

論文 漏洩磁束法に基づく PC 鋼材破断検知における格子鉄筋の影響の低減に関する検討

滝井 麻衣*1・寺澤 広基*2・鎌田 敏郎*3

要旨：漏洩磁束法を用いて PC 鋼材の破断検知を行う際、対象とする PC 鋼材よりもコンクリート表面に近い位置に配置されている鉄筋の影響は避けられない。本研究では、PC 鋼材の前面に配置された格子鉄筋が測定結果へ与える影響を確認するとともに、PC 鋼材破断検知への鉄筋の影響を低減する方法として脱磁の適用を試みた。具体的には、脱磁器を用いて、鋼材の種類およびそのかぶりと脱磁の程度との関係を確認し、脱磁前後での磁束密度測定結果の差分から鉄筋の影響を低減するための補正方法を検討した。その結果、脱磁に基づく補正方法が鉄筋の影響の低減に有効であることが確認できた。

キーワード：漏洩磁束法, PC 鋼材, 破断, 鉄筋の影響, 脱磁, 非破壊検査

1. はじめに

近年、ポストテンション方式の PC 構造物ではグラウトの未充填に伴う PC 鋼材の腐食や破断などの事例が顕在化している。PC 構造物の性能を長期にわたり確保するためには、PC 鋼材の変状をいち早く把握し適切に維持管理することが重要である。コンクリート中の鋼材の破断を非破壊で検知する手法に、漏洩磁束法がある。漏洩磁束法はコンクリートがほぼ非磁性体、鋼材が強磁性体であることを利用した手法であり、検査対象である PC 鋼材をコンクリート表面から永久磁石により磁化した後、磁気センサを用いてコンクリート表面近傍で磁束密度の測定を行う。図-1 に示すように、PC 鋼材が健全である場合はその両端で対の磁極が生じるのに対して、破断が生じている場合は破断箇所でも磁極が生じることから、両者での磁束密度プロファイルの違いにより鋼材破断の検知が可能である。

一方、実構造物において本手法を適用する場合、検査対象である PC 鋼材の前面に鉄筋が配置されていることが多い。この場合、PC 鋼材と同様に強磁性体である鉄筋も同時に磁化されるため、破断箇所でも磁極の存在を磁束密度プロファイル上で確認するのが難しくなる可能性がある。これに関連して著者らは、既往の研究¹⁾において、PC 鋼材の前面に単一方向（PC 鋼材の向きに対し垂直方向または平行方向）に鉄筋が配置されている場合における磁束密度プロファイルへの影響について検討を行っている。しかしながら、実際には PC 鋼材の前面に鉄筋が格子状に配置されているケースも数多く、このような条件下での鉄筋の影響については未だ明らかにされていない。

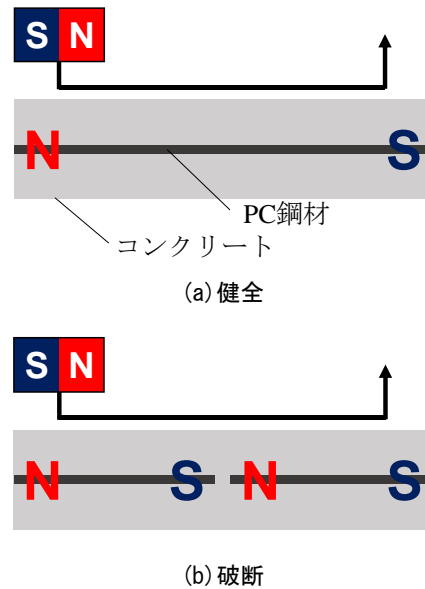


図-1 漏洩磁束法に基づく破断検知の概要

そこで本研究では、検査対象である PC 鋼材の前面に格子状の鉄筋（以下、格子鉄筋とする）が配置されている場合を想定し、格子鉄筋が PC 鋼材破断検知に及ぼす影響を把握するとともに、脱磁器を活用することにより格子鉄筋の影響を低減するための方法を検討することを目的とする。

2. PC 鋼材前面に配置された格子鉄筋の影響の把握

2.1 実験概要

本研究では木製およびプラスチック製のフレームに PC 鋼材および鉄筋を固定したものを供試体とした。PC

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (学生会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 助教 (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授 (正会員)

鋼材および鉄筋の配置状況を図-2 に、供試体外観を写真-1 に示す。PC 鋼材は PC 鋼棒 $\phi 26\text{mm}$ (A 種 2 号) を $\phi 45\text{mm}$ スパイラルシース中に配置し、鉄筋は D13 とした。また、PC 鋼棒は、健全と破断の 2 ケースを設定し、破断を模擬したケースでは鋼材長手方向の中央位置での破断を想定し、長さ 1000mm の PC 鋼棒 2 本を突き合わせて破断ギャップ 10mm で配置した。さらに、比較のためにスパイラルシースを用いずに PC 鋼棒のみを配置した場合についても検討を行った。

測定装置には鋼材を磁化する (以下、着磁とする) ための永久磁石およびコンクリート表面を想定した位置で磁束密度を計測する (以下、測定とする) ための磁気センサを使用した (写真-2)。永久磁石は寸法が $65\text{mm} \times$

$180\text{mm} \times 134\text{mm}$ 、重量が約 8kg で、底面から 150mm (概ね PC 鋼棒の埋没位置) 離れた位置における長手方向の磁束密度は約 7mT である。磁気センサは寸法が $140\text{mm} \times 230\text{mm} \times 125\text{mm}$ 、重量が約 1.6kg で、測定面に垂直な方向成分の $\pm 300\mu\text{T}$ の範囲の磁束密度を移動距離 1mm ごとに計測できる。鉄筋および PC 鋼棒における着磁および測定方法の概要を図-3 に示す。着磁および測定は、PC 鋼棒の直上かつ鉄筋表面から 40mm 上方で行った。永久磁石および磁気センサの走査速度はおよそ 0.4m/sec とした。

2.2 実験結果および考察

PC 鋼棒のみを配置した場合とスパイラルシースおよ

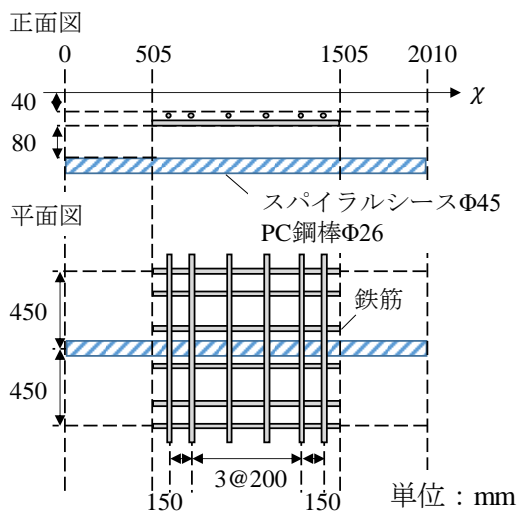


図-2 供試体概要

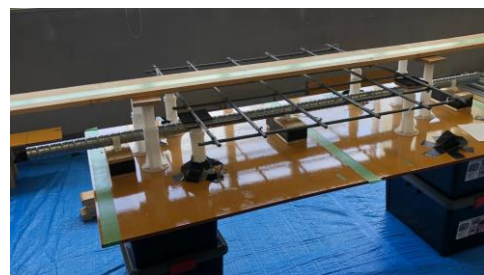
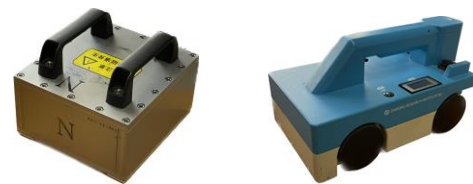


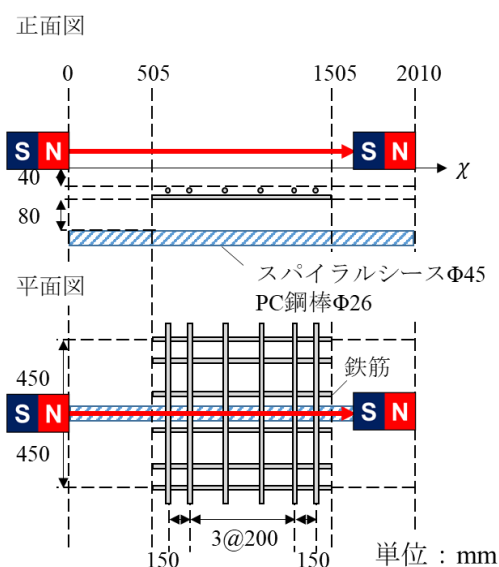
写真-1 供試体外観



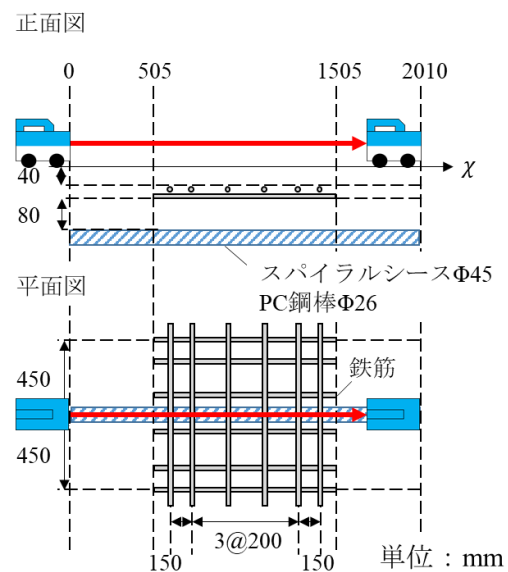
(a) 永久磁石

(b) 磁気センサ

写真-2 実験器具



(a) 着磁方法



(b) 測定方法

図-3 着磁および測定方法

び格子鉄筋を配置した場合の磁束密度測定結果を図-4に示す。図-4(b)について、鉄筋の直交位置を破線で示す。図-4(a)より、破断の場合はPC鋼棒の破断位置(x=1000)の前後において極小値および極大値のピークを持つS字型のプロファイルとなっており、鋼棒の破断箇所近傍に一对の磁極が生じた影響が捉えられていることが確認できる。また、健全のx=1700~2000において磁束密度プロファイルがおおよそ-400 μ Tでフラットな形状となっているのは磁気センサの測定範囲を大幅に超過したためと考えられる。一方、図-4(b)では健全、破断ともにx=500~1500の範囲で極大値と極小値のピークが連続しており、図-4(a)で確認できたPC鋼棒の破断箇所に生じるS字型のプロファイルが確認できなかった。ここで、PC鋼棒に直交する鉄筋の直上において極大値が認められることから、着磁によりPC鋼棒のみならず鉄筋も磁化されること、ならびに鉄筋の磁化の影響が大きくなるとPC鋼棒の破断の検知が困難になることがわかった。

3. 鋼材の種類およびかぶりと脱磁効果との関係

3.1 実験概要

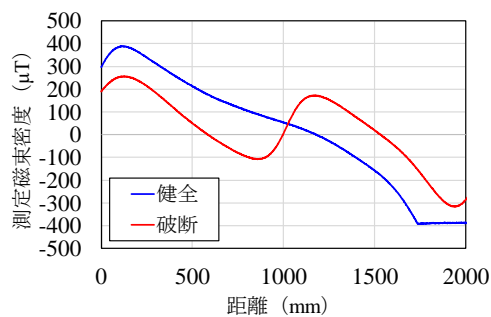
2.2の実験結果より、漏洩磁束法を用いてPC鋼材の破断を検知するためにはPC鋼材よりもコンクリート表面から近い格子鉄筋に付与された磁化の低減が有効と考

えられる。そこで本研究では、コンクリート表面に相当する位置で脱磁器を用いることにより格子鉄筋に脱磁を施すプロセスを組み合わせた鋼材破断の検知手法の検討を行うこととした。

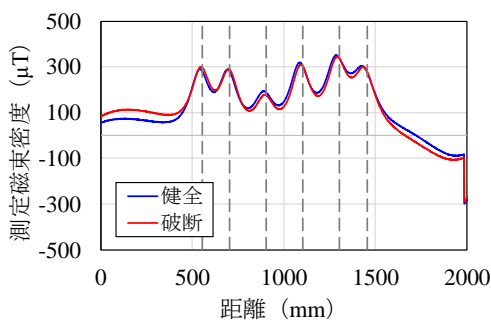
本章ではPC鋼棒および鉄筋に対して脱磁を行った際の脱磁効果について鋼材のかぶりを変化させた結果について述べる。

2.1と同様に木製およびプラスチック製のフレームに鋼材を固定したものを供試体とした、使用した鋼材は、D13の鉄筋、 $\phi 26\text{mm}$ (A種2号)の鋼棒、および図-5に示すようにD13の鉄筋12本を組み合わせた格子鉄筋の3種類とした測定装置については2.1と同様に写真-2の装置を使用した。脱磁については写真-3に示す車輪付移動式脱磁器を使用した。脱磁器の仕様については電源が単相AC100V、電源容量が300/250VA(3A/2.5A)である。

鉄筋およびPC鋼棒における着磁、測定および脱磁方法の概要を図-6に、格子鉄筋における着磁、測定および脱磁方法を図-7に示す。着磁および測定は、鉄筋については鉄筋の直上かつ表面から100mm上方で、PC鋼棒については鋼材の直上かつ表面から150mm上方で、格子鉄筋については供試体中心の直上かつ表面から40mm上方で着磁を行った。着磁および測定に関して、永久磁石および磁気センサを約0.4m/secで動かした。ま



(a) PC鋼棒のみ



(b) PC鋼棒・スパイラルシース・格子鉄筋

図-4 測定結果

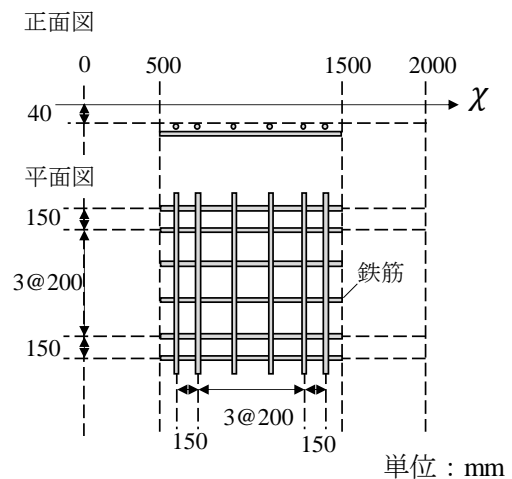


図-5 供試体概要



写真-3 車輪付移動式脱磁器

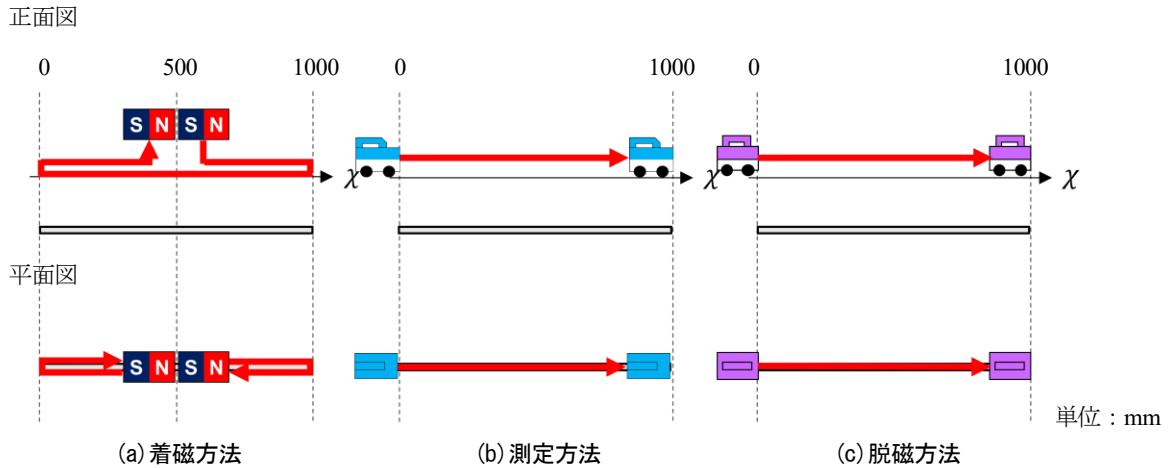


図-6 鉄筋およびPC鋼棒における着磁、測定および脱磁方法

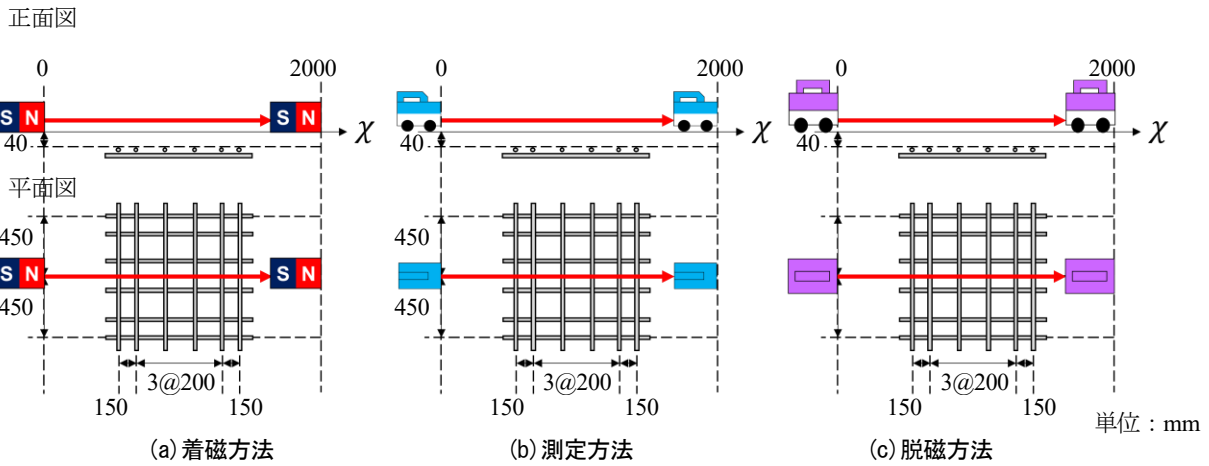


図-7 格子鉄筋における着磁、測定および脱磁方法

た、脱磁については、脱磁器を約 0.08m/sec で走査した。鉄筋および PC 鋼棒については表-1 に示すかぶり で脱磁を行った。格子鉄筋についてはかぶり 40mm で脱磁を行った。

3.2 実験結果および考察

鉄筋、PC 鋼棒および格子鉄筋の着磁後および脱磁後の測定磁束密度の一例を図-8 に示す。図-8(c) について、鉄筋の直交位置を破線で示す。ここで、鉄筋および PC 鋼棒はかぶり 100mm で脱磁を行った結果を示している。図-8(a) と (b) より、同じかぶりであっても鉄筋は着磁によって付与された磁化が脱磁により低減しているのに対し、PC 鋼棒では脱磁前後での測定磁束密度の差がほとんどなかった。これにより、鋼材の種類によって脱磁の効果は異なることが確認できた。

ここで、脱磁の効果を定量的に表現するために、鉄筋および PC 鋼棒については測定磁束密度の極大値と極小値に着目し、それぞれの脱磁前後の差分を脱磁前の値で除し、その平均をとることで脱磁率を算出した。一方、

表-1 脱磁を行う際のかぶり

	かぶり (mm)							
鉄筋	200	175	150	125	100	75	50	40
PC 鋼棒	200	175	150	125	100	75		

格子鉄筋の測定磁束密度については、着磁後の最大値に着目し、その位置 (x=1303) における脱磁前後の差分を脱磁前の値で除すことで脱磁率を算出した。各鋼材のかぶりごとの脱磁率の算出結果を図-9 に示す。

図からわかるとおり、鉄筋についてはかぶりが 175mm より大きい場合、PC 鋼棒では 75mm より大きい場合、脱磁率は 4%未滿となった。鉄筋単体の脱磁率について、かぶり 40~200mm の範囲で線形近似すると以下の式(1)となる。

$$y = -0.3001x + 54.69 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.9591$$

ただし、 y ：鉄筋の脱磁率（%）， x ：かぶり（mm）
線形近似の結果、決定係数は1に近い値となり、鉄筋のかぶりと脱磁率については、概ね線形近似が可能であると言える。また、かぶり40mmにおいて鉄筋単体と格子鉄筋で脱磁率はほぼ同程度となった。

4. 脱磁器を活用した鉄筋の影響の低減方法の検討

4.1 実験概要

2.1 で実施した PC 鋼材の前面に格子鉄筋を配置した状態での着磁・測定により図-4(b)の磁束密度を得た後、続けて写真-3の脱磁器を用いて鋼材の脱磁を行い、磁束密度を再度測定した。各種鋼材の配置状況は図-2、漏洩磁束法の測定装置は写真-2、着磁および測定方法は図-3に示した通りである。脱磁器については図-10に示す位置で約0.08m/secで走査した。

4.2 実験結果および考察

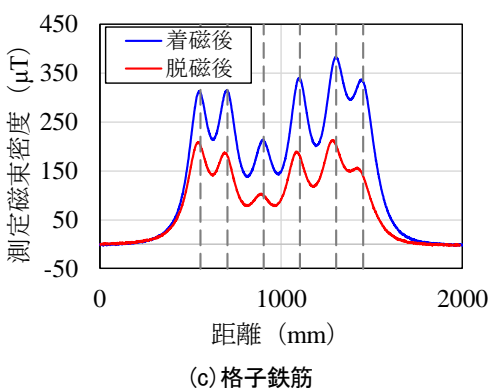
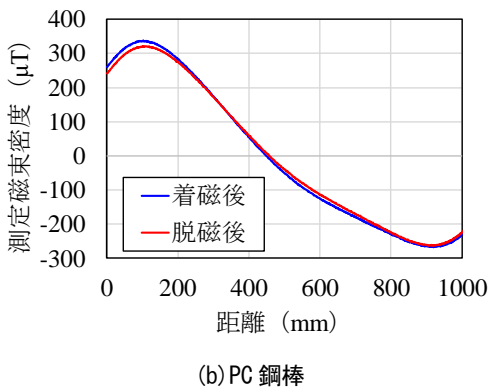
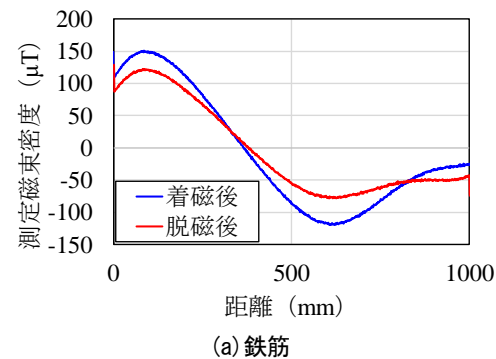


図-8 測定結果の一例

PC 鋼棒が健全、破断のそれぞれの場合について着磁後および脱磁後の測定結果を図-11に示す。図-11について、鉄筋の直交位置を破線で示す。図-8(c)の結果と同様に、鉄筋の直上における測定磁束密度のピーク値が脱磁後では小さくなった。

ここで、「脱磁前の測定磁束密度」を「脱磁前の格子鉄筋による磁束密度」と「脱磁前の PC 鋼棒による磁束密度」の和と仮定し、本実験で設定した PC 鋼材のかぶりが120mmであることと、図-9に示した PC 鋼棒のかぶりと脱磁率の関係を考慮すると、脱磁による PC 鋼棒の磁化はほとんど変化せず、鉄筋の磁化のみが減少したと考えられる。したがって、脱磁前後の差分に脱磁率の逆数を乗ずることで脱磁前に鉄筋に付与された磁化による測定結果への影響を以下の式(2)で算出することとした。

$$z = A \times 100 / Y \quad (2)$$

ただし、 z ：脱磁前の鉄筋の磁化による測定面での磁束密度（ μT ）， A ：脱磁前後の測定磁束密度の差分（ μT ）， Y ：鉄筋の脱磁率（%）

ここで、鉄筋の脱磁率は図-9の格子鉄筋における実測値（44.8%）を使用し、式(2)で算出した鉄筋に付与

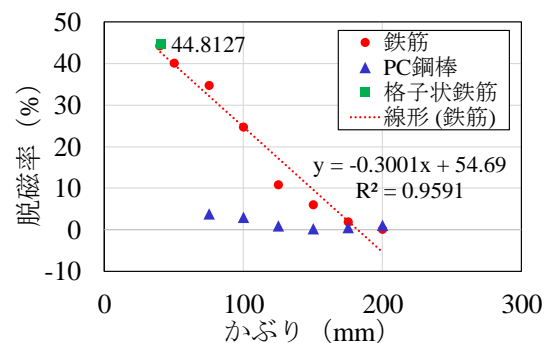


図-9 かぶりと脱磁率との関係

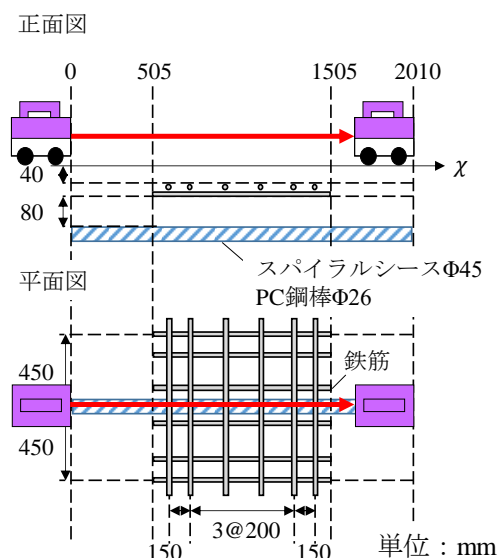
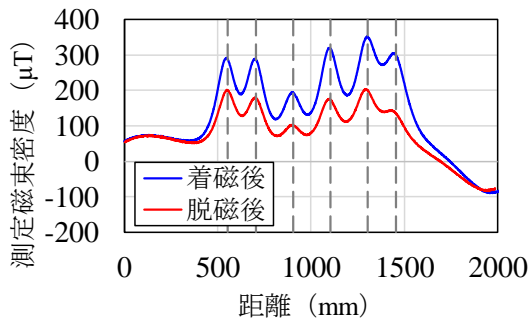
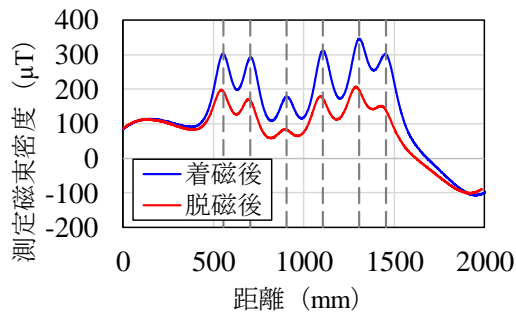


図-10 脱磁方法

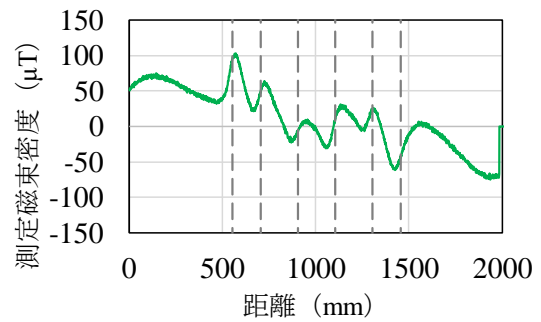


(a) 健全

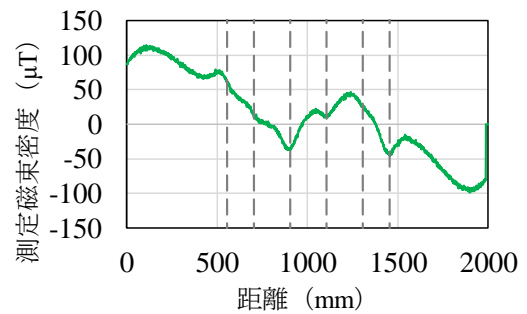


(b) 破断

図-11 着磁後および脱磁後の測定結果



(a) 健全



(b) 破断

図-12 補正後

された磁化を脱磁前の測定磁束密度から差し引くことで、PC 鋼棒に付与された磁化の影響のみを抽出する補正を行った。

補正後の測定磁束密度を図-12 に示す。図-12 について、鉄筋の直交位置を破線で示す。補正後では、格子鉄筋で認められた極大値が低減されており、PC 鋼棒が破断している場合(図-12 (b) 参照)については破断位置 1000mm において磁極が生じたことによる S 字型のプロファイル(極小値の位置 $x=899$, 極大値の位置 $x=1253$)が確認できた。よって、脱磁器を活用した磁束密度の補正により、格子鉄筋の磁化の影響を低減できる可能性が示唆された。一方、図-12 (a)では図-11 (a)の着磁後と比較すると格子鉄筋の磁化の影響は低減されたものの、依然として鉄筋直上での磁束密度プロファイルの変化は小さくなった。この理由として PC 鋼材の破断の有無によって格子鉄筋の帯磁状況に違いが生じた可能性が考えられることから、より適切な脱磁率の設定方法については今後更に検討していく必要がある。ここで、本実験で設定した格子鉄筋のピッチが 150mm および 200mm であり、この間隔で配筋の影響による磁束密度の極大値が生じるのに対し、PC 鋼材の破断箇所を確認できる磁束密度の極大値と極小値の間の距離が図-4 (a)では 319mm、図-12 (b)では 354mm と概ね 300mm 以上となった。よって、測定磁束密度の極大値と極小値の位置関係に着目することで、配筋の磁化による影響か PC 鋼材の破断によ

る影響かをある程度判別可能であると考えられる。

5. まとめ

漏洩磁束法に基づく PC 鋼材破断検知において、PC 鋼材の前面に配置された格子鉄筋の影響を把握し、脱磁器の併用による PC 鋼材破断検知の手法について検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) PC 鋼棒の前面に格子鉄筋を配置した供試体での実験の結果、磁束密度プロファイル上で破断箇所において磁極の存在を確認することが困難であった。
- 2) PC 鋼棒と比較して鉄筋は脱磁効果大きい。
- 3) 脱磁器を用いて格子鉄筋に付与された磁化の脱磁が可能であり、脱磁前後の測定磁束密度の差分から配筋の影響を低減する補正を行うことで PC 鋼棒の破断を検知できる可能性が示唆された。

謝辞

本研究は、株式会社ピーエス三菱 2022 年度研究助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 滝井麻衣, 寺澤広基, 檜山直生, 福本晃太, 鎌田敏郎: 鉄筋背面に配置された PC 鋼材の漏洩磁束法に基づく破断検知に関する基礎的検討, 2022 年度土木学会関西支部年次学術講演会, ポスター V-10, 2022