

J-BEC

レポート 2022 Vol. 18





目次

巻頭言

一般財団法人日本みち研究所 理事長
東京工業大学名誉教授 神戸大学名誉教授 朝倉 康夫

全国道路施設点検データベースと DX 推進について 01

AI を活用した道路橋メンテナンスの
効率化に関する共同研究について 08

寄附講座

・『道路アセットマネジメント政策（橋梁調査会）講座』について 16

助成研究

- ・位相空間分析と機械学習を応用した
コンクリート打音検査法の高度化の試み 22
- ・加熱式塗膜剥離による塗替え塗装の簡易化に関する基礎的検討 28
- ・定期点検値を利用した橋梁のマクロ的劣化評価とその予測手法の開発 33
- ・塗膜クリープ解析法の開発と
高力ボルト摩擦接合継手の性能評価への適用 41
- ・水の浸入による耐疲労性の低下を抑制する RC 床版断面の開発 47

トピック

- ・建設技術フェア等の参加報告 54
- ・令和3年度 橋梁シンポジウム「橋のこれから・新技術」開催報告 55
- ・第7回 橋梁のメンテナンスに関するセミナーの報告 57
- ・令和4年度賛助会員特別講演会の報告 58
- ・橋梁技術に関する研究開発助成について 59
- ・国土交通行政関係功労者表彰の受賞について 60

都市と橋

「難波橋」と「淀屋橋」 61

高速道路のリニューアル工事とその交通影響分析

一般財団法人日本みち研究所 理事長
東京工業大学名誉教授 神戸大学名誉教授 朝倉 康夫



1. はじめに

2022年春に東京工業大学を退職するにあたり古い資料を整理していたら、40年以上も前の卒業論文を発見した。京都大学の佐佐木綱教授のご指導の下、「都市高速道路が背後地域に及ぼす経済効果に関する2,3の考察」と題する卒業研究を行ったのが筆者にとっての高速道路を対象とした交通研究の始まりである。1972年に刊行されたローマクラブによる「成長の限界」は、地球の持続可能性に警鐘を鳴らしたレポートであるが、卒論ではその中で使われたシステム・ダイナミクス手法を用いて、阪神高速道路のネットワークの拡大が背後地域である大阪府と兵庫県南部地域の経済活動や財政に及ぼす影響を予測することが目的であった。ネットワークの拡充と背後地域の経済活動との関係を記述できるモデルを構築し、1964年の供用開始から15年間のデータでモデルをチューニングした上で、将来のネットワーク整備計画を順次インプットして経済効果を予測するという今思えばかなり大胆な試みであった。

卒論を書いた当時、経済成長の速度は緩やかになりつつあったが、高速道路に関する社会の関心はネットワークの新規整備や拡充にあった。しかしながら気がつけば、わが国で高速道路が供用開始されてから50年以上が経過し、最近では老朽化に伴う様々な障害が次第に顕著になってきた。国土交通省社会資本整備審議会道路分科会の「中間答申」によれば、2014年度以降、定期点検結果に基づく修繕や更新事業が実施されてきているが、修繕しても性能が十分に回復しない事例が明らかになるなど新たな知見も得られており、これまで積み上げてきた高速道路の機能を将来にわたり維持・継続するためには、更新事業の拡充が不可欠であるとされている。高速道路のような社会基盤は新規に整備することと同程度かそれ以上に維持・管理に注力することが重要であると社会も認識していると思われる。

2. 更新工事（リニューアル）と交通

高速道路の更新工事では、現道を利用している交通移動への影響を最小限にとどめつつ、老朽化した対象施設を新しいものに入れ替えるといった高度な技術が求められる。

更新工事に伴う通行規制により、高速道路の利用者だけでなく周辺道路の利用者にも大きな影響が出ることは避けられない。2021年から始まっているネクスコ西日本の中国道の更新工事は、2年間に渡って1か月程度の完全通行止めを6回繰り返すという大規模なものであり、2022年6月からは阪神高速道路の松原線のリニューアル工事が3年間程度という長期間の完全通行止めを伴って実施されている。

リニューアル工事に伴う交通への影響を最小限に抑えるための交通の観測・分析・制御の方法論は確立されたものがあるわけではなく、具体のリニューアル工事に伴う交通対策の検討の中で徐々に蓄積が進んでいるところである。通行規制された交通ネットワークの分析という視点でリニューアル工事に伴う交通影響を観測・分析することは、利用者の交通変更行動（経路・時刻変更、トリップの中止等）を観測することであり、その分析結果を踏まえて、一日の中での動的な交通現象と日々の動的な推移をモデル化してシミュレーションを行うことになる。さらに、このシミュレーションを組み込んで、リニューアル工事に伴う交通影響を最小化するための交通運用施策（情報提供、迂回誘導、需要抑制等）の評価ツールを開発することが求められている。交通工学の面からも興味深い課題が多く、実務との連携による成果が期待されている。

3. プロブデータを利用した交通影響分析

大阪南港周辺の阪神高速4号湾岸線は、筆者が卒業研究を行った翌年の1980年に供用開始された道路である。湾岸地域の重交通の利用が多いためか、供用後40年を経過した2019年に更新事業の対象となった。同年秋に2週間の車線規制に引き続き、10日間の完全に通行止めを実施してリニューアル工事が行われた。この工事が通行止め区間とほぼ並行する経路の交通にどのような影響を与えたかをプロブデータを用いて可視化した事例を紹介する。

分析に用いたプロブデータは、富士通（株）トランス tron）の商用車プロブデータである。分析対象路線は阪神高速15号堺線（湊町ジャンクション（JCT）～堺出入口）と堺線に合流する国道26号線（堺出入口～葛の葉町北交差

点)である。この路線を移動するプローブ車両の位置データを1秒ピッチで取得し、特定の日を対象にプローブ車両の移動軌跡を位置×時刻の2次元平面にプロットすると走行軌跡図が得られる。図-1は湾岸線の通行止めのない平常時(2019/10/23)、図-2は完全通行止め時(2019/11/20)の走行軌跡図である。通行止めのない平常時でも、湊町JCT付近を先頭にピーク時に速度30km/h以下の渋滞領域が堺線の1/2以上に延伸していることがわかる。通行止め時には、湊町JCTでは昼間は終日ほぼ渋滞となり、ピーク時には渋滞末尾が堺出入口を超えて国道26号線に達している。また、2枚の図を比較すると、図-2の走行軌跡図の軌跡数のほうが多く、湾岸線の通行止めにより堺線に経路を変更したと思われる車両が多いこともわかる。

紙幅の制約から日々の走行軌跡図の変化を紹介することはできないが、走行軌跡図を描くことで対象路線の混雑状況の動的な変化を追うことができ、リニューアル工事の規制内容や工事期間中の事象と関連付けて交通影響を把握することができる。ここでは工事区間の代替となる一路線を対象に軌跡図を示したが、プローブデータの集計はネットワーク内の任意の路線で可能である。プローブデータを用いた経路変更等のネットワーク分析については、安藤他(2020)を参照されたい。

4. おわりに

どのような時代でも、生活・産業を支える社会基盤の整備の重要性は不変であるが、成熟した社会では既存インフラの維持・管理や再編の占める割合が増加する。高速道路の大規模修繕・更新だけではなく、一般道路の空間再配分等の事業を進めるには、通行止めや車線数の削減による交通への影響を観測・解析・予測して、事業を安全・円滑に進めることが重要である。工事による通行止めは事前に周知されていることが多いと思われるので、利用者は事前に何らかの対応を取ることが可能である。利用者の行動変容は準備された行動変容であるとも言え、それを考慮して道路管理者は適切な対策を練ることになる。

これに対して、災害や事故などによる通行止めは利用者も道路管理者も予期しないものである。予期しない通行止めへの対応は簡単ではないが、道路管理者や交通事業者は工事等の計画された通行止め時の分析結果を活用して、代替路の利用策等、予期しない通行止めに対応した対策を議論しておくことも有効なのではないかと思われる。プローブデータ等によるネットワーク解析は柔軟性に優れたものであり、今後の活用を期待したい。

参考文献

安藤宏恵、イインホ、朝倉康夫、中西航(2020)商用車プローブデータによる車線規制・通行止めが及ぼす影響分析、第18回ITSシンポジウム2020、松山市、2020.12.10.

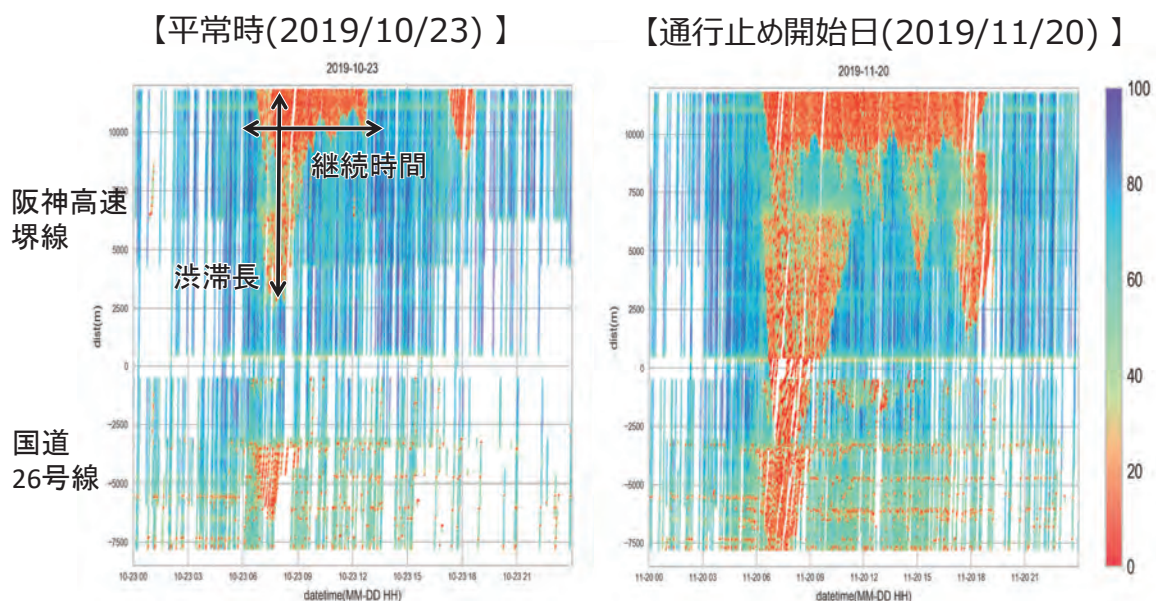


図-1 平常時の走行軌跡図

図-2 通行止め時の走行軌跡図

東京工業大学と(株)富士通交通・道路データサービスとの共同研究資料より編集

全国道路施設点検データベースとDX推進について

国土交通省 道路局 国道・技術課 技術企画室長 新田 恭士

はじめに

多くの産業分野で人手不足が進むことが予想される今、現在多くの企業や学校等においてデジタル技術を活用した非接触・リモート型の働き方・学び方への転換が進んでいます。

国土交通省においてもインフラ分野のDX（デジタル・トランスフォーメーション）を推進することで、土木事業の生産性を高め、強靱な社会経済構造を実現すべく、建設現場の改革や人材育成に取り組んでいます。

日本は、世界で発生するM6以上の地震の2割が集中する世界有数の地震国であり台風や線状降水帯などの自然災害に向き合い、インフラを整備運用しています。

建設産業は、国民の社会経済活動を支えるインフラを整備・維持する重要な役割を担っています。

建設産業の担い手の高齢化（55歳以上の就業者が35%を超過）による技術者・技能者の減少に対応するため、次世代の担い手への技術継承を進めるとともに、ICTの全面的な活用による生産性向上が不可欠な状況となっています。

過去100年間の技術的進化が、この先数年で起こると言われる現在、猛烈な勢いで進化するデジタル技術、AIやロボットを積極的に導入し、大胆に業務プロセスを変えることで、生産性向上や安全性向上、労働環境の改善を実現することが建設産業においても急務であると言えます。

本稿では、今年7月に公開された道路施設点検データベースのもたらす可能性について述べたいと思います。

1. xROADと道路施設点検データベース

2020年9月の社会資本整備審議会道路分科会国土幹線道路部会において、道路利用サービスの質を高め国民生活や経済活動の生産性を向上するため「道路システムのDX」を推進することが打ち出されました。

道路インフラに関連するデータには、各区間の交通量やCCTVカメラ映像、工事規制情報、占用物件データ等、多様かつ膨大なデータが存在します。

これらの情報をより多くの関係者が効果的に利用できるオープンな環境を構築するための仕組みが“xRoad（道路データプラットフォーム）”です（図-1）。

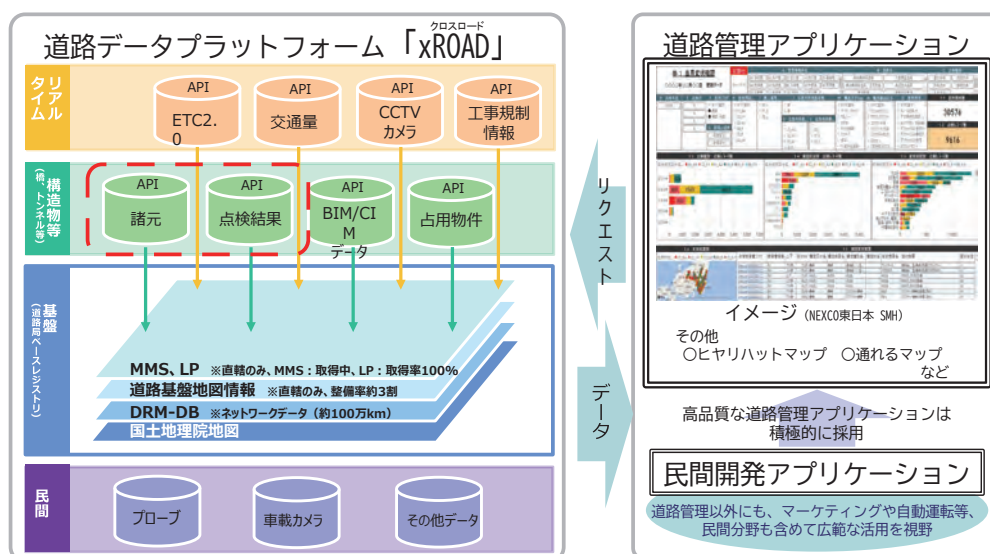


図-1 xROADのイメージ（赤点線部分が点検DB）

xRoadには、国土地理院地図をはじめ、DRM-DBや道路基盤地図情報、MMS等を基盤と構造物の諸元データや交通量データ等のリアルタイムデータとを紐づけができるよう整備が進められています。8月からは国土交通省が収集したMMS（モバイルマッピングシステム）による直轄国道の一部（約9000km）について三次元点群データの提供が始まりました。

1.1 全国道路施設点検データベース

また、今年7月からは全国道路施設点検データベースが本格運用開始され、道路橋やトンネル、横断歩道橋や門型標識などの附属物、舗装、カルバートやシェッド、長大法面や斜面安定工などの土工構造物等について、諸元データと定期点検に関するデータ（点検調書など）が公開されています（図-2）。

例えば道路橋DBには全国約73万橋の諸元情報と点検結果が収録されており、健全性の判定区分や部材毎の変状の種類や程度、点検写真など1橋あたり

約200項目のデータが橋の位置座標と共に定型様式で確認することができます（図-3）。

そのうち国土交通省が直轄管理する3.8万橋については、橋梁定期点検要領に基づく点検調書が収録され、橋梁の構造諸元に加え、全ての部材・種別毎に点検結果と補修履歴など1橋当たり約1400項目の詳細なデータが写真データと共に収録されています。例

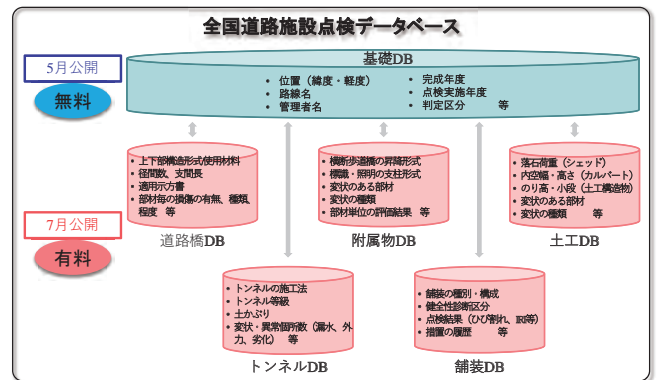


図-2 全国道路施設点検データベースのイメージ
(<https://road-structures-db.mlit.go.jp/>)

詳細DB	施設	閲覧・取得可能データ（7月有料公開範囲）	
		対象	データ項目
道路橋	橋梁	全道路管理者の約73万橋	詳細データ約200項目：構造諸元（代表値）、点検結果、耐震補強状況等
		国交省管理の約3.8万橋	詳細データ計約1,400項目：上記に加え構造諸元（構造体毎）、構造・材料種別点検結果（要素・部材単位を含む）、点検・補強履歴等
トンネル	トンネル	全道路管理者の約1.1万本	詳細データ約100項目：施工法、変状・異常箇所数（漏水、外力、材質劣化）等
		国交省管理の0.2万本	詳細データ計約300項目：上記に加え諸元（トンネル等級、土かぶり等）、非常用施設諸元、診断結果等
附属物	横断歩道橋	全道路管理者の約1.2万施設	詳細データ約130項目：構造諸元（代表値）、点検結果、橋下の管理者等
		国交省管理の約0.2万施設	詳細データ計約1,300項目：上記に加え構造諸元（構造・材料種別等）、変状のある部材、変状の種類、部材単位の評価結果等
	門型標識等	全道路管理者の約1.7万施設	詳細データ約50項目：構造諸元（代表値）、点検結果、施設設置場所等
		国交省管理の約0.4万施設	詳細データ計約400項目：上記に加え構造諸元（標識表示内容等）、変状のある部材、変状の種類、部材単位の評価結果等
	標識・情報板	国交省管理の約32万施設	詳細データ計約300項目：構造諸元（標識表示内容等）、補修内容、補修履歴等
照明	国交省管理の約28万施設	詳細データ計約200項目：構造諸元（灯具の種類等）、補修内容、補修履歴等	
舗装	舗装	国交省管理の約4.6万km ^{※1}	詳細データ約130項目：舗装の種類・構成、健全性診断区分、点検結果（ひび割れ、IRI等）、措置の履歴等
土工	シェッド	全道路管理者の約0.3万施設	詳細データ約30項目：内空断面、上部・下部構造、点検結果の判定区分（代表値）、所見等
		国交省管理の約750施設	詳細データ計約200項目：上記に加え設計条件（落石荷重等）、変状のある部材、変状の種類等
	大型カルバート	全道路管理者の約0.8万施設	詳細データ約30項目：内空施設、構造形式、使用材料、点検結果の判定区分（代表値）、所見等
		国交省管理の約2,500施設	詳細データ計約100項目：上記に加え内空幅・高さ、変状のある部材、変状の種類等
特定土工	国交省管理の約1.8万箇所	詳細データ約200項目：のり高・代表勾配・小段数、主な構成施設、変状の種類等	

※1：上下線別の数字

図-3 全国道路施設点検データベースの公開データ

例えば、健全度判定の根拠となる画像や所見（図-4）、豊富な損傷写真と損傷種類や程度（図-5）など実務上の参考になる貴重な情報が収録されています。

これらの点検データは、道路施設点検データベースが公開しているAPI（アプリケーション・プログラミング・インターフェース）を利用することで、外部のプログラムを使って利用することが可能となり、例えばBIツールを用いて地図上に19XX年の示

方書改定以前に建設された鋼橋を抽出し診断の判定区分を表示させるといったことが、目的に応じて容易に出来るようになります（図-6）。

このようにアプリを使って点検データベースの情報を自在に活用することで、道路管理者が情報収集に費やしていた時間と労力を省くことができ、業務の効率化が期待できます。また、画一的な専用システムを開発運用する必要もなく、点検計画や補修計



図-4 様式（その6）健全性の診断に関する所見の例

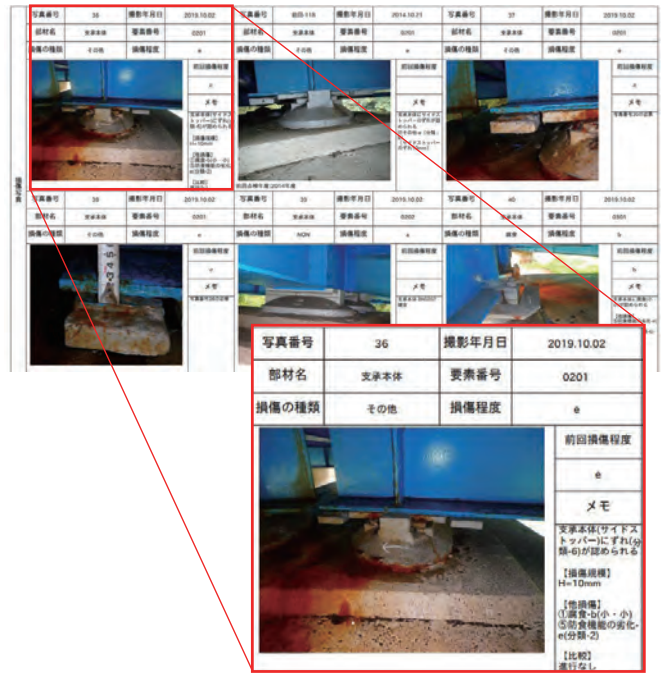


図-5 様式（その10）損傷写真とコメント例

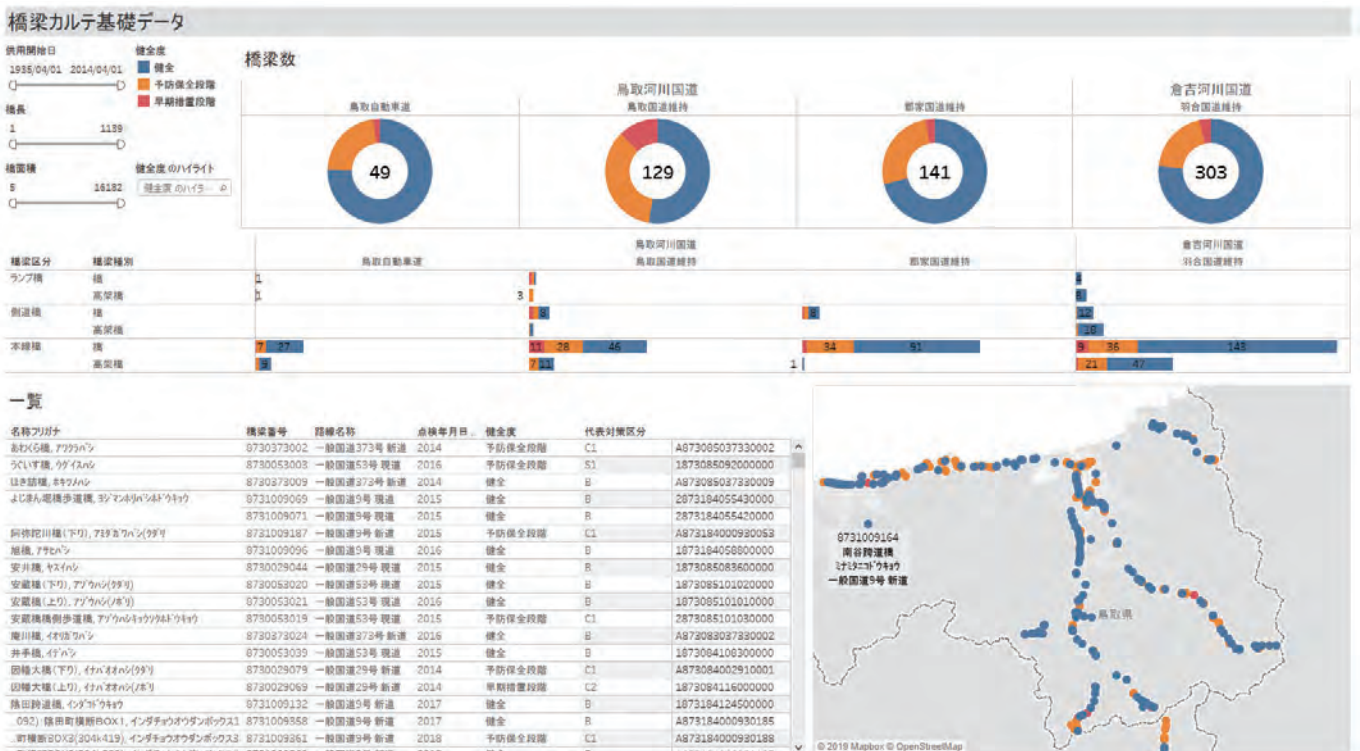


図-6 BIツールを用いた点検データベースの判定区分を表示した例（データはイメージ）

画立案、予算要求、さらには若手職員の学習など多目的に活用することが可能となります。

どのようなデータが公開されているか、点検DBの管理運営団体が運営するWebサイト (<http://rirs.or.jp/tenken-db/>) にてサンプルデータを掲載しています。

国土交通省では、令和4年度の点検業務成果から、点検調書のオリジナルデータをデータベースに直接アップロードすることにより継続的に情報が更新される予定です。

2. 点検支援技術の活用促進

2.1 点検支援技術活用の原則化

橋梁など道路施設の点検については「知識と技能を有する者が、近接目視を基本としつつ、自らが診断を適切に行えると判断する場合は、近接目視以外の方法（点検支援技術）を用いて効率的に点検を行える」としています。

点検支援技術の普及は、今後の維持管理の効率化において重要な課題であり、国土交通省では、今年度の点検業務委託（橋梁とトンネル）より、原則的に活用を求めています。その際、点検業務受注社が各種点検支援技術の機能・性能について容易に検討比較できるよう、開発者に技術情報を公募し有用な技術について収録した「点検支援技術性能カタログ」を公表するとともに今後も一層の充実と拡充を予定しています。

全国道路施設点検データベースにも点検支援技術を活用した点検事例が収録されています（図-7）。

2.2 点検支援技術が活かせる環境づくり

新技術は現場で使われることで改良が進むと言わ

れますが、残念ながら令和2年度の橋梁・トンネル定期点検業務で点検支援技術を利用した割合は未だ1割にも満たない状況です。

その理由として、新技術導入によりかえってデータ整理に手間やコストが増える、データ（ビューワ）を納品できない、発注者がデータを見ることができないなどメリットが実感できないことを指摘する声があります。

点検品質を損なわず効率化に寄与する技術は、カタログ集からも見つけることが出来ます。例えば、Visual SLAM機能を搭載したドローン、周囲に接触しないため狭隘空間でも容易に制御が可能です（図-7左上）。撮影で取得した大量の画像は、点検後の画像整理に膨大な手間を要しますが、SfM（Structure from Motion）といったソフト技術を使うことで、点検画像から3次元モデルを生成し、撮影した位置を表示することが可能です（図-8）。点検支援技術には、このようなソフトウェア技術もいくつか提案されています。

今後は、限りある人的資源を有効活用するために新技術の優位性を生かす点検方法を現場に応じ上手に使い分ける必要があります。点検支援技術性能カタログでも、現場での効率化に寄与した活用事例を収集するなど、全国で参考になる情報発信に取り組みます。

2.3 点検支援技術と点検データベースのデータ連携

今年度から、点検帳票（原本）は、従来の電子納品と切り離し、施設点検データベースにオンラインで直接登録する方法に移行します。点検調書の原本



図-7 実際に使われた点検ロボットと写真（様式10）

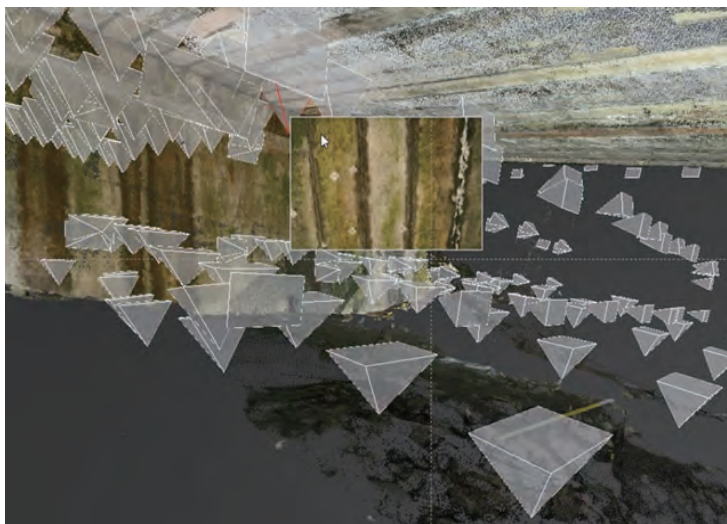


図-8 点検写真と撮影位置・方向の自動表示

をデータベースとすることで、点検報告書を保管している部門だけでなく、予算担当部門や自治体等の他の管理者も点検調査にアクセスすることが可能になります。その際には、現状の様にPDFファイルページ順に閲覧するのではなく、目的に応じてデータを可視化するツール（ビューワ）が必要になります。例えば、BIツールを用い上手に点検調査のデータの表示構成を工夫すると、調査のページを何度もめくる必要を無くし、管理者らの業務効率化に大きく寄与するはず（図-10）。

点検支援技術性能カタログには、取得した画像データをクラウドサーバーに格納し、画像から3次元モデルを生成する機能や、損傷をAIで判読する機能を実現したソフトウェアも提案されています（図-9）。

今後も点検様式を基本としつつも、点検支援技術を用いて取得したデータをクラウド上のオンラインストレージに紐付けすることで、道路管理者の手元でデータを確認できるようなWebアプリケーションの利用環境をなるべく早期に実現すべく検討を進めたいと考えています。

3. 点検データの高度利用に向けて

3.1 民間アプリケーションの導入促進

全国道路施設点検データベースは、まずは道路管理者の業務効率化に役立てることを第一に目指して

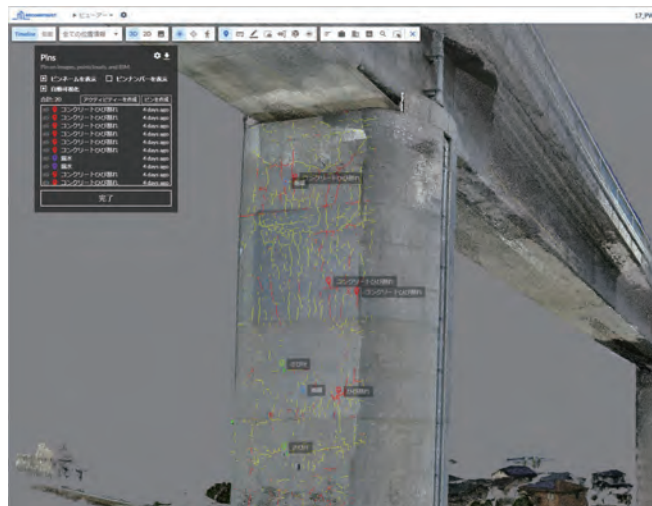


図-9 点検写真から自動生成した3D点群

います。道路管理者は点検診断の結果と重要度等を踏まえて毎年修繕計画を見直します。同時にデータベースにある点検診断の結果を利用して、傷んだ道路構造物の修繕について、重要度や診断結果を踏まえ、必要な修繕費用を推計することが可能です。

また、直轄管理橋の点検データベースには、部材・要素毎の損傷程度の判定結果も収録されているため、補修後の再劣化傾向なども把握して基準見直し検討の根拠データの一つとして活用することも可能になります。

また、点検データベースに情報を集約することで、これまで個別に整理していた各種調査へ入力重複

対象橋梁: 因幡大橋(上り)

▼ 工程 > 材料 > 部材 でフィルターを行う

工程	材料	部材種別	要素番号	損傷の種類	1	2	3	4	5	6	7
上部構造	コンクリート	床版	0101	剥離・鉄筋露	d	d	d	d	d	d	d
				漏水・遊離石	d	d	d	d	d	d	d
				床版ひびわれ	b	d	d	b	d	c	c

損傷の種類

- (すべて)
- NULL
- 剥離
- その他
- ひびわれ
- ゆるみ・剥落
- 亀裂
- 床版ひびわれ
- 洗掘
- 沈下・移動・傾斜
- 定着部の異常
- 土砂詰まり
- 破断
- 剥離・鉄筋露出
- 腐食
- 変形・欠損
- 変色・劣化
- 補修・補強材の損傷
- 防食機能の劣化
- 道床の異常
- 漏水・湧水
- 漏水・遊離石

損傷画像(1873084116000000)因幡大橋(上り)

径間番号	要素番号	損傷の種類	写真番号	ファイル名
1	0102	腐食	20	因幡大橋上1_05防食機能の劣化-e(分類-1) 24土砂詰り-e
			32	因幡大橋上1_前回点検より進展は認められなかった。
	33	変形・欠損		因幡大橋上1_シール材欠損
				前回点検より進展は認められなかった。17その他-e(分類-6)漏水
	18	漏水・湧水		因幡大橋上1_漏水 前回点検より進展は認められなかった。
	16	漏水・遊離		因幡大橋上1_L=200mm 06ひびわれ-d(大小・パターン?)
				前回点検より進展は認められなかった。
0201	腐食	4		因幡大橋上1_05防食機能の劣化-e(分類-1) L10201も同様

Links > 3d models

図-10 BIツールを用いた多径間の点検調査の表示例（データはイメージ）

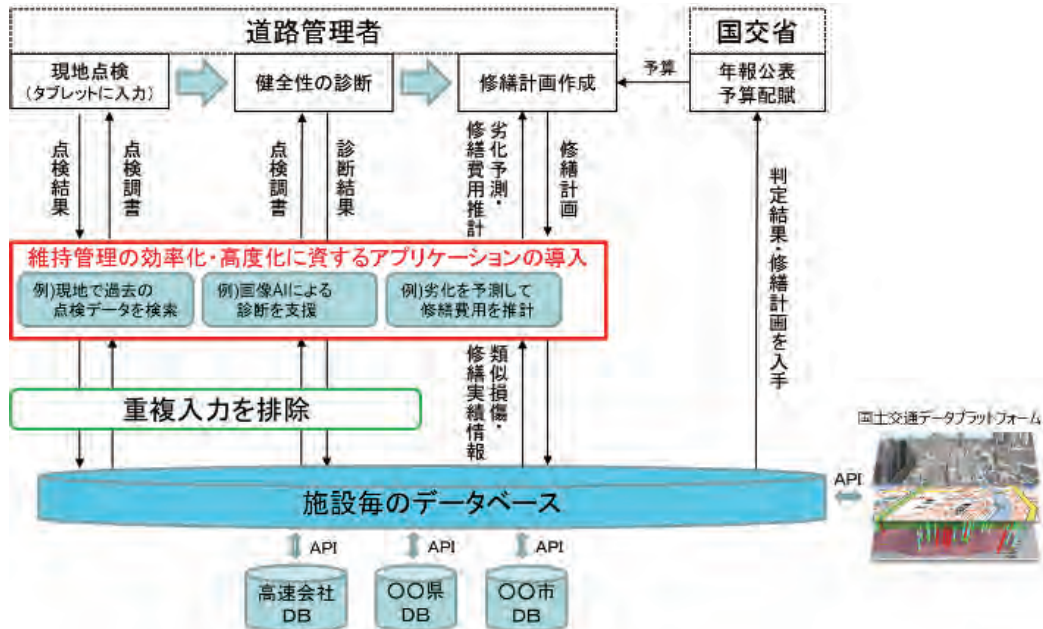


図-11 点検～修繕計画立案でのDB利用イメージ

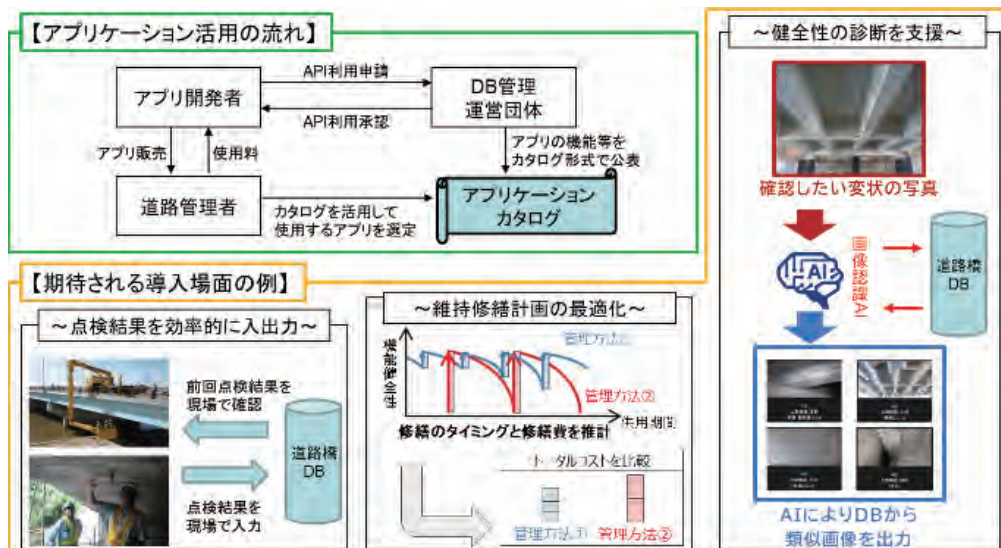


図-12 アプリケーションカタログと利用場面

を削減でき、点検調書を手元に持たない国土交通省職員や点検技術者でも、必要に応じて最新の情報に容易にアクセスすることができ、構造形式や周辺環境など類似した条件にある施設の点検・措置の情報を対策検討や学習において参考にすることが可能になりました。

点検情報をビッグデータ化したことで、橋梁の環境条件や外力等の作用と損傷や劣化状態の関係を分析評価することが可能となります。そして、優れた機能を実現したアプリケーションについては、カタログ化などを行うなど、情報処理に必要なアプリケーションの導入を積極的に進めたいと考えています（図-11）。

3.2 データベースの目指すところ

xROADのコンセプトの下では、全国道路施設点検データベースはデータを有効活用するアプリケーションの開発・導入を促進するためAPIを公開しています。従来にない発想でオープンイノベーションが促進され、斬新なアプリが登場することを期待しています。

維持管理のデータが橋梁等の重要インフラの設計・製作・施工・維持管理の様々な場面において、先進的なロボット技術や、人工知能、無数のセンシングデバイス、アプリケーションを駆使することで効率性を高め、より少ない人員でサービスレベルを維持することが可能となることを目指しています。

4. おわりに

経済産業省の「デジタルトランスフォーメーションの加速に向けた研究会」がまとめた「DXレポート2(令和2年12月)」には、DXを①デジタイゼーション（アナログデータのデジタル化）、②デジタルライゼーション（個別業務のデジタル化）、③デジタルトランスフォーメーション、の3段階に分けています。点検データベースの整備は、第一段階のデジタイゼーションに相当します。今後、点検データベースをデジタルライゼーションやDXにつなげていくには、これまでの紙様式へのこだわりを捨て、ソフトウェア・アプリケーションでのデータ活用に業務スタイルを転換することが必要となってきます。例えば、過去の点検結果や修繕に関するデータを基に最適修繕計画を立案するアプリケーションや、進展著しいAIも必要に応じ活用して類似事例の情報をユーザーに提供するアプリケーション等を駆使することになるでしょう。とりわけ、土木分野における情報管理が、これ

までの「静的・非同期・2D」だったところから「インタラクティブ・リアルタイム・3D」へ進化を遂げることは、必然であり、メタバース世界等の仮想空間でのレンダリングが、実空間×地球スケール（緯度経度高さを13桁で表現）で表現できる水準に到達していることから窺えます。図-13は、土木研究所が実施した「AIを活用した道路橋メンテナンスの効率化に関する共同研究」の参加企業が開発したプロトタイプシステムの一つです。昨今、DX分野では人材の争奪が激しくなっています。少し視点を変え、業務プロセスを変革に向け、異分野技術領域との連携も進めることも必要です。

国土交通省道路局においても維持管理の更なる効率化や高度化につながるアプリケーションの開発導入を積極的に進めるとともに、様々なデータとの連携による新たな価値創出をxROADのコンセプトの下で進めてまいります。

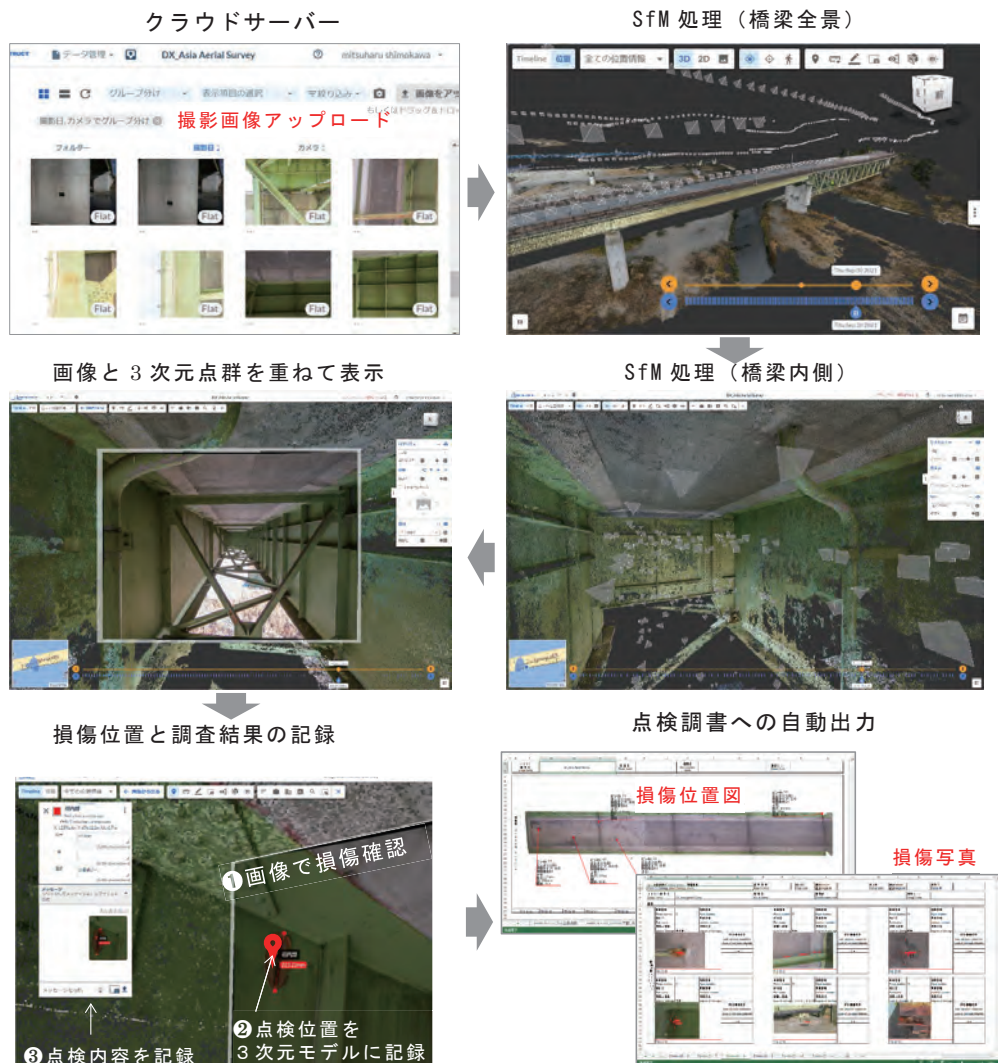


図-13 点検画像を3次元モデルで管理するソフトウェアの例（土木研究所共同研究資料より）

AIを活用した道路橋メンテナンスの効率化に関する共同研究について（主に診断AIについて）

国立研究開発法人土木研究所 道路構造物総括研究監
(兼) 構造物メンテナンス研究センター 次長 金澤 文彦

1. はじめに

近年、社会インフラの老朽化の進展に伴い適切な管理の問題がクローズアップされてきた。なかでも全国の道路橋梁約72万橋を持続的に維持していくうえで必要な維持管理コストの増加や専門知識を持った熟練技術者の減少などの問題が顕在化している。これに対応し、土木研究所では橋梁維持管理の信頼性や効率性の向上に取り組んでおり、その方法のひとつとしてAI技術を点検や診断の支援に活用しメンテナンスサイクル（点検・診断・措置・記録）の実効性を高めるため、平成30年度から官民共同研究を立ち上げ研究開発に取り組んでいる。共同研究では、診断のために必要な知識と技能を有する技術者が不

足している地方公共団体の診断業務を支援するための診断支援技術（診断AI）の開発¹⁾、近年に損傷が顕在化するRC床版の土砂化の予防保全のために非破壊検査技術とAIによる機械学習を用いた点検支援技術（点検AI（床版の土砂化等））の開発²⁾、及びUAV（Unmanned Aerial Vehicle）等を用いて取得した変状情報などの点検記録を画像解析により効率的に整理することができる点検支援技術（点検AI（画像解析））の開発³⁾を行ってきた（図-1）。本稿では、このうち診断AIの開発において、令和3年度に橋梁診断支援AIシステム（診断AIシステム）Ver.1.0を構築したので、この開発内容と今後の取り組みについて報告する。

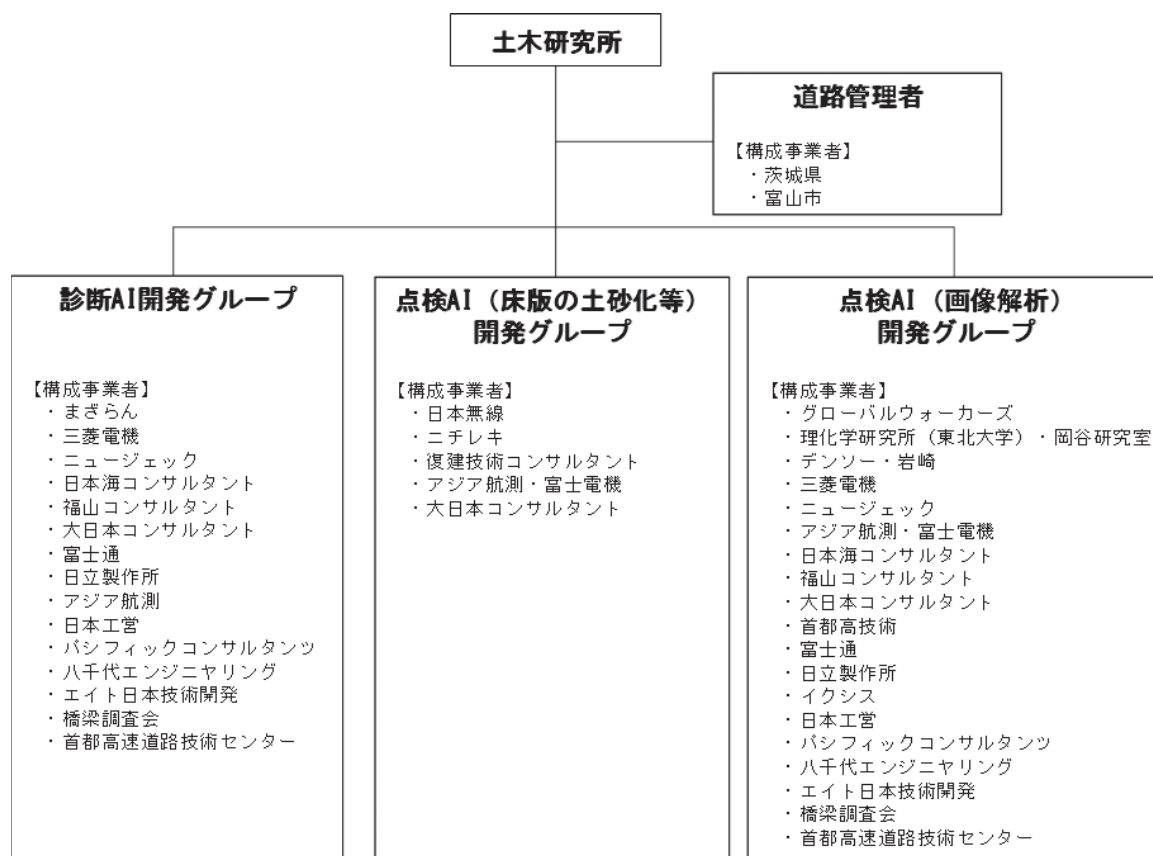


図-1 共同研究体制（平成30年度～令和3年度）（注1）

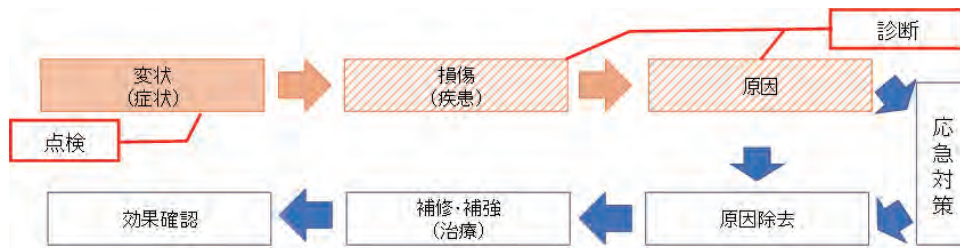


図-2 点検・診断・措置の基本的なプロセス

表-1 措置方針の定義

用語	意味
損傷なし	損傷がなく健全な状態であり、措置を行う必要はない。
早急な措置は不要	損傷ではあるが、次回の定期点検までに急いで措置を行う必要はない。
長寿命化	損傷原因の除去、完全な処置により元の状態に戻すこと。損傷が生じていない段階で将来的に損傷となることが予想される場合、損傷になる原因を除去することも含む。
延命	損傷の原因の完全な除去は難しく、補修などを行うことで損傷の進行をコントロールする。
危機管理	損傷進行の確実なコントロールができない状態で、モニタリング等を行いながら供用し、早期に対策する。
緊急措置	通行規制や緊急的な補修等を直ちに行う。

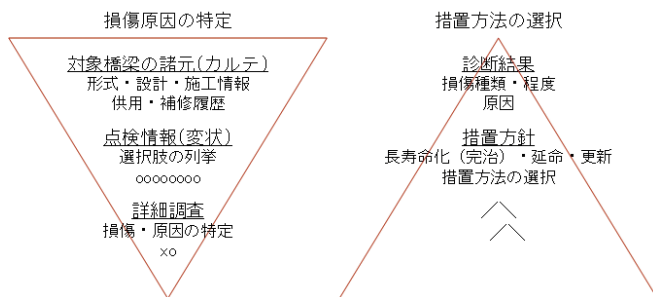


図-3 論理的な診断の基本プロセス

2. 診断AIシステムの概要

メンテナンスサイクルをより実効性のあるものとするため、特に技術力を要する診断の信頼性向上を目的に、土木研究所、招へい研究員及び共同研究者が有する診断の知識や思考方法をもとに診断AIシステムの開発に取り組んだ。このシステムは、画面に従って橋梁の台帳情報や点検情報等の診断に必要な情報を入力することで対象となる橋梁の診断結果とその理由及び措置方針を提示することができる。診断結果には、それに至った具体的な説明が求められることから、AIのうちエキスパートシステムを採用しており、招へい研究員や共同研究者と議論を繰り返しながら診断の知識や思考方法を整理し、その診断ロジックをフローチャート化して、順次システム化した。

3. 診断の基本プロセス

橋梁は供用開始後に外力作用の影響、環境作用の影響、その他の各種原因により損傷（性能を低下させる現象）が発生、進行し、その結果として様々な変状（通常とは異なる状態または前回点検時から変化が生じた状態）が生じる。点検、診断^(注2)、措置^(注3)のプロセスでは、図-2に示す通り変状を適切

に把握して記録し、損傷と原因を特定したうえで状態を評価し、原因の除去を含めて補修補強を行うことが基本となる。損傷と原因の特定が不完全であると再劣化等の原因となるため、必要に応じて詳細調査を追加し、これらを特定又は絞り込みを行うことが診断では特に重要である。

診断は、点検で得られた様々な情報に基づき総合的に判断する行為であり、信頼を得るために論理的なプロセスにより判断結果を示すことが重要となる。図-3に示すプロセスのとおり、まず対象橋梁の諸元や架橋環境条件、補修履歴、過去の点検記録等の情報を確認し、その後、点検で確認された変状から橋梁に生じている可能性のある損傷と原因を考えられる限り列挙する。情報が不足する場合は詳細調査を行い、損傷と原因を多種の情報と照らし合わせて矛盾がないように特定又は絞り込みを行う。その際、必ずしも一つに特定する必要はなく完全に否定できない選択肢は消去しないことが重要である。損傷と原因を特定又は絞り込みを行った後に、損傷メカニズム（何が原因でどのように損傷が進行するのかを整理したもの）に対応した措置方針（表-1）を選択していくこととなる。この措置方針に基づき、架橋環境条件、交通規制などの施工が可能な時期や

期間、それらの条件から定まる施工における制約条件等各種の条件をもとに効果が発揮される具体的な措置方法を選択することになり、このような論理的なプロセスで検討することが重要となる。

維持管理・更新コストを可能な限り抑制し持続的にインフラ機能を確保するためには、予防保全の推進などによる橋梁の長寿命化を図ることが重要であり、「第5次社会資本整備重点計画（令和3年5月閣議決定）」では予防保全型メンテナンスへの本格転換が明記されている。現状では既に損傷が進行した橋梁もあるため、これらに対して再劣化や早期劣化のない適切な措置を進めながら予防保全^(注4)を進めていく必要がある。このため、橋梁に生じる損傷メカニズムを明らかにして、長寿命化、延命可能、危機管理等が必要となる境界を区分するための考え方を整理し、それぞれの段階を特定するための点検方法や診断方法、各段階に効果が期待できる措置の工法例等の一連の技術情報を部材、損傷ごとにできるだけ網羅して整理することが重要である。これらの技術情報を共同研究では「診断セット」と称して、代表的な部材・損傷を対象に整理している。

4. 診断セット

4.1 診断セットの概要

「診断セット」とは、橋梁に生じる損傷のメカニズムや点検で取得すべき情報、詳細調査（措置方針や工法例を提示するために必要な調査を含む）、診断の決め手となる情報、措置方針や工法例という一連の技術情報を言い、構成する項目の概要を表-2に示す。エキスパートシステムを構築するために、橋梁に生じるすべての部材・損傷を整理する必要が

表-2 診断セットの構成

項目	内容
損傷メカニズム	何が原因で、損傷がどのように進行し、終局的にどうなるのかを図とともに解説した情報
点検における着目点	損傷の進行過程を特定するために必要な点検で着目する変状とその検知方法
診断に必要な詳細調査	損傷及び原因の特定、損傷の進行程度及び措置方針の判断に必要な詳細調査
診断の決め手となる情報	損傷及び原因の特定、損傷の進行程度及び措置方針の判断の決め手となる情報
措置の方針	長寿命化、延命、危機管理、緊急措置等の区分
工法例	措置の方針に応じた対策の例

あるが、既往研究等で解明できていないものもあり、その場合はデータ等をもとに土木研究所、招へい研究者及び共同研究者で議論を行ったうえで、仮説を立ててまとめている。表-3のうち緑着色で示す部材・損傷については、これまでに共同研究で作成したものであり要因別に細分化した損傷まで合わせると合計で203種類の診断セットを作成した。次の4.2節で、このうちRC床版を例にその具体的内容を紹介する。

表-3 診断セットの構成

部材	損傷種類
RC床版	疲労
	土砂化
	塩害
	張出し部特有の損傷
	その他の損傷
床版橋上部工	塩害
	アルカリ骨材反応(ASR)
	凍害
	土砂化
	連結桁に特有の損傷
	中空床版に特有の損傷
その他の損傷	
PCT桁	塩害
	アルカリ骨材反応(ASR)
	凍害
	連結桁に特有の損傷
	その他の損傷
RCT桁	塩害
	アルカリ骨材反応(ASR)
	凍害
	その他の損傷
RC中実床版橋	塩害
	製作・施工不良
	防水・排水工不良
RC溝橋	塩害
	沈下
	浸食
	その他の損傷
鋼桁	腐食
	疲労
	ボルトの遅れ破壊
	その他
鋼トラス	腐食
	疲労
	ボルトの遅れ破壊
	その他

部材	損傷種類
橋台・橋脚	塩害
	ASR
	凍害
	その他の損傷
基礎	洗堀
	地すべり
	側方流動
支承	オゾン劣化
	腐食
	凍害
	ボルトの緩み
	パッド型ゴム支承のズレ・逸脱
	遊間不足・片当り
	沓座モルタル内の空隙
	縁端距離の不足
	下部構造の移動に起因する損傷
	地震に起因する損傷
伸縮装置	腐食
	疲労、摩耗等
	走行繰返しによる隙間の形成
	止水材の劣化
	地震・側方流動
	構造に起因する損傷
排水装置	腐食
	割れ
	疲労
	ゴム、プラスチックの劣化
	伸縮異常
	その他

4.2 診断セットの例 (RC床版)

4.2.1 RC床版に生じる損傷

床版は橋を通行する自動車などの荷重を直接支持し、それを直接又は床組を介して主桁に伝達させる部材である。床版形式にはRC床版、PC床版、鋼コンクリート合成床版、鋼床版などがあるが、本節では既設橋の中で最も多くを占めるRC床版を例に紹介する。

これまでRC床版の損傷は、大型車の繰返し走行に起因する疲労損傷が多くを占めてきたが、近年では、路面からの水又は凍結防止剤の塩分を含む水がRC床版に侵入して床版上面が土砂化(砂利化)した事例や、塩害、凍害、ASRが複合的に関係していると疑われる事例が報告されている。措置方法の違いに着目すると代表的な損傷として、疲労、土砂化、飛来塩による塩害、海砂による塩害の4つに分類で

きる。例えば、疲労は、輪荷重の繰返し作用が原因で生じ、床版下面側からひび割れが発生し進展することで最終的には抜け落ちに至る損傷である。措置としては床版の剛性回復が基本となる。土砂化は、床版への水や塩分が主な原因で生じると考えられており、床版上面側からコンクリートの土砂化が進行し最終的には抜け落ちに至る損傷である。措置としては、土砂化が軽微な段階では床版上面からの水や塩分等の侵入防止、土砂化が進行した段階ではそれに加えて床版の剛性回復が基本となる。土砂化の損傷は、輪荷重、凍害、凍結防止剤による塩害、アルカリ骨材反応に細分類できる。飛来塩による塩害は、海から飛来する塩分が主な原因で床版内部の鉄筋の腐食が生じ、コンクリートのうきや剥離等が生じる損傷である。措置としては、塩分浸透が軽微な段階でコンクリート表面からの塩分浸透の防止(表面保護)が基本となる。海砂による塩害は、建設時のコンクリートへの塩分の混入が原因で鉄筋の腐食が生じ、コンクリートのうきや剥離等が生じる損傷である。措置としては、塩分を含むコンクリートの除去等が基本となる。

4.2.2 損傷メカニズムなど診断セット

(例としてRC床版の土砂化を示す)

図-4にRC床版の土砂化の代表的な損傷メカニズムとして凍結防止剤の侵入に起因したものを示し、図-5にその診断セットを示す。

損傷メカニズムに示す通り、水と凍結防止剤に含まれる塩化物イオンは、舗装の施工目地や伸縮装置、地覆境界、舗装のひび割れ等から床版内部に侵入する。水が床版コンクリート内に浸透すると輪荷重の繰返し作用の影響を受けて、床版上面から土砂化が進行するとともに床版内に侵入した塩化物イオン濃度が上側鉄筋位置で発せい限界を超えることで鉄筋に腐食が生じる。その後、かぶりコンクリートのうきや剥離等が生じかぶりコンクリートの土砂化がさらに進行する。土砂化は徐々に深層化し滞水層がある場合には輪荷重により大きな水圧が発生し陥没が生じる。ただし、実際には様々なパターンで損傷が進行するものと考えられるため、これは損傷メカニズムの一例として示したものである。

診断で土砂化の疑いが考えられるときは、凍結防止剤の散布の有無や床版防水工の有無や止水機能の経年的低下を考慮して床版防水工施工後の経過年数

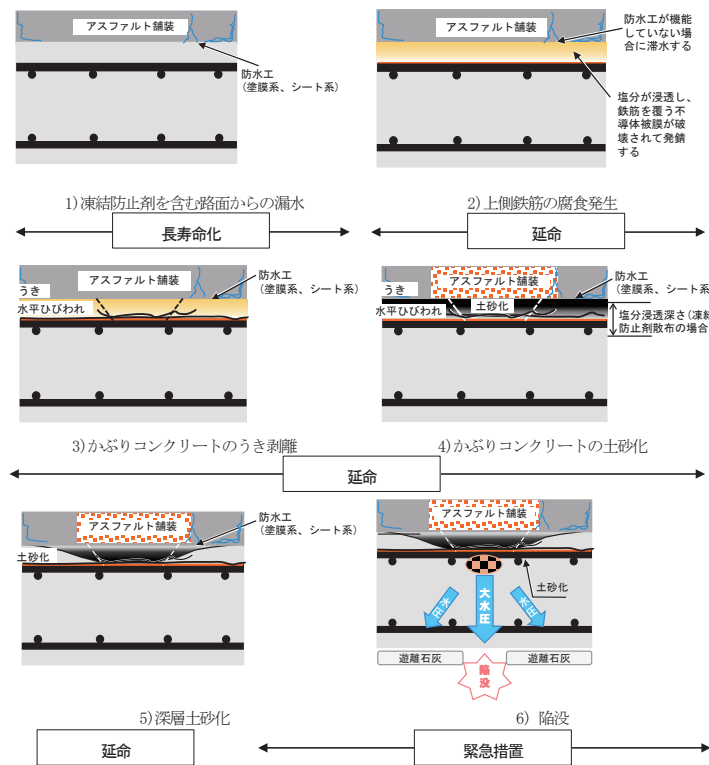


図-4 RC床版の土砂化の代表的な損傷メカニズム

メカニズム	点検における 着目点 (定期点検)	診断に 必要な 詳細調査	診断の決め手となる情報	追加情報	指図の方針	工法例
外観変状 無し	1)凍結防止剤を含む路面からの漏水	・床版下面、排水ます周辺からの漏水 ・凍結防止剤の散布 ・舗装下の滲水(電磁透しレーダ調査) ^{注1)}	・凍結防止剤散布有り ・床版下面の漏水跡 ・縦断面の舗装と床版の境界が一致ではない	-	長寿命化(透水)	床版防水工
	2)上側鉄筋の腐食発生	・電磁透しレーダ縦断面の確認	・縦断面の舗装と床版の境界が一致ではない ・錆汁などの腐食の痕跡で推定する	-	延命 (塩分の除去または更新 ^{注2)})	床版防水工+断面修復工 ^{注3)} or 床版部分打替え ^{注3)}
	3)かぶりコンクリートの剥離	・外観で判別できない場合、削孔+孔内の観察 ・電磁透しレーダ縦断面の確認	・舗装の異常(はがれ、蜘蛛の巣状のクラック、ポットホール) ・縦断面の舗装と床版の境界が一致ではない ・錆汁などの腐食の痕跡で推定する	-	-	-
外観変状 有り	4)かぶりコンクリートの土砂化	・舗装の異常が錆汁場合がある ・床版下面、排水ます周辺からの漏水 ・舗装の異常箇所での土砂噴出 ・凍結防止剤の散布 ・舗装下の滲水(電磁透しレーダ調査) ^{注1)}	・舗装の異常(はがれ、蜘蛛の巣状のクラック、ポットホール) ・上側鉄筋に等しい腐食 ・舗装の異常が発生している箇所土砂が噴出 ・縦断面の舗装と床版の境界が乱れている	・舗装の補修箇所 ^{注4)} に再劣化 ・舗装の異常が発生している直下の床版下面に遊離石灰	延命+舗装更新または床版更新 ^{注2)} 延命+走行性の確保 ^{注4)} (舗装または床版の更新)	床版部分打替え ^{注3)} or 床版全面取替え ^{注3)}
	5)深層土砂化	・電磁透しレーダ縦断面の確認 ・外観で判別できない場合、削孔+孔内の観察	・床版上側鉄筋程度までの深い土砂化 ・舗装の異常が発生している直下の床版下面に遊離石灰 ・舗装の土砂噴出口や床版下面から錆汁が噴出する場合もある ・縦断面の舗装と床版の境界が乱れている	・氷柱状の遊離石灰が析出している場合は更なる進行が懸念されるためより緊急性が高い	緊急措置 ^{注5)} (規制+鉄鋼板+床版更新)	-
6)陥没	-	-	・抜け落ちの発生	-	-	-

注1 床版上面から断面修復を実施する際には、ウオーターネットによりはつり、断面修復部の変形性能を既設コンクリートに合わせる事が重要である。必要に応じて、床版上面専用の断面修復材の使用を検討する。
 注2 床版上面への断面修復は応急措置と見做し、早期に再劣化の可能性はある。なお、早期の再劣化を防止するためには床版厚さ方向のはつり深さが重要だが、その目安は今後の研究にて検討予定である。
 注3 補修箇所の再劣化が顕著し、露筋重要度も高い場合には、床版取替が望ましい。
 注4 走行性に影響を与える舗装の異常が発生している場合には通行規制が必要となる。
 注5 上側鉄筋下面まで土砂化が進行し、その直下に遊離石灰が生じている場合には、抜け落ちまでの猶予がなく、緊急対応が必要となる。
 注6 主桁の桁形式(合成桁/非合成桁)によっては床版撤去時の応力度に注意が必要である。
 注7 定期点検の点検項目ではないが、便宜上、「点検における着目点」に記載している。
 ※指図の方針と工法例は管理レベルI;高の橋梁に対するものを示す(管理レベルII;中と低の指図の方針と工法例は検討中)。
 ※措置は原則床版の補修補強の実施により水の浸入を止めることが基本であり透水対策を行う必要がある。

図-5 RC床版の土砂化(凍結防止剤による塩害)の診断セット

を把握しておくことが望まれる。また、床版上面から進行することから舗装の異常や舗装の異常個所での土砂噴出が生じているか確認することも必要である。もし上側鉄筋下面まで土砂化が進行しその直下に遊離石灰が生じている場合には抜け落ちまでの猶予がなく緊急的な措置が必要となる場合があるため、上下表面における変状が比較的軽くても留意する必要がある。

外観目視により舗装の異常や床版下面、排水ます周辺からの漏水の有無等を把握することで、損傷メカニズムの1)の段階を把握できることもあるが、より定量的に把握する方法として、点検AI(床版の土砂化等)開発グループが開発している電磁波レーダを用いた方法がある。本方法は、滞水が生じた状態や床版上面が破碎された状態において電磁波の反射強度が健全部と異なる特性に着目した状態把握の方法で、できるだけ早期に土砂化の原因となる水の侵入の有無や土砂化の初期段階を把握し、予防保全として床版防水等の措置を行うことで長寿命化を図ることが可能となると考える。

損傷メカニズムの2)の上側鉄筋の腐食が発生する段階から3)のかぶりコンクリートのうきや剥離等が発生する段階になると、床版防水工だけでなく床版自体に対する補修補強が必要となる。土砂化が生じている部位をはつり、断面修復を行う方法を適用する場合は、はつる範囲の適切な設定や断面修復部の変形性能を既設コンクリートに合わせるなど慎重に検討しなければ再劣化の可能性があるので、床版の部分打替えについても検討することがよい。いずれにしてもこのような措置方法はコストが大きくなるため、できるだけ1)の段階で長寿命化の措置を図ることが望ましい。

このように、損傷メカニズムなど診断セットは、診断に必要な情報を診断技術者が参照することで適切な診断ができるようになる技術情報である。

5. 診断AIシステム

5.1 システム処理の流れ

診断AIシステムは、診断結果の理由を道路管理者などに説明可能

なものとするために、土木研究所、招へい研究員及び共同研究者で作成した診断セットと診断のプロセスを基にシステム化に必要なフローチャートを作成し、これに沿って入力情報を分岐処理するエキスパートシステムとした。システム処理の考え方と流れを図-6に示す。診断のプロセスごとに情報源(橋梁諸元・各種履歴、点検調査書、現地調査、前回調査との比較など)から抽出した情報と予め用意した部材・損傷ごとの診断セットの情報とを照合して、概ね該当する損傷の種類や進行度、進展の推定、措置方法などを推定する手法をとっている。具体的には、まず台帳データ(橋梁形式、供用年、設計基準、交通量等)、今回の点検データ(診断所見、損傷が疑われる部材、部位、変状等)、カルテデータ(前回までの診断所見、補修履歴等)などの情報から必要なデータを入力する。もし、直ちに措置が必要な変状の有無の情報があれば交通規制など緊急対策の必要性を判断し、その後入力したデータをもとに疑いのある損傷候補を考えられるだけすべてリストアップする。システムが損傷の特定又は絞り込みに情報が不十分な場合は追加情報を得るために詳細調査を提案し道路管理者が実施する。ここまで得られた情報をもとに損傷と原因の特定又は絞り込みを行うとともに、損傷の進行度(状態)及び今後の進展度の推定を行った後、措置方針や対応する工法例を含めた診断結果を出力し処置の実施内容等とともに保存するシステムとしている。

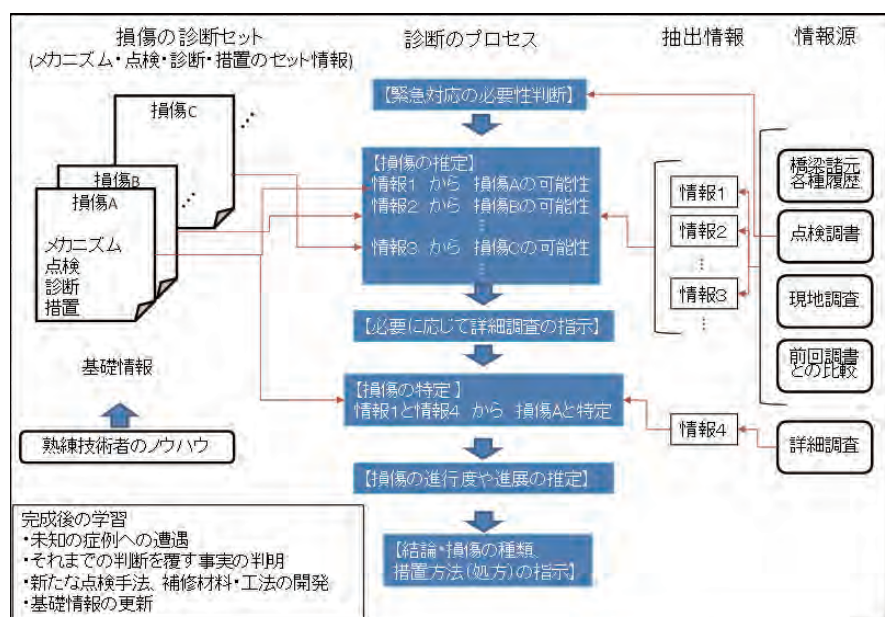


図-6 診断AIシステムの処理の考え方と流れ

5.2 診断AIシステムの画面（例）

診断AIシステムの画面の例をもとに入力内容や途中の処理内容、最終の出力内容を紹介します。図-7は点検情報を入力する画面で、対象とする部材の選択、診断に必要な情報項目に応じて点検で得られた情報に該当する内容を選択し、保存すべき現地写真を登録することができる。図-8は損傷の進行度（状態）の推定結果の出力画面で、前の画面で入力した橋梁の諸元情報、点検情報などの内容を確認し詳細調査の結果に該当する内容を選択することで、損傷の種類とその進行度（状態）を損傷メカニズムの図中に該当する状態を着色して出力することができる。図-9は診断結果の出力画面で、これまで入力した情報をもとに損傷と原因、損傷の進行度（状態）の推定結果、損傷の進展の推定結果、措置方針（案）

や工法例を出力することができる。また、損傷と原因を特定又は絞り込んだ根拠となる入力データ等も一緒に示すことができるためシステム利用者は診断に至った理由を確認することも可能である。

5.3 システムのユースケース

写真-1のとおり、システムをインストールしたタブレット型PCを対象橋梁の現場に持ち込み、その場で画面に表示される項目に従って現場状況を確認しながら入力できるように構築した。具体的には、まず現場に行く前に事務所で台帳データ、カルテデータ、前回の点検データなどの情報を予めシステムに入力し、現場に行くと画面に表示される診断に必要な項目に従って現地の橋梁の状態を見ながら情報を選択して入力する。情報の入力が完了したらその場で診断結果を出力して確認することができる。また、地方公共団体の点検診断業務の省力化を図るために点検診断結果を記録する際に参考としている全国共通の記録様式を出力することができる。



図-7 点検情報入力画面の例



図-9 診断結果の出力画面例



図-8 損傷の進行度（状態）の推定結果の出力画面の例



写真-1 タブレット型PCにインストールした診断AIシステム

5.4 システムの開発状況

令和3年度までに、診断支援が可能な症例が限定されてはいるものの、当該症例であれば床版橋、桁橋、トラス橋など橋種の約9割が適用可能な診断AIシステムVer.1.0を開発するとともに、本システムの普及に必要な機能要件書（案）を作成した。

5.5 システムの普及イメージ

図-10に示すとおり共同研究で構築した診断AIシステムをコアシステムとして民間企業等に提供して、その民間企業等が独自機能を付加し利便性や使用性等を向上させた民間システムを開発・販売して世の中に普及させ、土木研究所が中心となって本システムによる診断結果を集約・保管しつつ新たな知見が得られたらコアシステムに反映して随時バージョンアップして行くことをイメージしている。この際、コアシステムにおける診断のフローチャートの分岐条件などを改変できないようにし、診断の内容がシステム使用者によって異なるようにすることを考えている。

6. おわりに

今後は定期点検の3巡目となる令和6年度以降に本格的な普及展開が図られるよう、点検調書等を活用したシステムの出力結果の検証や実際の橋梁を対象としたシステムの使用性の検証などを行い、実運用に向けた課題を見つけてシステムの改善を図るとともに、システムの対象橋梁・部材、損傷の種類を拡大することとしている。

また、本共同研究の令和3年度までの実施内容について報告書を取りまとめ、今年度中に公表することを予定している。

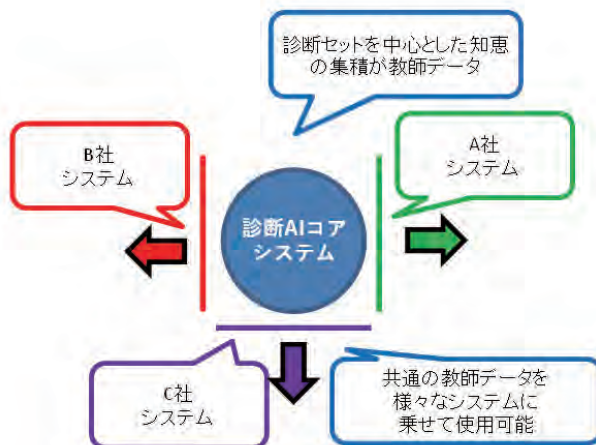


図-10 診断AIコアシステムを中心としたシステム普及イメージ

注釈

- (注1) 図-1の共同研究者のうち、診断AI開発グループ、点検AI（床版の土砂化等）開発グループについては構成事業者の一部により令和5年度まで共同研究期間を延長。
- (注2) 「診断」の用語は、メンテナンスサイクルの次のステップである措置に進むための判断であることから措置方法（処方）の所見を示すことを含めた意味で用いている。
- (注3) 点検要領において措置は、必要に応じて実施する調査結果に基づき、道路橋の機能や耐久性などの維持や回復を目的に監視や対策を行うことを指す。本稿でも同じ意味で「措置」を用いているが、具体の措置内容を決定する前に損傷の状況に応じた措置方針を設定することとしている。
- (注4) 「道路橋定期点検要領」（点検要領）において予防保全段階は、道路橋の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態と定義している。本稿では、道路橋の機能に支障が出る前の対策のみに限らず早い段階で損傷の原因を除去し元の状態に戻すこと等によりライフサイクルコストの低減や長寿命化を図る対策を「予防保全」としている。

参考文献

- 1) 澤田守、江口康平、石田雅博:道路橋の予防保全に向けた総合診断と診断AIシステムの研究開発、土木技術資料、第63巻、第10号、pp.8-11、2021
- 2) 藤木裕二、岩谷祐太、田中良樹、石田雅博:RC床版の土砂化の予防保全に向けた技術開発、土木技術資料、第63巻、第10号、pp.20-23、2021
- 3) 茂木正晴、二宮建、森川博邦:効率的な道路橋点検手法と点検AIシステムの研究開発、土木技術資料、第63巻、第10号、pp.28-33、2021

寄附講座『道路アセットマネジメント政策 (橋梁調査会) 講座』について (3箇年の総括)

国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 道路構造物機能復旧研究官
京都大学経営管理大学院 特命教授 玉越 隆史

はじめに

平成28(2016)年度から、京都大学経営管理大学院の「道路アセットマネジメント政策講座」は(一財)橋梁調査会の寄附による活動が開始されました。筆者は、3年間の第一期の活動を引き継ぎ、令和元(2019)年度から令和3(2021)年度末までの第二期の3年間、特定教授として他の先生方とともに講座の活動に携わりました。本稿では令和元年～3年までの第二期を中心に同講座の活動を振り返って報告させていただきます。

1. 背景と経緯

講座の第一期では、小林潔司教授(現京都大学名誉教授)中谷昌一特定教授(現一般財団法人日本デジタル道路地図協会専務理事)を中心に、第二次世界大戦後に急ピッチで整備が進められてきた我が国の道路橋をはじめとしたインフラ施設の高齢化に伴う急速な老朽化の懸念が増大しつつある状況を踏まえ、より高度で効果的・効率的なアセットマネジメント方策の立案および実践手法の確立を目指して、様々な調査研究活動が行われました。

特に京都大学経営管理大学院の特色である文理融合の体制を活かし、内外の広範な行政機関、大学、研究者などとも連携して、道路に関する実践的なアセットマネジメント手法に関する研究が精力的に進められました。第一期では、2014年1月に発効したアセットマネジメントの国際標準ISO 55000シリーズに準拠したアセットマネジメントシステムの開発のための研究が進められ、その一環として十分なデータのない開発途上国でも実装可能な劣化予測技術に関する研究も行われました。これら第一期の活動成果の一部は、学術論文¹⁾、²⁾として発表されるとともに、社会基盤施設のマネジメントに携わる官民の実務者あるいは研究者や学生にも幅広く参考とさせていただけるよう、一般図書「実践 道路アセッ

トマネジメント入門 ～継続的改善を実現するためのマネジメントの基本～³⁾として発刊されるなどにより社会に還元されています。

最近では、我が国のみならず世界的にも、自然災害の巨大化や多発化の疑いが指摘されるようになってきています。そして、道路アセットマネジメントの世界では、道路や道路構造物の公共財としての位置づけとその社会的重要性から、経年劣化や過去にも経験のある規模や種類の災害以外に、経験が乏しいかあるいは未だ経験したことのない大規模災害や不測の事態の発生による影響に対しても国土強靱化を図り、効果的な防災・減災を可能とするための方法論として、アセットマネジメントにおけるリスクマネジメントの考え方の導入が検討されるようになってきました。

第二期では、以上のような背景を踏まえて、第一期までの研究をさらに深化させるべく、国内外の近年の道路アセットに関するリスクマネジメントの取り組みと維持管理施策への反映の状況、国内でこれまでに道路アセットの機能に支障を及ぼした自然災害の発生状況と復旧までの経緯などの調査を行い、リスクマネジメントの概念を取り入れたインフラアセットマネジメント手法とその社会実装方策についての研究を重点的に行いました。

2. 第二期の研究活動

(1) 研究体制

研究は、筆者(特定教授)以外に、京都大学の河野広隆教授(～2020.3)(現京都大学名誉教授)、山本貴士教授(2020.4～)、小林潔司教授(京都大学名誉教授、2020.3～特任教授)、青木一也客員准教授(株式会社パスコ)、田村敬一特命教授(現株式会社社長)、中谷昌一特命教授が中心となり、各種団体等との共同研究への参画や研究会の実施など様々な形で産官学の連携体制も構築して実施しました。

(2) 研究内容と成果

1) 研究の概要

インフラでは、多くの場合それを構成する様々な施設や構造物が協働してはじめてインフラとしての役割を果たすことができます。道路の場合にも、交通機能だけでなく防災減災への貢献、暮らしの安全安心といった様々な社会的役割を有していることが通常ですが、道路がそれらの役割を果たすためには、区間や路線の単位ごとに道路を構成している、道路橋、トンネル、カルバート、シェッド、盛土、切土斜面などの様々な構造物が所要の耐荷性能などの物理的性能を有していることが前提となります。

そのため、インフラとしての道路機能に着目し、道路としての性能水準を保証するためには、それを支える多岐多様な構造物が有する物理的性能が調和してはなりません。例えば、地震などの災害時に路線や区間の一部で構造物の被災による交通機能の喪失が生じると、その構造物の範囲だけでなくその路線や区間の単位で道路機能を喪失することになります。そのため、道路構造物のアセットマネジメントでは、道路を施設ごとのメンテナンスの合理化やライフサイクルコストの低減では実現が困難な、道路ネットワークというインフラとしての性能の水準を意図したレベルに保つための意思決定の最適化には、多種多様な施設が混在するインフラに対して、施設相互の物理的性能の調和を図り、かつインフラが担う社会的役割に対応したインフラとしての性能あるいは機能の状態を俯瞰できるアセットマネジメントの方法論が必要となります。

これらを踏まえて、講座では主に以下の3つの研究テーマに取り組みました。

- ①道路機能に立脚した道路構造物の状態評価手法の開発
- ②リスクマネジメントの概念を取り入れたインフラアセットマネジメント手法の開発
- ③道路アセットマネジメントの高度化のためのデータシステムの検討

なお、研究にあたっては、先端の技術情報と社会実装のための条件を確実に反映するために、国の研究機関である国土技術政策総合研究所とともに産官学からなる研究体制を構築し、それらと密に連携して研究を推進しました。具体的には、維持管理に多

大なコストと高度な技術力が不可欠な長大橋やケーブル系の橋梁に対する合理的なアセットマネジメント手法の検討に取り組む「特殊橋・長大橋のマネジメントに関する共同研究」(国土技術政策総合研究所、本州四国連絡高速道路株式会社、京都大学経営管理大学院、京都大学大学院、大阪大学大学院、国立研究開発法人土木研究所、東京製鋼(株)、神鋼線工業(株))および、上記の主たる研究テーマを網羅した「既設道路橋群の維持管理計画の継続的改善に関する共同研究」(国土技術政策総合研究所、京都大学経営管理大学院、大阪大学大学院、(一社)建設コンサルタンツ協会、京都府、茨城県)です。

2) 性能保証型インフラアセットマネジメントの提案

道路というインフラは、基本的に安全円滑な交通を確保するためのものです。そして、その道路としての性能あるいは機能は、橋梁やトンネル、カルバート、盛土、シェッドなどの構造物や切土斜面など様々な人の手が加えられたものによって支えられています。そのため、道路というインフラの性能に着目するとき、それを構成する構造物等が発揮する耐荷性能などの物理的性能は、求められる道路機能を満足できるかどうかの観点でうまく調和していることが望まれます。写真は地震の際にある道路区間で同時に発生していた被災状況を示しています。土工部の不陸、橋梁部の段差、橋梁部材の損傷、落石や斜面崩壊など多様な被害が発生していますが、そのそれぞれが道路機能(通行可能重量、通行可能幅員、通行可能速度)に及ぼす影響も、その回復に要する時間もまたばらばらで一様ではありません。そもそも、それぞれの構造物や区間の整備に用いられた設計基準などの技術基準が整備時点で目標とした耐荷性能や被災後の復旧性などの物理的な性能が同じものとはなっていないこともありますし、点検診断時の耐荷性能や被災リスクに対する評価にもばらつきがあることが避けられないのが現状です。その結果、想定災害時に道路のどの区間がどのような障害を生じるのかを事前に推定することは現状では原理的にも難しく、何らかの災害を想定したとしても、道路ネットワークを構成する構造物などに対する補修や補強あるいは機能向上といった措置の必要性や優先度の決定を、道路機能障害による影響の最小化といった観点で俯瞰して最適なものとするのは容易ではありません。



写真-1 過去の地震時に同じ路線区間で見られた構造物等の変状

そこで、講座では、過去の地震や豪雨における被災事例を用いて道路構造物の被災形態と道路機能の障害の関係についての分析を行い、現在得られる構造物の様々な情報から道路機能の障害の発生可能性の大小を推定できるかどうかについても研究を進めました。

具体的には、リスクマネジメント手法を応用し、図-1に示すようなフローに従って、整備年代、構造種類および形式、劣化等の供用時からの状態の変化、立地条件など現在あるいは今後DX環境が整うことで容易に組み合わせることができるようにすると想定される情報を組み合わせることで、段階的に道路機能に及ぼす影響の推定が行えるかどうかを検討しました。検討では、過去からの技術基準類の変遷内容の分析やこれまでの被災事例から構造諸元と被災可能性の大小の傾向分析、被災報告書などからの原因の推定なども行いました。

なお、道路構造物のそれぞれに付随する情報から道路性能を評価しようとするとき、既存の道路構造物は、供用後に様々に劣化や損傷による状態の変化が生じていますので、その影響も考慮しなければなりません。一方で、劣化や損傷による変状が構造物の耐荷性能などの物理的性能に及ぼす影響は千差万別ですのでこれらを正確に考慮することは極めて難しいのが現実です。しかし、これらを考慮しなければ結局、道路性能の推定結果そのものが徒に信頼性の低いものになってしまうことは間違いありません。そのため道路リスクの評価では、各構造物の最新の状態をできるだけ正確に把握するとともに、それらが性能の推定に反映されるような仕組みを取り入れなければなりません。現在、日本の主な道路構造物は法令に基づく5年毎の定期点検で状態把握が行われていますので、少なくともそこで得られる情報をリスクアセスメントにあたっての構造

物の物理的性能の推定に反映させるとともに、被災実績などから明らかになる推定の限界や実際との乖離について推定手法の改善にフィードバックするというプロセスを繰り返していくことが現実的と考えられます。

このように、できるだけ多くの情報を構造物や道路の性能の推定に反映させることが重要ですが、例えば現在の道路構造物の法定点検では全般的な評価としての「健全性の診断」を行って、その結果が記録されるものの、今後想定される災害などの状況において、各構造物が具体的にどのような状態に至る可能性があるのか、さらには、その結果としてその区間の道路機能がどのように影響を受ける可能性があるのか、といった所見までは作られないことが一般的と考えられます。その場合、道路機能に及ぼす影響の推定の根拠となる変状などの情報があるような評価を行う前提では十分に得られていない可能性が高く、このままでは将来の道路リスクの推定に有益な情報が蓄積されないことも危惧されます。

そこで、研究では、一定の根拠をもって道路性能の評価の拠り所となる構造物の物理的性能の推定が

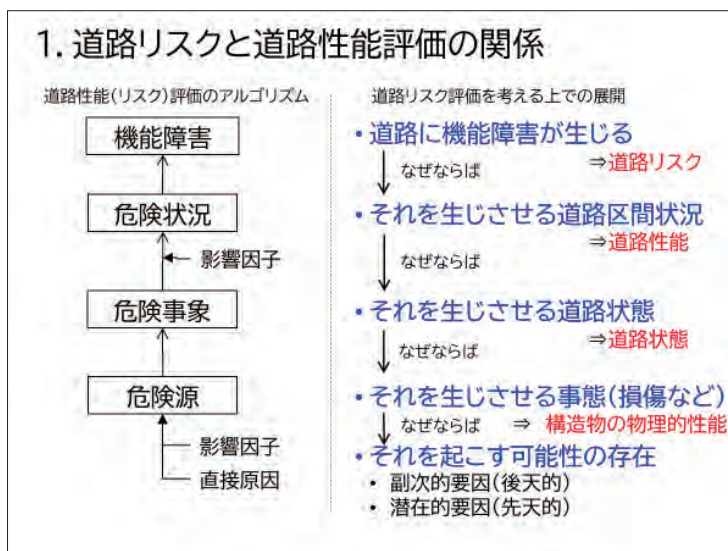


図-1 道路性能(リスク)の算出フローの例

行えるために必要な点検診断時の記録内容と記録方法についても検討を行いました（図-2）。具体的には代表的な橋梁形式からサンプルを抽出して、点検記録に残る所見と記録から推測される耐荷性能の関係などの分析を行いました。その結果、例えば、道路橋の場合には、H29年の道路橋示方書に反映されている設計時の耐荷性能照査ロジックと同様の考え方で、対象橋梁の現在の耐荷機構を反映した耐荷性能診断ロジック（図-3）を仮定し、それらに沿って橋全体の構成要素ごとにその耐荷性能を診断して所見を積み上げていくことで一定の診断品質が確保できる可能性があることがわかりました。

このように供用後の耐荷性能の診断と設計における耐荷性能の評価で基本とする工学的根拠の共通化は、新設から既設まで様々なフェーズにある構造物で構成される道路の性能の信頼性の高い評価には不可欠ですが、さらに同じ道路機能を支える多種多様な構造物相互の物理的性能もまた相対比較できなければなりません。講座では、このような同じインフラ機能を支える構造物等の物理的性能がライフサイクルを通じて相対比較できる評価体系に支えられたインフラ性能のマネジメント体系（図-4）を性能保証型インフラアセットマネジメントと名付けて提案を行うとともに、その実現性と課題について明らかにしました。

なお、インフラアセットマネジメントの目標は、突き詰めるとその機能障害による社会的影響の低減などの社会的要請の実現といえます。このとき、そのようなアウトカムは道路を例にとると、様々な原理で物理的性能や機能を発揮する構造物の状態というアウトプットによって実現することになりますが、アウトプットとアウトカムの対応関係は複雑であり、両者を厳密に整合させることはおろか、両者の整合性を評価する方法が確立していません。しかし、アセットマネジメントが所要の成果を挙げているのかどうか、何らかの形で評価できなければ、インフラの整備や維持への投資の妥当性のチェックもアセットマネジメントの最適化に向けた改善も十分に行えないかもしれません。そこで、講座では、様々な形態や手段をとる内外のインフラ統治の機構や関連の社会制度についての調査を行い、特にリスク情報のアセットマネジメントにおける活用方策の海外事例調査（図-5）、アウトカムベースのマネジメントとアウトプットの関係づけの

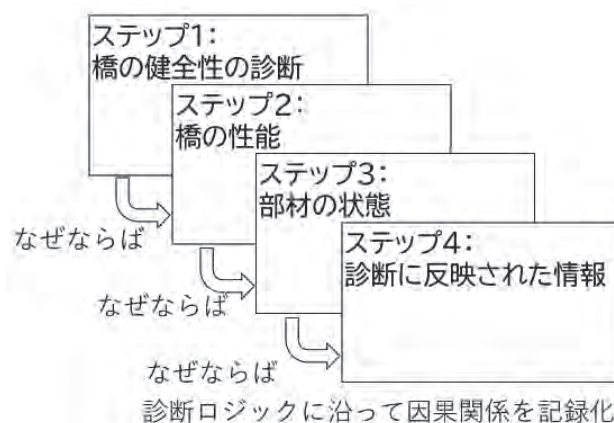


図-2 診断根拠の記録化手法

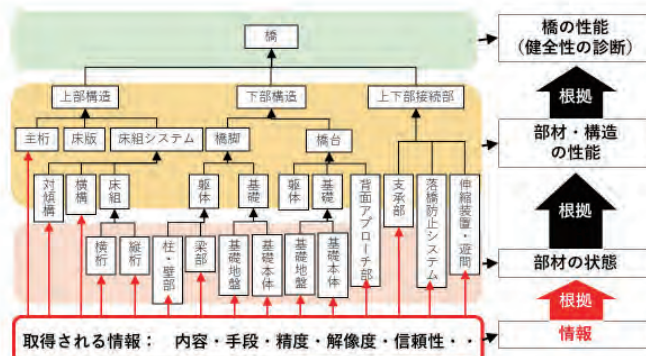


図-3 耐荷性能診断ロジックのイメージ

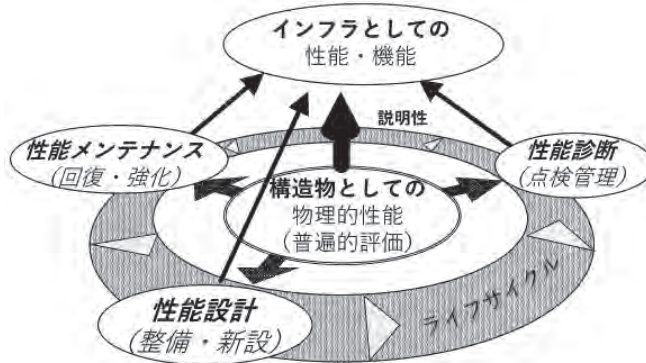


図-4 性能保証型インフラアセットマネジメントの概念

鍵と考えられるインフラの資産価値評価の在り方についての検討を中心に行いました⁴⁾。

3) 成果の公表と普及活動

講座の大きな目標の一つは、道路ネットワークを支える道路構造物群のアセットマネジメントを道路性能の観点から最適化できる方法論を見出すことですが、講座の検討で得られた知見を速やかに社会に還元することも実践的課題に取り組む講座の位置づけからは重要なことと考えました。そのため、講座

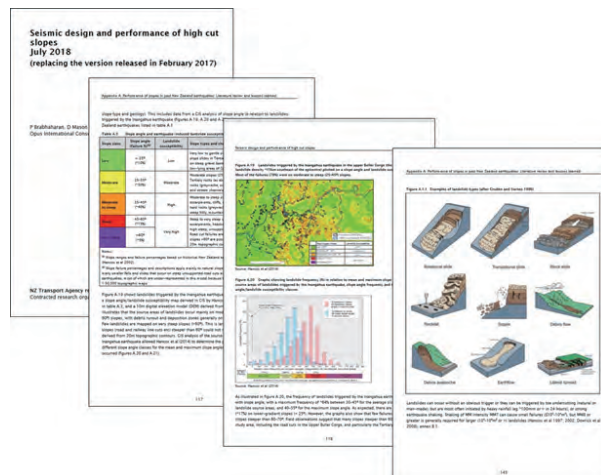


図-5 海外の道路インフラを対象としたリスク評価手法の検討事例^{5) 6)}

では二期目の発足当初の2019年6月18日に、前期の成果を中心に「アセットマネジメント技術講習会2019 — 次世代アセットマネジメント実装そして展開へ —」と題して公開の技術セミナーを対面形式で行ったのを皮切りに、道路管理者や学協会の講習会などでも検討状況を発信しました。そして、2022年2月22日には、今期のとりまとめとして、公開技術セミナー「性能保証型インフラアセットマネジメントの実現に向けて」を開催しました(図-6)。セミナーは、新型コロナウイルスの蔓延状況を考慮するとともに、できるだけ多くの方にアクセスしてもらえるようにウェビナー形式で行いました。また、社会人の多くが平日の昼間の参加には制約があることにも考慮して、事前参加登録者にセミナー動画の録画配信も行いました。結果的にセミナーには当日参加412名、録画視聴回数683回という多くのご参加をいただくことができ、研究テーマに対する関心の高さをうかがい知るとともに、講座成果の普及に大きな効果があったと考えています。

また、本講座で提案した「性能保証型インフラアセットマネジメント」の全体像とその意義について、学生から実務者あるいは関連の研究者などにも広く知っていただけるよう、一般図書としてとりまとめています。本稿が掲載される頃には発刊されていることとします⁷⁾。

4) その他の研究と成果

それぞれの施設や構造物が実質的には半永久的ともいえる極めて長期の供用を余儀なくされるインフラのアセットマネジメントの実践にあたっては、耐久性の向上と信頼性の確保はその成否を左右する重要な鍵を握ることになります。講座では、信頼性の



図-6 技術セミナー 2022.2の告知ポスター



図-7 性能保証型インフラアセットマネジメント

高い維持管理が特に求められる一方で、点検困難箇所となっている斜張橋や吊り橋のケーブルとケーブル定着部に着目して、国立研究開発法人土木研究所や本四高速道路株式会社などとも連携して、被覆内環境の評価手法の検討や、維持管理性の向上と耐久性の確保、ライフサイクルコストの縮減という3つの課題を高い次元で成立させる防食システムの実現性についての検討なども行いました^{8) 9)}。それぞれが大きく異なる構造をもつ施設からなる合理的なインフラの性能保証の実現のためには、耐久性向上とその信頼性の確保の方向性についてクリアすべき条件や最低限考慮されなければならない事項を明らかにすることで多くの改善余地が残されていることを示す結果が得られたと思います。なお、ケーブル定着部の防食手法の検討の一部は、株式会社ジャバラからの申し出を受けて同社と講座の共同研究として実施しました。

3. 道路アセットマネジメントにかかる今後の展望と期待

2期6年にわたって、(一財)橋梁調査会のご寄附によって活動させていただきました道路アセットマネジメント政策講座では、多くの成果を得ることができました。

一方で、提案を行ったリスクマネジメントの概念を取り入れた性能保証型インフラアセットマネジメントが本格的に社会実装されるためには、提案を構成している構造物点検の性能規定化方法、構造物性能の道路性能に基づくリスクに着目した状態評価方法、ライフサイクルコストの統一的评价手法などについてのさらなる検証とブラッシュアップも不可欠です。特に近年は、DX、x-Roadなど道路アセットマネジメントを取り巻く環境も急速に変化しつつあり、今後もさらに急速に変化しつづけることも予想されます。そのような中であって、将来を的確に予測して先進的かつ継続的改善が約束された実践的なマネジメントを行うための方策の社会実装には、普遍的な方法論や業務実施体系の確立とその実践を支える技術開発の両方を着実に進めなければなりません。

京都大学経営管理大学院の「道路アセットマネジメント政策講座」は、令和4年度から新たな体制で再スタートを切っています。そして、第一期で特定教授を務められた中谷昌一博士とともに当方も特命教授として引き続き講座の活動に参加しています。

(一財)橋梁調査会のご寄附で活動した二期6年間で得られた成果の普及と残された課題の解決、さらには性能規定型アセットマネジメントのさらにその先を展望した道路アセットマネジメント政策に係る研究の推進に微力ながら協力していきたいと思っています。

参考文献

- 1) 小林潔司、中谷昌一、大迫湧歩、安部倉完:橋梁の劣化速度の異質性を考慮した補修戦略プロファイリング、土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 73, No. 4, pp. 201-218, 2017.5
- 2) 小林潔司、中谷昌一、Nam Toan To、大迫湧歩、青木一也、安部倉完、Dinh Thao NGUYEN:建設時点の不完全性と橋梁劣化予測:ベトナムを対象として、土木学会論文集 F5 (土木技術者実践), Vol.75, No.1, pp22-41, 2019
- 3) 小林潔司編著、中谷昌一、玉越隆史、青木一也、竹末直樹:「実践 道路アセットマネジメント入門～継続的改善を実現するためのマネジメントの基本～」、コロナ社、2019.4
- 4) 竹末直樹、玉越隆史、小林潔司:アセットマネジメントにおけるインフラの資産価値評価に関する一考察、土木学会論文集 (投稿中)
- 5) 米国連邦道路庁の道路リスク評価に関する検討報告書「Risk-Based Transportation Asset Management, Building Resilience into Transportation Assets」(<https://www.fhwa.dot.gov/asset/pubs/hif13018.pdf>)
- 6) ニュージーランド運輸庁の研究報告書「Seismic design and performance of high cut slopes July 2018」(<https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/613/613-Seismic-design-and-performance-of-high-cut-slopes-revised.pdf>)
- 7) 玉越隆史著:「性能保証型インフラアセットマネジメント ～道路と道路橋のリスクマネジメント～」、コロナ社 (2022.10)
- 8) 坂本佳也、玉越隆史、上仙靖、山本健太郎、峰穂高「PE被覆ケーブルの内部環境の把握に関する研究」土木学会構造工学論文集Vol.66A, 2020.3
- 9) 小川祥、玉越隆史:点検・保守・交換の維持管理性に優れた橋梁用開閉式ケーブルカバーの開発、土木学会年次学術講演会講演論文集[I-50]、土木学会, 2022.9

位相空間分析と機械学習を応用した コンクリート打音検査法の高度化の試み

東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 特任講師 竹谷 晃一

1. 研究の背景・目的

約72万橋の橋梁のうち、7割以上となる約51万橋が市町村道にあり、その適切かつ効率的な維持管理が求められている。コンクリート構造物の高齢化はコンクリート片の落下等による重大な第三者被害を防ぐために定期点検を行う必要がある。コンクリート構造物の空隙・剥離の非破壊検査の一つに打音検査があり、実務で幅広く使われている。ハンマーの打撃で生じる音や振動から欠陥を診断するが、検査員の練度に依存する。少子高齢化に伴う熟練検査員の減少によって人員確保や技術継承が難しくなることが指摘されている。

これまでも打音検査の定量的評価やロボットによる自動化を目的として、打撃時の振動応答をマイクや振動センサ等で計測・分析してコンクリート内部の欠陥を検知する打音法が行われてきた。構造物に合わせたガイドフレームを搭載した走行式装置やUAV (Unmanned Aerial Vehicle) などのロボティクス技術への期待が高まっているが、機器のコストや操作、運用方法の構築など地方自治体での導入のハードルも高い。検査の定量化や自動化に関する研究開発が進む一方で、検査員による従来の打音検査を代替・補助するには検査時間やコスト、導入しやすさに課題がある。

一方、深い箇所の空隙については検出が難しく、空隙の深さが10cm近くになると熟練者による通常の打音法でも検出は容易ではない。深い欠陥に対する欠陥の検知性能向上には、計測データ中のノイズ量、すなわちS/N比の改善と分析手法の改良が挙げられる。S/N比の改善方法には、環境ノイズの削減やセンサ精度向上、打撃力増大が挙げられる。ロボットを用いた打音法では打撃力増大が有効であるが、人による検査では難しい。

近年注目されている機械学習は、入力データを学習して結果を推定する複雑なモデルを構築するものである。コンクリート構造物の打音法は、推定結果

の根拠や解釈も信頼性の観点で重要である。振動論に基づく時間・周波数解析等による特徴量分析に加えて、近年では機械学習で推定モデルを構築する研究が進められている。例えば教師なし学習の自己組織化マップ¹⁾ やパターン認識²⁾、教師あり学習では弱学習器のアンサンブル学習³⁾ やニューラルネットワーク⁴⁾ などの機械学習を用いて欠陥検知を行う方法がある。しかし、深い欠陥の検出は健全部との差異がほとんど生じないため、外れ値を利用する教師なし学習やランダムフォレストのような弱学習器は困難な可能性が高い。既往の打音法の実践に基づく計測データの特徴抽出と、そこから結果を推定するための適切なモデル構築を組み合わせることが重要といえる。そこで本研究では、音圧振動の微小変化を高感度で検知するため、位相空間分析に着目する。

以上より本研究は、深さ10cm程度までの比較的深い空隙欠陥を対象として、検査員による作業を前提とした打音法のための分析方法を提案する。マイクロフォンによる打音応答の計測・分析によって打撃位置の健全・欠陥の検出することで打音検査の定量化と効率化を目指す。はじめに、時間・周波数領域の様々な特徴量に加えて、位相空間分析による新たな特徴量を導入し、その評価と選択を行う。選定した特徴量から結果を推定するモデルとしてニューラルネットワーク (Neural Network、NN) を構築・学習し、欠陥検出精度の向上を試みた。

2. 対象試験体および実験概要

実験対象としたコンクリート壁の試験体は、杉本らが実験で用いた円形欠陥モデル⁵⁾ である。外観写真を図-1に示す。試験体には円盤状の発泡スチロール (厚さ25mm) を埋設した人工的な空隙があり、深さや直径がそれぞれ異なる。データ収集のトリガーおよび衝撃荷重を計測するためにインパクトハンマーを用いた。使用した計測機器のリストを表-1に、試験体と騒音計の配置の概略図を図-2に示す。

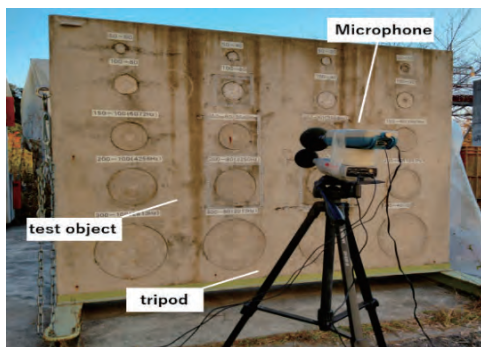


図-1 円形欠陥モデルとマイクロフォンの設置

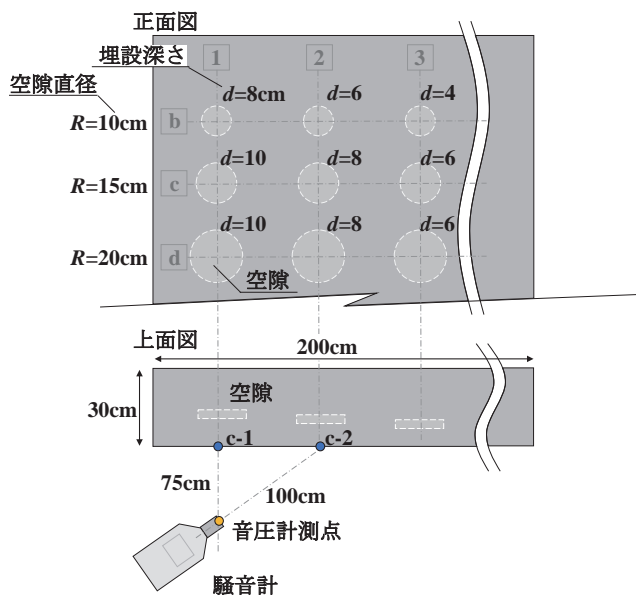


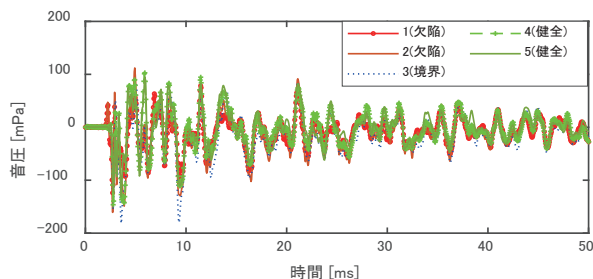
図-2 試験体の概略と騒音計の配置図

本研究では騒音計を三脚で固定して打音を計測しているが、将来的には小型マイクのウェアラブル化を視野に入れており、検査員の作業性を考慮して音圧計測点と打撃位置の距離は1m前後とした。例えばR20-d08は直径 $R=20\text{cm}$ の空隙を深さ $d=8\text{cm}$ に埋設されており、試験体上の座標はd-2 (d行2列) である。打撃位置は中心を基点として同心円状に半径を5cmずつ大きくした円を描いて、その円と円との範囲内をランダムに20秒間ずつ打撃した。試験体の埋設空隙の種類と計測データの内訳を表-2に示す。打音応答の計測データの一例を図-3に示す。

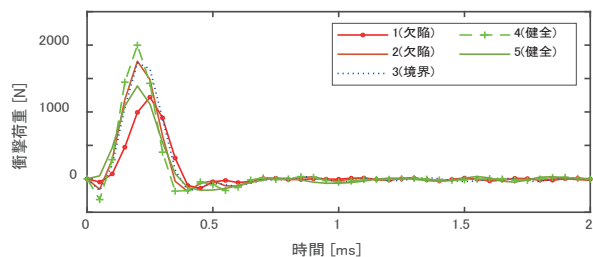
直下に空隙がない打撃位置は「健全」、空隙がある打撃位置は「欠陥」としたラベル名をつける。また、後述するが欠陥部と健全部の境界 $\pm 5\text{cm}$ の範囲を打撃したデータを学習に用いると精度が低下しやすいことから、学習データには用いないこととしている。一方、診断結果を評価する時には境界付近も含めたデータで評価を行う。本研究は、可聴域を利用した

表-1 計測機器の諸元

データロガー	NR-600 (KEYENCE)
アナログ計測ユニット	NR-HA08 (KEYENCE)
マイクロフォン (騒音計)	LA-3560 (小野測器)
インパクトハンマー	PCB-086D05 (PCB)
鋼製チップ	-
シグナルコンディショナ	480E09 (PCB)



(a) 音圧の時刻歴波形



(b) 衝撃荷重の時刻歴波形

図-3 R20-d08周辺部における計測データの例

表-2 対象の模擬欠陥と計測データ数の概要

模擬欠陥	直径	深さ	取得データ	有効データ
R05-d02	5cm	2cm	334	170
R05-d04	5cm	4cm	355	180
R05-d06	5cm	6cm	422	250
R10-d02	10cm	2cm	353	180
R10-d04	10cm	4cm	426	261
R10-d06	10cm	6cm	420	240
R10-d08	10cm	8cm	354	207
R15-d04	15cm	4cm	205	134
R15-d06	15cm	6cm	262	173
R15-d08	15cm	8cm	341	223
R15-d10	15cm	10cm	384	248
R20-d04	20cm	4cm	410	255
R20-d06	20cm	6cm	450	252
R20-d08	20cm	8cm	440	264
R20-d10	20cm	10cm	495	318
R30-d04	30cm	4cm	674	281
R30-d06	30cm	6cm	687	396
R30-d08	30cm	8cm	685	473
R30-d10	30cm	10cm	793	504

通常の打音検査と同様に、欠陥部が面外に振動する数kHzまでのたわみ振動を計測するため、サンプリングは50kHzとした。

3. 位相空間分析および特徴量の算出と選定

位相空間分析は、通常の振動計測で得られる時刻歴波形を空間領域に変換することで特に周期的な変化を拡大できるため、構造物の劣化損傷による振動応答の微小な振動数変化を敏感に検知できるといわれている⁶⁾。そこで、打音法による音の振動応答にも位相空間分析を導入して、その特徴量を用いることで検出感度を向上できると考えた。

(1) 位相空間分析について

位相空間の構築は、遅延座標と埋め込み次元に基づいて生成できる。N個のデータ (i = 1, ..., N) の時系列x (i) の測定データから、図-4のように位相空間に変換される。

ここで、Tは遅延時間、dは埋め込み次元とすると、各次元の要素ベクトル (X (1)、X (2)、...、X (N)) は、以下の式 (2) のように表すことができる。

$$\begin{aligned} X(1) &= [x(1), x(2), \dots, x(N - (d - 1)T)] \\ X(2) &= [x(1 + T), x(2 + T), \dots, x(N - (d - 2)T)] \\ X(N) &= [x(1 + (d - 1)T), x(2 + (d - 1)T), \dots, x(N)] \end{aligned} \quad (1)$$

この際に使われる遅延時間 T と埋め込み次元 d は適切な処理から求める必要がある。遅延時間 T は平均相互情報量 (Average Mutual information) の最初の最小ピーク点を使用する。埋め込み次元dはFalse Nearest Neighbors (FNN) アプローチの最小値からとる範囲が決定できる。本研究では遅延時間T=20サンプル、埋め込み次元d=7とした。

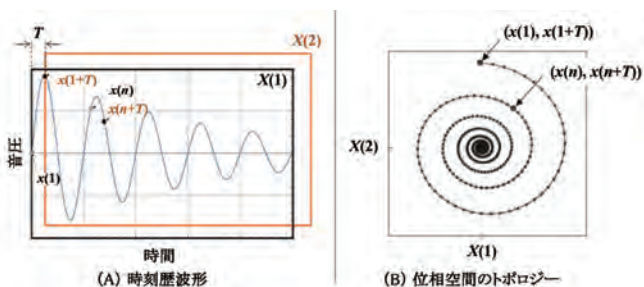


図-4 時刻歴波形から位相空間への変換

(2) 位相空間の特徴量

本研究で位相空間の特徴量として用いたものは、重心運動 (Centroid Movement: CM)、CPST (Change of Phase Space Topology)、Δ CPST (Delta CPST) である。以上の特徴量の求め方を次に記述する。

(a) CM

重心運動 (CM) 重心運動とは、トポロジー重心を追跡して運動を観察するもので、各トポロジーの重心は式 (2) に示すように、各次元の距離の平均値から決定できる。

$$CM = \sqrt{\bar{X}(1)^2 + \bar{X}(2)^2 + \dots + \bar{X}(d)^2} \quad (2)$$

(b) CPST

CPSTの概念は、トポロジーに基づいて計算された健全状態との損傷状態の差を測定することである。健全部のトポロジーがX (n) であり、損傷状態の位相空間トポロジーがY (n) であると仮定する。参照トポロジーに基づいて、このポイントの最も近いp個の近傍点が次の式 (3) のように選択される。

$$X(p_j): \min \|X(p_j) - Y(r)\| \quad (3)$$

ここで、X (p_j) は基準点Y (r) に最も近い近傍を示す。損傷状態のステップsの値は、次のステップsでの健全部の近傍の平均値から予測できる。これを以下の式 (4) に示す。

$$\hat{Y}(r + s) = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p X(p_j + s) \quad j = 1, \dots, p \quad (4)$$

次に、基準点時点指数rによる損傷状態と予測損傷状態の差は、次の式4.14のように計算できる。

$$CPST_r = \frac{1}{p} \|\hat{Y}(r + s) - Y(r + s)\| \quad r = 1, \dots, N_f \quad (5)$$

データ数をNとすると、N_f = N - (d - 1) T - sとなる。sステップ後のY (r+s) を求める際に、最近傍pおよびsの適切な数は、それぞれ10⁻⁴ < p < 10⁻³ および 1 < s < T/2 として提案されている。CPSTは、これらの差の平均値から次の式4.15のように計算できる。

$$CPST = \frac{1}{N_f} \sum_{r=1}^{N_f} CPST_r \quad (6)$$

(c) $\Delta CPST$

CPSTの変化率である $\Delta CPST$ は次式のように求められる。

$$\Delta CPST(i) = \frac{CPST^i - CPST^{ref}}{CPST^{ref}} \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

ここで、 $CPST^i$ は損傷部におけるCPST値、 $CPST^{ref}$ は健全部のCPST値である。本研究では直径と深さ、状態（欠陥または健全）別に求めた。例えばR20-d08ではトポロジーの基準値 $X(n)$ は健全部の平均的な波形とし、 $Y(n)$ はR20-d08の欠陥部、R20-d08の健全部とし、 $\Delta CPST$ を計算した。

図-5は欠陥部と健全部の打音応答のうち、3～3.5kHzの周波数成分に着目して描いた位相空間のトポロジーである。健全部ではトポロジーが円に近い形状をしているが、欠陥部では楕円が傾いたような形状になる傾向がみられる。そのため、ある健全部のトポロジーとの差を表す $\Delta CPST$ は欠陥部では大きくなると考えられる。

(3) 特徴量の重要度評価

筆者らの既往研究⁷⁾を参考にして、打音応答波形から得られる特徴量の重要度評価を行った。カイ二乗検定、Minimum Redundancy Maximum Relevance (MRMR)、ReliefF、近傍成分分析 (Neighborhood Component Analysis、NCA) による特徴選択アルゴリズムの特徴量の重要度スコアまたは重みを計算した。このほか、線形判別分析 (Linear Discriminant Analysis、LDA) モデルのデルタ閾値、決定木のアンサンブル分類の予測子重要度の計算を行った。使用した6つの特徴選択アルゴリズムの概要を表-3に示す。ReliefFアルゴリズムによる評価値の計算では試行毎に最近傍の個数を3、6、9、12、15と変更し、それぞれのモデルに対する予測子の重みの中央値を評価値 E とした。近傍成分分析および線形判別分析モデル、決定木のアンサンブル分類では計算試行毎に結果が異なる。そこで、計算を複数回実行してその中央値を評価値 E とした。決定木のアンサンブル分類は50本のランダムフォレストとしている。特徴量の評価値を統合するため、それぞれのアルゴリズムの評価値をその最大値で除すことで正規化する。

$$\bar{E} = \frac{E}{\max(E)} \quad (5)$$

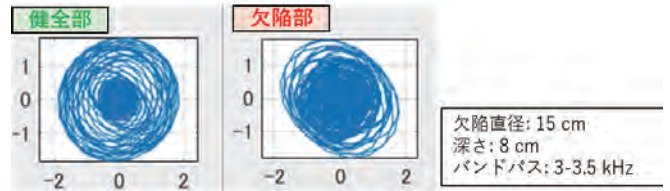


図-5 打音応答の位相空間トポロジーの例

表-3 特徴選択アルゴリズムの概要

アルゴリズム	MATLAB関数名	試行回数	評価値 E
カイ二乗検定	fscchi2	1	予測子スコア $-\log(p) > 0$
MRMR	fscmr	1	信頼度スコア: ρ $0 < \rho < 1$
ReliefF	relief	5	重み: $w > 0$
近傍成分分析	fscnca	100	重み: $w > 0$
線形判別分析モデルの閾値	fitdiscr	100	デルタ 閾値: δ $\delta > 0$
決定木のアンサンブル分類	fitcensemble	50	予測子重要度 $-dj/\sigma_j > 0$

表-4 特徴選択アルゴリズムによる特徴量のランク付け結果 (位相空間特徴量の有無の比較)

順位	位相空間特徴量あり	位相空間特徴量なし
1	$\Delta CPST$ (3.5-4kHz)	スペクトル面積 (1.5-2kHz)
2	スペクトル平均高 (2.5-3kHz)	インパルス最大高
3	スペクトル重心周波数 (3.5-4kHz)	スペクトル平均高 (2-2.5kHz)
4	スペクトル面積 (1.5-2kHz)	スペクトルピーク平均高 (1.5-2kHz)
5	スペクトルピーク平均高 (1.5-2kHz)	音圧実効値 (2-2.5kHz)
6	音圧実効値 (2-2.5kHz)	時間波形面積 (2-1.5kHz)
7	スペクトル平均高 (1.5-2kHz)	音圧実効値 (0-0.5kHz)
8	時間波形面積 (2-2.5kHz)	音圧実効値 (4-4.5kHz)
9	$\Delta CPST$ (2.5-3kHz)	音圧実効値 (2.5-3kHz)
10	音圧実効値 (2.5-3kHz)	スペクトルピーク平均高 (2-2.5kHz)
11	スペクトル重心周波数 (2-2.5kHz)	スペクトル重心周波数 (2-2.5kHz)
12	スペクトル平均高 (0.5-2kHz)	スペクトル平均高 (0.5-2kHz)
13	スペクトルピーク平均高 (1-1.5kHz)	時間波形面積 (3-3.5kHz)
14	スペクトル平均高 (2-2.5kHz)	スペクトル最大高 (2.5-3kHz)
15	スペクトル平均高 (1-1.5kHz)	スペクトル最大高 (3.5-4kHz)

ここで \bar{E} は正規化した評価値である。アルゴリズム毎に評価値を正規化しているため評価値は0から1の範囲であるが、特長選択アルゴリズムによって評価値の分布は異なる。そこで平均値の逆数で重み付けすることでアルゴリズム間の評価値を調整し、その合計値を特徴量の重要度 E^* として順位付けを行った。

$$E^* = \sum_a \left(\frac{n\bar{E}}{\sum_n(\bar{E})} \right) \quad (6)$$

ここで a はアルゴリズムの数、 n は特徴量の数である。検討した全57個の特徴量の重み付け順位のうち上位15個を位相空間特徴量を含めるか否かで2つに分けて表-4に示す。位相空間の特徴量を含むパラメータの評価では、位相空間特徴量である $\Delta CPST$ が特徴量の重要度が最も高い結果となった。このほか、周波数2.5-3kHzや3-3.5kHzの特徴量の重要度が高い評価される傾向が見られた。

4. ニューラルネットワークの構築と検証

(1) ニューラルネットワークの構築

本研究では打音応答の時刻歴波形から抽出した特徴量を入力パラメータとするため、全結合ニューラルネットワークを用いた。重要度が高い特徴量を全結合層によって処理し、ソフトマックス層で2値化して欠陥・健全に分類するものである。全結合層の数が大きくなるほど複雑なモデルを構築できるが、学習データへの適合が過剰となる過学習が生じやすくなる。そこで、過学習を抑えて分類精度を向上することを目的として、ニューラルネットワークの構造と学習条件を試行錯誤した。全結合層の数のほか、学習関数やミニバッチサイズ、学習率についても試行錯誤で検討を行い、図-6に示す構造のニューラルネットワークを構築した。ニューラルネットワークの構成内容を表-5に示す。

(2) 欠陥検出の検証結果と考察

位相空間を用いた場合、欠陥部の中心直上（領域1）における欠陥検出率は欠陥深さ4～10cmすべてにおいて8割以上であった。健全部の直上（領域6）では健全の正解率が欠陥深さ4～10cmすべてにおいておおよそ8割以上であった。一方、欠陥部と健全部の境界付近（領域3、4）での正答率は、ほかの領域に比べて低い結果となった。

位相空間の特徴量を入力パラメータに含めない

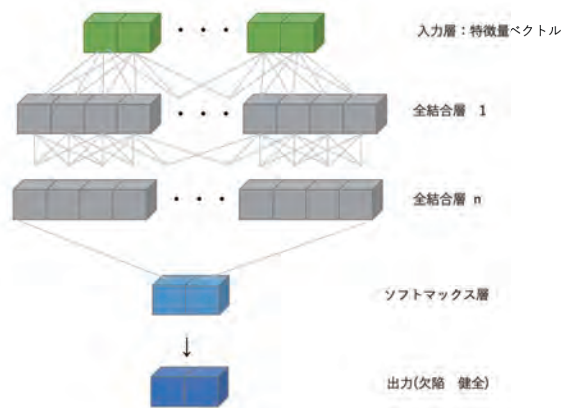


図-6 ニューラルネットワークの概要

表5 ニューラルネットワークの構成内容

層数	入力層：1 全結合層：4 出力層：1
活性化関数	全結合層: Tan-Sigmoid 出力層: Softmax
学習関数	SGDM
ミニバッチサイズ	256
学習率/モーメントム	0.0015/0.09
学習終了条件	分類精度0.9に到達
損失関数	交差エントロピー
入力データ	特徴量ベクトル (25)
出力データ	欠陥/健全 (2)

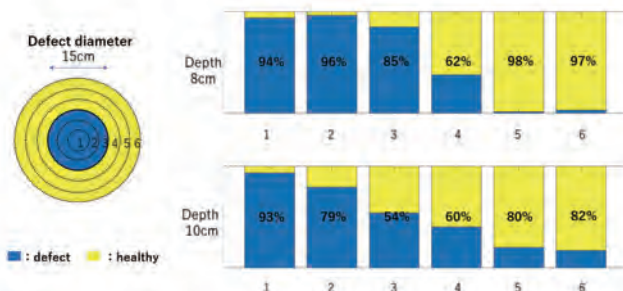


図-7 位相空間特徴量を含む場合の分類結果 (対象欠陥部: R15-d08 および R15-d10)

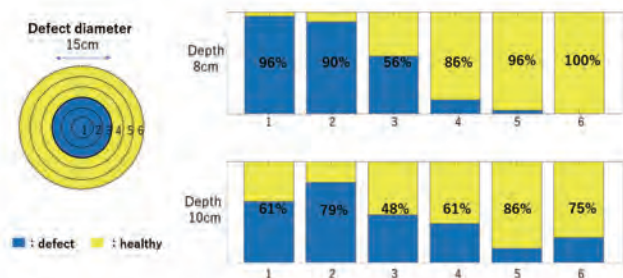


図-8 位相空間特徴量を含めない場合の分類結果 (対象欠陥部: R15-d08 および R15-d10)

ケースでは欠陥の検出率は高いが、健全の評価を適切に行えておらず、欠陥の誤検知が多くなる傾向があった。一方、図-7と図-8の比較でも見られるように、位相空間の特徴量を入力パラメータに含めることによって欠陥・健全の誤分類が減ることが確認できる。位相空間の特徴量である Δ CPSTは、ある健全部を基準としたときの打撃応答のトポロジーの比較であるため、変化に対する感度が高い。このことから、位相空間の特徴量を用いることで健全部をより適切に判断できたと考えられる。

また、R15-d06（直径15cm、深さ6cm）、R15-d10（直径15cm、深さ10cm）の欠陥部に対しては位相空間の特徴量を用いることで分類精度が大幅に向上した。R15-d06は欠陥検出率が1.3%から66.3%に向上し、R15-d10は欠陥検出率が70%から91.2%に向上した。大幅に向上したものの共通点として、欠陥部と健全部の周波数特性に大きな差がないということがあげられる。欠陥部と健全部の周波数特性に大きな差がないため周波数領域の特徴量や、時間波形の特徴量だけでは、欠陥部と健全部に違いが出にくく、欠陥検出の精度が低下していたと考えられる。

5. まとめ

本研究は、検査員による作業を前提とした打音法のための分析方法を提案すべく、これまで検知が難しかった深さ10cm程度までの比較的深い空隙欠陥を対象として、マイクロフォンによる打音応答の計測・分析によって健全・欠陥の検出することで打音検査の定量化を目指した。打音データの特徴抽出とニューラルネットワークを用いた先行研究での知見を基に欠陥検知精度の向上を目指すべく、新たな試みとして位相空間分析を用いた。その結果、位相空間のトポロジーが打音応答波形の欠陥部と健全部で異なる可能性を示し、位相空間の特徴量である Δ CPSTが重要なパラメータの1つであることを、複数の重要度評価手法から示した。そのうえで、全結合のニューラルネットワークを試行錯誤で構築し、実験計測で得られたデータを用いて学習を行った結果、欠陥直径15cm以上であれば深さ10cmまでの欠陥を8割以上の精度で検出できることを示した。また、欠陥部と健全部において周波数特性の差が小さいケースでは、周波数変化に対する感度が高い位相空間分析を導入することでその違いを明確化できる可能性を示した。その一方で、欠陥、健全の周波数

特性の差が微小でない場合は位相空間分析が必ずしも有効でないケースも見られた。そのため、位相空間の特徴量を用いるべきケースを明確化することでより汎用的なシステムを構築できると考えられる。

参考文献

- 1) 黒田千歳、歌川紀之、島田拓夢、安永守利：自己組織化マップ（SOM）による打音法の結果評価、佐藤工業技術研究所報、41号、pp.23-26,2016.
- 2) 大曲正紘、園田佳巨、宗本理：劣化したコンクリート橋の回転式打音検査に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、31巻、1号、pp.2143-2148,2009.
- 3) Fujii, H., Yamashita, A. and Asama, H.: Defect Detection with Estimation of Material Condition using Ensemble Learning for Hammering Test, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 3847-3854, 2016.
- 4) 江本久雄、馬場 那仰、浅野 寛元、長瀬 大和：AI手法による打音検査の浮き判定の検討、AI・データサイエンス論文集、1巻、J1号、pp.514-521, 2020.
- 5) 杉本恒美、赤松亮、歌川紀之、片倉景義：コンクリート非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法、コンクリート工学年次論文集、36巻、1号、pp.2062-2067, 2014.
- 6) Porjan Tuttipongsawat, Eiichi Sasaki, Keigo Suzuki, Masato Fukuda, Naoki Kawada, Koji : PC Tendon Damage Detection Based on Phase Space Topology phases in Different Frequency Ranges amaokaJournal of Advanced Concrete Technology Vol. 17, 474-488, 2019.
- 7) 竹谷 晃一、佐々木 栄一、范 書舒、伊藤 裕一：時間・周波数領域の特徴量評価とニューラルネットワークを用いた打音法の感度向上と効率化、AI・データサイエンス論文集、2巻、J2号、pp. 721-732, 2021.

加熱式塗膜剥離による塗替え塗装の簡易化に関する基礎的検討

大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 社会基盤工学部門 准教授 廣畑 幹人

1. はじめに

鋼構造物の主な劣化要因の一つとして鋼材の腐食が挙げられる¹⁾。鋼構造物の腐食対策として用いられる防食法としては、防食塗装、溶融亜鉛めっき、金属溶射、耐候性鋼材等が挙げられる。このうち最も一般的に用いられているのが防食塗装である²⁾。防食塗装は経年とともに劣化するため、適宜塗替えが必要となる。防食塗装の塗替えを行う際には、新しい塗装を塗り付ける前に素地調整を行う。素地調整の際には、ブラストやサンダー等の動力工具を使用するが、表面からさびや塗膜を削り取る過程で大きな騒音が発生し、さびや塗膜が粉じんとして周囲に飛散する。また、古い塗膜には鉛化合物、六価クロム化合物およびPCB等の有害物質を含む場合があり、素地調整の施工時には粉じんに対する作業員の安全性の確保や飛散を防止するための周囲の養生が必要となる。

素地調整に先立って古い塗膜を剥離する方法として、上述のブラストや動力工具に加え、塗膜剥離剤が用いられる。塗膜の表面に剥離剤を塗り付けることで塗膜を軟化させ、スクレーパー等の工具で容易に剥離できる状態にする。この工法では塗膜を粘度の高い液体状で回収できるため、施工時の粉じんや騒音を防止できる一方で、剥離剤を含む廃棄物の重量が増加する。また、塗膜の種類や厚さによっては剥離剤の塗付から剥離までに1日から2日程度の時間を要することや、可燃性の剥離剤を用いた場合に火災事故が発生した事例がある³⁾。

このような背景から、高周波誘導加熱（IH）を利用する方法が近年注目されている。鋼材の表面を誘導加熱により急速に温度上昇させることで塗膜の付着を低下させ、スクレーパー等により容易に剥離できる状態にする。この方法では、剥離した塗膜を固形の膜状で回収できるうえ、剥離剤を使用する場合と異なり乾燥したまま重量の増加がない状態で塗膜が回収できる。これにより廃棄物量を削減でき、粉

じんの発生が抑制されるため、作業員の安全性を確保できる。また、施工の際の誘導加熱ヘッドの移動速度は、対象とする塗膜厚によって異なるが3.0m/min程度であり⁴⁾、従来の方法と比較して施工に要する時間を短くすることができる。このような利点から、IHによる塗膜剥離の施工事例が増加してきている⁵⁾。

IHによる塗膜剥離は種々の利点から近年注目されているが、塗膜の剥離の程度や、残存する塗膜の状態等、塗替え塗装の耐久性に及ぼす影響には不明な点がある。本研究では、IHによる塗膜剥離が塗替え塗装の耐久性に及ぼす影響を明らかにするための基礎的実験を実施した。これにより、合理的で簡易な塗装仕様の開発に資するデータを提示することを目的として、一連の検討を実施した。

2. 高周波誘導加熱による塗膜剥離実験

既設鋼橋に使用されていた塗装鋼材を切り出して、供試体として使用した。供試体の数量は9体であり、寸法は150mm×70mmである。

本実験においては、加熱装置としてRPR Technologies社製のGenerator RPR 1650を使用した。高周波電源装置により発生させた電流をケーブルで繋がれたコイル（インダクションヘッド）に印加し、コイルを鋼材表面に近接させて加熱する。目標温度を200℃として加熱を行った後、スクレーパーを用いて鋼材表面に付着していた塗膜を剥離した。加熱および塗膜剥離の状況を図-1に示す。各供試体について、プライマーより上側の塗装を概ね剥離することができた。

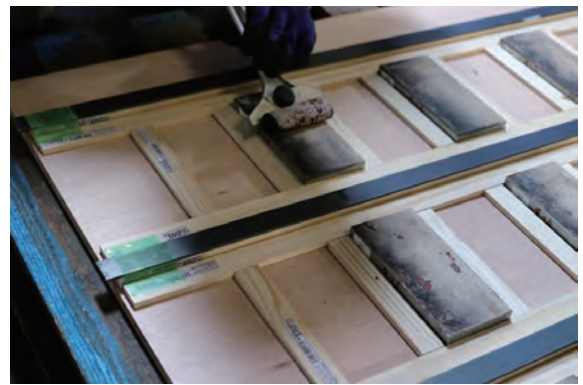
3. 腐食促進実験

本実験の供試体の数量とその内訳を表-1に示す。供試体作製工程の具体的な内容は以下の通りである。

- ① 既設鋼橋に使用されていた塗装鋼材を150mm×70mmの寸法で18体切り出した。



(a) 加熱状況



(b) 塗膜剥離状況

図-1 加熱および塗膜剥離の状況

- ② 9体の供試体に対してIH装置で塗膜の剥離を行った。
- ③ ②でIH塗膜剥離を行った供試体9体と、①の旧塗装が付着した状態の供試体9体の計18体の供試体に対して、素地調整程度1種、2種、3種の3種類の素地調整を行った。素地調整後の供試体表面の状況を図-2に示す。
- ④ 素地調整程度1種、2種、3種の素地調整を行った供試体に対して、それぞれRc-I、Rc-II、Rc-III

- の塗替え塗装を行った。また、塗替え塗装の完了後に膜厚の測定を行った結果を表-2に示す。
 - ⑤ 供試体の端から25mmの位置に2mm×50mmの初期欠陥⁶⁾を鋼材素地に達するように導入した。
- 図-2に示すように、素地調整程度1種と2種の供試体では、素地調整後の鋼材表面の状態にIH塗膜剥離の有無による相違は見られなかった。その一方で、活膜を残す素地調整程度3種の供試体では、IH塗膜

表-1 供試体の数量と内訳

	素地調整程度		
	1種	2種	3種
IH塗膜剥離なし	3	3	3
IH塗膜剥離あり	3	3	3

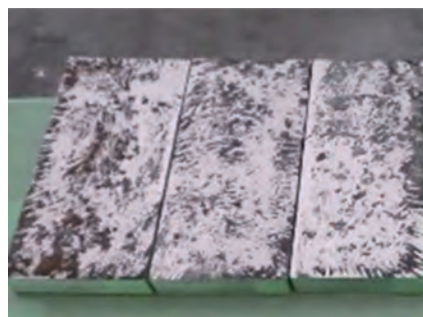
表-2 膜厚測定結果 (単位: μm)

	素地調整程度		
	1種	2種	3種
IH塗膜剥離あり	274 (4)	273 (4)	273 (19)
IH塗膜剥離なし	278 (15)	265 (10)	343 (41)

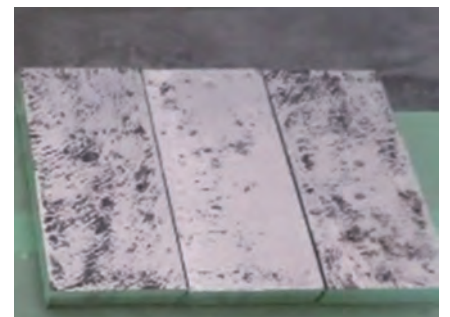
() 内は標準偏差を示す



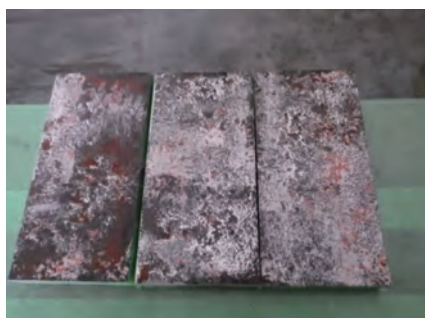
(a) 素地調整程度1種



(b) 素地調整程度2種 (IHあり)



(c) 素地調整程度2種 (IHなし)



(d) 素地調整程度3種 (IHあり)



(e) 素地調整程度3種 (IHなし)

図-2 素地調整後の供試体の外観

剥離を行った供試体表面では活膜が概ね除去されており、IH塗膜剥離の有無により素地調整後の鋼材表面の状態が異なる。また、表-2に示す塗替え塗装の膜厚について、IH塗膜剥離なしの素地調整程度3種の供試体では膜厚が目標よりも大きく、標準偏差も他の供試体と比較して大きい傾向が見られた。これは、IH塗膜剥離を行わない素地調整程度3種では活膜を残していることに起因するものと考えられる。

本研究では、腐食促進実験として人工海水噴霧と乾湿繰返しを基本とするISO16539-Method Bを採用した⁷⁾。実験条件を図-3に示す。塩水噴霧装置を用いて塩分濃度3.5%の人工海水を供試体表面に付着させ、 $28.0 \pm 2.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ の塩分付着量を得た。乾湿繰返し工程は、絶対湿度一定の下で乾燥状態(60℃、35%RH)を3時間、湿潤状態(40℃、95%RH)を3時間の繰返しとし、乾燥状態から湿潤状態、湿潤状態から乾燥状態への遷移に要する時間を1時間とする1サイクル8時間である。これを8サイクル(3日間)と11サイクル(4日間)に分けて行った。所定のサイクルの終了後には真水で供試体表面を洗い流すリンス処理を行った。また、実験に伴う供試体の腐食状況の評価のため、実験開始前と実験開始後28日(1か月)、84日(3か月)、

168日(6か月)経過時点で、供試体表面の画像の撮影と表面形状の測定を行った。

腐食に伴う外観の変化は主に初期欠陥部やその近傍で生じた。撮影した供試体の外観画像を図-4に示す。IH塗膜剥離の有無や素地調整程度に関わらず、28日経過時点で全ての供試体において初期欠陥部にさびの発生が視認された。後述する塗膜のふくれについては、84日経過時点で全ての供試体にて視認された。発生した塗膜のふくれの高さと範囲が、日数の経過に従って増加する傾向が見られた。また、一部の供試体では塗膜の割れが視認された。

塗装鋼材が水や酸素の供給を受けると塗膜下でさびが発生し、さびによる体積膨張が塗装を押し上げることで塗装鋼材表面にはふくれが生じる⁸⁾。この機構に基づき、実験前と比較して50μm以上の塗膜の隆起が生じた領域の面積をふくれ面積として、本研究における塗膜劣化の評価指標とした。なお、ふくれ面積は、初期欠陥を中心とした50mm×70mmの範囲に対して縦横各0.1mmの間隔で凹凸形状を計測することで算出した。算出したふくれ面積の推移のグラフを図-5に示す。グラフはいずれも3体の平均値(M)と標準偏差(±S)を示す。

素地調整程度1種、2種と比較して、素地調整程

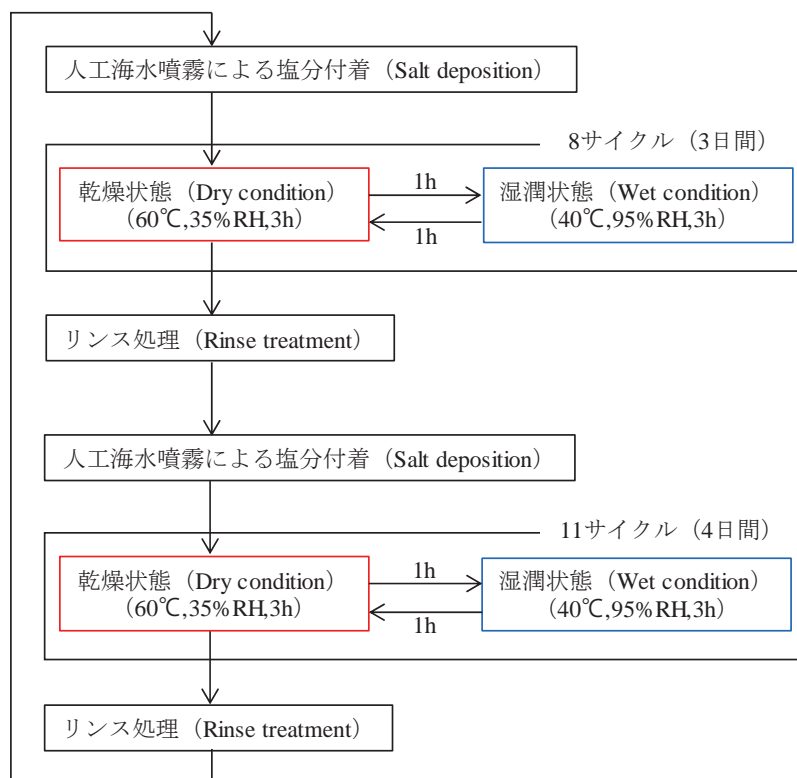


図-3 ISO16539-Method Bの条件

IH塗膜剥離	あり				なし			
	0	28	84	168	0	28	84	168
素地調整程度 1種								
素地調整程度 2種								
素地調整程度 3種								

図-4 腐食促進実験による供試体塗装欠陥部の外観変化

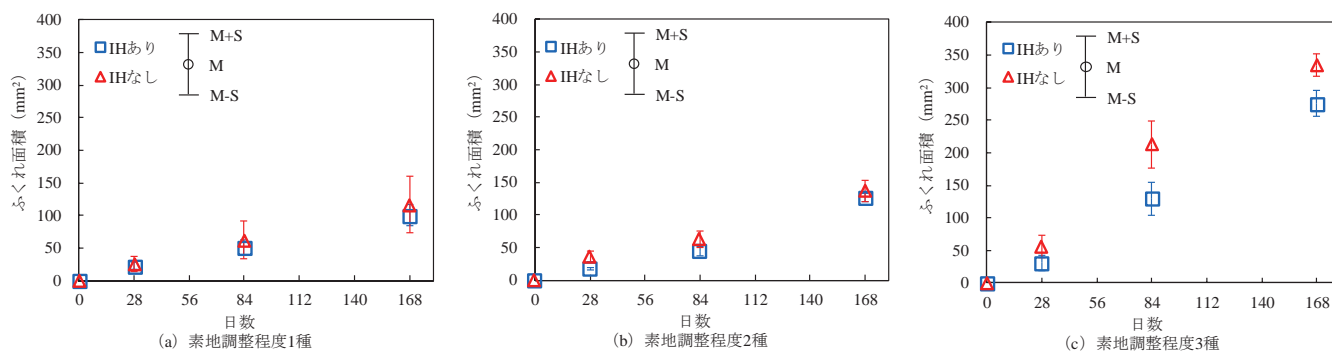


図-5 腐食促進実験によるふくれ面積の推移

度3種の供試体でIH塗膜剥離の有無によるふくれ面積の差が大きくなった。IH塗膜剥離を行った供試体では活膜が概ね除去されるが、塗替え塗装の耐久性には悪影響を及ぼさない可能性が示唆された。素地調整程度3種の供試体についても、腐食促進実験のサイクル数の増加に従ってIH塗膜剥離ありとIH塗膜剥離なしのふくれ面積が近づいていく傾向

が見られた。このことから、IH塗膜剥離が塗替え塗装の耐久性に及ぼす長期的な影響を検討するためには、さらに実験を継続して実施することが必要と考えられる。

4. まとめ

高周波誘導加熱 (IH) による塗膜剥離が塗替え塗

装の耐久性に及ぼす影響の検討を念頭に、既設鋼橋の塗装鋼材に対するIHによる塗膜剥離実験を実施するとともに、塗替え塗装を行った鋼材に対する腐食促進実験を実施した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) IH塗膜剥離により、既設鋼橋のプライマーより上層の塗膜を概ね剥離することができた。
- (2) IH塗膜剥離を施す場合には活膜が除去されるため、IH塗膜剥離を施さない場合と比べて素地調整程度3種の素地調整後の表面状態に差が生じた。
- (3) IH塗膜剥離による活膜の除去が、素地調整程度3種の塗替え塗装の耐久性に及ぼす影響は小さい可能性を示唆していた。

参考文献

- 1) 名取暢,西川和廣,村越潤,大野崇：鋼橋の腐食事例調査とその分析,土木学会論文集,No.668,pp.299-311,2001.
- 2) 腐食コスト調査委員会：わが国の腐食コスト,材料と環境,Vol.50,pp.490-512,2001.
- 3) 中日本高速道路株式会社：東名高速道路中吉田高架橋火災事故の概要,東名高速道路中吉田高架橋塗装塗替え工事による火災事故再発防止委員会(第1回委員会),2019,https://www.c-nexco.co.jp/corporate/pressroom/accident_prevention/pdf/accident_prevention02.pdf, (閲覧日 2022-01-17) .
- 4) 小西日出幸,井隼俊也,福島夏樹,松井隆行,早矢仕正尚,廣畑幹人：市川橋におけるIH装置による塗膜剥離の試験施工,橋梁と基礎,第54巻6号,pp.18-23,2020.
- 5) 小西日出幸,鈴木直人,田中正裕,鮫島力,西谷朋晃,廣畑幹人：許田高架橋補修工事におけるIH装置による塗膜剥離工法,橋梁と基礎,第51巻7号,pp.14-20,2017.
- 6) 国際標準化機構：Paints and varnishes-Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures,2009.
- 7) 国際標準化機構：ISO16539 Corrosion of metals and alloys - Accelerated cyclic corrosion tests with exposure to synthetic ocean water salt-deposition process - "Dry" and "wet" conditions at constant absolute humidity,2013.
- 8) Funke,W.：Problems and progress in organic coatings science and technology,Progress in Organic coatings,Vol.31,pp.5-9,1997.

定期点検値を利用した橋梁のマクロ的劣化評価とその予測手法の開発

東北工業大学 工学部 都市マネジメント学科 教授 須藤 敦史

1. はじめに

わが国では高度経済成長期に整備されてきたインフラストラクチャーの老朽化が進んできているため、国内における約70万の橋梁（2m以上）では、少なくとも頻度5年（劣化進行が認められる場合は2年）に1回で目視点検の実施を基本としており、図-2に示すような、点検結果に基づく予防保全を前提とした維持管理を実施することになっている。

このような状況下、国道橋梁に対する「道路橋定期点検要領」¹⁾などが制定されたが、これらの要領の目的は、橋梁部材すべてに対する近接目視の結果に基づいて、部材の損傷度診断結果を踏まえた監視および統一的な健全度の判定・診断・予測の実施が望まれている²⁾。

しかし、橋梁などのインフラストラクチャーにおける維持管理やそれらの更新に関して、観測・点検値やモニタリングに基づいた健全度の評価や劣化予測手法は確立されていないのが現状であり、これらの研究・開発が急務となっている³⁾など。さらに各部材において得られる多くの観測・点検値の整理・評価結果に基づいた橋梁ごとの総合的な健全度の診断・判定には、専門的な知識や多くの労力が必要となるため、多くに自治体等ではその対処に苦慮されている。

一方、国土交通省（北海道開発局）および北海道が建設した道路橋梁は、図-1 (a)、(b) に示すように、まず開発局による橋梁建設が先行しており、その後北海道による建設がなされているが、いずれも供用から30年以上を経過した道路橋梁が約60%近くになってきているため、寒冷地に特有の劣化要因などを考慮しながら、限られた予算の中で多くの既設橋梁に対する維持管理の構築とその運用が急務となっている⁴⁾など。

加えて、一般的に橋梁、山岳トンネルや種々のコンクリート構造物などインフラストラクチャーに対する健全度の判定は、その劣化状況に対して段階的な判定区分で評価されることが多いため、図-2に

示すような予防保全を前提としたライフサイクルマネジメント（Life Cycle Management : LCM）の概念⁴⁾の適用が難しいのも現状である。このLCMでは、対象とするインフラストラクチャーにおいて現在の劣

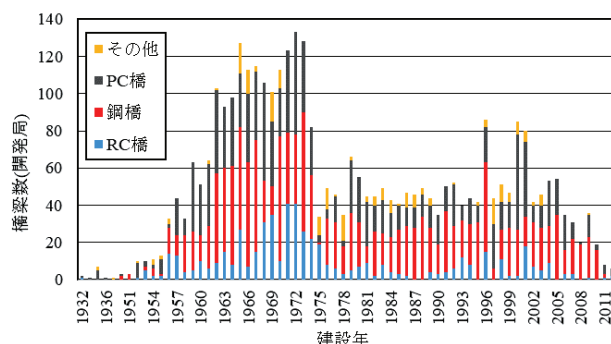


図-1 (a) 建設年代による橋梁数（北海道開発局）

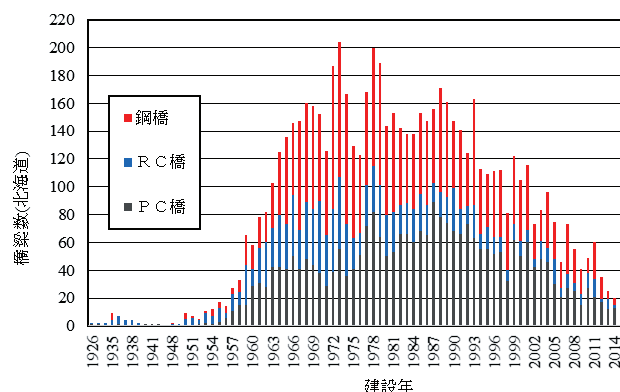


図-1 (b) 建設年代による橋梁数（北海道）

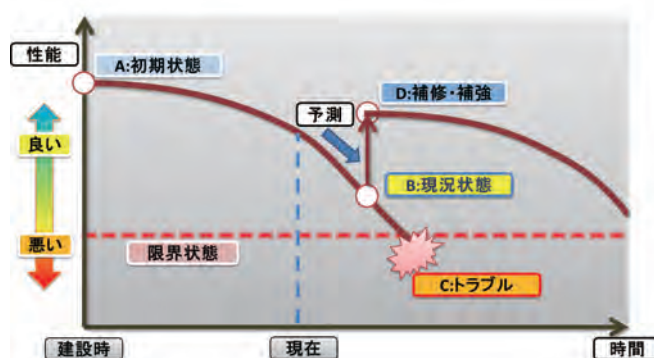


図-2 ライフサイクルマネジメント（概念）

化状態を定期点検等で把握・評価して、さらに劣化状態の将来を予測することにより、トラブルが発生する前に適切な処置（補強・補修）を施すことで、効率的な維持管理を実施するものである。

一方、インフラストラクチャーの定期点検値は、毎年多くの点検により、そのデータが蓄積されているため、データウェアハウスなどを構築して、数多くのデータから価値ある情報の発掘を行うデータマイニング（:Data Mining）⁵⁾などなどにより、蓄積されたデータの有効活用（データ同化⁶⁾など）が必要となってきた。

そこで本研究では、北海道において国および自治体が管理する道路橋梁を対象として、定期点検における各部材の劣化度の判定区分値から、劣化状態の経時変化などの把握や評価とそれらの将来予測の簡便化を図るため、劣化評価値を連続値として扱う劣化モデルの提案とその検証として以下の項目を実施している。

①国土交通省（北海道開発局）および北海道では道路橋梁の定期点検値より得られる4～5段階の劣化に対する判定区分を定めており、また土木研究所寒地土木研究所では、それらの定期点検値と報告書から、さらに詳細な劣化判定区分を求めて、補修のための現状評価を実施している。

加えて、北海道においても一部独自の点検・判定基準を定めて定期点検を実施しているため、どのような定期点検値からも簡便に求められる連続的な簡易健全度指数（SBHI）を提案して、統一的な尺度による劣化評価と将来予測の基礎検討を実施している。

②次に、北海道開発局と北海道におけるコンクリート製の道路橋梁において、それぞれの劣化特性を実際の定期点検データから、提案モデルのパラメータを同定することで、劣化の経時変化とそれらの分布（ばらつきなど）を求めて、今後のコンクリート製の橋梁におけるライフサイクルコストの向上に対する本手法の有用性など検証を行っている。

2. 道路橋梁における定期点検項目

北海道開発局の道路橋梁に対する定期点検は、旧建設省の点検要領（案）では点検箇所は20項目に区分されており⁷⁾など、更にそれらに対して材質を考慮した損傷種類が32項目選定されている⁸⁾など。

本研究では、北海道開発局においては道路橋梁の

代表部材として定めた、表-1に示す10項目の定期点検値と報告書から、さらに詳細な劣化判定区分としても求めたものを使用している。

一方、北海道においても旧建設省の点検要領（案）を参考にして定めた道路橋梁の点検要領では、表-2に示す道路橋梁を上部工（主桁・2次（副）部材・床版）、下部工（躯体・基礎）、その他（支承・高欄・地覆・舗装・伸縮装置など）20項目に分類して、橋梁の各径間毎に構成部材の損傷種別の判定結果が記録されており、北海道開発局と同様な10項目の値を使用している。

3. 道路橋梁における劣化指標の（連続）数値化

(1) インフラストラクチャーの健全度指数（HI）

道路橋梁（鋼橋・コンクリート橋）、山岳トンネルや各種コンクリート構造物などのインフラストラクチャーにおける経過年数に対する劣化度の遷移やその分布傾向を把握する目的として、Caltrans⁹⁾などやAASHTOの「PONTIS」¹⁰⁾などで採用されている式（1）に示す健全度指数¹¹⁾（Health Index : HI）を採用している。

表-1 点検部材の項目（北海道開発局）

上部構造	主 桁
	2次部材
下部構造	床 版
	軀 体
その他	基 礎
	支 承
	高 欄
	地 覆
	舗 装
	伸縮装置

表-2 道路橋梁における点検部材（20項目）の関係

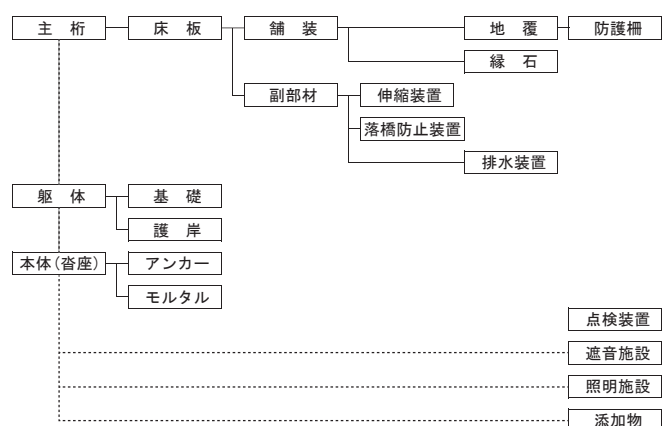


表-3 橋梁部材の劣化評価に用いた重み係数

部 材	重み係数	部 材	重み係数	
上部工	主 桁	3.0	支 承	2.0
	2次(副)部材	1.0	伸縮装置	2.0
	床 版	3.0	落橋防止装置	1.0
下部工	軀 体	3.0	橋面工	1.0
	基礎工	3.0	付局部材	1.0

$$HI = \frac{\text{現在資産価値}}{\text{初期資産価値}} \quad (1)$$

ここで初期資産価値 (TEV) は、全ての部材が健全な状態 (建設当初) の橋梁全体の建設費、現在資産価値 (CEV) は現在 (部材に損傷を有する状態) の橋梁全体の建設費である。具体的には、各種のインフラストラクチャーにおける定期点検値より得られる劣化判定区分 (4~5段階) に応じた部材等の重要度等を勘案した影響度 (Wfi) を点検項目数に乗じた簡易健全度指数を定義する¹²⁾。

本研究では表-3に示すように各部材に対する重み係数を点検技術者や管理する土木技術者へのアンケートからAHP解析¹³⁾より求めている。

(2) 道路橋梁の簡易健全度指数 (SBHI)

道路橋梁 (鋼橋・コンクリート橋) における簡易健全度指数の算出は、定期点検より得られる個々の部材 (主桁、床版、舗装など) の損傷判定区分 (5段階) より、それぞれの損傷判定区分に応じた影響度 (Wfi) を乗じ、さらに橋梁の各部材の重要度により設定した重み係数を乗じた、式 (2) に示す橋梁における簡易健全度指数 (Simple Bridge Health Index : SBHI) とする。

$$SBHI = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^V (\text{損傷ランク } i \text{ の総数} \times Wf_i \times W) \quad (2)$$

ここで損傷判定区分に対する影響度 (Wfi) は、部材の重要度の重み係数 (W) と同様にアンケート調査とAHP解析により I=0.00、II=0.25、III=0.50、IV=0.75、OK (V) =1.0と定めた。ここで、提案する簡易健全度指数は0.0~1.0の連続値をとり、健全な状態1.0から劣化度の進行に伴って0.0に向かっていく連続値となる。

4. インフラストラクチャーの劣化遷移モデル

本研究では、インフラストラクチャーの保有性能が、ある要求性能レベル以下 (閾値の通過) となる時期を予測し、戦略的に補修・補強や改修を施すこ

とにより長寿命化を図って行く予防保全による維持管理の確立を目標としているため、定期点検より得られる判定区分値から連続的な簡易健全度指数への変換を行った。さらにここではインフラストラクチャーの劣化時間遷移のモデル化を考える。

(1) Kachanov劣化モデル

$X(t)$ を時刻 t における健全度として、その不規則な時間変動を確率過程でモデル化する。ここで簡易健全度指数 (SBHI) には厳密な物理量ではないが、ここでは式 (3) に示す材料力学の分野において経験論的な劣化モデルであるKachanovモデルを用いて劣化の平均的な時間遷移 (変動) を記述する¹⁴⁾。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 X(t)^{-\gamma} \quad (3)$$

β_0 : 劣化に関する平均進展抵抗値、 γ : 劣化に関する形状パラメータである。

また、式 (2) がSBHIの区間 0.0~1.0 に理論上厳密におさまるように次式の補正関数 $g(x)$ を導入する。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 g(X(t)) \quad , \quad g(x) \equiv x^{-\gamma} F_c(x) \quad (4)$$

$$F_c(x) = \begin{cases} 1 & (\varepsilon \leq x \leq 1) \\ (x/\varepsilon)^{\gamma+1} & (0 < x < \varepsilon) \end{cases} \quad (5)$$

ε は任意に小さくできる正の定数

これにより、構造物の破壊に至るまでの時間変化は式 (3) と同じになる。また、時間的に不規則な劣化推移として複合Poisson過程を駆動雑音に導入すると地震などの突発的な自然災害による大きな損傷を考慮した確率微分方程式として次式のようになる¹⁵⁾。

$$dX(t) = -\beta g(X(t))dt - g(X(t-))dC(t) \quad (6)$$

$$C(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} Y_k \quad (7)$$

$N(t)$: Poisson過程 (強度パラメーター λ)、 $\{Y_k\}$: 同一の分布に従う独立な確率変数の集まりである。

複合Poisson過程 $C(t)$ を不規則な劣化度成長の駆動雑音として用いるモデル式 (7) は、サンプルパスが増減を繰り返して一様に成長してゆくため、劣化過程 (挙動) モデルに適している。

5. 道路橋梁の簡易健全度指数 (SBHI)

(1) 北海道開発局 (国土交通省) におけるSBHI

まず、北海道開発局が管理する道路橋梁 (3,945橋) の定期点検値より求めた簡易健全度指数 (SBHI) と

Kachanovモデルの平均値（実践）を図-3に示す。

具体的にはKachanovモデルにおける β をパラメータとして最尤法を用いて定期点検値により同定し、同定したパラメータより簡易BHIによる平均挙動（トレンド成分）線を描いている。

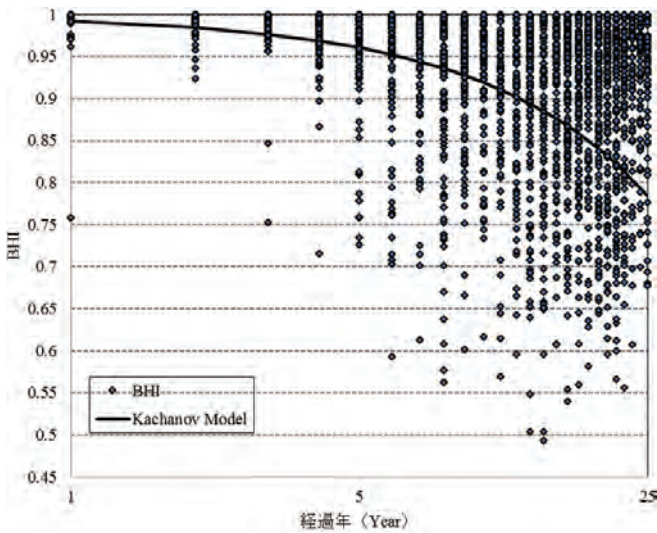


図-3 道路橋梁のSBHIの平均遷移（開発局管理）

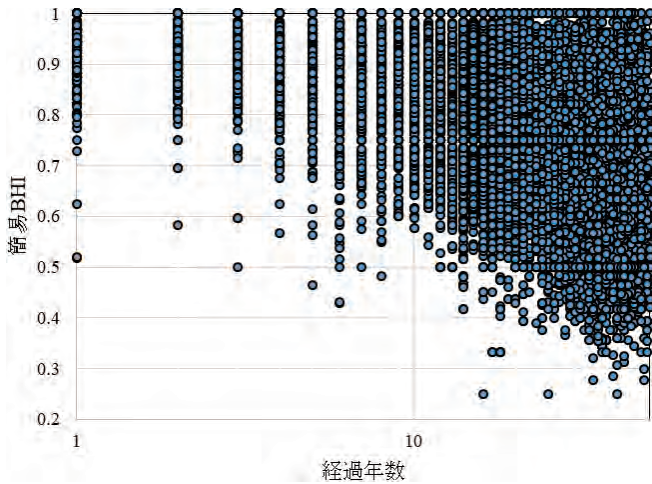


図-4 (a) 全道路橋梁のSBHI（北海道管理）

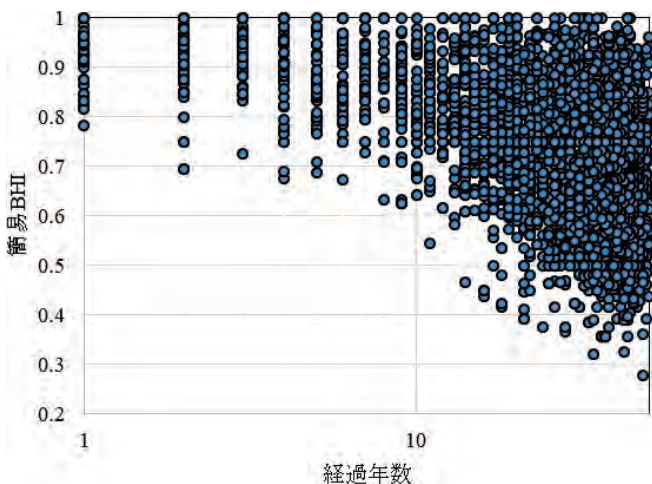


図-4 (b) PC橋梁のSBHI（北海道管理）

ここで用いた道路橋梁の定期点検値は、道路橋梁の維持管理台帳を参考にして、補修・補強が施されていないと考えられる供用年数25年未満のデータを用いている。

(2) 北海道におけるSBHI

さらに、北海道が管理する道路橋梁6,764径間における定期点検値の損傷判定区分から同様の手法により求めた、SBHIの経時変化を図-4 (a) には全道路橋梁、図-4 (b) にはPC橋梁を示す。

ここで、図-3、および図-4 (a)、(b) より、道路橋梁における定期点検値を連続値に変換した簡易健全度指数（SBHI）および提案したインフラストラクチャーの劣化過程のKachanovモデルは、道路橋梁における劣化の経時変化（遷移）を表していることより、北海道開発局（国）や北海道（地方自治体）など管理者（点検項目および手法の相違）にとらわれずにインフラストラクチャーの相対的な劣化健全度の評価が可能となり、維持管理および総合的なLCMの精度向上に繋がると考えられる。

6. 平均値（トレンド）と分散値（ボラティリティ）の遷移

一般にライフサイクルマネジメント（LCM）では、構造物において将来の劣化遷移・推移を予測して、最適な補修・補強を実施して、その保有性能（健全度）を維持・回復させる予防保全が非常に重要であるが、現状では点検値に基づく定量的なインフラストラクチャーにおける劣化予測およびその精度検証を行った研究は少ない。

ここでは、提案した劣化遷移モデルの平均（トレンド）値とその分布（ボラティリティ）の傾向をそれぞれの定期点検データから同定し、加えて遷移動向の将来予測も行い、精度を実際の点検データより確認を試みる。

(1) SBHIの遷移と分布：北海道開発局

北海道開発局が管理している国道の3,945橋（鋼橋・コンクリート橋）の定期点検値から求めた供用期間ごとのSBHIにおいて、分布状態の平均（トレンド）値と分散（ボラティリティ）値を①0～5年：平均2.5年、6～10年、②11～15年：平均12.5年、16～20年、③21～25年：平均22.5年において求め、その経過年数による平均と分散の遷移を表-4に示す。

表-4より、北海道開発局が管理する道路橋梁全体のSBHIは、平均値は供用年数にともない劣化進行を示し、分布は供用年数にともない広がる傾向を示している供用年数とともに進行している。また、表-4に示すように平均（トレンド）値と対数正規分布の分散（ボラティリティ）値は経過年数（供用期間）に応じて一様な劣化の進行を示しており、かつその分布は広がる傾向を示している。

表-4 SBHI（平均・分散）の遷移（北海道開発局）

供用期間		平均値	分散値
橋梁 (BHI)	0～ 5年	0.9761	0.04653
	6～10年	0.93239	0.08262
	11～15年	0.89548	0.1046
	16～20年	0.89595	0.09872
	21～25年	0.89457	0.09902
	26～30年	0.88678	0.10926

(2) SBHIの遷移と分布：北海道

同様に北海道が管理している道路橋梁におけるPC橋の定期点検値から求めた、供用期間ごとのSBHIにおける分布遷移（平均供用期間：①2.5年、②12.5年、③22.5年）を図-5 (a) ～ (c) に示す。

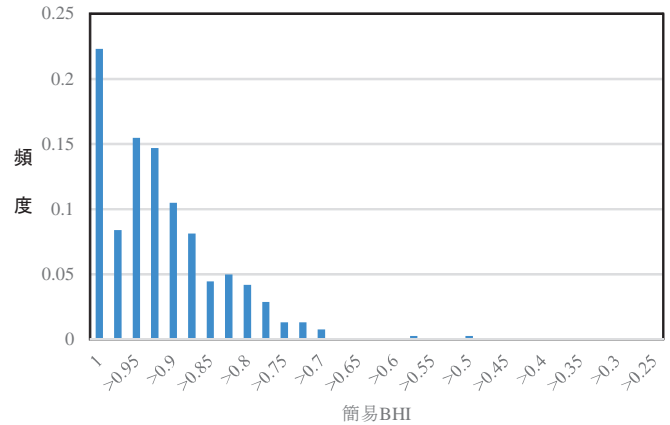


図-5 (a) PC橋梁のSBHI分布：供用0～5年（北海道）

さらに北海道が管理している道路橋梁におけるRC橋の定期点検値から求めた、供用期間ごとのSBHIの分布遷移（平均供用期間：①2.5年、②12.5年、③22.5年）ごとの結果を図-6 (a) ～ (c) に示す。

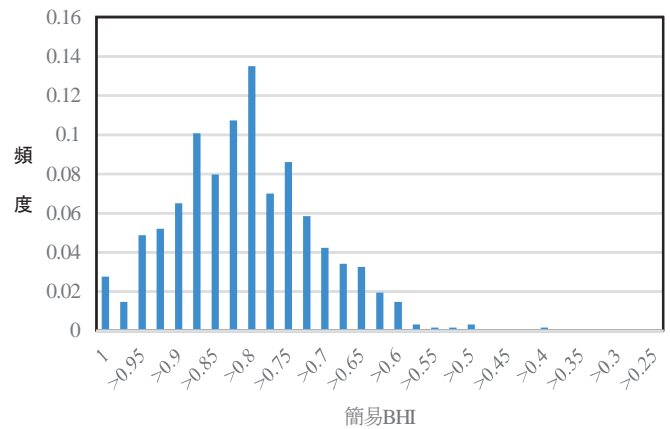


図-5 (b) PC橋梁のSBHI分布：供用11～15年（北海道）

図-5 (a) ～ (c) および図-6 (a) ～ (c) より、北海道が管理している道路におけるコンクリート（PC、RC）橋梁においてもSBHIの分布の平均値と分散値は、開発局が管理している道路橋梁と同様に供用期間にともない平均値は劣化方向に進行し、加えて分布の裾野は劣化が進行した方向に広がり、かつ度数も増加するロングテール・ヘビィテール化が見られる¹⁶⁾。

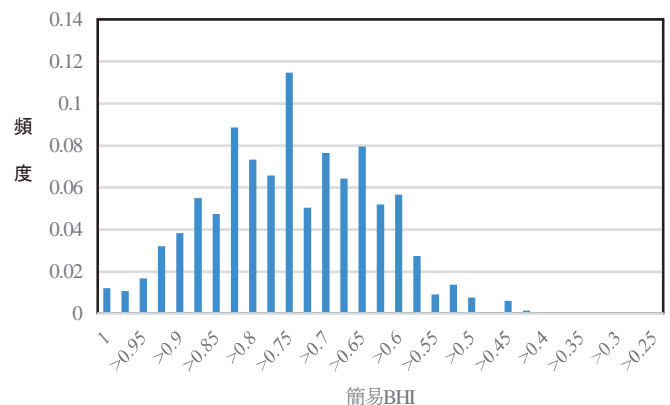


図-5 (c) PC橋梁のSBHI分布：供用21～25年（北海道）

したがって、実際に得られている北海道開発局および北海道における道路橋梁の定期点検よりSBHIの分布傾向を考察した結果、いずれも分布状況は対数正規分布に近い形状を示し、経過年数（供用期間）にともない分布の平均値は劣化が進行し、その分布幅は広がる傾向を示している。

さらに、道路橋梁のLCM（維持管理）において、橋梁劣化において分布の平均値・分散値の時間的な遷移、とりわけ裾野部分は長くなる（劣化が進行）傾向を示すことは、将来ここにおいて不具合が発生する確率が高いと解釈されるため、分布の平均・分散の時間遷移と裾野部分の遷移予測は維持管理に対して非常に重要な情報であると言える。

7. SBHIの分布（平均・分散値）遷移予測

ライフサイクルマネジメント（LCM）では、インフラストラクチャーにおいて将来の劣化遷移・推移を予測、最適な補修・補強を実施して、その保有性

能（健全度）を維持・回復させる予防保全を基本としている。しかし、予防保全では橋梁など構造物における劣化状態の予測が必須となるが現状では行っていないのが現状である。

ここで前節において表-4および図-5、6に示したように平均（トレンド）値と対数正規分布の分散（ボラティリティ）値は経過年数（供用期間）に応じて一様な進行傾向を示している。

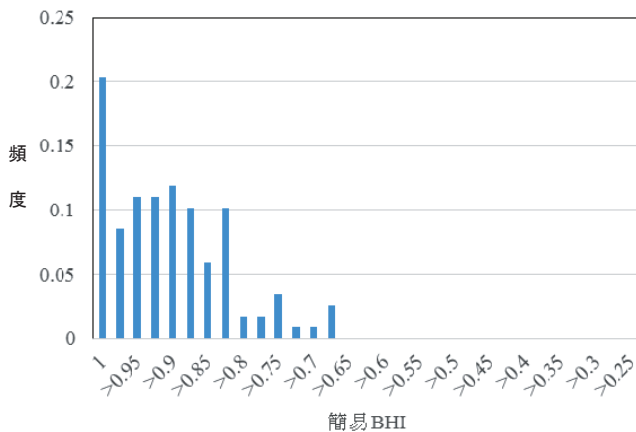


図-6 (a) RC橋梁のSBHI分布：供用0～5年（北海道）

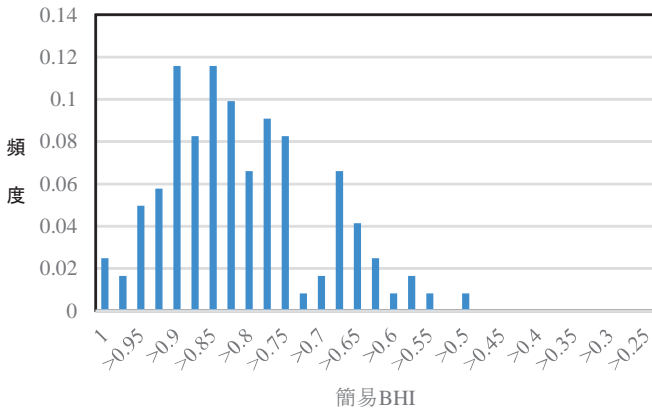


図-6 (b) RC橋梁のSBHI分布：供用11～15年（北海道）

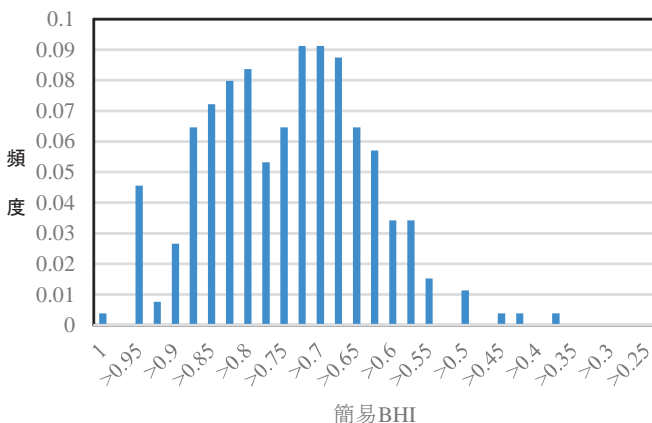


図-6 (c) RC橋梁のSBHI分布：供用21～25年（北海道）

(1) SBHIの分布特性

北海道が管理するコンクリート（PC・RC）橋梁において求められたSBHI分布特性の供用期間（0～10年、11～20年、21～30年、31～40年、41～50年）ごとの平均値・分散値を基に10年先（供用期間51～60年：平均55年）におけるWBHIの分布特性の予測を行う。具体的にはコンクリート（PC・RC）橋梁の各供用期間においてSBHIの分布特性（平均値・分散値）に対して対数曲線で近似を実施する¹⁷⁾。

近似された対数曲線より供用期間（51～60年：平均55年）におけるSBHIの分布特性（平均値・分散値）の将来を予測して、実際の定期点検値より求めた供用期間（51～60年：平均55年）におけるSBHIの分布特性（平均値・分散値）と比較する。

(2) 対数曲線によるSBHIの分布特性の近似

まず、PC・RC橋梁における供用期間（0～10年、11～20年、21～30年、31～40年、41～50年）の分布特性（平均値・分散値）を対数曲線で近似（平均値:

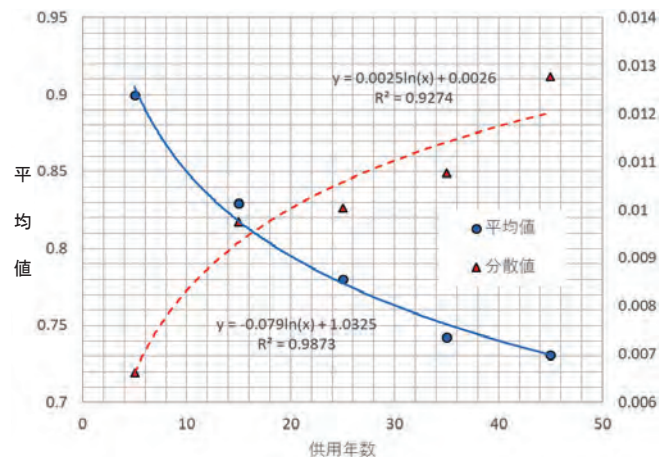


図-7 (a) SBHI分布遷移（平均値・分散値）と対数回帰（北海道：PC橋梁）

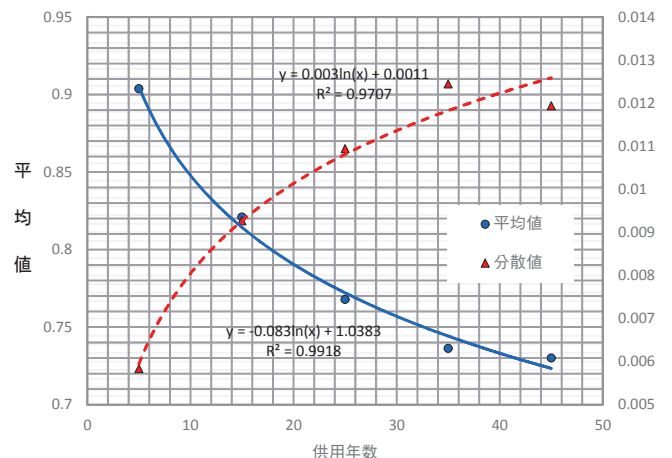


図-7 (b) SBHI分布遷移（平均値・分散値）と対数回帰（北海道：RC橋梁）

表-5 供用年数55年におけるWBHI分布特性の予測値と実測値 (PC・RC橋梁)

供用年数55年		平均値	分散値
PC橋梁	予測値	0.7159	0.0126
	実測値	0.6688	0.0195
RC橋梁	予測値	0.7057	0.0131
	実測値	0.7131	0.0128

実線・分散値:点線)したものを図-7 (a)、(b)に示す。

ここで図-7 (a)、(b)に示したように非常に良い相関特性を示している。

次に、得られた対数近似曲線より、PC・RC橋梁において供用年数55年(平均)におけるSBHIの分布特性(平均値・分散値)の予測、および実際の求められたSBHIの分布特性を表-5に示す。

表-5に示すように、SBHIの分布特性の予測が可能となり、これらコンクリート橋梁における実際の定期点検値から得られる劣化区分値より、劣化特性や分布特性(平均値や分散値)などの将来における分布特性の予測値が求められる。

8. 結論

本研究は、寒冷地(北海道)のインフラストラクチャーを対象として、その劣化特性を定期点検値から把握・評価する目的で簡易健全度指数および劣化過程をKachanovモデルとしての提案を行った。さらに経過年数に対する劣化傾向を定期点検値からモデルのパラメータ同定を行うとともにそれらの将来予測を行った。加えて、それぞれの劣化におけるばらつき状態の傾向も定期点検値より確認した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 寒冷地(北海道)のインフラストラクチャーの劣化特性を評価するための簡易健全度指数の提案を行い、さらに確率・統計的な損傷度成長(Kachanov)モデルと定期点検値により、簡易健全度指数における平均値と分散値の時間的な遷移過程を推定することで、それらの長期的な予測は可能である。
- (2) 国土交通省(北海道開発局)および北海道が管理する道路橋梁における健全度評価指数の分布は、双方とも対数正規分布に類似した分布傾向を示し、経過年数(供用期間)にともなって一様に平均値の劣化は進行方向に分散値は広がる傾向を示している。

- (3) 本研究で提案したKachanovモデルの平均値とその分散値より、簡易健全度指数(SBHI)の将来予測が得られれば、モンテカルロシミュレーションなどにより将来の劣化予測分布が求められるため、劣化予測のシミュレーション解析が行え、予防保全による維持管理も可能となる。

今後も寒冷地(北海道)の道路橋梁において、劣化の時間的遷移やその分布傾向の詳細な把握は予防保全を前提とした維持管理には不可欠な情報であり、詳細な検討には多くの定期点検データの蓄積とその整理が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局：道路橋梁定期点検要領、2014。
- 2) 国土交通省(社会資本整備審議会道路分科会)：道路の老朽化対策の本格的実施に関する提言、平成26年4月14日。
- 3) (公社)土木学会、社会インフラ維持管理・更新検討タスクフォース、平成25年、3月。
- 4) 特集、インフラの状態評価と将来予測の最前線、土木学会誌、Vol.98, No.11, 2013。
- 5) 須藤敦史、佐藤大介、星谷 勝：非構造システムの逆・同定問題におけるデータマイニングの相関ルール抽出について、土木学会 応用力学論文集、Vol.4, pp.33-40, 2000。
- 6) 大竹雄、流石堯、本城勇介、村上茂之、小林孝一：統計的手法を用いた橋梁点検データベースに基づく橋梁健全度評価に関する基礎的研究、土木学会論文集A2(応用力学)、Vol.67, No. 2(応用力学論文集Vol.14)、I_813-I_824, 2011。
- 7) 建設省土木研究所：橋梁点検要領(案)、土木研究所資料、第2651号、1988。
- 8) 北海道開発局：道路設計要領 第3集 橋梁、令和4年4月。
- 9) Health Index -IBMC-005, Technical Report, Caltrans, 1999。
- 10) AASHTO : PONTIS User's Manual, Release 3.2, 1997。
- 11) 但木純、佐藤誠、大島俊之、三上修一、池田憲二、竹田敏明：BMSにおける補修事業シミュレーション、土木学会北海道支部論文報告集、第60号、pp.228-231, 2004。
- 12) 渡邊一悟、石川博之、佐藤京、加藤静雄、佐藤誠、

大島俊之：北海道BMSの開発と本格運用に向けた課題、土木学会北海道支部論文報告集、第61号、2005。

- 13) Saaty, T. L.:The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill,1980.
- 14) Kachanov, R. :Rupture time under creep conditions,Int. J. of Fracture, 97, xi-xviii.
- 15) Hiroaki Kanekiyo, Osamu Maruyama, Atsushi Sutoh,Takashi Sato : A mixed Poisson model for radom damage growth of tunnel concrete linings, 62nd Japan National Congress for Theoretical and Applied Mechanics, pp.149-157, 2013.
- 16) 兼清泰明、丸山収、須藤敦史、佐藤京：寒冷地トンネル覆工コンクリートの損傷度確率分布のテイル特性に関する考察、日本材料学会論文集、Vol.65, No.4, pp.275-281, 2016。
- 17) 須藤敦史、佐藤京、兼清泰明：点検データに基づいた寒冷地におけるコンクリート橋梁の劣化過程、日本コンクリート工学、年次論文集、Vol.39, No.2, pp.1285-1290, 2017。

塗膜クリープ解析法の開発と 高力ボルト摩擦接合継手の性能評価への適用

横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院 准教授 田村 洋

1. はじめに

橋梁鋼部材の高力ボルト摩擦接合部においては現在、接触面に厚膜型無機ジンクリッチペイント（以下、無機ジンクと記す）を塗布することを基本としている。無機ジンクは圧力を受けるとクリープ変形を起こすため、無機ジンクが塗布された接触面（以下、無機ジンク面と記し、鋼板素地の表面粗さの影響も含むものとする）を含む継手では、高力ボルト締付け直後から塗膜のクリープ変形が始まる。これは、無機ジンク面を適用した高力ボルト継手におけるボルト軸力のリラクゼーションに関する最大の要因となっている。道路橋示方書¹⁾ および鉄道構造物等設計標準²⁾ においてはトルク法による高力ボルトの締付けに関して設計ボルト軸力に対し10%増しの締付けを規定されているが、これは無機ジンク適用以前から規定されているものであり、無機ジンク面を適用した継手では荷重伝達性能確保の観点から増締め量を高めボルトへの導入軸力（初期軸力）を増大させる提案がなされている³⁾。

無機ジンク面を含む継手における高力ボルトのリラクゼーションは、標準試験片等に対するボルト締付け直後からのボルト軸力の長期計測（例えば28日間の計測）によって評価されている⁴⁾。ただし、実構造物に適用される継手には様々な形式があり、無機ジンク面のクリープ特性も塗料やその乾燥条件等によって様々であるなか、上述の実験的手法は時間と費用を要するため高力ボルトのリラクゼーション特性の全容を把握するためには補完的手法が求められる。また、膜厚100 μm 以下のオーダーの無機ジンク面におけるクリープを直接的に計測することは困難であるため、高力ボルトにより締付けられた継手内部における無機ジンク面の局所的なクリープ挙動を実験的に特定することは難しい。

本研究では、無機ジンク面を構成する無機ジンク塗膜のクリープ解析法を開発し、無機ジンク面を含む高力ボルト摩擦接合部の性能評価への適用性を評

価することを目的とする。クリープ解析法としては粘弾性構成則を用いた有限要素解析に基づくものとし、これを高力ボルト摩擦接合継手に適用することで、無機ジンク面における局所的なクリープ挙動を長期的に予測する手法を構築し、継手の形式や無機ジンク面の多様な条件を包含するパラメトリック解析への展開を目指す。

2. 塗膜クリープ解析法

2.1 粘弾性構成則

まず、塗膜クリープ解析法の根幹をなす粘弾性構成則のモデル化について述べる。本研究ではMaxwellの粘弾性モデルによって無機ジンク面における粘弾性構成則（時間依存の応力-ひずみ関係）をモデル化した。時刻 t におけるせん断応力は次のように求められる。

$$\tau(t) = G_0\gamma - G_R(t) \sum_{i=1}^N \gamma_i \quad (1)$$

ここに、右辺の第1項は弾性応力成分、第2項はクリープによる応力緩和成分である。 G_0 は瞬間せん断弾性係数、 γ は時間依存のせん断ひずみ（工学ひずみ）、 $G_R(t)$ は時刻 t におけるせん断緩和弾性係数、 γ_i は G_0 で無次元化された $G_R(t)$ に関するProny級数展開の i 次の項の定数 \bar{g}_i^P 、 τ_i^G を用いて次のように求められる

$$\gamma_i(t) = \frac{\bar{g}_i^P}{\tau_i^G} \int_0^t e^{-s/\tau_i^G} \gamma(t-s) ds \quad (2)$$

1次から N 次までの和をとると時刻 t におけるクリープひずみとなる。クリープひずみの体積変形成分は無視できるものとした。したがって、本研究で適用する粘弾性構成モデルの材料パラメータは、 G_0 、 \bar{g}_i^P 、 τ_i^G であり、Prony級数展開において適切な最高次数 N を選択することで材料パラメータ数は $2N+1$ 個となる。

2.2 有限要素モデル

図-1に使用した有限要素モデルの一例を示す。モデルは高力ボルト締付け後のボルト孔周辺の応力場のボルト中心軸を中心とした軸対称性とボルトヘッド側とナット側の応力場の対称性を想定して、ボルト、座金、連結板無機ジंक面（ボルトヘッド側）、連結板、連結板無機ジंक面（母板側）、母板無機ジंक面（連結板側）、母板の一部を再現した。図1下縁は母板中心線であり鏡面对称条件を付与している。無機ジंक面の要素は四角形要素とし、計算コストも考え膜厚を3分割、面内方向を0.5mm間隔で分割した。鋼材は弾性体としYoung係数を200GPa、Poisson比を0.3とした。無機ジंक面は粘弾性体とし第2.1節で述べた構成則を適用した（使用した材料パラメータについては第2.3節で述べる）。図-1左下のボルト軸部下縁に属する要素節点に強制変位を付与することでボルトの締付けを再現し、時刻歴解析で得られる節点力の経時変化に基づきボルト軸力のリラクセーションを評価した。

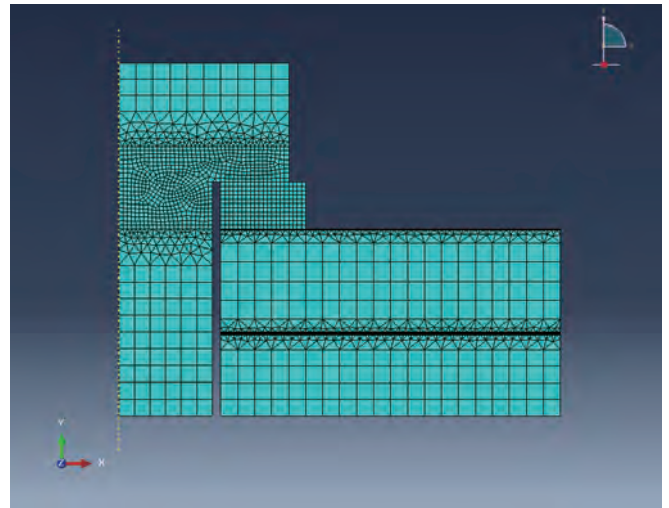


図-1 有限要素モデルの一例

2.3 パラメータキャリブレーション

第2.1節で言及した $2N+1$ 個の無機ジंक面に関する材料パラメータの決定方法について述べる。

まず G_0 については、ポリマー系塗料のYoung係数を1～5GPaとみなしている先行研究⁵⁾を参考に0.5～100GPaで比較検討した結果、応力解析に及ぼす影響が小さいことが確認されたため0.5GPaと設定した。

つぎに \bar{g}_i^P 、 τ_i^G については、リラクセーション試験結果（第3.1節）で得られた軸力減衰率 δ_{creep} の同種試験体内平均値の経時変化を十分に再現できるように材料パラメータを同定した。ただし、第4.2節で述べるように対象とする試験体の接合面構成によって同定結果が大きく異なったため、 \bar{g}_i^P 、 τ_i^G のセット（以下、パラメータセット）は接合面構成によって異なるものを使い分けることとした。このように、リラクセーション試験結果を用いたキャリブレーションから決定したパラメータセットを表-1、表-2に示す。

表-1 パラメータセットA

\bar{g}_i^P	τ_i^G
0.07	20
0.08	100
0.16	3000
0.0025	10000
0.0425	50000
0.075	500000
0.002	5000000
0.000015	50000000
0.05	12000000

表-2 パラメータセットB

\bar{g}_i^P	τ_i^G
0.05	20
0.03	100
0.15	3000
0.0025	10000
0.042	50000
0.068	500000
0.000015	5000000
0.000003	50000000
0.00002	12000000

3. 塗膜クリープ挙動とその再現結果

3.1 リラクセーション試験結果

継手における高力ボルトのリラクセーション特性を評価するリラクセーション試験の試験体を図-2に示す。試験体は、接合面を構成する2面の無機ジंक面（連結板と母板）の目標合計膜厚が $150\mu\text{m}$ の試験体A1と $300\mu\text{m}$ の試験体A2、母板側の接触面をグラインダー仕上げ（無機ジंक塗布なし）とした試験体B1、B2（連結板側の無機ジंक面は、前者では試験体A1、後者では試験体A2と同様の目標膜厚で施工）、接合面がグラインダー仕上げ面のみ

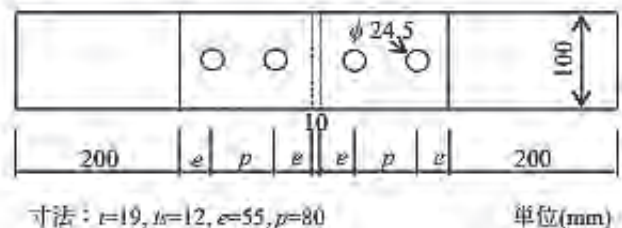
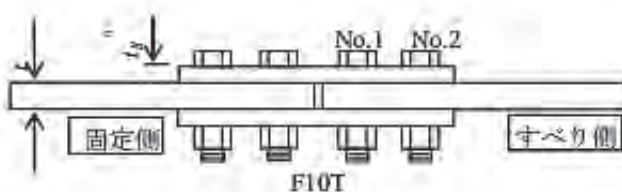


図-2 リラクセーション試験の試験体

で構成される試験体Cの5種類、計15体とした（表-3）。高力ボルトにおける軸力のリラクセーションは無機ジンの膜厚に依存するため、各鋼板においてボルト孔ごとに周辺の膜厚を膜厚計で事前に計測した。ボルト締め使用する高力ボルトはM22 (F10T)とし、各試験体に4本締付け（図-3）、すべり側と称する片側2本の高力ボルトに関して設計軸力の12%増しを目標とした締付け後のリラクセーションを軸部に貼付けたひずみゲージによって28日間をわたって計測した。

図-4にリラクセーション試験結果を示す。縦軸は軸力の初期値からの低下量を初期値で除した軸力減衰率 δ としている。まず試験体Cの結果についてみると、無機ジン面を一切含まない接合面においてもリラクセーションが発生していることがわかる。これは、ボルトねじ部の油分の移動や鋼材自体における僅かなリラクセーション等の使用高力ボルト固有のものと考えられる。そこで、試験体Cで観測された軸力減衰率の平均値を δ_{others} として、無機ジン面の有無によらずどの試験体においても同様に発生したリラクセーションとみなした。つぎに試

表-3 試験体の内訳

試験体名	接触面仕様		試験体数
	母板	連結板	
A1	標準厚無機ジンク	標準厚無機ジンク	3
A2	2倍厚無機ジンク	2倍厚無機ジンク	3
B1	グラインダー	標準厚無機ジンク	3
B2	グラインダー	2倍厚無機ジンク	3
C	グラインダー	グラインダー	3

標準厚無機ジンク：母板側と連結板側で目標合計膜厚が150 μm
 2倍厚無機ジンク：母板側と連結板側で目標合計膜厚が300 μm



図-3 ボルト締めの実施状況

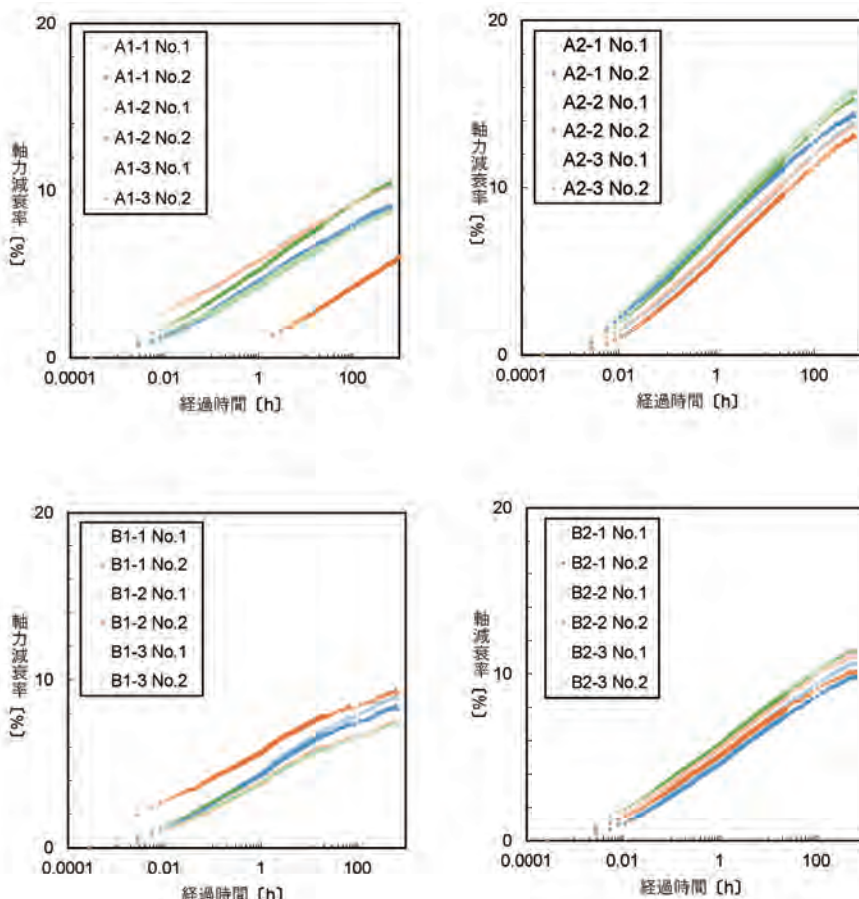


図-4

験体A1、A2の結果に関してみると、接合面の目標合計膜厚が大きい試験体A2では試験体A1より δ が大きな値を示している。試験体B1、B2の結果に関してみても、その比較から無機ジンク面の膜厚の違いの影響が確認できる。また、試験体A1、B1ならびに試験体A2、B2の比較からも、高力ボルトで締付けられる無機ジンク面の合計膜厚が δ に大きな影響を及ぼしていることがわかる。これらの δ からほぼ同じ経過時間の δ_{others} を一律に差し引いたものが無機ジンク面のクリープによる軸力減衰率 δ_{creep} となる。

3.2 リラクゼーション試験の再現結果

第2章で示した解析法（求解には商用解析ソフトウェアAbaqusを用いた）によるリラクゼーション試験の再現状況を試験体ごとに図-5と図-6に示す。ここでは解析で再現される塗膜クリープの影響を比較するため、縦軸は δ_{creep} としている。解析では各種

試験体3体に関する無機ジンク面の平均膜厚と平均ボルト導入軸力を用いている。両図は、本解析法により塗膜クリープに起因すると考えられるボルト軸力の低下が良好に再現されていることを示している。

4. 塗膜厚および接合面構成の影響

4.1 塗膜厚の影響

図-5と図-6に示された解析結果は試験結果と同様に塗膜厚の異なる試験体間の δ_{creep} の差異を再現しており、本研究で開発した塗膜クリープ解析法により塗膜厚が δ_{creep} に及ぼす影響を評価できることを示している。

図-7はこれらの解析で得られた主ひずみのベクトル図をボルト締め直後と28日後について示している。同図に示されているように、試験体A1、A2のいずれの場合も座金直下の無機ジンク面が28日間で最も大きなクリープひずみ（圧縮ひずみの増加）を示し、接合面の無機ジンクは締付け後の時間によ

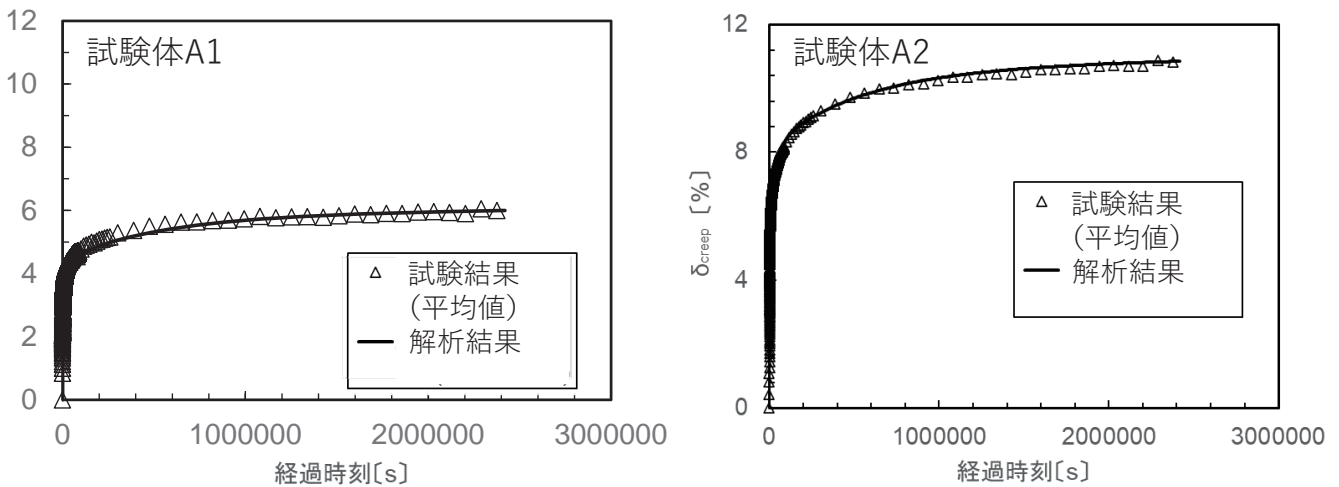


図-5 リラクゼーション試験の再現結果（パラメータセットA）

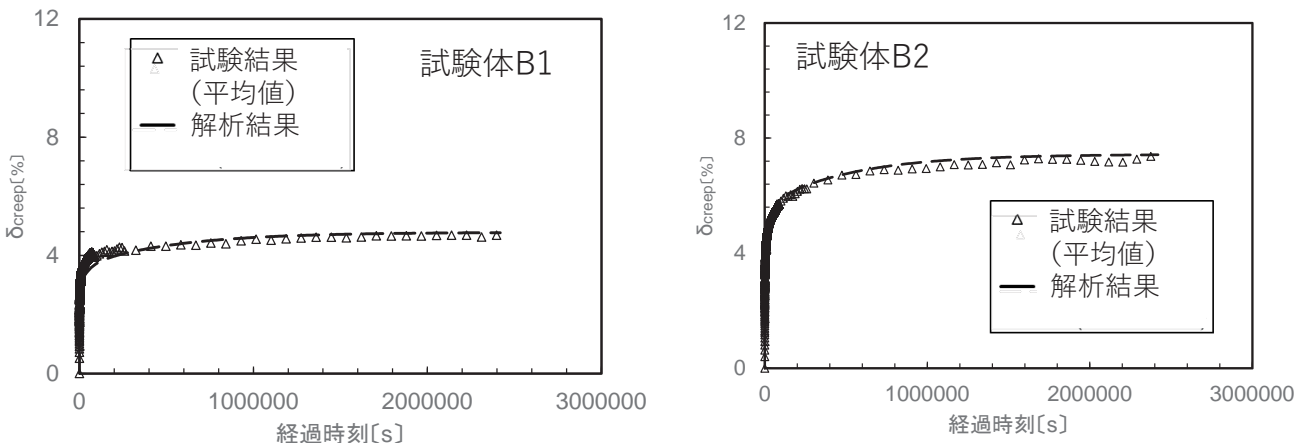


図-6 リラクゼーション試験の再現結果（パラメータセットB）

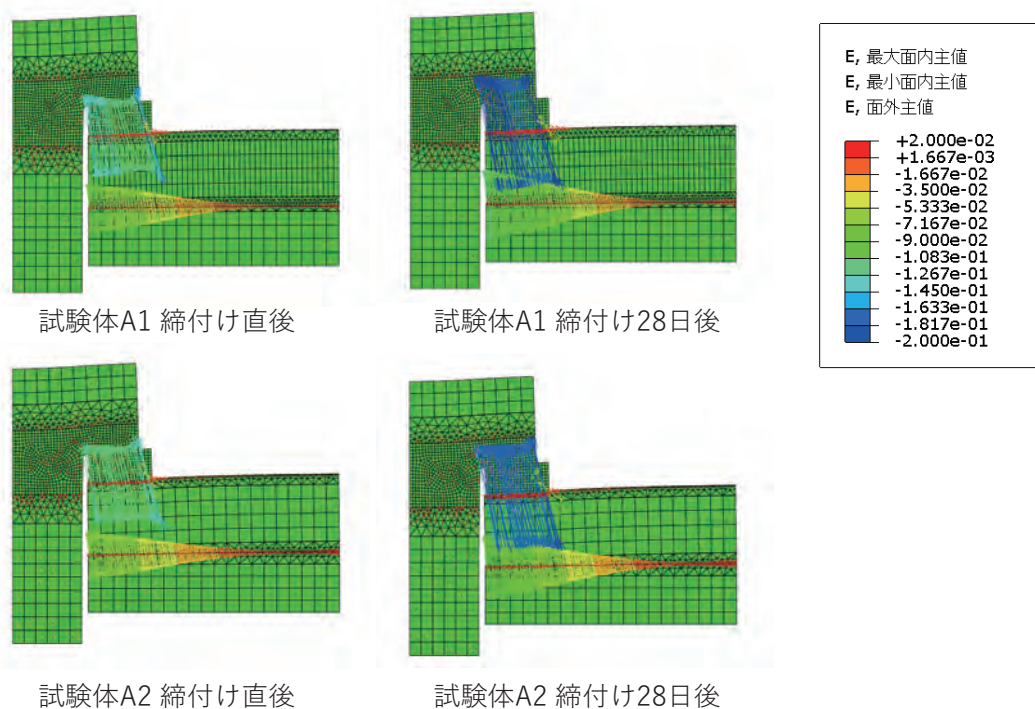


図-7 主ひずみのベクトル図

らずボルト孔に向かって直線的に圧縮ひずみが増加していく分布であることを示す解析結果となった。試験体A1、A2の間の無機ジンク面に発生するひずみ量の違いは小さかった。

4.2 接合面構成の影響

図-8は試験体B1、B2の解析においてパラメータセットAを適用した結果を示している。図-5と図-6に示された解析結果と同図の結果を比較すると、使用するパラメータセットを差し替えることで解析の再現性が大きく低下することが確認できる。このことは、 δ_{creep} に及ぼす接合面構成の影響が大きいことを示唆している。試験体A1、A2では接合面において無機ジンク面同士が接しているが、試験体B1、B2では接合面において無機ジンク面がグライダー仕上げの接触面に接しているため、クリープの進行が異なったものと考えられる。本研究で同定したパラメータセットは、同じ無機ジンクを用いても接合面構成によって異なるこのような差異を含んだものであり、本研究で対象とした仕様以外の接合面構成の場合あるいは同じ仕様でも仕上がりが大きく異なる接合面の場合には新たにパラメータセットを同定する必要があると考えられる。

5. 塗膜クリープの長期予測

筆者らは過去の研究において、高力ボルトのリラ

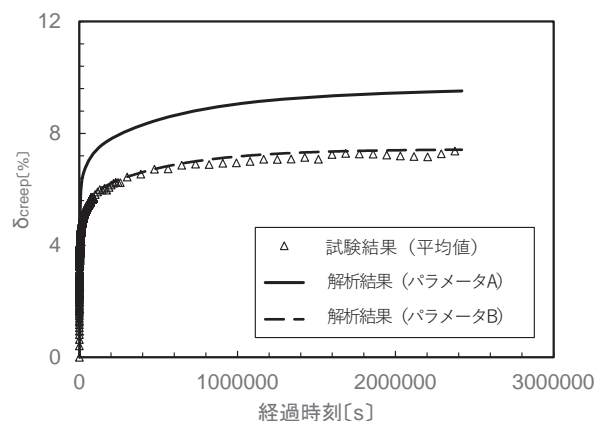


図-8 リラクゼーション試験の再現結果の比較

クゼーションに関する経験的簡易推定法を提案している⁶⁾。ここでは、本研究の塗膜クリープ解析法による推定法を手法i、文献⁶⁾で提案した方法による推定法を手法iiとして、ボルト締付けから28日後と1年後の δ に関する予測結果を比較する。

両手法による比較結果を表-4に示す。同表に示される28日後の実測値に対する推定誤差はいずれの手法でも1%以下となっており、どちらの手法も推定精度が良好であるといえる。1年後における δ の推定値に関しては、手法iiのほうが若干大きな値を示す傾向が見受けられるが、試験体A1、A2に関してその差は実用上問題とならないレベルである。試験体B1、B2に関してはそれよりも差異がやや大きい、これは手法iiにおいて接合面構成の違いが無

表-4 塗膜クリープの長期予測結果

高力ボルト	28日後					1年後		
	δ [%]		実測値	δ の推定誤差 [%]		δ [%]		δ の推定値の差 [%]
	推定値			手法i	手法ii	推定値		
	手法i	手法ii	手法i			手法ii		
A1 No.1	9.34	9.32	8.95	0.38	0.36	11.0	11.3	
A1 No.2	9.43	9.43	9.07	0.36	0.36	11.1	11.4	-0.3
A2 No.1	14.7	14.3	13.8	0.84	0.44	16.9	17.4	-0.5
A2 No.2	14.3	15.0	14.4	-0.02	0.64	16.5	17.9	-1.4
B1 No.1	9.26	9.86	8.88	0.39	0.98	10.1	11.9	-1.8
B1 No.2	8.88	9.37	8.32	0.56	1.05	9.75	11.3	-1.6
B2 No.1	11.4	11.3	10.8	0.59	0.54	12.3	13.8	-1.6
B2 No.2	10.9	10.5	9.92	0.96	0.57	11.8	12.8	-1.0

機ジンク面の膜厚で考慮されているのみであり、無機ジンク面が無機ジンク面と接しているのかグラインダー仕上げの接触面に接しているのかの違いが考慮されていないためである可能性がある。

6. おわりに

本研究では、無機ジンク面を構成する無機ジンク塗膜のクリープ解析法を開発し、無機ジンク面を含む高力ボルト摩擦接合部におけるボルト軸力のリラクゼーションへの適用性を評価した。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) 開発した解析法によりリラクゼーション試験結果をほぼ再現できた。リラクゼーション試験で計測されたボルト軸力減衰に及ぼす塗膜厚の影響も良好に再現できた。
- (2) 解析結果より、無機ジンク面におけるクリープによる軸力減衰率は接合面構成に依存する可能性が示唆された。
- (3) 筆者らは過去の研究において提案した高力ボルトのリラクゼーションに関する経験的簡易推定法と本研究で開発した解析に基づく推定法の1年後における軸力減衰率の推定値の差は、実用上問題とならないレベルであった。

このように、本研究ではクリープ解析法を開発し塗膜厚や接合面構成の異なる継手に関するパラメトリック解析を実施できたが、無機ジンク面の特性値とすべり耐力試験で得られたすべり係数の相関評価や、解析で再現される継手ごとの塗膜内部状態と試験で得られたすべり係数の関係の考察までは至らなかった。これらについては今後検討したい。

謝辞

本研究は、橋梁調査会の橋梁技術に関する研究助成によって実施された。また、リラクゼーション試験と有限要素解析は、横浜国立大学4年生（研究当時）の河村竜汰氏によるところが大きい。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説-II 鋼橋・鋼部材編,2017.
- 2) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造）,2009.
- 3) 南邦明,田村洋,吉岡夏樹,内田大介,茂呂充,安藤光希:高力ボルト継手における摩擦面の数に応じた導入ボルト軸力に関する検討,土木学会論文集A1,Vol. 75,No. 1,pp. 46-57,2019.
- 4) 南邦明,田村洋,内田大介,白旗弘実,吉岡夏樹,筒井康平,藤野大地:高力ボルト継手のリラクゼーション試験における初期値の設定について,土
- 5) 木下啓吾,坪田実,池本栄嗣:塗膜の付着性と内部応力（その2）,色材協会誌,Vol. 68,No. 9,pp. 573-577,1995.
- 6) 田村洋,南邦明,吉岡夏樹,内田大介,茂呂充,濱達矢,平尾賢生:仕様の異なる接合面を含む高力ボルト摩擦接合継手の適用性,土木学会論文集A1,Vol. 76,No. 2,pp. 255-274,2020.

水の浸入による耐疲労性の低下を抑制するRC床版断面の開発

日本大学 工学部 土木工学科 教授 子田 康弘

1. はじめに

既存道路橋の老朽化問題の多くは、RC床版の劣化に起因する。これは、RC床版を構成する材料の劣化が構造性能低下を直接的に招くことにある。この種の損傷は、疲労という荷重作用に、図-1のように水の浸入が相まって促進される。最終的には、図-2のような水平ひび割れの発生により構造性能は消失し終局状態に至る。また、材料劣化（例えば塩害）が重なった複合的な損傷においても、床版への凍結防止剤混じりの水の浸入が誘因となり、耐疲労性を著しく低下させる¹⁾。現行の水対策は、排水と防水層が担っている。しかし、防水工は、施工中に傷つく場合や供用中に何らかの原因で破損する場合がある。フェールセーフ的な発想をすれば、仮に雨水が防水層を通過し床版へ浸入したとしても、対策が施されているRC床版という考えも成り立つと思われるが、このような観点に立脚した検討はなされていない。

本研究では、既往の耐疲労性低下の要因²⁾に関する知見を踏まえ、配筋やコンクリートの仕様を変えた複数の断面を考案した³⁾。この疲労載荷試験結果のうち、最も抑制した断面を有する床版供試体を作製し、これの輪荷重走行試験を行い、考案断面の性能の検証を行った。また、考案断面に用いた補強材には、耐疲労性に対する相乗効果が示唆されたため、これについても実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 床版供試体による輪荷重走行試験

床版供試体の作製にあたっては、図-3に示す上側鉄筋を配筋しない断面（I型、単鉄筋断面）とし、ビニロン繊維（II型、以下、PVA）を混和したひび割れの進展が抑制されるとともに炭素繊維グリッド（III型、以下、グリッド）を縦配置し床版のせん断補強を施した断面（図中のIV型）とした。この断面は、湛水状態における耐疲労性が飛躍的に向上することを実験的に明らかにしたためである³⁾。

図-4に、供試体概要を示す。図より、供試体寸法は3,000×2,000×160mmである。また、青線範囲（2,200×1,400mm）に土手を作製することで湛水させ試験を実施しており、輪走行下も水が浸入する状

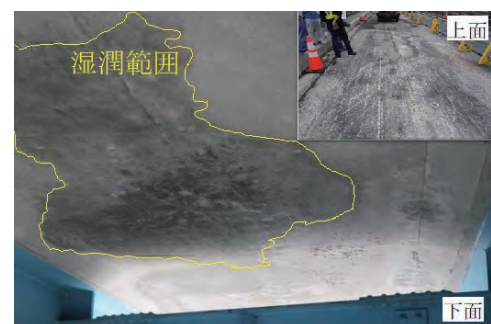


図-1 水が浸入し湿潤状態にある床版下面



図-2 水平ひび割れと砂利化が発生した撤去床版

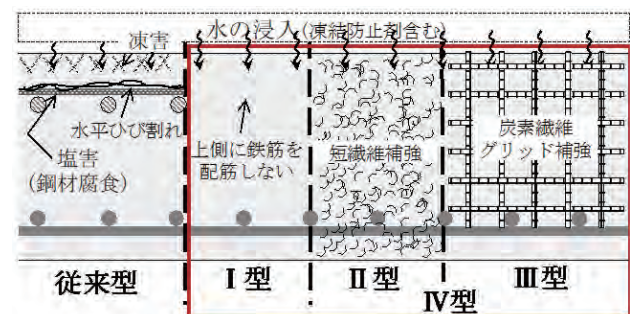


図-3 考案断面の概要

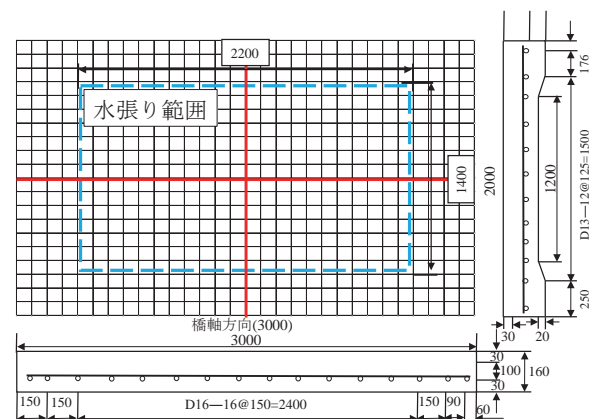


図-4 床版供試体（IV型）の形状

態とした。表-1に、コンクリートの配合を示す。なお、試験開始時の圧縮強度は、30.8MPaであった。また、PVAとグリッドの機械的性質は表-2と表-3である。なお、比較用の従来断面を持つ床版供試体も併せて作製した。グリッドは、版状供試体同様に下側主鉄筋間隔で全体に設置した。

図-5に、輪荷重走行試験機を示す。輪荷重走行試験は、供試体の支持条件として、長辺方向の2辺を単純支持、短辺方向の2辺を弾性支持とした。輪荷重走行試験における載荷ステップは、T荷重における1車輪分の荷重である98kNを基本荷重とし、走行回数10万回、20万回到達時に、載荷荷重を29.4kNずつ増加させる段階載荷方式により実施した。輪荷重走行回数は、段階載荷による走行回数を98kNによる走行回数に換算した等価繰返し走行回数で評価した。具体的には、各荷重における走行実績を、マイナー則を仮定した式(1)により98kNに換算した際の走行回数として求め、湛水状態の床版の疲労破壊回数と気中床版の疲労破壊回数を比較した。

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m n_i \quad (1)$$

ここで、 N_{eq} ：基本荷重 P_0 に換算した走行回数、 P_0 ：基本荷重(98kN)、 n_i ：荷重 P_i の走行回数、 m ：S-N曲線の傾きの逆数(12.76)である。

計測項目は、図-6に示す無損傷時(青色)のたわみから目標走行回数終了時点で基本荷重98kNを供試体中央に静的載荷した際の床版に発生する疲労損傷の蓄積により増加したたわみ(橙色)、すなわち総たわみの計測を行った。また、強制振動試験による共振周波数⁴⁾の測定も行った。この試験は、測定領域を定め所定の走行回数に達した後、健全時からの振動数の低下率に関する面的な分布を求めた。

2.2 CFロッドとPVAでせん断補強したRCはりの疲労試験

後述の実験結果で示すが輪荷重走行試験より、単鉄筋断面かつ炭素繊維(以下、CF)グリッドとPVAによる補強を施すことで耐疲労性が向上することが判明した。補強材の組合せによる相乗効果の可能性

表-1 コンクリートの配合1

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
20.0	64.3	47.0	4.5	178	277	839	1005	1.9

表-2 PVAの機械的性質

直径 (μ)	標準長 (mm)	引張強度 (MPa)	切断伸度 (%)	ヤング率 (GPa)
660	30	900	9.0	23.0

表-3 グリッドの機械的性質

公称断面積 (mm ²)	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)	格子間隔 (mm)
4.4	1400	100	50×50



図-5 輪荷重走行試験機

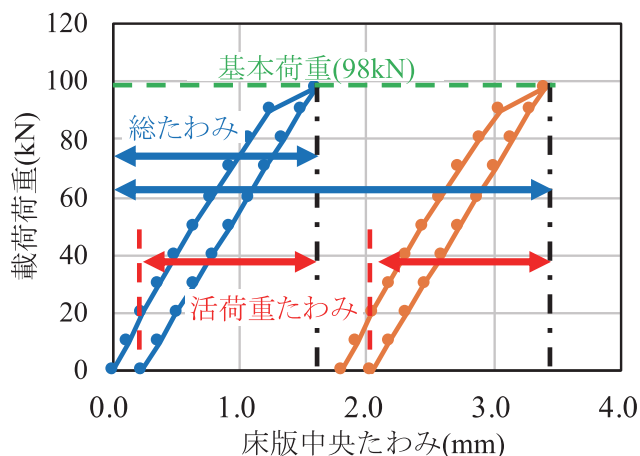


図-6 総たわみの定義

も示唆されたが未だ最適補強量の定量評価には至ってはならず、疲労作用下の相乗効果と補強材の適量を評価するため、はり供試体による定点の疲労載荷試験を実施した。

本実験では、まずせん断補強筋としてせん断分担

力の算出を簡単にするためCFロッドを使用した。表-4に、実験条件を示す。表より、CFロッドによるせん断補強筋比が0%、0.67% (3本)、0.89% (4本)、および1.12% (5本) の4条件、PVA混入が0%、0.25%、0.50% の3条件であり、これらを組み合わせた7条件とした。なお、表中のnは供試体数である。図-7に、供試体形状の概要を示す。図より、供試体は、寸法を高さ200mm×長さ1000mm×幅100mmとし、主鉄筋にSD295AD13を2本配置した単鉄筋矩形コンクリートはりである。ここで、斜めひび割れの発生によるせん断破壊領域を制御するため、検討範囲 (図中の赤枠) を設け、反対側はSD295AD10のスターラップでせん断補強を施し、更に曲げ疲労破壊を防ぐためCFシート下面補強を施した。検討範囲へのCFロッドの配置は、せん断スパン内で等間隔になるよう配置した。表-5にコンクリートの配合を示す。供試体には呼び強度30のレディーミクストコンクリートを使用し、PVAは供試体作製直前に添加した。圧縮強度はPVA無が31MPa、有が33MPaであった。表-6には、CFロッドの物性値を示す。PVAは、表-2を使用した。疲労載荷試験は、定点載荷試験装置 (図-8) を用いた対象2点集中荷重方式とした。上限荷重は無補強供試体 (CFロッド0%、PVA0%) の斜めひび割れ発生荷重70kNとその80%とし、下限荷重は5kNとした。疲労荷重は正弦波として与えた。載荷速度プログラムは、1万回まで0.5Hz、5万回まで1.0Hz、100万回まで1.5Hzであり、これ以降は2.0Hzとした。疲労載荷試験における計測項目は、目標載荷回数終了時点で上限荷重を載荷した際の供試体中央変位と載荷回数とした。

3. 輪荷重走行試験に基づく考案断面の耐疲労性

単鉄筋 (S) でグリッド (G) とPVA (Pv) を合わせた断面の床版供試体 (以下、本床版) の上面湛水状態を保持した輪荷重走行試験を実施した。なお、本床版との比較のため、既往の従来断面の気中床版²⁾と、本床版と同時に作製した従来断面の水張り床版の結果を併せて示す。

3.1 たわみ-等価繰返し走行回数の関係

図-9に、総たわみと等価繰返し走行回数の関係を示す。図より、まず疲労破壊回数は、気中床版2億330万回、水張り床版680万回、そして本床版は1800万回であった。湛水状態の床版は、乾燥状態の床版よりも耐疲労性は劣り、本床版の疲労破壊回数も気

表-4 はり供試体の実験条件

せん断補強筋比	PVA混入比		
	0%	0.25%	0.50%
0.00%	○ n=1		○ n=1
0.67% (3本)	○ n=2	○ n=2	○ n=2
0.89% (4本)			○ n=2
1.12% (5本)			○ n=2

n:供試体数

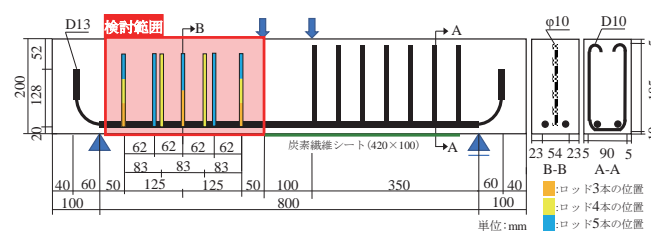


図-7 はり供試体の概要

表-5 コンクリートの配合2

粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水	セメント	細骨材①	細骨材②	粗骨材	混和剤
20	18	51.5	4.5	47.9	184	358	417	407	936	3.58

表-6 CFロッドの物性値

直径 (μ)	標準長 (mm)	引張強度 (MPa)	切断伸度 (%)	ヤング係数 (GPa)
660	30	900	9.0	23

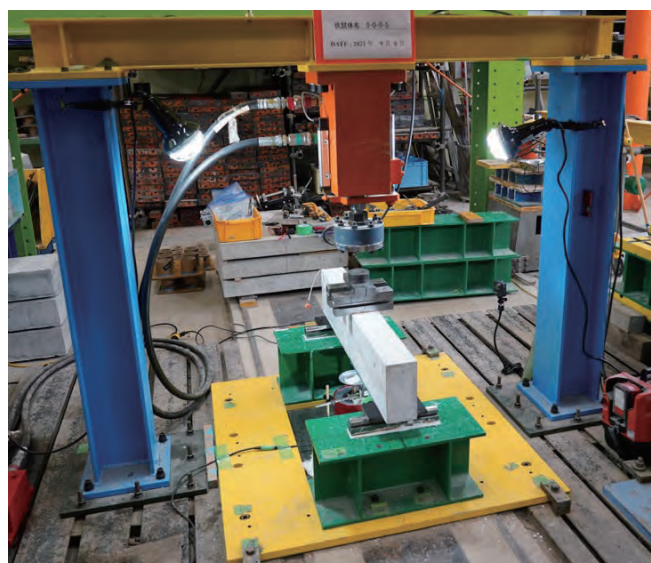


図-8 疲労載荷試験装置

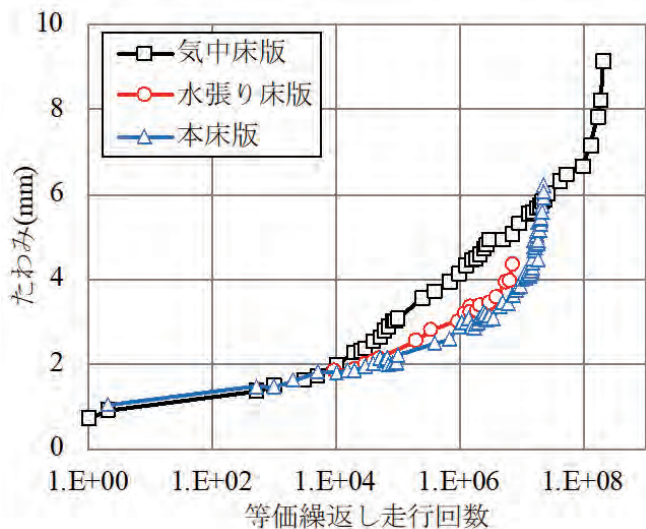


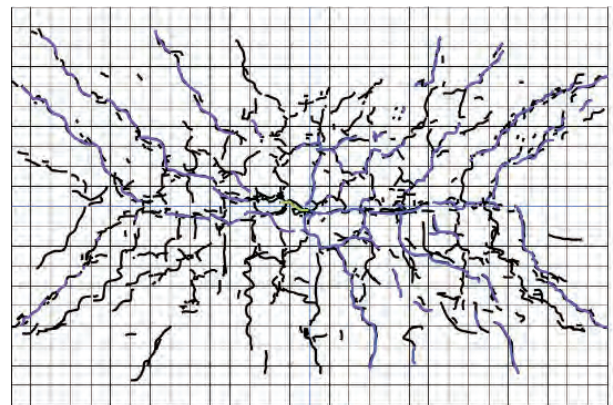
図-9 床版中央たわみ—等価繰返し走行回数との関係

中床版程度にはならなかった。しかし、水張り床版の約2.6倍と明らかに耐疲労性の低下を抑制する結果となった。本床版の総たわみの増加傾向は、他の供試体と同様に走行回数の増加に伴い徐々に増加する傾向にあったが、気中床版、水張り床版よりも増加の程度は小さく推移する傾向が見て取れた。本床版と水張り床版の疲労破壊時付近のたわみの増加傾向に着目すると、水張り床版は急激にたわみが増加するという脆性的な増加であったが、本床版はこのような傾向とはならず、じん性的な増加であり、これはPVAとグリットにより押抜きせん断破壊時の斜めひび割れの急激な進展を抑制したためと考えられた。

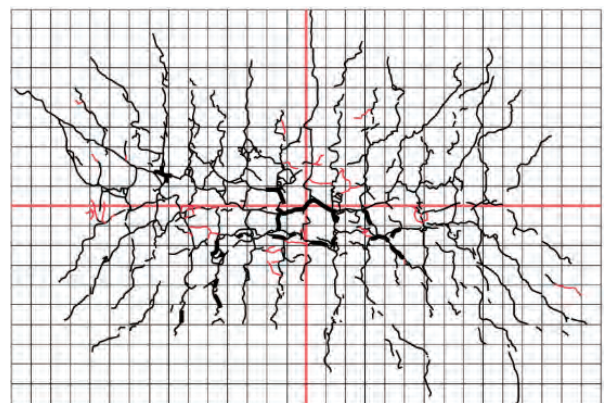
3.2 下面ひび割れ発生状況と疲労破壊様相

図-10に、本床版（走行回数1800万回）と気中床版（走行回数2300万回）のそれぞれ疲労破壊直前における床版下面のひび割れ発生状況を示す。図より、気中床版と比較して、軸直角方向のひび割れと軸方向のひび割れが網目状に進展している状況や軸方向端部における放射状のひび割れといった発生形態に明かな違いは無いように見て取れる。すなわち、本床版は従来断面と同様の床版たわみに応じたひび割れの発生と進展の過程を経ているといえる。

図-11は、本床版における走行回数1500万回付近の下面の漏水状況である。所有する輪荷重走行試験機によるこれまでの著者らの経験からは、このような漏水が発生した直後に突如、押抜きせん断破壊が生じる。しかし、本床版の場合は、この状態のまま約300万回走行状態を保つという押抜きせん断破壊を抑制するような挙動を示した。図-12は、試験終



(a) 気中床版（走行回数2300万回）



(b) 本床版（走行回数1800万回）

図-10 床版下面のひび割れ発生状況



図-11 床版下面の漏水状況（走行回数1500万回）



図-12 床版上面の砂利化状況（試験終了時）

了後の上面の状況である。上面走行範囲の一部に砂利化の発生が確認された。これより、考案断面は砂利化そのものを防ぐことはできないが、砂利化の発生時期および進展速度を従来断面（水張り床版）よりも遅らせることができると考えられた。

3.3 共振周波数比による内部損傷状態の推定

図-13に、供試体中央の共振周波数比⁴⁾と等価繰返し走行回数の関係を示す。共振周波数比は、初期値に対する共振周波数の低下割合を示している。健全部における共振周波数比は、0.88~1.12（95%信頼区間）の変動を有するため⁵⁾、損傷部と判断する閾値を0.8と定めている²⁾。なお、共振周波数の初期値（載荷前）は、気中床版が11000Hz、本床版と水張り床版が10200Hzであった。図より、走行回数約100万回までは、供試体を問わず走行回数の増加とともに共振周波数比は低下しており、本床版は気中床版と同様の低下傾向であった。これが走行回数約300万回を超えると0.8を下回り、さらに気中床版に比べ本床版と水張り床版の値の低下が著しい傾向となった。これは内部損傷が進行していることを意味しており、湛水状態にある場合は水の浸入によって疲労による損傷が乾燥状態よりも加速するといえる。

図-14は、水張り床版と本床版の共振周波数比をコンターとして表した図であり、水張り床版の疲労破壊時の走行回数680万回時とこの回数に近い本床版の走行回数670万回を比較している。なお、コンター図の色は、寒色から暖色になる程、共振周波数比は低下していることを表している。図より、水張り床版の赤色範囲は、床版中央に集中しており、この範囲で疲労損傷が進行したと判断される。これに対して本床版は、床版中央の共振周波数比は未だ0.5~0.6と水張り床版程には損傷が進行しておらず、この段階では損傷の程度は水張り床版よりも低いといえる。また、赤い破線枠は0.3~0.4と床版中央よりも値が低下しているがこの範囲は、図-11の下面漏水範囲であり、目視で確認できる損傷と一致した。このように、本床版は、水張り床版のような急激な破壊はしておらず、これはグリットのせん断補強効果とPVAによる架橋効果の相乗効果によるもので、この効果が疲労破壊に達するまで発揮されたと推察された。

以上より、考案断面（IV型）の耐疲労性の向上は、湛水状態の輪荷重走行試験におけるRC床版（本床

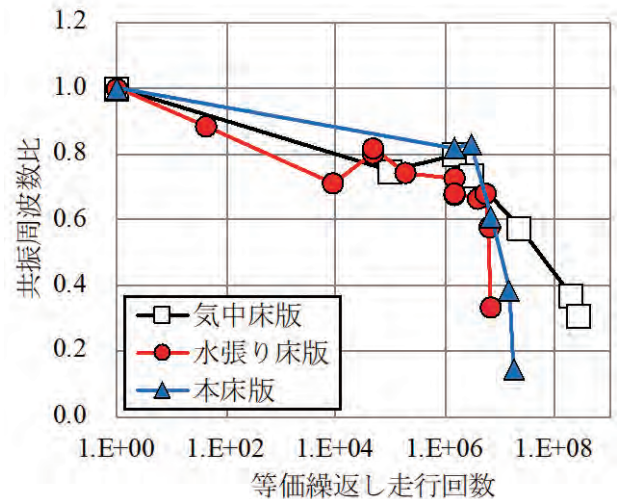


図-13 共振周波数比—等価繰返し走行回数の関係

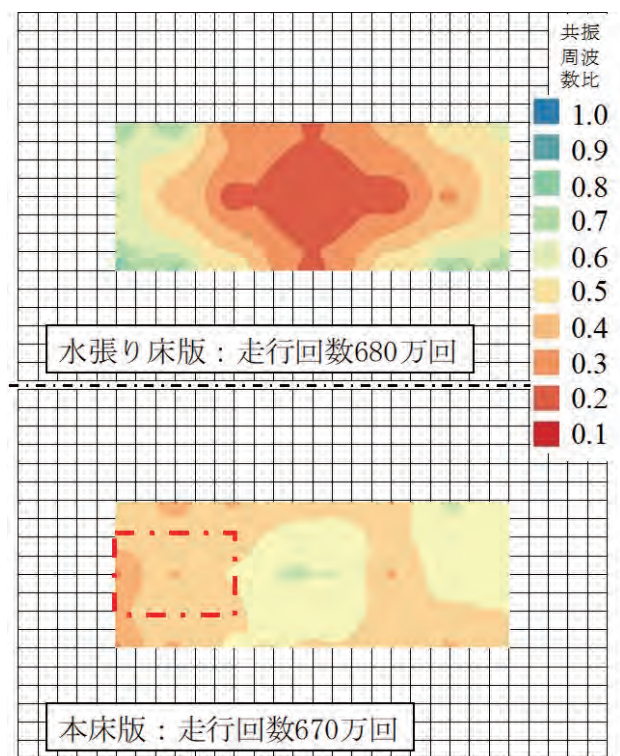


図-14 水張り床版と本床版の疲労損傷分布

版)の耐疲労性の低下を抑制する結果として確認された。

4. CFロッドとPVA繊維でせん断補強したRCはりの耐疲労性に及ぼす補強材の相乗効果に関する検討

4.1 概説

3章の成果より、補強材の組合せによる相乗効果の可能性も示唆されたが未だ最適補強量の定量評価には至ってはない。そこで疲労作用下の相乗効果と補強材の適量を評価するため、はり供試体による定点の疲労載荷試験を実施した。なお、現在も疲労試験は実施中であり、試験が終了した供試体を示す。

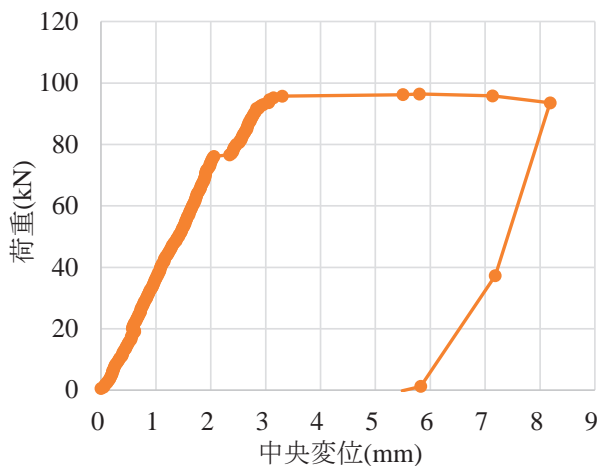


図-15 静的荷重—変位関係

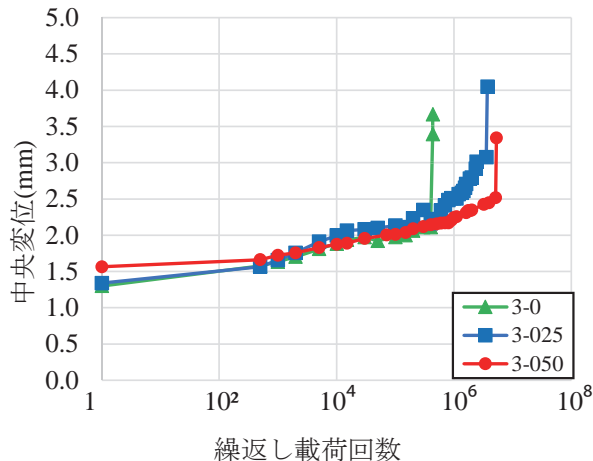


図-17 中央変位と繰返し载荷回数 (上限荷重56kN)

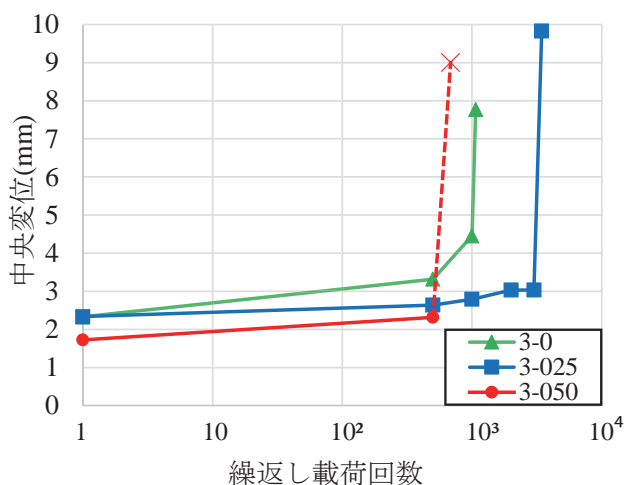


図-16 中央変位と繰返し载荷回数 (上限荷重70kN)

0.5%では0%よりも回数が僅かに下回るという結果

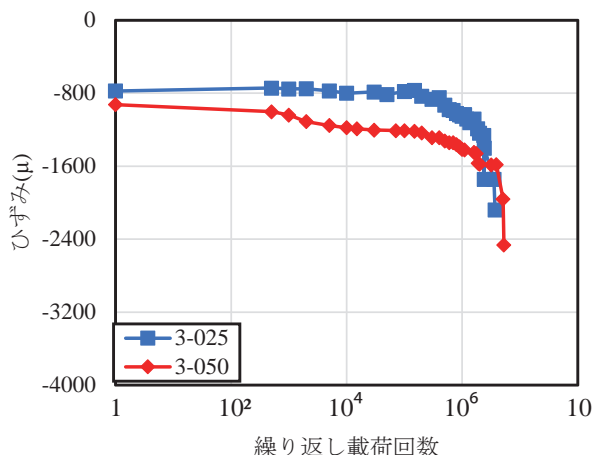


図-18 供試体上縁のひずみと繰返し载荷回数

4.2 载荷試験結果

(1) 静的载荷試験

図-15に、静的载荷試験における荷重—変位関係を示す。図より、斜めひび割れの目視確認は約70kNであった。その後76.6kNで斜めひび割れが明らかに進展し変位の増加が見られた。なお、最大荷重は96.4kNであった。

(2) 疲労载荷試験

図-16に、上限荷重70kNとした疲労载荷試験結果を示す。図より、疲労破壊回数は、PVA混入率0%が1067回、0.25%が3441回、そして0.50%が681回であった。全体的に斜めひび割れ発生荷重での疲労载荷試験は繰返し载荷回数を増加させることなく疲労破壊に至る結果であり、せん断破壊に近い状態における耐疲労性はほぼ期待できないと考えられた。次に、個別の疲労破壊回数に着目すると、PVA混入率0%よりも0.25%の方が回数は多く、PVAによるひび割れ進展抑制が耐疲労性の向上に寄与したといえるが、

を得た。この理由については次の試験結果とともに考察する。

図-17に、上限荷重56kNとした疲労载荷試験結果を示す。まずひび割れの進展は、初回载荷時点では斜めひび割れは発生しておらず、繰返し载荷回数の増加に従って斜めひび割れの発生と進展が観察された。次に、図より疲労破壊回数は、PVA混入率0%が43.6万回、0.25%が370万回、そして0.50%が530万回と明らかに回数は増加し、混入率の増加によっても疲労破壊回数は増加する傾向を示した。しかし、0.25%と0.5%の疲労破壊回数の差は160万回であり、混入率が2倍にはなっているものの回数の増分は倍増とまでには至らなかった。また、中央変位の増加傾向に着目すると、0%破壊時までは3供試体とも同様の増加傾向を示しており、その後、0.25%は破壊するまでの変位の増加も大きい傾向であった。これに対して、0.5%は繰返し回数の増加にともなう変位の増加の傾向は、初期からほとんど変化がなかった。しかしながら、疲労破壊時に着目すると0.25%と0.5%

の中央変位の差は0.5mmあり、0.5%は図のように突如たわみが急増し破壊に至る様相を呈した。これは、PVA混入率が高くなると、ひび割れ開口抑制には効果的だが、見かけ上の剛性が高い状態で疲労を受け続けることで、圧縮側コンクリートが疲労強度に達し破壊に至ると推察された。よって、上限荷重70kNにおいても0.5%は圧縮側コンクリートが疲労強度に達したと可能性がある。

図-18に、PVAを混和した供試体0.25% (3-025) と0.5% (3-050) の供試体上縁の圧縮ひずみと繰返し載荷回数との関係を示す。図より、疲労載荷初期のひずみは約800 μ であり、繰返し載荷回数が増加するにつれてPVA混入率0.25%はひずみに変化はないが、0.50%は徐々に増加するような傾向であった。このひずみ変化の理由は現在検討中であるが0.50%のひずみ変化より疲労の蓄積によってひずみが増加したと考えられる。また、ひずみが明らかに増加したのは繰返し載荷回数が約100万回付近であり、0.25%のたわみの急増回数とも概ね調和している。0.50%においても疲労破壊直前で増加しておりこれが疲労破壊のトリガーになったと考えられた。

5. まとめ

本研究で得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 床版供試体より、湛水状態において、複鉄筋断面よりも単鉄筋断面かつグリッドの設置とPVAを入れることで耐疲労性が従来断面より飛躍的に向上した。
- 2) この要因は、グリッドが斜めひび割れに対してせん断補強効果を発揮したこと、およびPVAが架橋効果を発揮したことによると考えられた。
- 3) 考案断面の耐疲労性は、下側主鉄筋とグリッドまたはPVAという断面よりも明らかに疲労破壊回数が増加しており、グリッドとPVAの組合せは相乗効果を発揮する可能性が示唆された。
- 4) 従来断面の湛水状態のRC床版よりも疲労破壊回数が増加しており、耐疲労性の低下を抑制することが確認された。
- 5) はり供試体より、耐疲労性は、PVA混入量の増加

に見合うように必ずしも向上するとは言い難い結果を得た。

今後は、現在実施中のCFロッド補強量の変化と耐疲労性の関係性を評価し、これら材料の疲労に対する個々の効果および相乗効果を定量評価するため実験のみならず、解析を加えた両面から検討を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、(一財)橋梁調査会「橋梁技術に関する研究開発助成」により実施した。実験の実施に関しては、日本大学工学部土木工学科コンクリート工学研究室学生諸氏の助力を得た。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 前島拓、子田康弘、土屋智史、岩城一郎:塩害による鉄筋腐食が道路橋RC床版の耐疲労性に及ぼす影響、土木学会論文集E2、Vol.70、No.2、pp.208-225、2014。
- 2) 子田康弘、島野孝則、田中泰司、岩城一郎:輪走行作用を受ける道路橋RC床版の疲労損傷過程に関する実験的研究、構造工学論文集A、66A巻、p.733-740、2020。
- 3) 大内凌輔、子田康弘:水の浸入に起因した耐疲労性の低下を抑制するRC床版断面に関する実験的検討、構造工学論文集A、2021、68A巻、p.756-764、2022。
- 4) 内藤英樹、齊木佑介、鈴木基行、岩城一郎、子田康弘、加藤潔:小型起振機を用いた強制加振試験に基づくコンクリート床版の非破壊試験法、土木学会論文集E2、Vol.67、No.4、pp.522-534、2011。
- 5) 内藤英樹、小林珠祐、土屋祐貴、杉山涼亮、山口恭平、早坂洋平、安川義行、鈴木基行:局所振動試験に基づく道路橋RC床版の内部損傷評価、土木学会論文集E2、Vol.73、No.2、pp.133-149、2017

建設技術フェア等の参加報告

例年各地方整備局等が主催する建設技術フェア等に、当調査会支部は参加しています。

令和3年度においても、コロナ禍、参加を見合わせイベントもありました。

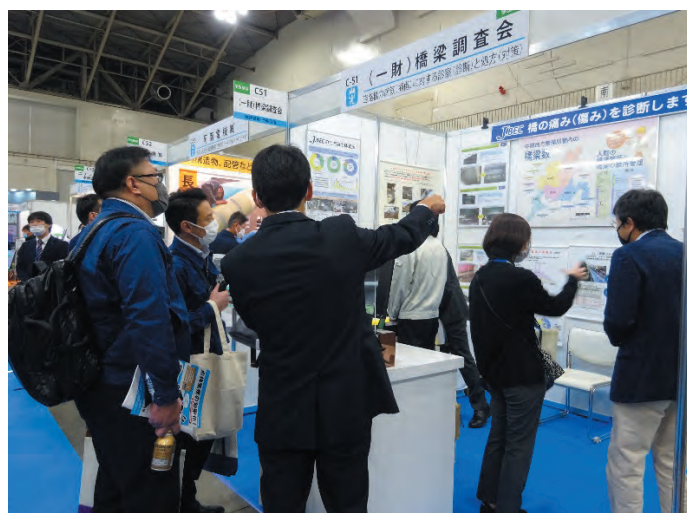
そんな中、中部地方整備局等が主催する建設技術

フェアは開催され、建設関係者はもとより一般の方々にも、「一般財団法人 橋梁調査会」を知って頂く機会として、当調査会が実施する事業を紹介（展示）いたしました。また、建設技術フォーラムにはオンライン展示を行いました。

開催日	イベント名	主催者
令和3年12月14日・15日	建設技術フェア2021in中部	国土交通省中部地方整備局 名古屋国際見本市委員会 (公財)名古屋産業振興公社
令和3年11月18日・19日	建設技術フォーラム2021inちゅうごく	建設技術フォーラム実行委員会



出展ブース



パネルの説明を聞き入る来場者

令和3年度 橋梁シンポジウム 「橋のこれから・新技術」開催報告

橋梁調査会が主催する令和3年度橋梁シンポジウムを令和3年11月30日（火）にイイノホール（東京都千代田区）にて開催しました。

本シンポジウムは、平成25年度より「国際橋梁シンポジウム」として5回開催してきましたが、広く橋梁に関する技術の継承と発展を図り、知識やノウハウの提供の場とするため、令和2年度に発展的に改組したものです。なお、令和2年度は、ビデオオンデマンド配信のみの実施でした。

令和3年度橋梁シンポジウムは、来場開催とビデオオンデマンド配信とのハイブリッド開催といたしました。様々な理由から来場が困難な方に対して、ビデオオンデマンド配信は好評を得ており継続していく予定としています。

今回は、京都大学の宮川先生に基調講演をいただき、後援をして頂いている各団体様ならびに国土技術政策

総合研究所様からご講演いただきました。

当日は約130名の皆様にご参加いただき、盛会のうちに終えることができました。

貴重なご講演をいただきました講師の皆様、ご後援いただきました国土交通省・(公社)土木学会・(一社)建設コンサルタンツ協会・(一社)日本橋梁建設協会・(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会の関係者皆様には、多大なご協力をいただきましたことに深く感謝の意を表します。

以下にプログラムと各講演者のご講演の状況を示します。



講演会会場風景

プログラム	
開会挨拶	一般財団法人橋梁調査会 理事長 菊川 滋
基調講演「コンクリートとの挑戦」	京都大学インフラシステムマネジメント研究拠点ユニット 宮川 豊章
「調査・設計等に関する新技術への取組み」 (一社)建設コンサルタンツ協会 交通基盤技術委員会 道路構造物専門委員会委員長	小原 淳一
「トルコ共和国第1ボスポラス橋の保全工事報告～長大吊橋の大規模保全～」 (一社)日本橋梁建設協会 海外事業委員会委員	佐藤 陽一
「PC橋の維持管理における最新技術」 (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修委員会保全補修部会長	安藤 直文
「新阿蘇大橋における地盤変状の影響を最小化するための構造的配慮と工夫 ～平成28年熊本地震での教訓を踏まえて～」 国土交通省 国土技術政策総合研究所 熊本地震復旧対策研究室長	西田 秀明

基調講演「コンクリートとの挑戦」

【講演者】(敬称略、所属等は開催時点。以下同じ)

宮川 豊章

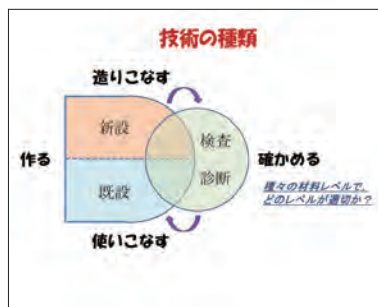
京都大学インフラシステムマネジメント研究拠点ユニット

【主な講演内容】

「丈夫で、美しく、長持ち」、「造りこなすから使いこなすへ」等



「丈夫で、美しく、長持ち」日ノ岡第11号橋



「造りこなすから使いこなすへ」



宮川豊章先生

講演1「調査・設計等に関する新技術への取組み」

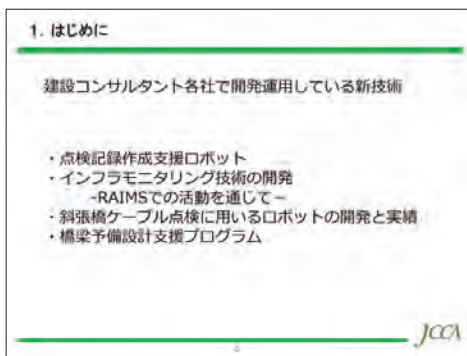
【講演者】 小原淳一

(一社) 建設コンサルタンツ協会

交通基盤技術委員会 道路構造物専門委員会委員長

【主な講演内容】

建設コンサルタント各社で開発運用している新技術の紹介



講演2「トルコ共和国第1ボスポラス橋の保全工事報告 ～長大吊橋の大規模保全～」

【講演者】 佐藤陽一

(一社) 日本橋梁建設協会 海外事業委員会委員

【主な講演内容】

トルコ共和国 第1ボスポラス橋の保全工事報告



講演3「PC橋の維持管理における最新技術」

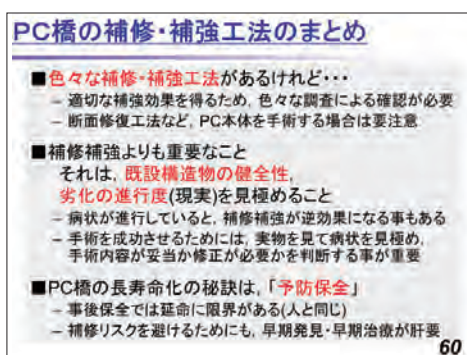
【講演者】 安藤直文

(一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会

保全補修委員会保全補修部会長

【主な講演内容】

「PC橋の維持管理のポイント」、「PC橋のリニューアル工事」等



講演4「新阿蘇大橋における地盤変状の影響を最小化するための構造的配慮と工夫～平成28年熊本地震での教訓を踏まえて～」

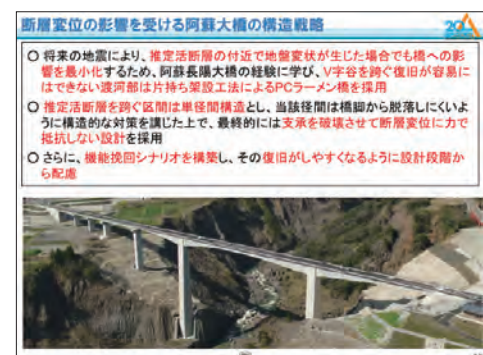
【講演者】 西田秀明

国土交通省 国土技術政策総合研究所

熊本地震復旧対策研究室長

【主な講演内容】

阿蘇大橋の復旧における構造的な配慮や工夫等を紹介



第7回 橋梁のメンテナンスに関するセミナーの報告

令和4年2月18日（金）に当財団大会議室での会場開催とオンライン開催とを併用したハイブリッド開催にて、賛助会員向けの「橋梁のメンテナンスに関するセミナー」を開催しました。来場者は少数でしたが、オンライン参加を含め約120名が参加するセミナーとなりました。今回は、講師による診断事例を紹介した後、ディスカッションの時間を多くとるようにしました。当財団が導入促進機関であることから「橋梁支援技術について」ご紹介した後、次の2題のご講演をいただきました。

はじめに、当財団橋梁診断アドバイザーの松村様から「橋梁診断事例 その1 ーコンクリート桁の診断事例などー」をテーマに、塩害を受けたコンクリート桁の判定案・考え方について写真を交えご講演をいただきました。

続いて、当財団橋梁診断アドバイザーの松村様から「橋梁診断事例 その2 ーRC床版の土砂化と再劣化を考えるー」をテーマに、床版の土砂化を中心とした再劣化事例と今後考え得る対策案についてご講演をいただきました。

さらに、当財団調査部山本構造課長の山本より講演に関連した損傷事例・診断事例をご紹介しながら参加者の方を交えた意見交換を行いました。

参加者からは、「劣化に関する貴重な事例が参考になった」「事例として話題提供をして頂けて、と



講演Ⅱ（樋野勝巳アドバイザー）

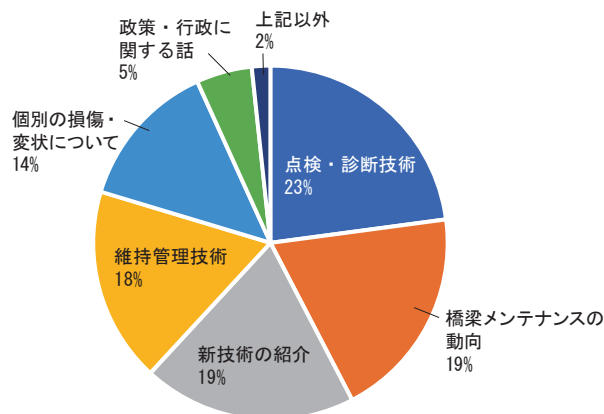
ても有意義なセミナーであった」などの声が聞かれました。

本セミナーは、2年ぶり7回目の開催となりましたが、多数のご参加をいただき、皆様には厚く感謝申し上げます。今後、定例化して毎年開催する予定でございます。

また、今後希望するテーマについて、アンケートを実施した結果、円グラフに示すとおり「点検・診断技術」「橋梁メンテナンスの動向」「新技術の紹介」などの声がありました。この会は実務者向けのセミナーとして実施しておりますが、この結果を今後の開催に参考とさせていただきます。



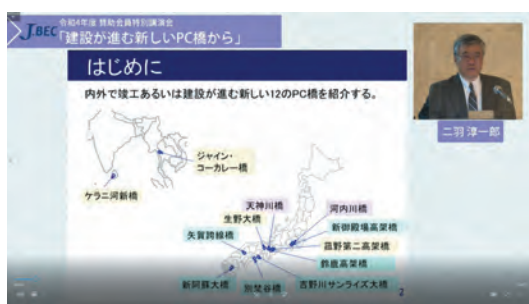
講演Ⅰ（松村英樹アドバイザー）



講演会・セミナーで希望するテーマ

令和4年度賛助会員特別講演会の報告

定例の賛助会員向けの特別講演会を2022年4月18日にアルカディア市ヶ谷にて開催し、68名の方にご参加いただきました。当日、来場された方へは座席指定制とし、1時間半程度の講演会となりました。また、当日の講演内容は、賛助会員向けにオンデマンド配信を実施しました。



配信状況（二羽淳一郎 東京工業大学名誉教授のご講演）

講演会冒頭、橋梁調査会 菊川滋理事長から開会のご挨拶を申し上げ、引き続き橋梁調査会審議役兼企画部長の酒井洋一より「橋梁調査会の最近の活動について」として橋梁調査会の取り組みをご報告いたしました。

本年の特別講演は、当調査会の評議員を務められており、コンクリート工学の第一人者としてご活躍されている東京工業大学 名誉教授の 二羽 淳一郎（にわ じゅんいちろう）様より、「建設が進む新しいPC橋から」と題してご講演いただきました。

ご講演では、内外で竣工あるいは建設が進む新しい12のPC橋を紹介されました。



まず桁橋の事例として、新阿蘇大橋をはじめ6橋を紹介されました。施工日数の短縮や安全性の向上を目的としたが施工段階における技術的特徴を取り

上げられ、また、環境面や今後の維持管理にも配慮されている技術も紹介されました。また、コンクリート橋の耐久性を低下させる腐食因子である鋼材を一切含まない新しいタイプのPC橋が実用化された事例（別荘谷橋（べっそだにばし））も紹介されました。

また、従来の構造とは異なる国内外4橋のエクストラードロード橋では、施工性の向上や、維持管理に配慮した構造詳細について施工状況を交えご紹介いただきました。

さらに、アーチ橋の事例では7径間連続RC2層アーチ橋の技術的特徴として、上層アーチの充腹材には現地発生材を使用し一般的な盛土と同じ舗装構造とすることで疲労劣化が生じやすい床版がなく維持管理性に優れるといった点、また、上層の充腹アーチでは舗装路面等からの雨水の浸透が予想され、この雨水の浸透によるRC構造の劣化に対処するため、補強材には鉄筋を使用せず、CFRPを使用することが紹介されました。

本講演会は定例化して10年経過いたしました。例年、道路行政や建設業界等に関わりの深い講師をお招きし、ご講演をいただいております。今回は会場開催に加えオンデマンド配信も行い多数のご参加・ご視聴をいただき、皆様には厚く感謝申し上げます。

本年の講演会参加者にご協力いただいた、橋梁調査会の主催する講演会等で今後希望するテーマについてのアンケート結果も参考にさせていただきながら、今後も情報発信に取り組む所存です。



講演会会場風景

橋梁技術に関する研究開発助成について

当調査会では、平成20年度から「橋梁技術に関する研究開発助成」を行っております。この制度は、橋梁技術に関する研究開発についての計画を公募し、優秀研究計画と認められる応募者に対して、当該研究開発に要する費用の一部を助成するもので、これまでに35件の助成を行ってきたところです。令和4年6月に、令和4年度分の助成が決定となりました。

助成対象者の選定にあたり、橋梁研究開発助成等審査委員会（魚本 健人東京大学名誉教授、藤野 陽三城西大学学長、丸山 久一長岡技術科学大学名誉教授）を設け、審査委員会での審査を経て助成を決定しております。

令和4年度の助成対象者は以下のとおりです。

橋梁技術に関する研究開発助成対象者

栗原 遼大氏（東京大学工学系研究科社会基盤学専攻 助教）

・ 研究計画：「繊維補強RC床版に対する数値解析による性能評価手法の高度化」

津野 和宏氏（国土館大学理工学部理工学科まちづくり学系 教授）

・ 研究計画：「鉄筋コンクリートにおける塩害腐食鉄筋の非破壊検査結果と構造性能に与える影響の関係性評価」

林 和彦氏（香川高等専門学校建設環境工学科 准教授）

・ 研究計画：「機械学習を用いた漏洩磁束法によるコンクリート中の鋼材破断検知手法の開発」

松村 政秀氏（熊本大学くまもと水循環・減災研究教育センター 教授）

・ 研究計画：「鋼桁橋の高耐震・高耐久化に向けた滑り構造の活用に関する研究」

国土交通行政関係功労者表彰の受賞について

国土交通行政関係功労者の表彰の一環として、令和3年度に完了した工事、業務の中から優秀な成績をあげた受注者に対して、地方整備局長や事務所長等から表彰が行われます。

当調査会におきましては、令和3年度に完了した以下の業務とその業務に従事した技術者に対して局長表彰ならびに事務所長表彰を頂きました。

表彰者	業務名	表彰名
関東地方整備局長	R2・R3関東MC管内橋梁診断他業務	・優良業務 ・優秀技術者（新沼俊治）
近畿道路メンテナンスセンター長	橋梁診断業務	・優良工事等施工者（業務） ・優秀建設技術者（業務） （狩野裕之）
九州地方整備局長	令和2・3年度九州管内橋梁診断（その1）業務	・優良施工業者（業務部門）
九州技術事務所長	令和2・3年度九州管内橋梁診断（その1）業務	・優良業務担当技術者 特別表彰（篠原晃）

「難波橋」と「淀屋橋」

商都大阪を代表する2本の橋

埋め立てと船運が作った街

大阪が商業の街として産声を上げたのは存外古い。日本書紀、古事記にも登場する港湾施設、難波津がその発祥ということができよう。難波津は、淀川や大和川が運ぶ土砂が作り上げた砂州、上町台地の北端にある。当時、上町台地の東西は多くの河川が綾をなす湿地帯か低地で、難波津は瀬戸内海航路や外国向け交易路と京や奈良の都を結ぶ要衝として発展した。

その後、難波津は廃れたものの、中世、淀川の浚渫や安治川の掘削などによってこの一帯は瀬戸内航路、淀川、大和川、神埼川などの発着点としてますますその重要度を高めていった。

豊臣秀吉の治世、本格的に大阪城下の整備が始まった。上町台地の東西に広がる低湿地帯にも排水路が掘られ、人の住める土地が造成された。秀吉はここに多くの商人を呼び寄せたのだが、これが現在の商都大阪の町割りのおおもとであり、「八百八橋」と言わしめた大阪が形作られた。大坂の陣が終わり、政権が変わっても開発は引き継がれた。幕府の手による開発はもちろん、商人が自費で排水路を掘り、地面を嵩上げして土地を生み出すケースも少なくなかったらしい。

物流、都市防衛の要の公儀橋「難波橋（なにわばし）」

この秀吉の時代に旧淀川にかかる難波橋ができたと言われる。難波橋は寛永11（1634）年、三代将軍家光が来阪した際、大阪の幕府管理12橋の一つに

選ばれ、補修費用は大阪城代が出すことになった。このように幕府が管理する橋を公儀橋と呼んだ。

難波橋は最初、一筋西の難波橋筋（藤中橋筋とも）にあり、橋長108間（207m）、橋幅3間（5.7m）と、大阪を代表する木橋であった。ちなみに難波橋を通る道は中国街道に接続する重要な街道であったことも公儀橋にされた理由だったと思われる。

難波橋界限は観光名所としても有名であった。当時中之島の北端はもっと下流で、難波橋はこれをかすめるように旧淀川の兩岸を結んでいたが、橋上は夕涼みや舟遊び、花火見物など、賑やかだったと伝えられている。難波橋は反り橋で、橋の上から遠くの山々や淀川の流れが見渡せるというのも、人気だったらしい。特に天神祭のときには神輿渡御を見物する船で川面は埋まり、橋も立錐の余地がない状態だったという。

難波橋は、中之島から北側が明治9（1876）年に鉄橋化され、明治30年代後半に南側も完成している。大正4（1915）年にはまた、市電通行可能にするため改築されている。その際、市電延伸に関する反対運動があったため、1本東の筋の現在の位置に新築された。

その際、多分に大正末に完成した中之島水上公園の景観にマッチさせる配慮があったのであろう。パリのセーヌ川にあるヌフ橋とアレクサンドル3世橋を参考にして製作された。難波橋のシンボルであるライオン像など、豪華な橋上装飾が施されたのもこのときである。





橋名	難波橋
形式	桁橋（連続桁）およびアーチ橋
橋長	189.65m
幅員	21.80m
竣工	大正4年（昭和50年架替え）
橋名	淀屋橋
形式	3径間RCアーチ橋
橋長	54.5m
幅員	37.6m
竣工	昭和10（1935）年



現在の佇まいは昭和50（1975）年の大改修を経たものだが、極力当時の雰囲気を残したままとなっている。

米本位経済と貨幣経済の架け橋「淀屋橋（よどやばし）」

江戸時代、大阪三郷（現在の北区の南半分、西区の東半分と中央区の範囲）には200近い橋があったが、そのうち公儀橋は12に過ぎず、のこりはすべて町民が生活や商売のために架けた町橋であった。

難波橋と同じ旧淀川にかかる淀屋橋もその一つ。こちらは豪商の淀屋の自費でかけられたと言われている。

淀屋は米市の創始者として知られている。当初米市は土佐堀川の南岸で行われていたが、初代の淀屋常安が中之島の開発に着手、米市も中之島に移転、諸藩の蔵屋敷や豪商の倉庫が立ち並ぶようになって、淀屋橋もかけられたと伝えられる。

淀屋橋は中之島への通行手段としてだけでなく、その橋詰には船着き場が設置されていた。ほぼ全国の年貢米は船運によってここ中之島に集められ、商人によって「銭」へと換金、再び各藩に還流していった。淀屋橋は、いわば「米本位経済と貨幣経済を繋ぐ橋」でもあった。

その後、明治18（1885）年の大洪水によって流出、鉄製杭橋脚と木材桁によって再建、明治44（1911）年には堺筋線の市電敷設に伴って、橋長57m、橋幅21.9mのシンプルな鉄橋として生まれ変わった。

淀屋橋が現在の姿になるのは、大正10（1921）

年からスタートした橋の新改築や都市開発を含む「第1次大阪都市計画事業」によるものである。淀屋橋の新築にあたってはデザインコンペが実施され、大江橋とともに南欧中世風の鉄筋コンクリートアーチ橋案が採択された。

新しい商都のシンボルとして

今、大阪市は万博開催など、国際化に向け、その姿を変えつつある。なかでも大阪の玄関口大阪駅からなんば駅に至る南北一帯は、「都市再生緊急整備地域」に指定され、国際的な中枢都市機能集積地としての再構築が図られている。ことに中之島エリアは水の都・大阪のシンボルとして重視されており、外国企業の誘致、都市交通や景観の再整備などを含む国際競争力強化が急ピッチで進められている。

日本の商都から世界の商都へ～難波橋、淀屋橋も、こうした時代の流れに従ってまだまだ輝き続けることであろう。

参考文献

※『「夢」を乗せて 藤本貴也』（近畿ゆめ通信より）



- 1 中之島公園 パラ園
- 2 難波橋取付階段（中之島公園アプローチ）
- 3 奥には日本銀行大阪支店
- 4 淀屋橋と都市ビル

本部・支部 所在地及び連絡先

本部 〒112-0013

東京都文京区音羽2-10-2

TEL : 03-5940-7788(代表) FAX : 03-5940-7789

03-5940-7794(企画部)

03-5940-7791(調査部)

03-5940-7746(研修担当)

03-5940-4800(道路橋点検士事務局)

03-6902-9090(橋梁データ管理室)

URL : <http://www.jbec.or.jp> E-Mail : info@jbec.or.jp

東北支部 〒980-0014

仙台市青葉区本町2-1-29(JRE仙台本町ホンマビル10階)

TEL : 022-221-5301 FAX : 022-221-5302

関東支部 〒330-0844

さいたま市大宮区下町1-42-2(TS-5BLDG.5階)

TEL : 048-657-6085 FAX : 048-645-2167

北陸支部 〒950-0965

新潟市中央区新光町10-3(技術士センタービルII8階)

TEL : 025-281-3813 FAX : 025-281-3818

中部支部 〒460-0002

名古屋市中区丸の内3-9-29(ダイセンビル6階)

TEL : 052-212-6811 FAX : 052-212-6812

近畿支部 〒540-6591

大阪市中央区大手前1-7-31(OMMビル12階)

TEL : 06-6944-8551 FAX : 06-6944-8556

中国支部 〒730-0013

広島市中区八丁堀15-10(セントラルビル5階)

TEL : 082-511-2203 FAX : 082-225-4745

四国支部 〒760-0026

高松市磨屋町3-1(合田不動産磨屋町ビル6階)

TEL : 087-811-6866 FAX : 087-811-6867

九州支部 〒812-0013

福岡市博多区博多駅東2-9-1(東福第二ビル2階)

TEL : 092-473-0628 FAX : 092-473-0629



J-BEC レポート 2022 Vol.18 令和4年11月発行

編集・発行 一般財団法人 橋梁調査会 J-BECレポート編集委員会

印刷 (株)大 應

表紙撮影：初芝成應



淀屋橋
Yodoyabashi Bridge



J-BEC

橋をかける
橋をまもる

R100
高配合率100%再生紙を使用しています

PRINTED WITH
SOYINK