

RC 橋脚の耐震信頼性評価による設計地震動と安全係数の設定に関する基礎的研究

東北大学大学院 学生員 ○伊東佑香
東北大学大学院 フェロー 鈴木基行

東北大学大学院 正会員 秋山充良
福島県庁 正会員 野口文孝
日本工営(株) 山手弘之

1. はじめに

構造物の信頼性に関する一般原則(ISO2394)¹⁾に基づく設計規準の整合化が国際的に検討されており、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を図る必要がある。著者らは、こうした背景のもと、耐震信頼性設計法に関する研究を進めており、参考文献 2)では、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た。しかしながら、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。

本研究では、参考文献 2)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 fragility 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構造物を耐震設計することが可能な安全係数と設計地震力の設定手法を体系化し、その単柱式 RC 橋脚への適用を試みる。

2. 耐震設計に用いる安全係数と設計地震力の設定手順

目標年破壊確率を確保するための安全係数および設計地震力の設定手順の概要(図-1)を以下で説明する。

(手順1) 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。

(手順2) 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。

(手順3) 確率的地震ハザード曲線の作成：地震ハザード評価コード SHEAT³⁾を用いて、建設対象地点ごとに歴史地震データと活断層データから確率的地震ハザード曲線 p_0 を作成する。

(手順4) 模擬地震動の作成：地震ハザード曲線において、再現期間 T_R (地動最大加速度 α_{TR})に対応する模擬地震動を作成する。模擬地震動は、 α_{TR} をもたらすマグニチュードと震央距離の期待値³⁾ M_{TR}^* , Δ_{TR}^* を介して推定した地震動パラメータにより波形を合成している。

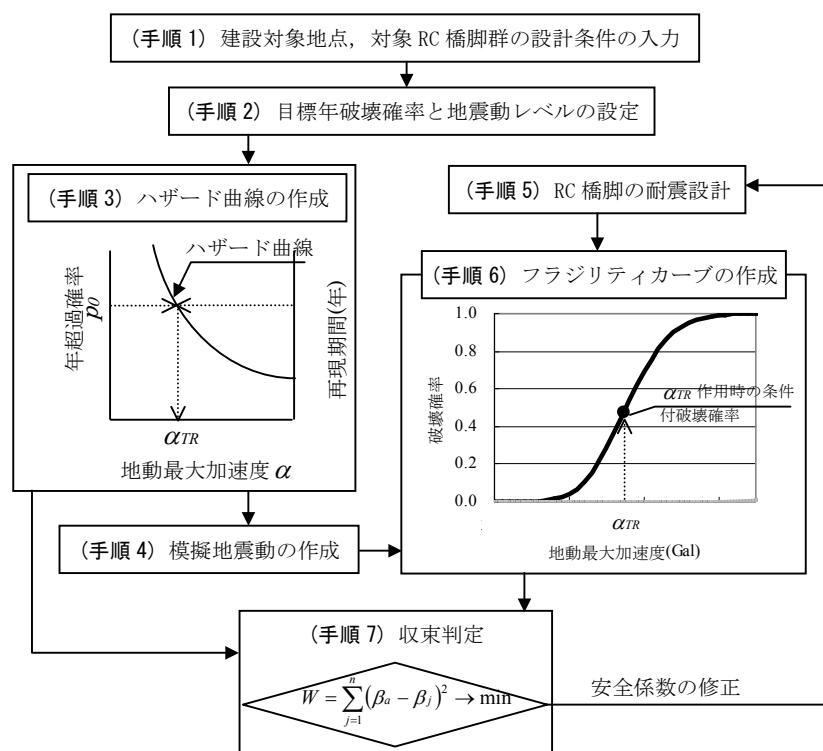


図-1 RC の耐震設計に用いる設計地震力と安全係数設定フロー

Key Words : 耐震信頼性, 設計地震動, 地震ハザード, フラジリティカーブ, 安全係数, 耐震設計

連絡先: 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06 Tel: 022(217)7447 Fax: 022(217)7448

(手順 5)地震時保有水平耐力法による RC 橋脚の耐震設計：再現期間 T_R に対応した設計水平震度と、目標年破壊確率を確保するための安全係数 γ_{s0} を用いて、 $R_n/S_n \geq \gamma_{s0}$ を満足する RC 橋脚を耐震設計する。ここで、 R_n は橋脚の許容塑性率、 S_n はエネルギー一定則に基づき算定される応答塑性率である。設計水平震度は M_{TR}^* と Δ_{TR}^* から川島ら 4)の距離減衰式により求めた加速度応答スペクトルの値を基にする。

(手順 6)フラジリティカーブの作成：地動最大加速度 α_{TR} の作用に対する橋脚の破壊確率 $Pf(\alpha_{TR})$ をモンテカルロシミュレーションにより求め、その結果を対数正規分布で近似した曲線(フラジリティカーブ)を作成する。

(手順 7)収束判定(安全係数 γ_{s0} の修正)：(手順 1)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(1)の目的関数を最小化する。収束と判定されない場合には、 γ_{s0} を修正し、(手順 5)に戻る。

$$W = \sum_{j=1}^n (\beta_a - \beta_j)^2 \rightarrow \min \quad (1) \quad \beta_a = -\Phi^{-1}(pf, a), \quad \beta_j = -\Phi^{-1}(pf_j) \quad (2) \quad pf_j = \int -\frac{dp_0}{d\alpha} Pf(\alpha) d\alpha \quad (3)$$

3. 提案フローを用いた 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 橋脚を対象に前記した図-1 のフローを用いることで、再現期間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。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、仙台地区を想定した。目標年破壊確率は 1.0×10^{-6} とし、設計水平震度は再現期間 T_R を 100 年と 10,000 年にした場合($T_R=100$: Case1, $T_R=10,000$: Case2)を考えた。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、 M_{TR}^* と Δ_{TR}^* から川島ら 4)の距離減衰式により求めた加速度応答スペクトル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。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、対応する安全係数が小さくなるため、結局、耐震設計される橋脚の鉄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 と安全係数の組合せを同時に検討する必要がある。

得られた設計水平震度と安全係数 γ_{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-2 に示す。橋脚毎の年破壊確率は概ね目標値に漸近しており、設計者は表-1 に示される設計水平震度と γ_{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。

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。目標年破壊確率の設定や耐力評価に介在する不確定性に加え、地震ハザード曲線の設定、再現期間 T_R に対応した地震動の作成方法など、検討すべき課題は多く残されている。しかし、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信頼性を高めることにより、地震動評価に関わる圧倒的な不確定性が存在する中で、今後、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) 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 3) 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 4) 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

表-1 解析結果

解析条件	Case1	Case2
地域	仙台	
目標年破壊確率	1.0×10^{-6}	
再現期間(年)	100	10,000
設計水平震度の平均値(20 橋脚)	0.56	1.48
変形性能の照査に用いる安全係数	7.3	2.2
軸方向鉄筋比の平均値(20 橋脚)	1.06	1.09
横拘束筋体積比 ^{2b)} の平均値(20 橋脚)	0.67	0.74

注) 橋軸方向に対して算定

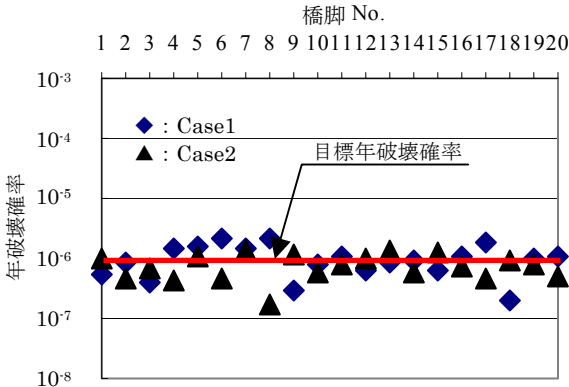


図-2 目標年破壊確率に対するばらつき