

# 論文 衝撃弾性波法による壁部材内部の豆板探査に関する実験的検討

太田 達見\*<sup>1</sup>・瀧 諭\*<sup>2</sup>

**要旨:** 鉄筋コンクリート部材に生じた豆板の探査には衝撃弾性波法がしばしば用いられるが、その適用条件は十分に把握されているとはいえない。そこで、空隙率が異なるポーラスコンクリートで製作した模擬豆板片を種々の条件で壁試験体に設置し、この豆板を含む壁部の弾性波速度を実験的に求めた。その結果、得られた弾性波速度は、豆板の存在位置等の諸条件にはほとんど影響されないことが確認された。また、豆板を模したポーラスコンクリートと健全部の普通コンクリートの見かけ密度、ヤング係数、ポアソン比、厚さなどに基づく弾性波速度は、模擬豆板を含む試験体壁部全断面での弾性波速度と概ね一致した。

**キーワード:** 衝撃弾性波法, 豆板, 弾性波速度, ヤング係数, 見かけ密度, ポアソン比

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート部材は、コンクリートが型枠内に密実に充填されれば、豆板などの欠陥が生じることなく一体性は確保される。しかし、実施工では、柱や壁の脚部に豆板が生じることがある。発生した豆板は、その後の確な補修を行うためにも、その範囲を早期に把握する必要がある。豆板の存在範囲を把握するには、脱型直後の自由水を比較的多く含むコンクリートに対しても有効と考えられる衝撃弾性波法<sup>1),2)</sup>がしばしば用いられるが、その適用条件は十分に把握されているとはいえない。

そこで、豆板を模したポーラスコンクリート片を空隙率を変えて作製し、これらを様々な条件で配した壁試験体を製作し、衝撃弾性波法によって豆板を含む壁部の弾性波速度を測定し、これら諸条件が測定結果に及ぼす影響を検討した。本報は、その概要をまとめたものである。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用材料および計画調合

#### (1) 使用材料

コンクリートの使用材料およびポーラスコンクリート(調合名: PO10, PO20, PO35)と普通コンクリート(調合名: N)の計画調合を、表-1および表-2に示す。

#### (2) コンクリートの計画調合

部材に生じた豆板を再現するため、実験ではポーラスコンクリートを用いた。豆板を模したポーラスコンクリートと健全部の普通コンクリートの水セメント比は本来同じにすべきであるが、実験において豆板状態を確実に再現するため、ポーラスコンクリートの水セメント比を26.1%とした。なお、ポーラスコンクリートのペース

ト粗骨材空隙比はいずれも7.0とした。

一方、健全部の普通コンクリートには、呼び強度27N/mm<sup>2</sup>、スランブ18.0cm、空気量4.5%(呼び27-18-20N)のレディーミクストコンクリートを用いた。

### 2.2 試験体の仕様

#### (1) 試験体の形状

試験体は、図-1に示すように、建築物の壁脚部を模したもので、壁は厚さ180mm、幅1840mm、高さ500mmとし、この壁に厚さ180mm、幅1840mm、奥行600mmのスラブを付けたものである。この形状の試験体を、計4体製作した。試験体に配した模擬豆板は、相互の影響をできる限り排除するため、豆板同士の間隔を260mm、試験体端部から150mmそれぞれ空けた。

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	諸元
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm <sup>3</sup>
練混ぜ水	W	水道水
細骨材	S	砕砂: 佐野産(石灰石) 表乾密度: 2.65g/cm <sup>3</sup> , 実積率: 62.5%
粗骨材	G	碎石2005: 佐野産(石灰石) 表乾密度: 2.70g/cm <sup>3</sup> , 実積率: 60.0%
混和剤	Ad	高性能AE減水剤標準形(I種)

表-2 コンクリートの計画調合

調合	空隙率 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				Ad (C×%)
			C	W	S	G	
PO10	10	26.1	456	119	166	1551	0.20
PO20	20	26.1	357	93	130	1473	0.50
PO35	35	26.1	192	50	70	1386	0.30
N	—	56.6	309	175	868	951	1.25

\*1 清水建設(株)技術研究所 構造・生産技術センター 情報化生産グループ グループ長 工博(正会員)

\*2 清水建設(株)技術研究所 構造・生産技術センター 情報化生産グループ 主任研究員 工修(正会員)

## (2) 試験体における実験パラメータ

実験では、衝撃弾性波法による豆板探査が可能な条件を明確にするため、ポーラスコンクリートによる模擬豆板（以下、模擬豆板と略記）を設置する試験体に対し、以下のようなパラメータを設定した。

- 1) 材齢（経過日数）：実部材の豆板探査が脱型後間もなく行われる場合とある程度日数が経過してから行われる場合を想定し、試験体の弾性波速度を普通コンクリートの打込み後 4 日、14 日および 28 日に測定した。
- 2) 模擬豆板の空隙率：模擬豆板の空隙率は 10%、20% および 35% とし、試験体 No.1 では空隙率 10%、No.2 と No.4 では 20%、No.3 では 35% の模擬豆板片を配した。
- 3) 模擬豆板の形状：模擬豆板片の厚さ（25～150mm）と幅（50～150mm）を表-3 のように設定した。厚さについては、模擬豆板全体の厚さ（総厚）が同じであっても発生箇所数が異なることを想定し、模擬豆板片 1 枚で構成する（壁面の片側のみに生じる）場合と 2 枚で構成する（壁の両面に生じる）場合を含むこととした。
- 4) 模擬豆板の設置位置：試験体における模擬豆板片の設置位置は、壁の脚部と上部とした。空隙率 20% で厚さと幅が 100mm の模擬豆板については、壁内部（壁芯）の場合を加え、壁表面の場合と比較できるようにした。
- 5) 模擬豆板背面の鉄筋：豆板背面の鉄筋が弾性波速度に及ぼす影響を確認するため、模擬豆板片の背面に鉄筋（D13）が存在する場合と存在しない場合を設けた（空隙率 20% で厚さ 50mm の模擬豆板片が 2 枚の場合）。

### (3) 試験体の製作方法

模擬豆板用のポーラスコンクリートを練り混ぜ、所定の空隙率になるよう、予め定めた質量分のコンクリートを 100×100×400mm 型枠に詰めて成形し、標準養生した後、材齢 7 日目に表-3 に示す寸法に切断した。模擬豆板の切断片は、弾性波速度の測定結果に影響を及ぼさないよう、壁脚部では目荒らしした試験体スラブ部にセメントペーストを塗布して固定し、壁上部では切断片端部を鉄筋用結束線で型枠に固定した。

試験体壁部には、普通コンクリートを 2 層に分けて打ち、棒形振動機で数秒間締固めを行った。脱型は普通コンクリートの打込み後 2 日目にいき、その後は壁部をビニールシートで覆って、20℃の室内にて養生した。

## 2.3 測定項目および測定方法

### (1) コンクリート供試体の力学的性質および空隙率

硬化コンクリートの圧縮強度は、JIS A 1107 に従って測定した。その際、張らの方法<sup>3)</sup>を参考に、φ100×200mm 供試体の縦ひずみをコンプレッソメータで測定し、JIS A 1149 に準拠してヤング係数を求めた。コンクリートの見かけ密度は、供試体の直径、高さおよび質量に基づいて求めた。硬化後のポーラスコンクリートの空隙率は、ポ

ーラスコンクリートの空隙率試験方法（案）<sup>4)</sup>（質量法）に従って、φ100×200mm 供試体を用いて測定した。

### (2) コンクリート供試体の弾性波速度

コンクリート供試体の弾性波速度は、衝撃弾性波法（透過法）<sup>5)</sup>によって求めた。すなわち、圧縮強度試験直前の供試体の両端面中央部を弾性波の入力点と受信点として、供試体の高さ方向の弾性波伝搬時間を測定し、供試体の高さをこの伝搬時間で除して弾性波速度を算出した。弾性波の入力は衝撃加速度計を取り付けた総質量 18g のインパクトをコンクリート表面に打撃することで、また受信は加速度計にて行き、サンプリング間隔は 0.48 μs とした。弾性波の伝搬時間は 1 本の供試体に対し 3 回測定し、3 本の供試体の平均値を弾性波速度とした。

### (3) 試験体壁部の弾性波速度

試験体壁部の弾性波速度は、ノギスにて 0.1mm 単位で測定した模擬豆板を含む壁厚を、当該壁の厚さ方向に対して衝撃弾性波法（透過法）<sup>5)</sup>で測定した弾性波の伝搬

表-3 試験体の実験パラメータ（模擬豆板の寸法）

試験体	空隙率 (%)	模擬豆板の厚さ×幅 (mm) [上段]					試験体に配した模擬豆板枚数 [下段]				
		50×100	100×100	150×100	50×100	75×100	1枚	1枚	1枚	2枚	2枚
No.1	10	50×100	100×100	150×100	50×100	75×100	1枚	1枚	1枚	2枚	2枚
No.2	20	50×100	100×100	150×100	50×100	75×100	1枚	1枚	1枚	2枚	2枚
No.3	35	50×100	100×100	150×100	50×100	75×100	1枚	1枚	1枚	2枚	2枚
No.4	20	100×50	100×100	100×150	50×100	25×100	1枚	1枚*1	1枚	2枚*2	1枚

\*1：模擬豆板を試験体の壁芯に設置した。

\*2：模擬豆板背面に鉄筋（D13）を設置した。

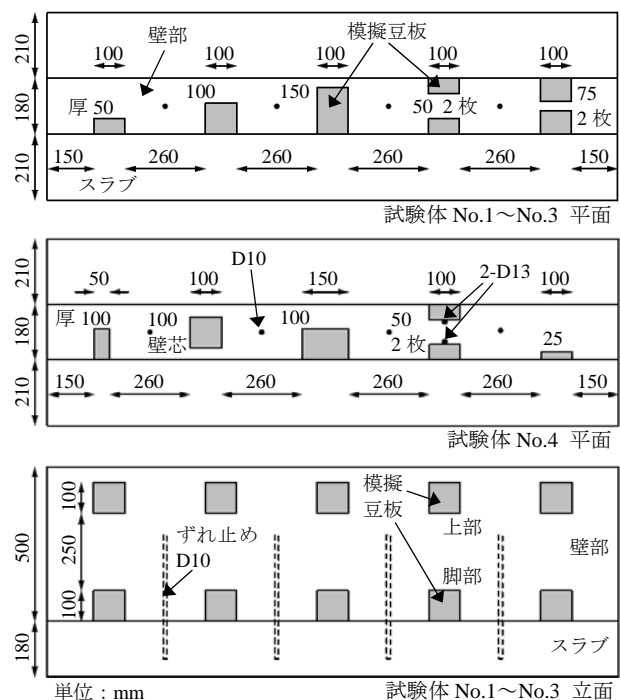


図-1 試験体平面および立面

時間で除して算出した。なお、試験体の模擬豆板を含む壁部1ヶ所に対し5点(1点につき3回の打撃を実施)で弾性波の伝搬時間を測定し、その平均値から弾性波速度を算定した。なお、試験体壁部への弾性波の入出力は、コンクリート供試体の場合と同様に行った。

弾性波速度は、試験体健全部の普通コンクリートの材齢で4日、14日および28日(ポーラスコンクリートの材齢で16日、26日および40日に相当)に測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 使用材料の諸元

##### (1) フレッシュコンクリートの諸性質

コンクリート打込み時のスランプは、ポーラスコンクリートではいずれも0cm、普通コンクリートでは19.0cmであった。また、普通コンクリートの空気量は4.0%、温度は23℃であった。

##### (2) 硬化コンクリートの諸性質

表-4に、試験体の弾性波速度測定時におけるφ100×200mm 供試体の圧縮強度、ヤング係数(静弾性係数)、見かけ密度および弾性波速度を示す。なお、質量法<sup>4)</sup>によって測定したポーラスコンクリートの空隙率は、PO10で9.0%、PO20で18.3%、PO35で33.4%であった。

#### 3.2 試験体の弾性波速度測定結果

試験体における弾性波の伝搬時間と壁厚の実測値から求めた弾性波速度を、各種条件で比較した。

##### (1) 材齢、空隙率および豆板設置位置による比較

図-2に、模擬豆板の幅が100mmの場合の試験体壁部

における弾性波速度を、材齢、空隙率、豆板設置位置(上部と脚部)に分けて示す。いずれの場合も、材齢が経過するにしたがって弾性波速度は増加する傾向にある。これは、供試体の弾性波速度が材齢の経過に伴って増加していることに起因する(表-4参照)。

空隙率に関しては、同一条件で比べると、空隙率の大きいほど弾性波速度は減少し、とりわけ空隙率が35%の場合にその傾向は顕著である。これは、表-4に示すように、空隙率の大きいほど、特に空隙率35%の場合に、弾性波速度が著しく減少することによる。

模擬豆板の設置位置に関しては、模擬豆板の空隙率、厚さ、材齢が同一の場合、脚部と上部とで概ね同等の弾性波速度が得られている。このことから、脚部に設けたスラブは、透過法による弾性波速度の測定結果にはほと

表-4 硬化コンクリートの諸性質

諸元	測定	材齢(日)		調合			
				PO10	PO20	PO35	N
圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	1回目	16	4	51.6	24.9	3.24	22.9
	2回目	26	14	50.5	25.9	3.52	31.3
	3回目	40	28	52.8	30.9	4.28	35.7
ヤング係数 kN/mm <sup>2</sup>	1回目	16	4	35.9	25.8	7.72	24.7
	2回目	26	14	35.2	27.1	9.18	29.4
	3回目	40	28	39.8	30.2	8.94	29.5
見かけ密度 g/cm <sup>3</sup>	1回目	16	4	2.33	2.10	1.75	2.30
	2回目	26	14	2.33	2.09	1.74	2.31
	3回目	40	28	2.33	2.11	1.75	2.30
弾性波速度 m/s	1回目	16	4	4245	4054	2668	3713
	2回目	26	14	4526	3991	2747	4078
	3回目	40	28	4760	4263	2826	4016

材齢の左欄はポーラスコンクリート、右欄は普通コンクリートを表す。

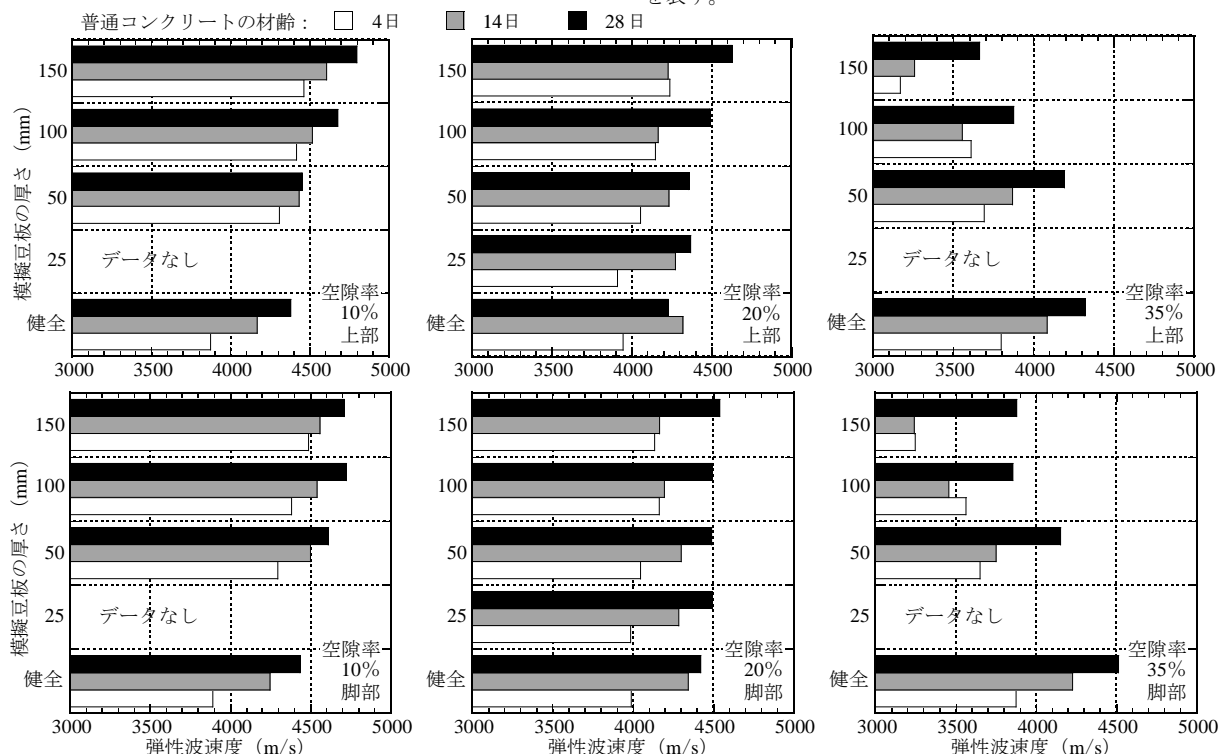


図-2 弾性波速度測定結果の比較

んど影響しないと考えられる。

(2) 模擬豆板の厚さによる比較

図-2 に示すように、空隙率 35% の場合は、模擬豆板の厚さが大きくなると弾性波速度は減少し、空隙率 20% の場合は、模擬豆板の厚さにかかわらず弾性波速度はほぼ同じで、空隙率 10% の場合は、模擬豆板の厚さが大きくなると弾性波速度は増加している。これは、試験体の弾性波速度測定時において、空隙率 20% や 10% の供試体による弾性波速度が普通コンクリートの供試体による弾性波速度と同等もしくは大きいことによる (表-4)。

(3) 模擬豆板の構成枚数による比較

図-3 に、模擬豆板の総厚が同じで、枚数が 1 枚の場合と 2 枚の場合の弾性波速度を比較して示す。ここで、枚

数 1 枚とは、例えば厚さ 100mm の模擬豆板を 1 枚試験体の片面にのみ設置したことを、2 枚とは、厚さ 50mm の模擬豆板 2 枚を試験体の両面に設置したことを表す。模擬豆板の総厚以外が同じ条件で、枚数が 1 枚の場合を 100 としたときの 2 枚の場合の弾性波速度の比は、総厚 150mm では 95.2~105.0 (平均 101.2, 変動係数 2.2%), 総厚 100mm では 92.6~105.6 (平均 100.0, 変動係数 3.0%) であったことから、部材厚さに対する豆板の総厚が同じであれば、弾性波速度は同等であることが確認された。

(4) 模擬豆板の幅による比較

図-4 に、空隙率 20%、模擬豆板の厚さが 100mm で、幅のみが異なる場合の弾性波速度を比較して示す。材齢 4 日の場合には、豆板の幅が大きいほど弾性波速度が増加

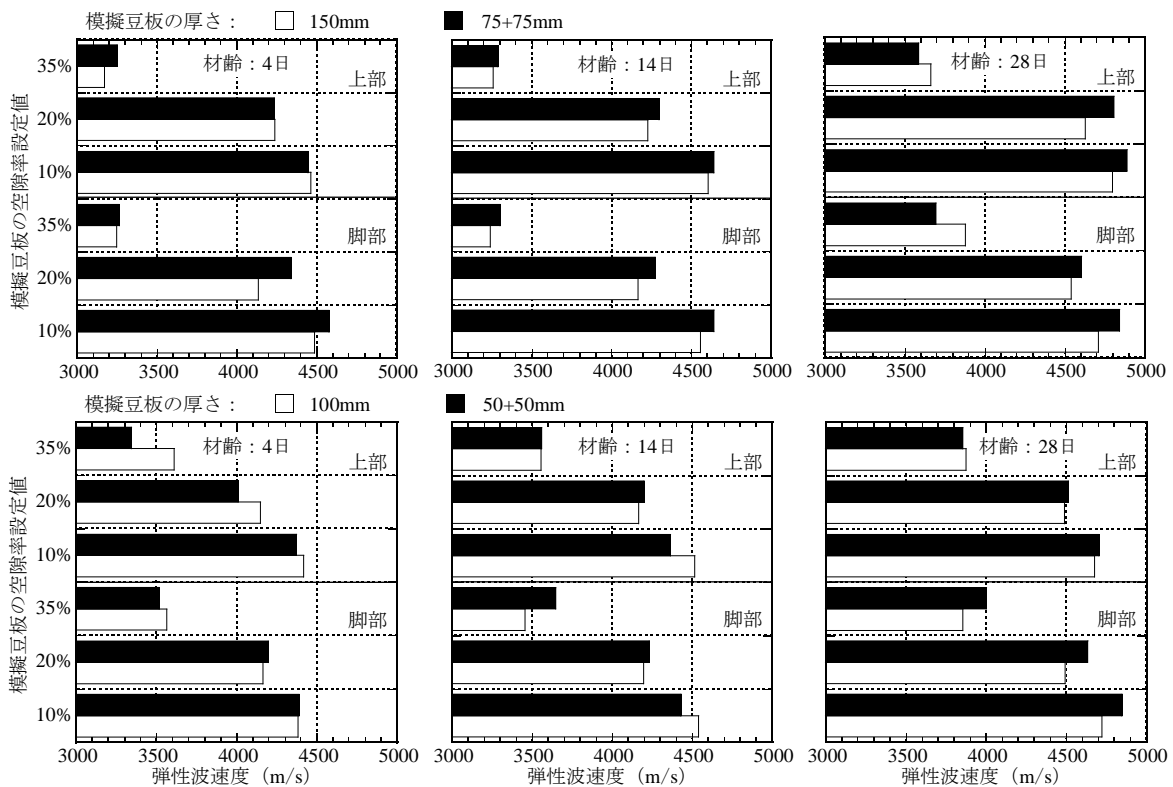


図-3 模擬豆板の構成枚数による弾性波速度測定結果の比較

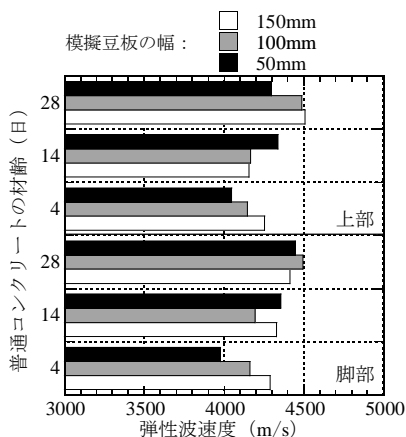


図-4 模擬豆板の幅による比較

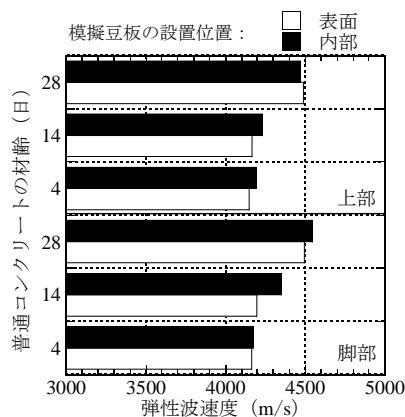


図-5 模擬豆板設置位置による比較 (壁表面と壁内部)

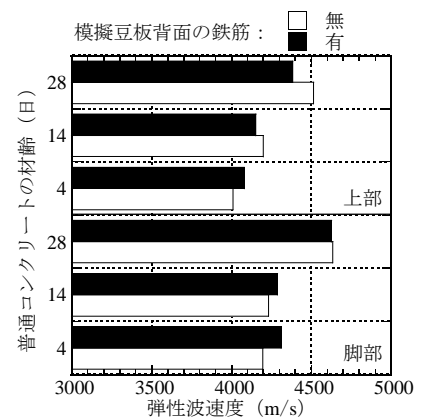


図-6 模擬豆板背面の鉄筋の有無による比較

しているが、材齢 14 日と 28 日では、豆板の幅と弾性波速度の間には一定の関係は認められなかった。今回の結果からは、模擬豆板の幅が弾性波速度の測定結果に及ぼす影響については明確にはならなかった。

(5) 模擬豆板位置（壁表面と壁内部）による比較

図-5 に、空隙率 20%、厚さ 100mm、幅 100mm の模擬豆板を壁表面と壁内部に設置した場合の結果を示す。表面に設置した場合を 100 としたときの内部に設置した場合の弾性波速度の比は 99.6~103.6（平均 101.2、変動係数は 1.4%）で、豆板が表面にある場合と内部にある場合とで試験体の弾性波速度に差は認められなかった。

(6) 模擬豆板背面の鉄筋の有無による比較

図-6 に、空隙率 20% の模擬豆板（厚さ 50mm、幅 100mm）の背面に鉄筋（D13）が存在する場合と存在しない場合の結果を比較して示す。鉄筋が存在しない場合を 100 としたときの存在する場合の弾性波速度の比は 97.1~102.7（平均 100.3、変動係数 2.1%）で、両弾性波速度は同等であった。したがって、D13 の程度の細径鉄筋は弾性波速度にはほとんど影響しないと考えられる。

4. 供試体の物性値に基づく試験体の弾性波速度の評価

3.2 に示したように、実験で用いた模擬豆板は、健全部の普通コンクリートよりも水セメント比が小さいため、実部材で生じうる豆板とは物性値が異なると考えられる。その結果、模擬豆板が試験体壁厚の過半を占めて

も、模擬豆板が存在しない場合より弾性波速度が大きくなっている。そこで、圧縮強度試験用供試体で得た弾性波速度などの諸元に基づき、模擬豆板を含む試験体壁部の弾性波速度を推定し、試験体での実測値と比較した。

(1) 模擬豆板を含む試験体壁部の弾性波速度算定式

試験体壁部の弾性波速度は、壁厚と弾性波の伝搬時間の実測値によって式(1)のように表される。一方、コンクリート部材中の弾性波速度は、ヤング係数、密度およびポアソン比によって式(2)のように表される<sup>5)</sup>。なお、各式における記号は図-7 に示すとおりである。

$$V_p = \frac{T_a}{t_a} = \frac{T_1 + T_s + T_2}{T_1/V_{p1} + T_s/V_{ps} + T_2/V_{p2}} \quad (1)$$

ここで、 $t_a = t_1 + t_s + t_2$

$$V_p = \sqrt{E \cdot (1-\nu) / \{\rho \cdot (1+\nu) \cdot (1-2\nu)\}} \quad (2)$$

実験では、供試体に対し総質量 18g のインパクトの打

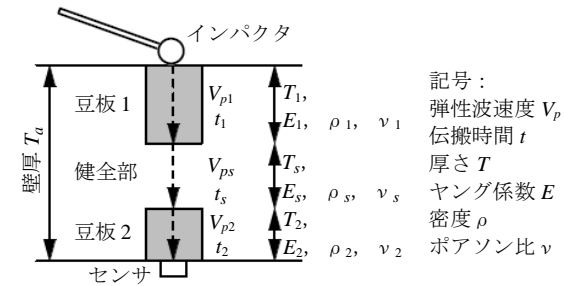


図-7 模擬豆板を含む壁部物性に関する式の中を表記

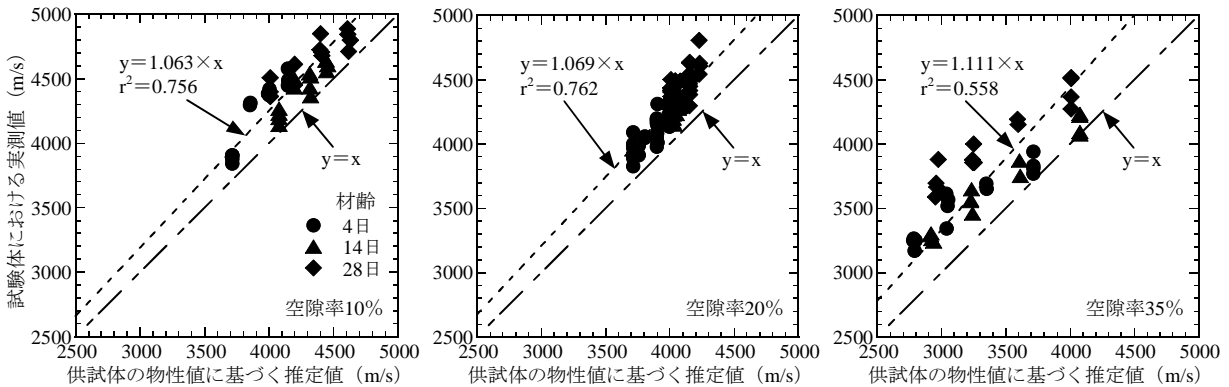


図-8 試験体における弾性波速度の推定値と実測値の比較

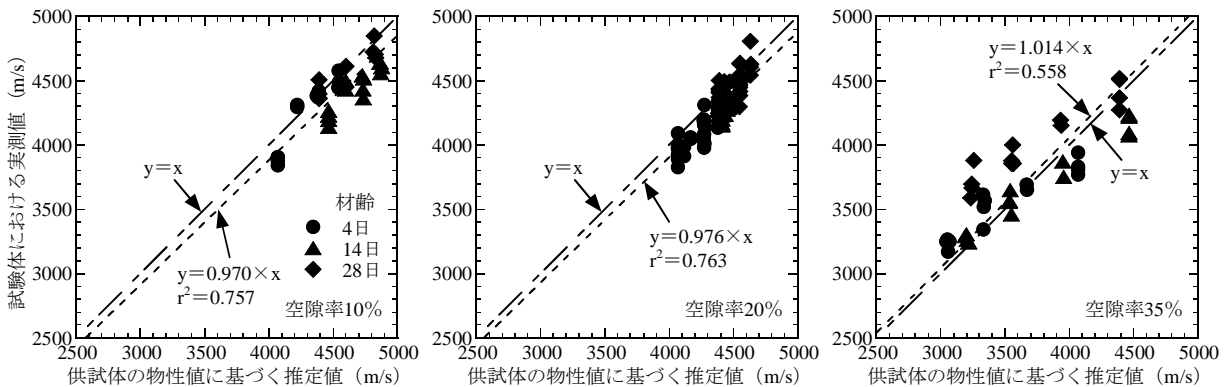


図-9 試験体における弾性波速度の推定値と実測値の比較（ポアソン比を考慮した場合）

撃によって弾性波を入力して弾性波速度を求めた。この場合、弾性波の入力波長は供試体の直径 100mm 以上となる<sup>6)</sup>ため、式(2)のポアソン比は無視することができ<sup>7)</sup>、弾性波速度 ( $V_p'$ ) は式(3)のように表される<sup>5)</sup>。

$$V_p' = \sqrt{E/\rho} \quad (3)$$

## (2) 模擬豆板を含む試験体壁部の弾性波速度推定結果

式(1)の分母の  $V_{p1}$ ,  $V_{ps}$ ,  $V_{p2}$  は、試験体の模擬豆板部と健全部の弾性波速度を表すが、これらに円柱供試体の弾性波速度 (表-4) を代入し試験体の弾性波速度を推定した。推定値と試験体での実測値を比較し、図-8 に示す。

空隙率 10%と 20%の場合は概ね良好な線形関係にあるが、弾性波速度の推定値は試験体での実測値を小さめに評価している。一方、空隙率 35%の場合は、推定値と実測値とは乖離する傾向にある。この理由としては、試験体の弾性波速度は入力点から受信点までの最短時間に基づくものであるが、空隙率 35%の模擬豆板のヤング係数が大きく低下したため、壁断面内の弾性波の最短経路が、豆板部を通過したのではなく、豆板周囲に沿ったものになった可能性が考えられる。

## (3) ポアソン比による弾性波速度の補正結果

図-8 に示す弾性波速度の実測値は、供試体の物性値に基づく推定値より大きい。これは測定対象物の形状と入力波長の関係から弾性波速度が変化することによるものと考えられる。すなわち、棒状体である供試体ではポアソン比を無視した式(3)に、版状の試験体では式(2)によって弾性波速度が決まると考えられる。このことから、尼崎の論文<sup>7)</sup>に基づきポアソン比を 0.25 とし、模擬豆板を含む壁部の弾性波速度を補正した。弾性波速度の補正後の推定値と実測値を比較して、図-9 に示す。

図-9 に示すように、空隙率 10%と 20%の場合の弾性波速度推定値は実測値と良好に一致し、ポアソン比の影響を考慮した評価の妥当性が確認された。また、空隙率 35%の場合も、ばらつきは若干大きい。ポアソン比による補正で実測値を概ね推定できることが判明した。

以上から、コンクリートの豆板部と豆板を含まない健全なコンクリートのヤング係数や密度などの諸物性が把握されていれば、豆板を含む部材の弾性波速度の推定が可能であり、また、これら推定結果は、部材で得られた弾性波速度と概ね一致することが確認された。

## 5. まとめ

空隙率が異なるポーラスコンクリートで模した豆板を様々な条件で設置した壁型試験体に対して、衝撃弾性波法 (透過法) によって弾性波速度を測定し、これら種々の条件が測定結果に及ぼす影響を検証した。本検討で得られた知見をまとめると、次のようになる。

- 1) 豆板を含むコンクリート部材の弾性波速度は、豆板の空隙率が大きくなると著しく減少する。この原理を利用すれば、程度 (等級) が異なる豆板に対しても衝撃弾性波法による探査は十分可能である。
- 2) 豆板が壁部材脚部にある場合と上部にある場合とで弾性波速度は同等であることから、透過法による鉛直部材の弾性波速度は、壁部材脚部にあるスラブの影響をほとんど受けない。
- 3) 豆板が部材表面にある場合と部材内部にある場合で弾性波速度は同等であることから、部材断面内における豆板の存在位置は弾性波速度の測定結果に影響しない。
- 4) 同じ空隙率の豆板が部材内の複数箇所でも生じていても、1ヶ所にのみ生じていても、部材厚さに対する豆板の総厚が同じであれば弾性波速度はほぼ同じになる。
- 5) 鉄筋 (D13) が豆板の背面にある場合とない場合とで弾性波速度は同等であることから、D13 程度の細径鉄筋は弾性波速度の測定結果に影響しない。
- 6) 豆板部と健全部のコンクリートの諸物性 (ヤング係数や密度など) が把握されていれば、豆板が生じた壁部材の弾性波速度を概ね評価することが可能である。

## 謝辞

文末ながら、実験にご協力頂きましたリック・岩野聡史氏、東陽コンサルタント・宮島真氏に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会：新コンクリートの非破壊試験、技報堂出版、2010.3
- 2) 岩野聡史ほか：非破壊試験によるコンクリート構造物の部材厚さの測定および変状の検出、非破壊検査、Vol.58, No.4, pp.152-158, 2009.4
- 3) 張茂剛、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの圧縮強度および弾性係数に及ぼす乾燥養生の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1099- 1100, 2010.9
- 4) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書、2003.5
- 5) 日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の弾性波による試験方法 第2部：衝撃弾性波法 NDIS 2426-2, 2009.6
- 6) 土木研究所、日本非破壊検査協会：非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル、大成出版社、pp.134-135, 2010.8
- 7) 尼崎省二：コンクリートの弾性波速度に及ぼす鋼材の影響、コンクリート工学年次論文集、Vo.24, No.1, pp.1491-1496, 2002