

# 論文 有限要素法による磁気法片面診断の磁束密度分布状況に関する検討

寺澤 広基<sup>\*1</sup>・廣瀬 誠<sup>\*2</sup>・服部 篤史<sup>\*3</sup>・河野 広隆<sup>\*4</sup>

**要旨:** ASR によるスターラップ隅角部での鉄筋破断を非破壊で診断する手法の 1 つとして磁気法がある。既往の研究より、構造物の隅角部の片面からしか接近できない場合でも、測定鉄筋に対して平行方向に着磁・測定することで、鉄筋破断の有無を判断可能であることが分かっている。しかし、鉄筋隅角部周辺の磁束密度分布状態は実験データから立体的に把握することは難しく、まだ明らかになっていない。本研究では、有限要素法による解析を実施し、隅角部の片面からの着磁による鉄筋の帯磁状況を明らかにするとともに、まだ用いられていない方向の磁束密度成分の測定が破断診断に有効であることを示した。

**キーワード:** 磁束密度, 鉄筋破断, 有限要素法, アルカリシリカ反応, 非破壊検査

## 1. はじめに

ASR によるコンクリート構造物内部の鉄筋破断を非破壊で診断する手法の一つに磁気法がある。磁気法とは鉄筋が強磁性体であることを利用し、永久磁石で鉄筋を着磁し、鉄筋によるコンクリート表面の磁束密度を測定することで破断の有無を診断する手法である。既往の研究<sup>1)</sup>より、隅角部の鉄筋破断を上面と側面の両側のコンクリート表面から着磁・測定（以下、両面診断）することで診断できることが報告されている（図-1 参照）。

また、上部工などの構造物の制約上、隅角部の片面側からしか接近できず、従来の両面診断手法を用いることができない場合に対して、隅角部の片面側からのみの着磁・測定によって鉄筋破断の診断を行う手法（以下、片面診断）の研究が進められている。既往の研究<sup>2)</sup>では、主に実験結果から片面診断により鉄筋破断の有無を判断できる可能性が高いことを明らかにしている。しかし、実験では測定磁束密度のデータを得られる位置・方向が限られており、隅角部周辺の磁束密度分布状態を立体的に把握することは難しい。このような背景から本研究では、3次元有限要素法による静磁場解析を行うことで、片面からの着磁による鉄筋の帯磁状況および隅角部周辺の磁束密度のベクトル成分を明らかにすることを目的とした。

## 2. 解析概要

表-1 に示すケースについて解析を行った。この解析手法は、既往の研究<sup>2)</sup>より実験結果をよく模擬できているものと考えられる。

### 2.1 解析モデル概要

RC の T 型橋脚の上に PC 桁が設置されている状況を想

定し、片面からしか接近できない橋脚梁部のスターラップ隅角部の破断を解析の対象とした。図-2 に解析モデルを座標とともに示す。鉄筋は円断面とし、スターラップはφ16mm、主鉄筋はφ32mm、桁内部の鉄筋はφ13mmとし、図-2 (b) に示す z-x 断面上およびその法線方向に各 1 本配置した。

### 2.2 解析方法

要素特性は 8 節点 1 次、要素数は 267,922、節点数は 275,407 である。物性に関しては、コンクリートは非磁性体と見なし、空気（比透磁率 $\mu=1$ ）と同じとした。鉄筋には磁界の強さ H と磁束密度 B の関係におけるヒステリシス特性を考慮し、その特性には Potter-Schmlian の式の重ね合わせで表現されたものを使用した。また、スターラップの曲げ加工部に幅 2mm の要素を設け、健全の場合は要素を鉄筋、破断の場合は空気とした。

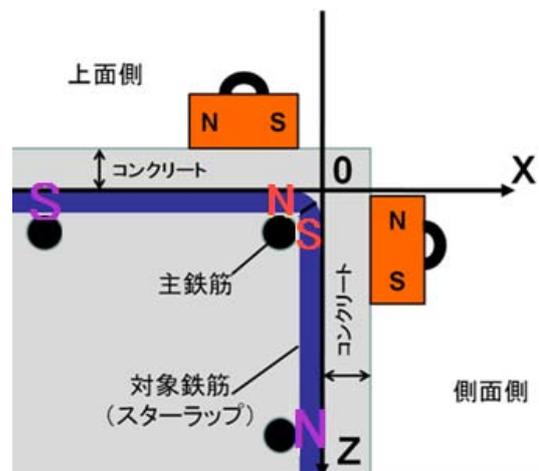


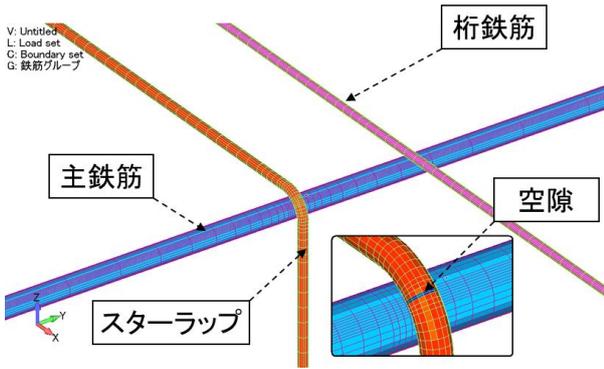
図-1 両面診断による鉄筋破断診断原理

\*1 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 修士課程 (正会員)

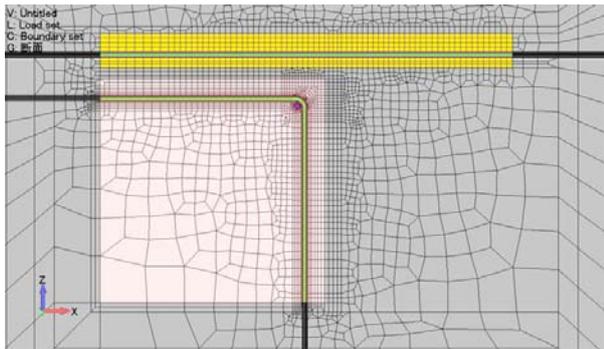
\*2 (株) 四国総合研究所 電力利用研究部 (非会員)

\*3 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 准教授 (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 (正会員)



(a) 鉄筋の解析モデル



(b) z-x 断面におけるメッシュ図

図-2 解析モデル

### 2.3 着磁方法

解析に用いた磁石の概要を図-3に示す。磁石は外場として取り扱った。鉄筋の着磁における磁石の動かし方については、スタールラップのかぶり縁の交点を原点とし、図-4に示す手順とした。以下に詳細を記す(単位はmm)。

- ①  $x = 1090 \sim$  着磁かぶり,  $y = 0, z = -11.5$
- ②  $x =$  着磁かぶり,  $y = 0, z = -11.5 \sim -511.5$  を 1.5 往復
- ③  $x =$  着磁かぶり $\sim 1090, y = 0, z = -511.5$
- ④  $x = 1090 \sim$  着磁かぶり,  $y = 300, z = -11.5$
- ⑤  $x =$  着磁かぶり,  $y = 300, z = -11.5 \sim -511.5$  を 1.5 往復
- ⑥  $x =$  着磁かぶり $\sim 1090, y = 300, z = -511.5$

着磁かぶりとは、磁石ユニットを往復させる位置でのスタールラップ側面のかぶり縁から磁石ユニット底面までの距離である。この磁石の動かし方は既往の研究<sup>2)</sup>の実験方法を模擬したものであり、複数本配置されるスタールラップ全てを診断対象とする実構造物の手順とほぼ同様の磁束密度分布を得ることができる。実際の解析では手順 1, 3, 4, 6 では 50~250mm ごとに、手順 2, 5 では 50mm ごとに磁石を止め磁束密度の出力を行った。

表-1 解析要因一覧

着磁かぶり(mm)	桁鉄筋の有無	鉄筋状態
50	あり	健全
		破断
78.5	なし	健全
		破断
	あり	健全
		破断
150	あり	健全
		破断

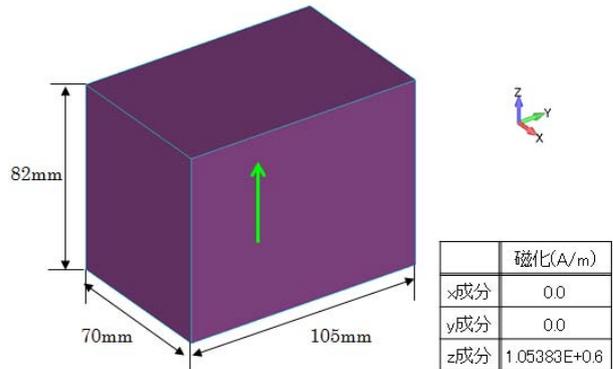


図-3 外場磁石概要

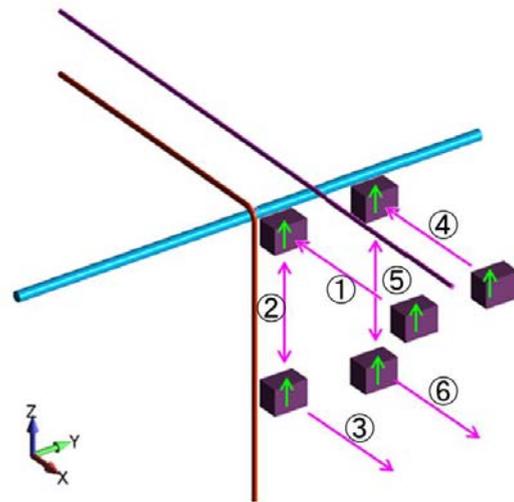


図-4 磁石の動かし方

## 3. 結果および考察

### 3.1 鉄筋の帯磁状況

桁鉄筋有のケースでの着磁終了後の z-x 断面の磁束密度ベクトルの分布の一例を図-5に示す。ここでスタールラップおよび桁鉄筋上の磁束密度ベクトルの方向に注

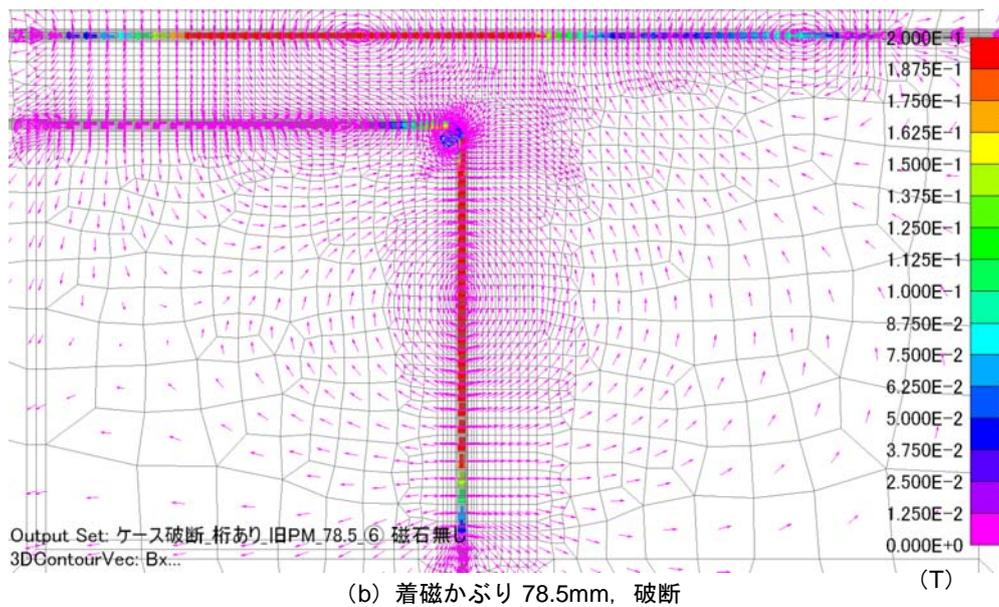
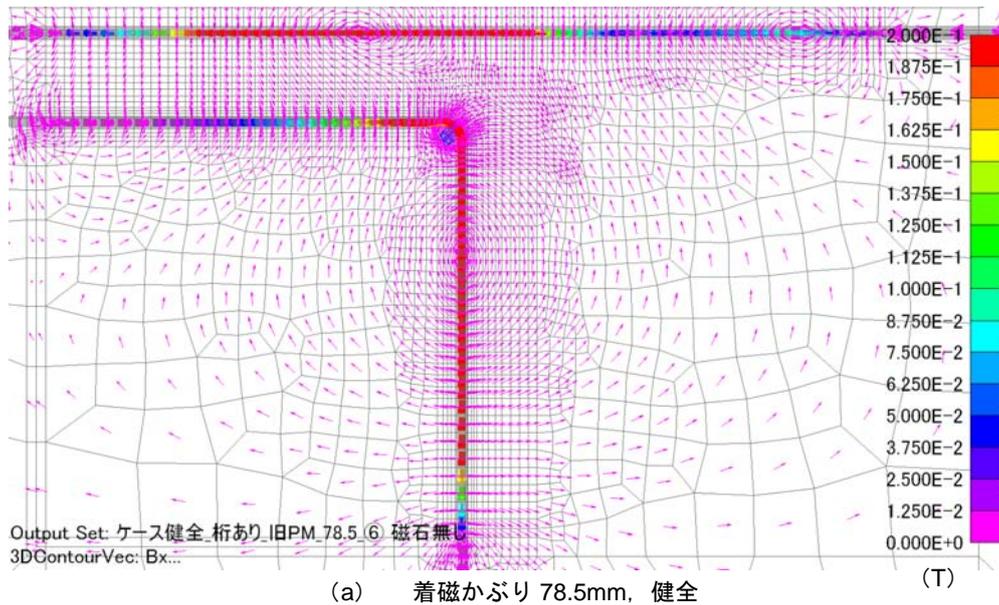


図-5 z-x 断面における磁束密度ベクトル分布一例

目すると、それぞれ磁束密度が流入する S 極と流出する N 極が存在することがわかる。鉄筋の帯磁状態の模式図を図-6 に示し、着磁かぶりおよび桁鉄筋の有無によるスターラップの帯磁状況への影響を検討する。

#### (1) 着磁かぶり

図-6 から隅角部側面側のスターラップの下側で、健全・破断ともに N 極となることがわかる。鉄筋が健全の場合、着磁かぶり 50mm (図-6 (a)) では隅角部周辺で S 極が発生し、これに伴い隅角部上面側のスターラップの左側で N 極となっている。着磁かぶりが 78.5mm (図-6 (b)), 150mm (図-6 (c)) と大きくなるほど隅角部の S 極が左側 (x 負方向) に移動し、隅角部上面側で

S 極、側面側で N 極という帯磁状態となる。

鉄筋に破断がある場合、着磁かぶり 50mm (図-6 (d)) では健全の場合と同様に隅角部周辺で S 極、隅角部上面側で N 極という帯磁状態となった。着磁かぶりが 78.5mm (図-6 (e)), 150mm (図-6 (f)) と大きくなるほど隅角部の S 極が側面側破断部方向 (z 正方向) に移動し、側面側のスターラップの破断部で S 極、下側で N 極という帯磁状態となる。

着磁かぶりが大きくなるほど鉄筋長手方向の広範囲で着磁を行うことができ、スターラップの帯磁状態が健全・破断ともに、両面診断でのスターラップの帯磁状況に近づき、診断がし易くなると考えられる。

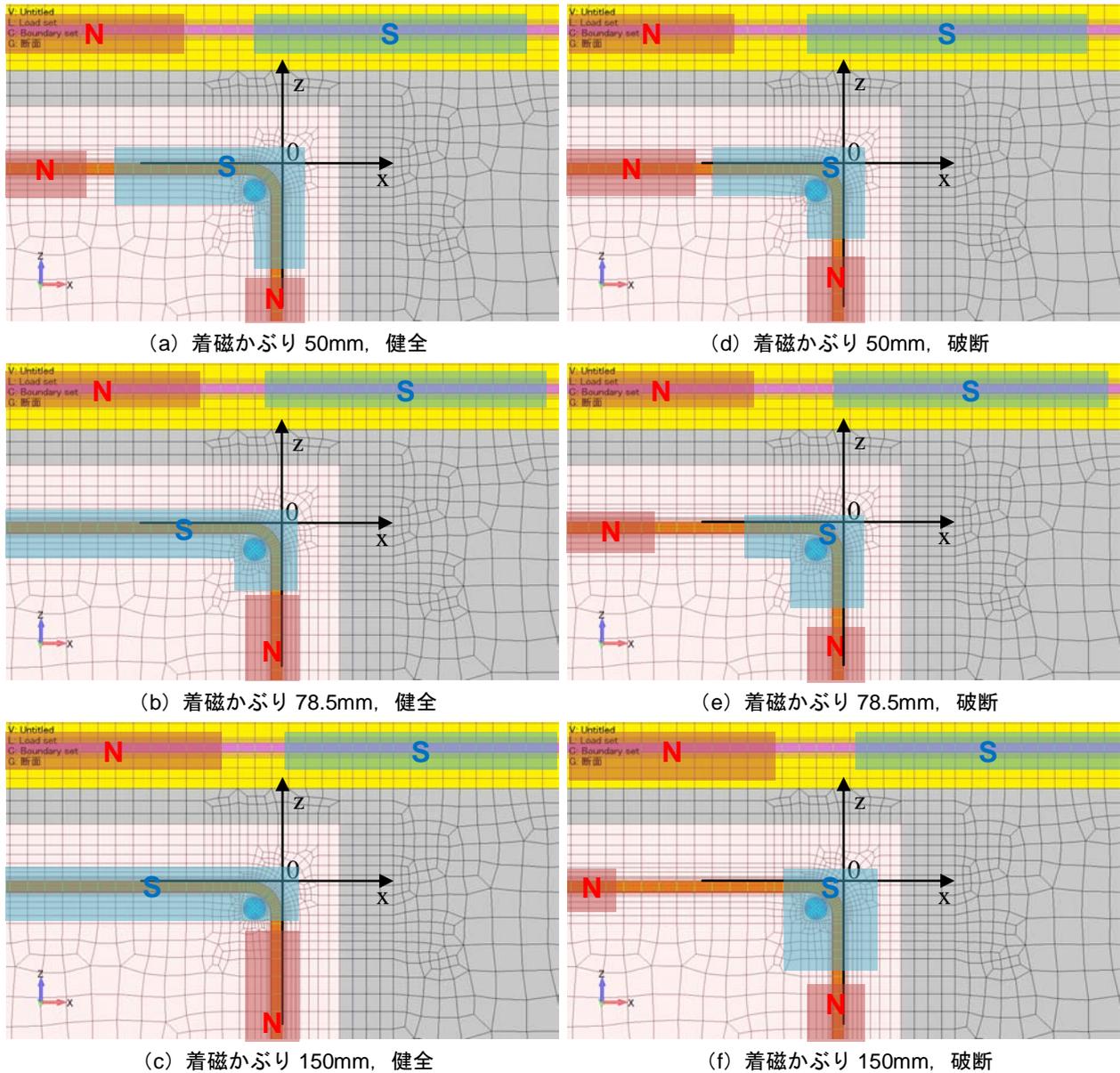


図-6 鉄筋帯磁状況模式図

## (2) 桁鉄筋の有無

図-6 から桁鉄筋の帯磁状況は、着磁手順において磁石のN面を近づけた  $x = 150\text{mm}$  付近でS極となり、これに伴い隅角部上面側スターラップの上方 ( $x = -700\text{mm}$  付近) でN極となる。桁鉄筋がこのような帯磁状況となることにより、スターラップは健全・破断それぞれ隅角部上面側のS極が左側 ( $x$  負方向) に移動し、隅角部周辺に存在するS極の影響が小さくなる。

桁鉄筋の存在により、鉄筋が健全である場合は隅角部での磁束密度がより小さくなり、健全とであるという診断がしやすくなる一方、破断鉄筋の特徴である磁極の影響も小さくなり診断が難しくなると考えられる。

## 3.2 磁束密度計測位置の磁束密度ベクトル成分

実際の片面診断では、磁石ユニットで鉄筋に着磁した後、コンクリート表面上で磁気計測ユニットを移動させることで、表面に対して垂直方向 ( $x$  方向) の磁束密度成分を測定するが、ここでは  $y$  方向、 $z$  方向の成分に注目した。

### (1) $y$ 方向成分

着磁かぶりが 50、78.5 および 150mm の場合の磁束密度の  $y$  成分を桁鉄筋有のケースについてそれぞれ図-7、8 および 9 に示す。解析結果から磁束密度を出力した位置は、かぶり 78.5mm ( $x = 78.5$ ) のスターラップ直上である。

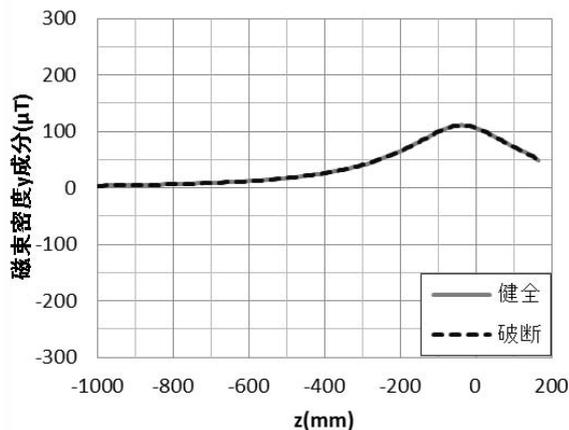


図-7 磁束密度の y 成分  
(着磁かぶり 50mm, 桁鉄筋有)

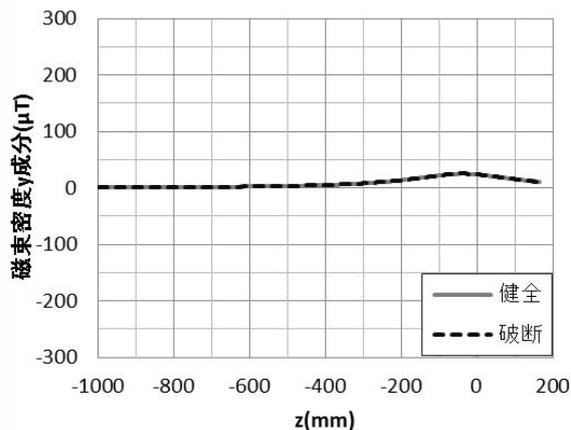


図-9 磁束密度の y 成分  
(着磁かぶり 150mm, 桁鉄筋有)

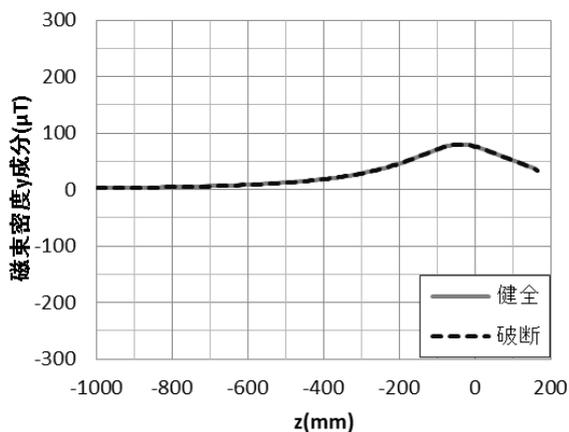


図-8 磁束密度の y 成分  
(着磁かぶり 78.5mm, 桁鉄筋有)

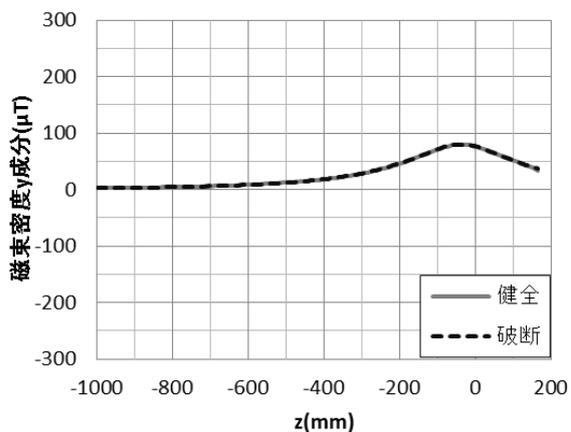


図-10 磁束密度の y 成分  
(着磁かぶり 78.5mm, 桁鉄筋無)

解析結果では、スターラップ直上の磁束密度の y 成分は健全・破断ともに隅角部周辺で上に凸のグラフとなり、着磁かぶりが大きくなるほど磁束密度のピークの山は低くなることがわかった。破断の有無による違いはみられなかった。

桁鉄筋無の場合の磁束密度の y 成分を着磁かぶりが 78.5mm のケースについて図-10 に示す。図-8 と図-10 を比較すると、健全・破断ともに桁鉄筋の有無による磁束密度の y 成分にほとんど変化はみられなかった。

磁束密度の y 成分は着磁かぶりの影響を受け、スターラップの破断の有無、桁鉄筋の有無の影響がほとんどないことから、隅角部周辺 ( $z=0$  付近) での磁束密度のピークの山は主鉄筋の帯磁によるものと考えられる。よって磁束密度の y 成分を用いた診断は難しいと考えられる。

## (2) z 方向成分

着磁かぶりが 50, 78.5 および 150mm の場合の磁束密度の z 成分を桁鉄筋有のケースについてそれぞれ図-11、

12 および 13 に示す。解析結果から磁束密度を出力した位置は、かぶり 78.5mm ( $x=78.5$ ) のスターラップ直上である。

スターラップ直上の磁束密度の z 成分は健全・破断ともに隅角部周辺 ( $z=0$ mm) で下に凸のピークを持つ。また、健全より破断のほうがピークの山が高く急峻になるという違いが表れた。着磁かぶりが小さくなるほど隅角部周辺のピークの山が緩やかになり、健全と破断のグラフの差が小さくなった。

桁鉄筋無の場合の磁束密度の z 成分を着磁かぶりが 78.5mm のケースについて図-14 に示す。図-12 と図-14 を比較すると  $z=-1000\sim-400$  までの磁束密度の z 成分はほとんど同じであるが、桁鉄筋の存在により隅角部周辺の磁束密度分布が変化することがわかる。

磁束密度の z 成分は隅角部周辺 ( $z=0$  付近) で破断の有無による差がみられ、着磁かぶり・桁鉄筋の有無による影響を考慮した上で診断に適用できると考えられる。

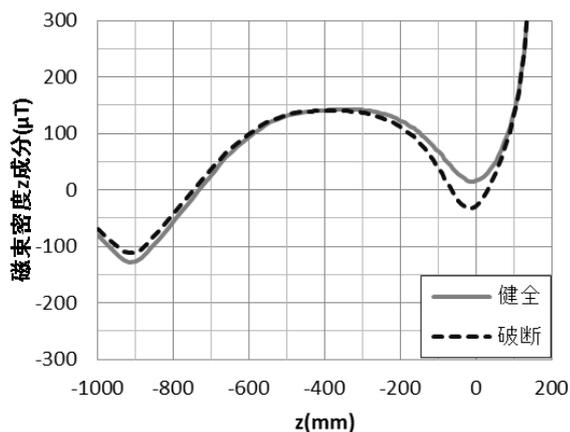


図-11 磁束密度の z 成分  
(着磁かぶり 50mm, 桁鉄筋有)

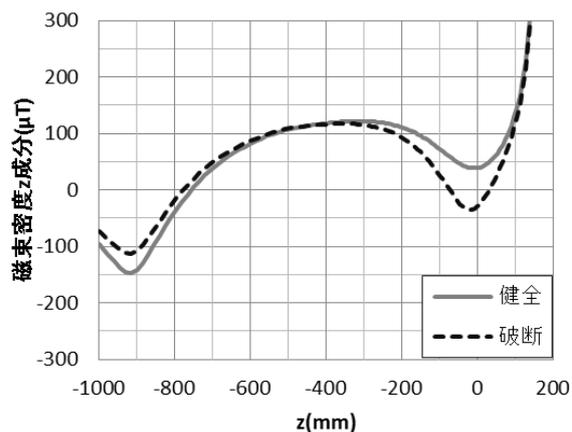


図-13 磁束密度の z 成分  
(着磁かぶり 150mm, 桁鉄筋有)

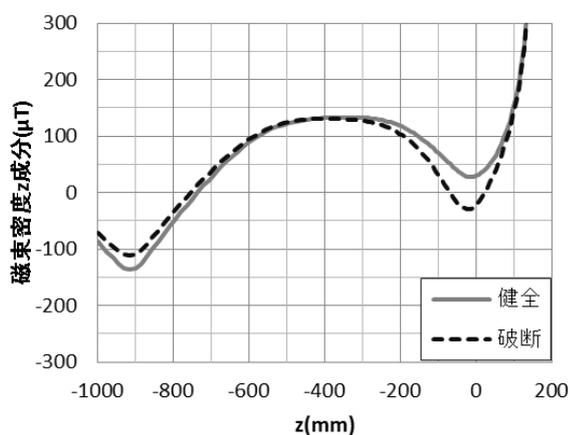


図-12 磁束密度の z 成分  
(着磁かぶり 78.5mm, 桁鉄筋有)

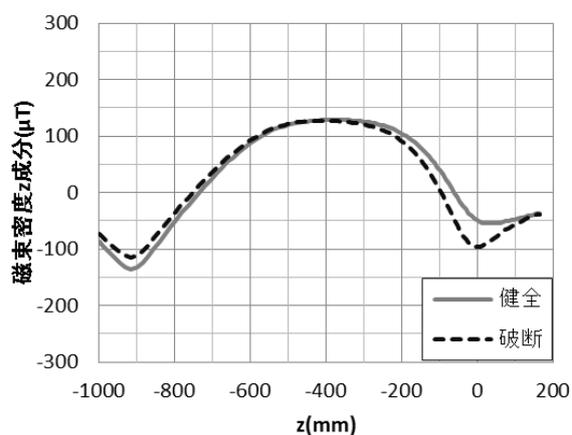


図-14 磁束密度の z 成分  
(着磁かぶり 78.5mm, 桁鉄筋無)

#### 4. 結論

本研究では、3次元有限要素法による静磁場解析を行うことで、片面からの着磁による鉄筋の帯磁状況および隅角部周辺の磁束密度のベクトル成分について検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 鉄筋の帯磁状態は着磁かぶりが大きいほど、両面診断での状況に近くなり診断し易くなる。
- (2) 桁内部の鉄筋の存在によりスターラップ隅角部の帯磁の程度が小さくなり、健全は診断し易く、破断は診断し難くなる。
- (3) 測定面に対して平行な y 方向の磁束密度成分はスターラップの破断の有無・桁内部の鉄筋の影響がほとんどなく、主鉄筋の帯磁による影響が大きい。
- (4) 測定面に対して平行な z 方向の磁束密度成分の測定は破断の有無の診断に有効である。ただし着磁かぶりや桁内部の鉄筋の影響を考慮する必要がある。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり京都大学院の宮川豊章教授、石川敏之助教ならびに(株)四国総合研究所の前田龍己氏、横田優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。

#### 参考文献

- 1) 松田耕作, 廣瀬 誠, 前田龍己, 横田 優: 新しい鉄筋破断非破壊診断手法の開発, コンクリートの補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 6 巻, pp.425-430, 2006.10
- 2) 寺澤広基, 廣瀬 誠, 服部篤史, 河野広隆, 宮川豊章: 片面からの磁気法を用いた鉄筋破断非破壊診断手法, コンクリートの補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 10 巻, pp.135-140, 2010.10