

# I-35 Ultrasonic Pulse-Echo 法における構造部材中の 応力波の内部減衰について

北見工業大学 正員 大島 俊之  
同 同 三上 修一  
日大生産工学部 同 能町 純雄

## 1. まえがき

近年の構造物の健全度診断の必要性の増加により、構造部材内部を超音波等による非破壊試験により検査する手法が発達しつつあるが、このように内部構造を超音波により精度良く明らかにするためには探査波の構造内部での変形を詳細に明かにする必要がある。この探査波の変形に影響を及ぼす因子としては波動の振動数やモードおよびその分散、構造部材による内部減衰などが上げられ、特にこの内部減衰の検討には複雑な解析を必要とする。本研究ではこれらの構造部材に入射される応力波の検出とその変形に関連した減衰についての若干の解析結果についてのべる。

表1 配合の割合

| w/c           | W              | C            | S              |
|---------------|----------------|--------------|----------------|
| 35<br>Model O | 0.35<br>(1.10) | 1.0<br>(1.0) | 0.95<br>(1.14) |
| 50<br>Model L | 0.50<br>(1.57) | 1.0<br>(1.0) | 2.0<br>(2.09)  |
| 65<br>Model P | 0.65<br>(2.02) | 1.0<br>(1.0) | 2.52<br>(3.02) |

## 2. 内部減衰に関する実験

本研究で対象としている構造部材の内部減衰による影響を調べるため、ここでは簡単な実験結果を紹介する。実験では表1に示すような配合の異なる3種類のモルタル長方形板供試体を用いた。供試体は長さ70cm、高さ40cm、板厚3cmで配合はw/cが35%、50%、65%の3種類である。表1の数字は上段が重量比、下段が体積比を示している。使用した測定システムは文献<sup>(1),(2)</sup>で述べているものと同様であり、応力波の入射と受波は長方形板の境界辺で行う。図1には観測された到達波の比較の一例を示しているが、この図からw/cが大きく、セメントに比較して砂および水分が多いモデルほど、位相遅れが大きく生じていることがわかる。

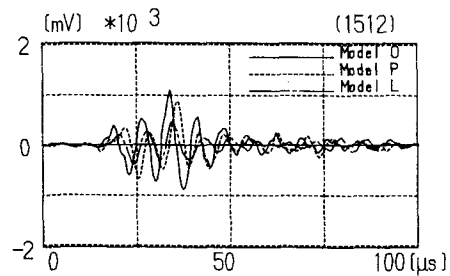


図1 配合の変化が内部減衰に及ぼす影響

## 3. 計測システムの応答特性

実験で得られる応力波の波形は図2のようにいくつもの測定プロセスを経由して観測されるので、測定システム自身の振動応答特性をあらかじめ確認する必要がある。このため、ここではまず増幅回路システム全体（プリアンプ、ディスクリミネータ）の周波数応答特性を検討するため、ファンクション・

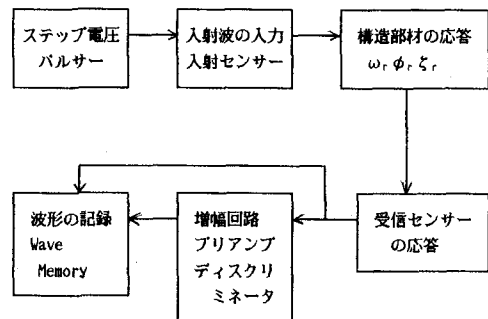


図2 システム構成図

ジェネレータを用い、入力  $\sin$  波の周波数を変化させ、出力波の増幅率、位相遅れを測定した。得られた結果を図3（増幅率）、図4（位相遅れ）に示している。図3において増幅率の値はファンクション・ジェネレータからの入力電圧の20倍の出力を100%として示している（ここで用いているブリアンプの増幅率は常に20倍の増幅を基準としている）。この図より増幅回路全体としては20 kHz～800 kHzの範囲でほぼ平坦となる周波数特性を有することがわかる。実際実験で主として用いる周波数帯は50 kHz～400 kHzであり測定には十分である。また図4の位相遅れの結果については30 kHz～200 kHzの範囲では小さいが、入力周波数が高くなると位相遅れが大きくなり、また低くなると応答波が先行する特性となっている。

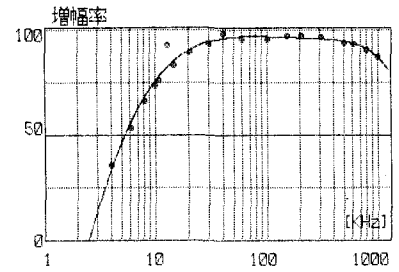


図3 増幅率

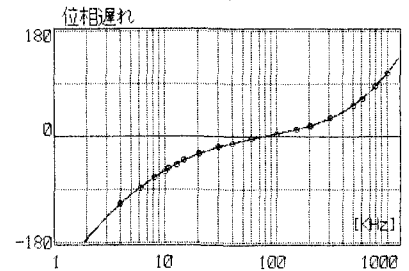


図4 位相遅れ

#### 4. センサー自身の振動応答特性

ここでは入射および受波用として用いるセンサーの振動応答特性について検討した結果についてのべる。センサー構造の概略は図5に示すように圧電材料による振動子本体がモールド内部でエポキシ樹脂により接着固定されている構造となっており、振動体として単純な系ではない。このセンサー自身の振動応答特性に影響する因子としては

- (1) センサーと振動体の接触圧
- (2) センサーと振動体のインピーダンス比などの影響
- (3) センサー自身の共振周波数による違い

などが考えられるので、2、3の方法によりこれを検討した。

まず(1)のセンサーと振動体の接触圧については通常の押しつけ圧力ではセンサー自身の振動応答波形には影響しないことが判った。これは別途押しつけ圧力を変化させて測定することができる装置を考案し、実験した結果明らかになったことであるがこれについては別に発表する予定である。

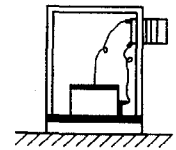


図5 センサー構造の概略

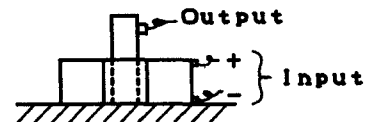


図6 円環形センサーと  
円柱センサーの組合せ

次に(2)のインピーダンス比の違いによるセンサー自身の応答に関する実験についてのべる。センサーを取り付ける構造体としてはここでは鋼材とモルタルを対象とし、弾性定数、密度、振動体としての固有振動数、振動減衰率などが異なる2種の媒体との連成振動応答を測定した。図6のように入射用の円環形センサーと受波用の円柱形センサーを組み合わせ、媒体上に設置し、入射センサーに異なる継続時間のパルス電圧を加える。入射センサーは共振周波数100 kHzであり、パルスの継続時間に応じて異なる入射波形を放射するが、これは一般に半無限媒体上に設置した円環体の動的加振問題となる。これらの動的応答解析については別途報告する予定である。このようにして放射された応力波は入射センサーの円環内部（内側）に配置された受波センサーにより応答波形として計測される。従ってここから得られる波形が上述の動的加振問題の解となるものである。（この中には受波センサーおよび増幅システムの応答も含まれる。）これらの測定結果の一例を図

7と図8に示す。これらは前述の動的応答解析結果と比較して詳細に論じられるが、例えばこれらに関する解としては点加振問題に対するLambの解がある。

次に(3)のセンサー自身の共振周波数などの影響に関する実験についてのべる。センサー自身は固有の共振周波数と減衰係数を有するが、設置する振動媒体と共に前述のように動的連成問題となり、合成系としては異なる応答周波数と減衰係数を有することとなる。従ってこれらの応答周波数および合成系としての減衰特性を明らかにすることが必要である。このための実験として二つのセンサー同志を向い合せて接触させ(圧接状態)、一方を入射用、他方を受波用として用い、この相異なるセンサー同志の合成系の振動応答を解析する。この問題を一自由度系の振動応答問題としてモデル化すれば、入射センサー及び受波センサーの質量及び振動方向の長さをそれぞれ、 $m_1$ 、 $m_2$ および $l_1$ 、 $l_2$  またセンサーの断面積A、弾性係数E、減衰係数hは両者で等しいものとする、継続時間 $\Delta T$ 、入力ステップ電圧によって生ずる全入射圧力 $F = EA\varepsilon$ (ただし $\varepsilon$ は圧電歪)の衝撃荷重に対する2センサーの合成系の軸方向変位 $u(t)$ として次式が書ける。

$$u(t) = \frac{F\Delta t}{m\omega_d} e^{-h\omega t} \sin\omega_d t \quad (1)$$

ただし  $m = m_1 + m_2$ 、 $l = l_1 + l_2$

$$\omega = \sqrt{\frac{EA}{ml}} \quad , \quad \omega_d = \omega \sqrt{1 - h^2}$$

また速度応答  $\dot{u}(t)$  の式は

$$\dot{u}(t) = \frac{F\Delta t}{m\sqrt{1-h^2}} e^{-h\omega t} \cos(\omega_d t - \gamma_n) \quad (2)$$

ただし  $\tan \gamma_n = \frac{h}{\sqrt{1-h^2}}$

また2つのセンサーそれぞれの応答の和(非合成)と考えれば次のようになる。

$$u(t) = F\Delta t \left( \frac{1}{m_1 \omega_{d1}} e^{-h\omega_1 t} \sin\omega_{d1} t + \frac{1}{m_2 \omega_{d2}} e^{-h\omega_2 t} \sin\omega_{d2} t \right) \quad (3)$$

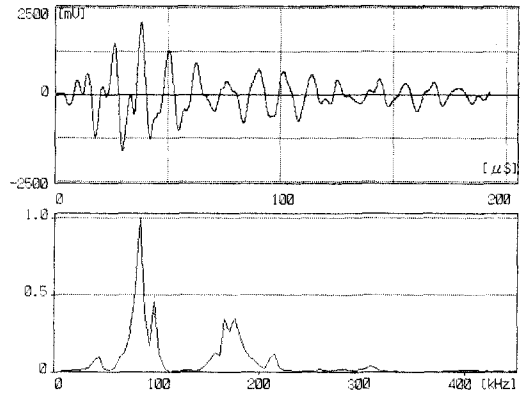


図7 鋼材への入射波形とスペクトル

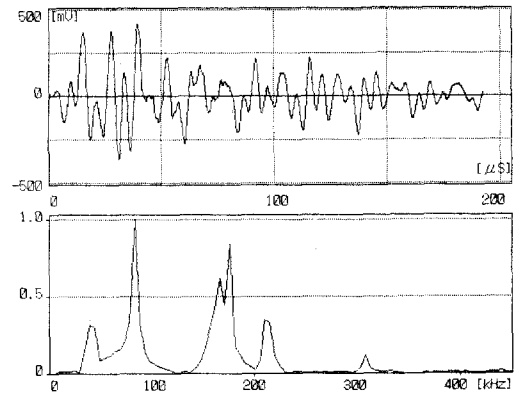


図8 モルタルへの入射波形とスペクトル

また速度応答の式は

$$\dot{u}(t) = \frac{F \Delta t}{m_1 \sqrt{1-h^2}} e^{-h\omega_1 t} \{ \cos(\omega_{d1} t - \gamma_n) + \frac{m_1}{m_2} e^{-h(\omega_2 - \omega_1)t} \cos(\omega_{d2} t - \gamma_n) \} \quad (4)$$

また電圧入力パルスに対するセンサーの合成系の応答として周波数領域における伝達関数は入力パルスのフーリエ変換値を  $F^*(\omega)$ 、出力応答値  $u(t)$  のフーリエ変換値の実数部を  $Re$ 、虚数部を  $Im$  とすれば

$$Re = \frac{k - m\omega^2}{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2} F^*(\omega) \quad (5)$$

$$Im = \frac{-c\omega}{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2} F^*(\omega) \quad (6)$$

ただし

$$k = \sqrt{\frac{EA}{l}}, \quad c = \text{粘性係数}$$

ここで  $F^*(\omega) = B^2 = \text{const.}$  (単発パルス) とすれば

$$Re^2 + Im^2 = B^2 \quad (7)$$

となり、ナイキスト線図上で原点を中心とする円となる。従って多くの実験を実施して最小自乗法によりナイキスト線図上で誤差を最小とするようなモーダルパラメータ ( $k, m, c$  等) を決定する手法により、1自由度系へのモデル化を実行することができる。

このセンサー to センサーの応答結果の一例を図9に示すが、これらの一連の解析のうち、スペクトル解析のピーク周波数に着目すると2センサーのうち低振動数のセンサーの周波数が卓越している。すなわち高い共振周波数のセンサーを入力側にした場合でも合成系の振動としては、質量の大きい、低い周波数のセンサーの応答が卓越する結果となる。

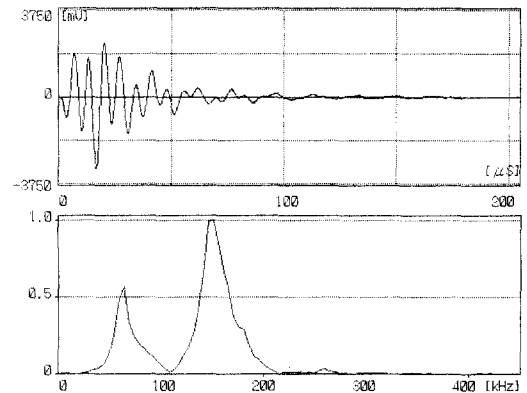


図9 2センサーの動的応答とスペクトル

## 5. 構造部材の内部減衰について

以上のように入射波はセンサーと媒体との連成系の振動応答として、センサーと媒体が決まればその入射波形はほぼ確定できる。構造部材の各点の応答は入射波の構造内部での変形過程としてとらえられ、内部の Inclusion、境界での反射などの影響を含んだ伝達系の応答であるが、一般にはこれを多自由度系のモデルとして表現できる。この多自由度系の伝達関数のモーダルパラメータの決定においては、周波数領域で実行する場合には重みつき非線形最小自乗法、時間領域で実行する場合には複素指数法、最小自乗

による複素指数法などがある。

このようにして構造部材の応答の実験結果の解析においては、解析的手法を応用して伝達系のモデルパラメータを精度良く決定することにより、構造部材の伝達系としての特性を把握できる。他方これを応用してシュミレーションのためのよりよいモデルの構築に資することができる。

材料が振動する間、弾性エネルギーの一部は常に熱に変化し、これらのメカニズムは全体として内部摩擦による減衰効果に含まれる。従ってこの内部摩擦による減衰量は振動の振幅や振動数に依存することとなる。この減衰の振動数依存の関係は図10のような傾向となる。モルタルのように砂粒子がセメントおよび空隙、水分などによって結合されている粒状体組織においては、微視的にみれば変形は異方性で複雑な挙動を示すこととなり、粒子と粒子の間で温度が異なり微量の熱の流れは粒子境界を横切って流れることとなる。振動する構造体の熱伝導による損失の場合、振動数にはある下限が存在し、この振動数では変形は非常にゆっくり生じ、体積変化は等温的であり、何らエネルギー損失は生じない。これはかなり小さい振動数の場合である。一方振動数の上限も存在する。この振動数では変形が非常に速く生じ、振動する間に熱の流れ（移動）が生じる時間が存在しない場合であり、この場合も何のエネルギー損失もない。従って最大の損失は適用される振動数がこの二つの限界の間に入ってきた時に生じ、またこの振動数の値は粒状体の径とその他の媒体の熱的伝導性に依存することとなる。<sup>3)</sup> 本研究では構造部材の自由減衰曲線から対数減衰率を求めた結果の一例を図11に示しているが、測定した範囲の周波数帯では最大値を有する傾向とはなっていない。図12には同様に得られた対数減衰率の振幅依存関係を調べた結果を示しているが、ここでは振幅が全体として小さいため振幅依存の特徴はみられていない。従ってこれらよりさらに精度のよい検討を行うため、前述のモードパラメータ決定法を応用した手法により解析する必要がある。

## 6. あとがき

本研究では構造部材の内部減衰に焦点をしばり、入射波の確定法とその伝達による振動応答の解析について述べた。ここでの内容はまだ充分なものではないが、今後さらに発展させて精度のよい解析ができる

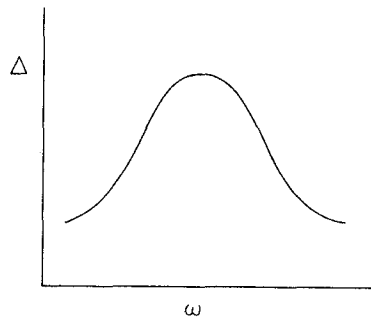


図10 内部減衰と振動数の関係

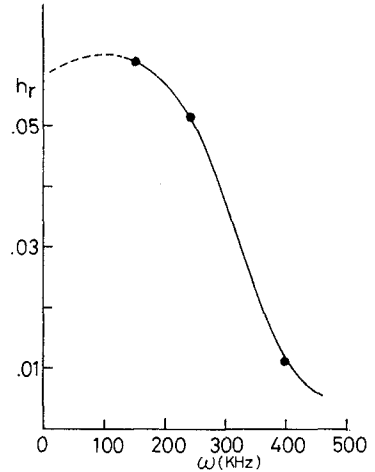


図11 対数減衰率の周波数依存性

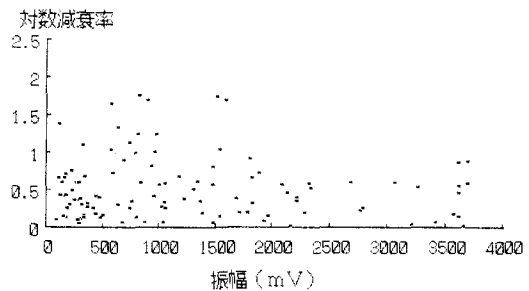


図12 対数減衰率の振幅依存性

よう努力したい。本研究の実験および解析に当たっては北見工大開発工学科の卒業論文学生山本裕之君、中村好宏君の援助があった。ここに深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 三上、大島、能町：複合長方形梁の動的応答に関する研究、土木学会北海道支部論文報告集、No. 44、1988.
- 2) 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.
- 3) H.Kolsky : Stress Wave in Solids, Dover Publication, 1963.
- 4) 大島：弾性波による老朽構造物の劣化と内部損傷の早期発見に関する研究、昭和62年度科学研究費補助金（一般研究（c））研究成果報告書、昭和63年3月.
- 5) N.J.Carino , M.Sansalone , N.H.Hsu : A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete, ACI Journal, Technical Paper, March-April, 1986.
- 6) 大津：コンクリート構造物の健全度診断へのアコースティック・エミッションの適用、コンクリート工学、Vol.25, No.12、1987.
- 7) 明石：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.
- 8) A.Alippi , W.G.Mayer : Ultrasonic Methods in Evaluation of Inhomogeneous Materials, Martinus Nijhoff Publishers, 1987.
- 9) J.Miklowitz : The Theory of Elastic Waves and Waveguides, North-Holland Publishing Company , 1978.
- 10) T.Niwa , S.Hirose , S.Nakatani : Model Studies on Scattering of Elastic Waves in a Half Space, 土木学会論文集、Vol.3, No.1、1986.
- 11) J.D.Achenbach , G.Herrmann : Dispersion of Free Harmonic Waves in Fiber-Reinforced Composites, AIAA Journal, Vol.6, No.10, 1968.
- 12) 大島、能町：有限プリズム法による繊維強化複合部材の縦波動伝播速度の研究、土木学会論文集、No.297、1980.
- 13) T.Oshima, S.G.Nomachi, T.Kida, S.Mikami : Stress Wave Propagation in a Rectangular Composite Beam, Proc. of 4th Japan-U.S. Conference on Composite Materials, Washington, D.C., June, 1988.