

論文 磁気法片面診断における鉄筋破断の新たな判断指標について

寺澤 広基^{*1}・廣瀬 誠^{*2}・服部 篤史^{*3}・河野 広隆^{*4}

要旨：ASR によるスターラップ隅角部などにおける鉄筋破断の非破壊診断手法の 1 つとして磁気法が挙げられる。既往の研究より、構造の制約上、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するのに十分な差が得られることが分かっている。この着磁手法による実験データを用いて、環境磁場の影響を考慮した新たな判断指標の観点から診断の可能性・適用性について検討した。その結果、用いた 2 つの判断指標はどちらも破断を診断できる可能性があること、またそれぞれのメリットを明らかにした。

キーワード：磁束密度、鉄筋破断、判断指標、環境磁場、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挙げられる。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。既往の研究より、隅角部の鉄筋破断を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^{1),2),3)}。

一方、構造の制約上、片面からしか接近できない場合（以下、片面診断）でも、鉄筋を平行方向に着磁・測定することで、鉄筋破断がある場合と無い場合の測定磁束密度のピークの間に破断の有無を判断するのに十分な差が得られること、また隅角部周辺の鉄筋（上部工内部の鉄筋や隅角部の主鉄筋）がある場合でも同様に診断できる可能性が高いことが分かっている⁴⁾。しかし、片面診断で用いた測定磁束密度のピークという指標は環境磁場による影響を受けると考えられるため、この影響を考慮した判断指標が必要である。

このような背景から本研究では、片面診断における環境磁場による影響を考慮した 2 つの診断指標を取り上げ、それらによる診断の可能性・適用性について検討した。

2. 実験概要

2.1 想定した配筋状況および供試体概要

実験データは既往の研究⁴⁾のものを用いた。以下はその実験概要である。

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診断の対象とした。鉄筋の配筋状況を

図-1 に示す。このような状況に対し、一般にはコンクリートは非磁性体と見なせ、磁気法では影響を受けないため、本実験ではコンクリートを打設せずに図-2 に示す木製の実験台に鉄筋をビニールタイで固定したものを供試体とした。実験台は作業簡便のため想定した状況を 90° 回転させたものであり、主鉄筋のかぶり (100mm) 縁とスターラップ軸の交点を原点として図-2 の通り x-y 座標をとった。

使用した鉄筋はスターラップが D16 の 1800mm、桁鉄筋が D13 の 1800mm、主鉄筋が D32 の 1500mm である。鉄筋の長さはそれぞれの端部からの測定磁束密度への影響が小さくなるよう十分な長さをとった。スターラッ

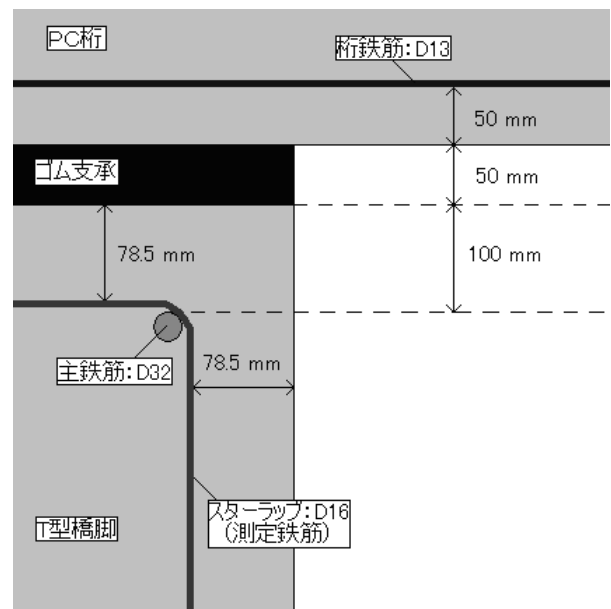


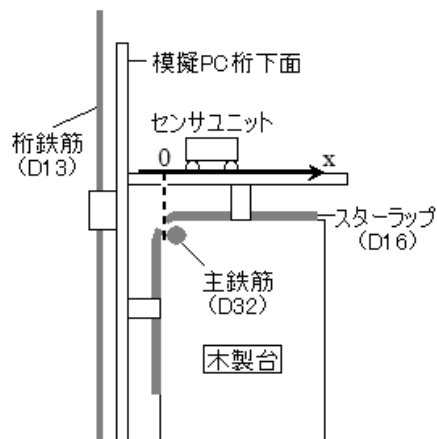
図-1 想定した配筋状況模式図

*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)

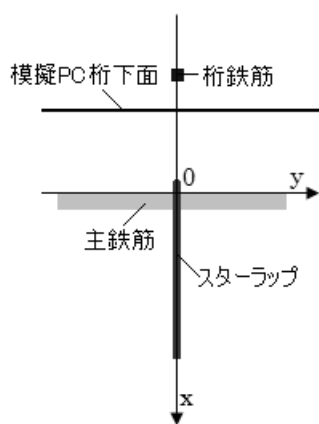
*2 (株) 四国総合研究所 電力利用研究部 (非会員)

*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)

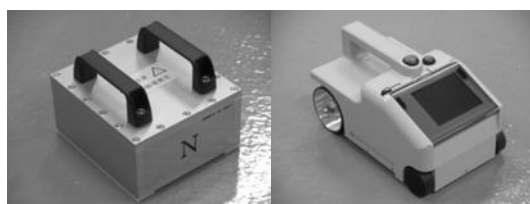


(a) 側面図



(b) 上面図

図-2 実験台概略図



(a) 磁石ユニット (b) 磁気計測ユニット

写真-1 診断装置

プについては中央で冷間曲げ加工し（曲げ内半径：35mm > 2D）、破断鉄筋は隅角部で45度方向にカッターによる切断を行った。破断ギャップは2mmとした。

2.2 実験要因

実験要因を供試体一覧とともに表-1に示す。3.1に記載する判断指標が、桁鉄筋・主鉄筋の存在によってどのような影響を受けるかを検討した。桁鉄筋位置は、図-3に示すように桁鉄筋のかぶり縁のx座標である。破断位置に近いと影響が大きいと予想される。

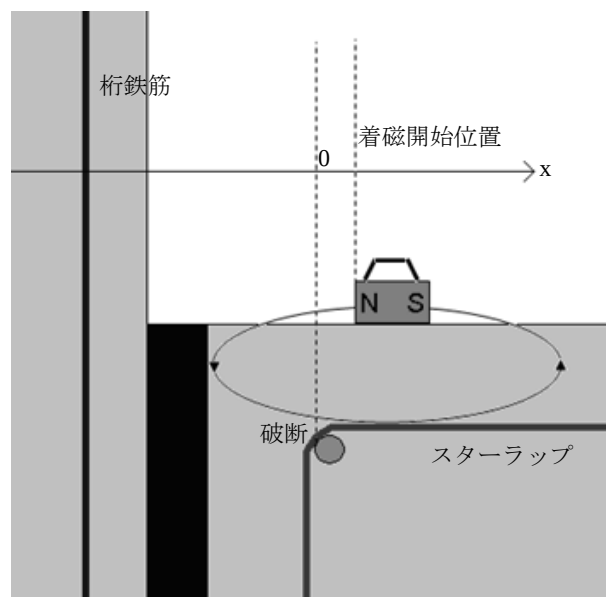


図-3 平行方向着磁

表-1 実験要因と供試体一覧

主鉄筋	桁鉄筋位置 (mm)	スターラップ
なし	なし	健全
		破断
	-200	健全
		破断
	-250	健全
		破断
	-300	健全
		破断
	-350	健全
		破断
あり	なし	健全
		破断
	-200	健全
		破断

2.3 診断装置および診断手順概要

(1) 診断装置

診断装置は鉄筋を磁化するための永久磁石を内蔵した磁石ユニットと、測定面に垂直な方向成分の磁束密度を測定する磁気計測ユニットの二つからなる。診断装置の外観を写真-1に示す。磁石ユニット底面から150mm離れた位置における平行方向の磁束密度は約7mTである。センサユニットは-300~300μTの範囲の磁束密度を移動距離1mmごとに測定、記録することができる。

(2) 診断手順

実験は各ケース 2 回ずつ行い、得られた測定磁束密度を平均した。2 回目は 1 回使用したすべての鉄筋（スターラップ、主鉄筋、桁鉄筋）を消磁器で消磁した上で使用した。着磁・測定はいずれも片面のかぶり面上（スターラップに対してかぶり 78.5mm）で行った。その範囲・手順は以下のとおりである（単位：mm，位置座標は図-2，図-3 参照）。

・平行方向着磁

($x = -100 \sim 500$, $y = 0$) を 1.5 往復後、

($x = -100 \sim 500$, $y = 300$) を 1.5 往復

このように磁石ユニットを動かすことで、複数本配置されるスターラップ全てを診断対象とする実構造物での手順とほぼ同様の磁束密度分布を得ることができる。

・磁束密度測定

($x = -100 \sim 500$, $y = 0$)

3. 結果および考察

3.1 判断指標

磁束密度の測定結果の例を図-4 に示す。鉄筋が破断している場合は健全の場合と比較してグラフのピークの山が高く、かつ急峻になった。しかし、このピーク値そのものは環境磁場の影響を受けて変動し得る。そこで、判断指標を設定するにあたり、図-4 に示すように 1 つの測定磁束密度グラフ内で 2 点の測定磁束密度の差分をとることでこの影響をキャンセルする方針とした。そのうえで以下の 2 種類の判断指標を取り上げた。

(1) 補正ピーク値

従来の両面診断¹⁾で用いられている判断指標に準じた値であり、ピーク値と隅角部 ($x = 0$) での測定磁束密度の差を指標とする。片面診断でも、両面診断同様ピークの位置が $x = 0$ より大きく、また破断の方が健全よりピークの位置が大きいこと、ピークの位置以下において破断の方が健全よりもグラフの傾きが大きいことから、破断の有無による測定磁束密度の違いを明確に示すと考えられる。

(2) 最大変化率

鉄筋が破断している場合はピークの位置付近で測定磁束密度のグラフの傾きが大きくなる傾向が見られた。そこでグラフの傾きを評価することを考えた。図-4 の平均変化率を図-5 に示す。ここで平均変化率を求めるための区間は 30mm とした。この測定磁束密度の平均変化率の最大値（以下、最大変化率）を指標とする。

3.2 判断指標に与える桁鉄筋・主鉄筋の影響

(1) 補正ピーク値

桁鉄筋位置と着磁開始位置 ($x = -100$) の距離（以下、

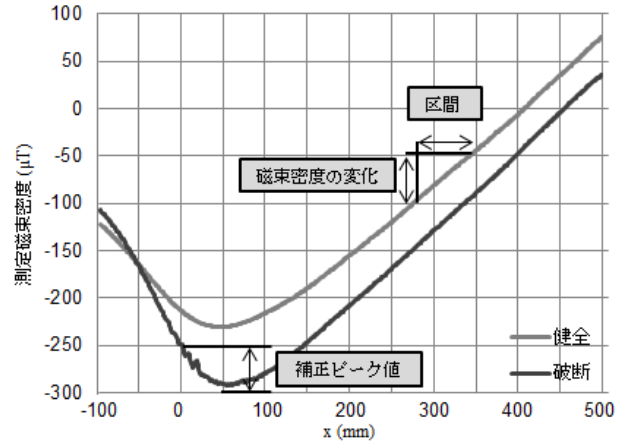


図-4 測定結果一例（スターラップのみ）

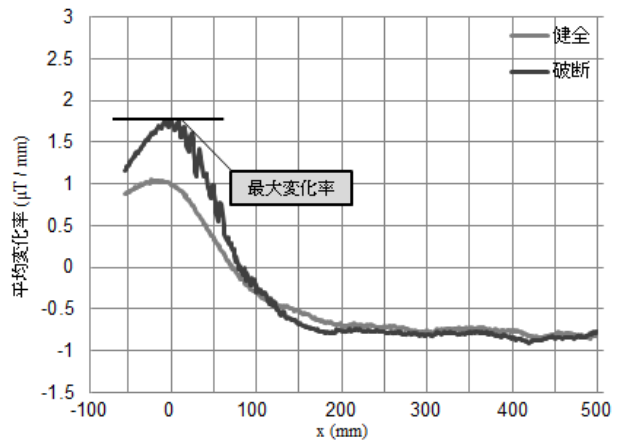


図-5 測定磁束密度の平均変化率

桁鉄筋距離）の違いによる補正ピーク値の変化を図-6 に示す。健全の場合は桁鉄筋距離が短くなるほど補正ピーク値が大きくなった。破断の場合は桁鉄筋距離が長い 250, 300mm でやや補正ピーク値が大きくなったものの、健全の場合と同様に桁鉄筋が近くに存在することで補正ピーク値が大きくなる傾向がみられた。

主鉄筋の有無による補正ピーク値の変化を図-7 に示す。主鉄筋の存在により、健全の場合は補正ピーク値が小さく、破断の場合は補正ピーク値が大きくなることで両者の差が広がり、判断がしやすくなることがわかった。

桁鉄筋（桁鉄筋距離 100mm）と主鉄筋両方を配置した場合とスターラップのみの場合の補正ピーク値の違いを図-8 に示す。スターラップのみの場合と比較して、健全の場合の補正ピーク値はほとんど差がなかった。これは桁鉄筋の影響と主鉄筋の影響が打消しあっているためと考えられる。一方、破断の場合の補正ピーク値は 20μT 以上大きくなった。これは桁鉄筋・主鉄筋のどちらも補正ピーク値を大きくするように影響したためと考

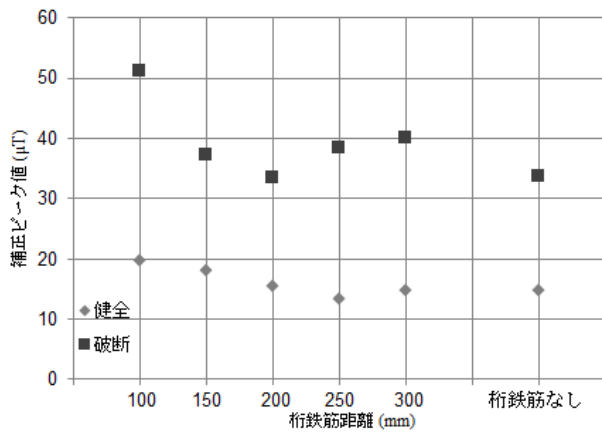


図-6 桁鉄筋による補正ピーク値への影響

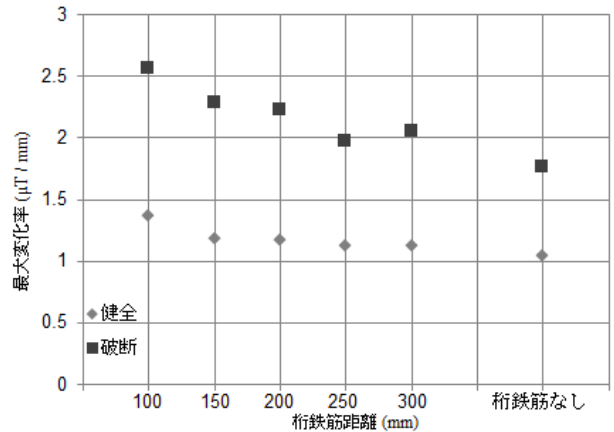


図-9 桁鉄筋による最大変化率への影響

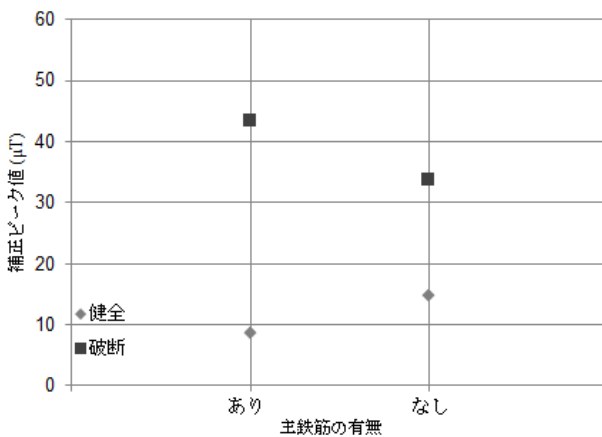


図-7 主鉄筋による補正ピーク値への影響

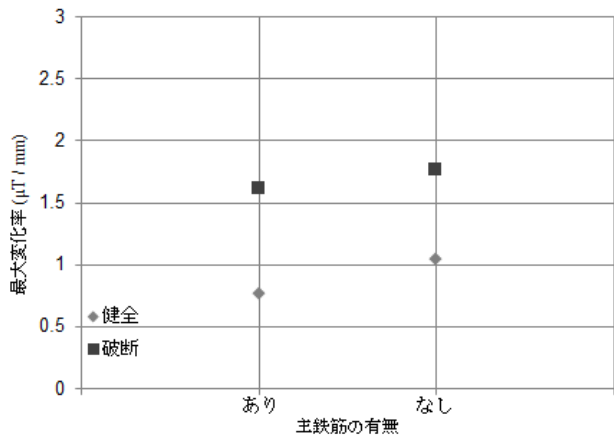


図-10 主鉄筋による最大変化率への影響

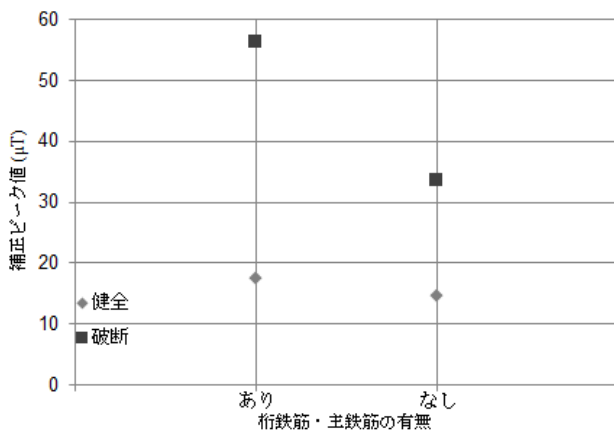


図-8 桁鉄筋・主鉄筋による補正ピーク値への影響

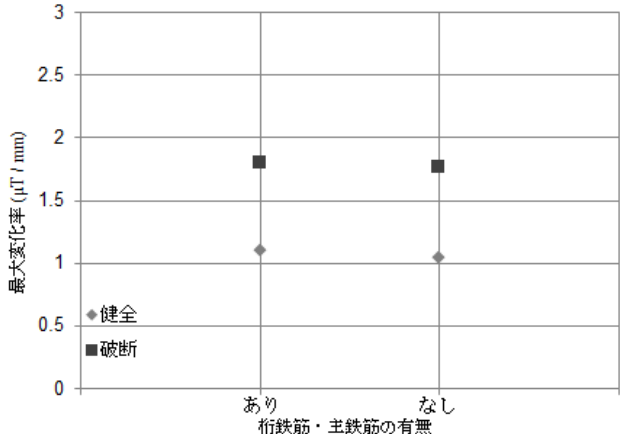


図-11 桁鉄筋・主鉄筋による最大変化率への影響

えられる。結果として、想定した配筋状況において補正ピーク値は健全と破断で差が大きくなり、判断がしやすくなることがわかった。

(2) 最大変化率

桁鉄筋距離の違いによる最大変化率の変化を図-9 に

示す。健全・破断ともに桁鉄筋距離が短くなるにしたがって最大変化率はほぼ一様に大きくなった。

主鉄筋の有無による最大変化率の変化を図-10 に示す。主鉄筋の存在によって健全・破断ともに最大変化率は小さくなった。

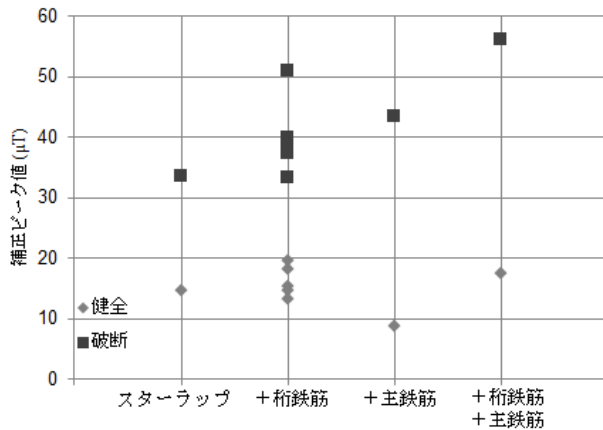


図-12 各鉄筋が与える補正ピーク値への影響

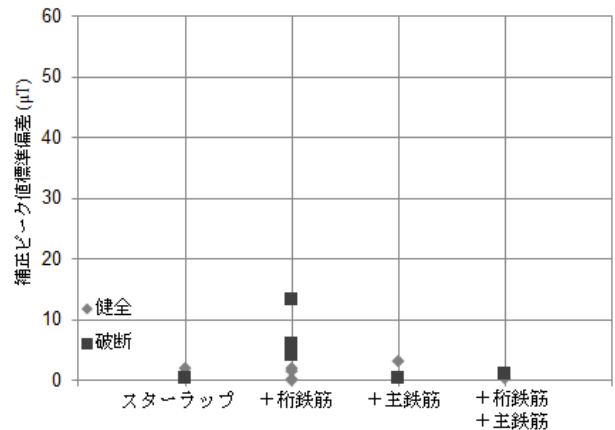


図-14 補正ピーク値の偏差

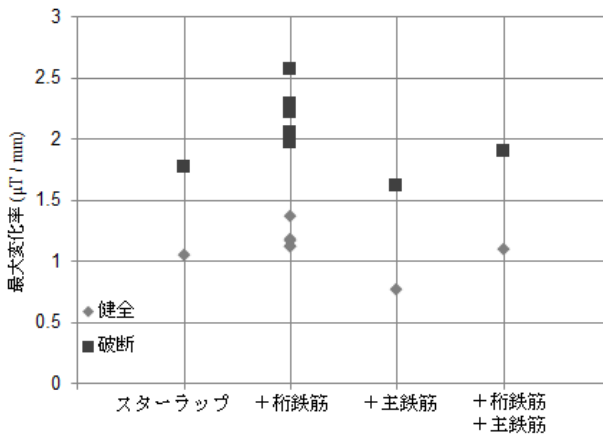


図-13 各鉄筋が与える最大変化率への影響

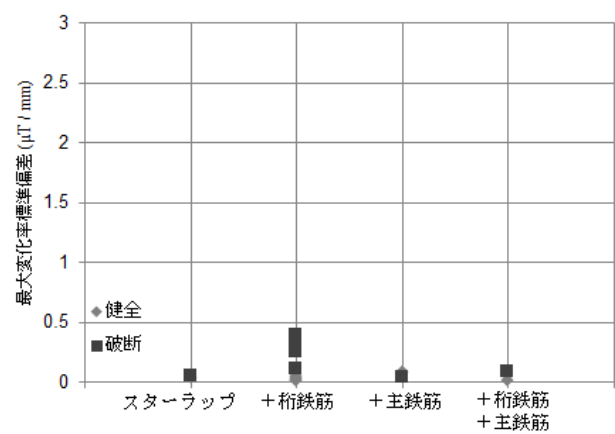


図-15 最大変化率の偏差

桁鉄筋（桁鉄筋距離 100mm）と主鉄筋両方を配置した場合とスターラップのみの場合の最大変化率の違いを図-11に示す。想定した配筋状況での最大変化率はスターラップのみの場合とほとんど差がなかった。これは健全・破断ともに、最大変化率が桁鉄筋によって大きくなる効果と主鉄筋によって小さくなる効果が同程度であり、打消しあったためと考えられる。

3.3 判断指標のしきい値の設定

3.2 で示した実験結果を配筋状況ごとに補正ピーク値の観点からまとめたものを図-12に、最大変化率の観点からまとめたものを図-13に示す。

補正ピーク値についてはどの配筋状況においても健全は $20\mu\text{T}$ 以下、破断は $30\mu\text{T}$ 以上となっている。これにより、しきい値の設定にある程度の幅が持てるという好ましい結果となった。

一方、最大変化率については、配筋状況ごとに見れば健全と破断で $0.5\mu\text{T}/\text{mm}$ 以上の差が開いているものの、桁鉄筋からの影響と主鉄筋からの影響が反対となっている。このため、すべての配筋状況におけるしきい値

は $1.5\mu\text{T}/\text{mm}$ 付近の限られた領域にのみ設定可能となっている。しかし、予め配筋状況を把握することで診断の可能性はあると考えられる。

3.4 判断指標の偏差

3.2～3.3 では2回実験を行い、測定磁束密度の平均値を各判断指標に変換したデータを示したが、これを平均値とし、1回ごとの測定磁束密度を用いた判断指標との偏差をとった。偏差は平均し、補正ピーク値についてまとめたものを図-14に、最大変化率についてまとめたものを図-15に示す。偏差については、ほとんどの配筋状況では破断の有無の判断に与える影響は小さいと考えられるが、スターラップと桁鉄筋が配置してあるケースで、かつ破断している場合においては補正ピーク値、最大変化率のどちらも大きくなっている。

特に、補正ピーク値では最大で約 $13\mu\text{T}$ の標準偏差が生じている。これは測定磁束密度ごとのピーク位置の誤差によるものと考えられる。スターラップと桁鉄筋を配置した場合のピーク位置を図-16に、それ以外の配筋状況でのピーク位置を図-17に示す。補正ピーク値は3.1

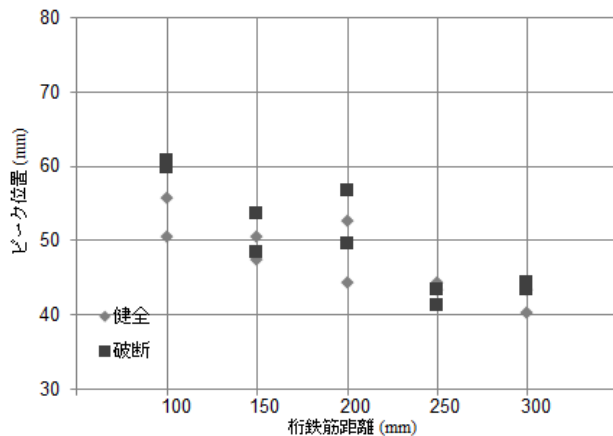


図-16 桁鉄筋距離ごとのピーク位置

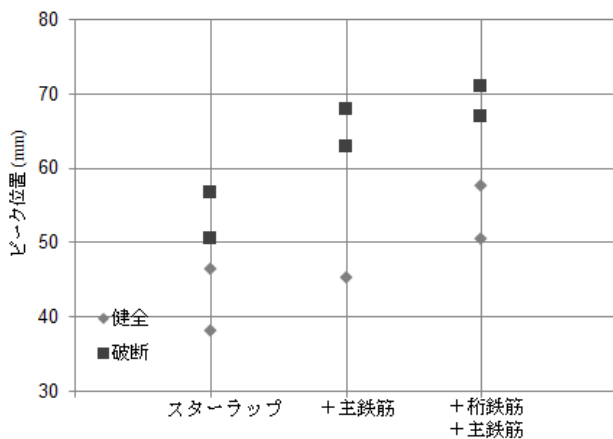


図-17 各配筋状況でのピーク位置

で述べたように $x = 0$ とピーク位置の測定磁束密度の差で表す指標であり、破断の場合のピーク位置は健全の場合より大きくなる。ところが、図-16によると健全の方が破断よりも大きいピーク位置が生じているケースがある。一方、図-17ではすべてのケースで破断時のピーク位置の方が大きくなっている。よって、桁鉄筋の影響によりピーク位置に誤差ができ補正ピーク値にばらつきが生じたと考えられる。

また、図-17より桁鉄筋がある場合でも主鉄筋を配置したケースではピーク位置は破断の方が大きい。このことから主鉄筋はピーク位置のばらつきを抑えるよう影響する可能性がある。

3.5 判断指標の現場診断での適用性

実際の現場での診断では、まず電磁波レーダーを用いた鉄筋位置の探査を行う。今回想定した事例では、対象構造物の上には PC 桁が載っていることから、鉄筋探査も隅角部の片面からのみで行わなければならない。このような状況では、正確な隅角部の位置（破断位置）を特定するのは難しい場合がある。そのため、補正ピーク値

は破断位置 ($x = 0\text{mm}$) に依存することから現場での診断では多少の誤差が生じることが予想される。破断位置の探査誤差を 10mm とすると、図-4 から健全で $-4 \sim +10\mu\text{T}$ 、破断で $-10 \sim +20\mu\text{T}$ 程度影響し、最大で $20\mu\text{T}$ の悪影響が生じると考えられる。しかし、図-12より主鉄筋が配置してある実際に近い状況ではしきい値の設定が可能であると考えられる。

最大変化率については破断位置やピーク位置に依存しないのでこれらの誤差は少ないものと考えられる。

4. 結論

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 磁気法片面診断において本研究で検討した新たな2つの診断指標「補正ピーク値」と「最大変化率」はどちらも診断に使用できる可能性がある。
- (2) 補正ピーク値では、測定値のばらつきや現地診断での誤差が生じることが予想されるが、特に健全と破断の差が顕著であり、しきい値の設定がしやすい。
- (3) 最大変化率では、配筋状況により値が上下し、一律のしきい値を設定することはやや難しいが、配筋条件毎にしきい値を設けることで診断の可能性は充分にあると考えられる。また、測定値のばらつきや現地診断での誤差が少なくなることが予想される。

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四国総合研究所(株)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) 横田 優, 廣瀬 誠, 前田龍己, 松田 耕作: 磁気法によるコンクリート構造物の鉄筋破断非破壊診断手法の開発, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, pp.867-868, 2007.9
- 3) 廣瀬 誠: コンクリート構造物の鉄筋破断非破壊診断装置の開発, 火力原子力発電大会論文集, Vol.60, pp.49-53, 2010.2
- 4) 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