

コンクリート中における弾性波伝播挙動に関する基礎的研究

岩波 光保¹・大即 信明²・二羽 淳一郎³・鎌田 敏郎⁴・長瀧 重義⁵

¹学生員 東京工業大学大学院博士後期課程 土木工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)
(現在 運輸省港湾技術研究所 構造部構造強度研究室 〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

²正会員 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

³正会員 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (同上)

⁴正会員 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

⁵フェロー会員 新潟大学教授 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050)

本研究においては、コンクリート中における弾性波伝播挙動を解明することを目的として、コンクリートの不均一性(骨材の存在、マトリックス部分の特性変化、マイクロクラックの存在)が弾性波伝播速度および周波数特性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、コンクリート中の骨材の大きさや量が弾性波伝播挙動に及ぼす影響が大きいことが、実験的、理論的に示された。さらに、マトリックス部分の密実性は弾性波伝播速度と密接な関係があり、骨材界面性状の変化やマイクロクラックの存在は、弾性波の伝播速度には影響しないものの、その周波数特性を大きく変化させることが明らかとなった。

Key Words : concrete, elastic waves, velocity, frequency, scattering

1. はじめに

近年コンクリート構造物に対する維持管理の重要性が認識されるようになり、コンクリート構造物の劣化診断技術が注目を集めるようになってきた。特に構造物に損傷を与えることなく比較的簡便に試験を行うことができる非破壊的な劣化診断技術が脚光を浴びつつある。このような手法によれば、構造物の劣化程度を経時的に追跡することができ、その適切な維持管理にとって欠かすことのできない劣化予測を行う上で重要な基礎資料を得ることができる。

非破壊的な手法の中でも特に、弾性波を用いた手法はコンクリート内部の劣化状況を簡便に評価できるため、効率的な維持管理を行う上で極めて有効である。例えば、コンクリートのひび割れ深さ測定¹⁾、コンクリートの圧縮強度推定²⁾、コンクリートの材料劣化評価³⁾などが例として挙げられる。これらの評価に弾性波の伝播特性、例えば伝播速度や周波数特性などを利用するためには、コンクリート中における弾性波伝播挙動を十分に把握した上で、劣化等にとまなう内部状態の変化が弾性波伝播特性にどのように反映されるのかを明らかにしておく必要がある。しかしながら、コンクリート中における弾性波

伝播挙動に関しては、一部検討されているものの⁴⁾、不明確な部分が多く残されているのが現状である。したがって、このような状況で上記のような評価を行ったとしても、その評価結果は信頼性に欠けるものと言わざるを得ない。

コンクリート中における弾性波伝播挙動は極めて複雑なものではあるが、その構成材料単体、すなわちセメントペーストと骨材は比較的均質な材料であると考えられる。著者らは、コンクリートをセメントペースト・マトリックスに骨材が分散して存在する複合材料であると考え、その弾性波伝播挙動について基礎的な検討を行うこととした。このような複合材料中における弾性波伝播挙動を複雑にしているのは材料の不均一性であり、結果的に弾性波の伝播速度や周波数特性が大きく変化する。中でも特に、

- ①骨材の存在
- ②マトリックス部分の特性変化
- ③マイクロクラックの存在

がコンクリート中を伝播する弾性波の速度および周波数特性に及ぼす影響は大きいと考えられる。

そこで本研究においては、これらの不均一性が弾性波伝播速度および周波数特性に及ぼす影響について、実験的、理論的に検討を行った。検討に際して

は、まずコンクリートのような粒子分散型複合材料中における弾性波伝播挙動の特徴を把握するため、モデル骨材を用いて作製した供試体に対して弾性波透過試験を行い、モデル骨材の直径、量、ならびに材質の違いが弾性波の伝播速度および周波数特性に及ぼす影響について検討を行った。また粒子分散型複合材料の弾性定数を理論的に算出した研究成果や球形粒子による弾性波の散乱を定式化した既往の研究に基づいて、実験結果の理論的検証を試みた。続いて上記のモデル試験の結果を踏まえて、実際の骨材を用いたコンクリート供試体に対しても同様な実験を行い、コンクリート中の骨材の最大寸法、形状、量、あるいは界面性状が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。さらに、セメントペースト・マトリックスの特性およびコンクリート中のマイクロクラックの存在が弾性波伝播挙動に及ぼす影響についても調べ、コンクリートの不均一性が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。

2. モデル骨材を用いた弾性波伝播挙動に関する基礎的検討

コンクリートのような粒子分散型複合材料中における弾性波伝播挙動に関する基礎的な知見を得ることを目的として、コンクリート中の骨材をモデル化した供試体を用いて検討を行った。この際、モデル骨材の直径、混入量および材質の変化が弾性波伝播速度および周波数特性に及ぼす影響について調べた。さらに粒子分散型複合材料に対する弾性定数の定式化を行った既往の研究や球形粒子による弾性波の散乱現象を表現した既往の研究に基づいて、実験結果の理論的検証を試みた。

(1) 実験概要

a) 供試体概要

コンクリート中の骨材をモデル化するため、モデル骨材をセメントペースト中に混入させた供試体を作製した。供試体寸法は、 $100 \times 200 \times 200$ (mm)である。用いたセメントペーストの水セメント比(W/C)は、供試体作製時にモデル骨材が沈降しない程度の粘性を確保するため、0.30とした。

モデル骨材には、骨材と比較的近い音響インピーダンスを有するガラス球と、それと著しく異なる音響インピーダンスを有する鋼球を用いた。ここで音響インピーダンスとは、弾性波が伝播する媒質の密度と伝播速度の積で定義されるものである。ガラス球および鋼球の音響インピーダンスは、それぞれ

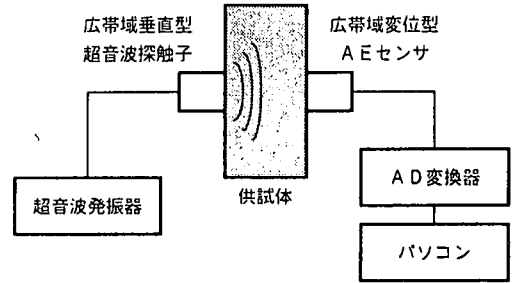


図-1 弾性波測定システム

13.1, $46.8 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ である。なお一般的な骨材の音響インピーダンスは $10 \sim 15 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ であり、本実験で用いた供試体のマトリックス部分(W/C=0.30のセメントペースト)の音響インピーダンスは、 $9.58 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ である。

モデル骨材の直径および混入量が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討するため、混入するガラス球の直径を 12, 20, 30(mm)、骨材体積濃度を 10, 25, 35(%)と変化させた供試体を作製した。用いたガラス球の密度および弾性波伝播速度は、 2.50g/cm^3 , 5.60km/s である。

またガラス球とは異なる音響インピーダンスを持つ鋼球を用いることにより、モデル骨材-マトリックス間の音響インピーダンスの差が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。セメントペーストの音響インピーダンスを 1 とした場合のガラス球および鋼球の音響インピーダンスは、それぞれ 1.36, 4.89 であり、両者の実験結果を比較することにより、モデル骨材-マトリックス間の音響インピーダンス差が異なる場合について検討することができる。この際、両モデル骨材の直径は 12mm、骨材体積濃度は 25%で等しくした。

b) 弾性波透過試験の概要

用いた測定システムを図-1に示す。広帯域垂直型超音波探触子により供試体中に入射されたパルス状の弾性波は、供試体中を伝播した後、広帯域変位型AEセンサにより受振された。この際、送信パルス幅は $0.8 \mu\text{sec}$ 、送信電圧は 65V とした。受振された弾性波は、高速AD変換器において、サンプリング周波数 2MHz でデジタル化し、パソコン上で記録・解析した。評価項目としては、供試体中の弾性波伝播時間より得られる弾性波伝播速度と、受振波形に対してFFT処理を施すことにより得られる弾性波の周波数分布を取り上げた。

発受振センサの供試体表面への設置に際しては、表面粗度が試験結果に及ぼす影響を除去するため、

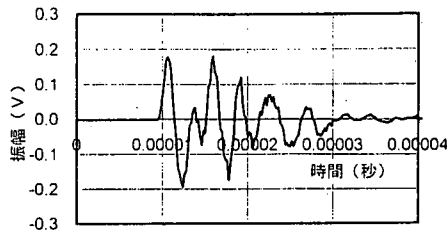


図-2 アルミニウム供試体を用いた場合の受振波形

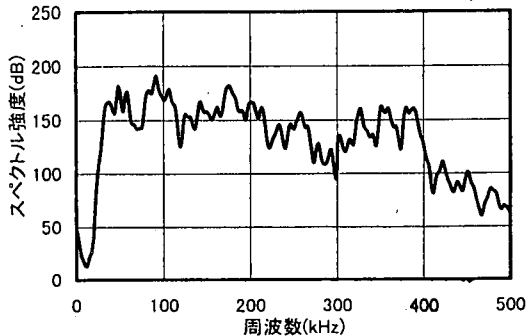


図-3 入射弾性波の周波数特性

あらかじめ供試体表面をグラインダで平滑に研磨し、適当な接触媒質を用いた。また供試体の含水状態が試験結果に及ぼす影響を考慮して、試験実施直前まで供試体を水中に浸しておき、余分な水分をウェスで拭き取った後に測定を行った。

このような試験方法・条件のもとで、本研究で対象とする周波数範囲においては弾性波の減衰をほとんど無視できるアルミニウム板（100×200×200 (mm)）に対して、弾性波透過試験を行った。その際に得られた受振波形およびその周波数分析結果を図-2～3に示す。これより、本研究で用いた弾性波は、0～500(kHz)という比較的広い周波数範囲にわたって成分を有していることが確認できる。また受振波には、供試体中を往復伝播した弾性波は含まれていないこともわかる。

本研究においてはこれ以降、上記と同一の試験方法・条件で弾性波透過試験を行うこととした。

(2) 実験結果および考察

a) モデル骨材として用いたガラス球の直径および混入量が弾性波伝播速度に及ぼす影響

図-4～5に、モデル骨材の直径および混入量を変化させた場合の弾性波伝播速度の計測結果を示す。これらによれば、骨材径よりも骨材量の変化の方が

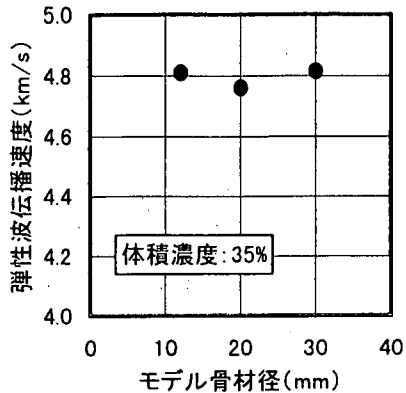


図-4 モデル骨材径と弾性波伝播速度の関係

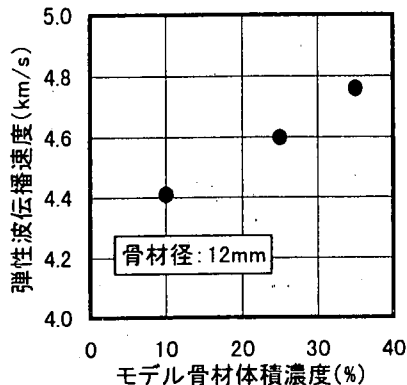


図-5 モデル骨材量と弾性波伝播速度の関係

表-1 各材料の諸物性

材料種類	密度 (g/cm ³)	伝播速度 (km/s)	ポアソン比
セメントペースト(W/C=0.3)	2.21	4.33	0.242
ガラス球	2.50	5.60	0.200
鋼球	7.86	5.95	0.300
セメントペースト(W/C=0.5)	1.97	3.72	0.265
骨材	2.61	5.63	0.200

弾性波伝播速度に及ぼす影響は顕著であることがわかる。これは、表-1に示すように、マトリックス部分であるセメントペーストよりも、モデル骨材として用いたガラス球の方が単体での弾性波伝播速度が大きく、その混入量が多いほど全体としての弾性波伝播速度が大きくなるためと推測される。なお図-4に示すように、混入量が等しい場合では、骨材径が大きいくほど弾性波伝播速度が若干大きくなる傾向が認められる。これは、骨材径が大きいくほど比表面積が小さくなり、脆弱な遷移帯形成量が少なくなることや弾性波の散乱にともなって弾性波伝播速度に変化が生じることによるものと考えられる。いず

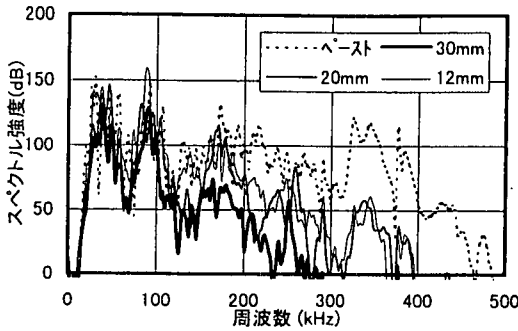


図-6 モデル骨材径と弾性波周波数特性の関係
(体積濃度：35%)

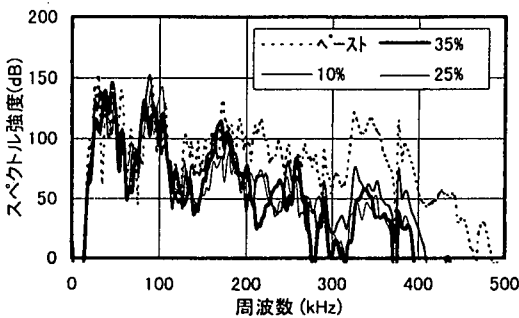


図-7 モデル骨材量と弾性波周波数特性の関係
(骨材径：12mm)

れにせよ骨材径の影響は、混入量の影響に比較すればごくわずかである。

b) モデル骨材として用いたガラス球の直径および混入量が弾性波の周波数特性に及ぼす影響

次にモデル骨材の存在が、供試体中を伝播した弾性波の周波数特性に及ぼす影響について検討を行った。図-6～7に、セメントペースト中のガラス球の直径および量を変化させた場合の透過弾性波の周波数分析結果を示す。これらによれば、ガラス球の直径が大きくなるほど、またガラス球の混入率が高くなるほど、周波数分布のうち高周波成分が減衰していくのがわかる。この減衰の影響を受けている周波数範囲は200～400(kHz)であり、ガラス球の直径と同程度の波長に相当する周波数範囲と一致する。このことから、この減衰はモデル骨材の存在に起因する弾性波の散乱によるものと推測される。また本実験の範囲内においては、モデル骨材量よりもモデル骨材径の方が周波数特性に及ぼす影響は大きかった。この傾向を定量化するため、式(1)で定義される周波数分布の平均周波数 f_{ave} を評価指標として導入した。

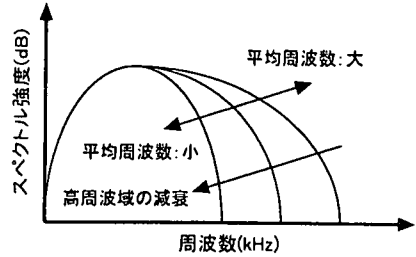


図-8 平均周波数の概要

$$f_{ave} = \frac{\int f \cdot S(f) df}{\int S(f) df} \quad (1)$$

ここで、 f ：周波数、 $S(f)$ ：周波数 f におけるスペクトル強度である。この平均周波数は、周波数分布の重心位置を表すものであり、図-8に示すように、高周波成分が減衰するほど、その値は小さくなるものである。したがって、この値の大小によって、高周波成分の減衰を定量的に扱うことができる。そこで上記のモデル骨材の直径および混入量を変化させたシリーズのそれぞれについて、平均周波数を算出した結果を図-9～10に示す。このように、ガラス球の直径を変化させたシリーズの方が平均周波数の減少が顕著であり、高周波成分の減衰が著しいことが的確に表されている。

c) 材質の異なるモデル骨材を用いた場合

直径 12mm のガラス球および鋼球を $W/C=0.30$ のセメントペースト中に体積濃度 25%で混入した場合の弾性波伝播速度は、それぞれ 4.42km/s、4.50km/s であった。このように鋼球を用いた場合の方が弾性波伝播速度が大きくなったのは、ガラス球よりも鋼球の方が単体としての伝播速度が大きいためである。また両供試体において得られた透過弾性波の周波数分布を図-11に示す。これによれば、鋼球を用いた場合の方が高周波域における減衰が若干大きいことがわかる。これは、ガラス球-マトリックス間よりも鋼球-マトリックス間の方が音響インピーダンス差が大きく、モデル骨材界面での弾性波の散乱が著しかったためであると推測される。したがって、ある媒質中に異なる音響インピーダンスを有する粒子が混入した場合、両者の音響インピーダンス差が大きいくほど、周波数分布における高周波域の減衰が顕著になるといえる。またガラス球と鋼球をモデル骨材として用いた場合には、セメントペーストとの付着性状が異なることから、骨材界面に形成される遷移帯の影響も考慮する必要がある。

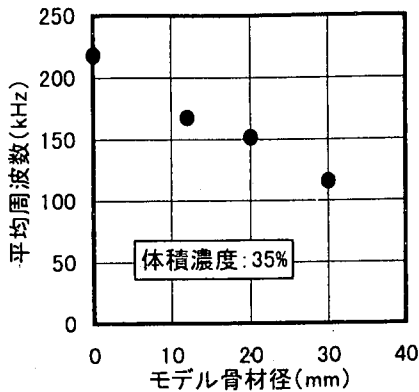


図-9 モデル骨材径と平均周波数の関係

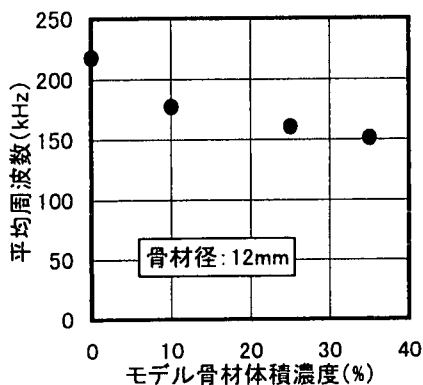


図-10 モデル骨材量と平均周波数の関係

(3) 理論的検証

a) 弾性波伝播速度に関する検討

上記の実験的検討により、弾性波伝播速度に及ぼす骨材径の影響は小さいが、骨材量が伝播速度に及ぼす影響は大きいことが示された。弾性波動論⁵⁾よれば、理論的な弾性波伝播速度 V は次式で得ることができる。

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

ここに、 E : 弾性係数、 ρ : 密度、 ν : ポアソン比である。密度 ρ については、セメントペーストおよびガラス球単体での密度とその構成比より算出することができ、また弾性係数 E およびポアソン比 ν については、Weng⁶⁾により定式化された複合材料の弾性定数を用いて求めることができる。この定式化は、多相系の粒子分散型複合材料の弾性定数を各構成要素ごとの弾性定数から算出するものであり、ここではモデル骨材供試体を 2 相系粒子分散型複合材料として解析することとした。マトリックスの体積弾性

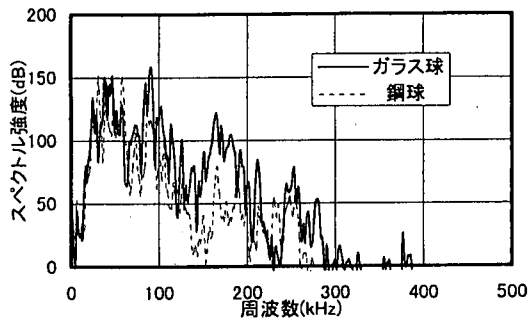


図-11 材質の異なるモデル骨材を用いた場合の弾性波周波数分布

率および剛性率を K_0, G_0 、分散粒子の体積弾性率および剛性率を K_1, G_1 、その粒子混入率を r とすると、それらから構成される複合材料の体積弾性率 K および剛性率 G は、次式のようになる。

$$\frac{K}{K_0} = 1 + \frac{r}{\frac{3(1-r)K_0}{3K_0 + 4G_0} + \frac{K_0}{K_1 - K_0}} \quad (3)$$

$$\frac{G}{G_0} = 1 + \frac{r}{\frac{6(1-r)(K_0 + 2G_0)}{5(3K_0 + 4G_0)} + \frac{G_0}{G_1 - G_0}} \quad (4)$$

また体積弾性率 K および剛性率 G は、弾性係数 E およびポアソン比 ν より以下のように関係づけられる。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

したがって、体積弾性率 K および剛性率 G が得られれば、弾性係数 E およびポアソン比 ν を求めることができる。モデル骨材供試体の各構成要素(セメントペーストおよびガラス球)の体積弾性率 K および剛性率 G は、それぞれの弾性波伝播速度(縦波) V_p およびポアソン比 ν を用いて算出することとした。まず V_p と ν より横波の伝播速度 V_s を次式により求める。

$$V_s = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1+\nu)}} V_p \quad (7)$$

これらと K, G の間の以下の関係式を用いて,

$$\frac{3K+4G}{3} = \rho \cdot V_p^2 \quad (8)$$

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (9)$$

各構成材料の V_p と v より, K と G を決定した. 計算に用いた諸量を表-1 に示す. 本手法で求めた弾性波伝播速度と実測の弾性波伝播速度を比較した結果を図-12 に示す. このように, 両者の関係は原点を通る傾き 45 度の直線上に分布しており, 実験結果の妥当性を示している. さらにこの図によれば, 骨材量を変化させたシリーズにおける弾性波伝播速度の変化の方が骨材径を変化させた場合より大きく, モデル骨材供試体による実験結果とよく対応していることがわかる. 以上より, 弾性波伝播速度は骨材量に大きく依存するというモデル試験結果の妥当性が理論的に確認された.

b) 弾性波の周波数特性に関する検討

モデル骨材供試体による検討により, 透過弾性波の周波数分布において, 骨材の存在による高周波域での減衰は, 骨材径が大きいほど, また骨材量が多いほど著しく, またその傾向は骨材径が変化する場合の方が顕著であることが示された. これは, 骨材の存在により弾性波の散乱が生じることによると考えられるため, 図-13 に示すようなモデルを考えることとした. このモデルは, 球形粒子が無限体内に 1 個存在するものであり, これによれば球形粒子に弾性波が入射したときの散乱波の強度を解析することができる. すなわち, 入射波の音圧 ξ_a に対する点 P における散乱波の音圧 ξ_r の比は, Rayleigh により次式のように表されている⁷⁾.

$$\frac{\xi_r}{\xi_a} = \frac{\pi T}{r \lambda^2} \left(\frac{K_1 - K_0}{K_0} + \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0} \cos \theta \right) \quad (10)$$

ここに, λ : 弾性波の波長, ρ_0 : マトリックスの密度, ρ_1 : 粒子の密度であり, セメントペーストおよびモデル骨材は均質な弾性体とみなしている. この際, 波長は粒子直径よりも小さいこととしている.

この関係を利用した Mason らによる減衰定数の算出方法⁸⁾を参考にすれば, モデル骨材供試体中における弾性波の減衰定数を以下のように求めることができる. この際, 球形粒子はマトリックス中にランダムに 3 次元的に配置していると仮定している.

$$\alpha = \frac{2\pi^3 r \cdot T}{\lambda^4} \left(\frac{K_1 - K_0}{K_0} \right)^2 \quad (11)$$

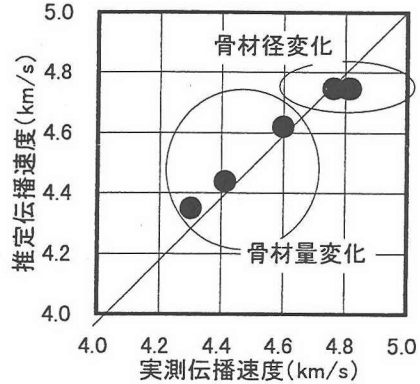


図-12 理論的に算出した弾性波伝播速度

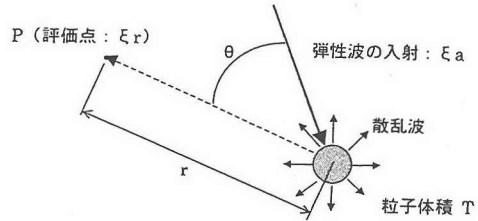


図-13 弾性波の散乱モデル

ここで多重散乱の影響は無視している. この式(11)に基づいて, 各モデル骨材供試体に対する減衰定数を算出した結果を図-14~15 に示す. このように, 骨材径が大きくなるほど, また骨材量が多くなるほど減衰定数は増加していることがわかる. さらにその増加傾向は, 骨材径が変化した場合の方が顕著であり, モデル骨材供試体による実験結果とよく対応している.

次に図-16 に, 異なる材質のモデル骨材を用いた場合の減衰定数算出結果を示す. これによれば, マトリックスとの音響インピーダンス差の大きい鋼球を用いた場合の方が減衰定数が若干大きくなっており, 実験結果の妥当性が示された.

以上より, モデル骨材供試体の実験により得られた弾性波の周波数特性の変化傾向を定性的にはあるが理論的に説明することができた. さらに定量的に骨材による散乱の影響を数学的に表現するためには, 多重散乱の影響, 骨材界面におけるモード変換の影響, 供試体側面からの反射波の影響などを考慮する必要があるものと考えられる.

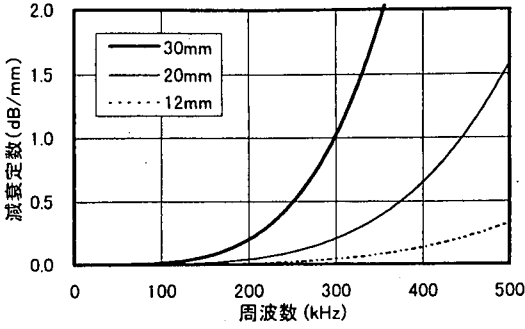


図-14 モデル骨材径が異なる場合の減衰定数
(体積濃度：35%)

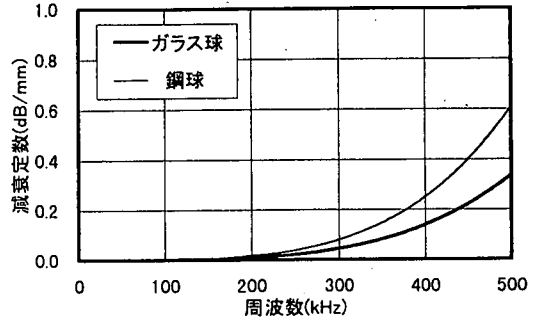


図-16 モデル骨材の材質が異なる場合の減衰定数
(体積濃度：25%，骨材径：12mm)

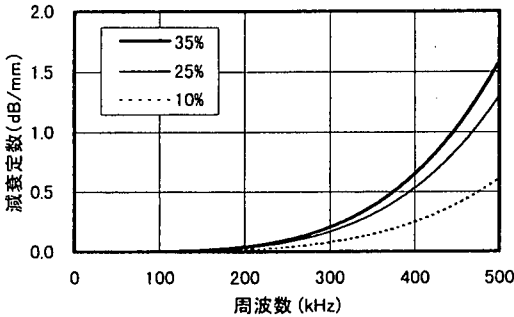


図-15 モデル骨材量が異なる場合の減衰定数
(骨材径：12mm)

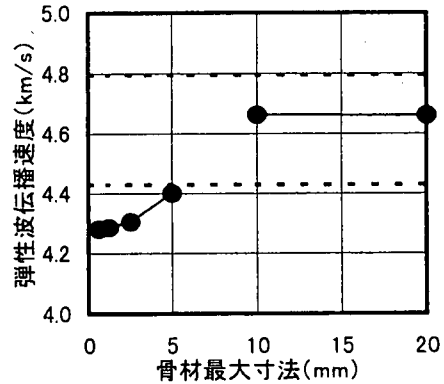


図-17 骨材最大寸法の変化にともなう
弾性波伝播速度の変化

3. コンクリート中の実際の骨材が弾性波伝播挙動に及ぼす影響

2. において、コンクリートのような粒子分散型複合材料中における弾性波伝播挙動に関する基礎的な検討を行ったが、あくまでもモデル骨材を用いた検討であったため、ここでは実際の骨材を用いてコンクリート供試体を作製し、コンクリート中に存在する骨材の最大寸法、形状、量、界面性状の違いが供試体中を伝播した弾性波の伝播速度および周波数特性に及ぼす影響について検討することとした。

(1) 骨材最大寸法に関する検討

a) 供試体概要

用いた供試体は、寸法が $100 \times 200 \times 200$ (mm)のコンクリート立方体であり、供試体数は各検討ケースごとに3個とした。マトリックス部分のW/Cは0.50で一定とし、骨材には川砂・川砂利を用いた。これらの骨材は、形状が比較的球形に近いので、モデル骨材を用いた検討結果と比較するのに適している。これらの骨材に対して、所定のふるいを用いてふるい分けを行うことにより、最大寸法を0.6, 1.2, 2.5, 5, 10, 20(mm)と変化させた骨材を用意した。

用いた骨材の粒度分布を表-2に示す。またコンクリート中における骨材量は、その最大寸法が5mm以下のものについては体積濃度で54%（配合は表-3のNo.1）、10mm以上のものについては68%（配合は表-3のNo.2）で一定とした。用いた材料の諸特性を表-4に示す。

b) 実験結果および考察

図-17に、骨材最大寸法と弾性波伝播速度の関係を示す。図中において骨材最大寸法が5mm以下と10mm以上で折れ線を不連続としているのは、この地点を境界として骨材体積濃度が異なり、両者を単純に比較することができないためである。また図中の2本の水平線は、前述の2.(3)の場合と同様に粒子分散型複合材料の弾性定数を用いて理論的に算出した弾性波伝播速度を各骨材体積濃度ごとに示したものである。この図によれば、供試体中における骨材体積濃度は一定であるにもかかわらず、骨材の最大寸法が小さくなるとともに伝播速度が徐々に減少していき、理論的に求めた値から若干離れていくことがわかる。この傾向は特に骨材最大寸法が小

表-2 骨材の粒度分布

ふるい目 (mm)	通過量(%)	
	細骨材	粗骨材
25	—	100
20	—	100
15	—	76
10	—	29
5	100	0
2.5	85	—
1.2	78	—
0.6	70	—
0.3	38	—
0.15	4	—

表-3 コンクリートの配合

番号	スラブ (cm)	空気量 (%)	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
No.1	—	6±1	0.50	—	258	515	1288	—	—
No.2	8±2.5	1±1	0.50	0.45	190	380	783	980	—
No.3	8±2.5	1±1	0.50	0.45	190	380	783	984	—
No.4	8±2.5	1±1	0.50	0.45	272	544	636	783	2.72 ^{*1}
No.5	8±2.5	1±1	0.50	0.45	127	254	911	1122	2.10 ^{*2}
No.6	8±2.5	1±1	0.30	0.45	151	503	783	984	1.38 ^{*2}
No.7	8±2.5	1±1	0.65	0.45	209	321	783	984	1.76 ^{*1}
No.8	8±2.5	6±1	0.50	0.45	160	319	783	984	0.32 ^{*3}
No.9	8±2.5	6±1	0.42	0.45	148	352	783	984	0.35 ^{*3}

ただし、*1:分離低減剤、*2:高性能減水剤、*3:AE剤

表-4 用いた材料の諸特性

材料	種類	特性
セメント	普通ポルトランドセメント	比重:3.15, 等価アルカリ量:0.67%
水	水道水	
細骨材	川砂	千葉県小櫃川産, 比重:2.59, 吸水率:1.41%, 粗粒率:2.26
粗骨材	川砂利	東京都多摩川産, 比重:2.60, 吸水率:1.67%, 粗粒率:6.68
	砕石	東京都青梅市産, 比重:2.61, 吸水率:0.98%, 粗粒率:6.68
混和材	高炉スラグ微粉末	ブレーン比表面積:8000cm ² /g
混和剤	高性能減水剤	主成分:ポリカルボン酸グラフトコポリマー, 抑泡剤併用
	分離低減剤	主成分:セルロースエーテル
	AE剤	主成分:特殊非イオン界面活性剤

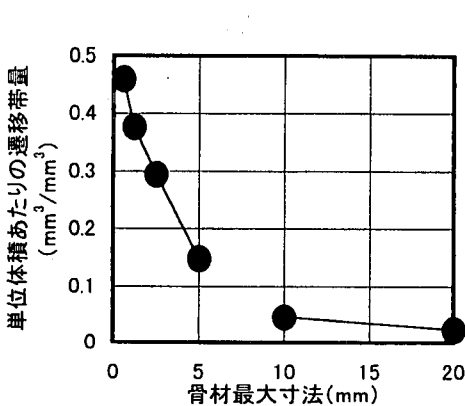


図-18 骨材最大寸法と遷移帯量の関係

さい範囲で顕著である。これは、骨材の最大寸法が小さくなるにつれて、骨材の比表面積が大きくなり、骨材周囲に形成されるポーラスな遷移帯の量が多くなる⁹⁾ことによるものと考えられる。そこで遷移帯量の影響について考察するため、骨材を球形と仮定した場合の比表面積 S を式(12)により算出し¹⁰⁾、それに遷移帯厚さを乗じることにより、遷移帯量を算出した。

$$S = \frac{6}{\rho \cdot d} \quad (12)$$

ここで、 ρ : 骨材粒子の密度、 d : 骨材径である。本来であれば、遷移帯厚さは骨材径とともに変化するものと考えられるが、ここでは既往の研究¹¹⁾を参考にして 50 μ m で一定であると仮定した。図-18に、骨材最大寸法の変化にともなう遷移帯量の変化を示す。このように、遷移帯量は骨材最大寸法が小さくなるにつれて増加し、この傾向は特に骨材最大寸法が小さい範囲で顕著である。この遷移帯量の増加が、前述の弾性波伝播速度の低下をもたらしたのではないかと考えられる。

次に透過弾性波の周波数分析結果から算出される平均周波数と骨材最大寸法の関係を図-19に示す。この図から明らかのように、骨材最大寸法が大きくなるほど平均周波数は小さくなっており、高周波成分が減衰していく傾向が捉えられている。このことは、モデル骨材を用いた検討結果とよく対応している。したがって、実際の骨材を用いたコンクリートにおいても、骨材の大きさは弾性波周波数特性に多大な影響を及ぼすことが示された。

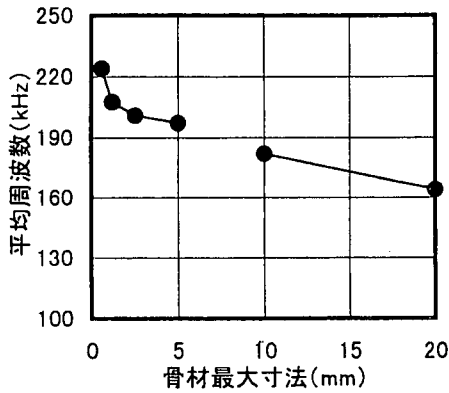


図-19 骨材最大寸法の変化にともなう平均周波数の変化

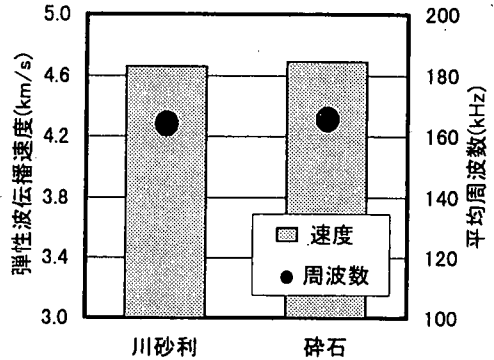


図-20 骨材形状が異なる場合の弾性波透過試験結果

(2) 骨材形状に関する検討

a) 供試体概要

骨材の形状が、コンクリート中における弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討するため、粗骨材に砕石を用いた供試体を作製し、(1)の川砂利を用いた場合と比較・検討した。砕石の最大寸法や粒度分布については、最大寸法 20mm の川砂利のものと同一となるように粒度調整を行った。この砕石の他の特性は表-4 に示すとおりである。この表より、これらの骨材の密度、吸水率等はほぼ等しく、また両骨材の産地は同一水系内であり、音響インピーダンス等の音響学的特性にも大きな差はないものと考えられる。配合条件は、表-3 中の No.3 に示すように、粗骨材の種類を除いて、最大寸法 20mm の川砂利を用いたコンクリートと同一とした。用いた供試体の形状は、100×200×200(mm)のコンクリート立方体であり、供試体数は3個とした。

b) 実験結果および考察

図-20 に、骨材形状が異なる場合の弾性波の伝播速度および平均周波数を示す。骨材形状が異なることによる比表面積の変化、あるいは骨材表面状態の違いによるセメントペーストとの付着性状の変化により、両者の弾性波伝播速度や平均周波数に差が生じることが推測されたが、実際には明確な差は認められなかった。これより、用いる骨材の形状は弾性波伝播挙動にほとんど影響しないことがわかった。そこで本研究ではこれ以降、粗骨材として砕石を用いることとするが、その形状が試験結果に及ぼす影響は考慮しないものとした。

(3) 骨材量に関する検討

a) 供試体概要

ここでは、骨材体積濃度を 55、68、78(%)と変化

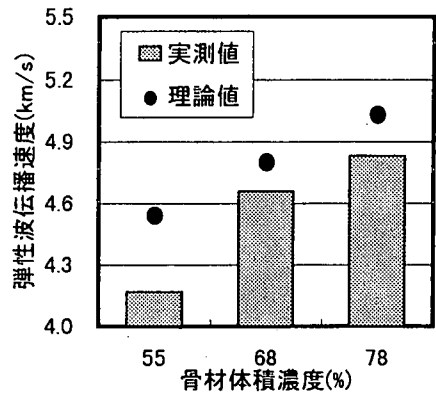


図-21 骨材量が異なるコンクリートの弾性波伝播速度

させた供試体を作製し、コンクリート中における骨材の存在量が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。マトリクス部分の特性を等しくするため、いずれのケースにおいても W/C は 0.50 とした。また骨材の大きさが試験結果に及ぼす影響を考慮して、骨材最大寸法は 20mm で一定とした。配合を表-3 中の No.3~5 に示す。適切な流動性と材料分離抵抗性を確保するため、体積濃度 55% のケースにおいては分離低減剤を、また体積濃度 78% のケースにおいては高性能減水剤を使用した。コンクリートの作製に用いた材料の諸特性を表-4 に示す。用いた供試体は、100×200×200(mm)のコンクリート立方体であり、供試体数は3個とした。

b) 実験結果および考察

図-21 に、骨材体積濃度の変化にともなう弾性波伝播速度の変化を示す。図中には、前述の 2.(3)と同様の手法で理論的に算出した弾性波伝播速度についてもあわせて示してある。これによれば、骨材体積濃度の増加とともに、モデル骨材供試体の場合

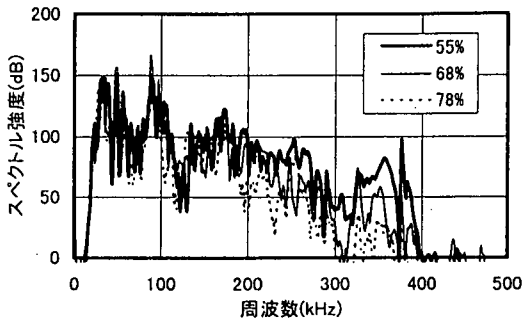


図-2 2 骨材量が異なるコンクリート中を透過した弾性波の周波数分布

と同様に弾性波伝播速度が大きくなることからわかる。また理論的に求めた弾性波伝播速度も同様に、骨材体積濃度の増加とともに大きくなっており、実験値の妥当性を示している。図中において、骨材体積濃度が低いほど、理論値と実測値の差が大きくなっているのは、前述の(1)と同様に骨材界面に存在する遷移帯の影響であると考えられる。骨材体積濃度が低い供試体においては、その分だけマトリックス部分が多くなるため、コンクリートの単位水量が多くなる。その結果、ブリーディングが著しくなり、脆弱な遷移帯量が多くなったものと推測される。

図-2 2に、異なる骨材体積濃度を有する供試体を透過した弾性波の周波数分析結果を示す。これより、骨材体積濃度が高いほど、高周波成分の減衰が著しくなっていることがわかる。このことは、モデル骨材供試体に対する実験結果と同様であり、この減衰が骨材の存在による弾性波の散乱により生じたものであることが改めて確認された。

以上より、コンクリート中の骨材量は弾性波伝播速度と深い関連があるだけでなく、弾性波の周波数特性にも影響を及ぼすことが示された。骨材量の増加は、弾性波伝播速度を増加させ、また周波数分布における高周波域の減衰を著しくした。このことは、前述のモデル骨材供試体による検討結果と同様であり、実験結果の妥当性が確認できた。

(4) 骨材界面性状に関する検討

コンクリート中に存在する骨材界面には、遷移帯が存在することが知られている。この遷移帯は、周囲のマトリックス部分よりも脆弱でポーラスな部分であり、力学的な弱点となるばかりでなく、塩化物イオンなどのコンクリート構造物にとっての有害物質が浸透する際の「水みち」ともなりうる。このようなマトリックス実体部よりも密実性に劣る遷移帯の存在は、弾性波伝播挙動にも少なからず影響を及

ぼすものと考えられる。ここでは、コンクリート中の骨材-マトリックス間の界面性状が弾性波伝播挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、人為的に骨材界面性状を変化させた供試体を用いて検討を行った。

a) 供試体概要

用いた供試体は、 $100 \times 200 \times 200$ (mm)のコンクリート立方体であり、供試体数は各検討ケースごとに3個とした。コンクリート中の骨材-マトリックス間の界面性状を変化させるため、次の4種類の検討ケースを設定した。すなわち、①粗骨材として碎石を用いた普通コンクリートのケース、②セメントの40%を高炉スラグ微粉末で置換したケース、③セメントペーストでプレコーティングした碎石を粗骨材として用いた^{1,2)}ケース、④鉱油を塗布した碎石を粗骨材として用いたケースである。②の高炉スラグ微粉末(以降、BFSと呼ぶ)を用いたケースにおいて界面性状が改善するのは、高炉スラグ微粉末の潜在水硬反応により、骨材界面に集中的に存在する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費され、骨材-マトリックス間に遷移帯が形成されにくい^{1,3)}ためである。

骨材の最大寸法、形状および体積濃度は、いずれのケースにおいても20mm、碎石、68%とした。マトリックス部分の特性を同一とするため、W/Cは②を除いて0.50で一定とした。②のケースについては、BFSの混和によりマトリックス部分の密実性も変化するため、セメントペースト単体での圧縮強度が等しくなるように、W/Cを0.55とし、マトリックス部分の特性が同一であると考えた。

③のケースにおいては、W/C=0.40のセメントペーストを用いて碎石をプレコーティングした。用いた碎石を球と仮定して算出した比表面積とコーティング材の体積から、コーティング厚さは0.25mmとなる。コンクリートの練混ぜに際しては、プレコーティングに用いた量のセメントペーストをあらかじめ差し引いて配合計算を行い、コンクリート中における骨材量を他のケースと等しくした。

b) 骨材界面性状の評価

上記の4ケースについて、実際の界面性状の差違を定量化するため、界面近傍における微小硬度(ピッカース硬さ)を計測した。ピッカース硬さの計測は、ブリーディングにより界面性状の違いが最も顕著に表れると推測される骨材-マトリックス下面において、界面から10, 30, 50(μm)の地点で行った。ここで、50 μm まで計測を行ったのは、一般に遷移帯厚さは、50 μm 程度である^{1,1)}とされているためである。計測に用いた荷重および荷重保持時間は、それぞれ0.01N、10秒である。

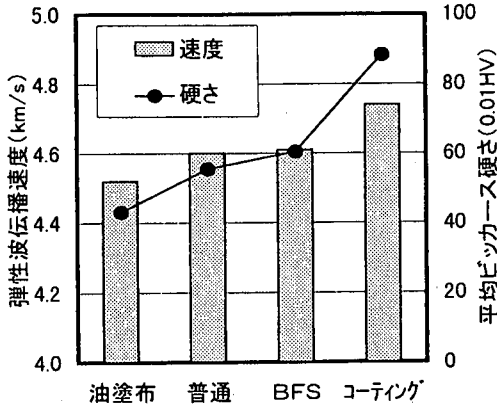


図-2 3 異なる骨材界面性状を有するコンクリートの平均ピッカース硬さと弾性波伝播速度

図-2 3に、骨材-マトリックス界面から 10, 30, 50(μm)において計測されたピッカース硬さの平均値を各ケースごとに示す。これによれば、①の基準ケースの普通コンクリートと比較して、②のBFSを用いたケースおよび③のプレコーティングを施した碎石を用いたケースでは界面近傍におけるピッカース硬さは増加しており、界面性状が改善されたことを示している。特にプレコーティングを行った場合、顕著なピッカース硬さの増加が認められた。一方、④の油を塗布した碎石を用いたケースにおいては、逆にピッカース硬さが低下しており、界面性状が悪くなっていることがわかる。以上より、本研究で対象とした4通りの実験ケースによれば、それぞれ異なる界面性状が得られることが確認できた。

c) 骨材界面性状が弾性波伝播挙動に及ぼす影響

図-2 3に、各ケースの弾性波伝播速度の計測結果を、前述のピッカース硬さの計測結果とあわせて示す。これによれば、基準ケースと比較して骨材界面性状が悪い場合には、弾性波伝播速度は小さくなり、界面性状が良い場合には弾性波伝播速度は大きくなることからわかる。これは、骨材界面に存在する遷移帯性状の違いによるものと考えられる。この遷移帯部分は、周囲のマトリックス部分の実体部と比較して、脆弱でポーラスとなっており、その部分の弾性波伝播速度も小さいものと考えられる。したがって、遷移帯性状の変化とともにコンクリートの弾性波伝播速度が変化したものと推測される。一方プレコーティングを施した碎石を用いたケースのように、骨材界面に周囲よりも密実なコーティング材(W/C=0.40のセメントペースト)が存在すると弾性波伝播速度はさらに増加する。本研究の範囲内においては、骨材界面性状の変化により弾性波伝播速度がおおよそ0.2km/s変化したが、ここで扱った骨

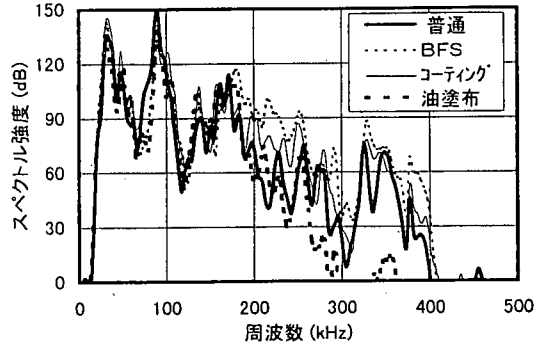


図-2 4 骨材界面性状が異なる場合の周波数分布

材界面性状はあまり現実的でないものも含まれており、実際のコンクリート中における骨材界面性状が弾性波伝播速度に及ぼす影響はさらに小さいものであると推測される。

次に透過弾性波の周波数分析結果を図-2 4に示す。これより、油を塗布した碎石を用いたケースのように、骨材界面性状が著しく悪い場合には、300kHz以上の周波数成分はほとんど減衰していることがわかる。一方、界面性状が良い場合の高周波成分は、基準ケースよりも若干増加していることがわかる。これは、油を塗布した碎石を用いた場合には、骨材界面において弾性波の散乱・反射が卓越して生じ、その減衰作用を大きく受けるが、界面性状が良い場合には、界面における散乱・反射の程度は比較的小さいことによると考えられる。また、これらのケースにおいて顕著な差違が生じている周波数範囲は、200~400(kHz)であり、これに対応する弾性波の波長範囲は、おおよそ10~20(mm)となる。これは、粗骨材の寸法範囲と一致しており、このことから、骨材界面性状が異なる場合の周波数分布の差違は、骨材界面における散乱・反射の程度の違いによりもたらされたものと考えられる。

4. マトリックス部分の密実性が弾性波伝播挙動に及ぼす影響

3. では、2つのコンクリートの構成材料のうち、骨材に関する検討を行った。ここでは、もう1つの構成材料であるセメントペースト・マトリックス部分の密実性が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について調べるため、コンクリートのW/Cおよび空気量を変化させることにより、マトリックス部分の密実性が異なるコンクリート供試体を作製し、3.までと同様な検討を行った。

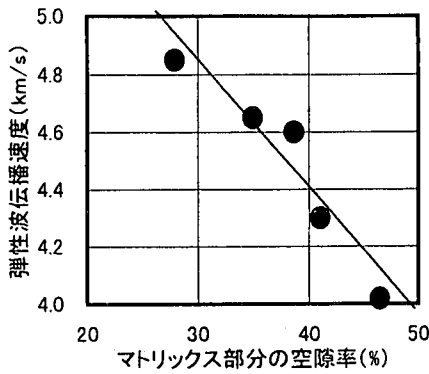


図-2 5 マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の関係

(1) 供試体概要

用いた供試体は、100×200×200(mm)のコンクリート立方体であり、供試体数は各検討ケースごとに3個とした。マトリックス部分の密実性を変化させるため、コンクリートのW/Cと空気量を変化させた供試体を作製した。W/Cを変化させたシリーズにおいては、骨材量を一定として、W/Cを0.30, 0.50, 0.65と変化させた。コンクリートの配合を表-3中のNo.3, 6~7に示す。コンクリートの練混ぜにあたっては、適切な流動性と材料分離抵抗性を確保するため、W/C=0.30のケースにおいては高性能減水剤を、W/C=0.65のケースにおいては分離低減剤をそれぞれ使用した。

一方、空気量を変化させたシリーズにおいては、上記のW/C=0.50のコンクリート(空気量:1%)を基準として、W/Cを変化させずに空気量を6%としたもの、ならびにW/Cを変化させて強度レベルを同程度とした上で空気量を6%に調整したケースを設定した。コンクリートの配合を表-3中のNo.3, 8~9に示す。ここで、骨材量はいずれのケースにおいても一定とした。コンクリートの練混ぜに際しては、コンクリートの空気量を所定の値に調整するため、混和剤としてAE剤を用いた。コンクリートの作製に用いた材料を表-4に示す。

(2) マトリックス部分の密実性評価

コンクリート中におけるマトリックス部分の密実性を評価するため、本研究においては以下に示す指標を用いた。すなわち、コンクリート中における空隙量は、脱気処理を行った供試体の質量と質量変化がなくなるまで105℃の乾燥炉内で乾燥させた供試体の質量の差として求められるとする。この消散水分量のうち、一部はセメントペースト部分の水分で

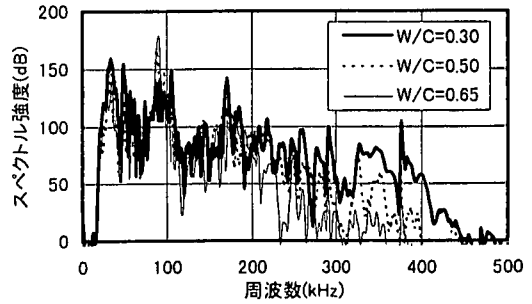


図-2 6 W/Cが異なる場合の周波数分布

あり、残りの部分は骨材部分の水分である。ここで、骨材部分に存在する水分量は、骨材単体での含水率を測定することにより求めることができるため、コンクリートとしての消散水分量から骨材部分の消散水分量を差し引くことにより、セメントペースト部分から消散する水分量を求めることができる。このような考え方により、セメントペースト・マトリックス部分の空隙率 $VR_p(\%)$ を式(13)により求めることができる。

$$VR_p = \frac{M_w - (V_s \cdot VR_s + V_G \cdot VR_G)}{V_p} \times 100 \quad (13)$$

ここで、 M_w : 単位体積のコンクリートから消散する水分量、 V_s 、 V_G 、 V_p : コンクリート中における細骨材、粗骨材、セメントペーストの体積割合、 VR_s 、 VR_G : 細骨材および粗骨材の空隙率(本実験においてはそれぞれ0.0371, 0.0258)である。このマトリックス部分の空隙率 VR_p には、骨材界面における遷移帯の影響も含まれている。

(3) 実験結果および考察

W/Cを変化させたシリーズおよび空気量を変化させたシリーズにおいて、式(13)より算出されるマトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の関係を図-25に示す。このように、W/Cおよび空気量の値にかかわらず、マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の間により対応関係が存在していることがわかる。本研究の範囲内においては、マトリックス部分の密実性の变化により、弾性波伝播速度に約1km/sの変化が生じた。なお上記の対応関係は骨材に関する条件が一定の条件のもとでのみ成立するものである。

図-26に、異なるW/Cの供試体中を透過した弾性波の周波数分析結果を示す。これより、W/Cの増加とともに高周波域における減衰が著しくなっ

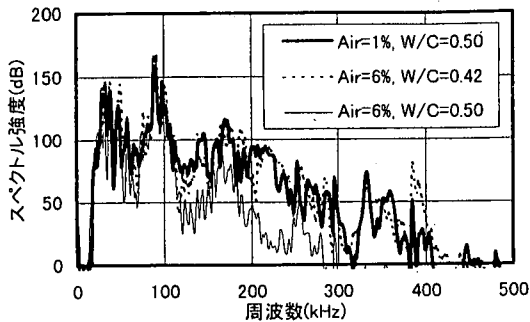


図-27 空気量が異なる場合の周波数分布

いることがわかる。これは、W/Cの増加によりセメントペーストの密実性が低下し、骨材との音響インピーダンス差が大きくなり、骨材界面における弾性波の散乱・反射が顕著になったことによると考えられる。このことは、前述の2.におけるガラス球と鋼球をモデル骨材として用いた場合の検討結果と一致している。

続いて、空気量を変化させたシリーズにおける透過弾性波の周波数分析結果を図-27に示す。これによれば、マトリックス部分の密実性の変化と対応して、高周波成分の減衰が生じていることがわかる。この相違は、前述のW/Cが変化した場合と同様に、骨材-マトリックス間の音響インピーダンス差に起因するものと考えられる。

5. コンクリート中のマイクロクラックが弾性波伝播挙動に及ぼす影響

コンクリート中には、乾燥収縮、温度応力あるいは外力などの作用により、多かれ少なかれマイクロクラックが存在している。このような不連続面の存在は、コンクリートにとっての有害物質が浸透する際の「水みち」となるばかりでなく、より重大な劣化を引き起こす誘因ともなりうる。このようなマイクロクラックの存在は、弾性波の散乱・反射源となることが考えられるため、ここではコンクリート中におけるマイクロクラックの存在が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った。

(1) モデルマイクロクラックを用いた検討

コンクリート中に存在するマイクロクラックが弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討するため、モデルマイクロクラックとしてプラスチック小片をコンクリート中に混入させた供試体を作製した。このような供試体に対して弾性波透過試験を行うことにより、コンクリート中のマイクロクラック量と

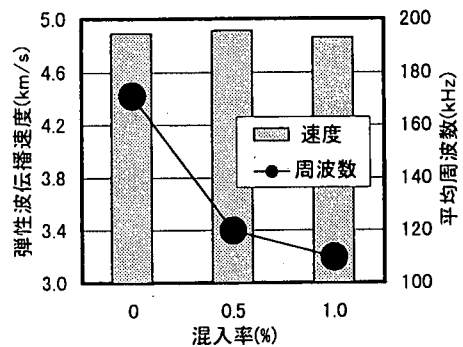


図-28 モデルマイクロクラックを含むコンクリートに対する弾性波透過試験結果

弾性波の伝播速度および周波数特性の関係を調べた。

a) 供試体概要

用いた供試体は、 $\phi 100 \times 200$ (mm)のコンクリート円柱であり、用いた材料および配合は、表-4および表-3中のNo.3に示すとおりである。なお作製供試体数は各検討ケースに対して3個とした。

供試体に混入したプラスチック小片の寸法は、 $15 \times 15 \times 0.3$ (mm)であり、混入量は体積割合で0.5%および1.0%とした。小片の大きさを 15×15 (mm)としたのは、コンクリート中に存在するマイクロクラック、特に骨材-マトリックス間の境界層部分のマイクロクラック(ボンドクラック)を対象とした検討を行うためである。ここで用いた骨材の最大寸法が20mmであり、直径20mmの円に包含される最大の正方形の一辺の長さが約14mmであることを考慮して小片の大きさを決定した。このプラスチック材料の音響インピーダンスは $1 \sim 2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ であり、コンクリートの約10%である。

b) 実験結果および考察

図-28に、モデルマイクロクラック量の変化にともなう弾性波伝播速度の変化を示す。これらによれば、マイクロクラックの存在量が増加しても弾性波伝播速度に変化がみられない。これは、モデルマイクロクラックをコンクリート中に混入させてもマトリックス部分の密実性に変化が生じないためであると考えられ、4.の検討結果と一致している。

次にモデルマイクロクラック量を変化させた場合の透過弾性波の周波数分析結果を図-29に示す。これによれば、弾性波の散乱源となるモデルマイクロクラック量が増加するにつれて、高周波成分が減衰していくことがわかる。混入させたモデルマイクロクラックの大きさが 15×15 (mm)であるため、その程度の波長に対応する周波数(おおよそ300kHz)以上における減衰が顕著になっている。

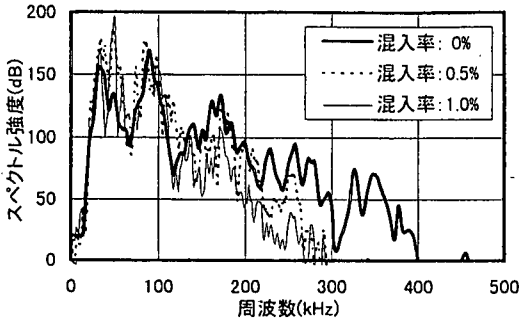


図-29 モデルマイクロクラックを含むコンクリート中を透過した弾性波の周波数分布

このことから、ここで生じた減衰がモデルマイクロクラックに起因したものであることが確認できる。この減衰傾向を前述の平均周波数を用いて表した結果を図-28に示す。このように、モデルマイクロクラック量の増加にともない、平均周波数が減少しており、高周波成分の減衰が的確に捉えられている。

以上より、プラスチック小片のような不連続部分がコンクリート中に存在すると、弾性波伝播速度はあまり変化しないものの、周波数分布の高周波域の減衰が著しくなることが示された。

(2) 実際のマイクロクラックに関する検討

ここでは、上記のモデルマイクロクラックによる検討結果の妥当性について検証するため、実際の載荷により発生したマイクロクラックを対象として、マイクロクラック発生量と弾性波伝播挙動の関係について検討を行った。

a) 実験概要

コンクリート中にマイクロクラックを発生させるため、円柱供試体 ($\phi 100 \times 200$ (mm)) に対して一軸圧縮載荷を行った。あらかじめ計測した破壊荷重 (420kN) の 20, 40, 60, 80%まで載荷を行った供試体と載荷を行っていない供試体の弾性波透過試験結果を比較した。コンクリートの練混ぜに用いた材料および配合は、表-4および表-3中の No.3に示すとおりである。

コンクリート中におけるマイクロクラックの発生量を評価するため、載荷を行った供試体を軸方向にダイヤモンドカッターで切断し、切断面に赤色インクを染み込ませた。その後、切断面をグラインダーにより研磨することで、周囲よりインクが深く浸透しているマイクロクラック部分を浮き出させた。切断面の1例(荷重レベル:80%)を写真-1に示す。このようにして得られるマイクロクラック発生状況を画像解析装置を用いて解析した。その際、マイク



写真-1 マイクロクラック発生状況

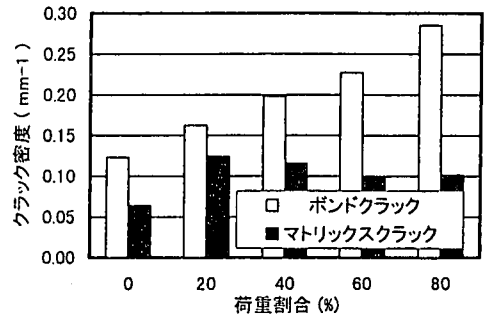


図-30 断面観察結果

ロクラック総長を、ボンドクラック(骨材-マトリックス間)およびマトリックスクラックにわけて算出し、これらを観察断面積で除することにより得られる「クラック密度」をマイクロクラック発生量の評価指標として用いることとした。本来であれば、弾性波伝播挙動に影響を及ぼすものと考えられる弾性波伝播方向と直角方向のマイクロクラック総長を評価指標として用いるべきであるが、写真-1に示したように、マイクロクラックは極めてランダムに一樣に分布しており、顕著な方向性は存在しないため、全マイクロクラック発生量を評価指標とした。

b) コンクリート中のマイクロクラック量の評価

載荷を受けたコンクリート中におけるマイクロクラック発生量を図-30に示す。これより、載荷荷重の増加にともなって、ボンドクラックの発生量は単調に増加しているが、マトリックスクラックの発生量にはあまり変化がみられないことがわかる。したがって、これらの供試体中においては、骨材-モルタル間にマイクロクラックが発生しているものの、マトリックス部分の特性はあまり変化していないといえる。この結果は、前述の(1)の場合と同様であり、コンクリート中における弾性波伝播挙動も(1)の場合と同様となることが推測される。また荷重レベルが0%の場合においてもマイクロクラックが発生しているのは、3. で述べた骨材界面の遷移帯の存在、あるいは供試体切断の影響によるものと考えられる。

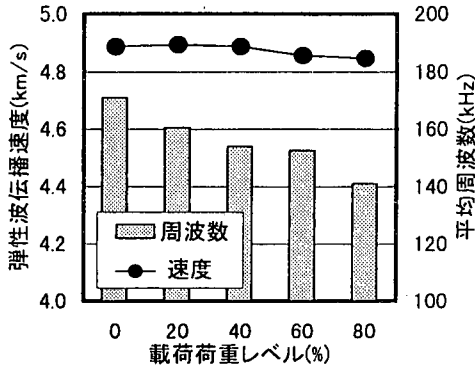


図-3 1 マイクロクラックの存在が弾性波伝播特性に及ぼす影響

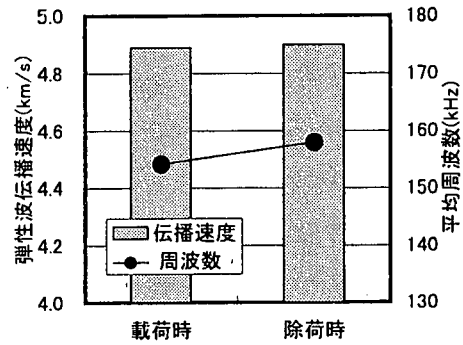


図-3 2 マイクロクラックの開閉状態が弾性波伝播特性に及ぼす影響

c) 弾性波透過試験結果

図-3 1に、載荷荷重の増加にともなう弾性波伝播速度および平均周波数の変化を示す。このように、載荷荷重が増加し、コンクリート中におけるマイクロクラック発生量が増加しても弾性波伝播速度には変化がみられないが、透過弾性波の周波数特性は変化し、結果的に平均周波数は減少していることがわかる。このことは、モデルマイクロクラック供試体による検討結果と同様であり、実験結果の妥当性が示された。この際、モデルマイクロクラックの場合と比較して実際のマイクロクラックの場合の方が平均周波数の変化量が小さいのは、実際のマイクロクラックにはクラック面が部分的に接触している箇所が存在することや、その厚さがモデルマイクロクラックよりも薄いためであると考えられる。

d) マイクロクラックの開閉状態に関する検討

外力作用時と除荷時においては、マイクロクラックの「開閉状態」が変化し、弾性波の散乱・反射の程度が異なるものと推測される。このことについて検討するため、載荷中および除荷後に行った弾性波透過試験結果を比較した。載荷レベルは破壊荷重の80%とし、測定箇所は同一とした。得られた結果を図-3 2に示す。これによれば、弾性波伝播速度には差違が認められないものの、平均周波数においては、載荷中すなわちマイクロクラックが開いた状態の方が小さくなっており、マイクロクラック部分における弾性波の散乱が著しいことを示している。したがって、コンクリート中におけるマイクロクラックの開閉状態は透過弾性波の周波数分布に影響を及ぼすことがわかった。

6. 結論

(1) 本研究のまとめ

コンクリート中の不均質性の中でも、①骨材の存在、②マトリックス部分の特性変化、③マイクロクラックの存在が弾性波伝播挙動に及ぼす影響について検討を行った結果、以下の結論を得た。

- ①弾性波伝播速度は骨材最大寸法の変化にあまり鋭敏ではないが、骨材量の影響を大きく受けた。また透過弾性波の周波数特性に関しては、骨材最大寸法が大きくなるにつれて高周波域の減衰が顕著となった。これらについては、定性的にはあるが、その妥当性を理論的に確認することができた。
- ②マトリックス部分の空隙率と弾性波伝播速度の間には密接な関係があることがわかった。本研究の範囲内においては、マトリックス部分の変化により約1km/sの弾性波伝播速度の変化が生じた。またマトリックス部分の密実性の変化により、骨材-マトリックス間の音響インピーダンス差が変化するため、骨材界面における弾性波の散乱程度が変化した。
- ③コンクリート中のマイクロクラックや骨材界面性状の違いは、コンクリート中を伝播する弾性波の伝播速度にはあまり影響しないものの、周波数特性を大きく変化させることが示された。これは、マイクロクラックや遷移帯の存在が弾性波の散乱・反射源となり、その大きさに対応した波長を有する弾性波の減衰を引き起こすためと考えられる。

(2) 総合的考察

以上の結果を踏まえて、弾性波伝播速度および周波数特性について総合的な考察を行うことにより、

以下の知見を得た。

本研究の範囲内では、マトリックス部分の密実性の変化により弾性波伝播速度がおおよそ 1km/s 変化した。一方、骨材界面性状の変化により弾性波伝播速度は 0.2km/s 程度しか変化しなかった。このように骨材界面性状が弾性波伝播速度に及ぼす影響はマトリックス部分の密実性よりも小さいといえる。さらに本実験で設定した骨材界面性状の範囲は、実際のコンクリート中において存在しうる範囲よりも広いものであり、実際の骨材界面性状の影響程度はさらに小さくなるものと考えられる。以上より、弾性波伝播速度はマトリックス部分の密実性評価に有効であるといえる。

また骨材やマイクロクラックの存在が弾性波の周波数特性に及ぼす影響は、高周波域ほど顕著であった。したがって、骨材やマイクロクラックの存在に影響されない評価を行うためには、周波数帯域を低くすれば良いといえる。逆に、マイクロクラック量を評価するような場合には、周波数分布の中でも高周波域の変化に着目することが有効である。

参考文献

- 1) 尼崎省二, 明石外世樹: 超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ測定に関する基礎的研究, 第 2 回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.133-136, 1980.
- 2) British Standards Institution: Recommendations for Measurements Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, *BS 1881, Part 203*, pp.618-619, 1986.
- 3) 岩波光保, 鎌田敏郎, 長瀧重義: コンクリートの材料

劣化評価に対する非破壊試験法の適用, 非破壊検査, Vol.46, No.3, pp.223-228, 1997.

- 4) 明石外世樹: コンクリートの非破壊試験に関する研究, 土木学会論文集, No.390/V-8, pp.1-22, 1988.
- 5) 佐藤泰夫: 弾性波動論, 岩波書店, pp.20-38, 1978.
- 6) Weng, G.J.: Some Elastic Properties of Reinforced Solids, with Special Reference to Isotropic Ones Containing Spherical Inclusions, *International Journal of Engineering Science*, Vol.22, pp.845-856, 1984.
- 7) Rayleigh, L.: *The Theory of Sound*, Vol.II, p.152, 1929.
- 8) Mason, W.P., and McSkimin, H.J.: Attenuation and Scattering of High Frequency Sound Waves in Metals and Glasses, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol.19, No.3, pp.464-473 1947.
- 9) 加藤佳孝, 魚本健人: 細骨材の量と比表面積が遷移帯形成に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.775-780, 1998.
- 10) 三輪茂雄: 粉体工学通論, 日刊工業出版社, pp.5-10, 1991.
- 11) Mindess, S.: Interfaces in Concrete, *Materials Science of Concrete*, pp.163-180, 1989.
- 12) 黒田正和, 寺師成明, 渡辺智秀: コンクリート塊の再利用に関する基礎的研究, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集, pp.198-199, 1995.
- 13) 小林孝一, 服部篤史, 宮川豊章, 藤井學: 微粉末混和剤を用いたセメントペーストと骨材の界面性状, 材料, Vol.45, No.9, pp.1001-1007, 1996.

(1998.12.21 受付)

A FUNDAMENTAL STUDY ON PROPAGATION BEHAVIORS OF ELASTIC WAVES IN CONCRETE

Mitsuyasu IWANAMI, Nobuaki OTSUKI, Junichiro NIWA,
Toshiro KAMADA and Shigeyoshi NAGATAKI

In this study, the propagation behaviors of elastic waves in concrete were investigated through both experimental and theoretical approach. As a result, the size and the amount of aggregate in concrete were key factors for the propagation behaviors of elastic waves. Furthermore, it was clarified that the pulse velocity was also related to the characteristics of cement-paste matrix. In addition, the condition of the aggregate-matrix interface and the existence of microcracks resulted in the changes in the frequency characteristics of the elastic waves propagated through the concrete.