

論文 直流電流がつくる磁束密度による PC 構造物における緊張材の健全性評価の実験的研究

宮澤 真^{*1}・大下 英吉^{*2}

要旨：著者らは緊張材に直流電流を流した時につくられる磁束密度を計測することにより緊張材の断面欠損を評価するシステムの開発に着手している。緊張材のような導線に直流電流を流すと、磁場はビオ・サバー

ルの法則「 $dH = \frac{I dl \sin\theta}{4\pi R^2}$ 」により電流の距離および方向によって決まる。断面欠損が存在する場合その周囲で

電流の流れが変化し、それに伴い磁場および磁束密度にも変化が生じる。そこで、健全な状態と断面欠損を有する場合の磁束密度の差から緊張材の健全性評価を可能にするとともに本システムの適用性を検討した。

キーワード：PC 構造物, 非破壊検査, 断面欠損, 磁束密度, 直流電流

1. はじめに

我が国では、多くの社会資本が高度経済成長期に整備され、これらは建設後30～50年の経過によって老朽化が進行している。建設当初、コンクリート構造物はメンテナンスフリーであると考えられていたため、十分な維持管理がなされなかった。そのため、現在供用されているコンクリート構造物は劣化の進行が危惧されているにも関わらず、全ての構造物において劣化状況が把握できていないとは言い難い。さらに、社会資本における維持管理費用に対する財源は、人口減少などの観点から、今後縮小されることも鑑みると、既設のコンクリート構造物を戦略的に維持管理し、有効利用することが必要不可欠となってくる。

特に、多数の橋梁に用いられるPC構造物はコンクリートの引張に弱い特性を改善する目的で、緊張材によりプレストレスを作用させる構造形式を用いている。そのため、緊張材の腐食や破断に伴う構造性能および耐久性性能の低下が著しい。したがって、PC構造物の安全性の確保ならびに長期延命化を図る上で、緊張材の状態を正確に把握することが必要不可欠である。

緊張材に腐食を誘発させる主要因として、PC構造物のポストテンション方式により施工された際に生じるグラウトの充填不良がある。図-1に示すように、緊張材の防錆に重要な役割を果たすPCグラウトの充填不良が、調査箇所数の約25%もあることが報告されている¹⁾。シース管内にグラウトの充填不良が存在する状態では、水および酸素といった腐食を誘発する有害物質が容易に侵入することで鋼材腐食が生じ、最終的には破断につながる。しかしながら、コンクリート内部で緊張材の劣化が進行していたとしても、コンクリート表面には現れないため、外観目視から確認することが困難である。そのた

め、緊張材の破断や腐食を検知する非破壊検査技術の確立が望まれている。

PC構造物における緊張材に関する非破壊検査手法の研究は数多く行われてきており、実用化されている代表的な手法に漏洩磁束法がある。この手法はコンクリート表面から緊張材を磁化させ、磁化された緊張材から発生する漏洩磁束を測定することにより破断の有無やその位置を判断するものである²⁾。しかしながら、漏洩磁束法はかぶりが大きい緊張材やPCより線の破断本数が少ない試験体に対する評価が難しくなり、適用限界があると言わざるを得ない。

以上のことから、著者らは、PC構造物の重要な役割を担う緊張材の損傷を、非破壊で簡易にかつ精度良く検査できる手法の構築に着手している。そこで本研究では、

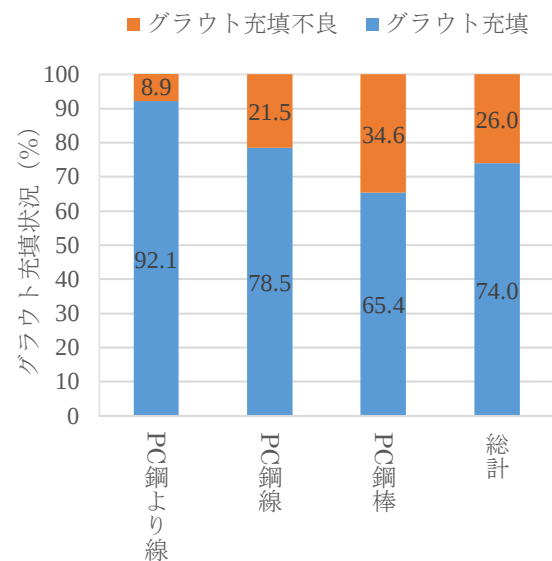


図-1 PC グラウトの充填調査結果¹⁾

*1 中央大学 理工学研究科都市人間学専攻(学生会員)

*2 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

緊張材に直流電流を流し、発生する磁場における磁束密度を計測することで、緊張材の健全性を評価可能か検討した。

2. PC 構造物における断面欠損評価システム

2.1 直流電流がつくる磁場における磁束密度

直流電流と磁場の間には、「ビオ・サバールの法則」が成立する。これは、図-2 に示す電流 $I[A]$ が流れている導体の微小長さ $dl[m]$ が作る磁界の強さ $dH[A/m]$ を表した法則である。いま、電流 $I[A]$ が流れている導体における微小長さを $dl[m]$ 、そこにおける接線と観測点 P との為す角度を θ 、 $dl[m]$ から観測点 P までの距離を $R[m]$ と置くと、微小部分 $dl[m]$ がつくる磁界の強さ $dH[A/m]$ は、次式で表すことができる。

$$dH = \frac{I dl \sin\theta}{4\pi R^2} \quad (1)$$

ここで、係数 $1/4\pi$ は実験的に得られた値である。

式(1)より、直流電流がつくる磁場は電流の大きさに比例し、電流が流れている導線からの距離の 2 乗に反比例する。

同式を導体における全領域にわたって積分することで、観測点 P に形成される磁場の大きさ $H[A/m]$ は次式となる。

$$H = \int \frac{I \sin\theta}{4\pi R^2} dl \quad (2)$$

そして、磁束密度 $B[T]$ は、真空中における透磁率を $\mu_0[H/m]$ とすると、次式となる。

$$B = \mu_0 H \quad (3)$$

2.2 断面欠損評価メカニズム

図-3(a)に示すように緊張材の断面が健全な状態であれば、電流は位置によらず一定値となり、形成される磁束密度は、式(1)~(3)より計測距離によって一義的な値に定まる。しかしながら、同図(b)に示すように、緊張材が腐食や一部破断による断面欠損により、不均一な状態であれば、不均一な領域で電流の方向が変化するとともに、断面欠損分だけ計測点までの距離も変化する。このような状態では、健全な状態すなわち断面が均一な状態に比べると磁束密度に乱れが生じることとなり、この乱れにより緊張材の健全性を評価する。

3. 磁束密度計測実験

3.1 実験装置

実験装置は図-4 に示すように、直流電源装置と電流計、緊張材を模擬した PC 鋼棒を直列に接続し、一定の電流値を保持した状態で、磁束密度を計測する。プローブを PC 鋼棒の長手方向に所定の距離を保持したまま移動させる。なお、使用したテスラメータは MTI 社製の

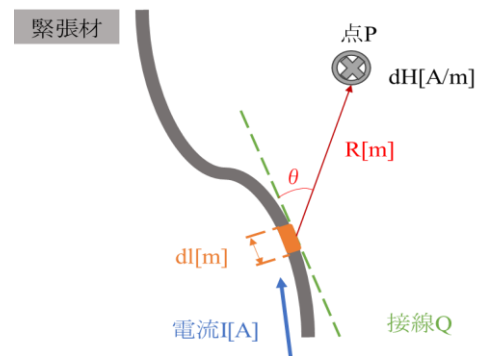
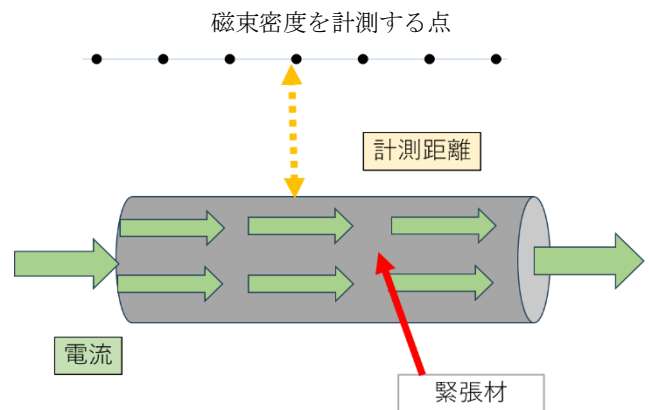
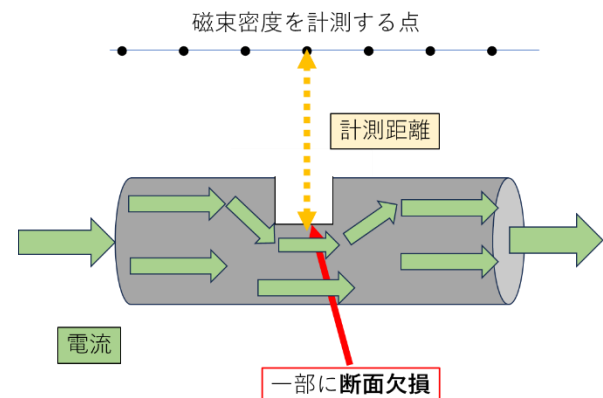


図-2 導線に流れる電流と磁場の関係



(a) 健全な鋼棒



(b) 切り欠きを有する鋼棒

図-3 切り欠きの有無による電流の変化

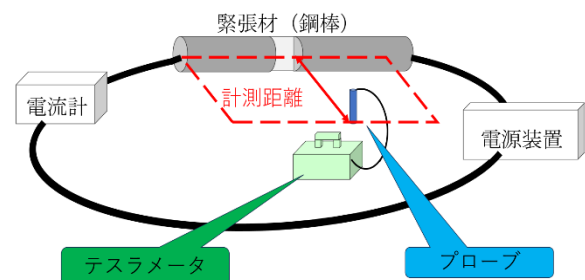
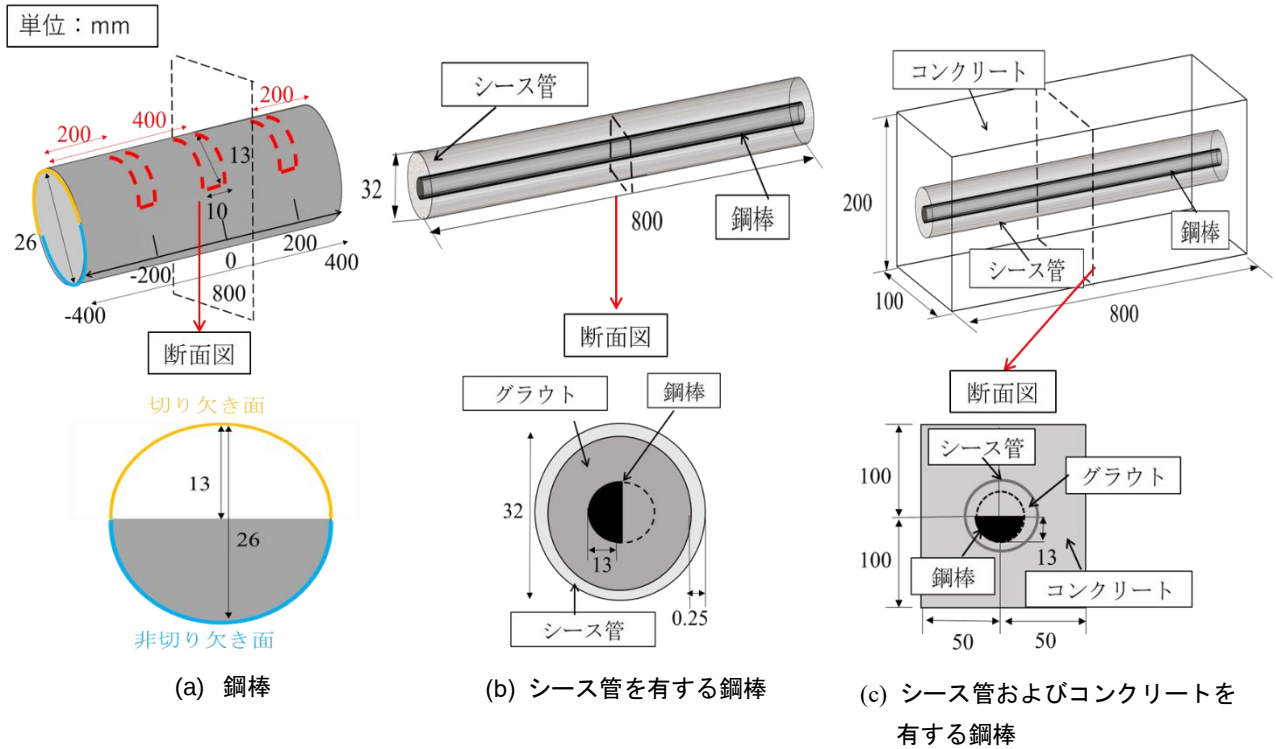


図-4 実験装置

表－1 実験パラメータ

径 (Φ)	計測距離 (K)	切り欠き位置	シース管	グラウト充填率	コンクリート	電流 I	切り欠き
9mm, 19mm, 26mm	10mm,100mm,500mm	200mm,0mm,-200mm	有, 無	0%,100%	有, 無	10A	有, 無



図－5 鋼棒径 26mm における試験体概要

表－2 配合表

単位:kg/m ³				
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AE
174	348	820	974	2.2

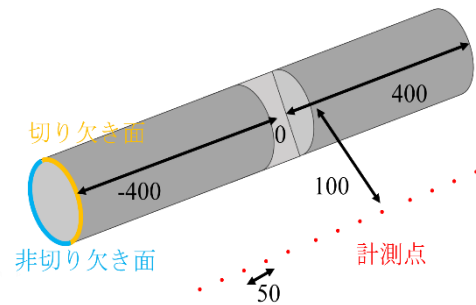
FM-1400 であり、分解能は 0.1μT である。

3.2 試験体概要

本研究における試験体概要、計測距離、切り欠き位置および電流を含む実験パラメータを表－1 にまとめて示す。試験体概要については、以降で詳述する。

(1) 鋼棒

本研究では、健全な鋼棒および破断や腐食による断面減少を想定した切り欠きを有する鉄鋼製の PC 鋼棒を使用した。代表として鋼棒径 26mm の試験体を図－5(a)に示す。全長 800mm の PC 鋼棒に、幅 10mm、深さ $\frac{\Phi}{2}$ の切り欠きを有するものである。切り欠きの幅が小さいほど磁



図－6 計測方法

束密度への影響も小さくなると考えられる。しかしながら、本研究で使用するプローブは幅 10mm の範囲の平均的な磁束密度を計測するため、切り欠きとその直上で特異的に影響を及ぼす可能性を考慮し、切り欠き幅を 10mm とした。なお、鋼棒径 9mm および 19mm も同様に、幅 10mm、深さ $\frac{\Phi}{2}$ の切り欠きを有するものである。

(2) シース管とグラウト

図－5(b)にシース管の概要を示す。全長 800mm、直径

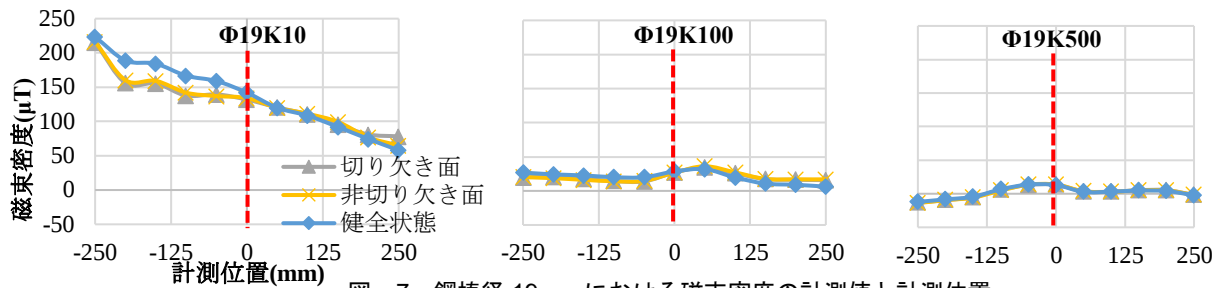


図-7 鋼棒径 19mm における磁束密度の計測値と計測位置

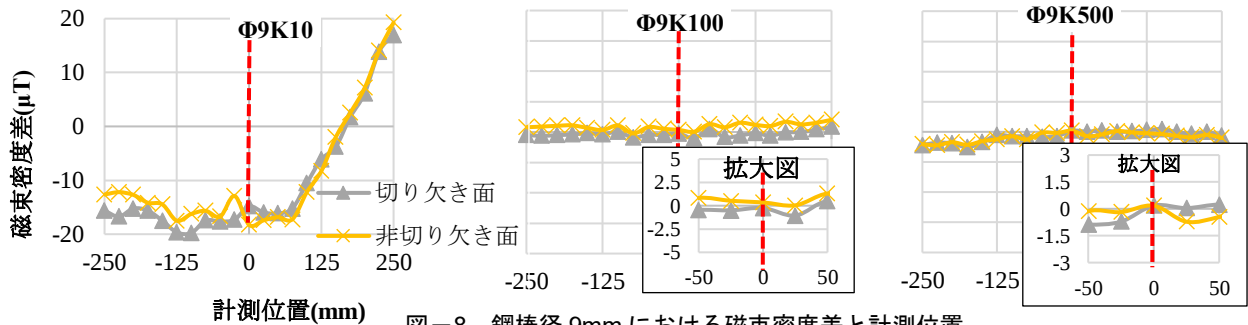


図-8 鋼棒径 9mm における磁束密度差と計測位置

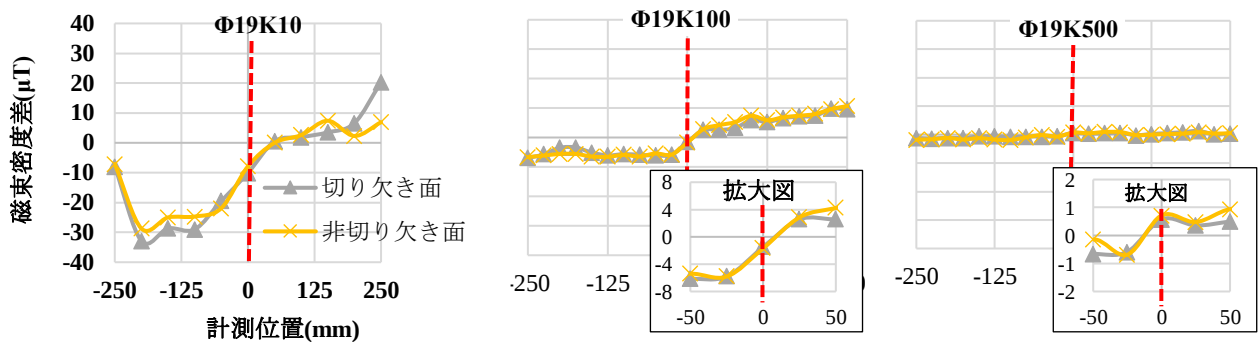


図-9 鋼棒径 19mm における磁束密度差と計測位置

32mm, 管厚 0.25mm の鋼製シース管を使用した。また、グラウトの充填率は 100%および 0%の 2 パラメータとする。

(3) シース管とグラウトおよびコンクリート

図-5(c)に PC 試験体を示す。芯かぶり 100mm の位置にシース管および PC 鋼棒を配筋した。3.2(2)に示した鋼棒およびシース管と同様に全長 800mm の試験体を用いる。なお、コンクリートの配合は表-2 に示す通りである。

3.3 計測方法

磁束密度の計測方法を図-6 に示す。PC 鋼棒に 10A の直流電流を持続的に流した後に磁束密度の計測を開始する。ビオ・サバルの法則より電流値に比例して磁束密度の乱れも大きくなると考えられる。したがって、本研究では使用した実験装置の最大電流値 10A で計測を行った。また、磁束密度の計測は、鋼棒の長手方向に対して 50mm 間隔で実施し、計測値は切り欠きを有する面とその裏面の 2 面とした。なお、本手法のメカニズムは 2.2 で示したように、鋼棒断面が健全な状態に対する切り欠

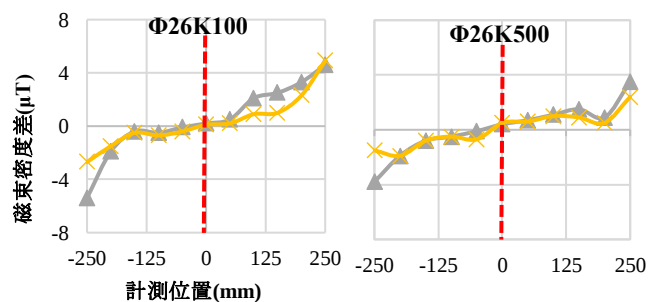


図-10 鋼棒径 26mm における磁束密度差と計測位置

きの存在による磁束密度の乱れであるため、健全な鋼棒の磁束密度も計測しなければならない。また、鋼棒の位置関係は長手方向の中心を原点とし、 $\pm 400\text{mm}$ とした。

4. 鋼棒の断面欠損が磁束密度に及ぼす影響

4.1 鋼棒径および計測距離

鋼棒径および計測距離の検討を鋼棒単体で行う。健全状態および切り欠きを有する状態の代表例として、鋼棒径 19mm における磁束密度を図-7 に示す。ここで、試験体名称は Φ (鋼棒径), K (計測距離) であり、記号 $\diamond$ は健全状態、記号 $\triangle$ および $\times$ は、それぞれ切り欠き面

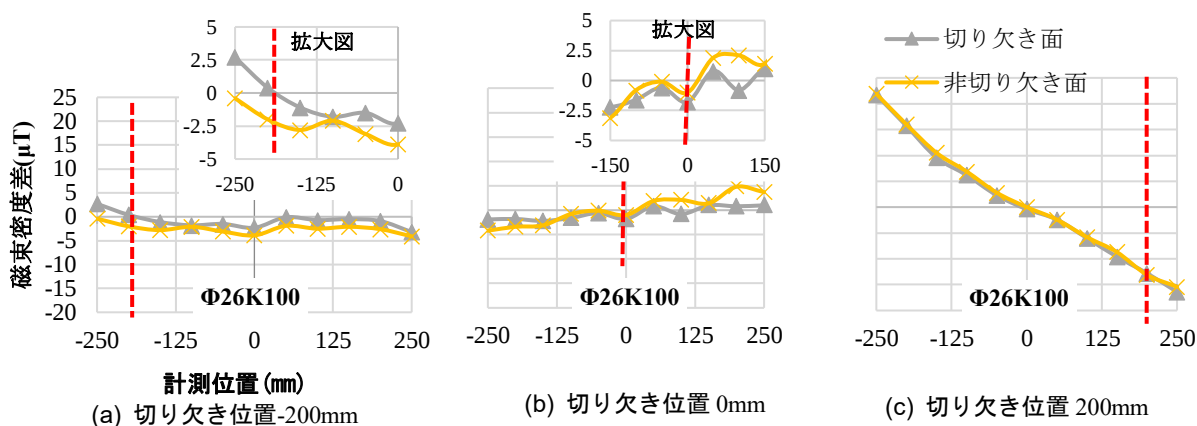


図-11 各切り欠き位置における磁束密度差と計測位置

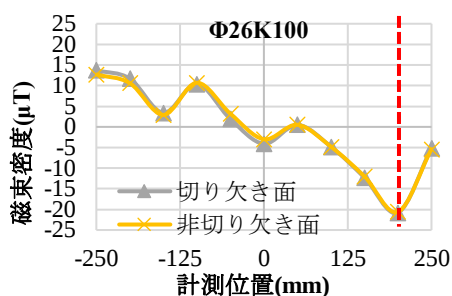


図-12 切り欠き位置 200mm の鋼棒がつく
る磁束密度

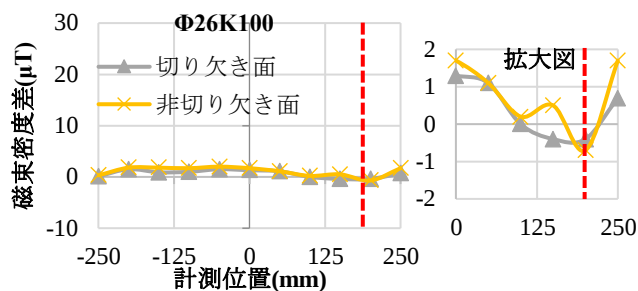


図-13 切り欠き位置 200mm における消磁後
の磁束密度差

および非切り欠き面における記号である。なお、鋼棒端部は境界であることに加え、電源装置と導線の接続による影響を加味する必要がある。したがって、端部を除く±250mmの範囲のデータを示す。また、図中の赤線は切り欠きが存在する位置を示す。

図-7に示すように、切り欠きの有無による差異は計測距離が10mmの時は顕著であるが、100mm、500mmのように計測距離が長くなるにしたがって、両者の差異は小さくなる。これは、鋼棒に電流を流した時の磁束密度の大きさが距離に反比例するため、電流が作り出す磁束密度に比べて地磁気を含む外部磁界が大きくなり支配的となるためである。

外部磁界の影響を排除するとともに、断面が健全な状態に対する切り欠きによる磁束密度の乱れに着目するため、磁束密度差 ΔB を次式で定義する。

$$\Delta B = Bc - B_0 \quad (3)$$

ここで、 Bc は切り欠きが存在する状態の鋼棒の磁束密度、 B_0 は健全状態の鋼棒の磁束密度である。

各種鋼棒径における磁束密度差の分布を図-8~10に示す。なお、鋼棒径26mmにおいては計測距離10mmの実験は未実施である。

各種鋼棒径における磁束密度差は切り欠き近傍で負の値から正の値に変化する。しかしながら、試験体Φ9K100、Φ9K500においては同様の傾向がみられるもの

の磁束密度差の変化は微小であり、評価が困難である。

これは、本研究では切り欠き深さを $\frac{\Phi}{2}$ と設定したことにより、鋼棒径19mmおよび26mmに比べて鋼棒径9mmは切り欠きによる電流の乱れが小さくなったためであると考えられる。また、鋼棒径19mmおよび26mmで磁束密度差が切り欠き近傍で負の値から正の値に変化する理由は、電流により鋼棒が磁化し、切り欠き近傍で漏洩磁束が発生したためであると考えられる。以上の結果から、鋼棒径19mmおよび26mmで切り欠きの有無とその位置を評価可能である。したがって、以降の検討を代表的な鋼棒径26mmおよび計測距離100mmで行うこととする。

4.2 切り欠き位置における検討

本手法による切り欠き位置の評価の可否を検討する。

図-11は各実験の磁束密度差と計測位置の関係である。切り欠き位置が0mmおよび200mmにおいては、前節で示したように切り欠き近傍で磁束密度差の正負が変化する傾向がみられる。一方、切り欠き位置200mmにおいては、切り欠き位置近傍ではなく0mmにおいて負から正の値に変化している。ここで、図-12に電流を流していない鋼棒における磁束密度の分布を示す。これは、鋼棒が磁性体であるため帯磁しており、微弱な磁力を有することで周囲に磁場を形成していることを示している。したがって、計測時に健全状態の鋼棒と切り欠きを有する

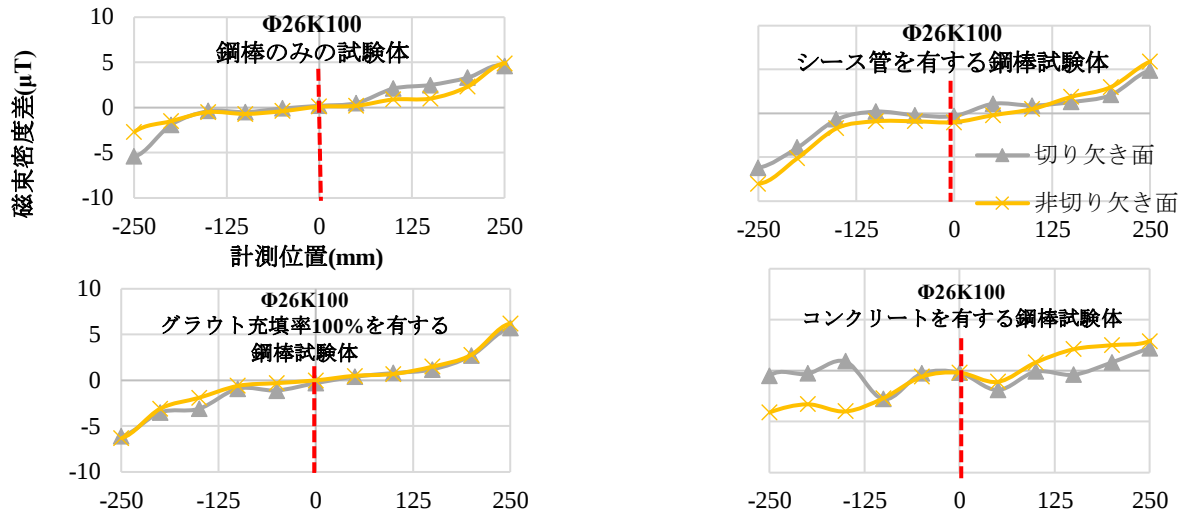


図-14 異なる試験体の磁束密度差と計測位置

状態の鋼棒の磁性を消磁し、磁場の分布を一致させる必要がある。その結果、図-13 に示すように、磁束密度差の分布は、上述のように切り欠き位置を境として正から負となる。

以上のことから切り欠きの位置によらず、切り欠きの有無とその位置を評価可能であることが明らかとなった。

5. シース管、コンクリートの存在が磁束密度に及ぼす影響

5.1 シース管の存在が磁束密度に及ぼす影響

これまでの検討により、緊張材に直流電流を流すことによって形成される磁束密度を計測することで、鋼棒の断面欠損が評価可能であった。しかしながら、実構造物における鋼棒は磁性体であるシース管に覆われており、空気に比べて透磁率が高いシース管の存在は、鋼棒が形成する磁束密度に大きな影響を及ぼすものと考えられる。したがって、シース管からある一定以上の距離では磁束密度が減少するため、影響のない範囲で計測を行う必要がある。

図-14 にシース管を有する鋼棒試験体と鋼棒のみの試験体における磁束密度差の分布を示す。まず、いずれの試験体においても、切り欠き近傍で磁束密度差は負から正の値に変化しているため、シース管の有無によらず本手法が適用可能である。また、非切り欠き面におけるシース管を有する鋼棒試験体と鋼棒のみの試験体の、切り欠き近傍での磁束密度差の傾きは、 $6 \times 10^{-3} [\mu T/mm]$ 、 $7 \times 10^{-3} [\mu T/mm]$ であり、ほぼ差異はない。なお、本研究で使用したテスラメータの性能では $\pm 0.2 \mu T$ (傾きに $\pm 2 \times 10^{-3} [\mu T/mm]$)の誤差であり、このことから上述した傾きの値は誤差の範囲内である。

5.2 グラウトおよびコンクリートの存在が磁束密度に及ぼす影響

充填率 100%またはコンクリートを有する試験体との比較を行う。グラウトおよびコンクリートは強磁性体ではないため本手法に影響はない。したがって、図-14 に磁束密度差の分布を参考として示す。また、非切り欠き面におけるグラウト充填率 100%を有する鋼棒試験体およびコンクリートを有する鋼棒試験体の切り欠き近傍での磁束密度差の傾きは、それぞれ、 $8 \times 10^{-3} [\mu T/mm]$ 、 $5 \times 10^{-3} [\mu T/mm]$ であり、同様に誤差の範囲内であった。

6. 結論

本研究では、鋼棒に直流電流を流し、発生した磁場における磁束密度から鋼棒の健全性を評価するものである。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 計測距離が長い鋼棒に対しても、損傷の有無とその位置を特定可能な方法を構築した。
- (2) 径の小さい鋼棒かつ計測距離が長い場合の切り欠きの有無を評価することは困難であった。
- (3) 切り欠きの位置によらず、切り欠きの有無とその位置を評価可能であることを明らかにした。
- (4) 本研究の範囲内では、シース管、グラウトおよびコンクリートの存在によらず断面欠損の評価が可能であった。

参考文献

- 1) 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（埼玉大学提出博士論文），2016.3
- 2) 荻原直樹，宮永憲一，青木圭一：実験による漏洩磁束法の適用性検証，第 25 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，2015.10