

耐震設計レベルの明確化に関する一考察 - 信頼性手法によるアプローチ

京大工学部 正員 龜田弘行
川崎製鉄 正員 橋本修身

はじめに 通常の土木構造物の耐震設計に関する基本方針としては、中程度の強震に対しては無被害、あるいは軽微な被害にとどめ、最大級の地震動に対しては構造物の完全な崩壊を防ぐという考え方が一般に受け入れられているようである。現行の耐震設計法は弾性設計を中心として組立てられているが、弾性設計された構造物が大きな地震動下における終局状態に対してどの程度の安全性を有するかは必ずしも明確ではなく、弾性限界および終局状態という異なる限界状態に対する安全度の関係もバリエーションがとれたものとすることは重要である。設計変数としての地震荷重と構造物（すなわち構造部材）の強度は通常かなり大まかい不確定変動を伴うから、それらを合理的に考慮した安全性評価を行なうためには信頼性解析の手法を導入することが有効であり、本報告の議論もこの方向で行なわれる。

耐震設計レベル明確化のための研究課題

(1) 構造物の地震時限界状態の明確化 各耐震設計レベルで想定する耐震性は、主として降伏後の変形能力に支配されることより、変形量（じん性率 μ ）を尺度に地震時の限界状態を次の3種に分類する。i) 弾性限界状態 …… 構造物が、その弾性限強度に相当する荷重作用によって降伏変位に対応する変形に達しているかこれを超えている状態。ii) 塑性限界状態 …… 降伏後に、まだ十分な余剰変形能を持ち、安定した耐震性が確保されていると考えられる許容変形量（じん性率 μ_p ）に達しているかこれを超えている状態。iii) 耐震終局限界状態 …… 荷重作用のこれ以上の増加によって崩壊に至るといふ最大変形能（じん性率 μ_u ）に対応する変形に達しているかこれを超えている状態。 μ_u, μ_p は、材料特性にもよるが、断面構成、工法によっても大きく影響され、何ぼらつきはかなり大きいものである。

(2) 地震荷重の評価 設計用地震荷重は、地震動そのものの有するばらつきに加えて地震発生確率のばらつきからもくる不確定要素を含むものである。(1)で定義した i), ii) の限界状態では構造物の耐用期間内の最大地盤震度 (lifetime max. load; K_{gm}) が対象となるのに対し、iii) については設計地点で想定する最大級の地震による地盤震度 (possible max. load; K_{gu}) を与えるべきであろう。これらの平均値 ($\bar{K}_{gm}, \bar{K}_{gu}$) および変動係数 ($\Omega_{kgm}, \Omega_{kgu}$) をそれぞれ地震重複頻度係数 α, β を用いて次式で表す。

$$\bar{K}_{gm} = \alpha \bar{K}_{gu} \quad (0 < \alpha < 1) \quad - (1) \quad \Omega_{kgm} = \frac{1}{\beta} \Omega_{kgu} \quad (0 < \beta) \quad - (2)$$

一般に、地震危険度が高く、最大級の地震動に比較的頻繁に見舞われる地点ほど α, β の値ともに 1 に近い値をとると考えられる。

(3) 各耐震設計レベルでの安全度の明確化 上記 (1), (2) によって限界状態、および地震荷重の特性が明らかにされれば、信頼性手法によって各限界状態に対する安全度も算定することができる。実構造物に対する信頼性評価において、設計変数の詳細な確率分布を定めるのに十分な統計資料を入手することは一般に困難であるため、2次モーメント法³⁾による安全性指標 β を用いて安全度を評価するのが現実的である。

i) 弾性限界状態に対する安全性指標 β_e

設計地盤震度を K_{gm} 、弾性限強度を R_y とすると $K_y (= R_y / A_e \cdot W) > K_{gm}$ の時に構造物の安全性は確

Kameda Hiroyuki, Hashimoto Osami

与えられる。ここで W は構造物の重量, A_e は弾性加速度応答係率であり, 減衰定数, 固有周期の関数として与えられる。これより, safety margin M_e は次式となる。

$$M_e = \ln(K_y/K_{gm}) \quad (3)$$

安全性指標 β_e は M_e の平均値 $\bar{M}_e$, および標準偏差 σ_{M_e} より次式で算定される。

$$\beta_e = \bar{M}_e / \sigma_{M_e} = \ln(\bar{K}_y / K_{gm}) / \sqrt{\Omega_{Ky}^2 + \Omega_{Kgm}^2} \quad (4)$$

ただし, $\bar{\quad}$ は平均値, Ω は変動係数を表す。

ii) 塑性限界状態に対する安全性指標 β_p

完全弾塑性系に対する Veletsos, Newmark の仮定²⁾ をバイリニア系に適用すると, 塑性限界じん性率 μ_p で規定される塑性限界状態での耐震性は, それと等価な耐震性も有する弾性系の降伏耐力 R_p で表わされるとして, 図-1 における $\triangle BOF$ と $\square AOGD$ の面積の等価性より次式で与えられる。

$$R_p = N \sqrt{2\mu_p - 1 + \theta(\mu_p - 1)^2} R_y \quad (5)$$

ここで, θ はバイリニア系の 2 次勾配 k_2 の 1 次勾配 k_1 に対する比

(k_2/k_1) であり, R_y は降伏強度である。また N は Veletsos, Newmark の仮定におけるばらつきを考慮するための補正係数である。(5) 式で与えられる R_p を (i) と同様に A_e, W で除した地盤震度 K_p として正規化して表わすと, 塑性限界状態に対する safety margin M_p は次式となる。

$$M_p = \ln(K_p/K_{gm}) \quad (6)$$

(6) 式を用いて, 塑性限界状態に対する安全性指標 β_p は次の (7), (8), (9) 式で求められる。

$$\beta_p = \frac{\bar{M}_p}{\sigma_{M_p}} = \frac{\ln(\bar{K}_p/K_{gm})}{\sqrt{\Omega_{Kp}^2 + \Omega_{Kgm}^2}} = \frac{\ln(N \sqrt{2\mu_p - 1 + \theta(\mu_p - 1)^2} \bar{K}_y / K_{gm})}{\sqrt{\Omega_{Kp}^2 + \Omega_{Kgm}^2}} \quad (7)$$

$$\Omega_{Kp}^2 = \frac{\sigma_{Kp}^2}{K_p^2} = \Omega_{Ky}^2 + [\Psi(\bar{\mu}_p)]^2 \Omega_{\mu p}^2 + 2\Psi(\bar{\mu}_p) \Omega_{\mu p} \Omega_{Ky} \rho_{\mu p Ky} + 2\Psi(\bar{\mu}_p) \Omega_{\mu p} \Omega_{\mu p \mu \mu} + \Omega_N^2 \quad (8)$$

$$\Psi(\mu) = \frac{1 + \theta(\mu - 1)}{(2 - 3/\mu) + \theta(\mu - 1)^2/\mu} \quad (9)$$

iii) 耐震終局限界状態に対する安全性指標 β_u

Veletsos, Newmark の仮定を用いて, 終局限界じん性率 μ_u で規定される耐震終局限界状態での耐震性を表わすと, ii) と同様に図-1 における $\triangle COH$ と $\square AOUE$ の面積が等しい事より, 地盤震度 K_u に正規化して次式となる。

$$K_u = N \sqrt{2\mu_u - 1 + \theta(\mu_u - 1)^2} K_y \quad (= R_u / A_e \cdot W) \quad (10)$$

次の (11) 式によって safety margin M_u が与えられることより, 耐震終局限界状態に対する安全性指標 β_u は以下のようになる。

$$M_u = \ln(K_u/K_{gm}) \quad (11)$$

$$\beta_u = \frac{\bar{M}_u}{\sigma_{M_u}} = \frac{\ln(\bar{K}_u/K_{gm})}{\sqrt{\Omega_{Ku}^2 + \Omega_{Kgm}^2}} = \frac{\ln(N \sqrt{2\mu_u - 1 + \theta(\mu_u - 1)^2} \bar{K}_y / K_{gm})}{\sqrt{\Omega_{Ku}^2 + \Omega_{Kgm}^2}} \quad (12)$$

$$\Omega_{Ku}^2 = \frac{\sigma_{Ku}^2}{K_u^2} = \Omega_{Ky}^2 + [\Psi(\bar{\mu}_u)]^2 \Omega_{\mu u}^2 + 2\Psi(\bar{\mu}_u) \Omega_{\mu u} \Omega_{Ky} \rho_{\mu u Ky} + 2\Psi(\bar{\mu}_u) \Omega_{\mu u} \Omega_{\mu u \mu \mu} + \Omega_N^2 \quad (13)$$

これらの安全性指標に関する数値計算結果, および各耐震設計レベルでの安全度の関係, を考慮して提案した耐震設計の方針について当日発表の予定。

(参考文献) 1) Ang, A.H.S., Cornell, C.A.; Reliability Bases of Structural Safety and Design, ST. ASCE, Sept. 1974.

2) Veletsos, A.S., Newmark, N.H.; Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple System to Earthquake Motions, Proc. 2nd WCEE, 1960.