

京都大学工学部 正員 家村浩和
 京都大学工学部 正員 後藤尚男
 日本鋼管 正員 谷村正人

1. まえがき 強震時における構造物の耐震性判定にあたっては、実現象により近いと考えられる多自由度履歴構造物の不規則応答を解析することが望ましいが、その一般的動特性は問題の複雑さゆえにさほど論じられていない。本研究では多自由度履歴系の基礎動力学特性ならびに不規則応答の確率統計量を把握する基礎段階として、2自由度 Bilinear 履歴系の定常不規則応答を解析した。まず多自由度履歴系に対する等価線形化解法を応用して速度・変位応答の RMS 値を予測するとともに、等価線形系の周波数伝達関数や応答モードなどの変化について考察を進めた。さらにアナログ計算機を用いたシミュレーションを実施して、等価線形化解法による予測精度の検討を行った。

2. モデルと運動方程式 本研究では図-1に示す自由度せん断系の第1・2層ごとに単位質量を有し、微小振動時の各層間の剛度および減衰係数は $\omega_i^2 (i=1, 2)$ および β_i で表わされるものとする。また各層間の履歴復元力特性 $\phi_i(y_i)$ としては、図-2に示す bilinear 型を採用した。層間変位 y_i を用いると運動方程式は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \beta_1 \frac{dy_1}{dt} - \beta_2 \frac{dy_2}{dt} + \omega_1^2 \phi_1(y_1) - \omega_2^2 \phi_2(y_2) &= -\ddot{z}(t) \\ \frac{d^2 y_2}{dt^2} + \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \beta_2 \frac{dy_2}{dt} + \omega_2^2 \phi_2(y_2) &= -\ddot{z}(t) \end{aligned} \right\} (1)$$

3. 統計的等価線形化解法 多自由度履歴系を、線形化に伴う誤差の2乗を最小にする規範で線形化すると、各層間の等価線形定数 ω_{eqi}^2 および β_{eqi} は、層間定常応答の統計量のみで次式のように表示できる。¹⁾

$$\left. \begin{aligned} \beta_{eqi} &= E[\omega_i^2 \phi_i(y_i) \dot{y}_i] / E[\dot{y}_i^2] \\ \omega_{eqi}^2 &= E[\omega_i^2 \phi_i(y_i) y_i] / E[y_i^2] \end{aligned} \right\} (2)$$

一才等価線形系の定常応答共分散値マトリックス $R_y(0)$ は等価線形系の周波数伝達マトリックス $H(\omega)$ とその共役転置 (*印) および入力のスペクトル密度マトリックス $\Phi_f(\omega)$ を用いて次式のように算出される。

$$R(0) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) \Phi_f(\omega) H^*(\omega) d\omega \quad (3)$$

したがって、まず初期値 ω_i^2, β_i を用いて式(3)より共分散値を求め、式(2)より第1次近似の線形系を決定する。以後式(3)および(2)の演算を共分散値が一定精度に納まるまで繰り返して、等価線形系およびその応答共分散値を決定する。

4. RMS 応答と等価線形定数 図-3・4には、弾性域と塑性域の剛度の比 α が $1/2 \sim 1/10$ の場合の各層間の RMS 応答 (0印) および等価線形定数を、降伏レベルを横軸に取ってプロットした。ただし $\ddot{z}(t)$ は定常ホワイトノイズである。両図の (a) には変位応答 y_i の RMS 応答を示したが、Ductility Factor でのスケールも表示してある。降伏レベル Y/σ_k が大きいと、ほとんど線形応答値に等しいが ($\sigma_y/\sigma_k \cong 1.0$)、降伏レベルが下ると履歴減衰効果が作用して線形応答値よりも小さな値となり、 $\sigma_y/\sigma_k = \sigma_u/\sigma_k \cong 1.0$ 付近で最小値を示している。これはこの付近で両図の (c) に示した β_{eqi} が最大値を示すことと対応する。さらに降伏レベルが下ると、両図の (d) に示した剛度の低下が影響して線

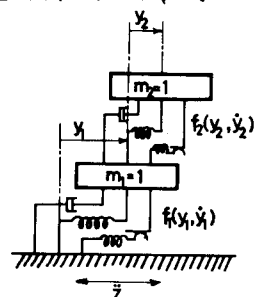


Fig.1 Two-Degree-of-Freedom Hysteretic Model

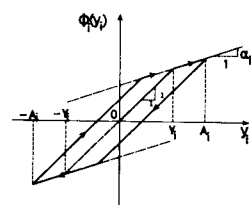


Fig.2 Bilinear Hysteresis

形応答よりも大きな値を示している。両図の(b)には速度のRMS応答を示したが、降伏レベルが小さい場合でも線形形応答より大きくなる。これは剛度の低下が振動周期の増大となり、速度応答も変位応答ほど増加させないためである。

5. 周波数伝達関数と応答モード 図-5.6に周波数伝達関数とRMS応答のモードを示した。図-5(a)より降伏レベルが下ると伝達関数は低周波数側に移動し、1次のピークは下降した後上昇していること、2次のピークもいったん平滑となった後再び出現していることなどが判る。これらは次のように説明できる。すなわち伝達関数の低周波側への移動は ω_{gi} の単調減少によるものであり、ピーク位置の上下は β_{gi} の減少・増大に起因するものである。図-6(a)に示した各層のRMS応答のモードは、降伏レベルの低下にともなって減少から増加へと変化している。しかし応答形状(2層と1層応答との比)そのものには大きな変化は無い。これは非線形性が小さく($\alpha=1/2$)、各層の動特性特に ω_{gi} ($i=1,2$)の変化の割合がさほど大きく無いためである。図-5.6の各(b)では、 $Y/\alpha=0.328$ での非線形性 α の影響を検討した。図-5(a)を見ると非線形性が大きいほど、1次ピークは低周波数側の下方へ移動していること、2次ピークは平滑化されほとんど判明しないことなどが知られる。図-6(b)に示したRMS応答のモードは、非線形性が大きいほど1層応答の比率が大きくなっている。これは図-4(d)に示した1層の ω_{g1} が2層のそれ ω_{g2} よりもかなり低下しているためである。

6. シミュレーション結果との比較 アナログ計算機を用いたシミュレーションの結果を図-3,4の各(a), (b)に示した($\Delta\theta$)。図-3は非線形性がさほど強くない場合($\alpha=1/2$)であるが、降伏レベルが低い場合($Y/\alpha \leq 0.4$)の変位応答を除いて、予測値とシミュレーション値とはほぼ良い一致を示している。特に塑性変形の影響のない速度応答は、降伏レベルが低下しても両者にさほどの差が見られない。一方非線形性が強い場合($\alpha=1/10$)の図-4では、降伏レベルの低下と共に両者の間に大きな差が見い出され、この領域での等価線形化に問題のあることを指摘している。

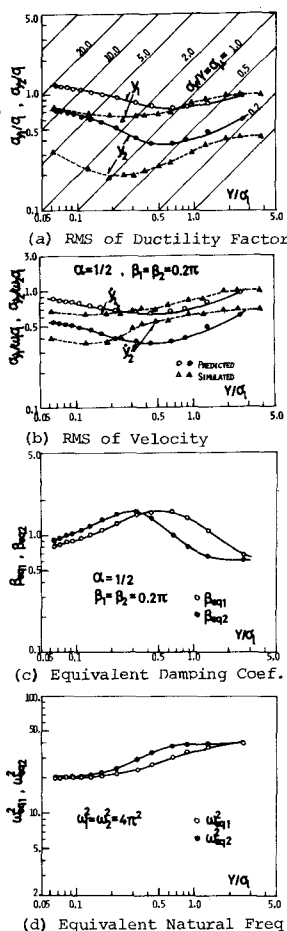


Fig.3 Stationary RMS Response and Equivalent Linear Parameters

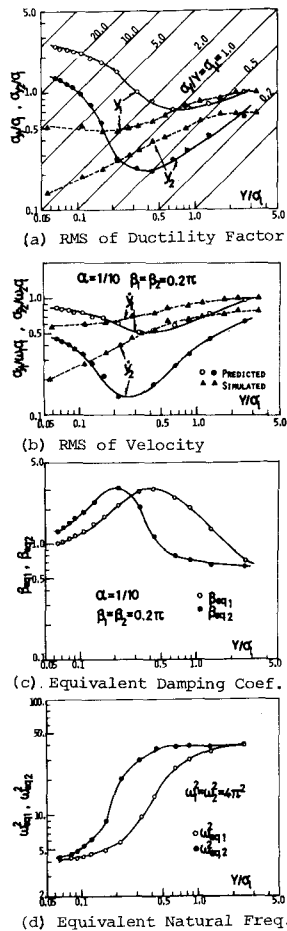


Fig.4 Stationary RMS Response and Equivalent Linear Parameters

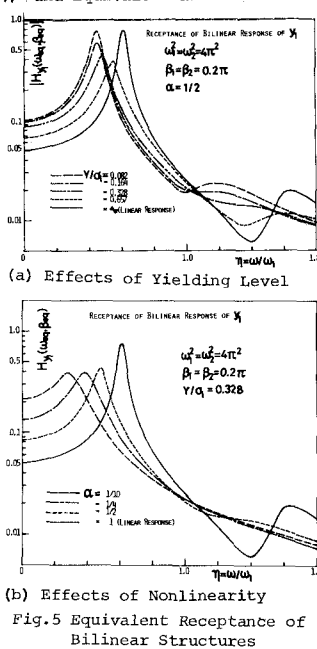


Fig.5 Equivalent Receptance of Bilinear Structures

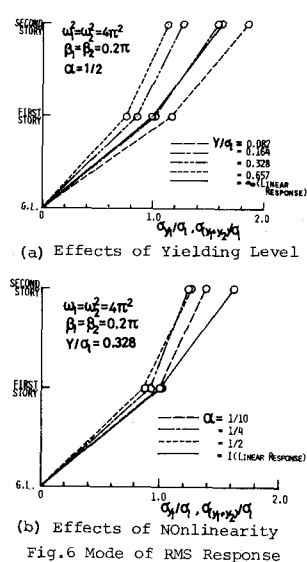


Fig.6 Mode of RMS Response