

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

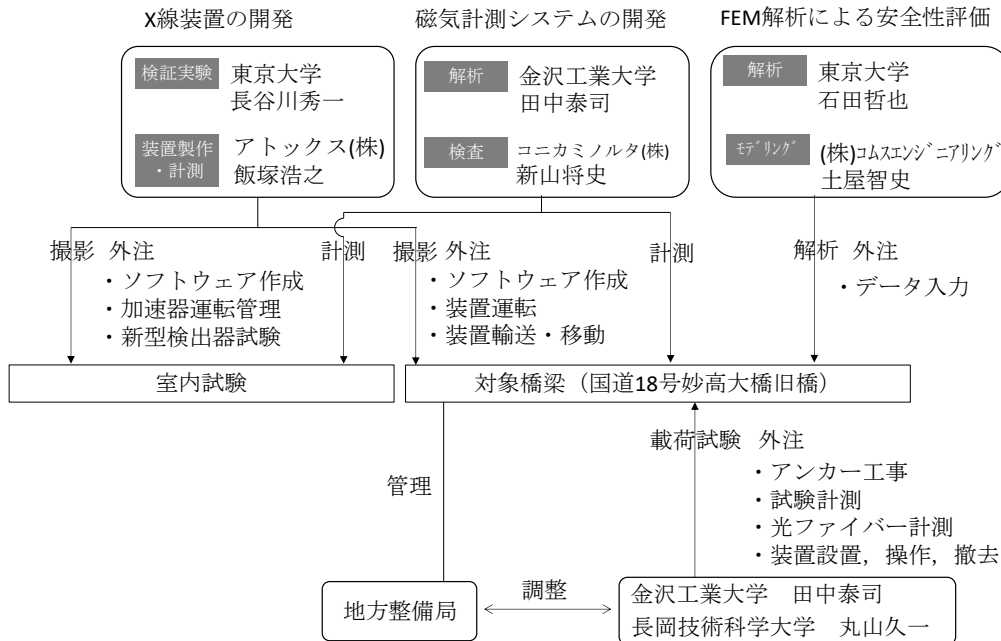
【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属		役職
	田中 泰司 (たなか やすし)		金沢工業大学		教授
②研究 テーマ	名称	高出力X線および磁気計測によるPC橋梁の腐食状況の検出と構造安全性評価に関する技術開発			
	政策 テーマ	[主テーマ] 8 道路資産の保全	分科会/ 公募タイプ	タイプIV	
		[副テーマ]			
③研究経費 (単位:万円) ※端数切り捨て。実際の研究期間に応じて記入欄を合わせる こと	令和2年度	令和3年度	令和4年度	総合計	
	—	3498	3993	7491	
④研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)					
氏名		所属・役職 (※令和5年3月31日現在)			
長谷川 秀一		東京大学・教授			
石田 哲也		東京大学・教授			
丸山 久一		長岡技術科学大学・名誉教授			
飯塚 芳之		(株) アトックス・主任			
土屋 智史		(株) コムスエンジニアリング・代表取締役			
新山 将史		コニカミノルタ (株)			
⑤研究の目的・目標 (提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)					
<p>本研究では、コンクリートのかぶり厚い箇所でも鋼材腐食状況が検出可能な、高出力で小型のX線撮像装置と、かぶり厚が小さな箇所で迅速に鋼材腐食状況が検出できる磁気計測装置をそれぞれ開発し、現場実証を行う。具体的には、3.95MeVの出力を備え、箱桁内部に搬入可能な大きさのX線放射装置と軽量な3軸磁気計測装置を開発し、国道18号妙高大橋を対象として現場実証を行う。妙高大橋は北陸地方整備局が管理する4径間連続PC箱桁橋である。多くのPCストランドが腐食・破断しており、ほとんどのPCシースのグラウトが未充填の状態であることが分かっている。さらに取得したデータから橋梁全体の構造性能をFEMによって評価し、構造安全性に関するアセスメントの体系を構築・提案する。FEMの計算結果の検証として、橋梁の現地載荷試験を実施する。</p>					

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

(研究の進捗や目的の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等（外注を実施している場合は、その役割等も含めて）について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。)

役割分担と外注の位置付けを下図に整理して示した。いずれの研究項目においても当初計画していた内容を遂行することができたので、目的は概ね達成されたと考える。



⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

(中間・FS評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。)

指摘事項 1: 高出力X線による鋼材の状況観察（画像解析）の結果、および磁気ストリーム法計測結果の情報から、精度よく鋼材状況を把握するマニュアル作成を期待する。特に、腐食レベルがどの程度の精度で把握できるのか確認が必要である。

→ **対応:** 高出力X線による鋼材腐食の検出精度については、模型を使った室内試験により検討を行った。その結果、鋼材の外形が変化するほど腐食が進行している場合には腐食を検知できるものの、ごく表層が錆びている程度では検知が難しいことが明らかとなった。一方で、グラウトの充填状況は腐食に比べて明瞭に把握することができた。

磁気ストリーム法の検出精度については、北陸地方の他の塩害橋梁で計測を行い、解体調査を行って検討をした。その結果、破断を伴うほどの腐食でないと検知できないこと、広範囲で破断している場合には破断検出ができないこと、PCシースの腐食に敏感に反応することなどが明らかとなった。これらの知見も含めたマニュアルを作成した。

指摘事項 2: 実橋の解体工事で得られる腐食状況に関して、定量、半定量、グレード分類などの、評価水準を明確にして、手法の適用性を明らかにしていただきたい。

→ **対応:** 解体工事が当初予定から遅れ、本研究開発期間中に開始されなかった。R5年度より解体工事が本格的に開始されているので、実際の腐食状況を調査し、高出力X線や磁気計測による評価の精度を明らかとする予定である。

⑨研究成果

(本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

本研究では妙高大橋旧橋において、高出力X線撮影と磁気計測を行い、PC鋼材の腐食・破断の検出に対する適用性を評価した。高出力X線撮影では、コンクリート厚さが60cm程度であれば、鋼材破断やグラウト充填の有無が判別できることが実証された。厚さ100cmを超えると、ノイズの影響が大きくなり鋼材の有無が識別できる程度であった。コンクリートブロックを用いた室内試験では厚さが80cm程度まではグラウト充填の有無が識別された。一方、コンクリート厚が大きくなるほど画像解析の効果が小さくなること、回折や散乱の影響によって鋼材径を正確に測定することが難しいことなどが明らかとなった。本研究で開発した高出力X線は、1日あたりの検査範囲が限られるものの、今まで破壊試験によっても確認できなかった深部の鋼材の状況を非破壊で確認できるのは大きなメリットである。

磁気計測については、妙高大橋旧橋において、過去に腐食によるPC鋼材の破断が確認された箇所を対象に計測を行い、破断箇所が存在することを確認した。また、これまで調査が行われていなかった範囲において、新規の腐食破断箇所を複数検出した。計測精度の検証のため、他の塩害橋梁の撤去工事において、現場計測と解体調査を行った。その結果、磁気計測が誤判定を起こす測定条件が数種類見付き、それぞれへの対応策を検討した。本研究で行った磁気計測は比較的簡易で迅速な検査方法である。ただし、計測可能なかぶり深さは10cm程度までであり、高出力X線と互いに短所を補完する関係にある。

塩害腐食が進行したPC橋の構造性能を明らかにするために、妙高大橋旧橋の第1径間において載荷試験を行った。曲げひび割れが発生するまで載荷試験を行ったところ、たわみ計測による剛性変化は1200kNで確認された。また、支間中央のセグメント境界においては、400kN～1200kNの範囲でひび割れが発生した。供用中に行われた内視鏡調査やハツリ調査による鋼材腐食状況を反映したFEM解析によって、その調査当時の構造性能が評価されていた。また、調査時点からの腐食の進行と死荷重たわみの増加の関係も求められ、実際の維持管理に使用されていた。たわみの長期モニタリングの結果から予想された荷重-たわみ関係と今回の載荷試験結果は概ね整合していたことから、供用中の性能評価が妥当であったと結論付けられた。一方で、各セグメント境界のひび割れ発生荷重は、実験がやや解析による予想を下回る傾向にあった。そのため、長期モニタリングや載荷試験ではひずみ分布の計測によるひび割れ検知が重要であるといえる。本研究で実施した光ファイバーひずみ計測では、ひび割れ発生位置とひび割れ幅が評価可能であることが示された。計測技術の完成度を高めることで、今後の劣化橋梁のモニタリングに役立つことが期待される。

本研究で行った高出力X線撮影と磁気計測の調査結果を反映させた構造解析を行った。解析には非線形FEMを使用した。解析では載荷試験と同様に、セグメント8において1200kNでひび割れが発生した。一方で、それ以外のセグメントでは、腐食状況が不明な鋼材が多かったために、ひび割れ発生状況は実験と相違した。未調査箇所の腐食の考え方が今後の課題である。

結論として、安全性評価においてはまず載荷試験を行い、安全性を直接確認するとともに、ひび割れ発生状況から腐食分布を大まかに推定し、詳細な腐食状況の把握が必要な位置を特定してから非破壊検査を行い、それらの結果を考慮した構造解析を行うのが合理的かつ信頼性の高いプロセスであることを提案した。

⑨研究成果の発表状況

(本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限ります。)

- ・寺尾静夏, 新井崇裕, 田中泰司: PC箱桁橋における分布型光ファイバセンサによるひび割れ評価, 令和4年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, I-17, 2023. 3.
- ・石田哲也, 房捷, 土屋智史, 田中泰司: マルチスケール解析を用いた過去の点検データに基づく妙高大橋の構造残存性能評価, 土木学会全国大会第78回年次学術講演会概要集, 2023. 9掲載予定
- ・Shizuka Terao, Takahiro Arai, Kiyotaka Toishi and Yasushi Tanaka: Loading test of long span prestressed concrete bridge degraded by salt attack, proceedings of CACRCS2023, 2023. 9掲載予定
- ・Yasushi Tanaka and Takumi Shimomura: An experimental and numerical study on remaining strength of corroded prestressed concrete girder, proceedings of CACRCS2023, 2023. 9掲載予定

⑩研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

- ・妙高大橋旧橋公開載荷実験, 2022年7月28日, 参加者約50名
- ・新潟県コンクリート診断士会, 通常総会, 「妙高大橋旧橋を対象とした次世代点検診断技術の開発」, 2022年7月11日
- ・新潟市橋梁維持補修技術協会, 橋梁講演会, 「旧妙高大橋の載荷試験と目的について」, 2022年9月25日
- ・新潟県コンクリート診断士会, 技術セミナー, 「旧妙高大橋の健全度評価」, 2023年2月8日

⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究で実施した載荷試験やFEM解析は、国内外において、鋼材腐食が進行したPC橋の安全性評価に直接活用することができる。載荷試験については自動運転車を導入することで、安全性の確保と試験費用の縮減を同時に実現できる可能性がある。また、実橋への荷重車試験によって安全性が直接証明できること、非破壊検査の必要性と必要箇所抽出が行えるようになるなどの利点があり、今後の発展が見込まれる。載荷試験による性能評価を支えるのは橋梁全体のたわみやひずみの分布を高密度で計測する技術である。ひずみ分布の測定としては光ファイバーによる計測が有効であることを本研究開発で示した。そのため、完成度を高めるための技術開発を進めることが望まれる。たわみ計測についてもより迅速かつ高精度に分布計測できる技術を開発する余地がある。

高出力X線はPC橋に加えて斜張橋ケーブル定着部など、これまで点検困難であった箇所の検査への活用が見込まれる。一方でコンクリート中の骨材による反射の影響を低減する技術の開発や装置の自動位置調整機構の開発が課題である。磁気計測については、性能を発揮できる条件に限られることから、レーダーなどの他の非破壊計測と組合せた上で、初心者であっても正確な判断ができるように、調査方法をマニュアル化する必要がある。

また、高出力X線、磁気計測ともに、実橋の調査を実施したものの、実際の腐食状況との整合性は不明であるので、今後行われる解体工事において実際の腐食状況を調査し、判定精度を検証する必要がある。

⑫研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

高速道路や国道などの重要路線にある橋梁では、供用の制限や停止を行った場合に社会的な影響が大きくなるので、このような橋梁で鋼材腐食を伴う劣化が発見された場合、管理者は難しい判断が求められる。本研究で実施した荷重車試験、長期モニタリング、性能評価を実施することで、構造安全性を定量的に確認することが可能となる。その結果、安全を確保しながら社会的な影響を最小限に留め、合理的な維持管理が行えるようになる。また、本研究で提案した非破壊検査を実務に反映することで、これまで破壊を伴う調査でしか得られなかった情報が入手可能となり、結果として橋梁へのダメージを低減することができる。

劣化橋梁の構造性能評価は、供用中の性能確保だけでなく、供用停止後に行われる解体・撤去時の安全性確保にも有効である。特に長大橋では架設方法自体が合理化されているものも多く、残存する構造性能を期待しないと、解体撤去に膨大な費用を要することになる傾向にある。本研究の成果によって劣化橋梁の性能評価を行えば、安全性を確保しつつ合理的な解体・撤去を計画・実行することが可能となる。

⑬自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今度の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

【研究目的の達成度】いずれの研究開発項目においても、当初計画を着実に遂行し、十分な成果を挙げることができた。全体としては90%と自己評価する。高出力X線は現地計測ができたものの、100cm程度以上の厚肉部の評価や撮影効率の改善など解決すべき課題が残された。また、磁気計測と合わせて検査結果の正誤を解体調査により検証する必要がある。構造解析および載荷試験については、当初の計画以上に研究が進捗した。特に載荷試験によって安全性の確認だけでなく、腐食分布をおおまかに把握可能であることが示された。

【今後の展望】2023～2024年に行われる妙高大橋旧橋の解体工事に合わせて解体調査を行い、高出力X線と磁気計測結果の検証を行う。得られた結果から技術改善を行い、両調査技術の実務への適用を実現する。載荷試験および構造解析は、安全性が危惧される橋梁の性能評価に実用可能であり、道路政策の質の向上に大いに寄与する。

【研究費の投資価値】研究対象である妙高大橋旧橋は希少な研究材料であったことから、本研究で実施した調査・実験はいずれも国内では二度とできない可能性が高いものであり、貴重である。得られた成果は各技術の発展に大いに寄与し、投資価値は十分に高かったと自己評価する。