

川崎製鉄 正員 〇橋本修男
京大工学部 正員 亀田弘行

はじめに

通常の土木構造物の耐震設計に関する基本理念としては、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強大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なく、弾性限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をバランスのとれたものにすることは重要であろう。設計変数としての地震荷重および構造物（または構造部材）の強度は通常かなり大き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なされる。なお、以下に表わす各地震時限界状態に対する安全性指標 β は、2次モーメント法を用いて文献2)において定式化したものである。ここでは数値計算の結果に基づき、構造物の地震時限界状態および地震荷重の特性が安全性指標に与える影響を検討するとともに、安全性のバランスがとれた耐震設計の方針についての基本的な考え方を提示する。

構造物の地震時限界状態

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、塑性変形量(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 R_y 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る状態。弾性限界状態に対する安全性指標を β_e で表わす。ii)塑性限界状態……降伏後に、まだ十分な余剰変形能力を有し、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。塑性限界状態に対する安全性指標を β_p で表わす。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う最大変形量(じん性率 μ_u)に達しているかこれを超えている状態。耐震終局限界状態に対する安全性指標を β_u で表わす。 μ_u , μ_p は材料特性はもとより断面構成、工法によっても大きく影響され、そのばらつきはかなり大きいものであろう。 β_e , β_p , β_u の定式化は文献2)によられたい。

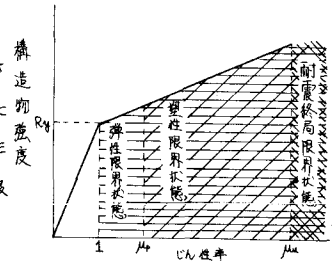


図-1 地震時限界状態の概念

地震荷重の評価

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の特異性からも多くの不確定性を含むものである。上記のi), ii)の限界状態では構造物の耐用期間内の最大地震動(lifetime max.)による地震震度 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動(possible max.)による地震震度 K_{gu} を考えるべきであらう。これらの平均値 $\bar{K}_{gm}$, $\bar{K}_{gu}$, および変動係数 Ω_{Kgm} , Ω_{Kgu} をそれぞれ次式のように関係づける。

$$\bar{K}_{gm} = \alpha \bar{K}_{gu} \quad (0 < \alpha < 1) \quad \text{--- (1)}, \quad \Omega_{Kgm} = \frac{1}{r} \Omega_{Kgu} \quad (0 < r) \quad \text{--- (2)}$$

上式で導入した α , r については、ともに設計地点にどの程度の頻繁さで地震動が来襲するかを表わす地震来襲頻度係数として定義するものであり、一般に、地震危険度が高く最大級の地震動に比較的高頻に見舞われる地点ほど α , r ともに1に近い値をとると考えられる。

耐震設計レベルのバランスについて

以上のようにして定義された各限界状態に対する安全性指標を用いて、異なる限界状態に対する安全度のバランスを次式で定義するパラメータ η_{up} , η_{ue} によって考慮する。

$$\eta_{up} = \beta_u - \beta_p = \frac{\ln(\sqrt{2\bar{\mu}_u - 1 + \theta(\bar{\mu}_u - 1)^2} \cdot \bar{K}_y / \bar{K}_{gu})}{\sqrt{\Omega_{K_u}^2 + \Omega_{K_{gu}}^2}} - \frac{\ln(\sqrt{2\bar{\mu}_p - 1 + \theta(\bar{\mu}_p - 1)^2} \cdot \bar{K}_y / \alpha \bar{K}_{gu})}{\sqrt{\Omega_{K_p}^2 + \Omega_{K_{gu}/\alpha}^2}} \quad (3)$$

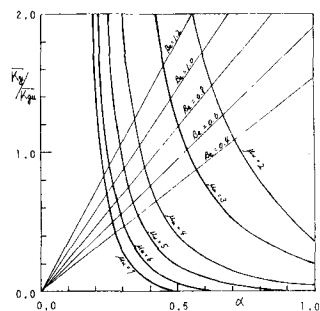
$$\eta_{ue} = \beta_u - \beta_e = \frac{\ln(\sqrt{2\bar{\mu}_u - 1 + \theta(\bar{\mu}_u - 1)^2} \cdot \bar{K}_y / \bar{K}_{gu})}{\sqrt{\Omega_{K_u}^2 + \Omega_{K_{gu}}^2}} - \frac{\ln(\bar{K}_y / \alpha \bar{K}_{gu})}{\sqrt{\Omega_{K_g}^2 + \Omega_{K_{gu}/\alpha}^2}} \quad (4)$$

ただし、 K_y は構造物を降伏せしめる地盤震度(以下降伏震度と呼ぶ)、 θ はバイリニア系の第2分枝剛性比である。設計時に考慮すべき β_u , β_p , β_e の所要値はいずれも対象とする構造物の重要度、使用目的等によって異なるものと考えられ、それらを合理的に決定することにより、同程度の重要度を有する構造物に対する耐震安全性のバランスを一樣なものに近づける可能性がある。ここで異なる限界状態に関する安全性のバランスを与えるパラメータ η_{up} , η_{ue} を、いずれもすべての構造物および地震危険度の異なるいずれの地点においても常に一定と設定する。このように設定することは、各限界状態に対する安全度の格差を常に一定に保つよう設計するという設計方針を意味し、 η_{up} , η_{ue} ともに冒頭で述べた耐震設計の基本理念に沿った設計を行なうための規範となりうる。

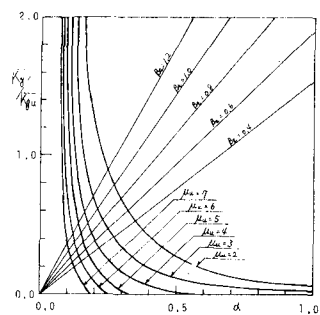
図-2 に、 β_e と η_{ue} を定めた場合の所要平均降伏強度 $\bar{K}_y$ と所要終局じん性率 $\bar{\mu}_u$ の値の一例を示した。例えば、同図(a) の $\eta_{ue} = 1$ の場合に、 $\beta_e = 0.4$ とすると、 $\alpha = 0.7$ なる地域では、 $\bar{K}_y / \bar{K}_{gu} \cong 1$, $\bar{\mu}_u \cong 2$ が要求されるのに対し、 $\alpha = 0.3$ の場合には、 $\bar{K}_y / \bar{K}_{gu} \cong 0.4$, $\bar{\mu}_u \cong 6$ という結果が得られる。この結果は、地震来襲頻度の高い地域では、大きな降伏震度が要求される代りに終局じん性率は比較的小さくてよく、逆に地震来襲頻度が低い地域では、降伏強度を低くしてよい代りに終局じん性率に大きな値が要求されることを示唆する。冒頭で述べた耐震設計の理念からはこの結果は当然の帰結と言えるが、図-2 の結果は、その定量的評価を可能とするものである。

同様の考察を図-2(b) の $\eta_{ue} = 0$ の場合について行くと、 $\bar{K}_y / \bar{K}_{gu}$ の所要値は図-2(a) の場合と同じ結果が得られるが、所要終局じん性率は大きく異なる。すなわち、 $\alpha = 0.3$ に対して $\bar{\mu}_u \cong 3$ で上の $\bar{\mu}_u \cong 6$ の約半分である。

これらの結果から、次のような耐震設計の基本方針が提起されよう。 $\bar{K}_{gu}$ が等しいが、 $\bar{K}_{gm}$ が異なる2つの地域があり、その α の値を α_1 , α_2 ($\alpha_1 > \alpha_2$) とすると、 α_1 に対しては変形性能より弾性強度に対する要求が厳しい設計、 α_2 に対しては逆に変形性能への要求が厳しく弾性強度はゆるやかな設計を行うことにより、両地域での耐震安全性のバランスを一樣にすることができる。本研究は未だ基礎的な段階にあり、今後個々のパラメーターを十分に検討して、より有用な手法として行きたいと考えている。



(a) $\eta_{ue} = 1$



(b) $\eta_{ue} = 0$

図-2 β_e , α と降伏強度 $\bar{K}_y$ および終局じん性率 $\bar{\mu}_u$ の関係

[参考文献]

- 1) Ang, A.H.S., Cornell, C.A.; "Reliability Bases of Structural Safety and Design", ST. ASCE, Sept. 1974.
- 2) 亀田・橋本; 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, 昭和55年度関西支部学術講演会, 1980.