

# 論文 空中超音波法を適用したセメント系複合材料の内部探査の適用性

関 俊力\*1・瀬古 繁喜\*2・山田 和夫\*3

**要旨：**本研究では、弾性波の入力・検出を非接触で行う空中超音波法を適用したセメント系複合材料の内部探査の適用性について検討した。その結果、モルタル部で計測した平均伝搬速度は、試験体が厚くなるほど増大し、モルタル中と空中を伝搬する弾性波の伝搬速度から算定される計算値と良く一致するが、発泡スチロール部では、弾性波のエネルギー損失が著しく、平均伝搬速度の算定が困難であること、検出弾性波の相対振幅値は、発泡スチロール部に比べてモルタル部の方が10倍以上の値となるため、モルタル内部の変状の正確な評価が可能で、自動計測・処理による内部探査の指標として適していること、などが明らかとなった。

**キーワード：**セメント系複合材料, 非破壊試験, 内部探査, 空中超音波法, 反射・透過, 伝搬速度, 振幅値

## 1. はじめに

近年、環境負荷低減型建築技術として、建築物の循環化・長寿命化技術の開発・実用化が求められているが、建築物の延命化・長寿命化を実現するには、物理的寿命、機能的寿命、社会的寿命および戦略的寿命の長寿命化を同時に図る必要がある。また、既存コンクリート造建築物の合理的な長寿命化を図るには、建築物の現状把握、残存寿命の判定、劣化状況に応じた適切な補修・補強対策の策定などの一連の検査・診断技術を確立する必要がある。ただし、関連する学・協会ですべてに制定されている規格・基準は、多くが既存コンクリート造建築物の変状を評価する方法まで規定したものではないため、結果の評価方法を含む試験方法の確立が急務である。

筆者らは、以上の点を踏まえて、既存コンクリート造建築物の検査・診断技術の確立を目的として、従来から弾性波法を適用した各種の非破壊試験方法について検討を行っている<sup>1)</sup>が、これらの試験方法では、何れも弾性波の入力・検出用変換子をコンクリート表面に密着させ

て測定するため、変換子とコンクリート表面との密着度の差異が測定結果に影響を及ぼす問題を有している。

これに対して、空中超音波法は、弾性波の入力・検出を非接触で行うことができるため、変換子とコンクリート表面との密着度を向上させるための接触媒体を使用する必要もない有用な試験方法として期待できるが、コンクリート分野に関しては、研究成果<sup>2),3)</sup>も少なく不明な点が多い。そのため、本研究では、空中超音波法をコンクリートの内部探査方法として実用化するための基礎的研究の第1段階として、まず骨材寸法が5mm以下のモルタルを対象として、その適用性を実験的に検討した。

## 2. 実験の概要

### 2.1 試験体

本実験では、表-1および図-1に示すように、初期欠陥(空洞)をモデル化した厚さ×幅×長さ=5×50×200mmの発泡スチロールが試験体中央部に埋設されている一辺が200mmの平板試験体(W/C=60%のモルタル)を使用し、実験要因として、試験体の厚さ(15, 25, 35および45mmの4種類)および細骨材の最大寸法(0.6, 1.2, 2.5および5.0mmの4種類)を取り上げ、内部探査を目的とした空中超音波法の適用性と適応限界について調査した。

表-1 実験の概要

試験体記号	母材モルタル		試験体寸法(mm)	介在物	
	W/C(%)	骨材寸法(mm)		種類	寸法(mm)
S15-D06	60	0.6	15×200×200	発泡スチロール	5×50×200
S15-D12		1.2			
S15-D25		2.5			
S15-D50		5.0			
S25-D06	60	0.6	25×200×200	発泡スチロール	5×50×200
S25-D12		1.2			
S25-D25		2.5			
S25-D50		5.0			
S35-D06	60	0.6	35×200×200	発泡スチロール	5×50×200
S35-D12		1.2			
S35-D25		2.5			
S35-D50		5.0			
S45-D06	60	0.6	45×200×200	発泡スチロール	5×50×200
S45-D12		1.2			
S45-D25		2.5			
S45-D50		5.0			

[注]細骨材の最大寸法:0.6, 1.2, 2.5および5.0mmの4種類

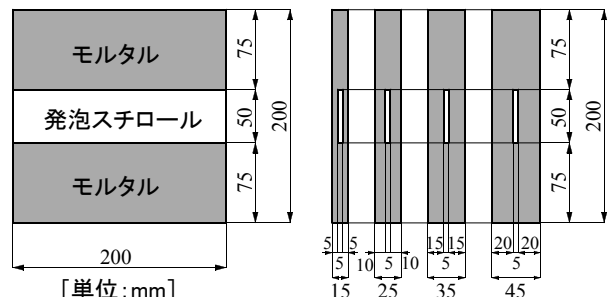


図-1 試験体の形状・寸法

\*1 愛知工業大学大学院 工学研究科生産・建設工学専攻 修士(工学) (正会員)

\*2 愛知工業大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 愛知工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

表-2 実験に使用したモルタルの標準調合表

W/C (%)	細骨材寸法 (mm)	S/C	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			実測フロー値
			セメント	水	細骨材	
60	0.6	1.50	666	399	998	205
	1.2	1.80	617	370	1,111	208
	2.5	1.90	603	362	1,146	212
	5.0	2.25	557	334	1,253	210

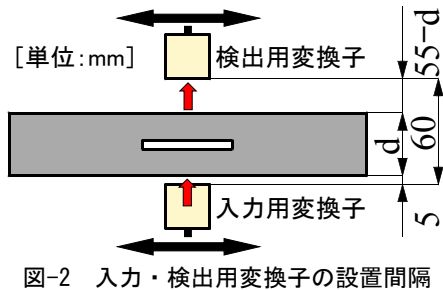
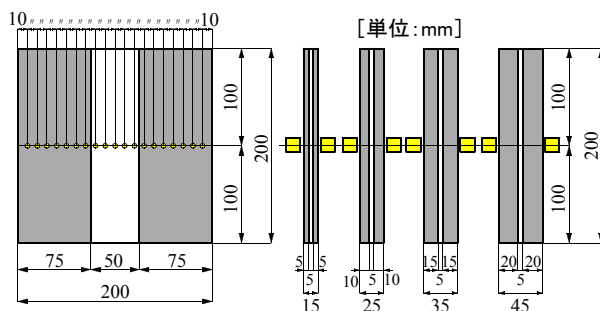


図-2 入力・検出用変換子の設置間隔



[注] ●:測定位置, ■:入力・検出用変換子の設置位置  
図-3 空中超音波測定位置および変換子の設置位置

## 2.2 試験体の作製方法

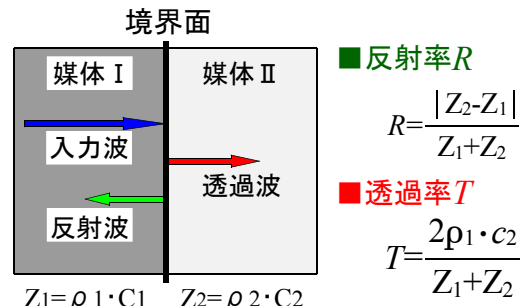
試験体の作製に際しては、目標フロー値を $200 \pm 10$ に設定し、普通ポルトランドセメントおよび多治見産の山砂（表乾密度： $2.58 \text{ g/cm}^3$ ，吸水率：1.45%）を最大寸法が0.6, 1.2, 2.5および5.0mmとなるようにふるい分けて使用し、試し練りにより調合表を決定した。本実験で用いたモルタルの標準調合表と実測フロー値を表-2に示す。モルタルの打設は、測定面が側面となるように発泡スチロールを所定位置に設置した木製型枠に2層に分けて行い、各層をテーブル・バイブレータで十分に締め固めた。試験体は、材齢1日で脱型した後、試験体質量が一定となるまで実験室内で空中養生を行って計測した。

## 2.3 計測方法

計測に際しては、空中超音波測定装置（超音波パルサー・レシーバ(JPR-10C-RL型)、増幅度60dBの外部プリアンプ(PR-60A型)および共振周波数が約200kHzのエアプローブ(ARH-0.2K25×25N型))と試作の2軸自動走査装置とから成る計測システムを使用した。また、超音波の入力・検出に際しては、変換子（エアプローブ）の設置位置を、図-2に示すように、試験体の厚さにかかわらず入力用変換子が試験体表面から5mmの位置、検出用変換子が入力用変換子から60mmの位置とし、図-3に示す平板試験体面の中央部を自動走査しながら試験体側面か



写真-1 本実験で使用した測定装置



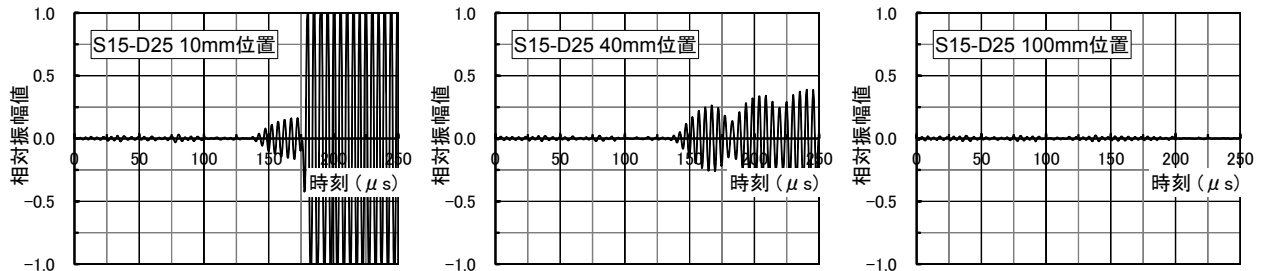
[注]  $Z_1, Z_2$  : 媒体 I, II の音響インピーダンス  
 $\rho_1, \rho_2$  : 媒体 I, II の密度  
 $C_1, C_2$  : 媒体 I, II の伝搬速度

図-4 境界面における超音波の反射と透過

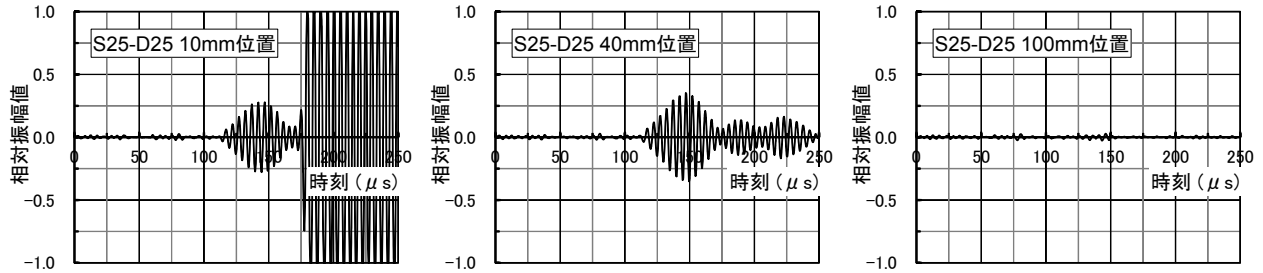
ら10mmの間隔で計測した。なお、発振矩形パルスの電圧、周波数および波数は、それぞれ100Volt, 200kHzおよび6波、サンプリングの間隔および個数は、それぞれ0.5  $\mu\text{s}$ および512個、トリガディレイは、0に設定して計測した。本実験で使用した測定装置の外観を写真-1に示す。

## 2.4 処理方法

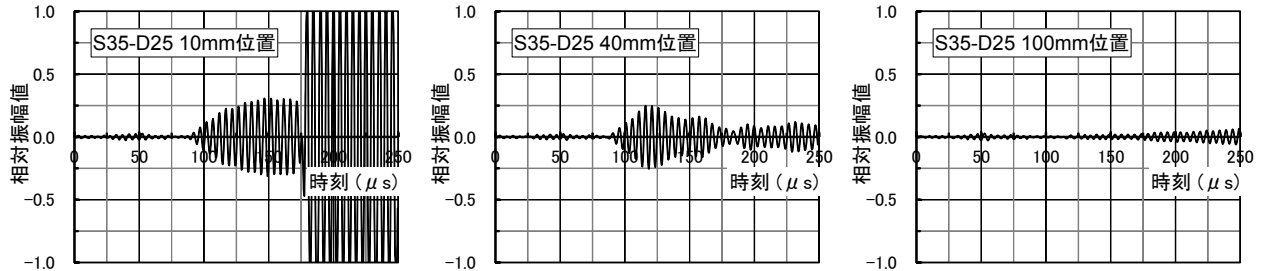
弾性波を利用したコンクリートの内部探査方法は、大別すると透過法と反射法とに分類できるが、何れの方法も、図-4に示すように、弾性波がコンクリート中の音響インピーダンスの異なった境界面に到達すると、弾性波の一部は透過し、一部は反射する性質を利用した探査方法といえる。ただし、空中超音波法のような弾性波の入力と検出を非接触で行う方法では、空気とコンクリートとの界面でのエネルギー損失が大きいため、接触型の測定方法と比較して弾性波の検出能力の面で問題が生じる可能性がある。そのため、本研究では、まず透過弾性波の伝搬時間（閾値法で求めた）から算出する伝搬速度と検出弾性波のエネルギー成分（収録された512個の波形データ全ての振幅値の自乗平均値）に着目したコンクリートの内部探査の適用性と適用限界について検討する。



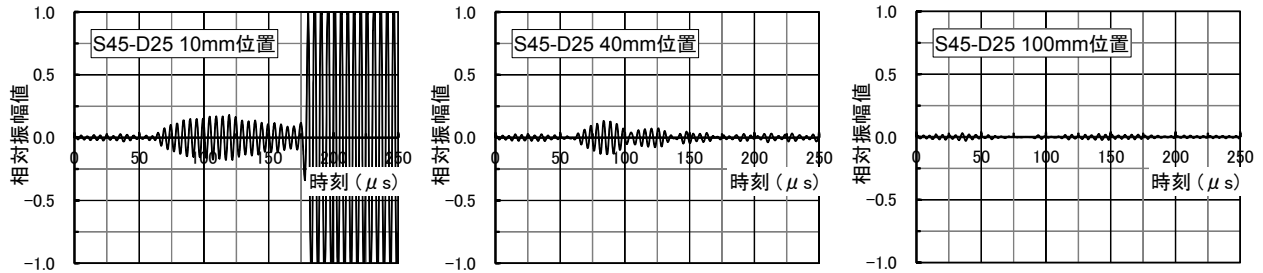
(a)測定位置：試験体端部 (b)測定位置：モルタル部中央 (c)測定位置：空隙部中央  
 図-5 検出波形の例 (試験体厚さ：15mm, 細骨材寸法：2.5mmの場合)



(a)測定位置：試験体端部 (b)測定位置：モルタル部中央 (c)測定位置：空隙部中央  
 図-6 検出波形の例 (試験体厚さ：25mm, 細骨材寸法：2.5mmの場合)



(a)測定位置：試験体端部 (b)測定位置：モルタル部中央 (c)測定位置：空隙部中央  
 図-7 検出波形の例 (試験体厚さ：35mm, 細骨材寸法：2.5mmの場合)



(a)測定位置：試験体端部 (b)測定位置：モルタル部中央 (c)測定位置：空隙部中央  
 図-8 検出波形の例 (試験体厚さ：45mm, 細骨材寸法：2.5mmの場合)

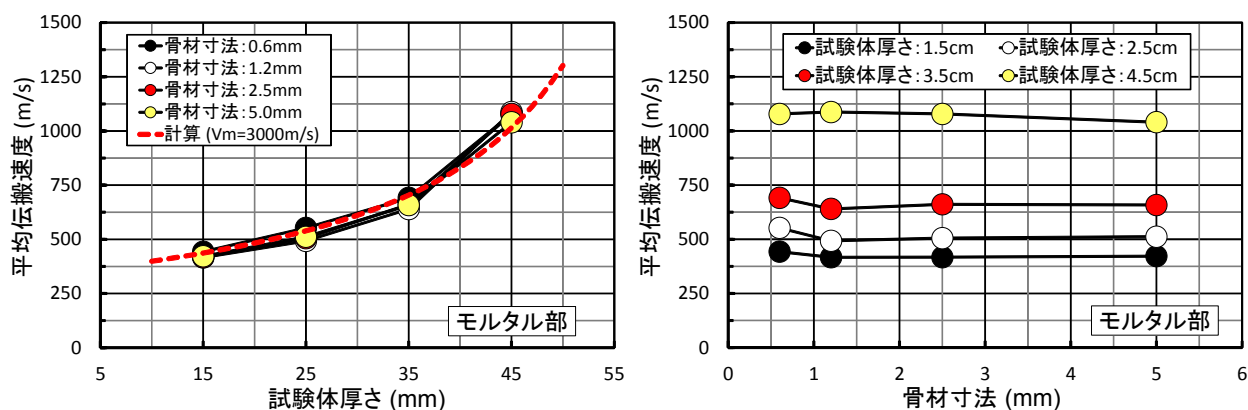
### 3. 実験結果とその考察

図-5～図-8は、細骨材寸法が2.5mmの試験体で得られた検出波形の例を試験体厚さおよび弾性波の入力・検出位置別に示したものである。これらの図によれば、各図の(c)に示す発泡スチロール（空隙モデル）埋設部中央で弾性波の入力・検出を行った場合は、試験体厚さに関わらずモルタルと発泡スチロールとの境界面で弾性波がほぼ全反射するため、透過弾性波成分が著しく小さくなっており、伝搬弾性波の初動を明確に検出することが困難であることがわかる。また、各図の(a)に示す試験体端部（試験体側面から10mmの位置）で弾性波の入力・検出を行った場合は、モルタル中を伝播した弾性波が

到達した後の約176 $\mu$ sの時点で著しく振幅の大きい弾性波が到達しているのが確認できる。これは、本研究で使用した入力・検出用変換子が一辺30mmの正方形断面であるため、試験体側面から10mmの位置における測定では、空气中を伝搬した速度340m/sの弾性波を検出しているためと思われる。なお、速度340m/sの弾性波が176 $\mu$ sで到達する距離は59.8mmとなり、前述した入力・検出用変換子の設置間隔とほぼ一致する。一方、モルタル部中央（試験体側面から40mmの位置）で弾性波の入力・検出を行った場合は、各図の(b)から明らかなように、試験体（モルタル部）が厚くなるに従って弾性波の到達時刻は早く、かつ検出弾性波の振幅は小さくなっている。

表-3 平均伝搬速度に関する実験結果一覧

試験体記号	測定位置(試験体左端からの距離(mm))毎の測定結果 [上段:伝搬時間(μs)/下段:平均伝搬速度(m/s)]																		
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
S15-D06	140.0	136.0	135.9	136.0	135.8	135.8	135.9	∞	∞	∞	∞	135.9	135.0	134.8	135.1	135.0	134.9	135.1	135.0
	429	441	441	441	442	442	442	—	—	—	—	441	444	445	444	444	445	444	444
S15-D12	146.5	146.1	145.8	145.6	145.1	145.0	145.1	∞	∞	∞	∞	∞	142.3	142.5	142.4	142.3	142.2	142.5	142.5
	410	411	411	412	414	414	414	—	—	—	—	—	422	421	421	422	422	421	421
S15-D25	144.0	143.7	143.5	143.5	143.6	143.4	143.4	∞	∞	∞	∞	∞	143.9	143.9	144.1	144.1	144.4	144.5	145.5
	417	418	418	418	418	419	419	—	—	—	—	—	417	417	417	417	416	415	412
S15-D50	144.0	143.3	143.1	142.8	142.8	142.6	143.0	∞	∞	∞	∞	∞	141.6	141.6	141.5	141.5	141.3	141.1	141.5
	417	419	419	420	420	421	420	—	—	—	—	—	424	424	424	424	425	425	424
S25-D06	107.5	107.4	107.6	108.0	108.1	108.1	113.9	∞	∞	∞	∞	∞	109.4	109.3	109.1	109.3	109.4	109.6	109.5
	558	558	557	556	555	555	527	—	—	—	—	—	548	549	550	549	549	547	548
S25-D12	124.5	123.7	123.4	122.8	122.7	122.9	123.1	∞	∞	∞	∞	∞	∞	121.5	121.5	121.3	121.4	116.3	121.5
	482	485	486	488	489	488	487	—	—	—	—	—	—	494	494	494	494	516	494
S25-D25	118.0	117.9	117.9	118.0	118.2	118.1	118.1	∞	∞	∞	∞	∞	124.9	119.7	119.5	119.5	119.7	120.0	120.5
	508	509	509	509	508	508	508	—	—	—	—	480	501	502	502	502	501	500	498
S25-D50	119.0	118.2	117.9	118.0	118.2	118.1	117.5	∞	∞	∞	∞	∞	116.7	116.7	116.5	116.5	116.5	116.3	116.5
	504	508	509	508	508	508	511	—	—	—	—	—	514	514	515	515	515	516	515
S35-D06	91.8	95.5	86.5	86.5	86.0	85.8	∞	∞	∞	∞	∞	∞	85.0	84.5	90.0	84.5	85.0	85.0	85.0
	653	628	694	694	698	699	—	—	—	—	—	—	706	710	667	710	706	706	706
S35-D12	94.0	93.5	97.8	97.5	97.2	97.5	97.7	∞	∞	∞	∞	∞	95.4	95.3	90.1	90.0	90.0	90.1	90.0
	638	642	614	616	617	615	614	—	—	—	—	—	629	630	666	667	667	666	667
S35-D25	92.0	91.9	91.8	91.5	86.0	91.5	91.7	∞	∞	∞	∞	87.4	91.0	91.0	91.0	91.1	91.0	91.0	91.5
	652	653	654	656	698	656	655	—	—	—	—	686	659	659	659	659	659	659	656
S35-D50	91.5	91.6	91.6	91.6	91.6	91.6	91.4	∞	∞	∞	∞	∞	90.9	90.8	90.8	90.7	90.6	91.0	95.0
	656	655	655	655	655	655	656	—	—	—	—	—	660	661	661	662	662	659	632
S45-D06	64.0	87.7	81.1	74.6	74.2	74.1	73.8	∞	∞	∞	∞	58.2	42.6	42.5	42.4	42.3	42.2	47.4	47.3
	938	684	740	804	809	809	813	—	—	—	—	1032	1409	1413	1415	1419	1422	1266	1270
S45-D12	61.5	60.7	65.0	64.6	59.5	59.3	59.1	∞	∞	∞	∞	∞	46.4	51.3	51.1	50.9	50.8	45.9	56.1
	975	989	923	929	1008	1012	1015	—	—	—	—	—	1292	1171	1175	1179	1182	1306	1069
S45-D25	64.0	87.7	81.1	74.6	74.2	74.1	73.8	∞	∞	∞	∞	58.2	42.6	42.5	42.4	42.3	42.2	47.4	47.3
	938	684	740	804	809	809	813	—	—	—	—	1032	1409	1413	1415	1419	1422	1266	1270
S45-D50	57.5	57.1	56.8	56.3	56.7	56.7	51.8	∞	∞	∞	∞	∞	28.4	66.7	66.0	55.8	54.3	53.6	52.7
	1044	1052	1056	1067	1059	1059	1159	—	—	—	—	—	2113	900	908	1075	1106	1120	1138



(a) 平均伝搬速度と試験体厚さとの関係 (b) 平均伝搬速度と骨材寸法との関係

図-9 平均伝搬速度に及ぼす各種要因の影響

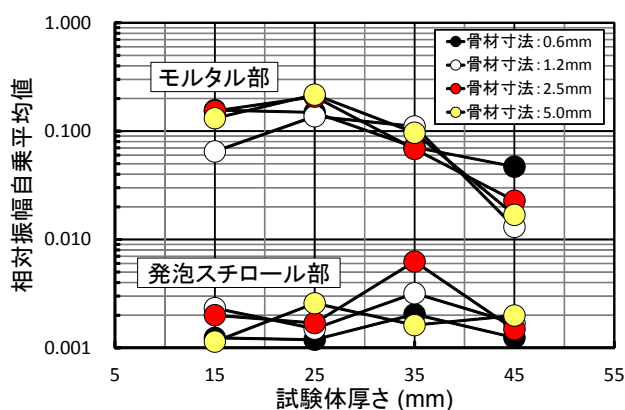
### 3.1 透過弾性波の伝搬速度に着目した内部探査

表-3は、弾性波の伝搬時間および{伝搬距離(60mm)/伝搬時間}で算定した平均伝搬速度に関する実験結果を一覧表にして示したものである。また、図-9(a)および(b)は、それぞれモルタル部で弾性波を入力・検出した場合の平均伝搬速度(図-2に示す試験体左側面から20~60mm位置および140~180mm位置で測定した結果の平均値)と試験体厚さおよび細骨材寸法との関係を示したものである。なお、図-9(a)中には、モルタル中を伝搬する弾性波の伝搬速度を3,000m/sと仮定して算定した

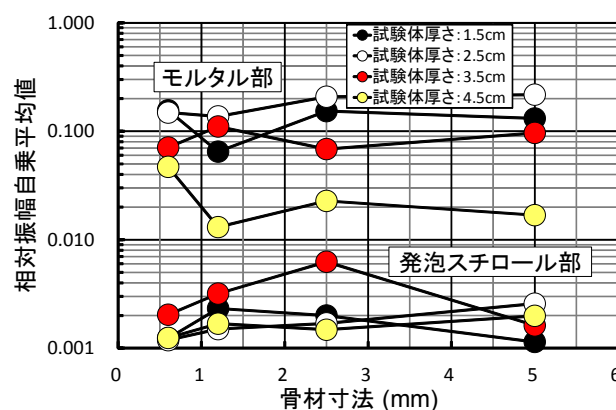
場合の平均伝搬速度の計算結果(赤の破線)も併示してある。これらの表および図によれば、モルタル部で弾性波を入力・検出した場合は、試験体が厚くなって入力・検出用変換子の設置間隔(60mm)の中に占めるモルタル部の割合が増大すると、平均伝搬速度も増大する傾向を示しているのがわかる。これは、モルタル中および空气中を伝搬する弾性波の伝搬速度がそれぞれ約3,000m/sおよび340m/sで、伝搬速度に約10倍の相違があることによるものであり、平均伝搬速度に関する実験結果は、モルタル中を伝搬する弾性波の伝搬速度を3,000m/sと仮定

表-4 検出波形の相対振幅値に関する実験結果一覧

試験体記号	測定位置(試験体左端からの距離(mm))毎の相対振幅自乗平均値に関する測定結果																		
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
S15-D06	2.666	0.075	0.348	0.199	0.165	0.234	0.049	0.003	0.001	0.001	0.001	0.011	0.084	0.107	0.092	0.088	0.114	0.140	2.685
S15-D12	2.656	0.038	0.083	0.114	0.086	0.066	0.037	0.007	0.000	0.001	0.001	0.001	0.009	0.068	0.054	0.044	0.044	0.051	2.547
S15-D25	2.565	0.070	0.258	0.222	0.208	0.118	0.037	0.005	0.001	0.001	0.001	0.004	0.026	0.130	0.102	0.198	0.159	0.070	2.734
S15-D50	2.616	0.231	0.064	0.197	0.208	0.195	0.040	0.002	0.001	0.001	0.001	0.007	0.054	0.117	0.076	0.067	0.107	0.052	2.630
S25-D06	2.544	0.126	0.152	0.147	0.130	0.126	0.026	0.002	0.001	0.001	0.001	0.004	0.094	0.223	0.169	0.126	0.165	0.123	2.498
S25-D12	2.361	0.104	0.106	0.087	0.066	0.214	0.110	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.021	0.110	0.146	0.215	0.184	0.136	2.422
S25-D25	2.642	0.347	0.117	0.118	0.245	0.273	0.019	0.004	0.001	0.001	0.001	0.004	0.117	0.315	0.309	0.150	0.102	0.103	2.702
S25-D50	2.391	0.060	0.095	0.180	0.303	0.428	0.073	0.008	0.001	0.000	0.001	0.003	0.051	0.262	0.404	0.290	0.090	0.058	2.369
S35-D06	2.513	0.032	0.194	0.252	0.067	0.034	0.010	0.003	0.001	0.002	0.003	0.019	0.019	0.022	0.025	0.024	0.032	0.027	2.499
S35-D12	2.514	0.270	0.078	0.213	0.146	0.064	0.057	0.008	0.001	0.002	0.001	0.011	0.044	0.070	0.068	0.088	0.056	0.052	2.530
S35-D25	2.577	0.091	0.099	0.074	0.061	0.036	0.017	0.017	0.001	0.004	0.003	0.009	0.030	0.042	0.040	0.050	0.082	0.109	2.542
S35-D50	2.449	0.180	0.130	0.135	0.102	0.102	0.029	0.003	0.001	0.001	0.001	0.002	0.011	0.030	0.056	0.074	0.092	0.054	2.431
S45-D06	2.955	0.025	0.042	0.034	0.030	0.018	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.005	0.016	0.037	0.050	0.079	0.092	0.064	3.258
S45-D12	2.088	0.011	0.024	0.014	0.014	0.021	0.020	0.004	0.001	0.001	0.001	0.002	0.009	0.011	0.010	0.008	0.008	0.011	2.122
S45-D25	2.111	0.068	0.027	0.014	0.018	0.015	0.006	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.009	0.017	0.016	0.014	0.018	0.020	2.179
S45-D50	2.115	0.023	0.020	0.015	0.026	0.045	0.012	0.004	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.008	0.005	0.009	0.009	0.010	2.147



(a) 相対振幅値と試験体厚さとの関係



(b) 相対振幅値と骨材寸法との関係

図-10 検出波形の相対振幅値に及ぼす各種要因の影響

して算定した計算結果と比較的良好に一致しているのが確認できる。一方、平均伝搬速度に及ぼす細骨材寸法の影響を示した図-9(b)によれば、細骨材寸法が大きくなるほどモルタル中を伝搬する弾性波の散乱および減衰の影響が著しくなるためか、平均伝搬速度は、細骨材寸法が大きくなるに従って若干低下する傾向を示している。

ところで、表-3によれば、発泡スチロール(空隙モデル)埋設部(試験体左側面から80~120mmの区間)で弾性波を入力・検出した場合には、前掲の図-5~図-8から明らかなように、モルタルと発泡スチロールとの境界面での弾性波のエネルギー損失が大きいため、検出弾性波の振幅は著しく小さくて弾性波の到達時刻を算出することが困難であり、伝搬時間は殆どが $\infty$ となっている。また、厚さが45mmの試験体で測定された伝搬時間は、測定位置によってかなり変動しているが、この原因としては、モルタルを伝搬した超音波の距離減衰により検出波形の初動立上りが鈍くなっていることが挙げられる。

### 3.2 透過弾性波の振幅に着目した内部探査

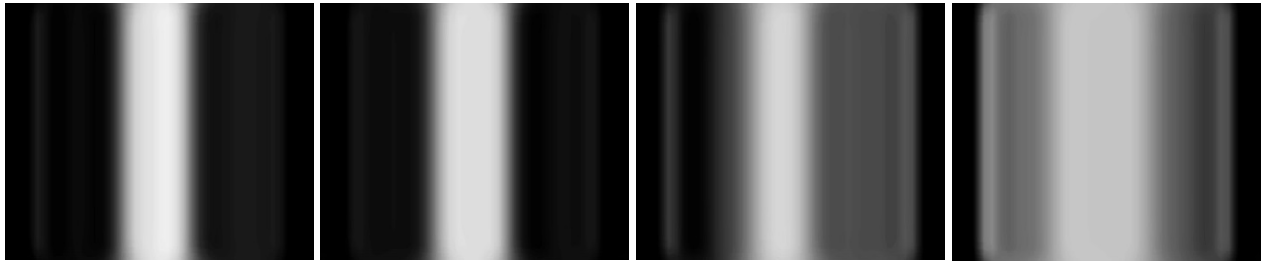
表-4は、発振パルスの振幅で除して無次元化した検出弾性波の相対振幅自乗平均値に関する実験結果を一覧表にして示したものである。また、図-10(a)および(b)は、

それぞれ相対振幅自乗平均値(モルタル部は、図-2に示す試験体左側面から20~60mm位置および140~180mm位置、発泡スチロール部は、左側面から80~120mm位置で測定した結果の平均値)と試験体厚さおよび細骨材寸法との関係を示したものである。これらの表および図によれば、モルタル部の相対振幅自乗平均値は、発泡スチロール部に比べて一桁~二桁大きな値となっており、モルタル内部の変状を容易に評価することが可能といえる。また、検出弾性波の相対振幅自乗平均値は、サンプリング間隔によって影響を受けるため、バラツキが若干大きい。発泡スチロール部においても算出が可能であること、かつ前述の平均伝搬速度と同様に、試験体厚の影響を敏感に反映できること、などの利点を有している。図-11~図-14は、検出弾性波の相対振幅値を用いた内部探査結果をコンター図で示したものであるが、45mmの試験体厚さになると、推定精度の低下が認められる。

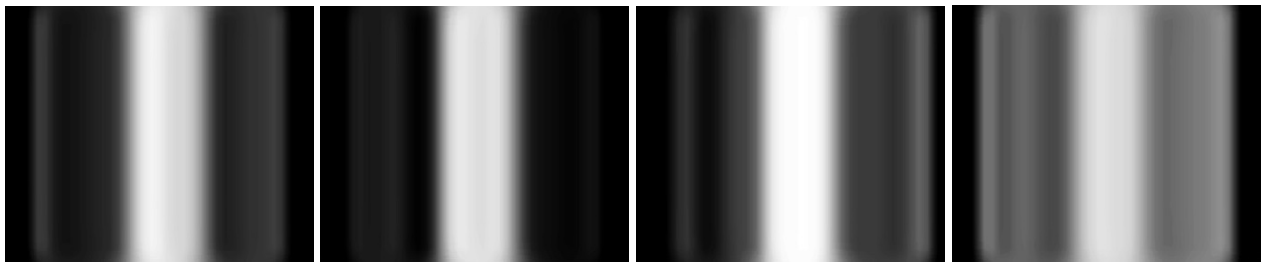
### 4. 結論

1) モルタル部の平均伝搬速度の実験値は、試験体が厚くなるほど増大し、モルタル中と空中を伝搬する弾性波の伝搬速度から算定される計算値と良く一致す

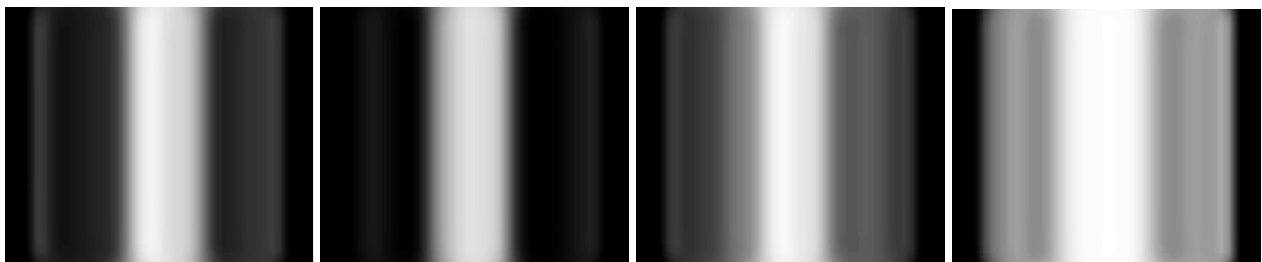
相対振幅値  
スケール : 0.5 0.1 0.01 0.001 0.0001



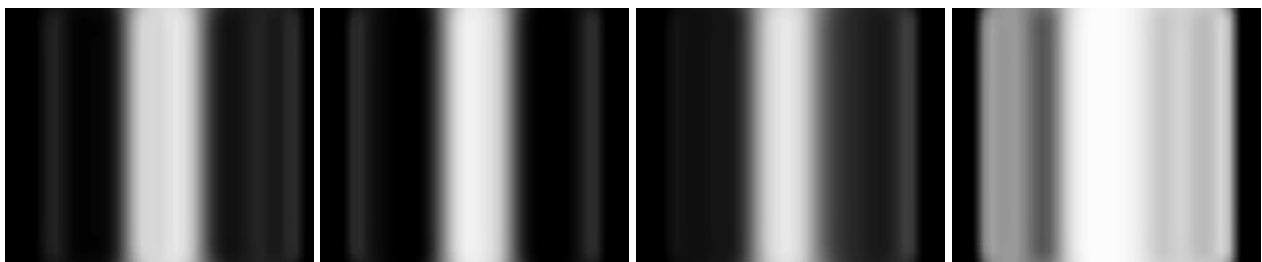
(a) 試験体厚さ : 15mm (b) 試験体厚さ : 25mm (c) 試験体厚さ : 35mm (d) 試験体厚さ : 45mm  
図-11 検出波形の振幅に着目した内部探査結果 (細骨材寸法 : 0.6mmの場合)



(a) 試験体厚さ : 15mm (b) 試験体厚さ : 25mm (c) 試験体厚さ : 35mm (d) 試験体厚さ : 45mm  
図-12 検出波形の振幅に着目した内部探査結果 (細骨材寸法 : 1.2mmの場合)



(a) 試験体厚さ : 15mm (b) 試験体厚さ : 25mm (c) 試験体厚さ : 35mm (d) 試験体厚さ : 45mm  
図-13 検出波形の振幅に着目した内部探査結果 (細骨材寸法 : 2.5mmの場合)



(a) 試験体厚さ : 15mm (b) 試験体厚さ : 25mm (c) 試験体厚さ : 35mm (d) 試験体厚さ : 45mm  
図-14 検出波形の振幅に着目した内部探査結果 (細骨材寸法 : 5.0mmの場合)

るが、発泡スチロール部では、弾性波のエネルギー損失が著しく、平均伝搬速度の算定が困難である。

- 2) 検出弾性波の相対振幅値は、発泡スチロール部に比べてモルタル部が10倍以上の数値を示すため、モルタル内部の変状の正確な評価が可能であり、自動計測・処理による内部探査の指標として適している。

#### 謝 辞

本実験の実施とデータ整理に際して多大なるご助力を得た愛知工業大学学部生の芳賀勝也君および靱山晏央君、並びに測定装置のシステム化に際してご協力を得た

ジャパンプローブ(株)の大平克己氏および菊池和幸氏、三和機器製作所の鳴澤博之氏に対して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 関俊力, 小野晃, 山田和夫: 弾性波トモグラフィ法によるコンクリートの内部探査の推定精度, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.316-321, 2012.7
- 2) 川嶋紘一郎, 犬飼稔嗣, 愛甲安富: 空気超音波法によるコンクリートの非破壊評価, 日本非破壊検査協会平成21年度春期講演大会梗概集, pp.169-172, 2009.5
- 3) 市橋清吾, 河辺伸二: 空気伝搬超音波によるALCパネルタイル張りの浮きの検知に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第48号, pp.69-72, 2010.2