

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 4406 号

令和 2 年度

土木研究所講演会
講演集

令和 2 年 10 月 21 日

国立研究開発法人土木研究所

Copyright © (2020) 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2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2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

◆新技術を活用した維持管理・災害時の対応

- 10:05～10:25 AI・ICTを活用した道路橋診断技術の開発
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・・・1
- 10:25～10:45 命を守るための水害対策の研究
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 伊藤 弘之・・・7
- 10:45～11:05 土砂災害発生時の応急対応にかかる CIM モデルの活用について
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 杉本 宏之・・・13
- 11:05～11:25 暴風雪による視程障害時の除雪車運行支援技術について
寒地土木研究所 技術開発調整監付
寒地機械技術チーム上席研究員 片野 浩司・・・17

◆新技術を活用した生産性向上の取り組み

- 14:20～14:40 建設現場が無人化する日に向けて
つくば中央研究所 技術推進本部長 岩見 吉輝・・・23
- 14:40～15:00 河川 CIM で魅力的な川づくりを目指す！
ー地形編集と環境評価ツールの開発ー
つくば中央研究所 水環境研究グループ長 萱場 祐一・・・27
- 15:00～15:20 見えないひび割れ・塩分を見えるようにする技術
ー近接目視が困難な部位等のための点検診断技術の開発ー
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・・・29

◆新機軸となる社会インフラ分野のニーズ

- 15:40～16:00 地質・地盤リスクに ONE-TEAM で対応する
ー地質・地盤リスクマネジメントの導入と運用ー
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・・・37
- 16:00～16:20 自然エネルギーを活用したダム堆砂対策技術
ー潜行吸引式排砂管の開発ー
つくば中央研究所 水工研究グループ
水理チーム上席研究員 石神 孝之・・・43
- 16:20～16:40 舗装の新たな性能規定化に向けて
つくば中央研究所 道路技術研究グループ長 久保 和幸・・・49

〔 新技術を活用した維持管理・災害時の対応 〕

AI・ICT を活用した道路橋診断技術の開発

命を守るための水害対策の研究

土砂災害発生時の応急対応にかかる CIM モデルの活用について

暴風雪による視程障害時の除雪車運行支援技術について

AI・ICT を活用した道路橋診断技術の開発

橋梁構造研究グループ グループ長 金澤 文彦

1. はじめに

道路橋の老朽化に対応して、点検、診断、措置、記録というメンテナンスサイクルを円滑に回していくことが求められている。平成26年から、全国の約70万の道路橋に対して5年に1回の定期点検が義務化され、1巡目が終了して対策区分が明らかになったが、特に自治体管理の橋梁では措置が進まない状況にある。図1に修繕実施状況を示す通り、措置の実施率は低く、特に予防保全型の修繕は進んでいないことがわかる。

この要因として自治体の財政状況による予算制約と伴に、専門知識を持った技術者の不足や診断結果の信頼性が低いことも要因として考えられる。図2に示すとおり、メンテナンスサイクルが円滑に流れるようにするためには、診断に必要な情報を点検において的確に取得し、信頼できる診断結果を示し適時適切に措置を実施することが必要である。もし、措置に円滑に流れない状況になると、道路橋の損傷がさらに悪化し、そのために必要な措置のための予算が増加することになることから、できる限り損傷の要因を早期に取り除き、措置予算を抑えて長寿命化を図れるよう、持続可能で実効性あるメンテナンスサイクルを実現することが求められる。また、措置を行ったものの早い段階で再劣化が生じた事例も報告されている。損傷や原因の特定が不十分なことが要因で診断内容が不適切であったことも考えられ、今後は更に、橋梁の専門知識を持った診断技術者の減少などの問題が顕在化し、不適切な補修補強設計や施工が行われ、これまで以上に不具合事例が増えないか懸念される。

このため、CAESAR（構造物メンテナンス研究センター）では、メンテナンスサイクルの診断における技術者の役割は、人の病気の治療を行う医者と同様に、予防、治療などの処方を行い治療、延命などを的確に行うために重要であり、その判断が信頼性あるものか否かは実効性あるメンテナンスサイクルの実現を左右するものと考え、診断を司令塔とするための技術開発を進めることとしている。

特に診断の信頼性向上のために、官民共同研究を立ち上げ熟練診断技術者の診断における知識や思考方法をAI・ICTを活用してシステム化を進めている。¹⁾ 本講演では、このシステム化のための方法や具体の損傷を例にした診断AIプロトタイプ構築について報告する。また、診断に必要な情報を取得するために新たな技術開発にも取り組んでおり、その中でRC床版の土砂化を対象にその変状を早期に検知する技術の開発についても報告する。

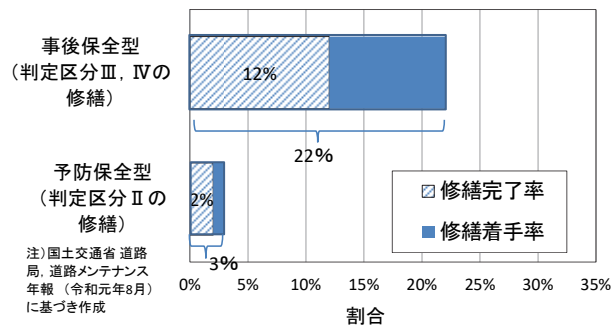


図1 定期点検1巡目における修繕実施状況

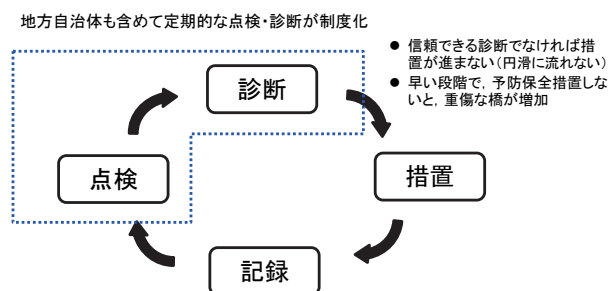


図2 メンテナンスサイクルにおける技術的な課題

2. AI・ICT を活用した道路橋の診断

2.1 診断の思考方法

診断方法をAI・ICTを活用したシステムに覚えさせる前に、診断技術者がどのように診断を行っているかを明らかにする必要がある。

まず、認知科学の知見をもとに、人がどのような思考方法を用いて判断に結び付けているのかを説明する。思考方法には2つあり、一つは直観的推論(システム1と呼ぶ)、もう一つは分析的推論(システム2と呼ぶ)であり、人はこれら2つの思考方法を行き来して推論と意思決定を行っていると言われており、二重プロセス理論と呼んでいる。システム1は、迅速かつ儉約的なプロセスであり、時に非常に効率的に作用するが、思考の偏り、つまりバイアスにより、しばしば間違いを起し失敗することもある。一方で、システム2は、ゆっくり慎重で意識的に行われ、信頼性はシステム1よりも高く失敗

はまれであるが、時間がかかり、実用的な現場で要求される迅速な決定には非効率である。ここで分析的推論（システム2）は、演繹法、帰納法、仮説形成法に分類され、これらを組み合わせて推論が行われる。²⁾ 演繹法とは、数学の公式に代表されるように、前提として与えられた情報が真実ならば、予め定式化した方法によりその結論も確かなものとして導かれる方法である。帰納法とは、確率の問題について公式を用いずにあらゆる発生事象を調べて答えを求める方法のように、考えられる多くの具体例を挙げて規則性をみつけ一般論を導く方法である。また、仮説形成法とは、最も可能性の高いと思われる説明を仮定し、行動に移しながら新しい情報を得るたびに柔軟に仮説を更新して結論を導く方法である。

診断の思考方法に関しては、橋梁分野よりも他の分野、特に医療分野で長年論じられ、実務でもよく用いられており参考になるものと考えられる。医療診断では、症状や徴候をもとに原因を仮定するため、結果から原因へ後ろ向きに推論することから、尤もらしい仮説を立てて不完全な情報でありながらも症状が悪化しないように治療を行いつつ、新しい情報が入り次第、仮説を更新して治療を続ける仮説形成法や、症状や徴候から考えられる複数の仮説を立てて、検査結果などから得られた事実をもとに検証し、可能性のないものは消去して結論を導く帰納法が用いられている。³⁾

また、医療分野では誤診を防ぐために、専門知識と技術の向上に加えて、バイアスを効果的に軽減するための取り組みも行われている。バイアスには、様々なものが報告されているが、初期の印象に過度に影響を受けてしまい、後の印象に柔軟に対応できずに早い段階で思考停止に至る「アンカリング」、十分に検証される前に意思決定プロセスの早期に思考停止する「早期閉鎖」や、自分が見たものが全てで、意思決定には十分と浅はかに考えてしまう「WYSIATI (What You See Is All There Is)」などのバイアスが知られている。こうしたバイアスを軽減する方法として、客観的・科学的データを意図的、系統的に収集すること、明確な診断や最も考えやすい診断以外の可能性を考えるなど代替案を提示すること、思考方法の二重プロセス理論を意識して診断方法を訓練し意思決定にバイアスが潜んでいることを認識するとともに不適切な意思決定にならないように学ぶこと、などが推奨されている。

2. 2 道路橋の診断方法

道路橋の診断においても、こうした思考方法やバイアスを軽減する考え方は参考になる。例えば、損傷のメカニズムなど診断に必要な情報の体系的な整理、診断技術者の思考方法の改善、診断を支援する情報システムの活用、症例報告の蓄積などに取り組むことが考えられる。⁴⁾

診断技術者の思考方法を改善するためには、教師となり得る優秀な診断技術者の思考方法を明らかにし、一般技術者がこれを学習できるようにすることが有効である。新設橋の設計・施工では、ある前提条件のもと近似的に最適解を得る方法、つまり演繹法によって思考し実施し得るが、既設橋の補修補強設計・施工では、個別の橋の品質・状態、置かれた環境条件、施工時に判明した新たな情報などをもとに対策を講じる必要があることから、帰納法、仮説形成法により思考し実施することになる。

そこで AI 共同研究に参加している複数の診断技術者に実務での診断方法を聴取のうえ、既設橋の診断に必要な知識、思考方法を整理した。

道路橋の点検、診断、措置のプロセスでは、**図3**のとおり変状を見つけて記録し、損傷と原因を特定したうえで健全性を診断し、原因の除去を含めて補修補強を行う。⁵⁾ など 損傷は、医療で例えるなら病気に相当し、変状はせきや鼻水などの症状に相当する。症状や問診、検査などの情報をもとに病気やその原因を特定又は絞り込んだうえで処方している。道路橋も同様な流れで診断すると良いと考えられる。医療の場合は、病気の原因や発症の過程、病気の診断確定を目的とする病理学が進歩しており、臨床現場において診断や処方の決定に大きな役割を果たしている。また、新たな症例などは論文等で多く発表されており、同様の症状に対する診断や処方にも活用されている。しかし、道路橋の場合は、これらの知見の蓄積、経験が不十分であり、そのような環境の中で診断を信頼性あるものにしていくことが課題と言える。道路橋の診断においても、どのような原因で損傷が生じ、どのようなプロセスを経て進行するのかといった損傷のメカニズムを明らかにすることが重要である。既に研究の蓄積があり原因、メカニズムが明らかにされた損傷については、それに従って診断、措置を行っていくことができるが、近年になって発生が明らかになった損傷については、原因、メカニズムが明らかになっていないので、定期点検から得られる情報や類似の変状を参考にすることで仮説を立て診断、措置を行うこととなる。この場合においても、道路管理者が納得できる論理的な診断内容を示すことが必要であるし、措置の効果が不明な場合などでは研究において明らかにし提示していく必要がある。



図3 点検・診断・措置のプロセス

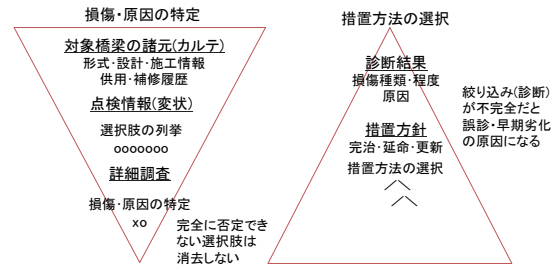


図4 論理的診断の基本パターン

論理的な診断とはいかなるものか。図4にその基本パターンを示す。⁵⁾など 診断を行う際に、まず、対象橋梁の諸元や架橋環境条件、補修履歴、過去の点検記録等の情報を確認し、その後、点検で確認された変状から橋に生じている可能性のある損傷やその要因を考えられる限り列挙する。損傷や原因を特定又は絞り込みを行ううえで、情報が不足する場合は詳細調査を行い、この情報を含めて各種の情報を照らし合わせて矛盾がないように行う。その際に、必ずしも一つに特定する必要はなく、完全に否定できない選択肢は消去しないことが重要である。

損傷や原因を特定又は絞り込みを行った後に、メカニズムに対応した措置方法を選択していくこととなる。その際、損傷の原因を除去し元の状態に戻す長寿命化措置を目指すのか、損傷の原因を完全には除去することが困難であるために損傷の進行をコントロールして長く使う延命化措置とするのか、損傷の進行を確実に制御することが困難で落橋か事故等が生じないように危機管理措置とするのか、あるいは緊急的な措置とするのかなどの措置方針を決めることとなる。その方針に基づき、架橋環境条件、交通規制などから施工が可能な時期や期間、それらの条件から定まる施工上の制約条件など、様々な条件をもとに効果が発揮される具体措置方法を選択する。このような論理的な診断プロセスを行うことが重要である。

2.3 診断セット

これまで、道路橋の診断は、診断を行う技術者の知識、経験に基づいて行われており、形式的に把握されていなかった。システムに学習させるためには、診断技術者の持つ知識、経験を暗黙知も含めて形式化する必要がある。そのため、道路橋に生じる可能性のある損傷を部材ごとに、考えられるものすべてを対象にして、①損傷の原因から崩壊に至る現象（メカニズム）をわかりやすく図示して解説、②点検で着目する変状とメカニズムとの関係、検知方法及び詳細調査の活用方法、③損傷の進行程度と措置の判断の決め手となる情報、④メカニズムに応じた措置方針、適用条件、工法例を、「診断セット」と称して体系的に整理することとした。¹⁾ 整理に当たっては、AI共同研究に参加する複数の熟練技術者への意見聴取を行うことにより、暗黙知も含め診断セットに反映を図っている。例えば、図5にRC床版土砂化（輪荷重による）の診断セットのうち、メカニズムを図示した内容を示す。

この診断セットについて、主要な部材（RC床版、鋼床板、床版橋上部工、PC桁、鋼桁、橋台・橋脚、基礎、支承、伸縮・排水装置）、損傷（疲労、土砂化、塩害、ASR、凍害、腐食など）から作成を進めているが、現時点で考えられるものを列挙すると120種類ぐらい考えられる。時間はかかるが、これらができる限り作成したうえで、新たな損傷の発生や新たな知見が加わるなどにより、作成したものを随時更新していく必要があると考えている。

2.4 診断のシステム化

診断のシステム化において、その診断結果が信頼できる内容であり道路管理者に納得のいく説明がなされることが重要となる。このため、診断を支援するシステムとして、結果の説明が可能なエキスパートシステムに代表されるルールベースのAIシステムを基本として開発を進めることとした。

システム処理の流れは、診断技術者から聴取した診断の流れをもとに定めている。¹⁾ 具体には、(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)(1)で取り込んだ情報から緊急対策の必要性を判断したのち、(4)疑いのある損傷候補を複数抽出する。(5)システムが損傷を特定するための追加情報取得の必要性を提案し、必要に

応じて道路管理者が詳細調査を実施する。(6)ここまでで得られた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、道路管理者が措置を実施したのち、その内容をカルテに保存する。また、診断セットの情報との矛盾や情報不足で損傷の特定ができない事象など診断結果を示せ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。

このシステムで出力された診断結果は、診断セットをもとに判断根拠を示すものとなり、経験の少ない技術者が行う場合でも、論理的な診断を行うことが可能となるので信頼性が高まるものとする。また、診断の経験が増し熟達度が上がるにつれて、診断時にシステム1の思考時間割合が増え、それに伴いバイアスが生じやすくなる傾向となるので、これを軽減するために診断を支援する情報システムを用いてシステム2の思考に戻ることも信頼性向上に有効であるとする。⁴⁾

ただし、システムの性格上、診断を支援するものであり、最終的な判断は道路管理者など人が行うものであることは変わらない。

2. 5 診断 AI プロトタイプの構築

診断 AI のプロトタイプ構築では、前述のシステム処理の流れの各段階に応じた情報を入力して、「診断セット」の内容をもとに、「もし・・・ならば、・・・である。そうでなければ、・・・である。」という作成したルールにより、システムが情報処理できるよう、開発にあたってまず診断フローチャートを作成した。

R2年度のプロトタイプについては、ユースケース(利用場面)として、定期点検が完了し事務所で診断作業を行う場面を設定した。この際、点検内容は直轄の定期点検要領をベースとしている。診断 AI の使用者は、橋梁点検や診断等について最低限の知識を有している者を対象とし、非熟練者でも使用できるように画面表示を工夫することとした。

現在開発しているシステムでは、各段階でのデータ入力が煩雑で、技術的判断が必要なデータ項目も多数あるなどデータ入力の支援方法を検討する必要がある。また、直轄だけでなく自治体での活用を視野に入れているので、点検データが各自治体で独自様式に簡素化されているなど直轄ほどには十分にはない場合にも、診断が可能となるよう最低限必要なデータ項目の検討などを考えている。

R2年度は、RC床版、床版橋を対象にプロトタイプを構築し、現場実証を行い具体橋梁の診断を行うなかで、定期点検で得られた所見との相違、業務での活用などについて課題を確認し、システム改良につなげることとしている。また、ユースケースについても、タブレットを用いて、点検で現場に行く前にカルテ等から情報をシステムに入れて、現地で橋の状況を見ながら情報を入力し、現地や事務所で診断結果が表示(出力)される場面を設定して開発することも考えている。⁶⁾ さらに共同研究の成果として、診断 AI システムの標準仕様となる機能要件、データ標準、システム連携仕様等を作成することを予定している。

3. RC床版の土砂化に対する早期検知技術の開発

3. 1 RC床版土砂化の現状

RC床版の設計基準では、建設省道路局長通達(S42)以降、最小床版厚および配筋鉄筋量の見直しによる疲労損傷への対応は実施されているが、スパイクタイヤ規制(H5)以降、凍結防止剤の散布量が増加しており、塩分を含んだ水が床版へ浸入し、床版下面に変状が発生しなくても、床版上面が土砂化している事象が発生している。(写真1、写真2を参照)床版の土砂化は、路面からの水が床版上面に浸入し疲労を促進するだけではなく、塩害、凍害等のコンクリートの劣化を誘発することが原因と推定される。⁷⁾



写真1 舗装開削後に土砂化が判明した事例



(a) 5年前の定期点検時



(b) 床版下面の抜け落ち時

写真2 床版下面の抜け落ち事例

3. 2 RC 床版土砂化のメカニズム

RC 床版の診断セットの作成において、土砂化のメカニズムについて、既存研究では十分な知見が得られなかったため、**図5**のような仮説をたてて診断に用いることを考えた。

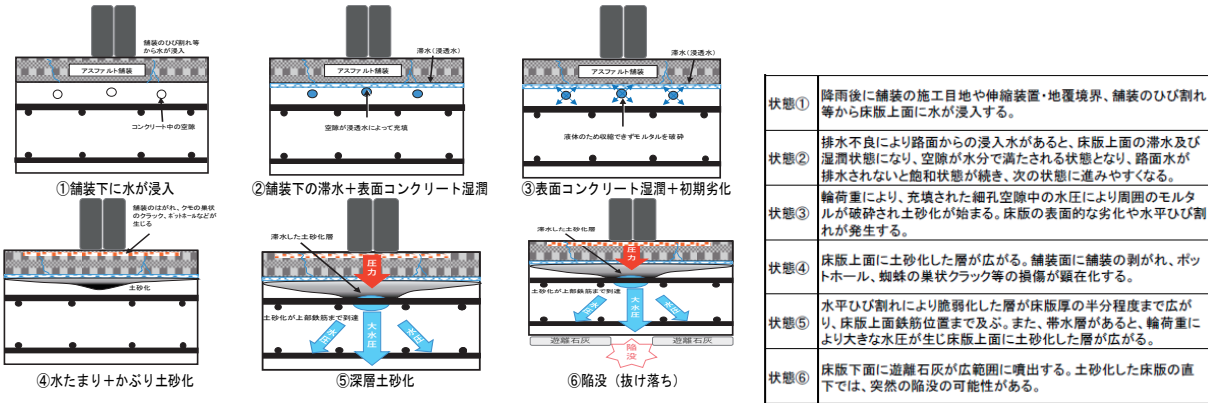


図5 RC 床版土砂化（輪荷重による）メカニズム

このように、土砂化の主原因は水であり、状態③までに措置を実施できれば健全な状態に戻すことができるが、状態⑤の補修となると、土砂化箇所等をウォータージェット等で適切に除去する必要がある。架橋地点によっては、大規模な仮設足場や長期間の交通規制を実施する必要もあり、補修期間やコストが増大することになる。⁷⁾ そこで、床版の長寿命化措置として、劣化の主要因である舗装下の滞水箇所の早期検知を行い、浸入経路を確認し、排水・遮水等の措置を実施することが重要である。このため、水の探査性能に優れている電磁波レーダを用いて床版上面の滞水箇所の検知が可能となれば、長寿命化措置の診断が可能であると考えた。

3. 3 電磁波レーダを用いた滞水箇所の検出

電磁波レーダ法は、金属以外の媒質を透過し、透過した媒質と異なる比誘電率を持つ媒質の境界で反射する性質を利用し、物質内部を非破壊で探査する手法である。この手法によるコンクリート非破壊検査は適用部材に対する制約が比較的少なく、測定も早く簡単である。しかし、各種境界面や異なる物質等からの雑信号が目標物からの信号と混合されるため、分析に専門的な知識と経験が要求される。このため、電磁波の基本伝搬特性を踏まえて定量的に分析する手法を、実橋梁（写真3）を対象にした調査をもとに検討することとした。調査橋梁は、標高が高く、積雪寒冷地に位置する橋梁であり、冬季期間は路面の凍結防止剤を散布している。床版下面には、ひび割れや遊離石灰の析出が確認されている。

調査には車載式電磁波レーダ（40km/h程度で走行しながら約1.5m幅の計測が可能）を用い自然交通流の走行のもと電磁波レーダ信号を取得し、**図6**のとおり舗装と床版上面との境界面での測定結果を図化した。ここで、レーダ波形の振幅が大きい場合は白色、小さい場合は黒色側に諧調表示される。**写真4**は、舗装開削後の床版の状況を示しており、青色マーキング箇所は、土砂化が確認された箇所、赤色マーキング箇所は、床版面のうきが確認された箇所を示している。また、同時に50cm×50cmメッシュで電気抵抗式水分計を用いて水分量を計測し、**図7**にその計測結果（健全部：カウント値 10～230、湿潤部：カウント値 231～520、滞水部：カウント値 521～990）を示す。これによると、地覆の端部、舗装目地、伸縮装置設置部付近及び土砂化部で水分量が多くなる傾向が確認できる。



側面写真



路面写真



床版下面写真

写真3 調査対象橋梁（側面写真、路面写真、床版下面写真）

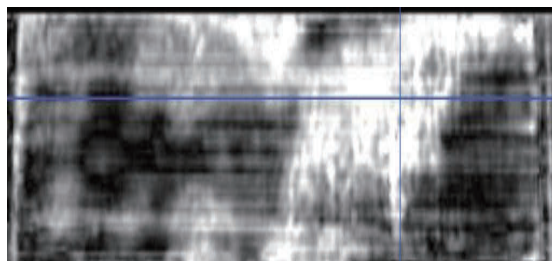


図6 電磁波レーダ計測結果（床版上面平面図）



写真4 舗装開削後オルソ画像

凡例
赤枠：浮き範囲
青枠：土砂化
（断面欠損）範囲

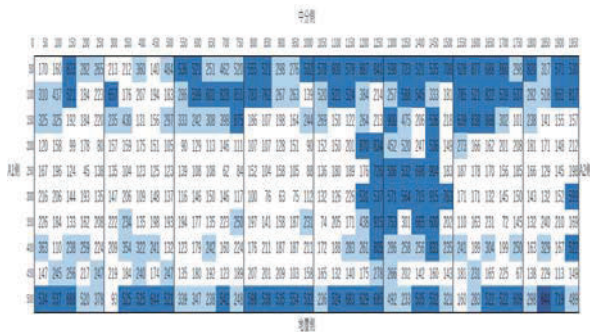


図7 舗装開削箇所の床版上面の水分計計測結果



図8 水分状態の分類結果

電磁波レーダの波形データと水分計計測結果を分析すると、健全部と滞水部では反射強度（反射波の最大振幅値と送信波の最大振幅値との比）に異なる特徴がある。このことは電磁波レーダの波形データにより滞水箇所を検出する可能性があることを示しており、将来における大量なデータからの自動的な検出を念頭に、AI（機械学習）を活用した検出技術について検討を行った。電磁波計測データを特徴量、水分量計測データを正解データとして、健全部、湿潤部、滞水部の3区分の状態に分類するモデルを構築した。考えられるアルゴリズムは多く存在するが、そのなかで分類精度が高くなったランダムフォレストによる分類結果を図8に示す。着色箇所は、床版上面に水が浸入している箇所であり、この箇所を重点的に点検、詳細調査等を実施することにより土砂化に対する長寿命化措置を早期に実施できる可能性があると考えられる。今後は、教師データを十分確保するために実橋梁や供試体でのデータ取得量を増やし、実運用を目指してモデルを構築するとともに、滞水検知を踏まえた遮水・排水等措置方法の検討に取り組むこととしている。

4. おわりに

本講演では、道路橋診断の信頼性を向上するために、AI・ICTを活用して熟練診断技術者の知識・経験、思考方法を習った診断AIシステムを開発している状況や、RC床版の土砂化に対応して診断に必要な点検情報を取得する技術の開発状況について報告した。今後の老朽化橋梁の増加に対し、信頼性の高い診断・措置が実施できるよう、開発技術の現場導入に向けて更なる研究の進捗を図っていきたい。

【参考文献】

- 1)金澤文彦：道路橋メンテナンスにおけるAI・ICTの活用、令和元年度土木研究所講演会講演集（土木研究所資料 No.4391号）、2019.10
- 2)ダニエル・カーネマン、村井章子訳：ファスト&スロー、早川書房、2014.6
- 3)Pat Croskerryら、綿貫聡ら訳：「誤診」はなくせるのか？、医学書院、2019.12
- 4)金澤文彦：橋梁診断の信頼性向上、土木技術資料 Vol.62No.5、pp.6-7、2020.5
- 5)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回年次学術講演会講演概要集、CS3-015、2018.8
- 6)西川和廣：道路橋メンテナンスサイクルへのAI導入—システム構築に必要なこと—、第75回年次学術講演会講演概要集、2020.9
- 7)野田翼、松本直土、遠藤正史、石田雅博：電磁波レーダを用いた床版上面の滞水検出による予防保全の検討、コンクリート工学年次論文集 Vol.42、2020

命を守るための水害対策の研究

水災害研究グループ グループ長 伊藤 弘之

1. はじめに

近年、毎年のように記録的な大雨とそれによる被害が発生しており、痛ましい人的被害が繰り返されている。最近の傾向としては、日本付近の海面水温が上昇し台風が勢力を保ったまま日本に接近・上陸したり、発達した前線に水蒸気が長期間に大量に供給されることにより大雨が生じている等、地球温暖化が影響していると見られる。このことは近年の水害の頻発が一時的な傾向ではなく、地球温暖化の進行に伴い今後さらに大雨災害が激甚化することを示唆している。

水害は地震等他の自然災害に比べて大雨から発災までにある程度の時間があることから、災害の予兆があった時点で適切な避難行動をすれば命は守れるといわれている。また最近では、気象予報の発達その他、浸水想定区域やハザードマップ、洪水予警報、避難勧告等、地域のリスクや避難のタイミングに関わる情報が作成され積極的に提供されている。それにも関わらず、毎年のように百人程度以上の死者・不明者が発生している状況を踏まえると、これまでのリスク情報の提供や災害時のトリガー情報の提供だけでは、住民が「自らの命は自らが守る」意識を持って自らの判断で避難行動をとるという原則自体が容易でないことが伺える。ICHARMでは水災害現象の解明・予測・リスク評価・コミュニケーション等広範な研究を行っているが、ここでは「命を守る」という視点から現在取り組んでいる研究について紹介する。

2. これまでの主な水害と避難誘導に関わる政策

避難誘導に関わる政策としては、水防法や災害対策基本法に基づき、平常時及び災害時のリスク情報の提供等様々な取り組みがなされてきた。水災害において「命を守るため」の情報の重要性が再認識されたのは、1999年6月の福岡水害と思われる。福岡市の御笠川の氾濫により地下鉄博多駅構内が浸水し逃げ遅れた一人が死亡している。地上での氾濫発見情報が地下街に届いていなかったのが一因であった。翌年2000年には東海豪雨により中心都市名古屋で1日の雨量が400mm以上と平年の月降水量の2倍に相当する記録的豪雨となり、庄内川・新川が氾濫し約10名が死亡した。これらを踏まえ、2001年には水防法で「洪水予報河川の拡大」、「浸水想定区域の指定」、「洪水予報等の伝達方法、避難場所等の記載、地下街等への洪水予報伝達方法の記載」が規定された。2004年には新潟・福島豪雨により刈谷田川・五十嵐川で堤防が決壊し、高齢者を中心に16名の死者が生じた。高齢者等要支援者の避難や、避難勧告等の発令時期、発令基準、情報伝達のあり方等の課題が議論され、2005年に内閣府で「災害時要援護者の避難支援ガイドライン」¹⁾が公表されたほか、「避難準備情報(現在:避難準備高齢者等避難開始情報)」が位置付けられた。また、「洪水等に関する防災情報体系のあり方について(提言)」²⁾が公表され、防災情報のレベル化や用語の見直し等が行われた。2014年には線状降水帯に伴う深夜の豪雨により伊豆大島において、2015年には広島で土砂災害による多数の死者が発生しており、災害発生後に避難勧告が出されたことから、夜間の避難勧告の発令について議論がされた。

このような豪雨の規模や頻度の増加、人的被害の度重なる発生、米国ハリケーン・サンディーの発生による首都機能喪失の危惧等から「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」³⁾が2015年に提言された。この中で、「新たなステージ」に対応するため、洪水等についても最大クラスの外力(大雨等)を想定して「命を守る」、「社会経済の壊滅的な被害を回避」するための対策を進めることが提言され、同年7月には想定最大規模外力による浸水想定等が水防法に規定された他、タイムライン作成等の取り組みが行われてきた。しかし、その後も2015年関東・東北豪雨災害による大規模氾濫、2016年台風第10号によるグループホームの浸水、2017年九州北部豪雨、2018年西日本豪雨、2019年台風第19号等災害と相次いで犠牲者が発生しており、このような状況を受け2015年には「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～答申」⁴⁾において、「氾濫が発生することを前提として、社会全体で常にこれに備える『水防災意識社会』を再構築する必要がある。」ことが提言されている。さらに2020年には「気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な『流域治水』への転換～答申」⁵⁾において、気候変動の影響や社会状況の変化などを踏まえ、あらゆる関係者が協働して流域全体で行う、流域治水への転換を推進し、防災・減災が主流となる社会を目指すこと等が提言されるに至っている。

3. 水害による死者の特徴

近年の特に甚大な水災害による人的被害を、過去43年間の気象災害と比較したものを図-1に示す。水災害に対する施設整備やソフト対策が進展した近年において、人的被害の規模が大きくなっている。また、犠牲者の大半は高齢者（65歳以上）が占めており（図-2参照）、高齢者のリスク認知や避難行動のあり方が課題となっている⁶⁾。内閣府では2019年台風第19号等による人的被害について詳細な調査を行っており、2階建て家屋の1階で亡くなった事例、車での移動中に被災した事例等の人的被害の特徴や、中小河川での水害リスク評価の拡充等の課題が報告されている⁷⁾。

水害に対する人命の保護はハードとソフトが相まって効果的な対策をすべきものであるが、ICHARMでは、特に災害外力のメカニズム解明・予測、リスク評価・コミュニケーション等ソフト対策に係る研究を行っている。ここでは、(1)情報空白地域でのリスク情報の創出、(2)水害リスクの正しい理解、(3)情報提供を確実にする危機管理対応機能の確保の視点から取り組み状況を紹介する。

4. 研究状況

4.1 情報空白地域でのリスク情報の創出

(1) 中小河川における水位予測技術

河川水位は氾濫の危険性に直結する情報であるが、これまで水位観測機器は大河川を中心に整備されてきており、中小河川の洪水時の水位状況を把握するのは困難であった。近年では危機管理型水位計により中小河川における水位観測が普及してきたが、中小河川ではその流域特性上急激な水位上昇が起こりやすいことから、避難のためのリードタイムを確保するためさらに数時間先までの水位予測が求められている。このため、ICHARMでは数多くある中小河川において避難行動のトリガー情報を提供できるよう、氾濫の危険性を2時間以上前に予測することに特化した、危機管理型水位計等を用いた汎用性のある水位予測モデルの開発を行っている（図-3参照）⁸⁾。ユーザー・インターフェースの整備されたRRIモデルを流出モデルとして使用し、H-Q関係式で算定された水位にリアルタイム水位観測データを粒子カルマンフィルター法により同化させ予測精度の向上を図る。現時点で、35河川を対象にリアルタイム稼働試験を行っており、実際の出水における予測精度や信頼性の検証を行っている（図-4参照）。

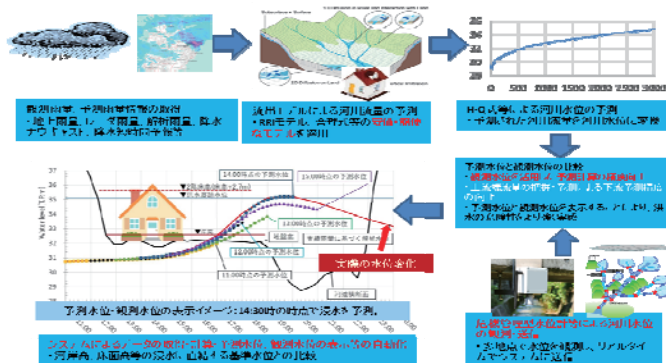


図-3 水位予測システムの構成

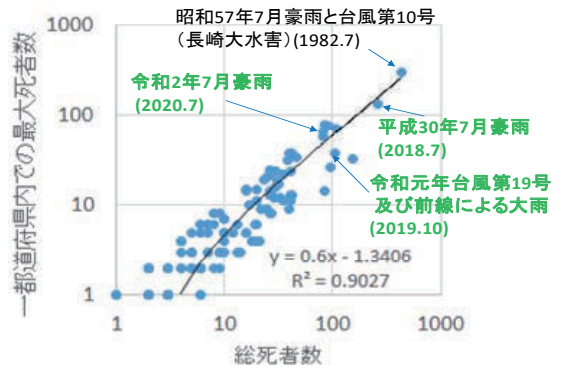


図-1 水災害による人的被害の比較⁶⁾

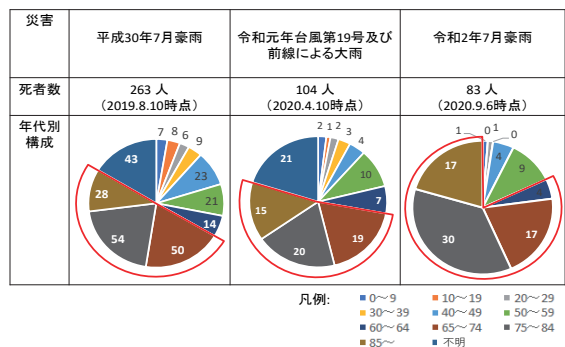


図-2 近年の水害による犠牲者の年齢別割合⁶⁾

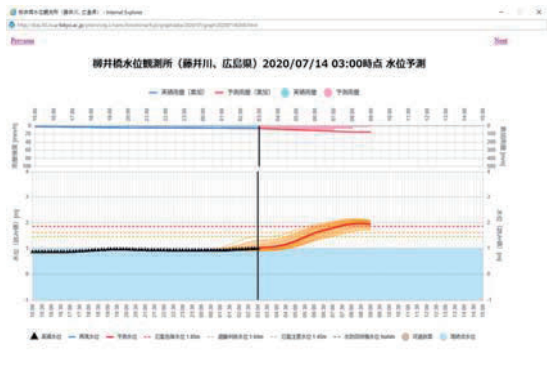


図-4 実洪水における水位予測状況

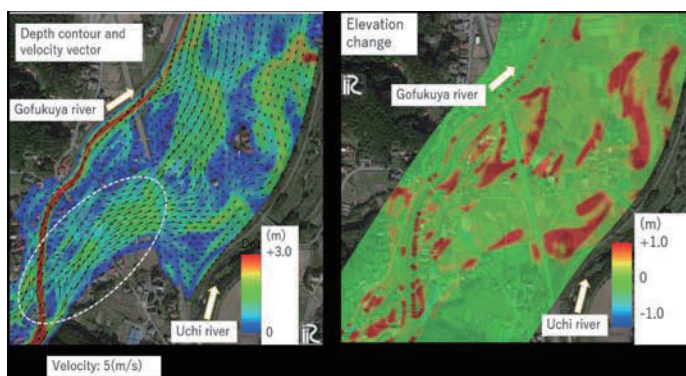
4.1 水害リスクの正しい理解

(1) 土砂・流木・洪水氾濫の理解

浸水想定においては大河川を対象に河川水が氾濫する現象を解析し、堤防決壊による浸水範囲や浸水深等を計算しており、岡山県倉敷市真備地区の氾濫等でその信頼性は評価されている。一方で、2017年九州北部豪雨における赤谷川や2019年の台風第19号における五福谷川等中山間地の中小河川では、大量の土砂や流木を伴った洪水が発生し、従来の方法では計算できない氾濫現象が発生している。五福谷川の谷の出口から平野部にかけての氾濫状況を図-5に示す。谷の出口の河道湾曲箇所付近において決壊が生じており、ここから下流側に向けて土砂と洪水流が氾濫したと見られる。なお、五福谷橋の橋梁には多量の流木が集積しており、流木の集積による水位上昇が破堤・氾濫を助長したと推察される。このような氾濫現象をシミュレーション再現するため、五福谷川の平野部分、概ね図-5に示す範囲において洪水流解析を行った。二次元不定流計算に土砂移動を考慮した iRIC-Nays2DH を一部改変し、流木の輸送・堆積・集積等を考慮したものを用いている⁹⁾。結果を図-6に示すが、河道湾曲部付近から大量の洪水流や土砂が氾濫し、広域に土砂が堆積していることが表現されている。これは河道内に土砂が堆積した結果、河道の容量が減少しているためであり、それらによる破堤・氾濫がより顕著に表現されている。



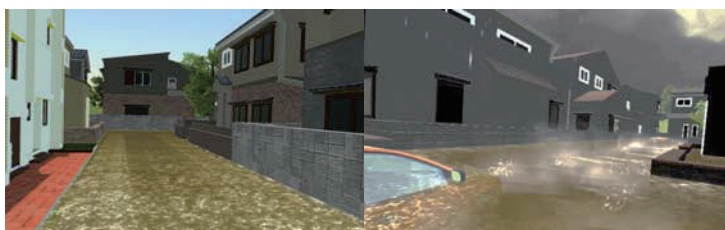
図—5 令和元年台風第19号による五福谷川の氾濫状況



図—6 シミュレーション結果
(左：水深・流速ベクトル、右：土砂堆積量)

(2) 仮想洪水体験技術

2018年西日本豪雨における家屋屋内での死者の発生、2019年台風第19号等における自動車移動中の死亡事故等から、浸水が屋内や自動車に及んだ場合にどのような事態が発生するのか、住民が正しく理解できていなかったことが示唆される。屋内の浸水深が一定程度以上になると停電や家財道具の浮遊等により階段で移動することが困難になること、自動車が浸水によりエンジンが停止し浸水深が増加すると自動車が浮遊・流送されること等の知識だけでなく、いざという時に対応するためには、身をもって体験しておくことが重要と考えている。このような体験を安全かつ手軽に経験できる方法として、ICHARMでは仮想現実 (Virtual Reality: VR) による洪水疑似体験ツールの開発を進めている。作成中のコンテンツを図-7に示す。避難所へ向かう途中の浸水状況を可視化したものであるが、避難開始が遅れた場合との比較を見せることにより、早期避難の重要性を認識させる狙いがある。このようなコンテンツは各地域の氾濫特性や風景に応じて作り込んだ上で自治体等で行われる避難訓練や体験学習 (図-8参照) での活用を想定しており、あわせてアンケート調査を行うことにより仮想体験の効果の測定やツールの改良に活用していくこととしている。



図—7 水害時の避難経路のVRコンテンツ
(左：早期避難の場合、右：避難が遅れた場合)



図—8 ゴーグルによる仮想洪水体験

4.3 情報提供を確実に行う危機管理対応の確保

(1) 水害対応ヒヤリ・ハット事例集

昨今の全国的な水害の頻発に鑑み、地方自治体の防災担当部署の災害対応力の向上を目指して、「水害対応ヒヤリ・ハット事例集」(図-9 参照)¹⁰⁾を作成し、ホームページで公開している。水害が発生した場合自治体は水害対応をするが、そのような業務が初めての自治体も少なからずあり、業務を通じて必ずしも全ての業務が円滑に進められるわけではなく、反省点や改善案が残されることとなる。これらは当該自治体だけでなく他の地方自治体にとっても災害対応を想定・実施する上で参考となるものである。そこで、水害対応において、職員が「困る・焦る・戸惑う・迷う・悩む」などの状況に陥る事例を「水害対応ヒヤリ・ハット事例」として定義し、地方自治体が公表している過去の水害での災害対応検証報告書などからこれらの事例を抽出し、冊子「地方自治体編」に取りまとめた。本冊子には 28 の典型的な事例とともに、「設備等」「仕組み」「スキル」という 3 つの観点からの教訓が見開きページで紹介されている。また、別冊の「新型コロナウイルス 感染症への対応編」では、新型コロナウイルスへの感染が懸念される中での水害発生を想定し、起こりうる事例と望ましい対策を各ページで紹介している。



図—9 「水害対応ヒヤリ・ハット事例集」の概要(左：役場浸水の例、右：コロナ編)

(2) 水害対応支援システム

ICHARM では「災害情報共有ポータルサイト」上で、浸水想定区域や過去の浸水発生域等のリスク情報や河川水位等のリアルタイム情報等、危機管理や避難判断に必要な情報を共有し、平常時から緊急時までの減災行動に活用できる IDRIS¹²⁾を開発した(図-10 参照)。一方、東京大学生産技術研究所の目黒・沼田は地震災害を対象に災害対応工程システム(BOSS)、災害対応人員配置システム(SHIFT)¹³⁾を開発している。BOSS は想定される災害に対して必要な災害対応の標準的工程が示されるものであり、SHIFT は災害規模から必要な人員・期間等が算出され効果的な資源配分に資するものである。BOSS・SHIFT の水災害分野への適応を図るため、ICHARM では彼らと連携し IDRIS の水災害情報の集約・通信機能に BOSS・SHIFT の機能を接続することにより、全国の地方自治体を対象とした水災害対応支援システムを構想している(図-11 参照)。

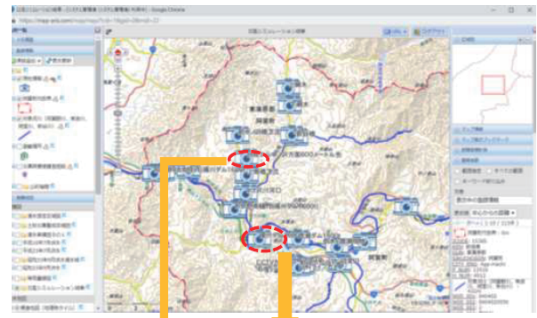
水災害では発災後に時間経過とともに被害の様相や規模が変化しつつ徐々に明らかとなってくるが、自治体等ではこれを把握しながら対応しなければならない。このような場合 IDRIS から提供される情報等から適宜被害想定を修正し、工程や人員配置等を柔軟に行っていくことや「水害対応ヒヤリ・ハット事例集」に収録されている配慮事項等のタイムリーな入手が可能となる。

また、集中管理型システムを水災害対応に使用することができれば、当該自治体だけでなく国・都道府県・近隣自治体が情報を共有し、作業分担や技術支援が効率的に行うことが期待できる他、災害対応後には一連の災害対応を通じて得られた知見・ノウハウ・反省点をシステムにフィードバックすることにより、本システムが水災害対応の知識データベースとして成熟することにより、その後の水災害対応をより効果的にする効果も期待できる。

現地状況 (写真・動画・YouTube)

- 役場職員だけでなく、水防団・区長が自分のスマートフォン等で位置情報付き写真や動画を即座にアップロード可能
- ドローンによる被害状況動画や、街のイベント映像などを、YouTubeライブ機能を利用し、リアルタイムに共有することも可能

【数クリックで簡単に登録】



山肌からの出水状況 (試験運用中に現地で撮影されたもの)



ドローン空撮動画のリアルタイム共有も可能 (YouTubeライブ中継機能を活用)

図-10 IDRIS の情報コンテンツの一例

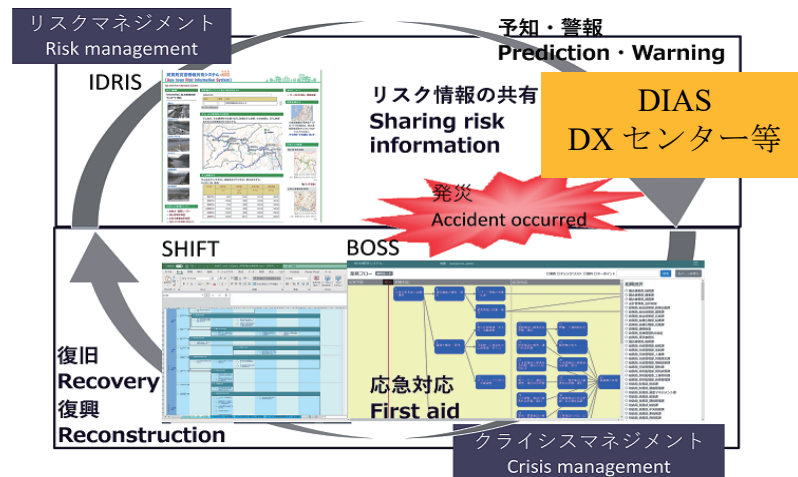


図-11 IDRIS と BOSS・SHIFT の結合による水害対応支援システムの概念図

5. おわりに

水害に関わる様々な防災情報が利用できるようになり、住民の適切な避難行動に対して一定の効果を挙げてきたと考えられる。一方で、近年の記録的大雨の頻発化により人的被害は未だ深刻な状況にある。このような状況を踏まえ、「命を守る」観点から ICHARM の研究状況を報告した。住民の適切な避難行動を支援するための、情報の作成や提供方法について検討しているが、様々な経験・知識等のバックグラウンドを有する住民の方々が情報や状況を正しく認知し避難行動がとれる社会構築のため、さらに研究を進めていきたい。

【参考文献】

- 1) 災害時要援護者の避難対策に関する検討会: 災害時要援護者の避難支援ガイドライン, 平成 18 年 3 月.
- 2) 洪水等に関する防災用語改善検討会: 洪水等に関する防災情報体系のあり方について (提言)、平成 18 年 6 月.
- 3) 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、平成 27 年 1 月.
- 4) 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～社会意識の変革による「水防災意識社会」の再構築に向けて～答申、平成 27 年 12 月.
- 5) 社会資本整備審議会: 気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～答申、令和 2 年 7 月
- 6) 大原美保: 日本における過去 3 年間の水害での人的被害発生状況、ICHARM Newsletter Volume 15 No. 2 Issue No. 57 July 2020. を時点修正したもの。
https://www.pwri.go.jp/icharm/publication/newsletter/pdf/icharm_newsletter_issue57.pdf
- 7) 中央防災会議 防災対策実行会議・令和元年台風第 19 号等による災害からの避難に関するワーキンググループ: 令和元年台風第 19 号等を踏まえた水害・土砂災害からの避難のあり方について (報告)、令和 2 年 3 月.
- 8) 伊藤弘之: 中小河川を対象とした安価・簡便な洪水予測システムの開発、雑誌「河川」令和 2 年 3 月号, pp. 54-57.
- 9) 原田大輔・江頭進治・柿沼太貴・南雲直子・伊藤弘之: 2019 年台風 19 号による阿武隈川水系五福谷川における多量の土砂を含む洪水流の特徴、河川技術論文集, 第 26 巻, 2020 年 6 月.
- 10) 大原 美保・栗林 大輔・藤兼 雅和: 水害対応ヒヤリ・ハット事例集(地方自治体編)の作成 (特集 国内外で頻発する洪水災害に備える : リスク低減への取組み)、土木技術資料 62(2), 22-25, 2020-02
- 11) ICHARM: 水害対応ヒヤリ・ハット事例集 (地方自治体論及び別冊: 新型コロナウイルス感染症への対応編) の作成・公開、
https://www.pwri.go.jp/icharm/special_topic/20200625_flood_response_collection_j.html
- 12) 栗林大輔・大原美保・岩崎貴志・徳永良雄: 「市町村向け災害情報共有システム (IDRIS) の開発」、地域安全学会、2018 年.
- 13) 沼田 宗純: 巨大災害では多様な職員の参画による組織の総合力が試される、
http://tdmtc.tokyo.wordpress/wp-content/uploads/2019/05/jiji_lecture.pdf.

土砂災害発生時の応急対応にかかる CIM モデルの活用について

土砂管理研究グループ 地すべりチーム 上席研究員 杉本 宏之

1. はじめに

土砂災害は豪雨や融雪、地震等によって全国各地で毎年発生しており、今年も既に多くの土砂災害が発生している。令和2年7月豪雨では941件の土砂災害が発生し、その内の80件が地すべりである¹⁾。地すべりは、斜面の一部（地すべり土塊）が地下水等の影響によってゆっくりと斜面下方に移動する現象で被害が大きくなることが多い。また、地すべり土塊が一旦動き出すとその動きを止めるのは困難であり、避難や応急対応が長期化することも少なくない。地すべり災害が発生した場合、まず、最優先で行われるのが地すべりの発生状況や被災状況についての現地調査であり、それに基づいて警戒避難体制が検討・整備される。また、地すべりの動きの抑制、被害の拡大を防ぐための応急対策工事についても並行して検討・実施される。これらは、国や自治体等が対応するが、対応策の検討が技術的に高度になる場合は、要請に基づいて土木研究所から土砂災害専門家（TEC-FORCE 高度技術指導班）を派遣することもある。

地すべり災害は進行性の災害であり、災害発生時の現地調査や警戒避難体制の構築、応急対策工事等の実施にあたっては、迅速化、安全性が強く求められることから、新技術を積極的に活用し、災害対応の高度化につなげる取り組みが重要である。土砂管理研究グループ地すべりチームでは、効果的かつ効率的な応急対応の実施に資するため、3次元地形モデル（CIMモデル）をバーチャルな現場として現地調査や警戒避難体制、応急対策工事の検討へ活用する取り組みを進めている。本講演では、地すべり災害発生時における CIM の活用方法、今年度の災害対応における CIM モデルの活用事例等について報告する。

2. 地すべり災害への CIM の活用についての検討

地すべり分野では令和元年5月に国土交通省から CIM 導入ガイドライン地すべり編²⁾が公表され、通常事業での CIM の活用が進められている。しかし、災害対応の場合は迅速に実施することが求められるために CIM 導入ガイドラインに沿って詳細な CIM モデルを作成するのは難しいと考えられる。地すべりチームでは、令和元年度から地すべり災害への CIM の活用について検討を開始し、災害対応における CIM 活用の基本的な考え方の整理³⁾、CIM モデルの作成手法についての検討^{4) 5)}を行ってきた。これら検討の成果を「地すべり災害対応の CIM モデルに関する技術資料（案）」（以下、技術資料）⁶⁾としてまとめ、地すべりチームのウェブページで令和2年5月に公表した。

技術資料については、国土交通省砂防部から全国の地方整備局等、都道府県の砂防担当部局宛の事務連絡に添付され、技術資料を参考にして CIM モデルの積極的な活用および必要な事前準備を進めるよう要請されている。令和2年7月豪雨でも多数の地すべりが発生しており、地すべりチームが技術支援を行った埼玉県、長崎県、岐阜県、宮崎県、山形県等で既に CIM モデルが災害対応に用いられている。なお、技術資料については、これらの災害対応の経験を踏まえ、必要に応じて内容の見直しを行う予定である。

3. 地すべり災害対応の CIM モデル

3.1 地すべり災害対応で求められる CIM モデル

地すべりの災害対応において重要なのは、斜面地形、変状の発生状況、保全対象の分布状況等の3次元的位置関係をふまえた地すべり災害の全体像を現地調査等によって正確に把握し、警戒避難体制の構築、応急対策工事等の検討を行うことである。そのため、地形データが重要となるが、そのような目的に用いることができるデータとしては、オルソ画像、陰影図、DEM とオルソ画像の重ね合わせ、カラー点群データ等がある（図2）。このうち、カラー点群データは、地形や地物の形状・色を3次元的に

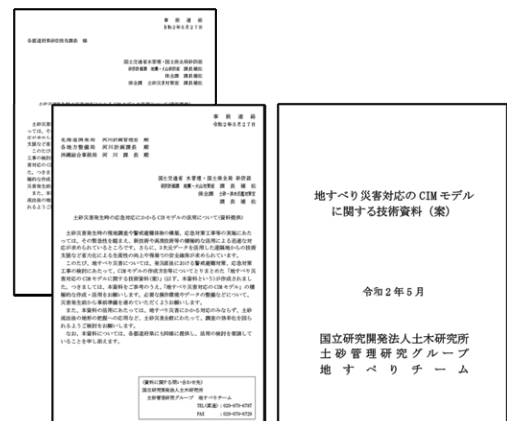


図1 事務連絡（左）と技術資料（右）

表現できるため、災害の全体像を特に把握しやすと考えられる。そこで、「地すべり災害対応の CIM モデル」は、カラー点群データからなる 3 次元地形モデルを基本とすることとした。

また、災害対応に用いる CIM モデルに求められる要件はいくつかあるが、短時間で作成が可能であることが必要である。そのため、1 日以内に作成できることを目標とし、精度は概要把握に必要なレベルとした。また、全国各地で発生する災害に対応できるよう、実施できる者が特定されるような特殊な技術を必要としないことも重要と考えた。

これらを踏まえると、発災直後に活用する地すべり災害対応の CIM モデルとしては、UAV 写真撮影と SfM 解析によって作成するカラー点群データの 3 次元地形モデルを基本とし、必要に応じてそれ以外のデータを順次追加していくモデルが実用的と考えられる。現地状況写真と 3 次元形状が組み合わさって表現されるカラー点群データの 3 次元地形モデルは、自由な視点から現場の状況を確認でき、いわば「バーチャル現場」である。災害の全体像を把握することについては現地で確認するよりも分かり易く、また、オンラインで遠方にいる者にも共有することができる。上手く使えば、災害対応のやり方を大きく変えていく可能性を秘めていると思われる。

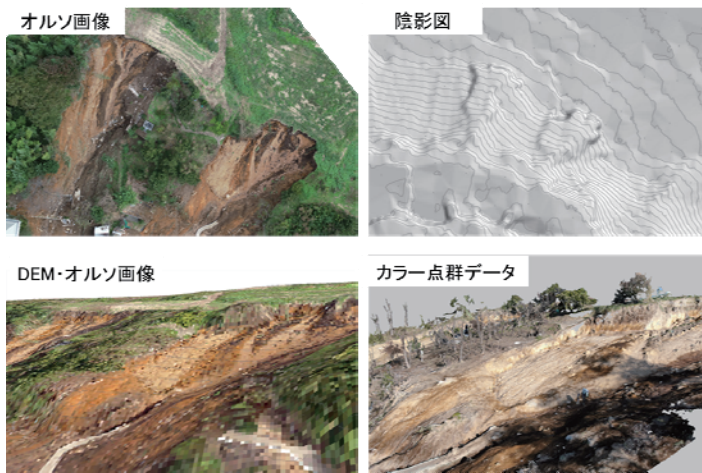


図 2 斜面地形の把握に用いられる各種データ

3. 2 地すべり災害対応の CIM モデルの構成

地すべり災害対応の CIM モデルは、迅速性を優先するために地すべり災害全体の概略的な精度の地形モデル (図 3 の①) を基本とし、必要に応じて、変状発生域の部分的な詳細地形モデル (図 3 の②) や緊急的な調査の結果 (図 3 の③)、警戒避難対策・応急対策工事の検討結果 (図 3 の④)、基盤地図情報等の公開データ (図 3 の⑤) 等の各種データを組み合わせたものとしている。

例えば、まず、UAV 写真撮影と SfM 解析によって①地すべり全体の概略地形モデル作成 (図 3 の①) を行う。これだけでも災害発生状況等が容易に把握できるようになる。更に、周辺地形や保全対象となる建物等を広めに把握できるよう、⑤基盤地図情報・国土数値情報等の公開データ (図 3 の⑤) を組み合わせると有効である。具体的には、等高線、水系線、道路、建物などを表示させると分かりやすい。

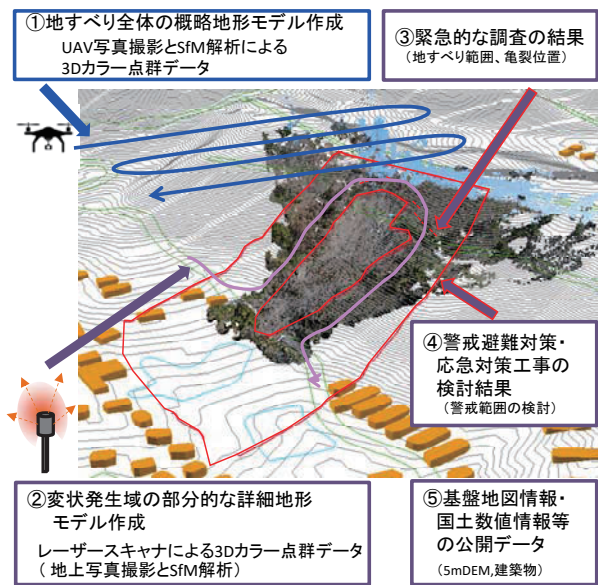


図 3 地すべり災害対応の CIM モデルの構成

ここまでは、地すべり災害発生直後に 1 日程度の作業で作成することが可能であるので、災害対応の初動から活用することが可能である。また、現地調査によって、②変状発生域の部分的な詳細地形モデル、③緊急的な調査の結果なども加えていくことも効果的である。さらに、CIM モデル上で、④警戒避難対策・応急対策工事の検討を行うこともできる。これらの作業を迅速に行い、国や自治体等の担当者が災害対応時に使いこなしていくには、事前の準備を整えておくことが重要である。具体的には、使用可能なデータの把握、協定会社の保有する資機材の把握、CIM モデル操作環境の整備等の準備が必要である。

3. 3 想定される活用方法

(1) 警戒避難体制の検討

警戒避難範囲を検討する際には、地すべり範囲と動きの方向、拡大の可能性のある範囲、保全対象と

の位置関係等を3次元的に確認することが重要である。そのためには、CIMモデルを動かして様々な視点から確認しながら、地すべりの影響範囲を予測することが有効である。

(2) 応急対策の検討

応急対策の検討では、地形形状や地物の配置の現地の状況等を考慮し、土砂流出が発生した場合の流出経路を3次元的な予測を行いながら、応急対策工の配置計画や施工計画の検討を行う。CIMモデルによって、土砂の堆積状況や現地の段差や勾配の状況、構造物・道路・河川・樹木の配置等を確認した上で検討を行うことが有効である。

(3) CIMモデルのWeb共有

国・自治体等の関係機関相互の情報伝達、打合せ協議、専門家による技術支援において、Web-GISやWeb会議システムを活用してオンラインで現場のCIMモデルを共有する。または、汎用性の高いファイル形式で共有する。これらを活用することで、状況認識の共通化、判断の迅速化、誤解による間違い防止等の効果が期待される。

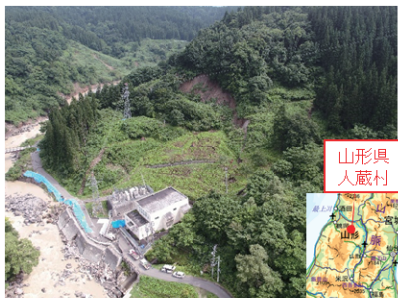
(4) 地域住民やマスコミへの説明に活用(例)

視覚的にわかりやすいCIMモデルを地域住民やマスコミへの説明に活用することで、地すべりの全体像、現地状況についての理解が向上すると考えられる。

4. 地すべり災害対応時のCIMの活用事例

4.1 地すべりの災害調査(山形県)

地すべりチームでは、山形県の要請を受けて地すべりの災害調査を令和2年8月に行い、警戒避難体制及び対策工事に関する助言等の技術支援を行った。発災直後のUAV写真等から山形県が作成した地すべり災害対応のCIMモデルを基に土木研究所において事前分析を行い、時間の限られる現地調査の効率化を図った。また、県をはじめとする関係機関への調査結果の報告や報道向けの記者会見においてもCIMモデルを活用し、調査結果を分かりやすく説明するように努めた。



発災直後のUAV写真(山形県提供)



地すべり災害対応CIMモデル



CIMモデルを用いた事前分析



災害調査の実施状況



CIMモデルを用いた調査報告



CIMモデルを用いた記者会見

図4 CIMを活用した地すべり災害技術支援

4.2 地すべり災害のリモート技術支援(埼玉県)

令和2年5月、地すべり災害に関する技術支援の要請を埼玉県から受け、応急対策や復旧対策についてリモートでの技術支援を実施した。埼玉県本庁、埼玉県秩父県土整備事務所、土木研究所の3カ所を結び、埼玉県が作成した地すべり災害対応CIMモデルを「バーチャル現場」としてオンラインで共有し、応急対策や復旧対策についての技術支援を実施した。



図5 CIMを活用した地すべり災害技術支援

5. おわりに

災害対応には CIM が有効である。3次元地形モデルを「バーチャル現場」として活用すると、3次元的位置関係をふまえた全体像の把握が容易になり、警戒避難体制の構築、応急対策工事の検討に活用することができる。遠方にある県庁・本省の担当者と現地状況を正確に共有することや、土木研究所等による遠隔での技術支援も可能になる。CIM を使えば様々な説明が一目瞭然であり、多くの関係者に対して繰り返し必要となる説明も効率的になると期待される。地すべりチームでは、令和2年7月豪雨の一連の技術支援対応で CIM モデルを活用してきたが、CIM モデルを使った説明は大変分かりやすいとの評価を、どの県からも頂いた。このような CIM モデルの良さは実際に3次元的に動かして見ないと伝わらないところがある。そのため、簡単な CIM モデルからでよいので、ぜひ取り組んでいただきたい。発災直後の対応においては、地すべり全体の概略地形モデルだけでも十分に有効である。

現時点では、国や自治体等の ICT 環境が十分とはいえず、広く普及していくには ICT 環境の整備がポイントとなると考えられる。通常の業務で用いているパソコンで CIM を扱えるようになると業務の進め方が格段に変わると思われる。また、点群データの CIM モデルを取り扱うハードウェア、ソフトウェアの機能や操作性の向上にも期待したい。現地調査の際に、タブレットやスマートグラスに CIM モデルを表示させ、現場で参照しながら調査結果が入力できたり、撮影した写真を CIM モデルにリンクできるようになると、現地調査が効率的に実施でき、結果も分かりやすく、速やかに共有できる。

効果的かつ効率的な現地調査、応急対応の実現に向けて、引き続き研究を進めるとともに、関係機関との連携を進め、現場への実装に取り組んでいきたい。

【参考文献】

- 1) 国土交通省：令和2年7月豪雨による土砂災害発生状況、https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r2dosha/r2_07gouu_2008311800.pdf、2020.8(参照日：2020年8月31日)
- 2) 国土交通省：CIM 導入ガイドライン(案)第9編地すべり編、<http://www.mlit.go.jp/common/001289037.pdf>、2019.5(参照日：2020年8月31日)
- 3) 竹下航、杉本宏之、和田佳記：地すべり CIM の活用による調査・対策の迅速化・効率化に向けた取組、土木技術資料、Vol.61-12、pp20-23、2019.12
- 4) 杉本宏之、竹下航、和田佳記、藤原一啓：発災直後に活用する地すべり災害対応の CIM モデルの検討、土木学会第75回年次学術講演会、2020.9
- 5) 和田佳記、竹下航、杉本宏之：地すべり災害の初動時に用いる CIM モデルについて、日本地すべり学会第59回研究発表会講演集、投稿中
- 6) 国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム：地すべり災害対応の CIM モデルに関する技術資料(案)、https://www.pwri.go.jp/team/landslide/kanrisya/cim/cim_model.pdf、2020.5(参照日：2020年8月31日)

暴風雪による視程障害時の除雪車運行支援技術について

技術開発調整監付寒地機械技術チーム 上席研究員 片野 浩司

1. はじめに

近年、積雪寒冷地では気候変動の影響による極端な暴風雪に伴い、車両の立ち往生や長時間にわたる通行止めなど、冬型災害の発生が増加している。そのため、暴風雪による視程障害時（写真-1）においても安全に除雪作業を行い、道路交通の早期解放や緊急車両の先導を可能とする除雪車の開発については、現場ニーズが非常に高い。

本稿では、吹雪による視程障害時においても安全に除雪作業が行える運行支援技術として、車線内を走行するために自車位置を推定する車線走行支援技術、及び衝突事故を防ぐために除雪車周囲の人・車両・道路工作物などを探知する周囲探知技術について検討したので紹介する。



写真-1 吹雪による視程障害の発生状況

2. 車線走行支援技術の検討

車線走行支援は、自車位置を正確に測位するために GNSS 測位を用いることを基本に考えているが、準天頂衛星「みちびき」の活用は各機関で検討されている。そこで、当チームでは、衛星不感地帯に必要な補完技術として、気象の影響を受けにくい磁気マーカシステムを採用し、先行的に取り組んでいる。

2. 1 磁気マーカシステムを用いた自車位置推定システムの概要

磁気マーカシステムは、道路に埋設した磁気マーカを車両底部に設置した磁気センサで検知することで、自車位置を測位する技術である。実験には愛知製鋼(株)製の磁気マーカシステムを使用した。また、磁気マーカシステムの位置情報と IMU^{*1}による自律航法を組み合わせた自車位置推定システムを新たに開発した。自車位置推定システムは IMU による自律航法を主としているが、IMU は観測時間の経過とともに測位誤差が累積される。そこで磁気マーカシステムの位置情報により測位誤差を補正する仕組みとなっている。自車位置推定システムの概要図を図-1 に示す。

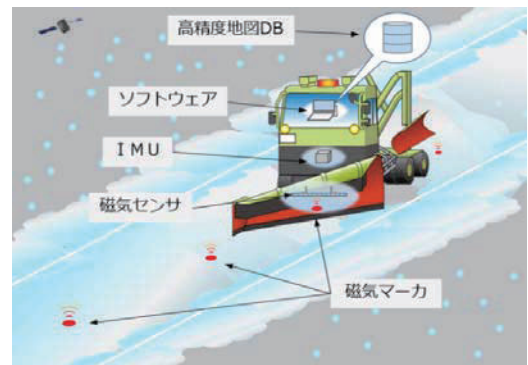


図-1 自車位置推定システム概要図

2. 2 車線走行支援ガイダンスの検証

自車位置推定システムの位置情報をオペレータに提供するための車線走行支援ガイダンスを試作し、自車位置の測位精度を検証するとともに、ガイダンス情報に従い車線を逸脱せずに走行可能か検証した。

(1) ガイダンス試作機の作製

ガイダンス試作機は、ロボット用オープンソースソフトウェア「ROS」^{*2}の可視化ツールである「RViz」をベースに新たに開発したものである。RViz は、ROS で通信されるデータであれば種類を問わず表示することができ、外部からのセンサ情報やロボットの形状モデル、地図、計画軌道などを三次元表示することができる。

図-2 にガイダンス画面例を示す。実験を行った寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路の高精度三次元地図を作成し、ベクターマップにより区画線と走行車線の中心にガイダンス用の走行目安線を表示した。また、現在位置や道路周辺状況を把握しやすいように、点群情報を基に道路や道路周辺の起伏・背景をカラー表示した。ガイダンス画面はオペレータの運転操作のしやすさを考慮し、運転席からの視点（以下、「コックピットビュー」という）、後方からの鳥瞰的な視点（以

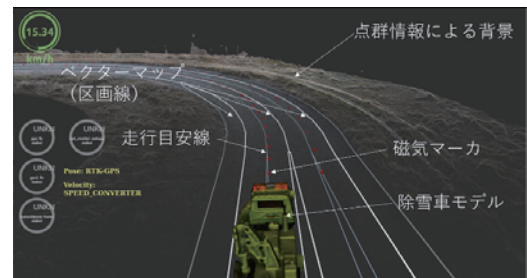


図-2 ガイダンス画面例(バードビュー)

下、「バードビュー」という)、カーナビゲーションのような二次元的な視点（以下、「2D ビュー」という）の3種類を設定した。

なお、測位方法は、磁気マーカシステムと IMU の組み合わせによる自車位置推定（以下、「磁気マーカ方式」という）のほかに磁気マーカシステムの測位精度を検証するため RTK-GNSS（以下、「RTK 方式」という）による測位も可能としている。

（２）磁気マーカ方式による測位精度検証実験

磁気マーカ方式による測位精度の検証は、磁気マーカを埋設した直線部と曲線部において、設置間隔の違いによる測位精度を検証した。

磁気センサは、除雪トラックの前方底部にブラケットを取り付け、地上高 25cm の位置に設置した（写真-2）。磁気マーカは、直径 30mm、高さ 20mm の埋設型マーカを、車線中央部に深さ 3cm で削孔した穴に埋設し、表層 1cm を充填剤にて充填した（写真-3）。

また、視程障害時における運転操作性を検証するためフロントガラス全面の視界を遮断し、視程障害時を模擬的に再現した状況において、ガイダンス情報を頼りに車線を逸脱せずに走行する実験を行った（写真-4）。

実験項目は以下のとおりである。

- ・ マーカ設置間隔：直線部 10m、20m、40m
 ：曲線部 3m、5m
- ・ 視界遮断の有無：有・無（視界遮断は直線部のみ）
- ・ 除雪作業の有無：除雪有り、除雪無し（回送）
- ・ 目標測位精度 ：±50cm

直線部の実験結果を表-1 に、曲線部の実験結果を表-2 に示す。直線部の実験では、マーカ設置間隔 10m における視界遮断無しの回送時と除雪時の条件において目標精度を達成できた。視界遮断有りの回送時と除雪時では、右方向の最大誤差が目標の 50cm を超える箇所があった。しかし最大誤差範囲では 1m 以内に収まっていること、及び平均誤差に大きな差が見られないことから、視界遮断無しと同等と判断した。一方、マーカ設置間隔 20m、40m の条件では目標精度を達成することができなかった。



写真-2 除雪車外観



写真-3 磁気マーカ埋設状況



写真-4 運転室内状況

表-1 自車位置推定実験結果(直線部)

設置間隔	除雪有無	視界遮断	平均測位誤差(m)	最大誤差範囲(m)		評価	
				左方向最大誤差(m)	右方向最大誤差(m)		
10m	回送	無し	0.08	0.77		○	
		有り	0.14	0.71		△	
	除雪	無し	0.07	0.51		○	
		有り	0.07	0.83		△	
	20m	回送	無し	0.71	2.40		×
			有り	0.52	2.26		×
除雪		無し	0.39	0.86		×	
		有り	0.47	1.41		×	
40m	回送	無し	0.58	1.42		×	
		有り	0.75	1.24		×	
	除雪	無し	0.53	0.92		×	
		有り	0.53	2.41		×	

表-2 自車位置推定実験結果(曲線部)

設置間隔	除雪有無	平均測位誤差(m)	最大誤差範囲(m)		評価
			左方向最大誤差(m)	右方向最大誤差(m)	
3m	回送	0.04	0.65		○
	除雪	0.08	0.83		△
5m	回送	0.28	0.69		△
	除雪	0.04	2.08		×

※曲線部の曲線半径は 50m である。

曲線部では、マーカ設置間隔 3m の回送時において目標精度を達成できた。マーカ設置間隔 3m の除雪時と設置間隔 5m の回送時では、上記と同様な理由で誤差に大きな差が見られなかったことから、設置間隔 3m の回送時と同等と判断した。

本実験では、圧雪路面上に磁気マーカの位置を示すマーキング等を行っておらず、ガイダンスの画面に表示される磁気マーカの位置を目安に行った。そのため、直接目視で路面を確認しながら運転するよりも、細かなハンドル操作を伴う運転となり、自律航法の測位精度に影響を与えたものと思われる。また、視界を遮断した場合は運転挙動がより不安定になるため、その傾向がより強くなったものと考えられる。

曲線部では、道路線形に合わせてハンドル操作を行いながら、磁気マーカの位置合わせを行うため、確実に磁気マーカ上をセンサが通過するためには、ガイダンスによる運転操作の習熟が必要である。

(3) RTK 方式によるガイダンス性能検証実験

ガイダンスシステムはリアルタイムに自車位置を高精度地図に表示するとともに、走行軌跡が記録可能である。高精度地図には、走行位置をガイダンスするための走行目安線が表示されているので、オペレータは走行目安線に除雪車モデルの中心を合わせて運転することで、車線を逸脱せずに走行できる。

そこで走行目安線の設定座標を基準とし、目視による通常走行の軌跡と視界を遮断したガイダンス情報のみによる走行軌跡の測位座標との差を比較することで、ガイダンス性能を評価することとした。また、オペレータにガイダンス使用時における運転操作性に関するヒアリングを行った（写真-5）。実験項目は以下のとおりである。

- ・ガイダンス画面：コックピット、バード、2D、通常走行（ガイダンス無し）
- ・走行条件：除雪有り、除雪無し（回送）

実験結果を表-3 に示す。コックピットビューでは、直線部の除雪時において目標精度を達成できたが、直線部の回送時と曲線部の除雪時では、左右方向の最大離隔距離が 50cm を超える箇所があった。しかし最大離隔距離範囲では 1m 以内に収まっていることから概ね目標精度を満たしていると評価した。

バードビューでは、直線部の回送時と除雪時においては目標精度を達成できた。曲線部の除雪時では最大離隔距離範囲が 1m を超えているため目標を達成できなかった。2D ビューはコックピットビューと同様の結果となった。一方、比較のため実施した目視による通常走行では、直線部の回送時と除雪時は目標精度内で走行できたが、曲線部では最大離隔距離範囲が 1m を大幅に超える結果となった。

通常走行とガイダンス画面毎の平均離隔距離を比較すると、直線部の回送時及び除雪時では、通常走行とバードビューの平均値は小さく、道路中心寄りに走行する傾向が見られた。また、コックピットビューと 2D ビューは、左方向に偏る傾向が見られた。

曲線部では目視による通常走行でも左方向に偏る傾向があり、2D ビューは同様の傾向を示したが、コックピットビューとバードビューでは、緩和される傾向が見られた。通常走行では、路面状況が圧雪のため中央線や外側線が視認できなかったことから、道路中心より左寄りに走行したものと考えられる。一方、コックピットビューやバードビューでは、ガイダンス画面上に区画線や走行目安が表示されているため、バラツキはあるものの道路中心に沿って走行することができた。

オペレータへのヒアリングでは、除雪車モデルと走行目安線との位置合わせに慣れが必要だが、慣れれば走行に支障はないことがわかった。また、3D 地図に背景があるため位置関係を把握しやすく、特に



写真-5 ガイダンス性能検証実験状況

表-3 ガイダンス性能検証実験結果

ガイダンス画面	走行条件	道路条件	平均離隔距離 (m)	最大離隔距離範囲 (m)		評価
				左方向最大離隔距離 (m)	右方向最大離隔距離 (m)	
無し (通常走行) 視界遮断無	回送	直線	0.00	0.49		○
				-0.26	0.24	
	除雪	直線	0.16	0.39		○
				-0.03	0.37	
除雪	曲線	-0.23	1.28		×	
			-0.84	0.44		
コックピット ビュー 視界遮断有	回送	直線	-0.36	0.71		△
				-0.61	0.10	
	除雪	直線	-0.08	0.40		○
				-0.32	0.08	
除雪	曲線	0.14	0.80		△	
			-0.23	0.57		
バードビュー 視界遮断有	回送	直線	0.02	0.60		○
				-0.30	0.30	
	除雪	直線	0.05	0.35		○
				-0.12	0.23	
除雪	曲線	0.10	1.13		×	
			-0.56	0.56		
2Dビュー 視界遮断有	回送	直線	-0.14	0.79		△
				-0.55	0.25	
	除雪	直線	-0.19	0.48		○
				-0.46	0.02	
除雪	曲線	-0.18	0.69		△	
			-0.53	0.16		

バードビューは俯瞰のため道路の先を見通すことができ、距離感を掴みやすかった。

但し、バードビュー、コックピットビューともに曲線部の出入りではハンドル操作の遅れが生じる場合があるため、ある程度の習熟は必要と思われる。また、画面を見ながらの運転でも画面酔いをする事はなかった。

ガイダンス性能の検証実験の結果、コックピットビュー及びバードビューでは、視界を遮断した状況においてもガイダンス情報に従って車線逸脱することなく除雪作業が可能なが確認できた。また、オペレータへのヒアリングの結果、バードビューが最も高い評価を得た。

3. 周囲探知技術の検討

ミリ波レーダはミリ波帯（30GHz～300GHz）の電波を用いて障害物を検出するものである。気象の影響を受けにくい特徴があり、自動車の予防安全技術に使用されるなど実用化が進められているが、吹雪時の影響については明らかにされていない。そこで、市販車用のミリ波レーダを除雪車に搭載し、視程障害時における周囲探知技術として適用可能か検証した。

3. 1 視程障害時におけるミリ波レーダの検証実験

実験は寒地土木研究所石狩吹雪実験場で行った。実験に使用したミリ波レーダは、凍結路面における除雪トラックの制動距離を参考²⁾に、前方障害物を探知するために必要な検出距離を70m以上と想定し、長距離用の76GHz帯ミリ波レーダを使用した。

実験条件は以下のとおりである。

- ・レーダ俯角 : 4度、5度、6度
- ・走行速度 : 10 km/h、20 km/h、30 km/h
- ・除雪作業の有無 : 除雪有り、除雪無し（回送）
- ・気象条件 : 降雪有り、降雪無し

除雪車を200m先の停止車両に向けて走行させ、ミリ波レーダが車両を検出し始めた距離と、車両直前まで接近し検出不能となる距離を計測することで、検出範囲を把握した。実験状況を写真-6に示す。

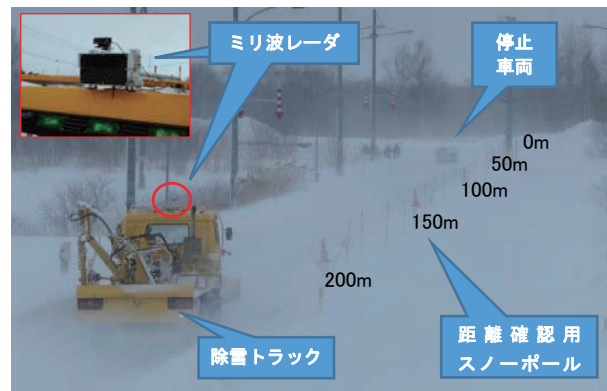


写真-6 ミリ波レーダ検証実験状況

車両検出結果を図-3に示す。グラフ縦軸には検出距離、横軸のフレーム番号は、計測間隔50ms毎の検出結果の順番を示している。降雪無しの車両検出距離は、165m手前から検出を始め、16mまで検出できた。降雪有りの車両検出距離は、132m手前から検出し13mまで検出できた。降雪有りの実験時における視程距離は50m以下であった。上記の実験環境では、降雪の影響により車両の最大検出距離が20%程度低下することがわかった。しかし、最大検出距離が低下するものの、100m以上手前から車両を検出できたため、除雪車が前方障害物を探知するために必要な距離として想定していた70mよりも更に手前から車両を探知可能であった。

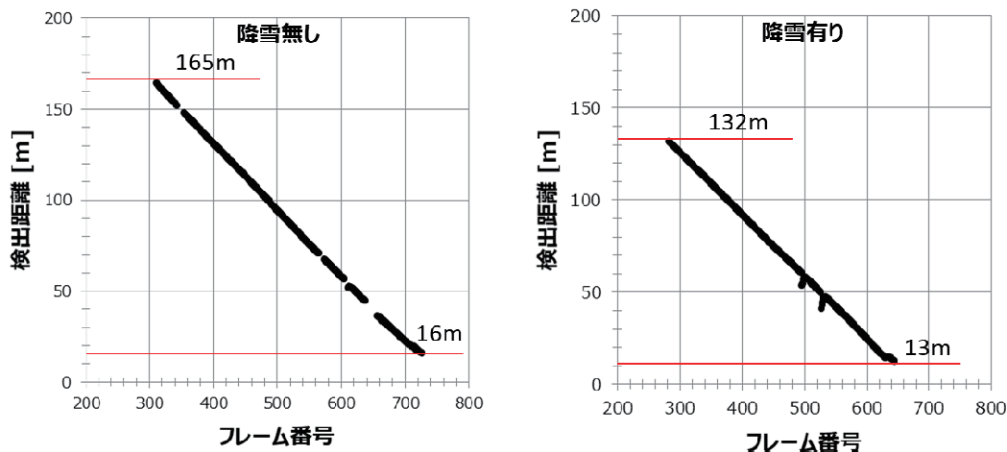


図-3 車両検出結果

3. 2 ガイダンス試作機の作製

吹雪による視程障害時においてもミリ波レーダにより車両の探知が可能であることを確認できたため、障害物情報をオペレータに提供するためのガイダンス試作機を作製した。ガイダンス試作機の表示画面は、3Dグラフィックスで描画した道路に、ミリ波レーダが検出した障害物情報をオペレータの視線（視野）で重畳表示したものである。図-4にガイダンス試作機の表示イメージを示す。

オペレータに障害物の接近を警告するため、自車（ミリ波レーダ）と障害物の距離が近づくにつれ障害物の表示色を段階的に変化させることとした。通常時は青色、注意時は黄色、警告時は赤色に変化する。また、画面中央上部にはミリ波レーダから最も近い障害物までの距離が常に表示される。

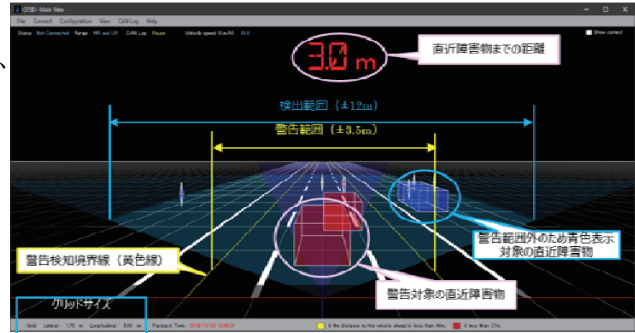


図-4 ガイダンス試作機の表示イメージ

3. 3 前方障害物ガイダンス性能検証実験

ミリ波レーダ及びガイダンス試作機を搭載した除雪トラックのフロントガラスの視界を遮断し、吹雪による視程障害を模擬的に再現した状況において、除雪トラックを走行させたときにガイダンス試作機により検出した前方の障害物情報のみを用いて安全に停止可能か検証した。

実験は寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路で行った。実験コースのスタート地点から100m先の路側帯及び200m先の自車線に障害物を配置し、20km/hの走行速度で障害物に接近した。障害物にはコーナリフレクターを使用した。実験状況を写真-7に示す。実験は被験者2名で行い、被験者はガイダンス試作機に従って自車線を走行し、赤色の警告表示を認識したところで停止操作をすることとした。

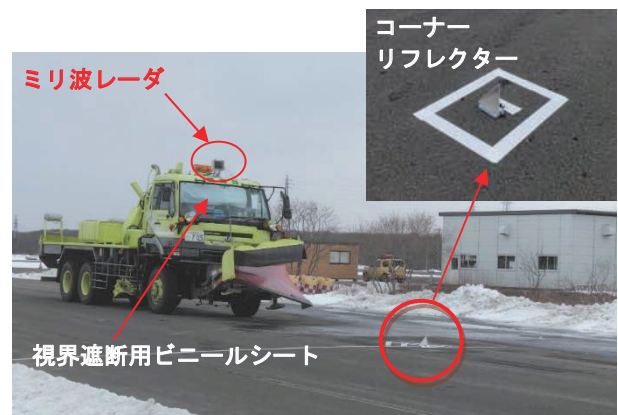


写真-7 検証実験状況

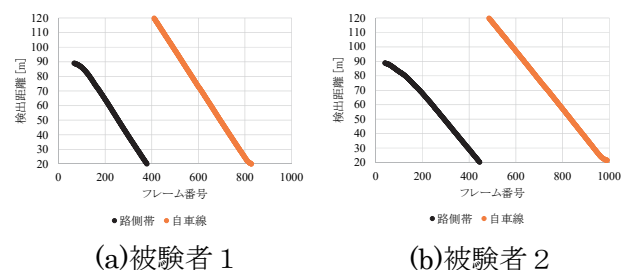
表-4 停止実験結果

No	警報距離(m)		検出範囲(m)		停止時の障害物までの距離(m)			
	注意 黄色	警告 赤色	検出幅	警告幅	被験者1		被験者2	
					路側帯	自車線	路側帯	自車線
1	40m	20m	3.5m	3.5m	-	5.8m	-	8.6m
2			8.0m	3.5m	-	7.8m	-	6.0m
3	50m	25m	3.5m	3.5m	-	10m	-	11.8m
4			8.0m	3.5m	-	12.9m	13.5m	14.1m
5	60m	30m	3.5m	3.5m	-	15.5m	-	17.5m
6			8.0m	3.5m	-	17.7m	19.2m	17.5m

表-4に実験結果を示す。すべての条件において被験者2名ともにガイダンス情報に従い、自車線障害物の手前で安全に停止することができた。警告距離20mでの平均停止距離が7.05m、25mでは12.2m、30mでは17.05mだったことから、本実験の条件において安全な停止距離を確保するには、警告距離を30mにすることが望ましいと考えられる。

路側帯の障害物は、誤検出により自車線に誤表示した場合、その情報を見たオペレータが停止操作をするか検証するために設置したものである。図-5に一例として実験No.6におけるフレーム毎の検出結果を示す。路側帯の障害物は誤検出率が0%であり、路側帯の障害物が誤って自車線に表示されることはなかった。

被験者に対するガイダンス試作機の評価に関するヒアリングでは、前方が見えない状況ではガイダンス試作機自体の有効性は高く、前方に何か障害物があるという情報は安心感に直結するため、できるだけ遠方から障害物を把握することが重要だとわかっ



	検出率	未検出率	誤検出率	正検出率
路側帯	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%
自車線	100.0%	0.0%	10.0%	90.0%

図-5 障害物検出結果 (No.6)

た。また、オペレータとしてはより安全側で警報を受ける方が良く、今回の条件だと注意 60m 警告 30m でのタイミングが望ましいことがわかった。一方で、画面表示（視覚情報）のみでオペレータに情報を伝達する方法には限界があり、音による警報と組み合わせることが有効であることが確認できた。

4. おわりに

本研究では、暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業が行える運行支援技術として、自車位置を推定し車線内を走行するための車線走行支援技術、及び除雪車周囲の人・車両・道路工作物などとの衝突事故を防ぐための周囲探知技術の開発に取り組んだ。

車線走行支援技術は、磁気マーカシステムを用いた自車位置推定システムの車線走行支援ガイダンスを試作し、除雪車の前方視界を遮断した状態で、ガイダンス情報に従って車線内を走行する実験を行った。車線走行支援ガイダンスは、目標測位誤差（±50cm 以内）で自車位置を表示し、車線逸脱することなく除雪作業が可能であることを確認した。

周囲探知技術は、ミリ波レーダを用いた前方障害物探知ガイダンスを試作し、これを搭載した除雪車の前方視界を遮断した状態で走行して、ガイダンス情報に従って除雪車を停止させる実験を行った。ガイダンス情報に障害物の未探知・誤探知はなく、オペレータはガイダンス情報に従いながら、障害物の10m以上手前で安全に停止可能であることを確認した。

今後、車線走行支援技術については、主たる自車位置測位である衛星測位（みちびき等）に関する一般道での検証試験を行う予定であり、周囲探知技術については、ガイダンスシステムの改良及び警告方法の検討とともに、一般道を対象とした除雪現場での効果検証及び課題の抽出を行う予定である。

※1 IMU (Inertial Measurement Unit : 慣性計測装置)

※2 ROS (Robot Operating System : ロボット用ソフトウェアプラットフォーム)

【参考文献】

- 1) 新保貴広、山口洋士、久慈直之：視程障害時における除雪車運行支援技術に関する検討、寒地土木研究所月報、No.798、pp.25-31、2019.11
- 2) 田畑修、山元達治：除雪トラック用タイヤ性能調査試験について、第33回北海道開発局技術研究発表会、pp.203-208、1990.2

〔 新技術を活用した生産性向上の取り組み 〕

建設現場が無人化する日に向けて

河川 CIM で魅力的な川づくりを目指す！
－地形編集と環境評価ツールの開発－

見えないひび割れ・塩分を見えるようにする技術
－近接目視が困難な部位等のための点検診断技術の開発－

建設現場が無人化する日に向けて

技術推進本部 本部長 岩見 吉輝

1. はじめに

近年我が国が直面している人口減少・少子高齢化の影響を受け、建設業界では就業者の高齢化が急速に進行している。建設業ハンドブック 2018¹⁾によると、建設業就業者における55歳以上の割合は、1998年は24.2%であったのに対し2017年は34.1%と約10%上昇しており、一方29歳以下の割合は、1998年は21.6%であったのに対し2017年は11.0%とこちらは約10%低下している(図1)。また、2014年における年齢階層別建設業就業者数によると²⁾、高年齢者が最も就業者数が多く、年齢階層が低下する毎に減っている逆ピラミッド型となっており(図2)、近い将来に100万人以上の熟練技能者が一挙にリタイヤすることが推測される。このことは、社会資本整備の担い手が今後大幅に不足する可能性を示しており、安定的で安全な社会資本整備が滞ることが懸念される。

この問題を解決するためには、建設事業においてICTなどの最先端技術を有効に活用し、建設労働生産性を飛躍的に向上させることが必要である。国土交通省ではこの課題に対し、建設生産プロセスにおいて抜本的に生産性を向上させる施策としてi-Constructionを実施している。また一方、(国研)土木研究所では、ICTを活用した次世代建設システムとして、無人化施工や建設施工自律化について研究を進めている。

本稿では、この「i-Construction」「無人化施工」「建設施工自動化」について紹介する。

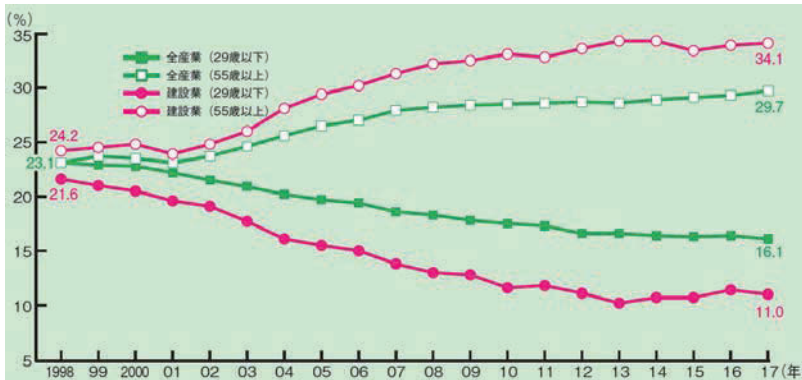


図1 建設業就業者¹⁾(2017)

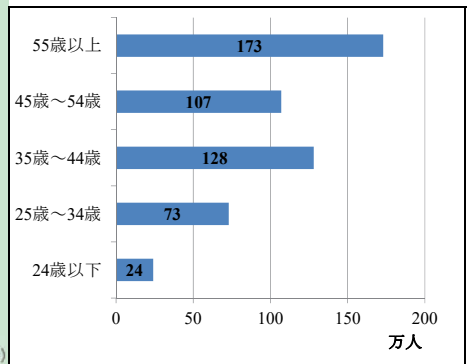


図2 年齢階層別建設業就業者²⁾(2014)

2. i-Construction

i-Constructionは、建設業界全体の生産性を向上させることを主眼とした取り組みである。2019年度は直轄工事の公告件数の79%でICT施工を実施している実績がある。今後は地方の中小建設会社への普及拡大が重要である(図3)。

このi-Constructionの取り組みの中では、新たにICTを用いた方法による技術基準がつけられていったことが重要である。今後ICT関連の新しい技術の開発・使い方によって、従来の考え方や仕事のやり方が変わってくることで、さらにそのことによって生産性向上が図られることが期待されている。

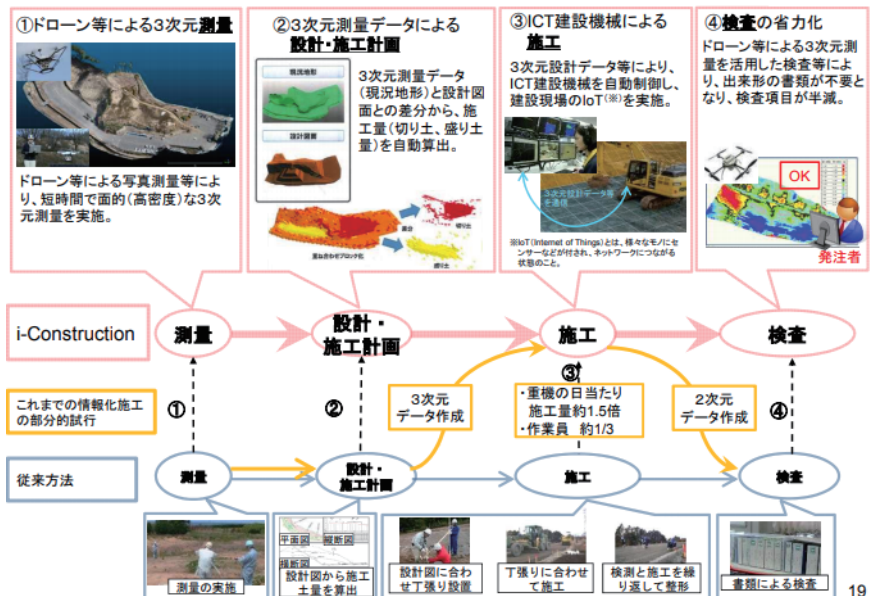


図3 i-Construction (ICT土工) 概要

3. 無人化施工

3. 1 無人化施工概要

我が国はこれまで多くの自然災害に見舞われており、甚大な被害が発生している。災害発生後の被害拡大防止や早期の復旧のためには、被災状況の調査や道路啓開などの災害応急復旧を迅速に行うことが重要であるが、これらは二次災害の危険性が高く、安全性に配慮しつつ迅速に高効率で施工を行うことは困難な場合が多い。この課題に対する一つの解決策として、遠隔操作が可能な建設機械を用いるオペレータは安全な場所から操作を行う施工方法が考えられる。この遠隔操作型建設機械を用いる施工は「無人化施工」と呼ばれ、1993 年度に雲仙普賢岳噴火後の土石流対策として実施された除石工事を契機に発展し、実用的な工法としてこれまで日本国内で 200 件以上の活用実績を持っている³⁾ (図 4)。

しかし、通常の施工方法に比べると施工効率が大幅に低下するため、今後改善し、生産性を高める必要がある。

また、この無人化施工技術は、応用すれば理論的には地球上のどこからでも建設機械の操作が可能であることから、オペレータは例えば自宅や都心のオフィスから操作することも可能である。このことは建設労働者の飛躍的な働き方改革と労働環境改善の実現可能性も秘めており、今後の研究が期待されている。



図 4 無人化施工概要 (カメラ画像方式)

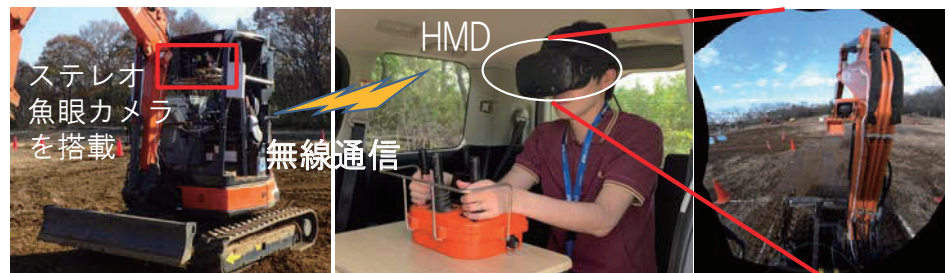


図 5 VR を活用した無人化施工

3. 2 無人化施工の課題と研究事例

前述のように無人化施工の施工効率は、通常の施工方法に比べ大幅に低下することが知られており、定量的に研究した結果では約 45%程度となっている⁴⁾。これは単純計算で無人化施工の工期が 2 倍以上になることを表しており、非常に大きな課題となっている。

無人化施工の施工効率を向上させる試みは、(国研) 土木研究所を始め様々な研究機関、企業などが行っている。例えば、運転席型のラジコンコントローラ⁵⁾、実際の運転席に座っているような VR 空間⁶⁾ (図 5)、操縦している建設機械を真上から見下ろした仮想画像 (ア라운드ビュー)⁷⁾、油圧ショベルのバケット反力を運転者にフィードバックするシステム⁸⁾、建設機械の傾きや振動を運転者に伝達するシステム⁹⁾、などが研究・開発されている。また、無人化施工は操作信号や画像などを無線で伝送するため、機械的な効率は無線環境に大きく依存している。そこで 5G 通信技術を活用した試みなども行われている¹⁰⁾。土木研究所と国土技術政策総合研究所では、この 5G 通信技術を常備した大規模な研究・実験・施工フィールドを整備し、今後研究を行うことを計画している。

また土木研究所ではシステムではなく運転者に着目し、無人化施工 (遠隔操作) に長けた運転者の抽出や、運転者の教育が施工効率を改善できる一つの方法と考え、研究を行っている¹¹⁾。

4. 建設施工自動化

4. 1 建設施工自動化概要

建設業界ではこれまで、ロボット、センサ、ヒューマンインターフェース、AI など我が国が強みを持

つ基盤技術の導入が他の業界に比べて遅れていた。そこで現在、これら最先端の技術を活用し、建設生産性の大幅な向上を実現することが期待されている。具体的には、これらの技術を用いて建設施工の一部あるいは全体を自動化し、非熟練技能者が熟練技能者並みの生産能力の発揮を実現することや、より少人数で建設施工を行うことで一人当たりの生産能力を上昇させるということである。そして最終的には、建設施工現場に必要な人員が最低限または無人となり、遠隔地などから指令を発信するだけで施工が自動で行われる状態、が将来的な目標となる（図6にイメージ図を示す¹²⁾）。



図6 建設施工の将来イメージ

この建設施工自動化は近年研究が進められてきており、施工会社や建設機械メーカーなどが建設機械の自動運転等で試行を行っている^{13)~16)}。しかし、建設施工は単独の建設機械による作業だけではなく、複数の機械の協調作業や全体の施工計画、施工後の検査などで構成されている。上記の将来目標を実現するためには、BIM/CIMや施工データ、AIの活用などを行い、これらの自動化を行うことも求められている。

4. 2 建設施工自動化の課題と土木研究所での取組

「建設業のためのロボットに関する調査報告書（日建連）¹⁷⁾」によると、建設業へのロボット実用化に向けた課題として下記の点などが挙げられている。これはそのまま建設施工自動化の実現に向けた課題ととらえることができる。

- ① 多種多様な建設現場環境や作業内容に対応できる柔軟な建設ロボットの開発
- ② 自動化を念頭においた法令・規制の整備
- ③ 協調領域の明確化と技術の標準化による研究開発体制の整備。それによる開発コスト削減。

これらの課題を解決するためには、法令・規制の提案とともに、建設施工会社、建設機械メーカー、レンタル業者、測量業者、情報システム業者などの様々な研究者が一体となり協力することが必要である。そこで（国研）土木研究所技術推進本部では、「各業者間の競争・協調領域の明確化」「多業種参入を容易にするための共通研究基盤（研究プラットフォームなど）の整備」「オープンイノベーションを前提とした実証フィールドの構築」「自律化を考慮に入れた施工方法、監督検査方法、安全規格の提案」などを目的とした研究を、現在実施中の重点研究や令和4年から開始される次期中長期研究開発プログラムなどを通して実施していきたいと考えている。

5. おわりに

国土交通省では、これまでの i-Construction の取り組みをふまえ、さらなる社会資本の変革と働き方の変革による安全・安心な社会の実現のために「インフラ分野における DX」を推進している。（国研）土木研究所も、国土交通省などと連携して本施策の推進に取り組んでいきたい。

【参考文献】

- 1) 日本建設業連合会：建設業ハンドブック 2018, 2018.
- 2) 日本建設業連合会：建設業ハンドブック 2015, 2015.
- 3) 新田恭士：災害復旧に貢献する無人化施工技術，土木技術，Vol.67, No.4, pp.16~23, 2012.
- 4) 茂木正晴, 油田信一, 藤野健一：油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案，建設機械施工, Vol.66, No.8, pp. 71-79, 2014.
- 5) 茂木正晴, 西山章彦, 橋本毅, 藤野健一, 油田信一：油圧ショベルの遠隔操作における視覚及び操作インターフェースの違いによる作業効率の向上について，第16回建設ロボットシンポジウム, O6-4, 2016.
- 6) 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その1.基本性能検証，第74回土木学会年次学術講演会, pp.VI346, 2019.
- 7) 橋本毅, 山田充, 山内元貴, 新田恭士, 油田信一, 野末晃, 上原広行：遠隔操作建設機械への俯瞰映像システムの導入について，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 1P2-D02, 2019.

- 8) 科学技術振興機構：遠隔操作性と繊細な作業性を備えた建設ロボットを開発，
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20161111-2/index.html>， 2020/8/13 閲覧。
- 9) 熊谷組：無人化施工 VR 技術の開発， https://www.kumagaigumi.co.jp/news/2019/pr_20191115_1.html，
2020/8/13 閲覧。
- 10) 古屋弘，森直樹，永嶋充：次世代高速通信 5 G を用いた重機の遠隔操縦試験，大林組技術研究所報，
No.82， pp.1-8， 2018。
- 11) 藤野健一，橋本毅，油田信一，建山和由：無人化施工に最適なオペレータの選抜手法に関する研究，
土木学会論文集 F3， Vol.74， No.1， pp.11-17， 2018。
- 12) 国土交通省：ロボット・AI 技術，
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000028.html， 2020/8/13 閲覧。
- 13) TOPCON ドーザシステム， <https://www.topcon.co.jp/positioning/products/product/mc/dozer-system.html>， 2020/8/13
閲覧。
- 14) 鹿島建設：クラウドアクセル， https://www.kajima.co.jp/tech/c_ict/automation/index.html#body_01， 2020/8/13 閲覧。
- 15) 大成建設：次世代油圧ショベルによる作業自動化を実証，
https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2019/190426_4636.html， 2020/8/13 閲覧。
- 16) 大林組：土砂の積み込み作業を自動化するバックホウ自律運転システムを開発しました，
https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20190718_1.html， 2020/8/13 閲覧。
- 17) 日本建設業連合会土木情報技術部会：建設業のためのロボットに関する調査報告書， 2020。

河川 CIM で魅力的な川づくりを目指す！

－地形編集と環境評価ツールの開発－

水環境研究グループ グループ長 萱場 祐一

1. はじめに

近年水災害が頻発し、中小河川においても大規模な災害復旧事業が行われることが多くなっている。しかし、災害復旧事業は厳しい時間的制約の中で行われるため、環境や水辺の利用にまで配慮して多自然川づくりを実践することが難しい。このため、事業者、コンサルタントの技術者が魅力的な川づくりを迅速に行うための支援ツールが求められている。一方、3次元測量技術の高度化やその成果をそのまま用いる CIM (Construction Information Modeling / Management) も浸透しつつあり、これらの技術を川づくりの場面で活かせるような技術の確立も求められている。水環境研究グループでは、3次元測量や CIM を頭に置いた新しい河道計画プロセスと本プロセスに基づく川づくり支援ツールの開発を並行して行っている。本報告ではそれらの概略について説明する。

2. 中小河川における新しい河道設計プロセス

現行の河道設計プロセス (図-1 左) と当グループで提案している河道設計プロセス (図-1 右) を示す。現行のプロセスでは、流下能力確保に必要な河道断面を単純な形状として決めた後に環境の配慮を行うため、多自然川づくりに求められる三次元的で複雑な地形処理が困難であり、環境への配慮が不十分な場合が多い。当グループでは、これを改善するため以下に示す地形編集ツール“RiTER”，生息環境の良し悪しを面的に評価する“EvaTrip”の開発を行った。

3. RiTER と EvaTrip の概要

RiTER (River Terrain EditoR) は河道地形を柔軟に編集するために開発しているツール群である。ここでは、横断面図ベースで地形編集を行う RiTER Xsec (cross-sectionの意、以下、RiTER) を概説する。RiTERはiRIC (河川等の水・土砂の数値シミュレーションのプラットフォーム) の GUI (Graphic User Interface) として実装されている。RiTERでは河道設計に欠かせない平面

図と横断面図を同時に編集することが可能であり、①平面図に線情報 (官民境界、道路など) をセットすると横断面図でも表示する機能、②横断面図上で法勾配を確認しながら法面編集する機能等を追加した。iRICに備わる横断面からの計算格子生成機能と合わせることで編集した地形をもとにすぐに水理計算が実施できる。EvaTRiP (Evaluation Tools for River environmental Planning) は、河川環境評価を行うためのソルバ (個別機能を iRIC ではソルバと呼ぶ) であり、iRICの水理計算ソルバで実施した解析から得られた時々刻々の水深・流速をもとに生息場評価などの環境に関わる評価値を算出することができる。瀬・淵・早瀬の環境条件を事前に定義することにより計算結果からその分布を算出し、定量的な環境評価が可能となっている。

4. おわりに

地形編集機能については、3次元地形をそのまま直感的に編集するツールや、設計したものの空間認識を容易にする VR 技術の活用についても検討中である。これまでは、河道の中 (堤外地) における多自然川づくりが中心であったが、堤内地側 (背後地) の状況を考慮した景観検討も今後必要になると考えている。今後機会を設け紹介したい。

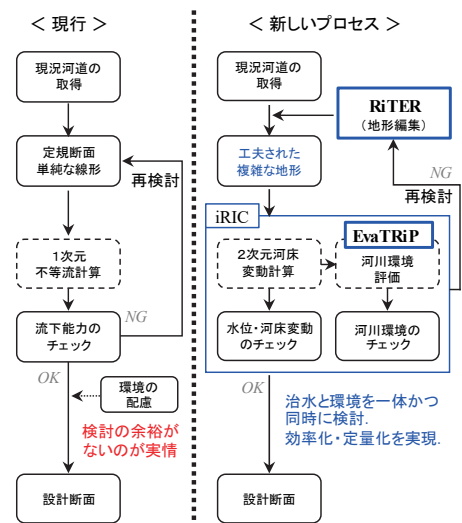


図-1 現行及び提案した河道設計プロセス

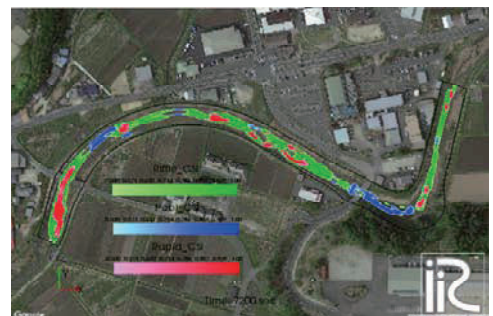


図-2 EvaTRiP の機能の一例 (瀬淵の抽出)

見えないひび割れ・塩分を見えるようにする技術 —近接目視が困難な部位等のための点検診断技術の開発—

材料資源研究グループ グループ長 西崎 到

1. はじめに

土木構造物の近接目視による点検・診断は、構造物の健全度の把握のために重要であるが、直接目視することが困難な部位や、塗膜等で被覆されている部分などでは、コンクリートの表面に発生するひび割れなどの変状を把握することが難しい場合がある。このため近年、このような部位のひび割れ等の変状を見やすくするのに役立つと期待される材料や技術が提案されている。また、コンクリート中への塩分の侵入は、構造物の耐久性に深刻な影響を及ぼす塩害を引き起こすおそれがあるが、塩分侵入部位は目視による点検では確認できない。塩分の侵入深さの把握は、現在はコア採取等で試料を採取して実施しているが、構造物に与える影響が大きく多用できない。塩分侵入部位を簡易に計測する技術は、点検時に塩害のおそれを未然に察知したり、補修時にはつりによる塩分除去を確実にしたりすることを容易にし、維持管理の信頼性向上や効率化に寄与すると考えられる。このような、目視困難なひび割れや、コンクリート中の塩分侵入部位を「見る」技術について、土木研究所 iMaRRC では様々なシーズ技術の中から、実用化の可能性や、現場における試行に向けた検討を行ってきたので、事例を紹介する。なお、本研究は国立研究開発法人物質材料研究機構（NIMS）との共同研究により実施したものである。

2. ひび割れを「見る」技術

2.1 ひび割れを可視化する材料技術の例

ひずみやひび割れに応答する機能材料に関する研究はこれまでも国内外で研究が進められており、土木分野への適用についても注目されつつある。表-1にそのような材料に関する研究の例を示す。これらはそれぞれの検知の目標とする変状と、「見え方」の発現原理が異なるものの、いずれも面的な変状の情報が視覚的に得られるため、構造物の効率的な劣化検知に役立つ可能性がある。

土木研究所では、近接目視が困難な場所や、表面被覆材で塗装され表面が直接目視できないコンクリート表面での、ひび割れの発生の検知を容易にする新しい方法の開発を目的に、表-1の技術のなかから、いくつかの技術について検討を行ってきた。本稿ではこのうち「モアレ縞」に関する内容を事例として取り上げて紹介する。

2.2 モアレ縞の原理と開発目標

モアレ縞とは、図-1に示すように、規則正しく並んだ格子もしくは模様を重ね合わせた際に発生する縞模様である。身近な例では、ネットフェンスの重なり、印刷時の網点の干渉、モニターで格子模様を表示した時の画素と格子の重なりによって生じる例があげられる。通常はモアレ縞を軽減あるいは抑制する工夫がなされるが、あえてモアレ縞を発生させその特性を利用した計測法があり、古くから工作機械の治具定位⁶⁾や等高線、等変位線を直接視覚情報として得る方法に用いられてきた。最近では、コンピュータの高性能化によって画像解析が容易になったことからサンプリングモアレ法⁷⁾など、デジタル画像処理を利用した高速高精度な計測法として開発が進んでいる。

土木分野におけるサンプリングモアレ法の利用による橋梁などの構造物のたわみを計測する手法も最近報告されている⁸⁾が、この方法では、高速かつ高精度であるものの、基準となる初期画像と変状・

表-1 新材料による構造物の劣化検出・診断技術

新材料	技術の概要	文献
応力発光体	応力作用時に発光する塗料によるひび割れの動的検出。	1)
力学応答樹脂	力学的刺激に反応して発光強度や色に変化。	2)
モアレ縞	干渉縞によって変形前後の画像処理でひずみを可視化。	3)
ひび割れ検出塗料	ひび割れによって侵入する酸素に反応して発光が消光。	4)
オパール薄膜	変形を検知して変色するシートによってひずみを可視化。	5)

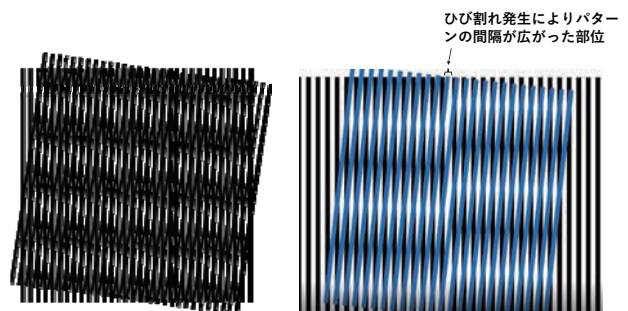


図-1 モアレ縞の例

図-2 ひび割れ部位のモアレ縞のずれ

変形発生後の画像との比較により高精度な測定を実現しているため、カメラのわずかなずれも許容できず、年単位の長い期間での計測は不向きであった。

本研究では、モアレ縞を活用しつつ、変状が起こる前の初期画像を不要とするとともに、新たに発生したひび割れを検知できる技術を目指して検討を実施した。

2. 3 モアレ縞を活用したひび割れを「見る」新しい方法の原理

本研究の方法においても従来の方法と同様に、ひび割れが発生する前に、格子状などの規則的なパターン模様（モデルグリッドという）をコンクリート表面に施す必要がある。ただし、初期における写真は不要であり、モアレ縞は、点検時に撮影した写真に、格子（マスターグリッドという）を重ね合わせて少し傾けることで発生させる。ひび割れが発生している場合には、発生したひび割れによりコンクリート表面の規則的なパターンの間隔が広がるため、ひび割れ線を境にモアレ縞のずれが発生する（図-2）。これにより、ひび割れの発生を視覚的にとらえようとするものである。

この方法では、ひび割れの検知だけでなく、ひび割れの幅の計測も可能である。図-3に算出の原理を示す。計測によりモアレ縞の幅 d と縞のずれ Δd が得られれば、式(1)によりひび割れ幅 w を容易に算出することができる。なお、 a はモデルグリッドの格子間隔である。

$$w = a \times \Delta d / d \quad (1)$$

点検時に撮影した写真にマスターグリッドを重ね合わせることによるモアレ縞の発生や、モアレ縞間隔やずれ間隔の計測は、PC上で一般の画像解析ソフトでも可能ではあるが、ある程度の熟練と労力を要する。そこでこれらの作業を容易にし、現場での活用役に役立つための専用の画像解析ソフトウェアを作成した。以下の実験ではこの専用ソフトウェアを用いて実施している。

2. 4 モアレ縞を活用したひび割れを「見る」新しい方法の実証実験

本技術を実際のコンクリート構造物の点検に役立てるために、必要と考えられる条件はいくつかあるが、そのうちのひとつに、近接目視が難しい場合を想定している点から、ある程度遠方からひび割れを「見る」ことができるか？が挙げられる。数十m程度離れた位置からでもひび割れを「見る」ことが可能であれば、本技術の実際の点検への適用可能性が広がると期待できる。そこで基礎的な実験として、規則的なパターンを施したコンクリート供試体に、人為的なひび割れを発生させ、数十m程度の距離から本技術により確認可能かを検証する実験を実施した。実験で確認されたひび割れの状況の例を図-4に示す。

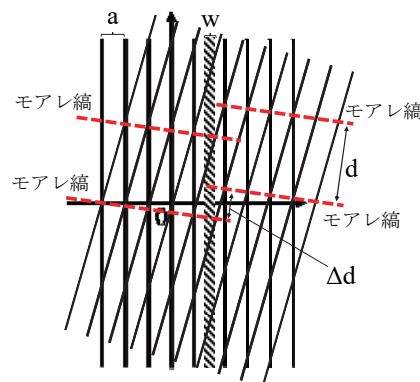
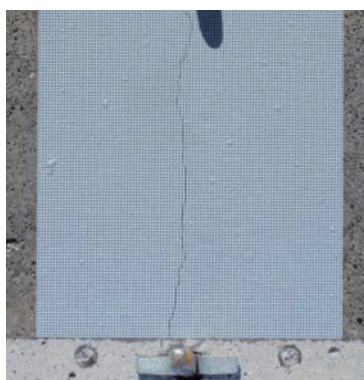
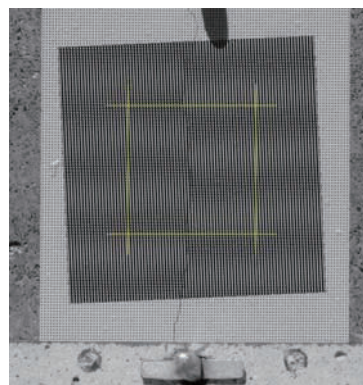


図-3 ひび割れ算出の原理⁸⁾



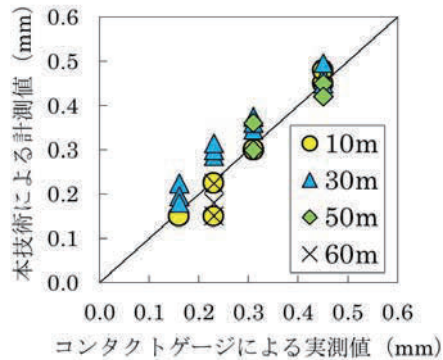
(a) ひび割れを発生させ遠方から撮影したコンクリート供試体



(b) 左の画像にマスターグリッドを用いて発生させたモアレ縞のずれ

図-4 遠方から見たコンクリートのひび割れとモアレ縞のずれの発生状況の例

実験ではひび割れを「見る」だけでなく、図-3の方法によるひび割れ幅の算出も行った。コンクリート供試体にひび割れをコンタクトゲージで測定したひび割れ幅と、同じひび割れを遠方から本技術で測定したひび割れ幅の結果を図-5(a)に示す。50m程度の距離からであれば、望遠機能のある市販のカメラを使うことによって、0.3mm以上のひび割れであれば±0.1mm程度の誤差で測定可能で、0.3mm以下のひび割れでも精度が劣るもののひび割れの検出ができることが確認できた。

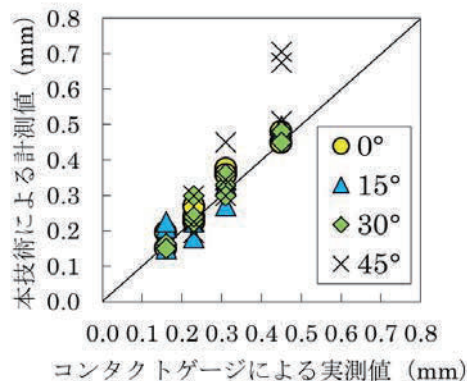
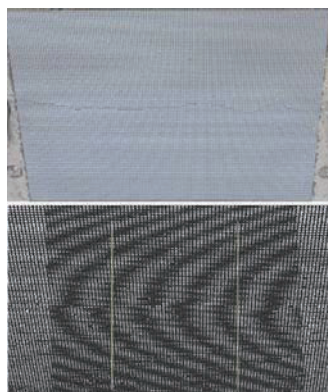


(a) 遠方からのひび割れ幅測定結果

(b) 実験の状況

図-5 遠方からひび割れを「見る」実験の結果と状況

また、本技術にさらに必要な性能として、点検する部材の注目する面との角度が、ある程度ある場合でも、ひび割れを「見る」ことができることも挙げられる。実験ではこの点についても検討を行った。測定面の鉛直線に対して角度がある場合のモアレ縞の状況の例を図-6(a)に示す。角度がある場合はモアレ縞にもひずみが生じるが、図-6(b)に示すように30°程度までの傾きであれば十分に良好な精度でひび割れ幅が測定できることが分かった。



(a) 角度がある場合のモアレ縞の例

(b) 角度がある場合のひび割れ幅測定結果

図-6 角度がある場合のひび割れを「見る」実験結果

2.5 モアレ縞を活用したひび割れを「見る」の応用と今後の課題

本技術は近接目視が困難な部位のコンクリートの点検において、ひび割れの発生検知の効率化に効果が期待されるが、実用化にあたってはさらなる具体的な使い方の提案と、効果の確認・検証が必要である。現在はこの点に関する検討を進めているところであるが、本技術は、事前にひび割れ発生を検知したい部位に、規則的パターンを施しておく必要があるという点からは、部材の広い範囲を対象とするよりは、ひび割れ発生があった場合、特に問題となりやすい特定の部位への適用が効果的であると考えられる。そのような部材の候補の一つとしては、トンネルジェットファンの取り付けなどに使われるあと施工アンカーボルトの周囲が挙げられる(図-7)。アンカーボルトは固着部位の近傍にひび割れがあると固着力が低下することが分かっており⁹⁾¹⁰⁾、トンネル覆工コンクリートのこの部位のひび割れの発生は、適切に検知されるべきである。一方、アンカーボルトの取り付け位置はトンネル覆工コンクリー

トの天井付近であることが多く、地上面からある程度距離がある。アンカーボルト周辺の覆工コンクリートにモアレ縞を施しておけば、本技術の活用により点検を容易にできる可能性がある。そのためには本技術の暗所での適用性など、解決すべき課題もあるが、撮影時の照明法やモアレ縞の施工法など用途に合わせて改良することで、用途を明確にした新技術として確立させることができる可能性があると考え。なお、この適用法は検討中の一事例を示したものであり、既に確立しているものではないことをお断りさせて頂きたい。



図ー7 モアレ縞によるひび割れを「見る」技術の実用化が期待される適用方法の例
(トンネルジェットファン取り付け用アンカーボルト周辺の覆工コンクリートへの適用イメージ)

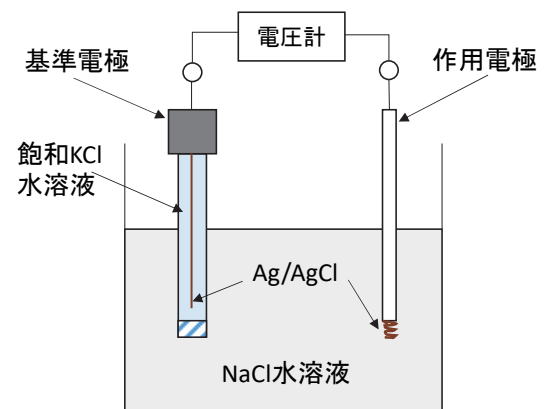
3. コンクリートに侵入した塩分を「見る」技術 3. 1 コンクリート中の塩分を「見る」技術の例

コンクリート中に多量に塩分が侵入すると、コンクリート中の鋼材を急速に腐食させ、いわゆる塩害が生じる。深刻な塩害が生じると、大がかりな補修が必要となる上に、補修によって塩分を除去することも困難になることから再劣化の恐れも大きくなる。そこで、塩害については予防保全が有効であることが知られており、沿岸構造物などにおいて、コンクリート表面からどの程度まで内部に塩分が侵入しているかを的確に知ることは、構造物の計画的な維持管理において重要である。また、塩害が生じて補修を行う際には、塩分が侵入してしまった部位の除去を行うことが多い。このとき、どの程度まで塩分が侵入しているかを的確に把握でき、塩分が侵入した部位の除去を現場でも確認できると、補修後の再劣化を防ぐことが期待できる。

コンクリート中に侵入した塩分を定量的に分析する方法は、JIS 等で定められているが、一般にコアを採取し、実験室で分析する必要があるが、構造物への影響やコストの面から多数箇所の調査は難しい。そこで、試料採取や分析の方法を簡素化した様々な方法が提案されている(表-2)。このうち、現場において比較的簡易に塩分侵入している部分を「見ることのできる」技術としての可能性の高い技術として、電極接触法によるコンクリート中の塩分量簡易測定方法としての活用について検討を行った例を紹介する。

表-2 コンクリート中の塩分を「見る」技術の例

技術名	技術の概要
可溶性塩分法	コンクリート粉体試料から水で塩分を抽出し塩分量を測定。抽出方法が精度に影響。
硝酸銀噴霧法	硝酸銀溶液をコンクリート面に噴霧、ある程度の塩分を含む部分を白色に変化させる。
電極接触法	線状の作用電極をコンクリート面に接触させ、測定した電位から塩分量を推定。
蛍光X線法	コンクリート面にX線を照射。発生する特性X線強度から塩分量を測定。専用装置・検量線作成が必要。
近赤外分光法	近赤外光線の吸光度から塩分量を測定。専用装置・検量線作成が必要。



図ー8 電極接触法に用いる電極の測定電位のモデル

3. 2 電極接触法の特徴とコンクリート中塩分測定技術への開発目標

電極接触法に用いる電極の測定電位のモデルを図-8に示す。電極接触法では、基準電極および作用電極を銀塩化銀電極として電位 ($U(\text{mV})$) を測定する。電位と JIS A 1154 の塩化物イオン量 (単位体積当たりの塩化物イオンの質量) には式(2)の関係がある¹¹⁾ため、これより測定対象の塩化物イオン量に換算することができる。

$$U = 0.418T - 0.198T \log_{10} \frac{C_{\text{Cl}^-}}{C_{\phi}} \quad (\text{mV}) \quad (2)$$

ここに、 C_{Cl^-} : 塩化物イオン量、 C_{ϕ} : 基準塩化物イオン量 (=1kg/m³)、 T : 温度 (K)

作用電極には、NIMS が開発した極めて細い線状電極を用いた (図-9)。この電極は、水溶液中だけでなく、表面を適度に濡らした状態のコンクリート表面に軽く押し当てる場合でも電位測定が可能である (図-10) こと、電極が小さく調査のための削孔径等を小さくできることから、コンクリート中の塩化物イオン量の簡易な測定にも利用可能であることが期待されていた。しかし、この手法によって得られる電極電位の測定値と、コンクリートの塩化物イオン量の関係が十分には明確にされていなかったため、本研究ではこれを明らかにすることを第一の目標とした。また、安定した電位測定を行うための留意点についても検討するとともに、本技術の特徴を活かした適用手法を提案することとした。

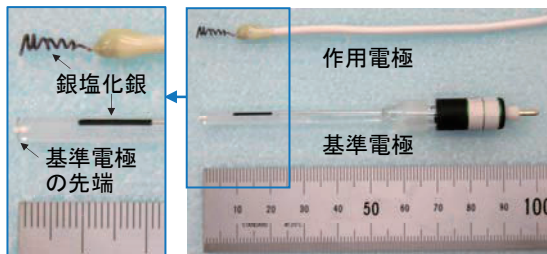


図-9 電極接触法の電極の外観



図-10 電極接触法によるコンクリートの測定イメージ

3. 3 電極接触法によるコンクリート中塩分測定技術の実証実験

コンクリート中の塩化物イオン量と鉄筋腐食の関係については、コンクリート分野において多くの研究がなされている。その多くはコンクリートを破砕して化学分析によって得られる全塩化物イオン量 (kg/m³) を指標としており、建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」では、全塩化物イオン量がおよそ 2.4kg/m³ を超える場合に塩害による鉄筋腐食が著しくなるなどの知見が蓄積され¹²⁾、現在のコンクリート構造物の耐久性確保に役立てられているなどの実績を有する。

そこで本研究では、土木構造物で用いられる様々なコンクリートについて、電極接触法の測定で得られる電位と、コンクリート中に含まれる全塩化物イオン量の比較試験を行った。表-3に実験に用いたコンクリートの種類を示す。

表-3 実験に用いたコンクリートの種類

名称※	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混入した塩化物イオン量 (kg/m ³)
			W	C	S	G	
N	50	47	165	330	827	968	1.2, 2.5, 5.0, 10.0
B	50	47	165	330	827	968	
H	36	44	165	458	721	968	

※N: 普通ポルトランドセメントを使用、B: 高炉セメント B 種を使用、H: 早強ポルトランドセメントを使用

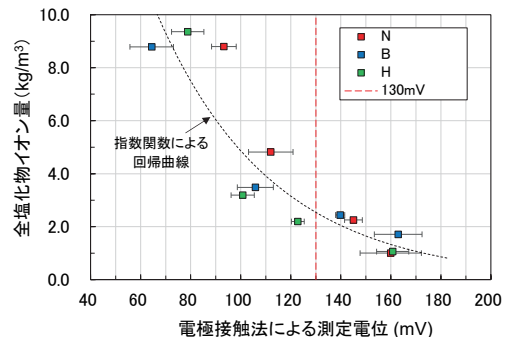
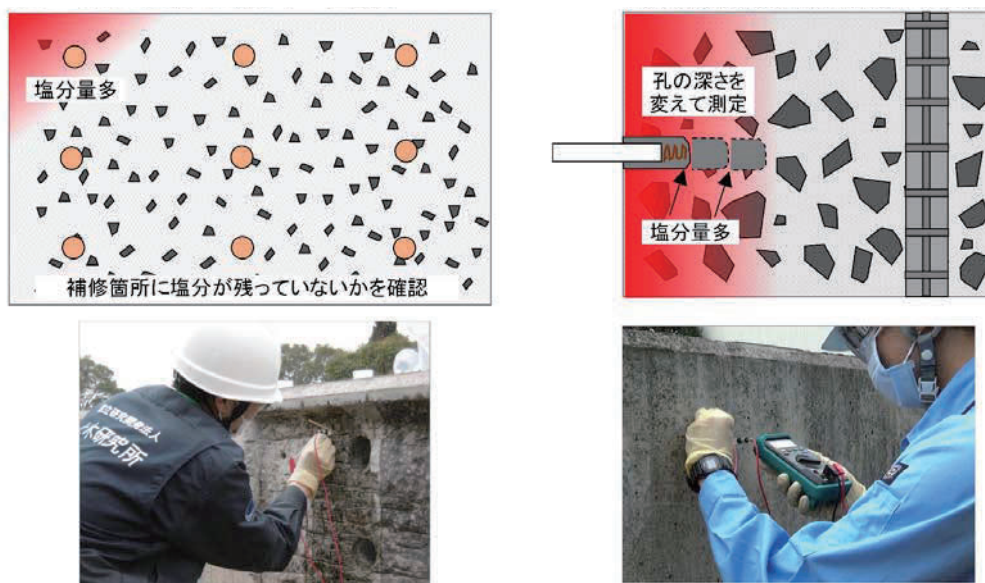


図-11 電極接触法による電位と全塩化物イオン量の関係

実験の結果を図-11に示す。接触電極法による測定電位 130mV を閾値とすると、配合によらず全塩化物イオン量がおよそ 2.4kg/m³ を超える場合を区別できていることが分かった。

3. 4 電極接触法によるコンクリート中塩分測定技術の応用と今後の課題

前項で確認した電極接触法の特徴を踏まえて、この方法を活用し塩害を受けた構造物の補修の高度化に活かす方法を検討し、はつり面の残存塩化物イオン量を推定する方法(図-12(a))と、塩害による腐食が始まる前に塩分の侵入状況を簡易に確認する方法として、かぶり深さ方向の塩化物イオン量を推定する方法(図-12(b))の2つを検討・提案した。ここではこのうち、はつり面の塩化物イオン量を推定する方法について、その適用法や可能性検討のための実証実験の事例を示す。



(a) はつり面の残存塩化物イオン量推定

(b) かぶり深さ方向の塩化物イオン量推定

図-12 電極接触法による塩化物イオン量推定の現場への活用方法のイメージ

実証実験の対象としたのは、ポストテンション方式3径間PC単純T桁(2主桁)の側道橋で、本線の道路橋と並んで約16年間塩害環境に供用されていた部材である(図-13)。600×600mmの範囲をはつり面とし、ブレーカーを用いてはつり作業を行った測定方法検証のために、はつり深さを0~70mmの範囲で変化させた。はつり作業ののちに現地で電極接触法による電位測定を行うとともに、試料を採取しての全塩化物イオン量測定も併せて行い、はつり作業途中での電極接触法による測定結果との比較も行った。

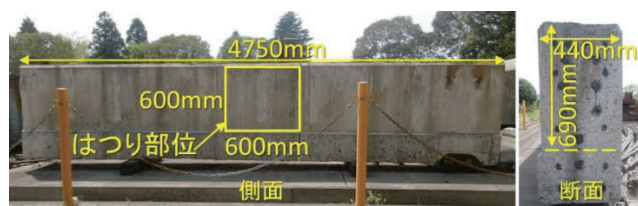


図-13 はつり面の残存塩化物イオン測定対象とした部材

この桁の、コンクリート表面からの全塩化物イオン量の深さ方向の分布を図-14に示す。60mmまでは全塩化物イオン量 2 kg/m³ 程度以上の値を示し、71mmでは全塩化物イオン量は 1.2kg/m³ 程度であった。この結果からは、表面からの距離を 50mm より大きくすれば、明らかに鋼材の腐食を促進させる全塩化物イオン量 2.4kg/m³ 以上のコンクリートを除去可能と推察される。

しかし、実際には部位によって塩化物イオンの侵入状況にはばらつきがある。はつり作業を、接触型電極法による電位測定を並行して進めた結果の例を図-15に示す。当初 50mm 程度はつっても、電位が 130mV 以下である部位が見つかった。このような部位でも、追加はつりによってはつり深さを深く

することで、電位を 130mV 以上とすることが可能となった。このように現場においてはつりでの塩分除去状況の確認と、追加はつりの効果の確認を可能と考えられ、補修後の再劣化のおそれを低減させることができる技術としての可能性を示すことができた。

本技術については、精度良く再現性のあるデータを取得するための、測定上の留意事項の検討も行った。このうち特に重要な項目としては、コンクリートの含水状態の管理法と、測定対象のコンクリート面の管理法（特に粗骨材を避けることが重要である）がある。これらについての詳細は研究報告書としてまとめて公表しているの、必要に応じて参照頂きたい¹³⁾。

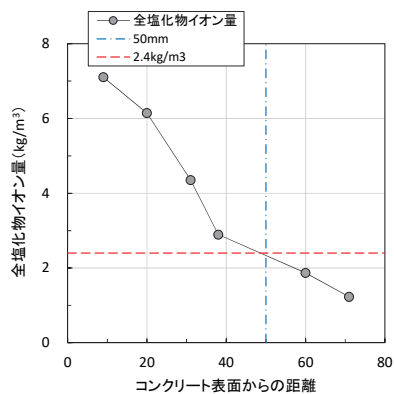


図-1 4 全塩化物イオンの深さ方向の分布

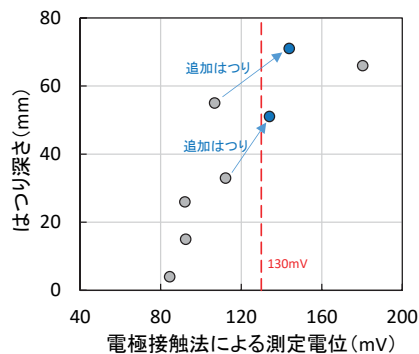


図-1 5 はつり深さと電位の結果

4. おわりに

新しい材料の土木分野への活用により、土木分野の直面している様々な課題の解決、改善につながることを期待され、多くの新材料活用の提案がある。一方で、実際の土木分野での実用化につながるには、単純に新しい材料の提案のみでなく、その土木分野における効果的な使い方や、得られるメリット、適用が効果的な方法や範囲、さらには利用にあたっての留意点や課題などを確認、取りまとめて、利用者に示すことが必要である。ここでは、そのような、新しい材料の活用技術研究の事例を「見えないひび割れ・塩分を見えるようにする技術」を例に紹介した。多くの新しい材料の提案についても同様の検討が必要と考えるので、参考になれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 徐 超男, 上野直宏, 寺崎正, 山田浩志: 応力発光による構造体診断技術, NTS, p.380, 2012.
- 2) Balkenende D., Coulibaly S., Balog S., Simon Y., Fiore G., Weder C.: Mechanochemistry with Metallosupramolecular Polymers, Journal of the American Chemical Society.136, pp.10493-10498, 2014.
- 3) 李志遠, 王慶華, 津田浩, 飯田伊佐務, 佐藤浩幸, 中島富雄: サンプルングモアレ法による構造材料のひずみ計測, 非破壊検査, 64(4), pp.160-165, 2015.
- 4) 百武壮, 西崎到, 道信剛志: ひび割れ検出塗料を用いた構造物の劣化検出技術, 検査技術, 20(1), pp.18-22, 2015.
- 5) 百武壮, 西崎到, 新田弘之, 不動寺浩, 轟真市, 田中義和: ひずみやひび割れを視覚化するシート材料を用いた計測システムの検討, 土木学会年次学術講演会概要集, 72,CS14-028, pp.55-56, 2017.
- 6) 中村常郎: 光学的長さの測定, 生産と技術, Vol.19, No.11, pp.30-36, 1967.
- 7) 森本吉春, 藤垣元治, 梶谷明大: サンプルングモアレ法による変位・ひずみ分布計測, Journal of the Vacuum Society of Japan, 54 巻, 第 1 号, pp.32-38, 2011.
- 8) 岸本 哲, 百武 壮, 新田 弘之: “き裂開口幅の測定法”, 特開 2019-200180. (出願: 2018/05/18, 公開: 2019/11/21)
- 9) 中村英佑, 栗原勇樹, 古賀裕久: 金属系あと施工アンカーの引張耐力に関する基礎的研究, 第 17 回コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, Vol.17, pp.69-72, 2017.
- 10) 中村英佑, 水戸健介, 古賀裕久: 固着方法の異なるあと施工アンカーの引張耐力に関する研究, 第 19 回コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, Vol.19, pp.515-520, 2019.

- 11) 櫻庭浩樹, 西村俊弥, 中村英佑, 古賀裕久: 塩分センサを活用したはつり面の塩分量測定方法の提案, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 18 巻, pp.615-620, 2018.
- 12) 土木研究センター: 建設省総合技術開発プロジェクトコンクリートの耐久性向上技術の開発, pp.21-33, 1988.
- 13) 共同研究報告書 第 517 号, 「コンクリート構造物の目視困難な損傷・変状に対する先端技術を用いた状態把握の適用性と性能評価に関する共同研究報告書 (I)」土木研究所他, 2020.3.

〔 新機軸となる社会インフラ分野のニーズ 〕

地質・地盤リスクに ONE-TEAM で対応する
—地質・地盤リスクマネジメントの導入と運用—

自然エネルギーを活用したダム堆砂対策技術
—潜行吸引式排砂管の開発—

舗装の新たな性能規定化に向けて

地質・地盤リスクに ONE-TEAM で対応する

－地質・地盤リスクマネジメントの導入と運用－

地質・地盤研究グループ 地質チーム 上席研究員 阿南 修司

1. はじめに

土木構造物のほとんどは、地質・地盤を基礎あるいは材料として利用するため、地質・地盤の分布や性状はその設計や施工、維持管理において重要な要素であるが、地質・地盤の分布はその成り立ちを反映して複雑なものであることが多く、同一の地質・土質区分であってもその性状が不均質なこともある。これに加えて地下は直接確認することが難しいことから、設計や施工で用いる地質・地盤条件の想定には不確実性が内在することは避けられず、平成 28 年 11 月に発生した福岡市地下鉄七隈線延伸工事における道路陥没事故は、このような不確実性に起因する事象の顕著な例である¹⁾。

この事故を始めとする地下空間の事故・事案の顕在化を受け、国土交通省の社会資本整備審議会・交通政策審議会は「地下空間の利活用に関する安全技術の確立について」（平成 29 年 9 月）を答申（以下、答申）し、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を実施することが、今後の方向性として示された²⁾。

この答申を受け、土木研究所では国土交通省とともに「土木事業における地質・地盤リスクマネジメント検討委員会」（以下、委員会）を平成 31 年 3 月に設立し、令和 2 年 3 月に「土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン」³⁾（以下、ガイドライン）を公表した。また、地質・地盤リスクマネジメントの実施において参考となる資料も作成した⁴⁾。

ここでは、ガイドラインで示した地質・地盤リスクマネジメントの概念と要点について紹介する。

2. 地質・地盤リスクマネジメントの概念

2. 1 ガイドラインにおける地質・地盤リスクマネジメントの位置づけ

答申²⁾では、地下工事の安全技術の確立に向けた現状と課題として、地質・地盤に関わる想定や条件設定の不確実性について以下の点を指摘した。

○工事着手前に全ての地盤情報を明らかにできないことによる安全性や効率性に対するリスクが常にある
○各事業者は限られた情報の中でリスクアセスメントを実施することとなるが、その技術的手法が必ずしも確立されていない

そして、「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」¹⁾で示された、地下空間等での工事における留意事項を引用した上で、

○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
○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、前段階の実施者および後段階の実施者）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
○維持管理段階で管理者が留意すべき事項をとりまとめた“取り扱い説明書”を作成し引き継ぐ
○地盤リスクアセスメントに基づくモニタリング計画の作成と実施
○受発注者間における即時的な情報把握を可能とする情報共有システムの導入

という項目を今後の方向性と対応策として示している。

これらは、リスクを関係者で共有し対応するための手続きの明確化や、技術的知見や情報等を確実に伝達するという、事業のながれに沿ったリスクへの対応の考え方や体系を求めるものである。つま

り、地質・地盤のリスクを適切に評価するというアセスメントは継続的に行われるべきものであり、事業全体のながれの中で、関係者が協力して事業の各段階において地質・地盤リスクを総合的に判断（＝意思決定）しながら、得られた技術的知見を設計・施工に反映するという枠組みを示したものである。

ガイドラインにおいては、こういった枠組みを地質・地盤リスクマネジメントとして位置づけ、

○地質・地盤リスクマネジメントを行う事業者及びこれに参画する関係者それぞれが担うべき役割・機能や連携のありかた

○地質・地盤リスクマネジメントの導入及び実施に当たっての手順、手法の考え方

○地質・地盤リスクマネジメントを運用するに当たっての留意事項

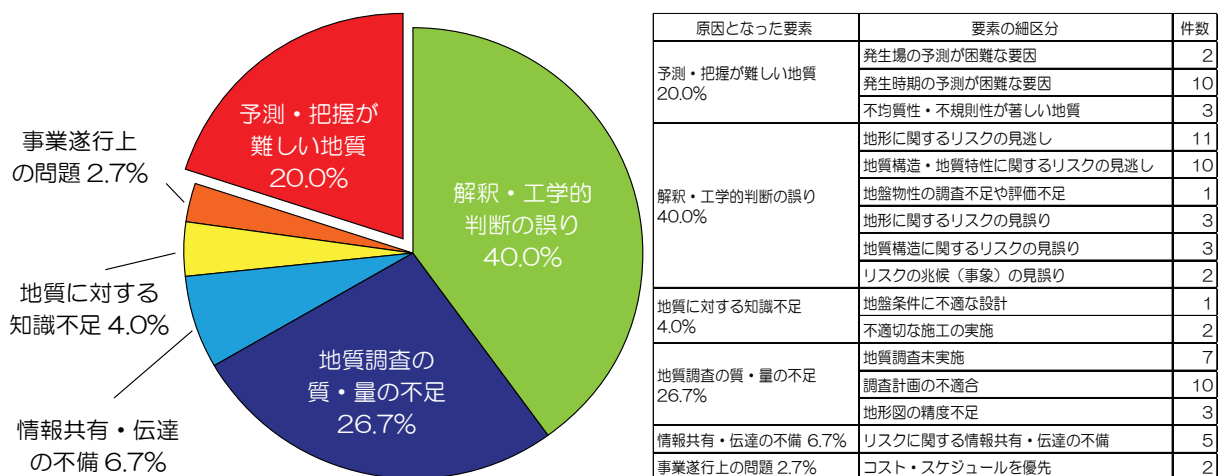
について示した。なお、ガイドラインのとりまとめにあたってはISO 31000（リスクマネジメントー指針）の概念を参考にしている。

2. 2 地質・地盤リスクとその取り扱いの課題

ガイドラインでは「地質・地盤リスク」を「当該事業の目的に対する地質・地盤に関わる不確実性の影響」「計画や想定との乖離によって生じる影響」と定義している。地質・地盤条件に関わる不確実性は「リスク要因」であるが、その分布や性質を正確に把握することが難しいことによる自然的なもの、その取り扱いによる人為的なものがある。

図－1は、文献調査によって収集した地質・地盤に起因する事業への影響が生じた75事例について、その原因となった要素で区分したものである⁴⁾。図のように「予測・把握が難しい」という自然的要素が支配的なものは2割に過ぎず、8割は地質・地盤条件の想定や調査の内容、情報の取り扱いといった人為的な要因が関わって影響が生じており、地質・地盤リスクが十分把握できず、リスクを適切に取扱えなかったことが課題となっている。

図－2は、道路事業の設計段階での業務を例に、事業者（発注者）を挟んで、地質調査と設計の間で業務の成果が次に引き継がれている様子を示したものである。図の中の、調査計画や設計条件の設定は、それ以前の業務での設計や調査の成果に基づいたものとなる。事例で課題となった点をこれに当てはめてみると、前段階での地質・地盤の調査で得られた情報の意味や想定が適切に引き継がれないと、設計条件において地質・地盤条件の見落としや見誤りが生じることが懸念される。一方、設計上の地質・地盤条件の考え方や設計上の物性値の意味についての理解が不足した場合には、設計の考

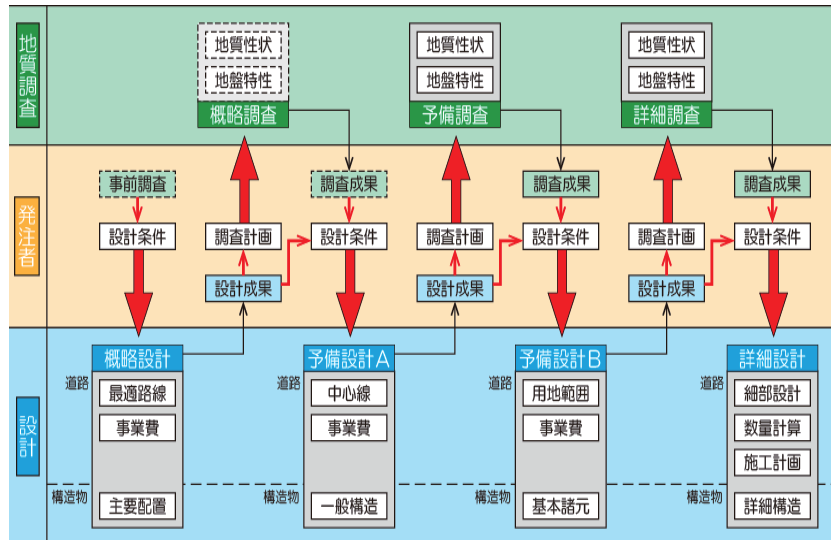


図－1 地質・地盤に起因する事業への影響事例とその要素⁴⁾を改変

え方に適合した調査計画とならず、地質・地盤条件の想定との乖離が生じる原因となる。

このようにリスクを適切に取り扱うには、地質・地盤に関する情報が、設計や施工、維持管理で行うべき判断に足るものであるか、想定からの乖離がどの程度見込まれるかといった観点で、互いの持つ情報や求める情報を議論する必要がある。

ガイドラインでは、こういった技術的知見や情報等を伝達・共有し判断するにあたって、関係者全体でのコミュニケーション及び協議が重要であることを示し、そのための組織・体制を事業者が構築することが必要であることを示した。また、リスクの状況の変化を捉えたマネジメントの改善や、コミュニケーション及び協議の結果の記録、引き継ぎについても示している。



図一 2 事業における業務成果の利用のイメージ
(道路事業の設計段階の例)

2. 3 リスクマネジメントの進め方

ガイドラインでは地質・地盤リスクマネジメントを、事業全体の最適な計画を立てることによって事業の効率的な実施という新たな価値を創造することを目指すものと位置づけている。これは、地質・地盤リスクマネジメントが、地質・地盤に起因するトラブルを防止するという戦術ではなく、リスクマネジメントのプロセスあるいはその繰り返しの中で、どの事業段階や工程でリスクに対応することが効率性や安全性といった事業の目的に合致するかを考え、地質・地盤リスクへの対応を最適なものとするという戦略を立てる手段となるということである。

一般的には地質・地盤リスクへの対応は、事業の初期段階ほど自由度があり多くの選択肢があるため、経済性や効率性の観点からは事業のより早い段階からリスクマネジメントを開始することが必要である。ただし、リスクマネジメントを早期に開始することと、早期にリスク対応を確定することは異なることに留意が必要である。

地質・地盤リスクの特徴の一つは、事業の進捗によってその情報が変化することである。調査が増えることによって地質・地盤条件の想定精度が向上することもあるが、対象となる地質・地盤の種別や事業の特性によっては設計段階での想定に限界があることもしばしばである。このため、地質・地盤リスクには、いわゆるフロントローディングによって調査段階等事業の初期段階で対応を早めに決定することが有利なもの、施工段階の現場条件が把握できる状況で対応をとることが有利なものなど、リスク対応の決定時期には様々なケースがある。

このためガイドラインでは、事業のどの段階でリスクに対応することが最適かをリスクマネジメントの実施にあたっての計画立案で検討すること、リスクの情報やその状況の変化に応じたリスクマネジメントのプロセスを継続的に実施し、必要に応じた見直しを行う必要があることを示した。

図一 3 はリスクマネジメントのプロセスがどのような構成となるか示したものであり、①コミュニケーション及び協議を基盤として、②リスクマネジメントの計画、③リスクアセスメント、④リスク

対応というながれを、⑤リスクマネジメントの継続的な改善によって見直しながら、継続していくという枠組みを提示している。

3. 地質・地盤リスクに ONE-TEAM に対応するために

ガイドラインには“関係者が ONE-TEAM でリスクに対応するために”という副題がある。

“ONE-TEAM 体制”とは、事業者、地質・地盤技術者、設計技術者、施工技術者、点検技術者、およびそれを支援する産官学の専門家等の関係者が、リスクマネジメントに参画し、リスクに関する情報を共有し、役割を分担し、また強く連携してリスクに対応しようとする意識とその体制であり、ガイドラインで示した地質・地盤リスクマネジメントの最も重要な考え方である。

これは、関係者がそれぞれの役割を果たすだけでなく、他の関係者が役割を果たすために必要なことにも配慮して相互に補うことで、個別に役割を果たした場合よりも大きな成果を得ることを期待するものである。

表-1 および図-4 は、参画する関係者の役割とその体制の例を示したものである。

ガイドラインでは地質・地盤リスクマネジメントの体制・組織について、画一的な組織・体制を求めるのではなく、リスクマネジメントに関連した既存の仕組みや取り組みを活用し、必要な部分を追加、改善するなど、事業の目的や特性に応じてその時点で取り得る最適な体制・組織を構築するよう事業者に向けている。

ONE-TEAM 体制の構築には地質・地盤に関する専門的な知識やマネジメントに関する知識を持つ専門家をはじめとする、様々な専門的な知識や経験を有する者が参画することが重要であり、事業者はリスクマネジメントの計画立案にあたって、事業の状況等を検討した上で必要な機能や知識を持つ

表-1 地質・地盤リスクマネジメント関係者の例³⁾

関係者	役割
事業者	事業の実施、地質調査等の計画・管理、リスク対応の実施にあたっての意思決定を行う者
地質・地盤リスクマネージャ	事業者の中で地質・地盤リスクマネジメント全体を統括する責任者
地質・地盤リスクサブマネージャ	地質・地盤リスクマネージャが行うリスクマネジメントの運用を補佐する者
地質・地盤リスクアドバイザー	専門的な立場で地質・地盤リスクマネージャやリスクマネジメントの運用を支援する専門技術者
地質・地盤技術者	地質・地盤に関わる調査・解析を行う者
設計技術者	構造物等の設計を行う者
施工技術者	設計資料を基に構造物等の施工を行う者
点検技術者	構造物の維持管理における点検を行う者

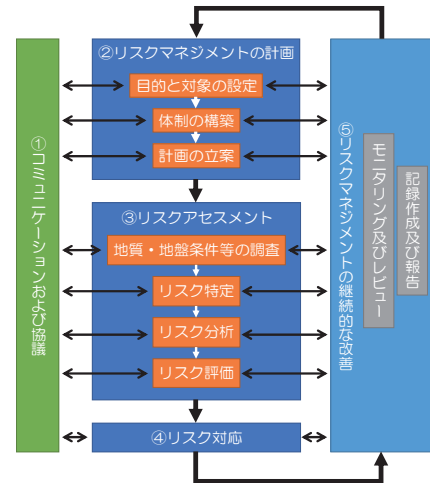


図-3 リスクマネジメントのプロセス³⁾

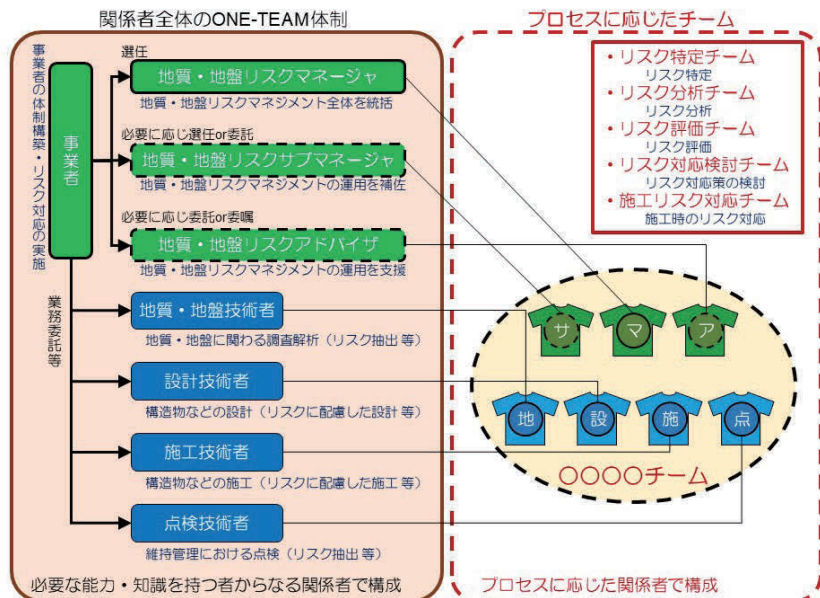


図-4 地質・地盤リスクマネジメント体制の例³⁾

た体制・組織となるよう内部・外部からこれら専門家を参画させる必要がある。

また、ONE-TEAM 体制における関係者の役割分担の設定や、連携のためのコミュニケーション及び協議の場の設定など、関係者の役割に応じた能力・機能が十分に発揮できる環境を整備することも重要である。関係者の連携では、リスクに関する情報の結果・結論のみではなく、その情報の前提、限界、判断の根拠等も共有し、判断に必要な情報は何かを他の関係者に伝える図-5 の様な双方向のコミュニケーション及び協議によって、最適な判断がなされるよう努力することが重要となる。

こういった体制は事業全体で構築するだけでなく、リスクマネジメントのプロセス（リスク特定、分析、評価及びリスク対応検討、施工リスク対応 等）に応じたチームで対応することを基本とした（図-4 右側）。このようなプロセスに応じたチームにおいても、複数の領域にまたがる構成メンバーによって、重層的かつ多面的な検討を行うことが重要である。

4. 地質・地盤リスクマネジメントの運用に参考となるもの

4. 1 既存の仕組み、取り組みの活用

参考資料⁴⁾には地質・地盤リスクマネジメントに関連する、これまでの制度や取り組みについて紹介した。これらは地質・地盤リスクを主題としたものではないものが多いが、これらの仕組みや取り組みを活用し、機能やプロセスを追加、統合することで、効率よく地質・地盤リスクマネジメントの導入・運用を進めることができると思われる。

(1) リスクマネジメントの導入・運用に関する既往の取り組み

「構想段階における計画策定プロセス」は、事業の構想段階における計画案の選定とそれに伴うコミュニケーション等を実施するもので、「プロジェクトマネジメント」は事業者が責任者として意思決定を行う枠組みであり、これらに地質・地盤リスクマネジメントを統合することが考えられる。

また、近畿地方整備局の「地質リスク低減のための調査・設計マニュアル（案）」は、道路事業において地質リスク低減を目的として、地質リスク調査検討業務を活用したリスクアセスメントを事業の各段階で行うものであり、リスクの観点から事業を遂行するという点で地質・地盤リスクマネジメントの考え方を先取りしたものとなっており、運用の参考となる。

(2) 体制・組織、専門家の参画

「事業促進 PPP」「プロジェクトマネジメント」は事業促進を目的とした制度であるが、地質・地盤リスクマネジメントの体制・組織と多くの部分で共通する。「地質技術顧問制度」「アドバイザー・コンサルタント制度」は外部の専門家の助言、運用の補助といった形で、活用可能なものである。

(3) 関係者の連携、コミュニケーション及び協議

品質確保や条件明示のための事業上の取り組みとして詳細設計や施工着手段階で実施、試行されている「地質技術者を参画させた合同現地踏査、三者会議」は、関係者の情報共有とリスクの引き継ぎ

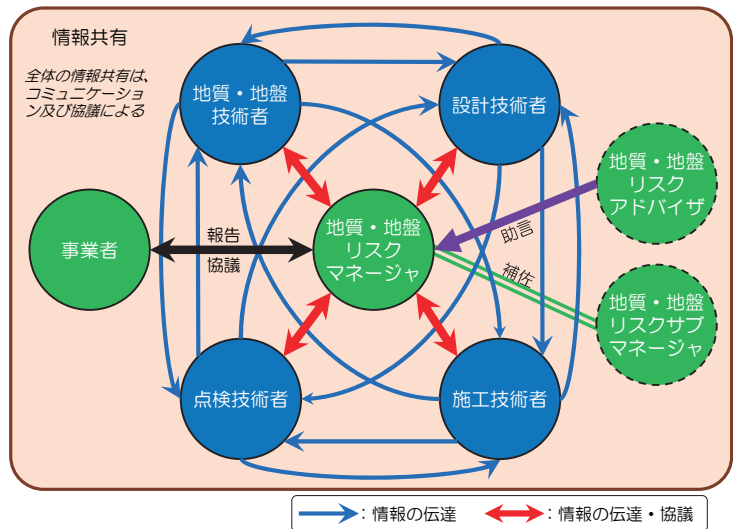


図-5 連携における情報共有・伝達³⁾

のための仕組みとして大変有効である。これはコミュニケーション及び協議の枠組みと運用の一つの形態であり、これらを地質・地盤リスクマネジメントの仕組みとして活用することが考えられる。

4. 2 リスクアセスメントの手法

ガイドラインでは、リスクアセスメントにおいて、リスクの内容、結果の大きさ及び起こりやすさ（これをリスクレベルという）を整理して“リスクの見える化（見せる化）”を行うという考え方を示している。ガイドラインでは“リスクの見える化”の具体的手法を提案するには至っていないが、参考資料⁴⁾には参考となるものとして「地質・地盤リスク調査検討業務」におけるリスクレベルの設定の事例について紹介した。また、地質・地盤の不確実性を考慮するための工夫は、様々な事業で個別に検討されているものもあり、“見える化”やそのための検討の考え方の事例についても紹介している。

こういった事例も参考としながら“リスクの見える化（見せる化）”を図り、関係者の認識をより深めて多面的な視点でリスクを取り扱うことが望まれる。

5. おわりに

ここで述べた地質・地盤リスクマネジメントの概念は新しいものではあるが、これまで全くなかったものではない。地質・地盤の調査によって明らかになった課題に対する設計・施工上の対応を考えるとということ自体は、これまでも行われてきたものである。つまり、地質・地盤リスクマネジメントはこれまで暗黙知であった地質・地盤リスクの取り扱いを、形式知として体系的に取り扱うというものである。このため、ガイドラインでは地質・地盤リスクを意識して事業を進めるための組織・体制やプロセスについて、実施のための手順を例示している。

しかしながら、地質・地盤リスクに主眼をおいたマネジメントの事例は少なく、またリスクアセスメントやリスク対応についての技術的手法も開発途上の状態であるため、地質・地盤リスクマネジメント技術の継続的な発展と向上が必要である。また、地質・地盤リスクマネジメントを担う人材を育成することも大きな課題である

土木研究所では、地質・地盤リスクマネジメントの事例分析を進め、既存の仕組みや制度の活用や効果的な運用方法について検討を進めたいと考えている。また、業界団体や国土交通省との連携によって地質・地盤リスクマネジメントの技術体系の充実と人材育成を行っていくことを目指している。

【参考文献】

- 1) 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委員会（国立研究開発法人土木研究所）：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委員会報告書，2017.5，
<https://www.pwri.go.jp/jpn/kentou-iinkai/pdf/houkokusyo.pdf>
- 2) 社会資本整備審議会・交通政策審議会：「地下空間の利活用に関する安全技術の確立について」2017.9，
<https://www.mlit.go.jp/common/001200765.pdf>
- 3) 国土交通省大臣官房技術調査課・国立研究開発法人土木研究所・土木事業における地質・地盤リスクマネジメント検討委員会：土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン－関係者が ONE-TEAM でリスクに対応するために－ 令和2年3月，2020.3，
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001337772.pdf>
- 4) 土木研究所：地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン－参考資料，2020.3，
<https://www.pwri.go.jp/jpn/research/saisentan/tishitsu-jiban/iinkai-guide2020.html>

自然エネルギーを活用したダム堆砂対策技術 — 潜行吸引式排砂管の開発 —

水工研究グループ 水理チーム 上席研究員 石神 孝之

1. はじめに

土木研究所では、ダム貯水池の堆砂対策およびダム下流の流砂環境の保全・改善のために、より広範囲な貯水池条件に適用可能で、経済的な堆砂対策手法として、ダムの上下流水位差によるエネルギーを活用し、輸送管としてフレキシブル管を用いた排砂手法（通称：潜行吸引式排砂管（以下、排砂管））の開発を行っている。これまでの研究の結果、浚渫などの従来技術よりも低コストの装置で、2.4m の水位差でも 4 系統を用いれば、巨石、塵芥を含まない約 1 万 m³ の堆砂を 2～3 日で吸引、下流へ排砂できる能力を有する技術となることを確認してきている^{1,2)}。本報告では、これまでの屋内外での実験状況と合わせて排砂量等の排砂能力に対する水位差・管延長等の施設設計手法などの開発状況を紹介する。

2. 潜行吸引式排砂管の概要

2. 1 潜行吸引式排砂管

開発中の潜行吸引式排砂管の構造を図-1、写真-1に示す。形状はフレキシブルな管路をU字状に折り返した形で、一方を取水口としている。使用材料は、取水口から折り返し部（以下、吸引部）までがフレキシブル管（サクシオンホース）、吸引部は重量を持たせて主に鋼製とし、底面に天然ゴム製の不透水性のシートを配している。吸引部から排水口側は輸送管としてフレキシブル管（サクシオンホース）としている。また、鋼製の吸引部と取水口側のフレキシブル管の底面には管径の半分の大きさの穴を設けて土砂の吸引口とする構造となっている。排水口側はダム下流まで延ばすものである。

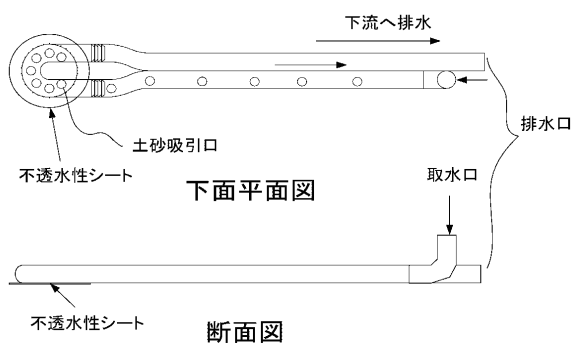


図-1 潜行吸引式排砂管の構造



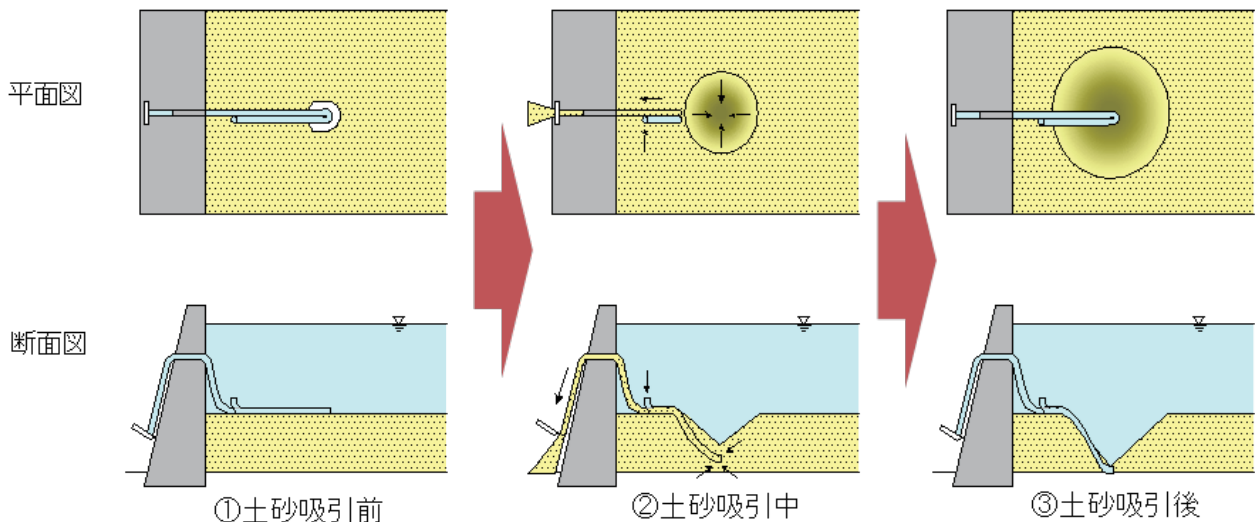
写真-1 排砂管(裏返した状況)

2. 2 排砂メカニズム

排砂管の操作イメージを図-2に示す。まず、①平水時に排砂管を堆砂の表面に設置し、その後、②出水時に排砂管下流のバルブを開くことにより、堆砂を吸引・放流する。堆砂はすり鉢状を形成しながら吸引され、吸引部は堆砂内に潜行していく。吸引部が底面に達した後も吸引部と上流部の管底面に設置された穴から土砂を吸引し続け、③最終的には排砂管は再び堆砂の表面に現れるという仕組みにより排砂を行う。この技術は貯水池の水位と放流地点の水位差を利用して、水位差で生じる管路内の通水に伴い、吸引口で発生する負圧により堆砂を管内へ吸引し、輸送管を通じてダム下流河川へ排出するものである。

3. 実験実績

3. 1 実績概要



図－２ 潜行吸引式排砂管の操作イメージ

表－１ これまでの実験実績

管径	吸引口径	場所	水位差	管延長	流速 (清水)	排砂時間	排砂量 (空隙込)	排砂可能粒径	時間当たり排砂量	排砂時流速 (概ね)	土砂濃度 (平均)
100mm	50mm	室内	2.6m	約16m	2.8m/s	約4.5時間	約30m ³	0.1mm～2mm	約6.7m ³ /h	2.5m/s	5.66%
		発電所 沈砂池	3.2m	約36m	2.3m/s	15分	約1.2m ³	0.1mm～50mm (長径80mm)	約4.8m ³ /h	2.2m/s	4.63%
200mm	100mm	穂高砂防 観測所	3.3m	約13m	3.7m/s	78分	約17m ³	0.1mm～長径38mm	約13m ³ /h	3.7m/s	1.92%
		高滝ダム 貯砂ダム	1.6m	約18m	2.4m/s	15分	約5.5m ³	0.1mm～100mm (長径140mm)	約22m ³ /h	2.3m/s	5.07%
300mm	150mm	室内	2.4m	約16m	3.4m/s	約1時間	約50m ³	0.1mm～2mm	約50m ³ /h	2.7m/s	5.13%
		高滝ダム 貯砂ダム	1.6m	約18m	2.6m/s	2時間	約21m ³	0.1mm～150mm (長径180mm)	約10.5m ³ /h	2.5m/s	0.99%
		松川砂防 堰堤	12m	約70m	3.0m/s	30分	約7.4m ³	0.1mm～80mm	約15m ³ /s	3.0m/s	2.0%

表－１にこれまでの主な実験実績を示す。管径毎の実績を見ると、排砂可能な粒径は0.1mmから吸引口径程度(50mm～150mm)の大きさとなっている。また、清水時で管内流速2.3m/s～3.7m/sが確保されれば、平均土砂濃度5%程度での排砂が可能な技術であることが確認できる。また、管径が大きくなると時間当たりの排砂量が多くなることが見受けられる。

これまでの実験から、代表的な事例を以降で紹介する。

3. 2 室内実験事例

本実験は、これまでの実験において、排砂能力が最大となった実験事例である。実験の状況を写真－2に示す。また、実験は図－3に示す水槽で実施した。排砂管は、土砂を水槽内に床板から約2.5mの高さまで投入した後、土砂表面上に設置した。この高さを初期河床高(吸引部深度0m)とする。排砂管と水槽外の管径300mmの塩化ビニル管を接続し、下流に土砂濃度計測装置、管終端部に止水バルブ(スルースバルブ)を設置した。管終端部との水位差を約2.3m程度確保する。管終端部は床板から約1mに位置し、吸引部が床板に到達すると管終端部より低くなる。土砂は図－4に示す粒径0.053mm～3.35mmで構成される平均粒径0.55mmの混合粒径砂を使用した。



写真-2 実験中の様子

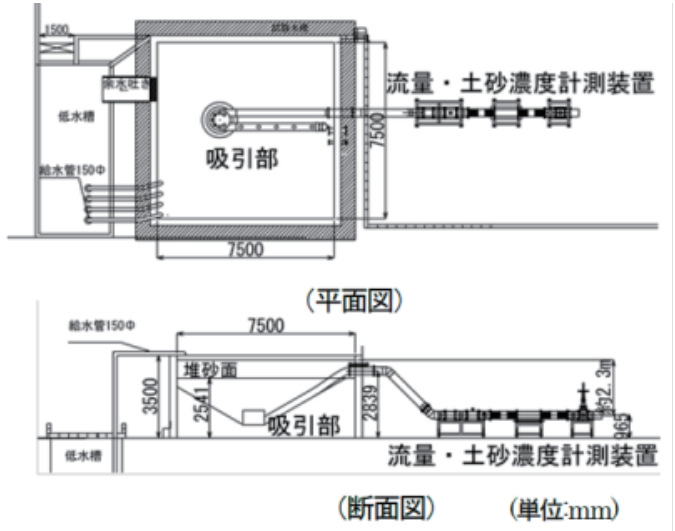


図-3 実験施設概要図

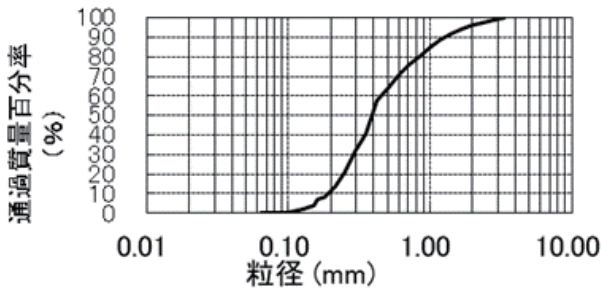


図-4 実験土砂の粒度分布

実験は図-5, 6に示すように3時間行い、土砂濃度計測装置による計測から求めた総排砂量は 50.19m^3 (空隙率 0.4 含む) となった。実験前後の水槽内の土砂の測量から総排砂量を計算し、土砂濃度計測装置から計算された総土砂量と比較した。図-7に実験後の水槽内の状況と縦横断測量結果から得た河床高を示す。等高線法により求めた総排砂量は 48.96m^3 (空隙率 0.4 含む) となった。2%程度の差はあるが、管径 300mm の土砂濃度計測装置においても精度の高い排出土砂濃度が計測できたと考えられる。

実験では図-5, 6に示すように実験開始直後から吸引部は潜行し、概ね30分で吸引部が水槽の床板に到達し、潜行中は排出土砂濃度が上昇するとともに管内流速が低下する現象が確認された。図-5に示したとおり1時間で概ね 50m^3 の排砂を確認した。この結果から、排砂管4系統を用いて約2日間(50時間)の洪水中に運用できれば $10,000\text{m}^3$ 相当の土砂が排砂できることとなり、実際のダムにおける堆砂対策に活用可能な規模と考えられる。

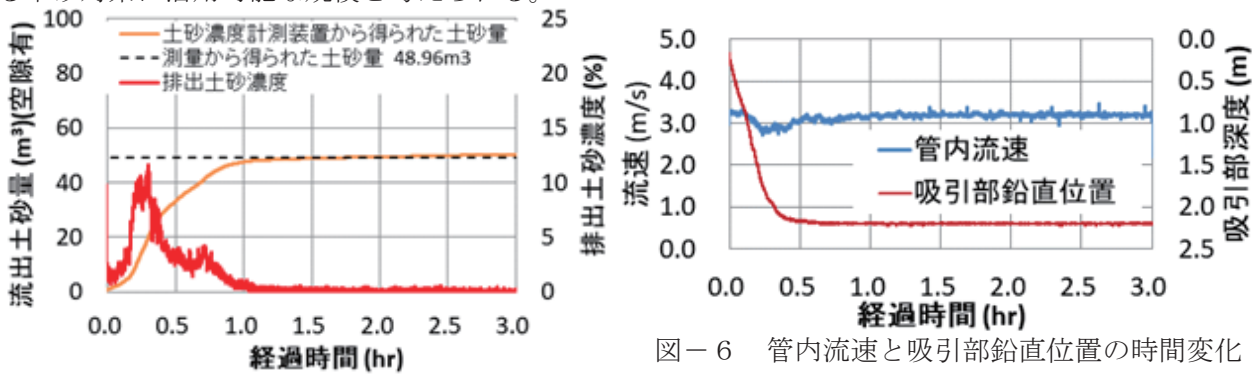
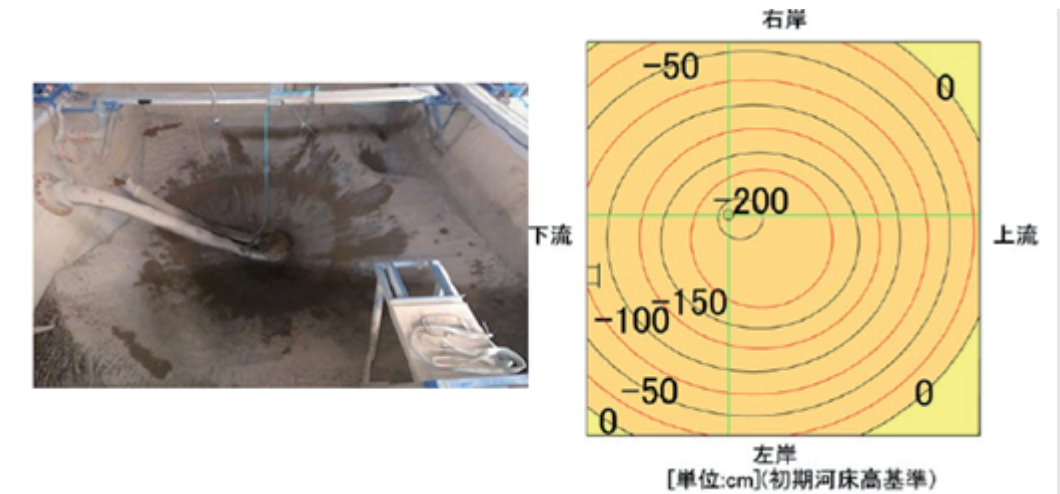


図-6 管内流速と吸引部鉛直位置の時間変化

図-5 排出土砂濃度と総量の時間変化



図－7 実験後の水槽内の状況と河床高

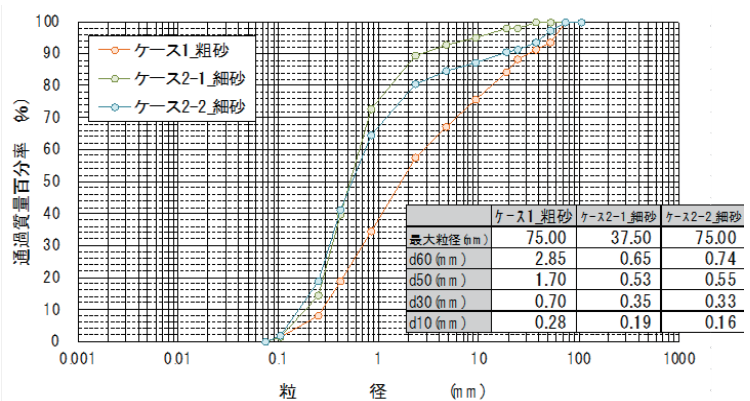
3. 3 現地実験事例

これまでの現地実験で、最大規模（配管延長および水位差が最大）の事例である。現地排砂実験は、天竜川水系松川の長野県片桐ダム上流の松川砂防堰堤において実施した。本実験は、水位差が約 12m であり、これまでの実験の中で最大の水位差を有するものである。図－8 に示すとおり、堰堤の上流側に吸引部を設置し、堰堤下流側の沈砂地へ排砂するように排砂管を設置した。対象土砂は、塵芥等を除去した $d_{50}=0.53\text{mm}\sim 1.7\text{mm}$ の 3 条件としている（図－9）。

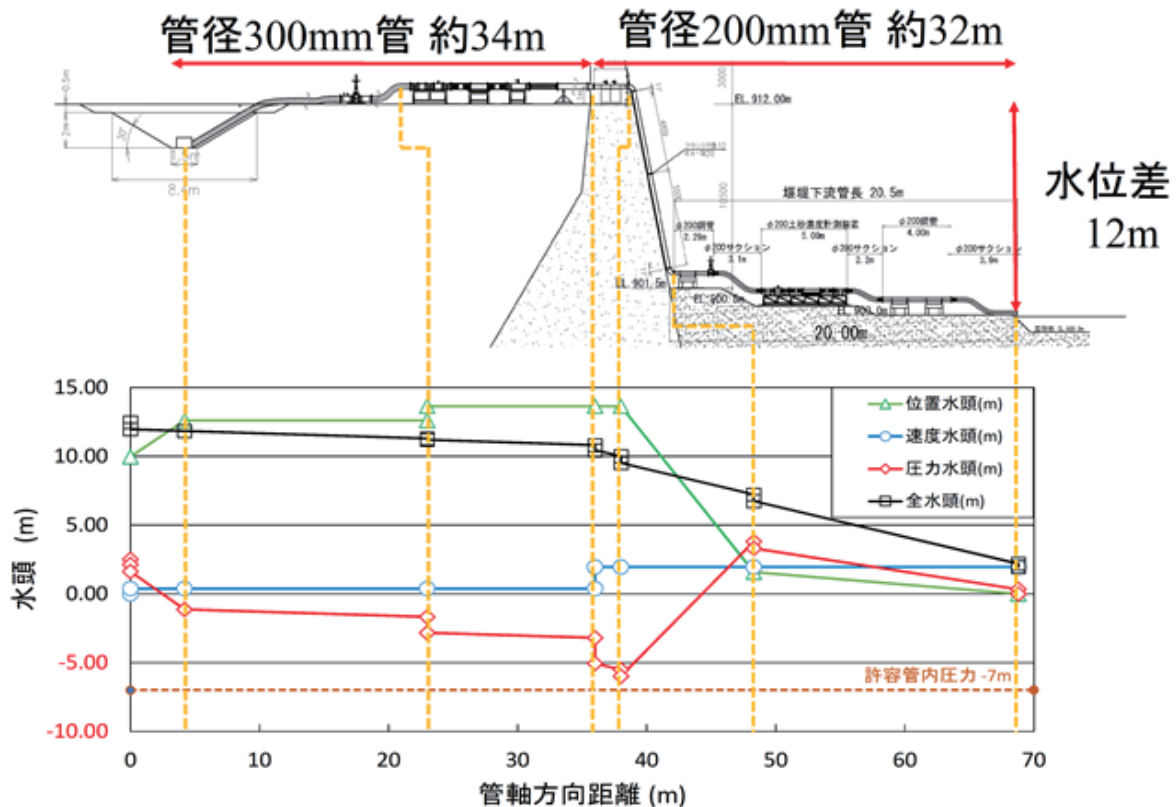
排砂管配置縦断図および事前の概略設計の結果（土砂濃度 3%での管軸方向距離における水頭分布）を図－10 に示す。排砂管の設置については、堰堤上流側と下流側排出口までの落差（水位差） $H_n=12\text{m}$ 、上流側管長 $L_1=38\text{m}$ （上流管長含む）、堰堤部管長 $L_2=10.3\text{m}$ 、下流側管長 $L_3=20.5\text{m}$ とし、管径 300mm（吸引口径 150mm）の吸引部を堰堤上流約 34m に置き、途中、排砂管はサイフォン形式（管高さ：水面+1m）で配置し、堰堤上流側の吸引部は水深 0.5m の位置から 2m 潜行するものとして施設設計を行った。また、特筆すべき点として、堰堤部直上流から下流を管径 200mm とすることで、堰堤上流側の動水勾配を小さくし、最大負圧発生位置での負圧を抑制する工夫を行った。



図－8 排砂管の配置



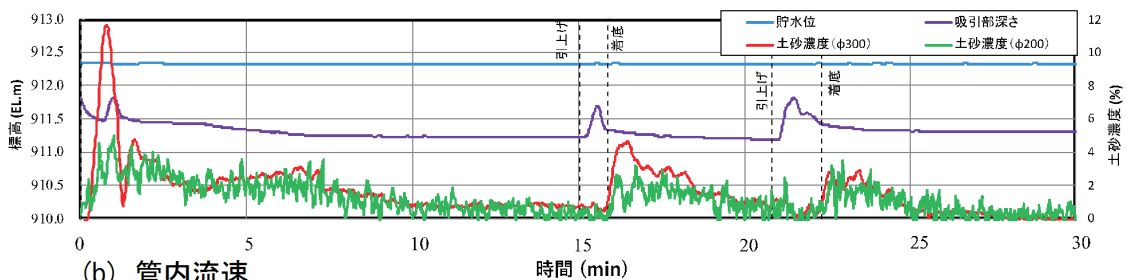
図－9 実験使用土砂



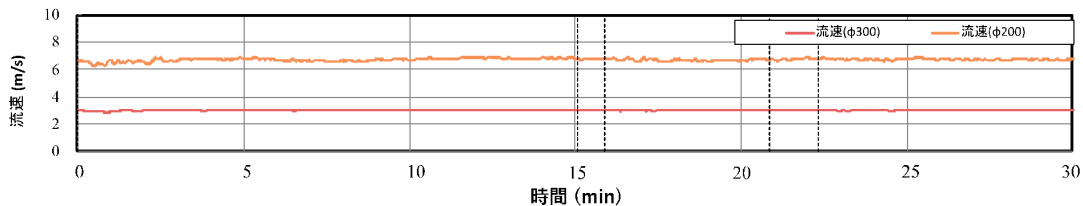
図一 10 排砂管配置縦断図と管軸方向距離における水頭分布（土砂濃度 3%）

図一 11 に土砂の $d_{50}=0.53\text{mm}$ の条件（ケース 2-1）で、4 度の潜行（着底・クレーンで引き揚げ）操作を行った 30 分間の実験結果を示す。本ケースにおける累積排砂量については、流量と土砂濃度の計測値よりおよそ 7.4m^3 が得られた。潜行時（図一 11 の経過時間 2 分、17 分頃）には、管内流速が小さい上流側において、土砂濃度の上昇に伴い堆積層の形成が生じたため、荷重計測に基づく $\phi 300$ の土砂濃度計測値は大きくなっているが、補正を行い堆積の生じていない下流側（ $\phi 200$ ）計測値と概ね同様の土砂濃度となることは確認している。排砂特性としては、潜行初期に高い土砂濃度を示しながら潜行し、吸引部の潜行速度が低下するにつれ土砂濃度が低下していることが分かる。これは、吸引部に集まる土砂量が少なくなるとともに現場の礫（吸引できない粒径の土砂）も集まり、吸引しにくくなったためであった。礫による吸引性能の低下がみられたが、排砂時間における土砂濃度から推定した排砂性能では平均土砂濃度は 2%程度となり $600\text{m}^3/\text{日}$ が排砂可能となると考えられた。

(a) 貯水位および吸引部深さ、土砂濃度



(b) 管内流速



図一 11 実験結果（吸引部位置、土砂濃度、管内流速）

4. 設計手法

4.1 基本的設計事項

潜行吸引式排砂管を実際使用するにあたっては、堆砂の位置・水位差等の情報を基に適切に設備設計を行わなければならない。現在検討中の設計の流れを図-12に示す。設備設計にあたって最も重要な事項は、適切な管内流速を設定することである。最初に使用する管径を設定し、堆砂位置等を基に管延長・水位差を想定して管内流速を算定することとなり、算定した管内流速から吸引可能な土砂粒径・土砂量（土砂濃度）・管内圧力等の確認を行う必要がある。これまでの実験等の結果から、目標土砂濃度を5%程度とすると、その時の管内流速3m/s以上が必要と考えられる。一方、管内流速が大きい場合は、最高標高位置で管内圧力が低下して、排水が停止する可能性があることも留意しなければいけない。なお、管径については、吸引部に接続するフレキシブル管の可撓性を考慮すると、現時点では管径300mmを上限と想定している。

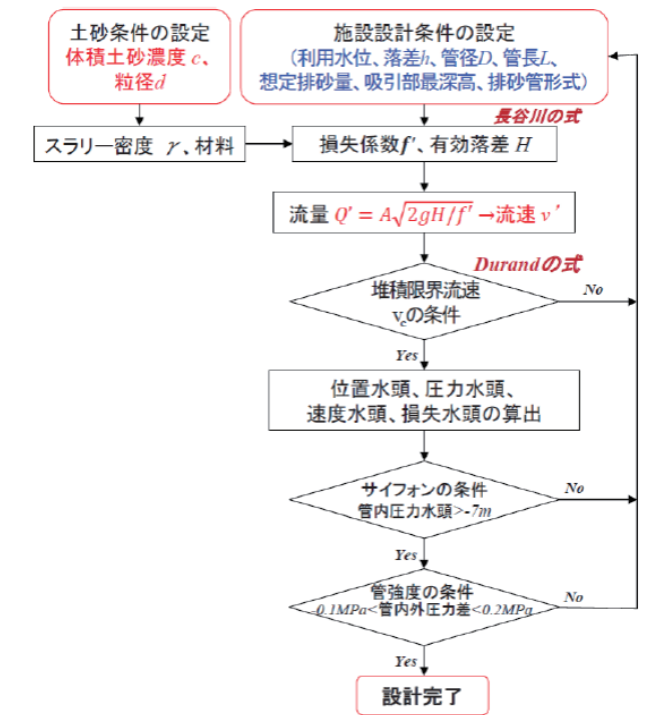


図-12 排砂設備設計の流れ

4.2 配慮事項

水位差が大きいため、適正な流速（約 3m/s）に対して管内流速が大きくなりすぎた場合の対応について紹介する。最も簡易に対応する方法としては、吐口部に設置したバルブの開度を小さくし、管内流速を適正な流速まで低下させることである。しかしながら、土砂を含んだものであるため、バルブ部で閉塞することが想定される。このため、松川砂防堰堤での実験においては、配管の途中で管径を小さく（300mm を 200mm に縮小）することで対応し、配管の途中で閉塞などの問題が生じずに排砂することができた。本設計による結果は、図-10にも示しており、圧力水頭について許容管内圧力-7m を下回らない設計となっている。

5. おわりに

潜行吸引式排砂管について、これまでの実験により、配管延長約 70m、水位差約 12m までの規模については実施可能であり、室内実験の結果ではあるが、排砂能力として 50m³/h の土砂量を排砂可能という結果も得られたところである。また、設計については、適正な流速として想定している管内流速約 3m/s 以上を確保する方策も合わせて、設計手法を示しつつあるところである。

現在、配管延長 100m 以上、水位差 20m 以上の条件で現地実験が可能なフィールドが見つかったところであり、今後、これらのより大きな規模での実証実験、土砂粒径が排砂能力に与える影響等についての室内実験等を行い、より確実に排砂が可能な技術として引き続き検討を進めてまいりたい。

【参考文献】

- 1) 宮川仁、宮脇千晴、櫻井寿之、石神孝之、箱石憲昭：潜行吸引式排砂管の現地排砂実験による実用化に向けた検討、河川技術論文集、Vol.21、pp.189-194、2015.
- 2) 宮川仁、宮脇千晴、石神孝之：潜行吸引式排砂管の排砂パフォーマンスと今後の展開、土木学会第 74 回年次学術概要集、II-121、2019.

舗装の新たな性能規定化に向けて

道路技術研究グループ グループ長 久保 和幸

1. はじめに

従来、道路の舗装は原則として、アスファルト舗装もしくはセメントコンクリート舗装に限定され、その仕様は「アスファルト舗装要綱」(H13 廃刊)などの技術図書により規定されていた。こうした仕様規定は、戦後日本の復興を支えるために舗装された道路を大量に建設する上では非常に有効であったと考えられる。一方で、平成 13 年 3 月に政府の方針として「規制緩和推進 3 か年計画」が閣議決定されると、技術革新に対して柔軟に対応するために従来の技術基準類を性能規定化する、という方針に舵が大きく切られた。この方針を受け、車道及び側帯の舗装の構造の基準が国土交通省令として平成 13 年 6 月に制定され、これを補足する舗装に関する技術図書類¹⁾も大々的に性能規定化された。

技術基準類の性能規定化後、舗装に関するさまざまな新技術が開発されるとともに、舗装工事の長期性能保証制度²⁾など「官から民へ」の規制緩和にも積極的に取り組まれてきた。一方で、平成 24 年 12 月に発生した中央自動車道笹子トンネル天井版落下事故などを踏まえ、平成 25 年を「社会資本メンテナンス元年」として、インフラ老朽化対策についての総合的・横断的な取り組みを推進するなど³⁾、道路管理者として官側技術者の果たすべき役割も見直されてきている。

舗装分野においても平成 28 年 10 月に点検要領が策定され⁴⁾、舗装の長寿命化・ライフサイクルコスト(以下、LCC)の削減を実現するに当たり、舗装の表層を使い続ける目標期間として「使用目標年数」の概念を導入し、標準的な年数(修繕サイクル、直轄国道ではおおむね 10~15 年程度)よりも早期に劣化している箇所については、その原因を究明し適切な措置を行うという「予防保全による LCC の削減」という方針を示した。

ここでは、舗装の性能規定化に関するこれまでの経緯を紹介するとともに、舗装点検要領に基づく点検により明らかとなった早期劣化箇所における詳細調査を経て、舗装に求められる新たな性能について言及し、性能規定化の新たな方針について提案する。

2. 舗装の性能規定化の経緯

2. 1 舗装の設計思想

まずは舗装とは何か、について簡単に説明する。舗はかつては「舗」の字を用いており、この字は訓読みで「しく」と読み、その言葉通り「しいて並べる」という意味がある。舗装の起源については諸説あるが、原始時代に“けものみち”に骨や枝などを敷き並べ、歩行時の快適性や荷物を運ぶ時の耐荷性能を向上させたものが最古の舗装だと認識されているようである⁵⁾。その後、ローマ帝国の街道では、馬車などのより重い荷重に耐えられるように石板が敷き詰められ、中世に入ると石板では高価すぎることから砂利や碎石が締固めて用いられ、さらに近代に入って自転車や自動車のタイヤによるせん断力に耐えられるように路面付近の層の材料がアスファルトやセメントで固められるようになり、現在のアスファルト舗装やセメントコンクリート舗装に至っていると考えられる。このように舗装の大きな目的としては 2 つあり、1 つは利用者に対して快適な路面を提供すること、もう 1 つは土台となる路床(原地盤など)が壊れないように通行する荷重を分散することである。

図-1 に舗装の概念図を示す。舗装はこのようにいくつかの層で構成され、重交通道路になるほど荷重分散効果を高めるために厚くなる。自動車が通行しない歩道部では表層はせいぜい 4~5 cm で路盤も上層と下層に分けずに 10~15cm を 1 層で構築するが、大型車交通量の多い直轄国道では、表層だけでも 3 層(15cm)程度で構成し、上層路盤、下層路盤と合わせると総厚は 1m 近くになる。一般的に上の層ほど薄く強い(=高価な)材料で構成され、大型車交通量と路床の支持力(CBR)を変数として、経済性も考慮してバランスよく各層の厚さと材料を決定している。

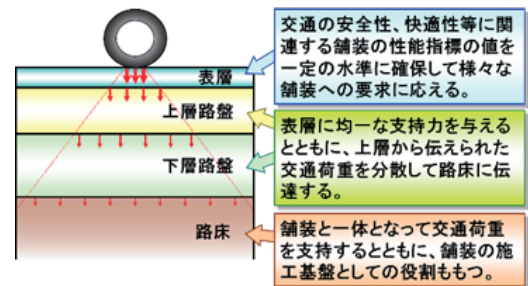


図-1 舗装の概念図

2. 2 舗装の性能規定化

図-2に概念図として示す通り、仕様規定と性能規定はそれぞれが一つの異なる決まりではなく、段階的により細かい仕様規定からより柔軟な性能規定に移行していくものと考えられる。例えば、図中の性能規定(3)の立場から見れば性能規定(2)の段階は仕様規定であるといえる。

平成13年に舗装に関する技術図書類が性能規定化された際には、必須の性能として疲労破壊輪数(繰返し载荷に対する耐久性)、塑性変形輪数(わだち掘れに対する抵抗性)、路面の平坦性が示され、これらの性能を満足すればどのような舗装を設計してもよいこととなった。一方で、これらの性能を評価する技術が十分には開発されていなかったため、従来の設計法であるCBR-TA法に基づけば所要の性能は満足する、という観点から従来の仕様規定に基づく設計法も“みなし規定”として残された。

図-3に舗装の性能指標の例を示す¹⁾。技術基準の性能規定化後、さまざまな性能が提案され、高速道路における雨天時の走行安全性を飛躍的に向上させた「排水性舗装」をはじめ、舗装表面に保水性を持たせることにより、猛暑時の路面温度を10℃以上低減することができる「保水性舗装」などさまざまな新技術が開発され、普及してきている。

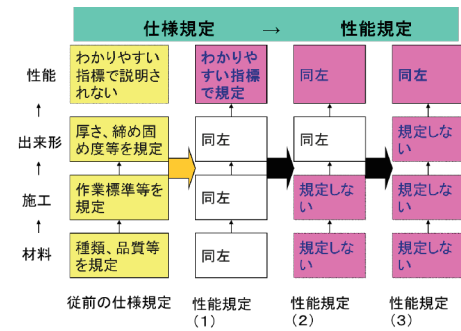


図-2 性能規定への移行ステップ

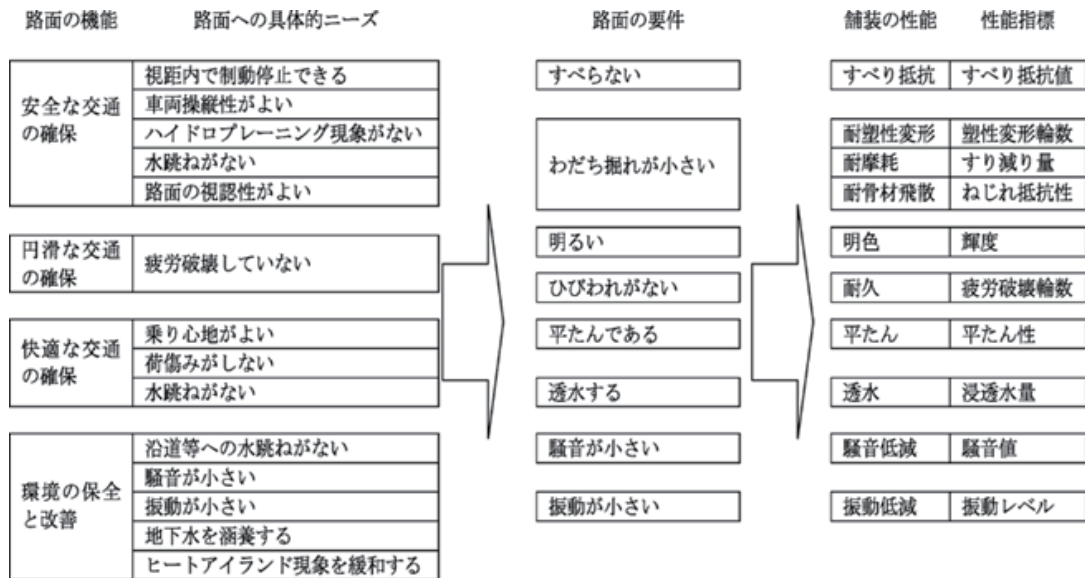


図-3 舗装の性能指標の例

3. 舗装の点検と早期劣化の特定

3.1 舗装点検要領の概要

国土交通省では、平成25年を「社会資本メンテナンス元年」と位置付け、老朽化対策に関する各種施策を進めてきており、舗装に関しても「長寿命化・ライフサイクルコスト(LCC)の削減など効率的な修繕の実施にあたり、道路法施行令第35条の2第1項第二号の規定に基づいて行う点検に関する基本的な事項を示し、もって、道路特性に応じた走行性、快適性の向上に資すること」⁴⁾が求められた。これを受けて平成28年10月に「舗装点検要領」が策定された。平成13年に策定された「舗装の構造に関する技術基準」が主に新設・改築に関するものであるのに対し、この点検要領は維持管理に関する技術基準といえるものである。

舗装点検要領の大きなポイントとして、LCCの削減のために効率的な修繕を行うことが推奨されている点が挙げられる。舗装のLCC削減の方法としては、新設もしくは改築段階で舗装の設計期間を従来よりも長く設定する「長寿命化」と、管理段階で軽微な破損を見つけ出し早めに措置することで大規模修繕までのサイクルを伸ばす「予防保全」の2つがある。点検要領では長寿命化策としてセメントコ

ンクリート舗装の採用も推奨しているが、ここでは予防保全について説明する。

舗装点検要領では、特に我が国の舗装の95%を占めるアスファルト舗装に関して、全体的な修繕サイクルの延長を目的に「使用目標年数」という概念を導入した。使用目標年数は「各道路管理者がアスファルト舗装の表層を使い続ける目標期間として設定する年数」と定義されている⁴⁾。その趣旨は、従来の「壊れたら直す」という事後処理対応を改めることにある。その考え方としては、管理している道路の平均的な修繕サイクルを基におよそこのくらいは修繕しなくてもよいと思われる期間を設定し、それを下回る区間については、何らかの根本的な問題があるはずなので、これを解決することで次回の修繕までの期間を延長し、全体の修繕サイクルを積極的に伸ばそうというものである。

図-4に表層の使用年数と診断区分の関係を示す。診断区分Ⅰが健全な状態であり、Ⅲは修繕の必要があるとされる状態である。表層の使用目標年数は道路によりさまざまであるが、直轄国道などの重交通路線では10~15年程度ではないかと思われる。アスファルト舗装は「固い粘土」のようなものであり、すぐには壊れないが、セメントコンクリートのように長期間変形しないというものでもない。その材料特性上、着実に徐々に壊れていくものであるが、その速度は場所によってさまざまである。舗装点検要領では、設計・施工・維持管理が適切に行われれば、図-4に示された「目標以上の耐久性」を実現できるはず、という前提に立ち、全体の修繕サイクルを伸ばすためには図-4のdに分類されている舗装(以下、「早期劣化区間」という)を改善することが重要であると考え、早期劣化区間の解消を道路管理者としての優先課題として位置付けている。

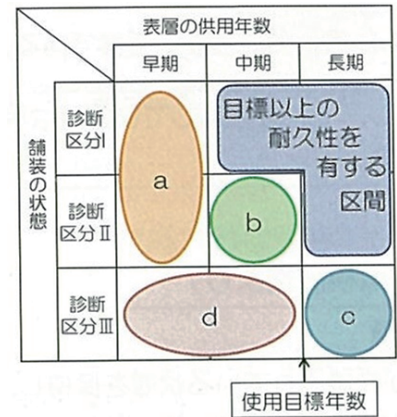


図-4 表層の使用年数と診断区分

早期劣化区間の発生要因としてはいくつかの事象が考えられるが、舗装点検要領では特に図-5に示すように、表層にひび割れが発生しそこから雨水などが浸透することで路盤まで浸水し、路盤の支持力が低下することに注目している。直轄国道などの重交通路線ではアスファルト混合物で構成される層が3~4層あり、その厚さも20cm程度に達するが、修繕対象が厚くなると工事時間も長くなり交通規制時間にも影響することから、舗装の補修は路面から5~10cmのアスファルト混合物層に対して行われることが多い。

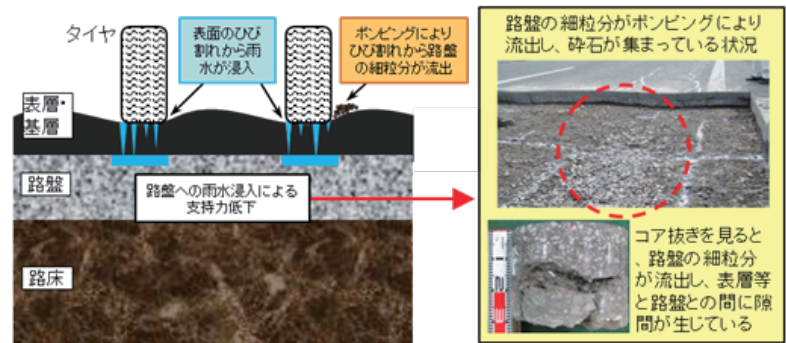


図-5 路盤の支持力低下による早期劣化のイメージ

図-5のような路盤の支持力低下に基づく破損を発見するためには路盤が見えるようにアスファルト層を全層撤去する⁷⁾、FWDと呼ばれる非破壊診断装置⁸⁾を用いて調査しなければならないが、いずれも通行規制を伴うため実施されることは稀である。こうした背景から、舗装点検要領では、点検時に「新設又は前回の修繕工事からの経過年数」を記録することとしており、図-4における早期劣化区間を抽出するための簡便で有効な手段として推奨している。

3. 2 早期劣化の事例(土工部)

極めて大型車交通量の多い直轄国道において、3~5年程度の短期間で補修が繰り返されていたことから、国土技術政策総合研究所道路基盤研究室に技術相談があった。対象となる道路は片側3車線の国道で、大型車の交通量が極めて多い幹線道路である。重交通路線であることからもともと損傷の進行が早い道路ではあったが、最近になって補修頻度が高まっているとのことであった。

当該道路のうち、特に破損が進行していると思われる3区間を調査対象とし、まずは路面の観察を行った。区間A、B、Cともに舗装の構造的破損の目安である亀甲状のクラックが発生していたが、区間Aは特に破損状態が悪く、すでに路面を補修した痕跡があった。また、区間Cの破損の程度(ひび割れの量)は区間Bに比べると低かった。

図-6は当該区間を開削調査した際の写真である。なお、図-5で示した早期劣化のイメージに基づき、このケースについても水が影響しているであろうと推測し、路面は乾燥しているが舗装内に水が存在することを期待して、直近1週間以内に降雨があったことを調査の条件とした。各区間を比較すると、いずれの区間でもアスファルト混合物層内での滞水が確認され、区間Aおよび区間Bではひび割れがアスコン層を貫通していた。また、区間Aでは路盤上面が湿っており、車輪が走行していると思われる位置では路盤面に沈下が発生していた。



図-6 国道の早期劣化区間の開削調査

開削調査による観察以外にも着色水を散水してどのように水が浸透しているのか、アスファルト混合物層全層のコアを採取して層間の接着力がどのようになっているかなど、さまざまな観点から調査した結果、図-7に示す仮説にたどり着いた⁹⁾。

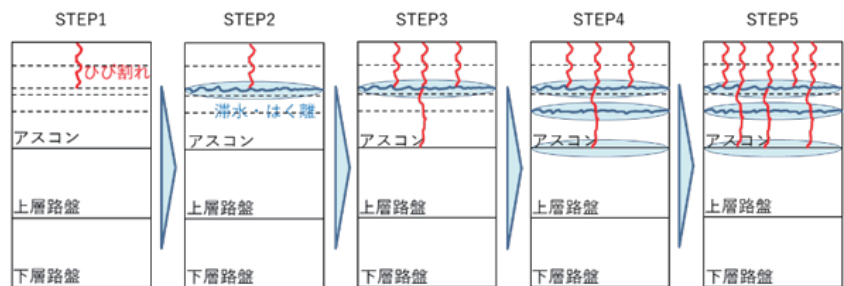


図-7 当該道路の早期劣化シナリオ(仮)

まず、大型車などの通行荷重によりアスファルト舗装の表層が破損し、これを補修するために5～10cm分のアスファルト混合物を撤去し、新たにアスファルト混合物層を施工する(STEP1)。この破損と補修が何度か繰り返されるうちに、その下のアスファルト混合物層の上面が施工時の衝撃や通行荷重により傷み、上層に発生したひび割れから浸透する水が傷んだ箇所に滞留することにより層間はく離が発生する(STEP2)。はく離によりアスファルト混合物層の支持力が低下し、はく離した層より下にもひび割れが進行する(STEP3)。より深く進行したひび割れにより、舗装のより深いところまで水が浸透することとなり、はく離もより深いところで発生する(STEP4)。こうして支持力が低下した舗装ではひび割れの進行も早くなり、修繕するまでにより多くのひび割れが内在することとなる(STEP5)。

このケースが図-5で示した早期劣化のイメージと大きく異なるのは、水による舗装の支持力の低下が路盤ではなくアスファルト混合物層内で発生していたことであり、大型車交通量の多い路線でアスファルト混合物層を複数有する舗装断面における新たな破損形態として認識されることとなった。

3.3 早期劣化の事例(橋梁部)

近年、コンクリート床版の新たな破損形態として土砂化(写真-1参照)が顕在化している。この土砂化はコンクリート床版内に浸入した水が床版内の微細な空隙に充満し、交通荷重により急激に上昇する水圧により、モルタルが破壊されることが原因とされている¹⁰⁾。

床版が土砂化してしまうと、その上層にある舗装は早期に劣化し短いサイクルでの補修を繰り返すこととなる。したがって、舗装のLCCの観点からも床版の土砂化を防止する必要があるが、そのためにはまずコンクリート床版に浸透した水の経路を確認する必要がある。道路技術研究グループと橋梁構造研究グループ共同で実橋の調査をした結果、舗装を補修した際の施工打ち継ぎ目や舗装端部、路面に発生したひび割れからの泥水の噴出痕が確認され、コア



写真-1 コンクリート床版の土砂化

抜きにより床版と舗装の接着不良や床版面での滞水も確認された¹⁰⁾。ひび割れからの浸水に下層が破壊されるという事象は前節3.2でご紹介したものと類似しているが、本ケースで特徴的なのは舗装端部から浸水している点である。特に床版上の舗装端部は締固めが難しく、中央部に比べて締固め度が低い傾向にあり、水密性の高い舗装端部をどう実現するかが土砂化抑制のポイントとなる。

図-8に床版上の舗装の概念図を示す。通常、床版上には2層のアスファルト混合物層を構築し、上層である表層が快適な路面を提供する目的で施工される一方、下層である基層は鋼床版の場合は床版の変形を表層に緩和して伝える緩和層として、コンクリート床版の場合は床版面の不陸を修正するレベリング層として施工される。鋼床版上の緩和層としてはグースアスファルトという特殊な材料が用いられているが、その特徴として、鋼床版の変形に追従するためのたわみ追従性が高いほか、高温の材料を流し込んで施工するため鋼床版継手部のボルトや段差部など隅々まで充填でき、締固めが不要、という点が挙げられる。この特徴はコンクリート床版の土砂化で直面している課題の解決策として理想的であり、土木研究所においてコンクリート床版用のグースアスファルトの開発が進められているところである¹⁰⁾。

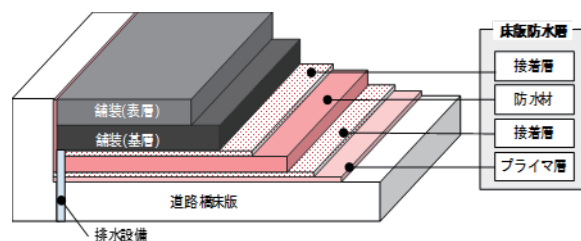


図-8 床版上の舗装の概念図

4. 新たな性能規定化に向けて

平成13年の技術基準の性能規定化の際には舗装の概念を路面と躯体に分け、路面の性能設計と躯体の構造設計という考え方を新たに示した。図-3に示した舗装の性能指標の例のうち、躯体に求められる性能は耐久性に関わる疲労破壊輪数のみであり、その他は路面で実現される性能である。そして、2.2で述べた通り、路面性能に関する自由な発想の下、さまざまな舗装技術が開発され、実用化されてきた。

一方で、平成28年10月に舗装点検要領が策定され、早期劣化など舗装の躯体性能に対する関心が高まりつつある。特に早期劣化の観点からは水による破壊が主要な課題として認識され、舗装材料の防水性能や弱点となる端部の施工性向上といった課題も明らかとなってきた。

このほか、例えば舗装分野におけるi-Constructionでは、ローラーの位置情報を把握することにより、より均一な締固めができるが、そのメリットを明確に説明できないために導入がなかなか進まない。図-9に示す例では、締固め度の平均値はAの方が高いが、Bの方がより均一に施工されており、局所的な締固め不足はBの方が少ない。従来の管理基準に従えば、Aの方が良い施工、ということになるが、これまで述べてきたように、局所的な弱点部からの浸水に気を付けなければならないという観点ではBの方が良い施工、ということになる。i-Constructionに基づくより良い施工を目指すためには「点」で評価する管理基準から「面」で評価する管理基準に転換していかなければならない。

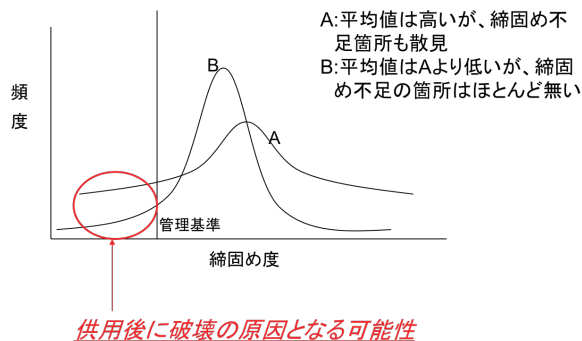


図-9 締固め度と施工の良否のイメージ

技術基準類の性能規定化から20年程度が経過し、我が国の舗装技術は図-2で言えば、路面設計は性能規定(2)、躯体設計は性能規定(1)の段階にいると考えられる。上記のような新たな課題が見つかった今、それぞれを次の段階の性能規定に移行させることが有効な手段の一つであろう。可能性のある新たな性能規定について、簡単に整理すると以下のとおりである。

①新たな舗装各層の性能規定

早期劣化の主な要因は水によるはく離であり、はく離抵抗性は有力な要求性能候補である。特にリサイクル材を活用するとはく離抵抗性が低くなる傾向にあるが、こうした素材に関わらずはく離抵抗性能の明確な規定が確立できれば、リサイクル材を積極的に活用するための技術開発も期待できる。

また、一般に水が浸透することで支持力が低下するため、水が浸透しないことを前提に設計されている路盤についても、例えば空隙率の高い礫により構築すれば、締固めにより頑強な路盤は構築できないが、一方で浸水による支持力低下も発生しないことから、水の浸透を前提とした設計も可能である。

②新たな施工管理規定

締固め度を面的に、さらに路盤や路床などのある程度の厚さを有する層に対しては三次元で管理すれば、より均一な構造物として築造することが可能となり、床版上の舗装などで端部が弱点と分かっている場合には、端部の締固め度を規定することも可能となる。i-Constructionにより十分実現可能な規定であり、これにより端部の締固め方法などの技術開発も期待できる。

③新たな性能保証の仕組み

舗装分野においては図-2の性能規定(3)に類するものとして舗装工事の長期性能保証にも取り組んできている²⁾。これは舗装工事完了後3~5年経過した時点での舗装の性能を評価し、その良否に応じて表彰対象とするなど、施工者側の努力を評価する取り組みであり、最終的にいいものを作ってくれればどう作るかは問わない、というコンセプトで進められてきている。

5. おわりに

平成13年の技術基準の性能規定化により、特に表層に用いる材料開発が促進され、排水性舗装だけでなく、遮熱性舗装などさまざまな技術が実用化されてきた。

一方、点検要領を整備し、実際の舗装の状況を改めて検証すると、従来の仮定では説明できない破損の実態が明らかとなり、構造設計においても新たな要求性能の可能性が示唆された。

i-ConstructionやBIM/CIMなど、公共事業全体を取り巻く環境にも大きな変化がこれからも想定され、目まぐるしく変わる状況に対して、舗装技術ひいては土木技術の本質である「現場で何が起きているのか」を基本に、要求性能を明確にした上で技術革新に取り組んでいかなければならない。

【参考文献】

- 1)(公社)日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説、2001.7など
- 2)国土交通省近畿地方整備局道路部道路工事課ほか：「道路舗装の長期保証」実施要領(案)、2019.3
- 3)「社会資本メンテナンス元年 老朽化への対策と長寿命化への挑戦」、国土交通 No.122、2013.10-11
- 4)国土交通省道路局国道・防災課：舗装点検要領、2016.10
- 5)多田宏行ほか：漫画で学ぶ舗装工学 基礎編、(株)建設図書、1996.8
- 6)(公社)日本道路協会：舗装点検必携、2017.4
- 7)高橋ほか：高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト、土木学会論文集 E1(舗装工学、Vol.71、No.3、I-93-I-101、2015
- 8)(国研)土木研究所 HP、<https://www.pwri.go.jp/team/pavement/japanese/facility/index.html#fwd>
- 9)若林ほか：早期劣化したアスファルト舗装の各種構造調査に基づく劣化メカニズムの推定、第24回舗装工学講演会、土木学会、2019.12
- 10)寺田ほか：橋面舗装の防水性に関する調査と今後の対策、令和元年度国土技術研究会、国土交通省、2019.11

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4406 October 2020

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