

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（2年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職
	つかだ けいじ 塚田 啓二		岡山大学大学院ヘルスシス テム統合科学研究科		名誉教授、特任教授
②研究 テーマ	名称	高感度磁気非破壊検査による目視不可能な箇所の損傷の検出についての技術研究開発			
	政策 領域	[主領域] 領域8 道路資産の保全 [副領域]	公募 タイプ	タイプIV	
③研究経費（単位：万円） ※R1は精算額、R2は受託額、 R3は計画額を記入。端数切捨。	令和元年度	令和2年度	令和3年度	総合計	
	3,200	2,752	3,400	9,352	
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				
鎌田 敏郎	大阪大学・教授				
石川 敏之	関西大学・准教授				
廣畑 幹人	大阪大学・准教授				
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。）				
<p>本研究では、高感度磁気非破壊検査により、定期点検の際に目視不可能な箇所の鋼部材に生じた腐食、疲労、破断などの損傷や欠陥を検出する技術開発を行う。4つの技術開発を行い、具体的には(1)水中部の鋼製橋脚など付着生成物を除去せずに地上から海底や川底まで到達できるプローブにより鋼矢板などの残存板厚を計測する方法、(2)照明・標識柱などのコンクリート埋設部や、閉じ断面内の腐食と疲労亀裂を舗装面から開削することなく検出する方法、(3)コンクリート中に埋め込まれたアンカーボルトの腐食をコンクリート表面から検出する方法、(4)鋼橋の塗装割れ箇所に対してき裂の状態を検出する方法に関する技術を開発する。</p>					

⑥これまでの研究経過

社会実装（定期点検での活用）を目指し、当該技術の評価基準を提案するため、類似技術を含めた性能評価と適用性を明らかにするため計測原理や適用範囲の条件整理をした。また、研究開発技術の誤差要因の把握と課題抽出、検査装置の改善、試験体及びフィールド試験評価を実施した。

1) 水中部の損傷の検出評価技術

磁気センサを用いた極低周波渦電流探傷検査装置(ELECT)として地上部から水中部を検査可能とするため、水深30mまで測定可能な防水型磁気センサプローブと磁場発振器の改良を行うとともに、高リフトオフデータ解析ソフトツールを追加した。水中部において問題となる技術課題は大きなものとして2点あげられ、磁気センサプローブと対象物の間に介在する付着物の厚み（リフトオフ）による計測誤差と、厚い錆による影響があった。

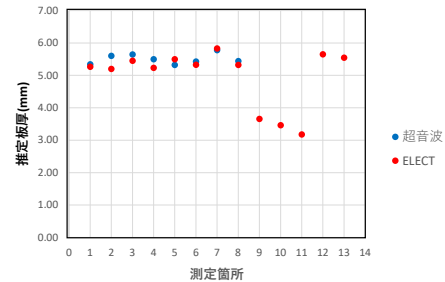


図1 用水路での鋼矢板損傷評価結果(ELECT とケレン後の超音波計測結果の比較)

リフトオフによる計測誤差を低減する方法として、リフトオフも測定できる方式を考案し、リフトオフ値による測定誤差を補正する方法を開発した。この装置構成で実際の港湾および用水路に設置された鋼矢板の板厚評価を行った。用水路での評価の結果ではケレン処理なしに錆の上から鋼矢板の減肉を検出することを実証でき、ケレン前のELECTでの検査結果とケレン後の超音波での板厚測定結果を比較して計測誤差が0.1mm程度と一致度が高かった（図1）。港湾での貝殻が付着した状態の鋼矢板を水中で計測した。基礎実験ではリフトオフ50mmまで計測ができ、実際の水中部でも今回は最大厚み16mmの貝の上からでも計測できることを実証できた（図2）。これにより研究目的である従来の超音波による減肉検査が必要とされた錆や付着生成部のケレン処理なしに減肉検査が可能であることを示せた。また測定精度として残存板厚の算出に必要な0.1mm単位の検出が可能であり、計測誤差0.1mmやリフトオフ50mmを満たすことができた。

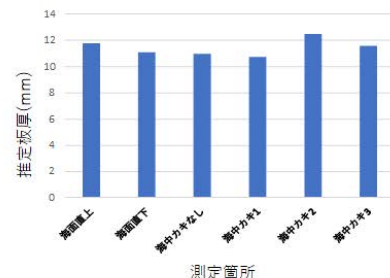
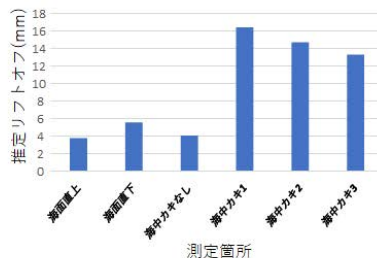


図2 水中部における付着生成物の厚みと鋼矢板の推定板厚

2) 埋設部や閉じ断面の損傷の検出評価技術
 道路の付帯物である標識柱や照明柱の地際下腐食およびリブ部の亀裂の検査を地表から簡易に検査できる装置の開発を行った。磁気センサプローブとしては、傾き40度で23mm離れた2つの磁気センサからなる検査プローブを製作した。測定対象の正常板厚が不明な場合でも、測定データの信号強度処理として、正常箇所の信号強度を基準とした信号強度比とすることで板厚に依存しない減肉率を得ることができた(図3)。また減肉量として5%以上から検知できることが分かった。実際の標識柱や照明柱のフィールド試験として標識柱58基、照明柱12基を対象として、開削前の本磁気検査と開削後の超音波検査の比較を行った。腐食率20%以上を問題ありと判断した場合で、両検査で問題ありと判定したのが5基、正常と判定したのが57基で、磁気検査だけが問題ありと判定したものが8基、超音波だけが異常ありと判定したものは0基であった。この結果から、開削前の磁気検査で広めに判定したが腐食検査の取りこぼしはなかったことが分かり、本検査のスクリーニング検査としての適用性は高まった。信頼性の高い検査とするため、測定誤差要因を抽出した。まず一定の厚さの減肉を模擬した切削鋼管を用いて、検査におけるプロービング方法による誤差や、周波数の最適化等の基本データの蓄積を行っている。実地検査では誤差要因として大きいものに環境磁気ノイズが挙げられた。交通量がもっとも多いところでの検査での磁気ノイズが車の磁化によるものであり、この大きさと周波数特性を明らかにした。これにより計測周波数を最適化すれば環境磁気雑音の影響が少ない検査を実現できることを明らかにした。リブの先端が地際位置となっている場合の標識柱リブの疲労損傷に対しては、リブを模した試験体の疲労試験を実施し、リブの溶接部の側面を2つの磁気センサの差分ベクトル強度比をとることにより、値として1.0を下回った場合に確実にリブに疲労損傷が発生していることを明らかにした(図4)。以上により研究目的である開削なしに地表から腐食を検出することができ、腐食率5%以上を検知できる検査であることができた。

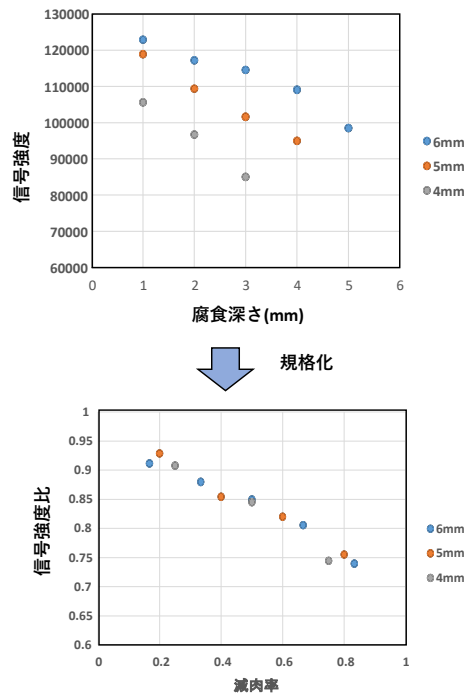


図3 規格による板厚に依存しない減肉率信号

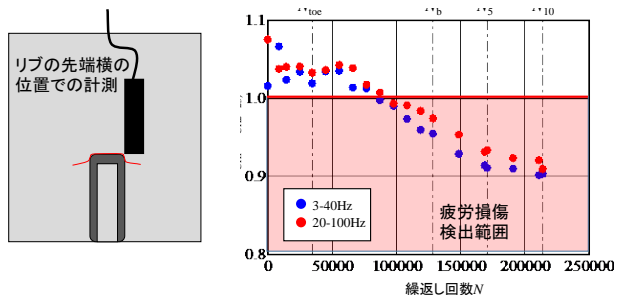


図4 リブの疲労損傷検出評価

3) アンカーボルトの腐食の検出評価技術

いままでなかったアンカーボルトの腐食検査が可能となる新検査法の確立を目指している。アンカーボルトへの磁場の励磁方式と磁場検出方式の最適化を進め、腐食による信号変化を検出できる見込みが得られた。励磁コイルが生成する磁場がアンカーボルトへ効率的に輸入されるようボルト貫通型の励磁コイルを作製し、アンカーボルトの腐食模擬試験体を使って評価した。励磁方式として周波数を60Hz～300Hzに掃引させ、検出磁場を励磁磁場と同相成分、および直交成分の軌跡を磁気スペクトル軌跡図で解析評価する方法を考案した(図5)。実験結果より、磁気センサの設置位置が試験体から15mm～50mmの範囲で、試験体の軸方向の磁場 (B_z) を計測することにより、腐食がない試験体との軌跡の差が確認された。またこの差は、磁気センサが試験体に近い程大きくなることが明らかになった。この現象を説明するための基礎解析として、動磁場解析により、鋼棒周辺の磁場ベクトルの分布を解析した。本解析結果から、アンカーボルトの軸方向磁場 (B_z) の有効性が確認された。新方式として、貫通型励磁コイルを適用することにより、腐食部の有無を効率的に検出できる可能性を確認した。現在、コンクリート中に埋設した鋼棒に腐食促進試験を実施し、より実構造物の腐食状況に近い条件でアンカーボルトの腐食検知性能の評価を進める準備をしている。

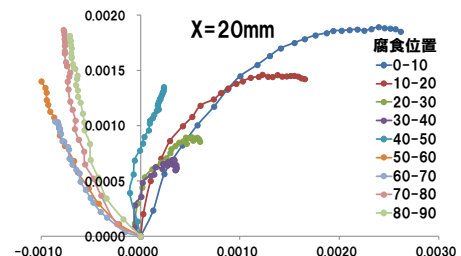


図5 腐食部の検出実験例

4) 溶接部のき裂の検出評価技術

複雑な構造部となっている溶接部での塗装割れの箇所に対して塗装を除去しなくてもき裂か、単なる塗装割れかの判別を迅速にできる検査装置の開発を目指した。磁気センサプローブとして2つの磁気センサを集積化した渦電流方式のものと、漏洩磁束方式の2種類を開発した。渦電流方式のものは印加磁場コイルの中に2つのTMRを実装する新しい構成として、鋼材特有の電磁特性の面内バラツキの誤差を取り除く差動型磁気センサを開発した。また、漏洩磁束方式のものは従来大きな磁場を印加して鋼材を磁気飽和させていたものを、交流駆動により位相情報を検出する新たな方式の磁気センサプローブを開発した。両者の磁気センサプローブをモデル試験体での評価と実際の橋梁のフィールド評価を行い、溶接部のき裂を検出できることを示せた(図6)。特にき裂の発生位置に対しては漏洩磁束方式のほうが表面から1mm程度の浅いき裂であっても検出できた。また、検査結果の表示として従来行われていたリサージュ波形以外に、より熟練を要しない定量的な表示として位相差波形を開発して、判別を容易にすることができた。現在これをもとにマルチセンサアレイによる画像化できる検査装置の開発見込を得ることができた。

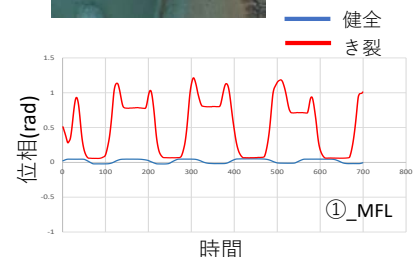
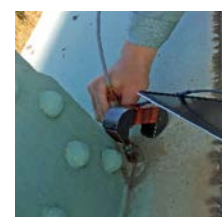


図6 き裂の検出実験例

⑦研究成果の発表状況

- 1) 水中部の損傷の検出評価技術：
日本磁気学会論文投稿中
日本非破壊検査協会 総合シンポジウム発表
電気・情報関連学会中国支部連合大会発表
日本磁気学会第228回研究会発表
第44回日本磁気学会学術講演会発表
マグネティックス研究会招待講演発表
国際学会2020 International Symposium on Novel and Sustainable Technology 発表
- 2) 埋設部や閉じ断面の損傷の検出評価技術：
土木学会第75回年次学術講演会発表
構造工学論文集Vol. 67へ投稿中
- 3) アンカーボルトの腐食の検出評価技術： 該当なし
- 4) 溶接部のき裂の検出評価技術： 該当なし

⑧研究成果の活用方策

- 1) 水中部の損傷の検出評価技術
鋼矢板や橋脚など水中部での損傷の検査においては人手と必要機材を多く必要しており、コストがかかっている、損傷が目に見える形になるまで放置されているケースが多くある。このため、簡便かつ定期的にできる検査を本研究により提供し、補修が早期の段階ででき、さらには補修後も検査ができる特徴を生かした損傷検出技術を実現できるようにしたい。このため、性能カタログ性能評価項目と性能評価基準を提案し、性能カタログの作成を早め社会実装を加速したい。
- 2) 埋設部や閉じ断面の損傷の検出評価技術
照明柱・標識柱の腐食損傷に対しては、実構造の検査に導入を希望している会社がすでに数社ある。このため、性能カタログの追加を早め社会実装を加速したい。
- 3) アンカーボルトの腐食の検出評価技術
道路、橋梁における附属物等に用いられるアンカーボルトの腐食による標識柱、照明柱等の転倒などの事例が見られるため、本手法を適用する現場条件や、対象とする損傷パターンを明らかにし、実運用を目指してゆく。
- 4) 溶接部のき裂の検出評価技術
渦電流探傷による信号パターンとき裂の関係を基本として、実務において課題とされる塗膜下のき裂検出への適用を展開する。
上記の各項目はそれぞれ、中国地方整備局管内での定期点検で活用し、実績をもとに全国展開を早期に実現したい。

⑨ 特記事項

- 1) 水中部の損傷の検出評価技術：従来鋼構造物の腐食による減肉検査では表面の錆や塗装，特に水中部では貝などの付着物を取り除かなくてはならなかった。本方法では他の方法ではできなかった測定環境を汚染することなく，しかも迅速にできる検査方法の実用化の見通しを得られた。なお，付着物が少ない清流にある四万十川の沈下橋のパイルベントの腐食検査において発表した論文は英国の学会 Institution of Civil Engineers で Telford Premium Prize を 2020 年に受賞した。現在多くの港湾箇所で鋼矢板の腐食問題が発生しており，相談が多く本年度末には大阪港での実施も予定していて社会実装を早めたい。
- 2) 埋設部や閉じ断面の損傷の検出評価技術：照明柱・標識柱の基部の腐食損傷に対しては，コンクリート舗装や土などを開削することなく簡便に検査できるスクリーニング検査手法を本磁気検査法で提供できる見込みが得られた。さらに，地際位置のリブに対して，疲労き裂が発生することにより，信号強度が変化するため，疲労き裂検出への応用ができることが分かった。また，損傷が判明された後の維持のためには，補修が必要であり，炭素繊維シートやガラス繊維シート補修方法が広まりつつあるが，その補修後でも本検査方法は腐食検査が可能であるので，長期に渡る維持管理として使えることを水中部の検査と同様に明らかにすることができた。標識柱・照明柱の基部の点検への利用に関する問い合わせ，機器の購入についての相談が多く，社会実装を早めたい。
- 3) アンカーボルトの腐食の検出評価技術：道路，橋梁などの標識柱，照明柱等などの附属物等に用いられるアンカーボルトの腐食検出への適用を検討している。これまでの評価では，腐食によりアンカーボルトの断面が欠損した場合を想定した基礎的な検証実験を実施し，腐食部の検出の可能性が見いだされた。今後，コンクリート中に埋設したアンカーボルトに促進腐食試験を行い，種々の腐食条件下での検出性能の評価を行う。さらに対象とする実構造物よりアンカーボルトを採取するなどし，本手法を適用する現場条件や，腐食状況の詳細調査を進める。また，標識柱，照明柱等などの附属物を対象として本手法が適用可能な計測ヘッドの構造を検討し，まずは試作プローブを用いて一次評価を行う予定である。
- 4) 溶接部のき裂の検出評価技術：供用中の構造物における一般的な溶接部疲労き裂の検出だけでなく，通常の検査技術では対応が困難な構造物への応用を検討している。具体的な対象構造物として，道路橋伸縮装置のマウラージョイントの目視困難箇所の点検への適用検証を行う。本検討は，本研究課題の採択が公表されたことを認知した外部機関からの打診，提案を受けたものであり，本研究課題の成果に対する期待感によるものと評価できる。