

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 4391 号

令和元年度

土木研究所講演会
講演集

令和元年10月16日

国立研究開発法人土木研究所

Copyright © (2019) 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。

令和元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、「令和元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。

目 次

◆新技術を活用した社会資本の維持管理と災害時の対応

- 10:05～10:30 道路橋メンテナンスにおける AI・ICT の活用
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長 金澤 文彦・・・11
- 10:30～10:55 災害発生時の対応にロボット技術を適用する上での課題と展望
つくば中央研究所 技術推進本部長 有田 幸司・・・7
- 10:55～11:20 激甚化する水災害に対する寒地土木研究所の取組
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・・・13
- 11:20～11:45 治水機能増大のための既設ダムへの増設放流設備の設計
つくば中央研究所 水工研究グループ長 箱石 憲昭・・・19

◆激甚化する自然災害リスクの評価と対策

- 14:10～14:35 水災害分野の気候変動影響評価を支える技術開発と適応策実装への戦略
－発展途上国における取組－
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 深見 和彦・・・25
- 14:35～15:00 火山噴火後の土石流発生に対する警戒避難のための新しい取り組み
つくば中央研究所 土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム上席研究員 石井 靖雄・・・33
- 15:00～15:25 土工構造物分野における近年の豪雨災害に対する土研の取組と展望
つくば中央研究所 地質・地盤研究グループ長 金子 正洋・・・39

◆建設材料に関する技術開発の取り組み

- 15:40～16:05 持続的な舗装リサイクル技術の確立を目指して
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 藪 雅行・・・43
- 16:05～16:30 気象環境と土木材料の劣化
－土木構造物の長寿命化に向けて－
先端材料資源研究センター
材料資源研究グループ長 西崎 到・・・49
- 16:30～16:55 河川用コンクリート護岸ブロックの環境評価
－経緯・現状・展望－
つくば中央研究所 水環境研究グループ長 萱場 祐一・・・55

道路橋メンテナンスにおける AI・ICT の活用

橋梁構造研究グループ グループ長 金澤 文彦

1. はじめに

近年、道路橋の老朽化が進みメンテナンスの重要性が高まるなか、橋長 2.0m 以上の道路橋について 5 年に 1 回を基本とした近接目視点検が義務化され、今年度から 2 巡目に入っている。橋梁点検は、帳票や報告書作成等現場以外の作業も多く、これまで以上に作業の合理化が求められている。また、維持修繕費用は、今後より一層の増加が予想され、適切な点検・診断をもとにしたメンテナンスが求められている。さらに、橋梁についての専門知識を持った熟練技術者の減少などの問題も顕在化してきており、今後の点検作業の合理化や診断レベルの維持は喫緊の課題となっている。

定期点検が 1 巡し、すべての道路橋の点検・診断が行われたが、特に自治体管理の橋梁において措置が進まない状況にあると言われている。財政上の問題のほかに、診断結果内容の信頼性についても原因があるのではないかとされている。診断について納得のいく説明がされ、誤診を防止することにより、安心して措置を進めることができ、再劣化や早期劣化による手戻りも減らすことができると考える。

また、「日本再興戦略」など政府方針では、IoT、ビッグデータ、人工知能による産業構造・就業構造変革の検討が主要施策の一つとして掲げられ、AI 等について関係府省の連携の下で戦略的に研究開発を推進することが定められており、AI・ICT を活用して戦略的に予防保全を行うメンテナンスのための技術開発に取り組むことが求められている。

今後は予防保全を前提としたメンテナンスのための点検・診断であるために、予防保全の段階で損傷の兆候をとらえる点検技術、予防保全の段階を見極める診断、適切な予防保全のための措置を示す診断である必要がある。

そこで土木研究所では、公募により共同研究体制「AI を活用した道路橋メンテナンスの効率化に関する共同研究」（以下、「AI 共同研究」という）を平成 30 年 10 月に構築し令和 3 年度までの 4 年間で研究期間として、点検 AI（床版の土砂化）、点検 AI（画像解析）、診断 AI を開発している。^{1),3)}

本講演では、AI 共同研究の取り組み概要を説明し、主に診断 AI を中心に開発状況を報告する。

2. AI 共同研究

2. 1 共同研究の目的

加速度的に発展する AI 技術に着目して、メンテナンスサイクルにおける点検・診断・措置の信頼性向上を目指し、ロボットなどの支援により診断に役立つデータを取得する技術や、点検の見落とし防止や効率的な調書の作成など点検を補助する技術（点検 AI）および、劣化要因の判断や的確な措置の判断など診断を支援する技術（診断 AI）、ならびに点検・診断に関するデータの取得・保存・分析・活用を円滑に行うデータ基盤の開発を目的に共同研究を実施することとした。土木研究所が共同研究者を公募し図-1 に示す 25 者と土木研究所とで平成 30 年度から AI 共同研究を開始した。

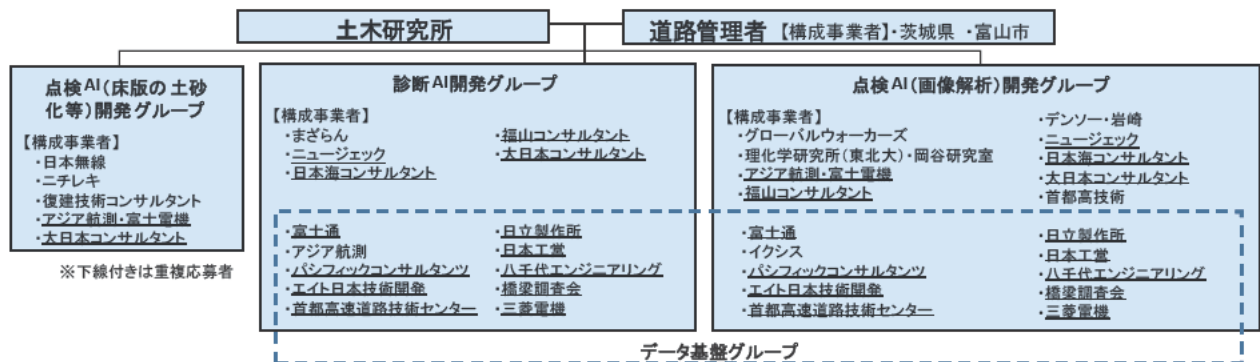


図-1 研究体制

2. 2 開発内容

AI 共同研究では、次の①から③の WG を設置して検討を進めており、共通事項として④についても検討を行うこととしている。開発を行ううえで、その要求レベル、つまりリクワイアメントを明確にしておく必要がある。図-2に示す通り、点検においては、どのような情報をどのような精度で取得し、どのように整理して情報を提供するのにかについては、診断で論理を組み立てるうえで必要な程度の精度から要求される。診断では、適切な措置を行ううえで道路管理者から明確な論理でわかりやすい説明と措置の代替案が求められる。道路管理者は、予防、完治、延命、モニタリングを伴う危機管理、更新という措置目標を設定して、施工条件や管理計画に応じて工法を選択し、措置に関する情報をカルテに記録し、次の点検での比較ができるように記録に残す必要がある。このようにメンテナンスサイクルの各工程におけるリクワイアメントは、後の工程から要求されることを踏まえて開発のリクワイアメントを決めていくことにしている。²⁾

表-1のとおり、AIの開発には3つのアプローチがあると言われている。エキスパートシステムに代表されるルールベースのアプローチは、専門家の知識やノウハウを人手でルール化し、そのルールに従ってデータを処理するもので、出力された結果について判断根拠を説明することができる。また、統計・確率論的アプローチは、データ間の因果関係を確率的に記述してデータを処理するもので、ルールベースのシステムに確率で柔軟性を持たせたもので、同じく出力結果の判断根拠を説明することができる。一方で、ディープラーニングに代表される脳科学的アプローチは、脳の神経活動を再現する数学モデルであるニューラルネットワークの階層を深くしてデータを処理するもので、結果を導く過程はブラックボックスになっている。これらの特徴を踏まえて、点検 AI、診断 AI に活用するアプローチを選択している。

①点検 AI (床版の土砂化) の開発

RC 床版の土砂化を対象に、電磁波レーダー等の技術を活用して、水の早期検出技術としての検証、早期検出を前提とした措置方法の検討を行う。電磁波レーダーの画像解析にはディープラーニングなどの技術の活用を検討し、床版の土砂化を特定するための診断では、③診断 AI の開発と連動して検討を行う。

②点検 AI (画像解析) の開発

ディープラーニングなどの画像解析技術を活用して、変状の抽出や要点検部位への誘導、採取データの分析等を行うもので、必要とされる性能を検討し、実務で使える AI の開発を行う。

③診断 AI の開発

熟練技術者の診断プロセスを可視化し、診断する際に決め手となる情報を整理し、これをもとにエキスパートシステムやベイジアンネットワークなどのルールベース、統計・確率論的アプローチを適用することにより、技術者の判断支援を行う AI の開発を行う。

④データ基盤の開発

点検・診断・措置に関するデータを収集・保管・活用・更新するシステムについて検討する。

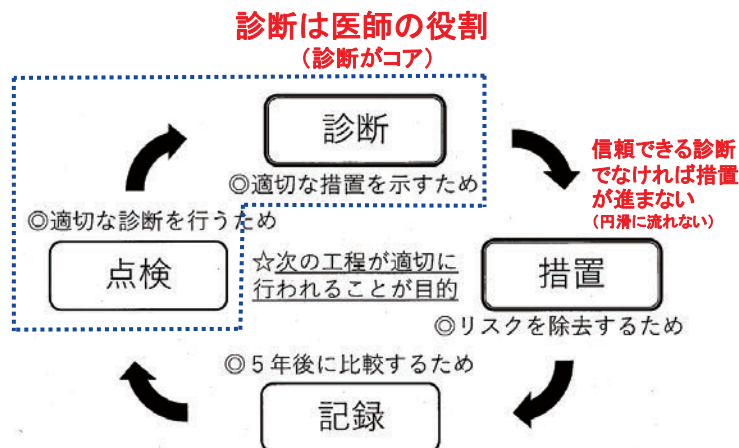


図-2 メンテナンスサイクル

表－1 AIの3つのアプローチ

アプローチ	概要	ルール生成	推論処理
ルールベース・アプローチ	・専門家の知識やノウハウを人手によってルール化し、そのルールに従ってデータを処理 IF(条件) then(処理1) else(処理2) : エキスパートシステム	人間が入力	機械
統計・確率的アプローチ	・データに内在する因果関係を確率的に記述する統計手法(ベイジアン・ネットワーク)を使ってデータを処理 Aである確率:98% Bである確率:17% ⇒ Aが妥当	機械	機械
脳科学的アプローチ	・脳科学の研究成果を取り入れ、脳の神経活動を再現する数学的モデル(ディープ・ニューラル・ネットワーク)を使ってデータを処理 : ディープラーニング	機械	機械

【図解】コレ1枚でわかる人工知能の3つのアプローチ ITソリューション塾 より編集

3. 診断AIの開発

3.1 開発の必要性

橋梁の診断技術を向上させるために、国の直轄道路管理では症例検討会や橋梁診断判定会議の実施、橋梁調査会では橋梁診断会議の実施が行われるなど、熟練技術者等の指導によるOJTが効果的である。しかし、地方自治体や地方の民間会社では、熟練技術者が不在の状況も多く診断技術向上のための教育環境に課題がある。このため、熟練技術者の代わりとなるシステムとして診断AIを開発する意義があると考えている。診断AIには、診断プロセスをシステム化するための教師となるデータが必要となる。そこで、熟練技術者が診断の際に活用している経験や知見をもとに暗黙知を含めて形式化するため、橋に生じる可能性のあるすべての劣化・損傷について、①損傷の原因から崩壊に至る現象(メカニズム)、②点検で着目する変状と検知方法及び詳細調査の活用方法、③損傷の進行程度と補修可能性を判断するための決め手となる情報、④損傷の補修方法と効果を診断セットと称して整理することとした。

3.2 診断のプロセス

熟練技術者の診断は、まず橋梁諸元・各種履歴、点検調書、前回調書との比較をもとに緊急対策の必要性の判断を行い、現地調査の結果等も踏まえ疑いのある損傷候補について、診断セットを根拠において抽出作業を行う。情報が不足する場合には、詳細調査を提示してその結果をもとに診断セットを根拠において損傷の特定、損傷の進行状態の推定を行い、措置方法の指示を含めた診断所見を示している。図-3に診断のプロセスと診断セット、情報源・抽出情報との関係を示す。

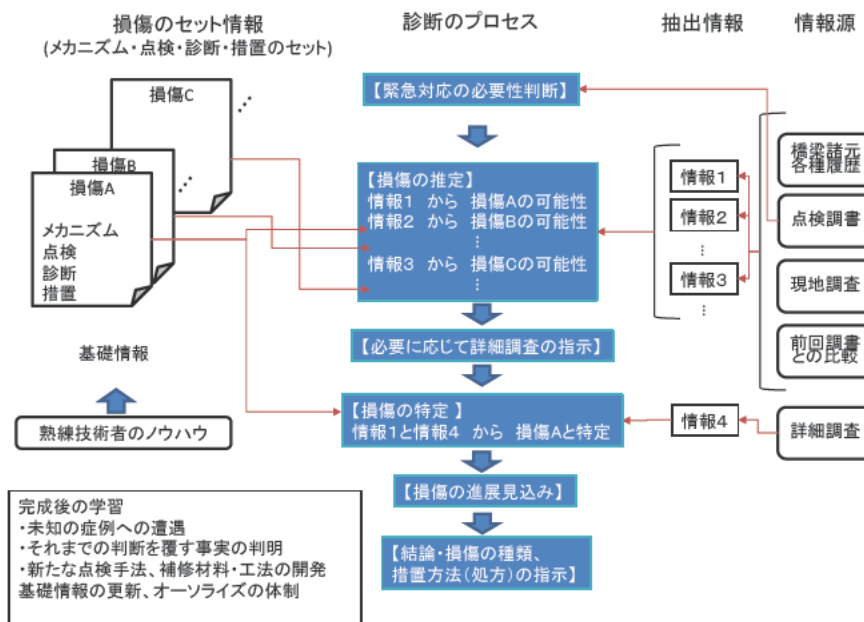


図-3 診断のプロセスと診断セット、情報源・抽出情報との関係

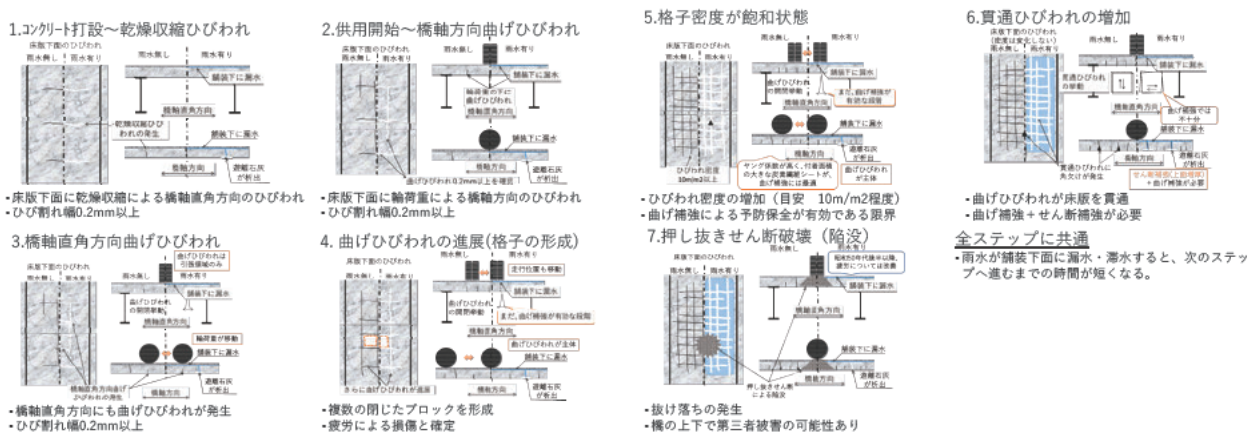
3. 3 診断セット

AI 共同研究において、部材ごと (RC 床版、PC 桁、鋼桁、支承、基礎、床版橋、鋼床版、橋台・橋脚、伸縮装置・排水装置など)、損傷ごと (疲労、土砂化、塩害 (凍結防止剤、飛来塩、海砂由来)、凍害、ASR、腐食など) に診断セットを検討している。

例えば、RC 床版の疲労の診断セットについては、図-4 (a)、(b)、(c) のとおり整理を行っている。(診断セット①、③) メカニズムについては、1.コンクリート打設後、床版下面に乾燥収縮による橋軸直角方向のひび割れが発生、2.供用開始後に、床版下面に輪荷重による橋軸方向の曲げひび割れが発生 (ひび割れ幅 0.2mm 以上に着目する)、3.更に輪荷重により橋軸直角方向にも曲げひび割れが発生 (ひび割れ幅 0.2mm 以上に着目する)、4.輪荷重の走行位置が橋軸直角方向、橋軸方向に分布して作用することにより曲げひび割れが進展し複数の格子状のブロックを形成する。この段階で疲労による損傷として確定することができる。5.格子密度が飽和状態 (ひび割れ密度約 10m/m²を目安とする) となり曲げ補強による予防保全が有効である限界な状態、6.曲げひび割れが床版を貫通し角欠けが発生、7.輪荷重による押し抜きせん断により抜け落ちが発生し橋の上下で第三者被害が発生する可能性のある状態となる。

こうした損傷メカニズムを念頭に各段階の変状の状況に応じて、(診断セット④) 措置の方針、補修・補強工法を示すことになる。図-4 (b) に示す通り、1.では降雨後に漏水が発生している場合は漏水対策として床版防水工の実施、2.から 3.までは遮水と曲げ補強を行うため床版防水工と炭素繊維接着による補強を実施する。ここまでは予防保全措置として機能する。4.以降になると事後保全措置となり、遮水と曲げ補強に加えてせん断補強も必要とし、床版防水工、炭素繊維接着及び上面増厚工法を実施したり、床版の取替を検討する。7.は第三者被害を懸念する状態となり床版の取替を実施することとなる。

以上を踏まえ、損傷として RC 床版の疲労と特定するうえで、(診断セット②) 点検時に着目すべき点として確認する項目について、診断から点検へのリクワイアメントは、図-4 (c) に示す通り、亀甲状のひび割れが発生し複数の閉じたブロックを形成しているかどうか、ひび割れ幅は 0.2mm 以上か、抜け落ちが発生しているか、について近接目視で確認する。また、ひび割れ密度 (目安: 10m/m²程度)、貫通ひび割れの発生の有無については、近接目視によりひび割れ発生状況や床版下面の漏水、角落ちの状況を確認して推定するか、詳細調査により、ひび割れ長さの計測やコンクリート削孔による孔内観察を行い判断する。併せて損傷を特定する際には、適用基準、大型車交通量、床版防水工の有無、補修・補強履歴などを台帳情報から判定に矛盾がないことを確認する。また、変状発生範囲が狭い場合にはその箇所特有の原因の特定のための調査が必要となる場合があることや、舗装下面への漏水・滞水により床版下面に漏水・遊離石灰が生じている場合に損傷の進行が速いこと、前回点検時からコンクリートの色に変化がある場合に漏水により損傷が進行している可能性があること、ひびわれ密度が飽和し貫通ひびわれが増加した段階で重要度が高い路線では床版取替が望ましいことなどを、診断において留意する必要がある。



(a) メカニズム

- 診断の決め手となる情報と措置の方針（雨水を伴う疲労）

【対象：桁間の床版】（張出し床版を含まない）

変状の状況	診断の決め手となる情報	措置の方針	工法例
橋軸直角方向のひびわれが発生	<ul style="list-style-type: none"> ひびわれ幅0.2mm以上 ひびわれや打継目からの漏水・遊離石灰の発生 	予防保全 (遮水)	床版防水
橋軸方向に曲げひびわれが発生	<ul style="list-style-type: none"> ひびわれ幅0.2mm以上 連続的なブロックは形成されていない ひびわれや打継目からの漏水・遊離石灰の発生 	予防保全 (遮水+曲げ補強)	床版防水 + 炭素繊維接着 ²
橋軸直角方向に曲げひびわれが発生	<ul style="list-style-type: none"> ひびわれ幅0.2mm以上 連続的なブロックは形成されていない ひびわれや打継目からの漏水・遊離石灰の発生 	事後保全 (遮水+曲げ補強+せん断補強)または更新 ¹	床版防水+炭素繊維接着 ² 、 ^{注3} +上面増厚 ^{注4} or 床版部分打替え or 床版全面取替
ひびわれが格子状(亀甲状)に進展	<ul style="list-style-type: none"> 複数の閉じたブロックを形成 ひびわれや打継目からの漏水・遊離石灰の発生 		
格子密度が飽和状態	<ul style="list-style-type: none"> ひびわれ密度が増加(目安10m/m²程度) ひびわれや打継目からの漏水・遊離石灰の発生 	更新	床版部分打替え or 床版全面取替
貫通ひびわれの増加	<ul style="list-style-type: none"> 曲げひびわれが全厚を貫通 貫通ひびわれに角落ち ひびわれや打継目からの漏水・遊離石灰の発生 前回点検時からのコンクリートの色の变化 		
抜け落ちの発生	<ul style="list-style-type: none"> 押し抜きせん断による陥没の有無 	更新	床版部分打替え or 床版全面取替

注1 ひびわれ密度が飽和し貫通ひびわれが増加した段階で、路線重要度が高い場合には床版取替が望ましい。

注2 炭素繊維接着と合わせてひびわれ補修が有効となるのは、ひびわれ部の清掃が十分にできる場合であることに注意する。

注3 事後保全段階で応急復旧として炭素繊維接着を実施する場合もあるが、部分打替えなどの本対策を別途検討する。

注4 上面増厚実施時は、目地部の防水、既設床版との付着性、増厚部のコンクリートの剛性に注意が必要である。

※措置の方針と工法例は管理レベル：高の橋梁に対するものを示す（管理レベル：中と低の措置方針と工法例は検討中）。

(b) 診断の決め手となる情報と措置方法

- 点検の着目点

< 損傷を特定するための点検時確認項目 >

- ひびわれ幅0.2mm以上
- 格子状(亀甲状)のひびわれ
- ひびわれにより複数の閉じたブロックを形成
- ひびわれ密度(目安: 10m/m²程度)
- 床版全厚を貫通する曲げひびわれの発生
- 抜け落ちの発生

詳細調査

- ひびわれ長さの計測
- コンクリート削孔+孔内の観察

近接目視から推定するための情報

- ひびわれ発生状況と参考写真の比較
- 前回点検からの床版下面の漏水の増加、または角落ち

青字：近接目視で確認 赤枠：詳細調査で確認

< 診断上の留意点 >

- 変状発生範囲が狭い場合にはその箇所特有の原因があるため、原因特定のための調査が必要となる場合がある。
- 舗装下面への漏水・滞水により床版下面に漏水・遊離石灰が生じている場合には、損傷の進行が速い。
- 前回点検時からコンクリートの色に変化がある場合には、漏水により損傷が進行している場合がある。
- ひびわれ密度が飽和し貫通ひびわれが増加した段階で、路線重要度が高い場合には床版取替が望ましい。

< 矛盾が無いことを確認するための台帳情報 >

- 適用基準 (S47道示より前/以降)
- 大型車交通量の大小
- 床版防水工の有無+前回実施からの年数
- 補修・補強履歴 (上面増厚、炭素繊維接着、鋼板接着など)

(c) 点検の着目点

図-4 診断セット(案)の例(RC床版の疲労)

3.4 プロトタイプシステム

前述の診断プロセスをもとに、診断 AI システムのプロトタイプを構築することとしている。システム処理の流れは、図-5の流れをイメージしている。(1)台帳データ(橋梁形式、供用年、設計基準、交通量等)、今回の点検データ(所見、損傷が疑われる部材、部位、変状等)、カルテデータ(前回までの所見、補修履歴等)などデータを取り込み、(2)対象となる橋梁を選択する。(3)これらの情報から緊急対策の必要性を判断し、(4)疑いのある損傷候補を複数抽出する。(5)必要に応じて詳細情報の取得、詳細調査の実施を指示する。(6)以上の情報をもとに損傷及び原因を特定するとともに、(7)損傷の進行度(状態)の推定、(8)その後の損傷の進展を推定して、(9)措置方針を含めた診断結果を出力し、道路管

理者の措置の実施内容をカルテに保存する。また、診断セットの情報とは矛盾したものなど診断結果として成果を得られなかったものについては、矛盾・未解決な再検討事例として保存し、研究や調査が進んで解決できるまで保留しておく。

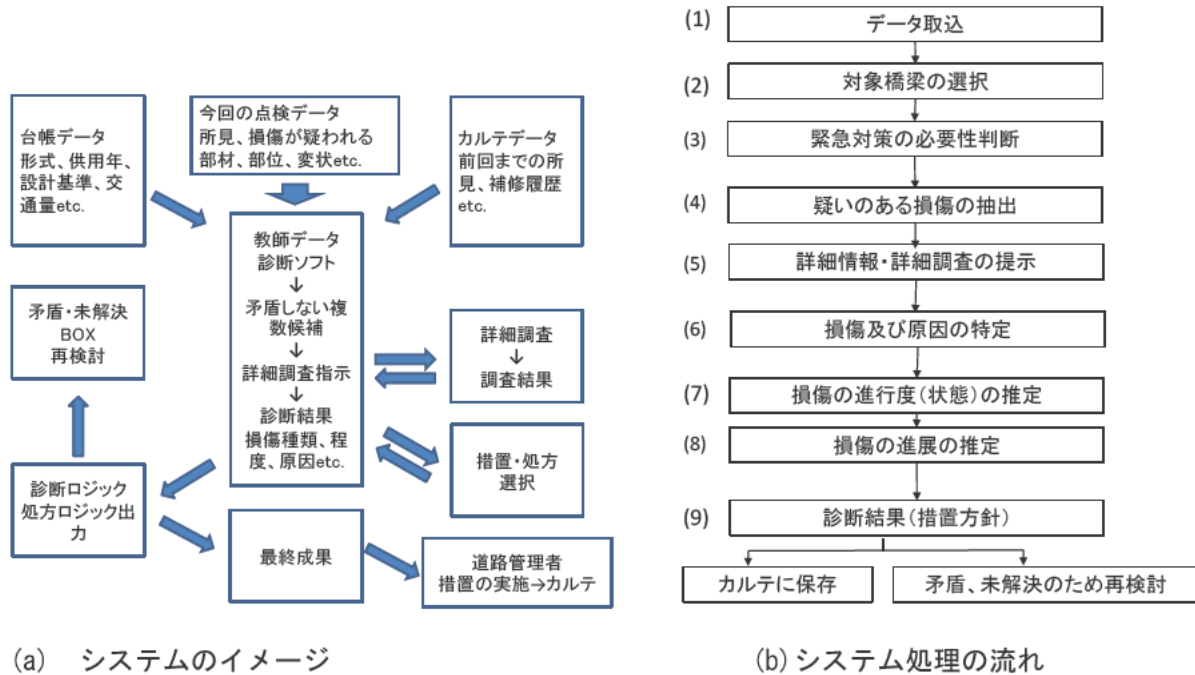


図-5 診断AIのシステム処理の流れ

3. 5 今後の検討課題

RC床版の疲労など特定の部材・損傷を対象にしたプロトタイプを構築し、来年度以降に現場での実証を行い、その結果を踏まえて診断セットを検討している他の部材・損傷も含めたシステムに拡充して実証を更に進めて、診断AIのシステム要件や共通データ基盤を明らかにしていく予定である。

診断AIを導入・普及展開を図るためには、官民の協調領域と競争領域を決めていく必要がある。診断セットの内容、システムが参照する診断プロセスのフローやデータセットなどの共通データ基盤、システムの機能要件定義やプロトタイプの構築については、協調領域と考えられ、システムの操作性、機能性、セキュリティなどは競争領域と考えられる。また、共通データ基盤について、データの提供方法・更新方法、診断AIで出力した結果の共有方法、更新データによる診断AIの拡張方法についても課題である。これらについても、今後AI共同研究のなかで検討をしていくこととしている。

導入・普及展開の段階では、システム要件をもとに公募により民間システム開発を促すことが考えられ、公募要件やシステムの評価方法についても検討課題と考えている。

4. おわりに

本講演では、AI共同研究の取り組み概要及び主に診断AIの開発状況について中間的に報告した。AI共同研究では、診断AIの開発側から診断技術者が必要とする情報を点検AIの開発側に対して要求事項として示すなど連動して進めており、今後の実証を踏まえて、一体のシステムとして早期に現場に導入できるように開発を進めていきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 土木研究所：令和元年度の土研の主な取り組み、土研HP 新着情報一覧
- 2) 西川和廣：道路橋メンテナンスサイクルへのAI導入に関する一考察、土木学会第73回年次学術講演会、2018.8
- 3) 金澤文彦：道路橋メンテナンスにおけるAI技術の活用、土木技術資料、土木研究センター、Vol.61No.1、2019.1

災害発生時の対応にロボット技術を適用する上での課題と展望

技術推進本部 本部長 有田 幸司

1. はじめに

大地震や大雨等に起因する土砂崩落等の災害発生時や活発な火山活動地域などにおいて、人が臨場や近接すること自体が困難、危険あるいは不可能といった状況下にあっても、更なる被害の拡大を防ぐための緊急対応あるいは恒常的な危険防止施設の構築が求められることがある。

この要請に応じ、人に代わって危険な環境の下でも調査や作業を迅速かつ効率的に遂行できるロボットや遠隔操作機器の実用機の開発投入が進められてきた¹⁾。しかし、災害対応ロボットの社会実装については産業競争力懇談会(2014年度プロジェクト最終報告)が「災害の発生はそれほど頻度が高くなく、市場も限定的であることから、民間の努力だけでは技術の開発・維持、社会実装を進めることが困難である。」としている²⁾。

ロボット技術の開発や新産業の創出に対して、国は「ロボット新戦略」(内閣に設置された日本経済再生本部が2015年1月に決定)に基づき、ロボット革命として関係省庁が連携し取り組むこととしている³⁾。

また、ロボット技術はその構成要素であるセンサー、知能・制御系に係る技術の進展が著しく、とりわけAI(Artificial Intelligence)技術、IoT(Internet of Things)等に対する期待が高い。さらに2020年からのサービス開始が見込まれている次世代通信規格「5G」(超高速・大容量通信、超低遅延、同時接続数の増加を可能とする第5世代移動通信システム)の普及が遠隔操作技術を大きく進展させるものと考えられている。

このような状況を踏まえつつ、土木研究所(技術推進本部 先端技術チーム)では、2016年度から災害発生時におけるロボット技術適用に関する研究に取り組んでいる。

本稿は、次世代通信規格「5G」への期待も含め、遠隔操作技術を中心に、災害発生時の対応にロボット技術を適用する上での課題と展望を整理して紹介するものである。

2. 建設機械とロボット技術の概念の関係

2. 1 ロボット及びロボット技術とは

NEDO ロボット白書2014によると「ロボット」について完全に一般性をもった定義というのは実は存在しないとのことである。同白書では、とりあえず「センサー、知能・制御系、駆動系の3つの要素技術を有する、知能化した機械システム」(ロボット政策研究会での定義)と矛盾しない程度に「ロボット」あるいはロボット技術を取り入れたシステムとしてのロボットやロボット化された装置と捉えることとしている⁴⁾。

また、「ロボット新戦略」では、「デジタル化の進展やクラウド等のネットワーク基盤の充実そしてAIの進歩を背景に、固有の駆動系を持たなくても独立した知能・制御系が現実世界の様々なモノやヒトにアクセスし駆動させるという構造が生まれてきている。今後、さらに、IoTの世界が進化しアクチュエーター等駆動系のデバイスの標準化が進めば、知能・制御系のみによって社会の様々な場面で多様なロボット機能が提供できるようになる可能性もある。」とし、「3要素の全てを兼ね備えた機械のみをロボットと定義することでは、実態を捉えきれなくなる可能性がある」と留意を促している⁵⁾。

2. 2 ロボット技術の観点から眺めた建設機械の姿

ロボット技術の3要素の観点から建設機械を眺めると、まず駆動系があり、そして制御系が備わっている。近年では、センサーや知能系に係る技術が建設機械に徐々に搭載されつつあるが、元々の建設機械の制御や作業効率はその建設機械の操作に従事する人(以下「オペレーター」という)の熟練技能に大きく依存していた。我が国の産業就業構造が変化していく中で、熟練技能を有するオペレーターの不足が問題となってきており、生産性の向上と熟練技能の継承が課題となっている。

現在はIoTを駆使して高い精度で位置や出来形の確認そして姿勢と動作の制御ができる装置やプログラムの活用実績が増えつつある。また、熟練技能を有するオペレーターの暗黙知を継承するため、AI技術を適用し、制御や作業効率の向上を図ろうとする活動も進められている。

3. 災害用ロボットの運用に使われる遠隔操作技術と無線通信システム

3. 1 遠隔操作技術の概要

遠隔操作を行うためには、センサー、知能・制御系に関する技術を災害用ロボット側と遠隔操作する側で適切に分担する必要がある。現在までのところ、災害用ロボット側で自律的に姿勢や動作を全て行うまでの技術は実用化されていない。災害用ロボットの活用が期待される現場は、地質・地盤の条件をはじめ、姿勢や動作を制御するために必要な測地情報が典型的な情報セットとして想定しづらく自律制御させることが難しいことがその要因である。

そのため、遠隔操作する側で、センサーからの情報を頼りに姿勢や動作を制御することが未だ主流となっている。

これまでの遠隔操作方式の概要を整理すると以下のようになる。

- ① ロボットを直接目視して制御する直接操作方式
- ② ロボット搭載カメラと外部カメラによる映像をモニターで視認して制御するモニター操作方式
- ③ ②に測位データや作業制御データを無線通信で伝送し精度と効率の向上を図る情報通信制御方式
- ④ ③にメッシュ LAN と中継局や光ファイバーケーブルを併用したネットワーク型遠隔操作方式



図-1 油圧ショベルの遠隔操作の様子

遠隔操作するロボットの例として、油圧ショベルを考えてみる。まず、搭乗して操作する場合、機体の移動、アームの操作は動かす部位の慣性による遅れや油圧による駆動系の応答具合、操作棒の感度による遅れ、そしてオペレーターが自身の身体特性などに習熟した上で操作している。その前提は頭を振れば眼前の視野に入ってくる情報であり、また搭乗しているからこそ体感で理解できる機体の傾き、揺れ、振動、加速度であったりする。

一方、遠隔で操作する場合、これらの情報の全てをオペレーターに伝えることは容易ではない。

また、センサーで取得した画像情報などについては情報を符号化する時間、またその逆に復号化する時間、通信システムの通信量等の制限があり、画像の解像度が低かったり、画角が狭かったり一秒あたりに送れる画面数(フレームレート)が低かったり、そして遅延(タイムラグ)が生じたりしている。これは遠隔操作技術により発揮が期待される効果の上限が、災害用ロボットに搭載している ICT 機器の能力及び使用する無線通信システムの技術規格によって制約を受けていることにほかならない。

3. 2 無線通信システムの技術規格について

今、観察しているものは全て過去の痕跡である。過去の痕跡から現在、将来における危険やリスクをどう感じ取りどう対処するかが重要である。操作・制御のための信号のやり取りのみならず、映像カメラをはじめとする各種センサーから得られた現場の痕跡をどれだけ遅延させずに伝送できるかが遠隔操作技術の要であり、無線通信システムに課せられた技術的課題である。

映像通信の遅延時間(単位はミリ秒)についてのイメージは以下のとおりである。

- ① 0ms 建設機械の前方からの対面目視
- ② 70ms カメラとモニターの直結
- ③ 300ms 伝送容量の大きい無線 LAN 環境
- ④ 700ms 伝送容量の小さい無線 LAN 環境
- ⑤ 1,000ms 公共 BB 等の無線通信環境
- ⑥ 2,000ms 人工衛星経由の通信

これまでの土木研究所における研究で、約 300ms 程度までの遅延時間であれば、作業効率やオペレーターの体感においては問題の少ない受容範囲であることが確認できている。また、現在の無線 LAN 技術では工夫を凝らしても最速で 200ms 程度の遅延時間が生じてしまう現状にある⁵⁾。

このようなことから、現場で利用可能な無線通信システムの伝送容量の範囲内で、まず遅延を抑え、そして複数のカメラ映像から可能な限り多くの情報量を遠隔操作側の複数のモニター画面に伝送するための資源配分が遠隔操作技術の重要事項となっている。この無線通信システムの伝送容量を大きく上

げ、高速・大容量通信、超低遅延、同時接続数の増加を可能とする通信規格として期待されているのが次世代通信規格「5G」である。

4G までは最大限のスループットを確保し、高速・大容量通信の提供（ベストエフォート）を目指したシステムであり、通信速度、遅延時間、カバレッジなどに限界があり、全てのユースケースへの対応は困難であった。これに対して 5G は有無線が一体となり、通信速度（モバイルブロードバンドの高度化）、接続数（大量のマシンタイプ通信）、遅延時間（超高信頼・低遅延通信）など、あらゆるユーザの要望やアプリケーションの要求条件に対応可能な優れた柔軟性を持つものとして規格が定められている。

建設分野での社会実装イメージとしては、5G サービスの提供により、高精細画像を伝送するための高速通信回線、遠隔操作のオペレーターの疲労問題から 200ms 以内の低遅延、多数の重機の同時制御が実現されることが期待されている。

また、地域や産業の個別のニーズに応じて、地域の企業や自治体等の様々な主体が自前で免許を取得し、柔軟に 5G システムが構築できる仕組みとして「ローカル 5G」の制度導入が始められようとしている。通信事業者によるエリア展開がすぐに進まない地域でも、独自に 5G システムを構築・利用することが可能となり、災害時の現場においてもその利用が考えられる。

このように「ローカル 5G」の利用環境も視野に入れることで、これまで培われてきた遠隔操作技術は更に大きな躍進の機会が訪れているものと考えられる。

4. 土木研究所での取り組み

4. 1 これまでの研究で判明した課題

これまでいくつかの災害対応ロボットが研究開発され現場に投入されてきた中で、無人化施工技術（オペレーターが建設機械に搭乗することなく、無線通信を介した遠隔操作によって工事を行う技術）は、1991 年の雲仙普賢岳の火山爆発後の工事を契機に継続的に工事に使用することで常に使える状態に保ち、2011 年の福島第一原子力発電所事故の現場において事故直後に迅速に投入がなされたことなどから、他のロボット技術と比しては、現場で活用可能なレベルに達した技術であるとの評価も得ている。

無人化施工技術は活用可能なレベルにあると言われてはいるものの、さらに問題点を潰し発展の余地について詰め、災害発生時の対応における当技術の有用性を評価する必要がある。実際に無人化施工技術を運用した地方整備局等に対して、現在抱えている運用上の問題点についてヒアリングを行い整理した結果を示すと以下のとおりである⁸⁾。

① 低い作業効率

進入路造成や掘削に係る作業効率の改善が急務

② 作業開始までの時間短縮（機器セットアップ時間の短縮）

運転室、カメラシステム（固定、移動）、無線システムの設営は現地条件（地形等）を考慮する必要がありノウハウの形式知化が必要

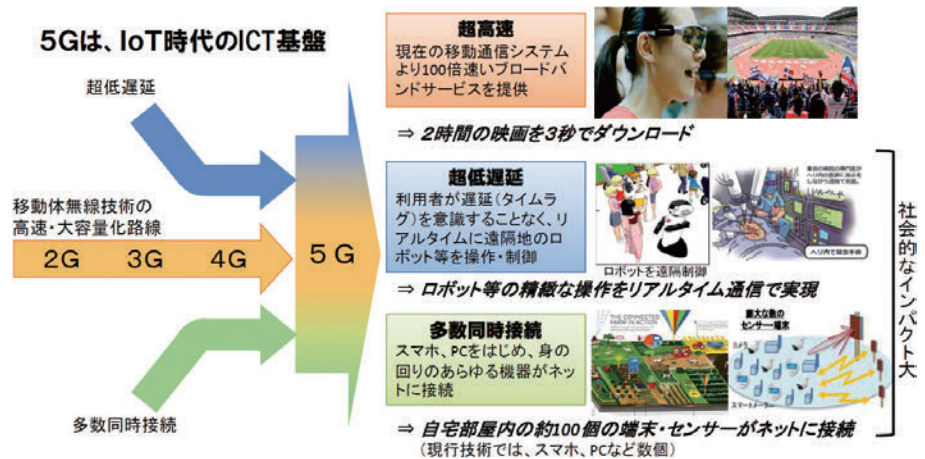


図-2 5Gの実用化で期待されている効果のイメージ⁶⁾

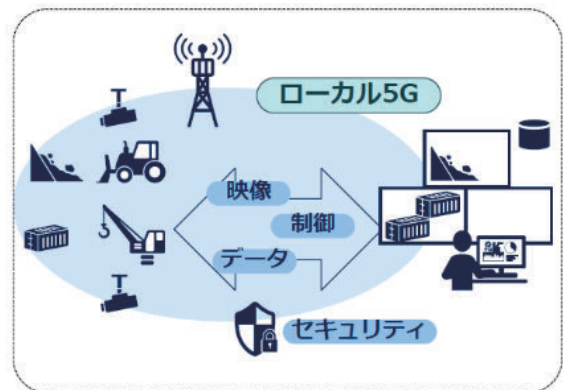


図-3 重機の遠隔操作にローカル 5G を利用しているイメージ⁷⁾

③ 既存機種での限界(初動時の制約)

アタッチメントが必要な倒流木の処理など、様々な作業種への適用が必要

④ 非常時の手続きに関するルールが不明確

初動時の対応(指揮系統の明確化、燃料調達、修理・補修、通行許可申請、無線割り当てなど)に係るルールを策定し周知徹底することが必要

⑤ 遠隔操作に精通したオペレーター、作業管理者が不足

遠隔操作に対応できるオペレーター、及びマネジメント人員の育成に必要な教習カリキュラムや技能習得フィールドが必要

4. 2 研究の概要と現在までの取り組み

4.1 で記したように、無人化施工技術の運用面での課題、より迅速・安全な復旧対応の実現に向けての課題、生産性向上の実現に向けての改善手法、運用の標準的な手法の整理など多くの課題が積み残されている。

土木研究所ではこれら課題の解決、現場での運用の向上を目指して災害発生時におけるロボット技術適用に関する研究に取り組んでいる^{9)~11)}。

① 作業効率の向上

作業効率を評価する手法を提案し、様々な画像支援技術を検証したが、遠隔操作による作業効率はオペレーター搭乗時の約 60%が限界。今後は最新の 3 次元情報を知覚できる技術(HMD(Head Mounted Display)・VR(高臨場感映像)、UAV(Unmanned Aerial Vehicle)、各種センサー(Laser Scanner 等)による機体・周辺把握、アラウンドビューシステム、シミュレーター活用による機械学習、クラウドシステム)を導入するなどして作業効率の改善が図られるか評価検証



図-4 UAVによる機体・周辺把握の実験の様子

② 迅速なセットアップ

HMD 利用による大型モニターや運転室の省略、UAV 利用による外部カメラの省略など最先端技術の適用性を評価検証

③ 様々な遠隔操作用機器の用意

運搬が容易な遠隔操作型油圧ショベルなど、様々な大きさの遠隔操作型油圧ショベルによる検証実験を実施。次世代無人化施工技術研究組合(UC-Tec)が戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)により実施した遠隔操作による半水中作業システムの開発に参画

④ 非常時のルールの明確化

無人化施工の構成要素の詳細及び災害復旧への運用マニュアルを検討

⑤ 技術の伝承(未対応、今後実施を検討)

無人化施工の実習フィールドの試行。通常工事で無人化施工習得手法

4. 3 新たな潮流(次世代通信規格「5G」、自律制御化)とこれからの取り組み

次世代通信規格「5G」について、様々な関係者が異業種連携を行うなどして建設機械の遠隔操作、自動化に係る研究開発、実証試験の取り組みを進めている。土木研究所としては「5G」の具体的なユースケースについてその技術的効果の評価検証していくとともに、現場において現行の無線 LAN システム構築の場合と比較して、どの程度迅速に「5G」の利用環境の設営ができるかなど「5G」の導入効果について調査し評価していきたいと考えている。

自律制御化について、ロボット技術に関わるセンサー、AI 技術や高速処理可能な ICT 基盤技術など自律制御に関する技術が近年著しく進展してきており、これまで自律制御化されていなかった動作・システムについても自律制御化が進められていくものと考えている。土木研究所としては、人が遠隔操作

する際の人、ロボット双方に対する制御や作業効率などの評価検証に引き続き取り組んでいく一方、建設機械の自律制御化についても調査し評価していきたいと考えている。この点について、まずは建設機械の自動化レベルの定義を提起し、具体的な自律制御の共通イメージについて関心を持つ者同士の情報交換を促進していきたいと考えている¹²⁾。

5. おわりに

危険環境下におけるロボット技術は、まず現場に安定した無線通信環境を確立し、その無線通信能力の制約に応じて、ロボットに対する遠隔操作と自律制御の分担が図られてくるものである。

仮に、貧弱な無線通信環境しか得られなかった場合、遠隔操作に必要な映像データ分の通信量を割り当てることができず、現場のロボットに自律制御を期待したくなる。しかし、災害や事故現場は想定外の環境であることがほとんどで突発的なミッションに対応できる自律制御はきわめて難しく、結局、そのまま制御や作業効率の低下に繋がってしまうということになる。

無線通信システムについては、これまでも技術規格の引き上げが図られてきたが、次世代通信規格「5G」は、これまでより高い周波数と広い帯域を利用した低遅延、大容量の通信を目標とした無線通信システムであり、サービス導入に合わせて遠隔操作技術の大いなる進展が期待される。

災害発生時のロボット技術に適用が可能な諸技術はそれぞれ跛行的に進捗している。今後とも遠隔操作と自律制御の両方の面から柔軟に最良の分担組み合わせとなることを意識して、市場性、装備・運用面も考慮に入れた研究開発を進めてまいりたい。

【参考文献】

- 1) 浅間一：災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システムの構築、日本ロボット学会誌 Vol32 No1, pp37-41, 2014
- 2) 産業競争力懇談会：災害対応ロボットの社会実装、2014年度プロジェクト最終報告、2015.3.5
- 3) 日本経済再生本部：ロボット新戦略、2015.2.10
- 4) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：NEDO ロボット白書 2014、2014.7.17
- 5) 梶田洋規、伊藤禎宣、橋本毅：無人化施工技術における生産性向上に向けた取組み、土木技術資料 59-1、2017
- 6) 情報通信審議会 情報通信技術分科会 新世代モバイル通信システム委員会報告：「新世代モバイル通信システムに関する技術的条件」のうち「第5世代移動通信システム(5G)の技術的条件」、2018.7.31
- 7) 情報通信審議会 情報通信技術分科会 新世代モバイル通信システム委員会報告：「新世代モバイル通信システムに関する技術的条件」のうち「地域ニーズや個別ニーズに応じて様々な主体が利用可能な第5世代移動通信システム(ローカル5G)の技術的条件等」、2019.6.18
- 8) 橋本毅、藤野健一、梶田洋規、油田信一：無人化施工の運用に関する課題点と今後の無人化施工機器の開発方針について、第73回土木学会年次学術講演会、pp1431-1432, 2018
- 9) 山内元貴、橋本毅、藤野健一：HMDを用いた遠隔操作型油圧ショベルの視覚提示システムの開発、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2A2-A04, 2018
- 10) 加藤 崇、木下 勇人、西田与志雄、橋本毅、山田 充：HMDを用いた臨場型遠隔映像システムの開発、第74回土木学会年次学術講演会、ppVI346-VI347, 2019
- 11) 桐林星河、薬師川楓、五十嵐傑、永谷圭司、橋本毅、山内元貴、藤野健一：無人化施工機械の遠隔操縦支援を目的とした空撮映像の評価、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2A1-K01, 2018
- 12) 橋本毅、山田充、山内元貴、新田恭士、油田信一：建設機械自動化レベル策定に向けて、第19回建設ロボットシンポジウム論文集、2019

激甚化する水災害に対する寒地土木研究所の取組

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 27 年の関東・東北豪雨、平成 28 年の北海道・東北豪雨、平成 29 年の九州北部豪雨、平成 30 年の西日本豪雨と、近年、気候変動の影響とも考えられる深刻な水災害が頻発している。これに対して土木研究所では、平成 28 年度から平成 33 年度までの第 4 期中期計画において、「安全・安心な社会の実現への貢献」という目標の下、「近年顕在化・極端化してきた水災害に対する防災施設設計技術の開発」や「国内外で頻発、激甚化する水災害に対するリスクマネジメント支援技術の開発」等の研究開発プログラムを推進している。ここでは、上記の研究開発プログラムの中から、寒地土木研究所が実施している河川関係の 3 つの研究課題を紹介する。

2. 破堤被害を最小化するための破堤氾濫流量の軽減技術に関する研究

2. 1 研究の背景

1. で述べた水災害の激甚化により、堤防決壊が今後増加することが懸念されるため、本研究では、①堤防決壊後に河川水が堤内地に流入している状況下で決壊口を早期に締め切る技術の開発、②越水から堤防決壊までの進行速度を抑制する技術の開発、を行うこととしている。ここでは、特に、①に関する現時点の成果を紹介する。

2. 2 河道特性に応じた決壊口の拡幅現象の分類

堤防決壊後の決壊口は、例えば、上下流のどちらかの方向への拡幅が卓越したり、非常に深掘れしたものが見られる等、様々なタイプがある。想定される決壊箇所での決壊口の拡幅現象がある程度予想できれば、効率的な締切方法を事前に検討することが可能となるので、模型実験と数値計算により、河道特性（川幅、河床勾配）に応じた決壊口の拡幅現象の分類を行った（図-1）。以下に、決壊した瞬間の河道内の水深が同じであった場合の、分類ごとの特徴及び特徴を考慮した締切工事の要点等を記載する。

（1）川幅が狭い場合

決壊による河川水位の低下が生じやすく、決壊口の拡幅は進行しにくい。上流域での決壊の場合には洪水継続時間が短い傾向にあるため、氾濫被害軽減のためには締切工事への迅速な着手が重要である。

（2）川幅が広い場合

決壊による河川水位の低下が生じにくく、決壊口での堤内外水位差が大きくなるので、決壊口の拡幅が継続して決壊幅は大きくなる。氾濫流量も大きいため締切工事による減災効果が発揮されやすい。河床勾配が急な場合には決壊口内の流速が大きくなるので、投入資材の流出防止等の工夫が必要である。

（3）河床勾配が急な場合

決壊口内の流速が大きく、氾濫流の流向は斜め下流方向となり、下流側への決壊口の拡幅が卓越する。決壊口の下流側での欠口止工を最優先で行い、可能であれば漸縮工も引き続き行う。氾濫流が比較的穏やかな決壊口の上流側では施工条件が厳しくないため漸縮工を効率的に進めることができる。

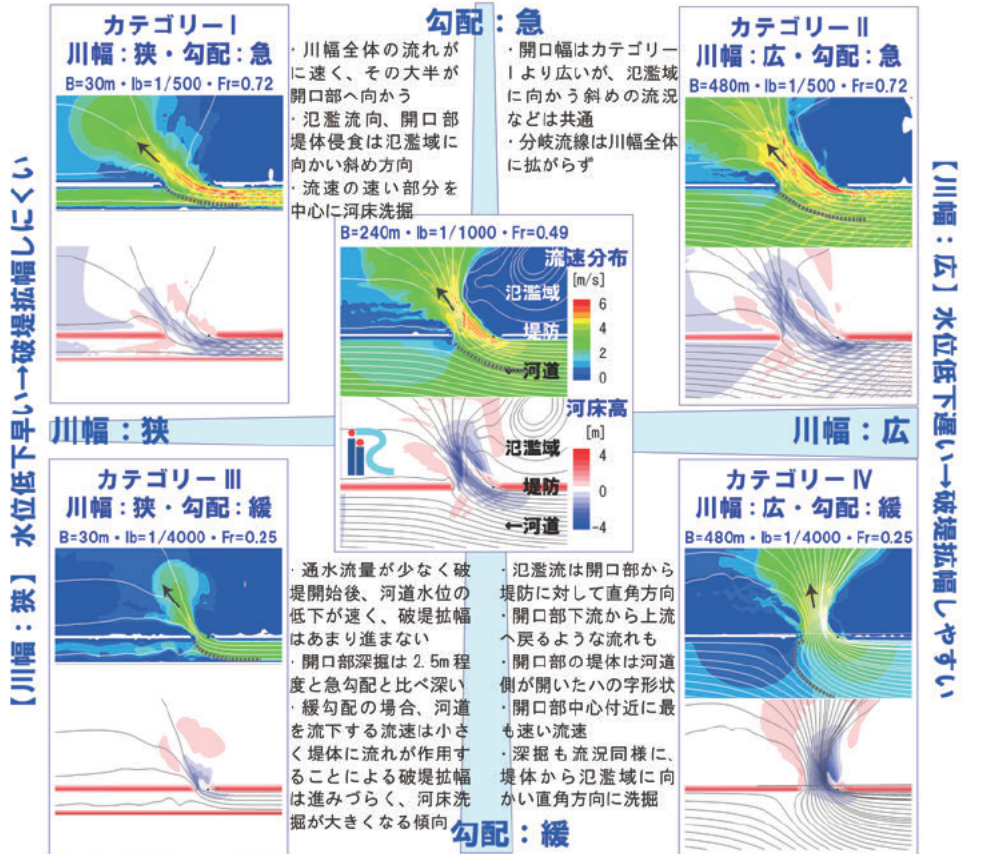
（4）河床勾配が緩い場合

堤防法線に対して直角方向に氾濫する流況となり、決壊口中央では流速が大きく、深掘れが生じる傾向がある。決壊口の両側からの漸縮工が効果的であるが、深掘れ箇所では多くの投入資材が必要となる。

2. 3 締切資材投入の効率化に向けた実験

近年の北海道内での緊急締切工事等の事例を調査したところ、全事例で工事の初期段階では締切資材の投入にクレーンではなくバックホウを用いていた。そこで、バックホウを使用して決壊口と想定した箇所に複数の方法でブロックを投入し、各投入方法の作業効率を計測した（図-2）。ブロックの投入は図-3に示す方法を組み合わせた 4 ケースとした。ケース 1・2 では一般的なワイヤーロープを用いて玉掛けを行い、玉外しは決壊口付近の堤防天端で人手により行った。投入はバケットでブロックを決壊口方向に押し出して行ったが、ケース 1 では 1 個ずつ押し出し、ケース 2 では運搬重機に積載した全てのブロック（ダンプトラックの場合は 3 個）を決壊口付近の堤防天端に並べた後に連続して押し出した。ケース 3・4 ではオートフック（吊り荷が着地すると自動的に玉掛けしたワイヤーが外れるもの）を用いた。玉外しの際に作業員が決壊口に近付く必要がないため、施工の安全性向上が期待できる。ケース 3 ではケース 1 と同様にブロックをバケットで決壊口方向に押し出し、ケース 4 ではブロックを決壊口

【勾配：急】 氾濫流縦断方向卓越→破堤拡幅下流進行、裏法尻先行



【勾配：緩】 氾濫流は開口部中央部分集中→表法の侵食先行、破堤形状、深掘顕著

図-1 河道特性に応じた決壊口の拡幅現象の分類

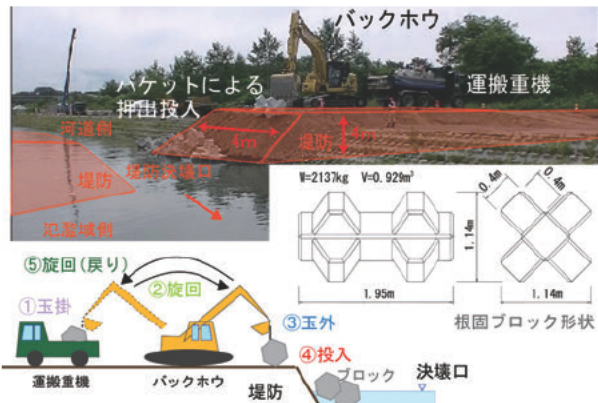


図-2 投入実験の概要と用いたブロック



図-3 投入実験の状況

斜面部に直接着地させることで決壊口へ直接投入を可能にして作業効率の向上を期待した。

図-4 にブロック 1 個当たりの平均投入時間を示す。基本となるケース 1 は 110 秒/個、連続投入したケース 2 は 103 秒/個で、まとめて投入することで 7 秒程度の短縮となった。オートフックを用いた場合は、ケース 1 と比べると、押し出しであるケース 3 は 128 秒/個と 20 秒程度の延長、直接投入であるケース 4 は 99 秒/個と 10 秒程度の短縮となり、想定どおりの大幅な短縮とはならなかった。これは玉掛けに要する時間がワイヤーロープに比べて 30 秒程

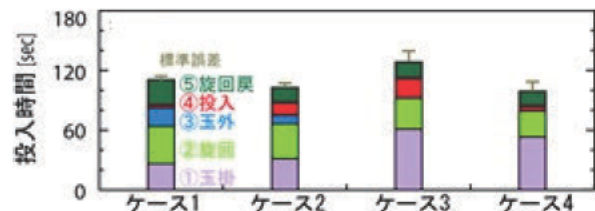


図-4 ブロック投入平均時間 (1 個当たり)

度長くなったため、オートフックを用いた玉掛作業の訓練等による作業効率の向上の余地がある。また、ケース4では、投入済みの積み上がったブロックと投入したばかりブロックの間にワイヤーが絡まるがあった。このような絡まりは復旧作業の遅延のみならず、重機転倒などの危険性もあるため、オートフックによる直接投入では、ブロックの着地位置を意識した作業が必要である。どの投入方法を採用するかは、実際の現場条件次第ではあるが、バックホウによるブロックの投入には現状で2分/個程度の時間のかかることがわかった。

3. 高流速下の水流・水面波・掃流砂による構造物の安定性評価と維持管理技術の開発

3. 1 研究の背景

高流速条件下で発生する三角波（図-5）にどのような河川管理上のリスクがあるのかは明らかとなっていない。これは、三角波の発生条件が不明であるため、洪水時の三角波の観測が困難であり、三角波の実態解明が進んでいないためと考えられる。これまでに見られた三角波の中には波高が2-3mと水深スケールまで発達するものもあり²⁾、河川構造物の被災要因の一つである可能性は否定できない。また、気候変動により、高速流の発生する大きな出水が増加すれば、三角波の発生頻度も増加して構造物の被災も増える可能性がある。そこで、本研究では、①三角波の発生する水理条件を明らかにすること、②三角波が構造物に及ぼす影響を評価する技術を開発すること、③三角波発生時の構造物の被災防止技術を開発すること、④三角波の発生を再現できる数値解析モデルを開発すること、を目的としている。ここでは、特に、①及び②に関する現時点の成果を紹介する。

3. 2 三角波の発生条件に関する実験

フルード数、無次元掃流力、水路幅-水深比等のパラメータを幅広く網羅するようにして、水路幅、水路勾配、粒径、流量を変化させて、全27ケースの移動床の水理実験を実施した。その内、12ケースで三角波が発生し、この12ケースでは小規模な河床波の発生が確認された。図-6に観測された三角波の例を示す。水路中央の水面が三角状に発達して縦断方向に列を成して発生する場合（図-6左）だけでなく、横断方向に複数の列を成して発生するケース（図-6右）も確認された。従来、三角波は低水路の中央付近で発生すると考えられてきたが、この結果は三角波が低水護岸の近傍等を含めた河道内のより広い範囲で同時に発生する可能性を示唆している。

次に、三角波の発生条件について検討するために、芦田・道上³⁾が示した小規模河床形態の分類図に本実験で得られたデータをプロットした（図-7）。図より、三角波が発生した全ケースはUpper regimeに分類されることがわかる。一方、Transition領域に位置するケースでは三角波は非発生であった。水面波と河床波が同位相であったことも考慮すると、観測された河床波は反砂堆であったと考えられ、三角波の発生には反砂確が重要な役割を担っていることがわかる。また同図より、Upper regimeに分類されたケースでも水深-粒径比が小さい場合では、三角波は非発生になりやすい傾向が見て取れる。次に、フルード数と無次元掃流力を両軸に取り三角波の発生・非発生の関係を見たものを図-8に示す。この図より、フルード数が概ね1以下のケースでは三角波は発生していないことがわかる。これらの非発生のケースは、図-7のTransition領域に位置するケースである。また、無次元掃流力が小さいケース、もしくはフルード数が比較的大きいケースでは、三角波は非発生となるケースが多いこともわかる。なお、図-8にA川とB川のデータがプロットされているが、これらは北海道内の2つの急流河川における生起確率ごとの高水流量を算出してプロットしたものである。生起確率が1/10~1/20程度以上の大きな洪水が発生すると、三角波の発生領域に入ってくる事がわかる。このため、気候変動によって豪雨がこれまでよりも頻繁に発生するようになれば、三角波もそれに応じてより頻繁に発生することになる。



図-5 三角波(昭和56年8月洪水 豊平川)¹⁾

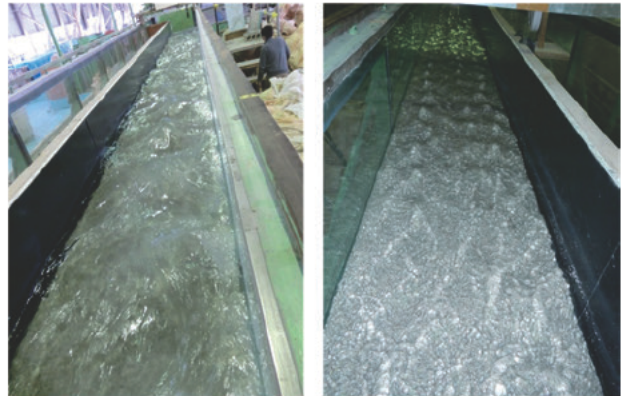


図-6 実験で観測された三角波
(左：中央に1列の波、右：横断方向に3列の波)

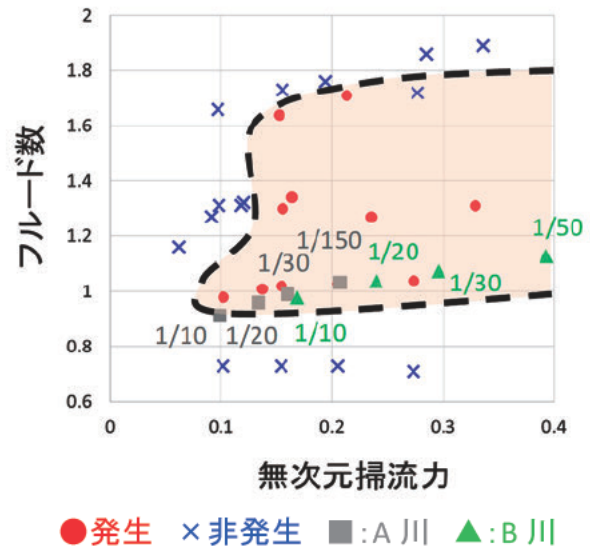
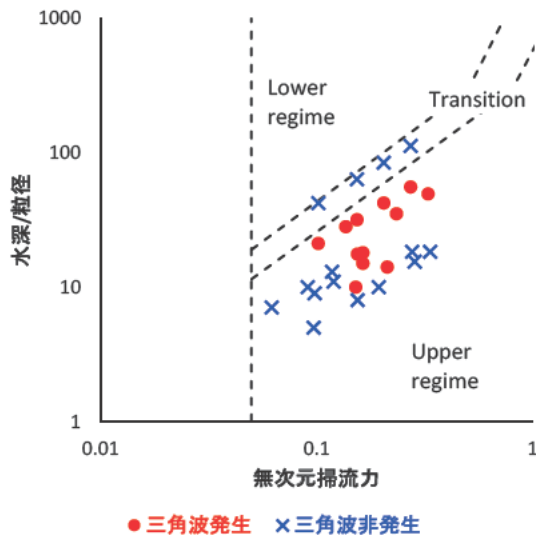


図-7 本実験結果と小規模河床波領域区分図⁴⁾ 図-8 本実験結果とフルード数、無次元掃流力との関係

3. 3 三角波の発生が構造物の安定性に及ぼす影響

「護岸の力学設計法」⁴⁾では、根固めブロックの一部が流体力により滑動・転動して移動する場合の限界流速を、ブロックに作用する抗力、揚力、重力、摩擦力の釣り合いやこれらの力のモーメントの釣り合いから導いており、ブロックが移動しないための必要重量は、ブロックに作用する流速の6乗に比例するとしている。実際には、想定する外力（流量）と河道条件から水理計算によって流速を算定してブロックに必要な重量を求めることで、ブロックの力学的安定性を照査する。また、水理計算で考慮できない要素、例えば湾曲や砂州による流れの偏流の影響などは、作用流速に対して割り増し係数などを別途かけることで対応する。しかしながら、この設計法では、三角波の影響は考慮されていない。三角波が発生すれば、水面と河床の変動によって、局所的に強い高流速が生じて、構造物に対して瞬間的に大きな流体力が作用することで、被災の要因となり得ることは容易に想像できる。そこで、三角波が発生する流れ場が護岸等のブロックの安定性に及ぼす影響を把握する実験を行った。また、三角波発生時の流況を詳細に計測し、流況とブロックの安定性との関係を検討した。

(1) 三角波発生時のブロックの安定性に関する実験

実験で用いるブロックの模型は、形状を単純化した直方体の平型とし、形が相似で大きさの異なる5種類の模型を用意した。三角波が発生する水理条件でも平坦固定床では三角波が発生しない性質を利用し、三角波が発生する条件での平坦固定床と比べて、三角波が発生する条件での移動床ではブロックの安定性が低下するかどうか、また低下する場合、どの程度ブロックが移動しやすくなるのかに着目した実験を行った。なお、三角波が発生しない条件でも実験を行った。

実験結果を図-9、10に示す。固定床では、三角波の発生条件を満たしているかどうかにかかわらず、ブロックの移動と停止の境界は、図中に点線で示した流速の6乗に比例する曲線で概ね表現できることがわかる。一方で、移動床では上記と同じ点線の曲線では移動と停止の境界を十分には表現できず、境界を示す線は実線の曲線で示したものとなる。図-9の三角波が発生しない条件では、点線と実線のずれは比較的小さい。一方で図-10の三角波が発生する条件では、2つの線には大きなずれがあり、移動床でブロックの移動を防ぐには固定床よりも3.5倍のブロック重量が必要なことがわかる。本結果は、三角波が発生する場では、護岸等のブロックの必要重量が顕著に増加することを示唆している。

(2) 三角波発生時の流況測定（ブロックの不安定化要因の解明）⁵⁾

(1)の実験で三角波発生時にはブロックが移動しやすくなることが明らかとなったので、その要因解明のために、三角波発生時の流況を詳細に計測した。実験では、まず、移動床で三角波を発生させた上で反砂堆の形状を計測し（図-11）、その計測データをもとに反砂堆形状を模した固定床を作成した。その後、移動床と同じ流量を固定床水路に流して、反砂堆上に発生する三角波の形状と内部流況を詳細に計測した。図-12に反砂堆の中央での流下方向と鉛直方向の局所流速と平均流速（平坦河床での流下方向の平均流速）の比を示す。この平均流速が「護岸の力学設計法」⁴⁾における護岸の必要重量算

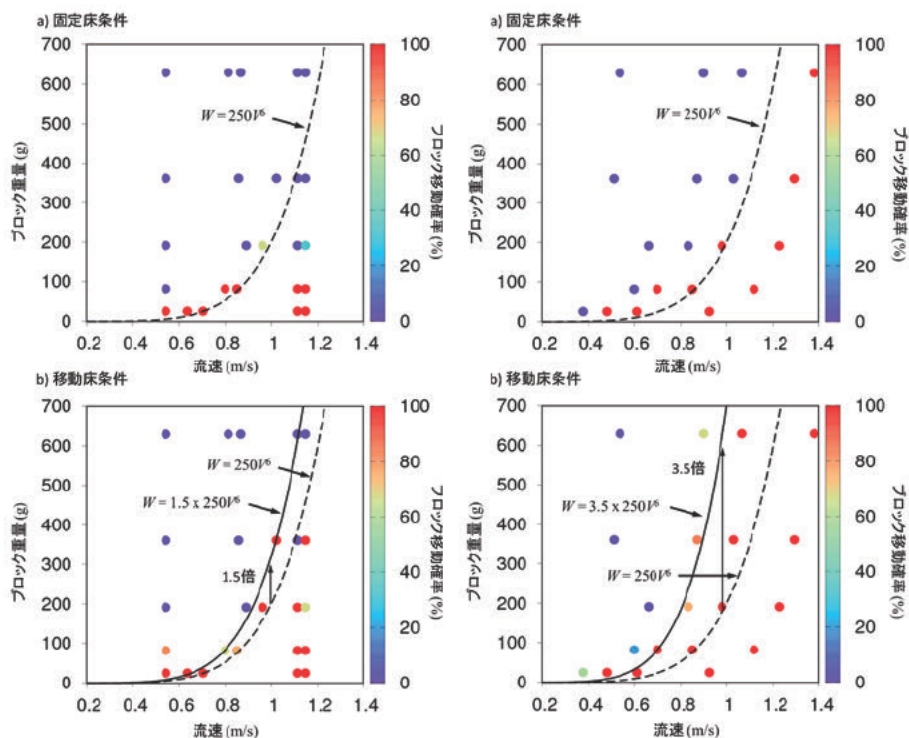


図-9 三角波非発生条件におけるブロック移動確率と流速-ブロック重量の関係

図-10 三角波発生条件におけるブロック移動確率と流速-ブロック重量の関係

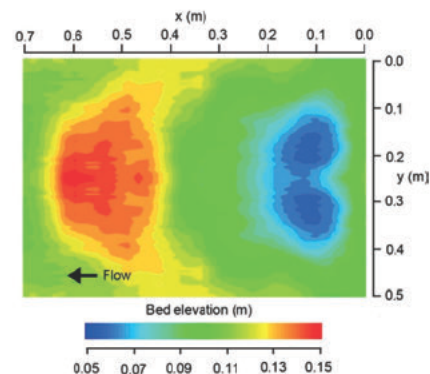


図-11 反砂堆の河床形状

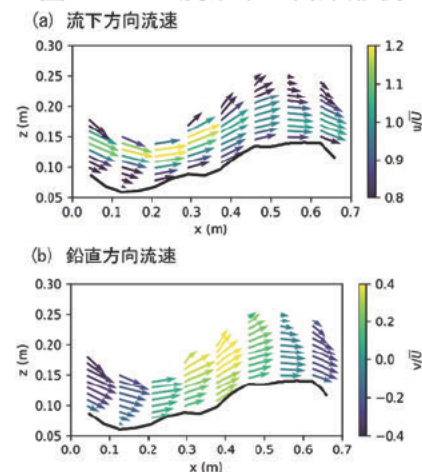


図-12 局所流速と平均流速の比

定で用いられる代表流速に相当するとともに、図-12aに示した u/\bar{U} の最大値(1.2)が割り増し係数であるとすれば、反砂堆形成時のブロックの必要重量は平坦河床に比べて約3倍($1.2^6=2.986$)となる。これは、(1)の実験に対して約15%の過小評価となるが、過小評価の要因としては、流速の時間変動や上昇流の影響(図-12bの v/\bar{U})が考えられる。今後、これらの要因をブロックの必要重量算定にどう反映させるかが次の課題となる。

4. 3D 浸水ハザードマップ作成技術に関する研究

4.1 研究の背景

激甚化する水災害に対するソフト対策としてハザードマップ(以降、HMと記載)の活用が推奨されており、全国の自治体でHMの作成が進んでいる。しかし、平成22年に内閣府がまとめた「防災に関する特別世論調査」⁶⁾によると、約7割の市民がHMを確認していないという結果が出ている。国土交通省では、平成27年の関東・東北豪雨の際にHMが避難行動に結びつかない事態が多数発生したことを受けて、「水害ハザードマップ作成の手引き」⁷⁾を改定し、水害時の住民避難にHMが有効活用されるように、単にHMを配布するだけでなく、インターネットでの公表、説明会・ワークショップ等を開催して、HMの理解促進に努めることが重要である旨を自治体に周知した。しかしながら、岡山県倉敷市の真備町では、HMの全戸配布に加えて出前講座等の開催によりHMの理解・活用の促進に努めていたが、平成30年の西日本豪雨では、実際の浸水域がHMとほぼ同じであったにもかかわらず、51名が犠牲となった。

一般的に洪水用のHMは事前に浸水深、避難場所、避難ルートを確認しておくことを前提としているが、例えば、外国人を含めた旅行者に事前の確認を期待することは難しく、仮に旅行者が事前の確認しようとしても土地勘が無い上に凡例などの理解にも時間を要すると思われるため、十分に理解できるのか疑わしい。このため、HMをよりわかりやすく、住民目線のものへと転換するための研究開発が進められている。例えば、国土交通省はWeb地図を用いた「重ねるハザードマップ」⁸⁾の提供を始めている。

4.2 3D 浸水ハザードマップの概要

本研究は、浸水リスクの情報や避難場所等の情報を、その地域を初めて訪れた方にもわかりやすく伝



図-1 3 札幌駅周辺の浸水状況（鳥瞰図）



図-1 4 札幌市中島公園付近の浸水状況

えることのできる HM を提案することを目的としており、具体的には、Google 社の Google Earth 及び Street View を活用した HM（以降、3D 浸水 HM と記載）の提案を行っている。Google Earth 及び Street View を活用する理由は、地形や建物、街並み等の 3 次元モデルが整備されており、平面的な眺め、鳥瞰的な眺め及び街角からの眺めを任意の角度で見ることができるとともに、これらの情報を無料で利用できるからである。無料で利用できるため、自治体が安価に 3D 浸水 HM を作成することが可能となる。なお、田中らが開発した Street View 上の仮想現実空間に浸水深を投影する技術⁹⁾を用いて研究を進めている。

大まかな 3D 浸水 HM の作成手順は、①浸水想定区域図を作成するために実施された氾濫計算の結果（浸水深のデータ）を河川管理者から入手し、②Google Earth に投影するために計算結果の座標を緯度経度に変換し、③座標変換された浸水深のデータから KML ファイル（または KML ファイルを圧縮した KMZ ファイル）を作成する、という流れになっている。KML ファイルは、電子地図を制御することができ、例えば、Google Earth の地表面を指定の角度で眺めたり、特定の地点に記号や文字、ポリゴン等を表示することができる。3D 浸水 HM の KML ファイルには、浸水深のデータから作成した 3 次元ポリゴンのデータが格納されており、このポリゴンのデータにより、Google Earth 及び Street View 上で浸水状況が表示される仕組みとなっている。

実際に 3D 浸水 HM を使用する際には、Google Earth がインストールされたコンピュータ（またはスマートフォン）上で KML ファイルをダブルクリックすると、Google Earth が自動的に起動して KML ファイルの内容にしたがって上空から見た地表の浸水状況が表示される。また、画面表示を Street View に切り替えれば、地上から見た街角の景色に浸水面を表示することも可能である。さらに、スマートフォンの位置情報を ON にすれば、自身の現在地周辺の浸水状況も容易にわかる。

ここでは、札幌市中心部の浸水状況の表示例を示す（図-1 3、1 4 © 2018 Google、© 2018 ZENRIN）。リアリティのある画像であるため、子供や外国人でも浸水深を直感的に理解することが可能である。

5. おわりに

紹介した 3 つの研究は、いずれも予定している研究期間の半分程度が経過したに過ぎず、今後も研究成果の最大化及び社会実装に向けて研究を精力的に進めていきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 北海道開発局札幌開発建設部：石狩川流域誌、2010.
- 2) 山口甲：日本一の急流都市河川 豊平川、(財) 河川環境管理財団北海道事務所、2005.
- 3) 芦田和男、道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、Vol. 195、1971.
- 4) 国土開発技術研究センター編：改訂護岸の力学設計法、山海堂、2007.
- 5) 井上卓也、岩崎理樹、矢部浩規：三角波形成時の河床・水面形状と内部流況の計測、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 75、No. 4、2019. (印刷中)
- 6) 内閣府政府広報室：防災に関する特別世論調査、2010. 1
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局：水害ハザードマップ作成の手引き、2016. 4
- 8) 国土交通省：重ねるハザードマップ <https://disaportal.gsi.go.jp/maps/>
- 9) 田中甫幸、井上卓也、清水康行：KML を用いた氾濫計算可視化の高度化、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 73、No. 4、I_331-I_336、2017.

治水機能増大のための既設ダムへの増設放流設備の設計

水工研究グループ グループ長 箱石 憲昭

1. はじめに

近年、毎年のように洪水被害が発生し、気候変動の影響による水害の頻発化・激甚化が懸念されている。また、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。このような認識のもと、国土交通省は、既設ダムの有効活用をより一層推進するための「ダム再生ビジョン」を2017年6月に策定している。

既設ダムの有効活用のための放流設備の増設は、既設ダムの運用改善や機能向上を目的としてこれまでも実施されてきたが、その配置は既設ダムの施設配置によって大きな制約を受ける。また、わが国では既設ダムの機能を代替する施設がなく運用を継続しながら施工することがほとんどであり、貯水池機能を確保するための大規模な仮締切の設置や、工事中の洪水調節への対応など、様々な配慮が必要となる。

本稿では、既設ダム堤体への洪水調節用放流設備の増設や地山へのトンネル式洪水吐きの新設といった治水機能増大のための既設ダムへの放流設備増設について、国土交通省（旧建設省を含む。以下同様）による実施事例と土木研究所が行ってきた水理模型実験による設計について紹介する。

2. 治水機能増大のための放流設備増設の必要性

洪水調節容量を有する多目的ダムの建設がはじまったのは1940年代であるが、洪水調節用のゲートは、それ以前に建設されていた発電用ダム等と同様に、堤頂に並ぶ形式であった。洪水調節容量をより多く確保するためには、洪水調節開始水位（洪水調節による貯留を開始する貯水位）を低くすることが求められる。その結果、越流頂標高を低くするために堤頂に設置するゲートの扉高を大きくすることや、ダム堤体の比較的低い位置に大流量を放流可能な高圧放流管を設置することが求められるようになった。なお、高圧設備とは設計水深25m以上の設備のことである。

洪水を貯留したときの水深が大きくなると、ゲートに作用する水圧が大きくなり水密の確保が難しくなる。また、ゲートを通過する流れが高速となり振動等への対策が必要となる。こうした課題に対応しながら、ダム用ゲートの設計・製作技術は発展を遂げてきた。

既設ダムにおいて、ダム堤体を嵩上げせずに洪水調節容量を増大させるためには、洪水調節開始水位を従前より低くする必要がある。また、流入量が無害流量（下流に被害が生じない流量）より小さいときは流入量と同量を放流して洪水調節容量を温存し、流入量が無害流量を超える洪水を貯留することができれば、最も効率的に洪水調節容量を活用できる。

しかし、ダム用ゲート技術の発展途上であった既設ダム等では、洪水調節開始水位を低くして洪水調節容量を増大させても、低貯水位における放流能力が不足し、図-1の左図のように洪水初期に貯留が生じ、その結果治水容量を使い切って異常洪水時防災操作に移行し放流量が増大することが考えられる。低貯水位に

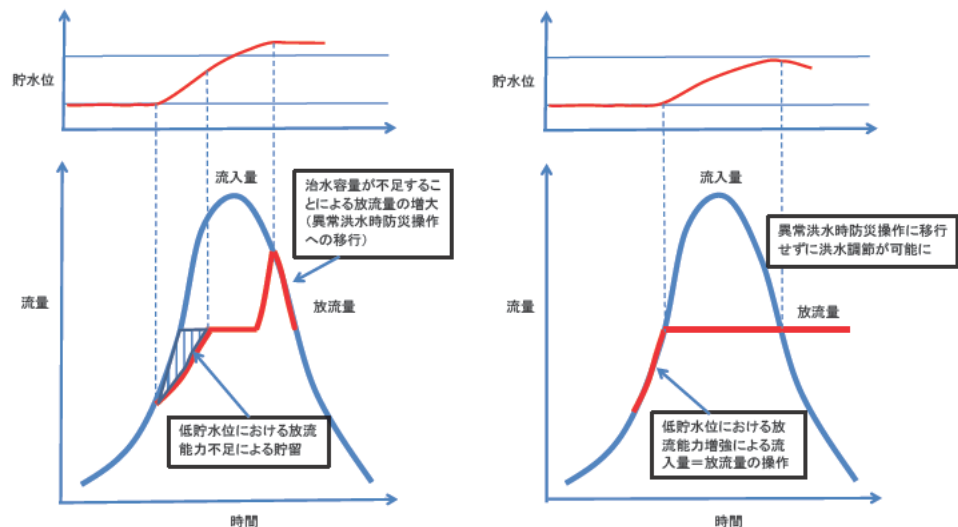


図-1 低貯水位における放流能力増強の必要性

おける放流能力を増強することで、図-1の右図のように、洪水の立ち上がり時に貯水位を低く保ったまま、流入量の増加に合わせて放流量を増加させていく操作が可能となり、洪水調節容量を有効活用できるようになる。

3. 放流設備増設の事例

3.1 放流設備の増設方法

放流設備の増設方法としては、堤体削孔による放流管増設、堤頂を切り欠いての越流式洪水吐きの増設、地山へのトンネル式洪水吐きの新設などがある。

既設ダムの放流設備の配置や周辺地形との取り合いによって、堤体に放流設備を増設できる箇所は限られる。その中で、ダムの構造への影響を考慮しつつ、堤体削孔による放流管増設や堤頂を切り欠いての越流式洪水吐きの増設の可否を検討することとなる。堤体削孔においては、堤体構造面で削孔径に、水理面で管内流速に限界があることから、放流管1条あたりの放流量には限界がある。そのため、必要放流量を満たせない場合は、条数を増やす必要があるが、配置できる放流管条数は個々のダムの条件により制約がある。堤体における放流設備の増設が困難な場合は、地山へのトンネル式洪水吐きの新設を検討することとなる。

3.2 重力式コンクリートダム堤体への増設

(1) 堤体削孔による放流管の増設

国土交通省が、仮締切を設置して貯水池機能を維持しながら、重力式コンクリートダムの堤体に削孔して増設放流管を設置したのは、秋田県雄物川水系鏝畑ダムの利水放流設備増設¹⁾(1990)がはじめてである(括弧は完成年度。以下同様)。この放流設備は、鏝畑ダムの上流に建設される玉川ダムからの利水放流量 $69.1\text{m}^3/\text{s}$ を通過させるために設置された。鏝畑ダムの増設放流管は放流管径が 3.2m 、削孔径は 4.4m 、であり、放流量が比較的小さい利水放流管の設計の考え方が踏襲され、管内流速は利水放流設備と同様に 10m/s 以下に抑えられている。

岩手県北上川水系田瀬ダムの洪水吐き増設²⁾(1998)は、洪水調節操作の改善を目的として実施された。1954年に完成した田瀬ダムには、1条あたり $100\text{m}^3/\text{s}$ の放流能力を有する高圧洪水調節用放流管4条が配置されており、それらには米国から輸入した日本初の高圧スライドゲートが設置されている。建設当時の高圧スライドゲートは全開全閉操作となっており、放流する放流管の条数を変えることで段階的に放流量を変化させるものであった。そのため、ゲートを部分開として放流することで連続的な放流量制御が可能な高圧ローラゲートを有する放流設備が、堤体削孔により増設された。これを既存の洪水調節用放流管と併用することで、きめ細かい流量調節が可能となった。増設放流設備の放流管径は 3.6m 、削孔径は 5.0m で、 $130\text{m}^3/\text{s}$ の放流能力を有する大容量放流管である。管内流速は鏝畑ダムの事例より増加し約 13m/s となっている。放流管の設計にあたっては、水理模型実験によって管内作用圧力の確認が行われている。

栃木県鬼怒川水系五十里ダムの洪水吐き増設³⁾(2002)は、五十里ダムの上流の湯西川ダム完成後の洪水調節計画の変更に対応するものである。五十里ダムの既設洪水吐きには、先に述べた田瀬ダムと同型の国内で製造した国産第1号の高圧スライドゲートが設置されていた。そのため、田瀬ダムと同様に洪水調節操作の改善もあわせて行われた。増設放流設備の放流管径は 3.8m 、削孔径は 5.0m である。五十里ダムでは放流管2条あわせて $500\text{m}^3/\text{s}$ の放流量が要求され、管内流速は 22m/s を超えるまでとなった。そこで、土木研究所において、放流管湾曲部の壁面作用圧力特性を明らかにするための基礎的な研究および水理模型実験による実施設計形状に関する検討が行われた。大規模な鋼製の放流管は曲げ加工ができないことから、斜めに切断した直管をつなぎ合わせた形状(エビ継管)として製作される。このエビ継管の接合部の折れ点付近で局所的な圧力低下が生じると考えられた。そのため、エビ継管の折れ角と圧力低下特性の関係を調査し、エビ継管接合部付近の圧力低下量の推定手法を提案⁴⁾し、設計に反映させている。

鹿児島県川内川水系の鶴田ダム再開発事業(2018)における洪水吐き増設では、放流管3条で $900\text{m}^3/\text{s}$ の放流能力が求められ、詳細な堤体応力解析を行った上で、削孔断面をさらに大きな $6.0\text{m}\times 6.0\text{m}$ の矩形とし、放流管径 4.8m としている。また、減勢工を含む一連の増設放流設備を先に完成させてから既設減勢工改造工事に着手することにより、工事中の洪水調節機能を確保している。再開発後の鶴田ダムを図-2に、土木研究所が行った鶴田ダム再開発に関する水理模型実験の状況を図-3に示す。鶴田ダ

ム再開発の水理模型実験では、洪水吐き設計のための水理模型実験に加えて、既設減勢工改造工事中の放流時に隣接発電所に影響を与えない施工手順を検討するための実験も行っている。

(2) 堤体切り欠きによる越流式洪水吐きの増設

ダム堤体の頂部を切り欠いて越流式洪水吐きを増設する事例としては、徳島県那賀川水系の長安ロダム改造事業(工事中)がある。図-4に示すように、長安ロダムは堤頂に既設ゲート6門を有しているが、洪水調節開始水位における放流能力増強のため、右岸側(写真左側)の堤頂を最大で約37m切り欠いて越流式洪水吐きを増設している。

増設される2門のゲートからは、既往最大規模に匹敵する越流水深約20mの厚い水脈が放流され、その直下流の導流壁で流向を川側へ曲げるといふ、新設ダムでは想定されないような厳しい制約条件での設計がなされている。土木研究所が行った長安ロダム改造に関する水理模型実験の状況を図-5に示す。長安ロダムにおいても、洪水吐き設計のための水理模型実験に加えて、減勢工新設工事中の放流時にも減勢効果を発揮するための施工手順を検討する実験も行っている。

3. 3 地山へのトンネル式洪水吐きの増設

トンネル式洪水吐きの増設事例としては、京都府淀川水系の天ヶ瀬ダム再開発事業(工事中)、愛媛県肱川水系の鹿野川ダム改造事業(2019)がある。堤体構造や求められる放流能力の関係から、両ダムともに堤体への洪水吐きの増設は困難と判断され、トンネル式洪水吐きが採用されている。天ヶ瀬ダムのトンネル洪水吐きは、トンネル内径10.3m、延長617m、放流量約600m³/s、鹿野川ダムは、トンネル内径11.5m、延長457m、放流量約1,000m³/sである。

湾曲部を開水路とした場合、トンネルを流下する高速の水脈が側面にはい上がるにより、トンネルが閉塞し流れが不安定となる問題がある。そこで、湾曲部は管路とするため圧力トンネルとし、その下流にゲートを設置している。また、両ダムとも減勢工の河道内の配置に制約があり、天ヶ瀬ダムでは地山内に大規模なトンネル式減勢工を配置し、鹿野川ダムでは、段上りの掘り込み形式とし、さらに補助構造物を配置して可能な限り減勢工規模を小さくしている。完成した鹿野川ダム改造事業の状況を図-6に、土木研究所が行った鹿野川ダム改造に関する水理模型実験の状況を図-7に示す。

4. 水理模型実験による設計

ダムからの放流水は、重力により加速されて高速流となり、減勢工でエネルギーを散逸させたのち、下流河川に放流される。この過程において流れの状態は構造物の形状の影響により大きく変化する。また、水面形や壁面に作用する圧力の時間的変動も大きい。このような複雑な流れを数値シミュレーションで再現するのは困難であり、ダムの洪水吐きの設計にあたっては、等幅直線といった単純な形式



図-2 再開発後の鶴田ダム
(川内川河川事務所提供)



図-3 鶴田ダム再開発水理模型実験



図-4 長安ロダム(改造工事中)
(那賀川河川事務所ホームページより)



図-5 長安ロダム改造水理模型実験

以外は水理模型実験を行って形状を検討することが基本である。

水理模型実験では、貯水池から洪水吐き（減勢工を含む）を経て下流の河道に至るまでの流れの状態を確認し、洪水吐きの設計原案に修正を加えていく。手順としては、流量を規定する部分において所定の水位・放流量条件を満たすことを確認した上で、流れを安定した状態で減勢工に導流できるか、減勢工が十分に機能し下流河道の流れをダム築造前の状態に復すことができるかといった観点から、必要に応じて形状を修正していく。模型で計測した流量、流速等の値を実物に換算する方法としては、ダムからの流れは重力が支配的であることから、重力と慣性力の比が実物と模型で同じとするフルードの相似則が用いられる。

5. 鹿野川ダムトンネル式洪水吐きの設計

土木研究所が実施した水理模型実験による設計事例のうち、鹿野川ダムのトンネル式洪水吐きの設計（2008～2011）について紹介する。

5. 1 鹿野川ダム改造事業の概要⁵⁾

鹿野川ダムは、一級河川肱川の河口から約 41km に位置する洪水調節及び発電を目的とする多目的ダムとして、建設省による施工後、1960 年より愛媛県において管理されてきた。形式は重力式コンクリートダムで、堤高 61.0m、集水面積 513.0km²（間接流域 57.4km²を含む）、総貯水容量 48,200,000m³、有効貯水容量 29,800,000m³である。

鹿野川ダム改造事業は、肱川水系河川整備計画（中下流圏域）（2004 年 5 月）に基づき、発電容量・死水容量を洪水調節容量と不特定容量に振り替え、発電を従属発電とすることにより、洪水調節機能を増強するとともに、新たに流水の正常な機能の維持を追加するものである。容量振替により洪水調節容量は 16,500,000m³から 23,900,000m³と約 1.5 倍となるが、洪水調節開始水位が約 4.7m 低下し、ダム堤頂に設置されている既設の洪水吐きゲート（クレストゲート）では放流能力が小さいため洪水調節容量増強の効果を発揮できない。そこで洪水調節開始水位で 1,000m³/s の放流能力を有する新たな常用洪水吐きが必要となった。そこで、鹿野川ダムでは、堤体構造や求められる増設放流能力の関係から、地山にトンネル式洪水吐きの新設が計画された。トンネル式洪水吐きの平面図を図-8 に示す。

5. 2 水理模型実験による鹿野川ダム洪水吐きの設計

水理模型実験は、既設の鹿野川ダム、トンネル式洪水吐きおよび下流河道を再現した縮尺 1/40 の模型を制作して実施した。所定の貯水位において必要な放流能力を満足することを確認し、トンネル内部および吐口の放流管に作用する圧力の確認、減勢工形状の検討、下流河道への放流状況の確認、さらには管理のための貯水位－ゲート開度－放流量の関係式の作成等を行った。

鹿野川ダムでは、トンネル式洪水吐きの呑口が洪水調節開始水位に対して浅く、呑口で空気を吸い込むとトンネル下流端に設置されたゲートの振動や流況の乱れを招く懸念がある。そこで水理模型実験によって呑口部で吸い込み渦の発生を抑える形状を検討した。

また、減勢工の設計にあたっては、環境への配慮と河道から減勢工への土砂の流入を防止する観点から、減勢工を河道内に張り出さないようにすることとした。

減勢工形状の検討にあたっては、減勢工に対してもっとも負担の大きい放流条件であるサーチャージ水位においてトンネル式洪水吐き単独 1,000m³/s（河川整備基本方針対応の洪水調節開始流量）放流時について、減勢工形状を変化させて流れの状況を調査した。机上設計による原案形状を図-9 に、水理模型実験による減勢工の流れの状況を図-10 に示す。原案では、放流水脈は十分に減勢されず、対岸



図-6 改造後の鹿野川ダム
(山鳥坂ダム工事事務所提供)



図-7 鹿野川ダム改造水理模型実験

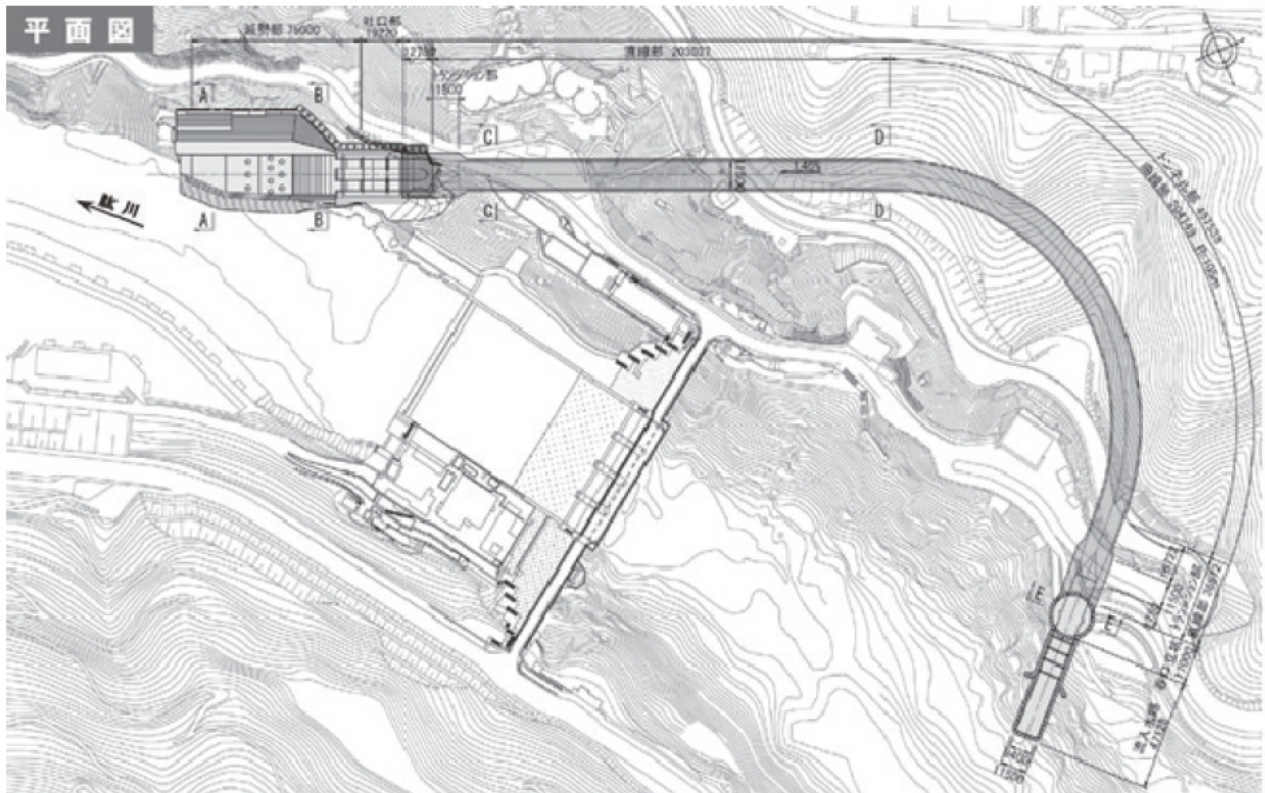


図-8 鹿野川ダムトンネル式洪水吐き平面図⁶⁾

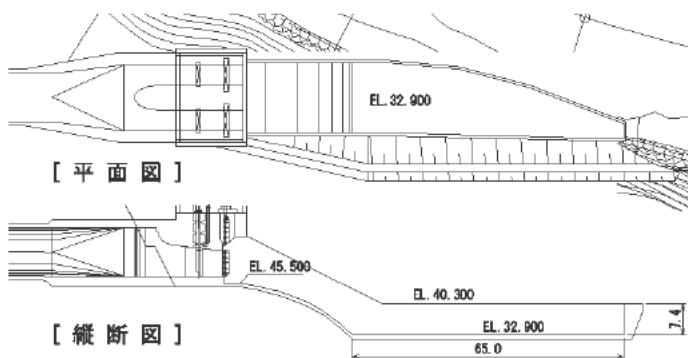


図-9 減勢工原案形状



図-10 減勢工原案の流況

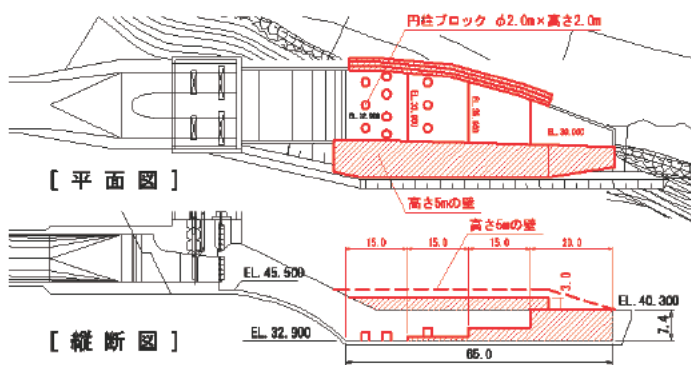


図-11 減勢工最終案形状

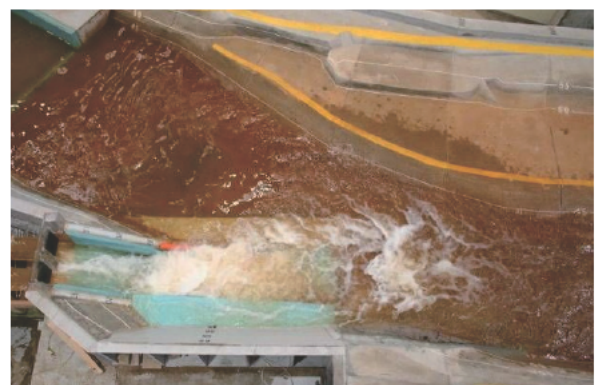


図-12 減勢工最終案の流況

の道路が常に冠水する状態であった。そこで、流れの状態を改善するため、減勢工内の水位確保を目的とした減勢工左両岸への壁の設置、流れに対する抵抗を大きくしかつ減勢工施工時の掘削量削減を目的とした段上がり形状の水叩きの検討、さらに抵抗を増やし跳水が起りやすくなるための円柱ブロックの配置の検討を行い、最終形状（図－11）を得た。最終形状の流れの状況を図－12に示す。これにより、減勢機能が向上して対岸への冠水は生じなくなり、かつ掘り込み式減勢工の長さを20m短縮してコンパクトに設計することができた。

6. おわりに

治水機能増大のための既設ダムへの増設放流設備について、求められる機能、増設方法、増設事例および水理模型実験による設計について述べた。

土木研究所では、水理模型実験を主要な手段として、個々のダムの増設放流設備の設計を行いながら、それまでになかった条件での施設設計を可能とするための研究を行ってきた。気候変動の影響による外力の増大が懸念される中、今後も治水機能増大のための放流設備の増設は続くものと思われ、現場ニーズに対応した研究を行い、課題の解決に貢献していきたい。

また、本稿では主に水理的事項について述べたが、既設ダムへの放流設備の増設においては、既設ダムの放流設備配置のみならず、周辺の地形・地質、工事中のダムの機能維持のための貯水容量確保や洪水調節操作を考慮した施工計画、さらには既設放流設備をあわせた運用方法等、多様な条件を考慮しつつ計画・設計を進めていく必要がある。そのため、施工区域周辺の地形地質調査、ダム堤体改造に関する構造的検討、施工計画の検討と継続的に調整を図りながら、その結果を増設放流設備の配置計画や設計にフィードバックさせていくことが求められる。地質、構造、水理、施工計画の専門家が情報交換を密に行いながら連携して設計を進めていくことが重要と考えている。

【参考文献】

- 1) 樋口淳美、高橋聡、安保一、中村雅彦：鎧畑ダム堤体掘削工事について、ダム技術、No.55、1991
- 2) 島田昭一・柿崎憲勝：田瀬ダム施設改良事業とその効果、ダム技術、No.183、2001
- 3) 蜂須賀運平：五十里ダム施設改良工事、ダム技術、No.193、2002
- 4) 柏井条介：既設重力式コンクリートダム堤体に設置する増設放流管の水理設計、ダム技術、No.207、2003
- 5) 渡邊健二：鹿野川ダム改造事業の取り組み状況報告、ダム技術、No.350、2015
- 6) 原田隆史、尾嶋百合香：鹿野川ダム改造事業の概要－トンネル洪水吐き新設工事進捗状況（中間報告）一、ダム技術、No.324、2013

水災害分野の気候変動影響評価を支える技術開発と適応策実装への戦略

－発展途上国における取組－

水災害研究グループ グループ長 深見 和彦

1. はじめに

現在、気候変動(地球温暖化)は確実に進行しているとされており、近年の豪雨・大雨災害の激甚化も気候変動が大きく影響しているものと考えられる。このため、水災害の激甚化は、災害をもたらすレベル以上の大雨の頻度の増大も相まって今後さらに顕在化するものと考えられ、安全・安心な国土・社会の形成のためには、将来の気候条件を予測し、水防災インフラで対処すべきハザード(降雨量・洪水流量等の災害外力)の水準を見極めつつ、それを超えるハザードによる災害のリスクもあらかじめ念頭に置いた上で社会全体で適応していく必要がある。一方で、将来(例えば21世紀末)の気候条件を正確に予測することは今日の科学をもってしても不可能である。様々な予測結果に関わる不確実性について認識・把握しながら将来シナリオの想定やリスク評価を行うことが、的確な適応策の組み合わせを検討するための前提条件として重要である。

我が国では、日本およびその周辺域の現在気候を高い適合度で再現する気象モデルを長年にわたり研究開発を自ら進めてきており、その成果を基盤として将来気候を的確に予測するために、複数の計算条件に摂動を与えて組み合わせることで想定される不確実性の幅を含めて予測シミュレーションを行うアンサンブル予測データ(d4PDF等)が整備されつつある。このような先進的な研究の蓄積と情報基盤の整備により、例えば国土交通省では、一級河川における気候変動適応を進めていくため、過去の実績降雨データだけでなくこれらの将来予測降雨を活用した治水計画のあり方の検討が始まろうとしている¹⁾。

水災害分野における気候変動適応策の推進の必要性は、発展途上国においても変わることはない。すなわち、多くの水防災インフラの整備レベルが低いことを踏まえると、激甚な水災害の発生リスクは先進国以上に高く逼迫しており、将来気候下での災害外力条件を早急に把握した上で、災害リスクを受忍可能なレベルに抑制するための防災・減災計画を早急に作成し対策を進めていくことが、それらの国・地域の持続可能な発展にとって喫緊の課題となる。しかしながら、発展途上国では、それぞれの気候・水文条件に適合した将来気候の予測シミュレーションを自らではほとんど行っていないため、適応策推進の前提となる影響評価のための研究・情報基盤整備が遅れている。また、インフラ整備水準を超える災害発生のリスクが高いため、社会全体でその残余リスクに備える必要性が高い。このため、それらの国・地域の河川流域における気候変動の影響評価を行うためには、特別な配慮・検討が必要となる。

土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM)では、このような課題を踏まえ、発展途上国における水災害分野の気候変動適応を推進するための前提となる気候変動影響評価、および、その成果を踏まえた社会全体での適応策推進を図るための研究・実践活動を行ってきた。

ここでは、発展途上国における洪水災害への気候変動影響評価研究の一例として、アジア開発銀行(ADB)プロジェクトの一環として行ったベトナム(図-1)を対象とした将来気候条件の予測とその不確実性の評価、及び対象河川流域における洪水氾濫条件の変化の評価の事例について



図-1 ベトナムにおける検討対象流域(上:Red River, 下:Perfume River)

概説する。また、発展途上国における気候変動適応を推進していくための基盤として、ICHARM がIFI(International Flood Initiative)に基づいて東南アジア諸国を中心に構築を支援しているIFI Platformの現状と、そこでの適応策検討の状況について紹介する。

2. 気候変動による降雨・洪水への影響予測とその不確実性の評価 ～ベトナムにおける検討事例～

2. 1 温室効果ガス排出量シナリオ (RCP シナリオ)

気候変動予測については、一般に全球を対象とした気象モデル(GCM: Global Climate Model)による予測シミュレーションが行われている(図-2)。この予測シミュレーションには様々な不確実性が内在する。代表的なものとして、①将来までの温室効果ガスの排出量シナリオによるもの、②使用する予測方法によるものがある。

このうち①については、政策的な温室効果ガスの緩和策を前提として、将来の温室効果ガス安定化レベルとそこに至るまでの経路のうち代表的なものを選んだシナリオが作られており、RCP(Representative Concentration Pathways)シナリオと言われる(図-3)。RCPシナリオでは、2100年以降も放射強制力の上昇が続く「高位参照シナリオ」(RCP8.5)から2100年までにピークを迎えその後減少する「低位安定化シナリオ」(RCP2.6)の範囲に4シナリオが立案されている。②は使用するモデルや境界条件等の与え方に依存するものである。世界各国の複数の機関がGCMを開発し、予測計算を行っているが、細かな現象の扱い方や解像度、初期条件や境界条件の設定方法はそれぞれ異なり、そのため計算結果に差異が生じる。ここでは、①についてRCPシナリオの最上位、最下位に位置付けられるRCP8.5,2.6を使用し、②についてはGCMの違いによる予測結果の幅を把握した詳細シナリオの立案方法について述べる。

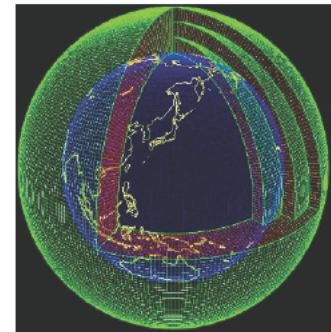


図-2 GCM 計算メッシュの一般的構造

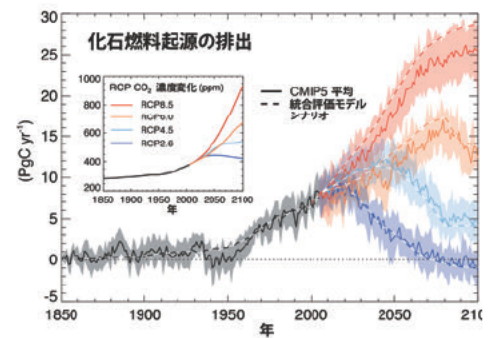


図-3 RCPシナリオにおける温室効果ガス排出量シナリオ

2. 2 GCMの選定

世界には数多くのGCMとその予測結果があるが(例えばCMIP5)、利用できる全てのGCMについて詳細に分析するのは非効率であり、対象地域の気候特性を良好に表現するモデルを予め選定することが有効である。選定基準としては、図-1に示す対象地域を含む周辺エリアの気候特性を代表する気象要素である降雨、上向き長波放射、海面気圧、気温(850hPa面)、東西風(850hPa面)、南北風(850hPa面)について、観測データとの相関係数及びRMASEにより個々に適合性を評価し、これらを合算した総合点数の高いGCMを選定する。この作業においては、CMIP5に提供された31機関の61種類のモデルを対象とし、観測値としてはGPCP、JRA55やNOAAの観測データを使用した。モデル選定においては、これらのデータや相関解析等を行うツールが整備されたDIASを利用した。結果として、CESM1(CAM5)、MPI-ESM-LR、CNRM-CM5、GFDL-CM3の4モデルが選定された。

2. 3 ダウンスケーリング

一般に、GCMの計算結果は現実の気候条件を表現するものではなく、100km程度の解像度による平均的な気候特性値が算出される。このため、GCMの気候特性値から対象地域の将来気候条件を想定するためには、

ダウンスケーリング(DS)という方法により、空間解像度を高めるとともに、バイアス補正を行い日平均降雨量や日平均気温等を算出する必要がある。この方法には一般に力学的DSと統計的DSがあるが、力学的DSはGCMで表現できないミクロスケール現象の補完を含む力学的整合性において、統計的DSは計算負荷の少なさに長所を有しており、それぞれの特徴を活用することにより、将来降雨シナリオの立案と不確実性の評価を行う。

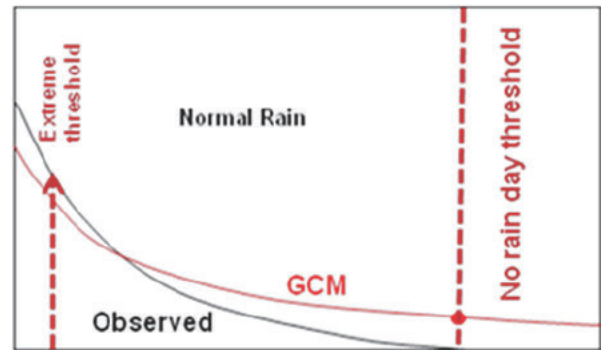


図-4 統計的バイアス補正の方法

(1) 統計的DSによるGCM間の不確実性の評価

統計的DSとは、「広域の気象場とローカルな気象要素との経験的あるいは統計的関係を仮定し、その関係式に基づいてGCMのデータから空間解像度の高いデータへの変換を行う方法」である。GCMで表現できない高解像度の地形や大気運動等を考慮できないため、力学的整合性に劣るが、簡便かつ計算負荷が少ないため、複数のGCMや多数の地点への適用等が可能である。

統計的バイアス補正については、Nyunt等の方法²⁾を使用した。この方法では、観測地点において日降雨量の大小で順に並べ、無降雨、大雨(極端現象)、平常時降雨の三領域においてそれぞれGCMの計算結果の補正を行うものである(図-4、注-1)。図-5に示すベトナム全土で利用可能な降雨観測地点に対して統計的バイアス補正を行い、その結果を内挿することによりDSした結果を示す(図-6)。RCPの違い、GCMモデルの違いにより、特に中部沿岸域や南部において将来の降雨条件に不確実性が見られる。また、統計的バイアス補正結果について、南北方向にそれぞれ代表3地点を選んで示す(図-7)。

注-1) 統計的バイアス補正の手順の概要

日降雨量の観測値及び計算結果について、最大値から最小値までを順に並べる。

a) 無降雨: 観測データより無降雨日数を設定し、その期間の雨量をゼロとする。

b) 大雨: 上位1%程度を極端事象とし、極値分布(一般パレート分布)を適合させる。 ※(20年間約7300日のうち、1%の73日をデフォルトで豪雨としている)

c) 平常時: 上記a), b)以外の平常時の降雨について、ガンマ確率累積関数を適合させる。

いずれのモデルもHa Giangで降雨が少なく、Hueが多いという地域的傾向は表現できている。将来

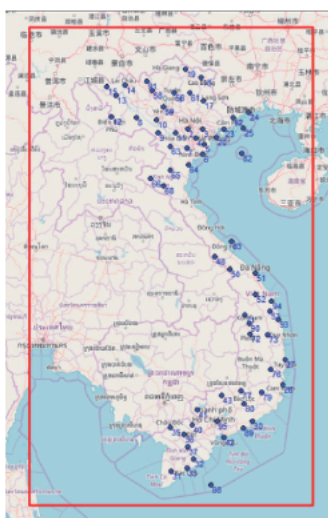


図-5 ベトナム全土の利用可能な雨量観測地点

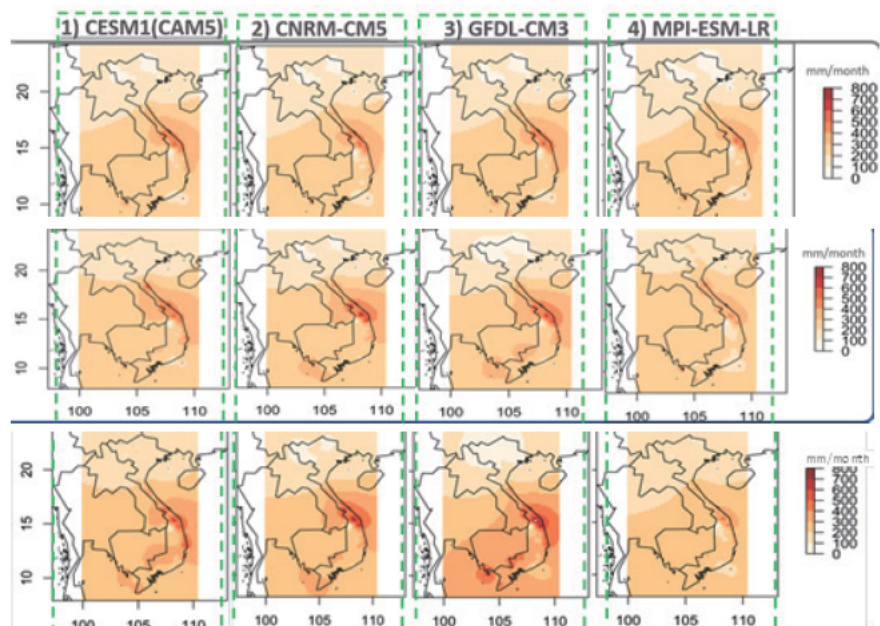


図-6 降雨の統計的DSの結果
(上: 過去, 中: 将来 RCP2.6, 下: 将来 RCP8.5)

気候においては、極端事象(大雨)ほど結果の幅が大きくなり、1/100 相当の降雨規模では、RCP8.5 は RCP2.6 の 1.5~2 倍程度の大きな予測結果を示している。

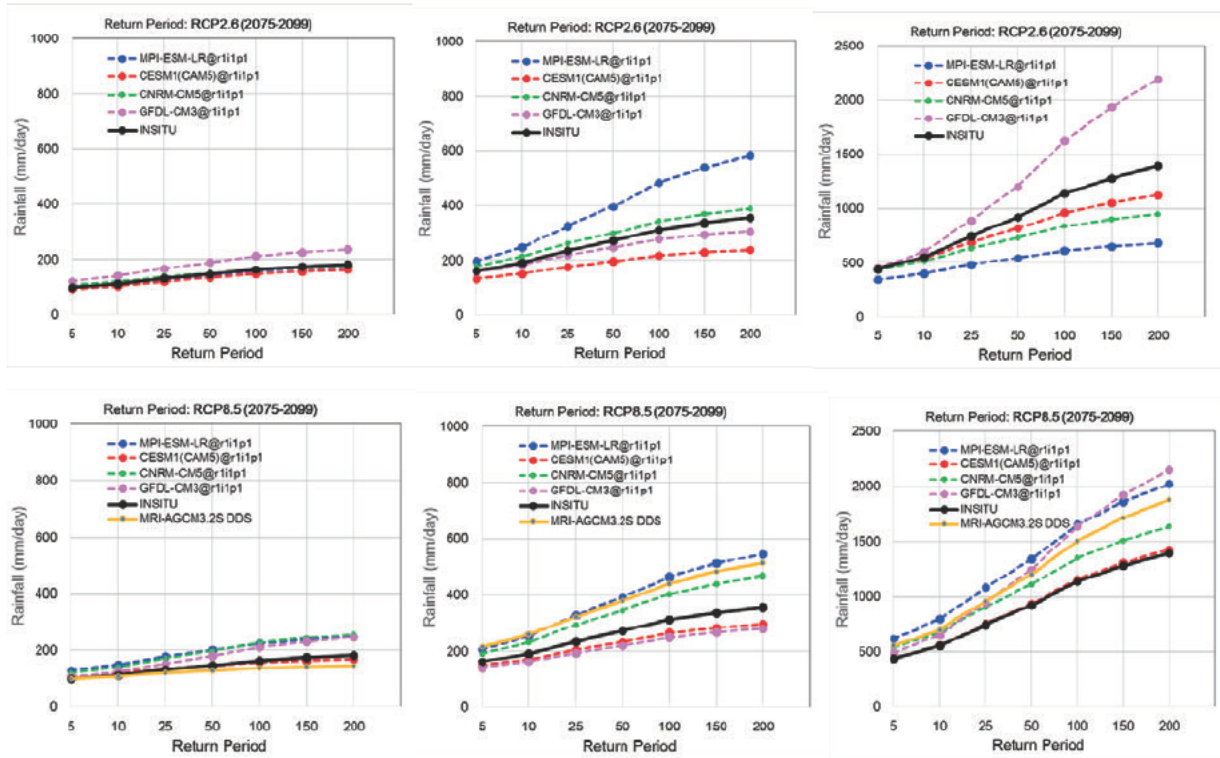


図-7 バイアス補正により得られた代表地点(左:Ha Giang(Bao Lac),中:Vinh Yen(Ha Dong), 右:Hue)における将来(2075~2099)の日降雨量の発生頻度(上段:RCP2.6,下段:RCP8.5)

(2) 力学的 DS による詳細シナリオの作成

力学的 DS は、対象地域を包含する領域に解像度の高い気象モデルを作成し(図-8)、GCM の計算結果を境界条件とすることにより、GCM では表現できない小規模スケールの物理現象を補完し、解像度の高い計算結果を得ることができる。一方で、計算量が膨大になるため、利用できる計算機により適用ケース数が限定される。また、境界条件の設定のため、対象とする GCM の全ての出力結果を取得する必要がある。このため、本手法は適応策検討等における詳細シナリオの作成に使用するものとし、必要なデータが得られる MRI-AGCM モデルによる RCP8.5 の結果について行った。力学的 DS の結果に、必要に応じてバイアス補正(観測値の確率関数に合わせて計算結果を補正)することにより、過去の降雨条件を概ね再現できた(図-9)。力学的 DS の結果では、図-10に示す通り夏季(6~8月)に南部において、冬季(10~12月)に中部海岸部において降雨量の増加が予想されている。また地点毎に見ると、北部の Ha Giang

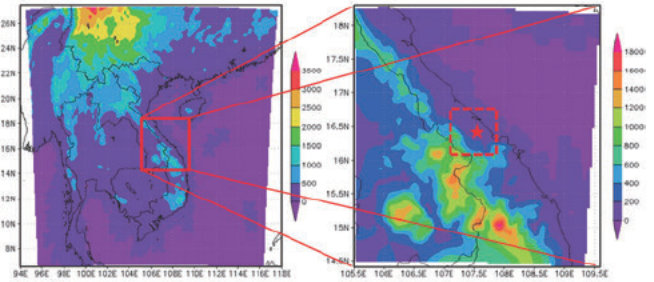


図-8 力学的 DS の計算領域 (Perfume River 流域を対象とした場合)

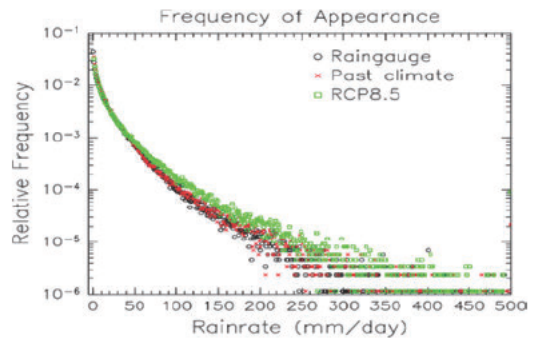


図-9 力学的 DS の結果 (バイアス補正後)

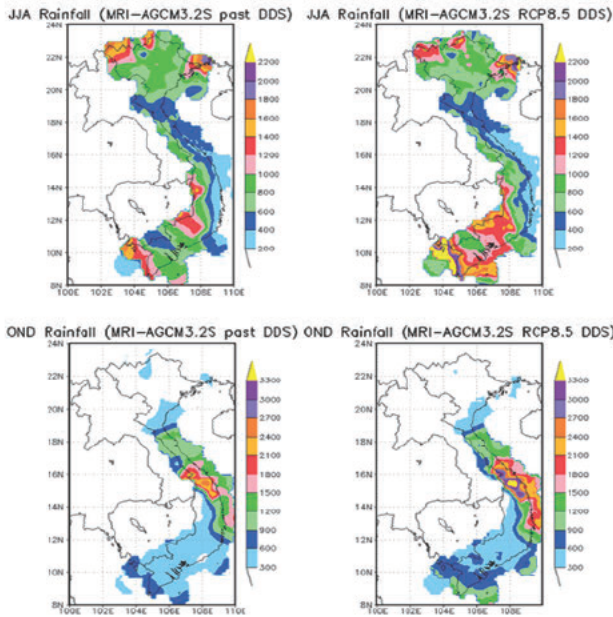


図-10 力学的 DS による降雨(3 か月雨量)の将来予測 上:夏季(6~8 月)、下段:冬季(10~12 月), 左:過去(1979~2003)、右:将来(2075~2099)

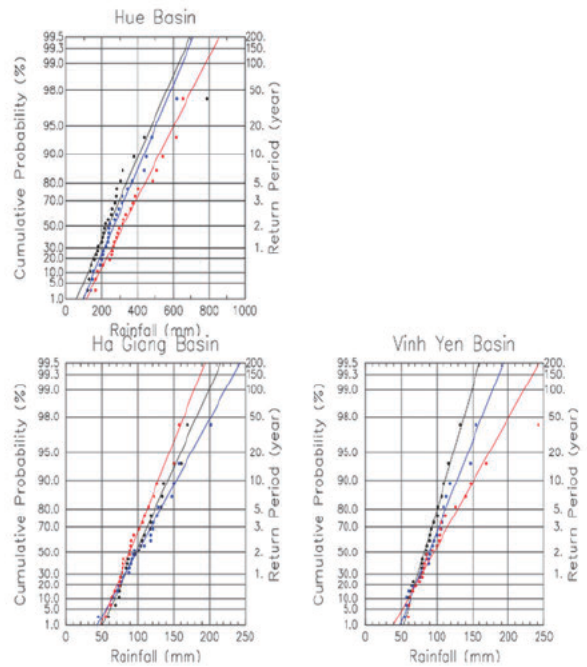


図-11 日降雨量の発生確率の将来予測 黒(観測値)、青(計算:過去)、赤(計算:将来)

では豪雨の発生頻度の減少が、一方で Hue, Vinh Yen では増加が予測されている(図-11)。なお、不確実性を評価した統計的 DS との比較では、図-7(黄色)に示す通り、北部・中部では比較的高位、南部では比較的低位に位置し、モデル間の範囲に収まっている。

2. 4 将来の洪水流出量および浸水域の変化予測

上記で得られた降雨量変化の情報をもとに、洪水流出量の変化を介した浸水域の変化の予測を行う。ここでは、力学的 DS から得られた詳細シナリオの降雨条件をもとに、佐山等³⁾が開発した降雨流出氾濫解析モデル RRI(Rainfall Runoff Inundation)モデル(図-12左)を使用して現在と将来における同一生起確率(1/100)規模の洪水による浸水域を計算し、両者の比較を行った。すなわち、力学的 DS 結果より現在と将来における 1/100

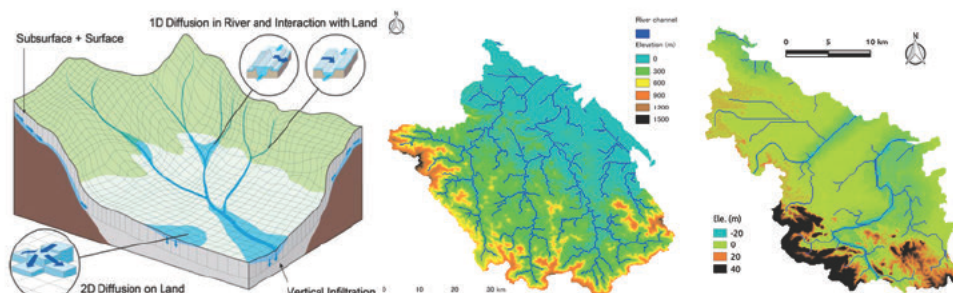


図-12 左:RRI モデル概念図,中:流域スケールモデル,右:地域スケールモデル

相当の流域平均日雨量を設定し、現在と将来で流出流量が最大となる 1983 年と 2088 年の洪水を、それぞれ現在および将来の降雨パターンとした。そして、Hue 市を含む Perfume 川流域を対象に流域スケールの RRI モデル(図-12中)を構築し上記の降雨条件を与えることにより洪水流出量を計算した。次に、Hue 市を中心とした地域(Hue Province)スケールの RRI モデルを構築し(図-12右)、上記で算定した洪水流量を境界条件として

開始できるようになった。気候変動影響に関しては、ダバオ川流域では気候変動予測結果のダウンスケーリングの結果としての年最大日雨量といった将来の極値雨量の増加、パンパンガ川流域では、ダウンスケーリングされた降雨量を RRI モデルに与えた結果としての将来の浸水面積の増加(一方で浸水時間は短縮)⁶⁾、といった最新の ICHARM の知見を IFI-Platform に対し報告し、これらの結果に基づき、関係機関による政策オプションの選択やコミュニティのための危機管理計画への活用について議論を始めている。

インドネシアでは、公共事業・国民住宅省(PUPR)、国家防災庁(BNPB)、気象気候・地球物理庁(BMKG)を中心として、河川管理・危機管理・気象観測等を所掌する政府機関と協議を行い、PUPR を中心として関係省庁が連携した IFI-Platform を構築し、フィリピンと同様にデータ収集・共有・統合の枠組みの整備を始めるとともに、ジャワ島のソロ川流域を対象として、具体的な気候変動影響評価や気候変動適応策の現地実装の検討を始めて行くことが今年 8 月に合意された。

なお、この両国における IFI-Platform 構築支援を通じた気候変動適応策実装の研究は、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマ D: 統合的ハザード予測(領域代表: 京都大学防災研究所中北英一教授)の支援を受けている。

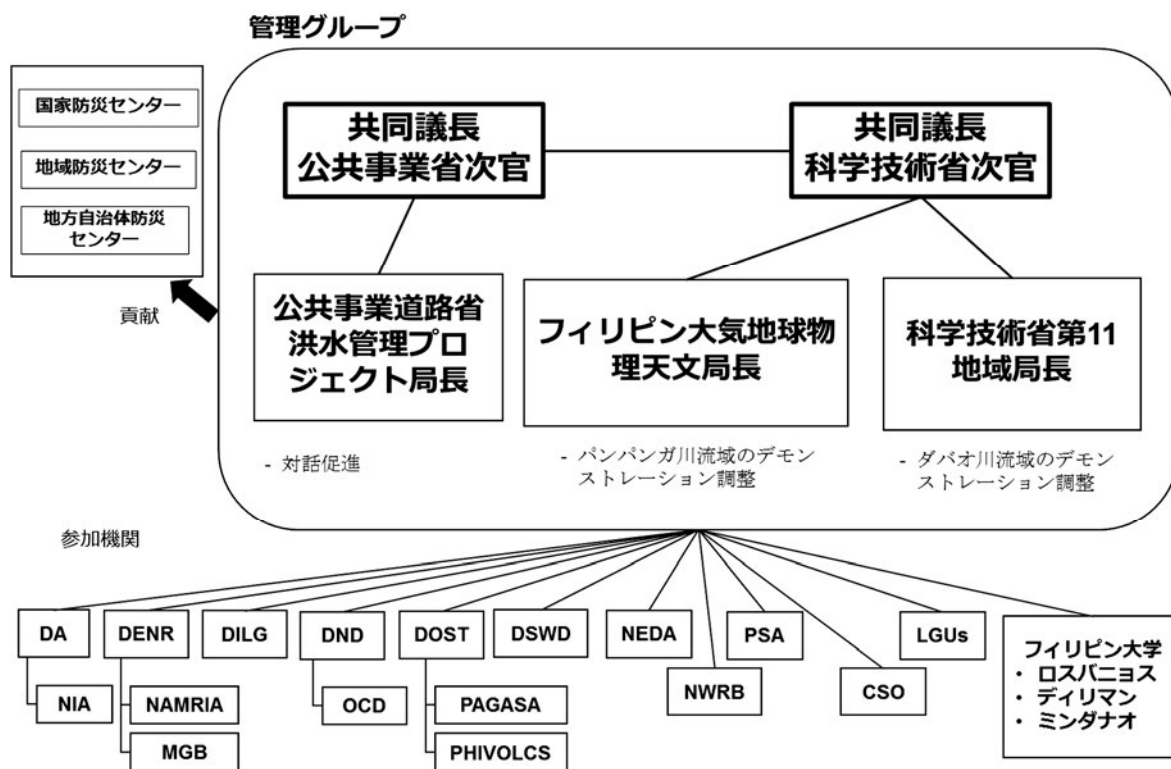


図-14 フィリピンにおける IFI-Platform の構成(2019年6月現在)

4. おわりに

本稿では、水災害分野における気候変動適応策を発展途上国においても推進するために、水災害に係るあらゆる関係者間で現在および将来における水災害ハザード・リスクに関する科学的・客観的な情報を共有・統合することが重要な出発点になるとの認識に立ち、最新の科学的知見に基づく水災害ハザード・リスクやそれらへの気候変動影響評価手法、ならびに、それらの統合情報を基盤とした適応策検討・実装へのプラットフォーム構築の取り組みを中心に紹介した。

我が国は、気候変動予測に必要な大量のデータと計算を扱う計算機環境が整っており、そのリソースを源泉にした発展途上国に対する気候変動影響評価への支援には大きな強みがある。一方で、本稿では触れなかつ

たが、我が国は災害のデパートと呼ばれるほど多様な災害ハザードにさらされ、長年にわたり磨き積み重ねてきた災害対策技術メニューやその実装の枠組みについての豊富な知識と経験を有している。すなわち、発展途上国における気候変動影響評価・適応策検討の支援は、我が国の国際貢献における有力なツールの一つと言える。また、多様な自然・社会経済条件下において、防災インフラの整備水準が低く水災害の発生頻度が高い発展途上国における適応策実装のあり方は、水災害のさらなる激甚化が懸念される我が国における今後の適応策のあり方にも参考になるものと考えられる。

ICHARM は、発展途上国における気候変動影響評価・適応策検討の支援を通じて、気候変動下においても安全・安心な世界の構築に、引き続き微力なりとも貢献して参りたい。

【参考文献】

- 1) 社会資本整備審議会河川分科会気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会：気候変動を踏まえた治水計画のあり方提言(案)、2019.7
- 2) Nyunt, C. T., Koike, T., Yamamoto, A., Nemoto, T., and Kitsuregawa, M. : Application of statistical bias correction method to the Yoshino river basin, Annual Journal of Hydraulic Engineering (JSCE), vol. 58, pp.L193-L198, 2014.3
- 3) Takahiro Sayama, Go Ozawa, Takahiro Kawakami, Seishi Nabesaka, Kazuhiko Fukami: Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, Hydrological Sciences Journal, Vo.57, No.2, DOI: 10.1111/jfr3.12147, pp.298-312, 2012.2.
- 4) <http://www.ifi-home.info>
- 5) <https://diasjp.net/>
- 6) 宮本守、牛山朋来、岩見洋一、小池俊雄：フィリピン・パンパンガ川流域における浸水時間を考慮した氾濫外力の将来変化、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.73、No.4、L277-L282、2017.3

火山噴火後の土石流発生に対する警戒避難のための新しい取り組み

土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム 上席研究員 石井 靖雄

1. はじめに

火山噴火時の火山灰等による生活への影響は長期に及ぶ場合がある。例えば、土石流の発生による避難もその一つである。雲仙・普賢岳では、1990～1995年の噴火による火山灰等の火山噴出物の影響で、少量の降雨でも、1991からの約10年間にわたり土石流が頻発し（古賀・村上，2002）、家屋や道路・鉄道などが大きな被害を受け、その影響は長期間に及んだ（内閣府，2007）。このように斜面に火山灰等が堆積すると、土石流が発生しやすくなることが知られている（田村ほか，2010）。そのため、火山噴火後には、速やかに山地流域の降灰状況を調査し、土石流の発生の危険性とそのリスクの高い範囲を迅速に評価し、住民の避難につなげることが重要となる。これに対し、2011年の土砂災害防止法の改正により、法律に基づく制度が設けられ、火山噴火時等の広範囲に多大な被害が及ぶと考えられる場合、緊急調査を行って被害が生じる恐れのある区域を市町村長に通知し、事前の避難に生かされてきている（全国治水砂防協会，2016）。一方で、今後の課題として、土石流氾濫リスク評価の精度を高めていくことも求められる。このような状況の中、火山・土石流チームでは、上記の一連の調査を現在よりも迅速に、また精度高めて避難対象エリアを設定できるよう、リスク評価手法の改良を行っている（西井，2018）。ここでは、現在の検討状況を中心に紹介する。

2. 火山噴火後の土石流発生リスク評価の現状と課題

(1) 法律に基づく緊急調査

火山噴火により大規模な土砂災害が急迫している場合には、緊急調査を行い、調査結果を土砂災害緊急情報として市町村長に提供する制度となっている（土砂災害防止法 第28, 29, 31条）。具体的には、勾配10度以上の流域において火山灰等が1cm以上の厚さで50%以上の面積で堆積している場合に、緊急調査が実施される（土砂災害防止法施行令 第8条）。土砂災害緊急情報は、避難勧告等の発令の判断に活用され、緊急調査では火山灰等の堆積状況、顕著な地形の変化等を調査し、土石流の氾濫計算を行って、被害が生じる恐れのある区域が推定される。

これまで、2011年5月からの桜島での噴火、2011年5月から2013年10月までの霧島山（新燃岳）での噴火（写真－1）、2014年9月から2015年6月までの御嶽山での噴火（写真－2）において、緊急調査の実績がある。噴火以前に作成されていたハザードマップは、一定の規模の噴火が想定されているが、実際の噴火をふまえて、①現地の火山灰等堆積状況調査、②降灰状況からの土石流発生の危険性の高い流域の抽出、③抽出された流域での土石流氾濫範囲の計算が行われている。霧島山（新燃岳）、御嶽山では、降灰状況の把握のためのヘリコプターによる調査及び現地調査1～2日間、氾濫計算結果の公表には、調査開始から6～8日を要した（佐々木，2014；林ほか，2015）。この一連の調査・計算期間の短縮が今後の課題である。



写真－1 新燃岳の爆発的噴火（佐々木，2014）

写真－2 御嶽山の噴火（2014年9月27日
16時頃，林ほか（2015））

(2)火山灰等堆積状況の調査

火山灰等の堆積状況は、ヘリコプターによる上空からの目視によって降灰範囲を確認し、地上で火山灰等の堆積厚を計測する。調査結果から等層厚線図が作成され、火山灰等が1 cm以上の厚さで堆積している範囲を明らかにする。等層厚線図の作成に必要な多数の地点の調査には時間を要することが課題として挙げられる。また、噴火が継続する中での調査には危険が伴い、特に火口周辺では、データを得ることが困難である。さらに、噴火後にあまり時間をおかず降雨が予想される場合や、噴火の規模が大きく調査範囲が広範囲となる場合には、迅速に計測データが得られないことも考えられる。今後、火山灰等の堆積状況の概略を迅速に把握するために、衛星などのリモートセンシング技術、UAVや自動計測手法を活用するなど、精度は低くても火山噴火の状況に応じて様々な手法を柔軟に活用して、計測データの質・量の向上を逐次図りながら、等層厚線図の精度を高めていくことが重要である。

(3)土石流氾濫計算

火山灰等の堆積状況から土石流発生の危険性の高い流域が抽出された後には、土石流の氾濫計算を行ってその範囲を推定する。氾濫解析は国土地理院で公開されている標高データを活用する平面2次元解析が用いられている(内田ほか, 2011)。この時、メッシュサイズが粗くなると適切に溪流が表現できず、実際にはない壁のような地形が生じて土砂が堆積するというような問題が生じる。最近では、LPデータの計測範囲も増えており、精細な標高データが活用可能となってきている。このような精細な標高データの活用や、解析モデルの作成方法を工夫することでこうした課題解決が可能となる。

計算においては、洪水流の計算を行って掃流力から土砂の到達しうる範囲を評価しており、土石流の氾濫範囲を直接計算していない。これに対して2018年からは、これまでに提案されている土石流の支配方程式(例えば、芦田ほか, 2008)を活用した氾濫計算(火山噴火リアルタイムハザードマップシステム)が一部の火山で導入され始めている(城ヶ崎, 2018)。数値計算モデルに関しては、実際の土石流を表現できるよう検討していくことが課題である。また、2014年の御嶽山噴火時には、氾濫計算に12時間を要したことから、計算の高速化のためハード・ソフト両面での検討も課題である。そのほか、等層厚線の作成から氾濫計算を行う過程には、途中段階で人手による対応も必要で、可能な限り処理の自動化を図ることも課題として挙げられる。他方、氾濫計算は一定の想定規模に対して実施されるものであるが、解析結果が過度に安全側の結果となり、住民の信頼を失わないよう気を配ることも重要と考えられる。

噴火によって斜面に火山灰等が堆積すると、土石流が発生しやすくなることが知られている。これは、火山灰等が堆積することによって浸透能が低下し、表面流出量が増加することが一因と考えられている(寺本, 2005)。また、火山灰等が堆積することで流出土砂量が増加するとの報告(田村ほか, 2010)もあるものの、火山灰等の堆積厚と浸透能との関係、粒径と浸透能の低下との関係など、火山灰等の堆積によって生じた斜面の変化と土石流発生との関連性について明らかとなっていないことが多い。したがって、火山灰等の堆積が土石流発生の頻度や規模に与える影響を明らかにしていくことも課題として挙げられる。関連するメカニズムは火山灰の性質や噴出量によって異なる可能性もあることから、個別の火山ごとに表面流出量の算定手法を検討しながら、土石流の氾濫解析に盛り込んでいくことが現実的と考えられる。

3. 土石流氾濫リスク評価の精度向上のための研究

火山・土石流チームでは、現在、火山噴火時の緊急調査における土石流氾濫リスク評価が迅速に進められるよう、また評価精度をさらに高めるためツールの開発を行っている。前節で述べた①現地の火山灰等の堆積状況調査、②降灰状況からの土石流発生の危険性の高い流域の抽出、③抽出された流域での土石流氾濫範囲の計算という一連の調査項目のうち、①について、噴火による立ち入り規制などで火山灰等の堆積厚が現地で直接計測することが難しい場合を想定し、山麓での計測値を用いた等層厚線の推定手法を検討している(山本ほか, 2019)。また、③について、土石流の数値計算モデルを活用し、実際の土石流を表現できる氾濫計算手法の開発を進めている(山崎ほか, 2019)。ここでは、それらの概要を紹介する。

3. 1 火口付近の火山灰等堆積厚の推定手法の開発

本研究では、火山噴火直後の計測データが少ない段階において、調査が困難な火口周辺の火山灰等の堆積厚(以降、降灰厚と呼ぶこととする)を推定する手法を検討している。これは、降灰厚が火口からの距離を用いて指数関数やべき乗関数で近似されるという既往の成果(González-Mellado and

Cruz-Reyna, 2010) を活用し、1975 年以降の国内の火山噴火について文献を収集し、その適用性を検討している。

国内の既往噴火 13 事例について、火口からの距離と降灰厚の関係を解析した結果、12 事例でべき乗近似式の決定係数 (R^2 値) が 0.8 以上となり、べき乗関数が良くあてはまる結果が得られた (図-1)。火口からの距離 X (m) における降灰厚 $T(x)$ (cm) は、 T_0 (定数)、 B (べき指数) をパラメータとする(1)式により求められることになる。

$$T(x) = T_0 \cdot X - B \dots (1)式$$

(1)式を活用し、2014 年御嶽山噴火の際の火口近傍の降灰厚を推定し、等層厚線の作成を試みた。この時、 B は同じ噴火形態である既往の水蒸気爆発 3 事例から得られた値の平均値を用いた。また、 T_0 は、火口から約 5.7 km 地点 (A) で実測された堆積重量から得られた堆積厚から求めた。これらのパラメータを用いた結果、火口から 500 m 地点における降灰厚は約 35 cm と推定された。実際の噴火時には火口近傍の降灰厚の情報が取得できないことを想定し、火口から 4 km 以遠の実測降灰厚と、(1)式から算定した値を用いて等層厚線を作成した (図-2)。火口周辺では、風下側と同様の降灰厚を全方向に仮定し、火口から 500 m の 4 地点に推定降灰厚 35 cm を与えた。実際の噴火では降灰厚 1 cm の範囲の大部分は火口から 4 km の範囲内と推定され、これまでは、この範囲内の実測データが得られない場合、降灰厚 1 cm の範囲を把握することが困難であった。しかし、推定値を与えることで、図-2 のように火口近傍の等層厚線の推定が可能となった。火口近傍の推定降灰厚を用いて作成した 1.5 cm の等層厚線と、Takarada *et al.* (2016) に示された 15,000 g/m² (堆積厚に換算すると約 1.5 cm) の等層厚線とを比較すると、両者が重複する範囲の面積割合は今回の推定結果に対して約 80%であり、多くの部分はカバーできていた。一方で、過大評価した範囲の面積は約 47%であった。このように、精度に課題は残るものの、火口近傍の降灰厚を計測できない状況においても、火口から離れた場所で計測された降灰厚データから等層厚線図を作成することが可能であり、おおよその降灰厚や降灰分布範囲の把握には活用可能と考えられる。現在、推定式のパラメータの設定方法について、さらに検討を進めている。また、2014 年御嶽山噴火では、火口周辺には火山灰以外に噴石や火砕流の堆積もあったことから、この手法の適用範囲についても検討を行っている。

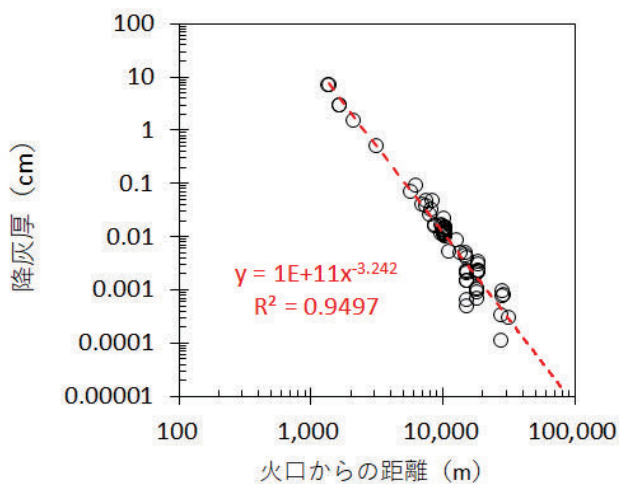


図-1 2014 年御嶽山噴火を事例とした火口からの距離と降灰厚の関係 (べき乗近似)

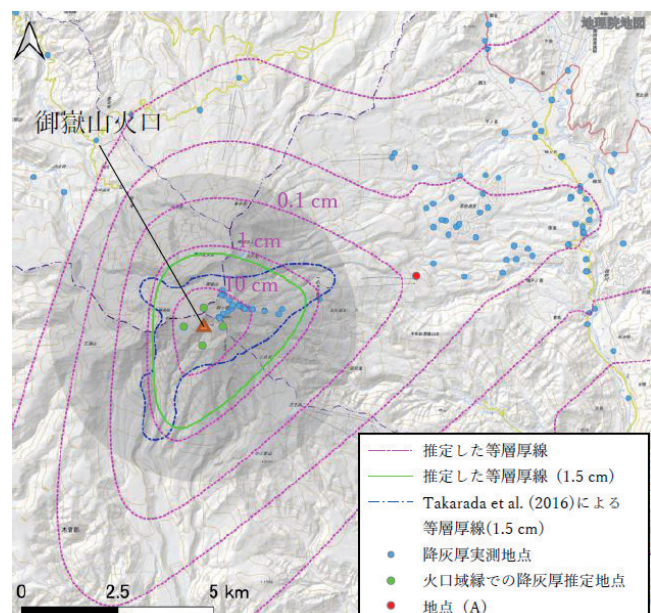


図-2 御嶽山 2014 年噴火の推定等層厚線図, 地理院地図に加筆

3. 2 観測データに基づく土石流氾濫計算手法の開発

本研究では、これまでに提案されている土石流の支配方程式を活用し、桜島有村川での土石流観測データに基づき、実際の土石流に適用可能な解析手法を検討している。土石流の流動機構はある程度明らかにされてきており、その支配方程式も提案されている（例えば、芦田ほか、2008）。桜島の有村川や野尻川では荷重計が設置され（大坂ほか、2013）、土石流の土砂濃度や間隙流体の質量密度の推定が可能になってきている。これにより、土砂濃度や間隙流体密度を既知とした抵抗則の検証が可能になってきている。また、火山地域での検討を進めるにあたっては、火山灰等には微細粒子が含まれることから、微細粒子の液相化を考慮する必要もある（西口ほか、2011；江頭ほか、2016）。

図-3に桜島有村川3号堰堤の位置と、堰堤近辺の縦断地形を示す。有村川3号堰堤には、荷重計、超音波流速計および測域センサーが設置されており、土石流表面の標高、表面流速および荷重の計測によって、土石流の土砂濃度や間隙流体密度が算出できるようになっている（大坂ほか、2013）。微細粒子が土石流へ及ぼす影響については、降雨による水の供給で堆積物層内の浸透流水深の上昇による不安定化により堆積物が土石流化すると、粗粒粒子は固相として、微細粒子は水とともに液相として振る舞うようモデル化している（山崎ほか、2019）。また、土石流の運動量保存則と質量保存則は、山崎・江頭（2018）と同様である。上記の解析モデルの妥当性は、土石流の土砂濃度や間隙流体の質量密度を推定し数値計算モデルに反映して、その結果と観測結果を比較することにより検討した。

対象区間は図-3に赤矢印で示す範囲で、対象イベントは2014年8月29日に発生した土石流である。設定したパラメータの詳細は既往報告（山崎ほか、2019）に譲るが、解析結果は図-4に示すとおりである。堰堤地点の観測および計算による流動深と流速の時間変化を示したが、観測による流速と水深は、計算結果の水深が零から立ち上がる時間に一致させて表示している。計算結果においては、観測では見られない後続流が見られているものの、流速のピーク値はほぼ一致しており、水深のピーク値は観測値の1.2倍程度となっている。流速および水深の立ち上がりからピークまでの変化やピーク後の減衰といった傾向についても、おおむね同様の変化を示す結果を得た。

土石流による土砂流出予測には、降雨流出過程および安定条件による土石流発生地点の推定や、斜面から河道への土砂移動過程を踏まえた河道における堆積物の分布の推定が課題であり、現在、検討を進めている。また、既往の土石流氾濫計算の計算時間の短縮化のため、氾濫グリッドのみを対象に集中的に計算する方法、並列計算による高速化方法を検討している。その結果、2014年御嶽山噴火では、計算に約12時間を要していたが、1時間程度で計算可能となった。改良したプログラムは、2018年5月に地方整備局に配布され、社会実装されている。

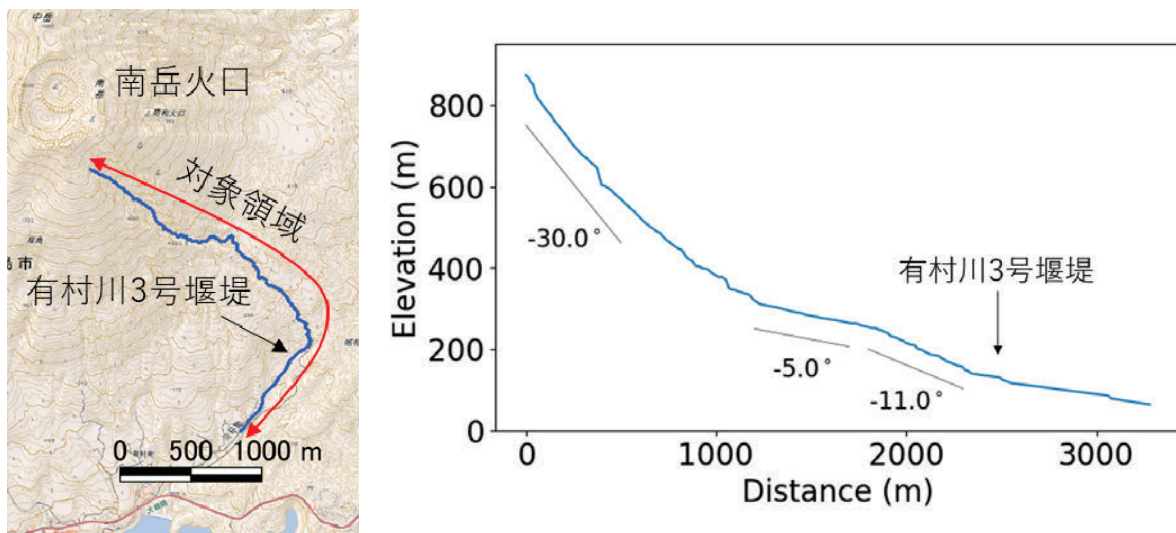


図-3 有村川3号堰堤の位置と縦断勾配，地理院地図に加筆

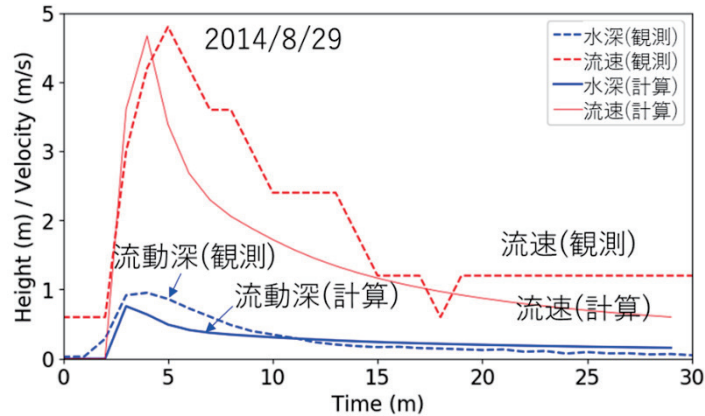


図-4 土石流氾濫計算による水深と流速の時間変化

4. 今後の取り組み

平成 25 年 7 月、国土交通省は九州地方整備局に九州防災・火山技術センターを設置し、降灰に伴う土石流等の火山災害への対応を強化した。火山・土石流チームでは、九州防災・火山技術センターとの意見交換を密に行いながら、活用者の目線に立って技術開発を進めている。

降灰状況調査については、九州防災・火山技術センターが検討を進めている各種の火山灰等の堆積厚の計測技術の利用を前提としながら、ここで紹介したような、多くの計測値が直ちに得られない状況における推定手法を開発することで、現場のサポートに努めている。また、天候等の影響を受けにくい衛星 SAR データの解析を共同して進め、一定の厚さ以上の火山灰等が堆積している範囲を面的に把握する手法の検討（堤ほか、2019）や、緊急調査の実務者のためのマニュアル作成と改訂についても共同で検討を行っている。また、土石流氾濫解析手法についても、開発後に九州防災・火山技術センターへの実装が円滑に進むように取り組んでいる。このような技術開発や社会実装により、火山噴火後の土石流の発生リスク評価の精度が高まれば、避難対象エリアのより適切な設定と円滑な土石流対策が期待できる。

一方、内閣府火山防災対策会議調査企画委員会では、火山噴火後の降灰に関する現地調査の連携・データ共有に向けた取り組みもスタートしている（内閣府、2019）。今後の研究機関の相互連携の成果も降灰による土石流の氾濫リスク評価に役立てていく予定である。

本稿で触れなかった研究として、火山灰等の堆積が土石流発生頻度や規模に与える影響の解明がある。火山・土石流チームでは、火山灰等の堆積が表面流出および土石流の発生に及ぼす影響を明らかにするため、火山噴火に伴う降灰が続く桜島の有村川流域に小斜面観測地を設け、2012 年より表面流出および表面侵食量の計測を実施している（手塚ほか、2019）。こうした観測結果をもとに、火山噴火に伴う流域環境の変化と土石流発生との関連性に対する理解を高めつつ、次の研究につながるよう検討を進めていきたい。

【引用文献】

- 芦田和男, 江頭進治, 中川 一: 21 世紀の河川学, 京都大学学術出版会, pp.107-167, 2008
 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, pp.38-42, 2016.1
 González-Mellado, A.O. and Cruz-Reyna, S.: A simple semi-empirical approach to model thickness of ash-deposits for different eruption scenarios. Natural Hazard and Earth System Sciences, Vol.10, No.11, pp.2241-2257, 2010.10
 林 真一郎, 北原 修, 草野慎一, 渡 正昭, 長井義樹, 國友 優, 石塚忠範, 藤村直樹, 清水武志: 平成 26 年 9 月御嶽山噴火による土砂災害に対する二次災害防止の取組, 砂防学会誌, Vol.67, No.6, pp.86-91, 2015.3
 城ヶ崎正人: 火山噴火対策に伴う土砂災害対策について, 砂防と治水, Vol.51, No.3, pp.7-12, 2018.8
 古賀省三, 村上 博: 地域住民の意見を聞いて策定した雲仙・普賢岳火山砂防計画, 砂防学会誌, Vol.55,

- No.1, pp.63-70, 2002.5
- 内閣府：1990-1995 雲仙普賢岳噴火，災害教訓の継承に関する専門調査会報告書，214p.，2007.3
http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1990_unzen_funka/index.html
(2019年8月15日参照)
- 内閣府：火山防災に係る調査企画委員会，内閣府ホームページ，
<http://www.bousai.go.jp/kazan/chousakikaku/index.html> (2019年8月15日参照)
- 西口幸希，内田太郎，石塚忠範，里深好文，中谷加奈：細粒土砂の挙動に着目した大規模土石流の流下過程に関する数値シミュレーション，砂防学会誌，Vol.64, No.3, pp.11-20, 2011.9
- 西井洋史：火山噴火に伴う土砂災害からの防災・減災を目指す研究の展望，土木技術資料，Vol.60, No.7, pp.6-7, 2018.7
- 大坂 剛，高橋英一，國友 優，山越隆雄，能和幸福，木佐洋志，石塚忠範，宇都宮 玲，横山康二，水山高久：桜島における土石流荷重計による単位体積重量測定，砂防学会誌，Vol.65, No.6, pp.46-50, 2013.3
- 佐々木美紀：平成 23 年霧島山（新燃岳）噴火とその後の対応について，砂防学会誌，Vol.66, No.5, pp.86-91, 2014.1
- Takarada, S., Oikawa, T., Furukawa, R., Hoshizumi, H., Itoh, J., Geshi, N., and Miyagi, I.: Estimation of total discharged mass from the phreatic eruption of Ontake Volcano, central Japan, on September 27, 2014. *Earth, Planets and Space*, Vol.68, No.138, doi: 10.1186/s40623-016-0511-4, 2016.8
- 田村圭示，山越隆雄，松岡 暁，安養寺信夫：火山噴火後に土石流が発生した事例，土木技術資料，Vol.52, No.3, pp.34-39, 2010.3
- 寺本行芳：火山灰被覆に伴う侵食と土砂流出，鹿児島大学農学部演習林研究報告，第 33 号，pp.73-120, 2005.12
- 手塚咲子，藤村直樹，山崎祐介，石井靖雄：桜島有村川流域小斜面における表面流出観測と浸透特性の分析，平成 31 年度（公社）砂防学会研究発表会講演集，pp.715-716, 2019.5
- 堤 宏徳，岡崎 敏，水野正樹，柴山卓史，平田育士，杉本 惇，本田 健：火山噴火時に衛星 SAR データを用いて一定厚以上の降灰分布形状を把握する手法の検討，平成 31 年度（公社）砂防学会研究発表会講演集，pp.697-698, 2019.5
- 内田太郎，山越隆雄，清水武志，吉野弘祐，木佐洋志，石塚忠範：河道閉塞（天然ダム）及び火山の噴火を原因とする土石流による被害範囲を速やかに推定する手法，土木技術資料，Vol.53, No.7, pp.18-23, 2011.7
- 山本 望，藤村直樹，水野正樹，石井靖雄，西井洋史：火口からの距離を用いた降灰厚分布の推定に関する試み，平成 31 年度（公社）砂防学会研究発表会講演集，pp.59-60, 2019.5
- 山崎祐介，江頭進治：豪雨に伴う土砂・流木の生産と流下過程に関する研究，河川技術論文集，第 24 巻，pp.71-76, 2018.6
- 山崎祐介，藤村直樹，手塚咲子，石井靖雄：桜島有村川における土石流の観測結果と数値解析結果との比較，平成 31 年度（公社）砂防学会研究発表会講演集，pp.145-146, 2019.5
- 一般社団法人 全国治水砂防協会：改訂版 土砂災害防止法令の解説－土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律－. 一般社団法人 全国治水砂防協会，東京，pp.212-231, 2016.1

土工構造物分野における近年の豪雨災害に対する土研の取組と展望

地質・地盤研究グループ グループ長 金子正洋

1. はじめに

土工構造物は、土を主な材料としており、土は含水の程度により性状・強度が大きく変化しやすく、また、水により浸食されやすいため、豪雨の影響を大きく受けやすい。さらに、その破壊形態も、土の強度変化や浸食により一気に進むなど複雑である。

このため、土工構造物は、豪雨により被災することが多く、例えば、平成30年7月豪雨においても、河川堤防、道路盛土、切土のり面等の土工構造物において多大な被害が発生した。

また、一口に土工構造物といっても、その構成は、堤防、道路盛土の様にほとんど土で構成されるものから、擁壁、アンカー斜面の様に土と一体となってその機能を発揮するものなど多種多様であり、豪雨による被害の形態も多岐にわたる。

土木研究所（以下「土研」という。）地質・地盤研究グループでは、複雑で多種多様な土工構造物の被害を引き起こす豪雨に対応するため、「全国の被害事例の調査」、「調査結果からの課題の把握」、「実大模型実験による破壊メカニズムの把握、対策の検討」を中心に取り組んでいる。本稿では、これらの取り組みについて報告する。

2. 土工構造物分野における豪雨災害に対する取組

2. 1 土研の災害発生時の対応

最初に、土研全体の災害発生時の対応について紹介する。

土研は、豪雨災害のみならず、地震、土砂災害等のあらゆる災害の発生時には、まず何よりも、災害現場の支援を最優先に活動を開始する。研究のための災害調査は、現場支援を終えた段階で実施される。

全国の災害の発生状況に関する情報は、国土交通省等を通じて土研に伝えられ、そのうち研究機関としての技術的な支援が必要な案件について、行政・現場からの要請を受けて、被害原因の把握、緊急対応策の提案等の支援を行う。

この時には、土研に蓄積されている過去の災害から得られた知見や防災等に関する研究成果を駆使するとともに、日頃から、インフラ施設の技術基準等の策定に関与する等、行政・現場と連携して研究を進めることにより得られた知見を元に、災害が、防災・利便等の様々な用途をもつインフラ施設、更に国民・社会にどの様な影響を及ぼすかも考慮して、最適な対応となるよう支援を行っている。

更に、被災現場が復興する段階においても、復興検討委員会への参加等を通じて支援を行っている。

2. 2 災害調査・技術相談を通じた課題の把握

土工構造物の豪雨による被害は、複雑で多種多様な形態を示すため、実際に現場で起こっている事例を地道に調査し、被害の状況を把握することが、重要であると考えられる。

災害発生時から、時間がたち現場が落ち着いてきた段階で、行政・現場と調整しながら詳細な被害調査を実施する。ここで調査は、大きな被害が出た土工構造物を中心に、被害分布の広がりも対象としており、上述の災害現場の支援時に得られた情報も活用している。また、被害現象の保持上、急を有する場合は、災害現場に迷惑がかからないように調整しながら早い段階で調査を実施することもある。

さらに、災害時のみならず通常時でも、土研では、技術相談により、全国の現場における土工構造物の豪雨の被害について情報を収集している。

このようにして、できる限りもれなく集めた全国の被害事例、課題から、施設の機能や社会に重大な影響を及ぼす事象や、これまでに検討されていない事象を抽出し、新たな研究課題として設定している。

2. 3 大規模模型実験

破壊メカニズムの解明や対策手法の検討にあたって、土工構造物における土の挙動や複雑な破壊メカニズムを明らかにするために模型実験は有効である。小規模な模型実験では、相似則を満足させて、複雑で多種多様な現象を再現することは難しいため、土研では、実大や実大に近いスケールの模型や遠心力実験装置など特殊な実験装置を用いて実験を行っている。

3. 取組事例

ここでは、土研の近年の取り組み事例を3つ紹介する。

3.1 堤防の浸透による法すべり¹⁾

堤防は、河川の流水を安全に流下させるために、設けられる線状土構造物であるが、決壊が1箇所でも生じると、これをきっかけにシステム全体が機能を失う。ここで、河川水や降雨の作用により、法すべり等の変状が生じると、これをきっかけ決壊に至る場合がある。平成30年7月豪雨においても、小田川で浸透による法すべりの痕跡が確認された(写真-1)。

本研究では、大型模型浸透実験により変状進行と堤体内水位の関係及び変状進行形態を明らかにし、これらを元に進行性を考慮した新たな評価法を提案した(図-1、写真-2)。本手法は、実務での利用も考慮した比較的簡単な方法である。また、進行性を有するすべりに対する、より安価な対策工についても実験による検討を行った(表-1、図-2)。

実際の法すべりでは、最初に法尻付近において小さな崩壊が生じ、徐々に崩壊範囲が拡大することも多い。大型模型実験で観察された進行性破壊の特徴を取り入れ、浸透流解析と円弧すべりを組み合わせ、進行性破壊を比較的簡単に評価可能な方法を提案した。また、このような進行性破壊に対するより安価な対策として、ドレーン工や礫混合土を用いた対策の効果小型模型実験で確認した。

これにより、洪水波形に対する堤防の機能に影響する変状の進行性や程度に関する評価が可能となり、堤防システム全体の安全性評価の合理化、対策の優先度の評価に活用されることが期待される。



写真-1 小田川の浸透滑りの痕跡



写真-2 大型模型実験による浸透滑りの再現

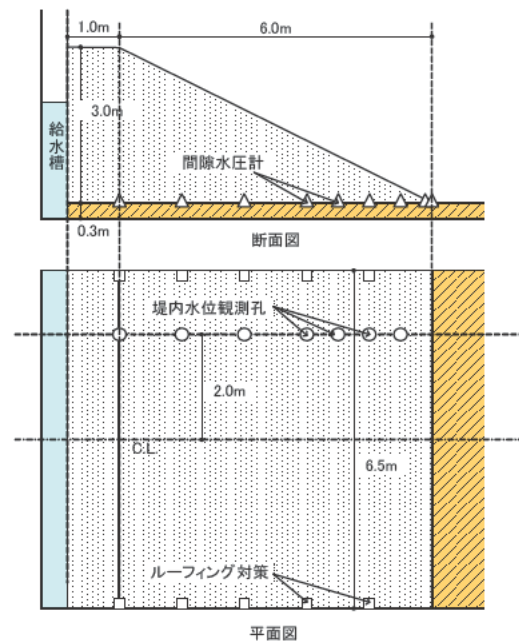


図-1 大型模型の形状および計測機器の配置

表-1 対策工に係る小型模型実験の条件一覧

	対策工配合条件 堤体土：3号砕石： 5号砕石	対策工の 締固め度	実験結果概要
Case0 無対策	-	-	4時間で大規模崩壊
Case1 対策1	礫混合率35% 13:3.5:3.5	100%	4時間で中規模崩壊
Case2 対策2	礫混合率50%		72時間で変状なし
Case3 対策3	2:1:1	90%	4時間で小規模崩壊

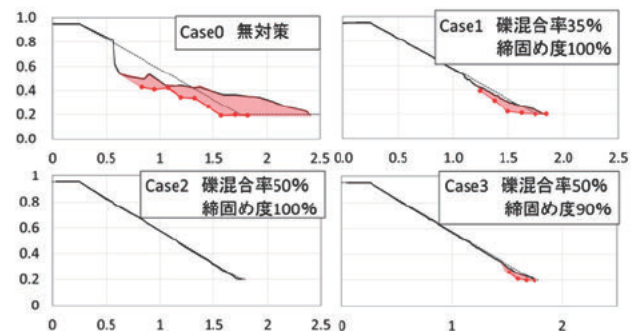


図-2 実験終了時の変状範囲

3. 2 異常降雨作用下での補強土壁²⁾

補強土壁においては、強い作用を受けた場合に、いくつかの現場で盛土材のこぼれ出しが確認されているが(写真-3)、こぼれ出しは、補強土壁のメカニズムの前提に影響を及ぼす恐れがあることから、その状況によっては致命的となる重大事象である。しかし、盛土材のこぼれ出しが生じた補強土壁の修復の必要性の判断方法や補修による効果は明らかにできていない。

本研究では、補強土壁の補修方法の確立に必要なこぼれ出しの詳細な進行過程の解明と従来から実施されているこぼれ出しに対する補修方法の要否の判定及び効果を確認することを目的として、異常降雨作用下での実物大模型による挙動確認実験を行い(表-2、図-3、写真-4)、盛土内の降雨作用の影響、盛土材のこぼれ出し状況、こぼれ出し後の補強材張力と壁面変位の挙動等に関して知見を得た。

補強土壁は、橋梁取付け部や用地制約の厳しいボトルネック部などに用いられることが多く、その変状が道路ネットワークに影響を与えることが懸念される。今後、本実験で得られた知見をもとに、こぼれ出しに関して、異常降雨のような条件下でも道路機能を確保するような仕様の改良、変状発生時の安全性評価や補修手法の確立に向けた検討を進めていく予定である。



写真-3 補強土壁の盛土材のこぼれ出し

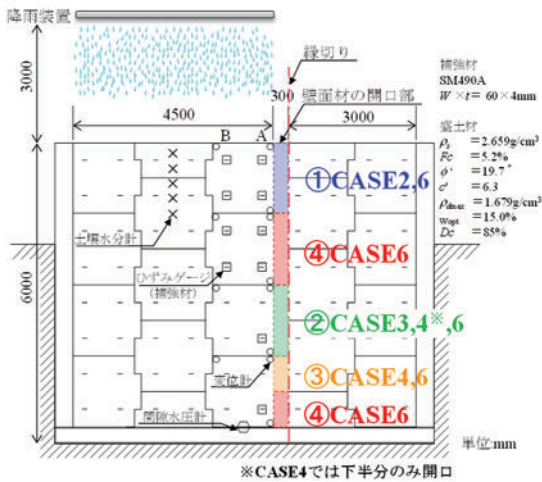


図-3 補強土壁の実大模型の概要

表-2 実験ケース

ケース名	時間雨量 (mm/hr)	総雨量 (mm)	開口長 (m)	開口位置 (図-3)
CASE1	26.3	約 1,700	0	—
CASE2	27.6	約 1,500	1.5	①
CASE3	27.6	約 2,000	1.5	②
CASE4	29.7	約 2,000	2.25	② ③
CASE5	34.1	約 2,500	0(閉塞)	—
CASE6	33.2	約 1,600	6.0	①~④



写真-4 異常降雨作用下での補強土壁の実大模型実験

3. 3 土工構造物等の排水性向上技術

近年、台風等による豪雨を誘因とする土工構造物等の被害が頻発しており、平成 28 年 8 月の台風 10 号では、土石流により排水施設(地下横断管)が詰まり、溢れた表面水が路面を伝い流下し、道路本体を侵食し、盛土が崩壊した被害事例が見られた(写真-5)。他の災害調査も踏まえ、被害の誘因として、土工構造物等の背後の集水地形、路面等から多量の表面水が集まったことが挙げられており、集水地形や路面等の集水を考慮した、盛土・切土の排水対策の強化が課題となっている。

ここで、集中豪雨による雨量の一時的な超過や表面排水施設の長期供用における損傷・劣化・機能低下を考慮すると、表面排水の強化(側溝や集水樹の容量増加)だけでなく、並行して、のり面保護・のり尻補強等による構造物の強化に加え、横断排水管の呑口閉塞対策、土工構造物自体の排水性能も高めることが効率的かつ効果的である。



写真-5 H28年台風10号での盛土崩壊
(国土交通省 北海道開発局 帯広開発建設部 HP より)

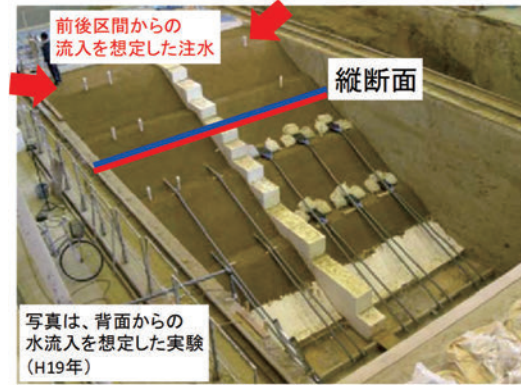


写真-6 大規模盛土実験での
排水性能の検討イメージ

本研究では、三次元的な水の浸透による盛土の崩壊メカニズムを解明するために、従来の背面からに加え、道路縦断方向からの水の流入を想定した大規模盛土実験（写真-6）を実施する予定である。

4. 今後に向けた展望

今後、地球温暖化に伴う気候変動により豪雨災害分野にも影響が及ぶことが予測され、例えば国土交通省社会資本整備審議会「気候変動に適応した治水対策検討小委員会」の答申において、21世紀末には、「大雨による降水量（日降水量）が全国平均で10.3～25.5%増加」、「全国の一級水系において、施設計画の規模を上回る洪水の発生頻度が約1.8～4.4倍に増加」することが示されている。³⁾

この様に、今後、気候変動による作用の増大・頻発化が想定されているが、土工構造物の豪雨災害被害への対応においては、これまで同様、「被害事例の調査」、「課題の把握」、「実大模型実験による検討」を継続していくことが基本であると考え。加えて、変状の土工構造物の機能への影響を考慮し、豪雨災害に対する安全性のより合理的な評価や対策工の提案の検討を進めることが重要であると考え。

また、国土交通省においては、近年の水害や土砂災害における課題を踏まえて、ハード・ソフト一体となった対策が強化されており、その動向も踏まえ研究を進めることが重要である。例えば、雨量に関して「高分解能、高頻度で、リアルタイムな雨量情報（XRAIN：エクスレイン）の配信エリアを全国に順次拡大」⁴⁾され、より詳細な情報が提供されるようになってきており、事前通行規制での運用など、これを土工構造物に関する安全性確保に活用することも有効であると考え。

5. おわりに

土工構造物分野における近年の豪雨災害に対する土研の取組として「全国の被害事例の調査」、「調査結果からの課題の把握」、「実大模型実験による破壊メカニズムの把握、対策の検討」を、3つの事例「堤防の浸透による法すべり」、「異常降雨作用下での補強土壁」、「土工構造物等の排水性向上技術」を示して紹介した。今後、気候変動により豪雨災害の増大・頻発化が想定されるが、その状況に十分に留意、把握しながら、また、国土交通省等の関連施策の動向も考慮して、引き続き、研究を進めていく所存である。

【参考文献】

- 1) 石原雅規、佐々木亨、佐々木哲也：堤防の浸透による地すべりの進行性を考慮した評価法と対策工の提案、土木技術資料、Vol. 61No. 8、pp. 34-39、2019. 8
- 2) 宮武裕昭、藤田智弘：補強土壁の異常降雨作用下での挙動確認実験、土木技術資料、Vol. 61No. 8、pp. 24-27、2019. 8
- 3) 気候変動に適応した治水対策検討小委員会：答申「水災害分野における気候変動適応策のあり方について ～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～」、pp. 6-7、H27. 8
- 4) 国土交通省 水災害に関する防災・減災対策本部：平成30年度の重点対策

永続的な舗装リサイクル技術の確立を目指して

道路技術研究グループ 舗装チーム 上席研究員 藪 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km¹⁾ であり、膨大な量となっている。道路利用者に良好な路面を提供していくためには、舗装は一定期間ごとに表層等を更新していく必要があり、舗装工事において古い舗装を切削した際等に建設副産物であるアスファルト・コンクリート塊（以下、アスコン塊）が大量に発生する。このため、舗装において、アスコン塊のリサイクルは重要な課題である。1970年に制定された「廃棄物の処理および清掃に関する法律」では、廃棄物の発生抑制および適切な分別、保管、収集、運搬、再生、処分等が行われることとなり、アスコン塊も適切に処分することが義務化された。さらに、1973年の第一次石油ショックにより、アスコン塊の有効活用がさらに望まれることとなった。これらを契機に、1970年代にはアスコン塊のリサイクルに関する研究は始まり、様々なリサイクル技術が開発され発展してきた。このような経緯から、わが国のアスコン塊の再生利用は40年以上歴史がある。

現在では、再生アスファルト混合物の出荷割合は加熱アスファルト混合物（以下、アスファルト混合物）の全出荷量に対して75%、再生骨材配合率は全国平均で50%に達しており²⁾、今後は繰り返し再生された骨材を含むアスファルト混合物の利用が増えるものと考えられる。しかし、アスファルト混合物を繰り返し利用した際の材料性状や混合物性状に関する研究は進められてきている³⁾⁴⁾ものの知見は少なく、明確になっていないのが現状である。

このような状況から、土木研究所では、繰り返し再生された骨材を含むアスファルト混合物の利用を念頭においた永続的な舗装リサイクル技術の確立を目指した研究開発に取り組んでいる。

本稿では、舗装におけるリサイクルの現状について述べるとともに、これを踏まえた土木研究所の取り組みを紹介する。

2. 舗装リサイクルの現状

2.1 舗装リサイクル

アスファルト混合物は、全てを新規の原料で製造する場合と、原料の一部にアスコン塊から製造したアスファルト・コンクリート再生骨材（以下、再生骨材）を使用する場合があります。この再生骨材を含有するものを再生アスファルト混合物と呼んでいる。

舗装工事等により発生したアスコン塊は、中間処理施設に持ち込まれ、破碎、分級等の処理を行い、再生骨材に加工される。この再生骨材は、再生路盤材料として利用したり、新しい材料と混合して再生アスファルト混合物

に加工したりして利用される。特に再生アスファルト混合物への利用は、廃棄物が多少の加工で元の製品に戻り、リユースに近いことから、持続的なリサイクルが可能な好ましい利用方法である。舗装リサイクルのイメージを図-1に示す。

2.2 アスコン塊のリサイクル

建設副産物の再資源化率の推移を図-2に示す。わが国のアスコン塊のリサイクルに関する研究は1970年代には始まり、平成3年「資源の有効な利用の促進に関する法律」、平成12年「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」の制定、舗装再生便覧⁶⁾等の技術図書の整備、舗装リサイク



図-1 舗装リサイクルのイメージ

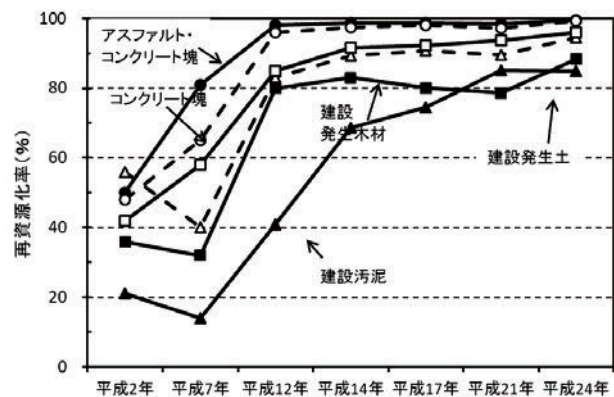


図-2 建設副産物の再資源化率の推移⁵⁾

ルに関わる技術開発等によりアスコン塊の再資源化率は高まってきた。平成 2 年度では再資源化率は 50%程度であったが、その後、急速に上昇し、平成 12 年度に 98%、平成 17 年度には 99%に達し、現在はほとんどが再利用されている状況である。

2. 3 再生アスファルト混合物の状況

アスファルト混合物の全製造量に占める再生アスファルト混合物の占める割合の推移を図-3 に示す。再生アスファルト混合物の製造割合は年々増加し、平成 10(1998)年度には 50%、平成 20 (2008)年度には 73%、平成 30(2018)年度には 75%に達している。再生混合物の出荷割合が 50%を超えてから現在まで約 20 年が経過しており、これらが更新時期を迎えることから、今後は過去に複数回再生されたアスコン塊が増加することになる。

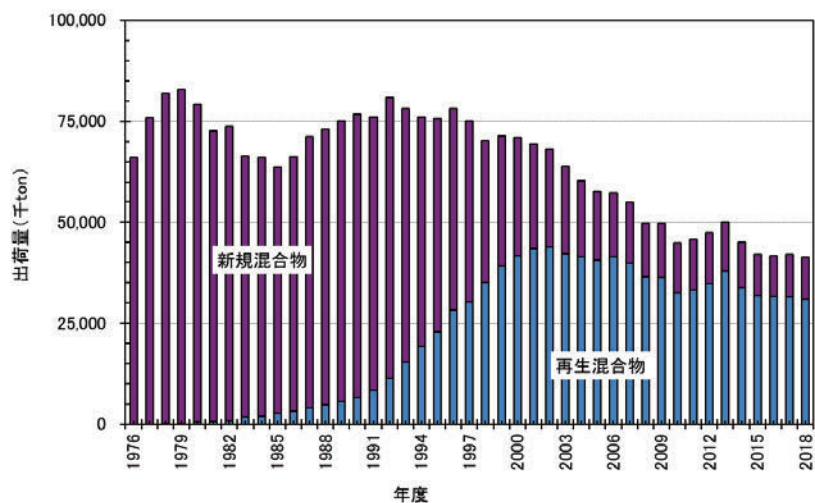


図-3 再生アスファルト混合物の製造割合の推移²⁾

また、再生アスファルト混合物は、新規骨材と再生骨材を混ぜ合わせて製造するが、このうち再生骨材の占める割合である再生骨材配合率の推移を図-4 に示す。再生骨材配合率についても年々上昇しており、全国平均では平成 10(1998)年度には 34%、平成 20 (2008)年度には 43%、平成 30(2018)年度には 50%を上回っている。特に関東地域での割合は高く、近年は概ね 60%程度となっており、南関東では7割近くになっている。

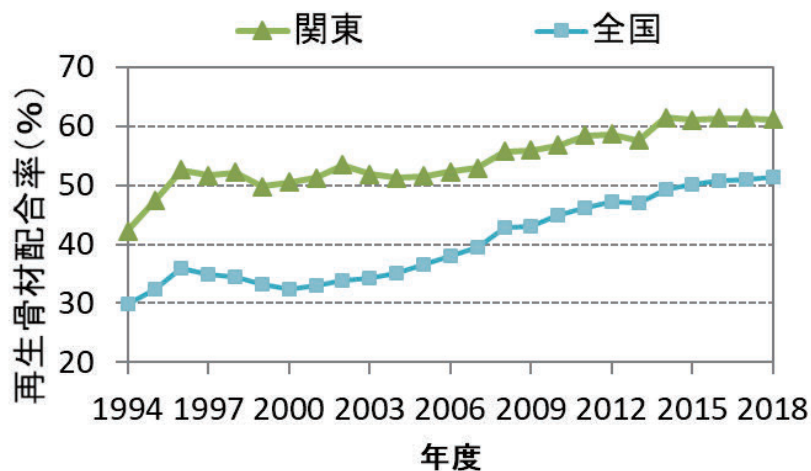


図-4 再生骨材配合率の推移²⁾

図-5 は、再生骨材配合率が 30%、70%において、再生アスファルト混合物を繰り返し製造した場合に 2 回以上再生した骨材の使用割合を示したものである。再生骨材配合率が 30%の場合には、2 回以上繰り返し再生された骨材を利用する割合は全体の 9%にとどまるが、再生骨材配合率の上昇に伴いその割合は増加し、再生骨材配合率が 70%となった場合には全体の 49%を占めることとなり、繰り返し再生

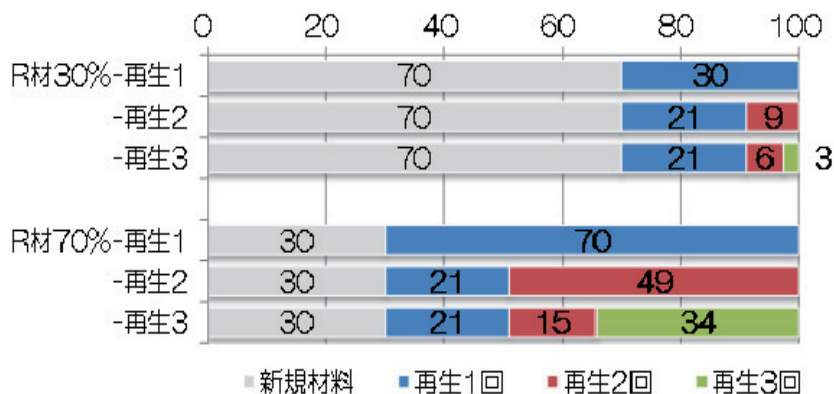


図-5 再生骨材配合率と繰り返し再生骨材の割合

された骨材が再生アスファルト混合物の品質に与える影響も大きくなることが想定される。

3. 土木研究所の取り組み

土木研究所では、昭和 50 年代から舗装のリサイクルの研究を始めており、現在は、2. において述べた舗装リサイクルの現状を踏まえつつ、永続的な舗装リサイクル技術の確立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「持続可能な建設リサイクルのための社会インフラ建設技術の開発」の研究課題「循環型社会に向けた舗装リサイクル技術に関する研究 (H28～R3)」において、再生骨材を多く含む再生アスファルト混合物の適用条件の明確化や現場での利用を念頭においた再生アスファルト混合物の品質を評価するためのより簡便な試験方法の検討に取り組んでいる。

再生骨材を繰り返し利用した際の材料性状や混合物性状に関する研究は進められてきているものの知見は少なく、明確になっていない。こうした状況を踏まえ、本研究では、まず、繰り返し劣化再生による性状変化を際立たせるために、新規アスファルトを追加しない、再生骨材配合率 100% (以下、100% 再生) での繰り返し再生によるアスファルトバインダー (以下、アスファルト) 及びアスファルト混合物 (以下、混合物) の性状変化の把握を行った。以下にその成果の概要を示す。

3. 1 検討概要

繰り返し劣化・再生したアスファルトおよび混合物の性状を把握するため、実験室内においてアスファルトを劣化させた後、再生用添加剤によりアスファルトの針入度を回復させ、それを複数回繰り返しその影響を分析した。

3. 2 試験方法

(1) 試験手順

試験手順を図-6 に示す。新規のアスファルト (以下、ORG) を試験室内で劣化・再生を繰り返し、性状変化を確認するため材料性状試験を行った。また、混合物は ORG と劣化・再生を 3 回および 5 回繰り返した再生アスファルト (以下、n 回繰り返し劣化・再生したものを劣化 n、再生 n と示す) をそのままバインダとして用いて作製し、混合物性状に関する試験を行った。なお、繰り返し劣化再生による性状変化を際立たせるために、本試験の再生アスファルトは、新規アスファルトを追加しない、100% 再生で実施した。

(2) 試験材料の性状

アスファルト (ORG) は舗装用石油アスファルト 60/80 を用いた。また、再生用添加剤は国内で流通しているもので、実際のアスファルトプラントで実績のあるものを 2 種類使用した。再生用添加剤 A は芳香族分が比較的多いものであり、再生用添加剤 B は飽和分が多いものとして採用した。アスファルトおよび再生用添加剤の性状を表-1 に示す。混合物は、最大粒径 13mm の密粒度アスファルト混合物で、最適アスファルト量は 5.5% である。混合物の合成粒度を表-2 に示す。

表-1 使用材料の性状

	ストレートアスファルト 60/80		添加剤A	添加剤B
密度 (g/cm ³)	1.037	密度 (g/cm ³)	0.975	0.909
針入度 (1/10mm)	70	アスファルト成分	0.1	0
軟化点 (°C)	46.5	組成 (%)		
伸度 (cm)	100+	レジン分	6.1	2.5
		芳香族分	88.1	47.7
		飽和分	5.7	49.9

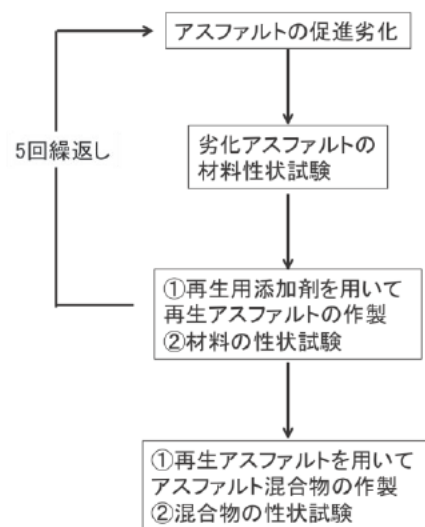


図-6 試験手順

表-2 アスファルト混合物の合成粒度 (密粒度アスファルト混合物)

通過質量百分率 (%)	合成粒度	
	ふるい目の開き	合成粒度
	19 mm	100
	13.2	96.2
	9.5	84.9
	4.75	63.4
	2.36	41.1
	0.6	26.0
	0.3	16.6
	0.15	8.9
	0.075	5.4
アスファルト量 (%)		5.5

(3) 試験方法

アスファルトの材料性状は、針入度試験、軟化点試験および伸度試験を舗装調査・試験法便覧⁷⁾に準拠して実施した。混合物性状は、繰り返し再生により再生アスファルトの接着力が低下することが予想されたため、圧裂試験およびカンタブロ試験を実施した。なお、カンタブロ試験ではこれまでの研究⁸⁾により供試体温度を上げていくと特に新規混合物と再生混合物の差が大きくなる傾向が見られたので、試験条件を供試体温度 60℃、ロサンゼルス試験機内の温度 30℃とした試験（以下、高温カンタブロ試験）を実施した。

3. 3 試験結果

(1) アスファルト材料性状試験結果

図-7 および図-8 に針入度および軟化点の結果を示す。再生用添加剤 B は、繰り返し劣化再生が進むにつれて、同じ劣化条件でも針入度 20 に達しないようになった。再生する際には、針入度 70 前後になるように再生用添加剤の添加量を調整した。軟化点については、再生用添加剤 B の方が軟化点の上昇幅が大きくなり、劣化 4 以降では軟化点が 100℃を越える結果となった。

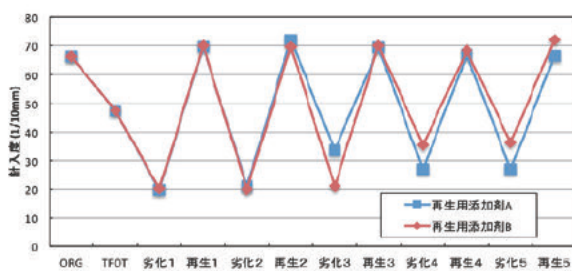


図-7 針入度

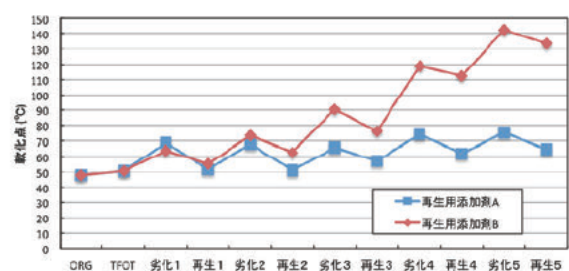


図-8 軟化点

次に、図-9 に劣化・再生アスファルトの伸度を示す。再生用添加剤 A では、再生 1 回目、2 回目で 30cm ほどまで回復していたが、再生用添加剤 B では再生 2 回目以降ほとんど回復しなかった。芳香族分の多い再生用添加剤の方が繰り返し再生時にも伸度の回復が多少有利であることが分かった。しかし、いずれの再生用添加剤も舗装再生便覧⁶⁾に示されている伸度 100cm までには回復していなかった。これは、今回再生時に新規アスファルトを全く添加しておらず、非常に厳しい条件であったことによると考えられる。

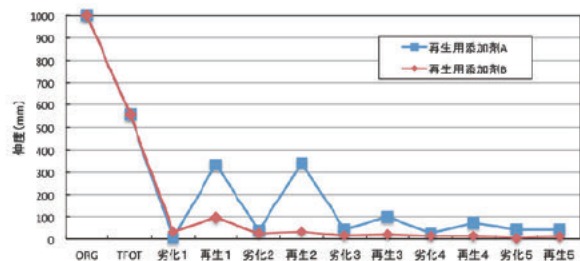


図-9 伸度

(2) 混合物性状試験結果

① 圧裂試験

図-10 に圧裂試験による圧裂係数の結果を示す。圧裂試験は、新規 (ORG)、再生 3 および再生 5 で行った。ORG は 0℃では圧裂強度が高く変位が小さかったため圧裂係数は大きな値となっている。これはアスファルトの脆化点に達していないためだと考えられる。20℃ではORG、再生 3 および再生 5 とほぼ

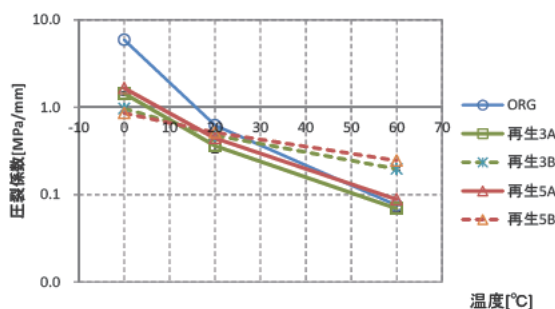


図-10 圧裂係数

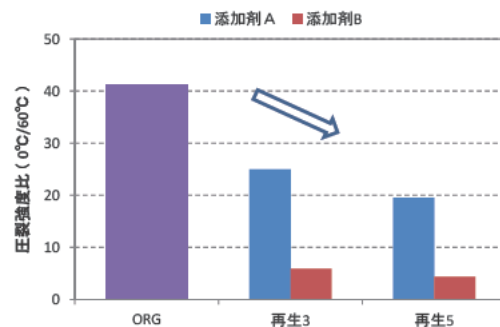


図-11 圧裂強度比

ほぼ同じ値となった。60℃の結果では、ORG と再生用添加剤 A は近い値となったのに対し、再生用添加剤 B は高い値を示した。これら 0℃および 60℃の圧裂係数と舗装の供用性についてはまだ明らかになっていないが、ORG と明らかに差が生じており、今後、他の試験結果等も踏まえつつ舗装の供用性に与える影響についても検討していきたいと考えている。

次に、0℃および 60℃の圧裂強度より算出した圧裂強度比を図-11 に示す。圧裂強度比は値が大きいとわだち掘れが大きく、小さいとひび割れが発生しやすいとされている⁷⁾。図より、圧裂強度比はいずれも繰り返し再生が進むにつれ減少した。特に、再生用添加剤 A より B の方の減少傾向が顕著となった。

②高温カンタブロ試験結果

図-12 に各再生混合物における高温カンタブロ試験損失率（以下、損失率）を示す。試験は、基本的に新規、再生 1、再生 2、再生 3、再生 5 について行った。ORG の損失率は、ほぼ 0%であった。再生用添加剤 A の損失率は、再生とともに増加したものの、再生 5 でも損失率は、約 4%であった。それに対して飽和分の多い再生用添加剤 B においては再生 5 で損失率は約 98%となっており、供試体が、ほぼ完全に破壊する結果となった。これは、飽和分の多い再生用添加剤を用いた場合、再生回数が多くなるに従い高温でのアスファルトの接着力が弱くなりアスファルト混合物が破壊しやすくなったと考えられる。

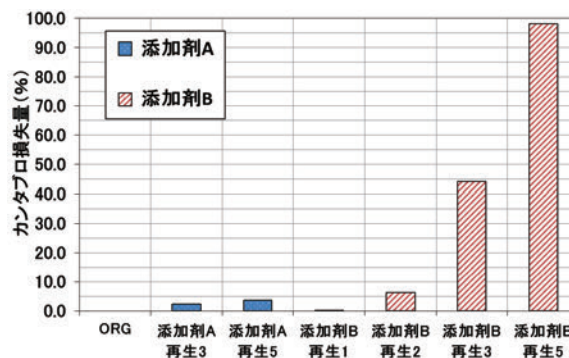


図-12 カンタブロ損失率

4. おわりに

本稿では、舗装リサイクルの現状と課題とこれを踏まえた土木研究所の検討内容を紹介した。今回紹介した検討内容は、繰り返し劣化再生による性状変化を際立たせるために、新規アスファルトを追加しない、100%再生で実施した結果であることに留意する必要がある。このため、引き続き、現状での再生骨材配合率等を勘案した条件における検討を進めている。こうした検討を通じて再生骨材を多く含む再生アスファルト混合物の適用条件の明確化、再生アスファルト混合物の品質を評価するための簡易な試験方法の開発を図り、さらにはこれらの成果の指針便覧類への反映等を通じて、永続的な舗装リサイクル技術の確立に向けた取り組みを進めていく所存である。

【参考文献】

- 1) 国土交通省：道路統計年報 2018, <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/index.html>
- 2) (一社)日本アスファルト合材協会：合材統計年報, 2018.
- 3) 坂本浩行：再生用添加剤, アスファルト, vol.27, No.141, pp.39-46, 1984.
- 4) 加納孝志, 新田弘之, 佐々木巖, 川上篤史：飽和成分の多い再生用添加剤で繰り返し再生した再生混合物と再生アスファルトの性状に関する一検討, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.71, No.3 (舗装工学論文集第 20 巻), I_65-I_71, 2015.
- 5) 国土交通省：平成 24 年度建設副産物実態調査結果参考資料, http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/d11pdf/fukusanbutsu/jittaichousa/H24sensuskekka_sankou.pdf
- 6) 社団法人 日本道路協会:舗装再生便覧(平成 22 年度版),2010.
- 7) 公益社団法人 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧, 2019.
- 8) 田湯文将, 新田弘之, 川上篤史, 川島陽子：再生用添加剤の成分差異が再生アスファルトおよびその再生混合物の性状に与える影響, 土木学会 第 73 回年次学術講演会講演概要集, V-631, 2018.

気象環境と土木材料の劣化

—土木構造物の長寿命化に向けて—

材料資源研究グループ グループ長 西崎 到

1. はじめに

社会資本のメンテナンスサイクルの中で、良好な社会資本を整備するためには、新しい技術の導入による長寿命化が求められている。社会資本の長寿命化を図る上では、主たる社会資本である土木構造物を構築する土木材料の耐久性向上が効果的と期待される。このためには、土木材料の耐久性を的確に評価する技術が必要である。

土木材料の劣化は、繰返し荷重や、持続的に荷重が作用する場合などの力学的作用が主であるものと、環境作用による主として化学的な経年劣化のものに大別できるが、環境作用による土木材料の経年劣化では、その劣化特性は設置される気象環境などの影響を受けることや、材料の種類により劣化機構や劣化に影響を与える因子がかなり異なることから、これらを考慮した適切な評価方法の確立が必要となる。

土木研究所においては、土木材料の環境作用による耐久性を的確に評価するための研究を長年にわたり実施してきている。国内の各地における実環境暴露試験がその中心であるが、実構造物調査、促進劣化試験などとも組み合わせて、主要な土木材料の耐久性評価のための研究に取り組んでいる。実環境暴露試験には、特定の場所での耐久性しか分からない、長期間を要するなどの課題も指摘されているが、気象環境の計測とともに複数の異なる環境での試験の実施などの方法で、これらの課題を克服しつつあるとともに、気象環境因子の材料劣化への影響をより詳細に解明しつつある。ここでは、実環境暴露試験を主体とした、土木材料の長寿命化研究に関する最近の土木研究所の取り組みを紹介する。

2. 土木材料の環境劣化の把握

2. 1 材料の種類と劣化特性・因子の整理

土木材料の環境作用による経年劣化は、基本的に化学反応であることが多いので、経年劣化に影響を与える環境因子や条件も、化学反応の基本的な原則に沿っていることが多い。すなわち、環境からのエネルギーが高い方（温度が高い、光が強いなど）が、そして劣化因子（酸素や水など）の供給が多い方が劣化速度は速いのが通常である。このことから、一般に温暖な気象条件の方が、材料劣化には厳しい条件であると考えられる。ただし、材料によっては、水の凍結融解の繰返しによる凍害を受ける場合もある。このように材料劣化への環境因子の影響の程度は、材料の種類やメカニズムによってかなり異なる。そこで土木材料の場合に影響が大きそうな事項を中心に、材料の種類ごとに以下に整理した。

(1) 鋼材

鉄は自然環境では酸化しているのが安定であるためさびやすく、土木材料としてはさびを防ぐ（防食）対策とともに用いるのが通常である。鋼材の腐食メカニズムには様々なものがあるが、基本的には酸素・水との反応であり、温度が高い環境の方が腐食しやすいが、さらに塩分の存在が促進的に作用するため、水や塩分の影響を受ける条件の方が腐食環境として厳しい。特に海上構造物等で海水の影響を強く受ける場合や、淡水であっても河川構造物などで水の影響を強く受ける場合は厳しい腐食環境となる。屋外大気中で使われる場合でも、水、塩分などの劣化因子の影響が大きい場合（気象環境や局所的な部位など）で腐食しやすくなる。

鋼材の防食方法では、基本的にこれらの劣化因子と鋼材との接触を避ける方法（塗膜やめっきなど）、腐食が進みにくい材料への改善（ステンレス鋼や耐候性鋼など）、電気的防食（めっきや流電陽極法、外部電源法など）がある。

(2) コンクリート

健全なコンクリート中の鉄筋には、セメントの水和生成物である水酸化カルシウムによる強いアルカリ性で表面不動態皮膜が形成され防食されている。この鉄筋の腐食の可能性を考える場合、その劣化因子は、前項と同様に酸素と水が主であるが、これに加えて、空気中の二酸化炭素とそれによるかぶりコンクリートの中酸化や外部からの塩分の侵入も経年劣化の因子として検討する必要がある。

かぶりコンクリートの中酸化が鉄筋近傍まで進行した場合には、不動態皮膜が破壊され鉄筋が腐食しうる状態となる。このため、一般的なコンクリート構造物では供用期間中に中酸化が鉄筋近傍に達しないように設計されている。また、塩分の供給がある環境条件の場合には、これに対応した対策を行うこ

ととなっている。

また寒冷地では、コンクリート中の水分の凍結融解作用によりポップアウトなどの損傷が生じる凍害が発生する可能性があるため、気温が低い条件にも留意が必要である。アルカリ骨材反応は、ある種の反応性の高い骨材がコンクリート中のアルカリと反応して発生するが、温度が高くかつ水分の供給が多い場合に進行しやすい。またこの他、主に酸性の化学物質が外部から接触すると、コンクリートのアルカリと反応して侵食してしまう化学的侵食でも、温度が高い方が進行しやすいと考えられる。

(3) 高分子系土木材料

鋼材・コンクリートの2つの主要な土木材料の他に、私たちは様々な土木材料を使っているが、材料劣化についてあまり明らかにされていないのが、高分子系土木材料であろう。舗装材料に多く用いられるアスファルトが代表的であるが、その他にも、塗料、接着剤、各種のシート、ゴム系の材料などがある。極めて多くの種類があるとともに、その環境耐久性も多様であり、優れた環境耐久性を有するものから、単独では屋外で早期に劣化してしまうものまで、さまざまである。

高分子系土木材料の主な劣化因子としては、温度、紫外線（主に太陽光から）、酸素（オゾン）、水、水蒸気等があげられる。鋼材やコンクリートで大きな問題となる塩分が、高分子系材料ではあまり問題とならない。一方で、鋼材やコンクリートではほぼ問題とならない太陽光が大きな劣化因子になる。このため温暖な地域だけでなく、日射量の多い地域での劣化が厳しくなる可能性が考えられる。

2. 2 土木材料の耐久性評価方法の整理

土木材料の環境作用による耐久性評価の方法には、主に、実構造物調査（試験）、実環境暴露試験、促進劣化試験があげられる。それぞれに特徴があり、これらをうまく組み合わせることで、土木用途での環境条件での耐久性を評価することが可能である。各方法の特徴を以下に整理した。

(1) 実構造物調査（試験）

実際の土木構造物で起きる問題点の検証のためには、劣化が生じた実構造物の調査が非常に重要であるが、材料の耐久性評価の観点からも極めて有効である（図-1）。使用された土木材料の情報が取得できることが前提ではあるが、構造物で起きている材料劣化が部分的なものであれば、その部位の局所的環境条件の調査もあわせて実施することで、劣化の因子や耐久性の評価にも役立つ。新たに開発された材料が長寿命化に寄与できる性能を有するかの確認のために、試験的に実構造物でその材料を使用してみることも有効な手法であるが、信頼性が十分に把握されていない材料の場合には使用が困難な場合も多い。

(2) 実環境暴露試験

土木構造物が実際に使われる環境や、それに類似して代表的と考えられる場所に、実構造物の状況を単純化した供試体を比較的長期間置いて、供試体に発生する劣化現象を観察する手法である。土木材料の環境作用による劣化は、材料の種類と環境条件の組み合わせで様々な劣化がありうることから、材料を使用する代表的な環境で、どのような経時変化が生じるかを把握するには適した方法である。供試体を使用するので、信頼性が十分に把握されていない材料でも試すことができる。欠点としては、比較的時間がかること、単純な方法ではその場所での耐久性しか分からないこと、などがあげられる。実環境暴露試験に必要な期間は、試験の設計によるため一概に定められないが、短いケースでは数週間、長いものでは数十年にわたる場合もある。

土木構造物での材料の使われ方にあわせて、陸上（大気中）、海上（大気中、干満帯、水中）、海浜（飛来塩分の影響のある大気中（図-2））、河川（水中、干満帯（図-3））、土中などの実環境



図-1 実構造物調査の例



図-2 実環境暴露試験（海浜環境）



図-3 実環境暴露試験（河川環境）

での暴露試験がある。陸上でも、屋根を設けて、雨掛かりや直射日光を避けた暴露試験や、下水処理槽内で行われることもある。

土木研究所では、暴露試験を効率的に行うために、代表的と考えられる全国のいくつかの場所に暴露試験を実施するための試験場を設けて、継続的な耐久性評価を行っている。

(3) 促進劣化試験

材料劣化に影響すると判明している環境因子の条件を促進的に設定できる試験槽(室)内に供試体を置き、材料劣化を促進的に発生させて、試験後の供試体の劣化現象を調べる手法である。比較的短時間で耐久性を評価できる。材料劣化に影響を与える環境劣化因子およびそれによる劣化現象が、ある程度分かっていることが前提であり、そうでない場合は適切な耐久性評価が行い難い。

材料と劣化因子・機構に応じた様々な促進劣化試験が提案されている。鋼材(防食されたものを含む)では、塩水噴霧試験や複合サイクル試験、促進耐候性試験(図-4)など、コンクリートでは、中性化試験、凍結融解試験など、高分子系材料では促進耐候性試験、オゾン劣化試験などがあげられる。劣化メカニズムによっては、環境作用とあわせて、力学的な作用を与える試験を実施することもある。



図-4 促進劣化試験機の例

2. 3 新しい材料の環境作用に対する耐久性評価方法と耐久性評価方法の改良

新しい材料を土木構造物で使用した場合に十分な寿命を持つことを評価する手法としては、前項の3つの手法を組み合わせることとなるが、類似の材料に土木材料としての実績が殆どない場合には、実構造物で用いるほどの信頼性が確認できないことが多く、また環境因子の劣化への影響が十分に評価出来ていない場合には、適切な促進劣化試験の選択が難しい場合も考えられるため、実環境暴露試験が行われていることが望ましいと考えられる。劣化因子や機構がある程度想定されれば、促進劣化試験も可能となる。この場合、促進劣化試験を実環境暴露試験と並行して実施することで、同様の材料劣化が起きることの確認や、促進劣化試験の促進倍率を求めることができる可能性もある。このように進めることで、それ以降の類似材料の耐久性評価を、比較的短時間で実施することが可能となる。

実環境暴露試験の問題点(または課題)には、試験を実施した場所の耐久性しか分からない、という点があげられる。この点を克服する方法として、土木研究所では暴露試験中の材料の環境条件が異なる条件を設定した暴露試験や、異なる気象環境の異なる複数の実環境暴露試験を組み合わせる、などの方法により、各種材料の環境劣化因子の影響度合いを評価する方法を研究している。前者の例としては、雨掛かりや直射日光の条件を変えて、同じ暴露試験場で試験を実施するものであり、後者は同一の材料を異なる気象環境下(例えば、茨城と沖縄など)に暴露するものである。複数の暴露試験場を用いる場合に特に重要となるのは、それぞれの環境因子データを入手することである。これは、その地域の気象台のデータを入手する場合もあるが、気象台のデータでは材料劣化に必要な全てのデータが得られるわけではないので、その暴露試験場内で、直接測定・記録する場合もある。複数の暴露場での材料劣化と気象環境データとを比較分析することで、その材料の環境劣化に対する各環境因子の影響度合いが把握できると期待されることから、様々な土木材料について、このような手法による耐久性評価のための研究を実施している。このようなデータは国内の主要な場所で十分な環境耐久性を有する土木材料に必要な仕様の基礎となるだけでなく、より高耐久な材料の開発にも役立つと期待される。次章以降ではいくつかの事例についてさらに詳細に紹介したい。

3. 鋼材防食の劣化と気象環境

鋼材は通常防食とともに用いられるが、その主要な方法は防食塗装である。防食塗装は一般に高分子系材料であるため、その環境作用による劣化は、高分子系材料としての塗膜の劣化と、防食塗膜によって保護された鋼材の腐食の2つの劣化機構が主に存在する。塗膜の経年劣化は塗膜表面が酸化し、粗く変質し始めることから始まり、徐々に塗膜を形成する樹脂が脱落することで膜厚が薄

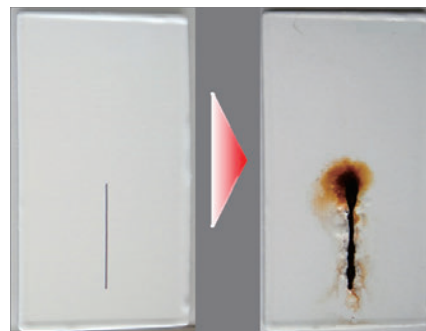


図-5 塗膜のキズから腐食を進展させた供試体の例

くなる。このような変化は、表面の光沢の度合いや膜厚を簡単な機器計測により調べることで評価できる。

一方、塗装鋼材の腐食は、防食塗膜の弱点部（ボルト部やキズ部）から発生することが多いので、実際に比較的起こりうる損傷を模擬する方法として、供試体にあらかじめ傷をつけておき、キズからのさびの進展の抑制程度により評価することも多い（図-5）。

塗料により防食した鋼材の様々な気象環境における環境劣化特性を調べるために、同じ仕様の塗装鋼板供試体を、つくば（茨城県）と大宜味（沖縄県）で屋外暴露試験に供した際の結果の例を図-6に示す。図-6では後述するように沖縄と同様に気温が高いが湿度条件の異なる環境での試験として追加実施されたヤンゴンでのデータも示している。塗膜の経年劣化の初期の指標としては、塗膜表面の粗さの変化と関連がある光沢度の保持率を用いた。図-6から、沖縄の方がつくば、そしてヤンゴンよりも劣化速度が速いとの結果が得られた。この傾向は同時に試験した他の2種類（ふっ素樹脂塗料、ポリウレタン樹脂塗料）の塗膜でも同様に認められ、劣化速度の大きさの順は、沖縄>ヤンゴン>つくばの順となった。

このことから、沖縄やヤンゴンではつくばよりもより環境耐久性（耐候性）に優れた塗膜が長寿命化に効果があることが示唆される。

図-7につくば、沖縄そしてヤンゴンで実施した気象環境データの観測データから、気温と湿度の1年分の変動を示す。つくばとヤンゴンの湿度（赤線）の変動は40~100%と大きいものに対して、沖縄では60%を下回ることが少ないことが分かる。水・水蒸気の影響は、降水量や平均湿度などにより評価されることもあるが、金属材料の腐食環境条件を規定するISO 9223では、気温が0℃以上で、相対湿度が80%以上の場合を、材料の表面が濡れている条件として評価することが提案されている。上記の計測は毎時間連続して実施していることから、上記の条件に当てはまる時間を濡れ時間として、各暴露地点について1年分のデータから算出した。結果を他の主要な気象観測データとともに表-1に示す。

表-1によれば、平均気温は、ヤンゴン>沖縄>つくばであり、このままでは塗膜の劣化の説明がつきにくい、塗膜の劣化に影響を与えらると思われる濡れ時間は、つくば>沖縄>ヤンゴンであることが分かった。このような結果から、塗膜の劣化には、気温と水・湿度（濡れ時間）の双方が影響しており、沖縄の条件が特に材料劣化に厳しい組み合わせとなる可能性が考えられる結果となった。これらの結果を基に、より適切な耐久性評価方法（試験条件）の確立を図り、長寿命化に資する土木材料改良に寄与したい。

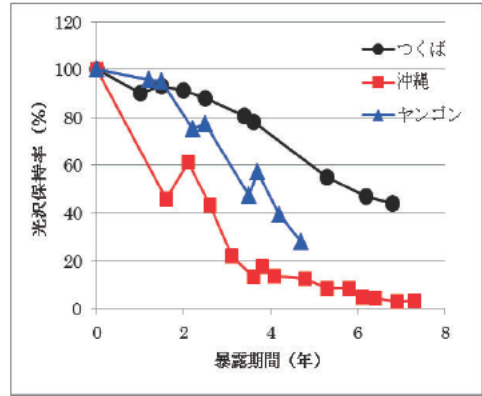


図-6 塗装鋼板の光沢保持率の暴露試験による経年変化（アクリルシリコン塗料の例）²⁾

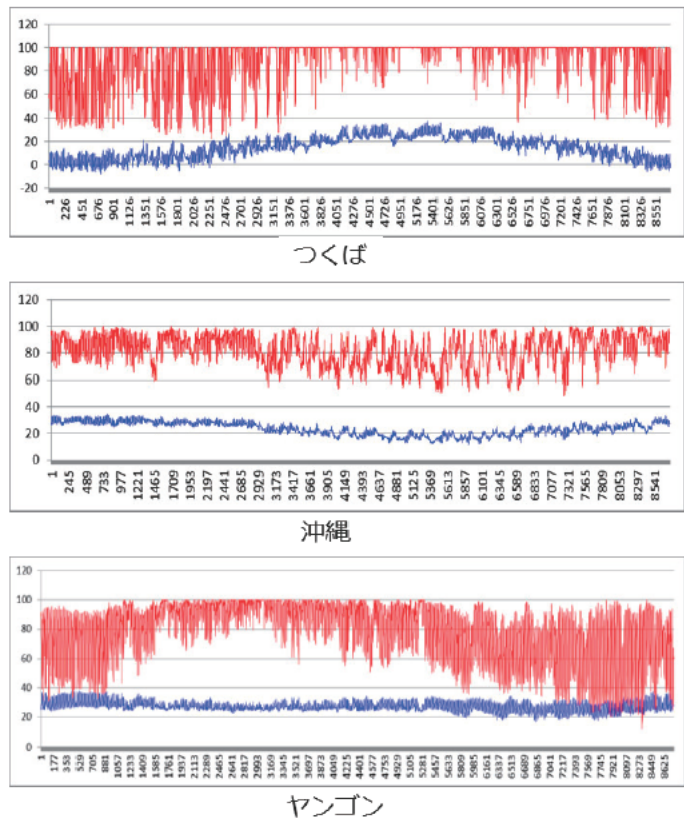


図-7 各暴露場所の気温（青線）と湿度（赤線）（1年分のデータ）²⁾

表-1 各暴露場の濡れ時間と主要気象データ²⁾

試験箇所	平均気温 (°C)	降水量 (mm)	濡れ時間 (時間) (>80% RH)	積算紫外線量 (MJ/m ²)	計測期間
つくば	14.5	1835	6343 / 8760	246	2011.1~2011.12
沖縄	23.5	1902	5387 / 8760	244	2016.7~2017.6
ヤンゴン	27.4	2502	5049 / 8760	277	2014.4~2015.3

4. コンクリートの中性化と気象環境

コンクリートの中性化速度については国内でも多くの研究がなされているが、視点を海外に向けた場合、日本国内よりも環境条件が多様であり、中性化の速さが、国内よりもはるかに大きな事例があること³⁾や、我が国の国土も南北に長く気象条件に相当の相違があること、さらには今後の気象変動の可能性も考慮し、全国の主要な地点での屋外暴露試験を実施し、中性化の観点からの相違を調査した⁴⁾。なお、検討には水セメント比が85%と大きいコンクリートを使用した。

図-8は同一仕様の供試体をつくばの土木研究所構内で、暴露条件を地下通廊内、日陰（ともに雨掛かりがない）、日なた（雨掛かりがある）、そして恒温恒湿の実験室内の4か所に暴露後に、中性化深さを測定した例である。日なたの場合のみ他の環境に比べて中性化速度が遅く、その他の環境では中性化速度に明確な差は認められなかった。中性化は二酸化炭素のコンクリート内部への侵入で進むが、実験室での促進試験により、気温については高い場合に、湿度については60%程度と低い場合に中性化速度が大きくなることが分かっている。日なたの供試体は、直射日光にさらされることで材料温度が他の供試体に比べ高く、この点では中性化が進みやすいことになるが、雨掛かりがあることで、コンクリート中に水分が供給され内部に二酸化炭素が侵入しにくくなる点では中性化が進みにくい条件となる。これらの条件が相殺された結果、雨掛かりの影響の方が大きく影響し、中性化深さが遅くなったと考えられる。

図-9は図8と同一仕様の供試体を全国8か所で屋外暴露試験に2年間供した結果の事例である。図-10および11には気象台のデータによる各暴露場所の平均気温と年降水量を示した。最も温暖な沖縄と、寒冷な北海道の平均気温の差は、14℃と相当に大きい。中性化速度は、両方で極端な差は見られなかった。これは、年降水量が沖縄の方が多く、供試体の含水率が高い状態が長いことで中性化が抑制されていることが影響したと考えられる。

これらの暴露試験から、我が国の屋外で雨掛かりの影響を受ける条件においては、中性化速度の大きさについて、大きな違いは生じないと見なせる結果であった。

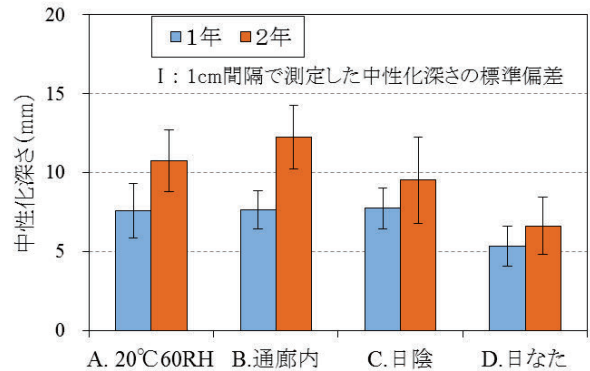


図-8 暴露条件を変えた供試体の中性化深さ⁴⁾

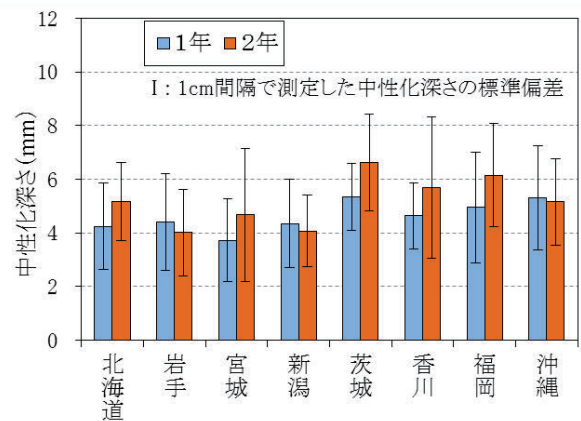


図-9 全国8か所での暴露試験（雨掛かりあり）での中性化深さの結果⁴⁾

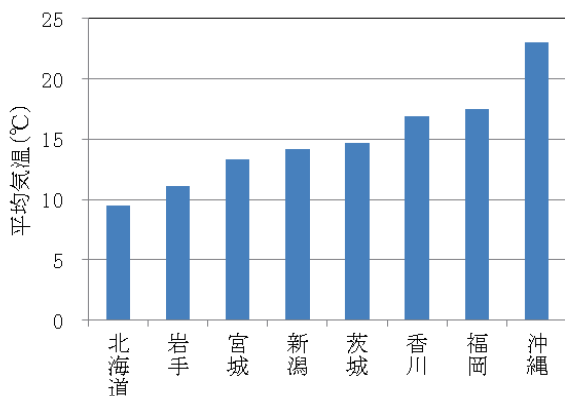


図-10 各暴露場所の平均気温⁴⁾

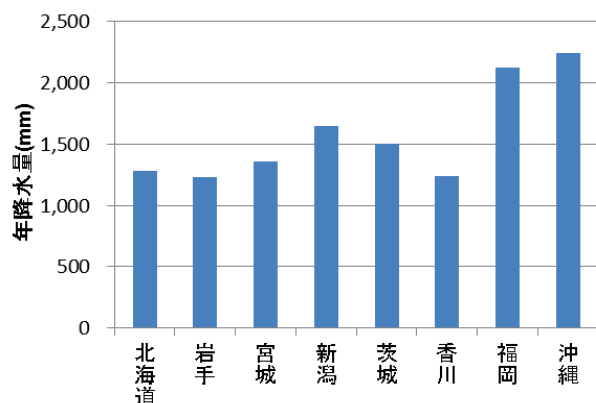


図-11 各暴露場所の年降水量⁴⁾

5. おわりに

土木材料への新しい技術の導入は、土木構造物の長寿命化のみならず、維持管理の効率化や信頼性向上など、様々な効果が期待されている。土木研究所においても、そのような新しい材料を積極的に活用して、社会資本の高度化に活かすべく研究を進めているところであるが、実環境での環境耐久性に関する情報は、長期間と膨大な労力を要することも多いこともあり、これらの新しい材料の実用化にあたって最後まで不明の点として残りやすい項目であり、さらなる技術の改良が必要である。

材料の環境耐久性を、より高い信頼性でより効率的に把握する技術を確立するための研究を、様々な耐久性評価方法の組み合わせや、劣化機構等の知見を積み重ねること、さらには新しい材料劣化評価方法の導入なども含めて、今後も進めていく所存である。

【参考文献】

- 1)国土交通省 インフラ長寿命化計画 平成 26 年 5 月
- 2) Itaru Nishizaki, Tomonori Tomiyama, Thinzar Khaing, Khin Khin Thaw, Yasuo Suzuki and Kunitomo Sugiura, "Durability of Protective Paint Systems on Steel Plates through the Exposure Tests in Various Environments", The proceedings of the eighth International Conference of Science and Engineering, paper No.229, 2017.12
- 3)渡辺博志:コンクリートの中性化に与える環境条件の影響 ー海外での暴露試験から分かったことー、土木技術資料、Vol.55, No.9、pp.46-47、2013.9
- 4) 片平 博、古賀裕久:コンクリートの中性化に関する全国暴露試験、土木技術資料、Vol.59, No.9、pp.20-23、2017.9
- 5) 渡辺博志:コンクリート構造物とひび割れ、コンクリートテクノロジー、Vol.38, No.7、pp.50-55、2019.7
- 6) 渡辺博志、古賀裕久、中村英佑、山田 宏、鈴木 聡:コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鋼材腐食に関する暴露試験 (暴露 5 年後の調査結果)、土木研究所資料 第 4223 号、2012.3

河川用コンクリート護岸ブロックの環境評価 -経緯・現状・展望-

水環境研究グループ グループ長 萱場 祐一

1. 経緯

護岸に用いるコンクリートブロック（以下「護岸ブロック」という。）は、河川の災害復旧事業において多用される土木資材である。しかし、通常のコンクリートは明るく平滑なこともあり、自然的要素から構成される河川景観の中で目立やすく、景観と調和しにくい。平成 22 年に改訂された「中小河川に関する河道計画の技術基準」（以下「中小河川技術基準」という。）及びその解説書として平成 23 年に発刊された「多自然川づくりポイントブックⅢ」（以下「PBⅢ」という。）において、護岸ブロックの留意事項が示されたが、これらは定性的表現に留まっており、現場においてどのような護岸ブロックを選定すべきかが不明確だった。このため、（国研）土木研究所自然共生研究センター及び（公社）全国土木コンクリートブロック協会（以下「ブロック協会」という。）は、平成 24 年 5 月より護岸ブロックの評価手法に関する共同研究を開始し（共同研究は平成 31 年 3 月に終了）、成果の一部は平成 26 年 3 月及び平成 30 年 6 月に改定された「美しい山河を守る災害復旧基本方針」（以下「美山河」という。）に反映されるに至った。美山河においては、護岸ブロックの①明度、②テクスチャー、③景観パターン、④素材の大きさ、など河川景観に関する留意事項が具体化され、さらに、①明度、②テクスチャーに関しては具体的な評価方法が明記された。また、ブロック協会において、美山河の改定に合わせて①明度②テクスチャーについては証明制度の運用を始めている。本報では、上記の①明度、②テクスチャーの評価方法とブロック協会で運用している①②の証明制度の現状を述べる。また、今後の展望として、③景観パターンの評価方法に触れる。

2. 護岸ブロックの景観評価手法の現況

2.1 明度

明度とは、物体面の明るさを表す。明度は 0～10 の数値で表示され、数値が高いほど明るい色を示す。滑面のコンクリートブロックの明度は 9～10 と高いことから、川周辺の自然的景観と比べて高明度となり、河川景観から浮き上がって目立つ存在となる。このため、PBⅢ等では護岸ブロックと周辺景観との明度差を小さくすることを目的とし、護岸ブロックの明度を 6 以下とすることを求めた。共同研究では、護岸ブロックの目地や素材表面の陰影を含む範囲を明度の評価対象領域と定義し、この範囲の平均的な明度を算出する方法を開発した。具体的には、護岸に当たる光量、光の入射角等によって変化する明度を補正するための補正板と一緒に護岸ブロックを数m離れた位置から撮影し、補正板を用いて画像データの明るさを補正した後、評価対象範囲の平均 RGB 画素値とカラーチャート（JIS Z 8721 準拠の標準色票）をマッチングさせて護岸ブロックの平均明度を決定する方法とした（図-1）。

2.2 テクスチャー

テクスチャーとは、材料表面が持つ肌理（細かい凹凸）を表し、素材の表情を豊かにする重要な要素の一つである。自然石のような肌理が粗く凹凸を持つテクスチャーは全体が不均質で表情が

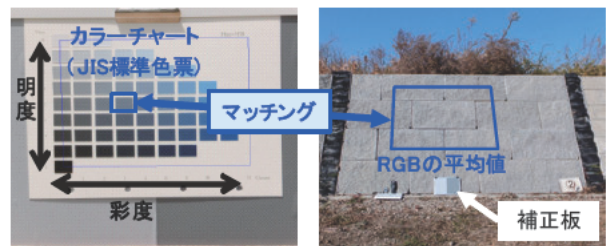
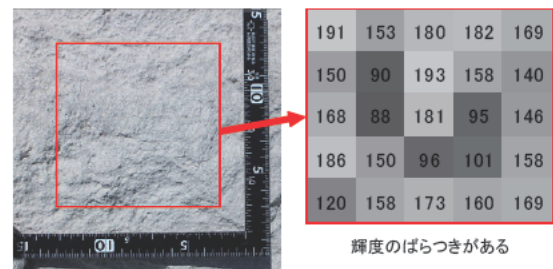


図-1 平均明度の評価方法の概念



※ 赤枠の中の輝度値は、イメージであり、実際のピクセル数や輝度値とは異なる

写真-1 擬石の輝度のばらつきの例

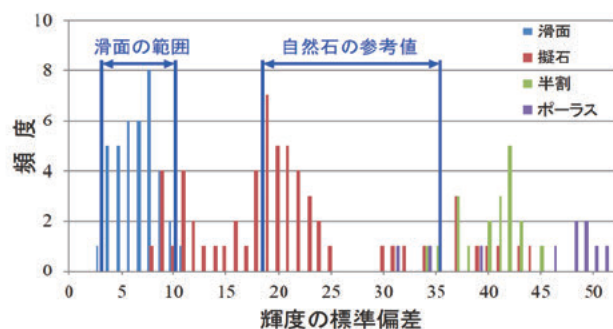


図-2 テクスチャーと輝度の標準偏差との関係

豊かである。一方、平滑なブロックは肌理に乏しく、全体が均質で無機質な印象となる。このため PBⅢ等でも平滑な護岸ブロックを使用しないよう求めている。

テクスチャーの評価対象は、素材表面の細かな凹凸である。ただし、この凹凸を物理的に測定し、評価することが難しい。このため、共同研究では、護岸ブロック表面を近距離で撮影し、その画像データから抽出した輝度の標準偏差により表面の凹凸を評価することとした。一定の角度を持って光が入射した場合、肌理に乏しく平滑な面では陰影が形成されないため輝度のばらつきが小さい。一方、肌理が粗い面では陰影が形成されるため輝度のばらつきが大きくなる（写真-1）。様々な護岸ブロックのテクスチャーを計測した結果、輝度の標準偏差は、滑面（3～10 の範囲）で最も小さく、擬石、半割、ポーラスの順に大きくなっていった（図-2）。以上から、護岸ブロックの輝度の標準偏差は 11 以上を平滑か否かのテクスチャーを判断する閾値とした。

2. 3 証明制度の現状について

美山河の改定に合わせて、護岸ブロックの平均明度およびテクスチャーの測定方法を示したマニュアルを作成し、護岸ブロックを開発したメーカーがマニュアルに沿って測定した護岸ブロックの平均明度及び輝度の標準偏差（テクスチャー）をブロック協会が分析、証明書を発行する制度の運用を開始した。明度証明では、図-3 に示すように、①明度証明を申請するブロックメーカーが照度等の撮影条件をそろえた上で 3～10m 離れた位置からデジタルカメラによりブロックを補正板（明度 5 と明度 7 の色票）とともに撮影、②これをブロック協会に申請、③ブロック協会がこのデジタル画像の対象範囲を分析し、その平均 RGB 画素値とカラーチャート（JIS 標準色票）をマッチングさせ明度を決定、④判定委員会で分析結果が妥当かどうかを判定し証明書を発行する、という手続きとしている。また、同じ製品であっても製造工程や材料等が異なり明度が変わる場合には、その条件ごとに明度証明を受けることを推奨している（テクスチャーの証明制度についてはブロック協会の HP に記載されているので興味のある方はこちらをご覧ください）。これまでに発行した証明書は、明度が 1,630 件、テクスチャーが 357 件となった。明度の件数が多いのは、同じ製品で製造工程や材料が異なる条件で測定したものが含まれるからである。平成 26 年度(2014)から運用を始めた明度に関しては、全国的に評価基準を満たした製品が普及している。また、平成 29 年度(2017)から運用しているテクスチャーに関しても、評価基準を満たした製品の開発・普及が進んでいるところである。

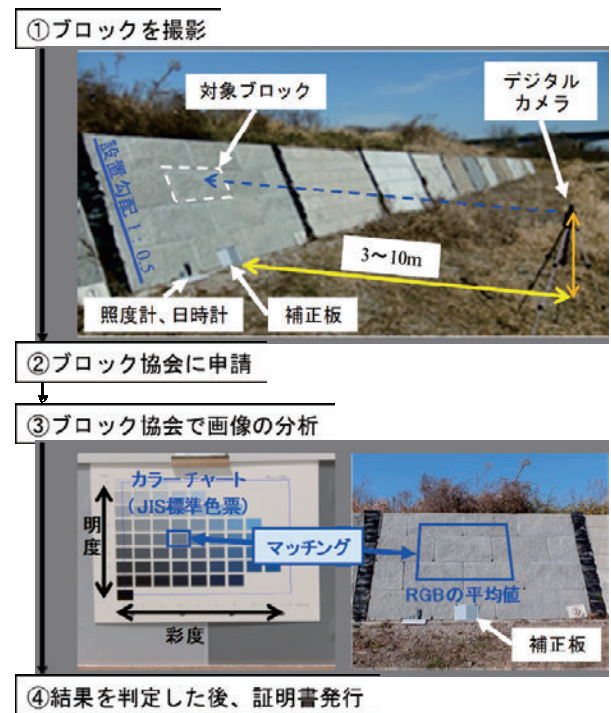


図-3 明度証明に関する手順

3. 今後の展望 — 景観パターンの評価手法 —

①明度、②テクスチャーの評価手法を開発、証明制度の運用を始めたことにより、美山河に記載された護岸ブロックの留意事項を満足する護岸ブロックの選定が可能になりつつある。しかし、③景観パターンについては具体的な評価手法が明示されていないため、景観上課題のある護岸ブロックが使用されている。景観パターンとは、護岸ブロックの構造目地・模様目地などによって形成される空間的に繰り返しのある“模様”である。景観パターンは明度やテクスチャーのように数値で評価することが難しいため、評価手法の開発に時間を要している。美山河には既存の護岸ブロックの景観パターンを 10 グループに類型化し、選好性について印象調査した結果を示しているが、現実の護岸ブロックには、この 10 グループには含まれないパターンも存在することから、現在、景観パターンの再分類を行い、各景観パターンの景観上の特徴や改善点等を整理している。今後、更に研究を続け、明度、テクスチャーに加え景観パターンも含めた、より総合的な護岸ブロックの評価を行えるよう、準備を進めていきたいと考えている。

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4391 October 2019

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