

論 文

[1082] 弹性波法を適用したコンクリート内部の空隙および鉄筋位置の推定に関する実験的研究

正会員 山田 和夫（愛知工業大学建築学科）
 正会員 ○ 山本 正岳（愛知工業大学大学院）

1. はじめに

昨今、高度成長期に建設された既設コンクリート構造物の早期劣化に関する諸問題が社会的な関心を集めており、関連する学・協会においても、既設コンクリート構造物の維持管理の方法、あるいは耐久的な構造物の設計・施工方法に関する委員会を設けて、この種の問題に関する多方面からの検討を行っている。このような社会的背景から、最近コンクリートの非破壊試験方法が再び関心の的となってきた。従来、コンクリートの非破壊試験は、コンクリートの強度推定を目的としたものが多かったが、近年は構造物の劣化度診断とも関連して、コンクリート内部のひび割れ、空隙や欠陥、含水状態、鉄筋の位置、直径および腐食状態、仕上げ材の剥離状態などといった強度以外の内部探査の方法も重要となってきている。筆者らも、従来から弾性波法を適用したコンクリートの非破壊試験方法を確立するための一連の基礎的研究[1-6]を行ってきたが、本研究は、それら一連の研究の延長上のもので、コンクリート中の空隙および鉄筋に対する内部探査を対象として実験的に検討を行ったものである。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本実験では、各試験体中を伝播した弾性波（本研究では、弾性波として超音波を用いたため、以下では単に超音波と略記する）の諸特性を測定し、それらの特性値とコンクリート中に存在する空隙または鉄筋との関係を調査した。本実験で取り上げた要因は、介在物の種類（空隙および鉄筋の2種類）、介在物の直径（d = 6.0、12.8、21.9および39.9mmの4種類）、かぶり厚さ（t = 9、24、44mmの3種類）、変換子の設置位置（予備実験の結果[6]を踏まえて、反射法では変換子を介在物の主軸方向と直角に変換子を設置し、変換子の間隔を介在物の頂点となす角度（頂角）が54度となる位置（反射法(A)）および介在物を挟んで間隔が50mmとなる位置（反射法(B)）の2種類、透過法では表面に介在物が存在しない相対する試験体面（後掲の図-1における上・下面）の中央位置の1種類、共振法では変換子同士が触れない程度の位置の1種類（変換子は介在物の主軸方向と直角に設置））、並びに変換子の接着方法（両面テープおよびグリースの2種類）である。なお、試験体としては、測定結果に及ぼす粗骨材の影響[6]を除去する目的で、水セメント比(W/C)が6.0%のモルタルを用いた。

2.2 試験体の製作および養生方法

試験体の製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂（表乾比重=2.60、最大粒径=5mm）を用いた。本実験で用いた標準調合表

表-1 調合表

W/C (%)	標準調合(kg/m ³)			フロー値
	水	セメント	砂	
60	352	587	1174	298

を表-1に示す。試験体は、いずれも10(縦)×10(横)×9(奥行き)cmの直方体とし、打設後24時間で脱型し、その後直ちに温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度80±5%の養生室内で4週間空中養生を行った。試験体の個数は、各要因毎に1個とした。試験体の概要を、図-1に示す。

2.3 計測・処理方法

本実験で採用した計測方法のうち、反射法と透過法については、前報[3]と同様の計測・処理方法を使用し、入力パルス幅を $2.5\mu\text{s}$ とした。

ただし、本実験では、超音波の到達時間に着目したかぶり厚さの推定も行った。使用した計測システムのブロックダイアグラムを図-2に示す。また、本実験で採用した共振法は、原理的にはまず発振周期が可変の超音波パルスをコンクリートに入力し、次に検出された励振部の残存波と反射波による合成波をFFTアナライザーでフーリエ解析することによって反射波のみを抽出し、超音波の到達時間を求めようとするもので、1次共振周波数 f と反射波の到達時間 t との間に、 $t=1/f$ の関係があることを利用して算定する方法[7]である。

3. 実験結果とその考察

3.1 かぶり厚さの推定結果

表-2は、各種方法を用いてかぶり厚さを推定した結果の代表的なものを一覧表にして示したものである。この表によれば、介在物の種類や径にかかわらず共振法による推定精度が最も優れていることが分かる。ただし、かぶり厚さが40mm以下の場合には、今回使用したポータブルFFTアナライザーの性能上の限界（解析可能周波数の上限：50kHz）のために測定が不可能であった。これに対して、反射法では頂角が54度となるように二つの変換子を設置した場合（反射法(A)）の推定精度がよく、共振法との差もほとんど認められないが、変換子の設置間隔を50mmとした場合（反射法(B)）には推定精度はやや劣っている。このことは、かぶり厚さを精度よく推定するためには、超音波の反射角度を最適な角度にする必要のあることを示唆している。また、推定精度は、かぶり厚さが大きくなるほど向上しており、かぶり厚さが極端に小さい場合になると、推定精度は著しく低下した。なお、かぶり厚さの推定精度は鉄筋よりも空隙の方が優れているが、介在物

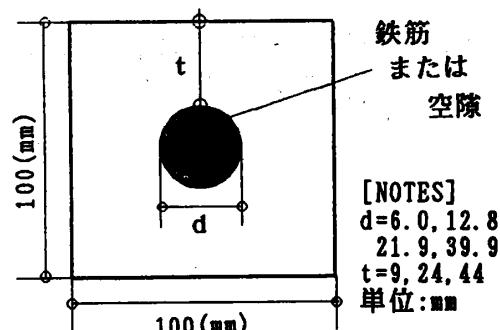
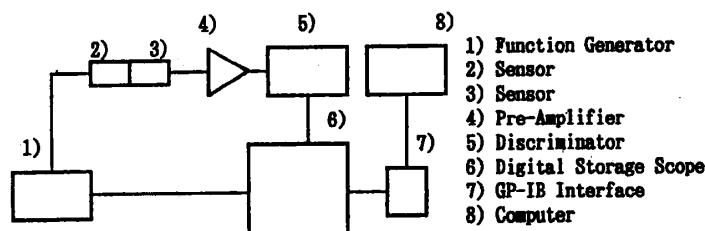
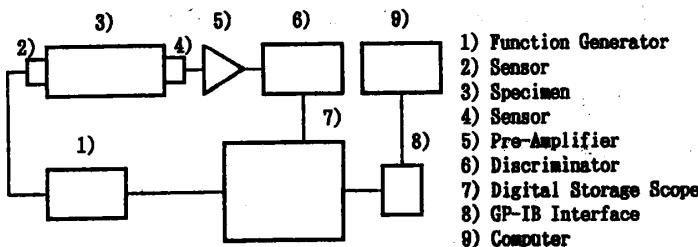


図-1 試験体の概要



(a) 変換子を含む計測システムの伝達関数算定用



(b) 変換子を含む計測システムと媒体の伝達関数算定用

図-2 計測システムのブロックダイアグラム

表-2 代表的なかぶり厚さの推定結果

介在物		かぶり 厚さ <i>t</i> (mm)	反射法(A)		反射法(B)		透過法		共振法		平均誤差 (%)				
種類	直 径 <i>d</i> (mm)		推定値 (mm)	誤 差 (mm)	直径別	かぶり別	種類別								
鉄筋	6.0	24	22	-2	40	16	50	26	*	*	61.1	73.6	69.0		
	12.8		29	5	49	25	47	23	*	*	73.6	72.2			
	21.9		29	5	33	9	62	38	*	*	42.9				
	6.0	44	51	7	43	-1	47	3	44	0	6.3	14.8	16.7		
	12.8		41	-3	49	-5	54	10	52	8	14.8	29.0			
	21.9		25	-19	29	-15	58	14	47	3	18.2				
平均誤差 (%)			20.1		34.8		55.9		8.3						
空隙	6.0	24	33	9	53	29	42	18	*	*	77.8	55.6	56.5		
	12.8		24	4	40	27	37	13	*	*	38.1				
	21.9		28	4	16	30	6	6	*	*					
	6.0	44	45	-1	51	7	44	0	47	3	6.3	13.6	12.7		
	12.8		49	-5	50	-1	55	-9	52	8	13.6	18.2			
	21.9		51	-5	51	-1	27	-17	47	3	18.2				
平均誤差 (%)			10.8		44.1		30.9		10.6						
全平均誤差 (%)			15.5		39.5		43.4		9.5						

[注] 反射法(A)：頂角が54度となるように変換子を設置した場合、
反射法(B)：間隔が5cmとなるように変換子を設置した場合。

の径の影響については明確な傾向は得られなかった。一方、透過法による推定精度は、今回採用した測定方法の中では最も劣っているが、介在物が空隙の場合には、鉄筋に比べて推定精度がよいのが分かる。

3.2 検出超音波の減衰特性

前節で示した結果のうち、かぶり厚さの推定精度が悪いものは、介在物からの反射波が正確には捉えられていないものと思われるため、ここでは推定精度が比較的よかつた反射法で、頂角が54度となるように変換子を設置した場合（反射法（A））について検討を行うことにする。

図-3は検出した波形の一例で、(a)は鉄筋径が40mm、(b)は空隙径が21.9mmの場合の結果であるが、検出波形には、何種類もの反射波が含まれていることが分かる。これらの波がどこから反射してきたものかを考え得る各種の反射経路と超音波速度とを用いて推定すると、介在物の種類にかかわらず、第1反射波が介在物位置、第2反射波が底面からの反射波にそれぞれ対応している。このように、変換子を適切な位置（本研究では、頂角=54度）に設置す

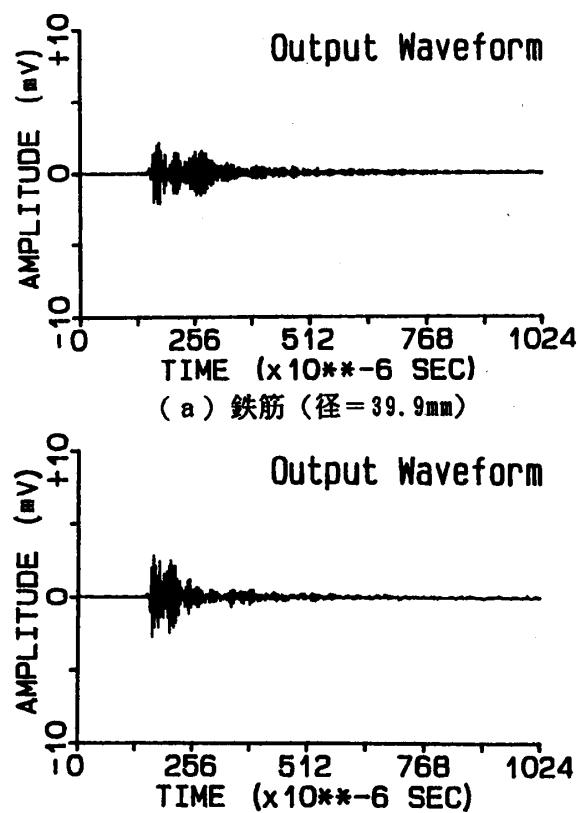


図-3 検出波形の一例
(反射法(A)、かぶり厚さ = 44mm)

ることによって、介在物からの反射波を第1波として明確に検出できるようになることが分かる。

図-4は、検出波形の各種特性パラメータのうち、最大振幅(AMPmax)およびエネルギー(Et)と介在物の径との関係を、かぶり厚さが44mmで介在物が鉄筋の場合について示したものである。図によれば、鉄筋径が21.9mmの場合を除けば、鉄筋径が大きくなるとともに最大振幅は徐々に減少し、エネルギーは逆に増加する傾向にあるのが分かる。なお、鉄筋径が21.9mmの場合に最大振幅およびエネルギーが大きくなっているのは、かぶり厚さの推定結果が実際のかぶり厚さよりも43%小さくなっていたことからも推察されるように、原因の一つとして超音波が鉄筋よりも浅い位置に存在する何らかの介在物から反射したことが考えられる。

ところで、鉄筋からの反射波が正確に捉えられているならば、かぶり厚さが同じ場合、鉄筋径が大きくなるほど鉄筋からの反射が生じやすくなるため、最大振幅およびエネルギーは増大するものと思われるが、図-4によれば、径の変化に依存する上記のような傾向は明確には認められていない。いま、検出波の最大振幅時点が底面からの反射波の到達時刻であるものと仮定すれば、その到達時間はかぶり厚さが9mmの場合に $59.8 \mu s$ 、24mmの場合に $60.2 \mu s$ 、44mmの場合に $61.2 \mu s$ となる。しかし、前掲の図-3(a)（ただし、パルス入力時点が $128 \mu s$ ）によれば、上記の各時刻以前に伝播波が検出されている。したがって、検出波には鉄筋の頂点から反射している波だけではなく、鉄筋とモルタルの界面を伝播した後反射したものや鉄筋内部を伝播しその後底面に到達して反射した波、骨材や空隙などから反射した波なども含まれていることが考えられる。

これに対して、介在物が空隙の場合の結果を示した図-5によれば、検出波の最大振幅およびエネルギーは、空隙の径が大きくなるほど増加している。これは、前掲の図-3(b)からもわかるように、空隙からの反射波が明確に検出できていたことによるものと思われる。また、最大振幅およびエネルギーは、かぶり厚さが24mmの場合よりも44mmの方が小さくなっている。これは、かぶり厚さが大きくなると超音波の伝播距離が長くなるため、超音波が減衰することによるものと考えられる。

3.3 試験体の周波数応答の減衰特性

前節と同様に、本節でも反射法で頂角が54度となるように変換子を設置した場合の結果について検討を行うことにする。

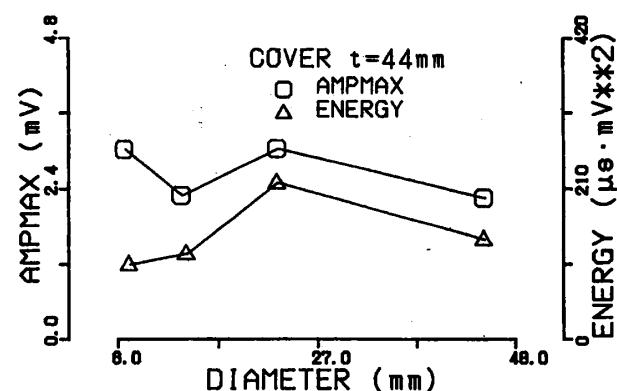


図-4 検出波形の最大振幅およびエネルギー（反射法(A)、鉄筋）

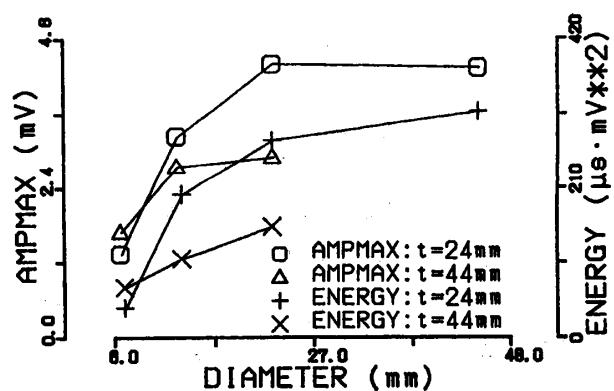


図-5 検出波形の最大振幅およびエネルギー（反射法(A)、空隙）

表-3 および表-4
は、それぞれ介在物が
鉄筋でかぶり厚さが44
mmのモルタルの周波数
伝達関数の最大振幅お
よびエネルギーを、50
kHz の周波数帯域毎に
分類して示したもので
ある。なお、これらの
表に示した値は、いず
れも10~300kHzの全周
波数領域における最大
振幅およびエネルギー
で除して無次元化して
ある。これらの表によ
れば、最大振幅および
エネルギーは、鉄筋径
が大きくなってかぶり
厚さの推定精度が向上
するほど、200~250kHz
の高周波数成分が次第
に卓越する傾向にある
のが分かる。また、表
-5は、周波数伝達関
数のエネルギーに及ぼ
すかぶり厚さの影響を
鉄筋径が39.9mmの場合
について示したもので
あるが、この表におい
ても、かぶり厚さが大
きくなつて推定精度が
良くなるほど、200~25
0kHzの周波数成分が増
加する傾向を示してい
る。

一方、表-6は、周
波数伝達関数のエネル
ギーに及ぼす空隙径の
影響を、かぶり厚さが
24mmの場合について示

表-3 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数の
相対最大振幅（反射法(A)、かぶり厚さ=44mm）

鉄筋径 (mm)	各周波数帯 (kHz単位) における相対最大振幅					
	10-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
6.0	0.0342	0.0669	1.0000	0.4802	0.1412	0.0206
12.8	0.0831	0.1872	0.6862	0.8623	1.0000	0.0076
39.9	0.0673	0.1387	0.4533	0.6209	1.0000	0.1536

表-4 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数のエ
ネルギー成分比（反射法(A)、かぶり厚さ=44mm）

鉄筋径 (mm)	各周波数帯 (kHz単位) におけるエネルギー成分比					
	10-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
6.0	0.0036	0.0226	0.6166	0.3049	0.0505	0.0018
12.8	0.0086	0.0454	0.1469	0.3608	0.4297	0.0086
39.9	0.0059	0.0293	0.1405	0.2479	0.5198	0.0566

表-5 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数のエ
ネルギー成分比（反射法(A)、鉄筋径=39.9mm）

かぶり 厚さ (mm)	各周波数帯 (kHz単位) におけるエネルギー成分比					
	10-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
9	0.0052	0.0183	0.6150	0.1507	0.1672	0.0436
24	0.0049	0.0507	0.2305	0.4736	0.2256	0.0147
44	0.0059	0.0293	0.1405	0.2479	0.5198	0.0566

表-6 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数のエ
ネルギー成分比（反射法(A)、かぶり厚さ=24mm）

空隙径 (mm)	各周波数帯 (kHz単位) におけるエネルギー成分比					
	10-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
6.0	0.0689	0.0689	0.1033	0.1952	0.4374	0.1263
12.8	0.0118	0.0118	0.0354	0.2995	0.4925	0.1490
21.9	0.0238	0.0387	0.1181	0.4176	0.3294	0.0724
39.9	0.0129	0.0294	0.1084	0.4479	0.3533	0.0481

表-7 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数のエ
ネルギー成分比（反射法(A)、空隙径=21.9mm）

かぶり 厚さ (mm)	各周波数帯 (kHz単位) におけるエネルギー成分比					
	10-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
9	0.1453	0.1433	0.1095	0.0418	0.4247	0.1354
24	0.0238	0.0387	0.1181	0.4176	0.3294	0.0724
44	0.0301	0.1093	0.1995	0.1530	0.3004	0.2077

したものである。この表によれば、空隙径が大きくなるほど200kHz以上の高周波数成分は次第に減衰し、200kHz以下の周波数成分が増加する傾向を示すことが分かる。また、表-7は、周波数伝達関数のエネルギーに及ぼすかぶり厚さの影響を空隙径が21.9mmの場合について示したものである。この表からあまり明確な傾向は認められないが、特記すべき事項として、かぶり厚さが最も小さい9mmの場合、10~50kHzの低周波数成分が他のかぶり厚さの場合に比べて著しく卓越していることが挙げられる。これは、おそらくかぶり部の薄いモルタル層で膜振動が生じているためと思われる。

4. 結 論

本研究では、弾性波法を適用したコンクリートの非破壊試験方法を確立するための基礎的研究として、弾性波法による空隙および鉄筋の位置推定の可能性について検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 空隙および鉄筋のかぶり厚さの推定精度は、本実験で採用した測定方法の中では共振法が最も優れていた。また、反射法を適用してかぶり厚さを精度よく推定するためには、超音波の反射角度を最適な角度となるようにする必要がある。透過法による空隙位置の推定精度は、反射法の場合と同程度であるが、鉄筋位置の推定精度はあまり期待できない。
- 2) 鉄筋径が増加しかぶり厚さの推定精度が向上するに伴って、モルタルの周波数応答特性は、200~250kHzの周波数成分が卓越した特性へと移行する。
- 3) 空隙径の増加およびかぶり厚さの減少に伴って、検出超音波の最大振幅およびエネルギーは増加し、空隙からの反射波の検出が容易となる。

謝 辞

実験およびデータ整理に際して御助力を得た愛知工業大学学部学生の太田純一君（現：旭化成ホームズ）、岡田直人君（現：豊田住宅）および垣内一宏君（現：東急建設）に対して謝意を表します。また、本研究費の一部は、内藤科学技術振興財団および石田財団の研究助成金によったことを付記し、謝意を表する。

引用文献

- 1) 山田和夫・小阪義夫：極低温化に曝されたコンクリート中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第1号、pp. 331-336、1989. 6
- 2) 山田和夫・土屋宏明・小阪義夫：超音波スペクトロスコピーによるコンクリートの劣化度評価に関する基礎的研究、材料、第8巻、第431号、pp. 956-965、1989. 8
- 3) 山田和夫・小阪義夫：アルカリ骨材反応を生じたモルタル中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第12巻、第1号、pp. 773-788、1990. 6
- 4) 山田和夫・小阪義夫：超音波スペクトロスコピー法によるコンクリートの劣化度評価に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No. 44、pp. 288-293、1990. 12
- 5) 山田和夫・小阪義夫・山本正岳：超音波スペクトロスコピーによるコンクリートの劣化度評価に関する研究（その5：極低温化に曝された水中養生コンクリートの場合）、日本建築学会大会学術講演梗概集A（中国）、pp. 209-210、1990. 10
- 6) 山田和夫・山本正岳：弾性波法を適用したコンクリートの内部探査に関する研究、コンクリートの非破壊試験方法に関するシンポジウム論文集、pp. 81-86、1991. 4
- 7) 山口哲夫：新しいコンクリートの厚さ測定法と測定装置、非破壊検査、第39巻、第3号、pp. 217-222、1990. 3