

平成27年度

土木研究所講演会
講演集

平成27年10月15日

国立研究開発法人土木研究所

平成27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27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

◆土木分野のイノベーションに向けて NO1

- 11:00～11:10 X線・中性子線で橋の内部を診る
～異分野融合によるイノベティブメンテナンス技術の開発～
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 上席研究員 石田 雅博 1
- 11:10～11:20 点検ロボットが生きるインフラ環境を目指して
～社会インフラ点検高度化に向けたインフラ構造及び点検装置についての研究開発～
技術推進本部
先端技術チーム 主席研究員 藤野 健一 3
- 11:20～11:30 既設橋の液状化被害を防ぐ
～液状化地盤における橋梁基礎の耐震性能評価方法と耐震対策技術の開発～
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 上席研究員 七澤 利明 7
- 11:30～11:40 巨大都市・大規模ターミナル駅周辺地域における複合災害への
対応支援アプリケーションの開発に向けて
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 主任研究員 大原 美保 9
- 11:40～11:50 野球場より広い大区画水田の灌漑を自動化できるか？
～圃場水管理の情報通信・制御技術を導入した圃場－広域連携型の次世代水管理システムの開発～
寒地農業基盤研究グループ
水利基盤チーム 上席研究員 中村 和正 11

◆土木分野のイノベーションに向けて NO2

- 14:10～14:35 見えない不具合箇所を探せ！！ ～移動式舗装たわみ測定手法の開発～
道路技術研究グループ
舗装チーム 上席研究員 久保 和幸 13
- 14:35～15:00 舗装・盛土の内部物性構造を可視化する ～非接触・非破壊計測技術の開発～
地質・地盤研究グループ 特任研究員 稲崎 富士 21

◆土木研究所の活動

- 15:15～15:40 実スケールの実験で堤防の本当の強さを測る
～十勝川千代田実験水路における破堤実験～
寒地水圏研究グループ長 浜本 聡 33
- 15:40～16:05 建設材料の国際ハブへ
～iMaRRC 発足による土木構造物の長寿命化に向けた建設材料の研究～
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 43
- 16:05～16:30 第3回国連防災世界会議から始まる新たな防災・減災
水災害・リスクマネジメント国際センター長 小池 俊雄 51
- 16:30～16:55 ネパール地震に対する復興支援
～BBB コンセプトに基づく復興と国土強靱化のための技術支援～
構造物メンテナンス研究センター
耐震研究監 運上 茂樹 57

[土木分野のイノベーションに向けて NO1]

X線・中性子線で橋の内部を診る

～異分野融合によるイノベティブメンテナンス技術の開発～

点検ロボットが生きるインフラ環境を目指して

～社会インフラ点検高度化に向けたインフラ構造及び点検装置についての研究開発～

既設橋の液状化被害を防ぐ

～液状化地盤における橋梁基礎の耐震性能評価方法と耐震対策技術の開発～

巨大都市・大規模ターミナル駅周辺地域における複合災害への 対応支援アプリケーションの開発に向けて

野球場より広い大区画水田の灌漑を自動化できるか？

～圃場水管理の情報通信・制御技術を導入した圃場－広域連携型の次世代水管理システムの開発～

X線・中性子線で橋の内部を診る ～異分野融合によるイノベティブメンテナンス技術の開発～

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 石田 雅博

1. はじめに

ポストテンション方式のPC構造物では、近年グラウトの充填が十分に行われていない事例が確認されており、対策が進められている。シーす内にグラウト未充填箇所が存在すると、雨水や塩化物イオン等がシーす内に侵入する恐れがあり、その結果PC鋼材が腐食、破断し、最終的に落橋という重大事故に繋がる可能性もある。また、古い床版では疲労により劣化し、上面が土砂化して抜け落ちる事例も生じている。特に橋面から水が侵入すると、床版の劣化は促進される。

土木研究所では、東京大学および理化学研究所とともに、高出力X線や中性子線による橋梁の調査・評価技術について、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)のインフラ維持管理・更新・マネジメント技術に採択され、研究を実施している。



図-1 PC鋼材の腐食・破断



図-2 床版の抜け落ち

2. 高出力X線による調査技術の開発

2.1 X線発生装置

現在、橋梁調査で用いているX線源はその出力が300keVまでであること、適用限界厚さは30~40cm程度といわれていること、厚い部材の場合は撮像に時間がかかることなど、従来の非破壊検査技術には限界があった。一方で、X線の利用を規定している放射線障害防止法においては、屋外で使用する場合、橋梁検査に限って4MeVまでの加速器の使用が認められている。本研究では、現場適用に向けて新たに950keV X線発生装置(以下950keV機)、および3.95MeV X線発生装置(以下3.95MeV機)の開発を行った。3.95MeV機の全体像を写真-1に示す。装置は、X線源、高周波発生装置、電源、水冷ポンプから構成されている。高出力の場合に比べ重量が小さいのが特徴であり、既存の橋梁点検車に搭載可能なように、X線源等を200kg以下に抑えている。また、実橋梁への適用に向けて、X線源および検出器を連続的に稼働できる専用のスキャン架台を作成している。

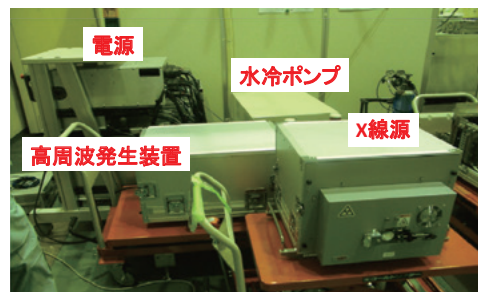


図-3 3.95MeV X線発生装置



図-4 撤去桁の撮影

3.95MeV機は法的には放射線発生装置であり、橋梁への照射に限り一時的な使用場所の変更が認められている。しかし、これまで使用された実績はなかった。そのため、土木研究所内で実施された屋外での撮像実験は、国内における初めての試みとなった。

X線検出器としては、イメージングプレート（Imaging Plate：IP）およびX線フラットパネル検出器（Flat Panel Detector：FPD）を用いた。

FDPにより得られたウェブ部の画像を図-5に示す。ウェブ厚170mmに対し、3.95MeV機による画像は1秒程度で取得されており、定格出力の1/6であっても十分な撮像能力があると判断できる。下フランジ部の撮像を図-6に示す。部材厚が400mmにもかかわらず30秒程度で画像を取得することができた。

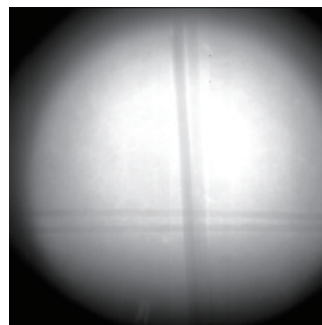


図-5 3.95MeV機 FPD 画像（ウェブ部）

2. 2 後方散乱および部分CT

現在、橋梁の調査のためにはX線源と検出器で対象物を挟み込む透過型撮影を実施している。しかし、実際の橋梁では透過型の撮影は困難な場所もある。そこで、物体から跳ね返ってきた後方散乱を検出してコンクリート内部を可視化する研究を実施している。

また、医療の分野ではコンピュータトモグラフィー（CT）による可視化が行われている。橋梁の調査・診断でもCTの活用が考えられるが、実際の橋梁では360°回転させることは不可能である。そこで、90°程度X線源と検出器を回転させて鮮明な画像が得られるように、部分CTの研究を行っている。



図-6 3.95MeV機 FPD(下フランジ部)

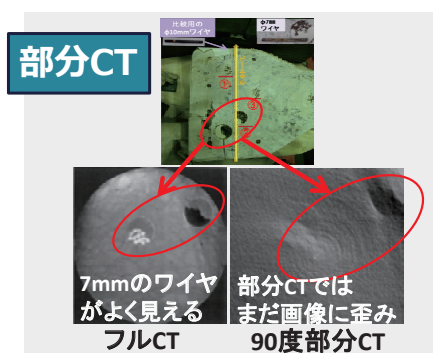


図-7 部分CTによる撮影

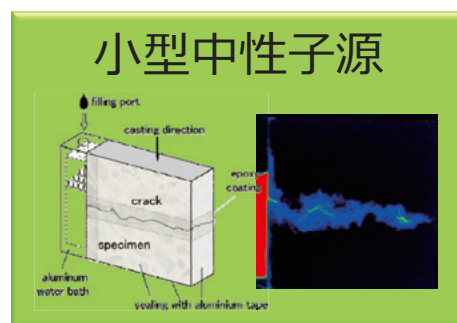


図-8 ひびわれへの水の侵入の可視化

3. 中性子線による調査技術の開発

橋梁の劣化は水の影響が大きい。中性子線はX線と特性が異なり、水のありかがよくわかる。そこで、中性子源を用いてコンクリート内部を調査し、床版内部の可視化や水の動きの可視化を行うことにより、床版の土砂化の進行の確認、耐荷力の評価を行うことを目的として研究を行っている。

4. おわりに

本研究では、高出力X線や中性子線による調査技術の開発とともに、載荷実験等を行って耐荷力の評価方法や維持管理体系における調査手法を確立することを目標としている。

【参考文献】

- 1) 大島義信、宇佐美惣、石田雅博、土橋克宏、上坂充：可搬型高出力X線によるPC桁内部の可視化実験、土木技術資料、Vol.57-9、pp.34-37、2015.9

社会インフラの点検高度化に向けたインフラ構造及び点検装置についての研究開発

技術推進本部 藤野 健一

1. はじめに(ゴシック体 10.5ポイント)

近年、日本においては社会インフラの老朽化とそれに伴う災害や事故リスクの発生が問題となっている。特に、笹子トンネル事故を契機として、インフラの維持管理の重要性が高まり、管理者の果たすべき役割としてインフラの状況を把握するための点検／診断が特に注目されている。

しかしながら、道路橋は全国で約70万橋、道路トンネルについては約1万本が設置されており、そのすべてを点検していくためには莫大な予算を要するだけでなく、多くの労働力を要することは明らかである。また、事故を防止する観点から、社会インフラに関する点検要領が改訂され、不可視部や点検困難箇所への対応、また、県管理も含めたインフラの一斉点検などが管理者に求められている。その一方で、橋梁においては点検作業に使用する管理用通路の老朽化により、管理用通路が落下し、死亡事故が発生した事例がある。このように、点検用に設置された管理用歩廊なども本体構造物と同様に老朽化が進み、点検作業の危険性が增大している。

その一方で、東日本大震災の復興需要、東京オリンピック対応のための需要などから、平成22年度以降の建設投資は増加傾向に転じており、少なくとも2020年までの今後6年間、熟練した技能者や労働力の確保が難しいことが予測され、点検作業の効率化や自動化の推進は極めて重要になっている。

このような状況への対処として、点検ロボットの導入が検討されている。しかしながら現実に点検作業を行う際には当初の設計時から構造的に点検が難しい場所やインフラ供用後の配管等



図-1 笹子トンネル

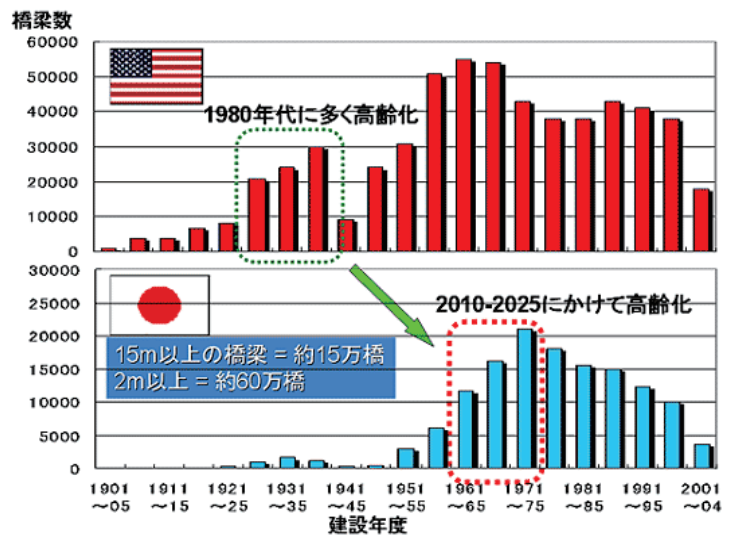


図-2 日米の橋梁高齢化の比較

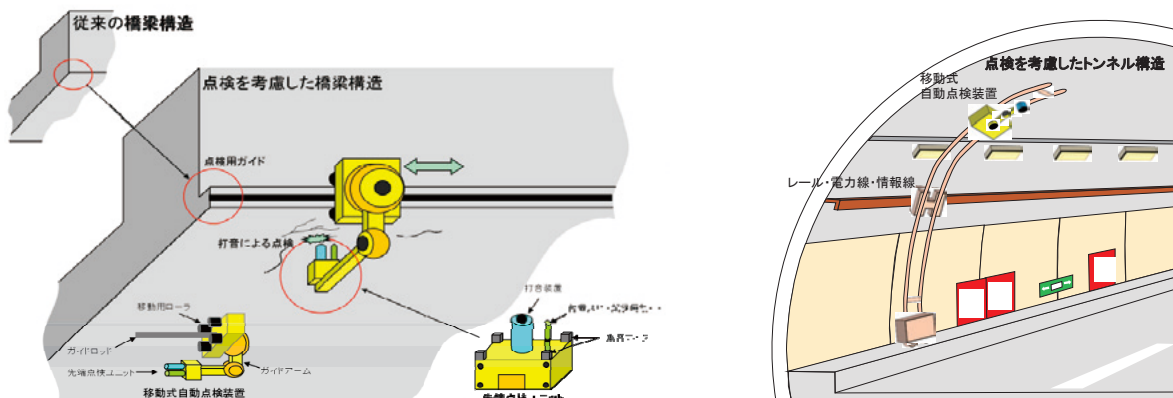


図-3 研究開発の目標イメージ

の追加的な設置により点検作業に支障をきたしている場所があり、維持管理作業の効率性を妨げている。また、これらの点検に支障となる部位の存在や機械・ロボットを稼働するための構造（レールや点検用装置）を設置する設計思想がないことから、作業の自動化を推進することの妨げとなっている。従って、自動点検用機械を効率的に使用するためにはその利用環境を整備することが重要である。

本研究では橋梁、トンネル等について点検作業の安全性の確保並びに効率化、省人化のために点検の作業性を高め、また、そのためのロボット等による自動化をより効果的に導入することを目的として、点検作業に適したインフラの構造検討を行うとともに、レールやワイヤーなどの付属的設備の設置などインフラ構造物の設計面での配慮事項を明確化し、インフラ構造と点検装置及び人間が協調した効率的かつ効果的な点検方法とそれに必要なインフラ構造を研究開発するものである。

2. 研究の特徴と実施体制(ゴシック体 10.5ポイント)

本研究は、労働力を合理化しつつ点検作業をより効果的、経済的に実施するために、インフラ・点検装置・人が強調した最適な点検手法を開発するものである。これにより、次のことを目指す。

- ・熟練点検者の現場での拘束時間を短縮し、熟練点検者の効率的活用を図る。
- ・検討、開発する具体的アウトプットは標準化・規格化を図る。
- ・インフラ構造・点検装置個々の部分最適化ではなく、システムとしての全体最適化により、効果の最大化を図ることができる。(1橋もしくは1トンネルの点検費用・設備費用・点検時間の最適化を実現する。)
- ・年配者や女性でも点検作業に従事可能とするため、3K(危険、汚い、苦しい)からの脱却を図る。

一般に土木構造物の研究開発と機械装置の研究開発は一つの組織体で行われることはなく、ニーズやシーズの理解といった基本的な事項の擦り合わせから必要になる研究開発分野である。本研究では、土木分野における機械設備および工事について長年にわたる経験を有する土木研究所を中心に、トンネル分野や建設機械研究開発に長じる日本建設機械施工協会および同施工技術総合研究所、橋梁の点検の実態や関連調査に長じる橋梁調査会の3者がこれまでの知見を結集し、その総力を挙げて、今後維持管理の時代を迎える社会インフラの設計とそれに必要な点検技術を考えるものである。さらに、橋梁分野とトンネル分野の両分野を一括りの研究実施体制で実施することにより、設計思想や目標とする技術的水準を整合させることが可能であるとともに、両者に共通する検討事項については重複した作業を省くことが可能であり、合理的に検討ができる研究体制となっている。

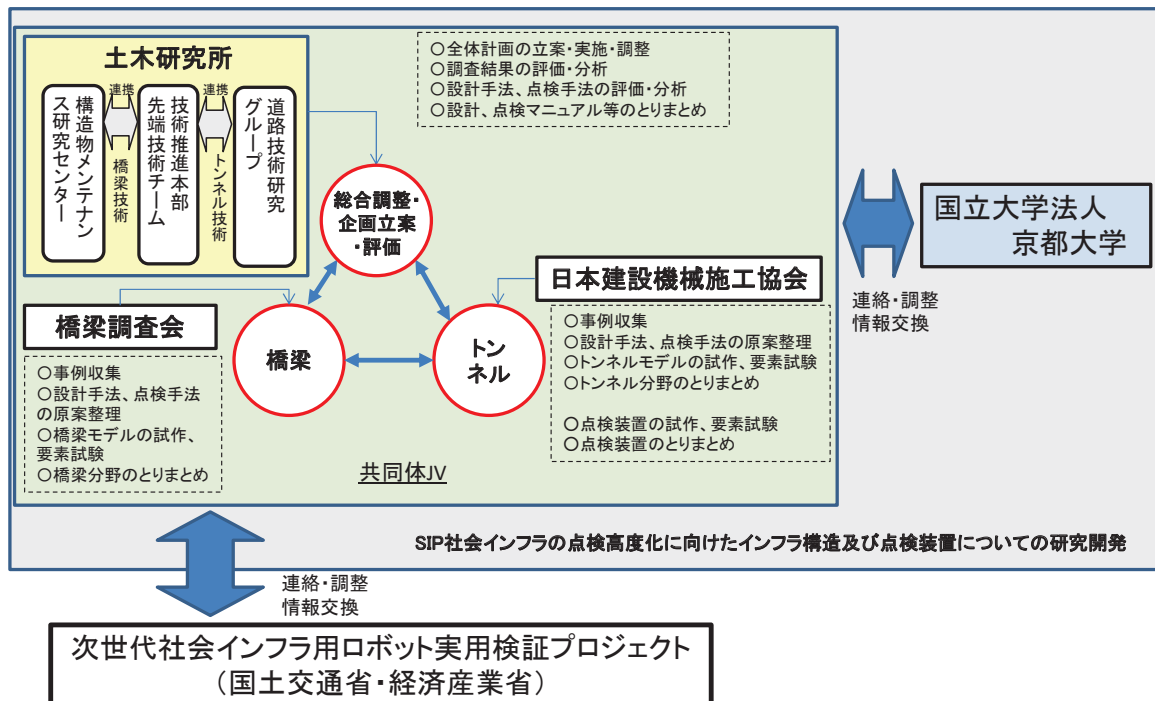


図- 4 研究実施体制と関連プロジェクト

3. 既設構造物と新設構造物(ゴシック体 10.5ポイント)

1章に述べた維持管理問題に対処するに当たっては、すでに構築されたストック、いわゆる既設構造物への対処方法の検討が急務である。

今回の研究開発においては、点検しやすく、ロボット・点検装置を活用しやすいインフラ構造を提案するもので、その成果の反映は設計段階から行うことが導入においては素直なアプローチである。既設構造物に対するアプローチはすでに点検の困難性や様々な拘束条件が顕在化している中で行うことになるため、難易度がかなり高くなるが、本研究開発では既設・新設双方の構造物に対して導入可能な提案を行うことを目標としている。

4. 平成26年度の実施概要と平成27年度の予定

図-5に平成26年度の実施項目と平成27年度の実施予定項目を示す。平成26年度は橋梁・トンネルの点検の実態、点検困難箇所の実態について図に示す観点から調査分析を行い、その傾向・特徴や拘束条件などを明らかにした。

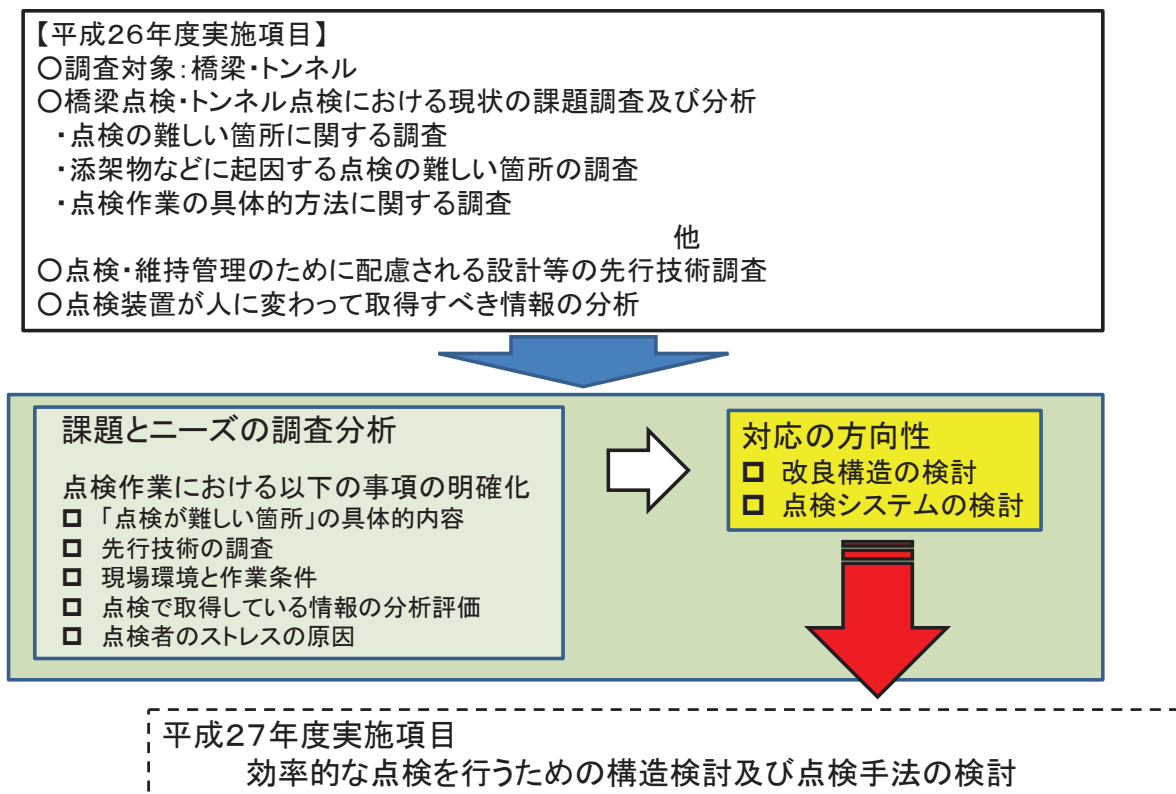


図-5 平成26年度実施項目と平成27年実施予定

4.1 調査結果の一部紹介(橋梁)

平成26年度の橋梁点検作業調査結果の一部を図-6に示す。

橋梁はその形式によって点検の難しさや特徴が変わるものの、鋼橋、コンクリート橋共に形状の複雑さや点検空間の狭さなどがあり、既存の橋梁点検者などでは近接目視ができない箇所があることが明確になった。これらについては、他の点検手段を取ることであり、点検コストの増大につながっていることが推定される。

また、点検者の主たる関心は道路規制時間をいかに短くするか集中しており、この改善に最も注意を払うべきことが明確になった。

さらに、点検箇所も狭隘であったり、高所であったり、酷暑・極寒の作業になることが多く、点検作業員の苦渋性が高いことも明らかになった。

【点検の難しい箇所や点検不能箇所に関する調査】

橋梁管理点検者との意見交換やアンケートより、橋梁及び添架物等により近接目視が難しい事象、点検者の危険もしくはストレスを伴う点検箇所、問題点等を整理した。

＜近接目視が難しい事象及び対処例＞

- 支障物(添架物、落橋防止システム等)により近接目視が難しい。
＜対処例＞ ボールカメラ、ファイバースコープ 等
- 下部構造高や主塔が高く、橋面及び地上から点検車のブームが到達しない。
＜対処例＞ ロープアクセス、双眼鏡、ズームカメラ 等
- 上部工形式の特性により点検箇所への近接が難しい。
・桁高が高く、主桁間に点検車のブームまたは箱桁上床版付近に梯子が届かない。
＜対処例＞ 仮設吊り足場の設置、双眼鏡、ボールカメラ、ズームカメラ 等

- 点検箇所の空間が狭い
・桁下空間が狭いため、桁下及び橋座部の目視が難しい
＜対処例＞ ボールカメラ 等
- ・箱桁内部への進入が難しい
＜対処例＞ 箱桁外観の近接目視、ファイバースコープ 等



＜点検者の危険もしくはストレスを伴う点検箇所＞

- ◇危険を感じる箇所や作業
・高所 ・不安定 ・足場不良箇所 ・密閉空間 ・夜間作業現場
・道路上(規制開始、撤収時) ・見通しの悪い場所 等
- ◇ストレスを感じる箇所や作業
・高所 ・酷暑、極寒時間 ・狭隘部 ・足場不良箇所 ・流水部
・膨大な点検量 ・密閉空間・ホコリ等がある箇所 ・鉄道敷地内 等

●橋梁点検における課題とニーズ

- ① アクセス困難箇所の削減
- ② 点検時の道路規制時間の短縮
- ③ 作業員の高所作業、狭隘部での作業等による危険性・苦渋性の改善

図－6 橋梁点検作業の調査結果 (一部抜粋)

4. 2 調査結果の一部紹介 (トンネル)

平成26年度のトンネル点検作業調査結果の一部を図－7に示す。トンネルは構造的にシンプルで、点検者の主たる関心は落下物・道路規制時間にあることが明らかになった。

【点検の難しい箇所や点検不能箇所に関する調査】

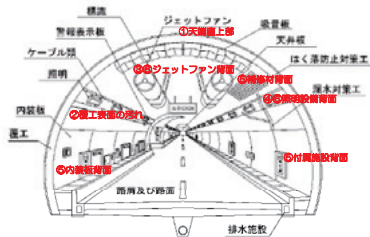
現行のトンネル点検方法について整理し、トンネル管理者並びに点検業務実施者からのヒアリングにより、点検困難箇所等の調査・分析を行い、トンネル点検の現状・課題をとりまとめた。

・一般的なトンネルにおける点検の困難箇所・制限箇所

因子	点検困難箇所	点検制限箇所
点検の作業に起因	① 天端直上部 ② 覆工表面の汚れ	なし
添架物等の設置に起因	③ ジェットファン背面 ④ 照明設備背面	⑤ 補修材、内装板、付属施設等の背面 ⑥ 照明背面、ジェットファン背面の打音検査

・点検上危険もしくはストレスを伴う点検箇所

対象	危険を伴う箇所	ストレスを伴う箇所
点検者	・通行車両との衝突	・上向き姿勢の作業 (チョーキング・たたき落とし) ・通行車両からの騒音・排気ガス 等
通行車両	・たたき落としの衝突 ・作業員・誘導員による幻惑	



車線規制下での点検作業状況



狭隘なトンネルでの作業状況

●トンネル点検における課題及びニーズ

- ① 現場では「道路規制時間の短縮」へのニーズが高く、点検に対しては「作業効率の向上」・「省人化」・「コスト削減」が求められる。
- ② 打音点検では、「うき」や「はくり」は撤去するため、落下物が生じる可能性がある。(管理上、落下物は問題大)
- ③ トンネル上部の点検では、上向き作業のため、苦渋性が高い。

図－7 トンネル点検作業の調査結果 (一部抜粋)

5. おわりに

以上のとおり、平成26年より開始した調査研究の概要と方向性について報告を行った。ここで明確化された課題に対してインフラ構造・点検装置でいかに対応していくか、また人間による作業や作業計画をいかに効果的にこの中に組み込むかについて調査研究を進めていく予定である。

既設橋の液状化被害を防ぐ ～液状化地盤における橋梁基礎の耐震性能評価方法と耐震対策技術の開発～

構造物メンテナンス研究センター（CAESAR） 七澤 利明

1. はじめに

液状化する地盤上にある既設橋の中には、大地震によって重大な被害が生じる可能性のある橋がある。この様な橋を合理的に評価して抽出し、効率的に耐震対策を進めていく手法を構築することは、既設道路ネットワークをレジリエント（強靱）なものにするために重要である。

このため CAESAR では、SIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」に位置づけられた液状化地盤における橋梁基礎の耐震性能評価手法と耐震対策技術の開発を平成 26 年度から開始している¹⁾。本稿ではその研究内容や実施体制について紹介する。

2. 研究内容

2. 1 液状化地盤における基礎の地震時挙動の解明と橋の耐震性能評価技術

これまでの震災経験等に基づき、橋の耐震性能（地震後の橋としての安全性や通行機能）に大きな影響を与える液状化による被災形態を明らかにするとともに、実際の大地震において生じた損傷の状況と当該橋が呈した耐震性能をベンチマークデータとして分析する。そして、動的遠心力载荷試験や大型模型の振動実験による検証を経て、液状化地盤における橋の耐震性能評価手法を開発していく。

これまでに、既往の大地震において液状化が生じた地盤における橋の被災事例（38 事例）を抽出・分析し、橋の耐震性能に大きな影響を与える被災形態として、①液状化に伴う側方流動が影響して生じたと考えられる橋脚や橋台の損傷（写真－1）、②液状化が影響して生じたと考えられる下部構造の沈下や傾斜（写真－2）が要因となっていることなどを明らかとした。



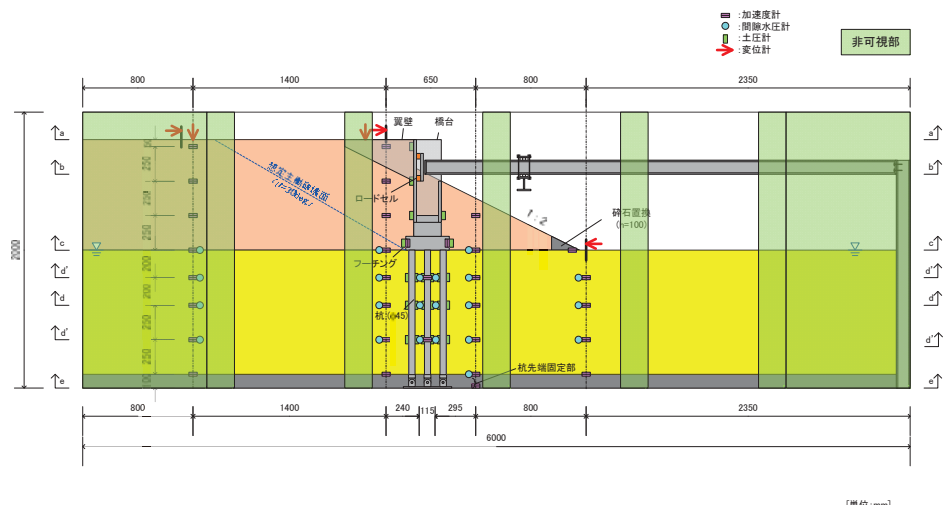
写真－1 側方流動に伴って生じたと考えられる橋の被害



写真－2 液状化による下部構造の傾斜・沈下による橋の被害

また、橋の耐震性能に大きな影響を与える被災形態に対して、耐震性能評価手法を構築していく際のベンチマークデータを得るため、土木研究所が所有する三次元大型振動台による大型模型振動実験を計画している。図－1は土槽内における地盤と橋梁基礎の大型模型のセットアップの概略図を示したものである。

さらに、東京工業大学高橋章浩教授との共同研究により、液状化地盤中



図－1 大型模型振動実験に用いる土槽と地盤・橋梁基礎のセットアップ概略図

の橋梁基礎の振動実験等に対する再現性を有する解析モデルの開発を進めている。

2. 2 液状化地盤における基礎の耐震対策技術

液状化地盤における基礎の地震時挙動や被害の生じるメカニズムを踏まえ、さらに供用中の道路橋であるという施工上の制約条件をも考慮した上で、基礎に対する合理的な耐震対策技術について検討する。そして、動的遠心力載荷試験や大型模型の振動実験による検証結果を踏まえ、対策技術とその評価手法の開発を行っていく。

これまでに、鋼管杭・鋼矢板技術協会（JASPP）との共同研究により、側方流動の影響を受ける橋台基礎の構造特性と地震時挙動の特性を踏まえたうえで、橋の供用性を出来るだけ阻害せずに施工することが可能な補強技術として、①斜杭による補強工法、②鋼管矢板壁による補強工法を抽出した（図-2）。今後は動的遠心力載荷試験等を実施して対策の有効性等の検証を行っていく予定である。

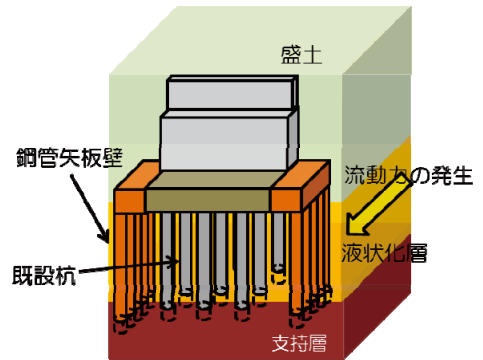


図-2 側方流動を受ける橋台基礎に対する耐震対策工法（イメージ）

2. 3 E-ディフェンスを活用した検証

従来この種の研究では、予算や試験装置の性能等の制約から実橋の規模に比して非常に小さな模型による検証が中心となっており、検証結果の実橋への適用性という観点から明確にできていない課題も残されている。このため、2. 1に示したように土木研究所が所有する三次元大型振動台を用いた振動実験を実施するとともに、最終的には防災科学技術研究所が所有する実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）による大規模実証実験も行うことにより、信頼性の高い検証データに基づき所要の研究成果を得る計画としている。

3. 実施体制

研究の実施体制を図-3に示す。SIP 研究開発課題「大規模実証実験等に基づく液状化対策技術の研究開発」の全体像としては、港湾空港技術研究所および消防庁消防研究センターと共同で研究を行い、土木研究所で行う橋梁を含む臨海部埋立地の各種施設（港湾施設、石油コンビナート施設）の液状化診断・対策技術の開発を行うこととしている。

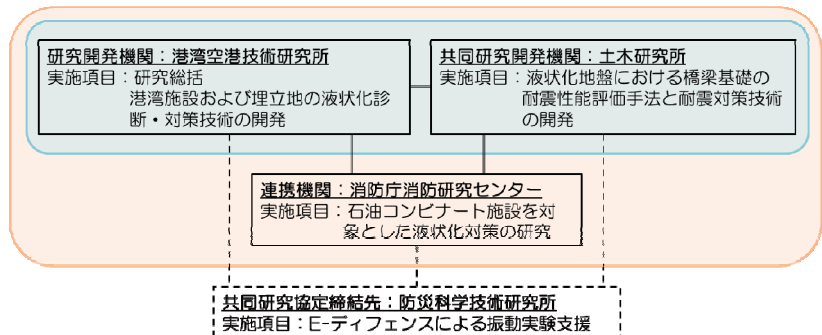


図-3 研究実施体制

各機関が専門とする施設を対象に研究開発を行うとともに、研究成果を相互活用するなどして、効率的に成果を出していくことを目指している。また、E-ディフェンスを用いた実験を行うことから、防災科学技術研究所とも共同研究協定を締結している。

さらに、2. に示したように高度な専門知識等を有する学識者および民間技術協会との共同研究も行い、CAESARにおける研究をより高度にかつ実現性の高いものとするための体制を構築している。

4. おわりに

本研究のように液状化問題に取り組む各種研究機関、学識者、民間企業が連携・協同して研究開発を行うことは大きな意義があり、この分野での技術の進展に大きなインパクトを与えることが期待される。CAESAR としても出来るだけ早期に成果をあげて社会に還元していくことを目指して重点的に取り組んでいく予定である。

【参考文献】

- 1) 武澤永純、大住道生：「戦略的イノベーション創造プログラム」と土木研究所の参画、土木技術資料，Vol.57, No.1, pp46-47, 2015.1

巨大都市・大規模ターミナル駅周辺地域における 複合災害への対応支援アプリケーションの開発に向けて

水災害研究グループ 大原 美保
澤野 久弥

1. はじめに

水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM)は、総合科学技術・イノベーション会議が創設した戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の「レジリエントな防災・減災機能の強化」分野の「地域連携による地域災害対応アプリケーション技術の研究開発」における研究課題「巨大都市・大規模ターミナル駅周辺地域における複合災害への対応支援アプリケーションの開発(研究代表者:工学院大学久田嘉章教授、研究期間:2014-2018年度)」に分担研究機関として参画している。本稿では、このSIP研究課題の取り組みについて紹介を行う。

2. 研究計画の全体構成

2011年の東日本大震災では、大規模ターミナル駅周辺に帰宅困難者が溢れ、幹線道路は大渋滞となり、改めて巨大都市の脆弱性が浮き彫りとなった。将来起こりうる地震・水害・複合災害に対しては、「想定外」の事態に陥らないよう、地域で想定される最悪の災害状況に加えて、発生頻度の高い中小規模の災害状況も想定した上で、地域特性や被災レベルに応じたきめ細かな事前の行動計画を準備しておく必要がある。本研究課題は、震災・水害など災害時に大群集等による大混乱が予想される巨大都市の大規模ターミナル駅エリアを対象に、エリア特性と被災レベルに応じた震災・水害時の事前・応急行動計画と行動ルールを策定し、災害時におけるステークホルダーの適切な対応行動を可能とする支援アプリを開発することである。具体的には、図1に示す通り、巨大ターミナル駅である新宿駅周辺エリアと北千住駅周辺エリアをテストフィールドとして、(1)エリア特性に応じた複合災害の予測技術の開発、(2)エリア災害対応支援アプリケーションの開発、(3)エリア災害予防のためのアプリケーションの開発、の3つの研究開発を行う。(1)では、被災レベル別のハザード・リスク評価を行い、地域が抱える災害リスクの見える化を図る。(2)では、地元大学(新宿駅の工学院大学、北千住駅の東京電機大)が防災拠点となり、エリア内で災害情報を受配信する「エリア災害対応支援アプリケーション」を開発する。災害情報の受配信においては、災害情報共有システムやリアルタイム被害推定システムに関するSIPの別テーマの研究課題とも連携して研究を行う。(3)では、(1)のハザード・リスク評価に基づき、研究参画機関と自治体・事業者・住民等が連携して、地域における事前行動・応急行動計画の策定と地域におけるルール化を図るとともに、「エリア災害予防のためのアプリケーション」の開発を行う。

研究期間5年間のうち、最初の3年間では、新宿駅周辺エリアでは震災、北千住駅周辺エリアでは水害を対象とした事前・応急行動計画の策定とアプリケーション群の開発を行い、地域での実証実験による効果検証を目指す。その後、両地区において、複合災害も含めた更なる実証実験を行い、研究成果の社会実装を目指す。



図-1 研究の全体構成¹⁾

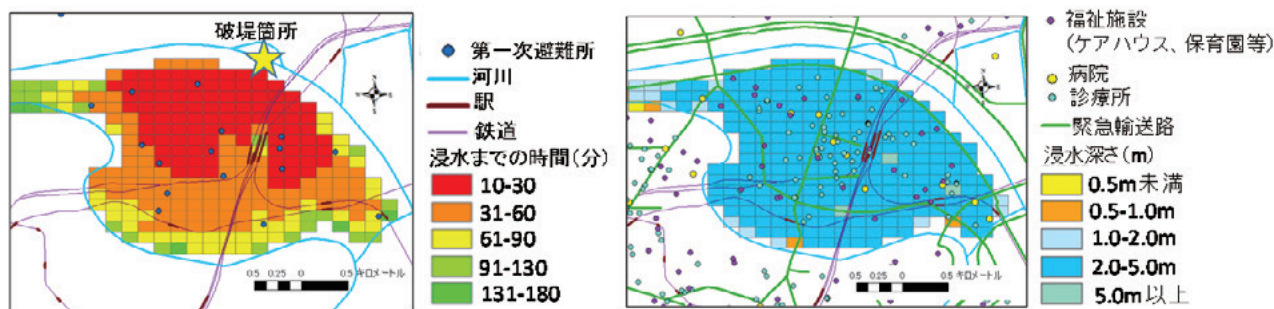


図-2 荒川右岸 12.5km 地点破堤時の浸水到達までの時間（左図）と想定浸水深さ及び災害時要配慮者施設の分布状況（右図）

3. ICHARM が分担する研究内容

北千住駅周辺エリアは、東京都足立区内の荒川・隅田川に挟まれた概ね2km四方の地域であり、首都直下地震時には震度6強の揺れが想定される²⁾とともに、荒川破堤時には最大5m以上の浸水が想定されている（図2）。足立区発行の洪水ハザードマップでは、この水害時には、地域一帯の住民は隅田川の対岸である荒川区方面へ広域避難を行うように定めている³⁾。

ICHARM は、2章で説明した全体計画のうち、「(1)エリア特性に応じた複合災害の予測技術の開発」における北千住駅周辺エリアの水害ハザード・リスク評価、及び「(3)エリア災害予防のためのアプリケーションの開発」における事前行動・応急行動計画の策定に関する研究を分担している。

「水害ハザード・リスク評価」については、まずは、既に公表されているハザードマップ等の情報を収集するとともに、これらを国土数値情報⁴⁾などの地域データと重ね合わせて地域全体での災害状況の把握を行った。本研究課題においては、想定する被災レベルとしては、両対象エリアともに、レベル1は建物内での対応で済むレベル、レベル2は建物外への避難が生じるレベル、レベル3は広域避難が必要となるレベルとする。これに従い、北千住駅周辺エリアについては、被災レベル1は内水氾濫による床下浸水レベル、レベル2は内水氾濫により床上浸水も生じるレベル、レベル3は荒川破堤（外水氾濫）のレベルとして設定する。レベル3の荒川破堤については、国土交通省荒川下流河川事務所からの協力を得て、初年度より、想定氾濫地点に応じた本地域への影響の分析を進めている。例えば、荒川右岸12.5km地点が破堤した場合、当該地域の約半分の地域は30分以内に浸水が到達することが想定されている（図2）。リスク評価においては、想定外をなくし、あらゆる災害に対応することを目指して、国勢調査、パーソントリップ調査、住宅土地統計調査、NHK 国民生活時間調査報告書⁵⁾等のデータを用いて時間帯・建物構造別の在宅・非在宅人口を推計し、これらを洪水氾濫想定と重ね合わせることにより、各時間帯に浸水が発生した場合にリスクに晒される曝露人口の推計を行っている。これらの推計に基づき、在宅居住者、非在宅居住者、通勤・通学者、買い物客等の滞留者等の立場に応じた災害シナリオの作成を行うとともに、これらの人々にとって対応行動のトリガーとなるべき情報や情報受信後に行うべき対応行動についての検討を進めている。

「事前行動・応急行動計画の策定」については、東京電機大学とともに、足立区及び駅周辺の事業所等のステークホルダーへのヒアリングを行い、地域連携に向けたネットワーク構築を進めている。

4. おわりに

本稿では、ICHARM の SIP 研究課題への参画状況について報告した。今後は、地域と連携しながら水害シナリオに関する議論を深めるとともに、災害発生までの猶予時間と各ステークホルダーの立場に応じた事前行動・応急行動計画のとりまとめと地域共通のルール化を図ることを目指している。

【参考文献】

- 1) SIP 課題⑦地域連携による地域災害対応アプリケーション技術の研究開発：パンフレット、2014.
- 2) 東京都：首都直下地震等による東京の被害想定 報告書、2012.
- 3) 足立区：足立区洪水ハザードマップ、2007.
- 4) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサービス、<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 5) NHK 放送文化研究所：国民生活時間調査報告書、2010.

野球場より広い大区画水田の灌漑を自動化できるか？

～圃場水管理の情報通信・制御技術を導入した圃場－広域連携型の次世代水管理システムの開発～

寒地農業基盤研究グループ 中村 和正

1. はじめに

戦略的イノベーション創造プログラム（S I P）の「次世代農林水産業創造技術」には「高品質・省力化を同時に達成するシステム」という研究開発項目がある。その達成に必要な水分配システムの開発を行う大課題が、「圃場水管理の情報通信・制御技術を導入した圃場－広域連携型の次世代水管理システムの開発」である。ここで、圃場という用語は1枚1枚の水田や畑をさす。

灌漑用水はダムから頭首工等を経て幹線用水路に入る。いくつかの分水工を通りながら、支線用水路、小用水路を流下し、水田や転作田に取り入れられる。ダムから幹線用水路までといった基幹的な施設は、遠方監視制御システムを有している。しかし、このような基幹的な施設よりも下流の支線用水路から圃場までの区間は遠方監視制御の範囲外であることが多い。この大課題では、圃場水管理に情報通信・制御技術を導入して、圃場から広域までを連携させた次世代水管理システムを開発する。

寒地農業基盤研究グループは、小課題「大区画水田における地下水位・湛水深の分布解明と簡易遠方監視技術の開発」（以下、この小課題と略記）を担当している。本講演では、北海道内の水田地帯で近年進められている地下灌漑が可能な大区画水田の整備を紹介し、この小課題の必要性を述べる。

2. 地下灌漑が可能な大区画水田の整備

北海道の水田地帯の中には、農家の高齢化と後継者不足で農家戸数の減少が進み、経営規模が拡大を続けている地域がある。夫婦2人の家族経営の場合、1戸当たりの経営面積が20haを超えると、稲作のすべてを移植栽培で行うには労働力が不足する¹⁾。経営規模が拡大した水田地帯には、作業効率向上を目指して圃場の大区画化と地下灌漑施設の整備を進め、さらに圃場整備を契機にして水稲直播栽培を導入する事例も増えている。

空知地域のM地区では、経営規模拡大への対応として、①水田圃場の大区画化（0.3haから約2haへ。図-1）、②ターン農道（農業機械が旋回できる幅広の農道）の整備、③地下灌漑施設の整備（直播栽培に有利）、④農家の自宅周囲への所有農地の集積、⑤直播栽培の導入、⑥RTK-GPS均平機の現地実証、といった取り組みが行われている。さらに今後は、⑦播種、代かき、田植え、防除の自動操舵化へのGPS活用が進められる予定である。このうち①～③は、国営農地再編整備事業によるものである。

図-2は、圃場に整備される地下灌漑施設である。灌漑管理ユニットのバルブを開くと、パイプラインから取水できる。圃場への取水は地表からでも地下からでも可能である。地下から灌漑する場合は、灌漑管理ユニットから暗渠管に用水を流入させる。暗渠管の下流端には水位調整型水閘がある。スリットの高さを調節すれば、地下水位をコントロールできる。暗渠管を通じた地下排水のほかに、地表排水の排水口もある。1枚の圃場に灌漑管理ユニットと水位調整型水閘がそれぞれ4箇所設置されている。



図-1 整備後の大区画圃場（M地区）

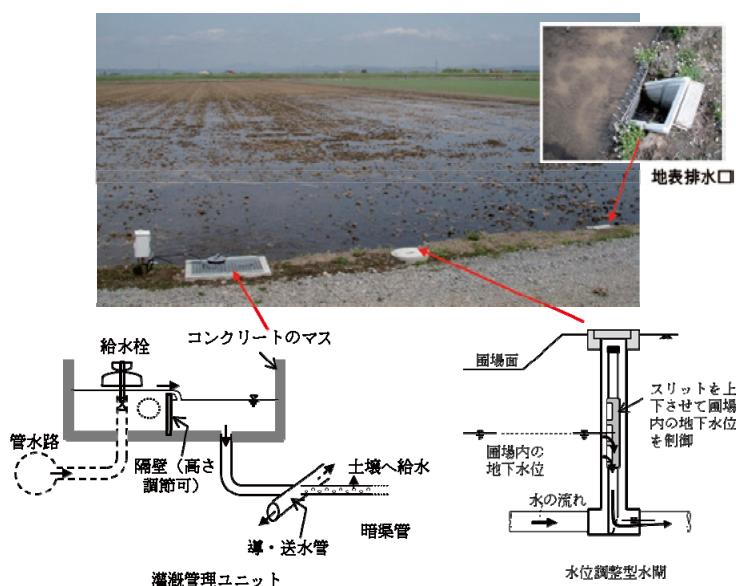


図-2 圃場の灌漑・排水・地下水位制御のシステム

3. 大区画圃場の水管理に関する寒地農業基盤研究グループの既往研究成果の活用

圃場の大区画化や地下灌漑施設の整備、さらに圃場の整備を契機とした直播栽培の面積拡大は、それぞれが圃場水管理の変化因子になる。今後の用水の安定供給のためには、総量としての、あるいは時期別の用水量の変化の把握が必要である。また、農家が地下灌漑に習熟し、その利点を活用するためには、地下灌漑時の圃場内での縦方向の、あるいは平面的な水の動きを農家がイメージできることが必要である。これらの必要性から、当グループは、M地区において圃場の地下水位や湛水深の観測と用水量の分析、成果の農家への発信を平成23年度から続けてきた。この小課題では、これらの知見も活用する。

4. 地下灌漑が可能な大区画圃場の水管理自動化に必要なこと

この小課題の圃場の水管理の自動化とは、作物の生育状況や気象条件を考慮して地下水位や湛水深を調整することである。自動化のためには、圃場の地下水位と湛水深の代表値を把握する必要がある。この小課題の達成目標の一つは、図-1に示すような、野球場より広い圃場を対象とする、これらの代表値の把握方法の開発である。

図-3は、風によって圃場内で生じる湛水深差の観測結果である。稲が小さい時期の強風では、風上と風下で4~5cmの湛水深差が生じる。この時期の水田は、5cm前後の湛水深とされることが多いから、この湛水深差は大きな偏りである。仮に、取水を自動化し湛水深の目標値を6cmと設定すると、浅い側の灌漑ユニットからは取水が継続し、深い側の地表排水口から越流・排水が継続してしまうといった現象も生じ得る。

今度は地下水位のばらつきを考えてみる。水稻の直播栽培では、播種から苗立ちまでの約3週間に、表面の土を乾燥させないよう水管理が行われる。この間は土壤水分を見ながら、5日間~7日間程度の間隔で取水する。毎回の取水は、地表面全体に水面が見られる程度になったら停止する。取水中の水の動きを図-4に示す。暗渠管の埋め戻し部（洗い砂利）の部分の水は上昇し、下層の土が飽和する前に地表面で横に広がる。それゆえ、取水中の地下水位は圃場内でばらつきが大きく、取水の停止の判断を少数の地点の地下水位で行うことは難しい。

この小課題では、このようなばらつきを持つ湛水深・地下水位の代表値の決定方法を検討する。

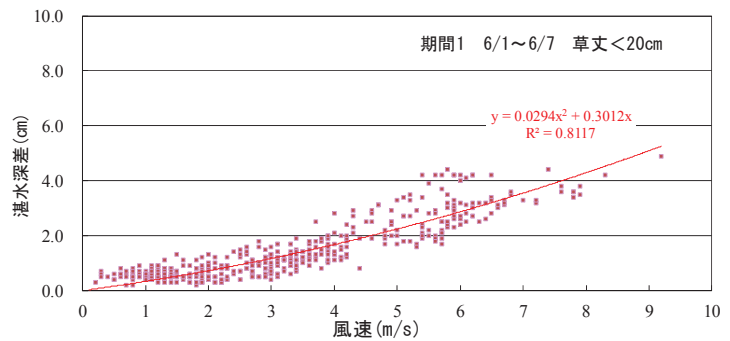


図-3 風による水面高さの偏り
(長辺方向に260m離れた2地点)

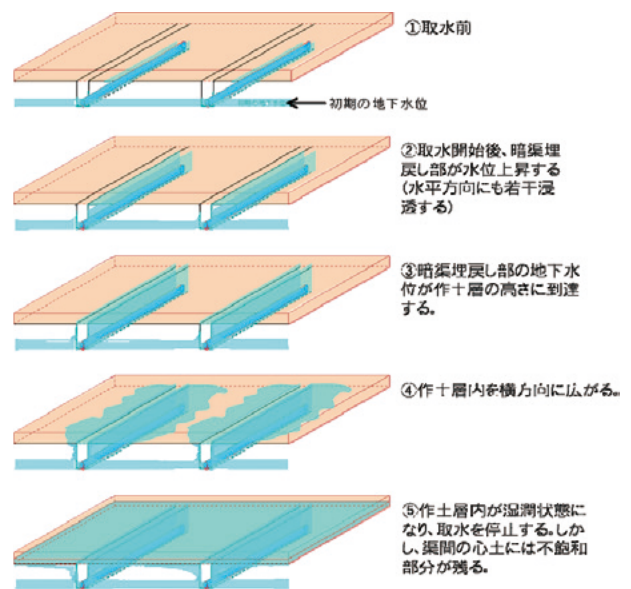


図-4 地下灌漑時の水の動き

5. おわりに

この小課題では転作田の地下水位制御についても現地調査や室内実験を行っている。今後、農家の作業軽減に結びつくような成果達成に結びつけたい。最後に、この研究は「戦略的イノベーション創造プログラム（次世代農林水産業創造技術）」のうち「圃場水管理の情報通信・制御技術を導入した圃場一広域連携型の次世代水管理システムの開発」（代表研究機関：国立研究開発法人農研機構農村工学研究所）で実施していることを付記し、謝意を表する。

【参考文献】

1) 仁平恒夫：北海道における稲作作業構造と限界規模、北海道農業試験場研究資料、No.43、pp.1-18、1991.3

[土木分野のイノベーションに向けて NO2]

見えない不具合箇所を探せ！！

～移動式舗装たわみ測定手法の開発～

舗装・盛土の内部物性構造を可視化する

～非接触・非破壊計測技術の開発～

見えない不具合箇所を探せ！！－移動式舗装たわみ測定手法の開発－

道路技術研究グループ舗装チーム上席研究員 久保 和幸

1. はじめに

我が国の舗装は道路延長ベースで 100 万 km を超え、膨大な量がストックされている¹⁾。高度経済成長期以降に集中的に整備されてきた道路構造物の老朽化が全国的に深刻な問題となってきた²⁾が、舗装は供用直後から車両の交通だけでなく、雨水や紫外線などの影響によりひび割れやわだち掘れが発生し、他の道路構造物と比較しても早期に健全性が低下し劣化する構造物である。一方で、舗装はドライバーや歩行者など道路利用者が直接触れる施設であり、道路のサービスレベルは舗装の良否に掛かっている、とも言える。

我が国では舗装の適切な管理のために 1979 年に MCI (Maintenance Control Index、舗装維持管理指数) が開発され³⁾、その後直轄国道では、3 年に一度の頻度で全路線の路面性状を計測し、これらをデータベースに保管してきた。MCI はわだち掘れ量、ひび割れ率、平坦性といった路面性状から算出される指標であり、舗装の補修の判断材料として活用されてきている。

舗装の構造設計は、その基盤となる路床の支持力(設計 CBR)と設計期間内(通常は 10 年、幹線道路では 20 年以上を採ることもある)における累積大型車交通量に基づいて行う。すなわち、舗装は路面だけでなく、その構成層である表層以下のアスファルト混合物層や路盤も構造的に劣化していくと考えられている。一方で、舗装の非破壊による構造診断方法としては、既設舗装上に重錘を落下させ、そのときに路面に発生するたわみ量を計測することで、舗装各層の健全性を評価する FWD(Falling Weight Deflectometer、たわみ測定装置)が実用化されているが、装置が静止した状態で計測を行う必要があり、膨大な舗装ストックをネットワークレベルで管理する方法としては不適切である。そこで、土木研究所では 2005 年から大学等の有識者とともに、当時すでに海外で検討が始まっていた移動式たわみ測定車に関する勉強会を開催し、我が国独自の測定手法を開発すべく取り組んできた。ここにその開発経緯と取り組みの現状を報告する。

2. たわみ測定手法の原理と現状

舗装の構造的健全度を非破壊で調査する手法としてはすでに FWD (Falling Weight Deflectometer、たわみ測定車)がある。図-1 にその概形と測定概念を示す。舗装の構造診断では、まず舗装の各構成層であるアスファルト混合物層や路盤層を弾性体と仮定する。この多層構造の弾性体に荷重を加えた際に、表面がどのようにたわむのかを計測することで、舗装各層の弾性係数を逆計算し、この弾性係数に基づき舗装各層の構造診断を行う。すなわち、載荷位置で得られるたわみ量が同じであっても、載荷位置付近が大きくたわんでいる場合には表層付近が劣化しており、ほぼ線形にたわんでいる場合は路床以下が劣化していることとなる。FWD による構造診断はすでに実用化されており、補修箇所における補修工法の選定などに活用されているが、停止して測定を行う必要があるため、ネットワークレベルの管理には不適である。

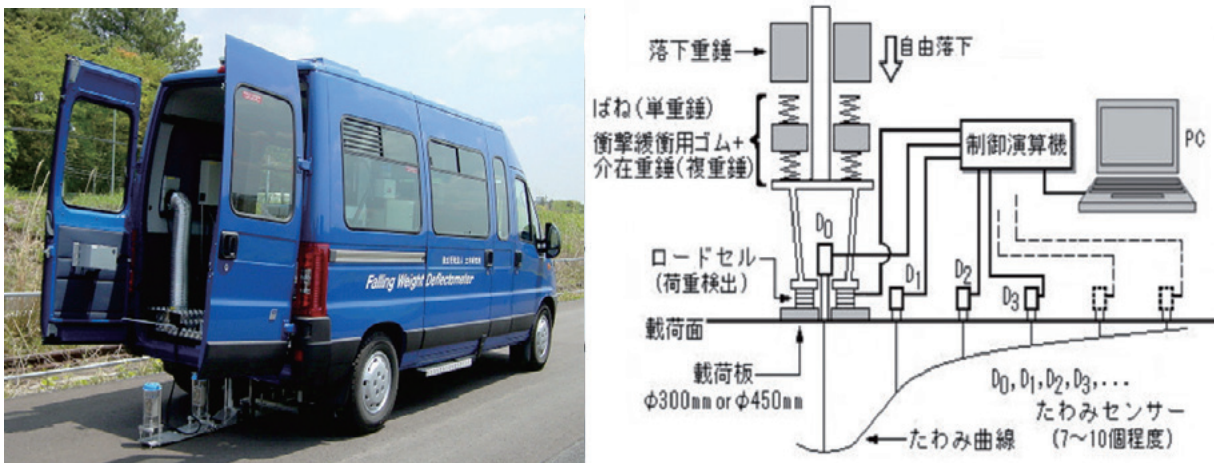


図-1 FWD とその測定概念

ネットワークレベルでの舗装の構造的健全度を評価するために、高速で移動しながら連続的にたわみを計測する試験機は、1990年代の初頭から各国で開発が進められている⁴⁾。実用的に使用されている試験機には、写真-1に示すRWD (Rolling Wheel Deflectometer (米国))、RDT (Road Deflection Tester (スウェーデン)) やHSD (High Speed Deflectograph (デンマーク)) などがある⁵⁾。これらの試験機で得られたたわみは、既にプロジェクトレベルで舗装マネジメント(PMS)の評価指標として用いられ、補修時期や補修工法の選定に役立てられている事例もある^{6),7)}。これらの試験機では、車両に搭載した変位センサ^{8),9),10)}やドップラーセンサ^{11),12)}を用いて、たわみ量やたわみ速度の計測を行っている。そのため、車両の振動や路面の凹凸、温度等が測定結果に与える影響を低減させるための装置の開発、また、試験で得られたデータの処理方法などの研究が現在も活発に行われている。

海外で開発されているこうした移動式たわみ測定装置は、写真でも分かるとおり巨大な牽引式トレーラにレーザー距離計を取り付けたものであり、高精度な変位測定のために様々な工夫がなされているが、日本国内では測定できる路線が限定されてしまうだけでなく、車両寸法が車両制限令に抵触してしまうため、我が国の道路をネットワークレベルで管理する試験機としては不適であると考えられる。



写真-1 RWD (Rolling Wheel Deflectometer (米国))¹³⁾

3. 試作機による確認、検討

我が国の幹線道路をネットワークレベルで管理するためのツールとして活用できるように、一般的な大型車としてかつて土木研究所舗装走行実験場で利用していた荷重車をベースに移動式たわみ測定装置を開発した。

試作機として写真-2に示す荷重車に、舗装のたわみを測定できるレーザーセンサーとドップラーセンサーを取り付けた。レーザーセンサーは安価ではあるが、センサー本体から路面までの距離を計測するため、たわみ以外の路面の凹凸形状にも影響を受け、解析時にはこうしたノイズをどれだけ正確に除去できるかが課題となる。一方ドップラーセンサーは路面が変形する際の変形速度を測定するためより純粋なたわみ量が計測できるが、その計測制度とともにセンサー自体の価格が普及時のネックとなる。舗装たわみの測定方法と解析方法を確立するため、車体の振動等のノイズの除去方法を含む解析方法を検討した。試作機が舗装の健全度を適切に評価できているかについては、FWDによる計測結果と比較することにより検証した。なお、ドップラーセンサーを用いた検討は、国土交通省新道路技術開発の採択技術「舗装路面の動的たわみ計測装置の開発と健全度評価に関する研究」¹⁴⁾研究代表者：東京農業大学 竹内康教授)の支援を受けて行っている。



写真-2 試作機

3. 1 試作機の概要

3. 1. 1 レーザーセンサーの配置箇所

後輪の周辺に生じるたわみを評価するため、車軸と路面までの距離の変化を複数のレーザーセンサーを用いて計測する。車輪の前後でたわみ形状が異なることも考慮し、車輪の前後に3個ずつセンサーを設置した。また、サスペンションの影響により車軸と車体フレームの運動が異なるため、車軸をベアリ

ングで挟み、それにセンサーの架台を取り付け、センサーと車軸を剛結して運動が一致するようにした。さらに、路面の原位置として車輪による変形の影響をあまり受けない路面の位置を把握するために車両の中央部にセンサーを3つ取り付けた。センサーの配置状況の詳細は、図-2に示すとおりであり、以降の記述では、図中のD1~D10をそれぞれのセンサーの名称としている。走行距離は、距離計を車体後部に取り付け、変位の計測と同期をとって計測した。

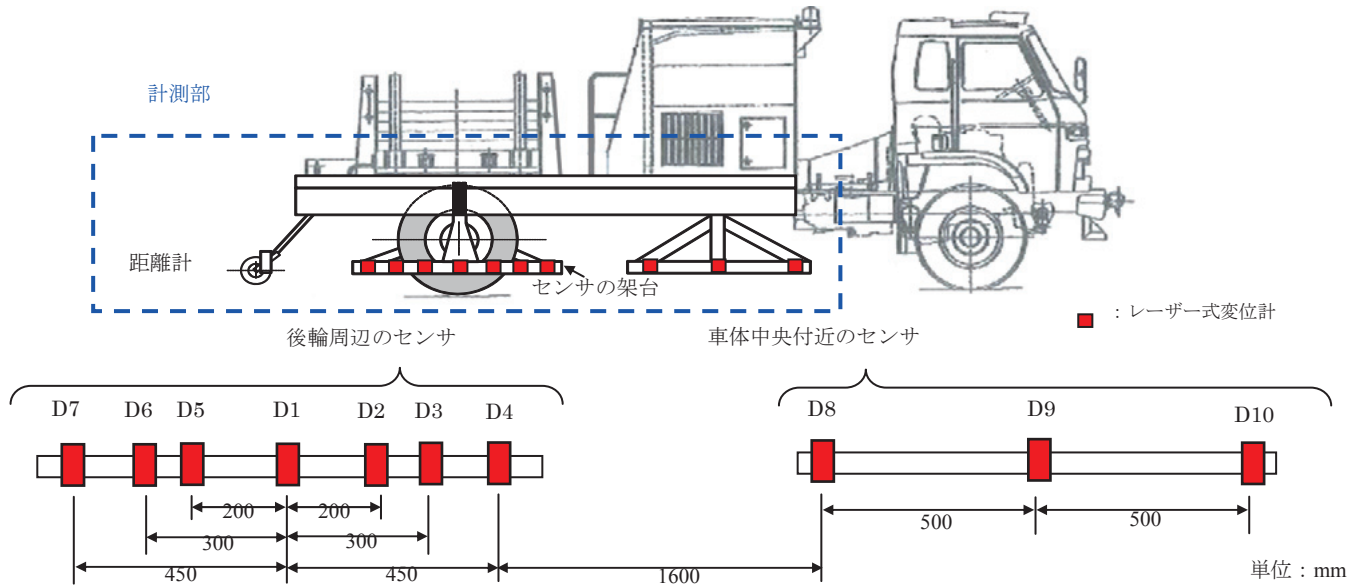


図-2 レーザー変位計配置図

3. 1. 2 ドップラーセンサーの配置箇所¹⁴⁾

ドップラーセンサーは計測対象からある程度間隔を開けなければならないことなどから、図-3に示すとおり荷重車の左後輪上部に設置した架台に取り付けた。また、架台の挙動を把握してドップラーセンサーによる計測値を補正するために架台に加速度計も取り付けた。前述のとおり、ドップラーセンサーは高価であり予算の制約上、センサーの設置個数は3個としている。

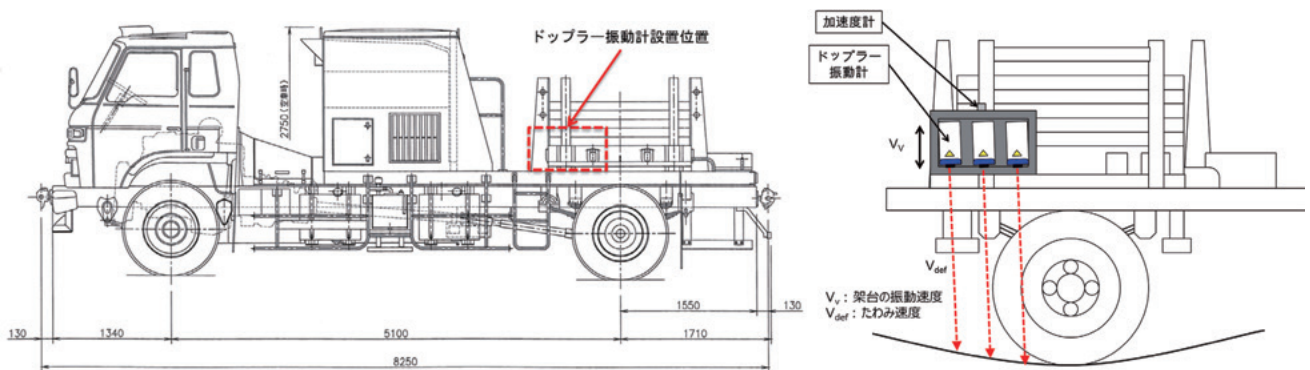


図-3 ドップラーセンサー配置図¹⁴⁾

3. 2 路面たわみの求め方

3. 2. 1 レーザー変位計

レーザー変位計でたわみ量を求める方法は、図-4に示す通りである。車両は、x軸方向に速度 v で進行するものとする。いま、路面に凹凸や傾斜がなく、また、車体自体の振動や傾きもない理想的な状況を考えると車輪直下のたわみは、以下の式で与えられる。この Δ_0 および Δ_d をレーザー式変位計で測定している。

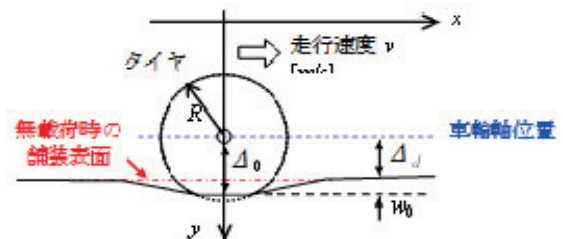


図-4 路面たわみの求め方 (レーザー変位計)

$$w_0 = \Delta_0 - \Delta d \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

w_0 : $x = 0$ におけるたわみ

Δ_0 : 載荷位置 ($x = 0$) における車輪軸と路面までの距離

Δd : 載荷輪から十分離れ、その影響を受けない位置 ($x = d$) における車輪軸と路面までの距離

3. 2. 2 ドップラー振動計¹⁴⁾

ドップラー振動計でたわみ量を求める方法は、図-5に示す通りである。いま、車輪直下を原点とする局所座標系において、たわみを w 、車両走行速度を V 、距離および時間をそれぞれ x 、 t とすると、式(1.1)に示すように、たわみ角 dw/dx は V とたわみ速度 dw/dt によって求めることができる。そして、たわみ角を x で積分すればたわみ形状を計算することができる。

一般的に、たわみ形状は指数関数でフィッティングできるため、複数のドップラー振動計によって計測したたわみに合うように指数関数のパラメータを計算すれば、最大たわみを求めることができる¹⁴⁾。

$$\frac{dw}{dx} = \frac{dt}{dx} \cdot \frac{dw}{dt} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

$V (= -\frac{dx}{dt})$: 車両の走行速度

$\frac{dw}{dt}$: 車両のたわみ速度

$\frac{dw}{dx}$: たわみ曲線の傾き

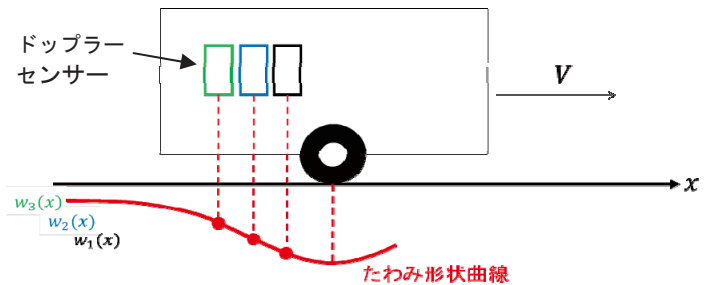


図-5 路面たわみの求め方 (ドップラーセンサー)¹⁴⁾

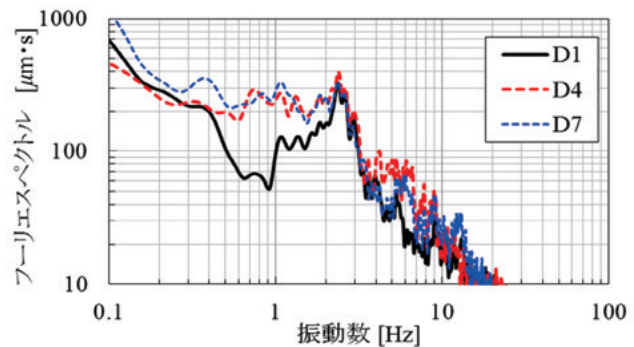


図-6 車両振動測定結果

3. 3 車両振動の確認

舗装たわみを直接読んだ変位は、さまざまな周期の波が含まれている。このさまざまな周期の振動の集まりととらえ、変位計の測定データをフーリエ解析し、周期ごとの振動の強さに分解したフーリエスペクトルを求めた。このフーリエスペクトルの結果を図-6に示す。いずれのセンサの結果でも、0.5Hz以下および2~3Hz付近で卓越する振動数成分が確認された。0.5Hz以下の振動が路面のたわみによるものであるものと考えられるのに対し、2~3Hz付近の振動は、車両の振動に起因するものと考えられ、たわみの評価に当たっては、これを除去する必要がある。

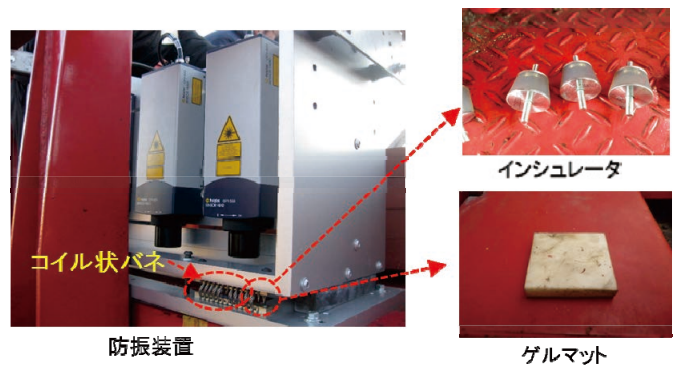


写真-3 物理的な振動対策¹⁴⁾

3. 4 振動抑制対策

3. 4. 1 物理的な振動対策法の検討¹⁴⁾

たわみの評価に当たっては、車両の振動を除去する必要があることが分かったため、物理的な振動対策として、写真-3に示すコイル状バネと高周波帯域の振動を吸収させノイズを軽減することができる衝撃吸収効果の高いαゲルを使用したインシュレータとゲルマットを用いた対策について検討した。センサ架台に生じる振動特性をセンサ架台上端に設置した加速度計で計測し、フーリエ解析によりパワースペクトルを求めた。その結果を図-7に示す。その結果、6~10Hz、10~30Hz および 100~300Hz

付近の振動が増加していることがわかる。また、荷重車のリーフスプリングサスペンションに起因する 3Hz 付近の振動も増加していることから防振材料による効果は期待できないことがわかる。そのため、センサ架台は車体に剛結し、センサ架台の不規則振動を抑制することとした。

3. 4. 2 ソフト的振動対策法の検討¹⁴⁾

ハード的対策のみでは、架台の振動を抑制できないことがわかったため、ウェーブレット解析を用いたソフト的振動除去を検討した。

ウェーブレット解析は、図-8に示すように観測パターンを短い波(ウェーブレット)¹⁴⁾の集合体として分解・解析するもので、車両の不規則振動波形の解析に適している。

今回行ったウェーブレット解析を用いたソフト的振動除去方法を簡略したイメージを図-9に示す。架台に取り付けた加速度から車両の振動をウェーブレット変換し、加速度が0になるようにフィルタを設定する。次に、ドップラーセンサーで測定したたわみ速度をウェーブレット変換する。たわみ速度には、車両の振動成分とたわみ速度成分が含まれているので、加速度が0になるように設定した同じフィルタを適用すると車両の振動成分が除去できるので、たわみ速度成分だけが残ることになる。これが、舗装のたわみ量となる。

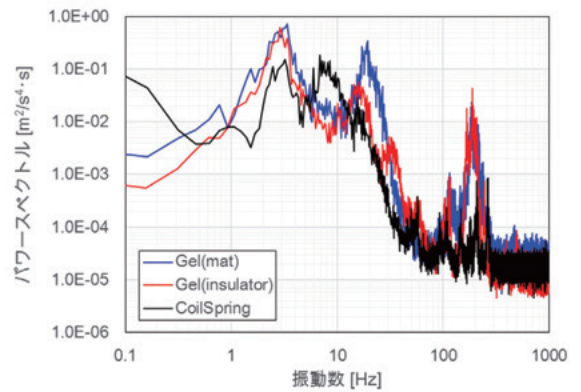


図-7 振動対策効果の測定結果¹⁴⁾

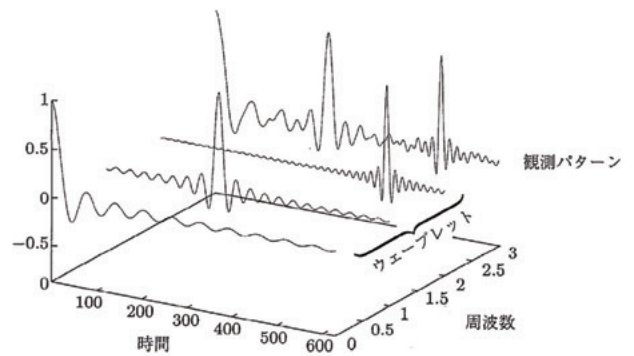


図-8 ウェーブレット解析¹⁵⁾

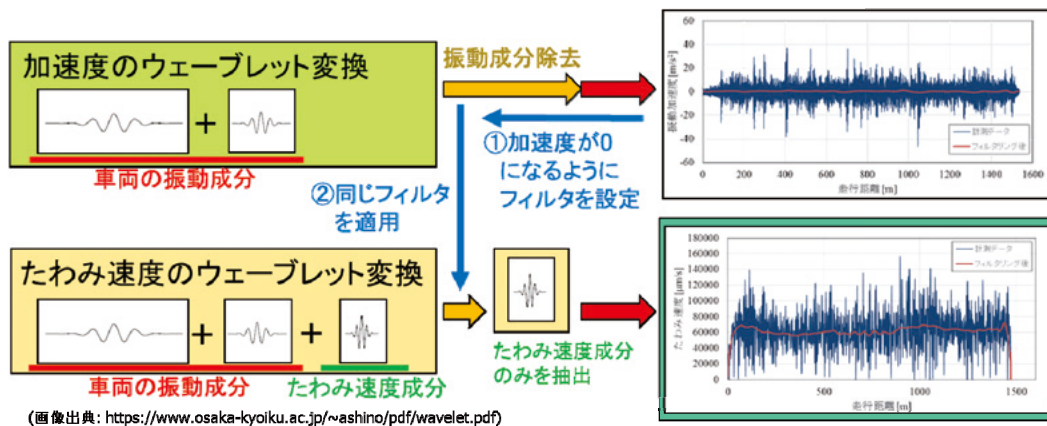


図-9 ウェーブレット解析を用いたソフト的振動除去方法を簡略したイメージ図

3. 5 測定結果

国土技術政策総合研究所の構内道路 1.4km で MWD と FWD を測定し、離散ウェーブレット変換を行った最大たわみと FWD で測定した最大たわみを比較した。

3. 5. 1 レーザー変位計測定結果

レーザー変位計の結果として時速 30km/h で測定した結果を図-10に、時速 50km/h で測定した結果を図-11に示す。離散ウェーブレット変換を行ったレーザー変位計によるたわみは、速度が変わっても FWD のたわみとほぼ同等の値を得ることができたことが分かった。

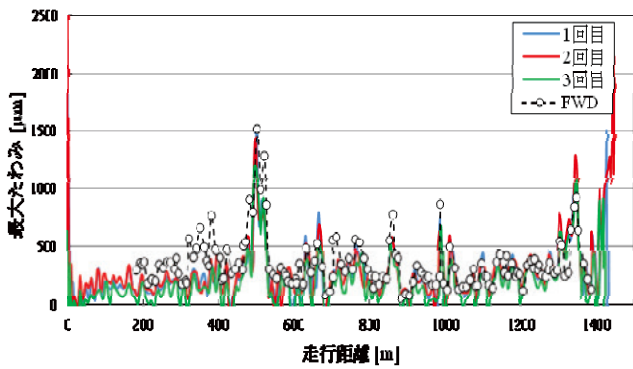


図-10 MWD たわみと FWD たわみの比較
(レーザー変位計、30km/h)

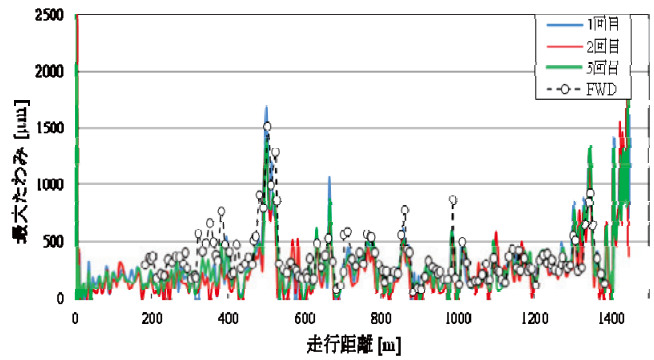


図-11 MWD たわみと FWD たわみの比較
(レーザー変位計、50km/h)

3. 5. 2 ドップラーセンサー測定結果¹⁴⁾

ドップラーセンサーの結果として時速 30km/h で測定した結果を図-12に、時速 50km/h で測定した結果を図-13に示す。分散ウェーブレット変換を行ったドップラーセンサーによるたわみは、速度が変わっても FWD のたわみとほぼ同等の値を得ることができていることが分かった。

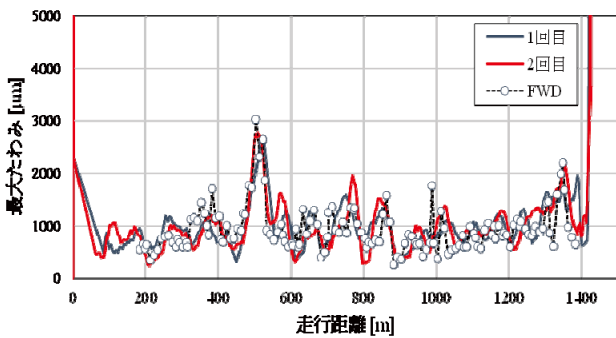


図-12 MWD たわみと FWD たわみの比較
(ドップラーセンサー、30km/h)¹⁴⁾

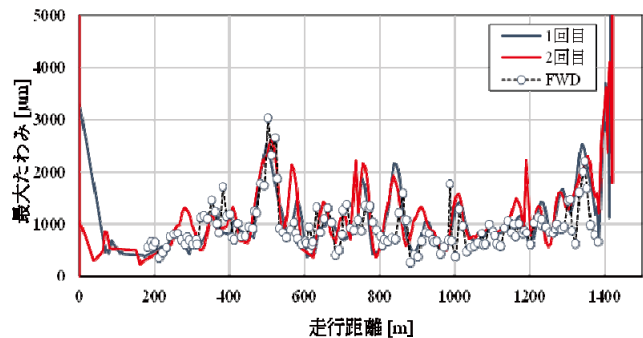


図-13 MWD たわみと FWD たわみの比較
(ドップラーセンサー、50km/h)¹⁴⁾

3. 6 路面下空洞の検出確認

土研構内道路 80m 区間に大きさと設置深さを変えた 4 種類の模擬空洞を敷設し、路面下空洞が検出可能か確認した。表-1 に模擬空洞の寸法と設置箇所を示す。また、写真-4 と写真-5 に模擬空洞敷設状況を示す。測定はドップラーセンサーで行った。路面下空洞区間の測定結果を図-14 に示す。空洞 A は検出が不明瞭であったが、それ以外の 3 種類の空洞は、空洞上でたわみ速度の差が大きくなり、空洞を測定できることが確認できた。

表-1 模擬空洞の寸法と設置箇所

空洞	寸法 (m)	設置深さ (m)		備考
		上端	下端	
A	1.0×1.0×0.2	0.7	0.9	改良路床下に設置
B	1.0×1.0×0.2	0.4	0.6	改良路床内に設置
C	1.0×1.0×0.2	0.2	0.4	路盤内に設置
D	0.5×0.5×0.2	0.2	0.4	路盤内に設置



写真-4 模擬空洞敷設状況 (空洞 A)



写真-5 模擬空洞敷設状況 (空洞 C)

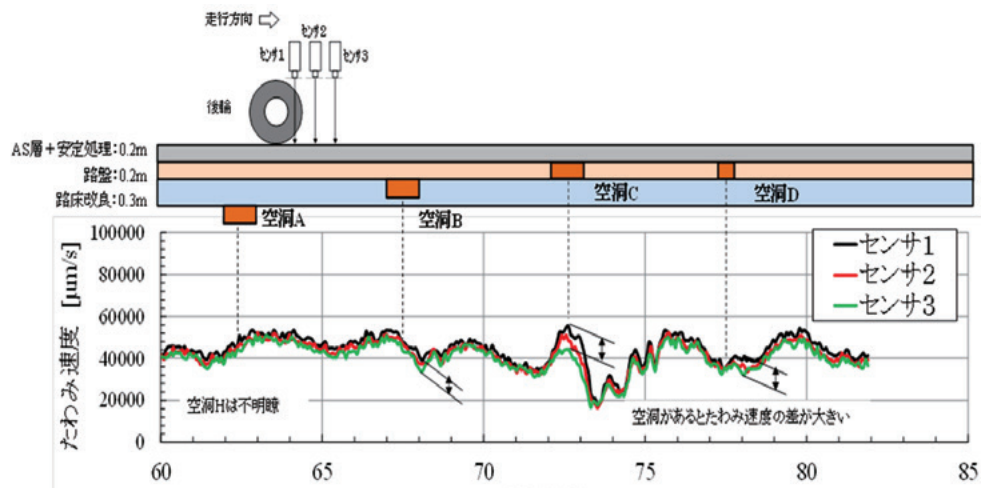


図-14 路面下空洞区間の測定結果

4. 計測システムの移設¹⁴⁾

荷重車を使用した試作機は、一般道を走行することができないため計測システムを一般道を走行可能な中型トラックを改造し移設した。写真-6に移設した中型トラックの外観を、写真-7に車体内部の状況を、写真-8～写真-10に移設した計測機の写真を示す。



写真-8 車体外観

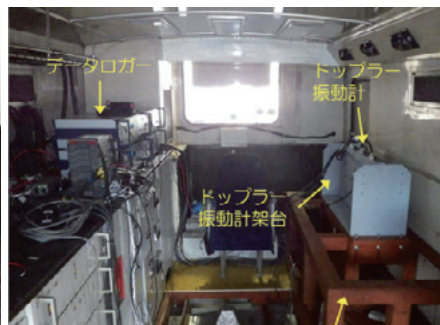


写真-9 車体内部



写真-10 ドップラーセンサー

5. 実道での測定結果¹⁴⁾

移設した車種でつくば市の市道約1.5km区間の片側1車線の道路を往復して、MWDおよびFWD試験を実施し走行確認を行った。今回測定した市道の舗装断面は表層5cm、上層路盤15cm、下層路盤20cmの舗装である。写真-11にMWD測定状況を、写真-12に路面状況を、写真-13にFWD測定状況を示す。往路で時速35km/hで測定したFWDたわみとMWDたわみの測定結果を図-15に示す。FWDたわみとMWDたわみは概ね一致しており、一般道を走行可能な中型車両に計器を移設し、実際の道路を測定した場合も、たわみを測定できることが分かった。



写真-11 MWD測定状況



写真-12 路面状況



写真-13 FWD測定状況

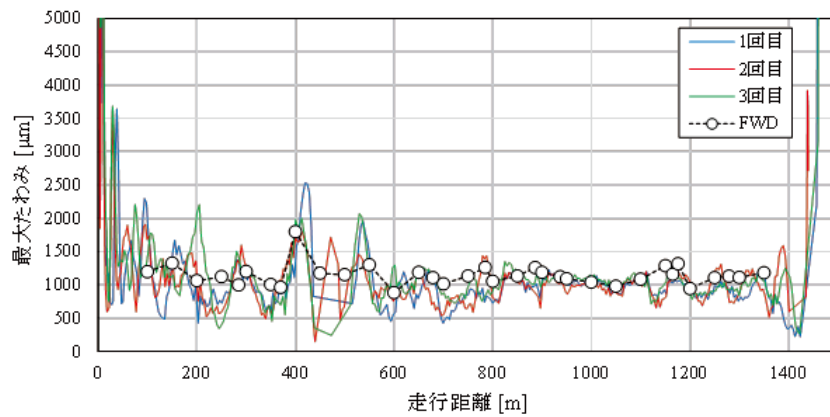


図-15 MWD たわみと FWD たわみの比較 (35km/h) 14)

6. おわりに

今回開発した MWD は、ネットワークレベルでの一時調査として、構造的不具合（不健全箇所）のおよその位置を特定するためのスクリーニング試験機として十分な精度を有しているものと考えられる。ただし、現時点で計測した路線は国総研外周路と市道でしかないので、詳細に測定誤差を検討するにはデータが不足している。よって、今後も継続して国道、県市町村道など一般道で検証実験を行って、移動式舗装たわみ測定システムシステムの構築および移動式舗装たわみ測定手法を用いた舗装の健全度評価手法の提案を行っていく予定である。

【参考文献】

- 1)道路統計年報 2014、全国道路利用者会議、2014.8
- 2)真下英人：道路構造物の点検技術の現状と今後の展望、土木技術資料 Vol.57、No.8、pp.4-5、2015.8
- 3)「舗装の維持修繕計画に関する調査研究」、第 33 回建設省技術研究会、1979)加納孝志他：移動式たわみ測定装置について—舗装のたわみ測定装置の変遷—、アスファルト、Vol. 51、No. 224、pp. 43-54、2008.
- 4)加納孝志他：移動式たわみ測定装置について—舗装のたわみ測定装置の変遷—、アスファルト、Vol. 51、No. 224、pp. 43-54、2008.
- 5)丸山輝彦：高速移動式たわみ測定装置、Journal of Civil Engineering、Vol.53、No.5、pp.58-59、2012.
- 6)T. Van: Rolling Wheel Deflectometer, Network-level Pavement Structural Evaluation, Measuring Deflection at Highway Speeds, Asset Management, US
- 7)ERES Consultants: Rolling Wheel Deflectometer (RWD), Demonstration and Comparison to Other Devices in Texas, Asset Management, US Department of Transportation, FHWA 2004.2
- 8)Brian K. Diefenderfer : INVESTIGATION OF THE ROLLING WHEEL DEFLECTOMETER, Virginia Transportation Research Council, Final Report VTRC 10-R5, 2010.
- 9)中道達也：非接触型連続たわみ測定装置による舗装構造評価方法の開発、長岡技術大学修士論文、平成 12 年.
- 10)非接触連続たわみ測定装置の開発、第 21 回日本道路会議論文集、pp.696-697、
- 11) Soren, Rasmussen et al. : A comparison of two years of network level measurements with the Traffic Speed Deflectometer, Transport Research Arena Europe 2008
- 12)B.Ferne, P.Langdale & N.Round : Development of the UK highways agency traffic speed deflectometer, Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields - Tutumluer & Al-Qadi, pp.409-418, 2009.
- 13) Steele D, Hall J, Stubstad R, Peekna A, Walker Ronald : Development of a high-speed rolling wheel deflectometer, Pavement Evaluation Conference, 2002, Roanoke, Virginia, USA
- 14) 国土交通省新道路技術開発の採択技術「舗装路面の動的たわみ計測装置の開発と健全度評価に関する研究」研究代表者：東京農業大学 竹内康教授
- 15) 新井康平：ウェーブレット解析の基礎理論、森北出版株式会社、2005.

舗装・盛土の内部物性構造を可視化する ～非接触・非破壊計測技術の開発～

地質・地盤研究グループ 稲崎 富士

1. はじめに

我が国は総人口に占める 65 歳以上の割合、いわゆる高齢化率がすでに 25%に達し、20 年後には 1/3 を超える超高齢化社会に突入しようとしている。高齢化の進行に伴って、社会保障費の増大、生産年齢人口の減少など、国民の健康な暮らしと国としての活力維持に深刻な影響が出来し始めている。高度成長期に集中的に整備された社会インフラ諸施設も、同様に「高齢期」を迎えており、その効率的な維持管理・長寿命化への取り組みが研究分野でも進められようとしている。人に対しては、幼児期からの定期健康診断の継続的な実施、さらに疫学的・医学的バックアップ体制が整備されており、予防措置や罹患時の各種医療サービスを楽しむことができる。一方で道路や河川堤防などの社会インフラ施設に対しては、効率的な点検診断手法すら確立しておらず、それらの「健康状態」の把握や、点検診断結果に基づいた予防保全措置が充分にとられているとは言い難い状況にある。現状では、変状や被災が発生したらその箇所に対しては補修するという、「対処療法的措置」が続けられてきている。しかし大規模地震や集中豪雨などの自然災害や一部への交通集中は、まさにボディブローのようにこれらの社会インフラ施設の機能低下を引き起こしていると想定される。他の先進諸国がかつて経験したような、社会インフラ施設の「多臓器不全」状態に陥る前に、それらの内部物性状態を迅速かつ経済的に把握することが可能な点検診断手法を開発し、診断結果を要対策区間の効率的抽出や最適対策工法の選定と施工効果判定に結び付ける総合的な社会インフラ施設管理システムを早急に構築することが求められている。

1.1 土構造物の本質的特徴としての不均質性

土木構造物のうち、道路、河川堤防など未固結土を主構成材料とする土構造物は、本質的にその物性や構造を設計どおりに制御することができず、ばらつきが生じるという特徴がある。コンクリートや鋼製材料も人工材料であることから物性的にある程度のばらつきが発生するが、土質材料の物性的ばらつきはそれらに比べて格段に大きい。基礎地盤を構成する未固結堆積物も物性・構造とも空間的に不均質ではあるが、基本的に共通した物理法則下で形成される堆積層の場合は、その不均質性を統計的に推定することが可能である。また構造、すなわち空間的な連続性についても地球科学的手法によってモデル化することが可能である。これに対し人造の土構造物の場合は、改築や嵩上げが繰り返されている場合があり、さらに地震や洪水の影響を受け、外見では一様に見えても内部物性構造が数 10m あるいは数 m のオーダーで変動していることがある。

たとえば図-1 は、河川堤防の開削面を撮影した複数枚の写真を鉛直面に投影してオルソモザイク画像を作成し、その上に堤体内の土質分布観察結果を重ねたものである¹⁾。この開削面では合計 272 点で比抵抗を測定するとともに、そのうち 42 点から試料を採取して粒度分析を実施している。それらの結果から、堤体を 4 層に区分できること、各層の累重構造を基に築堤・改築時期を大きく 4 期に区分できることを明らかにした。川裏側の腹付け体 (III) と旧築堤体の芯部 (II) には細粒土が使用されているが、堤体を横断するように礫質層が分布し、また中粒の砂質材料が旧築堤体 (I) を覆うように分布しており、堤体の物性、特に浸透特性が決して一様ではないことがわかる。不均質構造のオーダーは鉛直方向では 1m 程度、側方方向では 5m 程度と見積もられるが、地表からの目視観察でこのような盛土内部の細かな不均質内部構造を把握することは不可能であり、不均質構造のオーダーに見合った調査計測手法の開発と適用が求められていた。

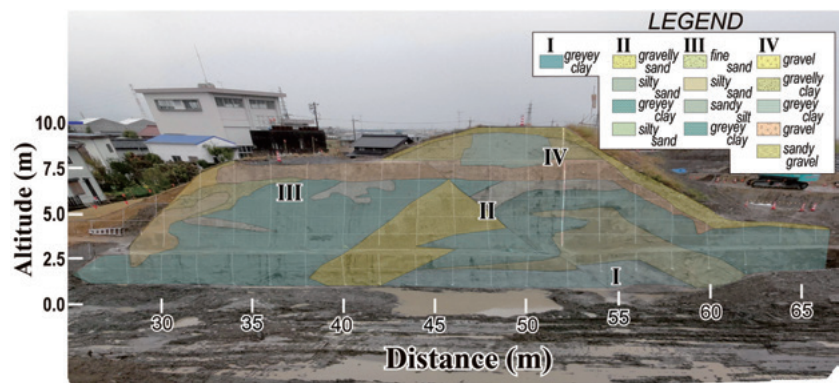


図-1 堤防開削面土質観察結果例(文献 1)に加筆).

1.2 舗装・盛土の不均質性とその状態把握の課題

農産物や工業製品の出荷時には、その品質を点検評価する製品検査が必ず実施される。一般に製品検査には、簡易全品検査、サンプル検査、非破壊全品検査の3形態がある。簡易全品検査は、例えば農産物の形状や色、サイズで品質や等級を定性的に階級区分する検査法で、規格外商品は通常の市場流通から除外される。この検査は全品に対しての目視や簡易計測によって行なわれる。従来の道路路面点検や、堤防概略点検など社会インフラ施設に対する安全検査も、基本的にこの簡易全品検査に分類される方法が採用されている。製品検査では、数100個に1個程度サンプルを抽出し、たとえば農産物ではその糖度や残留農薬が基準量以下であるかを測定するサンプル検査が簡易全品検査とセットで実施される。工業製品に対してもその強度特性などが規格を満足しているかを試験することが一般的である。このサンプル検査は基本的に破壊的な検査法であるので、検査対象となった個体は商品とはならない。当然、サンプル検査の対象となるのは商品の一部に限られる。さらにサンプル検査の経費は他の商品の価格に上乗せされることになるので、高額な検査法は敬遠されることになる。舗装の健全性調査や河川堤防に対する詳細点検は、このサンプル検査の典型であるといえよう。笹子トンネル天井板吊下げアンカーボルトの引抜き試験にも、このサンプル検査法が適用されている。これらの点検調査によって、特定の部位の物性を定量的に評価することができる。ただし製品は個別体であるのに対し、道路や河川堤防は連続体で切れ目がないという違いがある。それに加え農産物や工業製品の場合、抽出標本データから母集団の分布を統計的に推定できるのに対し、土構造物の場合は標本データから母集団の分布を推定することが極めて困難であるという本質的な違いがある。これは前述したように、土構造物の物性構造が人為的な要因によって細かなオーダーで変化すること、ばらつきのオーダーも場合によっては数桁に及ぶことがあるからである。

図-2は、道路盛土の縦断方向の物性分布を、安全率分布を代表例として示した概念図である。A点、C点で点検調査した場合には安全率は相対的に高く、「安全」と判定されるが、B点で点検調査した場合には「危険」と判定されることになる。一般に土構造物の安全性は「最小律」の法則に支配されると考えられる。すなわち、1箇所でも安全性に問題がある区間が存在すると土構造物の本来機能が損なわれる。言い換えればシステム全体の安全性が、最も脆弱な区間の存在によって支配されるという考え方である。舗装路面の陥没や盛土崩落などの被害が、特定の脆弱箇所が発生しているという実態が、最小律による安全性評価の必要性を支持しているといえよう。

製品検査では、さらに非破壊検査による全品検査が適用されることがある。残留放射線量に代表されるように、特定の基準を超過する個体が1個でもあると全体の商品価値を著しく損なう恐れがある場合は、基本的に全品検査が適用される。福島県産米に対する「全量全袋検査」がその典型例である。通常は商品価値を損なうことがないように非破壊での検査法が適用される。物理探査は、地盤に対する最も一般的な非破壊検査法であり、地下数1000kmの地球内部構造研究、数kmを対象とした地下資源調査、そして表層1m程度までの路面下空洞調査などに広く活用されている。本報告では道路舗装構造調査、盛土構造調査等の分野への最近の物理探査技術の適用例と、そのために新たに開発した計測機器類の概要を紹介する。

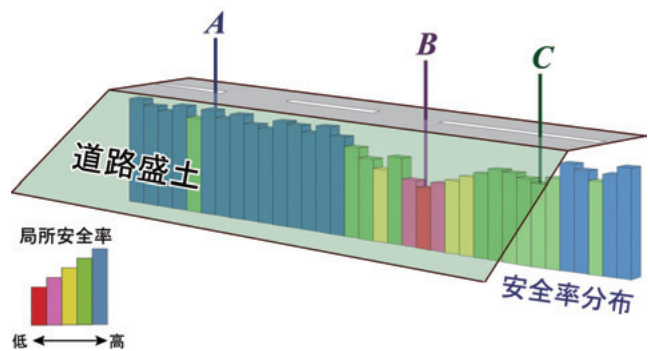


図-2 土構造物の縦断方向安全率分布概念図

2. 非接触・非破壊計測技術の開発

2.1 空間的詳細物性構造把握の必要性

道路や河川堤防に代表される線形構造物は、前述のようにその機能維持には連続性が保持されることが必要不可欠である。一方で従来の舗装健全度調査や盛土・のり面すべり安全性調査等は、サンプリング調査、すなわち数10mから数100mの間隔をあけて離散的に実施されてきた。この場合、調査地点間の不均質性に関する情報がなく、何らかの形で空間的補間を行なう必要があった。しかし前述のように人工土構造物に対しては、既存の空間補間法を適用できない場合が多々ある。

図-3は、道路盛土を対象例として、物理探査手法が提供する空間物性情報と、従来の土質調査ボーリング手法のそれとを比較した概念図である。標準貫入試験を伴う土質調査ボーリングは、関東では通常「ノンコア半ペネ」と呼ばれる掘削方法が採用され、土質試料が採取観察されるのは全掘進長の30%程度の標準貫入試験実施区間だけである。最大深さ5m、断面100平方mの道路盛土を想定すると、200m間隔でボーリング調査が実施されたとしても採取試料の体積比率は 1×10^{-7} に過ぎず、盛土部のN値データも、高々5点得られるだけである。室内試験試料の体積比率はさらに小さくなる。盛土内部の脆弱部、あるいは基礎地盤の弱点箇所を捉え、その物性を評価するには、より稠密な点検調査が必要とされる。

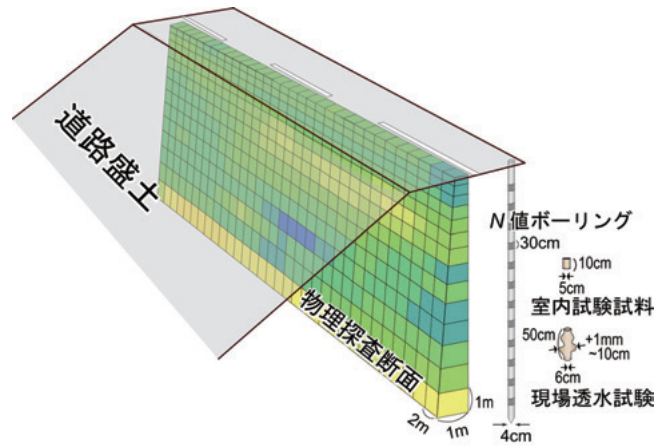


図-3 調査計測手法の空間的カバー率の比較

盛土上に縦断方向に測線を配置し、高精度表面波探査や高密度電気探査などの詳細物理探査を適用すると、盛土内部の2次元物理探査断面が得られる。物理探査断面は、厳密には格子点データで構成されているが、各点のデータはある領域の平均的なデータであるので、基本的には連続面データとして扱うことができる。格子データ数は同じ200mの区間で1000データ程度になり、体積比率も1/20程度になる。さらに3次元物理探査を適用すると、物性情報が得られる体積比率は1/4程度にまで向上する。

図-4は、詳細物理探査によって、盛土の縦断方向の不均質構造をイメージした例である。探査延長は高々100m程度に過ぎないが、盛土部が大きく3層(PS1~PS3)に区分できること、測線距離40mから90mにかけて異質の盛土材料が使用されていることが明らかになった。土質材料試験結果との比較によって、この異質の部分の物性は砂質で緩い(締固め度が小さい)と推定された。空間的解像度の面での物理探査の優位性が理解できよう。

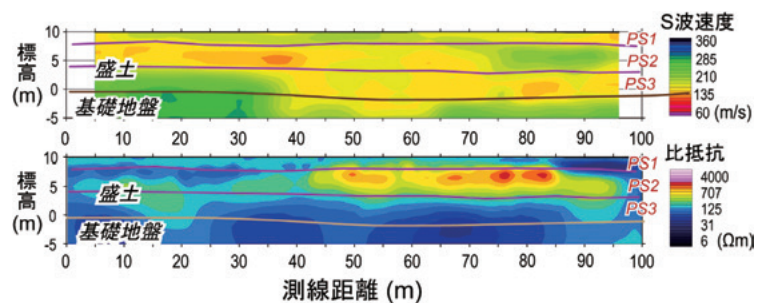


図-4 盛土の縦断方向不均質構造の検出例。上：高精度表面波探査断面；下：高密度電気探査断面。
(文献1)に加筆

2.2 舗装・盛土を対象とした物理探査技術の適用開発

2.2.1 探査技術の要求仕様の検討

舗装・盛土を対象とした物理探査技術の適用と新しい探査手法・システムの開発にあたっては、まず個々の計測技術の特性、すなわち空間分解能や計測物性などの基本特性の違いを理解することが大事である。物理探査には数多くの手法が存在し、手法によって得られる物性、探査深度、分解能などが異なるからである。

図-5は、既往の各種物理探査技術の探査深度と空間分解能の関係を概念的に示したものである。物理探査技術は、一般に探査対象深度が大きくなるほど分解能が悪くなる。舗装構造の探査や道路盛土の調査では、探査対象は10cmから5m程度、空間分解能も1m以下であることが要件となる。ところでこの空間分解能は、探査対象自体が有する空間的不均質性のオーダーに依存し、両者の間にはいわゆ

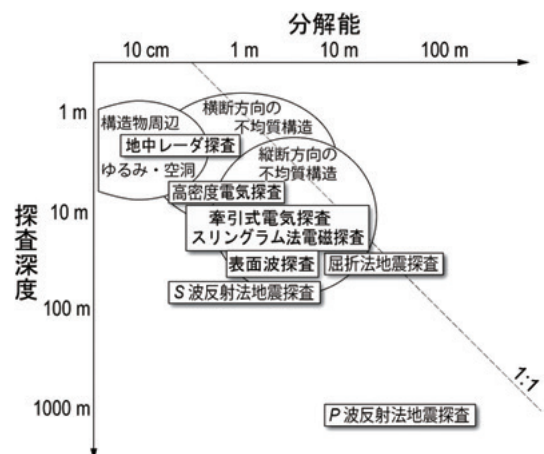


図-5 物理探査要素技術の探査深度と空間分解能の関係²⁾。

るトレードオフの関係が存在する。すなわち、土構造物のような空間的不均質性が大きい対象物に対しては、空間的分解能を向上させることが原理的にできない。分解能を上げるために測定に使用する波の波長を短くしたり、測定間隔を小さくすると、逆に不均質構造の影響を大きく受けることになるからである。路面下空洞探査の場合、要求仕様に合致する既往物理探査手法は極めて限られており、地中レーダ探査（以後 GPR と略称）以外には有力な候補技術は存在しない。一方舗装道路の縦断物性構造や道路盛土物性構造の把握を目的とする場合は、縦断方向の不均質構造のオーダーは探査対象深度と同程度かそれ以上の数 m 程度、深度方向の空間分解能は 10cm のオーダーと見積もることが可能であるので、既往探査技術の一つである表面波探査の空間分解能を 2 桁程度向上させることができれば適用が可能であると判断した。またこれまでの探査適用実績から、高密度電気探査についても電極間隔を小さくすることで、探査深度と空間分解能を向上させることができると評価した。

ところで空間分解能を上げるということは、データを取得する空間間隔を小さくするかあるいはセンサの配置間隔を小さくすることを意味する。それを達成するためには、従来の物理探査要素手法に比べてより稠密に多数のセンサを配置し、それを高速で走査する必要がある。さらに多数のセンサで取得される膨大なデータを短時間で取得・記録する高速データ収録システムが必要となる。活線道路上で適用するには、これに加えて高速走行・高振動下で測定機材を操作してデータを取得することが求められる。これらの要求仕様を短時日のうちに一度に解決することは極めて困難であることから、別個の技術的課題として扱い、個別に解決策を検討することとした。

2.2.2 高周波表面波探査技術

高周波表面波探査は舗装面に沿って伝播する表面波のうち、5kHz 程度まで高周波成分を用いて舗装の S 波速度構造を求める手法である。表面波探査法は、深さ方向に向かって S 波速度が小さくなる、いわゆる速度逆転構造が存在する場合でも速度層構造を求めることができ、最表層のアスファルト混合層（以下アス混層と略称）のせん断剛性が最も大きい舗装の構造調査に有用である。ただし表層 1m 程度までの舗装の構造を把握するには、表面波の高周波成分を計測することが必要であり、従来の表面波探査で使用されている速度型の地震計ではなく、加速度センサを用いる³⁾。図-6 に加速度センサアレイを用いた高周波表面波探査の実施風景を、また図-7 に高周波表面波探査記録からの舗装構造解析手順を例示する⁴⁾。同図左上が前処理後の計測波形である。2.4m のアレイ区間を 3ms 程度で伝播する優勢な表面波が捉えられている。この時間-距離領域の記録を、周波数-位相速度領域に変換することで表面波分散曲線（同図左下）が求められる。この分散曲線を説明する 1 次元 S 波速度構造を逆解析によって求める（同図右）。このような計測・波形データ解析によって特定区間に対応した S 波速度構造を求めるが、アレイ長を長く展開することで、2 次元の S 波速度構造断面を構築することも可能である。逆解析結果が示すように、厚さ 8cm 程度のアスコン層に対応した高速度層が求められている。アスコン層の S 波速度は 1400~1600m/s 程度であり、逆解析結果は既往データとも整合的であった。さらに路盤、路床部に

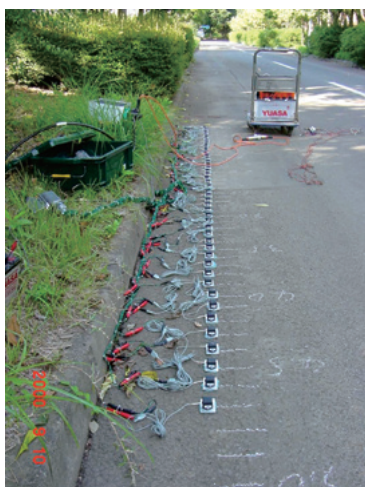


図-6 加速度センサを用いた高周波表面波探査実施例

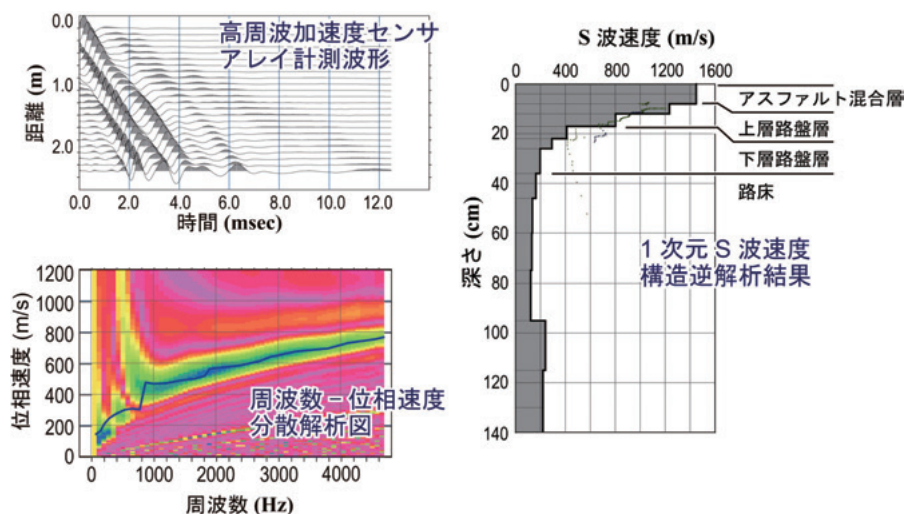


図-7 高周波表面波探査による舗装構造解析手順（文献4)に加筆）

対応する S 波速度も推定できる. このように, 舗装の内部物性構造を詳細に推定できることが高周波表面波探査の特長である.

ところで舗装構造の調査には図-8 に示す FWD (Falling Weight Deflectometer) と称されるたわみ量測定装置が使用されてきた. 同装置はシステムが自動化されており, 簡便に短時間で計測できることが特徴である. しかし先行静荷重に対して衝撃荷重が小さく, 舗装のたわみ変形に線形性が成立しているかという点が未検証であり, さらに収録解析する周波数領域が数 10Hz 程度以下の領域であることから, 図-9 に示すように上層路盤およびアスコン層の物性に対する感度が低いことが懸念される⁵⁾. これに対し高周波表面波探査では, 用いる加速度センサの周波数帯域が 1Hz~10kHz と広いことから, 舗装全域の物性を解析することが可能となっている. FWD 測定データに対しても, 計測システムの調整, 特に周波数帯域フィルタを広帯域化し, D_0 値だけではなく全波形に対する動的解析を施せば, 高周波表面波探査と対比可能な舗装構造を得られる可能性がある.

2.2.3 非接触舗装物性構造計測システムの開発

高周波数帯域の振動を測定できる加速度センサアレイを路面に稠密に展開することによって, 舗装を伝播する高周波表面波を観測できること, その分散特性から舗装物性構造を推定できることがわかった. しかし加速度センサを用いる場合, 舗装路面へセンサを固着することが必須条件となり, 路上での作業とそれに時間を要するという欠点があった. そこで, 非接触で路面を伝播する表面波を測定可能な一体型移動体システムを試作し^{6), 7)}, その機能を検証する比較検証実験を実施した.

測定方法の概念図を図-10 に示す⁶⁾. 舗装路の表面をハンマー等で打撃すると, 実体波とともに表面波が励起され, 舗装表面を伝播する. この表面波によって舗装表面が振動するので, その一部が空气中に漏洩する. これを漏えい表面波と称し, 超音波工学分野では広く計測産業に利用している. たとえば超音波顕微鏡では超音波トランスデューサーで垂直に試料表面に超音波を照射し, 直接反射波と漏えい表面波との干渉を, センサ高さを変化させて計測し, 試料の表面波速度を面的に計測する. 舗装伝播表面波は, 舗装構造によって速度分散性を有しているのので, 漏えい表面波にもそれが反映される. したがって単点, あるいは 2 個~数個のセンサで構成されるアレイでは分散特性を把握することができない. またセンサ高さを変えて干渉させる方法は, 超音波に比べると表面波波長が長いた

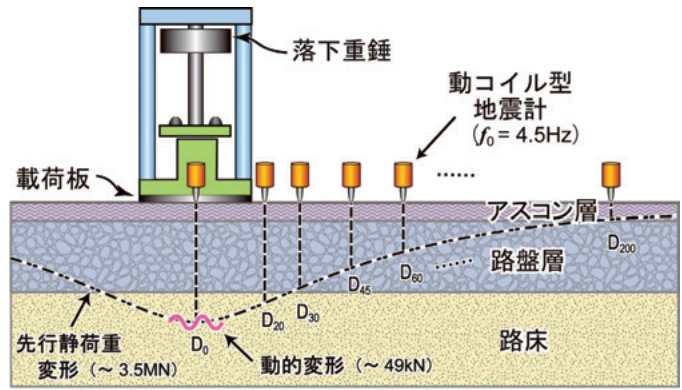


図-8 FWD たわみ量測定装置の概念図

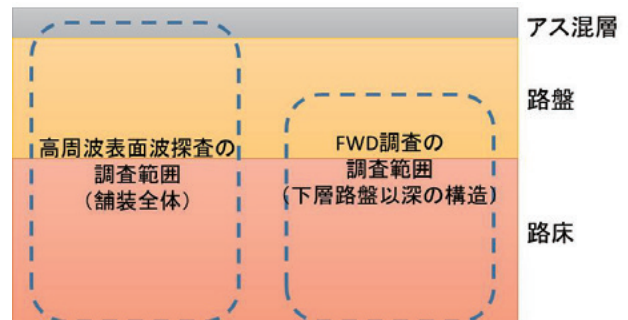


図-9 高周波表面波探査と FWD の感度領域比較

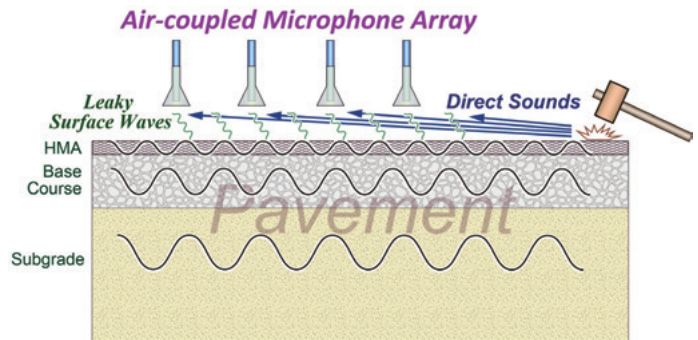


図-10 非接触型高周波表面波計測の概念図⁶⁾

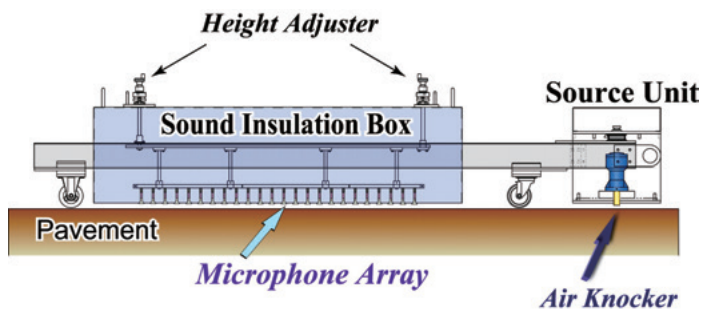


図-11 非接触舗装路物性計測システムの構成図⁶⁾

め不可能である。そこでセンサを舗装面と平行に多数並べるアレイ配置が有利となる。図-11 に試作した非接触型高周波表面波測定装置試作システムの構成を示す⁶⁾。本システムは振源ユニットと測定ユニットから構成され、両者はホイール付きのフレームに懸架されている。これにより路上を容易に牽引し、移動計測が可能である。非接触型のセンサアレイは防音函体に収納されており、振源から直接空中を伝播する打撃音を極力低減させるよう設計されている。なお、移動時には防音函体を上昇させ、測定時には下降させて路面と密着させる昇降装置が取り付けられている。測定地点における作業時間は、防音函体の昇降、振源の操作およびデータ取得を含め、検証実験段階では5秒程度であった。

2.2.4 高速3次元GPRシステムの開発

前述のようにGPRは、浅部を対象とした物理探査手法のなかで最も空間分解能が高い手法の一つである。一方で法令により信号出力に上限が設定されていること、地中では電磁波が急激に減衰することなどにより、探査可能な深度は3m程度までが限界であった。さらに数100MHzからGHz帯域の波を発受信することから、少なくとも0.1ns (10^{-10} 秒)の時間間隔で、加えて高分解能で波形データをデジタル収録する技術の適用開発が求められていた。従来はこのようなデバイスの入手が困難であったことから、GPRはチャンネル数の拡大と走査速度の高速化のいずれかを犠牲にせざるを得なかった。しかし近年、高速高分解能のA/Dコンバータやスイッチングデバイスが比較的安価で提供されるようになり、多チャンネルかつ高速での走査が可能なシステムの開発が進みつつある。しかし高品質のデータを取得するためには、さらなる技術開発とシステム試作・性能検証の過程を経ることが不可欠である。多チャンネル・高速のGPRシステムを開発すれば、舗装路面下の空洞探査への適用等、道路の点検調査分野への活用が急速に拡大すると期待されている。一方で空洞や舗装内の局所的不均質構造を高い確度でイメージングするには、高精度の測位システムとの結合が不可欠である。最近のGNSS測位システムの大部分は、GPS(32基)、GLONASS(24基)およびQZSS(1基)からの測位衛星データの受信が可能となっている。さらに国土地理院の電子基準点データの配信サービスが開始されたことから、それを用いて仮想基準点を設け、補正情報とともにリアルタイムで測位情報を配信するサービス(VRS)が開始され、それらを利用したRTK-GNSSによって、水平測位精度 ± 1 cm程度のRTK-FIX解が得られるようになった。そこでこのRTK-GNSS信号をGPRシステムに取り込み、3次元でのGPRデータ処理表示を可能にするシステムを開発した⁸⁾。試作機の外観を図-12に示す。GPR本体は四輪フレームに懸架されており、ホイールに装着されたエンコーダからの信号に同期して、最少では1mm間隔でGPR信号を記録する。フレーム上部にGNSSアンテナと2軸傾斜計を取り付けた脱着式のポールが搭載されている。GNSS測位データと傾斜計データは標準出力書式(NMEA-0183)で最速0.05秒ごとにGPRコントローラに送られ、GPRデータとともに収録される。高層建築物や街路樹など上空を遮る障害物があるとGNSSの受信状態が低下し、FIX解の決定率が低下するが、土研内でのテスト結果では、概ね60%以上の区間でFIX解を得られることが確かめられた⁸⁾。



図-12 VRS-GNSS測位機能付きGPR試作機

3. 非接触・非破壊計測技術の適用事例

3.1 舗装内部物性構造可視化例

土木研究所構内外周道路約6.3kmを対象に、既往の多チャンネルGPRの性能評価試験を実施した。また関東技術事務所構内にある模擬空洞舗装路約60m区間をお借りして、同様のテストを実施した。さらに外周道路の特定の区間(以下サイト1と略称)では、GPRに加えて高周波表面波探査、MMS(Mobile

Mapping System)を用いた路面性状計測, コア抜き取り・スコープ調査, 非接触舗装物性計測システムの予察検証実験を実施した^{9), 10), 11), 12)}.

サイト 1 での各種計測風景を図-13 に示す. また測線位置等を図-14 に示した. 対象サイトは 1970 年代初めに施設された外周道路の両側に, 1990 年代になって新たに側帯が設けられ拡幅された区間である. 図-14 に示されるように, 車道部には 2 条のわだちとクラック集中帯が形成されていたが, 補修等の形跡はなく, 施設時から蓄積した変状が路面化にも記録されていると期待された. このサイトではまず高所撮影カメラを用いて上方から斜め写真を撮影し, それらを合成してオルソ画像作成した. なお同図には合計 9 本の高周波探測線, 11 地点のコア抜き取り位置が示されている. また路面に 50cm 間隔で正方向格子を描き, このラインに沿って 25cm 間隔で GPR 探査を実施した. 測定データは SEGY 形式に変換し, 振幅調整, マイグレーション, バンドパスフィルタ, 共通モード除去などの標準的な処理を施した後, 反射面をトレースして 3D モデルを構築した.

図-15 は MMS 路面性状計測によって得られた路面の DSM (数値表面モデル) から, トレンド面を除去して路面の相対起伏を抽出したものである. 使用したポイントクラウドは約 25 万点で, これから 10cm グリッドの DSM を構築した. このサイトでは路面が全体的に西側 (図上側) に傾斜していたことから, この傾斜の影響を除去するために特定の傾斜面を設定し, その面からの相対的な起伏を図化して表示している. 同図に示されるように, わだちに沿ったクラック集中帯では相対的に路面が窪んでいる形状が明瞭に捉えられている. また白線部の相対的盛り上がりも明瞭である. 相対的起伏量は約 30mm に達していた.

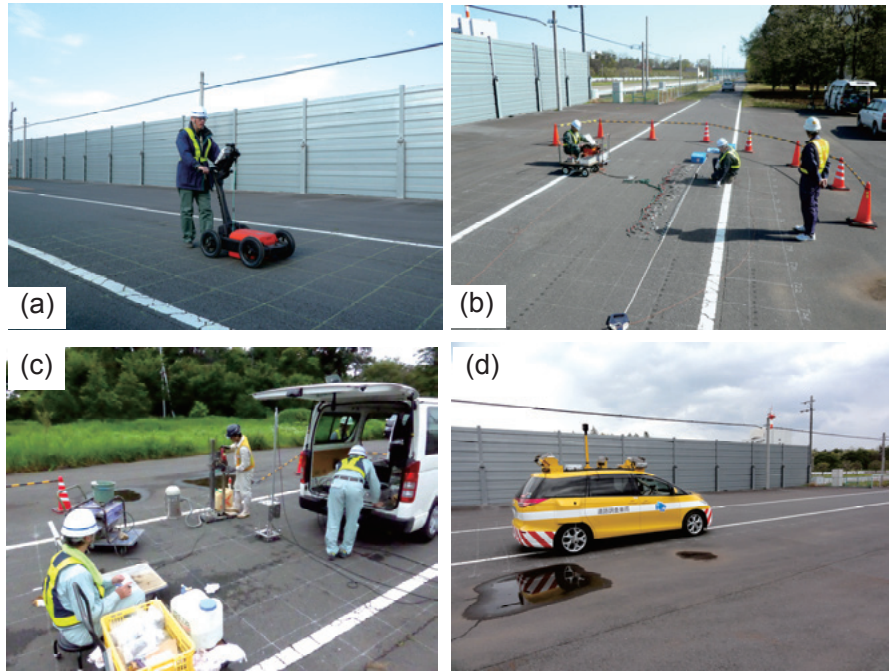


図-13 構内道路での各種舗装物性計測風景. (a): GPR 探査, (b): 高周波表面波探査, (c): コア抜き取り調査, (d): MMS 計測.

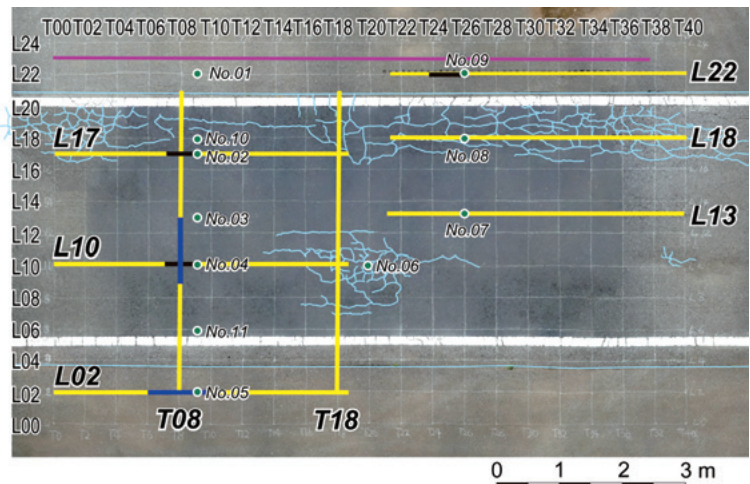


図-14 路面オルソ画像上への表面クラック, 高周波表面波測線, コア抜き取り箇所, グリッド測線表示⁹⁾.

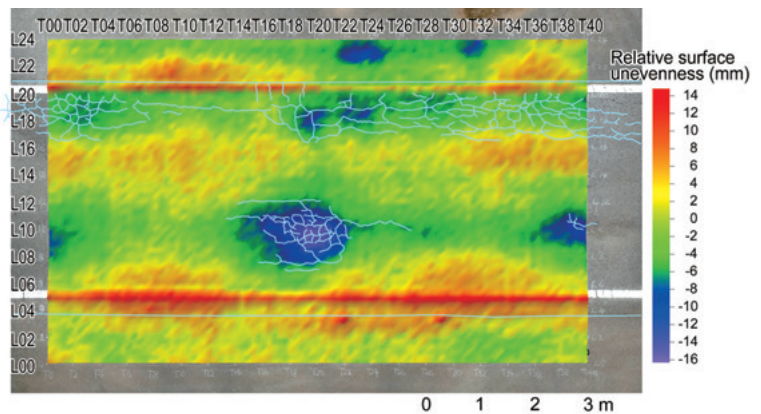


図-15 路面オルソ画像上への表面クラック, MMS 測定路面相対起伏表示 (文献 10) を改変)

図-16は横断測線T09に沿ったGPR探査断面である。断面上に、その測線上で掘削した7孔でのスコープ調査孔壁画像を投影してある。アス混層の層厚は側帯部も車道部も一様でほぼ5cmであった。一方粒調碎石およびクラッシャーランからなる路盤の厚さは、高々6mの測線区間で約20cmから32cmまで大きく変動していた。GPR断面に認められる強い反射面の位置は、スコープ調査で確認された路盤・路床境界位置と極めて整合的であった。

この路盤/路床境界に相当する反射面をGPR断面上で追跡してデータを編集し、市販の3Dマップ表示ソフトウェア Surfer[®]12に取り込み、境界面モデルを作成した¹⁰⁾。さらに路面DSMデータ、スコープ画像、GPR断面画像を合わせ、市販の3D可視化ツールVoxler[®]3を使用して3D表示した。同ツールを活用すれば、面モデルのカラー表示、視点の移動、ズーム回転操作などが簡便に実行でき、静止画像、動画での3Dモデル表示が可能である。

図-17、図-18に3D表示例をいくつか紹介する。まず図-17は、路面相対起伏面と路盤/路床境界面を南側上空から俯瞰した図である。横断方向軸(緑色)で2mおよび4m付近に認められるわだちの直下で、路盤/路床境界面が溝状に窪んでいることがわかる。図-18は、視点を地中に移動して路面下を俯瞰したものである。路盤層相当部分では、スコープ調査孔壁画像でも碎石層が分布していること、境界面以深は細粒の砂が分布し、明瞭な材料境界となっていることがみてとれる。また路盤層が薄くなっているのは側帯部下で、車道の下では境界面の比高は約10cmであることがわかった。路面のわだちの比高は約3cmであったので、約30cm下位の路盤/路床境界面にはそれが約3倍に増幅されて変形を与えていることが明らかになった。

このように、舗装内の面構造を3次元で定義し、3D表示することで相

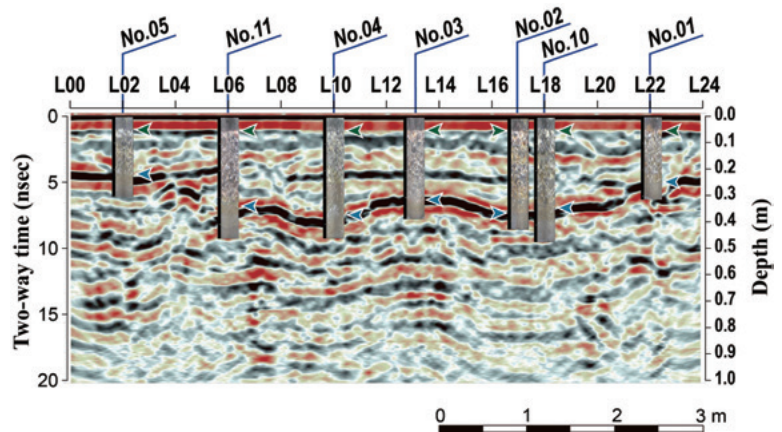


図-16 横断T09測線GPR探査断面。コア抜き取り・スコープ調査画像を投影¹¹⁾。

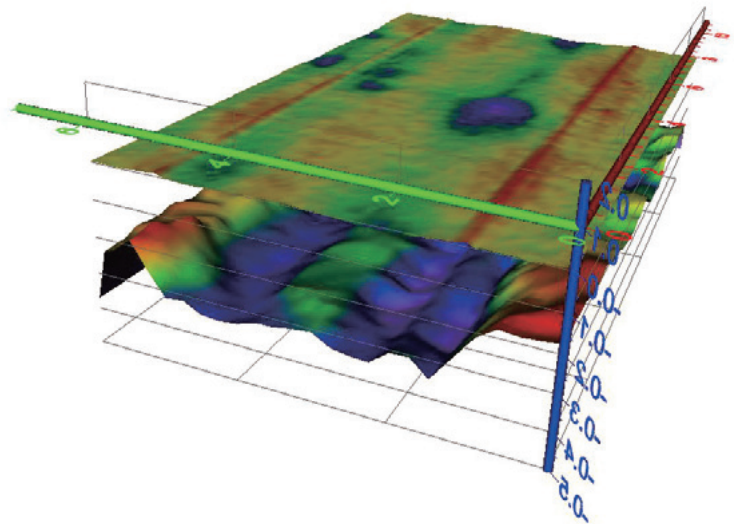


図-17 路面およびGPR抽出路盤/路床境界面3D表示例

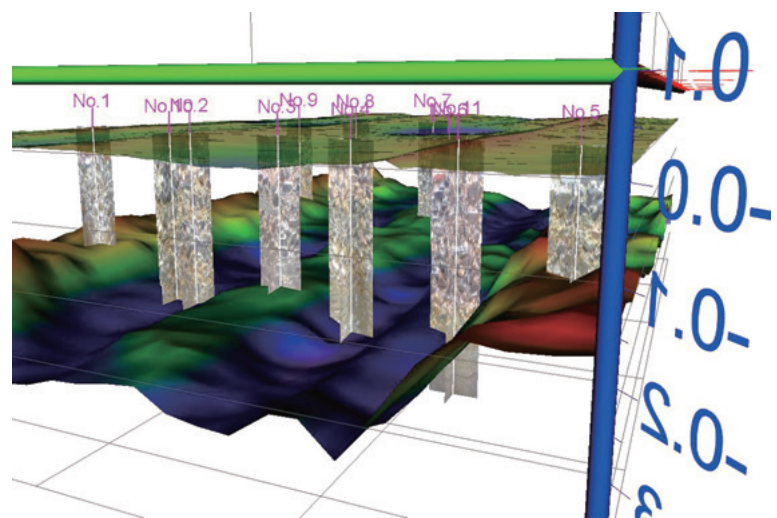


図-18 路面、路盤/路床境界面および孔内スコープ調査画像3D合成表示例

互の関係を空間的に把握することが容易となる。今後、空間ファクトデータに基づいた効率的な道路舗装の維持管理の一環として、このような3D処理表示の活用が期待される。

図-19はサイト1内で実施した高周波表面波探査の位相速度一周波数分散解析結果をいくつか例示したものである。測線対応位置は図中に示してあるが、対応位置は図-14にも太黒線分で示してある。たとえばL10/T07-09は、L10測線とT08測線の交点付近に相当する。図-19に示すように、表面波分散解析結果は、高々6m×10mの小規模なサイト内でも有意に変化していた。そこでこの表面波分散解析結果から分散曲線を求め、それを説明するS波速度構造を逆解析によって求めた。その結果を図-20に例示する¹¹⁾。同図で左側は、各地点の測定表面波分散解析結果と理論分散曲線（青線：求めたモデル速度構造に対応する表面波分散曲線）、右側に求めた1次元S波速度構造と近傍のスコープ調査孔壁画像を示してある。同図に示すように、逆解析で求めたS波速度構造は、観測結果ともまたスコープ調査結果とも極めて整合的であった。このことは、高周波表面波を利用した舗装物性構造探査手法が、理論的にも的確で、かつ実用的なものであることを実証したものであるといえよう。

3.2 盛土変状箇所内部構造可視化例

寒冷地で冬期施工されたある盛土区間において、内部物性構造の把握・イメージングを目的とした3次元GPR探査および高周波表面波探査を実施した⁸⁾。探査サイトの外観を図-21に示す。当該盛土区間では、路面沈下やジオテキスタイル補強土壁の開口変形などの変状が発生したために、大型土のうを設置して対処してきたが、変状が継続したために既存の補強土壁の撤去再構築を含む盛り返しを実施されることになった。積雪寒冷地では、冬期に施工された補強土壁や盛土が融雪期になって変状する事例がしばしば発生していた¹³⁾。

当該変状発生区間での盛り返しに伴う路盤開削の直前に詳細物理探査、高所カ

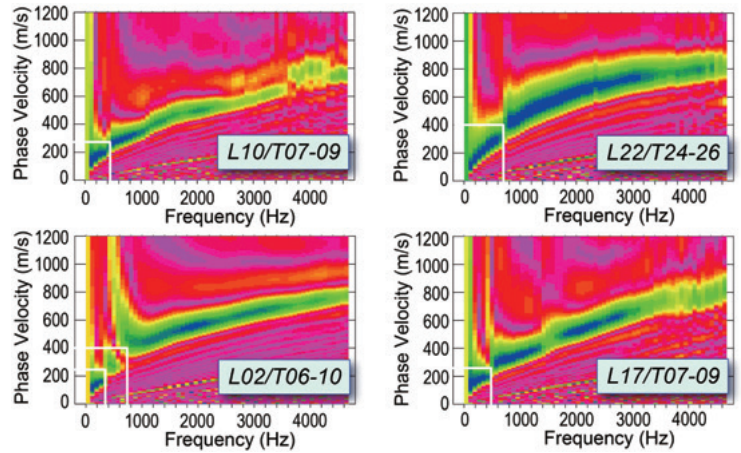


図-19 サイト1内高周波表面波探査分散解析例¹¹⁾

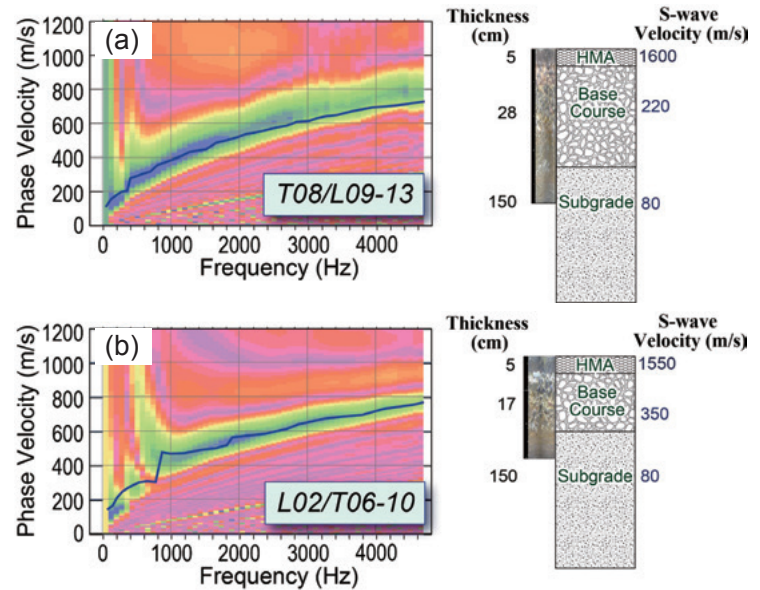


図-20 表面波探査逆解析結果の理論分散曲線（左）とS波速度構造（右）¹¹⁾



図-21 盛土内部構造調査を適用した盛土変状発生箇所の外観

メラ撮影を実施するとともに、開削直後の路盤内状況を観察・計測した。

図-22は、図-23中に示した横断探索測線に沿った GPR 探索断面 (a)と高周波表面波探索断面 (b)を示したものである。GPR 探索断面には、アス混層、路盤層、凍結抑制層および盛土の境界に比定される3枚の明瞭な反射イベントが認められた。これらの反射イベントを連続的に追跡して変状区間の舗装内3次元構造をイメージングした。特徴的であるのは、比定された層境界が、両側の路肩部で下方に垂れ下がっていることである。さらにこの垂れ下がり、下位の層境界ほど大きくなる傾向が認められた。これらの層境界と垂れ下がり構造は、高周波表面波探索断面でも認められる。各層のS波速度は既往データと整合的であり、アス混層が1400 m/s程度の高速度層として、また路盤層は600~800 m/s程度のS波速度を有していることがわかった。これに対し凍結抑制層のS波速度は300~400 m/s程度と相対的に低い速度値を示しているが、これは同層では締固め度が相対的に小さいことを示唆するものである。

図-23は、高所撮影カメラ画像から合成した調査対象盛土区間のオルソ画像の上に、GPR 探索断面から読み取ったアス混層の層厚分布を重ねて表示したものである。東側(図右側)に、変状が発生した補強土壁の最上部笠コンクリートが写っている。この補強土壁側および盛土区間の始末端部で層厚が厚くなっていることがわかる。なお橋台東側端部に、水色で塗られた層厚が薄い矩形の領域が分布しているが、この部分は変状の大きかった部分に碎石を投入して補修したツボ堀跡であることが、道路管理者への聞き取り調査および開削時調査によって判明した。

図-24に、GPR 探索結果から抽出した3枚の境界面および路面の3D合成画像を示す。変状発生区間では、オーバーレイによってアス混層が最大45cmまで厚層化していること、踏掛版も変形して盛土方向に傾斜していることがよくわかる。一方路盤層の層厚はほぼ一様であるが、変状発生区間では凍結抑制層が大きく下方に撓む特徴的な構造を読み取ることができる。

以上のような変形構造は、探索直後の開削部の目視調査においても確認することができた。たとえば図-25は、凍結抑制層(右側壁に帯状に分布する灰白色層)までを削剥し、部分的に盛土層(赤褐色面)を確認した時点の写真である。盛土上面が両側方向に撓みこんでいる変形構造が明瞭に捉えられている。目視確認された路盤層および凍結抑制層下面深度は、図-26に例示するようにGPR 探索結果と良く対応

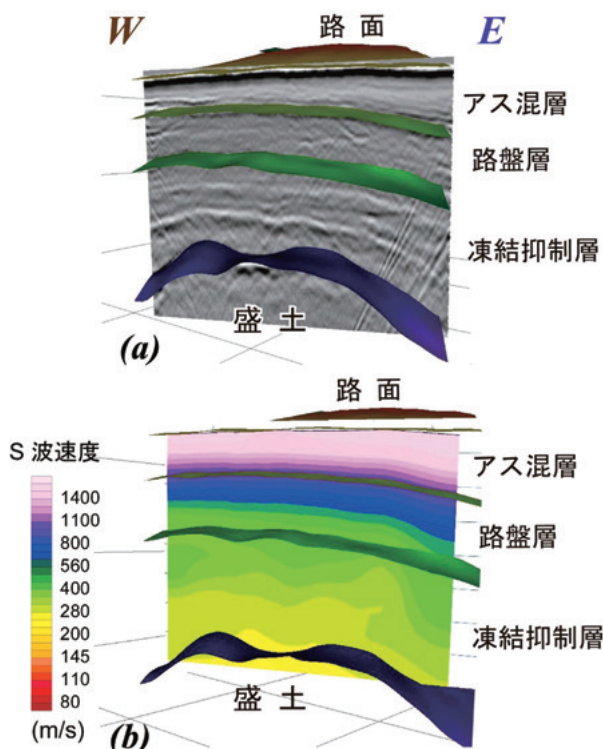


図-22 物理探査による盛土内変状把握結果。
(a):GPR 探索断面投影図, (b)高周波表面波探索断面投影図

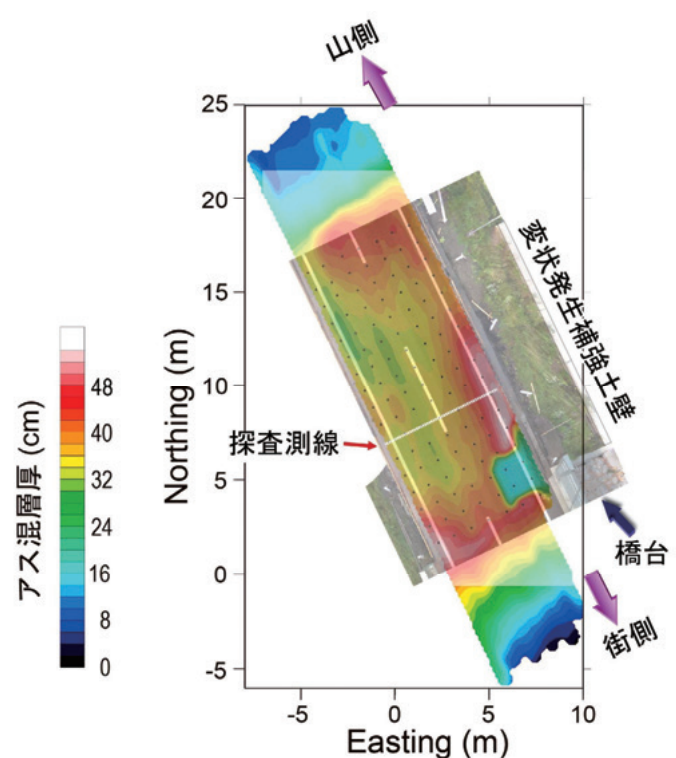


図-23 変状発生盛土区間オルソ画像投影図およびアス混層層厚分布図

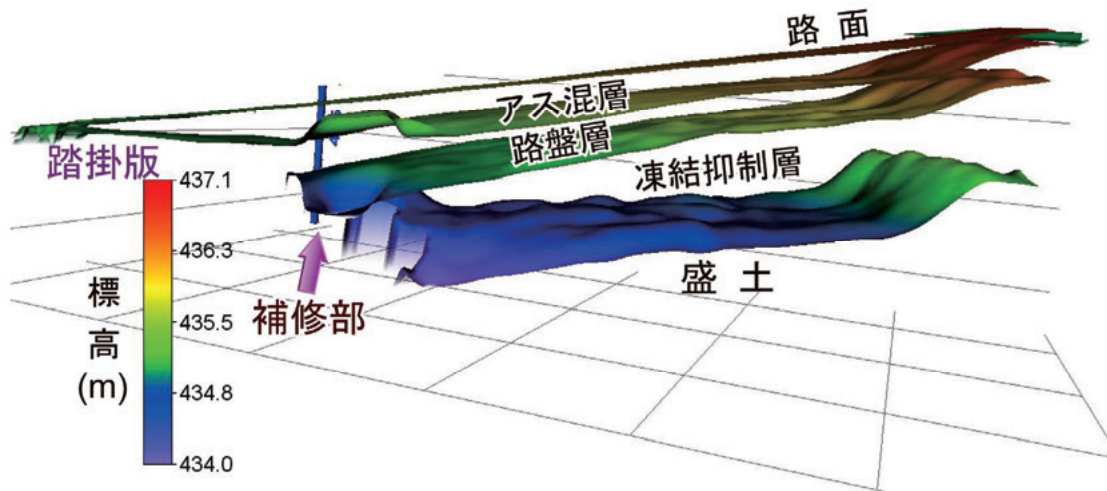


図-24 GPR 探査結果解釈 3D 表示例 (文献 8) を改変

していた。

以上のように変状発生部の内部構造と物性を物理探査技術によって非破壊で捉え、それを 3D 表示することによって、変状の発生過程と原因層を特定することが容易となる。すなわち 3 次元 GPR 探査が明らかにしたアス混層層厚分布は、路面沈下を伴う変状が東側補強土壁周辺、橋台部および北側盛土端部に集中していることを示した。一方路盤層および凍結抑制層の層厚変動は小さく、またその S 波速度も相対的に大きいか中程度の値を示した。これに対し盛土上面は両側部で大きく撓みこんでおり、S 波速度値も相対的に小さな値を示した。すなわち補強土壁背面での盛土沈下が、上位層に変形を及ぼした主原因であることが容易に推定できる。

4. おわりに

本報告で紹介した非接触・非破壊での各種計測手法の検討、関連装置開発および現地適用実験は、平成 23 年度に財団法人道路保全技術センターより土木研究所が受け入れた寄附金を原資とした道路保全技術の向上に関する調査研究として実施したものである。調査研究期間が短期であったことから、装置開発にあたっては詳細な仕様を提示するとともにセンサ類の性能を比較検討し、計測実験を繰り返すことでシステム全体の機能の評価と性能の向上を図った。また適用結果を評価する際も、FWD 等の既往の計測評価システムとの比較検証を重視するとともに、開削調査やコア抜き取り調査などによって可能な限り直接的に検証することを心掛けた。取得データの解析処理や結果のモデル化過程については、前提条件や各種仮定の妥当性を吟味し、数値シミュレーション等によって結果を検証した。さらに開発技術の適用拡大を加速するために、所内の舗装、火山・土石流、施工技術、寒地地盤、防災地質チーム等と連携して計測実験等を実施した。関係者の協力に謝意を表す。今後は試作機器類の実機開発とその実用化目指した調査研究を推進し、舗装、道路盛土だけでなく、コンクリート構造物の内部亀裂および背面空洞探査、浅部地盤の局所的不均質構造の 3 次元稠密探査等の分野への適用も検討していく予定である。



図-25 表層開削状況 (文献 8) を改変

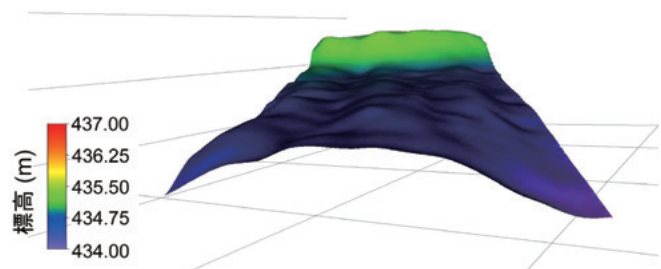


図-26 GPR 探査結果から抽出した凍結抑制層下面境界 3D 表示 (文献 8) を改変

【参考文献】

- 1) Inazaki, T., (2013): Problems in practical application of integrated geophysical technique for the vulnerability assessment of levee systems, *Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium*, pp.68-71.
- 2) 稲崎富士・今村杉夫 (2013) : 河川堤防の特徴と物理探査の役割, 河川堤防の統合物理探査 -安全性評価への適用の手引き-, pp.13-22, 愛智出版.
- 3) Inazaki, T., and Lei, X., (2003): High-frequency seismic measurements using a piezoelectric type accelerometer array, *Proceedings of the 16th Annual Symposium of the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2003)*, 1253-1262.
- 4) 稲崎富士・青池邦夫・今村杉夫・林 宏一 (2015) : 高周波表面波分散特性を利用した舗装の物性構造調査, 第 50 回地盤工学研究発表会講演概要集, 195-196.
- 5) 木佐貫 寛・稲崎富士 (2015) : FWD 舗装構造調査結果と GPR の比較検証, 物理探査学会第 133 回学術講演会講演論文集, 4p.
- 6) 稲崎富士・今村杉夫・林 宏一・青池邦夫 (2015) : 非接触舗装路物性計測システムの開発 (その 1) : 開発の背景とシステムの試作, 物理探査学会第 132 回学術講演会講演論文集, 87-90.
- 7) 今村杉夫・稲崎富士・林 宏一・青池邦夫 (2015) : 非接触舗装路物性計測システムの開発 (その 2) : 試作機の機械的特長, 物理探査学会第 132 回学術講演会講演論文集, 91-92.
- 8) Aoike, K, Fujita, T., and Inazaki, T., (2015): Detailed GPR surveys for delineating near-surface deformation structure in embankments with aid of RTK-GNSS, *Proceedings of the Near-Surface Asia Pacific Conference*, 4p.
- 9) 青池邦夫・稲崎富士・斎藤秀樹 (2013) : GPR および高周波表面波探査による舗装物性構造評価のためのパラメータスタディ, 物理探査学会第 128 回学術講演会講演論文集, 158-161.
- 10) 青池邦夫・斎藤秀樹・稲崎富士 (2013) : GPR および高周波表面波探査による舗装物性構造評価のための検証実験, 物理探査学会第 129 回学術講演会講演論文集, 51-54.
- 11) Inazaki, T., Aoike, K., Kita, T., and Hayashi, K., (2014): High-frequency surface wave measurement for the pavement structural analysis, *Proceedings of the 27th Annual Symposium of the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2014)*, 7p.
- 12) Aoike, K., Saito, H., and Inazaki, T., (2014): Detailed characterization of pavement surface structure using high resolution GPR, *Proceedings of the 27th Annual Symposium of the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2014)*, 4p.
- 13) 佐藤厚子 (2014) : 融雪期におけるジオテキスタイル補強土壁の変状について, 寒地土木研究所月報, 第 373 号, 39-41.

〔 土木研究所の活動 〕

実スケールの実験で堤防の本当の強さを測る

～十勝川千代田実験水路における破堤実験～

建設材料の国際ハブへ

～iMaRRC 発足による土木構造物の長寿命化に向けた建設材料の研究～

第3回国連防災世界会議から始まる新たな防災・減災

ネパール地震に対する復興支援

～BBB コンセプトに基づく復興と国土強靱化のための技術支援～

「実スケールの実験で堤防の本当の強さを測る」 ～十勝川千代田実験水路における破堤実験～

寒地水圏研究グループ グループ長 浜本 聡

1. はじめに

十勝川千代田実験水路は、十勝川中流部にある千代田新水路内の一部を利用し、実スケールの様々な河川の実験・研究を行う施設として平成19年に完成した¹⁾。

図-1、2のとおり、4門ある分流堰ゲートの一番左岸側の第4ゲートを背割り堤で分割し、実験水路として使用している。

延長1300m、水路幅30mの日本最大級の実験水路である。千代田分流堰のゲート構造が図-3のとおり背面支持式起伏ゲートであり、放流方式が単純な自由越流であるため、120m³/s程度までは水理実験として使える精度の流量制御が可能である。

このように、千代田実験水路を用いて、実スケールの水理実験が可能となったことにより、今まで縮尺模型実験では解明できなかった現象や実河川では観測が非常に困難であった現象の解明がなされつつある。

北海道開発局と寒地土木研究所が連携し、破堤拡幅機構の解明、破堤拡幅抑制工の実験を行ったので、その概要について紹介する。

2. 実スケールの破堤実験の必要性

河川整備が進んだ今日でも、豪雨にともなう大規模な出水は各地で頻発し、破堤による水害被害が発生している（表-1）。

特に、近年、集中豪雨が顕在化しており、計画規模を超える洪水が堤防を越水し、破堤まで至るケースが珍しくなくなっている。

これらに対応するため、河川工学全般のハイテク化、特にコンピュータによる数値シミュレーション解析技術は進んだが、堤防の越水破堤問題に関しては、定量的な解析の研究はあまり進んでこなかった。

これは、実スケールによる水理実験ができなかったことが、一つの大きな理由としてあげられる。

従来の水理実験では、実験施設の制約から、縮尺模型により現象の解明を行ってきたが、流水の物理量が数十分の1程度に縮小されるのに対し、堤防の土の強度は実スケールのままなので、実現象を再現することが難しかった。

今回、千代田実験水路を用いることにより、流水の物理量と土の強度の両方が実スケールの実験が初めてできるようになり、越水破堤や破堤拡大の定量的な解析が可能となった。

千代田実験水路を用いて得られた実験結果により、数値シミュレーションモデルの検証、モデルのパラメータのキャリブレーション、さらに実際の設計への適用が可能となりつつある。



図-1 千代田新水路の施設配置



図-2 千代田実験水路の全体風景

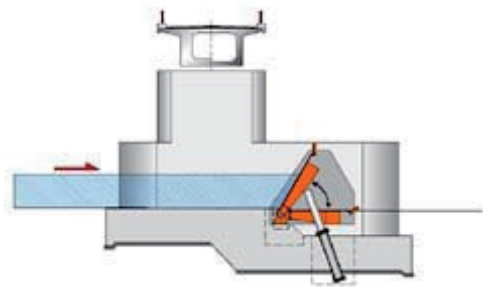


図-3 千代田分流堰ゲート構造図

また、千代田実験水路では、破堤の箇所と時間が人為的にコントロールできるため、PIV 解析(図-4)、堤防内部への加速度センサー埋設、超音波(水中)・レーザー(地上部)によるスキニングなどが可能となり、洪水時の流況や3次元の河床形状・破堤形状の時間変化など、今まで見えなかった部分が可視化され、この分野の研究が大きく進んでいる。

表-1 近20カ年の破堤に伴う主な災害事例²⁾

年月	被災地	破堤の状況
1995年 7月	信濃川 水系 鳥居川 (長野県)	信濃川支川鳥居川の豊野町浅野地区で越水破堤があった。昭和橋付近で越水による浸水が始まり、下流の鳥居大橋付近で堤内側から堤外側への越流による破堤が発生し、最終的に破堤延長は最大60mになった。 ※建設省河川局, 河川, 1995. 8より
1998年 8月	阿武隈川 水系 阿武隈川・ 堀川 (福島県)	阿武隈川支川堀川で1箇所、堀川が合流する付近の本川で2箇所の越水破堤があった。堀川では、堤防高が低かったことにより、越水破堤した。本川の2つの破堤箇所では、堀川による氾濫水がその2箇所に集中し、堤内地側から本川に越水し破堤した。 ※土木研究所, 土木技術資料, 1998. 11より
2000年 9月	庄内川 水系 新川 (愛知県)	新川で3箇所の破堤があった。破堤の要因としては、雨水浸透と河川水位上昇に伴う堤体浸透により堤体が弱体化し、堤防裏法が崩れ始め、崩壊が堤防天端にまで達したのち、越水が始まり、堤体侵食が広がったと推定されている。 ※辻本, 土木学会誌, 2001. 10より
2000年 9月	矢作川 水系 籠川・ 広田川 (愛知県)	矢作川支川籠川で1箇所、広田川で1箇所の破堤があった。籠川の破堤地点は護岸がない土堤状態であること、破堤前に越流はないことから湾曲部における外岸側の河床洗掘と側岸侵食の進行により、破堤が生じたものと推定されている。広田川では越水により破堤した。 ※辻本ら, 河川技術論文集, 2001. 6より
2004年 7月	九頭竜川 水系 足羽川 (福井県)	九頭竜川支川足羽川で7箇所、その他支川で2箇所の破堤があった。それらのうち、足羽川の春日地先では、破堤地点の上下流で左右岸ともに越水が認められ、越流水深は0.2mで約1時間の越流が継続したと推定されている。 ※玉井, 土木学会誌, 2004. 10より
2004年 7月	信濃川 水系 五十嵐川・ 刈谷田川 (新潟県)	・信濃川支川五十嵐川の諏訪地区において破堤があった。破堤延長は約120mであり、破堤原因は、越流によるせん断力が法面の植生の耐侵食力を上回る状態が続き、越流水の落下する法尻部の洗掘及び越流水が流下する法肩から法面が侵食し、さらに拡大して破堤に至ったものと推定されている。 ・信濃川支川刈谷田川で4箇所の破堤があった。そのうち中ノ島地区の破堤延長は50mであり、破堤原因は、水衝部での越水によるもので、越流によるせん断力が裏法面植生の耐侵食力を上回る状態が続き、堤防裏法尻部の洗掘・裏法面が侵食され、破堤に至ったものと推定されている。 ※7.13新潟豪雨洪水災害調査委員会報告書, 2005. 5より
2004年 10月	円山川 水系 円山川・出 石川 (兵庫県)	円山川及び支川出石川で各1箇所の破堤があった。円山川の立野地区では、堤防越水が発生し、裏法面侵食と堤体浸透により破堤したと推定されている。出石川の鳥居地区では、堤防越水が発生し、裏法面侵食により破堤したと推定されている。 ※後藤, 河川, 2005. 2より

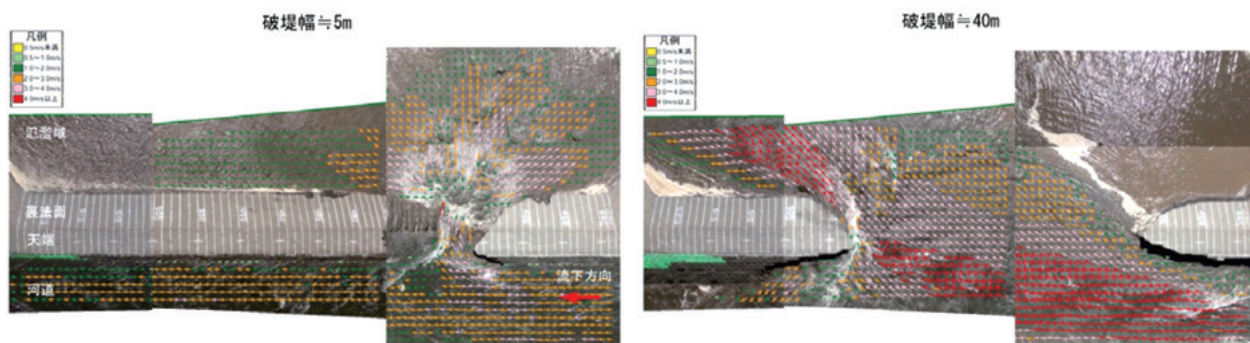


図-4 PIV 解析による流況観測結果 (Case1)²⁾

3. 破堤拡幅機構の解明（平成20～24年度）

3. 1 目的

実スケールで越水破堤実験を行い、破堤進行時の堤体及び水理量の時系列の観測データを得ることにより、破堤進行過程を定量的に解明する。

3. 2 実験条件

実験は、表-2に示す4ケースを実施した。基本堤防Case1は、高さ3m、天端幅3m、法面勾配1:2.0、堤体材料を砂礫とした（図-5）。なお、越水箇所を固定するため、各ケースとも深さ0.5m・上幅3m・下幅1mの切欠を設けた。

各ケースは、Case1の基本堤防に対し、Case2：流量が小さい場合、Case3：堤体材料がシルト質の場合、Case4：天端幅が広い場合について、破堤進行過程への影響に着目して実験を実施した³⁾。

表-2 実験ケース

ケース	流量	堤体土質	堤体天端幅
Case1	70m ³ /s	砂礫	3m
Case2	35m ³ /s	砂礫	3m
Case3	70m ³ /s	細粒分	3m
Case4	70m ³ /s	砂礫	6m

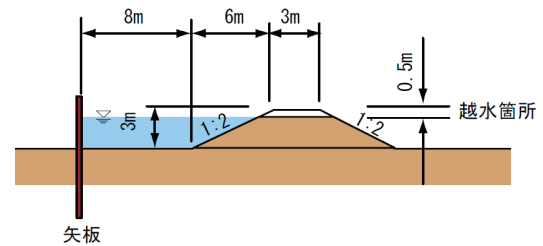


図-5 破堤部の横断形状（Case1：基本形状）

3. 3 観測項目

主な観測項目は次のとおり。

- ・水路内水位（電波式・水圧式水位計）
- ・氾濫域水位（水圧式水位計）
- ・流量観測（ADCP観測船、電波式流速計）
- ・流況観測（PIV手法）
- ・破堤形状（堤体内部に設置した加速度センサーによる堤体崩壊状態の感知）
- ・実験状況（クレーンによるビデオ撮影）

3. 4 実験結果

（1）堤防の破壊進行過程の4つのステップ

堤防の破堤進行過程は、次のとおり、Step1 から4までの4つのステップに整理できる。

① Step1 [初期破堤段階]

- ・堤防から越水し始めると、越水部の法面が侵食される。
- ・この段階では氾濫流量はあまり増加しない。

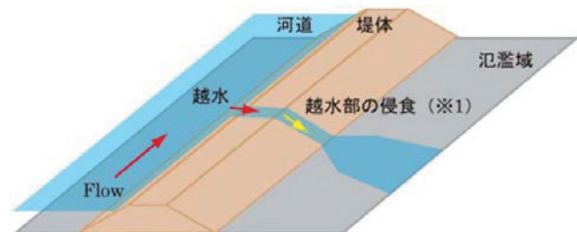


図-6 Step1 [初期破堤段階]

② Step2 [拡幅開始段階]

- ・越水部の侵食が表法肩まで進むと、上下流方向に侵食が進み始める。
- ・氾濫流量が増加し始める。

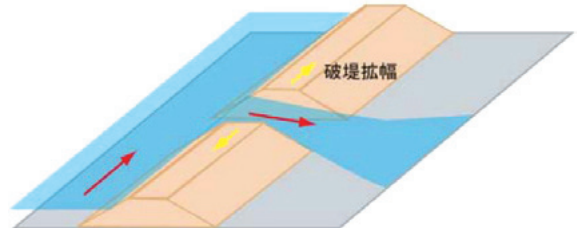


図-7 Step2 [拡幅開始段階]

③ Step3 [拡幅加速段階]

- ・破堤幅が広がると、侵食は主に下流側に進むようになる。
- ・氾濫流の流速が速くなり、この主流が下流堤体にあたりさらに侵食する。

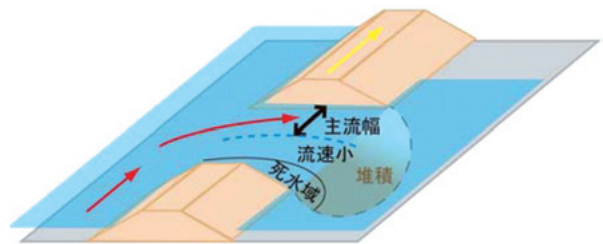


図-8 Step3 [拡幅加速段階]

④ Step4 [拡幅減速段階]

- ・下流方向への侵食、氾濫域への土砂堆積、氾濫流はほぼ一定で推移し、破堤拡幅速度は遅くなる。

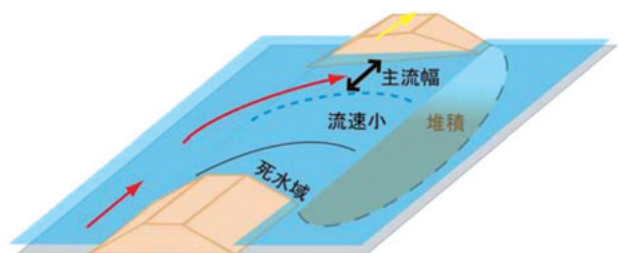


図-9 Step4 [拡幅減速段階]

(2) 破堤の初期段階の侵食過程 (Step1~2)

破堤の初期段階 (Step1~2) は、主に堤体の鉛直方向の侵食であるが、その侵食過程の状況をイメージで表すと、図-10のとおりとなる。

Case1~4のどのケースにおいても越水開始後、裏法面の侵食、天端の裏法肩から表法肩への侵食が拡大していく。そして表法肩まで侵食が進行した後、上下流方向への破堤拡大 (Step2、図-7) が始まる。

(3) 破堤の下流方向への拡幅過程 (Step3~4)

鉛直方向の侵食の後、氾濫流の主流により下流方向へ破堤が進行する (Step3)。

下流側堤防の崩壊面は、氾濫流の主流と平行な顕著な斜め形状となって破堤が進行するが、ある程度の破堤幅になり流速が落ち、この崩壊面における侵食力が堤防の土の強度より小さくなると、破堤拡幅速度は遅くなる (Step4)。この拡幅過程の状況をイメージで表すと、図-11のとおりとなる。

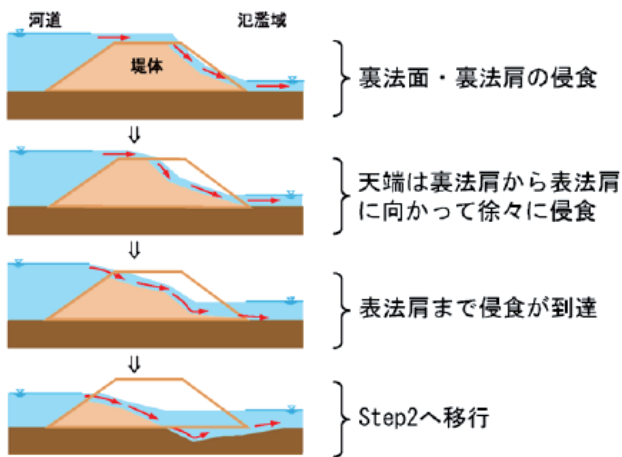


図-10 堤体の鉛直方向の侵食過程

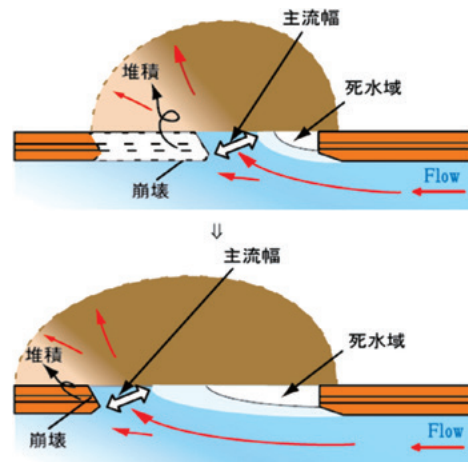


図-11 破堤の下流方向への拡幅過程

(4) 破堤拡幅と氾濫流の水理量との関係

破堤拡幅現象のモデル化や減災技術の開発のため、氾濫流の水理量を用いた破堤拡幅の定量的な評価手法の検討を行った。検討は、①堤体崩壊量の定量化・算出、②破堤部水理量の定量化・算出、③氾濫流の無次元掃流力と堤体崩壊量の関係について整理し一般式を導いた³⁾⁴⁾。これにより、越水破堤における破堤幅の定量的評価や、さらに既存の氾濫域計算モデルに組み込むことにより、経過時間に対する氾濫域拡大の予測計算精度向上に非常に大きな期待が持たれている。

① 堤体崩壊量の定量化・算出

堤体崩壊量は氾濫流の掃流力で表せるものと考え、代表的な掃流砂式である Meyer・Peter-Müller の掃流砂式(1)を参考に、無次元堤体崩壊量 q_* を式(2)と表現した。無次元堤体崩壊量 q_* は図-12に示す堤体崩壊量から式(3)を用いて求めた。

$$q_B = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{sgd^3} \quad (1)$$

$$q_* = \frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = \alpha_*(\tau_* - \tau_{*c})^{\beta_*} \quad (2)$$

$$q_* = \frac{dV}{dt} \frac{1}{\left(\sqrt{sgd_{50}^3 B_m} \right)} (1 - \lambda) \quad (3)$$

ここで、 q_b ：単位幅あたりの掃流砂量、 τ_* ：無次元掃流力、 τ_{*c} ：無次元限界掃流力、 s ：砂粒の水中比重、 g ：重力加速度、 d ：砂粒の粒径、 q_* ：無次元堤体崩壊量、 $\alpha_* \cdot \beta_*$ ：係数、 V ：堤体崩壊量、 t ：時間、 d_{50} ：砂粒の50%通過粒径、 B_m ：堤体下幅、 λ ：空隙率を表わす。

堤体内や地盤に設置した加速度センサーの記録結果を用いて、基礎地盤を含む堤体崩壊量を求めた(図-12)。越水直後の堤体崩壊量はわずかであり、その後、堤体の破堤拡幅の進行にあわせて急激に崩壊量が増大し、ピークに達したのち減少するという過程を経ることが分かった。

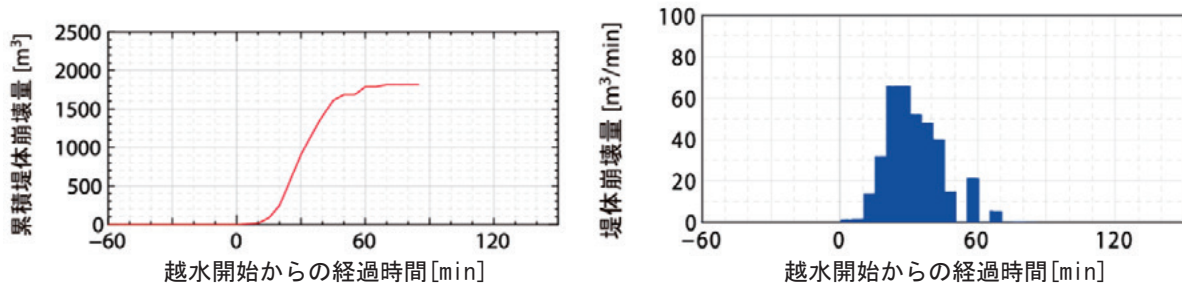


図-12 堤体崩壊量 (Case1)

② 破堤部水理量の定量化・算出

破堤拡幅の進行は、開口部下流端の堤体を侵食しながら進行していくので、破堤拡幅現象の評価にあたっては、図-13に示すように、破堤開口部近傍の水理量を用いることとした。

破堤開口部に作用する無次元掃流力 τ_* は、式(4)と式(5)を整理した式(6)で求めた。また、限界無次元掃流力 τ_{*c} は岩垣の式より求めた。

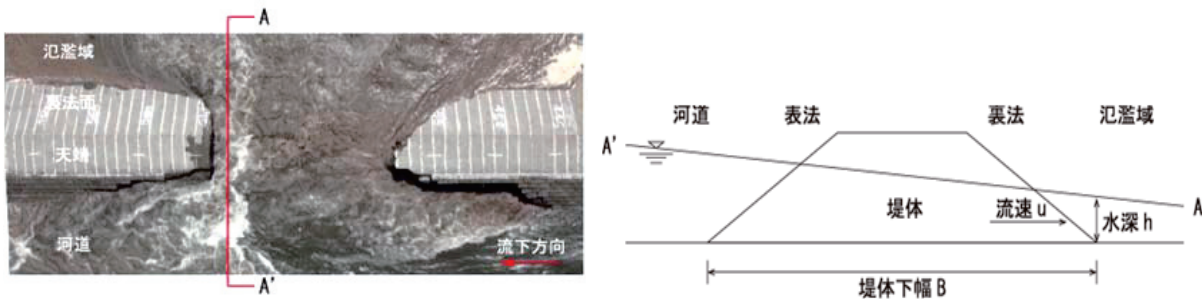


図-13 破堤部水理量の算出

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd} = \frac{hi_e}{sd} \quad (4)$$

$$i_e = \frac{u^2 n^2}{4 h^3} \quad (5)$$

$$\tau_* = \frac{u^2 n^2}{s d_{50} h^3} \quad (6)$$

ここで、 u_* ：摩擦速度、 s ：砂粒の水中比重、 g ：重力加速度、 d ：粒径、 h ：水深（ここでは、破堤開口部の水深 h ）、 i_e ：エネルギー勾配、 u ：流速（PIV画像解析により求めた平均流速値）、 n ：粗度係数（ここでは実験水路の値0.023）、 h ：水深（3D画像解析により求めた水深）、 d_{50} ：砂粒の50%通過粒径を表わす。

③ 堤体崩壊量と掃流力の関係

Case1～4の実験結果と式(3)から無次元堤体崩壊量、式(6)から堤体に作用する無次元掃流力を求め、式(2)を右辺、式(3)を左辺とした関係式(7)に代入し、両辺の関係を解析して係数 α_* ・ β_* を求めた。無次元堤体崩壊量と無次元掃流力の関係を図-14に示す。堤体形状や土質は各ケースで異なるものの、プロットした結果は相関性があり、無次元堤体崩壊量と破堤開口部周辺の無次元掃流力の関係が掃流砂量式に近い形で表すことができることが分かった。

$$\frac{dV}{dt} \frac{1}{\left(\sqrt{s g d_{50}^3 B_m} \right)} (1 - \lambda) = \alpha_* (\tau_* - \tau_{*c})^{\beta_*} \quad (7)$$

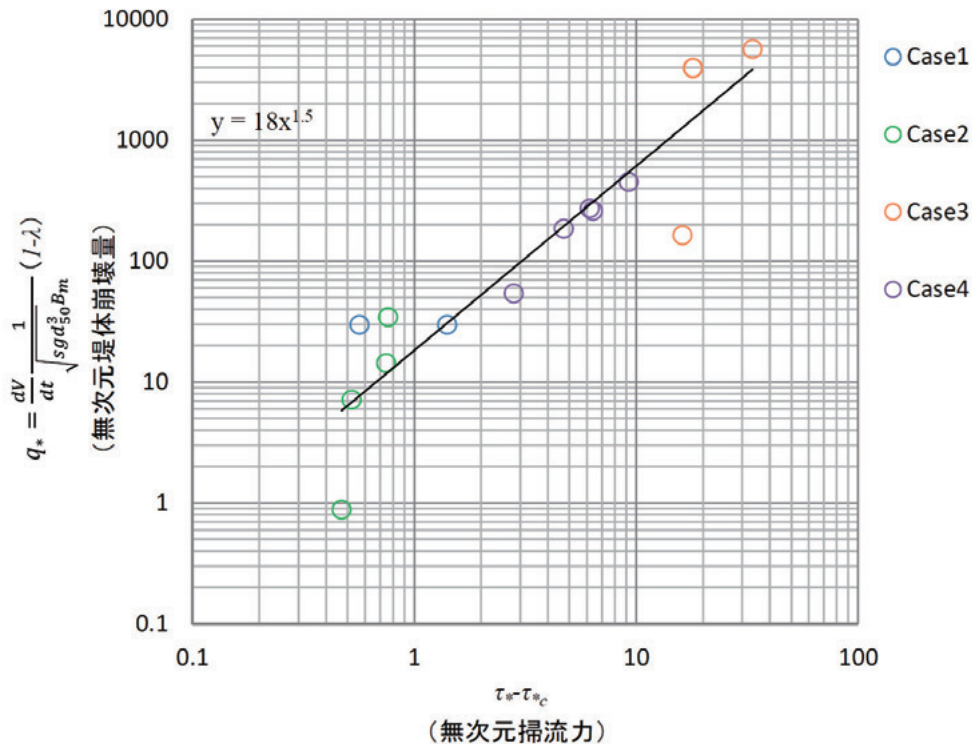


図-14 無次元堤体崩壊量と堤体に作用する無次元掃流力

なお、本一般式を含む破堤実験成果を、北海道大学の清水康行教授らが開発した2次元河床変動計算ソフトウェアNays2Dに組み込んだ破堤計算ソフトNays2D Breachについては、寒地土木研究所のホームページ (<http://river.ceri.go.jp/contents/tool/nays2d-breach.html>) より提供を行っている。

破堤計算ソフトNays2D Breachでは

- ・平面2次元での洪水流れ
- ・破堤拡幅現象
- ・氾濫流量算出

などの計算が可能となっている。

4. 破堤拡幅抑制工実験（平成25～26年度）

4. 1 目的

早期に堤防の破堤口の拡大を防止することは、洪水被害の軽減に対して大きな効果が期待される。

このため、堤体の破堤口の侵食防止や氾濫流の流勢を緩和させるため、高流速の流水に耐え、資材の調達や施工が容易であり、河岸保護として実績が高い2t型の根固めブロックを使用した破堤拡幅抑制工の実験を行った⁵⁾。

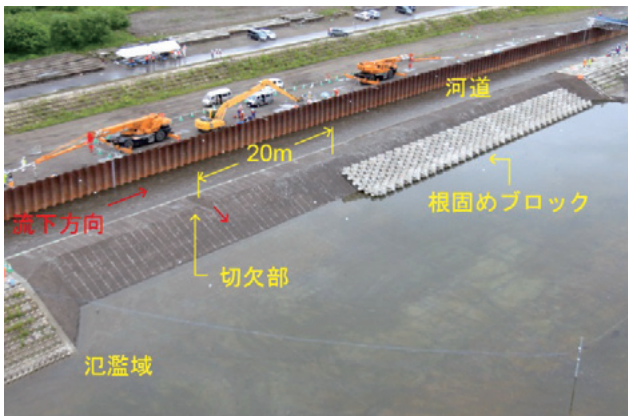


図-15 破堤拡幅抑制工実験（平成25年）

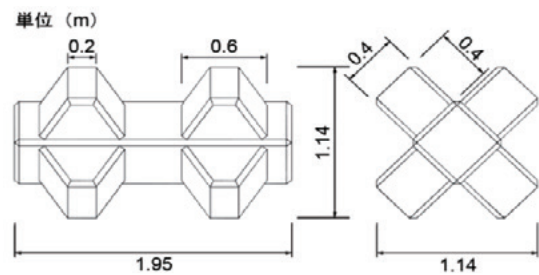


図-16 実験に用いた2t型根固めブロック

4. 2 実験概要

ブロックを破堤箇所（堤防切欠部）の下流側に設置し、破堤がブロック設置箇所まで進行した際、ブロックが破堤部に自然落下することで、破堤進行を抑制させる効果などについて検証を行った。

実験堤防の基本形状は、高さ3m、天端幅3m、法面勾配2割とし、今回、事例としてあげた平成25年の実験では、図-17のとおり破堤箇所（堤防切欠部）から下流20mの位置に根固めブロックを配置した。破堤拡幅抑制過程のイメージを図-18に示す。

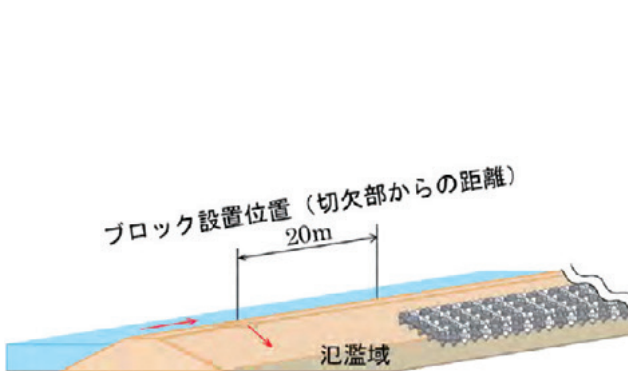


図-17 根固めブロック配置図

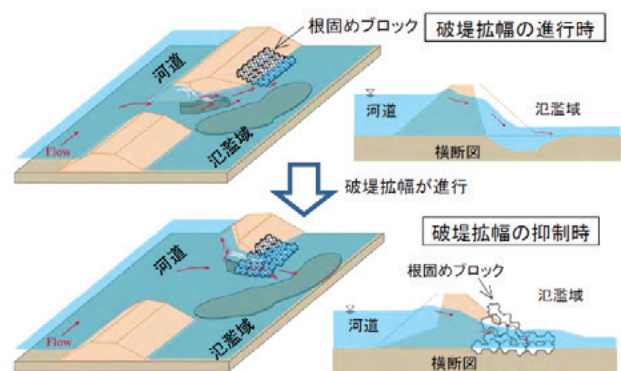


図-18 破堤拡幅抑制工実験のイメージ図

4. 3 実験結果 (図-19~23)

破堤状況は、堤体からの越水開始後 (図-19) 下流側へ破堤が拡幅し、根固めブロックに到達したが (図-20)、約30m以上の進行がなかったため (図-21) 通水を停止した。

その後、根固めブロックがない場合の破堤幅を確認するため、根固めブロック (図-22) を撤去して再通水を行った。

根固めブロックがない場合の再通水実験では、下流側堤体の崩壊が再度進行し、破堤幅は図-23のとおり約50mにまで拡大した。

これにより、根固めブロックによる破堤拡幅の抑制効果を確認することができた。

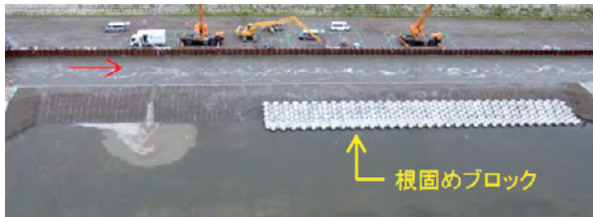


図-19 越水開始時

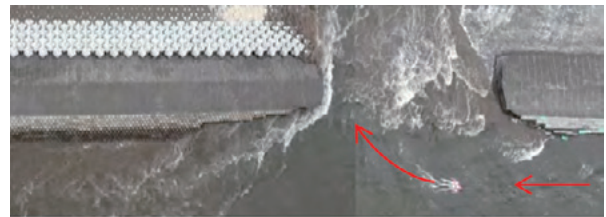


図-20 根固めブロックに破堤が到達

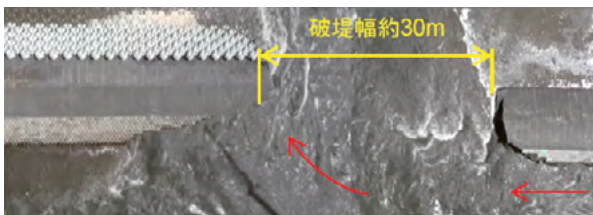


図-21 破堤幅が約30mで抑制
(根固めブロックありの場合)



図-22 通水終了後の根固めブロックの状況

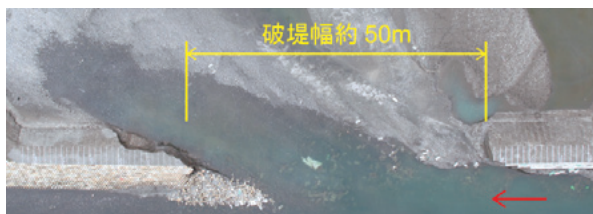


図-23 破堤幅が約50mに拡大
(根固めブロックなしの場合)

5. おわりに

千代田実験水路が完成して8年が経ち、この間、行政や研究者が待ち望んでいた実スケールの水理実験を数多く行い、縮尺模型実験では解明できなかった現象や実河川では観測が非常に困難であった現象の解明に対して、大きな成果を上げてきた。

平成27年度の千代田実験水路における実験は、行政ニーズを踏まえて、越水破堤後の破堤部の効果的な荒締切工の工法検討のため、ブロック転動基礎実験やブロック投入による荒締切工実験を中心に行っている。

近年、顕在化してきた集中豪雨による越水破堤が頻発している現状を考えると、破堤部の効果的な締切方法は緊急性の非常に高い研究であるので、これらについてもできるだけ早く成果をまとめて普及を図りたい。

【参考文献】

- 1) 十勝川千代田実験水路 <http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/riveroffice/chiyoda/zi/zi0.htm>, 2012.
- 2) 河川堤防の越水破堤現象のうち破堤拡幅機構に関する実験報告書
http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z_kasen/chiyoda_gaiyo/chiyoda_hokoku1.pdf, 2012
- 3) 十勝川千代田実験水路について 実験報告書【概要板】
http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z_kasen/chiyoda_gaiyo/chiyoda_gaiyo.pdf, 2012.
- 4) 柿沼孝治・清水康行・飛田大輔・井上卓也・横山洋：千代田破堤実験における堤体崩壊量のモデル化, 土木学会水工学論文集, 第 58 号, 2014.
- 5) 伊藤丹, 柿沼孝治, 飛田大輔：越水等による破堤の被害軽減技術に関する研究, 土木研究所 平成 25 年度重点研究報告書 <https://www.pwri.go.jp/jpn/seika/project/2013/pdf/ju-41.pdf>.

建設材料の国際ハブへ

～iMaRRC 発足による土木構造物の長寿命化に向けた建設材料の研究～

材料資源研究グループ グループ長 渡辺博志

1. はじめに

土木構造物の長寿命化への社会ニーズは高く、これまでも耐久性向上に向けた研究が進められてきた。将来の維持管理も含め、構造物の安全安心の確保に向けて、さらなる技術の向上が求められている。土木構造物用材料は、構造物の性能を左右する非常に重要なものであり、今後も技術の進展が期待されている分野である。

その一方で、土木構造物用材料の良否は構造物の安全性や耐久性に直結することから、新たな技術の導入に際しては、絶えず慎重な判断が求められる。とりわけ、耐久性にかかわる性能の検証にあたっては、促進劣化試験だけではなく、曝露試験のように実際の環境に材料をおいて、その性状の変化を観測する必要があるため、非常に根気が求められる調査が求められる。このため、材料分野の研究の着手から現場への普及までを見据えると、息の長い研究が求められる。

また、対象となる建設材料は鋼材、セメント、骨材はもとより、アスファルトや有機系材料、など多種多様であり、それぞれ異なった専門知識に立脚して成り立つ分野となっている。このため、各種材料分野に精通した研究者と、土木構造物に求められる技術を鳥瞰し適切なニーズ把握し現場に役立てる技術者の息の合った連係が構築されないと、期待される成果が得られない。新たな材料の開発だけではなく、材料に対する要求性能の特定と評価試験方法も含む検証技術、材料の特性を生かした設計技術、また構造物の維持管理の段階に至れば構造物全体またそれを構成する材料の変状や劣化を検出するための技術、といったように開発技術の多様性もこの分野の特徴である。いずれにしても、構造物の設計、施工のみならず、維持管理を含めたライフサイクル全体を通じてバランスのとれた技術体系の確立に向けて、今後解決すべき課題は多い。

こうした背景から、土木材料の高度化や資源の有効活用に関する研究を促進させるために、平成27年4月に土木研究所内に先端材料資源研究センター (innovative Materials and Resources Research Center;通称 iMaRRC) が設立された。先端材料資源研究センターでは、新たな先進的材料の実用化、創エネルギーやリサイクル技術の高度化、コンクリートや鋼材などの土木用汎用材料の機能向上や標準化といった横目を主題に据えて調査研究を行っている。

ここでは、近年特に重要視されている土木構造物の長寿命化に関連し、これまでに実施されてきた研究内容を振り返るとともに、今後の発展に向けて必要となる研究の方向性について述べることにしたい。また、土木構造物の長寿命化に資する技術開発は、日本のみならず、広く海外においてもその重要性は高いものである。日本で開発された技術が、海外においても実を結に発展していくことが期待されている。そうしたことも踏まえ、ISO 国際規格の動向など、一部に国際的な側面も加味した内容とした。なお、建設材料の分野は、非常に多種多様の材料から構成されており、その知識を把握したうえで高所に立った見解を述べるべきところである。しかし、残念ながら筆者にはそれに見合った知見を持ち合わせておらず力量が伴わない。これまで、コンクリート工学の分野で研究活動を行ってきた関係上、ここでもコンクリート構造物を対象として記述することをお許しいただきたい。

2. 土木用コンクリート構造物の長寿命化と建設材料に関する研究経緯と技術の進展

2. 1 早期劣化対策の確立

1980年代より1990年にかけて、塩害やアルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の早期劣化対策の確立が急ピッチで行われた。この時期の、早期劣化対策は、コンクリート構造物の耐久性確保に大きく貢献することとなった。

塩害に関しては、コンクリートの初期塩化物イオン量の確認（塩化物イオンの総量規制）により、コンクリート中の内在塩分による鋼材腐食の危険性が大きく低減されることとなった。これは、まだ固まらないフレッシュコンクリートに含まれる塩化物イオン量の即時測定手法が開発されたことが原動力となった。それ以前にも、コンクリートとして使用する海砂の塩分量規制は存在していたが、製造された生コンクリート中の塩化物イオン量測定手法が確立していなかったため、実際には現着コンクリートの検査が行われることがなく、十分な実効性が得られていなかった。フレッシュコンクリート中の塩化物イオン量の測定技術の開発により、こうした問題が一気に解決されることとなった。

また、全国の飛来塩分量調査結果がとりまとめられ、日本各地域について海風によってもたらされる飛来塩分量、すなわち塩害環境の厳しさが定量的に明確になった。これに基づいて、地域ごとの塩害環境の区分が示され、その区分に応じてかぶりの大きさが提示されるとともに、表面塗装や樹脂塗装鉄筋といった塩害対策として用いる材料仕様の選定方法が示されることとなった。こうした技術的な進展により、塩害対策のレベルが大きく向上することとなった。

一方、アルカリ骨材反応については、骨材反応性評価のための試験方法と判定基準、ならびに反応抑制のための混合セメントの使用やアルカリ総量規制が示されることとなった。これにより、対策提示以降に建設されるコンクリート構造物にアルカリ骨材反応が発生する事例はかなり減少した。

2. 2 施工品質の向上に向けた取り組み

2. 1で述べた塩害やアルカリ骨材反応はコンクリート構造物の性能に大きな影響を与えるものであり、これを防止することは非常に重要なことである。ただし、それだけでコンクリート構造物の耐久性が確保されるわけではなく、コンクリートの施工品質もコンクリート構造物の耐久性を大きく左右するものとなる。

1999年に発生したトンネル覆工コンクリートの剥落事象は、コンクリート構造物の信頼性に対して疑念を持たせる結果となった。コンクリート構造物の劣化状況の把握、損傷原因の特定に向けて、コンクリート構造物の実態調査が行われた。この実態調査は各地方整備局の協力を得て、約2100構造物の外観調査による劣化程度の判定と損傷原因の推定、約150構造物のコンクリートコアの強度試験、中性化深さから構成された。

外観目視調査結果に基づく、健全度の評価結果を図-1に示す。健全度の判定は表-1に示す分類に従って行った。外観目視調査した構造物の健全度判定結果は、構造物の竣工年次が古いほど不具合の認められる構造物の割合が大きいという結果が得られた。次に、不具合の発生した原因として損傷状況から類推された理由を図-2に示す。損傷理由としては、コンクリートの品質に問題があるもの、あるいはかぶりが適切に確保されていなかったものなど、施工に起因したものが多く認められた。一方、塩害やアルカリ骨材反応が原因と考えられるものもわずかに存在し、塩害やアルカリ骨材反応に起因する損傷が生じていた構造物の損傷程度は重大なものとなっていた。

一方、構造物から採取したコンクリートコアの強度試験を表-2に示す。コンクリートコアを採取した構造物は下部構造やカルバートなど、設計基準強度がおおむね18MPa~24MPa程度の構造物か

ら採取している。その結果によると、コンクリートコアの強度は、構造物の建設年代が古い場合にばらつきが大きく、非常に高い強度のコアがある一方で、強度の低いものも見受けられる。これに対し、比較的竣工年の新しい構造物から採取したコアは、ばらつきは少なく、特に低強度のコアや著しく高強度のコアは認められなかった。

この調査結果を受けて、コンクリート構造物の施工完了時の検査として、テストハンマーによる実構造物の強度、ならびにかぶりの非破壊測定が導入されることとなった。このような検査が導入は、これ以降に建設された構造物の品質の信頼性の向上に寄与したものと考えられる。

2. 3 構造物の耐久性ならびに信頼性に対する要求水準の変化

早期劣化対策の確立や品質検査の導入によって、コンクリート構造物の耐久性や信頼性については、一定の成果を見たが、これで十分であるかという点、必ずしもそうとは言えない。近年、コンクリート構造物に求められる要求性能の水準は、明らかにレベルアップしてきていると感じられる。これまで、土木構造物に求められる耐久性は、必ずしも明確にはされてこなかった。減価償却資産の耐用年数等に関する大蔵省令によると、鉄筋コンクリートで作られた橋の耐用年数は50年ないし60年、トンネルでは60年ないし75年とされてきたが、これは財政上の判断であり、必ずしも技術的な根拠が明確になっているとは思われない。近年、道路橋では耐久性について100年の供用期間を想定し、これを満足するように設計することが示方書に記載された。実際、コンクリート橋のかぶりの設計値は100年間の供用期間内にコンクリート表面から浸透する塩化物イオン量が鉄筋位置で発錆限界となる塩化物イオン量を超えないようにすることを目標として決定されている。

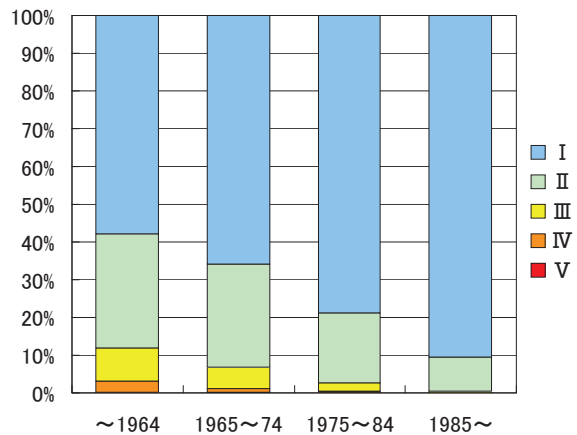


図-1 調査した構造物の健全度分布

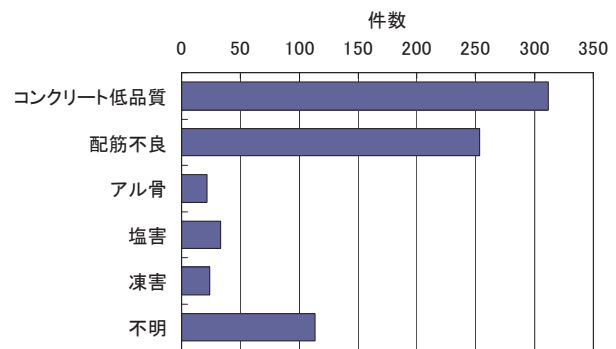


図-2 損傷理由の推定結果

表-1 健全度判定基準

劣化度	一般的状況
i	劣化が著しく、補修・補強を行う必要がある。劣化のため構造物の耐力や使用性が低下していることが明白なもの。
ii	劣化が著しく詳細調査を行い、補修するかどうか検討する必要がある。劣化のため構造物の耐力や使用性に悪影響がでているおそれがあるもの。あるいは、放置するとさらに劣化が進行することが十分に予想されるもの。
iii	劣化が認められ、追跡調査を行う必要がある。現時点では即座に構造物の耐力や使用性に影響を与えないが、将来的には劣化が進行することも予想されるもの。
iv	劣化の兆候が認められる。軽微なひび割れや錆汁等が認められ、条件によっては劣化が進行することも予想されるもの。

しかし、このことは、100年間使用されれば、その後解体撤去し新たに構造物の更新をすることを想定しているものではない。供用期間として100年を目標としつつも、できるだけ長期にわたり構造物が適切に機能することに重きがおかれていると思われる。

また、構造物の性能に対する信頼性、確実性が一層重要視されるようになってきている。前述のとおり、施工検査などが導入されることにより、人為的なミスもそれを是正するシステムが導入されてきたが、完全とは言えない状況にある。施工段階だけではなく維持管理段階も含め、できるだけ誤りなく所定の品質および機能が確保されるようにしなければならない。

このように、構造物の耐久性確保にむけた取り組みは、今後新たな進歩が求められる。では、どのような問題意識を持って調査研究を進めていく必要があるのか、以下に私見を述べることにしたい。

表-2 圧縮強度の分布

圧縮強度 (MPa)	竣工年				小計
	-1964	1965-74	1975-84	1985-	
10 ≤ < 15	3	2	1	0	6
15 ≤ < 20	8	5	5	6	24
20 ≤ < 25	8	11	10	11	40
25 ≤ < 30	6	5	15	10	36
30 ≤ < 35	3	13	5	3	24
35 ≤ < 40	5	2	0	4	11
40 ≤ < 45	5	0	2	0	7
45 ≤ < 50	3	1	0	0	4
小計	41	39	38	34	152

3. 構造材料分野の調査研究に関する今後の方向性について

3. 1 耐久性に関する要求性能の明確化とこれに適合した材料の評価・選定システムの実現

構造物の劣化メカニズムの理解が次第に進展し、いくつかの劣化機構については、劣化予測のための数理的なモデルが構築されるようになってきた。とりわけ、コンクリート中の腐食に関する塩害については、塩化物イオンのコンクリート中への浸透について、Fickの拡散方程式をベースとした照査式が土木学会コンクリート標準示方書において採用されることとなった。この考え方は、コンクリート構造物の耐久性設計を記述した国際規格 ISO 16204 Durability –Service life design of concrete structures: 2012にも採用されている。そこに示される照査式によると、コンクリート構造物の塩害耐久性を左右するパラメータは複数あるが、そのうち大きな影響を持つものに、コンクリート中の塩化物イオンの浸透しやすさを定量的に表現する塩化物イオン拡散係数があげられる。

塩化物イオンの拡散係数はコンクリートの配合条件や施工方法に依存して変化するが、塩害耐久性を表す重要な指標である。このため、これを適切に測定する試験方法を確立しておく必要がある。近年、土木学会の規準として試験方法が定められた。また、ISO規格においても ISO 1920 Testing of concrete -- Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusionとして2013年に試験方法が規格化された。

ところが、こうした試験方法はまだ普及しておらずコンクリート材料の評価や選定に反映されるまでには至っていない。コンクリートの耐久性に関する性能は圧縮強度によって間接的に評価される、といった従来の考え方が支配的となっていて、コンクリートの JIS 規格においても、一般的にはスランプ、呼び強度、空気量、粗骨材の最大寸法を仕様として選定するものとなっている。

コンクリートの圧縮強度によって間接的にコンクリートの耐久性も評価できるとする考え方は一次近似としては妥当であるものの、耐久性の評価をより正確に行うには必ずしも適切ではない。例えば、高炉スラグ微粉末やフライアッシュといった、混和材料を使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して、強度レベルは同等であるが塩化物イオンの浸透速度が小さい、一方で中性化深さの進展が早い傾向にあるなど、コンクリート強度による評価では適切な評価を下せないことが明らかとなりつつある。

コンクリートの品質について、圧縮強度のみに頼らない新たな評価指標を設計照査に導入するとともに、品質試験方法さらには材料規格へと反映される筋道を作っていくことが必要になると考えられる。

海外のコンクリートの品質規格に目を転じると、米国規格 ASTM C94 Standard Specification for Ready-Mixed Concrete や、欧州規格 EN206-1 Concrete. Specification, performance, production and conformity とともに、わが国の JIS 規格と同様の品質体系となっていて、コンクリートの拡散係数といった指標を品質規格中に導入するまでには至っていない。ところが、中国のレディーミクストコンクリート規格である GB/T 14902-2012 預拌混凝土では、従来の圧縮強度主体の品質だけではなく、耐久性に係わる品質も選定可能な体系を構築している。例えば、コンクリートの耐塩害性能に材齢 84 日（12 週）における促進塩分浸透性試験で得られる拡散係数を品質指標として選定することが可能となっている。この拡散係数が実際のコンクリート製品において確保されているかどうかといった品質検査方法は、コンクリートの通電による迅速判定試験方法（ASTM 規格に採用されている試験方法）を採用し、その試験結果によって判断する手法を導入している。こうした評価指標の導入とともに、コンクリートの製造者に対しては、混和材料の選択など比較的柔軟な対応を許容している。すなわち、コンクリートに対して性能規定化が一步進んでいるといえる。

ただし、コンクリートの品質指標として組み込むには、今後の検証を待たなければならない課題も多く含まれている。塩化物イオンの浸透を例にとれば、構造物が長期にわたって使用された場合では、塩化物イオンの浸透だけではなく、中性化の進行や凍結融解作用といった、他の劣化機構も並行して進むこととなる。例えば、図-3 はコンクリート中の塩化物イオン量の分布を示したものである。コンクリート中の塩化物イオンの浸透が拡散現象に従うのであれば、コンクリートの表層から内部に向

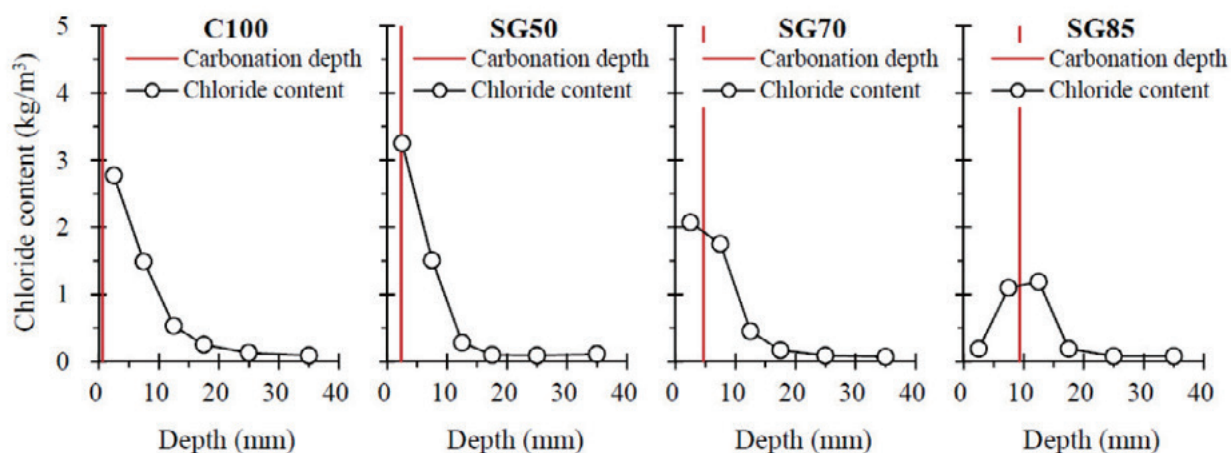


図-3 曝露試験によるコンクリートの中性化ならびに塩分浸透の観測結果¹⁾
 (左から、セメント 100%、スラグ 50%置換、スラグ 70%置換、スラグ 85%置換の順)

けて単調に塩化物イオン濃度は減少するはずである。しかし、実際にはそのような分布になっていない場合も見受けられる。特にコンクリートの中性化が進展している場合には、中性化深さ到達部付近でピークを有するような分布となっており、明らかに単純な拡散現象に従っているとは言えない。このように、複合作用による影響について十分に検討し、拡散が支配的となる範囲について明確にする必要がある。

3. 2 使用環境条件の把握と設計および維持管理への反映

構造物の耐久性には、材料構造の仕様とともに、構造物がおかれる環境条件によっても当然変化する。例えば、荷重の繰り返し作用が顕著な場合では疲労損傷による耐久性の影響が問題となる場所である。下水道構造物のように硫化水素が供給される場合では硫酸による化学的侵食が発生する。また、海風や凍結防止剤によって塩化物イオンが供給される部位では塩害による劣化が生じる。従って、構造物の耐久性設計を確実なものとするためには、環境作用条件についてその特徴を定量的に把握することが求められる。日本各地域の海岸線からの距離と飛来塩分量の関係を調査した結果によれば、地域によって、飛来塩分量は大きく異なるとともに、その標準偏差は非常に大きいことが分かる。

一方、これまで検討事例が少ないが、湿度条件も耐久性に関して影響する。特に、海外での構造物の劣化予測をする場合には、湿度のような気象条件の違いが劣化速度に大きな影響を与えるので十分な注意が必要となる。表-3は同一バッチから作成したモルタル供試体（日本国内で作成）を、土木研究所（つくば）屋外とエジプト（イスマイリア市）に暴露し、中性化深さの測定結果を示したものである。

つくばとエジプトの気候条件の違いを表-4に示す。中性化の進行はエジプトがつくばに比べて倍の速度で進行していることがわかる。また、供試体底面の中性化深さの違いも際立っている。供試体底面と床面の間にはわずかな隙間があるが、雨水がこの隙間に入り込むとしばらくは乾くことなく、隙間に残ることとなる。ところが、表-3に示す通り、エジプトでは降雨量が著しく少ないため、隙間に存在する水分が乾燥によって失われ、底面側からも炭酸ガスの侵入があったものと思われる。

こうした環境作用の違いは構造物の維持管理を適切に行う上でも、非常に重要となる。飛来塩分の大きなばらつきを維持管理において想定し、定期的な構造物の点検において、塩化物イオンの侵入量について把握し、以後の補修補強計画に生かすことを考えなければならない。また、構造物の位置する地域の降雨や湿度条件の違い（特に海外において）によって、非常に中性化が早く進行することも、構造物の維持管理計画を策定するうえで考慮に入れる必要がある。

3. 3 維持管理作業や耐久性向上に配慮したディテールの検討

構造物を長期にわたって使用するためには、適切な維持管理を行い、必要に応じて補修や補強対策を講じることによって達成される。補修補強対策の判断に当たっては、構造物の点検診断結果を踏ま

表-3 中性化深さの比較

暴露期間	側面(mm)	底面(mm)
6 か月	2.1 (4.3)	0.0 (2.5)
12 か月	2.8 (5.4)	0.0 (4.0)

括弧無：つくば 括弧付：イスマイリア

表-4 気候条件の比較

期間	日最低気温 の平均(°C)	日最高気温 の平均(°C)	月降水量 (mm)
1 月	-3.2 (9.0)	9.0 (20.0)	44 (7.2)
4 月	6.6 (14.0)	18.3 (28.0)	106 (1.2)
7 月	20.4 (23.0)	28.3 (36.0)	127 (1.2)
10 月	11.3 (18.0)	20.9 (30.0)	166 (0.9)

括弧無：つくば 括弧付：イスマイリア

える必要があり、点検診断の行為が非常に重要となる。近接目視点検や、場合によっては非破壊検査装置も活用した点検を実施することとなる。このため、点検の容易性に配慮した構造設計（ディーテール）が求められる。

また、ジョイント継ぎ目部など漏水が構造物の耐久性に与える影響は非常に大きい。こうしたジョイントを極力少なくするような構造上の工夫も重要である。

3. 4 補修の信頼性向上

社会インフラとして建設されたコンクリート構造物の高齢化の進展に伴い、適切な補修等による長寿命化技術が重要性を増している。日本はもちろんのこと、今後はアジアをはじめ諸外国においても補修対策技術に対する期待は大きくなるものと思われる。昨年、コンクリート構造物の維持管理および補修に関して、ISO16311 Maintenance and repair of concrete structures が制定されたが、これも構造物の維持管理の重要性が全世界的に認知されてきたことの表れと思われる。個別の対策工法の技術開発とともに、維持管理の枠組みや補修補強工法に関する体系化、標準化が世界レベルで一層促進することが予想される。日本で開発されている補修技術の世界展開を見据えると、この ISO 規格の内容に準じて体系を構築することも重要となる。

一方、補修対策を実施したコンクリート構造物の施工後の状況を見ると、必ずしも当初期待していた効果が得られていない場合も散見される。補修対策を行ってもその効果が持続せず再び劣化が進行し再補修を求められることもある。補修対策を繰り返すことは、ライフサイクルコストの観点から出来れば避けたいところであり、そのような状況に陥った原因について解明を行い、補修対策の信頼性向上につなげていく必要がある。コンクリートの補修対策としてさまざまな工法があるが、表面被覆、ひび割れ補修、断面修復といった、ありふれた補修対策であっても、検討の余地は多く残されていると考えられる。

例えば、補修工法に求められる要求性能を明示できるまでには至っておらず、必ずしも材料選定が適切に行われているとは言えない。そのためには、

- ①補修・補強の原理を明確にするとともに、要求水準と検証方法
 - ②補修補強用材料・工法の耐久性、特に付着や接合部の一体性に係わる耐久性について対処法
 - ③対象構造物の損傷状況に応じた適切な工法及び材料の選定手法
 - ④補修・補強の施工管理手法
- を整備することがあげられる。

とりわけ、②の付着や接合部の強度ならびに長期的な耐久性の確保は非常に重要な課題である。補修・補強ではその要素技術として、旧断面と新たに付け加える断面の打継などによる接合や一体化、あるいは後施工アンカーなどを用いた接合、補強鋼材の追加や補強鋼材同士の溶接による接合を用いる場合が多い。こうした接合部の強度は、当然補修補強設計では期待されるが、想定通りの強度が発揮されなければ、補修補強設計の根幹が揺らぎ、場合によっては部材の剥離剥落によって思わぬ事態を引き起こされる危険性もある。ところが、こうした接合部の強度は、打継部分の凹凸の処理や含水状態の調整など素地調整を含む施工状況によって大きく変化するとともに、プライマーの種類や新断面に用いる材料の効果発熱による熱ひずみによっても接合部の強度は変化する。また長期的な観点から付着強度の持続性について考えると、新旧断面の材料の乾燥収縮ひずみや温度変化にともなう膨張ひずみの違い、界面に存在する水分の凍結に伴う膨張圧の発生などによって経年的な低下が生じることが予想される。こうした経年作用による付着強度の低下に対する評価方法はまだ定まったものがない。断面修復部と旧断面部の剥離は、補修対象である構造物の耐荷性能に影響が生じるとともに、第三者への被害にもつながることから、重要な検討項目となる。構造物の維持管理において剥離箇所を事前に検出することが、必ずしも容易ではないことから、付

着強度の耐久性評価手法の開発は、補修材料や工法システムの選択、さらには新たな補修システムの開発をサポートする役割が期待される。

4. おわりに

土木構造物の耐久性向上に向けて、コンクリートを対象とした研究内容と今後の方向性について述べた。コンクリート系以外にも、鋼構造やアスファルト等様々な材料についても検討がなされている。例えばアスファルト材料では、土木研究所では、ポリマー改質アスファルトの新たな品質規格作成に取り組み、平成18年の「舗装施工便覧」の改訂においてポリマー改質アスファルトⅢ型（大型車交通量が著しく多い箇所及び交差点）が採用され、加えて耐水性の強いⅢ型-Wや耐水性と可撓性を持ち合わせるⅢ型-WF など、様々なグレードの品質規格が採用された。共同研究を行い、ポリマー改質アスファルトの新しい性能評価方法の開発に取り組んでいる。その結果、塑性変形抵抗性を評価する「アスファルトのせん断試験方法」や耐水性を評価する「珪砂を用いたポリマー改質アスファルトのはく離抵抗性試験」、低温クラック抵抗性を評価する「ポリマー改質アスファルトの低温曲げ試験」など、多くの新しい試験方法を開発している。これらは、より耐久性の高い製品の開発への活用や、品質規格への導入が期待されている。

鋼構造分野に関しては鋼道路橋の耐久性向上技術に取り組んでいる。鋼道路橋の鋼材の防食に関しては、これまで長年にわたり塗装が主たる位置を占めてきた。しかし最近では、塗装以外の防食法として耐候性鋼材、溶融めっき、金属溶射といった新しい技術の適用事例も増えつつある。その一方で、これらの新しい防食法については劣化過程が必ずしも十分に把握されているとは言えず、劣化や不具合が生じた場合の補修方法が確立されていないのが現状である。そこで土木研究所では塗料メーカーらと共同で屋外暴露試験を実施し、これらの鋼橋防食工の劣化挙動の解明と、塗装による耐久性の高い適切な補修方法の提案をめざし検討を進めている。

土木構造物の長寿命化に向けて、冒頭に述べたとおり材料分野の研究に当たっては、研究者の専門性が重要となるが、それだけでは十分な研究成果は得にくい。実構造物の特徴や要求性能に精通し、設計から維持管理に至る段階を検討範囲に含める必要がある。iMaRRCでは構造物の管理にあたっている行政機関はもとより、大学や民間企業、国立研究機関と適宜連携を図りハブとしての役割を果たしつつ、効率的な成果の最大化を目指していく所存である。

参考文献

1) Eisuke NAKAMURA, Tsuyoshi ISHII, and Hiroshi WATANABE : FACTORS INFLUENCING CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE OF CONCRETE IN LABORATORY ACCELERATED AND OUTDOOR EXPOSURE TESTS, The Fifth International Conference on Construction Materials, 2015.

第3回国連防災世界会議から始まる新たな防災・減災ⁱ

水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM） 小池 俊雄

1. はじめに

世界187カ国から約6,500人、のべ15万人をこえる参加を得て、仙台で本年3月に開催された「第3回国連防災世界会議」（以下、仙台会議）は大成功を収めた。災害による人的、経済的被害を2030年までに著しく低減する目標を定めた仙台防災枠組(SFDRR)が制定され、科学・技術に基づく災害リスクの軽減方策の確立への取り組みが始まった。

2. 近年の災害

仙台防災枠組によれば、災害による過去10年間の損失は、死者70万人、傷患者140万人を超え、住居の損失は2300万人にも及び、被災者は15億人以上で、経済損失は1兆ドルを超えるとされている。

近年、自然がもたらすハザードの影響は増大する傾向にあるが、貧困、人口増、都市の過密化等の人間の活動がハザードの影響をさらに増大させている。また、人間由来の活動が災害外力の影響を増大させていることにある。2011年のタイ水害に見られるように、サプライチェーン化によって世界経済の相互依存性が高まり、遠く離れた場所で生じた災害の影響が、国境を越えて次々と国際的に広がっていくことはその典型と言える。被害の増加は発展途上国のみならず、2013年のハリケーンサンディによるニューヨークの被害に見られるように先進国にもみられ、経済成長や科学・技術の発展は必ずしも災害リスクの減少にはつながっていないことがわかる。自然科学的にも社会科学的にも、災害外力に関する理解が進んできているが、損失が増加し続けている。

災害常襲国でありながら経済発展を成し遂げた我が国は、防災・減災の先進国としての自負があるが、2011年の東日本大震災によって、我が国の科学・技術は自然の脅威に対してまだ十分ではなく、より真摯に研鑽を積まなければならないことが明らかになった。



写真1 2011年タイ水害（左）と2013年ハリケーンサンディによるニューヨークの被害（東京会議ビデオより）



写真2 2011年東日本大震災時、田老町の防波堤を乗り越える津波（東京会議ビデオより）

3. 日本学術会議の取り組み

日本学術会議では、仙台会合においてこの防災・減災における科学・技術の役割の重要性を明確にする目的で、2012年秋より準備を始めた。その基本的な考え方は、政策決定者や実務者が災害に関する最新の科学的知識を充分認識して、その理解に基づいて行動できる社会を築くことである。2005年に神戸で開催された第2回国連世界防災会議にて採択された「兵庫行動枠組」では、国の防災を統合的に計画して実施していくために、国家防災組織（national platform）の設置が協調されたが、各国や地域の科学・技術研究機関が国家防災組織と協力して科学・技術を実務に反映できるように、国連機関、国際学術組織、国際開発援助機関などが支援・強化する体制を作るとのことである。

中央防災会議があるわが国には当たり前のように思われるこの体制は、国際的にはほとんどの地域、国で確立されていない。さらに、災害が生じたとき、国や地方自治体、地域の人々が、より適切に対処し、より早く復旧し、より良い状態に復興できるように事前の準備が必要である。東日本大震災の例をひくまでもなく、災害が生じる前に行動することの難しさは、われわれは身にしみて理解している。そこで、データ収集や経済分析の共通の方法論を開発することが必要で、様々な学問分野間にまたがる科学の知に基づいて、様々な災害による被害を事前に数値的に想定し、それに基づいて防災の政策や戦略を形成する体制づくりが肝要である。

そのためには、新たな災害リスクとその社会への影響を予測し、可視化する能力を強化しなければならない。特に災害が複合的に発生する可能性を含めた災害リスクを、自然科学的、人文社会科学的に統合的な観点からシミュレーションによって予測し、地理空間情報などを活用してハザードマップ作成などを作成し、社会の行動につながる情報の提供が肝要である。国家防災組織によるデータ収集・統計作成を支援し、地上での調査や観測を補完する目的で、時間的、空間的に漏れがなくデータを収集する地球観測との協力も重要である。また、情報通信技術（ICT）やデータ統合・解析技術を活用して、特にリアルタイムの情報共有や他分野間のデータ統合と情報融合の促進が必要である。

この分野間連携は災害分野に留まらず、日常の行動や生活と密着した地球環境科学や健康科学、あるいはまたこのようにして得られた科学的理解に基づいて災害リスクを軽減した優良な事例が広く共有されなければならない。地球環境分野では、自然科学と人文社会科学の統合、社会との連携によって地球環境の持続可能性を向上するための研究として「Future Earth」が推進されている。防災・減災と地球環境は対象とする時間スケールや政策の切迫性は異なるものの、両者の協力による統合的な科学の知は、気候変動の影響評価と適応策など、災害リスクと環境リスクの軽減を通して、持続可能な開発の確立に不可欠である。また、発災後の救援活動から、復旧、復興過程における心理的側面を含め、健康科学と協力したアプローチが求められている。またこれらは、レジリエントな社会を構築し、人類を持続可能な開発へと導くために不可欠なステップでもあるとも考えられる。さらに、実社会及び教育界と連携し、科学知の社会実装のための制度設計や能力開発のプロトタイピングを通して、コミュニティ防災、防災教育を進め、防災リテラシーの向上方策の有効性を吟味する必要がある。

これらの科学・技術重視の新たな防災枠組を作成するために、仙台会合へ向けて防災・減災と持続可能な開発の双方に貢献する科学・技術のあり方を国際的に集約する目的で、日本学術会議は2015年1月に「防災・減災に関する国際研究のための東京会議」（以下、東京会議）を開催した。同会議では、皇太子殿下ご臨席のもと、韓昇洙国連水と災害リスク軽減特使、ゴードン・マックベーン国際科学会議（ICSU）会長のキーノートに続き、学術団体から国際社会科学協議会・災害リスク統合研究（IRDR）・日本学術会議・英国王立協会、国連機関から国連気象機関（WMO）・国連教育科学文化機関（UNESCO）・経済協力開発機構（OECD）、国際開発援助機関から世界銀行・アジア開発銀行・国際協力機構（JICA）、衛星機関から宇宙航空研究開発機構の各代表が参加され、またバングラデシュ水資源担当大臣されてハイレベルパネルが開催された。続くテクニカルセッションでは、東日本大震災の経験を共有し、防災・環境・地球観測の連携、科学と社会の連携、分野間連携のそれぞれの推進を中心テーマとして、ポスターセッションも含め、27カ国より400名あまりの参加者により熱心に議論が進んだ。その結果、防災・減災と地球環境、健康、地球観測との連携強化などを明記した「東京宣言」が採択され、具体的な行動や提案を含む「東京行動指針」の案がまとめられた。また、国際コミュニティが協力して国家防災組織を支援する概念が示されるとともに、会議の内容は4分あまりのビデオにまとめられ、仙台会合にて報告された。

東京会議ビデオ：<https://www.youtube.com/watch?v=KtdzaXP1G7U&feature=youtu.be>

東京会議詳細資料：<http://monsoon.t.u-tokyo.ac.jp/AWCI/TokyoConf/jp>



Tokyo Statement

-Towards a new science and technology to consolidate disaster risk reduction and sustainable development-

1. Our assessment of the present status

- Human factors such as globalization, population growth, poverty, urbanization and changes in land use are aggravating negative consequences of natural hazards. The losses are increasing in both developed and developing countries.
- In this inter-connected world, the impact of an event immediately crosses borders and can lead to cascading consequences, even to geographically remote areas.
- Although we have increased scientific knowledge and technology, we have not been successful in demonstrating concrete methodologies for disaster risk reduction and in convincing those who are not familiar with disaster risk.
- In pursuit of human security, we need to consolidate disaster risk reduction and sustainable development.

2. Our key directions for addressing problems through solidarity towards building resilience

- Policy-makers and practitioners should be fully aware of the latest scientific knowledge on disasters, and be capable of utilizing those scientific findings.
- National platforms should be empowered as focal fora to incorporate science and technology into real practice.
- Science should play an important role in disaster risk reduction by developing collaborative frameworks with Earth environmental sciences and global Earth observations, thus promoting inter- and trans-disciplinary approaches for human well-being.
- National and local governments should improve their preparedness for better response and better recovery of households and communities.

3. Our findings and recommendation

- We need to adopt a common methodology on data collection and economic analysis of disasters which can be practiced by national and local platforms to realize evidence-based policy making on disaster risk reduction to be practiced globally.
- We need to enhance numerical pre-assessments of damage by various hazards based on inter-disciplinary knowledge to formulate preventive policies and strategies
- We need to fully share these valuable “best practices” of disaster risk reduction that are based on scientific findings.

4. Our proposals for concrete initiatives to be taken in cooperation with national and international stakeholders

- Governments need to empower national platforms so that they can practice evidence-based disaster risk reduction for sustainable development
- The science community needs to enhance forecasting and visualization capabilities of new risks and their potential social impacts in order to prevent further disasters due to intensification of hazards.
- The disaster management community and the Earth observation community need to collaboratively enhance their capability to monitor existing risks and their social impacts and to mitigate disasters due to augmentation of vulnerabilities.
- Science communities on disaster risk reduction, Earth environment and health need to bring practitioners and researchers together in collaborative efforts to improve disaster resilience.
- The international community needs to set up a process of encouraging existing and future programs and initiatives to create research networks and practices for promoting evidence-based disaster risk reduction for sustainable development.

To realize our proposals, we discussed the Tokyo Action Agenda as attached.

東京行動指針



Tokyo Action Agenda (draft)

(1) How to support national platforms to practice evidence-based disaster risk reduction?

- 1) Collect and archive disaster damage data and potential impact on populations (health, social) and to identify the nature of vulnerable groups ahead of a disaster through in-situ and satellite observations and model integration : **Monitoring**
- 2) Maintain national disaster damage statistics : **Monitoring**
- 3) Monitor disaster risk changes through in-situ, satellite and model integration : **Monitoring**
- 4) Assess current and future risks on economic growth, public health and social equality and demonstrate effects of investment in collaboration with donors: **Assessment**
- 5) Conduct capacity building activities and enhance education on disaster damage data collection, statistics maintenance, risk monitoring, risk assessment and information sharing, synthesis, and forensic approach beyond disciplines, : **Capacity building**

Target	Action	Executer
Monitoring	Data Collection & Sharing	IRDR/DATA World Data System (WDS) International Charter Space & Major Disasters Sentinel Asia Coordinated Satellite Observation Plan SATREPS Post-2015 GEO Implementation Plan Data Integration & Analysis System (DIAS)
	Statistics	Governmental Disaster Statistics
	Risk Monitoring	Post-2015 GEO Implementation Plan Data Integration & Analysis System (DIAS) Future Earth Priority Initiative
Risk Assessment	Future Earth Priority Initiative SATREPS	ICSU, ISSC, BF JICA, JST
Capacity Building	IRDR Flagship Future Earth Priority Initiative SATREPS Technical Assistance	IRDR ICSU, ISSC, BF JICA, JST JICA

(2) How to mobilize existing networks of scientific and research institutions at national, regional and international levels?

- 1) Create a regular, independent, authoritative, policy-relevant international assessment of science on disaster risks, resilience and transformation: **Assessment**
- 2) Provide a clear and unambiguous scientific view on the current state of knowledge in disaster risk, the potential socio-economic impacts of natural hazards, and the ways to reduce significant human and economic losses for international policy use: **Synthesis**
- 3) Conduct co-designed and policy-relevant integrated research by promoting inter-disciplinary and trans-disciplinary programs : **Communication and engagement**
- 4) Activate coordination between governments and science and technology communities at national, regional and global levels: **Communication and engagement**
- 5) Empower international scientific advisory functions to offer effective assessments and syntheses in collaboration with UN agencies, countries and donors: **Advice**

Assessment	Disaster Risks Research and Assessment to Promote Risk Reduction and Management	ICSU, ISSC
Synthesis	Disaster Risks Research and Assessment to Promote Risk Reduction and Management	ICSU, ISSC
Advice	Empowerment of Scientific Advisory Enhanced Cooperation between STAG, IRDR, Donors and Funding Agencies	ISDR, ICSU, ISSC, Donors
Communication and engagement	Transformation to Sustainability SATREPS International Disaster and Risk Conference Private-Public-Academia Partnership DRR Institute Summit	ISSC JICA, JST GRF Davos JBP, SCJ Kyoto Univ.

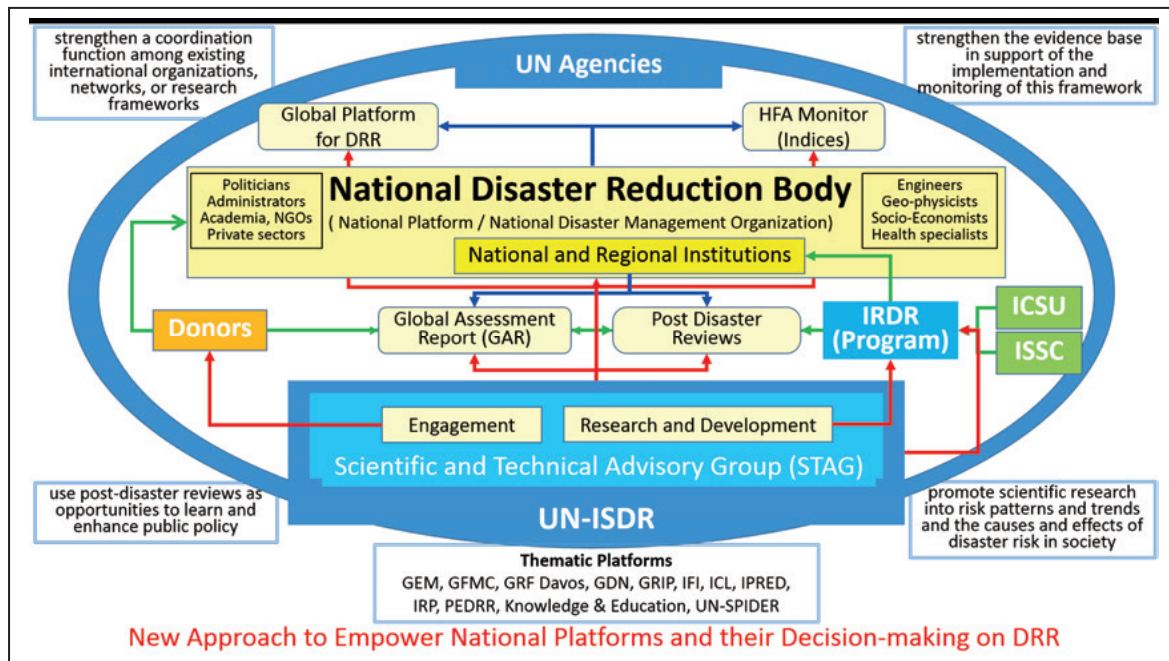


図1 国際コミュニティが協力して国家防災組織を支援する概念

4. 仙台防災会議での成果

25カ国の首脳に参加の下、187カ国から約6,500人、パブリック・フォーラムにのべ15万人をこえる参加で大成功を収めた仙台会合は、国連の潘事務総長が閉会式で述べているように、9月に国連サミットで議論される持続可能な開発目標、11月末にパリで開催される国際的気候変動体制に勢いを生むことになるであろう。

なかでも、最終日間際までの懸命な交渉と協議によってまとめられた「仙台防災枠組」では、今後15年間に期待される成果として、「人命・暮らし・健康と、個人・企業・コミュニティ・国の経済的、物理的、社会的、文化的、環境的資産に対する災害リスク及び損失の大幅な削減」を目指して、「新たな災害リスクを予防し、既存の災害リスクを減少させるために、ハザードへの暴露及び脆弱性を予防・削減し、応急対応及び復旧への備えや強靭性を強化するための、統合されかつ包摂的な手段を講ずる」を最終目的としている。そのために、①死亡者数、②被災者数、③経済的損失④重要インフラの損害、⑤防災戦略採用国数、⑥国際協力、⑦早期警戒及び災害リスク情報へのアクセスを国際目標（global targets）として設定している。

また行動のための4つの優先事項として、「災害リスクの理解」、「災害リスク管理のための災害リスクガバナンス」、「強靭化に向けた防災への投資」、「効果的な応急対応に向けた準備の強化と『より良い復興（Build Back Better）』」が定められた。「災害リスクの理解」が第一優先事項とされたのは、科学・技術の重視と見ることができ、東京会議の成果の反映であると自負できる枠組みには、データの収集・分析・管理・活用、複合災害を含めた災害リスク評価、地理空間情報の活用、防災教育や普及啓発が盛り込まれている。このように、東京会議と仙台会議の議論は方向性を共有している。

仙台会合で安倍首相は「仙台防災協力イニシアチブ」を発表され、わが国がとるべき防災政策として、長期的視点に立った防災投資、より良い復興（Build Back Better）、中央政府と多様な主体の連携の3点を中心課題に設定された。その効果的推進のために強調された点には、気候変動の影響への適応の観点を踏まえた協力や日本の知見・技術活用があり、災害リスク評価や地球観測を用いた災害の観測・予測など、具体的な科学・技術の貢献を例示されている。その上で、2015年から2018年の4年間で総額40億ドルの防災投資協力、計4万人の行政官及び地方のリーダーなどの人材育成の数値目標を掲げ、ソフト支援、ハード支援、及びグローバルな協力と広域協力を推進するとしている。

5. おわりに

仙台会合を成功に導いたわが国には国際的リーダーシップがますます求められる。わが国が一体となって自ら範を示し、災害リスクを軽減し、レジリエントな社会を構築し、持続可能な開発を確立して、人間の安全保障を実現に導かなければならない。そのためには、災害外力の種類や学問領域を超えてデータや情報を体系化、統合化し、これを様々なステークホルダー間で共有し、知識や経験、考え方を相互に交換し、熟議を通して科学・技術に基づく災害リスクの軽減方策の確立に努力すべきである。

ⁱ 本稿は、河川 2015・5 月号巻頭言 pp.3-4 をもとに作成した。

ネパール地震に対する復興支援 －BBB コンセプトに基づく復興と国土強靱化のための技術支援－

構造物メンテナンス研究センター 運上 茂樹

1. はじめに

2015年4月25日及び5月12日に発生したネパール地震（本震 Mw7.8 及び余震 Mw7.3）は、死者 8,790 名、負傷者 22,300 人以上、全壊 50 万戸、半壊 26 万戸の住宅被害、被害総額は国内総生産の約 1/3 となる約 70 億 US\$ に達する甚大な災害を引き起こした[1]。

国土交通省は、ネパール連邦民主共和国で発生した大地震に対し、(独)国際協力機構(JICA)が派遣するネパール復興支援調査団のメンバーとして、国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人土木研究所、国立研究開発法人建築研究所から4名の職員を派遣した。地震被害からの復旧・復興に協力するため、ネパール国政府が実施する地震復興計画策定等に対し、我が国のこれまでの震災から復興した知見・教訓を踏まえた助言等を行うことがミッションとされた。5月20日から約2ヶ月間首都カトマンズ他に滞在し、現地の被災調査、セミナーの開催を通じた我が国の知見・教訓の共有、そしてネパール政府による災害後のニーズアセスメントへの支援とともに、大地震が繰り返し発生するこの地域において、Build Back Better (BBB: 同じ災害を繰り返さない、より良い復興) コンセプトに基づく復興・強靱化計画策定への支援が実施された。

本文では、インフラ分野を対象に、我が国の震災経験とともに現地調査結果等を踏まえ、本調査団によりネパール国において実施された技術支援活動の概要について報告する。

2. 国土交通省調査団の活動概要

国土交通省調査団全体の主な活動経緯は以下の通りである。

1) 派遣期間 5月20日(水)～7月15日(水)

2) 活動概要

5月21日: ネパール支援国会合ワークショップ出席

5月25日: 「ネパールの『BBB:より良い復興』に向けたセミナー」講演(写真-1) [2]

阪神・淡路大震災、東日本大震災の経験と我が国の BBB 復興に関する知見の共有

6月10日: ネパール国家計画評議会(NPC)副議長に対する被害調査報告、復興政策提言(写真-2)

6月18日: JICA リスクアセスメント開発調査合同調整委員会(JCC)会議において講演

将来のカトマンズ都市圏の都市インフラを提案するとともに、将来の地震を想定した都市強靱化への施策提案

6月24日: 外務副大臣等の被災地視察、モデル復興住宅展示に随行、説明(都市・建築分野)

6月25日: 第1回ネパール支援国会合に参加

7月10日: 「ネパールの『BBB:より良い復興』の実現と JICA 支援セミナー」講演

強靱な国土形成に向けた住宅、建築、都市、インフラ全般にわたる「BBB:より良い復興」、「強靱化」のための施策提言



写真-1 5月25日 JICA 主催 BBB セミナー



写真-2 ネパール政府国家計画評議会副議長(右端)との協議・提言(庁舎被害のため屋外テント内仮オフィスで)

これらの活動成果については、ネパール国の要請に基づく「カトマンズ盆地における地震災害リスクアセスメントプロジェクト」や「カトマンズ盆地都市交通改善プロジェクト」に係る JICA 開発調査、「カトマンズ都市圏強靱化マスタープラン策定」に係る JICA 緊急開発調査等の技術協力支援により、ネパールの復興、次の地震に備えた国土強靱化の実現に寄与する予定となっている。

3) 現地被害調査

上記のネパール政府関係機関との協議やセミナー等での知見の共有活動と同時に、現地の状況、被害の実態に基づく実際的な報告、提言を行うために、**図-1**に示すように、被災やその影響が甚大であったカトマンズ都市圏（カトマンズ、パタン、バクタプール、サンクー）、チョータラ、ゴルカ（震源近傍）、ランタン（山地部ヘリ調査）の住宅被害（歴史的建造物を含む）やインフラ被害の調査を実施した。

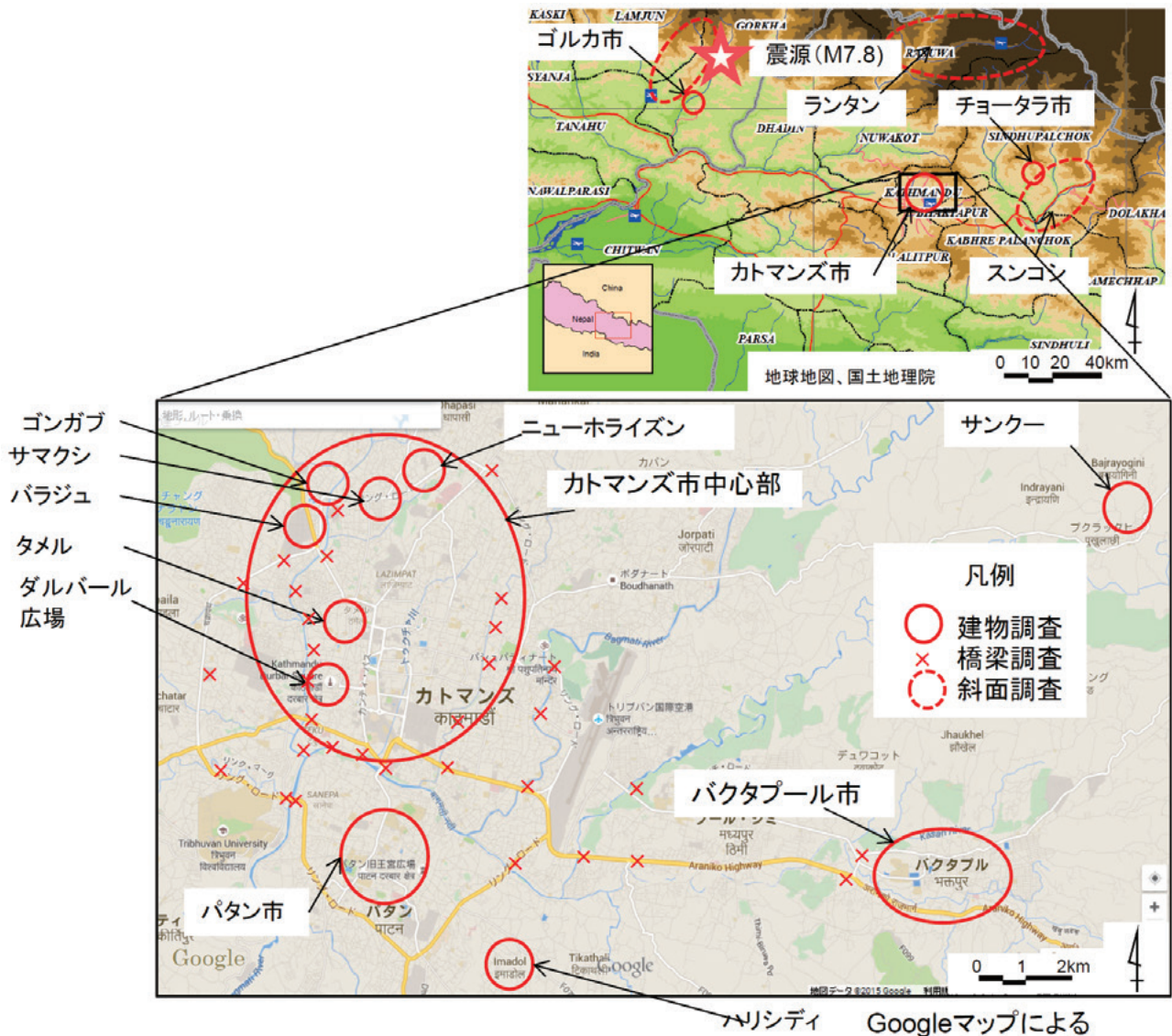


図-1 国交省調査団による現地調査範囲

3. インフラ施設の被害状況

3. 1 地震動特性

今回の地震記録としてデジタルデータまで公表されている唯一の記録は、カトマンズ市内中心部の米国大使館内に設置された強震計で観測された記録である。**図-2**に強震動データセンター（CESMD）により公表されている波形と応答スペクトルを示す。最大加速度としては、0.16~0.17Gで、固有周期3~6秒に相対的に強い揺れの成分を有する特徴的な波形となっている。こうした地震の揺れの特性に関しては、各方面で分析が進められているところであるが、地震震源から発出された周期成分特性と、柔らかい地盤で構成されるカトマンズの盆地構造が影響したことが議論されている。

また、高井らは、カトマンズ市内の4カ所で地震観測を行っており[3]、観測データはまだ公開されていないが、共同研究者のネパール国地質鉱山局(DMG)のSudhir Rajaure氏の発表によれば[4]、最大加速度としては、盆地縁部の岩盤上の観測点で約0.26G、盆地内の地盤上の観測点3点では、それぞれ、0.23G、0.15G、0.15Gとされており、地盤が固いところでは、最大加速度も相対的に大きい値が観測されている。

これらの記録は、地震動と地盤特性の関係分析、地震動特性と被害の関係分析、さらには将来この地域で起こり得る地震動の評価のために重要な観測記録となっている。発生した被害に関しては、観測されたこれらの地震動の強度レベルを見ながら評価する必要がある。

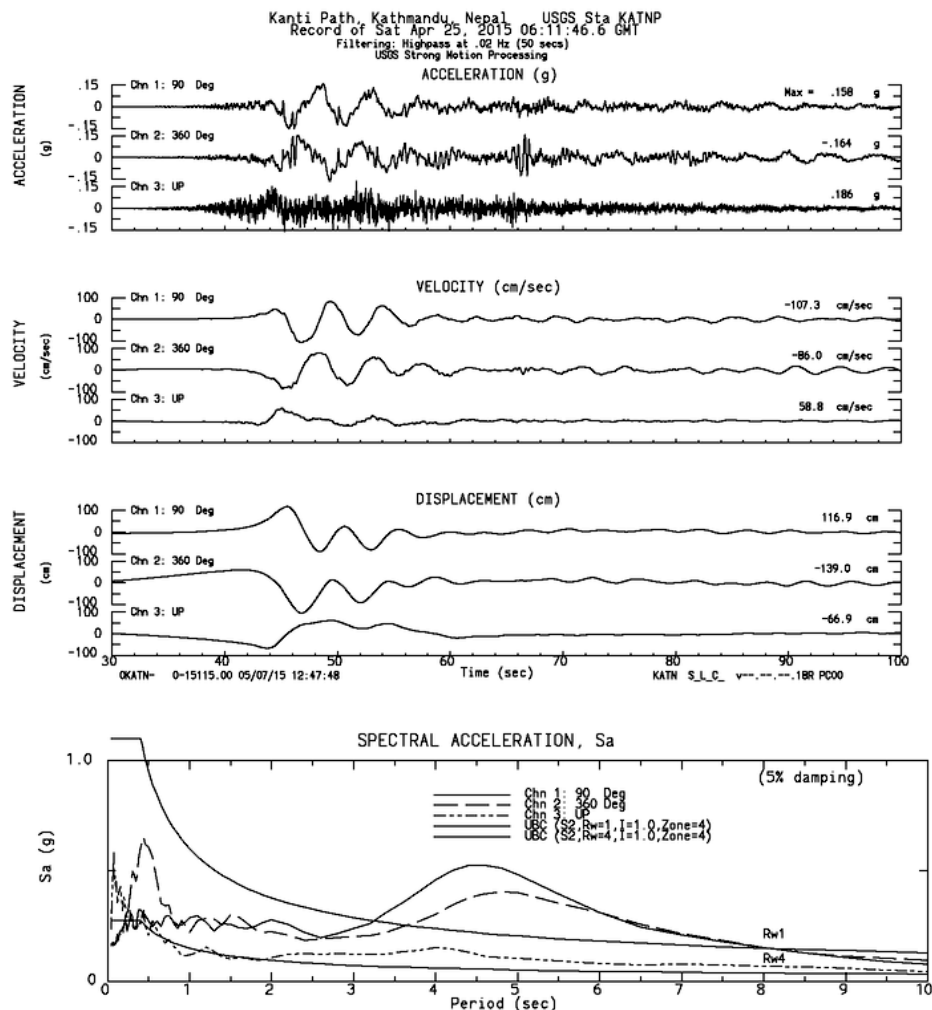


図-2 カトマンズ市内における地震観測記録
(CESMDにより公表：<http://www.strongmotioncenter.org/>)

3. 2 カトマンズ市内の道路・橋梁被害

地震動特性の影響が大きいと考えられるが、カトマンズ市内において確認されたインフラ土木施設の著しい被害は少なかった。被害が発生したインフラ施設として3カ所の道路・橋梁被害について以下に示す。

写真-3は、カトマンズとバクタプールを結ぶ主要幹線道路であるアルニコハイウェイ上の道路盛土部で、延長約200mに及ぶ大規模なすべり、地割れ、沈下被害が発生したものである。被害原因に関しては、基礎地盤部の軟弱地盤、液状化の影響等が指摘されているが、現在、JICAにより緊急復旧対応として調査が実施中である。さらに、**写真-4**に示すように、この盛土部のすべりに伴い、東側端部に位置する横断歩道橋の一方の基礎部が大きく変位し、桁位置部分で約46cmのずれが発生した。落橋までに

は至っていないが、桁かかり長が約半分に減少した。時間とともに地盤の変位が進展している可能性について土木学会調査団からの指摘を受け、現地を確認し、早急の撤去、あるいは、仮支持を実施すべきことをネパール政府道路局に申し入れ、被災区間の支間が撤去された。

カトマンズ市内には、Bishmati、Bagmati、Dhobikhola の大きく 3 つの河川が流れており、これらの河川を渡る橋として約 40 橋程度存在する。主要な橋全ての現場を調査、被害の有無を確認するとともに、構造条件、写真データ等をまとめた調査台帳を作成した。カトマンズ市内で確認されたほぼ唯一の顕著な被害を写真-5 に示す。本橋は、上部構造が 2 径間単純 RC 桁、下部構造は RC 壁式、上部構造 RC 桁は、弾性ゴムパッド支承によって支持されている。路面の歩道部上には、ライフラインとして水道管が添架、支持されている。支承部の桁の両側には RC 製のストッパーが設置されており、地震による橋軸直角方向の振動変位によりこれらのストッパーがせん断破壊した。破壊状況から見ると、片振幅として約 10cm 程度の応答変位が生じたことが推定される。なお、全体としては被害が少なかった RC 造の建物が橋台に隣接して存在し、この RC 造の建物は崩壊している。本橋のみに被害が発生した理由に関しては、さらに分析が必要であるが、地盤条件等によりこの地区の地震動の揺れが相対的に大きかった可能性、パッド支承で支持された上部構造の固有周期特性から地震動の揺れと共振し変位が増大した可能性などが考えられる。また、ストッパーの構造として、せん断鉄筋が相対的に少なく、地震力が耐力を上回ったことも考えられる。さらに、大きな地震が発生した際には、桁の大幅な変位、ずれ、水管の破壊など重大事に至った可能性もあり、注意すべき被害ということができる。また、本ストッパー構造の設計方法や構造細目についても検討が必要と考えられる。

なお、本橋以外に、基礎部の顕著な洗掘が発生したものや、路面、ジョイント、高欄等で損傷が生じ、メンテナンスや補修が必要な箇所も確認された。



写真-3 アルニコハイウェイの土工部のクラック、沈下



写真-4 アルニコハイウェイの横断歩道橋の基礎の変位による橋桁部でのずれ



写真-5 Bishmati 川を渡る橋梁の被害（隣接 RC 建物の被害、水管、支承部のストッパーの損傷）

3. 3 山地部の道路被害

山地部における代表的なインフラ土木施設としては道路が中心となる。道路については、未舗装区間、ガードレールなどの安全施設の未整備区間が多いことに加え、斜面崩壊、落石等が発生している箇所が数多く確認された。PDNA[1]によれば、こうした道路の被害総額は、125 百万ドルと報告されている。ネパールでは、急峻となる地形的な影響もあり、従来から雨期における斜面災害が数多く発生している。

ここでは、調査を行った区間の道路の被害状況について示す。カトマンズと南方のクレカンを結ぶ道路のうち南側を通る道路では、写真-6 に示すようにほとんどの区間が未舗装で、多くの落石、斜面崩壊跡が確認された。このような状況は、カトマンズ東方のシンガチ地区でもほぼ同様に土砂災害が多く発生している。また、さらにカトマンズ北部の 7000m 級の山脈の麓にあるランタン地区では、大規模な雪崩、岩盤斜面崩壊が発生し、居住地域がその土砂に飲み込まれ、多くの方が被災した。また、河川への土砂の崩落により、河川を堰き止めている箇所も確認された。



写真-6 クレカンに向かう道路の落石、斜面の崩壊



写真-7 シンガチ地区の道路の斜面崩壊

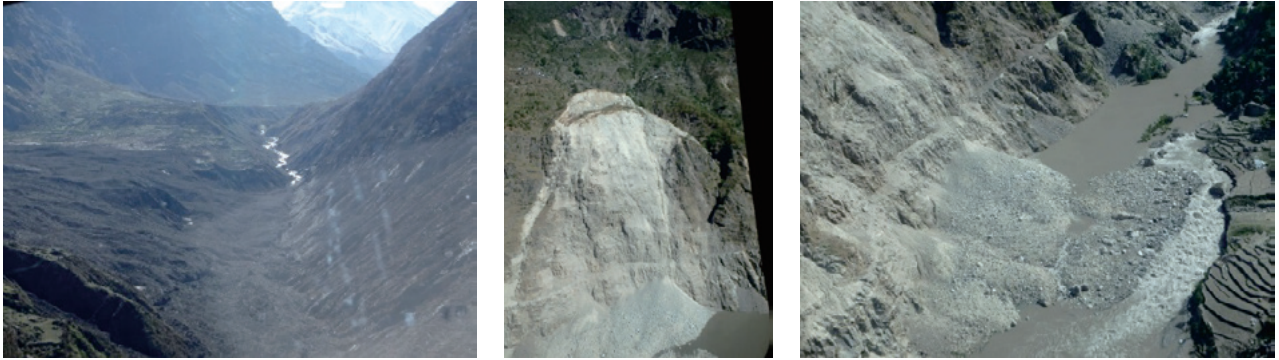


写真-8 ランタン地区の斜面崩壊、河川の堰き止め状況

カトマンズ西部の震源地に近いゴルカから、家屋の95%が被災したというその北部のバルパックまでの道路調査を行った。同様に、未舗装区間が多く、幅員も狭く、岩がごろごろするような路面状況であり、移動に時間を要した。雨期に入り、一部道路は水没し、一般的な4輪駆動車でも通行が困難となり、仮橋等が必要となるような地点も存在した。また、バルパックに向かう山地道路では、落石、斜面崩壊が多数発生しており、雨期における自動車での登坂は危険な状況であった。

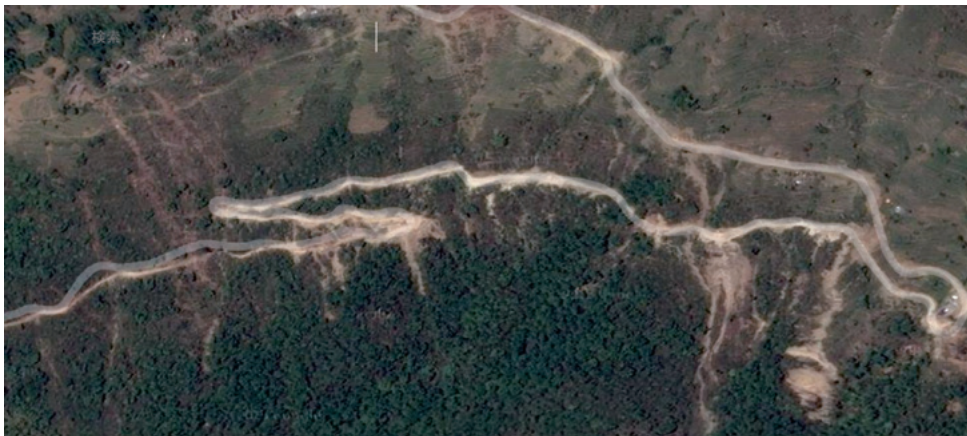


写真-9 バルパックに登る道路における斜面崩壊、落石跡（地震前、Google Earth による）



写真-10 増水により4輪駆動車では渡れない河川、未舗装の道路

3. 5 インフラ施設の被害のまとめ

土木系のインフラ施設の被害調査結果と必要な検討事項をまとめると以下の通りである。

- 1) 今回の地震の規模は $M_w=7.8$ と大きなものであったが、カトマンズ市内で観測された地震動記録によれば、地震の揺れとしては必ずしも強烈なものではなかった。ネパールはエベレスト造山運動に伴

うひずみの蓄積に起因し、過去に M8 クラスの地震が多く発生するとともに、近い将来の発生も予測されており、こうした地震に対する備えとしてインフラ施設の強化等の検討が必要と考えられる。

2) カトマンズ都市圏

- ・今回の地震では古い住宅の被害が甚大であった一方、インフラ施設の被害は顕著ではなかった。しかしながら、将来起こり得るさらに大きな地震に備えた都市インフラの強化の一環として、被災時に緊急輸送道路のボトルネックになる橋に対する耐震性強化の検討が必要と考えられる。
- ・橋の劣化等が進展し、点検・補修等が必要な橋が存在した。次の大地震で被害を受ける可能性のある劣化、洗掘への対策の検討が必要と考えられる。
- ・被害の数は少なかったが、盛土部での顕著なすべり、沈下等が発生した。土工構造物内の排水処理、旧河川地盤の構造物等の軟弱地盤対策などの検討が必要と考えられる。
- ・横断歩道橋の被害は1橋確認された。カトマンズ都市内には多くの横断歩道橋があり、劣化が進展したものも確認された。地震時に道路閉塞の可能性のある横断歩道橋に対する強化策の検討が必要と考えられる。

3) 地方部・山間地

- ・道路は、地域を結ぶライフラインであり、道路の安全性、信頼性向上のための対策の検討が必要と考えられる。
- ・山地部では斜面災害が多く確認されており、このような斜面災害に対するリスク評価、ハザードマップ、避難計画、優先順位を付けた対策、対策メニュー等の整備の検討が必要と考えられる。

4. 復興支援活動

4. 1 支援国会議 (ICNR) PDNA (災害後のニーズアセスメント) レポートの作成支援

支援国会議(ICNR: International Conference on Nepal's Reconstruction 2015)に向け、災害状況やそれを踏まえたニーズを評価する PDNA(Post Disaster Needs Assessment)レポートの作成が進められた。アセスメントは、23 のセクターに分かれて実施されており、国土交通省調査団は、そのうち、**Housing & Human Settlements / Transportation / Disaster Risk Reduction** の3つのセクターに参画し、ネパール政府側(国家計画評議会及び関係各省)とともに、被害調査結果に基づくレポート策定への支援、提言等を行った。

Housing & Human Settlements / Transportation / Disaster Risk Reduction の3つのセクターのネパール政府側の代表である国家計画評議会 (NPC) の副議長の Prof. Dr. Govind Raj Pokharel 氏、評議員の Prof. Dr. Govind Nepal 氏に対して、建築物やインフラの被害状況とその原因分析とその対策、カトマンズ強靱化都市マスタープランの検討イメージについての提案に関し、説明し資料提出を行った(写真-2)。また、都市開発省 (MoUD)、都市開発省都市開発建設局 (DUDBC)、カトマンズ都市圏開発庁 (KVDA)、地方開発省 (MoFALD)、インフラ交通省道路局 (DOR) 等のネパール政府関係省庁に対し、被害状況の報告、それに基づき PDNA レポートに反映すべき施策提言等を行った。

Transportation セクターに対しては、道路・橋梁等被害調査結果に基づき、日本が提案する BBB の基本思想を入れること；次に発生し得る大地震を考慮し、カトマンズ都市圏のレジリエンスを強化するための復興計画の策定について含めること；次の大地震に備え、交通施設の長期的な維持管理とともに、リスクアセスメント、脆弱性評価、必要な対策の実施等について含めること；地方部や山間部では道路はライフラインとなるため、山間地の道路の改良のためにリスクアセスメント、ハザードマップの作成、優先順位付けした対策等を含めること、などを議論、提案した。

4. 2 カトマンズ都市圏のインフラの強化支援

カトマンズ都市圏の重要インフラのうち、主に道路を対象とし、復興強靱化都市計画に合わせて、現地を調査結果に基づく提案/推奨事項としてとりまとめた。ネパール側は、主に、インフラ交通局道路局 (DOR) と意見交換、協議を進めながらとりまとめた。

図-3 は、被害調査結果と提案/推奨事項の概要を示したものである。被害の特徴とともに、これに基づく、カトマンズ都市圏のインフラ強化のための耐震診断と耐震強化の必要性の評価支援、技術の開発・蓄積・普及支援として、自国資源の連携体制の強化、自国基準の策定の必要性等に関する提案を行った。

ネパール地震の被害の特徴

■ インフラ施設の被害の特徴

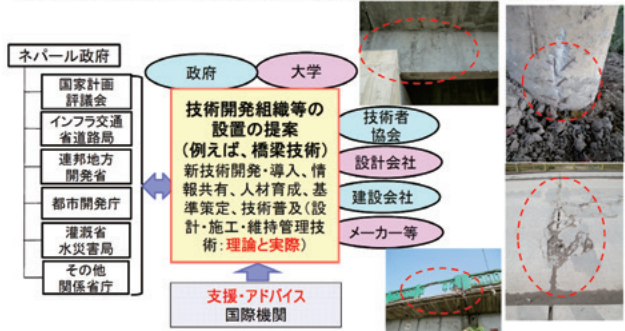
- カトマンズ都市圏
- ・地震動特性(強度・周期特性)との関係から、道路、河川、都市施設等のインフラ施設の甚大な被害は少ない。
- 地方部・山間部
- ・衛星データ、現地調査等から多数の土砂災害の発生が確認。



土研 Public Works Research Institute, Japan 1

インフラ構造物の技術の開発・蓄積・普及支援

- 設計・施工・維持管理技術の開発・蓄積・普及体制の強化の提案
- ・被害等現地調査結果をもとに、インフラ交通省(MOPIT)道路局(DOR)に対し、大学、建設会社等との連携のもと、自国の技術の開発、整備、普及体制の強化について提案



土研 Public Works Research Institute, Japan 3

カトマンズ都市圏のインフラの強化支援

■ 道路インフラ等の耐震診断と耐震強化の必要性の評価支援

- ・カトマンズ都市圏の強靱化マスタープラン策定のための現況耐震診断と課題点の抽出提案



土研 Public Works Research Institute, Japan 2

インフラ構造物の技術の開発・蓄積・普及支援

■ 橋梁基準の新規策定の提案

- ・現在インドIRC基準(Indian Road Congress)に準拠している橋梁基準を独自基準として整備し、基準をベースにして、自国の設計・施工技術の蓄積を図っていくべきことを、道路局(DOR)に対し提案
 - ・基準の策定に向けた検討事項に関する提案
- 1) 想定すべき地震と設計地震力
 - 2) 性能設計・じん性設計法の導入
 - 3) 今回被災した構造部位の設計ディテールの検討
 - 4) 3,000kmの道路と400橋の建設計画(今後3年)に資する技術資料の作成(標準設計図集や設計資料)
 - 5) 大学等における研究との連携



土研 Public Works Research Institute, Japan 4

図-3 被害調査結果とインフラの強化支援に関する主な提案

5. おわりに

本文では、国土交通省のネパール復興支援調査団の活動について、主にインフラ分野を対象に、現地調査の実施、調査結果に基づく技術支援活動について、その概要を報告した。我が国の震災経験、知見がBBBに基づくネパール国の復興、強靱化に少しでも役に立てばと心から願う次第である。

【謝辞】

ネパール地震の調査、支援活動等では多くの方々に大変お世話になりました。ここに記して感謝申し上げます。

- ・ネパール国政府、在ネパール日本国大使館、JICA 関係各位
- ・土木学会・建築学会・地盤工学会・地すべり学会調査団関係各位
- ・国土交通省(本省、国総研、土研、建研) 関係各位

また、地震・地震観測情報に関して、東京大学三宅弘恵准教授、北海道大学高井伸雄准教授、広島大学熊原康博准教授より貴重な情報をいただきました。

【参考文献】

- 1)ネパール政府による災害ニーズアセスメント・レポート (PDNA Report) : http://icnr2015.mof.gov.np/page/post_disaster_needs_assessment
- 2)JICA 主催のセミナー等情報 : http://www.jica.go.jp/topics/news/2015/20150527_03.html
http://www.jica.go.jp/press/2015/20150629_01.html
- 3)澤田・高井ら：ネパール国カトマンズ盆地の強震動評価ー強震観測点各点の表層地盤のS波速度構造と強震記録、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.239-240、2013年8月
- 4)S. Rajaure : International Workshop on Gorkha Earthquake-2015, Nepal, Present knowledge and way forward on future research, June 17, 2015