

## 学術論文

## パルス着磁を用いた鉄筋のかぶりと直径の新しい評価方法

## New evaluation method of the depth and the diameter of a reinforcing steel bar using the pulsed magnetization

小森 望充<sup>\*1</sup> (正員), 堀 充孝<sup>\*2</sup> (学生員), 深川 卓哉<sup>\*1</sup>

Mochimitsu KOMORI (Mem.), Michitaka HORI (Mem.), Takuya FUKAGAWA

For the evaluation of reinforcing steel bar, we often use an electromagnetic induction method, electromagnetic radiation radar and a self-potential method which is a non-destructive testing. A new method of evaluating diameter and depth of the reinforcing steel bar is proposed in this paper. At first, we will detect the position of the reinforcing steel bar based on the new method. The internal reinforcing steel bar will be magnetized from the surface of concrete by the pulsed magnetization method. The spatial distribution of the magnetic flux density on the surface of the concrete will be measured, and the position of the reinforcing steel bar will be detected from the distribution shape. The depth of the reinforcing steel bar can be easily calculated by the spatial distribution of the magnetic flux density. The diameter of the reinforcing steel bar will be detected from the magnetic flux density. We have already confirmed that the technique position, depth and diameter of a reinforcing steel bar through basic experiments.

**Keywords:** reinforcing steel bar, pulsed magnetization, magnetizer, magnetic flux density.

## 1 緒言

近年、鉄筋コンクリート構造物の劣化診断が重要視され、鉄筋位置の検知、鉄筋かぶり深さ、鉄筋の腐食検出など非破壊検査による劣化診断が行われている[1]。非破壊の検査手法として電磁誘導法、自然電位法、電磁波レーダ法などの技術が用いられている。自然電位法は、コンクリートの水分含有量によって影響を受けるため腐食発生電位を計測しても腐食していると判断することができない[2]。電磁波レーダ法は、簡便な手法で短時間に広範囲の調査を行うことができるが、誘電率の補正を行うなどの必要があり各種研究が盛んに行われている[3,4]。電磁誘導法は隣接鉄筋の間隔が測定精度に影響を及ぼすため、補正を行う研究がなされている[5]。現在において鉄筋位置、鉄筋かぶり深さ及び鉄筋腐食の検出評価する方法として、それぞれ解決すべき課題を有している。パルス電磁力により鉄筋を振動させその音響を利用してコンクリート中の鉄筋かぶり深さを推定する研究[6]も行われているが、コンクリートの密度のばらつきなどにより誤差を有することが考えられる。筆者らは、鉄筋コンクリート表面においてパルス磁界を印加して鉄筋を着磁し、コンクリート表面において鉄筋の磁束密度を測定し、

その磁束密度分布を解析することで鉄筋の位置、鉄筋のかぶり深さ、更には鉄筋の直径を推定する方式について研究を行っている。本方式は、広範囲な磁束密度分布を測定し、その分布から鉄筋の位置、かぶり深さ、鉄筋の直径を一度に推定できることから検査時間を短縮でき、比較的安価に装置を構築することができ実用的であると考えている。本論文においてパルス着磁による鉄筋の磁束密度分布から鉄筋を評価する新規な手法について報告する。

## 2 鉄筋のかぶりと直径の評価方法

## 2.1 パルス着磁法

本手法においてコンクリート表面から鉄筋を着磁して、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ことが重要である。コンクリート内部に存在する鉄筋を着磁する方法として、強磁界を発生する希土類磁石を近づける、コイルに励磁電流を通電し磁界を発生させるなどが考えられる。鉄筋コンクリート表面から 100mm 程度離れて内部に存在する鉄筋を着磁するためには、強力な磁界が必要となる。希土類磁石を用いるだけでは磁界が弱く鉄筋まで十分な磁界を与えることが出来ない。また、コイルに直流電流を流して磁界を発生させる場合、コイル発熱が大きくなり、冷却装置が必要になる。このため、効率良くかつ高磁界を発生させることが可能な

連絡先: 堀 充孝, 〒190-0031 東京都立川市砂川町 8-59-2,  
日本電磁測器株式会社技術開発部,  
e-mail: hori @j-ndk.co.jp

<sup>\*1</sup>九州工業大学 <sup>\*2</sup>日本電磁測器株式会社

パルス着磁法を用いる。パルス着磁法とは、コイルにパルス電流を流すことによって、瞬間的に強力な磁界を発生させ、その磁界を鉄筋に印加することにより磁化する方法である。この手法では、コイルに対して瞬間的に大電流を流して高磁界を発生させるため、大型コイルなどを必要とせず、装置の小型化・低価格化を図ることができ、機器に組み込んでの着磁が可能であるなど実用性がある。

## 2.2 かぶりと直径の評価

鉄筋位置の評価は、着磁した鉄筋から発生する磁束密度をコンクリート表面上において各方向成分の磁束密度を測定することにより行う。その磁束密度分布において、例えば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を見出すことにより鉄筋の位置を容易に推定することができる。着磁後にコンクリート表面上で得られる鉄筋の磁束密度を測定し、その分布を解析することにより鉄筋のかぶり深さを評価する手法を Fig. 1 に示す。鉄筋は、着磁コイル直下の部分に Z 軸方向の磁気モーメントが形成され、Fig. 1 では着磁コイル直下の鉄筋の断面図を示す。このとき、コンクリート表面に相当する面（鉄筋からコンクリート表面までの距離  $d$ ）での磁束密度の X 成分  $B_x$ 、Y 成分  $B_y$ 、Z 成分  $B_z$  を計測する。

コンクリート内部の鉄筋までのかぶり深さは、

$$d = \frac{B_z}{B_y} y \quad (1)$$

$d$ : 鉄筋のかぶり深さ、 $B_y$ : Y 方向の磁束密度  
 $B_z$ : Z 方向の磁束密度、 $y$ : 鉄筋直上からの距離

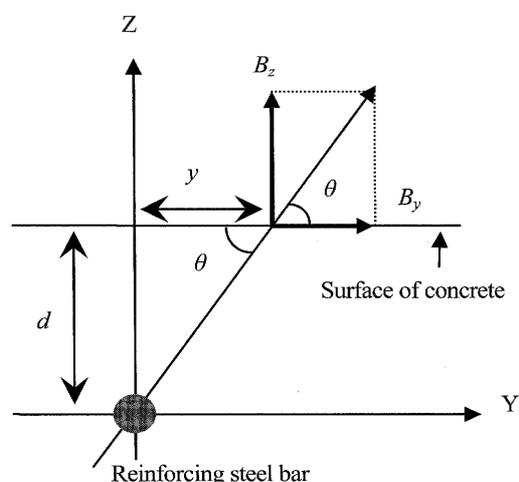


Fig. 1 Method to evaluate the depth of a reinforcing steel bar

によって表される。鉄筋の各直径において鉄筋のかぶり深さを変化させてコンクリート表面の磁束密度を測定したデータをあらかじめ準備し、実際に測定した磁束密度の大きさを照らし合わせて鉄筋の直径を推定する。

## 3 実験装置および実験方法

### 3.1 装置概要

本手法における鉄筋のかぶりと直径の評価の有効性を確認するための実験装置を Fig. 2 に示す。鉄筋を着磁するための着磁コイルと着磁電源、磁束密度を測定するための磁気センサからなり、着磁コイルから距離  $d$  離れた位置に鉄筋を設置する。この距離  $d$  は、鉄筋のかぶり深さに相当する。実験において鉄筋は、長さを全て 1m とし、鉄筋の直径は 8, 10, 12mm の 3 種類の丸棒鋼を用意した。鉄筋の材質は一般構造用鋼材 (SS400) を使用した。

#### 3.1.1 着磁装置

実験に使用する着磁電源の仕様を Table1 に、着磁コイルの仕様を Table2 に示す。出力電圧は 50V~1500V まで調整することができ、発生磁界を制御することが可能である。コンデンサ容量は 2000 $\mu$ F であり、着磁電流は 20kA まで通電可能である。着磁コイル（空芯コイル）を着磁電源に接続し、着磁電源内部のコンデンサに電圧を充電した後に、着磁回路に直列に接続した電力用半導体サイリスタを ON することにより、コンデンサ容量と着磁コイルの抵抗・インダクタンスにより決定されるパルス幅とピーク値のパルス電流を流すことができる。本着磁装置はコンデンサと着磁コイルにより減衰する減衰振動電流を流すこともでき、減衰交流磁界を得られることから鉄筋の脱磁を行うこと

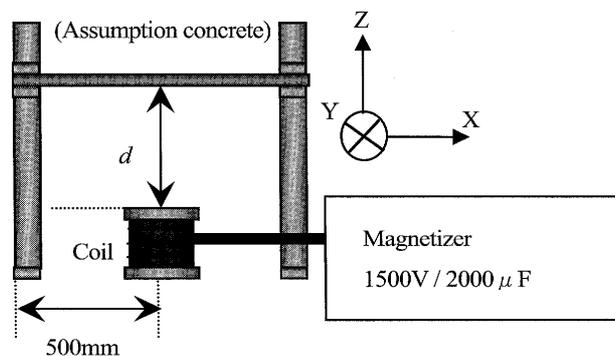


Fig. 2 Experimental setup for pulsed magnetization

Table 1 Specification of magnetizer

Power supply	1phase AC200V, 20A
Output voltage	50V~1500V
Output maximum current	20kA at Magnetizing 7kA at Demagnetizing
Capacitor	2000 $\mu$ F

Table 2 Specification of coil

Inside diameter	40mm
Outside diameter	82mm
Height	86mm
Wire diameter	$\phi$ 1.5mm
Number of turns	690 turns

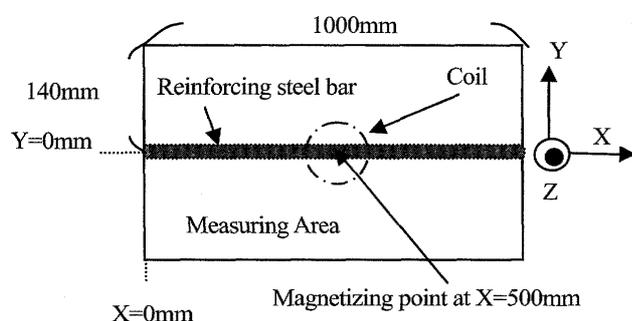


Fig. 3 Measurement area.

も可能である。鉄筋の残留磁気を取り除くため、着磁を行う前に脱磁を行っている。

### 3.1.2 磁束密度測定装置

鉄筋から距離  $d$  離れた仮想平面上において鉄筋中央に Fig. 3 に示すように 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、紙面に対して垂直な方向を Z 軸とする。X 軸の原点は左端で、Y 軸の原点は鉄筋中心軸の直上である。計測の方法は、X 方向に 50mm 間隔、Y 方向に 20mm 間隔の 20 $\times$ 15 点において各方向の磁束密度  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  をそれぞれ測定する。磁束密度の測定には磁気インダクタンスセンサ (感度 6.25V/mT, 1mm $\times$ 2mm) を用いた。地磁気の影響は、測定データから除去している。

### 3.2 実験方法

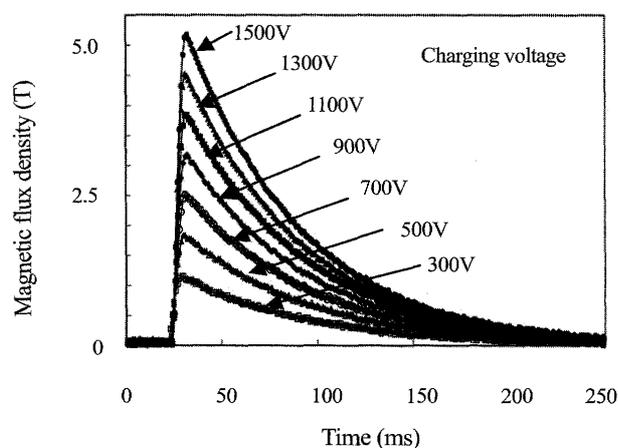
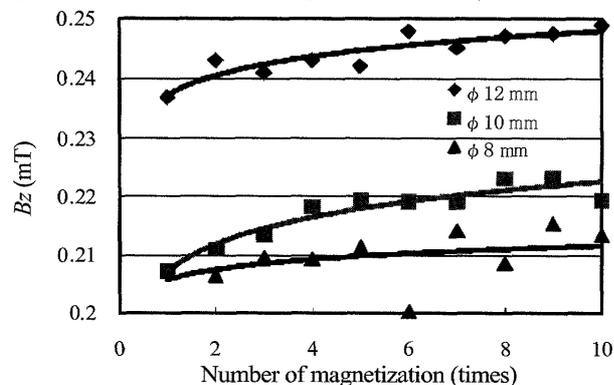
実際には、コンクリート中の鉄筋をパルス磁界により着磁して、着磁後にコンクリート表面において、その磁束密度を測定する。本実験においては、Fig. 2 に示すように着磁コイルの直上に鉄筋のかぶり深さ  $d$  離れた位置に鉄筋を配置し、コンクリートは磁気特性への影響は小さいと考え、空気として実験を行なった。

着磁後に鉄筋から距離  $d$  離れた位置にて磁束密度を測定し、その磁束密度の分布から鉄筋の位置・かぶり深さを推定した。推定された鉄筋のかぶり深さと真値の誤差を明確にし、更に鉄筋の直径を推定した。本実験を通して鉄筋のかぶり深さ・直径推定の有効性を確認する。実験は、鉄筋のかぶり深さ  $d$  を 100mm として行なった。

## 4 実験結果・考察

### 4.1 着磁結果と鉄筋の直径について

パルス着磁における着磁電圧とコイル中心に発生する磁束密度の関係を Fig. 4 に示す。コイル中心の磁束密度は、ホールセンサを用いて測定した。着磁条件は、充電電圧 1500V、コンデンサ容量 2000 $\mu$ F であり、着磁コイル中心の磁束密度は約 5T で実験を行なった。着磁後に Fig. 3 に示すように着磁コイルの位置 (着磁点 X=500mm, Y=0mm) において Z 方向の磁束密度を測定した。Z 方向の磁束密度  $B_z$  の絶対値と着磁回数との関係を Fig. 5 に示す。同一直径の鉄筋において着磁回

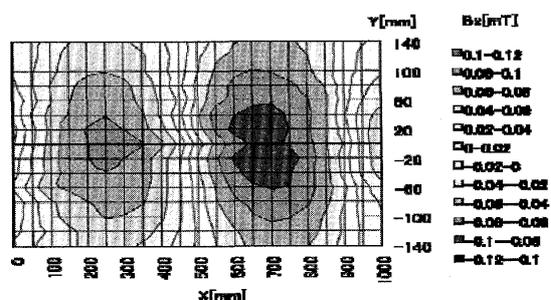
Fig. 4 Relation between magnetic flux density  $B_z$  and timeFig. 5 Relation between magnetic flux density  $B_z$  and number of magnetization

数を増やして行くと磁束密度  $B_z$  は増加する。しかし、5 回程度で磁束密度はほぼ一定で変化が小さくなるのが分かる。そこで、本研究においては、着磁を 5 回繰り返し行うこととした。鉄筋の直径が大きくなると磁束密度が大きくなるのが分かる。

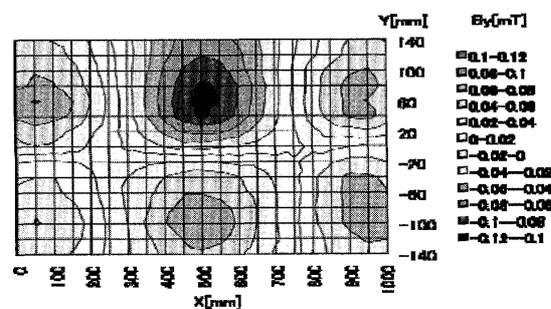
#### 4.2 磁束密度分布と鉄筋位置の評価

鉄筋と着磁コイル間の距離 100mm において、着磁後に各方向の磁束密度分布  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  を測定した結果を Fig. 6, 7 に示す。横軸に X 方向の位置、縦軸に Y 方向の位置を示し、擬似カラー表示で測定した磁束密度の大きさを示した。鉄筋は直径が 8mm と 12mm の 2 種類の丸棒鋼を使用し、鉄筋直径 8mm 時の磁束密度の測定結果を Fig. 6 に、鉄筋直径 12mm 時の磁束密度

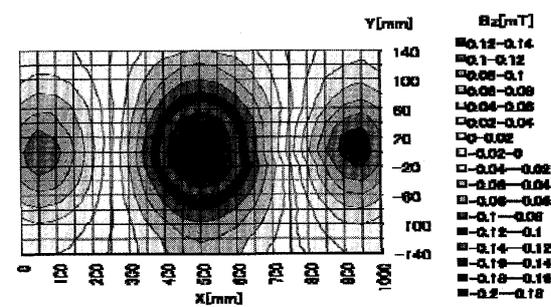
の測定結果を Fig. 7 に示す。基本的に鉄筋の直径が大きい方が、発生する磁束密度が大きいことが分かる。X 方向の磁束密度  $B_x$  の分布は、鉄筋の中央 (着磁点  $X=500\text{mm}$ ) を境界にして磁束密度の符号が変わっていることが分かる。これは、着磁後に鉄筋の長手方向 (X 軸方向) 左右より磁束が鉄筋中央に入り込む様子を示している。Y 方向の磁束密度  $B_y$  の分布は、鉄筋を境界にして磁束の方向が逆転しており、 $B_y$  の分極点に鉄筋が配置されていることが分かる。これにより鉄筋がどの位置に配置されているかが推定でき、Fig. 6, 7 の Y 方向の磁束密度  $B_y$  の分布が正負境界である  $Y=0\text{mm}$  付近に鉄筋があることが分かる。Z 方向の磁束密度  $B_z$  の分布は、鉄筋が設置してある着磁点の磁束密度が最も強く、鉄筋の両側に反対向きの磁束密度の分布が形



(a) X-direction  $B_x$

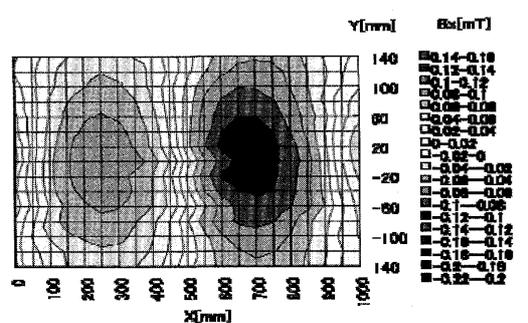


(b) Y-direction  $B_y$

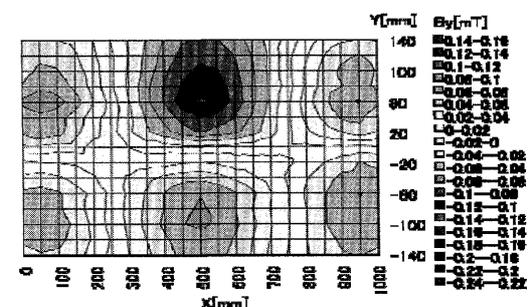


(c) Z-direction  $B_z$

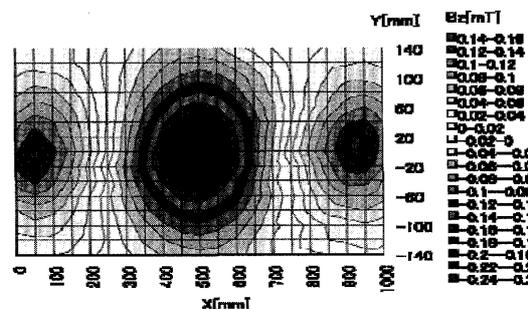
Fig. 6 Magnetic flux density distribution by the reinforcing steel bar  $\phi 8\text{mm}$ .



(a) X-direction  $B_x$



(b) Y-direction  $B_y$



(c) Z-direction  $B_z$

Fig. 7 Magnetic flux density distribution by the reinforcing steel bar  $\phi 12\text{mm}$ .

成されている。 $B_z$ の分布の中央の最大値を示す場所の直下に鉄筋が存在していることが分かる。このように、鉄筋の位置は磁束密度分布により推定できることを確認した。

#### 4.3 鉄筋のかぶり深さ評価

鉄筋の位置は、4.2項で記述したように着磁後の磁束密度分布から推定することができる。次に鉄筋のかぶり深さについて評価する。Fig. 6(b), (c)に代表されるように着磁後の磁束密度分布において  $X=500\text{mm}$  位置における  $Y$  方向の磁束密度  $B_y$ ,  $Z$  方向の磁束密度  $B_z$  の測定結果を Fig. 8 に示す。各磁束密度  $B_y$ ,  $B_z$  は、 $X=500\text{mm}$  と固定し  $-140\text{mm} < Y < 140\text{mm}$  の範囲を  $20\text{mm}$  間隔で測定値した値である。 $Y=0\text{mm}$  位置に鉄筋が配置されており、 $Y$  方向の磁束密度  $B_y$  は、鉄筋配置位置で符号が変化している。 $Z$  方向の磁束密度  $B_z$  は鉄筋直上で最大値を示している。この測定結果を用いて 2.2 項に記述した式(1)を用いて鉄筋のかぶり深さを求め、その結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 において推定結

果の変動が少ない範囲 ( $Y < -50\text{mm}$ ,  $Y > 50\text{mm}$ ) で平均のかぶり深さを求めた。鉄筋との距離  $100\text{mm}$  に対して測定結果から求められたかぶり深さは、直径  $8\text{mm}$  の場合  $97.8\text{mm}$ , 直径  $10\text{mm}$  の場合  $105.1\text{mm}$ , 直径  $12\text{mm}$  の場合  $97.3\text{mm}$  であった。以上の結果に示すように、測定結果である  $B_y$ ,  $B_z$  と式(1)を用いることにより、多少の誤差はあるものの数  $\text{mm}$  程度の誤差で鉄筋のかぶり深さを推定することができた。誤差の原因は、磁束密度の測定誤差によるものと考えられる。次に、鉄筋のかぶり深さを変化させたとき、鉄筋の直径  $8\text{mm}$ ,  $10\text{mm}$ ,  $12\text{mm}$  について同様に着磁後に磁束密度を測定し、求められた鉄筋のかぶり深さと真値の関係を Fig. 10 に示す。本手法により推定された鉄筋のかぶり深さは、真値に比例しており鉄筋のかぶり深さを十分推定可能であると考えられる。直径が違う鉄筋毎に、本手法により推定した鉄筋のかぶり深さと真値の誤差を Fig. 11 に示す。平均誤差は数%であるが、鉄筋のかぶり深さの変化に対して、本手法により鉄筋のかぶり深さを推定することが可能であることを確認した。

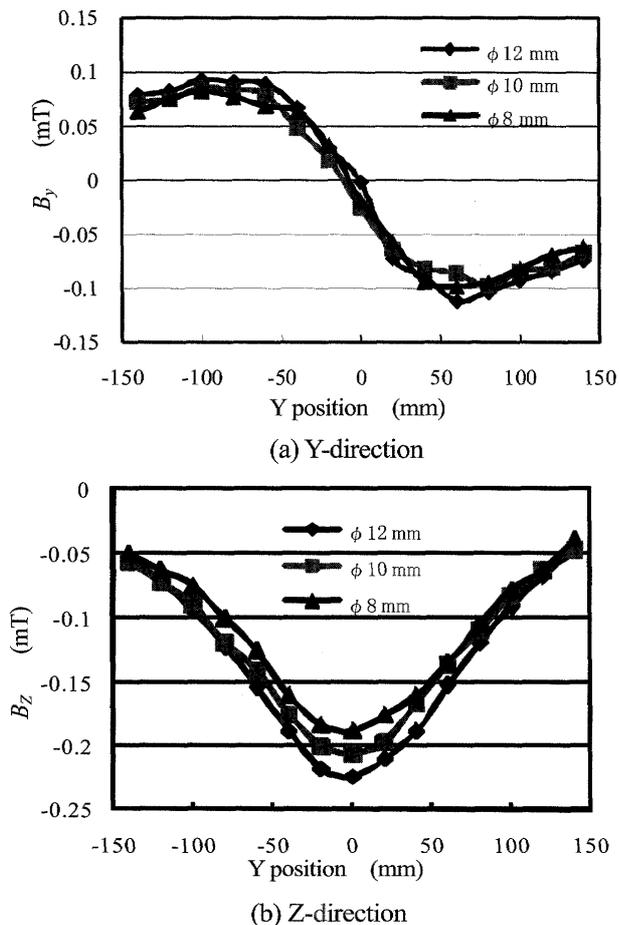


Fig. 8 Magnetic flux density distribution along the Y axis (at  $X=500\text{mm}$ )

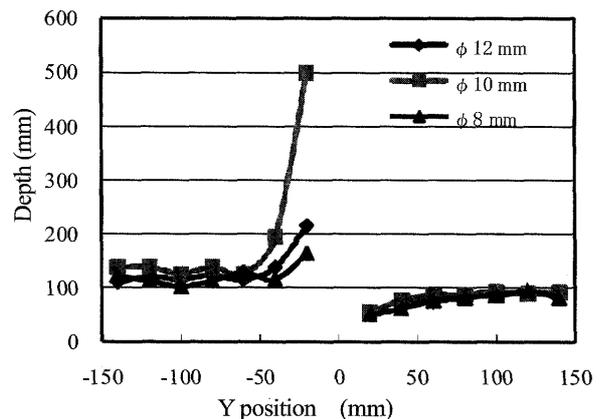


Fig. 9 Estimated depth of the reinforcing steel bar (at  $d=100\text{mm}$ )

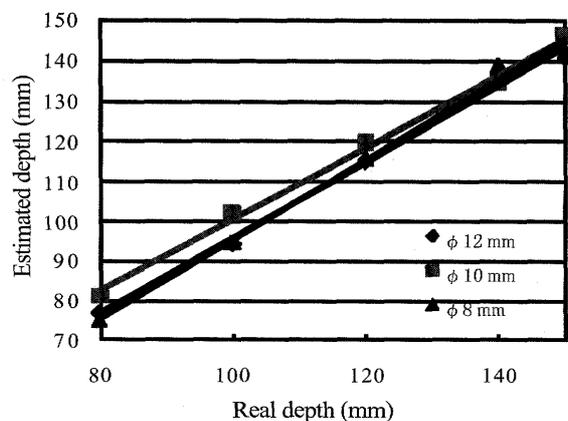


Fig. 10 Relation between estimated depth and real depth of reinforcing steel bars

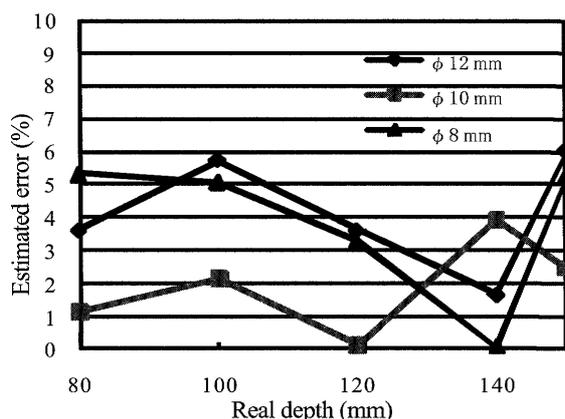


Fig. 11 Difference between estimated depth and the real depth of reinforcing steel bars

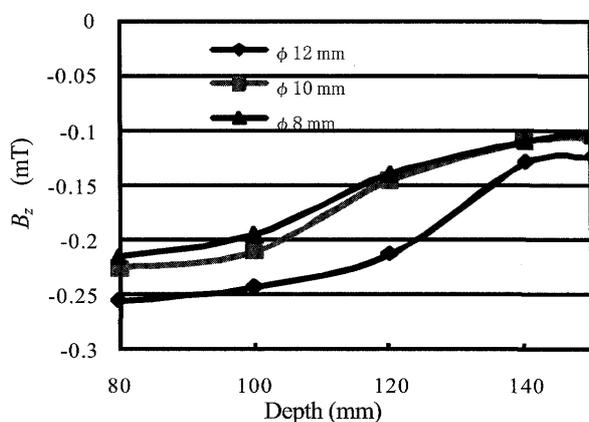


Fig. 12 Relation between maximum magnetic flux density  $B_z$  and depth of reinforcing steel bars

#### 4.4 鉄筋直径の評価

着磁点で測定される最大の磁束密度  $B_z$  は鉄筋の直径に依存すると考え、鉄筋までの距離と最大の磁束密度から直径を推定した。Fig. 12 に鉄筋のかぶり深さに対する最大の磁束密度  $B_z$  の関係を示す。鉄筋のかぶり深さが浅い範囲では鉄筋の直径によって磁束密度に差異が見られるが、かぶり深さが大きくなると磁束密度の差が減少していることが分かる。これは、鉄筋と着磁コイルの距離が長くなると同時に測定距離も長くなるためと考えられる。しかし、これは着磁磁界をより強くすることで改善できるのではないかと考える。鉄筋を着磁した後に測定した磁束密度  $B_z$  の再現性は 4.1 項に記載した。鉄筋の直径を求めるには鉄筋のかぶり深さを推定し、Fig. 12 を用いて求めた鉄筋のかぶり深さと最大の磁束密度の関係から鉄筋の直径を推定する。実験結果から鉄筋のかぶり深さ 100mm、鉄筋の直径

12mm で評価を行うと、4.3 項に示した磁束密度分布から鉄筋のかぶり深さ 97.3mm を求めることができる。そして、Fig. 7(c)に示すように Z 方向の磁束密度の分布から得られた最大の磁束密度は  $-0.24\text{mT}$  であった。Fig. 12 のグラフより 97.3mm のかぶり深さで  $0.24\text{mT}$  を示す鉄筋の直径は 12mm であると判断される。これにより鉄筋の直径を推定することができる。すなわち、本手法により鉄筋の直径を評価することが可能であると考ええる。

#### 5 結言

鉄筋のかぶり深さ・直径を評価するため鉄筋の着磁方向・磁束密度測定装置の検討・着磁特性の評価を試みた。コンクリートからの着磁にパルス着磁法を用いることでその可能性を見出し、着磁後に鉄筋の残留磁束密度をコンクリート表面における漏洩磁束密度として測定可能であることを確認した。測定した各方向の磁束密度  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  の分布から鉄筋の状態を評価する方法を提案した。鉄筋の直径と着磁距離によって鉄筋の着磁に再現性があることを確認した。また、鉄筋を着磁して、その磁束密度分布を測定することで鉄筋の位置を推定し、鉄筋の直径、かぶり深さを推定することができることを確認した。今後の課題として、本手法によるデータの蓄積を行い、評価の信頼性を図ることが挙げられる。更に複数の鉄筋に関する評価手法の確立が必要である。

(2010年6月1日受付, 2010年10月20日再受付)

#### 参考文献

- [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, 56(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] 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, 58(4), pp.126-131, 2009
- [4] 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
- [5] 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, 58(4), pp.132-137, 2009
- [6] 高鍋雅則, 橋本光男, 鉄筋コンクリート診断のためのパルス電磁力音響法の提案, 非破壊検査, 52(11), pp.628~632, 2003