

ISSN 0386-5878  
土木研究所資料第4368号

平成29年度  
**土木研究所講演会**  
**講 演 集**

平成29年10月19日

**国立研究開発法人土木研究所**

Copyright © (2017) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

## 平成29年度土木研究所講演会講演集

企画部研究企画課

### 要 旨

本資料は、「平成29年度土木研究所講演会」の講演内容をまとめたものである。この講演会は、土木研究所が実施している調査研究の成果や最近の土木技術に関する話題、動向などを各方面に紹介することを目的として毎年1回開催している。

# 一 目 次 一

## ◆インフラストックの有効活用をもたらす技術開発

10:05～10:30	「非」常用機械設備のメンテナンス つくば中央研究所 技術推進本部長 並河 良治	1
10:30～10:55	「ダム再生」を支える水理設計技術 つくば中央研究所 水工研究グループ 水理チーム上席研究員 石神 孝之	5
10:55～11:20	舗装メンテナンスサイクルの構築に向けた取り組み ～路盤の保護を通じた舗装の長寿命化を目指して～ つくば中央研究所 道路技術研究グループ 舗装チーム上席研究員 蔦 雅行	9
11:20～11:45	性能規定時代の道路橋の耐久性向上技術 構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ 上席研究員 玉越 隆史	15

## ◆生産性向上をもたらす技術開発

14:10～14:35	ドローン・AIを用いた河道内植生監視技術の開発 つくば中央研究所 水環境研究グループ 河川生態チーム主任研究員 傳田 正利	21
14:35～15:00	メンテナンスにおける地質・地盤リスクの捉え方、向き合い方 つくば中央研究所 地質・地盤研究グループ長 小橋 秀俊	25
15:00～15:25	コンクリート分野の生産性向上 —できたこと・まだできていないこと— 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ長 渡辺 博志	29

## ◆巨大化、多様化する災害に対する防災・減災のための技術開発

15:35～16:00	2017年九州北部豪雨等における土砂災害調査及び 大規模斜面崩壊等に関する監視技術の動向 つくば中央研究所 土砂管理研究グループ 上席研究員 水野 正樹	33
16:00～16:25	確実な避難を支援する洪水予測技術 水災害・リスクマネジメント国際センター 水災害研究グループ長 澤野 久弥	39
16:25～16:50	平成28年8月北海道豪雨災害について ～主に堤防決壊と流路変動に焦点を当てて～ 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 上席研究員 前田 俊一	45

[ インフラストックの有効活用をもたらす技術開発 ]

「非」常用機械設備のメンテナンス

「ダム再生」を支える水理設計技術

舗装メンテナンスサイクルの構築に向けた取り組み  
～路盤の保護を通じた舗装の長寿命化を目指して～

性能規定時代の道路橋の耐久性向上技術

# 「非」常時のみに作動する機械設備のメンテナンス

技術推進本部 並河 良治

## 1. はじめに

社会インフラの1つである土木機械設備は極めて重要な社会基盤施設であり、特に洪水被害防止を目的とした排水機場のポンプ設備は豪雨や異常出水時に確実な稼働が要求される。そのためには、設備の万全な整備が不可欠であり、これまで管理者は「時間計画保全」に基づいた維持管理を実施してきた。

ポンプ設備は、今後10年で約50%の設備が設置後30年超となり、老朽化の進行による故障頻度上昇の懸念がある反面、整備予算は年々削減されている現状にあり、この相反する状況下で如何に効率的で的確な設備維持管理を行うかが課題となっている。

工場などの機械設備では、「状態監視保全」を導入するケースがあり、これにより保全費用削減を可能とした例もある。従って、ポンプ設備の維持管理においても状態監視保全を導入することは極めて有効と考えられる。しかし、これまで状態監視保全は、常時稼働している機械設備に対して定期的にパラメータ計測を行う形で導入されており、平時は停止・必要時のみ稼働する排水機場のポンプ設備のような「非」常用設備では、診断技術が確立していないため、的確な診断が可能であるか未知数である。

本稿においては、不測の重大故障を回避し、無駄のない予防保全の実現を目指す目的で、ポンプ設備の維持管理に適した状態監視保全（劣化予測）技術を確立するための研究状況を報告する。

## 2. 計測・診断手法

常用系の設備では振動法が多く用いられていること、また、異常の早期発見には潤滑油分析が有用であることから、この2方式が主流であり、排水機場のポンプ設備においても、主ポンプについては振動法を、減速機については振動法と潤滑油分析の双方が有用と判断し、これについての適用性について調査検討を行うこととした。

特に、常用設備の状態監視保全技術をポンプ設備に適用するに当たって、振動法については、ポンプ設備は主軸回転周波数が60～500rpm（約1～8Hz）程度の低速回転機械なので振動エネルギーが小さいため困難とされている。また、潤滑油分析では、供用時間に対して運転時間が非常に短いため、設備の状態を示す代表的なサンプルが得られるか、などが、「非」常用設備での設備診断についての課題である。

また、状態監視保全は本来、連続して稼働している設備に対して計測パラメータを定期的に監視することが基本であるが、必要時にしか稼働しない「非」常用設備では、運転に連続性・定期性がないのでそれが不可能である。

しかし、排水機場では、設備の機能維持や異常の発見、運転操作員の習熟度向上を目的とした管理運転を、おおむね月1回、ポンプ1台当たり30分程度行っている。振動計測・潤滑油サンプリングは、この管理運転時に行うこととした。

本研究では、国土交通省管理の排水機場のうち直近で分解整備を予定している（=診断後に内部状態を確認できる）、延べ132機場320台のポンプ設備で現場調査を行った。

## 3. 振動法の排水機場ポンプ設備への適用性

振動法による状態監視保全技術は、振動値の大小により異常の有無を把握する「簡易診断」と、簡易診断により

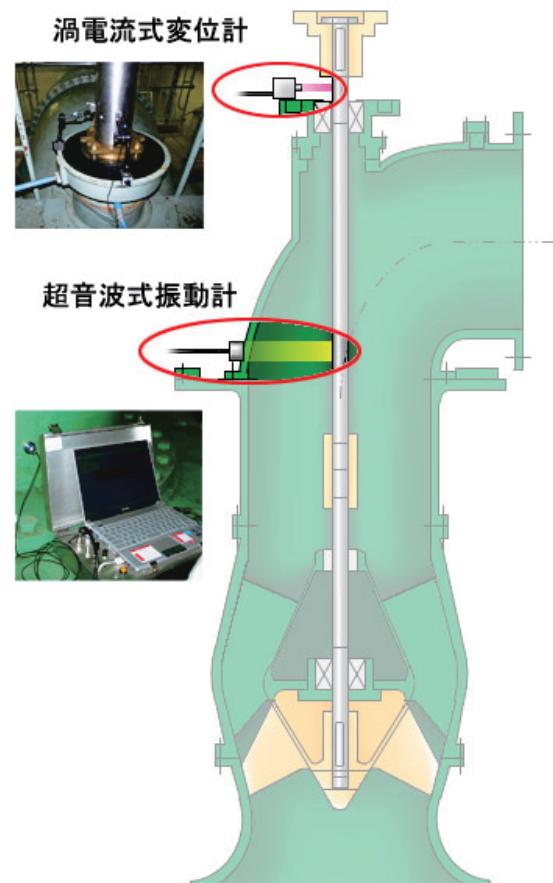


図-1 ポンプ主軸の振動計測位置

り異常有りとされた場合に、その異常部位の特定とその程度を診断する「精密診断」に大別される。

本研究では、精密診断に当たる部分、主ポンプの主軸回転による変位を直接計測し、振動波形、振幅に加え高速フーリエ変換により周波数分布の解析とその結果を基にした診断技術の適用性について検証した。計測は、回転機械では一般的な渦電流式変位計を用いて軸露出部を計測する手法と、近年開発された、ケーシング内の軸の動きを計測する超音波式振動計の2通りにより行っている。それぞれの計測位置を図-1に示す。

診断技術については、常用系設備で実施されている表-1に示すものを基本に検証している。その結果、表-2及び表-3に示すように、主ポンプ羽根車の劣化推定や軸の曲がりを発見することができた。以上より、振動法が主ポンプの状態監視保全に適用可能であることが示されたと考える。

特に、表-3に示す軸曲がりは、ポンプケーシングの振動を計測する従来のポータブル振動計による点検手法では、表-4に示すように振動値自体が小さく整備前後でも大きな差がないことから発見が困難であり、軸変位計測による維持管理は極めて有効であると言える。

しかし、診断後に予定通り内部状態を確認した設備について、適性に診断できたかの診断率を調査したところ、表-5に示す結果となった。なお、診断後に分解していない設備については現在も正常に稼働しており、これを上記の評価に含めた場合の数値を、参考として()内に記載している。

以上より、軸曲がりには高い精度での確な診断が可能な反面、羽根車の摩耗診断は精度が低い等の課題が残る。

これについては、診断事例の蓄積や他の計測パラメータの併用による精度向上が考えられる。

以上については引き続き研究を進めているところである。

表-2 羽根車摩耗例

○設備概要	○診断
 型式 立軸斜流 口径 1350mm 主軸回転数 225rpm 羽根車数 5枚	 周波数分布 渦電流式の計測結果 振動周波数分布では羽根車成分5Nが発生しており「羽根車に劣化傾向有り」と診断
○設備状態	
羽根車の肉厚が設計値を下回る部分があり、1箇所には穴が貫通していた	

表-1 発生周波数と発生原因

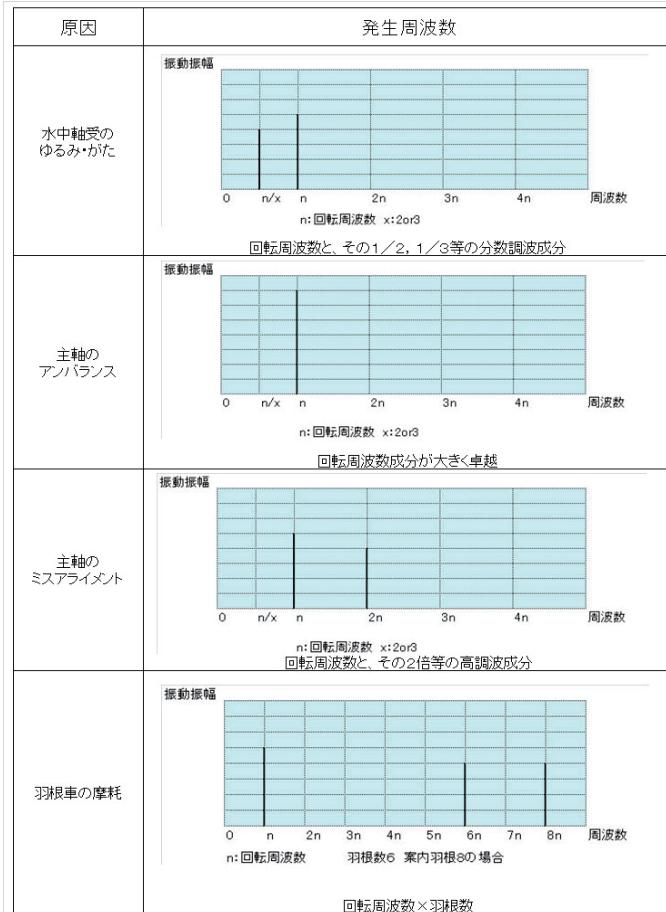


表-3 軸曲がり発見例

○設備概要	○診断
 型式 立軸斜流 口径 2600mm 主軸回転数 115rpm 羽根車数 4枚	 周波数分布 振動周波数分布では、回転周波数成分Nが強く発生しており「軸に異常有り」と診断
○設備状態	 本軸の中心線 変位した軸の中心線 分解整備時に軸心を計測したところ、1.37mmの偏心が確認された

#### 4. 潤滑油分析の排水機場ポンプ設備への適用性

潤滑油分析は、潤滑油そのものの劣化傾向を診断する性状分析の他、混入している摩耗粉の状態から設備の状態を診断する技術がある。そこで、性状分析と、SOAP 法・フェログラフィ法による設備診断の適用性について検証を行った。

性状分析では、特にディーゼル原動機の水分量が高めに推移していることが確認された。平成 25 年度に調査した 33 台のディーゼル原動機の水分量を図-2 に示す。

一般に原動機の潤滑油にとって最も劣悪な運転条件は、短時間の低負荷運転と言われている。これは、短時間の運転では、燃焼で発生した水分が熱量不足により完全に蒸発しきらず機関内に残留し潤滑油中に混入するためである。

排水機場においても、実排水運転頻度が少ない機場は月に 30 分程度の管理運転が主となり同様の条件となりうることから、水分量が高めになると思われる。

水分量が多くなると、設備内の発錆、酸化促進、潤滑不良（油膜切れ）の原因となる。一般にはディーゼル原動機の潤滑油監視項目には水分量は重要視されていないが、排水機場ポンプ設備においては重要な監視項目であるといえる。

設備診断について、SOAP 法は、同一機場、同一仕様で整備年次の異なる 1 号機（整備後 4 年の状態）と 3 号機（14 年未整備状態）の比較を行ったところ、図-3 に示すように、鉄や銅といった摩耗すると増大する成分は、より長期にわたり継続使用している 3 号機の方が多く検出されている事が確認され、排水機場ポンプ設備でも、含有元素の変化を見て機械のコンディションを予測する事が可能であることが示されている。

分析フェログラフィについては、概ね同規模の、H 排水機場 1 号ポンプと N 排水機場 1 号ポンプのディーゼル原動機 2 台の分析結果の比較を行った、結果を写真-1 及び写真-2 に示す。

この結果から、正常摩耗粒子量が多く、ホワイトメタルも目立つ H 排水機場の摩耗状態が進行しているものと推察できる。実際にそれぞれの原動機を分解したところ、H 排水機場の方が摩耗劣化が進行していることが確認された。これらのことから、潤滑油分析による設備の摩耗劣化程度の診断が十分可能であると考える。

しかし、排水機場のポンプ設備を管理する国や地方公共団体では、潤滑油分析を専門業者に依頼する場合、契約制度上、一般競争入札が原則のため、同一の分析者で継続して分析することは難しい、という問題がある。

そこで複数の分析業者による同一サンプルの分析

表-4 計測方法による振動の違い

計測部位	計測方法	計測条件	X方向	Y方向	Z方向
減速機下部	ポータブル 振動計	整備前	6	11	20
		整備後	5	10	15
主ポンプ ケーシング	ポータブル 振動計	整備前	5	6	18
		整備後	4	2	15
軸振動	渦電流 変位計	整備前		600	
		整備後		100	

単位:  $\mu\text{m}(\text{p-p})$

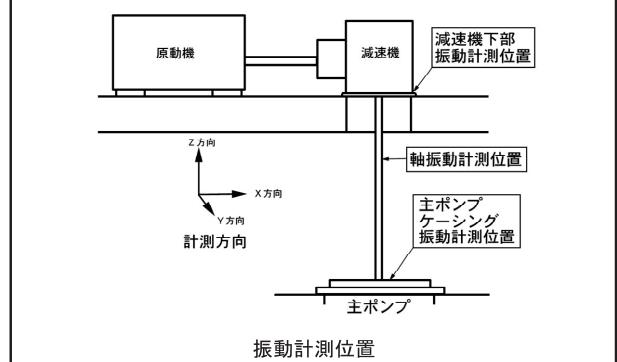


表-5 診断の的中率

診断	設備状態	羽根車摩耗	主軸曲がり
正常と診断 (整備延伸の判断)	正常(的中)	8 (83)	19 (94)
	異常(誤診)	6 (6)	2 (2)
	診断率	57.1% (93.3%)	90.5% (97.9%)
異常と診断 (異常の早期把握)	異常(的中)	4	1
	正常(誤診)	2	0
	診断率	66.7%	100.0%
診断率(全体)		60.0% (91.6%)	90.9% (97.9%)

「正常と診断」ならびに「診断率(全体)」の()内は、内部確認していないが正常に稼働している設備を含めた数値

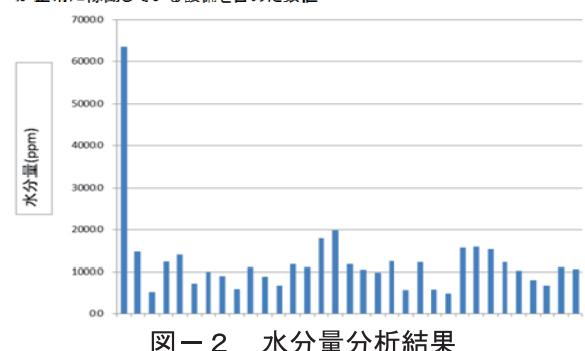


図-2 水分量分析結果

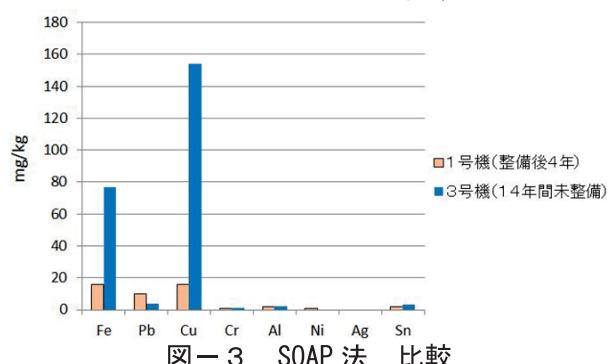


図-3 SOAP 法 比較

結果を比較したところ、設備診断結果（設備状態の良否）は同一の傾向を示すが、分析技術個々の結果、特に SOAP 法や定量フェログラフィ法など数値で示される分析結果については業者毎に数値が異なる事が示された。これは分析業者毎の知見等により分析・診断手法が異なるためである。

そのため、潤滑油分析の活用の一手法として、傾向管理を管理者が自ら保有することが可能な鉄粉濃度計により実施し、異常傾向が見られる場合に SOAP 法やフェログラフィ法による分析を行う方法を検討した。鉄粉濃度計測結果と、SOAP 法による鉄元素濃度の比較を、原動機については 33 サン

プル、減速機については 24 サンプルに対して行った。その結果を、図-4 及び図-5 に示す

原動機については、一部に例外があるが、概ね双方の計測結果が類似した傾向にあるので、鉄粉濃度計による傾向管理は可能と考える。

減速機については、類似した傾向を示しているとは言えない。これは濃度範囲が 10ppm 程度と鉄粉濃度計の誤差範囲内であることに起因すると思われる。そのため傾向管理は困難と言わざるを得ないが、異常摩耗時には鉄粉濃度が増大することが予想されるので、鉄粉濃度計による継続した計測は有効であると考える。

## 5.まとめ

「非」常時のみ稼働する排水機場のポンプ設備においても、常用設備と同様に、振動や潤滑油分析による状態監視保全技術によって、設備の劣化傾向の把握が可能であることが、これまでの調査で示された。

現段階では 100% の信頼性があるとまでは言えないが、これまで把握できなかつた異常の兆候をつかむことが可能で、重要設備の信頼性向上に寄与する技術であるとは言える。

現在も、診断精度を高めてゆくために本研究を進めているところであるが、より効率的・効果的に信頼性の向上を図るために、故障を未然に検知する技術を追求する研究と並行して、万一の故障リスク等を考慮したマネジメント手法に関する研究も進めている。これらの研究が両輪となり、河川ポンプ設備の信頼性向上と効率的な維持管理が実現することを願うものである。

## 【参考文献】

- 上野仁士 藤野健一 伊藤 圭：河川ポンプ設備への状態監視保全技術の適用について、第 14 回評価・診断に関するシンポジウム 講演論文集、一般社団法人日本機械学会、pp.70-73、2015.11

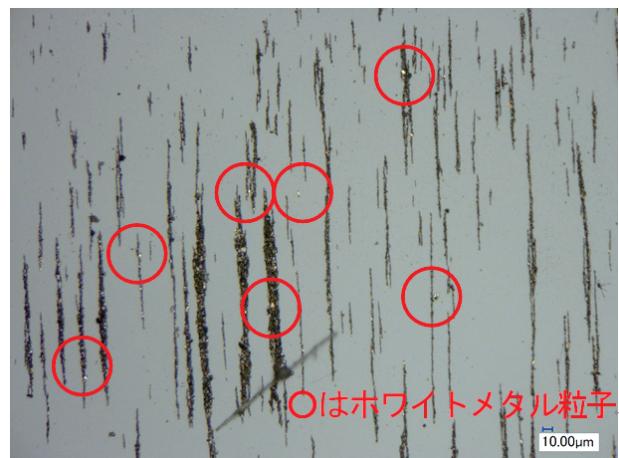


写真-1 H排水機場フェログラフィ



写真-2 N排水機場フェログラフィ

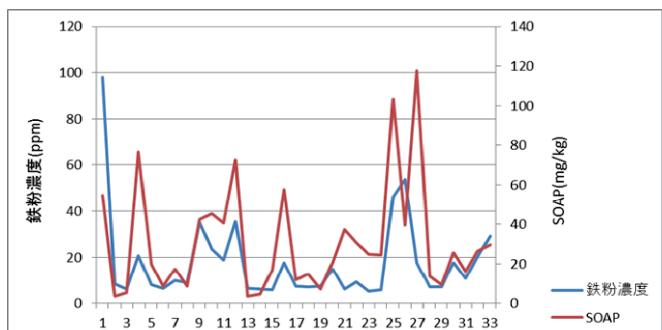


図-4 鉄粉濃度と SOAP 法比較 原動機

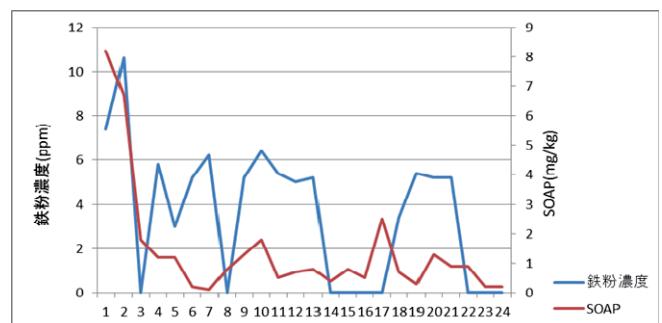


図-5 鉄粉濃度と SOAP 法比較 減速機

# 「ダム再生」を支える水理設計技術

水工研究グループ 水理チーム 石神 孝之

## 1. はじめに

国土交通省では、我が国の厳しい財政状況や生産年齢人口の減少などの状況の中、トータルコストを縮減しつつ、既存ストックを有効活用することが重要であるという認識のもと、既設ダムを有効活用するダム再生をより一層推進する方策を示す「ダム再生ビジョン」をとりまとめ公表したところである。この「ダム再生ビジョン」においては、「ダムの長寿命化」や「維持管理における効率化・高度化」などの「ダム再生の発展・加速に向けた方策」が示されたところであり、その方策の一つとして「高機能化のための施設改良」も位置付けられている。ダムの施設改良として、既設ダムのかさ上げや放流設備の増強等を行う「ダム再開発」については、これまで幾つかのダムで実施してきたところであり現在も実施中のダムも幾つかある。土木研究所では、国土交通省が建設するダムの洪水吐きなど放流設備に対して、これまで多くのダムについて水理模型実験等により水理設計を行ってきたところであるが、近年の放流設備の増強などによるダム再開発の場合においても水理模型実験による水理設計を実施してきたところである。本報告では、このダム再開発の事例として、土木研究所で水理模型実験を行った長安口ダム改造事業での水理設計事例を紹介する。

## 2. ダム再生ビジョンと土木研究所の役割

「ダム再生ビジョン」は、ダムを取り巻く背景・現状を踏まえ、ダム再生の基本的考え方、ダム再生に関するこれまでの取組、ダム再生をより一層推進するまでの課題を整理し、ダム再生の発展・加速に向けた方策として図-1に示す10の方策を推進することとしている。

これらの方策に対して土木研究所としては、「(10)ダム再生を推進するための技術の開発・導入」の部分を主に担う役割として、先端的な技術の研究開発や現場への技術支援等を実施することとなるが、「(1)ダムの長寿命化」に対応した堆砂対策としての新たな工法の研究など(1)から(9)までの個々の方策に資する研究開発も実施している。また、「(4)高機能化のための施設改良」については、地方整備局等からの受託研究により、放流設備の増強などによるダム再開発事業に対して、水理模型実験による放流設備等の水理設計を実施してきたところである。



図-1 ダム再生ビジョンの概要

## 3. ダム再開発事業における水理設計

### 3. 1 長安口ダム改造事業の概要

長安口ダムは、那賀川水系那賀川の徳島県那賀郡那賀町長安地先に、洪水調節、発電、かんがい用水の補給を目的として、昭和31年に建設された多目的ダムである。ダム形式は、重力式コンクリートダムであり、堤高85.5m、総貯水容量54,278千m<sup>3</sup>、有効貯水容量43,497千m<sup>3</sup>である。長安口

ダム改造事業は、長安口ダムの洪水調節能力の増強、那賀川における流水の正常な機能の維持及び放流水の水質改善を目的としてダム改造を行うものである。洪水調節能力の増強については、那賀川水系河川整備基本方針及び那賀川水系河川整備計画に基づき、長安口ダムに要求される洪水調節能力を確保するため、堤体の右岸の一部を切り欠いて2門の新設洪水吐きの増設を行うものである。

(図-2を参照)



図-2 長安口ダム改造事業

### 3. 2 水理模型実験による水理設計

長安口ダム改造事業に対して、土木研究所では平成20年度から平成24年度まで四国地方整備局那賀川河川事務所から受託研究を受け、水理模型実験により新設洪水吐き等の水理設計を実施した。水理模型実験による水理設計は、所定の水位・流量等の条件において、求められる放流能力が確保されているのか、導流部や減勢工等の施設に作用する水圧が許容される範囲内なのか、安定した流れが形成されているのかなど、必要とされる機能や安全性が確保されていることを確認し、確保されていない場合は施設の形状等の修正を行うものである。

具体的には、図-3、4に示す新設洪水吐きの越流部、導流部、既設及び新設洪水吐きからの水が合流する減勢工及び下流河道を対象に検討を行った。

机上設計による形状（「原案形状」という。）での縮小模型を製作・設置し、所定の水位・流量等の条件で水を流して実施する。手順としては、水の流れに沿った形で上流側の越流部、導流部、減勢工、下流河道の順に機能を確認していく。ここで、越流部はダムの洪水調節機能を決定する最も重要なもので、所定の水位で所定の流量が流れるものとなっているのかを確認し、水位と放流量の関係式を導く必要があり、多くの場合は、他の減勢工等の部分と合わせた全体の模型（「全体模型」（図-5を参照）という。）とは別に、越流部のみを抽出し大きな縮尺の模型（「抽出模型」（図-6を参照）という。）で検討する。この抽出模型での実験により、形状の修正等を行い最適な形状等を定め、その形状を全体模型に反映させ、下流側の導流部等の検討へと移っていく。

長安口ダムで実施した原案形状での水理模型実験の状況を図-7に示す。

越流部は所定の水位での放流量が足りない場合があった。導流部については越流部からの水流が勢

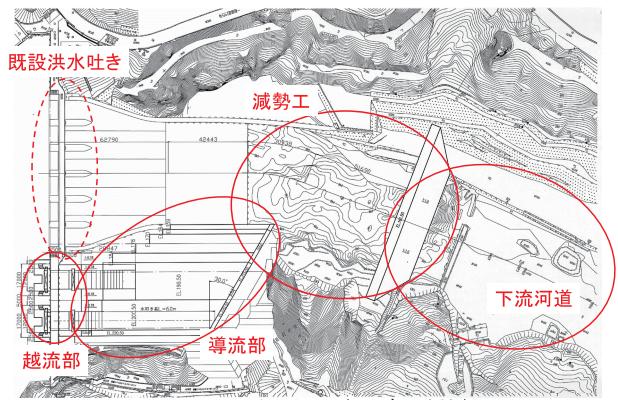


図-3 平面図（原案形状）

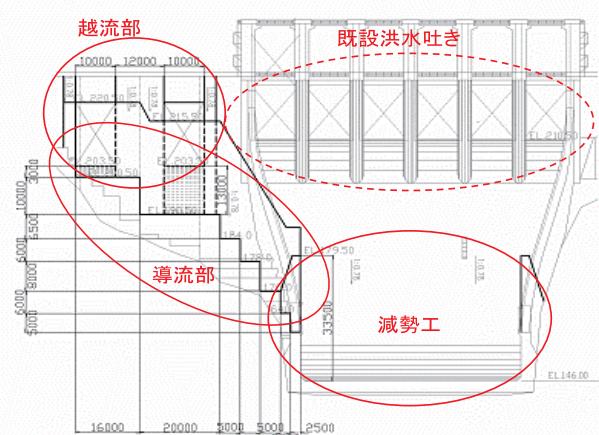


図-4 下流面図（原案形状）

いを持ったまま導流壁に当たり、さらに減勢することなく減勢工（減勢池）に落下している。減勢工として副ダムのみを設置した場合では、既設洪水吐き及び新設洪水吐きからの水流が合流する部分であるが、下流河道も含めて左岸側の水脈が大きく這い上がる状況となった。

これらの原案形状での状況に対して、越流部については、越流頂の形状を標準越流頂に変更、川側の越流頂標高を低くすることで、所定の水位で必要な放流量を満足させるものとした。

導流部については、導流壁の位置・角度の変更、スロープの設置など様々な形状を試行錯誤的に検討し、山側と川側の両者の洪水吐きからの水脈を分離・拡散する形状を見出した。その結果、導流部の水位を低く抑えることでき、導流壁の高さも低くすることが可能なものとなった。

減勢工については、平面形状の工夫や側壁の設置等により、一部減勢工側壁を越水する場合があるが、下流河道に対しては十分な安全性を持ったものとできた。

図-8, 9に修正した最終的な形状および図-10にその形状での水理模型実験の状況を示す。

#### 4. おわりに

ダム再開発での水理設計上の留意点としては、まずは、流況が大きく変化することである。新しく放流設備を設置する目的自体が、放流量を増大させることである。また、今回の長安口ダムの事例のように既設放流設備より低い位置に新設放流設備を設置する場合や、ダムのかさ上げなどで貯水位が高くなる場合など、新設の放流設備はより高水圧で高流速になるものと考えられる。これらに対応するため、減勢工などは規模を大きくする必要がある。

一方、ダム堤体の下流側に既存の施設等が存在し、特に利水として発電の目的を有するダムでダム堤体の直下に発電所などが存在する場合などは、既存の施設の移設等も困難であり、また施設への越流も許されない場合もある。このような場合に対しては、減勢工の規模を単純に大きくすることができないことなどに対応するため、副ダムの設置位置、導流部や減勢地内の水位・流速等の流況の確認や制御等の検討が必要となる。また、既設のダムということで、施工途中段階でも運用する必要があ



図-5 全体模型（縮尺 1/62.5）

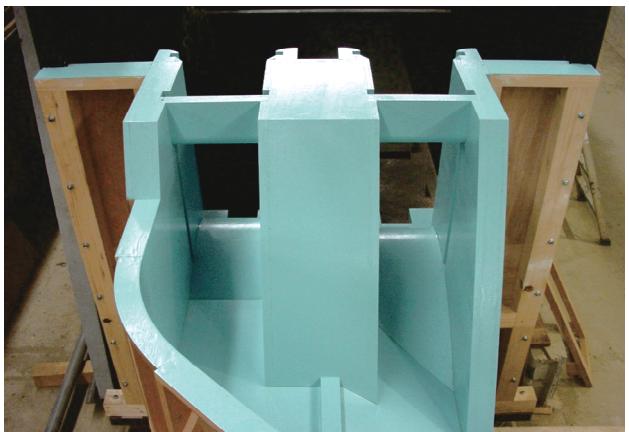


図-6 越流部抽出模型（縮尺 1/40）



図-7 水理模型実験での流況  
(導流部：原案形状)

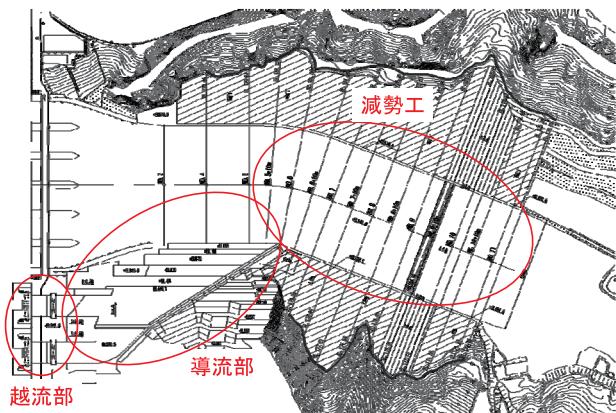


図-8 平面図（最終形状）

り、この途中段階での洪水調節機能等をどのように満足させるのか、下流河道や既存施設に影響を及ぼすものなのなどについて、水理模型実験等での検討が必要となる場合もある。

新規ダムの場合は、通常の一定の形状での放流設備等を配置していくことで水理設計が可能な場合もある。一方、再開発ダムの場合は、これまでにはない放流設備の配置で既存の周辺施設に影響なくかつ減勢させる必要もあり、施設の配置の変更が困難などの制約条件も多くなっている。さらに、新規ダムの場合よりも複雑な水の流れとなる場合が多く、水理模型実験による水理設計が必要不可欠と考えられるものである。

土木研究所では、今回示した長安ダム改造事業のほか、直轄事業では鹿野川ダム、鶴田ダム、天ヶ瀬ダムなどのダム再開発事業においても水理模型実験による水理設計を実施してきたところであり、また、これまでも自治体等が実施するダム再開発等に対して技術相談等に対応している。今後も引き続き、水理模型実験などによる水理設計技術により、ダム再開発などの「ダム再生」に貢献していきたいと考えている。

### 【参考文献】

- 1)国土交通省 水管理・国土保全局：ダム再生ビジョン、平成29年6月
- 2)国土交通省那賀川河川事務所ホームページ（長安口ダム改造事業）

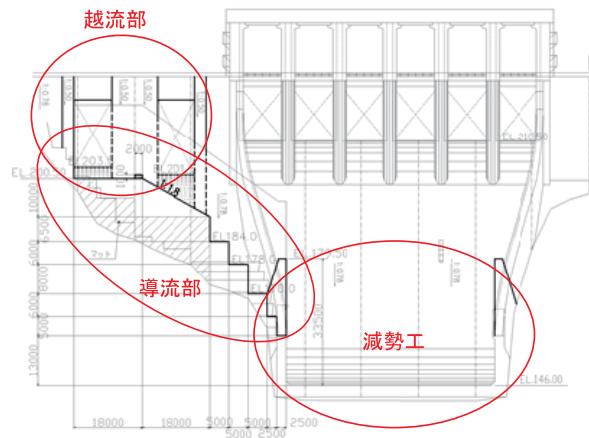


図-9 下流面図（最終形状）



図-10 水理模型実験での流況  
(導流部：最終形状)

# 舗装メンテナンスサイクルの構築に向けた取り組み -路盤の保護を通じた舗装の長寿命化を目指して-

道路技術研究グループ舗装チーム上席研究員 蔡 雅行

## 1. はじめに

わが国の舗装ストックは道路延長ベースで約 100 万km<sup>1)</sup> であり、膨大なストック量となっている。高度経済成長期に集中的に整備されてきた道路施設の老朽化が進行する中、橋梁やトンネルと同様に、道路の路面を形成する舗装においても、メンテナンスサイクルを確立し、予防保全型の管理を行うことにより、より効率的に維持管理していくことが求められている。

こうした状況の中、社会資本整備審議会道路分科会道路技術小委員会において、「舗装点検要領」に関する議論が行われ、この議論を踏まえて、国立研究開発法人土木研究所では、国土交通省道路局、国土技術政策総合研究所とともに、舗装の点検のあり方に関する検討を重ねてきた。これらの検討を踏まえ、「舗装点検要領」<sup>2)</sup> は、平成 28 年 10 月 19 日に国土交通省道路局において策定された。

舗装点検要領においては、「表層や基層の適時修繕による、路盤以下の層の保護等を通じ長寿命化に向けた舗装の効率的な修繕の実施を目的とした舗装の点検」に関する事項について定められており、舗装管理における路盤以下の層の重要性が指摘されている。

本稿では、舗装管理の現状や舗装の構造特性に着目した舗装メンテナンスの視点について述べるとともに、舗装点検要領の策定目的となっている路盤以下の層の保護等を通じた舗装の長寿命化に向けた土木研究所における取り組みについて述べる。

## 2. これから舗装メンテナンスの視点

### 2.1 舗装管理の現状

図-1<sup>3)</sup> は舗装の点検の実態について、国土交通省道路局が地方公共団体にアンケート調査を実施した結果を整理したものである。舗装において、点検を実施している割合は、都道府県の約 8 割、市町村の約 2 割にとどまっており、適切な予防保全・修繕の取り組みも十分に行われていない状況にある。

図-2<sup>3)</sup> に舗装ストックと舗装維持修繕費の推移を示す。1990 年代半ば頃までは、舗装ストックの増加とともに舗装の維持修繕に関わる予算も増加してきたが、それ以降は、財政制約の中で、舗装の維持修繕費は大幅に減少している。

このような状況を踏まえると、舗装分野においても、橋梁やトンネル等と同様に、メンテナンスサイクルを確立し、舗装の長寿命化・ライフサイクルコスト (LCC) 縮減を目指すことが必要であり、舗装の適切な点検と予防保全型管理を推進することが求められる。

### 2.2 路盤の健全性確保の必要性

舗装は路床の上に構築され、アスファルト舗装を例にとると、その一般的な構成は、図-3 に示すとおり路面から順に表層、基層、路盤となっている。路面に生じたひび割れ等の損傷を放置すると、損傷箇所から路盤に雨水等が浸入することにより路盤の支持力が低下し、路盤の変形に起因する沈下など舗装構造全体の損傷につながる。図-4<sup>2)</sup> にアスファルト舗装損傷の代表的なメカニズムを示す。

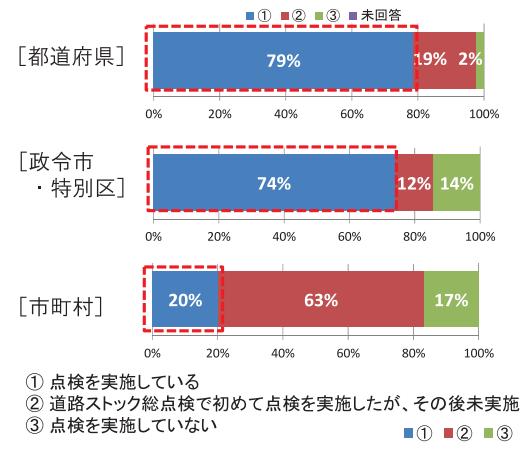


図-1 舗装点検の実態

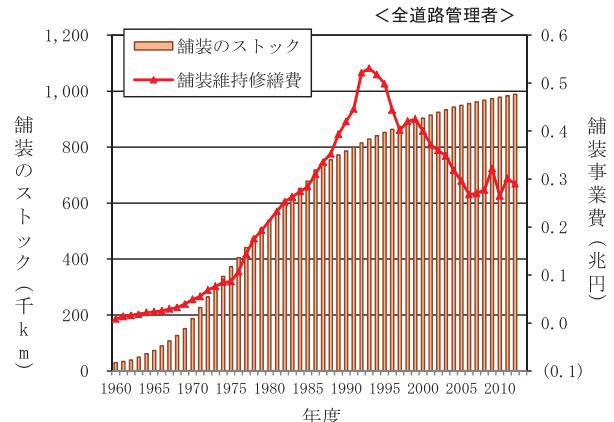


図-2 舗装ストックと舗装維持修繕費の推移

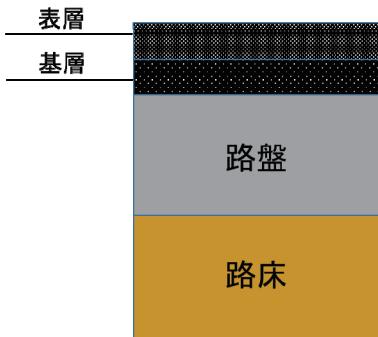


図-3 アスファルト舗装の構成

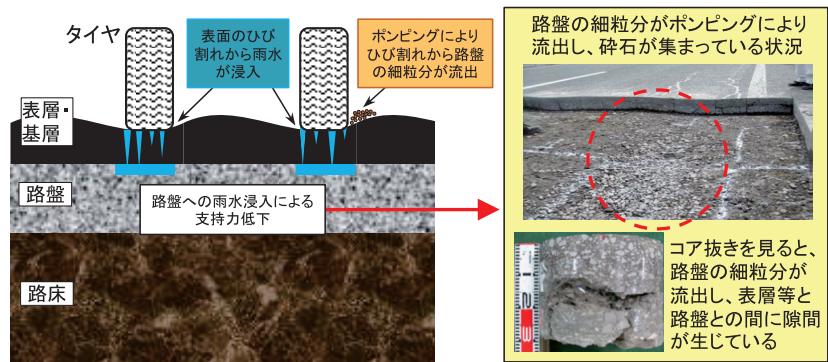


図-4 アスファルト舗装損傷のメカニズム

舗装構造全体の損傷に至ると、表層あるいは表層・基層のみを修繕する切削オーバーレイ工法等を行っても、路盤の支持力が十分でないため、早期に表層が損傷し、路面にはひび割れや沈下による不陸等が発生する。このような場合、路面管理の視点からも早期の修繕が必要となってしまうため、最終的には路盤も含めた修繕が必要となる。関東地方整備局管内における夜間での工事を想定して、路盤も含めた修繕（舗装の打換えによる修繕）した場合と表層等のみを修繕（切削オーバーレイ工法による修繕）した場合を比較すると、路盤も含めた修繕は、表層等のみを修繕する場合に比べ、費用は概ね3倍、工事期間は概ね4倍となる。

また、図-5<sup>2)</sup>にコンクリート舗装損傷の代表的なメカニズムを示す。コンクリート版の目地部の目地シール不良等を放置すると、目地部から路盤に雨水が浸入し、路盤材料である粒状材の噴出などにより路盤に不陸が生じ、コンクリート版の損傷につながる。コンクリート版が損傷すると目地部の補修のみならず、コンクリート版自体の修繕が必要となり、工事費が増大するとともに、修繕時のコンクリート養生のための期間が必要となるため、通行止めなどにより道路交通にも大きな影響を与えることになる。

このため、舗装の長寿命化・ライフサイクルコスト（LCC）縮減を図るために、路盤を健全に保つ視点が極めて重要である。

### 2.3 路盤以下の層の健全性を考慮した舗装の点検・診断区分

特に交通量の多い道路は、損傷の進行が早い一方で、路線の重要性が高いため、修繕工事による道路交通への影響は大きい。このため、路盤以下の層の保護を通じた舗装の長寿命化を図っていくことが特に求められる路線となる。

舗装点検要領では、道路の役割や性格などに応じて道路を分類A～Dに区分（表-1）し、アスファルト舗装・コンクリート舗装毎に、道路の分類に応じて点検・診断・措置・記録に関する基本的事項が示されている。この中で、損傷の進行が早い道路等におけるアスファルト舗装については、舗装の長寿命化を意識した管理に誘導するため、「使用目標年数」を規定している。

「使用目標年数」とは、劣化の進行速度にばらつきの大きいアスファルト舗装において、表層の早期劣化区間の排除や、表層の供用年数と損傷レベルに応じた適切な措置の実施といったきめ細やかな管理を通じた長寿命化に向け、表層を使い続ける目標期間として設定する年数である。

舗装管理の現場では、予算制約等から早期に破損している箇所においても十分な調査が行われないまま、表層等のみを修繕する切削オーバーレイ工法が適されるケースがある。しかし、早期に破損する箇所においては、路盤あるいは路床等に何らかの損傷原因があることも想定され、十

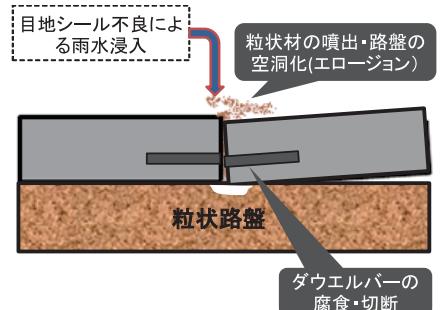


図-5 コンクリート舗装の損傷

表-1 道路の分類

大分類	小分類	分類
損傷の進行が早い道路等（例えば大型車交通量が多い道路）	高規格幹線道路等（高速走行など求められるサービス水準が高い道路）	A
		B
損傷の進行が緩やかな道路等（例えば大型車交通量が少ない道路）		C
	生活道路等（損傷の進行が極めて遅く、占用工事等の影響が無ければ長寿命）	D

表-2 アスファルト舗装（損傷の進行が速い道路等）における診断区分

区分		状態
I	健全	損傷レベル小：管理基準に照らし、劣化の程度が小さく、舗装表面が健全な状態である
II	表層機能保持段階	損傷レベル中：管理基準に照らし、劣化の程度が中程度である
III	修繕段階	損傷レベル大：管理基準に照らし、それを超過している又は早期の超過が予見される状態
	(III-1：表層等修繕)	表層の供用年数が使用目標年数を超える場合（路盤以下の層が健全であると想定される場合）
	(III-2：路盤打換等)	表層の供用年数が使用目標年数未満である場合（路盤以下の層が損傷していると想定される場合）

分な調査が行われないまま表層等のみを修繕すると、再度破損が進行し、再び早期に修繕が必要な状態になることが多い。このようなケースでは、最初に十分な調査を行い、抜本的な対応をした場合より、長期的な視点ではかえって多くの予算が必要となる。このため、アスファルト舗装の損傷の進行が早い道路等における診断区分（表-2）においては、「III 修繕段階」を路盤以下の層の健全性を考慮して「使用目標年数」により2段階に区分し、表層の供用年数が使用目標年数に満たず早期に劣化が進行している区間は、「(III-2 路盤打換等)」とし、これまでの措置の履歴確認を含めて詳細調査を実施して路盤以下の層の健全性を確認し、適切な修繕設計に基づく措置（詳細調査を踏まえた修繕措置（路盤打換等））を講ずることを求めている。（なお、ポットホールなどの即時の対応が必要な損傷は、効率的な修繕の実施を目的とした本要領の対象外としたこともあり、橋梁やトンネル等の点検要領に示されている「IV 緊急措置段階」という診断区分はない。）

### 3. 土木研究所の取り組み

#### 3.1 概要

舗装管理の現状や「舗装点検要領」の策定を踏まえつつ、「路盤以下の層の保護等を通じた長寿命化に向けた舗装の効率的な修繕の実施」を図るための舗装メンテナンスサイクルの構築に向けた技術開発に取り組んでいる。

具体的には、研究開発プログラム「メンテナンスサイクルの効率化・信頼性向上に関する研究（H28～33）」の中で、舗装分野においては、①既設舗装の構造的特性の把握技術の開発、②目的や道路管理体制に応じた精緻な／低廉な路面性状調査技術の開発、③重交通道路における舗装の長寿命化技術の開発、④軽交通道路における舗装の長寿命化・延命化手法の開発に取り組んでいる。このうち本稿では、舗装点検要領の目的である「路盤以下の層の保護等を通じ長寿命化に向けた舗装の効率的な修繕の実施」を達成する上で、特に重要と考える「①既設舗装の構造的特性の把握技術の開発」に関する取り組み状況について述べる。

#### 3.2 個別箇所における構造的特性の把握技術とこれに基づく措置の有用性

2.3において述べたとおり、舗装点検要領において、早期に劣化した区間に对しては詳細調査を実施した上で適切な措置を選定することが求められている。点検要領に基づくメンテナンスサイクルを運用していく上で、今後はより一層詳細調査の重要性が増してくると考えられる。個別箇所において構造的特性の把握するための詳細調査手法としては、FWD(Falling Weight Deflectometer, たわみ測定装置)によるたわみ量調査、コア抜き調査及び開削調査が点検要領の付録に例示されているが、開削調査は交通規制面等での制約が大きく、現場実務においてはFWDたわみ量調査やコア抜き調査が主体になるものと考えられる。しかしながら、それら詳細調査に基づく措置が、舗装の構造的健全度の回復度にどのような影響を与えるかは必ずしも明らかになっていない。

このような状況を踏まえ、土木研究所では平成28年度においてコア抜き調査をもとに修繕工法を選定した修繕工事現場にて、FWDたわみ量調査を修繕工事の前後で実施し、舗装の構造的健全度の回復状況に関して実態調査を行った。その概要を以下に述べる。

対象とした調査箇所は、関東地方整備局管内の直轄国道（往復2車線、大型車交通量は舗装計画交通量N6区分に該当）での修繕工事区間（上下2車線、L=約600m）である。コア抜き調査（アスコン層25cm）は、工事着手前に合わせて24箇所されている。コアの損傷状況は一様ではなく、ひび割れが中間層にとどまっているもの、層間剥離が発生しているもの、アスコン層内部の混合物自体の剥離が進行



写真-1 同一現場内の抜き取りコアの状況例

しているもの等に分類された。その結果、当該工事現場では、ひび割れ深さが15cm以上の区間においてはアスコン層全層の打換え、ひび割れ深さが15cm未満の区間においては2層( $t=10\text{cm}$ )の切削オーバーレイ工法が選定された。コアの状況例を写真-1に示す。

このような現場にて、FWDたわみ量調査を修繕工事の前後で実施した。その結果を図-6に示す。これより、当該現場では、前述のコア抜き調査によるひび割れ深さに着目した修繕工法の選定が、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへの回復に大きく寄与したことが分かる。構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが言える。

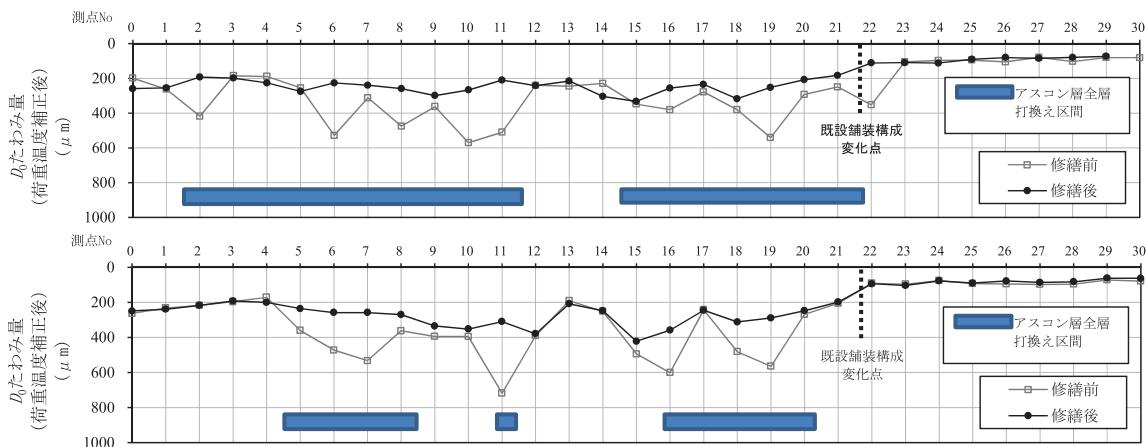


図-6 修繕工事施工前後のD0たわみ量の比較 (上：下り車線, 下：上り車線)

舗装点検要領に基づく舗装のメンテナンスサイクルにおいては、前述のとおり、損傷の進行が早い道路等における早期劣化区間について、詳細調査の実施を通じた適切な措置が求められるが、本調査結果により詳細調査としてコア抜きによる舗装の内部損傷の把握の重要性を示唆するものとなった。なお、今回の調査においては、多数のコア抜きによるアスコン層内部の損傷確認を実施したが、現場制約条件等から全ての現場で同様の取組を実施することは困難と考えられる。今後は、非破壊で面的に舗装の構造的健全性を把握する手法の検討を行っていく予定である。

### 3.3 ネットワークレベルでの構造的特性の把握技術の開発（移動式たわみ測定装置の開発）

既設舗装の構造的特性を把握する技術としてはFWDがすでに実用化されており、補修個所における補修工法の選定などに活用されているが、停止して測定を行う必要があるため、ネットワークレベルの管理には適さない。ネットワークレベルでの舗装の構造的健全度を評価するために、高速で移動しながら連続的にたわみを計測する試験機は、1990年代の初頭から各国で開発が進められている<sup>4)</sup>。実用的に使用されている試験機には、写真-2に示すRWD(Rolling Wheel Deflectometer(米国))、RDT(Road Deflection Tester(スウェーデン))やHSD(High Speed Deflectograph(デンマーク))等がある<sup>5)</sup>。こうした移動式たわみ測定装置は、巨大な牽引式トレーラによるものであり、日本国内では測定できる路線が限定されてしまうだけでなく、車両寸法が車両制限令に抵触してしまうため、日本の道路管理のための試験機としては適さないと考えられる。

このため、我が国の幹線道路をネットワークレベルで管理するためのツールとして活用できるように、

一般的な車両をベースにした移動式たわみ測定装置 (Moving Wheel Deflectometer, 以下 MWD) の開発に取り組んでいる。研究開発にあたっては、舗装の健全度評価方法に関する研究を実施する土木研究所と共に、路面性状測定車等による移動式測定の経験を有する測定会社、測定機器の開発に取り組むメーカ、舗装の構造解析やノイズ除去に知見を有する大学学識者などを募り、共同研究を実施している。

移動中の輪荷重が載荷した際に発生する舗装たわみを測定する手法は、レーザー変位計による方法とドップラー振動計による方法の 2 種類がある。レーザー変位計の場合、同じ地点に対し載荷時と非載荷時の高さの差を取ることでたわみを得る事ができる。ドップラー振動計は、ドップラー効果によりレーザーの入射光と反射光の周波数に差が生じることを利用して、舗装のたわみ速度を測定する。

上記の測定原理に基づき、試作機を作製し測定を実施した。当初は研究所が所有する促進載荷試験用の荷重車（写真-3 (a)）をベースに試作機を作製したが、特殊な車両で実道を走行できないため、8t 車両をベースにした試作機(写真-3 (b))に計器を移設した。

土木研究所構内の外周路にて試作機を用いて測定を実施し、FWD 試験の結果と比較したところ、車両の振動と思われるノイズ成分により、測定結果に大きな差異が生じた。そこで、レーザー変位計の測定値に対しスペクトル解析を行った。図-7 に解析結果を示す。図中の D1, D4, D7 はレーザー変位計の番号である。2~3Hz 付近の成分が卓越しており、この部分が車体の振動成分であると考えられる。舗装のたわみに比べ車体の振動は非常に大きいため、たわみを正確に求めるにはこの振動成分を取り除く必要がある。

はじめに、センサーの架台にインシュレータやゲルマットを用いたハード的振動対策を施したが、かえって様々な振動成分が増大するという結果となった。そこで、センサーの架台は車両に剛結させることで車体とセンサーの振動を一致させ、振動成分は離散ウェーブレット解析によるソフト的振動対策により除去することとした。離散ウェーブレット解析は時系列周波数解析の手法の 1 つで、ウェーブレットと呼ばれる短い波の集合体としてデータを解析する。図-8 にノイズ除去のイメージを示す。上下方向の加速度がフラットになるようにフィルタを設定し、センサーの測定値に対して設定したフィルタを適用することで車両の振動成分を概ね取り除くことができると考えた。

土木研究所構内における測定結果に対し、離散ウェーブレット解析による振動の除去を行い、たわみを算出した結果を図-9 に示す。レーザー変位計とドップラー振動計のいずれの場合も MWD たわみ量は FWD のたわみ量と概ね一致し、離散ウェーブレット変換によって車両振動成分を除去できていることが確認された。

現在、車体振動を低減するために車両のサスペン



写真-2 RWD (Rolling Wheel Deflectometer (米国))<sup>6)</sup>



(a) 荷重車ベース



(b) 8t 車ベース

写真-3 試作機の外観

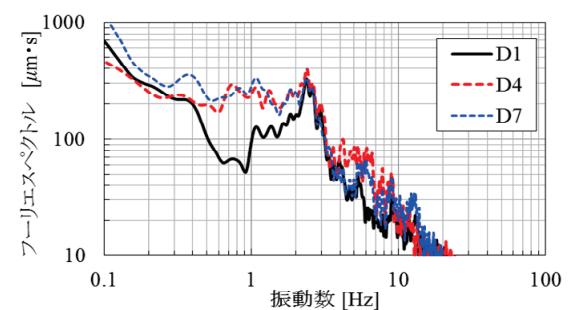
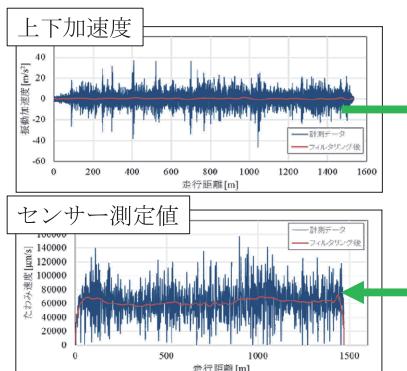


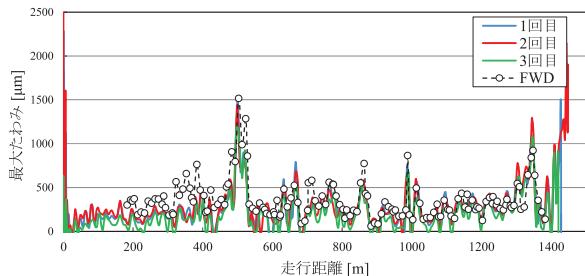
図-7 レーザー変位計のスペクトル解析結果



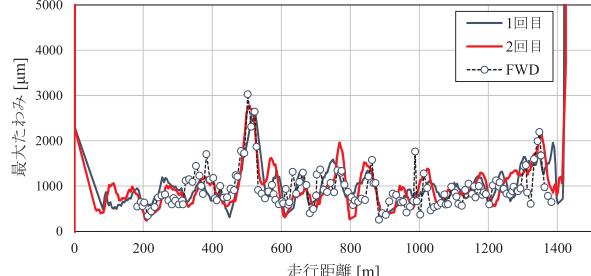
同じフィルタを適用

— 計測データ — フィルタリング後

図-8 ウェーブレット解析によるノイズ除去



(a) レーザー変位計



(b) ドップラー振動計

図-9 土木研究所構内道路での測定結果

ションの種類を変更することや、走行中の車両の角度による測定値の補正など測定精度の向上に向けた検討に取り組んでおり、引き続き実用化に向けた取り組みを進める予定である。

#### 4. おわりに

舗装点検要領が発出され、これまで以上に舗装メンテナンスサイクルの構築に向けた取り組みが各地で進められることになる。その一方、2.1で述べたとおり、これまで舗装点検等を行ってきていない道路管理者もあり、現在ある技術的知見を広く水平展開していくことも重要であると考えている。このため、本稿で述べた土木研究所での取り組みの他、各種技術委員会活動への参画等を通じて、産・学・官の技術者と協力して、各所で有する知見を集約し、これらを広く提供するための取り組みにも積極的に取り組む所存である。

#### 【参考文献】

- 1) 国土交通省道路局：道路統計年報，<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/>
- 2) 国土交通省道路局：舗装点検要領,平成28年10月19日
- 3) 国土交通省社会資本整備審議会道路分科会道路技術小委員会：これからの舗装マネジメント，第6回技術小委員会，資料3-2，2016.9
- 4) 加納孝志他：移動式たわみ測定装置について—舗装のたわみ測定装置の変遷—，アスファルト，Vol. 51, No. 224, pp. 43-54 , 2008.
- 5) 丸山輝彦：高速移動式たわみ測定装置，Journal of Civil Engineering, Vol.53, No.5, pp.58-59, 2012.
- 6) Steele D, Hall J, Stubstad R, Peekna A, Walker Ronald : Development of a high-speed rolling wheel deflectometer, Pavement Evaluation Conference, 2002, Roanoke, Virginia, USA
- 7) 若林由弥他：舗装の効率的評価のための新しい測定装置の開発～MWDの実用化に向けた取組み～，土木技術資料，平成28年8月号，pp.12-15, 2016.

# 性能規定時代の道路橋の耐久性向上技術

構造物メンテナンス研究センター 玉越隆史

## 1. はじめに

日本で建設される道路橋の設計・施工に関して、道路法や道路構造令といった法令レベルでは安全なものであるべきとされるものの、具体的な要求性能や考慮されるべき事項の詳細は定められていない。そして、国土交通省が通知する技術基準「橋・高架の道路等の技術基準」（以後、「道路橋示方書」という。）に満足すべき要求性能や設計・施工にあたって遵守すべき事項が詳細に定められている。

道路橋示方書では2002年に性能規定の概念が取り入れられるとともに、維持管理の時代を迎える情勢を踏まえて、耐久性に優れた橋の実現のために、設計上の目標期間の標準を100年として、これを満足するとみなせるかどうかの観点で耐久性に係わる規定の見直しも行われた。

しかし、具体的な規定内容は、適切な維持管理を前提としたうえで、耐久性能を大きく左右する材料特性や施工品質のみならず、鋼部材やコンクリート部材の疲労、架橋環境と関係が深いコンクリートの塩害などの劣化現象に対しても、多くは経験的な仕様であり、例えば腐食しろやコンクリートのかぶり厚さのように数値規定はあっても耐久性能が達成される確実性については必ずしも明確でないなど意図する耐久性が発揮されるかどうかの信頼性に不明な点も少なくない。

## 2. 既設道路橋の耐久性

日本では、2014年から国土交通省令（「道路の維持・修繕に関する技術基準」）で全ての道路橋で5年毎の近接目視点検が行われることとなった。しかし国管理の道路橋では、既に2004年から5年毎の全部材近接目視点検が行われており、データが蓄積されてきている。そして直轄道路の点検では、技術基準の改定などへの反映も意図して、全部材を主桁や横桁、床版など構造上役割の違う部材毎に細かく種別で分類するとともに、損傷や劣化の傾向分析や原因推定が詳細に行えるよう、部材をさらに要素に分割して変状の有無や内容の詳細な記録を蓄積してきている。

これらの記録からは、同部材の同位置（同一要素）で2回の点検間で、経過年0年時点で、変状がない状態（評価区分a）であったものが経年に従ってどのように劣化（評価区分b～e）するのかという劣化傾向を遷移確率として推定することができる。図-1に塗装鋼材で塗装面に錆が確認されてから腐食減肉が深刻化する過程である「腐食」での推定結果の例を示す。

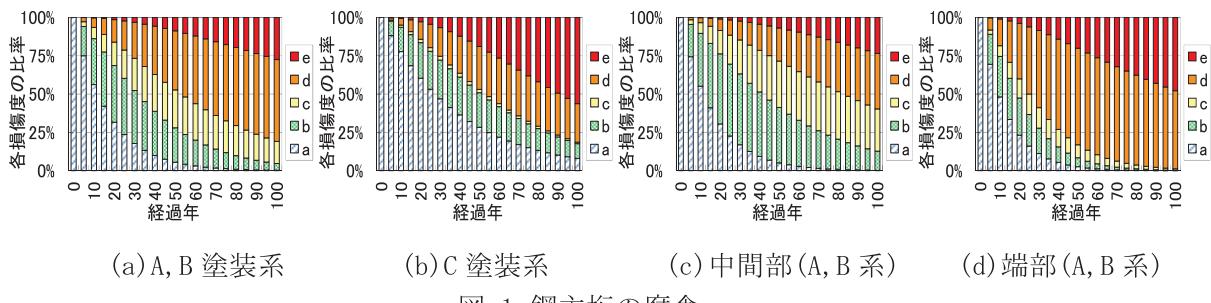


図-1 鋼主桁の腐食

仕様として防食性能に差のあるA,B塗装系とC塗装系（重防食仕様）、あるいは環境条件に差があると思われる橋の中間部と桁端部で劣化傾向に差があることがわかる。しかしいずれのケースも経過年と予測される劣化状態の関係は一様でなく、劣化には確率的に大きなばらつきのあることが窺える。

道路橋の劣化状況に大きな不確実性があること、およびそれらに多様な耐久性阻害要因がかかわっていることも、個々の既設橋の維持管理記録の分析から明らかにされてきている。

写真-1(a)は建設後早期に異常腐食を生じた耐候性鋼材の例、写真-1(b)は排水システムの設定不良である。設計段階で把握しきれなかった局部の環境不適合による可能性が高い。写真-1(c)は、仕様の設計思想とは乖離した塗膜損傷であり施工不良の疑いが強い。また写真-1(d)は異種金属間接触腐食を

生じたものであり絶縁性能が十分でなかった可能性がある。

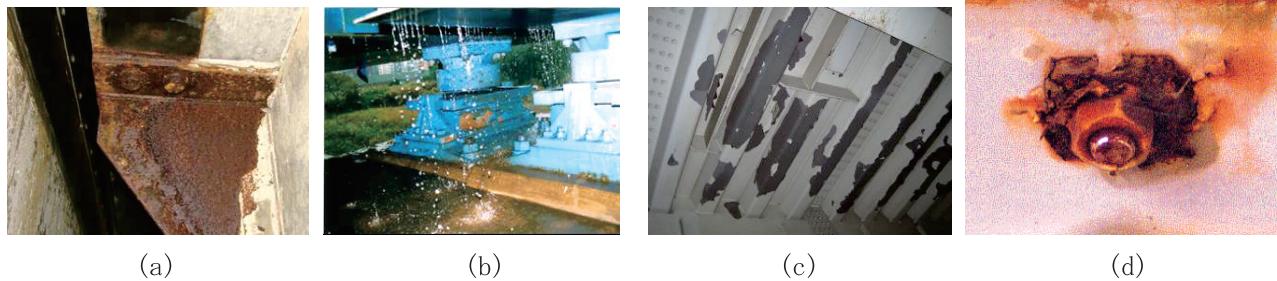


写真-1 早期劣化の事例

いずれも現象も原因も明らかなものであるが、道路橋のように大規模で複雑な構造の場合、設計・施工の段階で何らかの見落としや見込み違いを完全に排除できていない事例が少なからず存在する。

写真-2(a)は吊橋の主ケーブルの素線が防食被覆内部で腐食により破断していた事例、写真-2(b)はケーブル定着背面から著しい漏水がある例、写真-2(c)は、鋼斜材が貫通した床版下面に錆の混ざった漏水が生じている例、また写真-2(d)は外観目視困難な狭隘な桁端部構造の例である。いずれも外観からの状態確認が困難な構造であり、結果的に早期の耐久性喪失につながる変状の放置につながりかねない維持管理困難な構造も多い。



写真-2 維持管理性上の課題のある事例

### 3. 耐久性向上のために求められる技術

2で挙げたような課題は、介在する技術者の配慮レベルなどにも左右され基準等で完全に防止するには限界もあり、定期点検をはじめとする安定的な維持管理行為によるフォローも必要である。

他方、例えば写真-3は、いずれも急速な腐食減肉の進行している事例であるが、現象としては当該部位の温湿度などの環境条件と鋼材の腐食特性の関係で説明可能なものであり、実際の部位の環境条件の評価とそれらの条件が腐食に及ぼす影響をよりきめ細かく評価して対策に反映させることで防止できる類のものである。



写真-3 ローカルな環境の影響が現れた劣化の例

すなわち、主たる耐久性阻害要因の一つに、経年劣化現象に対してこれまで一般に行われてきた基準等に示される標準的な作用条件と耐久性能確保策の組み合わせが最適化されていないことが挙げられる。これは、性能規定の趣旨からは所要の性能が保証される限り、作用条件と抵抗の特性をよりきめ細かく評価することで耐久性の信頼性を向上させる余地のあることを意味している。

以上のような認識から、性能規定時代に入り、今後目標とする耐久性能がより確実に発揮される良質な道路橋資産を形成・維持するために求められる信頼性を含めた耐久性能の向上策として以下の実

現に向けた研究の取り組みを進めてきている。

### ①制御可能な不確実性の可能な限りの排除（制御出来るものは制御）

耐久性に悪影響を及ぼす可能性のある事象を設計段階で可能な限り排除することは確実に効果が期待出来る。一方で考慮すべき事項は多岐にわたり、これらに漏れなく配慮することは容易ではない。

Caesar では国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）とも共同で、既往の技術基準類や設計施工の実務での実検討事例の収集と分析から、ナレッジとして共有化すべき推奨仕様や排除すべき事象などの集約を進めている。

### ②不確実性を考慮した設計と維持管理手法

供用期間中の被災や不測の損傷の発生はゼロにはできないものの、設計と実際の乖離要因を把握してできるだけ乖離を小さくすることは不確定要素の削減による耐久性の信頼性を向上につながる。

Caesar では、例えば、耐候性鋼橋について、条件が明確で相対比較が可能な同じ路線の橋梁群を抽出し、架橋条件や橋梁構造と部位ごとや構造細部の環境条件の関連性について、環境不適合につながる要因の抽出を目的に調査を進めており、設計段階や架橋後の異常腐食発生リスクをより精度よく推定できることを目指している。

### ③耐久性設計の信頼性向上

道路橋示方書は2017年に、部分係数設計法の導入に象徴される信頼性の概念を拠り所にした大幅な改定が行われた。橋の要求性能は、「設計で考慮する（橋が実際に遭遇することを想定する）状況」に対し、「設計で考慮する（耐荷力などを決定づける照査対象となる）橋の状態」が「許容される信頼性で実現する」とことと定義され、設計目標としての橋や部材の供用期間に対して、常に発揮できなければならない耐荷性能が所要水準を下回らないことの時間的信頼性が耐久性能と位置づけられた（図-2）。

Caesar では経験や仕様に過度に依存せず、耐久性能の信頼性を評価して照査基準の作用や抵抗の評価の精緻化による合理化策の検討も進めてきており、次節で一端を紹介する。

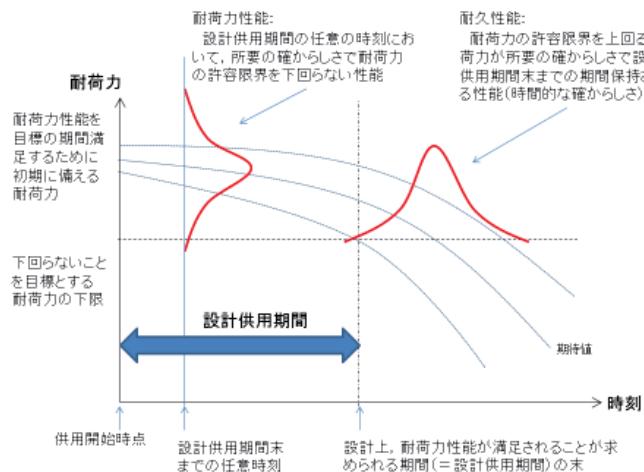


図-2 耐荷性能と耐久性能の関係

## 4. 鋼橋の疲労設計の信頼性向上のための継手強度の分析

道路橋の鋼部材の疲労設計では、変動する応力振幅とその繰り返し回数に応じて疲労寿命が決定されるとする疲労設計曲線（S-N線）が用いられる。疲労設計曲線は、非超過確率97.7%以上の確保を目安に多数の疲労試験データ<sup>3)4)</sup>を統計的に解釈したものが根拠となっており、主に継手形式と応力変動の方向のみに着目した大まかな分類区分で整理されている。一方、継手の疲労強度には溶接手法や材料など多岐にわたる要因が影響する可能性があり、本来疲労耐久性に有意差のあるデータが同じ母集団として扱われている可能性も否定できない。また、設計応力は小型試験体に対する単純な一方向載荷結果を公称応力で整理したものと対照されるため、大きさや向きが複雑に変化する実際の継手の使用条件とは少なからず乖離も考えられる。一方で、当初の基準化以降も、全国で疲労試験データの蓄積が進み、かつ様々な属性等の条件と関連付けられた疲労試験結果のデータベースも整備されてき

ている<sup>5)</sup>。

そこで土研では、蓄積されたデータを用いて継手分類の細分化による疲労耐久性評価の信頼性向上策の検討を進めてきている。

データベースには、溶接継手形式ごとに試験の応力範囲と破壊回数以外に、表-1に示す項目が登録されている。まずこれらに対する統計分析による疲労耐久性を左右する影響因子の抽出を試みた。

表-1 疲労試験データベースに登録されている主な項目

1. 使用材料	2. 材料規格	3. 圧延方向と荷重方向	4. 機械的性質(降伏点)	5. 機械的性質(引張強さ)	6. 機械的性質(衝撃値)
7. 機械的性質(伸び)	8. 化学成分	9. 溶接方法	10. グループ形状	11. 溶接パス数	12. 曲率半径 $\rho$
13. フランク角 $\theta$	14. 脚長(主軸)	15. 脚長(ガセット)	16. 溶接材料規格	17. 溶接材の系統	18. 溶接棒・ワイヤー直径
19. 溶接姿勢	20. 溶接条件(電流)	21. 溶接条件(電圧)	22. 溶接条件(速度)	23. 入熱量	24. 予熱温度
25. 試験体寸法(幅)	26. 試験体寸法(長さ)	27. 試験体寸法(板厚)	28. ガセット寸法(板厚)	29. ガセット寸法(長さ)	30. ガセット寸法(高さ)
31. 溶接部の仕上げ条件	32. 表面処理方法	33. 熱処理方法	34. 溶接欠陥		

分散拡大要因評価などにより多重共線性の問題が生じないように相関性の高い項目の選抜や明らかに説明性の乏しい項目の削除などを行って一定の説明性が期待できるとして抽出された条件項目への主成分分析と疲労設計曲線(応力範囲  $\Delta\sigma$  と破壊回数  $N$  の関係では3乗則を仮定し、 $\Delta\sigma^3 \times N = C$ (一定値)が成立)を目的関数とした重回帰分析を行った。

主成分分析の結果の例を図-3に示す。また主成分得点とベクトル図を図-4、図-5に示す。

第1主成分と第2主成分に着目すると、第1主成分は、曲率半径や脚長(ガセット)のような溶接部の形状に関わる成分であり、第1主成分で因子負荷量が大きい項目は、既往の知見から経験的にも疲労強度に影響すると考えられている止端部の応力集中を左右する項目である。第2主成分には、溶接パス数や入熱量、溶接の系統(被覆アークやCO<sub>2</sub>溶接など)といった溶接施工条件の影響の因子と考えられる。

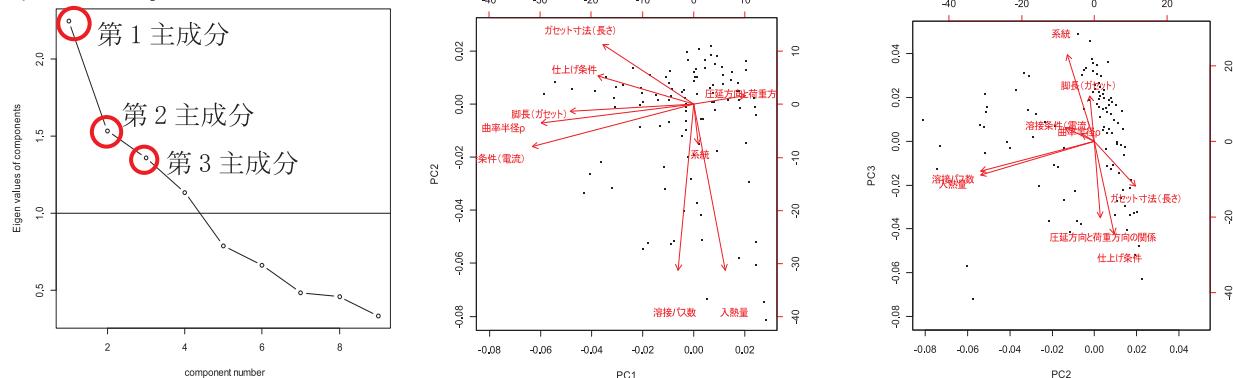


図-3 主成分と固有値の関係

図-4 主成分得点と因子負荷量

(第1vs第2)

(第2vs第3)

抽出された説明変数候補を用いて変数減少法により説明性が最大となる重回帰式を試算した。最適化されたかどうかの判断は情報量基準AICによる。結果を表-2に示す

表-2 変数減少法による絞り込み

項目	1回目			2回目			3回目		
	標準偏回帰係数の絶対値	F値	F<2の判定	標準偏回帰係数の絶対値	F値	F<2の判定	標準偏回帰係数の絶対値	F値	F<2の判定
3. 圧延方向と荷重方向の関係	(最小)0.0056	18.311	○						
11. 溶接パス数	0.037	0.246	×						
12. 曲率半径 $\rho$	0.05	48.267	○	0.058	57.853	○	(最小)0.062	57.75	○
15. 脚長(ガセット)	0.13	51.567	○	0.13	54.823	○	0.13	54.72	○
17. 溶接材の系統	0.12	22.698	○	0.12	21.579	○	0.096	21.54	○
20. 溶接条件(電流)	0.13	9.426	○	0.14	11.438	○	0.12	11.42	○
23. 入熱量	0.094	7.568	○	0.077	6.251	○	0.077	6.24	○
29. ガセット寸法(長さ)	0.11	32.262	○	0.12	35.797	○	0.13	35.73	○
31. 仕上げ条件	0.054	5.151	○	(最小)0.054	5.141	○			
AIC=6308.7				(最小)AIC=6307.2				AIC=6310.4	



説明変数として削除した部分

抽出された影響因子を参考にこれまで一つの母集団として扱われていた疲労試験データを分割して疲労強度等級として設定し直した結果を図-6 に示す。具体的には、 $\Delta\sigma^3 \times N = C$  (一定値) を仮定して、各疲労試験データ 200 万回の繰り返し回数に換算したうえで平均値と  $-2\sigma$  の位置を求め S-N 線として整理した。

分割しない母集団ではG等級とされているが、図-6(a)ではG等級程度、図-6(b)でF等級程度と判断でき、様々な影響因子や属性の相違が耐久性に及ぼす影響の分析によりデータ細分化による評価精度の向上が図られる可能性のあることが確認できた。なお、データの細分化は母集団のデータ数が小さくなることによる統計的分析結果の信頼性低下を招くことが考えられるが、母集団データとしての有意性の判断基準がなく結果の採否にあたっては注意が必要である。例えば図-6(c)では、S-N線の傾きとデータの拡がりの特徴が大きく異なっており、母集団データが不足している可能性が疑われる。

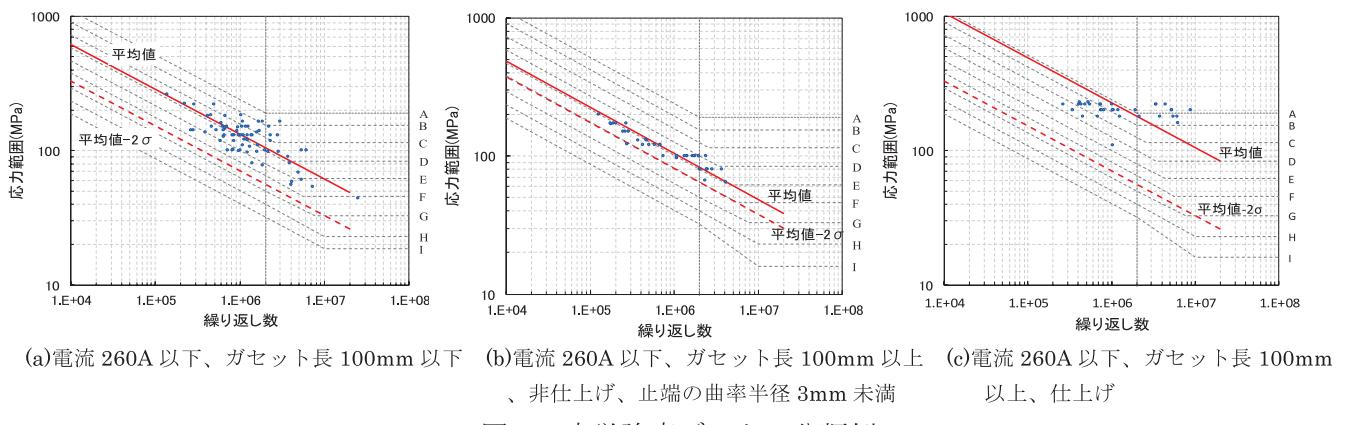


図-6 疲労強度データの分類例

データベースの統計的分析と並行して、道路橋の主桁を考えた場合に疲労耐久性の見極めが最も重要な継手の一つである面外ガセット溶接継手について、継手分類の細分化による疲労耐久性評価の合理化の可能性について実験による検討を行った。細分化のイメージを図-7に示す。

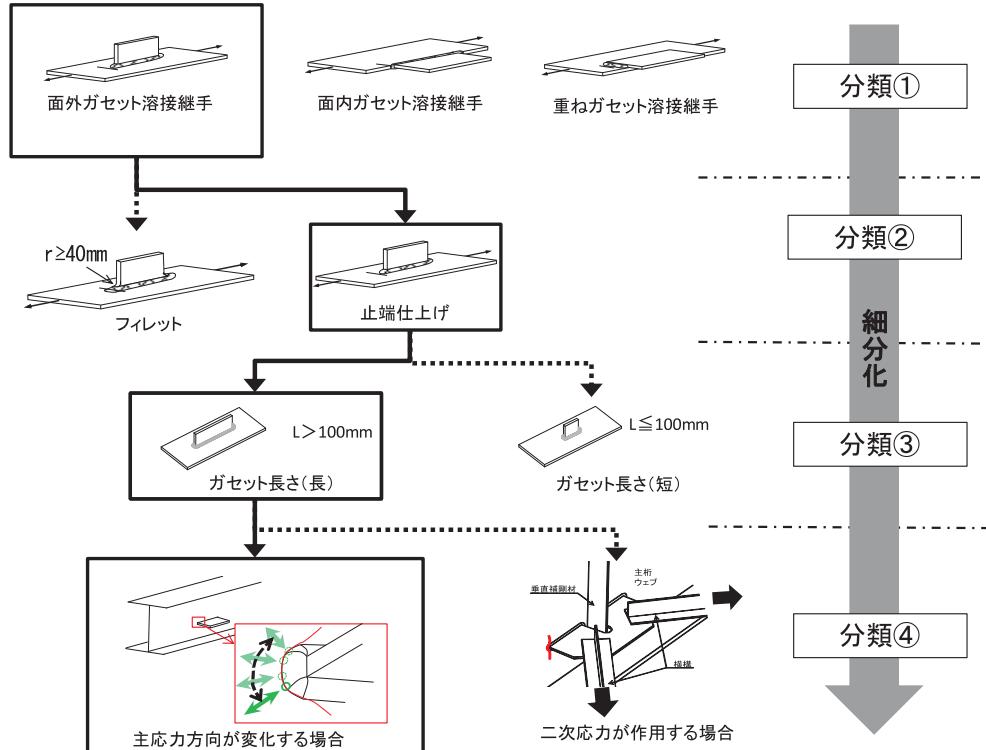


図-7 面外ガセット継手の細分化のイメージ

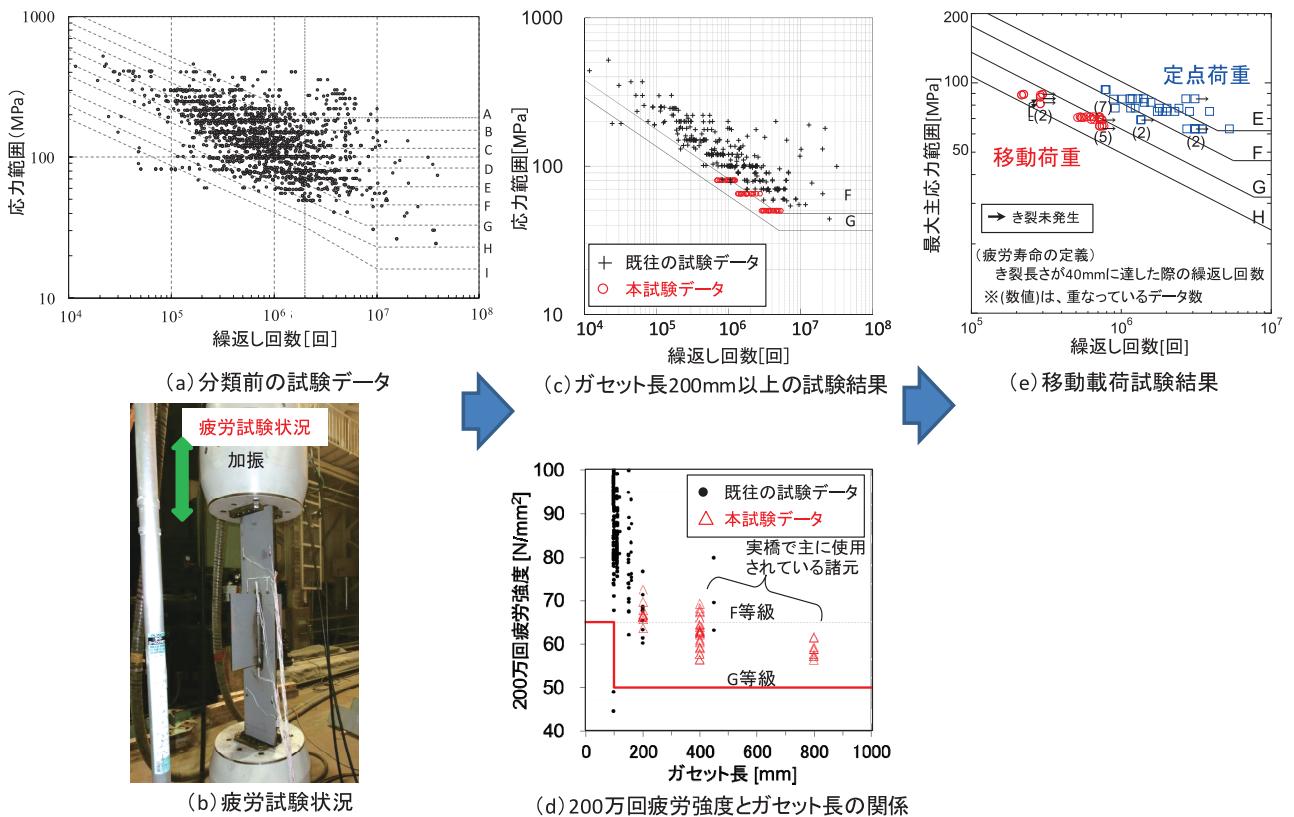


図-8 疲労試験結果を用いた疲労強度の細分化

元データと S-N 線(図-8 (a))に対して、ガセット長の違いによって等級を分けることができる結果となった(図-8 (c)(d))。さらに外力側の評価についても定点による疲労試験結果に対して、実際の供用状態での桁の継手を想定した移動載荷による疲労試験を行った。両者を同じ図にプロットしたものが図-8 (e)である。移動荷重では強度等級が定点載荷試験による評価に対して低下する傾向が表れている。

本稿では、関連研究の一部を例として紹介したが、以上のように、既存の照査基準の中には、実験等の根拠データを信頼性に基づく照査基準に照らして分析し、再評価することで条件に応じて信頼性の向上と合理化が図れる余地のある可能性が示された。

## 5. おわりに

長い供用期間を通じてインフラに求められる性能は、必要な機能がどの程度の確からしさで発揮されるのかという、信頼性に基づく水準とともに説明されなければならない。逆に信頼性の程度に応じて必要な安全余裕が所要の信頼性で確保されるならば、導入技術は画一的である必要はなく多様な技術や材料をニーズに応じて適材適所できる。この実現には経済的合理性も失わず、かつ耐荷性能維持期間の時間的信頼性を保証する耐久性能設計の信頼性向上策の確立が不可欠であり、点検技術の高度化などの既設橋対策と並行して、優先度の高いものから取り組みを続けていく予定である。

## 参考文献

- 1) 橋梁定期点検要領(案), 平成16年(2004年)3月, 国土交通省道路局国道・防災課
- 2) 玉越隆史、横井芳輝、石尾真理：全国規模の道路橋点検データに基づく鋼橋の劣化の特徴、鋼構造論文集、第21卷第82号、2014年6月
- 3) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針、2002年3月
- 4) 山田健太郎：1987年度科学研究費研究成果報告書、「疲れ試験データベースの作成と疲労許容応力度の評価」、1988
- 5) 甲弓子、森猛、南邦明：疲労試験データベースを利用した鋼溶接継手の疲労強度等級設定の試み、土木学会第63回年次学術講演会講演概要集、2008年9月

[ 生産性向上をもたらす技術開発 ]

ドローン・AI を用いた河道内植生監視技術の開発

メンテナンスにおける地質・地盤リスクの捉え方、向き合い方

コンクリート分野の生産性向上  
—できたこと・まだできていないこと—

# ドローン・AIを用いた河道内植生監視技術の開発

水環境研究グループ河川生態チーム 傳田 正利

## 1. はじめに

ドローンの有効性に注目が集まり、調査・研究に急速に普及している。従来の衛星・航空機・ラジヘリ等の高価な機材を必要とせず、高解像度のデジタルカメラの普及と相まって一定の知識・技能を持った者であれば低コストで高解像度の低空中写真をできようにした点は、大きなイノベーションである。また、ドローンによる空中写真の低コスト化は、高頻度での空中写真の撮影を可能にした（図-1）。SfM（Structure from Motion）は、ドローンで撮影された多量の空中写真から空中写真測量を行い、三次元空間情報の生成を可能にし、従来の高額な航空測量では得られなかつた三次元空間情報の高頻度な取得を可能としている。建設分野では、i-construction の起工測量に用いられる等、次世代の建設技術（イノベーション）への活用が期待される。



図-1 千曲川冠着地区における河道掘削を通じた礫河原再生事業の植生動態監視の試行

建設分野以外のイノベーションとしては、人工知能（AI :Artificial Interagency）への期待が高まっている。AIは、過去のデータを自律的に学習し、人間では適切な処理が難しい量のデータを処理し、人間の作業を代替えする可能性を持つ等、人口縮小に伴う労働力不足が懸念される産業での活用が期待されている。土木業界においても、ドローン、AIを活用した新しいイノベーションが期待されている。

河川分野にドローン・AIの適用を行う場合、河道内植生の監視技術への発展が期待される。現在、日本の河川では「樹林化」（行き過ぎた河道内樹林の繁茂）が大きな問題となっている。樹林の過剰な繁茂は、出水時の流れを阻害し洪水リスクを増大させ、砂礫河原に依存する河原植物に代表される植物の多様性を阻害する。これらの問題に対応するために河道掘削や樹林伐採を行う際には多額の費用を必要とし、河川管理費用の増大を招いている。治水・環境・コストの3つの面から、「樹林化」への適切な対応が求められる。

「樹林化」への対応を考える場合、「樹林化」が進行する前に管理行為を行うことが重要である。樹林が繁茂してからの樹林伐採を行うのではなく、適切な監視を行い、樹林化の進行の前に維持管理を行う必要がある。

河道内植生の監視にドローンとAIは大きな可能性を持っている。ドローンにより撮影される高精細の画像は肉眼を凌駕する面的な地被の画像情報をもたらす（図-1）。しかし、人間の目視では、高解像度の地被画像情報を十分に活かしきれない可能性が高い。地被画像情報の解析に量子化された大量の画素を処理できるAIを用いることができれば、ドローン情報を十分に活用した河道内植生監視技術に発展すると考えられる。本講演においては、土木研究所が着手する河道内植生監視技術の概要について発表し、今後の発展への可能性を議論する。

## 2. ドローンとAIを用いた河道内植生監視技術の概要

ドローンの利点として、（1）高解像度画像の取得と空間情報の生成、（2）高頻度でのデータ取得、

が挙げられる。

(1) に関しては、厳密に同じ時期の空間情報という点が重要である。ドローンを用いる前は、河川管理（定期横断測量、工事図面、植生図）等を用いて空間情報を生成していた。これらのデータの取得時期は異なるのが通常で、時期のズレが大きい場合、数年間時期がずれていることも多かった。しかし、ドローンと SfM は大きく現状を改善した。一時期の画像から SfM を用いて生成した DEM(Digital Elevation Model)、DSM (Digital Surface Model) 及び点群データは厳密に 1 時期といえる空間データを生成する。

ドローンと AI を用いた河道内植生監視技術の概要を図-2 に示す。まず、ドローンで撮影した空中写真を SfM を用いて解析し、空間情報（DEM、DSM 及び点群データ）を生成する。空間情報を解析空間上に再現し、河床変動計算・植生動態モデルを用いて将来の河道内植生を予測する。河床変動・植生動態は不確実性に左右されるため、誤差の蓄積状況から判断し、適宜、空間情報を更新し、新たなモデル計算を進めていくスキームである。この点に関しては、ドローンと AI を用いた河道内植生監視技術の持つ利点（2）の特性が大きな効果をもたらす

現在のスキームにおいては、空中写真から植生情報を生成する技術がなく、河川水辺の国政調査や花道掘削後の植生モニタリング時に作成される植生図を用いている。

空中写真から植生図を作成できれば、厳密に 1 時期といえる植生に関する空間情報を生成できる。現在は、空中写真から植生図を作成する段階に AI を用いた画像解析技術の適用・改良を行っている。以下、その内容を紹介する。

#### UAV・SfMを用いる利点：

同一の観測データから生成される空間情報。誤差伝搬の最小化、時間差異の考慮の必要性の少なさ。

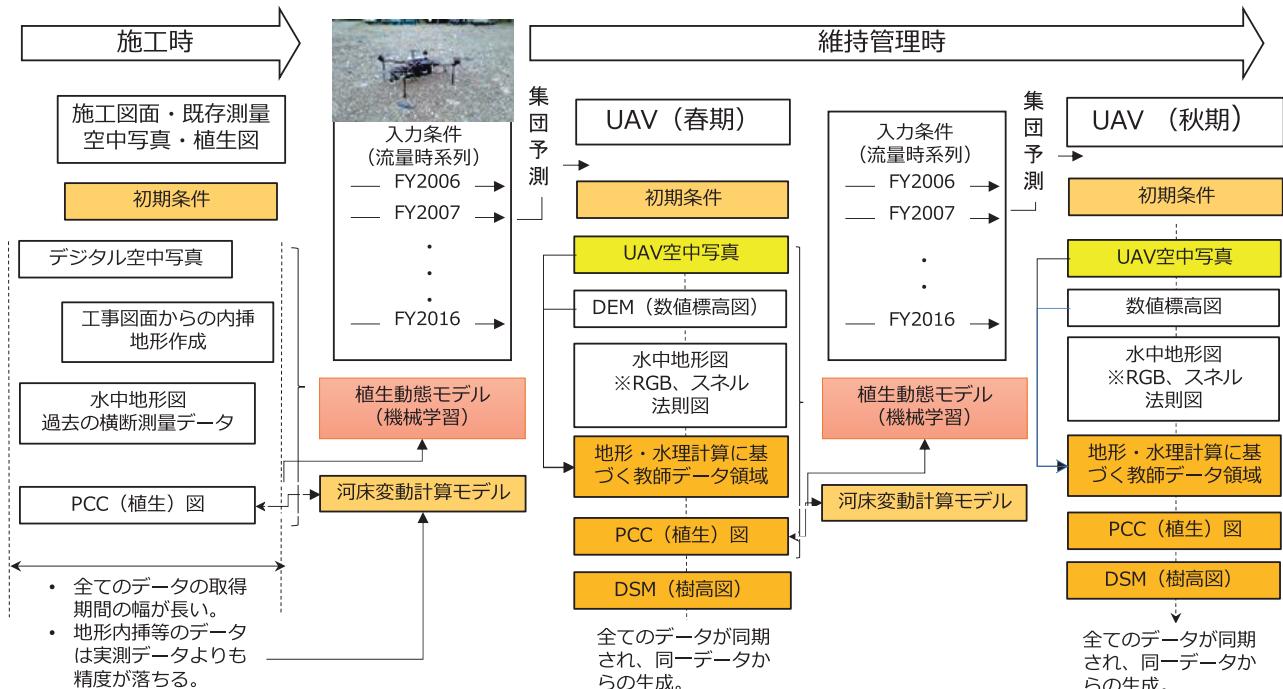


図-2 ドローンと AI を用いた河道内植生監視技術への概要

### 3. 空中写真を用いた植生図作成の試み

植生図は、植物群落境界の判読、現地調査による確認、植物群落境界の修正の過程を経て作成される（図-3）。この過程の中で、AI を用いて植物群落境界の判読を試みている。過去の植生図を検証すると、植物群落境界の判読は、植物を専門とする調査員間のバラつきが多い。高解像度の空中写真は、植

物の生育状況の微妙な変化、河床材料の材質・湿潤状態などを把握できるようになった。AIを用いて、植物の専門家達が妥当と思える植物群落境界の判読を可能になれば、植生図の均質化が可能となる。また、AIを開発できれば、植物を専門とする調査員の労力の軽減等の「生産性の向上」が期待できる。

ドローンと・AIを用いた河道内植生の監視技術においては、オブジェクトベース分類(OBC: Object Based Classification)の技術を採用している<sup>1)</sup>。OBCは、人間が対象物を認識する場合にContext情報(周辺情報)を合わせて認識し、対象物を認知することを模倣した分類方法であるDCNT(DCNT: Definiens Cognition Network Technology)に基づいている。空中写真構成する莫大な画素を個々に分析するのではなく、画素間の特性が比較的類似する区域を一連のオブジェクトとしてまとめ、個々のオブジェクトの境界領域を判読することを可能にする「教師なし分類」の一種である。

図-4にOBCに基づく群落境界の判読結果を示す。河床材料の変化、植生境界の変化等、画素の色調の変化を判読できている。

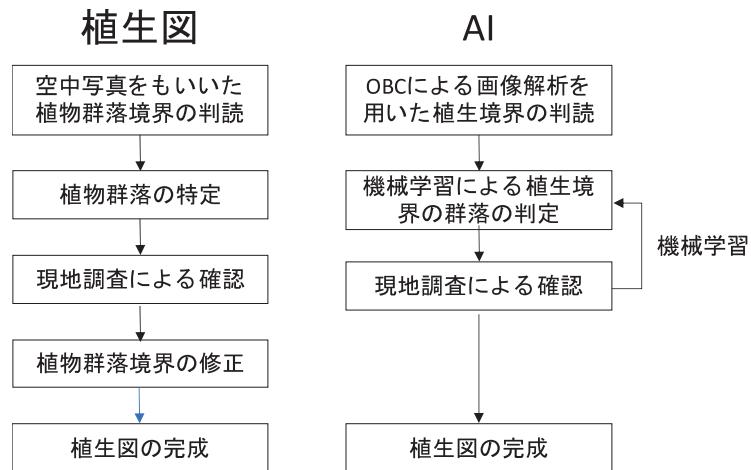


図-3 ドローンとAIを用いた河道内植生監視技術への概要

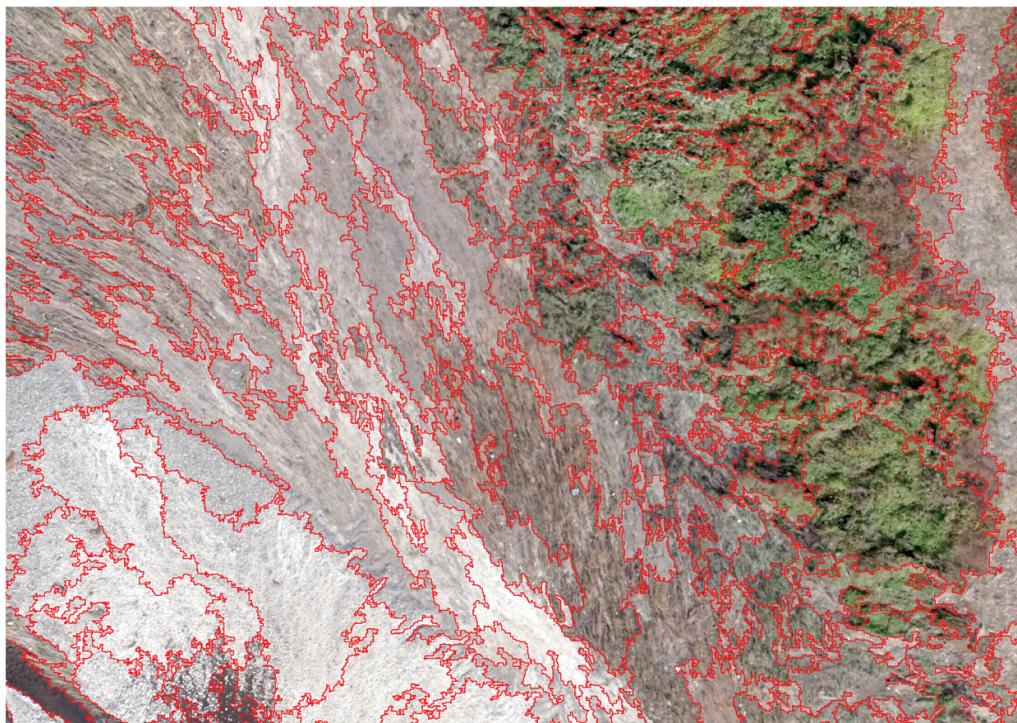
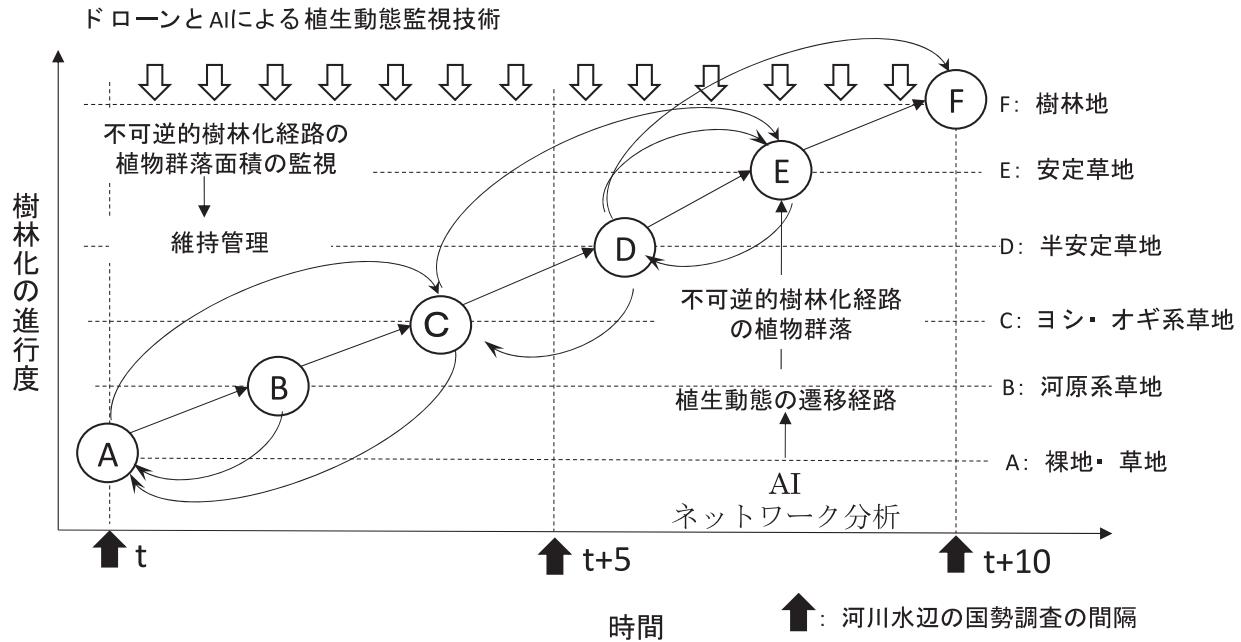


図-4 OBC用いた河道内植生の群落境界判別結果

#### 4. ドローンと AI を用いた河道内植生監視技術の開発への展望

現在、ドローンへの期待が高まり産業界を中心にドローンの開発・実用化が進んでいる。ドローンの機器開発は、民間事業により今後も積極的に進んでいくと考えられる。このイノベーションの中で、土木研究所果たすべき役割は、環境情報の AI 開発と考えている。



「樹林化」への対応を考える場合、「樹林化」が進行する前に管理行為を行うことが重要であることは2章において述べた。国土交通省に蓄積される河川管理データの中には、河川環境管理に関するデータが蓄積されている。例えば、「河川水辺の国政調査」の植生調査結果データには約25年間の植生動態が記録されている。この植生動態をAI（例えばネットワーク分析等）を用いて、長期的な群落変化の傾向（植物群落の遷移経路）を把握すれば、樹林化への不可逆的な進行をする前に確認できる植物群落等が特定できる（図-5内E：安定植生域）。また、樹林化が進行した区間としなかった区間の違いを河道管理データを関連付けてAI（例えば強化学習）を用いて分析すれば、樹林化が進行しやすい区間を特定できる。

特定した区間においては、現在、開発するドローンとAIを用いた河道内植生監視技術を用いて植生動態を監視し、樹林化への不可逆的進行が生じた場合には、河道内地形をより3次元のDEM・DSMで分析し、樹林化が進行しない河道内地形をデータを生成する。このデータをi-constructionの入力データとして河道管理（例えば河道掘削事業）に渡し、生産性が高い河道管理と樹林化への不可逆的な進行を予防する河道管理技術へ発展させていくことを目指している。

これらの取り組みを通じて、人口縮小に伴う技術者不足や事業費の削減等の「生産性向上」への社会的要請に対応するとともに、長期的な視点で治水・環境・コストの3つの要請を調和させた河道管理の取り組みに発展させていく予定である。

#### 【参考文献】

- 1) 村上拓彦・大西紀子・加治佐剛・溝上展也・吉田茂二郎: 林相区分を目的としたオブジェクトベース画像解析における最適なセグメンテーションの検討, 写真とリモートセンシング, Vol.49, No.3 pp. 159-165, 2010

# メンテナンスにおける地質・地盤リスクの捉え方、向き合い方

地質・地盤研究グループ長 小橋秀俊

## 1. はじめに

構造物や施設には必ず地上部と地中部とがある。したがって、地質・地盤リスクはあらゆる社会資本の整備計画、事業計画、施設や構造物の建設といった諸段階、新設の場面にも維持管理の場面について回る。土木研究所では平成28年度から第4期中長期計画が新たにスタートし、「戦略的な維持更新」という柱が掲げられている。本講演ではメンテナンスサイクル（維持管理計画、点検、診断、措置）に、地質・地盤リスクがどう関わり、老朽化という管理上のリスクのなかにどう組み込んで捉えたらしいのか、また、研究や維持管理業務に向き合えばよいのか考察してみた。

## 2. 地質・地盤リスクとは

地質・地盤リスクとして一つは、地すべり、土石流、落石、斜面崩壊、液状化などのいわゆる地盤災害がある。自然地盤のまま断層、崩壊地形、液状化層等として存在するタイプと、改変された地盤に潜伏しているタイプとがある。もう一つは工事など改変行為に付随するリスクで、初期不良の問題（計画、調査、設計、施工）、異常出水や崩落事故などの労働安全の問題、汚染土壌・廃棄物・杭ほか地中障害物との遭遇の問題などである。

## 3. 維持管理計画と地質・地盤リスク

### 3. 1 概要

構造物や施設の新設時には、計画段階において、まず脅威となるリスクを想定し、予備設計・詳細設計・施工と調査精度を上げながら、リスクの中身や措置を具体化する。このことは既設の維持管理の場合にも同様であり、管理上脅威と思うリスクを想定し、点検・診断・措置等の実施内容を具体化する。維持管理計画の段階で、地質・地盤リスクや老朽化による脅威を想定する際、以下で述べる個々の構造物や施設の特性、機能のネットワーク性に対する認識が重要と考える。

### 3. 2 個々の構造物や施設の機能の特性

大胆な分類かもしれないが、構造物や施設にはサービス提供型と防災保全型のものとがある。前者は交通インフラ（道路、鉄道、港湾、空港など）や生活関連供給インフラ（上下水道、ガス、電気、ダムなど）、後者は堤防、砂防施設、斜面対策工などの防災インフラである。

#### （1）サービス提供型

サービス提供型は、建設当初よりサービスによる作用や安全・安定供給を検討対象に造られており、その停止や途絶が主たるリスクとなる。この場合、地質・地盤リスクはサービス停止の原因としての外部リスクと捉えられる。両者の因果関係が想起しづらく、意識の希薄化から事故やトラブルに至る。日常トラブルとして顕在化し易いため、自覚や反省のチャンスは多い。

#### （2）防災保全型

防災保全型は豪雨や地震による災害の抑止抑制を目的として造られている。建設当初から地質・地盤リスクそのものが検討対象とされており、内部化されたリスクと捉えられる。リスクに対する意識の希薄化は少ないが、地盤災害の発生源や規模の特定に難しさがある。豪雨や地震の災害時のイベン

トに顕在化が限られているため、自覚や反省のチャンスが少ない。

### 3. 3 構造物群や施設群としてのネットワーク性<sup>1)</sup>

インフラには一連の構造物や施設がネットワークとして機能する側面がある。そのため、個々の構造物や施設がネットワーク全体にもたらす影響ないし脅威という視点に立って、重大リスクを想起しておかなければならぬ。個別の施設や構造物（橋梁、舗装、下水管路、ポンプ場など）の老朽化被害が、インフラ全体系（道路網、流域、管路網など）への影響と具体的に結びついているか、日頃から管理上重要な施設や構造物の認識を心掛けなければならない。地質・地盤リスクに関しても、広域的な地形地質情報－治水地形分類図、航空写真、液状化・浸水想定区域・土砂崩壊等のハザードマップなどにより、ネットワーク全体のなかでの地質地盤の脆弱性の意識が求められる。

## 4. 老朽化点検及び診断と地質・地盤リスク

### 4. 1 老朽化を決定づけている要因について

単純に古いかどうかではない「老朽化」の本質を再確認しておく必要がある。老朽化は以下の（1）～（4）のいずれかが決定づけていると考える。各要因のところで、地質・地盤リスクに関連していることについて触れてみたい。

#### （1）経過年数

経過年数は材料劣化（塩害、中性化、腐食、風化）、物理的変状（変位、変形、亀裂、ゆるみ、摩耗、侵食、流失、堆積、閉塞、凍上など）など、あらゆる老朽化のベースになっている要因である。地質地盤リスクに関して言えば、風化や浸食に弱い岩種や土質、集水地形、軟弱地盤など、経年変化（劣化）を起こしやすい形質で大きな要因となる。

#### （2）使用条件、稼働条件、建設当時からのそれらの変化

管理対象となる構造物や施設が同時期に集中的に建設されている場合も多い。経過年数での差別化が難しく、使用条件の厳しさや、供用後の使用動向に着目する必要がある。サービス提供型で言うと、大型車両の交通量が多い橋梁、汚濁負荷や満水期間の長い下水区間などが例として挙げられる。防災保全型で言うと、滑動性の高い斜面の安定工、増水頻度の高い区域の堤防や護岸など、厳しい自然作用に常に晒されているケース、供用後に遭遇した地震や洪水により変状が発生し拡大しているケース等が挙げられる。

#### （3）立地条件ないし周辺環境、建設当時からのその変化

老朽化現象の進行は、メカニズム的に水の作用の影響が大きい。地質・地盤リスクに関して言うと、表面水と地下水に関わる問題であろう。地上部では集水地形や低湿地、開発行為による表面流出の変化、新たな流出経路や滯水箇所の出現などである。地中部では地下水位の上昇、海域や感潮河川からの塩水の侵入等の地下水理条件が、漏水・塩害・中性化・腐食の促進要因となる。

#### （4）初期不良

建設当時の調査・設計・施工に関わる品質の問題である。地質・地盤リスクに関して言うと、以下のものが挙げられる。

- ①基礎地盤対策の問題：軟弱層の見落とし、改良不足、杭の支持層への着底不良など。
- ②造成盛土や埋め戻しの問題：不良土の使用、締め固め不足や過転圧、支持力不足など。
- ③斜面対策工の問題：流れ盤・不安定土層・風化層・湧水の認識不足による対策不良。
- ④排水対策の問題：排水系統どおり水が流れない、排水施設のオーバーフローなど。

## 4. 2 点検及び診断の効率化について

老朽化の点検及び診断では、管理対象全数をみる網羅性と、危ない対象物にたどりつく特定力とが求められる。効率化のポイントとして、一点目は点検や診断技術そのもののレベルアップ（スピードアップと精度向上の研究開発）、もう一点目は危ない対象物の未着手期間を短縮する工夫である。後者のポイントは短期的網羅が技術的に困難なケースや、ネットワーク全体の中での相対的弱点が問題となるケースで重要である。ここでは後者のポイントと地質・地盤リスクとの関わりに触れる。

### (1) サービス提供型の場合

使用負荷（大型車両の交通量、下水管の汚濁負荷や流量など）、運行・運用上のトラブルに関する情報活用が中心になる。現在の使用負荷の分布を知ることとともに、建設当初計画したとおりの分布状況かどうか、当時検討された施設や構造物の規格ないし規模に対して、過負荷がどこで発生しているか、過去と対比する時間軸の視点が必要である。建設時の整備計画や工事誌等は貴重な情報源である。地質・地盤リスクに関して言うと、以下の日常的に変状が出易い土工構造物や基礎地盤の構造的な弱点の分布情報と、使用負荷やトラブル情報を突合させる工夫である。

- ①軟弱地盤上の盛土分布、地盤改良区間の分布
- ②盛土部と切土部の分布域と境界線、構造物と盛土部の境界箇所の分布
- ③冠水したり、排水施設が閉塞したりオーバーフローする箇所の分布

### (2) 防災保全型の場合

防災保全型の場合は、健全に機能している対策工の機能低下が問題となる。とりわけ、過去の大災害をきっかけに対策され、その後の豪雨や地震で沈静化している構造物や施設に注視の必要がある。地質・地盤リスクが対策工の効果で抑え込まれているため、健全な状態レベル（余裕度）の可視化と、災害記憶の継承がポイントである。

- ①災害誌や復旧工事の記録：現在の対策構造物や施設の老朽化がもたらす地盤災害の想起  
対策当時に把握されていた地質・地盤リスクの再認識  
対策当時と現在との周辺環境の違いの把握（土地利用状況など）
- ②モニタリング技術：対策機能の経時変化の把握（背後斜面の風化状況、アンカー張力など）

以上のように、構造物の特性（サービス提供型、防災保全型）をふまえて、点検診断では目下の老朽化現象がいずれの促進要因によるものか、現象の深刻さ、機能の持続性や余裕を評価する必要がある。同一の老朽化現象であっても、決定要因によって老朽化のスピード感や切迫度は異なってくる。上記に示した背景情報の整理と使い方の工夫が必要な理由もまさにそこだと考える。

## 5. 措置と地質地盤リスク

### 5. 1 措置選択における地質地盤リスク

老朽化に対する措置は、大きくは以下の①～⑤の選択肢に分類でき、老朽化の決定要因に応じた選択肢を検討し具体的な措置を実施しなければならない。

- ①予防的補修による長寿命化（予防保全措置）
- ②事後保全、経過観察
- ③使用制限や使用負荷の軽減措置
- ④規模や規格の向上策、補強対策
- ⑤リニューアル（更新、再構築）

措置選択において、経過年数だけの問題であれば①と②の選択肢で十分だが、使用条件の問題があれば③を、立地条件や初期不良の問題が大きければ④と⑤の選択肢も検討対象とする必要がある。選択が不適切であれば再劣化を繰り返し、④と⑤の箇所が増えれば、地盤対策や土工事などが伴う大きな措置が必要となる。いずれにしても管理主体のメンテナンスサイクルが回らなくなるリスクとなる。

## 5. 2 対策工事に伴う地質地盤リスク

### (1) 既設構造物や施設の地中情報の喪失

既設構造物の設計や施工図書が喪失していることで、対策の選択肢が狭まつたり、設計や施工の再調査の手間が増える。例えば、既設の基礎構造物を生かした地上構造物の補強対策、基礎地盤対策の追加などが難しくなる。また、建設サイトの地表付近の地盤は、搬入土で嵩上げされたり、切り下げられたり、掘削後埋め戻されるなどの複雑な改変を受けている。このため、施工中の山留めの設置、重機やプラントの設置などの判断にも支障が出る。

### (2) 空間的に制約の大きな工事

近接構造物の存在、狭隘な施工空間、工事用道路・土の仮置きスペース・プラント用地が確保できないなど、施工計画上の難題が生じやすい。新設の大型工事が前提だった掘削工法、地盤改良工法、締固めや土質改良工法などの機動性の向上など、技術的にも新設とは異なる要素が多い。

### (3) 労働安全の問題を生じる工事

斜面対策工の補強更新や切り直しなどでの高所作業、基礎や地中構造物の補強更新における締切りや土留め工、地中埋設物の溝開削による埋め戻し、重機の転倒など、崩落・転落・出水など労働災害の危険を伴う作業がかかわる。

### (4) 汚染土壤や廃棄物（ないし地中障害物）の埋まった土地

地中を掘削した際に汚染土壤や廃棄物（ないし地中障害物）に遭遇するケースがある。また、自然由来の重金属含有土の問題も、山地と平地を問わず、切土やトンネルの掘削工事、都市再開発や地下工事、維持浚渫で遭遇しうる。建設当時なかった法規制により、掘削物の処理に行き詰ったり、また、掘削可能範囲や構造物の形式選定などの大きな制約条件にもなる<sup>2)</sup>。

### (5) 杭等の既設基礎の処理対応

杭等の基礎を有する地上構造物のリニューアルでは、既設杭の撤去か残置かの判断が必要となる。既設杭を撤去し周囲に新たな杭を打つ場合には、埋め戻しによる地盤強度低下や傾斜地においては不安定化の問題が生じる。残置し周辺に新たな杭を打つ場合にも、新たに打つ杭の傾斜や偏心、残置した杭が新設杭の地盤の水平抵抗に与える影響などの問題が生じる<sup>3)</sup>。このため、杭等の既設基礎の処理対応は、リニューアルされる地上部の施設や構造物の仕様を大きく左右するリスクとなる。

## 6. おわりに

以上、維持管理サイクルにおける地質・地盤リスクの関わり方について、サイクルが回らなくなる状況を考えて展開してみた。未だ断片的で持論に過ぎない部分をご容赦頂きたい。今後、地質・地盤リスクへの取組みの議論のきっかけになればと考える。

### 【参考文献】

- 1)地質リスク学会：地質リスク・エンジニア養成講座講義テキスト集, pp.96–101, 2015.6
- 2)小橋秀俊：建設発生土の利活用に関する取組と課題（投稿中），基礎工，2017.9
- 3)桑原文夫：最近の杭工法の特徴と施工の留意点, pp.1–3, 地盤工学会誌 Vol.64, No.5, 2016.6

# コンクリート分野の生産性向上

## —できたこと・まだできていないこと—

材料資源研究グループ グループ長 渡辺博志

### 1. はじめに

生産年齢人口が減少する中、持続的な成長を遂げるために各生産現場における生産性の向上が求められているところである。建設分野においては調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新までのあらゆる建設生産プロセスにおいて抜本的に生産性を向上させる i-Construction の施策が謳われて各種の取組みが進められている。

コンクリート分野は i-Construction に示されている 3 つのトップランナー施策の内の 1 つに挙げられており、「コンクリート工において全体最適の考え方を導入し、構造物の設計、発注、材料の調達、加工、組立等の一連の生産工程や、さらには維持管理を含めたプロセス全体の最適化を目指し、サプライチェーンの効率化、生産性向上を図る。」とされている。この目的を達成するため、コンクリート生産性向上協議会が国交省に設置され成果が生まれつつある。

ここでは、現時点で示されたコンクリート分野における生産性向上に資する成果について 2. に概要を示すとともに、今後に向けての課題について 3. に述べることとする。

### 2. コンクリート構造物の施工の生産性向上の方策

#### 2. 1 概要

現場打ちコンクリート構造物を建設するに当たって現場での生産性を向上する方策として大きく分類すると、鉄筋加工組み立てに関するものと、コンクリートの打設・養生に関するものとに大別できる。鉄筋加工組み立ての生産性向上に対しては、構造物の設計段階において、施工性に配慮した工夫が必要になるものもある。一方、コンクリートの打設に関しては、コンクリートの施工性に大きく関わるスランプの設定が重要となる。

ここでは、生産性向上協議会を通じて示された、機械式定着工法および機械式鉄筋継手工法などの鉄筋加工組み立てに関する対策と、コンクリートの打込みに関するスランプの設定について触ることとする。

#### 2. 2 機械式定着工法および機械式鉄筋継手工法による鉄筋加工組み立ての生産性向上

鉄筋コンクリート構造物においては、図-1 に示す通り、多くの鉄筋が交錯して配置され、この配筋作業が生産性を阻害する要因となっている。ここで、鉄筋の端部はコンクリートに確実に定着できるよう、半円形・鋭角・直角などの標準フックを、設けることが原則である。ここで、端部フックの曲げ加工寸法は構造細目として、昭和 4 年に刊行された土木学会コンクリート標準示方書（初版）ですでに規定され、現在に至っている。

しかし、鉄筋両端に曲げ加工フックが存在すると、これが邪魔となり鉄筋組立の効率を低下させる場合が多い。こうした問題を解消するため、鉄筋端部に定着板を取付けてコンクリートと鉄筋の一体化を図る機械式鉄筋定着工法が考案されている。この工法が効果的である例を図-2 に示す。図-2 の左に従来の両端半円形フックを用いた場合を示す。図において上下方向に配筋されるせん断補強鉄

筋は本来1本の鉄筋として配置したいところである。しかし、両端部に半円形フックが存在する場合、半円形フック部分が障害となり鉄筋配置が不可能となる。このため、図に示すように、2本の分割鉄筋とし、上縁側と下縁側で主鉄筋や配力鉄筋にフックを掛けた後、中央部で重ね継手を用いて2本の鉄筋を接合することとなる。これにより、曲げ端部加工の数量が増加するとともに、重ね継手のラップ部分の鉄筋量も余分に必要となる。これに対して、図-2の右は、赤で示すせん断補強鉄筋に、下端を曲げフックではなく定着板とした機械式鉄筋定着工法を活用した場合を表している。定着板であれば、容易に主鉄筋に端部をかけることができ、1本の鉄筋でも配置可能となる。これにより、曲げ加工の工数を削減し作業効率が向上するとともに、重ね継手部分に余分に必要となる鉄筋も不要となる。

ただし、機械式鉄筋定着工法の適用にあたっては、適用部位の力学的特性をふまえ、適切な工法の選択が重要となる。すなわち、一般的なせん断補強鉄筋に適用する場合と、柱基部のような塑性ヒンジ区間での中間帶鉄筋に適用する場合とでは、定着体に求められる性能も異なってくる。後者の場合、主鉄筋の座屈変形を拘束する機能が求められる。このように適用部位の鉄筋に求められる性能を考慮して機械式鉄筋定着工法を適用する標準的な手法を示したガイドライン<sup>1)</sup>が取りまとめられた。今後、こうしたガイドラインが活用され、機械式鉄筋定着工法の普及に寄与することが期待される。

一方、鉄筋の継手も配筋作業において生産性を左右する要因となる。鉄筋継手工法には、重ね継手、ガス圧接継手、機械式継手、溶接継手と様々なものがあり、それぞれ特徴が異なっている。ここで、機械式継手工法は、これを適切に用いると施工効率の向上につなげることができるが、その工法の種類は多く、鉄筋の引張力を伝達する機構も異なっている。鉄筋継手の技術指針としては、土木学会より鉄筋継手指針が1982年に発刊され、その後技術の進歩に応じ、2007年には鉄筋定着・継手指針として取りまとめられるとともに、日本鉄筋継手協会から鉄筋継手工事標準仕様書機-械式継手工事(2009年)-が示されている。鉄筋継手の採用にあたっては、これらの指針を参考としつつ、各種機械式継手工法の特性を十分に熟知し、適用部位に求められている性能を満足できることを確認する必要がある。こうした背景を踏まえ、機械式継手が適切に使用され、建設工事における生産性向上に資することを目的として、技術的な留意事項を取りまとめたガイドラインが取りまとめられた<sup>2)</sup>。

本ガイドラインにおいて、特に注意が払われた点としては、機械式継手工法の性能の客観性、継手工法の使用部位、全数継手の取り扱いの3点があげられる。機械式継手工法の性能の客観性に関しては、鉄筋定着・継手指針に示された評価方法に基づいた性能試験結果が第三者機関などにより確認されていることが重要となる。また、機械式継手工法の適用部位については、機械式鉄筋定着工法と同様に、設計上塑性ヒンジを想定する部位では、降伏点を超える引張応力が繰り返し作用することとな



図-1 鉄筋コンクリート橋脚配筋状況の例

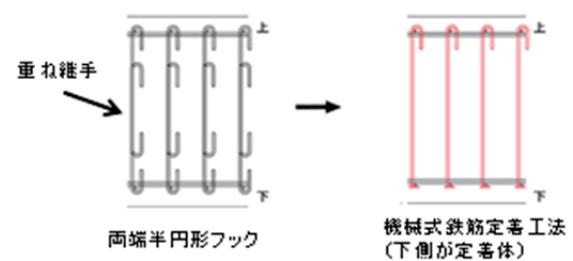


図-2 せん断補強鉄筋に機械式鉄筋定着工法を用いた例<sup>1)</sup>

り、継手部分の残留変位の発生が構造物のエネルギー吸収能力に影響を与えることとなる。このため、塑性ヒンジ区間における機械式継手工法の採用にあたっては、継手工法の性能を十分吟味して判断することとしている。継手位置が同一断面に集中する全数継手については、スリーブ寸法によるあきとコンクリート充填性、継手検査による信頼性、ひび割れ幅への影響などを検討項目として挙げている。

## 2. 3 施工条件に適したコンクリートのスランプ設定

鉄筋コンクリート構造物において、配筋密度が高まつくると、コンクリートのスランプを8cmと設定して施工することが困難となる。配筋状況や締固め時の作業員と締固め位置の距離などに応じてスランプを8cmよりも大きく設定し流動性を高めたコンクリートを用いることが施工効率の向上に資することになる。ところが、これまで使用するコンクリートのスランプは慣用的に8cmと設定されることが多く、スランプを大きく設定した柔らかいコンクリートは、品質上の懸念から、その採用に対して消極的になりがちである。

コンクリートの単位水量増加により、スランプを大きくすると、コンクリートの品質の低下につながる。たとえば、単位水量の増加によりコンクリートの乾燥収縮ひずみが増加しひび割れ発生の原因になるとともに、耐久性や強度の低下の要因となる可能性がある。

しかし、近年多くの種類の化学混和剤が開発され、これらを適切に使用することにより、単位水量を増加させずにスランプの調節が可能となっている。また、現着生コンクリートの単位水量試験が普及し、打設前の試験により過大な単位水量で配合されたコンクリートが使用されることを防止できるようになった。また、構造物の施工完了時点で、非破壊あるいは微破壊試験による構造体コンクリートの品質検査が導入されている。こうした化学混和剤の開発や現着生コンクリートの品質検査体系の確立、構造体コンクリートの品質確認の導入により、スランプの増加による硬化コンクリートの品質への弊害は発生しにくいと考えられる。

ただし、スランプを大きくしたコンクリートを用いた場合に想定される問題として、施工時における粗骨材や練混ぜ水の分離による悪影響が発生することも考えられる。フレッシュコンクリートの粘性を適切に確保し、材料分離を防ぐことが重要となる。図-3は材料分離の状況を知るため、スランプ試験を実施した直後のコンクリートの様子を示したものである。左は一般的なスランプ8cm程度のコンクリート、中はスランプ19cmで材料分離が認められないもの、右はやはりスランプ18.5cmであるが顕著な材料分離を生じているものである。右の材料分離が顕著なものは、粗骨材が偏在しているとともに、練板に広がったコンクリートの縁の部分にペースト分が先流れしている状況がうかがえる。こうした顕著な材料分離が発生した理由としては、コンクリート中に含まれるセメント等の微粒分が不足し粘性が不十分となっていることがあげられる。従って、コンクリートのスランプを大きく設定



図-3 スランプの比較（左：スランプ7cm、中：スランプ19cm、右：スランプ18.5cm）

し流動性を高めた場合は、スランプ試験を実施した際に、スランプ値の測定だけではなく、フレッシュコンクリートのくずれ状況を注意深く観察し、材料分離の兆候が認められないことを確認しておくことが重要となる。このような、くずれ状況の観察はコンクリートの材料分離抵抗性を判定するうえで有効であるが、主観的であり定量的な判断が難しいことも想定できる。こうした点を踏まえ、比較的短時間で実施可能な簡易ブリーディング試験<sup>3)</sup>を提案している。

図-4は簡易ブリーディング試験の概要

を示すものである。底面に0.3mm目のふるいを設置した容器に、試料となるフレッシュコンクリートを詰め上面に質量5kgの重錘を乗せ、底面から排出される水分を測定する簡単なものである。試験結果は、排出された水の容積( $\text{cm}^3$ )を、容器底面の断面積( $\text{cm}^2$ )で除した数値( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ )を簡易ブリーディング量と定義し判定指標として用いる。約30分の所要時間でコンクリート中の水分の分離抵抗性を評価することができ、 $0.30\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であれば、十分な材料分離抵抗性を有することを明らかにしている<sup>4)</sup>。スランプの崩れ具合の観察あるいは簡易ブリーディング試験を活用することにより、スランプが大きくても材料分離せず、均質で優れた施工性も有するコンクリートを実現することが可能となる。

### 3. まとめと今後に向けた課題

これ以外にも、プレキャストコンクリート製品の活用なども生産性向上に資する技術として期待される。プレキャストコンクリート製品の活用では、例えばプレキャスト製品同士の接合方法やプレキャスト製品と現場打ちコンクリートの接合方法について、性能評価手法の整備と要求水準の明確化が必要となろう。こうした性能評価手法が整備されることにより、新技術の適切な活用の道が開かれるものと考えられる。ここに紹介した対策は、いずれも従来からの仕様的な規定にとらわれることなく、完成後の構造物の性能を確保したうえで、生産性を向上させるものである。ともすれば、硬直的な仕様規定から逸脱することに躊躇もあるだろう。しかし、過去の実績のみに頼ることなく、柔軟な発想をもって、品質を確保しつつ生産性を向上させる手法を探り、それを実現させていくことが何より重要であると考えられる。なお、ここに紹介した成果は（一・社）日本建設業連合会の委員会において検討審議されたものである。紙面を借りて、関係各位に謝意を表するものである。

### 参考文献

- 1) 機械式定着工法技術検討委員会：機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン、国土交通省 HP、<http://www.mlit.go.jp/common/001184141.pdf>、平成28年7月。
- 2) 機械式鉄筋継手工法技術検討委員会：現場打ちコンクリート構造物に適用する機械式鉄筋継手工法ガイドライン、国土交通省 HP、<http://www.mlit.go.jp/common/001186458.pdf>、平成29年3月。
- 3) 流動性を高めたコンクリートの活用検討委員会：流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン、国土交通省 HP、<http://www.mlit.go.jp/common/001191821.pdf>。平成29年3月

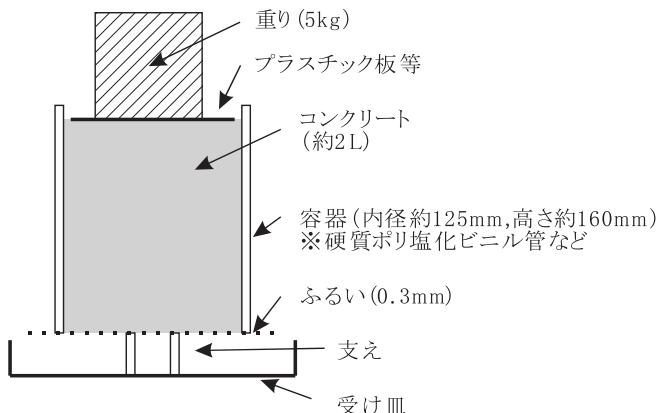


図-4 簡易ブリーディング試験<sup>3)</sup>

[ 巨大化、多様化する災害に対する防災・減災のための技術開発 ]

2017年九州北部豪雨等における土砂災害調査及び  
大規模斜面崩壊等に関する監視技術の動向

確実な避難を支援する洪水予測技術

平成28年8月北海道豪雨災害について  
～主に堤防決壊と流路変動に焦点を当てて～

# 2017年九州北部豪雨等における土砂災害調査及び大規模斜面崩壊等に関する監視技術の動向

土砂管理研究グループ 水野 正樹

## 1. はじめに

近年は、2014年8月広島災害や2017年7月九州北部豪雨災害等のような激甚な豪雨、2014年御嶽山噴火等の火山噴火、2016年熊本地震等の大規模地震、急激な降雪等、突発的な自然現象が頻発している。

これに対応して土砂管理研究グループでは、大規模な土砂災害発生時の減災対策に重点をおいた研究開発を実施するとともに、大規模な土砂災害が発生した場合、現地調査や国・地方自治体への災害技術支援を行っている。このうち土砂災害発生時の現地調査や災害技術支援として、2017年7月九州北部豪雨災害等の事例を紹介する。研究開発については、特に大規模斜面崩壊等の土砂災害に対して、衛星等を活用して広範囲に監視するための技術開発や、現地の状況を速やかに収集し初期対応をより迅速に実施するための技術開発を進めている。ここでは、広域エリアの斜面変動状況を捉える技術として、衛星差分干渉SAR、LP計測データ差分解析技術、また、大規模崩壊等の早期検知技術として、地震計・振動計データ活用技術、監視カメラ画像解析技術、さらに、現地状況の早期把握のためのSfM解析技術等の監視技術について、これまでの土砂管理研究グループの取組みと今後の動向を紹介する。

## 2. 2017年九州北部豪雨等における土砂災害調査と技術支援

### 2. 1 2017年九州北部豪雨の流木調査

2017年7月5日から6日かけて、福岡県朝倉市や大分県日田市付近を中心に線状降水帯が発生し<sup>1)</sup>、気象庁の朝倉観測所では2日間で586mmの降水量を記録した。この豪雨による多数の崩壊で多量の土砂と流木が流出し、激甚な被害をもたらした。筑後川の中流域右岸側の渓流から約21万m<sup>3</sup>の流木が発生したと報告されている<sup>2)</sup>。土砂管理研究グループは、流木の発生が特に顕著な朝倉市の筑後川右岸側の渓流を対象に、流木の発生域や流域内に残存する堆積箇所を明らかにするため、空中写真判読と現地調査を行った。7月に現地調査を行った妙見川と奈良ヶ谷川では、表層崩壊が広い範囲で多発して、流木が流域内のほとんどの支渓流で発生しており、このことが多量の流木流出となった要因と推察する。流木の堆積は、主に①崩壊斜面の下部、②支渓流と渓流の合流点付近（写真-1）、③合流点付近に堆積した支渓流からの流出土砂の渓流側上流部、④流路屈曲部の外湾部、で認められた。妙見川の須川第一砂防堰堤では、写真-2のように堰堤の堆砂域に多量の流木が確認され、砂防堰堤の流木捕捉効果が認められた。



写真-1 溪流内の流木の堆積状況(写真是妙見川の支渓流の谷出口付近)



写真-2 須川第一砂防堰堤における流木の捕捉状況(妙見川)

### 2. 2 2017年九州北部豪雨の日田市小野地区地すべりにおける現地調査と技術支援

筑後川水系支流の小野川右岸に位置する斜面（大分県日田市小野地区の集落の対岸）において、斜面長約300m、幅約200m、標高差約200mの大規模な斜面崩壊（写真-3）が発生したことから、大分県等の要請により現地調査等を実施した。崩壊地は上方斜面と下方斜面の2つの範囲に区分され、上方斜面は地すべりによる変動、下方斜面は表層崩壊による変動と考えられる。崩壊した土砂により小野川

の河道が閉塞され、閉塞箇所の上流では湛水及びそれに伴う家屋浸水が生じていた（写真－4）。崩壊地より上部の背後斜面では、複数の段差亀裂が確認され、今後、崩壊が背後斜面に波及する可能性を有すると判断した。また、今回発生した段差亀裂のさらに奥には古い滑落崖も確認され、過去に斜面変動が発生していたものと考えられる。上方斜面の崩壊地は、緩斜面（テラス状）となつておらず、緩斜面先端の遷急線付近に段差地形、斜面内に陥没帯が確認され、不安定土塊が残存していると判断した。急崖を呈する下方斜面については、部分的に露岩しているほか、一部植生が残存していた。市長をはじめ県・市の関係者に調査結果を報告するとともに、警戒避難のあり方等について助言した。

## 2. 3 豊後大野市綿田地区地すべりにおける現地調査と技術支援

2017年5月16日に、一級水系大野川支川平井川左岸に位置する大分県豊後大野市朝地町綿田地区において宅地内の地割れ発生に関する通報があり、その後、近隣地で相次いで多数の亀裂が発見された。亀裂群は幅約250m、長さ約400mの弧状に分布し、斜面末端部においては、道路・橋梁・護岸に押し出しと思われる圧縮変状が点在した。このため、この地割れ現象は、地すべり活動が発生したために生じた地表変状であると判断した。綿田地区は、平均勾配約20度の丘陵地で棚田と家屋が点在する。周辺は分離小丘を抱える地すべり地形を呈しており、古くから地すべり活動が繰り返し発生する履歴を有していると推測できる。現地調査で、斜面上方の段差を伴う亀裂の拡大（写真－5）、河川護岸や砂防堰堤の損傷、圧縮によると思われる変状等を確認したことから、今後の降雨等により、亀裂の拡大や地すべり土塊による河道閉塞等の一連の災害の進行が危惧された。そのため、市長をはじめ、県・市の関係者に対して調査結果を報告するとともに、応急対策としての地下水排除工の実施、河道閉塞対策の検討に向けて必要な調査・観測項目等について助言した。（写真－6）

## 3. 大規模斜面崩壊等に関する監視技術の動向

大規模斜面崩壊等に関する監視技術について、これまでの土砂管理研究グループの主な取組みと動向について報告する<sup>3)</sup>。

### 3. 1 衛星差分干渉 SAR を活用した深層崩壊の予兆となる変位の把握手法

深層崩壊前に「崩壊する個別斜面の位置」と崩壊規模を把握できれば、豪雨や地震時の崩壊による被害を減少させる事ができる。そこで、衛星Lバンド差分干渉SAR（以下、DInSAR）、GNSS測量、航空レーザ測量を組み合わせて「深層崩壊の予兆となる微小な変位を把握する手法」を検討している。対象箇所は、2時期の差分解析のALOS DInSAR画像で、地すべりによる衛星と地面との距離変化を示す変動縞の候補画像が抽出された<sup>4)</sup>長野県稻子岳である。

ALOS DInSAR画像を基に選点して、GNSS測量を実施した結果、図－1に示すとおり稻子岳山体の



写真－3 崩壊地全景



写真－4 河道閉塞箇所上流の湛水状況



写真－5 綿田地区地すべり亀裂の状況



写真－6 豊後大野市長への調査結果報告

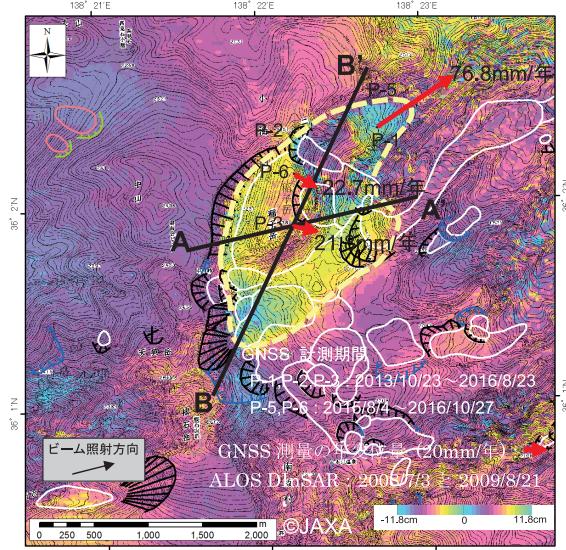


図-1 ALOS DInSAR 画像から推定した  
稻子岳山体の変位エリア（点線）と  
GNSS 測量による水平方向の変位

3測点で有意な地すべり変位が確認できた。そこでまず、稻子岳全体の変位土砂量を推定するため、図-1に示す AA'断面の位置でせん断強度低減法と震度法<sup>5)</sup>の解析を実施して、最大せん断ひずみ速度センターを図-2のとおり算出した。このセンターにおける最大せん断ひずみ速度の高い層（断面方向）と DInSAR 画像の変動縞（変位平面）から、稻子岳のすべり面の位置と形状を図-2とおり推定し、全体が地すべり変位している場合の土塊量の推定値を約 2 億m<sup>3</sup>と算定した。次に、特に安定性が低く危険な斜面を特定するために、航空レーザ測量データを用いた地形図（以下、LP 地形図）により稻子岳の微地形を確認するとともに、L バンド ALOS-2 DInSAR 画像により地すべり変位の平面分布を判読した。その結果、図-3 に示す「沈下」、「東方へ変位」、「押し出し」領域と推定できる変位分布が把握できた。これらの結果から安定性が特に低い斜面を次のとおり 2か所特定した。76.8mm/年の地表変位を計測した測点 P-1 の北東側にある「押し出し」領域は、DInSAR 画像から、点線で囲まれた変位領域内で最も変位速度が速く、安定性が特に低い斜面と考えられる。測点 P-3 付近の山体には、LP 地形図から複数の亀裂が確認でき、その東側は、ALOS-2 DInSAR 画像で変位方向が異なっていたことから「二次すべり」を形成していると判断した。この「二次すべり」も、斜面安定性が特に低く崩壊しやすい斜面と考えられる。

### 3. 2 航空レーザ測量データを用いた標高差分解析による斜面変動の把握

変動斜面の安全性は、非変動斜面に比べ、相対的に低いため、変動斜面が地震動を受けると、さらに斜面の不安定化が促進される可能性が考えられる。このため、地震時に不安定化する斜面を予測する上で、地震発生前から変動が進行している斜面を把握することは重要である。近年、国内では、航空レーザ測量が積極的に実施されるようになり、同一地域における複数時期の航空レーザ測量データ（以下、LP データ）の蓄積も進みつつあり、複数時期の LP データを活用して経時的な斜面の変化を把握することで、広域斜面を対象に、効率的に変動斜面を抽出できる可能性が高まっている。

この研究においては、斜面変動の発生を 2 時期の LP データの差分解析により把握する手法を検討した。その結果、斜面変動の発生を面的に把握できた事例（図-4（左））がある一方、計測データが少ない場合やフィルタリング処理による過度のデータ除去により、実際には斜面変動の発生していない箇所を見かけ上標高変化した箇所として解析する事例（図-4（右））が明らかになった。このため、標

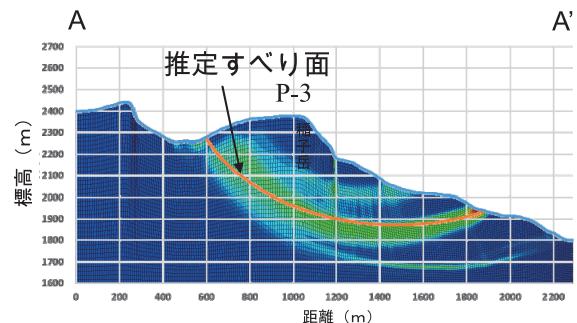


図-2 震度法による AA'断面における最大せん断ひずみ速度センターと推定すべり面

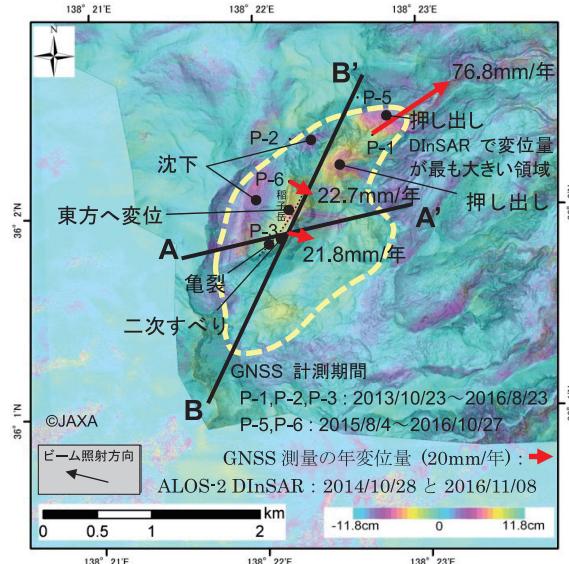


図-3 ALOS-2 DInSAR 画像と LP 地形図から推定した稻子岳山体の変位分布

※LP 地形図：国土交通省松本砂防事務所提供

高差分解析の精度向上に向けて、2 時期の LP データによる標高差分解析の誤差発生要因やその影響度についての検討を進めている。

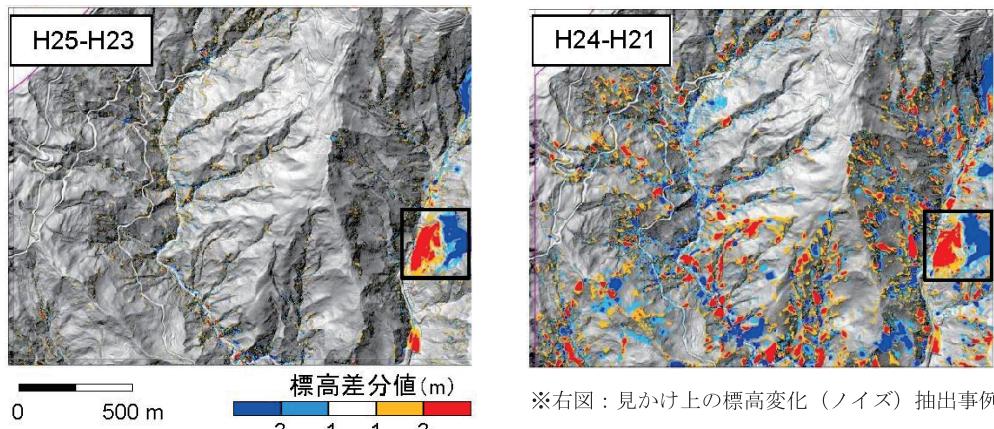


図-4 LPデータによる差分解析結果の事例（安倍川流域）

※黒実線枠（左右図）：有意な標高変化

### 3. 3 地震計・振動計による土砂移動の検出

災害時の警戒避難や応急復旧対策等を実施する上で、土砂災害が発生したエリアやそのタイミングを把握することは重要である。そのために、災害発生後にヘリコプター等空からの調査により、土砂災害の発生した範囲と発生箇所を調査しているが、気象条件等によって迅速な調査が困難な場合がある。一方、崩壊や土石流から生じる振動を、地震計で検出し、振動の震源を求めることで、土砂移動の発生箇所と時間を推定する手法（図-5）が提案された<sup>6)</sup>。また、振動波形から土砂移動の規模も推定できることが明らかになっている<sup>7)</sup>。これらの成果等を踏まえ、土砂管理研究グループは、大規模な土砂移動現象の発生を検知する振動センサーの設置が推進できるように、設置にあたっての基本的な原理や運用方法等をマニュアル<sup>8)</sup>としてまとめた。

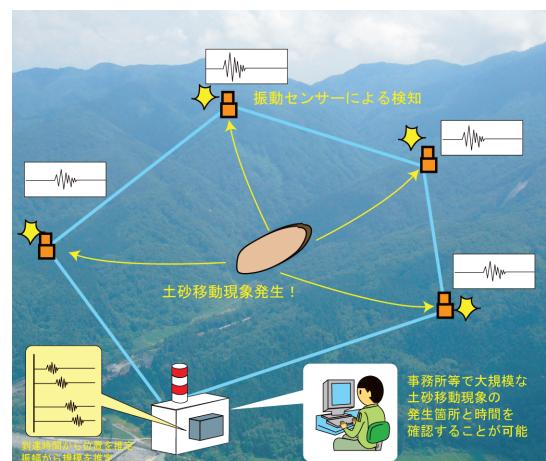


図-5 大規模な土砂移動現象の発生を検知する振動センサーの概念図

### 3. 4 RGB 画像解析による土石流の監視

全国の直轄砂防事務所では CCTV カメラを砂防堰堤等に多数設置しており、この画像を土石流監視のために活用できれば、警戒避難体制の向上に寄与できる。砂防分野ではこれまで、CCTV カメラの画像から流速や流量といった数値を求め、観測を行うための研究がなされてきたが、山地河川の急な流況変化や悪天候時等への対応が課題となっている。この研究では、土石流の監視を目的として、土砂移動に



写真-7 黒岳沢川の CCTV 画像

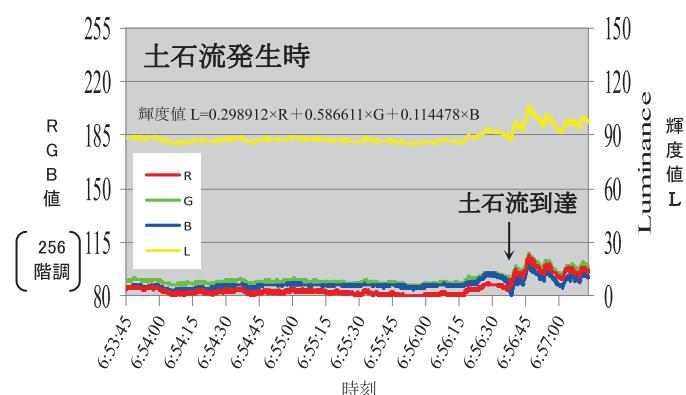


図-6 RGB の時系列変化

伴う濁りの変化を CCTV カメラで検知する技術を開発中である。

2016 年 8 月 23 日に北海道石狩川水系黒岳沢川で発生した土石流の CCTV 画像の解析を行い、土砂移動や土石流に伴う濁りの変化を画素情報から検知することを試みた<sup>9)</sup>。ここで画素情報とは画像が持つ基礎情報のことであり、R（赤）・G（緑）・B（青）の光の三原色を用いた値を指す。通常、土石流が発生した場合は、溪流水中の土砂濃度が急激に高まり、茶色に近い色で濁ることが一般的に考えられる。そこで、写真-7 の土石流発生時の画像により、画素情報の RGB を用いた解析を行った。図-6 の土石流到達前の RGB 値は、ほぼ一定値を示す平常時程ではないが、時系列での変化が小さい。一方で、土石流到達時は R の値が相対的に上昇するとともに RGB 値が時系列で変動する。このことから、土砂移動や土石流に伴う濁りの変化を RGB の画素情報から検知できることが分かった。今後は画素情報と濁度実測値との関係を明らかにしていく予定である。

### 3. 5 SfM 解析による天然ダム形状の計測

大規模斜面崩壊が発生し天然ダムが形成された場合、決壊を原因とする土石流により被害が想定される区域及び時期を明らかにする必要があり、その計算に必要な、天然ダムの高さ等の形状と位置を迅速に把握する必要がある。

現在、形成直後の天然ダム形状の計測手法として、ヘリコプターからの長距離レーザ距離計による計測を用いている。この手法は、計測後すぐに結果を使用できる利点がある一方で、上空から目視で堆積土砂の高低を判断して計測する越流開始点を決めるこ、手振れの影響を受ける中で計測を行うこと等から、精度や実施において課題がある。そこで、土砂管理研究グループでは、簡便かつ三次元的に形状を計測する手法として、複数の写真から三次元的形状を形成する技術である SfM (Structure from Motion)を活用した計測手法を試みた。その結果、図-7 に示すとおり、ヘリコプターから撮影した写真から天然ダムの形状を簡易に十分な精度で得ることができた。今後は、天然ダム形成直後の新たな計測手法として活用することを考えている。

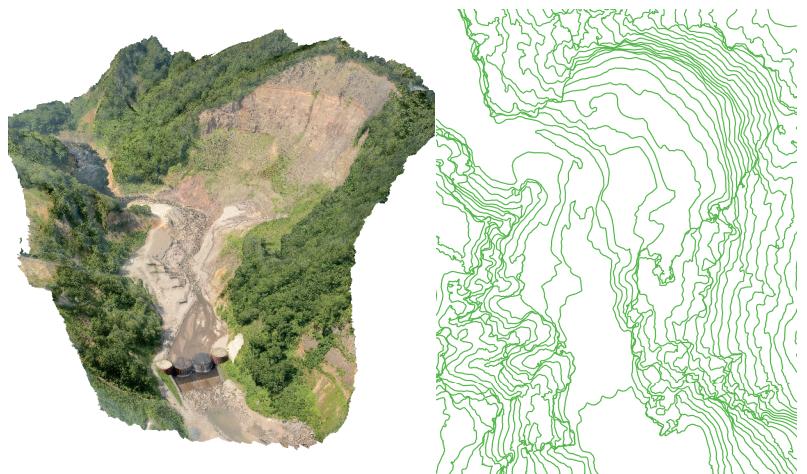


図-7 SfM 解析を活用した天然ダム（栗原市湯浜）の計測事例<sup>10)</sup>

### 3. 6 土石流の水理量評価

土石流の水理量を精度よく計測することは、氾濫範囲を予測するための数値シミュレーションの精度向上や、土石流の対策で設置する砂防堰堤の設計方法を策定する上で重要である。

土石流の流速は一般にマニング式を適用して推定される。式中のマニングの粗度係数は、土石流の流速を推定するために重要な変数で、土石流に含まれる土砂の容積濃度や密度、粒径分布といった条件によって変わると考えられている。そこで、土砂管理研究グループでは、火山灰の降灰後の土石流が頻発する鹿児島県桜島有村川で 2015 年 12 月 10 日と 2016 年 6 月 19 日に観測された土石流について、粗度係数の時系列変化に注目した解析を行った。

入力データは、有村川 3 号砂防堰堤の水通し上

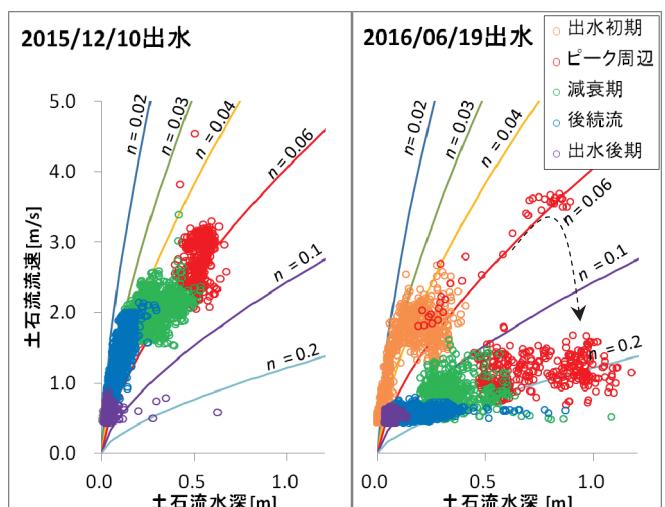


図-8 観測値とマニング式（実線）の比較

部に設置した走査型レーザ距離計である測域センサーで計測した、土石流の縦断流下断面形状と水深のデータを用いた。土石流流速は、流下断面形状データをもとに水通しから基準面までの流脈飛距離と落下時間を半理論式に代入して算出した<sup>11)</sup>。計測と算出によって得られた土石流水深と土石流流速について、清水を想定したマニング式

$$U = R^{2/3}(\sin \theta)^{1/2}/n$$

の理論曲線と比較した(図-8)。ここで、 $U$ : 平均流速(m/s)、 $R$ : 径深(m)、 $\sin \theta$ : 動水勾配、 $n$ : 粗度係数。その結果、出水初期は粗度係数( $n$ ) 0.03 の理論曲線に乗っているが、水深が増えてピーク周辺になると 0.06 を超える粗度係数の理論曲線へシフトし、その後の後続流では粗度係数が低下する傾向を確認した。このような傾向は既往の報告<sup>12)</sup>と整合している。今後も他分野で開発された技術を活用して計測を試みていく。

#### 4. おわりに

これまでの山地渓流における流木処理計画は、主に土石流とともに急勾配の渓流から流出した流木を調査した結果を基に策定した技術基準類により計画検討されてきたが、今回の九州北部豪雨では、緩やかになった渓床勾配の区間においても流木により被害が拡大した。そこで今後、渓床勾配が緩急の両区間において山地渓流の流木処理計画の立案に資するため、流木の発生、流出、堆積実態について調査を進めていく予定である。

また、LP データの差分解析、振動センサー、RGB 画像解析、SfM 解析等の大規模斜面崩壊等に対する監視技術については、信頼性や迅速性を高めるため、検知精度を向上させる研究を進めている。これらの監視技術を活用することで、土砂災害の緊急対応や災害予防をより円滑に実施できるようにしていきたい。

#### 【参考文献】

- 1) 気象研究所：平成 29 年 7 月 5・6 日の福岡県・大分県での大雨の発生要因について（平成 29 年 7 月 14 日）
- 2) 九州地方整備局：平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う流木発生量（速報値）について(平成 29 年 7 月 28 日)、[http://www.qsr.mlit.go.jp/site\\_files/file/bousai\\_kasen17072801%281%29.pdf](http://www.qsr.mlit.go.jp/site_files/file/bousai_kasen17072801%281%29.pdf)
- 3) 西井洋史：二次災害防止のための監視・計測技術の展望、土木技術資料、Vol.59、pp.6-7、2017.6
- 4) 水野正樹、王純祥、権田豊、西川大亮、平田育士：衛星干渉 SAR と GPS 測量による長野県稻子岳山体移動エリアの抽出事例、平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集、pp.B-124-125、2016.5
- 5) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2012.5
- 6) 大角恒雄、浅原裕、下川悦郎：2004 年 8 月 10 日奈良県大塔村斜面崩壊時の Hi-net データ解析—斜面崩壊検知への応用—、自然災害科学、Vol.24、No.3、pp.267-277、2005
- 7) Yamada, M., Y. Matsushi, M. Chigira, and J. Mori : Seismic recordings of the Landslides caused by Typhoon Talas, Geophysical Research Letters, Vol.39, L13301, doi:10.1029/2012GL052174, 2012
- 8) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム：大規模土砂移動検知システムにおけるセンサー設置マニュアル(案)、土木研究所資料第 4229 号、2012.6
- 9) 五十嵐和秀、水谷佑、高原晃宙、木下篤彦、水野秀明：山地河川の濁りによる RGB 値変化に着目した土石流発生検知手法開発に向けた試み、土木技術資料、Vol.59、pp.20-23、2017.6
- 10) 赤澤史顕、高橋佑弥、黒岩知恵、藤村直樹、水野秀明：ヘリコプターからの斜め写真を用いた SfM による天然ダム形状の計測、土木技術資料、Vol.59、pp.12-15、2017.5
- 11) 吉永子規、清水武志、水谷佑、高橋佑弥、藤村直樹、泉山寛明、石塚忠範：レーザ測距儀を用いたナップ飛距離及び水深の計測方法の提案と流速推定への応用、砂防学会誌、Vol.70、No.1、pp.46-53、2017.5
- 12) 水山高久、上原信司：土石流の水深と流速の観測結果の検討、砂防学会誌(新砂防)、Vol. 37、No. 4、pp. 23-26、1984.11

# 確実な避難を支援する洪水予測技術の開発

水災害研究グループ 澤野 久弥

## 1. はじめに

平成 28 年 8 月の岩手県小本川の洪水、平成 29 年 7 月の九州北部豪雨等に見られるように、近年局地的豪雨により中山間地が洪水に見舞われ、死者・行方不明等多数の人的被害が発生している。地球温暖化により、今後このような豪雨の発生頻度は益々増加することが危惧されている。今回被害の著しかった中山間地河川では、降雨から洪水到達までの時間が短く、また土石流による直接的被害、洪水との複合的被害が多くみられており、河川水位の観測結果だけで危険性を判断する方法では、安全な避難の確保等が不十分である。

このため ICHARM では、中山間地河川を対象に避難のために必要な情報を確保するため、降雨の予測から、流出・土石流・河道流下・氾濫までの一連の現象を予測し、避難のための十分なリードタイムを確保するとともに、より現実に即した現象の予測情報の提供のための研究に取り組んでいる。このような技術開発は、我が国のみならず国際的な気候変動適応策等にも活用できるものと期待される。ここでは、予測技術開発の現時点での成果・展望等について報告を行う。

## 2. 予測技術研究の適用対象領域

予測技術が一般的に適用できるものとなるよう、複数の流域を対象として研究を進めているところであるが、ここでは筑後川水系花月川、赤谷川における九州北豪雨災害の再現を対象とした研究について報告する。

本豪雨災害においては九州北部地方一帯で甚大な被害が発生したが、なかでも被害が大きかったのは福岡県朝倉市東部で、赤谷川や寒水川、奈良ヶ谷川といった筑後川右岸の流入支川の洪水・土砂等によるものである。この災害に対し、ICARM では 7 月中旬、8 月上・中旬に赤谷川流域で現地調査を実施した。今回の災害では山地部での崩壊・土石流の発生と谷出口における大量の土砂・流木の堆積、河道位置の変化と土砂の堆積による洪水・土砂・流木の氾濫によって道路や橋梁・家屋が流出し、地域に深刻な被害をもたらしたことが確認されている(図-1 参照)<sup>1)</sup>。



図-1 赤谷川流域の洪水・土砂氾濫模式図（文献<sup>1)</sup>の図を再整理したもの）

## 3. 豪雨災害の予測に関する研究

流域・河川内の洪水・土砂・流木移動等の個別の現象についてはこれまでに研究が行われており、洪水対策の計画や予測・警報システム等として活用されてきた。しかし、地球温暖化による気象現象の極端化が進む中で、近年では観測史上例を見ない強度や規模の豪雨が頻繁に記録されており、水・土砂等

が複合したカataストロフィックな災害の増加が見られる。このため、人命を守る対策として洪水流出、土砂、流木を総合的に考慮した洪水現象の解明や予測技術の開発が求められる。

このため ICHARM では、豪雨による水・土砂・流木が一体となった流出、河道流下、氾濫を一連の現象として、シームレスに予測する技術の開発に取り組んでいる。予測モデルについては、データの入手可能な範囲も考慮した上でできる限り物理モデルによるものとし、観測結果による検証を踏まえて、再現性の低い現象等の予測に関わる課題の明確化、災害現象のメカニズムへのアプローチを図る。また、予測の不確実性を定量化し提示することにより、予測方法・予測結果に関する説明力の強化、信頼性の向上を図ることとしている。

### 3. 1 豪雨の予測

今回の豪雨のように極めて局地的な現象については、気象庁の行っている MSM で豪雨等の発生可能性を予期することは困難である。また、予測に当たっての初期条件等の誤差や予測モデルに内在する誤差により、予測リードタイムが長くなると予測精度が急激に低下することも知られている。このため、ICARM では 12~72 時間のリードタイムを持った降水予報精度の改善を目指し、高解像度の計算とアンサンブルカルマンフィルターによるデータ同化を同時にを行うこととし、WRF-LETKF<sup>2)</sup>による領域アンサンブル予報を試みている。WRF モデルの境界条件は全球予報モデル GSM の計算結果を使用し、アンサンブルのメンバー数は 33 としている。同化データは、1 時間毎の PREPBUFR である。九州北部を対象に初期条件を 7 月 4 日 15 時として 72 時間先までの予報を行った。その結果、33 メンバーのうち 2 つのメンバーで九州北部地方の猛烈な豪雨が再現されている。なお、気象予測に内在する不確実性から、豪雨の発生位置をピンポイントでの命中させるのは現時点で困難であり、一定の範囲の中で同様な豪雨が発生する可能性があるとして、最悪の事態の想定につなげる必要がある。このため、45km を上限として流域内の積算降雨分布が最大となるように豪雨の空間分布を移動させた結果を表示する試みを行っている。

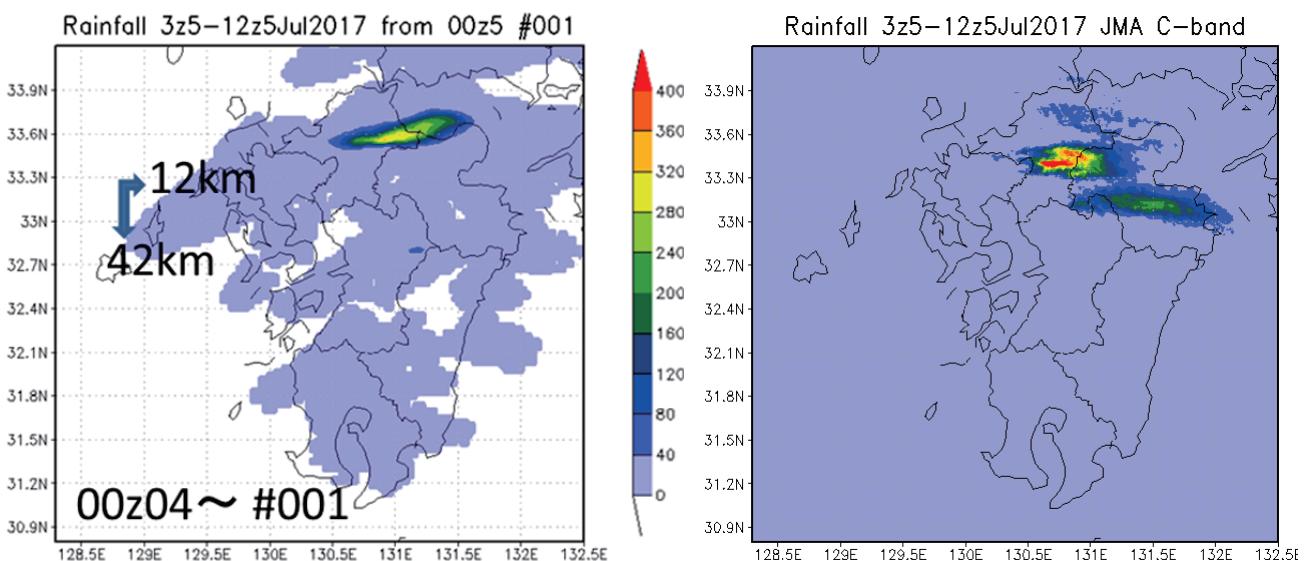


図-2 九州北部豪雨における積算降雨量(左図:最適メンバーと雨域移動量、右図:気象庁実績)

### 3. 2 降雨流出の予測

降雨流出過程から洪水氾濫までを流域スケールで一体的に解析できる RRI モデル<sup>3)</sup>を用い、花月川流域を対象に、予測雨量を用いたリアルタイムでの予測システムを構築した。RRI モデルのパラメータは気象庁解析雨量で同定し、洪水流量から水位への換算は過去の実績水位・流量から作成した水位流量曲線式を用いた。予測は、確度の高い気象庁降水短時間予報(6 時間先までの予測)を用いた水位予測と、より長期のリードタイムの確保を目指した領域アンサンブル予測(72 時間先までの予測)を用いて行った。

その結果、降水短時間予報を用いた 6 時間先までの予測では、図-3 に示すように 7 月 5 日 16 時時点

で、氾濫危険水位超過が予測されたことから、この時点で地域住民が避難した場合のリードタイムは160分程度となる。ただし、この時には既に強い雨が降り始めており、屋外の安全な場所への避難等が安全に行える状況であったのかも考慮しなければならない。

また、領域アンサンブル予測では図-4に示すように、全33メンバーのうち2メンバーについては洪水の1日以上前に避難判断水位超過が予測された。気象予測に内在する不確実性を理解し、豪雨の発生可能性を踏まえて、早めの避難行動等に結び付けることができれば、天候の比較的良好な時間帯に避難等を行うためのリードタイムが確保できる可能性が示唆される。

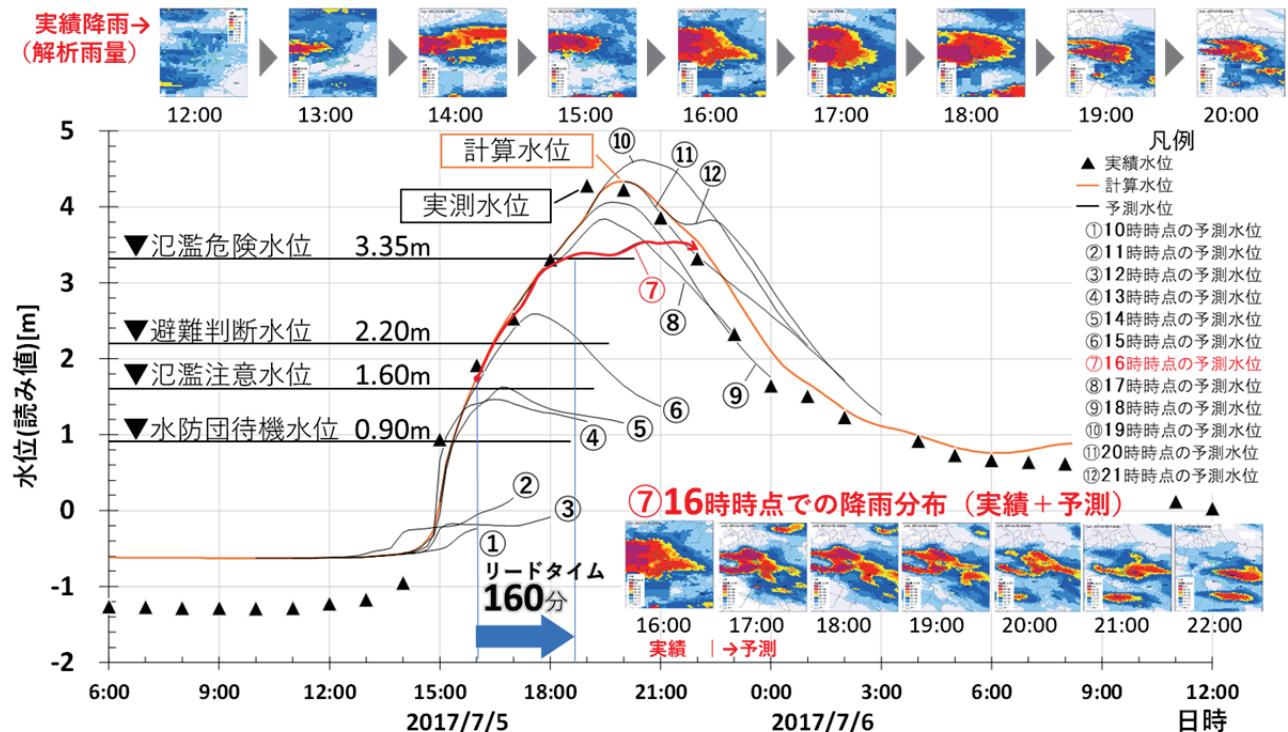


図-3 花月水位観測所における降水短時間予報(6時間先まで)の洪水予測結果

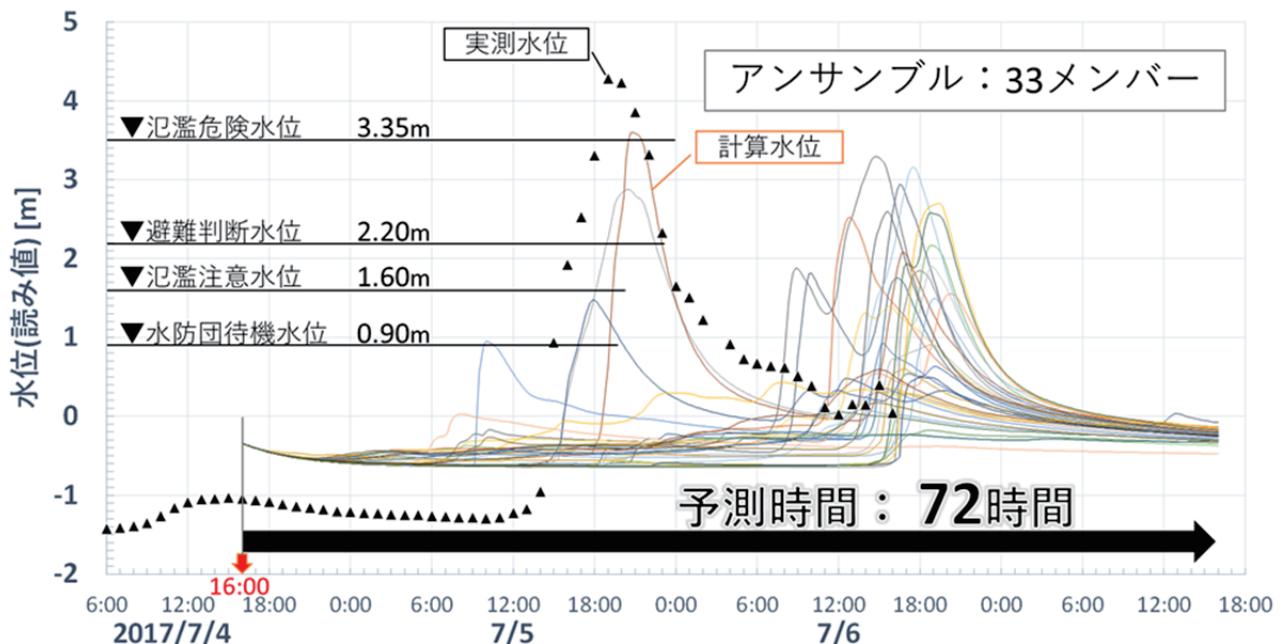


図-4 花月水位観測所における領域アンサンブル予測を用いた洪水予測結果(16時時点)  
(33メンバー全てについて記載)

### 3. 3 土砂流出量の予測

今回の災害では、山腹崩壊により発生した土砂により土石流が発生し、土石流によって甚大な被害が生じている。土石流そのものによる被害に加えて、河道への土砂流入による流路・河床変動の活発化が洪水被害を深刻にしている。このため豪雨により発生した崩壊起源の土石流について、その発生空間密度や到達範囲および土砂輸送量を推定することは、防災・減災対策の検討において極めて重要である。

豪雨に伴う山腹崩壊の発生や崩土の土石流への遷移条件、および土石流の流動ならびに侵食・堆積について既往の研究<sup>4), 5)</sup>がある。山腹崩壊の発生については、浸透流解析と無限長斜面の安定解析に基づいた方法、崩土の土石流化については、境界摩擦力のなす仕事と崩土内部の塑性ひずみエネルギーの関係に基づいた方法、土石流の発達・減衰については、土石流の材料のうち流体として振る舞う微細砂の含有割合と地形勾配が支配的原因ため、土石流の平衡勾配と、侵食堆積速度式に基づいた方法を用いている。これらの知見を活用し、対象河川流域に応じ河道のネットワークをモデル化するとともに、山腹崩壊発生の空間分布と崩土および河床材料の粒度分布および侵食可能深等の場の条件を与えれば、土石流の流下過程を発生地点から追跡していくことにより、流域における土石流による流出土砂量の空間分布が推定できるようになる。例えば、Horton-Strahlerによる2次河道を対象として土石流による流出土砂量を求めるものとする。

図-5は、1次河道流域内で発生した崩壊が1次河道へ移動し、2次河道へ合流している状態の模式図である。2次河道への流入土砂量は上流端に合流している1次河道と、河道沿いに合流している1次河道からの土石流によるものである。3次以上の河道の場合においても同様である。山腹崩壊により生じた土砂は、斜面の最急勾配の方向へ移動して河道へ到達していくものとすれば、このような河道の構造化が、流域内に分布する河道における土石流の流下過程を追跡するために必要である。

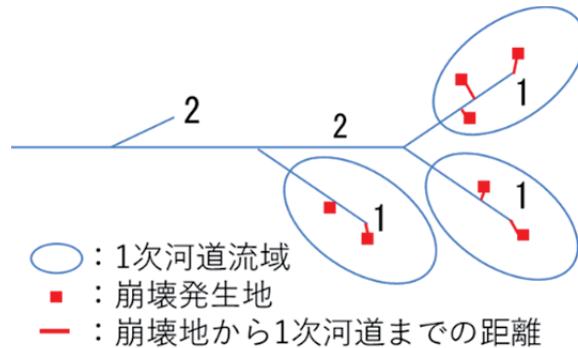


図-5 1次河道流域内で発生した崩壊土砂が1次河道へ移動し、2次河道へ合流している状態の模式図

本研究では前述の推定法を提案するとともに、これを2017年福岡県赤谷川流域で発生した豪雨に適用し、山腹崩壊の空間分布および崩壊起源土石流の流出土砂量の空間分布を推定するものである。現地調査により得られている山腹斜面の表土層厚とその粒度分布、河床の侵食可能深とその粒度分布に加えて、気象庁Cバンドレーダー雨量を用い、提案している方法を適用すると、赤谷川本川に対する土砂供給は、山腹崩壊により生じた土砂が土石流として供給されるものと、土石流から分離し、洪水流によって輸送されるウォッシュロード、浮遊砂・掃流砂によって行われているものと推定される。

### 3. 4 土砂の流入と流木の挙動を考慮した河道内流下・氾濫の予測

本災害では、上流の斜面崩壊や土石流によって大量の土砂が供給されたことによって、流路の位置そのものが大きく変化した。また、大量の流木が供給され、これが洪水被害に大きく影響したと考えられる。したがって現象を解析し、赤谷川の災害時にどのような現象が起きたのかを再現することが重要である。このため、流れの平面二次元解析にいくつかの新しい解析手法を導入した。その一つは、河床の土砂粒度分布をより正確に表現するために、河床表層の交換層厚を江頭らの式<sup>6)</sup>により物理的に決定した点である。また、流木の挙動について、流木を「流木濃度」として連続体の形態で扱うことにより、流木の挙動及び集積過程・それが流れに与える影響について評価することとした。なお、橋梁等がある場所では通過する流木が1.5mの高さを上限に堆積するものとした。

水・土砂・流木に対する平面二次元解析（乙石川合流点より下流から筑後川合流点より上流までの3kmの区間を、約10mのグリッドサイズで計算）<sup>7) 8)</sup>において、洪水流量は前述のRRIモデルによって求め、流量ハイドログラフを上流端から与えた。また、前述の方法によって算出した土砂流出量を上流端の土砂供給境界条件として与えた。なお、掃流砂量式として江頭らの式<sup>9)</sup>を用い、浮遊砂量式として岸・板倉の式<sup>10)</sup>を用いている。

図-6は、通水終了時の河床高の変化量について示したものである。図において、細粒分を供給した場合としなかった場合とを比較すると、細粒分を供給した場合には元々河道であった部分に多量の土砂が堆積し、そのことによって河道の位置が大きく変化していることが分かる。

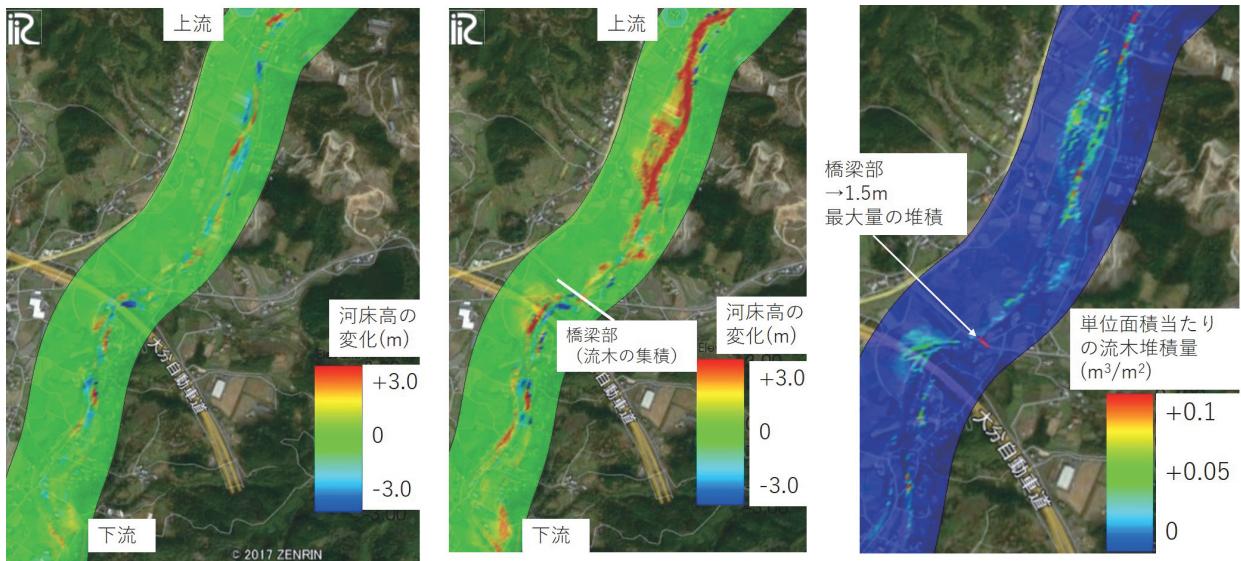


図-6 細粒分を供給しなかった場合（左）と細粒分の供給・流木を考慮した場合（中）の河床変動量の比較と、流木の堆積状況（右）

#### 4. 予測情報をもとにしたリスク・コミュニケーションの強化

最新の総務省消防庁の被害報<sup>11)</sup>によれば、九州北部豪雨による死者数は36名であり、その内訳は、福岡県朝倉市・福岡県東峰村・大分県日田市でそれぞれ30名、3名、3名である。ICHARMの調べによれば、犠牲者は80歳代が11人と最も多く、続いて70歳代が9名、60歳代が7名となり、高齢者が多い。被災地域では、2012年の九州北部豪雨の経験も踏まえて、戸別受信機を配布するなど住民が確実に災害・避難情報を入手できる環境の整備に力を入れてきたが、今回の災害では、戸別受信機へ情報を伝達する中継基地の故障により一部の集落に避難情報を伝えることができなかった。また、朝倉市では、全地区で自主防災マップを作成し、あらかじめ高齢者等の避難を支援する住民を決めておくなど、減災に向けた地域での活動に取り組んできた。これらの事前の取り組みを踏まえても、合計36名という犠牲者が発生しており、高齢化した中山間地におけるリスク・コミュニケーションと避難行動についての課題が改めて浮き彫りとなった。今後、予測情報をもとにしたリスク・コミュニケーションを強化し、いざという時の確実な避難行動を実現していく必要がある。

このため、予測については精度やリードタイムを追求するだけでなく、予測情報が住民の避難や危機管理対応に最大限活用されるための条件についても検討が必要である。切迫した危険性を直に伝える可視化技術の活用方法、不確実性を含む予測情報による意思決定方法、避難等行動に至る心理プロセスの変化の特徴を把握し、情報の有効性の評価・情報の内容の取捨選択・他の有効情報による補完方法等について研究を行うことで、情報が適切な行動につながることを目指すこととしている。

#### 5. おわりに

頻発化・多発化傾向にある中山間地での豪雨災害は、降り始めから発災までの時間が短く、また洪水だけでなく土砂・流木等が混在する現象となる。このような災害への対応に資するため、ICHARMでは降

雨・流出・土砂・河道流れ・氾濫を一体とした現象として解析し、予測するための研究を行っている。これらの他にも渇水に関する研究を行っており、ICHARMでは水災害に関する様々な課題に取り組み、気候変動への適応や、危機管理対策の強化に資することを目指し研究を進める予定である。

#### 【参考文献】

- 1) 南雲直子, 江頭進治 : 2017 年九州北部豪雨による赤谷川流域の土砂流出と被災状況、日本第四紀学会 2017 年大会、ポスター。
- 2) 牛山朋來, 佐山敬洋, 岩見洋一 : WRF-LETKF を用いた 2015 年鬼怒川洪水のアンサンブル予測実験、日本気象学会 2016 年春季大会、2016.
- 3) 佐山敬洋、岩見洋一 : 降雨流出氾濫(RRI) モデルの開発と応用、土木技術資料、平成 26 年 6 月号、pp. 18–21、2014. 6.
- 4) 江頭進治、宮本邦明、竹林洋史 : 崩壊に伴う土石流・泥流の形成と規模の決定機構、砂防学会誌、Vol. 68, No. 5, p. 38–42, 2016.
- 5) Yusuke Yamazaki, Shinji Egashira, and Yoichi Iwami: Method to Develop Critical Rainfall Conditions for Occurrence of Sediment-Induced Disasters and to Identify Areas Prone to Landslides, Journal of Disaster Research Vol. 11 No. 6, 2016.
- 6) Egashira, S. and Ashida, K. Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load, Advances in Micromechanics of Granular Materials, (Edited by H. H. Shen et al.) Elsevier, pp. 391–400, 1992.
- 7) 竹林洋史, 江頭進治, 岡部健士, 寺岡充夫：“給水・給砂の非定常性と植生の繁茂を考慮した砂州及び流路の形成水理条件”，土木学会水工学論文集，第 50 卷，pp. 973–978, 2006.
- 8) iRIC ソフトウェア : <http://i-ric.org/ja/>
- 9) 江頭進治, 宮本邦明, 伊藤隆郭 : 掃流砂量に関する力学的解釈, 水工学論文集 41 (1997) : 789–794.
- 10) Itakura, T. and Kishi, T. : Open channel flow with suspended sediments. Proc. of ASCE, HY8, pp. 1325–1343, 1980.
- 11) 総務省消防庁 : 平成 29 年 6 月 30 日からの梅雨前線に伴う大雨及び台風第 3 号の被害状況及び消防機関等の対応状況等について (第 66 報), 2017. 8. 21.

# 平成 28 年 8 月北海道豪雨災害について ～主に堤防決壊と流路変動に焦点を当てて～

寒地水圏研究グループ 上席研究員 前田 俊一

## 1. はじめに

平成 28 年 8 月の北海道では、17 日から 23 日の 1 週間に 3 個の台風の上陸、さらに 29 日からの前線と台風 10 号の接近により、大規模な洪水が各地で発生した。この結果、石狩川水系空知川、十勝川水系札内川等の 9 河川の堤防が決壊し、79 河川が氾濫し<sup>1)</sup>、人的被害や住宅被害、さらに橋梁等の構造物や農地等の被災が至るところで発生した。北海道内での国管理区間の堤防決壊による洪水氾濫は昭和 56 年以来のことと、洪水被害の影響は北海道内にとどまらず、野菜価格の高騰<sup>1)</sup>などを通じて全国に及んだ。なお、災害から 1 年が経過した 2017 年 8 月末現在でも、国道や鉄道等の一部区間が不通のままである。

1 週間に 3 個もの台風（台風 7 号、11 号、9 号）の北海道への上陸と、太平洋側から三陸地方への台風（台風 10 号）の上陸は、気象庁が 1951 年に統計を取り始めて以来、ともに初めてのことである。観測史上初の特異な気象状況が、平成 28 年 8 月北海道豪雨災害の大きな特徴の一つであったことは間違いないが、ここでは災害発生時の気象概況には詳しく触れないで、その詳細については、土木学会の災害調査団の報告書<sup>2)</sup>等を御覧になっていただきたい。

ここでは、タイトルにもあるように、堤防決壊の現象と、今回の豪雨災害の大きな特徴である流路変動に焦点を当てて、北海道豪雨災害の紹介を進めていくこととする。

## 2. 堤防決壊箇所の概要（石狩川水系空知川、十勝川水系札内川及び音更川）

### 2. 1 石狩川水系空知川

8 月 29 日からの大雨により、31 日の深夜から未明にかけて南富良野町幾寅地区では、空知川の堤防 2 箇所（写真-1 以降それを「上流（決壊）箇所」と「下流（決壊）箇所」と記載）が決壊し、小支川の氾濫と相まって約 130ha<sup>2)</sup>が浸水し、多くの家屋浸水や農地冠水等により甚大な被害が生じた。この洪水で幾寅地区の直下流に位置する金山ダムでは、計画高水流量（1,000m<sup>3</sup>/s）を超える既往最大の約 1,600m<sup>3</sup>/s のダム流入量を記録している。上流箇所の決壊原因については、①決壊口から上流約 100m の範囲の堤防に越流の痕跡があること、②決壊口直上流の堤防の川裏法面が侵食され堤体材料が流出していたことから、越流によるものと推定されているが、①決壊区間が湾曲部外岸側に位置し水衝部になっていた可能性があること、②実際に高水敷が侵食され、主流路が左岸側（決壊した堤防側）に移動していたことから、侵食が堤防に及んだ可能性は否定できないとされている<sup>3)</sup>。また、下流箇所の決壊原因については、流下してきた氾濫水が国道 38 号線と堤防に囲まれた堤内地の低みにたまつた後に、堤内から堤外に氾濫水が越流した様子を目撃した方がいることから、主に上流決壊箇所から流下してきた大量の氾濫水による堤内から堤外への越流によるものと推定されている<sup>3)</sup>。

### 2. 2 十勝川水系札内川及び音更川

8 月 31 日の深夜から未明には、十勝川水系（図-1）の札内川（KP25.0）でも堤防決壊が発生し、約 50ha<sup>2)</sup>が浸水した（写真-2）。また、同日の夜には音更川

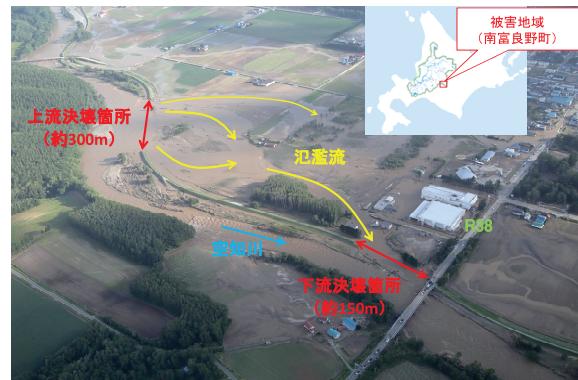


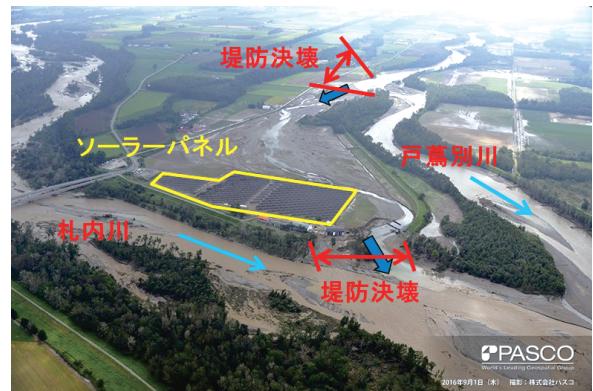
写真-1 空知川の氾濫状況(北海道開発局撮影)



図-1 十勝川流域図<sup>4)</sup> (一部修正)

(KP21.2) でも河岸侵食が進んで堤防が決壊し（写真－3）、翌9月1日の午前中には、前日には異常の無かつた札内川（KP40.5）の堤防も河岸侵食によって決壊していることが河川巡視員により発見された（写真－4）。音更川（KP21.2）と札内川（KP40.5）では、決壊時点で既に洪水のピークは過ぎており、河川水位が堤内地盤高よりも低くなっていたために、浸水被害は発生しなかった。

写真－2から、戸蔦別川右岸で堤防が決壊し、戸蔦別川からの氾濫水が堤内を流下し、札内川（KP25.0）の堤防決壊箇所から札内川に流入していることがわかるが、札内川（KP25.0）の堤防決壊原因については、このような堤内地での氾濫流の状況以外にも、①31日0時頃に堤内から堤外への越流が目撃されていること、②堤防の川表側に残った痕跡水位が現況堤防高を下回り、川裏側に残った痕跡水位が堤防天端の最も低い部分（決壊して流出した部分）よりも30cm程度高いこと、③残存した堤防の先端部分では、堤外への越流の痕跡や、天端から表法尻にかけての堤体崩壊及び堤体材料の流出が見られることから、戸蔦別川の氾濫水の堤内から堤外への越流が原因の一つと推察されている<sup>4)</sup>。実際に、写真－5の痕跡水位から、堤防決壊の時点ではレベルバックで堤内地が広範囲にわたって湛水していたことがわかる。侵食による堤防決壊の可能性については、①決壊箇所が水衝部ではなく、決壊につながるような高水敷の側方侵食が見られないこと、②決壊箇所の堤内側で戸蔦別川右岸からの氾濫流による川裏法面の侵食（写真－7）が見られることから、堤外側ではなく堤内側からの侵食により決壊幅が拡大した可能性があるとされている<sup>4)</sup>。なお、戸蔦別川右岸堤防の決壊原因は侵食によるものと推定されている<sup>2), 4)</sup>。また、音更川（KP21.2）と札内川（KP40.5）での堤防決壊については、両箇所ともに①決壊箇所前後の痕跡水位が現況堤防高を下回っていること、②決壊箇所付近が蛇行した低水路の外岸側で水衝部となっていること、③主流路が出水中に移動し、一部は堤内地まで及んでいることから、侵食によるものと推察されている<sup>4)</sup>。



写真－2 札内川（KP25.0）の堤防決壊  
(株式会社パスコ撮影)



写真－3 音更川（KP21.2）の堤防決壊<sup>4)</sup>



写真－4 札内川（KP40.5）の堤防決壊  
(北海道開発局撮影)



写真－5 戸蔦別川右岸堤防に残る湛水位を示すレベルバックの痕跡水位と川裏法面の侵食箇所

### 3. 越流による堤防決壊についての考察

ここでは、越流による堤防決壊の事例として、空知川（上流決壊箇所）と札内川（KP25.0）を取り上げて、出水時に発生していた現象について考察を進める。

#### 3. 1 空知川（上流決壊箇所）

寒地河川チームでは、千代田実験水路<sup>5)</sup>を用いた実物大スケールの実験や数値計算等により、堤防決壊に関する現象解明や対策工の研究を進めている。研究の成果として、急勾配河川の堤防決壊では、氾濫流の主流部が決壊口内の下流側に位置し、この流れが下流側堤体にぶつかり堤体が侵食されるため、決壊口の拡幅は下流方向に卓越するとともに、下流側堤体の先端が斜めに削られた形状になること<sup>5)</sup>（写真-6）、緩勾配河川の堤防決壊では、氾濫流の主流部が決壊口中央に位置し、決壊口の拡幅よりも洗掘が顕著になり、急勾配河川よりも明瞭な落堀が形成されること<sup>6)</sup>等が明らかになっている。幾寅地区の空知川の河床勾配は1/180程度で急勾配河川に分類されるため、堤防決壊後に決壊口は下流方向に卓越して拡幅したと考えられるため、決壊地点は決壊区間の上流端近傍と推察される。実際に、明瞭な越流の痕跡は決壊区間の上流側堤防のみに見られ、決壊区間の上流端近傍には落堀と思われる侵食域が形成されていた他、後述の再現計算の結果では、越流位置は決壊区間の上流端近傍と推定されている（図-2）。したがって、この地点の堤防が越流水により下刻されて流出した後に決壊口の拡幅が主に下流方向に進んだのではないかと考えられる。また、洪水減水期（8月31日13時頃）の空撮写真（写真-7）では、下流側に残っている堤防の先端が上述のような斜めに削られた形状になっており、研究成果が実際の決壊口の拡幅現象をよく説明していることがわかる。

#### 3. 2 空知川（上流決壊箇所）の再現計算

空知川の上流箇所の堤防決壊は深夜から未明にかけて発生したこともあり、越流や流路変動と堤防決

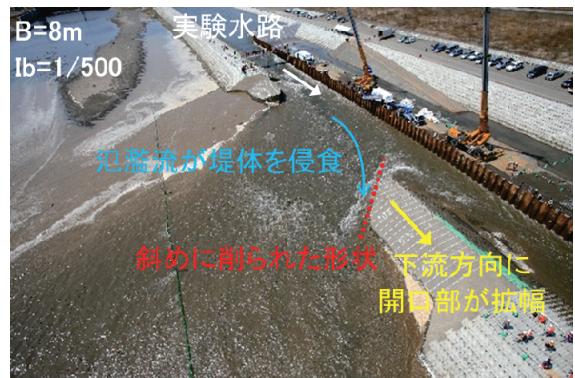


写真-6 千代田実験水路における堤防決壊部の拡幅



写真-7 空知川の上流決壊箇所における堤防先端の形状（赤の点線）

後述の再現計算の結果では、越流位置は決壊区間の上流端近傍と推定されている（図-2）。したがって、この地点の堤防が越流水により下刻されて流出した後に決壊口の拡幅が主に下流方向に進んだのではないかと考えられる。また、洪水減水期（8月31日13時頃）の空撮写真（写真-7）では、下流側に残っている堤防の先端が上述のような斜めに削られた形状になっており、研究成果が実際の決壊口の拡幅現象をよく説明していることがわかる。

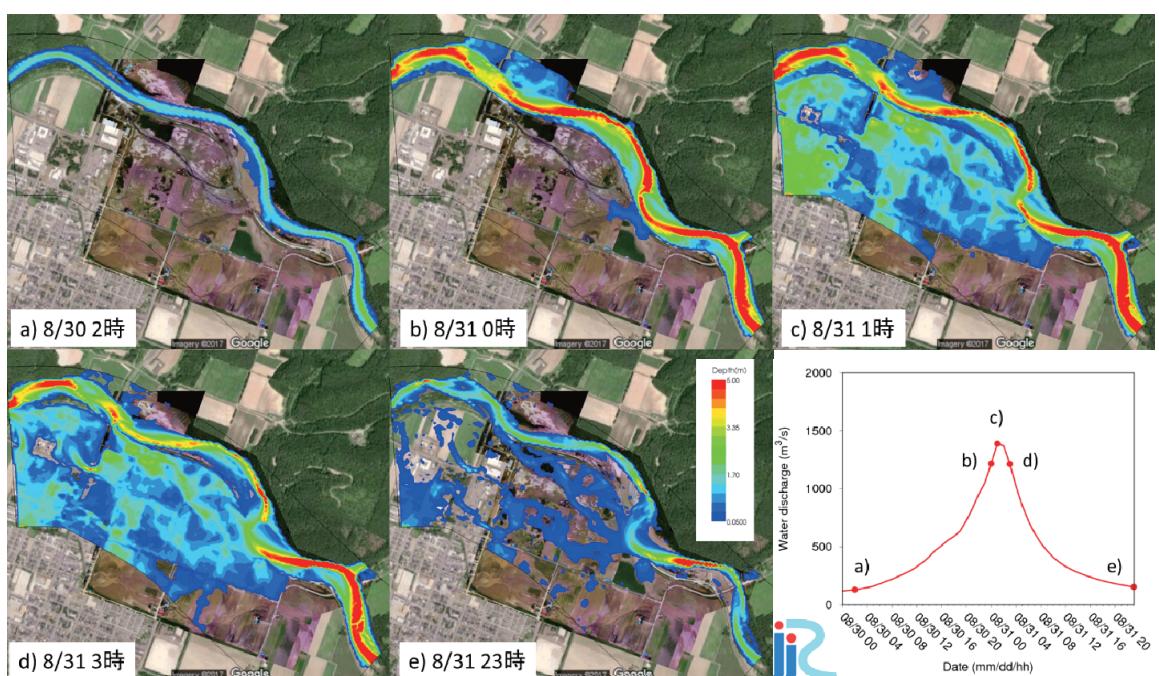


図-2 平面二次元河床変動モデルによる氾濫計算結果<sup>2)</sup>

壊の関係については不明な点が多い。そこで、越流と流路変動が堤防決壊に与えた影響を考察するために、平面二次元河床変動モデルを用いた再現計算を行った。解析モデルは、iRIC-Nays2DH<sup>7)</sup> を用いている。上流端流量は図-2に示す分布型流出モデルを用いて計算した幾寅地点流量推定値（北海道開発局提供）を与えており。マニング粗度係数を0.045で一定とし、樹木の範囲は氾濫前の航空写真を参考に設定した。計算領域全体で60mmの均一粒径を与え、流砂量式として芦田・道上式を使用して河床変動計算を行っている。これらの条件は、河道内の流れ、低水路の河床及び流路変動の特性を検討することを主眼に置いて設定されている。すなわち、本計算では越水と流路変動の関係について考察するものであり、流路変動とは関係の無い高水敷の侵食や、堤防決壊の進行過程、堤内地側の水理及び地形変動の特性の再現までを目指すものではないことに注意を要する。設定条件とモデルの妥当性についての詳細は省略するが、河道内の痕跡水位と計算結果を比較し、上流決壊箇所周辺の痕跡水位がよく再現されていることを確認している。

図-2より、越流は8月31日午前0時頃に、流量1,200m<sup>3</sup>/s程度で発生している。実際に下流決壊箇所では31日午前2時頃に湛水が確認されており、やや早めではあるが氾濫開始時刻としては妥当な値と判断される。また、越流位置は上述のように決壊区間の上流端近傍であり、この地点から決壊口の下流への拡幅が進行したものと考えられる。また、出水前には湾曲部内岸を流れていた低水路は、越流開始時点では既に堤防付近まで接近し水衝部となっており、高水敷の侵食や堤防侵食を引き起こしていたと推測される。このため、外岸側に寄った流れが決壊口から堤内地に流れ込むことで大規模な氾濫被害が発生したと考えられる。

### 3. 3 札内川(KP25.0)の再現計算

侵食による戸蔦別川の堤防決壊から札内川(KP25.0)の堤内からの越流による堤防決壊までの一連の氾濫現象を検証するために、平面二次元河床変動モデルを用いて氾濫現象の再現を試みた。計算にはiRIC-Nays2D<sup>7)</sup>を利用した。戸蔦別川の上流端流量は貯留閑数法による流量推定値（北海道開発局提供）を用いた。計算領域は戸蔦別川の河道内及び右岸側堤内を含む範囲とした。計算の上流端は、戸蔦別川右岸堤防決壊箇所より1km以上上流に設定した。また、本計算では戸蔦別川のみを対象とし、札内川の流れは考慮していない。地形標高には、平成18年に計測されたLPデータ（北海道開発局提供）を使用した。河道内の護岸等については、詳細な情報が入手できなかったため、過去の航空写真や現地調査より確認できた護岸箇所を固定床として設定した。樹木範囲は航空写真を参考に設定した。また、計算格子サイズは縦横断方向ともに約4mとし、河床材料の設定は札内川の代表粒径を参考に50mmの均一粒径とした。マニング粗度係数は堤内外ともに0.03とし、ソーラーパネルの設置箇所（写真-2）のみ0.1とした。流砂量式には芦田・道上式を使用し、崩落による側方侵食を考慮した条件で計算を実施した。

再現計算結果を図-3に示す。①出水初期の氾濫開始前の状況である。流量規模が約600m<sup>3</sup>/sを超えると戸蔦別川右岸の側方侵食が急速に進行することを本計算より確認しており、流量規模が約1,000m<sup>3</sup>/sに達したこの段階では、既に側方侵食は堤防の位置まで進んでいる。②戸蔦別川右岸から氾濫し始めた時点の状況である。堤防が側方侵食によって流失することで氾濫が生じた過程が再現されている。計算では流量ピークより約3時間半前に氾濫が始まっている。③氾濫流が堤内にレベルバックで湛水している中で、札内川(KP25.0)の堤防の一番低い箇所から越流が始まった時点の状況である。計算では流量ピークより約2時間半前に越流が始まっている。つまり、戸蔦別川での氾濫開始（②）から1時間程度で札内川(KP25.0)付近の堤内湛水位が堤防天端まで達し、越流し始めたことになる。2.2で述べたように、8月31日午前0時頃（流量ピークの2時間前）に堤内から堤外への越流が目撃されており、30分程度のずれはあるものの、本計算結果はある程度この氾濫現象を再現していると考えられる。④堤内側からの越流により札内川(KP25.0)の堤防が決壊した状況である。堤防の一番低い箇所の決壊に加えて、湛水位が低下するまでの間に堤防天端の2番目に低い部分からも越流が始まり、2番目の決壊も生じている。実は、最初の決壊箇所近傍の堤内地では建物が出水で流出しており、この流失は最初の決壊箇所に流れが集中することによって発生した高速流によるものと考えられる。⑤流量ピーク時の状況である。堤内に湛水していた水がある程度流れ出すと、粗度の大きなソーラーパネルの設置箇所を避けるように堤内地に主流部が形成され、結果としてソーラーパネルの背後に位置する最初の決壊箇所よりも2番目の決壊箇所に流れが集まるため、2番目の決壊箇所周辺で侵食が急速に進行していることがわかる。⑥出水後期の流量減衰後の状況である。札内川(KP25.0)では堤防決壊地点の侵食域が堤内の上流側へ拡大している状況が良好に再現されている。

このように、戸鳥別川の洪水流量がピークに達するよりもかなり前に戸鳥別川右岸堤防が側方侵食により決壊し氾濫が生じたことや、その氾濫流が比較的短時間で堤内を満水にした後に、札内川 (KP25.0) の堤防が越流により侵食・決壊した過程が検証された。

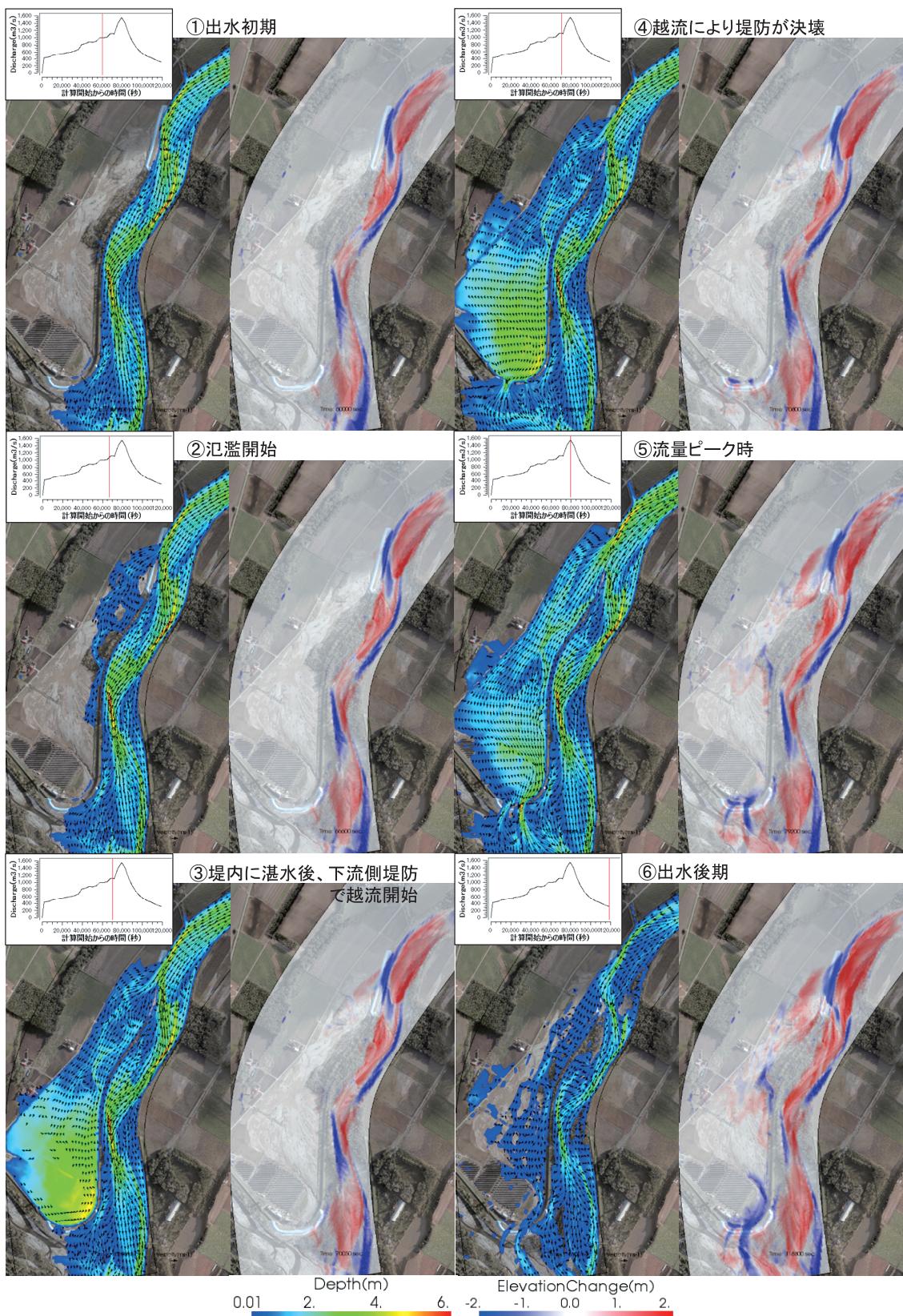


図-3 再現計算結果 (①～⑥それぞれ左図：水深コンター図；右図：河床変動量)<sup>2)</sup>

### 3. 4 堤防の決壊や決壊部の拡幅に関する数値計算上の留意点

空知川（上流決壊箇所）の再現計算については、上述のように、越水と流路変動の関係についての考察を目的に実施されたものであり、堤防決壊の進行過程等の再現までを目指したものではないが、札内川（KP25.0）の再現計算では、越流による堤防決壊の状況が概ね良好に再現されており、通常の平面二次元河床変動モデルが、堤防決壊の進行過程や、それに伴う氾濫流の状況等を検証するための有効なツールとなり得る場合のあることがわかる。

それでは、その他の堤防決壊の事例を同様な手法で計算すれば、現象が概ね良好に再現できるかと言えば、必ずしもそうとは限らない。その一例として、①千代田実験水路での実物大スケールの堤防決壊の実験結果、②通常の平面二次元河床変動モデルを用いた①の再現計算結果、③寒地河川チームが開発した決壊口の拡幅推定モデル（通常の平面二次元河床変動モデルに決壊口の拡幅現象を表す式を組み込んだもの）<sup>8)</sup>を用いた①の再現計算結果の3つを比べたものを図-4に示す。決壊口の拡幅推定モデルを用いた計算が実験結果を良好に再現している一方で、通常の平面二次元河床変動モデルを用いた計算では実験結果よりも拡幅の進みが遅く、再現性の良くないことがわかる。千代田実験水路での観測によると、決壊口の拡幅現象は、堤体の下部が氾濫流の主流部がぶつかって侵食された後にオーバーハングした堤体上部が崩落するプロセスの繰り返しであり<sup>5)</sup>、この現象を定式化して計算モデルに組み込んでいるかどうかが、上記の2つの計算結果の再現性の差として現れたものと考えられる。決壊口の拡幅推定モデルは、決壊口内の下流側に位置する氾濫流の主流部が下流側堤体にぶつかり堤体が侵食されていく急勾配河川での堤防決壊現象だけでなく、氾濫流の主流部が決壊口中央に位置し、決壊口の拡幅よりも洗掘が顕著になる緩勾配河川の堤防決壊現象も良好に再現できるため、決壊口の拡幅推定モデルを用いることで堤防決壊現象に関する数値計算の更なる精度の向上が期待できると思われる。

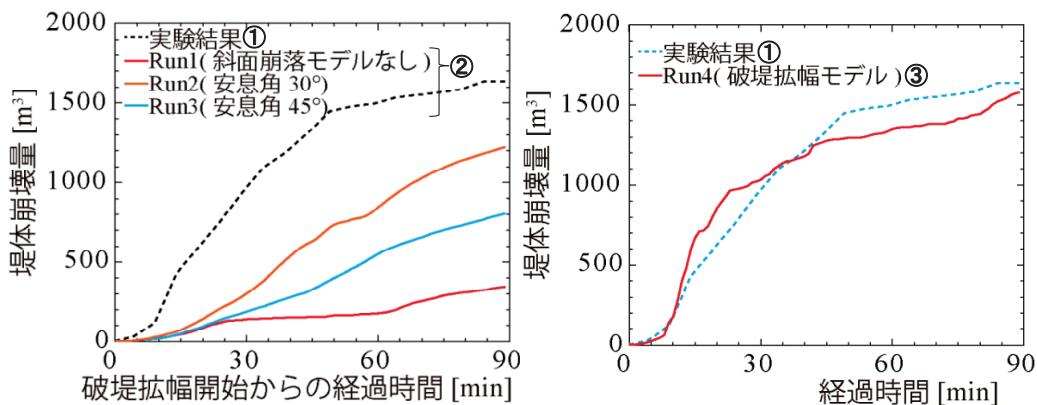


図-4 堤防決壊部の拡幅過程の比較（左：①実験結果と②通常の平面二次元河床変動モデルによる再現計算結果との比較 右：①実験結果と③決壊口の拡幅推定モデルによる再現計算結果との比較）<sup>9)</sup>

この他に、越流時の堤防の侵食現象についても留意が必要と思われる。堤体材料が近傍の河床材料とほぼ同様でも、堤防は建築の際に締め固められており、現実の堤防は平面二次元河床変動モデルで想定しているルーズな状態の河床材料の堤防よりも越流による侵食に強いと思われる。また、堤防の表面は植生（根系を含む）で覆われており、植生も耐侵食性を高める方向に働く。さらに、最近は危機管理型ハード対策の一環でアスファルト舗装による堤防天端の保護やブロック等による裏法尻の補強が全国的に進められており、いわゆる粘り強い構造の堤防の整備が進んでいる。したがって、通常の二次元河床変動計算モデルで堤防決壊の再現計算を行うと、実際の決壊時刻よりも早めに堤防が決壊する計算結果が出て来る可能性に留意する必要がある。ただし、札内川（KP25.0）では、堤体材料は砂礫主体で細粒分が少なく、天端も舗装されていなかったので越流時の耐侵食性が低く、越流から決壊に至る過程について、通常の平面二次元河床変動モデルでも実用上十分な再現性が得られた可能性があると思われる。

### 4. 急流河川における侵食（流路変動）による堤防決壊についての考察

ここでは、音更川（KP21.2）の堤防決壊の事例を取り上げて、昨年度の出水における側方侵食、すなわち大規模流路変動の実態や堤防の被災要因の分析等を行う。

#### 4. 1 音更川の側方侵食の実態

音更川は札幌市街地を貫流する豊平川や上述の札内川等とともに北海道内の代表的な急流河川であり、河川整備により河道の状況は昔とはかなり変わったものの、元来は複列もしくは網状の河道であった。このような河道では、中小規模の出水でも著しい側方侵食の生じることがある。例えば、音更川では昨年度の出水以外にも近年では平成23年9月の出水で約80mの側方侵食が生じ、昨年度の堤防決壊箇所から約3km下流で堤防決壊が生じた（写真-8）。ここで昨年度の出水を平成23年の出水と比べると、図-5から、昨年度の出水では、大きな流量が長い間継続したと言われている平成23年の出水<sup>10)</sup>よりも、ずっと洪水継続時間の長かったことがわかる。このため、長い洪水期間中に大量の土砂が移動して約170mもの側方侵食が生じて堤防決壊に至ったと考えられる。

また、流路変動の他の要因として、後述のように、洪水の低減期に蛇行流が発達して側方侵食が更に進むことがあげられる。平成23年の出水でも流量の減少期に発達した蛇行流によって側方侵食が更に進み堤防決壊が生じたが、昨年度の出水でも洪水ピーク後の減衰期に堤防侵食が確認されており、流量減少期の蛇行流発達が大きく影響していた可能性が考えられる。



図-5 音更水位観測所データ  
(平成28年(2016年)は暫定値)

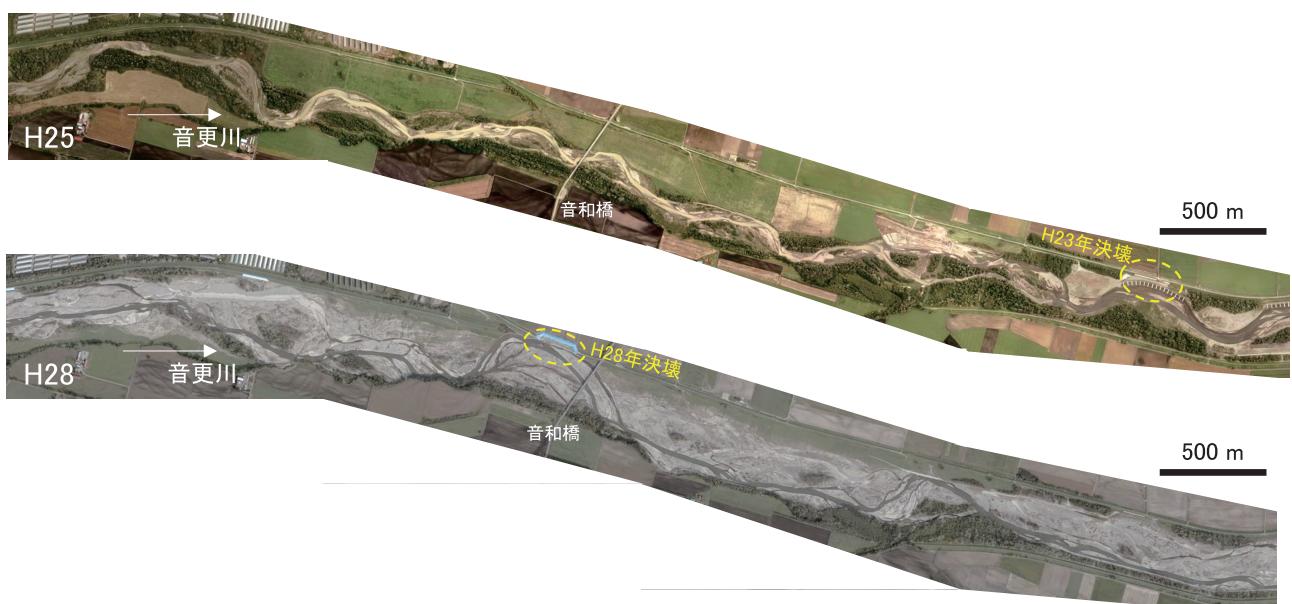


写真-8 平成28年8月出水前後の航空写真（上：平成25年；下：平成28年（出水後））

ここで、昨年度の出水後に実施された側方侵食幅の調査結果を図-6に示す（側方侵食がゼロの箇所はプロットしていない）。堤防決壊箇所のKP21.2周辺（図-6の赤丸）で特に側方侵食幅が大きくなっているが、それ以外にも100mを超える側方侵食が多く箇所で生じていることがわかる。音更川では堤防防護の観点から必要な高水敷幅は80mと設定されており、平成23年の出水でも側方侵食の最大幅は約80mであった。KP21.2では昨年度の出水前において十分な高水敷幅（約120m）を確保していたものの<sup>4)</sup>、これまでにない大規模な流路変動により堤防決壊に至ったことになる。また、200m近い最大側方侵食幅が発生したことから、音更川の現在の堤防防護の考え方の見直しを検討する必要がある。

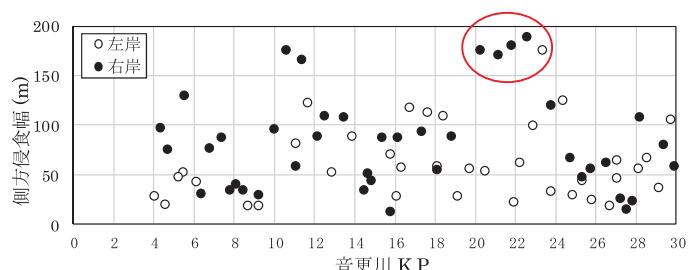


図-6 平成28年の出水における音更川の側方侵食幅

#### 4. 2 侵食による堤防決壊の再現計算

堤防決壊の要因となった大規模な流路変動を検証するために数値計算による出水の再現を行った。計算には iRIC-Nays2D<sup>7)</sup> を用いた。上流端流量は士幌観測所地点における暫定値（北海道開発局提供）を用いた。計算領域は音和橋（写真－8）付近から上流側 2km の範囲を対象とした。地形標高には、平成 25 年に計測された LP データ（北海道開発局提供）を使用した。樹木範囲は航空写真を参考に設定した。また、計算格子サイズは縦横断方向ともに 5m、河床材料は 50mm の均一粒径、マニング粗度係数は 0.03 とした。流砂量式には芦田・道上式を使用し、崩落による側方侵食を考慮した条件で計算を実施した。

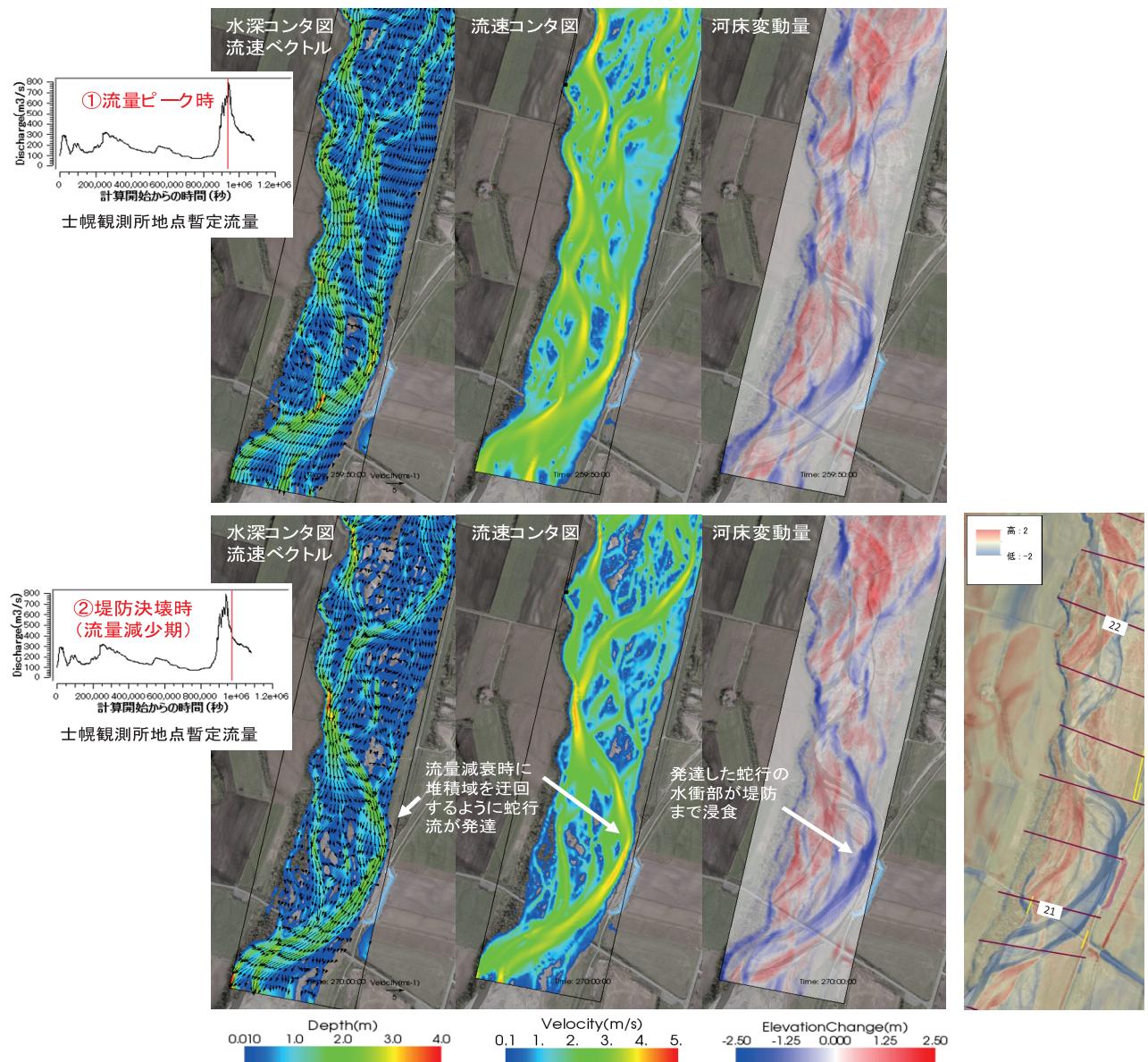


図-7 河床変動計算（上：①流量ピーク時；下：②堤防決壊時（流量減少期））（左）と LP データから算出した実際の河床変動量（右下 北海道開発局提供）

再現計算結果と、上記の平成 25 年の LP データと昨年の出水後の LP データの差分から算出した実際の河床変動量（北海道開発局提供）を図-7 に示す。数値シミュレーションによって再現された流路変動と実際に生じた流路変動には若干の差異は見られるものの、堤防決壊の位置はほぼ正確に再現することができている他、河道全体の堆積・洗掘傾向も概ね再現できている。次に流量ピーク時以降の流路変動や流速の状況を細かく見ると、まず、流量ピーク時には長期間継続した出水により、既に堤防近くまで流路が移動しているものの、流れは堤防法線に対して比較的平行で直線的に流下している。また、同

一断面内に複数筋の高速な流路が見られるとともに、河道全幅で比較的高速な流れが生じている。これに対して、堤防決壊時（流量減少期）には、出水前に主流路が存在していた堆積域を迂回するように蛇行流が発達して、流れが一つの流路に集中している。このように、長期間継続した出水で流路が大きく移動しつつ、洪水ピーク後の減水過程で蛇行流が発達したことによって側方侵食がさらに進み堤防決壊が生じたものと推測される。

#### 4. 3 急流河川における大規模流路変動に関する課題

堤防そのものの侵食を数値計算で取り扱うことの留意点については、既に3. 4で述べたとおりであるが、少なくとも、堤防まで迫るような出水中の大規模な流路変動（高水敷の側方侵食）は、上述のように数値計算によって、ある程度精度良く再現することが可能である。紙数の都合で紹介しなかったが、札内川（KP40.5）の堤防決壊についても良好な再現計算結果が得られている<sup>2)</sup>。したがって、音更川のように最大側方侵食幅の実績が非常に大きくなってしまった場合に、例えば、低水護岸整備の優先順位を決めるために、大規模流路変動が近い将来に生じる可能性が相対的に高いと思われる箇所を数値計算で予測し、危険と予測される箇所に低水護岸を優先的に整備する方策が考えられるが、ここで考えるべき課題が幾つかある。例えば、大規模流路変動のメカニズムは現状では十分に解明されていないことがあげられる。数値計算で大規模流路変動が予測できたとしても、大規模流路変動のメカニズムの十分な理解無しでは効率的な対策が実施できない恐れがある。例えば、上述のように、出水前の主流路が出水中の土砂堆積で埋まって流路が側方に変動する等、土砂供給が流路変動に大きな影響を及ぼすのであれば、土砂の生産源（例：上流域、近傍の河岸等）の対策も考えられるであろうし、河道内樹木が偏流を生じさせて流路変動を助長させるならば、樹木管理の改善・強化も考えられる。したがって、これらの対策を護岸整備と組み合わせることが効率的な場合もあると思われるが、その前提としては、大規模流路変動のメカニズム解明が必要となる。このため、昨年度の出水で顕在化した急流河川における大規模流路変動に関する課題を解決すべく、寒地河川チームでは今年度より、「急流河川の大規模河岸侵食対策技術に関する研究」に着手したところである。

なお、ここで問題とした流路変動は、水位が高い間は洪水の濁水により侵食の様子が見えないため、侵食が堤防まで至っていない場合は、洪水のピークが過ぎて高水敷程度まで水位が下がり高水敷の侵食が見えるようになって初めて確認されることになる。水位が下がって侵食がかなり進んでいることが確認された場合には、流路変動は水位が低くなつてからも進むことがあるので、必要に応じて侵食箇所の重点的な監視やブロック投入等の準備を検討すべきである。

#### 5. おわりに

ここまで、昨年の北海道豪雨での堤防決壊の事例を幾つか紹介するとともに、数値計算や千代田実験水路での研究成果をもとに堤防決壊に至る現象の分析等を行った。音更川の事例が特に顕著であるが、昨年度の出水の大きな特徴の一つとして、急流河川での流路変動による堤防決壊が目立つことがあげられる。侵食による堤防決壊の事例として紹介した音更川（KP21.2）と札内川（KP40.5）で大きな流路変動が発生したのみならず、越流による堤防決壊の事例として紹介した札内川（KP25.0）でも、大元の原因是戸蔦別川の侵食による堤防決壊である。また、空知川の上流決壊箇所においても、流路変動による侵食が堤防決壊に影響を与えた可能性は否定できない。このため、上述のように、寒地河川チームでは、急流河川の大規模流路変動に関する研究課題を立ち上げたところである。なお、紙数の都合で紹介できなかつたが、ここで紹介した比較的大きな河川の国管理区間だけでなく、地方自治体が管理する中山間地域の中小河川でも昨年度の出水では大規模流路変動が至るところで発生している。流路変動によって主流路が橋台背面まで移動した結果、背面盛土が流出して多くの橋梁が被災したことも昨年度の出水の大きな特徴である。このため、寒地河川チームでは、このようなタイプの橋梁被災を防ぐための研究も寒地地盤チームと共同で開始したところである。

また、その他の特徴としては、上流の堤防決壊箇所からの氾濫流で、下流の堤防が堤内側からの越流により決壊した事例が2つも生じたことがあげられる。氾濫形態が貯留型であれば、このような堤内からの越流による堤防決壊は起こり得るため、例えば、河川事務所等で定期的に実施されている堤防決壊時の図上訓練では、氾濫の形態によっては、このよう堤防決壊形態も想定することが必要と思われる。

最後に、「1. はじめに」で言及した観測史上初の特異な気象状況についてであるが、昨年度の豪雨災害を受けて、国土交通省北海道開発局と北海道は共同で、「平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏ま

えた水防災対策検討委員会」を設置し、今年の3月には「今後の水防災対策のあり方」<sup>1)</sup>がとりまとめられている。この「あり方」には、「今回の北海道大雨激甚災害を踏まえ、気候変動の影響が現実のものになつたと認識し、北海道から先導的に気候変動への適応策に取り組むべきである。」との文言が記載されている。これを受けて、北海道開発局と北海道は共同で今年の7月に、「北海道地方における気候変動予測（水分野）技術検討委員会」<sup>11)</sup>を設置し、気候変動の影響を最新の知見に基づき科学的に予測し、昨年度の出水で甚大な被害が発生した十勝川流域等をモデル流域に選定して、モデル流域における降雨の変化、洪水流出量の変化、リスクの変化を検討していくとしている。国土交通省が平成27年1月に公表した「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」<sup>12)</sup>でも、気候変動に対応した今後の水害対策について検討の方向性が示されているが、平成28年の特異な気象状況が今後は特異でなくなることを念頭に、気候変動による外力の増加を前提にした具体的な防災・減災対策を検討する時期に来ていると考えるべきであろう。

### 【参考文献】

- 1) 平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会：平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた今後の水防災対策のあり方～気候変動への適応により、命を守り国土の保全と発展～、2017.3
- 2) 土木学会 2016年8月北海道豪雨災害調査団：2016年8月北海道豪雨災害調査団報告書、2017.4
- 3) 空知川堤防調査委員会：空知川堤防調査委員会報告書、2017.4
- 4) 十勝川堤防調査委員会：十勝川堤防調査委員会報告書、2017.4
- 5) 国土交通省北海道開発局、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所：河川堤防の越水破堤現象のうち破堤拡幅機構に関する実験報告書、2012.10
- 6) 島田友典、渡邊康玄、岡部博一、岩崎理樹、中島康博：河床勾配と川幅に応じた破堤拡幅現象の分類、土木学会論文集B1（水工学）、Vol.73、No.4、pp.1345-1350、2017.2
- 7) <http://i-ric.org/ja/>
- 8) 破堤計算ソフト（Nays2D Breach）、<http://river.ceri.go.jp/contents/tool/nays2d-breath.html>
- 9) 柿沼孝治、清水康行、飛田大輔、井上卓也、横山洋：千代田破堤実験における堤体崩壊量のモデル化、Vol.70、No.4、pp.1537-1542、2013.2
- 10) 永多朋紀、柿沼孝治、桑村貴志：音更川の河道変遷と蛇行特性について、寒地土木研究所月報、No.706、pp.2-11、2012.3
- 11) [https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa\\_kei/splaat000000vdyw.html](https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000000vdyw.html)
- 12) 国土交通省：新たなステージに対応した防災・減災のあり方、2015.10

---

土木研究所資料  
TECHNICAL NOTE of PWRI  
No.4368 October 2017

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課  
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754