

ふたつの設計限界状態を考慮した 最適信頼性指標の検討

東京大学 ○高田毅士 NTT ファシリティーズ 山口啓亮

1 序

建築物の限界状態設計法では、設計で考慮する限界状態を設定し、さらに建築物が供用期間中に限界状態を超える度合いを、目標信頼性指標として設定することにより、各限界状態ごとに荷重・耐力係数設計法などの実用的手法を用いて、実設計に応用することになる。日本建築学会の限界状態設計指針では、こうした流れで設計指針が構成されており、設計の目標値と設計規範が同時に明示されている点が、従来の設計法にはない利点である。この記述により、多様な意思決定が合理的に実施されることになる。

しかしながら、目標信頼性指標をどのように設定するかは極めて難しい事項であり、過去より従前の設計法に合わせる方法〔コードキャリブレーション〕、総費用最小化原則に基づく方法、他リスクとの相対比較により判断する方法¹⁾などが提案されている。中でも、総費用最小化原則に基づく方法は、建物の供用期間中の費用と、建物性能水準とを両方を考慮して、トレードオフの考え方により、経済的にも建物性能的にも最も有利な目標性能レベルを算定できるとあって、経済分野における意思決定論の枠組みの中で展開されるものであり、その結果の意義は大きい。

これには、文献^{2,4)}などの研究があり、費用・便益解析とも呼ばれており、目標信頼性指標を上げることによる効果として、初期建設費用の増大効果と供用期間中の期待被害費用の低減効果を取り入れて、最低目標信頼性指標を探索するものである。しかし、これらの既往の関連研究においては、限界状態を安全性に関わる終局限界状態のみを対象として最適点を見つける努力がなされているのみである。建物の耐震設計に限るならば、少なくとも二つの限界状態、すなわち、安全性に関わる終局限界状態と、修復性に関わる限界状態が設定されることが多く、それぞれの限界状態に対して、実設計においては、自由に目標性能を設定して部材設計することは決して容易なことではない。言い換えれば、両者のレベルは互いに制約を有しながら、厳しい方の条件で部材断面が決まるということが実際に多いことがいろいろな試設計³⁾で報告されている。また、別の視点から考えるならば、終局限界状態に至る確率は、修復性や使用性に関する限界状態に至る確率よりも、生じる頻度が10? 100 倍も小さいことが予想されることから、部材設計を考える際に、複数の限界状態を同時に考慮した総費用最小化原則の適用を考えるべきである。

そこで、本論では、文献⁴⁾の総費用最小化原則に基づく最適信頼性指標を算出する方法を、建物の弾塑性効果をR係数の概念を用いて、二つの限界状態に発展させたものであり、極めて興味深い結論が導かれている。

2 ふたつの限界状態の定義

文献⁴⁾の限界状態の定義に従うと、多層建物のある層において、層せん断力に関わる修復性限界状態と、層間変形により表される終局限界状態のふたつを定義する。すなわち、

$$G_s = Q_y - Q \quad (1a)$$

$$G_U = \Delta_{cr} - \Delta \quad (1b)$$

ここに、 Q_y , Q は、各々、地震時の着目した層の降伏層せん断力、応答層せん断力、 Δ_{cr} , Δ は当該層の限界層間変形、応答層間変形とする。これらの変数は、ばらつく物理量であることから確率変数として扱う。

3 ふたつの限界状態に関する信頼性指標の関係の誘導

ある層が、修復限界状態に対して目標信頼性指標 β_{RS} の条件で部材設計されたとして、その層が終局限界状態に対してどれぐらいの β_{TU} を有するかを以下に導く。

各々の限界状態に対する β は一次近似二次モーメント法を用いて次式で定義される。

$$\beta_s = \frac{\mu_{Q_y} - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_{Q_y}^2 + \sigma_Q^2}} \quad (2a)$$

$$\beta_U = \frac{\mu_{\Delta_{cr}} - \mu_{\Delta}}{\sqrt{\sigma_{\Delta_{cr}}^2 + \sigma_{\Delta}^2}} \quad (2b)$$

今、式(2a)により部材断面が決定されたとすると、その部材の降伏せん断力の平均値 μ_{Q_y} は、式(2a)より、

$$\mu_{Q_y} = \mu_Q + \beta_s \sqrt{\sigma_{Q_y}^2 + \sigma_Q^2} \quad (3)$$

この部材を有する層の終局限界状態に対する信頼性指標 β_U は、以下のR係数を用いる。

$$\frac{Q_{cr}}{Q_y} = R \left(\frac{\Delta_{cr}}{\Delta_y} \right) = R \left(\frac{\Delta_{cr}}{Q_y / k} \right) \quad (4)$$

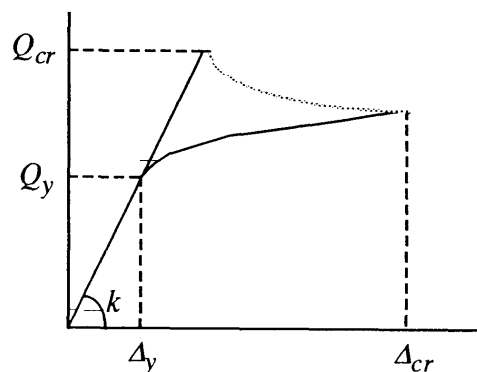


Figure 1 Concept of R factor

ここに、 Q_{cr} は、 Δ_y に等価な弾性応答値、 Δ_y は降伏層間変形とし、Fig 1にR係数の概念が示されている。

上式を用いて、式(1b)の層間変形の表現から、耐力軸の表現を用いた限界状態関数に書き換えることが出来る。

$$G_U = \Delta_y - \Delta = Q_{cr} - Q \quad (5)$$

ただし、R係数の定義により、以下の関係がある。

$$Q_{cr} = Q_y R \left(\frac{\Delta_{cr}}{\Delta_y} \right) = Q_y R \left(\frac{\Delta_{cr}}{Q_y / k} \right) \quad (6)$$

式(5)をR係数の表現に書き換えると、

$$G_U = Q_y R \left(\frac{\Delta_{cr}}{Q_y / k} \right) - Q \quad (7)$$

となる。ここに、確率変数は、 Q_y , Δ_{cr} , Q であり、本論では、弾性剛性 k は確定とする。

式(7)の右辺第1項は、含まれる確率変数に関して一般に非線形の関数であるため、第1項の平均値と標準偏差を求めるために、各々の確率変数の平均値周りでテーラー展開を施して1次項まで採用すると、様な形で信頼性指標 β_U が次式のように近似される。

$$\beta_U = \frac{\mu_{\Delta_{cr}} - \mu_{\Delta}}{\sqrt{\sigma_{\Delta_{cr}}^2 + \sigma_{\Delta}^2}} = \frac{\mu_{Q_{cr}} - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_{Q_{cr}}^2 + \sigma_Q^2}} \quad (8)$$

4 ふたつの限界状態を考慮した最適信頼性指標

文献⁴⁾にならって、建物供用期間中の期待総費用 C_T は、設計耐力に対する設計荷重の比(v_d)を用いて次式で表される。

$$C_T(v_d) = C_I(v_d) + P_{FS}(v_d)C_{FS} + P_{FU}(v_d)C_{FU} \quad (9)$$

ここに、 C_I :初期建設費用、供用期間中の P_{FS} , P_{FU} は修復限界状態及び終局限界状態に至る確率を、 C_{FS} , C_{FU} は各々限界状態に達したときの被害費用を表し、基準化被害費用 g_S , g_U を用いて次式で表現される。

$$C_{FS} = g_S C_0, \quad C_{FU} = g_U C_0 \quad (10a), (10b)$$

式(2a)と式(8)で定義される信頼性指標を用いれば、期待総費用は次式で表される。

$$C_T(v_d) = C_I(v_d) + P_{FS}(v_d)C_{FS} + P_{FU}(v_d)C_{FU} \quad (11)$$

ここに、 Φ は標準正規累積分布関数とする。

$$C_T(v_d) = C_0 \left[\{1 + k(v_d - 1)\} + \Phi(-\beta_S(v_d))g_S + \Phi(-\beta_U(v_d, \mu_{Q_y}))g_U \right] \quad (12)$$

式(12)は、設計での余裕 v_d の関数として表されており、数値的に期待総費用が計算される。計算に用いた統計量を Table 1に、式(12)中のコスト上昇係数 k , g_S , g_U は文献⁴⁾にならった。

Fig.2 および Fig.3 は、各々、R係数をエネルギー一定則、変位一定則と仮定して、いろいろなケースについて総期待費用を v_d の関数としてプロットしたものである。図中には、初期建設費用のみ、修復性限界状態のみを考慮したもの、終局限界状態のみを考慮した場合、及び、両方の限界状態を考慮し

た場合について、期待総費用を算出した。

これらの図より、既往研究のように、終局限界状態のみを対象とする最適点は、修復限界状態も考慮した場合に比べて、著しく小さな値となってしまっている。このことは、相対的に発生頻度の高い修復限界状態に関わる補修費用が結果的に総費用に大きく寄与していることがわかる。

Table 1 Statistics of Random Variables

Variables	Distribution	COV	Mean value
Δ_{cr}	Log-Normal	0.3	
Q_y	Log-Normal	0.15	
Q	Type II	0.8	115 (gal)

5 結

本論では、簡単な定式化を行って、ふたつの限界状態を対象に期待総費用最小化原理を適用した。入力する数値にも依存するが、終局限界状態のみならず、修復限界状態の影響が総費用に与える影響は大きく、最適設計荷重は大きめの評価になることを示した。

参考文献

- 1) 星谷勝, 石井清, 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会 (1986).
- 2) Rosenblueth, E., J. of ST, ASCE, Vol. 102, No.3 (1976).
- 3) 長 尚, JCOSSAR, (1991)
- 4) Kanda, J., Structural Safety, Vol. 9 (1991).
- 5) 日本建築学会, 1999年度日本建築学会設計競技, (1999)

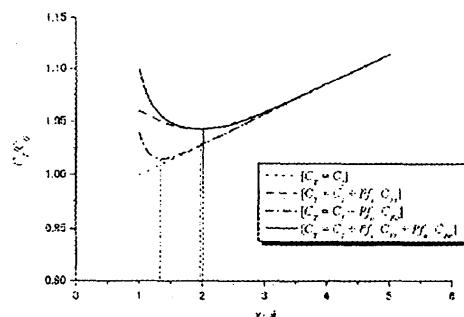


Figure 2 Expected life time cost (energy constant rule)

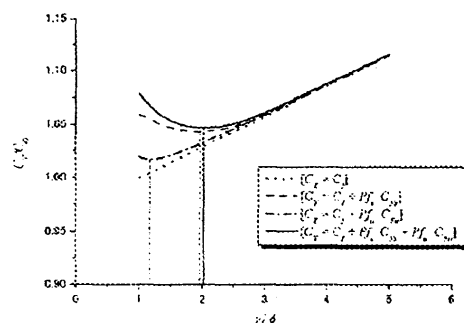


Figure 3 Expected life time cost