

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 4383 号

平成 3 0 年度

土木研究所講演会
講演集

平成 3 0 年 1 0 月 1 1 日

国立研究開発法人土木研究所

Copyright © (2018) 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 3 0 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 3 0 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

◆土木分野における新技術の活用

- 10:05～10:30 土木施設の維持管理・更新に
AI 技術を取り込む上での課題と展望
つくば中央研究所 技術推進本部長 有田 幸司・・・1
- 10:30～10:55 道路橋維持管理におけるモニタリング技術の活用
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・・・7
- 10:55～11:20 構造物の補修補強対策の信頼性向上
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・・・11
- 11:20～11:45 流量観測等の高度化に向けた土研の取り組みと今後の展開
つくば中央研究所 水工研究グループ長 箱石 憲昭・・・15
- 11:45～12:10 大規模岩盤崩壊の被害軽減に向けた研究の取り組み
寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ長 西本 聡・・・19

◆土木分野におけるリスクマネジメント

- 14:40～15:05 地質・地盤リスクマネジメント技術の開発
ーアセスメントからマネジメントへー
つくば中央研究所 地質・地盤研究グループ
地質チーム上席研究員 阿南 修司・・・27
- 15:05～15:30 山岳トンネル工事におけるリスク低減に向けた研究
つくば中央研究所 道路技術研究グループ
トンネルチーム上席研究員 日下 敦・・・31
- 15:30～15:55 地すべり災害のリスクマネジメントに関する話題提供
つくば中央研究所 土砂管理研究グループ
地すべりチーム上席研究員 藤平 大・・・37
- 16:05～16:30 下水処理水に残存する医薬品等のリスク評価及び除去技術
つくば中央研究所 水環境研究グループ
水質チーム上席研究員 小川 文章・・・41
- 16:30～16:55 世界各地で激甚化する水災害への取り組み
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・・・47

〔 土木分野における新技術の活用 〕

土木施設の維持管理・更新に AI 技術を取り込む上での
課題と展望

道路橋維持管理におけるモニタリング技術の活用

構造物の補修補強対策の信頼性向上

流量観測等の高度化に向けた土研の取り組みと今後の展開

大規模岩盤崩壊の被害軽減に向けた研究の取り組み

土木施設の維持管理・更新に AI 技術を取り込む上での課題と展望

技術推進本部 有田 幸司

1. はじめに

AI(Artificial Intelligence)技術は、機械学習の一つであるディープラーニングの登場により飛躍的に発展を遂げつつあり、多くの分野で生産性の向上に活用されることが期待されている。国土・土木と AI 懇談会(土木学会平成 29 年度会長特別委員会)の提言においても土木分野に AI を活用して省人化や生産性・コスト効率の向上に努めなければならないとされている。

データを与えるとコンピュータープログラムが自ら知識を学習する機械学習によって、AI に明示的知識のみならず暗黙的知識も具備させて、土木施設の点検時における変状の抽出認識やその要因の推論にまで活用する技術の開発を、土木研究所は平成 30 年度から官民研究開発投資拡大プログラム(PRISM)予算も活用しつつ進めることとしている。

データを取得するセンサー技術と大量のデータを蓄え処理できる ICT 技術の基盤があつてこそ土木施設の維持管理・更新に AI 技術を取り込むことが可能となる。近年、これらの技術も著しく進んできており、AI 技術を取り込むための環境が整いつつある。土木施設の維持管理・更新には知識や技能を有する多くの人の労力に頼ってきたが、今後ますます人材の確保が厳しくなることが予想される中、如何にその省人化と知識の継承を図っていくかが課題となっている。

本稿は、進展著しい AI 技術を土木施設の維持管理・更新に取り込んでいく上での課題と展望を整理して紹介するものである。

2. 土木施設の維持管理・更新に求められていること

2. 1 土木施設の特徴

土木施設の工学的な供用可能年数は、建設時の品質や供用後の荷重、化学的侵食などの影響、排水処理などへの維持管理・更新の施され方などにより千差万別であり、余命を正確に管理することは難しい。また、概して人間に比して長寿命であり損傷・劣化は存在するものの日々の変化には気づきにくい。

土木施設の工学的な規模も長手方向のみならず断面方向についても人間に比して大きいため、外見やまして内部についての細かい部分までは掌握しづらいのが一般的である。点検に必要な目視可能な距離にまで近づくことだけでも大きな労力を要するものとなる。

土木施設の撤去や新設には多大な時間と費用を要するので、河川堤防などその内部構造がわかっておらずとも、機能を長期にわたり発現しているものについて、現状有姿を前提に管理しているものも多い。

鋼構造物やコンクリート構造物のように、損傷・劣化メカニズムの解明がある程度進み当初の設計方法にも反映されているものもある。一方、土工構造物のように、表面的な変異を把握できたとしてもその変異がなぜ発生したのかという原因を直ちに特定することは一般的に困難で、更に進行した場合に崩壊に至る可能性やその時期を予測することも容易でないといったものもある。

土木施設と一体となって機能を発揮する機械設備や電気設備は、必ずしも供用可能年数が長いものではないが、広範囲に点在しており定期点検の技術者や非常時の操作員の確保が課題となっている。

2. 2 土木施設の管理者に求められていること

土木施設の管理者は、まず土木施設の崩壊や落下により人命や財産を危険な状況に晒すことを回避することが強く求められる。また、その土木施設が果たすべき機能について停止や低下により生ずる負の衝撃を最小限化することが求められる。

この二つは同時には達成困難となる場合もある。危険の回避には供用の停止が有効であるが、その土木施設の果たしている機能の停止や低下により負の衝撃を与えることになるので、負の衝撃とその影響期間がどの程度許容されるのかにより供用を停止し続けるのかなどの判断は難しいものとなる。予め判断の閾値を設定しておき、閾値に達した場合に必要な措置をとることを公表している土木施設もある。

加えて、地震や風水害等により面的に災害に見舞われた時においては地域全体的な機能の停止や著しい機能の低下を抑止できるよう、各土木施設の重要度や二重性に応じ各土木施設管理者の間で連携して体系的かつ効率的に維持管理・更新を図っていくことが求められる。

これらの責務を果たすため、土木施設の管理者は、その管理している施設の中に潜む危険な状況に陥る恐れのある要因を減らし、かつ利便の発揮が増進できるよう適切に維持管理・更新を実施することが

求められることになる。

2. 3 具体的な土木施設の維持管理・更新の方法

土木施設における危険な状況を回避させるため、必要に応じて補修・更新などの措置を講じなければならない。措置の方法や時期は、土木施設の部材や構造体の健全性の診断結果に応じて検討がなされる。健全性の診断は、巡視等や点検によって得られた情報に基づき行われる。

巡視や点検は、土木施設の安全性の確保・向上および効率的な維持管理・更新を図るため、土木施設の変状を把握するとともに、措置の必要性の判断を行うことを目的に行われる。巡視は日常、定期または異常時に実施される。巡視で変状が認められた場合のほか、施設利用者や住民からの通報、あるいは監視カメラなどによる監視などにより変状が認められた場合にも緊急点検または通常点検を行う。特定の構造物については5年に1回を目安とした頻度で近接目視により定期点検を行う。

点検によって得られた情報を基に土木施設の健全性を診断し、土木施設の機能や第三者への影響を一定の尺度で判定し、効率的な維持管理・更新に反映することが求められている。一見同じ変状であってもその原因や発生メカニズムは多様である。

健全性の診断結果は部材や構造物に対して措置する必要の緊急性等により区分して評価することとしている。評価は4段階の判断区分で示されることが多い。健全性の度合いとして問題がない最初の区分を「区分Ⅰ. 健全」とし、緊急措置が必要な区分を「区分Ⅳ. 緊急措置段階」としている。緊急というほどではないが速やかな措置が必要な区分を「区分Ⅲ. 早期措置段階」とし、区分Ⅰ. と区分Ⅲ. の間の段階として「区分Ⅱ. 予防保全段階」であるとか「区分Ⅱ. 経過観察段階」とかを置いている。区分Ⅱ. を一括りにしていないのは、対象となる構造物の劣化シナリオがある程度明確で予防保全が考えられるものと、そうでない構造物の場合があるからである。健全性の診断における各判定区分の判定内容は概ね以下のとおりである。

- 「Ⅰ. 健全」・・・変状はない、もしくは変状があっても対策が必要ない場合(土木施設の機能に支障が生じていない状態)
- 「Ⅱ. 予防保全段階」・・・(対象となる構造物の劣化シナリオがある程度明確となっており、) 発見された変状等から、近い将来その構造物が特定のシナリオによって機能を低下させることが予測されるものについて、具体的な機能の低下が発生する前に対策を講じることで効率的に保全を行える場合(土木施設の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講じることが望ましい状態)
- 「Ⅱ. 経過観察段階」・・・変状が確認され、変状の進行度合いの観察が一定期間必要な場合(土木施設の機能に支障が生じていないが、別途詳細な調査の実施や定期的な観察などの措置が望ましい状態)
- 「Ⅲ. 早期措置段階」・・・変状が確認され、かつ次回点検までにさらに進行すると想定されることから構造物の崩壊が予想されるため、できるだけ速やかに措置を講じることが望ましい場合(土木施設の機能に支障は生じていないが、次回点検までに支障が生じる可能性があり、できるだけ速やかに措置を講じることが望ましい状態)
- 「Ⅳ. 緊急措置段階」・・・変状が著しく、大規模な崩壊につながるおそれがあると判断され、緊急的な措置が必要な場合(土木施設の機能に支障が生じている、または生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態)

供用開始から50年をも超えた土木施設の数が増えつつあり、土木施設の管理者が担っている巡視等・点検・診断・措置の重要性は一層増してきている。また、巡視等、点検、診断、措置の結果を記録し、当該土木施設が供用されている期間はこれを保存していくことも求められている。

大量のデータを拾い出し処理するための諸技術、具体的にはセンサー技術(高解像なカメラ、レーザー、レーダー)と大量のデータを蓄えるストレージ(コンパクトあるいはクラウド)、高速処理可能なICT基盤の発達により、土木施設の変状等のデータを取得、蓄積、分析するための技術的環境が大幅に向上しつつある。これらの技術とAI技術を賢く組み合わせ、土木施設の維持管理・更新における省人化や生産性・コスト効率の向上が大いに期待されるところとなっている。

首都高速道路(株)は、カメラ、レーザー、近赤外線などのセンサーで得た大量のデータからAI技術を活用して構造物の変状を早期に認知し、別途構築している三次元点群データと突合して記録することで即応的な対応と点検作業の効率化を図るスマートインフラマネジメントシステム(i-DREAMs)の開発、

運用に向けた取り組みを進めており、その過程と成果に注視していきたいところである。

3. AI 技術を取り込むことで期待されること

3. 1 AI 技術の活用が期待される場面

AI 技術の活用に向いているのは、一人の人間の知識・能力で扱い切れない大量のデータを予めコンピュータープログラムに機械学習させておき、分析対象用のデータからその特徴的な情報をすでに学習したデータとの関係性に基づき抽出、推論させる業務においてである。つまりデータ分析を通して状況把握ができる、反復と再現ができる、予測・シミュレーションができる、要因把握ができることが期待される業務に向いている。具体的には、ヒト・モノを見つける、事象・状態を監視する、異常を見つける、傾向を認識する、分析材料を常時収集するといった分野においてその活用が有望視されている。

特に近年はディープラーニングにより学習した AI の画像認識技術は、精度と応答速度において人間の目を凌ぐレベルにあると評されるほど進展しており、社会実装が急速に進むことが期待されている。

土木施設の維持管理・更新においても、熟練技術者が行う異常の検知、膨大な業務量となっている一定の知識と技能を有する人材により目視等の方法で実施する変状の抽出と記録、経験豊富な技術者の判断が求められる診断時における変状の要因の推論および措置の提案などにおいて AI 技術の活用が期待できるところであり、その実用化に向けての取り組みが進められている。

3. 2 非常用機械設備等の異常検知の信頼性の向上

常用機械設備に対する故障診断技術は一定程度確立している。一方、土木施設と一体として設けられている機械設備は非常用機械設備であることが多く、このような非常用機械設備に対する軽負荷短時間の管理運転により本運転の調子を予測する体系的な診断技術は未確立なままである。

現状は機械設備の発する振動等の状態監視データを常時モニタリングできるシステムにはなっておらず、本運転時のデータ取得はできていない。このため、常時モニタリングシステムを構築し、人間の知識・能力では扱い切れない大量のデータに対して AI 分析技術を取り入れ異常を早期に発見し、異常検知率を改善し確実な運転を確保することが期待される。

3. 3 土木施設の点検業務の効率化

現在の土木施設の点検業務においては、一定の知識および技能を有する者が近接し目視、打音、触診等の方法により行うことが概ね基本的に求められている。土木施設の管理者にとって、土木施設の点検業務は近接するための足場等の確保や経験ある人材の確保そして観察データからの有意な情報の抽出と適切な記録の保持など労力と手間が大きく掛かるものとなっており、費用の面からも技術力の面からも大きな負担になっている。この点検業務において、AI 技術と人の代わりに近接し観察したデータを取得する機械（点検ロボット）さらにはカメラ、レーザー、レーダー、近赤外線などの遠望センサー技術や AR (Augmented Reality) 技術などを用いることにより、変状に関する情報をばらつき少なく効率的に抽出し記録し再現する技術の研究開発が期待されている。この技術の実装により、未熟練作業者への置き換え、足場の省略、省人化、情報抽出の即応化などを狙った点検計画の立案が見込めるようになる。

ここまでは、いわば現行の点検業務をなぞりつつその一部を効率的なものに代替するという方法による改善の手法である。しかし、そもそも鳥と飛行機が空を飛ぶという機能では同じ目的を達しているがその手法・技術は全く異なっていることと同様に、点検業務の体系においても新たな発想や技術の組み合わせにより現行の体系と大きく異なる体系が登場する可能性があつてよいはずである。この可能性も頭に置きつつ、センサー技術、ロボット技術これらを統合して活用する AI 技術などの ICT 技術全般の研究開発の更なる進展に期待し注視していきたい。

3. 4 健全性の評価、補修内容、更新すべきかどうかの判断における信頼性の向上

土木施設の健全性の評価、補修内容、更新すべきかどうかの判断は点検業務で得られた情報を基礎として必要な知識や経験を備えた技術者により診断として行われる。診断のために必要な情報としては変状に関する点検情報のほか当該施設の履歴、荷重や排水機能に関する情報と劣化シナリオがある程度明確な場合はその情報そしてその土木施設の果たしている機能などがある。

鋼構造物やコンクリート構造物のように劣化シナリオがある程度明確となっており、発見された変状等から、近い将来その構造物が特定のシナリオによって機能を低下させることが予測されるものについて、変状等のデータとその要因、劣化等の進行状況、具体的な措置内容を同じデータレコードに組み込

んでコンピュータープログラムに機械学習させることにより、予防保全段階での診断の推論ができる可能性がある。データセットの蓄積が進めばその判断の信頼性もより向上することが期待できる。

一方、土工構造物などのように劣化シナリオが必ずしも明確でなく点検業務で変状が確認され、変状の進行度合いの観察が一定期間必要と考えられる場合も、同様の機械学習を行うことにより、詳細な調査の実施や定期的な観察などの措置の必要性を推論できる可能性がある。

AI 技術を用いて、100%の信頼を置かずとも安全側に検出できるよう閾値を設定し、土木施設に潜んでいる症状を見落とす危険を回避しつつ簡便に損傷箇所の一次選別を実施することが考えられる。更に、抽出された損傷箇所の診断に人的資源等を集約して投入することにより、メリハリの効いた二段階方式で信頼性の高い診断が可能になるものと期待できる。

4. AI 技術の進展の見通しと課題

4. 1 AI 技術の現時点での到達点

AI 技術は、与えられたルールに基づき推論する、与えられた明示的知識に基づき推論する、人が定義した特徴量と与えられたデータについて機械学習し自ら暗黙的知識を習得しそれに基づき推論する、そして、与えられたデータから機械学習し自ら特徴量を抽出し暗黙的知識を習得しそれに基づく推論ができるところまで発展している。今後とも AI 技術の研究開発により高度な段階へ到達していくものと考えられるところであるが、本稿では現時点で到達している段階までの AI 技術を対象に土木施設の維持管理・更新に活用することについて扱うこととしたい。

AI 技術を構成する要素としてソフトウェア、アルゴリズム、ICT 基盤と与えられるべきルール、知識、特徴量の定義、学習用データセットなどがある。ソフトウェア、アルゴリズムについてはコモディティ化が進んできており、AI 技術の導入障壁が下がりつつある。

機械学習を行うには情報処理能力の高い ICT 基盤と特徴量の抽出を可能とする学習用データセットが重要で、ICT 基盤と学習用データセットの利用環境が整ってはじめて AI 技術の活用の実業務への取り込みが可能となる。

4. 2 AI 技術の出力に対する説明力

機械学習により習得した暗黙的知識に基づく推論については、どうしてその推論にたどりついたのかその理由を説明することが困難な場合がでてくる。また、学習に用いたデータセットの違いによって導き出される推論の結果も異なってくることも生じうる。

一方、推論結果への帰納法的な考察や学習用データセットに対する感度分析により、新たな技術的因果関係に係る仮説を打ち立て検証するなど新たな技術研究開発のきっかけとなることも考えられる。

4. 3 AI 技術に対する評価手法

コンピュータープログラムに学習させその推論の精度と応答速度を向上させるためには、精度の良い学習用データセットが必要となる。精度の悪い（ゴミ）データが大量にあっても使えないし、せっかくの精度の良いデータが無駄になってしまう。精度の良いデータがどの程度集められるかが重要である。

AI による推論の精度と応答速度は、学習用データセットだけで規定されるものではなく、アルゴリズムや ICT 基盤との兼ね合いのこともあり、学習用データセットと他の要素の組み合わせに対して要求品質をどう設定し確認するのかについてはこれからの検討課題である。

そもそも、土木施設の点検業務においても個々の現場の作業に従事する人の目視等で行われているものであり、その精度にはばらつきがあるものと考えられる。AI 技術を活用して入力されたデータから特徴を抽出し実務レベルで役立てるのにどの程度の精度で責任ある判断を委ねることができるのか、各現場での目的によって当然異なる。土木施設の維持管理・更新の分野においても様々な施設が存在しており、また具体的な実証はこれからということになる。

実装段階においては、AI 技術に対して技術評価が必要なのか、必要であるとして何を尺度に評価すればよいのか明示することが求められることとなろう。全く羅針盤も目標となる到達点も示されることなく自由に試行錯誤を進められているのが現状である。AI 技術の活用に関する多様な主体による取り組みが進んでいく中で、要求品質とその評価手法について段階的にでも確立されていくべきであろう。

4. 4 AI 技術に用いるプログラム、データセット等に対する権利保護

ソフトウェア、アルゴリズムや ICT 基盤は AI サービスの供給者側で開発が進められることが想定さ

れるが、機械学習に用いる学習用データセットについては現場に即した特徴を適切に抽出できるデータセットを現場管理者側で取り揃えておくことが必要である。

学習用データセットについて逐次新たなデータを追加蓄積していくのか、その蓄積場所はどう確保するのか、他の現場管理者への横展開や AI サービスの供給者側の技術開発を促すために利用を許諾すべきかどうかについては今後活用する場面に応じて課題として整理されていく必要がある。

即応性の高い AI 技術の活用のために ICT 基盤をクラウドとせず、現場における ICT 機器の実装や専用の ICT 基盤の組み合わせを自ら保有することを選択することも考えられるが、AI 技術の取り組みの概念実証段階においては他者の ICT 基盤を活用していくことで危険な投資を避ける意味で有効とも考えられる。しかし、他者の ICT 基盤を利用する場合、学習用データセットおよび分析対象データをどこまで提供するのか吟味しておく必要がある。概念実証段階までであれば課題は少ないと考えられるが、開発段階やその後の実装段階になると学習用データセット、学習済みモデルや分析対象データに含まれる価値が他者にも利用されてしまう可能性が出てくる。

このような状況下で、仮に学習済みモデルや学習用データセットが公開されるとして誰がどのように準備するのか、またその学習済みモデルやデータセットの利用はどのように保護されるべきかについての費用負担や権利の保護について議論が必要となる。

平成 30 年 6 月に経済産業省が作成し公表した「AI・データの利用に関する契約ガイドライン」では、「AI 技術を利用したソフトウェアに関する法的問題は、AI 技術が産業利用技術として近年急速に発展・普及してきたため、①AI 技術の特性を当事者が理解していないこと、②AI 技術を利用したソフトウェアの権利関係・責任関係等の法律関係が不明確であること、③ユーザ（=AI 技術を利用したソフトウェアの開発を依頼する者）がベンダ（=開発する者）に提供するデータに高い経済的価値や秘密性がある場合があること、④AI 技術を利用したソフトウェアの開発・利用に関する契約プラクティスが確立していないことに主に起因していると考えられる。」と、4 つの問題を指摘している。同ガイドラインは、法による権利保護が不備な状況にあっても関係当事者間の契約により権利関係を定めておくことができることを前提とし、具体的な開発段階に応じた契約の考え方やその内容における留意事項など広く実務の一助となることが期待される情報が盛り込まれたものであり、AI 技術を利用したソフトウェアに係る契約関係の相場観の確立は将にこれからといった現状を認識させられるものとなっている。

4. 5 AI 技術の開発に対する規制

AI 技術の研究開発についてどのような規制をそもそもかけていくのか、ソフトローというあいまいな規制のあり方も議論中である。

総務省が設置した AI ネットワーク社会推進会議により、AI 開発原則（9 原則）及びその内容を解説した非規制的で非拘束的なソフトローとしての指針の案として「国際的な議論のための AI 開発ガイドライン案」が平成 29 年 7 月に作成、公表されている。開発者に課される原則として、①連携の原則、②透明性の原則、③制御可能性の原則、④安全の原則、⑤セキュリティの原則、⑥プライバシーの原則、⑦倫理の原則、⑧利用者支援の原則、⑨アカウントビリティの原則が挙げられている。

また、「AI 利活用原則案」が非規制的で非拘束的なソフトローとして、平成 30 年 7 月に AI ネットワーク社会推進会議により作成、公表されている。利用者及びデータ提供者が AI の利活用に際して留意することが期待される事項として、①適正利用の原則、②適正学習の原則、③連携の原則、④安全の原則、⑤セキュリティの原則、⑥プライバシーの原則、⑦尊厳・自立の原則、⑧公平性の原則、⑨透明性の原則、⑩アカウントビリティの原則が挙げられている。

しかし、開発に対する規制のあり方については、AI 開発の実情を踏まえ、AI がもたらす結果の責任を開発者だけでなく、学習を施した利用者も含め、全体を含めて議論すべきとの意見もあり関係者の間で十分な合意は必ずしも形成されていない。国際的にも議論が尽くされることが望まれるところである。

5. AI 技術を取り込む上で求められていくこと

5. 1 業務内容の分析

データを活用し意思決定を支援する業務において AI 技術の活用が期待できる。データを人間が解釈しその後の施策に生かすものと、繰り返し業務の効率化・自動化を図るものに分けてその違いを意識することが重要である。前者においては分析結果の解釈可能性と適切なタイミングでの可視化が、後者においては業務への直接的な貢献と必要十分な精度が重視されることとなる。

土木施設の維持管理・更新に AI 技術を取り込むには、巡視（常時監視等も含む）・点検・診断・措置の各段階における業務内容の分析が不可欠であり、個々の業務要素や業務全体に対する改善が大きく見込めるかどうか評価するとともに各要素技術としての要求品質を明確にできるよう努める必要がある。

5. 2 良質な学習用データセットの準備

学習済みモデルの生成は、学習用データセットの統計的な性質を利用して行われる。したがって、学習時と推論時の確率分布が大きく異なるような場合には機能しない場合があり得る、学習用データセットに通常性質が反映されない「まれな事象」に対して推論が及ばない可能性がある、学習用データセットから統計的なバイアスを排除することは不可能であり生成された学習済みモデルを未知データに適用する場合には本質的に誤差が含まれることになる、といった原理的な限界を有するとされている。

学習済みモデルが学習用データセットの統計的性質を反映して生成されることから、学習用プログラムの使用に問題がない場合であっても、満足のいく性能の学習済みモデルが生成できないという事態も十分に想定される。

首都高速道路(株)は、前述のスマートインフラマネジメントシステム（i-DREAMs）の要素技術の一つであるコンクリートのひび割れ検出の技術開発のために、精度の良い 100 セット程度の学習用データセットを準備し、共同研究開発者である産業技術総合研究所の ICT 基盤を利用して、希望する精度の学習済みモデルが生成できるか検証を済ませ、現在、平成 30 年度中の学習済みモデルの開発完了を目指している。学習用データセットは、既に蓄積されているデータを加工して利用するのではなく、データセット用に新たにデータを取得するという方法が効率的との理由で選択しているとのことである。

学習済みモデルの性能は学習用データセットの品質に依存するので、良質な学習用データセットが準備できるかどうか、ノウハウも含めて極めて重要な技術的課題であると認識すべきである。

5. 3 契約内容の検討と公共調達のための手続きの検討

技術的課題の検討のみならず、AI 技術に関する契約のあり方も検討しておくことが必要である。前述の「AI・データの利用に関する契約ガイドライン」では、企業が抱えている懸念、①普通のソフトウェア開発と何が違うのか、②従来型の契約方式のどこを変えたらよいのか、③知財権等はどのように処理すれば良いのか、④学習済みモデルの横展開はできるのか、⑤学習済みモデルの性能等に関する責任は誰がどのように取るのか、に対してそれぞれ解決方針が提案されている。ガイドラインの内容は今後も柔軟に変更されていくものと思われるが、最新の情報を確認しつつ、契約手法についても検討を進めることが重要である。特に土木施設の管理者は公的機関であることが多いので、公共調達の手続きの中でどう進めていけばよいか利用者及びデータ提供者の観点で議論を進めることが必要である。

6. おわりに

AI 技術は土木施設の維持管理・更新に適切に取り込めれば、省人化や生産性・コスト効率の向上が期待できる。そのためには、土木施設の管理者は維持管理・更新にかかる業務のどの部分にどの程度の精度の AI 技術を取り込むこととするのか吟味することが重要である。

また、土木施設の管理者は AI 技術の取り込みにおいてどのような学習用データセットが準備できるのか検討しておく必要がある。

そして、各施設の管理者がこれらの吟味や検討を容易に実施できるように共通のものとして何が整えられていくべきか関係者の突っ込んだ議論と取り組みが必要である。

【参考文献】

- 1) 公益社団法人土木学会：インフラ・国土管理における土木と ICT の融合に関する提言、2018. 5. 24
- 2) 松尾豊：人工知能は人間を超えるか、KADOKAWA、2015. 3. 10
- 3) 公益社団法人日本道路協会：道路土工構造物点検必携 平成 30 年版、2018. 7. 27
- 4) 日経 BP ムック：まるわかり人工知能最前線 2018、日経 BP 社、2017. 10. 19
- 5) 経済産業省：AI・データの利用に関する契約ガイドライン、2018. 6. 15
- 6) 総務省：AI ネットワーク社会推進会議 報告書 2017、2017. 7. 28
- 7) 総務省：AI ネットワーク社会推進会議 報告書 2018、2018. 7. 17
- 8) 株式会社ブレインパッド：失敗しないデータ分析・AI のビジネス導入、森北出版、2018. 7. 18

道路橋維持管理におけるモニタリング技術の活用

橋梁構造研究グループ グループ長 金澤文彦

1. はじめに

社会インフラの急速な老朽化に伴い、維持管理・更新費用の増大が懸念されており、さらに将来的な担い手不足も問題視されている。それらの課題に対応するために、新技術などを活用した効率的な維持管理が求められている。その一つがモニタリング技術であり、道路橋の維持管理に活用することが期待されている。一方で、モニタリングを行うためのセンサや、通信技術、データ分析技術等には多種多様なものが開発されている。しかし、これらをインフラの維持管理の現場に活用するための具体的な方法や考え方などが整理されていないため、どのような構造・部位にどのような技術を適用すべきかをインフラ管理者が判断できず、本格的な現場導入に至っていない。

土木研究所は平成 26 年に設立されたモニタリングシステム技術研究組合（以下、RAIMS）に参加している。この技術研究組合は、土木研究所の他、道路管理者である高速道路会社、補修・補強技術に精通した総合建設会社、劣化メカニズムや診断解析に精通したコンサルタント、最先端のセンサや通信技術、データ分析評価システムの開発者である電気通信分野の企業が参加している。センサや通信・データ解析技術等を組み合わせ、効率的で合理的なモニタリングシステムを社会インフラの維持管理業務へ導入するためのガイドラインを提案することを目指している。ここでは、RAIMS の活動におけるモニタリングシステムの活用による維持管理業務の効率化の取り組みを紹介する。

2. 管理者ニーズの把握

RAIMS は道路管理者の目的にマッチしたモニタリングシステムの提案を目指している。そこで、まず道路管理者ニーズを整理するために、文献調査、有識者意見交換、地方公共団体の道路管理者へのヒアリングの実施などにより、橋梁の維持管理におけるモニタリングの適応場面の整理を行った。図-1 に示す維持管理サイクルの各段階におけるモニタリングの活用シーンを①点検の補助、②診断の補助、③補修・補強の効果確認、④緊急時の対応の補助として整理し代表的な管理者ニーズとその場合のモニタリングの目的を具体的に整理して表-1 に、維持管理フローにおけるモニタリングの活用場面を図-2 のようにまとめた。

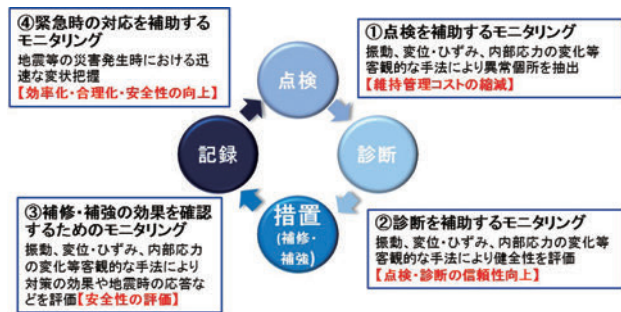


図-1 維持管理サイクルにおけるモニタリング

表-1 管理者ニーズとモニタリングの目的（例示）

モニタリングの役割	管理者ニーズ	モニタリングの目的	タイプ
(1)点検の補助	日常点検時の変状の見逃しを低減する（スクリーニング）。	何らかの異常があった箇所を把握する（事象は特定できなくてよい）。	A
	定期点検の範囲を絞り込み、点検時間・費用を削減する。	健全性を確認している範囲を把握する。	B
(2)診断の補助	予防保全対策の実施により劣化損傷の重症化を防ぐ。	健全性を確認するべき状態に達したことを把握する。	C
	措置の優先順位付けを行う。	定量的データを取得し、比較する。	D
	健全度評価の精度を向上する。	健全度評価のための定性的、定量的データを取得する。	E
	供用状態を維持する。	通行制限あるいは通行止めにすべき状態に達したことを確認する。	F
(3)補修・補強の効果の確認	対策の妥当性を確認する。	補修・補強等の対策を講じるまでの間の状態を確認する。	G
(4)緊急時の対応を補助	交通開放するまでの時間を短縮する（高速道路）。	落橋の危険が予測される箇所を把握する。	I

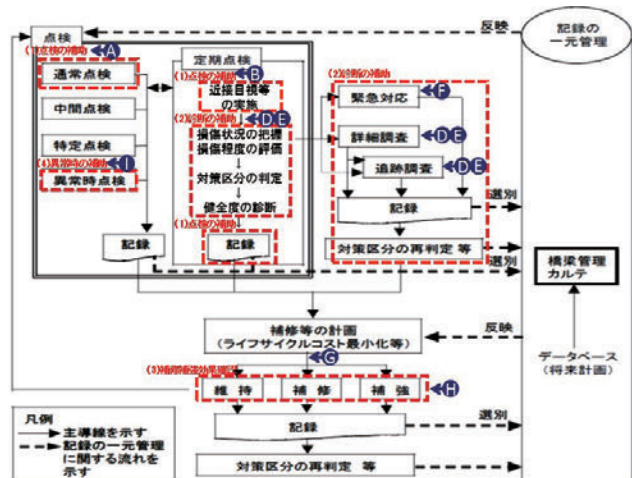


図-2 維持管理フローとモニタリングの活用場面

モニタリング技術を活用する場面は多種多様であり、管理者の維持管理方針に合わせて、構造物の種類、健全度、環境条件等に応じて、適切に採用していくことが重要である。モニタリング技術の採用が効果的と考えられる場面として、「変状を確認したら行うモニタリング」「変状の早期発見のために行うモニタリング」「補修・補強の効果を確認するために行うモニタリング」などが想定される。

3. モニタリング技術の活用に向けた現場実証実験

3. 1 画像撮影による RC 床版のひび割れモニタリング

前前述の「変状を確認したら行うモニタリング」は、通常の点検において構造物の変状が確認された場合に行うモニタリングであり、診断に必要な情報の取得や変状の進行を監視するためのものである。その一例として、RC 床版のひび割れのモニタリングを紹介する。従来の点検では、現地で目視判読したひび割れを「損傷図」にフリーハンドで記録することが一般的であり、点検時期や点検者が変わることにより、ひび割れの同定（2つの記録にあるひび割れが同一かの判断）が困難になることも多い。カメラで撮影した画像を用いることで、客観的なデータとしてひび割れの記録が可能となり、経年の画像を比較することにより、ひび割れの進行を確認できるようになる。

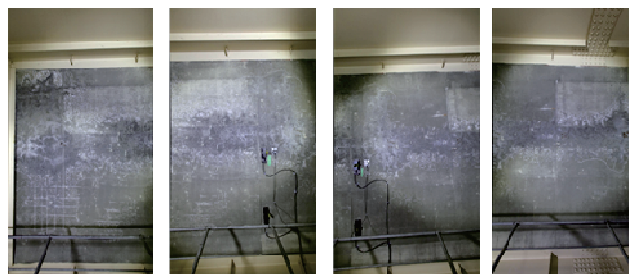
RAIMS では高速道路の橋梁で、ひび割れ撮影・画像解析システムの実証実験を行っている。床版の画像データ取得においては、カメラの仕様や現場条件の制約などにより、1枚の床版を分割して撮影し、後に接合して1枚の成果画像にすることが一般的である。しかし、カメラの傾き、床版の傾き、床版までの距離などが画像ごとに異なるため、単に画像を接合するだけでは画像の客観性を保持することができない。実証実験では、撮影に単焦点レンズを用い、分割撮影した画像を正規化（中心投影画像を正射投影画像に変換する処理）し、その画像を自動接合して床版パネル単位の画像を作成した。正規化に必要な標定点（現地の床版上の位置と写真上の位置を対応付ける点）は、撮影と同時に取得した各画像の四隅の3次元座標を使用した。また、画像の接合精度を高めるため、隣り合う撮影範囲が重複するように撮影した。ひび割れ分布図は、パネル単位の画像からひび割れをトレース（幅、形状）して作成した。分割撮影の例を図－3、それを元に作成したひび割れ分布図の例を図－4に示す。

床版の写真（画像データ）とひび割れ（ベクトルデータ）は、同じ座標上で管理されているため、2時期のデータを容易に比較・解析できる。例えば、ひび割れ密度を算出して比較することで、既存の変状の進行や新たな変状の発生をモニタリングすることが可能となる。

3. 2 塩害補修効果の確認

構造物の維持管理においては、予防保全のためにコンクリートを被覆したり、損傷箇所の補修や補強を行うことが少なくない。その場合に、補修や補強の前後で構造物の状態や挙動をモニタリングして、設計で想定された効果が発揮されているかを確認しておくことは有効である。ここでは補修効果の確認のためのモニタリングの例として、塩害を対象としたモニタリング実施事例を紹介する。塩害に対しては、センサを設置しておくことで塩害の進行をモニタリングすることができ、損傷が顕著になる前に適切な対策時期を判断することが可能となる。補修時にセンサを設置した場合は、補修効果の確認や塩害による再劣化の発生をモニタリングできる。塩害による損傷を受けた橋梁に対して補修工事が行われた際に、その効果の確認のためにセンサを設置してモニタリングを実施している事例を紹介する。

凍結防止剤を含んだ水が箱桁内部に侵入し、箱桁下床版に塩害劣化（剥離、鉄筋露出）が生じていた PC 箱桁橋において、断面修復および電気化学的脱塩工法により補修が実施された。電気化学的脱塩工



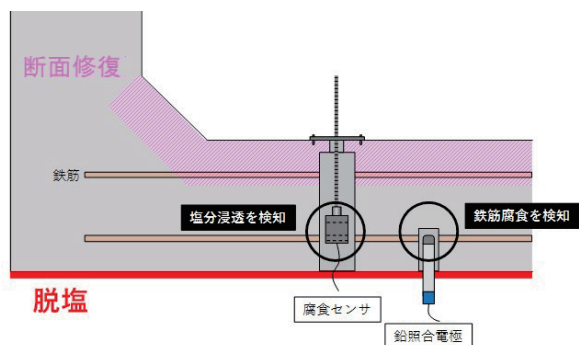
図－3 分割撮影の一例



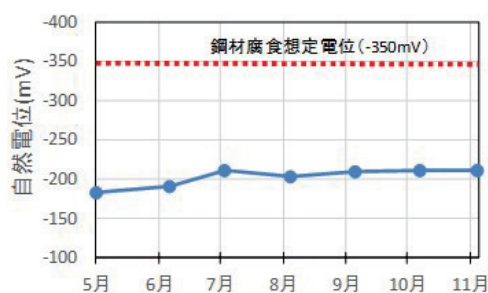
図－4 ひび割れ分布図の一例

法について、時間経過に伴う再劣化が生じていないことをモニタリングで確認するため、腐食センサおよび鉛照合電極を設置した（図－5）。腐食センサは、センサに設置された模擬鉄筋の電気抵抗から、塩分の進展深さを調べるものであり、照合電極は自然電位によって鉄筋腐食の有無を判断する。平成 29 年 4 月より月 1 回の計測を継続している。

凍結防止剤を含んだ水が桁部に掛り、桁端部に塩害劣化（剥離、鉄筋露出）が生じた PCT 桁橋においては、断面修復による補修後に、マクロセル腐食が生じていないことを確認するためのモニタリングとして、照合電極を設置した（図－6）。平成 29 年 11 月から月一回、継続的な計測をしている。



図－5 PC 箱桁橋でのセンサ設置
（脱塩後のモニタリング）



図－7 計測結果の一例
（PC 箱桁橋・照合電極）



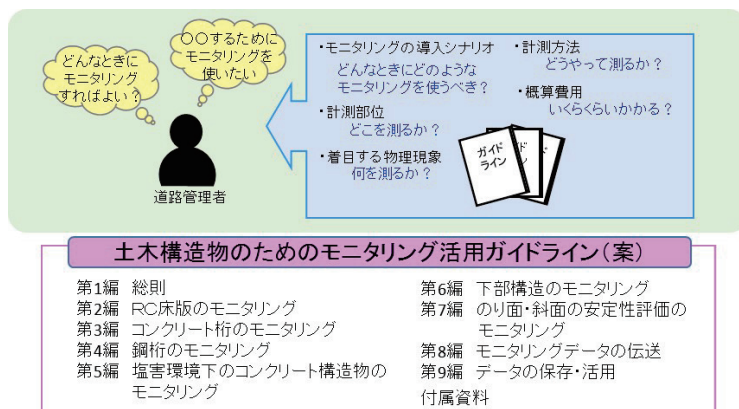
図－6 PCT 桁橋でのセンサ設置
（断面修復後のモニタリング）

現時点ではこれらの計測結果には、塩害再劣化を示す変化は確認されておらず、塩害補修の効果が持続しているものと考えられる（図－7）。今後も引き続き計測することにより、効果の持続を監視していく。

4. 土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン

管理者ニーズの把握で得られた知見と現場実証実験の結果を元に、橋梁を中心とした土木構造物を対象として、モニタリング技術の適用方法や留意事項、モニタリングの適用事例などをまとめたガイドラインを作成している（図－8）。

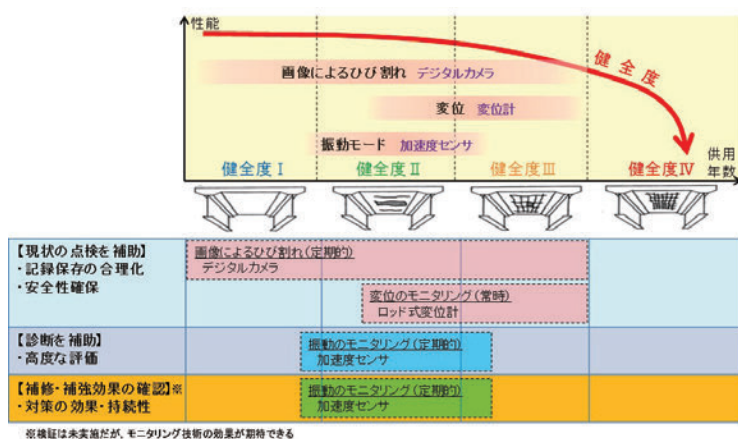
センサなどに求められる要求性能や対象とする部材・部位および損傷ごとに推奨するモニタリング方法をガイドラインにて示すことは、インフラ管理者にとって、モニタリングに必要な機器の選定やモニタリング計画の立案の一助となると考えられる。また、要求性能を示すこと



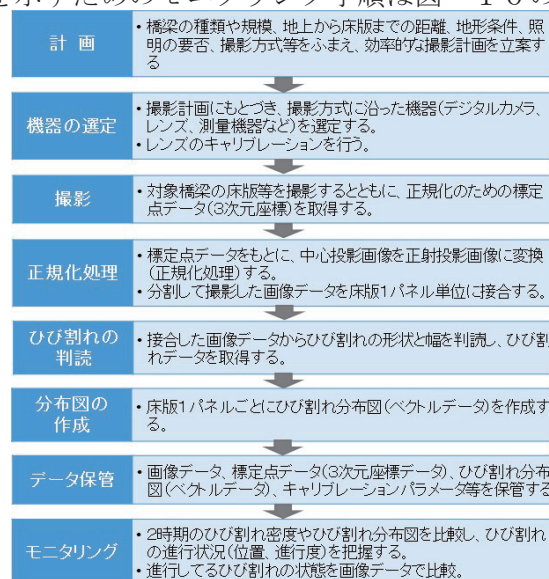
図－8 ガイドラインの概念

でメーカーにおける技術開発目標が明確になるという効果も期待できる。

さらに、ガイドラインでは、管理者のモニタリング計画立案の参考となるよう、どの技術によるモニタリングをどのような段階でどう使用するのが良いかを示すこととしている。図－9は健全度やメンテナンスサイクルの各段階に応じてモニタリングの位置づけや種類を例示したものである。また、各技術についてどのような流れでモニタリングを行うと良いかを示すためのモニタリング手順は図－10のようにとりまとめている。



図－9 モニタリングの位置づけと種類の例（RC床版）



図－10 画像による床版のモニタリングの手順

5. おわりに

土木研究所が組合員として参画している RAIMS における、社会インフラの維持管理業務へモニタリングを効果的に導入するための取り組みについて紹介した。RAIMS が作成するガイドラインについては、本年度中の完成を目指しているところであり、完成後は一般に公開する予定である。

今後 RAIMS では、ガイドラインに記載したモニタリング技術を現場で活用してもらうために周知活動を進めるとともに、道路管理者からのニーズが高いと考えられる点検時の省力化、予算の制約によりすぐに補修・補強ができない場合の対策を実施するまでの間の監視、塩害環境下での補修・補強効果の確認などに貢献するモニタリング技術の現場における導入に向けて、具体的な検討を進めていくことを考えている。

本稿で紹介した取り組みは、RAIMS の活動であり、内閣府の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一環として国土交通省が実施する「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発」委託事業研究の内容を含む。

【参考文献】

- 1)モニタリングシステム技術研究組合：平成 30 年度 RAIMS 活動報告会資料、2018.7
<http://raims.or.jp/>
- 2)石田雅博、山口岳思、松尾健二、廣江亜紀子：モニタリング技術の活用による橋梁維持管理の高度化・効率化、土木技術資料、Vol.58 No.1、pp.18-21、2016.1
- 3)藤野和雄、倉田直樹、葛西茂、廣江亜紀子：東北自動車道大森川橋におけるモニタリング技術の現場実証、土木技術資料、Vol.59 No.9、pp.46-49、2017.9
- 4)園田崇博、松山公年、中野雅章、高地透、中津井邦喜：塩害モニタリングにおける対象位置決定方法に関する研究、第 72 回年次学術講演会講概要集、土木学会、CS14-031、2017.9
- 5)松山公年、園田崇博、中野雅章、高地透、中津井邦喜：塩害モニタリングにおける実橋センサ設置方法に関する研究、第 72 回年次学術講演会講概要集、土木学会、CS14-032、2017.9

構造物の補修補強対策の信頼性向上

材料資源研究グループ グループ長 渡辺博志

1. はじめに

社会インフラの点検、診断、補修補強対策から構成されるメンテナンスサイクルは、そのどれが欠けても目的を全うすることができない。とりわけ、補修補強対策は、治療に相当するものであり、その良否は既設構造物の延命化のカギを握るものであり技術に対する期待も大きい。材料資源研究グループでは、土木研究所第4期中長期計画において補修補強に焦点を当てた研究プログラムを実施しているところである。対象としている構造物は、ゴム堰やコンクリート舗装、コンクリート橋等、その種類や対象となる材料や劣化現象も様々で、それぞれに固有の課題を取り扱っている。

一方で、これらの補修補強対策には、共通する本質的な問題意識がある。それは、構造物の補修補強対策実施後、再劣化を生じた事例が認められるように、効果に対する信頼性が不十分であり、対策効果の信頼性向上について早急に改善しなければならないとの認識である。構造物や材料の種類によらず、補修補強対策の効果を確実なものとするうえで対処しなければならない共通の技術的課題が存在する。ここでは、具体的な補修対策に関わる事例を紹介しつつ、共通の技術的課題の解決策についてその方向性を述べることにしたい。

2. 補修補強の信頼性向上のための方策

2. 1 対象構造物の状況把握とそれに適合した補修補強対策の選定

補修補強対策は非常に多くの種類があり、補修の原理ならびに補修の目的も異なっている。当然、実構造物の劣化損傷状況によって、採用すべき対策は異なってくる。対象構造物の綿密な状態把握とともに、状況に適合した対策の選定が重要であり、ここを誤ると当初期待する効果を得ることができない。当然のことのように思えるが対象構造物の状況把握を確実に行うことは必ずしも容易ではない。

例えば、鉄筋コンクリート構造物において鉄筋腐食による損傷が発生している場合を想定する。塩害に起因する場合では、対象構造物中の塩分浸透範囲を把握し、鉄筋腐食原因である塩分を含むコンクリートの除去が可能かどうかの判断が補修設計のために必要となる。一般的には、鉄筋腐食を生じさせる塩化物イオン量の限界値として、 $1.2\text{kg/m}^3 \sim 2.5\text{kg/m}^3$ 程度の値となることが知られていて、この値を超える量の塩化物イオンを含んだコンクリートを的確に除去しなければならない。

ところが、非常に大きな断面寸法を有するコンクリート構造物に対して、広範囲かつ深さ方向にも塩化物イオンの含有量をくまなく把握することは不可能である。いくつかの点で測定された塩化物イオン含有量の値、過去の調査結果、あるいは鉄筋の自然電位といった非破壊試験など、限られた情報を総動員して、リスクを踏まえた工学的な判断を下さざるを得ない。また、除去すべきコンクリートの部位が、鉄筋やP C鋼材の定着部付近であったり、コンクリートにプレストレスが導入されていたりした場合には、塩分に汚染されたコンクリートのはつりが、対象構造物の構造性能に与える影響を慎重に評価しなければならない。その評価を行った結果、構造性能からの制約によりコンクリートのはつりが不可能であると判断されれば、電気防食工法の適用を考えなければならないこともあろう。

このように、構造物の状況把握とそれに応じた補修補強対策の選定手法が重要であり、維持管理技術者の力量が問われるところである。

2. 2 補修補強の施工品質の確保

補修補強の施工にあたっては、施工期間が限られたり、非常に狭隘な空間での作業を強いられたりと、制約条件も多くなりやすい。困難な施工条件であっても、補修補強対策の効果を確実なものとするためには、施工品質の確保が非常に重要である点は忘れてはならない。

補修補強工事では、劣化した部分を取り除き、そこに新たに材料を付加し、新旧断面を接合する場面が多く発生する。例えば、コンクリート構造物であれば、劣化したコンクリートを部分的に除去し、新たにポリマーセメントモルタルなどの補修材を打ち継いで修復

することとなる。旧断面と補修材の付着強度の確保が非常に重要であり、付着強度には施工品質の影響が大きく現れるところである。付着強度に影響を与える因子は非常に多くあり、旧断面の劣化程度や補修材の材料特性はもちろんのこと、打継ぎ面の素地調整方法も重要となる。打継ぎ面の凹凸の程度や湿潤状態、さらには削りカスの清掃状態や、タガネ等を用いたはつり作業に伴って旧断面に発生するマイクロクラックへの対応など、細部にわたって丁寧な施工が求められる。

こうした新旧断面の接着強度については、有機系材料であるゴムを用いた構造物の補修にも当てはまる。図-1は母材のゴムと当てゴムとを接着した際の接着力の試験結果¹⁾を示したものである。使用するゴムの種類とともに接着面の前処理（バフがけ）の有無によっても接着強度は大きく異なっていることが分かる。バフがけにより、ゴム表面に存在する脆弱層を取り除くとともに微細な凹凸をつけることにより接着剤の投錨効果が発揮されることも接着力を高める一つであると考えられる。

コンクリート部材に対してあと施工アンカーのように機械的な接合を行う工法を用いる場合も現場での施工品質が重要であることに変わりはない。接着系のあと施工アンカーでは削孔箇所の清掃が重要となるが、金属拡張式あと施工アンカーの施工においても、削孔後の清掃の程度や、削孔直径に誤差がアンカーの定着強度に大きな影響を及ぼすことが知られている。とりわけ削孔径の施工誤差の影響は顕著であり、図-2は金属拡張式あと施工アンカーの施工方法による引張耐力の差について試験結果を表したものである。図-3はあと施工アンカーの引張荷重に対する抜け出し変位量を示したものである。削孔径が過大であった場合には、引張耐力の低下とともに、引き抜けに対する変位量も非常に大きくなっていて、削孔径の施工精度の管理の重要性が改めて認識できる。

一方、塗替え塗膜では、膜厚の管理や乾燥状態の管理のほか、素地調整の施工品質が、

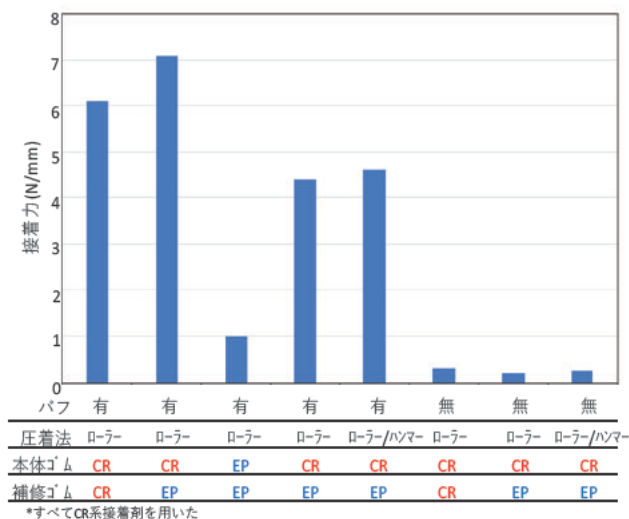


図-1 ゴム表面への当てゴム補修の接着力¹⁾

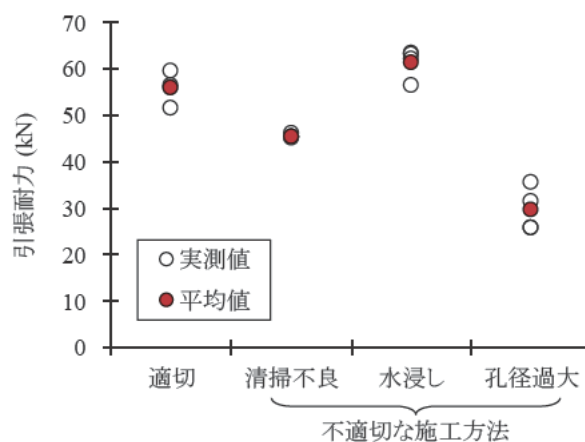


図-2 あと施工アンカーの引張耐力²⁾

その後の防食性能に多大な影響を生じることとなる。残存塩分量を低減できるような素地調整に努めることが重要である。

施工品質が適切に確保されたのかどうかを工事完了時に検査することは困難なことが多い。このため、工法ごとに肝となる施工管理項目をあらかじめ特定し、それに基づいて施工のプロセス管理を着実に実施していくことが重要である。

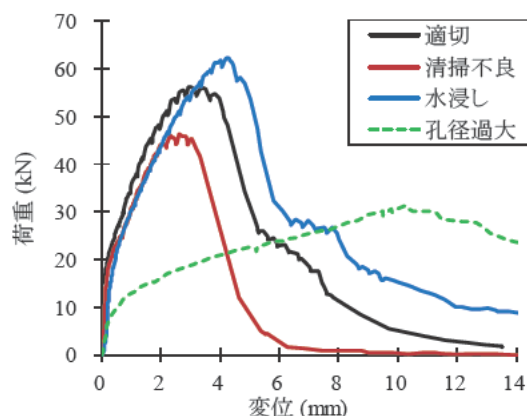
こうした状況を考えると、補修補強効果が施工品質に大きくは左右されない、いわば過度に緻密な施工管理を要しない工法システムの開発も期待されるところである。

2. 3 対策後の効率的な維持管理手法の策定

補修・補強対策の施工品質の確保とともに重要なのが、対策実施後の適切な維持管理の実施である。万全を期して実施された補修補強対策であっても、対象構造物の損傷状況の把握には限界もあり、接合や部材の追加、塗膜の塗替えなど、長期供用性に対して不確実な項目は残されることとなる。このため、補修補強対策実施後の構造物の供用に当たっては、再劣化のリスクも想定し、適切な維持管理手法を策定しておくことも重要である。

とりわけ、電気防食工法といった一連の装置システムによって延命効果を発揮するような対策工法においては、システムを構成する機器、配線、陽極材、防食電流の状況など、そのどれかでも不具合があった場合、適切に機能しなくなる。このため、供用後の維持管理において確認すべき項目は多い。図－4は電気防食を適用しているコンクリート橋において、電気防食システムが適切に稼働し防食電流が供給されているかどうかを確認できる装置の例を示したものである。塩害対策として電気防食を適用するコンクリート構造物では、内部の鉄筋の周囲にはすでに塩化物イオンが多く含まれているため、電気防食システムに異常があった場合、当該構造物は急速に劣化が進行する。このため、日常点検で簡易に電気防食システムの異常を知らせるシステムは維持管理上有効なものである。

一方、表面被覆工法の適用後の点検の在り方についても、今後改善が必要であると考えられる。表面被覆工法は、コンクリート構造物において水分や塩分の浸透を防止する目的でしばしば用いられる手法である。ところが、使用する被覆材料によっては、施工後の母材コンクリートのひび割れなどの変状について、近接しても目視点検が困難となる場合があり、再劣化の兆候を容易にとらえられなくなる可能性がある。このため、透明な被覆材や含浸材を用いるか、もしくは不透明な材料で表面被覆した場合でも、被覆下のコンクリートの変状を外観から判断できる点検技術の開発が重要となる。こうした新たな点検技術についても現在研究に取り組んでおり、検証を終えたのち、機会をあらためて成果を公表し



図－3 あと施工アンカーの抜け出し性状²⁾



図－4 日常管理における通電の確認を支援する例³⁾

たい。

維持管理に従事する技術者が減少する中で、補修補強対策を実施した後の構造物に対する点検の省力化の実現は重要である。これまで、ともすれば補修補強工法そのものの開発に目を奪われがちであり、施工後の維持管理の合理化に向けた技術開発は十分ではなかったと思われる。対策実施後の構造物について、各種センサーの設置や情報技術を駆使する方法も視野に入れつつ日常管理を着実かつ簡易に行うための技術開発が必要である。

2. 4 補修補強用材料および工法の要求性能の明確化と性能検証方法の確立

補修補強用材料や工法の開発は活発に行われていて、断面修復材や表面含浸材料など、様々な材料が市場に流通しつつある。これらの新たな材料については、成分の内訳や構成など、詳細な仕様は明らかにされることはまれである。このため、こうした材料の適用性や品質評価については、構成材料の仕様からではなく、材料試験による性能評価結果に基づいて判断することが原則となる。ところが、材料の開発速度と比べて、補修材料に関する品質規格や標準的な試験方法の整備が追いついておらず、必ずしも適切な性能評価ができない状況にある。開発された新材料や新工法の現場導入を円滑にするためにも、性能評価のための試験方法ならびに評価尺度の確立は重要である。

ただし、室内試験では、実際の適用箇所で受ける負荷を忠実に再現することは困難であり、単純化された条件での促進試験にならざるを得ない。すなわち促進試験結果の解釈に今一つ信頼性が伴わない状況にある。海外に目を転じれば、補修材料に関する試験法や品質表示方法については、すでに EN 規格の整備が進展してきているが、実際の用途に適合した性能を確保するために必要となる規格値が明確でないため、現場への適用の判断が必ずしも容易ではないと考えられる。実際の供用状況を再現した試験と、促進試験の比較検討を行い、促進試験の妥当性を検証するとともに、実構造物に適用する際に要求される性能に見合った試験規格値の設定がなされる必要がある。

3. まとめと今後に向けた課題

補修補強の信頼性向上に向けた方策について、概論を述べた。補修補強については、経験工学の要素が強く、現場での試行や適用後の日々の点検によって得られた知見が非常に貴重となる。施工現場での経験やノウハウはもちろんのこと、補修補強対策適用後の構造物の追跡調査は欠かすことができない。材料メーカーはもちろんのこと、設計施工、ならびに構造物管理に携わる各種の技術者が一丸となって、信頼性の高い補修補強対策のシステム確立を目指した取り組みが必要となる。

参考文献

- 1) 百武壮、新田弘之：ゴム引布製起伏堰のゴム袋体補修技術の高度化、土木技術資料 Vol.60, No.8, pp.16-19, 2018.8.
- 2) 中村英佑、日下 敦、古賀裕久：あと施工アンカーの耐荷力の低下要因に関する基礎的考察、同上、pp.24-27, 2018.8.
- 3) 西崎到、石田雅博、山口岳思、佐々木巖：コンクリート橋の電気防食工法における維持管理の課題、一 維持管理マニュアルの発刊一、同上 pp.8-11, 2018.8.

流量観測等の高度化に向けた土研の取り組みと今後の展開

水工研究グループ 箱石 憲昭

1. はじめに

我が国は山地が国土の多くを占め、沖積平野に人口の多くが集中し、毎年台風や梅雨による水害が頻発している。近年でも平成 27 年関東・東北豪雨や平成 24 年 7 月と 27 年 7 月の九州北部豪雨、今年の西日本豪雨などで大きな被害が出たのは記憶に新しいところである。また、河川の延長が短く、降雨の多い時期と少ない時期がはっきり分かれていることから水資源の確保が容易でなく、これまで渇水の被害も何度となく受けてきた。

このような自然状況の中、我が国は古くから様々な治水対策、利水対策を行ってきた。これら対策の推進にあたっては、過去の被害や河川の状況等を踏まえ適切に計画を策定し推進していく必要があるが、そのためには長期間にわたる定常的かつ継続した水文観測データの蓄積とその解析の重要性は高い。

水文観測のうち、雨量や水位についてはすでにその計測が自動化され、そのデータは瞬時に河川管理者等へ転送され、また川の防災情報等により住民に提供されている。一方、流量については現在でもその多くが人の手により計測されている。しかしながら、洪水時の観測の危険性や人手不足等の課題があり、また近年は機械による計測法の開発も進んでおり、平成 29 年に改正された水文観測業務規程では新たな計測手法として非接触型流量計による計測が位置づけられたところである。

土木研究所では、これまで流量観測の高度化に向けた様々な研究を行ってきた。ここでは土研が開発した電波式流速計などの流量観測手法や、流量観測の最近の動きについて紹介する。

2. 電波式流速計の開発

これまで、流量観測は平常時の低水流量観測には回転式流速計等の可搬式流速計、洪水時の高水流量観測は浮子による計測が主に行われてきた。

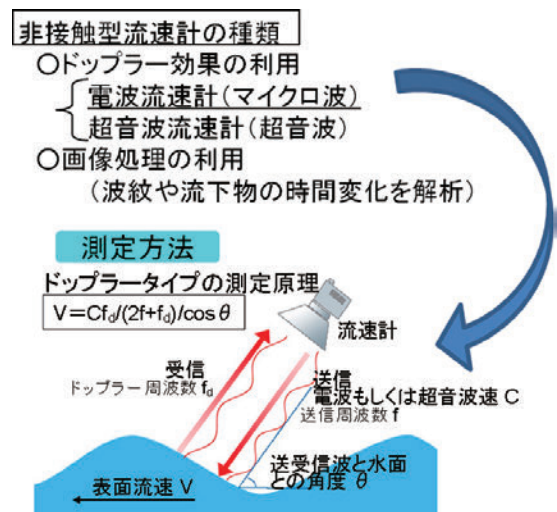
しかしながら、浮子測法による高水流観では、観測員の安全確保等のためやむを得ず観測を中断せざるを得ない場合が発生するなど、安全・確実に観測を実施するための体制構築が急務の課題であった。また、観測には最低 5 名の人員を要し、洪水時に複数の観測所において測定を行わなければならない、洪水の期間によっては 1 カ所で複数班を用意し交代制で観測を行わなければならないなど、測定期間における人員の確保も近年では大きな懸案となっている。

土木研究所は、メーカーや航測会社等との共同開発により、非接触型の電波式流速計を開発した（写真－1）。電波式流速計は、ドップラー効果を利用して河川の表面流速を計測する流速計である。その概要を図－1 示す。流速計から発射された電波や超音波は河川表面で反射されるが、このとき表面流速の影響を受けドップラー効果により周波数が変化する。この周波数の変化および流速計の発射する送受信波と水面の角度より表面流速が算出される。

現在、この電波式流速計は複数のメーカーにより製品化され販売されている。また、近年では流速と水位を同時に計測する電波式流速水位計の開発も行われ、一部の河川ではこれを用いた各種調査が行われている。



写真－1 電波式流速計



図－1 電波式流速計の概要

3. 非接触型流速計の活用

3. 1 非接触型流速計の特長

非接触型の流速計は、ドップラー効果を利用した電波式、超音波式のほかに、画像解析によるものがある。これら非接触型流速計は、浮子による観測と比較して以下のようなメリットがある。

計測に要する時間が短く、安定的、連続的な計測が可能

浮子による観測の場合、1回の観測に数十分の時間を要するため、特に水位の上昇、低下の早い中小河川などではピーク時の流量をとらえられない場合がある。非接触型流速計では計測時間が数十秒程度であることから連続的、安定的な流速の計測が可能となる。

橋梁などの浮子投下施設を必要としない

画像解析による計測では、基本的に河川の流下方向に垂直となるよう河岸や堤防上にカメラを設置するため、横断構造物を必要としない。このため観測地点選択の際の自由度が大きい。

大きな延長を必要としない

浮子による観測の場合、計測区間は最大流速 $\times 10 \sim 15$ 秒程度の距離（概ね 50m 以上が目安）とされているが、ドップラー効果を用いた計測では点での流速が算出される。このため、観測地点の自由度が高いほか、複数音機器を用いて面的な流速分布を把握することも可能となる。

3. 2 非接触型流速計の活用例

このように、非接触型流速計は多くのメリットがあり、現在でも現場での利用が進められている。写真－2は直轄河川に設置されている電波式流速水位計の例である。この例ではセンサーの位置情報や反射波の位相差などから水位の計測も可能である。

流速水位計と他の手法による流速を比較した結果を紹介する。調査は利根川で行い、Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP)及びトータルステーションを搭載した橋上操作艇を有人船で曳航することで複数の観測地点に移動して流量及び水位を計測し、一方それぞれの観測地点に電波式水位流速計のセンサーを照射することで両者を比較した。

なお、ADCPは、海洋での計測技術として開発された超音波多層型計測技術であり、かつては機器を載せたボートの跳躍、揺動、流木の接触により流速の大きな河川での計測が困難であったが、土研による橋上操作艇や流速算出アルゴリズムの改良により河川においても精度の高い計測が可能となったものである。

図－2がその結果である。計測範囲全域にかけて ADCP と電波式流速水位計の計測結果はほぼ等しく、その差は 0.15m/s であった。¹⁾

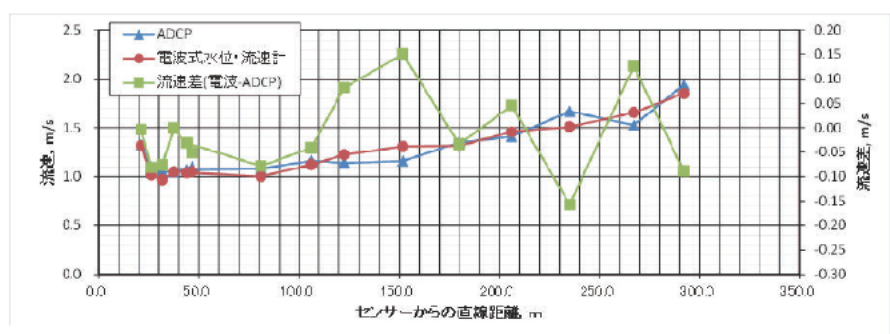


写真－2 電波式流速計の設置例

写真－3,4は平成28年の洪水時に北海道開発局が管理する空知川で画像処理による流量計測を行った様子である。

平成28年8月の台風10号により、空知川は計画規模を超える出水となり上流の2カ所で堤防が決壊し南富良野町市街地が約130ha浸水する大きな被害を受けた。この洪水では、幾寅水位流量観測所の

施設が被災したため水位データが取得できなくなった。また観測所へのアクセス道路の冠水や空知川の水位上昇により浮子による流量観測を中止し、観測地点より下流の橋梁において急遽浮子観測をおこなったものの、その橋も写真のように被災し立ち入り禁止となったことから動画撮影カメラによって撮影



図－2 電波式流速計と ADCP による計測値の比較

を行い、後日 STIV 法(Space Time Image Velocimetry)による流速の算定等を行った。²⁾



写真－３ 幾寅水位観測所の様子



写真－４ 河岸からの動画撮影

4 流量観測の今後に向けて

4. 1 さらなる技術開発とその支援

流速計や水位計については、低価格化や高精度化のほか、新たな計測手法や活用方策等を目指した開発が現在でも多くのメーカー等において行われている。こうした開発を支援するため、土木研究所は土木学会水工学委員会の流量観測技術高度化研究小委員会（会長：藤田一郎神戸大教授）の事務局として、合同流量観測会や勉強会等を開催している。今年 4 月に信濃川で開催された合同観測会では、AI による水位の計測技術、遠赤外線カメラによる映像取得、マルチカメラによる水面の 3 次元データの取得等様々な現地実験がメーカーや建設コンサルタント会社等により行われた。電波式流速計についても小型化した流速水位計をドローンに搭載して流速を計測する実験を行った（写真－５）。また、いくつかの大学では学生の研究として複数の計測法による観測値の比較を行う例も見られた。



写真－５ ドローンに搭載した電波式流速計

現地における大規模な計測は河川管理者や橋梁の管理者、交通管理者としての警察署等様々な機関に対して届け出が必要であるなど非常に手続きが煩雑であり、一者単独でこうした手続きを行うことは容易ではない。そのため自ら手続き等を行うことなく計測実験が行えるこのような場は貴重な機会と考えられており、今年も現地観測会には 40 弱の機関が参加（見学のみも含む）した。また 6 月に神戸で行われた勉強会では約 20 の機関が観測会での成果報告や技術紹介を行うなど、積極的な情報交換が行われた。土木研究所としては、こうした研究開発への支援を今後も継続していく。

4. 2 新技術の普及に向けた取り組み

電波式流速計等の新しい観測技術は、直轄河川を中心に各種調査に利用されつつあるものの、現場レベルではまだそのノウハウが十分でないのが実情である。土研水工研究グループには地整等からの問い合わせが多く寄せられており、積極的に技術指導を行っているところである。

一方、こうした利用はまだ直轄河川の一部であり、多くの現場（特に都道府県）では新しい技術に関する知識が十分ではない。土研では、開発した技術の広報、普及のため、「土研新技術ショーケース」を各地方ブロック毎にほぼ 2 年に 1 度の頻度で主催する等、積極的な活動を行っている。電波式水位計についてもこの場で講演やパネル展示を行い（写真－６，７）、その有用性等について積極的に PR しているところである。

また、こうした観測技術を普及させていくためには、河川の状態に応じた適切な観測方法を提示していくことが重要と考えている。土研では、今後国土交通本省や地方整備局等とも連携して様々な河川に

において複数の手法で観測を行い、河川の状況等に応じた各種流量観測技術の適用性の検証を行っていく予定である。



写真-6 新技術ショーケースでの
ミニ講演会

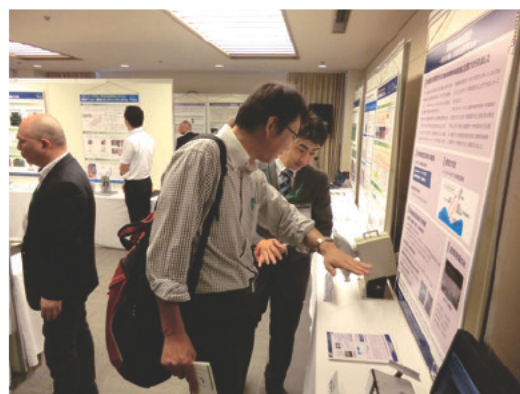


写真-7 パネル展示の様子

5. おわりに

近年の水文観測技術の高度化を受け、平成 29 年 3 月に国土交通省の水文観測業務規程が改正された。改正された主な点は、雨量観測の手法としてレーダー雨量計が正式に位置づけられ、データを蓄積することとされたこと、また流量観測に関して電波式と画像式の非接触型流速計が位置づけられたことである。なお、非接触型流速計については、浮子測法では観測を一時中断せざるをえない場合でも観測を継続し観測データを補完するという位置づけである。しかしながら、近年の技術者不足の状況を鑑みると、流量観測の無人化、自動化は避けて通れない課題と認識している。

土木研究所では、今後も非接触型流速計の普及の取り組みや流量観測の高度化に向けたさらなる研究開発を続けていくこととしている。

【参考文献】

- 1) 萬矢敦啓、墳原学、工藤俊、小関博司、笛田俊治：電波式流速水位計の開発、土木学会論文集 G（環境）、土木学会、Vol.72、I_305-I_311、2016
- 2) 佐藤匡、萬矢敦啓、橋場雅弘：平成 28 年台風 10 号空知川上流における画像処理型流量観測の適用性-大規模出水に対応した流量観測高度化(その 2)-、国土交通省北海道開発局第 60 回(平成 28 年度)北海道技術開発研究発表会
- 3) 河川砂防技術基準 調査編、平成 26 年 4 月、国土交通省水管理・国土保全局
- 4) 平成 14 年度版水文観測、国土交通省河川局監修、独立行政法人土木研究所編著、社団法人全日本建設技術協会

大規模岩盤崩壊の被害軽減に向けた研究の取組み

寒地基礎技術研究グループ 西本 聡

1. はじめに

岩盤崩壊の中でも特に大規模な岩盤崩壊については、事前の予測が難しく、過去に北海道においては、図－1に示すとおり、豊浜¹⁾、白糸²⁾、北見北陽³⁾、えりも⁴⁾など、数万立米を越える崩壊規模の岩盤崩壊がわずか10年弱の間に立て続けに4度も発生している。このような大規模な岩盤崩壊に対応するため、国土交通省北海道開発局ならびに土木研究所寒地土木研究所では、様々な委員会を立ち上げ、原因究明と再発防止に向けて真摯に取り組んできたところである。しかしながら、人工構造物と異なって複雑多様な様相を呈する自然の岩盤斜面における崩壊に対しては、その崩壊メカニズムが現時点では十分に解明されているとはいえず、崩壊発生の正確な予知・予測も困難な中、今後、新たな技術開発や調査研究の進展に委ねられる部分が多いのも事実である。

そこで、本稿では、北海道で発生した主な大規模岩盤崩壊の調査委員会やその他検討委員会等による知見を改めてレビューするとともに、寒地土木研究所で取り組んできた研究成果や、大規模岩盤崩壊による災害の軽減に向けた調査評価方法について紹介したい。



図－1 北海道における1万m³以上の大規模岩盤崩壊事例¹⁾²⁾³⁾⁴⁾(写真：北海道開発局)

2. 北海道における大規模岩盤崩壊の調査委員会やその他検討委員会等による知見

豊浜トンネル¹⁾や第2白糸トンネル²⁾での崩壊事故については、急崖背面の亀裂の伸展、オーバーハングや岩塔状の地形、湧水や崩壊斜面を構成する水冷破碎岩の吸水による強度低下などが、大規模崩壊の要因として挙げられるとともに、岩盤生成過程や地形発達過程などの地球科学的なマクロな視点からの調査・検討の必要性が提言された。これらのことを受け、「北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会」が設置され、崩壊規模100m³以上の141件の岩盤崩壊事例を収集分析し、岩盤崩壊発生の地形・地質的背景や、岩盤崩壊の規模、形態および発生場について検討を行い、「北海道日本海沿岸において大規模岩盤崩落の発生する可能性のある地形・地質的条件は、比較的分離面の少な

い火砕岩で構成される急傾斜で比高の高い急崖である」とのまとめがなされている⁵⁾。

北見市北陽での崩壊は、これまで崩壊事例が報告されていない地域で発生したものであり、また、急崖というよりはむしろ比較的緩やかな傾斜を持った斜面での発生事例であった。崩壊斜面を構成する地質は、常呂帯仁頃層群という付加体で、火山砕屑岩、石灰岩・チャート互層、チャート、赤色含礫泥岩等であり、多数の亀裂を内在した複雑な構造を呈していた。崩壊原因は、斜面上部岩盤内の開口亀裂と連結した流れ盤状の鏡肌をともなう亀裂などが自重・地下水などの影響によって長期間を掛けて劣化・伸展し、約 3 週間前と直前までの記録的な豪雨により浸透した雨水が斜面内部に滞留した際に発生した水圧により、岩盤は安定を失って崩壊に至ったと報告されている³⁾。

えりも町における岩盤崩壊斜面を構成する地質は、付加体である白亜紀の堆積岩（泥岩/砂岩）が熱変成したホルンフェルスを中心とする日高変成岩類であり、内在する白色鉍物脈の溶脱に起因した開口亀裂が多数存在していた。自重および地震（2003 年十勝沖地震）等の影響により、亀裂が深部まで進展して不安定に近い状態であったとともに、暖気により加速された融雪による表流水が表層部の開口亀裂から斜面深部に流入し、さらには早朝には地震も発生したことから、岩石・岩盤が有する様々な抵抗力が減少したことにより大規模な崩壊に至ったと推察されている⁴⁾。

北見市北陽の崩壊もえりも町の崩壊もともに、付加体という複雑な地質構造の斜面で発生したものであり、従来の技術的知見では予知予測がきわめて困難な現象であったといえる。そのため、岩盤崩壊による被災を回避・防止するため、岩盤計測やセンサなどに関する研究開発を目的とした「北海道での岩盤計測に関する調査技術検討委員会」が設置され、不安定と思われる北海道内 9 箇所の岩盤斜面において 8 年余にわたり様々な計測技術によってモニタリングを行い、岩盤崩壊の予知・予測技術の可能性が検討された。しかしながら、崩壊が発生しそうな斜面であることまでは分かっても、斜面のどの箇所がこういった形態で崩壊するのかまでの事前想定が難しく、岩盤斜面を点や線で計測する接触系のモニタリング手法には現時点で限界があり、広範囲を非接触で把握する手法の有効性と今後の開発発展を期待する旨の報告がなされた⁶⁾。

寒地土木研究所では、これら委員会の趣旨や提言に沿って様々な研究を行ってきた。それらを総括する形となる大規模岩盤崩壊災害を減らすための今後の調査評価方法の提案を 3 章で、それらに対応した個別の研究内容と現在取組中の研究成果の一部を 4 章で紹介する。

3. 大規模岩盤崩壊災害を減らすための調査評価方法の提案⁷⁾

岩盤斜面の調査・評価に当たって、突然の災害を少しでも減らすための調査評価方法のフローとして、図-2 を提案する。その手順として、先ず、事前の準備として、災害履歴や地形発達史を考慮した上で、個々の斜面崩壊の崩壊メカニズムから調査範囲における“場”としての素因・誘因を明らかにし、崩壊モデルとして整理を行っておくことが重要である。その上で、評価対象斜面に対し、調査から現在明らかとなっている地形・地質状況等を基に崩壊メカニズムを決定することになる。ただし、一般的な調査量では、地山内部の潜在的な不連続面や不安定化に繋がる地質的要因を全て把握しきれていない場合もあり、後に想定外災害へとつながる可能性も考えられる。

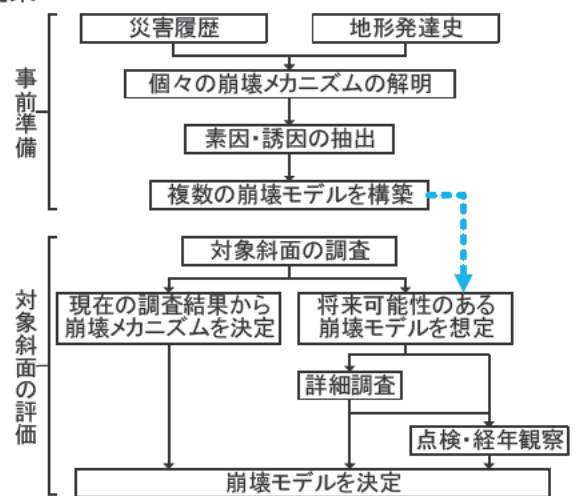


図-2 多様な岩盤崩壊モデルに対応した調査評価方法フロー⁷⁾

その予防として、事前に準備しておいた崩壊モデル群から、地形地質条件やまだ顕在化していない潜在要因も含めて合致する可能性のある崩壊モデルを全て抽出した上で、想定される様々な崩壊メカニズムに対応した詳細な調査を適切な箇所で実施することにより、想定された多様な崩壊モデルの可能性を一つずつ消していき、予測の精度を上げることになる。それでもなお可能性を拭い去れない崩壊モデルについては、モデル中の未該当項目を参考として、目的と箇所を明確にした点検やモニタリング等を実施し、経年的に潜在的な斜面の不安定化要因の発現を観察し続けることで、突然の災害を可能な限り防止しようという考え方である。このことは、想定される崩壊パターンを一つに絞りきって対策等を行うのではなく、可能性のある複数の崩壊パターンをハザードとして全て抽出した上で、崩壊が起きてしまった場合の影響度を考慮した上で対応するという考え方⁸⁾にも繋がるものである。

4. 岩盤斜面に関する研究の取り組み

4. 1 崩壊履歴の蓄積と分析

地象・気象状況の似た地域においては、崩壊の素因や崩壊形態が類似したものとなると考えられることから、地域の斜面防災を考える上で、崩壊履歴の整理分析により過去の崩壊発生状況を事前に把握して置くことは、斜面の安定性を評価する上で、今後起こりうる崩壊の規模と頻度の目安を得られる点でも有益であると考えられる。また、崩壊履歴を分析することで、こういった地形・地質状況の地域において、崩壊の危険性が高いかという、ある程度の面的な絞り込みができるだけではなく、調査地域に多くみられる崩壊形態や崩壊の地形・地質的特徴を前もって整理しておくことで、現地調査を行う際の着目点の明確化と崩壊危険要素の見落とし防止にもつながる。斜面崩壊の危険性を評価するためには、現地の斜面状況から得られる様々な情報を基に、幾つかの崩壊形態の可能性を仮定した上で、詳細な現地調査、安定解析、計測・監視などの検討を重ね、将来起こりうる想定すべき崩壊形態を絞り込む必要がある。その際にも、過去の崩壊事例の知見の集まりともいえる履歴情報は極めて重要な情報といえる。

岩盤斜面崩壊の防災にあたっては、「いつ(When)、どこ(Where)の岩盤斜面(Where)が、どのように(How)、どのくらいの規模(How many)で崩壊し、保全対象の被害額はいくら(How much)になるのか」という2W3Hを、前もって把握しておく必要がある。その内、「いつ」については、現在の調査技術では正確に予測することは困難な場合が多く、計測や監視によって崩壊に繋がる斜面変状を捉えて推測することしか出来ないのが現状である。ただ、崩壊発生前には何

名称	地質名	前兆現象	地質	前兆発生時期	
				落石等	変状
東北線浅虫	流紋岩質凝灰岩	約1ヶ月前の台風豪雨でクラック発生	火山岩		30日前
福知	中生代:火山岩主体	2時間前の小崩壊、2-3日前にクラック確認	火山岩	2時間前	2日前
R305越前山甲	火山砕屑岩	約1時間前から小落石頻繁に発生	火砕岩	1時間前	
R231太島内	火山角礫岩	南西沖地震(1993.7.12)直後に落石あり	火砕岩	48日前	
R229 豊浜	安山岩質水砕破砕岩	約30分前にトンネル天端から砂が落下	火砕岩	30分前	
R229 第二白糸	安山岩質水砕破砕岩	巻きだし部覆道上に落石	火砕岩	115日前	
"	安山岩質水砕破砕岩	断続的な落石と変状が継続	火砕岩	3日前	1日前
飯山線高場山	第三紀層:泥岩	前年4月以降のトンネル変状	正常堆積物		300日前
高徳線白鳥・引田間	和泉層群:砂岩・頁岩	約2年前にクラック確認	正常堆積物		730日前
真名川原石山	手取層群:砂岩・礫岩・頁岩	1973年9月以降小崩壊が頻発	正常堆積物	168日前	
"	手取層群:砂岩・礫岩・頁岩	2月18日の崩壊直後にクラック確認	正常堆積物		215日前
武甲山	秩父帯:輝緑凝灰岩・石灰岩	前年7月以降亀裂拡大、7日前から落石	付加体堆積物	7日前	450日前
R33柳谷	秩父帯:砂岩・粘板岩	約3ヶ月前にクラック確認、7月1日小崩壊	付加体堆積物	19日前	
R327小八重	四万十帯:頁岩	4月20日クラック確認	付加体堆積物		41日前
R158猿なぎ	粘板岩・チャート	5日前から落石が頻繁に発生	付加体堆積物	5日前	
R333北陽	緑色岩・チャート・石灰岩	法面の変状が12年前と7年前に発生	付加体堆積物		12-7年前
R336えりも町	日高変成岩類	前日から当日に小崩壊発生	付加体堆積物	39-11時間前	

表－1 岩盤崩壊における前兆現象とその発生時期⁹⁾

かしらの前兆現象があると考えられるため、崩壊事例文献等において、崩壊発生前の変化やその発生時期が確認できた事例を表－1に示す。いずれの事例でも、崩壊発生後に振り返り、あの時の変状現象は崩壊に繋がる前兆ではなかったかと推察される程度であり、崩壊を明確に予知できる情報とは言えない確からしさであり、岩盤崩壊の予知・予測の困難さを改めて示す情報である。

4. 2 地形発達史を考慮した岩盤斜面の評価

岩盤斜面を適切に評価するためには、崩壊の素因を漏れなく把握し、今後起こり得る多様な崩壊のパターンを全て想定した上で、現状での崩壊の起き易さや安定度などを評価する必要がある。この崩壊の素因やパターンを把握するにあたっては、前述した周辺地域の崩壊履歴の分析が重要となるが、個々の崩壊事例における素因を局所的視点で調べるだけではなく、これら複数の素因が生じるに至った調査地の被ったテクトニックな作用を知った上で、より広範囲の地域の“場”としての崩壊の素因を地球科学的なマクロな視点から十分に把握した上で、現在の斜面の成り立ちを理解し、今後起きるかもしれない崩壊形態をあますところなく推測する必要がある。

2章で述べたように、凝灰岩や水冷破碎岩などの火砕岩類から構成され、比較的亀裂密度が低いことから、崩壊規模の大きな崩壊事例の多かった北海道日本海沿岸域に比べ、えりも地域では、亀裂が多いことから細かな崩壊が頻発することで、大規模な崩壊は起こりづらいと考えられていた。そのため、えりも町での大規模岩盤崩壊の発生を受けて、えりも地域における岩盤崩壊の特徴を把握するため、寒地土木研究所では、地質踏査に基づいたえりも地域の地史の分析から、現在の斜面形状の成り立ちと場としての素因について研究を行った¹⁰⁾。

4. 3 事例に基づく崩壊形態モデルの分類⁹⁾

過去の大規模岩盤崩壊事例を収集分析によると、断層・構造的節理や亀裂の風化・劣化などが大半の事例で崩壊の素因として挙げられており、その他にも亀裂の進展・連結や流れ盤構造なども注目項目となっていることから、大規模岩盤崩壊の発生には亀裂の関与が大きいことが見て取れる⁹⁾。この亀裂によって、岩体が斜面から分離し、その後移動する現象が岩盤斜面崩壊であると考え、崩壊の運動像が一目で分かるように、崩壊岩体を取り巻く分離面の組合せに基づいた岩盤崩壊の3次元モデル化を行った(図-3、表-2)。斜面形状は、崩壊岩体の側面を隔する分離面を伴うか否かに基づき、側方拘束型(C)と側方非拘束型(N)に区分した。分離面は、背面(B)・側面(S)・上面(U)・底面(L)の4種類とし、これら分離面の組合せで分離した崩壊岩体を表現した。崩壊岩体を区切る分離面の内、崩壊の最終段階で破壊したと推定される分離面を最終分離面として、崩壊以前に把握可能と推定される分離面を確認分離面として、単純な分離面と区別した。また、分離面から見た崩壊岩体の分離・移動状況から崩壊形態を4種類に定義した(表-3)。

文献等に基づき、50事例の既往大規模岩盤崩壊について、3次元崩壊形態モデル図、最終分離面・確認分離面の区別を付記した分離面組合せと、崩壊状況や崩壊の主因・伏在要因となった分離面情報、崩壊の誘因と崩壊の直接的引き金(トリガー)を記載した図表にとりまとめた。

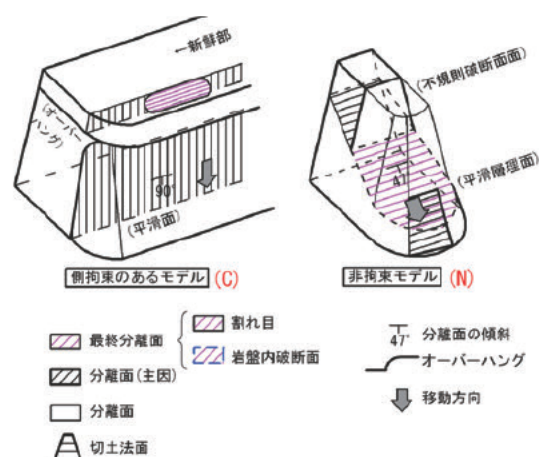


図-3 3次元崩壊形態モデル図例⁹⁾

表-2 崩壊形態モデルにおける記号凡例⁹⁾

斜面形状	C: 側方拘束型斜面(Controlled)
	N: 側方非拘束型斜面(Non-controlled)
分離面	B: 背面(Back-plane)
	S: 側面(Side-plane)
	U: 上面(Upper-plane)
	L: 底面(Lower-plane)
分離面組合せと側方拘束状態	BS: 背面・側面(C型斜面)
	BSU: 背面・側面・上面(C型斜面)
	BSL: 背面・側面・底面(C型斜面)
	B: 背面のみ(N型斜面)
	BU: 背面・上面(N型斜面)
	BL: 背面・底面(N型斜面)
確認分離面:	崩壊以前に把握可能と推定される分離面
最終分離面:	崩壊岩体を区切る分離面の内、崩壊の最終段階で破壊したと推定される分離面

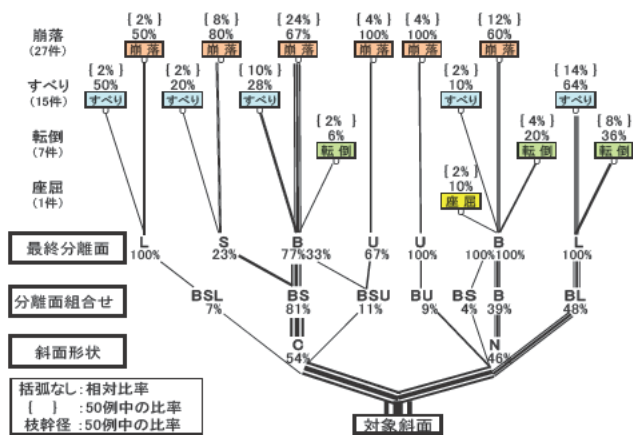
表-3 崩壊形態の定義と事例数⁹⁾

		崩壊岩体の移動方向	
(全50例)		主に前方に移動	主に下方に移動
分離面に対する岩体の移動状況	主に分離面沿いに移動	すべり 15例(30%)	座屈 1例(2%)
	分離面から分離して移動	転倒 7例(14%)	崩落 27例(54%)

表－４ 大規模岩盤崩壊事例の崩壊形態モデルとその諸元（文献 9）からの抜粋）

崩壊名	豊浜	第2白糸B(1回目の崩壊)	第2白糸C(2回目の崩壊)	4北陽	5えりも
分離面	ⓑS	ⓑS	BSL	B(L)	B(L)
モデル					
崩壊状況	斜面と側面中段～下段が分離した崩壊	斜面から分離した崩壊	主断面は前面開口、側面は上部開口	流れ壁によるすべり	斜面に平行な2方向の亀裂に沿ったすべり
主因	斜面に平行で下部でオーバーハングする主断面と、これに斜交する高角な右側断面	斜面に概ね平行な高角分離面の主断面と、これに斜交する高角な右側断面	3方向の分離面	斜面上部の開口亀裂 斜面下部の亀裂を伴う流れ壁亀裂	流れ壁と高角受け壁系の斜面に平行な亀裂
伏在要因	主断面と同じ方向の分離面	斜面下部にオーバーハングが不規則に分布	背後の急立流れ壁分離面	火砕岩上の石灰岩・チャートキャップロック トッピングクレーブ 自重・地下水による岩盤劣化 流れ壁亀裂の強度低下 [3層間の記録的豪雨] [斜面下部の産物堆積]	基底の流れ壁亀裂
誘因 [トリガー]	崩壊前の斜面下部にオーバーハング 岩盤内の亀裂が風化で進展 水結晶・凍結融解で岩質劣化 亀裂凍結で間隙水圧上昇 [断層面の強度低下]	斜面下部にオーバーハングが不規則に分布 様々な要因で分離面が進展 含水比増大で強度低下 [背面分離面の強度低下]	白糸Bの崩壊で片側方岩体が欠如 岩盤下部 側面の強度低下 岩盤下部を支持する岩盤の強度低下 [片側方岩体の欠如]		割れ目充填層(白色部)の凍結 暖気による融雪水の浸透 [切土と斜面の小崩壊] [地震動]

表－５ 確認分離面と崩壊形態の関係 9)



崩壊前に 確認できる 分離面 組合せ	崩壊時に 起こりえる 分離面 組合せ	分離面組合せ毎の 崩壊形態事例数				計	該当崩壊事例番号 (黒数字: 拘束型斜面, 赤数字: 非拘束型斜面)
		崩 落	す べ り	転 倒	座 屈		
× (なし)	B	4		1		5	3, 22, 25, 50, 40
	BU						
	BL						
	BS	3	1			4	13, 27, 28, 36
	BSU						
B	BSL						
	(計)	7	1	1		9	←最も多い崩壊形態を塗色
	B	2	1	1	1	5	8, 41, 29, 5, 1
	BU	1				1	17
	BL		2	3		5	6, 7, 24, 10, 45
S	BS	1				1	18
	BSU						
	BSL						
	(計)	4	3	4	1	12	←最も多い崩壊形態を塗色
	BS	8	2	1		11	2, 19, 26, 38, 40, 42, 44, 45, 11, 12, 37
U	BSU						
	BSL						
	(計)	8	2	1		11	←最も多い崩壊形態を塗色
	BU						
	BSU						
L	(計)						
	BL						
	BSL						
	(計)						
	BS	4	2			6	15, 16, 45, 47, 21, 23
BS	BSU	2	1			3	33, 34
	BSL	1	1			2	43, 14
	(計)	7	4			11	←最も多い崩壊形態を塗色
	BU	1				1	39
	BSU						
BU	BSL						
	(計)	1				1	←最も多い崩壊形態を塗色
	BL		5	1		6	4, 5, 10, 20, 39, 31
	BSL		5	1		6	←最も多い崩壊形態を塗色
	(計)						
SU	BSU						
	(計)						
	BSL						
	(計)						
	BSU						
BSU	BSL						
	(計)						
	BSL						
	(計)						
	BSL						
BSL	(計)						
	総計	27	15	7	1	50	

崩壊前からの確認分離面と崩壊後の最終分離面を区別して三次元で図示し、崩壊に至る不安定化の誘因と併せることで、崩壊メカニズムを把握し易くなっている。2章で紹介した代表的な4事例を表－4に例示する。どの様な確認分離面の組合せの斜面では、どの分離面が最後に壊れて、崩壊形態が何であったのか、その発生比率が分かる資料として、図－4の岩盤斜面崩壊系統樹を整理した。また、どの様な確認分離面の組合せの斜面では、どの分離面組合せでどの崩壊形態を示す崩壊の可能性が高いのか、実際の調査時に判断する上で参考となる資料として、崩壊前に確認できている確認分離面組合せごとに崩壊する際に起こりえる分離面組合せを示し、該当数と崩壊形態を表－5のように整理した。

4. 4 岩盤斜面の調査・評価における UAV を活用した研究事例

2章で述べたように、岩盤に直接計測器を設置するような接触型の岩盤モニタリングによる岩盤崩壊の予知・予測は難しい中で、近年技術進歩が著しい UAV に着目し、岩盤斜面調査へ適用する新技術としてその活用方法について検討した内容を報告する。

(1) 斜面の三次元形状の把握

単地点の測量ではなく、面的に地形を知る方法としては、空中写真の航測図化やレーザ測量による方法があり、従前から、対象が広範囲な場合には有人航空機による測量が、狭い場合には地上設置型

のレーザスキャナや光波による測量が行われてきた。近年、UAV の登場により、空中撮影がより手軽になったことや、画像処理のソフトウェアやパソコンが進歩したことにより、岩盤斜面の UAV 撮影写真から SfM (Structure from Motion) 技術により簡便かつ迅速に三次元地形モデルが作成可能となってきた。また、落石の危険のある岩盤斜面では金網が施工されることが多く、このような斜面で UAV 撮影写真から三次元地形モデルを作成した場合、金網の表面がモデル化され、実際の岩盤斜面の正確な形状が再現されないことがある(図-5)。また、オーバーハングがあるような急崖斜面では、オーバーハング部下位や遷急線の上位部などが写真撮影の死角となることもある。

研究においては、急傾斜でオーバーハング等の凹地形があり、金網が施工されていることもある急崖岩盤斜面においても、死角のない地形モデルを作成するための UAV 撮影方法や地形モデル作成手順(図-6)を検証し、岩盤斜面に適した三次元地形モデルの構築方法について検討を行っている。

現地調査で亀裂面等の方向を測るにあたっては、クライミングが必要となるオーバーハング部や高比高部などではクリノメータを直接当てるのが困難となり、計測値点数の不足から、亀裂全体の走向・傾斜を正確に把握しづらい場合がある。このような場合においても、UAV による空中撮影によって亀裂分布状況の正確な把握が可能となり、前述の三次元地形モデル上で面の交差関係を表現することで、亀裂面が完全に分離したと仮定した場合の斜面から縁切られる岩体の特定と、その岩体の重心位置と支えとなっている下面の傾斜方向等から、崩落に至る運動像の正確な推定につなげられる(図-7)。

このようにして得られた斜面と開口亀裂の三次元情報を基に、4.3節で紹介した過去の崩壊事例モデルの中から類似する崩壊モデルを参照し、更なる現地調査を行うことで、評価対象斜面において今後起こり得る崩壊形態を絞り込んでいくことになる。

(2) 写真点検による変状の把握

寒地土木研究所では、斜面点検時に地上からデジタルカメラで撮影される写真の有効活用法として、背景差分法を用いた2時期の写真の変化を自動的に抽出する方法を検討し¹⁾²⁾、その手順を「写真計測技術を活用した斜面点検マニュアル(案)」¹²⁾としてHP上で公開してきた。

背景差分法とは、2枚の画像の差分からその変化箇所を把握する手法である。図-8に示すように、異なる時期に撮られたほぼ同じ構図の2枚の写真の背景差分をとることで、より客観的な変化箇所の抽出が可能となる。この手法を点検時に撮影される斜面写真に適用することで、人の眼による比較では見落とされるような斜面の変化を、より客観的に拾い出すことを目的としている。このマニュアルでは手持ちカメラによる地上からの斜面撮影を想定していたが、UAV による空中からの斜面撮影にも対応可能となるように現在研究を進めている。

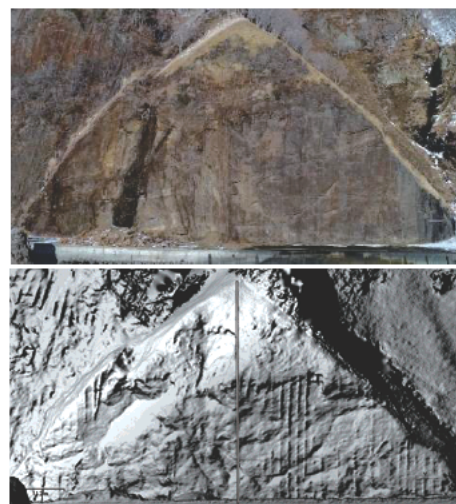


図-5 金網施工された急崖岩盤斜面の全景と地形モデル

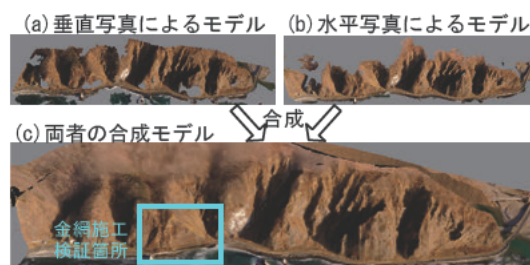


図-6 合成による地形モデルの構築¹¹⁾



図-7 開口亀裂面の三次元モデル化¹¹⁾

背景差分の抽出を行うためには、2 枚の画像の重ね合わせ処理が可能となる程度の同じ構図の写真を撮影する必要がある。斜面の点検においては、撮影に用いるカメラ機材も異なることが想定されるため、焦点距離や解像度などの写真の諸元が大きく異なった条件においても、構図がほぼ同じとなる様に、撮影及び画像処理を行う必要がある。

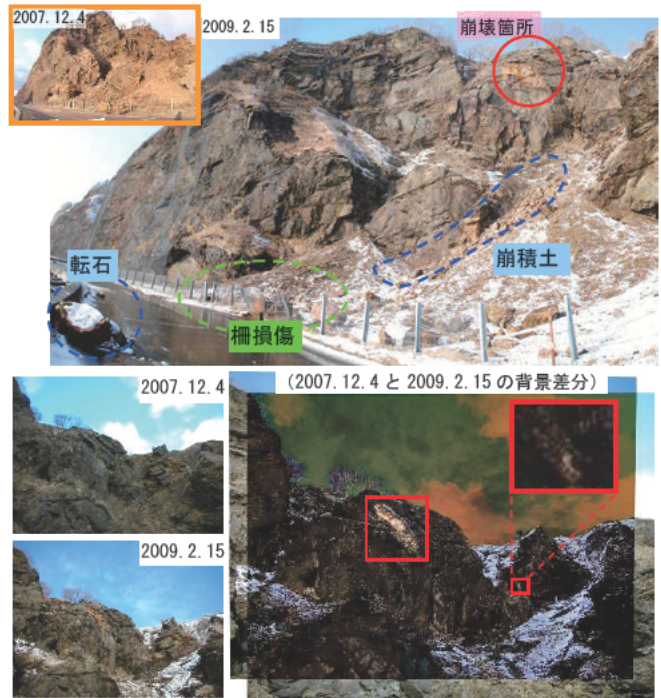
研究の途中ではあるが、現時点で明らかとなっている背景差分の抽出が可能となる撮影条件や画像処理の方法について、紹介する。

同じカメラで撮影する場合には、カメラの撮影設定を同じくした上で、同じ位置から撮影を行えば、ほぼ同じ構図の画像となる。その際の画像のブレの許容量として、画像のラップ率が 90%以上あれば、背景差分が適用可能であることが現地検証によって確認された（図－9）。UAV の運用においては、撮影時の機体の位置座標や撮影方向などが記録されているため、前回の撮影時の撮影位置や撮影方向をプログラムした上で、実際の撮影状況のブレがラップ率 90%以上になっていれば、背景差分が行えることになる。

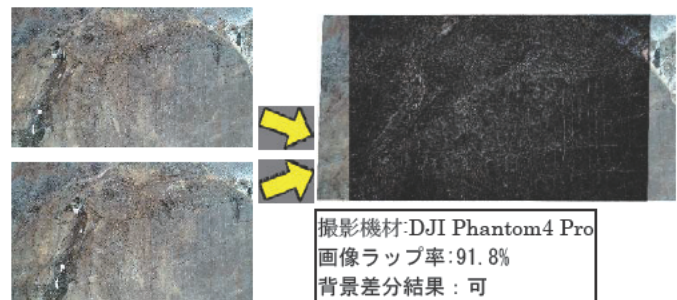
また、カメラが異なる UAV で撮影を行う場合には、画角（焦点距離）やレンズ特性、撮影条件が大きく異なるため、撮影画像の単純な画像処理だけでは、2 枚の画像の構図を合わせることは困難であった。そのため、画像のオルソ補正を行い、正射投影画像に変換することで、撮影位置や撮影条件に左右されない構図の揃った比較用の画像を準備可能とした。対象物の形状の影響を受けない正射投影画像であるため、背景差分においても極めて高精度の変化抽出が可能となることが確認された（図－10）。

また、UAV によって空中からの斜面の近接撮影が可能となったことで、従来であればクライミング等でしか確認できなかった高比高部において、亀裂の伸展・開口の把握だけではなく、色調変化等による風化・変質の進行程度などの斜面状況の詳しい把握がより手軽になり、調査箇所の漏れもなく斜面全体を把握し易くなると思われる。

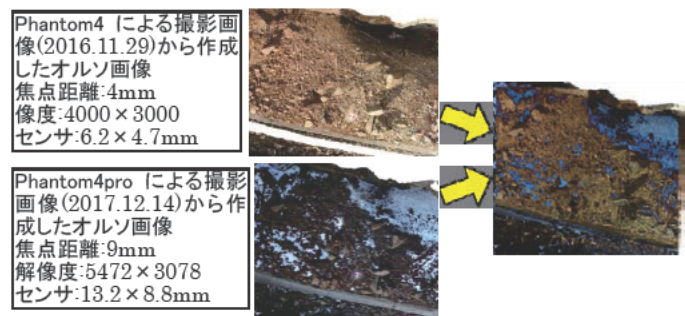
このように、斜面点検ごとの細かな違いを把握し、その経年的な変化が斜面の劣化進行に繋がるものであるのか、あるいは、ささいな変化に過ぎないのかを判断できれば、斜面が不安定化している兆候を捉えることにもつながり、突然の岩盤崩壊の発生予防や被災回避に大きく寄与できると思われる。



図－8 背景差分法による崩壊発生状況の把握¹³⁾



図－9 同じカメラによる背景差分結果¹⁴⁾



図－10 異なるカメラ撮影による背景差分結果¹⁴⁾

5. おわりに

岩盤斜面の評価を行う際の最大の課題は、斜面内部の状況、特に崩壊へ結びつく不連続面の分布状況を適切に捉えることの難しさにある。その情報が不正確・不十分であると、崩壊形態や崩壊規模の予測、ひいては崩壊発生の可否判断までを見誤る危険性がある。そういった事態を避けて評価の精度を上げるためには、図-2で提案するように、調査地域において、崩壊履歴情報を集め、地形発達史を考慮し、“場”としての崩壊の素因や起こりえる崩壊メカニズムを全て把握しておくといった事前準備の上で、初めて個々の斜面の調査評価を行う必要があると考える。

また、4.3節で紹介したような過去の崩壊形態モデル情報を整備しておくことは、どの箇所でどのような情報を取得すべきといった明確なイメージを持った適切な調査を行う際だけでなく、数値解析等による斜面安定度評価を行う上での想定崩壊モデルの設定の際にも、また、斜面の不安定化進行状況を経年的に点検していく際にも、極めて有益な参考情報となる。

本稿で紹介した様々な岩盤斜面評価に関する研究成果や考え方が、大規模岩盤崩壊発生の事前予測や被害軽減につながれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 豊浜トンネル崩落事故調査委員会：同報告書、218p、1996
- 2) 第2白糸トンネル崩落事故調査委員会：同報告書、158p、1998
- 3) 一般国道333号北陽土砂崩落調査委員会：同報告書、200p、2002
- 4) 一般国道336号えりも町斜面崩壊調査委員会：同報告書、252p、2004
- 5) 北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会：同報告書、184p、2000
- 6) 北海道での岩盤計測に関する調査技術検討委員会：北海道での岩盤計測に関する調査技術検討報告書、2006
- 7) 日外勝仁、角田富士夫、山崎秀策、倉橋稔幸：岩盤斜面崩壊の予測に向けた UAV の活用方法に関する検討、日本応用地質学会平成29年度研究発表会講演論文集、日本応用地質学会、pp.81-82、2017.10
- 8) 土木学会：岩盤斜面崩壊のハザード抽出と影響評価、155p、2014.8
- 9) 日外勝仁、倉橋稔幸、伊東佳彦：岩盤斜面崩壊事例における分離面に基づく崩壊形態のモデル化、寒地土木技術研究、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所、第767号 pp.20-26、2017.4
- 10) 日外勝仁、伊東佳彦、日下部祐基、岡崎健治：地質的観点から見た黄金道路急崖の崩壊特性と斜面点検時の着目点、寒地土木研究所月報、No.664、pp.17-27、2008.9
- 11) 日外勝仁、角田富士夫、山崎秀策、倉橋稔幸：道路沿い岩盤斜面の点検における UAV の活用、第32回日本道路会議論文集、4026、2017.10
- 12) 寒地土木研究所寒地基礎技術研究グループ防災地質チーム：写真計測技術を活用した斜面点検マニュアル（案）（平成22年3月版）、54p. URL：<http://chishitsu.ceri.go.jp/soft.html>（2018.8.17）
- 13) 日外勝仁、宍戸政仁、伊東佳彦：道路斜面点検におけるデジタル写真活用の試み（第2報）、寒地土木研究所月報、第677号、pp.17-24、2009.10
- 14) 日外勝仁、倉橋稔幸：UAVによる岩盤斜面写真に対する背景差分法の適用可能性について、寒地土木技術研究、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所、第780号 pp.13-18、2018.5

〔 土木分野におけるリスクマネジメント 〕

地質・地盤リスクマネジメント技術の開発

ーアセスメントからマネジメントへー

山岳トンネル工事におけるリスク低減に向けた研究

地すべり災害のリスクマネジメントに関する話題提供

下水処理水に残存する医薬品等のリスク評価及び除去技術

世界各地で激甚化する水災害への取り組み

地質・地盤リスクマネジメント技術の開発 ーアセスメントからマネジメントへー

地質・地盤研究グループ地質チーム 阿南 修司

1. はじめに

平成 28 年 11 月に発生した福岡市地下鉄の道路陥没事故は、その衝撃的な光景が報道され、大都市の地下に潜む危険について、社会に非常に大きなインパクトを与えた。当該事故および頻発する道路の陥没事故等をうけ、国土交通省の「地下空間の利活用に関する安全技術の確立に関する小委員会」の答申では、「地下工事における地盤リスクアセスメントの技術的手法を確立させる必要があること」、「計画・設計・施工・維持管理の各段階において、地盤リスクアセスメントを実施できるよう、関係する技術体系の確立、手続きの明確化、専門家の育成等を行う必要があること」等が挙げられている。

土木研究所では事故発生当初からの技術指導に加え、福岡市からの要請を受け「福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会」を設置し、平成 29 年 3 月に事故原因や工事再開に当たっての留意事項等を取りまとめた。また、上記の答申を受け土木研究所では関係チーム等による組織横断の「地質・地盤リスクマネジメント研究会」を組織し、地質・地盤リスクマネジメントの考え方やあり方の検討を進め、今年度から地質チームでは「地質・地盤リスクマネジメントの基本体系の構築に関する研究」に着手し、トンネルチーム等関係チームにおいても関連する研究を進めている。

本稿は、本研究課題を始めるにあたって「地質・地盤リスク」の概念や基本的な考え方についてまとめたものである。したがって、今後の事例研究など研究の進展や研究会や有識者による委員会等の議論によって内容が変わるものであることをあらかじめお断りしておく。

2. 地質・地盤リスクの概念

2. 1 地質・地盤リスクとは

これまで地質や地盤に関するリスクという用語は、防災の分野などで様々に用いられている。

土木事業における地質のリスクとしては、脇坂¹⁾は地質に関するリスクを「望ましくない地質事象の生起確率とその事象の大きさの組み合わせ」と定義した上で、「土木地質の場合には地質事象の生起確率が未定の場合が多いため、「土木地質の不確実性」と呼ぶべきであろう」としている。また、全国地質調査業協会連合会²⁾でも、地質リスクを「地質に起因する事業リスクで事業損失とその不確実性」と定義し、「地質リスクは建設事業においてその建設コストに極めて大きな影響を及ぼす地質、土質、地下水などに係るリスク」のことを指すとしている。

一方、ISO31000 (JIS Q 31000 リスクマネジメント・原則及び指針) ではリスクは「目的に対する不確かさの影響」と定義され、不確かさとは「事象、その結果またはその起こりやすさに関する、情報、理解または知識が、たとえ部分的にでも欠落している状態」、影響とは「期待されていることから、好ましい方向または好ましくない方向に乖離すること」をいうとされている。地質・地盤について ISO31000 流に定義すると「当該事業の目的に対する地質・地盤の不確かさの影響」となり、さらに細かく読み替えてみると

目的	当該事業や工事を経済的、合理的かつ安全に進めること
不確かさ	地質・地盤の状態に関する『情報』や『理解』が一部欠落している状態
影響	当初の想定と設計条件が（好ましい方向にも好ましくない方向にも）乖離し、結果として工費や工期に変更が生じたり、最悪の場合事故が生じたりする

ということになる。

従来の土木事業における地質のリスクと ISO31000 流のリスクのとらえ方はほぼ同じものであるが、影響として好ましい方向も含めたとらえ方である点が大きな違いである。本稿では「土木事業における地質・地盤リスク」を、事業のながれの中でどのように取り扱うべきかというリスクマネジメントの観点で、後者の考え方にそって議論することとしたい。

2. 2 地質・地盤の不確かさとは

前節のとおり「地質・地盤の不確かさ」は地質・地盤の状態に対する情報と理解が部分的に欠落している状態と読み替えられるが、として自然的な要因と人為的な要因の組み合わせによって生じるもので

ある。このうち、自然的な要因は、地質・地盤の状態そのものに起因し、地質・地盤の状態の把握が十分に行えないことで設計条件や施工条件との乖離が生じるようなはじめから存在する不確実性である。一方、人為的な要因は上記の自然的な要因について、事前の調査を怠ったり、地質調査の情報を軽視したりすること、各段階で自然的な要因の情報が正しく伝えられない、さらには地質・地盤の評価の過程で発生するなど、主に自然的な要因の取り扱いの過程で発生する要因といえることができる。

2. 3 自然的な要因

○ 影響の大きさの問題

自然的な要因には不確実性があるものだけではなく、事業や工事の区域に存在することで著しく好ましくない結果を生じるものも含まれる。このような地質現象や地質・地盤の要素は、計画や調査などのより早い段階で存在を把握し、事業の計画や構造物の設計上問題を生じるか否かの判断を行う必要があるが、こういった要素への対応について指針や基準に明文化されたものはごくわずかであり、判断の基準も明確ではない。全国地質調査業協会連合会の「リスクスコア」のように、結果と起こりやすさの組み合わせによる判断が適用できる可能性があるが、地質・地盤リスクマネジメントの要素技術として検討が必要である。

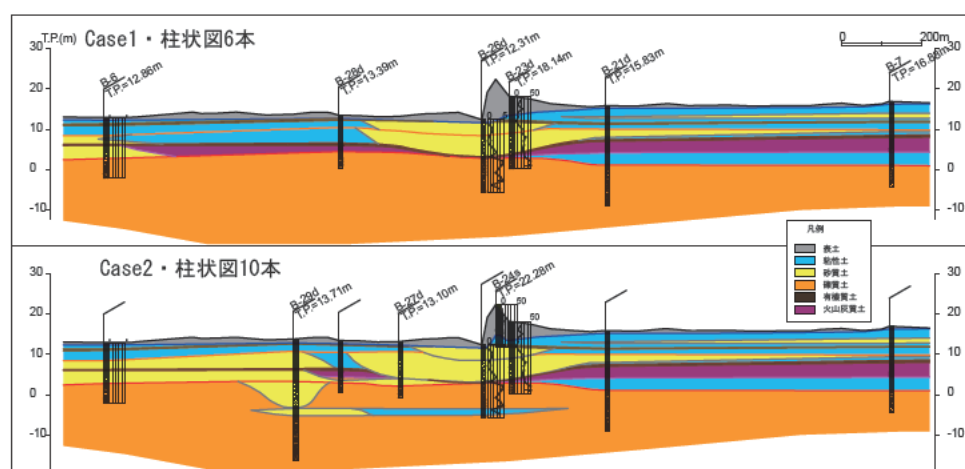
また、このような要素があると認識されている場合でも事業上の制約などにより、対策によるリスク低減やモニタリングを前提とした管理を行うことで、事業や工事を継続することがある。この場合は、不確実性について考慮する必要があることとなる。

○ 不確実性の問題 不確実性は、地層の堆積時やその後に受けた変形、断層など地質や地盤の成り立ちによって生じる分布の複雑さや、風化や変質あるいは堆積時の環境の違いに等による同一地層内の物性値の違いなどによって生じる。

図－１はボーリングの本数の違いによる地質分布の解釈の違いを示したものである³⁾。この例はボーリングの密度による地質分布の推定精度を確認するため、あえて地質の成り立ちや地形判読を考慮しない条件で断面図を作成したもので、ボーリングの追加により砂質土の分布や、粘性土の分布に大きな解釈の違いが生じ、既往のボーリング箇所周辺にもその影響が及んでいる。この地域は、河川の蛇行により旧河道や自然堤防、氾濫原が複雑に入り組んでおり、既往の地質調査の情報や地形判読などによって地層の成り立ちについて考慮した上で、その分布の推定が必要なケースである。

地層の成り立ちが推定できる場合であっても、地下の状態は直接確認することが出来ないものであり、限られたボーリングなどの点の情報をつなぎ合わせることで想定した地質や物性値の分布は、調査・設計段階で想定したものと施工段階で出現する状態には差が生じることは避けられず、時には想定に大きな誤りも生じることもある。この点は、不確実性を規制する大きな要素となる。

博多駅前陥没事故の報告書⁴⁾では「ボーリング等の地質に関するデータは地下空間の限定的な情報であり、たとえ多くの調査を実施しても地下空間を詳らかに把握することには限界があることから、施工の安全性を事前に完璧に確保することには自ずと限界がある。(中略)地下空間に関する調査については効果的・効率的に行うとともに、その目的に照らして必要かつ十分なものでなければならない。」と



図－１ ボーリング数量による地質分布の解釈の違い³⁾を一部修正

している。

ここで問題となるのが、調査を必要かつ十分に行うという点にある。不確実性を減ずるには調査密度が高ければ高いほど良いのは当たり前だが、コストや工程の制約も考えると、どこまで調査を行うべきかを明確に示すことは容易ではない。これまで述べてきた地質・地盤の不確実性という面で考えると、事前に既往の知見や地質調査結果からその箇所の地質・地盤の複雑さや不均一さをある程度把握し、それに応じた調査密度で「地質・地盤の不確かさ」を評価するという概念が必要となる。

2. 4 人為的な要因

自然的な要因が存在するにもかかわらず事前の調査を怠ると、好ましくない結果を引き起こす可能性がある。特に、著しく好ましくない結果を引き起こすようなものについては、文献調査や地形判読などにより早い段階でその存在を明らかにする必要がある。

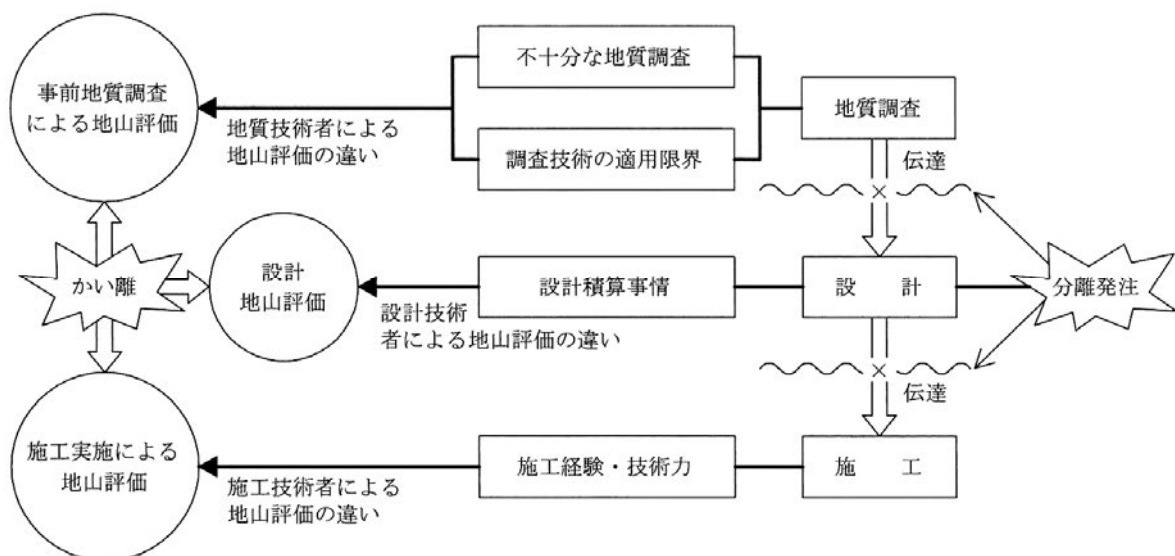
図－2は、トンネル工事において事前の地質調査と施工実績において生じる地山評価の違いの要因を概念的に示したもので、人為的な要因による不確実さの原因として、地質調査の情報が設計を行う側に正しく理解されないことや、各段階で地質の解釈や不確実さがの情報が正しく伝えられないことをよく表している。このような不確実さを減ずるには、地質調査の結果に不確実性について明確にすることや、3者会議（発注者、前段階の実施者及び後段階の実施者による合同会議）のような情報共有の場を設けるなど、コミュニケーションと協議が重要である。

3. 地質・地盤リスクマネジメントの体系化にむけて

3. 1 リスクアセスメント

これまで様々な事業で行われてきたと思われる地質・地盤に関するリスクマネジメントは、工法の選定や設計方針の確定のための地質・地盤の評価にポイントをおいたものであり、ISO31000ではリスクアセスメントに相当するものである。事業初期の段階で調査を入念に行ない、事業の計画等に反映するというフロントローディングを重視したものである。しかしながら、実際の事業においては、事業の進捗に伴い、調査や設計の段階では標準値の採用や仮定するしかなかった地質・地盤の条件が、施工段階で確認できるようになるなど、事業の進捗に伴って不確実性が低減していくことが多い。当初の想定と確認された条件が異なった場合の考え方や、事業の段階が進む毎の継続的なリスクの評価と対応の決定という視点が乏しいものであった。このため、事業初期段階において十分な現地の情報が無いにもかかわらずいたずらに高度な試験や解析を実施するなど、2. 4で述べたような人為的な不確実さによる好ましくない結果を生じる原因となることもあったことは否めない。

これに対し、全国地質調査業協会連合会²⁾の提案する地質リスク調査検討業務は、事業の各段階で地質リスクアセスメントと合同会議（リスクコミュニケーション）を行って、必要に応じた地質調査の追



図－2 人為的な要因の発現事例⁵⁾

加を含めアセスメントの結果を次の段階への引き継ぐというながれを示しており、アセスメントからマネジメントに一步近づいた考え方となっている。

小委員会の答申では、計画・設計・施工・維持管理の各段階における地盤リスクアセスメントの現状と課題として、「その技術的手法が必ずしも確立されていないため、地盤リスクに対する評価についての技術向上が求められる」とし、今後の方向性に対応策として「国は、関係する学界等の協力を得て、地下工事における地盤リスクアセスメントの技術的手法を確立させる必要がある」こと、「計画・設計・施工・維持管理の各段階において、地盤リスクアセスメントを実施できるよう、関係する技術体系の確立、手続きの明確化、専門家の育成等を行う必要がある」ことを挙げている。また、「具体的には計画から設計、設計から施工といった次の段階に進む際には、いわゆる“3者会議”（発注者、前段階の実施者及び後段階の実施者）を設置し、前段階で得られた技術的知見や情報等を確実に伝達する必要がある」という点と、「維持管理段階へ移行する際にも、当該施設の管理者が留意すべき事項をとりまとめた、いわゆる“取扱説明書”を作成し引き継ぐことも必要である」という点を挙げている。ここでも「リスクアセスメント」という言葉が用いられているが、内容的にはリスクマネジメントにさらに近い考え方が示されており、特に重要なのは、「手続きの明確化」と「前段階で得られた技術的知見や情報等を確実に伝達する」という点である。

3. 2 リスクアセスメントからリスクマネジメントへ

リスクアセスメントそのものはもちろん重要であるが、地質・地盤の不確かさは、通常調査の進展によって不確かさを減じるものであり、事業の各段階でその時点の最新の地質・地盤の情報に基づいて評価し、リスク対応の意思決定を行うというプロセスを繰り返していくことで、事業のながれのなかで一貫したリスクへの対応をはかることができる。そのためには、事業者や受注者等の関係者全員で地質・地盤リスクを共通に理解すること、リスク対応のための意思決定を明確な役割分担のもと合理的に行うこと、地質・地盤の不確かさの情報とリスク対応の関係を事業の各段階で引き継いでいく、という点が重要である。「地質・地盤リスクマネジメント」はこういった一連の活動を指すものとする。

4. おわりに

現在、地質チームでは関連する各チームの協力を仰ぎながら

- ・地質・地盤リスクマネジメントの基本理念や体系の全体像の提示に向けた検討
- ・関係者の役割や共有すべき情報の内容・記録の考え方の検討
- ・CIM との連携や地盤情報 DB の活用
- ・実務的で見逃しの少ないリスクアセスメント手法やリスクの明示方法の検討
- ・技術の確保や人材の活用

といった項目について、本省、地整、関連学会や業界団体等とも連携しながら取り組んでいるところである。

また、「地質・地盤リスクマネジメント」の導入にはある程度のコストや作業の増加につながるものであるため、これまでリスクマネジメントとは意識されずに行われている手続きや判断など組み込みが可能なものを最大限活用し、さらに事業の規模や内容によって簡略化を図るといった実効性を考慮したものとする必要があると考えている。

【参考文献】

- 1) 脇坂安彦：土木地質におけるリスクとその管理、独立行政法人産業技術総合研究所、地質調査総合センター第 10 回シンポジウム、地質リスクとリスクマネジメントー地質事象の認識における不確実性とその対応一、pp.11-14、2008.3
- 2) 全国地質調査業協会連合会：地質リスク調査検討業務発注ガイド、44p.、2016.10
- 3) 阿南修司：地盤情報の精度が液状化判定に与える影響について、日本応用地質学会、平成 25 年度研究発表会講演論文集、pp.169-170、2013.10.
- 4) 福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会：福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会報告書、国立研究開発法人土木研究所、2017.3.
- 5) 土木学会：より良い山岳トンネルの事前調査・事前設計に向けて、2007.5

山岳トンネル工事におけるリスク低減に向けた研究

道路技術研究グループトンネルチーム 日下 敦

1. はじめに

山岳トンネルの計画・設計・施工体系は、他の土木構造物とは大きくことなる場合が多い。

山岳トンネルと比較すると、他の構造物では想定される作用荷重が明確である。また、構成する材料は、鋼材やコンクリート等、均質で力学的特性が既知のものが用いられる。したがって変形や応力状態の検討は一般的に取り組み易く、数値解析により予測された結果を評価することに困難を伴うことは多くはない。当然のことながら現在の技術をもってしても解明されていない現象も存在するが、様々な手法により所定の安全率を確保すること等により力学的な安定性は確保されていることがほとんどである。施工においては、一般には設計されたとおりの構造物を構築する。加えて、計画においても、これらの前提をもとに検討が行われる。

一方、山岳トンネルの場合は、設計の前提条件においても不明確な部分が多い。トンネルの支保構造に作用する荷重は、土被りの大きさや Terzaghi の緩み土圧等の考え方をを用いて概ね推測はできるものの、掘削前に明確に算定するのはまず不可能である。掘削後もトンネルの変形や支保工の応力状態から荷重を推定することはできるものの、定量的に確信を持つまでには至らない場合が多い。トンネルを構成する要素の一つである地山の力学的特性も、事前の調査によりある程度は把握できるものの、トンネルの掘削による地山の応力再配分等の影響により変形特性が変わる場合もあり、実際のところはトンネルを掘削してみるまでは不明確な部分が残る。トンネル掘削時には鋼材として鋼アーチ支保工を用いることもあるが、地山や吹付けコンクリートとの間には部分的に隙間が残る、地山からの荷重に対してどのタイミングから抵抗しているのか、明言することはできない。このような事情もあり、山岳トンネルにおいては、施工時に常に観察・計測を行い、力学的な安定性、施工の安全性、経済性等の観点から、過去の実績や経験と照らし合わせ、施工法や支保の選択に不合理さがあると判断される場合は設計の変更も行いつつ、施工を進めている。山岳トンネルは「掘ってみるまで分からない」と言われるのは、概ね上述のようなことを指していると考えられる。また、計画においても、このような事情を踏まえ、一定程度の不確実性を包含することを前提に検討が行われている。

本稿では、このような不確実性を有する山岳トンネルにおけるリスク低減の取り組みについて紹介する。

2. トンネルプロジェクトにおけるリスク共有の考え方

発注者と受注者のリスク分担割合と、プロジェクト全体に要する費用 C について、概念的に示したものが図-1 である。発注者がリスクを受け入れることなく受注者が全てのリスクを負担する場合は、受注者は安全を見て高額な契約を要求すると考えられる。逆に発注者が全てのリスクを負担する場合は、受注者はリスク低減や工費縮減に対するインセンティブを見失い、やはり全体では高額な契約となると考えられる。

日本国内における山岳トンネルの工事を概観すると、設計において不明確であった事象が施工により明らかとなった時点で、発注者・受注者双方が議論し、費用の増減に応じてい

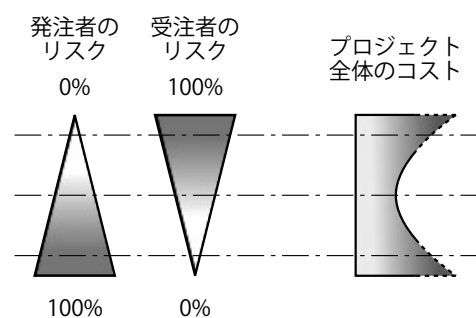


図-1 リスク分担の割合がコストへ及ぼす影響（文献 $1)$ を参考に作成）

る事例が多いと感じられる。すなわち、リスクを双方で分担し、コストの著しい増大は抑制していると思われる。

山岳トンネル工事においては、不確実性を完全に除去するのは困難であり、一定のリスクを含みながらの施工となる。このリスクを発注者あるいは受注者の一方に押しつけるのではなく、相互に共有して対応するというのが、プロジェクトを推進するうえで極端なコスト増を抑制する方法となると考えられる。これは精神論にすぎないが、山岳トンネルの工事に関係する技術者は常に意識することが重要であると考えられる。

3. 山岳トンネル工事における不確実性

前述のとおり、山岳トンネルの建設においては、様々な段階で不確実性に起因するリスクが存在する。本章では、これらの不確実性についてその例を示すとともに、地山崩落といったトラブルに対するリスク低減に関する分析事例について紹介する。

3. 1 地山の不確実性

トンネルを掘削する以前に最も直接的に地山の情報を得られる調査のひとつに、ボーリング調査がある。ボーリング調査の数を増やせば、地山の性状に関する情報量が増加し、事前の予測精度が向上する。しかし、ボーリング調査にも限界がある。一例を挙げると、ボーリング孔はトンネルの掘削断面積に比べて小さいため、トンネル掘削の全体像を把握できない場合がある。地層が成層構造であると仮定すれば、2本のボーリングデータからボーリング孔の間の地層を類推することができる。しかし、地層境界が完全な平面であることはほぼ無く、図-2のような局所的な凹凸についてはボーリング本数を増加させても完全に把握するのは困難である。また、ボーリング調査を行った箇所に巨礫が偶然にも存在すれば、当該箇所は非常に良好な地山であると誤解する恐れがある。これらはトンネル掘削中に坑内から前方にボーリング調査を行う場合も同様である。

トンネルの土被りが大きい区間については、ボーリングで直接的な地山情報を得るのは、費用対効果等の面で非合理的となる場合が多い。土被りが大きい区間の地山の性状を類推するためには、弾性波探査が多用される。しかし、弾性波探査にもやはり限界がある。例えば頁岩では、地山の深い場所で地山の自重により圧縮応力場となっていれば、亀裂が密着して弾性波速度も速い地層、すなわち良好な地山として検出される。しかしトンネルの掘削に伴う応力再配分により地山がルーズな状態になれば、あたかも並べた麻雀牌を両手で押さえていた軸力を失うかのように、自立性も悪く、見かけの弾性係数としても小さくなることもあり、事前の調査結果よりも悪い地山として施工時に評価されることになる。

調査を行うことでトンネル掘削前に地山の情報を多く得ることが重要であることは論を俟たないが、上述したように、不確実性を完全に除去するのは困難をとまうと考えられる。

3. 2 施工の不確実性

地山の不確実性に対するトンネル施工時の対策のひとつとして、補助工法の適用がある。近年では、トンネル掘削時の天端の不安定対策として、長尺鋼管先受け工法が用いられることが多い。これはトンネルの掘削面である切羽から斜め前方に鋼管を並べて打設することにより地山の抜け落ちを支持するとともに、鋼管から注入により地山改良を行い、鋼管間からの地山の抜け落ちも抑制するなどの効果を期待するものである。この工法は不良地

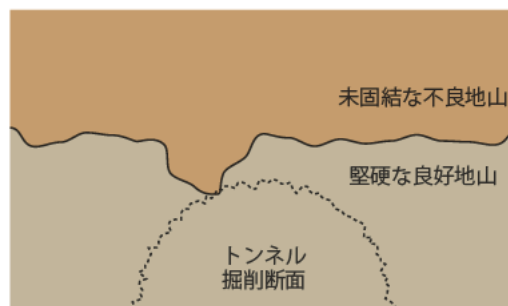


図-2 事前調査では把握が困難な地層の局所的な凹凸のイメージ

山において安全に施工を進めるうえで多くの実績を有する工法であるが、こういった工法においても不確実性を完全に除去するのは困難である。とくに鋼管間からの抜け落ちを防止するためには、鋼管間の地山に注入材を確実に行き渡らせる必要があるが、注入材と地山の相性等によっては想定するとおりに改良体が形成されない場合がある。想定通りの改良体が形成されているかどうかはチェックボーリングにより確認することも可能であるが、チェックボーリングにより新たな水みちを形成する恐れもあり、闇雲に行うことは得策とならない場合もある。

3. 3 施工時の調査や補助工法による地山崩落の低減

トンネル工事においては地山や施工の不確実性に起因する様々なリスクを除去するために、現場において各種の取り組みが行われている。その代表的なものとして、施工時の調査や上述した補助工法の採用があるが、ここでは、それらが地山崩落といったトラブルに対するリスク低減にどの程度寄与したのかについて、実績を簡単に集計した事例²⁾について紹介する。

トラブルの事例としては、道路トンネルで汎用的に用いられている切羽観察記録の中で崩落の情報が記載されている断面を「崩落あり」として集計した。崩落の中には、吹付けコンクリートによる充填で対応できるような小規模の崩落から、切羽を停止させて空洞充填や支保構造の増強といった対策が必要な比較的大規模の崩落まで存在するが、ここでは分別することなく画一的に取り扱うこととした。施工時調査としては、坑内より実施する切羽前方探査を取り扱い、その中でも比較的实施件数の多い先進ボーリングを対象とし、実施の有無のみで区分することとした。補助工法は、その目的に応じて種々の工法が存在し、設計時に採用が決定していた場合や、切羽等の状況に応じて現場で採用が決定した場合など、採用の経緯も多岐にわたるが、ここでは傾向分析のために細分化は行わず、実施の有無のみで区分することとした。

図-3に、施工時調査の有無と補助工法の有無によって分類した施工時の崩落確率を示す。最上段は全てのトンネルについて集計したものであり、岩質ごとの内訳はその下に示している。補助工法を実施した場合において、施工時調査が行われていた場合（YY）と行われていない場合（NY）を比較すると、中硬質岩（層状）や軟質岩（層状）では施工時調査の実施により崩落確率が減少しているのに対し、それ以外の岩質では崩落確率の大幅な減少は見られなかった。これは、施工時に補助工法が必要となるような不良地山が出現した場合に、施工時調査により事前に地山状態を把握しておくことでトラブルの発生を未然に防止できる場合と、その効果があまり期待できない場合があり、岩質によってもその傾向が現れる可能性があることを示していると考えられる。ただし、本検討で用いたデータからは、施工時調査の目的、すなわち切羽の崩落に関連する情報を事前に得ようとしたのか、それ以外の情報を得ようとしたのか等の情報を読み取ることができなかったため、施工時調査が直接的あるいは間接的にでも切羽の崩落を防ぐのにどの程度寄与したのかは不明確である。さらに、本稿ではデータを示していないが、本検討において施工時調査を行っている事例には地域的な偏りがあり、崩落確率が施工時調査の有無による影響を受けているものなのか、地質的な地域特性を反

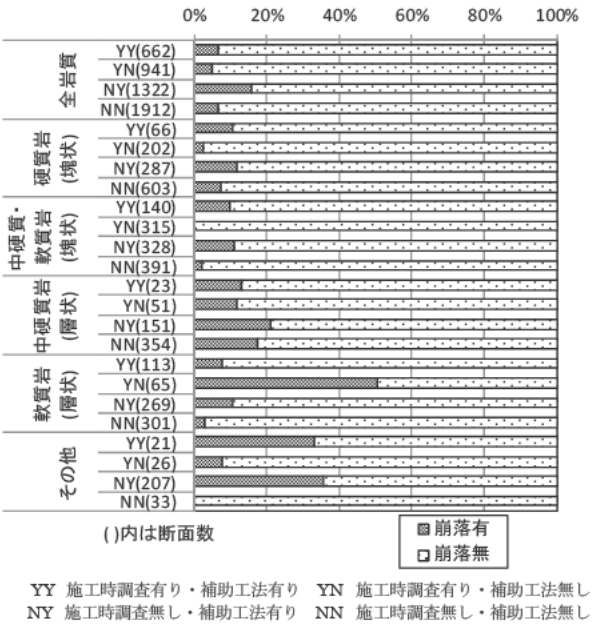


図-3 施工時調査と補助工法の有無による崩落発生確率

映しているものなのかについても区別ができていないことに注意を要する。

なお、中古生層の泥岩地山においては、割れ目の間隔や割れ目の形態、湧水の評価点が悪ければ崩落確率が高い傾向にあることなどが分かっている²⁾。すなわち、岩種によっては特定の切羽観察項目の評価点と崩落確率に一定程度の相関がある可能性があり、施工現場において得られたデータと比較することにより崩落を未然に防ぐ対策が可能となる場合があると考えられる。

3. 4 山岳トンネル工事におけるリスク低減に関する考え方

以上述べたように、トンネル工事においては、不確実な地山に不確実な施工を行っているという見方をすることもできる。地山の調査を数多く行うことで、地山の不確実性を減少させることは、それに合った費用を要する。一方で、厳密な調査を行ったとしても、トンネルを掘削して地山の状況を確認することでしか判断ができないこともある。また、多種の補助工法を併用することで不確実な地山に対する崩落等のリスクを減少させることは可能であるが、採用する補助工法に見合った費用が必要となる。すなわち、これらの不確実性に対してリスクを低減させるためには費用を要する。一方で、費用を投じたとしてもリスクをゼロにすることは不可能であるのも現実であると言え、費用対効果の面も含めて工学的な判断をせざるを得ない場面も多いと考えられる。

実際のトンネル建設においては、計画段階、概略設計段階、詳細設計段階、施工段階とステップが進むにつれて調査の精度も向上し、不確実性も徐々に減少するが、それでも完全には無くならない。このような事情があることを、発注者、受注者双方が認識し、ステップが進んでも情報を共有し、施工段階においても完全に確実なことは無いという前提で事業を進めることが、より確実な施工を行うためには重要であると考えられる。

4. 山岳トンネルの耐震対策に関する考え方

上述のように山岳トンネルの施工時のリスクは地山の不確実性に起因するものが存在する。これは施工時の支保構造の増強や補助工法の採用によりトラブル防止に資することができるが、施工完了後も不確実性として残るリスクのひとつが地震の影響である。本章では、道路トンネルにおける地震に対するリスク低減に向けた考え方³⁾について概説する。

4. 1 活断層に対する考え方

既往の山岳トンネルの地震被害事例を分析すると、地震により覆工の崩落をとまなうような比較的規模の大きな被害が発生したのは、地震により活動した活断層のごく近傍で、かつ特殊な地山条件が内在する箇所が多数を占める。ただし、その逆は必ずしも成立していないと考えられる。すなわち、地震により活動した活断層のごく近傍で、かつ特殊な地山条件が内在する箇所においても、地震による大きな被害が発生しなかった事例も見られており、耐震対策の要否を検討する上では留意が必要である。また、トンネルの寿命というタイムスパンで考えた場合に、トンネルのごく近傍で今後活動する活断層を特定するのは、現在の技術的水準では困難をとまなうと考えられる。加えて、活断層は面的な広がりを持つ一方で、トンネルは線状に建設されるため、トンネルの平面線形や縦断線形を多少変更したところで、多数の活断層が存在する我が国において完全に活断層を避けて通るのは困難であると考えられる。

これらのことを踏まえると、山岳トンネルの地震被害を低減させるためには、計画・調査段階において活断層の位置の把握に努め、可能な範囲でトンネルとの離隔を確保するとともに、地震の影響を受けやすいと考えられる特殊条件を有する区間において十分な支保構造となるように設計・施工を行うのが望ましいと考えられる。

なお、活断層に限らず、トンネル工事で一般的に称される「断層・破碎帯」は一般に、断層角礫や断

層粘土をともなっており、破碎や割れ目の程度も不均質で、幅は数 cm の単純で小規模なものから数 100 m におよぶ複雑で大規模な破碎を受けたものまである。これらは、岩質が脆弱で切羽の自立が難しいことが多く、大きな土圧が発生しやすく、湧水も多く、膨潤性の粘土を含むことが多いなど、工事を困難にする。このため、従前より、トンネル建設において注意を要する箇所とされている。

4. 2 致命的な被害の低減に資する対策

山岳トンネルにおける被害発生メカニズムは十分に解明されているとはいいがたいが、これまでの地震による被害発生状況を踏まえると、比較的規模の大きな被害が発生した箇所においては、地震により地山に大きな変形が発生し、その変形に覆工が追従できなかったことにより、覆工に圧縮破壊等の変状が発生したと想定される。

このような被害を再現することを目的とした数値解析による試算結果⁴⁾によると、地震時における外力として、土被り荷重に換算して少なくとも $3D$ (D はトンネル径) 程度を超える荷重が作用したと想定される。この荷重に対し、所定の安全率を確保するという前提で構造計算により覆工の設計を行うと、高強度コンクリートの採用や増厚等が必要となる。一方で、これらの対策を実施したとしても、地震時の地山の変形に覆工が追従できることにはならない。また、覆工に対して鉄筋補強や繊維シート貼付を実施したとしても、これらは本来、引張部材として期待されるものであり、覆工の圧縮破壊そのものを抑制する効果までは期待し難い⁵⁾。さらに、覆工に繊維補強コンクリートを採用したとしても、小規模なコンクリート片のはく落抑制には効果が期待できるものの、覆工に破壊が生じて大きな変形が発生した場合は繊維とコンクリートの付着が切れて補強効果を失う⁶⁾と考えられるため、変形に追従できず、大規模な覆工コンクリート塊の崩落抑制効果を期待するのは難しいと考えられる。すなわち、地震時に発生する地山からの極めて著しい変形に対して覆工の破壊そのものを防止することは困難であると考えられる。したがって、トンネルの耐震対策の考え方として、支保工やインバートによりトンネルの力学的な安定性を確保することが原則であると同時に、万が一覆工が破壊したとしても、大規模なコンクリート塊の落下を抑制することが重要と考えられる。

覆工が破壊した場合の覆工コンクリート塊の落下防止に関しては、過去に土木研究所で実施した実験⁷⁾の結果等により以下の知見が得られている。2 車線道路トンネル程度を模擬した半円形の覆工供試体に全周から荷重を作用させると、覆工に軸圧縮力によるせん断破壊が発生する。その際、覆工コンクリートを単鉄筋で補強しておくと、せん断破壊面においてコンクリート片のはく落が見られるとともに供試体にずれが生じたが、鉄筋は破断せず、図-4 に示すように覆工供試体の分離は抑制された。この結果は、外力により覆工に大きな変形が発生したとしても、単鉄筋を設置することにより大規模な覆工コンクリート塊の落下を抑制できる可能性があることを示唆していると考えられる。

以上のような観点から、道路トンネルにおいては、地震による影響を受けやすいとされる特殊条件を有する区間におけるトンネルの支保構造の考え方として、以下の項目に留意することが重要であるとされている。なお、ここでいう特殊条件とは、主として地山の不良箇所を示



図-4 覆工載荷実験において覆工供試体の分離が抑制された事例

すが，特殊条件に該当するか否かの判断においても一定の不確実性を有する。

- ①インバートを設置してトンネルをリング構造とし，力学的により安定な構造とする
- ②吹付けコンクリート，鋼アーチ支保工，ロックボルトに代表される支保工を十分な構造とする
- ③地震により覆工に破壊が生じたとしても，大規模な覆工コンクリート塊が崩落することのないよう，覆工に単鉄筋補強するなどの措置を講じる

換言すれば，①②は不確実な地山に対して，維持管理段階におけるリスクを低減させるために，施工時に十分な支保構造を構築しておくという考え方である。③は，地震時において覆工に破壊を生じさせるような地山からの荷重や変形は不確実性を多分に有しており，定量的な評価が困難であることも相俟って，万が一覆工に破壊が生じたとしても，覆工コンクリート塊が大規模なブロックで落下しないように対策を行っておくという考え方である。

なお，上記は主として新設トンネルに適用が可能な考え方であるが，既設トンネルの維持管理段階においては，施工時の記録が十分に残されていない場合もあり，不確実性はさらに増加する。このようなトンネルに対しては，変状対策を行うことで耐震対策を兼ねることにもなる。やや具体的に述べると，覆工の背面に空洞がある場合は，裏込め注入を行うことで均一な地盤反力を確保し，地震時の覆工の応力状態を改善することにつながる。外力性の変状が発生している場合は，覆工の補強等を行うことで，地震による外力が付加した場合の安全率の向上につながる。うき・はく離がある場合は，はく落対策を行うことで，地震時の覆工コンクリート片のはく落の抑制につながる。これらの考え方に加え，過去に地震による被害が発生したトンネルは，既往の変状が多数発生していたという事例が多く，維持管理を十分に行うことが地震被害の抑制にもつながると考えられる。

5. おわりに

以上，山岳トンネルの建設において不確実性を完全に除去することの困難さについて概括するとともに，不確実性に起因するリスクを低減させる取り組みの例について述べた。不確実性を可能な限り除去し，安全・安心，かつ経済的にトンネルを建設することが求められるのは言うまでも無い。土木研究所においても，地山の探査方法や，施工時に観察した切羽や計測した変位の評価方法，補助工法の選定手法や留意事項等について，研究を行っているところである。今後，トンネル工事における不確実性を極力除去する努力を惜しまないことに加え，残された不確実性を関係者で共有し，その対策について全員で知恵を絞るというのがトンネル工事に携わる技術者としての基本であると考えられる。

【参考文献】

- 1) Erland Kleivan: NoTCoS: The Norwegian Tunneling Contract System, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 43-45, 1989.
- 2) 角湯克典, 砂金伸治, 日下敦: トンネル工事等における地質リスクマネジメント手法に関する研究②, 土木研究所成果報告書, 平成 23 年度, No. 16, pp. 1-7, 2014.
- 3) 土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム: 山岳トンネルの地震時挙動と耐震対策に関する研究報告書, 土木研究所資料, 第 4358 号, 2017.
- 4) 日下敦, 河田皓介, 砂金伸治, 真下英人: 地震による地山の変形を想定した山岳トンネル覆工の耐荷力評価に関する数値解析的考察, トンネル工学報告集, 第 24 巻, No. I-14, pp. 1-8, 2014.
- 5) 日下敦, 河田皓介, 砂金伸治, 真下英人: 二次元静的載荷実験の再現解析による山岳トンネルの耐震対策工の効果に関する一考察, 岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 第 43 回, pp. 93-98, 2015.
- 6) 小出孝明, 砂金伸治, 日下敦: 覆工コンクリートの破壊過程に関する実験的考察, トンネル工学報告集, No. I-14, pp. 1-8, 2017.
- 7) 真下英人, 日下敦, 砂金伸治, 木谷努, 海瀬忍: トンネル覆工の破壊メカニズムと補強材の効果に関する実験的研究, 土木学会論文集 F, Vol. 64, No. 3, pp. 311-326, 2008.

地すべり災害のリスクマネジメントに関する話題提供

土砂管理研究グループ 藤平 大

1. はじめに

著者は高知県庁出向中に経験した 2014 年 8 月豪雨による激甚災害を紹介しつつ、地すべり災害の避難や緊急工事対応などの参考となる知見を紹介する。

2. 地すべり災害と行政の現状

土砂災害による人的被害を防止するためには、防止工事の実施と併用して災害発生の誘因となる豪雨時の雨量などを目安として、危険性が高まっている時期を特定した避難行動や危険箇所の監視を強化することが有効な対策である¹⁾。

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では、直接的被害を生じる土砂災害として、急傾斜地の崩壊、土石流及び地すべりが例示されている。

このうち、土石流やがけ崩れ災害については、一定の地域に存在する無数の斜面における個々の雨水の浸透を観測評価して、災害を予測することは技術的にも経済的にも困難である。そのため、降雨に起因する土石流及び集中的に発生するがけ崩れを対象にして、一定の地域内で過去に発生した災害と雨量の関係から、避難の目安となる土壌雨量指数などを用いた雨量基準（土砂災害警戒情報）が設定される^{1,2)}。居住者はこの情報などを手掛かりに避難することが期待されている³⁾。



図ー1 土砂災害（急傾斜地の崩壊、土石流及び地すべり）の紹介事例³⁾

一方、地すべりについては、個々の地すべり地内での地下水変動等を観測することにより発生の危険性を評価する手法が検討されている^{例え 4, 5)}。これらの研究成果は、個々の地すべり地ごとに、地下水変動等のさまざまな応答を再現したものであり、個々の地すべり地ごとに応答特性が大きく異なることが理解されている。しかし、一定の地域内に多数存在する地すべり観測を、すべて行うことは困難である。そこで、観測が実施されていない地すべりの長期間にわたる発生危険度を降雨から広域的に評価する取り組みが求められているが、実務向けに一般化されたものは存在しない。

また、地すべり地において地盤変位の観測が実施されている斜面では、変位量により崩壊の危険性を評価することが一般的である^{例え 6)}。ただし、実際に変位量の観測を継続していると、変位が途中で止まったり、変位の増減を繰り返したりなど、不規則な変動を示す例もあり、リスク評価の観点から崩壊までの切迫性の程度を適切に評価する手法が求められている⁷⁾。

そこで、本稿では、著者が高知県庁出向中に経験した 2014 年 8 月豪雨による激甚災害とその後の対応事例の実例^{3, 9)}などを紹介しつつ、まず、土石流等の災害に備えた避難行動の目安となる基準である土砂災害警戒情報の発表から解除の期間及び解除後 3 日間以内に発生した地すべり災害の捕捉率を調査

した事例⁸⁾を紹介し、土砂災害警戒情報を広域予測の参考とした避難にも一定の有用性を示すと思われる事例を示す。次いで、滑落崖に相当すると思われる開口亀裂が発見され、崩壊による人的被害が危惧される状況等（＝警戒を要する斜面が特定された場合）において、崩壊発生の見込みの高まり（＝切迫性）を把握する方法⁷⁾を紹介する。

3. 2014年8月豪雨による激甚災害とその後の対応事例

高知県における2014年8月激甚災害では、台風12号、11号が来襲し、それぞれ多いところで1,000mmを超える雨量を経験し、8月1～10日間での総雨量は2000mmを記録した。各地で地すべり21箇所を含む多数の土砂災害が発生した。負傷者は7名であったが、幸いなことに、死者行方不明者は0名であった。その後、県では、災害の教訓を生かすために、災害の記録や啓発のための資料を作成した。土研講演会当日に、これらの資料を利用して、災害の概要をお話する予定である。

4. 土砂災害警戒情報と地すべり災害発生について

土砂災害警戒情報発表によって地すべり災害の発生危険度の高まりを評価する可能性を探るために、地すべり災害報告の災害発生時刻と土砂災害警戒情報発表期間の対応関係について調査した。

4. 1 調査地と調査方法

調査地は、梅雨台風期(6月1日～11月30日)に地すべりが発生する地域（高知県及び徳島県）とした。これらの県では土砂災害警戒情報の発表を2007年6月から各地方気象台と共同で運用している。調査方法は、土砂災害警戒情報の発表状況及び土砂災害データベースによる地すべり災害の災害報告を照合して、地すべり災害の発生数に対する土砂災害警戒情報が発表されている期間等に発生した災害数の割合(以下、「捕捉率」という。)を求めた。地すべり災害は、降雨が終息したのちに巡視が行われて、発見される場合もあることから、土砂災害警戒情報解除からの一定時間後に災害発生と報告されているものも含めた場合の捕捉率も併せて求めた。また、分析にあたっては、太平洋側では非梅雨台風期に土砂災害警戒情報が発令されることはまれであるため、降雨の多い6月1日～11月30日を梅雨台風期、それ以外を非梅雨台風期として区別した。

4. 2 調査結果

高知県及び徳島県では2007年6月1日～2015年12月31日の期間を対象とした。表-1に結果を示す。高知県では、計18件の(a)地すべり災害が報告されていた。18件中17件が土砂災害警戒情報発表中に(c)捕捉されており、(e)一年を通した土砂災害警戒情報発表中の捕捉率は94.4%であった。2014年8月豪雨によるもの17件については、すべて土砂災害警戒情報発表中の災害であった(図-2)。捕捉できなかった1件については、2007年7月豪雨によるものである。災害発生時刻は7月14日0時であるのに対して、土砂災害警戒情報発表は、同日14時15分から翌15日午前6時35分となっていた。徳島県では、

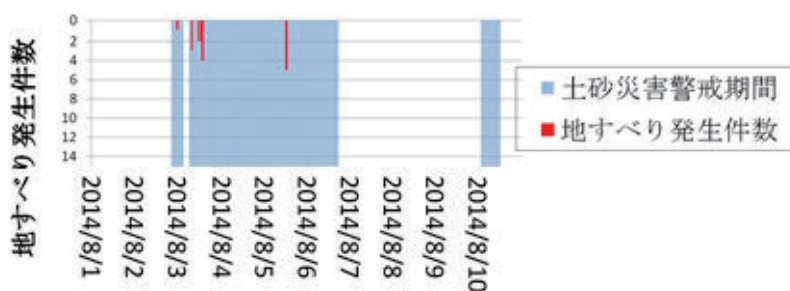


図-2 土砂災害警戒情報と地すべりの発生
(平成26年8月激甚災害における高知県大豊町の例)

表-1 各県の地すべり災害発生件数と土砂災害警戒情報による捕捉率⁸⁾に加筆修正

県名	(a)地すべり災害発生件数	(b)うち梅雨台風期の発生件数	(c)土砂災害警戒情報発表中の捕捉件数	(d)土砂災害警戒情報解除後72時間を含む捕捉の件数	(e)一年を通した土砂災害警戒情報発表中の捕捉率(c)/(a)	(f)梅雨台風期の捕捉率(c)/(b)	(g)梅雨台風期の土砂災害警戒情報解除後72時間を含む捕捉率(d)/(b)
高知県	18	18	17	17	94.4%	94.4%	94.4%
徳島県	25	22	11	16	44.0%	50.0%	72.7%

計 25 件の(a)地すべり災害が報告されていた。25 件中 11 件が(c)土砂災害警戒情報発表中に捕捉されており、(e)一年間を通した土砂災害警戒情報発表中の捕捉率は 44.0%であった。(f) 梅雨台風期の捕捉率に限定すれば、50.0%となる。さらに、捕捉できなかった 14 件のうち 5 件については、土砂災害警戒情報解除から 1.4 時間～62.3 時間以内に災害が発生したと報告されており、梅雨台風期におおむね土砂災害警戒情報解除から 3 日(72 時間)以内に発生したと報告されたものも含めた場合の捕捉数は、22 件中 16 件となり、(f)捕捉率は 72.7%となる。捕捉できた 16 件のうち 7 件は 2009 年の台風 9 号(木頭町で連続雨量 783.5mm を観測した)によるものであった。捕捉できなかった 6 件のうち 1 件は、同台風にとまなう土砂災害警戒情報の 15 時間前に発生していた。なお、同台風後の 11 月～翌年 6 月中までに 6 件発生している。大きな豪雨後、数か月から 1 年近い遅れを伴って地すべり災害が発生している可能性がある。

4. 3 降雨と地すべり災害の関係のまとめと今後の課題

高知県、徳島県の事例において以下の傾向が確認された。梅雨台風期(6 月 1 日～11 月 30 日)には、いずれの地域においても、土砂災害警戒情報期間内に地すべり災害が発生する傾向が高いことが確認できた。両県においては、地すべり災害を含めて土砂災害警戒情報の発表開始時間を設定しても、現行基準と大きく異なる閾値の設定となる可能性が示された。ただし、土砂災害警戒情報が解除されたのちに災害発生する事例も見られるため、解除設定のタイミングについては他の土砂災害とは異なる可能性がある。なお、今回の検討では、土砂災害警戒情報と地すべり災害発生のタイミングのみの分析をおこなったが、より詳細に人的被害と災害の関係を分析するためには、人的被害を生じた、あるいは避難により人的被害を免れたが被害を生じる可能性のあった地すべり災害を対象に、被害を生じた、あるいは免れた原因と対策・改善策を考察する必要がある。現在地すべりチームでは、このような観点から、調査分析を進めている。土研講演会当日にその一部を紹介予定である。

5. 崩壊の切迫性評価について

崩壊を伴う地すべりは、移動土砂の動きが緩慢な地すべりとは異なり、最終的には比較的速い速度で短時間に滑落するために大きな被害を伴う場合が多い。このような崩壊の切迫性を評価する崩壊時刻の予測式が多数提案されている。しかし、これらの予測式では、適用範囲や計算条件の設定方法などに一定の基準がないものが多く、個々の地すべり地で計算条件を設定し、計算結果を評価しなければならない。そこで、既往の崩壊予測式の課題を整理するとともに、地すべりのひずみとひずみ速度に着目した崩壊の切迫性評価手法を検討した。

5. 1 既往の崩壊予測手法と利用上の課題

土のクリープ破壊実験を行うと図-3 に示す曲線が得られる。左から順に第 1 次クリープから第 2 次、加速点を超えてから第 3 次の領域を経て破壊に至る。地すべりも類似の領域を経て崩壊に至ると想定した崩壊予測式がいくつか提案されている。とりわけ、3 次クリープに着目した既往崩壊予測式はその精度が高い。しかし、実際の地すべりは、加減速を繰り返したのちに崩壊する場合や、そのまま変位が停止する場合もある。このため、地すべりの活動が進行する過程で、現在の地すべりのクリープ段階、特に 3 次クリープ段階であるか否かを把握することは困難を伴うことが多い。

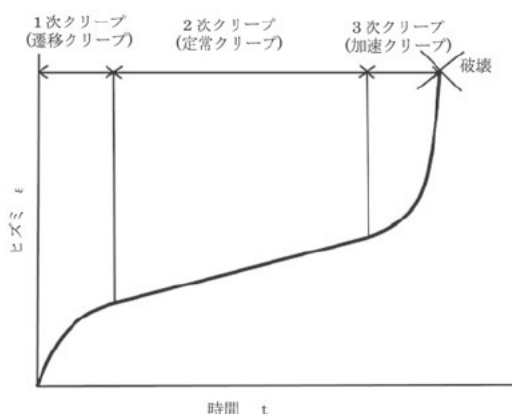


図-3 土の破壊実験におけるクリープ曲線

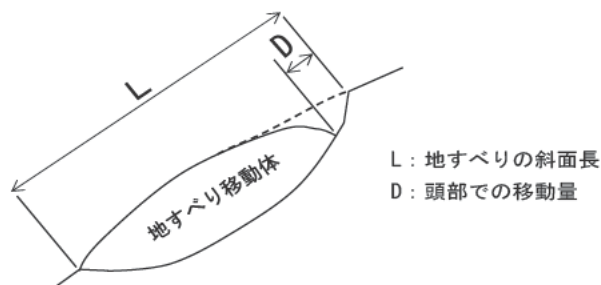


図-4 ひずみの算定方法⁷⁾

5. 2 ひずみ及びひずみ速度を用いた崩壊の切迫性評価

前節の課題を踏まえて、崩壊予測式を運用しようとする、加減速を生じるような不規則な条件下で式を適用する条件によって予測値のばらつきが生じるため、ばらつきが比較的少なく、崩壊予測式が適

用可能な時期をあらかじめ把握できることが望ましい。そこで、地すべり移動体の斜面長 L に対しての、相対的なひずみ及びひずみ速度がそれぞれどの程度まで大きな値を示した時に、空振りが少なく実用的な崩壊の予測が可能となるか（＝切迫性）を評価した。ここでは、ひずみとは図-4 に示すように、地すべり斜面長と頭部での変位量の比 (D/L) を「ひずみ」とし、1 時間当たりのひずみの増加量を「ひずみ速度」としている。結果を図-5 に示す。ひずみ ε が 2.1×10^{-3} 以上かつひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ が $3 \times 10^{-5}/h$ 以上の時に加速点が分布する範囲に入り予測手法の信頼性が高まる領域に達し、ひずみ ε が 5.7×10^{-3} 以上かつひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ が $1.3 \times 10^{-4}/h$ 以上の時に加速点が分布する範囲に入り予測手法の信頼性が高い領域に達することが明らかになった。

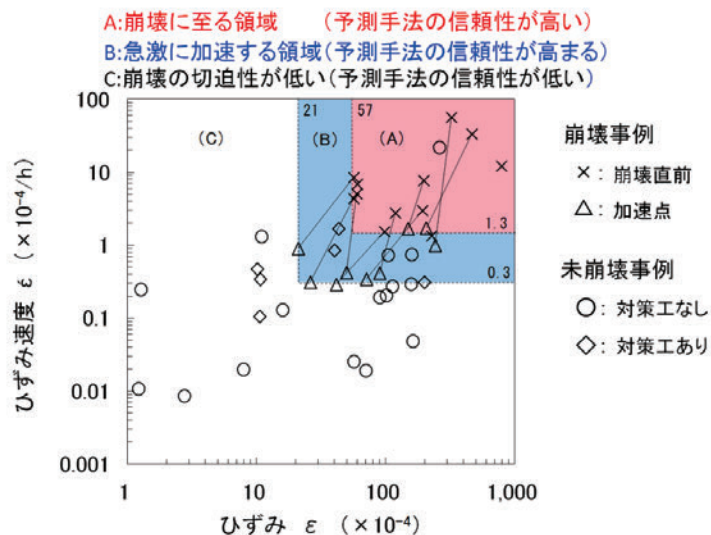


図-5 ひずみ及び歪速度の関係図 7)に加筆修正

6. おわりに

降雨に起因する地すべりの多くは土砂が緩慢に移動する現象から始まり、降雨量の増加や累積に伴い地下水位がさらに上昇すると、移動速度を増し崩壊に至ることによって、甚大な被害を引き起こすことがある。そのため、地すべり変位量や降雨量等を覚知することにより、少なくとも人的被害の軽減は可能であるという確信のもとに研究を進めている。本日はその研究成果の一部をご紹介した。

【参考文献】

- 1) 内閣府(防災担当): 避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン①(避難行動・情報伝達編)、http://www.bousai.go.jp/oukyu/hinankankoku/h28_hinankankoku_guideline/pdf/hinankankokugaidorain_01.pdf (2018.5.14 時点)、2017
- 2) 国土交通省河川局砂防部, 気象庁予報部, 国土交通省国土技術政策総合研究所: 国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案)、http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/sabo/dsk_tebiki_h1706.pdf (2018.5.14 時点)、2005
- 3) 高知県庁防災砂防課: 土砂災害啓発冊子と土砂災害危険箇所マップの全戸配布について <http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/171501/2015030500367.html> (2018.5.14 時点)、2015
- 4) 海野寿康、中里裕臣、井上敬資、高木圭介: 破碎帯地すべり地区における地下水位計測と実効雨量に基づく地下水位の降雨応答特性、日本地すべり学会誌、第45号、第3号、pp.33~40、2008
- 5) 松浦純生: 積雪地帯における降水の到達過程と地下水及び地すべりの挙動(その3)ー地表面到達量と地下水変動の関係(後)、地すべり技術、第30巻、第3号、pp.12-22、2004
- 6) 地すべり観測便覧編集委員会: いつでも、どこでもすぐに役立つ地すべり観測便覧、社団法人斜面防災技術協会、2014
- 7) 杉井良平、西井稜子、石井靖雄: 地すべりのひずみ及びひずみ速度の経時変化による崩壊の切迫性評価、日本地すべり学会誌、Vol.54、No.6、pp.11-20、2018
- 8) 藤平 大、鳥海貴裕、石井靖雄: 土砂災害警戒情報と地すべり災害発生についてー主に徳島県及び新潟県の発生データをもとにー、砂防学会研究発表会、砂防学会研究発表会、pp.B-368-369、2016
- 9) 高知県庁防災砂防課: [平成26年8月豪雨 土砂災害の記録]を作成しました <http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/171501/2016051300103.html> (2018.5.14 時点)
- 10) 藤平 大: 降雨に起因する地すべり災害発生の広域予測と崩壊予測式の適用性、日本地すべり学会シンポジウムー豪雨を誘因とする土砂災害の予測と住民避難行動へのアプローチー、pp14-17、2018

下水処理水に残存する医薬品等のリスク評価及び除去技術

水環境研究グループ 小川 文章

1. はじめに

医薬品類など、水質規制の対象となっていない化学物質（未規制物質）の中には、様々な人間活動において使用されたのち、下水道を通じて処理場に流入し、下水処理水に残存したまま水環境中に排出される物質が存在する。従来の下水処理システムは有機物、窒素、リン等の法令規制項目の適正処理を目的として計画設計されており、未規制の化学物質の除去を想定していないが、近年、水環境中に流入する多種多様な化学物質による水生生物への影響が懸念されるようになり、環境基準や排水基準化も検討されていることから、水環境中における化学物質のリスク管理や低減対策が求められるようになってきている。下水道管理者がリスク管理や低減対策を講じるためには、これらの物質の水環境中での存在実態や挙動を把握するとともに、優先的に対策を実施すべき物質を抽出し、除去・低減方法について検討していく必要がある。本稿では、化学物質のうち、高齢化や医療技術の進展に伴い、近年、特に大きな課題とされている医薬品類を対象に、実際の河川における生態リスク評価及び下水処理水の微生物担体処理技術に関する研究成果を報告する。

2. 多摩川における医薬品類の実態調査と生態リスク評価

2. 1 対象医薬品類

本研究では、流域の人口増加及び下水道普及率の上昇に伴い、渇水期の河川中流域流量の5割以上を下水処理水が占めると言われている多摩川を対象として、医薬品類の存在実態を調査した。多摩川は、山梨県、東京都、神奈川県を流れる多摩川水系の本川である（河川法河川延長：481.0 km、流域面積：1,240 km²、流域人口：約380万人¹⁾）。高度成長期の流域の都市化の影響を受けて水質が悪化したが、下水道整備や河川浄化施設の設置などにより水質改善が進み、近年の中流域（多摩川原橋）の水質はBOD 2mg/L程度で推移している（2001年以降の環境基準はB類型、BOD 3mg/L）。調査対象とする医薬品類は、国内の出荷量²⁾、実河川中での実態³⁾、および水生生物への毒性³⁾の観点から、医薬品類のうち10物質を選定した（表-1）。対象物質には抗生物質、殺菌剤、解熱消炎剤などが多く含まれ、ng/Lオーダーで水生生物に影響するものも存在している。

表-1 調査対象の医薬品類

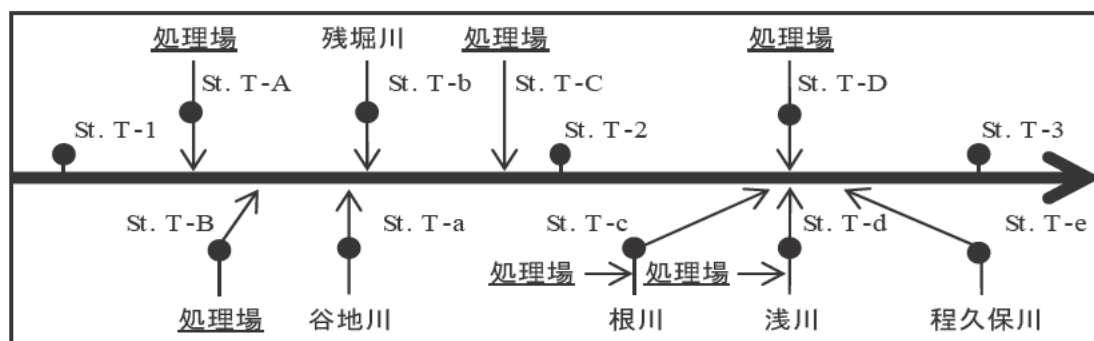
物質名	主な効用
アジスロマイシン	マクロライド系抗生物質
ベザフィブラート	高脂血症治療薬
カフェイン	中枢興奮・強心・利尿剤
クラリスロマイシン	マクロライド系抗生物質
クロタミトン	かゆみ止め軟膏
イブプロフェン	消炎・鎮痛・解熱剤
ケトプロフェン	消炎・鎮痛・解熱剤
レボフロキサシン	フルオロキノロン系合成菌剤
スルファメトキサゾール	サルファ剤（感染症治療薬）
トリクロサン	殺菌剤

2. 2 調査及び分析方法

本研究では、多摩川中流域の約11kmの調査区間を設定し、合計11回調査を行った（表-2左）。調査地点の概要を図-1に示す。調査地点 St. T'e は、2013年の9/30以降の調査回で対象とした。また、医薬品類の流下過程での減衰状況について調査するため、2012年の1/31、2/16、8/22、2013年の1/30、9/30、2014年の12/16に、「河川砂防技術基準（案）⁴⁾」に準じて、調査地点において流量観測を行った。また、東京都下水道局から流量観測日の下水処理場の放流量データを入手した。得られた放流量データから、調査地点ごとに1日当たりの流量を推計した。ただし、St. T'e では、2011年の6/10、10/17、2012年の1/31、2/16、8/22、2013年の1/30において流量観測を行わなかったため、東京都環境局より入手した流量観測日と同じ月の流量データで代用した。

表-2 多摩川での調査対象の医薬品類の実態調査と挙動調査の調査時期一覧

調査河川	実態の調査	挙動（減少係数）の調査
多摩川	2011年6/10、10/17	2012年1/31、2/16、8/22 2013年1/30、9/30 2014年12/16
	2012年1/31、2/16、8/22	
	2013年1/30、9/30、12/17	
	2014年8/25、10/27、12/16	



図－１ 多摩川の調査地点

分析方法は、アルミ箔で遮光したガラス瓶に満水状態で採水し、アスコルビン酸（酸化防止剤）と Na₂EDTA（マトリックス元素のマスキング剤）をそれぞれ約 1g/L となるように加え、冷蔵状態で試験室へ持ち帰った。試料中の溶存態成分について、トリクロサンは、Nakada *et al.*⁵⁾ の方法を参考に抽出、濃縮、アセチル化等の前処理を行った後、GC-MS を用いて測定した。その他の物質は小西ら⁶⁾ の方法を参考に抽出、濃縮等の前処理を行った後、LC-MS/MS を用いて測定した。定量は、GC-MS 法、LC-MS/MS 法ともに、同位体希釈法により定量した。本研究では、濃度が検出下限値以上で定量下限値未満の値を示した場合は、その値を濃度として用いた。

2. 3 実態調査結果

表－3 に各調査地点における医薬品類 10 物質の実態調査結果を示す。生活系・事業系排水の影響が少ない上流地点 St.T-1 において、カフェイン以外の 9 物質は、中央値で 10 ng/L 以下と低濃度で検出された。下水処理水が流入する調査範囲の中流地点 St.T-2 と下流地点 St.T-3 において、アジスロマイシン、カフェイン、クラリスロマイシン、クロタミトン、レボフロキサシン、スルファメトキサゾールは最大で 100ng/L を超える濃度で検出された。多摩川支川では、下水処理場が存在せず生活系・事業系排水の影響が少ない St.T-a と St.T-b に比べ、下水処理水が流入する St.T-c と St.T-d では、医薬品類が高い濃度で検出された。ただし、St.T-a では下水処理場が存在しないにもかかわらずカフェインが高い濃度(最大 1,600ng/L)で検出されており、生活系排水が流入していることが考えられた。また、下水処理場の各排水樋門(St.T-A～T-D)では、カフェインとイブプロフェンを除き、高い濃度で医薬品類が検出された。

表－3 多摩川における医薬品類 10 物質の分析結果 (ng/L)

調査地点	アジスロマイシン			ベザフィブラート			カフェイン			クラリスロマイシン			クロタミトン		
	検出頻度	中央値	最大値	検出頻度	中央値	最大値	検出頻度	中央値	最大値	検出頻度	中央値	最大値	検出頻度	中央値	最大値
T-1	4/8	0.29	0.78	5/6	0.27	1.2	7/7	39	330	8/8	0.3	0.93	7/7	7.4	12
T-2	10/10	110	210	8/8	68	91	9/9	130	230	10/10	250	600	10/10	515	950
T-3	11/11	72	130	9/9	62	72	9/9	110	270	11/11	150	440	10/10	465	790
T-A	7/8	10	23	7/7	31	150	8/8	435	1600	8/8	21	46	8/8	36.5	58
T-b	7/8	0.37	1.6	4/7	0.17	0.34	8/8	61	110	8/8	0.82	2.3	8/8	5.05	8.3
T-c	7/7	430	500	6/6	175	360	6/6	185	770	7/7	900	1200	6/6	1100	1800
T-d	7/7	5.6	19	6/6	31.5	110	6/6	270	390	7/7	56	100	6/6	200	300
T-e	2/3	3.8	5.3	2/2	5.4	8.7	2/2	50.5	76	3/3	19	45	2/2	59.8	110
T-A	8/8	355	430	7/7	100	140	8/8	36	170	8/8	870	1400	8/8	1250	2100
T-B	8/8	465	610	7/7	110	180	8/8	44	130	8/8	1150	1800	8/8	1300	2100
T-C	8/8	415	570	7/7	360	910	8/8	57	160	8/8	740	1000	8/8	895	1200
T-D	7/7	350	380	6/6	74	130	6/6	38	310	7/7	880	980	6/6	1040	1700
調査地点	イブプロフェン			ケトプロフェン			レボフロキサシン			スルファメトキサゾール			トリクロサン		
	検出頻度	中央値	最大値	検出頻度	中央値	最大値	検出頻度	中央値	最大値	検出頻度	中央値	最大値	検出頻度	中央値	最大値
T-1	1/6	0.1	0.1	5/7	0.54	1	3/8	0.86	1.1	6/6	0.91	1.2	8/8	1.55	4.9
T-2	7/8	3.3	14	10/10	2.7	30	10/10	185	410	9/9	72	140	10/10	42.95	61
T-3	8/9	2.3	3.8	10/10	1.75	18	11/11	130	270	10/10	77	150	11/11	31	47.7
T-a	6/7	7.5	10	6/8	1.55	6.4	8/8	6.95	31	7/7	4	15	8/8	7.95	15
T-b	2/7	0.13	0.14	7/8	0.41	0.64	8/8	1.9	4.8	7/7	1.3	2	8/8	3	5.7
T-c	6/6	13.5	46	6/6	360	500	7/7	1000	1200	6/6	140	520	7/7	180	210
T-d	6/6	2.9	5.9	5/6	0.43	1.9	7/7	30	57	6/6	42.5	73	7/7	15	27.1
T-e	1/2	0.55	0.55	2/2	0.21	0.27	3/3	6	31	2/2	34	49	3/3	7.1	10
T-A	4/7	1.66	7.5	8/8	200	300	8/8	630	780	7/7	180	230	8/8	155	230
T-B	4/7	1.11	2.2	8/8	255	450	8/8	805	1100	7/7	140	290	8/8	128.9	160
T-C	7/7	38	150	8/8	305	690	8/8	720	910	7/7	180	190	8/8	145	200
T-D	4/6	0.54	2.3	6/6	360	520	7/7	730	890	6/6	140	280	7/7	210	220

2. 4 生態リスク評価

本稿で調査対象とした医薬品類 10 物質のうち、今後詳細な生態リスク評価を実施すべき物質を把握するため、濃度実測値を用いて生態リスク評価を試みた。

2. 4. 1 評価方法

「化学物質の環境リスク初期評価ガイドライン（平成 23 年度 12 月版）」⁷⁾を参考に、生態リスク評価を実施した。リスク判定は、以下の式を用いてハザード比（HQ）により行った。

$$\text{ハザード比 (HQ)} = \text{MEC} / \text{PNEC}$$

ここで、PNEC(Predicted No Effect Concentration)は予測無影響濃度、MEC(Measured Environmental Concentration)は採取試料中の化学物質濃度の実測値である。本稿では、MEC として各調査地点での化学物質濃度の最大値を用いた。医薬品類の PNEC は、真野ら⁸⁾によって用いられた値を使用した。本稿で使用した医薬品類の PNEC の値を整理して表-4 に示す。なお、化学物質の環境リスク初期評価ガイドラインでは、ハザード比（HQ）が 1 以上の化学物質は「詳細な評価を行う候補」とされている。

表-4 生態リスク初期評価に用いた医薬品類 10 物質の予測無影響濃度

化学物質名	予測無影響濃度 (PNEC, ng/L)
アジスロマイシン	19
ベザフィブラート	10000
カフェイン	5200
クラリスロマイシン	20
クロタミトン	3500
イブプロフェン	130000
ケトプロフェン	160
レボフロキサシン	79
スルファメトキサゾール	1600
トリクロサン	5.3

2. 4. 2 評価結果

表-5 は各調査地点の医薬品類のハザード比(HQ)を示す。アジスロマイシン、クラリスロマイシン、ケトプロフェン、レボフロキサシン、トリクロサンについては、ハザード比(HQ)が 1 を超過する地点が存在した。中でもアジスロマイシン、クラリスロマイシン、トリクロサンの 3 物質は、ほとんどの調査地点でハザード比(HQ)が 1 を超えた。このため、これらの物質については、今後、より詳細な生態リスク評価や低減対策を検討していく必要があると評価された。

表-5 医薬品類 10 物質のハザード比（HQ）

調査河川	調査地点	アジスロマイシン	ベザフィブラート	カフェイン	クラリスロマイシン	クロタミトン	イブプロフェン	ケトプロフェン	レボフロキサシン	スルファメトキサゾール	トリクロサン
多摩川	T-1	0.04	<0.01	0.06	0.05	<0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01	0.92
	T-2	11.05	0.01	0.04	30.00	0.27	<0.01	0.19	5.19	0.09	11.51
	T-3	6.84	0.01	0.05	22.00	0.23	<0.01	0.11	3.42	0.09	9.00
	T-a	1.21	0.02	0.31	2.30	0.02	<0.01	0.04	0.39	0.01	2.83
	T-b	0.08	<0.01	0.02	0.12	<0.01	<0.01	<0.01	0.06	<0.01	1.08
	T-c	26.32	0.04	0.15	60.00	0.51	<0.01	3.13	15.19	0.33	39.62
	T-d	1.00	0.01	0.08	5.00	0.09	<0.01	0.01	0.72	0.05	5.11
	T-e	0.28	<0.01	0.01	2.25	0.03	<0.01	<0.01	0.39	0.03	1.89

太字は1以上のハザード比を示す

3. 医薬品類の微生物担体処理特性

3. 1 省エネ化を目的とした無曝気の微生物担体処理実験

下水処理場に流入する医薬品類には、通常の活性汚泥処理プロセスで除去可能なものがある一方、下水処理水に残存するものが存在することが確認されている⁹⁾¹⁰⁾。特に、アジスロマイシン、クラリスロマイシン、ケトプロフェン、トリクロサンの 4 物質については藻類生長阻害又はミジンコ繁殖阻害があることが報告されている¹¹⁾¹²⁾¹³⁾。既往研究¹⁴⁾において、通常の活性汚泥処理プロセスの後段に微生物担体処理槽を置いてエアレーション（曝気）する方法により、医薬品類 4 物質の除去効果を確認した結果、アジスロマイシンでは 91%、クラリスロマイシンでは 84%、ケトプロフェンでは 90%、トリクロサンでは 88%が除去可能であることが分かった。しかしながら、継続して曝気を行う場合、大量の電力を必要とするため、本研究では省エネ化を目的として、曝気を行わずに担体の添加量だけを変化させた実験を行い、曝気した場合との医薬品類の除去効果を比較した。

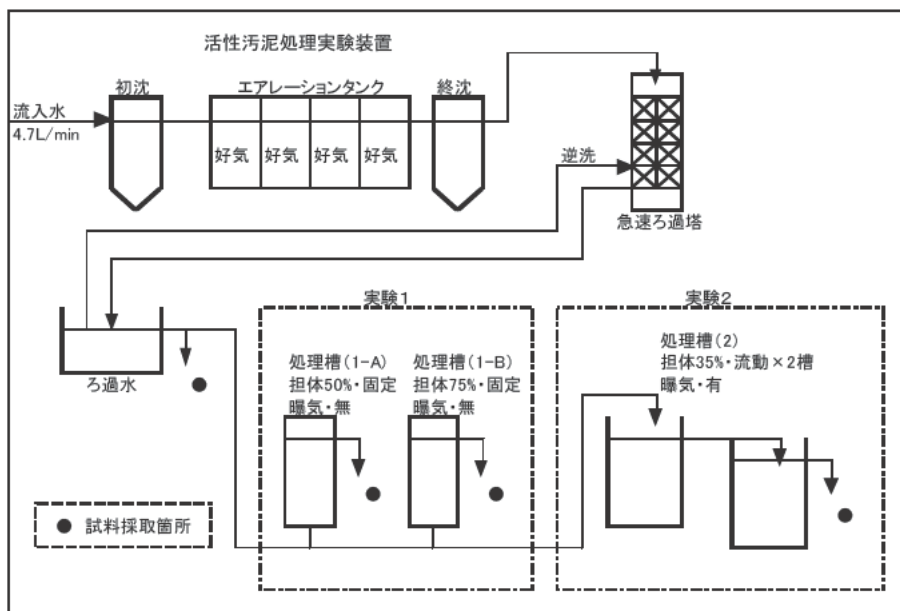
アジスロマイシン、クラリスロマイシン、ケトプロフェンについては、小西ら⁹⁾の方法を参考に抽出・濃縮等の前処理を行った後、LC-MS/MS により分析した。また、トリクロサンの分析は、宝輪ら¹⁵⁾の方法を参考に抽出・濃縮・誘導化等の前処理を行った後、GC/MS を用いて測定した。

3. 2 実験装置の概要及び試料採取

本実験では、標準活性汚泥法で運転している活性汚泥処理実験装置の二次処理水を急速砂ろ過し、担体処理実験装置の流入水とした（図-2）。

実験条件を表-6 に示す。実験 1 では曝気を行わず、担体の嵩比率^{かさひりつ}を処理槽(1-A)では 50%、処理槽(1-B)

では75%にして処理を行った。また、実験2では実験1と比較するため、嵩比率を35%にした処理槽を2つ連結させ、各槽とも曝気を行った。担体はポリプロピレン製の中空円筒状の微生物保持担体（写真－1：4mm^{OD}×3mm^{ID}×5mm^L）を使用した。実験1、2ともに、担体に付着した微生物を馴致させるため、運転開始から2ヶ月以上経過した後、平成27年11月と12月に一回ずつ、医薬品類の分析を行った。



図－2 微生物担体処理実験装置の概要と試料採取箇所



写真－1 実験に用いた微生物保持担体

表－6 微生物担体処理実験条件

	実験1		実験2
	処理槽(1-A)	処理槽(1-B)	処理槽(2)
各槽の容積(L)	9.4	9.4	10×2槽
各槽HRT(min)	30	30	60 ※2槽の合計HRT
担体嵩比率(%)	50	75	35
曝気の有無	無	無	有

3. 3 実験結果

試料採取箇所における一般項目分析結果を表－7に示す。採取試料の水温は、11月10日と12月9日で約6℃の差があった。溶存酸素濃度(DO)については、実験1、2ともに12月9日に処理槽の表面付近の水を測定した。無曝気の実験1の処理槽のDOは1.5～2.0mg/Lであり、曝気を行った実験2の処理槽のDOは8.8mg/Lであった。溶存性有機態炭素(DOC)については、嵩比率50%の処理槽(1-A)で除去率6～8%、嵩比率75%の処理槽(1-B)で除去率10～13%であった。また、NH₄-N、NO_x-Nのデータから、担体処理槽に供する前のろ過水の時点で硝化反応がほぼ終了していることが分かった。

担体処理実験装置の流入水（ろ過水）及び各処理槽通過後の医薬品類4物質の分析結果を図－3に示す。嵩比率50%で無曝気の処理槽(1-A)では、アジスロマイシン除去率は54%(11/10)、64%(12/9)、クラリスロマイシン除去率は30%(11/10)、63%(12/9)、トリクロサン除去率は82%(11/10)、76%(12/9)、ケトプロフェン除去率は58%(11/10)であった。なお、12月9日採取試料における処理槽(1-A)のケトプロフェン濃度は、ろ過水より高くなっており、原因としてサンプリングエラーが考えられる。

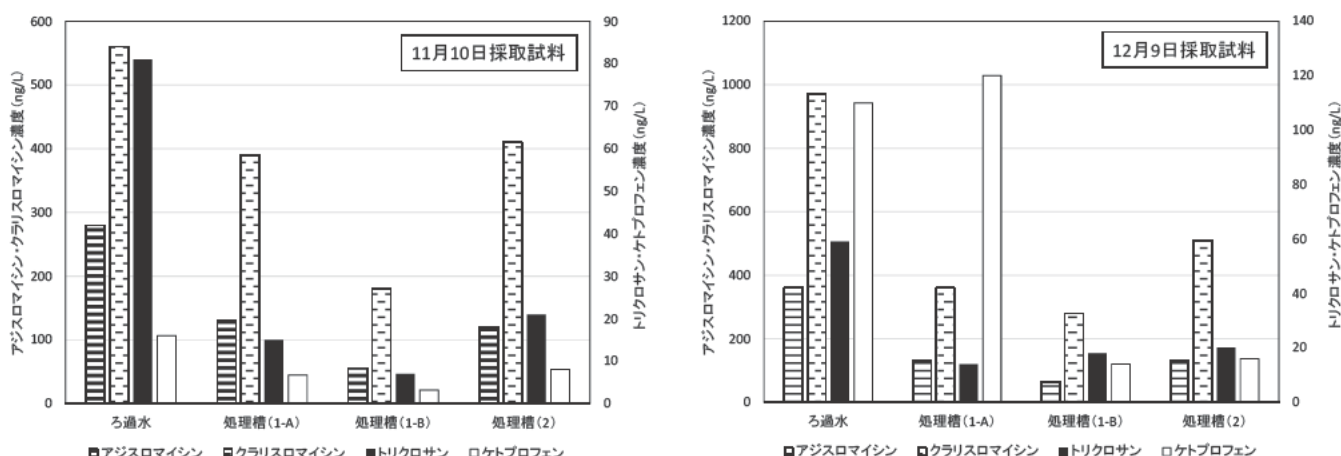
また、嵩比率75%で無曝気の処理槽(1-B)について、アジスロマイシン除去率は80%(11/10)、83%(12/9)、クラリスロマイシン除去率は68%(11/10)、71%(12/9)、トリクロサン除去率は91%(11/10)、70%(12/9)、

ケトプロフェン除去率は 80%(11/10)、87%(12/9)となり、処理槽(1-A)に比べて高い結果となった。この理由としては、嵩比率が高いぶん、流入水中の医薬品類が担体に付着している微生物膜と接触する時間が長かったためと考えられる。

また、2 槽の合計 HRT を約 60min に設定して曝気を行った処理槽(2)について、アジスロマイシン除去率は 57%(11/10)、64%(12/9)、クラリスロマイシン除去率は 27%(11/10)、47%(12/9)、トリクロサン除去率は 74%(11/10)、66%(12/9)、ケトプロフェン除去率は 49%(11/10)、86%(12/9)であった。滞留時間や嵩比率が実験 1 と異なるため、一概に比較はできないが、無曝気の実験 1 のほうが、曝気を行った実験 2 よりも医薬品類の除去率が高いものが多かった。

表－7 ろ過水及び各処理槽通過後の水質一般項目分析結果

	11月10日採取試料				12月9日採取試料			
	ろ過水	実験1		実験2	ろ過水	実験1		実験2
		処理槽(1-A)	処理槽(1-B)			処理槽(1-A)	処理槽(1-B)	
水温(℃)	22.0	21.5	21.7	21.4	17.0	13.9	15.9	15.7
pH(-)	7.0	6.9	6.9	7.7	6.8	6.7	6.6	7.4
DO(mg/L)	—	—	—	—	4.7	2.0	1.5	8.8
BOD(mg/L)	0.9	0.8	1.0	1.2	2.1	1.5	1.6	3.5
COD(mg/L)	7.0	7.0	6.8	6.8	7.6	8.4	9.8	8.0
SS(mg/L)	0.6	0.8	1.0	1.4	0.2	0.2	0.8	0.6
VSS(mg/L)	0.2	0.6	0.8	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DOC(mg/L)	4.0	3.7	3.5	3.7	4.8	4.5	4.3	4.4
TN(mg/L)	10	12	10	11	13	13	14	13
NH4-N(mg/L)	0.04	0.02	0.02	0.02	0.14	0.12	0.03	0.03
Nox-N(mg/L)	9.7	10	10	10	12	12	12	12



図－3 ろ過水及び各処理槽通過後の医薬品類 4 物質の濃度 (左図 11/10、右図 12/9)

4. おわりに

多摩川中流域で医薬品類の調査を行った結果、アジスロマイシン、クラリスロマイシン、ケトプロフェン、レボフロキサシン、トリクロサンはハザード比(HQ)が 1 を超過する地点が存在し、上流に位置する下水処理場の放流水の影響が考えられた。また、無曝気式の微生物担体処理方法により、省エネ化を図りつつ医薬品類を除去することが可能であること、及び担体の嵩比率を増加させることで除去率が向上することが分かった。

既に、これらの結果を受け、医薬品類濃度に対する影響度の大きい下水処理場の特定や河川域内での医薬品類の減衰現象に関する調査研究を実施しているところである。今後は、河川域内での減衰現象の影響因子に関する分析を行い、現象のモデル化や分解・収着メカニズムのシミュレーション技術の開発等につなげていきたいと考えている。

また、法令化への対応や改築更新時における技術の社会実装を視野に、大きな排出源の一つと考えられる下水処理場における効果的な医薬品類の除去・低減方法についても研究を進めていく予定である。

【参考文献】

- 1) 国土交通省：一級水系における流域等の面積、総人口、一般資産額等について、
http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/ryuiki.pdf
- 2) 厚生労働省：平成 22 年薬事工業生産動態統計年報、2011
- 3) 南山瑞彦 他：生理活性物質の水環境中での挙動と生態系影響の評価方法に関する研究、平成 22 年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料 No. 4212、239-265、2011
- 4) 第 4 回神田川流域水循環系再生構想検討委員会 資料 -2 参考資料、
<http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/toshisaisei/kandagawa4/shiryo2s.pdf>
- 5) Nakada N. et al.: Pharmaceutical chemicals and endocrine disrupters in municipal wastewater in Tokyo and their removal during activated sludge treatment, Water Res., 40(17), 3297-3303, 2006
- 6) 小西他：水環境中医薬品の LC-MS/MS による一斉分析法の検討、環境工学研究論文集、43、73-82、2006
- 7) 環境省環境保健部環境リスク評価室：化学物質の環境リスク初期評価ガイドライン（平成 26 年度 12 月版）、2014
- 8) 真野浩行 他：PRTR 情報等を活用した下水処理水中に含まれる化学物質の環境リスク初期評価、下水道協会誌、50(612)、85-92、2013.10
- 9) 小森他、下水処理における医薬品(92 物質)の除去特性、第 45 回下水道研究発表会講演集, pp.91-93, 2008
- 10) 成宮他、下水処理過程における医薬品類の存在実態と挙動、環境工学研究論文集, 46, pp.175-185, 2009
- 11) 福永他、藻類生長阻害試験を用いた医薬品の毒性評価、環境工学研究論文集, 43, pp.57-63, 2006
- 12) A. Harada et al., Biological effects of PPCPs on aquatic lives and evaluation of river water, Water Science & Technology, Vol.58, No.8, pp.1541-1546, 2008
- 13) 環境省、化学物質の生態影響試験について、<http://www.env.go.jp/chemi/sesaku/seitai.html>, 2006
- 14) 小森他、微生物担体処理における医薬品類の除去特性、第 48 回日本水環境学会年会講演集,p.581,2014
- 15) 宝輪他、GC-MS による水環境中 PPCPs 一斉分析法の基礎的検討、第 16 回環境化学討論会講演要旨集,pp.774-775,2007

世界各地で激甚化する水災害への取り組み

水災害研究グループ 澤野 久弥

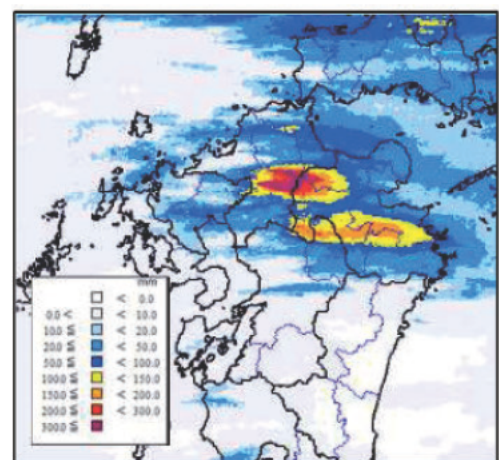
1. はじめに

世界で発生している自然災害で、水関連災害件数は全体の約8割を占め、その約4割がアジア地域で発生している。日本でも水災害が頻発しており、洪水に関しては、近年降雨の局地化、集中化により被害が激甚化し、多くの人命・財産が失われ、地域社会に多大な影響を及ぼしている。このような災害リスクを軽減するためには、科学技術を用いたハザード及び災害リスクの適切な評価、評価結果の行政から住民への情報提供、住民による情報の理解とその活用、洪水時に時々刻々と変化する状況を踏まえて地域での行動に速やかにつなげるための情報収集・伝達手段の確保等、適切なリスクコミュニケーションが必要となる。これらの基本的な要素は世界で共通であり、ICHARM 水災害研究グループは、地域ごとに異なる気象・地形条件・社会経済活動の状況を踏まえつつ、水災害に関するリスクコミュニケーションを充実させることで、水災害の軽減に資するべく研究を進めている。

2. 近年の日本の水災害とその特徴

2. 1 近年の豪雨災害と特徴

ここ数年、我が国では梅雨前線や台風に伴う豪雨が頻繁に発生し、毎年のように甚大な被害を引き起こしている。平成26年8月の広島市を襲った豪雨では、バックビルディング現象により積乱雲が次々と発生、線状降水帯を形成し、土砂災害を引き起こした。平成27年9月には日本海を通過した台風に湿った空気が流れ込み、関東・東北で大雨となった。9月9日～10日にかけては鬼怒川上流域に線状降水帯が形成され、栃木県北部では最大で600ミリ以上の大雨をもたらした。これにより鬼怒川下流の常総市において大規模な氾濫が発生した。平成28年8月には4つの台風(7号、11号、9号、10号)が相次いで発生し、東北・北海道に上陸した。そのうち日本近海で発生した台風10号は迷走した後8月30日に岩手県に上陸し、統計開始以降東北太平洋岸に上陸した初の台風となった。これにより岩手県の小本川や北海道空知川等で氾濫が発生した。平成



地域の防災力向上のためには、緊急時だけでなく平常時から、行政が提供する「災害リスク情報」に一般住民が関心を持ち、その内容をあらかじめ理解することで、緊急時の効果的な避難行動や減災行動につなげられるようにする「リスクコミュニケーション」が重要である。そのため、

- 災害時の行動判断に必要となる防災・災害情報に住民が普段から慣れ親しむよう、平時から住民の興味を引く形で情報提供し、緊急時の情報提供にシームレスにつながる環境を整えること
- 洪水シミュレーションなどの再現情報を、実感できる形で提供することで、状況を具体的に認識することにつなげ、今後想定される災害への対応能力を向上させること

を進めるとともに

- 災害対応は個人の対応（自助）だけでなく集団での対応（共助）も重要であるため、集団での対応能力を向上させること

が必要である。これらを具体化するために、

- 平常時から慣れ親しむことで、緊急時にもストレスなく利用できる情報利用ツール（スマートフォンでの利用が容易なアプリ等）
- 災害対応訓練をより効果的なものとするために、災害時を想定した仮想空間上で、住民や行政が取るべき行動手順を自ら検証する、集団体験が可能な疑似体験ツール

等の開発が望まれる。「リスクコミュニケーション」による効果的な情報の伝達・共有は、発信者である行政、専門家、メディアと、受信者である住民やコミュニティの双方向的な意志疎通による相互理解をも目指すものであり、それらは現場での具体的な行動のよりどころとなる。

3. 災害対応の課題の整理と今後の方針

国土交通省では、近年の異常な気象状況を踏まえ、平成 27 年 1 月に「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」を示し、温暖化の進行により危惧されているような極端な雨の降り方が現実に起きていることを、新たなステージと捉え、最大クラスの大雨等に対しては「少なくとも命を守り、社会経済に対して壊滅的な被害が発生しない」ようにすることを目標とした。そして住民一人一人が自然災害に対する「心構え」と「知識」を備え、いざというときには、自ら考え適切に行動できるようにするための施策を推進するとともに、住民が自分の住んでいる場所の災害リスクを認識し、災害リスクと共存できる住まい方への転換が必要であるとしている。平成 27 年 8 月には、国土交通大臣の諮問を受け、社会資本整備審議会は「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～」をとりまとめ、その中で、施設の能力を上回る外力に対し施策を総動員して被害を軽減するための考え方が示された。さらに平成 27 年 9 月の関東・東北豪雨災害を踏まえ、社会資本整備審議会は平成 27 年 12 月 10 日に「大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について～社会意識の変革による『水防災意識社会』の再構築に向けて～」をとりまとめた。この中では、「施設の能力には限界があり、施設では防ぎきれない大洪水は必ず発生するもの」へと意識を変革し、社会全体でこれに備える「水防災意識社会」の再構築を訴えている。これを受け、国土交通省では、水防法の改正や大規模氾濫減災協議会制度の創設など、関連法の改正や多様な関係者の連携体制の整備を進めた。一方で平成 28 年 8 月の岩手県小本川での洪水や平成 29 年 7 月の福岡県赤谷川での洪水による被害等、整備が比較的遅れている中小河川の水災害への脆弱性も大きな課題となっており、社会資本整備審議会は平成 29 年 1 月に「中小河川等における水防災意識社会の再構築のあり方について」をとりまとめ、水害リスク情報等の地域との共有、治水対策の重点化・集中化による効率的・効果的な事業の推進、関係機関の連携、地方公共団体への支援について提言している。ICHARM は、近年の日本での災害、それらを踏まえた今後の対応への一連の提言に基づき、地域の防災・減災に資する研究開発を進めているところである。

4. 防災・減災に向けた国際的な取り組みの動向

国連での防災に関する分野横断的な初めての国際会議は、1994 年に横浜で開かれた国連防災世界会議であり、「防災のための横浜戦略」が採択された。しかしながら自然災害のリスクが高い地域は、アジア、アフリカ、中南米に集中しており、1990 年代はまだ国際社会全体としての自然災害への関心は必ずしも高いものではなかった。1992 年には、リオ・デ・ジャネイロで環境と開発に関する国連会議が開催され、持続可能な開発のための課題が整理されたが、防災については言及されていない。2005 年に第 2 回国連防災会議を神戸で開催することが決まった時にも、EU は、防災は国連会議で扱うほど重要な課題

かと疑問を呈している。しかし 2004 年 12 月に約 23 万人もの死者・行方不明者を出したインド洋津波が発生し、多くのヨーロッパからの観光客が東南アジアのリゾート地で犠牲になると、この神戸での会議が注目を浴びることとなり、会議には世界各国から 4000 名以上が参加し、世界で防災に取り組む際の指針としての「兵庫行動枠組 2005-2015」が採択された。その後も 2005 年にアメリカでのハリケーン・カトリナ、2008 年にミャンマーでのサイクロン・ナルギス、2011 年のブラジルでの豪雨、東日本大震災による津波、タイでの大洪水等により、世界各地で甚大な水災害が生じ、そのような中、2015 年 3 月に仙台で第 3 回国連防災会議が開かれ、本体会議に 6500 名が参加した。会議で採択された「仙台防災枠組 2015-2030」には、「災害リスクの理解」を含めた 4 つの優先行動と防災・減災に関する 7 つの目標が掲げられている。2015 年には、この会議の他、9 月に国連本部で「国連持続可能な開発サミット」、12 月にパリで気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21)が開かれた。前者では持続可能な開発目標(SDGs)が採択され、その中で水関連災害による死者や被災者数を大幅に削減することを目標として明記しており、後者では気候変動の悪影響に適応する能力並びに気候に対する強靱性を高めることを目的として掲げている。さらに 2017 年の国連本会議で、2018 年から 2028 年を国際行動の 10 年「持続可能な開発のための水」とすることを決議したが、その中で水に関連する災害への懸念が表明されている。2018 年 3 月 14 日には、11 か国の元首で構成する水に関するハイレベルパネル(HLPW)が、国連事務総長と世界銀行総裁に提言書「Making Every Drop Count -An Agenda for Water Action-」を提出し、その中でも水災害軽減のための予防的措置の重要性が明記された。

5. ICHARM の貢献

5. 1 中山間地での取り組み

日本各地で未曾有の規模の豪雨による洪水被害が頻繁に発生し、小本川や赤谷川等の中山間地河川で人的被害が発生している。このため、ICHARM 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によるデータ同化を同時に行うことによる、気象モデルによる領域アンサンブル予報や、得られたアンサンブル降雨予報に基づく洪水予測を試みている。また、赤谷川で発生した土砂・流木を伴う洪水氾濫現象を理解するため、流れの平面二次元解析に土砂の移動・供給を導入するとともに、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・それらが流れに与える影響について評価し、良好な再現結果を得ている。

また、中山間地河川においては水位観測の不足に加え、豪雨発生時の降雨流出時間等が極めて短く水位上昇速度が大きい傾向にあり、情報の不足から避難が遅れる危険性が高い。このため現在、国土交通省を中心に約 1 万カ所の危機管理型水位計の設置が進められており、今後これらによる水位情報を伝達するとともに、予測降雨データや水位情報の同化による河川水位の予測情報を提供することが、安全な避難の誘導の強化に資すると考えられる。このため ICHARM では、官民研究開発投資拡大プログラム(PRISM)により安価・簡便な洪水予測システムの開発について検討を行っている。

5. 2 情報伝達・共有に関する取り組み

ICHARM では、住民避難に関する情報が乏しい中山間地の自治体や、海外の自治体を対象として、RRI モデルによる氾濫シミュレーション結果を用いた新たな洪水リスク指標「洪水カルテ」やその活用手法の検討を行っている。また、平常時から緊急時までシームレスに活用できる防災情報ポータルサイト「ICHARM 災害情報共有システム(ICHARM Disaster Risk Information System: IDRIS)」の開発も行っている。

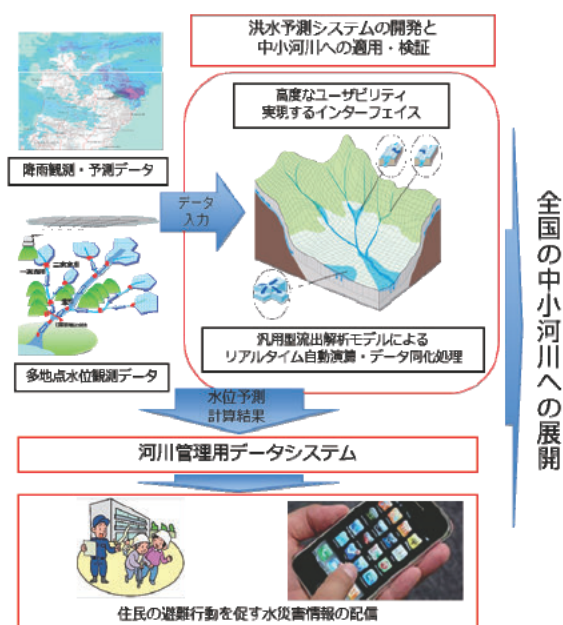


図 2 中小河川洪水予測システム

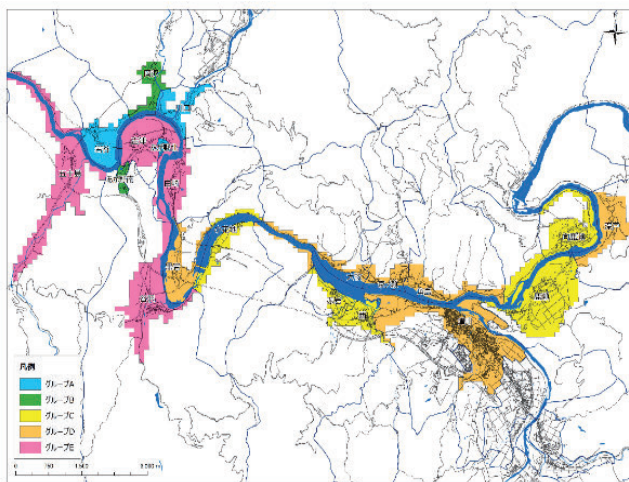
「洪水カルテ」は、複数の降雨外力に対して氾濫解析を行い、その結果などをもとに、町内各地区の洪水脆弱性(リスク)を様々な評価軸で客観的に評価する手法である。また、「洪水カルテ」の結果に対してクラスター分析を行い、洪水に特に脆弱な地区群を「洪水ホットスポット」として抽出する手法を考案した。本手法を新潟県阿賀町、及び ICHARM が以前より活動を行ってきたフィリピン共和国ルソン島パンパンガ川流域の洪水常襲地帯であるブラカン州カルンピット市に適用し、現地の防災担当者と共に「洪水カルテ」による評価の妥当性を確認した。

IDRIS については、阿賀町で「阿賀町災害情報共有システム(ARIS)」としてプロトタイプを開発している。現在は町役場職員により試用中で、今後頂いたご意見をもとにシステムの改善を進めるとともに、地域防災力向上への活用検討を予定している。

また、今年度からは住民避難率と地域防災力の飛躍的向上を図るため、これまでの研究成果を活用しつつ、災害時の住民らの適切な行動判断をどのように支援するべきか、行動心理学を活用し災害時の行動調査・分析を行う。また、この成果を用いて、平常時の事前情報の提供～訓練～緊急時の情報提供などを含む「リスクコミュニケーションシステム」の開発を目指す。

5. 3 気候変動に関する取り組み

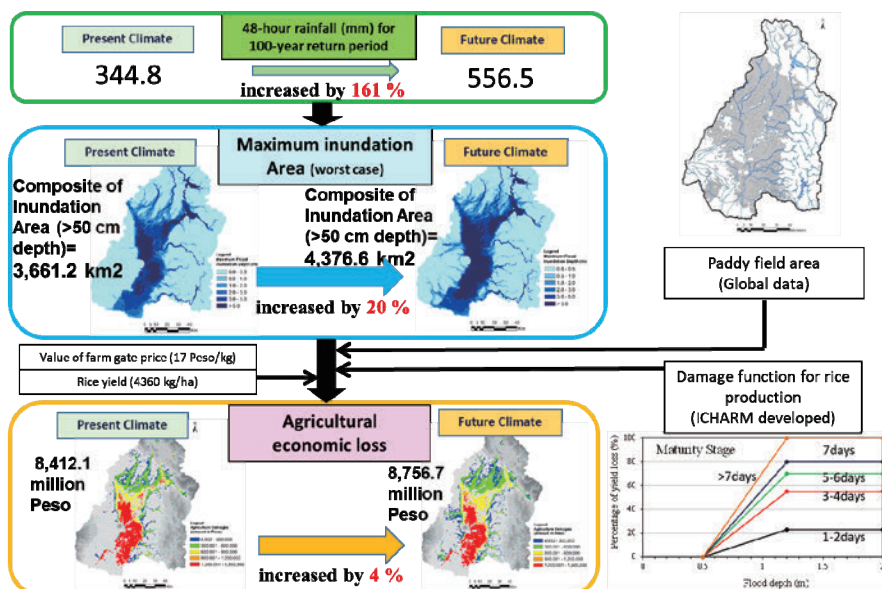
途上国等においては、水災害が社会経済発展の阻害要因の一つとなっており、さらに今後、地球温暖化による影響が懸念されている。ICHARM では、これまで文部科学省の創生プログラムでフィリピン、インドネシア、タイ、パキスタン、カンボジアを、ADB プロジェクトでベトナムを対象に、気候変動による水災害リスクの影響評価を行ってきた。フィリピンのパンパンガ川流域を対象に行った検討では、GCM (全球気候モデル) から得られた排出シナリオ RCP8.5 による将来の降雨量データを用いて流出氾濫計算を行い、それによってもたらされる洪水被害リスクの現在と将来の状況を比



図ー3 洪水リスクの種類に応じた阿賀町地区の分類結果 (赤色地区が「洪水ホットスポット」)



図ー4 ARIS によるリスク情報表示



図ー5 現在と将来における 100 年確率降雨による氾濫と水稻被害の比較 (フィリピン・パンパンガ川)

較した。現在気候・将来気候各々の 100 年確率降雨による浸水深 50 cm以上の浸水面積は、現在気候のワーストケースでは 3,661 km²、将来気候のワーストケースでは 4,377 km²であり、現在に比べて将来は 20%増加する結果となっている。この氾濫想定結果に、水稻の生長に応じた被害関数を適用し、被害額を算出すると、被害額は 4%の増加となった。浸水面積の増大に比べて水稻の被害額が小さいのは、浸水継続時間が短くなったためと考えられる。

創生プログラムに引き続き現在進められている統合プログラムでは、気候変動による影響への適応策の検討を行うこととしている。その際に、将来気候による降雨の予測について、排出シナリオ(RCP2.6～8.5)による違いや、GCM(CMIP5)の違いによる影響を不確実性として評価し、これらの結果を対象国の政府と共有した上で、適応策に関する議論を行うこととしている。なお、ハザードの評価においては、従前の RRI モデル等に加え、地表面の水・エネルギー収支を考慮した WEB-RRI モデルを使用することにより、渇水から洪水までを連続的に評価することとしている。

5. 4 国際洪水イニシアティブ (IFI) の活動

国際洪水イニシアティブ (IFI) は、ICHARM が事務局となり、国連組織等と連携して進めている活動である。2016 年 6 月に UNESCO 本部で開催された UNESCO-IHP 政府間理事会のサイドイベントで IFI の新戦略と実施計画を策定した。2016 年 10 月にはインドネシア・ジャカルタで、国土交通省技監等有識者がメンバーとなっている HELP (High-level Experts and Leaders Panel on Water and Disasters) の第 8 回会合が開かれたが、そのサイドイベントで「洪水リスク軽減と持続可能な開発を強固にするための学際的な協力に向けた HELP-IFI ジャカルタ宣言」を採択した。この中で、各国での洪水リスク軽減による持続可能な開発を目指し、水と災害への対応に係る機関が集まって議論・検討を進めるプラットフォーム構築が提言され、IFI による各国への支援が行われることとなった。2017 年 7 月にニューヨークの国連本部で開催された第 3 回国連水と災害に関する特別会合の科学技術に関する特別セッションでも、水と災害に関するプラットフォームについて議論された。先述の HLPW による成果文書の中でも、各国で水のレジリエンスと災害に関するプラットフォームを設立することを提言している。現在、プラットフォームの構築は、フィリピン、スリランカ、ミャンマー、パキスタンで進められており、ICHARM は、フィリピンでの研究活動、スリランカで 2017 年 5 月に発生した洪水・土砂災害を受けて実施した緊急的な支援活動、ミャンマーで ICHARM が担った ADB プロジェクト、パキスタンで ICHARM が担ったユネスコプロジェクト等、これまでの活動の成果や現在進めている活動と連携させながらプラットフォームへの支援活動を行っている。今後はインドネシアでも、ソロ川で進めている統合プログラムの調査と連動させながら、プラットフォーム構築に向けた支援を行っていく予定である。

5. 5 研修活動

途上国への支援活動の成果を持続的なものとするためには、それを担う技術者の育成が必要となる。ICHARM では、修士課程「防災政策プログラム 水災害リスクマネジメントコース」、博士課程「防災学プログラム」、短期研修、フォローアップ研修、インターンシップ受入れなどの研修活動を行ない技術者の育成に貢献している。

修士課程「防災政策プログラム 水災害リスクマネジメントコース」は、政策研究大学院大学 (GRIPS) 及び JICA と連携して実施しているもので、途上国の行政機関の職員を対象としており、2007 年から 2017 年までに 31 ヶ国 124 名の卒業生を出し、現在 14 名が就学中である(#1)。博士課程「防災学プログラム」は GRIPS と連携して実施しているもので、2010 年から 2017 年までに 7 名の修了生を出し、現在 5 名が就学中である(#1)。2018 年からは、新しく JICA の奨学金制度を博士課程で活用し、途上国の行政職員を受け入れることとなった。(#1:平成 30 年 8 月末時点)

短期研修は、JICA、アジア開発銀行、世界銀行等と連携を図り、統合洪水解析システム (IFAS)、降雨流出氾濫モデル (RRI) などを活用した洪水解析及び水災害マネジメントに関する講義と演習を数日から数週間実施している。

この他、フォローアップ研修では、ICHARM 職員が各国に出向き、その国の修士、博士課程及び短期研修の卒業生・受講生とワークショップを行ない、最新の研究や課題について情報共有と議論を行なっている。さらに、世界各国からのインターンシップの受け入れも積極的に行なっている。

6. おわりに

昨今の日本での豪雨災害によって、自然災害に関し、今後さらに検討すべき様々な課題が明らかとなっている。国土交通省では、そのような課題について、社会資本整備審議会の答申に基づき対応を進めているところであり、ICHARM も、それらを踏まえつつ、地域の防災・減災に向けた研究を、地方自治体等と連携しながら行っていくこととしている。また、日本での課題は、海外での災害への対応でも共通となる面が多く、ICHARM は国内外での水災害リスクマネジメントの促進を支援する国際センターとして、日本での研究成果を活用した海外での防災・減災研究活動も引き続き進めていく。

【参考文献】

- 1) 気象庁：災害時気象速報 平成 26 年 8 月豪雨
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_201404.pdf
- 2) 気象庁：災害時気象報告 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨及び平成 27 年台風第 18 号による大雨等
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2015/saigaiji_201501.pdf
- 3) 気象庁：災害時気象報告 平成 28 年台風第 7 号・第 9 号・第 10 号・第 11 号及び前線による 8 月 16 日から 8 月 31 日にかけての大雨及び暴風等
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_201701.pdf
- 4) 気象庁：災害時気象報告 平成 29 年 7 月九州北部豪雨及び 6 月 7 日から 7 月 27 日までの梅雨前線等による大雨等
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_201801.pdf
- 5) 気象庁：災害をもたらした気象事例 平成 30 年 7 月豪雨
https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/jyun_sokuji20180628-0708.pdf
- 6) 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」、2015.1
- 7) 社会資本整備審議会：「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～」、2015.8
- 8) 社会資本整備審議会：「大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について～社会意識の变革による「水防災意識社会」の再構築に向けて～」、2015.12
- 9) 社会資本整備審議会：「中小河川等における水防災意識社会の再構築のあり方について」、2017.1
- 10) 西川智：第 3 回国連防災世界会議報告、地域安全学会ニューズレター、No.91、2015.4
- 11) 中村要介・小池俊雄・阿部紫織・中村和幸・佐山敬洋・池内幸司：粒子フィルタを適用した RRI モデルによる河川水位予測技術の開発、土木学会論文集 B1(水工学)Vol.75,(掲載予定).
- 12) 中村要介・牛山朋来・阿部紫織：平成 29 年 7 月九州北部豪雨を対象とした 72 時間先洪水予測の適用可能性、水文・水資源学会 2018 年度総会・研究発表会・創立 30 周年記念学術シンポジウム 予稿原稿
- 13) 原田大輔・江頭進治：流砂・流木を伴う洪水流の解析 —2017 年 7 月九州北部豪雨による赤谷川洪水を対象として—、土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, I_937-I_942, 2018.
- 14) 栗林大輔・大原美保・佐山敬洋・近者敦彦・澤野久弥：「洪水カルテ」による地区ごとの洪水脆弱性評価および対応案の検討手法の提案、土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol. 73, No. 1, pp.24-42, 2017
- 15) 栗林大輔・大原美保・岩崎貴志・徳永良雄：「e コミュニティ・プラットフォーム」を活用した汎用的な自治体防災情報システムの提案、平成 29 年地域安全学会梗概集 No.41, 41-44, 2017.11
- 16) 文部科学省研究開発局：1.5.アジアにおける水災害リスク評価と適応策情報の創生、気候変動リスク情報創生プログラム、平成 27 年度研究成果報告書
- 17) Badri Bhakta Shrestha, Edangodage Duminda Pradeep Perera, Shun Kudo, Mamoru Miyamoto : Assessing Flood Disaster Impacts in Agriculture under Climate Change in the River Basins of Southeast Asia, International Journal Natural Hazards (投稿中)

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4383 October 2018

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