パルス着磁を用いた複数鉄筋かぶり厚の推定

堀 充孝^a 眞 亮介^a 小森 望充^{a,*}

Depth Estimation of Reinforcing Steel Bars by using Pulsed-Magnetization

Michitaka Hori^a, Ryouyuke Sana^a, Mochimitsu Komori^{a,*}

(Received July 5, 2015; revised September 24, 2015; accepted October 9, 2015)

Abstract

There are some non-destructive methods for estimating a depth of reinforcing steel bars in concrete structure. In this paper, we propose a technique for estimating the depths of reinforcing steel bars through the analysis using FEM and experiments. Reinforcing steel bars are magnetized by using pulse magnetization method. The spatial distribution of magnetic flux densities B_x , B_y , B_z at the surface of concrete structures are measured. Two reinforcing steel bars are magnetized by using the pulse magnetic field in the same direction and the opposite direction. Magnetic flux densities B_y and B_z are measured for estimating the depth of reinforcing steel bars. We have confirmed that the depth of reinforcing steel bars is estimated by using our proposed method. Furthermore, FEM analysis is performed for the experiment. The depth of the reinforcing steel bars is found to be estimated by using FEM. Relationship between the real depth by using experiments and the estimated depth by using FEM are discussed in our paper.

キーワード：鉄筋，パルス着磁，着磁器，磁束密度

Keywords : Reinforcing steel bar, Pulse magnetization, Magnetizer, Magnetic flux density.

1. はじめに

近年，鉄筋コンクリート構造物の劣化は社会問題であり，劣化診断は重要となつて来ている⁽¹⁻³⁾。鉄筋の劣化診断において，鉄筋の位置，鉄筋のかぶり厚（鉄筋までのコンクリートの厚み）の検査は電磁放射レーダ法，電磁誘導法の技術を使用して行われる。電磁波レーダ法⁽⁴⁻⁸⁾は，コンクリートの誘電率を用いて鉄筋までの距離を測定するため，誘電率の変化を補正する必要がある，その補正方法について研究がなされている。電磁誘導法^(9,10)は，鉄筋間の距離が短いときの補正方法の研究がなされている。著者らは，鉄筋をコンクリート表面からパルス着磁し，コンクリート表面における磁束密度の分布を測定することにより鉄筋の位置，かぶり厚，鉄筋の直径を推定する手法について研究を行なっている。先に，単独（一本）配筋した状態での鉄筋の位置，かぶり厚，

直径は，磁束密度分布を測定し，鉄筋位置において磁束密度の方向が変わるところ，最大の磁束密度を示す点などの特徴点から推定する方式を提案した^(11,12)。次に複数配筋された鉄筋の位置を推定する方法を提案した。複数配筋された鉄筋を最適回数のパルス着磁を行い，その磁束密度分布から複数鉄筋の位置を推定する方式を実験により検証した結果を報告した⁽¹⁴⁻¹⁶⁾。複数の鉄筋位置を推定できることが明らかになったので，本論文では，複数の鉄筋を二個のコイルを用いて同時に異極または同極で着磁し，複数配筋された鉄筋のかぶり厚を推定する方法を提案し，コイル二個を用いて複数鉄筋を同時に着磁し，かぶり厚推定法の検証を行った。FEM解析と実験により得られた磁束密度分布の比較を行い，鉄筋の磁化状態を確認した。更に得られた磁束密度分布から本方式に基づきかぶり厚推定し，かぶり厚を推定できることを確認した。本論文においてパルス着磁を用いて複数鉄筋におけるかぶり厚の推定法とその妥当性について報告する。参考文献⁽¹³⁾は，コイル一個を用いて複数の鉄筋一本一本をパルス着磁し，かぶり厚を推定したものであり本論文と手法が異なる。

* Corresponding author. E-mail: komori_mk@yahoo.co.jp

^a 九州工業大学

〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

Kyushu Institute of Technology

1-1, Sensuicho Tobata-ku Kitakyushu-shi, Fukuoka, Japan
804-8550

2. 複数鉄筋におけるかぶり厚推定法

2.1 鉄筋の着磁方法

コンクリート表面から鉄筋を着磁し、コンクリート表面で磁束密度分布の測定を行うことから、鉄筋を十分に着磁するためパルス着磁法を用いた。パルス着磁に使用する着磁装置は、磁界を発生するための着磁コイルと着磁コイルにパルス状の電流を流すための着磁器により構成される。着磁器のコンデンサ容量は $2000\mu\text{F}$ であり、出力電圧 $50\text{V}\sim 1.5\text{kV}$ の調整により発生磁界を可変することが可能である。着磁コイルは、内径 30mm 、外径 118mm 、高さ 86mm 、巻数 690 の空芯コイルを使用した。鉄筋の着磁は、着磁コイルに数 ms のパルス電流を通電して行った。本論文において、コイル中心の磁束密度は数 T であり、水分に起因する誘電率は無視できコンクリート領域を空気領域と仮定した。パルス着磁法は、装置の小型化・低価格化を図ることができ、機器に組み込んで着磁が可能であるなど実用性があると考えている。

2.2 コンクリート表面における磁束密度

コンクリート表面において鉄筋の初期の残留磁化に応じた磁束密度を測定する。鉄筋の残留磁化を取り除くため必要に応じて着磁を行う前に消磁を行っている。磁束密度は、磁気感度 5.0V/mT 、感磁面 $1\text{mm}\times 2\text{mm}$ の磁気センサを3方向測定できる様に構成し測定した。地磁気や外部磁気の影響は、あらかじめ測定した磁束密度値を減算することで除去している。磁束密度は仮想平面上において Fig.1 に示した X, Y, Z 方向の座標を取る。鉄筋長手方向を X 軸、長手方向へ垂直な方向を Y 軸、着磁コイルの中心軸方向に相当し鉄筋に垂直な方向を Z 軸とする。Z 軸方向は、コンクリートのかぶり厚の方向である。

2.3 鉄筋のかぶり厚推定法

鉄筋のかぶり厚を推定する方法として、コンクリート表面から 100mm 離れた位置にある単独の鉄筋をパルス着磁し、その磁束密度分布を測定し Z 軸方向の磁束密度と Y 軸方向の磁束密度を用いてかぶり厚を推定する方法

Fig. 1. Experimental setup for magnetization method

を提案した^(11,12)。実際にはコンクリート内部には複数配筋されており、複数の鉄筋におけるかぶり厚推定方法について詳述する。複数の鉄筋位置は、最適な着磁回数により着磁を行い、磁束密度分布を測定し、Z 軸方向の磁束密度 B_z が鉄筋位置において最大値を示す特徴を用いて推定する方法を提案した⁽¹⁴⁾。その手法により鉄筋位置を推定したのちに2本の鉄筋を同時に着磁する。各鉄筋の直下にて Fig.1(a),(b)に示すように着磁コイルから発生する磁界が逆方向（異極）の場合と同方向（同極）の場合の着磁を行い、それぞれの磁束密度分布を鉄筋間の中央点にて測定する。同極で着磁した場合及び、異極で着磁した場合における着磁後の磁束密度のベクトル図を Fig.2 に示す。Z 軸方向の磁束密度 $B_{Z1,2}$ 、Y 軸方向の磁束密度 $B_{Y1,2}$ とすると、異極で着磁した場合、Fig.2(a)に示すよう Z 軸方向の磁束密度 $B_{Z1,2}$ 、Y 軸方向の磁束密度 $B_{Y1,2}$ とすると、異極で着磁した場合、Fig.2(a)に示すように B_{Z1} と B_{Z2} は打ち消し合い、 B_{Y1} と B_{Y2} は合成され、合成された磁束密度を B_Y とする。また、同極で着磁した

(a) Case of different pole-magnetization

(b) Case of same pole-magnetization

Fig. 2. Magnetic flux density vector chart after magnetization

場合, Fig.2(b)に示すように B_{Y1} と B_{Y2} は打ち消し合い, B_{Z1} と B_{Z2} は合成され, 合成された磁束密度を B_Z とする。コンクリート表面から鉄筋までのかぶり厚 d , 磁束密度 B_Z , B_Y および鉄筋から鉄筋間の中央点までの距離 y の関係よりかぶり厚 d は, 式(1)

$$d = y \times B_Z / B_Y \quad (1)$$

但し, $B_Y = B_{Y1} + B_{Y2}$, $B_Z = B_{Z1} + B_{Z2}$ により推定することができる。

3. 磁束密度の解析とかぶり厚推定

3.1 解析方法

鉄筋のかぶり厚を推定するため, 2本の鉄筋に対して同極着磁と異極着磁を行う。鉄筋の同極着磁後と異極着磁後にコンクリート表面における磁束密度を解析するため, 汎用の FEM 解析ソフトを用いた。着磁コイルが発生する磁界の強さを解析し, 鉄筋の磁気特性は保磁力 7 kA/m, 着磁率, リコイル透磁率は実験から任意に設定し静磁場により鉄筋を着磁し, 着磁後のコンクリート表面に相当する位置での磁束密度分布の解析を行った。鉄筋は長手方向に磁化され, 鉄筋の着磁点においてはラジアル方向に磁束が発生する。鉄筋の磁化方向については参考文献^(11,14)において実験・解析を通して確認した。鉄筋から 100mm 離れた位置にある 2 個の着磁コイルに 450A を通電して解析を行った。2本の鉄筋は長さ 1m, 直径 25mm, 鉄筋間隔を 150mm, 200mm, 250mm とした。鉄筋は, Fig.2 に示すように X 軸方向を鉄筋の長手方向とし, 鉄筋間の中央点を Y 軸原点として 2 本配置した。X 軸原点は着磁点である。鉄筋間隔が 150mm の時は, Y 軸 -75mm と 75mm に鉄筋 2 本を配置した。解析領域は, 鉄筋を中央部に配置し, X 軸方向 3m, Y 軸方向 2m, Z 軸方向 2m の空間であり, 磁束密度分布は X 軸, Y 軸とも ± 200 mm の範囲を求めた。

3.2 解析によるかぶり厚の推定結果

鉄筋間隔 150mm におけるコンクリート表面での磁束密度分布を Fig.3, Fig4 に示す。Fig.3(a),(b)は異極着磁における磁束密度 B_Y , B_Z をそれぞれ示し, Fig.4(a),(b)は同極着磁における磁束密度 B_Y , B_Z をそれぞれを示す。横軸は X 軸方向, 縦軸は Y 軸方向を示し 400mm $\times$ 400mm の平面における磁束密度分布を示す。異極で着磁した場合, Fig.2(a)で示したように磁束密度 B_Y は, 2本の鉄筋の磁束密度が合成され大きくなることが分かる。磁束密度 B_Z は, 逆に鉄筋の磁束密度が打ち消し合いゼロとなることが分かる。同極で着磁した場合, Fig.2(b)で示したように磁束密度 B_Y は, 2本の鉄筋の磁束密度が打ち消し合いゼロとなることが分かる。磁束密度 B_Z は, 逆に 2本の鉄筋の磁束密度が合成され大きくなることが分かる。

(a) Distribution of magnetic flux density B_Y

(b) Distribution of magnetic flux density B_Z

Fig. 3. Analysis results of distribution of magnetic flux density in the case of different pole-magnetization

(a) Distribution of magnetic flux density B_Y

(b) Distribution of magnetic flux density B_Z

Fig. 4. Analysis results of distribution of magnetic flux density in the case of same pole-magnetization

鉄筋間隔 150mm, 200mm, 250mm において鉄筋中心における Y 軸方向-200mm~200mm までの磁束密度分布を Fig.5 に示す。Fig.5(a)は異極着磁後における磁束密度分布 B_Y を示し, Fig.5(b)は同極着磁後における磁束密度分布 B_Z を示す。鉄筋間の中央点における磁束密度 (B_Y , B_Z) は, 鉄筋 150mm 時に(0.179mT, 0.239mT), 200mm 時に(0.166mT, 0.166mT), 250mm 時に(0.141mT, 0.113mT)であり, これらの磁束密度と鉄筋から測定位置までの距離 y を用いて 式(1)に基づき, かぶり厚 d の推定を行った。測定は, 2 本の鉄筋間の中央点で行っており, 鉄筋から測定位置までの距離 y は, 鉄筋間隔 150mm, 200mm, 250mm に対してそれぞれ 75mm, 100mm, 125mm である。推定したかぶり厚と鉄筋間隔の関係を Fig.6 に示す。鉄筋間隔 150mm, 200mm, 250mm においてかぶり厚 100mm を精度良く推定することが可能であることが分かる。この結果, 鉄筋直下において異極と同極で着磁し, その磁束密度 B_Y , B_Z の測定結果と鉄筋から測定点までの距離 y を用いて式(1)により鉄筋のかぶり厚を推定できることを確認した。

(a) Distribution of magnetic flux density B_Y in the case of different pole-magnetization

(b) Distribution of magnetic flux density B_Z in the case of same pole-magnetization

Fig. 5. Analysis results of distribution of magnetic flux density B_Y and B_Z

Fig. 6. Estimated result of depth of reinforcing steel bars by analysis

4. かぶり厚推定実験

4.1 実験方法

次に, 実際に鉄筋を着磁し磁束密度分布からかぶり厚を推定する実験を行った。実験に用いた鉄筋は, 直径 25mm の異形鉄筋 2 本を用い, かぶり厚 100mm を想定し, コンクリートは空気と仮定して実験を行った。鉄筋間隔は, 解析を行った 150mm, 200mm, 250mm とした。着磁条件は, 着磁電圧 1500V, コンデンサ容量 2000 μ F により着磁した。着磁はコイル 2 個を使用して行った。2 本の鉄筋は, かぶり厚 100mm に相当する位置に, 各鉄筋間隔に非磁性材であるベーク板の上に設置した。異極着磁の場合, 鉄筋 2 本の直下にコイルを配置し, コイルの発生磁場が異極となるようにパルス電流を通電して着磁を行った。また同極着磁の場合, 鉄筋 2 本の直下にコイルを配置し, コイルの発生磁場が同極となるようにパルス電流を通電して着磁を行った。これらの 2 本の鉄筋は, 非磁性材であるベーク板の上に設置してあり, コンクリート表面に相当する 100mm 離れた位置において磁気センサを走査して磁束密度を測定し, かぶり厚推定を行った。

4.2 実験結果

解析により得られた磁束密度分布と比較するため実験で得られた鉄筋間隔 150mm におけるコンクリート表面に相当する位置での磁束密度分布を Fig.7, Fig.8 に示す。Fig.7(a),(b)は異極着磁における磁束密度 B_Y , B_Z をそれぞれ示す。解析結果と同様に磁束密度 B_Y は, 2 本の鉄筋の磁束密度が合成され大きくなり, 磁束密度 B_Z は, 逆に鉄筋の磁束密度が打ち消し合いほぼゼロとなっている。Fig.8(a),(b)は同極着磁における磁束密度 B_Y , B_Z をそれぞれ示す。解析結果と同様に磁束密度 B_Y は, 2 本の鉄筋の磁束密度が打ち消し合いほぼゼロであり, 磁束密度 B_Z は, 逆に 2 本の鉄筋の磁束密度が合成され大きくなっている。実験結果は, 解析結果と同様の分布傾向を示していることを確認した。解析結果と実験結果に若干の差があるが, 測定誤差によるものと考えている。鉄筋間隔

(a) Distribution of magnetic flux density B_y

(b) Distribution of magnetic flux density B_z

Fig. 7. Experimental results of distribution of magnetic flux density in the case of different pole-magnetization

(a) Distribution of magnetic flux density B_y

(b) Distribution of magnetic flux density B_z

Fig. 8. Experimental results of distribution of magnetic flux density in the case of same pole-magnetization

150mm, 200mm, 250mm における鉄筋中央部での実験で得られた磁束密度分布を示す。Fig.9(a)は、鉄筋を 2 本同時に異極となるように着磁した場合の磁束密度分布 B_y を示す。解析結果と比較すると 150mm と 200mm のピーク値の差異が小さいようであるが、実験結果は解析結果と同様の傾向を示している。Fig.9(b)は、鉄筋を 2 本同時に同極となるように着磁した場合の磁束密度分布 B_z を示す。解析結果と比較すると、それぞれの鉄筋間隔での実験による磁束密度分布は、解析結果を再現している。また、鉄筋位置付近でピーク値を示し、2 本の鉄筋のピーク値はほぼ一致している。実験により測定した異極着磁による磁束密度 B_y と同極着磁による磁束密度 B_z 、及び鉄筋から測定位置までの距離 y を用いて式(1)に基づきかぶり厚 d の推定を行った。その結果、かぶり厚と鉄筋間隔の関係を Fig.10 に示す。かぶり厚推定値は、鉄筋間隔 150mm, 200mm, 250mm において、真値 100mm に対して各々 101mm, 106mm, 116mm であり、鉄筋間隔が長くなるにつれてかぶり厚が大きく推定される結果となった。誤差率は、各々 1%, 6%, 16% であった。かぶり厚推定による真値との誤差の要因は、鉄筋間隔が長くなる

(a) Distribution of magnetic flux density B_y in the case of different pole-magnetization

(b) Distribution of magnetic flux density B_z in the case of same pole-magnetization

Fig. 9. Experimental results of distribution of magnetic flux density B_y and B_z

Fig. 10. Estimated result of depth of reinforcing steel bars by experiment

に従い磁束密度が微小となるため、磁気センサの方向・位置合わせによる誤差によるものと推測している。今後、測定プローブの方向・位置については、機械的に精度良く制御した測定方法に改善して行く予定である。測定誤差は、実用上問題にならない範囲であると考えている。今回の検証により、本手法は複数配筋された鉄筋のかぶり厚を推定できることを確認した。

5. おわりに

鉄筋コンクリート構造物において劣化診断を行う上で、鉄筋のかぶり厚を推定することは重要である。著者らは、パルス磁界を用いて鉄筋の位置を推定する手法を提案し、本論文において鉄筋の位置を推定した後にパルス着磁を用いてかぶり厚を推定する方法を提案した。位置が既知である2本の鉄筋の直下に2個のコイルを配置し、異極で着磁し磁束密度 B_Y を測定する。更に同極で着磁し磁束密度 B_Z を測定する。測定した磁束密度 B_Y 、 B_Z 用い、本方式により鉄筋のかぶり厚を推定できることをFEM解析および実験により確認した。今後、効率良くかぶり厚を推定できる様に改良を加えるとともに、メッシュ構造の配筋状態におけるかぶり厚の推定、さらに測定精度向上について基礎研究を行っていくとともに、本手法は、新規な測定法であり電磁誘導法、電磁波レーダ法など従来法との優位性についても研究により明らかにして行く予定である。

文 献

- (1) 笠井芳夫:「コンクリート構造物への非破壊検査の展開 コンクリートの非破壊試験・検査の進展状況」, 非破壊検査, Vol. 56, No. 2, pp. 77-83, 2007
- (2) 魚本健人, 加藤潔, 広野進:「コンクリート構造物の非破壊検査」, 森北出版株式会社, pp. 6-20, 2000
- (3) T.Uomoto: “Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000”, Published By Elsevier, pp. 615-678, 2000
- (4) 森濱和正:「非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査(1) 共同研究の内容と成果の概要」, 非破壊検査, Vol. 58, No. 4, pp. 126-131, 2009
- (5) 田中正吾, 岡本昌幸:「電磁波レーダを用いた鉄筋の腐蝕厚計測(第二報)」, 日本非破壊検査協会, 平成 21 年度春季大会講演概要集, pp. 157-160, 2009
- (6) Hubbard S.S., J.Zhang, P.J.Monteiro, J.E.Peterson, and Y.Rubin: “Experimental Detection of Reinforcing Bar Corrosion Using Nondestructive Geophysical Techniques”, ACI Materials Journal, Vol. 100, No. 6, pp. 501-509, 2003
- (7) Shaw M.R., S.G.Millard, and T.C.K.Molyneux: “Location of Steel Reinforcement in Concrete using ground penetrating Radar and Neural Networks”, NDT&E International, Vol. 38, No. 3, pp. 203-212, 2005
- (8) S. Tanaka, and M.Wakabayashi: “On Measurement of the Depth and the Diameter of Steel Bars in Reinforced Concrete Using Electromagnetic Wave (Radar)”, SICE-ICASE International Joint Conference, No. 18-21, pp. 2555-2559, 2006
- (9) 飯田洋志, 松本功, 久富真悟, 森濱和正:「非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査(2)非破壊試験によるコンクリート構造物の鉄筋かぶり厚さの測定」, 非破壊検査, Vol. 58, No. 4, pp. 132-137, 2009
- (10) Benitez D.S., Sung Quek, Gaydecki, and P.Torres V.: “A 1-D Solid-State-Sensor-Based Array System for Magnetic Field Imaging of Steel Reinforcing Bars Embedded within Reinforced Concrete”, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 9, pp. 3335-3340, 2009
- (11) 小森望充, 堀充孝, 深川卓哉:「パルス着磁を用いた鉄筋のかぶり厚と直径の新しい評価方法」, 日本 AEM 学会誌, Vol. 19, No. 1, pp. 63-67, 2011
- (12) M.Hori, R.Sana, and M.Komori: “Proposal of Non-Destructive Evaluation Method for Reinforcing Steel Bars by Using Pulsed-Magnetization”, International Conference Electrical Engineering (Hong Kong, July, 2011), pp. 1-6, 2011
- (13) M.Hori, R.Sana, and M.Komori: “Depth Estimation of Reinforcing Steel Bars by Using Pulsed-Magnetization”, International Conference Electrical Engineering (Hong Kong, July, 2011), pp. 1-6, 2011
- (14) 堀充孝, 眞亮介, 小森望充:「パルス着磁による鉄筋位置の推定法」, 日本 AEM 学会誌, Vol. 21, No. 2, pp. 176-181, 2013
- (15) M.Hori, R.Sana, and M.Komori: “Estimation Method of the Positions of Reinforcing Steel Bars by Using Pulsed-Magnetization”, International Conference Electrical Engineering (Xiamen, July, 2013), pp. 1-6, 2013
- (16) M.Hori, R.Sana, and M.Komori: “Estimation Method of the Positions of Reinforcing Steel Bars by Using Pulsed-Magnetization”, Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 4, pp. 315-318, 2014

堀 充孝

1986年3月明治大学工学部電気工学専攻修了。
2009年4月九州工業大学大学院工学研究院先端機能システム工学系研究院博士課程入学，現在に至る。鉄筋コンクリート構造物における非破壊検査の研究に従事。

眞 亮介

2009年3月九州工業大学先端機能システム工学学科卒業。2011年4月九州工業大学大学院工学研究院先端システム工学修了。鉄筋コンクリート構造物における非破壊検査の研究に従事。

小森 望充

1984年3月大阪大学基礎工学研究科制御工学分野修了。2008年4月九州工業大学大学院工学研究院先端機能システム工学研究系教授，現在に至る。磁気浮上及び超電導応用メカトロニクスの研究に従事。