

徳島大学大学院 学生員 ○竹園 雅樹 徳島大学工学部 フェロー 平尾 潔
 徳島大学工学部 正 員 成行 義文 三井建設 正 員 城中 孝夫

1. まえがき：現在の土木・建築構造物の多くは、「耐用期間中に数回発生するような中小地震に対しては無損傷となるように、また 1 度発生するか否かのような大地震に対しては、ある程度の損傷は許すが、完全な倒壊等には至らないように設計する」という 2 段階設計法の理念に基づき耐震設計されている。道路橋の耐震設計⁽¹⁾の第 1 段階では震度法が、また第 2 段階では地震時保有水平耐力法が用いられているが、後者において、強震下における橋脚等の最大塑性率等を精度良く推定する必要がある。現在、この最大塑性率は弾性応答値からエネルギー一定則に基づき算定されているが、このエネルギー一定則の精度については多々異論のあるところである。以上のようなことから、本研究ではエネルギー一定則に代わる新しい「構造物の地震時最大塑性率の推定法」を導くことを試みた。

2. 解析方法：本研究は図-1 に示すように Bilinear 型復元力履歴特性を有する非線形 1 自由度系の最大変位 x_{max} を等価減衰定数 h_e を有する等価線形系の応答より推定しようとするものである。

線形系の復元力特性は、非線形系のスケルトンカーブにおける弾塑性剛性比 γ を 1.0 として表現する。したがって、各々の最大変位 x_{max} , x_{emax} は、共通の降伏変位 x_y で除すことにより、それぞれの最大塑性率 μ_d ならびに μ_{de} で表わされる。ここでは、以下 μ_{de} を弾性最大塑性率と呼ぶ。非線形 SDOF 系の運動方程式を質量 m と x_y の積 mx_y で除して示せば式(1)のようである。

$$\ddot{\bar{x}} + 2h_0\dot{\bar{x}} + \omega_0^2\bar{Q}(\bar{x}) = -\omega_0^2R_i\ddot{z}_i \quad (1)$$

図-1 線形モデルと非線形モデル

ここで $\bar{x} = x/x_y$, $\dot{\bar{x}} = \dot{x}/x_y$, $\ddot{\bar{x}} = \ddot{x}/\ddot{x}_{0max}$, 入力強度比 $R_i = m\ddot{x}_{0max}/Q_y$, $\ddot{x}_0$: 地震動加速度である。

3. 等価減衰定数と弾性最大塑性率との関係：ここでは、等価減衰定数 h_e の求め方およびそれらと弾性応答値を関連づける手順について述べる。図-2 に示すようにまず、非線形系を対称として所定の最大塑性率 μ_d に対する所要入力強度比 R_i を求める。次いで、これらの R_i を用いて、減衰定数 h_e を適当に変えながら、線形解析を行い、それぞれの μ_{de} を求める。これらの結果より、各周期ごとに $\mu_{de} = \mu_d$ となる h_e を求め、それをその周期における等価減衰とする。この h_e を式(2)により μ_{de} に変換し、 μ_{de} 曲線に重ねると、これらの曲線は非常に類似性が高いことが分かった。

$$\mu_{de} = (h_e/2h)\mu_d + (1/2)\mu_d \quad (2)$$

したがって、これらの諸量の比は、比較的安定した値となることが期待される。本研究では試行錯誤的に μ_{de} と μ_{de} との関係を表わす係数 $q(T)$ を式(3)のように定義した。これは非線形系の最大塑性率 μ_d を含んだ形となっている。

$$q(T) = (\mu_{de}/\mu_d^2) \times \mu_d \quad (3)$$

式(3)に式(2)を代入し、 h_e について解くと式(4)が得ら

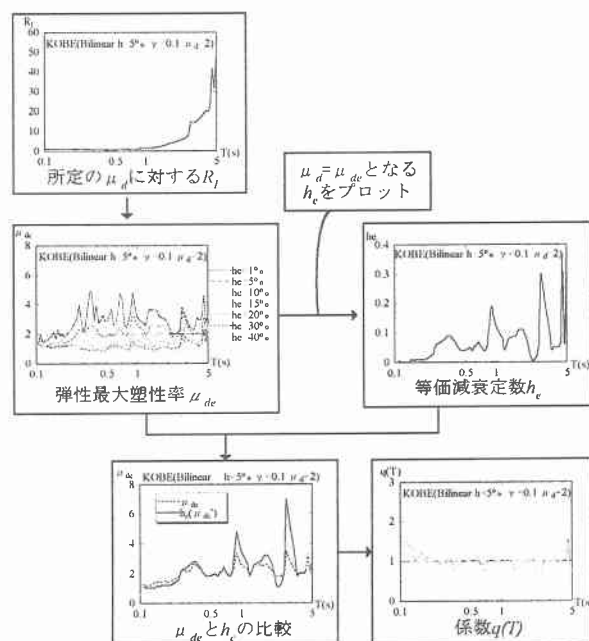


図-2 等価減衰定数 h_e と弾性最大塑性率 μ_{de} の比較手順

れる。ここで、未知数は等価減衰定数 h_e と最大塑性率 μ_{de} の 2 つである。

$$h_e = 2h \cdot q(T) (\mu_{de} / \mu_d)^2 - h \quad (4)$$

4. エネルギー理論に基づく等価減衰定数の定式化：ここでは、エネルギー論的な観点より等価減衰定数の定式化を行う。ここで、非線形系およびその等価線形系において、同一入力地震動に対しては最大応答変位が等しく、また変位が零の場合に最大応答速度が同時刻に出現すると仮定する。この仮定と両者の運動方程式より次式が得られる。

$$2h_e \omega_0 \dot{\bar{x}}_{1\max} = 2h \omega_0 \dot{\bar{x}}_{2\max} + \omega_0^2 (1 - \gamma) \quad (\dot{\bar{x}}_{1\max}, \dot{\bar{x}}_{2\max} : \text{等価線形系, 非線形系の最大速度, } \omega_0 : \text{固有円振動数}) \quad (5)$$

また等価線形系、非線形系において変位 $\bar{x} = 0 \sim \mu_d$ 間でのエネルギーの釣合いは式(6) (7) のように表わされる。

$$\frac{1}{\omega_0^2} \int_0^{\mu_d} \ddot{\bar{x}} \cdot \dot{\bar{x}} dt - \int_0^{\mu_d} \left(-\frac{\ddot{\bar{x}}_G}{\omega_0^2} \cdot \dot{\bar{x}} \right) dt = \int_0^{\mu_d} \frac{2h_e \omega_0}{\omega_0^2} \cdot \dot{\bar{x}}^2 dt + \int_0^{\mu_d} \bar{Q}_e(\bar{x}) \cdot \dot{\bar{x}} dt \quad (6)$$

$$\frac{1}{\omega_0^2} \int_0^{\mu_d} \ddot{\bar{x}} \cdot \dot{\bar{x}} dt - \int_0^{\mu_d} \left(-\frac{\ddot{\bar{x}}_G}{\omega_0^2} \cdot \dot{\bar{x}} \right) dt = \int_0^{\mu_d} \frac{2h \omega_0}{\omega_0^2} \cdot \dot{\bar{x}}^2 dt + \int_0^{\mu_d} \bar{Q}(\bar{x}) \cdot \dot{\bar{x}} dt \quad (7)$$

これらの式の各項は、左辺第 1 項から順に、それぞれ運動エネルギー、入力エネルギー、減衰エネルギー、ひずみエネルギーを表わしている。ここでは、 $\ddot{\bar{x}} - \ddot{\bar{x}}_G, \dot{\bar{x}} - \dot{\bar{x}}$ 関係をとともに線形と仮定して、式(6) (7) から $\dot{\bar{x}}_{1\max}$, $\dot{\bar{x}}_{2\max}$ を求め、式(5)に代入することで等価減衰定数 h_e と最大塑性率 μ_d との関係式が式(8) のように得られた。

$$h_e = \left[2h\mu_d \left\{ h + \sqrt{h^2 + \gamma + \frac{2(1.0 - \gamma) + R_f}{\mu_d}} \right\} + 1.0 - \gamma \right] / \left[2\mu_d \left(h_e + \sqrt{h_e^2 + 1.0 + \frac{R_f}{\mu_d}} \right) \right] \quad (8)$$

5. 最大塑性率の推定式：式(4), (8)により、最大塑性率 μ_d に関する方程式が式(9) のように求まる。

$$\mu_d = \left\langle B \times \left[2\mu_d \left\{ B + \sqrt{B^2 + 1.0 + R_f / \mu_d} \right\} - (1.0 - \gamma) \right] / \left[2h \left(h + \sqrt{A} \right) \right] \right\rangle \quad (9)$$

ここに、 $A = h^2 + \gamma + \{2(1.0 - \gamma) + R_f\} / \mu_d$, $B = 2h \cdot q(T) \cdot (\mu_{de} / \mu_d)^2 - h$

式(9)は、容易に μ_d について解けないため本研究では、逐次代入法により解を求めることにした。

6. 最大塑性率の推定結果：図-3 は、El Centro 記録、兵庫県南部地震の神戸記録をそれぞれ入力地震波とした場合の、所定の最大塑性率 $\mu_d = 2.0$ 、減衰定数 $h = 5\%$ 弾塑性剛性比 $\gamma = 0.1$ 、の場合の係数 $q(T)$ と非線形系の最大塑性率の推定結果である。 $q(T)$ は近似的に周期 $T_1 = 0.2532$ までの短周期では q_1 を切片とする直線式 $q(T)$ を与え、それ以降の周期では、 $q(T) = 1.0$ を与えている。これらの図より、所定の最大塑性率が 2.0 の場合には、最大塑性率の推定精度に及ぼす影響は少なく、また 0.5 秒以降の周期域では若干危険側ではあるが、比較的精度良く推定できていることが分かる。

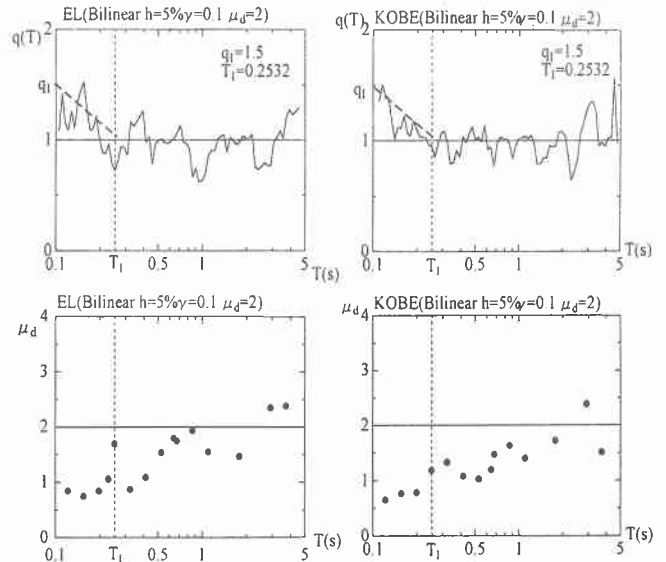


図-3 最大塑性率の推定結果

7. あとがき：本研究では、線形系の最大応答から非線形系の最大塑性率を推定する一手法を開発した。本手法の精度を向上させるためには今後、係数 $q(T)$ の近似方法、また各エネルギーを算定する際の仮定をより厳密なものに改良してゆく必要があるものと思われる。

参考文献

(1) 道路橋示方書・同解説、V耐震設計編 1996年12月