

I - 44

免震橋梁の耐震安全性に影響する不確定要因の抽出

東北大学 学生会員 ○伊東佑香

東北大学 正会員 秋山充良

東北大学 フェロー 鈴木基行

1. はじめに

免震橋梁では、支承のエネルギー吸収能と長周期化による地震力の低減が期待でき、世界第一級の地震国に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安全性の付与が指摘されている。橋梁構造に求める目標安全性レベルは、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. 解析方法

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、地震動強度を固定した耐震信頼性解析¹⁾ではなく、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。フラジリティカーブの作成フローを図-1に示す。解析対象は、道路橋示方書²⁾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などの耐力項(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Rと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定数、および支承の剛性と強度を足立³⁾の提示した各統計量に従い変動させ、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⁴⁾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⁴⁾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²⁾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へ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 $\ddot{a}_g$ 毎に波形を拡大・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から、破壊確率 $P_{f_{sys}}$ は $P_{f_{sys}}=n/1,000$ として算出される。フラジリティカーブは、 $\ddot{a}_g$ が250Galから2,000Galまで250Gal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規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、

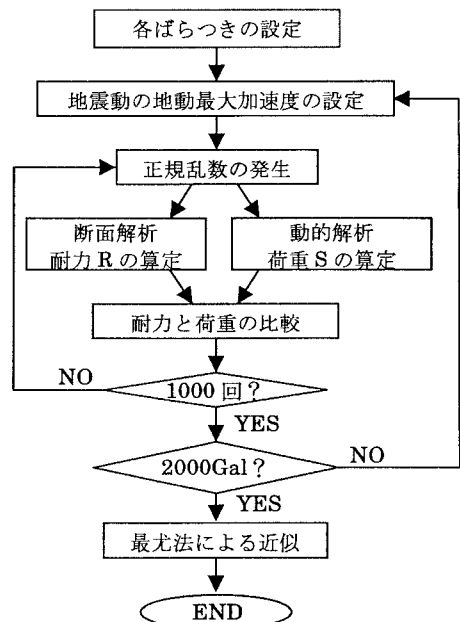


図-1 フラジリティカーブの算出のフロー

その最大値を 2,000Gal にしている。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-2 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的作用に対しても十分な安全性を有し、それは著者ら¹⁾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。

次に、各不確定要因が、免震橋梁の耐震安全性に与える影響を考察する。図-2 には、支承のハードニングを無視した場合、図-3 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模擬地震動の数を 3 波、7 波、10 波および 1,000 波とした場合の解析結果を示す。図-2 より、ハードニングを無視することにより実際の免震橋梁の耐震安全性が過小評価される。これは、支承にハードニングが生じると、急激に橋脚に伝達されるせん断力が大きくなり、その結果として、橋脚の応答変位が増加し、橋梁全体として算定される Pf_{sys} がハードニングを考慮していない場合に比べ大きくなるためである。図-2 より支承のハードニングを正しく評価することの重要性が理解され、このばらつきは、免震橋梁の耐震安全性に大きく影響する不確定要因であることが分かる。実際には、設計上の種々の安全側の配慮により、このハードニングが生じよう地震力の作用は考えられないが、フラジリティカーブを用いることにより、耐震安全性上好ましくない現象の生起を抑えることが可能な $\ddot{a}_g$ の限界レベルを定量的に把握できる。図-3 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 波の動的解析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-3 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、支承のハードニングと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、その結果としてこれら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) 秋山充良ほか：信頼性理論を用いた構造最適設計法の提案及び 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。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002。
- 3) 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。
- 4) 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.119-130，2001.1

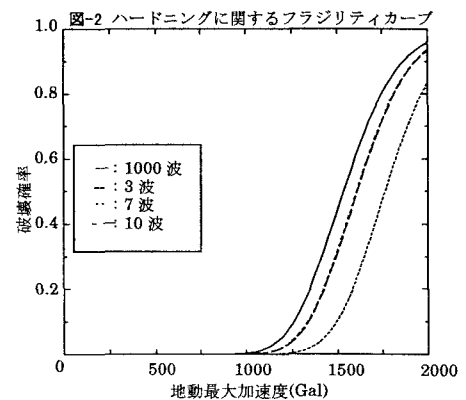
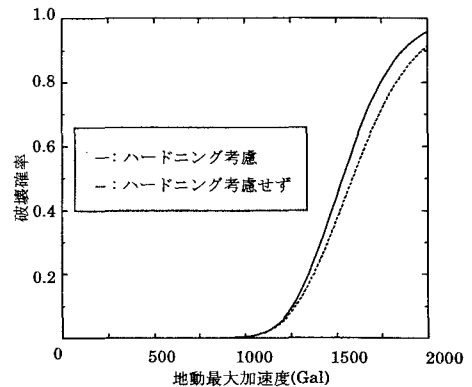


図-3 地震動の位相特性に関するフラジリティカーブ