

論文 漏洩磁束法で取得された波形に基づく PC 鋼材破断に対する自動判別技術の構築

手嶋 克智*1・三輪 国大*2・藤本 悠星*3・岡崎 慎一郎*4

要旨：PC 鋼材の破断の有無を非破壊にて適切に判断することが求められている。本研究では、3 軸磁気計測装置を用いた漏洩磁束法により、コンクリート内部の鋼材が破断した際の磁束波形の変化の特徴を自動で捉え、破断の有無を判別するモデルを構築した。PC 鋼材の破断が無い場合において、スターラップが存在する箇所における波形の特徴を参照波形とした自己相関から破断箇所の特特定を行うアルゴリズムを開発し精度検証を行った。さらに、奥行き方向の波形データに対して直行する 2 方向で微分を行った 2 次元画像によるパターンマッチングアルゴリズムにより、判別精度が大きく向上することを確認した。

キーワード：漏洩磁束法, 非破壊検査, 機械学習, パターンマッチング

1. はじめに

塩害や中性化等の要因で鉄筋コンクリート構造物内部の鋼材が腐食すると、その破断のリスクが生じ、構造性能を大きく損なうことが懸念される。内部鋼材の破断状況を非破壊で確認する方法として、一般に X 線透過撮影法¹⁾、漏洩磁束法^{2,3)}等が挙げられる。

X 線透過撮影法は、コンクリート内部を実体に近い状態で確認でき、透過写真によって破断の有無を容易に判別できる一方、放射線防護のための安全管理上の制約と、また検査資材の準備および検査現場への装置配置にも制約があるため、極めて高コストな計測となっている。

漏洩磁束法は、内部鋼材が強磁性体であることを利用し、コンクリート表面から永久磁石で内部鋼材を着磁させ、その後測定された磁束密度の波形から鋼材破断箇所を検知するものである。鋼材破断箇所における波形による位置の特定に一定の知識と経験を要するものの、取り扱いが容易で、人体への影響がない本手法は広く普及しつつある。この一方で、構造物の診断技術者が不足する現状において、磁束密度に関する波形から破断の有無の判別を自動化することが強く求められている。

本研究は、漏洩磁束法に基づき 3 軸方向を一度に計測可能な磁気計測装置で得られた波形から、鋼材の破断の有無を自動的に判別する手法を提案するものである。

2. 波形の取得法

2.1 計測デバイスと計測原理

(1) 計測デバイス

本研究ではコニカミノルタ社製の 3 軸磁気計測装置を使用する(図 - 1 参照)。本機器は、長軸方向 54cm に

1cm 間隔、短軸方向 16cm に 4cm 間隔の 3 軸磁気センサが上下 2 段に内蔵されている(図 - 2 参照)。この装置を用いて面的な磁束密度分布を計測した。

(2) 計測原理

漏洩磁束法の計測は、まず強力な永久磁石をコンクリート表面に軽く押し当てた状態を維持しつつ、幾度か動かすことで内部の鋼材を着磁させる。本機器では、S 極をコンクリート表面に押し当て、計測器の原点から図 - 1 の X 軸方向に永久磁石を動かす。鋼材破断がない場合、磁石を移動させた範囲の両端がそれぞれ S 極と N 極に分極する一方で、鋼材破断が生じた場合は破断箇所の左右に N 極と S 極が同時に生じる。本手法は、これら



図 - 1 3 軸磁気計測装置の外観

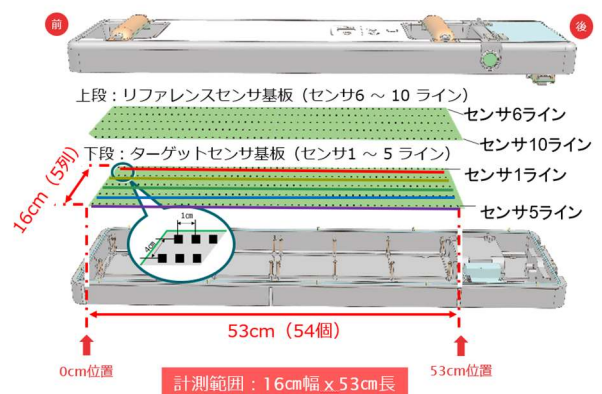


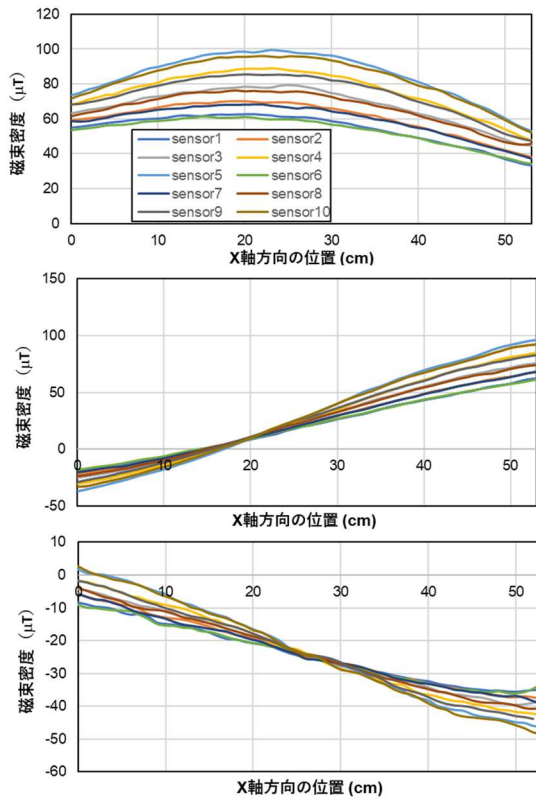
図 - 2 3 軸磁気計測装置内のセンサ配置

*1 コニカミノルタ(株) AI センシング開発部 修士(工学) (正会員)

*2 コニカミノルタ(株) AI センシング開発部

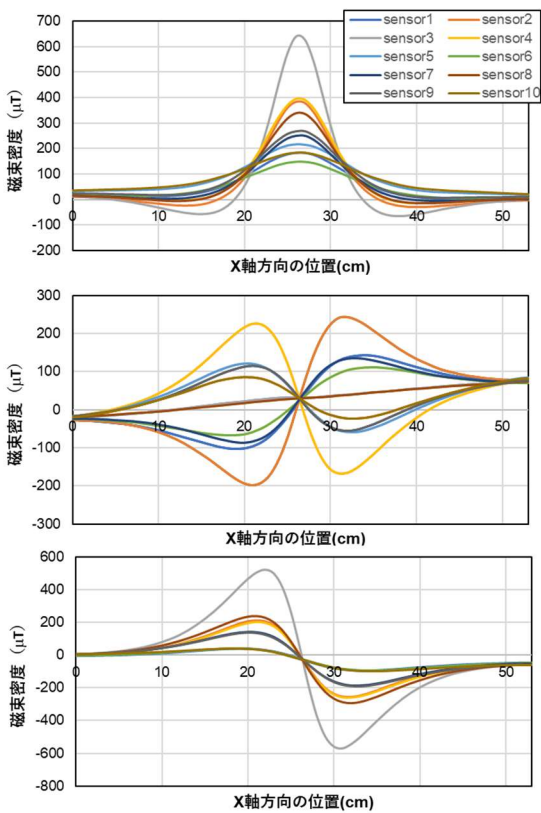
*3 (株)KandaQuantum 修士(物理学)

*4 香川大学准教授 創造工学部 博士(工学) (正会員)



(上：X方向，中：Y方向，下：Z方向)

図-3 破断が生じていないケースにおける波形



(上：X方向，中：Y方向，下：Z方向)

図-4 鋼材が破断したケースにおける波形

の波形の相違から鋼材の破断検知を行うものである。図-3に破断のないPC鋼材1本に対する3軸方向それぞれ

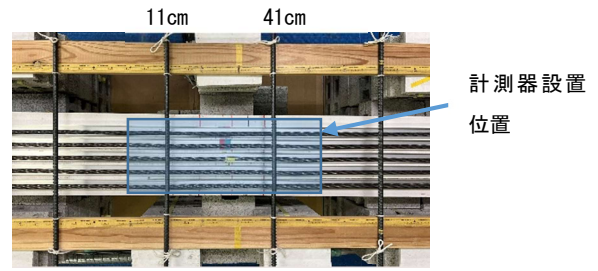


写真-1 中空試験体の外観

れの波形を、図-4に破断のある場合におけるそれらの波形を示す。使用したPC鋼材の種類はSWPR7Bの7本より、径は12.7mmのもので、かぶりは5cm、破断の離隔は5mmで実施した。破断が生じていない場合には、波形の挙動が概ね単調的である一方、破断が生じている場合には、X軸方向に1つの極大値、Y軸方向には破断箇所の上側のセンサと下側のセンサによる波形が交差(図-2中のセンサ3下に破断がある場合、センサ2とセンサ4の波形同士の交差)、Z軸方向には1つの極大と極小が検知されている。本計測結果は、極めて単純な系におけるものであり、この2種類の図の相違を容易に判別可能であるが、スターラップが存在する場合や、PC鋼材が複数本存在する場合には、それらの影響がノイズとなり、診断結果に影響を与えることに留意する必要がある。

3. スターラップを有する系における自動判別

3.1 試験体の概要と測定波形の特徴

スターラップを有する系においてPC鋼材の破断が波形に与える特徴を把握するため、コンクリートを用いないPC中空モデル試験体を対象とした試験を実施した。コンクリートと空気は比透磁率が共に1であるため、磁気としては等価とみなした。写真-1に試験体の外観を示す。使用したPC鋼材の種類はSWPR7Bの7本であり、径は12.7mm、長さは2mのものを使用し、鋼材同士の間隔を4cm、かぶり5cmとした。また、スターラップはD13のものを30cm間隔で配置した。

図-5に、PC鋼材に破断が無い場合における測定波形の一例を示す。スターラップは、図中横軸における11cmと41cmの位置にある。PC鋼材のみならずスターラップへの着磁の影響があるため、X軸では1つの極小値のうちに1つの極大値が、Y軸、Z軸の波形においては磁気の1つの極大値がちょうどスターラップの位置に生じている。この波形のパターンは、図-4に示すような、破断時における波形の特徴とは異なっていることがわかる。

図-6に、PC鋼材が破断した場合における測定波形の一例を示す。なお、破断の箇所はグラフ横軸の25cmにあり、スターラップは図-5の場合と同じ位置にある。スターラップの無い波形に、図-4に示すような破断時

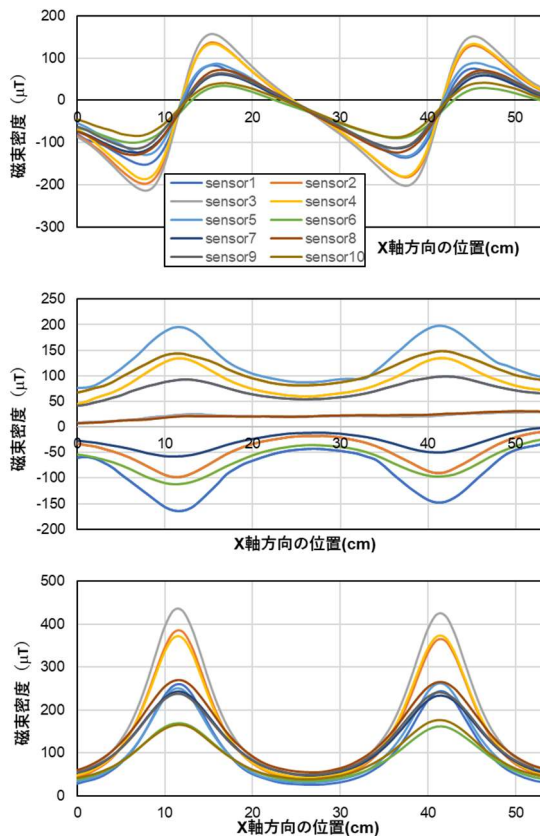


図 - 5 中空桁における PC 鋼材破断なしの波形
(上 : X 方向, 中 : Y 方向, 下 : Z 方向)

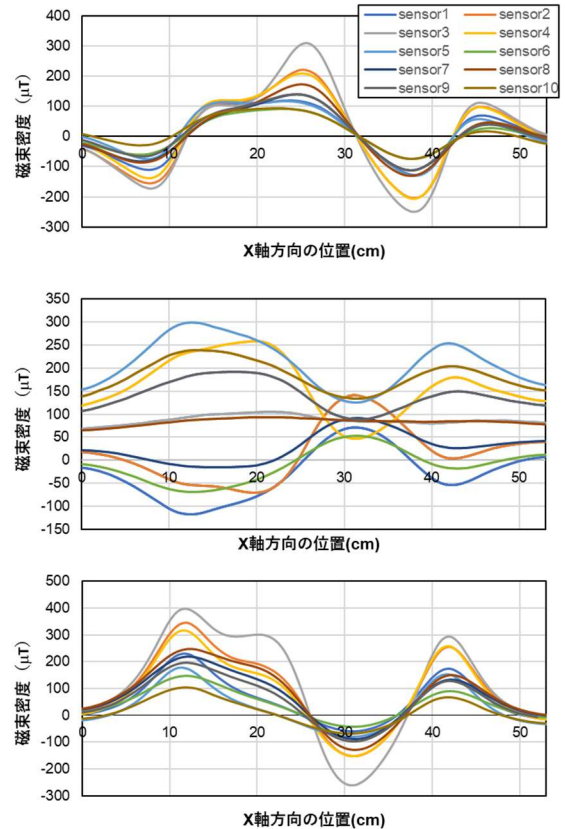


図 - 6 中空桁における PC 鋼材破断ありの波形
(上 : X 方向, 中 : Y 方向, 下 : Z 方向)

での波形を足し合わせたような波形を呈した。実際の PC 部材の状況に近い波形であり、スターラップのような連続した鋼材が Y 軸方向に沿って鋼材が存在するケースによる波形と、PC 鋼材のような、X 軸に沿った鋼材が破断したケースにおける波形のそれぞれの特徴を念頭において診断を行うことが必要であることを示唆している。

3.2 自己相関性に着目した自動判別アルゴリズム

(a) 概要

実験室の中空部材を対象に機械学習アルゴリズムを援用した自動検知手法を構築する。図 - 6 に示す波形のままでは、波形の特徴を機械学習等により機械的に抽出することが困難であり、仮に抽出できたとしても破断判別を精度高く行えないことが事前の検討より判明したため、可能な限り波形に対する前処理を施すこととした。PC 鋼材に破断が生じていない場合、図 - 5 に示すとおり、磁場の Z 軸成分においてスターラップの存在する箇所につき 1 つずつの極大値が周期的に存在することは前節での検討で判明している。また、PC 鋼材に破断が生じた場合に磁場が反転することから、グラフ上では「S」の文字を反転させたような波形が付加されることから、上記の周期性を呈する波形に対しては負の相関が生じていると言える。これらの特徴から、破断の無い場合において、スターラップの存在がもたらす周期的な波形を参照波形

とすると、その波形と同じような形状が存在することをもって自己相関性を確認すれば、例えば自己相関性が高い場合にはスターラップの箇所であると判別でき、また参照波形とは異なり負の相関がみられる場合には鋼材が破断した箇所と判別することが可能であろうと考えられ、本章ではその考え方に基いて自動判別手法を構築する。

(b) 自己相関処理

磁場の Z 軸成分に対して、自己相関処理を適用したコレログラム⁴⁾を計算した。コレログラムとは、図 - 5 の Z 成分のような周期性のあるデータに対して、1 つ目の起伏を元データである参照波形とした場合において、元データ位置をずらしたデータとの相関係数を計算し、1 次元の棒グラフで表現したものである。

図 - 6 に対して作成したコレログラムの一例を図 - 7 に示す。横軸の値は初期の起伏波形に対して、X 軸方向にずらした量を示し、縦軸は相関係数を示す。定義上、図 - 7 の横軸が 0 の場合、参照波形と一致し相関係数は必ず 1.0 になるため、この周辺の正の相関係数を呈する領域は考慮しない。このケースの場合、縦軸の値がはじめて 0 以下となる、X 軸方向の位置が 10cm 以上に着目した。このドメインにおいて相関係数が最小 (Valley 値) および最大 (Peak 値) となる座標を算出する。最後に、X 軸方向の位置と最大値と最大値の比である

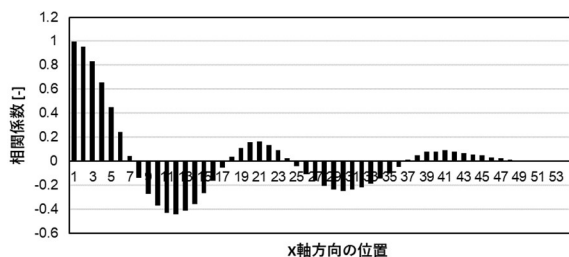


図 - 7 中空桁におけるPC 鋼材破断ありのコレログラム

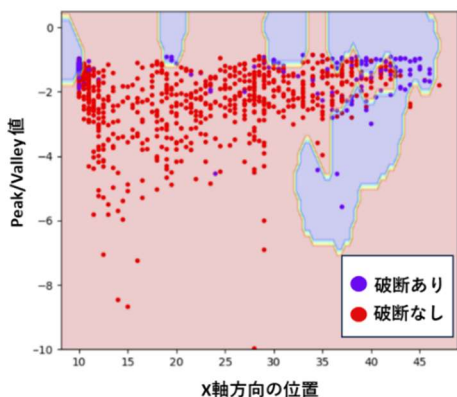


図 - 8 SVM により構築された判別モデル

表-1 中空部材における結果

	破断あり(予測)	破断なし(予測)
破断あり(実際)	65	28
破断なし(実際)	27	163

Accuracy	Precision	Recall
正解率	適合率	再現率
80.6%	70.7%	69.8%

Peak/Valley 値に関する 2 次元プロット空間を可視化し (図 - 8), そのプロット群に対して機械学習アルゴリズムを用いて判別モデルを構築する。なお 1 本の直線によって、破断のプロットと破断なしのプロットを分離できるのであれば、線形モデルによる判別分析を行うが、今回は直線では十分に分割できなかつたため、カーネル法によりプロット群を高次元の特徴空間に写像し、SVM⁵⁾ (サポートベクターマシン) による判別を行った。また、破断した鋼材および破断していない鋼材における波形、計 848 における波形を機械学習させた。なお、機械学習モデルの性能検証には 5 分割交差検証を採用した。

図 - 8 に判別モデルによる算定結果を示す。図のプロットは実際に破断がある場合および破断がない場合を示しており、プロット以外の赤色領域と紫色領域は SVM により構築されたモデルであり、赤色領域は破断なしと判別される領域で、紫色領域は破断ありと判別される領域であって、今後新たに計測値がプロットされた場合には、この領域に含まれる色によって破断の有無を判別する。

また、表-1 に、図 - 8 の結果を表に纏めたものを示す。表中の数字は計測データ数を示しており、破断ありと予測したのは 92 データ、破断なしと予測したのは 191 データであった。太字の数字は正解を示すものであり、破断ありと正解したのは 65 データ、破断なしと正解したのは 163 であった。モデルの正解率 (全数に対する太字数字の割合) は約 81% で、適合率 (破断ありと予測された数に対する正解の割合) は約 71%、再現率 (実際に破断があったケースに対して破断ありと予測できた数の割合) は約 70% と概ね良好な予測精度であった。

4. PC 実桁に対するモデル検証

4.1 対象橋梁の概要

PC 実橋梁に対する計測を行うとともに、今回、中空桁を例題として構築したモデルによる精度検証を行った。表-2 に、今回対象としたプレテンション方式の実橋梁の一覧を示す。また、写真-2 に計測を行った実橋梁のうち、切り出しを行い桁のみ設置した表中の橋梁 C を示す⁶⁾。また、漏洩磁束法により波形を取得した後、手練の技術者によって破断の有無を判別し、その結果を以降の検討における正解とした。判別には破断が生じている場合の各軸の特徴 (X 軸方向に極大値をとり、Y 軸方向に破断箇所の上側と下側のセンサによる波形が交差し、Z 軸方向に 1 つの極大値と極小値が発生するといった特徴) が現れているか分析を行い判定している。なお、技術者による判別結果の妥当性は、PC 実橋梁のうち、各橋梁の数か所におけるかぶりコンクリートをはつり、破断を確認したことで検証されている。

4.2 PC 実橋梁における取得波形

PC 鋼材が破断したケースにおける波形の一例を図 - 9 に示す (C 橋梁で計測)。なお、破断箇所は、概ね 13cm (奥行方向でセンサ 4 に該当する箇所) 付近と 48cm 付近 (奥行方向でセンサ 1 に該当する箇所) の 2 箇所であった。中空部材の結果と異なり、スターラップの存在 (22cm, 45cm 付近) および破断した PC 鋼材の影響のみならず、コンクリートの存在による磁束密度に対するノイズの影響や、鋼材に生じた腐食生成物に由来する磁場の影響等で、波形に乱れが生じた。

4.3 機械学習モデルによる判別結果

表-3 に、表-2 に示した PC 実橋梁を対象に漏洩磁束法によって得られた波形による破断の判別結果と、計測後にかぶりののはつりを行い破断の有無を確認し、これらの結果を比較したものを示す。モデルの正解率は約 60% であり、中空桁での検証時よりも精度が低下した。また、適合率は約 100%、再現率は約 51% となっており、適合率はかなりの高精度ではあったが、特に再現率が低く、この場合には実際に破断が生じていたにも関わらず、判

表-2 対象橋梁

名称	所在県	橋梁形式	架設年	橋長(m)	鋼材種類	かぶり(mm)
A	広島	PC単純床版	1967	8.65	Φ2.9 2本	30
B	富山	T桁	1972	305	7本より 12.7mm	45
C	沖縄	単純PC I桁	1982	10.4	Φ2.9 2本	30
D	新潟	PC単純床版	1973	30.1	7本より 10.8mm	40



写真-2 PC実橋梁から切り出した桁部材

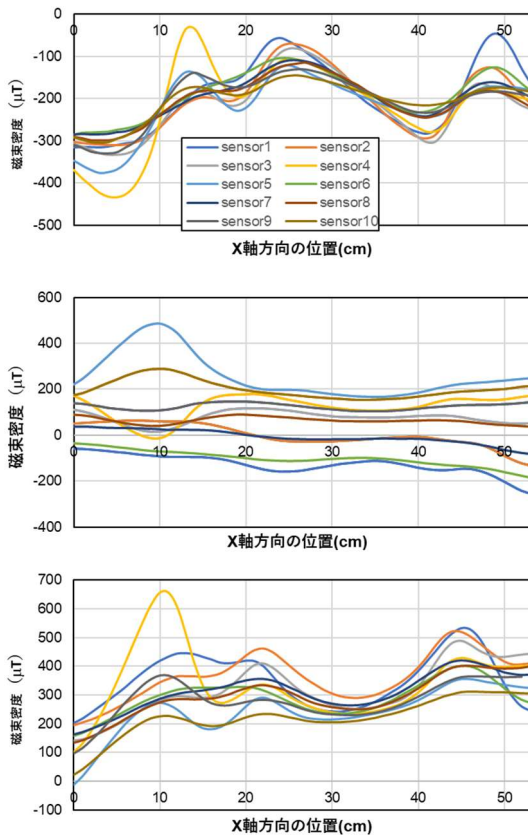


図-9 PC実橋梁の切り出し桁における波形
(上: X方向, 中: Y方向, 下: Z方向)

表-3 PC実部材における結果

	破断あり(予測)	破断なし(予測)
破断あり(実際)	768	732
破断なし(実際)	2	328

正解率	適合率	再現率
59.9%	99.7%	51.2%

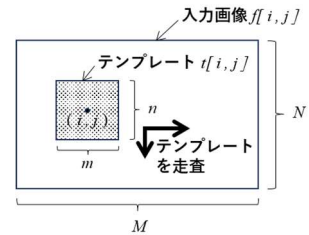


図-10 テンプレートマッチング工程の概念図

別モデルでは破断なしと診断されるリスクが大きいことを意味し、実務上は現状使用が限定されると思われる。今後、実PC橋梁における波形も適切に学習することで、判別精度の向上をはかりたい。

5. テンプレートマッチングによる判別モデルの構築

5.1 概要

前章までの検討では、各方向の一次元方向の磁束密度の波形から破断の有無を判別したが、多次元的な波形の特徴を一度に勘案することも重要である。そこで今回、Z軸成分の波形をX軸およびY軸成分で微分した2次元画像に対し、事前に用意した破断時の両画像に対する類似度から、破断の有無を自動判別するテンプレートマッチングと呼ばれる手法を利用した。具体的には、磁気センサで計測されたZ軸のデータをグレースケールに画像化し、破断画像とテンプレートマッチングさせ、その類似度より破断の有無を類推するものである。

5.2 テンプレートマッチングアルゴリズム⁷⁾

テンプレートマッチングでは、あらかじめ用意したテンプレートと呼ばれる、診断しようとする画像に比べてサイズが小さい画像を用意し、診断しようとする画像の中からテンプレートに一致する箇所を探索することを行う。つまり、サイズ $M \times N$ (M および N は自然数)の入力画像 $f[i, j]$ の中から、サイズが $m \times n$ (通常は $m < M$ かつ $n < N$, m および n は自然数)のテンプレート $t[i, j]$ の画像に一致する位置を検出する方法である。図-10に示すようにテンプレートの中心を入力画像のある点 (i, j) に置き、点 (i, j) をラスタ走査と呼ばれる、座標の成分 i もしくは j の一方を固定して一方を走査させる方法をさせながら、重なっている局所領域の類似度を計算し、この値が最大になる位置を決定する。類似度 R の計算には、以下の相関係数の算出に用いられるものを用いる。

$$R = \frac{\sum_{l=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{m-1} (f[i - \frac{m}{2} + k, j - \frac{n}{2} + l] - \bar{f})(t[l, k] - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{l=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{m-1} (f[i - \frac{m}{2} + k, j - \frac{n}{2} + l] - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{l=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{m-1} (t[l, k] - \bar{t})^2}} \quad (1)$$

各文字の直上に付随した「-」の記号は平均値を意味する。

5.3 前処理について

53cm×16cmのエリアで計測したZ軸方向の波形に対



図 - 11 鋼材破断箇所テンプレート (拡大図)

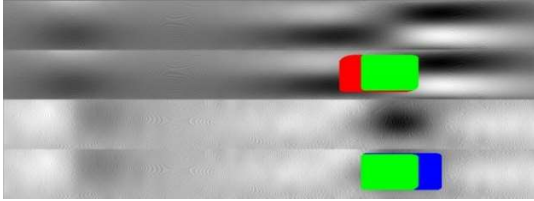


図 - 12 テンプレートマッチングを実施した例

(上段 2 段は長軸方向に、下段 2 段は短軸方向に微分した画像。上下段の 2 段は同一の画像。赤：長軸方向が一致、青：短軸方向が一致、緑：長短両軸方向で一致)

して、長軸である X 軸方向と短軸である Y 軸方向の変化量の可視化のため、センサが捉える磁界の Z 軸成分を X と Y 軸成分を各々微分し、2 次元化された画像を 2 種類作成する。なお、センサの数が少なく解像度が低いため 20 倍に線形補完しアップスケーリングさせた。この画像を 8bit に正規化し、 $dZ(z)/dx$ と、 $dZ(z)/dy$ の値をグレースケール画像として 2 枚生成する。ここに、 $Z(z)$ は Z 方向における磁束密度の値、 x, y, z は各軸の方向である。

5.4 判別処理

中空部材での鋼材破断箇所を測定し、破断箇所を含む画像に対して前節に示した前処理を施し、破断箇所の周辺を切り取って画像化してテンプレートとしたものを図 - 11 に示す。次にこのテンプレートを、判別対象画像に対してラスタ走査させることで類似度をそれぞれ算出し、閾値を両画像ともに超過した場合を破断として判別することとした。図 - 12 に、実際に PC 実橋梁を測定した波形から構築された画像に対して、テンプレートを走査させ、事前の感度分析の結果、X 軸方向で R が 0.65 以上、Y 軸方向で R が 0.90 以上と判別された箇所を図示したものの一例を示す。今回は、長軸方向と短軸方向で上述の閾値を超過した箇所を破断箇所と判断することとした。

5.5 判別結果

表-4 に、表-2 に示した PC 実橋梁 (スターラップを含む箇所を計測) を対象に漏洩磁束法に関する波形の 2 次元画像化に対する破断の判別結果と、実際の破断の有無との結果の比較を示す。モデルの正解率は約 91%、適合率は約 98%、再現率は約 74%であり、自己相関に関する判別モデルと比較していずれも高い精度での診断できている。再現率が若干低く、破断箇所の見逃しの可能性が 4 箇所に 1 箇所程度生じるリスクは生じるが、今後可能な限り再現率を向上させたモデルの構築することに加え、類似度 R が閾値付近である診断結果に対しては技術者による診断結果を追加で実施するなどの対応を加えたい。

表-4 PC 実部材における結果

	破断あり (予測)	破断なし (予測)
破断あり (実際)	525	182
破断なし (実際)	13	1520

正解率	適合率	再現率
91.3%	97.6%	74.3%

6. まとめ

本研究では、3 軸磁気計測装置を用いた漏洩磁束法により、コンクリート内部の鋼材が破断した際の磁束波形の変化の特徴を自動で捉え、破断の有無を判別する自動判別技術を構築した。PC 鋼材の破断が無い場合において、スターラップが存在する箇所における波形の特徴を参照波形とした自己相関から破断箇所の特定を行うアルゴリズムを開発し精度検証を行った。さらに、奥行き方向のデータに対して直行する 2 方向で微分を行った 2 次元画像によるパターンマッチングアルゴリズムにより、判別精度が大きく向上することを確認した。

謝辞

本研究は国土交通省・道路政策の質の向上に資する技術研究開発「超小型赤外分光カメラと磁気センシングの融合によるコンクリート建造物の完全非破壊による劣化診断」(研究代表者：岡崎慎一郎) の支援を得て実施された。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'23[基礎編]，pp.164-172，2023
- 2) 長谷俊彦，萩原裕樹，白石浩造，溝渕利明：漏洩磁束法を用いた道路用床版の PC 鋼材非破壊検査の車両走行計測に関する研究，土木学会論文集 A1, Vol.78, No.1, pp.139-155，2022
- 3) 手嶋克智：磁気を利用した非破壊検査機器によるプレテン桁の PC 鋼材破断位置推定，検査技術，2023 年 9 月号，2023
- 4) 高瀬信忠：時系列論から見たわが国水文諸量の性格について，土木学会論文集，Vol.43, pp.38-42，1957
- 5) Bishop, C. M. : Pattern Recognition and Machine Learning, Springer, 2006
- 6) 田邊優子，下里哲弘，垣花寿：3 軸磁器センサ型漏洩磁束法による PC 素線の腐食破断検知特性に関する研究，土木学会年次学術講演会講演集，2022
- 7) 酒井幸市：画像処理とパターン認識入門，森北出版，2006