

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

## 【研究状況報告書（1年目の研究対象）】

①研究代表者		氏名（ふりがな）		所属		役職	
		たなか やすし 田中 泰司		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			公募	タイプIV	
		[副テーマ] -			タイプ		
③研究経費（単位：万円）		令和3年度	令和4年度	令和5年度	総合計		
※R3は受託額、R4以降は計画額を記入。端数切捨。		3,498	5,000	0	8,498		
④研究者氏名（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。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			
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。）							
本研究では、コンクリートのかぶりが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、かぶりが小さな箇所ですばやく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。なお、FEMのモデル化においては2次元CAD図面からAIを用いて3次元モデルを自動作成することで解析コストを圧縮し、構造解析の適用性の拡大をはかる。なお、妙高大橋では令和3年度には新橋への交通振替、その後、撤去が予定されていることから、将来的には解体調査を行って、検査結果の検証を行う。

## ⑥これまでの研究経過

### 1. 高出力X線による鋼材腐食とグラウト未充填部の検出に関する技術研究開発

3. 95MeVの出力を備えつつ、PC橋梁の箱桁内に搬入可能なX線放射装置の製作を行っている。橋梁への侵入口となるマンホールが最も狭隘な箇所となることから、一般的なマンホールのサイズ以下となるように装置筐体を再設計し、コンパクト化を行っている。装置はX線源、高周波源ユニット、チラー、制御・電源ユニットの4ユニットで構成されており、各ユニットの改造は完了している（図1）。ユニットをつなぐケーブル類の製作と室内性能確認試験は計画通り、年度内に完了できる見込みである。

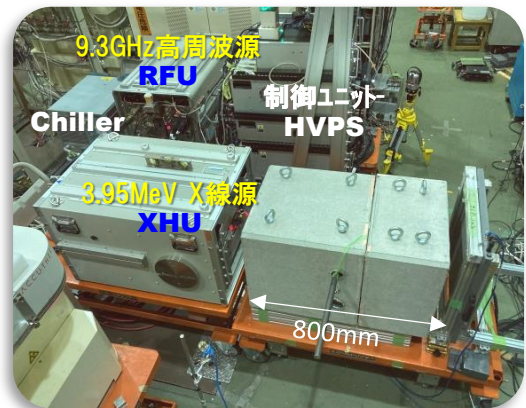


図1 筐体改造後のX線システム

開発中の高出力X線装置を橋梁現地で運転するには原子力規制庁の許可が必要となる。申請内容は2つに大別され、ひとつが水平方向から上向きにX線を照射することに対する変更申請である。これについてはすでに原子力規制庁へ申請中である。もうひとつは橋梁現地への移動使用申請である。次年度に撮像を行う橋梁の形状や周辺地形を考慮したX線線量率解析を実施中であり（図2）、年度内に申請手続きが完了する見込みである。

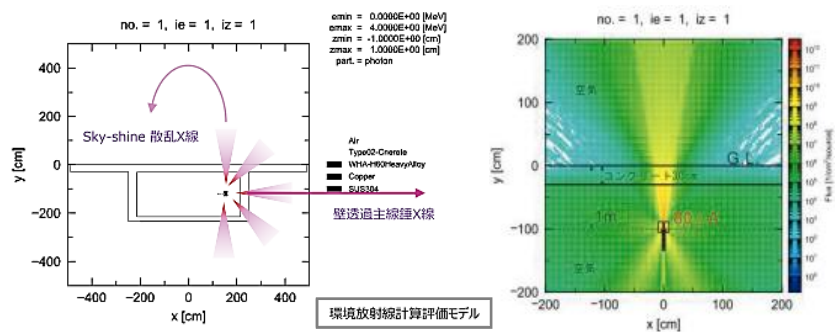


図2 妙高大橋周辺のX線線量解析結果

令和4年度に実施予定の実橋梁のX線撮像に向けて、現地確認の上でX線照射装置の照射計画を立案し、必要となる治具の設計製作を行っている。従来の内視鏡調査では、3～5割の鋼材の腐食状況しか確認できなかったものが、高出力X線であれば、9～10割まで検査可能となる見込みである。

高出力X線によって厚肉コンクリート中に配置されている鋼材の状況を明瞭に観察するための計測条件や画像解析手法を確立することを目的として、厚さの異なるコンクリートブロック試験体を製作し、シースの空洞と鋼材の撮影を行った。80cm厚のコンクリートでもシースの空洞と鋼材が検出可能であ

ることを再確認するとともに、検出器から鋼材までの距離が小さいほど鋼材が明瞭に見えることを確認した。厚肉コンクリートでは散乱X線の検出器への再入射により鮮明度を損なう影響が大きくなるので、各種フィルターの効果確認と画像処理の検討を行っている。画像解析手法としては、従来のエッジ強調に加え、強調多色カラー表示を検討している（図3）。

当初計画通りに高出力X線装置の開発と実橋梁への撮影に向けた準備が進められている。また、撮像写真の明瞭化に向けて当初計画どおりに実験が進捗している。

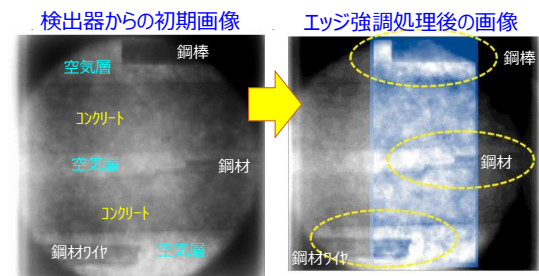


図3 800mm厚コンクリート内のPCワイヤおよびシース内空洞のX線撮影画像(左)と画像処理イメージ(右)

## 2. 3軸磁気計測による鋼材腐食検出に関する技術研究開発

計画を一部、前倒して令和3年度中に実橋梁での計測を実施した。対象橋梁の妙高大橋旧橋は、グラウト未充填と凍結防止剤の侵入によりPC鋼材で塩害腐食が多数発生している橋梁である。過去に、下からハツリ調査が行われ、鋼材破断や腐食が確認されている箇所を対象として3軸磁気計測を行ったところ、多くの鋼材で破断判定となった（図4）。また、橋軸方向に1mほど離れた場所ではすべての鋼材が健全の判定となったことなど、大型のPC箱桁橋に対する磁気計測の適用性が見込める結果を得た。次年度以降に対象橋梁で行われる解体工事の際に実際の腐食状況の調査を行い、検査結果を検証する。

磁気計測結果から内部鋼材の腐食状況を推定するための解析アルゴリズムを構築することを目標として、令和3年度中に3次元静磁場解析を行い、単純な配筋状態における磁気計測結果と解析値が整合することを確認した（図5）。また、破断を模擬した配筋モデルを製作し、磁気計測を行った。その計測結果を検証用データとして、3次元静磁場解析による鋼材の破断推定アルゴリズムの構築を令和4年度中に進める。

実橋梁における実証計測が当初計画よりも進んだ一方で、破断箇所の解析アルゴリズムの構築は当初計画よりやや遅れており、全体としては当初計画と同程度の進捗状況となっている。

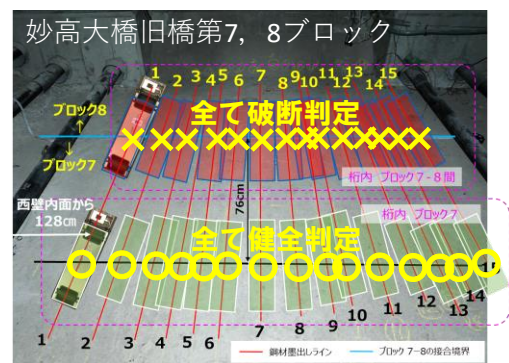


図4 実橋梁内部での磁気計測結果  
磁気ストリーム法計測結果

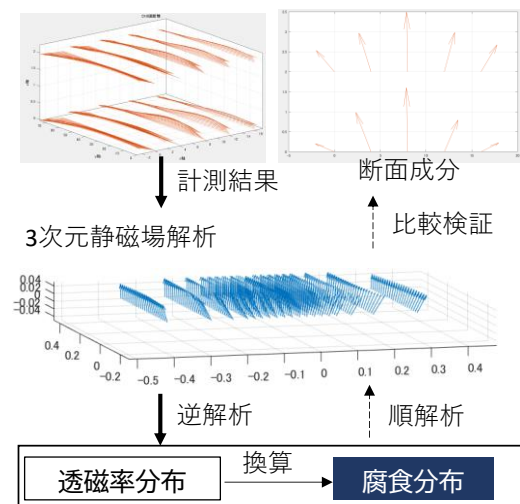


図5 静磁場解析による破断判定手法の開発と計測結果との比較検証

### 3. 構造解析による安全性評価技術の開発

高出力X線や磁気計測で得られる劣化情報から構造安全性を評価するために、材料劣化が考慮可能な有限要素解析を実施する。令和3年度は、対象橋梁である妙高大橋旧橋の解析メッシュを作成することが目標である。検討対象の径間は3次元フルソリッド要素にてメッシュ化し、PCケーブルは個別に腐食が考慮できるように線要素でモデル化している（図6）。令和3年度中に、健全状態での構造解析を実施し、通常の設計で用いられるフレーム解析との比較を行う。また、令和4年度にはX線および磁気計測結果を反映した構造解析を行い、载荷試験結果との比較検証を行う。

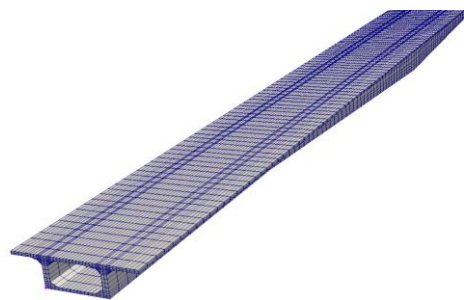


図6 妙高大橋の解析メッシュ

令和4年度の春に実施予定の実橋梁の载荷試験に向けて、令和3年度は载荷試験計画を立案した。また、载荷時の反力を受け持つグラウンドアンカーについて、当初計画では地盤調査とアンカーの設計・製造を予定していたが、計画を前倒して令和3年11月に現地での施工を完了させた。令和4年度は、最大300tの载荷を行い、橋梁の残存強度を明らかとする。また、载荷試験結果は、X線計測、磁気計測、構造解析の検証に用いる。

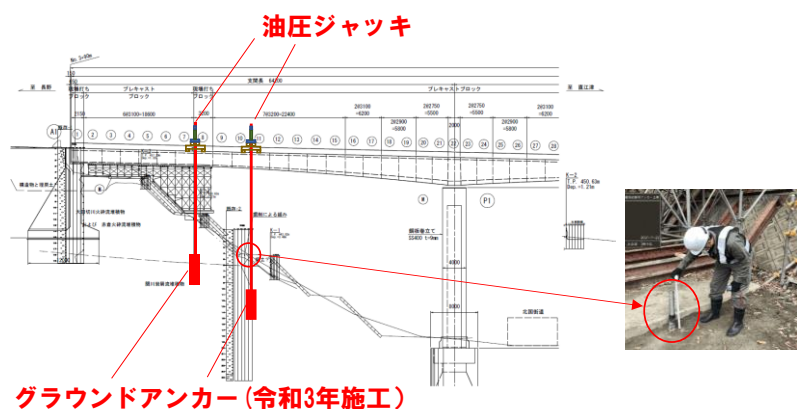


図6 妙高大橋の载荷方法と载荷位置

構造解析の作業が当初計画よりもやや遅れ気味であるのに対して、実橋梁の载荷試験は当初計画よりも進んでいるので、全体としては当初計画と同程度の進捗状況となっている。

## ⑦特記事項

(研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の見通しや進捗についての自己評価も記入。)

本研究で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3軸磁気計測を行い、破断箇所が存在することを確認した。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り、現時点でも、実橋梁において1日に30m<sup>2</sup>程度の表面積を検査可能である。一方、本研究で開発している高出力X線は、1日あたりの検査範囲が限られるものの、コンクリートの厚さが80cmであっても内部に配置されている鋼材が撮影可能であることが確認できた。このため、比較的大型の橋梁であっても、ほとんどの鋼材を確認することが可能といえる。現状では、コンクリートの一部を破壊し、目視や内視鏡で鋼材の腐食状況を観察している。今まで破壊試験でしか得ることができなかったコンクリート内部の腐食による鋼材破断状況が、非破壊で確認可能となる。

本研究では、塩害等で鋼材腐食が相当に進行した橋梁をターゲットとして、その内部の鋼材の腐食状況を非破壊で計測し、さらに構造安全性への影響を定量的に評価できる技術の開発を研究目的に掲げている。この目的を達成するために選定された、高出力X線と磁気計測はいずれも当初の狙いどおり、構造物内部の鋼材の腐食状況を検出できる技術となる見通しが立っており、かつ、互いに短所を補完する関係となりえる。非破壊検査で得られる情報を非線形FEMに取り入れることができれば、構造安全性評価の信頼性を格段に向上させることができる。本研究では、意欲的な目的・目標設定を行ったが、当初計画どおりに研究開発を進めることができる見通しであり、全体として順調に進捗している。