

J-BEC

レポート

2023 Vol. 19



一般財団法人 橋梁調査会
Japan Bridge Engineering Center

目次

巻頭言

東京工業大学 名誉教授
高速道路総合技術研究所フェロー 二羽 淳一郎

国土交通省が推進するインフラ分野の DX	01
----------------------	----

新技術導入促進機関 (橋梁の点検支援技術、横断歩道橋床版技術)	06
------------------------------------	----

激甚災害後の事態および復興に関する研修(3.11 震災研修)	11
--------------------------------	----

助成研究

・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	14
・鋼桁橋の高耐震・高耐久化に向けた滑り構造の活用	20
・繊維補強 RC 床版の数値解析による性能評価手法の開発	25
・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	31

海外調査

・第 11 回 国際吊構造管理者会議についての報告	40
・PIARC ワークショップ(神戸)	42
・第 40 回国際橋梁会議(IBC2023)の聴講参加と ワシントン D.C.、サンフランシスコでの橋梁現地調査報告	44

トピック

・令和 4 年度 橋梁シンポジウム「変革期の橋梁維持管理」開催報告	49
・東京の名橋	51
・建設技術フェア等の参加報告	53
・令和 5 年度賛助会員特別講演会の報告	54
・2023 道路橋点検士統計情報	55
・橋梁技術に関する研究開発助成について	56
・国土交通行政関係功労者表彰の受賞について	56

都市と橋

「名島橋」	57
-------	----



更新が進む高速道路橋

東京工業大学 名誉教授
高速道路総合技術研究所フェロー 二羽 淳一郎

多年にわたって供用されてきた道路橋の経年劣化が顕著になってきたことから、わが国では現在5年に一度の近接目視点検が義務付けられるとともに、判定の結果、区分IVとなった場合には、緊急の対策が求められることとなった。道路橋ではこのような定期点検の仕組みが立ち上がってきているが、高速道路橋においても、各所で先進的な取組みが進められている。ここでは、筆者が実際に現地で実態を見聞した事例を紹介することとした。

(1) 首都高大師橋の架替

首都高1号羽田線が多摩川を横過する箇所に1968年に架設された高速大師橋は55年を経過しているが、日交通量8万台ならびに大型車の混入により、鋼主桁に多数の亀裂が発生していることが明らかとなり、このため一括更新されることになった。ただし、重要路線であるため、通行止めの期間は5月27日午前5時から6月10日午前5時までの2週間に限定された。この短い期間内にすべての作業を終えるため、新設桁を既設桁のすぐ下流側に配置した上で、舗装や高欄、標識、照明などもほぼ完成させておいた。そして、2週間の間に、既設桁の切断と横移動・撤去、新設桁の横移動と設置を行い、さらにあらかじめ設置しておいた橋脚と新設桁から張出した橋脚上部との溶接、恒久足場の取付など諸作業が行われた。事前に入念かつ十分に準備を行い、長さ300mにも及ぶ新設桁への架替を所定の期間内で完了できたことは特筆すべきであり、この事業に関係した各位に敬意を表したい。

(2) 東名多摩川橋の床版更新

NEXCOでは高速道路のコンクリート床版の更新事業を全国的に進めており、各地で更新事業が行われている。ここでは、東名多摩川橋における事例を紹介する。東名東京ICと川崎IC間の多摩川に架かる本橋は橋長495mの上下6車線の鋼合成鈹桁橋であり、1968年の建設から53年以上を経過し、コンクリート床版の損傷が著しくなった。このため、NEXCO中日本東京支社ではプレキャストPC床版への更新を行うこととした。ただし、日交通量10万台に達する重交通路線であることから、できる限り車線数を減じることなく、作業を進めることとなった。このため、中央分離帯部分を改造し、両側の路側帯の部分も利用して、工事区間の車線を順次付け替えながら、極力片側3車線を確保した状態で、床版更新が進めら

れている。なお、本橋のプレキャスト床版には常温硬化型の超高強度繊維補強コンクリート（UFC）が使用されている。これは塗膜系の防水に替えて、プレキャスト床版の上面を厚さ20mmのUFCに置き換えたものであり、防水材の塗布作業が省略できる。また床版間の接合にもUFCが使用されており、UFCを用いた間詰により、継手長を短くでき、さらに直交方向の鉄筋も省略できる。本更新工事では、高速で通行する上り下りの重交通に囲まれた非常に狭いスペースで厳しい作業が続いているが、工事の無事竣工を祈りたい。

(3) 北陸道手取川橋の架替

北陸道の手取川橋（橋長547m、8径間PCラーメン箱桁橋）は1972年の完成から50年以上を経て、日本海からの飛来塩分による塩害が顕在化してきた。建設時は海側にまだ海浜が残っていたが、現在は汀線が後退し、橋脚は完全に波しぶきに洗われている。このような過酷な塩害環境にあるため、NEXCO中日本金沢支社では、上部工を完全に更新することとした。上下4車線の内、上り線の2車線を完全に通行止めにし、下り線を対面通行として、上り線の桁をPC桁から、鋼桁に更新することにした。この新設の鋼桁には塩害に対抗するため、ステンレスクラッド鋼が使用されている。これは熱間圧延により炭素鋼とステンレス鋼を接合した複合鋼板で、炭素鋼の外側を厚さ1.5mmのJSL310Moステンレスで覆ったものである。従来は海洋構造物等に使用されていた鋼種が初めて道路橋に適用されることとなった。また手取川橋の周囲には絶滅危惧種のクモヤ小鳥が生息する砂浜があり、このため工事の際の重機や車両の進入が制限されていた。今回の更新では、地組した新設桁を既設のPC桁の上側に設置し、これを既設桁撤去用の支持桁として利用している。撤去のために切断された既設のPC桁はさらに6ブロックに分割されて新設桁上に引き上げられ、新設桁上の台車で搬出されるので、重機が橋梁下の砂浜に進入することはない。非常に合理的な撤去方法であると思われる。既設のPC桁が撤去されたのち、新設桁がジャッキダウンされ、最終的にPC床版が施工されて架替が終了する。現在は上り線が施工中であるが、この更新工事が終了したのち、下り線も同様に更新される計画である。

以上、筆者が見学することのできた高速道路橋の更新事例を紹介した。いずれも先進的な試みであり、今後の更新事業において参考になるものと思われる。以上

国土交通省が推進するインフラ分野のDX

国土交通省 大臣官房参事官(イノベーション) 森下 博之

1. はじめに

我が国は、現在、人口減少社会を迎えており、働き手の減少を上回る生産性の向上等が求められている。国土交通省では、2025年度までに建設現場の生産性2割向上を目指して2016年度より「i-Construction」の取り組みを推進している。具体的には、①建設現場における調査・測量、設計、施工、検査等のあらゆる建設生産プロセスにおいてICT(情報通信技術)を活用すること、②設計、発注、材料の調達、加工、組立等の一連の生産工程や、維持管理を含めたプロセス全体の最適化が図られるよう、全体最適の考え方を導入し、サプライチェーンの効率化、生産性向上を目指すこと、③国庫債務負担行

為等の活用により年度末に集中する工事量を平準化することの3施策をトップランナー施策として推進する他、BIM/CIM等の3次元データの利活用促進等様々な取り組みを推進してきた。

さらに、政府を挙げたデジタル社会への変革が求められる中、今般の新型コロナウイルス感染症も踏まえ、国土交通省においてもこれまでのi-Constructionの取組を中核に、更に発展させ、データとデジタル技術を活用し、建設現場の生産性向上のみならず職員自身の働き方改革等も含めた変革に取り組む「インフラ分野のDX(デジタル・トランスフォーメーション)」を推進しているところである(図-1)。



図-1 i-Constructionとインフラ分野のDXの関係

2. 「インフラ分野のDXアクションプラン」策定

インフラ分野のDX推進のため、国土交通省一体となって取り組むべく、2022年7月に「国土交通省インフラ分野のDX推進本部」（以下、「推進本部」という。）を設置した。

2022年3月には、インフラ分野のDXの実現に向けて、国土交通省が所管するインフラ各分野の施策について「DX推進のための取組」や、その実現のための「具体的な工程」、「利用者目線で実現できる事項」をとりまとめた「インフラ分野のDXアクションプラン」（以下、「アクションプラン」という。）を策定した。

その後もインフラ分野のDXの取組をさらに深化させるため、2022年8月に推進本部の開催をもって、第2版への改定に向けた検討を開始し、外部有識者からの意見・助言を踏まえた検討を省内各部局で重ね、2023年8月にアクションプラン第2版を公表した。

3. インフラ分野のDXの目指すべき将来像

2022年4月に、「第5期国土交通省技術基本計画」が策定された。第5期国土交通省技術基本計画とは、技術政策の基本方針を示し、技術研究開発の推進、技術の効果的な活用、技術政策を支える人材の育成等の重要な取組を定めるものである。現在の課題やニーズに対応して定める今後5年間の技術政策の前提として、20～30年先（おおむね2040～2050年頃）の将来を想定し、長期的な視点で実現を目指す将来の社会イメージを作成している。

国土交通省が推進するインフラ分野のDXにおいては、第5期国土交通省技術基本計画に掲げた、「国土・防災・減災」「交通インフラ、人流・物流」「暮らし、まちづくり」「海洋」「建設現場」「サイバー空間」の6つの将来社会のイメージ実現を目指すべき将来像としている。（図-2）インフラ分野のDXでは、これらの将来の社会イメージをバックキャストして、具体的なロードマップを検討していくこととしている。

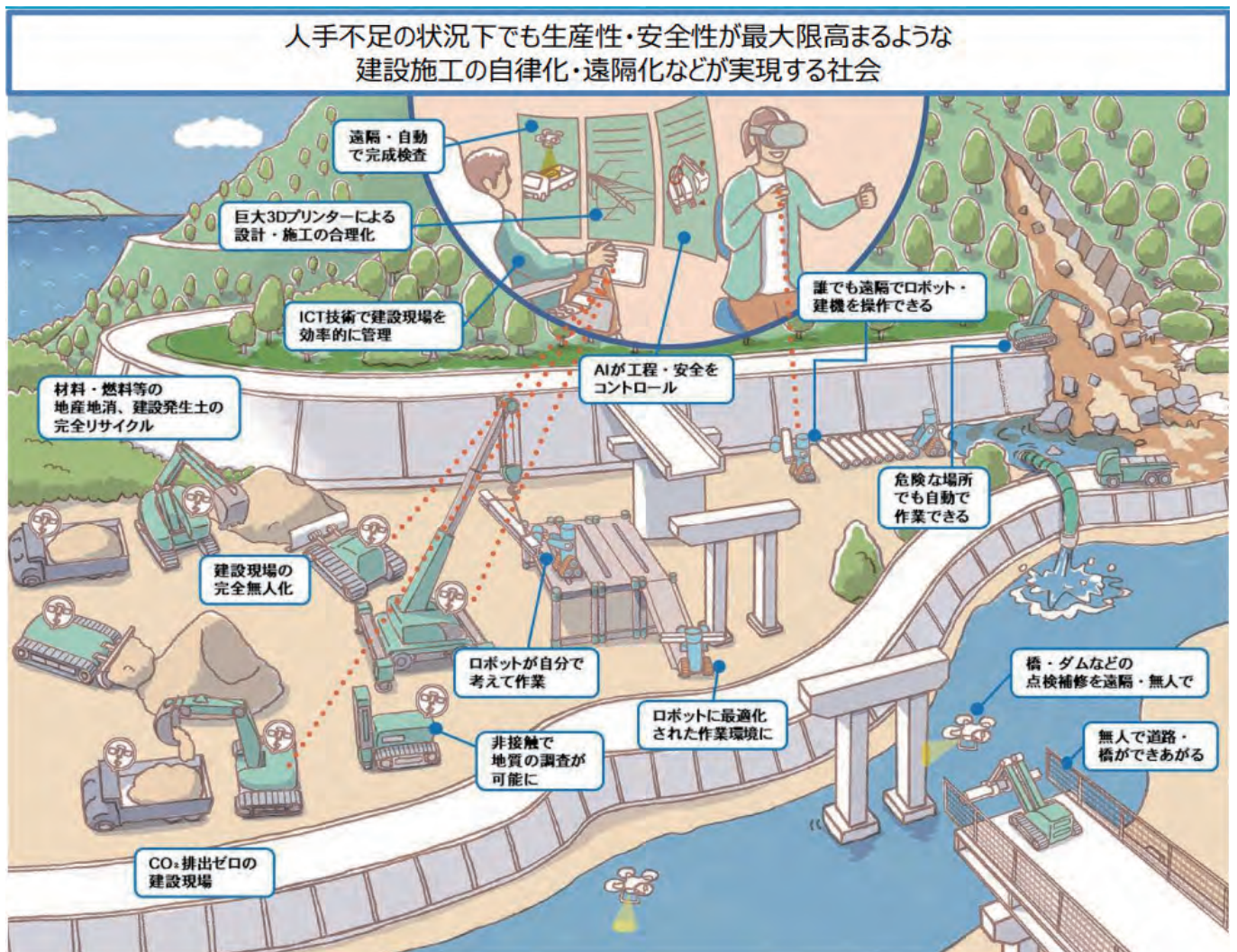


図-2 将来社会イメージ「建設現場」

4. 目指す将来像に向けたインフラ分野のDXの方向性

アクションプラン第2版ではDXに向けた更なる取組強化に向け、「インフラの作り方の変革」、「インフラの使い方の変革」、「データの活かし方の変革」という3つの観点で、分野網羅的に取り組むことを掲げた（図-3）。

①インフラの作り方の変革

インフラの建設生産プロセスを変革する取組が対象となる。データの力により、インフラ計画をこれまでよりも高度化していく、i-Constructionで取り組んできたインフラ建設現場の生産性向上を目指す等により、よりよいインフラを作っていくことを目指す。

②インフラの使い方の変革

「インフラの使い方の変革」では、インフラの「運用」と「保全」の観点が対象となる。「運用」では、インフラ利用申請のオンライン化や書類の簡素化に加え、デジタル技術を駆使して利用者目線でインフラの潜在的な機能を最大限に引き出すことなどが挙

げられる。「保全」では、最先端の技術等を駆使した、効率的・効果的な維持管理などが挙げられる。

これらの取組を通じて、賢く（Smart）かつ安全（Safe）で、持続可能（Sustainable）なインフラ管理の実現を目指す。

③データの活かし方の変革

上記2つはフィジカル空間を対象としている一方で、「データの活かし方の変革」はサイバー空間を対象とした変革である。この変革では、「国土交通データプラットフォーム」をハブに国土のデジタルツイン化を進め、データの標準化、技術開発・環境の基盤整備（ネットワーク・通信環境等）、データの収集・蓄積・連携、利用者・国民への発信等、インフラまわりのデータを徹底的に活かすことにより、仕事の進め方、民間投資、技術開発が促進される社会を実現することを目指す。

5. インフラ分野のDXを進めるためのアプローチ

DXはデジタル技術によって業務変革を達成することを目的とした取組である。分野が異なっても類似のデジタル技術を活用している場合、当該技

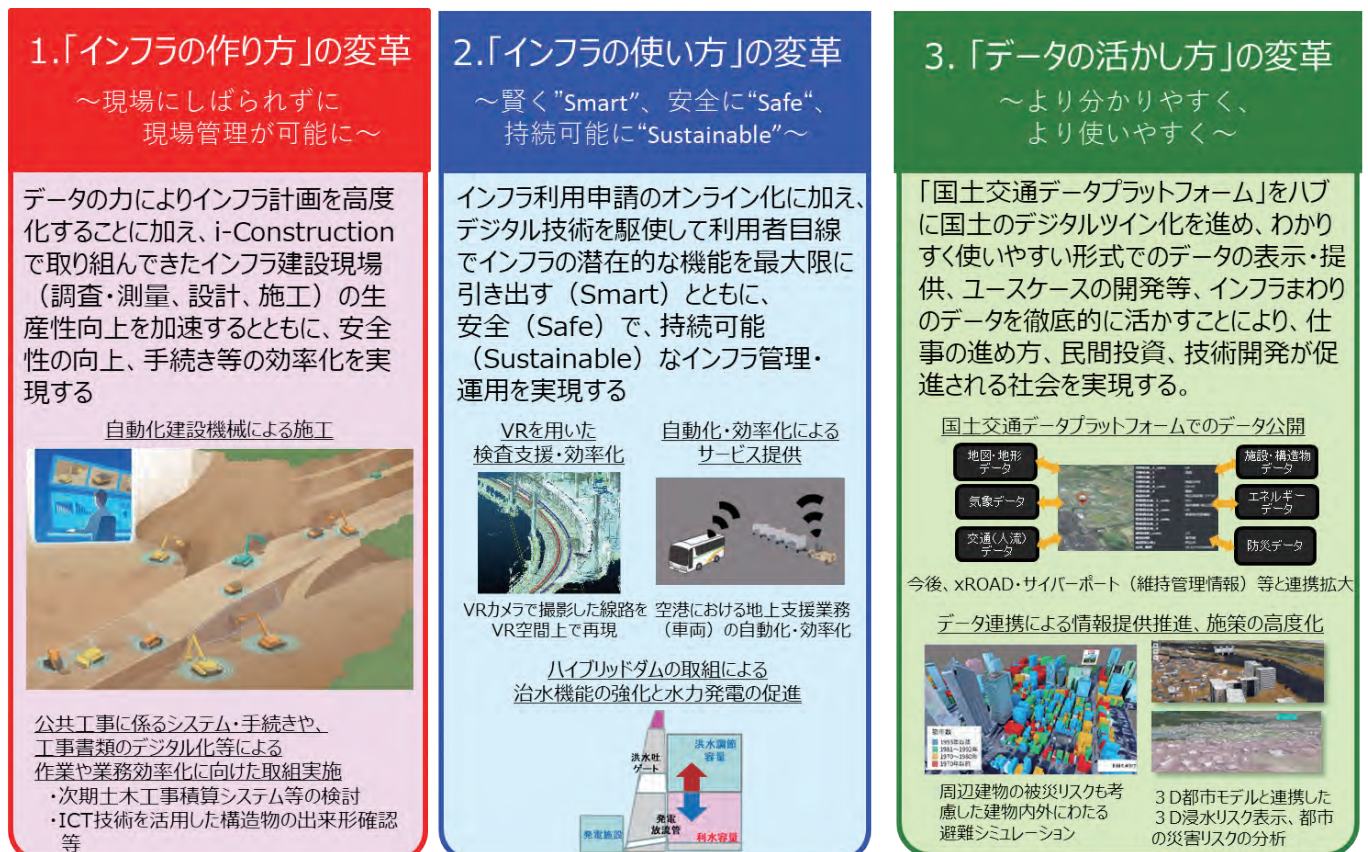


図-3 インフラ分野のDXにおける3分野

術の横展開により、一層効率的な技術開発が可能となる。また、業務変革の知識・経験についても同様である。

これまで施策・部局毎に蓄積されてきたデジタル技術と業務変革の知識・経験を、国交省全体で組織横断的に取り組むことで、DXの取組の一層の加速化が期待されている。

2023年4月に、大臣官房に新たにイノベーション担当の参事官が新設され、「インフラ分野のDX推進本部」の事務局の機能を強化した。インフラ分野のDXに関する国交省内での技術・知識の共有を図り、横断的な施策展開を推進する。これに加え、国交省内のみならず、他省庁・民間・学术界との連携強化・取組の推進も図っていく。

6. BIM/CIM

2023年4月からは直轄の業務・工事においてBIM/CIMの原則適用についてがスタートした。(図-4)

BIM/CIMはICT施工を支える基盤でもあり、まず3次元モデルデータが建設業界に浸透することを目指して、義務項目として視覚化による効果を経験させる枠組みを設けるとともに、3次元モデルの解析

など高度な活用に取り組む推奨項目についても設定した。

さらに発注者によるデータ共有としてDS（データシェアリング）にも取り組んでいく。将来的なデータ管理に向けた第一歩として、業務や工事の契約後、速やかに受注者に設計図書作成の基となった情報を説明することを発注者に義務付ける。

3次元モデルは作ることが目的ではなく、仕事を楽にすること、生産性を向上させることが目的であり、建設生産・管理システムにおいてデータを前工程から後工程に円滑に引き継ぎ、活用することが重要である。

2023年4月には、鋼橋工事において、設計段階と工場製作段階のデータ連携をより一層推進するために、(一社)日本橋梁建設協会(以下、「橋建協」という。)と(一社)建設コンサルタンツ協会(以下、「建コン協」という。)との間で橋梁技術のデータ連携実装に向けた共同宣言に署名がされている。国土交通省は橋建協と建コン協と連携し、建設コンサルタントが作ったデータをそのまま工場製作や積算に使うことを目指していく。(図-5)

上記データ連携において、鋼橋の設計では自動設

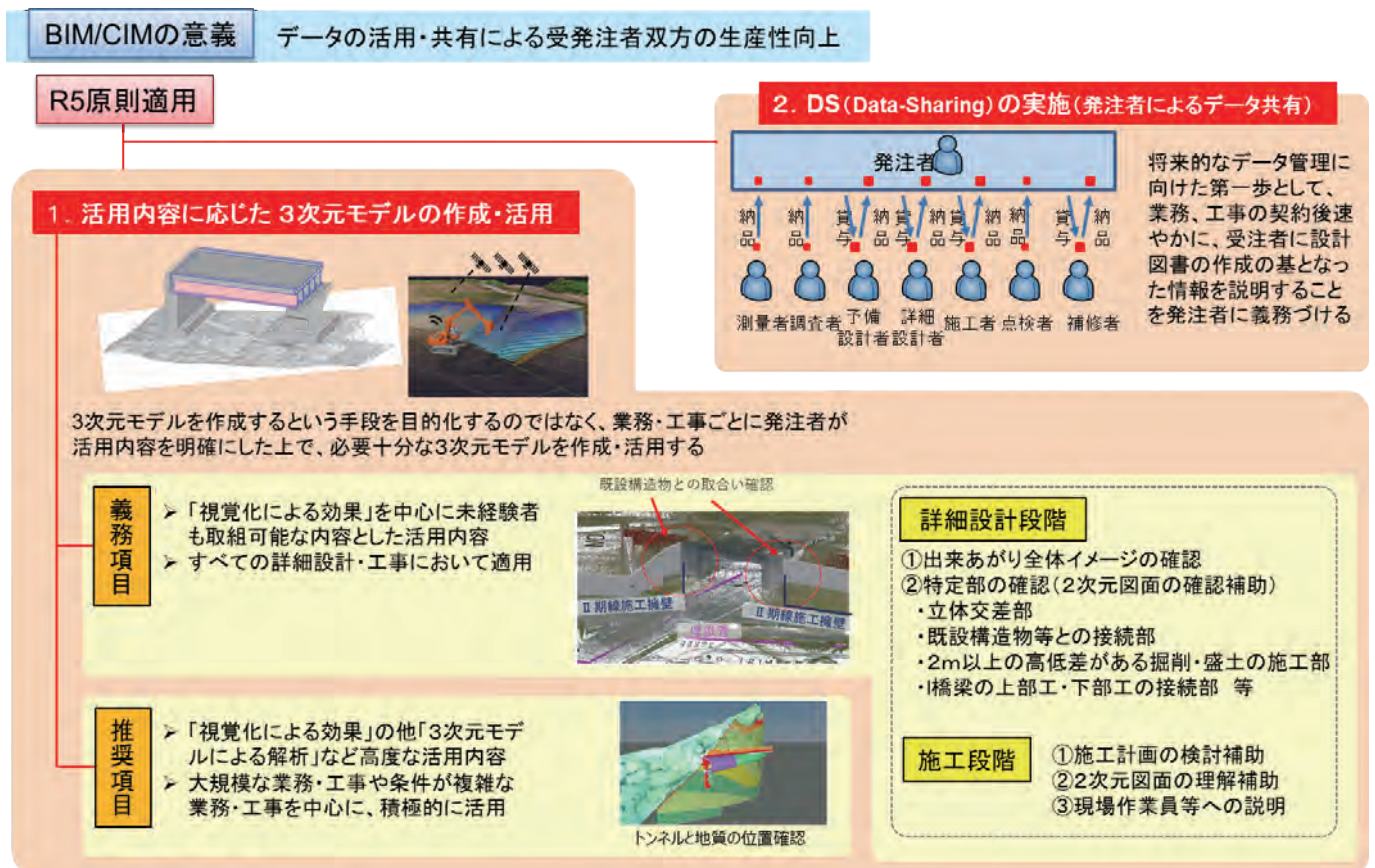
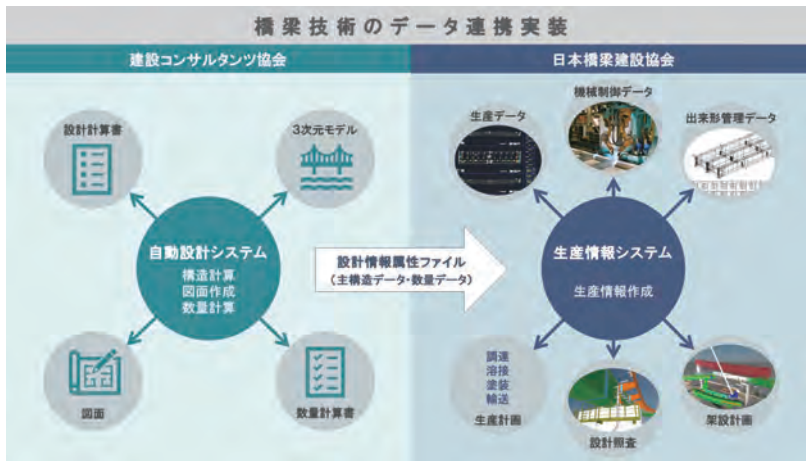


図-4 BIM/CIM原則適用



共同宣言署名式（令和5年4月18日）

図-5 橋梁技術のデータ連携実装

計システムを活用して設計されているが、工場製作の際に使う自動原寸システムへは図面から手入力しており、データ連携がスムーズに行われていないので、非効率であるという課題がある。

現状では、中間ファイルの「設計情報属性ファイル」の内容及びデータ形式については策定されているものの、自動設計システムから中間ファイルへの掃き出し機能及び中間ファイルから自動原寸システムへの取り込み機能が未開発である。

そこで、①自動設計システムのデータから設計数値データを「設計情報属性ファイル」という共通フォーマットに書き込む、②「設計情報属性ファイル」を工場製作における自動原寸システムに取り込む、これら①②の一連のデータ連携が問題なく実行され、効率化されていることを実証していきたい。さらに「設計情報属性ファイル」を活用して3次元モデルを自動生成し、部材干渉や不整合箇所の抽出ができる新たな設計照査支援ソフト開発を検討していきたい。

原則化元年となる2023年度はBIM/CIMのフォローアップにも力を注いでいく。原則化の課題を整理し、課題解決に向けて取り組んでいき、これまで策定したガイドラインも修正していく予定である。

7. 最後に

インフラ分野のDXの推進に向けては、国交省だけでなく、「国土を支えるインフラ」の建設・維持管理を担う管理者、建設業界に加え、通信業界やサー

ビス業界といった業界にも取組を拡げ、組織横断的に取り組むことに加え、デジタル技術とデータの活用による業務変革を目指していく必要がある。

インフラDXアクションプラン第2版に基づき、「インフラの作り方の変革」、「インフラの使い方の変革」と、「データの活かし方の変革」の3つの分野を網羅することで、仮想空間（サイバー）と現実空間（フィジカル）が融合した「高質化したインフラ・国土」によりSociety5.0の実現に寄与することに繋げる。

データとデジタル技術により、「インフラを変え、国土を変え、社会を変える」ことを目指すことで、具体的には「デジタル技術とデータで、インフラの生産性を高めるとともに、新たな価値を創出していく」の実現を目指す。

そのために、組織的に業務変革を継続して実施することが必要であり、「変革し続ける組織」を目指していく必要がある。

国土交通省では2023年をインフラ分野のDXを加速させる「躍進の年」と位置付けており、建設業を若手や女性など関係なく、全ての人が活躍でき、最新技術を導入した新3K（給与、休暇、希望）＋「カッコいい」魅力ある仕事となることを目指して、引き続き省を挙げてDXを推進していく所存である。

注意)

本稿は執筆時点（2023年10月上旬）での情報である。インフラ分野のDXの最新状況については、国土交通省ホームページなども適宜、参照されたい。

新技術導入促進機関 (橋梁の点検支援技術、横断歩道橋床版技術)

企画部 企画課長 大黒屋 信英

1. 導入促進機関について

近年、様々な分野・業種において新技術が開発されており、その進歩は著しいものがある。また、コスト縮減や品質の向上、安全確保などの観点から新技術に対するニーズがあり、生産性の向上や働き方改革等の課題への対応として期待されている。

しかしながら、各基準類は性能規定化されているものの、求められている性能の確認方法が明示されていないか、従来技術との比較検討に手間がかかったり、従来技術との比較検討に手間がかかったりする等して新技術の活用が進んでいない状況にある。

このような状況の中、新技術の活用を推進するために、技術基準類の検討や技術の実証を行うための第三者機関【新技術導入促進機関】を国土交通省道路局が公募を行った。橋梁調査会は、この公募に応募し第三者機関として選定された。

2020～2022年度の3年間にわたって実施した、「①橋梁の点検支援技術」および「②軽量で耐久性に優れた新しい横断歩道橋床版技術」の2つのテーマについての導入促進機関としての活動を報告する。

2. 橋梁の点検支援技術

2.1 背景、経緯

2023年8月に公表された道路メンテナンス年報（文献1）によると、2023年3月末において全国では、約73万橋の橋梁が管理されており、そのうち92%にあたる約67万橋は地方公共団体が管理する橋梁である。建設後50年を経過した橋梁の割合は、2023年3月末時点で約37%、10年後の2033年時点では約61%に急増する。1巡目（2014～2019年度）に健全性の診断でⅢおよびⅣと判定された橋梁のうち、修繕等に着手した橋梁は国の99%に対し、地方公共団体では75%にとどまっている。また、市区町村における橋梁管理に携わる土木技術者は5人以下が大半を占めている。このように維持管理に従事する技術者不足が浮き彫りとなっている。さらに橋梁の定期点検

における新技術の活用状況は、活用を検討した地方公共団体は85%あるが、実際に活用したのは28%しかなく、新技術の活用が進んでいない状況にある。

国土交通省等では、2014～2018年度までの5年間において、SIPやNETISテーマ設定型などの取り組みを通して、点検支援技術の開発・導入に係る現場検証等を実施し、これらの技術をとりまとめた「点検支援技術 性能カタログ（案）」が2019年2月に公表された。2019年度に国土交通省が新たな技術の公募を行い、それらを取りまとめ、2020年6月に性能カタログ（案）が更新された。

2.2 点検支援技術性能カタログの概要

2.2.1 性能カタログの分類

点検支援技術性能カタログとは、国が定めた標準項目に対する性能値を開発者に求め、開発者から提出されたものをカタログ形式でとりまとめたものである。各技術は、計測原理や検出項目が多岐にわたっており、計測原理や検出項目を整理し、検出項目ごとに性能カタログを「画像計測技術」、「非破壊検査技術」、「計測・モニタリング技術」、「データ収集・通信技術」に分類されている（表-1）。

画像計測技術は、ドローンや三脚等に搭載したカメラで画像を撮影し、撮影画像を処理しひびわれを検出する技術や、斜張橋などの斜材の変状を検出する技術がある。（図-1）

非破壊検査技術は、超音波等で鋼材亀裂を検出する技術や打音や赤外線によってコンクリートのうきを検出する技術、電磁波等によりコンクリート床版上面の土砂化を検出する技術がある。（図-2）

計測・モニタリング技術は、計測した項目（加速度等）から検出項目（変位量や振動特性等）を算出し、支承部の変位量を画像により計測する技術や遊間量をモニタリングする技術、PC鋼材にセンサーを設置して張力を測定する技術、振動特性による洗掘のモ

表-1

カタログ分類		主な検出項目	技術数 (2023.3時点)
画像計測技術 (橋梁)	点検対象構造物の画像を撮影又は計測する技術、画像を処理し調書作成を支援する技術	ひびわれ、斜材の変状	61技術
非破壊検査技術 (橋梁)	点検対象構造物の変状を外部から非破壊検査により計測する技術	亀裂、うき、剥離・鉄筋露出、床版上面の土砂化	31技術
計測・モニタリング技術 (橋梁)	点検対象構造物をセンシング又はモニタリングする技術	変位、張力、3次元座標	53技術
データ収集・通信技術 (共通)	点検対象構造物に設置したセンサー等により計測したデータを収集し、通信技術によりデータを転送する技術	データ収集・通信	3技術



図-1 画像計測技術の例

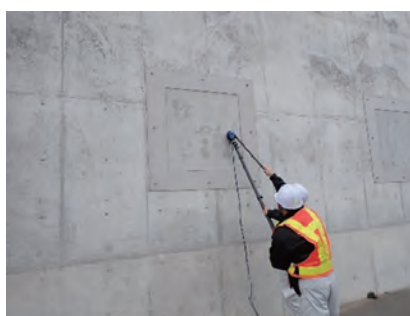


図-2 非破壊検査技術の例



図-3 計測モニタリング技術の例

ニタリング技術等がある。(図-3)

データ収集・通信技術は、計測したデータを無線や4G通信で転送する技術等がある。

2.2.2 性能カタログの標準項目

性能カタログにおいて、表-2に示すような標準項目(諸元や各性能として表示すべき標準的な項目)の性能値(標準項目に対する性能について、開発者が想定した条件下で独自に算出した理論値又は実施

した試験値を表示したもの)を掲載している。

特に、運動性能や計測性能の記載事項には、共通の検出項目に対して計測原理等が異なる技術であっても、その技術の性能が比較できるように結果を整理するために、共通の限定的な条件下で行った再現性のある試験、いわゆる標準試験を実施して、その値を標準試験値として掲載する。これにより、類似技術の性能比較をすることができる。これらの標準試験方法も国土交通省のHPで公開している。標準

表-2

標準項目	標準項目	主な記載事項
基本事項	技術の概要、対象とする部位や変状など基本的事項	技術情報(番号、技術名、開発者、連絡先、概要など)、技術区分(対象部位、変状の種類、原理、検出項目)
基本諸元	計測機器の構成や機器の物理的に一意のものなどの諸元	計測機器の構成、機器の情報(移動原理、外形寸法・重量・動力・設置方法等)、計測方法(計測原理、計測プロセス、アウトプットなど)
運動性能	移動体としての能力を定量的に示すもの	構造物近傍での安定性能、狭小進入可能性、最大可動範囲、運動位置精度
計測性能	データの質に関わる能力を示す	撮影(計測)速度、計測条件(計測レンジ、感度、S/N比、分解能など)、計測精度
画像処理・調書作成支援	ソフトウェアの原理・アルゴリズムなどを示す	変状の検出手順、ソフトウェア情報・調書作成情報(調書作成の手順、適用条件など)
留意事項	上記以外のその他事項を示す	現場条件、作業条件、適用条件



図-4 標準試験実施場所の例

試験を実施している実施場所の例を図-4に示す。

一方、実構造物で各技術の動作確認を行ったものを現場試験として、試行状況を掲載している。

2.3 点検支援技術性能カタログの作成・公表の流れ

性能カタログの作成・公表に当たって、図-5に示すフローで、検討を行っている。なお、各種検討において、有識者からなる技術検討委員会の助言をうけながら進めている。

① リクワイヤメントの検討

道路管理者や点検技術者のニーズを調査し、要求性能（リクワイヤメント）を検討

② 公募要領策定

リクワイヤメントに基づき公募要領や応募書類等を作成

③ 公募の実施

国土交通省およびJBECのHPにて公募要領や応募書類を掲載（公募期間：一ヶ月程度）

④ 応募技術の選定

応募のあった技術に対して、応募書類確認し性能カタログの趣旨と合致している技術を選定

⑤ 試験方法の検討

応募技術に合った標準試験や現場試験方法を検討

⑥ 各種試験の実施

選定した技術を対象に、福島ロボットテストフィールドや国の実験施設等で各種試験（標準試験および現場試験）を実施

⑦ 性能カタログの作成

試験結果などを所定の形式でとりまとめ

⑧ 性能カタログ公表

国土交通省のHPにて、更新した性能カタログを公表

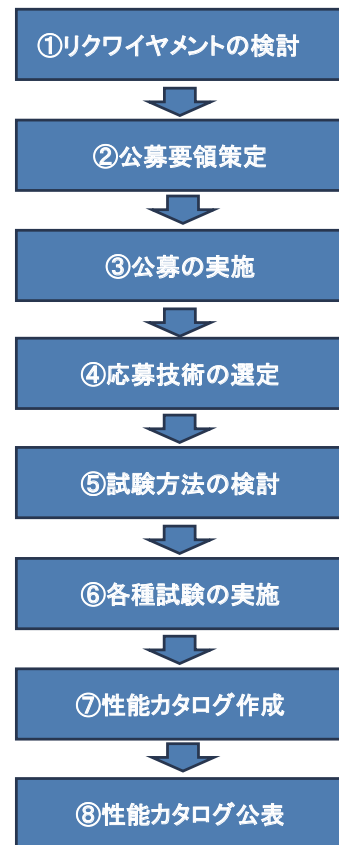


図-5 性能カタログ検討フロー

2.4 今後について

橋梁調査会は、2023～2025年度も橋梁の点検支援技術に関する導入促進機関として選定された。今後も継続して、カタログの拡充を行う一方で、性能カタログのPR活動や性能カタログの掲載方法といった別の側面からも導入促進機関として点検支援技術の活用促進を進めていきたい。

3. 軽量で耐久性に優れた新しい横断歩道橋床版技術

3.1 背景

横断歩道橋は、標準設計を適用し設計されたものが都市部を中心に、多数整備されている。これらの床版は、図-6に示すように標準的な構造で建設されたデッキプレート床版が多数を占める。この構造は舗装面のひびわれから侵入した水が、中詰めされた無筋コンクリート等を通り、床版内部に滞水しやすい。滞水によって、コンクリートや鋼材の損傷が顕著であることが分かっており、中には、抜け落ち事例も生じている。また、床版の腐食部から水の析出により、主桁や横桁の腐食も懸念される。

このような構造上の問題に加え、維持管理においても問題が顕在化している。例えば、床版からの腐食片等の落下やそれによる歩道橋の下方にいる第三者への被害の事例も報告されている。また、床版の腐食状態の確認や腐食片の除去のためには、橋面や橋下の交通規制が必要であることや、床版内部の状態や床版下の横桁上面や床版と主桁の溶接部が直接目視できず、点検が困難である。

デッキプレート床版の補修を行う際に、従来技術である横断歩道橋のデッキプレート床版と同じ構造で現状復旧したとしても、再度同じ劣化を繰り返すことが懸念される。

横断歩道橋の設計の基準となる「立体横断施設技術基準」は1979年度から改定されていない。

3.2 歩道橋床版の性能確認マニュアル（案）

前節の背景にあって、老朽化したデッキプレート床版を打換える際には、従来構造と同じ構造ではなく、軽量で耐久性に優れた床版技術が求められている。

しかしながら、現行基準も古く、道路管理者や設計者は新しい材料や新しい構造形式を用いた技術を採用するにあたって、その要求性能の設定や評価方法を定めるのが困難である。

令和元年に国土交通省が行った技術公募に応募の

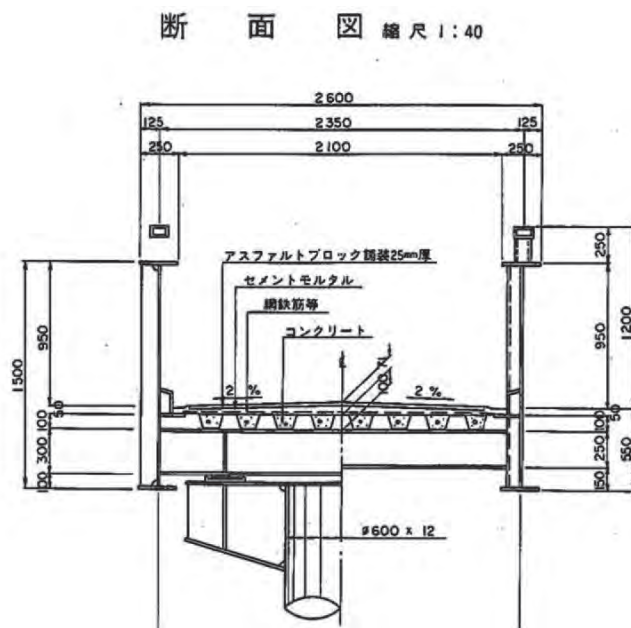


図-6 標準断面図

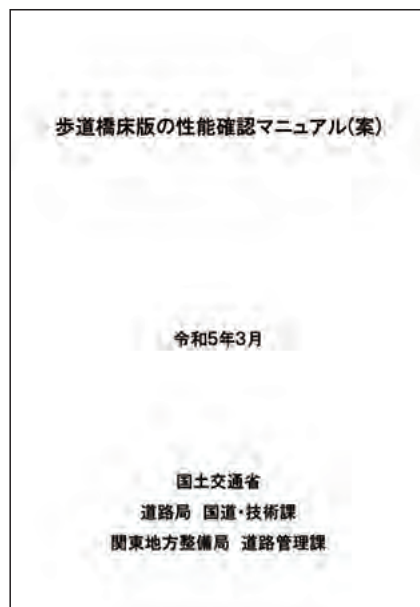


図-7 表紙

目次	
第1章 一般	1
1.1 適用の範囲	1
1.2 性能説明書の作成	4
1.3 確認すべき性能と前提条件	5
1.4 性能の確認方法	9
第2章 性能の確認（設計編）	12
2.1 材料特性	12
2.2 寸法諸元・最小寸法等	15
2.3 耐荷機構	16
2.4 耐荷力の特性値	18
2.5 耐久性能	21
2.6 第三者被害の生じにくさ	23
2.7 歩道橋利用者の快適性・安全性	24
第3章 性能の確認（施工編）	27
3.1 製作時の施工品質	27
3.2 架設時の施工品質・施工前提条件等	29
第4章 性能の確認（維持管理編）	31
4.1 維持管理の確実性・容易さ	31
付属資料	
歩道橋床版の性能説明書 記入要領（案）	

図-8 目次

あった新しい床版技術の内、新しい材料・構造の応募技術を参考としながら、要求性能やその評価方法についての検討を行い、採用の検討を行う上で明らかにされていることが望ましい事項や、その裏付けとなる知見の有無や程度を整理するための方法などを記載した歩道橋床版の性能説明書の作成方法や性能の確認方法を設計、施工、維持管理段階に分けて整理し、図-7に示す「横断歩道橋床版の性能確認マニュアル（案）」（以下、マニュアル（案）という）をとりまとめた。マニュアル（案）の検討にあたっては、有識者からなる技術検討委員会を設立し、その内容等について助言を頂きながら行った。

マニュアル（案）の目次構成を図-8に示す。第1章一般では、本マニュアル案の適用範囲、確認すべき性能と前提条件、性能の確認方法などの一般的事項をとりまとめた。第2章では、設計段階において確認すべき性能として、材料特性や耐荷機構、耐荷力、耐久性能、第三者被害の生じにくさ、利用者の快適性・安全性の観点から、それぞれの確認方法についてとりまとめた。第3章では施工段階において確認すべき性能として、製作時の品質や架設時の品質、施工計画などの確認方法をとりまとめた。第4章では維持管理段階において、維持管理の確実性・

容易さ、点検・診断方法、補修方法などについての確認方法をまとめた。また、付属資料として、性能説明書の作成時の参考となる、性能説明書記入要領（案）としてまとめた。

マニュアル（案）は国土交通省道路局のHPにデータとして公開されている（<https://www.mlit.go.jp/road/tech/genbajisou.html>）。また、直轄国道においての横断歩道橋詳細設計については、本マニュアル案を用いて、従来技術と新技術を比較検討することが原則化された。今後、横断歩道橋床版の打換えの際に、マニュアル（案）を活用して新技術の導入促進が進むことを期待する。

参考文献

- 1) 道路メンテナンス年報：令和5年8月 国土交通省
- 2) 新技術利用のガイドライン（案）：平成31年2月 国土交通省
- 3) 点検支援技術 性能カタログ：令和5年3月 国土交通省
- 4) 歩道橋床版の性能確認マニュアル（案） 令和5年3月 国土交通省

激甚災害後の事態および復興に関する研修 (3.11震災研修)

技術研修室長 三澤 伸吾

1. はじめに

令和5年5月11日～12日の2日間にわたり、2011年3月11日の東日本大震災により甚大な被害を受けた三陸沿岸市（岩手県宮古市、釜石市、陸前高田市、宮城県気仙沼市）を訪れ、震災後における復旧・復興事業の現場及び震災伝承施設を視察し、震災の実情と教訓を学ぶ研修を行った。ここでは、研修の実施状況について報告する。

2. 実施概要

日 程：令和5年5月11日(木)～12日(金)
参加者：40名
宿泊地：岩手県宮古市
企画協力：一般財団法人3.11伝承ロード推進機構

3. 行程

月日	視察施設
5月11日	【宮古市 新区界トンネル】 → 【田老防潮堤、津波遺構たろう観光ホテル】 → 【思惟花笑み大橋】
5月12日	【いのちをつなぐ未来館】 → 【東日本大震災 津波伝承館】 → 【高田松原津波復興祈念公園】 → 【気仙沼湾横断橋】 → 【気仙沼市 東日本大震災遺構・伝承館】

4. 研修の様子

【5月11日】

宮古市たろう学ぶ防災【案内：防災ガイド】
田老防潮堤



津波遺構たろう観光ホテル



思惟花笑み大橋【案内：三陸国道事務所】



【5月12日】

いのちをつなぐ未来館



東日本大震災津波伝承館にて集合写真



高田松原津波復興祈念公園 献花



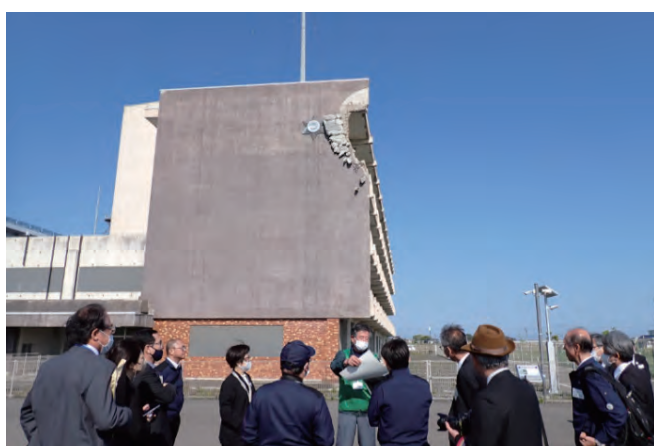
奇跡の一本松



気仙沼湾横断橋 【説明：南三陸沿岸国道事務所】



気仙沼市東日本大震災遺構・伝承館（旧気仙沼向洋高校） 【案内：語り部ガイド】



5. 研修参加者の感想

震災伝承の意義を感じた

- ・伝承館で被災した実物を見ることで想像では得られない体験として意義があり、震災を伝承していく必要があると強く感じた。
- ・今回の研修に参加し改めて大震災の悲惨さに直面し、地震や津波に対する自分の対応について考えさせられた。

被災経験者（ガイド）から震災の経験を学べた

- ・実際に被災された方々のお話を聞き、住民の津波に対する意識の高さや防災の知恵や工夫など知らなかったことばかりでとても勉強になった。
- ・東日本大震災の被災者でもあるガイドの方から、震災の経験から学ぶべきことを聞いたことは印象的であった。
- ・『津波でんでんこ』（地震が起きたら津波が来るので、肉親にもかまわず、各自、てんでばらばらに逃げろ）は、自分の命は自分で守るという防災教

育の存在を知り得たことが一番の収穫であった。

- ・本研修会で復旧された道路網を利用しながら遺構を巡り、被災者のガイドの方から説明や教訓を伺える機会を与えて頂いたことに心から感謝したい。

防災意識を高める良い機会であった

- ・被災された語り部の方の言葉には、被災された方にしか表現できない説得力があり、自然と涙があふれてきた。構造物を点検診断する土木技術者として、防災に対する意識を向上させる良い機会となった。
- ・映像で見るのとは違い、実物を見ながら話を聞くことができ大変有意義であった。徐々に薄れつつある防災意識をもう一度高めることができた。
- ・復興として防災・減災という観点から土木の範疇である防潮堤や水門の整備、広大な土地の嵩上げ、震災伝承施設の整備など、震災から12年後の人々の生活に関わる取り組みがみられ、その教訓から防災意識が向上したのではないかと思う。

6. アンケート結果

【1. 研修に参加した感想】

大変よかった	32	80%
よかった	8	20%
どちらともいえない	0	0%
よくなかった	0	0%
全くダメ	0	0%
	40	100%

【2. 今回の研修内容】

大変よかった	25	63%
よかった	14	35%
どちらともいえない	1	3%
よくなかった	0	0%
全くダメ	0	0%
	40	100%

【3. スケジュールの過密さ】

過密すぎる	5	13%
過密	26	65%
ちょうどよい	9	23%
もう少し密にしたい	0	0%
もっと密にしたい	0	0%
	40	100%

【4. このような研修会について次回があれば】

是非参加したい	18	45%
参加したい	16	40%
参加してもよい	3	8%
場所による	3	8%
参加したくない	0	0%
	40	100%

【5. 研修として最もよかったところを上げてください。】

1. 宮古市 新区会トンネル	0	0%
2. 宮古市たろう学ぶ防災	34	50%
3. 思惟花笑み大橋	3	4%
a. いのちをつなぐ未来館	6	9%
b. 東日本大震災津波伝承館、高田松原津波復興記念公園	7	10%
c. 気仙沼湾横断橋	6	9%
d. 気仙沼市東日本大震災遺構・伝承館	12	18%
	68	

7. おわりに

研修を通じて得られた知見を踏まえ、当橋梁調査会の橋梁に関する調査・研究・開発等の分野への活用や、職員の防災意識の向上等を継続していくよう努めて参りたい。

謝辞

この度の研修は、一般財団法人3.11伝承ロード推進機構の皆様へ企画協力をいただき実施できましたことに、深く感謝申し上げます。

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

香川高等専門学校 建設環境工学科 准教授 林 和彦

1. はじめに

高度経済成長期に数多く作られてきた橋梁構造物の多くが当初設定した耐用年数を経過し高齢化が進行している。鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート橋においては、コンクリート内部に配置された鋼材（鉄筋およびPC鋼材）の健全性を確保することが必要であるが、海水飛沫や凍結抑制剤散布による塩化物イオンの浸入、さらには建設時のPCグラウト不良の初期欠陥等も重なり、鋼材が腐食して断面欠損や破断に至る例（図-1）も数多く見られる。それらの鋼材破断を早期に非破壊で検知する手法が求められているが、その技術は発展途上にある。

鋼材の内部破断を非破壊で検知する技術として漏洩磁束法が着目されており、コンクリート構造物の鋼材破断検知を対象とした装置¹⁾、²⁾も販売されている。これらの手法において鋼材単体がコンクリート中に配置されているのであれば明瞭に鋼材破断を検知できる。しかし、橋梁内では検知したいPC鋼材は鋼製シース管内に存在し、さらにはPC鋼材に対して直交するスターラップ等の補強鉄筋、附属金物等



図-1 横締めPC鋼材が破断し側面に突出した橋（鋼材撤去後）

が縦横に配置されているため対象とする鋼材のみを非破壊で抽出することは難しい。また、橋梁上部工の多くは断面に凹凸があり床版も一体化しているため計測装置を設置するにも困難が伴い、断面形状や配筋が複雑な実構造物の鋼材破断検知については不明瞭な点が多い。

本研究では漏洩磁束法を適用したときの、複雑な鋼材配置を想定した室内実験および実構造物を対象にして、機械学習を用いて鋼材破断の有無を判定する手法について検討した。

2. 漏洩磁束法の原理

漏洩磁束法はあらかじめコンクリート表面から強力磁石を用いて、コンクリート内部に配置された鋼材を磁化させ、その鋼材から漏洩する磁束密度をコンクリート表面で計測し、鋼材軸方向の磁束密度の波形の変化から鋼材破断の有無を判定する非破壊手法である。鋼材に破断がない場合、図-2 (a) を左から右にS極を先頭とした強力磁石を当てて移動させると鋼材は磁化し1本の長い棒磁石のようになる。鋼材からは磁束が図のように鋼材の両端を結ぶように曲線状に分布する。例えば、鋼材に直交方向の磁束成分のみをセンサで計測すると図-2 (b) のように鋼材両端部で磁束が最大、鋼材中央部で磁束が0となるほぼ直線状の分布となる。一方、図-2 (c) のように鋼材が途中で破断していると破断した部分がそれぞれN極、S極となるため、その直交方向の磁束成分の分布は図-2 (d) のように破断部付近において傾きが反転する部分ができ近傍で極値をもつ。このように磁束分布が明瞭に変化した場合には容易に鋼材破断があると判定することができる。

コンクリートは非磁性体材料であるため、コンクリートをはつり取り鋼材を露出させる必要がなく非破壊で測定することができる。

漏洩磁束は3次元的な分布をするため、磁束密度を計測する方向は3次元方向が考えられるが、既往

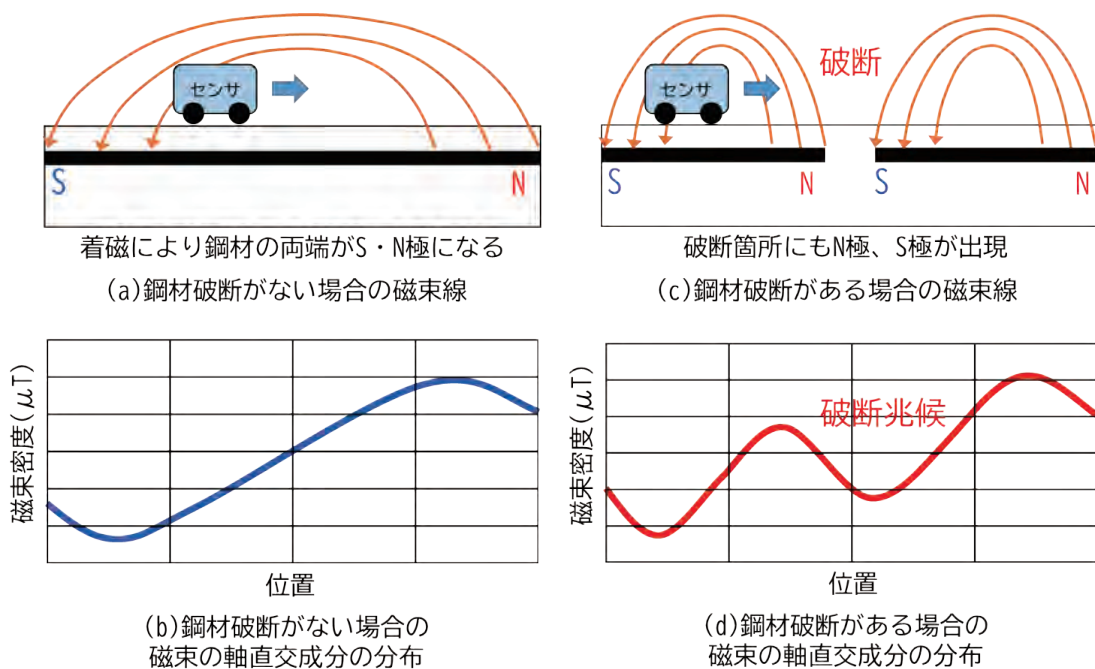


図-2 着磁した鋼材の磁束密度の分布

の検討は、コンクリートのかぶりに対して垂直方向（鋼材に対して直交方向）のセンサを配置した方法¹⁾、xyz3次元方向のセンサを配置した方法²⁾等、複数の手法が存在する。本検討では、前者によるもので（株）四国総合研究所が開発販売しているM.EYEチェッカー¹⁾を利用した。本製品は、コンクリート表面に対して垂直方向の磁束密度センサをかぶりからの高さを2段階、スキャン走行方向に対して鋼材直上、および左右の3段階、合計6チャンネルのセンサ配置（図-3）をもつ。関連する非破壊検査手法として、コンクリート表面の1点から磁場をかけて磁力の変化を計測し鋼材破断位置で急速に減衰する挙動から破断位置を検出する磁気ストリーム法もある²⁾。

3. 漏洩磁束の感度

漏洩磁束法においては、断面形状や配筋状況が単純な場合には、鋼材破断検知の有効性が示されている。図-4は実構造物のコンクリート電柱で軸方向のPC鋼材が複数本破断したものを切り出して室内で測定したものである。円周上に配置されたPC鋼線の周囲に細いスパイラル状の横補強筋が配置されている。円断面のためそのままでは計測装置のタイヤ走行に支障があるが、磁性体でない平板（プラスチック板、木板等）を当てれば、計測装置と鋼材までの間に必ずしもコンクリートが満たされていなくても結果に影響を及ぼさない。

コンクリート電柱の測定例として、測定部直下に

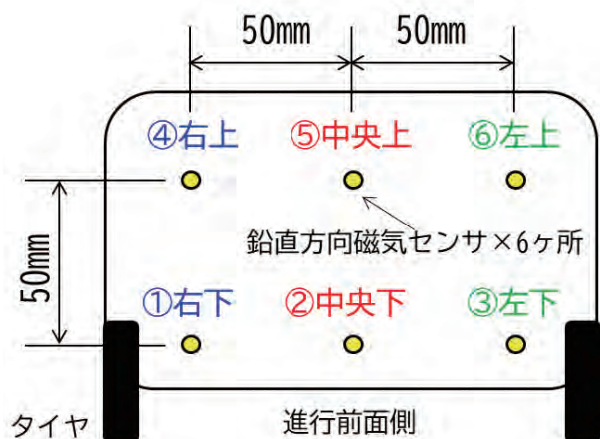


図-3 計測装置の複数のセンサ配置

鋼材破断がある場合を図-5と図-6に、鋼材破断がない場合を図-7に一例を示す。図-5では6つのセンサ配置のうち、破断した鋼材の直上で計測したセンサ②の感度が一番大きく変化が明瞭であるが、そのセンサから水平または鉛直に50mmずつ離れた他の計測点においては感度が低下しつつも若干破断の影響を受けていることがわかる。ただし、図-6では破断があるにも関わらず変曲点が見られるものの大きな変化はなく、図-7の破断のない場合との見かけ上の差は小さくなっている。

軸方向鋼材に対して直交方向にスターラップ等の鋼材が配置されている場合、測定前の着磁作業時にそれらの鋼材も同時に着磁されるため、図-8のよ

うに測定結果の波形は乱される。このように技術者の目視のみによって判定を行うには困難を伴うため、機械学習を用いて判別をすることとした。



図-4 電柱の測定状況

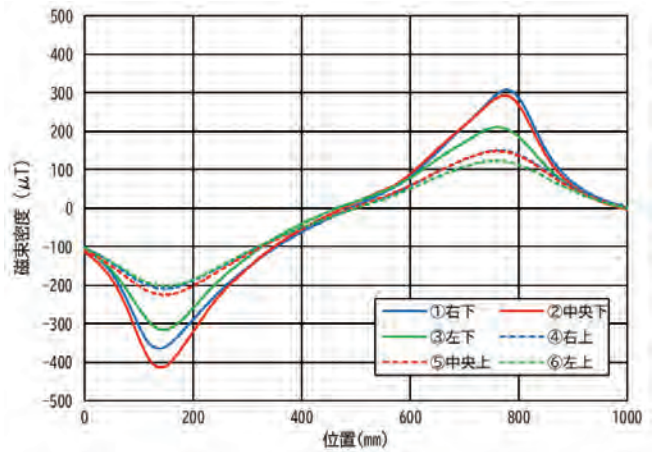


図-7 破断がない場合の測定例

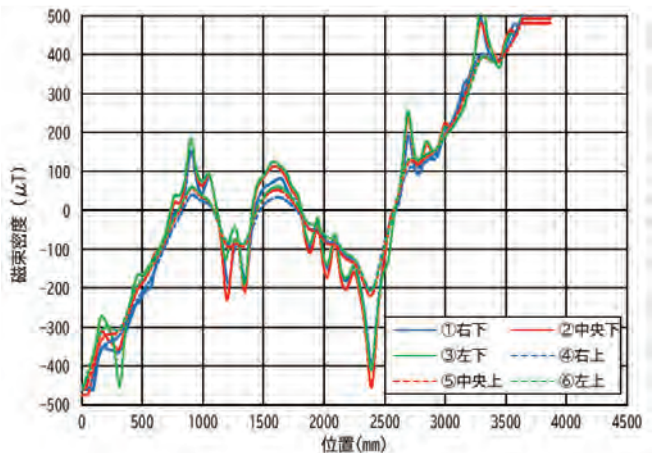


図-8 スターラップが配置された場合の測定例
(②直下に破断あり)

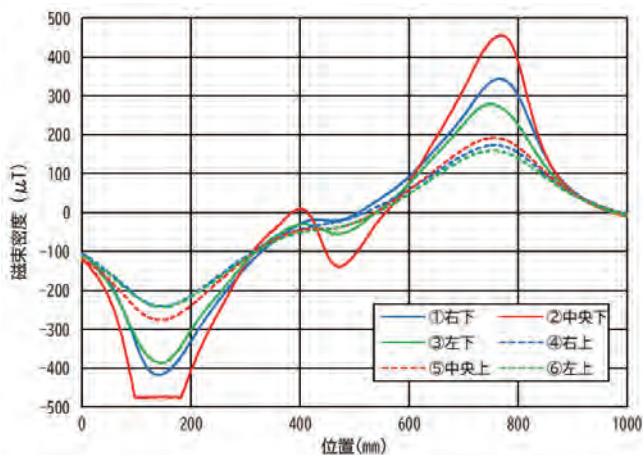


図-5 破断兆候が明瞭な場合の測定例 (②直下に破断あり)

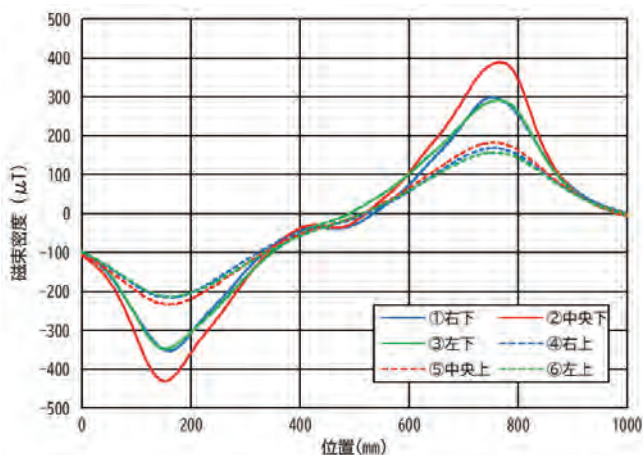


図-6 破断兆候が明瞭でない場合の測定例 (②直下に破断あり)

4. 室内実験での検討

機械学習（畳み込みニューラルネットワーク、CNN）を用いた判定をするにあたり、鋼材破断の有無を判別するためのデータの種類と数を増やす必要がある。教師データとなる実際に鋼材破断を有する構造物のデータを数多く取得するのは簡単ではないため、室内での検討を主体とすることとした。

鉄筋コンクリート橋およびプレストレストコンクリート橋を対象とするものの前述のとおりコンクリート自体は非磁性体であるため、実験供試体の製作にあたっては橋梁を模擬した鋼材を空間配置するだけでよく、コンクリートを打込んで硬化させる必要はない。したがって配筋を容易に変更して短期間に数多くのデータを取得することができる。最終的な目標としてはプレストレストコンクリート橋梁上部工のグラウト未充填等に起因するPC鋼材の破断を検知することにあるが、まずは広く鉄筋コンクリート構造物に想定される条件下のデータを取得することとした。

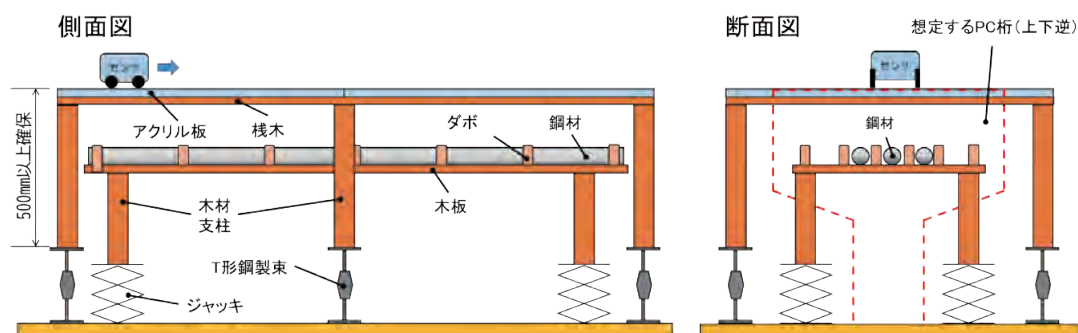


図-9 室内実験装置

基礎的な検討として、実構造物で考え得るパラメータを設定し、測定を行うことで実験データ数を増やすとともに、これらのパラメータに対して漏洩磁束の分布に対してどのような感度をもつのかについて把握することとした。

与条件となる着磁方法についても、かぶりが小さいと磁力の影響が大きく測定レンジ（±500μT程度）を越えてしまう場合もあるため、着磁回数についても検討を行った。

実験装置の概要図を図-9に示す。磁力の影響範囲として強力磁石を設置させる上面（橋梁上部工の下面を想定）から余裕をみて500mm以上の区間では、非磁性体である木材またはアクリルを支持材料として用いた上で、測定対象とする鋼材（PC鋼材、鉄筋、鋼製シース）を配置した。金属製のボルトやネジも磁性体として影響を及ぼすと考え、その500mmの区間では木材の接合には接着剤または木材同士の凹凸による継手を用いた。かぶりの大きさを段階的に変化させるためにパンタグラフ式の手動ジャッキを組み込んだ。試験体はPC桁のウェブと下フランジを想定し、桁が天地逆になるように鋼材を設置している。

5. パラメータの影響

与条件としては軸方向の鋼材にPC鋼より線(SWPR19-

28.6)を用い、鋼材の全長を3,400mmとした。鋼材を破断させた場合として、高速切断機を用いて軸方向に直交する断面で切断し全本数が切断された状態とし、切断部を装置全長のほぼ中央で一定間隔だけ離して配置することで鋼材破断を模擬した。

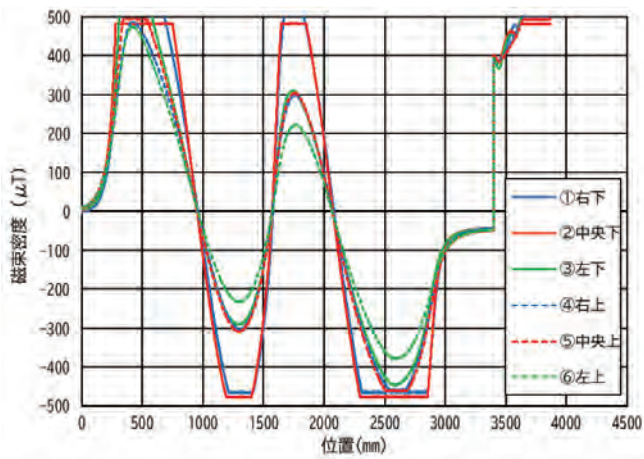
まず、検討項目として着磁回数（条件:1方向のみ、鋼材が内部に配置されていると想定してかぶり200mm）を0回～5回で検討した結果から、3回程度で収束する結果を得た。ただし、かぶりが小さい場合には回数を重ねるにつれて着磁が大きくなりレンジオーバーする傾向も見られたため、実構造物を測定する際には事前に傾向をつかむ必要もあると思われる。以下の室内検討では、実験検討の順番から回数を固定できず着磁回数は1回～5回とした。パラメータを変えても着磁は行わず、継続して測定している。

実験においては表-1に示すようにパラメトリックに検討し、各条件で5回測定した。

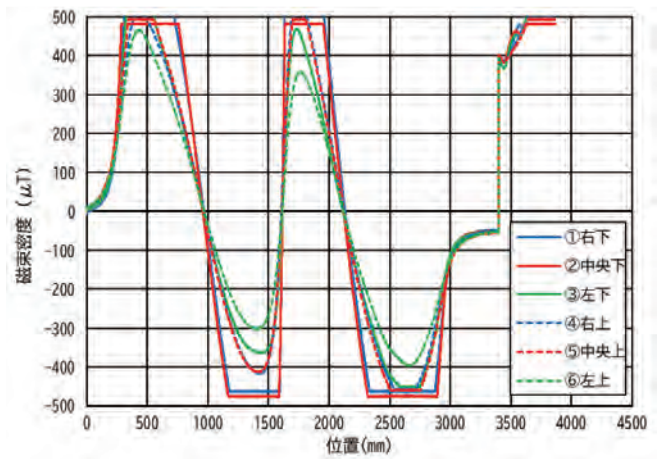
測定結果について、一部のみ示す。図-10において(a)破断面間隔を0mmと(b)100mmの場合の比較を行うと両者の差は小さいことがわかり、例えばPC鋼材が破断した際に付着の喪失とともに内部に引き込まれる場合においても結果に大きな影響は受けにくいことが示唆される。

表-1 パラメータの種類と測定条件

パラメータの種類	パラメータの範囲	固定条件
鋼材のかぶり	62、70、80、90、100、150、200、235mm	着磁回数1回（かぶり62mmで着磁作業実施）、PC鋼材本数1本、鋼材破断なし
鋼材のあき	8、46、84、122mm	着時回数5回（かぶり62mmで着磁作業実施）、かぶり50mm、鋼材破断なし
破断面の距離	0、1、5、10、100mm	着時回数5回（かぶり62mmで着磁作業実施）、かぶり50mm、鋼材破断あり
軸方向鋼材の本数	1、2、3本	着時回数5回（かぶり62mmで着磁作業実施）、かぶり50mm、あき8mm、鋼材は1本のみ破断
鋼材破断箇所とスターラップとの距離	スターラップ間隔250mmとして、スターラップの真下、およびスターラップ間隔中央の2ケース	着時回数5回（かぶり62mmで着磁作業実施）、かぶり50mm、あき8mm、鋼材は1本または3本



(a) 破断面間隔0mm



(b) 破断面間隔100mm

図-10 破断面間隔の影響

6. 実構造物の測定

まず、香川高専で所有する実際に供用され撤去されたポストテンションPC桁Aについて測定を行った。PC T桁橋であり事前に一部箇所X線調査およびはつり調査にてグラウトが健全であることを確認している。試験区間には鋼材の破断はないと考えられる桁である。

供用中の実構造物においてグラウト不良または腐食によるPC鋼材が破断した構造物の測定は困難であったため、(株) 高速道路総合技術研究所が所有し、(一社) 日本建設機械施工協会施工技術総合研究所(静岡県富士市)内に設置しているPC桁構造物群の

うち、PC鋼材破断を有するものを選定して測定を行った。測定対象として、試験桁B(ポストテンション方式、鋼製シース、複数種のPC鋼材と定着方法)、PC桁C(プレテンション方式、2種類)とした。



(a) PC桁A



(b) 試験桁B



(c) PC桁C

図11 実大構造物の測定

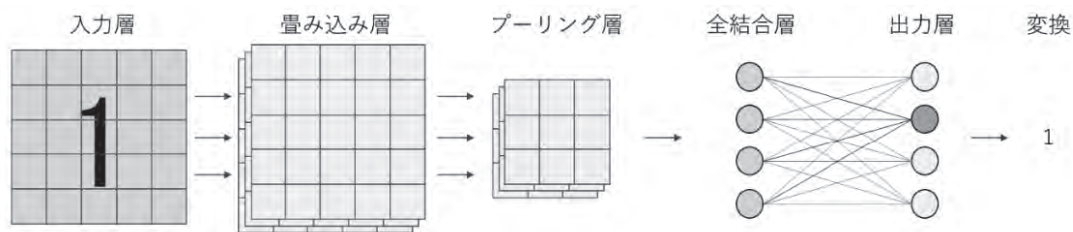


図-12 畳み込みニューラルネットワークモデルのイメージ図

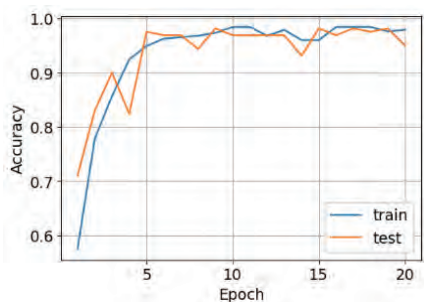


図-13 正解率

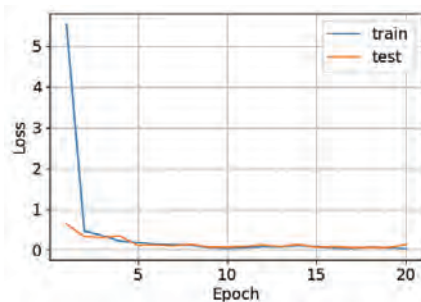


図-14 損失

		予測値	
		破断なし	破断あり
正解値	破断なし	0.97	0.03
	破断あり	0.07	0.93

図-15 混同行列

7. 機械学習

機械学習にはディープラーニングを用いることとし、一般的な畳み込みニューラルネットワークを構築した(図-7)。畳み込み層3層、全結合層2層の全5層のシンプルなモデルを採用した。

本装置では1回の測定において同時に6つのセンサにおけるデータが取得できる。今回は1次元畳み込みのモデルとし、6チャンネル全てのデータを使用しチャンネル相互間の関係は考慮せずに解析を行った。磁束密度は距離が1mmごとに計測されるが、使用した試験体の大きさから、1回の計測長が約1,000mm～3,500mm程度であったため、データ長を4,096(測定、センサーあたり)に統一し、データの中央に配置し欠損部分は0で補完した。

解析に使用した訓練データは、本検討で得られた室内および実構造物のデータから検証用に使用する90ケースを除外し、鋼材破断あり244ケース、鋼材破断なし285ケースの全529ケースとした。これらの訓練データをランダムに学習データとして70%、テストデータとして30%に分け、ミニバッチ法で学習を行った。ハイパーパラメータは以下の通りである。

- ・損失関数：Cross Entropy
- ・最適化関数：adam (学習率 10^{-3})
- ・評価指標：MAE (平均絶対誤差)
- ・バッチサイズ：10
- ・エポック：20

解析結果を以下に示す。図13に正解率、図14に損失、図15に混同行列をそれぞれ示す。本解析の条件では過学習も起こしておらず損失も収束しているといえる。

ホールドアウト検証を行い、訓練に使用していない90件の検証データを用いて実施したところ $84/90=93\%$ の正解率であった。今回行った1次元のCNNでも93%の精度で鋼材破断の有無を判別できるが、さらに高精度に判別を行うためには、同時に計測した6つのセンサ間の関係性を確認するために2次元畳み込みについても検討を行うことが必要と考えている。

謝辞

本研究の一部には(一財)橋梁調査会の2022年度橋梁技術に関する研究開発助成を受けた。実構造物の測定に関しては(株)高速道路総合技術研究所、(一社)日本建設機械施工協会施工技術総合研究所の協力を賜った。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 四国総合研究所 M.EYEチェッカー
<https://www.sskn.co.jp/service/meye.html>
 (閲覧日：2023年10月1日)
- 2) コニカミノルタ SenriGAN
<https://bic.konicaminolta.jp/hihakai/>
 (閲覧日：2023年10月1日)

鋼I桁橋の高耐震・高耐久化に向けた滑り構造の活用

熊本大学 くまもと水循環・減災研究教育センター 教授 松村 政秀

1. はじめに

大型交通の増加や経年の作用により生じる鋼橋の主な損傷には、腐食や疲労が挙げられる¹⁾。これらの損傷は部材や橋の性能低下に直結することから、耐荷力や耐久性を確保するための予防的・事後的な対策が実施されている。構造側の抵抗を高めるべく、大掛かりなものでは、鋼I桁橋におけるRC床版の高耐久化の実現のためプレキャストPC床版への取替や鋼桁の補修や取替が進められている。耐震性が不足する場合には、作用力を低減すべく鋼製支承をゴム支承へ取り替える耐震性向上対策が、耐久性対策と併せて実施されることも多い。この耐震性向上対策では、鉛直力支持機能および変位や回転に対する常時および地震時の変形追従機能を1つの支承で受け持つ免震ゴム支承や、すべり構造とゴム支承の複数で受け持つ機能分離型支承が主に選択される。

ここで、支承部を改良する上部構造の免震化は、下部構造の応答低減や損傷低減が期待できる一方、上部構造の応答変位が大きくなる傾向も認められ、例えば図-1に示すように、橋台との衝突による鋼桁の損傷、支点上補剛材の変形、支承の取付ボルトやゴムの破断なども生じている²⁾。これらは必ずしも全ての橋梁に生じる損傷ではないが、上部構造や支承部には多様な損傷が生じる可能性があり、支承部や上部構造の機能が損傷・喪失すると、その復旧に多大な時間を要することは避けられない。

鋼I桁橋の構造と特徴は、図-2に示すとおり、軽量で横荷重に対する剛性が低い鋼I桁が、重量の大

きなコンクリート系床版（鋼桁との重量比は7:3程度）を支持する構造形式であり、鋼桁や支承部への負荷が大きく、PC床版等の高耐久な床版を採用する場合にも床版重量が約1.2倍に増加することから、床版取替を行う場合であっても鋼桁や支承部への作用力が大きくならない条件で、鋼桁の耐震性と耐久性をとともに向上できるような対策が有用といえる。

このようなことから、多くのすべり構造が提案されている³⁾ 状況を鑑み、文献4)、5) では、すべり構造を活用した鋼I桁橋の構造形式として、図-3に示すように、コンクリート系床版の下面すなわちコンクリート床版と鋼桁上面の間にすべり構造を設け、常時および地震時における鋼桁、支承部、下部構造への作用力低減を期待する免震床版構造を提案している。すべり構造を支承部に設ける形式も、すべり構造より下方の下部構造の損傷低減の効果が期待できる。いずれの位置にすべり構造を設ける場合にも、復元力を獲得したり大変形を防止するための機能部材の設置も必要となるが、なによりも高耐久なすべり構造の採用により安定したすべり性能が発現することが構造成立の前提となる。そこで、本稿では、すべり構造を活用した免震床版構造およびその構造成立性について述べ、2種類の滑り剤、すなわち



図-1 桁端部や支承の損傷

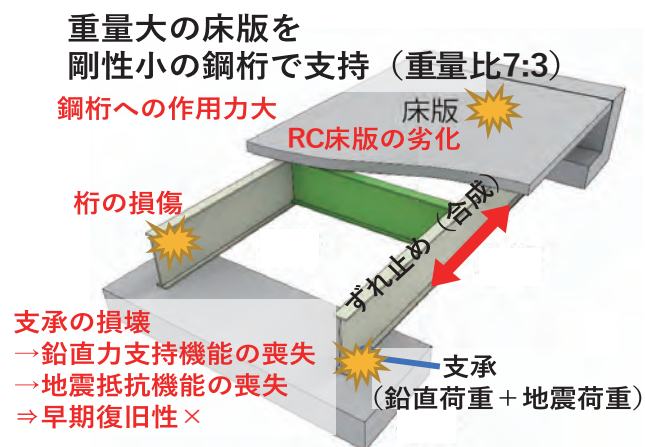


図-2 鋼I桁橋とその特徴

PTFEおよびMSM（MAURER社製）とSUS316板からなるすべり構造を対象に、繰返し作用を受ける場合のすべり構造の性能を、載荷実験により評価している。

2. すべり構造を活用した免震床版構造

床版免震構造⁴⁾、⁵⁾では、図-3に示したとおり、床版-桁間にすべり構造を設置し、常時・地震時ともにすべり構造より下方の鋼桁と支承部、下部構造への力の作用を低減することを期待する構造形式であり、とくにこの点で、支承部を改良し上部構造を長周期化することによって下部構造の応答低減を期待する、免震ゴム支承を用いる形式とは得られる効果が異なる。免震床版構造では、床版-下部構造間にすべり構造と床版には床版の地震時応答を制御するため復元力を発現する構造を配置し、すべり構造より下方の、鋼桁や支承部、下部構造への作用力を低減できる効果に加え、床版と鋼桁とは合成せず分

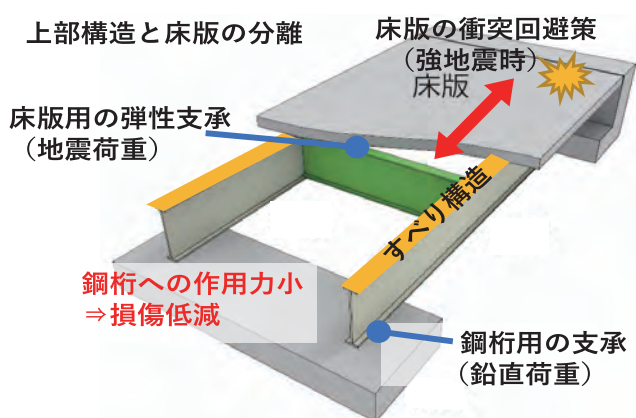


図-3 免震床版を有する鋼桁橋とその特徴



図-4 単純支持された鋼桁橋⁵⁾

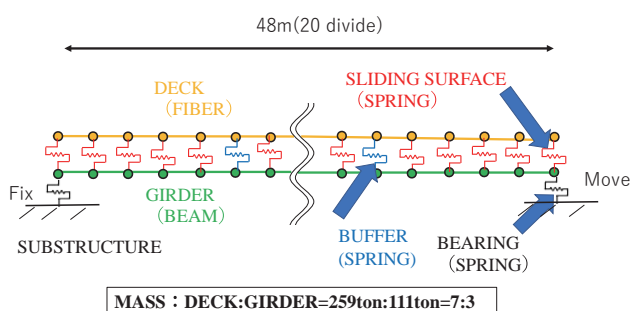


図-5 鋼桁橋の簡易解析モデル⁵⁾

離した（非合成）構造であるため、床版-鋼桁間の温度伸縮やクリープ等による影響や床版と桁の拘束による二次応力の発生を抑制できる効果も期待できる。一方、鋼桁は鉛直荷重を支持し常時の温度変化等による伸縮や回転に追随できる支承構造（例えば、通常の鋼製支承）により支持することが考えられ、免震床版構造は既設鋼I桁橋の床版取替における床版構造としても応用できるのではと考えている。

このような免震床版を有する鋼橋の実現には、高耐久なすべり性能だけでなく、横倒れ防止など鋼桁の設計法の見直し、交通荷重に対して十分な耐久性を有する床版および応答変位を許容できる伸縮装置などの採用等の検討も必須となるが、多様なすべり構造の実験も実施され、高耐久な床版は合成床版やPC床版など数多く開発され、床組にすべり面を適用して免震化し橋梁システムの耐震性を向上させた事例⁶⁾もあり、免震床版構造を用いる構造形式の構造成立は十分見込めると考えている。

ここでは、すべり構造の適用効果を、図-4に示す、厚さ0.22 mのコンクリート系床版を4本の主桁で支持する橋長48 m、幅10 mの一般的な鋼I桁橋を想定し、レベル1地震動、レベル2・タイプII地震動を入力する地震応答解析により検討している。解析には、図-5に示す簡易解析モデルを用い各部の水平剛性をバネ要素により設定する。支承には鋼製支承（降伏時の荷重と変位は1,600 kN、約4 mm、水平剛性は $k_{BEA}=400$ kN/mm、）、復元力を得るための構造にはゴム系支承（ k_{BUFFER} は0.21 kN/mm、200%ひずみ以後は $3 \times k_{BUFFER}$ ）、桁端部の遊間は50 mmとし、すべり構造の摩擦係数 μ を0.01～0.50の範囲で変化させる。

すべり構造を用いる場合の応答は、入力地震動により異なり、また、免震ゴム支承を用いる場合ほど周期性ある応答にはならないが、図-6に示すように、すべり構造の摩擦係数が $\mu < 0.15$ かつ小さいほど上部構造の水平変位の最大値が大きく、図-7に示すように、 $\mu > 約0.05$ かつ大きいほど鋼桁や支承への作用力が大きくなり、支承への作用力を設計水平震度0.3程度以下へと低減するためには、繰返し変位を受ける場合も概ね $\mu < 0.05$ を確保することが必要であることが確認できる。

したがって、概ね $\mu < 0.05$ の高耐久なすべり構造が採用できると、常時および地震時ともに、すべり構造より下方への作用力を低減でき、高耐久で高耐震な鋼I桁橋を実現できると考えている。

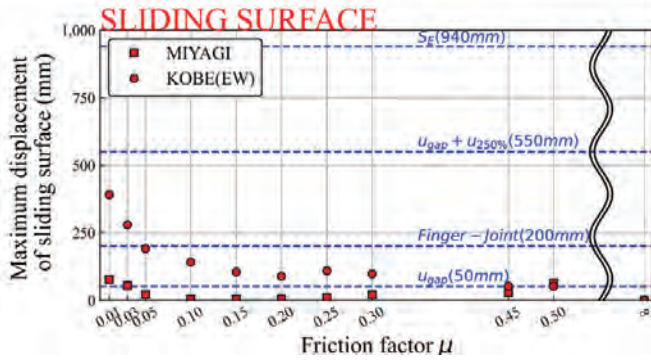


図-6 摩擦係数と上部構造最大変位⁵⁾を改変

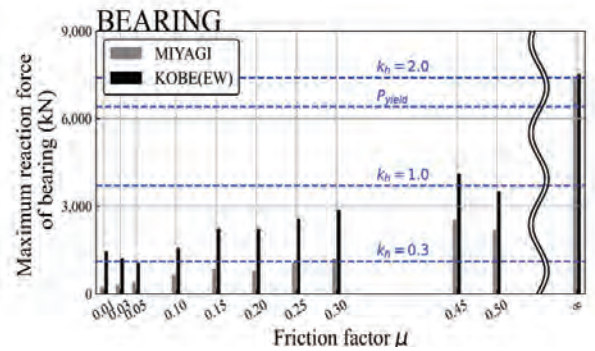


図-7 摩擦係数と支承への作用力⁵⁾を改変

3. すべり構造の性能評価

滑り剤には、我が国で広く採用されている充てん材入りPTFE⁷⁾（ガラスファイバー 15%、二硫化モリブデン5%、カタログ情報によると動摩擦係数0.29～0.31、静摩擦係数0.08～0.10）および高い圧縮応力下で安定したすべり性能を示すMSM⁸⁾（MAURER社製）を選定した。MSMの製品情報によると、MSMは表-1に示すとおり、50 kmの摺動距離においても $\mu < 0.06$ を示し、PTFEよりも高い圧縮応力下で摩擦係数0.02程度以下を実現できる滑り剤とされている。我が国におけるMSMの試験実績や使用実績は無いものの、設置時に治具等への接着は不要であり、高い面圧に対する優れた耐久性とすべり性能を示すことから、交換時にも有利といえる。

表-2に実験ケースの内訳を示す。滑り剤のサイズは直径80 mmの円形とし、滑り剤は凹みを設けた鋼製の治具に設置する。PTFEの設置には接着が奨励されており、ここでは2液混合型のエポキシ樹脂

系接着剤を用いて接着する。そこで、PTFEは接着する場合／しない場合、MSMは表面に深さ2 mmのディンプル加工しグリースを用いる場合／ディンプル加工しない場合を対象に、鉛直荷重は文献9)を参考に、滑り面の面圧が30、80、130 MPaに相当する150、400、650 kNの3パターン、水平変位は漸増する正弦波（目標振幅 ± 20 mm、繰返し周期0.125 Hz、平均速度10 mm/sec）とし、目標振幅に到達してから10サイクル（摺動距離0.8 m）を载荷した。PTFE接着ありとMSMディンプルありの2ケースは、面圧30 MPaの条件で400サイクル（摺動距離32 m）の载荷も実施した。

図-8には载荷装置の概要を示す。凹みを設けた鋼製（SS400）円形治具に、PTFEは厚さ4 mmのうちその70%の2.8 mm、MSMは厚さ8 mmのうち5.5 mmを凹みに埋め込み、滑り剤を設置する。相手材にはステンレス鋼板SUS316を用い、表面仕上げNo.3以上（表面粗さRaが1.6以下）となるよう⁹⁾に滑り剤との接触面を仕上げた。载荷は、面圧の小さいケースから実施し、滑り剤に損傷等が目視で確認できない場合には引き続き大きな面圧で、確認できた場合には新しい滑り剤に交換し、実験を実施し、面圧130 MPaは各ケース3回実施した。

表-1 MSMの摩擦係数（カタログ値，移動距離50km）⁷⁾

Temperature in °C	Experimental coefficients of friction μ_T at		
	15MPa	30MPa	60MPa
-25	0.060	0.046	0.027
-10	0.052	0.037	0.020
+21	0.027	0.020	0.013

表-2 実験ケースの内訳

	面圧 (MPa)	振幅 (mm)	加振回数	周期 (sec)
PTFE-接着剤なし	30 80 130	± 20	10	8
PTFE-接着剤あり				
MSM-ディンプルなし				
MSM-ディンプルあり				
PTFE-接着剤あり	30		400	
MSM-ディンプルあり				

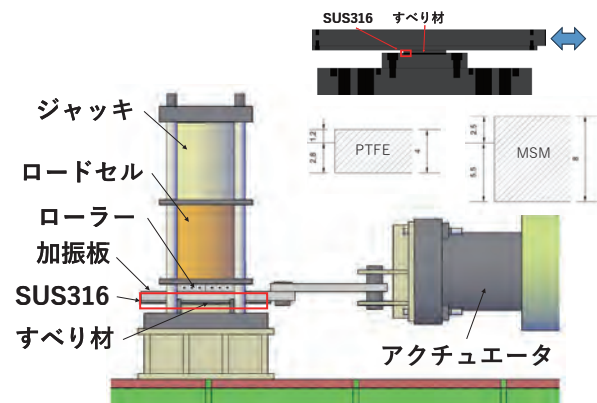


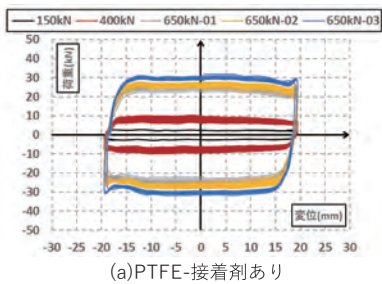
図-8 载荷装置の概要

紙面の関係から、PTFE接着剤あり、MSMディンプルありの2ケースを取り上げ、図-9に荷重変位曲線を、図-10に荷重変位曲線から得られた摩擦係数とサイクル数の関係、図-11に実験前・後の滑り剤の変形状況を示す。

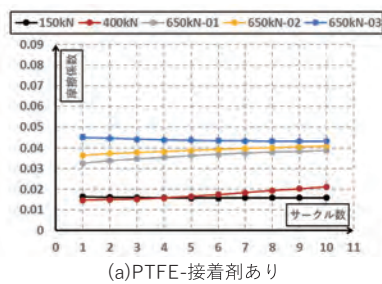
図-9によると、10サイクルの繰返し変位を载荷すると、±20 mmの変位折り返し付近で载荷速度の低下と速度ゼロからの上昇により荷重の値が変動し、この影響はMSMの方が顕著であるが、PTFE、MSMとも、一定な速度域では一定な水平荷重(すべり抵抗)を示し、滑り面の面圧が大きいほど水平荷重も大きくなることを確認できる。図-10より、水平荷重を鉛直荷重で除して得られる摩擦係数とサイクル数に着目すると、PTFEは面圧30 MPaではサイクルを通じてほぼ一定な摩擦係数(10サイクルの平均値で0.016)を示した。面圧が大きいとサイクル数が増加するにつれて摩擦係数が大きくなり、10サイクル

を3回実施した面圧130 MPaで平均値は0.04となった。一方、MSMは面圧30 ~ 130 MPaの範囲でほぼ一定な摩擦係数0.01となり、面圧の影響は確認されなかった。図-11に示すように、実験終了後には、PTFEはせり出しが認められたが、MSMの変形は小さかった。

PTFE接着ありとMSMディンプルありの2ケースは400サイクルを载荷した。図-12および図-13に示すように、PTFEは50サイクルのとき摩擦係数は0.054、100サイクルのとき0.068、140サイクル付近で最大値0.07と、繰返し回数の増加とともに摩擦係数が増加した。一方、MSMの摩擦係数は最大値で0.017と繰返し载荷に伴う変動が小さく安定したすべり性能を発現することが確認できる。図-14に示すように、実験終了後、PTFEにはせり出しが確認され、MSMにも若干のせり出しが確認されたがその程度は小さかった。



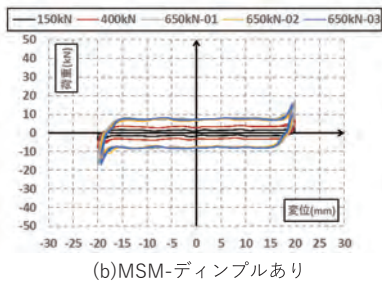
(a)PTFE-接着剤あり



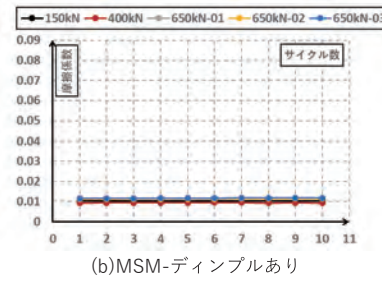
(a)PTFE-接着剤あり



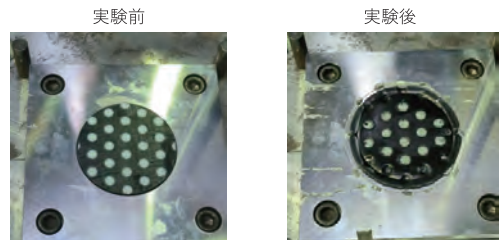
(a) PTFE-接着剤あり



(b)MSM-ディンプルあり



(b)MSM-ディンプルあり

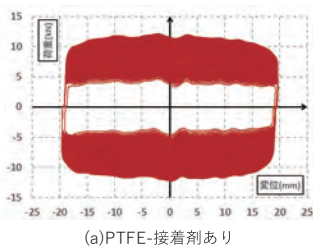


(b) MSM-ディンプルあり

図-9 荷重-変位関係 (10サイクル)

図-10 摩擦係数-サイクル関係

図-11 滑り剤の変形 (10サイクル)



(a)PTFE-接着剤あり

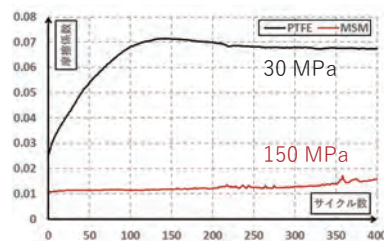
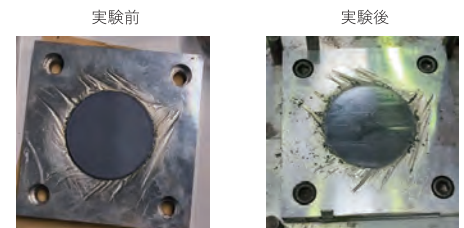
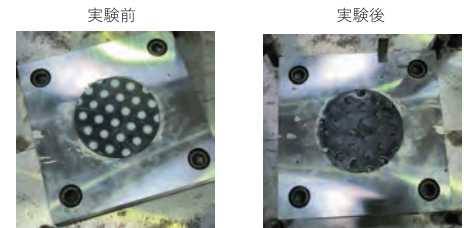


図-13 摩擦係数-サイクル関係



(a) PTFE-接着剤あり



(b) MSM-ディンプルあり

図-12 荷重-変位関係 (400サイクル)

図-14 滑り剤の変形 (400サイクル)

4. おわりに

本研究は、長寿命な鋼橋を実現するうえで、従来手法よりも鋼桁橋における鋼部材への作用力の低減が期待できる手法として、すべり構造を活用した免震床版構造およびすべり構造の実現に不可欠な滑り剤について検討を行ったものである。滑り剤には、我が国で採用実績の豊富なPTFEおよび欧州では実用に供されているが我が国では採用実験の無い滑り剤MSM（ディンプル加工を施しグリースを塗布）に着目した。

PTFEは面圧が大きくなると摩擦係数が大きくなり（面圧30～130 MPaの範囲で0.016～0.04）、MSMは面圧に依存せずほぼ一定な摩擦係数（0.01程度）となることが確認できた。繰返し回数が多い場合には、PTFEでは繰返し回数に応じて摩擦係数が最大で0.07程度まで、MSMは0.017程度まで上昇するが、いずれの滑り剤も、面圧130MPa以下で繰返し回数が少ない場合には、摩擦係数0.05程度以下を発現することがわかった。

滑り剤の性能発現は、温度や載荷速度・繰返し回数により異なることから、種々な条件において試験研究の継続が必要であるが、すべり構造により作用力の低減が比較的容易に実現できることから、すべり構造を活用できると従来手法では得ることが難しい性能や効果の獲得に繋がり、引き続きすべり構造を活用した高耐震で高耐久な構造の検討を進めたいと考えている。

なお、PTFEでPTFEと鋼製治具を接着しない場合、およびMSMでディンプル加工を施さずグリースを塗布しない場合には、面圧が小さい場合には摩擦係数が0.06～0.08程度と大きく、面冊が大きいと0.04～0.05となったが、別の機会に紹介したい。

参考文献

- 1) 例えば、都市橋梁の持続的デザイン—補修・補強のホーリスティック・アプローチ、JSSCテクニカルレポート、No.92、日本鋼構造協会、維持管理の現状と課題、pp.8-22、維持管理と補修・補強・再構築を支える技術、pp.31-37、2010.11
- 2) (一財)九州橋梁・構造工学研究会、2016年熊本地震被害調査・分析報告書、2019.12
- 3) 例えば、(独)土木研究所耐震研究グループ他、共同研究報告書、すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究報告書（その1）、第320号、2005.7
- 4) 松村政秀、報告：床版免震構造による既設鋼橋のリニューアル手法の適用可能性に関する研究、高速道路と自動車、第64巻、第1号、pp.44-47、高速道路調査会、2021.1
- 5) Masahide Matsumura, Kota Annoura, Hitoshi Moriyama, Structural plan and design of bridge deck isolation system for seismic redundancy, Proceedings of the Eighth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, SEMC2022, pp.183-188, 2022.9
- 6) 金治秀貞、宮本義広、高田佳彦、地震防災特集：免震技術を活用した阪神高速湾岸線・港大橋の耐震補強—日本で最初の本格的な長大橋大進補強—、pp.31-36、建設の機械化、日本建設機械化協会、2004.2
- 7) 三井デュポンフロロケミカル（株）編、テフロン実用ハンドブック、1992
- 8) <https://www.maurer.eu/produkte/bauwerkslager/msmrsar-kalottenlager/>（参照日：2023.10.5）
- 9) 日本道路協会、道路橋支承便覧、平成30年改訂版、2019.2

繊維補強RC床版の数値解析による性能評価手法の開発

東京大学 工学系研究科 社会基盤学専攻 助教 栗原 遼大

1. はじめに

インフラ高耐久化および維持管理コスト削減のため、近年、短繊維補強コンクリートが注目されている¹⁾。繊維補強コンクリートは数ミリから数十ミリの繊維をコンクリート中に分散させて混入したものである。コンクリート中に混入された繊維は、図-1のように、コンクリートがひび割れたのちにひび割れ間に架橋効果を発揮し、ひび割れ開口を抑制する効果があり、ひび割れ後に抵抗できないコンクリートの靱性を大きく向上させることができる。一般に、混入する繊維には鋼や合成繊維(PVAやPP)が用いられ、コンクリートの体積比で数%の繊維を混入することが多い。普通コンクリートに繊維を混入することでコンクリートへ靱性やひび割れ抵抗性を付加することが目的のものから、高性能なセメント系複合材料と繊維補強を組み合わせることで、高い強度を達成すると共に、数%といった引張終局ひずみを有する高靱性なUHPRC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete) と呼ばれるもの材料もある。

繊維補強コンクリートには高い耐荷性能をもち、疲労長寿命化、高耐久化、床版の薄肉化による軽量化、といったメリットが期待され、床版を中心に実橋梁への適用例も増えてきている。ここで、数値解析で繊維補強鉄筋コンクリート(RC)床版の力学的挙動を追跡できることができれば、実構造物をありのままに再現し、構造性能の定量評価を行うことができ、より効率的な維持管理戦略に資する。本研究は特に有限要素法解析を用いて繊維補強RC床版の構造性能評価を行うことを狙うものである。

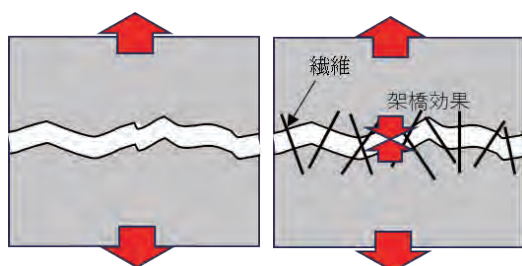


図-1 架橋効果イメージ

2. 数値解析モデル

普通コンクリートの非線形挙動のモデル化は、既往の研究で前川らによって提案されており²⁾、これをベースとして繊維補強コンクリートの挙動の取り込みを試みた。本モデルは、コンクリートの複数のひび割れを一定の範囲内で平均して、有限要素の平均応力-平均ひずみ関係として取り扱う。ひび割れ分散性を高め、複数の微細ひび割れを発生させる効果をもつ繊維補強コンクリートの挙動をモデル化するに合理的であると考えている。様々な繊維補強コンクリートがあるが、架橋効果を付加するという点では同じ機能を果たしているため、同一の挙動を仮定した構成則で入力パラメータの変化のみでこれらを整理し、適用範囲の高いモデルの構築を目指した。

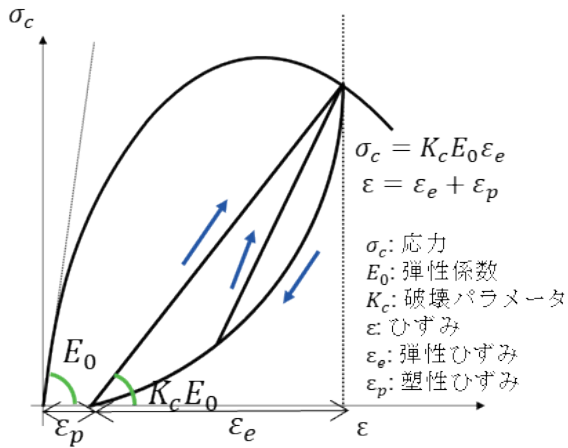
図-2に圧縮、引張、せん断の構成則を示す。繊維補強の効果は、架橋効果によるひび割れの開口に対する抵抗が主であるため、引張靱性の向上に顕著に現れる。過去に高い靱性をもつUHPRCの一つであるECC (Engineered Cementitious Composites) の構成則として提案されたモデル³⁾を参考に、引張モデルに式(1) - (3)に示す構成則を適用した。コンクリートにひび割れが入り、架橋効果が発揮され引張応力が更に増加し、ピークひずみに達して引張強度を示す挙動をバイリニア関係とした。その後の軟化挙動については普通コンクリートの軟化挙動と同じモデルとしている。

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon \quad (0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{cr}) \quad (1)$$

$$\sigma_t = f_{cr} + (E_{br}(\varepsilon - \varepsilon_{cr})) \quad (\varepsilon_{cr} \leq \varepsilon < \varepsilon_{up}) \quad (2)$$

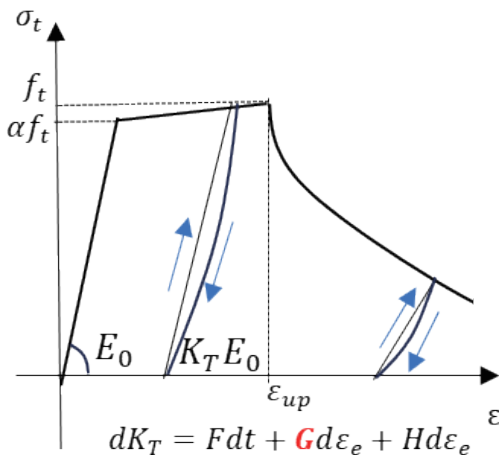
$$\sigma_t = f_t \varepsilon^c \quad (\varepsilon_{up} \leq \varepsilon) \quad (3)$$

σ_t : 平均引張応力, E_0 : ヤング率, ε : 平均ひずみ, ε_{cr} : ひび割れひずみ, ε_{up} : ピークひずみ, ひび割れひずみ, E_{br} : 架橋効果を考慮した2次勾配, f_{cr} : ひび割れ時引張応力, f_t : 引張強度

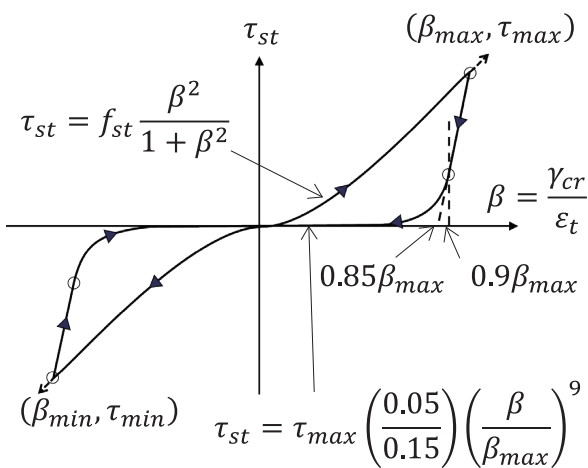


$$dK_c = \left(\frac{\partial K_c}{\partial t}\right) dt + \left(\frac{\partial K_c}{\partial \epsilon_e}\right) d\epsilon_e$$

圧縮



引張



$$\tau = X\tau_0(\delta, \omega)$$

$$X = 1 - \frac{1}{10} \log_{10} \left\{ 1 + \int |d(\delta/\omega)| \right\}$$

せん断

図-2 数値解析モデル概要

繊維補強の効果は圧縮強度には大きく影響しないという既往の報告をもとに、圧縮モデルに関しては既往のモデルをそのまま適用し、ポストピーク靱性を向上させた。圧縮モデルは式 (4) - (6) で記述される。2

$$\sigma'_c = K_c E_0 (\epsilon - \epsilon_p') \quad (4)$$

$$K_c = \exp[-0.73(\epsilon'_{max})\{1 - \exp(-1.25\epsilon'_{max})\}] \quad (5)$$

$$\epsilon'_p = \epsilon'_{max} - (20/7)\{1 - \exp(-0.35\epsilon'_{max})\} \quad (6)$$

σ'_c : 平均圧縮応力, ϵ' : 平均圧縮ひずみ, ϵ_p' : 組成圧縮ひずみ, K_c : 破壊パラメータ, ϵ'_{max} : 最大圧縮ひずみ

固定ひび割れモデルでは、主応力とひび割れ面の方向が一致しないため、せん断伝達を別に考慮する必要がある。既往の研究をもとに、せん断伝達に支配的な要素は骨材の有無であるとして普通コンクリートと同じモデル (式 (7) - (9)) を適用した。しかし、特に鋼繊維はひび割れ間のせん断伝達の補強効果を持つという報告もあり、微視的スケールの現象理解に基づく更なる検討が必要である。

$$\tau = G\gamma \quad (7)$$

$$1/G = 1/G_{st} + 1/G_c \quad (8)$$

$$G_{st} = \tau_{st}/\gamma = f_{st}\beta^2/(1 + \beta^2), \quad \beta = \gamma/\epsilon_t \quad (9)$$

G_{st} : せん断剛性, G_c : ひび割れの無いコンクリートのせん断剛性, ϵ_t : ひび割れ面垂直方向の引張ひずみ, f_{st} : せん断強度

コンクリートの疲労損傷については、繰り返しにかかる外力によって発生する塑性変形とコンクリート中の微細ひび割れの両方を考慮し、剛性の低下として取り込んだモデルが提案されており^{3) 4)}、普通コンクリートの床版疲労への適用性が確認されている⁵⁾。圧縮、引張それぞれの破壊パラメータ K_c, K_T について、式 (10)、式 (11) で損傷が考慮される。

$$dK_c = \left(\frac{\partial K_c}{\partial t}\right) dt + \left(\frac{\partial K_c}{\partial \epsilon_e}\right) d\epsilon_e \quad (10)$$

$$dK_T = Fdt + Gd\epsilon_e + Hd\epsilon_e \quad (11)$$

せん断伝達についても、剛性低下率 X を導入することで疲労損傷を考慮している。繰り返し荷重の影響により、ひび割れ面が平滑化することによるせん断伝達低下の影響を取り込んだものである。

$$X = 1 - \frac{1}{10} \log_{10} \left\{ 1 + \int \left| d \left(\frac{\delta}{\omega} \right) \right| \right\} \quad (12)$$

これら構成則は、コンクリートの非線形挙動が一番開口しているひび割れに支配的であるというアクティブクラックの概念に基づき3次元6方向固定ひび割れモデルへと拡張される²⁾。

3. 既往の実験の再現解析

モデルの検証の一つとして、既往の研究⁷⁾で報告されている、無筋繊維補強コンクリートの静的曲げ载荷試験および曲げ疲労試験の再現解析を行った。100mm辺の正方形断面、長さ420mmのコンクリートはりに対するスパン400mmでの3点曲げ载荷試験である。無筋はり (Plain) と繊維補強コンクリートはり (FRC) に対してそれぞれ静的実験と曲げ疲労試験を再現した。どちらの試験体も水セメント比47%のコンクリートによって作製され、FRCは体積比1%の鋼繊維が混入されている。形状の異なる2種類の繊維で比較されているが、本報告においては直線形

状の鋼繊維を用いたケースを対象とする。有限要素モデルを図-3に示す。载荷治具も含めて全て3次元ソリッド要素で構成し、メッシュサイズは軸方向に20mm。幅方向に25mm、鉛直方向に10mmとした。コンクリート部にはコンクリート要素を、载荷治具には弾性挙動を適用した。材料パラメータは実験で報告されている表1に示す値を用いた。静的解析についてはひび割れ後の挙動を比較するため、変位制御で解析を行った。図-4は実験で測定された荷重—CMOD (亀裂開口変位) 関係の解析と実験間の比

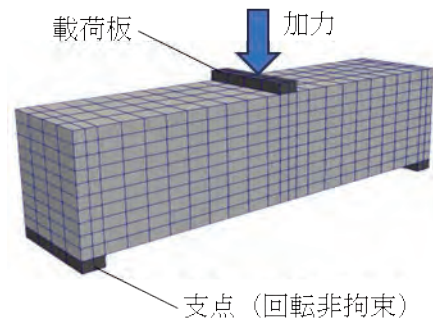


図-3 有限要素モデル

表-1 材料特性

	圧縮強度	引張強度	ヤング率
Plain5	5.0 MPa	5.2 MPa	32 GPa
FRC	53.22 MPa	5.3 MPa	30 GPa

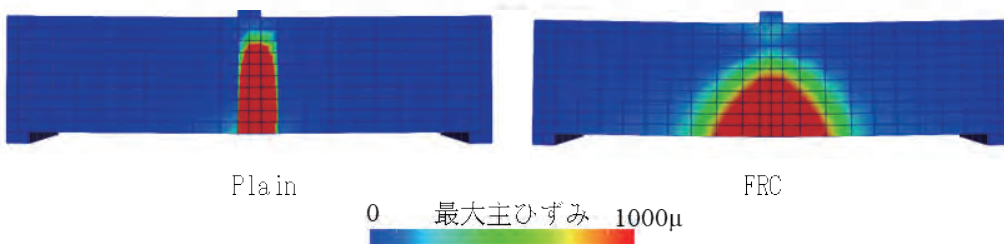
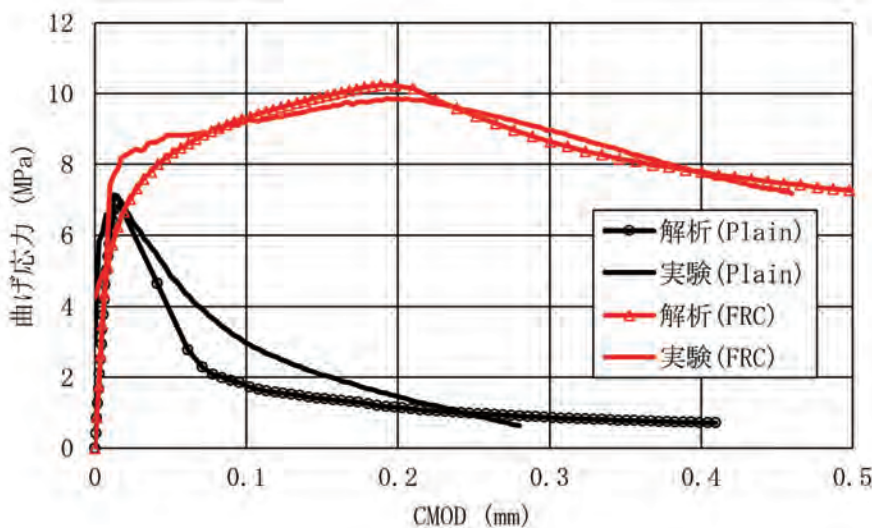


図-4 解析と実験の比較 (静的载荷挙動)

較を示しており、解析が実験の挙動を再現できていることがわかる。図-4には解析により得られたCMOD 0.1mm時の最大主ひずみコンターも示している。最大主ひずみは概ねひび割れの分布と考えてよく、普通コンクリートはひび割れ後にひび割れの開口に抵抗しないため一本のひび割れが底面から貫通するように進展し、一気に耐荷力を失うのに対して、FRCで見られるひび割れ開口に抵抗力があることによってひび割れが分散する挙動も捉えられている。

報告では同じ試験体を用いて曲げ疲労試験を行っており、これも同様に再現解析を行った。実験では、普通コンクリートはりに対しては5.5MPa、6.4MPa、繊維補強コンクリートはりに対して9.5MPa、8.5MPa、8.0MPaの最大曲げ応力で3点曲げ疲労させた。疲労強度は一般に、所定のサイクル数繰り返し支持できる静的強度の割合として定義されており、応力-疲労強度に達した時のサイクル数の関係（S-N曲線）で評価され、曲げ疲労の場合、Sははりの曲げ応力となる。

図-3に示した解析モデルを用いて、荷重制御によって疲労試験の再現解析を行い、解析では最大曲げ応力をPlainで5.0 MPaから6.5 MPaまで、FRCで6.5 MPaから9.5 MPaまで0.5MPaずつ設定した。なお、試験において最小曲げ応力は0であったため、解析でも設定した最大曲げ応力まで载荷したのちに完全除荷するサイクルを繰り返す载荷条件とした。なお、疲労破壊の基準については文献中には明確な記載が

なかったものの、PlainとFRCで疲労によるたわみの進展が大きく異なる。どちらのケースも中央たわみの値で判断したが、Plainの場合、あるサイクルに到達すると急激にたわみが上昇するため、その回数を破壊時のサイクル数とした。一方、FRCでは漸次的にたわみが増加するため、たわみの値が1サイクル目の値の10倍に達した時を破壊とした。図-5に実験と解析の比較を示す。普通コンクリートについては、解析の曲げ疲労挙動は実験の結果をよく再現できており、これは過去の研究でも検証されてきたものである。FRCの疲労挙動については、特に8 MPaを超える最大曲げ応力がかかる領域について、よく実験を再現できた。最大曲げ応力が曲げ強度に近い領域では、疲労破壊サイクル数は100回以下となって繊維補強の有無による疲労強度の差はあまりない。初期にかかった曲げ応力によるひび割れが大きく進展しており、開口幅も大きいため、架橋効果が限定的であると考えられる。一方、破壊が10000回程度以上となる高サイクル域（最大曲げ応力では8MPa以下の領域）において、実験データのばらつきも大きく単純な判断はできないものの、解析が疲労損傷を過大評価する傾向であった。文献では、繊維の形状によって特に高サイクル疲労の強度が変化することも報告されている。繊維の抜け出しによる架橋効果の減少がこの領域での疲労損傷を招き、この進行が普通コンクリートにおいて微細な損傷が進展する場合と比較して遅いが、ある程度以上の損傷

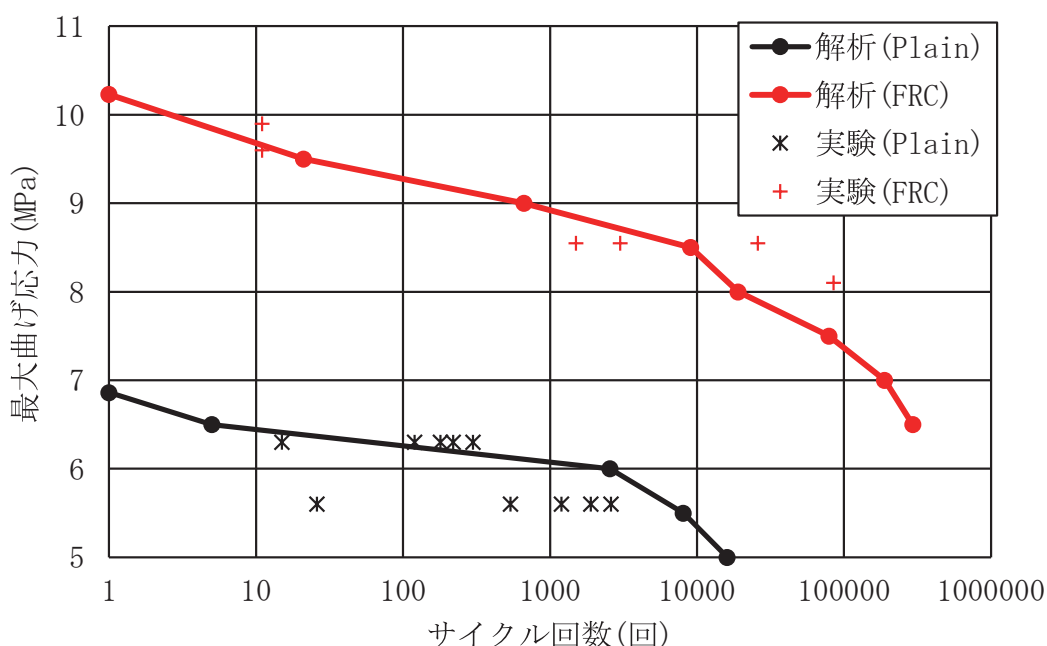


図-5 解析と実験の比較 (疲労)

がある段階ではコンクリートの損傷進展が支配的となるような挙動をとると考察できる。モデルでは損傷を平均して剛性低下として再現しており、剛性低下率を損傷の程度によって変化させることで反映できると考えている。

4. 床版モデルへの適用

2章に記述したFRCモデルを用いて床版疲労解析を行った。既往の研究⁸⁾で行われた輪荷重移動載荷試験を対象とし、試験体は橋軸方向3500mm、橋軸直角方向2800mm、厚さ160mmのハンチ付き床版であり、スパンは2500mmの鉄筋コンクリート床版である。橋軸直角方向にはSD345D16鉄筋が上面300mmピッチ、下面150mmピッチ、橋軸方向には上面にはSD345D16、下面にはSD345D13鉄筋がともに300mmピッチで配筋されている。図-6に示す解析

モデルを用いて輪荷重走行疲労試験を再現し、160kNで10万回載荷したのちに220kNで載荷したケースを再現した。解析は普通コンクリートと繊維補強コンクリートのケースを設定し、普通コンクリートのケースの材料特性は文献中の記述の値を使用した。繊維補強コンクリート使用を仮定したケースでは、架橋効果の影響を評価するため、強度やヤング率の値はそのままとした上で、引張終局ひずみを0.1%とした。図-7に220kN載荷時のたわみと載荷サイクル数の関係を示す。たわみが急増したサイクル数は実験と解析で概ね整合している。繊維補強コンクリートのケースでは、材料の剛性が同一のため、サイクル初期でのたわみ挙動は普通コンクリートとほぼ同じであるものの、たわみの増進が遅延し、疲労寿命の向上が確認された。

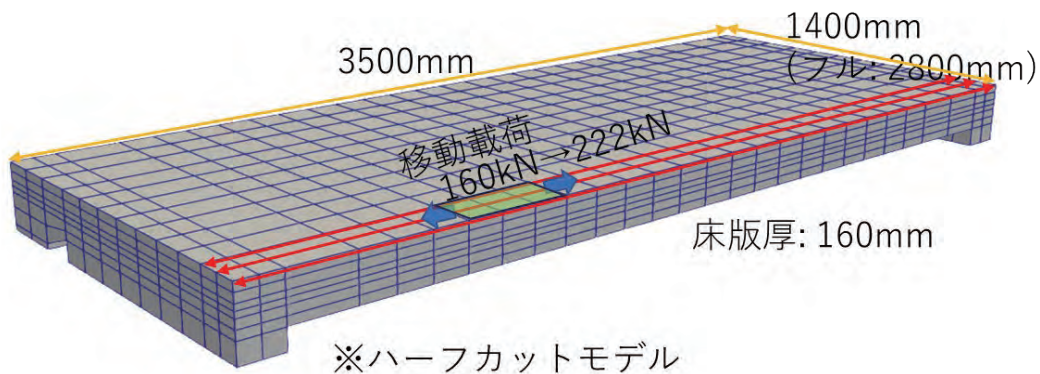


図-6 床版モデル

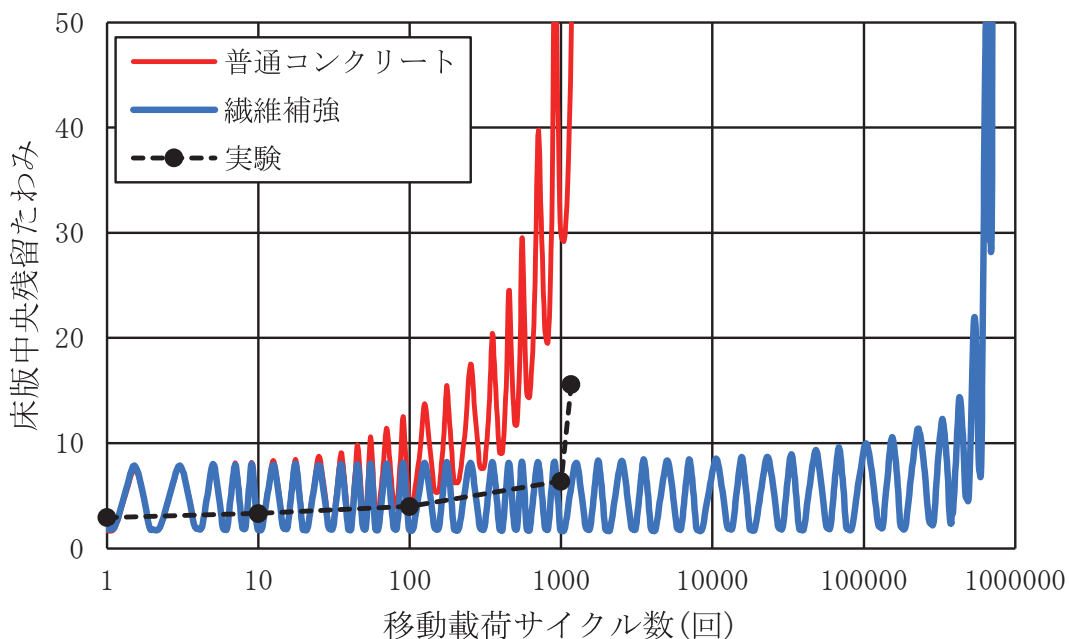


図-7 床版疲労解析結果

5. まとめ

短繊維補強コンクリートはコンクリートの靱性を大幅に改善し、損傷を抑制できる効果的な技術である。本研究は数値解析による評価手法の構築を目標とし、主に引張特性や疲労損傷の蓄積に関するモデルに着目して現象の記述を試みた。短繊維がコンクリート中に分散して効果を発揮しているため、その効果を平均化して取り込める分散ひび割れモデルとの親和性は高いと考えている。数値解析によって既往の要素実験を再現でき、床版疲労解析を行った。モデルは更なる検証を要するとともに、改めて繊維補強コンクリートの損傷に関して微視的スケールでの現象理解に基づきモデルの評価を行うことが課題となる。また現状では、材料試験に基づいて、ピークひずみといった引張に関する力学特性を直接入力する必要がある。将来的にはコンクリートの力学特性と、繊維の種類と混入量といった簡単に得られる情報から力学挙動を推定するようなモデルへと整理することを目指したい。

謝辞

本研究は、一般財団法人橋梁調査会 橋梁技術に関する研究開発助成を受けて実施したものであり、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林一輔：繊維補強コンクリート－開発研究の現状と将来－、コンクリート工学、Vol.15、No.3、pp.2-6、1977
- 2) Maekawa, K., Okamura, H., & Pimanmas, A. Non-linear mechanics of reinforced concrete. CRC Press., 2003
- 3) Suryanto, B., Nagai, K., & Maekawa, K. Modeling and analysis of shear-critical ECC members with anisotropic stress and strain fields. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8 (2) , 239-258, 2010
- 4) Maekawa, K., & El-Kashif, K. F. Cyclic cumulative damaging of reinforced concrete in post-peak regions. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2 (2) , 257-271.2006
- 5) Maekawa, K., Toongoenthong, K., Gebreyouhannes, E., & Kishi, T., Direct path-integral scheme for fatigue simulation of reinforced concrete in shear. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4 (1) , 159-177.2006
- 6) Maekawa, K., Gebreyouhannes, E., Mishima, T. & An, X., Three-dimensional fatigue simulation of RC slabs under traveling wheel-type loads, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.4, No.3, pp.445-457, 2006.
- 7) Zhang, J., Stang, H., & Li, V. C. Fatigue life prediction of fiber reinforced concrete under flexural load. *International Journal of Fatigue*, 21 (10) , 1033-1049., 1999
- 8) 平塚慶達, 千田峰生, 藤山知加子, & 前川宏一、RC床版の疲労余寿命に及ぼす先行荷重履歴の影響. *土木学会論文集E2*, 72 (4) , 323-342. 2016

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

国士舘大学 理工学部 理工学科 まちづくり学系 教授 津野 和宏

1. 研究の目的

インフラのライフサイクルコストを削減し、保全予算の平準化を図るためには、正確な点検データと状況判断に基づき、適切に予防保全を進める必要がある。RC構造物の塩害に関しては、ひび割れと錆び汁の発生から鉄筋の腐食が確認される例がほとんどであるが、近年では様々な非破壊試験手法が開発され、ごく初期の発錆についても発見が可能となってきた。ただし、腐食の定量的な推定は実現しておらず、予防保全への活用手法の確立が課題となっている。

このため本研究では、最新の非破壊試験により鉄筋腐食を把握し、また鉄筋腐食が構造性能に与える影響を、載荷試験を用いて直接確認することにより、非破壊試験による診断結果と構造性能の劣化状況の直接的な相関を明らかにし、更に三次元有限要素法 (FEM) 解析によって劣化の進展を予測する手法の確立を目的とする。これにより、今まで困難であった塩害に関する非破壊試験結果の定量化を実現し、定期的な非破壊試験によって早期における適切な補修手法や時期の想定を行うことによる、より適切かつ容易な予防保全の実用化を目指す。

本研究は継続中であるが、本稿では既に纏まった結果まで報告する。

2. 研究概要

研究の概要を以下に示す。

- ①実験供試体の作成：長さ2mの鉄筋コンクリート梁供試体を5体作成し、脱型後高頻度で塩水を散布して塩害を生じさせ、鉄筋の腐食を促進する。
- ②非破壊試験：鉄筋腐食の発錆が見込まれる時期に、加振レーダー法、電磁パルス法、電磁波レーダー法などを用いて非破壊試験を実施、内部鉄筋の腐食状況及び塩分量を診断する。また、コンクリート内部の塩分量を、中性子塩分計等を用いて測定する。
- ③曲げ載荷試験：前述の非破壊試験の後、梁試験体の静的曲げ載荷試験を行い、耐力やひび割れの発生

状況から鉄筋の付着力と構造性能を確認する。

- ④解析による現象の再現：三次元FEM (COM3) により曲げ破壊試験の再現解析を実施し、内部鉄筋の腐食状況と付着力の関係の確認と定量化を行う。
- ⑤予防保全への応用：大田区所管の実構造物 (RC橋脚や橋台等) について、実施済みの非破壊試験結果と上記研究結果を反映した三次元FEM解析を行い、劣化曲線と補修補強スケジュールの作成による予防保全計画を作成して本研究の成果の社会実装を図る。

3. 梁供試体による曲げ載荷試験

予備試験として小型供試体への塩水散布を6週間行った結果、加振レーダー法および電磁パルス法で鉄筋の変状が認められ、目視でも鉄筋の腐食が確認された (写真-1) ため、以下の通り、本試験として梁供試体を用いた塩水散布および腐食確認後の曲げ載荷試験を実施した¹⁾。

3.1 試験方法

(1) 梁供試体

曲げ載荷試験に使用した供試体を図-1に示す。寸法は長さ2000mm、高さ200mm、幅150mmで、主筋にはD13 (SD345、設計かぶり23.5mm)、せん断補強筋には非破壊試験に影響を与えないよう、アラミド筋 (公称径2.7mm、補償耐力7.8kN) を用いた。供試体は、3日間の散水養生後、材齢28日まで気中保管とした。供試体の底面を上向きにして側面にはシーリングを施し、5体それぞれに濃度が0、2.9、5.7、13、26%と異なる塩化ナトリウ



写真-1 予備試験体割裂による腐食確認状況 (塩水濃度 26%)

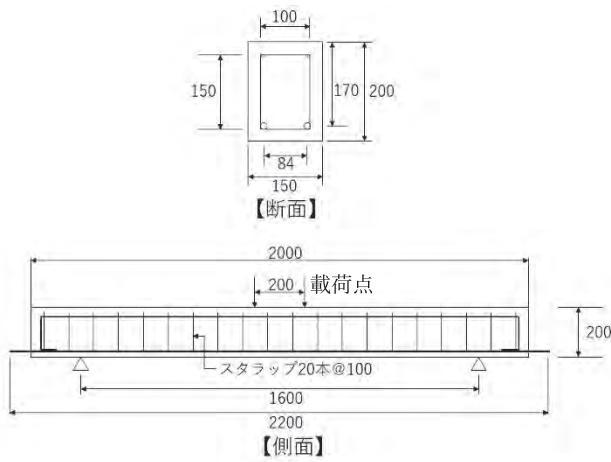


図-1 実験供試体概要

表-1 梁供試体コンクリート強度試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
43.0	3.5	4.34	30.2

ム水溶液を定期的に3カ月間散水した。表-1に、材齢28日におけるコンクリートの強度試験結果を示す。

(2) 曲げ載荷試験

図-1に示す支点および載荷点位置にて、アムスラー試験機を用いて4点曲げ載荷試験を実施した(写真-2)。

(3) AE計測

曲げ載荷試験の実施中、供試体表面に接着したAEセンサ(図-2)によって供試体内部から発生するAE波を計測し、各載荷段階までのAE源位置標定の3次元分布図を作成した。

3.2 試験結果

(1) 曲げ載荷試験

表-2に、供試体A(散布塩分濃度0%)と供試体B(同26%)に関する曲げ載荷試験の主な計測結果を示す。曲げ載荷試験後に実施した斫り調査において、供試体Aには発錆が見られなかったが、供試体Bについては5カ

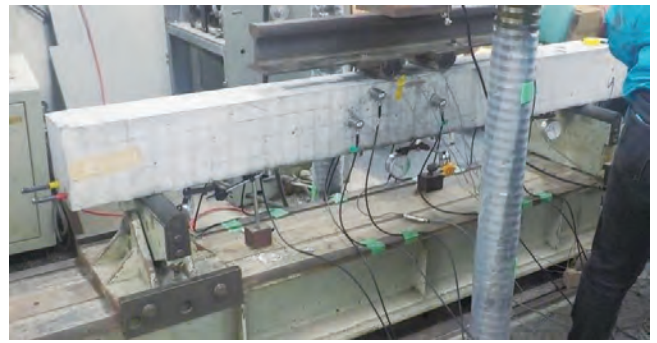


写真-2 曲げ載荷試験
(ダイヤルゲージおよびAEセンサ設置状況)



※白は前面、黒は背面の位置を示す

図-2 AEセンサ設置位置(供試体A)

所の軽微な発錆が確認された。主筋かぶりの実測値を考慮した降伏荷重の計算値に対する実験値の割合は、供試体BがAに比してわずかに小さく、降伏時の中央変位は供試体Bがわずかに大きくなった。また、ひび割れ荷重に関し、鉄筋ひずみの推移から推定された値に対する変位の推移から推定された値の比は、供試体Bの方が1割程度小さくなった。図-3に、荷重40kN時(降伏荷重の9割程度)における供試体AおよびBのひび割れ図

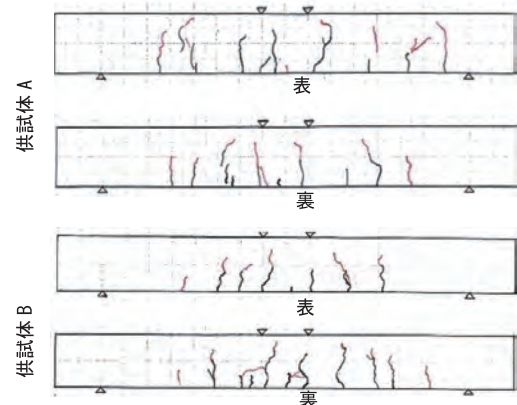


図-3 ひび割れ図(供試体AおよびB、40kN時)

表-2 曲げ載荷試験結果(供試体AおよびB)

	主筋かぶり (mm)	ひび割れ荷重(kN)			降伏荷重(kN)			中央変位(mm)		鉄筋の腐食個所数
		①変位から推定	②鉄筋ひずみから推定	①/②(%)	③実験値	④※計算値	③/④(%)	実験値	対A(%)	
供試体A (塩水濃度0%)	23.11	11.22	10.01	89.2	43.75	46.21	94.7	4.22	100.0	0
供試体B (塩水濃度26%)	28.27	13.8	10.69	77.5	41.56	44.75	92.9	4.37	103.6	5

※計算値：実際の主筋位置を考慮した有効高さ

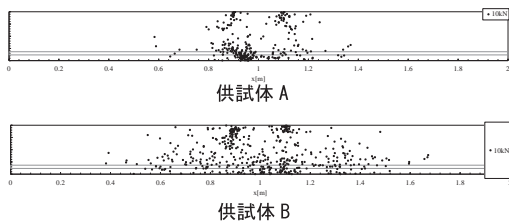


図-4 ひび割れ発生時までのAE源位置標定(10kN時)

を示す。供試体B中央部において主筋に沿った水平ひび割れが発生し、供試体Aと比べてわずかにひび割れの分散範囲が狭かった。以上から、鉄筋が発錆によってコンクリートと剥離することにより、载荷の早い段階で微小な滑りが生じて鉄筋の節によるコンクリートへの力の伝達に移行し、鉄筋のひずみが大きい中央部分に損傷がやや集中した可能性が考えられる。

(2) AE計測

図-4に、供試体AおよびBのひび割れ発生までのAE計測結果を示す。図中の点は、側面から見たAE源位置標定を示しており、供試体BではAに比べて分布範囲が広い。前述の各測定結果も加味し、供試体Bでは鉄筋の発錆によるはく離から载荷によってひび割れ発生前においても広範囲にわたってわずかなずれが生じ、AEが発生しているものと考えられる。

過去の研究²⁾において、鉄筋断面に顕著な欠損が生じない限りは最終的な耐荷力に大きな影響が出ないことは確認されているが、このわずかなずれによって界面の隙間が拡大し、劣化因子の通路となり耐久性を低下させる可能性がある。

4. 非破壊試験

4.1 超音波法³⁾

(1) 測定概要

超音波の測定には60kHz共振型AEセンサを図-5に示すように3個使用し、入力センサから300mm離れた位置に検出点1、さらに50mm離れた位置に検出点2を設けた。各検出点で得られた信号は、プリアンプにて60dB増幅した。サンプリング時間間隔は実験の都合により、供試体AおよびBでは0.1 μ s、供試体C、D、Eでは0.5 μ sで振幅を記録した。このとき、検出点1と検出点2の到達時間差および検出点間距離50mmから得られる見かけの速度を評価指標とすると、図-5に示すように、鉄筋とコンクリートの付着状態が推定可能となる。本研究では、この3個のAEセンサセットを図-1のRC梁左端から100mmの位置

を入力点の起点とし、50mm間隔でRC梁右側へ走査し、検出点2がRC梁右端50mmとなる位置まで測定した。なお、超音波の測線は、コンクリートのみの超音波速度を把握する目的で供試体側面の高さ中央部で1測線、鉄筋とコンクリートの付着状態を評価する目的で供試体底面の鉄筋上に2測線とした。

(2) 試験結果

図-6に、各供試体の超音波速度と付着状態判定結果を示す。また、超音波速度測定後に4点曲げ試験を実施し、その後かぶりコンクリートを研り取り、内部の鉄筋の状態を確認した際の写真を併せて示す。付着状態の色分け判定は、鉄筋の平均的な超音波速度から $\pm 10\%$ (図中破線)を超える場合を付着切れと定義し、その部分を赤色(暖色系)、鉄筋の平均速度では青色(寒色系)で表現した。

供試体A(0%)では、供試体全体的に鉄筋の平均速度が得られているが、供試体中央部で鉄筋の速度とは異なる速度が得られた。これは、写真からわかるように、鉄筋に貼付したひずみゲージを保護するためのテープによる影響と考えられ、コンクリートと鉄筋が直接接触していないため、図-5中のCase3およびCase4の状態が生じていると推察される。このことから、本手法では、コンクリートと鉄筋が直接接触していない状態が評価可能であることが示唆された(供試体C、D、Eでも同様)。一方、供試体B(26%)の結果に着目すると、いずれの鉄筋上の

付着状態	入力 300 50 単位[mm]	検出点1 検出点2	検出点1-2の時間差 速度域 1-2間の伝搬媒体
Case 1 付着切れ 無	経路②	コンクリート 鉄筋	Δt : 短 V: 高速度 鉄筋
Case 2 入力点付近 付着切れ有	経路① 付着切れ領域	コンクリート 鉄筋	Δt : 長 V: 低速度 コンクリート
Case 3 検出点1付近 付着切れ有	経路②	コンクリート 鉄筋	Δt : 短 V: 超高速度 鉄筋の短距離
Case 4 検出点2付近 付着切れ有	経路②	コンクリート 鉄筋	Δt : 長 V: 低速度 コンクリート
Case 5 検出点1, 2 付近付着切れ 有	経路① 経路②	コンクリート 鉄筋	Δt : 長 V: 低速度 コンクリート

図-5 超音波の伝搬経路模式図と付着評価

結果においてもコンクリートの超音波速度に近い値を示し、多くの部分で付着切れの判定となった。図-6の研り後の写真より、褐色の錆（黄色の丸線）が確認されているが、これらの錆は鉄筋の断面減少

を伴うものではなく、非常に軽微な錆であり、3.で示した通り曲げ耐力に大きな影響は与えなかった。この時の超音波伝搬経路は、図-5のCase2あるいはCase5の状態であると推察される。

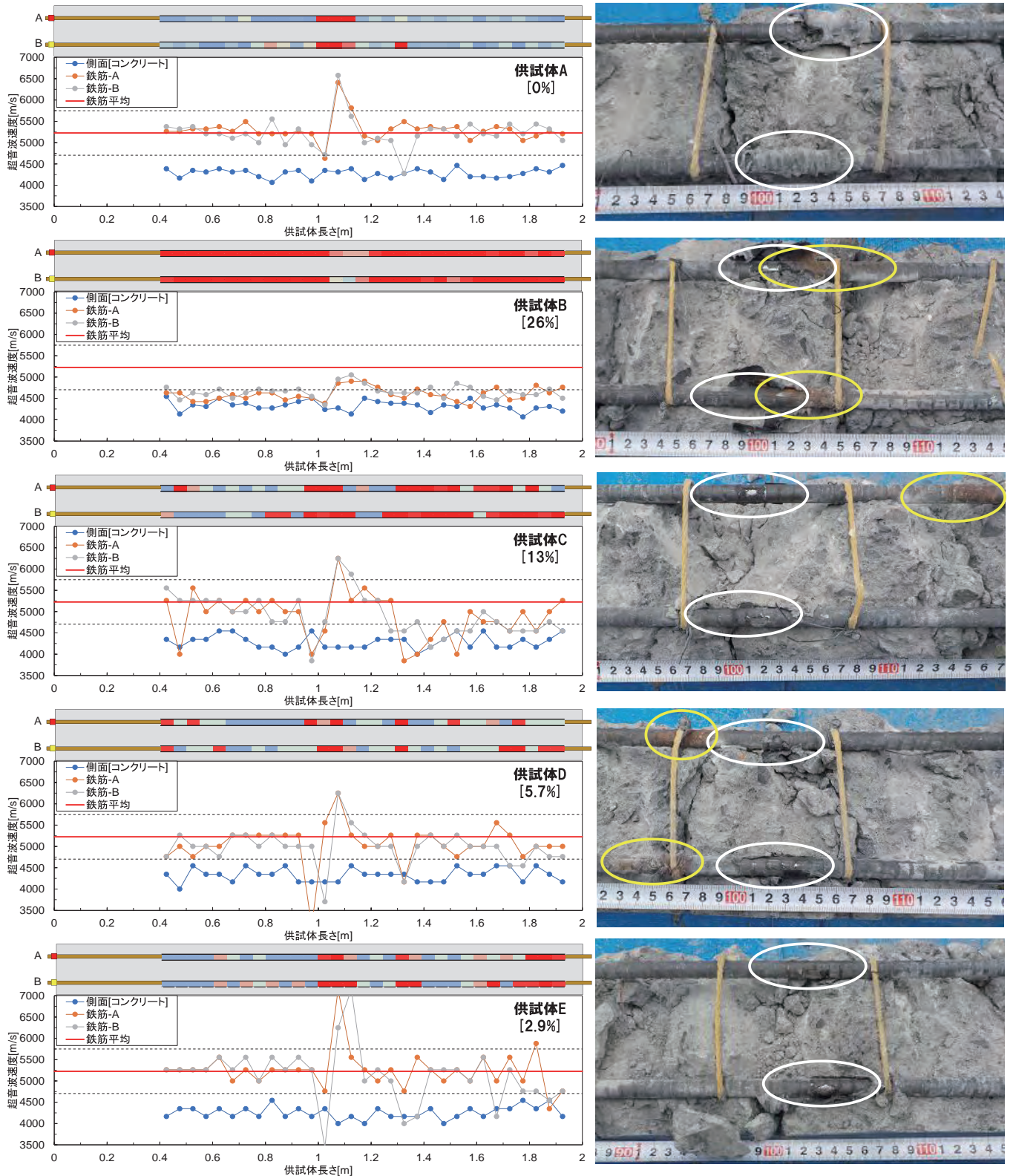


図-6 超音波速度，付着判定結果およびコンクリート中の鉄筋の状態

4.2 衝撃弾性波法⁴⁾

(1) 測定概要

図-7に示すように2本の主筋上に39点ずつ測定点を設定し、直径10mmの鋼球で打撃、近傍に設置した加速度計で発生した弾性波を測定した(写真-3)。サンプリング時間間隔は1 μ sで、鋼球打撃により発生する弾性波の模式図を図-8に示す。コンクリート表層付近に空隙が存在すると、発生する弾性波の伝搬範囲は狭くなり、時間経過に伴うエネルギー損失が小さくなる。本法はこの性質を利用し、各点での振幅加算値 Y_s を時間 t での測定波形の振幅値 $y(t)$ から式(1)により算出し、比較する方法である。既往の研究では実構造物で50mm \times 50mm以下の空隙を検知したが⁵⁾、鉄筋の腐食による僅かな空隙まで把握できるのかを確認した。

$$Y_s = \sum_{t=0}^{3.5ms} |y(t)| \quad (1)$$

(2) 試験結果

各供試体、各鉄筋での振幅加算値の測定結果を図-9に示す。供試体A(0%)の測定結果を比較対象とし、供試体Aの全平均値 m と標準偏差 σ から判定

基準値を $m+3\sigma$ により設定した。測定された振幅加算値が判定基準値より大きくなれば異常値であり、弾性波の時間経過に伴うエネルギー損失が小さくなる空隙の存在が懸念される。図-9より、供試体B(26%)は複数の測定点で異常値となった。測定後にコンクリートを研り、鉄筋の腐食状況を目視で確認した結果(写真-4)、供試体Bは複数の箇所では黄色の錆(黄色の丸線)が確認された。振幅加算値の測定結果はこの結果を反映したと考えられる。しかしながら、供試体C(13%)の錆を反映していない、供試体D(5.7%)のA鉄筋の全範囲で異常値となる、という実際の錆の状況を反映しない結果も確認された。この原因としては、①3. で示したように曲げ耐力に大きな影響を与えない非常に軽微な錆であったこと、②全供試体とも鉄筋が側面から26.5mmの位置に配筋されており、測定点が供試体の端部付近となって、弾性波の時間経過に伴うエネルギー損失が空隙の存在しない測定点でも小さくなり結果に有意な差が生じなかったこと、などが考えられる。特に、供試体Dは鉄筋かぶりの実測値(配筋位置)が他の供試体と数mm程度ではあるが異なっており、②の影響が大きくなったことも考えられる。

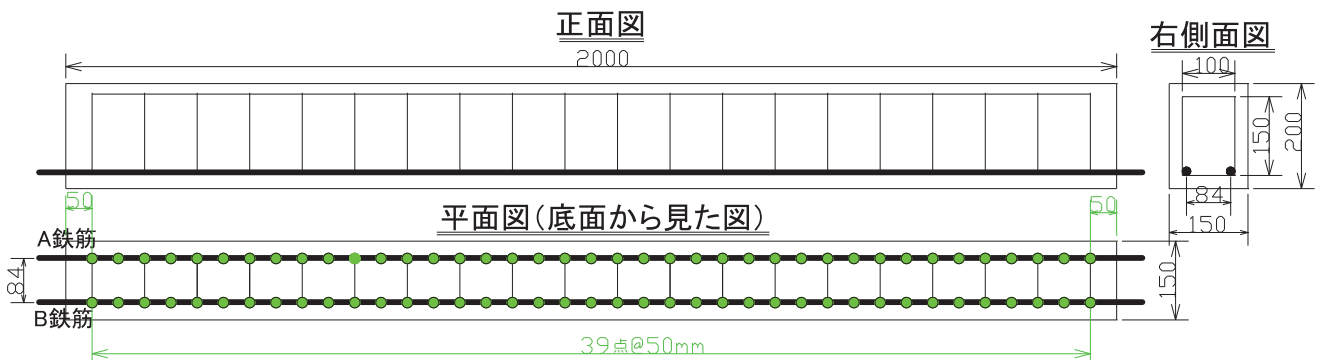


図-7 供試体形状及び測定点の設定状況 (●:測定点)

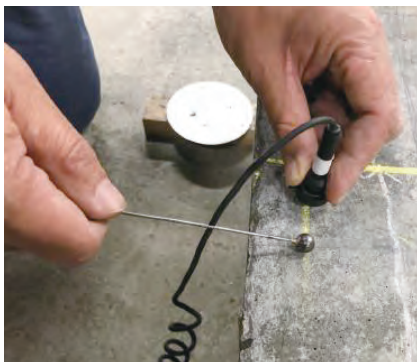


写真-3 測定状況

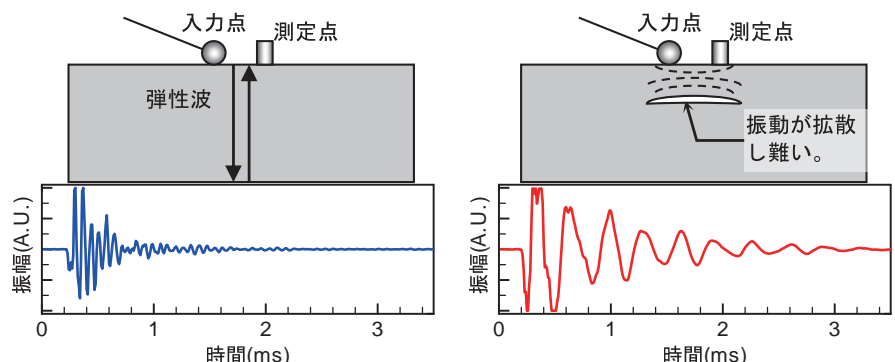


図-8 各条件で発生する弾性波の模式図

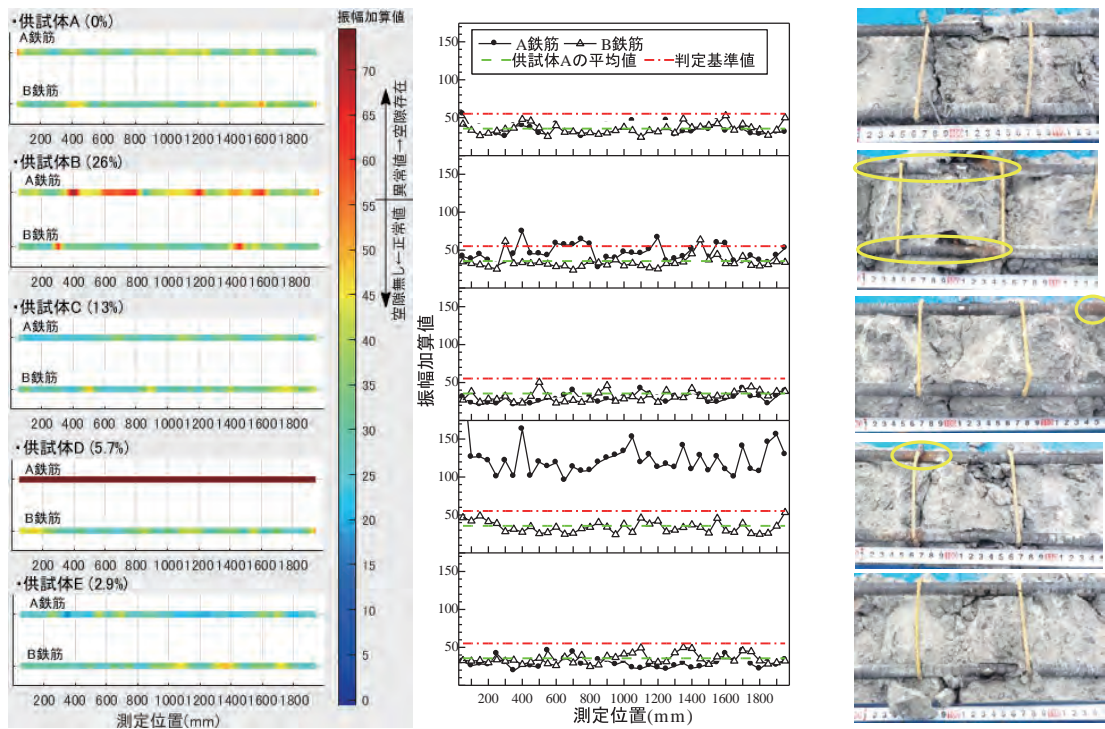


図-9 各試験体での測定結果

写真-4 斫り後の鉄筋状況

4.3 電磁パルス法⁶⁾

(1) 測定概要

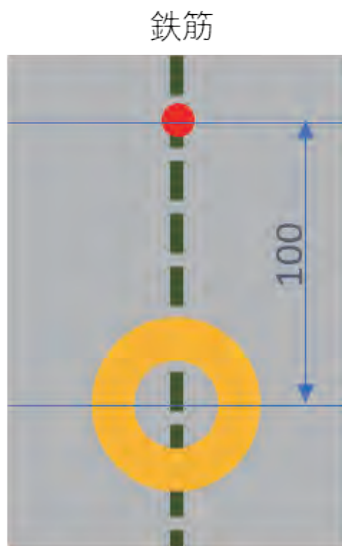
電磁パルス法とは、励磁コイルにパルス電流を印加することで発生するパルス磁場を利用して非接触で鉄筋自身から弾性波を発生させ、それをAEセンサで受信し解析することで鉄筋周辺の状態を評価する手法である⁷⁾。測定は、各主筋に対して供試体端部より400～1600mm範囲を100mmピッチで測定した。測定箇所は図-10に示すように鉄筋直上とし、測定点毎に弾性波波形（鉄筋1本あたり13波形）を採取した。評価の流れを図-11に示す。まず採取した時間波形を処理し、HPF波形や周波数スペクトルを作成、これらの波形特徴を示す10の評価指標データを算出した。各評価指標名を表-3に示す。次に、健全とされるA 供試体における各測定点での評価指標値の平均値とバラツキから評価基準と評価境界値を決め、評価境界値を外れる値にNG (Not Good) ポイントを付与した^{8) 9)}。一例として図-12に波形エネルギーの評価基準値と評価境界値を示すが、各評価指標値が評価境界値を大きく外れるほどNGポイントを多く付与する。各評価指標で付与されたNGポイントを試験箇所毎で加算し画像化することで各供試体の傾向を評価した。加えて各評価指標値の傾向を比較した。

表-3 評価指標一覧

評価指標名	内容
波形エネルギー： E	受信波形の二乗和
HPF波形エネルギー： E_{HPF}	HPF波形（20kHzHPF）の二乗和
HPF比： E_{HPF}/E	波形エネルギーに対するHPF波形エネルギーの割合
波形継続時間： DT	受信波形の最大振幅に対して10%未満に減衰するまでの時間
第一ピーク周波数： FP	最大ピークに対し一定レベル以上になるピークの中で最も低い周波数のピーク
重心周波数： SC	周波数スペクトルの0-20kHz以下の重心周波数
低周波成分値： SL	周波数スペクトルの0-10kHz以下の積分値
高周波成分値： SH	周波数スペクトルの10-50kHz以下の積分値
低周波成分比： SL/SH	周波数スペクトルの高周波成分値に対する低周波成分値比
相関係数： CF	A供試体の周波数スペクトルの平均値に対する各測定点における周波数スペクトルの相関

(2) 試験結果

各試験箇所のNGポイント合計点を基に描画したカウンター図を図-13に示す。供試体BのNGポイントが突出して高く測定点全体が腐食している評価結果となった。併せて実施した供試体の内部鉄筋腐食状況の目視確認では、供試体Bにおいて軽微な腐食が5箇所で見られた程度であり、電磁パルス法による評価結果が腐食を過大評価する結果であった。また、供試体毎の各評価指標値を図-14に示す。10の評価指標値の内、「波形エネルギー」「HPF波形エネルギー」「低周波成分値SL」「高周波成分値SH」の指標が塩分の濃度に応じて階段状に変化していた。



- : 励磁コイル設置位置
- : センサ設置位置

図-10 センサ配置図

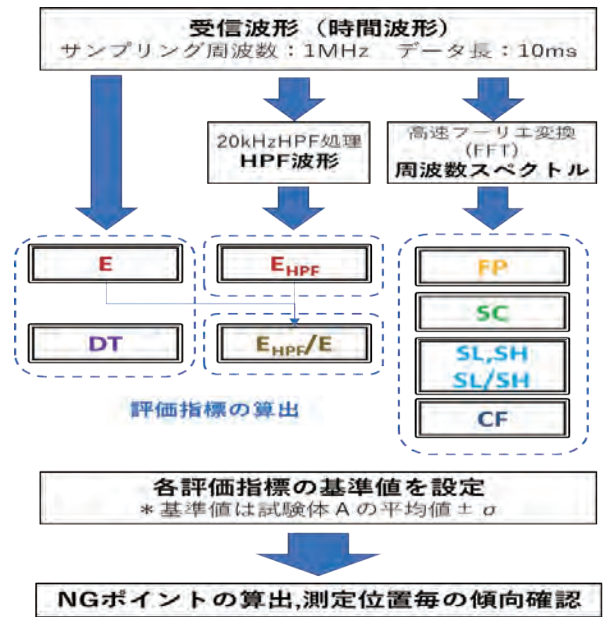


図-11 評価の流れ

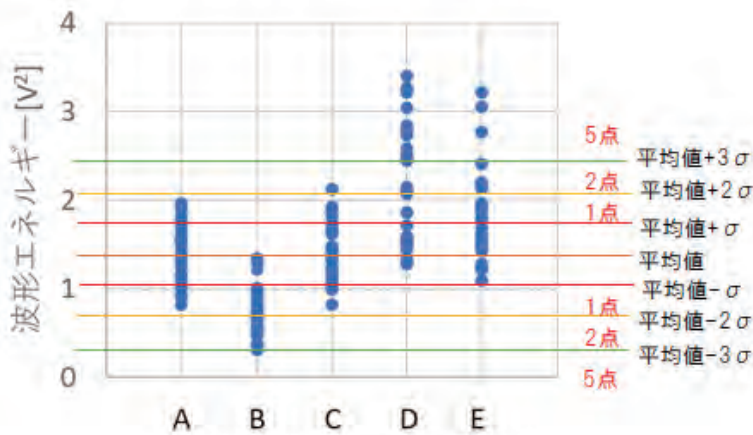


図-12 評価基準値と評価境界値 (波形エネルギー)

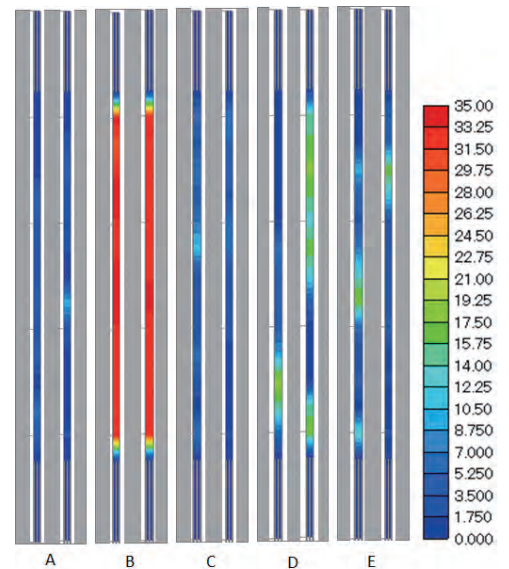


図-13 NGポイント集計結果

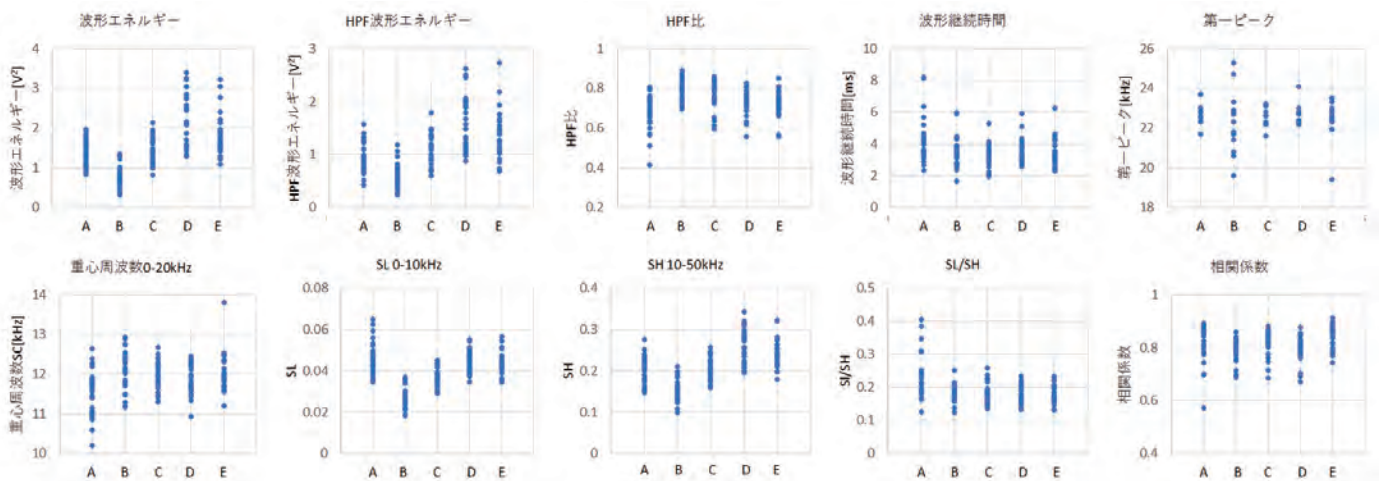


図-14 評価指標値

5. 数値解析による評価¹⁰⁾

5.1 評価手法

数値解析によって、3. に示した曲げ載荷試験結果の妥当性を評価するとともに、腐食が更に進行した場合にどのような変状が生じることになるかについて検討を行った。解析プログラムには、鉄筋コンクリート非線形有限要素解析システムCOM3¹¹⁾を、また腐食モデルにはToongoenthongらによるモデルを使用した¹²⁾。なおこのモデルでは、腐食ゲルの外部流出による膨張圧の低減は考慮されていない。解析に使用したメッシュと材料物性を図-15、表-4 に示す。本検討では実験で使用した供試体の腐食程度と、劣化が進展した場合を想定し解析を行った。

実験と同じような鉄筋腐食を模擬するため、鋼材腐食プロセスでは試験体を空間上に固定するための最低限の拘束条件とし、載荷時には単純支持条件となるように支持条件を変更して検討を行った。引張強度は乾燥の影響を考慮して、圧縮強度に基づく推定値から2割を減じた値とした。検討におけるパラメータは、断面欠損率、腐食部位、腐食のばらつきの3つである。

5.2 解析結果

図-16は、主鉄筋に対して一様に腐食が生じた場合を想定し、断面欠損率を変化させた解析である。断面欠損率が小さな場合には、腐食による膨張圧によって若干耐力が向上するものの、それ以降は断面欠損率に比例した耐力低下がみられた。

図-17は、腐食部位が構造性能に与える影響を検討したものである。腐食部位として、等曲げモーメント区間(Moment)、せん断スパン内の載荷点直下から有効高さDの幅領域(それぞれO-D,D-2D,2D-3D)に対して断面欠損率8%を与え解析を行った。結果、曲げ降伏発生荷重について、腐食位置と、そこに作用する曲げモーメントとの間に関係がみられた。また載荷点直下からせん断スパン側にDだけ張り出した領域で腐食が生じた場合には、曲げひび割れの進展に変化がみられ、他のケースに比べて圧壊が早まるような応答がみられた。

実構造物での腐食分布のばらつきも構造性能に影響する可能性がある。そこでGumbel分布¹³⁾を仮定し、尺度パラメータ μ と平均値からの分布幅 σ をパラメータとした検討も行った。図-18にその結果を示す。尺度パラメータ μ は分布の広がり表現し、値が小さいほどなだらかな分布になる。このため断面欠損率の最頻値が同一の場合でも、尺度パラメータが小さいと断面欠損率

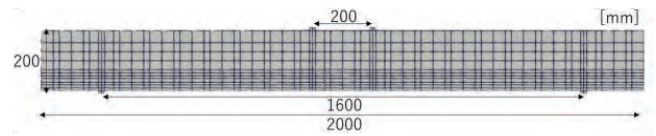


図-15 使用したメッシュ

表-4 設定した材料物性

コンクリート	圧縮強度	47.4N/mm ²
	ヤング係数	32.5kN/mm ²
主鉄筋 (SD345 D13)	降伏強度	380N/mm ²
	引張強度	490N/mm ²

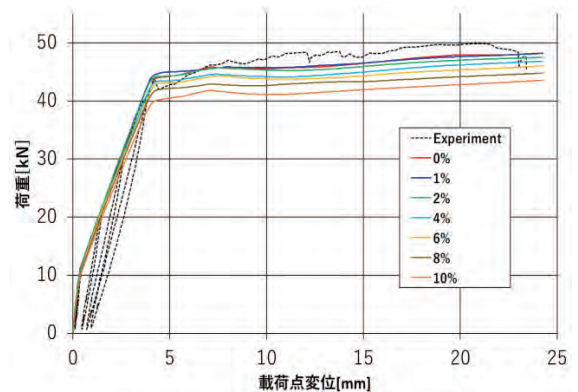


図-16 変位荷重曲線 (一様な腐食の場合)

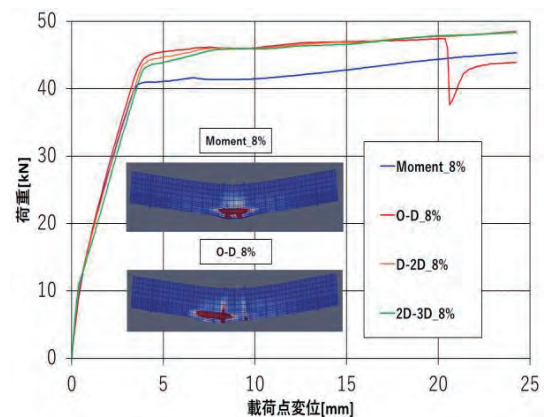


図-17 変位荷重曲線 (腐食部位の影響)

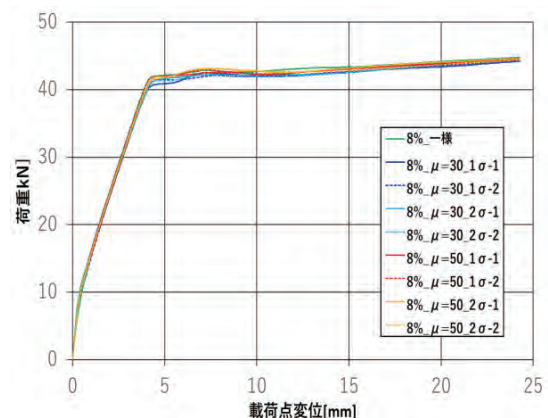


図-18 変位荷重曲線 (腐食のばらつきの影響)

の大きい値をとる割合が大きくなるため、部材降伏荷重に影響がみられた。ただし降伏後の反力は、変形進行に伴って同一の値に収束していく結果となった。

6. 全体のまとめ

非破壊試験による塩害調査結果を定量的に把握し、正確かつ容易な予防保全手法を確立することを目的に、ごく初期の鉄筋腐食が生じた鉄筋コンクリート梁供試体を用いて各種非破壊試験および曲げ載荷試験を実施した。この結果、斫りによる目視でもわずかに確認できる程度の初期の鉄筋腐食であっても、非破壊検査によって発見することが可能であること、その初期の腐食によってわずかなはずみでも鉄筋とコンクリートの付着切れが加速し、その後の劣化因子の通路となって腐食を加速させる可能性があること、またごく初期の鉄筋腐食であっても、適切な腐食モデルの設定により鉄筋の腐食の進展に応じた構造性能の変化を解析によって追跡できる可能性があること、などが明らかになった。

今後の課題としては、より明確に腐食状態に差が生じた塩害供試体を作成し、各非破壊試験の結果を定量的に判断できるように多くのデータを蓄積する必要がある。

本研究においては、本原稿執筆時点においても前述の供試体を用いた非破壊検査による検証が継続しており、機会を得て発表したいと考えている。一連の結果を踏まえ、塩害橋梁の適切な予防保全の社会実装に向けて、更なる研究を進めてゆきたい。

謝辞

本研究は、一般財団法人橋梁調査会の研究開発助成を受けて行われました。ここに深甚の謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 津野和宏 大前朋葉 大野健太郎, 後藤幹尚 非破壊試験による塩害調査の予防保全への活用検討(その1) - 初期の鉄筋腐食が構造に与える影響に関する実験的研究 -, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, V部門, 2023.
- 2) 例えば, 玉井宏樹 ほか/鉄筋腐食により劣化したRC梁部材の曲げ耐荷性能および耐衝撃性能に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.63A 2017年3月
- 3) 大野健太郎, 津野和宏, 後藤幹尚, 藤森竣平, 岩野聡史 非破壊試験による塩害調査の予防保全への

活用検討(その2) - 超音波法による鉄筋とコンクリートとの界面付着状態推定に関する検討- 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, V部門, 2023.

- 4) 岩野聡史, 津野和宏, 後藤幹尚, 藤森竣平 大野健太郎, 實藤大夫 非破壊試験による塩害調査の予防保全への活用検討(その3) - 塩害に着目した供試体による衝撃弾性波法の適用に関する確認実験令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, V部門, 2023.
- 5) 岩野聡史ほか: 衝撃弾性波を用いた接着工法における接合面の剥離判定方法への一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1747-1752, 2013.6
- 6) 高鍋雅則, 三輪秀雄, 津野和宏, 後藤幹尚, 藤森竣平 非破壊試験による塩害調査の予防保全へ活用検討(その4) - 塩害に着目した供試体への電磁パルス法による検証- 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, V部門, 2023.
- 7) 高鍋雅則, 橋本光男: 鉄筋コンクリート診断のためのパルス電磁力音響法の提案, 非破壊検査, Vol. 52 No.11 pp.628~632, 2003.11
- 8) 高鍋雅則, 三輪秀雄, 松浦康博, 加賀敏明, 陰山公明: 電磁パルス法を用いたコンクリート構造物の鉄筋腐食検知の検討, 第7回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集, pp 47~52 2022.8
- 9) 加賀敏明, 三輪秀雄, 高鍋雅則, 和高修三, 長岡康之, 濱崎仁: 電磁パルス法によるあと施工アンカーボルト定着部の定量的非破壊評価, 日本建築学会技術報告集, 第25巻, 第60号, pp.6031308 2019.
- 10) 神谷慧力, 鈴木悠人, 千々和伸浩, 岩波光保, 津野和宏, 後藤幹尚, 藤森竣平, 非破壊試験による塩害調査の予防保全への活用検討(その5)) - 非線形有限要素解析を用いた腐食状況が構造性能に与える影響の検討- 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, V部門, 2023.
- 11) Maekawa, K., Okamura, H., Pimanmas A., Nonlinear mechanics of Reinforced Concrete Spon Press 2003.
- 12) Kukrit Toongoenthong, Koic hi Maekawa, Simulation of Coupled Corrosive Product Formation, Migration into Crack and Propagation in Reinforced Concrete Sections, Journal of Advanced Concrete Technology, 3(2), pp.253-265, 2005.

第11回 国際吊構造管理者会議についての報告

東急建設株式会社 顧問 前 橋梁調査会審議役 桑原 徹郎

はじめに

2022年11月14日から16日までの3日間、神戸市の神戸国際会議場において、国際吊構造橋梁管理者協会（ICSBOA）の協力を得て、第11回国際吊構造管理者会議（ICSBOC）が本州四国連絡高速道路株式会社（本四高速）主催で開催された。本稿では、本会議の概要について報告するものである。

開催の経緯

国際吊構造管理者協会は、会員相互の交流と資質の向上等を目的とし、本四高速を含む世界の主要な吊構造橋梁管理者6社を中心に11カ国約50社の会員で構成されている。本協会の協力の基で、吊構造橋梁の維持管理に携わる世界各国の技術者が一堂に会し、維持管理に関する情報交換・意見交換を行う国際吊構造管理者会議が1990年より開催されてきた。これまで日本での開催は2回あり、2002年には淡路で、2008年には高松で開催されている。今回の第11回会議は、新型コロナウイルスの感染拡大のため2018年に南通（中国）で開催された第10回会議以来4年ぶりの開催であった。

表-1 発表論文数と参加人数

	参加人数	発表論文数		参加人数	発表論文数
【アジア】			【ヨーロッパ】		
Japan	84	18	Turkey	17	6
China	12	1	Denmark	8	5
Koria	2	1	UK	5	2
Laos	2	1	Sweden	2	3
Canbodia	0	1	Germany	2	0
【北・南米】			France	2	2
USA	34	6	Spain	1	0
Canada	4	1	Norway	1	0
Chili	1	1	Romania	0	1
【アフリカ】			【合計】		
Uganda	3	1	参加人数	180名	16カ国
Conga	0	1	発表論文数	51編	

第11回会議の概要

今回の第11回会議では、本四高速やNEXCO、首都高速、阪神高速など日本からの発表18編を含んで11カ国から計51編の論文発表がなされた。

開催にあたっては、新型コロナウイルスの感染拡大状況を踏まえ、初めての試みとなる会場参加とオンライン参加を併用したハイブリット形式による会議開催であった。本会議への参加者人数は、10月になってから日本への入国の水際対策が大幅に緩和されたこともあり、海外から44名の会場参加者となり、全参加者180名の内訳は、以下のとおりとなった。

表-2 会議参加者数の内訳

	国内	海外	計
会場参加	64	44	108
オンライン参加	20	52	72
計	84	96	180

本会議のプログラムは主要な参加国と日本との時間差を考慮し、日本時間の午前8時～10時および午後4時～6時までを各国共通のコアタイムとし、論文発表を行う技術セッション時間帯とした。また、会場においては午前および午後それぞれ2時間程度の時間帯を設け、各国の長大橋建設プロジェクトを紹介するワークショップ及び日本国のODAにより建設された長大橋の維持管理をとりあげるワークショップに充てることとした。

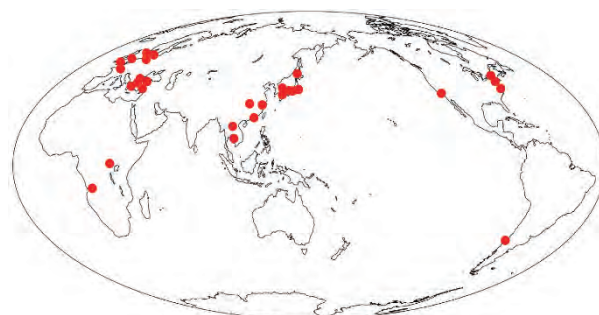


図-1 発表対象となった主な長大橋の分布

表-3 会議プログラム

13日 (日)	18:00～	ウェルカムパーティー
14日 (月)	08:00～ 10:00	開会式 主催者挨拶 本四高速社長 後藤政郎 協会挨拶 ICSBOA議長 JastineTientjen 来賓挨拶 神戸市長 久元喜造 基調講演 城西大学学長 藤野陽三
	10:30～ 12:30	ワークショップ (長大橋建設プロジェクト関連の論文発表)
	14:00～ 15:30	ワークショップ (長大橋建設プロジェクト関連の論文発表)
15日 (火)	16:00～ 18:30	技術セッション (論文発表)
	08:00～ 10:30	技術セッション (論文発表)
	11:00～ 12:30	ワークショップ (JICAプロジェクト関連の論文発表)
	14:00～ 15:30	ワークショップ (JICAプロジェクト関連の論文発表)
16日 (水)	16:00～ 18:30	技術セッション (論文発表)
	08:00～ 10:30	技術セッション (論文発表)
	10:40～ 11:00	閉会式 会議総括 本四高速常務 大江慎一 次期主催者挨拶 NYSBA主任技術者 Jeffrey Wright
	11:30～ 17:00	テクニカルツアー (全員参加可) 明石海峡大橋

発表概要

技術セッションは最大で同時に3会場に分かれ、3日間で合わせて10セッションが行われた。その内容は、デンマークのグレートベルト橋におけるAI等を駆使した点検やフランスの長大橋における最新の動態観測、更には本州四国連絡高速道路3ルートを経済効果まで多岐にわたり、各セッションにおいてはオンライン発表者・オンライン参加者も含め活発な質疑がなされた。

表-4 技術セッションのテーマ

14日 (月)	16:00～ 18:30	・吊形式橋梁の点検と維持管理方針 ・塗装管理、舗装設計等 ・ケーブル部材の点検、モニタリング、強度評価
15日 (火)	08:00～ 10:30	・吊形式橋梁の長寿命化 ・点検、維持管理、更新等の計画 ・ケーブル部材等の維持管理、更新他
	16:00～ 18:30	・ケーブル送気乾燥システム・動態観測
16日 (水)	08:00～ 10:30	・地震、強風、火災・地域貢献、経済効果

また、ワークショップにおいては、明石海峡大橋を抜いて世界最大支間長を有し2022年3月に開通したトルコ国の1915チャナッカレ橋建設や、日本企業が参画し2023年6月に開通した(会議当時は建設中) ルーマニアのブライラ橋建設をはじめ現在建設が進んでいる長大橋が紹介された。また、日本のODAにより建設されたコンゴ民主共和国のマタディ橋やカンボジア国のつばさ橋など長大橋の維持管理に関し各国からの報告がなされた。

おわりに

コロナ禍における国際会議の開催ということで大変なご苦労があったことと思われるが、ハイブリッド形式を採用しプログラムを工夫することで多様なニーズに答えるなど様々な工夫がなされていた。

また、本会議終了後には明石海峡大橋塔頂へのテクニカルツアーが実施され、多くの海外参加者がその壮大なスケールと景観を堪能した。

なお、次回第12回会議は、2024年10月に米国ニューヨーク州ウェストポイントにおいて開催される予定である。

<https://icsboa.com/about-icsboa.php>



写真-1 会議終了後の参加者撮影



写真-2 テクニカルツアー (明石海峡大橋)

PIARCワークショップ（神戸）

企画部 調査役 日里 正夫

PIARC（TC4.2）のワークショップが、明石海峡大橋開通25周年記念と連動する形で平成5年5月11日、兵庫県神戸市において開催された。

PIARC（世界道路協会）の技術委員会（Technical Committee）の一つであるTC4.2（Bridges）は、本州四国連絡高速道路（株）の今井清裕氏が2016年から継続して委員長を務められており、近年の活動テーマとしては、橋の分野でも重要な役割を果たすレジリエンス（強靱化）計画に関して、気候変動への適応問題と、地震発生時の橋の耐久性の向上に焦点を当ててきた。さらに、橋梁検査の手順と方法のさらなる開発と、橋梁管理システムへのこれら新技術の導入や、橋の崩落に関する科学捜査工学に基づく教訓の反映や、老朽橋の補修のための革新的な建設資材の使用にも取り組んでいる。

今回開催されたTC4.2ワークショップは午前9時～午後6時の8時間（途中休憩を除く）におよび、橋梁の維持管理をテーマに世界各国から参加したTC4.2の各委員より熱のこもった講演があった。

ワークショップは、本州四国連絡高速道路（株）の後藤政郎社長及び日本道路協会の菊川滋会長（現名誉会長、当財団理事長）による開会挨拶に続き、PIARC事務局長のPatrick MALLÉJACQ氏の挨拶で開始された。

講演テーマとその概要は次のとおり。

1. PIARC TC4.2の成果概要

道路橋の気候変動への対処、科学捜査工学の応用、橋梁点検とマネジメント、補修補強のための新材料・新技術、耐震とレジリエンスなど5編の講演。



写真-1 ワークショップオープニングセッション



写真-2 日本道路協会菊川会長（現名誉会長）の挨拶



写真-3 講師など関係者一同

2. 橋梁の特殊点検と補修補強

PC橋ポステンケーブルと斜張橋ケーブルの点検技術、診断と補修、阪神高速道における大規模更新工事報告など4編の講演。

3. 橋梁点検とマネジメント

性能指標による維持管理マネジメント、オランダ・オーストリア・アメリカ各国の橋梁マネジメントの紹介、日本の橋梁マネジメント（国総研・白戸真大橋梁研究室長）の紹介など5講演。

4. 吊構造橋梁の維持管理

ドイツの斜張橋群、フランスのノルマンディ橋、アメリカのゴールデンゲート橋、関門橋、本州四国連絡橋の維持管理などに関する5編の講演。

講演ではインフラの強靱化及び持続可能な維持管理に関して最新のデータに基づく分析を含め、各国が直面している課題についての興味深い発表があり、各国が目指すものは同じなのだという認識が得られた。

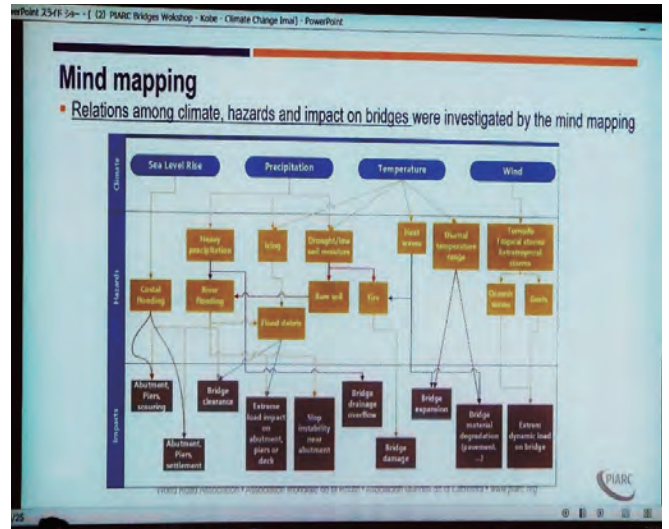


写真-4 Joseph Hartmann氏 (FHWA,USA) による科学捜査工学に基づくマネジメントの一例

各講演テーマの終了時には聴講者との質疑応答の時間が設けられ、会場からは技術的な質問が相次ぎ、予定時間をオーバーするほどの熱気の中、ワークショップは幕を閉じた。

第40回国際橋梁会議（IBC2023）の聴講参加とワシントンD.C.、サンフランシスコでの橋梁現地調査報告

中部支部 調査役 播金 昭浩
中国支部 橋梁課長代理 松岡 真美

1. はじめに

2023年6月12日～14日までの3日間、第40回国際橋梁会議（IBC2023）がアメリカのメリーランド州ナショナルハーバーにあるゲイロードナショナルリゾート&コンベンションセンターで開催され、会議には少なくとも10カ国の代表者ら950人以上が出席した。本報告では、会議の聴講と会議場近隣のワシントンD.C.と西海岸のサンフランシスコでの橋梁・インフラの現地調査をとりまとめた。なお、今回の行程を表-1に示す。

表-1 行程表

行程	内容
6月11日（日）	羽田→ワシントンD.C.橋梁視察
6月12日（月）	IBC2023聴講、橋梁視察
6月13日（火）	IBC2023聴講、IBC Tour
6月14日（水）	IBC2023聴講、インフラ視察
6月15日（木）	ワシントンD.C.→サンフランシスコ
6月16日（金）	市内橋梁・インフラ視察
6月17日（土）	市内橋梁・インフラ視察
6月18日（日）	サンフランシスコ→羽田
6月19日（月）	羽田着



写真-1 IBC2023開催場所

2. IBC2023の概要と聴講報告

IBC（International Bridge Conference）は、西ペンシルベニア技術者協会が主催し、南北アメリカ、ヨーロッパ、オーストラリア、アジア、のアフリカの橋梁業界から橋の所有者や技術者、上級政策立案者、政府関係者、橋梁設計者、建設幹部、サプライヤーが集まる国際会議であり、今回は基調講演を含め85件の報告が行われた。

聴講したセッションの中から4つを代表して紹介いたします。「設計セッション：コミュニティに焦点を当てた都市インフラ改善」はマイアミの既存の州間高速道路を置き換えて、歴史ある地区の活性化、コミュニティ内の安全性と移動性の向上を目的としたプロジェクトで大変参考になった。

「設計セッション：シカゴ交通局史上最大の資本改善プロジェクト」はシカゴで最も混雑する箇所の補修交換、再構築等で、コスト削減や工程管理、メンテナンスを最小限に抑える代替技術等の重要性を学ぶことができた。「検査と評価セッション：橋梁におけるポストテンショングラウト欠陥の検出」は内容が日本と共通しており、日本の橋梁技術レベルがアメリカに比べ、遜色ないレベルにあることを実



写真-2 会議聴講

感出来、自信を持つことが出来た。「基礎セッション：浸食と洗掘の緩和」は洗掘対策についての実務的成功事例の報告が数例あり、解析評価と構造の工夫を組み合わせ問題为解决しており、参考にすべきと感じた。

一般的には、日本の学会に比べ、実務解決的な報告が多く、参考となった。質疑応答が活発で制限時間を超過する場面も多くあったが、自身の語学力の不足で質疑に参加できないのが残念であった。

3. 橋梁・インフラの現地調査報告

3.1 Interstate495号線橋梁（メリーランド州）

会議場からバスで10分程度の郊外に位置する橋梁である。メンテナンスフリーを強く意識したと思われる床版にメッキ処理されたデッキプレートと耐候性鋼材を用いたI桁橋である。また、主桁の現場継手長が20m以上あり、日本との輸送制限の違いを感じた。（写真-4）



写真-3 紹介されたパワーポイント



写真-4 橋梁全景と床版下面

3.2 Frederick Douglass Memorial Bridge（ワシントンD.C.）：IBCツアー

2021年に架設された美観に優れた鋼・コンクリート複合アーチ橋で、歩道の幅員が広い点と支承がコンパクトなところに日本の橋梁との差異を感じた。国際会議主催の見学ツアーであり期待していったが、路面からの見学が主で、桁下からの見学時間が短かったのが残念であった。（写真-5、6、7）



写真-5 すっきりとした構造美



写真-6 広い歩道を有する橋面



写真-7 コンパクトな支承

3.3 ジョージタウンの高架橋（ワシントンD.C.）

隣接するビルとビルに挟まった橋脚と隣接する全く別のコンクリート橋に剛結された横梁が特徴的な高架橋であり、アメリカの大胆さと大らかさを感じることができた。（写真-8、9）

3.4 San Mateo-Hayward Bridge（サンフランシスコ）

サンフランシスコ湾を渡る橋で、サンマテオ東端のフォスターシティとハイワードを結んだ全長11270mの世界で25番目に長い橋である。あいにく、補修工事中であり、近くで見ることができなかった。

丁度、朝の作業開始前ミーティングをやっていたので、少しだけ、中で写真撮影をさせてもらえないかと頼んだが、州から請け負った仕事であり、あなた方に何かが起こると責任問題となるので、だめだと断られた。安全に対する意識の高さは日本と同様であると感じた。（写真-10、11）

3.5 Dumbarton Bridge（サンフランシスコ）

サンフランシスコ湾を渡る橋で、フリーモントとメンローパークを結んだ全長2620mのPC箱桁橋でデッキプレート床版が採用されていた。（写真-12、13）



写真-8 ビルとビルの間に設置された鋼製橋脚



写真-11 朝のミーティング風景（補修工事中）



写真-9 隣接橋の支柱に鋼製横梁を剛結した構造



写真-12 全景



写真-10 全景



写真-13 床版下面

3.6 Dumbarton Railroad Bridge (サンフランシスコ)

Dumbarton Bridgeのすぐ南側にかかる7連(55m×3連の鋼プラットトラス+94mの旋回橋+55m×3連の鋼プラットトラス)の旧鉄道橋である。現在は使用されていないが、古きアメリカが偲ばれる魅力的な橋であった。(写真-14)

3.7 Golden Gate Bridge (サンフランシスコ)

誰もが知る、ゴールデンゲート海峡に架かる、全長2737m、中央径間支間長が1280mの吊橋である。1937年に完成以降、専門のチームにより、メンテナンス作業が交通の流れを妨げることがないように計画的に実施され、

良好な状態が維持されていた。見学者の数もさることながら、自殺者も多かったため、様々な自殺予防対策が実施されている。対策が功を奏し、自殺者は大幅に減少したようである。(写真-15、16、17、18)

3.8 Lombard St (サンフランシスコ)

美しい花壇に囲まれた住宅地内にある急斜面(最大斜度4.86度)道路である。直線で結ぶと勾配が27%にもなり、ほとんどの自動車にとってはあまりにも急すぎる勾配を緩和するために工夫された道路であり、サンフランシスコの観光名所となっており、制限速度は8km/h以下とされている。(写真-19)



写真-14 全景



写真-17 落下防護柵



写真-15 全景



写真-18 自殺者浸入防止柵



写真-16 自殺予防対策



写真-19 道路インフラの観光地化

4. 公共交通機関

ワシントンD.C.およびサンフランシスコともにアメリカを代表する観光地であり、観光地を巡る、無料バスを含め、公共交通サービスが充実していた。ワシントンD.C.到着初日に、空港から市街地までの地下鉄の一部区間が不通となっていたが、無料のシャトルバスが運行されており、その乗り換え説明のための案内人が丁寧に説明を行っており、大変、助かった。また、Iphoneアプリのウォレットに登録されている交通カード（Smartp,CLIPPER）とGoogle Mapを駆使することでバス、地下鉄、ケーブルカー等をほぼ（たまに乗り間違えたが）乗りこなすことができたことは、今後活かせる貴重な経験となった。（写真-20）



写真-20 サンフランシスコの代表的交通機関

5. おわりに

今回、IBC2023に出席させていただき、海外の橋梁技術動向を知ることができたとともに、海外の技術者が力強く活動する姿を見ることで、我々ももっと頑張る必要があると実感した。また、アメリカの多数の橋とインフラを見る機会を与えていただきましたことに感謝するとともに、今回得た知見を今後の業務に活かしていければと考える。最後の橋として、ワシントンナショナルギャラリーに展示されていた、幻想的で美しい「日本の歩道橋」を紹介して終わりとする。（写真-21）



写真-21 The Japanese Footbridge CLAUDE MONET

令和4年度 橋梁シンポジウム 「変革期の橋梁維持管理」開催報告

橋梁調査会が主催する令和4年度橋梁シンポジウムを令和4年11月30日（水）に都市センターホテル（東京都千代田区）にて開催しました。

本シンポジウムは、令和2年度に「橋梁シンポジウム」と名称を改めてから3回目の開催となります。開催方法は、前年度に引き続き会場とビデオオンデマンド配信としました。様々な理由から来場されない方に対して実施しているビデオオンデマンド配信は、多くの申し込みがあることから、今後も継続していきたいと考えております。

今回は、長岡技術科学大学名誉教授の丸山先生に基調講演をお願いし、塩害を受けた橋梁の対応方針の決定やモニタリングについて、具体的かつ詳細なご講演を頂きました。また、後援をして頂いている各団体様ならびに国土交通省道路局様から、テーマとした維持管理についてご講演いただきました。

当日は約100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「塩害を受けたPC 橋梁のモニタリングと耐荷性能」	長岡技術科学大学	名誉教授	丸山 久一
「建設コンサルタンツが取り組むDX、ECI、CIM等プロジェクト紹介」	（一社）建設コンサルタンツ協会	道路構造物専門委員会	大内 隆志
「鋼橋におけるDXの取り組み」	（一社）日本橋梁建設協会	DX推進特別小委員会 製作DX特別WG長	永島 寛之
「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
「道路メンテナンスの現状とDXへの取り組み」	国土交通省 道路局	国道・技術課 技術企画室長	新田 恭士

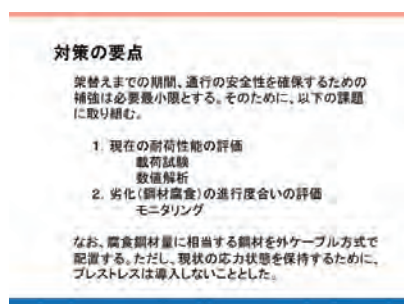
基調講演「塩害を受けたPC

橋梁のモニタリングと耐荷性能」

【講演者】（敬称略、所属等は開催時点。以下同じ。）
長岡技術科学大学 丸山久一 名誉教授

【主な講演内容】

塩害を受けた妙高大橋における耐荷性能の評価と劣化進行度合いの評価のための検討内容と架け替えまでの対策についての紹介



検討された「対策の要点」



架替え前後の妙高大橋



丸山久一先生

講演1 「建設コンサルタンツが取り組むDX、ECI、CIM等プロジェクト紹介」

【講演者】 (一社) 建設コンサルタンツ協会
大内 隆志 氏

【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DX関連の
新技術の紹介



目次

1. 維持管理計画へBIM/CIMを活用した海上部の橋梁設計
2. BIM/CIMを活用した維持管理計画の事例(資料未掲載)
3. BIM/CIMデータのXR機器への利活用検討
4. 橋梁の予防保全型維持管理への移行を踏まえた道路ストック包括的民間委託(奈良県田原本町での事例)
5. 基礎自治体の橋梁架け替え事業におけるハイブリッド型包括的民間委託の試行(京都府和東町での事例)

JCAA

講演2 「鋼橋におけるDXの取り組み」

【講演者】 (一社) 日本橋梁建設協会
永島 寛之 氏

【主な講演内容】

i-bridge等のDXの取り組みの紹介



3 i-Bridge の全体像 (橋梁工場の生産性・安全性向上)

i-Bridge

①測量・地理調査 ②設計・施工計画 ③製作 ④施工 ⑤検査・納品 ⑥維持管理

従来方法

14

講演3 「PC橋の維持管理における最新技術」

【講演者】 (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会
安藤 直文 氏

【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



1.4 ポイント

プレストレス
【効果】ひび割れを防ぎ、耐力を掌る
【着目】プレストレスの減少

グラウト (ポストテンションの場合)
【効果】PC鋼材の防錆と付着
【着目】グラウト充填

予兆を見逃さない
点検、調査の重要性
計画的予防保全

PCではとくに

講演4 「道路メンテナンスの現状とDX への取り組み」

【講演者】 国土交通省
新田 恭士 氏

【主な講演内容】

道路メンテナンスに係るこれまでの経緯とこれからの
DXへの展望を紹介



点検支援技術を活かせる現場の環境づくり

国土交通省

点検写真と撮影位置、方向の自動表

点検写真から自動生成した3D点群

東京の名橋

企画部 企画課長 大黒屋 信英
 企画部 企画課長代理 石井 豊

隅田川に架かる橋は、多種多様な構造形式があることで知られている。古くは大正15年（永代橋）から平成27年（築地大橋）に至るまで約90年の間に、それぞれ当時の最新の土木技術を駆使し、架けられた橋である。関東大震災後の震災復興橋梁として架橋された9橋の内、相生橋以外は全て現存している。また、東京都内には隅田川だけではなく日本橋川や神田川にも、架橋後100年近く経過した橋が今も多く現存している。これらの多くは、国の重要文化財や

土木学会選奨土木遺産に指定されるなど、構造的だけでなく、景観等にも配慮されており、その歴史的価値は高い。今年、関東大震災（1923年）から100年が経過する節目の年であるため、これらの震災復興橋や歴史的価値の高い橋梁の撮影を行った。撮影した写真は、冊子を作成するだけでなく、電子データとして公開・活用していく予定である。こうした取り組みを通して、これらの橋梁の土木遺産としての価値を伝えていくことができれば幸いである。

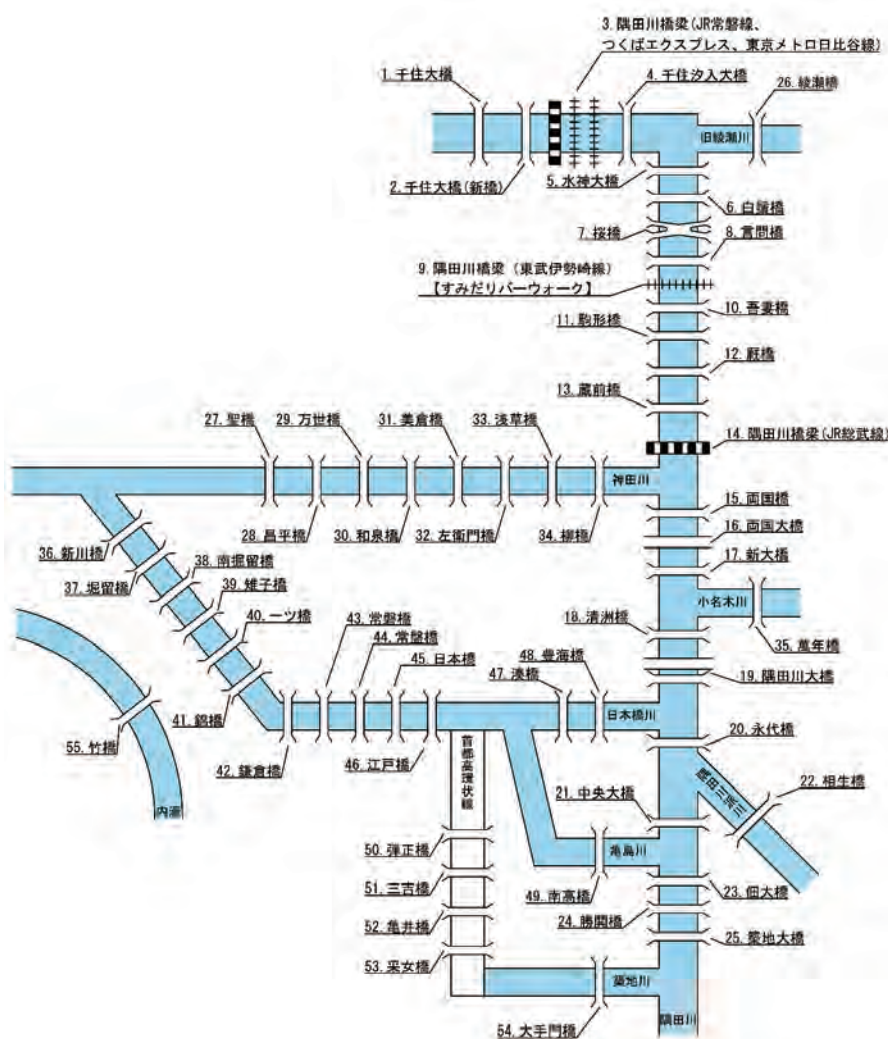


図-1 撮影橋梁位置図

表-1 主な撮影橋梁一覧表

橋梁名	架設年	路線名	構造形式
白鬚橋	1931年（昭和6年）	都道306号	鋼バランスドサイドアーチ橋
駒形橋	1927年（昭和2年）	都道463号	中央径間：下路式鋼2ヒンジアーチ橋 側径間：上路式鋼2ヒンジアーチ橋
清洲橋	1928年（昭和3年）	都道474号	鋼自碇式チェーン吊橋
隅田川大橋	1979年（昭和54年）	都道475号,首都高9号	3径間連続鋼床版箱桁橋
永代橋	1926年（大正15年）	都道10号	3径間鋼サイドアーチ橋
中央大橋	1994年（平成6年）	都道463号	2径間連続鋼斜張橋
築地大橋	2015年（平成27年）	都道50号	3径間連続中路式鋼アーチ橋
日本橋	1911年（明治44年）	国道1号	2径間連続石造アーチ橋



写真-1 白鬚橋



写真-2 駒形橋

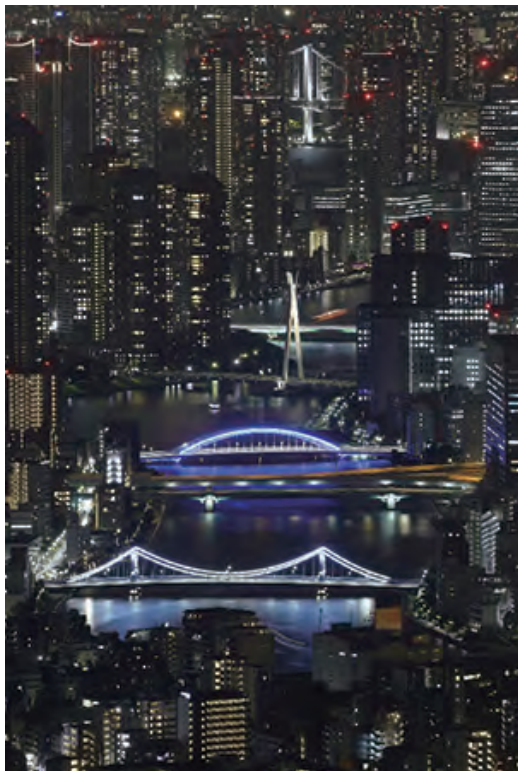


写真-3 スカイツリーからの隅田川
(手前から清洲橋、隅田川大橋、永代橋、中央大橋)



写真-4 築地大橋



写真-5 日本橋

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4年度は、感染対策を実施しながら会場開催を実施したイベントへの出展やプレゼンを行いました。ブースに展示されたパネルは、広く「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）していますが、道路橋点検士の登録資格や道路橋点検士技術研修会の実施回数等に関心が高いようでした。

また、建設技術フォーラムは前年度に引き続き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4年6月1日・2日	EE東北'22	EE東北実行委員会事務局
令和4年10月4日・5日	建設技術フェア2022in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4年11月13日・14日	建設技術フォーラム2022inちゅうごく	建設技術フォーラム実行委員会



展示ブース（東北）



プレゼンの様子（EE東北）



展示ブース（中部）

令和5年度賛助会員特別講演会の報告

定例となりました賛助会員様向けの特別講演会を令和5年4月19日にアルカディア市ヶ谷にて開催し、73名の方に来場参加していただきました。当日の講演内容は、後日、賛助会員向けにオンデマンド配信を実施しております。

講演会は、まず橋梁調査会 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。

特別講演は、内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「スマートモビリティプラットフォームの構築」PDであり筑波大学 名誉教授の 石田 東生 (いしだ はるお) 様より、「道路政策とイノベーション～道路の進化と回帰～」と題して約一時間半のご講演いただきました。



講演状況 (石田東生 筑波大学名誉教授)



講演会会場風景

まず、日本の危機 劣化する日本・立ちすくむ日本と題しお話しになった後、モビリティ政策・道路政策の挑戦と題し、モビリティのあり方、イノベーションと社会資本政策、クルマや道路の進化、みちと道路の違いやそれらの今後について話され、最後に欧米を事例にあげられたうえで道路に要求される機能・サービスといったことをお話しになりました。

講演の中で紹介された、社会資本整備審議会道路分

科会基本政策部会提言の道路の長期ビジョンでは、道路機能として効率化や省エネ・省人化を目標とし、自動運転ODDのネットワーク化や次世代高速道路の姿を描いた「進化」を期待する一方、賑わい、ゆとり、楽しい道路空間へ道路空間の柔軟な発想による整備といった「回帰」との役割再考という、興味深い内容がありました。



「進化」と「回帰」(講演資料より)

アンケートには、普段、橋梁の構造にばかり着目して業務をしていないので、道路政策としての話題(政策道路のリデザイン等)を聞くことが出来て良かった。といった、普段とは異なる視点での講演で大変良かったとの声が多く聞かれました。

本講演会は平成25年度より定例化して毎年行っており、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。

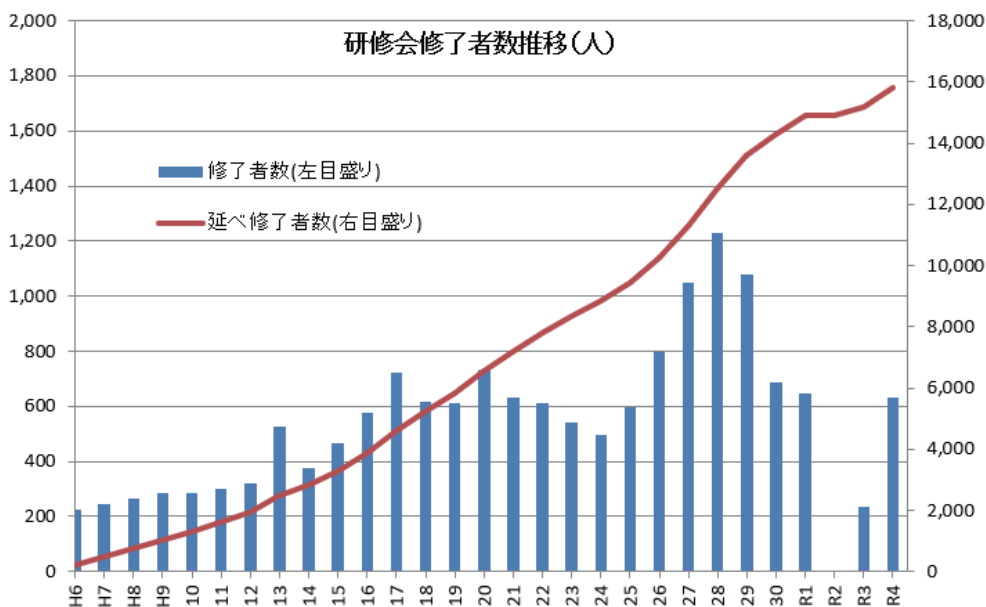
令和3年度からは会場開催に加えオンデマンド配信も行い、多数のご参加・ご視聴をいただき、皆様には厚く感謝申し上げます。

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ますながら、今後も情報発信に取り組む所存です。

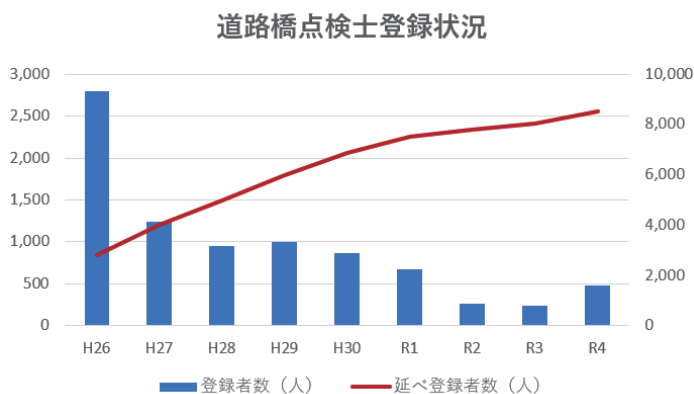
また、コロナ禍の4年間は交流会が行えず、賛助会員様とコミュニケーションをとる場が減っていましたが、令和6年度には復活させたいと考えておりますので、あわせて多数のご参加をお待ちしております。

2023道路橋点検士統計情報

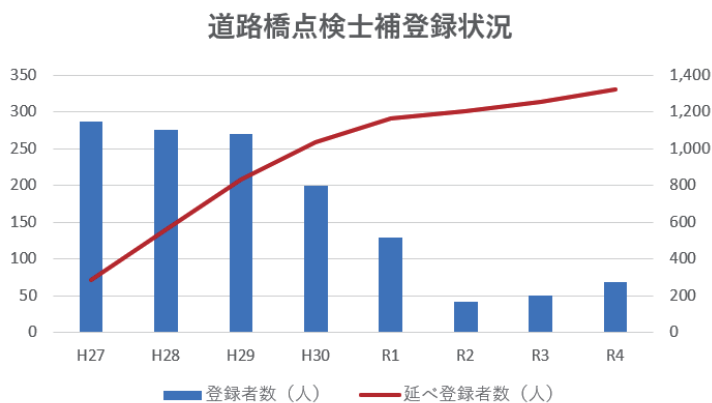
◎道路橋点検士技術研修会（令和5年3月現在）



◎道路橋点検士および道路橋点検士補の登録状況（令和5年3月現在）



道路橋点検士
8,500人



道路橋点検士補
1,300人

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39件の助成を行ってきたところです。令和5年6月に、令和5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5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

- 近藤 拓也氏（高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科 教授）
・ 研究計画：「けい酸塩系表面含浸工の施工効果に基づく費用対効果」
- 杉本 悠真氏（岩手大学理工学部システム創成工学科社会基盤・環境コース 助教）
・ 研究計画：「補修・補強で用いられる高力ボルト引張接合継手の疲労強度評価と既存疲労照査法の改良」
- 平尾 賢生氏（横浜国立大学都市イノベーション研究院 助教）
・ 研究計画：「AI画像処理を用いたナット回転履歴によるボルトの緩み検知」

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4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4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センター長表彰を頂きました。

表彰者	業務名	表彰名
東北地方整備局長	東北北部管内橋梁診断業務	・ 優良業務施行者
中国道路メンテナンスセンター長	令和3年度中国管内西部橋梁外診断業務	・ 優良業務履行団体表彰 ・ 優秀建設技術者 (福田真佐夫)

7連のアーチが美しい九州を代表する名橋

「名島橋の謎」とは

名島橋は福岡市東区、多々良川に架かる国道3号線の道路橋である。白い御影石が眩しい7連のアーチは、九州一の都市、博多の東の玄関にふさわしい優美な姿を水面に映している。現在でも1日平均6万台を超える交通量を支え、福岡と北部九州、さらにはその先の本州との産業、経済、文化の交流を担う重要な役割を果たし続けている。

名島橋のある多々良川河口の開発は、江戸時代、多々良瀨と呼ばれる浅瀬の埋め立てに始まる。しかしながら恒久的な橋はなく、あっても洪水で流されるため、明治以降は渡し船による輸送に頼っていた。明治24（1891）年、博多～門司間の鉄道敷設によって鉄橋が架けられたが、人の自由な往来には十分とは言えなかった。

明治の終わり頃、有料の総檜造りの木橋が完成、名島周辺は大きく発展することになる。大正9（1920）年には当時東洋一の石炭火力発電所（現名島運動公園付近）が竣工し、名島地区は急速に近代化が進んだ。そして全国の道路網整備の一環として、国道2号線（後に3号線）の整備とともにこの地に橋が架けられることとなった。

名島橋は昭和5（1930）年に着工、完工は昭和8（1933）年。その役割は、北部九州と博多を結ぶのはもちろん、昭和5（1930）年に建設された水上機専用飛行場であった。名島水上飛行場

（1934年閉鎖。現：福岡市東区名島1-1付近）と福岡市街をつなぐという役割も担っていた。

設計は福岡県第2号国道改築事務所の所長・後藤龍雄氏。自動車時代の黎明期にも関わらず長さ204.1m、幅24.0mと、当時としては威容というべき規模。完工から90年を経た今も膨大な交通量をさばく、この仕様は「名島橋の謎」と呼ばれており、人々に格好の話題とロマンを提供している。

最新の土木技術を優美なデザインで包み込む

さて、名島橋を九州の名橋と言わしめているのはその構造にある。当時、これだけの規模の橋を架橋する場合、鋼材を用いたアーチ橋かトラス橋が一般的であるが、名島橋は塩害や圧縮力に強いコンクリートを用い、耐震性に優れる鉄筋コンクリートアーチ構造という極めて先進的な技術が採用されている。この方式でこれだけの規模の橋は当時としては珍しく、ほかには昭和4（1929）年に完成した新潟の萬代橋（三代目）が有名である。ちなみに萬代橋とはこれが縁で平成6（1994）年に兄弟縁組を結んでいる。

また、構造のみならずデザイン性にも秀でている。ゆるく弧を描く7つのアーチ、半円を載せた4本の照明灯付き親柱、半円形の左右6対のバルコニー、足の長い照明器具など、「古典的装飾をバランス良く配置した優美なデザインが特徴」と





橋名	名島橋
形式	7径間連続鉄筋コンクリートアーチ橋
橋長	204.1m
幅員	24.0m
竣工	昭和8（1933）年3月

して、平成30（2018）年には国の登録有形文化財（建造物）に登録された。なお、登録有形文化財に登録に先立つ平成16（2004）年には社団法人土木学会より土木学会選奨土木遺産に認定されている。

名島橋を核に生まれる人々の集い

名島橋の歴史は決して安寧なものではなかった。特に戦争中は爆撃を避けるためコールトールで黒く塗られ、照明器具等は取り外されるなどしたらしい。その後も完工当時の装飾もないまま、名島橋は還暦を迎えた。

平成6（1994）年の60周年、完工当時の面影を取り戻そうと当時の建設省福岡国道建設事務所による修繕事業が行われた。事業にあたり福岡市民はじめ多くの人々に協力を呼びかけたところ、古い資料や写真が集まったという。これらを参考に損傷部分を修繕、完工当時の白くなめらかな高欄に戻し、親柱や照明を復元した。加えて歩道を御影石の石畳に改装、ブロンズタイプの横断防止柵などが追加されている。

また、修繕事業と同時に、名島商工連合会による橋の清掃活動がスタート。やがて近所の自治連合会や校区内の参加希望者が加わり、名島校区全体で国道3号のゴミ拾いを行う美化運動にまで発展した。また、平成15（2003）年6月には国土交通省のボランティア・サポート・プログラムを締結、より一層充実した活動になっている。

これら修繕事業と足並みをそろえ、福岡県による多々良川環境整備事業、福岡市による都市サイン事業が行われている。名島橋のたもと、下流左岸には橋と同じ白御影石による親水公園が完成したほか、多々良川緑地帯公園などの整備も進んでいる。

90年の年月が経った今も名島橋は交通の要衝としてはもちろん、「結」のシンボルとして、これからも地域の人々に愛され続けるに違いない。



- 1 7つのアーチが連なる美しい姿
- 2 4本の照明灯が付いた親柱
- 3 登録有形文化財（建造物）記念碑
- 4 御影石の歩道とブロンズ調の道路照明灯
- 5 左岸下流の公園

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 : <https://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2ビル2階)

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



J-BEC レポート 2023 Vol.19 令和5年11月発行

編集・発行 一般財団法人 橋梁調査会 J_BECLレポート編集委員会

印刷 (株)大 應

表紙撮影：初芝成應



J-BEC

橋をかける
橋をまもる

R100
高耐久配合100%純生紙を採用したエコ紙

PRINTED WITH
SOYINK
Soyink is a registered trademark of Soyink Corporation.