

電磁波レーダ法によるかぶり厚さ推定に関する一考察 (その1. 反射時間とかぶり厚さ測定)

かぶり厚さ 電磁波レーダ法 反射時間
比誘電率 標準的な試験片 伝搬経路

正会員 ○山田雅裕*1 同 安田正雪*2 同 柳田淳一*3
同 住 学*4 同 後藤健二*5

1. はじめに

RC 建築物の品質確保のため JASS5 (2009 年版) に構造体コンクリートのかぶり厚さの検査が導入され、主として電磁誘導法装置によってかぶり厚さが推定されている。これは非磁性体であるコンクリートにはほとんど影響されずに計測する電磁誘導法装置の方が、コンクリートの比誘電率の設定が特にかぶり厚さの小さい箇所では難しい電磁波レーダ法探査装置と比較して推定精度において優れているためである¹⁾。しかし、電磁誘導法装置でも過密な配筋条件やかぶり厚さ 50mm 以上となると推定精度が悪くなり²⁾、基礎梁などでは適用が困難である。

本報では、市販電磁波レーダ法探査装置が反射時間を 0.01ns 単位で記録保存可能となったことなどを踏まえて、RC 建築物のかぶり厚さ推定に電磁波レーダ法の適用性を探るため、反射時間や比誘電率設定の基礎的試験を行うとともに、それらに及ぼすコンクリートの含水率の影響などの試験結果について報告する。その1では、メラミン樹脂板などを試験片とした場合やかぶり厚さが既知のコンクリート壁試験体の反射時間や比誘電率について検討した。

2. 使用した電磁波レーダ法装置の概要

使用した装置の仕様を表1に示す。ただし、仕様には反射時間の表示精度の記載はない。

表1 装置の仕様

かぶり厚さ	5~300mm (コンクリートの比誘電率 6.2、鉄筋径 6mm 以上で上端筋の場合)
かぶり厚さ分解能	浅モード: 約 1mm、深モード: 約 2mm
水平方向分解能	深度 75mm 未満にある探査対象物: 75mm 以上 深度 75mm 以上にある探査対象物: 深度以上の間隔 ※標準コンクリートでの実測値 (深度 75mm 時及び 175mm 時に鉄筋間隔 40mm の鉄筋を判別可能)
水平方向距離分解能	2.5mm
受信周波数帯域	300~2300MHz

3. 電磁波レーダ法装置による基礎的試験

3.1 メラミン樹脂板、アクリル樹脂板、空気層

ここでは、幅 5cm、厚み 0.1mm のアルミテープを鉄筋に見たて、その上にメラミンおよびアクリル樹脂板を 10mm ~170mm 程度重ねた場合の反射時間 (T) を計測した。媒体の伝搬速度 (V) は式1で表される。比誘電率を算出する場合の伝搬経路は図1に示すように、①板厚さと送受信アンテナ間隔および装置裏面の空気層を考慮した場合と、

②板厚さと装置裏面の空気層のみとした場合について検討し、①は式2および式3により、②は式4、式5より算出した。なお、120mm までの空気層を設けた場合についても計測した。その結果を図2および図3に示す。図3における、厚さ 100mm の比誘電率はアクリル樹脂板が 2.79、メラミン樹脂板が 6.58、空気は 1.03 であった。

いずれの材も厚みが小さい場合には反射時間の変化が少なく、比誘電率が小さい 1.03~6.58 のような場合、厚みが 30~50mm 以上になると比誘電率が一定の傾向を示した。30~50mm 以下の浅い部分の反射時間の変化が少ないのは、実際の厚みの反射時間よりも、送受信アンテナ間隔等による直達波、及びコンクリート表面からの反射時間が相対的に大きく反映されているためと考えられる。図4に示すよ

$$V=C/\sqrt{\epsilon_r} \quad \text{式 1}$$

$$d=VT/2 \quad \text{式 2}$$

$$\epsilon_{r1} = C^2/V^2 = C^2 T^2 / 4d^2 \quad \text{式 3}$$

$$D=VT/2-a \quad \text{式 4}$$

$$\epsilon_{r2} = C^2/V^2 = C^2 T^2 / 4(D+a)^2 \quad \text{式 5}$$

ここに、C:真空中での電磁波の速度 3×10^8 (m/s)

ϵ_{r1} 、 ϵ_{r2} :対象物の比誘電率

L:送受信アンテナの間隔 (56mm)

D:板厚さ [かぶり厚さ] (mm)

a:対象物と装置裏面の距離 (4mm)

d:電磁波の伝搬経路 (mm) = $\sqrt{(D+a)^2 + (L/2)^2}$

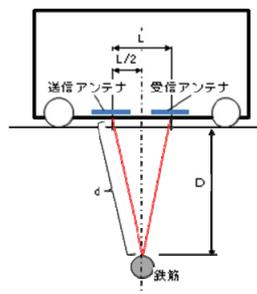


図1 電磁波伝搬経路

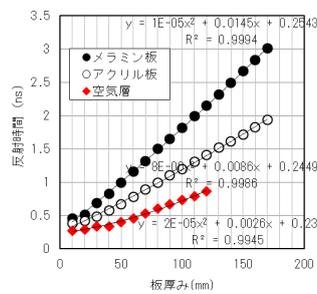


図2 板厚みと反射時間

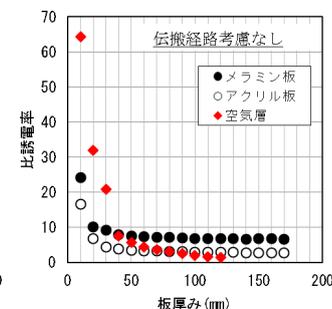
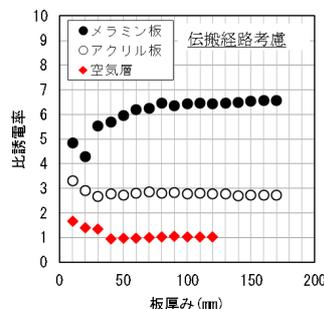


図3 板厚みと比誘電率 (左: 伝搬経路考慮、右: 同考慮なし)

ように、浅い場合は反射波形のピークが上下非対称になる。これらより 30~50 mm 程度の厚みにおいて、これら板を標準的な試験片として、比誘電率の確認することで使用する測定装置の動作異常の有無の確認が可能だと考えられる。また、板厚みと反射時間の関係は 2 次の近似曲線式で相関が高いことから、反射時間を確認することで少ない板厚みで容易に確認でき合理的であると考えられる。

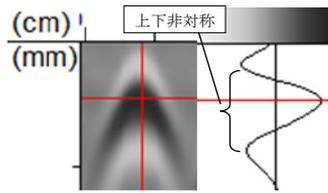


図 4 断面画像と波形

3.2 異種材料における反射時間と比誘電率

メラミン樹脂板 40mm 厚さをかぶり厚さにみため、その上にアクリル樹脂板 20mm、40mm、60mm を載せて反射時間を計測し比誘電率を算出した。同時に空気層についても行った。その結果を図 5 および図 6 に示す。メラミン樹脂板を上載した場合も示すが、これは全項と同じ値である。アクリル樹脂板を上載した場合の 0mm から 60mm の反射時間は比例関係にある。異種の材料が重なっても板厚みが厚い場合、すなわち伝搬経路が長い場合には反射波が乱れることはないようである。なお、式 3 により求めた比誘電率は異なる材料を上載するため大きく変化していることがわかる。このことはコンクリート表面が乾燥している状態と類似しており、比誘電率の設定が難しいことを意味している。

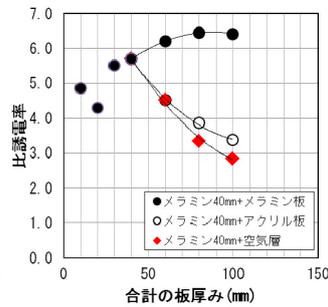
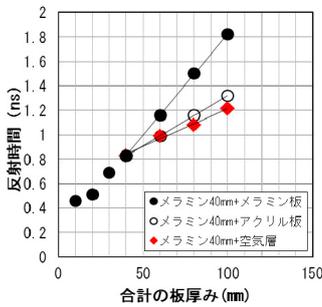


図 5 上載した場合の反射時間 図 6 上載した場合の比誘電率

3.3 コンクリート中の反射時間と比誘電率

試験体概要を図 7 に示す。試験体は乾燥状態（表面含水率 4.8%）とそれを 4 週間湿布で覆った後の湿潤状態（同 5.2%）とした。なお、表面含水率の測定には静電容量式含水率計を使用した。試験体の A 面および B 面のかぶり厚さ 4.4mm~83mm (D10) について、各 8ヶ所の反射時間を計測した結果を図 8、また式 3 および式 5 の板厚さをかぶり厚さに置き換えて、比誘電率を算出した結果を図 9 に示す。反射時間はかぶり厚さが小さいところを除けば、乾燥状態と湿潤状態のいずれも反射時間はかぶり厚さと正の比例関係にあることが確認された。伝搬経路を考慮した式 3 による比誘電率は両面から中央位置の約 50mm に向けて

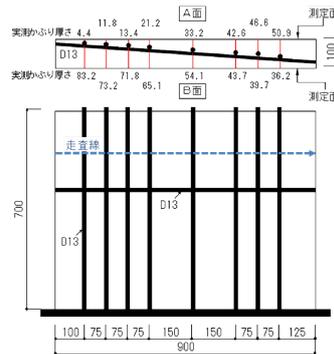


図 7 試験体概要

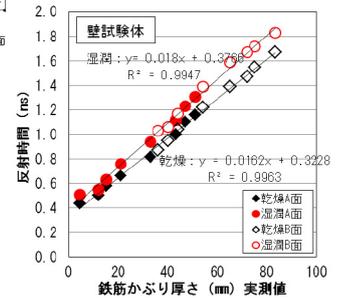


図 8 かぶり厚さと反射時間

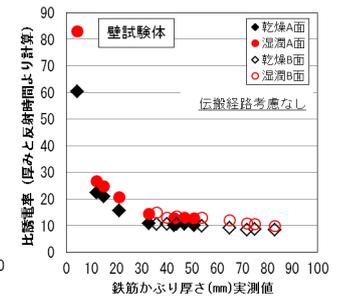
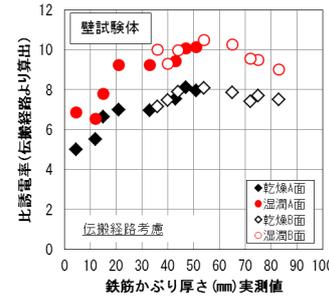


図 9 比誘電率（左：伝搬経路考慮、右：同考慮なし）

大きくなり、その後反転していることから、両面からの乾燥状態をうまく捉えている。一方、伝搬経路を考慮していない式 5 による場合（かぶり厚さと装置裏面空気層）、比誘電率は A 面の表面付近では、かなり大きく算出され、両面からの乾燥状態を捉えているとはいえない。このことから、現場で電磁波レーダ法を適用する場合、比誘電率を正確に求めるには式 3 の利用が良いといえる。しかし、比誘電率を算出することなく、反射時間とかぶり厚さの関係式を精度良く近似できれば、容易に反射時間から直接かぶり厚さが推定できることも可能なので合理的な方法であると考えられる。

4. まとめ

RC 建築物のかぶり厚さ推定に関する電磁波レーダ法の適用性についての検討した結果は、以下のとおりである。

- 1) 装置使用前の動作確認には標準的な試験片としてメラミン樹脂板やアクリル樹脂板の利用が考えられる。
- 2) 送・受信アンテナ間隔を踏まえた電磁波の伝搬経路を考慮して、比誘電率を算出した方が良い。
- 3) 反射時間は実かぶり厚さとほぼ比例関係にあることから、反射時間から直接かぶり厚さを推定できる可能性が示唆された。

【参考文献】

- 1) 例えば、永山、西浦、谷川、棚野、濱崎：コンクリートの非破壊試験における測定精度に関する実験的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2004. 8, pp. 219~222
- 2) 柳田、大沼、山口、山田：プレキャストコンクリート部材の品質管理とかぶり厚さに関する一考察、コンクリート工学 Vol. 50, No. 2, 2012. 2, pp. 163~170

電磁波レーダ法によるかぶり厚さ推定に関する一考察 (その2. 比誘電率に及ぼす含水率の影響)

かぶり厚さ 電磁波レーダ法 反射時間
比誘電率 含水率 非破壊試験

正会員 ○安田正雪^{*1} 同 山田雅裕^{*2} 同 柳田淳一^{*3}
同 住学^{*4} 同 後藤健二^{*5}

1. はじめに

その2では、柱試験体などを用いて、かぶり厚さ推定に及ぼす含水率の影響や、かぶり厚さと反射時間の関係を確認するとともに、反射時間と実かぶり厚さから計算した比誘電率の推定精度についても検討した。

2. 実験概要

2.1 かぶり厚さ測定と含水率測定に用いた装置

かぶり厚さ測定はその1に示す電磁波レーダ法装置を用いた。また、コンクリートの含水率測定は表面が静電容量式水分計を用い、内部が電気抵抗式水分計を用いた。

2.2 試験体

(1) 柱試験体

試験体の概要を図1に示す。寸法は断面700×700mm、長さ2000mmで、縦打ちした試験体を横置きとし1面のみを測定対象とした。コンクリート強度は2種類（呼び強度27および40）であり、材齢約8か月経過したものである。配筋は、主筋D25、せん断補強筋D10@100mmで、かぶり厚さは、コンクリート打込み時の配筋乱れで検討に都合が良く約35~50mmとばらついている。実験は、最初に乾燥した状態で測定したケース、その後濡れウェスとシートで4週間覆って湿潤状態で測定したケースとした。また、せん断補強筋近傍の含水率を確認する目的で、測定面に対して中央付近に均等に3か所（深さ40mm）孔を設け、内部含水率およびその横で表面含水率を測定した。

(2) かぶり厚さを変化させた試験体

試験体概要を図2に示す。表面（脱型面）から10、30、50、100および150mmの位置にかぶり厚さを5段階に変化させて丸鋼φ16を配置し、各位置の近傍には含水率測定用の孔を設けた。コンクリートは表1に示す呼び強度24および45の2種類を使用した。湿潤養生後、材齢5日に測定対象面のみを脱型し、他は型枠を存置し、コンクリート打込み面は引続き乾燥させないよう湿潤状態とした。なお、別途にかぶり厚さに相当する厚みの断面10cm角の供試体も同時に製作し、材齢28日に質量測定後、吸水率試験を実施し、比誘電率との関係を調べた。

3. 実験結果

3.1 柱試験体

かぶり厚さの実測値と電磁波レーダ法の測定で得られた反射時間との関係を図3に示す。柱試験体における含

表1 かぶり厚さを変化させた試験体の調査

呼び強度	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					材齢28日 圧縮強度 (N/mm ²) 封かん
			W	C* ¹	S* ²	G* ³	A* ⁴	
24	57.4	46.0	179	312	809	989	1.88	39.2
45	38.4	43.2	170	443	725	989	4.06	57.5

*1:セメント(普通ポルトランドセメント)

*1:山砂(表乾密度2.60g/cm³) *2:石灰岩砕石2005(表乾密度2.70g/cm³)

*3:呼び強度24(AE減水剤)、呼び強度45(高性能AE減水剤)

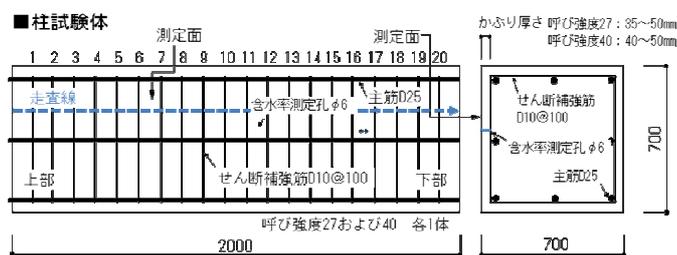


図1 柱試験体

■かぶり厚さを変化させた試験体

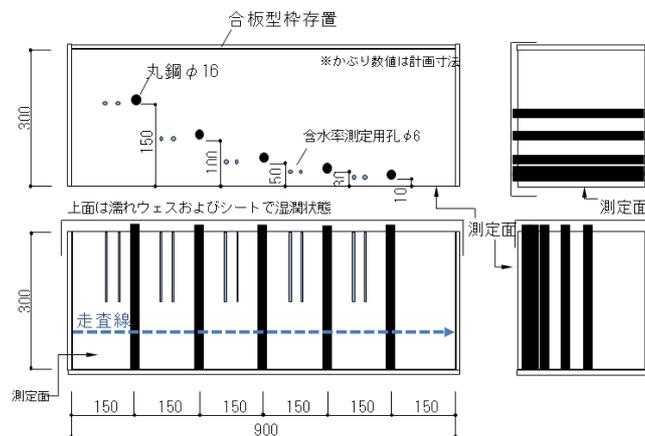


図2 かぶり厚さを変化させた試験体

水率の測定結果を表2に示す。反射時間はその1の結果と同様、かぶり厚さ約35~50mmの範囲において、かぶり厚さが大きくなるほど大きくなり、また乾湿状態の違いが良く捉えられている結果となった。含水率は、呼び強度27の方が呼び強度40より表面と内部との差が大きく、表面は低かった。この反射時間とかぶり厚さの実測値（ドリル孔で確認）を用いてその1の式3より各箇所の比誘電率を求め、測定対象面毎に平均の比誘電率を求めた。各箇所の推定かぶり厚さをその1の式1、式2より反射時間と平均

の比誘電率から算出し、かぶり厚さの実測値との誤差を確認した。その結果を図4に示す。いずれの試験体の乾燥および湿潤状態で、約35~50mmのかぶり厚さの範囲において実測値±2mmの精度で推定できている。このことは、限られた範囲で平均の比誘電率を正確に捉えることができれば、測定精度は良いといえる。

表2 柱試験体の含水率測定結果 (3ヶ所平均)

呼び強度	乾燥状態		湿潤状態	
	表面	内部	表面	内部
27	4.9%	6.1%	5.8%	7.5%
40	5.4%	5.8%	7.1%	7.0%

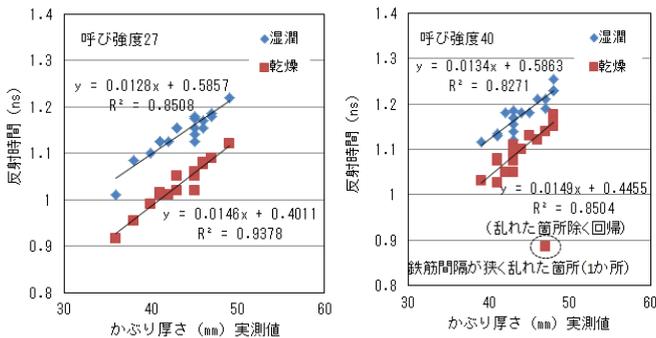


図3 かぶり厚さ実測値と反射時間との関係 (電磁波レーダ法)

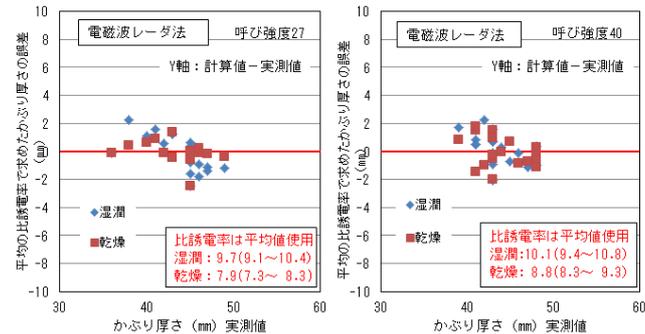


図4 平均の比誘電率で推定したかぶり厚さの誤差

3.2 かぶり厚さを変化させた試験体

各試験体の材齢毎のかぶり厚さの実測値と含水率の関係を図5に示す。含水率は表面から内部に向かって大きくなり¹⁾、初期材齢では呼び強度24の方が呼び強度45よりも全体的に含水率が高い結果となり、単位水量の違いなどが影響したと考えられる。かぶり厚さの実測値と反射時間および比誘電率の関係を図6に示す。比誘電率は、材齢の進行とともに小さくなり、かぶり厚さの浅い10~50mmの範囲で大きく変化し深くなるとほぼ一定の傾向となった²⁾。一方、反射時間とかぶり厚さの関係はかぶり厚さの広い範囲でも材齢毎に直線回帰式で相関が良く近似できている。このことから、かぶり厚さの推定では、あるかぶり厚さ毎で平均の比誘電率を用いるよりも反射時間のみで直接かぶり厚さを推定した方が精度は向上するものと考えられる。

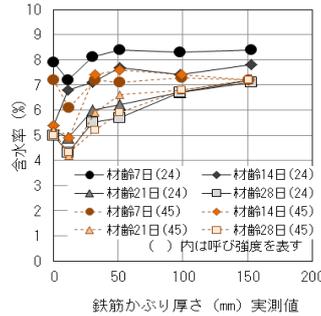


図5 かぶり厚さと含水率

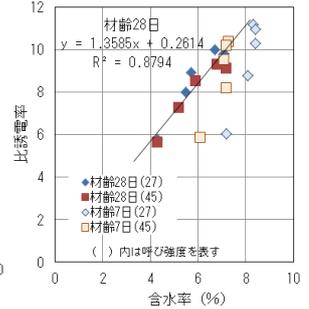


図7 含水率と比誘電率

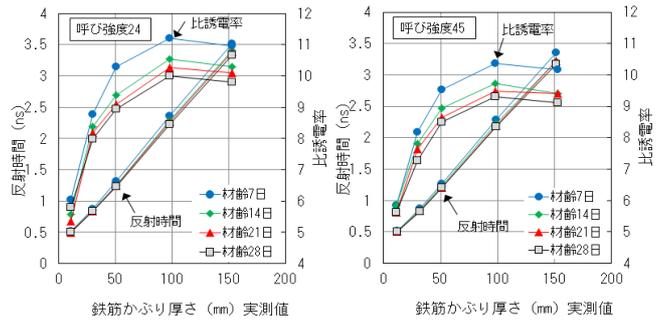


図6 かぶり厚さの実測値と比誘電率の関係

次に、含水率と比誘電率の関係を図7に示す。また、吸水率に対する含水率比と比誘電率の平方根の関係を図8に示す。図7の含水率は内部水分計によるもので、図8は別途供試体によるものであるが、それぞれ材齢28日においていずれの調合も、同一の回帰直線上に分布しており、含水率から比誘電率を簡易推定できる可能性がある。

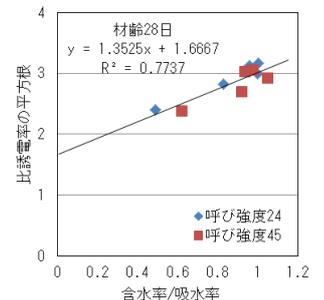


図8 含水率/吸水率と比誘電率の関係

4. まとめ

本実験の結果、以下の知見を得た。

- 1) 限定されたかぶり厚さの範囲では、平均の比誘電率を用いたかぶり厚さの推定誤差は小さかった。
- 2) かぶり厚さと反射時間がほぼ比例関係となり、かぶり厚さの推定には反射時間から直接算出する方法もある。
- 3) 比誘電率は深さ方向で変化するが、材齢28日の含水率から簡易推定できれば参考となる。

今後、反射時間から直接かぶり厚さ推定を検討する。

【参考文献】

- 1) 金森・野中ほか：非破壊試験によるかぶり厚さ測定に関する実験的研究 (その1~4), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 2009年8月
- 2) 山口・森濱ほか：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, 2004

*1 東洋建設 *2 東亜建設工業 *3 大木建設
*4 鴻池組 *5 計測技術サービス

*1 Toyo Construction *2 Toa Corporation *3 OHKI Corporation
*4 KONOIKE CONSTRUCTION Co.,LTD *5 KGS inc.

電磁波レーダ法によるかぶり厚さ推定に関する一考察 (その3 比誘電率の推定方法に関する検討)

かぶり厚さ 電磁波レーダ法 反射時間 正会員 ○柳田淳一*1 同 山田雅裕*2 同 安田正雪*3
比誘電率 含水率 非破壊試験 同 住学*4 同 後藤健二*5

1. はじめに

電磁波レーダ法によるかぶり厚さの推定精度は、測定対象箇所の比誘電率に大きく影響を受けることから、比誘電率の推定方法についていくつかの方法が示されている。その3では、これら既往の推定方法のほかに、比誘電率の推定対象箇所が出隅部分に限定されるが、非破壊の推定方法の選択肢のひとつとして、出隅部分を利用した比誘電率の推定方法（以下、本方法と呼ぶ）について実験検討を行い、その精度などについて検討した結果を報告する。

2. 電磁波レーダ法の比誘電率を推定する方法の例

比誘電率を求める方法は、①鉄筋の深さが既知で測定対象のコンクリートと同じコンクリートの媒体から求める方法、②かぶり厚さを測定した鉄筋のかぶりコンクリートをはつり取る、または穿孔してかぶり厚さを実測し求める方法、③測定対象内の鉄筋径を利用して非破壊により推定する方法、などが示されている¹⁾²⁾。比誘電率の推定には、かぶり厚さを実測して求める方法が高い精度であると考えられるが、制約条件も多いことから、非破壊による比誘電率の推定方法を併用していることが多い。

3. 出隅部分を利用した比誘電率の推定

3.1 測定手順と方法

本方法は、柱や梁の出隅部分端部にある径が既知の鉄筋を利用して、出隅部分の頂点から鉄筋中央までの距離 (D_x , D_y) と電磁波の鉄筋表面までの反射時間 (T_x ,

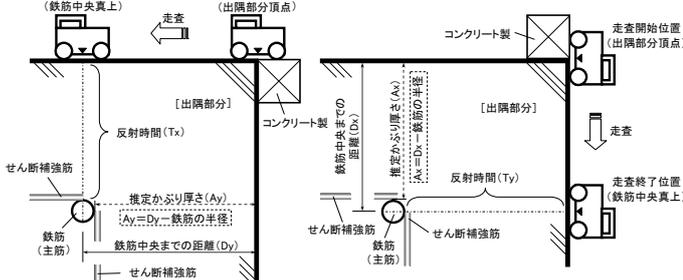


図1 測定手順概要

- 測定手順—
- ①鉄筋中央位置までの距離 (D_y) を測定し かぶり厚さ (A_y) を求める
 - ②反射時間 (T_x) の測定
 - ③鉄筋中央位置までの距離 (D_x) を測定し かぶり厚さ (A_x) を求める
 - ④反射時間 (T_y) の測定
 - ⑤対応する A_y と T_y 、および A_x と T_x から、測定箇所の比誘電率を算定
 - ⑥測定した比誘電率の平均値を用いて、計算によりかぶり厚さを推定

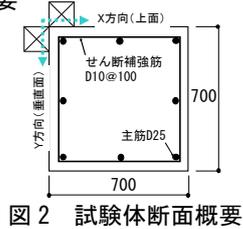


図2 試験体断面概要

T_y) を出隅部分で直交する二面について測定し、この結果から比誘電率を推定する方法である。測定の手順を図1に示す。このときの鉄筋中央の位置は、走査により断面画像に現れた鉄筋を示す円弧の頂上となる。なお、この位置は、その1で用いた装置では装置内部により自動的に求められている。また、この比誘電率は、その1の式3により求めた。

3.2 柱試験体による測定と測定結果

本実験では、その2に示した鉄筋コンクリートの柱試験体を用いて、本方法で比誘電率を推定するとともに、かぶり厚さの誤差を確認し、本方法の適合性を検証した。電磁波レーダ法装置は、その1で示したものを用いた。試験体は、呼び強度 27 と 40 のコンクリートで製作された2種類を用いた。試験体の断面を図2に示す。それぞれは主筋に異形鉄筋 D25、せん断補強筋は D13 が 100mm 間隔で配筋されており、一部区間には、故意に豆板を生じさせた箇所がある。試験体は、測定作業のために横置きにし、その水平面と垂直面からの主筋の位置とかぶり厚さをレーダ法装置の走査対象とし、せん断補強筋の位置を避けて走査した。写真1に走査状況を示す。この走査箇所は、各面とも同じせん断補強筋間の 18 区間とした。各面の表面含水率を、静電容量式水分計により測定した結果を図3と図4に示す。次に、図1に示した測定手順に従い、装置により測定した出隅部分から鉄筋中央までの距離 (D_x , D_y) から、鉄筋の半径を差し引いた数値、すなわち距離による推定かぶり厚さ (A_x , A_y) を後述の



写真1 走査状況

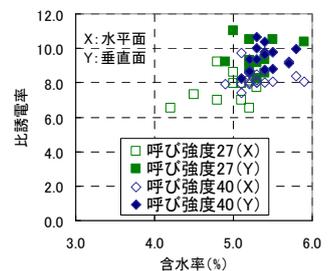


図5 含水率と比誘電率の関係

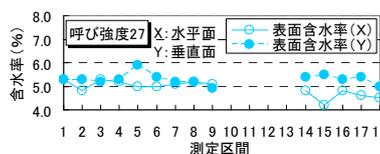


図3 表面含水率の測定結果

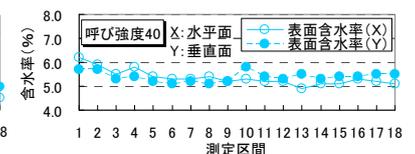


図4 表面含水率の測定結果

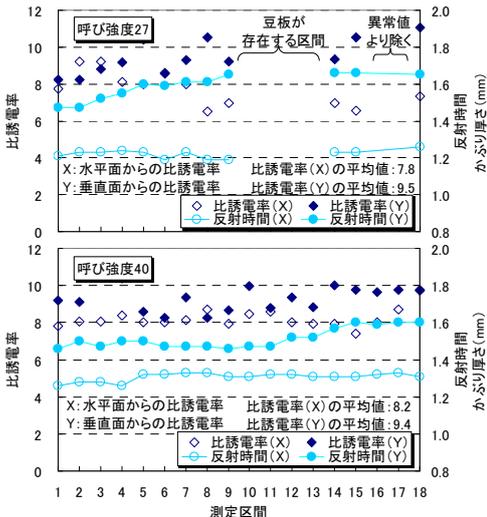


図6 測定区間の本方法による比誘電率と反射時間

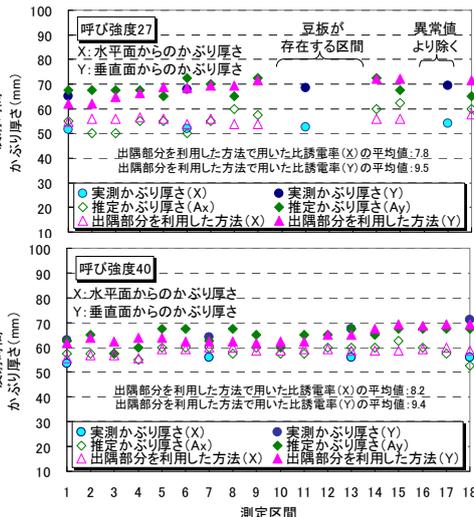


図7 基準かぶり厚さと推定かぶり厚さ

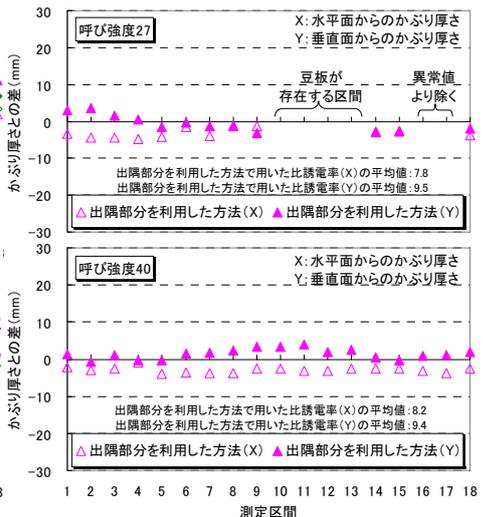


図8 本方法によるかぶり厚さの推定値と基準かぶり厚さとの差

図7の中に示す。なお、各試験体の測定区間1から500~600mm間隔ごとの4箇所において、かぶり部分をはつり取ってスケールで直接測定した数値を基に、かぶり厚さを直線補間して求めた値、ここでは基準かぶり厚さと記したが、推定かぶり厚さは基準かぶり厚さと若干の違いが認められるのは、後述の計測走査開始位置の影響などが考えられる。推定かぶり厚さから求めた比誘電率と含水率の関係を図5に示す。その2における実験同様に、含水率の増減に従い比誘電率も増減する傾向がみられ、含水率4.2~5.9%の範囲で、比誘電率は水平面、垂直面ともに3程度変化している。

図6に、本方法で推定した測定区間それぞれの比誘電率を示すとともに、図中に各比誘電率の平均を示した。各鉄筋のかぶり厚さの推定は、各反射時間とこの平均の比誘電率を用いて算出し、基準のかぶり厚さとの誤差を確認した。その結果を図7に示す。また、図8に基準かぶり厚さと本方法によるかぶり厚さの推定値との差を示す。ただし、呼び強度27の10~13区間は、走査した断面画像が豆板のために不明瞭なため明確な数値が得られないことから、また、16~17区間は異常値であったため、検討対象から除いている。

次に、図9に基準かぶり厚さと本方法の推定値との差について、基準かぶり厚さとの関係で示す。本実験は、測定したかぶり厚さの範囲が限定的ではあるが、本方法では差が約9.5%以内に収まった結果となった。以上の結果より、出隅部分を利用した比誘電率の推定方法を用いることでも、他の方法と遜色がない精度でかぶり厚さの推定が可能であると考えられる。ただし、本方法の推定精度には、以下の①から③に挙げる要因などが影響する

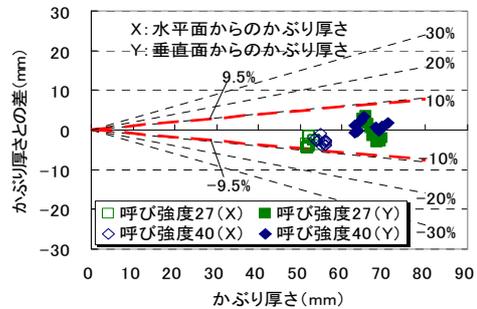


図9 基準かぶり厚さと本方法の推定値との差

ものと考えられるので、注意が必要である。

- ①測定対象出隅部分の直角性について
本方法は、測定する二面の直交が前提であるため、その直交精度の影響が考えられる。
- ②探査機器距離計の計測精度について
探査機器の距離計測精度(±2.5mm)、および計測走査開始位置の正確さも影響が考えられる。
- ③測定対象の含水率について
測定対象箇所の二面からの乾燥によって、この部分の含水率が影響を受ける。

4. まとめ

出隅部分を利用した比誘電率の推定方法について測定手順を示すとともに、本方法で求めた平均の比誘電率と反射時間よりかぶり厚さを推定した実験の範囲では、他の方法と遜色ない精度が得られた。

今後、RC建築物における電磁波レーダ法によるかぶり厚さ推定の精度向上にむけて、さらに検討を進める。

【参考文献】

- 1) (社)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の品質管理および維持管理のための試験方法、2007
- 2) 中村・森濱ほか：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厚さの推定、コンクリート工学年次論文集、Vol. 27, No. 1, 2005

*1 大木建設
*3 東洋建設
*5 計測技術サービス

*2 東亜建設工業
*4 鴻池組

*1 OHKI Corporation
*3 Toyo Construction
*5 KGS inc.

*2 Toa Corporation
*4 KONOIKE CONSTRUCTION Co.,LTD