

電磁石式漏洩磁束法による小型 PC 鋼材破断検査機の開発

Development of Compact PC Steel Rupture Inspection Device based on Magnetic Flux Leakage Method and using Electromagnet for Magnetization

京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻・インフラ先端技術産学共同講座
特定助教 小椋 紀彦

(研究計画ないし研究手法の概略)

本研究では、狭隘部でも検査可能な小型の漏洩磁束法（以下、MFL）による PC 鋼材の破断検査機を開発した。MFL は、鋼材が強磁性体である特性を利用し、鋼材を磁石で磁化させた後、漏洩した磁束を検出することにより、非破壊で鋼材の破断の有無を調査する方法である。MFL 検査機は磁石と磁場センサの2つの主要部分から構成されており、センサからの信号は外部記録器に記録される。

MFL の測定方法は、専用の磁石ユニットで PC 鋼材を磁化し、磁場センサでコンクリート表面の磁束密度を測定する。これにより、破断箇所近くからの漏洩磁束を検知し、磁束密度分布の波形から PC 鋼材の破断の有無を判定する。破断位置では磁場が強くなるため、磁束密度分布の波形にはピークや S 字形が現れる（図 1）。

本研究で開発した検査機の主な目的は、ダブルックバンド橋の上部工と橋台を繋ぐ鉛直 PC 鋼材の破断調査である。その際、上部工と下部工との間の空間が狭い（図 2）ため、従来の非破壊検査機では調査が困難であり、この状況に特化した検査機が必要となる。

検査機の特徴として、電磁石を用いることでの小型化が挙げられる。電磁石の設計のため、FEM 解析を用いてモデルを作成し、電磁石のパラメータ（形式、寸法、コイルの巻き数、鉄芯の材料）を選定した。電磁石の小型化に伴い、その磁場が弱まることが予想されるため、破断による磁場の変化を検出できるよう、より高精度のセンサが必要となる。本研究では3種類のホールセンサを比較検討し、最適なセンサを選定した。最後に、試作機を作製し、供試体で確認計測を行った。本研究の流れを図 3 に示す。

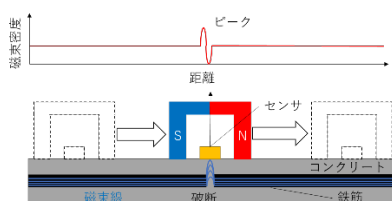


図 1 漏洩磁束の原理

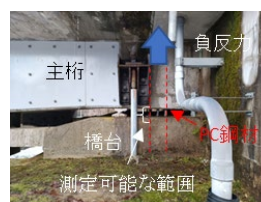


図 2 ドブルックバンド橋の
上部工と下部工との間の測
定可能な範囲

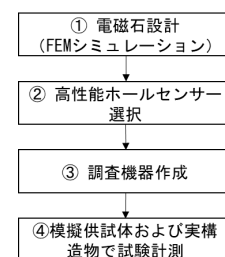


図 3 本研究の流れ

(実験調査によって得られた新しい知見)

①小型電磁石の開発

ダブルックバンド橋の鉛直 PC 鋼材破断調査の実態を把握するため、既設のダブルックバンド橋で電磁石式の磁場調査機器を使用して試験計測を行った。その結果、上部工と橋台と

の間の空間は 150mm であることが確認され、試験計測に使用した電磁石では磁化できないことが判明した(図 4)。そのため、設計時には電磁石の寸法を最大 50mm までとした。なお、この寸法では U 字型の電磁石の実現が困難であるため、ソレノイド型の電磁石を採用することとした。



図 4 既設のダブルックバンド橋での電磁石式の磁場調査機器の計測

小型電磁石の設計には、FEMM という 2 次元有限要素静磁気解析ソフトウェアを使用した。検討する電磁石の寸法を 50mm とし、ケースの寸法を踏まえた上で、電磁石の主要部分であるコイルの寸法を 45mm に設定した。更に、コイルと鉄芯の形状に合わせて PEW0.9mm の銅線を使用し、電磁石の磁場を強くするため、コイル巻き数を 520 巻数(機器の最大巻数)とした。

鉄芯については、低炭素鋼、純鉄、コバルト鉄合金、ケイ素鋼を解析モデル上で比較検討した。モデル条件としては、PEW0.9mm の銅線 (AWG18 相当) を用いたコイル (巻き数 520)、鉄芯の直径を 25mm、コイルの直径を 45mm、コイルの電流を 10A とし、ソレノイド周りには空気の空間を設け、無限境界条件を設定した。評価は、ソレノイド下面から 1mm 離れた位置での最大漏洩磁束密度 B の垂直方向の成分で行った。比較した結果、鉄芯の材料による B の変化の差はどれも同程度であった。そのため、経済性を考慮して低炭素鋼を鉄芯材料として採用した。FEM モデルと材料の比較結果を図 5 に示す。

以上の結果より、小型電磁石の設計としては、ソレノイド型の電磁石、コイルは PEW0.9mm 銅線で巻き数 520、鉄芯は低炭素鋼を使用し、寸法は直径 45mm、高さ 45mm、コイル電流は 10A とした。

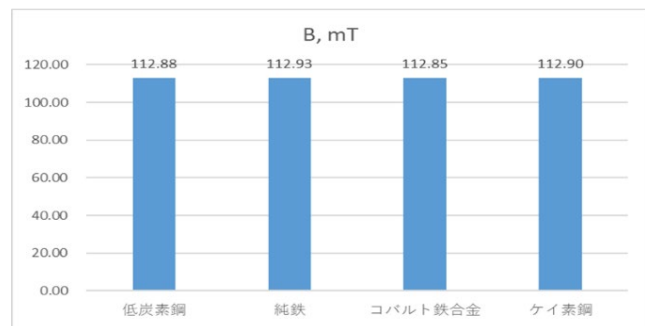
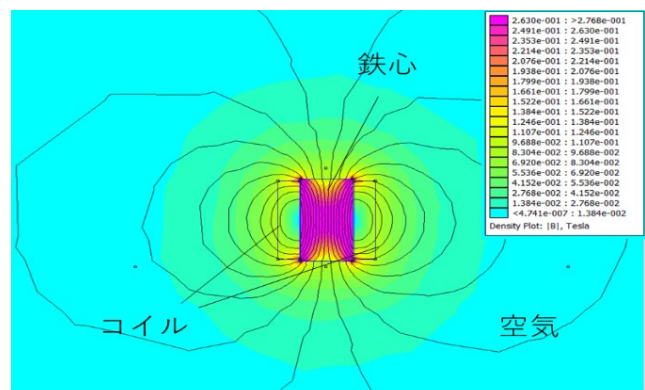


図 5 FEM モデルと鉄芯の材料比較の結果

②高性能ホールセンサの選択

本研究では、PC 鋼材の破断検出の可能性を高める目的で高性能ホールセンサを利用した。センサは Allegro MicroSystems 社製の A1324 (アメリカ)、FW Bell 社製の GH701 (アメリカ)、旭化成社製の EQ730L (日本) の 3 種類を選択し、比較検討を行った。各センサをそれぞれ基盤に取付けた後ケースに格納し、距離 5cm 離れた位置に棒状の永久磁石を置き、磁石がある場合とない場合との信号の差を感度として比較した。比較の結果、旭化成製

EQ730L のセンサが最も感度が高いことが確認された。ホールセンサの写真と比較検討の結果を図 6 に示す。

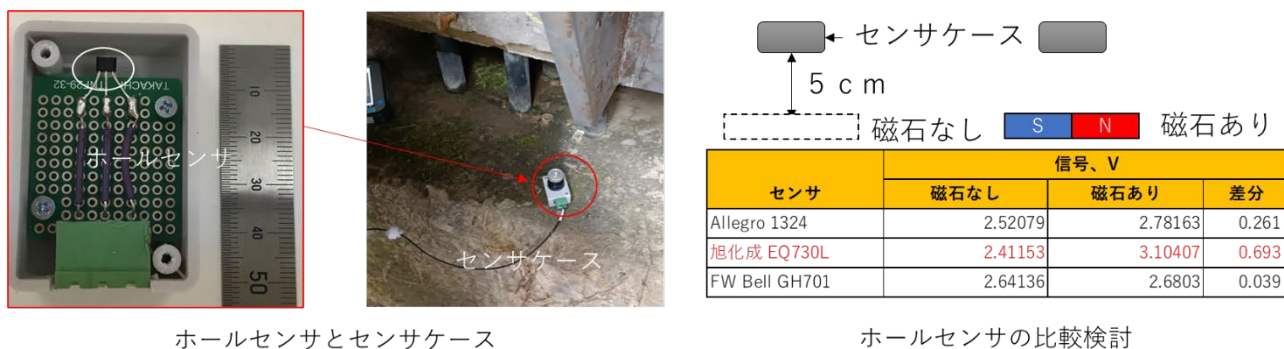


図 6 FEM ホールセンサの写真と比較検討の結果

③調査機器作製

これまでに得られた電磁石の各パラメータを使用し、試作機を作製した。鉄芯には SS400 の丸鋼を使用し、コイルドラムは 3D プリンターで作製した。PEW0.9mm の銅線を使用し、コイルの巻数は 520 巻数とした。小型電磁石のドラムとケースも 3D プリンターで製作した。ソレノイドは動作中に熱を発生するため、150°C までの耐熱性があるナイロン炭素繊維フィラメントを使用した材料でコイルドラムとケースを作製した。なお、旭化成 EQ730L のセンサは汎用ケース内に設置した。

FEM シミュレーションでは、小型電磁石の磁束密度は約 114mT であった。試作機の磁束密度は約 125mT であり、FEM の結果と同程度の値が得られた。なお、試作機の磁束密度は、日本電磁測器製の磁束密度計 GV-400A を使用して測定を行った。

小型電磁石の試作機を図 7 に示す。

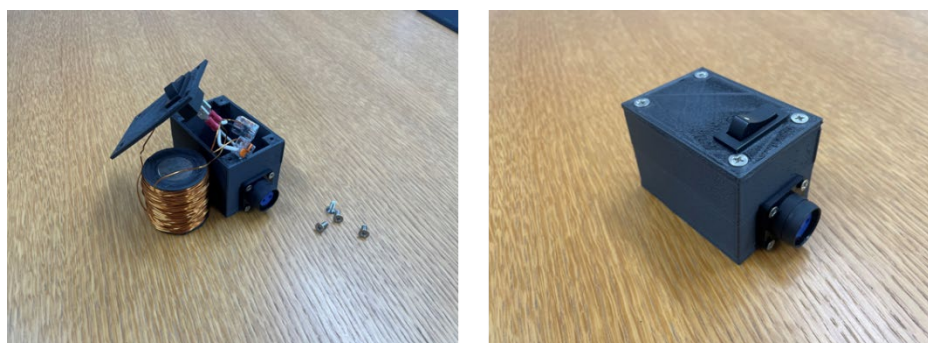


図 7 小型電磁石の試作機

④模擬供試体での試験計測

ダブルックバンド橋の上部工と橋台を繋ぐ鉛直 PC 鋼材の状況を模擬するために、模擬供試体を作製した。模擬供試体のフレームは木材を使用した。PC 鋼棒の模擬は、直径 25mm の丸鋼を使用した。また実際のダブルックバンド橋と同様に、鋼棒はゴムで保護し、健全な鋼棒と破断がある鋼棒の 2 ケースを模擬した。

計測は狭隙空間を考慮して 150mm の範囲で実施することとし、開発した小型電磁石を走行させて磁化し、その後センサボックスを走行させ磁場を計測した。模擬供試体の概要と試験計測の結果を図 8 に示す。

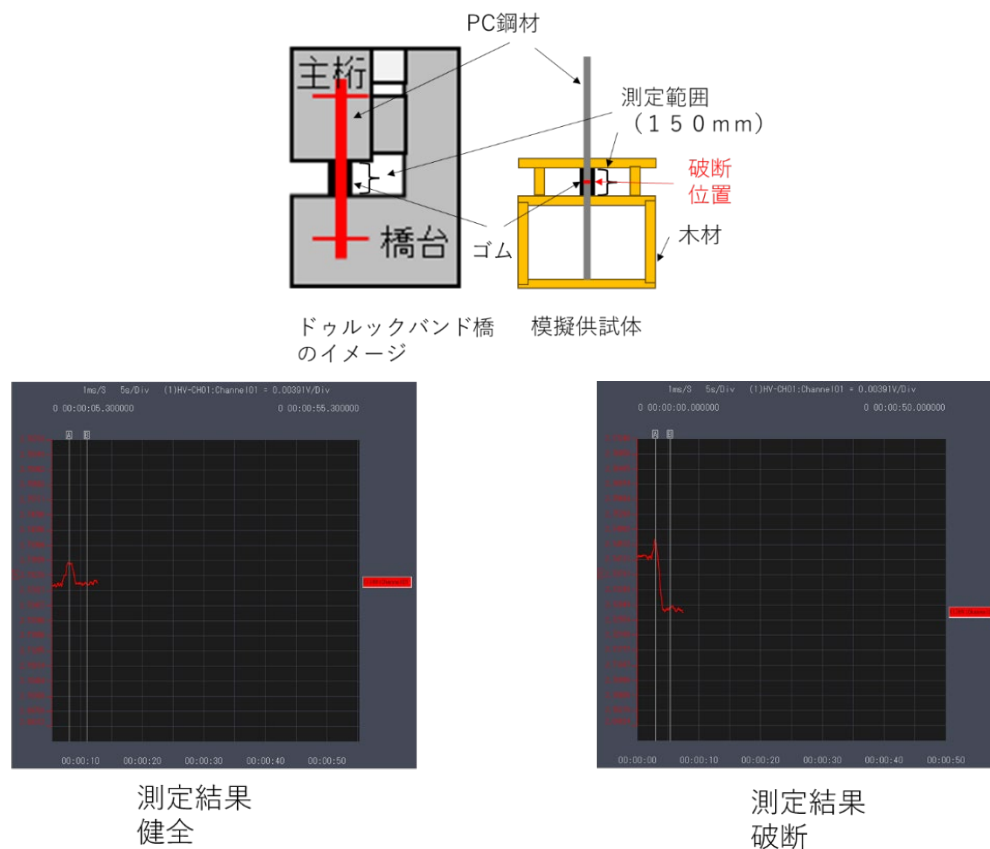


図 8 模倣供試体の概要と試験計測の結果

模倣供試体で計測を行った結果、丸鋼が健全なケースでは、磁束密度波形は小さな単峰性が観察されているのに対し、破断がある場合では、急激な低下を伴う波形形状を示すことが確認された。健全なケースと破断のケースとの差は明らかであり、開発した小型電磁石と高性能ホールセンサを使用することで、ダブルトラック橋の上部工と橋台を繋ぐ鉛直 PC 鋼材の破断検出に適用できる可能性が示された。

まとめ

本研究では、ダブルトラック橋の上部工と橋台を繋ぐ鉛直 PC 鋼材の破断検出を目的とした漏洩磁束法の検査機器の開発を行った。小型電磁石の設計、高性能ホールセンサの選定及び試作機の作製を行い、作製した機器による試験的な計測を通じて PC 鋼材の破断検出の可能性を確認した。今後は、本研究で開発した機器を用いて実橋での確認試験を重ね、検査機器の完成度を高めていきたいと考えている。

(発表論文)

1. 小椋紀彦, サグラジャンアルトゥル, 野上翔平, 横山勇氣, 塩谷智基: 電磁石式漏洩磁束法による小型 PC 鋼材破断検査機の開発, 土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, CS9-04, 2023