

## 渦電流法によるさび汚れの検出 Rust dirt detection using eddy current

○前畑 尚行 横田 理\*\*

○Naoyuki Maehata\* Osamu Yokota\*

\*日本大学大学院, \*\*日本大学

\*Graduate School, Nihon University, \*\*Nihon University

キーワード: さび汚れ(Rust dirt), 渦電流法(Eddy current), 腐食鉄筋 (Corroded Reinforcing Bars),  
リサージュ図形(Lissajous' pattern)

連絡先: 〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原 1  
日本大学 工学部 機械工学科 工作研究室, Tel: (024)956-8772,  
E-mail: g17313@cc.ce.nihon-u.ac.jp

### 1. 緒言

コンクリート構造物は劣化, 経年変質するので, 構造物の耐久性診断が必要となり, そのための手法として非破壊検査が重要視されている. コンクリート構造物の耐久性診断を行う方法として, 従来より X線透過法, 超音波法, AE法, 赤外線サーモグラフィ法, 渦電流法など数々の試験方法が検討され, 実施されている. その中でコンクリート中の鉄筋を検出できる試験法の一つに渦電流法がある. この方法は, コンクリート中の鉄筋径やかぶり厚さの測定に適用できるのでこれらに関する研究が数多く報告されている<sup>1)~3)</sup>. しかし鉄筋径やかぶり厚さを精度よく推定するためには, コンクリート, 腐食鉄筋やさび汚れによる渦流信号の振幅, 位相, および形状の変化について知る必要があると思われる.

そこで今回は渦電流法を用いて, 腐食鉄筋により発生するさび汚れの検出について実験を行ったので, その報告をする.

### 2. 実験方法及び実験方法

#### 2. 1 測定原理

Fig. 1 のように, 半径  $a$  の円形コイルの円周に電流  $I$  が流れるとき, 中心軸上の円中心から距離  $x$  にが生じる磁場の強さ  $H$  は, 次式で表される.

$$H = Ia^2 / 2(a^2 + x^2)^{3/2} \quad (1)$$

コイル中心では

$$H = I / 2a \quad (2)$$

となる. ここで,  $I = 1 \text{ A}$  とすると, 式(1)によって計算した  $x$  軸上の磁場の強さ  $H$  を示した Fig. 1 おいて, 試験コイルの半径が大きいほど, 磁界の  $x$  軸方向の減衰が少ないため, かぶり厚さの大きい鉄筋を検出することができる. 一方, 試験コイルの半径が小さい場合, かぶり厚さの比較的大きい範囲では減衰は大きくなるが, 鉄筋の分解能を高くすることができる.

#### 2. 2 実験方法

使用したプローブ(上置コイル)を Fig. 2 に示す. 実験に使用したコイルは, 局部的変化の検出に敏感なフェライト磁気コアを含んだ自己誘電型コイルである. このプローブコイルの仕様を Table 1 に示した.

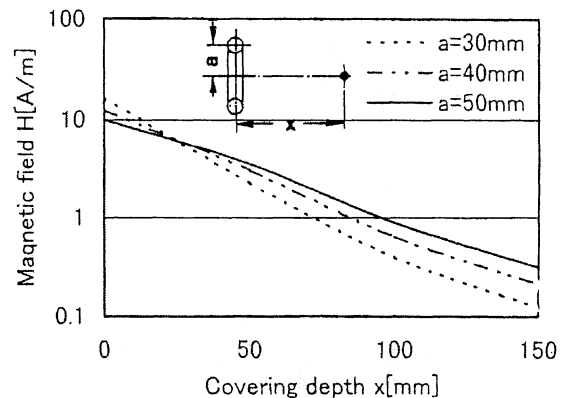


Fig.1 Relation between magnetic field and covering depth

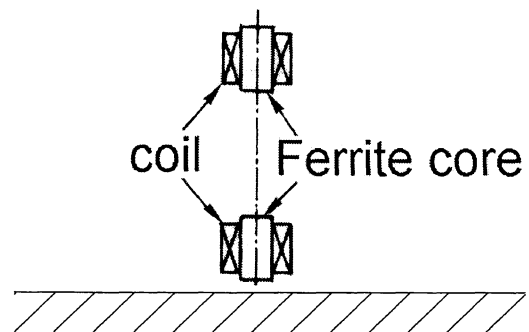


Fig.2 Outline drawing of probe coils

Table 1 Specification of probe coils used

Coil diameter	Coil turn	Coil distance
2 mm	200	20 mm

実験方法(Fig.3)は鉄筋の長手方向に対し垂直にプローブを移動させ、ブリッジ回路の一辺に組込まれていたコイルは、鉄筋の存在しないときの出力信号のない状態からブリッジの平衡のずれとして出力信号が発生する。コイルに加わる電圧を  $V\sin\omega t$  とすると、ブリッジからの二次電圧は  $V\sin(\omega t + \theta)$  で表される。  $\theta$  はコイルに加えた電圧と二次電圧との位相差である。すなわち

$$V\sin(\omega t + \theta)$$

$$= V\sin\theta \cos\omega t + V\cos\theta \sin\omega t$$

ここで、 $I_x$ ,  $I_y$  を Fig. 4 のように定義する。

$$I_x = V\cos\theta$$

$$I_y = V\sin\theta$$

$I_x$ ,  $I_y$  は  $\cos\omega t$ ,  $\sin\omega t$  を独立に位相検波することにより得られる。鉄筋径やかぶり厚さを測定するために  $I_x$ ,  $I_y$  の出力信号を XYレコーダーの信号の複素電圧平面上の軌跡として記録させたり、あるいは鉄筋の位置を調べるために Y 軸にはプローブからの出力、X 軸にはプローブの位置を記録させた。

なお、試験周波数は 128kHz を用いた。

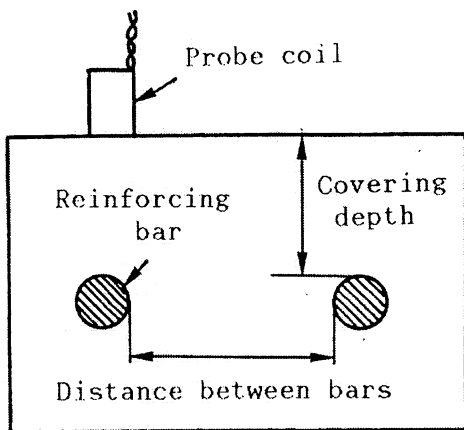


Fig.3 Method of experiment

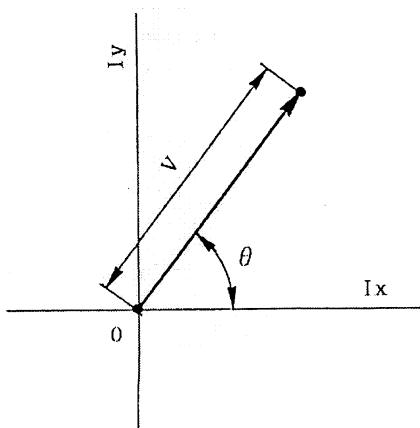


Fig.4 Marks for amplitude and phase of Lissajous' pattern

### 3. 実験結果および考察 3.1 渦電流による信号波形

Fig.5 は内部に腐食鉄筋が埋設されたコンクリ

ートのマクロ写真である。コンクリート中に埋設された鉄筋が  $Cl^-$  の存在下でかなり腐食進行した全面腐食の状態になっていて、コンクリート表面にさび汁によるさび汚れが観察されている。

Fig.5 のプロフィール A~G は、腐食鉄筋の長手方向に対して直角な方向であり、そのプロフィールに沿って試験コイルを一定速度(10 mm/s)で移動させた。測定間隔は 5 mm である。Fig.6 は Fig.5 の渦電流信号の波形である。信号は腐食鉄筋に強く反応し、その波形から腐食鉄筋が検出できていることがわかる。しかし波形から腐食鉄筋、さび汚れ、モルタルの信号を明白に区別することはできなかった。

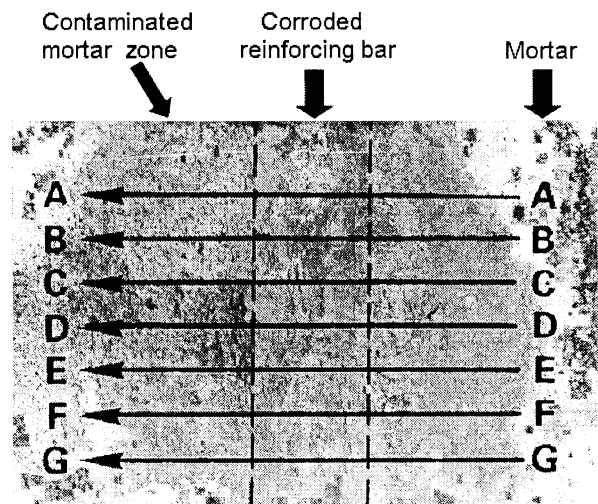


Fig.5 Macrostructure on concrete surface with corroded reinforcing bar and contaminated mortar zone

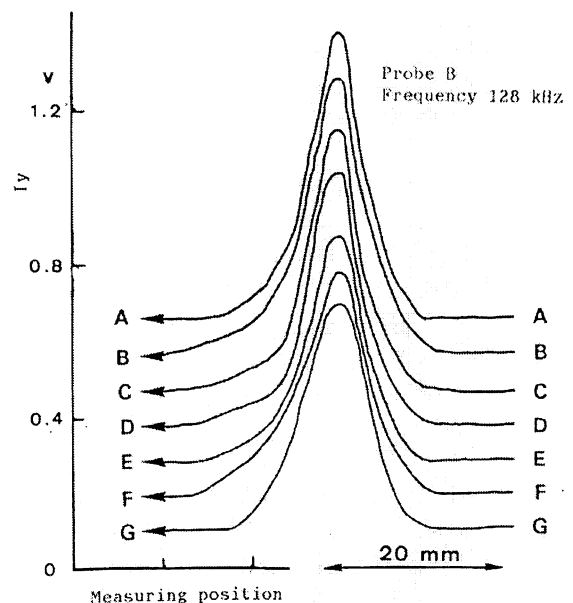


Fig.6 Measured trajectories for the component  $I_y$  in the Lissajous' pattern obtained from the scanning line between profile (A) to (G) in Fig. 5

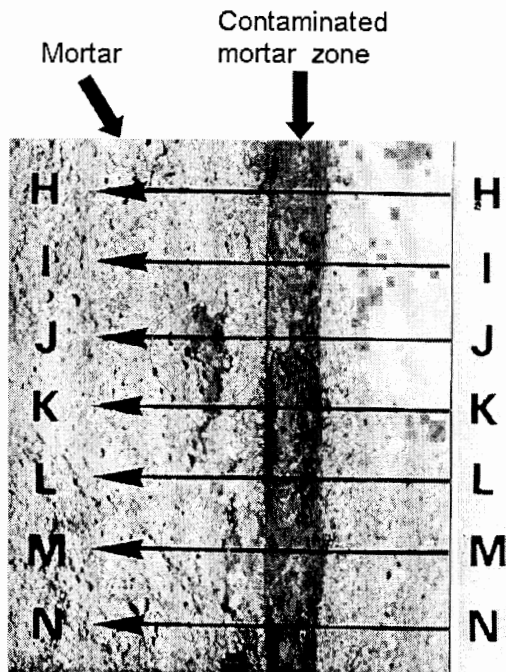


Fig.7 Macrostructure in concrete with contaminated mortar zone

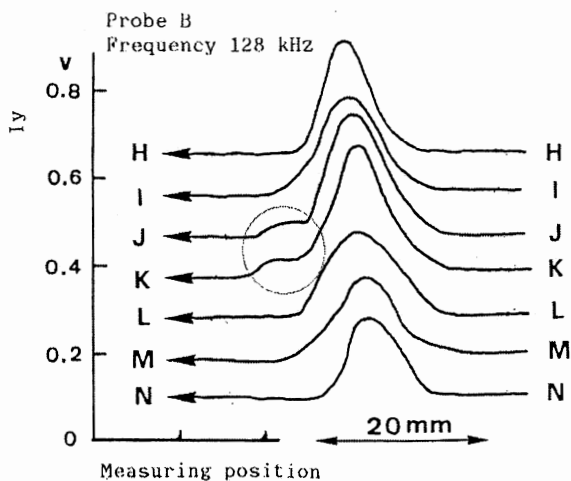


Fig.8 Measured trajectories for the component  $I_y$  in the Lissajous' pattern obtained from the scanning line between profile (H) to (N) in Fig. 7

次に、モルタルとさび汚れによって起こる渦電流の変化について実験を行った。Fig.7はFig.5の上部を覆っているさび汚れと腐食鉄筋を削り取ったものである。

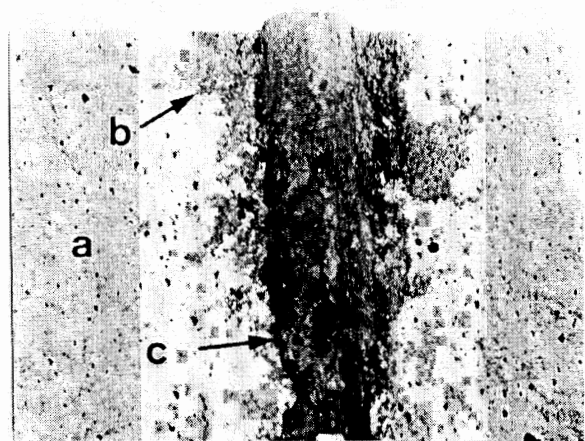
実験は先ほどと同じように、測定間隔を5mm、移動速度10mm/sにし、Fig.7のプロフィールH~Nに沿って試験コイルを移動させた。その結果をFig.8に示す。実験の結果、腐食鉄筋の埋設されていた場所で最も大きな反応が現れた。これは、他の場所に比べてさび汚れを削り取る際に残った腐食鉄筋の表面のさびを含んでいるために、渦電流に対して応答しているのだと考えられる。またJ、Kのライン上の信号波形にわずかな変化が

みられる。Fig.7を確認してみると、グラフと同じ地点にさび汚れと思われる部分がある。このことよりこちらもさび汚れにより起きたものと思われる。

Fig.6, Fig.8の信号波形では腐食鉄筋からの信号波形であるのか、さび汚れからの信号波形であるかを区別することはできなかった。

### 3. 2 リサージュ図形によるさび汚れ検出

渦電流信号の振幅だけで、コンクリート中の塩化物によるさび汚れを検出することは難しいので、Fig.4に示したようなリサージュ図形に描かせて、信号の振幅および位相の違いを調べた。Fig.9に供試材の腐食鉄筋のマクロ写真の一例を示す。コンクリート中での塩化物による鉄筋腐食は全面腐食に加えて、かなり大きな孔食が発生していることが確認できる。



(a)Mortar, (b)Contaminated mortar zone, (c)Corroded reinforcing bar

Fig.9 Macrostructure in concrete with corroded reinforcing bar and contaminated mortar zone

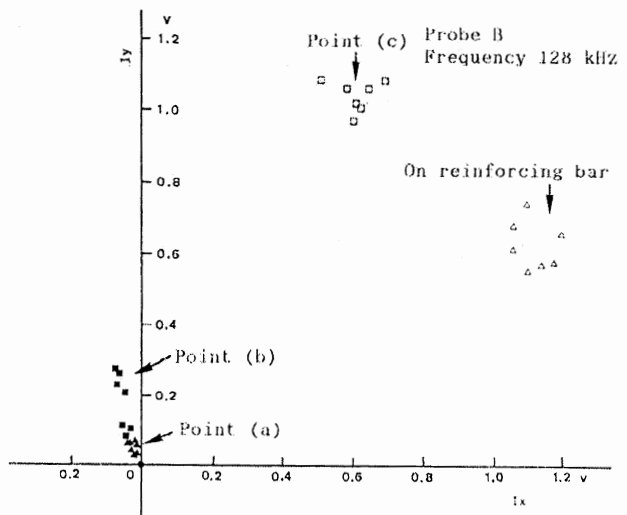


Fig.10 Comparison of Lissajous' patterns form corroded reinforcing bar and contaminated mortar zone in Fig.9

Fig.10 に(a)モルタル, (b)さび汚れ, (c)腐食鉄筋, および腐食なし鉄筋の各点にプローブを置いたときのリサージュ図形の変化を調べた結果を示す。

Fig.10 において, プローブが空気中にありブリッジがバランスを取っているときには, XYレコーダーのペン先は原点に位置している. その後, プローブをモルタル上に置くとブリッジのバランスが崩れ, ブリッジの出力には電圧が発生し, ペン先は原点から僅かに▲印の場所に移動した. 次にさび汚れ上にプローブを置くとリサージュ図形は■印に移動している. これは, モルタル部から得られる渦電流信号よりも, さび汚れ部から得られる渦電流信号の方が, 振幅が大きいので位相も時計方向に僅かに進んでいる. 腐食鉄筋からのリサージュ図形は□印で示すが, モルタルやさび汚れから得られる信号よりもかなり大きく, また位相も時計方向に回転しているのがわかる. 腐食のない鉄筋からの図形(△印)の振幅の大きさは腐食鉄筋からの振幅とほぼ同じであるが, 位相はかなり異なっている.

Fig.11 はさび汚れのマクロ写真である. Fig.11 の d はさび汚れのないモルタルであり, e~h はさび汚れ部分である, 特に g および h 付近は腐食鉄筋が埋設されていた場所である. Fig.12 は Fig.11 のリサージュ図形の結果である. モルタル部から比較的汚れの少ない箇所の図形, Fig.10 と同じ場所に現れているが, 腐食鉄筋のあった場所に近づくにつれ, 図形に示される場所が変わってきている. これは汚れが強くなるにしたがい, モルタルに含まれるさびの量が増えるために, 振幅も強くなってきているためと考えられる. また位相は僅かに時計方向に回転する程度であるため鉄筋および腐食鉄筋との違いもはっきりとしている.



Fig.11 Macrostructure of contaminated mortar zone

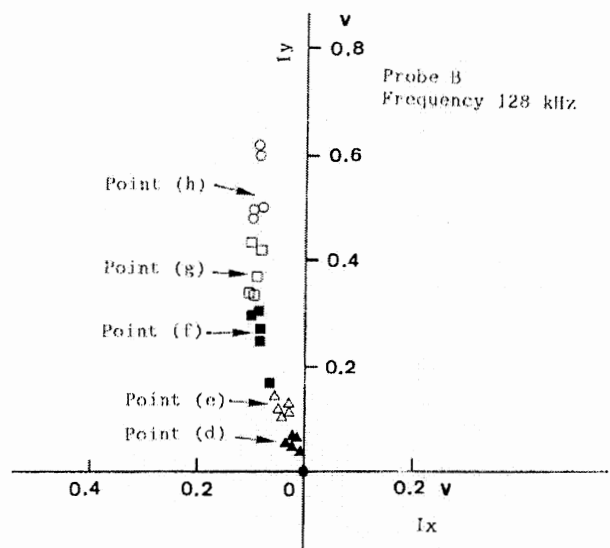


Fig.12 Comparison of Lissajous' patterns form contaminated mortar zone

以上のことから, 渦電流法を使用することにより腐食鉄筋の検出や, さび汚れによるコンクリート構造物の腐食診断に利用することが可能だと考えられる。

#### 4. 結 言

今回の実験より以下のことが分かった。

- 1) 渦電流法は, リサージュ図形を使用することで, 鉄筋, 腐食鉄筋とさび汚れを区別して検出することができる。
- 2) 渦電流法は, さび汚れの起こっている箇所, およびその汚れの酷さをリサージュ図形から知ることができる。

#### 5. 参考文献

- 1)横田 理, 土肥 博:コンクリート中に埋設された腐食鉄筋の渦流試験, 圧力技術 第31巻第4号, 1993
- 2)横田 理, 出村克宣:電磁誘導試験による鉄筋コンクリート構造物の鉄筋検出に関する研究, 圧力技術 第38巻第3号, 2000
- 3)伊藤秀之, 芹沢正直, 広島龍夫, 星川 洋, 三好 磁, 森 年弘, 吉川 実:非破壊検査技術シリーズ渦流探傷試験 A(電磁誘導試験)1977, 社団法人 日本非破壊検査協会, 昭和52年2月20日