

I-23

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

川田工業㈱ 正員 小笠原 照夫
北見工大 正員 大島 俊之
北見工大 正員 三上 修一
島田建設㈱ 正員 斉藤 隆行

1. まえがき

コンクリート構造に対して超音波による非破壊検査を実施する際、入射された応力波動は材料の減衰性によって振幅および位相が変化し、速度減衰も生ずる。非破壊検査においては入射波が材料内部の劣化状況に応じて変化しながら伝播するので、これらの波動の変化状況を詳細に解析して、材料内部の状態を評価する。その際応力波動が材料の減衰性によってどのように変化するかをあらかじめ求めておくことが必要であり、本研究の目的はここにある。

しかし材料の減衰機構は大変複雑で多くの因子が内部メカニズムとして連成している。したがってこれらの因子をそれぞれの問題に応じて卓越した挙動として抽出することが必要である。

本研究ではこれらのうち、モルタル供試体中を伝播する応力波動に着目し、材料の減衰定数を対象として、いくつかの検討を行なったので報告する。

2. 減衰機構とそのモデル化

構造材料の減衰のメカニズムについてはこれまで様々の研究成果があるが、種々の効果が複雑にからみ合って全体としての減衰を引き起こしており、これらの解明には今後非常に多くの研究を必要としている。ここではこれらの減衰性に関する多くの研究成果のうち特徴的な事項について若干整理してみることにするが、ここで述べる内容は紙面の都合もあり、全体像の一部であることをあらかじめご了解いただきたい。

減衰特性のモデル化の例としては次のようなものが上げられる。

- (1) クーロン減衰 (Coulomb Damping)
- (2) 線形減衰 (Linear Damping)
- (3) 非線形減衰 (Nonlinear Damping)

物体が高レイノルズ数の流体中を移動するような場合、流体は分離され、抗力は物体速度 $\dot{x}$ の2乗にほぼ比例する。

すなわち

$$f = c |\dot{x}| \dot{x} \quad (1)$$

この場合 c は物体の幾何形状と流体の性質の関数である。

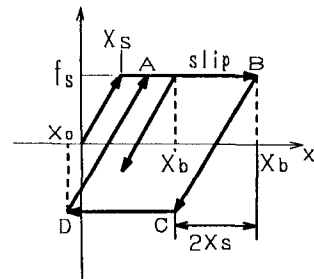


図 1 履歴減衰図

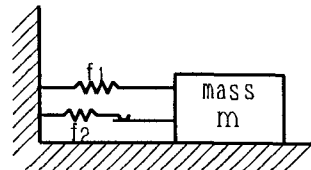


図 2 減衰システム

Study on Material Damping of Concrete to apply to Nondestructive Evaluation

By Teruo OGASAWARA, Toshiyuki OSHIMA, Shuichi MIKAMI, Takayuki SAITO

またレイノルズ数が中間的値のときは減衰力は線形と2次の非線形の間にくる。

したがってある研究者は減衰力の表現式として

$$f = c |\dot{x}|^\alpha \dot{x} \quad (2)$$

ただし $0 < \alpha < 1$

を提案している。

しかしこれらの減衰のモデル式は解析的なものではないので、他の研究者は減衰力の表現式として

$$f = c f(x) \dot{x} \quad \text{又は} \quad f = c g(\dot{x}) \dot{x} \quad (3)$$

などの式を一般式として用いている。ただし $f(x)$ と $g(\dot{x})$ はそれぞれ x と $\dot{x}$ の偶関数である。

(4) 履歴減衰 (Hysteretic Damping)

図1の履歴減衰図に示すように非線形性を含む弾性バネ効果 f_1 と、線形バネとクーロン減衰の組合せによる効果 f_2 からなる。

図2において上の要素の減衰力は $f_1(x)$ で表わされ、下の要素の減衰力は質量 m の履歴による。たとえば $x \leq x_s$ のとき ($f_2(x_s) = f_s$ はダンパーの限界摩擦力とする) 下の要素ののびは x で摩擦力はバネ係数を k とすると kx となる。

$x \geq x_s$ のときダンパーは滑動し、のびは x_s のままで摩擦力は $f_s = kx_s$ となる。

次に運動が $x = x_s > x_s$ で逆になった状態を想定すると、最初ダンパーはスリップせず下の要素の減衰力は kx_s から $k(x + x_s - x_s)$ にBCに沿って減少する。質量が $x = x_s = x_s - 2x_s$ に到達した時、下の要素は限界摩擦力 f_s に到達し、これは圧縮力である。さらに x が x_s を越えて減少する時、ダンパーは滑動し、下の要素の減衰力は $-kx_s$ である。ここで再度 $x = x_s$ で振動の向きを変えると、最初ダンパーはスリップしない。そして下の要素の減衰力は $k(x - x_s - x_s)$ でありDAに沿って増加する。

また x が x_s に到達した時滑動が発生し、減衰力は kx_s となる。またもし振動が x_s' で向きを変えると最初滑動が生じず、下の要素は減衰図のように減少しはじめる。この図で閉じた回路に囲まれた領域が逸散したエネルギーに等しい。この例で示した履歴の例は歪硬化タイプで線形であり、このような挙動を示す構造物にはボルト結合を有する構造物、外的に補剛されている石造構造、RCせん断壁、Beam-column 接合などに例がみられる。その他にも多くの例が研究されている。¹⁾ さらに複合材料の場合も素材界面でスリップや降伏が徐々に生じ同様の挙動を示す。

(5) 複素減衰 (Complex Damping)

減衰力があると、復元力と変形はヒステリシスを描くことを前述したが、このヒステリシスループの形状は振動数の変化に依存して、振動数の増加に応じてループ形状が長楕円となる材料もある。他方構造減衰の場合には一サイクルの消費エネルギーが振動数にはあまり依存せず、ほとんど振幅の関数と考えられるものもある。このような場合には減衰特性のモデルとして複素減衰の考え方が用いられる。

複素外力 $f = F e^{i\omega t}$ に対する運動方程式は

$$m \ddot{x} + \frac{k\alpha}{2\pi\omega} \dot{x} + kx = F e^{i\omega t} \quad (4)$$

となり、減衰が振動数に依存しないことから定常応答が $x(t) = A e^{i\omega t}$ となることを考えると

$$\ddot{x} + (1 + gi) kx = f \quad (5)$$

ただし

$$g = \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\delta E}{E}, \quad E = \text{運動方程式 (T) + 歪エネルギー (U)}$$

$$\alpha = \frac{\delta E}{U_{max}} = \frac{\delta E}{E} \quad : \text{エネルギー消費率}$$

また上式の g は共振時には減衰定数 h_r が小さい時

$$g = 2 h_r \quad (6)$$

の関係がある。

このような場合は履歴特性を示す振動系を、バネ機構を複素形で与えることによって表現でき、この $(1 + gi)k$ を複素バネ定数と呼んでいる。

(6) レーリー減衰 (Rayleigh Damping)

減衰を含むシステムのモデル化を考える場合、減衰効果を剛性および質量による効果の関数として表現すれば、以後の計算がやりやすくなる。

Rayleigh は多自由度系のシステムの減衰マトリックスを $[C]$ として

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (7)$$

ただし α, β は比例定数
と仮定した。

この考え方はその後 Caughey²⁾ により一般化され

$$[C] = [M] \{ a_0 + a_1 [M]^{-1} [K] + a_2 ([M]^{-1} [K])^2 + \dots + a_{n-1} ([M]^{-1} [K])^{n-1} \} \quad (8)$$

と表現された。ここで a_0, a_1 までとると Rayleigh 減衰となる。

Rayleigh 減衰では周波数依存性として低周波数領域と高周波数領域で減衰が大きくなり、中間領域で減衰が小さくなると仮定していることになる。

以上述べた減衰効果のモデル化の例は主として構造系の外的要因による減衰のモデルとして応用されているが、コンクリートなどのような複合材料においては異種材料間の相互作用による減衰効果のモデルとしても応用できる考え方である。

(7) 内部摩擦 (Internal Friction)

実際の材料が変形するとき、ある内部メカニズムが働いてエネルギーの逸散が生ずる。いくつかのモデルがこのメカニズムとして提案されている。たとえば Maxwell 流体や Kelvin/Voigt Model である。Caughey は弱い bilinear 履歴を示す半無限棒中を伝播する波動の振幅と位相の変化は線形粘弾性棒の場合とまったく異なることを示している。また物理システムの内部減衰機構を表わすために用いる粘弾性減衰を含む粘性減衰の存在は非保存力を受ける構造システムの特異な不安定性を予測する必要性を生み出すと述べている。²⁾

内部摩擦による減衰効果に関しては古い研究の歴史がある。³⁾ また ASME では近年この問題に関する国際会議を開催しているが、この背景には最近の制振、免震技術からの要請として高剛性かつ高減衰な複合材料の開発に関する研究が活発になってきている事情があげられる。

Kolsky³⁾ によれば内部摩擦による減衰効果の周波数依存性として図3のような傾向のあることが示されている。^{3), 4)} これによれば内部メカニズムに起因する減衰効果は低周波数および高周波数領域で小さくなり、中間に最大を示す領域がある。

また Kolsky⁵⁾ は応力波動伝播の際に生ずる波動エネルギー逸散に関する考察として「応力波動の減衰効果は二つに分類される。一つは幾何的減衰で、ポアソン比に依存する波動進行方向

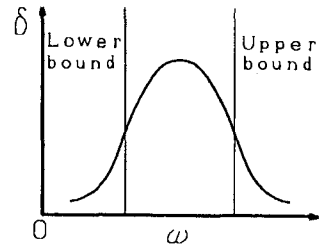


図 3 減衰の周波数依存性

に直角な方向の慣性力や部材の断面積および断面形状に依存し、高周波領域で大きな減衰を引き起こす。一方内部摩擦によって引き起こされる材料減衰は周波数の増加にともなって減少するので、これらの二つの効果は高周波領域においてお互いに打ち消し合う効果をもたらしていると思われる。」と述べている。この内容は本論文で述べた種々の効果が全体的減衰効果として複雑に連成していることを意味するものであり、減衰効果のモデル化は容易でないとも言える。

3. 材料減衰に関する実験

(1) 実験概要

モルタル供試体に関する応力波動伝播減衰に関する実験として図4に示すようなシステムを用いて、主として今回は

1) 材料の配合による違い、2) 波動モードの違いによる影響、3) 振幅依存性 などに着目して実験を行なった。供試体の寸法は縦30cm、横70cm、厚さ3cmであり、モルタルの配合はw/cとして35% (Model O)、50% (Model A)、65% (Model P) の3種類を用いた。入射センサーは50kHzのものを用い、計測は広帯域用のセンサーを用いた。センサーの接触圧は特殊なセンサー取付治具にバネを内蔵させ一定とした。パルス入力電圧レベルを変化させて入射応力波の振幅を変化させた。入射センサーの位置は図4で0の位置である。受信波の計測点として今回は図4で1、2、3の位置に着目した。

解析では図5のような計測初期の原波形に対して、対数減衰率δを求め

$$\delta = \frac{2\pi h_r}{\sqrt{1 - h_r^2}} \approx 2\pi h_r \tag{9}$$

から減衰定数h_rを計算している。

(2) 材料の配合の違いによる変化

図6には前述のModel O、A、Pそれぞれの供試体に対する測定1における減衰定数の計測結果の例を示している。図中に多くの点をプロットしているが、これは振幅レベルの異なる測定値を示している。これによればModel Pは他のModelに比べて砂成分が多く、減衰も大きめに出ている。またModel Aでは減衰のばらつきも少なく、比較的小さくなっている。これらの傾向の解析についてはさらに検討を必要としている。

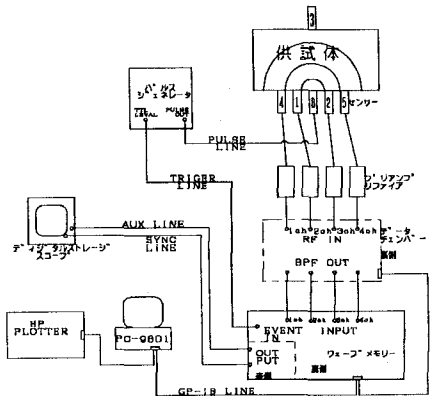


図 4 装置接続図

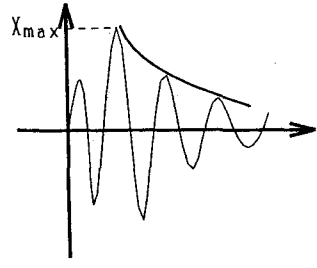


図 5 自由減衰の計算法

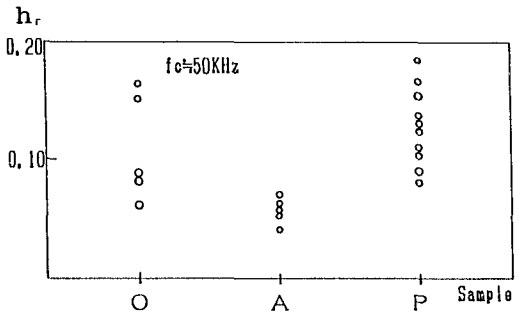


図 6 材料の配合の違いによる変化

(3) 波動モードの違いによる影響

図7と図8には振幅依存性の少ない

Model Aの測定点1と3に対する結果を示している。これによれば測定点3における値の方が3倍程度大きくになっている。測定点1での計測値には入射点の境界に沿う応力波動が観測されており、これには計測初期に表面付近を伝播するS波の他にRayleigh波も含まれている。この自由境界付近応力波動では、波動エネルギーはS波および表面波に卓越しており、せん断変形成分が卓越する。

これに対して測定点3では計測初期においてP波が卓越し、その後S波が到達する結果となる。したがって減衰定数の解析結果は体積歪成分が卓越する内容となっている。図7と図8の結果の違いにはこれらの差が現われているものと思われる。

(4) 振幅依存性

Model OとModel Pは減衰定数の振幅依存性が高い。図9にはModel Oの測定点3における結果を示している。横軸は計測波形の電圧を示しており、図5における x_{max} の値(減衰開始時の振幅)を意味している。この図によれば振幅が増加すると減衰定数が減少する傾向となっている。図10はModel Pに対する測定点3の結果を示している。この場合は振幅が大きくなると減衰定数が増加する傾向となっている。

これらの結果から砂成分が多いModel Pでは振幅が大きくなるほど材料減衰は大きくなるのに対して、砂成分が少なく相対的にセメント成分が大きいModel Oでは振幅が大きくなるほど減衰は小さくなっていることがわかる。

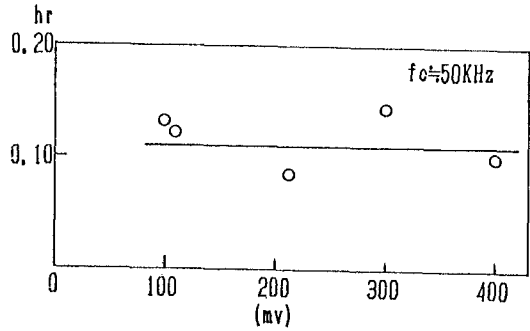


図 7 測点1における減衰定数

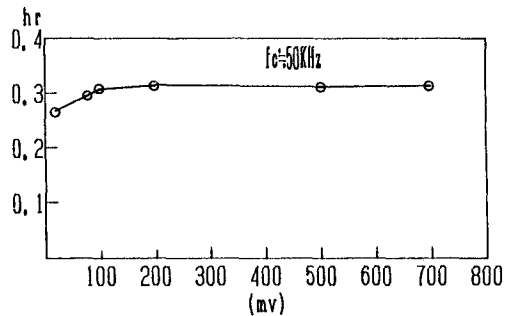


図 8 測点3における減衰定数

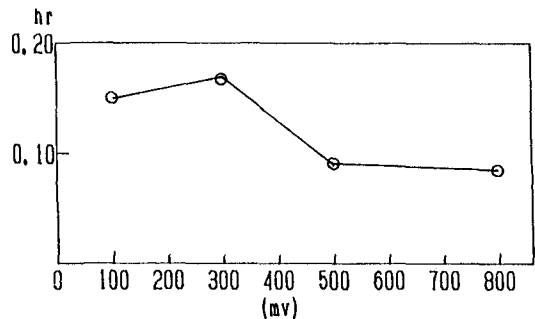


図 9 振幅依存性(供試体O, 測点3)

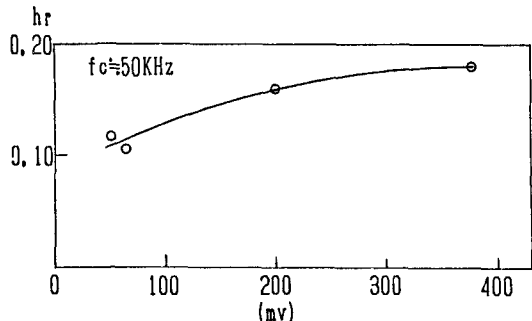


図 10 振幅依存性(供試体P, 測点3)

4. あとがき

本論文では構造材料としてのコンクリートを対象として超音波による非破壊検査をする際に重要となる材料減衰に着目して、減衰特性のモデル化について検討し、さらに材料減衰に関連する応力波動の実験結果について述べた。既述のように減衰機構は大変複雑であるので、そのモデル化にあたっては個々の変形挙動に応じた適切なモデルを用いることが要求される。したがって今後はこれらに対して何らかの指針が必要となるので、それらについて今後の研究課題としたい。

本研究の実験にあたっては北見工大学生の高木利昭君の助力を得た。また論文をまとめるに当たって杉浦伸哉、大科統和両君にお世話になりました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) A.H.Nayfeh, D.T.Mook: Nonlinear Oscillations, Wiley Pub., 1979
- 2) T.K.Caughey: Forced Oscillations of a Semi-infinite rod exhibiting weak bilinear Hysteresis, J.App.Mech, 27, 100, 236, 1960
- 3) H.Kolsky: Stress Waves in Solids, Dover Pub, 1963
- 4) 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
- 5) H.Kolsky: 大島あて私信, 1991
- 6) 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