

免震支承のハードニング特性が斜張橋の耐震性に与える影響の確率論的考察

九州大学 学生員 児玉 学 九州大学大学院 フェロー 大塚 久哲  
九州大学大学院 正会員 古川 愛子

1. はじめに

近年、構造物に含まれる様々な不確定要因を信頼性設計により評価しようという機運があるが、免震橋梁の設計に関しては、現状では確定論的な扱いがなされており、構造特性のばらつきを考慮した設計法の確立には至っていない。また免震支承は大変形時にせん断剛性が急激に大きくなるハードニング現象が生じるが、現状ではハードニング特性を考慮に入れた設計は行われていない。しかし、構造特性のばらつきを考慮した場合、免震支承の応答にばらつきが生じ、ハードニングの領域に入ることが予想され、これを考慮する必要がある。

そこで本研究では、ハードニング特性を考慮したモデルと考慮しないモデルに対して、構造物に含まれる様々な不確定要因を考慮した信頼性解析を行うことで、ハードニング特性が斜張橋の耐震信頼性に与える影響の検討を行った。

2. 解析概要

2.1 解析モデルと解析手法

解析の対象とした斜張橋の橋梁全体一般図を図-1に示す。主塔・橋脚はRC製、桁は鋼2箱桁とし、床版と主桁とは非合成構造とした。主桁・横梁は線形梁要素、ケーブルは線形棒要素、RC主塔とRC橋脚は非線形梁要素としてモデル化を行った。RC部材の材料非線形特性は骨格曲線としてトリリニア型、復元力特性として武田モデルを用いた。基礎と地盤の結合条件は、線形バネ要素として扱った。免震支承の復元力特性は、ハードニング特性を考慮しない場合はバイリニア型とし、ハードニング特性を考慮に入れる場合は図-2に示すようなトリリニア型とした。解析手法は直接積分法のNewmark法(=0.25)を用いた。積分時間間隔は0.005秒、減衰はレーリー減衰とした。検討は橋軸方向を対象とし、入力地震動は道路橋示方書<sup>1)</sup>の標準波形(Type- - -1)とした。

損傷度指標として、最大変形に着目した指標(RC部材：応答塑性率、免震支承：最大せん断ひずみ)と、累積吸収エネルギーに着目したエネルギー靱性率<sup>2)</sup>を用いた。損傷度指標の着目部材は、P1橋脚、P2橋脚、P2主塔で最も損傷度指標が大きくなったP1橋脚基部、P2橋脚基部、P2主塔中央とした。免震支承については、P1支承、P2支承とした。

2.2 モンテカルロシミュレーション(以下、MCSと略す)

本研究では、構造特性の不確定性を考慮に入れたMCSにより、ハードニング特性の考慮の有無が耐震信頼性に与える影響を検討する。解析に用いた不確定要因とその変動係数を表-1に示す。平均値として道路橋示方書<sup>1)</sup>に準拠して試設計されたモデルを用いた。入力地震動の最大加速度(PGA)を400galから1200galまで振幅調整し、様々なレベルのPGAに対してMCSを行うことで、ハードニングの程度が各主要部材の耐震信頼性に与える影響についても検討した。なお、MCSの試行回数は1000回とした。

3. ハードニング特性が確定論的解析結果に与える影響

構造特性の変動を考慮しない確定論的解析によりハードニングの影響を検討した。図-3にバイリニアモデルの解析結果を、トリリニアモデルの解析結果で除したものを示す。  
・P1, P2 支承: 図-3より、ハードニング特性を考慮に入れたトリリニアモデルを用いた解析結果を真値とした場合、ハードニングを考慮しないバイリニアモデルを用いた解析は、支承のせん断ひずみを過大評価し、エネルギー靱性率を過小評価する。これは、ハードニングを考慮したモデルでは剛性の増加により支承の変位が抑えられ、同時に支承の履歴吸収エネルギーが増加するためと考えられる。

・P1, P2 橋脚基部: 図-3より、P1・P2橋脚の応答塑性率は、P2橋脚基部の800galにおける応答を除き、モデル化の違いの影響をほとんど受けないが、エネルギー靱性率はPGAの増  
キーワード ハードニング特性、免震支承、構造特性の不確定性、耐震信頼性  
連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡744 TEL 092-802-3374

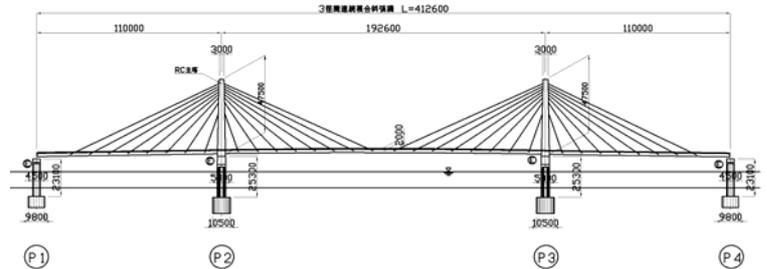


図-1 全体一般図(単位 mm)

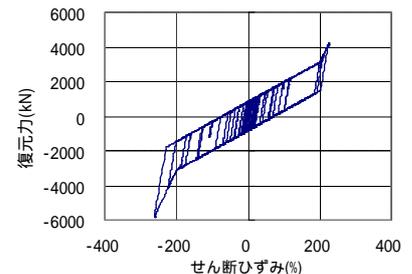
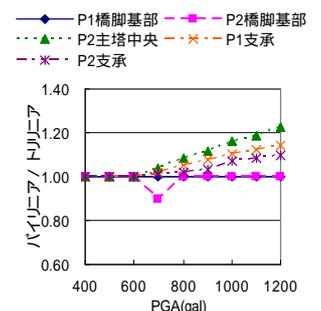


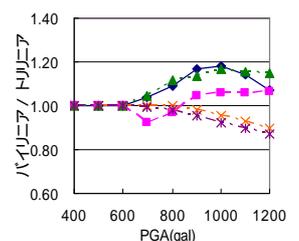
図-2 免震支承のハードニング特性を考慮したモデル化の例

表-1 不確定要因とその変動係数の値

不確定要因		変動係数(%)
RC部材	剛性	10
	降伏耐力	10
	第1剛性低下率	10
	第2剛性低下率	10
免震支承	剛性	10
	降伏耐力	14
	剛性低下率	10
主桁	剛性	10
ケーブル	剛性	10
地盤	剛性	60



(a) 応答塑性率とせん断ひずみ



(b) エネルギー靱性率

図-3 確定量解析結果の比較

加に伴いバイリニアモデルの方が大きくなっている。これはハードニングが橋脚に対して相反する2つの影響を及ぼすためであると考えられる。1つ目は支承の剛性増加による橋脚に伝わる慣性力の増大、2つ目は支承のエネルギー吸収量の増加による他部材の吸収エネルギーの減少である。その為、ハードニングを無視した設計は、橋脚の損傷度指標を危険側にも安全側にも評価し得る。

次に、橋脚基部の応答塑性率がハードニングの影響をほとんど受けない理由について考察する。図-4に800galにおけるP1橋脚基部、P1支承の応答波形を示す。図-4より、P1橋脚基部の曲率が最大となるのは両モデルともハードニングが生じる前である。ハードニングが生じた後、両モデル化の有無による差が見られるが、応答が小さい範囲での影響となり、最大変形のみを取り出す応答塑性率には影響を及ぼさない。一方、700galにおけるP2橋脚基部の応答はトリリニアモデルでの解析結果のほうが大きく危険側の評価となっている。700galにおけるP2橋脚基部とP2支承の応答波形を図-5に示す。図-5より、P2橋脚基部の曲率が最大となるのは、ハードニングが生じた後となっており、ハードニングの影響がP2橋脚基部の最大変形に表れている。以上のように、橋脚と支承の振動モードは異なり、それぞれが最大値をとる時間にずれが生じるため、ハードニングが生じる前に橋脚で最大曲率が生じる場合は、応答塑性率比にモデル化の有無による差は生じないが、ハードニングが生じた後に最大曲率をとる場合は、応答塑性率比にもモデル化の有無による差が生じ得るといえる。

・P2主塔中央：図-3より、PGAの増加に伴い、バイリニアモデルの方が両損傷度指標ともに大きく安全側の評価を与えている。これは、支承のエネルギー吸収量増大に加え、支承の応答低減により主塔の応答が小さくなったためと考えられる。

4. 信頼性解析結果

まず初めに、ハードニング特性の考慮の有無が信頼性解析結果に与える影響を検討する。図は省略するが、MCSによって得られた損傷度指標の平均値についてもバイリニアモデルとトリリニアモデルで比をとったところ、確定論的解析結果の図-3と同様の傾向を示した。しかし、確定論的解析に比べ、P1・P2橋脚における両モデルの差は小さなものとなった。これは、構造特性の変動の影響に比べハードニングの影響の方が小さく、構造特性の変動を考慮したMCSではハードニングの影響が埋もれてしまうためと考えられる。

次に、構造特性の変動のみを考慮したMCS、構造特性の変動とハードニング特性の両方を考慮したMCSと、いずれも考慮しない解析結果を比較することで、構造特性の変動とハードニングのそれぞれの影響を考察する。図-6, 7にバイリニアモデルの確定量解析結果をバイリニア・トリリニア両モデルのMCS結果の平均値で除した値を示す。最大変形に関して、P1・P2橋脚に与える影響は、全PGAで構造特性の不確定性の影響の方が大きい。一方、P2主塔は700gal以上のハードニングのレベルが大きい領域では構造特性の不確定性よりハードニングの影響の方が強く表れている。P1・P2支承もPGAが大きい領域では、構造特性の不確定性よりハードニングの影響の方が強い。エネルギー吸収量に関しては、いずれの部材も構造特性の影響の方が大きい。800gal以上の大きいPGAではハードニングの影響も見取れる。

5. まとめ

本研究では、免震支承のハードニング特性のモデル化の有無が斜張橋の耐震信頼性に与える影響について検討した。ハードニング特性を考慮しないバイリニアモデルは、橋脚の応答を危険側にも安全側にも評価し得る恐れのあること、主塔の応答は安全側の評価となることがわかった。また、最大変形に関して、橋脚はハードニング特性より構造特性の不確定性の影響を強く受けること、主塔は大きなPGAではハードニングの影響が大きいこと、エネルギー吸収量に関しては、構造特性の影響の方が大きい。PGAが大きくなればハードニングの影響も表れることがわかった。

参考文献 1) 日本道路協会：道路橋示方書耐震設計編，2002 2) 別宮稔史：構造特性と入力地震動の不確定性を考慮に入れた斜張橋の耐震信頼性に関する研究，九州大学修士論文，2006

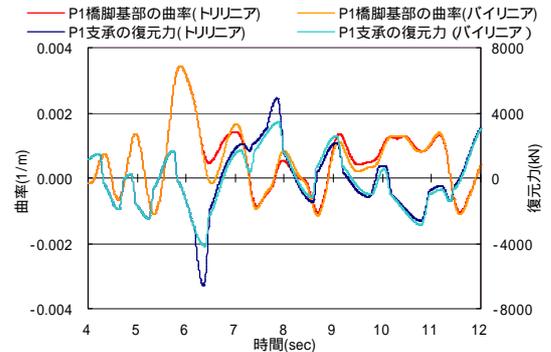


図-4 800galにおけるP1橋脚とP1支承の応答波形

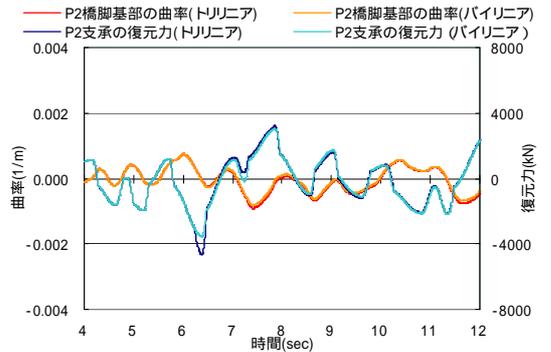
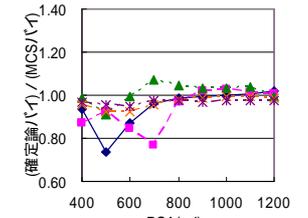
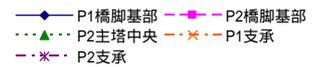
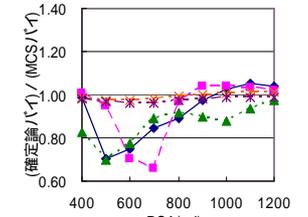


図-5 700galにおけるP2橋脚とP2支承の応答波形

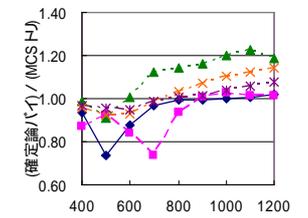


(a) 応答塑性率とせん断ひずみ

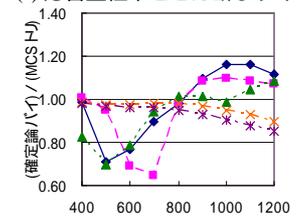


(b) エネルギー塑性率

図-6 確定量解析結果とMCS結果の平均値(バイリニア)との比較



(a) 応答塑性率とせん断ひずみ



(b) エネルギー塑性率

図-7 確定量解析結果とMCS結果の平均値(トリリニア)との比較