

I - 10

確率論的地震ハザード解析結果を反映した RC 構造物の  
耐震信頼性設計に関する基礎的研究

東北大学大学院 学生会員 ○松崎 裕  
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

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国際的整合化が検討されており、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が急務となっている。著者らは、こうした背景の下に、信頼性理論を耐震設計へと適用する研究を進めており、参考文献2)では、設計者が構造系の信頼性解析を行うことなく、目標破壊確率に概ね漸近した安全性レベルを有する構造物の設計を可能とする安全係数の算定手法を体系化した。しかしながら、この手法では建設対象地点毎の地震ハザードレベルの相違を考慮できないため、提示される安全係数は、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のに過ぎない。確率論的地震ハザード曲線における極低頻度な領域の評価については、種々の課題が指摘されているが、設計規準の国際的整合化や構造性能に対する説明責任が求められる大きな変革の流れの中にあつて、今後は、設計地震力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設計システムの構築が必要不可欠である。

本研究では、参考文献2)の安全係数算定フローの中に、確率論的地震ハザード曲線と fragility curve を用いた耐震信頼性解析を組み入れることで、目標年破壊確率に漸近した安全性レベルを有する構造物を耐震設計することが可能な設計地震力と安全係数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. 耐震設計に用いる設計地震力と安全係数の設定手順

目標年破壊確率に漸近した安全性レベルを確保するための設計地震力と安全係数の設定手順の概要を以下に説明する。図-1 に示されるように、提案手法は、(手順1)～(手順7)の7つのステップから構成される。

(手順1)建設対象地点、対象 RC 橋脚の設計条件の設定：RC 橋脚の設計条件を設定する。この橋脚から算定される安全係数は、橋脚の諸元や地盤条件、地震ハザードのレベルが概ね等しいと考えられる場合に適用される。

(手順2)目標年破壊確率と地震動レベルの設定：現行の道路橋示方書<sup>3)</sup>に基づいて設計される 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、動的照査用に用いる設計地震動の再現期間  $T_R$  を選定する。

(手順3)確率論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>4)</sup>を用いて、建設対象地点毎に、歴史地震データと活断層データとから確率論的地震ハザード曲線を作成する。

(手順4)模擬地震動の作成：模擬地震動は、建設対象地点における特性を反映させて作成する。なお、本研究では提案フローの有効性の検証を

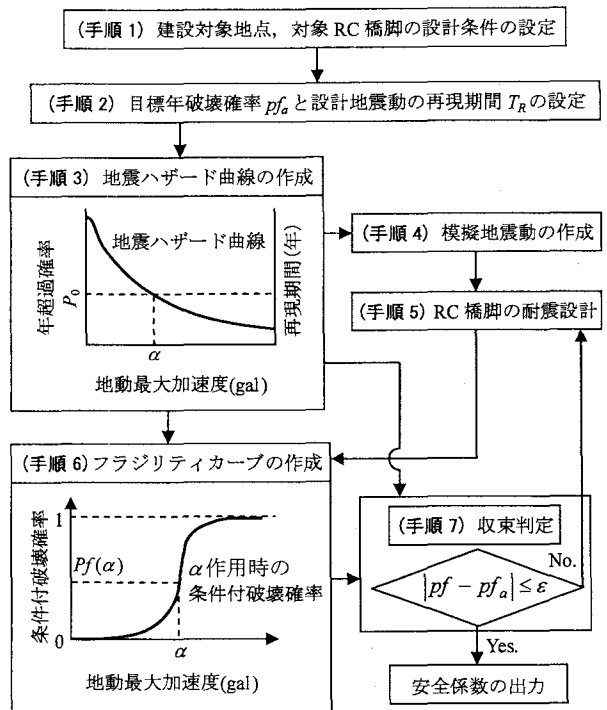


図-1 設計地震力と安全係数の設定フロー

第一の目的としたため、地震動については、応答スペクトル形状が概ね等しい1000波を人工的に作成し、用いることにした。

(手順 5) 動的照査法による RC 橋脚の耐震設計：再現期間  $T_R$  に対応した地震動と目標年破壊確率を確保するための安全係数  $\gamma_{s0}$  を用いて、 $R_n/S_n > \gamma_{s0}$  を満足す

る RC 橋脚を耐震設計する。ここに、 $R_n$  は橋脚の許容塑性率、 $S_n$  は応答塑性率である。 $S_n$  は、例えば 1 次モード卓越型の単柱式 RC 橋脚であればエネルギー一定則などの簡易手法により、また、地震時挙動が複雑な斜張橋などであれば、動的解析により算定する。

(手順 6) フラジリティカーブの作成：各地動最大加速度を有する地震動の作用に対する橋脚の条件付破壊確率をモンテカルロシミュレーションにより算定し、その結果をもとにフラジリティカーブ  $Pf(\alpha)$  を作成する。

(手順 7) 収束判定(安全係数の修正)：(手順 3) で作成した確率論的地震ハザード曲線と(手順 6) で作成したフラジリティカーブを用いて式(1)に基づいて年破壊確率  $pf$  を算定した上で、式(2)により目標年破壊確率との差が許容値  $\varepsilon$  以下であることを確認し、収束と判定する。ただし、収束と判定されない場合には、安全係数  $\gamma_{s0}$  を修正し、(手順 5) に戻る。なお、ある 1 つの諸元を有する橋脚のみを対象として算定される安全係数は、様々な諸元を有する橋脚群から算定される安全係数の平均値と、ほとんど変わらないことが参考文献 2) において確認されている。

$$pf = \int_0^{\infty} \left( -\frac{dp_0}{d\alpha} \right) Pf(\alpha) d\alpha \quad (1) \quad |pf - pf_0| \leq \varepsilon \quad (2)$$

### 3. 提案フローに基づく単柱式 RC 橋脚の耐震設計に用いる安全係数の試算

単柱式 RC 橋脚を対象として、図-1 のフローを適用し、再現期間の大きさに対応した安全係数を試算する。RC 橋脚の建設対象地点としては、地震ハザードレベルによる違いを考察するために、仙台と福岡を選定した。また、目標年破壊確率は現行の道路橋示方書<sup>3)</sup>に基づいて試設計された RC 橋脚のキャリブレーション結果を参考に  $1.0 \times 10^{-6}$  とし、地震動の再現期間としては 1000 年と 10000 年を設定した。

解析結果を表-1 に示す。表-1 において同一建設対象地点に着目すると、再現期間が長くなるに伴って地震動強度は大きくなるが、それに対応して安全係数が低減されるために、同一の目標年破壊確率に対しては、設計される断面の鉄筋量に有意な差は生じないことが確認される。また、仙台と福岡とで同一の再現期間の場合に着目すると、仙台の方がより地震ハザードレベルが高いため、安全係数が大きく算定されている。このように、RC 橋脚の耐震安全性の大小を決定するのは目標年破壊確率の大きさであり、所定の安全性レベルを確保するためには、地震動の再現期間の大小、換言すれば地震動強度の大小に応じて安全係数を適切に変化させる必要がある。

### 4. まとめ

確率論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行い、目標年破壊確率に漸近した構造物を耐震設計することが可能となる設計地震力と安全係数の設定手法を体系化した。本提案フローには、動的解析に用いる地震動の設定方法など、未だ検討すべき点が多く残されているものの、提案フローを構成する各部分の信頼性を高めることによって、地震動評価に関する圧倒的な不確実性の存在下で、構造物の耐震安全性を合理的に向上させるための情報を得ることなどが可能となる。

### 参考文献

- 1) ISO : International Standard ISO/DIN 2394, General Principles on Reliability for Structures, 1998. 2) 秋山充良, 土井充, 松中亮治, 鈴木基行 : 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) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, V.耐震設計編, 2002. 4) 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, JAERI-Data/Code2002-001, 2002.

表-1 解析結果

解析条件	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
建設対象地点	仙台		福岡	
目標年破壊確率 $pf_0$	$1.0 \times 10^{-6}$			
再現期間 $T_R$ (年)	1000	10000	1000	10000
安全係数 $\gamma_{s0}$	10.7	6.8	7.4	5.2
軸方向鉄筋比 (%)	1.31	1.40	1.31	1.31
横拘束筋体積比 (%)	1.71	1.69	0.86	0.84