

◆新しい探査技術特集◆

超音波による正確なコンクリート版厚の測定方法

森濱和正*

1. まえがき

コンクリートの舗装版、床版などの厚さを検査するには、コアを抜いて直接測定するか、レベルなどにより間接的に測定するのが通常である。ところが、コア抜きはひび割れの誘発や耐力の低下をきたす恐れがあるし、補修を必要とする。レベルによる方法は、事前に位置を決めておいて随時測定する必要があり、サンプルをランダムに採取するという検査の原則から逸脱している。

そこで本報文では、超音波による非破壊試験によって、検査にも適用できるほど精度の高い版厚測定方法について基本的な検討を行ったものである。

まず2章では、これまで一般的に行われている測定法(以下、従来法と呼ぶ)の問題点について検討した。従来法では数%の誤差は避けられないが、その原因は版厚の計算に用いるコンクリートの音速の測定に問題があることを指摘した。

3章では、正確な音速を求めるため、版内の音速を分布としてとらえ(以下、音速分布と呼ぶ)、その求め方を提案した(以下、提案法と呼ぶ)。

4章では、2例の実測例について提案法による音速分布および版厚の結果を紹介し、高い精度で版厚を測定できることを明らかにした。

2. 従来法とその問題点

2.1 従来法による版厚の求め方

従来法による版厚の求め方は以下のとおりである。
① 図-1のように表面の発振探触子から発せられた超音波は、底面で反射して表面に達し、受振探触子によって受振される。この往復時間を反射波到達時間 t と呼び、これを測定する。

② 版厚は式(1)によって求めることになる。

$$h = \frac{1}{2}v \cdot t \quad (1)$$

ここに、 h : 版厚、 v : コンクリート版の音速、 t : 反射波到達時間

③ そのため、 v を知る必要がある。 v は、通常、図-2のように表面の2点間の距離 ℓ の伝播時間 ts を測定する。音速 v は式(2)によって求めている。

$$v = \frac{\ell}{ts} \quad (2)$$

2.2 従来法の問題点

ここで問題になるのが音速 v の求め方である。コンクリートの音速は使用材料、配合、材齢、含水状態などによって異なるので、図-2の距離 ℓ を変化させると、式(2)で求められる音速も変化することが知られている。表面が打設面の場合、 ℓ が長くなるほど v は大きくなる。この原因として、材料分離や、表面は乾燥しやすいが内部では常に湿潤に保たれており強度発現が大きいことなどから、表面近くでは音速が小さく、内部にいくほど大きくなることが考えられる。このようなことから従来法では、音速を特定するのが難しい。

3. 提案法の原理と方法

3.1 正確な音速分布を求めるための仮定

従来法の問題に対しては、版内の音速は一定で

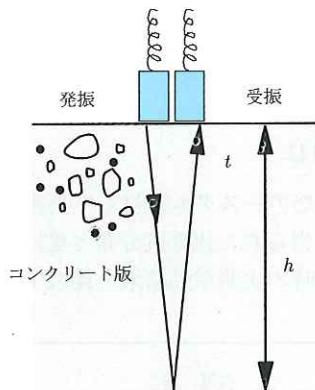


図-1 超音波による版厚の測定法

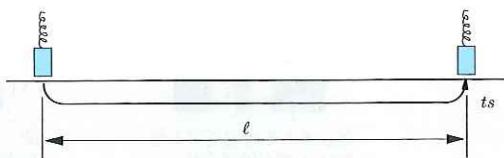


図-2 通常のコンクリート音速の求め方

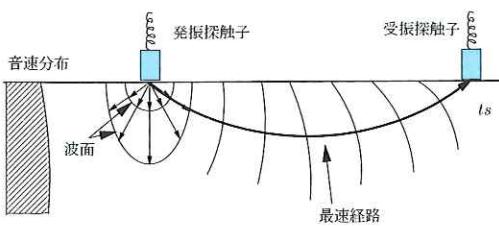


図-3 超音波の伝わり方

ではなく、変化していること、それに伴い超音波は表面ではなく内部を伝播すると考えることにした。

つまり、版内を伝播する場合、図-3のように発振探触子から発せられた超音波は、ホイヘンスの原理により、波面に垂直に伝わっていく。そして、受振探触子に最初に到達するのは、フェルマーの原理により、要する時間が極小(停留)値になる経路(以下、最速経路と呼ぶ)にそって進むと仮定した。ここで、コンクリート内の音速分布を求めるには、音速分布と最速経路、そのときの伝播時間、この3者の関係を明らかにする必要がある。

3.2 伝播時間、最速経路の求め方

図-3の左のような音速分布を有するコンクリート内に超音波を発振したときの最速経路を求める問題は、重力作用下で質点が2点間を最短時間ですべり落ちるときに描く曲線(最速降下線)を求める問題と同じように考えることができる。この問題を解く方法に変分法¹⁾がある。

(1) 伝播時間の求め方

図-4(a)のように座標系をとり、版厚 h のコンクリート版があり、版内の音速分布を $v(x)$ とする。 $v(x)$ をここでは、式(3.1)~(3.3)の3種類を仮定し、 $v(x) = 0$ の点を原点とし、原点から版表面までの距離を ho 、表面から版の深さ方向の距離を hi とする。

$$v(x) = K \cdot x = K(ho + hi) \quad (3.1)$$

$$v(x) = Kx^{\frac{1}{2}} = K(ho + hi)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

$$v(x) = K \cdot x^{\frac{1}{2m}} = K(ho + hi)^{\frac{1}{2m}} \quad (3.3)$$

なお、 K および ho は定数である。式(3.1)は、音速が厚さに対して直線分布と考えた場合である。式(3.2)は、 $1/2$ 乗分布とした。式(3.3)は式(3.2)からさらに材齢の影響、乾燥の影響などを考慮するため $1/2m$ 乗分布を当てはめてみた。

また、図(b)のようにコンクリート版表面のAB

間の超音波伝播時間を t_s とする。

微小な長さ ds は式(4)となる。

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sqrt{1 + y'^2} dx \quad (4)$$

ただし、 $y' = dy/dx$

ds を超音波が伝播するに必要な時間 dt は、式(5)となる。

$$dt = \frac{ds}{v(x)} = \sqrt{\frac{1 + y'^2}{v^2(x)}} dx \quad (5)$$

したがって、伝播時間 t_s は式(6)によって求められる。

$$t_s = \int_A^B \sqrt{\frac{1 + y'^2}{v^2(x)}} dx \quad (6)$$

(2) 変分法

式(6)には、 x と x に関する導関数 $y' = dy/dx$ が含まれている。一般に、関数 $f(x, y, y')$ のように関数が含まれている関数を汎関数という。汎関数の極値(停留値)を求める問題が変分法である。

汎関数の停留値を与える関数 $f(x)$ が満たさなければならない必要条件がオイラーの方程式(7)である。

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) - \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

ただし、 $F = \int f(x, y, y') dx$

積分 F が x と y' だけの関数で y を含まないと、 $\partial F / \partial y = 0$ であるから、

$$\left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) = C \quad (C \text{は定数}) \quad (8)$$

となる。

(3) 最速経路の求め方

最速経路は、式(6)の x と y の関係を求めることである(図-4(b))。そのためには汎関数である式(6)の極値を求めることになるので、変分法により解析することにした。

式(6)に式(3)を代入し、式(8)を解くことによって、音速分布が式(3.1)のときの最速経路は、

$$y = -\sqrt{r^2 - x^2} \quad (9.1)$$

となる。式(9.1)のように音速が直線分布の場合の最速経路は半径 r の円弧を描く。

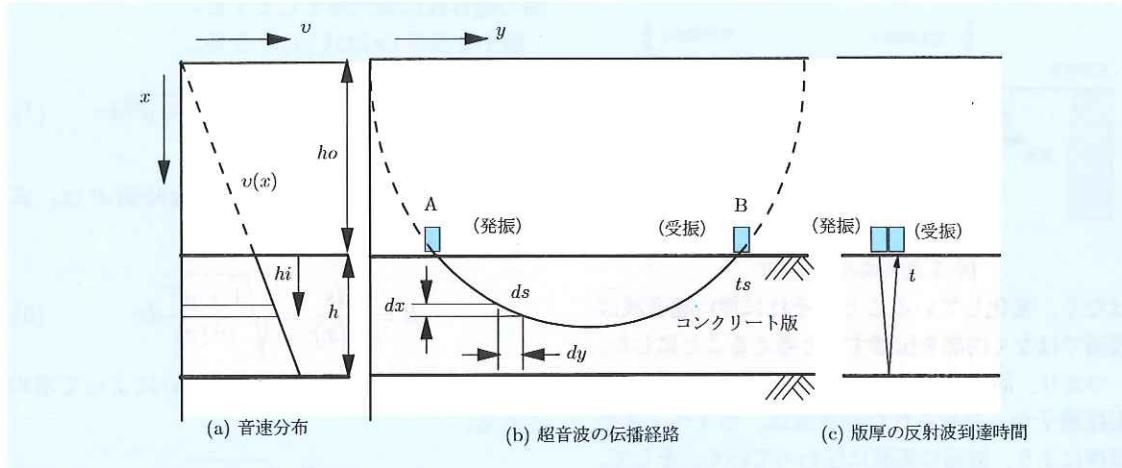


図-4 音速分布と超音波の伝播経路

式(3.2)の場合についても同様に求めると、式(9.2)のように半径 a の円が回転角 θ としたときのサイクロイドとなる。

$$\begin{aligned} x &= a(1 - \cos \theta) \\ y &= a(\theta - \sin \theta) \end{aligned} \quad (9.2)$$

式(3.3)の場合は、

$$\begin{aligned} y &= -2m \sum_{j=0}^{m-1} \left(A_j a^{2j} x^{\frac{2m-2j-1}{2m}} \right) \sqrt{a^2 - x^{\frac{1}{m}}} \\ &+ 2m \frac{(2m-1)!!}{(2m)!!} a^{2m} \arcsin \frac{x^{\frac{1}{m}}}{a} \end{aligned} \quad (9.3)$$

となる。ただし、 m は正の整数。

$$\begin{aligned} A_j &= \underbrace{\frac{(2m-1)!}{(2m)!}}_{j=0} + \underbrace{\frac{(2m-1)(2m-3)!}{(2m)(2m-2)!}}_{j=1} \\ &+ \underbrace{\frac{(2m-1)(2m-3)(2m-5)!}{(2m)(2m-2)(2m-4)!}}_{j=2} + \dots \\ &+ \underbrace{\frac{(2m-1)!!}{(2m)!!}}_{j=m-1} = \frac{1}{2m} + \frac{2m-1}{2m} \frac{1}{2m-2} \\ &+ \frac{(2m-1)(2m-3)}{(2m)(2m-2)} \frac{1}{2m-4} + \dots \\ &+ \frac{(2m-1)(2m-3)\cdots 3 \cdot 1}{(2m)(2m-2)\cdots 4 \cdot 2} \\ \frac{(2m-1)!!}{(2m)!!} &= \frac{(2m-1)(2m-3)\cdots 3 \cdot 1}{(2m)(2m-2)\cdots 4 \cdot 2} \end{aligned}$$

3.3 音速分布の求め方

音速分布を求めるには、式(3.1)～(3.3)の K 、 h_0 および m を求める必要がある。これらは、以下の手順で求めることができる。

- ① 版表面の2点間の超音波伝播時間 t_s を、距離を変化させ何点か計測する。
- ② 式(3.1)～(3.3)の K 、 h_0 、 m を仮定し、 $v(x)$ を求める。
- ③ 式(9.1)～(9.3)の r 、 a を仮定し、最速経路を求める。
- ④ ③で求めた最速経路の伝播時間 $tscal$ を式(6)によって求める。
- ⑤ ②～④の計算を繰返し、 $\sum(t_s - tscal)^2$ が最小となる K 、 h_0 および m を求めれば、それが音速分布の最尤値を与えることになる。

3.4 版厚の求め方

版厚は、以下の手順で求める。

- ① 版厚の往復の反射波到達時間 t を測定する(図-4(c))。
- ② 反射波到達時間は版内の音速分布に依存し、式(10)によって求められる(図-4(a))。

$$t = 2 \int_{h_0}^{h_0+h} \frac{dx}{v(x)} \quad (10)$$

- ③ 版厚は、式(10)に前節で求めた $v(x)$ を代入することにより式(11.1)～(11.3)によって求められる。

$v(x)$ が式(3.1)の場合

$$t = 2 \int_{h_0}^{h_0+h} \frac{dx}{K \cdot x} = \frac{2}{K} \ln \left(1 + \frac{h}{h_0} \right)$$

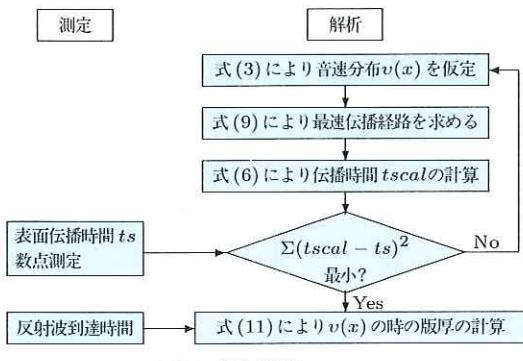


図-5 版厚解析フロー

であり、

$$h = ho \left\{ \exp \left(\frac{K \cdot t}{2} \right) - 1 \right\} \quad (11.1)$$

となる。同様に、式(3.2)の場合

$$h = \left(\frac{K \cdot t}{4} + \sqrt{ho} \right)^2 - ho \quad (11.2)$$

式(3.3)の場合

$$h = \left(\frac{2m-1}{2m} \frac{K \cdot t}{2} + ho^{\frac{2m-1}{2m}} \right)^{\frac{2m}{2m-1}} - ho \quad (11.3)$$

3.5 版厚解析手順

以上のことから、版厚は図-5のフローによって求めることができる。測定するのは、①版表面の2点間の伝播時間 ts を数点と、②求めたい版厚位置の反射波到達時間 t である。

解析は、音速分布 $v(x)$ を仮定し、表面の2点間の音速測定と同じ距離のときの最速経路と、そのときの伝播時間の計算値 $tscal$ が ts に最も近いときの $v(x)$ を求める。これをもとに、反射波の到達時間が t になるときの版厚を式(11.1)～(11.3)によって求める。

4. 実験結果

4.1 実験方法

(1) 供試体

用いた供試体の1例目は、アスファルトの排水性舗装上に作製した無筋のコンクリート版供試体である。供試体の大きさは、厚さ 250mm、縦 1,000mm、横 2,000mm である(図-6)。使用したコンクリートは最大寸法 20mm の粗骨材を使用し、高性能 A E 減水剤を混和した粘性の高いものであ

る。打設後雨などによる乾湿の繰返しを受けないよう供試体をシートで覆った。また、打設面のみから一方で乾燥するよう、湿布養生後に側面にゴム系塗料を塗布し、下面には打設前にビニールシートを敷いておいた。

2 例目は、約 20 年供用されている連続鉄筋コンクリート舗装版(以下、単に舗装版)である(図-7)。版内には、レーザーによる非破壊試験の結果、ほぼ基準(セメントコンクリート舗装要綱)どおりに鉄筋が入っていた。

(2) 表面および版厚の伝播時間の測定

版供試体については、音速分布を求めるため、表面の2点間の伝播時間を測定した。測定は対角線上の中心から両側に 50～1,000mm(測定長 100～2,000mm)の 10 点とした(図-6)。側面からの伝播時間も測定した(図-6)。これらの測定は、コンクリート打設後 7、15、28、56、70、90 日の各材齢で行った。版厚は、中央で 42、56 日に測定した。

舗装版の版厚は端部から 800mm の位置で、約 5m 間隔に 5 点測定した。表面の伝播時間は、版厚測定箇所と同じ 5 箇所で、横断面方向に測定間隔 400、1,000、2,000mm の 3 点を測定した。測点は鉄筋の間に設定した。

4.2 版供試体の測定および解析結果

(1) 音速分布の解析結果

音速分布の解析結果および側面から求めた音速は図-8 に示すようにほぼ均一に分布している。ただし、側面から求めた音速は、測定距離/伝播時間によって求めた。

解析によって求めた音速分布は、側面からの場合とほぼ一致しているものの、直線分布を仮定した場合、側面から測定した音速の傾きよりわずかに大きくなっている。1/2 乗分布および 1/2m 乗分布の場合、側面からの場合とほぼ同じ傾きになっている。解析によって求めた最速経路は図-9 のようになつた。

(2) 版厚解析結果

版中央の解析によって求めた版厚は表-1 のとおりであった。従来法では極めて高い精度で測定されていることが分かる。このときの表面の音速は、測定距離 400mm で 4390m/s であった。提案法も直線分布の場合、実測値より 5% 大きく測定されたものの、1/2 乗および 1/2m 乗分布の場合は 1～2%

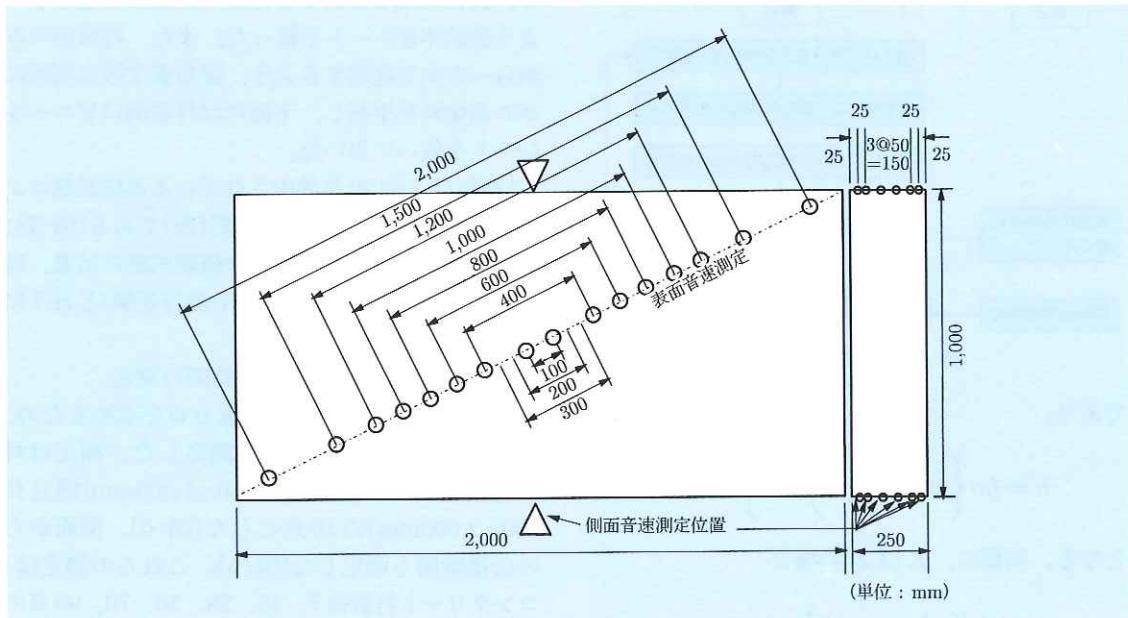


図-6 版供試体と音速測定位置(単位:mm)

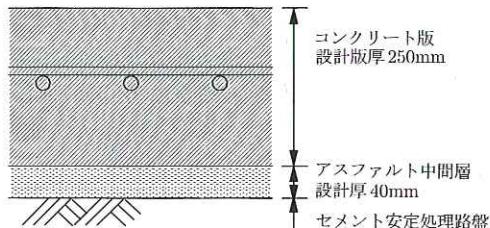


図-7 連続鉄筋コンクリート舗装(CRCP)の構造

以内という高精度で求めることができた。さらに、 $1/2m$ 乗分布の場合については、各材齢ごとに音速分布を求めたときの係数を直線回帰して求めた場合は実測値と一致した。 m の値は、各材齢とも $m = 3$ であった。

今回のように音速分布がほぼ均一な場合、従来法でも十分な精度で測定できることがわかる。しかしながら、コンクリート内の音速分布が今回のようにほぼ均一になるのはまれであり、一般には次に示す舗装版の測定例(図-10)のような分布を有する。

4.3 舗装版の測定および解析結果

舗装版の表面の伝播時間から求めた音速分布は図-10のようであった。図-8と比較して音速分布の傾きが大きくなっている。版厚の解析結果は表-2のとおりであった。

版厚は従来法では表面から音速を求める距離を

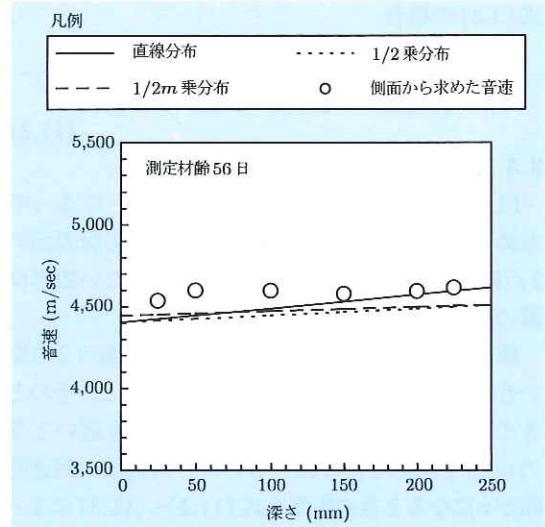


図-8 表面の伝播時間から求めた音速分布と側面から求めた音速

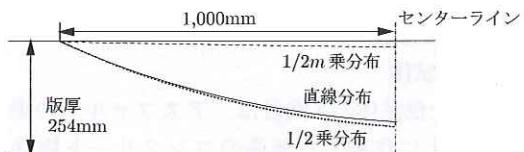


図-9 版供試体の最速経路(材齢 56 日)

一般的な値である 400mm としたとき実測値の 89% であった。このとき、従来法の音速は 4,020m/s であった。提案法は音速分布を $1/2m$ 乗 ($m = 3$)

表-1 版供試体の版厚解析結果

測定材齢 (日)	版厚実測値 (mm)	反射波到達時間 (μs)	従来法 (mm)	提案法 (mm)			
				直線分布	1/2乗分布	1/2m乗分布	回帰*
42	254	115.9	-	-	-	-	254 (1.000)
56		115.2	253 (0.996)	267 (1.051)	257 (1.012)	258 (1.016)	253 (0.996)

* 1/2乗分布の各材齢で求めた係数 K 、 ho を直線回帰して求めた値を使って計算した結果
()内は、解析値/実測値

表-2 補装版の版厚解析結果

版厚 実測値 (mm)	反射波 到達時間 (μs)	従来法 (mm)	提案法 (mm)		
			直線 分布	1/2乗 分布	1/2m乗 分布
259	115	231 (0.89)	269 (1.04)	250 (0.97)	263 (1.02)

()内は、解析値/実測値

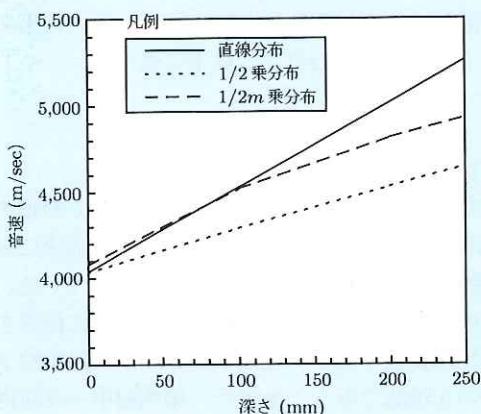


図-10 補装版の音速分布

としたときが最も実測値に近く 102%と高い精度で測定できた。従来法の音速は図-10 より極表面の音速を測定していることになる。ところが、実際には大きな音速分布の傾きがあるにもかかわらず従来法ではこれを考慮することができていない。提案法の直線分布は版の底部では 5,200m/s にも達しており、通常のコンクリートではこのように大きな音速は一般には測定されないことから、過大に解釈されているものと考えられる。そのために版厚は厚くなっている。1/2乗分布は他の 2 分布より全体に小さく解釈されているので、版厚も小さくなっている。一方、1/2m乗分布の場合は版厚も高い精度で求められていることから、ほぼ妥当な音速分布が求められているものと考えられる。このような音速分布を有する場合、提案法は非常に有効な方法であることがわかる。

5. まとめ

超音波によるコンクリート版厚の測定を行い、以下のことが明らかになった。

- (1) 正確な版厚を求めるには、版内の正確な音速分布を求める必要がある。その方法として、表面の 2 点間の超音波伝播時間を数点測定し、変分法により最速経路を推定することにより、コンクリート版内の音速分布を求める方法を提案した。
- (2) (1)によって求めた音速分布を使うことにより誤差 1~2%以内という極めて高い精度で版厚が求められた。

今回提案した方法により高い精度で版厚を測定できることが明らかになった。今後、実用化への課題として、解析上、音速分布の形をどう仮定するのか、測定の問題として、舗装のように多層構造の場合、求めたい層をいかに分離して反射波到達時間を求めるか、表面から音速を測定する場合、その距離や回数をどの程度にする必要があるのか、などを検討する必要がある。

最後に、実験やまとめにご協力いただきました(株)東横エルメスの山口氏、全体を通してご指導いただいた日本大学の笠井名誉教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば、小出啓一郎: 解析力学, 岩波書店, pp.60-65, 1983.

森濱和正*



建設省土木研究所材料施工部
コンクリート研究室主任研究員
Kazumasa MORIHAMA