

## I - 8

## システム信頼性を考慮した RC 橋脚の耐震設計に用いる部分安全係数の試算

東北大学 正会員 ○秋山 充良

東北大学 学生員 土井 充

東北大学 フェロー 鈴木 基行

## 1. はじめに

設計基準類の国際化の中で、構造物の設計の基本に関する規格となる ISO2394<sup>1)</sup>に準じた設計コードの整備に関して議論が進められている。これら設計コードは、原則的に確率論的設計であり、耐用期間内において要求性能が満足されない確率を許容値(許容破壊確率)以下に抑えることを確認するための性能照査アプローチが規定される。そこで本研究では、著者らが提案した複数の限界状態から構造系としての破壊確率を算定する構造系信頼性評価法と逐次2次計画法(SQP法)を組み合わせた構造設計手法<sup>2)</sup>を援用することで、RC橋脚の耐震設計に用いる部分安全係数を試算した。

## 2. 部分安全係数算定手法

図-1に部分安全係数算定フローを示す。また、その算定過程における各解析手法の概要を以下に示す。

①目標安全性指標、目的関数、制約条件の定義を行う。なお、目的関数 $W$ は、提示する部分安全係数により耐震設計されたRC橋脚が保有する安全性指標と目標安全性指標の差として定義<sup>3)</sup>した(図-1(A))。

②最適化解析で算定される部分安全係数 $\gamma$ を用いたRC橋脚の耐震設計を次の照査式の基で行う(図-1(B))。

なお、式(1)~(3)に示される耐力、応答値等の具体的な算定法は参考文献2)と同じである。

$$\text{せん断照査} : \gamma_{shear} \cdot \frac{V_{act}}{(V_c/1.3 + V_s/1.15)} \leq 1.0 \quad (1)$$

$$\text{応答変位照査} : \gamma_{def} \cdot \frac{\delta_p}{(\delta_y + (\delta_u - \delta_y)/1.5)} \leq 1.0 \quad (2)$$

$$\text{残留変位照査} : \gamma_{res} \cdot \frac{C_R(\delta_p - \delta_y)}{\delta_{Ra}} \leq 1.0 \quad (3)$$

ここに、 $\gamma_{shear}, \gamma_{def}, \gamma_{res}$  : 所要の安全性を確保するために必要な部分安全係数、 $V_{act}, V_c, V_s$  : 作用せん断力、帯鉄筋以外が受け持つせん断耐力、帯鉄筋が受け持つせん断耐力、 $\delta_y, \delta_u, \delta_{Ra}, \delta_p$  : 降伏変位、終局変位、許容残留変位、エネルギー一定則により推定される最大応答変位、 $C_R$  : 残留変位比応答スペクトル。

③式(1)~(3)の照査を満足するRC橋脚を対象に、構造系信頼性評価法を用いることで、橋脚の保有する安全性指標を算定する。安全性指標は、式(4)~(6)で定義されたせん断破壊、変形能および残留変位に対する限界状態式 $g_i$  ( $i=1\sim3$ :橋軸方向、 $i=4\sim6$ :橋軸直角方向)から算定する(図-1(C))。

$$g_i = \alpha_1 V_c + \alpha_2 V_s - \alpha_3 V_{act}, (i=1,4) \quad (4)$$

$$g_i = \alpha_4 \delta_u - \delta, (i=2,5) \quad (5)$$

$$g_i = \delta_{Ra} - C_R(\delta - \delta_y), (i=3,6) \quad (6)$$

ここに、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  :  $V_c, V_s$  および  $V_{act}$  の算定に伴うばらつきを考慮する係数、 $\alpha_4$  : 終局変位算定過程に含まれるばらつきを考慮する係数、 $\delta$  : リダクシヨ

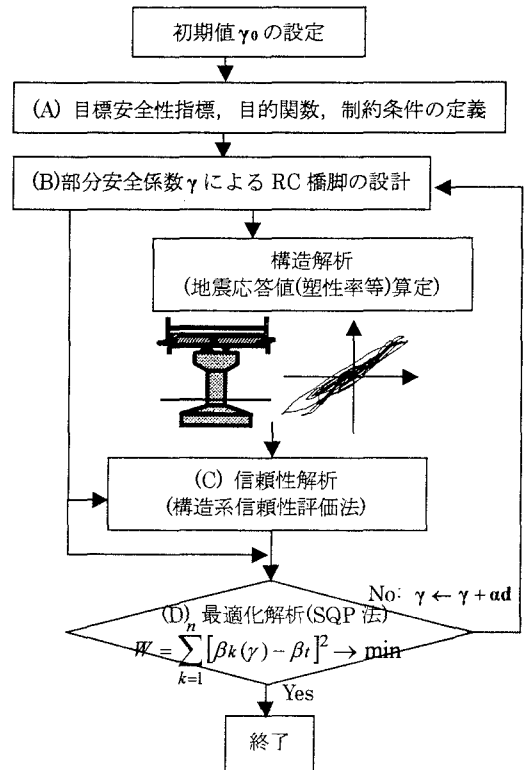


図-1 部分安全係数算定フロー

ンファクタースペクトル<sup>3)</sup>により算定される最大応答変位。

設計に用いる式(1)～(3)の安全性照査に対して、安全性指標を算定する際には、(i)鉄筋強度などの過強度特性を考慮する、(ii)せん断耐力などは、安全係数を用いることなく耐力算定式より得られる値を平均値と見なす、等を変更している。なお各確率変数は、非相関正規変数と仮定している。また、各確率変数に与えた変動係数は、参考文献2)やリダクションファクターが有するばらつき<sup>3)</sup>を基に設定した。

④SQP法に基づき、部分安全係数 $\gamma$ を用いて耐震設計されたRC橋脚が保有する安全性指標と目標安全性指標 $\beta_t$ の差を最小化する(図-1(D))。

3. 解析結果

図-1に示すように、本研究では、耐震設計されたRC橋脚から算定される安全性指標と目標安全性指標の偏差の総和を検討対象橋脚群に対して計算し、それを最小化するような部分安全係数 $\gamma$ を提示する。検討対象橋脚群は、互いに異なる設計条件を持つ10基のRC橋脚を想定した。そしてまず、各設計条件の基で道路橋示方書<sup>4)</sup>のタイプIIの地震動に対する耐震設計の照査を過不足なく満足する単柱式RC橋脚を試設計した。次に、この試設計されたRC橋脚

を基に、図-1のフローに従い部分安全係数を算定した。結果を表-1に示す。また、表-1に示す部分安全係数 $\gamma$ と式(1)～(3)よりRC橋脚を耐震設計し、その各橋脚から式(4)～(6)に基づき構造系信頼性評価法により安全性指標を算定した結果を図-2に示した。なお図-2には、道路橋示方書に基づき試設計したRC橋脚より安全性指標を算定した結果も併記している。図-2より、道路橋示方書により耐震設計されたRC橋脚が保有する安全性指標は、 $\beta = 1.3$ から $\beta = 2.3$ の広い範囲でばらついているのに対し、試算した部分安全係数と式(1)～(3)を用いることにより、確率・統計の計算を一切必要とすることなく、目標安全性指標に漸近したRC橋脚が耐震設計されていることを確認できる。なお、式(1)～(3)による安全性照査は、基本的に道路橋示方書に準じたものであり、表-1に示す $\beta_t = 2.0$ を確保するための部分安全係数を用いて耐震設計されたRC橋脚の断面諸量は、試設計された状態から、若干鉄筋量を増減した程度であった。今後は、図-2に示されるように、現行の道路橋示方書に基づき耐震設計されたRC橋脚の耐震安全性は、均一化されていない可能性に留意し、本研究で提示したような確率論的手法を反映させることで改善していく必要があると思われる。

4. まとめ

確率論的手法に基づき、RC橋脚の耐震設計に用いる部分安全係数を検討した。そして、試算した部分安全係数を用いて耐震設計されたRC橋脚は、設定した目標値に近い安全性指標を有していることを確認した。

参考文献

1) ISO: International Standard ISO/DIN 2394, General Principles on Reliability for Structures, 1998. 2) 秋山充良, 松中亮治, 土井充, 鈴木基行: 信頼性理論を用いた構造最適化手法の提案およびRC橋脚の耐震安全性評価への適用, 土木学会論文集, No.662/V-49, pp.185-204, 2000. 3) 足立幸郎, 運上茂樹: 材料強度等のばらつきが鉄筋コンクリート橋脚の地震応答特性に及ぼす影響, JCI コンクリート構造系の安全性評価研究委員会報告書・論文集, pp.367-374, 1999. 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.

表-1 目標安全性指標と部分安全係数の関係

| 目標安全性指標         | $\gamma_{shear}$ | $\gamma_{def}$ | $\gamma_{res}$ |
|-----------------|------------------|----------------|----------------|
| $\beta_t = 2.0$ | 1.4              | 1.2            | 1.2            |
| $\beta_t = 3.0$ | 1.9              | 2.3            | 2.1            |

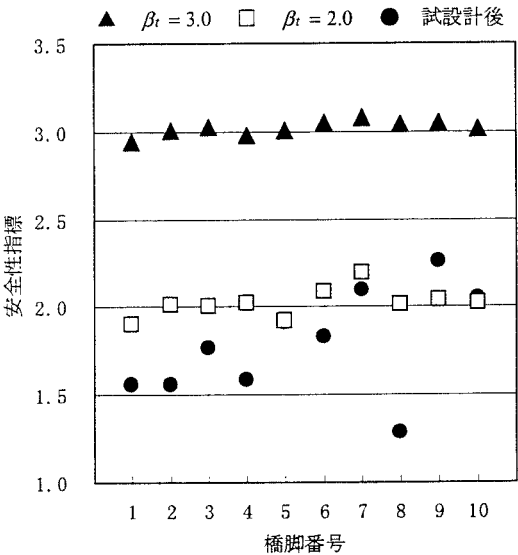


図-2 試算した部分安全係数で耐震設計されたRC橋脚が保有する安全性指標