

システム信頼性を考慮した部分安全係数最適化法の RC 橋脚の耐震設計への適用

東北大学大学院 学生員 ○丸山 大輔 東北大学大学院 正会員 秋山 充良
東北大学大学院 フェロー 鈴木 基行 日本鉄道建設公団 正会員 土井 充

1. はじめに

ISO¹⁾などの国際標準への対応から、構造設計では、確率論的手法を用いた設計体系への移行が検討されている。そこで本研究では、著者らが提案したシステム信頼性を考慮する部分安全係数最適化法を援用することにより、RC 橋脚の耐震設計に用いる部分安全係数を試算した。

2. 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算定フロー

図-1 に RC 橋脚の耐震設計に用いる部分安全係数算定フローを示す。また、各解析手法の概略を以下に示す。

- (a) 目標安全性指標 β_t 、目的関数、制約条件の定義を行う (図-1 (A))。
 (b) 次の設計規準式と最適解析で算定される部分安全係数により RC 橋脚の耐震設計を行う (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方法は参考文献 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、 γ_{shear} 、 γ_{def} 、 γ_{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、 δ_y 、 δ_u 、 δ_{Ra} 、 δ_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。

(c) 構造系信頼性評価法により、式 (1)~(3) の各設計規準式を満足するように耐震設計された RC 橋脚が保有する安全性指標を式 (4)~(6) で定義されるせん断破壊、変形性能および残留変位に対する限界状態式 g_i ($i = 1 \sim 3$ ：橋軸方向、 $i = 4 \sim 6$ ：橋軸直角方向) から算定する (図-1 (C))。

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

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

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

ここに、 α_1 、 α_2 、 α_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、 α_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、 δ ：リダクションファクタースペクトル³⁾により算定される最大応答変位。

式 (1)~(3) の設計規準式で用いる設計変数に対して、安全性指標算定時には、(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ない耐力算定式より得られる値を平均値とみなす、などの条件下で各確率変数を求めている。なお、各確率変数は非相関正規変数とした。また、各確率変数の変動係数は、参考文献 2) や観測強震記録を用いた弾性地震応答解析による統計シミュレーションなどを基に設定した。

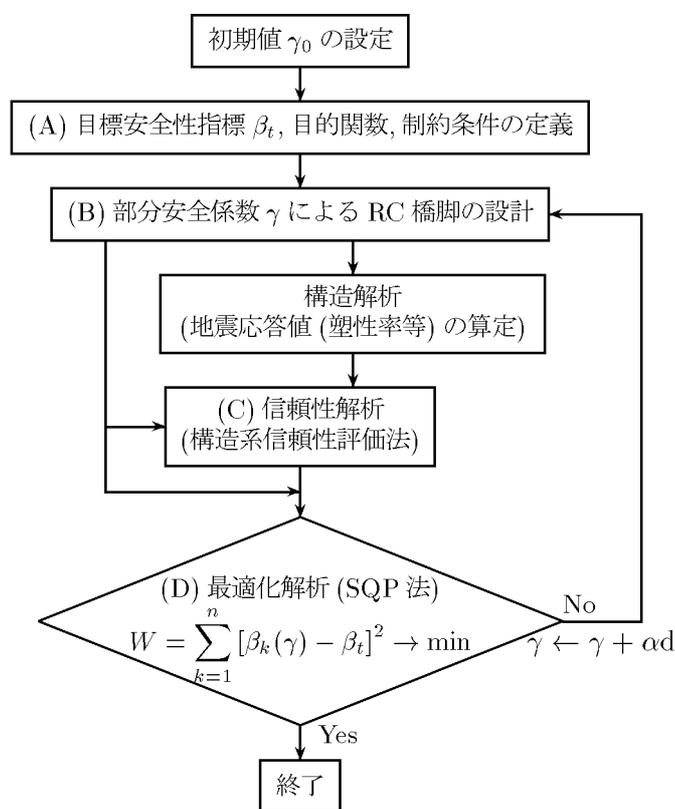


図-1 部分安全係数最適化法のフロー

Key Words：システム信頼性理論，構造最適化，部分安全係数，安全性指標，RC 橋脚

連絡先：〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06, TEL：022-217-7449, FAX：022-217-7448

(d) 逐次2次計画法 (SQP法) に基づき算定された部分安全係数 γ を用いて耐震設計された RC 橋脚が保有する安全性指標 $\beta_k(\gamma)$ と目標安全性指標 β_t の差を最小化する (図-1 (D)).

3. 解析結果

本研究では、図-1 に示すように、耐震設計された RC 橋脚から算定される構造系としての安全性指標と目標安全性指標の偏差を検討対象橋脚群に対して計算し、それらの総和を最小化するような部分安全係数を提示する。検討対象橋脚群は、互いに異なる設計条件を持つ 46 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⁴⁾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、目標安全性指標 2.0 として図-1 のフローに従い部分安全係数を算定した。その結果を表-1 に示す。また、表-1 に示す部分安全係数 γ_{shear} , γ_{def} , γ_{res} と式 (1)~(3) より RC 橋脚を耐震設計し、その各橋脚に対して式 (4)~(6) に基づき構造系信頼性評価法から安全性指標を算定した結果を図-2 に示す。なお、図-2 には、道路橋示方書に基づき試設計した RC 橋脚に対して同様に算定した安全性指標の値も併記している。図-2 より、現行の道路橋示方書に基づき耐震設計された RC 橋脚が保有する安全性指標は、 $\beta = 1.0$ から $\beta = 2.3$ の広い範囲でばらついているのに対し、部分安全係数最適化法を用いて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、道路橋示方書により試設計した RC 橋脚が保有する曲げ耐力およびせん断耐力に対して、表-1 に示す部分安全係数を用いて耐震設計された RC 橋脚が保有する各耐力の増加率を表-2 に示した。限られた橋脚データと設定した確率変数の条件下で導かれた結果であるが、検討対象とした 46 基の RC 橋脚に対して、平均して表-2 に示す程度の耐力増加を図ることにより、式 (4)~(6) に示される複数の限界状態を同時に考慮して算定される構造系としての安全性指標を 2.0 に近づけることができている。

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、本研究で用い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

本研究で提示した部分安全係数 γ_{shear} , γ_{def} , γ_{res} のように、複数の限界状態を同時に考慮した構造系の安全性を目標安全性レベルに抑える設計とするためには、構造系信頼性評価法のようなシステム信頼性を考慮することで幾つかの値を同時に規定した部分安全係数を用いる必要がある。

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) 足立幸朗, 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 2.0 に対する部分安全係数

目標安全性指標	γ_{shear}	γ_{def}	γ_{res}
$\beta_t = 2.0$	1.53	1.22	1.30

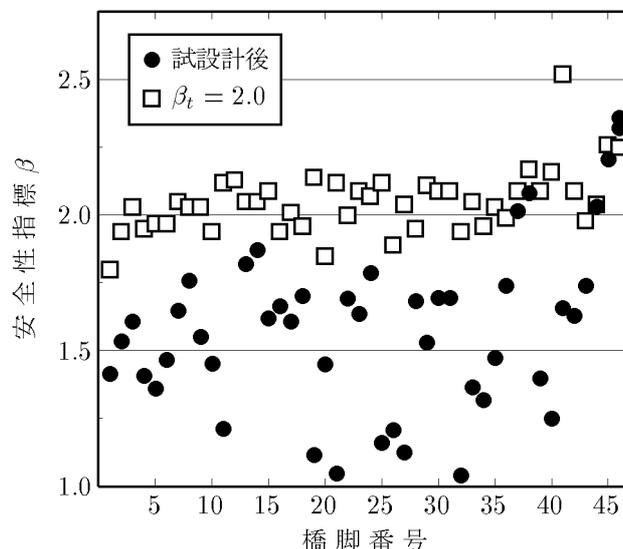


図-2 RC 橋脚が保有する安全性指標

表-2 検討対象橋脚群の耐力増加率の平均値

	耐力増加率の平均値 (%)
曲げ耐力 (橋軸方向)	117
せん断耐力 (橋軸方向)	116
せん断耐力 (橋軸直角方向)	130