

## 不均一性材料の超音波伝播と減衰特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON ULTRASONIC PROPAGATION AND DAMPING  
CHARACTERISTICS OF NONUNIFORM MATERIALS

三上修一\*、大島俊之\*\*、村丸清英\*\*\*、角田與史雄\*\*\*\*

Shuichi MIKAMI, Toshiyuki OSHIMA, Kiyohide MURAMARU and Yoshio KAKUTA

\* 北見工業大学助手 工学部土木開発工学科(〒090 北海道北見市公園町165)

\*\* 工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科(〒090 北海道北見市公園町165)

\*\*\* (株)青木建設 技術本部研究所 (〒300-26 茨城県つくば市大字要36-1)

\*\*\*\* 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

Experimental results on the ultrasonic waves propagating through nonuniform materials like concrete are obtained in this paper. The effect of volume fraction between aggregate and paste in concrete on the wave propagation is clarified by using the waveform analysis and the spectrum analysis. Damping characteristics of concrete is also obtained as a function of water cement ratio, volume ratio of aggregate and size of aggregate in concrete.

Key Words : Nonuniform material, Ultrasonic waves propagating, Damping characteristics,  
Waveform analysis, Spectrum analysis

## 1.はじめに

近年、高度成長期に建設されたコンクリート構造物の早期劣化や長期使用に伴う問題が発生し、耐久性に関する検討が一層重要となってきた。したがって既設コンクリート構造物においては強度診断のみではなく、耐久性診断も含めた維持管理が必要とされてきた<sup>1)~4)</sup>。そこで従来は強度推定を目的としたものが多かった非破壊検査が、最近では耐久性診断にとって欠かせないものとして注目されている。

コンクリート材料は、セメント、細骨材、粗骨材、水、気泡などから成る複合材料であり、不均一な材料である。この様な不均一性を有する材料において、超音波を用いた非破壊検査をする場合、応力波動の材料の減衰性を含めた伝播特性を精度良く確定しておき、そのうえで材料内部の欠陥やInclusionによる影響を波動散乱問題として解析することとなる。一般に非破壊評価における減衰に関する研究は、材料の内部構造による波動エネルギーの逸散 (Attenuation)、散乱 (Scattering) に関する研究<sup>5)</sup>と材料自身の内部摩擦に起因する内部減衰 (Internal Damping) に関する研究<sup>6)~9)</sup>に大別される。また明石<sup>3)</sup>はコンクリートの内部減衰の構成要因を粘性材料減衰、粗骨材による散乱減衰および材料中の空隙による反射減衰の3つに分類している。したがって本論文では粗骨材を含むコンクリートの材料減衰を対象とするのでマトリックスとしてのセメント

ペーストと細骨材からなるモルタル、および粒子分散補強材としての粗骨材を含んだ複合材料としての総合的材料減衰を検討することになるので、解析内容にはこれらの効果が連成して含まれることになる。したがって本論文では波動エネルギーの伝播現象を詳細に検討するため、複合材料であるコンクリートを構成する各種材料の構成割合を変化させて実験を行った。実験は大きく分けて(1)セメントペーストの水セメント比、波動の伝播距離(長さ)が応力波動へ及ぼす影響、(2)セメントペースト中の骨材の粒径や体積率が応力波動へ及ぼす影響、(3)超音波の斜角入射による伝播特性の3つについて、波形解析とスペクトル解析により検討している。また、これらの波形より卓越振動数付近の減衰波形に関して、自由振動法を用いて減衰定数を求め、減衰特性について検討を行った<sup>11)~15)</sup>。減衰定数を求めた理由は、この結果を今後実施するこの種の波動応答問題の数値解析によるシミュレーションに応用するためである。一般にこのような実験計測においては計測システムの特性和実験内容の再現性について慎重に注意を払わなければならない。本論文の解析においては、著者等のこれまでの経験からそれらを十分考慮の上、検討をすすめている。また論文で対象とする材料の構成成分の変化による減衰特性などの波動伝播特性の解析内容は、実験の再現性が確保されているので信頼性を保持している。

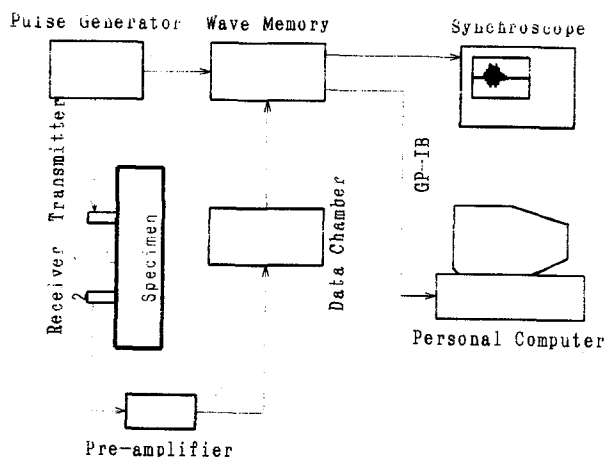


図1 測定システム

## 2. 実験概要

### 2.1 測定システム概要

測定システムの構成を図1に示す。ここで、入射センサー (Transmitter) として共振周波数50kHzのP波用のものを用い、Pulse Generatorにより供試体側面に垂直に応力波を入射した。Pulse Generatorは、それぞれの供試体に応じた入射電圧 (Amplitude)、継続時間 (Duration) を設定した。入射センサーは直径12mmの円柱形状であり、圧電型センサーを用いたが、入射条件は (入射音圧) / (電圧) = Const.の関係があるので加速度入力となっている。受信センサー (Receiver) には接触面に対して垂直方向の変位成分を感知する縦波用のSensor V (広帯域型、50kHz~1.6MHzで平坦な増幅特性を示す) と接触面に平行な方向の変位成分を感知するSensor H (指向性を有し100kHz~500kHzまで平坦な増幅特性を示す) の2種類を使用した。Sensor Hはせん断型圧電センサーで感知方向に指向性があるため感度が最大になるように配置した。応力波はセンサーを固定する方法により振幅等が異なる。したがって実験全体を通して再現性良く一定に保つため、各センサーはバネが内蔵された専用取り付け治具で固定し、グリスをはさんで接触圧を一定とした。受信波は図1に示す増幅回路を経てWave Memoryに書き込まれる。Wave Memoryの設定は最小サンプリング間隔25ns、サンプリング数は8kまたは16kWordsとし、振幅解像度10bitである。FFT (高速フーリエ変換) などの波形の2次処理は別途ワークステーションを用いて行う。

### 2.2 供試体

本論文では、コンクリートの複合材料としての超音波伝播特性の複雑な現象をパラメトリックに解析できるように、コンクリートの母材であるセメント

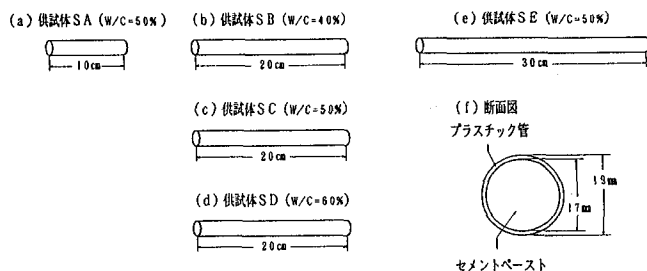


図2 円柱供試体

ペーストの水セメント比や超音波の伝播距離をパラメータとして、超音波特性の検討を行った。さらに、母材であるセメントペースト中にコンクリート中の細骨材、粗骨材の体積率、粗骨材の最大粒径などをパラメータとして供試体を作製し、これらのコンクリートの不均一性による超音波特性を検討する。また、これとは別に骨材の配置の不規則性による波動伝播の影響を検討するために形状、寸法が等しい疑似骨材として、ガラス玉を用いた供試体を作製した。

図2のセメントペースト供試体SA~SEは円柱状の供試体で、水セメント比、伝播長さによる波動伝播への影響を検討する。供試体は図2(f)の断面図のように全て外径19mm、内径17mmのプラスチック管にセメントペーストを打ち込み、脱型せず管と一体の供試体とした。これは脱型が非常に困難なこと、また非常に細いためセメントペーストのみでは破損もしくはひびわれが生じやすい等の理由からである。供試体SAは長さ10cm、水セメント比(W/C)=50%。供試体SB、SC、SDは全て長さが20cmで、水セメント比はそれぞれ順にW/C=40%、50%、60%となっている。供試体SEは長さ30cmで水セメント比(W/C)=50%である。供試体PA~PHは、直方体状のセメントペーストを母材とし、骨材の最大粒径、混入体積率をパラメータとして作製した。図3に示すように30×30mmの断面で、長さ400mmの正方形断面の棒状供試体である。図3(a)はセメントペースト(PA)のみの供試体であり、供試体PB、PC、PD、PEは、セメントペーストに選別して取り出した粗骨材(川砂利、表乾比重=2.66)を混合した供試体で、それぞれ最大粒径と供試体に占める体積率に違いがある。供試体PBは最大粒径  $d_{max}=10\text{mm}$ 、体積率10%の供試体、供試体PCは最大粒径  $d_{max}=10\text{mm}$ 、体積率30%の供試体、供試体PDは最大粒径  $d_{max}=30\text{mm}$ 、体積率10%の供試体、供試体PEは最大粒径  $d_{max}=30\text{mm}$ 、体積率30%の供試体である。供試体PF、PGはセメントペーストに細骨材を混合したもの、つまりモルタル供試体である。それぞれ順に、細骨材(川砂、表乾比重=2.63)の供試体に占める体積率を30%、50%とした。供試体PHはセメントペーストに疑似骨材とし

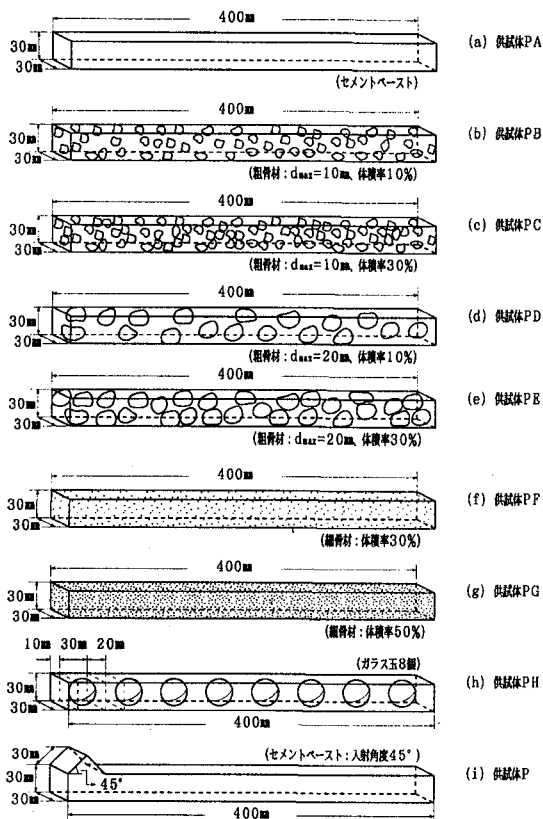


図3 角柱供試体

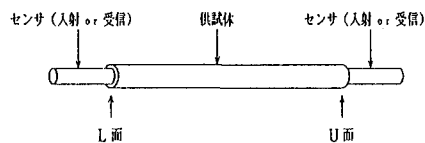
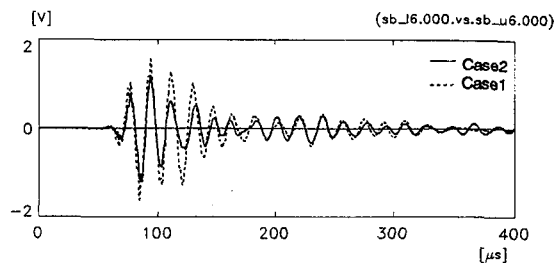


図4 円柱供試体センサー配置

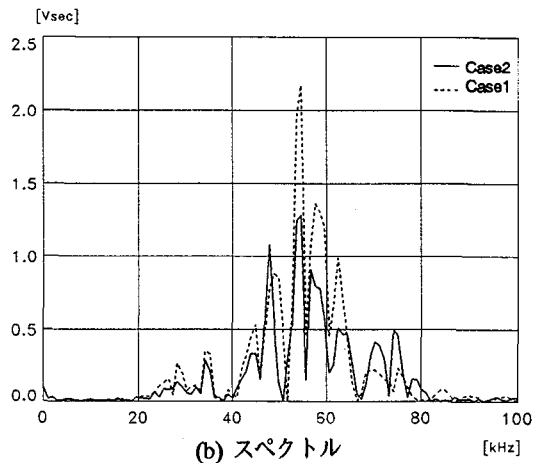
て直径3cmのガラス玉を図3(h)のように8個並べて混合した供試体である。図3(i)の供試体Pは、図のように45°で応力波を入射できるように作製している。ただしセメントペーストは普通ポルトランドセメント（比重=3.16）を用い、W/C=50%として、全て同じ配合である。

### 3. セメントペーストの材料特性が波動伝播に与える影響

プラスチック管にセメントペーストを打設し一体化した供試体SA~SEを用いて、水セメント比、伝播距離による応答特性を検討した。この実験では、前述のように受信センサーにSensor Vを用いて超音波の伝播特性を実験的に検討する。測定は図4に示す棒状供試体の両端をU面、L面としその両方について行った。U面を入射側にした場合をCase1、L面を入射側にした場合をCase2と呼ぶことにする。

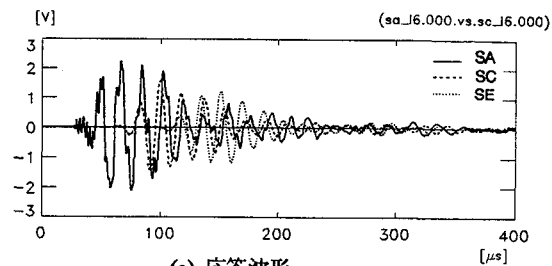


(a) 応答波形

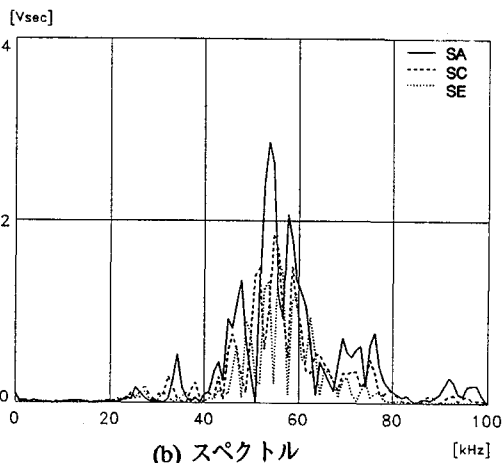


(b) スペクトル

図5 Case1とCase2の測定波形の比較(供試体SB)



(a) 応答波形



(b) スペクトル

図6 伝播距離による測定結果の比較  
(供試体 SA,SC,SE)

この実験では、Pulse Generatorの入射継続時間を1μsecとして測定を行っている。入射継続時間1μsecで実験したため、測定された波形には、伝播

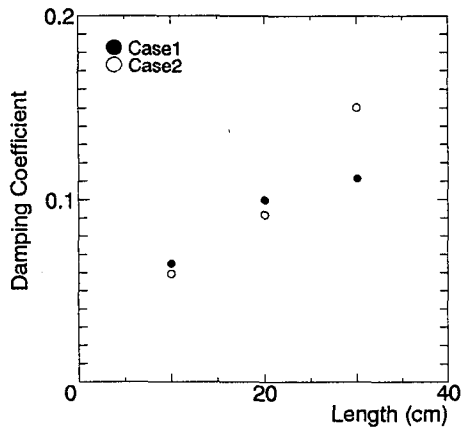


図7 伝播距離による減衰定数の比較

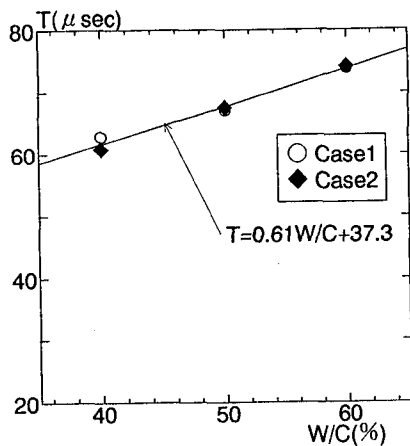
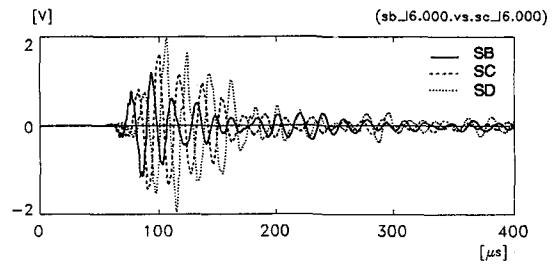


図9 水セメント比と超音波到達時間の関係

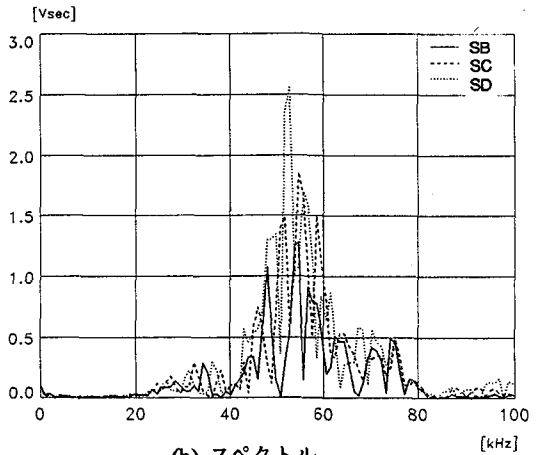
距離の短い供試体には高周波成分が見られる。図5 (a),(b)では供試体SBのU面で受信した応答波形(実線)とL面で受信した応答波形(破線)を比較すると、振幅やスペクトルのピーク高さに違いがみられる。これは供試体を立てて打設したため材料の粗密等が、上下で異なるためによると考えられる。到達時間については、ほぼ同じである。

### 3.1 伝播距離

次に供試体の伝播距離(棒の長さ)による違いについて同じ水セメント比(W/C=50%)で比較をしたものが図6(a),(b)である。図6(a)の横軸は経過時間(μs)を、縦軸は振幅を表す。また、図6(b)は周波数解析結果を表し、横軸は周波数(kHz)を、縦軸はFourier-Spectrum(Vsec)を表す。到達時間からわかるように、供試体 SA(L=10cm)が約27μs、供試体SC (L=20cm)が約67μs、供試体SE (L=30cm)が約100μsとなり、到達時間はほぼ伝播距離に比例する。また、最大振幅は伝播距離が長くなるほど小さくなり、距離減衰が見られる。図7はセメントペーストの減衰定数と伝播距離の関係を示しており、減衰定数との間にも比例関係が見られる。ここで減衰定数は、図8(a)の応答波形の第一波群のうちから減衰部



(a) 応答波形



(b) スペクトル

図8 水セメント比による測定結果の比較

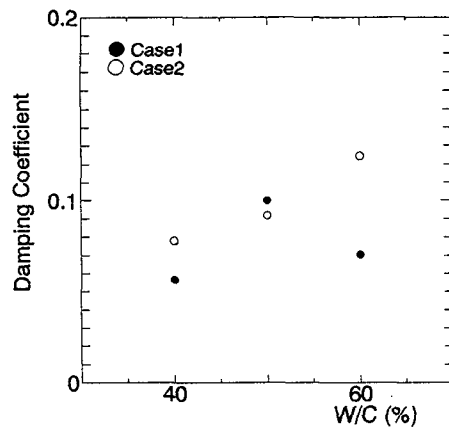


図10 水セメント比による減衰定数の比較

分を自由振動法を用いて隣り合うピークより対数減衰率より求める。また同時にこの波形から周期を求めスペクトル解析より求めた卓越振動数と比較し、周期がほぼ等しいことを確認している。

### 3.2 水セメント比

供試体SB、SC、SDの水セメント比が40% (実線)、50% (破線)、60% (点線) と異なる場合のCase2の測定波形とスペクトル波形を比較したのが図8である。水セメント比が大きくなると、到達時間は遅れ、最大振幅は大きくなることがわかる。スペクトルより水セメント比が大きくなると、30kHz~70kHzの卓越振動数が数kHz低くなることがわかる。

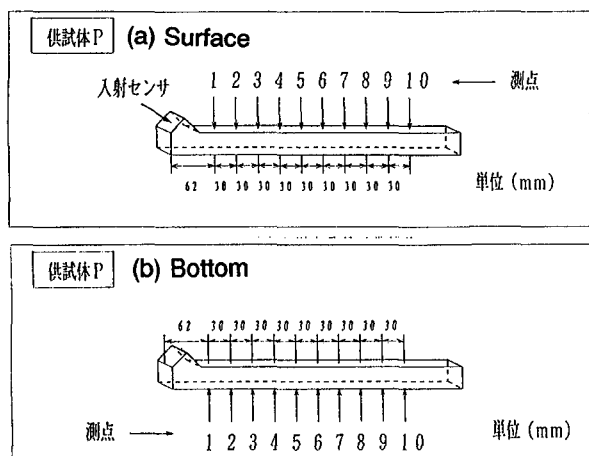
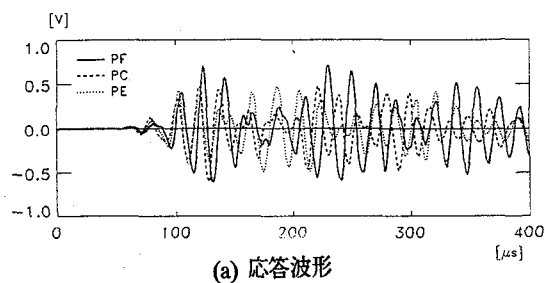
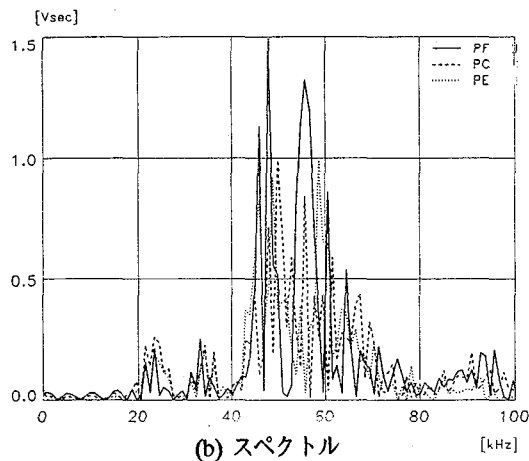


図11 供試体Pのセンサー配置



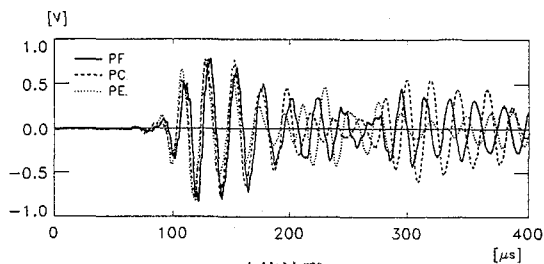
(a) 応答波形



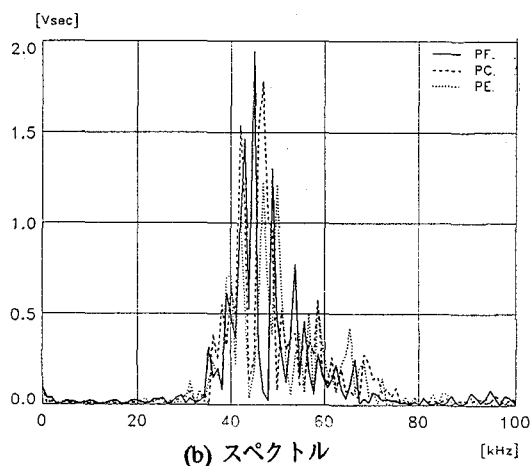
(b) スペクトル

図12 粗骨材粒径による測定結果の比較  
(測点2、Case X、Sensor V)

図9は到達時間 $T$ と水セメント比の関係を示している。到達時間はこの場合  $\text{Bar Velocity} (= \sqrt{E/\rho})$  に比例する。したがってこの場合は図中の直線式で示しているように、40%~60%の範囲で水セメント比とセメントペーストの  $\text{Bar Velocity}$  とがほぼ比例関係を示していることになる。図10は減衰定数と水セメント比の関係で、横軸は水セメント比である。この図より  $\text{Case 2}$  の白丸は水セメント比の増加に伴い減衰が大きくなる傾向にあることを示しているが、 $\text{Case 1}$  は、上に凸のピークを持つような分布を示している。こ

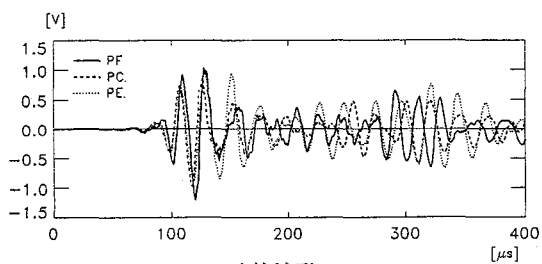


(a) 応答波形

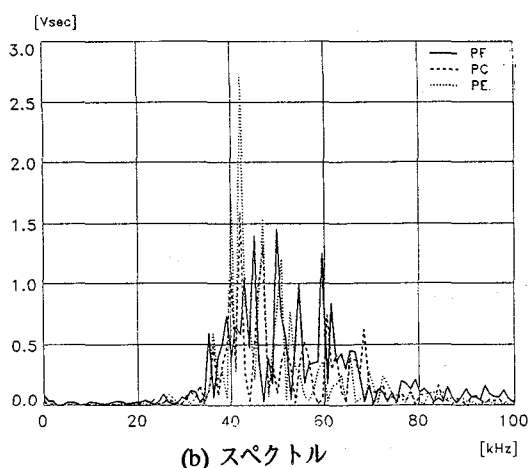


(b) スペクトル

図13 粗骨材粒径による測定結果の比較  
(測点2、Case X、Sensor H)



(a) 応答波形



(b) スペクトル

図14 粗骨材粒径による測定結果の比較  
(測点2、Case Y、Sensor H)

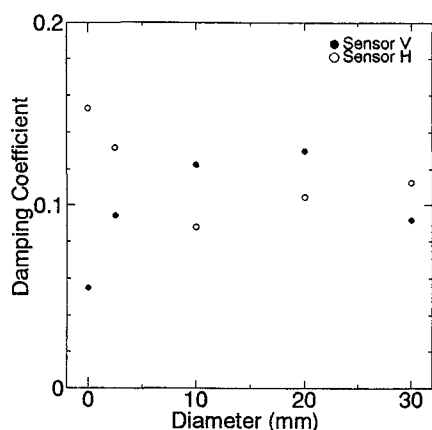


図15 骨材粒径による減衰定数  
(測点1、体積率30%、Case X)

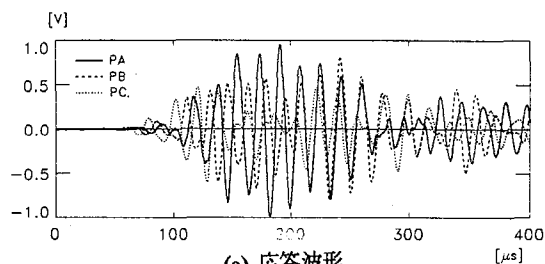
れは、水セメント比が大きくなる供試体SDは、供試体作製時の打設方向（上下）によって波動の伝播特性に影響を与え、減衰定数に幅が生じたためと考えられる。

#### 4. セメントペースト中の骨材が波動伝播に与える影響

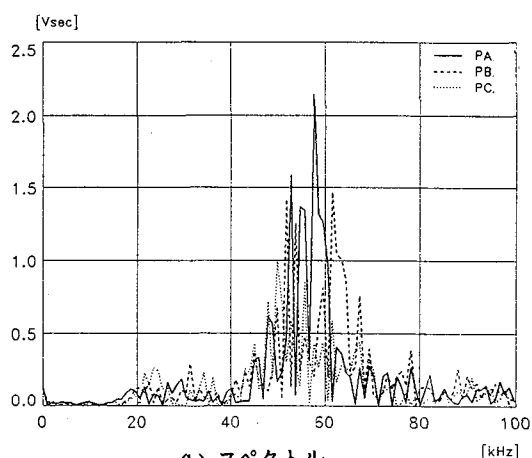
本章では、セメントペーストに骨材等を混合し、種々の配合条件の正方形断面棒の供試体が、どのような応答特性を示すか検討している。また同時に入射角45度で入射された応力波動のセメントペースト中における減衰特性についても検討した。ここでの入射波の波長は約8cm程度となり、部材断面寸法(3cm)と比較して波長が充分長いので、断面寸法による波動分散は小さいものと思われる。したがって、ここでの実験から前述したように、波動の伝播経路の内部減衰の影響が卓越して得られるものと思われる。

供試体PA～PHまでの実験は図1に示すように各測点間隔が10cmとなるようにセンサーを配置し、各測点毎に測定を行なった。実験では、図1のようなセンサー配置をCase X、測点2とTransmitterを入れ換えた場合をCase Yとし、2パターンについて実施した。これはCase Xの応答結果とCase Yでの応答結果を比較し、その両結果の共通点を確認することにより供試体のランダムな応答特性を明確にしようとするためである。

図11(a)に供試体Pのセンサー配置と測点を示す。測点は、測点は、反射波が到達すると予想される点と、逆に反射波の影響が少ないとみられる点に設けた。図11(b)は測点を反対側の面にした場合である。実験によって得られた結果は、それぞれ応答波形およびスペクトル図に示す。



(a) 応答波形

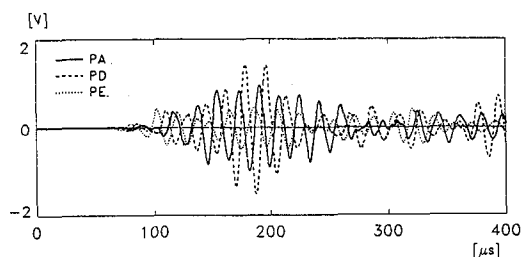


(b) スペクトル

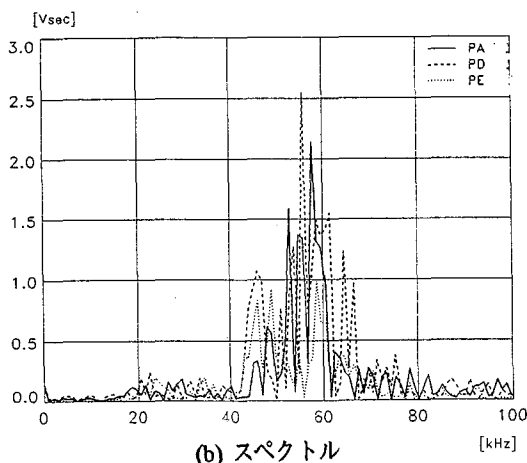
図16 粗骨材の体積率による測定結果  
(dmax=10mm、測点2、Case X、Sensor V)

#### 4.1 骨材粒径による影響

骨材の粒径と応力波動の伝播特性との関係は、骨材の弾性係数がセメントペーストに比べて大きいため伝播速度に影響を与える。また、骨材と母材との境界でおきる反射・透過・散乱によって応力波動は複雑に挙動する。図12は供試体PF(実線)、PC(破線)、PE(点線)のCase Xの測点2で、Sensor Vを用いて測定した波形とスペクトルを比較したものである。この供試体は骨材の体積率を30%として骨材の最大粒径を2.5mm(細骨材)、10mm、20mm(粗骨材)とした場合の比較である。この図より骨材の粒径が大きくなると到達時間は早くなることがわかる。また、最大粒径が大きくなると振幅は小さくなる傾向が見られる。これは骨材と母材の境界での散乱の影響を大きく受けるためと考えられる。また、スペクトルの比較より粒径が大きくなるに従い卓越ピークの数が増える様子が見られ、内部での散乱が発生していることを示している。図13は、図12と同様の比較をSensor Hを用いて測定した波形とスペクトル解析の結果である。伝播速度の違いは、図12の場合と同様に、骨材粒径が大きくなると早くなる。しかし振幅はほとんど同じであり、受信された波形の第1波群の波動モードでは、減衰はほとんど同じである。ただし、第2波群からは供試体表面付近で



(a) 応答波形



(b) スペクトル

図17粗骨材の体積率による測定結果

(dmax=20mm、Case X、測点2、Sensor V)

の骨材分布の影響が大きく波形の振幅を支配するものと考えられる。図14は図13の測定条件を同じにして測定面をCase Yにかえた場合の測定波形とスペクトル解析結果を示している。Case XとCase Yの骨材配置の不規則性から図13とは異なり内部の骨材粒径の違いが見られる。しかし、図13と図14のスペクトル図の卓越ピーク周波数はピーク位置に大きな影響を与えていない。しかし、最大ピーク周波数は47kHzから41kHzへ変わっている。この41kHzの卓越周波数は大きく卓越した振動モードであり、粒径が大きいほど大きく現れていることがわかる。また、細骨材と粗骨材の卓越スペクトルの差は細骨材に比べて粗骨材の卓越振動数において約2kHz程度高くなっていることがわかる。この様にCase XとCase Yの骨材配置が異なることによって生じる不規則性はSensor Vでも同様である。図15は骨材の粒径と減衰定数の関係を、測点1、Case Xでの解析結果をプロットした図である。骨材の体積率を30%とした場合を比較しているが、粒径0mmは供試体PA（セメントペースト）、粒径30mmは供試体PH（ガラス玉、体積率 17.9%）の場合の減衰定数である。黒丸はSensor Vを、白丸はSensor Hを表している。Sensor Vは骨材の粒径が大きくなると減衰定数は増加傾向を示し、Sensor Hは粒径10mmまでは減少傾向にあるが、粒径が大きくなると増加傾向がみられる。

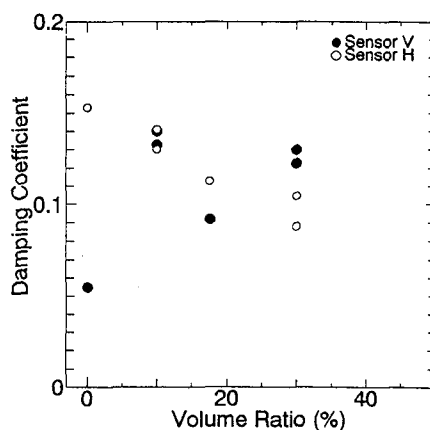


図18骨材体積率による減衰定数

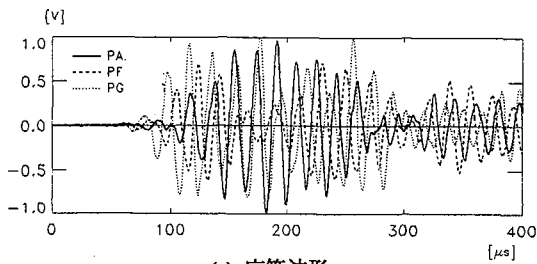
## 4.2 骨材体積率による影響

### (1) 粗骨材の体積率による違い

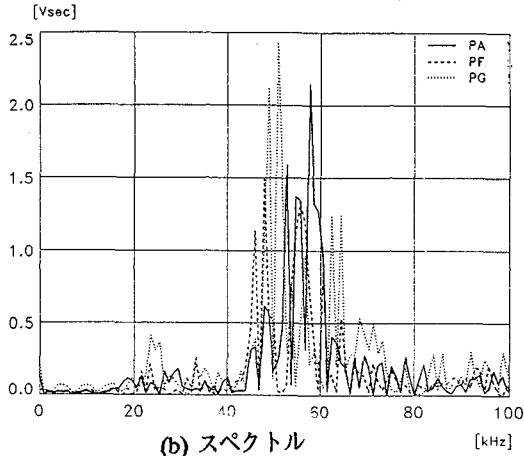
図16、図17は粗骨材の体積率による違いをみるため、供試体PBとPC、供試体PDとPEについて、供試体PAの測定波形とスペクトルを比較した図を表す。図の波形は測点2、Case X、Sensor Vとした場合の測定結果である。まず到達時間について比較をすると、粗骨材の体積率が大きい、つまり粗骨材の量が多いほど伝播は早くなる。次に振幅について応答結果をみると供試体PBとPCの比較では体積率の大きい供試体PCの方が振幅は小さく、同様に供試体PDとPEでは供試体PEが小さい。つまり粗骨材の体積率が大きいほど波動伝播に影響を及ぼすと考えられる。図17のスペクトル図では体積率が大きくなると卓越ピークは全体に小さくなっているが、47kHz付近の卓越ピークが比較的大きく現れている。図18は粗骨材を有する供試体PB、PC、PD、PE、PHの、体積率に対する減衰定数の関係を、横軸に体積率、縦軸に減衰定数をとって示した。ここで示すのは、測点1、Case Xで測定した波形を解析した結果である。これによるとSensor Vは体積率に比例して減衰定数が大きくなり、Sensor Hは逆に小さくなる傾向があることがわかる。

### (2) 細骨材の体積率による違い

図19は細骨材の体積率による応答の比較を行うため供試体PF（体積率30%）、PG（体積率50%）とセメントペースト供試体PAの測点2、Case X、Sensor Vで測定した波形とスペクトル解析結果を示している。粗骨材の場合と同様に骨材の体積率が大きくなると伝播速度は速くなった。一方、振幅は粗骨材の場合と異なり体積率が増すことによって大きくなる結果となった。これは、粗骨材の場合より粒子一つ一つの表面積が小さいため粒子と母材の境界での波動の散乱が少ないためと考えられる。スペクト



(a) 応答波形



(b) スペクトル

図19 細骨材の体積率による測定結果  
(測点2、Case X、Sensor V)

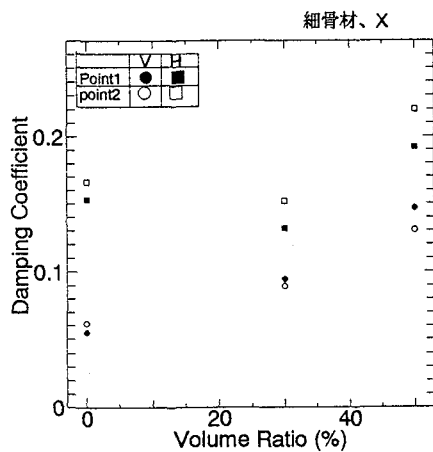
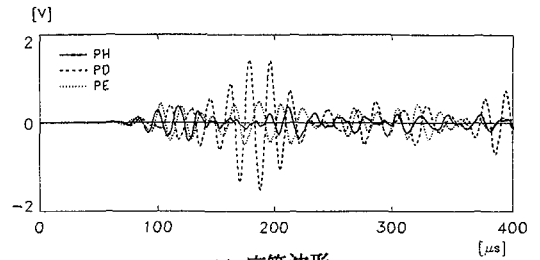


図20 細骨材体積率による減衰定数

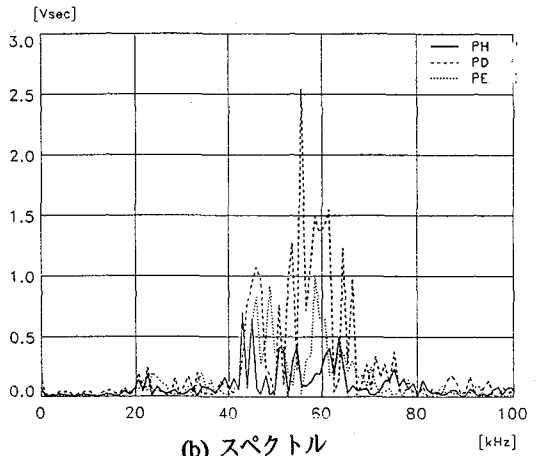
ル図の最大卓越周波数は供試体PGが51kHz、供試体PFが48kHzとなり3kHzほど体積率が大きくなると高くなっている。図20は細骨材の体積率と減衰定数の関係を、横軸に体積率、縦軸に減衰定数をとって示した。白黒の○印は Sensor Vについて測点ごとの減衰定数を、白黒の□印は、Sensor Hの測点ごとの減衰定数を示している。全体的には、体積率の増加に伴い減衰定数も増加する傾向にある。

### (3) ガラス玉と粗骨材の配置の比較

供試体PHは、ガラス玉を規則的に配置したモデルで粒径が30mm、骨材体積率は17.9%である。この供

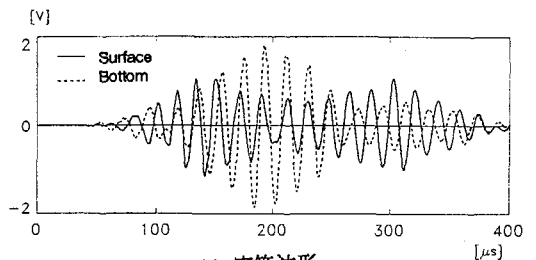


(a) 応答波形

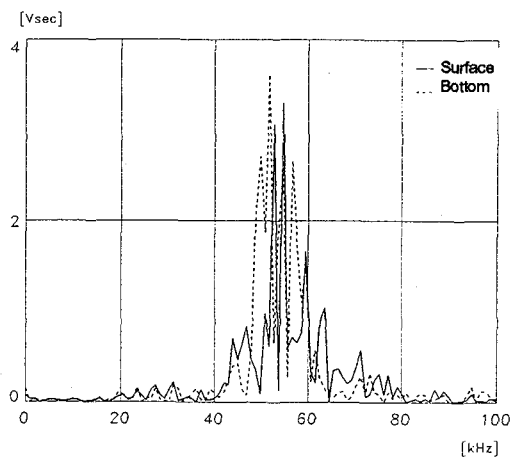


(b) スペクトル

図21 粗骨材とガラス玉の配置の比較  
(測点2、Case X、Sensor V)



(a) 応答波形



(b) スペクトル

図22 供試体Pの測定結果 (測点4、Sensor V)

試体と供試体PD、PEを測点2、Case X、Sensor Vで測定した波形とスペクトルを図21に示す。供試体PHは体積率がPD、PE供試体のほぼ中間であることが

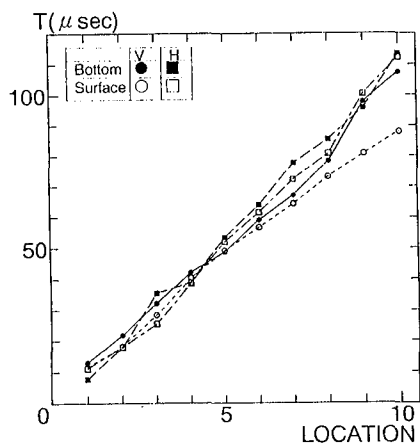
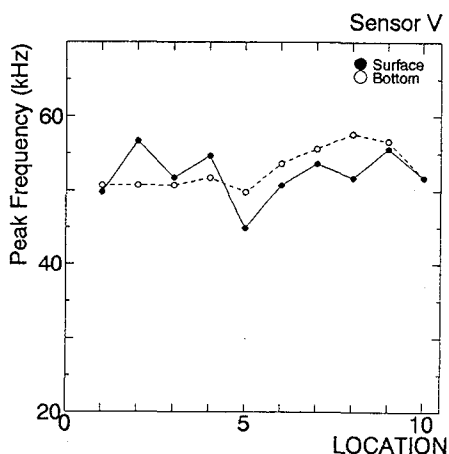
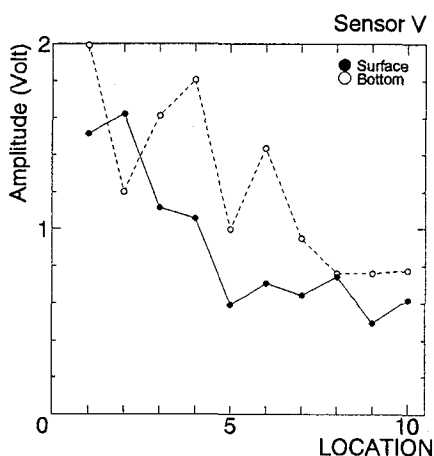


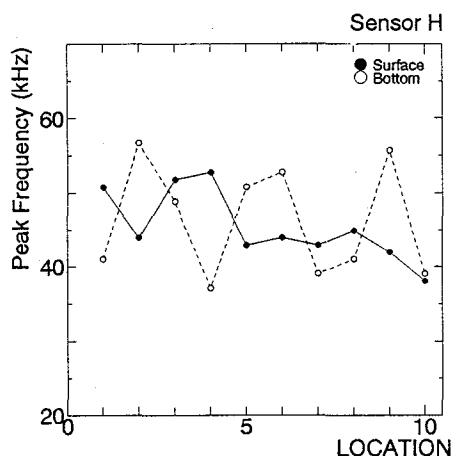
図23 供試体Pの各測点での波動到達時間



(a) Sensor V

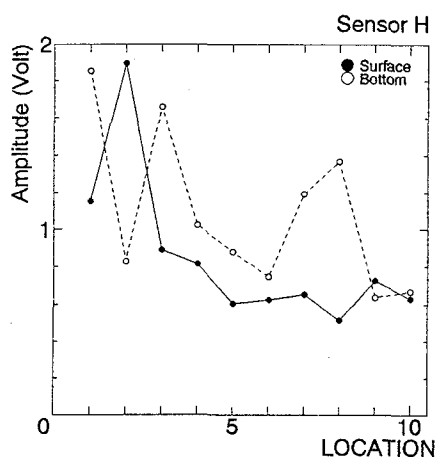


(a) Sensor V



(b) Sensor H

図25 各測点毎の卓越振動数の比較 (供試体P)



(b) Sensor H

図24 各測点毎の最大振幅の比較 (供試体P)

ら到達時間も中間であった。また、全体的に振幅が小さく、卓越ピークの数も40kHz~70kHzの間では

少なくなっていることがわかる。骨材と母材の境界が大きくなって境界での波動散乱が大きくなるためと、実験の測点が丁度疑似骨材の真上であったことから、等間隔に並べられた疑似骨材の波動伝播経路では振幅の小さい測点であったことも考えられる。

#### 4.3 供試体P (入射角45°) の応答特性

本節では、入射角45°で入射した応力波動がセメントペースト中を伝播する過程においてどのような特性を示すか検討する。測定点とした箇所は、P波、S波の全反射を仮定した場合の伝播経路である。図22に測定波形とスペクトルの一例を示す。これらの測定波形から振幅、卓越スペクトルに注目して各測点についてSurface(実線)とBottom(破線)について比較すると、単純に伝播距離に比例して振幅が小さくならないことがわかる。むしろ大きくなったり小さくなったりを繰り返し変化をすることがわかる。

図23は図11に示した各測点における到達時間(μsec)を入射点に対してSurface(○、□)とBottom(●、■)に分け、各センサー毎にまとめて

示した。SurfaceとBottomの到達時間の最大の差は約 $20\mu\text{sec}$ 程度であった。図24は各測点毎の最大振幅をSurfaceとBottomで比較している。最大振幅は入射点から離れると徐々に減少する傾向にあり、入射点近くでは特に測定値が大きくなったり小さくなったりして振動していることがわかる。この傾向はBottomでの測定結果に強く現れている。斜角入射によって $45^\circ$ に入射された波動は反射を繰り返す間に正方形断面棒の断面全体の伝播となっている。図25は各測点毎の卓越振動数をSurface(●)とBottom(○)で比較している。縦軸は卓越振動数で、各測点毎に測定した応答波形のスペクトルの最大卓越振動数をとっている。図25(a)はSensorVの測点毎の卓越振動数を表す。測点5より入射点に近い位置ではSurfaceの卓越周波数がBottomより大きくなっているが、測点5より入射点から遠くなると卓越振動数はBottomより小さくなっている。図25(b)はSensorHの測点毎の卓越振動数を表す。この場合卓越振動数は45kHzから47kHzを中心にSurfaceとBottomで交互に入れ替わっている。この理由としては、SensorHの個々の波形のスペクトル分布からも明らかなことであるが、モード分散の影響が水平方向振動成分に大きくあらわれているからと思われる。

## 5. 結 論

コンクリート構造物のような複合材料を超音波診断する上で重要となる超音波伝播特性や減衰特性に関する研究を実験的に行った。コンクリートの母材であるセメントペーストによるモデルの超音波伝播特性の解析を行い、その基本的特性を検討した。さらに、コンクリート内部にある細骨材や粗骨材の粒径や体積をパラメータとして解析を行った。以下にその結果をまとめることにする。

- 1)セメントペーストの水セメント比が大きくなると、周波数特性から30kHz~70kHzの卓越振動数が数kHz低くなる。
- 2)セメントペースト中の骨材粒径と減衰定数の関係をしめた。Sensor Vでは骨材の粒径が大きくなると減衰定数は増加傾向を示し、Sensor Hでは粒径10mmまでは減少傾向にあるが、粒径が大きくなると増加傾向にある。
- 3)粗骨材の体積率と減衰定数の関係を示した。これより受信する波動モードにより異なる減衰特性の傾向を示した。

## 4)細骨材の体積率による特性

- a)最大卓越周波数は体積率が大きくなると高くなる傾向を示した。
- b)体積率と減衰定数の関係を示し、体積率の増加に伴い減衰定数も増加することを示した。

## 参考文献

- 1) T.Mura : Micromechanics of Defects in Solids, Second, Revised Ed., Kluwer Academic Pub., 1991.
- 2) V.M.Malhotra, N.J.Carino : Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, 1991.
- 3) 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、第390号/V-8, 1988.
- 4) P.L.Chow, W.E.Kohler, G.C.Papanicolaou : Multiple Scattering and Waves in Random Media, North-Holland Pub. Company, 1981.
- 5) T.Oshima, S.Mikami, S.G.Nomachi : Analysis of Stress Wave Propagation in Composite Rectangular Beam in the Case of Ultrasonic Pulse Method, 土木学会論文集、第416号/I-13, 1990.
- 6) たとえば北原、加藤、中川 : 弾性散乱エネルギーの計算と材料の不均質評価への応用、構造工学論文集、Vol.39A, 1993.
- 7) H.Kolsky : Stress Waves in Solids, Dover Pub., 1963
- 8) A.H.Nayfeh, D.T.Mook : Nonlinear Oscillations, Wiley-Interscience Pub., 1979.
- 9) 田中、三枝 : 振動モデルとシミュレーション、応用技術出版、1984.
- 10) ASTM Committee : International Symposium on  $M^3D$  : Mechanics and Mechanisms of Material Damping, Baltimore, 1991.
- 11) 小笠原、大島、三上、斉藤 : 非破壊評価に応用するコンクリートの材料減衰に関する研究、土木学会北海道支部論文報告集、第48号、1992.
- 12) 小笠原、安田、大島、斉藤 : 非破壊評価に応用するコンクリートの減衰定数に関する研究、土木学会第47回年次学術講演会概要集、CS1-28, 1992.
- 13) 三上、大島、能町 : 複合材料長方形ばりの応力波動解析とその健全度評価への応用、構造工学論文集、Vol.35A, 1989.
- 14) 村丸、小笠原、井上、大島 : 不均一性を有する材料中を伝播する応力波動の応答特性、土木学会第48回年次学術講演会概要集、CS50, 1993.
- 15) 三上、他 : 不均一性を有する材料中を伝播する応力波動の応答解析、構造工学論文集、Vol.40A, 1994..

(1994年9月14日受付)