非定常スペクトル応答解析に基づく構造物の動的特性の同定法

株式会社　松下産業　　正会員　　○鈴木　悠紀賞
広島工業大学工学部　　フェロー会員　中山　隆弘

1. はじめに

構造物に損傷が生じた場合，剛性や減衰定数などの動的特性は損傷前に比べて変化する可能性がある．

このことに着目して，伝達関数法やカルマンフィルターの利用等，種々の同定手法を用いて，ある時期の構造物の動的特性を同定し，損傷前の同定結果との比較によって，そのときの損傷の程度を検出しようとする研究が数多く行われている[1)~3)].

本研究の目的もそれらと同様であるが，手法としては，かなり頻繁に発生する微小地震動の際に得られる地震加速度記録とそのときの構造物の応答変位記録と，非定常スペクトル解析法[4)]および非定常スペクトル応答解析法[5)]を利用することによってその動的特性を同定しようとする新たな試みである．

なお，非定常スペクトル理論によるシステム同定法は文献 6)でも提案されているが,本研究のアプローチはそれとは異なるものである．

2. 同定法

地震動を受ける線形一自由度振動系の応答変位 $y(t)$ の非定常スペクトル $f_y(t,\omega)$ は，地震力 $x(t)$ の非定常スペクトル $f_x(t,\omega)$ とシステムの周波数応答関数 $H(\omega)$ を用いることにより次式で表される．

$$f_y(t,\omega) = f_x(t,\omega)\frac{|H(\omega)|^2|G(t,\omega)|^2}{|A(t,\omega)|^2} \qquad (2.1)$$

なお， $f_x(t,\omega)$ と $x(t)$ の変調関数 $A(t,\omega$ ，および $f_y(t,\omega)$ と $y(t)$ の変調関数 $G(t,\omega)$ の算定法については，それぞれ文献 4)と 5)で示した通りである．

さらに式（2.1）を変形すれば，次のように式（2.2）が得られる．

$$\frac{f_y(t,\omega)}{f_x(t,\omega)}|A(t,\omega)|^2 = |H(\omega)|^2|G(t,\omega)|^2 \qquad (2.2)$$

式中の $A(t,\omega), H(\omega), G(t,\omega)$ はいずれも複素関数であり，そのことを考慮すれば式(2.3)が得られる．

$$\frac{f_y(t,\omega)}{f_x(t,\omega)}|A_R + iA_I|^2 = |H_R + iH_I|^2|G_R + iG_I|^2 \qquad (2.3)$$

なお，添字の R と I はそれぞれ各関数の実部と虚部を表す．

式（2.3）をさらに変形し，式（2.4）が得られる．ただし，紙面の都合で右辺の詳細は省略する．

$$\frac{f_y(t,\omega)}{f_x(t,\omega)}|A_R + iA_I|^2 = |(HG)_R + i(HG)_I|^2 \qquad (2.4)$$

さて，振動系の単位衝撃応答関数を $h(t)$ とすれば，$y(t)$ は振動系の質量 m を用いて次式で計算できる．

$$y(t) = \int_0^t h(t-\tau)\left[m\int_{-\infty}^{\infty} A(\tau,\omega)e^{i\omega\tau}dX(\omega)\right]d\tau \qquad (2.5)$$

そして，この $y(t)$ を用いれば，応答の変調関数 $G(t,\omega)$ に関する式(2.6)と式(2.7)が得られる．

$$G(t,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau)A(\tau,\omega)\frac{e^{-i\omega(t-\tau)}}{H(\omega)}d\tau \qquad (2.6)$$

$$H(\omega)G(t,\omega) = \int_0^t h(t-\tau)\cdot m\cdot A(\tau,\omega)e^{-i\omega(t-\tau)}d\tau \qquad (2.7)$$

さらに，式（2.7）の右辺を式（2.5）を用いて表し式（2.8）が与えられる．

$$\begin{aligned}\frac{f_y(t_i,\omega_k)}{f_x(t_i,\omega_k)}\left|A_R(t_i,\omega_k)^2 + A_I(t_i,\omega_k)^2\right| = &\left[\begin{array}{l}\sum_j \frac{1}{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}}\exp\left\{-\xi\ \omega_n\ (t-\tau_j)\right\}\times\sin\left\{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}(t_i-\tau_j)\right\}\\ \times\left[A_R(\tau_j,\omega_k)\cos\left\{\omega_k(t_i-\tau_j)\right\} + A_I(\tau_j,\omega_k)\sin\left\{\omega_k(t_i-\tau_j)\right\}\right]\Delta\tau\end{array}\right]^2\\ &+\left[\begin{array}{l}\sum_j \frac{1}{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}}\exp\left\{-\xi\ \omega_n\ (t-\tau_j)\right\}\times\sin\left\{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}(t_i-\tau_j)\right\}\\ \times\left[-A_R(\tau_j,\omega_k)\sin\left\{\omega_k(t_i-\tau_j)\right\} + A_I(\tau_j,\omega_k)\cos\left\{\omega_k(t_i-\tau_j)\right\}\right]\Delta\tau\end{array}\right]^2\end{aligned} \qquad (2.8)$$

式（2.8）の左辺は地震動に対する非定常スペクトル解析と非定常スペクトル応答解析によって計算できるので，右辺の ω_n と ξ に試行錯誤的に数値を与え，同式を満たす ω_n と ξ を求めることにより構造物の固有周波数と減衰定数を同定することができる．

3. 解析例

3.1 地震動および解析モデル

ここでは，あらかじめ固有振動数と減衰定数の分かった線形一自由度振動系の地震応答解析を行い，その結果を用いて本法の妥当性を検証した．

まず，解析モデルの固有振動数 f_n（固有円振動数 ω_n は $2\pi f_n$）と減衰定数 ξ については，それぞれ 2.0Hz，0.05 と仮定した．また入力地震動は EL Centro 地震波の NS 成分で，主要動を含む 0.02 秒の周期でサンプリングされた 20 秒間の加速度記録を用いた．図 3.1 に解析モデルと入力地震動，応答変位の時間記録を示す．なお，図中の k と c はそれぞれ振動系のバネ定数および減衰係数である．

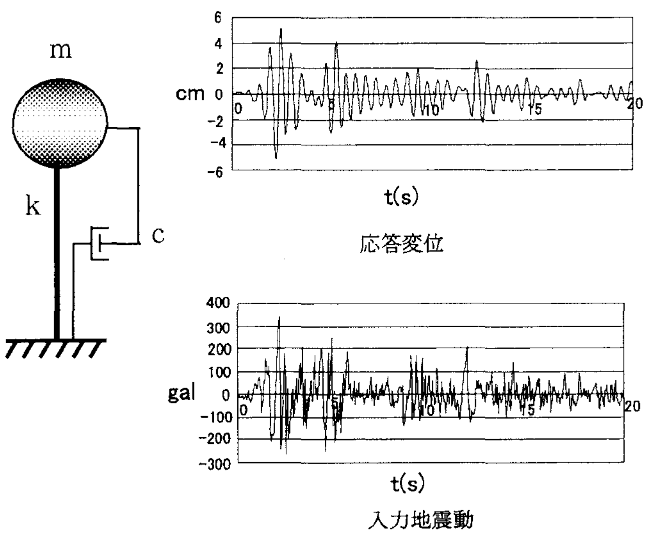

図 3.1　解析モデルおよび地震応答解析結果

3.2 解析結果

図 3.2～3.4 は，式(2.8）の右辺に暗に含まれる固有振動数をそれぞれ 1.8Hz，2.0Hz，2.2Hz とし，減衰定数を 0.04，0.05，0.06 としたときの解析結果である．時刻によらず式（2.8）の両辺が精度良く一致しているのは，図 3.3 に示すように固有振動数を 2.0Hz，減衰定数を 0.05 とした場合であることは明らかである．このことより，本法によれば，振動系の固有振動数と減衰定数を同時に精度良く同定できることが理解できる．

4. まとめ

本研究によって，粘性減衰が成立する振動系の動的特性を非定常スペクトル解析理論の応用によって，精度良く同定できることが明らかになった．

今後は実構造物への適用の可否，さらには動的特性が振動継続時間内で変化する場合への応用についての検討を進めなければならないと考えている．

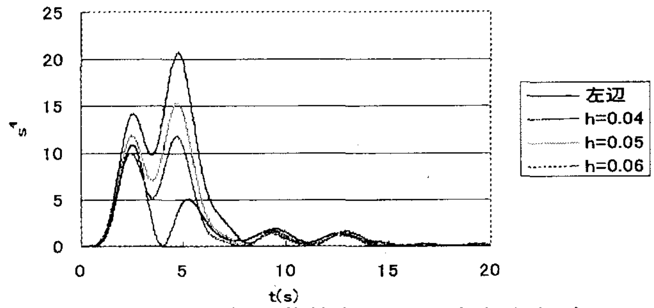

図 3.2　固有振動数を 1.8Hz とした場合

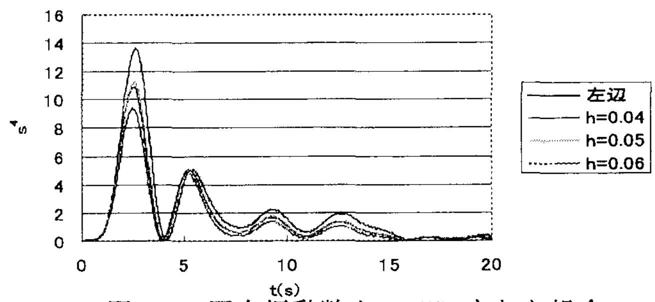

図 3.3　固有振動数を 2.0Hz とした場合

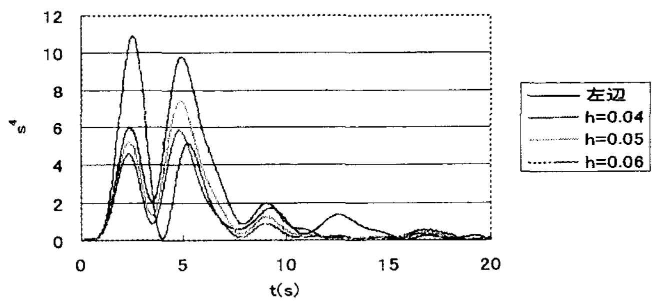

図 3.4　固有振動数を 2.2Hz とした場合

参考文献

1) 野田　茂：構造同定を伴う地震応答の知的制御システムに関する研究，平成 5 年度科学研究費補助金研究成果報告書，1994.3.
2) 神田　順：一般建築物における地盤を考慮した動的振動モデルに関する研究，平成 9～11 年度科学研究費補助金研究成果報告書，2000.10.
3) 柴田俊文：衝撃力が作用する梁の減衰定数と剛性の同時同定，第 55 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp.43～44，2003.5.
4) 小松定夫・藤原豪紀・中山隆弘：コンプレックス・ディモデュレーション法による地震動の非定常スペクトル解析，土木学会論文集，第 368 号/Ⅰ-5，pp.311～318，1986.4.
5) 中山隆弘・小松定夫・角田直行：構造振動系の非定常スペクトル応答解析法について，土木学会論文集，第 374 号/Ⅰ-6，pp.541 ～ 548，1986.10.
6) 増田新・山本鎭男・曽根彰：線形時変システムのノンパラメトリック同定（第 1 報，非定常スペクトル解析に基づく同定手法の基礎的検討），日本機械学会論文集（C 編），64 巻 634 号，1996.6.