

破壊確率を判断基準とした RC 橋脚の耐震設計時に考慮すべき不確定要因の抽出

東北大学大学院 正会員 ○秋山充良
 日本道路公団 正会員 丸山大輔
 東北大学大学院 フェロー 鈴木基行

1. はじめに

信頼性理論を基礎とする性能設計法の確立が検討され、ISO2394¹⁾や欧州の設計標準となる EuroCode においても信頼性設計の考え方が取り込まれている²⁾。この設計法では、構造安全性に影響する主要な不確定要因を見極め、その要因の存在下でも考慮する限界状態への到達確率(破壊確率)が許容値以下となる安全係数等が用いられる³⁾。本研究では、破壊確率により対象構造物の耐震安全性を定量化し、それに影響する主要な不確定要因を構造系信頼性理論と実験計画法を基に抽出する手順を体系化した。そして、本手法を既往の設計基準により耐震設計された RC 橋脚に適用することで、設計基準の変遷に伴う橋脚の耐震安全性の向上度を確率的に評価し、橋脚毎に抽出される主要な不確定要因の相違を考察した。

2. システム信頼性解析と実験計画法を用いた不確定要因の提出手順

地震時破壊確率 p_f は、式(1)により算出する。

$$p_f = \int_0^{\infty} f_{ph}(\alpha) \cdot P_{f,sys}(\alpha) d\alpha \quad (1) \quad f_{ph}(\alpha) = -\frac{dp_0(\alpha)}{d\alpha} \quad (2)$$

ここに、 $p_0(\alpha)$ ：地動最大加速度などで表される地震動強度 α の年超過確率、 $P_{f,sys}(\alpha)$ ：地震動強度 α の作用に対して設計対象構造系の信頼性解析を実施して求めた条件付破壊確率。

式(1)による破壊確率で定量化される耐震安全性に大きな影響を与える不確定要因の抽出手順を以下に示す。

Step 1. 確率論的地震危険度解析により、地震動強度 α の確率密度関数を算出する。

Step 2. 不確定要因の抽出を検討する設計対象構造系の耐震解析モデルを構築し、システム信頼性解析から $P_{f,sys}(\alpha)$ を算出する。本研究では、RC 橋脚を解析対象とし、橋軸方向と橋軸直角方向に対し、作用せん断力とせん断耐力、作用変位と終局変位、および地震後の残留変位と許容残留変位の各比較を行い $P_{f,sys}(\alpha)$ を算出する³⁾。

Step 3. 不確定要因の変化に対する p_f の増減量を基に、耐震安全性に影響する主要な要因を実験計画法により抽出する。本研究で実験計画法を用いる際の水準は、初期に想定した不確定要因を考慮する場合(水準 1)とそれを無視した場合(水準 0)の 2 水準とした。最終的に、各不確定要因の p_f に与える影響の大きさを示す寄与率を分散分析により算定⁴⁾し、設計対象構造系の耐震安全性に影響する主要な不確定要因を抽出する。

3. RC 橋脚の耐震安全性に影響する不確定要因の抽出

(1) 解析条件

前記のフローを既往の耐震設計基準に基づき試設計された米田ら⁵⁾の RC 橋脚に適用した事例を示す。米田らが提示した昭和 39 年、平成 2 年、および平成 8 年改訂の各道路橋示方書に準拠した RC 橋脚の橋脚天端位置における荷重－変位関係を図-1 に示す。

地震ハザード曲線は、大阪周辺を対象に Kameda and Nojima⁶⁾が示

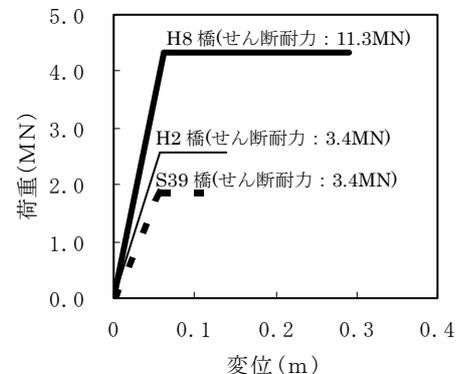


図-1 橋脚天端の荷重－変位関係

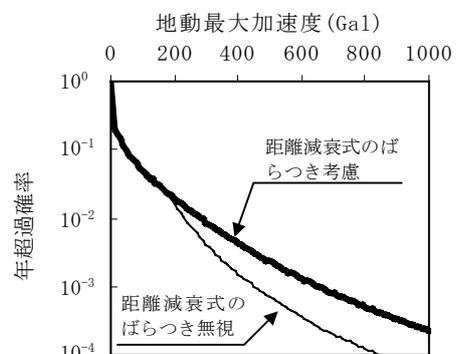


図-2 地震ハザード曲線

Key Words : システム信頼性理論, 破壊確率, RC 橋脚, 性能照査型設計法, 耐震設計, 実験計画法

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

した震源モデル，および地震動強度 α を地動最大加速度 α_g で表し，その距離減衰式に川島ら⁷⁾の式を用いることで作成した．得られた地震ハザード曲線を図-2 に示す．図-2 には，距離減衰式の不確定性($\ln \alpha_g$ の変動係数 52%⁷⁾)を無視したハザード曲線も示した．本研究では， $p_0(\alpha)$ の算定時に考慮する不確定要因としてこの距離減衰式のばらつきのみを考慮する．次に，地動最大加速度 α_g に対応する時刻歴波形は，佐藤ら⁸⁾の手法を基にした模擬地震動 100 波を用いた．なお，模擬地震動は，道路橋示方書タイプ II の加速度応答スペクトルに適合するように振幅調整した後，100 波の地動最大加速度の平均 $\overline{\alpha_g}$ を求め， α_g 作用時の橋脚の応答は $\alpha_g / \overline{\alpha_g}$ を掛けた波形により求めた．そして，同じ加速度応答スペクトルを有する地震動から得られる橋脚の弾塑性応答変位のばらつきの影響を評価するため， α_g 作用時の橋脚の応答を 100 波から任意に選んだ 3 波より算出し，その平均値を用いて $P_{f,sys}(\alpha)$ を求める水準(水準 0)と 100 波の応答の平均値と変動係数を考慮して $P_{f,sys}(\alpha)$ を求める水準(水準 1)の 2 つの水準を用意した．従って， $P_{f,sys}(\alpha)$ の算定時に考慮する地震動特性に関する不確定要因としては，位相特性のばらつきのみを考慮していることになる．材料強度のばらつきや各耐力算定式の実験結果に対するばらつきなど， $P_{f,sys}(\alpha)$ の算定に関する他の不確定要因は，参考文献³⁾と同様に考慮した．

本研究で地震時破壊確率 p_f の算定時に考慮した不確定要因の一覧を表-1 に示した．

(2) 解析結果

年破壊確率 p_f で定量化された耐震安全性に影響を及ぼすとして抽出された主要な不確定要因の一覧を表-2 に示した．ここでは，寄与率の大きい順に並べ，寄与率の合計が 90%となるまでの要因を示している．寄与率の大きさに基づき抽出された各不確定要因は，図-1 の荷重-変位関係を良く反映した結果となっている．つまり，せん断破壊型橋脚である S39 橋では，せん断力やせん断耐力の推定に伴う不確定要因が橋脚の耐震安全性に大きく影響する要因として抽出された．一方，曲げ破壊型である H8 橋では，a)地震ハザードの設定が p_f に影響を与えること，b)応答変位や残留変位の照査に関する C_R や δ_{pd} の推定精度が p_f に影響すること，c)材料強度のばらつきは p_f の評価に何ら影響しないこと，などが示されている．

4. まとめ

破壊確率により耐震安全性を定量化し，これに与える影響が大きい不確定要因を抽出できるフローを提示した．地震ハザードの設定や模擬地震動の作成法などは，今後詳細な検討を必要とするが，本手法を基にすることで，効率的に耐震安全性を高めるための情報が提供される．また，新材料や新構造形式の適用が図られる際，実施すべき実験サンプル数や実験データを基に導く耐力算定式の精度を向上させる意味などを他の不確定要因が対象構造物の耐震安全性に与える影響との比較から評価できるようになる．

参考文献 1) ISO : International Standard ISO/DIN 2394, General Principles on Reliability for Structures, 1998. 2)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)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. 4)中里博明ほか: 品質管理のための実験計画法テキスト, 日科技術出版社, 1985. 5)米田慶太ほか: 試設計に基づく耐震設計基準の改訂に伴う RC 橋脚および杭基礎の耐震性向上度に関する検討, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.751-762, 1999. 6)Kameda, H. and Nojima, N.: Simulation of Risk-consistent Earthquake Motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.16, pp.1007-1019, 1988. 7)川島一彦ほか: 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特性スペクトルのモデル化, 土木学会論文集, No.640/I-50, pp.119-130, 2001

表-1 抽出対象不確定要因

材料強度のばらつきの影響	
項目	記号
帯鉄筋以外が受け持つせん断耐力への影響	V_c
帯鉄筋が受け持つせん断耐力への影響	V_s
曲げ耐力への影響	V_{act}
終局変位への影響	δ_u
降伏変位への影響	δ_y
耐力算定式による計算値の実験値に対するばらつき	
帯鉄筋以外が受け持つせん断耐力算定式のばらつき	α_1
帯鉄筋が受け持つせん断耐力算定式のばらつき	α_2
終局変位算定式のばらつき	α_4
構造モデル化に伴うばらつき	
作用せん断力の推定に伴うばらつき	α_3
残留変位の推定に伴うばらつき	C_R
地震動の設定に伴うばらつき	
位相特性による弾塑性応答変位のばらつき	δ_{pd}
距離減衰式のばらつき	H

表-2 不確定要因抽出結果

影響度	S39 橋		H2 橋		H8 橋	
	要因	ρ_l	要因	ρ_l	要因	ρ_l
1	α_3	84%	α_4	74%	H	35%
2	α_4	7.3%	α_3	11%	C_R	33%
3	V_c	3.2%	δ_{pd}	8.0%	δ_{pd}	11%
4	その他	5.5%	その他	4.0%	α_3	9.5%
5	---	---	---	---	α_4	3.6%