

論文 RC 構造物の耐震安全性に影響する不確定要因の抽出

秋山 充良^{*1}・丸山 大輔^{*2}・鈴木 基行^{*3}

要旨：ISO 対応などの理由により，信頼性理論を用いた性能照査型設計法の整備に関し議論が進められている。この設計法では，構造安全性に影響する不確定要因が抽出され，その設計への対処法が検討される。本研究では，破壊確率や損失期待値などの評価指標により耐震安全性を定量化し，これに与える影響が高い不確定要因を抽出できるフローをシステム信頼性理論や実験計画法などを基に提示した。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するなどして，本手法の有用性を確認した。

キーワード：システム信頼性理論，性能照査型設計法，耐震設計，RC 橋脚，実験計画法

1. はじめに

ネットワークの一部を形成する橋梁などの土木構造物の耐震設計では，地震時の安全性を確保し，地震後においても避難路や緊急物資の搬送のため早期に復旧できる構造とする必要がある¹⁾。その際には，関係する不確定要因の大きさを考慮し，ネットワーク内の各地点に存在する橋梁構造の限界状態への到達確率(破壊確率)が設計条件などに関らず均一化された耐震設計を行うことが望ましい²⁾。

一方，兵庫県南部地震後，RC 構造の耐震解析手法は長足の進歩が見られるのに対し，地震動の設定や地盤の定数設定などには，依然として大きな不確定性が存在する。例えば，RC 橋脚・杭基礎系では，直感的に，コンクリートの圧縮強度のばらつきや RC 橋脚の応答解析の精度に比べ，地震動特性や杭基礎－地盤間ばねの設定に伴う不確定性がその系の耐震安全性に与える影響は極めて大きいと判断される。

このため，ネットワーク内に存在する橋梁構造などの耐震安全性を破壊確率や損失期待値を基に評価する耐震設計では，設計対象構造系に介在する各種不確定要因がその耐震安全性に与える影響を評価し，影響度が高いと判断された

不確定要因から，そのばらつきなどを低減する検討を行うことにより合理的な設計が可能となる。このような手法が構築されれば，性能照査型設計法への移行に伴い新材料や新構造形式の適用が図られる際，実施すべき実験のサンプル数や，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。

耐震安全性を表現する指標には，破壊確率や損失期待値など，種々の定義が考えられる。本研究では，耐震安全性を表す任意の評価指標を基に，不確定要因を影響度順に抽出できるフローをシステム信頼性理論や実験計画法などを用いて構築する。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などを考察する。

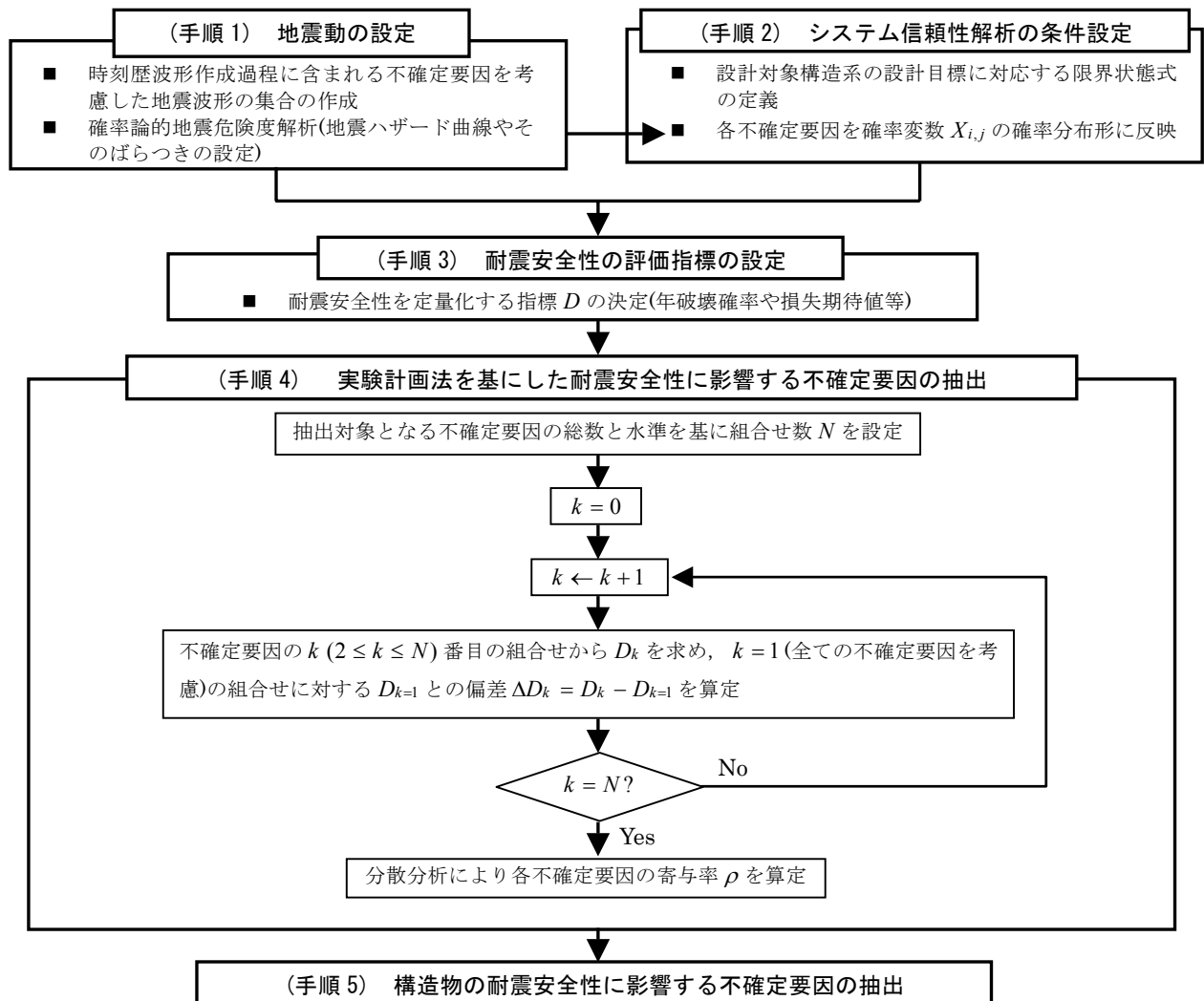
2. 耐震安全性に影響する不確定要因の抽出フロー

設計対象構造系の耐震安全性を確率的に評価する場合，式(1)の年破壊確率 p_f や右辺に記す $P_{f,sys}(\alpha)$ を基にして，耐震安全性が定量化される。

*1 東北大学講師 大学院工学研究科土木工学専攻 博(工) (正会員)

*2 日本道路公団 (正会員)

*3 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)



図－1 構造物の耐震安全性に影響する不確定要因の抽出フロー

$$p_f = \int f_{ph}(\alpha) \cdot P_{f,sys}(\alpha) d\alpha \quad (1)$$

$$f_{ph}(\alpha) = -\frac{dp_0(\alpha)}{d\alpha} \quad (2)$$

ここで、 $p_0(\alpha)$ は、地動最大加速度などで表される地震動強度が1年間に特定の値 α を超える確率、 $P_{f,sys}(\alpha)$ は、地震動強度 α が作用した下での設計対象構造系の条件付破壊確率。

そこで、設計対象構造系に介在する不確定要因から、耐震安全性に与える影響が高い要因を抽出するフローを図－1のように体系化する。フローの概要を以下に示す。

(手順1)

耐震安全性の評価に用いる地震動を設定する。地震動の評価に伴う不確定要因は、式(1)の $p_0(\alpha)$ や $P_{f,sys}(\alpha)$ の計算に関係し、確率論的地震危険度解析³⁾などを用いて定量化される。通常は、耐震安全性評価の目的に合わせ、次のよう

な不確定要因を考慮する。

・式(1)右辺の条件付破壊確率 $P_{f,sys}(\alpha)$ を基にした耐震安全性評価の場合：想定した地動最大加速度や加速度応答スペクトルに対応する時刻歴波形の作成過程に含まれる不確定性をその振幅特性や位相特性に反映する。

・式(1)の年破壊確率 p_f を基に評価する場合： $P_{f,sys}(\alpha)$ の他に、 $p_0(\alpha)$ の評価が必要であり、これは地震ハザード曲線として与えられる。

(手順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作成し、システム信頼性解析⁴⁾から $P_{f,sys}(\alpha)$ を評価するために必要な以下の条件を定義する。

・設計対象構造系の設計目標を設定し、対応する限界状態式 g_i ($i=1,2,\dots,n$)を定義する。なお、 n は考慮する限界状態の総数であり、 $g_i > 0$ は限

界状態が生起しない状態， $g_i \leq 0$ は生起する状態，すなわち破壊を表す。

・限界状態式 g_i に含まれる不確定要因を確率変数 $X_{i,j}$ ($j=1,2,\dots,m$) で表す。なお m は，限界状態式 g_i の確率変数の総数である。

確率変数 $X_{i,j}$ は，RC 橋脚のせん断耐力や地震時応答変位 δ_R などを表し，種々の不確定要因を反映した結果となる。

(手順 3)

耐震安全性を定量化する指標 D を決定する。指標 D は，式(1)の p_f や $P_{f,sys}(\alpha)$ ，地震時の損失期待値などが考えられる。

(手順 4)

不確定要因の変化に対する指標 D の増減量を基に，耐震安全性に影響する主要な不確定要因を抽出する。本研究では，以下の実験計画法により抽出を簡単化することを提案する。

s1) 抽出対象となる不確定要因の総数 L と水準を基に組合せ数 N を設定し，(手順 1)や(手順 2)で評価された不確定要因を直交表⁵⁾に割付ける。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 水準を考える。

s2) 直交表より決定される k ($2 \leq k \leq N$) 番目の不確定要因の組合せに対して，(手順 3)で設定した指標 D_k を算定し，全ての不確定性を考慮した $k=1$ に対応する $D_{k=1}$ との偏差 ΔD_k を求める。

$$\Delta D_k = D_k - D_{k=1} \quad (k=2,3,\dots,N) \quad (3)$$

総数 L の不確定要因を水準 0 または水準 1 に変化させた全ての組合せから ΔD_k などの計算を行う場合， L の大きさによりその計算量は膨大なものとなる。そこで本研究では，直交表を用いることにより組合せ数の削減を図っている。

s3) 不確定要因毎に，指標 D に与える影響の大きさを表す寄与率 ρ_i ⁵⁾ を分散分析により算定する。

(手順 5)

寄与率 ρ_i に基づき，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。

現在の RC 構造の耐震解析手法は，計算環境の向上も手伝い，大きく高精度化されたが，こ

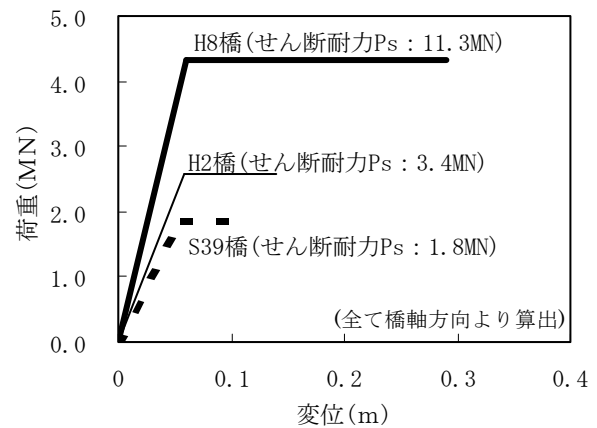


図-2 橋脚天端の荷重－変位関係⁶⁾

のような高精度化が式(1)などで評価される年破壊確率 p_f の低減にどれほどの寄与を与えているのかの議論が十分になされていない。図-1のフローは，このような問題に対し，種々の不確定要因が $p_0(\alpha)$ や $P_{f,sys}(\alpha)$ に与える影響を定量化し， p_f の低減に寄与する不確定要因を抽出する際の判断材料を与えるものである。

なお，現在，(手順 1)で行う作業には大きなばらつきがあり，全てのモデルパラメータを十分なデータに基づき評価できない。しかし，このようなパラメータに対しても，研究者毎に与えられる判断の幅³⁾を不確定要因として図-1のフローに組み入れることで，この不確定要因が構造物の耐震安全性に影響を及ぼさないような耐震設計時に用いる安全係数等を検討すれば良く，その場合にも本手法は有用と考える。

3. RC 橋脚の耐震安全性に影響する不確定要因の抽出

3.1 解析対象 RC 橋脚

図-1のフローを単柱式 RC 橋脚を対象に適用した事例を示す。本解析では，耐震設計基準の変遷による RC 橋脚の耐震安全性の向上を確率的に評価し，橋脚毎に抽出される主要な不確定要因の相違を考察するなどして，本手法の有用性を検証する。そこで，既往の耐震設計基準を満足するように試設計された米田ら⁶⁾の RC 橋脚のうち，昭和 39 年鋼道路橋示方書，平成 2 年道路橋示方書，および平成 8 年道路橋示方書で耐震設計された II 種地盤上の 3 橋脚(以下，

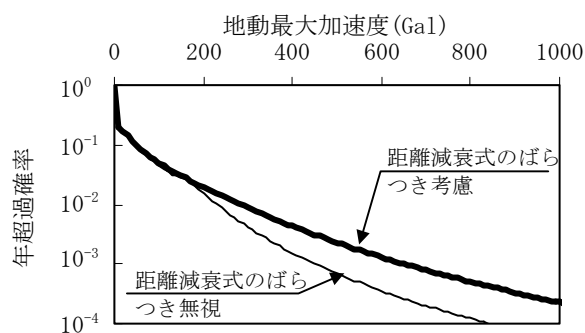


図-3 地震ハザード曲線^{7),8)}

S39 橋, H2 橋, および H8 橋)を解析対象に選択した。なお, 参考文献⁶⁾に詳述されていない断面諸量は, 曲げおよびせん断耐力が整合するように, その諸量を決定した。各橋脚の橋脚天端位置における荷重-変位関係を図-2 に示す。

3.2 解析条件

(1) 地震動の評価

地震ハザード曲線は, 次の条件で作成した。なお, 本解析では, 距離減衰式の選択の違いによるハザード曲線のばらつきなどは考慮しない。

- ・大阪周辺を対象に, Kameda and Nojima⁷⁾が示した震源モデルを用いる。
- ・地震動強度 α は地動最大加速度 α_g で表し, その距離減衰式には, 川島ら⁸⁾の II 種地盤用の式を用いる。

得られた地震ハザード曲線を図-3 に示す。図-3 には, 距離減衰式の不確定性($\ln \alpha_g$ の変動係数 52%⁸⁾)を無視したハザード曲線も示した。図-1 のフローにおいて, 用いる距離減衰式の不確定性が RC 橋脚の耐震安全性に与える影響を評価する際は, 直交表の水準に応じた図-3 のハザード曲線から式(1)の p_f を計算し, 偏差 ΔD_k にその影響を反映する。

また, 地動最大加速度 α_g に対応する時刻歴波形は, 佐藤ら⁹⁾の手法を基にした模擬地震動を用いる。模擬地震動は次の条件で作成した。

- ・模擬地震動の集合は 100 波
- ・継続時間は 60 秒
- ・位相特性は, マグニチュード M と震央距離 Δ (km)を $6.5 \leq M \leq 8.0$, $10 \leq \Delta \leq 50$ の範囲で任意に組合せてモデル化
- ・各模擬地震動は, 道路橋示方書タイプ II(II 種

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
終局変位算定法のばらつき	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

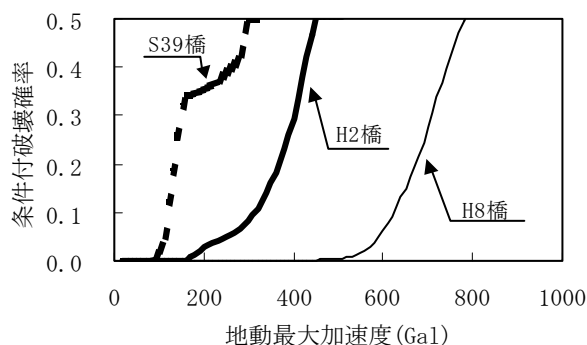
地盤)の加速度応答スペクトルに適合するように振幅調整した後, 100 波の地動最大加速度の平均 $\overline{\alpha_g}$ を求める。 α_g 作用時の橋脚の応答は, $(\alpha_g/\overline{\alpha_g})$ を掛けた波形により算出

現在, 道路橋示方書¹⁾では, 動的解析により耐震性能照査を行う場合, 3 波から得られる応答の平均値を用いることにより, 位相特性のばらつきを簡易的に考慮している。そこで, この単純化が, RC 橋脚の耐震安全性に与える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 波の動的解析より算出し, その平均値を用いて(変動係数は 0%と仮定), 後述のシステム信頼性解析により $P_{f,sys}(\alpha)$ を求める水準(水準 0)と, 100 波を用いた動的解析より得られる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, 直交表に割当てて。

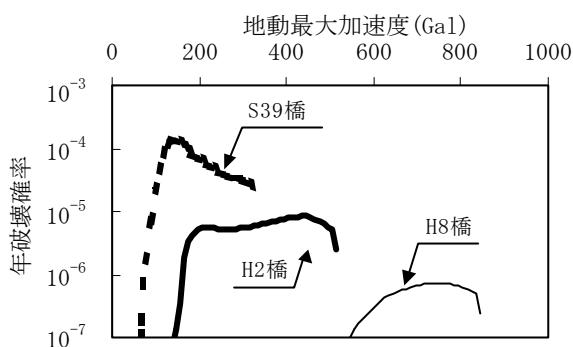
なお, 式(1)の地震ハザード曲線の設定や地震動強度 α に対応する地震動評価には種々の手法があり, 今後, 本研究で考慮できていない不確定要因が p_f に与える影響を検討する必要がある。

(2) RC 橋脚のシステム信頼性解析の条件

RC 橋脚の信頼性解析では, 橋脚の破壊形態に関らず, せん断耐力や保有水平耐力など, 多くの設計変数の関与を考慮する必要があり, 本研究では, 式(1)の $P_{f,sys}(\alpha)$ は, 参考文献⁴⁾と同じ手



図－4 地動最大加速度の作用に対する各橋脚の条件付破壊確率



図－5 解析対象橋脚の年破壊確率

法で算出した。限界状態式 g_i は、橋軸方向と橋軸直角方向に対するせん断力の照査、応答変位の照査、および残留変位の照査を表すため、 $i=1\sim6$ となり、 $P_{f,sys}(\alpha)$ は何れか一つの限界状態式が $g_i < 0$ に陥る確率を表す。なお、 $P_{f,sys}(\alpha)$ を計算時の各確率変数の分布形とそのパラメータも参考文献⁴⁾と同じとした。

(3) 抽出対象不確定要因

本研究で抽出対象とした不確定要因の一覧を表－1 に示した。

3.3 解析結果

本解析では、耐震安全性の評価指標として p_f を用いる。

図－4 に、地動最大加速度 α_g が作用した下での各橋脚の条件付破壊確率 $P_{f,sys}(\alpha)$ を示す。図－2 の荷重－変位関係の結果を反映し、H8 橋は、S39 橋に比べ高い耐震安全性を確保している。前記したように、図－1 のフローは、システム信頼性を考慮する点が特徴の一つであるが、S39 橋は、全ての地動最大加速度の範囲でせん断力の照査から決まる破壊確率により $P_{f,sys}(\alpha)$

表－2 年破壊確率

S39 橋	H2 橋	H8 橋
1.6×10^{-3}	2.2×10^{-4}	1.7×10^{-5}

表－3 不確定要因抽出結果

影響度	S39 橋		H2 橋		H8 橋	
	要因	ρ_I	要因	ρ_I	要因	ρ_I
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%

は支配され、H8 橋は、 α_g が 400Gal 程度までは応答変位の照査、650Gal 程度以上は残留変位の照査、そして、その間の α_g では、両者の照査から決まる破壊確率により $P_{f,sys}(\alpha)$ は支配されていた。このように、任意の大きさの地震力から設計対象構造系の破壊確率を評価する場合にも、システム信頼性解析を実施し、地震力の大きさにより耐震安全性に関係する限界状態が推移する可能性を考慮する必要がある。

図－3 と図－4 から求められる α_g に対する解析対象橋脚の年破壊確率を計算した結果が図－5 であり、これを基に式(1)の p_f を算出した結果が表－2 である。表－2 より、設計基準の変遷に伴い、確率的に評価される橋脚の耐震安全性が大きく向上していること、地震ハザード作成時の仮定に依存する結果ではあるが、平成 8 年道路橋示方書を満足する RC 橋脚の年破壊確率 p_f は、茂木ら¹⁰⁾により報告された RC 地中構造物からの値と同程度と見なすことができること、などが確認される。このように、年破壊確率 p_f を介することで、構造種別に関らず、均一な耐震安全性を有する耐震設計法の構築が可能となる。

次に、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主要な不確定要因を図－1 のフローに従い抽出した結果を表－3 に示す。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、耐震安全性に与える影響が大きいとして抽出された各不確定要因は、橋脚毎の特徴を良く反映した結果である。つまり、

S39 橋は、図-4 に示されるように、 α_g が小さい領域から $P_{f,sys}(\alpha)$ が増加するため、図-3 との比較から、この加速度レベルでは、距離減衰式のばらつきの影響を受けないことが分かる。そのため、不確定要因 H が抽出されないのに対し、せん断破壊型橋脚であることを反映し、作用せん断の推定に伴うばらつき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、H8 橋の場合には、a) 同じく図-3 と図-4 の比較から、距離減衰式のばらつきの考慮の有無により $p_0(\alpha)$ の値が異なる地動最大加速度の範囲で $P_{f,sys}(\alpha)$ が大きいため、この要因が p_f に強い影響を与えること、b) 図-5 に示される年破壊確率 $f_{ph}(\alpha)P_{f,sys}(\alpha)$ が大きい加速度レベルでは、橋脚が大きな非線形挙動を示すため、応答変位の照査や残留変位の照査に関する δ_{pd} や C_R のばらつきが橋脚の耐震安全性に影響すること、c) 材料強度のばらつきは、年破壊確率 p_f で評価される耐震安全性に何ら影響を及ぼさないこと、を反映した抽出結果となっている。このように、図-1 のフローを用いることで、橋脚毎の耐震安全性に影響する主要な不確定要因が抽出され、耐震安全性を合理的に向上させるために必要な情報が提供される。

なお、本解析の条件下では、例えば、H8 橋において、 δ_{pd} が橋脚の耐震安全性に与える影響が大きいと判断されたため、設計時の動的解析に用いる波の数とそのばらつきの扱いに注意が必要であることが示唆された。しかし、影響度の順位付けの目安となる寄与率 ρ_l のみでは、この不確定要因に対する設計時の対応を決定できない。そこで、例えば、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)に対し、 δ_{pd} の寄与率 ρ_l が有意と見なせなくなる水準 0 の設定のあり方を検討するなどして、設計時の位相特性のばらつきへの対処法を決める作業が必要になる。

4. まとめ

破壊確率や損失期待値などの評価指標により

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システム信頼性理論や実験計画法などを基に提示した。

また、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。本手法を用いることにより、効率的に耐震安全性を高めるための情報が提供され、耐震設計時に考慮すべき不確定要因の判断が可能になるなど、その有用性が示された。

今後は、本手法の RC 橋脚・杭基礎系等への適用を図り、また、地震危険度解析を反映した動的解析用地震動を種々の手法により作成するなどして、本研究で考慮できていない不確定要因の RC 構造物の耐震安全性に与える影響を評価する予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002
- 2) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986
- 3) 地震工学委員会レベル 2 地震動研究小委員会：レベル 2 地震動の明確化に向けて，土木学会論文集，No.675/I-55，pp.15-25，2001.4
- 4) 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，No.718/V-57，pp.1-17，2002.11
- 5) 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
- 6) 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.751-762，1999.3
- 7) Kameda, H. and Nojima, N.: Simulation of Risk-consistent Earthquake Motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.16, pp.1007-1019, Aug. 1988
- 8) 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，1985.9
- 9) 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
- 10) 茂木寛之ほか：RC 地中構造物の破壊モードに対する確率論的耐震安全性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1123-1128，2002.6