

航空機搭載型合成開口レーダ（航空機SAR）の 常設化改修

田代 ゆかり¹・石塚 麻奈¹・関口 泰徳²・笹川 啓¹

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

²国土地理院 企画部 測量指導課（〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番）

国土地理院では、災害発生時に測量用航空機「くにかぜⅢ」を用いて、災害の種類や被災状況に合わせたセンサを活用した観測を行っており、火山噴火時には地形変化の把握を目的として、雲や噴煙を透過するマイクロ波を用いたセンサである航空機SARによる観測を行っている。迅速な災害対応を可能とするため、2019年度には航空機SARの常設化改修を行った。改修前後の航空機SARの仕様比較や精度検証結果を報告する。

キーワード 航空機SAR, くにかぜⅢ, 災害対応, 火山地形把握, 位置精度検証

1. はじめに

国土地理院は、災害対策基本法に基づく指定行政機関として、災害時の迅速な被災状況把握及び災害復旧を支援するため、測量用航空機「くにかぜⅢ」（以下「くにかぜⅢ」という。）による災害対応を行っている。くにかぜⅢでは、測量用航空カメラ、航空レーザ機器及び航空機搭載型合成開口レーダ（以下「航空機 SAR」という。）や一眼レフカメラ等のセンサを、災害の種類や被災状況に合わせて使い分けて活用している。火山災害においては、光学センサによる観測は噴煙による影響などで制限されるが、マイクロ波を用いたセンサである航空機 SAR は、雲や噴煙などの影響を受けずに観測が可能であり、火山火口周辺の地形変化把握に活用されてきた。

しかしながら、航空機 SAR は構成機材が大きく、一部の他機器との同時搭載が不可能であり、これが迅速な災害対応の妨げとなっていた。そこで、災害時の迅速な観測を可能とするため、2019年度に航空機 SAR の常設化改修を行った¹⁾。改修の概要と試験観測の結果を報告する。

2. 改修概要

2011年度から運用してきた従来の航空機SARは、その構成機材の大きさから、航空レーザ機器との同時搭載が不可能であった。そのため、未搭載の機器を使用する際には、くにかぜⅢが地方空港を拠点とした作業を実施している場合であっても、一度本拠地である東京の調布飛

行場まで戻って機器の積替えをする必要があり、これが迅速な災害対応の妨げとなっていた。そこで、2019年度に構成機材を小さくし、他機器との同時搭載が可能となるような航空機SAR常設化改修を行った（図-1）。

従来の機器では、くにかぜⅢの姿勢変化に応じてアンテナ架台が回転することで電波照射方向を調整していたが、今回の改修で電波照射方向を電氣的に制御する方式（フェーズドアレイ方式）に変更したことで、アンテナ架台の回転機構が不要となり、機器性能を維持したまま省スペース化を実現できた。照射する電波の帯域幅や中心周波数等は変更していないため、従来の SAR 観測と同様のデータが取得できる（表-1）。

表-1 改修前後の航空機SAR機器仕様比較

	改修前	改修後
観測モード	Stripmap	
送信中心周波数	9.4GHz (Xバンド)	
最大送信帯域幅	300MHz	
偏波	水平送信／水平受信 (HH)	
送信電力	10W	
観測幅	最大 10km	
空間分解能 (ノミナル値)	0.6m～5m	
オフナディア角可 変範囲	55°～75° (5°刻 みで可変, 機上 変更不可)	55°～75° (5°刻 みで可変, 機上 変更可)
干渉 SAR 用受信 アンテナ間距離	84cm	89cm
重量	61kg	45kg

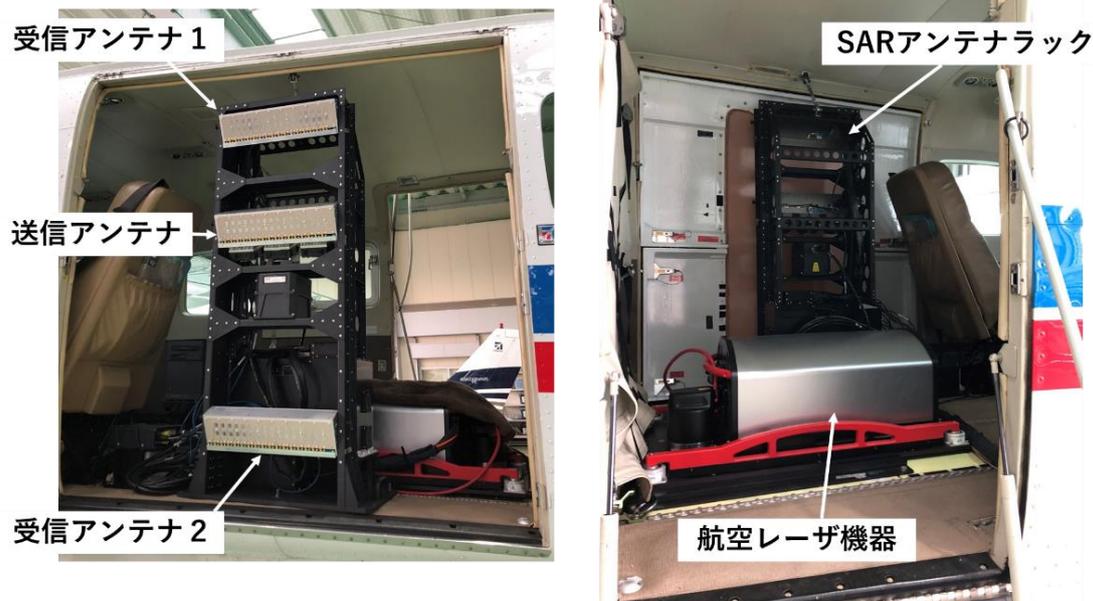


図-1 改修後の航空機 SAR 機器の外観及びくにかぜⅢ機内への搭載状態

また、改修に伴いオフナディア角（くにかぜⅢ直下と電波照射方向のなす角度）の変更が容易になった。従来は角度変更の際は地上駐機中に工具を使用し30分程度要していたが、改修後は飛行中に5分程度の手作業で容易に変更できるようになった。これにより、画像の写り具合によって観測中に角度を変更することで、火口内のより深いところの観測を行えたり、あらかじめ設定されているオフナディア角の異なる複数火山を1フライトで観測できたりと、柔軟な観測が可能になった。

3. 水平位置精度検証

茨城県つくば市国土地理院周辺と静岡県伊東市大室山近辺の観測を実施し、取得データの解析により得られる再生画像の水平位置精度検証を行った。観測諸元を表-2に、くにかぜⅢの飛行経路と電波照射方向を図-2に示す。飛行高度、また、観測対象の違いから、両地区での飛行経路長は異なる。

再生画像作成には機体の位置や傾きを計測するGNSS/IMUにより得られた軌跡解析結果を用い、基盤地図情報（数値標高モデル）10mメッシュ（標高）を用いてオルソ補正を行った。

水平位置精度検証にあたっては、地上検証点としてコーナーリフレクタを使用した。コーナーリフレクタは入射波の入ってくる方向へ反射波を返すという特性があるため、再生画像上で反射位置が白く光る。つくば地区では国土地理院グラウンドに、コーナーリフレクタを4つ

繋げて設置し、それぞれ東西南北の方向を向くようにした（図-3）。大室山地区では山頂につくば地区と同様に4つ、また、山麓駐車場に東西の方向を向くよう2つ、計6つ設置した。SAR観測終了後に、コーナーリフレクタを設置した位置を、VRS方式のRTK-GNSS測量で取得した（図-4）。

再生画像上のコーナーリフレクタが白く光る反射位置（図-5）と、VRSで取得した実際の位置情報を比較した水平位置精度検証結果を表-3に示す。従来の航空機SAR（大室山地区でRMSE2.951m）²⁾と比較して、改修後の航空機SARではつくば地区・大室山地区ともにより精度よく観測でき、今後の火山観測に十分な精度を有しているといえる。

精度向上の要因として、電波照射制御方式をフェーズドアレイ方式へ変更したことで従来より精密な電波照射制御が可能になったこと、また、SARの改修と合わせてGNSS/IMUを新しくしたことで、従来より正確に機体の傾きを把握できるようになったことが考えられる。

表-2 観測諸元

観測地	つくば	大室山
観測日	2020/6/4	2020/6/16
観測方向	8方向	8方向
オフナディア角	65°	65°
飛行高度	約2,400m	約3,000m

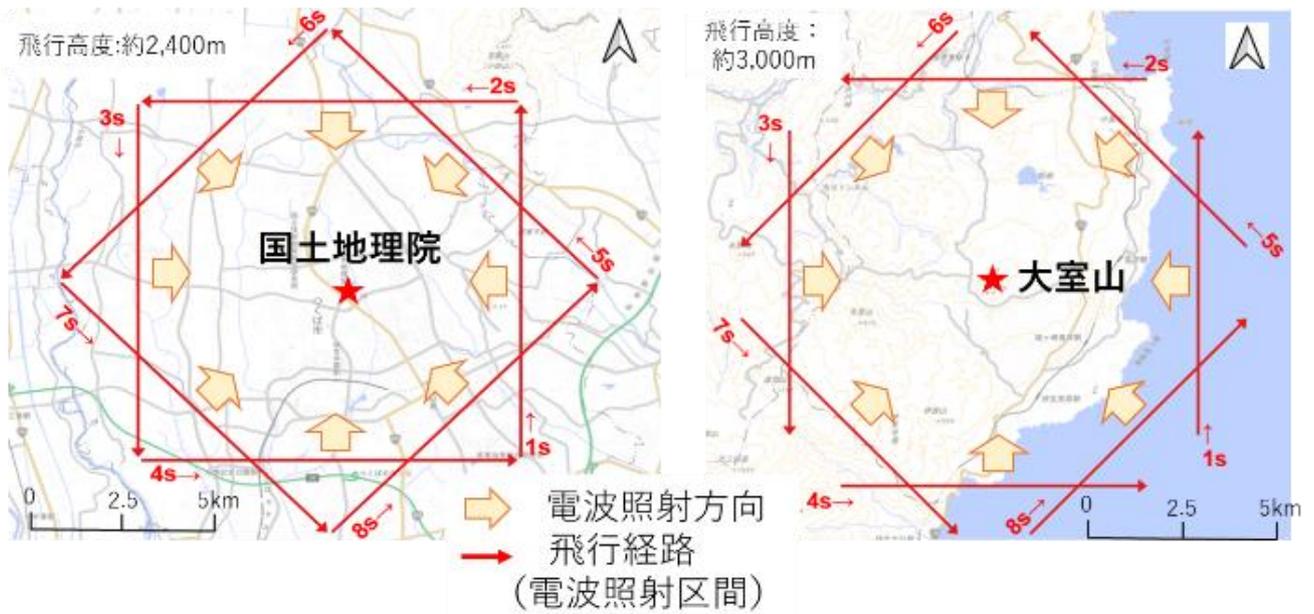


図-2 つくば地区(左)・大室山地区(右)飛行コース

表-3 水平位置精度検証結果

つくば地区_国土地理院グラウンド				大室山地区_山頂				大室山地区_山麓駐車場			
飛行コース	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta XY(m)$	飛行コース	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta XY(m)$	飛行コース	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta XY(m)$
1s	-0.227	1.717	1.732	1s	-0.925	-1.067	1.412	1s	0.154	-1.376	1.385
2s	3.496	-0.851	3.598	2s	1.023	-1.544	1.852	2s	1.017	-1.824	2.088
3s	0.168	-1.719	1.727	3s	-0.039	0.338	0.340	3s	-1.737	0.527	1.815
4s	-0.472	0.153	0.496	4s	0.801	-2.727	2.843	4s	レーダーシャドウでデータ欠損		
5s	2.472	2.141	3.270	5s	0.143	-0.689	0.704	5s	0.306	-0.178	0.354
6s	1.693	-2.825	3.293	6s	1.795	-0.667	1.916	6s	0.374	-1.348	1.399
7s	-0.942	-0.797	1.234	7s	1.828	0.620	1.930	7s	3.529	-0.721	3.602
8s	-0.973	0.849	1.291	8s	1.005	-2.104	2.331	8s	1.965	-1.459	2.447
RMSE	1.708	1.603	2.342	RMSE	1.126	1.449	1.835	RMSE	1.716	1.195	2.091



図-3 4方向に設置した4枚のコーナーリフレクタ



図-4 VRSを用いた位置情報取得の様子

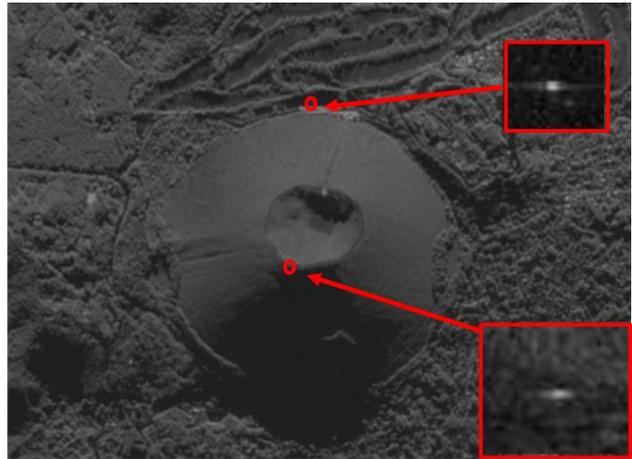
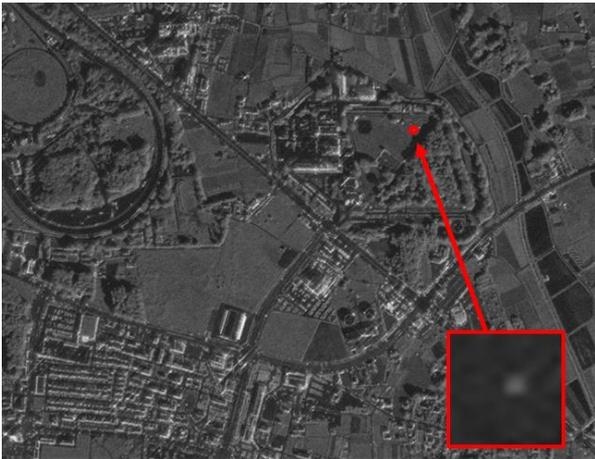


図5 つくば地区（左）・大室山地区（右）でのコーナーリフレクタ設置箇所と反射の様子

4. まとめ

災害時の迅速な観測を可能とするため、2019年度に航空機SARの常設化改修を行った。改修により航空機SARは小型化され、他機器との同時搭載が可能になるとともに、電波照射方向を電氣的に制御するフェーズドアレイ方式へ変更になった。また、改修の結果、オフナディア角の変更が容易になったことで従来よりも柔軟で機動的な観測が実現した。

改修後のSARで水平位置精度検証を行ったところ、従来よりも良い精度での観測が可能になった。

今後は、高さ方向の精度検証を行うとともに、火山噴火の際に迅速な対応ができるよう準備を進めていく。

参考文献

- 1)菅井秀翔, 片山理佐子, 笹川啓, 関口泰徳, 茶谷隆行 (2020) : 災害状況の迅速な把握, 提供技術の開発—航空機SARの常設化改修及び一眼レフカメラ等を活用した取組—, 国土地理院令和元年度調査研究年報, ページ未定.
- 2)伊藤裕之, 笹川啓, 藤原博行, 大野裕幸 (2012) : 災害時の運用に向けた航空機搭載型合成開口レーダの改修及び精度検証, 平成 24 年度日本写真測量学会秋季学術講演会発表論文集, 65-66.

センサやロボット技術を活用した 高度な避難安全性確保の可能性

鍵屋 浩司

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

本研究は、日常生活で実用化されているスマートフォン等のセンサや介護用ロボットを活用して、火災等の災害時に施設内の高齢者等の避難弱者を含むすべての在館者の避難をしやすいように機能拡張したプロトタイプを建築物に実装して、実証実験を行うものである。

これにより、施設内の避難誘導において有すべき要件やこれらを活用する施設の設計指針を提示して、建築物等の施設の高度な避難安全性を確保する技術の開発・社会実装を促進する。本稿では、現在実施中の研究概要と今後の展開を紹介する。

キーワード センサ、スマートフォン、介護用ロボット、避難誘導、介助避難、避難弱者

1. はじめに

超高齢社会に突入した我が国は、10年後に人口の3人に一人が65歳以上になることが予測されている(図-1)。

現在、建築防災計画は健康者を標準として計画されてきたが、超高齢社会では、身体能力が健康者よりも低下した避難弱者(自力避難が困難でその円滑かつ迅速な避難に支援を要する者)が大半を占めることが予想される。

このため、将来にわたって現行の防火規定で要求される水準と同等な避難安全性を確保するためには、より高度な避難安全性を確保することが必要である。

また、超高層建築物群や駅・地下街等の大規模施設に見られる機能の重層・複合化、建築ストックの長寿化、バリアフリー化への社会的要請に対して、様々な用途や多様な在館者特性に柔軟に対応できる避難誘導技術が必要不可欠と考える。

火災時の避難安全に関する技術的背景として、従来、火災の発生は火災報知器で在館者に知らされるが、建築物のどこでどのくらいの範囲で発生しているかは、防災センター等で受信される煙感知器や熱感知器の作動状況以外では即座に把握することは困難である。

このため特に大規模施設では在館者の火災覚知や避難開始の遅れ、避難経路の誤認、不特定多数の在館者の避難行動の混乱につながる可能性がある。

一方、近年のセンサ技術や情報通信技術の飛躍的進歩によって、高性能の感知・制御技術が普及するとともに、装着型・介護ロボット技術も実用化されている。

そこで、本研究ではメーカーとの共同研究等によって、実用化されているセンサやロボット技術を活用して、避難弱者を含むすべての在館者の火災時の避難を迅速かつ円滑にするように機能拡張したプロトタイプを建築物に実装して実証実験を行い、建築物等の施設の高度な避難安全性を確保する技術の開発を促進するものである。



図-1 高齢者人口と割合の実態と推計
(内閣府、平成30年度版高齢社会白書から作成)

2. センサやロボット技術を活用した避難安全技術

本研究では、以下の避難誘導技術のプロトタイプを構築して実証実験を行い、これらに要求される機能・性能等の技術基準の枠組みを構築することを構想している。

(1) 避難ナビゲーションシステム

超高層建築物群や都心の駅、地下街等の大規模施設において、火災感知器に空調・防犯センサ等を連携させて、火災時に火災による熱や煙の影響を受けている範囲などを即座にかつきめ細かく把握して、在館者のスマホやデ

デジタルサイネージ（電子看板）等にリアルタイムで有効な避難経路等の情報を提供する技術（図-2）である。



スマホで火災の状況に応じてリアルタイムに避難誘導するイメージ

人感センサ・防犯カメラ（屋内に設置されているセンサの例）

図-2 避難ナビゲーションシステムのイメージ

(2) 介護用ロボットを活用した避難技術

超高齢社会では、自力避難が困難な要介護者が火災等の災害時に避難しやすくするための技術開発がなお一層求められる。そこで、すでに普及が進みつつある介護用ロボット²⁾（表-1、図-3）に着目して、避難支援用に追加すべき機能や、ロボットが稼働する高齢者福祉施設や病院などの設計指針について検討する。

表-1 ロボット技術の介護利用における開発等の重点分野²⁾
（厚生労働省・経済産業省）

1. 乗介助	<ul style="list-style-type: none"> ・ロボット技術を用いて介助者のパワーアシストを行う装着型の機器 ・ロボット技術を用いて介助者による抱え上げ動作のパワーアシストを行う非装着型の機器
2. 移動介助	<ul style="list-style-type: none"> ・高齢者等の外出をサポートし、荷物等を安全に運搬できるロボット技術を用いた歩行支援機器 ・高齢者等の屋内移動や立ち座りをサポートし、特にトイレへの往復やトイレ内での姿勢保持を支援するロボット技術を用いた歩行支援機器 ・高齢者等の外出等をサポートし、転倒予防や歩行等を補助するロボット技術を用いた装着型の移動支援機器
3. 排泄支援	<ul style="list-style-type: none"> ・排泄物の処理にロボット技術を用いた設置位置の調整可能なトイレ ・ロボット技術を用いて排泄を予測し、的確なタイミングでトイレへ誘導する機器 ・ロボット技術を用いてトイレ内での下衣の着脱等の排泄の一連の動作を支援する機器
4. 見守り・コミュニケーション	<ul style="list-style-type: none"> ・介護施設において使用する、センサーや外部通信機能を備えたロボット技術を用いた機器のプラットフォーム ・在宅介護において使用する、転倒検知センサーや外部通信機能を備えたロボット技術を用いた機器のプラットフォーム ・高齢者等とのコミュニケーションにロボット技術を用いた生活支援機器
5. 入浴支援	<ul style="list-style-type: none"> ・ロボット技術を用いて浴槽に出入りする際の一連の動作を支援する機器
6. 介護業務支援	<ul style="list-style-type: none"> ・ロボット技術を用いて、見守り、移動支援、排泄支援をはじめとする介護業務に伴う情報を収集・蓄積

し、それを基に、高齢者等の必要な支援に活用することを可能とする機器

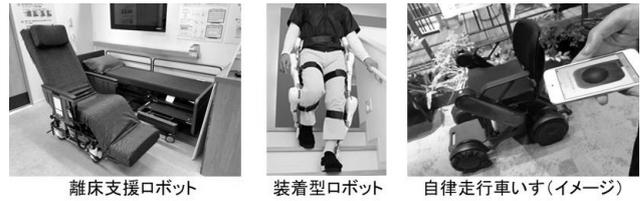


図-3 実用化されている介護用ロボットの例

3. 機能拡張上の課題の整理

(1) 機能拡張の考え方

避難ナビゲーションシステムや介護用ロボットを活用した避難誘導技術のプロトタイプ構築にあたり、それらに求められる機能を明確にする必要がある。例えば、避難に要する時間に応じてシステムを機能維持するための電源の確保やシステムの省電力化が必須である。

そこで目的に応じた要求性能を明確にするための試みとして避難に要する時間と空間（移動距離）を整理したもの³⁾を図-4に示す。また、建築物単体を越えた避難にあたって避難誘導のスケールに応じて自助・共助・公助の位置づけの整理も必要である。

さらに、介護ロボットを活用した避難誘導について、施設内の自律走行も想定して、開発が急速に進んでいる自動車の自動運転技術のレベル⁴⁾を参考に、避難方法を整理³⁾した（表-2）。

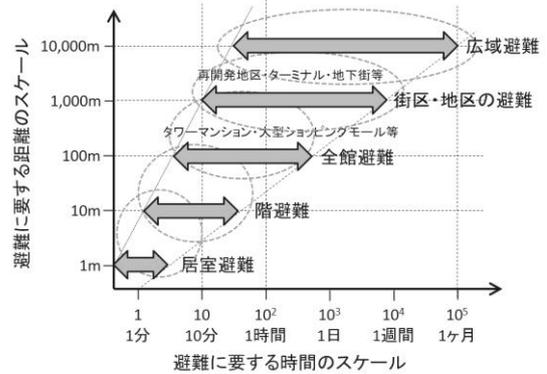


図-4 避難に関する時間と空間のスケール³⁾

表-2 自動車の自動運転化レベルとロボットを活用した避難³⁾

レベル	運転の主体	自動車の運転内容	ロボットを活用した避難
0	運転者	運転支援・自動化機能のない一般的な自動車	利用者・介助者が避難にかかる全ての行動を実行
1	運転支援	自動ブレーキ、車線逸脱防止機能等の運転支援	利用者・介助者の特定の避難行動を支援
2	部分運転自動化	限定された領域での部分的な自動運転で、運転者がシステムを監督	限定された領域での部分的な自動避難で利用者・介助者がシステムを監督
3	条件付運転自動化 (緊急時に対応可能な運転者)	限定された領域での自動運転で、緊急時以外はシステムが運転	限定された領域内を自動で避難。動作が中断された場合に介助者等が補助
4	高度運転自動化	限定された領域のみシステムが自動運転	限定された領域内の安全な場所まで自動で避難
5	完全運転自動化	運転者が不要な、完全な自動運転	屋外の安全な場所まで自動で避難

(2) メーカーの開発担当者へのヒアリング

実用化されているセンサ技術や介護用ロボットの避難誘導への機能拡張上の技術的課題や市場性について、それぞれのメーカーの開発担当者へのヒアリングを行った。

ヒアリングの方法は、本研究¹⁾の内容を説明した上で、各メーカーで実用化しているセンサやロボット技術の避難誘導への機能拡張の可能性について意見交換を行った。その結果、いずれも避難誘導は想定されていなかったが、機能拡張には興味を持っており、その市場性ととも、それぞれの技術の課題も明らかになった(表-3,4)。

表-3 センサ技術の避難誘導への適用上の課題

センサ技術の例	特徴	避難誘導への機能拡張上の課題(例)
AR(拡張現実)ナビゲーション	GPSが使えない屋内でスマホに表示された前方の視野に、目的地に向かう経路をリアルタイムに表示して誘導する	人混みの中を歩くような前方の見通しが確保できない場合は誘導できない
AIによる画像認識	駅等の施設で不特定多数の利用者の動きを防犯カメラの映像でリアルタイムに分析して異常を即座に検知する	避難が必要となる異常時の画像の状況をAIに適切に学習させることが必要
行動分析センサ	高齢者福祉施設や病院等の個室で在室者の動作をプライバシーに配慮しつつ見守る	停電時の電源の確保

表-4 介護用ロボットの避難誘導への適用上の課題

ロボット技術の例	特徴	避難誘導への機能拡張上の課題(例)
離床支援ロボット	ベッドの半分が車いすとして分離することにより、車いすとの移乗時の負担を軽減する	移乗の時間は短縮できるが、介助者による水平移動を前提に開発
自律走行車いす	周囲の状況を判断しながら目的地に向かって自動走行する	人混みの中では、自律走行が困難
装着型ロボット	身体に装着して歩行等の自律行動を支援する	パニック防止のため避難弱者ではなく、介助者が装着する方が現実的

4. スマートフォンによる大規模施設内の避難誘導

スマートフォン(スマホ)の普及や通信環境の発達によって、動画など膨大な情報がどこでも即座にやり取りできるようになってきている。

そこで、地下街などの複雑な大規模施設で火災などの災害が発生したときに、リアルタイムでスマホの画面に非常口までの避難経路をわかりやすく示して誘導する方法(図-5)を研究している。

まず、その可能性を検討するために、実験上の安全確保を前提に、スマホの使い方が歩行速度に及ぼす影響を建築研究所の廊下や階段を使って実験⁵⁾した(図-6,7)。

実験の方法は、20~56歳までの成人男女12名(表-2)が、廊下や階段の歩行コース(図-8)を通常の歩行のほか、前方の視野を表示させたスマホの画面(図-9)を見ながら歩く場合(「視野付きながら」とスマホの画面で文字を打ちながら歩く場合(「文字打ちながら」)について、それぞれ廊下や階段を歩く速度をビデオカメラで撮影して測定した。

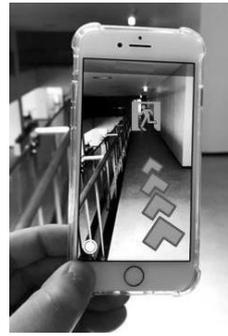


図-5 避難誘導のイメージ

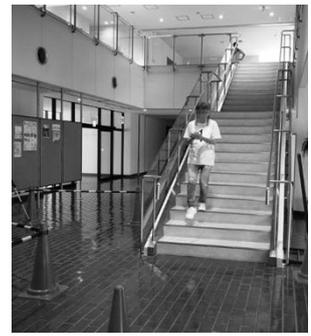
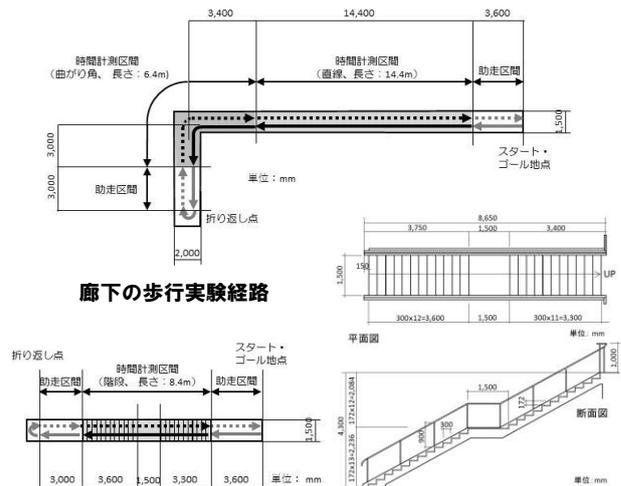


図-6 階段の歩行実験の様子



図-7 廊下の歩行実験の様子



廊下の歩行実験経路

階段の詳細図

図-8 実験の歩行コース(廊下・階段)

表-2 実験参加者リスト

No.	年齢	性別	身長 [cm]
1	56	男	168
2	32	男	177
3	33	男	161
4	35	女	158
5	36	女	168
6	20	女	154
7	44	男	167
8	26	女	159
9	24	男	173
10	30	男	166
11	24	男	173
12	46	男	172
平均身長			166.3



図-9 「視野付きながら」の画面

その結果、例えば「文字打ちながら」の場合の歩行速度は、通常の歩行速度より約15～30%低下したが、「視野付きながら」の場合、廊下を歩く速度については7%の低下であり、通常歩行に対して速度低下の幅が最も小さいことがわかった（図-10）。

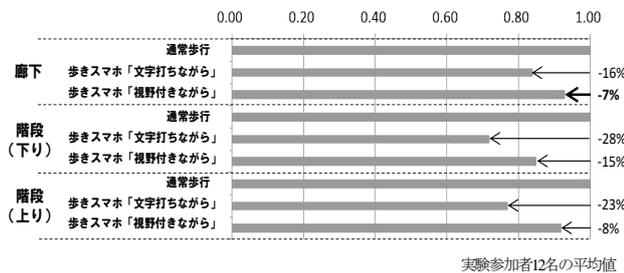


図-10 通常歩行に対する歩きスマホの歩行速度の割合

これは大規模施設内の廊下などの水平方向の避難誘導に、前方の視野をスマホの画面に表示させて避難誘導する技術の見通しをつけるものと考えられ、引き続き具体的な誘導方法などについて研究を行っている。

5. 介護用ロボットを活用した施設内の避難

高齢者福祉施設や病院において、自力避難が困難な要介護者が、火災等の災害時に避難しやすくするための研究を行っている。

従来、避難方法はベッド上の要介護者を複数の介助者が車いすやストレッチャー等に寄せかえたり、ベッドごと搬送する方法が取られており、介助者の身体的負担や人員確保が日常業務を含めて課題になっている。

そこで普及が進みつつある介護用ロボットに着目して、日常的な介護の使用のほか、災害時には避難にも活用するために追加すべき機能や、ロボットが稼働するこれらの施設の設計上の要件を明らかにするために、介護用ロボットを使った避難を模擬した実験を行っている。

事例として今年9月に建築研究所の実験施設で行った、介護用ロボットを使った避難実験を紹介する。実験では実用化されている介護用ロボットの例として、ベッドの一部が電動で分離・変形して車いすになる離床支援ロボット（図-11）を使用した。このように介護用ロボットを、自力避難困難者（自力で歩行することが困難な人）の避難に応用する実験は前例がない。



図-11 離床支援ロボット 図-12 要介護者（介護訓練用人形）

実験の方法は、離床支援ロボットのベッドに横たわる要介護者（介護訓練用人形、図-12）を、介助者役の20歳代の男女と40歳代の女性（計8名）それぞれがベッドを車いすにリモコンで分離・変形させて、部屋の出口を通して廊下に搬送するまでに要する時間を測定した。部屋は高齢者福祉施設の介護居室や病院の病室を模擬したベッド数の異なる部屋を再現（図-14）して測定した。



図-13 離床支援ロボットによる介助避難実験の様子

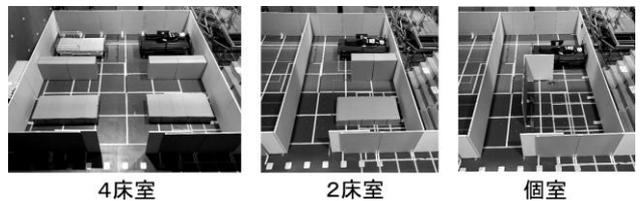


図-14 避難実験に使用した様々なベッド数の居室（病室）

6. 今後の展開

今後はメーカーとの共同研究等を通じて、実用化されているこれらの技術を避難誘導に機能拡張したプロトタイプを実際の建築物等の施設に実装して実証実験を行い、災害時の避難誘導に活用可能なセンサや介護用ロボットに必要な機能、これらを積極的に使う施設の設計上の要件を明らかにして、製品開発やその社会実装を促進する。

謝辞

ヒアリングにご協力頂きました各メーカーの開発担当者の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 鍵屋浩司・山海敏弘：高度な避難安全確保のためのセンサやロボット技術の活用可能性，日本建築学会大会学術講演梗概集，2019年9月
- 2) 厚生労働省老健局高齢者支援課・経済産業省製造産業局産業機械課：ロボット技術の介護利用における重点分野，平成29年10月改定（2020年10月15日閲覧）
- 3) 鍵屋浩司・山海敏弘：センサやロボット技術を活用した避難のための基礎的検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，2020年9月
- 4) (公社)自動車技術会：自動車用運転自動化システムのレベル分類及び定義 JASO TP 18004，2018.
- 5) 河合邦治，鍵屋浩司他：スマートフォンによる大規模施設内の避難誘導を想定した歩行速度の実測，日本建築学会大会学術講演梗概集，2020年9月

浦添第一防波堤台風被災の復旧状況報告

新垣 英隆¹・村松 蒼¹

¹沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所 第一工事課 (〒901-2123 沖縄県浦添市西洲1-1)

平成30年9月29日00時頃から30日03時頃まで台風24号により沖縄本島地方は暴風域に入り、沖縄本島地方では一部の地域で高潮による浸水や冠水の大きな被害をもたらした。本防波堤においても想定以上の大きな波高の波が来襲したことにより被災した。

本防波堤は平成24年度より200mの延伸工事を進めていたが、平成31年度完成を目前にして被災した。被災範囲は防波堤ケーソンの7号函から10号函の約80mと広範囲となった。本報告では防波堤の被災状況及び現在、急ピッチで進める復旧作業について現場で安全且つ円滑に対処した内容を中心に報告する。

キーワード 防波堤, 台風, 復旧, ケーソン, コンクリート

1. はじめに

那覇港は沖縄本島南部に位置し、外国や本土、県内離島を定期航路で結ぶ港湾であり沖縄県の生活・産業・観光を支えている。那覇港は、那覇ふ頭、泊ふ頭、新港ふ頭、浦添ふ頭の4つのふ頭に分かれており、那覇ふ頭は、セメント船、穀物船等に利用されており、泊ふ頭は、県内離島の生活を支えるフェリーや大型旅客船ターミナルを有する観光拠点になっている。新港ふ頭地区は沖縄県経済流通の中心として機能している外内貿易物の物流拠点である。浦添ふ頭地区は、生活関連用品を扱う内貿易物の物流拠点である。

浦添ふ頭沖にある浦添第一防波堤は貨物を安全に陸揚げするために那覇港港内の静穏度を確保する重要な施設として整備している。

本報告では防波堤の被災状況及び現在、急ピッチで進める復旧状況について、波浪・潮流など厳しい施工条件を克服しつつ、復旧工事特有の困難な施工を現場で安全かつ円滑に対処した内容を報告するものである。

2. 浦添第一防波堤の被災概要

(1) 異常気象の概要

台風24号が最も接近した29日は、沖縄本島地方では波高11mの猛烈なしけとなった。29日の満潮時間(那覇で09時32分)と台風接近が重なったことから、沖縄本島地方では一部の地域で高潮による浸水や冠水の被害が発生した。この暴風の影響により護岸の被害や住家の破損、停電があった。

(2) 被災原因

那覇港波浪観測結果より、当時の波高を推算した結果、設計波(施工時)である10年確率波より大きな波高(36年確率波相当)が来襲したことが分かり、想定以上の大きな波高により当該施設が被災したと推定された。被災規模は、平成24年度より200mの延伸工事を進める途中にあった防波堤ケーソンの7号函から10号函の約80mと広範囲となった。

(3) 被災状況

被災範囲は浦添第一防波堤の7号函から10号函までの堤体を含む基礎マウンド周辺である。防波堤の被災状況は上部斜面堤ケーソンの滑動・損傷、上部コンクリート転倒・破損。8号函については、堤体が港内側に最大12.4mの滑動。7号函は8号函の滑動衝突による側壁の損傷、側壁損傷による中詰材流出、上部コンクリート転倒・破損。消波ブロックおよび港内外の被覆・根固ブロックが飛散した。9号函及び10号函はケーソンが港内側に最大2.6m滑動。ケーソン側壁・隔壁の一部欠損・損壊。基礎マウンドの乱れ。根固ブロック及び被覆ブロックが散乱した。



図-1 那覇港の概要

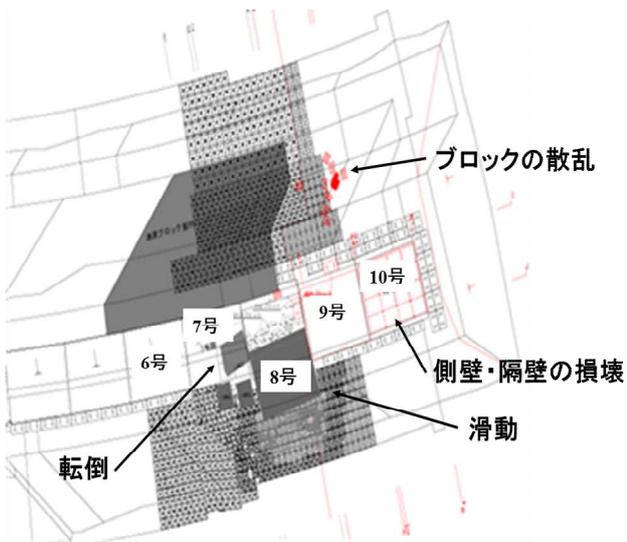


図-3 被災後の状況図

(4) 被災のメカニズム

8号函は厚さ2mの上部工と消波ブロックが一部の状態で施工時に想定以上の波浪が作用したため、安定性が確保できず滑動するとともに転倒する挙動となり、基礎マウンド内にケーソンがめり込んだものと推測される。

7号函は完成断面となっていたが、高波浪により直接被災したのではなく隣接する8号函が滑動し、衝突したことにより、7号函の側壁が破損、中詰砂が流出し、隔壁内に波の流入が繰り返されることで上部工を支えることができずに落下したものと推測される。



図-6 8号函ケーソンの滑動状況



図-7 10号函ケーソンの損壊状況

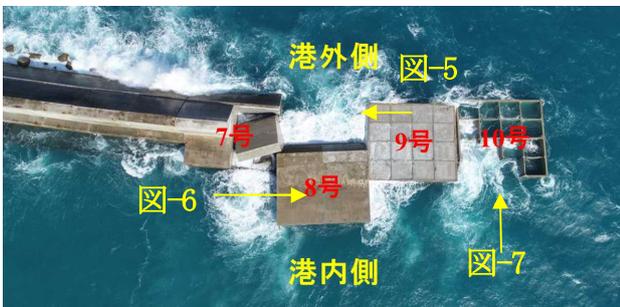


図-4 被災箇所（平成30年10月）

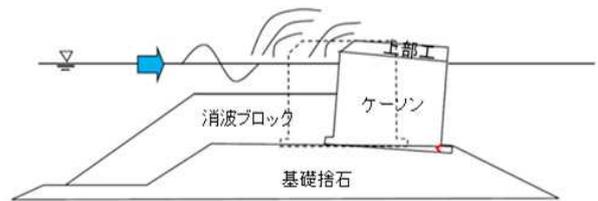


図-8 8号函の被災パターン

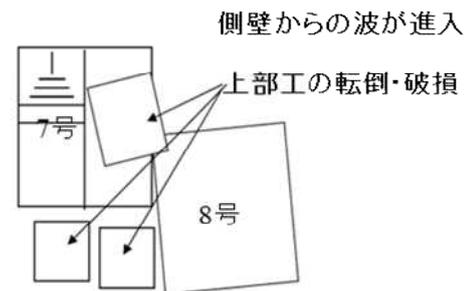
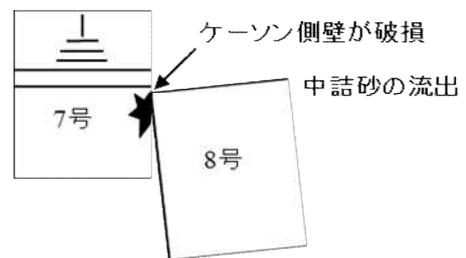


図-9 7号函の被災パターン



図-5 7号函ケーソンの損壊状況

3. 健全度の検証及び復旧方法の検討

ケーソンの損傷状況からケーソン健全度を評価し、流用の可否を判定した後、復旧方法の検討を行った。

7号函

8号函側のケーソン側壁が天端から底版付近まで損壊、中詰材流出、隔壁損壊している。上部工落下により隔壁損壊。ほぼ全壊しており、健全度が失われているとして流用は否と判定。

8号函

最大 12.4m 港内側に背後マウンドへめり込みながら斜めに滑動したためフーチング部が背後マウンドに埋まった。作用力を計算した結果、耐力限界を超えたことから靱性が失われたと判定し、流用は否とした。

上記の通り、7、8号函の修復は不可能として取壊し、新たに2函のケーソンを製作し据付けることとした。

9号函

ケーソン側壁の一部ひび割れは、ケーソン本体への影響はなく、港内側へ 1.28m~2.63m 滑動した。滑動したが、滑動が小さいため靱性は保有していると判定し、流用は可とした。

10号函

台風直前までに投入していた中詰砂が功を奏し、ケーソンの側壁及び隔壁の破砕、剥離、ひび割れ、中詰砂流出の損傷が限定的であり、駆体として流用は可と判定した。

上記の通り、9号函はエポキシ樹脂の注入で修復する。10号函は被災により残存したコンクリート片及び中詰砂等を除去した後、鋼製型枠を設置して水中コンクリートによりケーソンを補修・復旧させることとした。

施工の順序としては9・10号函は施工中であったことから9・10号函を復旧後に7・8号函の撤去、据付復旧を行うこととした。

4. 復旧工事状況

9号函補修

足場を利用してエポキシ樹脂を注入した。

10号函補修

型枠設置に支障となるような側壁破損箇所の露出した鉄筋は切断した。中詰コンクリートが流出しないように側壁損壊箇所には型枠を設置した。残留した中詰砂を撤去し中詰コンクリートを充填した。ミキサ船により現場で製造したコンクリートを台船に搭載したポンプ車を中継してケーソン内に打設し、型枠を支えた井桁受けを隔室内に残し、上部工と一体化を図ることで、より強固な形状に復旧した。



図-10 ケーソン中詰材撤去状況



図-11 水中コンクリート打設状況

7・8号函復旧準備

ケーソン撤去の支障及び飛散した被覆・根固、消波ブロックを一時撤去した。



図-12 100t 消波ブロック撤去状況

7・8号函撤去

起重機船に砕岩棒を装着して破砕を行い、発生したコンクリート殻と中詰砂はグラブ浚渫船にて台船に積み込み、陸揚げした。



図-13 砕岩棒によるケーソン破砕状況

7・8号函築造

基礎マウンドが乱れ、基礎捨石の散乱が生じたため、現在これを再形成し、製作済ケーソンを据付、一時撤去したブロックを再設置することを年内に終えるよう進めている。

5. ケーソン撤去時における課題及び解決策

(1) 波浪対策

本箇所は沖合のため、潮流が速く、高波浪が発生する非常に厳しい海象条件であり、汚濁防止膜を常時設置しておく、膜の損傷により汚濁の流出や他の船舶に影響を与える懸念があった。そのため、海象予報から危険な場合は膜を撤去することとした。しかし、膜の全長は 220m と長いので撤去設置に各 1 日近くかかる。工事の進捗を遅らせないように膜を船に取付けることで膜の長さを短くしても汚濁防止対策ができる形状に切り替え進捗を良くした。



図-14 汚濁防止膜設置状況

(2) 作業船負荷の対策

コンクリートの破砕は吊り上げた砕岩棒を上から海面に向かって落とす方法で破砕作業を行った。7号函の上部工は転倒して斜面状況のため、狙った場所になかなか当たらず、当たっても斜面によって滑ってしまい衝撃が直接船体にかかり船が損傷するリスクがあった。そのため先に小さい砕岩棒を用いてケーソンを削りなるべく斜面を平らにして的を増やしてから破砕を行った。また砕岩棒を吊り上げるワイヤーの長さを管理し、一定以上の深さに落ちないように調節をした。

破砕する際の衝撃はワイヤーと滑車にも影響を及ぼすため、砕岩作業中はワイヤーと滑車の状況を常時点検し、損傷が確認された場合は作業を中止しすぐに交換するなど、船上での事故を防ぐよう細心の注意・管理を行いながら作業にあたった。

(3) 既設構造物の保護

今回の復旧工事では既存のケーソンが隣接していることから、破砕中に既設構造物を損傷するリスクがあった。そのため既設構造物と近い場所で破砕する際は、対象物を砕岩棒やグラブを使い分けながら、既設構造物から離して破砕をした。

また、現場の潮流が早く波高も高いため、砕岩棒での正確に破砕させるためにはグラブ浚渫船を安定化させることが重要であり、既設ケーソンからロープをとって船を安定させることは既設構造物を損傷する恐れがあった。そのため既設構造物からロープをとるのではなく、船の後方 4 箇所にアンカーを落とし、且つ常時押船で押すことで船体の安定化を図った。



図-15 施工中の作業船状況

6. まとめ

今回の浦添第一防波堤の被災は、広範囲かつ大規模なものであり、早急に復旧を図っている。次は築造時における課題が発生することが予想されるためこれの解決を図りながら、一日も早く港を安全・安心して利用していただくため、請負者及び関係者との密な連携をとり、安全第一で災害復旧事業を進める。



図-16 現在の防波堤の様子（令和 2 年 5 月）

LPデータを用いた道路防災危険箇所の抽出について

小室 宣孝・蔵本 直行

中国地方整備局 中国技術事務所 維持管理技術課 (〒736-0082 広島市安芸区船越南2-8-1)

航空レーザ（以下LP）測量データの道路防災事業への本格導入が全国的に始まった。本報告では本格導入に先駆け、昨年度より中国技術事務所内で試行した“航空レーザ測量（LP）データによる広域スクリーニング”の継続検討結果を報告する。今回はレベル500LPデータを用いて傾斜量図とCS立体図を作成し、危険箇所の定量抽出を試みた。結果として、検証対象とした既往カルテ点検220箇所中の36%にあたる77箇所まで、これまで把握されていない危険リスクの抽出に繋がった。道路防災管理にLP調査を活用する最大の利点は、管理斜面外危険箇所（もらい災害）の抽出が可能となることである。過不足ない効率的な点検実施に繋げるためにも、客観的かつ定量的な抽出を行い、危険箇所の見逃しと空振りを最小限とすることが重要である。

キーワード 道路防災点検、道路防災診断、レベル500航測LP、傾斜量図、危険箇所机上抽出

1. はじめに（昨年度報告概要）

航空レーザ測量の斜面防災事業への適用に関しては、近年多くの研究事例がある。その中で、LPデータから作成した微地形表現図に基づくスクリーニングに際して、以下の共通した課題が存在する。“危険箇所抽出には明確な基準がないため、技術者による判読差異が著しく、抽出精度に対する評価が難しい。特に対象範囲が広域に及ぶ場合には、抽出誤差や作業量が膨大となる。”

これに対し、昨年度報告¹⁾では中国地方整備局管内の直轄国道（当時の総延長1912.8km）を対象に、レベル500（点群座標分布4点/m²以上、0.5mメッシュDEM）～レベル2,500（点群座標分布1点/4m²以上、2.0mメッシュDEM）のLPデータから傾斜量図を作成し、道路防災点検に資する危険箇所の広域定量スクリーニングを試みた。また、代表地点を選定して現地確認を行い、スクリーニング抽出結果を検証した。

結果として、傾斜量図を用いて不安定落石源を抽出する際の閾値としては傾斜60°が適するとの結論を得た。レベル500のLPデータを用いて作成した傾斜量図の場合、傾斜60°を閾値とした場合の空振り率は15%、見逃し率は3%と実務に十分に適用しうるレベルであった（国道約23 km区間での試行結果²⁾）。一方でレベル2,500のLPデータの場合は、現地で露頭を探す目安として使用できる程度であり、不安定落石源の机上抽出には精度が不足するという結果となった（図-1）。

なお、本試行の実施時点ではレベル500のLPデータは限られた範囲でしか取得されていなかったため、直轄国道全区間を対象としたレベル500LPデータによる広域ス

クリーニングの実施には至らなかった。また、不安定落石源以外の災害要因に対する実用的な閾値の設定に課題を残していた。

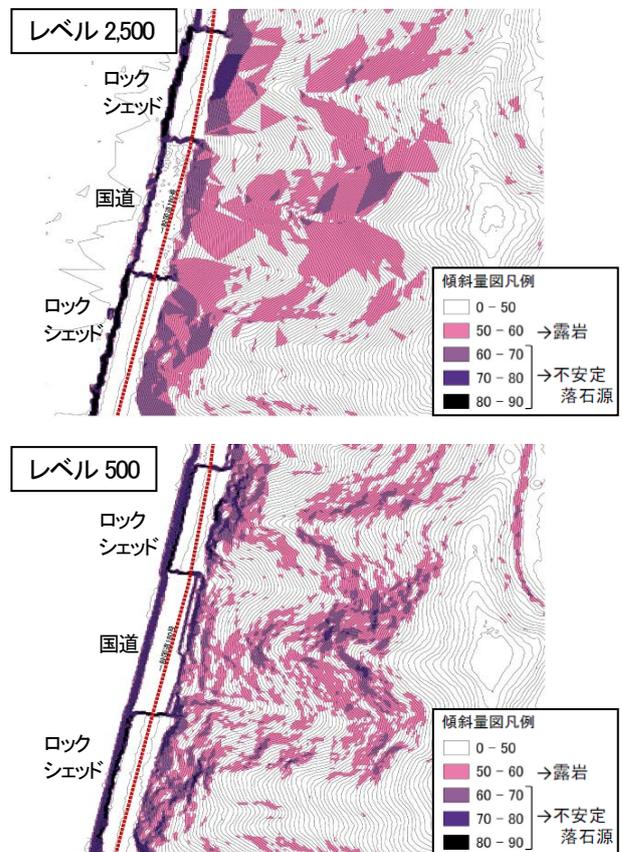


図-1 LPデータの精度による傾斜量図の表示の違い（60°以上が不安定落石源、コンターは1.0m間隔）

2. レベル500LPデータによる傾斜量図, CS立体図を用いた危険箇所机上抽出

課題解決に向け、今回は林野庁撮影のレベル500データ（H30年撮影）³⁾を活用した危険箇所の机上抽出を試行した。林野庁では平成30年7月豪雨を受けて、広島県と岡山県（新庄村を除く）を対象にレベル500のLP撮影を実施している。中でも、被害の大きかった広島県南部と岡山県南西部については各種図化に必要なDEMデータが揃っていたことから、本地域を検証範囲とした（図-2）。具体には、①検証範囲内の直轄国道（総延長390km）について、レベル500LPデータを用いて傾斜量図とCS立体図を作成した。②対象延長内の道路防災カルテ点検箇所（220箇所）を対象に、傾斜量図とCS立体図を用いて危険箇所を机上抽出した。

ここで、CS立体図とは長野県林業総合センターにより考案された微地形表現図で、曲率と傾斜量の重合により凹凸の度合いを寒暖色で強調表示した図面である⁴⁾。斜面崩壊やすべりは水が集積する箇所が発生するが、LPデータをCS立体図に加工することで、0次谷や湧水箇所、ガリー浸食等の斜面中で水の集積する地形情報を抽出可能とした（図-3）。

傾斜量図に関しては、前回報告と同様に傾斜量に応じた6段階表記を基本とした（図-4）。また、落石と岩盤崩壊リスクが顕著な斜面に対しては、傾斜50°以上の急傾斜箇所に着目（50°以上を着色）した傾斜量図も併せて作成した（図-5参照）。

CS立体図と2種類の傾斜量図を用いて危険箇所の机上抽出を行った結果、対象とした全220箇所のうち全体の36%にあたる77箇所について、既存防災カルテ点検では把握されていない危険リスクを抽出した。抽出した危険リスクの割合は落石が57%、土石流33%、崩壊10%となる。なお、今回対象区間では地すべりは確認していない。また、既存のカルテ点検箇所に該当しない区間は、今回の机上抽出の対象外としている。



図-2 林野庁LP撮影範囲と今回の検証区間

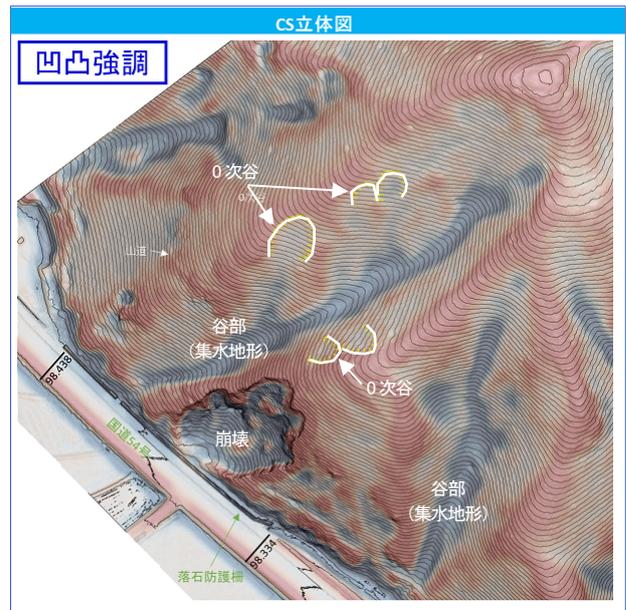


図-3 CS立体図による水の集積箇所抽出事例

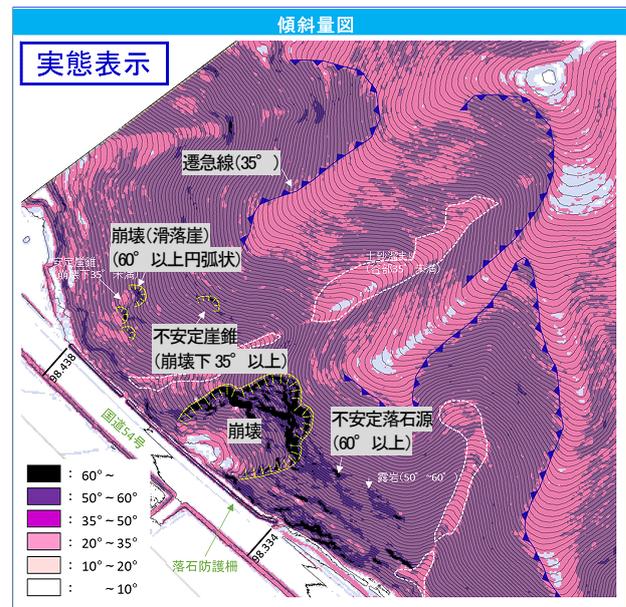


図-4 傾斜量図による危険箇所抽出事例（図-3同地点）

3. 道路防災重点診断箇所での現地検証結果

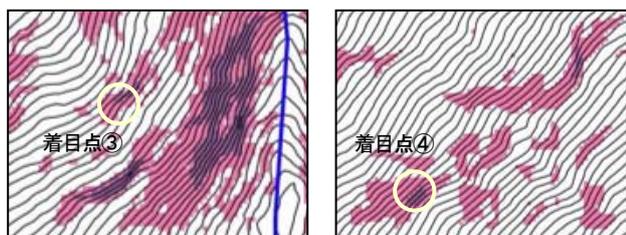
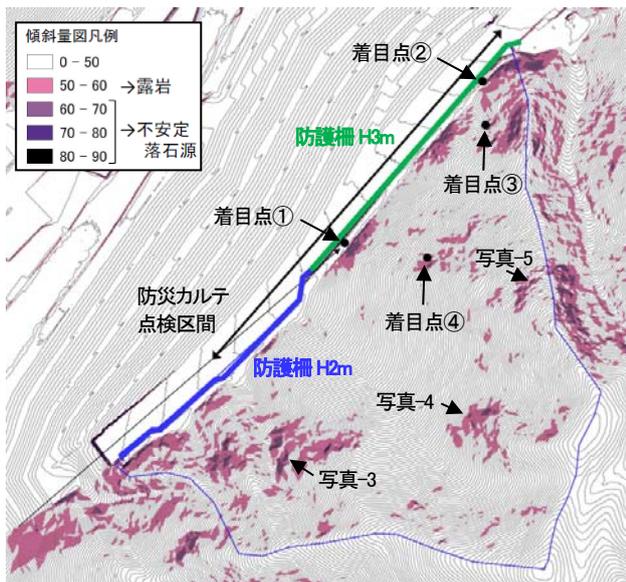
a) 傾斜量図（50°以上着色）による落石・岩盤崩壊危険箇所抽出結果の現地検証

既存防災カルテ点検で見逃されている可能性のある77箇所の危険リスクを抽出したことに對し、代表箇所を選定して防災重点診断に供することとした。ここで、防災重点診断とは、道路防災診断業務の中で総合評価や対策工の必要性について意見が分かれる地点や、緊急対策が求められる箇所等で、地域防災に精通した道路防災ドクターに現地診断を行って頂き、的確な助言を求める重要

な工程である。

以下に、落石崩壊を対象とした防災カルテ点検箇所
の防災重点診断による検証結果を掲載する。なお、該当斜
面は落石を主対象としているため、傾斜量図を主体とし
た危険箇所の抽出を行っている。

図-5に、防災重点診断箇所の傾斜量図（50°以上着
色）を示す。ここで、傾斜50-60°は露岩が想定される斜
面⁵⁾、傾斜60°以上は不安定落石源の想定分布域とした。
図中の黒丸印4箇所は防災カルテ点検による着目点であ
り、着目点①,②は防護柵背後の新規落石の有無、着目
点③,④は上部斜面中の落石源の動きが監視されている。
図-5をみると、不安定落石源とされる着目点③,④とも、
“傾斜50°以上の露岩中に存在する傾斜60°以上の不安定
範囲”として机上抽出された。また、防災カルテ点検の
着目点以外にも、不安定落石源として抽出される箇所が
点検区間の上部斜面や点検区間外で多数存在した。現地
踏査の結果、これら各地点にはそのすべてに不安定落石
源が存在することを確認した（写真-3、写真-4、写真-5
に代表写真を示す）。これらはいずれも、高さが1.0mを
超える規模の岩塊であった。また、傾斜60°を超える中
でも傾斜量が90°に向かって急峻となるほど、不安定化
の度合いを増す状況を確認した。



着目点③付近の拡大図 着目点④付近の拡大図

図-5 防災重点診断箇所の傾斜量図
(50°以上を着色、コンターは1.0m間隔)



写真-1 着目点③の不安定落石源（防災カルテ点検）



写真-2 着目点④の不安定落石源（防災カルテ点検）



写真-3 不安定落石源（H2.2×1.4×1.0m）傾斜70-80°



写真4 不安定落石源 (H1.0×0.7×0.5m) 傾斜60-70°



写真5 不安定落石源 (H1.0×0.8×0.5m) 傾斜60-70°

b) 傾斜量図 (6段階着色) による崖錐・転石群危険箇所抽出結果の現地検証

次に、図-6に示すように6段階に着色した傾斜量図を作成し、落石・岩盤崩壊以外の災害形態に関する危険箇所の机上抽出を行った。ここで、傾斜35°は土砂（礫混じり土）の安定勾配の目安であり（道路土工-斜面安定工指針など）、斜面中に滞留する崖錐・転石群の安定度を予測するための閾値とした。また、10°と20°は地すべりや土石流等の危険箇所を抽出する際に用いた閾値であるが、当該斜面には該当する災害要素は抽出されなかった。

結果として、円弧状の滑落崖（傾斜60°以上）を目安にその直下で傾斜35°以上の斜面を不安定崖錐・転石群、傾斜35°未満の場合は安定した崖錐・転石群として机上抽出した。現地において前者は非常に不安定な転石群、後者は苔生して噛み合った（再滑動し難い）安定した転石群として確認できた（写真-6、写真-7）。

以上のように、2種類の傾斜量図を用いることにより、落石危険箇所の大多数を机上抽出段階で把握することが可能となり、その中でも特に危険な落石源の分布も傾斜量の度合いで推測できるようになった。

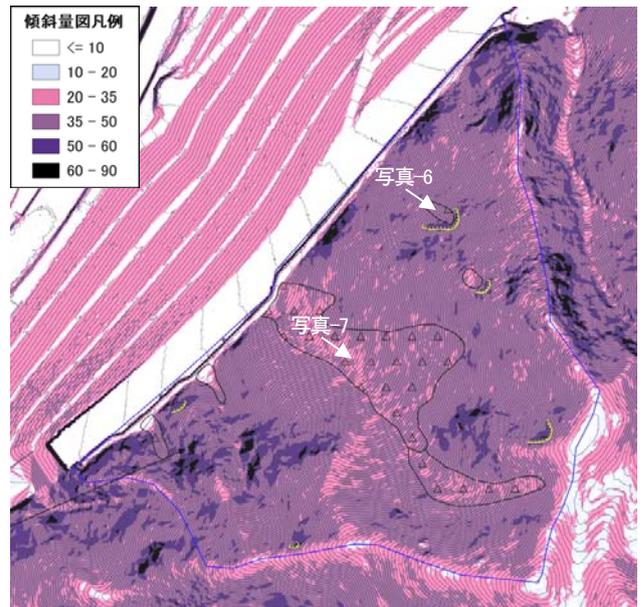


図-6 防災重点診断箇所の傾斜量図 (6段階着色)



写真-6 崩壊部滑落崖下の不安定崖錐・転石群 (傾斜35-50°の斜面中に不安定転石が散在)



写真-7 中央谷地形内の安定崖錐・転石群 (傾斜20-35°の谷部に苔生した転石が堆積)

c) UAV-LPデータとレベル500航測データによる危険箇所抽出結果の比較検証

最後に、道路防災診断業務内で撮影したUAV-LPデータ（精度600点/m²、0.25mメッシュ）から傾斜量図を作成し（傾斜60°以上着色）、レベル500航測データによる危険箇所抽出とどの程度の差異があるかを検証した（図-7）。結果として、レベル500による不安定落石源抽出結果（図-5）とUAV-LPによる抽出結果は多くの地点で同様の結果が得られた。ただし、谷地形内で広葉樹が密に繁茂する範囲においては、レベル500航測データでは大規模露頭でも見え難い箇所があった（写真-7）。

以上のように、レベル500航測データは道路防災点検箇所の危険箇所抽出に対して必要十分なデータ精度といえる。その中で、谷部で広葉樹が密なエリアでは抽出精度に差異が出るので留意が求められる。

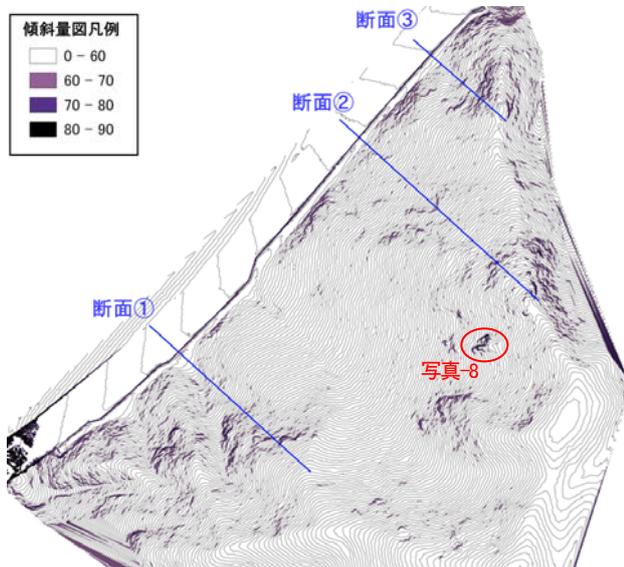
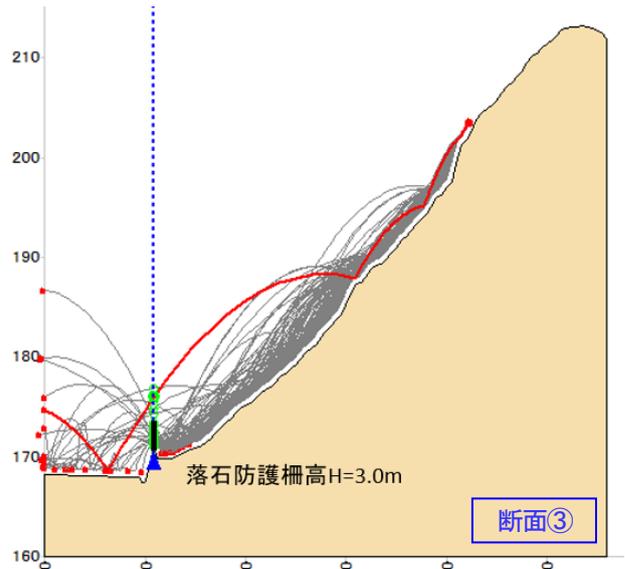


図-7 UAV-LPデータによる傾斜量図（60°以上着色）



写真-8 谷部広葉樹繁茂下の露頭状況（図-7赤丸部）

なお、LPデータは三次元点群座標として得られるため、任意の断面図作成も容易である。ここでは、主要な落石源のある3断面を選定して落石シミュレーションに供した（図-8）。結果、いずれの断面においても防護柵の高さ・捕捉エネルギーとも不足しており、対策が必要であることを示す裏付けとなった。また、防災重点診断の際には、3Dプリンターで作成した落石危険斜面の実体モデルによる説明を行うことで、危険箇所に対する既存対策状況等の診断のポイントを全員で共有できた（図-9）。いずれも、LPデータの活用利点である。



落石防護柵衝突個数	落石防護柵上方通過個数	擁壁天端からの最大通過高 (m)	最大エネルギー (kJ)
25	5	6.3	463

図-8 LPデータを活用した落石シミュレーション（図-7の断面③）



図-9 3Dプリンターによる落石危険斜面のモデル化（防災重点診断箇所、モデル切断面：落石シミュレーション実施断面、着色部：不安定落石源を含む露岩部）

4. 結論

本報告では、航空レーザ測量（LP）データによる広域危険箇所の上抽出について、特に落石等の地形的特徴に着目した検証結果を整理した。傾斜量や曲率に基づく定量的な危険箇所抽出手法を適用することにより、技術者による判読差異を最小限にするとともに、今後は机上抽出に対する作業量の抑制に繋がることが期待される。また、防災重点診断箇所を対象に2種類の傾斜量図により防災カルテの照査を行った結果、これまで把握されていなかった危険箇所を多数抽出し、カルテ対応から要対策への総合評価の変更につながった。さらに、点検区間の延伸やより効果的な点検時着目点の設定など、道路防災ドクターの判断に資する有益な材料となった。

今回、実証した事項は次のとおりである。①道路防災に関する危険箇所抽出にはレベル 500 相当の LP データで必要十分である（ただし、谷部広葉樹繁茂下では見逃しがある可能性があり、留意が必要である）。②不安定落石源としての落石（岩盤崩壊）の危険箇所抽出には、閾値として傾斜 60°が妥当である。③岩盤が露出する斜面は傾斜 50°以上が目安となる。④以上より、不安定落石源は“傾斜 50°以上の露岩部中の傾斜 60°以上の範囲”として、現地状況に則した形で抽出されることが多い。⑤傾斜 60°以上の落石危険斜面の中でも、傾斜や規模（高さ）が大きくなるほど危険度が増す傾向にある。⑥抽出できる不安定落石源は、レベル 500 では高さ 1m 以上が目安となる。

また、従来、転石群については机上抽出は困難とされてきたが、⑦崩落箇所の頭部滑落崖（傾斜 60°以上の円弧状急崖部として抽出）下の緩傾斜面を対象に、傾斜 35°（密実でない礫の安定傾斜）を閾値として判定することで不安定箇所を机上抽出可能となる。なお、斜面中の崖錐の安定性に関しては、以下式の該当有無を確認することで判定間違いを低減することが可能である（ $\alpha \geq 44 - 4\log S$ ここで、 S ：崖錐の斜面長、 α ：崖錐の平均傾斜、該当する場合は非常に不安定⁶⁾）。

なお、本報告では割愛したが、CS 立体図を適用した地点については、水の流れを詳細地形として把握することで、崩壊および土石流危険箇所についても客観的な机上抽出に繋がっている。こちらに関しては、今後の豪雨等に関連した発災記録と机上抽出結果の突き合わせが必要であり、次の機会での報告としたい。

5. 今後の課題と解決案

現在、中国技術事務所では令和元年度以降のレベル 500LP データを用いた防災危険箇所分析業務を発注している。これら業務における危険箇所分析結果は、管内各事務所から発注予定の道路防災カルテ点検業務へフィードバックする予定である。

そこで、より効果的な道路防災事業に繋げるための課題として、危険箇所の増加を見据えた点検の重点化・効率化が挙げられる。LP データの活用により、これまで把握されていなかったリスクが抽出されることによる危険箇所数の増大が予想される。これに対し、LP による危険箇所抽出結果に地質リスクや被災履歴等の情報を GIS 上で重ねて危険度ランクを設定することなどで、点検の重点化・効率化に資する検討が求められる。併せて、近年急速に進展しつつある I-construction 関連技術について利点と課題、維持管理への適用性を整理するとともに、その中で有望な技術を現地で試行し改善点や具体的利用方法を検証することで、今後を見据えた対応を事前に検討しておくことが大切と考える。

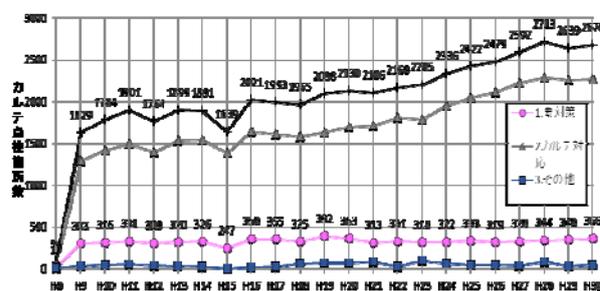


図-10 中国地方整備局防災カルテ点検箇所数の推移
(中国地方整備局防災カルテDBより集計)

謝辞：道路防災ドクターの各位には、防災重点診断を通してLPデータを活用した危険箇所抽出や今後の対応方法に関し、多くの有益なコメントとアドバイスを頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 河中響平（2019）：道路防災点検（LP データ）手法検討，第 70 回中国地方整備局技術研究発表会
- 2) 三浦健一郎・寺脇直志・入谷正人（2019）：LP 傾斜量図を用いた危険箇所の抽出・評価手法の開発と適用事例，第 33 回日本道路会議論文集
- 3) 林野庁（2019）：平成 30 年度森林域における航空レーザ計測業務（その 1）道路防災点検の手引き（豪雨・豪雪等）を編集
- 4) 戸田堅一郎（2014）：曲率と傾斜による立体図法（CS 立体図）を用いた地形判読，森林立地，56（2），75-79，2014
- 5) 長谷川淳・浦越拓野（2017）：数値標高モデルを用いた落石ハザードマップ作成手法，RTRI REPORT，Vol.31，No.5，May，2017
- 6) 池田和彦（1971）：崩壊堆積物斜面の安定について，応用地質，Vol.12，No.3

豊平川の河道特性に応じた河川改修について —大型模型実験による河床低下対策工の検討—

大島 省吾¹・大石 兼史¹・舘野 奈々¹

¹ 北海道開発局 札幌開発建設部 河川計画課 (〒060-8506 北海道札幌市中央区北2条西19丁目)

豊平川は、都市部を流れる河川として全国屈指の急流河川である。札幌市街地の発展とあわせて床止めや高速流対策等の河川整備が行われてきたが、近年は上流域において土砂堆積や局所洗掘が生じ、河道の固定化が顕著となり、洪水時には河床洗掘による護岸の倒壊や堆積土砂上の樹林化による河積阻害等の治水上の課題がある。

本論は、豊平川の1/40縮尺の大型模型実験施設を用いて、これらの課題解消に向けた検討結果を報告する。

キーワード：河床低下対策，河道計画

1. はじめに

豊平川における河川整備は、札幌市街地の発展とともに行われてきた。1881年の現況河道なりの堤防整備に始まり、1950年～1973年にかけて急流河川特有の河床低下に伴う低水護岸や既設工作物の保護を目的とした床止め群の整備、1971年からは札幌市の都市化に伴う河川空間の利用促進や堤防の保護、流路の安定化を目的とした河道の複断面化及び高水敷の造成といった様々な整備が行われてきた。

1981年洪水以降、河道内の河岸浸食及び土砂堆積が進行したことで、常時及び平均年最大流量規模の流量が流下する際に河道の固定化が進行し、これまで扇状地特有の網状河道を有し横断方向に自由に蛇行氾濫していた河道から、縦断方向への変化が顕著となる河道変化が生じてきた。また、豊平川左右岸で市街化が顕著であることから、今後河道の拡幅は困難な状況にある。

このため本論では、河床低下が著しい豊平川上流区間(KP17.4～KP21.4)について、治水上の課題を整理した上で変化要因と河床低下対策工について、大型模型を用いた水理実験による検討結果等から今後の対策について報告するものである。

2. 豊平川上流部の課題

豊平川上流区間は河床勾配1/160の急流区間となっているが、床止めのような横断工作物による縦断規制は実施していない。また、直轄区間より上流の河道では、かつては砂礫に覆われていたが、現在は一部の河床表層に砂礫が残存しているものの、露岩している状況となっている(図-1)。

1981年頃までの低水護岸整備後、1981年8月洪水を経て河道内の堆積土砂で形成される中州と滞筋の比高差が



図-1 豊平川直轄区間上流(五輪大橋付近)の露岩状況

拡大し、河床低下が進行(以降、二極化と称す)した。図-2に1981年洪水前の河床高に対して、河川縦断における平均及び最深河床高を経年的に整理した。平均及び最深河床高共に経年的に低下傾向を示し、さらに最深河床高は平均河床高よりも低下傾向が大きく、二極化が進行していることがわかる。

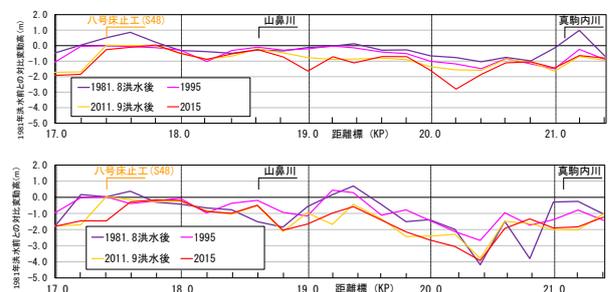


図-2 1981年洪水前との対比変動高(平均河床高変動量縦断図(上)、最深河床高変動量縦断図(下))

二極化の進行により流路が固定され、砂州上への冠水頻度も低下し砂州上の樹林化を促進させている(図-3)。

豊平川上流区間は過去の洪水により河岸浸食が生じたことから河岸を護岸で防御している。護岸整備箇所では前面の河床低下により洪水時に護岸の被災が生じた場合堤防が決壊に至る可能性があり、その場合札幌市街地に甚大な浸水被害が生じる。その対策として1987年から護岸基礎を継ぎ直す工事（根継ぎ護岸）を継続的に実施している（図-4）。

3. 河床低下対策工検討

豊平川上流区間における河床低下対策を進めるにあたって、大型模型実験（1/40縮尺）及び平面二次元河床変動解析を実施し、対策工の効果を検証した。

豊平川における河床低下対策案としては、現状の応急的な対策として、河床の低下に合わせて低水護岸の機能を損失する箇所を根継ぎする護岸根継ぎ案、河床低下を抑制する対策として、現況の河床高を維持するために帯工を設置する帯工設置案、床止めを設置することにより土砂を補足し河床を上げる床止め設置案が考えられる。

既往検討より帯工設置案は、根継ぎ箇所が少なくなるため対策効果が高く、さらに、落差が生じないため環境への影響も少なく有効であることから対策工として選定した。

(1) 実験条件

大型模型の妥当性を確認するため、再現性検証実験を行い、その後、現況施設での将来予測実験及び河床低下対策実施後の将来予測実験を行った。実験において設定した条件を表-1, 2に示す。なお、上流端土砂供給条件については、直轄区間より上流の河床の露岩状況を踏まえ、給砂量を考慮しないこととした。

a) 模型の範囲

検討区間は8号床止からKP21.4とし、対策区間の上流800mの助走区間を設けて、上流端をKP22.2とした。

表-1 再現性検証実験条件

河床形状	2006年測量成果
河床材料	2006年、2011年河床材料調査平均値
流量	2007年～2011年の400m ³ /s以上(τ* = 0.05以上となる流量)を対象
流況	非定常流量
給砂量	なし
支川合流	真駒内川(常盤観測所の流域面積比流量)
河川工作物	橋脚、床止工、樹林帯

表-2 将来予測実験（無対策、対策工検証）条件

河床形状	2015年測量成果
河床材料	2011年河床材料調査平均値
流量	平均年最大流量(30年間相当)+整備計画目標流量
流況	定常流量+非定常流量
給砂量	なし
支川合流	真駒内川(常盤観測所の流域面積比流量)
河川工作物	橋脚、床止工、樹林帯

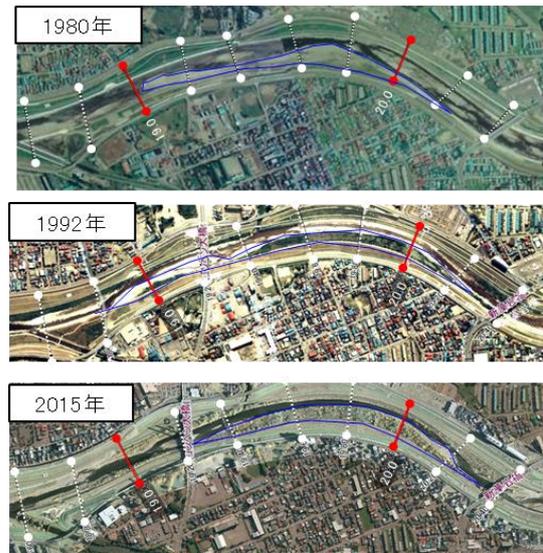


図-3 航空写真による変遷図（中州樹林の変化）

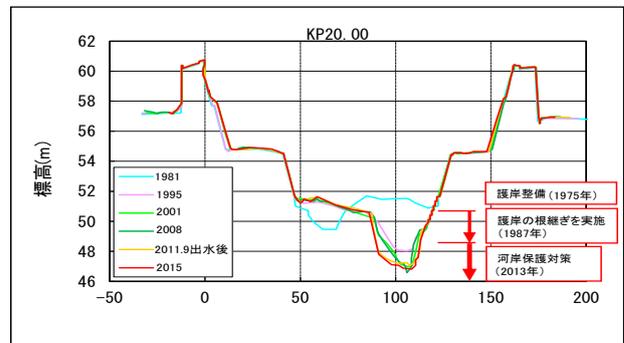


図-4 根継ぎ護岸対策図 (KP20.0)

また、対策区間の下流についても800mの助走区間を設けて、下流端を6,7号床止とした（図-5）。

b) 河床材料

再現性検証実験の河床材料は、再現期間の2006年と2011年の調査結果をもとに、「河道計画検討の手引き」より河床変動に寄与する粒径として、細粒分を除いて粒度分布を設定した¹⁾。現地河床材料と比較検討した結果、洗砂利5割：精選砂5割を混合することで現地と同等の粒径分布となった。将来予測実験についても同様に最新調査結果をもとに粒度分布を設定した。

c) 流量条件

再現性検証実験の流量条件は、 $Q=400\text{m}^3/\text{s}$ （河床変動が活発化する無次元掃流力 $\tau_* = 0.05$ 以上となる流量）以上を対象とした。また、時間縮尺は、岩垣の限界摩擦速度式に砂粒の水中比重1.65、動粘性係数 $0.01\text{cm}^2/\text{sec}$ 、重力加速 $980\text{cm}/\text{sec}^2$ を用いると、実験で使用する河床材料の代表粒径3.9mmより、岩垣式による無次元限界掃流力

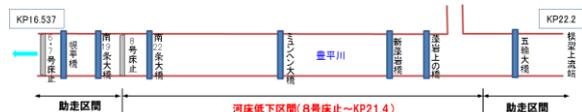


図-5 実験区間模式図

が0.05となり、フルード相似が成立するため $1/\sqrt{40}$ とし、6.3時間とした。

将来予測実験の流況は、「河川水理模型実験の手引き」を参考に、長期的な河床変動状況を把握する場合、比較的出水頻度の高い流量条件の定流実験による検討が実施される²⁾ことから定流実験で中小洪水での土砂移動を予測し、その後、整備計画目標流量を与え、大規模洪水における土砂移動を予測した(図-6)。

(2) 再現性検証実験

実験で得られた水位と河床高を2011年洪水後の痕跡水位と河床高の実測値と比べると、ミュンヘン大橋及び湾曲部外岸側の洗掘、新藻岩橋付近の堆積等について概ね同様の傾向であり、妥当性を確認した(図-7, 8)。一方で実験では実測よりも河床変動が大きい傾向となった。これは、現地では河床表面の粗粒化が進み土砂移動が生じにくいことが考えられる。

(3) 河床低下対策工検討

帯工を設置する箇所については、既往検討より帯工上流で河床低下抑制効果が期待できるため、橋梁の下流側及び湾曲部の河床低下が著しい区間を選定した(図-9)。

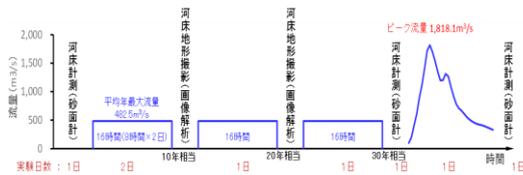


図-6 流量条件図

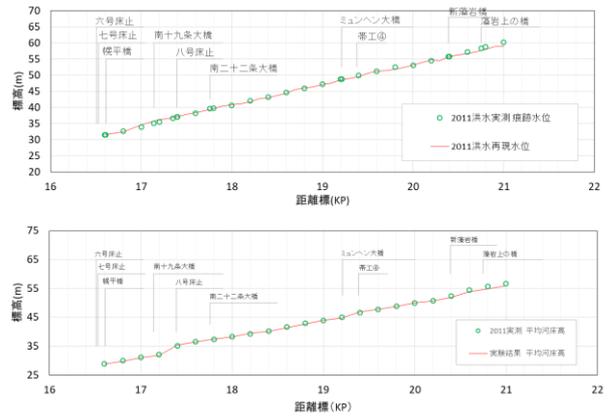


図-8 現地実測と実験結果(痕跡水位縦断面図(上) 平均河床高縦断面図(下))

また、豊平川上流区間の最深河床高と砂州上において、平均年最大流量流下時における摩擦速度を算出した結果を図-10に示す。最深河床高の摩擦速度は、限界摩擦速

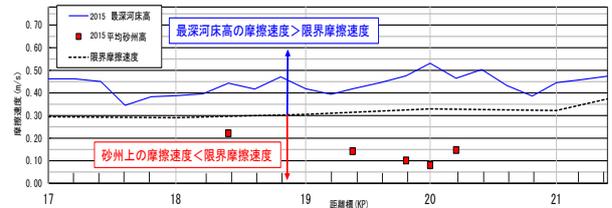


図-10 平均年最大流量流下時の最深河床高及び砂州上の摩擦速度

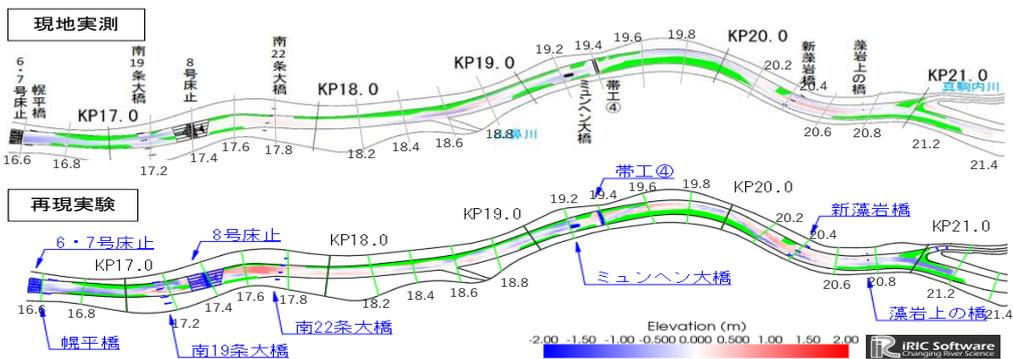


図-7 現地実測と再現実験結果



図-9 対策工配置図

度よりも大きく、砂州上の摩擦速度は、限界摩擦速度よりも小さい値となったことから平均年最大流量規模で二極化が進行することが予想される。KP19.4上流においては河道湾曲部で河川横断上比高差が顕著であり、二極化が進行しているため、河川横断上での摩擦速度を平滑化するため、帯工設置と合わせて砂州を切り下げ平均河床高に河道を修正し、その効果を確認した。

(4) 無対策工検証実験

平均年最大流量（30年相当）流下後及び整備計画目標流量流下後の河床変動予測実験を行った。現況施設での平均年最大流量（30年相当）流下後では二極化が進行している湾曲部（KP19.4~KP20.2）及び上流からの給砂が少ない上流部（KP20.2~KP21.2）について一連で河床低下し、KP20.1~20.4では土砂が堆積し砂州が生じる結果となった（図-11, 13, 14）。

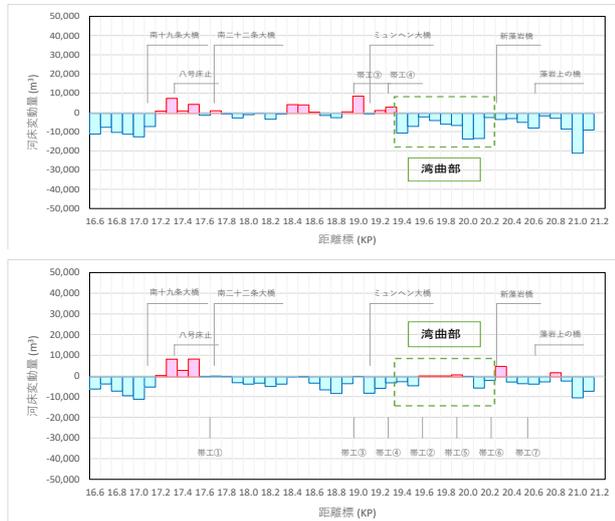


図-11 平均年最大流量（30年相当）流下後河床変動量（無対策実験（上）、対策工検証実験（下））

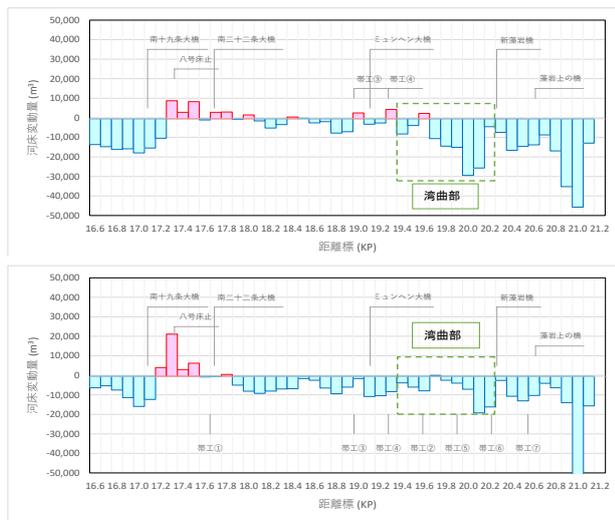


図-12 整備計画目標流量流下後河床変動量（無対策実験（上）、対策工検証実験（下））

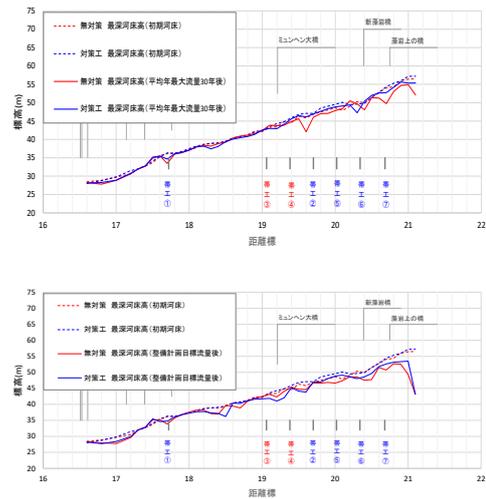


図-13 最深河床高縦断面図（平均年最大流量30年後（上）整備計画目標流量後（下））

一方で整備計画目標流量の外力においても同様に河床低下の傾向がみられ、湾曲部における最大低下量は1.9mとなり、現況施設では河床低下が著しく、河川構造物等への影響が懸念される（図-12, 13, 15）。

(5) 対策工検証実験

対策工の効果について無対策実験と河床変動高、変動量を比較し、外力の違いによる効果を以下に述べる。

a) 平均年最大流量（30年相当）

二極化が進行し経年的に河床低下が進行している湾曲部について、河床変動量をみると、対策工は無対策に比べ、52,000m³程度河床低下を抑制することを確認した（図-11）。また、上流部でも同様に河床低下が抑制され、帯工⑥上流の新藻岩橋及び帯工⑦上流の藻岩上の橋において河床低下を抑制し対策工としての有効性を確認した。

一方で上流の給砂を抑制した結果、下流の河床低下が無対策に比べ大きくなり、ミュンヘン大橋及び南二十二条大橋付近では河床低下が生じ、対策工として課題がみられたが、検討区間全体では44,000m³程度河床低下を抑制することを確認した（図-11, 13, 14）。

b) 整備計画目標流量

検討区間全体では65000m³程度河床低下を抑制し、湾曲部についても43000m³程度河床低下を抑制する結果となった（図-12）。ただし、湾曲部外岸側での洗掘及び内岸側での土砂堆積が生じ、河川横断上比高差が生じる結果となった（図-15）。また、藻岩上の橋上流から真駒内川合流点付近までの帯工対策を実施していない区間において著しい河床低下が生じた。

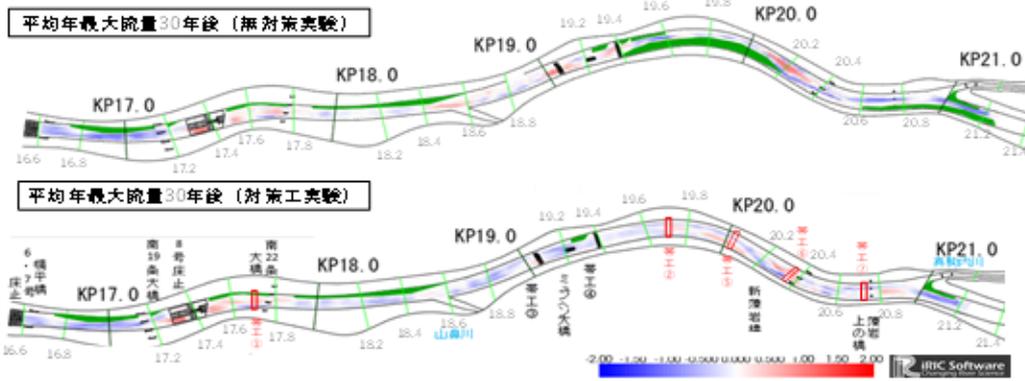


図-14 平均年最大流量30年流下後河床変動高カウンター図（無対策実験（上），対策工検証実験（下））

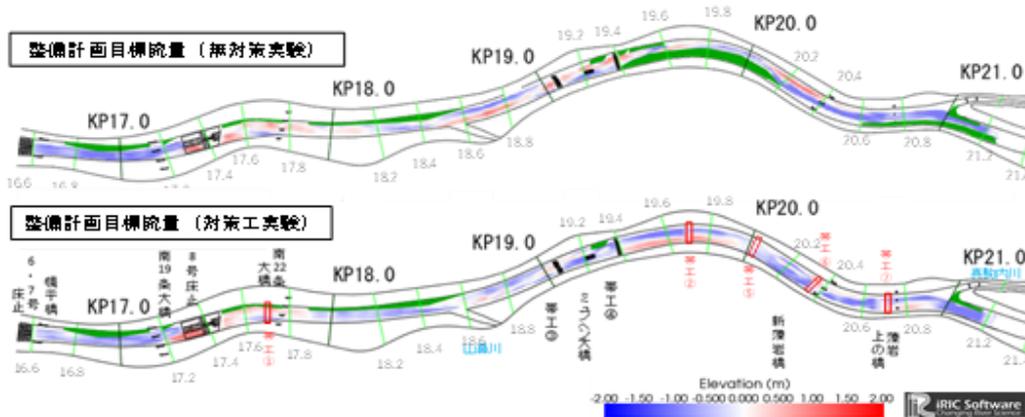


図-15 整備計画目標流量流下後河床変動高カウンター図（無対策実験（上），対策工検証実験（下））

平均年最大流量（30年相当）流下後と同様に湾曲部より下流のミュンヘン大橋及び南二十二条大橋については河床低下が進行する結果となった（図-12, 13, 15）。

c) 局所的な洗堀について

対策工検証実験における帯工⑥下流のKP20.3について、平均年最大流量（30年相当）流下後で下流の砂州の影響を受け滞筋が偏り、流れの集中による深掘れ現象が生じ、低水護岸への影響が懸念され帯工設置に課題が残った（図-16, 17）。

d) 橋梁橋脚部への影響

無対策実験での河床低下が著しい新藻岩橋周（KP20.39）について、対策工における整備計画目標流量流下後の最



図-17 帯工⑥直下流KP20.3平均年最大流量30年通水後写真（対策工検証実験）

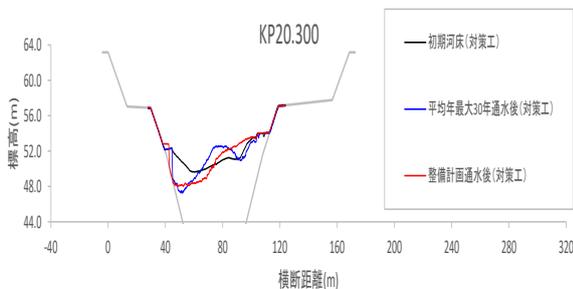


図-16 帯工⑥直下流KP20.3横断面図（対策工検証実験）

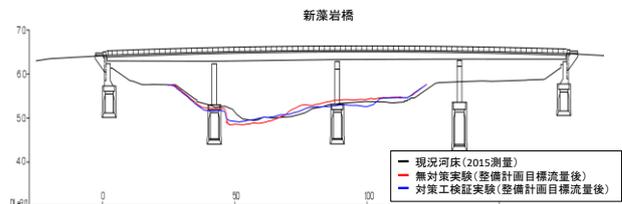


図-18 整備計画目標流量流下後の新藻岩橋横断面図（無対策実験，対策工検証実験）

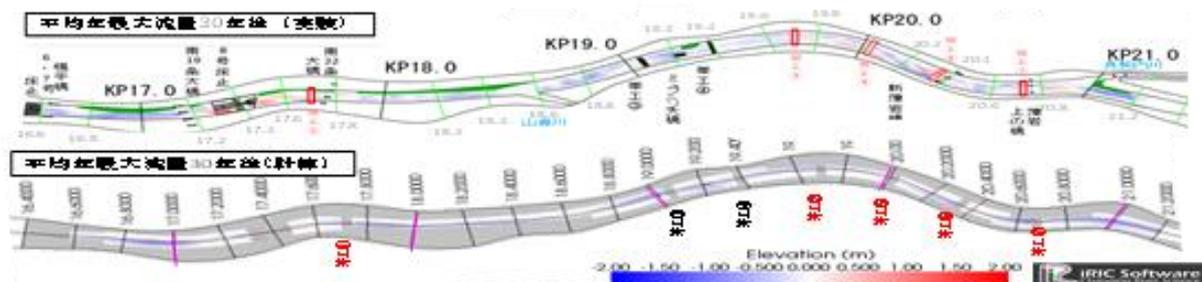


図-19 平均年最大流量（30年相当）流下後の対策工河床変動高コンター図（実験結果（上），計算結果（下））

深河床低下量は無対策に比べ、0.65m河床低下を抑制する効果が見られたが、橋梁橋脚部ではフーチング基礎高（標高53.11m）以下の洗掘が確認され対策工として課題がみられた（図-18）。

（6）平面二次元河床変動解析による対策工効果検証

模型実験で得られた結果について数値計算でも同様の対策における効果を検証し、比較を行った。計算条件を表-3に示す。実験と計算で平均年最大流量（30年相当）流下後の河床低下対策効果を比較した結果、湾曲部外岸側及び上流部の橋梁箇所での洗掘が抑制され、実験結果と概ね同様の傾向となり、数値計算においても河床低下対策工の有効性を確認した（図-19）。

表-3 計算条件

河道形状	2015年測量成果
平面形状	流下方向：271測線（約20.0m間隔） 横断方向：21測線（約10.0m間隔） 低水路10分割，高水敷5分割×2
粗度係数	低水路：粒径によって変化 高水敷：～KP10.20：n=0.050 ～KP21.40：n=0.040
樹木	投影面積密度（透過係数） 抗力係数 $c_d=1.2$
橋脚	投影面積密度（透過係数） 抗力係数 $c_d=1.2$
流量	30年予測（近15カ年の時刻流量（2000-2014）×2回）+整備計画流量
固定点	高水敷，床止め，帯工，根固め
河床材料	混合粒径 KP16.4～KP21.4：2011洪水後の細粒分以外
上流端土砂	静的平衡条件
流砂量式	掃流砂量：芦田・道上の式 浮遊砂量：Lane-Kalinskeの式

4. おわりに

1981年洪水以降河道内の二極化が進行したことで、それまでの横断方向の変化から、縦断方向への変化が顕著となる河道変化が生じてきた。また、二極化による平常時の砂州上への冠水頻度の低下は、砂州が樹林化し更なる

る河床低下の原因となっていると考えられた。

河床低下対策工を検討するため、豊平川上流区間における帯工配置及び砂州の切り下げによる河床低下対策について、大型模型実験（1/40縮尺）及び平面二次元河床変動解析により、その効果を検証した。

本論での検討結果を以下にまとめる。

- ・帯工7基設置及び砂州切り下げによる河床低下対策工について、平均年最大流量規模の中小洪水では河床低下抑制効果が確認できた。ただし、河道湾曲部の帯工直下流については局所的な洗掘が生じ課題となったため、設置場所や構造上の更なる検討が必要と考えている。
- ・整備計画目標流量規模の外力が大きい洪水では、河床変動高及び変動量が大きく既設構造物の安全性について治水上の課題がある。
- ・藻岩上の橋上流から真駒内川合流点付近までの対策工を実施していない区間において、著しい河床低下が生じ、対策の必要性が示唆された。
- ・KP20.2から下流部は、対策工により上流部（KP20.2～KP21.2）及び湾曲部（KP19.4～KP20.2）の河床低下を抑制することにより上流からの供給土砂が少なくなり、無対策より河床低下傾向となったため、既設構造物の安全性について留意する区間である。
- ・平面二次元河床変動解析結果においても実験結果と同様に湾曲部外岸側及び上流部の橋梁箇所での洗掘が抑制され、対策工の有効性を確認した。

本検討結果を踏まえて今後は既設構造物の安全性について定量的に評価を行い、帯工の設置基数や配置の見直し等について、模型実験や河床変動解析により河床低下対策工の検討を進めて参りたい。

参考文献

- 1) 財団法人国土技術研究センター：河道計画検討の手引き。
- 2) 建設省土木研究所河川部河川研究室：河川水理模型実験の手引き。
- 3) 平成31年度 豊平川大型模型実験業務報告書。
- 4) 平成31年度 豊平川河床低下対策検討業務報告書。

マイ・タイムラインを活用した 住民主体の避難行動促進 ～逃げ遅れゼロ大作戦～

齋藤 良一¹・西村 雄喬¹・佐々木 洋一²・高橋 崇史²

¹信濃川河川事務所 調査課 (〒940-0098 長岡市信濃1丁目5番30号)

²信濃川河川事務所 防災情報課 (同上)。

令和元年台風第19号の被害を受けてまとめられた緊急治水対策プロジェクトの中でソフト対策の柱として，“逃げ遅れゼロ大作戦”を実施している。本稿では流域自治体と共同で実施している逃げ遅れゼロ大作戦において中心施策であるマイ・タイムラインの普及活動について取り組み状況を報告する。

キーワード 緊急治水対策プロジェクト，マイ・タイムライン，ハザードマップ

1. はじめに

令和元年10月の台風第19号豪雨水害では長野県において信濃川上流の千曲川等の氾濫により大規模な浸水被害が発生した。信濃川河川事務所（以下、当事務所という。）管内でも小千谷、長岡、大河津の3観測所において観測史上最高水位を記録し(図-1、図-2参照)、長岡市、小千谷市、魚沼市、津南町の4市町で床上浸水23棟、床下浸水163棟の浸水被害が発生したり。

台風第19号豪雨災害を踏まえ、国・県・市町村で構成する「信濃川水系緊急治水対策会議」を立ち上げ、次の洪水に備え、河川整備によるハード対策と避難等のソフト対策を一体的かつ緊急的に実施する「信濃川水系緊急治水対策プロジェクト」が令和2年1月31日にとりまとめられた。とりまとめの中では住民一人ひとりが的確な避難行動を実施し「逃げ遅れゼロ」を達成するためには水害リスクを「我がこと化」することが必要であり、そのために必要な支援を国・県・市町村で連携して実施することが重要であるとの認識を得た。そこで信濃川水系緊急治水対策プロジェクトのソフト対策の柱として洪水からの「逃げ遅れゼロ大作戦」を展開することとした。

具体的には、水害に備え、前もって、個人や各家庭で、自分の取るべき行動を時間軸にまとめたオリジナルの避難行動計画である、マイ・タイムラインの普及活動を流域の自治体と共同で実施することとなった。



図-1 出水時の野積橋付近の状況



図-2 出水時の旭橋付近の状況

2. 信濃川管内の避難情報の発令について

台風第19号による洪水は主に信濃川上流域での降雨により発生したため、新潟県内での降雨がおさまってから洪水流が到着し、晴天の中の大洪水となったことが特徴

である。上流の立ヶ花水位観測所(長野県中野市)でのピーク水位は10月13日3:00ごろであったが、下流の大河津水位観測所(新潟県燕市)のピーク水位は10月13日15:00ごろであり、約半日の時間差がある。(表-1参照)

水位の上昇が長時間続いたことから、地域により12日の夜遅くから13日の夕方まで避難情報の発令が継続したところもあった。しかし水位の上昇していた13日は朝から晴天であり、好天下の洪水となったため、住民の緊迫感、危機感は薄く、避難行動をとった住民は少なかったと想定される。たとえば長岡市では89,712世帯219,200人に避難情報が出されたが、実際の避難所への避難者はピーク時で1,262人とどまった²⁾。また、避難情報が出ている地域においても13日の日中には信濃川の堤防上に多くの住民が集まり洪水流を見物していた。

自宅での垂直避難等もあり、一概に言えないが、当事務所や各自治体が現在実施している情報発信だけでは住民の避難行動を促すことは難しいということがわかった。

また、当事務所で民間企業における水害BCP策定促進の方策に関する検討を行った際に管内の浸水想定区域に所在する企業から回答をもらったアンケート結果を表-2に示す。これによると企業においても洪水ハザードマップの認知度は半数未満、浸水深の認知は3割未満である。これらのことから水害のリスク情報の普及においても地域社会へは十分に浸透していないと言える。

3. 避難促進に係る最近の動向

水害時に住民の避難行動を促すための方策について、最近の動向を紹介する。

内閣府中央防災会議³⁾では平成30年7月豪雨を踏まえ、「突発的に発生する激甚な災害への行政主導のハード対策・ソフト対策に限界」があることを説明するとともに、「国民全体の共通理解のもと、住民主体の防災対策に転換」していくことの必要性を強調している。また全国の自治体の首長で構成される水害サミット⁴⁾では、平成30年7月豪雨等の被害を踏まえ、「行政主導から住民主体の防災対策の転換に向けて」といったテーマで議論がなされ、「水害から命を守る緊急提言」を手交した。その中では、「災害リスクを自分ごととして理解し、避難行動に結びつくような工夫が必要」と言及している。さらに令和元年台風第19号後に内閣府でまとめられた「令和元年台風第19号等を踏まえた水害・土砂災害からの避難のあり方について(報告)」⁵⁾によると、災害リスクととるべき行動の理解度として、住民ウェブアンケートの結果、約半数が「ハザードマップを見たことがない」又は「見たことがあるが避難の参考にしていない」と回答している。これらの状況を踏まえ令和2年7月に社会資本整備審議会により「気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について」⁶⁾が答申された。

表-1 台風第19号時の流量ハイドロ

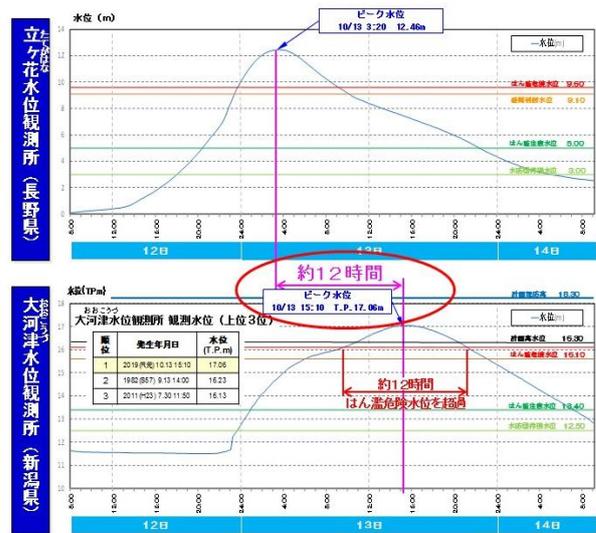
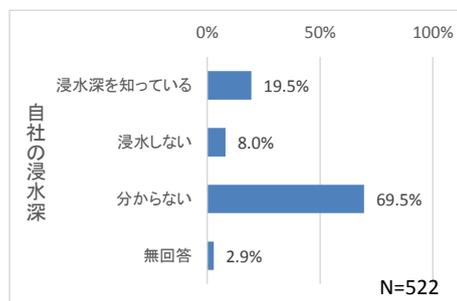
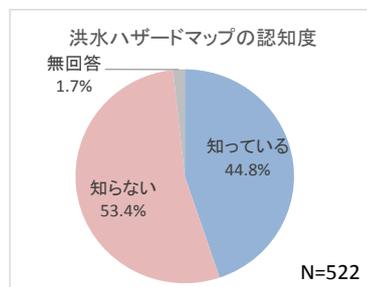


表-2 民間企業への水害BCPアンケート結果

所在地	送付数	回答数	回答率
新潟市	189	51	27.0%
三条市	71	30	42.3%
燕市	389	103	26.5%
弥彦村	19	7	36.8%
見附市	0	0	0.0%
長岡市	749	274	36.6%
小千谷市	37	12	32.4%
十日町市	16	1	6.3%
魚沼市	51	26	51.0%
南魚沼市	12	6	50.0%
無回答		12	
合計	1533	522	34.1%



答申では今後の水災害対策の方針として、あらゆる関係者が共同して流域全体で行う、流域治水への転換を推進することを説明し、速やかに実施すべき施策の一つで、避難体制の強化として、住民の主体的避難力を支える仕組みとしてマイ・タイムライン等の作成の推進を掲げている。

4. 逃げ遅れゼロ大作戦について

前述の台風第19号の被害を受けて本年2月、信濃川中流及び魚野川大規模氾濫に関する減災対策協議会において改めて信濃川の洪水の特徴や教訓の振り返りを行った。その中で、避難に関する情報提供等の行政の一層の対応が必要であるとともに、住民一人ひとりが水害リスクを「我がこと化」し、自ら、避難行動がとれるように支援することも重要であるとの認識を得た。そして具体的な行動として、関係機関が連携し、「逃げ遅れゼロ大作戦」と銘打ち避難行動作成の支援に有益なツールである「マイ・タイムライン」の作成、普及を目指すこととした。

なお、住民の避難行動は、「リスクの把握」と「リスクに応じた行動」が両輪として機能して初めて実現すると考えられることから、リスクの把握である「ハザードマップ」とともに、リスクに応じた行動を促す「マイ・タイムライン」の普及を、関係機関が連携し、強力に推進することとした。

(1) マイ・タイムラインの作成支援

既存の資料として、平成27年関東・東北豪雨後に関東地方整備局下館河川事務所で作成された、「みんなでタイムラインプロジェクト」がある。このプロジェクトで作成された逃げキッドを参考に当事務所では要点を絞った簡易版のマイ・タイムラインを作成した。(図-3参照)これをたたき台にして各自治体において地域内を流れる河川の情報など地域性を考慮した自治体版の作成を依頼した。また、流域によって上流部からの洪水の流下時間は異なるため、各自治体においてどの地点(観測所)からどれくらいの時間で洪水が来るのか記載してもらった。たとえば津南町では、長野県内の千曲川の状況に特に気を配ってもらうために立ヶ花観測所(長野県中野市)からの流下時間を記載していただいた。(図-4参照)

(2) コロナ禍での状況

活動を進めているところでコロナウィルスの流行が始まり、対面での打ち合わせやサポートを実施することが困難になった。そのため資料作成のサポート等はデータのやりとりを通して実施した。

またコロナウィルスの流行に対して災害時の避難所等ではできる限り接触のリスクを下げる必要がある。地域住民の中には家屋の構造や河川との位置関係により避難情報が発令されたとしても避難所に向かうことを必要としない方も一定数存在する。コロナ禍において住民一人ひとりが避難所への避難、自宅などで垂直避難、自家用車での避難など多様な避難を考え、その可否をマイ・タイムラインで決めておくことはきわめて有用である。

避難の方法や場所の多様化に加えて避難する際の持ち物にマスクや体温計などを記載するなどコロナ禍に有用な知見を盛り込んだマイ・タイムラインを作成した自治

体(図-5、図-6参照)もあった。



図-3 当事務所作成のマイ・タイムライン



図-4 津南町のマイ・タイムライン (一部抜粋)



図-5 燕市作成のマイ・タイムライン

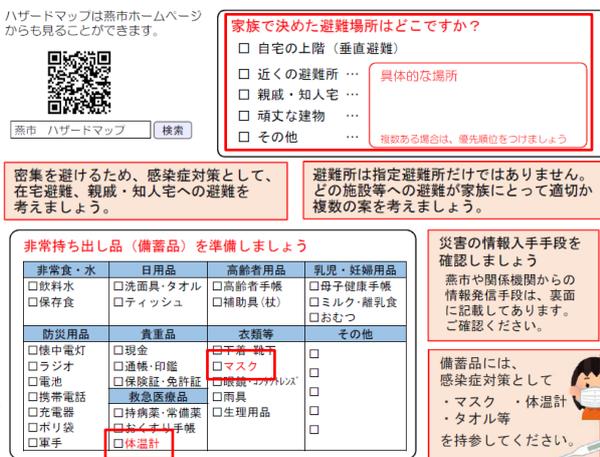


図-6 燕市作成のマイ・タイムライン（コロナ対応部分を一抜粋）

(3) 取組の発信

令和2年7月7日に当事務所は流域の11市町村、新潟県と連名で「逃げ遅れゼロ大作戦～マイ・タイムライン 自分の命は自分で守る～」を記者発表した。記者発表と同時に当事務所の信濃川水系緊急治水対策プロジェクトのホームページ内において「まちづくり・ソフト対策」の具体的な取組として参加自治体のマイ・タイムライン等のURLを掲載した「逃げ遅れゼロ大作戦」ページを更新した(図-7参照)。

具体的な取組

◆逃げ遅れゼロ大作戦

大規模洪水からの「逃げ遅れゼロ」を実現するためには、住民一人ひとりが、「水害リスクの把握」と「水害リスクに応じた行動」を両輪とし、水害リスクを「我がごと化」する必要があります。このため、リスクの把握である「ハザードマップ」とともに、リスクに応じた行動を促す「マイ・タイムライン」の普及を、関係機関が連携し、強力に推進します。特に、コロナ禍における避難は、「在宅避難」、「車中避難」等、多様な避難方法となることから、「マイ・タイムライン」は、その実践的な検討に有益です。「逃げ遅れゼロ大作戦」では、「各自治体によるマイ・タイムライン作成ツールの普及」に加え、「マイ・タイムラインの指導者育成講座」、「学校における防災教育を通じた普及」等、関係機関の様々なアイデアにより、「逃げ遅れゼロ」の実現を目指します。



<信濃川中流市町村の実施状況>

市町村名	上段マイ・タイムライン等(MT) / 下段ハザードマップ(HM)
新潟市	MT: https://www.city.niigata.lg.jp/kurashi/bosai/bosai_taisaku/index_jijo/bosai20200622.html HM: http://www.city.niigata.lg.jp/kurashi/bosai/hinanjo/kouzui_hinanchizu/index.html
三条市	HM: https://www.city.sanjo.niigata.jp/bosai_bohan/bosai/higoronosona/gaidomappuhazardmap/index.html
見附市	MT: https://www.city.mitsuke.niigata.jp/18677.htm HM: https://www.city.mitsuke.niigata.jp/7502.htm

図-7 逃げ遅れゼロ大作戦ホームページ（一部抜粋）

表-3 各組織の取組状況

組織	普及項目
信濃川河川事務所	逃げ遅れゼロ大作戦
燕市	マイ・タイムライン
見附市	豪雨災害対応ガイドブック(マイ・タイムライン)
弥彦村	マイタイムライン
新潟市	マイタイムライン
三条市	豪雨災害対応ガイドブック
長岡市	洪水ハザードマップ(避難行動チェックシート)解説動画
小千谷市	マイ・タイムライン
魚沼市	洪水ハザードマップ(手引き)
南魚沼市	マイ・タイムライン
十日町市	マイ・タイムライン
津南町	マイ・タイムライン

(4) 自治体のマイ・タイムライン整備状況

「逃げ遅れゼロ大作戦」の記者発表に前後して参加自治体においてもマイ・タイムラインなどが公表された。(表-3参照)

令和2年7月28日現在、「逃げ遅れゼロ大作戦」に参加している11の自治体の内、8自治体でマイ・タイムラインを公表しており、未公表の3自治体においても避難行動チェックシートなどのマイ・タイムラインに近い趣旨の施策が実施されている。

表-4 各自治体の普及状況

自治体名	活動内容	
新潟市	実施済	○6月29日 市ホームページへ掲載
見附市	実施済	5月22日 見附市豪雨災害対応ガイドブック配布（最終面にマイ・タイムライン掲載） 6月5日 『広報みつげ6月号』にマイ・タイムラインに関する記事を掲載（ガイドブック掲載面の解説） 6月29日 ガイドブックからマイ・タイムライン部分を抜き出したリーフレットを市のホームページに掲載済み
燕市	実施済	・5月22日 分水中学校（3年生）の防災教育で説明 ・6月1日 広報誌に特集記事掲載 ・6月1日 広報誌の配布に合わせて全戸配布 ・6月5日 燕中学校（2年生）の防災教育で説明 ・6月8日 ホームページに掲載
長岡市	実施済	（ハザードマップ） ・5月28日から地区別説明会を順次実施中 ・6月1日 広報誌と合わせて全戸配布済み。 ・6月1日 ホームページに掲載済み。 ・6月19日 わかりやすい解説動画（YouTube）を公開済み。
南魚沼市	実施済	・令和元年5月1日 広報誌の配布に合わせてハザードマップを全戸配布済み。 ・令和元年5月1日 ホームページにハザードマップを掲載済み。
津南町	実施済	・新潟地方気象台、県防災局より気象情報（注意報・警報級）の情報がいった際、町登録制防災メールにて注意喚起文と合わせて、広報文を掲載。
弥彦村	実施済	・6月25日 広報やひこ配布に併せてマイ・タイムラインを全戸配布

(5) 普及活動の実施と今後の展望

記者発表と前後して、各自治体において地域住民への普及活動を実施している。令和2年7月8日現在の普及状況を表-4に示す。これ以降、各自治体において学校等における防災教育やマイ・タイムラインの指導者育成講座など関係機関の様々なアイデアで普及活動が実施されていく予定である。

また、発表直後の同年7月12日には燕市においてマイ・タイムラインの講習会が実施された。（図-8参照）



図-8 マイ・タイムライン講習会の実施状況

講習会では実際に同市作成のマイ・タイムラインを参加者に配布し、ハザードマップを用いて自宅の浸水深などを見ながらそれぞれのマイ・タイムラインを作成してもらった。

4. まとめ

当事務所では昨年の台風第19号地豪雨水害での振り返りを通して、流域全体での「逃げ遅れゼロ」を達成するために住民一人ひとりが災害を「我がこと化」で考え、災害リスクを把握し、リスクに応じた行動をとれるようになるための「逃げ遅れゼロ大作戦」を実施している。

現状では「逃げ遅れゼロ大作戦」に参加している11自治体のうち8自治体でマイ・タイムラインを作成してもらったところであり、引き続き他の自治体のマイ・タイムライン作成を支援していくところである。

マイ・タイムラインを作成済の自治体では住民への周知・普及が重要であることから各自治体や地域の防災団体と協力しながら説明会などの普及活動を実施していく予定である。

また、コロナ禍では多人数での集会形式の普及活動は難しいことから、対面形式以外での普及活動、例えば、書き方動画のホームページへの掲載やWEB会議形式の説明会の実施なども必要であると考えている。さらに、事務所の担当者や自治体の担当者だけでは活動・周知の力が足りないため、地域のマイ・タイムラインリーダーを育成することが重要である。

また、「逃げ遅れゼロ大作戦」の記者発表後に数社のマスコミより取材いただいた。新聞やテレビによる報道は地域住民への周知活動として大きな力になることから報道の要望があった際は引き続き積極的に協力していく予定である。

「逃げ遅れゼロ大作戦」は始まったばかりであるが、

これらの活動を通して各自治体と協力しながら地域の防災力を少しでも高めることができるように普及活動を推進していく所存である。

謝辞：本稿の執筆にあたり、ご協力いただいた関係者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 新潟県防災局危機対策課：台風第 19 号による被害状況(第 13 報)
(URL:<https://www.pref.niigata.lg.jp/sec/kikitaisaku/typhoon19-no13.html>)
- 2) 長岡市：令和元年台風第 19 号被害等の概要
(URL:<https://www.bousai.city.nagaoka.niigata.jp/wp-bousai/wp-content/uploads/2019/10/84050e94d515be1004722d3d644392bd1.pdf>)
- 3) 内閣府中央防災会議：平成 30 年 7 月豪雨を踏まえた水害・土砂災害からの避難のあり方について（報告）
(URL:http://www.bousai.go.jp/fusuigai/suigai_dosyaworking/index.html)
- 4) 水害サミット実行委員会：水害から命を守る緊急提言
(URL:https://www.mlit.go.jp/river/suigai/pdf/teigen_190628.pdf)
- 5) 内閣府中央防災会議：令和元年台風第 19 号等を踏まえた水害・土砂災害からの避難のあり方について（報告）
(URL:http://www.bousai.go.jp/kaigirep/r1typhoon/pdf/dai3kai_gaiyou.pdf#page=3)
- 6) 社会資本整備審議会：気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～
(URL:https://www.mlit.go.jp/river/shimgikai_blog/shaseishin/kasembun-kakai/shouinkai/kikouhendou_suigai/pdf/02_gaiyo.pdf)

地域と連携した カリキュラム型防災教育について

濱田 将琴¹・村田 浩之²

¹近畿地方整備局 総務部 人事課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

²近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所 調査課 (〒668-0025兵庫県豊岡市幸町10-3)

近年の激甚化する災害を踏まえ、国土交通省では平成27年12月に「水防災意識社会 再構築ビジョン」を策定し、ソフト対策とハード対策について一体的に取り組んできた。

豊岡河川国道事務所では、「地域ニーズの反映」と「全教員に使用してもらう」をコンセプトに、この取組の1つである防災学習の補助資料として、小学生用の防災教育資料を作成した。

本論では、平成30年度と平成31年度に豊岡河川国道事務所で行った、小学生用防災教育資料の作成過程と結果を報告するとともに、地域の要望を取り入れた防災教育資料を作成する際に必要な「行程」について述べる。

キーワード カリキュラム型防災教育、アンケート調査、地域の災害特性

1. はじめに

(1) 円山川の概要

円山川は、源を兵庫県朝来市生野町円山に発し、大屋川、八木川、稲葉川等の支川を合わせて北流し、豊岡盆地にて、出石川、奈佐川等を合わせ日本海へ注ぐ流域面積1,300km²の一級河川である。

また円山川流域の上流部は、山間部を大きく曲流し、谷底平野を形成しながら下流部の豊岡盆地を貫流している。円山川の下流部は河口から約16km上流の出石川合流部までが感潮区間となっており、河床勾配は1/9000と非常に緩やかである。



図1 円山川の概要図

(2) 過去の災害と被害

円山川の主要な洪水は台風によるものが多く、中でも平成16年台風23号では、円山川の立野地点において、水位 T.P.+8.29m を記録し、支川出石川の弘原地点でも、観測史上最高水位の T.P.+5.38m に達した。この豪雨により、円山川と出石川では多くの箇所でも越水が生じ、円山川右岸 13.2k 地点(豊岡市立野地先)、出石川左岸 5.3k 地点(豊岡市出石町鳥居地先)で堤防が決壊した。また、円山川の水位が危険な状況となり、排水ポンプの運転を停止したこともあって、大規模な内水氾濫も発生した。

平成30年7月豪雨では、円山川の立野地点において水位 T.P.+6.96m を記録し、円山川左岸 16.0k 地点(豊岡市九日市地先)では漏水が発生した。また、奈佐川でも右岸 2.4k+40m 地点(豊岡市福田地先)で漏水が発生した。

(3) 防災教育の重要性

平成16年台風23号や平成30年7月豪雨等、近年の豪雨は激甚化の傾向がある。この激甚化する災害に対応すべく、昨今では幅広い世代を対象とした講演会や学習会が数多く開催されている中で、なぜ特段子どもへの防災教育に目が向けられつつあるのだろうか。

片田(2014)¹⁾は、近年の防災意識の持ち様について、以下のような課題を述べている。

私が防災講演を始めた頃は、主に大人を対象にしていました。【中略】要は、来ている人が毎回同じなんです。そういう人たちは、すでに防災意識が十分高いわけですから、わざわざ話を聞く必要はないのです。問題なのは、そこに来ない人たちです。その人たちをなんとかしないとどうにもならない。何とかしなければいけないのは、そこに来ない人たちです。

また片田(2014)¹⁾は、このような現状に対応する方法として子どもへの防災教育を取上げ、その重要性を以下のように述べている。

そこで、大人を対象にするのではなく、学校の子供たちを教育しようと思ったのです。その場合、「二〇年」という期間を一つの目安と考えました。小学生から防災教育を始めて、一〇年継続すれば、子どもたちは大人になります。そして、もう一〇年続ければ、彼ら、彼女らは親になる。そうすれば、真つ当な防災意識をもった親が、次の世代の子どもを育てるようになる。

このように、大人を対象とした防災の講演会だけでは、十分な防災意識の啓発を行うことができず、近年の激甚化する災害に対応するためには、子どもへの防災教育の普及が重要なのである。

2. 防災教育資料の作成

(1) 出前授業(講座)と防災教育資料

学校で防災教育に取り組むにあたり、防災教育資料を作成して学校で利用していただく他に、防災士や防災に関する知識や経験を持った者が学校へ行って授業を行う出前授業がある。それぞれの強みや弱み、課題は以下のとおりである。

a) 出前授業の強みと弱み

出前講座の強みは、防災士等が直接授業を行うため、より現実味のある内容を届けられることができることだ。

出前講座の弱みは、出前講座を行う「人」に限りがあることだ。防災士等の数と生徒の数から、全学年の全生徒を対象に出前講座を開くことは現実的ではない。

b) 防災教育資料の強みと課題

防災教育資料の強みは、作成した資料を利用していただくことで、たくさんの生徒に効率よく防災知識を普及できることである。

しかし、防災教育資料にも弱みになりうる課題がある。例えば、作成された防災教育資料を教師が十分に活用できなかった場合、十分な成果が期待できない。

また、災害について臨場感をもって危険性を伝え、避難の必要性や重要性を理解していただくにあたり、知識や経験を持ち合わせていないと上手に説明することが難しい部分も多い。これらが防災教育資料作成の弱みとなりうる課題である。

(2) 防災教育資料作成にあたり工夫したこと

防災教育資料の課題でも述べたように、「教師が活用しやすい」資料のかたちを意識し、「災害の臨場感」を再現することで、防災について真剣に考えてもらえる資料を作ることに力を入れた。その他にも、対象者が「小学生」であることも踏まえa-dの工夫を取り入れることにした。

a) 低・中・高学年用にジャンル分けした防災教育資料

防災教育資料を3段階に難易度分けし、その中でも「避難」や「洪水」といったジャンル分けを行った。

低・中・高学年用の3段階に分けた理由は、学習についてこれられない生徒を減らすためである。適切な難易度の資料を適切な学年で活用していただくことで、理解の促進を図ってもらうことを目的としている。

ジャンル分けを行った理由は、資料の活用しやすさを狙ってである。生徒の理解度や授業の目的地点によって、資料の内容を編集する必要が出てくるが、その際の編集を行いやすくしている。

b) 被災写真を用いて避難の大切さを表現

人は何かの情報を得る際に視覚から約90%の情報を得ると言われているほど、目で「見る」ことは重要な意味を持っている。そのため、災害を知ってもらうことや避難の大切さを理解してもらうことにおいても、実際に平成16年台風23号での被災写真を使用する等して、ビジュアル化を意識して資料を作成した。



図2 被災写真

c) 学習指導要領に沿った資料作成

授業構成を「導入」「展開」「まとめ」の3段階とした。また、各段階での配分時間の目安を提示した。

授業内容にあたっては、学習指導要領で焦点をあてられていることのひとつである、「主体的・対話的で深い学び」、いわゆる「アクティブ・ラーニング」の視点も持ちながら、授業案を作成した。

d) クイズ形式やワークショップ形式の授業

対象者の小学生に興味を持ってもらえるよう、〇×クイズや穴埋め問題を取り入れた。また、みんなで一つの問題について議論する場を設けた。

ワークショップ形式の授業にすることで、ただ聴講するだけの形式では思いつかなかった回答に触れることや、他の人と意見交換を行うことで、思考力や協調性の向上を目的としている。



図 3 クイズ形式の資料

(3) アンケート取りまとめ

豊岡市からの要望もあり、平成30年度防災教育資料を豊岡市内全29校へ配布し、うち27校で活用していただいた。

また、授業後に教材についてのアンケートを行い、学校からの要望や改善点を探した。

a) よかった点（上位5つ抜粋）（複数回答）

- 教員として、授業を行う上で教材等が使いやすかった。（17件）
- パワーポイントや写真等、視覚的にわかりやすかった。（12件）
- 写真等によって、子供たちが災害を身近に感じることができ、自分事として捉えられた。（8件）
- 学年で積み上げができる点から、子供たちにとって、教材やその内容が理解しやすかった。（7件）
- 〇×クイズや選択問題等がよかった（わかりやすい、楽しく学習できた等）。（6件）

b) 改善点や要望等（上位3つ抜粋）（複数回答）

- 感想や気づきだけでなく、授業の展開の中で使用できるワークシートがあるとよかった。
- 低学年・テーマ1において、雨の恵みについて考え

る部分について、アクティブ・ラーニングとして学習指導案を修正するとともに、ワークシートを追加した。

□ 資料が多く、パワーポイントとワークシートのセットを探すのに時間がかかった。

→ 「ワークシート集」の目次に、該当するパワーポイントのファイル名、および児童用副読本の種類を記述した。

□ 「洪水が怖い」という実感を持たせるには、表現が少し弱いように感じた。

→ 自然の災いの部分を全面に押す「脅しの防災教育」については限界があるとしつつ、現状の静止画だけでなく短編動画を用いることで洪水の仕組みを分かりやすく説明した。

3. 防災教育資料の改良

平成31年度防災教育資料は、平成30年度防災教育資料のアンケート結果から見えた改善点を踏まえて作成した。加えて、平成30年度より好評だった要素をより洗練することを意識した。

平成31年度防災教育資料を作成するにあたり、特に工夫した点は次の3つである。

(1) 3段階×2テーマ（洗練）

昨年度版の資料で好評だった3段階の難易度分けに加えて、振り返りつつ防災教育に関わる知識を積み増していくことができるような授業テーマを設定した。

授業テーマは、文部科学省・学習指導要領で示される指導上の工夫（小学校低学年では「社会生活上のきまりが確実に身に付くよう繰り返し指導する」、中学年では「自分を内省できる力を身に付け、自分の特徴を自覚し、そのよい所を伸ばそうとする意識を高められるよう指導する」、高学年では「児童の自立的な傾向を適切に育てるように配慮する」、といったこと）を踏まえ、昨年度作成した教材を再編成したものである。

学齢	授業テーマ	学齢別の主な特長
高学年	テーマ2 わたしたちができること ～助けられる側から助ける側へ～	<ul style="list-style-type: none"> ・思いやりの共感能力が発達。 ・自立的な態度が発達。
	テーマ1 洪水災害にどのように対応するか ～避難方法を知る～ ※平成30年度版をもとに再編	
中学年	テーマ2 自然との共生	<ul style="list-style-type: none"> ・地域の施設・行事、自然等への関心も増加。 ・内省する力が発達。
	テーマ1 洪水災害とその対策 ※平成30年度版をもとに再編	
低学年	テーマ2 自分の命は自分で守る ※平成30年度版をもとに再編	<ul style="list-style-type: none"> ・自分でしなければならぬことができるようになる。 ・行ってよいことと悪いことの理解ができるようになる。
	テーマ1 雨の恵みと災い ※平成30年度版をもとに再編	

図 4 難易度分けと授業テーマの設定

(2) 積極的に地元の写真を使用する（改善）

豊岡市の防災担当者からの意見もあり、防災や災害だけでなく、防災以外の河川環境等についても身近なものとして捉えてほしいことから、地元の写真を使用した。

また、過去には実際に写真のような災害が起きたという歴史を知ってもらう意図もある。



図 5 豊岡市内で撮影された写真の活用

(3) アクティブ・ラーニング（改善）

授業内容にあたっては、先生から何かを教わるという姿勢ではなく、自らが「主体的・対話的」に学ぶ形式の授業案を作成した。図6のように、自分で考えることや他の人と意見を交わすようにすることで、より能動的な学習を目的としている。

小学校高学年：テーマ①【ワークシート】

大雨が降ったときに 身を守る行動を知ろう

____年 ____組 ____番 名前(____)

1. 次の状況を想像してください。それぞれの状況では、あなたは避難しますか？ 避難しませんか？

状況	どちらかに○をつけてください 避難場所に避難する	避難場所に避難しない	理由
A: 「〇〇市の川で水があふれた」というニュースを見た			
B: 市役所から「避難勧告」が発令され、避難場所が開いた			
C: 家の1階の床まで水がきた			

2. 今日の学習で、わかったこと・思ったこと

図 6 能動的な学習を目的としたワークシート

4. まとめ

授業アンケートの結果およびメモリアル授業での防災教育資料の活用状況をふまえ、防災教育資料に係る成果と課題を以下にまとめる

(1) 成果について

平成31年度作成の防災教育資料については、豊岡市内小学校 29 校中、24 校で使用されており（82.8%）、平成30年度作成の防災教育資料を使用した小学校が2校いた。授業形態（全学年共通で防災教育を行う：1校）や授業方針（既存の防災教育資料を利用等：2校）により、平成31年版または平成30年版を活用しなかった学校においても、今後活用したい旨回答があった。

また、活用した学校からは、使い勝手の良さや、児童にとってわかりやすい、実感が得やすい、といった意見を得ることができた。防災教育資料の内容、形式に関しては、教育現場に適合したものが作成できたと考える。

(2) 課題について

平成31年度においても授業アンケートを行った。当該アンケートには、クイズのバリエーションや動画を増やしてほしい、ワークシートの課題をもっと具体化してほしい（シチュエーションを限定して欲しい）等といった、防災教育資料に対する意見や要望が寄せられた。

これらの要望に応えるためには、近年の災害事例をもとにしたクイズやアクティブ・ラーニング用の資料等を定期的に追加・提供していくとともに、地域特性を考慮したアクティブ・ラーニング用資料（シチュエーションの限定）を作成することが有効と考える。

(3) 地域と連携した防災教育資料作成で必要な行程

地域の要望を取り入れた、地域と連携した防災教育資料を作成するためには、「より多くの地域の要望を聞く」必要があると考える。つまり、従来方式の支援校を選定して、防災教育資料を作成するのではなく、広く募り、たくさんの要望を反映させつつ資料を改良していく方法が良いのではないかと考えた。なぜなら、要望の数だけ多角的な視野から考えられた防災教育資料に仕上がるからだ。

5. 今後の取組について

小学生用の防災教育資料作成で得た経験を活かし、今後は中学生用の防災教育資料の作成を計画している。その際に気を付ける点は、中学生になると「自助」だけでなく「共助」についても考える必要が出てくることだ。

小学生までは助けられる側であり、自分が被害にあわないためにはどうすればいいか、という「自助」の考え方について理解することが何よりも大切であった。

しかし中学生になれば、「自助」はもちろんのこと、自力での避難が困難であったり、避難に時間を要する要支援者の力となることも、社会的に求められる。具体的にどうすれば要支援者を助けられるのかという「共助」についても触れていく必要がある。

また「共助」は「自助」の考え方に比べて、より置かれる現状によって適切な行動が変わってくるため、判断力や分析力といった、講義形式で培われずらい力が必要となってくる。

すなわち、従来の講義形式の授業からロールプレイング形式の授業、もしくは避難訓練のような実技形式のカリキュラムへ転換が必要になってくるのではないだろうか。

謝辞：防災教育資料作成にご協力いただきました豊岡市内の小学校のみなさま、豊岡市内の全小学校への資料配布や資料説明でご尽力いただきました豊岡市役所のみなさま、また本稿とりまとめにあたりご助言及びご指導くださいましたみなさま、誠にありがとうございました。深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 片田 敏孝 (2014) : 『人が死なない防災』 集英社新書出版, pp111~112
- 2) 豊岡河川国道事務所 (2019) : 『平成 30 年度円山川流域防災教育他支援業務』
- 3) 豊岡河川国道事務所 (2020) : 『平成 31 年度円山川流域防災教育他支援業務』

NIOM法を活用した地震記録による ロックフィルダムの健全性評価手法の検討

市川 滋己¹・佐野 貴之²・茂木 秀則³

¹独立行政法人 水資源機構 総合技術センター (〒338-0812 埼玉県さいたま市桜区神田936)

²独立行政法人水資源機構 池田総合管理所 新宮ダム管理所 (〒739-0301 愛媛県伊予三島市新宮町馬立1144)

³埼玉大学 理工学研究科 准教授 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

フィルダム堤体の物性値は強い地震動を受けると一時的に変化することが知られているが、これまで地震観測記録から直接的に堤体の物性値を把握する方法はなかった。本研究では、NIOM法という解析手法を大規模ロックフィルダムの地震観測記録に適用した。結果、堤体コアゾーン、上下流ロックゾーン、及び岩盤の動的物性値を地震観測記録から直接的に把握できることを示した。また、小地震記録にNIOM法を適用して平常時の堤体の物性値を把握するとともに、大地震前後の物性値の変化を分析することにより、地震観測記録に基づいてロックフィルダム堤体の健全性を評価できる可能性を示した。

キーワード NIOM法, 地震観測記録, ロックフィルダム, 伝播速度, 健全性評価

1. はじめに

本研究は、ロックフィルダムで観測された地震波形記録から直接的に堤体の物性値を把握することを目的として、水資源機構が所管する阿木川ダム（堤高101.5m, 岐阜県恵那市）及び徳山ダム（堤高161.0m, 岐阜県揖斐川町）で観測された地震記録を用いてNIOM解析¹⁾を行い、堤体及び基礎岩盤を伝わる地震波の伝播速度を求めることにより、ダム堤体の動的物性値を推定するとともに、堤体の健全性評価手法について検討したものである。

ここで ω は角振動数であり、 $G(\omega), F(\omega)$ はそれぞれ $g(t), f(t)$ のフーリエ変換である。

NIOM法は、2点の観測結果から求めた $H(\omega)$ に対して、入力 $x(t)$ を $x(0) = 1$ を満たす単純なパルス形としたときの入力 $x(t)$ と出力 $y(t)$ を求める手法であり（図-1）、具体的には式(2a)及び式(2b)で与えられる。

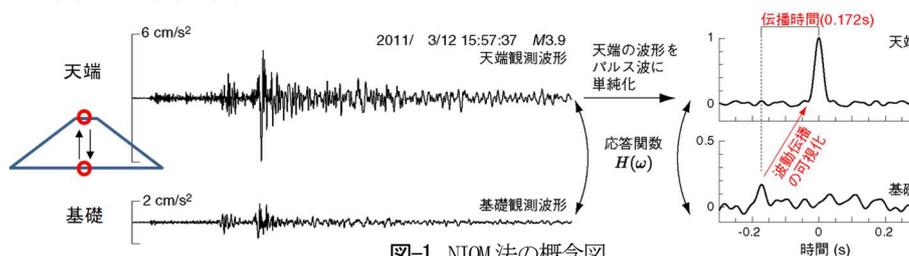
$$X(\omega_i) = N\Delta t \frac{1}{\sum_{n=1}^{N-1} \frac{(1 + \frac{kx}{Cx} \omega_i^2)(Cx + Cy[H(\omega_i)]^2)}{1}} \quad (2a)$$

$$Y(\omega_i) = H(\omega_i)X(\omega_i) \quad (2b)$$

2. NIOM解析の概要

鉛直アレー2点の観測記録を $f(t), g(t)$ とするとき、両者は伝達関数 $H(\omega)$ を用いて式(1)のように関連づけることができる。

$$G(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (1)$$



ここで、 Δt は観測記録の時間ステップ、 N はデータ数、 Cx, Cy, kx, ky はNIOM解析のパラメータである。

最後に、得られた $X(\omega), Y(\omega)$ をフーリエ逆変換すると、単純化された時間領域の入出力モデルが得られる。この時間領域の入出力波形におけるピークの時間差から、2点間の伝播時間を求めることができる。

3. 阿木川ダムにおけるNIOM解析

(1) コアゾーンの伝播速度

阿木川ダム（図-2）の地震計設置位置を図-3に、その地震記録にNIOM解析を適用して得られた入出力モデルの例を図-4に示す。用いた地震記録は2002/9/22 9:36:34、岐阜県南東部 M4.0、深さ49.2 km、震央距離19.4 kmによるもので、堤頂T1-コア内上M3（鉛直距離27 m）の上下流方向成分の結果である。図中、太実線が観測点M3の波形を入力モデル $x(t)$ （図中、細実線）に置き換えたときの観測点T1の出力モデル $y_g(t)$ 、細破線が観測点T1の波形を入力モデル $x(t)$ に置き換えたときの観測点M3の出力モデル $y_f(t)$ を示す。この結果では、コア内上M3に時刻0で単位振幅をもつ入力モデル $x(t)$ （図中細実線）が現れるとき、堤頂T1では太実線のような波形が生じることを示しており、M3からT1までの波動伝播に0.0694 sを要することが読み取れる。



図-2 阿木川ダム（堤高101.5m, 岐阜県恵那市）

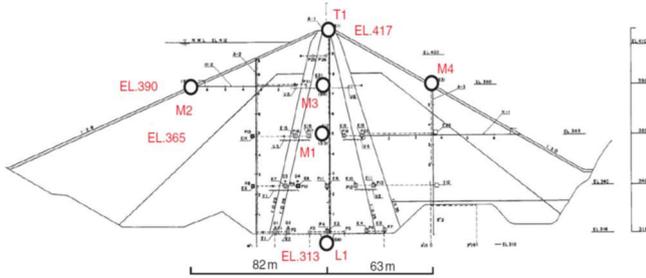


図-3 阿木川ダム地震計設置位置図

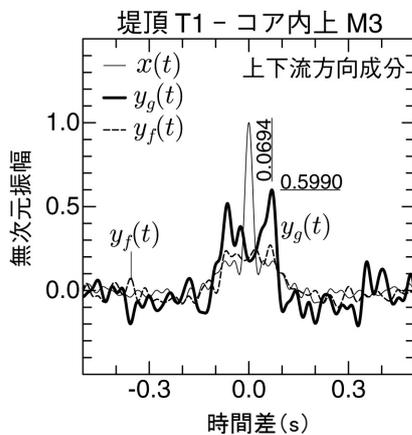


図-4 NIOM解析の入出力モデルの例

図-5に、2001年から2004年までの地震記録の解析から得られた伝播時間を示す。この図は堤体中央の鉛直アレー部分の下区間（コア内下M1-監査廊L1）の結果である。図中の横線はM1-L1間に要した伝播時間の平均値で、この平均値から求めた伝播速度は、上下流方向成分523m/s、ダム軸方向成分539m/s、鉛直方向成分2255m/sとなった。

(2) 堤体の速度構造の推定

阿木川ダム堤体における地震波の伝播速度をNIOM法解析によって推定した結果を図-6に示す。図中の数字は、隣接する地震計設置位置の標高差（図中矢印の長さに相当する距離）を、NIOM解析で得た上下流方向成分の伝播時間で除して求めたゾーンごとの平均のせん断波（S波）速度である。

コアゾーンの平均のS波速度は、上区間（T1-M3）で424m/s、下区間（M1-L1）で523m/sを示し、拘束圧の増加に伴うと推定されるS波速度の増加が見られた。

ロックゾーンについては、上流側ロックゾーンの平均のS波速度は480m/sであり、コアゾーン上部より多少大きい。また一方で、下流側ロックゾーンのS波速度は576m/sであり、上流側より大きい値を示した。

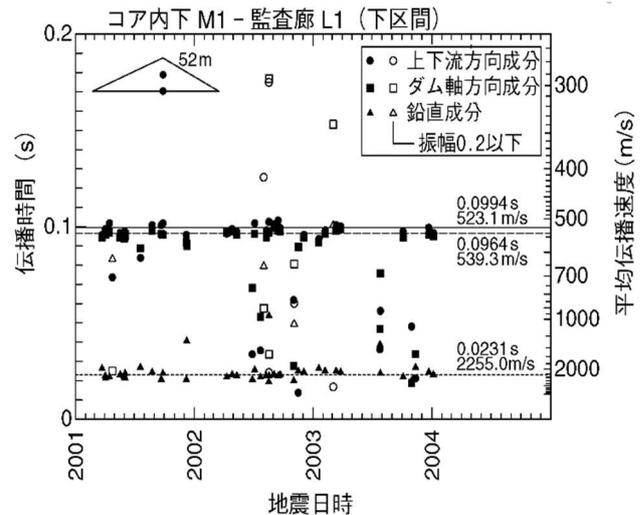


図-5 NIOM解析による阿木川ダム堤体内の地震波の伝播時間と区間平均伝播速度（コア内下M1-監査廊L1）

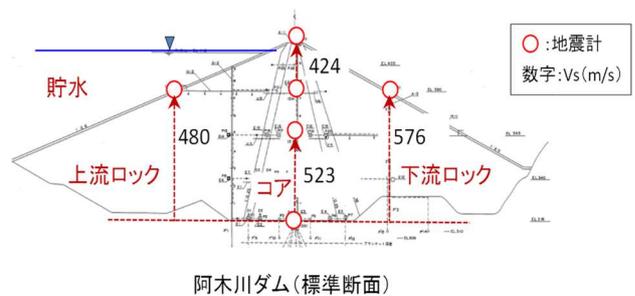


図-6 小地震記録のNIOM解析で得た阿木川ダム堤体の地震波伝播速度（上下流方向成分）

これらの本研究で得られた伝播速度は、過去に堤体で実施されたPS検層による計測値と概ね整合している²⁾。

この上流側ロックゾーンと下流側ロックゾーンにおけるS波速度の違いの要因としては、貯水の有無による有効応力の違いや、貯水による動的な影響の可能性が考えられるが、飽和しているロックゾーンの伝播速度がドライなゾーンに比べなぜ遅くなるのかについてのメカニズムについては十分に明らかになっていないと考えている。この点については、試験湛水中の小石原川ダムにおいて湛水開始前の段階から実施している地震観測によって得られる、貯水位が徐々に上昇していく過程の小地震記録の分析を行い、水の影響を定量的に評価することを予定している。

4. 徳山ダムにおけるNIOM解析

徳山ダム(図-7)の地震観測記録を用いて、阿木川ダムと同様にNIOM解析を行い、堤体および岩盤の伝播速度を推定した結果を図-8に示す。

コアゾーンにおける平均のS波速度は堤体の上部の区間(上区間)で500m/s、堤体の下部の区間(下区間)で785m/sとあり、阿木川ダムのコアゾーンでのS波速度と比較してやや大きい、すなわち、速い結果となった。この伝播速度は、阿木川ダムでの結果と同様に、過去に堤体で実施されたPS検層の結果と概ね整合している³⁾。また、岩盤内に設置された地震計記録からは、岩盤内の伝播速度は1845m/sと推定された。



図-7 徳山ダム(堤高161.0m, 岐阜県揖斐川町)



徳山ダム(ダム軸縦断)

図-8 小地震記録のNIOM解析で得た徳山ダム堤体・岩盤の地震波伝播速度(上下流方向成分)

5. 強震動を受けた荒砥沢ダムでの知見⁴⁾

荒砥沢ダム(図-9)は堤高74.4mのロックフィルダムであり、地震計はダム基礎、コアゾーン中段、及び堤頂に配置されている(図-10)。荒砥沢ダムは宮城県に位置するため、これまでに岩手・宮城内陸地震、東北地方太平洋沖地震など複数回の強震動に見舞われている。これらの大地震を含む長期間にわたる地震記録の分析から、強震動を受けた後、堤体の物性値は変化したことが報告されている。

荒砥沢ダムの長期にわたる地震観測記録を用いて、NIOM法により堤体内部を伝わる地震波の伝播時間の時系列変化をまとめた結果を図-11に示す。

コアゾーン中段、すなわち堤体中位標高と堤頂との間の伝播時間を示した、図-11の上の図からは、伝播時間が強震動を受けた直後には長くなり(すなわち伝播が遅くなり)、その後、時間をかけて強震動を受ける前のレベルに徐々に回復していることがわかる。また、地震波の伝播時間は、上下流方向成分が、ダム軸方向成分に対して、よりも長い(上下流方向成分の方が伝わるのが遅い)ことも分かる。これは上下流方向の方がダム軸方向に対して、堤体の拘束度が小さいためと推察されている。

一方で、堤体基礎から堤体の中位標高までの伝播時間を示した図-11の下の図では、強震動を受ける前後で伝播時間がほとんど変化していないことがわかる。このように、低位標高部の変化が高位標高部の変化に比べて小さくなった要因は、低位の標高ほど拘束圧が大きいためと推察されている。



図-9 荒砥沢ダム(堤高74.4m, 宮城県栗原市)

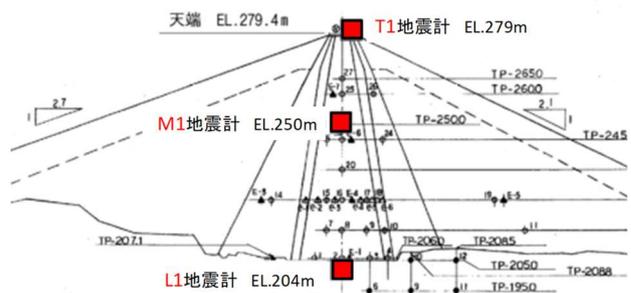


図-10 荒砥沢ダム地震計設置位置図

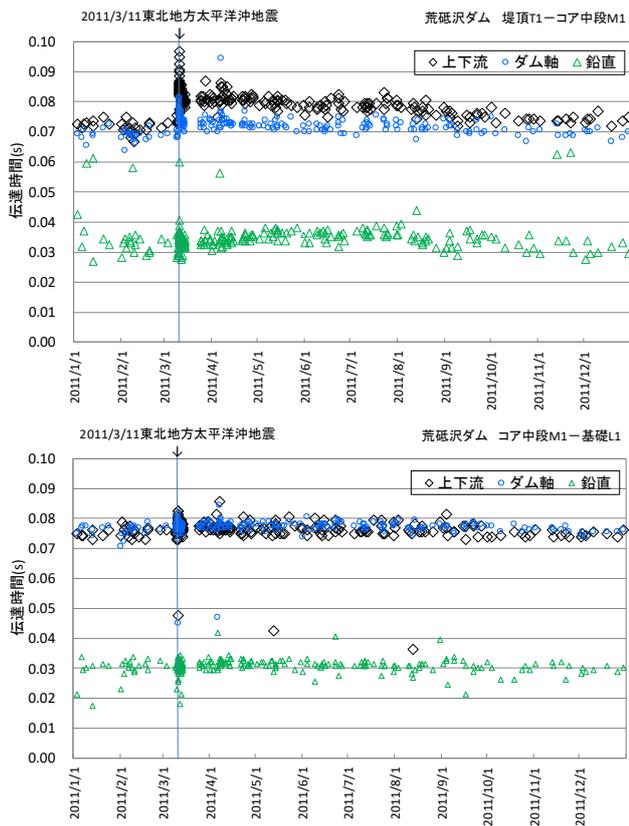


図-11 荒砥沢ダム堤体内の地震波伝達時間の経時変化
(上図：コア中段→堤頂 下図：基礎→コア中段)

6. 堤体の健全性評価への活用

筆者らは、図-11に示した堤体中の地震波の伝播時間の経時的な変化がロックフィルダム堤体の健全度評価に活用できるものと考えている。すなわち、小地震の観測記録からNIOM法によって平常時の伝播時間を求めておき、大地震が起こった際には余震記録を用いて伝播時間の変化を把握する。仮に伝播時間が長くなっていけば、地震動によって堤体の物性値が変化した可能性が把握でき、その後、伝播時間が時間の経過とともに短くなっていけば（伝播速度が速くなっていけば）、堤体の物性値が回復しつつあり、元の状態に戻ったことも確認できるものと考えている。また、ダム堤体の圧密が進めば、それによって伝播速度も速くなることが推定されるため、伝播速度の変化を把握することで、ボーリング調査によってコア試料を採取することなく、堤体の強度の変化を定量的に把握できる可能性がある。

ロックフィルダム堤体の常時の伝播速度は、ダム毎に

少しずつ異なることが想定される。そのため、事前に各ダム堤体の常時の物性値をNIOM法で推定しておき、地震中、ならびに地震後の地震記録をNIOM法で分析することが必要となるが、本研究で示した手法を用いれば、ロックフィルダム堤体の健全性を評価できるものと考えている。

7. 結論

本研究では、堤高の高い中央コア型ロックフィルダムである阿木川ダムと徳山ダムで観測された地震記録にNIOM法を適用して解析することにより、堤体のコアゾーン、上下流ロックゾーン、及び基礎岩盤内を伝わる地震波の伝播速度を算出し、地震観測記録から堤体の動的物性を直接的に把握できることを示すことができた。本研究で求めた堤体のせん断波速度は、過去に実施されたPS検層による計測値と概ね整合していることも確認している。

これまでの既往の研究により、フィルダム堤体は強震動を受けるとその物性値が一時的に変化することがわかっている⁴⁾。このようなフィルダム堤体の特性に対して、地震観測記録に基づくNIOM解析によってロックフィルダム堤体の定常時の物性値を把握するとともに、その解析結果を用いて常時および大地震後のダム堤体の健全性（強震動が堤体に与えた影響や回復状況）を評価する手法の検討を進めていく予定としている。

謝辞：本研究では、阿木川ダム、徳山ダム、荒砥沢ダムの地震観測記録を使わせて頂いた。また、埼玉大学工学部建設工学科川上研究室によるNIOM解析プログラムを使わせて頂いた。記して深謝の意を表す。

参考文献

- 1) Kawakami et al : Modeling wave propagation by using Normalized Input-Output Minimization (NIOM), Soil Dyn.Earthq.Engng, 17, 1998
- 2) 茂木秀則ら：地震観測記録に基づくロックフィルダム堤体の速度構造の推定, ダム工学 29(3), 181-190, 2019
- 3) 茂木秀則ら：長期間の地震観測記録に基づくロックフィルダムの動的物性評価, ダム工学 27(4), 254-264, 2017
- 4) 茂木秀則ら：ロックフィルダムにおける長期間にわたる地震観測記録から推定した地震波伝播時間の経時変化, ダム工学 25(4), 218-229, 2015
- 5) 茂木秀則ら：アースダムにおける長期間にわたる地震観測記録のNIOM解析と堤体の物性評価, ダム工学 25(3), 139-149, 2015

水窪佐久間道路における地質リスク検討について ～地質リスクを見逃すな！！～

河田 祐奈¹

¹岐阜国道事務所 工務課 (〒500-8262 岐阜市茜部本郷1-36-1)

近年、道路事業の施工や維持管理段階で生じるトラブルの多くが地形・地質に起因しており、これらが事業費や工事期間の大幅な増大など、事業推進に大きな影響を与えている。三遠南信自動車道では、中央構造線に近接することから、破碎帯をはじめとした脆弱な地質への対応が事業推進への大きな課題となっている。この課題に対し、事業の早期段階から地質リスクを抽出し継続してマネジメントすることで、地質に起因するリスク回避の機会が飛躍的に増大すると考える。ここでは水窪佐久間道路の事業初期段階における地質リスクマネジメントの適用結果と今後のマネジメント手法について報告する。

キーワード：地質リスク、リスクマネジメント、道路事業、施工箇所変更

1. 水窪佐久間道路の概要

平成31年4月に事業化した水窪佐久間道路は、長野県飯田市から静岡県浜松市に至る三遠南信自動車道の一部を構成する道路(図-1)で、災害時に信頼性の高い道路ネットワークの確保、地域医療サービスの向上等の整備効果が期待されている。中央構造線に併走する本道路は、全体の約8割が山岳トンネル区間で、比較的

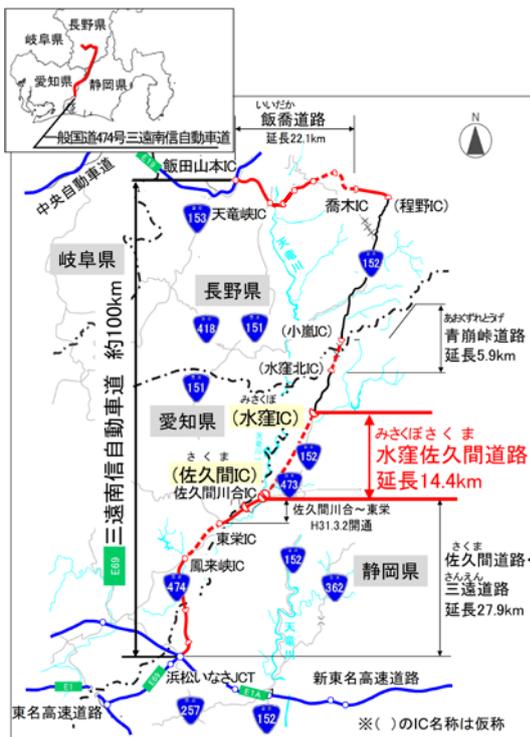


図-1 位置図

ル区間で、比較的地質条件の良い内帯側(領家帯)に計画されているが、周辺は天竜峡花崗岩及び領家変成岩類からなる急峻な斜面が形成されており、現道沿いでは地すべりや崩壊、落石等の斜面災害が比較的多く発生している状況にある(図-2)。このため、期待される整備効果発現については、地質リスクへの対応が重要となる。

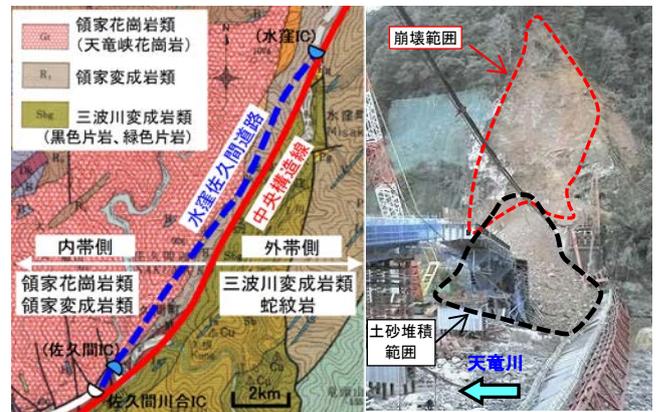


図-2 計画路線沿いの地質と現道沿いの斜面災害
(右写真：H27.1岩盤崩壊による原田橋の崩落)

2. 地質リスクの抽出

事業初期段階の地質リスク検討では、「漏れの無い地質リスクの抽出」¹⁾が重要となる。一方で本道路が中央構造線に近接する急峻な山岳地において14.4kmの延長を有することから、地質リスク源(地形地質特性)も多岐に渡ることが想定された。そこで、事前に資料調査・地形解析及び予察踏査を行い、重

要な地質リスク源を抽出した上で詳細な地表地質踏査を実施した（図-3）。また、近接目視困難な急崖におけるリスクの見落としの回避や設計見直しにつながる可能性のある重要なリスク源と計画の関係性を把握するため、広域に適用でき、かつ経済性に優れたクライミング調査や比抵抗二次元探査などの補足調査を実施した。これらの結果と地域の特性（資料調査の結果）を踏まえることで、計画路線沿いに潜在する地質リスクの把握に漏れが無いように留意した。

地質リスク抽出の結果、水窪佐久間道路の当初計画に潜在する地質リスクは100箇所以上に上り、これらを想定される事象ごとに大別して整理を行った（図-3）。

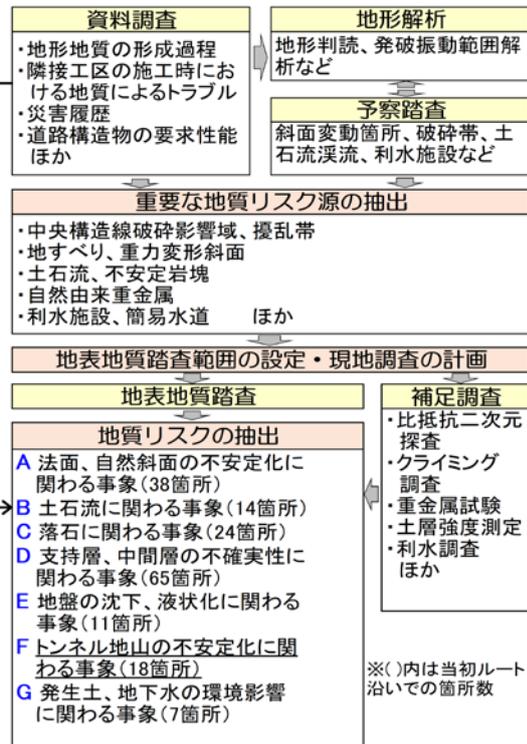


図-3 地質リスク抽出の流れ

以下に抽出された地質リスクのうち、特に重要な地質リスクについて概説する。

(1) 中央構造線の破碎影響域

中央構造線は内帯・外帯側に幅数百mの破碎影響域を伴い、その分布範囲では中央構造線に沿った方向の破碎帯、及び擾乱帯と呼ばれる褶曲、小断層の発達する岩盤劣化帯も確認されている。すでに供用中の隣接工区では、路線に平行な破碎帯に起因した側壁の押し出しによりトンネル支保が変形した事例が発生している。このような事象を避けるべく、当初計画は空中電磁探査等により破碎影響域の分布範囲を推定し、中央構造線破碎影響域を避けたルートが設定されていた。そこで、想定分布範囲の精度向上を目的に、沢部を中心とした詳細な破碎影響域追跡踏査を行い、分布範囲について照査を行った。そ

の結果、中央構造線破碎影響域の分布範囲が当初計画の想定よりも広範囲に分布することが想定され（図-4、図-5）、一部のトンネルにおいて、長区間にわたって施工時の支持力不足や切羽・天端の不安定化、側壁の押し出し等が懸念された。

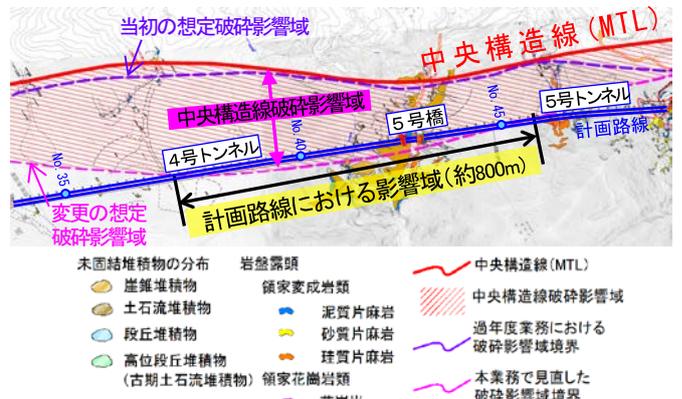


図-4 中央構造線破碎影響域の評価

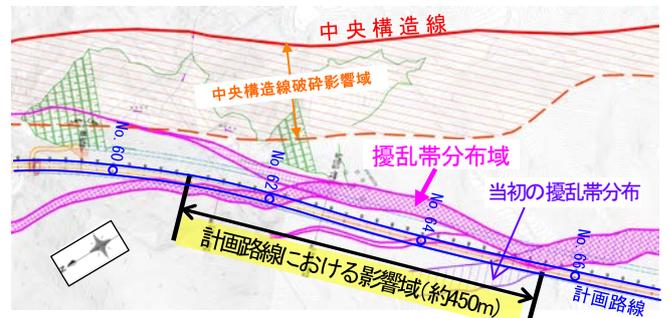


図-5 擾乱帯分布の評価

(2) 地すべり、重力変形斜面

計画路線周辺の岩盤崩壊は凸型の緩んだ尾根斜面で比較的多く発生していることから（図-2参照）、地形判読や予察踏査を実施し、地すべりに加えて重力変形斜面の抽出を行った。その結果、トンネル坑口付近で大規模な地すべりブロックが確認されたことから、リスク評価に必要な地すべりの規模・安定性を把握するため、詳細踏査に加え比抵抗二次元探査を実施した（図-6）。調査の結果、地すべりブロック層厚は20~25mと想定され、トンネルと地すべりブロックとの位置関係から、トンネル施工による地すべり活動の誘発とこれに伴うトンネルの損壊、隣接する河道閉塞等が懸念された。また、地すべり活動に対する必要抑止力は7,680kN/mと試算され、大規模な対策となることも想定された（図-7）。

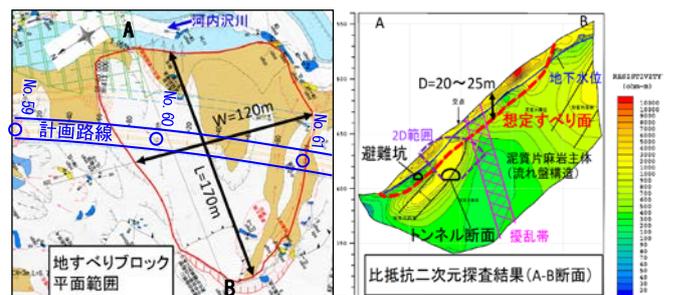


図-6 地すべりの平面範囲と比抵抗二次元探査結果

- (a) $P < 2,000\text{kN/m}$ ……地すべり対策工で抑制、抑止可能である。
- (b) $2,000\text{kN/m} < P < 4,000\text{kN/m}$ ……大規模土工（大幅な排土、押え盛土工）や大規模な抑止工（シャフト工やアンカー工）あるいはこれらの組合せで抑制、抑止できる場合もある。
- (c) $4,000\text{kN/m} < P$ ……通常考えられる対策工では抑制、抑止は困難である。

図-7 地すべり地で路線を通過させるか否かの判断の目安（「道路土工 切土工・斜面安定工指針」より）

(3) 土石流

計画路線は複数の溪流を横断し、特に北部域の溪流の多くが土石流危険溪流等に指定されている。一部のトンネル坑口では、現河床との高さ関係や上・下流部の流出土砂や流木の状況などから、土石流による計画路線への土砂の流入が懸念された（図-8）。



図-8 土石流による土砂流入が懸念される箇所

(4) 不安定岩塊（落石、岩石崩壊）

浮石・転石の安定度調査の結果、多くの坑口や土工区間で落石の発生が懸念される箇所が確認された。また、広範囲の落石堆積物（礫が緩詰め状態で堆積）の分布により、切土法面の不安定化等が懸念される箇所も確認された。花崗岩分布域では落石の発生量が多く、対策施設の維持管理上の課題も挙げられる（図-9）。



図-9 現道沿い防護柵背後の落石の堆積状況(上)と切土区間の落石堆積物(下)の状況

(5) 自然由来重金属

露頭試料を対象とした重金属調査の結果、泥質片麻岩や破碎帯、熱水変質帯（花崗岩分布域）で採取した試料の一部で溶出量基準値を超過する砒素等が確認された。そのため、トンネル湧水や発生土からの重金属溶出が懸念される。

3. 地質リスク基準の設定

抽出した各地質リスクへの対応（回避、低減、保有）を決定するため、地質リスクを「影響度」と「発生確率」によって評価するマトリクスランク表を作成した（表-1）。

表-1 マトリクスランク表

		発生確率		
		低い	中程度	高い
影響度	非常に高い	A	A	AA
	高い	B	A	A
	中程度	B	B	A
	低い	C	B	B

AA	線形変更等によりリスクを回避することが望ましい事象
A	詳細な地質調査を実施して、完全な対策を講ずべき事象
B	地質調査等を行い、結果に応じて適切なリスク低減対策を講ずべき事象
C	施工段階へリスクを保留することが可能な事象

影響度の評価については、評価の基本項目を〔コスト〕、〔期間〕、〔安全〕、〔環境〕とし、コストや期間については影響度「低い」～「非常に高い」に応じてそれぞれ基準値を設定することで定量的な評価を行った。各基本項目の評価において最も高い影響度を当該リスクの影響度とした。

発生確率は、地形要因や地質要因、地下水要因、履歴等のそれぞれの要因が相互に関連しているため、各項目の評価結果に基づき総合的に評価するものとした。これらに基づき、抽出したすべての地質リスクに対してリスクランクを設定した（表-1）。

影響度と発生確率の評価表の例（トンネル地山の不安定化を例示）をそれぞれ表-2、表-3に示す。

表-2 影響度評価表（「トンネル地山の不安定化」の例）

		影響度			
		低い	中程度	高い	非常に高い
コスト	破砕帯の延長は数m以下で、支保パターンの大幅な変更等はない。	破砕帯の延長が10m以上に及ぶ。支保パターン変更等による増加費用1000万円以上（CI～CII地山⇒DI～DII地山）	破砕帯の延長が30m程度以上に及ぶ。支保パターン変更や補助工法の追加等による増加費用1億円以上（CI～CII地山⇒DI～DII地山、補助工法追加）	破砕帯の延長が350m程度以上に及ぶ。支保パターン変更や補助工法の追加等による増加費用10億円以上（CI～CII地山⇒DI～DII地山、補助工法追加）	
	現場対応が可能なもの 軽微な追加対策で対応可能なもの（対応期間：1ヶ月以内）	支保パターンの変更などで対応可能なもの（対応期間：1年以内）	支保パターンの変更や補助工法の追加、及び調査・各種検討の実施により、1年前後以上の工事の遅延。	大幅な工事の遅延が生じることから路線計画の変更が必要となるもの	
周辺環境への影響（突発湧水時）	準備した湧水処理施設で処理可能な湧水の発生	準備した湧水処理施設を一時的に上回る湧水の発生	準備した湧水処理施設を継続的に上回る湧水が発生し、周辺環境（河川、利水施設等）に影響を及ぼす。	—	

表-3 発生確率評価表(「トンネル地山の不安定化」の例)

	発生確率		
	低い	中程度	高い
破砕・変質の程度	[1]多亀裂※ ¹⁾	[2]多亀裂～細片状※ ²⁾	[3]細片状～粘土状
破砕帯の構造 (計画路線との平面交差角)	[1]高角度交差(90°～60°)	[2]中角度交差(60°～30°)	[3]鋭角交差(30°以下)
高圧・大量湧水の可能性	[1]水圧0.1MN/m ² 以下、または、湧水量0.05m ³ /分以下	[3]水圧0.1～1MN/m ² 以下、または、湧水量0.05～0.5m ³ /分	[5]水圧1MN/m ² 以上、または、湧水量0.5m ³ /分以上
膨潤性粘土鉱物の有無	[1]殆ど含まれないと推定される。	[2]含まれると推定される。或いは未詳。	[3]多量に含まれる可能性有り。
地山強度、土被り	[1]塑性土圧発生の可能性は低い(地山強度比:4以上)。	[3]軽微な塑性土圧発生の可能性あり(地山強度比:4～2)。	[5]塑性土圧発生の可能性あり(地山強度比:2以下)。

4. リスク対応

AAランク及び一部のAランクの地質リスクに対しては施工箇所変更でリスクを回避し、それ以外のは後続の地質調査や対策工検討等を通じて事業の各段階で不確実性を含めたリスクの低減を図る方針とした(表-4)。

表-4 本事業におけるリスクランクと対応方針

対応	リスク	想定事象と対応方針	発現事象の例
回避	AA	事象が発現した場合、通常計画可能な構造物や対策工による対応が困難である。通常容認される以上の事業費がかかる。 → 施工箇所変更により回避 *	・大規模地すべりが発生し、通常の対策工での対応が困難になる。 ・破砕帯が長区間にわたり、補助工法の追加等で大幅な事業費の増加、工事遅延が発生。
低減	A	事象が発現した場合、構造形式の変更が必要となる場合や、安全性が著しく低下する可能性がある。 → 施工箇所変更や構造変更で回避 或いは リスクを低減 → 詳細な調査を実施して、完全なリスク低減を実施	・支持層が予定より深く基礎形式が変更となる(基礎形式や施工手順の大幅変更)。
	B	事象が発現時、軽微な追加対策や、対策範囲の変更により対応可能。 → 通常の地質調査を行い、調査結果に応じて対策工を検討	・施工時の発破振動等で道路・現道に落石が発生し、別途落石対策が必要となる。
保有	C	事前の低減対策等の必要性が低い ため、施工段階や維持管理段階にリスクを保有。	・切土法面からの湧水が認められたため、水抜きを実施。

※重金属に関わるリスクについては、重金属を含有すると推定される地質が広範囲に分布し、現時点では回避が困難と考えられるため、事業の早い段階から対応検討を進める方針とする。

施工箇所変更の検討に際しては、発注者、地質技術者、設計者間で設計見直し前後の地質リスクを整理したリスク比較表を用いて施工箇所変更の効果を相互に調整しながら検討を進めるとともに、変更施工箇所に対してもリスク抽出・評価、対応検討を繰り返すことでリスクの低減を図る方針とした(図-9)。

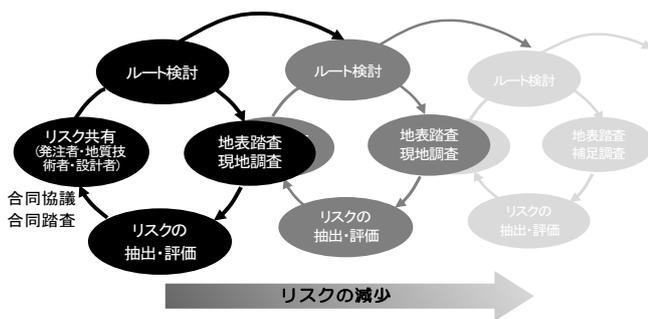


図-9 反復評価によるリスクの低減

事業初期段階において、これまで述べてきた通り、地質リスク検討を実施してそれを設計に反映させることで、大規模な追加対策費と工程遅延が懸念されるAAランクの地質リスクの回避が可能となるとともに、Aランクの地質リスクの大幅な減少も期待される。

5. 今後のリスクマネジメント手法

今後、計画路線沿いに残存する地質リスク(A,Bランク)に対して、リスク評価に基づく詳細な地質調査や対策工の設計・施工の実施、及びこれらによるリスクの再評価・対応検討を繰り返すことで事業全体が抱える地質リスクの影響は徐々に抑制され、さらなる事業全体のコスト縮減や事業工程の遅延回避が可能になると考えられる。また、このようなリスクマネジメントの記録を引継ぐことにより、維持管理段階における地質リスクの低減も期待できる。

上記を事業の各段階で的確かつ継続的に進めるためには、地質リスクに応じた後続調査計画の立案や事業の各段階でのリスクの引継ぎ、当該事業に即したリスクマネジメント手法の体系化が求められる。

(1) 地質調査計画の立案

当該計画路線で残存する地質リスクに対し、現段階のリスクランクや地質評価の不確実性を考慮した地質調査計画(予備設計段階)を立案した。計画の立案の際には、リスクランクと地質評価の不確実性、事業工程を考慮し、地質調査の優先順位を設定した。

(2) リスク引継ぎ管理表の作成

ここでは各事業段階でのリスク評価やリスク対応、地質評価上の課題等を後続段階に引き継ぐための管理表を作成した(表-5)。これにより前段階のリスク評価に基づいた計画や対応方針の立案等が可能となる。また、事業初期段階では地質リスクに関わる地質評価そのものの不確実性が相対的に高いが、管理表に地質評価上の課題や未調査項目等を記録し、後続段階でフィードバック(追加調査、詳細調査等の実施)することで、事業の進展に合わせて地質評価の不確実性も低減すると考えられる。さらに、施工時に発現した地質リスクとその措置を記録に残すことで維持管理段階での有効活用も期待できる。

(3) 地質リスク対応マニュアルの策定

本事業の各段階における地質リスクマネジメントを的確かつ継続的に進めるために下記項目を取りまとめたリスク対応マニュアルを策定した(図-10)。

- ・マネジメント目標
- ・前段階のリスク評価に基づく調査・設計・施工計画の進め方
- ・リスクの再評価、リスク対応の方法
- ・関係者間での情報共有の内容と時期
- ・リスク引継ぎ管理表の運用方法 など

表-5 地質リスク引継ぎ管理表（一例）

		No59+90切土	7号トンネル
地質リスク検討段階	リスク源	流れ盤亀裂の発達した緩み岩盤、擾乱帯の分布	未固結堆積物、低土被り、偏圧地形
	事象・結果	すべり破壊による切土変状、崩壊	天端崩壊、断面変形、L側斜面不安定化(保全対象への影響)
	リスクランク	A	A
地質調査段階	地質評価上の課題	風化性状、緩み範囲、地質構造の変化等が未詳	未固結層性状、基盤岩との境界形状、地下水位状況が未詳
	調査計画	(予)オールコアボーリング2箇所、ホアホールカメラ、弾性波探査、岩石試験 (詳)ボーリング1箇所(起点側)	(予)ボーリング4箇所、標準貫入試験、室内試験(粒度・含水) (詳)ボーリング2箇所、孔内水平載荷試験
	調査結果	当初想定よりも風化帯は薄く、幅の広い破砕帯も確認されない。	強度の低い未固結層がトンネル断面～天端付近、隣接斜面に分布していることを確認。
	リスクランク	B	A
設計段階	地質評価上の課題	(予)表層に開口岩盤の分布が予想され、法面対策必要。	(予)終点側で基盤岩境界の不陸が大きく、詳細確認必要。
	リスク対応	表層付近の風化帯の崩壊を抑制するため、鉄筋挿入工を計画	補助工法として長尺先受工法を計画するとともに、緩みを抑制する掘削工法を計画。
	概算対策費等	15～20百万	150百万
施工段階	リスクランク	C	B
	地質評価上の課題	切土範囲の変更により、起点側の対策範囲(緩み範囲)が未詳	施工時に斜面の動態監視が必要。数値解析に必要な物性値の取得。
	施工計画	逆巻工法を採用。施工時は地山が緩み崩壊が発生しないよう観測する。 切土施工時に一部の亀裂から湧水が発生し、その周辺部で小規模な崩壊が発生したため、水抜き孔を施工。	機械施工で地山の緩みの最小化を図るとともに、掘削時に斜面動態モニタリング実施。 モニタリングの結果、変位は許容値内に収まっていることを確認。
維持管理段階	リスクランク	B	C
	維持管理方針	水抜き孔の目詰まりの確認や、降雨時に崩壊箇所周辺の異常の有無を確認する。	通常の維持管理で対応。

青字：新たな地質評価上の課題に対するフィードバック内容
(予)：予備設計時点、(詳)：詳細設計時点

今後、事業の進捗や外部状況の変化、リスクに関する情報の変化等について適宜モニタリング、レビューし、これらに基づきリスクマネジメント手法の継続的な改善（マニュアルの改訂等）を行うことで地質リスク対応の最適化を図っていく。

6. まとめ

ここでは、事業に対して地質リスクがもたらす工程遅延や事業費増大などの影響を大幅に低減することを目的として、地質リスク検討の効果を具体的事例に基づいて述べた。今後は残存する地質リスクに対して、事業の各段階でリスクの評価、引継ぎ等を確実にを行うことで、厳しい地質条件が課せられる水窪佐久間道路の更なるリスク低減が期待されるとともに、円滑で安全な事業の推進に寄与すると考える。

参考文献

- 1) 全地連（2007）；企業間連携等の推進に関する調査・研究委員会 報告書 -地質リスクに関する調査・研究-
- 2) Transit New Zealand (2004)；Risk Management Process Manual AC/Man/1 48p.



図-10 リスク対応マニュアル（右写真：関係者間でのリスク共有方法（本事例））

アスファルト舗装の調査結果に基づく 早期劣化メカニズムの推定

若林 由弥¹・渡邊 一弘¹

¹国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 道路基盤研究室 (〒100-8918 茨城県つくば市旭1)

膨大なストック量の道路舗装を効率よく管理していくためには、供用の目標年数よりも早く劣化が起こる「早期劣化区間」をいかに減らしていくかが重要である。しかし、舗装の早期劣化メカニズムについては明らかになっていない部分が多く、道路管理者が早期劣化が発生した際の措置を判断するのは難しい状況にある。そこで、直轄国道において実際に早期劣化したアスファルト舗装を対象に開削調査等の構造調査を実施したところ、アスファルト混合物層内の滞水及び層間はく離が確認され、これらが早期劣化の一般的な要因の1つであることがわかった。

キーワード アスファルト舗装, 早期劣化, 構造調査, 層間はく離

1. はじめに

高度経済成長期に集中的に整備されてきた道路構造物の老朽化が進む一方、道路構造物を管理する国や地方自治体等では人口減少や少子高齢化に伴う技術者不足や財政難が深刻化している。特に道路舗装は更新周期が短いストック量が膨大であり、メンテナンスサイクルを確立し、長寿命化によるライフサイクルコスト縮減を目指すことが喫緊の課題である。

こうした中、舗装の更新年数を意識した維持管理を行うことで舗装の長寿命化を図ることを目的に、2016年10月に国土交通省道路局より「舗装点検要領」¹⁾が策定された。この要領において、道路管理者は、損傷の進行が早い道路等のアスファルト舗装について、表面の層を供用し続ける期間として使用目標年数を設定し、この期間よりも早期に劣化した区間（以下、「早期劣化区間」という）について、詳細調査を実施し適切な修繕設計を行うことが示された。図-1に使用目標年数を用いた舗装管理のイメージを示す。早期劣化が生じた際、対策を講じずに通常どおりの修繕を行った場合、再度早期劣化が生じるおそれがある。このため、早期劣化が生じた際に詳

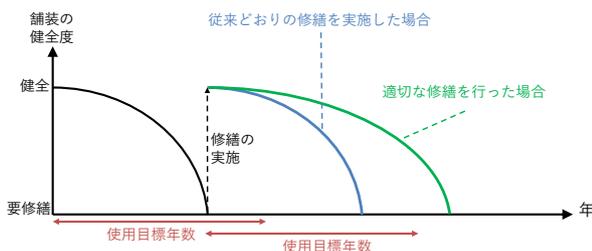


図-1 使用目標年数を用いた舗装管理のイメージ

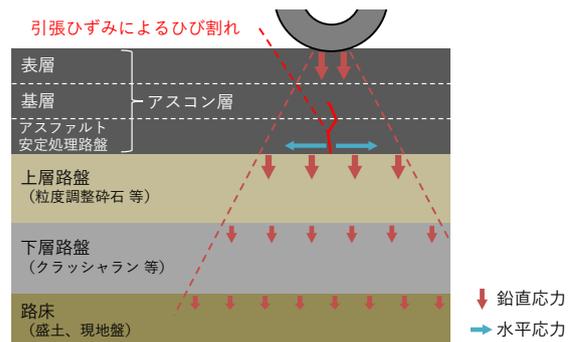


図-2 アスファルト舗装の構造設計における疲労破壊

細調査を実施し、その要因について検討し対策を講じることで再度の早期劣化を防ぐという考え方である。

図-2に従来の構造設計で想定されてきたアスファルト舗装の疲労破壊の考え方を示す。舗装は複数の層が積み重なった構造となっており、交通荷重を各層で分散し、路床で受け持つ構造となっており、表層や基層、瀝青安定処理路盤等からなるアスファルト混合物（以下、「アスコン」という）層の下面に生じる引張ひずみにより下部から上部にかけて疲労ひび割れが発生する。ここでひび割れや施工継目などを通じて雨水等が浸入すると、アスコン層下部の粒状路盤が脆弱化し、荷重分散効果が弱まるため、アスコン層のひび割れが生じやすくなる。このため、従来より早期劣化の主な要因は粒状路盤の脆弱化であると考えられてきた。

しかし、アスファルト舗装の早期劣化メカニズムについては、実際に早期劣化区間について調査した報告が少なく、明らかにされていない部分が多い。そこで、本研究では実際に早期劣化した直轄国道のアスファルト舗装

表-1 実施した調査の概要

調査年度	調査区間	区間の概要	調査内容
2017	A,B,C	同一路線内における、 修繕後の早期劣化区間	開削調査、 コア観察
2018	D,E,F, G,H,I	複数の路線における、 修繕後の早期劣化区間	コア観察
2019	J,K,L	同一路線内における、 新設後の早期劣化区間	コア観察



図-3 2017年度調査区間の路面状況

表-2 2017年度調査実施区間の概要

項目		区間A	区間B	区間C
調査概要	調査日	2018.1.30 (夜間)	2018.1.15 (昼間)	2018.2.7 (昼間)
	車線	第2車線	第1車線	第1車線
直近の降雨	降雨日	2018.1.29	2018.1.19	2018.2.22
	降雨量	60mm	1.0mm	3.5mm
基本諸元	舗装構成 (最新修繕時)	アスコン層 { 表層 : 50mm 中間層 : 50mm 基層 : 50mm 瀝青安定処理 : 80mm 上層路盤 (M40) : 150mm 下層路盤 (RC40) : 150mm		
	表層材料	ポーラス	密粒	密粒
	最新修繕年	2007	2008	2003
	最新修繕内容	切削オーバーレイ (2層)		
	最新路面調査	調査年	2014	2014
最新路面調査	経年数	7年	6年	11年
	ひび割れ率	55.40%	33.80%	36.90%
	使用目標年数	13年		

を対象に開削調査等の構造調査を実施した。表-1に調査の概要を示す。調査は3箇年で合計12箇所を対象に実施した。調査の結果、アスコン層内部の滞水と層間はく離の発生が確認され、これらが早期劣化の一般的な要因の1つであることがわかったため、本稿にて報告する。

2. 2017年度調査 (区間A~C)

(1) 調査区間の概要

表-2に2017年度に調査を実施した区間の概要を示す。調査区間は、交通量区分N₇の直轄国道1路線内で舗装修繕を予定している工事区間より、最新の路面調査において最近の修繕から13年以内にひび割れ率が30%に達した区間を抽出した。ここで、13年は道路管理者が設定した使用目標年数である。ひび割れ率とは、路面に生じたひ

び割れの密度を表す指標で、例えば車道の幅員が3mの道路に縦断方向にひび割れが1本生じた場合のひび割れ率は10%となる。なお、表中の最新修繕内容に記載のある切削オーバーレイとは、アスコン層の上部を切削しその上に新しいアスコン層を敷設する修繕工法であり、現在ほとんどのアスファルト舗装の修繕で一般的に採用されている工法である。

また、区間Aは調査の前日に6.0mm、区間Bは6日前に1.0mm、区間Cについては5日前に3.5mmの降雨が観測されており、その後調査まで降雨はなかった。

図-3に各区間の路面状況を示す。区間Aでは、外側車輪通過部(以下、「OWP」という)に亀甲状のひび割れが発生した結果、パッチングによる補修が施されていた。区間BではOWPにおいて亀甲状ひび割れの発生が著しく、路面の沈下も発生していた。区間CではOWPにおいて線状ひび割れが発生していたほか、内側車輪通過部(以下、「IWP」という)において亀甲状のひび割れが発生していた。

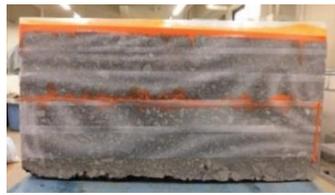
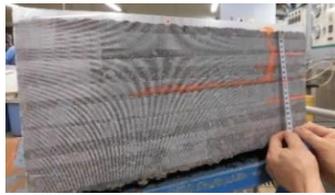
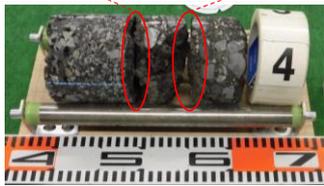
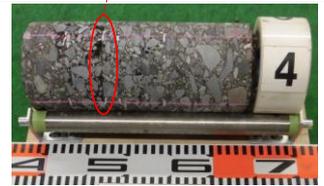
(2) 調査の概要

上記の区間において、幅3m長さ2mの範囲を0.5m×0.5mに分割し、アスコン層を撤去して開削した。なお、

表-3 開削後のアスコン層断面および路盤の状況

	区間A	区間B	区間C
開削後のアスコン層断面			
路盤上面の損傷状況			

表-4 着色水による浸水の確認および切取コアの観察結果

	区間 A	区間 B	区間 C																																			
着色水による浸水の確認	吊り上げの際にアスコン層が崩壊してしまったため未確認																																					
切取コアの観察結果	アスコン層の構成 (mm)	アスコン層の構成 (mm)	アスコン層の構成 (mm)																																			
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>1層目</th> <th>2層目</th> <th>3層目</th> <th>4層目</th> <th>5層目</th> <th>計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>39</td> <td>51</td> <td>12</td> <td>53</td> <td>60</td> <td>215</td> </tr> </tbody> </table>	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	計	39	51	12	53	60	215	<table border="1"> <thead> <tr> <th>1層目</th> <th>2層目</th> <th>3層目</th> <th>4層目</th> <th>5層目</th> <th>計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50</td> <td>50</td> <td>15</td> <td>47</td> <td>78</td> <td>240</td> </tr> </tbody> </table>	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	計	50	50	15	47	78	240	<table border="1"> <thead> <tr> <th>1層目</th> <th>2層目</th> <th>3層目</th> <th>4層目</th> <th>5層目</th> <th>計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40</td> <td>40</td> <td>15</td> <td>55</td> <td>95</td> <td>245</td> </tr> </tbody> </table>	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	計	40	40	15	55	95
1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	計																																	
39	51	12	53	60	215																																	
1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	計																																	
50	50	15	47	78	240																																	
1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	計																																	
40	40	15	55	95	245																																	
																																						

切断時には舗装内の滞水状況を把握するためにドライカッターを使用するとともに、切断したアスコン層は、既設路盤面を乱さないように吊り上げて撤去した。その後、撤去したアスコン層に着色水を浸水させ滞水状況を確認した。さらに開削箇所付近の損傷が大きい箇所から採取したコアを観察し、層間はく離の発生状況を確認した。

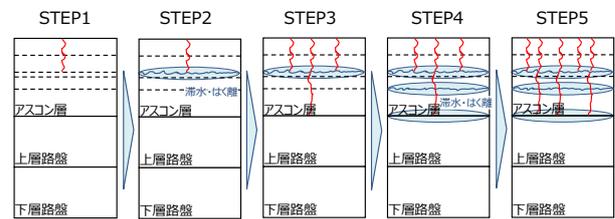


図-4 層間はく離に伴う早期劣化メカニズム

(3) 調査結果

a) 開削後の観察結果

表-3 に開削調査実施箇所のアスコン層断面と路盤上面の観察結果について示す。

開削調査を実施した箇所においてアスコン層の断面を観察した結果、区間 A および区間 B ではひび割れがアスコン層を貫通しており、アスコン層内の滞水も確認された。また、区間 A では上層路盤上面まで水が浸透しており、OWP において路盤の沈下が発生していた。区間 C では、一部を除きひび割れは下層まで貫通しておらず上層路盤も健全であったが、アスコン層内における滞水が確認された。区間 B と C では調査前 5~6 日間降雨がなかったため、アスコン層内に滞留した水は少なくとも 5 日は残留し続けたと考えられる。

b) アスコン層の室内観察結果

表-4 に、現場で撤去したアスコン層に着色水を浸水させた結果及び現場で採取したコアの観察結果を示す。

区間 A のアスコン層については吊り上げの際に崩壊してしまったため、着色水による確認を行うことが出来なかった。区間 B および区間 C でのアスコン層に着色水を浸透させた結果、舗装表面下 100mm の層間から着色水の染み出しが確認された。舗装上面からひび割れを通じて層間に滞水したと考えられる。

また、コアを確認したところ、全ての区間において設計上 4 層のアスコン層が 5 層存在し、3 層目に厚さ 15mm 以下の薄いアスコン層があることが分かった。調査区間

では前回修繕時に 2 層の切削オーバーレイを実施しており、この薄層部は切削した際に残存した既設のアスコン層と考えられる。また、区間 A では 2~3 層目及び 4~5 層目で、区間 B では 3~4 層目の間で層間はく離が発生していた。比較的健全な区間 C においても 3 層目の上部において連続した空隙が確認された。

(4) 調査結果に基づく早期劣化メカニズムの考察

前節の調査結果で確認された損傷形態は、アスコン層の下面からひび割れが生じるという従来の設計の考え方とは異なるものであった。図-4 に、調査結果から推察される、本調査区間における劣化メカニズムを示す。具体的には、以下のとおりと考えられる。

- 施工継目の開きやアスファルトの劣化・老化により路面から入ったひび割れなどを通じてアスコン層内に水が浸入する。(STEP1)
- アスコン層の内部に水が滞留し、層間はく離が発生する。(STEP2)
- 層間はく離によりアスコン層の支持力が低下した結果、アスファルト安定処理層及び路盤までひび割れが進行する。(STEP3)
- アスファルト安定処理層や路盤内への浸水・滞水により、これらの層が細粒化などにより劣化する。(STEP4)
- 舗装全体の支持力不足により、アスコン層のひび割れが急速に拡大する。(STEP5)

表-5 2018年度調査箇所概要

項目	区間D	区間E	区間F	区間G	区間H	区間I		
調査概要	調査日	2019.1.24 (夜間)	2018.12.20 (昼間)	2018.12.19 (夜間)	2018.12.20 (昼間)	2018.12.17 (夜間)	2018.12.17 (夜間)	
	コア採取数	早期劣化区間 : 4 早期劣化区間近傍 : 3	早期劣化区間 : 3 早期劣化区間近傍 : 4	早期劣化区間 : 3 早期劣化区間近傍 : 3	早期劣化区間 : 3 早期劣化区間近傍(ポーラス) : 3 早期劣化区間近傍(密粒) : 4	早期劣化区間 : 3 早期劣化区間近傍 : 3	早期劣化区間(2008修繕) : 3 早期劣化区間(2009修繕) : 3 早期劣化区間近傍 : 3	
直近の降雨	降雨日	2018.12.17	2018.12.17	2018.12.17	2018.12.17	2018.12.17	2018.12.12	
	降雨量	5.0mm	7.0mm	6.5mm	13.0mm	4.5mm	12.0mm	
基本諸元	舗装構成 (最新修繕時)	アスコン層 表層 : 50mm 中間層 : 50mm 基層 : 70mm 上層路盤 : 110mm 下層路盤 : 250mm	アスコン層 表層 : 50mm 中間層 : 50mm 基層 : 80mm 上層路盤 : 200mm 下層路盤 : 350mm	アスコン層 表層 : 50mm 中間層 : 50mm 基層 : 100mm 上層路盤 : 150mm 下層路盤 : 250mm	アスコン層 表層 : 50mm 基層 : 50mm 瀝青安定処理 : 80mm 上層路盤 : 250mm 下層路盤 : 250mm	アスコン層 表層 : 50mm 中間層 : 50mm 基層 : 80mm 上層路盤 : 200mm 下層路盤 : 350mm	表層 : 50mm 中間層 : 50mm 基層1 : 50mm 基層2 : 30mm 基層3 : 50mm 上層路盤 : 100mm 下層路盤 : 250mm	
	表層材料	密粒	ポーラス	ポーラス	ポーラス/密粒	ポーラス	密粒	
	上層路盤材	再生瀝青安定処理	粒度調整砕石	不明	再生切込砕石/粒度調整砕石	粒度調整砕石	粒度調整砕石	
	交通量区分	N7	N6	N6	N6	N6	N7	
	一般・雪寒	一般	一般	一般	雪寒	雪寒	雪寒	
	沿道条件	平地・山地	DID・市街地	平地・山地	平地・山地	平地・山地	平地・山地	
	最新修繕年	2005	2005	2009	2006	2009	2008	
	最新修繕内容	不明	切削オーバーレイ(2層)	切削オーバーレイ(2層)	切削オーバーレイ(1層)	切削オーバーレイ(2層)	切削オーバーレイ(2層)	
	最新路面調査	調査年	2014	2014	2014	2013	2014	2014
		経年数	9年	9年	5年	7年	5年	6年
ひび割れ率		11.0%	82.0%	63.1%	39.9%	33.4%	39.2%	
使用目標年数	13年							

表-6 採取したコアの損傷状況(2018年度)

調査箇所	調査数	ひび割れ				層間はく離	滞水
		全層崩壊	貫通	路面から	路盤から		
区間D	早期劣化区間	4	1	2	3	2	4
	早期劣化区間近傍	3				2	3
区間E	早期劣化区間	3	1	1	2	1	3
	早期劣化区間近傍	4	1		1		1
区間F	早期劣化区間	3		2	2	1	3
	早期劣化区間近傍	3					2
区間G	早期劣化区間	3	1	1	2	1	3
	早期劣化区間近傍(ポーラス)	3					2
区間H	早期劣化区間近傍(密粒)	4	1	1	2		3
	早期劣化区間	3	2		2	2	-
区間I	早期劣化区間近傍	3				1	-
	早期劣化区間(H20修繕)	3		2	2		-
計	早期劣化区間(H21修繕)	3		2	1	3	1
	早期劣化区間近傍	3		1	1	1	-
計	早期劣化区間	22	3	2	9	2	16
	早期劣化区間近傍	23	2	1	0	1	4
						4	11

表-7 コア及びコア採取孔の状況(2018年度)

区間	採取したコアの状況	コア採取孔の状況
D		
E		
F		
G		
H		—
I		—

3. 2018年度調査(区間D~I)

2017年度の調査から推察した劣化メカニズムが一般的なものか検証するため、2018年度は2017年度の路線とそれぞれ異なる6路線における早期劣化区間を抽出し、調査を実施した。

(1) 調査区間の概要

表-5に2018年度に調査を実施した区間の概要を示す。調査区間は舗装種別、交通量、気候条件、及び沿道条件等の条件を考慮し、2017年度調査と同様の考え方で、最近の修繕から路面調査まで13年未満にひび割れ率が30%以上となった区間を複数の路線から抽出し、現地踏査で路面の状況を確認して決定した。なお、区間Dについては、最近の路面調査実施時にはひび割れ率が30%に達していなかったが、現地踏査によりひび割れ率30%を

大きく上回っていることが確認されたため、調査区間として追加した。

これらの区間の、ひび割れ発生箇所及び比較的健全であるその近傍において、ドライカッターを用いてコアを

採取した。ただし、区間 H 及び区間 I は現場条件等によりドライカッターを使用できなかったため、通常のコア採取同様に路面に散水しながら採取した。その後、コアの観察及びコア採取後の採取孔観察により、ひび割れや層間はく離、滞水の発生状況について確認した。

(2) 調査結果

表-6 に採取したコアの損傷状況を、表-7 に層間はく離が発生したコア及びコア採取後の採取孔の状況を示す。区間 D～G ではドライカッターを使用してコアを採取したことによって、コアだけでなく採取孔からも正確な滞水状況を把握することができた。

ひび割れ箇所から採取したコアの数は早期劣化区間とその近傍で合わせて 20 試料であるが、このうち 5 試料はアスコン層が崩壊していた。残りの 15 試料のうち、アスコン全層に渡ってひび割れが貫通しているコアは 3 試料で、路面とアスコン層内の間にひび割れが生じているコアが 9 試料、アスコン層内とアスコン下面の間にひび割れが生じているコアが 3 試料であった。また、いずれの早期劣化区間においてもアスコン層の内部で層間はく離が発生しているコアが存在した。

一方、ひび割れがほとんど発生していない早期劣化区間の近傍においても、多くの箇所において滞水や層間はく離の発生が確認された。これより、早期劣化区間でひび割れを通じて浸透した水が横方向に進行し、滞水及び層間はく離が発生したと考えられる。

層間はく離が確認されたコアの採取孔では、滞水状況を確認出来なかった区間 H 及び区間 I を除く全ての区間でアスコン層内の滞水が確認された。また、区間 E 及び区間 G では路盤上面における滞水も確認された。

上記の調査結果より、2018年に調査を実施した区間についても 2017 年度調査の結果から推察した劣化メカニズムが同様に進行したと考えられる。

4. 2019年度調査 (区間J～L)

表-8 2019年調査区間における路面の損傷状況

区間	路面の状況 (赤線がひび割れ)
J	
K	
L	

表-9 コア及びコア採取孔の状況 (2019年度)

区間	採取したコアの状況	採取直後
J		
K		
L		



図-5 コア採取孔における水の染み出し (区間 J)
(左: コア採取直後, 右: コア採取 30 分後)

2017 年度及び 2018 年度の調査では、長期供用された路線の、修繕後に早期劣化が生じた区間を対象に調査を行った。2019年度は、新設後に早期劣化が生じた区間を対象に調査を行った。

(1) 調査区間の概要

調査区間は、供用後6年が経過した積雪寒冷地の自動車専用道路における3区間である。表-8にそれぞれの区間の路面に生じたひび割れの状況を示す。これらの区間は同一IC間であり、交通量や気象条件などの各種条件はほぼ同一であるにも関わらず、路面性状、特にひび割れの発生について明確な差が生じており、特に区間Jでは部分的ではあるが路面に比較的多くのひび割れが発生していた。

上記の3区間についてドライカッターによるコア採取を実施し、採取したコアとコアを採取した後の採取孔の観察を行った。なお、調査は夜間に実施し、調査日の前日には降水量0.5mm以下の降雨があったものの、調査時点では路面は乾燥していた。

(2) 調査結果

表-9に調査区間において採取したコア及びコアを採取

した後の採取孔の状況を示す。ひび割れが最も多く発生していた区間Jから採取したコアでは、アスコン層内に連続した空隙が生じていた。また、コア採取孔の側面から水の染み出しが確認された。その後も継続して採取孔を観察した結果、図-5のように時間の経過に伴い水が染み出した箇所が面積が増大していることが確認された。このことより、区間Jの層間部分に滞水が生じていること、さらにその滞水量は少なくなく、降雨後も長期に渡りアスコン層内に残存していたことがわかった。ひび割れが次に多く確認された区間Lにおいても、アスコン層内に連続した空隙が発生しており、滞水も生じていたことが確認された。一方、ひび割れがほとんど生じていなかった区間Kでは、アスコン層内に連続した空隙や滞水は確認されなかった。

以上の結果より、新設後に早期劣化が生じた区間においても、アスファルト混合物層内の滞水が劣化を促進させたものと考えられ、2017年調査の結果から推察された劣化メカニズムの初期段階にあるものと考えられる。特にアスコン層内に連続した空隙が確認された区間Jや区間Lでは、今後層間はく離に進展し、その後路面のひび割れが加速度的に進行していく可能性が高いと考えられる。

5. おわりに

本研究では、アスファルト舗装の早期劣化メカニズムを確認するため、実際に早期劣化が生じた複数の区間を対象に、開削調査やコア観察等の調査を実施した。2017年度の調査では、劣化の進行度合いが異なる同一路線内の3つの早期劣化区間を対象に開削調査等を実施し、アスコン層内の滞水や層間はく離が生じていることを確認し、図-6のようにそれらに起因する劣化のメカニズムを推察した。続いて2018年度の調査では、複数の路線の早期劣化区間やその近傍で採取したコアの観察により、ひび割れが生じていないコアにも滞水や層間はく離が確認されたことから、推察された劣化メカニズム同様、アス

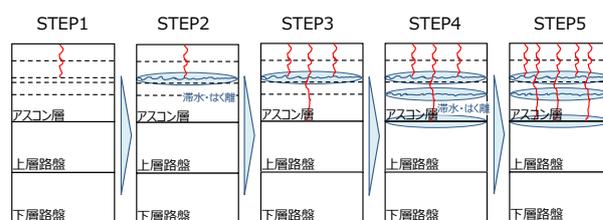


図-6 層間はく離に伴う早期劣化メカニズム (再掲)

コン層内部の滞水や層間はく離がひび割れの発生につながっていることを確認した。さらに、2019年度の調査では新設後に早期劣化が生じた区間を対象にコア観察を行い、劣化メカニズムの初期段階にあることを確認した。

本研究で調査を実施したいくつかの工区でも確認されたとおり、アスコン層の劣化が進行すると最終的には粒状路盤への浸水により粒状路盤が劣化し、路盤以下の支持力が低下してしまい、一層早期劣化が生じやすい状態となってしまうことが危惧される。そのため、早期劣化が発生した際はアスコン層内の滞水や層間はく離の発生状況を確認し、修繕時には、それらが発生している箇所より深く切削して切削オーバーレイを実施するなど、発生箇所を残さないようにすることが重要である。そのため確認手段として、今回実施したようなドライカッターを使用したコア採取が有効であると考えられる。

一方、こうした劣化が発生しないようにするためには、アスコン層内に水が浸入しないよう、ひび割れが発生した早期の段階でひび割れ注入などの維持工法を実施することも重要である。また、水が浸入した状況でも層間に空隙が生じないように、施工時の層間の接着性を向上させるため材料の開発や接着性の評価手法の確立も必要である。

今後も早期劣化事例の調査を実施し、その発生メカニズムや適切な調査方法、対策工法の確立に向けて検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：舗装点検要領，2016.

鉄筋コンクリート造壁面におけるかぶりコンクリート剥落現象の再現実験およびその観察

中田 清史¹・松沢 晃一¹・棚野 博之¹・鹿毛 忠継¹・土屋 直子²・三島 直生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国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)。

鉄筋腐食に伴うコンクリート片の剥離、剥落現象を再現し、この一連のプロセスを明らかにすることを目的として、RC造壁面の促進腐食試験を行った。試験では、鉄筋間隔およびかぶり厚さの異なる試験体を作製し、促進腐食試験中に生じる変状（ひび割れ、浮き、剥離、剥落）を観察するとともに、平均ひび割れ幅および各変状の面積率の経時変化を比較した。この結果、かぶり厚さ20mm以下の試験体で広範囲の剥離、剥落が確認された。一方、かぶり厚さ30mm以上の試験体では、試験体表面に明確な剥離、剥落は確認されなかったものの、内部でひび割れが連結し広範囲でコンクリートが剥離している場合があることが確認された。最後にかぶり厚さに基づいて剥離、剥落性状を整理した。

キーワード 鉄筋コンクリート造壁面、腐食ひび割れ、コンクリート剥離・剥落、目視検査

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された建築ストックがその耐用年数を迎え、これらを適切に点検、維持管理する手法が求められている。鉄筋コンクリート造（以下、RC造）建築物の場合、構造安全性の確保だけでなく、鉄筋腐食に代表される老朽化現象をいかに予測、制御あるいは早期発見するかが重要な課題となる。特に、鉄筋腐食に伴うコンクリート片の落下は、建物の使用者や第三者に危険を及ぼす可能性があり、その危険性を評価する手法が求められる。

従来、RC造建築物における鉄筋腐食については、予防保全の観点から変状が顕在化する以前を対象に多くの研究がなされてきた²⁾⁴⁾。一方、ひび割れなどの初期変状が現れて以降、どのようなプロセスを経てコンクリートの剥離、剥落に至るかについては、十分な研究がなされているとは言えない⁵⁾⁷⁾。竣工後50年以上経過した建築物では、すでに変状が顕在化している建物も想定され、このような場合にも適用しうる知見が必要である。

鉄筋腐食に伴うコンクリート片の剥離、剥落は、腐食により膨張した鉄筋が、周辺のコンクリートを押し出すことで生じると考えられる。本研究では、鉄筋腐食に伴う表面の変状を観察することで、鉄筋腐食からコンクリートの剥離、剥落に至るまでプロセスを明らかにすることを目的とする。実験にあたっては、RC造壁面を模擬した試験体を用意し、これを強制的に鉄筋腐食させることで表面に現れる変状を再現した。

2. 実験概要

(1) 試験体概要

本研究では、鉄筋間隔およびかぶり厚さを主な実験水準として、鉄筋コンクリート壁面を6体作製した。試験体の詳細については、表-1に示す通りであり、鉄筋間隔については120mmまたは200mm、かぶり厚さについては、10、20、30、50mmとした。ここで、実験水準の一つをかぶり厚さとした理由は、図-1に示すように鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ性状は、かぶり厚さによって異なると考えられるためである。また、鉄筋軸ひび割れ（図-1右）が生じた場合には、隣り合う鉄筋どうしのひび割れが、躯体内部で連結し、広範囲の剥離、剥落に至る可能性があると考えられる。そのため、鉄筋間隔についても実験水準とした。

表-1 試験体標記および諸元

試験体 No.	W20_1	W20_2	W20_3	W20_5	W12_3	W12_5
鉄筋間隔 (mm)	200				120	
かぶり厚さ (mm)	10	20	30	50	30	50
部材厚さ (mm)	180			120	180	120

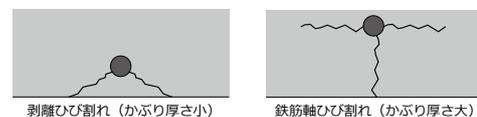


図-1 かぶり厚さによる腐食ひび割れ性状の違い (例)²⁾

(2) 鉄筋腐食促進試験

本研究では、直流電源装置を用いて試験体に定電流を通電し、強制的に鉄筋腐食を発生させた。試験体と直流電源装置の配線方法は図-2 に示す通りである。装置の陽極側には試験体片面の横筋を、陰極側には銅板を結線した。また、銅板と試験体の間には、塩化カリウム (KCl) 水溶液で作製した寒天を設置し両者を密着させた。この寒天は、試験体に塩化物イオンを供給し、鉄筋腐食を促進させるために設置しており、1 週間おきに交換した。

上記のように試験体を設置したうえで、28 日間試験体に通電した。通電した電流値は図-3 に示す通りであり、通電開始から 9 日間は 2.5A としたが、10 日以降は 5.0A とした。ただし、電気抵抗が大きくなり、一定電流を流すための電圧が 40V を超える場合には、安全性を考慮して 3.0A で通電を続けた。

(3) 測定項目

通電開始後、1, 2, 3, 7, 9, 10, 11, 14, 16, 18, 21, 23, 25, 28 日時点において、一度寒天および銅板を取り外し、表面のひび割れ、浮き、剥離、剥落の状態を観察した。ひび割れについては、最大ひび割れ幅 (0.04mm 以上) およびひび割れ長さ (5mm 刻み) を測定した。浮き、剥離、剥落については、表-2 に示す定義に基づいてそれぞれの箇所を分類、マーキングし、長辺と短辺を測定した (5mm 刻み)。浮き、剥離、剥落の面積は、この長辺と短辺の積として算出した。ここで、各ひび割れの幅はその最大値を代表値としているが、これは実構造物調査を想定した場合に、より簡易な測定方法が望ましいと考えられるためである。また、予備実験の結果、鉄筋腐食の進行とともに表面ひび割れが連結し、浮きや剥離として観察される領域が散見された。この領域では、ひび割れと浮き、剥離が重なって観察されるが、本研究では、このような領域については浮きまたは剥離として記録し、その直上および周縁部に見られるひび割れは記録しないものとした。

以上のように測定、記録した各変状について、その経時変化を定量的に取り扱うことを目的として、以下の式に基づき指標 I_c 、 I_d を算出することとした。

$$I_c = \frac{\sum(l_i \times w_i)}{L_s} \quad (1)$$

$$I_d = \frac{\sum S_j^d}{S_0} \quad (2)$$

ここに、 I_c : 平均ひび割れ幅 (mm²/mm)、 l_i : 各ひび割れの長さ (mm)、 w_i : 各ひび割れの最大幅 (mm)、 L_s : 観察面側の鉄筋の総延長 (mm)、 I_d : 各変状 (浮きまたは剥離または剥落) の面積率 (mm²/mm²)、 S_j^d : 各変状 (浮きまたは剥離または剥落) の面積 (mm²)、 S_0 : 観察面の総面積 (mm²)、 i, j : 各変状の個数。

なお、 I_c については単位が mm²/mm (=mm) となって

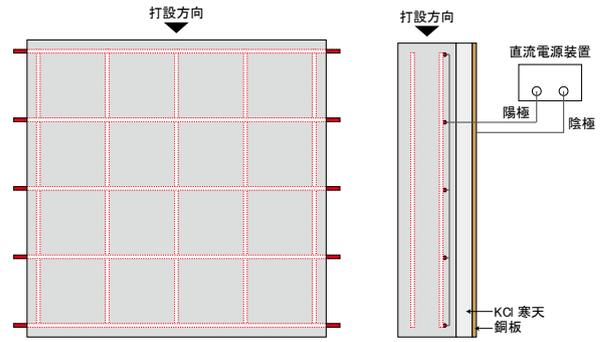


図-2 試験体立面図および配線方法

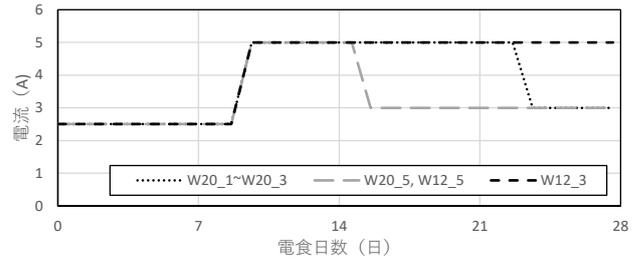


図-3 電食試験中に通電した電流

表-2 本研究における変状の定義

名称	定義
浮き	ハンマーの打音検査により、濁音等が生じている状態
剥離	目視のみでも浮きと判別でき、ハンマーで叩けば容易に落ちる状態
剥落	剥離したコンクリート片が、脱落した状態

おり、この物理的な意味合いとしては、「対象とする部材において鉄筋直上に生じたひび割れ (幅 0mm を含む) の平均的な幅」と解釈することができる。鉄筋腐食に伴うひび割れは、鉄筋直上またはその周辺に生じると考えられるが、上記のような指標を用いることにより配筋密度の異なる試験体どうしても同列に比較することができると考えられる。

また、本研究では、促進試験の進行度合いを示す指標として積算単位電流量を算出し (式(3))、上記の各指標と比較することとした。通常、積算単位電流量と鉄筋腐食量の関係はひび割れ発生の有無やかぶり厚さによって異なると考えられる⁴⁾。また、本実験の場合、試験体内でも鉄筋腐食やひび割れ発生 of 進行度合いが異なることから、積算単位電流量に対する腐食量を一意に求めることは困難である。しかしながら、通電時の電流値や期間が異なる本実験において、試験の進行度を同列で比較する指標が必要であり、本研究では積算単位電流量を用いることとした。

$$C_{sum} = \frac{\sum(c_k \times t_k)}{a_s \times l_s} \quad (3)$$

ここに、 C_{sum} : 積算単位電流量 (mA·hr/mm²)、 c_k : 期間 k における電流量 (mA)、 t_k : 期間 k において通電した時間 (hr)、 a_s : 通電した鉄筋断面の半円弧の長さ (=15.7mm)、 l_s : 試験体における鉄筋の全長 (mm)。

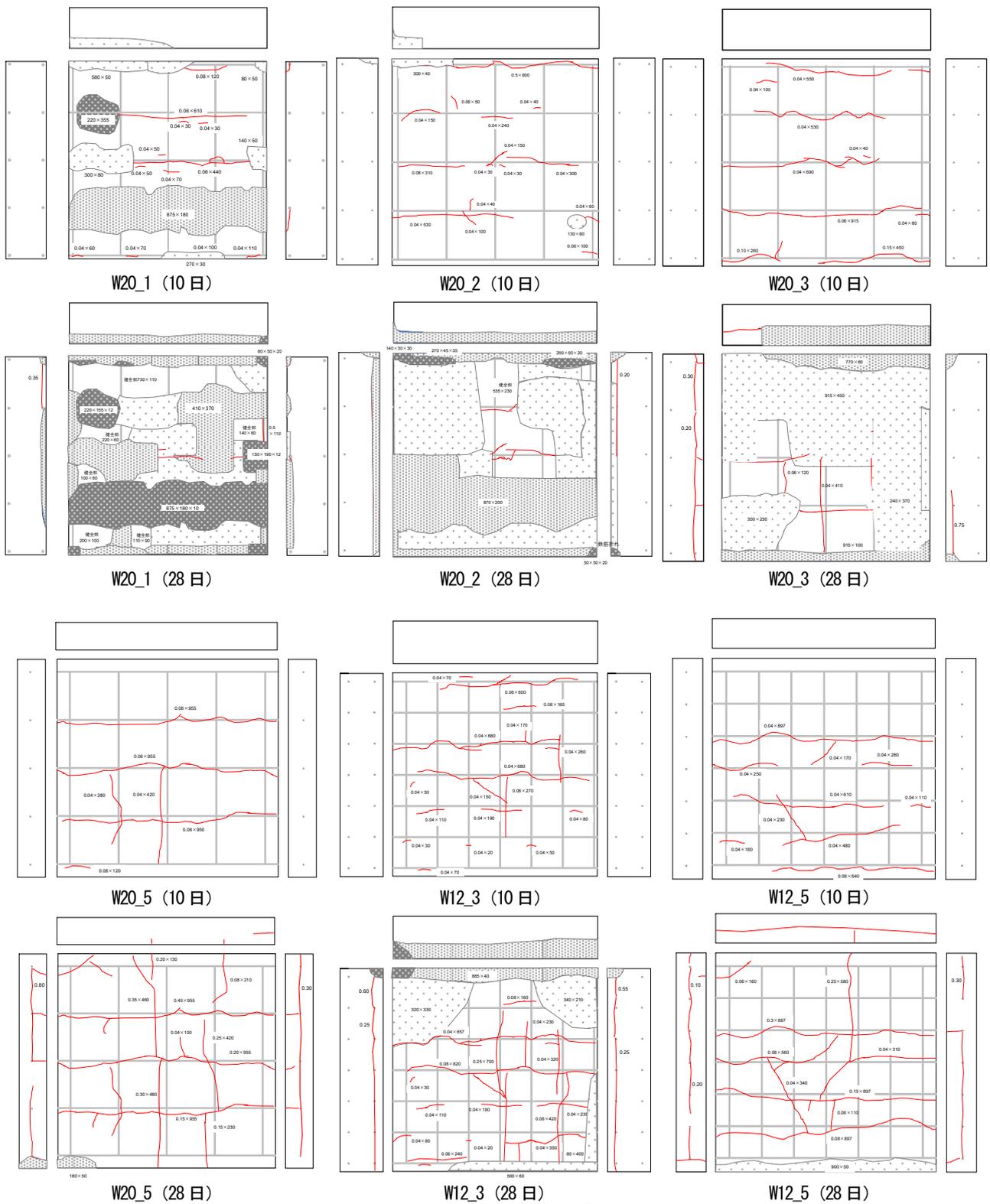


図-4 変状の測定結果の一例 (□ : 浮き, ▨ : 剥離, ■ : 剥落)

(4) はつり調査によるひび割れの観察

打診や目視などの非破壊検査は、コンクリート内部のひび割れ、浮きの状況を正確に把握することはできない。そこで、促進腐食試験後の試験体については、はつり調査を実施し、鉄筋の腐食状況を確認するとともに、コンクリート部に発生しているひび割れを観察した。

3. 結果と考察

(1) 変状の観察結果

図-4に促進開始後10日および28日時点での変状の観察結果を示す。いずれの試験体も、電食日数が経過するほ

どひび割れ等の変状が増加していることが分かるが、変状の現れ方は試験体によって異なる。まず、剥離や剥落を生じているのはかぶり厚さ30mm以下の試験体のみであり、これらの試験体では促進28日の時点で観察面の大部分（8割以上）が浮きや剥離と判定されていることが分かる。特に剥落が生じているのはかぶり厚さ20mm以下の試験体であり、このことは実構造物における剥落調査結果と符合する⁸⁾。また、各変状の大きさを比較すると、かぶり厚さ10mmのW20_1では面積が比較的小さい変状が散見されるのに対し、かぶり厚さ20、30mmのW20_2やW20_3ではそれぞれの変状の面積が大きいことが分かる。これは、かぶり厚さ（および鉄筋径）により腐食ひび割れ性状が異なることに起因していると考えられ⁹⁾、本研究の実験条件ではかぶり厚さ10mmの場合には剥離ひび割れ（図-1左）が卓越し、20mm以上の試験体では鉄筋軸ひび割れ（図-1右）が卓越したものと考えられる。

(2) 変状の経時変化

図-5に式(1)、(2)から求めた平均ひび割れ幅および各変状の面積率推移を示す。図から、剥離や剥落が見られた試験体（かぶり厚さ30mm以下）については、ひび割れが増加していき、一つ目のピーク（×印）を過ぎた付近で浮きや剥離が急激に増加していることが確認できる。これは、鉄筋腐食によりまずひび割れが生じ、その後さらに腐食が進行することでコンクリートの剥離、剥落へと進展するという一連の剥離・剥落プロセスが試験体の各所で生じていることを表しているものと考えられる。

一方、W12_5やW20_5（かぶり厚さ50mm）では、大部分で浮きや剥離が見られなかったにも拘わらず、平均ひび割れ幅の増加が停滞していることが分かる（W20_5

では1.2~1.5mm²/mm付近、W12_5では0.6mm²/mm付近）。試験体側面の鉄筋に沿ったひび割れが発生していることを合わせて考えると（図-4）、観察面のひび割れ発生は、鉄筋周りに発生する観察面に対して平行なひび割れが成長し、鉄筋腐食膨張圧が浮きや剥離の進展に寄与しやすくなったために生じていると推察される。それにも拘わらず、記録上浮きや剥離が観察されなかったのは、かぶりコンクリートが厚かったためと考えられ、目視や打診のみでは浮きや剥離を判定できなかったものと考えられる。本研究では、実構造物調査で一般的に実施されている方法として目視や打診を採用したが、かぶり厚さの大きい部材において浮きや剥離の状態を正確に把握するには打診や目視以外の試験方法も併せて検討する必要があると考えられる。

(3) 躯体内部に発生したひび割れの観察

図-6に、はつり調査の結果を示す。試験体は、長期間にわたって促進腐食試験を行った結果、コンクリート部の表面がさび汁によって覆われていた。特に試験体内部で発生したひび割れ部にはさび汁が充填されており、目視により容易にひび割れの発生状況を観察することができた。まず、かぶり厚さの小さい試験体（図-6左）では鉄筋に対して八の字にひび割れが走っており、剥離ひび割れ（図-1左）が多く発生していることが改めて確認された。一方、かぶり厚さ30mm以上の試験体（図-6右）では、ひび割れは試験体表面に対して直角あるいは平行に走っていることが確認でき、このような試験体では鉄筋軸ひび割れ（図-1右）が多く発生していたものと考えられる。

図-7にW12_5のはつり調査前後の様子を示す。はつり調査前の写真（左）では、一部でさび汁が見られるが、

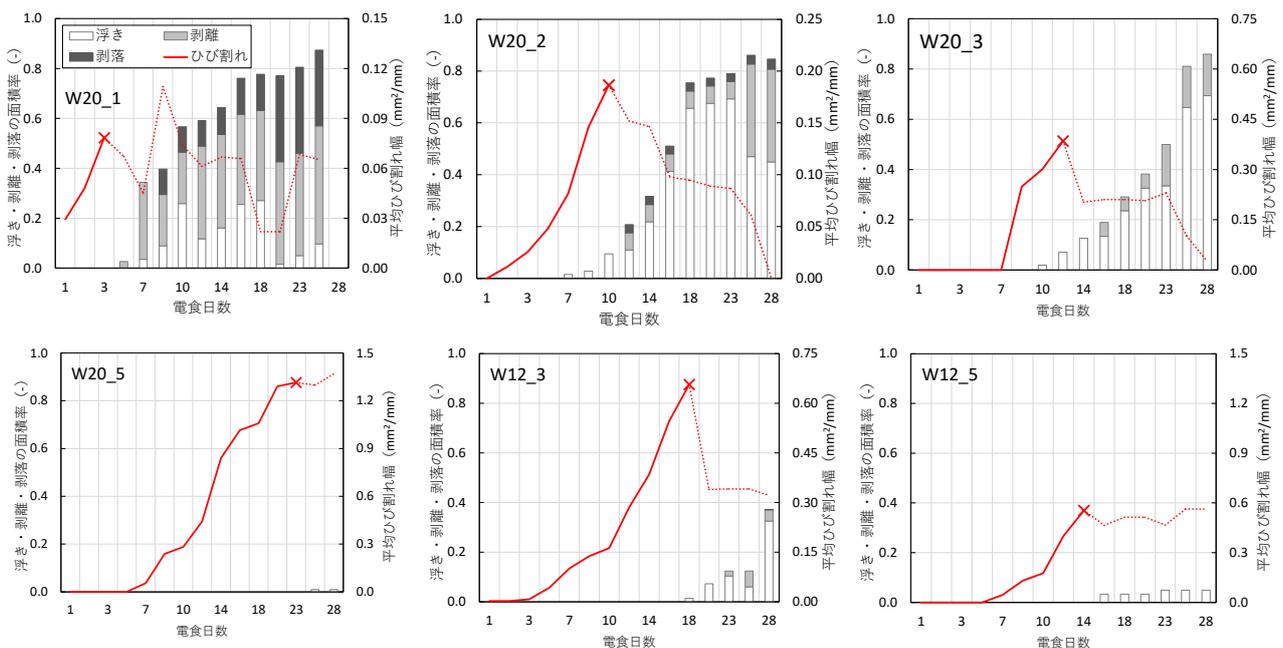


図-5 平均ひび割れ幅（右軸）および浮き、剥離、剥落（左軸）の面積率の推移



表面および内部に発生したひび割れ (W20_2)



内部に発生したひび割れ (W12_3)

図-6 はつり調査の状況



図-7 W12_5の表面 (左) および内部のひび割れ状況 (右)

明確な浮きや剥離、剥落は検出されておらず、表面ひび割れが生じているのみであり、これは、図-5や前項で指摘した通りである。一方、はつり調査後の写真(図-7右)から、試験体内部では観察面に対して平行な面がほぼ全面さび汁で覆われていることが分かる。このことは、試験体各所で鉄筋軸ひび割れ(図-1右)が生じ、これらが隣り合う鉄筋どうしで連結し、広範囲の剥離に至っていたことを示す結果と考えられる。ここで、W12_5やW20_5で平均ひび割れ幅の増加が停滞している原因について、前項では、試験体観察面に対して平行なひび割れ(図-1右)が発生したためと推察した。上記のようなはつり調査の結果は、これらの推察の妥当性を示すとともに、かぶり厚さの大きい壁面においては、表面に明確な変状が見られないうちに広範囲のコンクリートの剥離、剥落が生じる可能性を示唆するものと考えられる。

(4) かぶり厚さと変状顕在化の関係

前述した通り、かぶりコンクリートの剥離、剥落は、平均ひび割れ幅が見かけ上低下して以降、急速に増加していく(顕在化していく)と考えられる。図-8に、平均ひび割れ幅が低下する直前の点(図-5×印)について、この際の平均ひび割れ幅をかぶり厚さに基づいて整理した結果を示す。この図から、剥離、剥落が顕在化し始め

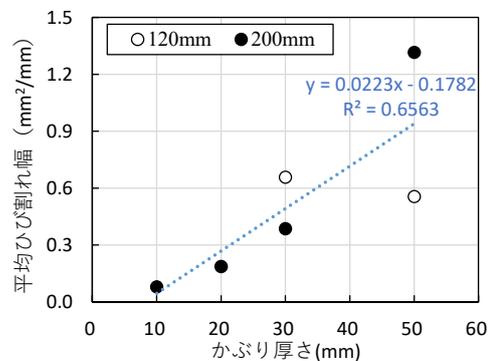


図-8 かぶり厚さと平均ひび割れ幅の関係

る際の平均ひび割れ幅は、かぶり厚さが大きいほど大きいことが分かる。

図-9に式(3)を用いて算出した積算単位電流量とかぶり厚さの関係を示す。なお、算出した積算単位電流量は、図-5×印時点のものであり、剥離、剥落が顕在化し始めた際の鉄筋の腐食度合を概ね表すものと考えられる。この結果から、かぶり厚さが小さい場合には、鉄筋腐食進行の比較的早い段階で剥離、剥落が生じることが確認できる。一方、かぶり厚さが大きい場合には、十分に鉄筋腐食が進まない限り剥離、剥落は生じないと考えられる。また、かぶり厚さが大きい場合、鉄筋腐食の進行速度も

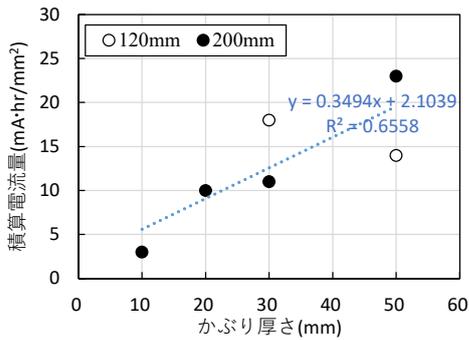


図-9 かぶり厚さと積算単位電流量の関係

比較的遅いと考えられ、この点を加味するとかぶり厚さの大きい壁面においては、コンクリート片の剥離、剥落に至るまでに比較的長い時間を要すると考えられる。

(5) 鉄筋腐食に伴うコンクリート片落下の危険性

以上の考察を踏まえ、鉄筋腐食に伴うコンクリート片の落下の危険性について検討を加える。部材のかぶり厚さを十分に確保することは、鉄筋腐食に伴うコンクリート片の剥離、剥落の可能性の低減に寄与すると考えられる。ただし、かぶり厚さが大きい場合には、変状の顕在化を検出するのが困難である上、腐食が進行した際のコンクリート片の剥離が広範囲となり、コンクリート片が剥落した際の危険性も大きくなると考えられる。このことから、かぶり厚さが大きい場合でも、変状（浮き、剥離）の検出や鉄筋腐食状況が可能となるような点検手法の適用も必要であると考えられる。

なお、本研究で得られた知見は、あくまで人工的に鉄筋腐食を発生させた際の結果である。従って、さび汁の発生のみかたや鉄筋腐食量と各変状の量（例えば、図-9の直線の傾きなど）との関係など、実際のRC造建築物とは異なる点があると考えられる。また、コンクリートの剥離、剥落性状はコンクリート強度にも影響を受けることが知られている。実際のRC造建築物におけるコンクリート強度のばらつきを考慮すると、図-8や図-9の関係はさらにばらつきが生まれると考えられる。上記のような点については、今後実構造物調査を実施し基礎的なデータを蓄積するとともに、本研究で示した傾向の妥当性やばらつきの大きさなどについて検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、かぶり厚さおよび鉄筋間隔の異なるRC造壁試験体について鉄筋腐食促進試験を行い、壁面に現れる変状を観察した。実験の結果、得られた知見を以下に示す。

- 1) 本実験の範囲内では、かぶり厚さ 20mm 以下の試験体で剥落が生じた。また、かぶり厚さ 30mm 以上の試験体では剥落は見られなかった。
- 2) かぶり厚さ30, 50mmの試験体では、目視や打診のみでは明確な変状は確認できない場合があったが、試験体内部では鉄筋軸ひび割れが連結し広範囲の剥離に至っていた。
- 3) かぶり厚さを確保することは、鉄筋腐食に伴うコンクリート片の剥離、剥落の可能性を低減するが、かぶり厚さが大きい場合には、その検査方法などについて留意する必要がある。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：既存コンクリート構造物の性能評価指針 2014, 2014
- 2) 堤知明ほか：腐食ひび割れの発生機構に関する研究，土木学会論文集, Vol. 1996, No. 532, pp. 159-166, 1996
- 3) 橘高義典, L. P. NGUYEN, 塚越雅幸, 松沢晃一：鉄筋コンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋腐食量に関する検討，コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 1145-1150, 2011.
- 4) 篠原保二ほか：腐食鉄筋によるひび割れ発生前後の腐食挙動およびひび割れ進展，日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 728 号, p. 1609-1618, 2016
- 5) 荒木弘祐, 服部篤史, 宮川豊章：鉄筋の腐食膨張によるかぶりコンクリートの剥離現象とその予測，土木学会論文集, Vol. 2005, No. 802, pp. 209-222, 2005
- 6) 篠原保二, 塩害環境下における RC 柱の鉄筋腐食ひび割れ挙動および横補強筋のひずみ上昇，日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 720 号, p. 323-333, 2016
- 7) 渡辺健：RC 構造物の鉄筋腐食によるかぶりの剥落評価手法，第 291 回鉄道総研月例発表会, pp. 19-22, 2015.
- 8) 石橋忠良ほか：高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集, Vol. 2002, No. 711, pp. 125-134, 2002