論文 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

山口 順一郎*1・森濱 和正*2・前川 聡*3・飯田 洋志*4

要旨:コンクリート構造物のかぶりを電磁波レーダ法で測定する場合,コンクリートの比誘 電率を的確に設定する必要がある。そこで,比誘電率の特性について検討し,非破壊で比誘 電率を推定する方法として,鉄筋径から求める方法と鉄筋反射波形から求める方法について 検討した。その結果,比誘電率は材齢や表面からの距離に起因する含水状態の影響を受ける ことが分かった。また,非破壊的に比誘電率を推定し,かぶりを算出した結果,かぶりが浅 い場合や鉄筋径が小さい場合には,実測かぶりとの誤差は大きくなったが,機器精度や解析 手法を改善することで誤差を小さくできる可能性があることが分かった。

キーワード:電磁波レーダ,かぶり,比誘電率

1. はじめに

コンクリート構造物の代表的な劣化原因とし て塩害,中性化があるが,その原因となる外部 からの劣化因子の浸透による内部鋼材への影響 を最小限に抑えるためには,十分なコンクリー トのかぶり厚さを確保しておく必要がある。か ぶり厚さが不足すると構造物の耐久性が低下す るだけでなく,コンクリート片の剥落などの第 三者被害をもたらす。つまり,十分なかぶり厚 さを確保するということは,構造物を維持管理 していく上で極めて重要なことである。

できあがった構造物のかぶり厚さを確認する 方法としては、コンクリートをはつり取る方法 がある。しかし、確実に厚さを把握することは できるものの、はつり取った部分のみの情報し か入手できず全体の代表値とはならないこと、 また、構造物の破壊を伴うことから、好ましい 方法とはいえない。そこで、現在、非破壊試験 による手法として電磁波レーダ法、電磁誘導法 などでかぶりを検査する手法の検討がなされて いる¹⁾。本文では、その中でも取り扱いが簡単で、 かつ短時間で広範囲の調査が可能な電磁波レー ダ法について、かぶり測定の精度向上のための 検討を行った。

2. 試験方法

2.1 試験目的

電磁波レーダ法でかぶりを精度良く測定する ためには、コンクリートの比誘電率を的確に設 定する必要がある。しかし、コンクリートの比 誘電率の特性については明らかにされていない。 そこで、本試験では、比誘電率の特性を確認す ることを目的として、材齢、コンクリートの種 類、表面からの距離との関係について検討を行 った。

これまでは、比誘電率を推定する方法がなく、 やむを得ず、測定対象とする構造物に対してコ ア抜きやはつりを行い、かぶり厚さを確認して いたが、構造物の維持管理上望ましくない。そ こで、非破壊的に比誘電率を推定する方法とし て、鉄筋径を利用した方法と鉄筋反射波の双曲 線形状を用いた方法について検討を行った。

2.2 試験供試体

供試体は、雨がかりの影響など実際の構造物 を模擬し、各種条件の違いを把握するため、図 -1に示すようなボックス型とした。

*1 独立行政法人土木研究所 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 (正会員)
*2 独立行政法人土木研究所 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 応用地質(株) つくば技術開発センター探査工学センター

*4 日本無線(株) 通信機器技術部計測技術グループ

また, 配筋は, 鉄筋種類 (異形棒鋼, 丸鋼), 径、間隔、かぶり等による測定結果の違いを確 認するため、様々なパターンで配置した。 図ー 2に参考として西側側壁の配筋図を示す。

また,配合は,各部位で異なる配合条件とし ており, 表-1のようになっている。

なお,供試体の作製においては,土木研究所 敷地内の屋外においてコンクリートを打設した 後, 散水養生を 4 日間行ない, 各部位ごとに脱 型を行った。脱型時の材齢は、頂版が4日、側 壁が18日、底版が32日であった。

2.3 測定装置

測定装置は,電磁波レーダ法の特性や測定機 器によるかぶりの測定可能範囲等を把握するこ とを目的として2種類の測定試験装置を対象と して測定を行った(以下,装置A,B)。

以下に各装置の特徴を示す。

1) 装置 A

装置Aは、測定現場のコンクリートの比誘電 率を推定し、装置に入力することによりかぶり を求める方法である。比誘電率の推定方法は, 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分かっている箇 所を測定して,測定値が実測値に近い値になる ように比誘電率を調整する方法が一般的である。 装置が小型で取り扱いが簡単である。

2) 装置 B

装置Bは、ボーリング等の実測値がなくとも 鉄筋位置での反射波の波形が双曲線状になるこ とを利用して、 個々の鉄筋毎に電磁波速度とか ぶり厚さを解析により求めることができる。コ ンクリート中では深度方向の内部状態に伴い, 往復時間が変化する。例えば、含水率が高くな ると電磁波速度が遅くなり,反射波形状が変化 する (図-3)。したがって,鉄筋反射波の形状 に対して最小二乗法を適用することで、内部の 影響も考慮した平均電磁波速度とかぶりを求め ることが可能である²⁾。なお、図-3に示すよう に電磁波速度算出時には,二点鎖線のように鉄 筋の頂点を固定と仮定して鉄筋までの距離を考 慮している。



図-2 供試体配筋図(西側側壁)

部位	セメ ント	呼び 強度	組骨材の 最大寸法 (mm)	スラン プ(cm)	水セメ ント比 (%)
頂版	N	30		8	50
薄壁	N	45	20	12	35
厚壁	N	18	20	8	70
底版	BB	30		8	50

表-1 ボックス供試体の部位ごとの配合



電磁波レーダ法での鉄筋反射波形

各装置の仕様を表-2に示す。

2.4 測定時期

供試体の測定材齢は1週,4週,16週,24週 (測定装置Bは4週のみを掲載)であり、測定 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³⁾のように表面が小さく、 内部ほど大きくなっているものと考えられる。

3. 比誘電率の特性についての検討

(1) 測定内容

測定箇所は,頂版上面,両側壁内外面,底版 上面の計6面で実施した。測定を行った鉄筋の ピッチは 2~300mm 程度であり, 隣り合う鉄筋 の影響をなるべく受けないように設定した。ま た、実測かぶり確認のための小径コアの採取数 は、表-3で示す箇所、全26箇所採取した。

(2) 比誘電率推定と測定結果

実測かぶりは、 φ25mm のコアを採取し、採取 コアもしくは削孔跡よりノギスを用いて測定し た。鉄筋位置で採取したコアの鉄筋との接触状 況を**写真-1**に示す。

装置Aを用いた場合の比誘電率推定は、式(1) により、設定した比誘電率でのかぶり測定値か ら電磁波の反射時間 T を算出し、式(2)により供 試体コンクリートの比誘電率を算出した。

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

ここに、 *ε*_o: 設定したコンクリートの比誘電 率(10.7,8.0,6.2), *ε*_r: 供試体コンクリートの比誘 電率, T: 反射時間(×10⁻⁹s), C: 空気中での電磁 波速度(3×10¹¹mm/s), D: 実測かぶり(mm), D': 設定した比誘電率でのかぶり測定値(mm)である。

装置 Bは、 測定により 往復反射時間が得られ、 解析により電磁波速度が求められるため、比誘 電率は $\epsilon_r = C^2 / V^2$ により算出できる。

表-3に各部位での実測かぶり結果,装置A, Bの4週でのレーダ測定結果,その結果を元に 算出した比誘電率を示す。なお、装置Aでかぶ り結果がない箇所は、都合により未測定の箇所 である。また,表-3での装置Aのかぶり測定 値は、比誘電率を8.0に設定した時の値である。

(3) 材齢と比誘電率

図-4に実測かぶりと装置Aにおける材齢ご との比誘電率の関係を示す。なお、グラフ中の 実線は、各材齢での分布状態を近似的に回帰し た曲線である。回帰曲線は文献 3)を用いた。

比誘電率が変化している100mm未満での傾向 をみると、比誘電率の値は、1 週→4 週→16 週と 材齢を重ねるごとに小さくなる傾向がみられた。

表-2 測定装置仕様

項目	装置A	装置B	
測定可能厚さ	5~200mm	20~300mm	
深度方向分解能	2~3mm	1mm	
周波数	400~950MHz	1500MHz	
→ 注• 舌昙	160×210×150	38×100×165	
コム・里里	mm,約 1kg	mm,約 1.8kg	



写真-1 コアと鉄筋との接触部状況

表-3 かぶり測定結果と比誘電率算出結果

		No.	鉄筋径	実測 かぶり (mm)	レーダ測定結果		比誘電率	
					装置A かぶり (mm)	装置B 速度 (cm/ns)	装置A	装置B
頂版		[1]	Φ12	107.8	110	9.52	8.3	9.9
		[2]	Φ12	108. 5	-	9.96	-	9.1
		[3]	Φ12	142. 0	-	10.10	-	8.8
		[4]	Φ12	101.4	103	10.70	8.3	7.9
	ᆂᆈ	[5]	D25	140.9	142	10.70	8.1	7.9
	四外	[6]	D19	121.5	124	9.96	8.3	9.1
	则用	[7]	D19	120.8	121	10.10	8.0	8.8
	표ы	[8]	D38	79.0	74	11.80	7.0	6.5
	四外	[9]	D19	59.6	55	11.70	6.8	6.6
	测于	[10]	D25	78.8	77	11.20	7.6	7.2
1711		[11]	D22	31.7	27	12.30	5.8	6.0
1則 辟	四内	[12]	D13	18.4	7	13.50	1.2	4.9
- 31	빗키키니	[13]	D22	33.2	30	12.60	6.5	5.7
	ᆂᆈ	[14]	D32	86.8	84	11.10	7.5	7.3
	東 外 側南	[15]	D25	61.7	57	11.10	6.8	7.3
	因用	[16]	D13	83.7	82	11.30	7.7	7.1
	東内	[17]	D51	71.8	67	11.40	7.0	6.9
1		[18]	D25	124. 0	124	10.50	8.0	8.2
	KI 10	[19]	D51	71.7	67	11.80	7.0	6.5
			D19	82.4	-	11.60	-	6.7
底版		[21]	D19	71.0	-	11.10	-	7.3
		[22]	D19	97.0	96	10.60	7.8	8.0
		[23]	D19	95.8	93	10.40	7.5	8.3
		[24]	Φ20	94. 7	93	11.00	7.7	7.4
		[25]	Φ20	60.2	55	12.90	6.7	5.4
		[26]	D19	91.7	-	11.30	-	7.1

その原因としては、コンクリートの水和作用に よる水分量の変動や水分の蒸発等によりかぶり コンクリート内の水分量が変化していることが 考えられる。また、16 週と 24 週が逆転している ことから、比誘電率は、測定日の含水状態によ り変化するということを示しているといえる。 また、100mm より深くなると、比誘電率の値は 一定に近づくが、その値も測定日の含水状態に より変化すると考えられる。

(4) コンクリートの種類と比誘電率

図-5,図-6は、装置A、Bでコンクリートの種類ごとに実測かぶりと比誘電率の関係を示したものである。

本試験で用いた供試体は,各部位(N30:頂版, N45:側壁薄壁,N18:側壁厚壁,BB30:底版) でコンクリートの種類を変えていたが,実測か ぶりと比誘電率の関係をみるかぎり,特に種類 でばらつきもないことから,コンクリートの種 類が比誘電率の特性に与える影響は少ないと考 えられる。また,同様に打設面か,側面かとい ったことについても影響は少ないと考えられる。

(5) 考察

本実験より、コンクリートの比誘電率特性に 影響を与える要因としては、材齢や表面からの 距離による含水状態の影響が大きいと考えられ る。また、表面からの距離が 100mm 以上では比 誘電率が一定に近づくが、100mm より浅い範囲 では、比誘電率が変化するため、条件に応じて 適切に比誘電率を求める必要があるといえる。

そこで,各部位ごとでかぶりが異なる構造物 に対して,代表的な数点を測定することで非破 壊で効率的に比誘電率を推定する方法があれば, 検査手法として非常に有効であるといえる。

4. 鉄筋径による比誘電率の推定

(1) 比誘電率の推定方法

装置Aで非破壊的に比誘電率を求める方法と して,図-7に示すように,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する方 法⁴⁾を基本にして検討を行った。なお,装置Aで は,深さ方向での比誘電率の変化の影響を考慮 していない。





深い鉄筋のかぶり

鉄筋の位置関係

図-4 材齢ごとの実測かぶりと比誘電率

図-7

比誘電率の算定式を以下に示す。

$$T = \frac{2d'\sqrt{\varepsilon_o}}{C} \qquad (3) \qquad \varepsilon_r = \left(\frac{C\overline{T}}{2d}\right)^2 \qquad (4)$$

ここに,*T*:各設定比誘電率での反射時間の平 均(×10⁹s),*C*:空気中での電磁波速度(3× 10¹¹mm/s),*d*:鉄筋径(ふしの谷部と山部間の実 測値)(mm),*d*':交差する鉄筋のかぶりの差(mm) である。

(2) 実測かぶりと推定比誘電率を用いて算出 した推定かぶりとの比較

本試験では、図-8に示す2つの方法で比誘 電率の推定を行った。

- 方法1:交差する鉄筋のかぶり差(鉄筋1本分) で推定する方法。
- 方法2:縦方向鉄筋の前後(上下)に丸鋼を配 置し,鉄筋2本分の差で推定する方法。

図-9は、装置Aの結果より、横軸に鉄筋径 を縦軸にかぶり推定値と実測かぶりとの差(誤 差)を、図-10は、実測かぶりと誤差の関係 を示す。なお、図-9と図-10のグラフでは 同一鉄筋でマークと数字を合わせている。

図-9より,鉄筋径が小さいほど誤差が大き くなる傾向がみられた。ここで、鉄筋径D51 で 誤差が 10mm 程度と大きくなっているが、これ は表面からの距離が浅いことによる影響と考え られる (図-10)。また、図-10 では、表面から の距離が浅いほど誤差が大きくなる傾向がみら れた。ここで、100mm 付近で誤差が 15~20mm 程度と大きくなっているものは、いずれも鉄筋 径が小さいことによる影響と考えられる(図ー 9)。このように、鉄筋径が小さいほど、また表 面からの距離が浅いほど誤差が大きくなる。そ の原因として、測定機器の分解能の問題がある。 装置Aの分解能は 2~3mm であることから,鉄 筋径が小さい場合や表面からの距離が浅い場合 には、かぶり推定値に与える影響は大きくなる。 これが誤差が大きくなった原因と考えられる。

また,方法1と2で対応する頂版([1]と[8]) と底版([7]と[9])の結果を比べると,鉄筋1本 で推定する方法1より鉄筋2本分で推定する方法2の方が誤差が小さくなる結果となった。

方法 1 (頂版[1], 側壁[2][3][4][5][6], 底版[7])



方法2(頂版[8],底版[9])



図-8 測定概念図



図-9 鉄筋径と誤差



5. 反射波の双曲線形状を用いたかぶりの推定

前述の装置Bによりかぶりの推定を行った。 なお、比誘電率は電磁波速度から求めることが できる。図-11、図-12は、横軸に実測かぶり、 縦軸に推定かぶりと実測かぶりの差(誤差)を示 したものである。

図-11 より、誤差は深度によらずほぼ 10mm 未満となった。図-12 の誤差の割合で見ると、 100mm より深くなると誤差の値は一定に近づく が,100mm より浅いと表面に近づくにつれて大 きくなる傾向になった。表面からの距離が浅く なると誤差の割合が大きくなる原因については、 図-3の上図を参考とすると,表面からの距離 が深いと電磁波速度算出時に仮定している鉄筋 までの距離と往復伝播時間の経路がほぼ整合す るため解析上の仮定が成り立つが,浅くなると 仮定した鉄筋までの経路(二点鎖線)と実際の経 路(実線)に誤差が生じるため,必ずしも解析上の 仮定が成り立たなくなることが考えられる。



6. まとめ

(1) コンクリートの比誘電率は、若材齢では含水 量が多いため大きめの値を示すが、材齢の経過 に伴う水和作用や蒸発等により値は小さくなる。 また、実際は測定日の含水状態により、値が変 化するため、測定日ごとの設定が必要である。
(2) コンクリートの表面からの距離が 100mm よ り深い位置においては、比誘電率は一定の値に 近づくが、100mm より浅い範囲では、比誘電率 は変化するため、表面からの距離に応じた比誘 電率の設定が必要である。

(3) 比誘電率の特性に、コンクリートの種類や打設面か側面かの影響は少ないと考えられる。

(4) 装置Aで,鉄筋径から比誘電率を求める方法 は,表面からの距離が浅い場合や鉄筋径が小さ い場合には,機器の分解能の影響を受けやすく, 誤差が若干大きくなる傾向になることが分かっ た。今後,精度よくかぶり推定を行うためには, 更なる測定機器の分解能の向上が望まれる。

(5) 装置 B で反射波の双曲線を利用する方法は, 誤差は深度によらず 10mm 程度であったが,表 面からの距離が 100mm より浅い範囲では誤差の 割合が大きくなった。誤差の割合が大きくなる 原因について,解析上の仮定の見直しを含めた 今後の検討が必要である。

参考文献

- (1) 森濱和正ほか: 非破壊試験によるコンクリート品質, 部材厚さ, かぶり厚さの検査方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.511-516, 2001.5
- 前川聡ほか:コンクリート中の鉄筋かぶりの 高精度測定,(社)日本非破壊検査協会 平成 15年秋季講演概要集,pp.131-134,2003.11
- 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