

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

松崎 裕¹・小野寺 周²・津村 拓都³・鈴木 基行⁴

¹正会員 博(工) 東北大学助教 大学院工学研究科土木工学専攻
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²学生会員 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻(研究当時)(同上)

³学生会員 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻(同上)

⁴フェロー会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(研究当時)(同上)

1. はじめに

免震橋は、設計地震動に対して、免震支承が塑性化することで免震支承において確実に地震エネルギーが吸収されるように設計がなされている¹⁾。このような設計地震動に対する応答の制御に加えて、万一の終局的な損傷を修復のしやすい特定の部材へと誘導することは、危機耐性²⁾を高める観点からも重要である。しかしながら、設計地震動を超過する強度を有する極大地震動に対して、免震橋のどの部材が最終的に損傷するのかが設計時に照査されておらず、明示的には意識されていない。ここで、極大地震動に対する健全な免震支承－RC橋脚系のキャパシティデザインとして、先行して塑性化させた免震支承へと万一の終局的な損傷を誘導することは、免震支承とRC橋脚の終局耐力の関係から困難である³⁾。さらには、被災した場合の復旧期間を長期化させないためにも、特に重要度の高い路線上の構造物においては、一品生産品である免震支承の破断は防ぐ必要がある。そこで、安定的なエネルギー吸収の限界点としての免震支承のハードニング開始点における水平耐力をRC橋脚の終局耐力よりも高めることで、免震支承の破断を防いだ上でRC橋脚のみへと万一の終局的な損傷を誘導できることが示されている³⁾。また、近年、免震支承の経年劣化が顕在化してきているが⁴⁾、免震支承の経年劣化に伴う性能低下は免震橋の地震時損傷配分に有意な影響を及ぼす。

そこで、本研究では、危機耐性確保の観点から、地震動強度や免震支承の経年劣化の影響を受けにくく、ライフタイムにわたって地震時安全性・復旧性

を確保できる免震橋の実現に向けて、免震支承の経年劣化を想定した免震橋の終局的な地震時損傷の配分について基礎的検討を行う。

2. 解析条件

(1) 免震支承－RC橋脚間における耐力比の指標

万一の終局的な損傷を特定の部材へと誘導するための耐力比の指標として、免震支承における安定的なエネルギー吸収の限界点に着目した次式で定義される著者ら⁵⁾が提案した耐力比 R_{QH} を用いる。

$$R_{QH} = Q_{BH} / Q_{CY} \tag{1}$$

ここに、 Q_{BH} ：免震支承のハードニング開始点における水平耐力、 Q_{CY} ：RC橋脚の降伏耐力である。

(2) 解析対象とした構造系

免震設計の照査^{1), 6)}を満足させた上で、式(1)の耐

表-1 対象構造系の形状・寸法や鉄筋比に関する諸元

		構造系 A	構造系 B
RC 橋脚	断面寸法	4,500mm×2,000mm	
	高さ	10,000mm	
	躯体質量	294ton	
	軸方向鉄筋比	0.89%	
	横拘束筋体積比	1.0%	
免震 支承 (LRB)	断面寸法	470mm×470mm	600mm×600mm
	ゴム層	10mm×9層	15mm×10層
	鉛プラグ	75mm×4本	80mm×4本
	1次形状係数	11.8	10.0
	2次形状係数	5.2	4.0

表-2 対象構造系の力学的諸元

構造系	上部構造	RC 橋脚					免震支承 (LRB5 基分)				等価固有周期	耐力比
	質量	降伏耐力 Q_{CY}	降伏剛性	降伏変位	終局変位 δ_{ls3}	靱性率 μ_{CU}	降伏耐力 Q_{BY}	降伏剛性 K_1	ハードニング開始点での水平耐力 Q_{BH}	等価剛性 K_{BEQ}	T_{EQ}	R_{QH}
	ton	MN	MN/m	mm	mm	-	MN	MN/m	MN	MN/m	s	-
A	600	2.86	81.0	35.3	213	6.04	0.870	50.9	2.15	13.3	1.76	0.75
B							0.990	57.8	3.51	12.6	1.80	1.23

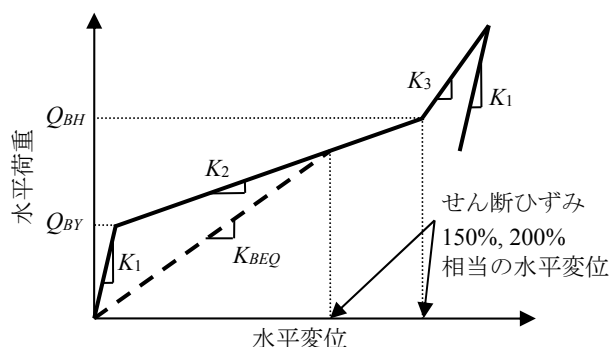


図-1 免震支承の水平荷重－水平変位関係

表-3 入力地震動とした観測記録

地震名	観測点
兵庫県南部地震 (1995 年)	JMA 神戸海洋気象台, 阪神高速道路公団 猪名川, 関西電力 新神戸地点, 神戸大学
十勝沖地震 (2003 年)	清水道路維持出張所構内地盤上, KiK-net 鶴居西, KiK-net 鶴居東, KiK-net 大樹
新潟県中越地震 (2004 年)	K-NET 十日町, K-NET 小千谷, KiK-net 長岡
岩手・宮城内陸地震 (2008 年)	KiK-net 一関西, KiK-net 東成瀬
東北地方太平洋沖地震 (2011 年)	開北橋周辺地盤上, 新晩翠橋周辺地盤上

表-4 免震支承－RC 橋脚系に介在する各種不確定要因

不確定要因		分布	特性値	特性値に乗じる係数	
				平均値	変動係数
上部構造	質量	正規 分布	600ton	1.05 ⁷⁾	0.05 ⁷⁾
RC 橋脚	コンクリートの圧縮強度		23.5 N/mm ²	1.20 ⁷⁾	0.10 ⁷⁾
	鉄筋の断面積		公称値	0.97 ⁷⁾	0.01 ⁷⁾
	鉄筋の降伏強度		295 N/mm ²	1.20 ⁷⁾	0.07 ⁷⁾
	鉄筋の弾性係数		2.06×10 ⁵ N/mm ²	0.97 ⁷⁾	0.01 ⁷⁾
	質量		294ton	1.05 ⁷⁾	0.05 ⁷⁾
	終局変位 δ_{ls3}		道路橋示方書に基づく算定値 ¹⁾	1.062 ⁸⁾	0.181 ⁸⁾
免震支承	降伏耐力 Q_{BY}		表-2 に示す値	1.13 ⁷⁾	0.18 ⁷⁾
	剛性 K_1, K_2, K_3		表-2 に示す値	1.00 ⁷⁾	0.07 ⁷⁾
	破断ひずみ	250 % ⁷⁾	1.34 ⁷⁾	0.11 ⁷⁾	

力比 R_{QH} の異なる I 種地盤上における免震橋の振動単位を解析対象構造系とした。各構造系は RC 橋脚 1 基に免震支承 (LRB) が 5 基設置されている。対象構造系の形状・寸法や鉄筋比に関する諸元を表-1 に、設計値に基づいて評価された力学的諸元を表-2 に示す。

(3) 解析モデルと入力地震動群

上部構造、免震支承および RC 橋脚から成る 2 質点 2 自由度系モデルを用い、Newmark β 法 ($\beta=1/4$) により時刻歴応答解析を行った。免震支承の骨格曲線としては、免震支承の破断までの領域を対象とするため、図-1 に示すハードニングを考慮したトリリニア型モデルを用いた。ハードニングは、足立⁷⁾と同様に、せん断ひずみ 200% で生じ始めるものとした。各剛性の比は $K_1:K_2=1:0.15$ ⁶⁾、 $K_{BEQ}:K_3=1:2.59$ ⁷⁾ である。一方、RC 橋脚には完全弾塑性型の骨格曲線を有す

る Takeda 型モデルを用いた。減衰に関して、各要素の減衰定数として免震支承は 0%、RC 橋脚は 2% とし、Rayleigh 減衰により評価した。入力地震動としては、国内 15 地点で観測された表-3 に示す水平 30 成分の強震記録について、位相特性は変化させず、振幅特性を調整して用いた。

(4) 免震支承の経年劣化に伴う力学的特性の変化

本研究では、免震支承の経年劣化に伴う力学的特性の変化として、林ら⁴⁾に基づき、図-1 において、免震支承の剛性が初期値の 1.2 倍、切片荷重が初期値の 0.5 倍、破断ひずみが初期値の 0.8 倍へと変化したことを想定した。

(5) 各種不確定要因とフラジリティ評価

免震支承－RC 橋脚系に介在する不確定要因とし

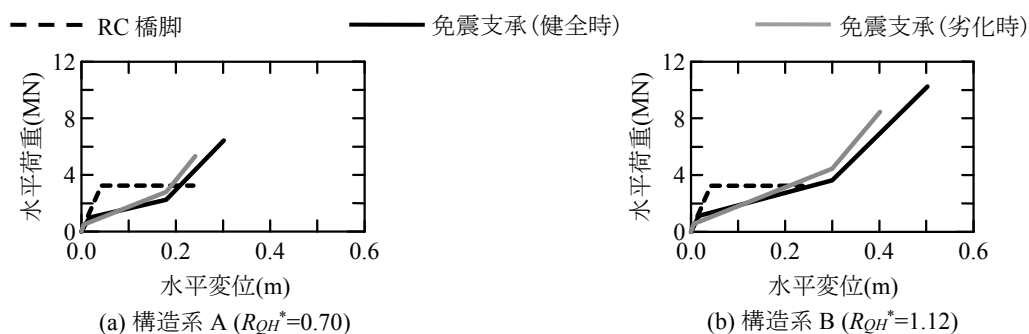


図-2 平均値を用いて評価されたRC橋脚と免震支承の荷重－変位関係の骨格曲線

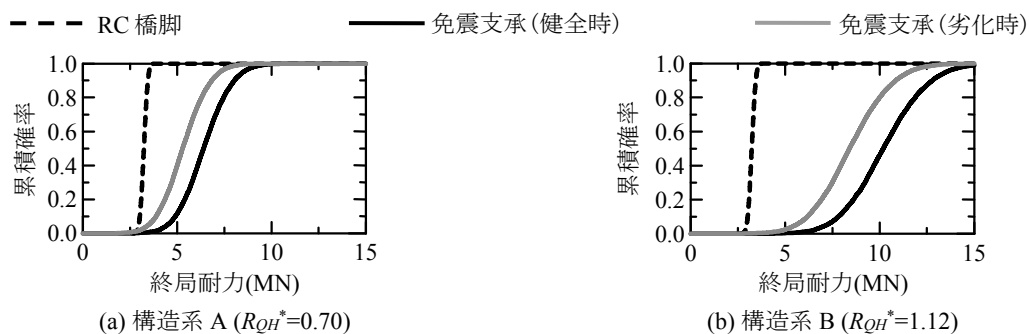


図-3 RC橋脚と免震支承の終局耐力の関係

て、表-4 に示す足立⁷⁾の研究に基づく材料特性および力学的特性、RC 橋脚の終局変位の算定⁸⁾に関する各種不確定要因を考慮した。その上で、試行回数を 90,000 回としたモンテカルロシミュレーションを実施して、1) RC 橋脚が先行して終局変位 δ_{k3} に到達する場合、2) 免震支承が先行して破断する場合、3) 1)または 2)が生起する場合として、それぞれ 1) RC 橋脚の損傷確率、2) 免震支承の損傷確率、3) 構造系の損傷確率を評価した。 fragility 評価における地震動強度は等価固有周期 T_{EQ} における弾性応答加速度 $S_a(T_{EQ})$ とした。なお、以降では、表-2 に示す健全時における特性値ベースの耐力比 R_{QH} に対して、特性値とのずれを考慮した平均値ベースの耐力比 R_{QH}^* を用いて評価を行う。

3. 静的評価に基づく免震支承－RC 橋脚間の地震時損傷配分に関する検討

表-4 に示される平均値ベースで評価されたRC橋脚と免震支承の荷重－変位関係の骨格曲線を図-2 に示す。免震支承の経年劣化に伴うゴムの硬化および破断ひずみの低減により、免震支承の破断耐力に対応する終局耐力が低減していることが確認される。そのため、図-3 に示すように、 $R_{QH}^*=0.70$ と耐力比が小さい構造系Aでは、終局耐力について、RC橋脚と免震支承との間で階層化が十分になされておらず、免震支承に経年劣化が生じると、両者の乖離がさらに

小さくなる。一方で、 $R_{QH}^*=1.12$ と耐力比を十分に確保した構造系Bでは、免震支承に経年劣化が生じた場合であっても、終局耐力について、RC橋脚と免震支承の間で階層化がなされている。ただし、このような静的評価には、RC橋脚の慣性力の影響や減衰の影響が反映されていないため、続いて、動的解析に基づく fragility 評価を行う。

4. fragility 評価に基づく免震支承－RC 橋脚間の地震時損傷配分に関する検討

表-3 の入力地震動および表-4 の各種不確定要因を考慮して算定された fragility 曲線を図-4 に示す。 $R_{QH}^*=0.70$ と耐力比が小さい構造系Aでは、免震支承が健全な場合において、免震支承とRC橋脚の両者が損傷しており、損傷部材が不明確である。そのため、被災時の復旧計画の立案に支障が生じるが、免震支承に経年劣化が顕在化し、図-3(a)のように終局耐力の乖離が小さくなると、免震支承の損傷可能性が大きくなっており、損傷配分に変化が生じている。一方で、 $R_{QH}^*=1.12$ と耐力比を十分に確保した構造系Bでは、免震支承が健全な場合に、免震支承－RC橋脚間において十分な耐力階層化がなされていることから、免震支承に経年劣化が生じた場合であっても、万一の損傷部材がRC橋脚へと誘導され、復旧期間が長期化する免震支承の破断が生じにくい構造系となっている。このように、最終的な損傷部材を

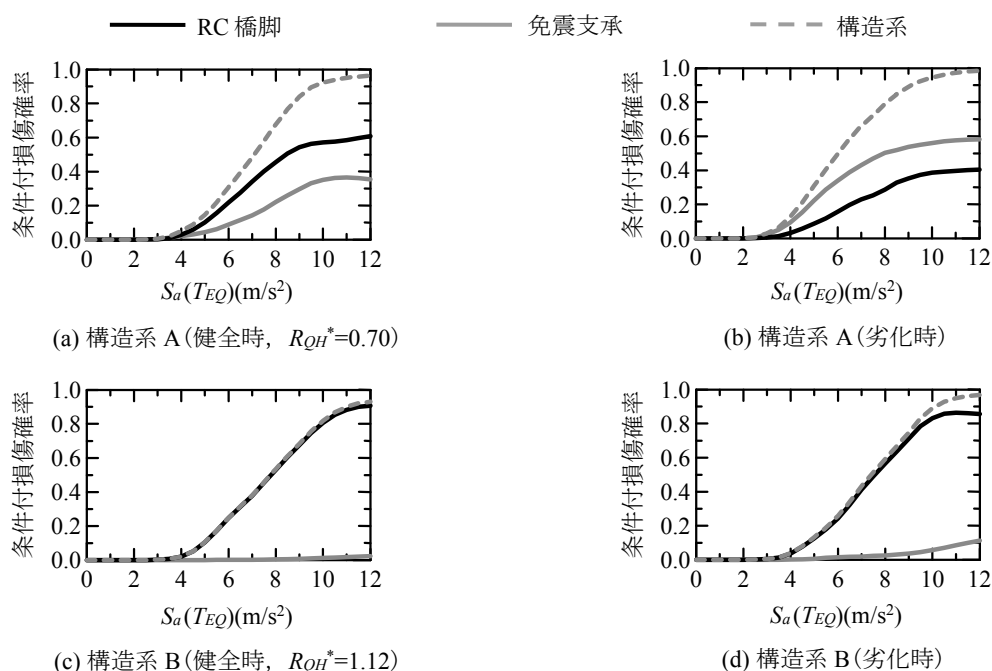


図-4 免震支承の健全時・劣化時における fragility 曲線

意識して、地震作用や経年劣化の影響を受けにくい構造系を実現することは、重要度の高い構造物の危機耐性の確保において重要であると考えられる。

5. まとめ

危機耐性確保の観点から、地震動強度や免震支承の経年劣化の影響を受けにくく、ライフタイムにわたって地震時安全性・復旧性を確保できる免震橋の実現に向けた基礎的検討を行った。得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 免震支承－RC 橋脚間で終局耐力について十分な耐力階層化がなされていない構造系では、免震支承と RC 橋脚の両者に終局的な損傷が生じ得る。さらには、免震支承の経年劣化により、免震支承－RC 橋脚間における損傷配分が変化するなど、経年劣化の影響を大きく受ける構造系である。
- 2) 免震支承－RC 橋脚間で終局耐力について十分な耐力階層化を図った場合、復旧期間が長期化する免震支承の破断を防いだ上で、RC 橋脚への損傷誘導がなされる。また、免震支承の経年劣化の影響を受けにくい構造系が実現される。

謝辞：本研究は、科学研究費基盤研究(C)(課題番号：26420452、研究代表者：松崎裕)により実施しました。また、本研究において用いた強震記録は、国土交通省国土技術政策総合研究所、気象庁、防災

科学技術研究所(K-NET, KiK-net)、震災予防協会および米国太平洋地震工学研究センター(PEER)より提供して頂きました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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，2012。
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，2013。
- 3) 小野寺周，松崎裕，鈴木基行：極大地震動に対する免震支承－RC橋脚系のキャパシティデザインに関する研究，土木学会論文集A1，Vol. 72，No. 4，pp. I_708-I_718，2016。
- 4) 林訓裕，足立幸郎，甲元克明，ハツ元仁，五十嵐晃，党紀，東出知大：経年劣化した鉛プラグ入り積層ゴム支承の残存性能に関する実験的検証，土木学会論文集A1，Vol. 70，No. 4，pp. I_1032-I_1042，2014。
- 5) 小野寺周，松崎裕，鈴木基行：不確定性を考慮した免震支承－RC橋脚系の損傷モード評価，第8回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム論文集，pp. 371-377，2015。
- 6) 日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善出版，2004。
- 7) 足立幸郎：激震動下における免震橋梁構造の信頼性評価と限界状態設計法に関する研究，京都大学博士論文，2002。
- 8) 土木研究所：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。