

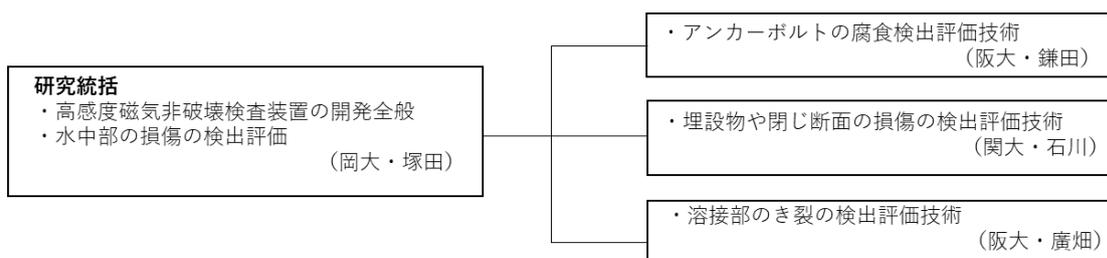
## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

## 【研究終了報告書】

		氏名 (ふりがな)	所属		役職
①研究代表者		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 テーマ	[主テーマ] 領域8 道路資産の保全	公募 タイプ	タイプIV	
		[副テーマ]			
③研究経費 (単位:万円)		平成31 (R1) 年	令和2年度	令和3年度	総 合 計
※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		3,200	2,752	3,100	9,052
④研究者氏名					
氏 名		所属・役職 (※令和4年3月31日現在)			
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					
<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・標識柱や鋼製橋脚の基部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)鋼床版などの溶接部のき裂を溶接部塗装表面から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・目的の達成状況

本研究では、4つの各テーマに対して高感度磁気計測装置の開発（プローブの開発やソフトウェアの開発）を実施した。それぞれのテーマに対して、試験体レベルでの検証および実際の構造物への適用を実施した。具体的な研究実施体制は以下の通りで各テーマをそれぞれが責任を持って進行したが、各テーマの基本技術は共通なので、定期的なミーティングなどを通して研究開発の効率化とスケジュールに沿った進捗の確保をお互いでサポートしながら行った。



水中部の損傷については、目的とした水中付着物の上から、簡便に鉄鋼構造物の損傷を検査できる検査装置を完成させた。基礎実験およびフィールド試験を通じた総合的な評価を行い、検査における誤差要因や適用性などを明確にした定期点検として施行してもらうための指針を明確化することができた。埋設物や閉じ断面の損傷の検出においては、標識柱や照明柱の地際下腐食等の損傷を地表から検査できる装置を開発した。ここで板厚に依存しないデータの規格化により腐食度を指標とする検査方法の確立や、リブにおける欠損による信号変化を明らかにすることができ定期検査のための指針を明確化することができた。道路上での評価を通して、外部磁気雑音などの影響因子を明らかにして誤差の低減ができた。アンカーボルトの腐食検出においては、アンカーボルトがつけられたまま検査できる方法を開発した。腐食による減肉度および大きさの違いによる基礎実験と解析モデルによるシミュレーションを実施し、信号変化の特性と適用性を明らかにすることができた。溶接部のき裂の検出においては、鋼床版の補剛材の溶接部などで塗装された複雑な状態でも検査できることを示した。き裂の長さ、深さなどの違いによって、磁気測定応答を把握し、応答の特徴がより顕著に評価できる磁気非破壊計測およびその磁気センサーの開発ができた。開発した装置の有効性をフィールド試験において検証し、検出精度、適用範囲などをまとめることができた。以上のように各テーマで目的とした内容は100%達成することができた。

## ⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

指摘として現場での適用方法・判定基準等を含めた実用化の推進の必要性から、性能カタログや実運用のイメージを作成してもらいたいとの要望があった。またそのためには、性能評価のための誤差精度の表し方、前提条件などの性能を横並びで評価できるように整理してもらいたいとの指摘があった。このため、研究スケジュールとしては、研究終了年度内に「水中部の損傷の検出評価」と「埋設部や閉じ断面の損傷の検出評価」に関しては性能カタログをまとめることとしていたので、各基本性能の整理とその精度を網羅して評価するとともにフィールド検査を推進した。水中部では基礎試験も含め3

か所の港湾および1か所の河川, 1か所の用水路で実施した。また埋設部や閉じ断面では, 3か所の地域において実施した。これらのフィールド試験においては, 従来の検査法である超音波による検査結果と比較して, 性能比較とともに検査の作業性など総合的に比較した。これらのフィールド検査を実施することにより, 各対象に対する適応性を評価するとともに各性能に対する誤差要因の解析と精度をまとめた。これらは中国地方整備局に各検査の仕様書としてまとめるとともに, 性能カタログ案としてチェックしてもらい提出をした。性能カタログの応募がすでに締め切られていたため, 本年末からの募集に応募する予定になっている。「アンカーボルトの腐食検出評価」では, 高速道路等における鋼製支柱や照明灯具などの支柱基部のアンカーボルトを対象に, 腐食を検査できる新たな高感度磁気非破壊検査法の確立を目指した。その結果, 実構造物に適用する計測ヘッドを製作し, 励磁コイル, および検出コイルの配置条件の最適条件を明らかにした。

「溶接部のき裂の検出評価」に関しては, 研究開始当初, 当該技術による検出対象を溶接継手における未溶着部としていたが, 新設構造物の製作時の欠陥検出よりも, 供用中の構造物の損傷を検出する技術の構築に注力すべきとの指摘を受けた。そのため, 供用中の構造物に発生する損傷である疲労き裂を研究対象として絞り込み, 塗膜下に存在するき裂を塗膜上から検出する技術の確立に注力する方針に変更した。

## ⑨研究成果

全体的なテーマとして新しい手法である磁気センサを用いた腐食やき裂検査に関して多くの発表依頼があり, 例えば2021年の表面シンポジウムでの特別講演や, 日本社会基盤安全技術振興協会などでの招待講演などがあり, 注目していただいている。また個別のテーマとして「水中部の損傷の検出評価」では, 最近板厚検査として用いられ始めているパルス磁場を用いた方法とは異なり, 世界で初めて開発した極低周波渦電流探傷法ELECT法により水中部の鋼構造物を検査できる方法を発表した。この検査技術により, 気中のみならず水中の鉄鋼構造物の腐食による減肉板厚を非接触で検査できるようにすることができた。厚い錆や貝等の付着物がある場合でもケレン処理なしに, これらの影響なく板厚を検査できるようになった。この方法に対して期待は大きく, いくつかの自治体から検査の要望がでてきた。また, 学術的にもこの検査法を用いた応用としてパイルベント橋脚に関する論文はイギリスの土木学会ICEからTelford Premium Prize 2020を受賞することができ注目されている。「埋設部や閉じ断面の損傷の検出評価」に関して, 照明柱や標識柱のコンクリートやアスファルト, 土などに影響されないで, 地際下の腐食を開削しなくても検査できる手法を開発することができた。この検査技術も同様に学会でも, 学生の日本非破壊検査協会での新進賞など4件の受賞や日本磁気学会論文賞1件など注目を浴びている。この手法も, いくつかの自治体から問い合わせがあり, コンサルタntsからの立ち合い評価依頼が来ており, 照明柱や標識柱の地際下腐食を開削なしに一点を数秒で検査できる方法の期待が大きい。「アンカーボルトの腐食検出評価」では, 新たな技術として, 内閣府のSIPインフラの後継のプロジェクト「靱性モルタル・DLCを

用いたコンクリート構造物への使いたくなる新たなメンテナンス技術の評価委員会」での話題提供（計3回）などがあり、注目されている。また、学会では、第21回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム（2021年10月14、15日）で、優秀論文賞を受賞し、注目されている。「溶接部のき裂の検出評価」に関しては、鋼橋に適用される防食塗膜厚さを想定したリフトオフ（1～2 mm）を設けても、溶接部に発生した疲労き裂を明確に検出できる方法を提示できた。き裂サイズによる応答特性を整理検討し、溶接継手の検査に適した評価指標を示すことができた。さらに、フィールド計測の結果から具体的なき裂検出の流れを示した。溶接部に発生する疲労き裂の検出において、塗膜割れの下にき裂が存在するか否かを効率的にスクリーニングできる技術は有用性が高い。本研究で得られた成果は、維持管理の現場に対し実用性、即効性を持つものと評価できると考える。

## ⑨研究成果の発表状況

（論文）

- 1) K. Tsukada, M. Hayashi, T. Kawakami, et al., Magnetic thickness measurement for various iron steels using magnetic sensor and effect of electromagnetic characteristics AIP Advances 12, 035109-1-4 (2022)
- 2) M. Hayashi, T. Kawakami, S. Adachi, et al., Crack Detection for Welded Joint with Surface Coating Using Unsaturated AC Magnetic Flux Leakage, IEEE Transactions on Magnetics (2022)
- 3) K. Tsukada, H. Shobu, Y. Goda, et. al., Integrated magnetic sensor probe and excitation wire for nondestructive detection of submillimeter defects, IEEE Magnetics Letters, 10, 8105105-1-5 (2019)
- 4) M. Hayashi, T. Saito, Y. Nakamura, et al., Extration Method of Crack Signal for Inspection of Complicated Steel Structures Using A Dual-Channel Magnetic Sensor, Sensors, 19, 3001-1-14 (2019)
- 5) 大西泰生, 石川敏之, 塚田啓二: ELECT を用いた ICR 処理のき裂閉口の確認, 鋼構造年次論文報告集, 第 28 巻, pp.739-746 (2020)
- 6) 大西泰生, 石川敏之, 塚田啓二: 高感度磁気非破壊検査による疲労き裂の検出の試み, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.479-487 (2021)
- 7) 大西泰生, 中谷裕太, 石川敏之, 塚田啓二: ELECT による ICR 処理したき裂の再開口・進展の評価, 鋼構造年次論文報告集, 第 29 巻, pp.604-612 (2021)
- 8) 大西泰生, 石川敏之, 塚田啓二: 高感度磁気非破壊検査による鋼製橋脚の地際下の腐食損傷の検出に関する基礎検討, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.1, No.1, pp.297-305 (2022)
- 9) 上杉潤矢, 服部晋一, 寺澤広基, 鎌田敏郎, 塚田啓二: 高感度磁気センサを用いた低周波交流磁場応答の位相検波によるコンクリート中アンカーボルトの腐食検出に関する基礎的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.21, p.343-348 (2021)

他6件

（国際学会）

- 1) M. Hayashi, et al., Crack Detection for Welded Joint with Surface Coating Using Unsaturated AC

Magnetic Flux Leakage, 2022 Join MMM-Intermag Conference, 10-14 Jan. 2022

- 2) S. Wakabayashi, et al., Optimization in the detection performance of extremely low-frequency eddy current testing for application to various shapes of corrosion defects in the actual social infrastructure, Xth International Workshop NDT in Progress, 7-9 Oct. 2019
- 3) Ohnishi, T., Ishikawa, T. and Tsukada, K.: Detection of Fatigue Crack by Extremely Low-Frequency Eddy Current Testing, Proceedings of the 11th International Symposium on Steel Structures, Korea, Session13-04, 2021.

他8件

(国内学会)

- 1) 塚田啓二, (特別講演) 磁気センサを用いた社会インフラ劣化診断技術, 日本非破壊検査協会 表面シンポジウム, 3月19日, 2021.
- 2) 大西泰生, 石川敏之, 塚田啓二: 極低周波渦電流検査による疲労き裂の検出, 土木学会第75回年次学術講演会概要集 第1部, 第75巻, I-329, 2020.
- 3) 宮本陽平, 廣畑幹人, 塚田啓二, 林実: 高感度磁気非破壊検査による溶接未溶着の検出に関する基礎的検討, 2021年度土木学会関西支部年次学術講演会, I-9, 2021.5.
- 4) 宮本陽平, 廣畑幹人, 塚田啓二, 林実: 高感度磁気非破壊検査による溶接部き裂の検出に関する基礎的検討, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, I-139, 2021.9.
- 5) 宮本陽平, 廣畑幹人, 塚田啓二, 林実: 高感度磁気非破壊検査による溶接部の未溶着およびき裂の検出実験, 鋼構造年次論文報告集第29巻, pp. 560-566, 2021. 11.

他18件

## ⑩研究成果の社会への情報発信

- 1) 展示: 岡山大学, 鉄鋼構造物の目視困難な欠陥の高感度非破壊検査, 非破壊評価総合展 出展 アカデミックコーナー, 東京ビックサイト, 7.24-26, 2019
- 2) 講演会: 石川敏之: 照明柱・標識地際部の鋼材腐食や橋き裂検出, 日本社会基盤安全技術振興協会 第5回あんしん協働強会, 2020.10.7
- 3) 委員会: 鎌田敏郎, 服部晋一: 極低周波帯域を用いたコンクリート中のアンカーボルトの高感度磁気非破壊評価, DLC/靱性モルタル委員会, 第6回全体会議, 2021.3.15, (他2回)

## ⑪研究の今後の課題・展望等

本プロジェクトにおいて当初目的としたことは達成できたが, 今後さらなる発展として以下の展望をもっている. まず「水中部の損傷の検出評価」に関しては, 今後潜水士不足や老朽施設の増大の問題から, 本プロジェクトで試みた機械アームによる陸上部からの検査方法が強く求められてくるものとする. そのためには, 計測器の部分だけでなく様々な構造物形状および環境に対応した機械装置全体の開発をしていきたい. また, 「埋設部や閉じ断面の損傷の検出評価」に関しては, 本プロジェクトでは照明柱や標識柱を対象にしたが, 道路設備には他にもコンクリートなどに埋設された鋼構造部材が数多くあり, これらの数量を

全て検査していくために、さらに小型で簡便に検査装置として改良をしていきたい。「アンカーボルトの腐食検出評価」に関しては、実構造物におけるベースプレート、ナット、座金などの附属物が本手法の腐食評価に与える影響の解析を含め、さらに配置条件の評価を行い、改善を進めていく予定である。「溶接部のき裂の検出評価」に関しては、参照信号を取得すべき健全部位の定義の明確化や、信号パターンとき裂の長さ、深さなどとの定量的な関係を把握することで、本技術がより汎用的、実用的になるものと期待される。この点が本研究の今後の課題であり、数値シミュレーションの援用などにより課題克服を目指していきたい。

## ⑫研究成果の道路行政への反映

「水中部の損傷の検出評価」および「埋設部や閉じ断面の損傷の検出評価」に関しては研究開発スケジュールの通りに、性能カタログ申請に対する準備ができたので、登録を進め、コンサルタンツなど業界にメリットをアピールして公共設備の検査手法として標準化を図っていきたい。「溶接部のき裂検出評価」に関しては、本技術の適用性が検証できているので、実際の点検業務への利用が想定される。また、点検業務に本技術を利用するケースを蓄積することでデータを蓄積し、信号パターンとき裂の関係に関する情報を収集することで、本技術の高精度化に資する知見が得られると考える。

## ⑬自己評価

研究目的に対して100%達成できたと考える。特に磁気センサを用いた極低周波での磁気スペクトルを用いた検査手法は、世界的にオリジナルな手法である。また、オリジナルだけでなく、今までの鉄鋼材での検知方法で問題になっていた磁化特性のバラツキの影響を低減したので、高精度の板厚、き裂等の非破壊検査を実現できたと考える。水中の鉄鋼構造物の腐食減肉や、道路付帯物の地際下腐食減肉の検査は、定期検査として用いることができる段階まで達成している所以、完成度は高いと考える。また、アンカーボルトの腐食検査では全く新規な方法を提案できたので、今後の大きな展開ができると考える。また、溶接部のき裂検査では、理解しやすい指標を提示することで汎用性の高い検査方法を確立することができたので、簡便なき裂検査法として実用展開できると考える。これら各テーマでの研究開発成果は、実利用への道も開くことができたので、研究費としては見合うだけの成果を上げることができたと考える。しかし、もう少し予算があれば、装置のハンディ化等の使い勝手の点での開発もできたかもしれないと思うがこれは次のフェーズとも考える。