免震支承のハードニング特性が免震斜張橋の耐震信頼性に与える影響について

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

構造物は，材料・幾何学特性や施工精度の変動性等，数多くの不確定要因を含んでいる．従来の確定論的な設計法では示方書で定められた確定量と安全率を用いることでこれらの影響を考慮してきたが，近年は信頼性設計により評価しようという機運がある．しかし，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．

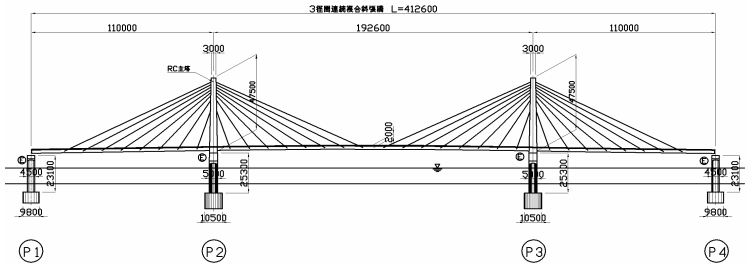


図-1　全体一般図(単位 mm)

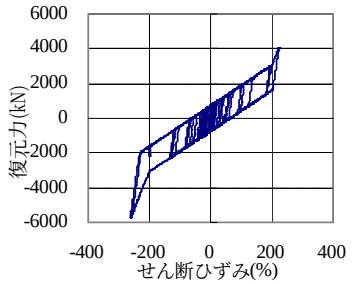


図-2　免震支承のハードニング特性を考慮したモデル化の例

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 β法(β=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V編[1]の標準波形(Type-Ⅱ-Ⅱ-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靭性率[2]を用いた。

表-1 不確定要因とその変動係数の値

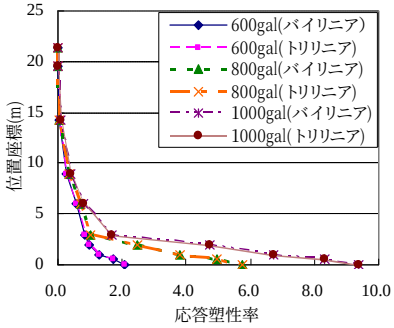
不確定要因		変動係数
RC部材	初期剛性	10%
	降伏耐力	10%
	第1剛性低下率	10%
	第2剛性低下率	10%
免震支承	初期剛性	10%
	降伏耐力	14%
	剛性低下率	10%
主桁	剛性	10%
ケーブル	剛性	10%
地盤	剛性	60%

2.2　モンテカルロシミュレーション(以下，MCSと略す)

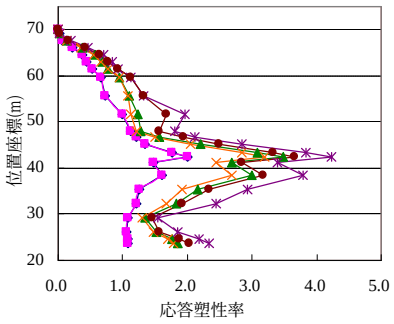
本研究では，構造特性の不確定性を考慮に入れたMCSにより，ハードニング特性の考慮の有無が耐震信頼性に与える影響を検討する．解析に用いた不確定要因とその変動係数を表-1に示す．平均値として道路橋示方書[1]に準拠して試設計されたモデルを用いた．入力地震動の最大加速度(PGA)を500galから1000galまで振幅調整し，様々なレベルのPGAに対してMCSを行うことで，ハードニングの程度が各主要部材の耐震信頼性に与える影響についても検討した．なお，MCSの試行回数は1000回とした．

3．ハードニング特性が確定論的解析結果に与える影響

MCSの実施に先立って，構造特性の変動を考慮しない確定論的解析を行った．図-3に，ハードニング特性を考慮しない場合(バイリニアモデル)と考慮する場合(トリリニアモデル)の600，800，1000galに対するP1橋脚とP2主塔の応答塑性率の分布を示す．P2橋脚はP1橋脚と同様の傾向を示したため省略する．図-3より，橋脚の応答に及ぼすハードニングの影響は小さいこと，主塔ではハードニングを考慮することで応答が小さくなること，PGAによってハードニングの影響



(a)P1 橋脚



(b)P2 主塔

図-3　確定論的解析による応答塑性率分布

が異なることが分かる．以降，橋脚と主塔とで応答塑性率が最大となったP1・P2橋脚基部，P2主塔中央，およびP1・P2支承に着目し検討を行う．

図-4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．着目部位ごとにハードニングの影響をまとめると以下の通りである．

・P1，P2支承：バイリニアモデルを用いた解析は，せん断ひずみを過大評価し，エネルギー靭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である．

・P1,P2橋脚基部：P1橋脚の応答塑性率はモデル化の違いの影響をほとんど受けないが，エネルギー靭性率はPGAの増加に伴いバイリニアモデルの方が大きくなっている．P2橋脚の応答塑性率は700galではバイリニアモデルの方が小さく危険側の評価となるが，800gal以降はモデル化の違いの影響が小さくなる．エネルギー靭性率は700、800galではバイリニアモデルの方が小さいが，900gal以降では逆に大きくなる．以上のように，橋脚毎，PGA毎に異なる傾向を示した．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り橋脚に伝わる慣性力が大きくなること，2つ目は支承のエネルギー吸収量の増加により，他部材の吸収エネルギーが小さくなることである．以上により，バイリニアモデルを用いた解析は橋脚の損傷を危険側にも安全側にも評価し得る．

・P2主塔中央：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

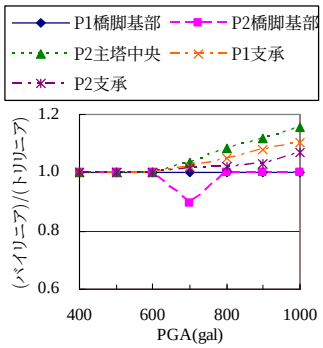
まず初めに，ハードニング特性の考慮の有無が信頼性解析結果に与える影響を検討する．図は省略するが，MCSによって得られた損傷度指標の平均値についてもバイリニアモデルとトリリニアモデルで比をとったところ，確定論的解析結果の図-4と同様の傾向を示した．しかし，確定論的解析に比べ，P1・P2橋脚における両モデルの差は小さなものとなった．これは，構造特性の変動の影響に比べハードニングの影響の方が小さく，構造特性の変動を考慮したMCSではハードニングの影響が埋もれてしまうためと考えられる．

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-5，6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が，800gal以上の大きいPGAではハードニングの影響も見て取れる．

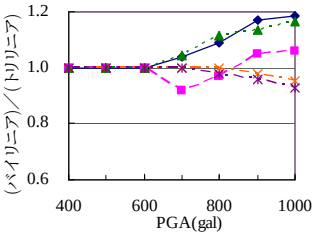
5．まとめ

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が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Ⅴ，2001　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

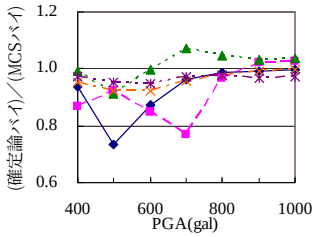


(a) 応答塑性率とせん断ひずみ

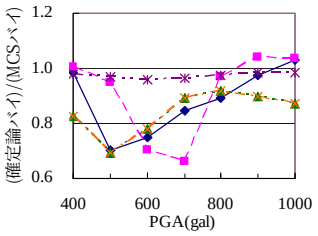


(b)エネルギー靭性率

図-4　確定量解析結果の比較

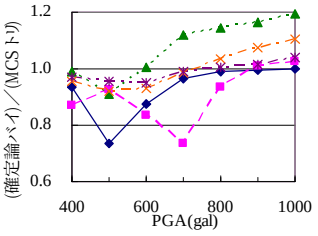


(a) 応答塑性率とせん断ひずみ

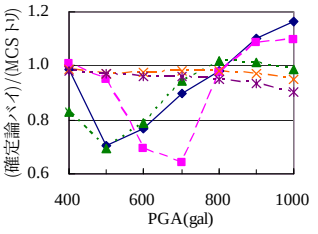


(b) エネルギー靭性率

図-5　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)エネルギー靭性率

図-6　確定量解析結果とMCS結果の平均値(トリリニア)との比較