

## 構造系の信頼性を考慮した安全係数および 地震時保有水平耐力法に基づくRC橋脚の耐震設計

秋山充良<sup>1</sup>・土井充<sup>2</sup>・松中亮治<sup>3</sup>・鈴木基行<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 東北大学講師 大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

<sup>2</sup>正会員 工修 日本鉄道建設公団 関東支社工事第二部(〒110-0014 東京都台東区北上野 1-10-14)

<sup>3</sup>正会員 工修 鹿島建設(株) 土木設計本部設計技術部(〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

<sup>4</sup>フェロー会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

### 1. はじめに

設計規準類の国際化の中で、構造物の信頼性に関する一般原則(ISO2394)に準拠した限界状態設計法の整備に関して議論が進められている。本研究では、生起する可能性のある全ての限界状態から計算される構造系の信頼性を要求信頼性レベルに漸近させることが可能な安全係数の算定手法を体系化した。次いで、RC橋脚の耐震設計に適用し、せん断破壊、変形性能、および残留変位に対する安全性照査に用いるべき一組の安全係数を試算した。これにより、従来の地震時保有水平耐力法による耐震性能照査法と試算した安全係数を用いることのみで、構造系の信頼性を考慮した信頼性解析を行うことなく要求安全性レベルを確保したRC橋脚が耐震設計されることを示した。

### 2. 構造系の信頼性を考慮した安全係数算定手法

設計規準の適用範囲にある構造物の部位・部材が有する諸元を網羅し、幾つかの設計条件を考慮した上で、ある目標値のまわりに均等化した信頼性を有することができると安全係数の評価が試みられている。この評価手法を用いた既往の研究では、基本的に、式(1)に類した目的関数 $W(\gamma)$ を定義し、目標値との偏差の総和を最小化しながら安全係数 $\gamma$ を探索している。

$$\min_{\gamma} W(\gamma) = \sum_{j=1}^L w_j (\beta_j(\gamma) - \beta_i)^2 \quad (1)$$

ここに、 $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m)$ 、 $w_j$ ：設計条件 $j$ に対する重み係数( $\sum_{j=1}^L w_j = 1$ )、 $\beta_i$ ：目標安全性指標、 $\beta_j(\gamma)$ ：設計条件 $j$ と安全係数 $\gamma$ を用いて設計される構造物から計算される安全性指標、 $L$ ：考慮する設計条件の総数。

なお、安全性指標 $\beta$ とは、式(2)により破壊確率 $P_f$ と対応関係を有するものである。

$$\beta \equiv -\Phi^{-1}(P_f) \quad (2)$$

ここに、 $\Phi$ ：標準正規分布の累積分布関数。

式(1)を用いる場合、定めるべき安全係数の総数により、解の探索の難易度が決まる。そこで、本研究では、佐藤らの研究<sup>1)</sup>を参考に、要求信頼性レベルを確保するための安全係数を設計規準式毎に一つ提示することにした。式(3)に、佐藤らの提案する設計規準式を示す。

$$R_n / S_n \geq F_s = \gamma_i \times \gamma_{s0} \quad (3)$$

ここに、 $F_s$ ：安全係数、 $\gamma_i$ ：構造物の重要度に応じて設計者が決める重要度係数(本研究では、 $\gamma_i = 1.0$ )、 $\gamma_{s0}$ ：目標破壊確率との対応から定められる基本安全係数。

佐藤らは、現状の研究水準と設計者への便宜を考え、各設計変数の不確定要因の影響を一つの安全係数に集約した式(3)を提案している。

本研究では、式(3)を引用する際、 $R_n$ や $S_n$ の算出時に、従来の規準で引用されてきた安全係数(例えば、せん断耐力を算出する際に用いる部材係数)の値を要求信頼性レベルに関係なく引用し、それらによって確保される安全マージンが目標値に比べて不足する分を補うため基本安全係数 $\gamma_{s0}$ を導入する。この $\gamma_{s0}$ を式(1)の条件下で探索する際には、著者らによって提案された構造系信頼性設計手法<sup>2)</sup>を用いる。

式(1)、式(3)および構造系信頼性設計手法による基本安全係数算定フローを以下に示す。

s1) 目標安全性指標 $\beta_i$ の設定。

s2) 基本安全係数の算定を行う検討対象構造物群の選定。

s3) 考慮する限界状態に対応する設計規準式の設定。

$$R_{ni} / S_{ni} \geq \gamma_{s0,i} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

ここに、 $R_{ni}, S_{ni}$ ：指定された耐力算定式および構造解析

手法により算定される耐力, 荷重効果,  $\gamma_{s0,i}$ : 所定の構造系の信頼性を確保するための基本安全係数,  $m$ : 考慮する限界状態の総数.

s4)式(4)に対応する限界状態式 $g_i$ の設定.

$$g_i(\mathbf{X}) = g_i(x_1, x_2, \dots, x_k, x_{k+1}, \dots, x_n) \quad (5)$$

ここに,  $x_1, x_2, \dots, x_k$ :  $R_{ni}$ に関する確率変数,  $x_{k+1}, \dots, x_n$ :  $S_{ni}$ に関する確率変数.

s5)基本安全係数 $\gamma_{s0,i}$ の初期値の設定.

s6)式(4)を満足する検討対象構造物群の再設計.

s7)構造系の信頼性を考慮した破壊確率 $Pf_{sys}$ の算定.

$$Pf_{sys} = \sum_{j=1}^m C_j \quad (6)$$

ここに,

$$C_1 = P(E_1), \quad C_2 = P(E_2) - P(E_2 E_1)$$

$$C_j = P(E_k) - \sum_{i=1}^{j-1} P(E_j E_i) + \sum_{\substack{m=1, j-2 \\ n=2, j-1}}^{m \leq n} P(E_j E_m \cap E_j E_n), \quad (j > 2)$$

本研究では, 式(6)に基づく破壊確率算定手法として, 著者らが提案した構造系信頼性評価法<sup>3)</sup>を用いる.

s8)構造系信頼性設計手法を基に, 式(1)の目的関数 $W$ を最小にする基本安全係数 $\gamma = (\gamma_{s0,1}, \gamma_{s0,2}, \dots, \gamma_{s0,m})$ の組合せを探索するまで, これらを仮定し直し, s6)から s8)を繰返す.

### 3. RC 橋脚の耐震信頼性評価の解析条件

#### (1) 解析対象 RC 橋脚

前記したフローに従い RC 橋脚の耐震設計に用いる基本安全係数を検討するため, 解析対象橋脚群を特定する. ここでは, 提示する基本安全係数を用いて耐震設計される RC 橋脚が, 現行示方書に準じ耐震設計された場合に比べ, どの程度断面諸量の変更が必要になるのかを定量的に評価できるようにするため, まず, 断面諸元等が適当に異なる 46 基の RC 橋脚を道路示方書<sup>4)</sup>に基づき耐震設計した. なお, 想定した地盤モデルは, 全ての場合 I 種地盤であり, 設計する際には, 道路橋示方書のタイプ II の地震動に対する安全性照査を過不足なく満足するように配慮した.

試設計した橋脚は, 橋脚の断面幅(B)と高さ(H)の比が 0.2~1.0, 軸方向鉄筋比 $p$ が 0.32~2.76%, 横拘束筋の体積比(橋軸方向)  $\rho_{sl}$ が 0.34~1.38%の範囲にある. この集合は, 実存する橋脚の断面寸法, 鉄筋量, 固有周期などを反映し, 構成されていることが望ましいが, 現在供用されている橋脚諸元の統計量を得ることができなかったため, 本研究では, この橋脚群を基に基本安全係数の検討を行うことにした. なお, 設定した橋脚群により, 算

定される基本安全係数は異なるため, 適当な橋脚諸元の統計量を得られた場合には, それらを反映した橋脚群を定義する必要があり, 今後の課題である.

#### (2) 設計規準式の設定

式(4)に相当する設計規準式により RC 橋脚を耐震設計する際には, 式(7)のせん断破壊, 式(9)の変形性能, および式(11)の残留変位に対する照査を橋軸方向, 橋軸直角方向ともに満足させる. 式(7)~(12)において,  $i=1 \sim 3$ は橋軸方向,  $i=4 \sim 6$ は橋軸直角方向に対する照査を表している.

##### a) せん断破壊に対する照査

$$\frac{V_{cap,i}}{V_{act,i}} \geq \gamma_{s0,s} \quad (7)$$

$$V_{cap,i} = V_{c,i} / \gamma_{b,c} + V_{s,i} / \gamma_{b,s} \quad (8)$$

ここに,  $i=1, 4$ ,  $V_{c,i}$ : 帯鉄筋以外が受け持つせん断耐力<sup>5)</sup>,  $\gamma_{b,c}$ :  $V_{c,i}$ に対する部材係数で 1.3<sup>6)</sup>,  $V_{s,i}$ : 帯鉄筋が受け持つせん断耐力<sup>6)</sup>,  $\gamma_{b,s}$ :  $V_{s,i}$ に対する部材係数で 1.15<sup>6)</sup>,  $V_{act,i}$ : 曲げ耐力に達するときの部材各断面のせん断力,  $\gamma_{s0,s}$ : せん断破壊に対する照査に用いる要求信頼性レベルに応じた基本安全係数.

##### b) 変形性能に対する照査

$$\frac{\delta_{a,i}}{\delta_{p,i}} \geq \gamma_{s0,d} \quad (9)$$

$$\delta_{a,i} = \delta_{y,i} + (\delta_{u,i} - \delta_{y,i}) / \alpha \quad (10)$$

ここに,  $i=2, 5$ ,  $\delta_{u,i}$ ,  $\delta_{y,i}$ : 橋脚の終局変位および降伏変位<sup>4)</sup>,  $\alpha$ :  $\delta_{a,i}$ の算定時に用いる安全係数で 1.5<sup>4)</sup>,  $\delta_{p,i}$ : 地震時応答変位で, エネルギー一定則により算定,  $\gamma_{s0,d}$ : 変形性能に対する照査に用いる要求信頼性レベルに応じた基本安全係数.

##### c) 残留変位に対する照査

$$\frac{\delta_{Ra,i}}{\delta_{R,i}} \geq \gamma_{s0,r} \quad (11)$$

$$\delta_{R,i} = C_R (\mu_{R,i} - 1) (1 - r) \delta_{y,i} \quad (12)$$

ここに,  $i=3, 6$ ,  $\delta_{Ra,i}$ : 橋脚の許容残留変位(橋脚下端から上部構造慣性力作用位置までの高さの 1/100<sup>4)</sup>,  $C_R$ : 残留変位比応答スペクトル(=0.6<sup>4)</sup>,  $r$ : 橋脚の降伏剛性に対する降伏後の 2 次剛性の比( $r=0$ ),  $\mu_{R,i}$ : 橋脚の応答塑性率(=  $\delta_{p,i} / \delta_{y,i}$ ),  $\gamma_{s0,r}$ : 残留変位に対する照査に用いる要求信頼性レベルに応じた基本安全係数.

#### (3) 限界状態式の設定

式(5)に対応する限界状態式 $g_i$ は, 設計規準式と同じく, 橋軸方向, 橋軸直角方向ともに, せん断破壊, 変形性能, および残留変位に対して定義する<sup>7)</sup>.

##### a) せん断破壊に対する照査

$$g_i = \alpha_1 V_{c,i} + \alpha_2 V_{s,i} - \alpha_3 V_{act,i} \quad (13)$$

ここに,  $i=1, 4$ ,  $\alpha_1$ :  $V_{c,i}$ の算定時に生じるばらつきを

表-1 各確率変数の分布形およびパラメータ

| 限界状態式<br>での記号   | 確率分布 | 確率分布パラメータ                         |       |
|-----------------|------|-----------------------------------|-------|
|                 |      | 平均値                               | 変動係数  |
| $V_{c,i}$       | 正規分布 | 耐力算定式                             | 10.0% |
| $V_{s,i}$       | 正規分布 | 耐力算定式                             | 8.0%  |
| $V_{act,i}$     | 正規分布 | 曲げ耐力より算定                          | 4.6%  |
| $\alpha_1$      | 正規分布 | 1.02                              | 8.2%  |
| $\alpha_2$      | 正規分布 | 1.22                              | 14.5% |
| $\alpha_3$      | 正規分布 | 1.00                              | 30.0% |
| $\delta_{u,i}$  | 正規分布 | 終局変位算定値                           | 6.1%  |
| $\delta_{pd,i}$ | 正規分布 | 降伏耐力比と橋脚の降伏剛性から求めた固有周期をパラメータとして算定 |       |
| $\alpha_4$      | 正規分布 | 1.16                              | 25.0% |
| $\delta_{Ra,i}$ |      | $(h_a^*)/100$                     | (確定値) |
| $\delta_{y,i}$  | 正規分布 | 降伏変位算定値                           | 8.2%  |
| $C_R$           | 正規分布 | 残留変位比応答スペクトル( $\lambda=0.6$ )     | 50.0% |

\*) 橋脚基部から上部構造慣性力作用位置までの距離

考慮する係数,  $\alpha_2 : V_{s,i}$  の算定時に生じるばらつきを考慮する係数,  $\alpha_3 : 作用せん断力  $V_{act,i}$  の推定に伴うばらつきを考慮する係数.$

#### b) 変形性能に対する照査

信頼性解析では、式(9)の  $\delta_{p,i}$  のように、設計上、安全側の結果を出す解析手法をそのまま適用することは適当ではない。そこで、変形性能に関する限界状態式では、式(7)~(12)により設計された橋脚の固有周期と降伏耐力比  $R_u$  から地震時応答変位の統計量を既往の観測波に基づき推定した。ここに、降伏耐力比  $R_u$  は、弾性応答水平力  $P_H$  (道路橋示方書タイプⅡ地震動より算定)と橋脚の降伏耐力  $P_y$  の比( $R_u = P_H / P_y$ )として定義している。

$$g_i = \alpha_4 \delta_{u,i} - \delta_{pd,i} \quad (14)$$

ここに、 $i = 2, 5$ 、 $\delta_{pd,i}$  : 橋脚の固有周期と降伏耐力比  $R_u$  から算定される地震時応答変位、 $\alpha_4$  : 終局変位算定過程に含まれるばらつきを考慮する係数。

#### c) 残留変位に対する照査

$$g_i = \delta_{Ra,i} - C_R (\delta_{pd,i} - \delta_{y,i}) \quad (15)$$

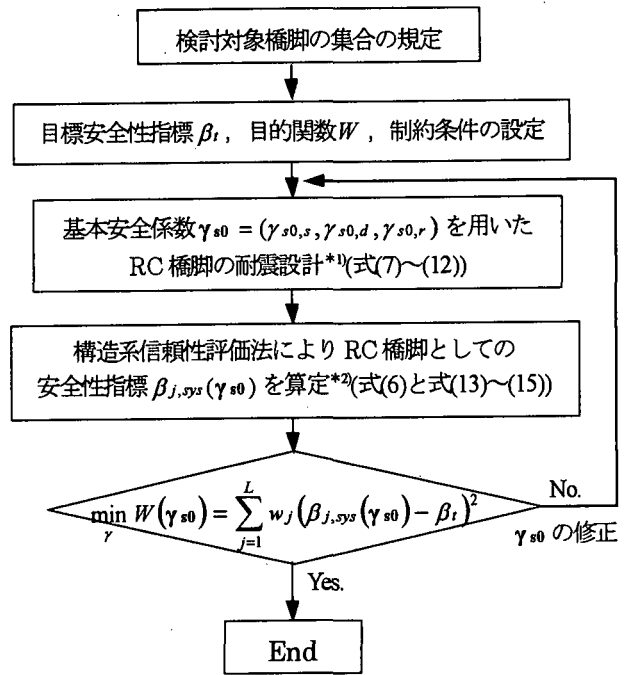
ここに、 $i = 3, 6$ 。

#### (4) 確率変数の分布形とパラメータ

定義した限界状態式から信頼性解析を行う際に用いた各確率変数の平均値や変動係数を表-1 に示した。

#### (5) RC 橋脚の耐震設計に用いる基本安全係数算定フロー

RC 橋脚の耐震設計に用いる基本安全係数の算定フローを図-1 に示した。なお、コンクリート標準示方書 耐震設計編<sup>7)</sup>では、式(7)に相当する破壊モードの判定で、 $V_{act,i}$  の計算時には、実耐力を考慮するため、鉄筋の引張



\*1) 基本安全係数  $\gamma_{s0}$  による RC 橋脚の耐震設計時の条件

- ・帯鉄筋以外が受け持つせん断耐力算定式には、部材係数 1.3 を適用。
- ・帯鉄筋が受け持つせん断耐力算定式には、部材係数 1.15 を適用。
- ・地震時応答変位は、エネルギー一定則により算定。
- ・許容応答変位算定時には、安全係数 1.5 を適用。
- ・耐力計算時には、各材料の規格値を用いる。

\*2) 構造系信頼性評価法による安全性指標  $\beta_{j,sys}(\gamma_{s0})$  算定時

の条件

- ・設計時に考慮する安全係数を全て取除き、各耐力および変形性能を算定。
- ・地震時応答変位は、降伏耐力比と固有周期から評価。
- ・耐力計算時には、各材料のばらつきを考慮し規格値を増減。

図-1 RC 橋脚の耐震設計に用いる基本安全係数算定フロー

降伏強度として、材料強度の規格値の 1.2 倍程度の値を用いている。一方、式(7)~(12)では、材料強度の特性値として、規格値を一貫して用い、そのように耐震設計された RC 橋脚の信頼性解析を行う式(13)~(15)では、材料強度の平均値(規格値の 1.2 倍)を用いて  $V_{act,i}$  などの値を計算している。つまり、設計規準式における各耐力の計算時には、一貫して材料強度の規格値を用いていればよく、材料の過強度による影響は、要求信頼性レベルに応じて算定される基本安全係数に全て含まれている。

#### 4. 構造系の信頼性を考慮した RC 橋脚の耐震設計に用いる基本安全係数の試算

##### (1) 目標安全性指標

目標安全性指標  $\beta_t$  は、表-1 に示される各確率変数の条件下で、解析対象 RC 橋脚から計算される安全性指標  $\beta_{sys} (= -\Phi^{-1}(Pf_{sys}))$  の上限値( $\beta_{sys} = 2.4$ )を参考にして、 $\beta_t = 2.0, 2.5, 3.0$  とした。

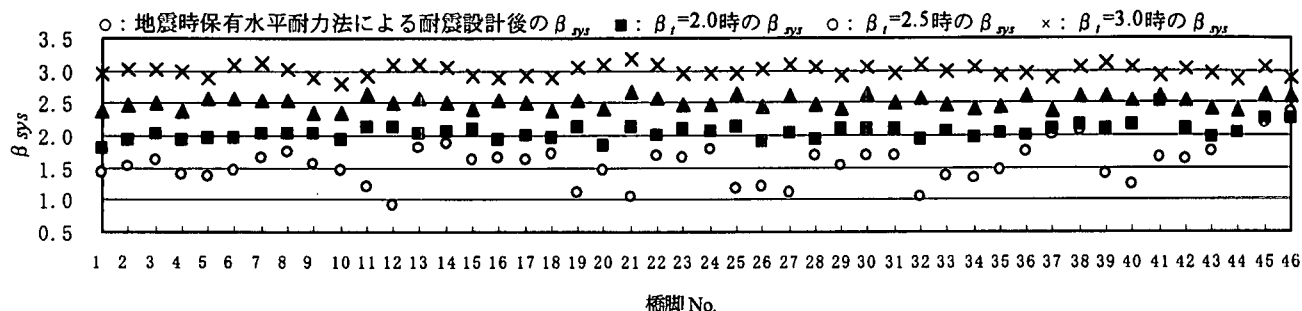


図-2 目標安全性指標  $\beta_t$  を確保する基本安全係数  $\gamma_{s0}$  が算定された際の RC 橋脚の安全性指標  $\beta_{sys}$

表-2 目標安全性指標  $\beta_t$  毎に得られた基本安全係数

| $\beta_t$  | $\gamma_{s0,s}$ | $\gamma_{s0,d}$ | $\gamma_{s0,r}$ | 図-2 の $\beta_{sys}$ |       |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|-------|
|            |                 |                 |                 | $\mu$               | c.o.v |
| 2.0        | 1.53            | 1.22            | 1.30            | 2.05                | 5.7%  |
| 2.5        | 1.71            | 1.64            | 1.75            | 2.51                | 3.7%  |
| 3.0        | 2.05            | 2.21            | 2.23            | 3.00                | 2.8%  |
| 地震時保有水平耐力法 |                 |                 |                 | 1.56                | 19.8% |

$\mu$  : 平均, c.o.v : 変動係数

## (2) 解析結果

図-1 のフローに従い、目標安全性指標  $\beta_t$  毎に算定された基本安全係数の一覧を表-2 に示す。また、この基本安全係数が算定された際の RC 橋脚としての安全性指標  $\beta_{sys}$  を図-2 に示した。設計対象地震動の大きさに対し、地震時保有水平耐力法により耐震設計された 46 基の橋脚群も高い安全性指標を確保しているが、前記した通り、 $\beta_{sys}$  の値が 0.9~2.4 の範囲でばらついている。一方、表-2 の基本安全係数を用いた橋脚群は、橋脚の諸元によらず、図-2 に示されるとおり、 $\beta_t$  に漸近した  $\beta_{sys}$  を確保できている。

なお、各解析条件に対し、46 基の橋脚群から計算される  $\beta_{sys}$  の平均値と変動係数を表-2 に併記した。

## 5. 結論

(1) 著者らが先に提案した構造系信頼性設計手法を援用することで、構造系の信頼性を考慮した信頼性解析を行うことなく、設計対象構造系の破壊確率が要求信頼性レベル(目標破壊確率)を満足できる設計を可能にする安全係数の算定手法を体系化した。

(2) 設計条件の異なる 46 基の RC 橋脚を検討対象橋脚群として、提案手法により、その耐震設計に用いる基本安全係数を試算した。その結果、現行示方書に基づき地震時保有水平耐力法により耐震設計された RC 橋脚の安全性指標  $\beta_{sys}$  は、 $\beta_{sys} = 0.9 \sim 2.4$  の範囲でばらついているのに対し、試算した基本安全係数と定義した設計規準式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 橋脚が耐震設計できることを確認した。

設計規準の国際整合化や構造性能に対するアカウンタビリティが求められる流れのなかで、信頼性理論を用いた耐震設計法の検討が今後より必要になると考える。本研究で提示した基本安全係数は、荷重および耐力の不確定性の定義、部材耐力と作用荷重の解析法の定義、などに依存するものであり、これらの定義が前記した手順と同一な場合にのみ、目標安全性指標を確保した RC 橋脚の設計を可能にするものである。このような基本安全係数を用いれば、設計者が確率的な計算を行うことなく要求信頼性レベルを確保した耐震設計が容易に具現化されるが、一方で、基本安全係数の算定の際に仮定した不確定性の大きさ(耐力(変形性能)などのばらつき)や指定した構造解析手法等を開示し、これら不確定性の評価が改善された場合などには、必要に応じて、基本安全係数の変更が可能となるように配慮する必要がある。

## 参考文献

- 1) 佐藤尚次, 藤田宗久, 白木渡, 香月智, 中村孝明: 設計規準における安全性確保の考え方, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.493-504, 1997.
- 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) 鈴木基行, 秋山充良, 山崎康紀: 構造系の信頼性評価法および RC 橋脚の耐震設計への適用に関する研究, 土木学会論文集, No.578/V-37, pp.71-87, 1997.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.
- 5) 二羽淳一郎, 山田一宇, 横沢和夫, 岡村甫: セン断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編平成 8 年制定, 1996.
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書 耐震設計編平成 8 年制定, 1996.