

免震支承と橋脚のエネルギー吸収割合が 免震橋の動的応答のばらつきに及ぼす影響

高橋宏和¹・岡田太賀雄²・大住道生³・星隈順一⁴

¹正会員 修(工) (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 修(工) (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 主任研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 修(工) (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 橋梁研究室 室長
(前 (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員)
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

1. はじめに

免震橋は、免震支承を用いて橋の固有周期を長くするとともに、そのエネルギー吸収による減衰性の向上により、橋に作用する地震力を低減するだけでなく、橋を構成する免震支承以外の部材に生じる応答を低減させる構造である。このため、主として免震支承において確実にエネルギーを吸収するように設計することが基本となる旨、平成24年道路橋示方書Ⅴ 耐震設計編¹⁾（以下、道示Ⅴ）で規定されている。具体的には、免震橋のRC橋脚（以下、免震橋の橋脚）の許容塑性率を一般的な橋梁のRC橋脚（以下、一般的な橋脚）の許容塑性率の0.5倍とし、RC橋脚に生じる応答を限定的な塑性変形に抑え、長周期化やエネルギー吸収が橋脚ではなく免震支承において確実に行われるように規定されている。ただし、免震支承においてどの程度のエネルギー吸収を図ればよいのか定量的に示されたものはなく、また許容塑性率を一般的な橋脚の0.5倍に抑えることの工学的意義についても明確にはなっていない。

そこで、本稿ではモンテカルロシミュレーション手法を用いて、免震支承および基礎の抵抗を表わすばね剛性のばらつきや、材料強度のばらつき等によるRC橋脚の降伏曲げ耐力のばらつきを考慮した動的解析を行い、エネルギー吸収量についての免震支承と橋脚との割合の観点から、免震設計に及ぼす影響について確認した。

2. 動的解析に用いたモデルの条件

動的解析に用いたモデルは、免震支承を有する橋梁として、図-1に示す5径間連続鋼1桁橋²⁾を採り上げ、その中間橋脚（RC橋脚）を対象とした。解析モデルは、図-2に示す多質点骨組みモデルを用い、各部材の非線形特性には、免震支承はバイリニアモデル、RC橋脚はTakedaモデル、基礎の並進・回転ばねは線形モデルを用いた。ここで、本稿で想定した免震支承は、平成16年道路橋支承便覧³⁾（以下、支承便覧）に示されている高減衰ゴム支承（以下、HDR）を対象とした。ただし、そのバイリニアモデルは支承便覧に示されているモデルではなく、近年新たに実施されたせん断ひずみ依存性試験で得られた力学的特性を踏まえて提案されているモデル⁴⁾を採用した。

表-1に解析モデルの諸元を示す。RC橋脚は、柱の降伏曲げ耐力 P_y を地震時保有水平耐力法に用いる等価重量 W で除した P_y/W （以下、降伏震度）を0.4、0.5、0.6、0.7（以下、モデル①～④）に設定したモデルを対象とした。ここで、モデル①～④の橋脚の断面寸法は同一であるが、軸方向鉄筋の直径と段数を変えることにより降伏震度がそれぞれの設定値となるように設計した。さらに、モデル①～④において、免震支承の等価剛性を変えた固有周期の異なるモデルを追加し、解析モデル数は全部で9ケースとした。なお、免震支承の等価剛性は、支承の2次形

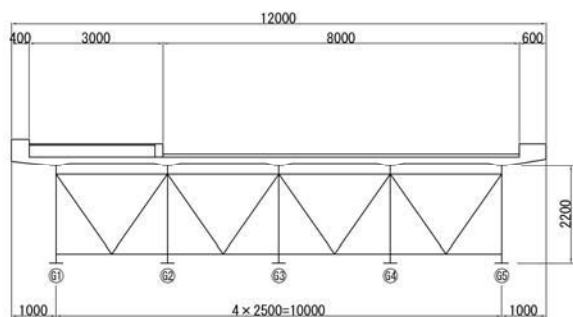
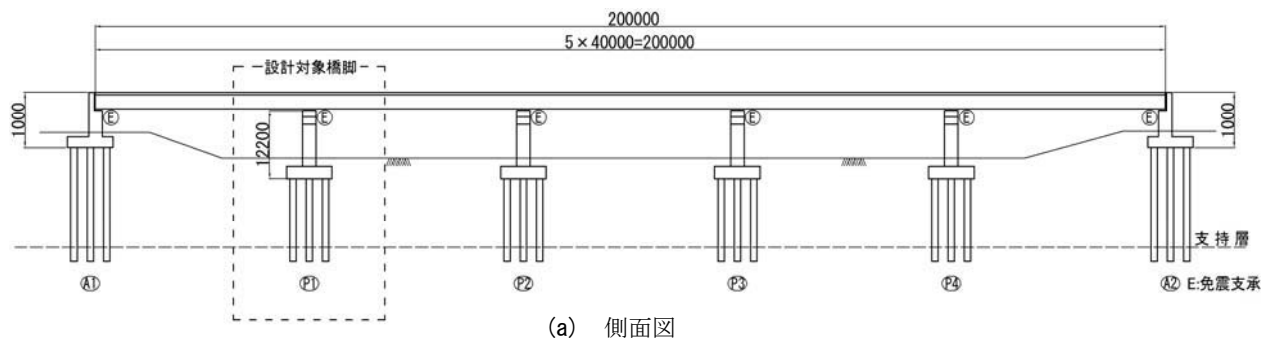


図-1 解析対象橋梁

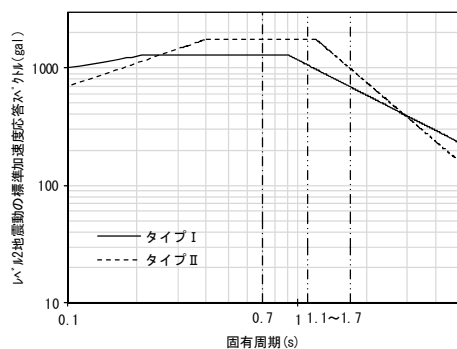
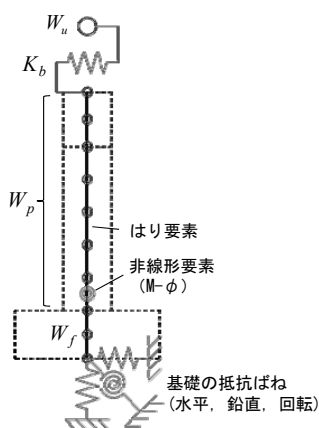


表-1 解析モデルの諸元

(a) 共通の諸元

項目	記号	単位	値/適用	備考
上部構造	重量	W_u	kN	6,690
RC橋脚	橋脚柱高	H	m	7.5
	橋脚柱幅	W	m	5.0
	橋脚柱厚	D	m	2.2
	重量	W_p	kN	3,390 $W_u/W_p=2.0$
	減衰定数	h_p	-	0.02
フーチング 及び基礎	重量	W_f	kN	3,890
	Ass	kN/m	2.762E+06	場所打ち杭を想定
	Asr, rs	kN/rad kN・m/m	4.438E+06	
	Arr	kN・m/rad	3.914E+07	
	減衰定数	h_f	-	0.20
地盤種別	-	-	Ⅱ種地盤	
地域区分	-	-	A地域	

(b) 個別の諸元

解析モデル	RC橋脚の 降伏震度 P_y/W	免震支承の 等価剛性 K_b (kN/m)	固有周期 T (sec)	軸方向 鉄筋	
モデル①	0.43	10,590	1.73	D32	1.0
モデル②-1	0.53	15,400	1.48	D32	1.5
モデル②-2		12,080	1.63		
モデル③-1	0.63	20,970	1.30	D32	2.0
モデル③-2		17,060	1.41		
モデル③-3		12,250	1.61		
モデル④-1	0.74	38,120	1.05	D35	2.0
モデル④-2		24,190	1.22		
モデル④-3		17,300	1.39		

状係数4以上のものを前提としているため、モデル①、②については、これ以上の長周期化を図った解析ケースは設定していない。

また入力地震動は、道示Ⅴ 図-解7.2.3のうち、図-3に示すⅡ種地盤におけるレベル2地震動の標準加速度応答スペクトルより、本稿のモデル①～④の固有周期帯（固定支承0.7s、免震支承1.1～1.7s）に対して卓越するタイプⅡの加速度波形を用い、応答値は3波の平均値とした。

表-2 解析で考慮したばらつき一覧

項目		記号	平均	変動係数	備考
HDR	1次, 2次剛性	K_1, K_2	1.050	0.063	250%せん断ひずみ時の割線剛性
RC橋脚	コンクリート強度①	σ_{ck}	1.200	0.150	材料試験データの統計量に基づいて整理
	鉄筋降伏強度②	σ_s	1.140	0.040	
	曲げ耐力評価式③	-	1.045	0.065	
	降伏曲げ耐力	P_v	1.170	0.073	
基礎	せん断弾性波速度	V_s	1.086	0.254	砂質土
	杭軸方向ばね剛性の補正係数	a	1.000	0.600	場所打ち杭

3. 動的解析で考慮した力学特性のばらつき

動的解析で考慮した力学特性のばらつきについて、以下に示す。

(1) 免震支承の剛性のばらつき

免震支承の剛性のばらつきは、文献4)の提案式より算出した剛性に対する実験で得られたHDRの剛性⁵⁾のばらつきを用いた。ここで、実験で得られたHDRの剛性とは、HDR 計30体の設計せん断ひずみ250%における繰返しせん断変形能試験より得られたせん断ひずみ250%の水平力ー水平変位の関係から、最大荷重と最大変位および最小荷重と最小変位より求まる割線剛性のことを指す。

(2) RC橋脚の降伏曲げ耐力のばらつき

RC橋脚の降伏曲げ耐力のばらつきは、材料強度のばらつきと曲げ耐力評価式のばらつきを考慮した。ここで、材料強度のばらつきは、コンクリート強度と鉄筋降伏強度の各材料試験データの統計量^{6)~8)}に基づいて設定した。また、曲げ耐力評価式のばらつきは、道示Vの曲げ耐力評価式より算出した降伏曲げ耐力に対する土木研究所等で行ったRC橋脚模型計34体の正負交番繰返載荷実験で得られた降伏曲げ耐力⁹⁾のばらつきを用いた。

(3) 基礎ばね剛性のばらつき

基礎の抵抗を表わすばね剛性は平成24年道路橋示方書IV 下部構造編¹⁰⁾およびV 耐震設計編に基づいて算出することとし、基礎ばね剛性の算出に用いる地盤の動的変形係数 E_D 、杭軸方向のばね剛性 K_V について、それぞれせん断弾性波速度および杭軸方向ばね剛性を求める際の補正係数のばらつきを考慮した。なお、これらのばらつきは、既存のN-Vs関係のデータや文献11)を参考に設定している。また、その他の物性値への変換式にもばらつきは存在すると考えられるが十分なデータが揃っていないため、本稿ではそのばらつきの影響は考慮していない。

以上、本稿で考慮した各ばらつきの値をまとめる

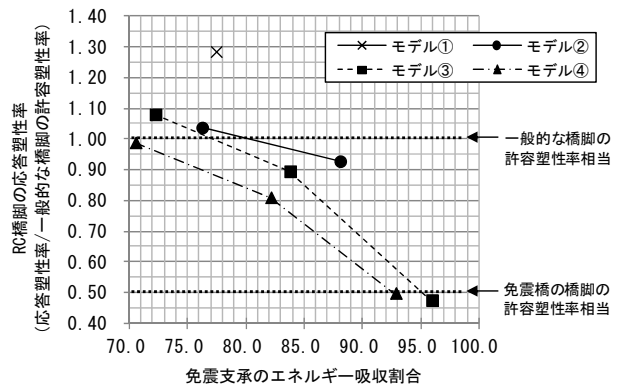


図-4 免震支承のエネルギー吸収割合とRC橋脚の応答塑性率の関係

と表-2に示す通りである。

本稿では、動的解析にて表-2のばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーションを行った。なお、モンテカルロシミュレーションの試行回数は、各モデルにおける平均値、変動係数、ばらつき傾向を確認する目的で100回とした。

4. 免震支承のエネルギー吸収割合とRC橋脚の応答塑性率の関係

まず、免震支承のエネルギー吸収割合とRC橋脚の応答塑性率との間にどのような関係があるかを確認する。ここで、免震支承のエネルギー吸収割合とは、免震支承の履歴エネルギー吸収量を免震支承とRC橋脚の履歴エネルギー吸収量の合計で除した値とする。表-1に示した9ケースのモデルにおいて、免震支承のエネルギー吸収割合とRC橋脚の応答塑性率の関係を示すと図-4の通りである。

図-4より、例えばモデル③の条件における免震支承のエネルギー吸収割合は、RC橋脚の応答を免震橋の橋脚の許容塑性率以下とする場合は90%以上となり、一般的な橋脚の許容塑性率以下とする場合には80%以上となった。また、一般的な橋脚の許容塑性率を超える応答が生じる場合は、免震支承のエネルギー吸収割合は80%以下となった。また、モデル④の結果についても、モデル③と同様に免震橋の橋脚の許容塑性率以下とする場合は、免震支承のエネルギー吸収割合が90%以上となった。

以上より、本稿の動的解析に用いたモデルの条件下では、免震橋の橋脚の許容塑性率を一般的な橋脚の0.5倍に抑えることにより、免震支承のエネルギー吸収割合を90%以上とする結果を導くことになっていることが分かる。さらに、このように免震橋の橋脚の塑性変形を限定的なものに抑えることにより、

表-3 免震支承のエネルギー吸収割合と
RC橋脚の許容塑性率

モデル	エネルギー 吸収割合 (%)	RC橋脚の 応答塑性率 μ	RC橋脚の 許容塑性率 μ_a	
			一般橋	免震橋
①	77.4	4.71	3.67	1.84
②-2	88.0	3.07	3.31	1.66
③-2	83.7	2.75	3.08	1.54
④-3	92.8	1.59	3.19	1.60

図-4のモデル①，②のような降伏震度が小さい橋脚が設計されにくくなり，その結果，確実に免震支承でエネルギー吸収を図ることができるようになっていくことも確認される。

5. 動的解析によるモンテカルロシミュレーションの結果

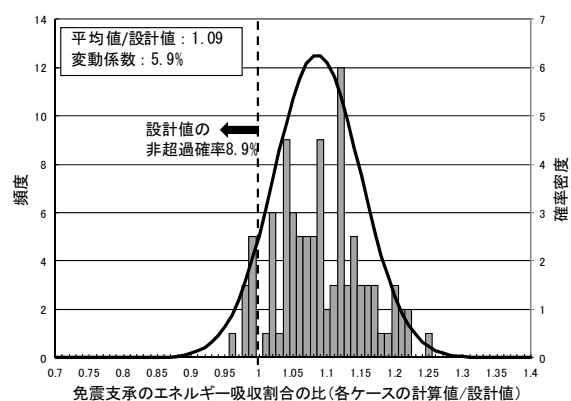
ここでは，表-2に示すばらつきを考慮した動的解析を行い，免震支承のエネルギー吸収割合が，免震設計に及ぼす影響について確認した．以下に動的解析によるモンテカルロシミュレーションの結果を示す．

(1) 解析対象となるケースの抽出

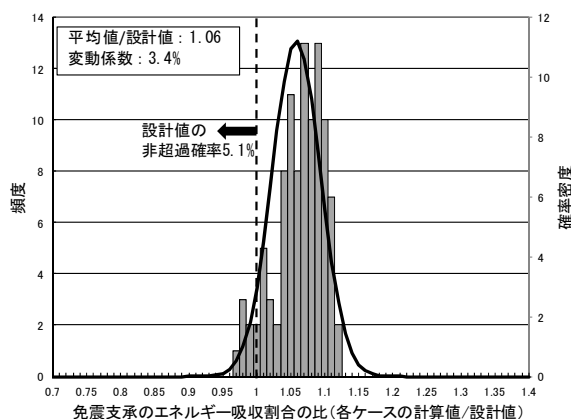
前述の免震支承のエネルギー吸収割合とRC橋脚の応答塑性率の関係を踏まえ，表-1で示した9ケースの中から，モデル①，モデル②-2，モデル③-2，モデル④-3を抽出して，動的解析を行った．表-3に抽出したケースの免震支承のエネルギー吸収割合およびRC橋脚の応答塑性率を示す．モンテカルロシミュレーションを行うに当たっては，表-3の免震支承のエネルギー吸収割合を設計値として扱い，後述の動的解析結果ではこれを基本に考察した．ここで，設計値とは，表-2に示すばらつきを考慮せず，道路橋示方書に示される各定数，評価式より算出した値を指す．

(2) 免震支承のエネルギー吸収割合の解析結果

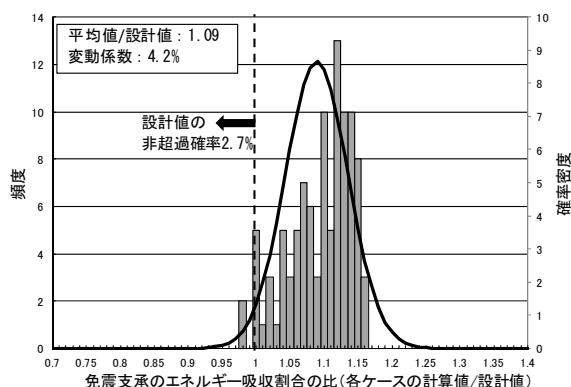
図-5に各モデルにおける免震支承のエネルギー吸収割合の解析結果を示す．例えばモデル①の解析結果において，免震支承のエネルギー吸収割合の平均値は設計値よりも大きくなるが，正規分布を仮定した場合に設計値は非超過確率8.9%となり，全体の1割程度が設計値を下まわる結果となる．それに対し，モデル①以外では，正規分布を仮定した場合に設計値は非超過確率5%程度以下となり，モデル①に比べ設計値を下まわる確率が小さくなる．また，各モ



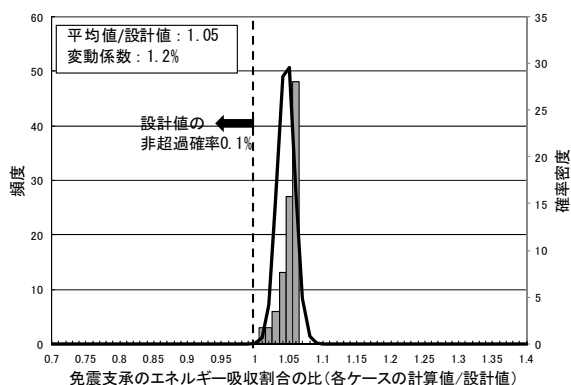
(a) モデル①



(b) モデル②-2



(c) モデル③-2



(d) モデル④-3

図-5 各モデルの免震支承のエネルギー吸収割合

表-4 免震支承の変位量

モデル	HDRの総 ゴム厚 (mm)	平面 寸法 (mm)	せん断 弾性係数 (N/mm ²)	HDRのせん断ひずみ		
				設計値 (%)	平均値 (%)	変動係数 (%)
①	160	660×660	0.8	234	247	8.6
②-2	180	740×740	0.8	216	232	5.8
③-2	160	750×750	1.0	221	236	7.4
④-3	175	730×730	1.2	208	205	7.2

デルの解析結果を比較すると、RC橋脚の許容塑性率を超える応答が生じるモデル①のように、RC橋脚の降伏震度が小さい場合には、免震支承でエネルギー吸収する割合が相対的に小さくなるため、モデル①を除く一般的な橋脚あるいは免震橋の橋脚の許容塑性率以下の応答に抑えるモデルに比べ変動係数が大きくなる。

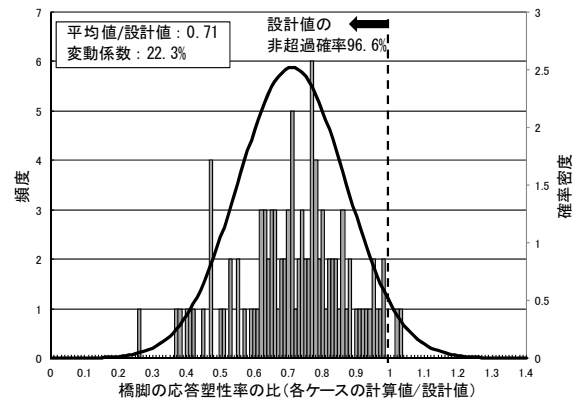
以上より、表-2で示す各ばらつきの影響を考慮すると、降伏震度が小さい場合には、設計で想定したエネルギー吸収を期待できない可能性が高まってくる傾向にあると言える。

(3) RC橋脚の応答塑性率の解析結果

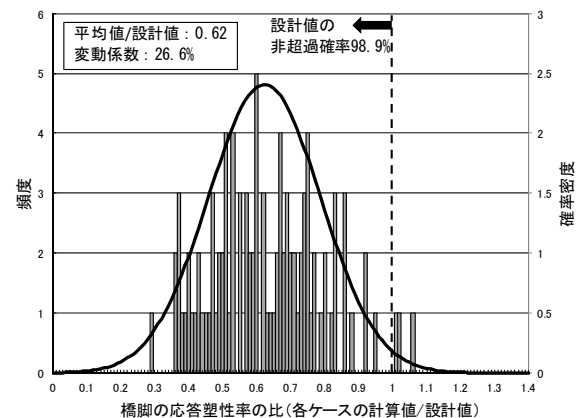
図-6に各モデルにおけるRC橋脚の応答塑性率の解析結果を示す。図-6について、例えばモデル①の解析結果において、応答塑性率の平均値は設計値よりも小さくなり、正規分布を仮定した場合に設計値は非超過確率96.6%となる。また、全てのモデルでRC橋脚の応答塑性率は、変動係数20%程度でばらつくものの、表-2に示すRC橋脚の降伏曲げ耐力の過強度特性による影響が大きく、結果的にどのモデルも応答塑性率が設計値以上となる確率は5%未満となる。

(4) 免震支承の変位量の解析結果

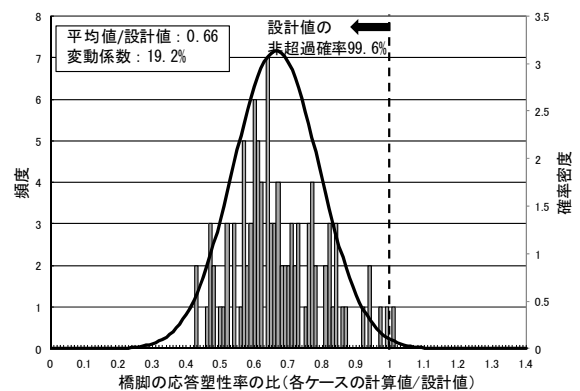
道示Vおよび支承便覧では、支承の機能が失われる状態に対して十分に安全であることおよび地震応答の継続時間中に安定して機能することを踏まえて、免震支承の許容変位をゴム本体のせん断ひずみが250%に相当する変位としている。したがって、本稿においても、HDRの許容変位は250%のせん断ひずみを目安に設定することとし、動的解析を行う上で、設計値のHDRのせん断ひずみは200%~250%の範囲で設定した。表-4に各モデルにおける免震支承の変位量の解析結果を示す。表-4より、各モデルの変動係数は5~10%となり、免震支承の変位量に対しては、RC橋脚の降伏震度と明確な相関は認められなかった。



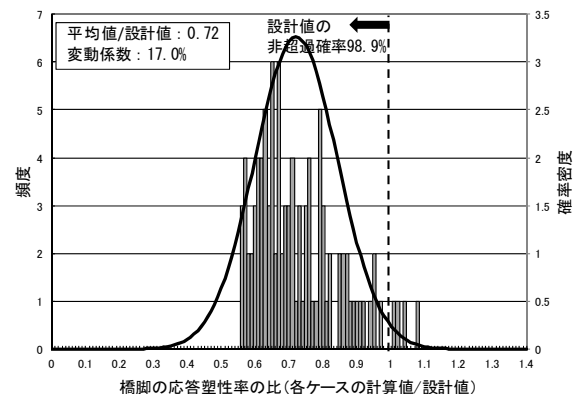
(a) モデル①



(b) モデル②-2



(c) モデル③-2



(d) モデル④-3

図-6 各モデルのRC橋脚の応答塑性率

6. 結論

本稿では、免震支承と橋脚のエネルギー吸収割合に着目し、動的解析にて免震支承および基礎の抵抗を表わすばね剛性のばらつき、材料強度および曲げ耐力評価式のばらつきによるRC橋脚の降伏曲げ耐力のばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーションを行った。以下に本稿の解析モデルを対象に得られた知見を示す。

- (1) 本稿の動的解析に用いたモデルの条件下では、免震橋の橋脚の許容塑性率を一般的な橋脚の0.5倍に抑えることは、免震支承のエネルギー吸収割合を90%以上とすることを意味していることが確認された。さらに、このように免震橋の橋脚の塑性変形を限定的なものに抑えることにより、降伏震度が小さい橋脚が設計されにくくなり、その結果、確実に免震支承でエネルギー吸収を図ることができるようになっていることも確認された。
- (2) 免震支承のエネルギー吸収割合は、RC橋脚の許容塑性率を超える応答が生じるモデル①では、免震支承でエネルギー吸収する割合が相対的に小さくなるため、モデル①を除く一般的な橋脚あるいは免震橋の橋脚の許容塑性率以下の応答に抑えるモデルに比べ変動係数が大きくなった。また、降伏震度が小さい場合には、設計で想定したエネルギー吸収を図ることができない可能性が高まることが確認された。
- (3) 免震支承の変位量は、変動係数5～10%でばらつく傾向にあり、その値はRC橋脚の降伏震度と明確な相関は認められなかった。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.3.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.3.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.4.
- 4) 高橋良和，篠原聖二，星隈順一：免震支承の設計モデルの高度化，第17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，2014.7.
- 5) 篠原聖二，榎本武雄，星隈順一，岡田慎哉，西弘明，高橋良和：ゴム支承の終局限界状態の評価に関する研究，第17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，2014.7.
- 6) 河野広隆，片平博，古賀裕久：レディーミクストコンクリートの品質実態調査－(2)1999年調査結果－，土木研究所資料 第3838号，2001.11.
- 7) 河野広隆，渡辺博志，古賀裕久：既存コンクリート構造物の健全度実態調査結果－1999年調査結果－，土木研究所資料 第3854号，2002.3.
- 8) 普通鋼電炉工業会・電炉鉄筋棒鋼品質調査委員会：電炉鉄筋棒鋼品質調査報告書，2004.10.
- 9) 星隈順一，堺淳一，小森暢行，坂柳皓文：鉄筋コンクリート橋脚の地震時限界状態の評価手法に関する研究，土木研究所資料 第4262号，2013.3.
- 10) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，2012.3.
- 11) 福井次郎，西谷雅弘：杭の支持力，変形特性に関する研究，土木研究所資料 第3836号，2001.9.