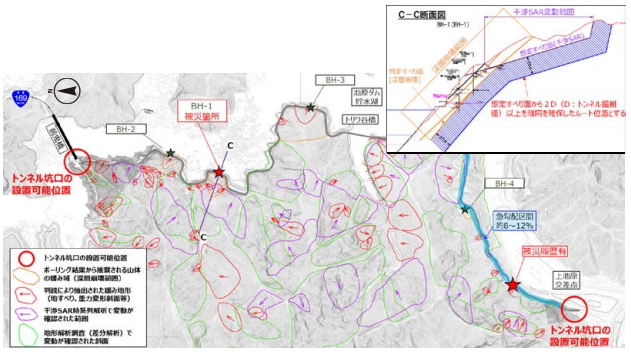


図-16 別線（山側）トンネル

(2) 比較検討

以上の比較３案に対して，施工の難易度，施工安全性，維持管理，工期，経済性の観点から比較，評価をおこなった．

a) 施工の難易度

アンカー工の場合，抑止力が大きくなるため，アンカー配置が密集するとともに，常時満水位以下での施工では，受圧板の品質管理が高度となる．橋梁案では，ダム湖内での施工により仮締切（ケーソン等）の規模が大きく高度な管理が必要となる．トンネルについては，標準的な山岳トンネル工法（NATM）での施工が可能である．

b) 施工安全性

アンカー工の場合，大型の削孔機により打撃振動を与

えるため，崩壊を誘発する．直高 50m 超で急斜面に設置される足場が強風時，地震時に安定性を損なう．橋梁，トンネルは，規模は大きくなるが，既往の施工事例等を元に管理することで対応は可能である．

c) 維持管理

アンカー工の場合，ダム湖の常時満水位以下の施工も含まれるため，点検が容易ではない．再緊張の必要性が生じた場合，工事費が高価となる．橋梁は，ダム湖内となり，橋梁の点検知識を有する潜水士が必要となる．一方トンネルは，一般的なトンネル点検で対応が可能である．

d) 工期，経済性

災害復旧事業のため，工期は最短が望ましい．アンカーは打設規模が大きく，橋梁，トンネル案に比べて工期が長い．橋梁は，ダム湖の中央付近を通過し，橋脚高が 100m を超えるため，トンネル案に対して高価となる．

e) 検討結果

以上の比較結果より，施工の難易度，施工安全性，維持管理に問題が無く，工期，工費に優れるトンネル案を選定した．また，結果的に，トンネル案とすることで，地質調査結果で，将来的に崩壊の危険性が残るBH-2～4の半島状尾根付近を回避できる．

4. まとめ

(1) 本格復旧案検討の流れ

地質リスク把握を目的とした地質調査を早期に実施するとともに，その結果を反映した比較案の検討や防災検討会での助言の反映し，設計精度（構造信頼性，概算費用，概算工程）を逐次更新を行い，委員会での合意形成を経て，3 ヶ月の短期間で本格復旧案を確定させることができた（図-17）．

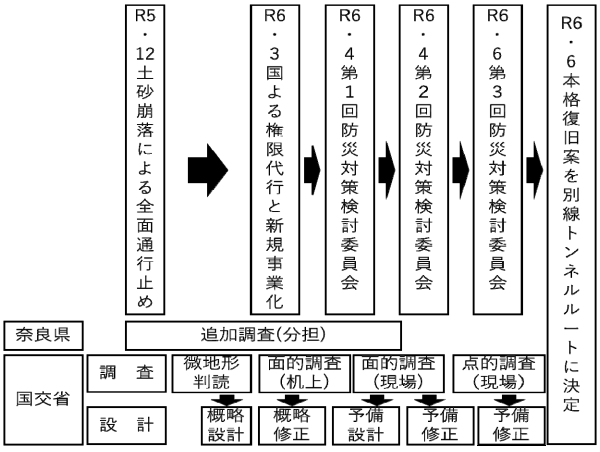


図-17 本格復旧案検討の流れ

(2)道路早期災害復旧に向けて得た知見

早期に道路災害復旧案を確定するに至った調査，比較検討，及び工程管理で得た知見を以下に示す．

a) 地質調査段階

机上調査の面的，現地調査の面的，現地調査の点的の順で調査を実施することで，効率的に崩壊地，及びその周辺における地質リスクの内在範囲と影響度を効率的に把握することができる（表-2）．

表-2 実施した調査とその目的

	調査名	目的	対象	地質リスク範囲の絞り込み
机上調査	①既存調査のレビュー	● 過去に調査された広域的な地形地質リスク分析を確認する。	面的	○
	②地形解析調査（航空測量データ差分解析）	● 過去と現在の航空写真測量データから等高線を対比してm単位で地形の変化量、変化状況を確認する。	面的	○
	③干渉SAR時系列解析	● 過去と現在の衛星から地上との距離データを解析してmm単位で地形の変化量を確認する。	面的	○

危険度の高い地形を把握し、詳細調査の範囲を絞る

	調査名	目的	対象	地質リスク 危険度
現地調査	④ボーリング調査（ボアホールカメラ）	● 地質や亀裂・風化度合によりすべり面を確認し、土塊の厚さを把握する。	点的	○
	⑤弾性波探査	● 地盤から反射される弾性波を確認し、地質の成層状況や地盤の強度を把握する。	点的	○
	⑥空中電磁探査	● 地盤の含水量を３次元で確認し、風化度合や地下水分布状況を把握する。	面的	△（④を補完）
	⑦現地踏査	● 地表に現れる岩盤の走向傾斜を確認し、受け盤か流れ盤かを把握する。	面的	△（④⑤を補完）

b) 比較検討段階

比較案抽出にあたっては，対策の信頼性を踏まえて，比較案を抽出することが重要である．本事業の別線（山側）トンネルのように構造物規模は大きくなるが，斜面崩壊のリスクを回避することで経済性，工期短縮が図れ，かつ，維持管理性においても優位となり，当該地域の抱える地質リスクを回避することができた．

他方，推奨案の選定にあたっては，比較案に対して実現性が担保される必要がある．類似事例，簡易構造計算をもとに，必要な補強構造，ルート，工期などの信頼性を向上させることに留意の必要がある．

(3) 今後の展望

本路線と同様に 1970 年代以前にダムの工事用道路で建設され，その後国道，県道として利用されている道路や，法面に対する安全基準が十分に整備されていなかった時代に建設された道路については，本路線と同様に斜面の経年劣化が進行しているものと思われる．今回の調査，あるいは復旧対策で得られた知見を基に，災害復旧の迅速化を図るとともに，予防保全の考えも踏まえ，引き続き，安全な道路の整備，管理に繋げていきたい．

謝辞：本論文の執筆にあたり，国道169号下北山村上池原地区防災対策検討委員会の京都大学　大西有三名誉教授，関西大学　社会安全学部　小山倫史教授をはじめ，各委員の皆様，並びに奈良県，下北山村の関係者，業務関係者の皆様にお礼申し上げます．

参考文献

1) 土木学会：岩盤斜面の調査と対策，1999

関連資料

1) 国道169号下北山村上池原地区防災対策検討委員会　会議資料　第1～3回，臨時開催　奈良県
2) 国道169号下北山村上池原地区防災対策検討委員会　会議資料　第1～3回　国土交通省

桟橋上部工点検用ROV/ASVと その運用支援技術の開発

田中　敏成[1]・喜矛　司[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　インフラDX研究領域
メタロボティクス研究グループ　（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）.

桟橋上部工下面の目視点検作業の安全性と効率性の向上を目的として，水上部無人でその変状を撮影し，劣化度判定に資する画像データを収集する点検ロボットを開発した．当該ロボットは，特徴的な桟橋下での測位機能をはじめ，衝突回避や定点保持といった部分的な自動化技術を用いた遠隔操作の支援機能を具備するとともに，1杭列間エリアに限定して機能する自動誘導機能を実装し，ROVとASVの両方の特徴を併せ持った点検ロボットとなっている．

本課題では，当該点検ロボットの特徴的な遠隔操作支援機能や自律・自動制御機能について述べるとともに，膨大な取得写真を取り扱う点検診断時において，その内業を支援する機能についても併せて紹介する．

キーワード　桟橋上部工の目視点検，ROV/ASV，桟橋下測位，点検診断支援システム

1. はじめに

一般定期点検における桟橋上部工下面の目視点検作業は，小船や船外機船等に乗った作業員によって行われている．筆者らは，このような点検作業の安全性と効率性を向上させることを目的として，陸上からの遠隔操作によって桟橋上部工下面の変状を撮影し，その劣化度判定に資する画像データを収集するROV（Remotely Operated Vehicle）型の点検装置を開発するとともに，その運用をサポートする様々な操縦支援技術を開発し実装してきた．さらに，それらの支援技術の拡張により，当該ロボットのASV（Autonomous Surface Vehicle）化を図った．また，取得した写真を効率的に取り扱い，点検帳票の作成を支援する点検診断支援システムも開発した．

本課題では，桟橋上部工点検用ROV/ASVとその運用支援するために開発してきた支援技術について紹介する．

2. 桟橋上部工点検用ROV/ASV

当該点検ロボットは，陸上からの遠隔操作または自動航行によって水上部無人で桟橋上部工下面の変状を撮影し画像データを効率よく収集する点検ロボットである．

GNSS が利用できない桟橋下において，逐次測位を可能とする LRF（Laser Range Finder）を用いた測位機能をはじめとして，遠隔操作を支援するための自動衝突回避や定点保持機能など，その特殊環境下でのロボットの運用をサポートする種々の支援機能が実装されている [1)2)3)]．さらに，遠隔操作支援のための自動化機能を拡張し，有線ではあるが所定の作業範囲において全・半自動誘導が可能な ASV 化を図った [4)5)]．

撮影した膨大な写真はオフラインで SfM（Structure from Motion）により 3D モデル化され，内業支援用に開発した点検診断支援システム上で活用される [6)7)]．

表-1　桟橋上部工点検用ROV/ASV

	実証試験機	小型廉価版試験機 [8)]
		
プラットフォーム	DELTA-200.net 改 (QI inc.), 有索	BlueROV2 (Blue Robotics Inc.), 有索
カメラ	操縦用： 気中前×1, 気中後×1, 水中前×1 調査用： 24.5Mpx Full-size DSLR	操縦用： 気中前×1, 気中後×1, 水中前×1 調査用： 45.75Mpx Full-size ミラーレス
照　明	前：調光LED 1W×12 上：調光LED×8 (80 deg拡散板)	前：調光LED 15W (1500LM)×4 上：調光LED 6.6W (700LM)×4
推進器	水平：200W×4 垂直：200W×2	水平：200Wクラス×4 (Hydromea DiskDrive に50置換) 垂直：不使用
前進速力	約1.5ノット	約2ノット（Duty比50%）
その他の機能	方位保持, 自動衝突回避, 桟橋下測位 (LRF利用), 定点保持, 自動測線作成, 自動誘導	方位保持, 自動衝突回避, 桟橋下測位 (LRF利用), 定点保持, 自動測線作成, 自動誘導
動力源	外部給電 (発電機等)	Li-Ion二次電池, 14.8V, 15.6Ah×2
稼働時間	制限なし	約0.5～1時間
寸　法	L1200×W800×H925 (Min. 708)	L800×W600×H600
質　量	約100kg	約50kg

3. 現場での運用支援技術

これまでに構築した地図表示機能や回避方向の提示機能等の遠隔操作支援機能を改良し，撮影漏れを低減するための撮影履歴の提示機能と自動衝突回避機能を追加した．次節以降で，それぞれの機能について述べる．

(1) 桟橋下における測位機能[1)]

ここではまず，2 台の LRF で得られた走査結果を合成して全周走査とし，これを画像化してこの中から画像処理により杭を検出しその位置情報を利用する．つまり，これらの検出杭の相対測位結果と保有する地図データベース中の杭の位置を照合し，照合に成功した杭をランドマーク化して，その位置から見た自機位置を逆演算によって推定するものである．図-1 に測位例を示す．

LRF の走査画像から画像処理によって検出された円形断面の「検出物」の位置と地図データベース上にある杭の位置との照合に成功した「照合杭」が 2 本以上存在する場合は ROV/ASV に直近の照合杭を「測位基準点（ピンク杭）」とし，これに対する自機位置の相対測位（ピンク細線）を行う．次に，ROV/ASV に二番目に近い次点の照合杭を「方位推定補助点（オレンジ杭）」とし，測位基準点と方位推定補助点を結ぶ基線（オレンジ細線）と ROV/ASV のなす角から自機方位を推定する．また，照合杭が 1 本となった場合の方位推定はジャイロベースに切替え，照合杭が 0 本となった場合は，自機位置の推定そのものを慣性航法等に切り替えることを許容する．

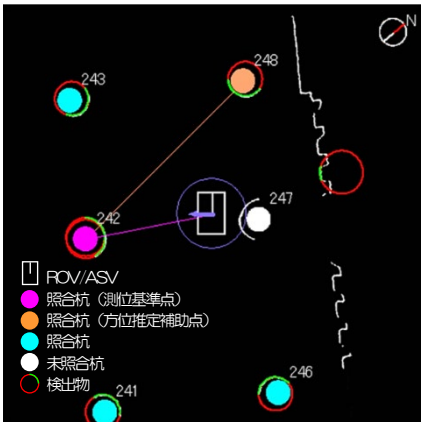


図-1　LRF を利用した桟橋下での測位例

次項以降に測位機能の数式表現を示す．なお，ROV 座標系の第 1 軸と第 2 軸は水平面上にあるロール軸とピッチ軸であり，第 3 軸は鉛直下向きのヨー軸である．また，地図座標系の第 1 軸と第 2 軸は水平面上にある岸壁法線に平行な軸とそれに直行して陸側を正とする軸であり，第 3 軸は鉛直上向きである．世界座標系の第 1 軸と第 2 軸は北緯と東経であり，第 3 軸は鉛直下向きである．ただし，いずれの座標系も正系の直交座標系である．

a) 地図座標系上での測位

杭の位置ベクトルに関して式(1)を定義する．ここで，変数の左肩の添え字は座標系を表し，右下の添え字は変数が示す対象物を表す．太字はベクトルと行列を表す．

なお，ロボットの添え字は便宜的に ROV で統一した．

$$
\begin{aligned}
&{}^{\mathrm{ROV}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}_k},\ {}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}_k}: \text{地図上での杭の位置}\\
&{}^{\mathrm{ROV}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{RES}_j},\ {}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{RES}_j}: \text{検出杭の位置}\\
&{}^{\mathrm{ROV}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{RES}_{P_i}},\ {}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{RES}_{P_i}}: \text{照合杭の位置}\\
&{}^{\mathrm{ROV}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}_{Q_i}},\ {}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}_{Q_i}}: \text{照合杭の地図上での位置}\\
&k: \text{地図上での杭のインデックス}(1,2,\cdots,n)\\
&j: \text{検出杭のインデックス}(1,2,\cdots,m)\\
&i: \text{照合杭のインデックス}(1,2,\cdots,l)\\
&P_i: \text{ROV/ASV に近い順の照合杭のインデックス}\\
&Q_i: P_i \text{に対応する照合杭 の地図上でのインデックス}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

ここで，検出杭jの位置と地図データベース上での杭kの位置を比較し，それらの間のノルムが所定の閾値以下である場合，検出杭jは杭kと同一と見なされ照合杭iとなる．なお，P_iはiを ROV/ASV に近い順に並べ替えたインデックスであり，Q_iはそれに対応する地図データベース上での杭のインデックスである．以降，P_1, Q_1は ROV/ASV に最も近い照合杭のインデックスとして測位基準点として扱い，P_2, Q_2は ROV/ASV に二番目に近い次点のインデックスとして方位推定補助点として扱う．ROV/ASV の方位と位置ベクトルを次式で定義する．

$$
\begin{aligned}
&{}^{\mathrm{ROV}}\theta_{\mathrm{MAP}}: {}^{\mathrm{ROV}}\text{第1軸に対し}{}^{\mathrm{MAP}}\text{第1軸のなす角}\\
&{}^{\mathrm{MAP}}\theta_{\mathrm{ROV}}: {}^{\mathrm{MAP}}\text{第1軸に対し}{}^{\mathrm{ROV}}\text{第1軸のなす角}\\
&{}^{\mathrm{ROV}}\theta_{\mathrm{RES}_{P_1\to P_2}}: {}^{\mathrm{ROV}}\text{第1軸と線分}\mathrm{RES}_{P_1\to P_2}\text{のなす角}\\
&{}^{\mathrm{MAP}}\theta_{\mathrm{MAP}_{Q_1\to Q_2}}: {}^{\mathrm{MAP}}\text{第1軸と線分}\mathrm{MAP}_{Q_1\to Q_2}\text{のなす角}\\
&{}^{\mathrm{ROV}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}},\ {}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}}: \text{ROV/ASVの位置ベクトル}\\
&\text{ただし，} {}^{\mathrm{ROV}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}} \equiv \boldsymbol{O}\\
&\boldsymbol{R}_1(\theta): \text{回転行列．添え字は回転軸. 引数は回転角度.}
\end{aligned}
\tag{2}
$$

以上の定義から，照合杭が 2 本以上存在する場合は測位基準点と方位推定補助点を用い，地図座標系における ROV/ASV の方位${}^{\mathrm{MAP}}\theta_{\mathrm{ROV}}$を式(3)から推定可能である．

$$
\begin{aligned}
{}^{\mathrm{ROV}}\theta_{\mathrm{RES}_{P_1\to P_2}} &= \operatorname{atan2}\left(\frac{{}^{\mathrm{ROV}}y_{\mathrm{RES}_{P_2}} - {}^{\mathrm{ROV}}y_{\mathrm{RES}_{P_1}}}{{}^{\mathrm{ROV}}x_{\mathrm{RES}_{P_2}} - {}^{\mathrm{ROV}}x_{\mathrm{RES}_{P_1}}}\right)\\
{}^{\mathrm{MAP}}\theta_{\mathrm{MAP}_{Q_1\to Q_2}} &= \operatorname{atan2}\left(\frac{{}^{\mathrm{MAP}}y_{\mathrm{MAP}_{Q_2}} - {}^{\mathrm{MAP}}y_{\mathrm{MAP}_{Q_1}}}{{}^{\mathrm{MAP}}x_{\mathrm{MAP}_{Q_2}} - {}^{\mathrm{MAP}}x_{\mathrm{MAP}_{Q_1}}}\right)\\
{}^{\mathrm{ROV}}\theta_{\mathrm{MAP}} &= {}^{\mathrm{ROV}}\theta_{\mathrm{RES}_{P_1\to P_2}} - {}^{\mathrm{MAP}}\theta_{\mathrm{MAP}_{Q_1\to Q_2}}\\
{}^{\mathrm{MAP}}\theta_{\mathrm{ROV}} &= {}^{\mathrm{MAP}}\theta_{\mathrm{ROV}_{inc}} = -{}^{\mathrm{ROV}}\theta_{\mathrm{MAP}}
\end{aligned}
\tag{3}
$$

照合杭が 1 本以下となって式(3)が使えなくなった場合でも，常時方位ジャイロによる方位計測値${}^{\mathrm{MAP}}\theta_{\mathrm{ROV}_{inc}}$を${}^{\mathrm{ROV}}\theta_{\mathrm{MAP}}$で初期化しておくことで自機方位の情報源を${}^{\mathrm{MAP}}\theta_{\mathrm{ROV}_{inc}}$にシームレスに切り替えて${}^{\mathrm{MAP}}\theta_{\mathrm{ROV}}$を算出可能である．さらには慣性航法等別種の測位手段に切り替えることも許容しており，測位の継続を試みる．

次に，地図座標系における ROV/ASV 位置の相対測位手法を示す．ここでは，推定方位と測位基準点の位置ベクトルを利用して，地図座標系における ROV/ASV の位置ベクトル${}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}}$を式(4)で算出する．

$$\begin{pmatrix} {}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{R}_3\left({}^{\mathrm{MAP}}\theta_{\mathrm{ROV}}\right) & {}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}_{Q_1}} \\ \boldsymbol{O}^{\boldsymbol{T}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -{}^{\mathrm{ROV}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{RES}_{P_1}} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$${}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}} = \boldsymbol{R}_3\left({}^{\mathrm{MAP}}\theta_{\mathrm{ROV}}\right)\left(-{}^{\mathrm{ROV}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{RES}_{P_1}}\right) + {}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}_{Q_1}} \quad (4)$$

最後に，これまでに推定した ROV/ASV の位置ベクトルと方位を用いて，ROV 座標系における地図データベース上での杭の位置ベクトルを式(5)により更新しておく．このことにより，次の測位ステップにおいても新たな検出杭と新しい地図データベースとを照合可能となり，測位を継続することが可能となる．

$${}^{\mathrm{ROV}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}_k} = \boldsymbol{R}_3\left({}^{\mathrm{ROV}}\theta_{\mathrm{MAP}}\right)\left({}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}_k} - {}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}}\right) \quad (5)$$

b) 世界座標系への変換

地図座標系の原点${}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}} \equiv \boldsymbol{O}$の世界座標系における位置ベクトルを${}^{\mathrm{W}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}}$とし，世界座標系に対する地図座標系の傾きを岸壁の法線方向${}^{\mathrm{W}}\theta_{\mathrm{MAP}}$とする．式(4)で推定された${}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}}$の世界座標系への変換は，これを第 3 軸周りに岸壁法線方向${}^{\mathrm{W}}\theta_{\mathrm{MAP}}$だけ回転した後，メートル単位から緯経度に変換する緯経度変換ベクトル$\boldsymbol{L}$を乗じて${}^{\mathrm{W}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}}$だけ平行移動して表される．ただし，地図座標系（x, y, z）と世界座標系（北緯, 東経, 深度）は前項で示した通り互いに第 3 軸の極性が異なるため，$\boldsymbol{R_1}(\pi)\cdot{}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}}$として地図座標系の第 1 軸周りに180deg回転させて極性を合わせる．式(6)に地図座標系（メートル単位）で推定された ROV/ASV の位置ベクトル${}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}}$の世界座標系（緯経度）への変換式を示す．

$$\begin{pmatrix} {}^{\mathrm{W}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{L} & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O}^{\boldsymbol{T}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{R}_3\left({}^{\mathrm{W}}\theta_{\mathrm{MAP}}\right) & {}^{\mathrm{W}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}} \\ \boldsymbol{O}^{\boldsymbol{T}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{R_1}(\pi)\cdot{}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$${}^{\mathrm{W}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}} = \boldsymbol{L}\cdot\boldsymbol{R}_3\left({}^{\mathrm{W}}\theta_{\mathrm{MAP}}\right)\left(\boldsymbol{R_1}(\pi)\cdot{}^{\mathrm{MAP}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{ROV}}\right) + {}^{\mathrm{W}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}} \quad (6)$$

地理緯度φに依存する緯度1degと経度1degに相当する距離は，例えば理科年表等で示されている．これを用いれば，地理緯度φ周辺における${}^{\mathrm{W}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{MAP}}$近傍の緯経度変換行列$\boldsymbol{L}$を設定することができる．

c) 取得写真と撮影位置情報等の対応機能

取得写真と撮影位置等の情報との対応は，写真データに直接付帯させる手法と，撮影タイミングと同期したログファイルへの記録の 2 種類の手法を用意した．

第 1 の手法は，式(6)で算出した位置情報を NMEA0183 準拠のパケット情報に変換し，各写真データ中の Exif GPS IFD タグに直接書き込む方法である．

第 2 の手法は，撮影日時や位置と同期したログファイルを記録する手法である．ここでは世界座標系における緯度経度に加え，式(4)で算出した分解能の高い地図座標系における位置情報を同時に記録する．

(2) 撮影履歴の提示機能 [2)]

桟橋上部工点検用ROV/ASVは陸上から遠隔で操作され，ASVモード時は測線上を自動誘導される．

図-1は運用アプリケーション上に表示される杭の配置図であり，地図画面上にROV/ASVを表示したナビゲーション画面である．オペレータはこの画面の情報からROV/ASVの現在位置を把握し，計画経路に沿ったROVの操縦，あるいはASVとしての運行を行う．なお，ROV/ASVを囲む青細線の矩形枠はカメラの撮影範囲を示しており，その撮影範囲をフットプリントとして残していくことで撮影履歴を提示する（**図-2**）．図ではライトグレーの塗りつぶし範囲が撮影済み領域となる．この機能により，運用中であっても桟橋下面の撮影済み領域と未撮影領域を容易に判別可能である．

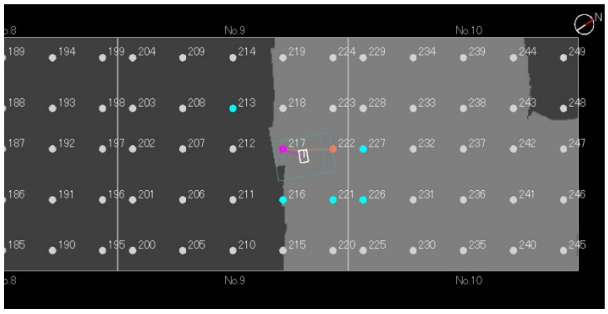


図-2　運用アプリ上に表示される杭の配置図と撮影状況

(3) 自動衝突回避機能 [2)]

ROV の遠隔操作支援ならびに ASV の自動誘導を実現するためのLRFを用いた衝突回避のアルゴリズムについて述べる．なお，ここでのアルゴリズムは後方が死角となる LRF の利用を想定し，2 台の LRF を各々前方と後方に向けて設置することを想定している．

まず，障害物を検知する範囲として ROV/ASV の周囲に任意の警戒エリアを設定する．ここでは説明の単純化のために，各 LRF を中心とした半径R_{MI}の 2 つの円弧（二重円弧）の内側を警戒エリアとして設定するが，式(7)で示すように，各LRFから警戒エリアの境界線までの距離L_{MI}を定義できれば，単一円や矩形等任意の形状の警戒エリアを設定することが可能である．

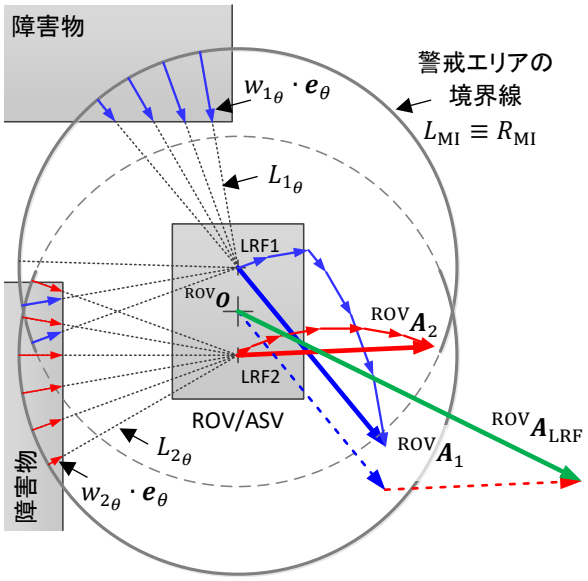


図-3　衝突回避のイメージ図

次に，ROV/ASV に設置した各 LRF から各方角の第 1 反射点までの距離を$L_{1_\theta}, L_{2_\theta}$とすると，障害物による各方角の警戒エリアの侵食度合いw_{i_θ}はL_{MI}から各方角の第 1 反射点までの距離を減じた値として式(8)となる．

$$L_{MI} = \begin{cases} R_{MI} & (\text{二重円弧}) \\ -X_i \cos\theta + \sqrt{{X_i}^2 \cos^2\theta - ({X_i}^2 - R^2)} & (\text{単一円}) \end{cases} \quad (7)$$

$$w_{i_\theta} = \begin{cases} -(L_{MI} - L_{i_\theta})/L_{MI} & (\text{if } L_{i_\theta} \le L_{MI}) \\ 0 & (\text{if } L_{i_\theta} > L_{MI} \text{ or no-data}) \end{cases} \quad (8)$$

i：LRF の識別番号．$i = 1,2$

θ：LRF の走査方向．$-180 \le \theta < 180$ deg

X_i：LRF の${}^{ROV}x$軸上における${}^{ROV}O$からのオフセット位置

R：警戒範囲の単一円の半径

ここで，障害物による警戒エリアの侵食度合いに応じた斥力の方向を回避すべき方向と仮定すれば，w_{i_θ}に各方角の単位ベクトルe_θを乗じて総和を取ると衝突回避方向を示すことができる．ここではまず，各々の LRF ごとに斥力の方向${}^{ROV}A_i$を算出し，それらを合算して衝突回避方向ベクトル${}^{ROV}A_{Tot}$を算出する．

$$\begin{aligned} {}^{ROV}A_i &= \sum_\theta (w_{i_\theta} \cdot e_\theta) \\ {}^{ROV}A_{Tot} &= \sum_i {}^{ROV}A_i \end{aligned} \quad (9)$$

LRFの観測に基づく衝突回避指令ベクトル${}^{ROV}B_{LRF}$は，衝突回避方向ベクトルに感度Gを乗じて次式となる．

$${}^{ROV}B_{LRF} = G \cdot {}^{ROV}A_{Tot} \quad (10)$$

また，ROV/ASV はジョイスティック操作による操作指令ベクトル${}^{ROV}B_{JOY}$を常時許容している．よって，ROV/ASVに対する総移動指令ベクトル${}^{ROV}B_{Tot}$は，操作指令ベクトル${}^{ROV}B_{JOY}$に衝突回避指令ベクトル${}^{ROV}B_{LRF}$を重畳し，飽和条件を付して次式となる．

$${}^{ROV}B_{Tot} = \begin{cases} {}^{ROV}B_{JOY} + {}^{ROV}B_{LRF} & (\text{if } |{}^{ROV}B_{JOY} + {}^{ROV}B_{LRF}| \le 1) \\ \dfrac{{}^{ROV}B_{JOY} + {}^{ROV}B_{LRF}}{|{}^{ROV}B_{JOY} + {}^{ROV}B_{LRF}|} & (\text{if } |{}^{ROV}B_{JOY} + {}^{ROV}B_{LRF}| > 1) \end{cases} \quad (11)$$

ただし，衝突回避中の完全な操縦不能を回避するために，式(12)に示すように衝突回避指令ベクトル${}^{ROV}B_{LRF}$の上限を総移動指令量の 50%とした．

$${}^{ROV}B_{LRF} = \begin{cases} G \cdot {}^{ROV}A_{LRF} & (\text{if } |G \cdot {}^{ROV}A_{LRF}| \le 0.5) \\ 0.5 \cdot \dfrac{{}^{ROV}A_{LRF}}{|{}^{ROV}A_{LRF}|} & (\text{if } |G \cdot {}^{ROV}A_{LRF}| > 0.5) \end{cases} \quad (12)$$

(4) 自動誘導機能

当該 ROV/ASV の自動化された機能は，前節で詳述した衝突回避も含め，以下のとおりである．

① 衝突回避機能 [2)]
② 定点保持機能 [3)]
③ 測線の自動生成機能（杭列間に限定）[4)]
④ 測線上の自動誘導機能 [4)]

これらのうち，①と②の機能は当初の ROV 時に実装された機能であり，遠隔操作運用時の操縦支援機能として使用する前提で実装した機能である．③は当該点検ロボットの ASV 化の過程で実装された機能であるが，自動誘導時だけでなく遠隔操作運用時においても機能する．④は ASV として自動誘導時に使用される機能である．

a) 全自動誘導 [4)]

全自動誘導時は，前述の①から④までの全ての自動化機能が使用可能である．

②の定点保持は，主に開始位置での待機時に使用される [3)]．なお，④の自動誘導はこの拡張により実現される．

③で生成される測線は，ROV/ASV 正面方向で直近の 2 つの杭列間に限定した範囲において，ROV/ASV が辿るべき測線として自動で生成される．ROV/ASV の作業開始位置が桟橋側面であれば法線平行方向に，船舶を接岸する桟橋正面に位置すれば法線直行方向に測線を自動で生成する．測線数はマニュアルで設定するが，杭間隔と測線数に応じた密度で等間隔に自動で生成され，ウェイポイント（経由地点）の集合として格納される．

④の測線上の自動誘導機能は，③で定められたウェイ

ポイントを順に辿りながら測線上を進むよう ROV/ASV を誘導する機能である．③の説明で述べた通り，自動誘導の実施は２つの杭列間の範囲に限定される．

ROV/ASV は測線上の直近の点から次のウェイポイント方向に微小な距離だけ離して置かれた逐次更新される瞬間的な目標点を目指して誘導される（図-4）．

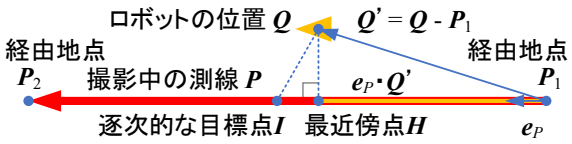


図-4　全自動誘導時の測線上の誘導目標点

まず，経由地点$\boldsymbol{P}_1$と$\boldsymbol{P}_2$を結ぶ測線$\boldsymbol{P}$は式(13)となる．ROV/ASV の位置$\boldsymbol{Q}$ に対する測線$\boldsymbol{P}$上の最近傍点$\boldsymbol{H}$は，$\boldsymbol{P}$ 上の任意の点として媒介変数jを用いて式(14)で表される．

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{P}_2 - \boldsymbol{P}_1 \tag{13}$$

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{P}_1 + j\boldsymbol{P} \tag{14}$$

ここで，$\boldsymbol{H}$が$\boldsymbol{Q}$の最近傍点となる条件は，線分QHと測線$\boldsymbol{P}$が式(15)の直交条件を満たす場合である．

$$\boldsymbol{P} \cdot (\boldsymbol{Q} - \boldsymbol{H}) = 0 \tag{15}$$

これらの式を整理すると，ROV位置$\boldsymbol{Q}'$に対する測線$\boldsymbol{P}$上の最近傍点$\boldsymbol{H}$は式(16)で表される．なお，測線$\boldsymbol{P}$ 方向の単位ベクトル$\boldsymbol{e}_P$は式(17)となる．

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{P}_1 + (\boldsymbol{e}_P \cdot \boldsymbol{Q}')\boldsymbol{e}_P \tag{16}$$

$$\boldsymbol{e}_P = \frac{\boldsymbol{P}}{|\boldsymbol{P}|} \tag{17}$$

次に，この点$\boldsymbol{H}$ から次経由地点$\boldsymbol{P}_2$の方向に微小な距離だけ離して置く瞬間的な目標点$\boldsymbol{I}$ は，式(18)で表される．ここで，kは任意の正数である．

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{H} + k\boldsymbol{e}_P \tag{18}$$

この逐次更新される瞬間的な目標点$\boldsymbol{I}$を目指して常時②の定点保持を行うことで，始点からウェイポイントを順に辿って終点まで誘導する④の自動誘導が実現される．

b) 半自動誘導 [5)]

半自動誘導時は全自動と同様に，①から④までの全ての自動化機能が使用可能である．全自動と異なる点は，④の測線上の自動誘導において，式(18)のk を0とする点である．結果として，半自動誘導時の逐次的な目標点$\boldsymbol{I}$は式(19)で示す通り最近傍点$\boldsymbol{H}$と等しくなる．

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{H} = \boldsymbol{P}_1 + (\boldsymbol{e}_P \cdot \boldsymbol{Q}')\boldsymbol{e}_P \tag{19}$$

$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{H}$となる半自動誘導は，測線上の直近の点に復帰するのみの誘導となり，測線上の移動はオペレータのジョイスティック操作によるが，あたかもレール上を移動するようなイージーオペレーションが期待できる．また，ここでは自動衝突回避機能も有効であるが，操作の重畳により回避方向等にオペレータの判断を加味できる．

索の状態等，現場では不確定な要素が少なくない．オペレータの操作や判断が介在可能な半自動誘導は，省力化を目指しながら柔軟な対応が期待できる．

4. ROV/ASVの全・半自動の誘導による撮影試験

2024年3月6日から3月8日にかけて，四日市港霞ケ浦北埠頭地区のPC桟橋にて，桟橋上部工点検用ROV/ASVに実装した全自動と半自動の自動誘導機能について現場実証試験を実施した [5)]．ここでは実施した試験を抜粋して紹介する．図-5に現場でのロボットの投入状況を示す．



図-5　ROV/ASVの海上への投入状況

前述の①から④の全ての自動機能を用いて桟橋下における全自動誘導および半自動誘導による桟橋下面の撮影を試行した試験について述べる．

桟橋正面に向かって右手から進入することとし，測線は桟橋の法線平行方向に２ブロック分設定した．それらのうち，手前の通常杭列間では全自動誘導用として3線1セット，桟橋最後列背後の狭隘部では半自動誘導用として1線1セットの測線を自動生成した．なお，ここでの自動誘導は測線1セット単位で機能し，測線セット間の移動は遠隔操作で実施した．

半自動（赤）と全自動（紫）の誘導軌跡を図-6 に示す．誘導中，明確な障害物に遭遇することはなかったが，杭や擁壁への異常接近の防止・抑制が確認できた．また，ここで撮影した写真を SfM ソフトウェアで合成した 3D モデルを図-7 に示す．誘導手法の異なる２つの領域の撮影結果であっても問題なく合成して 3D モデルを作成できることを確認した．

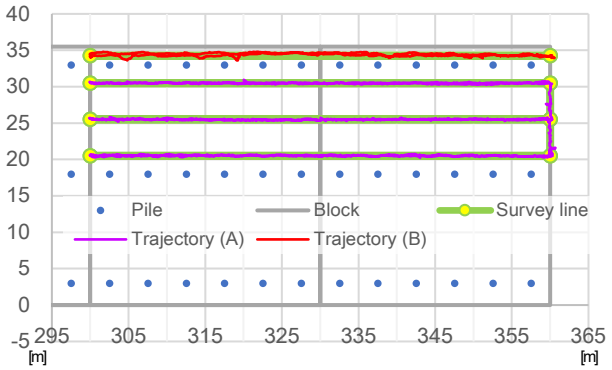


図-6　全自動（紫A）と半自動（赤B）による誘導軌跡

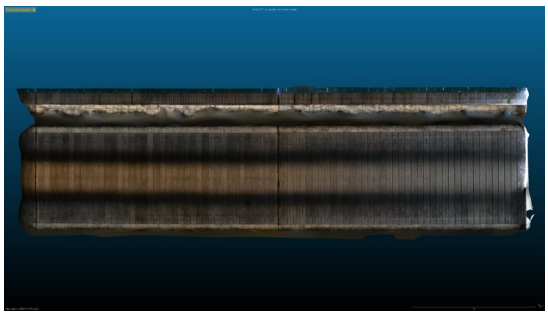


図-7　SfMによる3D合成写真の生成結果（上面透視）

5. 帳票作成等を支援する点検診断支援システム

膨大な写真取得が見込まれたため，点検帳票の作成等の内業を支援する点検診断支援システムを開発した[6]．

図-7 のような桟橋上部工下面の 3D モデルを用意すると，当該システムは3Dモデルから部材単位で2D展開図を自動作成し，展開図上で劣化の可能性のある箇所を半自動で検出する（**図-8**）．ユーザーは誤検出や検出漏れの有無を確認しながら，劣化のグレードを分類し，その結果から変状図が作成され，点検帳票が作成される．

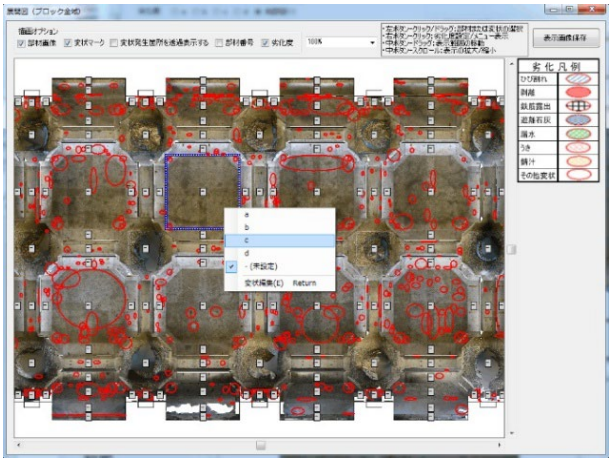


図-8　点検診断システム（2D展開図上で半自動検出）

また，当該システムは劣化度の集計機能を有し，その分布や進行具合をグラフィカルに提示するほか，集計結果をCSV形式で出力可能である[7]．これにより国土技術政策総合研究所の維持管理費用（LCC）計算ツールへの条件入力や，外部のCIMモデル等との連携が可能である．

6. おわりに

本論文では，港湾空港技術研究所で開発してきた桟橋上部工点検用ROV/ASVとその運用支援技術を紹介した．

当初はROVの遠隔操作支援技術として実装した自動化機能であるが，拡張して簡易的にASV化するに至った．

また，効率化への対応は内業にも及ぶことから，併せて開発した点検帳票の作成等を支援する点検診断支援システムを紹介した．本ツールはその利便性や発展性を鑑み，集計機能や外部システムとの連携機能を有している．

今後の対応としては，自動誘導範囲の制限等を改善し，自動化・自律化のレベルをさらに進展させる計画である．

謝辞：本課題は第 1 期SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の成果を端緒とし，国土交通省関係部局・港湾管理者の皆様に継続的に多大なご協力をいただきました．また，一部の実証試験は（株）エコーのご協力を得て実施しました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 田中，加藤，宇野：桟橋上部工下における点検装置の測位とその下面の撮影実験，第 17 回建設ロボットシンポジウム，O-54，2017.
2) 田中，加藤，宇野，喜孝：桟橋上部工点検用 ROV のための遠隔操作支援機能の改良，第 18 回建設ロボットシンポジウム，O4-2，2018.
3) 田中，喜孝，野上，倉持，丸井：桟橋下における点検ロボットの定点保持技術の開発，第 20 回建設ロボットシンポジウム，O7-3，2022.
4) 田中，喜孝，野上，倉持，丸井：ROV 型桟橋上部工点検ロボットの ASV 化を目的とした特定動作の自動化実験，第 21 回建設ロボットシンポジウム，O3-5，2023.
5) 田中，喜孝，先岡，倉持：桟橋下における杭列間エリアにおける点検ロボットの全・半自動の複合誘導実験，第 22 回建設ロボットシンポジウム，O2-5，2024.
6) Kato E. et al.: Demonstration test for improvement of inspection and diagnosis of concrete pier superstructure by remotely operated vehicle. In Proc. the 3rd ACF symposium, S5-3-1, 2019 (USB).
7) https://www.pari.go.jp/unit/robotics/ids-sys/
8) 田中，喜孝：汎用 ROV をプラットフォームとした桟橋上部工点検ロボット，第 24 回建設ロボットシンポジウム，O1-2，2025.

メンテナンスに優れた橋梁伸縮装置の研究開発について

林　泰正[1]

[1]福井県産業労働部工業技術センター　建設技術研究部　（〒910-0102福井県福井市川合鷲塚町61字北稲田10）

橋梁補修の工種の一つである伸縮装置の更新において，これまで採用されてきている一般的な伸縮装置は，構造的な制約の都合上，全体的な更新が主流である．しかし，実際に漏水に発展しているケースは局所的な損傷であることが多い．そのため，全体的な更新は費用が増大するだけでなく，廃材の発生や交通規制の長期化等，社会的・環境的負荷が大きくなっている．

本研究開発では，中小企業でも製造できる簡単な構造かつ入手しやすい材料で構成し，損傷している箇所を橋面上から部分的に補修できるメンテナンスに優れた伸縮装置の開発を行ったものである．

キーワード　伸縮装置，メンテナンス，コスト縮減，環境的・社会的負荷低減

1. はじめに

我が国の社会資本ストックの内訳をみると全体の約40%近くを道路が占めている[1)]．その道路の構造物の一つである橋梁は全国で約70万橋を超える[2)]と言われており，福井県でも県管理橋梁は2,300橋を超え，市町管理橋梁を加えると相当数にのぼる．

これらの多くが高度経済成長期に整備された橋梁であり，今後10年から20年の間に建設後50年以上を経過する老朽橋となり，その割合が急増することが明らかとなっている[3)]．また，老朽化だけでなく，通行車両の大型化や交通量の増加，経年劣化や疲労損傷等の要因により，橋梁の健全性は低下傾向にある．今後は重量規制や通行止め等，社会生活への影響が深刻化することが懸念されている．

また，橋梁は他の土木構造物と比較して特に構造が複雑で部材数も多いという特徴があり，維持管理が困難な構造物である．その橋梁の健全性低下や損傷原因の一つとして伸縮装置からの漏水が挙げられる．伸縮装置が損傷すると図-1に示すように，橋面から雨水が侵入するだけでなく，土埃やゴミ類，冬季の凍結防止剤等が橋桁端部や支承部に滞水・堆積し，図-2に示すような橋梁に重大な損傷を与えるケースが見られる．

現在，一般的に用いられている伸縮装置は，主要構造部が鋼構造の荷重支持型が多く，止水機能部に弾性シーリング材やゴム系材料を用いている．橋梁点検[4)]において健全性Ⅲと判定されるケースは，図-3に示すように止水機能部のみの損傷であることが多く，現状，このような損傷形態の場合においては一般的な伸縮装置の構造的な制約により，図-4に示すように伸縮装置周囲の保護コンクリート部も含めた全体の更新が主流である．

これまで多くの伸縮装置取替工事の監督業務等に従事してきた筆者は，以前からこのような方法は健全な部材を含めた過剰な更新になっていると考えており，高コストかつ長期間の交通規制は避けたいと感じていた．

本研究開発は，伸縮装置の損傷に伴う橋梁の健全性低下に対し，伸縮装置の全体更新とは異なる補修方法として、真に損傷している必要最小限の補修ができ，橋梁の供用期間中における伸縮装置に関するメンテナンスコスト縮減と，不要な取り壊しや長期の交通規制解消といった環境的・社会的負荷の低減を可能とする新たな伸縮装置の開発を目的として実施したものである．

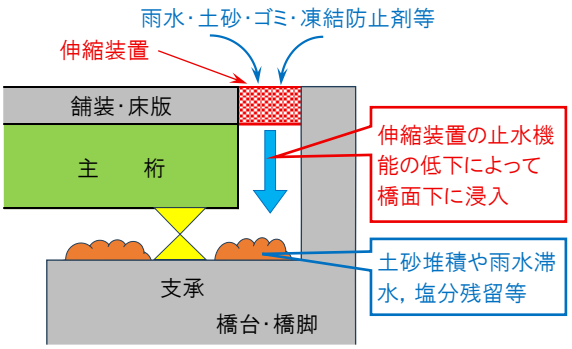


図-1　橋梁伸縮装置の損傷メカニズム



図-2　伸縮装置からの漏水による主桁端部の損傷事例



図-3　撤去した旧伸縮装置の止水機能部の損傷状況



図-4　現在の一般的な伸縮装置取替状況

2. 伸縮装置開発における課題

橋梁の伸縮装置の構造や形状には，その地域性や周辺環境に考慮した複数の種類があるが，本研究では以下の点を課題として整理し，開発に取り組んだ．

①福井県は降雪地域であり，橋梁部の除雪作業に対応可能な構造・形状が不可欠である．

②伸縮装置内の止水用弾性シーリング材やバックアップ材等の止水構造部が外的要因や経年劣化等により健全性が低下する．

③市場流通品は構造的に伸縮装置全体を更新する必要があり，不経済である．

④市場流通品は伸縮装置更新時に交通規制や場合によっては足場設置等を要し，工期が長期に渡る傾向にある．

⑤本研究で独自に伸縮装置を開発する場合，市場流通品と同様に，国土交通省や日本道路ジョイント協会が定める構造安全性や性能を確保のための試験に合格しなければならない．

⑥開発した伸縮装置の供用下道路での施工性，部分補修の作業性の評価，施工後の騒音・振動等の評価が不可欠である．

⑦伸縮装置に使用する各部材について，実際の橋梁での実証試験にて適用性を検証しなければならない．

3. 開発した試作品の伸縮装置の特徴

前述の 2 を踏まえ，本研究ではまず試作品を開発し，その試作品を用いて各種性能試験や実際の供用下橋梁に試験的に設置することでモニタリングデータを取得することとした．開発した試作品の伸縮装置は以下の特徴を有する．

①国土交通省及び一般社団法人日本道路ジョイント協会が定める基準 [5]に準拠した形状並びに構造設計である．

②福井県道路管理者が保有する各橋梁の諸元や台帳データ，2014 年以降の点検義務化の法整備に伴う橋梁点検データに基づき，橋梁数が多い橋長 20～50m 程度の中規模橋梁（県管理橋梁数の約 60%）に適用可能な遊間・伸縮量の荷重支持型伸縮装置である．

③車両走行面と接するフェースプレートを脱着可能とし，止水機能部の損傷に応じた部分補修が可能となる構造である．

④弾性シーリング材等の止水機能部の補修を橋面上から実施可能とし，止水機能部の保護用繊維シートを設置する．

⑤中小企業でも製作可能でかつ簡単な構造とし，主構造の鋼構造部の接合をすみ肉溶接に限定するとともに，入手しやすい市場流通性の高い材料にて構成する．

⑥橋梁の供用期間を最低50年間と仮定し，初期設置1回，中間補修3回を前提とした場合，現行手法と比較して概算で約30%のトータルコスト縮減を実現する．

⑦止水機能部のみの補修が可能となることから，現行手法と比較して中間補修1回当たり概算で約70%のランニングコスト縮減を実現する．

4. 試作した伸縮装置による各種試験等

(1) 試作品の設計及び製作・設置

福井県内での積極的な採用を考え，橋梁台帳データに基づき橋長毎に桁遊間を整理し，試作品の製作対象とする伸縮量を 20mm，30mm，40mm，50mm の 4 種類とした．その後，部材の分割や溶接形状，フェースプレート固定方法に配慮した概略形状を定め，構造計算を行うとともに，メンテンナスに重点を置いた止水機能部の形状や材料の選定を行った．

以上のことから，実際に製作する試作品の仕様及び構造計算を確定し，伸縮量 4 種類の試作品を製作した．

図-5 に試作品の構造断面図例，図-6 に試作品の外観例を示す．製作した試作品の一部について，道路管理者の協力を得て図-7 のとおり福井県福井市内の県道橋に試験採用され，2021 年 11 月に設置を完了した．

(2) 各種性能確認試験の実施

試作した伸縮装置について，所定の性能を有していることを確認する必要があり，疲労耐久性能，伸縮追従性

能、止水性能の各確認試験[6]を実施した．これらの試験は静岡県富士市にある一般社団法人日本建設機械施工協会施工技術総合研究所にて行った．

a) 疲労耐久性能確認試験

疲労耐久性能確認試験については，伸縮量 50mm の試作品を供試体として用いた．図-8 に示すとおり重交通路線の交通量及び大型車混入率を考慮した疲労照査期間 20 年相当の確認試験（200kN で 200 万回の繰り返し載荷試験）を実施した．なお，現地で製作した供試体の鋼構造部，コンクリート構造部に各 4 箇所ずつひずみゲージを貼付け，疲労試験前及び試験後のひずみを計測した．図-9 及び図-10 に示すとおり残留ひずみは無く，ひずみの範囲も適正値であり，鋼材の変形，疲労亀裂の発生等の損傷もなかった．後打ちコンクリート部も伸縮装置本体との界面に開きもなく一体化しており，異常がないことを確認した．

b) 伸縮追従性能確認試験及び止水性能確認試験

伸縮追従性能確認試験は，伸縮装置を最大遊間時～最小遊間時～最大遊間時を 1 回とした繰り返し試験である．本研究では耐用年数 20 年に加え地震動等の影響も考慮し，30 回の繰り返し回数を設定して実施した．

止水性能確認試験では，伸縮追従性能試験後に供試体周囲をスタイロフォーム等で囲い，そのまま注水して漏水の有無を確認した．

使用した供試体は伸縮量 30mm と 40mm の 2 種類とした．供試体を 2 種類としたのは，止水機能部に使用する弾性シーリング材を工場で先行施工する場合（一般的なケース）と，曲線橋等の片勾配が大きい橋梁で弾性シーリング材のセルフレベリングが困難な場合を想定した止水機能部の二次製品採用ケースの 2 工法の比較を行うためである．よって，伸縮量 2 種類×止水機能部 2 工法の計 4 パターンにて試験を実施することで，本研究での伸

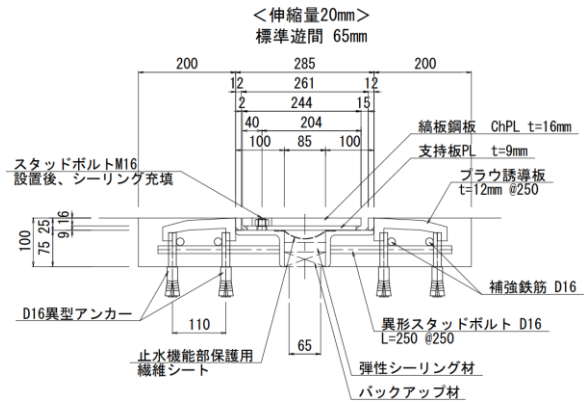


図-5　試作品の伸縮装置の構造断面図の一例



図-7　試作した伸縮装置の設置事例



図-6　試作品の外観の一例



図-8　繰り返し載荷試験実施状況

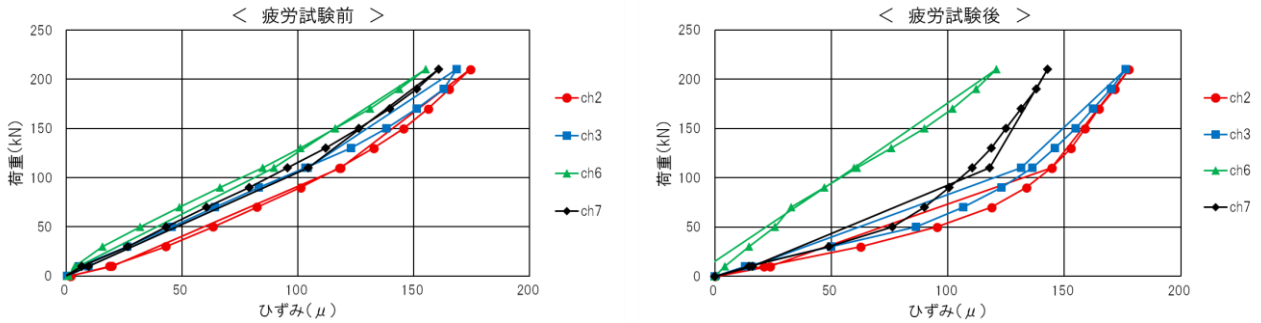


図-9　静的試験時の鋼材ひずみ（疲労試験前・疲労試験後）

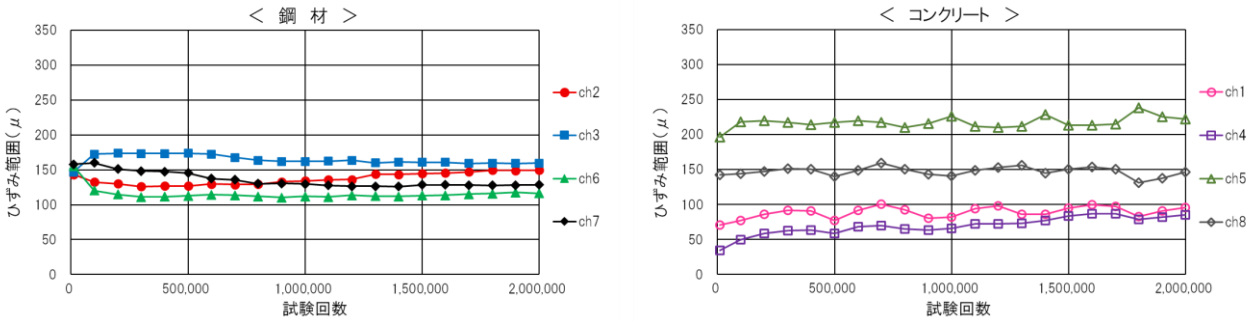


図-10　疲労試験時の鋼材・コンクリートのひずみ範囲の経時変化



図-11　伸縮追従性能確認試験（止水機能部先行形式）

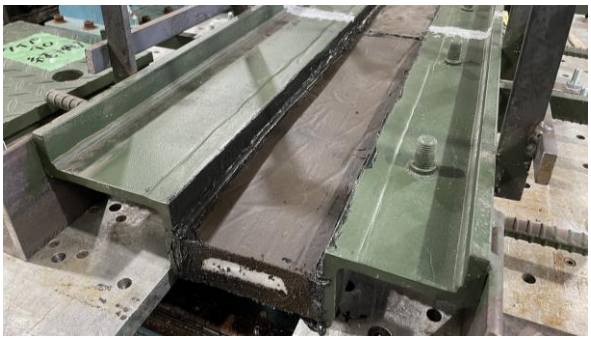


図-12　伸縮追従性能確認試験（止水機能部二次製品）

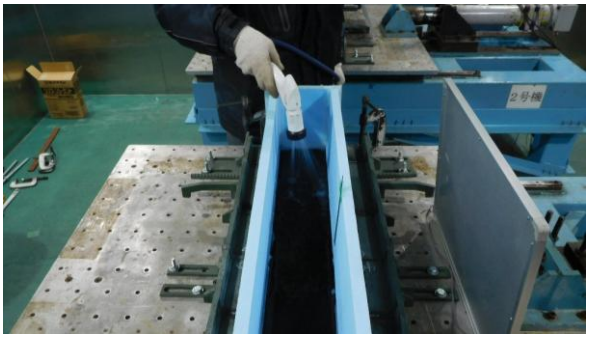


図-13　止水性能確認試験（水張り状況）

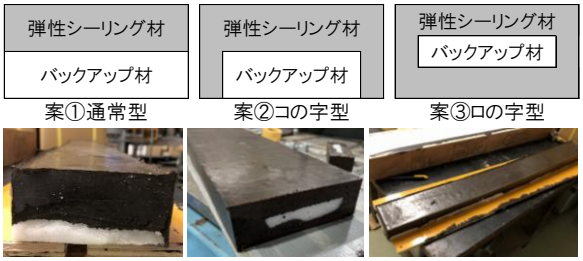


図-14　止水機能部の二次製品化検討案

縮装置の試作品に関する設計の妥当性を確認できると判断した．図-11 に止水機能部先行施工形式を，図-12 に止水機能部二次製品化形式の伸縮追従性能確認試験状況を示す．また，図-13 に伸縮追従性能確認試験後の止水性能確認試験の水張り状況，図-14 に止水機能部二次製品化検討案を示す．

試験では止水機能部と鋼材界面での剥離，弾性シーリング材の破断や漏水等も発生せず，計 4 パターン全てにおいて異常が無いことを確認した．

また，止水機能部を二次製品化すると，現場での補修における作業時間の短縮はコスト縮減だけでなく，交通規制期間の短縮にもなり，社会的負荷の低減に大きく寄与する．そのため，伸縮追従性能確認試験及び止水性能確認試験に向け，止水機能部を二次製品化する検討も実施した．図-14 に示す 3 タイプを試験的に製作し，特に止水性を考慮して案③タイプを本試験で用いた．試験結果は良好であったが，今後も二次製品の製作の容易性や補修時の作業性を考慮し，他形状も含め実用化に向けた検討を行う計画である．

5. 試作した伸縮装置の設置橋梁のモニタリング

試作品を設置した橋梁では 2 ヶ月に 1 回の頻度でモニタリング調査を実施した．モニタリング項目は，外観全景，騒音及び振動（午前・午後に分けて無作為に 1 時間計測），フェースプレートと伸縮装置本体との間隔量計測（午前 1 回・午後 1 回），伸縮装置に注水し下面からの漏水の有無の確認，フェースプレート脱着用ボルトナットのキャッピング材の損傷状況の計 6 項目とし，現在も継続実施している．外観全景は目視確認とし，騒音についてはリオン㈱普通騒音計 NL-42 を使用し「騒音にかかる環境基準について」[7]に基づき計測した．振動については同じくリオン㈱汎用振動計 VM-83 と加速度センサ LS-10 を組み合わせて計測した．間隔量計測にはデジタルノギスを用い，漏水確認には目視の他マイクロスコ

ープを使用して実施した．図-15 にモニタリング状況，図-16 に 2025 年 3 月までのモニタリング結果を示す．この結果から，伸縮装置本体の鋼構造において塗装の摩耗が確認されたが，これは現在使用されている一般的な伸縮装置も同様であることから大きな問題ではないと結論付けた．騒音・振動の計測値は波形計測の結果から，モニタリング箇所の環境基準の上限である 65db 前後を示した．最大値としては環境基準を超える値も確認されたが，金属製である伸縮装置本体とフェースプレートの接触による金属音のような高い周波数の計測値は無く，道路舗装の段差等による影響が大きいものと考えられる．フェースプレートと伸縮装置本体との間隔量も全て規格値内の変化量であり，異常値は計測されなかった．後述するが 2024 年 9 月に試験的な補修業務を実施したためこの時は欠測であるが，その後の計測値も補修前と大きな隔たりはなく，異常が無いものと判断した．
また，モニタリング期間中における漏水の発生は一度もなく，フェースプレート固定部のナットキャッピングシール材についても，本試作品設置橋梁に加え当工業技術センター敷地内でも計 5 種類のシール材料の暴露試験を経て 1 種類を選定することができ，モニタリングによる有益なデータを多く取得することができた．



図-15　伸縮装置試作品設置橋梁のモニタリング状況

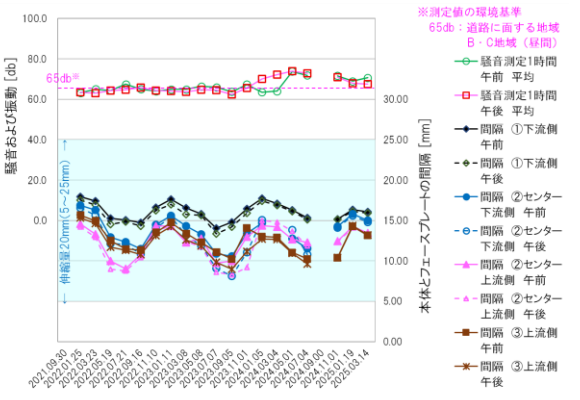


図-16　モニタリング結果

6. 試験的な補修作業と細部構造の修正

本研究で開発した伸縮装置は，部分的なメンテナンスを可能にすることが大きな特徴であるため，実際に試作品を設置した供用中の橋梁にて試験的な補修業務を実施した．これは，実際に部分的な補修の実施が可能かどうか，橋面上から安全に補修作業が行えるかを検証するためであり，施工業者が円滑に作業に従事できるよう，補修要領の作成のためのデータ取得を行った．図-17 に示すとおり，フェースプレートの取り外しから止水機能部の打ち替え，スタッドボルト並びにフェースプレートの交換まで，考え得る最大限の補修内容とした．

実際の補修業務では，時間計測を行いながら半車線ずつの施工とし，各工程の作業時間や人工の配置，使用材料の種類，使用量を記録しながら進めた．本研究開発品における最大量の補修内容として実証したが，想定していたとおり交通規制期間も短く，短時間での作業完了を確認した．作業全体について作業従事者から意見聴取も行い，損傷の程度に応じた細分化した補修用施工歩掛作成のための貴重なデータ取得となった．

また，これまでに実施してきた試作品設置橋梁でのモニタリング結果や試験的な補修業務を踏まえ，当初設計の細部構造の見直し，細部形状の変更，使用材料の決定を行い，修正設計の内容を整理し，図-18 に示すとおり最終修正の設計図面に反映した．



図-17　試作品設置橋梁での補修業務実施状況

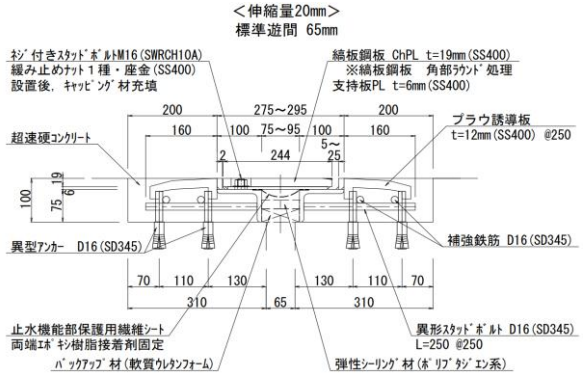


図-18　最終修正後の伸縮装置の構造断面図の一例

7. 最終試作品の製作及び設置，実証データ取得

これまでの研究開発の成果を踏まえ，図-18 に基づき最終試作品を製作し，初期の試作品設置橋梁とは異なる福井県福井市内の橋長 110.0mの多径間橋梁にて，橋台部・橋脚部合わせて計 4 箇所の伸縮装置に試験採用され，2024 年 12 月に設置を完了した．図-19 に各伸縮装置の伸縮量並びに配置図を示す．この最終試作品を設置した橋梁は初期の試作品設置橋梁よりも交通量が多く，走行速度や重交通量も異なる環境となっているため，この橋梁において実供用下での長期的な耐久性検証や細部構造に不具合が発生しないかモニタリングを実施している．直近までのモニタリング結果は割愛するが，初期の試作品設置橋梁同様に不具合の発生は確認されておらず，一般的な伸縮装置と遜色なく現場に適用できていると考える．

前述してきたとおり，各種性能試験は全て合格しているが，実際の供用下での実証データ取得は本研究開発品の展開や普及において非常に重要であると位置付けており，今後も長期的にモニタリングを実施し．変更点や改良点が確認できた段階で速やかにブラッシュアップできるよう努めていく．

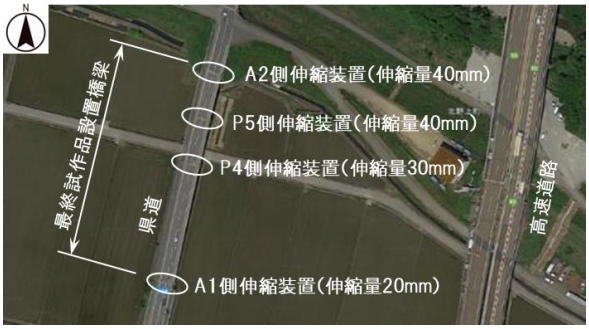


図-19　最終試作品設置橋梁の伸縮装置配置図

8. 結論

本研究では，部分的に補修できるメンテナンスに優れた伸縮装置の開発に向け，各種取り組みを行ってきた．本研究で得た知見を以下に示す．

- 国土交通省及び日本道路ジョイント協会が定める基準に準拠した形状，構造設計とし，疲労耐久性能，伸縮追従性能，止水性能の各種性能を満たしていることを確認した．
- 降雪地域でも適用可能な形状とし，橋梁部における除雪作業に支障の無い形状での構造，設計とすることができ，特に全国的に数量が多いと考えられる中規模橋梁に適用可能な遊間，伸縮量の荷重支持型伸縮装置とした．
- 初期の試作品を用いた実際の補修作業を行うことで，車両走行面と接するフェースプレートの着脱から止水機能部の損傷に応じた部分補修が可能となる構造であることを確認し，本研究開発品の伸縮装置に合致した補修要領書の作成や補修歩掛データを取得した．
- 部分的な補修が可能な構造であるため，橋面上からの作業に限定することが可能であり，実際の補修作業に要する期間はこれまでの一般的な伸縮装置の更新よりも短時間で終えることが可能となり，不要な取り壊しを避けることも含め．社会的，環境的負荷を小さく出来た．
- 試作品設置橋梁でのモニタリング結果や試験的な補修業務を経て，細部構造の見直しや使用材料の選定を確定し，これまでの専門的なメーカーでなくとも中小企業でも十分に製作可能な構造として整理し，また使用材料も入手しやすいもので構成した最終設計を確定した．
- 橋梁の供用期間中におけるこれまでの伸縮装置の更新と比較して，部分的な補修や不要な取り壊しを避けることで，約 30%のトータルコスト縮減と更新 1 回当たり約 70%のランニングコスト縮減が可能である試算を算出した．

今後も試作品を設置した各橋梁でのモニタリング調査を継続実施し，本研究開発品へのフィードバックを行いより良い製品への改良につなげていきたい．また，本研究開発品が普及することにより，膨大な橋梁数に対してより一層の橋梁の長寿命化対策の促進とコスト縮減に寄与されれば幸甚である．

謝辞：本研究開発の実施にあたり，独立行政法人国立高等専門学校機構福井工業高等専門学校環境都市工学科・阿部孝弘名誉教授，日光産業株式会社・古木敬三相談役並びに筧貴憲営業部長，北陸ロード株式会社・兼上智博福井営業所長には多大なるご協力を賜りました．ここに記して感謝の意を表します．

参考文献

1) 内閣府政策統括官(経済社会システム担当)：社会資本ストックの推計方法及び推計結果の概要(日本の社会資本 2023)，2025.3，p9
2) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報(令和 5 年度)，2024.8，p3
3) 国土交通省：社会資本の老朽化の現状と将来，2025，https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html
4) 国土交通省道路局：橋梁定期点検要領，2024.7，p9
5) 一般社団法人日本道路ジョイント協会：伸縮装置の設計ガイドライン，2021.6
6) 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社：NEXCO 試験方法，第 4 編　構造関係試験方法，2023.10
7) 環境庁・環境省：騒音に関する環境基準について(環境基本法第 16 条)，1998.9

オーバーツーリズム渋滞に対する社会実験の試行及び対策工の効果

中沢　翔太

山梨県　企業局　早川水系発電管理事務所　（〒400-0111 山梨県甲斐市竜王新町2277-3）

山梨県甲州市勝沼町には、観光農園やワイナリーが数多く点在しており、ぶどうの収穫期を迎える観光シーズンには、県外からの観光客が多く訪れ、一部の道路では大規模渋滞が発生している。

このような、『オーバーツーリズム』に伴った期間限定の特異な大規模渋滞に対し、発生源である交差点ではなく、渋滞から離れた箇所にて簡易的な改善を図ることにより渋滞解消に繋がるか、社会実験を交えて検討・検証した。

キーワード　世界農業遺産，オーバーツーリズム，大規模渋滞，社会実験

1. はじめに

山梨県峡東地域に位置する甲州市勝沼町は、果樹農業が盛んであり、観光農園及びワイナリーにより、例年多くの観光客が来訪する地域となっている。

2022 年 7 月には甲州市勝沼町を含む峡東地域の果樹農業が『世界農業遺産』に認定されたこともあり、特にぶどうの収穫期を迎える 9 月から 10 月にかけた観光シーズンには観光客が集中し、大きな賑わいを見せている。

一方、観光客の出入りによる盛り上がりの裏側では、観光農園の沿線道路において、渋滞が頻繁に発生し、周辺に住む住民や道路利用者が快適に通行できる状況とはほど遠い現状となっており、所謂『オーバーツーリズム』の様相を呈している。

特に、国道 20 号と県道塩山勝沼線の合流点である「柏尾（かしお）交差点」は、平時では全く渋滞しないものの、所謂シルバーウィークと言われる 9 月の連休時においては、『観光農園エリア』から勝沼 IC へ向う車両が集中し、例年大規模な渋滞に見舞われている。（図-1 参照）

前述の大渋滞においては、周辺住民の生活に支障が生じる規模となっているため、地元から強い改善要望を受けており、本稿では、その「柏尾交差点」渋滞解消に向けて、対策案を検討した。



図-1 渋滞発生概要

2. 対策案の選定

2021 年 9 月のシルバーウィークに交通量調査を実施した結果、「柏尾交差点」から県道塩山勝沼線の最大渋滞長はL=1,315mに達し、その原因は県道塩山勝沼線から勝沼 IC へ向かう右折車両の増加による右折車線の交通容量不足であることが判明した。このことを踏まえ、対策案の検討を行う。

本来、渋滞対策としては**表-2** の通り交差点拡幅等のハード対策が一般的だが、「柏尾交差点」の場合、**表-2** 課題欄のとおり長大法面や橋梁が近接しており、拡幅をする際には、大規模な事業費・事業期間を要する。

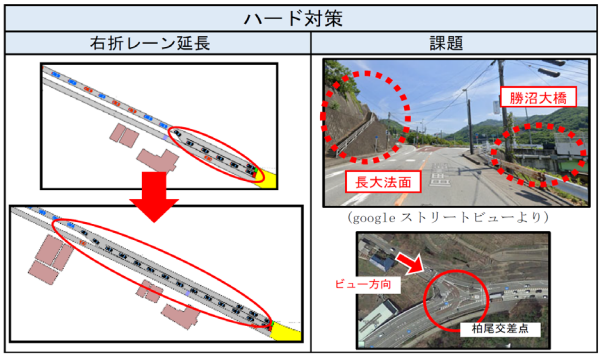
また、特筆すべき点として、観光シーズンのみ渋滞する特異な交差点であるということであり、従前の対策では費用対効果が見合わない可能性がある。

そこで、新たな視点として、**“渋滞へ流入する車両を事前に迂回させる“**ソフト対策を立案した。

具体的には、**図-2** のとおり図上誘導地点（上町北交差点）から本来「上行寺交差点」へ向う車両を「上町交差点」へ誘導し、その後「上町交差点」を直進させ、国道 20 号を経由して勝沼 IC へ向かう迂回案（赤線ルート→オレンジ線ルート）である。なお、この迂回案でも、アクセス距離は柏尾交差点ルートとほぼ変わらない。

※なお、県道塩山勝沼線の東側から「上町交差点」を直進し、「柏尾交差点」へ向かう車両を、「上町交差点」で右折誘導する案も検討したが、「上町交差点」に右折レーンがないことから、右折車両の増加に伴う交通流悪化による新たな渋滞を生む可能性があるため、誘導案としては棄却した。（**図-2**黄線ルート）

表-2 ハード対策案と課題



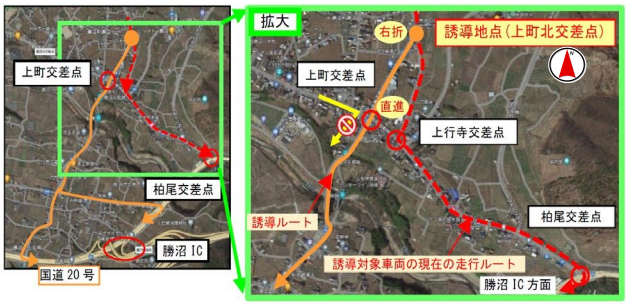


図-2 立案した誘導案

3. 社会実験の実施

前項の誘導案の効果検証を目的に、交通誘導による社会実験を実施した。

実施日は 2023 年のシルバーウィークである 9 月 17 日（日）とし、交通誘導員及び誘導看板の設置により行った。（**図-3** 参照）

なお、社会実験に併せて実施した交通量調査により得られた検証結果を次項より示す。



図-3 仮設案内看板による誘導計画

4. 社会実験の解析（交通状況の評価）

実施した社会実験の結果を踏まえ、過年度の交通状況調査との比較を行った。

「柏尾交差点」からの渋滞長は、2021 年の調査最大時 1,315mに対し、最大660mとなり半減する結果となった。（**図-4-1** 参照）

また、「上町北交差点」の右折比率は増加し、過年度調査時に対し右折率が直進率を逆転する結果となった。

これらの結果から、社会実験は成功したものと解釈できる。

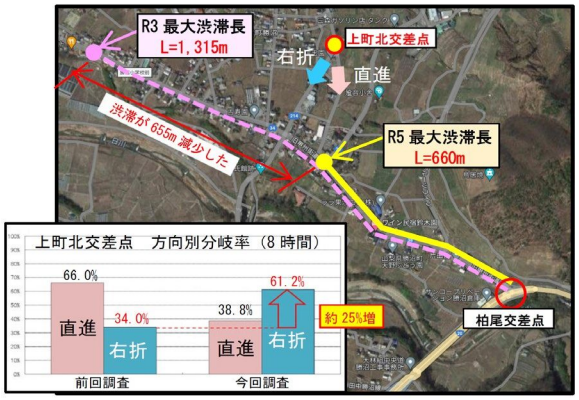


図-4-1 柏尾交差点渋滞長比較

一方、「柏尾交差点（県道→国道）」に着目すると、右折率においては 2021 年と比較し減少が確認できた。（図-4-2 参照）

また、流入交通量は 2021 年と比較し、ピーク時間前後のいずれの時間においても上回る結果となった。（図-4-3 参照）

これらの結果から、社会実験が無対策の「柏尾交差点」の処理能力改善にも寄与しており、迂回案の有効性を立証できたものといえる。

ここまで解析結果を整理してわかったことは、社会実験にて行った誘導案は渋滞解消に対し有効であり、毎年同時期に同様の対策を行うことにより、オーバーツーリズムによる渋滞は緩和されるということである。

ただし、誘導員や看板配置作業の手配を毎年継続的に行っていくのは困難であるため、次項では、それらの手配が不要かつ社会実験と同等の成果を得ることのできる対策案を検討する。

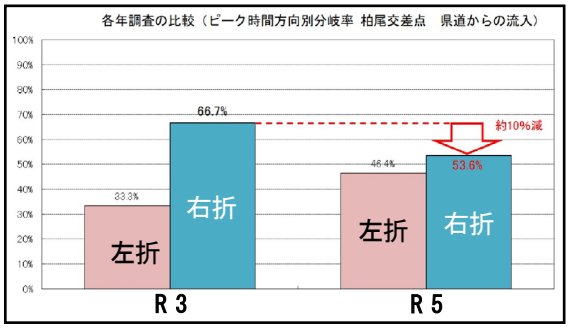


図-4-2 柏尾交差点の右左折率

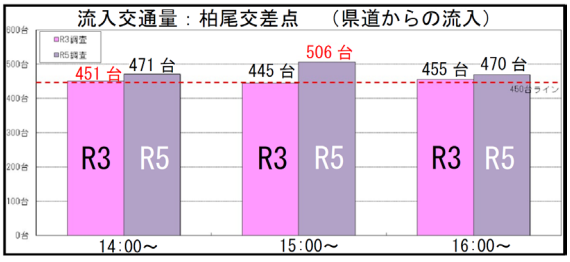


図-4-3 柏尾交差点への流入交通量

5. 社会実験の再現を目的とした対策案

ここでは、社会実験の再現を行うための対策工を検討した。

対策工としては、用地買収が不要で簡易的なものであることを条件とし、下記のとおりとした。（図-5 参照）

(1) 主従の入れ替え

「上町北交差点」にて簡易的な交差点改良（舗装打換え、マーキング修正）を実施することにより、直線（主）＋右折（従）を、左折（従）＋直線（主）にし、主交通を「上町交差点」方面に切り替える。

なお、実施にあたり、事前に交通管理者や地元甲州市とも協議を行い承諾を得た。

(2) 道路標識の見直し

(1) における「上町北交差点」の交差点改良に伴い、直進側を勝沼ICへ案内する案内看板を設置する。併せて、直進先の「上町交差点」でカーナビゲーションにより左折しないよう案内標識の表記変更や設置を行う。

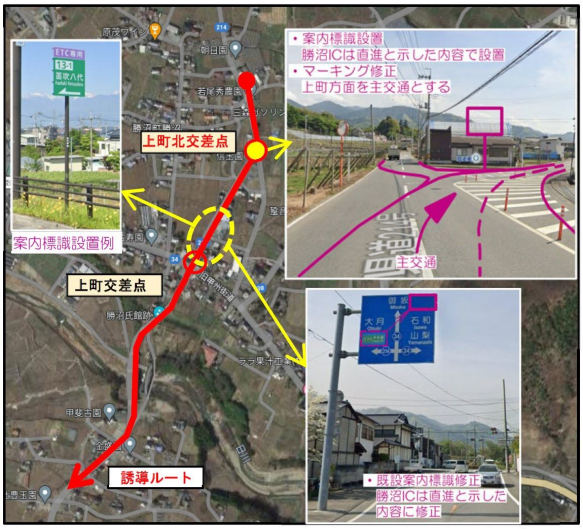


図-5 上町交差点　対策案

6. 対策工の実施

前項で挙げた対策工については、2024年のシルバーウィークまでに施工を実施した。

図-6-1は、主従入れ替え後の「上町北交差点」、図-6-2は、「上町交差点」までの標識表記修正と新設標識の設置状況となる。

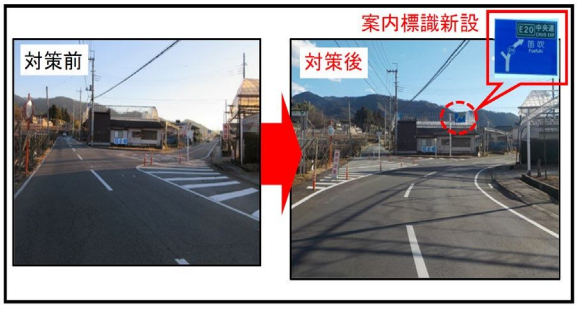


図-6-1 上町交差点　主従入れ替え状況

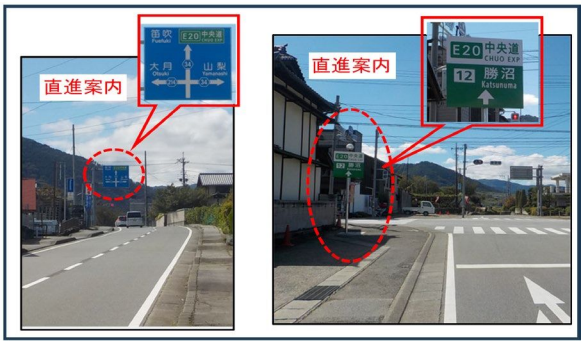


図-6-2 標識表記修正　標識新設

7. 検証

ここからは、対策工の効果を検証する。2024年9月15日（シルバーウィーク）に、対策後の交通状況調査を実施したため、結果を次に示す。

(1) 柏尾交差点からの渋滞長について

図-7-1 は、2021 年（対策前）、2022 年（社会実験）及び 2023 年（誘導対策後）の各渋滞長を比較したグラフとなる。

2023年の誘導対策後は、対策前と比較し渋滞が半減し、社会実験時と同等の効果が得られた。

また、**図-7-2**は、「柏尾交差点」における県道塩山勝沼線からの分岐率を示したものである。

右折率においても渋滞長と同様に、対策前より減少し、社会実験時と同等の結果となった。

(2) 上町北交差点の分岐率について

図-7-3は、「上町北交差点」における北からの分岐率を前述した(1)と同様に比較したグラフとなる。

社会実験時から比較しても誘導比率は大きく上昇し、90%を超える結果となった。

(1) (2)の結果により、実施した対策工においては、社会実験の再現またはそれ以上の成果が得られたのではないかと考える。

ただし、「上町北交差点」の誘導率が上昇したにも関わらず、社会実験時と渋滞長が変わらなかった要因としては、「柏尾交差点」を通過する大型車（特に観光バス）が例年と比較し多かったことにより、右左折に時間を要し、通過台数が減少したことが考えられる。（**図-7-4** 参照）

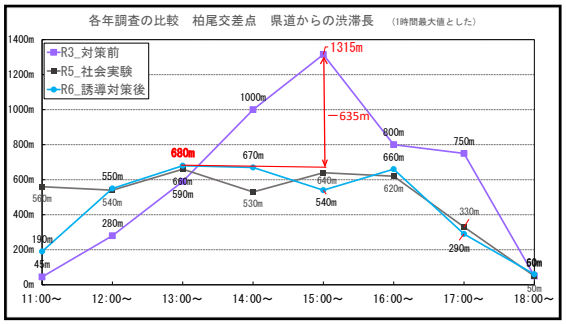


図-7-1 柏尾交差点からの渋滞長比較

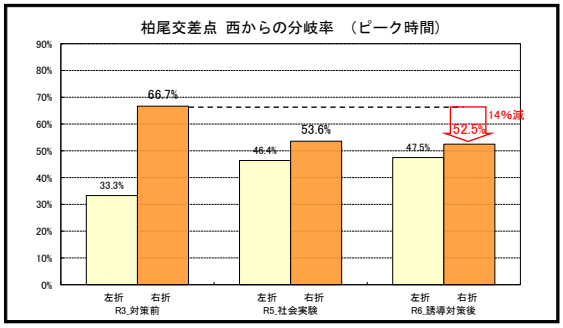


図-7-2 柏尾交差点　分岐率比較

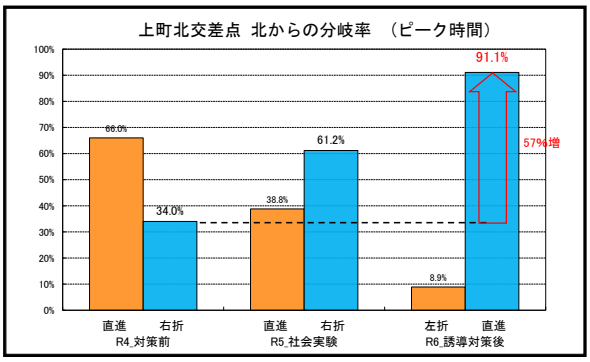


図-7-3 上町交差点　分岐率比較

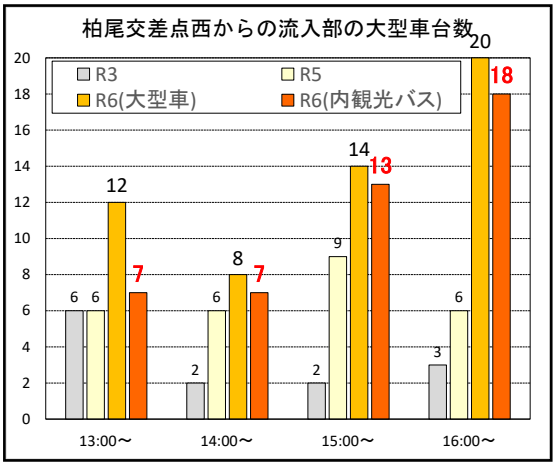


図-7-4 柏尾交差点　大型車台数

7. まとめ・課題

前項までの対策工により、『社会実験の再現』『渋滞緩和』という観点で成功を収めた。その一方で『渋滞解消』には至っていない。残存する課題として下記のようなものがある。

- 渋滞の緩和はされたが対策後も 600m 以上の渋滞長が残っている
- 「柏尾交差点」右折レーン大型車許容が不十分　等

今後は、上記課題に対する対策を立案・検証し、渋滞解消を目指していく必要がある。

8. おわりに

今回の渋滞対策は、渋滞が発生している「柏尾交差点」自体での対策ではなく、渋滞発生箇所から離れた交差点である「上町北交差点」での対策により渋滞を大幅に削減できる成果が得られたという特徴がある。

このことから、広域的な視野での対策は、必ずしも大規模な用地買収や工事をせずとも渋滞解消を見出すことができる有効な手段であると考える。

終わりに、今回の検証を参考に、渋滞を課題とした道路において課題解決の一助となれば幸いである。

地区全体を対象とした耐震改修による復興枠組みの提案 ～BBBから改修中心へ～

片山　耕治[1]

[1]建築研究所　所付　（〒305-0802 茨城県つくば市立原1）.

仙台防災枠組みで提唱されたBuild Back Better（BBB,よりよい復興）を住宅に対して実現するには様々な課題がある．被災住宅は大破など大きな被害を受けた住宅は建替により従前よりも住宅性能の向上が図られるが，例えば耐震改修で対応できる対象も多い．本研究では,地区全体の安全性の向上のために耐震改修を面的・計画的に実施することを提案する.

キーワード　Build Back Better（BBB），被災住宅，耐震，改修，計画，面的，復興枠組み

1. はじめに

我が国の現在の災害復興政策は，被災住宅に対する支援の充実が図られているものの，それらは全壊・大規模半壊の住宅再建に重点が置かれており，半壊以下への支援は限定的である.さらに，罹災証明において被害なしとされた住宅への支援はほとんどなく，被災地全体で既存住宅の住宅性能向上を図ることは重要だが，一般に自治体の関心は低い.

その背景として，平時における行政の住宅性能向上改修への支援の不足，居住者による取り組みが進んでいないという現状がある.また，令和6年能登半島地震では，被災者が入居している仮設住宅が浸水するという再度災害[注1)]に近い事例が発生し，日本がBBB（Build Back Better；より良い復興）[1)]を提唱する国でありながら，実際の災害復興において改善の余地があることが顕在化した.

一方，平成19 年の能登半島地震では，新耐震基準で再建した住宅や本格復旧後に耐震改修を行った建物が，令和6年の地震による再度の被災を免れた事例があり，再度災害対策の重要性が示されている.

2．本研究の背景と目的

一般に被災地の復興において，土地区画整理事業等の面的整備事業が実施されない地区では，地区単位で被災住宅以外の既存住宅を含めた改善は実施されない.

また，通常の個別の住宅の復興においては，最初に被災住宅を対象として応急修理による最低限の補修が実施され，その後，被災住宅の復旧のための被災者生活再建支援法などによる補修や建替の支援が行われる.この時,被害が軽微であったものや被害なしと判断された住宅は,耐震性が不十分であっても耐震化の支援は行われず，結果として，再度災害に対して脆弱な地区が温存されるという重大な課題がある.

そこで本研究は，こうした再度災害に脆弱な地区の解消を目指すために，従来の全壊など大きな被害を受けた被災住宅が主として建替によって住宅性能向上が図られる復興の取組みに加え，地域全体として，被災していない既存住宅の耐震改修をそれと同時期に実施する総合的な復興計画を提案し，地区単位での段階的な住宅性能向上改修の枠組みを提案することを目的とする.

本研究では，復興計画において，建替中心の従来の手法に代えて，耐震改修など住宅性能向上改修をより積極的に取り入れるという新たな概念を，本研究では Build Back and Retrofit Better（BBRB）と定義する.大地震後に,耐震改修を応急復旧段階から実施することで，施工の効率化，耐震化の早期の実現，居住者の安全性確保など,費用対効果に優れた相乗効果が期待される.

本稿においては，仙台防災枠組みにおけるBuild Back Better（BBB）の概念[1)]を基に，まず，日本の住宅復興の取り組みにおける課題を明らかにし，耐震改修を面的に促進するための新な被災住宅の復興計画の提案およびその効果をマクロに評価する手法について検討する.
また今回の研究報告では，耐震性の確保に限定した内容とするが，水害からの復興時に耐震改修が進んだ事例[2)]もあり，今後，対象災害として水害等や複合災害につい

ても，「Build Back and Retrofit Better（BBRB）」の概念の適用方策を提案することとする.

３．研究方法

本稿では，以下の検討事項について報告する.

① 国内外制度分析：国内外のBBBに関する制度の調査，自治体の応急修理補助制度の分析，ならびに復興計画における耐震改修の実態の整理を通じて，課題と支援方策を明らかにする.

② 新たな住宅復興の枠組みの提案：復興期において被災住宅のみならず無被害の旧耐震住宅にも既存制度を活用して耐震改修を促進することで，地区単位での面的な耐震性向上を図ることの方策を提案する.

③ 復興シナリオ想定による定量的な分析：仮想的なモデル地区を設定し，複数の復興シナリオを想定して定量的な分析を行うもので，マクロな視点から，耐震改修の面的展開における効果および実現可能性について定量的な検証を試みる.

４．国内外の復興計画の取組み状況および課題

海外で起きた激甚な自然災害には，例えば2004年に発生したインド洋津波をはじめ，ハリケーン・カトリーナ，パキスタン地震，ハイチ地震，ネパール地震，ハリケーン・マリア，スラウェシ島地震，トルコ・シリア地震，ハワイ山火事等がある.これらの発災により重大な住宅被害が生じ，その復興にあたってはBBB（Build Back Better）の概念が広く採用された.

しかし，これらの災害でのBBBの過程で実施されていることの多くは，全壊した建物の建替による復興であり，改修や補強により居住を再開させるケースでは，耐震性能向上等の取組みは少なく，ハイチ地震後にハリケーン対策として建物の補強が行われた例や，ハリケーン・カトリーナによる被災後の復興過程での高床化等の既存建物の改修事例が見られる程度である.

一方，わが国においては，2004年の新潟県中越地震を始め，東日本大震災，熊本地震，平成30年7月豪雨，令和６年年能登半島地震など多数の自然災害により甚大な住宅被害が発生している.

発災後，各自治体は「被災者生活再建支援法」に基づき，応急仮設住宅の提供や住宅の応急修理，支援金の支給などを実施しているが，財源，救援・復興に係る労働力，情報提供の面での支援が十分でないことが課題である.特に，個人所有の被災住宅の早期の復旧は，必要となる仮設住宅や復興住宅の計画戸数と密接に関わっているため支援の充実は重要である.これらに対し，災害発生後には，全壊，半壊等の住宅への支援制度の拡充や災害認定基準の明確化，情報提供の強化，仮設住宅環境の改善等が提案され，その都度，復興計画等が定められ実現されているのが現状である.特に，住宅再建支援，公営住宅供給，住宅ローン減免，地域産業復興支援，コミュニティ再生支援などの長期的な復興施策が安定的に実施されることが必要と考える.

一方，特に大地震で被災した地域では広く耐震化促進が取り組まれるものの，地区単位での面的な安全性を向上させるために明確な目標を定めて，被害の有無に関わらず耐震性が確保されていない住宅への耐震化支援方策が展開されるというケースは見られない.

平時の対応としては，平成25年に改正された耐震改修促進法では，沿道建築物の耐震化という面的な概念を導入している.これは，緊急輸送道路の閉塞は多くの者に影響が及ぶため，一定規模の建築物の耐震診断を義務付け，耐震化に補助を行うことで面的な広がりのある安全性の向上を図るものである.

このように，建築物の耐震化という建物単体の施策においても，地域の道路沿いなど対象地域を明確にすることで面的な整備効果を図ることが既に制度でも示されている.そして，面的な整備は土地区画整理事業等を被災市街地全体に適用することが可能であれば，道路などの公共施設の整備改善とともに住宅は新築，改修されることで安全な市街地を形成することは可能である.

しかしながら，財源等の問題等からこのような面的整備事業が実施される地区は限られ，それ以外の多くの地区では被災前と同じ危険な状態が残ることになる.そのため，個別の耐震化の促進を進める際でも，地区のBBBを目指し，戦略的に面的な整備をイメージしながら施策を推進することで，限られた予算でより安全な市街地の形成を図ることができるのではないかと考える.

なお，BBBにおける復興の質を定量的に測定するための指標は未だ確立途上であり，特に建物性能の向上や耐震化といった住宅の質の改善を評価する枠組みは限られている.また，本稿で取り上げた建物の耐震化率のみに留まらず，土地利用の状況，コミュニティの復興といった被災者支援も含まれる概念で，災害後の経済復興，雇用創出，地域社会の再構築といった社会経済的側面などについて様々な観点から評価がされている.

既往のBBBの取り組みを評価する指標としPDNA（災害後ニーズ評価）やWRI（世界リスク指標）を活用し，復興計画と資源配分の改善を図る取組みもある[3]が，これらは，国，地域単位を対象とした極めてマクロな指標を用いているために，復興計画において具体の施策に取り組むためには，地区単位での指標や評価方法を定める必要がある以下の検討事項について報告する.

５．新たな住宅復興の枠組みの提案

研究目的に示した考え方を復興の際に導入することで，必要となる費用，総工期（地区で対象住宅の目標とする耐震化が完了に要する時間），地区レベルでの耐震化により安全な住宅の整備が実現するまでの速さについて検

討を行い，行政が支援する上で，予算制約がある中でどうメリハリをつけることが有益かについて，ケーススタディを行った.

本章以降，複数のシナリオおよびモデル地区を設定し，個別の旧耐震の木造住宅の耐震改修を戦略的に促進することによる面的な効果について，費用，総工期，耐震化率，耐震化の速度についてマクロな観点から検討した.

(1) 整備方策の設定

まず，災害復旧方策について以下の5つのタイプを前提条件として想定した.

① 従来型：被災住宅についてのみ建替または補修により現状復旧を行う（なお，建て替えることはすなわち耐震化が行われることである）.

② 従来型＋耐震改修：被災住宅について建替または耐震改修を行う.

③ 主要道路沿道部住宅の耐震化：従来型の方策（①）に加えて，地区の主要な道路沿道の住宅の耐震化を，被災の有無に関わらず，建替または耐震改修にて行う.

④ 沿道部住宅の耐震化：主要道路沿道部住宅の耐震化（③）に加え，地区内の全ての道路の沿道にある住宅の耐震化を行う.

⑤ 地区全域耐震化：地区内の全ての住宅の耐震化を行う.

(2) 段階的な耐震改修方策の設定

(1)で示した耐震化促進の方策に加えて，2段階の段階的な耐震改修を実施する方策を設定する.

国交省で定められた建物の耐震性を示す指標である構造耐震指標（木造住宅の場合「Iw値」）は，「地震の震動及び衝撃に対して倒壊，又は崩壊する危険性が高い（Iw＜0.7）」「地震の震動及び衝撃に対して倒壊し，又は崩壊する危険性がある（0.7≦Iw＜1.0）」「地震に対する安全性が高い（1.0≦Iw）」という評価区分となっている.これに倣って，まず「0.7≦Iw」となるような耐震改修を実施し（第1段階），さらに第2段階として，「1.0≦Iw」となるような耐震改修を行うという2段階の実施方策を設定する.

第１段階の改修は第2段階よりも工期が短く，費用も安価である.この2段階の耐震改修の実施により，耐震改修が早期に実施され，一定の安全が確保された住宅に被災者が住めるようになることは，避難所や仮設住宅の削減，地域コミュニティの維持にもつながる.

(3) シナリオの設定

(1)で示した①から⑤までの前提条件と2段階の耐震改修方策を組み合わせ，ケーススタディのためのシナリオを設定した.表１に各シナリオの内容，図１にシナリオ毎の実施方策のイメージを示す.

表１ 各シナリオの内容

シナリオ	復旧方策	耐震改修実施方策（対象住宅）	
		第1段階（0.7≦Iw）	第2段階（1.0≦Iw）
Z	① 従来型（被災住宅補修のみ）	－	－
A-1	② 従来型＋被災住宅耐震化	被災住宅	－
A-2	② 従来型＋被災住宅耐震化	－	被災住宅
B-1	③ 主要道路沿い耐震化	被災住宅	主要道路沿いの全住宅
B-2	④ 道路沿い耐震化	道路沿いの全住宅	主要道路沿いの全住宅
C-1	⑤ 地区全体耐震化	全住宅	－
C-2	⑤ 地区全体耐震化	全住宅	主要道路沿いの全住宅
C-3	⑤ 地区全体耐震化	－	全住宅

※ 各シナリオは，旧耐震住宅の耐震改修に関する実施方針（段階的改修の有無，対象範囲など）の違いにより区分されている. 全てのシナリオにおいて，被災した住宅のうち全壊の住宅の 60%は建替，被災した新耐震住宅については補修され，いずれも第 2 段階耐震化済みとされることを共通の前提として

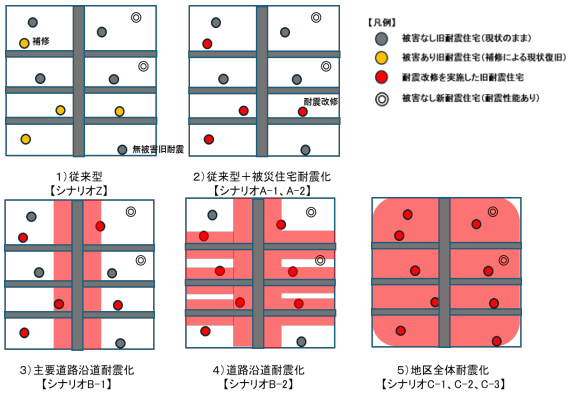


図1.　シナリオ毎の耐震化実施方策のイメージ

6. 復興シナリオ設定による定量的な分析

(1) ケーススタディの前提条件

本研究におけるケーススタディでは，実在の地区ではなく，仮想の地区モデルを設定して定量的な分析を試みたものである.表2に設定したモデル地区2,000戸，33haの密集市街地の前提条件[注2)]を示す.

被害の想定については，住宅の建築年代（旧耐震，新耐震（2000年5月以前および2000年6月以降））ごとの構成比，被災率等については熊本県益城町を対象とした建築学会等が実施した悉皆調査[4)]の結果を参考にした.

なお，本ケーススタディで耐震化を検討する際には，非木造の住宅については耐震化がされているものとみなし，施策対象をすべて木造住宅として検討した.費用，工期は以下の式で算定を行う.

① 総費用の算出方法

総費用は，建替，補修，耐震改修（第1段階および第2段階）にかかる戸数と，それぞれの単価を掛け合わせて算出した.具体的には，建替が必要な戸数に建替費用単価（1戸あたり2,000万円）を，補修のみの戸数に補修費用単価（同300万円）を，それぞれ掛けて求めた.また，耐震改修を実施する戸数については，第1段階（0.7≦Iw）を1戸あたり450万円，第2段階（1.0≦Iw）を600万円

とし，それぞれの戸数に掛けて加算した.これらをすべて合算したものを，各シナリオの費用とした.

表2.　モデル地区でのケーススタディの前提条件

項目	値	備考
木造住宅総数	2,000戸	対象エリア（33ha）の木造住宅数
旧耐震率	38%	旧耐震基準による木造住宅の割合
新耐震率	62%	新耐震住宅（1981年以降の住宅割合）
2000年以前新耐震	45%	上記のうち1981年～2000年5月の住宅の割合
被災率（旧耐震）	46%	旧耐震住宅の倒壊・崩壊・大破割合
被災率（2000年以前）	18%	新耐震2000年5月以前のうちの倒壊・崩壊・大破割合
被災率（2000年以降）	6%	新耐震2000年６月以降のうちの倒壊・崩壊割合
全壊割合	44%	被災住宅のうち全壊の割合
建替率（全壊内）	60%	全壊した住戸の建替割合
補修費	300万円	補修費（耐震改修なし）
第１段階補強追加費	150万円	0.7≦Iw耐震改修の追加費用
第2段階補強追加費	300万円	1.0≦Iw耐震改修の追加費用
建替費用	2,000万円	建替の１戸あたりの費用
補修工期	60日	補修工事の工期
第1段階改修工期	120日	0.7≦Iw耐震改修を伴う補修にかかる工期
第２段階改修工期	150日	1.0≦Iw耐震改修を伴う補修にかかる工期
建替工期	180日	建替にかかる工期

②総工期の算出方法

総工期は，建替や耐震改修の施工に要する年数を，それぞれの年間施工能力を基に算出した.具体的には，建替戸数を年間100戸，耐震改修戸数（第1段階・第2段階とも）を年間200戸とし，それぞれの施工対象戸数を年間施工能力で除して必要年数を算出した.このうち最も年数を要するものをそのシナリオの総工期とし，全体の復興期間を評価した.なお，以上の算出においては，補修のみを行う住宅は比較的短期間で整備可能であり，全体の工期に与える影響が小さいと判断し，工期算出には含めていない.

(2) ケーススタディの結果

第5章(3)で定めたシナリオでケーススタディを行った結果を以下に述べる.

なお，本稿で使用する地区の耐震化率は，構造耐震指標Iwに基づき以下の2段階として扱うものとする.

・第1段階耐震改修率（0.7≦Iw）：地区内で最低限の安全確保が期待される第１段階又は第２段階の耐震改修済みの住宅が占める比率

・第2段階耐震改修率（1.0≦Iw）：地区内で第２段階の耐震改修済みの住宅が占める比率

通常，政策評価や統計において地区の「耐震化率」を表現する場合は1.0≦Iwを意味することが多いが，本研究では段階的整備の導入による復興速度や費用対効果の検討を目的としており，以下では文脈に応じて0.7≦Iwまたは1.0≦Iwのいずれかを明記し，両者を区別して用いる.

(3) 費用と耐震化率

図2に示すように，従来型（シナリオZ）に比して，被災住宅の耐震化を進めるシナリオA系列，沿道整備を含むシナリオB系列，そして面的整備を行うシナリオC系列では，耐震改修率の向上に伴い費用も増加する.

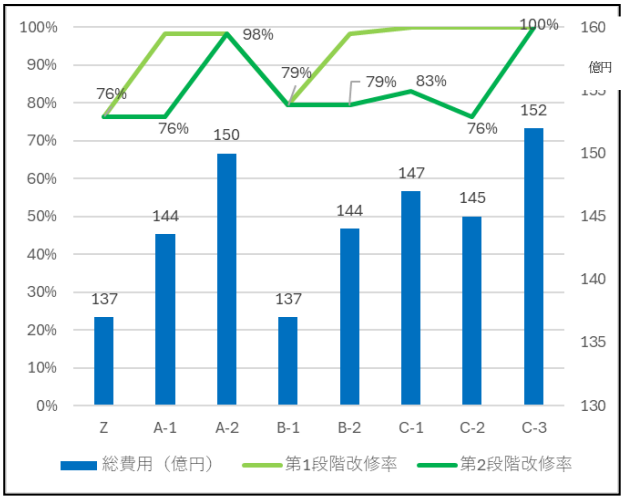


図2.　耐震化率と費用（億円）

特にシナリオC-3では，従来型の1.11倍，約+15億円の増加となる.しかし，費用と効果のバランスに着目すると，例えばシナリオB-2では，費用増加は+6億円（シナリオZ比1.04倍）であるにもかかわらず，0.7≦Iwの耐震化率は98%に達する.さらにシナリオC-2では，費用を抑えながら100%の1.0≦Iwの耐震化率を達成している.

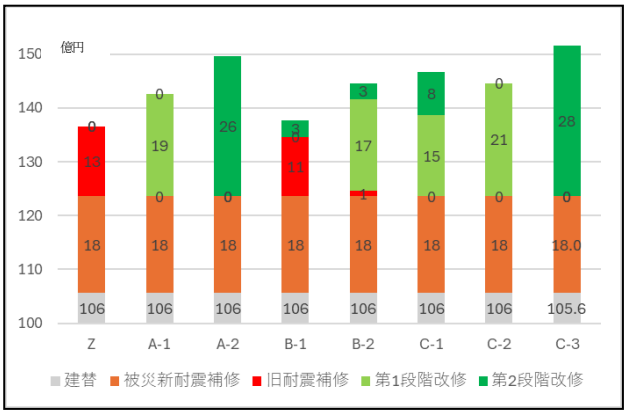


図3.　建替・補修・耐震化費用の内訳

図3は費用の内訳を示したものであるが，費用のうち大半（106億円）を建替が占めており，この一部を第2段階耐震改修（1.0≦Iw）に置き換えることで，大幅な費用削減効果が見込める.仮に100戸の建替を改修に転した場合，1戸あたりのコスト差は1,400万円（前提条件により（表2）建替費用2,000万円，第2段階耐震改修費用600万円）であり，合計1.4億円の削減となる.

表3.　建替率別の費用，総工期，耐震化率（シナリオC-1の例）

建替率（%）	費用	総工期	第2段階耐震化率
0%	61億円	1年	69%
20%	90億円	0.9年	74%
40%	118億円	1.7年	78%
60%	147億円	2.6年	83%
80%	175億円	3.5年	88%
100%	204億円	4.3年	93%

表3は，シナリオC-1（すべての住宅を第1段階まで耐震化する条件）において，建替率を0-100%で20%ずつ変化させた際の費用・総工期・耐震化率への影響を示したものである.

建替率が高くなるほど第2段階耐震化率も向上するが費用と総工期は増加する.建替率60%の場合，費用，総工期は中間的な値だが，第2段階耐震化率も比較的高く，費用対効果の高い整備となっている.

(4) 総工期

図4に示す通り，建替を中心とする従来型（シナリオZ）では，建替工期を基準として2.6年が必要となる.一方，面的整備（シナリオC-3）では，第2段階改修（474戸）を年間200戸で施工した場合，0.97年で完了し，建替より1.6年早く整備が完了する.

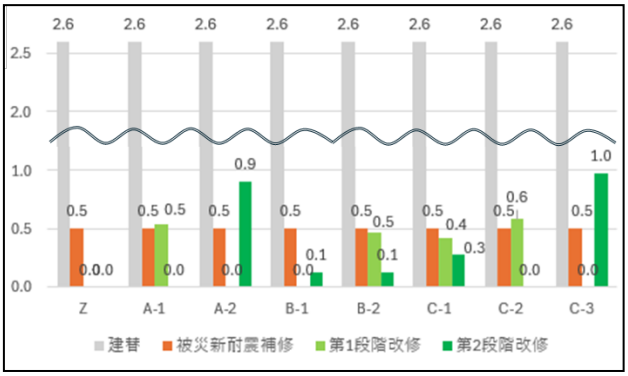


図4.　総工期（年）

(5) 耐震化の整備速度について

本研究では，第1段階以上の耐震化が行われた住宅を「一定の安全性が確保された住宅」として捉え，その整備速度を新たに「耐震化整備ペース（戸/年）」として定義した.

「耐震化整備ペース」＝（第1段階以上の耐震化が実施された住宅戸数）÷（必要工期）

これは，総工期とは異なり，耐震性能の段階的な向上と早期の地区の安全確保に注目した政策評価指標であり，一定水準以上に耐震化された住宅の整備速度を定量化できる.シナリオ別では，シナリオC系列で768戸/年と最速であり，従来型（シナリオZ）およびシナリオA-1の586戸/年を大きく上回る.すなわち，面的整備と段階的耐震改修を組み合わせることで，早期の安全確保が可能となる.

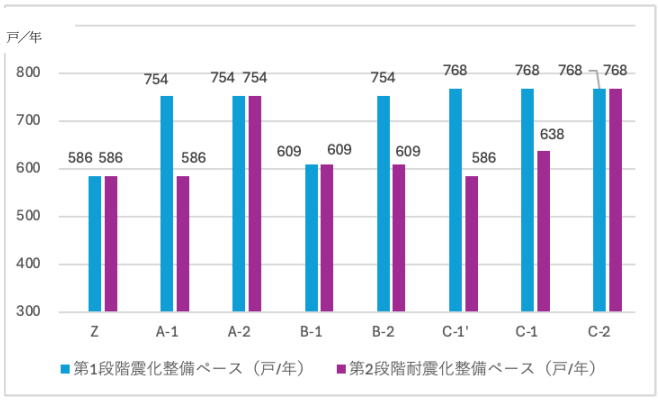


図5.　耐震化整備ペース（戸/年）

この指標は，被災者が住宅の耐震性が確保されないまま，補修後の元の住宅で生活するといった，安全性に問題のある状況の改善，仮設住宅の縮小時期や復興住宅供給の判断材料等復興計画立案の指標としても活用できる.

(6) 最適なシナリオの検討

これまでの分析をふまえ，総合的に最適なシナリオを検討する.表4に各シナリオの5指標についてランキング評価を行った（緑:最上位，灰色:最下位）.

表4.　各シナリオの５指標のランキング

指標＼シナリオ	Z	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	C-3
総費用（億円）	137	144	150	137	144	147	145	152
0.7≦Iw 耐震化率（%）	76%	98%	98%	79%	98%	100%	100%	100%
Iw≧1.0 耐震化率（%）	76%	76%	98%	79%	79%	83%	76%	100%
総工期（年）	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
耐震化整備ペース（戸/年）	586	755	755	609	755	768	768	768

面的整備を実施するシナリオC系列のうちシナリオC-1は費用が若干高いものの，それ以外の指標で最上位に位置し，シナリオA，B系列と比較して費用，耐震化率，耐震化の速度のバランスが最も良好であることがわかる.

面的整備による段階的な耐震化アプローチは，当初の整備費用を抑えつつ耐震化整備ペースの最大化と早期の安全性の向上が同時に実現可能である.

7. まとめ

本研究では，従来の建替中心の復興アプローチに加えて，段階的な耐震改修を組み合わせた新たな住宅復興の枠組みを提案しBBRBの概念を地区単位での実現方策として示した.特に，0.7≦Iwの第1段階耐震化を面的に実施することにより早期の安全確保を図りつつ，予算や人員の制約を踏まえながら段階的に1.0≦Iwの第2段階に進むことで，従来型に比して費用抑制と工期短縮を実現し，仮設住宅の早期解消や住民生活の再建に大きく寄与する

ことが示された.

また，「耐震化整備ペース」という指標は，復興施策の実効性を評価可能とし，今後の復興政策の計画立案や進捗管理にも資する.限られた資源の中で最大限の効果を得るためには，段階的かつ戦略的に整備対象を設定し，地区特性や被災状況に応じた柔軟な耐震化方策の導入が必要である.

なお，各シナリオに基づく整備を実施するためには，被災地区の建物所有者による実際に耐震化等の取り組みが前提となる.大規模災害時には，応急修理制度（上限額：約70万円）の活用が可能である.また，平時から存在する耐震改修補助制度（補助限度額：約60～300万円）も利用可能であり，これらの制度は併用が認められている.さらに，被災者生活再建支援制度により，耐震改修および建替に対する支援（限度額：300万円）が受けられ，地方自治体による上乗せ補助も存在する.

これらの制度により，住宅復興において，面的な耐震化と段階的耐震改修の促進の実現が可能な環境は一定程度整備されていると考える.

8. おわりに

本研究では特に，被災住宅の耐震性確保に着目し，面的な整備と2段階の耐震化という観点を導入し，被災住宅に限らず地区の旧耐震の既存住宅についても耐震改修の実施を復興計画に位置付けるための基礎的な検討を行った.

検討より，従来の完全な耐震化を前提とする政策から，段階的な整備により，地区の安全性の確保を考慮し，早期整備を促しつつ，将来的に第2段階改修へ移行する政策への転換の有用性であることが示唆された.限られた財源と施工能力の中で，地域ごとの条件に応じた最適解を導くには，シナリオと評価に基づいた政策選択が求められる.

なお今回の検討では簡略化したモデル地区を設定し，木造住宅の建替・改修のみを対象とした検討を行った.今後は，耐震改修が可能な技術者数等の人的な問題，道路閉塞と第１段階，第２段階での耐震改修による影響の違い，国・自治体の費用負担等も含め，ケーススタディに反映し，感度分析を行うなどの検証も必要である.

上記の検討に加え，行政や住民に対する意向調査や，災害種別（地震・水害等）に応じた適用可能性の検証を通じて，BBRBの汎用性を高め，制度設計や支援制度のあり方についても深掘りしていく必要がある.引き続き，国内外のBBRB事例の調査や国・自治体等のヒアリングの実施などを通じて検討を重ねていく予定である.

なお，本稿は既発表の論文[5]を再構成したものである.

参考文献

1) UNISDR (2015): Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015‐2030.
2) 片山耕治・小野久美子・渡邊史郎・中野卓：平成30年7月豪雨災害による被災住宅の復旧に併せた住宅性能向上方策に関する研究，日本建築学会第37回建築生産シンポジウム論文集，pp.189‐194. 2020.8（査読あり）
3) Securing recovery needs for Build Back Better (BBB) by linking Post-Disaster Needs Assessment (PDNA) with sectoral breakdown of World Risk Index (WRI),Nagami, Kozo, Takeya, Kimio, Global Assessment Report on Disater Risk Reduction. ，2019.5
4) 国土交通省国土技術政策総合研究所及び国立研究開発法人建築研究所,熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書，2016.9
5) 片山耕治・小野久美子・鈴木　承治：Build Back and Retrofit Better（BBRB；既存住宅の性能向上改修を統合した住宅復興の枠組み）の提案-耐震改修の面的な展開の促進とその効果についての考察-,第40回建築生産シンポジウム論文集,pp.111-116,日本建築学会,2025.8（査読あり）

注釈

1) 再度災害：災害復旧が完了した箇所で同等の自然外力により再び被害を受ける災害を指す（例：台風，地震，豪雨等）
2) モデル地区の状況，被災状況の想定に関しては，表2に示す他，以下の前提に基づき復旧・復興の対応を設定している.
・全壊率は大破以上とし，建替対象とした.
なお，全壊戸数については，悉皆調査における倒壊・崩壊戸数に加え，「大破」も全壊に含めて建替率を設定し，建替対象となる戸数を算出している（小破・中破・大破の内訳を均等に1/3ずつと仮定）・新・旧耐震の別は1981年6月1日以降・以前に建築確認受理による.
・費用の算出方法
建替の単価は，石川県,「いしかわ型復興住宅」モデルプラン集,
https://www.pref.ishikawa.lg.jp/kenju/jyuutakupuran.html(2025.0530収録)，改修費用については既往の被災者生活再建支援制度，耐震改修補助制度の限度額を参考に設定している.
・モデル地区における道路沿いの旧耐震住宅の戸数は，地区全体の道路面積率15%（都市再生土地区画整理事業の採択要件より）とし，以下の表に基づき設定，道路に面する宅地の間口を6m，旧耐震住宅は地区内に均等に存在するとして算出した.

道路幅員	道路面積比率%	道路延長m	沿道戸数 戸
6m以上	15%	928	60
4m以上6m未満	55%	5,445	652
4m未満	30%	3,712	

九州地方整備局管内の道路橋定期点検結果（１・２巡目）を踏まえたメンテナンスサイクルの留意点

萩原　頼徳[1]・梶尾　辰史[1]

[1]九州地方整備局　九州道路ﾒﾝﾃﾅﾝｽｾﾝﾀｰ　技術第一課　（〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東2-11-1）

平成26年3月に道路の維持修繕に関する省令・告示が公布されて以来，道路橋は，近接目視による定期点検を5年に1回の頻度で実施することが基本とされ，令和6年度からは3巡目点検が開始されている．その定期点検において橋梁の状態の把握を確実に行い，施設の機能や性能に不具合が発生する前に修繕等の措置を講じ，予防保全を含めた長寿命化を図ることが重要である．今回，九州地方整備局が管理する橋梁において，1巡目定期点検（平成26年～平成30年）から2巡目定期点検（令和元年～令和5年）の判定区分について遷移状況等を分析し，予防保全による長寿命化を図る上での今後の留意点等について考察した．

キーワード　橋梁定期点検、メンテナンス、予防保全、健全性診断

1.　はじめに

道路橋（以下，「橋梁」という）は，基本，5年に1回の頻度で近接目視による定期点検を計画的に実施している．九州地方整備局が管理する橋梁の平均橋齢は約40年となっており，建設後50年以上となる橋梁数の割合は図-1に示す通り今後急速に増加していく．

九州地方整備局が管理する橋梁のうち，平成26年度から平成30年度の1巡目の橋梁定期点検（以下，「1巡目点検」という）と，平成31年度（令和元年度）から令和5年度の2巡目の橋梁定期点検（以下，「2巡目点検」という）の健全性判定区分の割合を図-2に示した．判定区分Ⅳの橋梁はなく，判定区分Ⅲも約1割であり，約9割の殆どの橋梁が判定区分Ⅰ・Ⅱとなっており，適切に点検や措置等が行われていると言える．しかし，1巡目点検において，次回点検までに措置を講ずべきとされる判定区分Ⅲの橋梁が2巡目点検では約1.7倍に増加しており，一部の橋梁において健全性判定区分の推移が改善していない状況となっていた（図-2）．

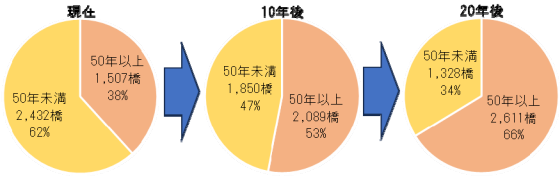


図-1　建設後50年以上の橋梁数の推移　※付録参照

予防保全による長寿命化を図る上で，改善の余地があると考えられる2巡目点検の判定区分がⅢに遷移している橋梁に着目して，1巡目点検から2巡目点検の遷移状況や要因等を分析し，考察した．

2.　1巡目と2巡目の定期点検結果

(1)　判定区分の遷移状況結果からの課題

先述の通り，2巡目点検においては判定区分Ⅲの橋梁が前回点検より約1.7倍となっているが，そのうち，1巡目点検の判定区分がⅠ・Ⅱとなった橋梁が2巡目点検で判定区分Ⅲに移行した橋梁は408橋であった．1巡目点検で判定区分Ⅲの橋梁が2巡目点検でも判定区分Ⅲのままである橋梁は79橋であった（図-3）．判定区分Ⅲの橋梁に対して修繕等の措置を行うことで判定区分Ⅲが減っていくことが理想的であるが，何らかの要因（シナリオ）で健全な状態（判定区分Ⅰ）になっていないと考えられる．

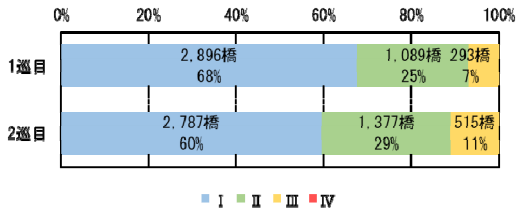


図-2　1巡目と2巡目の判定区分の割合　※付録参照

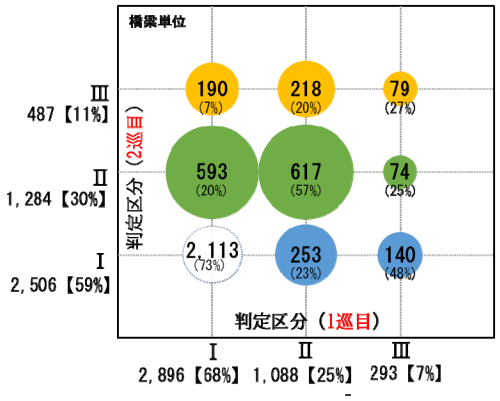


図-3　1巡目と2巡目の判定区分Ⅰ～Ⅳの遷移
（橋梁単位）　※付録参照

表-1　1巡目と2巡目の判定区分Ⅲの部材

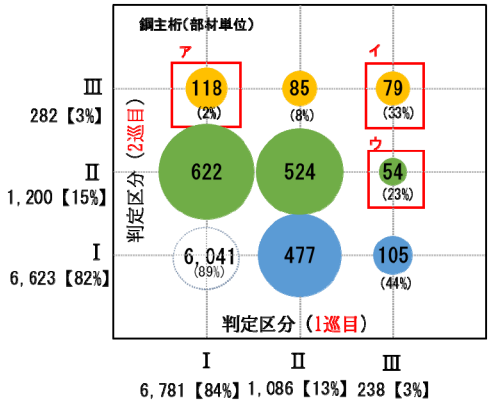
（橋梁数）

部材名	材料	健全性Ⅲ	
		1巡目	2巡目
主桁	鋼部材	68	105
	コンクリート部材	81	125
床版	鋼部材	4	13
	コンクリート部材	31	47
下部構造	コンクリート部材	49	101
支承	鋼部材	58	65

この遷移状況を分析するためにⅢ判定となった主たる要因の損傷の部材を整理した．表-1に示すようにⅢ判定が多かった鋼部材，コンクリート部材の主桁を分析対象とした．

1巡目点検で判定区分Ⅲであった橋梁が2巡目点検での判定区分でⅡあるいはⅢとなっている場合（図-4のイ・ウ）があり，その割合は1～3割程度となっている．判定区分がⅢの橋梁は対策等の措置が行われ，判定区分がⅠになるのが理想的であるが，再度，判定区分がⅢとなっている実態が確認できた．

1巡目点検の判定区分Ⅰの橋梁が2巡目点検で突然Ⅲの判定区分となっている橋梁（図-4のア）も少数であることが確認できる．これらのような遷移については何らかの要因（シナリオ）が考えられ，その要因について想定できるものを表-2に示す．これを基に実橋での検証を行った．その結果は後述する．



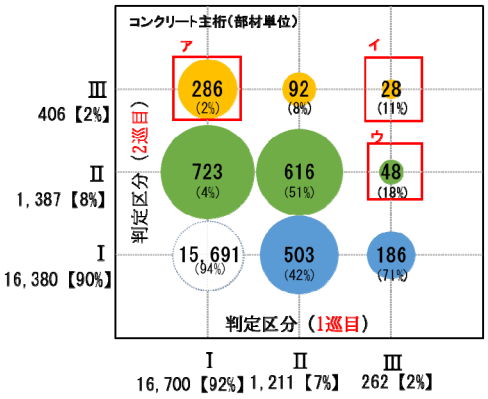


図-4　1巡目と2巡目の判定区分Ⅰ～Ⅳの遷移
（部材単位）　※付録参照

併せて，1巡目点検の判定区分がⅠで2巡目点検の判定区分がⅢになった鋼主桁とコンクリート主桁の損傷の種類別の部材数を整理した．その結果，鋼主桁の腐食と防食機能の劣化の割合は亀裂等の他の損傷より多いことが分かった．

表-2　2巡目点検の判定区分がⅢとなった想定される要因（シナリオ）

判定区分の遷移パターン		想定される要因（シナリオ） ①：適切な対応等により特に問題なし　②③：工夫や改善の余地有り
ア	Ⅰ→Ⅲ	①　突発事象等の外的要因による影響 ②　現場条件等により要因排除に限界があり補修後に再劣化
イ	Ⅲ→Ⅲ	①　詳細調査等により対策実施時期を見送り ②　判定区分Ⅲとなりそうな部材（箇所）が多く、2巡目で他の部材（箇所）での損傷が進行
ウ	Ⅲ→Ⅱ	①　構造・現場条件等により抜本的な対策ができずに対処療法的な対応（暫定措置等） ②　判定区分Ⅲとなりそうな部材（箇所）が多く、2巡目で他の部材（箇所）での損傷が進行 ③　現場条件等により要因排除に限界があり補修後に再劣化

これは，腐食と防食機能の劣化が桁端部からの漏水等の影響により急速に進行しやすい損傷であることも理由の一つとして考えられる．

一方で，コンクリート主桁ではひびわれが多かった．これは，アルカリ骨材反応により内部で潜在的に進行していた損傷が進行期に入りコンクリート表面にひびわれとして顕在化したことや，アルカリ骨材反応の恐れのある部材（対策区分S1）がすでにあって，その部材が2巡目点検で判定区分Ⅲとなっていることが理由の一つと考えられる．

⑵　遷移状況についての実橋での検証

次に表-2に示した要因を実橋で検証した．「ア－①」は点検等で予測できないため，突発事象が発生したら速やかに対応するしかないと考えられる．「イ－①」については，詳細調査等を含めた対策を適切な時期に実施すれば特に問題無いと考えられる．「ウ－①」についても，構造条件や現地条件等で抜本的な対策が難しい場合が想定されるが，総合的に判断して暫定的な措置等を行い，適切な管理を継続的に実施すれば特に問題無いと考えられる．

一方で，「ア－②」，「イ－②」，「ウ－②・③」は点検や対策等をさらに工夫や改善等を行うことでより良い予防保全や長寿命化修繕計画の推進を図ることが可能になると考えられる．そこで，これらについて，実際の橋梁の点検調書等を確認して詳細に検証することとした．表-3-1，表-3-2に鋼主桁，コンクリート主桁に対する検証結果を示す．

鋼主桁についてはⅢ判定となっている損傷の種類として腐食および防食機能の劣化が多く，原因としては漏水に起因するものが多かった．また，対策後の早期劣化の原因として，施工上の制約等により要因排除（橋面からの漏水等の除去など）に限界があった事例や，別箇所の類似損傷が2巡目点検までに進行した事例が複数確認されており，点検・補修時に判定区分Ⅲのみに着目するのではなく，再度損傷が進行することを予防するために損傷原因の確実な除去，類似損傷に対する進行を予想して予防保全を行うことが重要となる．

コンクリート主桁についても，鋼主桁と同様に要因排除（コンクリート内部の塩分等の除去など）に限界のあった事例や，別部材の類似損傷が進行した事例が複数確認されており，点検・補修時に留意する必要がある．

表-3-1　遷移状況に対する実橋での検証から得られた改善案（鋼主桁）

想定要因	1 巡目	2 巡目	損傷状況(⇒具体例)	原因例/改善案
ア-② Ⅰ→Ⅲ 要因排除の限界			現場条件等により対処療法的な延命措置とならざるを得なく、要因排除に限界があり、再度劣化 ⇒伸縮装置からの漏水があり、狭隘な桁端部の腐食	【原因例】 施工上の制約等より要因排除に限界 【改善案】 狭隘部にて施工可能で耐久性向上につながる対策の実施
イ-② Ⅲ→Ⅲ 別箇所の損傷進行			1巡目の損傷のほか、同一部材の他の箇所でも同様の損傷が発生しておりそれが進行し2巡目でもⅢ判定 ⇒伸縮装置や橋面からの漏水があり、狭隘な桁端部の腐食	【原因例】 現地条件等より対策箇所が限定的(Ⅲのみ対策) 【改善案】 塗装時に端部や橋面からの漏水対策を同時に実施
ウ-② Ⅲ→Ⅱ 別箇所の損傷進行			1巡目の損傷に対して対策済みであるが、他の箇所で同様の損傷が発生しておりそれが進行し2巡目でⅡ判定 ⇒水はけが悪くなり滞水しやすい添接部に腐食発生	【原因例】 現地条件等より対策箇所が限定的(Ⅲのみ対策) 【改善案】 塗装時に添接板の境界等のケレンの難しい箇所を丁寧に施工
ウ-③ Ⅲ→Ⅱ 要因排除の限界			現場条件等により対処療法的な延命措置とならざるを得なく、要因排除に限界があり、再度劣化 ⇒狭隘な桁端部の腐食	【原因例】 施工上の制約等より要因排除に限界 【改善案】 塗装時に狭隘な桁端部等のケレンの難しい箇所を丁寧に施工

表-3-2　遷移状況に対する実橋での検証から得られた改善案（コンクリート主桁）

想定要因	1 巡目	2 巡目	損傷状況	原因例/改善案
ア-② Ⅰ→Ⅲ 要因排除の限界			現場条件等により対処療法的な延命措置とならざるを得なく、要因排除に限界があり、再度劣化 ⇒飛来塩分による塩害、内部鉄筋の腐食により膨張	【原因例】 施工上の制約等より要因排除に限界 【改善案】 内在・飛来塩分に配慮した工法・材料の工夫
イ-② Ⅲ→Ⅲ 別箇所の損傷進行			1巡目の損傷のほか、同一部材の他の箇所でも同様の損傷が発生しておりそれが進行し2巡目でもⅢ判定 ⇒ASR の疑いのある損傷、歩道と車道の境界部より漏水	【原因例】 現地条件等より対策内容が限定的（Ⅲのみ対策） 【改善案】 歩車道境界部の滞水対策（ｽﾗﾌﾞﾄﾞﾚｰﾝ設置等）
ウ-② Ⅲ→Ⅱ 別箇所の損傷進行			1巡目の損傷に対して対策済みであるが、他の箇所でも同様の損傷が発生しておりそれが進行し2巡目でⅡ判定 ⇒ｱｰﾁﾘﾌﾞ下面のひびわれ、打ち継ぎ目部から漏水	【原因例】 現地条件等より対策内容が限定的（Ⅲのみ対策） 【改善案】 橋面からの水の侵入経路を調査し、漏水対策を実施
ウ-③ Ⅲ→Ⅱ 要因排除の限界			現場条件等により対処療法的な延命措置とならざるを得なく、要因排除に限界があり、再度劣化 ⇒床版と地覆の打ち継ぎ目部より顕著な遊離石灰の析出	【原因例】 施工上の制約等より要因排除に限界 【改善案】 床版と地覆の境界部の滞水対策（ｽﾗﾌﾞﾄﾞﾚｰﾝ設置等）

3.　今後の定期点検や補修等での留意点

表-3-1，表-3-2に示した実橋での検証から得られた損傷の想定要因に対する改善案を実行するために重要となる，定期点検や補修時の留意点を表-4に整理した．併せて，留意点の効果をわかりやすくするため，橋梁のメンテナンスサイクルを人に置き換え，診察等に例えた事例を記載する．表-4の点検・補修等での留意点について，以下に具体例を詳述する．

(1)　定期点検での留意点

定期点検結果を記録するにあたり，確認された各損傷の関係性や損傷要因について記録した上で，損傷要因が何に起因するか推測し，同様に損傷が発生する要因が継続する可能性について記載する工夫を行う．表-3-1のシナリオの「ア―②」，「ウ―③」において，鋼橋の主桁端部の防食機能が劣化する事象がある．防食機能を回復するため，塗装塗替等を施工する上で，桁端部は胸壁や支承などが密接し狭隘部となるため，腐食した主桁等の素地調整が十分に行えず，塗膜の腐食が生じやすい．塗膜の腐食には，素地の状態だけでなく，水が供給されることで進展しやすい環境となる．そのため，点検を雨天時に確認すること等で水みちの調査などを行い，排水処理の状況を確認することが適切な状態の把握や措置につながることになる．表-3-1，表-3-2の「イ―②」，「ウ―②」においては，鋼橋の亀裂やコンクリート橋の塩害等，点検時に損傷が確認された箇所だけでなく，類似する損傷が生じる可能性のある箇所についても，予防保全の観点から措置の必要性についても記録を行うことが良い．

(2)　補修等の措置の留意点

損傷は外部からの水に起因することが多いため損傷を直接的に補修するだけでなく，劣化要因を如何に除去するかが重要となる．表-3-1の「ア―②」，「ウ―③」において，主部材である主桁や支承等が腐食している場合，点検時の記録を基に，水みちを確認し伸縮装置の構造を非排水型に変更等，排水処理が適切に行えるような措置を行うことが重要である．表-3-2の「イ―②」，「ウ―②」においては，塩害やASR等が要因と推測されるひび割れの損傷に対し，損傷個所の補修を行うだけでなく，軽微な損傷の段階のうちに同様の損傷が進行しないために，内部に水等の劣化因子が侵入しない措置（表面保護等）が考えられる．

また，定期点検や補修設計の時期と実際に補修を行う時期に時間差が生じることが多く，損傷が進行していることも考えられる．そのため，補修を行う際には損傷の進行を把握した上で，設計時の思想で問題がないか確認し，LCCを踏まえた補修を行うことが大切と考える．

上述のように損傷要因排除や症状に応じた対策実施など，基本的なことを確実に実施することが如何に大事であるかが分かる．

表-4　今後の定期点検や補修等での留意点

想定される要因		点検・補修等での留意点	人の診察等に例えた場合（イメージ）
ア―② Ⅰ→Ⅲ ウ―③ Ⅲ→Ⅱ	現場条件等により要因排除に限界があり補修後に再劣化	・各損傷の関係性や損傷要因、対策時の現場条件が診断者や設計者に伝わる損傷図等の点検記録の工夫 ⇒（例）損傷の進行がわかるように遊間幅、桁下余裕等を損傷図に記載 ・劣化要因を確実に除去する対策の実施 ⇒（例）施工上の制約がある場合も再塗装の対策時に水供給を遮断する伸縮装置の非排水化等の対策を実施することを徹底	・生活習慣や病歴も含めてカルテへ記録し、今後の治療に関わる専門医や看護師等に広く情報提供 ・今後の進行性やどこまでの機能回復を目指すのかを考えた治療方針を立案し、生活習慣の改善も含めて病気を根治
イ―② Ⅲ→Ⅲ ウ―② Ⅲ→Ⅱ	判定区分Ⅲとなりそのような部材（箇所）が多く、２巡目で他の部材（箇所）での損傷が進行	・類似損傷が生じる可能性がある部材（箇所）の損傷状況確認 ⇒（例）疲労き裂やＡＳＲによるひび割れ発生時に類似箇所も併せて詳細調査を実施し橋梁全体の健全性を把握 ・類似損傷の発生・進行を想定し、LCCを考慮したうえで、予防保全型の対策を実施 ⇒（例）上記の詳細調査結果に基づき、類似箇所も含めて損傷の進行予想を行い、対処療法型と予防保全型のLCCを比較した上で損傷進行を抑制する対策（漏水対策等）を実施	・関係性のありそうな病気についても精密検査を行い、身体全体の健康状態を把握 ・精密検査結果に基づき現在症状のある病気の治療だけでなく、将来的に発症が想定される病気に対しても、現在から予防的な治療を実施

4.　おわりに

今回，1巡目と2巡目の定期点検結果について，Ⅲ判定が多い鋼主桁，コンクリート主桁のⅠ→Ⅲ，Ⅲ→Ⅲ，Ⅲ→Ⅱへ移行した要因を分析し，実橋での検証を行い，点検・補修等における留意点をとりまとめた.

その結果，点検・補修等においては損傷要因の排除や症状に応じた対策実施などの基本的なことを確実に実施することが如何に大事であるかが分かり，①如何に損傷要因を除去（排除）できるか，②如何に損傷発生・進行を予測して予防保全型の措置（対策）が実施できるか，ということが重要であると再確認できた.

本稿で取り上げた留意点については，今般改定された道路橋定期点検要領（令和6年3月）[1] の改定内容が適切に運用されることにより，今回整理した留意点の実施につながることが期待される.

また，令和6年度より3巡目の橋梁定期点検（以下，「3巡目点検」という）が始まっている．1巡目点検後に措置を実施し，2巡目点検で判定区分がⅠと改善したたにもかかわらず，3巡目点検での判定区分がⅢ等となる再劣化等の課題もある．今後も損傷が生じる要因把握や措置が適切に実施され，健全性を保つことができている事例等，引き続きデータ分析等を行うことで，効果的な橋梁の長寿命化計画の実現に寄与していきたい.

なお，定期点検等を確実に実施するために参考となる資料が国土技術政策総合研究所資料第1307号（令和7年1月）[2] に掲載されており，先に述べた点検・補修等における基本的なことを確実に実施するために必要な情報があるので参考にされたい.

謝辞：本論文の作成にあたり，ご指導，ご助言をいただきました関係者の皆様及び，データの提供等について多大にご尽力頂いた（株）建設技術研究所に心より感謝申し上げます.

付録

図-1，図-2，図-3，図-4について

※令和5年3月31日時点の4,625橋が対象

※　Ⅰ→Ⅰに該当する部材数を参考として記載（図内点線部）

※【 】内は1巡目点検（2巡目点検）における各判定区分の占める割合を示す.

※（ ）内は1巡目点検の判定区分が2巡目点検に遷移したときの各判定区分の占める割合を示す.

（抽出条件）最新橋梁管理カルテデータのうち以下条件を満足するデータを集計（被災橋梁は除外）

・1巡目と2巡目の点検調書がマッチングするもの

・点検調書に登録されている部材単位の健全性の判定区分を集計

参考文献

1）国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，令和6年3月

2）国土交通省国土技術政策総合研究所：道路構造物管理実務者研修（橋梁初級Ⅰ）道路橋の定期点検に関するテキスト（その２）2025 年版，令和7年1月

木下川（きねがわ）排水機場の耐震化について

福永 龍佑

[1]東京都　建設局　江東治水事務所　（〒124-0023 葛飾区東新小岩一丁目14番11号）

木下川排水機場は，隅田川・荒川・臨海部で囲まれた江東三角地帯（図－１）の河川に降った大雨を荒川へ排水する治水上重要な施設である．本事業は，1976年度に建設された排水機場を耐震化するものであり，マグニチュード 8.2 の海溝型地震など，想定される最大級の地震が発生した場合においても，排水機場の機能を保持することを目的としている．

本稿では木下川排水機場の建物の耐震化にあたり，当所が経験した高難度の設計・施工事例について報告する．

キーワード　排水機場，建替，耐震化，原位置，プレキャスト・プレストレストコンクリート

1. はじめに

木下川排水機場が位置する江東三角地帯内には11もの河川が流れており，それらを総称して江東内部河川（図－２）という．江東三角地帯の地盤高の大部分は，東京湾の満潮面以下であるため，これまで多くの水害に見舞われてきた（図－３）．そのため建設局では，江東三角地帯を東西に2分化し，平均地盤面が高い西側は耐震護岸方式により，低い東側は水門等で周囲を締め切る，水位低下方式（図－４）により治水対策を講じている．



図-1　江東三角地帯



図 1-補　江東三角地帯位置図



図-3　錦糸町駅付近（明治 43 年）

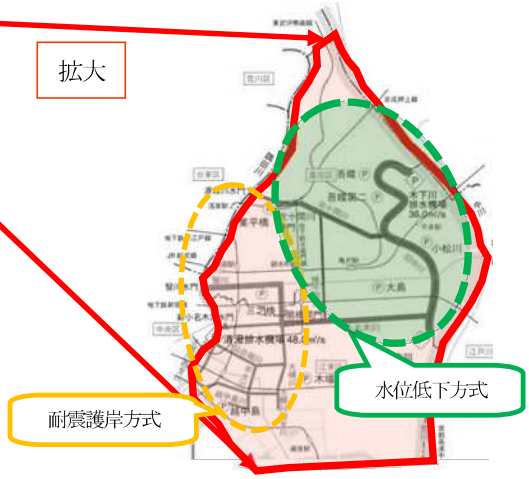


図-2　江東内部河川配置図



図-4　水位低下方式

2. 排水機場の耐震診断結果

所管４か所の排水機場において耐震診断を実施した結果，木下川排水機場においては，1981 年以前の旧耐震基準で建てられているほか，躯体を貫通する幅 1.2㎜ のひび割れ（図−５）や，コンクリート表面から 50㎜ 以上の中性化（図−６）が確認されるなど，劣化も進行しており耐久性が十分でないと判断された．このため木下川排水機場は，筋交い設置などによる施設補強ではなく，建替えにより耐震化を図ることとした．

排水機場	建設年度	判定	対策	
新川	1968 年度	×	筋交い設置	旧耐震
小名木川	1969 年度	×	耐震壁設置	
木下川	1976 年度	×	建替え	
清澄	1986 年度	○	外壁補修	新耐震

表-1 所管排水機場耐震状況



図-5 貫通ひび割れ 1.2㎜



図-6 中性化深さ 52㎜

3. 排水機場建替えの課題と解決に向けた取組

(1) 現位置での建替えと機能維持の両立

木下川排水機場は，荒川と旧中川を接続する位置にあり（図−１），排水ポンプの位置を変えることができないため，現位置での建替えが求められる．また，豪雨時に江東三角地帯が浸水する恐れがあるため，工事期間中であっても 24 時間 365 日，排水ポンプを稼働できる状態を維持しなければならない．排水機場の耐震化に当たっては，排水ポンプを稼働できる状態のまま，既設排水機場を現位置で解体・新築することが課題となった．

その解決策として，既設排水機場内に鉄骨造の柱・梁と鉄筋コンクリート造の屋根で構成された仮設シェルター※（図−７，８）を設置することとした．仮設シェルターは，風雨や建替え工事で発生する粉塵等から排水ポンプを保護する建屋として機能するため，工事期間中であってもポンプ機器の運転・点検業務が可能となる．また，仮設としているが，本設と同程度の耐震性と建築基準法等の審査が必要となる法定上の建築物である．そのほか，仮設シェルターの骨組みの設置に際しては，既設の天井クレーンを使用するとともに，排水ポンプに損傷を与えないよう鋼材で養生を行うなど，高難度の施工を実施することにより，排水機能を確保しつつ現位置での建替え工事を進めることができた．

※都内で初、国内でも国土交通省所管の築 50 年経過の排水機場では初の取組（他省庁・他自治体の排水機場は未調査）

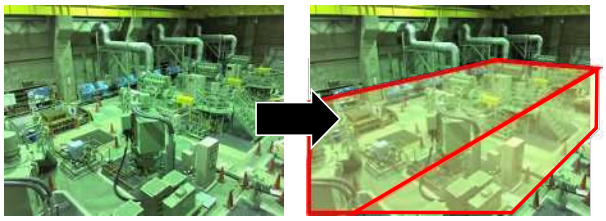


図-7 仮設シェルターイメージ

(2) 限られた空間での耐震化施工

排水機場の基礎（土木構造物）（図−９）は，排水ポンプを支持しているため，造り替えができず，補強工法を選択せざるを得なかった．したがって，建築物の建替えに当たっては，既設基礎を活用することが前提条件となり，排水機場の耐震化は限られた空間で実施することが課題となった．



図-8 仮設シェルター

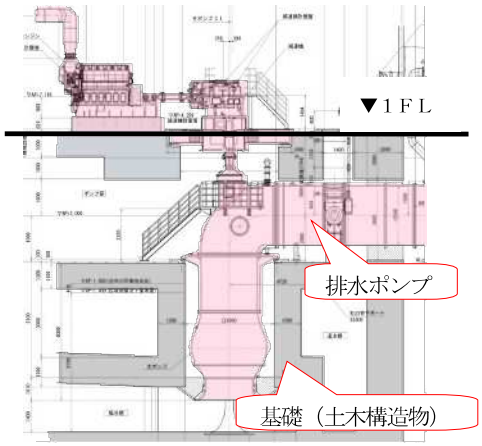


図-9 排水機場基礎断面図

その解決策として，プレキャスト・プレストレストコンクリート構造を採用した．既設排水機場で用いられていた鉄骨鉄筋コンクリート構造では，型枠支保工（図-10）を必要とするが，建物内の排水ポンプや配管類が障害となるため施工ができず，支保工を要しない鉄骨造とした場合では，施設の耐震性が十分確保できないため，採用を見送った．



図-10　型枠支保工

プレキャスト・プレストレストコンクリート工法では，部材を工場で製作することで型枠工事を必要とせず（図-11），かつプレキャスト部材内に鋼線を通し，その鋼線（図-12）を引張り，強い圧縮力を導入することで，高い強度を確保できる．施工面では，隣接する新管理棟への接触による損傷を防ぐため，柱を５分割にして軽量小型化を図り，その他の部分については定格荷重以下で揚重回数が最も少なるよう３分割とした．



図-11　部材設置状況

このように，工場で製作した部材を効率よく揚重機（550tクレーン車）で設置することで，限られた空間で，耐震化に必要な強度を持った排水機場の躯体を構築することができた．

(3) 複雑な現場の管理

木下川排水機場には様々な設備機器が付随しており，

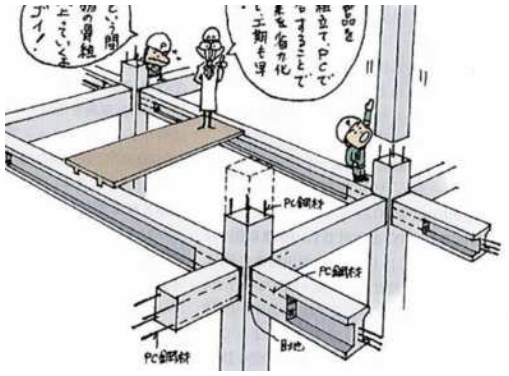


図-12　プレキャスト断面部材イメージ

建替えに併せて多様な設備も全て再整備する必要がある．そのため建替えに当たっては，建築工事と異業種工事（天井クレーン・ポンプ付帯設備・監視制御・消火設備・換気設備・電気設備）に携わる全７業者（７契約）の並行作業が課題となった．

その解決策として，全工事を踏まえた仮設計画の立案及び異業種工事間の連携強化を図った．仮設計画の立案については，仮設足場を設計段階から建築工事以外の異業種工事業者が使用することを前提に割付し（図-13），その工事の施工状況に合わせて部分的に解体できるようにした．



図-13　仮設足場の割付例

また，建築工事で使用する揚重機を，別契約の天井クレーン業者が据付時にも使用することとした（図-14）．これにより，別途仮設足場や揚重機の組立作業を省略することができ，施工日数を最小化できた．



図-14　揚重機の共用

異業種工事間の連携ついては，リモート操作を活用したオンライン会議の工夫により強化を図った．これまでのオンライン会議では，発言者が説明し，各自が発言内容を手元の紙媒体で整理する方法であったため，主催者が取りまとめる際，発言者の意図が十分に議事に汲み取られずに工事が進んでしまうことがあった．本工事では７業者の各発言者が主催者の端末を遠隔で操作し，発言内容を１つの図面データ等に落とし込むことで，発言者の意図を関係者へ正確に伝えることが可能となり，認識の齟齬による工事の停滞や手戻りの抑制を図った（図-15）．これらの取組により，7業者が並行する複雑な現場を効率的に管理することができた．

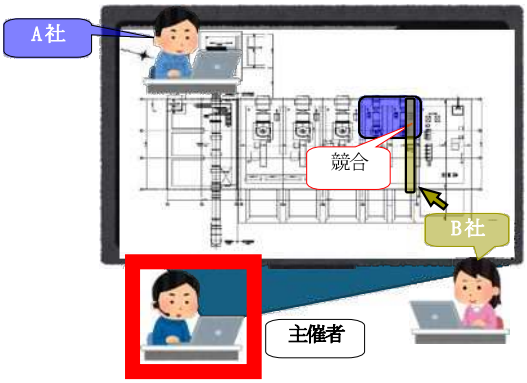


図-15　リモート操作イメージ図

4. まとめ

木下川排水機場の耐震化事業は，2015年度の着工からこれまでの約１０年間，４大技術（建築・土木・電気・機械）の総合力で本発表以外にも多くの難所を越えてきた．その度に，組織内の協調性や連携力の高まりを実感することができた．今回の経験を糧に，引き続き幅広い観点から都市基盤事業に携わり，困難に直面した場合においても最適解を見出し，チームの連携を高めることで，都民の生命，財産を守り，都民の生活をより豊かにする「ものづくり」を進めていきたい．



解釈可能AIを用いた木造建築物多目的最適設計に向けた基礎的研究

難波　宗功[1]・井上　涼[2]

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

[2]熊本大学大学院　先端科学研究部　助教　（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2-39-1）

本研究では，木造建築を対象に解釈可能AIを導入し，地震時応答・二酸化炭素排出量・体積を目的変数とした多目的最適化手法を提案する．これにより，設計変数の寄与度を明示しつつ，トレードオフの関係を定量的に把握できる枠組みを構築し，2階建て木造建物を対象とした事例を通じて有効性を検討した結果を報告する．

キーワード　木造建築，多目的最適化，解釈可能AI

1. はじめに

近年，建築分野においては持続可能性と防災性の両立が重要な課題となっている．特に日本においては，新設住宅着工戸数のうち約60%を木造住宅が占めており[1)]，地震や気候変動等による外力に対して高い安全性を確保することが強く求められている．さらに，木材は再生可能資源であり，ライフサイクル全体を通じた環境負荷低減に資する材料として注目されている．既往研究においても，木造建築が環境負荷の観点で優位であることが定量的に示されている[例えば2)]．したがって，木造建築のさらなる普及には，耐震性能・環境性能・経済性といった複数の性能要求を同時に満たす設計が不可欠である．

木造住宅の耐震性能に関する最適化としては，井下等[3)]の研究が挙げられる．井下等は木質ラーメン架構について，ドリフトピンの本数と部材総体積の二つの変数を対象として，多目的最適化を試みた．しかし，対象は簡易モデルにとどまっており，接合部や耐力壁を考慮した詳細な解析モデルを扱った例はほとんど見られない．詳細モデルを用いることで，耐震性能に加えて環境性能や経済性を同時に考慮した，より実践的な最適化が可能になると考えられる．

さらに，近年注目される解釈可能AI（Explainable AI）の導入は，設計変数の影響度を明示しつつ，設計者の判断に基づく多目的最適設計を実現する有効な手段と期待される．文献4）においても，将来的展望として解釈可能AIの活用が指摘されている．解釈可能AIによってパラメータ同定やパラメトリックスタディを行う事例もあり[5), 6)]，その適用範囲は拡大しつつある．従来のAIは最適解導出の過程が不透明であるという課題を抱えていたが，解釈可能AIによりそのプロセスを明示することで，設計者が最適解を理解・評価でき，多目的意思決定支援への展開が期待できる．

以上の背景を踏まえ，本研究では木造建築を対象に，耐震性能・環境負荷・経済性といった相反する性能要求を同時に考慮した多目的最適化手法を提案する．設計変数の寄与度を明確化し，複数目的間のトレードオフ構造を設計者が把握可能となる枠組みを構築することを目指す．

本論文では，解釈可能AIを活用し，生産時の二酸化炭素排出量，柱・梁の体積，および地震時の応答値を目的関数とした多目的最適化手法を提示する．さらに，2階建て木造建物を対象とした適用事例を通じて，本手法の有効性を検討した結果を報告する．

2. 解釈可能AIを用いた多目的設計

本研究では，解釈可能なAIを用いて各パラメータの影響度を把握しつつ，設計者の判断を反映させながら多目的最適化を実現する手法を提案する．本章では，まず提案手法の全体的な枠組みを示し，次に設計変数および目的変数の設定，さらに具体的な分析手順について述べる．

(1) 提案手法概要

図-1に最適化手順概要を示す．木造建物の設計においては，外壁，内壁，筋かいなど多様な耐震要素の仕様を決定する必要がある．これらの要素は設計の自由度を高める一方で，組み合わせ数が指数関数的に増加するため，

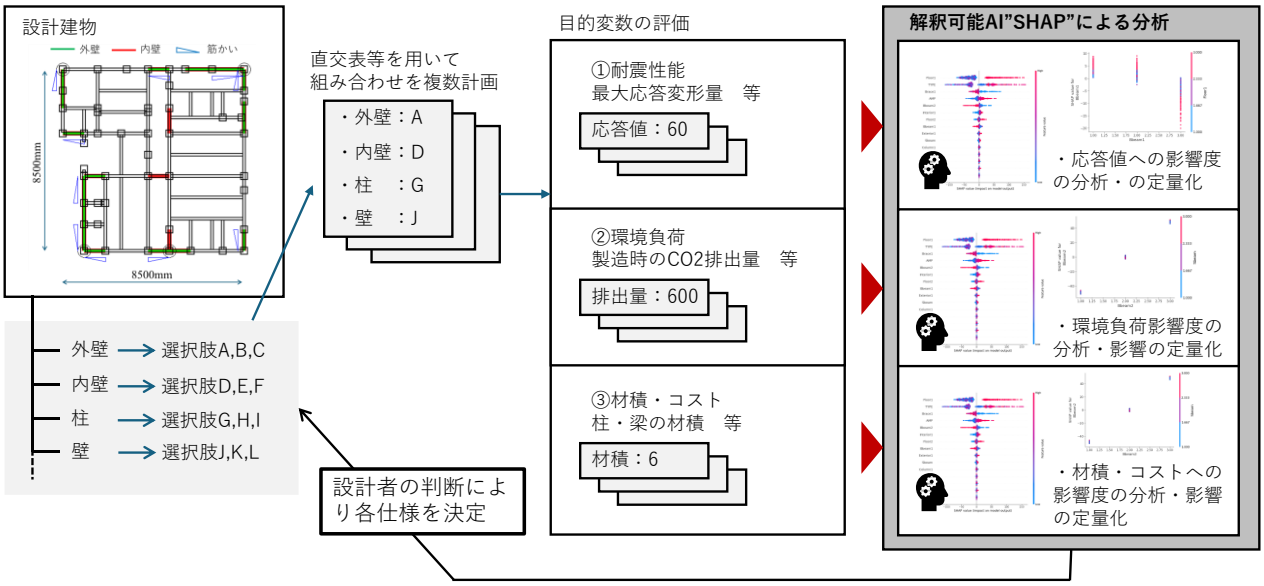


図-1　解釈可能 AI による多目的設計概要

従来の人手による設計プロセスでは短時間で合理的な最適解を探索することが困難である．

まず，直交表を用いて各設計変数の水準を整理し，効率的に組み合わせを計画する．これにより，探索空間を縮減しつつ，設計変数間の影響を網羅的に分析可能とする．

次に，各組み合わせに対して性能評価を行う．耐震性能については，数値解析を必要とするため，本研究では時刻歴応答解析を容易に実施可能なシミュレーションツール wallstat 7)を採用した．環境負荷については，各部材の使用量を基に，製造段階における二酸化炭素排出量を算定し，評価には既往のLCAデータベースを利用する．経済性については，柱・梁など主要部材の体積を算出し，コストの近似指標とした．なお，将来的には部材単価データを組み込むことで，より精緻なコスト評価への拡張が可能である．

以上により説明変数および目的変数のデータが整った後，解釈可能AIの一手法である SHAP を用いて分析を行う．SHAPはゲーム理論に基づくShapley値の概念を応用した手法であり，機械学習モデルによる予測結果に対して，各特徴量がどの程度寄与しているかを定量的に評価することが可能である8)．従来の機械学習モデルでは予測精度が高くとも，各変数の影響度を明確に理解することは困難であったが，SHAPを活用することで，設計変数の寄与度を定量的かつ直感的に把握することができる．

SHAPによる分析では，以下のような評価が可能である．

・summary plot により，どの設計変数が耐震性能・環境負荷・経済性に大きな影響を与えているかを可視化する．

・耐震性能に大きく寄与するが環境負荷への影響が小さい変数を特定し，設計者が耐震性を優先する場合には当該変数を選択するといった合理的判断が可能となる．

・環境負荷削減を優先する場合には，寄与度分析を基に，影響の大きい要素を重点的に最適化する設計を採用できる．

以上より，SHAPを用いた解析により，設計変数が目的関数に与える影響を定量的かつ直感的に理解できるため，設計者の経験則に依存せずに合理的な判断を行いつつ多目的最適化を実施できる．

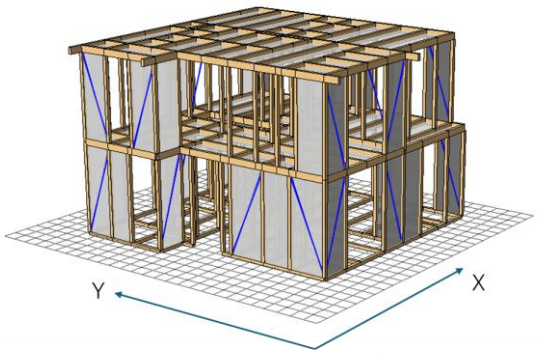


図-2　設計建物解析モデル

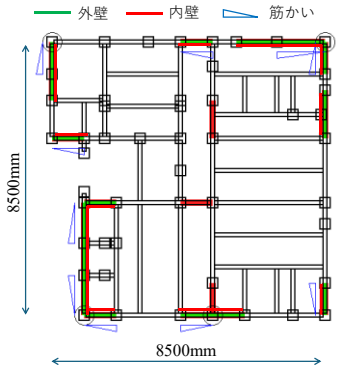


図-3　設計建物耐震要素配置図（1 階）

表-1　最適化対象とする因子・水準

因子			水準1	水準2	水準3
1	Exterior1	1階外壁の仕様	土壁	モルタル	サイディング
2	Exterior2	2階外壁の仕様			
3	Interior1	1階内壁の仕様	構造用合板	土壁	石膏ボード(大壁)
4	Interior2	2階内壁の仕様			
5	Brace1	1階筋かいの仕様	筋かい30×90	筋かい45×90	筋かい45×90端部釘打ち
6	Brace2	2階筋かいの仕様			
7	Floor1	2階床の仕様	構造用合板	構造用合板	板材
8	Floor2	屋上階の仕様	(落し込み　根太@340)	(半欠き　根太@340)	(落し込み　根太@340)
9	Sbeam	2階床及び屋上階の小梁せい	105mm	120mm	150mm
10	Bbeam1	2階床の大梁せい	210mm	240mm	270mm
11	Bbeam2	屋上階の大梁せい			
12	Column1	1階の柱幅及び高さ	105mm	120mm	150mm
13	Column2	2階の柱幅及び高さ			

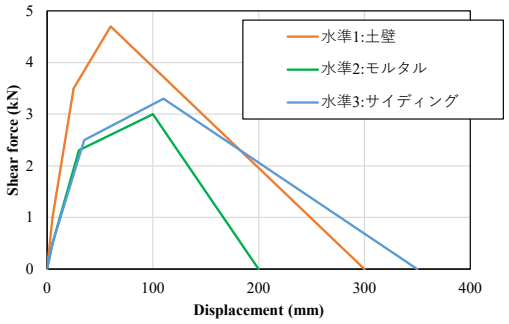


図-4　内壁の骨格曲線(幅 910mm×高さ 2730mm)

(1) 対象建物及び設計変数

対称建物は，延べ床面積 128.50m^2 の 2 階建て木造住宅である．各層の床重量は，1 階：46.31kN，2 階：69.52kN である．wallstat[7]によって解析モデルを構築した．解析モデルを図-2 に，1 階における耐震要素の配置を図-3 に示す．

最適化の対象とする設計要素（因子）と，それぞれの選択候補となる仕様（水準）を表-3 に示す．耐震要素の配置は図-3 に示す配置として固定値とした．表-3 に示すこれらの要素について，どの仕様を採用すべきかを合理的に判断するため，本研究では解釈可能 AI を用いて各因子の影響度を自動的に可視化することを試みた．図-4 には，内壁仕様における骨格曲線を示す．これらの骨格曲線を解析モデルの入力パラメータとして採用する．その他のパラメータについても同様である．

(2) 目的変数

最適化の目的変数は，大きく分けて①耐震性能，②環境負荷，③材積の 3 項目とした．下記，それぞれの目的変数について詳述する．

① 耐震性能

wallstat によって解析モデルを作成し，時刻歴応答解析を実施した．解析モデルの入力パラメータとしては，表-1 に示す指標の組み合わせを採用し，直交表 L27 を用いた[9]．これは 13 因子 3 水準の組み合わせを効率的に検証するための直交表であり，27 通りの組み合わせが計画される．なお，すべての組み合わせを総当たりで検討すると 3^{13}=1.6×10^6 ケースの解析が必要となるが，直交表を用いることで 27 ケースに集約可能である．

3 軸加振とし，入力地震動（TYPE）は，Taft 波，JMA 輪島波，El Centro 波，八戸波，JR 鷹取波，JMA 神戸波の 6 種類とした．なお，X 方向に EW 成分，Y 方向に NS 成分，Z 方向に UD 成分を入力し，倍率（AMP）は 0.80，0.85，0.90，0.95，1.00 の 5 種類とした．したがって，パラメータの組み合わせ 27 通りに対して，地震動 30 通りを入力した結果，合計 810 ケースの時刻歴応答解析を実施した．　実施した 810 ケースについて，各層各方向の最大層間変形量を評価し，目的変数とする．

② 環境性能

対象建物について製造段階における二酸化炭素排出量を算定した．本研究では表-1 に示す仕様のみを対象とし，それ以外の接合部等の要素は今回最適化対象としていないため，仕様を変えておらず，数値が一定であるため，評価の対象外とした．算定にあたり，各仕様および材料の面積ならびに体積に，該当する材料の二酸化炭素排出量原単位を乗じて算定した．排出量原単位を表-2 に示す．原単位は文献 10）および文献 11）に拠った．

二酸化炭素排出量の算定に関しては，応答解析において直交表を用いたのとは異なり，計算時間が極めて短いため，全組み合わせ 3^{13}=1.6×10^6 ケースについて総当たりで算定を行った．

表-2　製造時の二酸化炭素排出量原単位

壁仕様・材料	炭素排出原単位
土壁	1.02　kg-CO_2/m^2
モルタル	4.40　kg-CO_2/m^2
サイディング	3.60　kg-CO_2/m^2
石膏ボード(大壁)	2.64　kg-CO_2/m^2
製材	0.35　kg-CO_2/kg
合板	0.70　kg-CO_2/kg

③ 材積

柱・梁の材積を算定した．材積は木造住宅のコストと強く関連する指標であり，本来であれば外装材等の面積も含めて算定し，より精緻なコスト評価を行う必要がある．しかし，本研究の目的は最適化設計手法の提案にあるため，柱・梁の材積のみを対象とした．なお，二酸化炭素排出量の算定と同様に計算時間が極めて短いため，全組み合わせ 3^{13}=1.6×10^6 ケースについて総当たりで算定を行った．

(3) 解釈可能 AI による分析

前項まで説明した入力変数と目的変数の関係性について解釈可能 AI「SHAP」を用いて分析する．SHAP におけ

る summary plot 及び dependency plot を用いてパラメータの影響度を分析する. 式(1)のように, 各目的変数について, それぞれのパラメータによる寄与度の足し算に近似化することで, それぞれの寄与度, 影響の大きさについて分析が可能となる.

$$f(x) \approx \varphi_0 + \sum_{i=1}^{M} \varphi_i \qquad (1)$$

ここに, $f(x)$：目的変数(ここでは, 実験結果と解析結果の差を示す評価指標), φ_0：目的変数の平均値(=SHAPley 値), φ_i：各パラメータの貢献度(=SHAP 値)を示す.

SHAP 値を算出するためには、まず機械学習によるモデル構築が必要である. 本研究では, 高速かつ正確な学習を可能としている LightGBM[12]を採用した. 学習データは全ケースの 80%, 残り 20%を検証用データとした. 学習させたモデルに対して, python の SHAP ライブラリ[13]を用いて SHAP 値に変換した.

SHAP による分析では, 主に summary plot と dependency plot の二種類のグラフを用いる。summary plot の概要を図-7 に示す. 横軸を SHAP 値, 縦軸はパラメータ名であり, 横軸の広がりが大きい順に並べられている. 全ケースについて, 各パラメータの SHAP 値をプロットしており, 横軸の広がりが大きいパラメータほど, 探索範囲内で解析結果への影響が大きいことを示している.

図-8 には, dependency plot の例を示す. 縦軸は SHAP 値, 横軸は各水準名である. 縦軸の SHAP 値は前述の通り, 目的変数を足し算に分解したものである. 図の例は, 目的変数は 1 層最大層間変形量, 因子は 1 層の内壁である. 構造用合板が最も SHAP 値が小さいため, 応答値が小さく, 耐震性能に優れると言える. 耐震性能, 環境負荷, 材積についても, 各水準で小さい値であるほど, 良い性能と言える. その他の分析結果については, 次章にて詳述する.

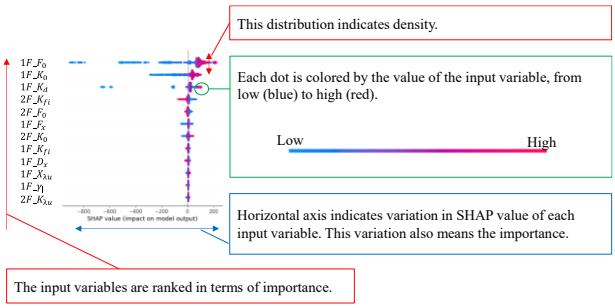


図-7 SHAP summary plot 概要 [5]

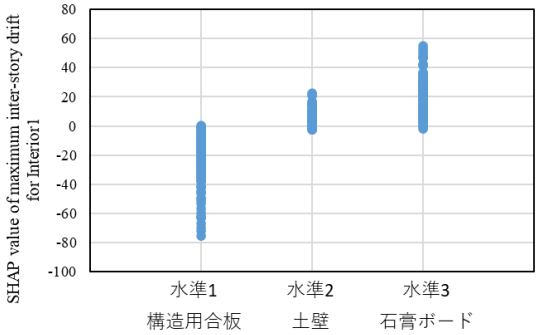


図-8 SHAP dependency plot の例

4. 分析結果と考察

wallstat を用いて実施した時刻歴応答解析, 設計建物の柱・梁の材積および製造段階における二酸化炭素排出量について, SHAP を活用してパラメータ分析を行った。これにより, 各設計変数が耐震性能, 材積, 環境負荷に与える寄与を定量的に評価し, 複数の目的間に存在するトレードオフ関係を明らかにする。

(1) 耐震性能

時刻歴応答解析の結果について, 各層および各方向の最大層間変形量を目的変数として SHAP により分析を行った。図-9 に, 1 層の最大層間変形量を目的変数とした場合の summary plot を示す。最も影響度が大きい因子は TYPE（地震動）であり, これは地震動ごとに周期特性や波形特性が異なることに起因する。AMP（地震動倍率）の影響度も大きく, 倍率が増加すれば建物の応答も増大することは自明である。

次に, 各仕様に対する影響度を詳細に確認するため, dependency plot を分析する。図-10 に 2 階床仕様 Floor1 の dependency plot を示す。図-6 に示した骨格曲線の性能傾向と一致しており, 性能の低い板壁を採用した場合, SHAP 値が大きくなり, 応答が顕著に増加することが確認できた。図-11 には Interior1（1 階内壁）の dependency plot を示す。最も性能の高い構造用合板の SHAP 値は小さく, 応答も小さい結果となった。さらに, 図-12 に Bbeam1 の dependency plot を示す。梁せいが大きくなるほど耐震性能は向上することが定量的に確認された。

(2) 環境負荷

製造時の二酸化炭素排出量について，SHAP によって分析を行った．なお，製造時の二酸化炭素排出量は，内壁や外壁の面積，材積等を元に算定しており，手計算から分解可能である．施工時の二酸化炭素排出量も考慮することで，SHAP の有効性は高まると期待されるが，本論では簡易のため，製造時のみ対象としている点に注意されたい．

図-13 に summary plot を示す。最も影響の大きい因子は柱幅および柱高さであり，次いで 1 階層の内壁や床が続く結果となった。図-14 には Column2（柱断面）の dependency plot を示す。断面が大きくなるほど環境負荷が増加することは予測されるが，本解析により定量的に確認された。前節の耐震性能分析（図-9 参照）においては，Column2 が耐震性能に与える影響は小さいことが示されているため，環境負荷低減を優先する観点から断面は小さく抑えることが合理的であると考えられる。

次に，Interior1 の dependency plot を図-15 に示す。土壁の SHAP 値が最も小さく，環境負荷が低いことが確認できた。前節で示した耐震性能（図-11 参照）においては，石膏ボードよりも土壁を採用した場合の応答値が比較的小さかったことから，耐震性能および環境負荷の両観点を考慮すると，土壁の採用が望ましいと判断できる。ただし，本解析では製造段階の CO_2排出量のみを対象としているため，左官工事時の CO_2排出量を含めた場合には結果が変わる可能性がある点に注意が必要である。

さらに，Floor1 の dependency plot を図-16 に示す。板壁を採用した場合，環境負荷は最も低くなることが確認できる。しかし，前節の時刻歴応答解析の SHAP 分析結果において，板壁は最も性能が低く応答が顕著に大きくなることが示されており，耐震性能確保の観点から板壁の採用は困難であると考えられる。

(3) 柱・梁の材積

柱・梁の材積についても，SHAP を用いた分析を実施した。製造段階の二酸化炭素排出量と同様に，材積は手計算により各設計変数への寄与を分解可能であるが，本研究では簡易化のため柱・梁の材積のみを対象として計算した点に注意されたい。

図-17 に summary plot を示す．柱・梁の材積を計算しているため，柱・梁を除いたパラメータはゼロとなっている．最も影響度の高いのは Column2(2 階の柱幅及び高さ)である．それぞれの影響度は設計建物の各層の柱量にも依存するが，SHAP によって自動的に分析可能であることは確認できた．図-18 に Column2 の dependency plot を示す。解析結果から，柱幅および柱高さが大きくなるほど材積も増加することが定量的に確認でき，設計変数の選択が材積に与える影響を明確に把握できることが示された。

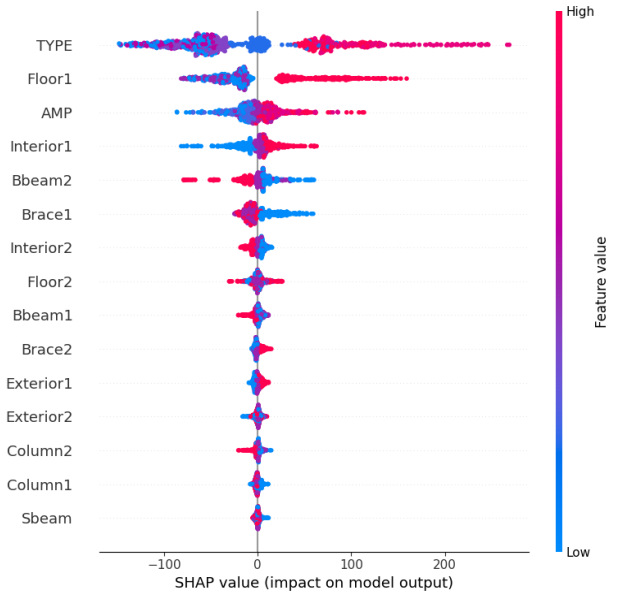


図-9 SHAP summary plot（1 層 X 方向最大層間変形量）

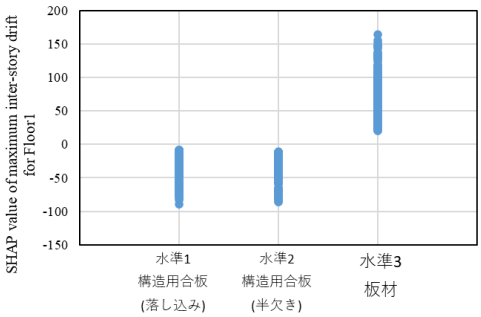


図-10 SHAP dependency plot of Floor1
(1 層 X 方向最大層間変形量)

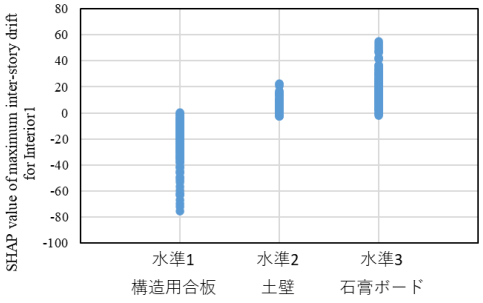


図-11 SHAP dependency plot of Interior1
(1 層 X 方向最大層間変形量)

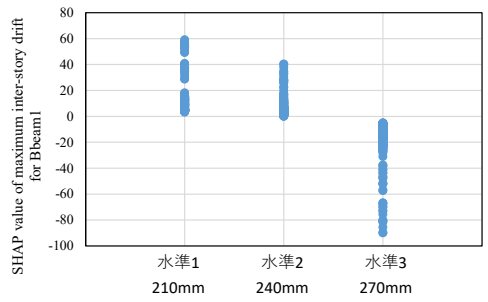


図-12 SHAP dependency plot of Bbeam1
(1 層 X 方向最大層間変形量)

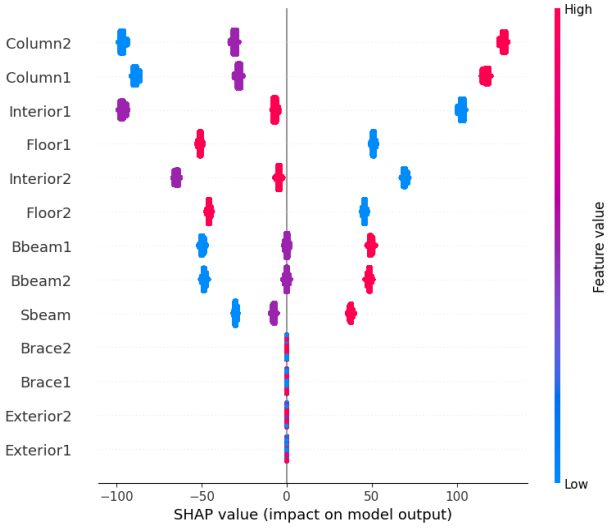


図-13 SHAP summary plot (二酸化炭素排出量 kg-CO_2)

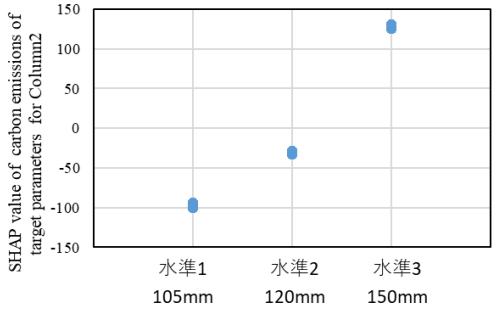


図-14 SHAP dependency plot of Column2
(二酸化炭素排出量 kg-CO_2)

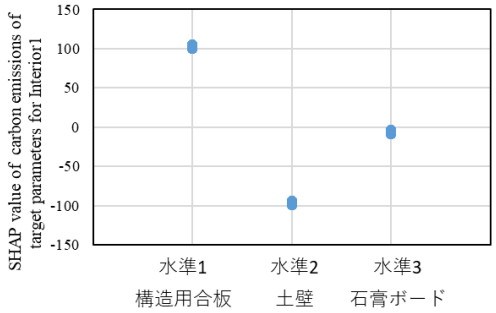


図-15 SHAP dependency plot of Interior1
(二酸化炭素排出量 kg-CO_2)

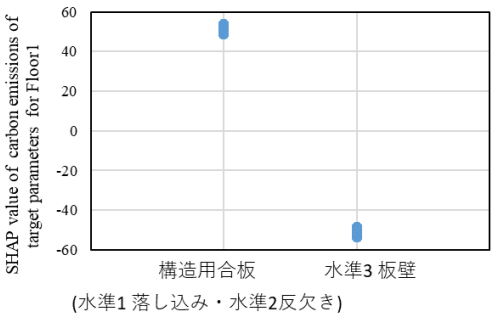


図-16 SHAP dependency plot of Floor1
(二酸化炭素排出量 kg-CO_2)

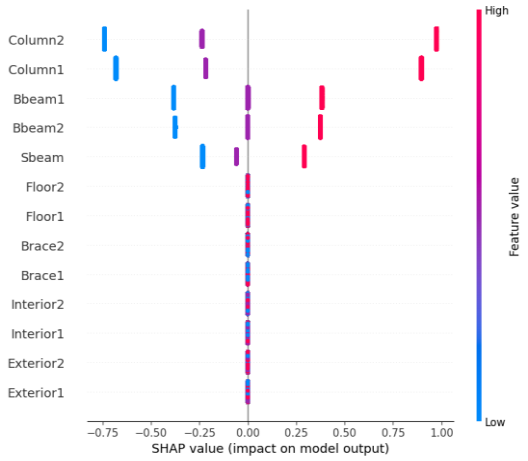


図-17 SHAP summary plot (材積 m^2)

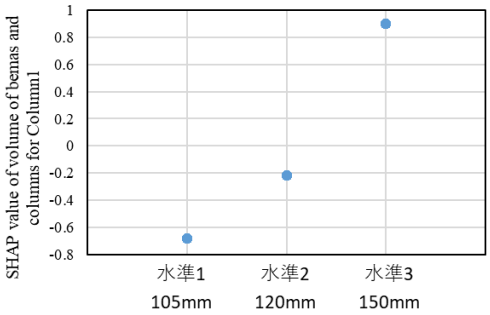


図-18 SHAP dependency plot of Column2
(材積 m^2)

(4) 多目的最適化設計と考察

図-17 より，Column2 が材積に対して最も大きな寄与を持つ因子であることが確認された。柱幅（断面寸法）が小さくなるほど材料体積およびそれに起因する環境負荷（製造時 CO_2排出量）は低下する(図-18)。一方，耐震性能は一般に柱断面が大きいほど改善されるが，図-9 の SHAP 値の大きさを比較すると，Column2 の耐震性能への寄与は非常に小さいことが示されている。したがって，現行の評価範囲内では断面の小さい 105 mm の選択が，材積と環境負荷の削減を優先する観点から合理的であると考えられる。

図-9 より，内壁仕様は耐震性能に対して大きな影響を与える因子であり，最も耐震性能を高めるのは構造用合板であることが示された。図-11 より，土壁および石膏ボードはこれに続く結果であった。一方，図-15 の結果は環境負荷に関して土壁が最も低い値を示している。したがって，Interior1 の選択は明確なトレードオフを伴う．設計者は以下の選択肢が考えられる．

・耐震性を最優先する場合：構造用合板を選択することで剛性・耐力が高まり，地震応答の低減が期待できる．

・環境負荷を最優先する場合：土壁を選択することでCO_2排出量を低減できる．構造用合板ほど高い耐震性能を要求しない設計条件であれば，土壁を採用することで環境負荷を抑制できる．

以上に示した事例は一例にすぎないが，本研究で提案する解釈可能 AI を用いた影響度分析に基づき，設計者は各目的に応じた合理的な判断を迅速に行うことが可能となる．また，以上の結果を設計運用に落とし込むため，次の手順が考えられる．

1. 性能閾値の設定：設計建物に耐震性能（最大層間変形量等）の最低要件を定める。
2. SHAP による因子ランク付け：各目的変数（耐震性能・環境負荷・材積）ごとに SHAP 値の絶対値で因子をランク付けし，影響の大きい因子を特定する．
3. 候補絞り込み：性能閾値を満たす候補群の中で，環境負荷・材積が最小となる設計案を選定する．
4. 追加解析：選定案に対して，追加の数値解析を行い，安全性を最終確認する．

この手順を取り入れることで，SHAP に基づく可視化が設計者の直感的理解を補強し，意思決定の効率化が期待される．

5. まとめ

本研究では，2 階建て木造住宅を対象に，耐震性能，環境負荷（製造時二酸化炭素排出量），および材積を目的変数とし，解釈可能 AI による多目的最適化手法を適用し，有効性を検証した．wallstat による時刻歴応答解析を基に，各設計変数の組み合わせに対する耐震性能を定量化し，製造段階の二酸化炭素排出量および柱・梁の材積も算定した．これらのデータを解釈可能 AI（SHAP）により分析することで，各設計変数が複数の目的変数に与える寄与度を定量的に評価した．分析の結果，設計変数としての内壁仕様，床仕様等が地震時応答に寄与することが明らかとなった．結果を統合的に評価することで，耐震性能と環境負荷，材積との間に存在するトレードオフ関係が可視化され，設計者は目的に応じた合理的な意思決定を迅速に行うことが可能となる．

今後の課題としては，製造段階に加え施工時や維持管理段階の CO_2排出量も考慮したライフサイクル全体での評価や，より詳細な建物仕様（外装材・仕上げ材など）を含めた最適化の適用が挙げられる。

謝辞：本研究は科研費（25K23510）の助成を受けたものである．

参考文献

1) 国土交通省（参照 2025/9/28） https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/content/001858662.pdf
2) WIN LEI SHWE YEE，五十田博，中川貴文，篠原昌寿：日本の木造建築の工法別での建設時に発生する二酸化炭素排出量に関する分析，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.2343-2344，2025.
3) 井下宙，山邊友一郎：接合部特性を考慮した木造建築物の多目的最適化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.207-208，2024.
4) 難波宗功：木造建築における人工知能活用の現状と課題，AI・データサイエンス論文集，［印刷中］，2025.
5) 難波宗功，中川貴文，角有司，五十田博，瀧野敦夫：品質工学と解釈可能 AI を用いた木造住宅振動台実験のパラメータ同定，日本計算工学会論文集 2024 巻，No.2024008，2024. (DOI: https://doi.org/10.11421/jsces.2024.20240008)
6) Malaga-Chuquitaype, E. J. C., and Chawgien, K.: Interpretable machine learning models for the estimation of seismic drifts in CLT buildings, Journal of Building Engineering, 70 (2023), 106365, 2023.
7) 中川貴文：大地震動時における木造軸組構法住宅の倒壊解析手法の開発，建築研究資料，第 128 号（2010），2011.
8) Lundberg, S. M., and Lee, S.-I.: A unified approach to interpreting model predictions, Adv. Neural Inf. Process. Syst. pp.1-30, 2017.
9) JAXA: "JIANT", (https://www.jss.jaxa.jp/)，（参照 2025/9/29)
10) 日本建築学会編：建物の LCA 指針―温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール―改定版, 2024
11) 竹中徹，石川恒夫，三田村輝章，大井明弘：内装材としての土壁のライフサイクル評価 現代版「土壁の家」づくりのための基礎的研究，2013 年度日本建築学会関東支部優秀研究報告集，pp.133-136，2014
12) Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., Ye Q., Liu T. Y.: LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree, 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, CA, USA., pp.3149-3157, 2017.
13) "SHAP", (https://github.com/shap/shap)，（参照 2025/9/28)

氾濫シナリオ別水害ハザード指標分布を用いた地域の脆弱性評価に関する研究

大野純暉 [1]

[1] 国土技術政策総合研究所　河川研究部　水害研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭 1）

水害ハザード特性を地域住民にも理解されやすい情報を提示し，洪水被害の軽減，防止対策の検討を各地域で加速させていく必要がある.しかし，既存の洪水浸水想定区域図等のハザード情報からでは,対象地域がどの氾濫シナリオで危険となるか，またそのシナリオ時に水がどこから,どのような勢いでやってくるかといった情報等を読み取ることが出来ず,具体的な被害イメージを想定するためにはなお一層の工夫が求められている.本研究では氾濫シナリオ別に人的・物的被害に影響するハザード指標と土地利用状況（暴露情報）を重ねて，その特徴毎に小エリアに分割して,考察することで，地域の脆弱性が見いだせる可能性があることを示した.

キーワード　流域治水，氾濫シナリオ，水害ハザード指標，脆弱性評価

1. 研究背景

気候変動の影響による豪雨の頻発化・激甚化により全国で水害による被害が多発している中で，流域治水が全国各地で実践され，減災対策の検討が実施されつつあるが[1]，更なる対策の加速化のためには現況の水害ハザード特性に基づく減災対策の検討及びその効果の定量化が不可欠となる.

現況ハザード分布を把握する手段として，洪水浸水想定区域図等が挙げられ，これは一般に公開されているハザード情報として利用価値の高いものと認識されている[2][3]．洪水浸水想定区域図は，洪水時の円滑かつ迅速な避難を確保し，又は浸水を防止することにより，水災による被害の軽減を図ることを目的に作成されている．洪水浸水想定区域図は，想定した各降雨規模時において，様々考えられる決壊点で決壊させた時の氾濫解析結果を包括するように作成しているため，浸水深や浸水範囲はある想定した降雨・氾濫条件時の浸水解析結果よりも過大に評価しているが，水害時の迅速な避難に関するリスク情報として活用する目的においては，妥当な資料であることが推察されている[4].

一方で，浸水の防止や被害の軽減を目的に，減災対策メニューやその優先度を検討する上では，やや不十分でとの指摘もある[4][5]．つまり，公開されている既存のハザード情報を減災対策メニューやその優先度を検討する上で活用する際には，その地域において，水がどこから，

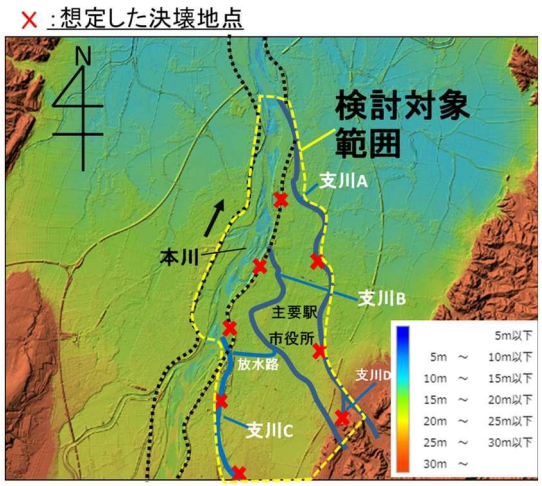


図-1　モデル流域における地盤高コンター図と想定した破堤点

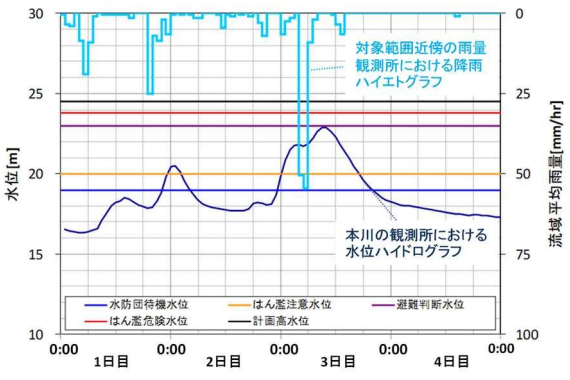


図-2　対象とした降雨波形と本川の観測所における水位ハイドログラフ

どのような勢いで流れてくることが，その地域にとって良くないシナリオなのかをまず把握した上で，減災対策案の抽出やその優先度を考え，その効果を定量化・可視化を行うことが重要である[6),7)]．さらに，浸水被害の軽減のための対策検討に関しては，これまでの知見等の蓄積がある学識者や河川管理者等らによる技術的支援を行い，関係自治体，地域住民らが対話をしていくことが，流域治水の深化につながるものと考えられる[7)]．

従って，本研究では流域治水の加速化やそれを行うための地域間の合意形成に向けた分かりやすい基盤情報を提供することを目的として，まず地域で想定しうる氾濫シナリオ毎に人的・物的被害に影響する各種ハザード指標の分布を算出し，被害イメージと関連付けることを検討した．

2. 検討対象地域・対象降雨の設定とその特徴

本研究では，**図-1**に示すように，1つの氾濫ブロック程度の大きさを有する地域（約18.8km^2）を検討対象とした（以下，モデル流域）．氾濫形態は拡散型である．モデル流域は，本川の中流部右岸に位置しており，本川は川幅を500m程度有する大河川である．支川A，Bの上流域には森林や農地が広がっている．またモデル流域は，北側は支川Aの左岸堤防，南側は支川Cの右岸堤防，東側は山地，西側は本川左岸の堤防で囲まれており，その中央部には主要駅や生活の基盤となる重要施設が位置している．

対象とする降雨波形は対象地域で記録的大雨とする（**図-2**）．降雨分布の特徴としては，モデル流域よりも少し上流側を中心として降雨がみられ，本川水位だけでなく支川の水位も高い状態となった，本川・支川集中型の分布となっている．

3. 現況ハザード分析のための計算方法

本研究では本川・支川，下水道からの氾濫及びその水のやりとりを考慮した内外水一体型の計算を行った．作成した解析モデルの再現性については，複数の実績洪水で検証を行っており，その解析結果の妥当性を確認している．なお，本論文中における氾濫シナリオとは，降雨強度・分布や，破堤地点の選び方によって変化する氾濫形態を意図しているが，本研究では決壊地点の選び方のみを変化させて検討を行った．決壊箇所については，**図-1**に示すように，本川・支川の上流側，下流側に設定し，対象地域において様々考えられる氾濫パターンを網羅できるよう設定した．決壊開始水位は計画高水位とした．

対象エリア内の下水道網については,詳細なモデル化はせずに，排水を表現した．具体的には，当該モデル地域における下水道排水区を基に，排水ブロックを設け，ブロック内における排水施設による雨水排水量を調べた．さらに，ブロック内に属する計算メッシュにおける平均排水量を評価し，分布型の流出氾濫解析で計算される水のボリュームから差し引く形で評価した．また，排水機場等の施設に関しては，解析で得られる河川の外水位と内水位を比較し，その状況に合わせて，排水を計算上で表現した．

4. 氾濫シナリオ別水害ハザード指標分布の算出と考察

（1）解析結果

本研究ではハザード指標として，各氾濫シナリオ別の最大浸水深，最大流速，浸水位上昇速度について考察を行った．浸水位上昇速度は，浸水開始から浸水深 0.3m に達するまでの時間で評価した.その理由は，浸水深や流速は家屋や施設の被害に大きく影響し[例えば 2)]，浸水位上昇速度や流速は避難行動の意思決定や避難途上の被災に大きく影響することが知られているため[8)]，3 つのハザード指標を設定した．本論文では紙面の都合上，本川の上流側・下流側，支川Aで決壊，支川Cで決壊，決壊なし（越流のみ）の条件下における解析結果を**図-3** に示し，考察する．

まず（a）～(f）に示すように，本川が決壊した場合は，浸水深は決壊地点によらず，水深 1.0m 以上となる大浸水深エリアが多く存在している．また，（a），(d)を比較すると，上流側で決壊した場合の方が下流側で決壊した場合よりも，床上浸水となり得る浸水深 0.5m 以上となる範囲が広がり，その影響が主要駅や市役所等が立地するエリアまで及んでいることが分かる．また（c），（f）より，浸水位上昇速度も最大浸水深の分布と同様な分布となっており，1時間以内に浸水深0.3mに達するエリアが多く存在している．一方（b），(e）より，最大流速は浸水深の結果と同様に上流側で決壊した方が，流速 0.5m/s と支川A以上となる範囲が大きくなるが，下流側で破堤した場合，流速 0.5m/s 以上となる範囲は小さくなっていることが分かる．また本川からの決壊シナリオによる解析結果より，支川 A，B と本川の合流点付近(**図-4** で示すエリア A に該当)の範囲において，本川からの氾濫シナリオによらず，全ハザード指標の値が大きくなっており，相対的に人的・物的被害が生じやすいエリアであることが分かる．

(g)～(l)は支川が決壊した場合における最大浸水深・最大流速・浸水位上昇速度を示す．支川が決壊した

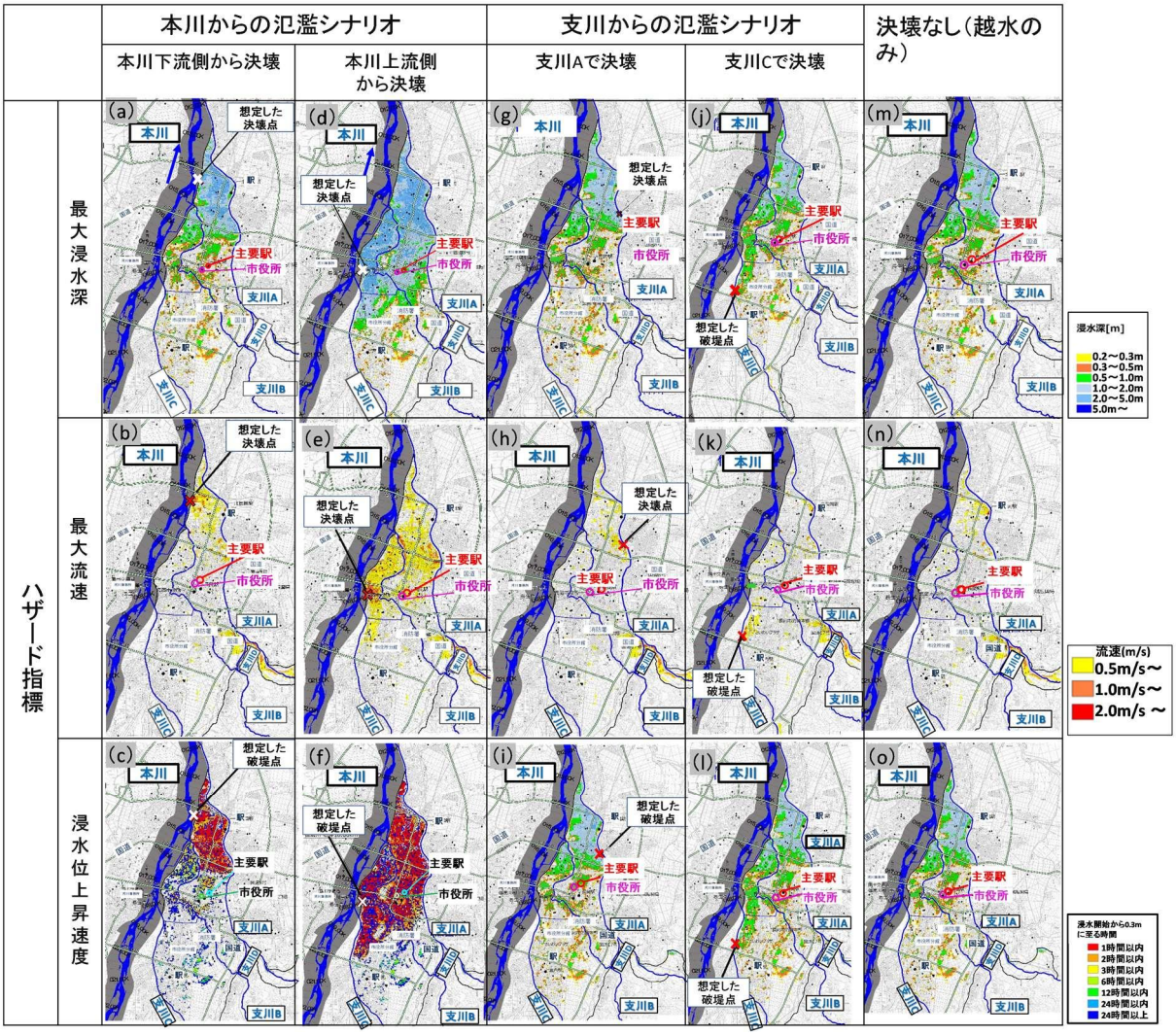


図-3 氾濫シナリオ別ハザード分布図 [10)]

場合，駅や市役所が立地するエリアは，浸水は発生してしまうが，支川からの全氾濫シナリオにおいて浸水深や流速，浸水位上昇速度は小さい．また,(m)～(o) で示す決壊なしのシナリオと，(g)～(l) に示す支川で決壊したシナリオにおける結果を見比べると，全ハザード指標によるハザード値ともに，ほぼ同様な分布傾向にある．これは支川が本川よりも流量規模が小さいため，氾濫ボリュームや氾濫の影響範囲が小さいことにより違いが生じにくいためと考えられる．

また，本川が決壊するシナリオでみられた人的・物的被害が生じやすいエリアについて，支川 A，C が決壊した場合や，全河川で決壊しない場合についても同じエリアで水深 1.0m 以上となるエリアが存在していることが分かる．これは，地盤高が図面上部方向へ向かって低くなっていること，本川の右岸堤防と支川Aの左岸堤防との間に挟まれ，水が集まりやすく，かつ排水もされにくいことで生じているものと考えられる．

（2） 解析結果と地域の土地利用分布を踏まえたハザード特性分析と被害イメージへの翻訳

1）で考察したハザード特性と暴露情報である土地利用分布を比較し，対象地域を図-4に示すように，４つの小エリアに分割を行った．分割にあたっては，いずれのシナリオにおいても浸水する地域，地域拠点の機能低下に大きく影響する地域，田んぼや農地が広がる地域については，分割するようにした．以下は，分割されたエリアごとにハザードと土地利用分布の特徴を整理したものである．

・エリアA：宅地等の建物が立ち並んでいるエリア．想定した全シナリオにおいて，水深が1.0m以上となり，本川で決壊した場合は，決壊箇所によらず安全な避難が困難となる．

・エリア B：主要駅や市役所等を有する地域の中枢を担っているエリア．本川上流側で決壊した場合，浸水深が大きくなり安全な避難が困難となる．

・エリア C：宅地等の建物が立ち並んでいるエリア．本

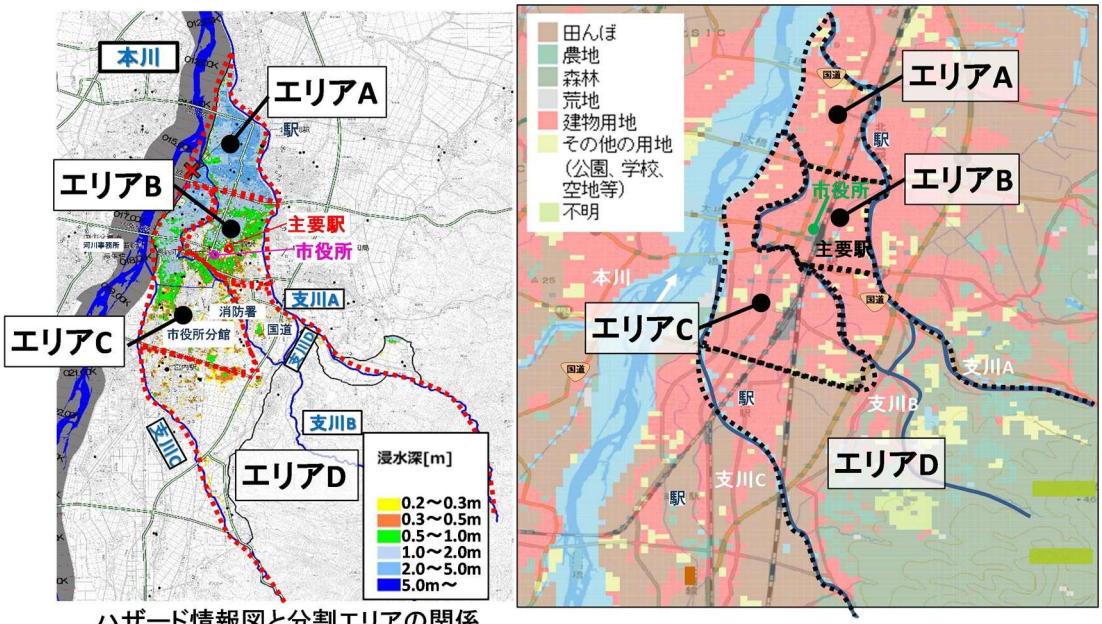


図-4 ハザード分布と土地利用分布を考慮したエリア分割図 [10)]

川上流側で決壊した場合，安全な避難が困難となる．

・エリアD：上流域は農地や森林が多く占める．想定した全シナリオでは目立った影響はない．

また**表-1** は各種ハザード分布から，どの氾濫シナリオ時に，人的・物的被害が生じうるかをエリアごとに記載したものである．既存の洪水浸水想定図の作成手法で図化した場合は，今回想定したシナリオの最大包絡となるため，エリアA～Cは浸水深が大きく，浸水継続時間も大きいといった結果となる．一方で，本研究によって小エリア毎にかつ各種ハザード指標別に，氾濫シナリオ別のハザード分布を人的・物的被害がイメージされやすいように詳細に整理を行うことで，ある１つの氾濫ブロック程度の大きさを持つ地域内においても，相対的に脆弱性の程度が異なることが把握できた．さらに対象地域に対して，注意すべき氾濫シナリオが明らかとなり，どこから流れてくる水に対して対策を講じるべきかが把握できた．

しかし，本研究では解析結果として得られるハザード指標の大きさと人的・物的被害の関係を定量的に結びつけることができておらず，被害の大きさの具体性に欠けている点については，今後の課題である．

（３）分析結果を踏まえて減災対策を検討する際の考え方の例示

上記の分析結果を踏まえた減災対策の検討方法としては，例えば以下のことが想定される．分析結果より，本川上流側で決壊した場合は，エリアA，B，Cで大きな被害となりうる可能性が高く，特に対象地域内でエリアBは地域の中枢を担うエリアであることから，例えば，本川上流側で決壊した場合におけるエリアBへの被害軽減に効果のある減災対策を行うことを考えることとする．この場合，エリアBへ流入する水量を減らす（例：本川上流域で田んぼダムを導入する等），またはエリアBから流出させる水量を増やす（例：堤内地内にある排水施設の新設または増強する等）ことで，エリアBの被害が軽減できると想定されるため，これらを満たす減災対策を検討することが考えられる．一方で，エリアBへ流入する水量を減らす，またはエリアBから流出させる水量を増やすことは，周辺のエリアへの氾濫水量を増やすことにつながる可能性もある．したがって，減災対策前後における各水害ハザード指標分布の変化を定量化・可視化し，地域が受け容れられる利益相反に鑑みて流域治水対策を行っていくことが重要であると考える．

５．まとめと今後の展望

（１） 本論文の結論

本研究では，流域治水を推進するために，現況ハザードを**表-1** に示すような形で，被害イメージと関連付けられるような考察を行った．その上で，現況ハザード分布と土地利用分布の特徴から，対象域をエリア分割し，小エリア単位ごとに整理を行うと，水害に対する地域の脆弱性の相対的な違いが把握できた．このことは，既存の洪水浸水想定図では読み解くことができない情報であり，地域における減災対策を考えていく上で重要である．

表-1 ハザード分布と土地利用分布から読み解ける小エリア毎の被害イメージにつながる情報[10)]
（既存の浸水想定区域図から読み解ける情報との対比）

	洪水浸水想定区域図	氾濫シナリオ別ハザード分布と土地利用分布から読み取れること		
	最大浸水深、浸水継続時間（包絡値）	最大浸水深	最大流速	浸水位上昇速度：V_{h_s}
エリアA（市街地）	浸水深は大きく、浸水継続時間も長い。	・ほぼ全ての範囲で1m以上 ・本川、支川の氾濫シナリオによらず ⇒氾濫シナリオによらず、家屋や事業所の、浸水深に依存する物的被害が大きくなりやすい	・本川氾濫：シナリオによらず高流速となる範囲が広い。 ・支川氾濫：シナリオによらず高流速となる範囲が限定。 ⇒本川からの氾濫シナリオでは家屋被害が大きくなりやすく、避難途上の被災可能性が相対的に高い	・本川氾濫：シナリオによらずほぼ全域でV_{h_s}が大きくなる。 ・支川氾濫：決壊地点近傍のみV_{h_s}が大きくなるが、その他の場所ではV_{h_s}は小さくなる。 ⇒本川から氾濫した場合は、ほぼ全域で逃げることが困難
エリアB（主要駅、市役所、市街地）	浸水深は大きく、浸水継続時間も長い。	・本川上流側からの氾濫シナリオでのみ、ほぼ全ての範囲で大浸水深。 ・本川下流側からの氾濫シナリオ、支川からの氾濫シナリオでは小さい浸水深。範囲も一部に限定。 ⇒本川上流側から氾濫すれば、主要駅や市役所の機能停止による経済活動への影響長期化が懸念。	・本川上流側からの氾濫シナリオでのみ、広い範囲で高流速となる。 ・本川下流側からの氾濫シナリオ、支川からの氾濫シナリオでは多くの範囲で高流速が発生しない。 ⇒本川上流側から氾濫すれば、家屋被害が大きくなりやすく、また、避難途上の被災可能性が相対的に高い範囲が大きくなる。	・本川上流側からの氾濫シナリオでのみ広い範囲でV_{h_s}が大きくなる。 ・本川下流側からの氾濫シナリオ、支川からの氾濫シナリオではV_{h_s}が小さくなる。 ⇒本川上流側から氾濫すれば相対的に氾濫から逃げにくくなる。
エリアC（市街地）	浸水深は大きく、浸水継続時間も長い。	・本川上流側からの氾濫シナリオでは、多くの範囲で大浸水深となる。 ・隣接する支川からの氾濫シナリオでは、決壊地点近傍で0.5～1m。 ⇒本川上流側、隣接する支川からの氾濫により、家屋や事業所の、浸水深に依存する物的被害が大きくなりやすい。	・本川上流側からの氾濫シナリオで、広い範囲で高流速となる。 ・隣接する支川からの氾濫シナリオで、決壊地点近傍で高流速。 ⇒本川上流側、隣接する支川からの氾濫により、家屋被害が大きくなりやすく、また、避難途上の被災可能性が相対的に高い範囲が大きくなる。	・本川上流側からの氾濫シナリオでは、広い範囲でV_{h_s}が大きい。 ・隣接する支川からの氾濫シナリオ時に、決壊地点近傍でV_{h_s}が大きい ・その他の氾濫シナリオではV_{h_s}が小さい。 ⇒本川上流側、隣接する支川からの氾濫シナリオでのみ、相対的に氾濫から逃げにくくなる。

（２） 本研究を踏まえた今後の展望

本成果の全国の流域への適用に向けては，本研究で用いた計算手法は，現在全国各地で作成されている内外水統合型の水害リスクマップを作成する際の計算手法とほぼ同じ手法である．従って，その図面を作成する際の元となっている計算結果の時系列データを整理することで，新たに解析モデルの構築やその計算をしなくとも，容易に本研究と同様な検討を全国の流域で実施できる可能性がある．さらに内外水統合型の水害リスクマップは，想定される様々な氾濫シナリオのもと作成されているため，種々の降雨強度・分布，決壊地点の選び方による氾濫形態の違いを考慮した地域の脆弱性評価の検討が可能と考えられる．今後は，複数の流域を対象に，内外水統合型の水害リスクマップの計算結果群を整理することで，本研究で得られたと同様な結果が得られるかどうか確認するとともに，その具体的な検討方法等について，手引きの作成を進めていく予定である．

本研究では，地域で生じる蓋然性の高い氾濫シナリオの設定について，降雨強度・分布や，決壊地点の選び方によって生じる氾濫形態の違いであると定義したが，1つの降雨波形で検討を行った．今後は，地域として受け容れられる，または受け容れられない被害事象について地域との対話を通じて共有し，その事象が生じるハザード閾値と現況ハザード分布の関係から，減災対策やその優先順位について各地域で議論されるべきである．

参考文献

1) 国土交通省水管理・国土保全局：令和7年度水管理・国土保全局関係予算概算，令和7年1月．
2) 国土交通省河川環境課水防企画室，国土技術政策総合研究所河川研究部水害研究室：洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第４版），平成27年7月．
3) 国土交通省河川環境課水防企画室，国土技術政策総合研究所河川研究部水害研究室：多段階の浸水想定図及び水害リスクマップの検討・作成に関するガイドライン，令和5年1月．
4) 中野卓，木内望：水害リスクを踏まえた都市づくりにおける洪水浸水想定区域の活用可能性と課題，都市計画論文集，pp. 888-895，2020.
5) 原田守啓，小泉公一：氾濫ブロック毎の想定破堤点に着目した氾濫解析結果の分析，河川技術論文集，第30巻，pp. 405-410，2024.
6) 井上清敬，武内慶了，山本哲也：流域における減災対策の現場適用に向けた水害ハザード特性の評価手法の試案，河川技術論文集，第29巻，pp. 395-400，2023.
7) 板垣修： 流域治水の推進に必要な合意形成のための減災対

策による被害軽減効果の評価手法の研究，政策研究大学院大学博士論文，2021.
8) 武内慶了，山田朋人，山田正：洪水時の非避難行動及び周囲の変状が累積避難 開始人数分布に与える影響の動力学的考察, 河川技術論文集，第30巻，pp. 477-482，2024.
9) 国土交通省水管理・国土保全局：流域総合水管理のあり方評価手法検討小委員会（第１回）配付資料，令和7年2月.
10) 大野純暉，湯浅亮，武内慶了：氾濫シナリオ別水害ハザード指標分布を用いた現況ハザード分析による地域の脆弱性評価手法, 河川技術論文集，第31巻，pp. 445-450，2025.

無信号横断歩道における歩行者及び車両の挙動分析と対策の方向性

三嶌　晃平[1]・梶原　一慶[1]・宗光　太助[1]

[1]四国地方整備局　道路部　道路計画課　（〒760-8554 香川県高松市サンポート3-33）

四国管内の直轄国道には多くの無信号横断歩道が設置されており，歩行者との死傷事故も発生している．本稿では，直轄国道の無信号横断歩道における，歩行者及び車両の挙動，一時停止割合が高い横断歩道の特徴について分析を行うとともに対策の方向性について検討を行った．

キーワード　歩行者事故対策，人流データ，画像解析，一時停止率が高い横断歩道

1. はじめに

警察庁の統計によると令和6年における道路交通法違反で取り締まったもののうち，最も多かったのは，「一時不停止」で，約118万件あり全体の28%を占めている状況である．このデータは，「とまれ」指示のある交差点における一時停止や「踏切」における一時停止なども含まれているが，一時不停止が最も多い交通違反であることは事実である．この中で，無信号横断歩道における一時不停止は，歩行者事故に直結し，その結果，重傷・死亡事故といった重大事故につながるものである．そのため，道路交通法第38条第1項では「車両等は，（中略）横断歩道等によりその進路の前方を横断し，または横断しようとする歩行者等があるときは，当該横断歩道の直前で一時停止し，かつ，その通行を妨げないようにしなければならない」と定められている．しかしながら，前述したように依然として違反件数が多い状況であることから，道路交通法が改正され，2026年9月から一般道路のうち速度規制がかかっておらず，中央線などがない生活道路においては，法定速度が30km/hに引き下げられることになっている．一方で，直轄国道等の主要幹線では，求められるサービス速度の観点などから法定速度は現状維持される．そうした中で，本稿では，四国の直轄国道における無信号横断歩道に着目し，歩行者及び車両の挙動について調査及び分析を行い，対策の方向性について検討を行った．

2. 四国の直轄国道における無信号横断歩道の実態

(1) 無信号横断歩道の実態

まず始めに，四国管内の直轄国道がどれぐらい存在するのか，航空写真を基に調査を行った．その結果，実に570箇所も存在することが明らかとなった．内訳は，徳島県が80箇所（単路20箇所，交差点60箇所），香川県38箇所（単路11箇所，交差点27箇所），愛媛県262箇所（単路55箇所，交差点207箇所），高知県190箇所（単路56箇所，交差点134箇所）であり，市街地部より地方部（山間部等）に多い傾向となっている．



図-1 四国管内における無信号横断歩道箇所

(2) 事故発生状況

(1)で示した直轄国道における無信号横断歩道について，2019年～2022年の4年間で26件の歩行者死傷事故が発生している．さらに事故発生日時における車両平均旅行速度をETC2.0プローブデータで分析したところ，**図-2**に示すように重傷・死亡事故は，走行速度が30㎞/h以上で走行している割合が約7割となっており，走行速度と重傷・死亡事故との因果関係は高いと考えられる．

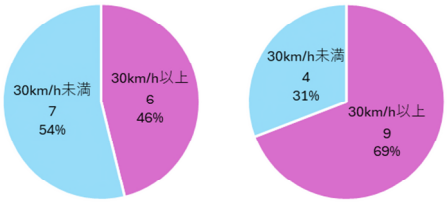


図-2 無信号横断歩道における歩行者事故発生時の車両速度割合（左：軽傷事故，右：重傷・死亡事故）

3. 実態調査

(1) 調査箇所の抽出

抽出された無信号横断歩道について詳細な分析を行うにあたり，全数を調査するには費用と時間が膨大になるため，調査箇所の抽出を行うこととした．まず，無信号横断歩道が四国4県で最も多い愛媛県を対象とした．また，交差点は，従道路の影響による挙動変化もあり，歩行者及び車両の挙動が複雑化するため，対象から外し，挙動が体系化しやすい単路を対象とすることにした．

さらに，愛媛県の単路55箇所ついて，各無信号横断歩道の横断ニーズを調査し，調査箇所の抽出を行った．具体的には，民間の携帯電話を元データにして作成された人流データを活用・解析し，愛媛県内の各無信号横断歩道を横断したと想定されるサンプルを抽出し，その数が多い上位箇所について，沿道状況や車両交通量などによる違いも加味して，最終的に5箇所抽出を行った．

(2) 調査の実施

調査は，**図-3**に示す場所において，2024年12月19日(木)及び20(金)，7時～19時の12時間でビデオカメラによる観測調査を行った．



図-3 ビデオカメラ調査箇所

4. 調査結果

(1) 横断者数及び横断者の特性分析

今回調査を行った5箇所について，12時間で16～33人の横断者が確認された．横断者の自転車・歩行者の内訳は，**図-4**に示す．すべての箇所において，自転車より歩行者による横断者が多い状況である．また，横断者が実際に観測されたことで，人流データの活用も確認できた．

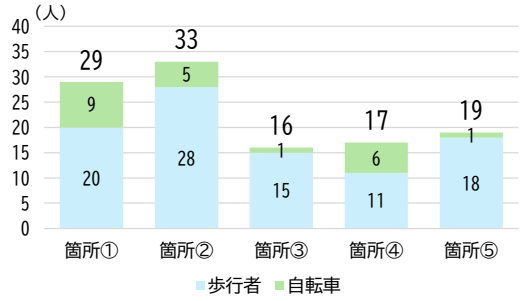


図-4 横断者数

横断者の属性について，ビデオ画像からの見た目で判断した結果，箇所②については，高齢者が多く，箇所①及び⑤は子供が多い状況である．特に⑤は，小学生の通学路となっていることがビデオ画像から確認できた．

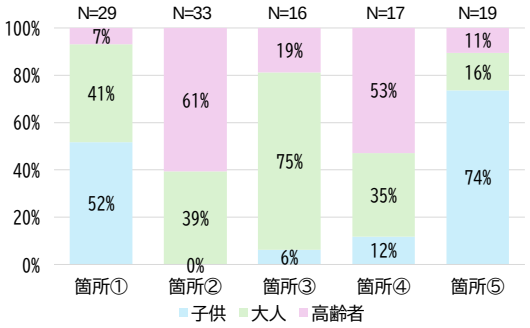


図-5 横断者の年齢層（見た目※）

※ビデオ画像から見た目で判断した年齢層（子供は18歳以下）

また，各箇所別に横断者が挙手行動をしているか確認を行った（**図-6**）．箇所⑤は，小学生の通学路となっているため保護者や安全パトロールの方による横断旗の使用及び小学生（低身長）自身の挙手行動により，ドライバーが気づきやすい状況（効果）となったことが要因と考えられる．また，箇所②については，高齢者が多いものの挙手率が他より高く，地域として挙手行動が根付いている可能性がある．

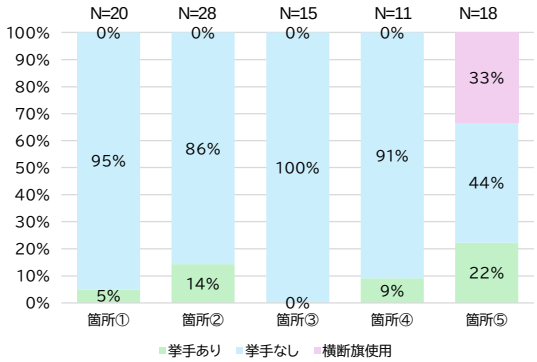


図-6 横断者の挙手状況

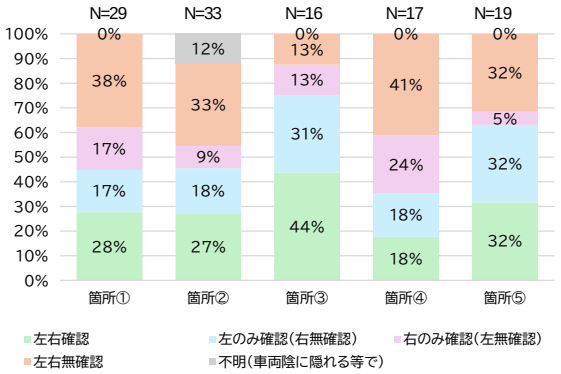


図-7 横断中における左右確認状況

また，横断にあたって，横断者が横断中に左右の確認を行っているか調査をしたところ，左右確認を行っているのは2～4割程度となっている（**図-7**）．特に左側が未確認又は左右未確認が半数近い箇所も存在している．道路の横断をする場合，まず，横断者の進行方向から見て右側から車両が来る車線を横断し，その後，進行方向から見て左側から車両が来る車線を横断するようになる．また，横断始めから中央線を跨ぐまで時間が経過するため，交通状況が変化している可能性も高く，横断中に左側確認を行わないことは一定のリスクが生じる．そのため，リスク低減のためには，車両が停止していない状況下での横断時に左側確認を促す施策が必要と考えられる．

(2) 車両挙動の特性分析

車両挙動の分析を行うにあたり，横断者がいる場合の車両の挙動を4つに分類を行った（**図-8**）．

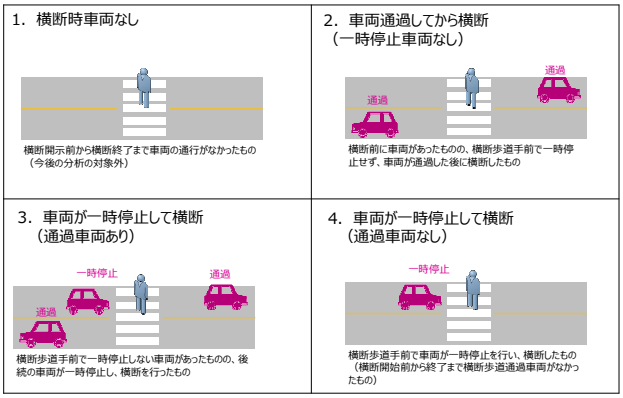


図-8 車両挙動の分類

1分類目は，横断時に車両の走行が全くなかったものである．これは，交通事故の発生リスクが低く，今回の分析の対象外とした．2分類目は，横断者がいるものの車両は一時停止を行わず，車両が通過後に横断を行ったものである．3分類目は，一時停止車両を行った車両があるものの，その前に通過車両が存在したものである．4分類目は，通過車両が全くなく，車両が一時停止を行い，横断者が安全に横断したもので，本来あるべきものである．これらの分類で各箇所について車両挙動分類を行ったところ**図-9**に示すとおりとなった．箇所によりかなり傾向が異なっており，箇所②については，一時停止率が高い状況と言える．一方，箇所⑤は通学路にもかかわらず，望ましい4分類目のパターンがない状況である．

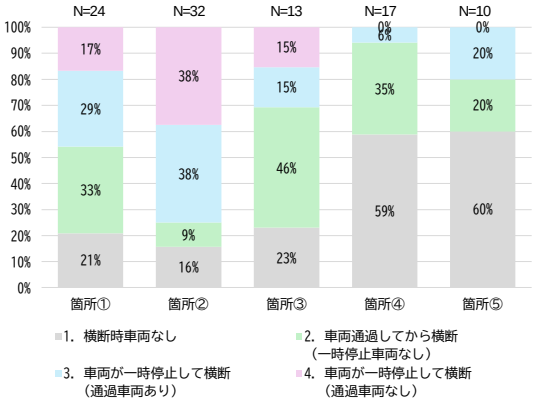


図-9 横断者がいる場合の車両挙動

また，①～⑤の箇所において，夜間の横断があったものは7事例あり，それについて分析したところ，**表-1**に示すとおり，6事例で車両通過後に横断，1事例に車両が一時停止したものの，通過車両もあったというものであった．これは，夜間は歩行者の存在に気づきにくい状況であることが要因と考えられる．そのため，夜間における歩行者の存在をドライバーに周知させる施策が有効と考えられる．

表-1 夜間における歩行者がいる場合の車両挙動

No.	箇所	車両挙動分類	夜間照明
1	①	2. 車両通過してから横断	街灯あり
2	①	2. 車両通過してから横断	街灯あり
3	①	2. 車両通過してから横断	街灯あり
4	①	2. 車両通過してから横断	街灯あり
5	②	2. 車両通過してから横断	街灯なし
6	②	3. 車両が一時停止して横断 （通過車両あり）	街灯なし
7	④	2. 車両通過してから横断	街灯なし

通過車両の特性について，歩行者の立ち位置（上り側・下り側）と車線別で分析を行った（**図-11**）．その結果，歩行者が上り側及び下り側のいずれも，車両の通過車両の割合は，手前側の車線で4割，奥（反対車線側）側の車線で6割という結果であった．これは，ドライバーから見て，走行車線側の歩道にいる歩行者より反対車線側の歩道にいる歩行者は，視野から外れやすいことに加え，対向車線側の車両等により死角になりやすく，結果として気づかずに通過してしまうことが考えられる（**図-10**）．そのため，反対車線側の歩行者の存在をドライバーに気づかせる対策が有効と考えられる．

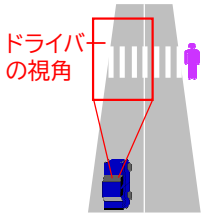


図-10 ドライバーからの視角

(3) 一時停止割合が高い箇所の特徴

先述したとおり箇所②について，他の箇所より一時停止率が高い状況であったが，その要因について各箇所の特徴を道路交通センサス箇所別基本表やETC2.0プローブデータ及びビデオ画像から確認できたことについて**表-2**に示すとおり整理を行った．その結果，一時停止率が高い箇所②は，「高齢者が多いにもかかわらず挙手率が高い」，「車両の走行速度が30km/hの割合が高く，60km/h以上走行車両がなく，止まりやすい走行環境」，「横断者の数が多く，ドライバーも横断者がいることを学習している」などの特徴が見受けられる．ただし，一時停止のしやすさは，道路のデザインや走行環境などにも影響を与えていると考えられるため，これらについては，今後さらに詳細分析を行っていく予定である．

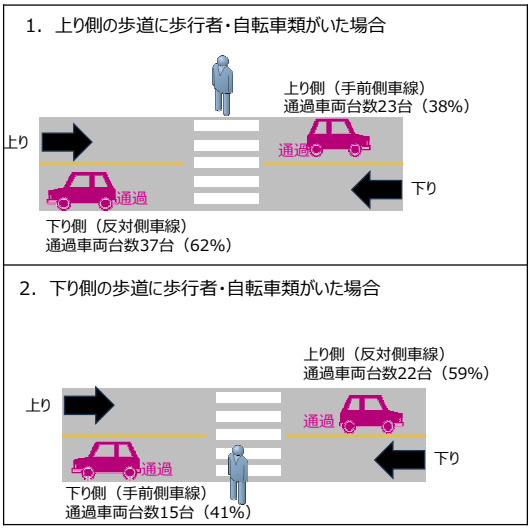


図-11 上り下り別の通過車両の割合

表-2　各調査箇所における特性

No.	国道路線番号	横断歩行者数	横断時挙手率 ※横断旗使用含む	横断者属性（年齢層※）※見た目	ETC2.0 平均速度	ETC2.0 ダイヤマークからの速度変化	ETC2.0 30km/h未満の車両割合	ETC2.0 60km/h以上の車両割合
①	56	29	5%	子供51% 大人42% 高齢者7%	上り 44km/h 下り 55km/h	上り +1km/h 下り -1km/h	上り 13% 下り 7%	上り 2% 下り 2%
②	56	33	14%	子供0% 大人39% 高齢者61%	上り 45km/h 下り 41km/h	上り +6km/h 下り -8km/h	上り 15% 下り 18%	上り 0% 下り 0%
③	56	16	0%	子供6% 大人75% 高齢者19%	上り 38km/h 下り 48km/h	上り -10km/h 下り -1km/h	上り 26% 下り 3%	上り 0% 下り 10%
④	56	17	9%	子供12% 大人35% 高齢者53%	上り 48km/h 下り 48km/h	上り -3km/h 下り -1km/h	上り 0% 下り 0%	上り 0% 下り 0%
⑤	56	19	55%	子供74% 大人16% 高齢者11%	上り 43km/h 下り 44km/h	上り -1km/h 下り 0km/h	上り 0% 下り 3%	上り 0% 下り3%

5. 調査結果を踏まえた有効な対策

前述までの調査及び分析を踏まえ，無信号横断歩道において歩行者に安全な道路横断を行っていただくためには，歩行者が左側確認を促すこと及びドライバーがいち早く歩行者の存在を確認し，早めの速度低減を促す必要がある．そのため，横断歩道手前などにおける車両の速度抑制及び横断歩道の存在をアピールすることが重要であり，そのための一つの施策として二段階横断施設が考えられる．二段階横断とは，車道中央部に横断歩行者が待機，退避できる交通島を設置し，その前後で2回に分けて横断する方式である．横断歩行者は一方向ずつ安全を確認して車道を横断できるため，横断の判断がしやすく，また横断途中に交通島で退避できることから安全性が向上する．また，今回の調査でも明らかとなった反対車線側の車両に対しても，横断者が中央の交通島にいることから気づきやすくさせる効果も期待できる．

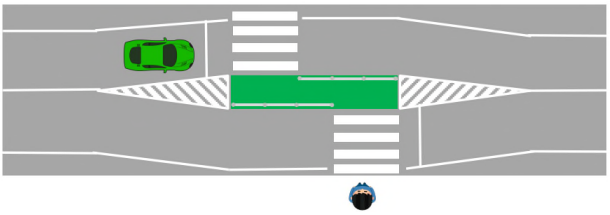


図-12 二段階横断施設[2]

また，夜間に歩行者及び横断歩道の存在をアピールする方策については，片桐ら[3]が報告しているようにプロジェクションマッピングやスポットライトによる対策がドライバーへの注意喚起を促すとともに，歩行者の存在を早期に気づかせる効果が期待でき，有効であると考えられる．




図-13 夜間における対策例
（左：プロジェクションマッピング，右：スポットライト）[2]

6. まとめ

本稿では，四国管内における無信号横断歩道の現状について整理するとともに，歩行者及び車両挙動，一時停止割合が高い横断歩道の特徴について調査・分析を行った結果について報告した．

今後，さらに詳細に一時停止を促すための道路デザインの分析や一時停止を高めるための施策について検討していき，安全な道路空間の構築に努めていきたい．

謝辞：本稿をまとめるにあたり，ご助言，ご指導頂いた地域道路経済戦略研究会四国地方研究会（座長　徳島大学奥嶋教授）の委員の先生方に感謝申し上げます．

参考文献

1) 警察庁：令和6年中における交通死亡事故の発生状況及び道路交通法違反取締り状況等について．
2) 交通工学研究会：無信号二段階横断施設導入の手引き（案），p13.
3) 片桐果奈：夜間の横断歩行者事故対策の実証実験について，

小開口付き面材耐力壁のせん断性能に関する研究

酒井　優太[1]

[1]国土技術政策総合研究所建築研究部材料部材基準研究室（〒305-0802 茨城県つくば市立原１）

本研究の目的は、住宅規模の木造建築物において面材耐力壁に設けられる配管等のための小開口が耐力壁のせん断性能に及ぼす影響を明らかにすることである。特に合板以外の面材や正方形以外の開口形状においても筆者が提案した耐力算定手法の適用可否を検討する。耐力壁の一面せん断試験の結果、既往文献と同様に小開口に起因する面材のせん断破壊により最大耐力が決定したが、各仕様の結果が示す傾向は既往の知見とは合致しなかった。

キーワード　面材耐力壁、小開口、一面せん断試験、せん断破壊

1. 緒言

木造建築物において、給排気口や配線のために面材耐力壁に小開口が設けられる。木造軸組工法住宅の許容応力度設計[1)]（以下、グレー本）に記述されている図１に示す小開口の設置基準は中大規模木造建築物への適用を想定されていない。またその技術的根拠は明らかではなく、定量的な評価方法も存在しないため、小開口が面材耐力壁のせん断性能に与える影響は未知である。そこで筆者は小開口付き合板張り耐力壁の耐力算定手法を提案した[2)]。ただし、提案した手法は使用した面材を構造用合板、開口形状を正方形に限定していた。そこで本研究ではこの本手法の他面材・及び他の開口形状への拡張を目的として小開口付き面材耐力壁の面内せん断試験を行ったので、その結果について報告する。

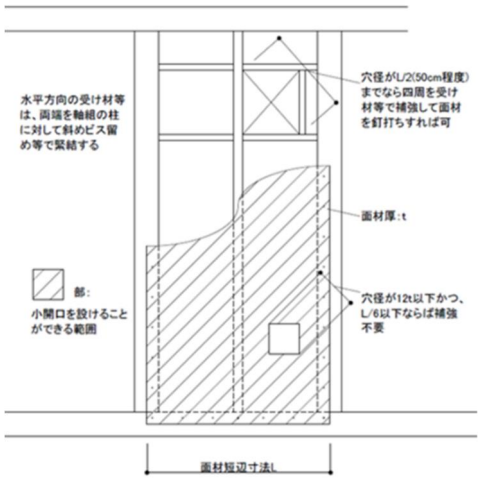


図１　小開口の設置基準

2. 試験体

図２に試験体である高さ 1820㎜、幅 910㎜ の面材耐力壁を示す。表１、表２に試験体仕様について示す。表１に示す仕様では開口形状（正方形）・開口径（一辺 322㎜）・開口位置(中央)は変更せず、パラメータを面材料（MDF,PB）、面材厚さ（9㎜,12㎜）、面材釘（CN50,CN65）、釘ピッチ（50㎜,75㎜,150㎜）とした。一方で、表２に示す仕様では面材（厚さ 12ｍｍ構造用合板）、釘（CN65）、釘ピッチ(50ｍｍ）を変更せず、開口形状・開口径をパラメータとしている。ここで試験体の名称は図３に示す通りとした。尚、表２では試験体名称の前半部分は同じであるため、図３中の枠線内のみを表２に記している。また表２には比較のために既往の研究 [2)]にて実施した仕様を併記している。面材釘は釘打ち機を用い打ち込んだ後、手打ちで面一程度に合板四周に打ち込んだ。間柱・開口補強材には 150㎜ 間隔とした。軸組の樹種は釘の保持力が比較的高く、面材のせん断破壊が起きやすくなるようにベイマツとした。これはベイマツの方がスギやヒノキに比べて密度が大きく、釘の保持力が高いことから、本試験体のような合板がせん断破壊する破壊性状が予測される場合、安全側の評価とするためである。小開口四周は補強材によって補強した。補強材の端部は構造用ビス 45㎜ を用いて軸組みに、もしくは補強材同士を留め付けた。柱頭柱脚は短ほぞ差しとした。試験は、グレー本の面内せん断試験に準拠し、柱脚固定式で行った。尚、同じ軸組みに対して表裏を用い二回試験を行った。そのため、一回目試験時の柱頭柱脚接合部でのめりこみが二回目の試験結果に影響を及ぼす可能性を排除するために、以降は真のせん断変形角を用いて検討を行う。

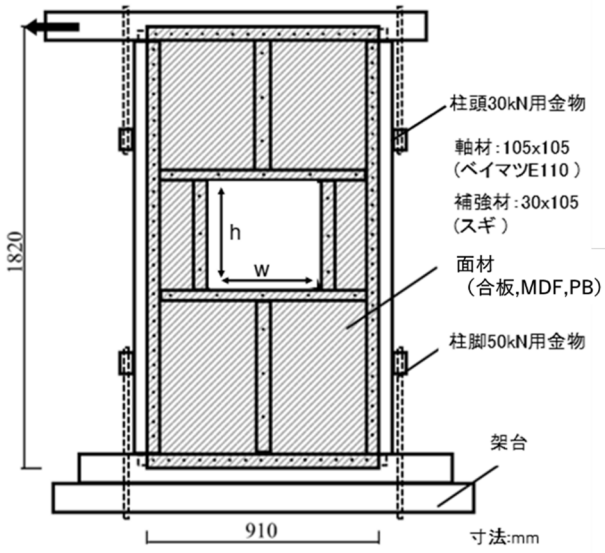


図２　面材耐力壁試験体

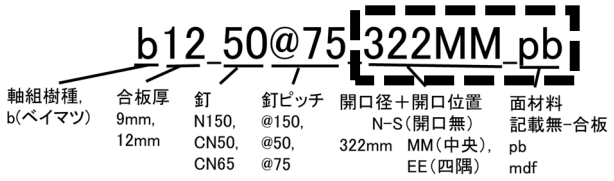


図３　試験体名称

表１試験体仕様（MDF、PB）

試験体名	面材	厚さ	釘	ピッチ（mm）	開口形状	開口幅（対角）	位置	試験体数
b9_50@150_322MM_mdf	MDF	9	CN50	150	正方形	322（455）	中央（MM）	1
b9_50@75_322MM_mdf				75				3
b12_50@50_322MM_mdf		12		50				3
b12_65@50_322MM_mdf			CN65					1
b9_50@150_322MM_pb	PB	9	CN50	150				1
b9_50@75_322MM_pb				75				3
b9_50@75_N-S_pb					無開口(N-S)			1

表２試験体仕様（合板）

試験体名	面材	厚さ（mm）	釘	ピッチ（mm）	開口寸法（mm） 高さ	幅	開口位置	試験体数
N-S	合板	12	CN65	50	無(N-S)			1
s322MM					322	322	中央(MM)	3
s322EE							隅部(EE)	3
r644x322MM					644	322	中央(MM)	3
r644x322EE							隅部(EE)	1
r150x322MM					150		中央(MM)	1
r150x322EE							隅部(EE)	1
r455x150EE					455	150	隅部(EE)	1
r150x455MM					150	455	中央(MM)	1
r150x455EE							隅部(EE)	1
c455MM					円形(半径:455)		中央(MM)	3

グレー部は既報[2]の内容

3. 試験結果および考察

（１）他面材での比較

代表的な破壊性状を図４（b9_50@75_322MM_mdf の終局状態）、図５（b9_50@150_322MM_pb の終局状態）に示す。図４のように釘ピッチが 150mm である仕様は、開口隅部から亀裂が生じるものの合板端部に達することなく、釘が塑性化していたため、無開口仕様と同様の破壊性状であったと推察される。一方で釘ピッチが75mm、もしくは50mmの仕様すなわち最大耐力が高い仕様では図５のように面材がせん断破壊し、耐力が低下した。



図４ b9_50@75_322MM_mdf の終局状態

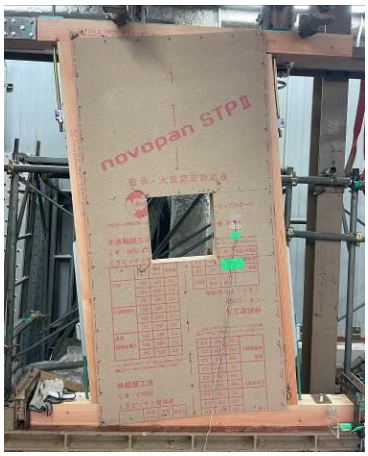


図５ b9_50@150_322MM_pb の終局状態

図６、７に荷重と真のせん断変形角関係、それを基に完全弾塑性モデル化して算出した特性値を表３に示す。釘ピッチが 150mm の仕様である b9_50@150_322MM_mdf、b9_50@150_322MM_pb では耐力低下も生じず、一般的な住宅レベルで用いられる壁倍率３倍程度では現行の運用基準でも問題ないことが示された。一方でb9_50@75_N-S_pb と b9_50@75_454MM_pb で比較すると、b9_50@75_454MM_pb は荷重が約１７ｋN程度で面材のせん断破壊が生じ、荷

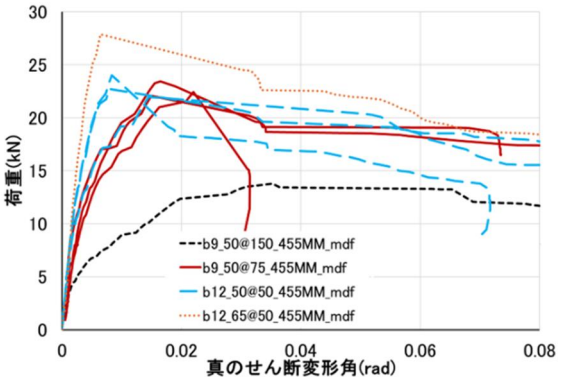


図６荷重変形角関係（MDF）

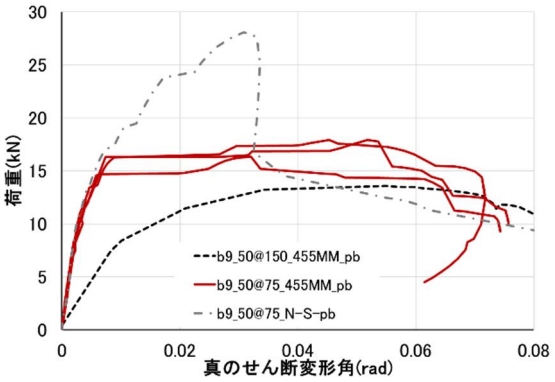


図７荷重変形角関係（PB）

表３　各特性値（MDF、PB）

	b9_50@150_455MM_mdf	b9_50@75_455MM_mdf	b12_50@50_455MM_mdf	b12_65@50_455MM_mdf	b9_50@150_455MM_pb	b9_50@75_N-S_pb	b9_50@75_455MM_pb
最大耐力Pmax(kN)	13.78	22.08	22.72	27.87	17.78	28.08	16.35
初期剛性K	1405	2628	3825	4533	1028	2307	2932
終局耐力Pu(kN)	5.91	9.61	20.36	24.98	7.1	24.28	14.84
塑性率μ	16.27	18.35	11.1	8.01	9.8	3.29	12.64
降伏耐力Py(kN)	6.48	12.36	12.41	16.28	13.13	15.06	11.35
0.2Pu$\sqrt{}$(2μ-1)(kN)	6.64	11.48	18.75	19.36	6.13	11.47	14.62
P150(kN)	7.38	15.03	20.02	25.52	7.72	15.24	14.57
2/3Pmax(kN)	9.19	14.72	15.15	18.58	11.85	18.72	10.9
壁倍率	3.63	5.26	5.72	9.13	3.43	6.43	5.54

重はその後横ばいとなった。その結果、壁倍率では１倍程度の差が生じ、小開口による耐力壁のせん断性能の低下が確認された。

b9_50@75_454MM_mdf と b12_50@50_454MM_mdf では面材厚に 3mm の差があるにも関わらず、最大耐力はほぼ同じ（差は 0.03%）であった。一方で、b12_50@50_454MM_mdf と b12_65@50_454MM_mdf は同じ面材厚であるが、最大耐力は約 5kN ほど差のある結果となった。これは既往文献[2]による合板がせん断破壊する場合、その最大耐力は合板厚と合板残幅（合板の短辺方向における開口部を除いた水平長さ）により、釘や釘ピッチには依存しないという知見と合致しない。この原因は、面材の製造工程の差に起因すると考えられた。合板は単板を積層し製造するが、MDF や PB はチップを接着し製造するため、面材のせん断応力分布、特に小開口の隅部の応力集中に差が生じることによると推察される。

（２）開口形状による比較

図９に各仕様における破壊性状を示す(a：r644x322MM、b：r150x322MM、c：c455MM)。図１０に荷重と真のせん断変形角関係、それを基に完全弾塑性モデル化して算出した特性値を表４に示す。全ての仕様において合板のせん断破壊は生じていた。合板のせん断破壊は開口の圧縮方向の対角線隅部から進展し、せん断破壊が軸組み（合板縁）に達すると壁の耐力が低下する。r644x322MM などの大きな開口では合板のせん断破壊の発生は 1/50rad 程度であり、1/30rad 程度で合板縁に達し、耐力が低下する。一方で、r150x322MM では合板のせん断破壊の発生は 1/30rad 程度であり、1/15rad 程度で合板縁に達し、耐力が低下する。すなわち、r150x322MM では、壁倍率の評価上、小開口による影響は不利に働かず、無開口仕様と比べても同程度のせん断性能を有していることが分かった。

開口寸法が同じ幅で最大耐力を比較すると、r150x322MM＞s322MM＞r644x322MM, r150x322EE＞s322EE＞r644x322EE のように高さが低いものの方が最大耐力が高い傾向を示した。これは文献[2]による最大耐力は合板の残り幅によるという知見と矛盾する。

r644x322MM、r150x322MM について、開口部横に貼ったひずみゲージより下式(1)を用いてせん断力Qを推定した。

$$Q = \tau \times t \times w_p \qquad (1)$$

ここで、

τ：最大せん断応力(N/mm2) $\tau = G \times \gamma_{max}$

G：せん断弾性係数(N/mm2)、文献[2]より引用

γ_{max}：最大せん断ひずみ

t：合板厚(mm)

w_p：開口残幅、合板の短辺方向における開口部を除いた水平長さ

図４に、式(1)より算出したせん断力と実験値の比較を示す。この際、開口残幅を 588mm とした推定値(588)では曲線の概形が一致しなかったため、開口残幅を 910mm とした推定値(910)も記載した。推定値(910)は曲線の概形が一致したため、開口残幅部が負担するせん断力は開

口付近以外の合板と相違ない可能性が示唆された。

また小開口が円形の場合、円の内側に内接する正方形の仕様（322MM）と同等以上のせん断性能を有していた。これは円形が応力集中に対して有利であるため、面材のせん断破壊の発生が遅れることによると考えらた。

4. 結言

合板を面材に用いた面材耐力壁に正方形の小開口を設けた場合を想定した耐力算定手法が他面材（MDF,PB）や他の開口形状においても成立するか検証するために耐力壁の面内せん断試験を行った。小開口に起因する面材のせん断破壊により最大耐力が決定したが、各仕様の結果が示す傾向は既往の知見とは合致しなかった。今後は解析を行い、面材のせん断応力分布を把握すると共に、開口形状が応力集中に与える影響を考察する。

【参考文献】

1）（公財）日本住宅・木材技術センター編：木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2017 年度版）

2）酒井優太，他：日本建築学会構造系論文集, 89(824), 1156-1163, 2024.



a：r644x322MM



b：r150x322MM



c：c455MM

図９各仕様の破壊性状

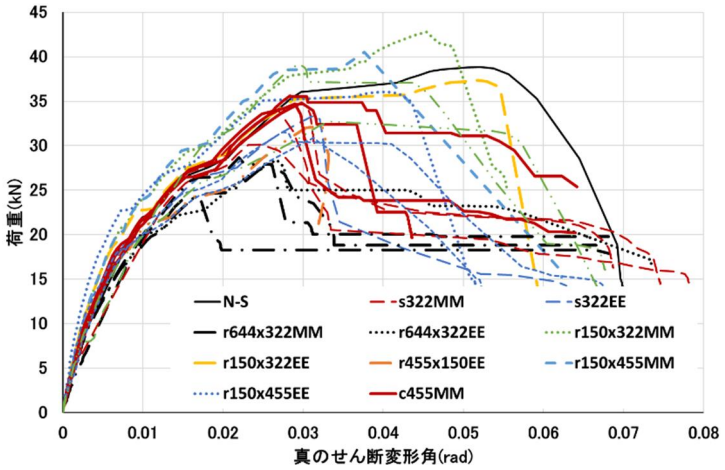


図１０荷重変形角関係

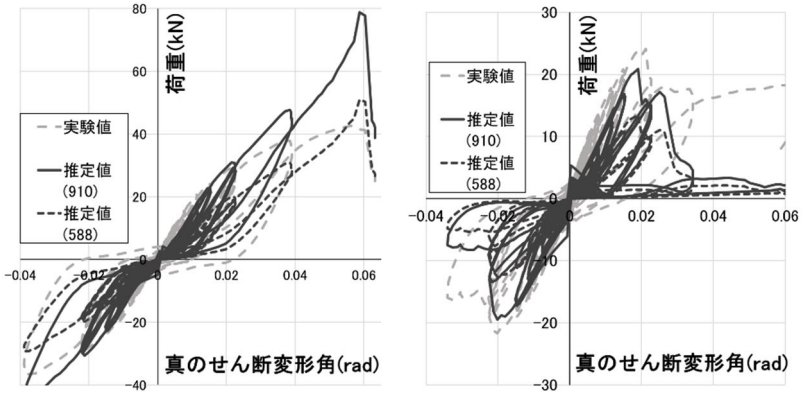


図１１　実験値と推定値比較　（左：r644x322MM、右：r150x322MM）

表４　各特性値（合板）

	N-S	s322MM	s322EE	r644x 322MM	r644x 322EE	r150x 322MM	r150x 322EE	r455x 150EE	r150x 455MM	r150x 455EE	c455MM
最大耐力P_{max}(kN)	38.9	33.2	32.2	26.9	28.4	42.8	37.4	32.2	40.5	36.0	35.0
初期剛性K(kN/rad)	2316	2202	2606	2279	2608	2513	2684	2442	2687	3546	2489
終局耐力Pu(kN)	34.9	29.6	27.6	24.3	24.3	37.3	33.7	27.0	35.4	32.6	30.7
塑性率μ	3.92	2.30	3.54	2.36	5.95	3.28	4.35	3.00	2.86	4.74	3.31
降伏耐力Py(kN)	20.7	19.1	17.3	14.6	16.9	23.4	19.9	18.0	20.8	19.9	18.2
$0.2Pu\sqrt{(2\mu-1)}$	18.3	11.2	13.5	8.79	16.0	17.6	18.7	12.1	15.4	19.0	13.3
2/3Pmax	25.9	22.1	21.5	17.3	18.9	28.5	24.9	21.5	27.0	24.0	23.2
P_{150}	16.4	15.8	17.3	14.6	17.0	19.8	19.1	17.0	19.9	21.7	17.4
壁倍率	9.2	6.0	7.4	4.9	9.0	9.9	10.5	6.8	8.6	10.6	7.5

吉野川水系における
流域治水の自分事化に向けた取り組み
～洪水と水害の「勘どころ」作成～

髙野　稜馬

四国地方整備局　徳島河川国道事務所　流域治水課　（〒770-8554 徳島県徳島市上吉野町3-35）

近年，線状降水帯などによる記録的短時間降雨の発生回数の増加や台風の大型化等，既に地球温暖化の影響が顕在化してきており，今後さらに水害の激甚化・頻発化が予測されている．吉野川流域においては，平成16年以降，大規模な洪水は発生していないものの，豪雨による甚大な水害がいつ発生してもおかしくない状況にある．

そこで，当事務所では，自治体の避難判断等に資する情報として，水位やダム放流量等の情報を示し，今後どのような被害が発生する可能性があるかを示した洪水と水害の「勘どころ」を自治体職員とともに作成することで，防災意識の向上に取り組んだため報告する．

キーワード　吉野川，流域治水，自分事化，勘どころ，水害リスク，防災・減災情報

1. はじめに

近年，線状降水帯などによる記録的短時間降雨の増加や台風の大型化等により浸水被害が頻発しており，地球温暖化の影響が顕在化している．さらに今後，水災害の激甚化・頻発化が予測されている．

このような気候変動の影響や社会状況の変化などを踏まえ，これまでの「水防災意識社会」を再構築する取組をさらに進め，あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」へと転換を図ることが令和2年度に打ち出され，これを機に全国の一級河川では「流域治水協議会」を設立し，流域治水に関する検討が開始された．

吉野川流域においても，令和2年度に流域治水協議会を設立し，集水域と河川区域のみならず，氾濫域も含めて一つの流域として捉え，①氾濫をできるだけ防ぐ，減らすための対策，②被害対象を減少させるための対策，③被害の軽減，早期復旧・復興のための対策をハード・ソフト一体で多層的に進めている．

また，国土交通省では，令和5年度に「水害リスクを自分事化し，流域治水に取り組む主体を増やす流域治水の自分事化検討会」にて，住民や企業などのあらゆる関係者による，持続的・効果的な流域治水の取組の推進に向け，行政の働きかけに関する普及施策の体系化と行動計画のとりまとめがなされた．

これを受け，吉野川では令和6年度に「流域治水の自分事化に向けた取組計画」をとりまとめた．現在は，流域治水を自分事として捉えてもらうための最初の取り組みとして，まずは吉野川に興味を持ってもらうため，積極的な広報活動に取り組むとともに，これまでの治水及び利水の変遷などに関して，住民や企業等を対象とした説明会を実施しているところである．

2. 吉野川流域の洪水特性等

(1) 吉野川流域の概要

吉野川は，その源を高知県吾川郡の瓶ヶ森（標高1,896m）に発し，四国山地に沿って東に流れ，北に向きを変えて四国山地を横断し，銅山川，祖谷川等の支川を合わせて，徳島県池田において再び東に向かい，紀伊水道に注ぐ，幹川流路延長194km，流域面積3,750km^{2}の一級河川である．（図-1）

上流域の山間部は年間平均降水量が3,000mm以上に達する全国屈指の多雨地域であり，吉野川は四国4県のいのちをはぐくむ恵みの川であると同時に，古くから日本三大暴れ川のひとつとして「四国三郎」と呼ばれ，ひとたび大雨が降れば暴れ川となり，洪水被害を発生させてきた．

当事務所では，吉野川の池田（徳島県三好市）から河口（徳島県徳島市）に至る区間（延長77.69km）と派川の旧吉野川・今切川（合計延長36.45km）を管理している．

このうち，岩津下流（河口～池田間）は堤防が完成しているものの，岩津上流（岩津～池田間）や旧吉野川・今切川では，未だ多くの無堤地区が存在している状況にあり，当事務所では氾濫をできるだけ防ぐ、減らすための対策として，堤防整備や河道掘削などのハード整備を重点的に進めている．



図-1　位置図

(2) 吉野川流域の洪水特性

吉野川の流路は，四国山地に沿って西から東へ向かうため，台風による洪水が生起しやすいという特徴を有しており，過去の大洪水は全て台風を要因としている．（表-1）また，台風の進行経路に応じて，洪水特性が変わり，代表的な洪水の形態としては，「全流域型」，「上流域型」，「下流域型」の3種類に分けられる．

特に，水位が上昇しやすいのは「全流域型」である．（図-2）台風が土佐湾から四国に上陸し縦断すると，池田上流の山地部を中心に激しい降雨が生じ，その後，池田下流域においても激しい降雨となる．この場合，吉野川本川の洪水流量の上昇に加え，支川からの合流量も比較的大きくなり，内水被害も生じやすい傾向にある．戦後最大洪水を記録した平成16年台風23号は，全流域型の代表的な洪水であり，上流無堤地区では溢水氾濫，下流有堤地区では内水氾濫が発生し，浸水面積7,645ha，床上浸水745戸，床下浸水1,975戸と甚大な被害が生じた．

「上流域型」については，台風が九州の西側海上から九州地方に上陸し，その後四国付近を進んだ場合，池田上流の山間部を中心に降雨が卓越し，下流側での降雨が少ないにも関わらず，ダム放流量の増加により，急激な水位上昇が発生する降雨特性となる．

「下流域型」については，台風が高知県の東側海上を通過し，紀伊水道を進行すると河口周辺で高潮が生じやすい降雨特性となる．旧吉野川・今切川は，河床勾配が他河川と比較し非常に緩やかであり，高潮による影響を受けやすく，高潮と洪水が同時生起した場合，吸い上げ影響による海面の上昇に加え，洪水による水位上昇が発生しやすいため，特に注意が必要となる．（図-3）

洪水発生年月日		要因	岩津上流流域平均2日雨量 (mm)	岩津最大流量 (m3/s)	被害・概要等
西暦	洪水日				
1961	昭和36年 9月16日	台風18号	318	約12,000	浸水面積6,638ha、床上浸水15,462戸、床下浸水9,702戸。
1970	昭和45年 8月21日	台風10号	326	約12,800	浸水面積6,187ha、床上浸水828戸、床下浸水6,507戸。
1974	昭和49年 9月 9日	台風18号	329	約14,500	浸水面積3,144ha、床上浸水362戸、床下浸水2,439戸。
1975	昭和50年 8月23日	台風 6号	336	約13,900	浸水面積7,870ha、床上浸水1,679戸、床下浸水10,139戸、全壊流失家屋75戸。
1976	昭和51年 9月12日	台風17号	578	約11,400	床上浸水3,880戸、床下浸水25,713戸、全壊流失家屋109戸。
1993	平成 5年 7月28日	台風 5号	421	約12,100	浸水面積159ha、床上浸水39戸、床下浸水243戸。※台風7号の被害を含む
2004	平成16年 8月31日	台風16号	279	約13,600	池田から岩津間の無堤地区で氾濫被害、内水 地区で浸水被害。浸水面積757ha、床上浸水92戸、床下浸水139 戸。
	平成16年10月20日	台風23号	366	約16,400	戦後最大の洪水。浸水面積7,645ha、床上浸水745戸、床下浸水1,975戸。
2005	平成17年 9月 7日	台風14号	505	約13,800	吉野川は浸水面積 666ha、床上浸水19戸、床下浸水111戸。
2011	平成23年 9月21日	台風15号	314	約11,000	吉野川は浸水面積4,201ha、床上浸水107戸、床下浸水618戸。
2014	平成26年 8月 3日	台風12号	442	約11,900	（台風11号の来襲により、未調査）
	平成26年 8月10日	台風11号	336	約10,400	吉野川は浸水面積2,989ha、床上浸水29戸、床下浸水118戸。
2018	平成30年 7月7日	台風7号及び7月豪雨	415	約10,000	吉野川は浸水面積 97ha、床上浸水0戸、床下浸水1戸。

表-1　過去の洪水被害一覧



図-2　台風経路のイメージ図（全流域型）



図-3　高潮と洪水の同時生起イメージ

3.　『洪水と水害の「勘どころ」』作成の経緯

当事務所では，治水安全度の向上に向け，堤防整備や河道掘削等の直轄河川改修事業を推進しているが，残された事業量が多く，限られた予算の中，短期間で治水安全度を向上させることは困難であり，河川整備が完了するまでには長い時間を要する．また，河川整備が完了したとしても，前述したとおり，近年の気候変動による影響を踏まえると，計画を上回る洪水が発生する可能性がある．実際に平成27年の鬼怒川や令和2年の球磨川での堤防決壊等，一級水系の直轄管理河川でも計画を超える洪水が発生している状況にある．

吉野川流域では，平成16年以降，人命の危機を感じるほどの大水害は発生していない．このような状況下では，

大規模洪水の経験を伝承する機会が希薄となり，危機意識が低下する傾向にある．

洪水や高潮等によって生じる被害を最小限に抑えるためには，自治体による避難情報の適切な発令が重要のため，担当者は適時的確な防災行動を判断・実施する必要がある．しかし，近年は職員数の減少による日常業務の多忙化により，防災対応に関する勉強に費やす時間が短く，防災対応時の危険箇所等の習熟に時間を要している．また，人事異動等により洪水をあまり経験していないため，実際にどのような現象が起きるか想像しにくく，的確な判断に時間がかかる．

当事務所では，気象台と共同して河川の増水や氾濫などに対する防災情報の提供を行っている．吉野川本川では洪水予報を発出する基準観測所を，岩津水位観測所と池田観測所に設定している．洪水時には自治体もこの2つの観測所と池田ダム放流量から危険度を判断することが多い．しかし，吉野川は河川延長が長く，これらの情報を的確に活用するためには，洪水が流下する時間を把握しておくことが重要であるが，多くの自治体では，この流下時間の目安を把握していない状態にあった．

また，気象・水象情報をもとに，事務所や自治体，住民等における防災行動を示した「タイムライン」を作成しているが，防災行動の確認には有効であるものの，どのような水害リスクがあるかまでは明示できていないという課題がある．

そこで，当事務所では流域治水における，「被害の軽減，早期復旧・復興のための対策」として，水害リスクの伝承や自治体による避難情報の発出など，迅速な防災行動の判断に繋がることを目的に，ダム放流量や水位などの情報から吉野川ではどのような状況にあり，今後どういった被害が発生する可能性があるかを示した『洪水と水害の「勘どころ」』（以下「勘どころ」という．）を作成し，令和7年6月18日に公表した．

なお，吉野川は直轄管理区間の延長が長く，各自治体によって水害リスクや防災上必要な情報等に違いがあるため，沿川14自治体毎に「勘どころ」を作成することとした．

4. 『洪水と水害の「勘どころ」』の作成

(1) 「勘どころ」の作成

「勘どころ」の作成では，過去洪水で蓄積した被害状況やダム放流量と水位観測所の相関等のデータをもとに，侵食，漏水，内水氾濫，外水氾濫等が発生する可能性がある放流量や水位の数値を記載することとした．

また，普段，自治体担当者へ十分に説明できていない情報も加えることとした．具体には，氾濫注意水位は，堤内地盤高等を目安に設定されていることが多いため，この水位を超過すると，洪水が直接，堤防へ当たりはじめ，侵食や漏水，無堤地区での溢水氾濫や樋門閉鎖による内水氾濫の危険性が一気に高まること．また，ダム放流後における洪水が河川を流下する時間などの情報である．

「勘どころ」の資料に記載した事項を以下に示す．

①洪水時における勘どころとは？
②勘どころの話に入る前に
- 現在の河川整備状況
- 過去の洪水被害
- 吉野川の洪水特性
- 過去の治水対策

③洪水が流下する時間（図-4）
④地形条件による破堤氾濫リスク
⑤想定される洪水リスク
⑥ダム放流量及び水位と水害リスク（図-5，6）
⑦洪水予報の解説
⑧入手可能な洪水情報



図-4　洪水が流下する時間

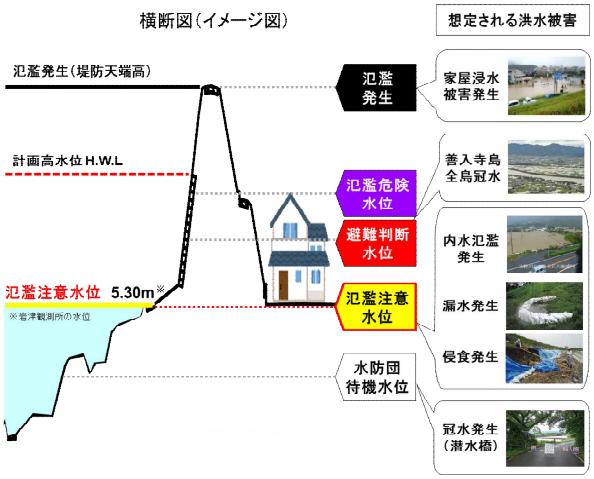


図-5　水位毎に想定される被害（吉野川市版）



図-6　ダム放流量及び水位と水害リスク（吉野川市版）

(2)「勘どころ」作成時の工夫点

自治体では，技術職員が少なく事務職員の方が危機管理部署の担当になることが多い．そのため，「勘どころ」の作成にあたっては，河川行政に初めて携わる担当者にも水害リスクを容易に想像することができ，防災対応時に活用いただけるよう，簡潔で分かりやすい資料作成が重要となる．しかし，当事務所職員のみで作成した場合，実際に活用してもらいたい自治体職員の方に理解しずらい表現になることが危惧された．

そこで，作成対象の14自治体全ての担当者に対してヒアリングを実施し，理解しづらい情報が無いか，浸水や通行規制の頻度が高い箇所はあるか，防災対応にあたって追記すべき事項が無いか等を航空写真や浸水実績，浸水想定区域図などを提示して確認を行った．（写真-1）

その結果，以下の情報を明示して欲しいと要望を受けたため，資料へ追加することとした．

・内水氾濫や農業用水路等の排水不良により，過去洪水での浸水頻度が高い箇所
・吉野川における治水の歴史（図-7）
・ダム放流によるサイレンの目安情報（図-8）
・洪水時における第十樋門や河口堰の操作（図-9）

また，「勘どころ」の作成にあたっては，コンサルタント会社による氾濫計算などは実施せず，当事務所及び自治体における過去洪水のデータをもとに，直営で作成を行った．そのため，新たな洪水が発生し，見直しが必要となった場合も業務発注等の必要はなく，手軽に更新することが可能である．



写真-1　自治体担当者へのヒアリング時の様子



図-7　吉野川における治水の歴史（吉野川下流の例）



図-8　ダム放流によるサイレンの目安情報



図-9　河口堰や第十樋門の操作イメージ

5.　まとめ及び今後に向けて

今回作成した「勘どころ」によって，情報が入手しやすいダム放流量や水位等の情報から，どのような被害が発生する可能性があるかを自治体地域毎に担当者へ示すことができたと考えられる．

自治体担当者からは，「大規模洪水が発生していない中，目安として数値を提示いただけるのは非常にありがたい」，「当事務所が作成したデータを活用し，地域住民向けにデータを加工した後，自治体HPへ掲載することも検討したい」との意見もあり，全体として「勘どころ」の作成は大変好評であった．

今後，当事務所では現在実施中である堤防整備や河道掘削などの直轄河川改修事業を推進するとともに，今回作成した「勘どころ」を防災対応に活用し，追加すべき事項や数値の更新など，より分かりやすい情報に見直すことで，ハード・ソフト一体となった防災対策を加速化させる．

また，流域治水を自分事として捉え，流域治水に取り組む主体を増やすため，企業及び地域住民に向けた講習会などの施策を更に推進することで，各自が行動の可能性や有効性を考える素材や機会を提供し，知ることと行動することのギャップを埋める．そして，いつ発生するか分からない大規模洪水に向け，あらゆる関係者との密接な連携体制のもと，流域治水の取組を持続的に推進していく．

謝辞：洪水と水害の「勘どころ」作成にあたり，関係機関の皆様からは貴重なご意見を賜りましたこと，この場をお借りして感謝申し上げます．

参考文献

1）国土交通省：社会資本整備審議会（令和2年7月）
2）国土交通省：水害リスクを自分事化し，流域治水に取り組む主体を増やす流域治水の自分事化検討会（令和5年8月）

恵那市街地の水害軽減に向けた取り組み
～阿木川ダム下流残流域の流出特性～

向井　健朗[1]

[1]独立行政法人水資源機構　木曽川上流ダム総合管理所　管理課（〒509-7202 岐阜県恵那市東野字花無山2201-79）

阿木川の重要地点である大門水位観測所（以下「大門地点」という．）の上流域は，阿木川ダム流域だけでなく，支川の飯沼川流域も含まれている．飯沼川流域には，ダム等流水調節施設及び常時観測可能な水文観測施設が設置されていないことから，洪水時の流出量を詳細に把握することが困難な状況にある．したがって，流域面積比により想定した流量を飯沼川の流出量として見込み，これまで防災操作を行ってきた．今回，管理開始以降の36洪水を対象に飯沼川流出量を分析したところ，多くの洪水で想定を上回る流出傾向が確認された．本稿では，この結果から将来的に危惧される水害リスクと課題解決に向けた方針案を示す．

キーワード　洪水，防災操作，残流域，流出特性，流下能力

1. はじめに

阿木川ダムは，木曽川水系阿木川（岐阜県恵那市）に位置し，独立行政法人水資源機構が管理する中央遮水壁型ロックフィルダムである．洪水期（6月1日～10月15日）には16,000千m³の洪水調節容量を備える制限水位方式の多目的ダムであり，阿木川ダムを含む木曽川上流ダム群が洪水調節を行うことにより，木曽川本川の治水基準点（犬山地点）において，基本高水のピーク流量16,000m³/sを12,500m³/sに低減させるものとして計画された．阿木川ダムは平成3年4月から管理を開始し，令和7年4月時点で34年が経過している．

2. 阿木川ダムの洪水調節

阿木川ダムは，洪水量を120m³/sとした一定量放流方式のダムであり，洪水調節容量16,000千m³を用いてダム地点の計画高水流量850m³/s（年超過確率1/100）を120m³/sに調節する計画である（**図-1**）．

また，令和2年5月には，ダムの洪水調節機能の強化を図るため，関係機関及び関係利水者の理解・協力を得て「木曽川水系治水協定」が締結され，従前の事前放流による治水機能が増強された．これにより，大規模な洪水が事前に予測される場合には，本来の洪水調節容量16,000千m³に加え，最大18,416千m³の洪水調節可能容量を備えることが可能となった．

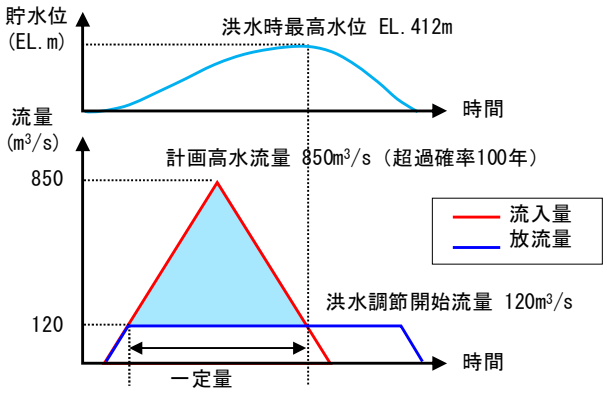


図-1　阿木川ダム洪水調節計画図

記録に残っている中で，阿木川ダム管理開始以前における阿木川の既往最大流量は，昭和58年9月台風第10号の襲来によるものであり，ダム流域の総雨量は336mm，ダムサイト地点の最大流量は750m³/sを記録した．この洪水により，恵那市では住家破損5戸，床上浸水19戸，床下浸水250戸という甚大な被害が発生した[1)]．

阿木川ダム管理開始以降は，令和6年4月までの33年間で計36回の洪水調節を実施している．このうち，最大の流入量は平成12年9月台風第14号（東海豪雨）によるものであり，ダム流域の総雨量は372mm，ダムへの最大流入量は743m³/s（計画高水流量の約87%）を記録した．この洪水は，先に述べた洪水（昭和58年台風第10号）と同規模の流入量となったが，阿木川ダムが洪水調節を実施

したことにより，恵那市街地において浸水被害等は発生しなかった．

3. 残流域（飯沼川流域）からの流出傾向

阿木川の重要な地点として大門地点があり，ダム防災操作時の基準地点であるほか，河川管理者（岐阜県）が水防警報，洪水予報を発表するための水防基準点となっている．大門地点の上流域は，**図-2**に示すように，大きく二つの流域に分けることができる．阿木川ダムが位置する「阿木川ダム流域（A_A=81.8km^2）」と，ダム残流域の「飯沼川流域（A_I=22.7km^2）」である．この飯沼川流域については，ダム等の流水調節施設がなく，また，常時観測可能な水文観測施設も設置されていないことから，洪水時の流出量を「時間的」かつ「定量的」に把握することが非常に難しい状況にある．そのため，阿木川流域との流域面積比により想定した流量（以下「想定流量」という．）を流出量として見込み，これまで運用を行ってきた．具体的には，阿木川ダムの流入量Q_A (m^3/s) に，飯沼川流域と阿木川ダム流域の面積比（A_I/A_A=0.278）を乗じたものを飯沼川流出量Q_I (m^3/s)とするものである．したがって，Q_I=0.278Q_Aであれば想定どおりの流出量となる．

今回，二山洪水を2洪水とみなした場合の既往38洪水を対象に，飯沼川の流出量を算定し，阿木川ダム最大流入量との比較を行った．ここで，飯沼川の流出量は，「大門地点の最大流量」から「阿木川ダム最大流入時の放流量」を控除したものとし，過去の洪水調節報告書の値を基に計算した．算出した飯沼川流出量Q_Iと，阿木川ダム最大流入量Q_Aを比較したところ，約89%（34洪水）において想定流量を上回る結果となった（**図-3**）．



図-2　阿木川流域図（主要部分のみを表示）

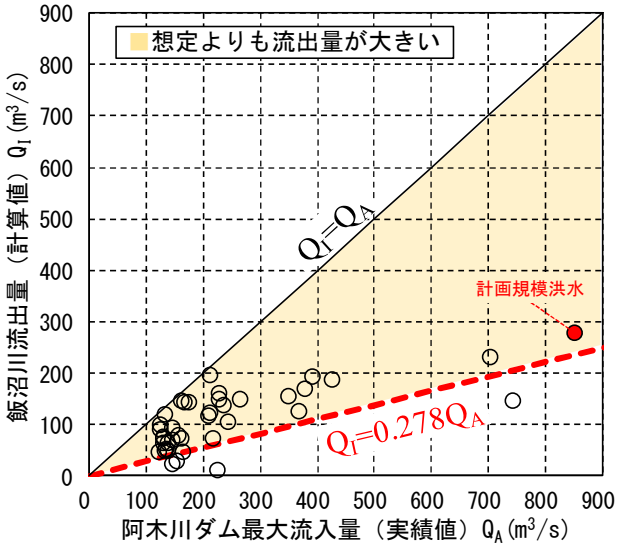


図-3　阿木川ダム最大流入量と飯沼川流出量の関係

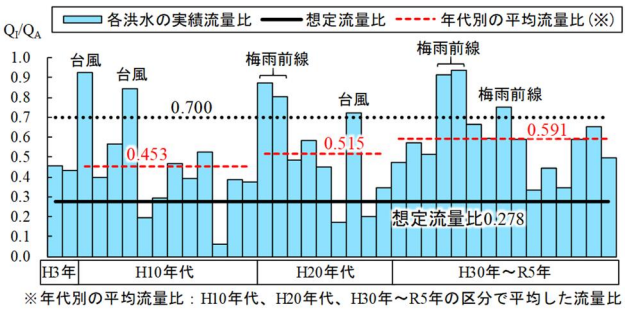


図-4　既往洪水における流量比の推移

次に，飯沼川流域と阿木川流域の流量比（Q_I/Q_A）を時系列で整理したものを**図-4**に示す．個々の数値には明確な傾向は見られないが，年代別で比較すると平成30年以降のすべての洪水において，想定流量比0.278を超過していることがわかる．特に，想定流量比を大きく超過した洪水（Q_I/Q_A≧0.70）の原因に着目すると，平成10年代は台風に起因する洪水が多かったが，平成20年代以降は前線に起因する洪水が目立っている．

また，年代別の平均流量比は，いずれも想定流量比を超過しているほか，徐々に大きくなる傾向にあり，平成30年から令和5年における平均値は，想定流量比の2倍を超える0.591であった．

4. 大門地点の流下能力

平成 30 年時点における阿木川の流下能力を**図-5** に示す [2]．阿木川の計画流下能力は，阿木川ダムの計画規模洪水に合わせて設定されており，ダム直下で 140m^3/s，恵那市街地区間で 450～600m^3/s を確保するものとなっている．平成 30 年時点で河川改修は概ね完了しており，阿木川ダムから木曽川合流部までの全区間において，左右岸ともに概ね計画値まで流下能力が確保されている．

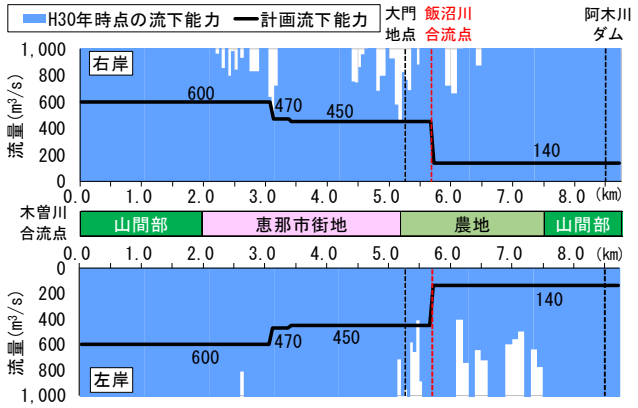


図-5　阿木川の流下能力図（平成30年時点）

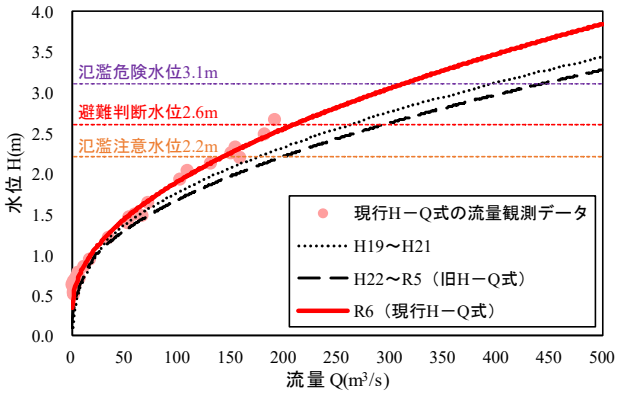


図-6　大門地点のH－Q図

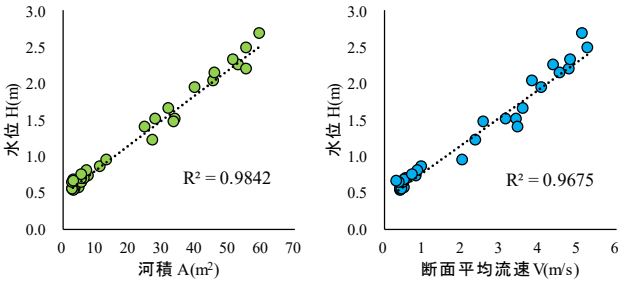


図-7　大門地点の水位と断面積及び断面平均流速の関係

しかし，河道の流下能力は常に一定ではなく，様々な要因により刻々と変化するものである．河川水位と流量の関係を表すものとして，一般的に水位流量曲線式（H－Q式）があるが，洪水による澪筋の変化，河床変動による河積（断面）の変化，樹木や植生の繁茂による粗度係数の変化等，河道の状態・変化を適宜調査し，必要に応じてH－Q式を見直していくことが望ましいとされている．

大門地点のH－Q式を**図-6**に示す．R6年に使用しているH－Q式（以下「現行H－Q式」という．）は，31回の流量観測データを基に作成しており，令和5年度における高水・低水流量観測データのほか，令和2年度及び令和3年度の高水流量観測データ，令和4年度の低水流量観測データを使用している．H－Q式を構成する観測データの相関係数は0.800以上が推奨[3)]されているのに対し，現行H－Q式は0.996である．また，水位と河積の関係（H－A図），水位と断面平均流速の関係（H－V図）を**図-7**のように整理したところ，これらも非常に高い相関を示したほか，年間を通じて一定の傾向が見られることから，現行H－Q式は非常に高い精度で河道を再現できていると言える．

しかし，概ね避難判断水位（H=2.60m）以上の水位帯については，流量観測データが不足しており，外挿によりH－Q式を作成している．よって，今後の流量観測においては，発生頻度が低い水位帯（避難判断水位を超えるような洪水）を確実に観測できるよう体制を強化し，H－Q式の精度を確認していくことが課題と言える．

また，大門地点のハイドロ特性，飯沼川の流出特性を詳細に把握していくためには，洪水ピークだけでなく，ピーク前後を含めた連続的な流量観測を行う必要があり，従来の浮子観測に加えて画像解析カメラ（STIV）や電波流速計，超音波ドップラー流速計（ADCP）等の次世代型観測手法の導入，飯沼川への危機管理型水位計の増設等も視野に入れた検討を進めていく必要がある．

また，河道内における土砂の堆積や樹木・植生繁茂等，流下能力に与える影響が大きい物理的な要因については，今後も継続して河川管理者（岐阜県）と情報共有を行い，流下能力を維持していくために相談・協議を進めていく必要がある．

5.　現況河道に基づくシミュレーション

先に述べた既往洪水の流量比（実績値）及び流下能力を用いて，恵那市街地における水害リスクのシミュレーションを行う．大門地点で設定されている氾濫注意水位，避難判断水位，氾濫危険水位を旧H－Q式（R5年までのH－Q式）及び現行H－Q式にて流量に換算し，既往38洪水との関係性を**図-8**のように整理した．旧H－Q式を用いたケースでは，38洪水のうち4洪水が避難判断水位を超える結果となったものの，氾濫危険水位を超える洪水は存在しなかった．一方，現行H－Q式を用いたケースでは，38洪水のうち22洪水が避難判断水位を超え，さらに3洪水が氾濫危険水位を超える結果となった．このシミュレーション結果は，当時は安全に流下できた洪水であっても，現況河道では安全に流下できない恐れがあるということを示唆している。

ただし，第4章でも述べたように，概ね避難判断水位（H=2.60m）以上の水位帯については，H－Q式の外挿による推定流量であるため，今回のシミュレーション結果が必ずしも正しいものであるとは限らない．今後，流量観測データの蓄積や，大門地点の上下流を含めた地形データ（縦横断測量成果等）により現況河道の能力を明らかにした上で，改めてシミュレーションを行っていく必要がある．

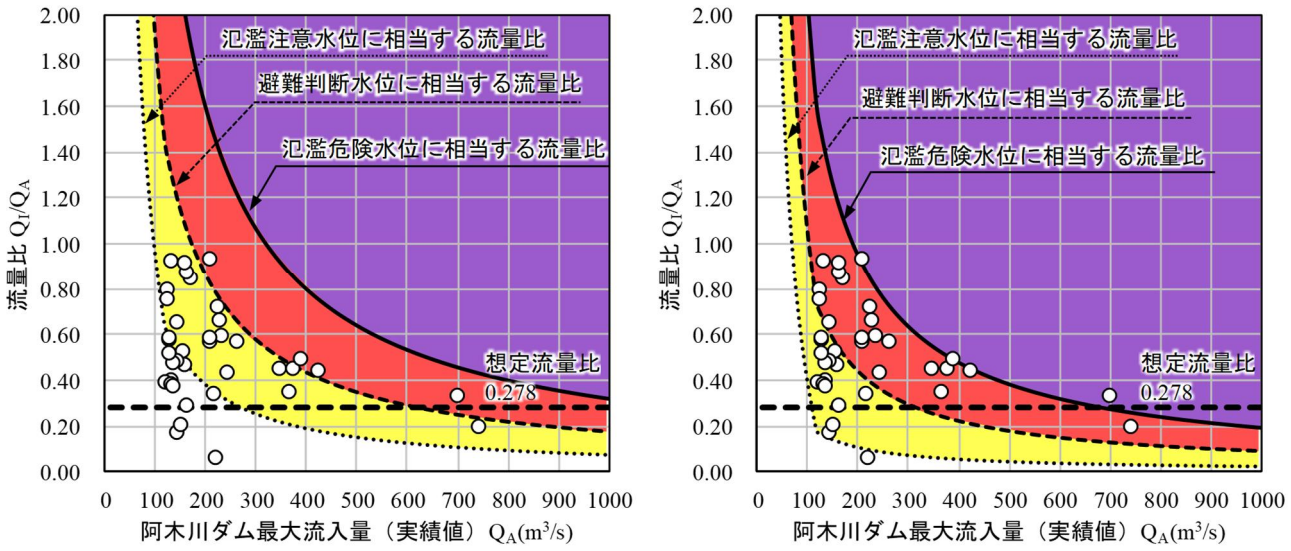


図-8　既往洪水におけるダム最大流入量と流量比の関係

6.　将来的に危惧される事象と今後の対応方針案

第5章のシミュレーション結果を踏まえ，将来的に危惧される事象と今後の対応方針案を以下のとおり示す．

（1）現行H−Q式に基づくシミュレーション（**図-8**）により，各基準水位の超過頻度が変化することが示唆されたため，計画規模以下の洪水であっても，下流河川の状況を注視しながらダム操作を行う必要があると言える．そのためには，より高精度な降雨予測，流出予測が要求されることから，現在使用している分布型流出予測システムの精度向上に向け，検討を進めていく必要がある．

また，河川管理者等の関係機関も交え，ダムの柔軟的かつ効果的な運用方法（例えば，下流河川の水位を低減させるための減量操作等）とその実現性についても相談・検討を進めていく必要がある．

（2）各基準水位の超過頻度の変化は，基準水位の設定根拠である「リードタイム」へも影響を及ぼすと考えられる．この場合，下流自治体の防災計画（避難指示等の発令時期）にも影響が生じてくることから，阿木川ダムで年2回開催している河川管理者（岐阜県）及び下流自治体（恵那市）との防災担当者会議の場で情報共有を図り，相談・協議を進めていく必要がある．

また，令和元年度より毎年実施しているダム下流住民（自治会）を対象とした説明会や，平成30年度より実施しているマスコミ関係者への説明会を今後も継続し，ダムの防災操作に加えて「飯沼川の流出特性」についても説明を行うことで，阿木川流域全体の特性について理解促進を図っていく必要がある．

（3）阿木川流域の特徴のひとつとして，「洪水の急激な立ち上がり」が挙げられる．近年の洪水に着目すると，令和3年以降に発生した9洪水のうち，4洪水が2時間以内に洪水量へ到達している．これに対し，操作規則に基づく増量操作（ステップ操作）では，放流量を洪水量まで増加させるのに最短で3時間程度を要するため，先行的に貯留が生じてしまうという課題がある．ダムが本来持つポテンシャルを最大限に発揮するためにも，また，（1）で述べたような柔軟的かつ効果的な運用を実現するためにも，必要な時に必要な容量を空けておくことが重要であり，現行の操作規則に対する課題の抽出，改良の必要性やその実現性等を検討していく必要がある．

また，近年の取り組みとして，防災時には河川管理者（岐阜県）及び下流自治体（恵那市）に対し，降雨予測や操作見込み等の情報提供を行っている．今後も継続することで三者の連携をより強固なものにし，恵那市街地を水害から守るために万全を期していくこととする．

7.　まとめ

本稿では，阿木川ダム下流における残流域の流出特性について，従来の経験則との乖離，将来的な水害リスクについて触れるとともに，対応方針の一例について述べた．今後，ますます進展するであろう気候変動に備え，これまでの知見や経験則に囚われず，あらゆる可能性を視野に入れたダムの操作・運用方法を検討し，ダム管理の一助としていきたい．

参考文献

1)　恵那市：9・28豪雨災害誌，pp.17-19，昭和61年3月
2)　岐阜県恵那土木事務所：洪水浸水想定区域図作成（国補正分）委託報告書，平成31年3月
3)　国土交通省水管理・国土保全局：水文観測データ品質照査の手引き（改定案），p.75，令和5年3月

旭川水系における既存ストックの有効活用検証

福井　文菜[1]・門田　直人[1]・仁科　維之[1]

[1]中国地方整備局　岡山河川事務所　開発調査課　（〒700-0914 岡山県岡山市北区鹿田町2丁目4-36）

岡山県を流れる一級河川旭川では，令和2年度より「旭川中上流ダム再生事業」として，現在，実施計画調査段階である．一方，令和6年度よりダムの新規事業化までのプロセスが見直され，治水機能増強検討調査として，既存ストックを最大限活用することを検討・検証することが要件化された．また，令和6年3月に気候変動を考慮した河川整備基本方針（変更）を策定し，既存ストック活用を踏まえた洪水調節施設計画の精査等を行い，河川整備計画（変更）の策定を令和7年7月に行った．本稿では，河川整備計画（変更）にあたって実施した「旭川水系における既存ストックの有効活用検証」について報告を行うものである．

キーワード　整備計画，基本方針，ダム再生

1. 旭川の概要

旭川は，その源を岡山県真庭市蒜山の朝鍋鷲ヶ山に発し，途中，新庄川，目木川，備中川，宇甘川等の支川と合流し，岡山市北区三野で百間川を分流した後，岡山市の中心部を貫流して児島湾に注ぐ，流域面積1,810 km^2，幹川流路延長142kmの一級河川である．百間川は，貞享4年（1687年）頃に岡山城下を洪水から守る治水対策と，大規模な新田開発の両立を図るための放水路として整備され，現在まで約300年にわたってその役割を果たしている．

旭川流域は，岡山県の3市4町1村からなり，下流部には，岡山県の県庁所在地があり人口・資産が集中する岡山市の市街地を抱え，「烏城」で知られる岡山城，日本三名園の一つである「岡山後楽園」が位置するなど，社会，経済，文化の基盤となっている．

旭川本川は，図-1.1に示す河口から17.5kmまでが大臣管理区間となっており，それより上流は岡山県の管理区間となっている．

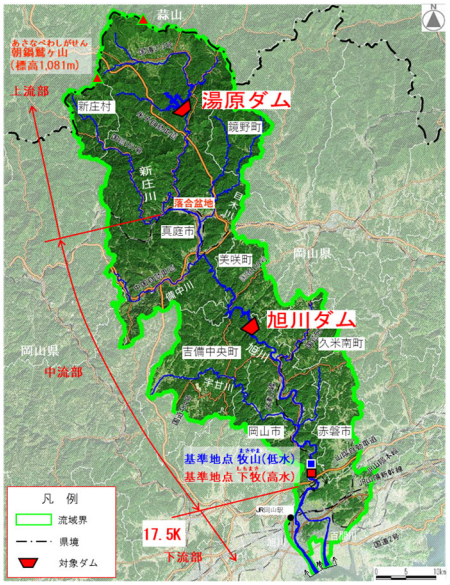


図-1.1　旭川水系流域図

2. 治水計画の変遷

(1) 旭川水系河川整備計画（変更）令和元年6月

平成25年に旭川水系河川整備計画【大臣管理区間】（以後，整備計画）策定後，平成30年7月豪雨が発災し，このような整備計画の目標を超える流量が発生したことによる課題や将来の気候変動の影響等を踏まえ，令和元年6月に整備計画（変更）を策定した．図-2.1は，令和元年6月策定時の整備計画の流量配分図を示している．目標流量6,500 m^3/sのうち，洪水調節施設により1,500 m^3/s調節し，残りの5,000 m^3/sを旭川へ3,450 m^3/s，百間川へ1,550

m³/s流す計画とした．

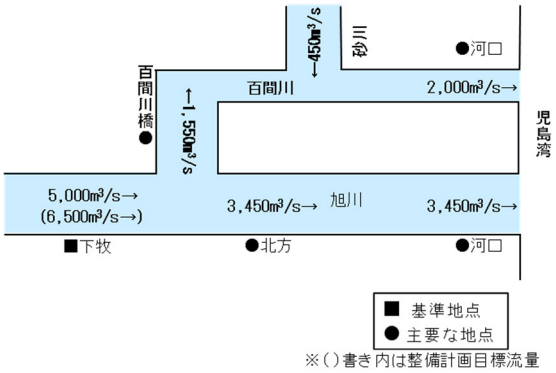


図-2.1　整備計画（令和元年策定）の流量配分図

以降，この整備計画に基づき，堤防整備や河道掘削等を進めるとともに，旭川ダム，湯原ダム等の既設ダムの有効活用等について調査・検討を行うこととした．詳細は，3章に述べる．

(2) 旭川水系河川整備基本方針（変更）令和6年3月

国土交通省では，令和元年10月に「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」提言を公表している．この提言を踏まえ，旭川水系においても河川整備基本方針（以後，基本方針）を変更することとなった．基本方針の変更に伴って，気候変動を考慮することだけでなく，時間雨量データの蓄積量及び主要洪水の継続時間の変化も伴い，これまで日系（2日）だった計画降雨量の降雨継続時間を時間系（18時間）に変更するとともに，主要降雨波形群を10洪水から23洪水に見直しを行うこととなった．

河道と洪水調節施設等の配分流量については，図-2.2に示すとおり基本高水のピーク流量9,400 m³/sのうち，河道配分流量を600 m³/s増大させ6,600 m³/s見込むこととし，ダム等の洪水調節施設は800m³/s増大させ2,800 m³/sを調節することとした．

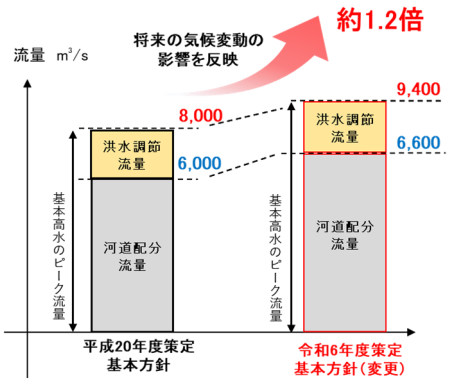


図-2.2　河道と洪水調節施設の配分流量の比較

上記を踏まえた計画高水流量図を図-2.3に示す．河道配分流量6,600m³/sのうち，旭川は平成20年度策定の基本方針と同様に4,000m³/sを踏襲した．これは，岡山市の中心部を貫流していることに伴う人口・資産の集積，沿川に特別名勝岡山後楽園や岡山城があることなど様々な要因から引堤や河道の大規模掘削は社会・経済への影響等から困難であるためである．そのため，増大した600 m³/sを百間川に流し2,000 m³/sから2,600 m³/sに増大することとした．百間川の利用状況を踏まえつつ，地域との合意形成を図りながら，可能な範囲で河道掘削や高水敷の盤下げ等を進めることで対応可能な流量である．

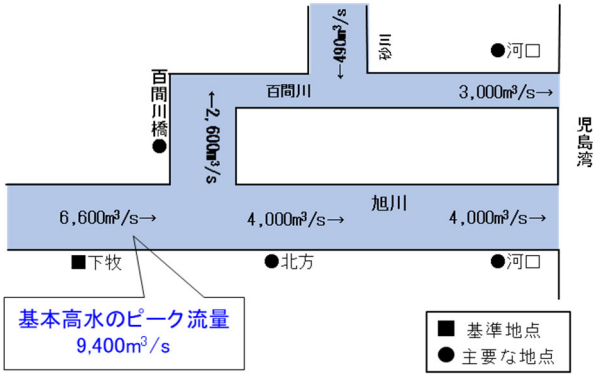


図-2.3　基本方針（令和6年策定）計画高水流量図

このような気候変動を踏まえた計画の見直しに加え，流域治水に関して河川管理者が実施すべき項目や流域治水を推進する立場として取り組む方針についても記載し，令和6年3月に旭川水系河川整備基本方針（変更）を策定した．

(3) 旭川水系河川整備計画（変更）令和7年7月

基本方針の変更に伴い基本高水ピーク流量・河道配分流量等が変更となったことから整備計画の見直しを行った．図-3.1に流量配分図を示している．

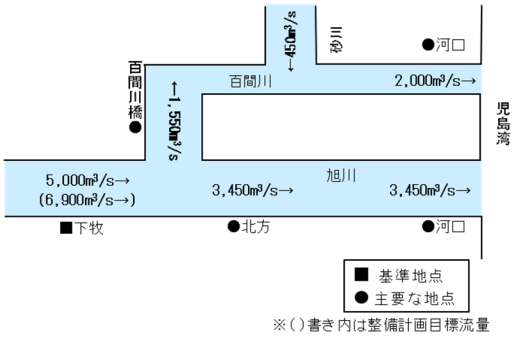


図-3.1　整備計画（令和7年策定）の流量配分図

整備計画の目標流量は，気候変動の影響を考慮した流量計算を行い6,900 m³/sとした．この目標流量6,900 m³/sに対して，河道配分流量は，令和元年策定の整備計画から

変更せず，5,000 m³/sとした．これは，令和元年策定の整備計画目標流量に達するまでの整備が途中であり，次期整備計画期間中に整備可能な河道を検討したものである．また，基本方針の河道整備に向けた段階的な整備として，上下流のバランスを考慮した配分流量となっていることから5,000 m³/sとした．そして，目標流量6,900 m³/sのうち河道整備分の5,000 m³/sを除いた洪水調節流量1,900 m³/sについては，現行の湯原ダムと後述の旭川ダム再生で対応可能であることを確認した．

3. 旭川中上流ダム再生事業

(1) ダム再生の背景

国土交通省が発表しているダム再生ビジョンによると，「流域の特性や課題に応じ，ソフト・ハード対策の両面から，既設ダムの長寿命化，効率的かつ高度なダム機能の維持，治水・利水・環境機能の回復・向上，地域振興への寄与など，既設ダムを有効活用する「ダム再生」を推進する」としている[1]．

このような背景から，旭川においても令和元年6月に策定した整備計画の目標とする治水安全度達成のための方策として，「旭川中上流ダム再生事業」（以後，本事業）を位置づけた．

a) 旭川ダムの諸元

旭川ダムは，旭川の中流部（河口から約50km離れた場所）に位置する重力式コンクリートダムである（**図-1.1**，**写真-4.1**）．昭和29年に完成し，洪水調節，上水道用水，発電，流水の正常な機能の維持を目的とした堤高45m，総貯水容量57,382千m³，湛水面積4.21km²のダムである[2]．旭川水系には全11ダムがあるが，旭川ダムが流域最大の集積面積（1,140 km²）となっており，下牧上流の流域面積1,588 km²の約2/3を占めている．



写真-4.1 旭川ダム

b) 湯原ダムの諸元

湯原ダムは，旭川の上流部の美作三湯の一つである湯原温泉の露天風呂「砂湯」から約300m上流に位置し（**図-1.1**，**写真-4.2**），集水面積255km²，総貯水容量99,600千m³におよぶ貯水池を持つ洪水調節と発電を目的とした，堤高73.5mの重力式コンクリートダムである[3]．このダムの有効貯水容量86,000千m³は岡山県最大であるとともに，ダムによってできた「湯原湖」の湛水面積は4.55km²で中国地方最大である[3]．



写真-4.2 湯原ダム

(2) 旭川中上流ダム再生事業のこれまでの経緯

本事業は，令和元年6月に策定した整備計画において目標とする治水安全度の達成のための方策として位置づけられ，旭川ダム，湯原ダム等の既設ダムについて洪水調節機能の向上のための方策について検討し，旭川沿川における浸水被害の防止又は軽減を図るための対策を実施する事業である．

令和元年8月に新規事業採択された本事業は，中国地方の直轄事業としては初めてのダム再生事業である．令和2年4月から実施計画調査に着手し，地質・環境等の各種調査や概略設計を進めているところである．

(3) 実施計画調査段階での計画

令和元年8月に事業化した際の事業計画について述べる．令和元年6月に変更した整備計画を踏まえ，既設の旭川ダムの利水容量を洪水調節容量に振り替えるとともに予備放流を実施し現況の洪水調節容量を23,000千m³から6,000千m³増加させ，約29,000千m³とし，低標高部にトンネル洪水吐きを整備し放流機能の増強を行うことにより，洪水調節機能の向上を図る計画とした．トンネル洪水吐きのイメージ図を以下の**図-3.1**に示す．

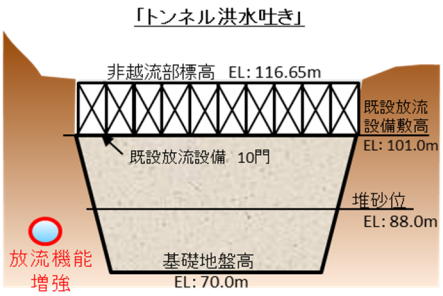


図-3.1 令和2年度事業着手時のトンネル洪水吐きイメージ図

また，旭川ダムで減少する利水容量は，湯原ダムに振り替え，さらに発電容量を確保することで旭川水系全体で減電とならない計画とした．

4. 旭川ダム再生事業

(1) 治水機能増強検討調査の要件化

本事業は，令和6年3月に変更した基本方針に加え，令和2年度の実施計画調査に着手後に「治水機能増強検討調査」が要件化されたことにより，事業計画を精査する必要が生じ，その結果，事業内容が変更となった．

治水機能増強検討調査とは，事前放流の取組等が進展していることから，ダムの改造・新設の検討にあたっては，事前放流のさらなる活用や放流操作の最適化など，既存ストックを最大限活用することを検討・検証することを要件化したものである[4]．

本事業においても，これに基づき既存ストックを最大限活用できるように計画の精査を行った．

(2)既存ストックを最大限活用した旭川ダム再生の検討

a) 旭川ダム再生の検討対象及び検討条件

治水機能増強検討調査の要件化に伴い，それに準じた検討を行った．令和6年に変更した基本方針に基づき，旭川中上流ダム再生事業についても基本方針規模の外力を想定した将来的な整備視点に立った検討を行った．検討にあたり，検討条件を基準地点下牧で計画高水流量6,600 m^3/sを超過しないこと及び「緊急放流」を行わないことを検討条件とした．緊急放流とは，ダムが満水に達すると想定される場合，流入量をそのまま下流に流す操作のことである．

なお，検討対象となる施設は旭川ダム，湯原ダム（以後，現行施設とする）とした．対象施設の選定は，治水協定を締結している11ダムのうち，上記2ダムを除く9ダムは洪水調節可能容量が小さく，主要降雨波形群23洪水における事前放流の効果を検証した結果，効果割合が最大でも1.9%となり，治水効果も小さいため検討対象外とした．

b) 現行施設の能力を最大限活用した検討

まず，施設整備規模を比較的小さく抑えるため，現行施設を最大限活用する有効策として，「事前放流」「操作見直し」「容量振替」を検討した．

有効策の一つとしてあげられている「事前放流」とは，以下の図-4.1に示すとおり，通常水が溜まっている容量である利水容量を使用し，予め降雨が予想される場合において，事前に水位を下げておくことにより，洪水調節容量を増やす取組である．

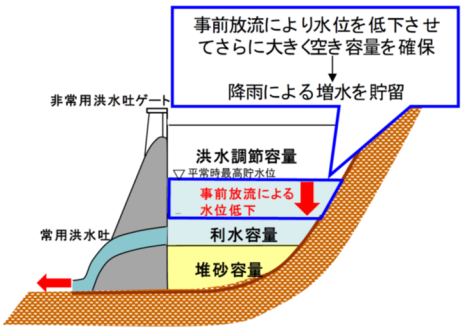


図-4.1 治水等（多目的）ダムにおける事前放流

旭川水系では，令和2年に旭川水系治水協定を締結し，利水容量を活用した事前放流の取組を行っている．

検討における「事前放流」については，事前放流ガイドラインに基づき既設の利水放流施設やクレストゲートを用い，3日前から事前放流による水位低下を始め，低下可能な水位を検討し，確保可能な容量を確認した．その結果，クレストゲート敷高程度までしか水位を低下させることができず，湯原ダムでは緊急放流とならなかったが旭川ダムでは緊急放流となり，基準地点下牧において計画高水流量を満足出来なかった．

この結果を踏まえ，旭川ダムにおける緊急放流を回避するためには，放流量を増加させる必要があるのではと考え，施設最大放流が可能となる自然調節方式による洪水調節を行う「操作見直し」を検討した．

また，計画高水流量を満足させるためには，事前放流により確保出来る容量に加え，洪水調節可能容量を確保するための「容量振替」を検討した．

検討の結果，「操作見直し」及び「容量振替」を実施しても緊急放流を回避することができなかったため，現行施設の改造を伴う検討を行うこととした．

c) 設備改造を伴う有効策の検討

「トンネル洪水吐き」及び「移設型ダム再生」の2案を検討した．トンネル洪水吐きを整備する案については，令和2年度に事業化した際の計画であるが，気候変動に伴う洪水調節量の増加等を踏まえて再検討すると，トンネル洪水吐きの設備規模が大きくなるなど，経済性において不利であることが分かった．

一方，移設型ダム再生については，計画高水流量を超過するものの，下流に移設することで 既存ダムの貯水池を最大限活用することができるため効率的であることが分かった．

これらの現行施設の改造を行うことによって，緊急放流は回避できたものの，基準地点下牧での計画高水流量を満足できなかったため，さらなる洪水調節容量の確保を検討する必要があることが分かった．

d) 移設型ダム再生（下流移設案）の検討

下流移設を行うにあたって，さらなる洪水調節容量の確保を行うため「設備改造」「操作見直し」「事前放流」

に加え，「嵩上げ」を加えた検討を行った．嵩上げ高については，主要降雨波形群23洪水において「設備改造」「操作見直し」「事前放流」を踏まえた洪水調節計算を実施した．

その結果，必要な洪水調節容量を確保するために約9mの嵩上げが必要となった．

この場合，3次元の点群データによりダム貯水池周辺の家屋や公共施設の高さ等を確認すると，補償家屋が大規模となり社会的影響が大きいことから，実現可能な高さとして，洪水時に貯水池に貯めることができる最高水位であるSWL.をE.L.110.4mとする結果となった．

令和6年策定の基本方針において，「設備改造」「操作見直し」「事前放流」に加え，現実的な観点からSWL.をE.L.110.4mに嵩上げすることでは，計画高水流量を超過する結果となる．つまり，治水機能増強検討調査に準じた検討を行った結果，既存ストックを最大限活用しても新たな洪水調節施設を設ける必要があることが明確となった．

(3) 整備計画規模での旭川ダム再生の検討

(2) の検討を踏まえて，整備計画に位置づけるために整備計画規模での検討を行った．検討にあたっては，整備計画の河道配分流量である5,000 m³/sを超過しないこと及び緊急放流しないことを条件とした．

a) 現行施設の能力を最大限活用した検討

基本方針の検討と同様に，「事前放流」「操作見直し」「容量振替」について検討を行った．その際，事前放流の実施判断を，山陽地域の過去の降雨における予測と実績の相関性や誤差の程度により18時間前として検討を行い，これにより事前放流により確保出来る容量を4,000千m3とした．

この条件を踏まえて，「事前放流」「操作見直し」「容量振替」について検討を行った結果，どの検討においても河道配分流量を超過し，旭川ダムにおいて緊急放流を開始する結果となったことから，既存ストックを最大限活用しても条件を満足しなかった．

このことから，湯原ダムは現行施設を活用することで問題はないが，旭川ダムの緊急放流を回避する必要がある．このことから，(2)の(c)で述べたとおり，経済性で有利となる下流移設によるダム再生の検討を行うこととした．

b) 整備計画規模での下流移設案の検討

(2)のd)において，社会的影響を考慮したSWL.をE.L.110.4mまで嵩上げする計画としており，この計画での検討を行った結果，基準地点下牧で整備計画の河道配分流量を超過しないこと及び緊急放流を行わないことを満足したため，整備計画における旭川ダム再生は，既存ストックを最大限活用した「設備改造」「操作見直し」「事前放流」「嵩上げ」を行う計画とした．

この計画のうち，事前放流を令和7年7月策定の整備計画に位置づけることができ，全国初めての取組となった．また，既存のダムを有効活用する計画のため，新規ダムを整備するよりも早期に効果発現が見込まれ，大規模な家屋移転や用地買収の必要はないと考えられる．また、環境についても水域環境への改変が少なく，周辺の生物の生育環境への影響は少ないと考えられ，大変有効的な計画である．

(7) 旭川ダム再生事業

上記で検討した旭川ダム再生事業の事業計画について以下の図-4.3に示す．



図-4.3　既存の貯水池を活用したダム再生計画（案）

旭川ダム再生後の容量配分図は，以下の図-4.4のとおりである．

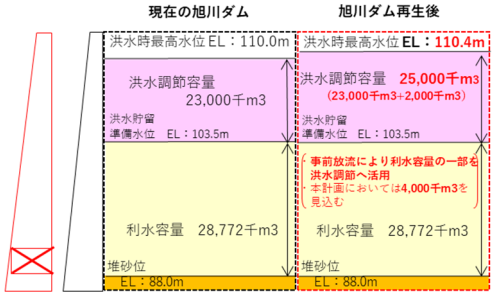


図-4.4　現在の旭川ダム及びダム再生後の容量配分図（案）

左側に現在の旭川ダム，右側にダム再生後の容量配分図を示している．現在の旭川ダムを「嵩上げ」することにより，洪水時最高水位を40cm上げ，洪水調節容量23,000千m³から2,000千m³を増加させた25,000千m³の洪水調節容量を確保させ，さらに，「事前放流」により4,000千 m³を見込む．この容量を確保するために，「設備改造」としてダムを下流に移設するとともに，放流設備の増強を行う．

現在の旭川ダム操作は一定率一定量調節方式を採用しているが，最も効果的な洪水調節方式として，水位放流方式に「操作見直し」を行った．水位放流方式とは，貯

水池情報を基に，放流開始時期および放流量を決定するダム操作方法である．この操作方法を用いることで，基準地点下牧においてピークカットができ，洪水調節容量を効率的に使用することができる．

これにより基準地点下牧において，整備計画目標流量6,900m³/sのうち1,900m³/sを洪水調節する計画である．なお，1,900m³/sには，洪水特性や降水量予測の不確実性等により「事前放流」の効果は異なるが，「事前放流」による効果量を最大で300m³/s見込んでいる．

本事業を行うことにより，整備計画の目標規模の洪水が起きた場合で，旭川ダム下流の水位を低下させることができ，浸水被害の防止又は軽減を図ることが可能なため旭川全体の治水安全度が向上する．

5. 旭川ダム再生の課題に対する提案

(1) 旭川ダム再生（案）における課題

中国地方では，尾原ダム・殿ダムが平成23年に本体工事を完了して以来，ダムの建設を行っていない．そのため，ダムの技術者が減っており，ダム本体の設計・施工だけでなく事業全体の評価や課題の抽出が困難となっている．その中で現段階で考えられる課題について述べる．

a) 現在の旭川ダムの機能維持

現在の旭川ダム（以後，既設旭川ダム）の機能を維持しながらの施工となる．洪水調節機能や利水機能を確保しながらダム建設を行うため，確実な施工が可能であるかどうか，また，その施工方法の検討が必要であると考えている．

b) ダム再生工事中の対応

現在の事業計画では，既設旭川ダムは全て撤去するのではなく，再生後に影響のある範囲のみ撤去することを想定している．そのため，既設旭川ダムに影響が及ばない施工が必要である．例として，既設旭川ダム堤体下流の掘削や発破を行うことによる振動が考えられる．また，工事による影響を把握するための計測設備の配置検討も必要ではないかと考えている．

加えて，環境への配慮も必要である．環境への影響を予測評価した上で，必要な保全措置等の検討を行う．

c) 撤去施設の設定

前述したとおり既設旭川ダムの一部は残すことを想定しており，それに伴った貯水池の運用や計画堆砂量への影響，また水質への影響等を考慮して撤去範囲を決める必要がある．また，既設旭川ダムは貯水池に水没するため，水位低下により既設旭川ダムが出現したときの景観も考慮する必要がある．

(2) 今後の提案

日本全国で，直轄事業及び補助事業等として，これまでに74ダムでダム再生事業の事例があり，このうち，既設ダムを残置したまま下流にダム再生を実施している事例としては，完成が9ダム，再生中が2ダムある．先行してダム再生を行っている事例を参考に，対応策を検討していくことが最も有効ではないかと考えている． 先行事例から専門的な知見を得ながら，課題を抽出し，対応策を検討するとともに，環境等に配慮しながら手戻りのない施工を進めていく．

6. 最後に

気候変動に伴う基本方針と整備計画の変更，事前放流による利水容量の活用を整備計画に見込む全国初の検討，中国地方の直轄事業における初めてのダム再生等，初めて行うことが多く，その分，様々な検討を実施してきた．その中で考えられる課題については，現在検討を進めているところである．早急に課題解決を行い，旭川ダム再生の早期完了に向けて努める．

また，引き続き，整備計画に位置づけられた堤防整備や河道掘削，樹木伐開などの河川整備を併せて行うことなど，流域のあらゆる主体で流域治水プロジェクトに位置づけた取組を計画的に推進することにより，旭川水系全体の治水安全度が向上するよう努める．

参考文献

1) 国土交通省：ダム再生ビジョン　平成 29 年 6 月
<https://www.mlit.go.jp/common/001190127.pdf>（令和7年6月24日閲覧）

2)岡山県：旭川ダムの概要（令和7年6月30日閲覧）
<https://www.pref.okayama.jp/page/detail-27431.html>

3) 岡山県：湯原ダムの概要　（令和7年6月30日閲覧）
<https://www.pref.okayama.jp/page/detail-4163.html>

4)国土交通省：治水機能増強検討調査とは
<https://www.mlit.go.jp/river/dam/pdf/chikizoo.pdf>（令和7年7月1日閲覧）

5)国土交通省：事業評価実施要領細目
<https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/pdf/kasen_04_saimoku.pdf>（令和7年7月1日閲覧）