

論文 漏洩磁束法を用いた PC 鋼材の局所的な緊張力評価に関する検討

寺澤 広基^{*1}・福本 晃太^{*2}・鎌田 敏郎^{*3}

要旨：永久磁石で鋼材を磁化させ、コンクリート表面で磁束密度を測定する漏洩磁束法によれば、PC 構造物内部の PC 鋼材の緊張力を評価できる可能性がある。しかし、漏洩磁束法により緊張力を評価できるメカニズムおよび局所的に緊張力が変化する場合の測定結果への影響は不明である。本研究では、PC 鋼材の緊張力が磁気ヒステリシス曲線に与える影響を把握するとともに、局所的に変化する緊張力が漏洩磁束法の測定結果に与える影響を検討した。その結果、漏洩磁束法を用いて PC 鋼材の局所的な緊張力の変化を評価できる可能性が示唆された。

キーワード：非破壊検査、漏洩磁束法、PC 鋼材、緊張力、磁気ヒステリシス曲線

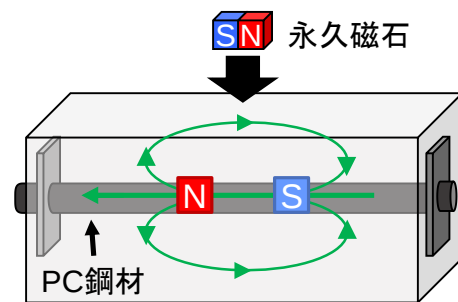
1. はじめに

近年、PC 構造物の老朽化が深刻な問題となっている。老朽化に伴う損傷の事例として、PC 鋼材の腐食およびこれに伴う鋼材破断が挙げられる。PC 鋼材が破断した場合、PC 鋼材の緊張力が減少し¹⁾、構造物の耐荷力の低下が懸念される。よって、PC 構造物を適切に維持管理する上で、PC 鋼材の緊張力を評価する手法の確立が求められている。

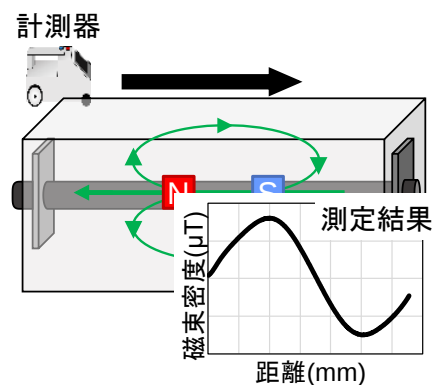
PC 構造物内部の PC 鋼材の健全性を非破壊で評価する手法に漏洩磁束法²⁾がある。図-1 のように、永久磁石を用いて強磁性体である PC 鋼材を着磁し、磁化した PC 鋼材から発生する磁界の磁束密度を測定することで、PC 鋼材の破断等の損傷を評価することができる。既往の研究³⁾では、PC 鋼材の緊張力が PC 鋼材の帯磁状況に与える影響についての検討がなされ、緊張力と漏洩磁束法での評価結果との間に良い相関関係が認められている。

しかし、漏洩磁束法で PC 鋼材の緊張力を評価するメカニズムについては未だ十分に検討されていないという課題がある。また、既往の研究では、漏洩磁束法の測定範囲において一様の緊張力が PC 鋼材に導入された条件での検討となっている。しかし、PC 鋼材の破断に伴う緊張力の変化を想定した場合、破断箇所周辺では緊張力が低下するが、破断箇所から離れると付着により緊張力が保持される。そのため、PC 鋼材の緊張力は局所的に変化している可能性がある。

そこで本研究では、漏洩磁束法を用いて PC 鋼材の緊張力を評価するメカニズムに関して緊張力によるヒステリシス曲線の変化に着目した検討を行うとともに、局所的に変化する緊張力の漏洩磁束法を用いた評価手法に関する検討を行った。



(a) 永久磁石を用いた着磁



(b) 計測器を用いた磁束密度の測定

図-1 漏洩磁束法を用いた PC 鋼材の健全度診断

2. ヒステリシス曲線に関する検討

PC 鋼棒の緊張力の大きさにより、漏洩磁束法の測定結果が変化する要因として、ヒステリシス曲線に着目した。ヒステリシス曲線とは、鋼材に与えた磁場と鋼材に生じる磁化との関係を表す。本章では、PC 鋼棒の緊張力がヒステリシス曲線に与える影響について実験的検討を行い、ヒステリシス曲線の違いが漏洩磁束法の測定結果に与える影響を明らかにするために、解析的な検討を行った。

*1 大阪大学 大学院工学研究科助教 博士(工学) (正会員)

*2 関西電力株式会社 再生可能エネルギー事業本部

*3 大阪大学 大学院工学研究科教授 博士(工学) (正会員)

2.1 実験概要

本実験では、PC 鋼棒の緊張力がヒステリシス曲線に与える影響を明らかにすることを目的とした。使用した鋼棒は、長さ 1000mm の PC 鋼棒 φ26 A 種 2 号である。無段変速が可能な油圧式の万能試験機を用いて、PC 鋼棒に緊張力を導入した。緊張力の大きさは土木学会の規準⁴⁾である緊張作業直後の緊張材の引張応力度、「 $0.85 \times$ 緊張材の降伏強度」を参考に、350kN 以下とし、緊張力 0, 50, 100, 200, および 300kN において、それぞれヒステリシス曲線の計測を行った。ヒステリシス曲線の計測方法を図-2 に示す。巻き数 300 ターンの励磁コイルに交流電流を流すことで、磁場を発生させ、PC 鋼棒を磁化させる。そして、磁場により巻き数 20 ターンの検出コイルに生じた起電力から、式(1)より磁束密度を算出し、式(2)より PC 鋼棒の磁化を算出した。

$$B = \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^t V_i \Delta t \quad (1)$$

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H \quad (2)$$

ここで、 B ：磁束密度(T)、 N ：検出コイルの巻き数、 S ：検出コイルの断面積(m^2)、 V_i ：電圧(V)、 Δt ：サンプリング間隔(s)、 t ：サンプリング数、 M ：PC 鋼棒の磁化(A/m)、 μ_0 ：真空の透磁率(H/m)、 H ：磁場(A/m)である。

2.2 実験結果

各緊張力におけるヒステリシス曲線を図-3 に示す。ここで、図-3(b)および図-3(c)はそれぞれ図-3(a)中の磁場 $H = 0$ における磁化（以下、残留磁化）および磁化の最大値が含まれる部分を拡大したものである。緊張力 0～200kN では、緊張力が大きい程、残留磁化の絶対値が大きくなった。緊張力の増加に伴い、PC 鋼棒長手方向の磁区が発達したことにより、磁化の絶対値が大きくなったと考えられる。しかしながら、300kN の磁化は 200kN と概ね同じ値を示した。緊張力が一定以上大きくなると、磁区構造が変化しなくなると考えられる。

2.3 解析概要

次に、緊張力による鋼材のヒステリシス曲線の変化が漏洩磁束法の測定結果に与える影響を明らかにするために、解析的な検討を行った。解析ソフトは「photo-MAG(ver. 7.0000105)」を使用し、有限要素法による 3 次元静磁場解析を行った。PC 鋼棒については、既往の研究⁵⁾と同様にマイナーループを含めた磁化のヒステリシス特性を考慮した。

図-3 において測定した各ヒステリシス曲線の残留磁化および磁化の最大値が、0kN の値を基準に 50kN では約 1.05 倍、100kN では約 1.1 倍、200kN では約 1.2 倍となったことから、本解析では、既往の研究⁵⁾を参考に設定した 0kN の値に上記の倍率を掛けることで、各緊張力

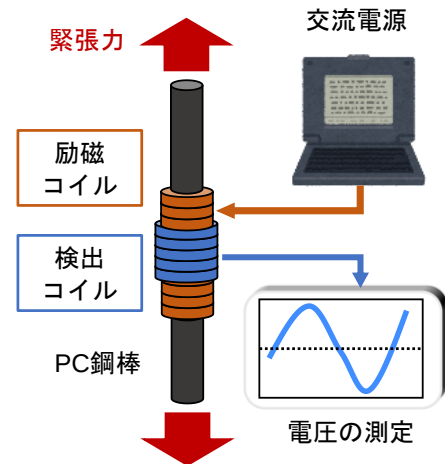
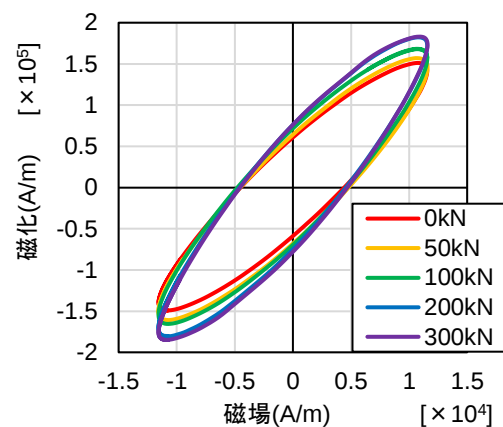
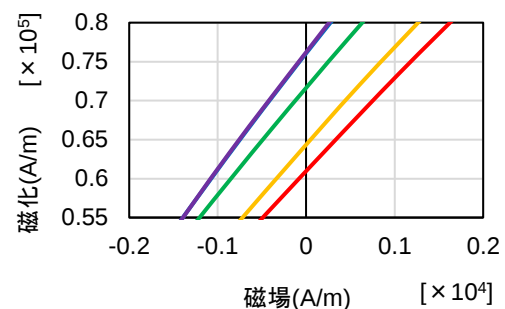


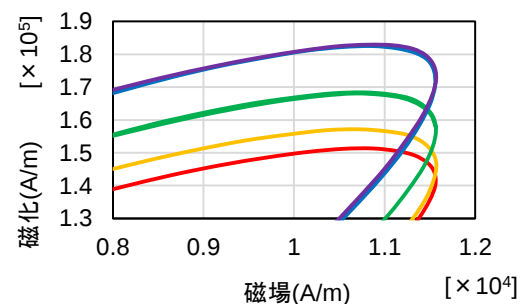
図-2 ヒステリシス曲線の測定方法



(a) 各緊張力における結果



(b) 残留磁化



(c) 磁化の最大値

図-3 ヒステリシス曲線

表-1 解析で設定した各緊張力の物性値

緊張力	0kN	50kN	100kN	200kN
残留磁化(A/m)	732000	769000	805000	879000
磁化の最大値(A/m)	1380000	1450000	1520000	1660000

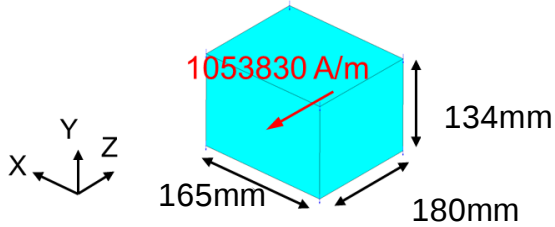


図-4 外場磁石の寸法と磁化

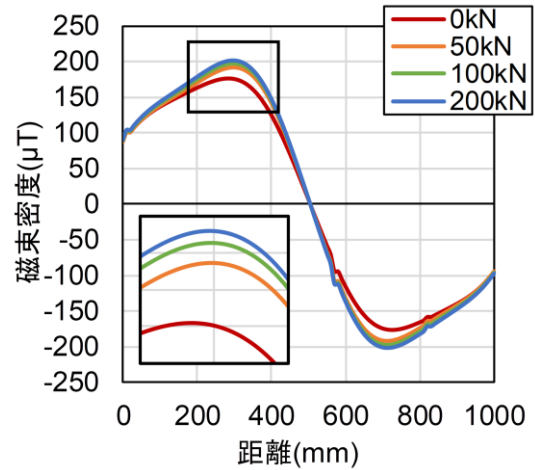


図-6 かぶり 100mm における磁束密度

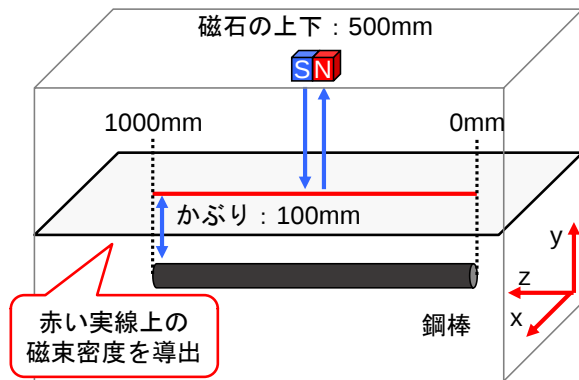


図-5 解析の概要

で異なるヒステリシス曲線を表-1のように設定した。

解析に用いた外場磁石の寸法と磁化を図-4に示す。磁化については、実験で使用する磁石による着磁を再現するため、既往の研究⁶⁾を参考にz軸方向に1053830A/mとした。解析モデルにおいてかぶりは100mmを想定し、図-5のように外場磁石を鋼棒上端からy軸方向に100mmの位置まで近づけた後、遠ざけた。その後、かぶり100mmにおけるy軸方向の磁束密度を導出した。

2.4 解析結果

各緊張力における磁束密度を図-6に示す。距離570～580の位置などでメッシュの大きさに起因すると考えられる曲線の形状の乱れは見られるものの、永久磁石による鋼棒の着磁後の測定面における磁束密度のグラフ形状を概ね再現できていることが確認できる。緊張力が大きい程、即ち設定したヒステリシス曲線の磁化の絶対値が大きい程、かぶり100mmにおけるy軸方向の磁束密度の最大値および最小値の絶対値が大きくなった。よって、緊張力による鋼材のヒステリシス曲線の変化は緊張力と漏洩磁束法の測定結果が良い相関を示す要因の1つと考えられる。



写真-1 供試体外観



(a) 磁石ユニット

(b) 磁気計測ユニット

写真-2 測定装置

3. 着磁時において局所的に異なるPC鋼材の緊張力が漏洩磁束法の測定結果に与える影響

PC構造物において、PC鋼材の破断等を想定した場合、緊張力が局所的に変化する可能性がある。本章では、漏洩磁束法を用いて、PC鋼材において局所的に異なる緊張力を評価できる可能性について検討を行った。具体的には、着磁時において局所的に異なるPC鋼材の緊張力が

着磁により付与される磁束密度に与える影響を明らかにした。

3.1 実験概要

本実験で使用した供試体の外観を写真-1 に示す。本実験で使用した供試体について、対象とする鋼材は PC 鋼棒 $\phi 26$ C 種 1 号・3000mm とした。コンクリートの寸法は縦 400×横 2000×高さ 450mm、鋼棒からコンクリート表面までのかぶり厚は 150mm とした。中央部には切り欠きを設け、鋼棒の定着具を設置できるようにした。

測定装置の外観を写真-2 に示す。測定装置は、鋼材を磁化するための永久磁石が内蔵されている磁石ユニット（写真-2 (a)）と、測定面に垂直な方向成分の磁束密度を測定する磁気計測ユニット（写真-2 (b)）の 2 つを用いた。磁石ユニットは寸法が 165mm×180mm×134mm、重量が約 8kg で、底面から 150mm 離れた位置における長手方向の磁束密度は約 7mT である。磁気計測ユニットは寸法が 140mm×230mm×125mm、重量が約 1.6kg で、測定面直下から垂直上方向の磁束密度成分を移動距離 1mm ごとに測定・記録した。

着磁および測定の概要を図-7 に示す。図中右側の定着具にセンターホールジャッキを設置し、PC 鋼棒全体に引張力を導入した。その後、供試体中央の定着具を定着させ、再度引張力を加えた。上記の手順により、PC 鋼棒において 0～1000mm の範囲よりも 1000～2000mm の範囲の緊張力を大きく設定した。本研究では目標とする緊張力として 0kN、50kN および 200kN の組合せによる 5 水準の緊張力を設定し、鋼棒両端に設置した荷重計で実際に導入した緊張力を計測した。導入した緊張力の値を表-2 に示す。緊張力導入後、着磁および測定を行った。着磁については、図-7 における 250mm と 1650mm の位置で、永久磁石の磁極の片側を、鋼棒に対して垂直に近づけた後、遠ざけた。そして、コンクリート表面における鋼棒直上位置で磁束密度の測定を行った。

3.2 実験結果

図-8 に、CASE_0-200、CASE_200、CASE_0 の測定結果を、図-9 に CASE_50-200、CASE_200、CASE_50 の測定結果を示す。ここで、凡例中の数字は荷重計の実測値を示している。いずれのグラフも供試体左端から 250mm の位置では磁石の S 極面を近づけたことにより上に凸、左端から 1650mm の位置では磁石の N 極面を近づけたことにより下に凸の形状となっている。

図-8 より、CASE_0-200 では、202kN 導入した 1000～2000mm において、測定磁束密度の絶対値が大きくなった。0～600mm では CASE_0-200 と CASE_0 の測定磁束密度が概ね一致し、1300～1900mm では CASE_0-200 と CASE_200 の測定磁束密度が概ね一致した。

図-9 より、CASE_50-200 では、203kN 導入した 1000

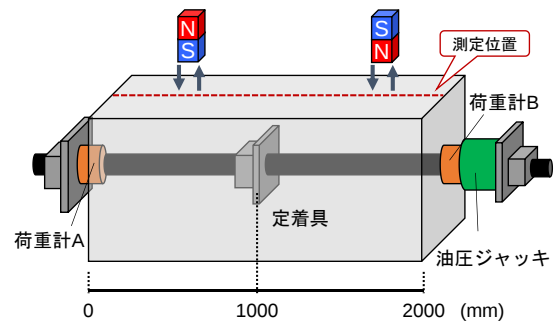


図-7 計測概要

表-2 導入した緊張力

CASE	荷重計 A (kN) 範囲: 0～1000mm	荷重計 B (kN) 範囲: 1000～2000mm
0-200	0	202
200	203	203
0	0	0
50-200	58	203
50	52	52

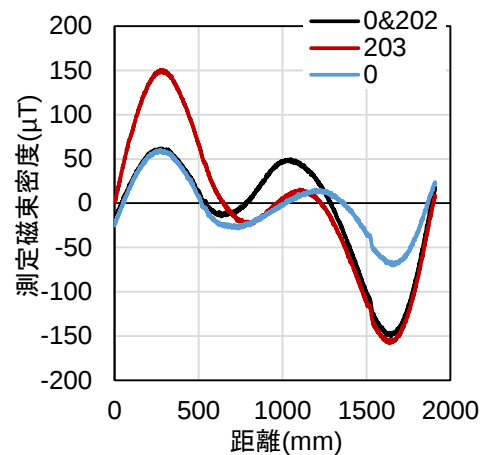


図-8 CASE_0-200・200・0の測定結果一例

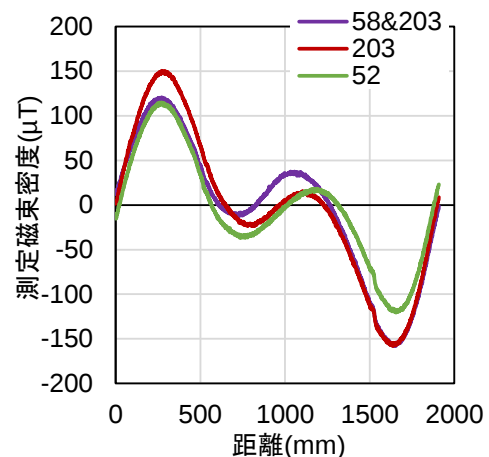


図-9 CASE_50-200・200・50の測定結果一例

～2000mm において測定磁束密度の絶対値が大きくなった。0～600mm では CASE_50-200 と CASE_50 の測定磁束密度が概ね一致し、1300～1900mm では CASE_50-200 と CASE_200 の測定磁束密度が概ね一致した。

ここでは、測定磁束密度における最大値と最小値の絶対値をピーク値(μT)と定義した。CASE_0-200 において 0kN とした 0～1000mm のピーク値および 202kN とした 1000～2000mm のピーク値、また、CASE_50-200 において 58kN とした 0～1000mm のピーク値および 203kN とした 1000～2000mm のピーク値を図-10 に示す。図中の誤差範囲は、同様の実験を 3 回ずつ行った結果の最大値と最小値を示す。緊張力が大きい程、ピーク値が大きくなった。上記の傾向から、PC 鋼棒において緊張力が局所的に異なる場合においても、ピーク値から緊張力を評価できる可能性が示唆された。

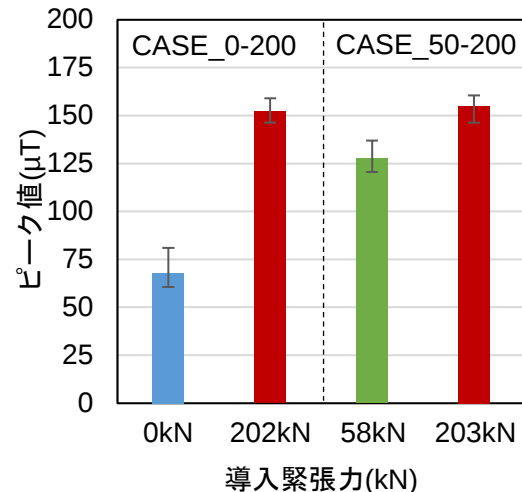


図-10 緊張力とピーク値との関係

4. 着磁後における PC 鋼材の緊張力の局所的な変動が漏洩磁束法の測定結果に与える影響

本章では、漏洩磁束法を用いて、PC 鋼材における局所的な緊張力の変動を評価できる可能性について検討を行った。具体的には、着磁後における PC 鋼材の緊張力の局所的な変動が着磁により付与される磁束密度に与える影響を明らかにした。

4.1 実験概要

本実験においても写真-1 に示す供試体を使用し、対象とする鋼材は PC 鋼棒 $\phi 26$ C 種 1 号・3000mm とした。コンクリートの寸法は縦 400×横 2000×高さ 450mm、鋼棒からコンクリート表面までのかぶり厚は 150mm とした。測定装置についても写真-2 に示したものを使用した。

計測概要を図-11 に示す。着磁については、図-11 における 550mm と 1450mm の位置で、永久磁石の磁極の片側を、鋼棒に対して垂直に近づけた後、遠ざけた。磁束密度の測定は、コンクリート表面における鋼棒直上で行った。センターホールジャッキは供試体左側の端部に設置し、PC 鋼棒全体に約 230kN の引張力を導入した。次に、供試体中央の定着具を定着させ、着磁および測定を行った。そして、ジャッキを解放することで、0～1000mm の範囲では緊張力を減少させ、定着により 1000～2000mm の範囲では緊張力を概ね一定に保持した。0～1000mm の範囲で緊張力が約 20kN 程度減少するごとに磁束密度の測定を行った。測定時における荷重計の実測値を表-3 に示す。0～1000mm の範囲での緊張力減少に伴い、1000～2000mm の範囲でも若干の緊張力の低下が確認された。

4.2 実験結果

測定結果を図-12 に示す。ここで、凡例の数字は荷重計 A の値を示している。緊張力が変動した 0～1000mm

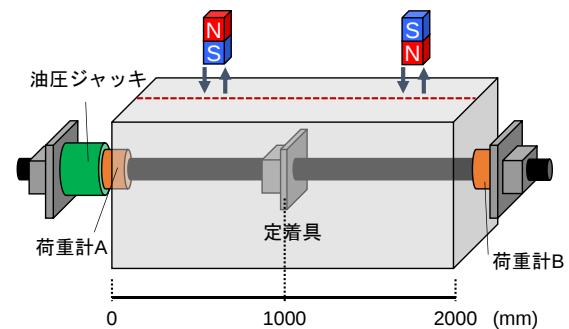


図-11 計測概要

表-3 測定時における緊張力の過程

荷重計 A(kN) 範囲：0～1000mm	荷重計 B(kN) 範囲：1000～2000mm
165.5	233.3
146.0	230.0
124.8	227.3
101.0	224.7
74.5	222.0
52.2	220.0
15.3	216.7
0.0	215.5

の範囲では、緊張力の変動に伴い測定磁束密度の絶対値が減少した。一方、緊張力の変化が比較的小さい 1000～2000mm の範囲では、測定磁束密度のグラフ形状がほとんど変化しないことが確認できた。

図-12 の測定磁束密度における最大値と最小値の絶対値をピーク値(μT)と定義し、0～1000mm におけるピーク値と 1000～2000mm におけるピーク値と緊張力の関係を図-13 に示す。0～1000mm の範囲におけるピーク値

は減少しているが、1000～2000mm におけるピーク値はほぼ変化していない。このことから、同一鋼材中の局所的な緊張力の変化であっても、着磁範囲内のピーク値の変化に着目することで捉えることができる可能性が示唆された。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 緊張力の導入により、鋼材の磁気ヒステリシス曲線が変化し、漏洩磁束法により測定する磁束密度の絶対値が大きくなる。
- (2) 着磁時において PC 鋼材の緊張力が局所的に異なる場合、緊張力が大きい範囲では、着磁により付与される磁束密度が大きい。
- (3) 着磁後において PC 鋼材の緊張力が局所的に減少した場合、緊張力が減少した範囲では測定磁束密度が減少し、緊張力が変化しない範囲では測定磁束密度はほぼ変化しない。
- (4) ピーク値の大きさや変化量に着目することで、PC 鋼材中の局所的な緊張力の大きさおよび緊張力の変化を評価できる可能性が示唆された。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 20K04653 の助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 前田友章, 徳永光宏, 田所敏弥, 谷村幸裕: PC 鋼材破断時における PC 桁の残存プレストレス評価に関する一考察, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集第 5 部門, pp.1191-1192, 2008
- 2) たとえば, 青木圭一: プレストレストコンクリート橋における PC 鋼材破断とその調査および性能評価に関する研究, 博士学位論文, 埼玉大学, 2016
- 3) 品川達哉, 四之宮彰吾, 寺澤広基, 鎌田敏郎: 漏洩磁束法を用いた PC 鋼材の緊張力評価に関する検討, 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, 第 19 巻, pp.267-272, 2019

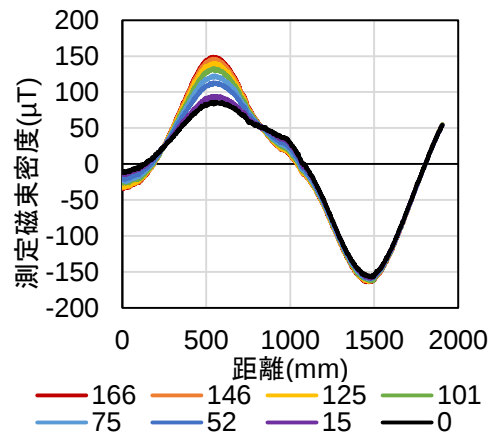


図-12 緊張力減少過程における測定結果

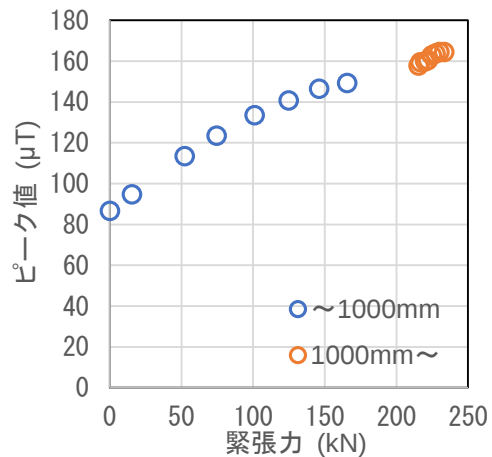


図-12 各緊張力におけるピーク値

- 4) 土木学会: 2018 年制定コンクリート標準示方書 [標準編], pp.451-452, 2018.10
- 5) 寺澤広基, 檜山直生, 鈴木真, 鎌田敏郎: 磁場に着目した横締め PC 鋼材の破断検出に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, 44 巻, 1 号, pp.1456-1461, 2022
- 6) 寺澤広基: コンクリート内部鉄筋破断の漏洩磁束法片面診断に関する研究, 博士学位論文, 京都大学, 2014