

論文 実構造物におけるかぶり厚さの測定誤差およびその補正方法に関する検討

濱崎 仁^{*1}・川西 泰一郎^{*2}・榎田 佳寛^{*3}・鹿毛 忠継^{*4}

要旨：コンクリート中の鉄筋のかぶり厚さは、電磁波レーダ法あるいは電磁誘導法などの非破壊試験によって調査が行われる場合が多いが、その測定結果には一定の誤差が含まれる。本検討では、実構造物のかぶり厚さの調査において非破壊試験とはつりによる実測調査の結果を比較することにより、測定誤差の傾向を把握した。また、電磁波レーダ法によって測定する場合の比誘電率の最適値を建物の部位ごとに求め、その値を用いることにより測定誤差が低減することを確認した。さらに、モルタル等の仕上材の比誘電率を求め、含水状態による影響等を把握した。

キーワード：かぶり厚さ、測定誤差、電磁波レーダ、電磁誘導、比誘電率、含水状態

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物における鋼材のかぶり厚さは、中性化や塩化物イオンなどの劣化外力に対する耐久性を決定する重要な要因である。しかしながら、かぶり厚さは施工上の問題などにより一定程度のばらつきを有する¹⁾。また、既存構造物のかぶり厚さの調査では、電磁波レーダ法あるいは電磁誘導法などの非破壊試験に頼らざるを得ないため、その測定結果は必ず測定誤差を含んだものとなる。

非破壊試験によるかぶり厚さの測定方法としては、日本建材産業協会による、JCMS-III B 5707 (電磁波レーダ法によるコンクリート中の鉄筋位置の測定方法) および JCMS-III B 5708 (電磁誘導法によるコンクリート中の鉄筋位置・径の測定方法)²⁾、あるいは日本建築学会による、CTM-12 (電磁波レーダ法によるコンクリート中の鉄筋位置の測定方法 (案)) および CTM-13 (電磁誘導法によるコンクリート中の鉄筋位置及び鉄筋径の測定方法 (案))³⁾などが提案されている。これらの測定方法の中では、測定装置の性能として、標準試験片等によって一定の測定誤差の範囲内であることを確認することとされているが、実構造物での確認は行われない。また、電磁波レーダ法による測定において測定精度に影響を及ぼす比誘電率の設定については、はつり調査や穿孔による既知のかぶり厚さによって設定する方法などが提案されているが、いずれも局部的な破壊を伴うことから、実構造物において頻繁に行うことは難しい。

その他、前川らによる提案として、鉄筋径を用いる方法も提案されている⁴⁾が、これは鉄筋径が既知であること、鉄筋が確実に緊結されていることなどが前提である。

また、鉄筋径が比較的小さい建築物では測定装置の読み取り精度等の制約からも適用が困難である。

また、非破壊試験の測定精度を定量的に把握した例としては、著者らによる実験⁵⁾、土木研究所⁶⁾による調査などがあるが、実構造物特に建築物における例は少ない。

そこで、著者らは既存の建築物において非破壊試験およびはつり調査を同一箇所を実施することによって、測定誤差の傾向を把握した。また、建物の部位やかぶり厚さに応じた測定誤差の補正の方法について検討した。さらに、仕上げモルタルの含水状態を比誘電率によって推定することを試みた。

2. 調査方法

2.1 調査項目および方法

かぶり厚さの調査は、表-1 に示す項目、内容について実施した。なお、非破壊試験については、市販の一般的な装置を用い、それぞれの装置の測定の経験を有する技術者が行った。また、測定装置は、調査前に動作に支障のないことを確認し、電磁波レーダ法については、比

表-1 かぶり厚さ調査の項目および内容

調査項目		調査方法
資料調査	設計図書の確認	設計図書を確認し、設計かぶり厚さ、配筋状況を確認
非破壊試験	電磁波レーダ法	市販の装置を用い、指定した測線に沿って、かぶり厚さを測定 (ただし、仕上材は除去しない)
	電磁誘導法	
実測調査	かぶりおよび仕上げ厚さの実測	非破壊試験と同一箇所のかぶりコンクリートをはつりとり、かぶり厚さと仕上材の厚さをノギスにより実測

*1 (独)建築研究所 材料研究グループ 博士 (工学) (正会員)

*2 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

*3 宇都宮大学 工学部建設工学科教授 工博 (正会員)

*4 (独)建築研究所 建築生産研究グループ Ph.D (正会員)

誘電率の設定値は装置の標準設定（比誘電率=8.0）、電磁誘導法については、鉄筋径を D10 に設定した状態で測定を行った。写真-1 に非破壊試験の状況、写真-2 にはつり調査の状況を示す。

2.2 調査対象

調査を行った建物は、昭和 30 年代に建設された 4 階建て、5 階建ての壁式集合住宅 2 棟（A 棟および B 棟と表記）の妻側一住戸の基礎梁から 5 住戸および 1 階部分の外壁である。施工は、現場打ちの在来工法、コンクリ

ートは現場練りである。調査は解体工事と並行して実施し、この建物はすでに解体されている。

2.3 調査箇所および数量

調査は、建物の部位を、基礎梁、壁、壁梁、床に分け、それぞれの部位ごとに調査を行った。調査を行った数量を表-2 に示す。調査の測線は、外部足場等を使用しない範囲で測定できる箇所とし、各部材の縦・横方向の鉄筋に直交する方向に、各部材長さの 1/2 程度の長さとなるように設定した。測線の例を図-1 に示す。



写真-1 非破壊試験の状況



写真-2 はつり調査の状況

表-2 鉄筋調査数量

部位	鉄筋方向	主な仕上げ	A 棟		B 棟		合計	
			鉄筋本数	測線長さ (m)	鉄筋本数	測線長さ (m)	鉄筋本数	測線長さ (m)
基礎梁 (屋外)	縦筋	モルタル	58	16.0	50	13.5	108	29.5
	横筋		7	2.4	10	2.8	17	5.2
基礎梁 (屋内)	縦筋	打放し	33	8.5	14	3.8	47	12.3
	横筋		8	2.7	6	1.5	14	4.2
壁 (屋外)	縦筋	モルタル	113	28.7	75	18.6	188	47.3
	横筋		90	26.6	41	15.4	131	42.0
壁 (屋内)	縦筋	打放し・モルタル+しっくい	64	18.2	41	11.5	105	29.7
	横筋		51	16.2	51	14.6	102	30.8
壁梁	縦筋	〃	45	12.7	48	14.0	93	26.7
床 (周辺部)	桁行	打放し	23	8.1	—	—	23	8.1
	梁間		36	10.9	—	—	36	10.9
合計			549	151.0	336	95.7	885	246.7

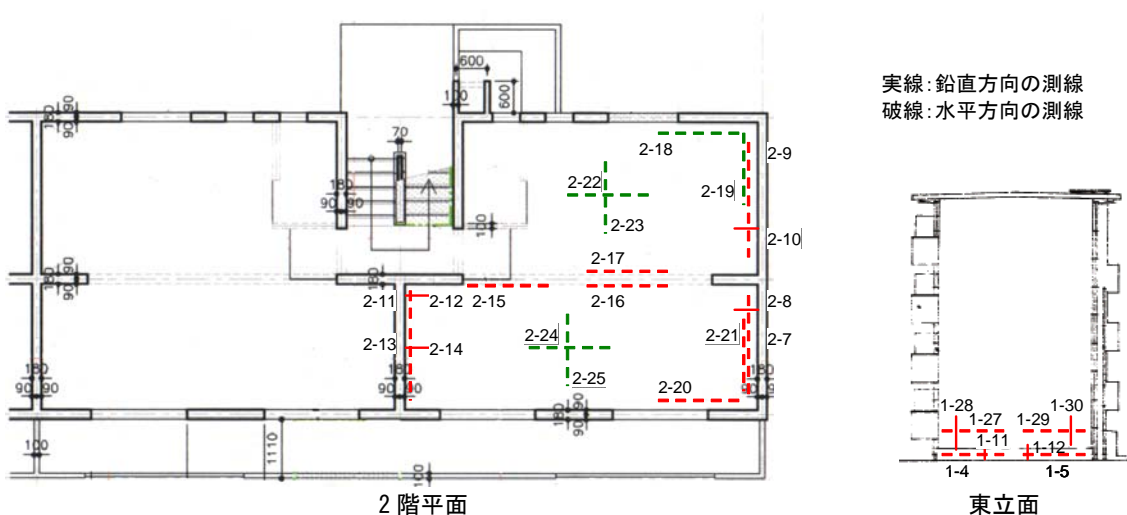


図-1 測線の例

3. 調査結果および考察

3.1 測定誤差の傾向

表-3 に測定誤差の平均値、標準偏差を示す。また、図-2 に測定誤差の 2.5mm 間隔の相対度数分布を示す。結果は、A 棟、B 棟の合計であり、仕上材の有無で分けて表している。測定誤差は、非破壊試験の測定結果からはずりによる実測値を引いており、実際よりも小さく測定される場合（安全側）に負の値となる。

なお、電磁波レーダ法については、比誘電率を測定装置の初期設定値である 8.0 に設定して測定を行っている。また、電磁誘導法については、装置の適用範囲であるかぶり厚さが 100mm を超える場合には除外した。また、仕上材は除去せずにモルタル等の仕上げがある場合にも仕上げの表面から測定を行っている。

測定誤差の標準偏差は、概ね 5mm~10mm の範囲にあり、部材試験体により調査を行った既往の調査結果⁵⁾と

同程度である。また、モルタル仕上げがある場合の方が誤差が大きくなっており、その原因として、電磁波レーダ法については、モルタルとコンクリートの界面があり、特にモルタルが浮いている場合には界面での電磁波の反射が生じること、モルタル部分の比誘電率がコンクリートと異なることなどが考えられる。電磁誘導法については、測定原理からはモルタルの存在は影響しないはずである。

測定誤差の平均は、いずれの方法も実際のかぶり厚さよりも小さくなる傾向にある。この傾向について、電磁波レーダ法については、比誘電率の設定によるものと考えられ、その詳細は次節に述べる。電磁誘導法については、かぶり厚さを鉄筋の存在による磁束変化から算定しているが、算出のアルゴリズムは、測定装置独自のものとなっている。そこで、その傾向についてさらに詳細に検討する目的で、かぶり厚さの範囲ごとに誤差の平均値

表-3 測定誤差の平均値および標準偏差

	電磁波レーダ法						電磁誘導法					
	仕上げ無し			仕上げ有り			仕上げ無し			仕上げ有り		
	N	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	N	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	N	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	N	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)
A 棟	192	-7.7	5.2	324	-8.7	5.8	180	-4.0	7.7	321	-4.7	9.2
B 棟	56	-12.2	5.0	272	-11.2	7.5	56	-2.9	6.9	244	-5.9	9.4
合計	248	-8.7	5.5	596	-9.8	6.7	236	-3.8	7.5	565	-5.2	9.3

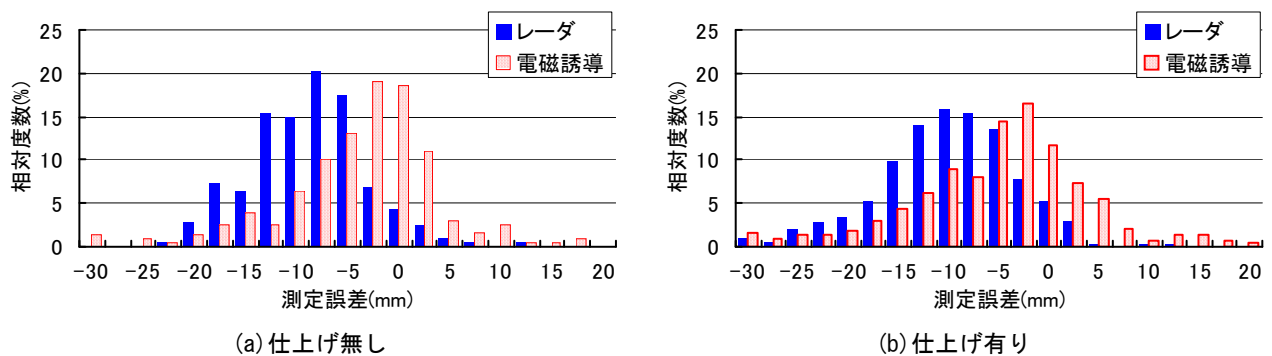


図-2 測定誤差の分布

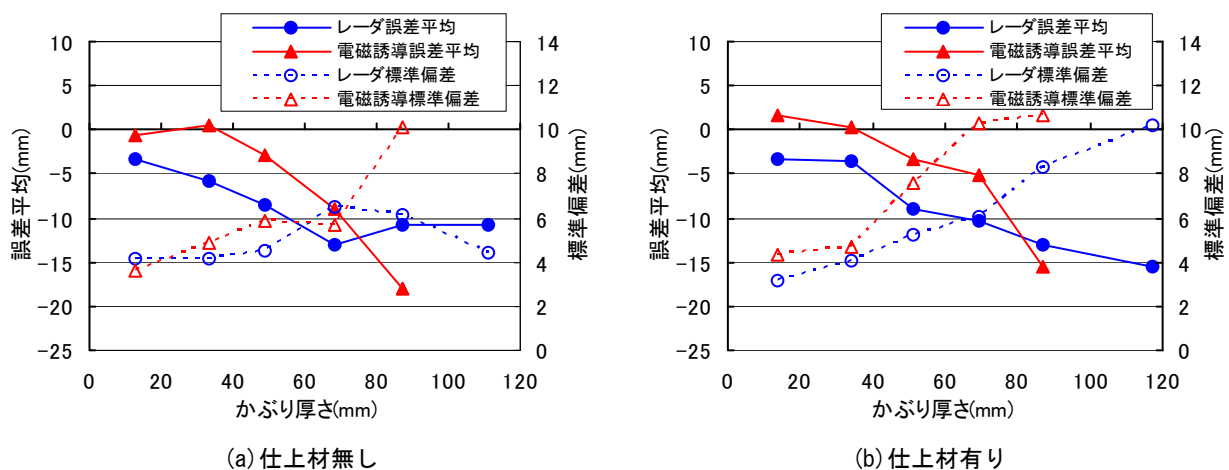


図-3 かぶり厚さの範囲と誤差の平均値、標準偏差の関係

および標準偏差を計算した結果を図-3に示す。

仕上材の有無に関わらず、かぶり厚さが大きくなるほど、誤差の平均が-（マイナス）方向に大きくなり、標準偏差が大きくなる。この傾向は電磁誘導法の方がより顕著であるが、建築物において最も測定頻度の高いかぶり厚さが30～50mmの範囲では誤差の平均はほぼ0であり、標準偏差も5mm程度となる。電磁波レーダ法については、比誘電率の差によるずれが、かぶり厚さに比例して大きくなるのがその主因と思われる。電磁誘導法については、その理由は不明であり、今回使用した測定装置固有の傾向である可能性もあるが、測定前にその装置の特性を把握しておくことが重要であると思われる。

3.2 比誘電率の設定最適値の検討

(1)電磁波レーダによるかぶり厚さ測定の基本原則

電磁波レーダ法によるかぶり厚さの測定原理は、式(1)で表される。また、このときの電磁波の速度(V)は式(2)で表される。

$$D = \frac{VT}{2} \quad (1)$$

ここで、 D ：かぶり厚さ(m)
 V ：コンクリート中の電磁波の速度(m/s)
 T ：鉄筋からの反射波の到達時間(s)

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

ここで、 C ：真空中における電磁波速度(=2.998×10⁸m/s)

ϵ ：誘電体の比誘電率

比誘電率は、コンクリートの含水状態が支配的であり、

一般的なコンクリートでは、4～20程度の範囲にあると言われている。コンクリートが乾燥状態にあるほど比誘電率は小さくなり、電磁波速度は大きくなる。したがって、比誘電率を同じ設定で測定した場合、乾燥したコンクリートほど測定されるかぶり厚さが実際よりも小さくなる。

(2)打放しコンクリートにおける比誘電率の最適値の算定

本調査では、電磁波レーダの比誘電率を測定装置の標準値である8.0に設定した状態で測定している。乾燥状態のコンクリートの比誘電率は8よりも小さいと思われるため、得られた結果は実際のかぶり厚さよりも小さくなるのが推測される。そこで、今回の調査結果から、比誘電率を逆算し、部位ごとに最適な比誘電率を求めた。

まず、式(3)によって、測定結果(D')および比誘電率の設定値(ϵ_0)から測定点ごとの反射時間(T')を求める。次に、式(4)によって、実際のかぶり厚さ(D)から、実際の電磁波速度(V)を求め、(5)式によりそのときの実際の比誘電率(ϵ)が求められる。

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

$$V = \frac{2D}{T'} \quad (4)$$

$$\epsilon = \left(\frac{C}{V}\right)^2 = \left(\frac{C \cdot T'}{2D}\right)^2 = \epsilon_0 \cdot \left(\frac{D'}{D}\right)^2 \quad (5)$$

式(5)によって求めた測定点ごとの比誘電率の分布を図-4に示す。また、求めた比誘電率のデータ数、平均

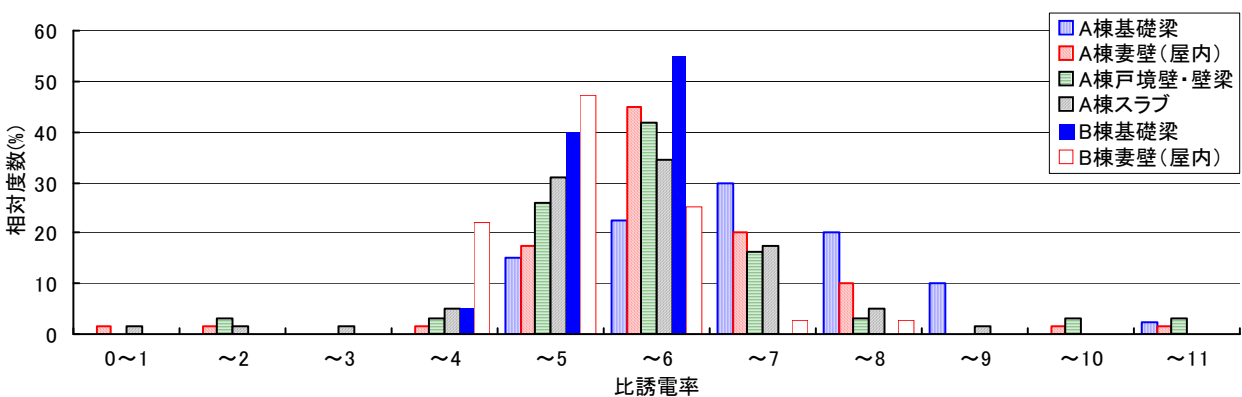


図-4 測定値より逆算した部位ごとの比誘電率の分布

表-4 部位ごとの比誘電率

部位	A棟			B棟			合計		
	N	平均値	標準偏差	N	平均値	標準偏差	N	平均値	標準偏差
基礎梁	40	6.51	1.41	20	5.02	0.58	60	6.01	1.39
妻壁(屋内)	69	5.72	1.37	36	4.67	0.90	105	5.36	1.33
戸境壁・壁梁	31	5.63	1.63	—	—	—			
スラブ	58	5.20	1.35	—	—	—			

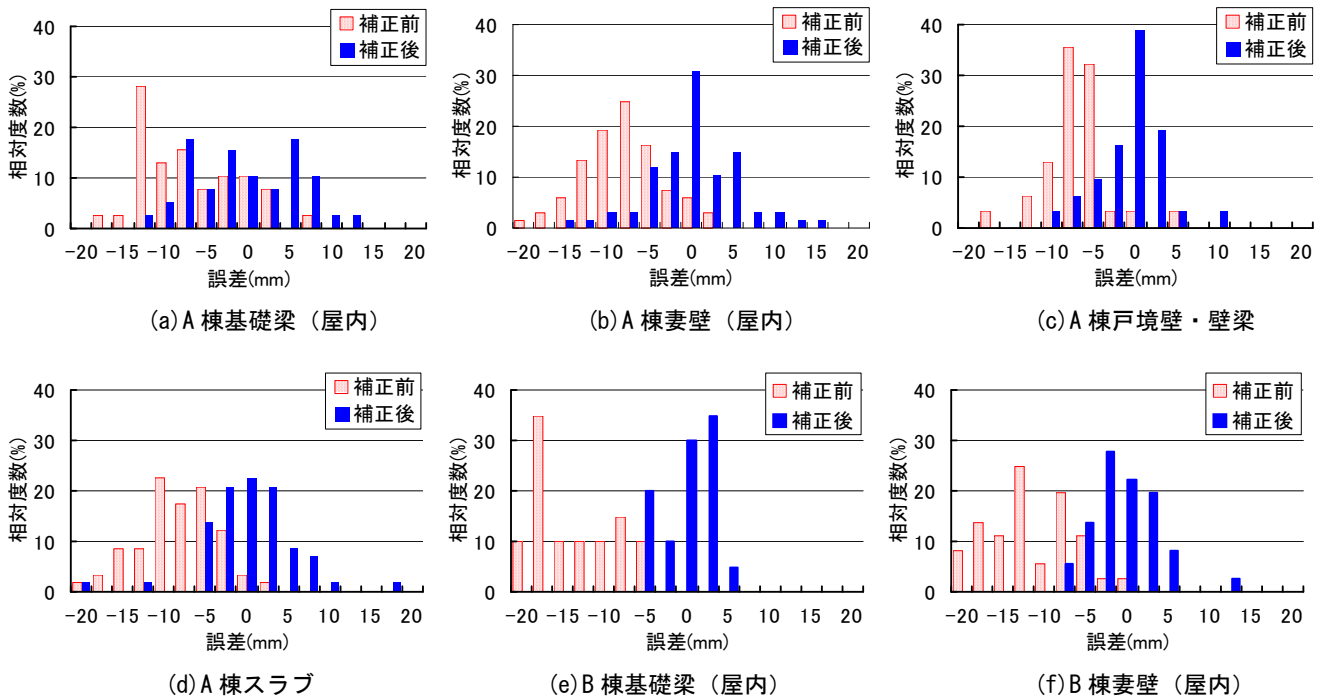


図-5 かぶり厚さの測定誤差の補正前後の比較

表-5 比誘電率の補正前後の誤差の分布の比較

	A 棟								B 棟			
	基礎梁		妻壁		戸境壁・壁梁		スラブ		基礎梁		妻壁	
	平均値 (mm)	標準 偏差 (mm)	平均値 (mm)	標準 偏差 (mm)	平均値 (mm)	標準 偏差 (mm)	平均値 (mm)	標準 偏差 (mm)	平均値 (mm)	標準 偏差 (mm)	平均値 (mm)	標準 偏差 (mm)
補正前	-7.1	5.7	-8.3	4.8	-6.5	4.1	-8.3	4.6	-13.3	5.1	-11.5	4.9
補正後	-0.4	6.0	0.0	5.1	-0.7	3.8	0.0	5.3	-0.2	2.9	-0.5	3.9

値、標準偏差を表-4に示す。

比誘電率は、建物ごとの傾向として、基礎梁では地中の水分や湿気が多いことから若干大きくなっているものの、いずれの部材についても装置の標準値(8.0)以下でありばらつきも比較的小さい。ただし、建物間を比較するとB棟の方が小さくなっており、B棟の方が全体的にコンクリートが乾燥していることが推測される。

ここで得られた比誘電率によってかぶり厚さの測定値を補正した場合の補正前後の誤差について、2.5mm 間隔の相対度数分布を図-5に示す。また、このときの補正前後の誤差の平均値、標準偏差を表-5に示す。

比誘電率を適切な値によって補正することによって、誤差の平均はほぼ0となり、測定値の平均としての精度は格段に向上する。このことから、ある部材内の複数の測定点の平均値を用いて部材面単位のかぶり厚さの評価を行う場合などにあっては、評価の精度(たしかさ)の向上が期待できる。ただし、誤差のばらつきは、部材間での比誘電率のばらつきや波形の読み取り誤差などその他の測定上の要因も含むため、測定点の1点ごとのばらつきの大きさ(標準偏差)としては同程度か若干小

さくなる程度である。

建物間の比誘電率の違いについては、環境条件や建築後の経過年数などの影響も大きく、今後さらにサンプル数を確保した上で適用範囲や適用条件などの検討を行う必要がある。

(3)仕上材の比誘電率の推定

上記の結果を応用して、仕上材(モルタル、しっくい)の比誘電率について求める。仕上材およびコンクリート部分の電磁波速度(V)、伝播時間(T)、比誘電率(ϵ)および厚さ(D)を図-6の通りとすると、仕上材の比誘電率は、式(6)、式(7)を用いて求められる。

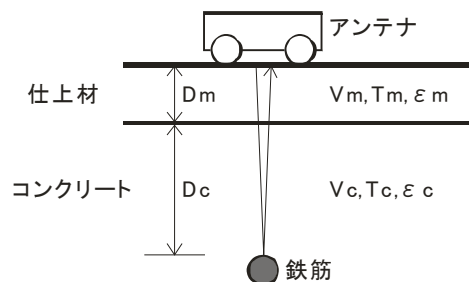


図-6 電磁波レーダ法による測定の模式図

表-6 仕上げ材の部位ごとの比誘電率

部位		主な仕上げ	A棟			B棟		
			N数	平均	標準偏差	N数	平均	標準偏差
基礎梁	基礎梁全体	モルタル	64	9.33	5.02	59	26.60	15.04
	北面		29	11.38	5.02	17	21.71	10.00
	東面		15	8.39	5.36	15	19.55	5.56
	西面		20	7.06	3.56	19	50.44	13.78
外壁	外壁全体	モルタル+リシン	201	5.35	3.17	99	8.53	4.24
	南面		105	3.54	2.42	29	5.14	2.45
	北面		45	7.37	2.77	40	11.04	5.07
	東面		24	7.23	3.32	23	10.22	2.01
	西面		27	7.41	1.81	11	9.59	2.76
内壁・壁梁	内壁等全体	モルタル+しっくい	59	2.84	4.31	101	4.55	2.40

$$T_m = T - T_c = \frac{2(D_c + D_m)}{V'} - \frac{2D_c}{V_c} \quad (6)$$

$$\varepsilon_m = \left(\frac{C}{V_m}\right)^2 = \left(\frac{C}{D_m/T_m}\right)^2 = \left(\frac{C \cdot T_m}{2D_m}\right)^2 \quad (7)$$

ここで、コンクリート部分の比誘電率は、それぞれ該当する部位の打放し仕上げの比誘電率の平均値を代入し、仕上材およびかぶり厚さは実測値としている。仕上材の部位ごとの比誘電率を表-6に示す。

基礎梁部分のモルタルは、全体的に比誘電率が大きく、雨水の跳ね返りや地中からの水分の影響で含水率が高くなっている。特に北側では乾燥しにくいことなどから比誘電率が大きい。外壁については、ベランダ、庇によって雨掛りのない南側の壁面では、比誘電率が小さくなり、乾燥の程度が大きい。その他の面は7程度である。内壁については乾燥しているためさらに比誘電率が小さくなる。

建物間の比較では、B棟の方が全体的に比誘電率が大きく、特に基礎梁のモルタルでその傾向が顕著である。その理由として、測定前日に降雨があり表層部のモルタルが雨水の影響や湿度の影響を受けているものと考えられる。また、コンクリート部分の比誘電率は短期的な降雨の影響等を受けにくく、比誘電率もA棟と比較して小さいため、相対的に仕上材部分の比誘電率が大きくなる傾向にあることも考えられる。

4. まとめ

本検討では、電磁波レーダ法および電磁誘導法によるかぶり厚さの測定誤差について、その傾向の把握および低減の方法について検討を行った。

本調査の範囲では、測定誤差は電磁波レーダ法、電磁

誘導法ともに、標準偏差で5~10mm程度、平均で-10mm程度までの誤差があること、その誤差はかぶり厚さが大きくなるほど大きくなる傾向にあることが確認された。

測定誤差の補正方法について、電磁波レーダ法における比誘電率の最適値を部位ごとに求めた結果、今回調査を行った2棟の屋内側の部材について概ね5~6程度であり、その値によって補正した結果、測定面単位でなどの平均値としての精度は大きく向上する。

また、仕上材の比誘電率を算定した結果、表層部の含水状態の影響をよく表していることが明らかになった。

参考文献

- 1) 榊田佳寛, 友澤史紀, 矢島義磨: 実際の鉄筋コンクリート造建築物における鉄筋のかぶり厚さの実態, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.7, pp.45-48, 1985.7
- 2) 日本建材産業協会: コンクリートの非破壊検査方法, pp.65-108, 2003.3
- 3) 日本建築学会: コンクリートの品質管理および維持管理のための試験方法(案), pp.391-410, 2007.3
- 4) 前川聡, 森濱和正, 佐藤次男: 電磁波による鉄筋のかぶり厚さ測定, 非破壊検査, Vol.55, No.1, pp.16-22, 2006.1
- 5) 西浦範昭, 谷川恭雄, 永山勝, 棚野博之, 濱崎仁: 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(その5 電磁波レーダ法および電磁誘導法によるかぶり厚さの推定精度), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.219-220, 2004.8
- 6) 国土交通省土木研究所: 非破壊試験によるコンクリート品質, 厚さ, 鉄筋かぶり・径の計測に関する共同研究報告書, pp.131-163, 2001.3