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*1·森濱 和正*2·山口 順一郎*3·松塚 忠政*3

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¹⁾。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²⁾, 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³⁾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^{4)、5)}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。

$$T = \frac{2D'\sqrt{\varepsilon_0}}{C}$$
(1)
$$\varepsilon_r = \left(\frac{CT}{2D}\right)^2$$
(2)

ここで、*T*:電磁波反射時間(×10⁻⁹s)、*D*:設定した 比誘電率でのかぶり測定値(mm)、 ϵ_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(3×10¹¹mm/s)、 ϵ_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。

$$T' = \frac{2d'\sqrt{\varepsilon_0}}{C} \tag{3}$$

$$\varepsilon_r = \left(\frac{C\overline{T}}{2d}\right)^2 \tag{4}$$

ここで,*T*':各設定比誘電率での電磁波反射時間 の差(×10⁻⁹s),*d*':交差する鉄筋のかぶりの差 (mm),*T*:各設定比誘電率での電磁波反射時間差 の平均(×10⁻⁹s),*d*:鉄筋径(ふしの谷部と山部の間



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 ⁴⁾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。

$$\sqrt{\varepsilon} = \frac{x}{\frac{1}{a} + \frac{x}{c-b}} + b \tag{5}$$

ここで、 ϵ :比誘電率、x:=220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(=22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。

$$\frac{CT}{2} = \int \sqrt{\varepsilon} dx \tag{6}$$

$$\frac{CT}{2} = cx - \frac{(b-c)^2}{a} \ln(ax - b + c)$$
(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⁵⁾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



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²⁾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 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²⁾ 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⁴⁾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 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²⁾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

No.	測定位置	鉄筋径		宇測かごは	測定かぶり	本論文の方法に	実測かぶりと推定	
		横筋	縦筋	天風がふり	8= ₀ 3	よる推定かぶり	かぶりとの誤差	
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%)	
义畄付	ī:mm							

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

※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	38	一中午前	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	
	识	则正固则			ε ₀ =10.7	ε ₀ =8.0	ε 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
1			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
2			113.5		98.0	114.0	131.0	92.5	21.0	108.9	4.6
2		中央上	102.0	15.0	89.0	105.0	121.0	96.7	5.3	112.8	10.8
3 5#	大击		117.0		104.0	122.5	140.5	112.7	4.3	128.9	11.9
4	竹田	篇 強 中央中	108.0	17.0	94.0	110.0	126.0	99.3	8.7	119.7	11.7
4	立		125.0		111.0	128.5	143.0	115.3	9.7	135.5	10.5
5	비미	, 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)

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



図-11 実測かぶりと誤差(本論文)

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⁴⁾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と 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⁵⁾ および本論文の方法を用いて推定したかぶりと 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

- 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
- 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
- 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