

◆ コンクリート特集 ◆

電磁波レーダ法、衝撃弾性波法による コンクリート構造物検査方法の提案

— コンクリート強度、部材厚さ、かぶり厚さの推定 —

森濱和正*

1. まえがき

筆者らは非破壊試験によりコンクリート構造物を直接検査する方法を検討するため(社)日本非破壊検査協会と共同研究を行ない、検査方法を提案した¹⁾。そして本誌 Vol.43, No.7 (前報)では、超音波法を用いたコンクリートの品質、部材厚さ、鉄筋のかぶり厚さと径の推定方法について報告した²⁾。

今回は、電磁波レーダ(以下レーダ)を用いた部材厚さとかぶり厚さの推定と、衝撃弾性波を用いたコンクリートの圧縮強度と部材厚さの推定結果を報告する。検討に当たっては、コンクリート内部の電磁波および弾性波の速度分布が重要であることから³⁾、これらの求め方についても検討し、厚さ、圧縮強度を精度よく推定することができた。

2. これまでの問題点と検討内容

レーダ、衝撃弾性波によるコンクリート部材、かぶりの厚さは、一般には式(1)で求めるため、速度と反射時間が必要である。

$$h = V \cdot t / 2 \quad (1)$$

ここに、 h :厚さ、 V :コンクリートを伝搬する速度、 t :厚さを求める位置の反射時間である。

レーダ法の電磁波速度 V は式(2)で表される。

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

ここに、 C :電磁波の真空中での速度(3×10^{11} mm/s)、 ϵ :比誘電率である。

比誘電率は、コンクリートでは8~12程度といわれているが、実際にどの値を用いればいいのか、その求め方は明らかになっていない。コンクリート内部の含水率は一定ではなく、通常表面近傍が小さく、内部は大きくなっている。水の比誘電率は81なので、含水率が比誘電率に及ぼす影響は非

常に大きい。コンクリート表面近傍の含水率の変化は大きいため、比誘電率も大きく変化しているものと考えられる。そのため、厚さ、特にかぶり厚さを精度よく求めるには、表面近傍の比誘電率を精度よく求める必要がある。

衝撃弾性波法による厚さとコンクリート強度の推定にも弾性波速度を使うため、精度の高い速度の求め方を検討する必要がある。また、これまで衝撃弾性波法によるコンクリートの強度推定はほとんど行なわれていないので、その手順を検討する必要がある。

3. 実験概要

3.1 供試体の種類および測定項目

実験に用いた供試体と、供試体ごとの測定項目は表-1のとおりである。

供試体 A は厚さ一定の版供試体であり、部材厚さ、かぶり厚さを推定した。レーダ法により電磁波速度を測定するために、供試体の片側に $\phi 20$ mm の鉄筋をかぶり厚さ 15~90mm までは 25mm ピッチで、240mm までは 50mm ピッチで入れている。反対側には、かぶり厚さを推定するために、D25、D32、D38、D51 の鉄筋をかぶり厚さ 50mm で入れている。

供試体 B は床版を想定し、厚さを直線的に 150~300mm まで変化させている。供試体 C は、1

表-1 供試体の種類と推定項目

供試体の種類		供試体寸法 (mm)			測定機種	推定項目	測定材齢 (週)
		厚さ	高さ or 長さ	幅			
A	版	300	2,500	1,200	レーダ	部材厚さ かぶり厚さ	1, 4, 13
B	床版	150 ~300	2,200	1,300	衝撃 弾性波	部材厚さ	1, 4, 13
C	壁		1,350	2,200			
I面		100	600	800			
II面		200	600	1400			
III面		400	750	800			
IV面	600	750	1,400				
D	壁	200	1,500	1,600		圧縮強度	1,4
E							

Proposal of Test Methods on Concrete Structures Using Electro-Magnetic Wave Radar Method and Impact Elastic Wave Method - Estimation of Concrete Strength, Thickness and Cover of Re-Bars in RC Members -

表-2 コンクリートの配合

供試体	配合条件			
	呼び強度	目標スランプ (cm)	粗骨材最大寸法 (mm)	目標空気量 (%)
A, B, C	24	8	20	4.5
D	24	8	25	
E			40	

体の供試体の中に厚さが 100、200、400、600mm の 4 面を有している壁供試体であり、B、C 供試体とも部材厚さを推定した。

供試体 D と E は、強度推定用の壁供試体である。

コンクリートの配合条件は表-2 のとおりである。強度管理用の円柱供試体 (以下、管理供試体) は、粗骨材最大寸法 (G_{max}) が 20 または 25mm のときは $\phi 100 \times 20\text{mm}$ 、 G_{max} 40mm のとき $\phi 125 \times 250\text{mm}$ とし、水中養生と気中養生を行なった。

3.2 測定装置

測定に用いたレーダ、衝撃弾性波とも 2 機種であり、レーダは装置 M と N、衝撃弾性波は装置 G と H と呼ぶ。衝撃弾性波は、両方とも鋼球で打撃する方法である。各装置の周波数を表-3 に示す。

表-3 測定装置の周波数

装置	周波数の範囲
レーダ	M 400 - 950 MHz
	N 1,500 MHz
衝撃弾性波	G 0.1 - 30 kHz
	H 1 - 60 kHz

3.3 供試体 A の含水率

供試体 A の含水率を次のように測定した。

供試体作製時に図-1 のように塩ビパイプにコンクリートを打ち込み、供試体と同じ養生を行なった。

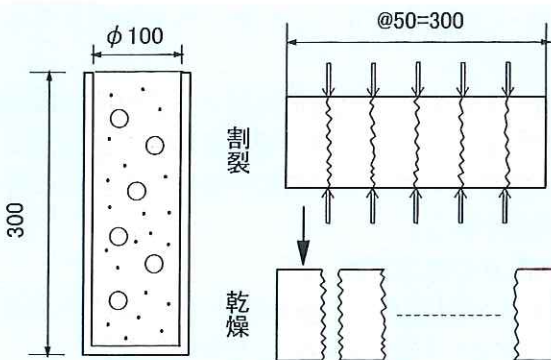


図-1 含水率の測定方法

所定の材齢時に塩ビパイプを取り除き、50mm 間隔で割裂し、質量を測定後直ちに乾燥機に入れ絶乾にして質量を測定して個々の含水率 w_i を求めた。その後、水中に浸漬して吸水率 w_{si} を求めた。

図-2 に含水率 w_i を吸水率 w_{si} で割った w_i/w_{si} (以下、相対含水率と呼ぶこととする) を示す。表面付近は乾燥しやすいので相対含水率が小さく、内部ほど大きくなっている。また材齢が進むほど小さくなっている。表面から 100mm 程度より内部では含水率の変化が小さく飽和に近いことがわかる。

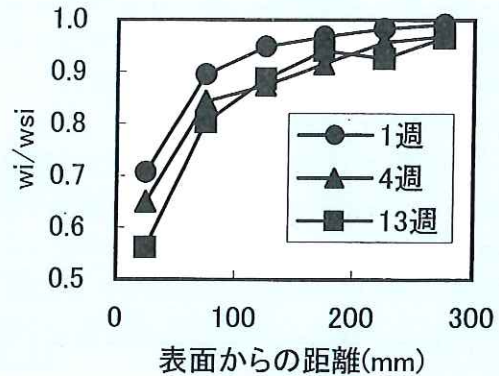


図-2 相対含水率分布

4. レーダ法の推定結果⁴⁾

4.1 電磁波速度の測定

(1) 電磁波速度分布

供試体 A の各鉄筋のかぶり厚さ c_i のときの反射時間 t_i を測定した。各鉄筋間の電磁波速度 V_i を式 (3) で求めた (図-3)。

$$V_i = \frac{2(c_i - c_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad (3)$$

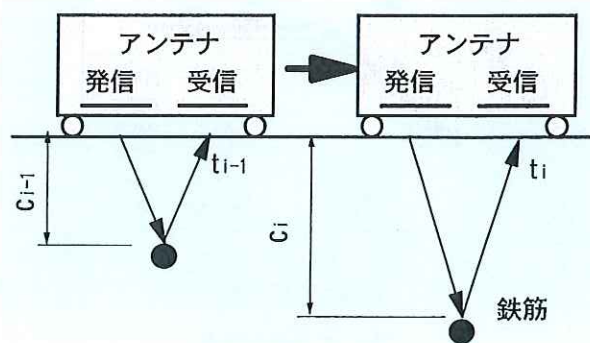


図-3 かぶり厚さと鉄筋からの反射時間

電磁波速度 V は式 (2) で表されるので、各鉄筋間の比誘電率 ϵ_i は次式となる。

$$\sqrt{\epsilon_i} = C/V_i \quad (4)$$

電磁波速度 V_i および比誘電率の平方根 $\sqrt{\epsilon_i}$ を求めると図-4 および 5 のとおりであった。

電磁波速度は、表面は速く、内部深くになるに従い遅くなり、ある距離からはほぼ一定

になっている。 $\sqrt{\epsilon_i}$ は逆に表面は小さく、内部ほど大きくなっている。 $\sqrt{\epsilon_i}$ の表面近くの分布を、図-2と図-5の近似曲線として式(5)で回帰した結果を図-5中に示した。この回帰結果から式(2)によって求めた電磁波速度が図-4の曲線である。

$$\sqrt{\epsilon_i} = K(ho + hi)^{1/2} + 1 \quad (5)$$

ここに、 K ：回帰係数、 ho ： $\sqrt{\epsilon_i} = 1$ になる距離を表す回帰係数(図-6)、 hi ：コンクリート表面から各鉄筋間の中心までの距離である。

(2) 相対含水率と比誘電率の関係

図-2の相対含水率の分布と、図-5の比誘電率の分布から、表面から同じ位置の相対含水率と比誘電率の値をプロットすると、図-7のようになった。両者の関係はほぼ線形関係になり、文献3)の

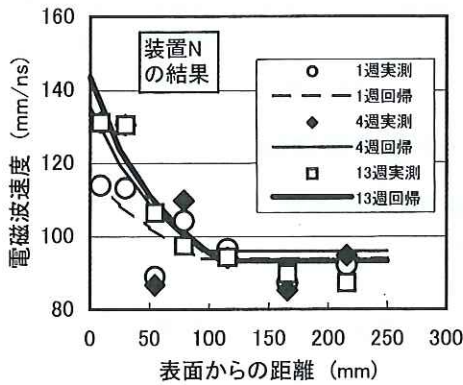


図-4 電磁波速度分布

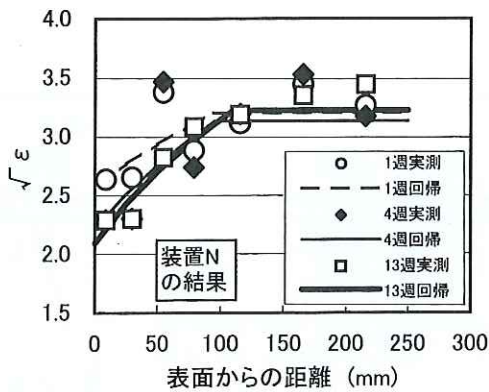


図-5 比誘電率分布

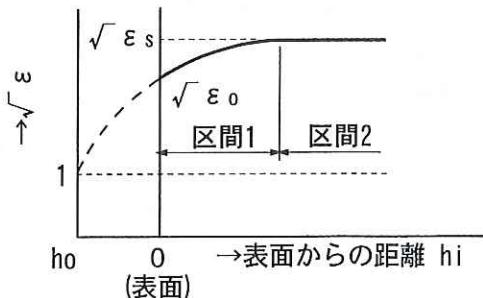


図-6 比誘電率分布の仮定

仮定と一致する。回帰すると次式が得られた。

$$\left. \begin{aligned} \text{装置 M} \quad \sqrt{\epsilon} &= 1.72w_i/w_{si} + 1.54 \\ \text{装置 N} \quad \sqrt{\epsilon} &= 2.34w_i/w_{si} + 1.03 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

図-7のように式(6)の切片は相対含水率が0の時の比誘電率の平方根 $\sqrt{\epsilon_0}$ を表している。同様に相対含水率 $w_i/w_{si} = 1$ のとき飽和の $\sqrt{\epsilon_s}$ となる。これまでの結果をまとめたのが表-4である。

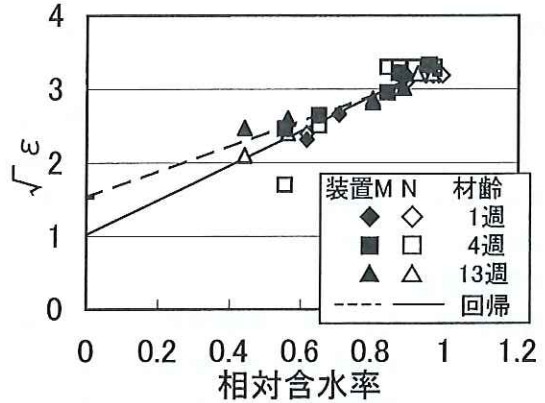


図-7 含水率と比誘電率の関係

表-4 式(6)から得られる比誘電率

相対含水率	0.4	1.0		備考	
	比誘電率 ϵ	$\sqrt{\epsilon_s}$	ϵ_s		
装置	M	5.0	3.26	10.6	文献3)
	M'	6.2	3.45	11.9	
	N	3.9	3.37	11.4	

通常、コンクリートの比誘電率 $\epsilon = 8 \sim 12$ 程度といわれており、今回の実験結果では相対含水率が1の時 $\epsilon = 11 \sim 12$ 程度であることから、これまでの上限値はほぼ飽和状態の値である。表面が乾燥している場合(相対含水率0.4~0.5程度)は $\epsilon = 4 \sim 6$ 程度になり、これまでの下限値よりもかなり小さい。

図-7のように相対含水率と $\sqrt{\epsilon}$ の間に線形関係があるということは、電磁波速度を測定することによりコンクリート内部の含水率を推定できる可能性がある。

4.2 厚さの推定方法

図-4の関係から、部材厚さ h およびかぶり厚さ c は次の手順で求めることができる。

式(7)が反射時間 t と厚さ h の関係の基本式となる。

$$\frac{t}{2} = \int_0^h \frac{dh}{V(h)} \quad (7)$$

(1) 速度分布を有する範囲 (区間 1) 内の厚さ

図-6のように速度分布を有する範囲を区間 1 とする。このとき、式 (7) の $V(h)$ は式 (2) である。式 (2) に含まれている $\sqrt{\varepsilon}$ は、ここでは式 (5) を仮定しているから、これを式 (7) に代入することにより式 (8) が得られる。

$$\frac{t}{2} = \frac{1}{C} \int_h^0 [K(h_o + h_i)^{1/2} + 1] dh \quad (8)$$

式 (8) から厚さと反射時間の関係は式 (9) となる。

$$t = \frac{2}{C} \left(\frac{2}{3} K[(h_o + h)^{3/2} - h_o^{3/2}] + h \right) \quad (9)$$

(2) 速度一定区間 (区間 2) の厚さ

まず、区間 1 (厚さ h_1) までの往復する時間 t_1 を式 (9) を用い $h \rightarrow h_1$ とおいて求める。

区間 2 内の往復時間 t_2 は式 (10) によって求められる。

$$t_2 = t - t_1 \quad (10)$$

区間 2 内の厚さ h_2 は式 (11) で求められる。

$$h_2 = V_2 \cdot t_2 / 2 \quad (11)$$

ここに、 V_2 : 図-4 の一定速度である。求める厚さは式 (12) となる。

$$h = h_1 + h_2 \quad (12)$$

4.3 部材厚さの推定結果

図-8 は部材厚さの推定結果である。コアの長さの実測値に対する推定値の比で示してある。図-4 の速度分布を用いて推定した場合は実測値とはほぼ一致しており、平均値 0.99 で ± 0.04 の範囲に入っていた。

しかし、速度に図-4 の内部の一定値を用いると

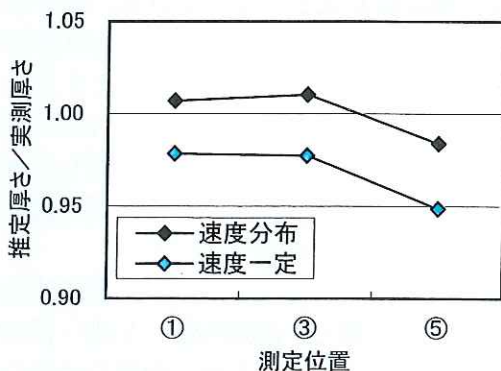


図-8 レーダ法による部材厚さ推定結果

0.95 \pm 0.06 であった。これは、表面付近の速度が速い部分が考慮されていないことによる。

4.4 かぶり厚さの推定結果

図-9 のかぶり厚さの推定の結果も、速度分布を考慮した場合は実測値にはほぼ一致し、0.98 \pm 0.03 であった。しかし、内部の一定値の速度を使うと実測値よりも 10~20% も小さくなり、部材厚さの場合よりもさらに小さく推定された。このことは、表面付近の速度分布の影響が大きく現れたためであり、かぶり厚さのように表面近傍の厚さを精度良く求めるには、今回のように表面付近の速度分布を精度良く求める必要があることを示している。

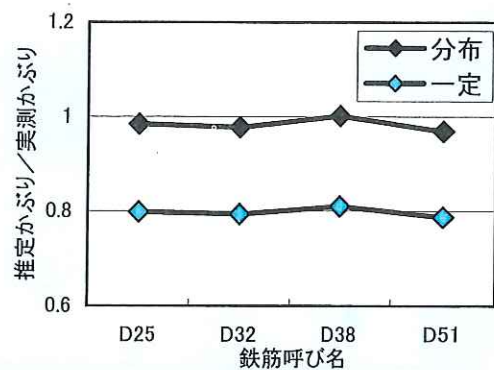


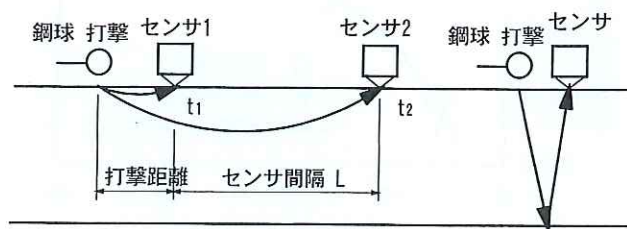
図-9 レーダ法によるかぶり厚さ推定結果

5. 衝撃弾性波法の推定結果

5.1 弾性波速度と反射時間の測定方法

表面弾性波速度の求め方を図-10 (a) のように、打撃距離とセンサ間隔を変化させて検討した。しかし、前報²⁾の超音波法のようにコンクリート内部の速度分布を求めるまでには至っていない。

検討の結果、表面弾性波速度の測定は、装置 G ではセンサ間距離 200mm、打撃距離 100 mm、装置 H では 300mm、50mm 程度とした。弾性波速度は、センサ間距離 L をセンサ 2 とセンサ 1 の時間差 ($t_2 - t_1$) で除して求めた。詳細は、装置 G については文献 5)、装置 H は文献 6) をご覧いただきたい。



(a) 表面弾性波速度の測定 (b) 反射時間の測定

図-10 衝撃弾性波法の測定方法

厚さや往復弾性波速度を求めるための反射時間は、図-10 (b) のように共振周波数を測定することによって求めた。

5.2 部材厚さの推定結果

供試体 A~C の部材厚さを式 (1) で求め、コア実測結果の比は図-11 のとおりであった。

測定範囲は 0.97 ± 0.04 であり、ほぼ良い推定値が得られている。

ただし、ほとんどの推定値が実測値より小さくなっているのは、表面弾性波速度を求めるときの距離をセンサ間距離とし、弾性波の伝搬経路を考慮していないため、遅く推定しているものと考えられる。

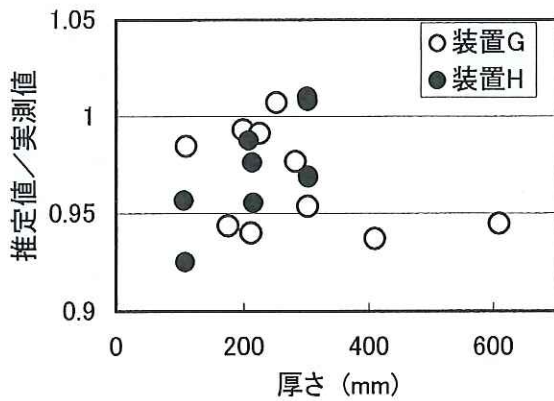


図-11 衝撃弾性波法による部材厚さ推定結果

5.3 圧縮強度の推定結果

壁供試体 D および E の上段、中段、下段で表面および往復弾性波速度を測定し、圧縮強度を推定した。推定方法、推定結果は以下のとおりである。

(1) 管理供試体の往復弾性波速度と圧縮強度の関係

図-12 に管理供試体の往復弾性波速度と圧縮強度の関係を示す。水中養生したものを対数回帰した結果、相関係数は非常に大きい。気中養生した

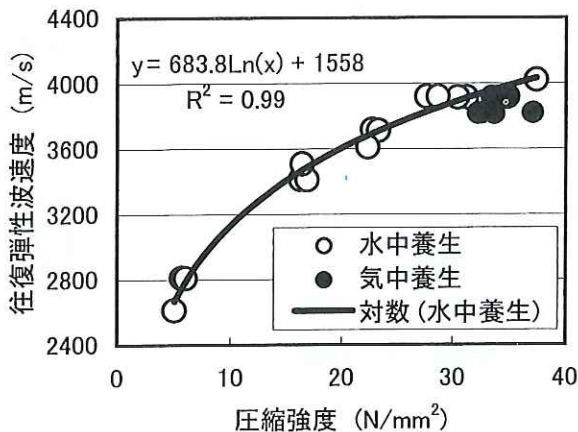


図-12 管理供試体の往復弾性波速度と圧縮強度の関係 (供試体 D)

ものの速度は水中養生のものよりわずかに遅い。
 (2) 壁供試体の表面弾性波速度と往復弾性波速度
 壁供試体の表面弾性波速度と往復弾性波速度を比較したのが図-13 である。両者はほぼ良い対応関係にあるものの、表面弾性波速度の方が極わずかではあるが速い傾向がある。

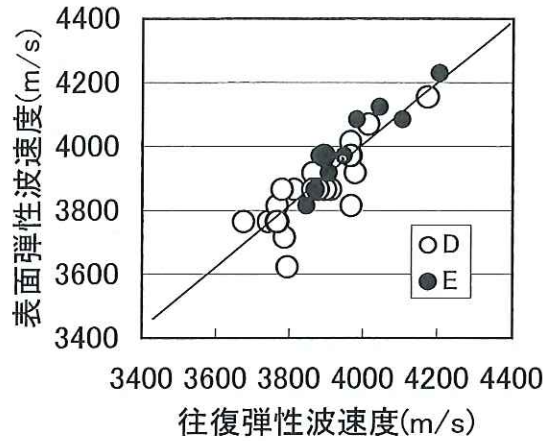
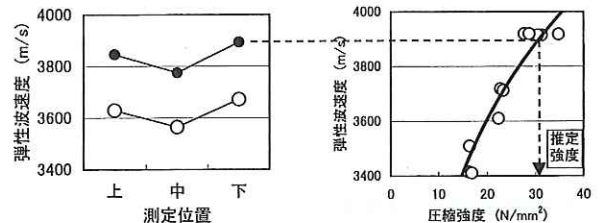


図-13 表面/往復弾性波速度の比較

(3) 圧縮強度の推定方法

圧縮強度の推定は、図-14 のように管理供試体で求めた往復弾性波速度と圧縮強度の関係から、壁供試体で得られた弾性波速度に対応する圧縮強度を求めるという方法で行なった。



(a) 壁供試体の弾性波速度の測定結果 (b) 管理供試体の弾性波速度と圧縮強度の関係

図-14 圧縮強度推定方法

(4) 圧縮強度の推定結果

推定結果をコア強度と比較したのが図-15 である。強度の低い部分ではほぼ一致しているが、高い部分では推定値が大きくなっている。推定強度とコア強度の比を、試験材齢、往復/表面弾性波速度ごとに平均値を求めると表-5 のようになった。材齢 7 日の場合は良い推定値が得られている。28 日の場合は、往復弾性波速度を用いたものが約 10%、表面弾性波速度を用いたものは 20% 程度大きな推定値になっている。

この原因としては、図-12 のように弾性波速度は乾燥していると遅く、湿潤状態だと速い傾向があるように、コンクリート表面と内部の品質の違いにより速度が異なっているものと考えられる。

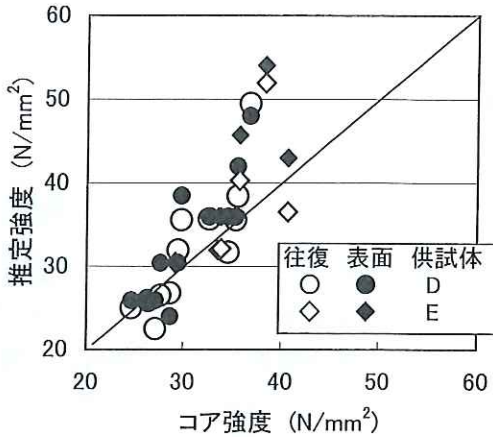


図-15 圧縮強度の推定結果

表-5 推定強度/コア強度比

材 齢	7 日		28 日	
	往復	表面	往復	表面
供試体 D	0.97	0.99	1.11	1.16
供試体 E	0.98	1.06	1.13	1.25
D+E	0.97	1.02	1.11	1.19

5.2でも触れたとおり、さらに精度を向上するには弾性波速度を求めるとき伝搬経路を考慮するなど詳細な検討が必要と考えられる。

6. まとめ

電磁波レーダ法、衝撃弾性波法を用いて部材厚さ、かぶり厚さ、圧縮強度の推定を行ない、以下のことが明らかになった。

電磁波レーダ法では、

- ①電磁波速度分布を求め、それを考慮することにより部材厚さ、かぶり厚さを精度よく推定することができた。
- ②比誘電率の平方根は含水率と線形関係にあり、コンクリート内部の電磁波速度の分布を求めることにより含水率の分布も求められる可能性がある。

衝撃弾性波法では、

- ③部材厚さ、圧縮強度の推定結果はほぼ良好であった。
- ④ただし、さらに精度を向上するためには、弾性波速度を求めるとき伝搬経路を考慮した詳細な検討が必要と考えられる。

最後に、レーダ法の検討は日本無線(株)の松本功氏、応用地質(株)の前川聡氏、衝撃弾性波法の検討は伊藤建設(株)の岩野聡史氏、松下インターテクノ(株)の後藤俊宏氏に担当していただいた。

参考文献

- 1) 森濱和正、富士岳、小林幸一、西山直洋：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, 2001.7
- 2) 森濱和正：超音波法によるコンクリート構造物検査方法の提案 - コンクリートの品質、部材厚さ、鉄筋かぶり、径の推定, 土木技術資料, Vol.43, No.7, pp.64-69, 2001.7
- 3) 森濱和正、笠井芳夫、湯浅昇：コンクリート内部の含水状態と比誘電率の関係, 日本非破壊検査協会平成11年春季大会講演概要集, pp.91-94, 1999.5
- 4) 前川聡、松本功、森濱和正：非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋の計測に関する研究その22 コンクリート内部の電磁波速度の分布, 日本非破壊検査協会平成13年秋季大会講演概要集, pp.107-110, 2001.10
- 5) 岩野聡史、極檀邦夫、境友昭、森濱和正：衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.547-552, 2001.7
- 6) Jiunn-Ming Lin and Mary Sansalone : Impact- Echo Response of Hollow Cylindrical Concrete Structures Surrounded by Soil and Rock : PartII- Experimental Studies, Geotechnical Testing Journal, Vol.17, No.2, pp.220-226, 1994.6

森濱和正*



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
Kazumasa MORIHAMA