

# 論文 コンクリート材料中の磁性体が漏洩磁束法による鉄筋破断の片面診断に与える影響

永瀬 繁幸\*1・寺澤 広基\*2・服部 篤史\*3・河野 広隆\*4

**要旨：** ASR によるコンクリート構造物中の鉄筋破断を調査する非破壊検査手法の一つに漏洩磁束法による片面診断が挙げられる。本研究では、既往の研究では検討が不十分だったコンクリートの持つ磁性による影響を調べるため細骨材に着目し、かぶり部分に磁気特徴の異なるコンクリートを配置して実験を行うことで磁性を持つコンクリートが漏洩磁束法に与える影響を検討した。その結果、材料中に磁性体を含むコンクリートが破断鉄筋に対する測定時に与える影響を明らかにするとともに、漏洩磁束法の診断指標に与える影響についてもその影響範囲が明らかになった。

**キーワード：** 漏洩磁束法, 鉄筋破断, 非破壊試験, ASR, コンクリート材料中の磁性体

## 1. はじめに

アルカリシリカ反応（以下、ASR）によるコンクリート構造物中の鉄筋破断に対する非破壊検査手法の一つに漏洩磁束法がある。漏洩磁束法とは鉄筋が強磁性体であることを利用して、磁石ユニットを用いた診断対象とする鉄筋の着磁と、磁気計測ユニットを用いた磁束密度の測定をともにコンクリート表面で行うことによって鉄筋破断の有無を診断する手法である。既往の研究<sup>1)</sup>から内部鉄筋の破断報告事例の多い曲げ加工部では隅角部の上面と側面から着磁・測定することでかぶり 150mm 程度までの鉄筋に対して診断が可能であり、図-1 に示すように上部工のような構造上の制約で片面からしか接近できない場合でも、側面からのみの着磁・測定により鉄筋破断を診断する手法（以下、片面診断）の研究が進められ、その可能性が示されている<sup>1) 2)</sup>。

一方、コンクリートの材料には鉄分などの磁性体が含まれる場合があり、これらの磁性体が鉄筋と同じように磁石ユニットによって着磁されることにより漏洩磁束法に何らかの影響を与える可能性がある。この影響についての研究はほとんどなされておらず、既往の研究<sup>1) 2)</sup>ではコンクリートの影響は無視されてきたが検討が必要である。

そこで本研究では、異なる磁気特徴を持つ材料を使用したコンクリートを作製し、既往の研究<sup>3)</sup>では健全鉄筋に対する影響をもとにした推測にとどまっていた破断鉄筋に対して、同様の実験を行うことによって得られた結果から漏洩磁束法の片面診断にどのような影響を与えるのかについて検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要および実験装置

本研究では橋梁梁部での片面診断によるスターラップの診断を想定した供試体を作製した。図-2 にコンクリートと鉄筋の設置状況の側面図と断面図、および鉄筋状態を示す。実験台は木製の角材・板材と、非磁性体である真鍮製のねじ・釘を用いて作製した。コンクリートの寸法は幅 100×高さ 84×長さ 400mm となっており、下面にはかぶりが 75mm になるように溝がついている。実験台に設置した鉄筋の長辺上に 3 つ並べて配置した。対象鉄筋は D16 を使用し、内半径 35mm で 90° に曲げ、500×900mm の L 字型とした模擬スターラップのみを配置し、隅角部主鉄筋は配置していない。鉄筋状態は健全状態のものと、曲げ部で切断し、破断ギャップを 0mm とした接触状態に加え、破断部に厚さ 2mm の木片を挟み、破断ギャップを 2mm とした破断状態のものについて検討を行った。

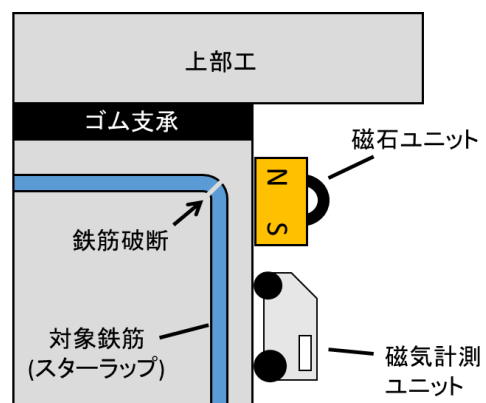


図-1 漏洩磁束法片面診断

\*1 京都大学 工学部地球工学科 (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 博士 (工学) (正会員)

\*3 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻准教授 博士 (工学) (正会員)

\*4 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻教授 博士 (工学) (正会員)

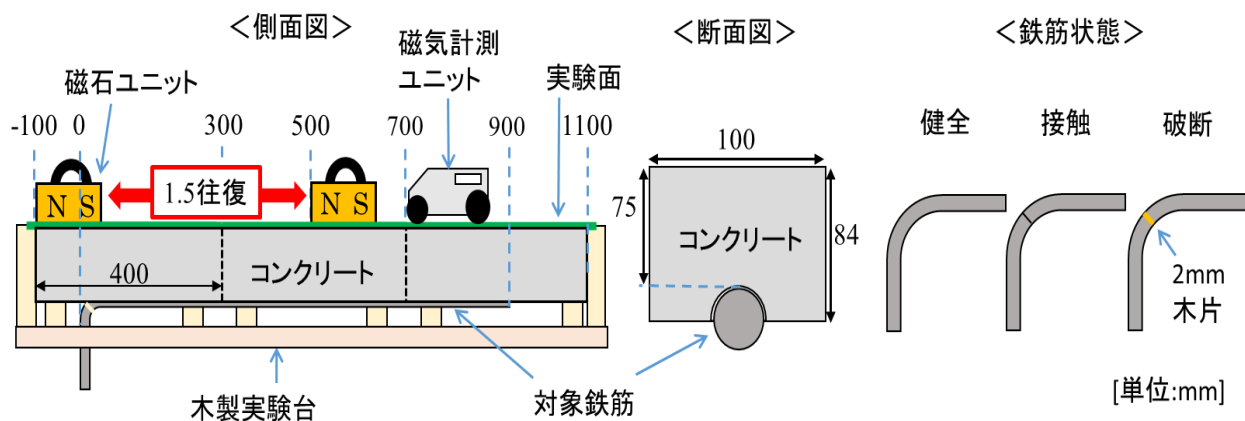


図-2 実験供試体概要図

表-1 コンクリート配合表

コンクリート種類	水セメント比	細骨材率	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 助剤	AE 減水剤
	%		kg/m <sup>3</sup>				g/m <sup>3</sup>	
OS コンクリート	60	49.0	175	292	824	936	730	1168
FN コンクリート	68	53.1	209	307	1104	901	730	1168
CS コンクリート	60	57.7	198	332	1468	882	860	1400

表-2 コンクリートの鉄含有量

コンクリート種類	質量%	体積%
OS コンクリート	1.4	0.4
FS コンクリート	3.3	1.1
CS コンクリート	21	7.3

表-3 要因表

鉄筋状態	コンクリート種類
健全	OS
	FS
	CS
接触 (ギャップ 0mm)	OS
	FS
	CS
破断 (ギャップ 2mm)	OS
	FS
	CS

コンクリートの磁気特性は、鉄の含有量に影響されるものと考えられるので、鉄分の含有量の異なる骨材を使用した。コンクリートのパラメータとして普通細骨材(野洲川産川砂、密度 2.54g/cm<sup>3</sup>、F.M.2.89：以下、普通細)、フェロニッケルスラグ細骨材(密度 3.00g/cm<sup>3</sup>、F.M.3.67：以下、FN 細)、銅スラグ細骨材(密度 3.88g/cm<sup>3</sup>、F.M.4.71：以下、銅細)を使用した。他の材料は共通で上水道水、普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm<sup>3</sup>)、普通粗骨材(滋賀県土山産砕石、密度 2.77g/cm<sup>3</sup>、Gmax15mm)を用いた。表-1にコンクリートの配合表を示す。表-2に文献<sup>4)</sup>等を参考にそれぞれのコンクリート材料の酸化鉄含有量を仮定し、それを Fe に換算した上でのコンクリート全体としての鉄分量の質量%と、配合表の重量から算出した Fe に換算した上でのコンクリート全体としての鉄分量の体積%を合わせて示す。配合は細骨材の種類のみを変え、ASR により劣化した一般的なコンクリートのモデルとして普通細を使用した OS コンクリート、一般的なものより鉄分を多めに含むコンクリートのモデルとして FN 細を用いた FS コンクリート、鉄分量変化に

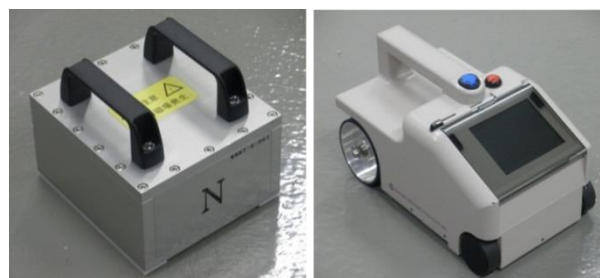


写真-1 磁石ユニット(左)、磁気計測ユニット(右)

よる傾向を観察するため鉄分を通常のコンクリートよりかなり多く含む銅細を用いた CS コンクリートの 3 種類のコンクリートを作製した。表-3 に本実験の要因表を示す。合計 9 つのケースに対し各 1 回ずつ実験を行った。

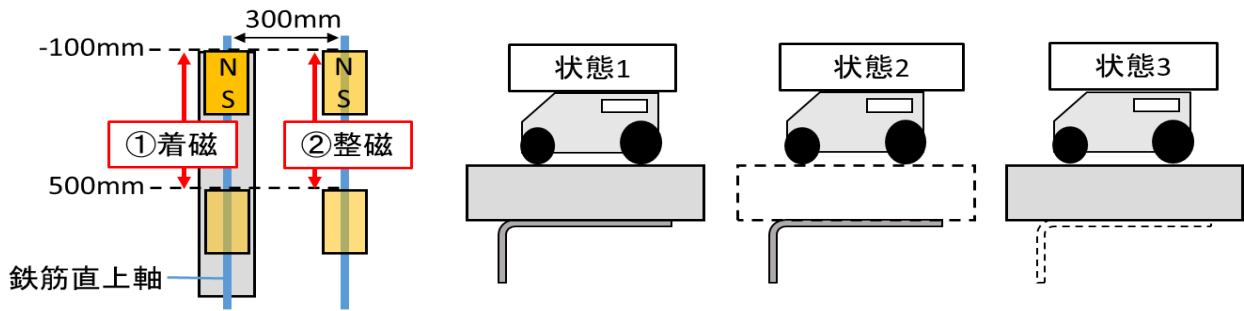


図-3 着磁操作・測定操作

写真-1 に診断装置である磁石ユニットと磁気計測ユニットの外観を示す。磁石ユニットは診断対象とする鉄筋を磁化するための強力な永久磁石を内蔵しており、磁気計測ユニットは測定面に対して垂直方向の磁束密度成分を $-300\sim 300\mu\text{T}$ （公称値）の範囲で $1\text{mm}$ ごとに測定できる。

## 2.2 実験方法・手順

図-3 に着磁操作と測定操作の手順を示す。コンクリート表面を実験面として対象鉄筋直上に軸をとり、鉄筋曲げ部の直上点を原点（ $0\text{mm}$ 地点）として長手方向を正とした（図-2）。着磁方法は漏洩磁束法での通常の着磁の操作に従い、 $-100\text{mm}$ 地点を着磁開始位置、 $500\text{mm}$ 地点を着磁終了位置として、磁石ユニットのS面を正方向に向けた状態でN面が開始位置→終了位置→開始位置→終了位置となるように実験面上で1.5往復スライドさせることで着磁（図中①着磁）を行った。着磁操作の後、軸から平行に $300\text{mm}$ 離れた軸上でも磁石ユニットを同様にスライドさせる整磁操作（図中②整磁）を行い、整磁操作も合わせて本研究での着磁とする。着磁の際、鉄筋とコンクリートの両方が配置されている。測定は実験面の鉄筋直上軸の $-100\sim 700\text{mm}$ の範囲で磁気計測ユニットを操作することによって行った。着磁操作の後、状態1（鉄筋とコンクリートがともに配置されている状態）、状態2（コンクリートを外した鉄筋のみの状態）、状態3（鉄筋を外し、コンクリートを再び配置したコンクリートのみの状態）でそれぞれ測定を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 鉄筋状態による測定結果の違い

図-4 に健全、接触、破断状態の鉄筋における状態2（鉄筋のみ）での測定結果を示す。測定結果の特徴として、コンクリートを配置しない鉄筋のみの場合では測定結果は下に凸の滑らかな曲線になる。鉄筋が破断している場合、破断ギャップが大きくなるに従って健全な場合の測定結果に比べて山の高さが高くなり、曲線のカーブも急になる。

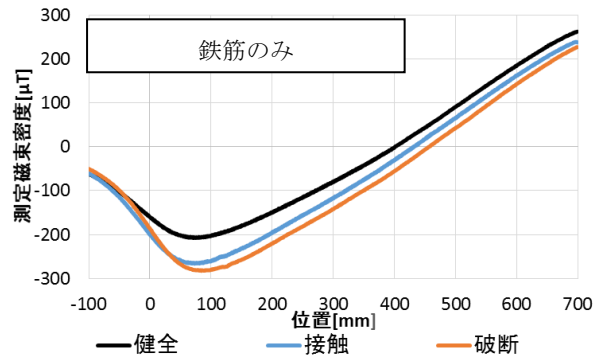


図-4 測定磁束密度：状態2

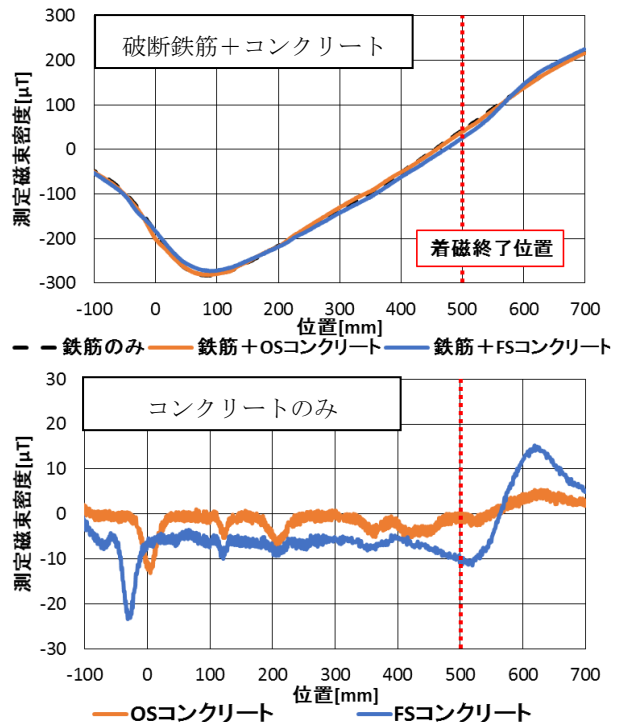


図-5 OS、FSコンクリートの測定磁束密度：状態1（上）・状態3（下）

### 3.2 磁性を持つ細骨材を含むコンクリートが測定結果に与える影響

図-5 に OS コンクリートと FS コンクリートにおける、破断状態の鉄筋における状態1（鉄筋+コンクリート）での測定結果と、状態3（コンクリートのみの）での測定

結果を示す。図中の点線は図-4 に示した破断状態の鉄筋のみの測定結果を掲げており、状態 1（鉄筋+コンクリート）での測定結果はそれと比較すると、コンクリートの影響により滑らかだった曲線に凹凸が見られるが全体的に大きな変形は無い。

状態 3（コンクリートのみ）での測定結果の形状の特徴として、着磁範囲（-100～500mm 付近）にほぼ一定の測定磁束密度が見られ、着磁終了位置（500mm 付近）に大きな傾きが現れる。着磁終了位置の傾きに注目すると、鉄分量が多い FS コンクリートのほうが傾きが大きくなっており、鉄分量を多く含むコンクリートほど強く着磁されていることを意味している。

図-6 に鉄分をかなり多く含む CS コンクリートにおける、破断状態の鉄筋での状態 1（鉄筋+コンクリート）での測定結果と、状態 3（コンクリートのみ）での測定結果を示す。状態 3（コンクリートのみ）での測定結果では鉄分量の多い CS コンクリートでも着磁範囲にほぼ一定の帯磁成分と着磁終了位置の大きな傾きという OS コンクリートや FS コンクリートと同じ特徴が見られるが、コンクリート自体が強く着磁されているため状態 1（鉄筋+コンクリート）での測定結果は鉄筋のみの状態と比べ大きく変形している。

### 3.3 漏洩磁束法における診断指標

既往の研究<sup>2)</sup>で漏洩磁束法による片面診断において鉄筋破断の診断指標として特に有効とされている「補正ピーク値」と「最大変化率」について述べる。図-7 に本研究の配筋条件で得られた健全状態と破断状態の測定結果の一例と診断指標のとり方を示す。

#### (1) 補正ピーク値

補正ピーク値は、測定磁束密度の曲線が健全状態と破断状態で曲げ加工部（0mm 地点）付近のピーク山の高さが異なることに着目し、地磁気等の環境磁場の影響で調査地域によって測定磁束密度の曲線が上下に平行移動することを考慮して、相対的に破断の診断ができるように考案された指標であり、式(1)のように定義される。

$$\left| \text{（測定磁束密度のピーク値）} - \text{（測定位置 0mm での測定磁束密度）} \right| \quad [\mu\text{T}] \quad (1)$$

#### (2) 最大変化率

最大変化率は、測定磁束密度の曲線の傾きが健全状態と破断状態とで異なることから考案された指標であり、式(2)のように定義される区間平均変化率の極値の絶対値で表される。

$$\text{区間平均変化率} = \text{（測定磁束密度の増減）} / \text{（測定位置の一定区間）} \quad [\mu\text{T}/\text{mm}] \quad (2)$$

区間平均変化率は鉄筋曲げ加工部（0mm 地点）付近で極小値が存在し、この絶対値を最大変化率と定義する。本研究では一定区間を 30mm とした。

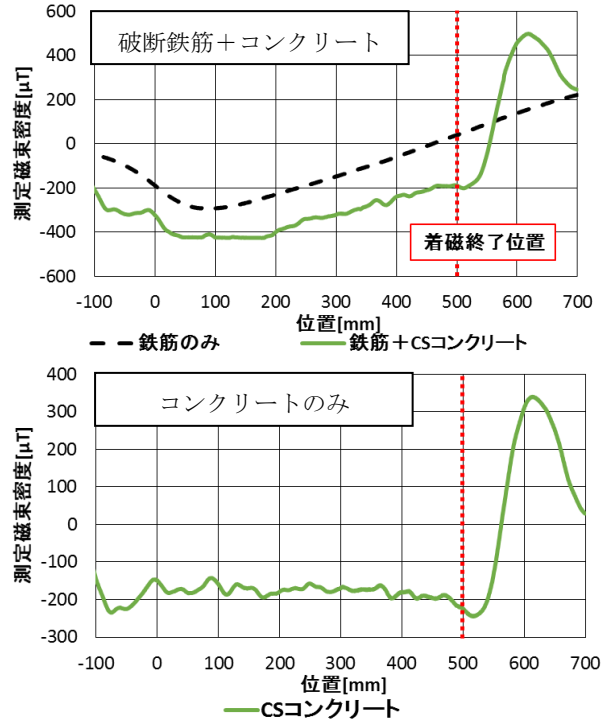


図-6 CS コンクリートの測定磁束密度  
：状態 1（上）・状態 3（下）

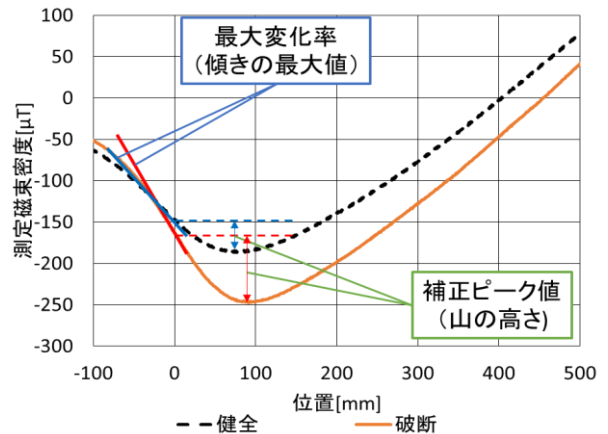


図-7 健全・破断の測定結果と診断指標

### 3.4 磁性を持つ細骨材を含むコンクリートが診断指標に与える影響

以上のように、漏洩磁束法の診断指標は補正ピーク値・最大変化率ともに、主に隅角部（0mm 位置）付近の測定磁束密度のグラフ形状から鉄筋状態を判断する。3.2 で述べたようにコンクリートは着磁範囲（-100～500mm 付近）でほぼ一定の帯磁成分を持つがその磁束密度の形状には凹凸が見られ、測定結果のグラフ形状を変形させるため、診断指標は影響を受けると考えられる。

#### (1) 補正ピーク値に与える影響

図-8 に健全、接触、破断状態における状態 1（鉄筋+コンクリート）と状態 2（鉄筋のみ）での測定結果から算出した補正ピーク値を示す。

OS コンクリート・FS コンクリートについては状態 2（鉄筋のみ）と比べてコンクリートの影響で補正ピーク値の値が小さくなっていることがわかる。補正ピーク値への影響は鉄筋のみの状態と比較して最大で $-10\mu\text{T}$  程度の影響が見られた。これはコンクリートの影響によって状態 1（鉄筋+コンクリート）での測定磁束密度のグラフ形状が、状態 2（鉄筋のみ）のものとは比べて 0mm 位置から見たピーク山の高さが低くなっていることに起因しており、コンクリート自体が着磁された際（図-5）に 0mm 位置付近に他の部分よりも負の方向に大きめの磁束密度が測定されていることに関係があると考えられる。補正ピーク値は式(1)に示されるとおり 0mm 位置の測定値と測定磁束密度のピーク値とで算出される。コンクリートの帯磁成分が 0mm 位置の測定値に影響することで算出される補正ピーク値の値が小さくなった可能性がある。コンクリートの帯磁成分はそのコンクリート毎に異なった値が測定されるが、図-5（下）で、一般的なモデルよりも鉄分量の多い FS コンクリートでの 0mm 位置付近での測定磁束密度に着目すると $-20\mu\text{T}$  程度の値が測定されているため、コンクリートによる補正ピーク値への影響は最大で $-20\mu\text{T}$  程度が目安となる。

CS コンクリートの場合は、算出された結果（図-8）では、健全状態と破断状態での影響は OS・FS コンクリートと同程度であり、接触状態での影響は OS・FS コンクリートよりも大きいという結果が得られたが、図-6（上）の状態 1（鉄筋+コンクリート）と状態 2（鉄筋のみ）を比較するとコンクリート自体が強く着磁されておりグラフ形状の変形がより大きくなっていることがわかる。加えて、図-6（下）の状態 3（コンクリートのみ）でも絶対値  $200\sim 300\mu\text{T}$  の強い磁束密度が測定されているため、状態 1（鉄筋+コンクリート）での測定結果は磁気測定ユニットの測定限界に達し、磁束密度を正確に測定できていない可能性がある。このため、従来と同じように形状から正確に補正ピーク値を算出して評価することは難しい。

## (2) 最大変化率に与える影響

図-9 に健全、接触、破断状態における状態 1（鉄筋+コンクリート）と状態 2（鉄筋のみ）での測定結果から算出した最大変化率を示す。

OS コンクリートの接触・破断状態での最大変化率は、コンクリートの影響によって大きくなっている。一方、FS コンクリートの接触・破断状態での最大変化率は、コンクリートの影響によって小さくなっている。これはコンクリートの影響によって測定磁束密度のグラフ形状に凹凸が現れることにより、曲線の傾きが乱れるためである。本実験からコンクリートの影響が最大変化率の大小どちらに現れるかを特定することはできなかったが、後

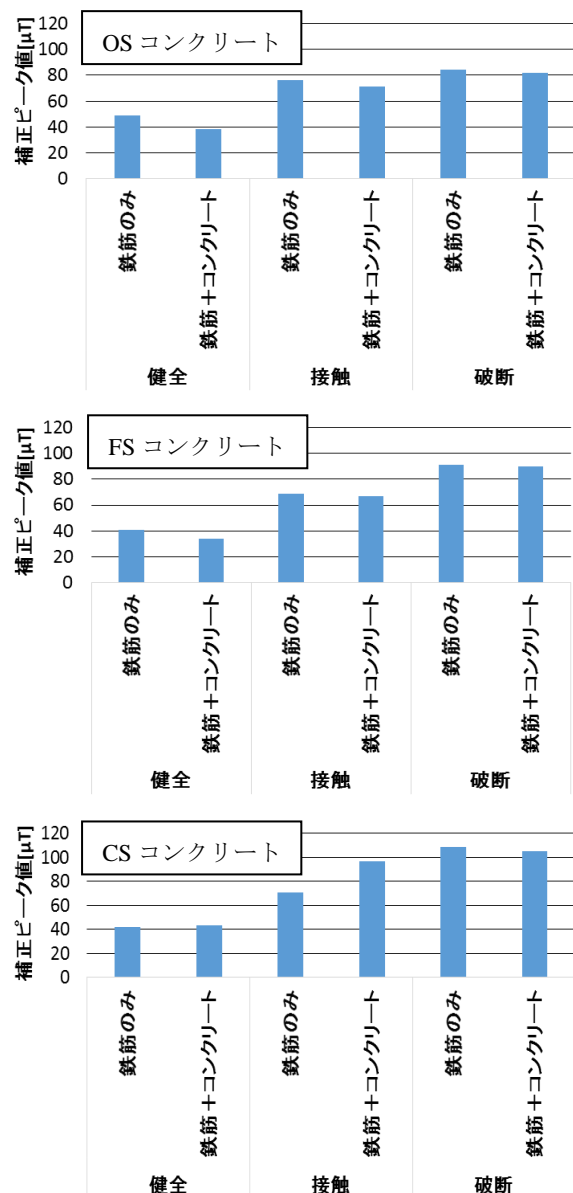


図-8 コンクリートが補正ピーク値に与える影響  
：OS（上）・FS（中）・CS（下）

述のように小さくなる方向に着目すると、OS・FS コンクリートの場合では、最大変化率への影響は鉄筋のみの状態と比較して最大で $-0.3\mu\text{T}/\text{mm}$  程度であった。

また、CS コンクリートが最大変化率に与える影響は、OS・FS コンクリートよりも大きい傾向にあるが、CS コンクリートはコンクリート自体が強く着磁されているため、補正ピーク値の場合と同じように形状から正確に最大変化率を算出して評価することは難しい。

## 3.5 コンクリートの影響の取扱い

本実験では漏洩磁束法の診断対象となりうる構造物のモデルとして OS コンクリートを作製しており、診断対象となる鉄分量の目安も OS コンクリート程度だと考えられる。また、それよりも鉄分量が多く、影響も強いと考えられる FS コンクリートを考慮に入れてもコンクリ

ートが実構造物での診断の際に診断指標に与える影響は最大でも補正ピーク値に対して $-20\mu\text{T}$ 程度、最大変化率に対して $-0.3\mu\text{T}/\text{mm}$ 程度との目安を得た。

診断の際に注意すべきなのは、補正ピーク値・最大変化率ともに破断状態における診断指標の値がコンクリートの影響によって小さく測定された場合、破断状態を健全であるとする誤診断が起こり得ることである。しかし、今回目安として得られた上記の診断指標に対する影響はコンクリートの影響を無視した時の健全と破断の差（補正ピーク値で $40\mu\text{T}$ 、最大変化率で $0.6\mu\text{T}/\text{mm}$ ）の半分程度であるため、コンクリートの影響は破断状態のものを健全と判断するほど大きくはなく、コンクリートの影響で診断結果が左右されることは無いと考えられる。既往の研究<sup>3)</sup>より健全状態の鉄筋での診断指標に対する影響の目安を得ていたが、今回の実験からも破断状態の鉄筋におけるコンクリートの影響も診断結果を左右するほど大きいわけではないということが確認できた。

また、3.4で述べたように診断指標は特に着磁開始位置付近でのコンクリートの帯磁成分に影響を受けると考えられる。このため、着磁を行う際により上方（マイナス側）から着磁を開始することで着磁開始位置のコンクリートの影響をキャンセルできる可能性がある。この手法については今後の課題である。

#### 4. 結論

以下に本研究で得られた結果を要約して示す。

(1)材料中に磁性体を含むコンクリートは漏洩磁束法による測定時に影響を与え、鉄筋状態に関わらず測定磁束密度のグラフ形状を変形させうる。また、鉄分量を多く含むコンクリートほどグラフ形状を大きく変形させる傾向にある。

(2)鉄筋破断の有無に関わらず漏洩磁束法の診断対象となる構造物として一般に想定される範囲の鉄分量では従来と同じようにグラフ形状から診断指標をとることができる。

(3)破断状態の鉄筋における診断指標はコンクリートの影響を受けるが、その影響はコンクリートの影響を無視した場合と比較して最大でも補正ピーク値に $-20\mu\text{T}$ 程度、最大変化率に $-0.3\mu\text{T}$ 程度であり、診断結果を左右するほど大きいものではない。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり京都大学大学院の宮川豊章教授、石川敏之助教ならびに(株)四国総合研究所の廣瀬誠氏、木村美紀氏には多大なるご指導とご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

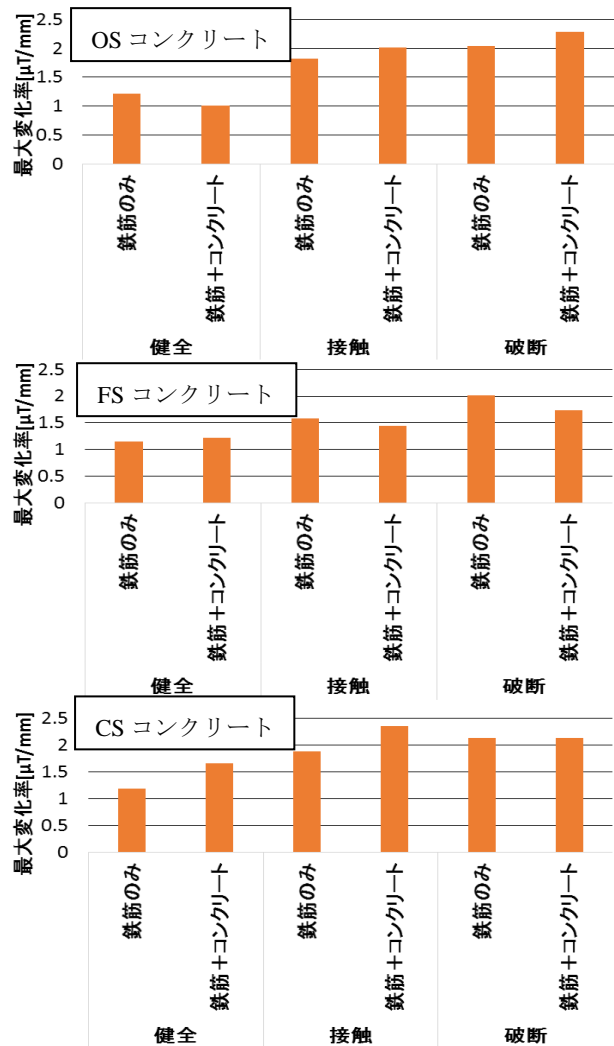


図-9 コンクリートが最大変化率に与える影響  
: OS (上)・FS (中)・CS (下)

#### 参考文献

- 1) 長谷川真侑, 服部篤史, 寺澤広基: 磁気法片面診断による隅角部鉄筋破断の判断基準に関する研究, 平成23年度土木学会全国大会第66回年次学術講演概要集, pp.101-102, 2008.9
- 2) 寺澤広基, 廣瀬誠, 服部篤史, 河野広隆: 磁気法片面診断による鉄筋破断非破壊検査の確率論的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第12巻, pp.477-482, 2001.11
- 3) 永瀬繁幸, 寺澤広基, 廣瀬誠, 服部篤史, 河野広隆: コンクリート材料中の磁性体が漏洩磁束法の鉄筋破断診断に与える影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文集, 第14巻, pp.309-314, 2014.10
- 4) 國府勝郎: 資源の有効活用とコンクリート, スラグ骨材を用いたコンクリート, 会誌「コンクリート工学」, vol.34, No.3, pp88-93, 1996.3