

I-14

セメントペーストをマトリックスとする不均一材料の減衰特性に関する実験的研究

北見工業大学 正員 三上 修一

北見工業大学 正員 大島 俊之

北大工学部 正員 角田興史雄

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等、耐久性に関する疑念がもたれるようになった。そのような経緯から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^{1), 6)}。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、最近ではひび割れや内部欠陥等の検査を行い、構造物の耐久性を診断するための研究が盛んに行われている。この中で超音波を非破壊検査に用いる研究も盛んに行われている。

コンクリートの材料のように形状や物性が異なり、超音波の伝播特性も異なる複合材料を、超音波を用いた非破壊検査をする場合、応力波動の伝播特性については不明の点が多い。コンクリート構造物の非破壊検査を精度良く行うためには、セメントペースト中の各材料による超音波の伝播特性を明らかにして、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。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^{6), 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行った。構造材料の減衰のメカニズムにはこれまで様々な研究があるが、全体としては種々の効果が複雑に連成している。伝播波動の減衰特性は、構成材料と応力波動の周波数によって異なる。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供試体を作製した。ここでは特にセメントペースト中の骨材の粒径が応力波動へ及ぼす影響について、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^{11), 14), 15)}。

2. 実験概要

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の円柱形状の圧電型センサーを用いた。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と接触面に平行な方向の変位成分を感知するSensor H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

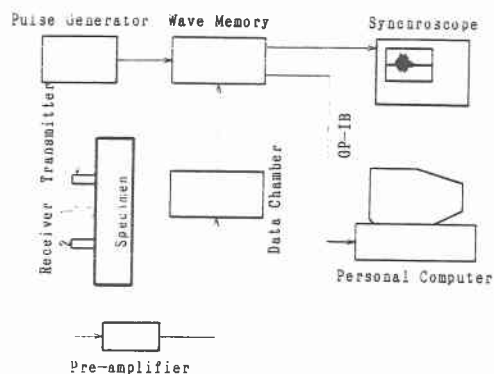


図-1 測定システム

Experimental Study on the Damping Characteristics of Nonuniform Materials with Cement Paste Matrix.

by Shuichi MIKAMI, Toshiyuki OSHIMA and Yoshio KAKUTA

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、グリズをはさんで接触圧を一定とした。受信波は増幅回路を経て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。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、母材であるセメントペースト中に細骨材、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。

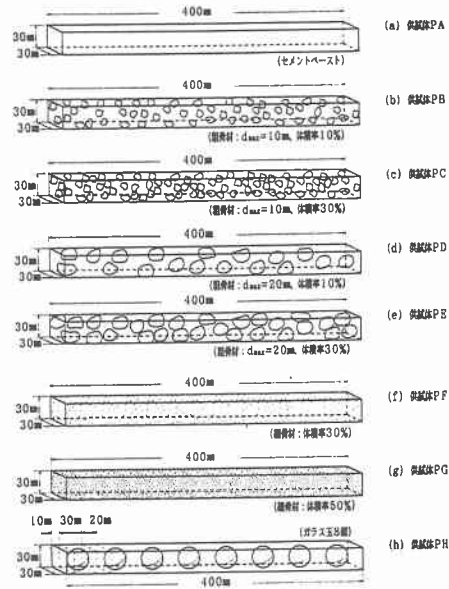


図-2 角柱供試体

供試体PA～PHは、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直方体状の供試体である。図-2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-2(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て直径30mmのガラス玉を図-2(h)のように8個並べた供試体である。実験は図-1に示す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。

3. セメントペースト中の骨材粒径が波動伝播に与える影響

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に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-3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。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多くなる様子が見られ、粒径が大きくなると内部散乱が発生していることを示している。図-4は、図-3と同様の比較をSensor II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-3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。

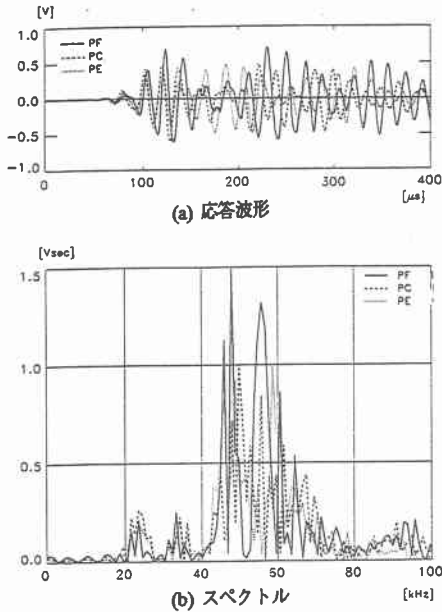


図-3 粗骨材粒径による測定結果の比較
(測点2、Case X、Sensor V)

ただし、第2波群からは供試体表面付近で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-5は骨材の粒径と減衰定数の関係を、測点1、Case Xで、骨材の体積率を30%とした場合の解析結果をプロットした図である。ここで横軸は粒径を表し、粒径0mmは供試体PA（セメントペースト）、粒径30mmは供試体PB（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。

4. まとめ

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。コンクリート内部にある細骨材や粗骨材の粒径をパラメータと

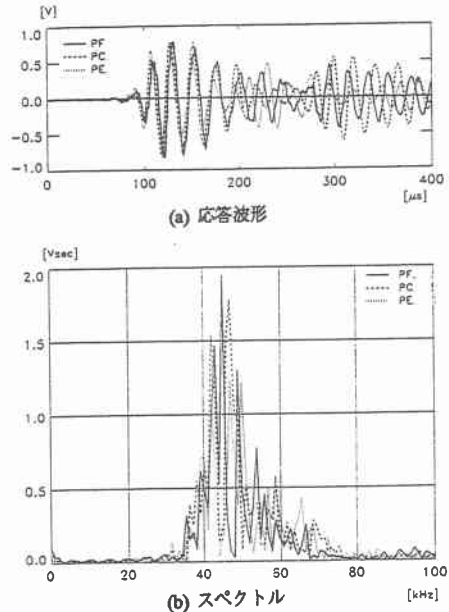


図-4 粗骨材粒径による測定結果の比較
(測点2、Case X、Sensor H)

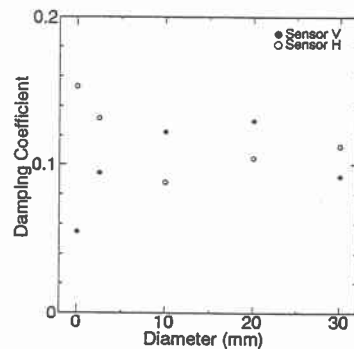


図-5 骨材粒径による減衰定数

して解析を行った。以下に結果をまとめることにする。

1)測定波形の比較より、伝播初期には内部散乱による影響は小さい。しかし、測定波形全体としては内部散乱の影響を受けている。このことは、スペクトル解析の結果からもわかる。

2)減衰定数と骨材粒径の関係より次のようなことがわかった。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。

セメントペースト中の骨材粒径の違いによる内部減衰には、内部摩擦によって超音波が減衰する影響と、骨材とセメントペーストの境界で超音波が散乱することによる減衰の影響が含まれている。ここで求めた減衰定数には両者の影響が含まれており、これらの影響を厳密に分離して考えることは難しい。しかし、本研究の結果よりセメントペーストと骨材の複合体としてのコンクリートの減衰特性を骨材粒径をパラメータとして表すことができた。

本研究は、文部省科学研究費一般研究（C）（研究代表者大島俊之）の一部として行ったものである。

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) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 三上、大島、菅原、村丸: 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.
- 15) 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.