

# 粗骨材の形状、配置が弾性波の伝播速度に及ぼす影響

Influence of the Shape and Position of Coarse Aggregates on the Velocity of the Elastic Waves

魚本 健人\*・伊東 良浩\*

Taketo UOMOTO and Yoshihiro ITO

## 1. はじめに

コンクリートにおける弾性波の挙動を検討するとき、一般的にコンクリートは均質材料として取り扱われることが多い。これは、たとえば粗骨材とマトリックスにおいて生じているような不均質性はコンクリート構造物全体に比べ微小であり、コンクリートを均質であると仮定しても、誤差は無視できる範囲であるという工学的判断によるためと思われる。

しかし、寸法の小さな供試体あるいは大きな構造物でもある特定の領域を問題とする場合には、この不均質性によって生じる誤差は必ずしも無視できる範囲にとどまるとはかぎらない。特に弾性波の伝播速度を利用する手法は、共振特性を利用する手法と比べて局所的な不均質性の影響を受けやすく、測定結果に大きく影響するものと考えられる。

このようなことから本研究では、コンクリート中の粗骨材がコンクリートの弾性波(縦波)伝播速度に及ぼす影響について検討した。ここでは、マトリックスと粗骨材の組み合わせを石膏とアルミニウム(以下アルミと略す)に置きかえて実験を行った後、その挙動を把握するため2次元FEM解析を実施した。

## 2. 石膏とアルミニウムを用いたモデル実験

### 2.1 実験概要

#### (1) 実験供試体

実験に用いた材料は石膏とアルミで、それぞれの物性値は表1に示すとおりである。供試体は、型枠内の所定の位置にアルミを配置した後、石膏と水を1:0.7で練混ぜて流し込み、硬化後温度を50℃に保った状態で重量変化がなくなるまで乾燥して作製した。供試体の寸法は縦320mm、横240mm、厚さ50mmの版状のもので、その内部に図1

に示すように形状、寸法の異なる長さ50mmのアルミ棒を粗骨材として配置した。

#### (2) 測定方法

弾性波速度は、弾性波測定装置(TESCO KH751)により、図2に示すように供試体の短辺に、向かい合うように発振子および受振子を設置し、それぞれを20mmピッチで移動しながらすべての組み合わせについて伝播時間を測定

表1 石膏アルミモデルの材料物性

材 料 名	単位体積重量 $\text{tf/m}^3$	弾性波速度 $\text{km/s}$	動弾性係数 $\text{tf/m}^2$	ポアソン比
石 膏	1.12	2.50	$7.14 \times 10^9$	0.235
アルミニウム	2.69	6.42	$1.13 \times 10^7$	0.345

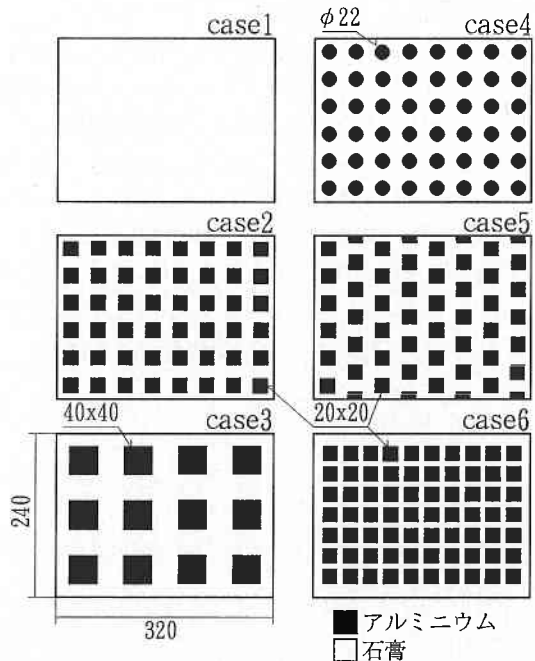


図1 供試体

\*東京大学生産技術研究所 第5部

した。なお実験で用いた弾性波は周波数が50kHzの矩形パルス波である。

2.2 実験結果および考察

各供試体ごとの弾性波速度測定結果を3次元的に示したものが図3である。図からも明らかなように、内部に粗骨材のない case 1 および粗骨材が円形の case 4 を除くと、同一の供試体において発・受振子の位置によって異なった伝播速度が得られる。総じて粗骨材が正方形で発・受振子が斜めに位置する場合に、伝播速度が低めに求められる傾向がある。

また、粗骨材のない case 1 よりも伝播速度が速くなる

ものは case 3 のみで、その他のものは弾性波速度の速いアルミを添加しているにもかかわらず、速度は変わらないか逆に遅くなっている。

図4は、図3に示した結果のうち、発・受振子が正面に向かい合う場合のみを取り出して示したものである。すべてのケースにおいて、供試体中央部で測定するよりも供試体端部で測定する方が伝播速度が速くなる傾向がある。また、このときの到達波の最大振幅を case 1 と case 2 についてみると、case 1 では中央部で175mV、端部で198mVであり、case 2 では中央部で26mV、端部で84mVであった。これによると粗骨材を有する case 2 は粗骨材のない case 1 に比べ、振幅が低下していることがわかる。また、いずれも端部の方が振幅が大きくなっているが、case 2 のほうが中央部の振幅低下の割合が大きいことがわかった。

以上に示したようなことから、内部に異質な材料が配置されることによって、弾性波は均質材料とは異なった挙動

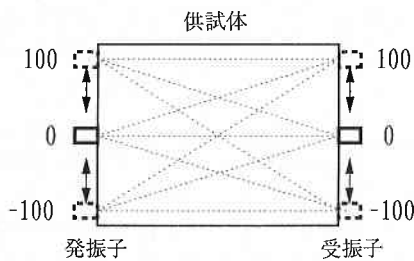


図2 伝播速度測定位置

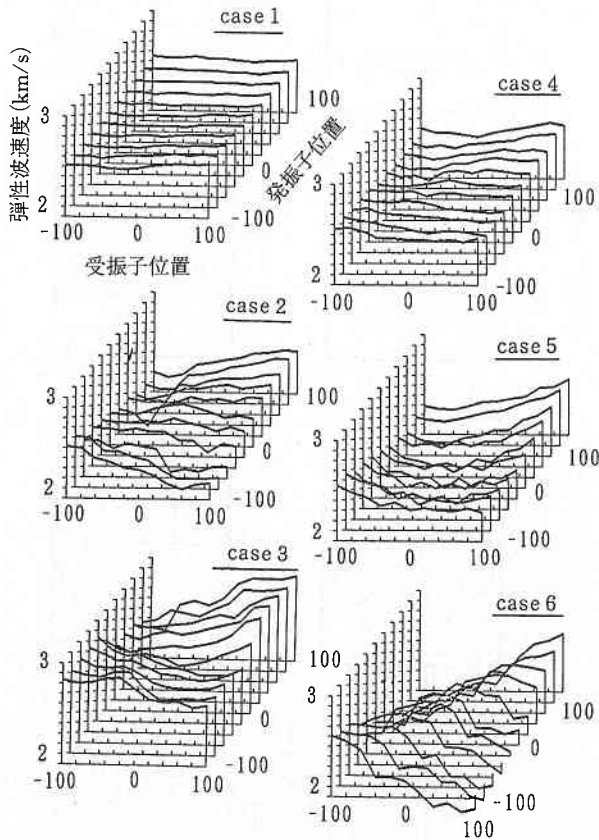


図3 弾性波伝播速度測定結果

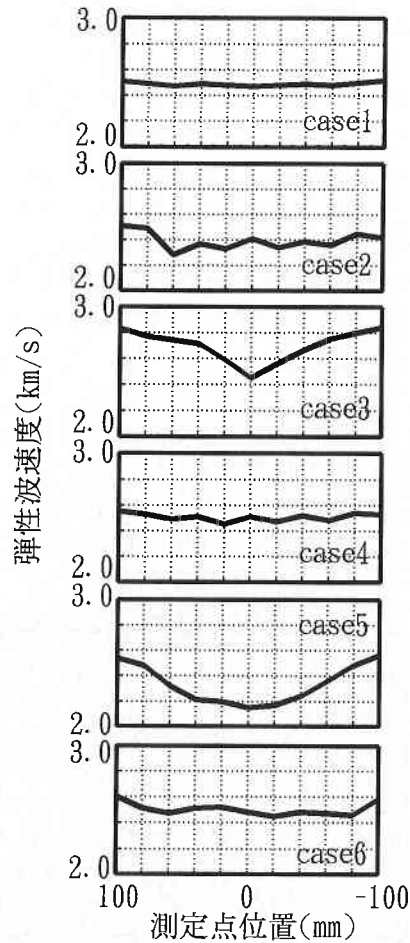


図4 発・受振子が正面に向かい合う場合の伝播速度

研究速報

を示し、明らかに粗骨材の配置、寸法、形状の影響を受けていることがわかった。

3. 弾性波の伝播速度に関する解析的検討

3.1 解析方法

粗骨材とマトリックスをそれぞれ別個のものとしてモデル化し解析する方法として、ここでは、2次元FEMを用いて時間領域における解析を行う。運動方程式の解法はニューマークのβ法を用い、減衰モデルとして比例減衰モデルを用いる。また、弾性波の伝播速度は、変位振幅値に一定のしきい値を設けることにより決定する。

3.2 モデルによる粗骨材の影響の検討

(1) 解析内容

解析は実験ケースに対応して case 1~6 までのパターンについて行う。解析モデルは厚さ方向の拘束のない2次元平面応力モデルとする。粗骨材(アルミニウム)およびマトリックス(石膏)の弾性係数  $E_d$  は、2次元平面応力モデルであることを考慮して、表1の弾性波速度  $V$ 、単位体積重量  $\rho$  およびポアソン比  $\nu$  を式(1)に代入して、マトリックスは  $E_{dm}=6.6 \times 10^6 \text{tf/m}^2$ 、粗骨材は  $E_{da}=7.2 \times 10^6 \text{tf/m}^2$  とした。また、同様のモデルについて粗骨材とマトリックスが密着していない場合を想定して、粗骨材の弾性係数を  $E_{da}=0 \text{tf/m}^2$  とした場合の計算を同時に行う。実験では50kHzの矩形パルス波を与えたが、本解析では解の安定性を考慮して、振動は継続時間  $20\mu\text{s}$  の三角形パルス波を半波長与える。これを短辺の中点をゼロとしてそれから20mmごとに100mmの点までそれぞれ順に与え、対辺において弾性波伝播時間を求める。

$$E_d = V^2 \cdot \rho \cdot (1 - \nu^2) \quad (1)$$

(2) 解析結果と実験結果との比較

図5は、case 4について、粗骨材の弾性係数を  $E_{da}=7.2 \times 10^6 \text{tf/m}^2$  とした場合の変位の波頭の進行を示したも

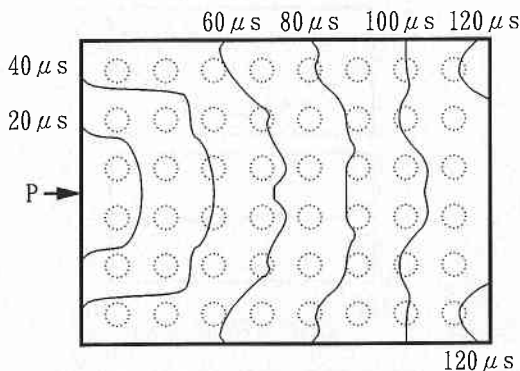
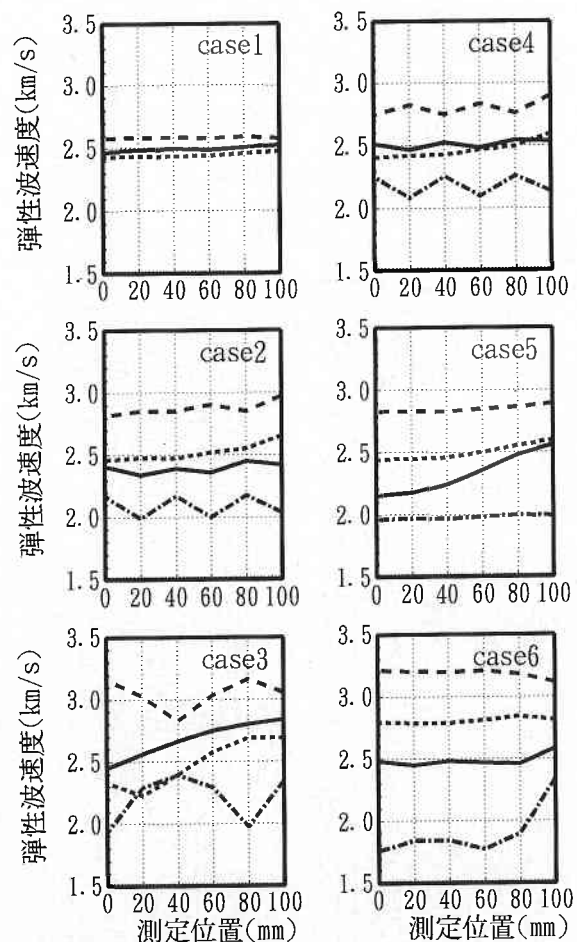


図5 弾性波の波頭の進行(case 4)

のである。波頭の進行はおよそ円弧状であり、弾性波速度の速い粗骨材の縦列部分を先行して伝わっていくのではないことがわかる。

図6は各発振点ごとにその正面位置で求められた波形から伝播速度を算定し、実験結果と比較したものである。ここで  $E_{da}=7.2 \times 10^6 \text{tf/m}^2$  としたのものについては、変位振幅のしきい値を  $1 \times 10^{-9} \text{m}$  とした場合と  $5 \times 10^{-9} \text{m}$  とした場合について比較した。なお、 $E_{da}=0 \text{tf/m}^2$  としたものはしきい値を  $1 \times 10^{-9} \text{m}$  とした場合についてのみ伝播速度を求めた。

全体に、 $E_{da}=7.2 \times 10^6 \text{tf/m}^2$  とし、しきい値を  $1 \times 10^{-9} \text{m}$  とした場合の計算結果は測定値よりもかなり大きい。しきい値を大きくすると伝播速度は遅くなり、測定結果に類似した傾向になる。また、 $E_{da}=0 \text{tf/m}^2$  とすると伝播速度は



— 実測値    - - - 計算値(しきい値:  $1.0 \times 10^{-9}$ )  
 ..... 計算値(しきい値:  $5.0 \times 10^{-9}$ )  
 - - - 計算値( $E_{da}=0$ )

図6 伝播速度の比較

測定結果よりも遅く算定される。

また、測定結果から弾性波速度は供試体の端部ほど弾性波速度が速くなっているが、解析結果においても  $E_d = 7.2 \times 10^9 \text{tf/m}^2$  としたものについては case 2, 4, 5 など で明らかにその傾向が認められる。実験により、端部では到達波の振幅が中心部に比べて大きいことが示されたが、解析においても端部では波の拡散が少ないために波の振幅が大きく、到達時間が早めに算定された。

次に、case 2, 4 の測定結果の伝播速度分布に着目すると、この凹凸は粗骨材の解析で  $E_d = 0 \text{tf/m}^2$  として弾性波が粗骨材中を通過しないとした場合の傾向に一致している。これは計算では粗骨材とマトリックスが完全に結合しているとして理論的な透過率で伝播しているのに対し、実際には空隙などにより両者の境界面での反射が大きく、粗骨材を一部う回した経路をたどったものが測定されるためと考えられる。

### 3.3 コンクリートモデルによる検討

#### (1) 解析内容

ここでは、FEM により実際の粗骨材およびモルタルに近い物性値を用いて、弾性波速度に生じる差異を検討する。計算に用いる粗骨材およびモルタルの物性値を表 2 に示す。解析モデルは同様に case 1 ~ 6 とし、伝達速度の算定はしきい値は  $1 \times 10^{-9} \text{m}$  として求める。

#### (2) 解析結果

各ケースの伝播速度の平均値と標準偏差、範囲をこれまでの石膏アルミモデルとともに示すと表 3 となる。コンク

リートモデルの場合においても、石膏アルミモデルと比べてばらつきの程度は小さくなるが、伝播速度が配置、寸法、形状の影響を受けて変化することがわかる。

ここで最小速度から最大速度までの範囲についてみると、粗骨材を 40mm として縦列に配置した case 3 で範囲が 0.24km/s 程度と最大で、最も小さいもので粗骨材を千鳥に配置した case 5 で 0.11km/s となっており、粗骨材の形状や配置の影響で 3 ~ 6 % 程度の変動が生じうる可能性を示している。

## 4. ま と め

実験および解析の結果、粗骨材の配置、寸法、形状の影響を受けてコンクリートの弾性波速度が少なくとも 2 ~ 5 % 程度は変動することがわかった。また、弾性波速度の速い粗骨材の量を増加しても、マトリックスと粗骨材の境界面での減衰の影響で、必ずしもコンクリートの弾性波速度が速くなるとは限らないことがわかった。

実験結果と解析結果が必ずしも一致しない原因として、粗骨材とマトリックスの界面における付着の問題が考えられた。もし、付着の程度が弾性波速度に強く影響を及ぼすとすれば、弾性波速度とコンクリート強度の関係における重要な因子とも考えられ、今後の検討課題である。

(1994年 2月10日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 尼崎省二・宮川豊章・小林茂広：超音波法による構造物コンクリートの品質評価に関する 2, 3 の考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1 pp479-484, 1991
- 2) コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp69-103, 1992. 3

表 2 コンクリートの材料物性

材 料 名	単位体積重量 $\text{tf/m}^3$	弾性波速度 $\text{km/s}$	動弾性係数 $\text{tf/m}^2$	ポアソン比
モルタル	2.1	3.5	$2.6 \times 10^9$	0.20
粗骨材	2.7	5.0	$6.8 \times 10^9$	0.30

表 3 伝播速度のばらつき (単位:  $\text{km/s}$ )

case	解析値 (コンクリート)			解析値 (石膏アルミ)			測定値 (石膏アルミ)		
	平均	標準偏差	範囲	平均	標準偏差	範囲	平均	標準偏差	範囲
1	3.507	0.030	0.074	2.442	0.019	0.047	2.49	0.018	0.050
2	3.767	0.057	0.157	2.522	0.073	0.196	2.40	0.040	0.110
3	3.816	0.084	0.238	2.485	0.195	0.466	2.68	0.150	0.390
4	3.733	0.061	0.168	2.468	0.069	0.185	2.51	0.028	0.070
5	3.756	0.043	0.107	2.500	0.064	0.157	2.33	0.169	0.410
6	3.950	0.024	0.069	2.805	0.021	0.057	2.49	0.047	0.130