Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，1994

論　文

[1123] 粗骨材の形状、配置が弾性波の伝播速度に与える影響

伊東良浩*1・魚本健人*2

1．はじめに

コンクリートの弾性波伝播速度にばらつきが生じる原因として、コンクリート自体の不均質性によるもの、製造過程において発生するもの、測定装置や測定手法の違いによるものなどが考えられる。例えば、尼崎らによりコンクリート打設時の骨材の分離・沈降によって、同一供試体内において伝播速度が２０％程度も異なることが報告されており［１］、このようなばらつきは弾性波法による非破壊試験の信頼性に対する懸念材料の一つである。

本研究では、コンクリートがマトリックスと粗骨材という材質の異なる材料で生成されていることが、このようなばらつきを生じる一つの原因と考え、この不均質性が弾性波の伝播挙動に与える影響について検討する。ここでは、不均質性が及ぼす影響を明確にするため、マトリックスと粗骨材の組み合わせを弾性波速度の大きく異なる石膏とアルミニウム（以下アルミと略す）に置きかえ供試体を作製した。この供試体の伝播速度を測定した後、２次元ＦＥＭにより同様のモデルで解析を行い粗骨材の影響について検討した。

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

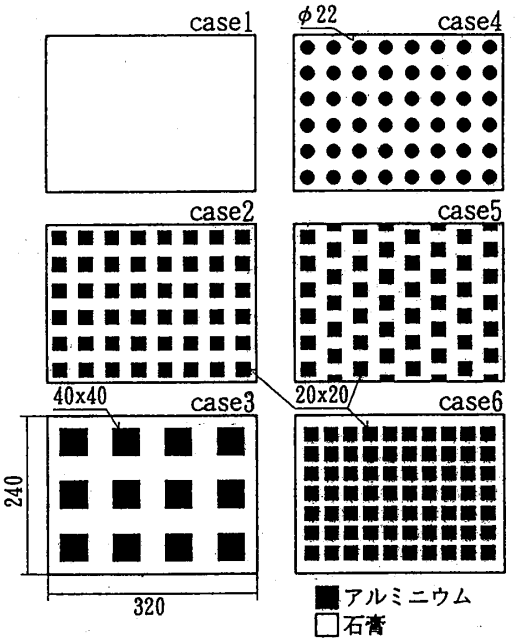
実験に用いた材料は石膏とアルミで、それぞれの物性値は表－１に示すとおりである。供試体は、型枠内の所定の位置にアルミを配置した後、石膏と水を１：０．７で練混ぜて流し込み、硬化後温度を５０℃に保った状態で重量変化がなくなるまで乾燥して作製した。供試体の寸法は後の解析、発・受振子の設置などを考慮して、縦３２０mm、横２４０mm、厚さ５０mmの版状のもので、その内部に図－１に示すように形状、寸法の異なる長さ５０mmのアルミ棒を粗骨材として配置した。

(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・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した。なお実験で用いた弾性波は周波数５０kHzの矩形パルス波である。

表－１　石膏アルミモデルの材料物性

材料名	単位体積重量tf/m³	弾性波速度km/s	動弾性係数tf/m²	ポアソン比
石膏	1.12	2.50	7.14×10^{5}	0.235
アルミニウム	2.69	6.42	1.13×10^{7}	0.345



図－１　供試体

*1　佐藤工業株式会社　中央技術研究所主任（正会員）
*2　東京大学教授　生産技術研究所　第５部、工博（正会員）

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

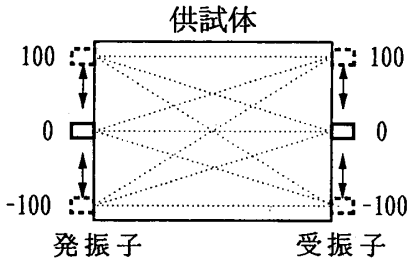
２．２　実験結果および考察

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。また、これらの結果の内、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が図－４である。図より以下のようなことがわかる。

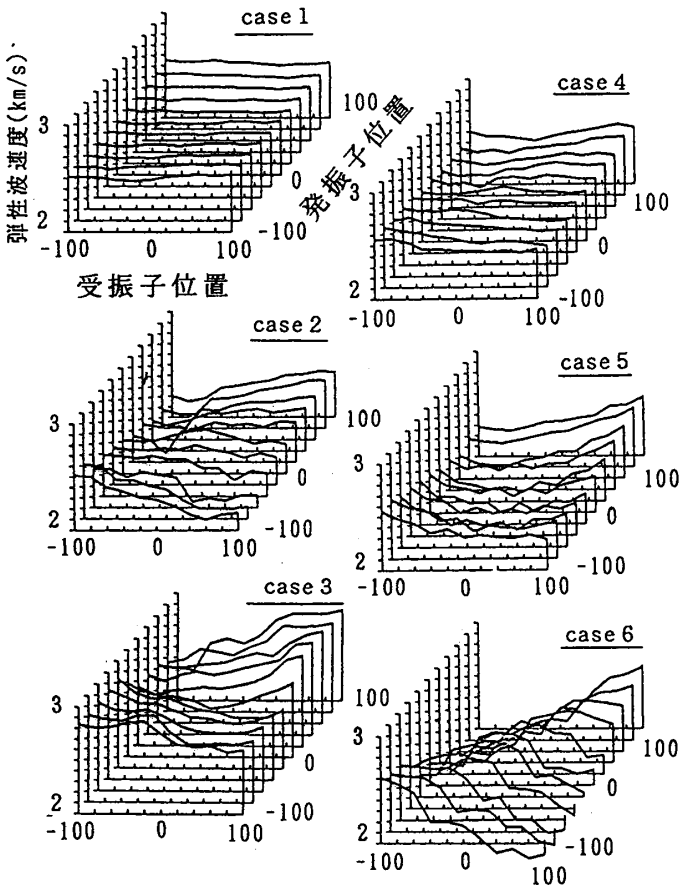
①粗骨材のないcase１よりも伝播速度が速くなる傾向にある　ものはcase３のみで、その他のものはcase４を除き伝播速度が遅くなる傾向がある。またcase２、４について発・受振子の中心線上に粗骨材が並ぶ箇所と粗骨材が存在しない箇所の伝播速度を比較すると、粗骨材がないところの方が伝播速度が速くなっている。このように弾性波速度の速い粗骨材をマトリックスに添加しても、必ずしも伝播速度が速くなっていない。

②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弾性波速度が速めになる傾向がある。供試体端部では、理論的には拘束力が小さいために伝播速度が低下することが考えられるが、実際には逆に速度は速くなっている。

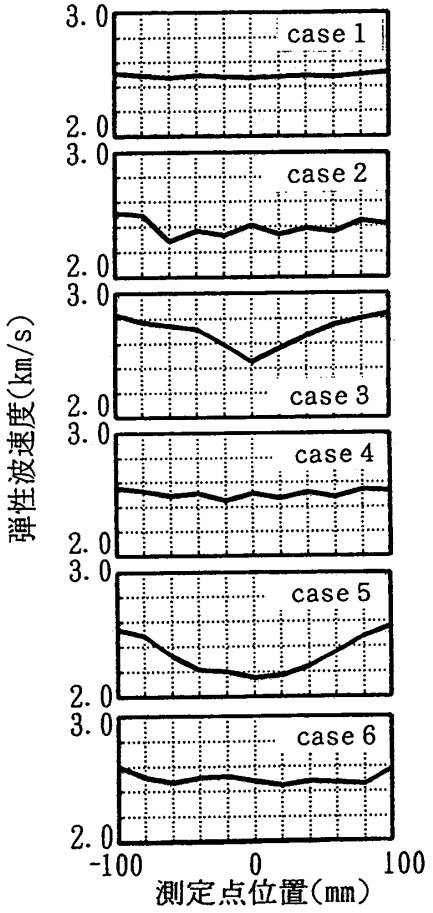
③内部に粗骨材のないcase１および粗骨材が円形のcase４では、発振子と受振子の位置関係によらずほぼ一様な伝播速度が得られる。逆に粗骨材が正方形のcase２、３、５、６では、発振子と受振子の位置が斜めになっている場合、伝播速度が低くなる傾向がある。粗骨材の比率の高いcase６が最もその傾向が顕著である。



図－２　伝播速度測定位置



図－３　弾性波伝播速度測定結果

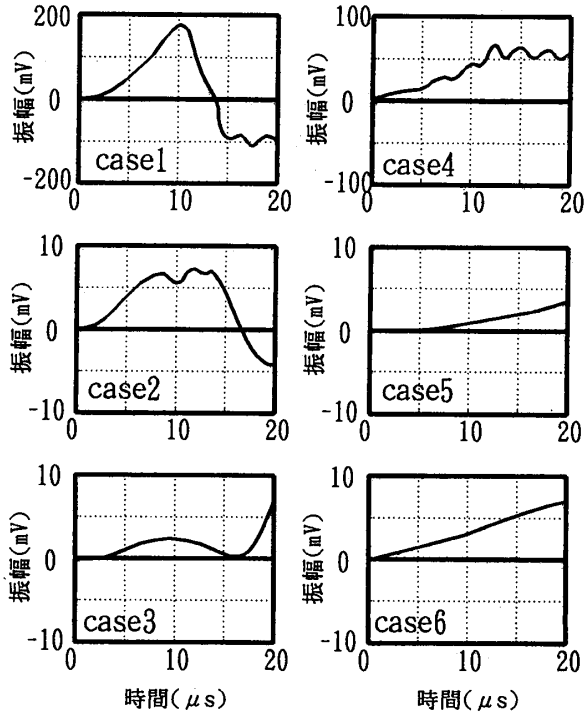


図－４　正面位置での伝播速度

NII-Electronic Library Service

また、図－５は各ケースについて供試体の中心線上で測定した時の到達波の立ち上がり部分の波形である。case１に比べて他のケースはすべて振幅が小さいが、その中でcase４は比較的大きな振幅となっていることがわかる。

以上に示したように、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を示す可能性が示された。



図－５　到達波の立ち上がり波形

３．弾性波の伝播速度に関する解析的検討

３．１解析方法

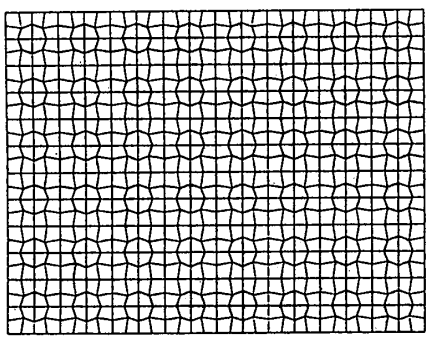
粗骨材とマトリックスをそれぞれ別個のものとしてモデル化し解析する方法として、ここでは、２次元ＦＥＭを用いて時間領域における解析を行う。運動方程式の解法にはニューマークのβ法を用い、減衰モデルとして比例減衰モデルを用いるものとする。弾性波の到達時間は変位振幅値に一定のしきい値を設けることにより決定するものとする。

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case１～６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。図－６にcase４の要素分割図を例として示す。なお、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Ｅｄ 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ρおよびポアソン比νを式（１）に代入して、マトリックスはＥｄｍ＝６．６ｘ１０^{5}tf/m^{2}、粗骨材はＥｄａ＝７．２ｘ１０^{6}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Ｅｄａ＝０tf/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を考慮して、振動は継続時間２０μｓ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。

$$Ed = V^{2} \cdot \rho \cdot (1 - \nu^{2}) \qquad (1)$$



図－６　要素分割図

(2)解析結果と実験結果との比較

図－７は、一例としてcase４を取りあげ、粗骨材の弾性係数をＥｄａ＝７．２ｘ１０^{6}tf/m^{2}とした場合の変位の伝播状況を示したものである。弾性波の波頭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優先的に伝わっていくのではないことがわかる。

また、図－８は各発振点ごとにその正面位置で求めた波

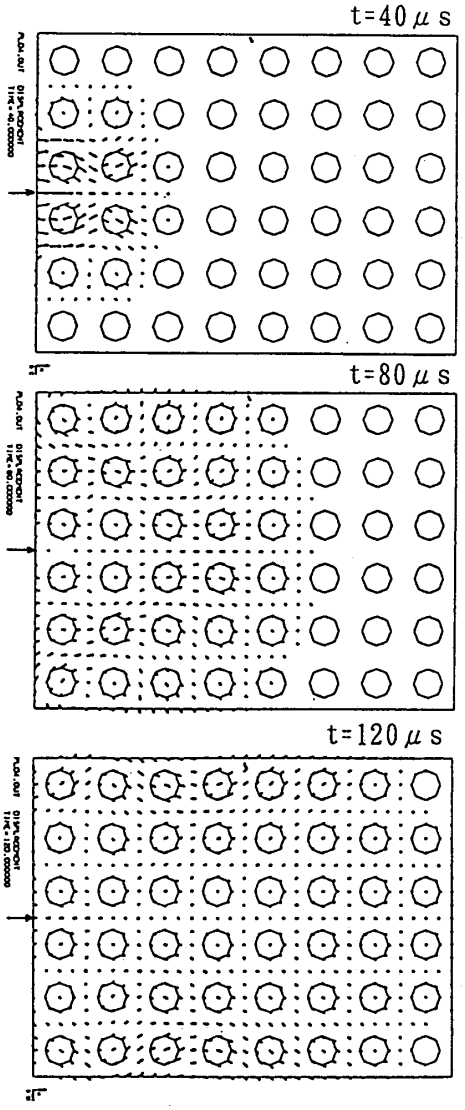
NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

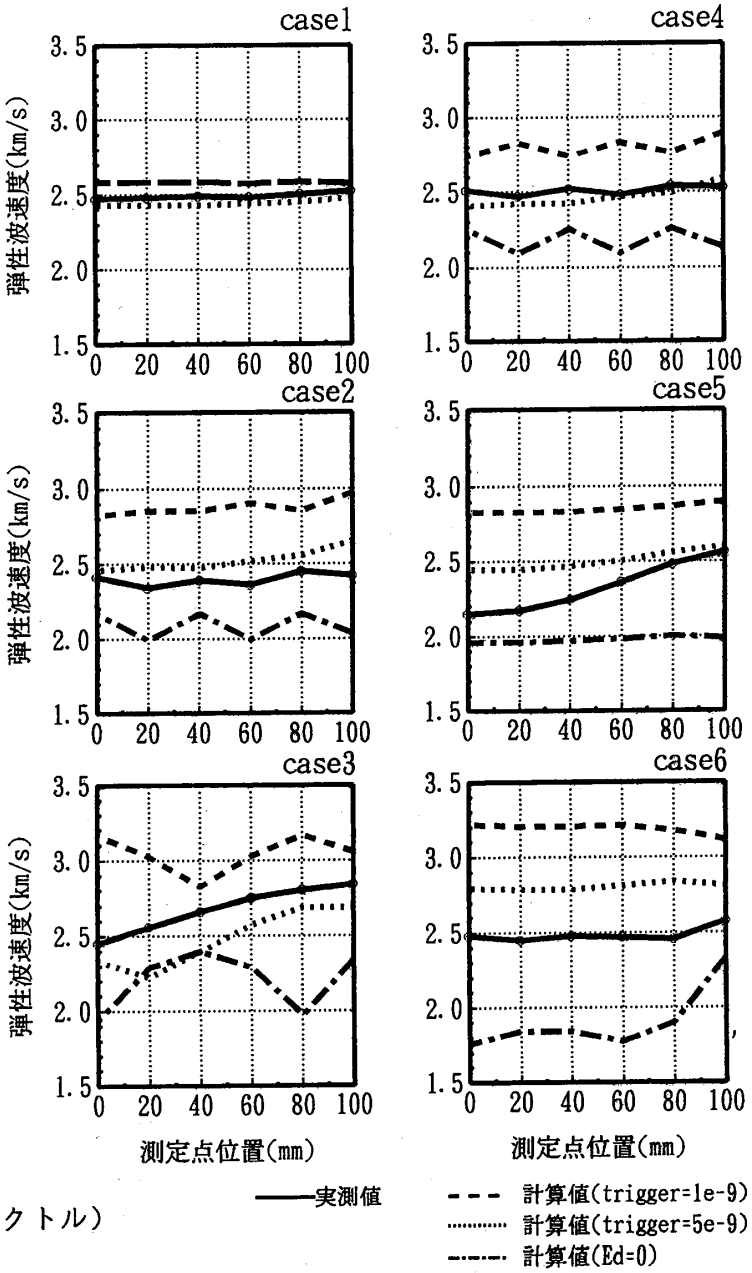
形から伝播速度を算定し、実験結果と比較したものである。ここでEda＝７．２ｘ１０^{6}tf/m^{2}としたものについては、しきい値を１×１０$^{-9}$mとした場合と５×１０$^{-9}$mとした場合について比較した。Eda＝０tf/m^{2} としたものはしきい値を１×１０$^{-9}$mとした場合についてのみ計算した。

各計算結果は必ずしも測定結果に一致していないが、定性的な一致点に着目して実験結果との比較を試みる。以下にそれらについて述べる。

①しきい値を大きくするとしきい値に達するまでの時間が長くなり伝播速度は低下するが、測定位置により低下の度合いが異なる。しきい値を５×１０$^{-9}$m とした時には、中央部よりも端部の速度が高いという結果になる。これはcase３、５における測定結果の傾向と一致する。逆にcase１ではこのような傾向は計算結果、測定結果とも認められない。粗骨材があるものについては、粗骨材とマトリックスの境界面で反射・屈折・散乱などにより、到達波の振幅が小さく



図－７　弾性波の伝播状況（変位ベクトル）



図－８　伝播速度の比較

NII-Electronic Library Service

継続時間が長いものとなるが、端部では波の拡散が少ないためにその影響が小さくなることが原因であると考えられる。

②case２、３、４の解析結果では、粗骨材の配列の影響を受けて速度分布に凹凸を生じている。これらとcase２、４の測定結果を比較すると、Ｅda＝０tf/m² として弾性波が粗骨材中を通過しないとした場合の凹凸に一致している。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、実際には両者の境界面での反射がこれよりも大きく、粗骨材を一部迂回した経路を辿ったものが測定されるためと考えられる。case６で、粗骨材の比率が５０％程度になっているにもかかわらず、伝播速度が大きくなっていないのもこのためと考えられる。

③粗骨材の形状の影響についてcase２とcase４を比べると、Ｅda＝７．２ｘ１０⁶tf/m²としたものについては、case２の方がやや高い値を示し、逆にＥda＝０tf/m² とした場合にはcase４の方が伝播速度は速い。つまりマトリックス中を伝播する波だけを比較した場合は、粗骨材が円形であるcase４の方が速いということになる。これは、粗骨材部分を通過する際に境界面が円形である方がよりスムーズに回折し、波のエネルギーが損なわれないので、受振点でより速い立ち上がりを示すためと考えられる。このことから粗骨材が円形の場合はマトリックスの物性値の影響をより受けやすいと見ることができる。

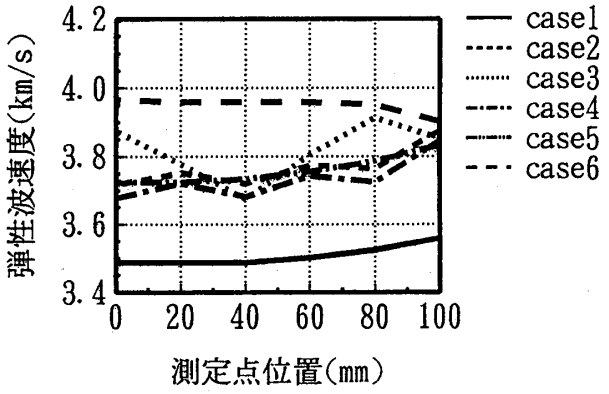
３．３コンクリートモデルによる検討

(1)解析内容

石膏アルミモデルでは両者の物性値の差異がかなり大きいので、粗骨材の形状や配置の違いにより、弾性波速度がかなり変化することが確認できた。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、どの程度弾性波速度に差異が生じる可能性があるかを検討する。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case１～６とし、伝達速度はしきい値は１×１０⁻⁹m として求める。

表－２　コンクリートの材料物性

材料名	単位体積重量tf/m³	弾性波速度km/s	動弾性係数tf/m²	ポアソン比
モルタル	2.10	3.50	2.60x10⁶	0.200
粗骨材	2.70	5.00	6.80x10⁶	0.300



図－９　コンクリートモデルでの伝播速度計算値

(2)解析結果

図－９に各ケースの伝播速度の計算結果を示す。また表－３上段はこれらの平均速度と標準偏差、範囲を示す。下段はそれらを式（２）に示すような「単純計算速度」で除したものを示したものである。石膏アルミモデルでは計算結果の平均値は単純計算速度よりも１０～３０％小さい値になっているのに対し、コンクリートの物性値を用いると計算結果の平均値は単純単純計算速度とほぼ一致するようになる。このような石膏アルミモデルとコンクリートモデルでの差異は、粗骨材とマトリックスの音響インピーダンスの違いによる弾性波の透過率が、石膏アルミモデルでは２８％と小さいのに対して、コンクリートモデルでは７１％とかなり大きな値であることによると考えられる。しかし、case６のように粗骨材比率を５０％としたものは、わずかであるが石膏アルミモデルと同様に速度が

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

低下する傾向が生じている。また、速度のばらつきについても、程度は小さくなるものの石膏アルミモデルと同様に粗骨材の配置、寸法、形状の影響を受けて伝播速度が変化していることがわかる。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case３で範囲が約０．２４km/sと最大となっており、粗骨材の形状や配置の影響で最大６%程度の変動が生じうることを示している。

$$1/Vt = x/Va + (1-x)/Vm \qquad (2)$$

ここで　Ｖｔ：単純計算速度　Ｖａ：粗骨材弾性波速度　Ｖｍ：マトリックス弾性波速度
ｘ：全体積に占める粗骨材比率

４．まとめ

本研究では、コンクリートが持つ不均質性が弾性波に与える影響について、モデル実験およびＦＥＭにより検討した。その結果をまとめると次の通りである。

表－３　伝播速度のばらつき

単位:km/s

case	解析値(ｺﾝｸﾘｰﾄ) 平均	標準偏差	範囲	解析値(石膏ｱﾙﾐ) 平均	標準偏差	範囲	実験値(石膏ｱﾙﾐ) 平均	標準偏差	範囲
1	3.51	0.03	0.07	2.44	0.02	0.05	2.49	0.02	0.05
2	3.77	0.06	0.16	2.52	0.07	0.20	2.40	0.04	0.11
3	3.82	0.08	0.24	2.49	0.20	0.47	2.68	0.15	0.39
4	3.73	0.06	0.17	2.47	0.07	0.19	2.51	0.03	0.07
5	3.76	0.04	0.11	2.50	0.06	0.16	2.33	0.17	0.41
6	3.95	0.02	0.07	2.81	0.02	0.06	2.49	0.05	0.13
上段の値を単純計算速度で除したもの									無次元
1	1.00	0.01	0.02	0.98	0.01	0.02	1.00	0.01	0.02
2	1.00	0.02	0.04	0.85	0.02	0.07	0.81	0.01	0.04
3	1.01	0.02	0.06	0.84	0.07	0.16	0.91	0.05	0.13
4	0.99	0.02	0.04	0.84	0.02	0.06	0.85	0.01	0.02
5	0.99	0.01	0.03	0.85	0.02	0.05	0.79	0.06	0.14
6	0.96	0.00	0.02	0.78	0.01	0.02	0.69	0.01	0.04

(1) 粗骨材比率が同一でも、粗骨材の配置、寸法、形状の影響を受けて、供試体および測定位置によって弾性波速度がばらつくことがわかった。また、粗骨材とマトリックスの間の弾性波透過率の減少が平均の弾性波速度の低下を招く原因となると考えられた。

(2) 粗骨材とマトリックスの境界面で弾性波の一部が反射、散乱し、到達波は振幅が小さく継続時間の長いものに変化する。また、境界面を多く通過する波は、反射を繰り返すために減衰し受振子に到達しない可能性がある。このため、入力信号の大きさや受振側のしきい値のレベルによって、得られる弾性波速度は大きく変化する可能性があると考えられた。

(3) 実験結果と解析結果は必ずしも一致しなかった。これは石膏とアルミの界面での付着が完全でなく、弾性波の透過率が解析と異なっているためではないかと思われる。逆にこのような解析と実際の差異が付着の程度と関連づけられれば、コンクリートの強度特性と何らかの関係があることも考えられ、今後の検討課題としたい。

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, pp.479-484,1991

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,pp.69-103,1992.3

NII-Electronic Library Service