

コンクリート内部の弾性波動伝播特性 に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON CHARACTERISTICS OF ELASTIC WAVE PROPAGATION IN CONCRETE

山田 和夫
Kazuo YAMADA

Abstract In this study, the elastic wave method was applied for estimating the location of inclusion such as void and steel plate, as the fundamental investigation to establish a new non-destructive testing technique for concrete. In the experiments, plate specimens of dimension 30x30x10cm were used. In the analysis, a 2-dimensional finite element method was used to solve the equations of elastic waves for concrete plates with inclusion such as void and steel plate and the wave propagation analyses and the frequency response analyses were carried out. Following results were obtained in this study:

- 1) The location of void and steel plate can be most accurately estimated by using a resonance technique among techniques applied in this experiments (resonance technique and flection technique).
- 2) In the reflection technique, it is necessary to set two transducers to keep the angle from the top of inclusion at the best reflection angle, so as to improve the accuracy for estimating its location.
- 3) The accuracy of location estimation can be raised by combining the result of frequency analysis of measured waveform.
- 4) The inclusion location in concrete can be predicted exactly from the frequency characteristics, when the reflection wave is clearly detected.

1. はじめに

従来、コンクリートの内部探査には電磁波法を用いることが多く、超音波法は殆ど適用されてこなかった。これは、コンクリート内部では骨材などの存

在によって超音波の散乱による減衰が著しく、介在物からの反射エコーの抽出が困難なためであるが、超音波法は電磁波法と比較して一般に取扱が簡便で、かつ安全性も高いため、超音波を適用したコンクリートの内部探査に関する試験方法の実用化に対する要望は根強いものがある。近年、電子計測技術およびデータ処理方法の向上に伴って介在物からの反射

エコーの抽出精度も徐々に向上しており、超音波を適用したコンクリートの内部探査に関する多方面からの研究が次第に増加しつつある¹⁾。筆者も、従来からコンクリート中を伝播し検出された弾性波の周波数特性に着目したコンクリートの非破壊試験方法の確立を目的として一連の実験的研究²⁾⁻⁶⁾ および理論的研究⁶⁾⁻⁸⁾ 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、入力した超音波の伝播特性とコンクリート内部に存在する空隙や鉄板などの介在物との関係について実験的および解析的に検討を行ったものである。

2. 実験的検討

2.1 実験方法

(1) 実験の概要

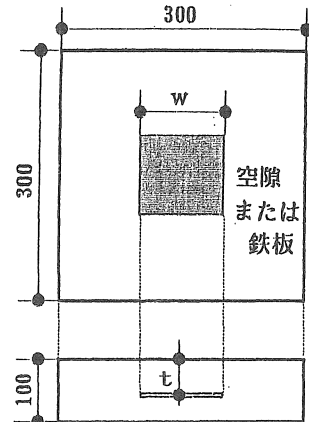
別報⁴⁾では、一辺10cmの立方試験体を用いたが、本報では、検出超音波に及ぼす側面からの反射波の影響が比較的小さいと思われる30(縦) x 30(横) x 10(厚さ) cmの平板試験体を用いて一連の検討を行った。本実験で取り上げた要因は、介在物の種類(介在物なし、空隙(模型用発泡スチロール製)および鉄板の3種類)、介在物の大きさ(一辺(w)=30、50、100および150mmの4種類、ただし厚さは全て4.5 mm)、かぶり厚さ(t=30、60 および 90mmの3種類)、介在物の埋設角度(測定面に対して0(水平)、10、30、45、60および75度の6種類)、探査の方法(反射法および共振法の2種類)、変換子の設置間隔(反射法では、変換子の間隔を介在物を挟んで50mm(反射法(A))、100 mm(反射法(B))および介在物からの反射角度(頂角)を54度⁴⁾とした場合(反射法(C))の3種類、共振法では変換子同士が触れない程度の間隔の1種類)である。なお、変換子は、両面テープで試験体表面に接着させた。また、試験体としては、測定結果に及ぼす粗骨材の影響を除去する目的で、水セメント比(W/C)が60%のモルタルを用いた。

(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=5 mm)を用いた。本実験で用いたモルタルの標準調合表および実測フロー値を表-1に示す。試験体は、打設後24時間で脱型した後直ちに、温度 20±1℃、湿度80±5% の養生室内で空中養生を行った。試験

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	253



[NOTES]
W=30, 50, 100, 150
t=30, 60, 90 単位: mm

図-1 試験体の概要

材令は約3ヶ月である。試験体の概要を図-1に示す。なお、試験体の個数は、各要因毎に1個とした。

(3) 計測・処理方法

本実験で採用した反射法および共振法の計測・処理方法は、いずれも別報⁴⁾と同様であり、超音波の到達時間に着目したかぶり厚さの推定および検出波形の周波数解析を行った。

2.2 実験結果とその考察

(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、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アナライザの性能上の限界(解析可能周波数の上限: 50 kHz)のために測定が不可能であった。これに対して、反射法では介在物からの反射角度(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(C))の推定精度は、別報⁴⁾と同様に比較的良好であり、共振法との差も殆ど認められないが、変換子の設置間隔を50mmとした場合(反射法(A))および100mmとした場合(反射法(B))は推

表-2 代表的なかぶり厚さの推定結果

介在物 種類	かぶり 厚さ (mm)	反射法(A)		反射法(B)		反射法(C)		共振法		要因別平均誤差 (%)		
		推定値 (mm)	誤差 (%)	推定値 (mm)	誤差 (%)	推定値 (mm)	誤差 (%)	推定値 (mm)	誤差 (%)	辺長別	かぶり 種類別	
鉄板	60	30	41.00	31.67	75.66	26.14	58.23	2.87	67.59	12.64	18.33	21.8
		50	58.95	1.76	84.08	40.13	60.28	0.46	59.26	11.07	19.36	
		150	43.07	28.22	104.28	79.43	58.28	12.80	62.92	12.04	23.84	
	90	30	51.13	43.19	94.28	4.75	108.06	20.06	85.40	5.11	18.23	
		50	49.12	45.40	84.08	6.58	76.19	12.34	71.14	20.35	22.07	
		150	41.00	38.24	82.00	8.89	144.06	60.06	81.84	9.09	20.50	
	60	30	47.14	21.44	88.19	46.99	52.18	13.04	53.36	11.07	23.14	
		50	58.00	18.73	90.08	50.38	60.28	0.46	49.80	17.00	18.04	
		150	43.07	28.22	106.21	77.01	56.26	6.23	56.92	5.14	29.15	
平均誤差 (%)		26.70		37.50		12.52		10.40				
空隙	60	30	38.95	35.08	75.78	26.31	56.33	6.12	67.65	12.75	20.07	21.34
		50	47.20	21.34	84.19	40.31	54.29	9.51	53.41	14.96	20.54	
		150	47.20	1.568	93.39	97.32	58.30	2.76	59.97	10.99	29.36	
	90	30	47.20	47.56	82.11	8.77	80.58	10.47	79.89	11.12	19.48	
		50	45.17	15.79	75.79	18.79	74.21	15.79	76.52	14.96	15.59	
		150	38.95	56.73	133.36	48.47	84.39	12.93	63.47	11.12	16.37	
	60	30	41.05	31.58	77.91	29.85	79.80	33.00	56.97	5.06	24.87	
		50	42.17	31.58	102.38	70.63	70.18	16.97	56.97	12.75	31.06	
		150	43.12	28.19	92.37	53.95	52.24	12.93	61.63	18.66	38.83	
平均誤差 (%)		29.31		33.92		11.54		10.20				
全平均誤差 (%)		28.01		35.71		12.03		10.30				

[注] 反射法(A) : 間隔が10cm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、
 反射法(C) : 頂角が54度となるように変換子を設置した場合、
 * : 介在物の埋設角度を変化させたもの (数字はそれぞれの角度を表わす)。

定精度がやや劣っている。なお、反射法(A)および反射法(B)の場合でも、変換子の設置位置が頂角=54度(反射法(A)ではかぶり厚さが60mmの場合、反射法(B)ではかぶり厚さが90mmの場合)となると、かぶり厚さの推定精度は向上している。したがって、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にする必要があるといえる。ただし、かぶり厚さの推定精度は、前掲の表-2からも明らかのように、介在物の埋設角度には殆ど影響を受けない。なお、かぶり厚さの推定精度は鉄板よりも空隙の方が優れているが、本実験の範囲では、介在物の大きさの影響については明確な傾向は得られなかった。

(2) 周波数応答特性

図-2は、介在物の種類が鉄筋、辺長が50mm、かぶり厚さが60mmのモルタル試験体で、入出力間隔を反射角度が54度となるように変換子を設置した場合の反射法(反射法(C))によって得られた周波数伝達関数の振幅スペクトルを示したものである。いま、介在物からの反射波の到達時間から算定される1次共振周波数を求めてみると26.4kHzとなる。この図によれば、モルタル試験体の周波数特性はかなり複雑ではあるが、上記の1次共振周波数に対応したピークを確認することができる。また、2次の共振周

波数も確認することができ、介在物からの反射波がある程度正確に捉えられていることが分かる。したがって、時系列データのみに着目するのではなく、検出された時系列データを周波数領域データに変換して1次共振周波数を特定することによって、反射波の到達時刻を更に正確に算出することができる。ただし、この図から明らかなように、上記の介在物からの反射波に対応した周波数以外にも数多くの共振周波数が存在しているが、この原因とし

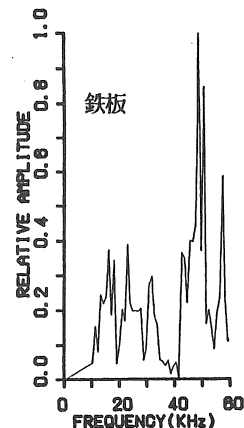


図-2 周波数応答 (辺長=50mm, かぶり厚さ=60mm)

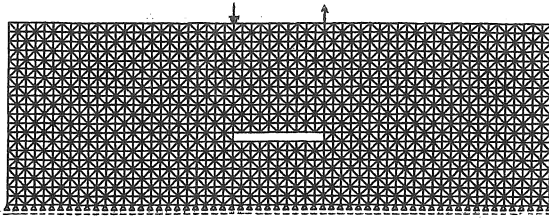


図-3 解析モデルの一例
(空隙、辺長=50mm、かぶり厚さ=60mm)

表-3 構成材料の力学的特性

媒体	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)	ポアソン比	密度 (g/cm^3)
モルタル	2.96	0.18	2.16
鉄板	20.39	0.30	7.80

ては、検出波には介在物からの反射波だけでなく、底面や側面などからの多重反射波も含まれていること、および計測システムの周波数特性の影響が完全には除去できていないことなどが考えられる。

3. 解析的検討

3.1 解析方法

(1) 解析の概要

本解析では、速度比例型の減衰項を有する波動方程式を採用した。減衰マトリックス[C]としては、 $\alpha[M] + \beta[K]$ で表される比例減衰(ここに、[M]:質量マトリックス、[K]:剛性マトリックス)を使用し、実験結果に基づいて $\alpha = 5 \times 10^{-6}$ 、 $\beta = 5 \times 10^{-6}$ または $\alpha = 5 \times 10^{-8}$ 、 $\beta = 2 \times 10^{-6}$ とした。波動伝播解析に際しては、波動方程式の解法にウィルソンの θ 法($\theta = 1.4$)を使用し、入力単位パルスの幅を $2.5 \mu\text{s}$ および解析時間増分を $1 \mu\text{s}$ として $1,024 \mu\text{s}$ まで解析を行った。また、周波数応答解析では、周波数増分を 0.2 kHz に設定して 60 kHz まで解析を行った。

(2) 解析モデル

本解析では、前記の実験で取り上げた要因のうち、介在物の種類(介在物なし、空隙および鉄板の3種類)、介在物の大きさ(辺長(w)=50および150 mmの2種類)、かぶり厚さ(t =30および60 mmの2種類)、介在物の埋設角度(水平および45度の2種類)、入出力間隔(反射法(A)、反射法(B)および反射法(C)に対応した距離の3種類)、並びに超音

波パルスの入射角度(垂直および67度の2種類)を解析要因として取り上げた。なお、反射法(C)における入出力間隔は、かぶり厚さ30 mmの場合が30.6 mm、60 mmの場合が61.1 mmとなる。本解析で使用したモデル試験体の要素分割、支持条件、超音波の入出力位置などの一例を図-3に、構成材料の各種力学特性を表-3に示す。

3.2 解析結果とその考察

(1) 波動伝播特性

図-4は、介在物が空隙のモデル試験体で、辺長が50 mm、かぶり厚さが60 mm、入出力間隔が50 mm(反射法(A))および入力方向を空隙に対して垂直とした場合の波動伝播状況を変位ベクトル図で示したものである。この図より、伝播波の先端部は伝播速度の速い縦波が進行しその後伝播速度の遅い横波が進行しているのが分かる。また、超音波はパルス入力後 $20.0 \mu\text{s}$ 経過すると空隙に到達し、 $30.0 \mu\text{s}$ 経過すると空隙から反射した波が検出位置に到達するのが読み取れる。ただし、この解析では、超音波パルスを空隙端の上部で垂直方向(図-4中の矢印)に入力しているため、空隙からの反射波だけでなく迂回波も数多く観察される。これに対して、空隙での反射位置が空隙中央となるように超音波パルスの入射角度を67度に設定した場合には、図-5に示すように、入力方向を空隙に対

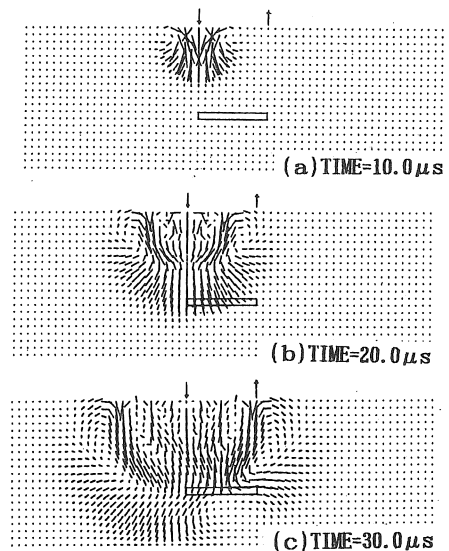


図-4 超音波の伝播、反射ベクトル図
(空隙、反射法(A))

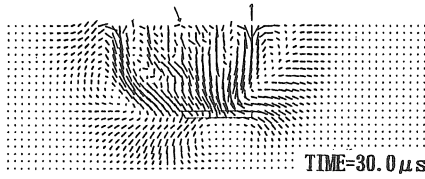


図-5 超音波の伝播、反射ベクトル図
(入射角=67度、空隙、反射法(A))

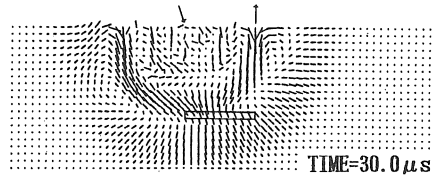
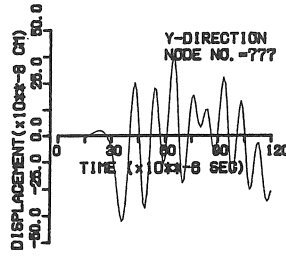
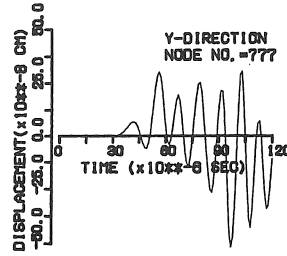


図-6 超音波の伝播、反射ベクトル図
(入射角=67度、鉄板、反射法(A))



(a) 生の解析結果



(b) 表面波の影響を除去した結果

図-7 変位履歴応答
(入射角=67度、空隙、反射法(C))

して垂直とした場合に比べて空隙からの反射波成分が増大し、反射波の到達時間も縦波伝播速度から算定される超音波の到達時間(34.0 μs)とほぼ合致する結果が得られた。また、図-6は、介在物が鉄板の場合の結果を示したものであるが、伝播超音波は鉄板からの反射波だけでなく鉄板を透過する波も存在しているのが分かる。

図-7は、介在物が空隙のモデル試験体で、辺長が50mm、かぶり厚さが60mm、入出力間隔が61.1mm(反射法(C))および入力パルスの入射角度を67度とした場合の変位応答履歴を示したものである。なお、図(b)には応答値に及ぼす表面波の影響を除去するために、得られた応答値(図(a)参照)を内部に空隙を有さない試験体の応答値で差し引いた値が示してある。図(a)に示す解析結果によれば、表面波の影響のために、第1波の立ち上がり時間は、縦波伝播速度と伝播経路とから算定される反射波の到達時間(34.0 μs)よりもかなり小さくなっているが、図(b)に示すような方法で表面波の影響を除去することによって、空隙からの反射波を明確に捉えられるようになることが分かる。

(2) 周波数応答特性

図-8は、介在物の辺長が50mm、かぶり厚さが60mmのモデル試験体で、入出力間隔を50mm(反射法(A))とした場合の周波数応答解析結果を、介在物の種類別に示したものである。ただし、図の縦軸は

最大応答振幅値で除して無次元化してある。図から明らかなように、介在物の種類にかかわらず周波数が20kHz以下の周波数領域ではかなり複雑な周波数特性を示し、共振周波数も数多く存在しているが、この周波数領域における基本的な振動モードは、別の実施したモード解析の結果によれば、試験体全体の共振現象であることが分かった。これに対して、20kHz以上の周波数領域では、介在物が空隙の場合は25.0kHzで、鉄板の場合は25.4kHzでピークが観察されるが、これらの値はいずれも介在物からの反射波の到達時間から算定される1次共振周波数(約28kHz)とほぼ一致している。

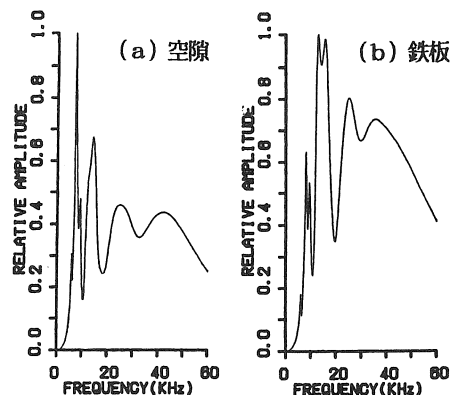


図-8 周波数応答
(辺長=50mm、かぶり厚さ=60mm、間隔=50mm)

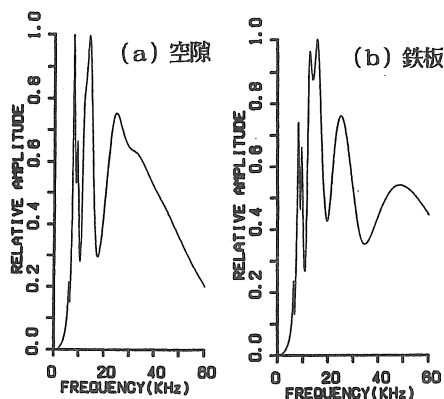


図-9 周波数応答
(辺長=50mm、かぶり厚さ=30mm、間隔=50mm)

図-9は、介在物の辺長が50mm、かぶり厚さが30mmのモデル試験体で、入出力間隔を50mm(反射法(A))とした場合の解析結果を、介在物の種類別に示したものである。この図によれば、介在物が鉄板の場合には、反射波の到達時間から算定した周波数(約49kHz)とほぼ一致した周波数(48.6kHz)で共振周波数が存在しているが、介在物が空隙の場合には、そのような共振周波数は認められず、更に低周波数の成分が卓越した周波数特性となっている。この原因としては、介在物が空隙でかぶり厚さが小さい場合には、検出結果に及ぼす薄いかぶり部の膜振動の影響が大きくなり、反射波による応答が抽出し難くなることが考えられる。

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、コンクリート内部の弾性波動伝播特性について実験的および解析的に検討を行った。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) 介在物からの反射波が明確に捉えられている場合には、共振周波数の出現状況に注目することによって、介在物のかぶり厚さをかなりの精度で推定できる。
- 2) コンクリートの内部探査に際して反射法を適用する場合にも、検出された時系列データの立上り時刻の読み取り結果と周波数解析結果とを併用することによって、かぶり厚さの推定精度は更に向上する。

- 3) 表面波の影響によって介在物からの反射波の抽出が困難な場合には、介在物からの反射波と表面波とが複合された検出波形を内部に介在物を有さない試験体において検出された波形で差し引くことによって、表面波の影響を軽減させることができる。
- 4) 介在物が鉄板の場合には、伝播超音波の一部が鉄板を透過するため、反射波エネルギーが小さくなり、介在物のかぶり厚さの推定精度は、介在物が空隙の場合よりも低下する。

[謝辞]

実験および解析に際して御助力を得た本学大学院生の山本正岳君、ならびに学部学生の浅井陽一君、田中宏志君、大野智幸君、佐々木伸治および鈴木伸幸君に対して謝意を表します。なお、本研究費の一部は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。また、数値計算に際しては愛知工業大学計算機センターのスーパーコンピュータ-CRAY X-MP/14seを使用したことを付記する。

[引用文献]

- 1) 谷川恭雄・山田和夫：コンクリートの非破壊検査、コンクリート工学、Vol. 27, No. 3、pp. 5-13、1989. 3
- 2) 山田和夫・土屋宏明・小阪義夫：超音波スペクトロスコープ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：超音波スペクトロスコープ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
- 4) 山田和夫・山本正岳：弾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、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻、第1号、pp. 491-496、1991. 6
- 5) 山田和夫・山本正岳：弾性波法による外壁タイルの剥離およびコンクリートのひび割れ評価に関する実験的研究、第45回セメント技術大会講演集、pp. 424-429、1991. 5
- 6) 小阪義夫・山田和夫・土屋宏明：コンクリートの超音波波動伝播特性に関する解析的検討、セメント・コンクリート論文集、No. 43、pp. 226-

231、1989.12

- 7) 山田和夫・山本正岳：弾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解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻、第1号、pp. 485-490、1991.6

- 8) 山田和夫・山本正岳：弾性波法による外壁タイルの剥離およびコンクリートのひび割れ評価に関する解析的研究、第45回セメント技術大会講演集、pp. 430-435、1991.5

(受理 平成4年3月20日)