

## フラジリティカーブを用いた免震橋梁の耐震安全性評価

東北大学大学院 学生員 伊東 佑香  
 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  
 日本道路公団 正会員 丸山 大輔

### 1. はじめに

免震橋梁では、支承におけるエネルギー吸収能と長周期化による地震動の低減が期待でき、世界第一級の地震国である我が国の橋梁構造の耐震安全性を合理的に確保する構造形式として、今後も広く活用されると思われる。一方、免震支承を支持する RC 橋脚は、支承に塑性化を集中させる目的から、許容変位が小さく設定され、さらに、設計震度の下限値規定や免震支承に課せられた基本性能の高さから、他の橋梁構造に比し免震橋梁への過剰な耐震安全性の付与が指摘されている。橋梁構造に求める目標信頼性レベルは種々の指標を基に議論されるべきであるが、近年の ISO 対応などへの設計基準類の国際化の中では、信頼性理論により免震橋梁の耐震安全性の大きさを破壊確率を指標として表し、それに与える影響が大きい不確定要因を見極めた上で、現行の設計基準で考慮する種々の安全係数や規定条項の見直しを図ることが望ましい。本稿は、その基礎的研究として、免震橋梁の信頼性解析を実施し、その耐震安全性レベルの大きさや各不確定要因の影響を論じたものである。

### 2. フラジリティカーブの作成

免震橋梁は、支承のハードニングやマルチヒンジの形成など、その非線形挙動が地震力レベルにより複雑に変化するため、全ての地震動強度を対象に耐震安全性レベルを定量化できるフラジリティカーブを用いる。解析対象は、道路橋示方書<sup>1)</sup>を満足するように耐震設計された一般的な免震橋梁である。破壊確率はシステム信頼性を考慮したモンテカルロ法により、i)材料特性等のばらつきを反映した動的解析モデルの作成と終局変位等の耐力項(R)の算定、ii)模擬地震動の作成、iii)模擬地震動を用いた動的解析による荷重項(S)の算定および耐力項(R)と荷重項(S)の比較による破壊確率の算定、の3つのプロセスから求められる。

i)では、鉄筋とコンクリートの材料特性と断面寸法、上下部構造の重量および支承の剛性と強度を足立<sup>2)</sup>の提示した統計量(平均値,変動係数)に従い,正規乱数を発生させることで変動させ,動的解析モデルを作成する。また,破壊確率は橋脚のせん断耐力と作用せん断力,終局変位と応答変位,残留変位と許容残留変位,および支承の破断ひずみと応答ひずみ,の4つの照査から算定<sup>3)</sup>するため,各統計量を反映した支承の破断ひずみなどの耐力項(R)も求める。ii)では,位相特性のばらつきを佐藤ら<sup>4)</sup>の手法により考慮した模擬地震動を1,000波作成し,これを道路橋示方書<sup>1)</sup>に規定されるタイプII地震動(I種地盤)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,設定する地動最大加速度 $\ddot{a}_g$ 毎に拡大・縮小する。iii)では,動的解析を実施し,前記した作用せん断力などの荷重項(S)を算出し, $R < S$ となる回数 $n$ を求め,破壊確率 $Pf_{sys}$ を $Pf_{sys} = n / 1,000$ として算出する。フラジリティカーブは, $\ddot{a}_g$ が100Galから2,500Galまで100Gal刻みで計算した破壊確率を基に,対数正規尤度の最大化を基準とする最尤推定法による近似曲線として与えた。地動最大加速度は,過剰な安全性を有する免震橋梁の耐震安全性レベルを見極め,また,支承のハードニングなど過大入力を受けることにより発生する現象を把握するため,その最大値を2,500Galに設定している。動的解析を行う際には,免震支承とRC橋脚を2質点系に置換し,履歴復元力特性は免震支承にハードニングを考慮したバイリニアモデル,RC橋脚にTakedaモデルを用いた。

### 3. 解析結果

前記の解析条件で作成したフラジリティカーブを図-1に示す。用いた模擬地震動は, $\ddot{a}_g$ が概ね650Gal程度で道路橋示方書の加速度応答スペクトルに一致するが,それを大幅に上回る過大入力の作用に対しても十分な安全

Key Words : フラジリティカーブ, 耐震安全性評価, 免震橋梁, 不確定要因, 破壊確率, 位相特性

連絡先 : 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06, TEL : 022-217-7449, FAX : 022-217-7448

性を有し、それは著者ら<sup>3)</sup>が提示した他の橋梁構造よりも過剰に高い。今後、提示したフラジリティカーブを基に、このような過剰な安全性を生む設計上の要因を検証する必要がある。

図-1には、支承の履歴復元力特性としてハードニングの影響を無視した解析結果を示す。また図-2には、位相特性のばらつきの影響を検討するため、モンテカルロ法を行う際の地震動として、任意に抽出した3波および7波を用いる場合と1,000波全てを用いる場合の解析結果を示す。図-1より、本検討の範囲内では、支承にハードニングが発生しても確率的に評価される免震橋梁の耐震安全性に与える影響は小さい結果となった。これは、確定的に実施する動的解析の範囲では、支承の履歴モデルにハードニングを考慮した場合、支承部の履歴吸収エネルギーの減少分が橋脚部で負担されるため、橋脚の応答変位は増加するが、この増加が橋脚終局変位と応答変位の比較から算定される破壊確率に大きな影響を与えなかったためである。なお、図-1の破壊確率は、前記したように、支承および橋脚に設けた4つの限界状態の何れか一つを超過したときを破壊とするシステム破壊確率であるが、この破壊確率は橋脚終局変位と応答変位の比較から算定される破壊確率で近似されている。

図-2では、用いる地震動の数を大きくすることにより、1,000波から得られるフラジリティカーブに漸近することが確認される。勿論、3波のみを用いた解析でも、その組み合わせにより1,000波から得られるフラジリティカーブに一致する結果も得られるが、本来評価されるべき1,000波の結果を過小評価する危険性が高くなる。免震橋梁は、通常、3波を用いた動的解析により得られる応答値の平均を用いて耐震設計されるが、図-2の結果を見る限り、それは位相特性のばらつきを十分には考慮していないと言える。

#### 4.まとめ

本研究より、地震動の位相特性は、免震橋梁の耐震安全性に影響する重要な不確定要因であることが分かった。しかし、現行の設計基準を満たす免震橋梁は、過剰な耐震安全性を有しており、その結果としてこの不確定性が現実的なレベル2地震動の設定の範囲では問題とならない。今後は、フラジリティカーブを基に、この過剰な耐震安全性を生む要因の特定と、免震橋梁のより合理的な設計体系を構築するため、他の橋梁構造が有する破壊確率 $Pf_{sys}$ などを基準に、安全係数や設計基準の規定条項の見直しを提案していきたい。

#### 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) 足立幸郎：激震動下における免震橋梁構造の信頼性評価と限界状態設計法に関する研究，京都大学学位論文，2002.
- 3) 秋山充良，松中亮治，土井充，鈴木基行：信頼性理論を用いた構造最適設計手法の提案およびRC橋脚の耐震安全性評価への適用，土木学会論文集，No.662/V-49，pp.185-204，2000.
- 4) 佐藤忠信，室野剛隆，西村昭彦：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 - 130，2001.

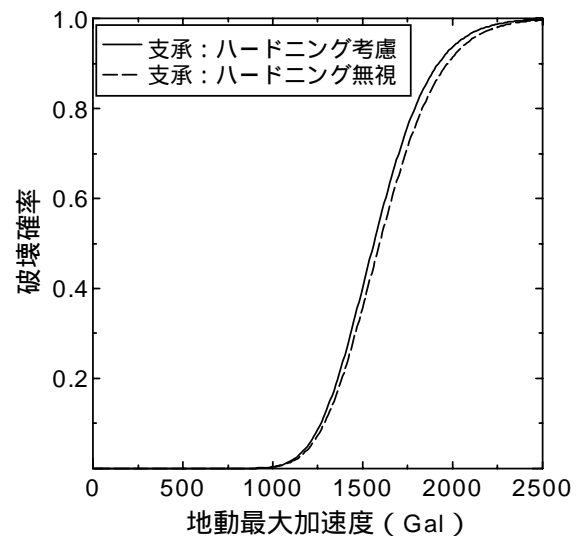


図-1 免震橋梁のフラジリティカーブ

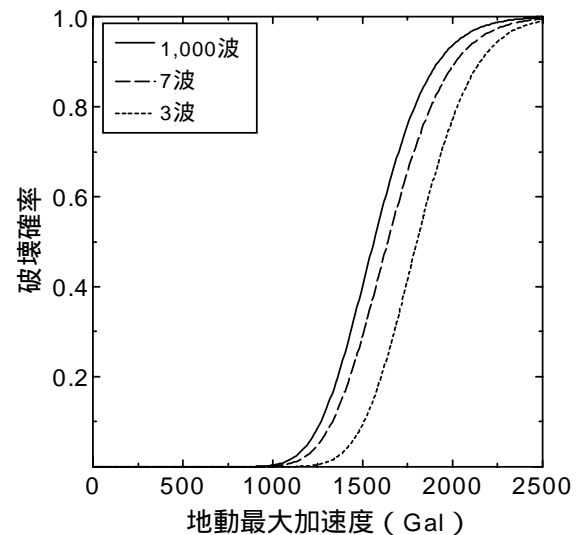


図-2 位相特性のばらつきが免震橋梁の耐震安全性に与える影響