

# 論文 確率的地震ハザード解析結果を反映した RC 橋脚の耐震設計に用いる安全係数と設計地震力の設定の試み

秋山 充良<sup>\*1</sup>・野口 文孝<sup>\*2</sup>・伊東 佑香<sup>\*3</sup>・鈴木 基行<sup>\*4</sup>

**要旨**：確率的地震ハザード曲線とフラジリティカーブを用いた耐震信頼性解析を実施し、目標年破壊確率に近い安全性レベルを有するコンクリート構造物を耐震設計することが可能な安全係数および設計地震力の設定手法を体系化する。また、本手法を単柱式 RC 橋脚へ適用することで、確率的地震ハザード曲線や目標年破壊確率の相違に対応した設計水平震度と安全係数を試算した。そして、従来の地震時保有水平耐力法による耐震性能照査において、試算した設計水平震度と安全係数を用いることにより、耐震信頼性解析を一切行うことなく目標年破壊確率を概ね確保した RC 橋脚が耐震設計されることを示した。

**キーワード**：耐震信頼性, 確率的地震ハザード解析, フラジリティカーブ, RC 橋脚

## 1. はじめに

構造物の信頼性に関する一般原則(ISO2394)<sup>1)</sup>に基づく設計規準の整合化が国際的に検討されており、今後、コンクリート構造物を対象とする設計規準においても、これに準拠する確率論的な概念を導入した限界状態設計法への移行が検討されると考える<sup>2)</sup>。

著者らは、こうした背景のもと、RC 構造物を対象とした耐震信頼性設計法に関する研究を進めており、ある地震動作用下の条件付破壊確率と目標破壊確率の差を最小化する最適化問題を解くことにより、構造系の信頼性を考慮した信頼性解析を行うことなく、目標破壊確率を概ね確保した設計を可能にする安全係数の算定手法を体系化している<sup>3)</sup>。ただし、この手法では、建設地毎の地震ハザードの相違を考慮できないため、提示する安全係数は、ある特定の地震動作用に対する構造物の破壊確率を目標値に漸近させているに過ぎない。超低頻度な領域で、地震動を確率的地震ハザード曲線に基づき評価することには、種々の問題が指摘されているが、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

られる流れの中で、今後は、設計地震動と構造物の耐震設計に用いる安全係数を同時に設定できる評価システムの構築が必要である。

一方、既存構造物の耐震や耐風安全性などを具体的な数値で提示するシステムの開発が進められており、例えば神田ら<sup>4)</sup>は、建設地や建設年などの建物情報を入力することで、対象構造物の危険度を開示するシステムをインターネット上で公開している。これらのシステムでは、構造物の地震危険度は確率的地震ハザード曲線とフラジリティカーブの積を用いて表現されている。

そこで本研究では、参考文献<sup>3)</sup>の安全係数算定フローの中に確率的地震ハザード曲線とフラジリティカーブを用いた耐震信頼性解析を組み入れることで、目標年破壊確率を有するコンクリート構造物を耐震設計することが可能な安全係数および設計地震力の設定手法を体系化する。提示するフローには、地震ハザードの評価などに未だ解決すべき課題が多く残されているが、ここでは、この種の設計法の有効性や可能性を確認するため、耐震信頼性解析が容易な単柱式 RC 橋脚への適用を試みる。

\*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻講師 博(工) (正会員)

\*2 福島県庁 工修 (正会員)

\*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻

\*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

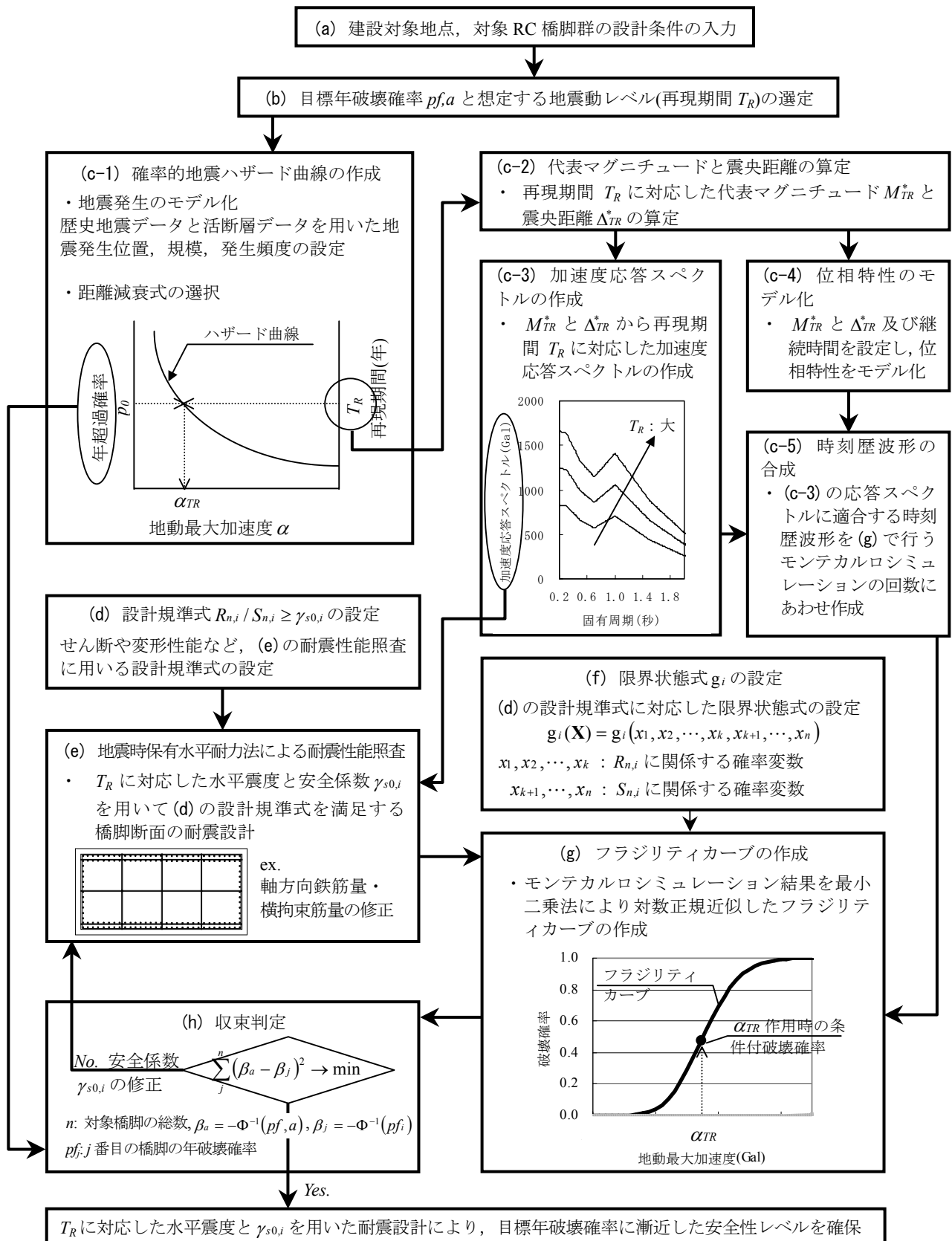


図-1 地震ハザード解析結果を反映した RC 橋脚の耐震設計に用いる安全係数と設計地震力の設定フロー

## 2. RC 構造物の耐震設計に用いる安全係数と設計地震力の設定フロー

RC 橋脚を対象に, 目標年破壊確率を得るための安全係数および設計地震力の設定フローを図

1 に示す。以下に, フローの概要を説明する。

- ・ (a) 建設地点, 対象 RC 橋脚群の設計条件の設定  
同一の安全係数を適用する RC 橋脚群とそれらの設計条件を特定する。この橋脚群から算定

される安全係数は、橋脚の構造諸元の範囲や使用する材料強度のほか、地盤条件や地震ハザードが概ね等しいと考えられる場合に用いられる。

・ (b) 目標年破壊確率と地震動レベルの設定

現行の耐震規準で設計される RC 橋脚のキャリブレーションなどから、目標年破壊確率  $pf_a$  と考慮する地震動レベル(再現期間  $T_R$ )を選定する。

・ (c-1) 確率的地震ハザード曲線の作成

本研究では、地震ハザード評価コード SHEAT<sup>5)</sup>を用いる。地震の発生はポアソン過程に従うものとし、歴史地震データと活断層データを用いて地震の発生位置、規模、発生頻度を設定した。活断層データは、参考文献<sup>6)</sup>を参照し、地震動強度は、地動最大加速度  $\alpha$  とした。また、その距離減衰式  $f_{ATT}$  には、後述の加速度応答スペクトルとの対応を考慮し、川島らの式を用いた<sup>7)</sup>。

・ (c-2) 代表マグニチュードと震央距離の算定

本研究では、時刻歴応答解析により RC 橋脚の耐震信頼性を評価し、フラジリティカーブを作成する((g)参照)。そこで、再現期間  $T_R$ (地動最大加速度  $\alpha_{TR}$ )に対応する地震動を作成するため、 $\alpha_{TR}$  をもたらすマグニチュードと震央距離の期待値  $M_{TR}^*, \Delta_{TR}^*$ (代表マグニチュード・震央距離<sup>5)</sup>)を算定し、これらを介して推定した地震動パラメータより波形を合成する((c-5)参照)。

・ (c-3) 加速度応答スペクトルの作成

$M_{TR}^*$  と  $\Delta_{TR}^*$  を介することにより、再現期間  $T_R$  の加速度応答スペクトル  $S_a(M_{TR}^*, \Delta_{TR}^*, T)$  ( $T$  は固有周期)を参考文献<sup>7)</sup>より算定する。なお、地震ハザード曲線作成時と同様に、加速度応答スペクトルの距離減衰式のばらつきの大きさを考慮した  $S_a(M_{TR}^*, \Delta_{TR}^*, T)$  の補正を行うことにより、再現期間  $T_R$  の  $\alpha_{TR}$  と (c-5) で作成される時刻歴波形の最大加速度は概ね等しくなっている。

・ (c-4) 位相特性のモデル化

本研究では、佐藤ら<sup>8)</sup>の回帰式により、群遅延時間の平均値と標準偏差を  $M_{TR}^*$  と  $\Delta_{TR}^*$  から求め、位相をモデル化する。

・ (c-5) 時刻歴波形の合成

(c-3) と (c-4) より、再現期間  $T_R$  に対応した加速

度応答スペクトル  $S_a$  に適合する時刻歴波形を作成する。その際、正規乱数の組合せを変更することで、(g)で行うモンテカルロシミュレーション(MCS)の回数にあわせた地震波の集合を用意する。

なお、地震ハザード曲線の設定や再現期間  $T_R$  に対応した地震動評価には種々の手法があり、今後、より詳細な検討が必要とされる。その際には、橋脚の年破壊確率の計算時に考慮すべき不確定要因を網羅できる計算法への改良が求められる。また、後述するように、非常に小さい目標年破壊確率を設定すると、橋脚の破壊確率の計算時に 2,000Gal を超えるような地動最大加速度に対して信頼性解析を実施することになり、算出される安全係数が距離減衰式などの確率分布の裾野部に強く依存する。今後は、上限打切りを考慮した確率分布を使用するなどの検討も必要である<sup>5)</sup>。

・ (d) 設計規準式の設定

せん断や変形性能など、橋脚の耐震設計時に考慮する限界状態に対応した設計規準式を設定する。設計規準式は、式(1)の表現を用いる<sup>3)</sup>。

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

ここに、 $R_{ni}, S_{ni}$  : 地震時保有水平耐力法により算定される耐力、荷重効果、 $\gamma_{s0,i}$  : 目標年破壊確率を確保するための安全係数、 $m$  : 考慮する限界状態の総数。

・ (e) 地震時保有水平耐力法による耐震性能照査

安全係数  $\gamma_{s0,i}$  と、再現期間  $T_R$  の  $S_a$  を重力加速度で除した水平震度を用いることで、式(1)を満足する RC 橋脚を耐震設計する。

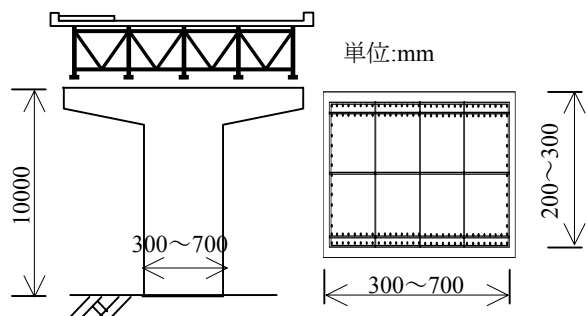
今後、地震時の挙動が複雑などの理由で動的解析により式(1)の荷重効果  $S_{ni}$  を算出する場合には、再現期間  $T_R$  に対応した時刻歴波形((c-5)参照)から数波を選択し、使用することになる。

・ (f) 限界状態式の設定

式(1)に対応する限界状態式  $g_i$  を設定する。 $g_i$  は、設計規準式と異なり、安全係数等を介さず平均的に評価された耐力と荷重効果の差などで表わされ、 $g_i < 0$  となる確率が破壊確率である。

・ (g) フラジリティカーブの作成

(c-5) で作成された地震波により、(e) で設計



※ 断面寸法のみを変更した 20 橋脚(最適化過程では断面寸法は変更せず軸方向鉄筋量と横拘束筋量のみを変更)

図-2 解析対象橋脚群の概要

した各橋脚のフラジリティカーブをMCSを基に作成する。その際、次の工夫により、計算効率と精度の向上を図っている。

i) 100Gal程度の粗い刻み毎にMCSを実施することで得られる破壊確率 $Pf(\alpha)$ の結果をii)に示す計算法により対数正規分布で近似する。次いで、 $\alpha$ 毎に $pf_{\alpha,j} = (-dp_0/d\alpha)Pf(\alpha)$ を計算し、その値の大きい地動最大加速度の領域でMCSを再度実施する。この作業を、式(2)から計算される年破壊確率 $pf_j$ が収束するまで繰り返す。

$$pf_j = \int -\frac{dp_0}{d\alpha} Pf(\alpha) d\alpha \quad (2)$$

ii) フラジリティカーブを対数正規分布で近似する際には、 $\log(\alpha)$ と $\beta = -\Phi^{-1}(Pf(\alpha))$  ( $\Phi$ :標準正規分布の累積分布関数)が直線となることから、最小二乗法による対数正規近似を行う<sup>9)</sup>。その際には、 $pf_{\alpha,j}$ の重み付けを行い、年破壊確率への寄与度が大きい地動最大加速度の領域でMCSの結果に整合させる。

・(h) 収束判定

(a)で設定した橋脚群(総数 $n$ )の年破壊確率 $pf_j$ を計算し、破壊確率を安全性指標に変換した式(3)の目的関数を最小化する $\gamma_{s0,i}$ を探索する。

$$W = \sum_{j=1}^n (\beta_a - \beta_j)^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

$$\beta_a = -\Phi^{-1}(pf, a), \quad \beta_j = -\Phi^{-1}(pf_j) \quad (4)$$

(a)~(h)で算出される再現期間 $T_R$ に対応した水平震度と $\gamma_{s0,i}$ を用いた橋脚の耐震設計を式(1)により行うことで、構造系の信頼性解析を一切行うことなく、目標年破壊確率に近い安全性レベルを有する橋脚が得られる。

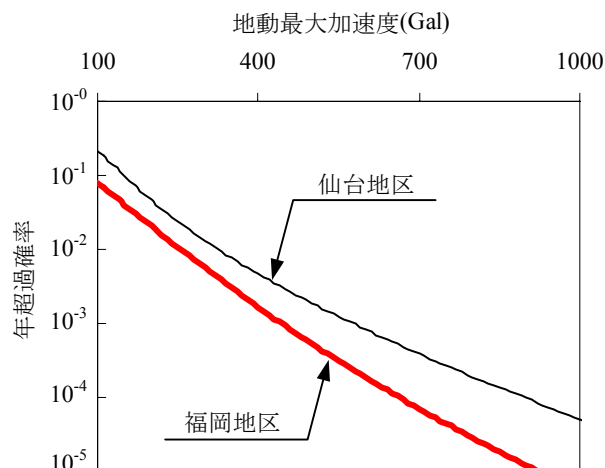


図-3 対象とした地震ハザード曲線

### 3. RC 橋脚の耐震設計に用いる設計水平震度と安全係数の試算

単柱式 RC 橋脚を対象に図-1のフローを用いることで、目標年破壊確率の大きさに応じた設計水平震度と安全係数の算定例を提示する。

#### 3.1 解析条件

解析対象橋脚群の概要を図-2に示す。橋脚総数 $n$ は20であり、何れもI種地盤上に位置すると仮定した。建設対象地点は、仙台地区と福岡地区を想定し、図-1(c-1)に従い作成したハザード曲線が図-3である。

##### (1) 設計規準式の設定

図-1のフローは、本来、複数の限界状態を考慮し、各設計規準式で用いる安全係数 $\gamma_{s0,i}$ を同時に算定するものであるが、ここでは、提案フローの有効性の確認を目的に、橋軸方向の変形性能の照査のみを考慮し、その照査に用いるべき安全係数の検討を行う。そこで、式(1)に相当する設計規準式として、エネルギー一定則を基にする式(5)を仮定した。

$$\frac{\delta_a}{\delta_p} \geq \gamma_{s0} \quad (5)$$

$$\delta_a = \delta_y + (\delta_u - \delta_y)/a \quad (6)$$

ここに、 $\delta_u, \delta_y$ :道路橋示方書<sup>10)</sup>に従い算定される橋脚の終局変位および降伏変位、 $a$ :許容塑性率の算定に用いる安全係数<sup>10)</sup>、 $\delta_p$ :地震時応答変位で、再現期間 $T_R$ の $S_a$ よりエネルギー一定則に基づき算定、 $\gamma_{s0}$ :変形性能に対する照査で用いる目標年破壊確率に応じた安全係数。

表－1 解析結果

解析条件	A-1	A-2	A-3	A-31 <sup>注1)</sup>	A-4	A-5	A-6	A-7
地域	仙台地区				福岡地区			
再現期間(年)	100	1,000	10,000		100	1,000	10,000	
目標年破壊確率	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$
設計水平震度の 平均値(20 橋脚)	0.56	0.92	1.48	1.49	0.34	0.35	0.59	0.87
変形性能の照査に 用いる安全係数	7.3	4.0	2.2	2.2	1.1	6.4	4.0	1.9
軸方向鉄筋比の 平均値(20 橋脚)	1.06	1.00	1.09	1.12	0.57	0.66	0.66	0.79
横拘束筋体積比 <sup>注2)</sup> の平均値(20 橋脚)	0.67	0.70	0.74	0.73	0.16	0.32	0.21	0.13

注1) 終局変位算定過程に含まれるばらつきを考慮する係数 $\alpha_1$ の変動係数を10% (A-31以外は25%)

注2) 橋軸方向に対して算定

### (2) 限界状態式の設定

式(5)に対応する限界状態式として、式(7)を用いる。式(5)を満足するように耐震設計された橋脚は、安全係数  $a$ 、 $\gamma_{s0}$  やエネルギー一定則の使用により、再現期間  $T_R$  の地震動(図－1 (c-5))が作用しても、その応答値が橋脚の終局変位を超過することはない。ここでは、式(5)で確保されるこのような安全性の余裕度を式(7)により定量化する。

$$g = \alpha_1 \delta_u - \delta_{pd} \quad (7)$$

ここに、 $\delta_{pd}$  : 動的解析により求められる応答変位、 $\alpha_1$  : 終局変位算定過程に含まれるばらつきを考慮する係数。

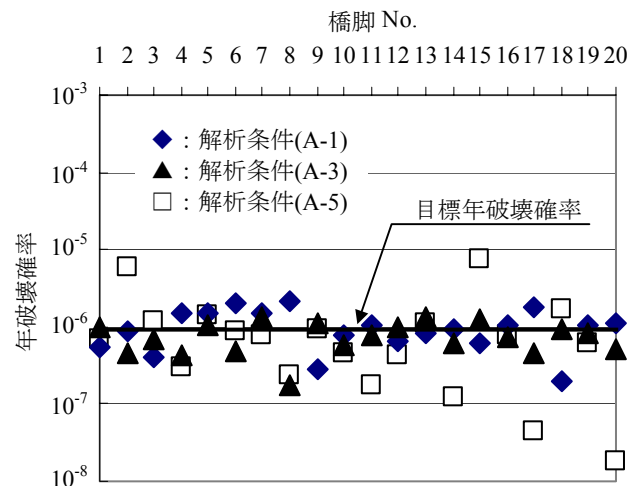
式(7)は、図－1 (g) のフラジリティカーブの作成時に用いられ、 $\delta_{pd}$  は図－1 (c-5) で作成した地震波による時刻歴応答解析から算出する。なお、式(7)の $\alpha_1$ などの確率分布とそのパラメータは、参考文献<sup>3)</sup>と同じ値を用いている。

### (3) 最適化手法の概要

式(3)の最適化問題を解く際には、遺伝的アルゴリズム(GA)<sup>11)</sup>を用い、最適化過程では、式(5)の安全係数 $\gamma_{s0}$ および橋脚の軸方向鉄筋と横拘束筋の径、本数等を変更する。

## 3.2 解析結果

試算により、道路橋示方書に従い耐震設計した橋脚から算定される年破壊確率は、仙台地区の地震ハザードを想定したとき、 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ の値が算出されたことを参考に、ここでは、目標年破壊確率を $10^{-4}$ と $10^{-6}$ に設定した。再現期間



図－4 目標年破壊確率に対するばらつき

$T_R$  は、100年、1,000年、10,000年を考えた。

$\gamma_{s0} > 1.0$  となった解析結果を表－1に示す。表－1にある設計水平震度の平均値とは、図－1 (c-3)に示される $S_a$ を重力加速度で除した震度を各橋脚の固有周期から求め、それを平均化したものである。例えば、表－1の解析条件 A-1～A-3の結果に示されるように、再現期間 $T_R$ が大きくなるにつれ、設計水平震度は大きくなるが、同じ目標年破壊確率であれば、対応する安全係数 $\gamma_{s0}$ が小さくなるため、結局、耐震設計される橋脚の軸方向鉄筋量および横拘束筋量には有意な差は生じない。橋脚の耐震安全性の大小を決めるのは、目標年破壊確率  $pf,a$  の大きさであり、そのような  $pf,a$  を確保した設計を行うためには、再現期間 $T_R$ と安全係数 $\gamma_{s0}$ の組合せを同時に検討する必要がある。

解析条件 A-1、A-3、および A-5 から得られた

設計水平震度と安全係数  $\gamma_{s0}$  により耐震設計した各橋脚の年破壊確率と目標年破壊確率  $pf,a$  の関係を図-4に示す。解析条件 A-1 や A-3 から得られた結果は、橋脚毎の年破壊確率が概ね目標値に漸近しており、設計者は表-1に示される水平震度と  $\gamma_{s0}$  を用いることで、耐震信頼性解析を行うことなく、 $pf,a$  に近い安全性レベルを有する橋脚を耐震設計できることが確認される。一方、福岡地区のように、地震ハザードのレベルが低い場合に再現期間  $T_R$  を小さく設定すると、軸方向鉄筋量に関して設けた制約条件を満たす橋脚では、塑性変形が多く橋脚で生じず、エネルギー一定則を基にする式(5)で耐震設計した場合には、橋脚毎の年破壊確率のばらつきを小さく抑えることができない。このため、再現期間  $T_R$  は想定した限界状態に相応しい設計水平震度となるように決定する必要があり、例えば、弾性限界点を超過する確率を目標値に漸近させる安全係数を検討する場合には、再現期間  $T_R$  を式(5)を対象とする場合に比べ小さく設定することが必要となる。

また、解析条件 A-31 では、式(7)の  $\alpha_1$  の変動係数を他の解析条件で用いた 25%から 10%に変更している。 $\alpha_1$  の変動係数のみが異なる解析条件 A-3 と A-31 の結果に有意な差は生じていない。これは、図-1のフローで考慮される他の不確定性の存在により、本検討の条件下では、この程度の  $\alpha_1$  の精度の改善は耐震安全性の向上につながることを示している。このように、地震外力と耐力(変形性能)の評価に関わる不確定性を一元的に包括した図-1のフローでは、例えば耐震設計で用いる終局変位算定法などの精度を向上させる意味を他の不確定要因がその耐震安全性に与える影響との比較から評価できる。

#### 4. まとめ

確率的地震ハザード曲線とフラジリティカーブを用いた耐震信頼性解析を実施し、目標年破壊確率を有するコンクリート構造物を耐震設計することが可能な安全係数および設計地震力の設定手法を体系化した。本手法では、フラジリ

ティカーブの作成を効率的に行うための工夫を施しており、将来的に、複数の限界状態を同時に扱うシステム信頼性を考慮する場合でも、目標信頼性レベルに漸近させる安全係数の設定を容易に行うことができると思われる。また、設計地震力から構造物の安全係数の設定までを包括する本提案フローの使用により、地震動評価に関わる圧倒的な不確定性が存在する中で、コンクリート構造物の耐震安全性を合理的に向上させるための情報などを得ることが可能となる。

#### 参考文献

- 1) ISO: International Standard ISO/DIN 2394, General Principles on Reliability for Structures, 1998
- 2) 例えば、野口貴文: ISO の整備とその影響, コンクリート工学, Vol.38, No.9, pp.74-81, 2000.9
- 3) 秋山充良ほか: 構造系の信頼性を考慮した RC 橋脚の耐震設計に用いる安全係数の試算, 土木学会論文集, Vol.718/V-57, pp.1-17, 2002.11
- 4) 神田誠一ほか: 確率を用いた建物の安全性評価プログラムの公開と事後評価, JCOSSAR 2003, pp.223-228, 2003.11
- 5) 山田博幸, 堤英明, 蛭沢勝三, 鈴木雅秀: 地震ハザード評価コード SHEAT(PC 版)の使用手引き, JAERI-Data/Code2002-001, 2002
- 6) 活断層研究会編: [新編] 日本の活断層—分布図と資料, 東京大学出版会, 1991
- 7) 川島一彦, 相沢興, 高橋和之: 最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式, 土木研究所報告, 第 166 号, 1985
- 8) 佐藤忠信ほか: 観測波に基づく地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集, No. 640/I-50, pp.119-130, 2000.1
- 9) 吉田郁政, 鈴木修一: 限界地震動指標を用いた損傷確率の効率的な算定方法, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.201-206, 2003.3
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002
- 11) 古田均, 杉本博之: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版(株), 1997