

既存橋梁システムの耐震性能計算への応答曲面代替モデルの適用に関する検討

横浜国立大学 学生会員 ○北原 優
横浜国立大学 正会員 西尾 真由子

1. はじめに

既存橋梁は、将来の地震リスクに対する性能を老朽化等も考慮して把握するには数値モデルを用いた地震応答解析での構造信頼性計算が有効であるが、このとき、既存橋梁は桁・支承・橋脚・基礎などの各構造要素が相互に関連して性能を発揮する構造システムであることを無視できず、橋梁全体系を適切にモデル化して、劣化等の構造パラメータ不確定性を考慮した非線形時刻歴応答解析を行うことが求められる。また検討する不確定パラメータが多くなると、膨大なサンプル数でのモンテカルロ(Monte Carlo: MC)計算を行う必要があり、これに橋梁全体系モデルの非線形解析(「構造解析」)を繰り返すと、計算負荷が膨大となってしまう。

本研究では、この橋梁全体系での MC 計算に構造解析を繰り返すのではなく、あらかじめ不確定パラメータの変動と照査応答の関係を表す応答曲面代替モデルを構築し、これを MC 計算に用いることを提案し、その有効性を検証した。

2. 非線形性を示す照査応答への応答曲面の適用

はじめに、図 1 に示す基礎的な 4 自由度系構造モデルを対象に、非線形性を示す照査応答への応答曲面代替モデルの適用について検討した。このモデルは剛性 k_4 に図 1 に示す非線形性を導入しており、ここではこの非線形性に影響を与えるパラメータである GAP に平均値 0.01mm と標準偏差 0.16 の正規分布のばらつきを、 Δ に平均値 0.3mm と標準偏差 0.13 の正規分布のばらつきを与え、ランダム波を入力したときの最上部の最大加速度を照査応答として検証を行った。

照査応答とパラメータの関係を把握するために、パラメータの変動を考慮して 300 点のラテン超方格サンプリング(LHS)を行い、各サンプル点に対して算出した照査応答の分布は図 2 に示した通りであり、照査応答が非線形性を示すことが確認できた。

応答曲面とは、実験計画に基づいて算出した照査応答値の回帰分析により得られる、照査応答とパラメータの関係を表す近似関数であり、1 次もしくは 2 次程度の多項式を用いるのが一般的である。ところが図 2 のように照査応答が非線形性を示す場合、近似精度が不十分であることが考えられる。これに対して本研究では、より高次の多項式で関数近似を行うことで応答曲面関数の近似精度が向上することを明らかにした。

3. 橋梁モデルの構築とパラメータ不確定性

次に、基礎的な橋梁構造システムとして、文献²⁾の I 種地盤上における鉛入り積層ゴム支承を有する橋脚モ

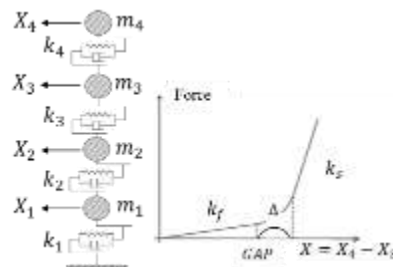


図 1 4 自由度系構造モデル

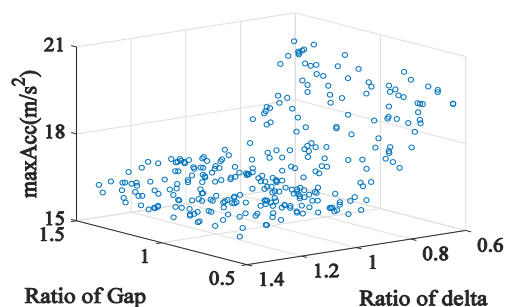


図 2 照査応答とパラメータの関係

表 1 1 径間免震橋梁モデルの諸元

上部構造	質量	120800kg
免震支承	降伏荷重	940800N
	1 次剛性	40023200N/m
RC 橋脚	質量	326300kg
	降伏荷重	3374kN
	降伏変位	0.0306m
	降伏剛性	110.1MN/m
	終局変位	0.2735m

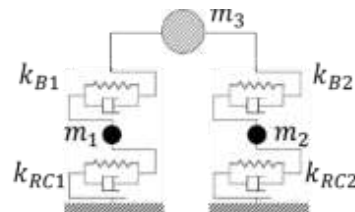


図 3 1 径間免震橋梁モデル

デルの緒元をもとに、図 3 に示す 1 径間免震橋梁モデルを構築した。モデル緒元は表 1 の通りであり、橋脚および支承の緒元は左右で同一とした。時刻歴応答解析には Newmark β 法($\beta=1/4$)を用いた。免震支承の骨格曲線はバイリニア型モデルを用いており、1 次剛性と 2 次剛性の比は $K_1:K_2=1:0.15$ とした。RC 橋脚には完全弾塑性バイリニア型モデルを適用した。構造減衰に関し

キーワード モンテカルロ計算, 代替モデル, 応答曲面, 耐震性能, 既存橋梁

連絡先 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 TEL 045-339-4243

ては、各要素の減衰定数を免震支承は 0%, RC 橋脚は 5%とし Rayleigh 減衰を導入した. 入力地震動には設計地震動 Type II-I-1 を用いた.

MC 計算で考慮する構造パラメータ不確定性は、上部構造の重量、RC 橋脚(×2 基)の重量、免震支承(×2 基)の 1 次剛性、2 次剛性、降伏荷重の 9 つとした. その上で既存橋梁の耐震性能を評価するため、免震支承の劣化を考慮する場合も含めて 3 つの検証ケースを設定した. ①全ての構造要素が健全で初期不確定性しか持たない場合、②左側の支承のみ劣化を認めている場合、③両方の支承劣化を認めている場合、である. ①のケースでは、各パラメータに表 1 に示す平均値と変動係数 5% の正規分布のばらつきを設定した. ②③のケースでは、劣化を認めている支承に対して、既往文献³⁾に基づき、1 次剛性と 2 次剛性が表 1 に示した初期値の 1.2 倍、切片荷重が初期値の 0.5 倍とした平均値を与え、変動係数が 10%の正規分布とした.

4. 応答曲面代替モデルの構築

①から③の各ケースについて、左右の橋脚および支承の最大変位を照査応答としてそれぞれ応答曲面を構築した. 本研究では、試行回数 10000 回の MC 計算を想定して、サンプル数がこれよりも十分小さくなるように、応答曲面関数を 220 の項を持つ 3 次多項式として、全ての相互作用項を考慮した. この関数を決定するには、最低でも項数以上のサンプル数が必要であり、サンプル数が多いほど近似精度は向上する. 本研究では、項数の 1.5 倍の 330 点とし、パラメータの変動を考慮して LHS を行い、各サンプリング点に対して算出した照査応答値の回帰分析により応答曲面を構築した. 応答曲面関数の自由度調整済み決定係数は全て 0.9 以上であり応答値を十分説明できていると判断した.

5. 代替モデルによる耐震性能評価

性能評価計算では、試行回数を 10000 回とし、①から③の各ケースについて、パラメータの確率分布において乱数発生を行い、それを前章で構築した応答曲面関数に代入する代替モデル MC 計算により左右の橋脚および支承の最大変位の分布を求めた. また比較のため、同じく試行回数 10000 回の構造解析 MC 計算を行った. その上で文献³⁾に基づき、橋脚の許容変位 0.055m(安全係数 $\alpha=2.4$)および支承変位から得られるせん断ひずみ 250%を限界状態としてその超過確率を算出した. 表 2 に代替モデルおよび構造解析での MC 計算で算出した左右の橋脚の超過確率および構造要素のうちいずれか 1 つでも限界状態を超える場合を橋梁構造システムとしての超過確率をまとめた. ここでは LHS がパラメータの変動範囲に対してサンプリング点を確率的に選択するために、構築する応答曲面関数および MC 計算により得られる超過確率が安定しない可能性があることを考慮して、代替モデル MC 計算については、LHS を 5 回行い、それぞれ応答曲面を構築して超過確率を算出しており、表 2 にはこの超過確率の平均値と標準偏差を示した. なお支承は全ケースでせん断ひず

表 2 代替モデルと構造解析での MC 計算結果の比較

ケース		代替モデル		構造解析
		平均値	標準偏差	
①	左側橋脚	4.5%	0.56%	4.7%
	右側橋脚	4.0%	0.57%	4.3%
	システム	7.8%	0.79%	8.5%
②	左側橋脚	18.3%	1.07%	16.2%
	右側橋脚	81.4%	1.14%	76.5%
	システム	84.4%	1.16%	79.6%
③	左側橋脚	80.0%	0.44%	80.6%
	右側橋脚	80.3%	0.66%	81.1%
	システム	94.2%	0.60%	94.4%

み 250%以内に収まった.

表 2 より支承の劣化に伴う超過確率の増加が認められたが、これは支承の劣化によりエネルギー吸収性能が低下し、橋脚の塑性化が進展したためだと考えられる. さらに構造要素だけでなく橋梁構造システムとしての性能評価を行うことで耐震性能の過小評価が避けられること、橋脚と橋梁構造システムでは超過確率が最大となるケースが異なり、既存橋梁の耐震性能を把握するには橋梁構造システムとしての耐震性能評価を行うことが重要であることを示せた.

最後に、代替モデルおよび構造解析による MC 計算の比較を行うと、②では代替モデルおよび構造解析での超過確率には 6~13%程の誤差が認められたが、特に③について、両者の誤差は 1%以内に収まっており代替モデルにより精度良く超過確率を算出できた. また MC 計算に要する時間は代替モデルでは 2100s、構造解析では 63400s 程度であり、代替モデルを用いることで計算効率が 30 倍程高くなった.

6. おわりに

本研究では、応答曲面代替モデルによる MC 計算を行うことで、既存橋梁の耐震性能を橋梁構造システムとして効率的に評価できる可能性を示せた. 今後、橋梁構造システムを拡張して径間が増えることや、基礎や地盤の影響を考慮することを想定し、検討するパラメータがさらに増加した場合にも、応答曲面代替モデルが有効な手法となり得るかを検討していくことが課題となる.

参考文献

- 1) Mayuko. N. : Feature Extraction for Structural Dynamics Model Validation, Proceedings of the 29th IMAC, A Conference on Structural Dynamics, pp.153-163, 2011
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善出版, 1997
- 3) 松崎裕ら: 免震支承—RC 橋脚間の耐力比および免震支承の経年劣化と免震橋における地震時損傷部材の関係に関する基礎的研究, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.265-268, 2016