

## 論文 鉄筋径を利用した非破壊試験による比誘電率分布とかぶりの推定

中村 英佑<sup>\*1</sup>・森濱 和正<sup>\*2</sup>・山口 順一郎<sup>\*3</sup>・松塚 忠政<sup>\*3</sup>

**要旨**：電磁波レーダ法でコンクリート構造物のかぶりを推定するためには、コンクリートの比誘電率を正確に設定する必要がある。本論文では、構造物中の鉄筋を利用してコンクリート内部の比誘電率の分布状態を非破壊的に推定する方法を提案し、得られたかぶりの精度を検証した。この結果、本論文の方法で得られた比誘電率分布を用いるとかぶりを概ね推定できるものの、測定装置の性能上の問題が推定精度に影響を及ぼすことが明らかとなった。

**キーワード**：非破壊試験，電磁波レーダ法，比誘電率，かぶり

### 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性や健全度を確認するため、非破壊試験により構造物の性能・品質を検査する方法が検討されている。

コンクリート構造物のかぶりを非破壊的に推定する方法として電磁波レーダ法がある。これは、測定装置から放射された電磁波がコンクリート構造物中の鉄筋により反射され再び戻ってくるまでの往復伝搬時間を測定することにより、かぶりを算出する方法である<sup>1)</sup>。この方法を実構造物に適用するためには、コンクリート構造物の比誘電率を事前に正確に設定することが必要である。ところが、実際にはコンクリート構造物の比誘電率は構造物ごとに異なり、正確な比誘電率を得るためにコアを採取することが提案されている。この方法は局所的ではあるものの構造物の破壊を伴うため、構造物の維持管理上好ましいとは言い難い。また、コンクリートの比誘電率は構造物の含水状態にも大きく左右されるため<sup>2)</sup>、コアの採取位置や測定日の気象条件等の影響を受けやすい。従って、電磁波レーダ法によりコンクリート構造物のかぶりを推定するには、コンクリート内部の比誘電率を非破壊的に簡潔に求める方法が必要となる。

こうした視点から、本論文では、コンクリー

ト構造物中の鉄筋の径を利用し非破壊的にコンクリート内部の比誘電率を推定する方法を提案するとともに、これを供試体と実構造物に適用し得られたかぶりの精度を検証することを目的としている。

### 2. 比誘電率分布とかぶりの推定方法

#### 2.1 既往研究

これまで、電磁波レーダ法を用いてコンクリート構造物の比誘電率やかぶりを推定するために様々な提案がなされてきた。野田ら<sup>3)</sup>は、コンクリート構造物内部で交差する鉄筋のかぶり差が鉄筋径と同値となることを利用して比誘電率とかぶりを推定し、この方法により精度良く実構造物の比誘電率を推定できることを示している。また、山口ら<sup>4), 5)</sup>は、同様の方法を異形鉄筋の表裏に2本の丸鋼を埋設した供試体や実構造物に適用し、比誘電率とかぶりの推定を行っている。これらの既往研究では、コンクリート構造物中の鉄筋の径を利用することにより、比誘電率やかぶりを精度良く推定することに成功している。

ところが、これらの既往研究ではコンクリート内部の特定の一部の比誘電率しか求めることができていない。実際には、コンクリートの比

\*1 (独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 研究員 工修 (正会員)

\*2 (独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 (正会員)

\*3 (独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 工修 (正会員)

誘電率は内部の含水状態の影響を受け、表面からの距離が深くなるほど大きくなるという特徴を持つ。従って、電磁波レーダ法によりコンクリート構造物のかぶりを精度良く推定するには、内部の比誘電率の分布状態を明らかにする必要がある。これを踏まえ、本論文では構造物中の鉄筋の径を利用してコンクリート内部の比誘電率の分布状態を非破壊的に推定する方法を提案し、これから得られるかぶりの精度を検証する。

### 2.2 鉄筋径を利用した比誘電率分布とかぶりの推定方法

一般に、電磁波レーダ法を用いてコンクリート構造物の比誘電率を推定するには、式(1)により設定した比誘電率でのかぶり測定値から電磁波反射時間を算出し、式(2)により比誘電率を推定する方法が用いられる。

$$T = \frac{2D'\sqrt{\epsilon_0}}{C} \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \left(\frac{CT}{2D}\right)^2 \quad (2)$$

ここで、 $T$ :電磁波反射時間( $\times 10^{-9}$ s),  $D'$ :設定した比誘電率でのかぶり測定値(mm),  $\epsilon_0$ :測定時に設定したコンクリートの比誘電率(10.7, 8, 6.2),  $C$ :空気中での電磁波速度( $3 \times 10^{11}$ mm/s),  $\epsilon_r$ :コンクリートの比誘電率,  $D$ :実測かぶり(mm)とする。

一方、コンクリート構造物中の鉄筋の径を用いて比誘電率を推定する場合、交差する鉄筋のかぶりの差が鉄筋径と同値となることを利用する。図-1に鉄筋の位置関係を示す。ここで、横筋のかぶりと縦筋のかぶりの差は鉄筋径  $d$  と等しいことから、電磁波反射時間および比誘電率は以下の算定式により得られる。

$$T' = \frac{2d'\sqrt{\epsilon_0}}{C} \quad (3)$$

$$\epsilon_r = \left(\frac{CT'}{2d}\right)^2 \quad (4)$$

ここで、 $T'$ :各設定比誘電率での電磁波反射時間の差( $\times 10^{-9}$ s),  $d'$ :交差する鉄筋のかぶりの差(mm),  $\bar{T}$ :各設定比誘電率での電磁波反射時間差の平均( $\times 10^{-9}$ s),  $d$ :鉄筋径(ふしの谷部と山部の間

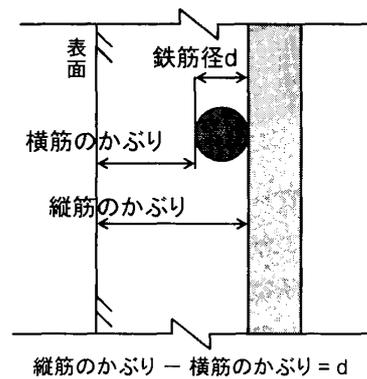


図-1 鉄筋の位置関係

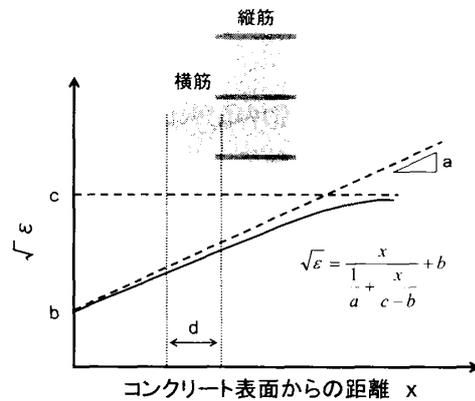


図-2 比誘電率分布の仮定

の実測値)(mm)とする。

コンクリート内部の比誘電率分布は、山口ら<sup>4)</sup>の分析結果によると、表面からの距離が深くなるほど大きくなり、概ね 100mm ほどの深さで一定値に落ち着くと考えられる。これを踏まえると、コンクリート内部の比誘電率の分布は、図-2 および式(5)のように仮定できる。

$$\sqrt{\epsilon} = \frac{x}{\frac{1}{a} + \frac{x}{c-b}} + b \quad (5)$$

ここで、 $\epsilon$ :比誘電率,  $x$ :コンクリート表面から内部までの距離(mm),  $a, b, c$ :パラメータ,  $a$ は  $x=0$  のときの接線の傾き,  $b$ は  $x=0$  のとき(コンクリート表面)の比誘電率,  $c$ は  $x=\infty$  のときの比誘電率とする。

すると、電磁波反射時間とかぶりの関係は、式(6)から式(7)のように示される。

$$\frac{CT}{2} = \int \sqrt{\epsilon} dx \quad (6)$$

$$\frac{CT}{2} = cx - \frac{(b-c)^2}{a} \ln(ax - b + c) \quad (7)$$

本論文では、コンクリート内部の比誘電率の分布を推定するため、まず、仮定した比誘電率における電磁波レーダのかぶり測定値から電磁波反射時間を式(1)により算出し、式(7)で回帰分析を行う。次に、回帰分析から得られたパラメータを式(5)に代入し、コンクリート内部の比誘電率分布を推定する。また、上記で得られたパラメータと電磁波レーダのかぶり測定値から求めた電磁波反射時間を式(7)に代入し、かぶりを推定する。かぶりの推定精度の検証においては、本論文の方法を用いて推定したかぶりと、山口ら<sup>5)</sup>の式(3)、(4)を用いて推定したかぶりとの精度を比較する。以下、前者を本論文の方法を用いた推定値、後者を既往研究の方法を用いた推定値と呼ぶ。

### 3. 実験概要

#### 3.1 供試体

本論文では、上記で提案したコンクリート内部の比誘電率分布とかぶりの推定方法を供試体と実構造物に適用する。

供試体は、図-3に示すようなボックス型とし、屋外に設置した。鉄筋は、鉄筋径、間隔、かぶり等が測定結果に与える影響を加味するため様々なパターンで配置している。図-4に、コア抜き位置とかぶり推定位置を示す。紙面の都合上、全ての位置を同一壁面に表示している。測定位置は、西外壁3ヶ所、西内壁2ヶ所、東外壁1ヶ所の計6ヶ所とした。

実構造物は、河川内の小判型壁式橋脚であり、図-5に示すように車道部に側道部を拡幅し、車道部は供用34年、側道部は供用19年である。測定箇所は、補強後の車道部1ヶ所、中央3ヶ所、側道部1ヶ所の計5ヶ所において図-6のように行った。鉄筋径は全て16mmであり、コアは主鉄筋、帯鉄筋上で2本ずつ採取した。

#### 3.2 測定装置

測定装置は、測定現場のコンクリートの比誘

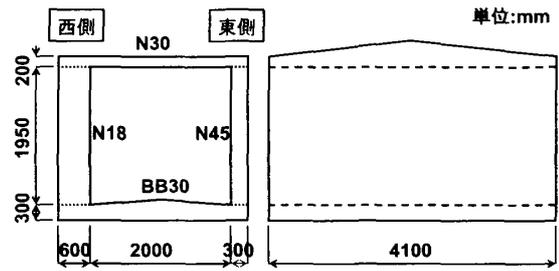


図-3 供試体寸法

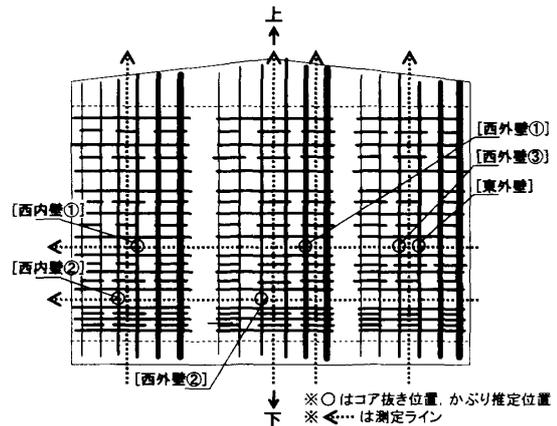


図-4 コア抜き位置とかぶり推定位置

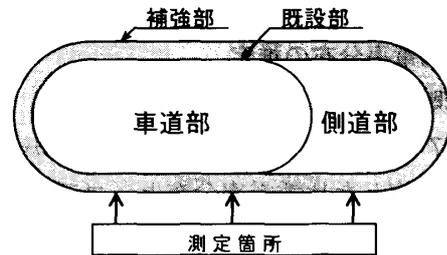


図-5 構造物概要

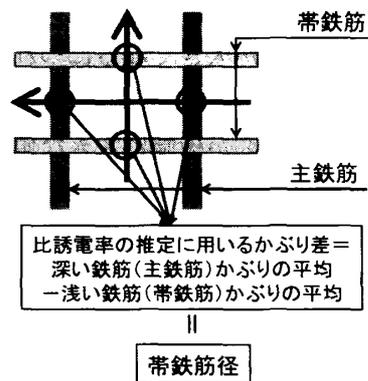


図-6 測定方法

電率を仮定し、装置に入力することによりかぶりを求めるものである。比誘電率の推定はボーリング等で測定現場の一箇所の深さを実測するか、あるいは壁等の厚さのわかっている箇所を

測定して測定値が実測値に近くなるように比誘電率を調整する方法が一般的である。しかし、これらの方法は構造物内部の比誘電率の分布形状を把握できないため、実際の土木構造物への適用には適していない。そこで、本論文では電磁波レーダによるかぶりの測定値と供試体中の鉄筋の径からコンクリート内部の比誘電率の分布形状を推定する方法を適用する。

### 3.3 測定時期

供試体の測定材齢は、1週、3週、4週、16週、54週であり、測定の前日の天候は雨天を避けた。なお、含水率分布は、既往の実験結果<sup>2)</sup>と同様に、表面が小さく内部ほど大きくなっているものと予測される。一方、実構造物の測定は、補強後5週目に行った。既設部は、長期間に渡り水面下に浸かっていたため、内部の含水状態が他の部分と異なることが予想される。

## 4. 比誘電率分布とかぶりの推定結果

### 4.1 比誘電率分布の推定

#### (1) 測定位置ごとの比誘電率分布

図-7に、供試体の材齢4週目の測定かぶりをを用いて推定した比誘電率分布と、コア抜きの実測かぶりを式(1)、(2)に代入して得た比誘電率の値を示す。ここでは、比誘電率を8と仮定した時の測定かぶりをを用いて推定を行った。それぞれ表面からの距離が大きくなるにつれて比誘電率が増加し、次第に一定値に近づく傾向にある。西内壁①と西内壁②が極端に大きな値を示していることを除けば、実測値との誤差も小さく、一般にコンクリートの比誘電率とされる数値<sup>2)</sup>に近い。西内壁①、②の推定が正確に行えなかったのは、山口ら<sup>4)</sup>も指摘するように、測定装置の分解能の問題のため表面からの距離が浅い場合に正確な測定を行えなかったことが原因と思われる。従って、十分なかぶりを持つ構造物であれば、本論文での提案方法によりコンクリート内部の比誘電率分布を推定することが可能と考えられる。

同様に、図-8に、実構造物の比誘電率分布の

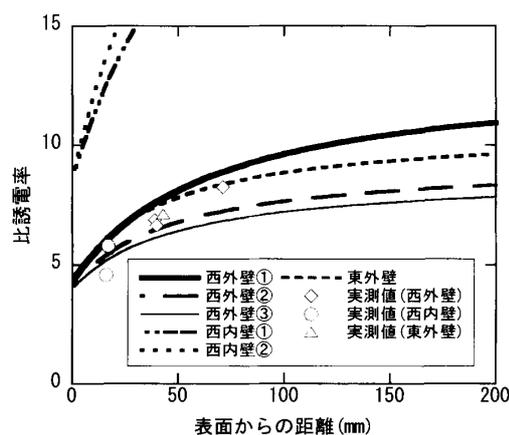


図7-比誘電率分布(供試体)

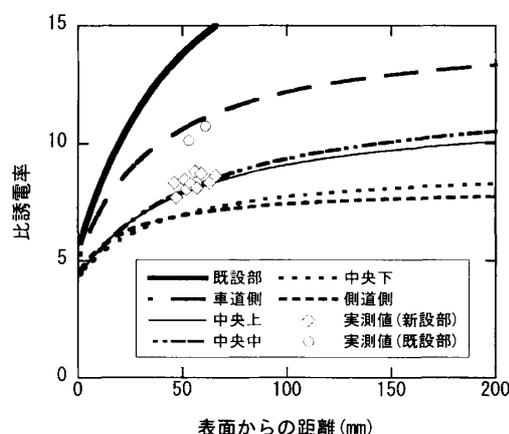


図8-比誘電率分布(実構造物)

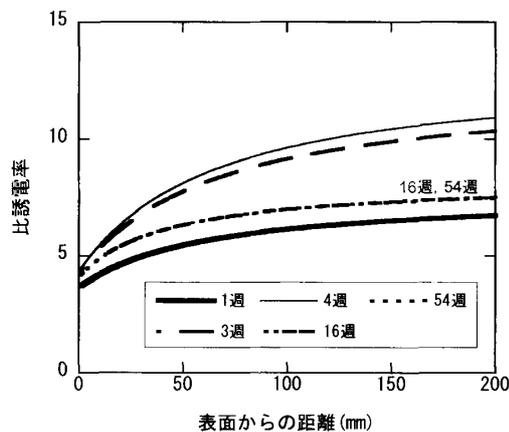


図9-材齢ごとの比誘電率分布

推定結果と実測値を示す。ここでの推定には、3種類の比誘電率を仮定して得られた測定かぶりをを用いた。既設部を除けば、得られた比誘電率分布は概ね通常のコンクリートの比誘電率の範囲内<sup>2)</sup>に収まっている。実測値との誤差も少なく、精度良く比誘電率分布を推定できている。既設

表-1 供試体の各測定位置の鉄筋径, 実測かぶり, レーダ測定値, 推定値と誤差

No.	測定位置	鉄筋径		実測かぶり	測定かぶり $\epsilon_0=8$	本論文の方法による推定かぶり	実測かぶりと推定かぶりとの誤差
		横筋	縦筋				
1	西外壁①	19.4	25.3	140.9	131	150.3	9.4 (6.7%)
2	西外壁②		38.6	79.0	69	81.9	2.9 (3.7%)
3	西外壁③		25.3	78.8	69	83.8	5 (6.3%)
4	西内壁①	12.5	22.2	31.7	21	48.3	16.6 (52.4%)
5	西内壁②				24	48.0	16.3 (51.4%)
6	東外壁	25.3	32.1	86.8	77	88.7	1.9 (2.2%)

※単位: mm

表-2 実構造物の各測定位置の実測かぶり, レーダ測定値, 推定値と誤差

No	測定箇所	実測かぶり	実測かぶり差	測定かぶり			既往研究の方法		本論文の方法	
				$\epsilon_0=10.7$	$\epsilon_0=8.0$	$\epsilon_0=6.2$	推定かぶり	誤差	推定かぶり	誤差
1	既設部	105.0	17.5	102.0	117.0	136.0	79.9	25.1	114.3	9.3
		122.5		122.0	142.0	162.0	95.9	26.6	130.3	7.8
2	車道側	92.5	21.0	80.0	94.5	109.5	76.5	16.0	92.8	0.3
		113.5		98.0	114.0	131.0	92.5	21.0	108.9	4.6
3	中央上	102.0	15.0	89.0	105.0	121.0	96.7	5.3	112.8	10.8
		117.0		104.0	122.5	140.5	112.7	4.3	128.9	11.9
4	中央中	108.0	17.0	94.0	110.0	126.0	99.3	8.7	119.7	11.7
		125.0		111.0	128.5	143.0	115.3	9.7	135.5	10.5
5	中央下	114.5	16.5	103.0	120.0	137.5	120.0	5.5	128.6	14.1
		131.0		117.0	136.0	155.5	136.0	5.0	144.5	13.5
6	側道側	93.5	11.5	77.0	91.0	108.0	107.1	13.6	96.8	3.3
		105.0		89.0	105.0	123.0	123.1	18.1	113.1	8.1

※推定値のうち誤差の小さい方を網掛けで示す。鉄筋径は主筋, 帯筋ともに16mm。単位: mm

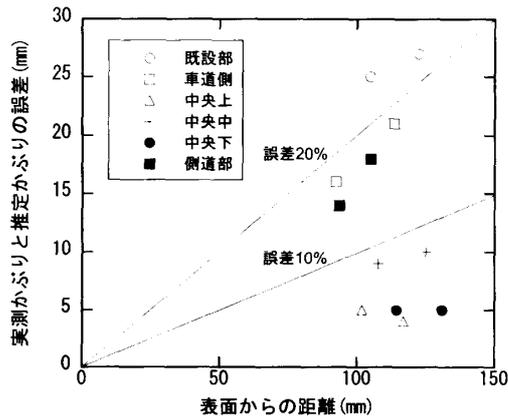


図-10 実測かぶりと誤差(既往研究)

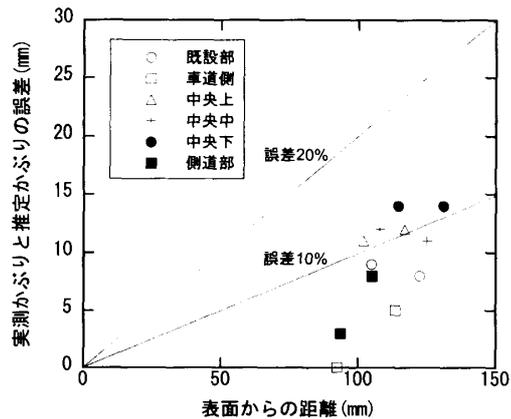


図-11 実測かぶりと誤差(本論文)

部の比誘電率分布が他よりも大きな値を示したのは、この部分が長期間に渡り水に浸かっていたため、他の部分と内部の含水状態が異なっていたことが原因と思われる。

(2) 材齢ごとの比誘電率分布

図-9に、西外壁①の比誘電率分布の推定結果を材齢ごとに示す。材齢1週目の比誘電率分布は、コンクリート内部の含水率が大きいため、他のものよりも大きくなることが予測される。ところが、材齢1週目の比誘電率分布は小さな値を示している。これは電磁波レーダの測定値にばらつきが生じたため、精度の高い推定が困難であ

ったことが原因と思われる。他の比誘電率分布は、コンクリート内部に進むほど比誘電率が増加し一定値に近づくという比誘電率分布の特徴を良く表したものとなっている。また、材齢ごとに異なる大きさを示したのは、山口ら<sup>4)</sup>の指摘するように比誘電率の値が測定当日のコンクリートの含水率等の影響を受け、材齢が16週、54週と増加するに伴い乾燥により比誘電率が小さくなることが原因と思われる。

4.2 かぶりの推定

表-1に、供試体の各測定位置における鉄筋径, コア抜きによる実測かぶり, 比誘電率を8と仮

定した時のレーダによる測定かぶり，本論文の方法によるかぶり推定値と誤差を示す。西内壁①と西内壁②を除けば，本論文の推定かぶりを実測値の誤差は10%以下となっており，精度良くかぶりを推定できている。西内壁①と西内壁②の誤差が大きいのは，前述したように，これらのかぶりが約30mmと薄いことが原因と思われる。

表-2に，実構造物の各測定位置におけるコア採取による実測かぶり，3種類の比誘電率を仮定した時のレーダによる測定かぶり，既往研究<sup>5)</sup>および本論文の方法を用いて推定したかぶり誤差を示す。既往研究と本論文の推定値のうち，精度の高い方を網掛けで示している。両者の間では，場所によって精度の高い方が異なる推定結果となっている。

図-10，11に，実構造物のかぶり実測値と既往研究および本論文の推定値の誤差をそれぞれ図示する。これからわかるように，既往研究の推定値には20%以上の誤差が生じたものがある。一方，本論文の推定値の誤差は，概ね10%前後に落ち着いている。このことを踏まえると，精度良くかぶりを推定するには，本論文で提案した方法が適していると考えられる。さらに，本論文で測定に用いた測定装置の分解能は2～3mmであったが，これを改善すれば，より一層正確なかぶりの推定も可能と言える。

## 5. 結論

本論文では，コンクリート内部の比誘電率分布を非破壊的に推定する方法を提案し，これから得られるかぶりの精度を供試体と実構造物で検証した。得られた知見を以下にまとめる。

(1) 構造物中の比誘電率の分布形状を仮定し，回帰分析によりコンクリート内部の比誘電率分布を推定した。得られた比誘電率分布は，実測値との誤差も小さく，コンクリート内部の数値として概ね妥当なものである。

- (2) 推定した比誘電率分布は，測定当日の含水状態の影響を受けるため，材齢や場所によって比誘電率分布の大小が異なっていた。また，材齢が増えるほど，比誘電率は小さくなることも確認できた。
- (3) 推定したかぶりは，表面からの距離が浅い鉄筋を除き，実測値との誤差が10%前後となり，精度の良いものであった。表面からの距離が浅い鉄筋のかぶりの推定は，測定装置の機構上の問題のため精度の良い結果を得ることができなかった。

以上の結果より，電磁波レーダ法によりコンクリート構造物内部の比誘電率分布やかぶりを非破壊的に推定することは可能と考えられる。ただし，より精度の高い推定結果を得るためには，電磁波レーダ法の測定装置自体の精度の向上が必要である。

## 参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所ほか：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，技報堂出版，pp.215，2003
- 2) 非破壊試験によるコンクリート品質，厚さ，鉄筋かぶり・径の計測に関する研究，非破壊検査第52巻12号，pp.691-696，2003.12
- 3) 野田一弘ほか：実構造物コンクリートの比誘電率の非破壊推定方法，土木学会第58回年次学術講演会，pp.841-842，2003.9
- 4) 山口順一郎ほか：電磁波レーダ測定におけるコンクリートの比誘電率とかぶり測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1875-1880，2004
- 5) 山口順一郎，森濱和正：非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究電磁波レーダ法 その3 非破壊によるコンクリート構造物の比誘電率推定とかぶり厚さ，日本非破壊検査協会，平成16年秋季大会講演概要集，pp.39-40，2004