

◆ 報文 ◆

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—

森濱和正*

1. まえがき

最近、高度成長期に建設された大量のコンクリート構造物の健全性に対する問題が顕在化しており、これらの構造物の維持管理方法の確立が緊急かつ重要な課題になっている。

一方、今後の課題として、新設時に十分な耐久性を確保しておくことが必要であり、そのために、まずは新設時に構造物自体が所要の性能を有しているかを確認する方法の確立が必要である。これまでのコンクリート構造物の検査は、一部の項目を除き間接的に行なわれているのが現状である。例えば、構造物の強度を知るために、構造物のコンクリートの強度を検査する必要がある。しかし実際のコンクリートの圧縮強度試験は、通常、コンクリートを打ち込む前に試料を採取して供試体を作製し、それを20°Cの水中で所定材齢まで養生し、強度試験を行なっている。しかしコンクリート強度は、締固めの程度や養生方法によっても異なるため、上記の通常行なわれている方法では構造物に打ち込まれた強度を表しているわけではない。そのため、構造物の品質を評価するには、構造物を直接評価できる方法が望まれている。

そこで、表-1のように非破壊試験による検査方法の確立を目指し¹⁾、(社)日本非破壊検査協会と共同研究を実施した。そのうち、本報では、超音波法による検討結果を述べる。

筆者は、本誌 Vol.41, No.2²⁾ (以下、前報)で、超音波法により部材厚さを正確に求めるには内部の音速分布を求めることが重要であり、その方法を提案した。コンクリートの品質は、音速と高い相関関係があることから、コンクリート内部の正確な音速分布が求められれば、コンクリート内部の品質は一定値ではなく、分布で推定できるものと考えた。ここで対象とするコンクリートの品質は、圧縮強度と、コンクリート表面近く(表層)の

表-1 非破壊試験による構造物自体の検査方法(提案)

検査項目		非破壊試験方法	検査時期
概観検査	配筋状態 内部状態	レーダ	竣工時
	速度(分布)	レーダ・超音波・ 弾性波	
	鉄筋のかぶり厚さ	レーダ・超音波	
	コンクリート 品質	超音波・弾性波	
	強度	超音波・弾性波	
	表層(表面) の品質	超音波・弾性波	
部材の厚さ		レーダ・超音波・ 弾性波	

耐久性に大きな影響を及ぼす大小さまざまな空隙量(細孔量)である。前報で提案した方法にはまだ実用化への課題として、コンクリート表面の超音波伝搬時間を探触子間隔を変化させながら測定する(以下、表面走査法と呼ぶ)とき、測定する距離や点数をどの程度にすればよいのか、音速分布の解析に当たってその形状をどう仮定するのか、などの問題が残っていた。

そこで、本報ではまず、前報に引き続き音速分布の推定方法について検討した。次に、その音速分布からコンクリートの品質、部材厚さ、鉄筋のかぶり・径の推定方法の提案を行なった。

2. 検討内容

音速分布や強度などを推定する方法を確立するための基礎実験と、この推定方法の実構造物への適用可能性(適用実験)について検討を行なった。

2.1 基礎実験

図-1の3種類の供試体を用いて推定方法を検討した。供試体Aは、舗装版を想定したものであり、底面が路盤などに接して乾燥しにくいことを考慮して底面および側面は塗装した。供試体Bは、床版を想定して断面を変化させ、上下面を乾燥状態とした。A、Bとも鉄筋が音速に及ぼす影響、鉄筋のかぶり・径の推定を検討するために、鉄筋径、かぶり、間隔を変化させて鉄筋を配置している。供試体Cは無筋の壁供試体であり、4種類の厚さに分かれている。使用したコンクリートは、呼び

Proposal of Inspection Methods on Concrete Structures using Ultrasonic Method -Estimation of Concrete Qualities, Thickness of Concrete Members, Cover and Diameter of Re-Bars-

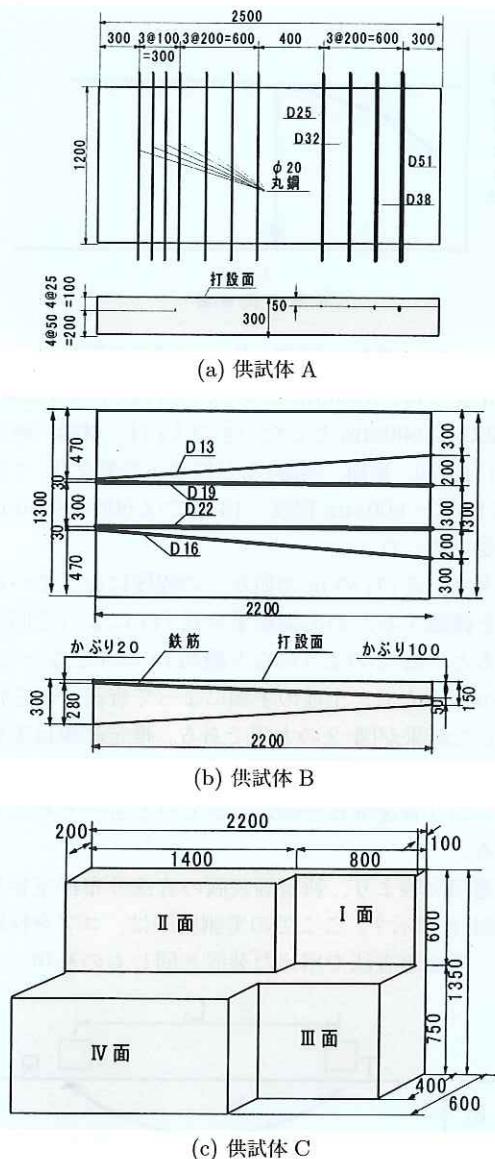


図-1 基礎実験に用いた供試体
強度 24、スランプ 8cm、空気量 4.5% のレディーミクストコンクリートである。

2.2 適用実験

以下に示す 3 種類の構造物、供試体を用いた。
一つ目は、16 年経過した厚さ 200mm、高さ 2,050mm、幅 2,800mm の壁供試体であり、普通ポルトランドセメントを用い脱型材齢が 2 日と 7 日の N2、N7 供試体、高炉セメント B 種を使用し 7 日で脱型した BB7 供試体の 3 体である。いずれも呼び強度 18、スランプ 18cm、空気量 4% のレディーミクストコンクリートを使用した。

二つ目は、コンクリート舗装版である。25 年間

供用中の既設舗装版と、新設舗装版、新設舗装版と同じ材料を使い同じ層構成の模擬供試体の 3 種類である。舗装版の厚さは 300mm、路盤は 40mm のアスファルト中間層とその下に厚さ 150mm の粒調碎石路盤がある。舗装版内部は既設舗装版に 125 × 260mm、新設舗装版に 150 × 150mm の D6 の鉄筋網が入っている。呼び強度は曲げ 4.5、スランプ 2.5cm の舗装用コンクリートが使用されている。

三つ目は、強度推定を目的とした厚さ 200mm、高さ 1,500mm、幅 1,600mm の壁供試体で、粗骨材最大寸法 (G_{\max}) 25mm の供試体 D を 2 体と、 G_{\max} 40mm の供試体 E である。使用したコンクリートの呼び強度はいずれも 24、スランプ 8cm である。

3. 検討結果

3.1 音速分布の推定方法

音速分布の推定方法の概略は前報から次のとおりである。

- ① 表面走査法により探触子間距離 L_i を数点変化させたときの伝搬時間 t_i を測定する。
- ② 音速分布を式 (1) と仮定し、 L_i と t_i の関係から変分法により式 (1) の係数 K 、 h_0 、 m を求め、音速分布を求める (図-3 参照)。

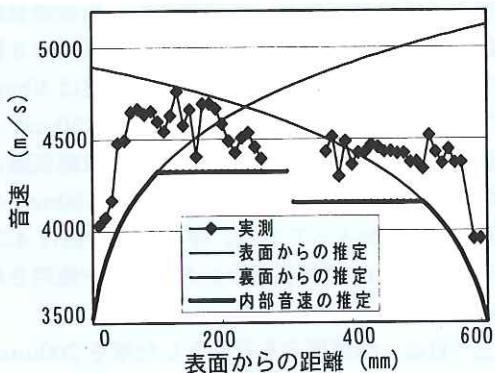
$$V(h) = K(h_0 + h_i)^{1/2m} \quad (1)$$

ここに、 K 、 h_0 、 m は解析によって求められる係数である。 h_0 は、音速分布を外挿し音速が 0 になった位置を原点とし、原点からコンクリート表面までの距離を表す係数である。 m は、本解析では正の整数である。 h_i は、コンクリート表面からの距離である。

- ③ このとき m の値は、測定した伝搬時間 t_i と計算した伝搬時間 t_{ical} の差の平方和が最小となる最尤値を求める。

基礎実験において前報の方法により内部の音速分布を推定した結果を図-2 の細線で示した。また図中には、測定後に供試体からコアを採取し、孔の間の音速を特殊な超音波探触子を用いて直接透過法により実測した結果も示した。実測結果は、表面から内部深くなるに従い速くなっているが、100mm 程度より内部はほぼ一定になっている。

この結果は、コンクリートの表面の品質は内部

図-2 音速分布の実測値と推定値の比較
(供試体 C の IV 面)

より低いという一般的な傾向を示している。それに対し推定結果は、深くなるほど速くなっている。これは、推定方法が表面付近の音速の変化している部分を外挿して求めていることによる。

そこで、今回、音速分布を図-3のように仮定した。表面付近の音速が変化している部分を「表層」と呼ぶこととし、その厚さを「表層厚さ」と呼ぶ。表層より内部の音速がほぼ一定の部分の音速を「内部音速」と呼ぶ。

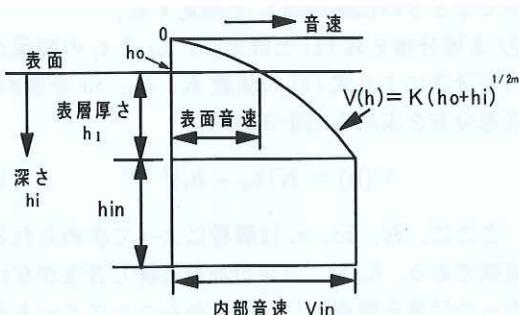


図-3 音速分布の仮定

表層の音速分布は前報の方法で求めることができるので、表層厚さを次の手順で求めることにより音速分布が決まる。

- ① 表面走査法により探触子間距離 L_i を数点変化させたときの伝搬時間 t_i を測定する。
- ② 見かけの音速 ($= L_i/t_i$) と L_i の関係から見かけの音速がほぼ一定となる距離 L_I を求める(図-4)。
- ③ 距離 L_I のときの最速経路を求め³⁾、経路の最深部までの深さ h_I が表層厚さとなる(図-5)。
- ④ 内部音速は、式(1)の $h_i = h_I$ のときの音速である。

①の表面走査法による実際の測定距離は、1,000

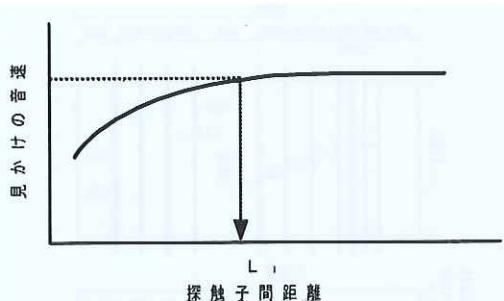


図-4 探触子間距離と見かけの音速の関係

mmまでは、100mmピッチ、それ以上は1,200、1,600、2,000mmとした。②の L_I は、材齢、測定面(打設面、底面、側面)などによって異なり、4週では400~600mm程度、13週では600~800mm程度であった。

次に、式(1)の m の値がどの程度になっているかを確認するため実測結果を式(1)によって回帰すると、表-2のようになり概ね $m = 5$ となった。

$m = 5$ とし、上述の手順によって音速分布を推定した結果が図-2の太線である。推定結果は実測値より500m/s程度遅いものの、形状はほぼ一致しており音速分布を推定できているものと考えられる。

適用実験より、新設舗装版の音速分布推定結果を図-6に示す。ここでの実測結果は、コアを採取し、表面走査法で用いた装置と同じものを用いた

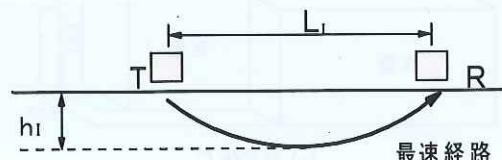


図-5 表層厚さ

表-2 実測値の回帰結果

供試体	測定面	K	h_o	m
A	打設面	2,806	28.2	5.00
B	打設面	2,921	42.5	5.22
C	I面 表面	2,214	167.7	4.25
	I面 裏面	2,171	31.8	3.30
	II面 表面	2,341	25.4	3.15
	II面 裏面	2,806	156.1	5.29
C	III面 表面	3,040	35.0	5.21
	III面 裏面	2,953	33.9	5.06
	IV面 表面	3,076	6.6	5.43
	IV面 裏面	2,925	16.5	5.49

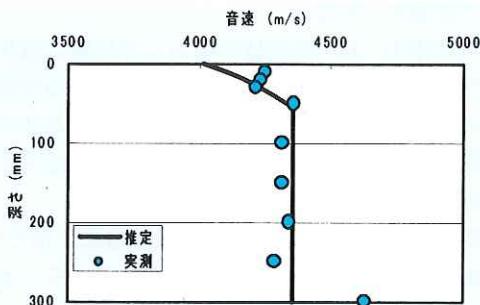


図-6 補装版の音速分布

場合のコアの側面の透過音速である。推定結果は実測値によく一致していることがわかる。

なお、表面走査法によって音速を測定するには、事前に鉄筋の影響を受けないように電磁波レーダなどにより配筋状態を把握しておき、鉄筋に対して斜めに測定線を設ける⁴⁾。また探触子の大きさなどによって探触子間距離を補正しなければならない⁵⁾。

3.2 強度推定方法

上記の手順で求めた音速分布をもとにコンクリートの圧縮強度の推定結果について述べる。

コンクリート表層の音速分布は、含水率の影響や強度発現の違いによって変化する。そのため、強度推定には安定した音速が得られる内部音速を用いることとした。コンクリートの音速は強度のみではなく、使用材料や配合などさまざまな要因によって変化するため、強度を推定するための基準とした音速と強度の関係は、内部の状態に近い封緘養生した管理用供試体の透過音速と圧縮強度の関係を用いることとした(図-7)。

強度の推定は、図-7のように内部音速に対応する圧縮強度を求めるという方法で行なった。

供試体Cの強度推定結果は図-8のとおりである。壁供試体の上、中、下部を測定した。縦軸は

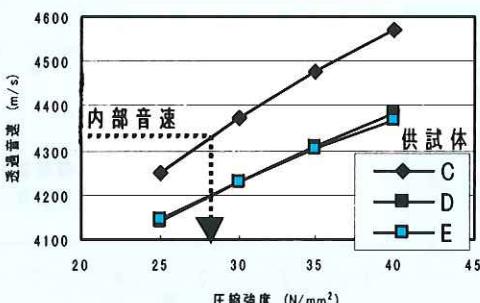


図-7 管理供試体の圧縮強度と音速の関係

コアの圧縮強度に対する推定強度の比で表している。Ⅱ面を除き、上部の推定値は0.7~0.8程度と小さいが、下部はほぼコア強度と一致している。基準となる音速は管理用供試体から求めており、コンクリートがよく充填されたときの音速と考えられる。一方、壁の上部はブリーディングなどにより品質が劣っているので音速が遅く推定強度が小さくなつたこと、下部ではよく締め固まつてるので精度よく強度が推定できたものと考えられる。

適用実験の供試体D, Eの結果も図-9のように図-8とほぼ同様の傾向である。この方法により、下部のよく締め固まつた部分のコンクリート強度を、コア強度に対して±15%以内で推定することができそうである。

3.3 有効細孔量と音速分布の関係

次に耐久性に大きな影響を及ぼす細孔量と音速分布の関係についても検討した。ここで細孔量は、骨材の影響を取り除いた「有効細孔量」を用いた。

図-10のように有効細孔量が増えると音速は低下するという傾向があることがわかる。有効細孔量と強度には強い相関関係があることがわかっている⁶⁾。強度と音速も強い相関関係があることは

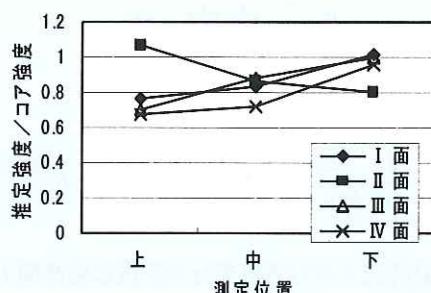


図-8 強度推定結果(供試体C)

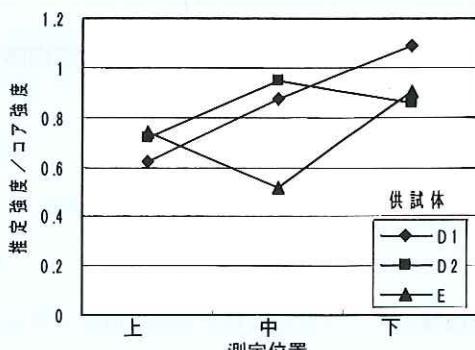


図-9 強度推定結果(供試体D, E)

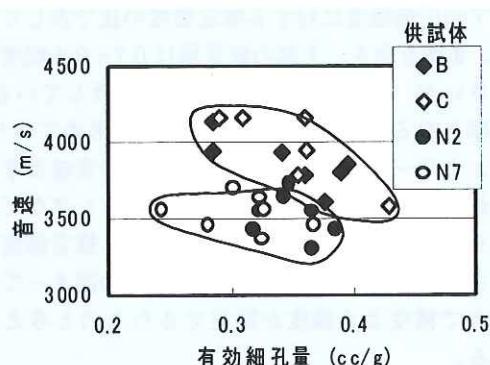


図-10 有効細孔量と音速の関係

よく知られている。従って、推定した音速分布は有効細孔量も間接的に推定することができ、耐久性を評価する重要な指標になり得るものと考えられる。

3.4 部材厚さ

図-3の音速分布を有する場合、コンクリート部材の往復反射時間を測定し、次の手順で厚さを求めることができる。

① 表層部分(表層厚さ h_I は 3.1 節により既知)の往復伝搬時間 t_I は式(2)となり、 $V(h)$ に式(1)を代入して解くことにより式(3)によって求められる。

$$\frac{t_I}{2} = \int_{h_0}^{h_0+h_I} \frac{dh}{V(h)} \quad (2)$$

$$t_I = \frac{1}{K} \frac{2m}{2m-1} \left[(h_0 + h_I)^{\frac{2m-1}{2m}} - h_0^{\frac{2m-1}{2m}} \right] \quad (3)$$

② 反射時間 t から表層部分の往復伝搬時間 t_I を引いた差 tin を求める。

$$tin = t - t_I \quad (4)$$

③ tin と内部音速 Vin から式(5)によって内部の厚さ hin を求める。

$$hin = Vin \cdot tin / 2 \quad (5)$$

④ 部材厚さ h は式(6)によって求められる。

$$h = h_I + hin \quad (6)$$

壁部材のように音速分布が対称と仮定できる場合には、式(4)の t を $t/2$ とし、式(5)、(6)によつて $1/2$ の厚さを求め、それを 2 倍することにより

厚さが求められる。

供試体 B、C、新設舗装版および模擬供試体の厚さ推定結果を、図-11~13 にコアによる実測長さに対する推定厚さ比で示す。供試体 B および模擬供試体は実測値に対して 3%以内で推定できている。

供試体 C は上、中、下部の推定結果を示した。I 面の上、中部はかなり小さく推定されているものの、そのほかは精度よく推定できている。

新設舗装版の推定値が 10%程度厚くなっているのは、アスファルト中間層までの反射時間が測

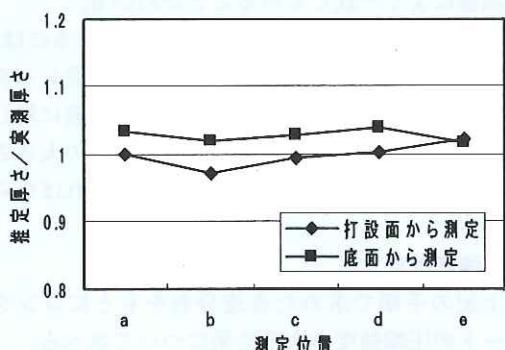


図-11 部材厚さの推定値(供試体 B)

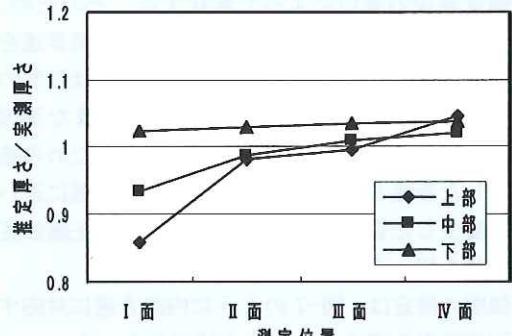


図-12 部材厚さの推定値(供試体 C)

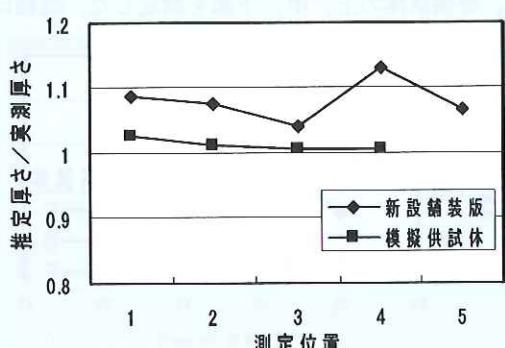


図-13 部材厚さの推定値(新設舗装版、模擬供試体)

定されたためと考えられる。

3.5 鉄筋のかぶり厚さ、径の求め方

鉄筋かぶり厚さ c は、鉄筋上面からの反射時間から求める。鉄筋径は、鉄筋内を周回して戻ってくる時間と鉄筋上面からの反射時間の差と、鉄筋の音速から鉄筋径を求めることができる。

かぶり厚さ c は、鉄筋が表層内にある場合、式(2)の t_I に鉄筋上面からの反射時間 t 、 h_I にかぶり c とすることにより式(7)で求められる。

$$c = \left[\frac{2m-1}{2m} \frac{K \cdot t}{2} + h_0 \frac{\frac{2m-1}{2m}}{2} \right]^{\frac{2m}{2m-1}} \quad (7)$$

供試体 A のかぶりが約 50mm の D25、D32、D38、D51 の鉄筋の、かぶりと径の推定を行なった結果を図-14 および表-3 に示す。図-14 は、反射波の周波数スペクトルである。ピークが 2 つあり、39kHz が鉄筋上面を、19kHz が鉄筋内を周回して戻ってきた波と考えられる。周波数の逆数が反射時間となる。この結果からかぶりと鉄筋径を求めた結果が表-3 である⁷⁾。

鉄筋径は、呼び名の ±1mm で推定できている。鉄筋の種類は 3mm ピッチであり、実用上問題ない範囲で推定できている。かぶりも 5mm 以内と精度よく推定できている。

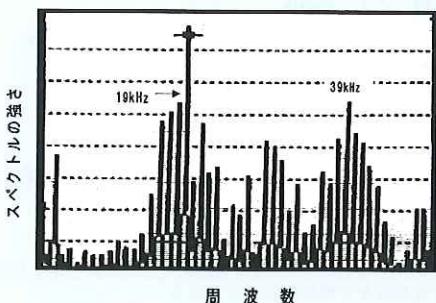


図-14 鉄筋からの反射スペクトル

表-3 鉄筋かぶり・径の推定

鉄筋呼び名	実測かぶり (mm)	推定した径 (mm)	推定かぶり (mm)
D25	52.8	26	50
D32	53.2	33	48
D38	53.9	39	51
D51	51.6	50	51

4. まとめ

超音波法によるコンクリート内部の音速分布の求め方を提案した。音速分布を図-3 のように仮定し、表面走査法による伝搬時間の測定は表層厚さが求められる程度でいいことが明らかになった。具体的には、探触子間隔を 100mm ずつ増やしていき 1,000mm 程度まで測定すると図-3 の音速分布を求めることができる。この分布を用いてコンクリートの品質、部材厚さ、鉄筋かぶり厚さと、鉄筋径の推定方法も提案し、精度よく推定できることが確認された。

今後、現場への適用を検討し、所要の性能を有するコンクリート構造物の建設に役立てる予定である。

参考文献

- 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講演会論文集、Vol.23, No.1, pp.511-516, 2001.7
- 森濱和正：超音波による正確なコンクリート版厚の測定方法、土木技術資料、Vol.41, No.2, pp.38-43, 1999.2
- 前掲 2), pp.40, 式 (9.3)
- 山口達夫、山口哲夫、奥紀仁、坂本一、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 7 コンクリートの表面の音速測定に及ぼす鉄筋の影響、日本非破壊検査協会 平成 12 年春季大会講演概要集, pp.77-78, 2000.5
- 森濱和正、山口哲夫、南康雄、廣瀬正行、柏瀬一彦、坂本一、奥紀仁：同上、その 8 超音波による表面伝播時間の測定における探触子の影響、同秋季大会講演概要集, pp.259-260, 2000.11
- 例えば、湯浅昇：RC 構造物を守る「表層コンクリート」の研究、セメント・コンクリート、No.621, pp.44-50, 1998.11
- 山口達夫、山口哲夫、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 5 超音波法による鉄筋径とかぶりの計測、日本非破壊検査協会 平成 12 年春季大会講演概要集, pp.73-74, 2000.5

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)主任研究員
Kazumasa MORIHAMA