

免震支承のエネルギー吸収量に着目した免震設計に関する一試算

国立研究開発法人 土木研究所 正会員 ○高橋 宏和, 岡田 太賀雄, 星隈 順一

1. はじめに

免震橋は、免震支承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、道路橋示方書Ⅴ 耐震設計編（以下、道示Ⅴ）で規定されている。具体的には、免震橋の RC 橋脚の許容塑性率を一般的な橋梁の許容塑性率の 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梁の 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による試算を行い、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。

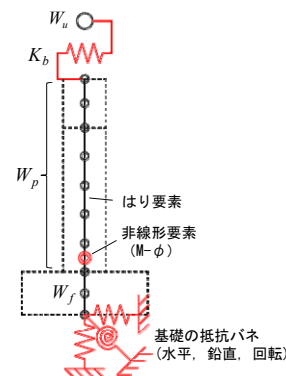


図-1 多質点骨組みモデル

2. 解析モデル

動的解析では、免震支承を有する一般的な橋梁として、文献 1)にある 5 径間連続鋼 I 桁橋を採り上げ、その中間橋脚(RC 橋脚)を解析対象とした。解析モデルは、図-1 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。なお、免震支承のバイリニアモデルは、文献 2)で提案されている設計モデルを採用した。表-1 に解析モデルの諸元について示す。試算は、降伏曲げ耐力比 (P_y/W) を 0.4, 0.5, 0.6, 0.7(以下、モデル①～④)の各ケースにおいて行い、 P_y/W の違いが結果に及ぼす影響について確認した。各モデルのうち、モデル④は現行設計法の RC 橋脚における免震橋の許容塑性率、モデル②、③は一般的な橋梁の許容塑性率をおおの満する橋脚であり、モデル①は許容塑性率を満足しない橋脚を想定している。また入力地震動は道示Ⅴ図解 7.2.3 のうち、Ⅱ種地盤におけるレベル 2 地震動(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。

3. 考慮したばらつき

本稿で考慮した各ばらつきについて、表-2 に示す。免震支承の剛性は文献 3)に示される HDR-S のせん断ひずみ 250%における水平力-水平変位の関係から、最大荷重と最大変位及び最小荷重と最小変位より求まる割線剛性のばらつき、RC 橋脚の降伏曲げ耐力は材料強度のばらつきと文献 4)を基に算出した曲げ耐力評価式のばらつき、基礎ばね剛性の算出に用いる地盤の動的変形係数 E_p 、杭軸方向のばね剛性 K_v はそれぞれ文献 5)、6)に示されるせん断弾性波速度および杭軸方向ばね剛性の補正係数のばらつきをそれぞれ考慮した。また、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。

表-1 解析モデル諸元

項目	記号	単位	値/適用	備考
上部構造	重量	W_u	kN	6,690
免震支承	免震支承種別	-	-	HDR-S
	等価剛性	K_b	kN/m	モデル① 10,590 等価減衰定数17.7%
				モデル② 12,080 等価減衰定数18.6%
				モデル③ 17,060 等価減衰定数17.9%
				モデル④ 17,300 等価減衰定数17.6%
RC橋脚	降伏曲げ耐力比	P_y/W	kN	モデル① 0.43 橋軸主筋D32-1段
				モデル② 0.53 橋軸主筋D32-1.5段
				モデル③ 0.63 橋軸主筋D32-2段
				モデル④ 0.74 橋軸主筋D35-2段
	橋脚柱高	H	m	7.5 柱厚2.2m
ファック及び基礎	橋脚柱幅	W	m	5.0
	重量	W_p	kN	3,390 $W_u/W_p=2.0$
	減衰定数	h_p	-	0.02
	重量	W_f	kN	3,890
	基礎ばね剛性	A_{ss}	kN/m	2.762E+06
	基礎ばね剛性	$A_{sr,rs}$	kN/rad	4.438E+06 場所打ち杭を想定
		A_{rr}	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

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-S	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
	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
RC橋脚	鉄筋降伏点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_y	1.160	0.070	
	せん断弾性波速度	V_p	1.086	0.254	砂質土
基礎	杭軸方向ばね剛性の補正係数	a	1.000	0.600	場所打ち杭

キーワード 免震支承, エネルギー吸収量, 動的解析, モンテカルロシミュレーション

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター TEL 029-879-6773

4. 試算結果

本稿では、免震支承において確実にエネルギー吸収することの条件として、長周期化により設計値の免震支承のエネルギー吸収割合(=支承履歴エネルギー吸収量/支承と橋脚の履歴エネルギー吸収量の合計)が80%以上であると仮定し、試算を行った。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。表-3に各モデルの設計値の免震支承のエネルギー吸収割合、固有周期を示す。なお、モデル①については、免震支承の2次形状係数 ≥ 4 の制約により、これ以上の長周期化が図れずエネルギー吸収割合を80%以上とすることができていない。

図-2にモデル①の免震支承のエネルギー吸収割合の試算結果を示す。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。表-4にモデル別の試算結果を示す。RC橋脚の許容塑性率を満足しないモデル①のように橋脚の降伏曲げ耐力が小さい場合には、免震支承でエネルギー吸収しにくくなるため、モデル②～④に比べ変動係数が大きい。また、降伏曲げ耐力が小さい橋脚ほど設計値以下となる確率が高い。以上より、各ばらつきの影響を踏まえると、長周期化により免震支承でエネルギー吸収を確実にする場合でも、降伏曲げ耐力が小さい場合には、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くなってくると言える。現行設計法では免震橋の許容塑性率を一般的な橋梁の0.5倍として規定することにより、このような降伏曲げ耐力が小さい橋脚が設計されにくくし、免震支承でエネルギー吸収を図ることができない構造とならないようにする効果があると考えられる。また、

図-3にモデル①の橋脚の応答塑性率の試算結果を示す。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。表-5より全てのモデルで橋脚の応答塑性率の変動係数は20%程度となるものの、表-2に示す降伏曲げ耐力の過強度特性の影響が大きく、結果的にRC橋脚の許容塑性率を満足しないモデル①では応答塑性率が設計値以上となる可能性は4%程度となり、一般的な橋梁の許容塑性率を満足するモデル②と③は、免震橋の許容塑性率を満足するモデル④と同じ1%程度となった。

5. まとめ

本稿のモデルにおける試算の結果、一般的な橋梁のRC橋脚の許容塑性率を満足するモデル②と③では、免震支承のエネルギー吸収割合が80%以上であることを確認しておけば、免震橋の許容塑性率を一般的な橋梁の0.5倍に抑えなくとも、応答塑性率を見誤る可能性は低いことが確認された。今後は、上・下部構造重量比、地盤種別、地域区分の違いによる影響についても検証を進めて行く予定である。

参考文献 1) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，平成9年3月， 2) 高橋良和ら：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年7月， 3) 篠原聖二ら：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年7月， 4) 星限順一ら：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年3月， 5) 福井次郎ら：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年9月， 6) 中谷昌一ら：杭基礎に関する動的照査法の適用について，土木研究所資料 第4083号，2007年12月

表-3 免震支承のエネルギー吸収割合と固有周期

モデル	エネルギー吸収割合(%)	固有周期(sec)		T/T_0
		固定支承 T_0	免震支承 T	
①	77.4	0.74	1.73	2.34
②	88.0	0.70	1.63	2.33
③	83.7	0.69	1.41	2.04
④	92.8	0.67	1.39	2.07

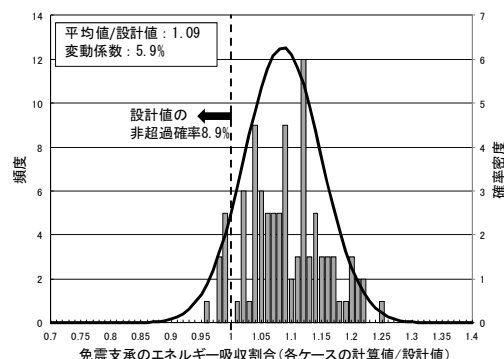


図-2 モデル①の免震支承のエネルギー吸収割合

表-4 モデル別の免震支承のエネルギー吸収割合

モデル	エネルギー吸収割合(%)		平均値/設計値	変動係数(%)	設計値の非超過確率(%)
	設計値	平均値			
①	77.4	84.0	1.09	5.9	8.9
②	88.0	93.1	1.06	3.4	5.1
③	83.7	91.9	1.10	4.2	2.7
④	92.8	97.3	1.05	1.2	0.1

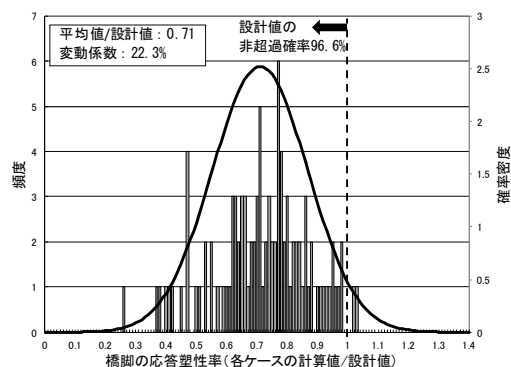


図-3 モデル①の橋脚の応答塑性率

表-5 モデル別の橋脚の応答塑性率

モデル	橋脚の応答塑性率		平均値/設計値	変動係数(%)	設計値の非超過確率(%)
	設計値	平均値			
①	4.7	3.3	0.71	22.3	96.6
②	3.1	1.9	0.62	26.6	98.9
③	2.8	1.9	0.68	19.2	99.6
④	1.6	1.1	0.72	17.0	98.9