

不均一性を有する材料中を伝播する応力波の応答解析

RESPONSE ANALYSIS OF STRESS WAVE PROPAGATION IN NONHOMOGENEOUS MATERIALS

三上修一^{*} 大島俊之^{**} 菅原 登^{***} 村丸清英^{****}

by Shuich MIKAMI, Toshiyuki OSHIMA, Noboru SUGAWARA and Kiyohide MURAMARU

Dynamic responses of stress wave propagation in nonhomogeneous materials are analyzed by a visual simulation and an experimental study. Amplitude and phase of stress wave propagating in nonhomogeneous materials are shifted by the effect of internal damping, attenuation and multiple scattering. The effects of internal damping, crack, notch, slit, periodical array of slit and artificial gravel on the mortar specimen are analyzed by waveform analysis and spectrum analysis. Visual simulation to interpret the change of waveform are also obtained by scientific visual analysis(SVA).

Key Words: wave scattering, QNDE, ultrasonic inspection

1. まえがき

コンクリートや岩石などのように材料内部に多数の不均一性を有する材料の定量的非破壊評価(QNDE: Quantitative Nondestructive Evaluation)をする場合、材料内部の不均一性をできるだけ確に評価しなければならない。^{1), 2), 3), 4), 5), 6)}すなわち超音波を用いて材料内部の構造特性を診断する場合、基本となる波動場の伝播特性を精度良く確定しておき、その上で内部の欠陥や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。しかしたとえばコンクリートを例にとると、健全なコンクリート中を伝播する応力波動においても材料の減衰の影響を強く受け、その挙動は複雑である。^{3), 4), 5)}非破壊評価(NDE)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⁶⁾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^{5), 7)}に大別される。本研究ではこのうち後者の内部減衰が応力波動に及ぼす影響の検討を最終目標としているが、今回の実験では前者のInclusionや欠陥が波動伝播に及ぼす影響を含めた全体的な検討を行なった。

構造材料の減衰のメカニズムについてはこれまでに様々な研究成果があるが、全体としては種々の効果が複雑に連成している。減衰特性のモデル化としては(1)クーロン減衰(Coulomb Damping)、(2)線形減衰(Linear Damping)、(3)非線形減衰(Nonlinear Damping)などがあり、^{8), 9)}それぞれに関して多くの研究がある。内部摩擦による減衰についてはこれまで粘弾性減衰による非保存力系の挙動として、ばねと

* 北見工大助手	工学部土木開発工学科	(〒090 北海道北見市公園町165)
** 工博 北見工大教授	工学部土木開発工学科	(〒090 北海道北見市公園町165)
*** 北見工大助教授	工学部土木開発工学科	(〒090 北海道北見市公園町165)
**** 北見工科大学院生	工学研究科土木開発工学専攻	(〒090 北海道北見市公園町165)

ダッシュボットを用いたモデル化が主として用いられてきたが、これらのモデルが内部メカニズムとの対応関係が不明であったため、その改善として内部エネルギーの変化を基礎とするモデル化の研究が進められている。¹⁰⁾

本研究では二次元長方形板に関する応力波動問題を対象としてこれらの応力波動が内部減衰および波動散乱の影響によりどのように変化するかを実験的に検討している。^{11), 12), 13)}

2. 実験概要

実験に用いた供試体の種類を図1に示しており、7種類のモルタル長方形板である。供試体の形状は長さ700mm、高さ300mm、板厚30mmであり、モルタルのみの供試体MAを基準として、クラックモデル（供試体MB）、切欠きモデル（供試体MC）、一個の水平スリットモデル（スリットの厚さ10mm、幅100mm；供試体MD）、多数の周期的に配置した幅30mmのスリットモデル（スリットの厚さ1mm；供試体ME、スリットの厚さ3mm；供試体MF）、および骨材をモデル化した多数の円形介在物（ガラス玉、直径3cm）モデル（供試体MG）の7種類である。¹⁴⁾モルタルはW/Cとして50%、密度 2.117 g/cm^3 、縦波伝播速度 $V_P=4373 \text{ m/s}$ 、横波伝播速度 $V_S=2757 \text{ m/s}$ となっている。

次に図2には測定に用いた計測システムを示している。入射センサー（Transmitter）としては本研究では50kHzのP波用のものを用い、Pulse Generatorより電圧10V、継続時間 $10\mu\text{s}$ の設定条件で供試体の上辺中央に面に垂直に応力波を入射した。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。この変換係数は圧電歪定数などに依存するが詳細はここでは省略する。また入射波は入射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、入射条件を再現性良く一定に保つため、入射センサーはバネが内蔵された特殊な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。受信センサー（Receiver）についても同様に接触圧を一定とするための治具を用いるとともに、50kHz～1.5kHzの範囲で-10dBの応答特性を持つ広帯域のセンサーを用いた。受信センサー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センサーAと接触面に平行な水平方向成分を感知するセンサーBの2種類を使用した。センサーBはせん断型圧電センサーで感知方向に指向性があるので感度が大きくなるように配置した。受信波は増幅回路を経てWave Memoryに書き込まれるがこの間にそれぞれの装置の伝達特性が波形に重ね合わされることとなる。したがって、解析にあたってはこれらの影響に注意するとともに、必要に応じて不必要な影響を取り除く処理が必要となる。実験に用いた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、振幅解像度10 bitとした。FFTなどの波形の2次処理

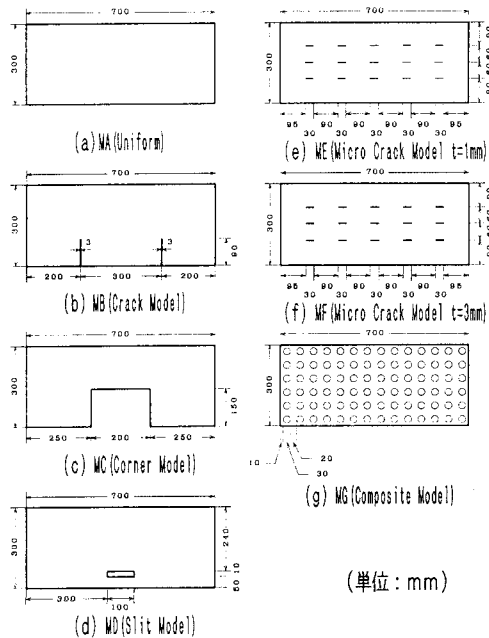


図1 供試体

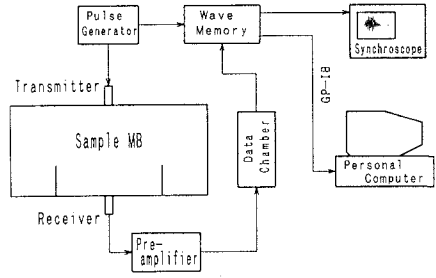


図2 測定システム

は別途ワークステーションを用いて行う。

3. Visual Simulation による波動応答の予測

文献¹⁵⁾にあるように応力波動解析において複雑な波動の散乱現象をコンピュータ・グラフィックの技術に応用した、ワークステーション上のSVA(Scientific Visual Analysis)によってVisual SimulationすることによりVirtual Reality (VR)として現象の予測や解析が実際の実験実施以前に可能となる。したがって実験計画におけるセンサーの配置位置の検討や実験結果で得られた複雑な応答波形の解釈においてかなり有効に活用できる。

(1) 数値計算モデル

2次元のFEM解析に用いた数値計算モデルを図3に示している。これらの内、(f)図は(a)図のメッシュ分割図を示しており、この領域を縦30分割、横35分割の等間隔に分割している。材料定数については別に実施した材料試験から次のように決めている。

弾性係数 $E = 3.39 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、

せん断弾性係数 $G = 1.41 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、

ポアソン比 $\nu = 0.17$ 、密度 $\rho = 2.117 \text{ g/cm}^3$ 。

計算は総合構造解析プログラムI SAPを用い時間間隔 $1 \mu\text{s}$ ピッチで動的応答解析を行っている。

減衰効果の考慮の程度は数値計算結果に大きな影響を及ぼすが、前述したように波動問題における減衰特性のモデル化については確立された検討結果が現状では見当たらない。したがってとりあえずここでは著者らのこれまでの経験から⁵⁾、I SAPで用いているRayleigh減衰の減衰マトリクス [C] を

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad \dots \quad (1)$$

とすると

$$\alpha = 23500, \beta = 3.472 \times 10^{-8}$$

と設定している。この場合要素数1050、節点数1116となる。他の(b)、(c)、(d)、(e)、図についても同様の分割を用いて欠陥等の形状を考慮している。荷重は長方形板中央上辺に集中荷重として作用している。この際局部的な応力集中の影響は生じないように配慮している。また図3の(e)図はスリットが板の上部に配置されており、はり上縁中央から入射した波動がどのようにスリットを回折していくかを検討するために適している。そしてこの結果は前述図1の供試体ME、MFのスリットを多数有する場合の波動伝播の検討において有効に使用される。入射波は入射点近傍における波形を参照して、図4に示すような波形を用いた。この関数は次式で表現される。

$$F(t) = \begin{cases} F_0 \sin 2\pi f_a t \sin 2\pi f_e t & 0 \leq t \leq T_p \\ 0 & t > T_p \end{cases} \quad \dots \quad (2)$$

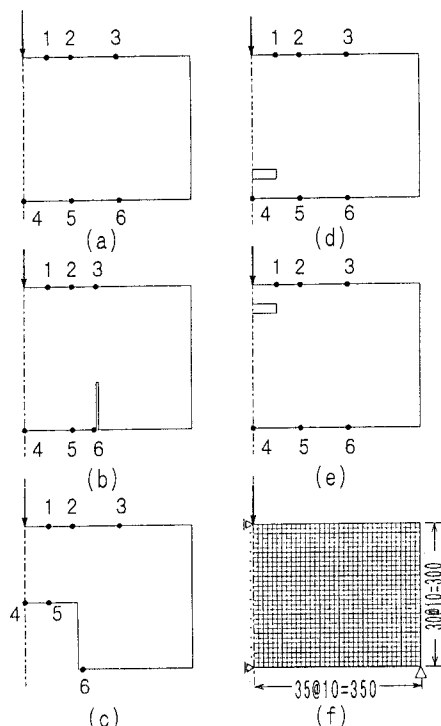


図3 測定位置と数値計算モデル

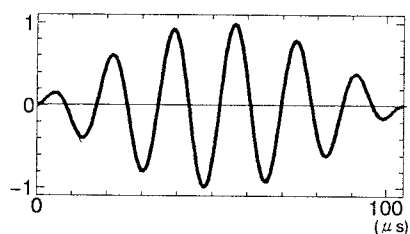


図4 入射波形

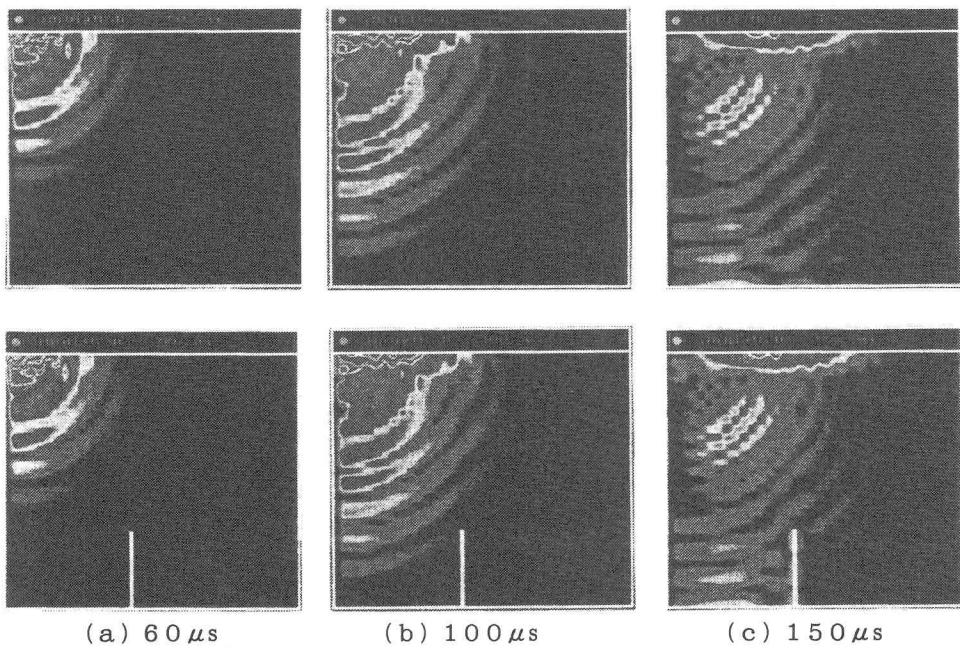


図5 クラックモデルの波動散乱の可視化による比較（2次元表示）

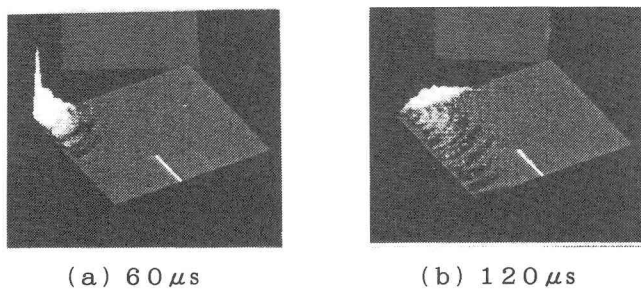


図6 クラックモデルの波動散乱の3次元表示

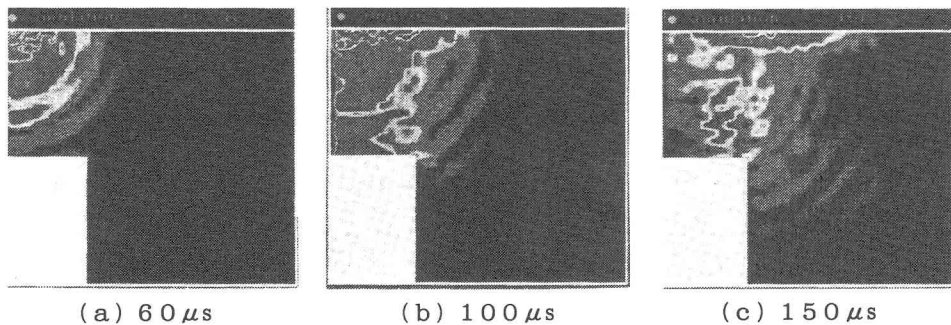


図7 切欠きモデルの波動散乱の可視化による比較（2次元表示）

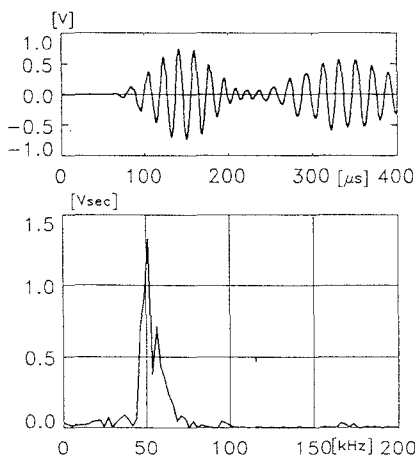


図8 MAの計測波形とスペクトル
(下辺中央点4)

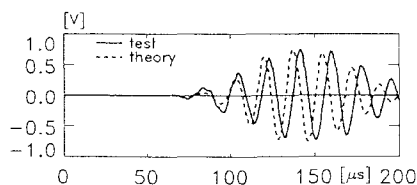


図9 理論値と測定値の比較 (MA、下辺中央点4)

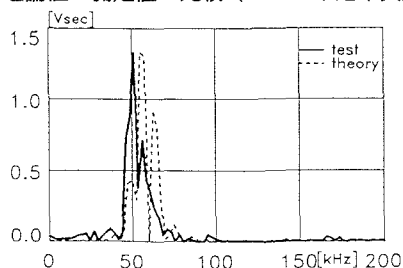


図10 理論値と測定値のスペクトル
(MA、下辺中央点4)

ただし F_0 = 最大振幅、 $f_a = 4.76 \text{ kHz}$ 、 $f_o = 57 \text{ kHz}$ 、 $T_p = 105 \mu\text{s}$ (継続時間)、 t = 時間とする。この f_a 、 f_o は実験から得られる入射波形に近似させた図4の入射波形を表現するための周波数パラメータである。

(2) 波動応答計算結果

応答計算は入射波が下辺から反射してもどってくる時刻を考慮して $200 \mu\text{s}$ までを実施している。計算結果のうち、出力波形については実験結果の波形を後に示すのでその際に比較して示すことにする。したがってここではコンピュータ・グラフィックスのソフトウェアを用いて可視化した画像について示し、以降の実験的解析の参考とすることにする。図5には図3の(a)図と(b)図の計算モデルに対する結果の比較を示している。図には対称性を考慮して構造の右半分を示しており、クラックがない場合(上段)とある場合(下段)について(a) $60 \mu\text{s}$ 、(b) $100 \mu\text{s}$ 、(c) $150 \mu\text{s}$ の時刻についての水平、鉛直変位応答成分の合変位の大きさの分布を2次元表示して示している。実際にはこれらの結果は画面上でカラー表示されている。これによればいわゆるクラックからの端部エコーが発生する状況が確認できるとともに、クラックの左側に波動エネルギーが集中している状況がわかる。図6にはクラックのある場合についてこれらの結果を3次元表示した結果を示しており同様の状況がさらに明確に確認できる。図7には同様にして切欠きのある場合の結果を示している。これによれば切欠き隅角部において波動が回折していく状況が見られる。また(a)の $60 \mu\text{s}$ においてすでに切欠きによる影響が切欠きからの反射波として見られる。

4. 実験波形解析による不均一性材料の非破壊評価

前述のように不均一性材料中を伝播する応力波動においては材料そのものの動的性質によって入射波形に振幅の減少および位相の遅れを生じて、見かけ上、反射および透過係数 (Reflection and Transmission Coefficient) の減少^{17), 18), 19), 20)} およびスペクトルの変化など、全体としては波動の減衰性の表われとして評価されることとなる。したがって Inclusion や内部欠陥を含んだ構造材料を含めた、応力波動による材料の非破壊評価においては入射波と反射波および到着波の波形の比較およびそのスペクトル解析結果から、材料内部を評価する指標が取り出せることとなる。

以下では実験で得られた波形に対する詳細な検討結果を前述のシミュレーション結果を併用しながら記述することとする。

(1) 均質モルタル供試体 (MA)

図8には下辺中央 (図3(a)の点4) における鉛直方向の加速度応答成分を示しているが、この図からは入射

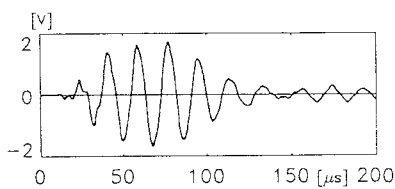


図11 MAの計測波形（上辺点1）

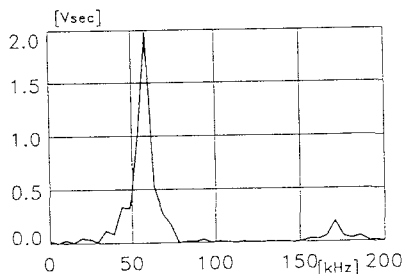


図12 MAのスペクトル（上辺点1）

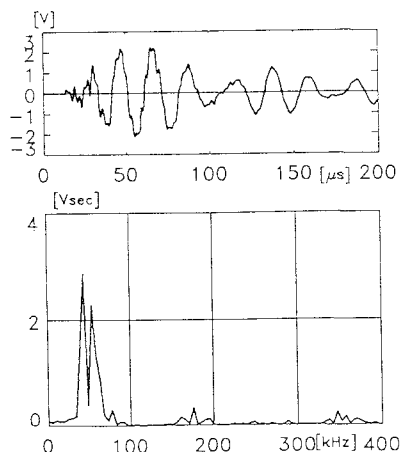
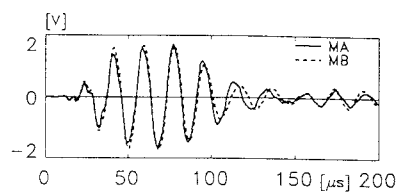
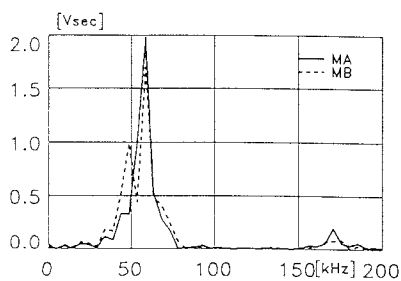


図13 MAのセンサーBによる
測定波形とスペクトル（上辺点1）

波の点 4へのP波の到達時刻は $68\mu s$ 、また下辺での反射波(R1)が上辺で反射してまた下辺に到達した時刻(R2)が約 $210\mu s$ であることがわかる。また第1の波群(R1)の最大振幅と第2の波群(R2)の最大振幅を比較することにより、モルタル供試体の減衰特性の一部が明らかとなるが、この場合縦波成分が卓越しており、波動エネルギーの逸散が少ないので、振幅の減衰は小さいことがわかる。²¹⁾ 図9には図8の第1波群(R1)に着目して3章の数値計算と比較した結果を示している。両者は理論値の方が多少位相が先行しているものの、ほぼ実験値に一致する結果となっている。また図10には同様に実験値と理論値の波形のフーリエスペクト

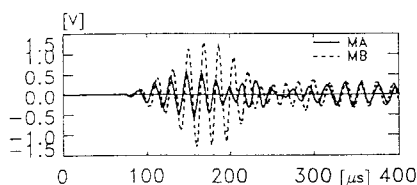


(a) 応答波形

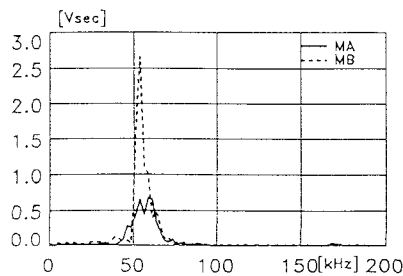


(b) スペクトル

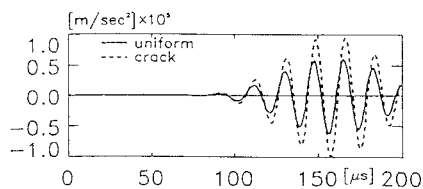
図14 クラック供試体（MB、上辺点1）



(a) 応答波形



(b) スペクトル



(c) 理論計算の比較

図15 クラック供試体
(下辺、MB点6、MA点5)

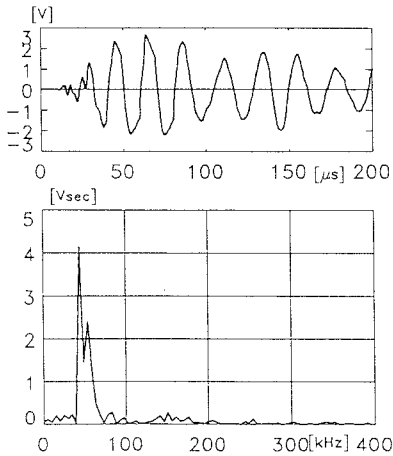


図16 センサーBによる測定波形とスペクトル
(MB、上辺点1)

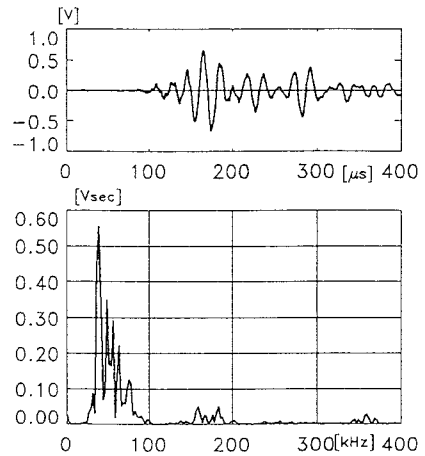
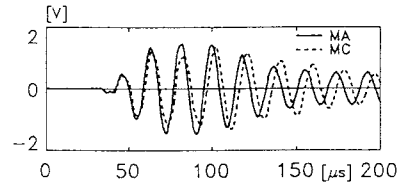


図17 センサーBによる測定波形とスペクトル
(MB、下辺点6)

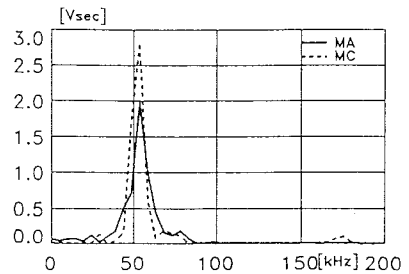
ルを比較している。ピークの位置に多少ずれが見られるもののほぼ一致する結果となっている。次に入射点側の上辺で入射点から水平に5cm離れた点(図3(a)の点1)における鉛直方向の加速度応答結果を図11に示している。この図によれば入射波形の概略がほぼ推測できると同時に到達初期では入射センサーの応答特性と思われる高周波成分が見られる。しかしこの高周波成分は距離が離れるにしたがって急速に減衰する。また135 μ s付近には下辺からの反射波(R1)の到達の影響が見られる。図12にはこの波形のフーリエスペクトルを示しているが、これによれば図8との比較からピーク周波数は点4の方が8kHz程度大きくなっていることがわかる。これは材料中を伝播する過程で内部減衰の影響を受けて卓越振動数の減少が発生しているものと思われる。図13には同様にして点1のセンサーBによって得られた水平方向成分の応答結果をスペクトルとともに示している。図12と同様応答初期に高周波成分がみられるとともに、100 μ s付近以降に反射波の影響がみられている。

(2) クラック供試体 (MB)

図14(a)にはクラックがある場合とない場合の比較として、図3の(a)図と(b)図における点1の位置における鉛直方向の加速度波形を示している。これによれば100 μ s付近から両者に差があらわれており、端部エコーの影響が見られる。また図14(b)はこの波形のスペクトルであるがMBの結果においてクラックによるモード分散からピークの分岐が見られている。このモード分散は波動が材料中を伝播する過程で境界条件の影響を受けて、卓越振動数の前後に周波数の異なる振動波形が発生することにより生じるものである。一方図15(a)、(b)には図3(b)の点6と図3(a)の点5の鉛直



(a) 応答波形



(b) スペクトル

図18 切欠き供試体 (MC、上辺点2)

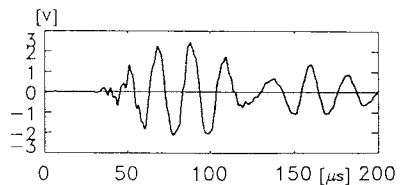
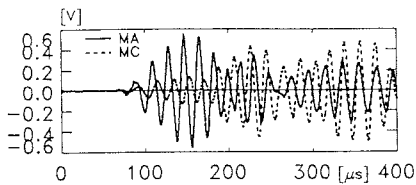
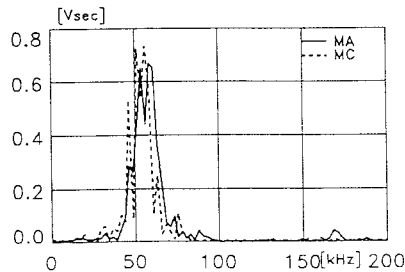


図19 センサーBの応答波形 (MC、上辺点2)

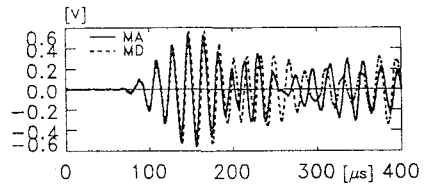


(a) 応答波形

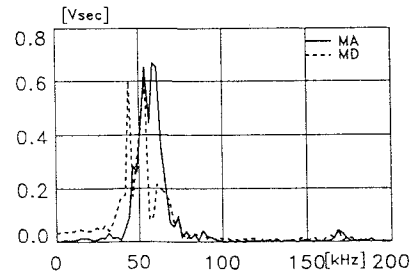


(b) スペクトル

図20 切欠き供試体 (MC、下辺点6)

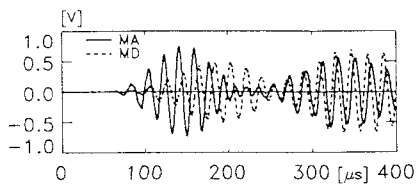


(a) 応答波形

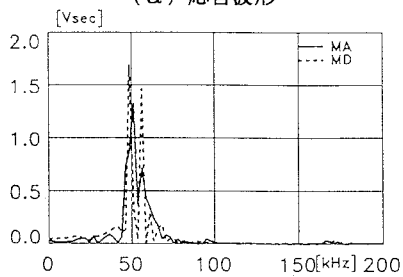


(b) スペクトル

図22 スリット供試体 (MD、下辺点5)

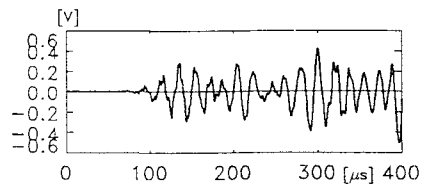


(a) 応答波形

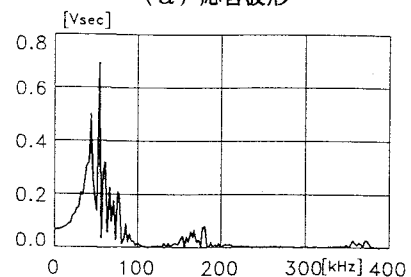


(b) スペクトル

図21 スリット供試体 (MD、下辺点4)



(a) 応答波形



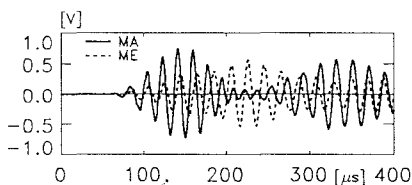
(b) スペクトル

図23 スリット供試体 (MD、下辺点5)

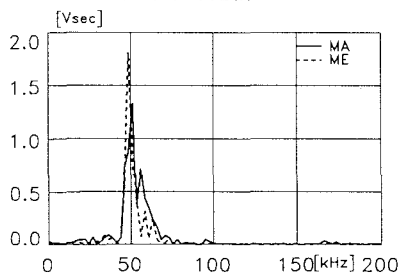
方向加速度応答を比較している。前章でも述べたようにクラックの影響によりこの点では波動エネルギーが集中するので、供試体MBに対する結果は振幅がかなり大きくなっている。スペクトルについては比較している点が多少ずれているのであるが、MBのスペクトルはMAのスペクトルを包絡する傾向となっている。図15 (c)には同様に3章における図3(a)と(b)の点 6に関する数値計算結果の比較を示しているが、図15(a)と同様の傾向が見られている。また図16 には水平方向応答成分の結果を示しているが、図14 と同様クラックの端部エコーの影響が応答波形の100 μ sあたりに顕著に見られている。さらに図17にはクラック近傍 (点 6) の応答結果を示しているが、モード分散がかなり生じていることがスペクトル図から明らかである。

(3) 切欠き供試体 (MC)

図18には切欠き供試体 (MC) の上辺の点 2における鉛直方向の応答結果を供試体MAの結果と比較して

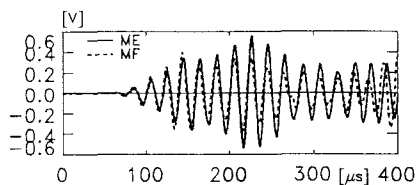


(a) 応答波形

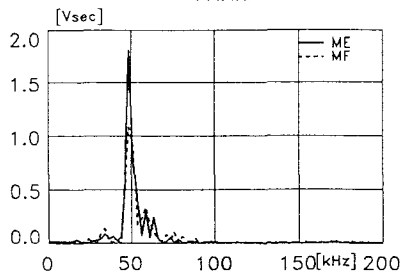


(b) スペクトル

図24 スリット供試体 (ME)
(スリット厚1mm、下辺点4)

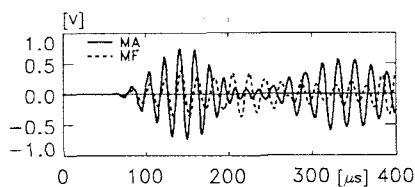


(a) 応答波形

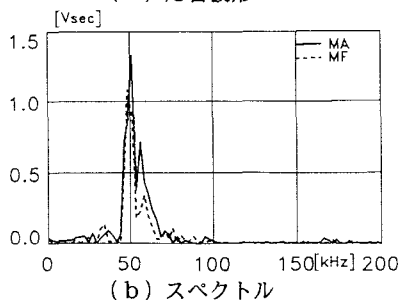


(b) スペクトル

図26 スリット厚さの比較
(ME、MF、下辺点4)

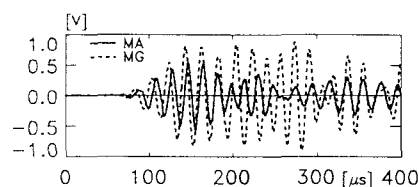


(a) 応答波形

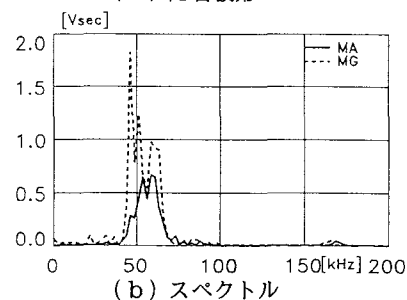


(b) スペクトル

図25 スリット供試体 (MF)
(スリット厚3mm、下辺点4)



(a) 応答波形



(b) スペクトル

図27 ガラス玉供試体 (MG、下辺点5)

示している。これによれば切欠き部からの反射波の影響が $70\mu\text{s}$ 付近からあらわれているとともに $110\mu\text{s}$ 以降供試体MAの波形とは位相も異なってきた。この結果は数値計算結果からも得られている。同様に図19には水平方向成分の結果を示しているが、この図と図13の波形を比較すれば、入射波は切欠きを回折して下辺に到達するため、上辺への反射波の到達時刻は $120\mu\text{s}$ 付近となっている。また図20には切欠き部下辺隅角部の鉛直方向応答結果を示しているがこの場合もスペクトル図で明らかのようにかなりモード分散が生じている状況がわかる。しかし図には示していないが水平成分においてはこのようなモード分散があまり生じない結果となっている。

(4) スリット供試体 (MD)

図21にはスリット供試体MDの下辺の点4における鉛直方向応答結果を示している。予想されるように応

答初期ではスリットの影響のため振幅は小さくなっているが、回折波が回り込んだのち振幅は大きくなる。また時間がたつにつれスリットの影響は小さいものとなる。この場合スペクトルにはあまり変化はない。一方図22に示す点 5 の鉛直方向成分の結果はこの点がスリットから離れているため応答初期には供試体MAと差はないが、 $200\mu\text{s}$ 以降スリットの影響により波形に差があらわれる。この時刻には下辺での反射波(R1)が上辺で反射してまた下辺に到達(R2)する時刻に対応している。スペクトルには低次の大きなピークがあらわれている。また図23は同じ点 5 の水平方向成分の結果を示している。スペクトル図にみられるようにスリットの影響は水平成分において多数の高次モードの発生となってあらわれている。

(5) 周期配置したスリット供試体 (ME、MF)

図24、図25、図26には周期配置したスリット供試体に対する結果を示している。図24はスリット供試体ME (スリット厚1mm) において図3(a)の点 4に相当する下辺中央における鉛直方向成分の応答結果を供試体MAと比較して示している。この場合入射波の縦波の波数 $k_L=0.74$ 、発生する横波の波数 $k_S=1.175$ 。したがって文献⁽⁸⁾の解析結果と比較する際の無次元化した波数は $k_Ld=8.87$ および $k_La=1.11$ となる。ただし d はスリット間隔、 a はスリット幅の1/2である。上辺中央から入射した縦波はスリットによる散乱の影響を受けながら下辺中央に到達している。スリットの影響は振幅の減少および最大振幅の到達の遅れとして観測されている。これは波動がスリットを回折しながら伝播するため、見かけ上波動伝播の遅れとなってあらわれるからである。スペクトルにおいてはピーク周波数がわずかに小さくなる結果となるとともに散乱による高次モードの発生がみられ小さいピークがあらわれている。図25には同様にスリット厚3mmの場合の結果を比較している。スリットの厚さが厚くなると散乱の影響が大きく、応答振幅はかなり小さくなっている。スペクトルでは図24と同様の傾向が見られる。また図26には2種類のスリット供試体に対する上記の結果を比較して示している。これによりスリットの厚さのちがいによる影響の程度が明らかとなった。

(6) ガラス玉供試体 (MG)

一般にコンクリート中の粗骨材はその形状、位置がランダムであり、波動散乱解析やAE波源解析の際にそのランダム性が解析精度に影響を及ぼす。しかしコンクリートの超音波による非破壊試験のためにはこれらの問題は避けて通ることができないので、本研究ではこれらの検討の一步としてモルタル中に規則的にガラス玉を配置した供試体MGにより測定した結果を示す。図27は前述と同様、図3(a)の点 5に相当する測点における鉛直方向成分の応答波形とスペクトルを示している。モルタルに比較してガラス玉は弾性係数が大きいので応答の振幅は大きくなり、位相も供試体MAより先行する結果となっている。これは弾性係数の大きい異質の材料が混入することによって波動エネルギーの減衰効果が小さくなると共に、平均弾性係数が大きくなることにより卓越振動数が増加するので生じるものと思われる。スペクトルにおいては多重散乱のためモード分解が強く、入射波の共振周波数の前後に大きなピークがあらわれている状況がわかる。

5. 結論

不均一性を有する材料中を伝播する応力波動の伝播特性を解析するためモルタル供試体を対象として実験および数値計算により検討した。得られた結果を要約すれば以下ようになる。

- (1) 有限要素法による波動応答解析を行ない、Visual Simulationとして波動散乱の状況を可視化することにより現象を把握でき、実験波形の解釈に活用できた。
- (2) 均質モルタル供試体における反射波などの波動伝播挙動および材料減衰による卓越振動数の変化などが明らかとなった。
- (3) クラック供試体に関する結果においてはクラックの端部エコーの影響やクラック近傍におけるモード分散の影響が得られた。また切欠き供試体についての検討の結果、切欠き隅角部の影響は波動回折のため波形としては到達波の遅れとなってあらわれるとともに、切欠き先端では鉛直方向応答成分にモ

ード分散の影響がみられる。

- (4) スリット供試体についての結果においてはスリットによる波動散乱の影響は、到達波の振幅の減少、および波動エネルギーの到達の遅れとなってあらわれている。
- (5) ガラス玉供試体について実験では粗骨材をモデル化したガラス玉の影響は到達波の振幅の増加および位相の先行となってあらわれている。

このような応力波動の詳細な解析を通じて材料内部の欠陥やInclusionをより精度良く評価できるものと思われるが、特に逆解析的な検討のためにはより多くの測点における波形データを必要とするのでそれらについては今後の課題としたい。構造部材の内部構造の診断の精度向上には今後多くの研究を必要としており本研究がその一助となれば幸いである。本研究の実施にあたって平成5年度文部省科学研究費一般研究C（研究代表者 大島俊之）の補助を受けました。またVisual Simulationの解析においては北見工科大学の久恒雅人氏のお世話になりました。ここに感謝いたします。

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 M³D: Mechanics and Mechanisms of Material Damping, Baltimore, 1991
- 11) 小笠原、大島、三上、斉藤: 非破壊評価に应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: 非破壊評価に应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、共通セッション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、共通セッションCS50, 1993
- 15) 大島、クリッツ: 複合材料中を伝播する応力波動のVisual Simulation、土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集、1991
- 16) V.Twersky: On Multiple Scattering of Waves, Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol.64D, 1960
- 17) Y.C.Angle, J.D.Achenbach: Reflection and Transmission of Elastic Waves by a Periodic Array of Cracks: Oblique Incidence, Wave Motion, Vol.7, No.4, 1985

- 18) J.D.Achenbach, Z.L.Li: Reflection and Transmission of Scalar Waves by a Periodic Array of Screens, Wave Motion, Vol.8, No.3, 1986
- 19) Y.Mikata, J.D.Achenbach: Interaction of Harmonic Waves with a Periodic Array of Inclined Cracks, Wave Motion, Vol.10, No.1, 1988
- 20) Y.C.Angle, J.D.Achenbach: Harmonic Waves in an Elastic Solid Containing a Doubly Periodic Array of Cracks, Wave Motion, Vol.9, No.5, 1989
- 21) 三上、大島、クリッツ、菅原: 積層複合ばりを伝播する応力波動とEnergy Flux分布の研究、構造工学論文集、Vol.39A、1993

(1993年9月16日受付)