

論文 コンクリート部材厚さの超音波法とレーダ法による非破壊試験

山口哲夫*1 森濱和正*2 富士 岳*3 笠井芳夫*4

要旨：超音波法を適用してコンクリート舗装版の厚さを精度よく測定するために、各種の誤差要因を克服する方法を研究した。較正用の音速を版の表面で測定する場合、表面と内部の音速が異なる問題については、低周波探触子を用い、探触子間隔を広くする測定方法により解決できた。アスファルト層の上にコンクリート版が施工してある場合には、感度の高い厚さ測定法を考案した。また、予め測定箇所のアスファルト層の上に鉄板を敷く方法を採用した。その他、転圧コンクリート舗装版及び高架橋の床版を測定し、レーダ法の活用や版の底面の凹凸の問題を検討した。

キーワード：コンクリート版の厚さ測定、超音波法、レーダ法、測定精度

1. はじめに

コンクリート部材の厚さ測定を、超音波法やレーダ法の非破壊試験により推定する必要性が増えている。本論文では、厚さ200~300mmの舗装版を対象として、一般的な部材への応用を想定しつつ、コンクリート版の厚さの推定精度向上を目的に実験研究した結果を述べる。

2. 使用した測定装置と既知の関連事項

(1) 測定装置と方法：超音波法とレーダ法ともに反射波の到達時間s または周波数 f と、信号波の伝搬速度c から、厚さd を $2d/c=s=1/f$ の式で求める。測定器種を表-1に示す。A 器種はFFT で f を測定し、また表-2の3

表-1 使用した測定装置

測定法	特徴、方式
A	超音波FFT で不要な波除去
B	超音波波形の直接観察測定
C	レーダPCで画像表示
D	レーダパネルで画像表示

種の方法を使用する。B, C, D 器種は受信波形で s を測定し、また、C, D 器種は位置情報の画像も表示する。裏面が傾斜した版の超音波の厚さ測定では、垂直な反射面までの、斜めの距離が測定される [1~ 3]。

(2) 較正用音速の測定方法：版の場合には、3種の方法がある。①コンクリート表面を伝搬する縦波の音速を用いる方法、②コアの音速を用いる方法、③反射波の到達時間 (FFT を使用の場合見掛けの測定値) と厚さの実寸法から求める方法。これらのうち、①の方法の検討が本論文の目的であり、②、③の方法は①を検証する手段として用いた。

(3) レーダ法による電磁波の速度：
電磁波の速度 c は、比誘電率を ϵ とすると、 $c=1/\sqrt{\epsilon}$ で変化する。厚さ測定に、この関係を利用する。 ϵ は空気；1、水；81、アスファルト；5、コンクリート；

表-2 器種A の厚さ測定の3種の方法

手法	パルス繰返し周波数	スペクトル	測定の使い分け
第一	低い周波数一定保持	FFT 瞬時表示	瞬時に結果判明
第二	高い周波数で調節	ピークを探す	感度高いが面倒
第三	周波数の連続的変化	波形加算平均	ピーク自動測定

*1 (株)東横エルメス, 技術顧問, 工博、(正会員)

*2 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室, (正会員)

*3 日本溶接構造専門学校

*4 日本大学教授、生産工学部建築工学科、工博、(正会員)

4~13 であり、コンクリートの ϵ は含水率に大きく影響される。また、電気伝導度の大きな水でも ϵ は変わらないが、電磁波の減衰率が増加すると言われている。

3. 供試体の厚さ測定結果

一般的な測定精度を調べるため、厚さが既知の供試体の厚さを測定した。コンクリートの裏面は空気層とした。測定結果を表-3に示す。器種Aの較正用音速を①の方法で測定する場合、探触子の間隔400mmで測定した。ただし、供試体Cのみは300mm間隔で測定して値を+3%補正をした。過去の多くの透過法による測定経験にもとづき、探触子の間隔400mmで測定し、もし、プラスの第一波の音速が測定できないような粗なコンクリートでは、300mm間隔で測定して+3%補正すると決めてあるからである。測定結果は実寸法の約1~2%の誤差で推定できている。

表-3 コンクリート供試体の測定結果と誤差
供試体寸法：厚さ×幅×長さ C：200×600×1600；
N1：200×400×2000；N2：300×500×1600（単位mm）

供試体	測定法	器種	表面音速 (m/s)	実寸法	厚さ 測定値	誤差
C 1	超音波	A	3410	195	193	-2
C 2		A	3490	197	198	-1
C 3		A	3460	195	193	-2
C 1	レーダ	D	$\epsilon 6$	195	197	+2
C 2		D		197	198	+1
C 3		D		195	197	+2
N 1	超音波	A	3820	202	204	+2
	超音波	B	4210	202	200	-2
	レーダ	C	$\epsilon 6.4$	202	198	-4
N 2	超音波	A	4440	301	299	-2
	超音波	B	4680	301	303	+2
	レーダ	C	$\epsilon 6.8$	301	301	± 0

4. 反射面が凹凸な版の厚さ測定

4.1 砕石礫層の上に打設されたコンクリート版の測定

砕石礫層の上に打設されたコンクリート版（寸法約100×4450×10000mm）の厚さを超音波法の器種Aを用い、表面の縦横1500mm×2000mm間隔の6点について、表-2の第一の手法で測定し、採取した $\phi 100$ mmの6本のコアの寸法と比較した。コアの裏の反射面には20~40mmの礫が付着していた。音速は①の方法により、探触子間隔400mmで求めた。第一の手法のスペクトルを図-1に、結果を表-4に示す。礫が付着した底面の凹凸のために、厚さ測定値には $\pm 10\%$ の誤差があった。

表-4 礫上の版厚(mm)

位置	音速 (m/s)	厚さ 測定値	コア 寸法	誤差
A 1	3770	111	110	+1
A 2	3770	94	97	-3
A 3	3770	94	97	-3
B 1	3740	98	108	-10
B 2	3750	111	113	-2
B 3	3760	125	117	+8

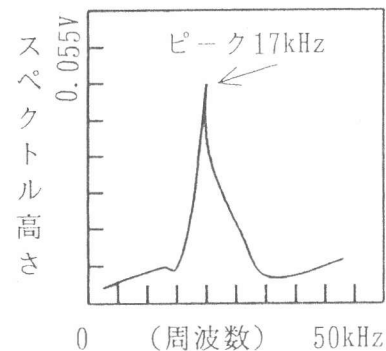


図-1 礫付着の版の測定

4.2 砕石礫層の上の転圧コンクリート版の厚さ測定

版底に安定化処理層のない、無筋の転圧コンクリート版(RCCP)（版厚約180~200mm）の厚さを、道路の端部から約800mmの位置で約2m間隔に5点で、超音波法のA,B器種とレーダ法のC器種で測定した。採取したコアの底面は、25mm程度の凹凸面であった。器種Aの第三の手法で厚さを測定したが、乱反射と版に空隙が多い（写真-1）ことのために、不正確であった。採取した $\phi 100$ mmのコア

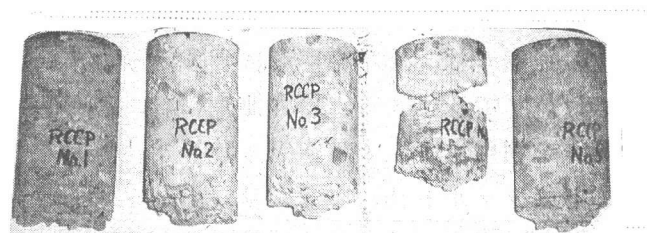


写真-1 RCCP版のコアの写真（下が凹凸の底面）

採取した $\phi 100$ mmのコア

の写真を写真-1に、コアの寸法、音速と、コアの音速で校正した厚さの測定結果を表-5に、スペクトルを図-2に示す。表-5に

表-5 RCCPのコアと厚さ測定値(mm)

位 置	コア 寸法	音速 m/s	測定値と探触子指向性	
			狭い	広い
1	195	4050	181(-14)	253(+5)
2	189	4050	169(-22)	211(+22)
3	180	4200	175(-5)	191(+11)
5	188	4220	192(+4)	192(+4)

は、平らな厚さ200mmの床版では同じ測定値を示す、指向性が異なる2種類の探触子を送波に使用した結果を示してある。指向性の狭い方の誤差が小さかった。指向性が広いと裏面の斜め方向の反射波が受信されているからと思われる。

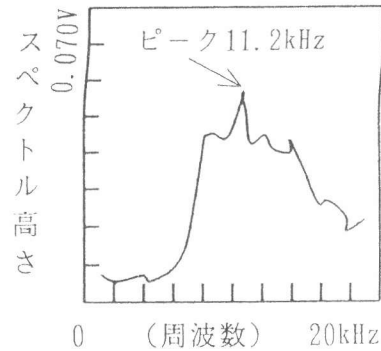


図-2 RCCP版の厚さ測定

5. コンクリートとアスファルトが複層した版の厚さ測定

5.1 アスファルト舗装されたコンクリート床版の厚さ測定

供用後の高架橋のC o版(a)とA s舗装版(b)について、器種Aの第三の手法で厚さを床版の下から上向きに多数点で測定した。床版の条件および測定結果の例を図-3に示す。(b)でC oとA sの合計の厚さが測定されている。図のA s舗装版のスペクトルには多少分離の痕跡が見られるが、C oとA sを分離測定することはできなかった。しかし、別のA s舗装版の供試体の場合(c)では、第二の手法で測定し、C oとA sの分離測定は可能であった。分離の可否は、両者の音速差などが影響していた。

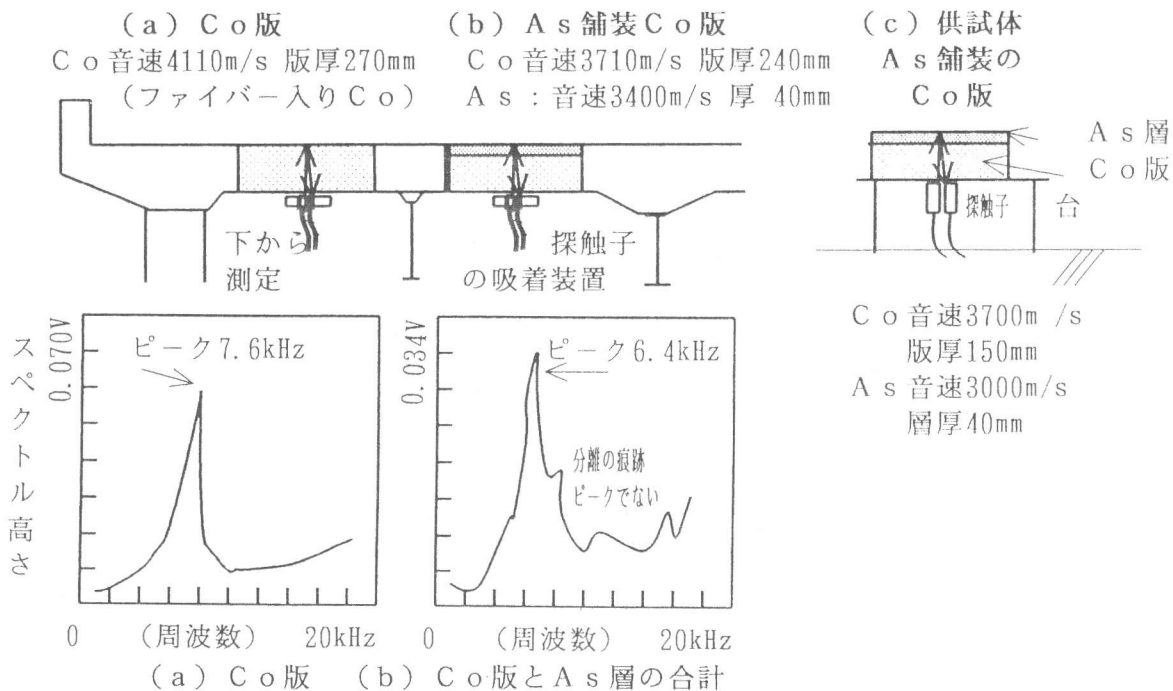


図-3 高架橋床版と供試体の厚さ測定の様子と測定結果

5.2 底にアスファルト層のある連続鉄筋コンクリート版の厚さ測定

道路のC o版の底に、路盤安定処理層としてA s層がある、連続鉄筋コンクリート版

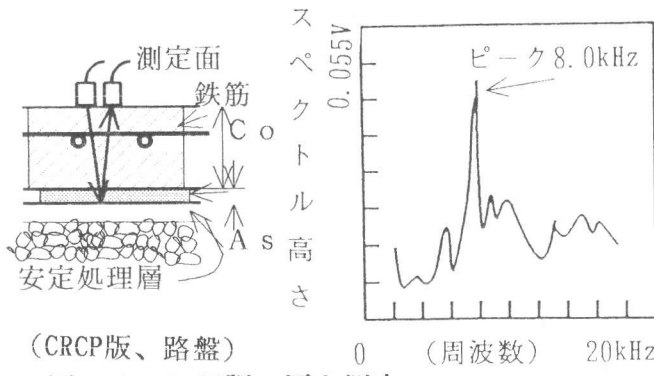


図-4 CRCP版の厚さ測定

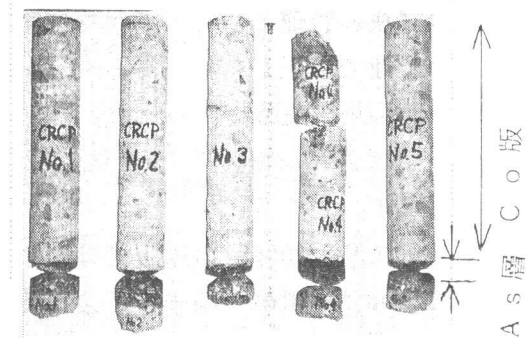


写真-2 CRCP版のコアの写真

表-6 CRCP版のコアの値、測定読取り値、厚さ測定値および音速推定値 (mm)

位置番号	コアの値		コンクリートとAsの合計の厚さ測定値				表面音速	版の音速	
	分類	I	III	IV	V	VI	VII		
	コアの寸法(mm) Co部 As部	音速 (m/s) Co部	音速4000 m/s 仮定 の読取り値	コア音速で 校正した合計 の厚さ測定値	表面音速で 校正した合計 の厚さ測定値	表-8の値	IとIII から求め た音速		
1	255	332	288	4650	244 mm	284 (-4)mm	282 (-6)mm	4620 m/s	4720m/s
2	266	337	303	4680	250	293 (-10)	294 (-9)	4710	4850
3	260	338	298	4510	256	289 (-9)	301 (+3)	4700	4660
4	(261)	330	291	(4760)	250	297 (+6)	293 (+2)	(4680)	4660
5	254	336	290	4500	250	281 (-9)	293 (+3)	4680	4640

括弧は計測部で、音速測定部は知い
算出法 III=III×II/4000 V=III×VI/4000 VII=4000×I/III

(CRCP)の厚さを測定した。Co版厚約250mm、埋設鉄筋かぶり約80mm、鉄筋間隔120×600 mmで、Co版より下の路盤は、上から約40mmのAs層と、音速がかなり低い、底面が凹凸の薄いセメント安定処理層である(図-4)。Co版の底面は平坦であった。超音波法の器種Aで第三の手法により、道路の端部から800mmの位置で、約5m間隔に5点で測定した。採取したφ50mmのコアの写真を写真-2に、コアの寸法とコアの音速を表-6(コアの値)に示す。版の見掛けの厚さの読取り値、コアの音速と表面の音速(表-8)で校正した厚さの結果と誤差を表-6(III、IV、V)に、スペクトルを図-4に示す。この厚さの測定結果は、Co版の下のAs層を反射面としたCoとAs層の合計の厚さである。

5.3 コンクリート層の厚さの分離測定

器種Aで、より感度の高い、第二の手法のピークホールド法(スペクトルピークをすべて図に記録する方法)で、Coのみの厚さの反射波のスペクトルを求めた。測定結果を図-5に、Co版の厚さ測定値を表-7に示す。CoとAsの合計のピーク高さよりも、両者の境界部

表-7 Asを分離したCoの厚さ測定値

位置	コア音速で校正		表面音速で校正	
	測定値	8mmの修正	測定値	8mmの修正
1	242(-13)	250(-5)	241(-14)	249(-6)
2	249(-17)	257(-9)	251(-15)	259(-7)
3	245(-15)	253(-7)	255(-5)	263(+3)

(注) 4、5はひび割れがあり、測定不能

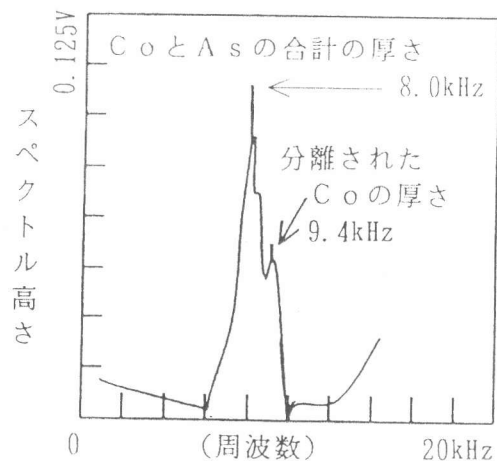


図-5 Asを分離したCoの厚さ測定

の反射波のピークは低く、測定場所により多少、このピークの出現高さに差があった。なお、この種の境界面の反射では、厚さで10mm以下のかたより誤差の出ることを過去に幾度か経験している。このような境界面の反射の、かたより誤差の機構は不明であるが、表-7には、この誤差の経験値8mmの修正案も示した。この結果で、3%以内でC o 版厚が求められた。

6. 版の表面2点間の音速測定値が厚さの精度に及ぼす影響

CRCP版の表面音速を、探触子間隔400mm で求めた値(表-8)は、コアの音速(表-6)より遅かった。コアの観察によると、コンクリートに用いられた最大粒径40mmの粗骨材が上部にはなく、コアの部分測定でも表面の音速は遅かった。送波に透過能力の大きな5kHzの探触子を使用し、探触子間隔を拡大した場合の測定結果を表-8に示す。拡大で音速が増加している。均質な半無限の弾性体に送波した縦波は表面を含め球面状に伝搬する筈であるが、表面音速が遅いので、内部の音速の速い部分を経由した超音波が受信されている。また、上下の音速差で、波は斜めに屈折湾曲して進む。これらを考慮し、超音波は、深さ1/2 まで円弧で進み、以後は水平に進み、再び円弧で表面に戻る

表-8 表面音速の測定結果(m/s)

番号	表面音速			補正した 遠距離音速
	床面での探触子間隔400mm	1000	2000	
1	4110	4200	4320	4620
2	4200	4280	4400	4710
3	3800	4280	4390	4700
4	4000	(床版ひび割れのため)		(4680)
5	4000	4300	4370	4680

(注) No. 4はひび割れ付近のため、No. 5で代用

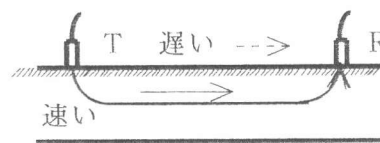


図-6 音速補正の説明図

として、間隔2000mmの音速に対し、波が音速の速い部分を進む経路増加分の距離を計算し、+7%の補正をした。この説明図を図-6に示す。音速の測定には波形観察を必要とした。結果を表-8に示す。補正後の表-8の音速は、表-6の他(Ⅱ、Ⅲ)の音速と比較し、妥当であった。表-6(Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ)には、推定に使用する、これら3種の音速を纏めて示してある。表-6(Ⅳ)の2.(2)の③に相当する「版の音速」には、若干のAs層が含まれるので、この値は、C oのみの音速(Ⅱ)よりも、本来は、低めに測定されている筈である。しかし、この「版の音速」(Ⅳ)の方が、コアのC o部の音速よりも早い。従って、もし、2.(2)の③の「版の音速」が正しい、とするならば、表-6(Ⅱ)の50φのコアのC o部の音速は、真の音速よりも多少遅く、また表-8の表面音速の補正後の測定値は真値に近いと言える。表-6(V)に版の厚さ測定精度を示す。同一点で平均すれば、3%以内の測定が期待できる。

7. 反射板を入れた模型実験

As層や、粒状路盤による凹凸の影響をなくし、反射面を明確にするために、C o版(音速3690m/s, 厚さ100mm)の底に反射板を入れた模型実験を実施した。Asの代わりに、軽量コンクリート(音速2000m/s, 厚さ100mm)を、反射板には1mmの鉄板、接着にはセメントモルタルを使用した。実験では、(a)C o, (b)2種のC oの接着, (c)2種のC oの間に反射板を接着の場合の厚さを、第三の手法で測定した。結果を図-7に示す。(c)は(b)と比較し、スペクトル高さに、鉄板の効果が見られた。(a)と(c)の厚さ測定値は同一(100mm)であり、(b)ではC oの厚さ100mmに対し、-10mmと+13mmの2つのピークがみられ、正確な測定はできなかった。反射板を現地に適用する場合、As層に反射板を乗せるので、反射板とAs層の間には、点接触はあるが、超音波を反射する隙間ができ、

し。版の厚さが測定できる。従って版厚の表 6 (V) の約3%以内の精度が期待できる。

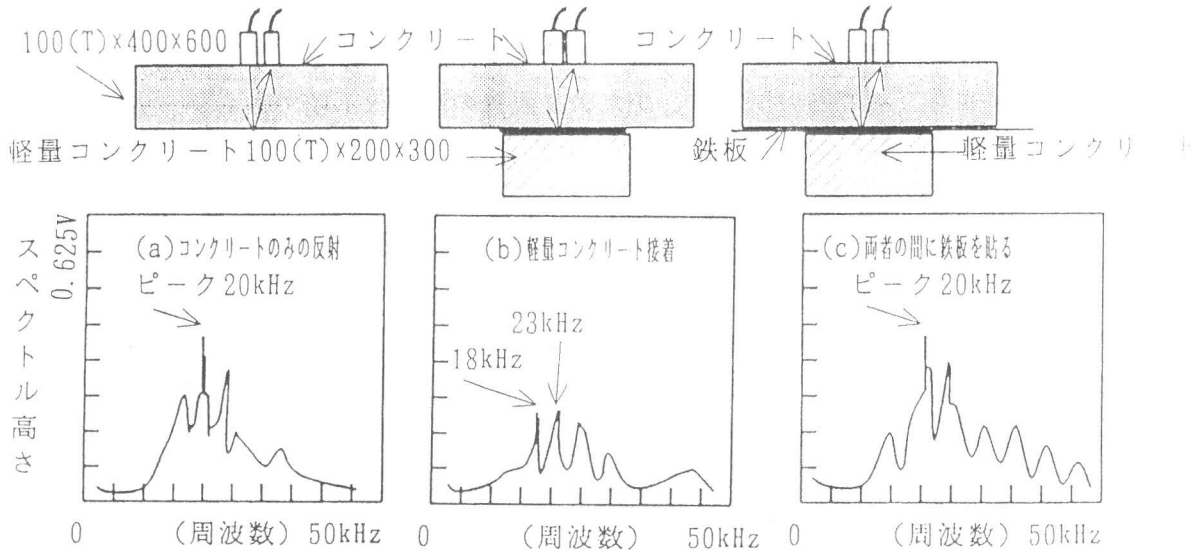


図-7 コンクリートの底面に鉄板を接着し、反射波を測定した実験

8. レーダ法による版厚の測定

器種Cのレーダ法により図-4を測定した。画像を図-8に示す。図の矢印がかぶり約80mmの鉄筋であり、かぶりの3倍が版厚の筈である。しかし、反射波の識別は図ではむつかしい。また、 ϵ の較正法がなかった。反射波の識別のために金属板 ($\epsilon = \infty$) の挟み込みが、また、 ϵ の較正のために、なんらかの方法の検討が必要であった。

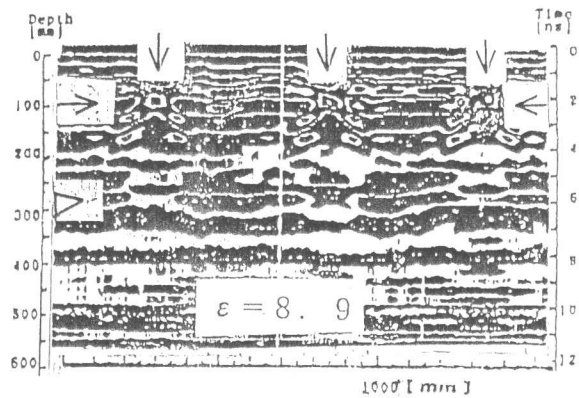


図-8 CRCP版のレーダ法による厚さ測定
→ 鉄筋 ▷ C版厚

9. まとめ

コンクリート版の厚さの精度確保を目的に研究し、以下の結果が得られた。(1)裏が空気層の供試体の場合、超音波法、レーダ法とも誤差1~2%で測定可能である。(2)コンクリート舗装版の場合のように、反射面に他の材料がある場合、反射面が不明確になり、版厚の測定には工夫が必要である。(3)解決方法として、他の材料との間に反射板を入れる方法を検討し、超音波の厚さ測定法では、3%以内で測定できる成果が得られた。

謝辞

研究に参加のコマツエレクトロニクス(株)、清水建設(株)、(株)東横エルメス、東京理学検査(株)、日本クラウドクレマ(株)、日本無線(株)の各位に感謝致します。

参考文献

- [1] 山口哲夫、丸茂文夫：波形解析法の超音波法によるコンクリートの厚さ測定、コンクリート工学年次論文集、Vol. 14、pp. 703~706、1992
- [2] 山口哲夫、丸茂文夫：コンクリート構造物における超音波試験法の改善、コンクリート工学年次論文集、Vol. 15、pp. 613~618、1993
- [3] 山口哲夫、丸茂文夫：超音波法による接近した鉄筋のかぶりの測定、コンクリート工学年次論文集、Vol. 16、No. 1、pp. 753~758、1994