# 論文 地震動強度が免震支承-RC橋脚間の損傷配分に及ぼす影響に関する 基礎的研究

小野寺 周\*1·松崎 裕\*2·鈴木 基行\*3

要旨:免震橋梁において,設計地震動を超過する強度の極大地震動に対する損傷配分の解明およびその地震 時安全性評価が重要である。本研究では,設計地震動を超過する強度の地震動作用下において,RC橋脚に対 する免震支承の降伏耐力や剛性の比が構造系の損傷配分に及ぼす影響に関する基礎的検討を行った。その結 果,設計地震動を超過する地震動強度において,降伏耐力比の増加に伴って免震支承の応答が低減されるこ とで,免震支承および RC橋脚の終局限界状態に対する余裕度は上昇する傾向にあること,降伏耐力比が等 しい場合,剛性比が大きい程,地震動強度の増大に伴って RC橋脚の余裕度はより低下することが示された。 キーワード:免震支承,RC橋脚,損傷配分,降伏耐力比,剛性比,限界状態,設計地震動

### 1. はじめに

免震橋梁の地震応答について,免震支承および RC 橋 脚の力学的特性を考えると,免震支承が有意な2次剛性 を有する一方で RC 橋脚は 2 次剛性を有さないため、地 震動強度の増大に伴って免震支承が受け持つ水平荷重は 増加することから, 庄司ら<sup>1)</sup>が示すように RC 橋脚の塑性 化進展が卓越する恐れがある。そのため、現行の道路橋 示方書<sup>2)</sup>においては,設計地震動に対して RC 橋脚の応 答を弾性域に留めることで確実に免震支承にエネルギー 吸収を図らせるような設計がなされている。免震支承の 力学的特性の最適化に関する研究として、Zhang & Huo<sup>3)</sup> は、RC 橋脚に対する免震支承の降伏耐力の比である降 伏耐力比や降伏剛性の比である剛性比等を確定的に変化 させた複数の免震支承-RC 橋脚系のフラジリティ評価 を行い,免震支承-RC 橋脚系の損傷確率が 50%となる 地震動強度を解析的に求めている。その上で、幾つかの 限界状態に対してその地震動強度が最大となる条件を免 震支承の最適な力学的特性としてそれぞれ示している。

一方で,平成24年の鉄道構造物等設計標準<sup>4)</sup>において, 極大地震動に対する構造物の危機耐性に関する考え方が 盛り込まれたように,免震橋梁においても設計地震動を 超過する強度の極大地震動に対して,損傷配分の解明お よび橋梁が致命的な損傷モードとならないような危機耐 性に配慮した設計が重要である。しかしながら,現行の 免震設計<sup>2)</sup>では設計地震動に対する地震時安全性評価は なされているものの,設計地震動を超過する強度の極大 地震動に対しては,免震橋梁における損傷配分の解明お よび地震時安全性評価手法の構築には至っていない。

以上の背景を踏まえ,本研究では,免震支承-RC 橋

脚系において,地震動強度が免震支承-RC 橋脚間の損 傷配分に及ぼす影響の解明を主目的とした免震橋梁の地 震時安全性評価に関する基礎的検討を行う。具体的には, 平成 24 年の道路橋示方書<sup>3)</sup>および平成 16 年の道路橋支 承便覧<sup>5)</sup>に基づいて免震設計された複数の免震支承-RC 橋脚系に対して,設計地震動を超過する強度の地震 動を用いた地震応答解析を行う。そして,構造系の終局 限界状態を免震支承の破断ひずみおよび RC 橋脚の終局 変位に基づいて評価し, RC 橋脚に対する免震支承の降 伏耐力の比である降伏耐力比および剛性比が免震支承, RC 橋脚および構造系としての終局限界状態に対する余 裕度に及ぼす影響について検討する。

### 2. 解析条件

#### 2.1 解析対象橋梁

免震支承-RC 橋脚間の降伏耐力比および剛性比が免 震支承-RC 橋脚系の損傷配分に及ぼす影響を検討する ために,解析対象橋梁として,I 種地盤上における降伏 耐力比および剛性比の異なる複数の免震橋梁を用いた。 免震支承には,道路橋の耐震設計に関する資料のに記載 されている鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB: Lead Rubber Bearing)を標準とし,諸元の異なる計5種類のLRBを用 いた。図-1に本研究で用いたLRBの履歴復元力特性を 示す。また,RC 橋脚および免震支承の諸元を表-1およ び表-2に示す。上部構造の質量は、参考文献 6)に掲載 されているLRBを用いた免震橋梁と同じ604.0tonとした。 なお、表-1に示す橋脚A および橋脚 B に対して表-2 に示すいずれの免震支承を設置した構造系についても, RC 橋脚および免震支承は道路橋示方書<sup>9</sup>および道路橋

*1	東北大学	大学院工学研究科土木工学専攻(学	生会員)	
*2	東北大学	大学院工学研究科土木工学専攻助教	博(工)	(正会員)
*3	東北大学	大学院工学研究科土木工学専攻教授	工博	(正会員)



図-1 免震支承の水平荷重-水平変位関係

表-1 RC 橋脚の諸元					
RC 橋脚の名称	橋脚 A	橋脚 B			
躯体質量	346.8ton	414.8ton			
降伏耐力 $Q_{YC}$	2994.6kN	3086.6kN			
降伏変位	0.0545m	0.0789m			
降伏剛性 Kc	54.9MN/m	39.1MN/m			
終局変位	0.329m	0.393m			
(靭性率 µCU)	(6.04)	(4.98)			

表-2 免震支承の諸元

免震支承の名称	免震支承 QR <sup>5), 6)</sup>	免震支承 QL	免震支承 QH	免震支承 KL	免震支承 KH
降伏耐力 QyB	1118.0kN	990.4kN	1253.4kN	1118.0kN	1118.0kN
1 次剛性 K1	40.0MN/m	42.3MN/m	40.1MN/m	34.9MN/m	59.0MN/m
2 次剛性 K2	6.16MN/m	6.50MN/m	6.17MN/m	5.37MN/m	9.07MN/m
等価剛性 KBEQ	10.3MN/m	10.9MN/m	10.4MN/m	9.12MN/m	14.1MN/m
破断ひずみ yBU			330% <sup>8)</sup>		

表-3 各構造系における降伏耐力比および剛性比

構造系の名称	A-QR	A-QL	A-QH	A-KL	A-KH	B-QR	B-QL	B-QH	B-KL	B-KH
降伏耐力比 RQ	0.373	0.331	0.419	0.373	0.373	0.362	0.321	0.406	0.362	0.362
剛性比 RK	0.187	0.199	0.189	0.166	0.256	0.262	0.280	0.265	0.233	0.360

支承便覧 5に基づく免震設計の照査を全て満足している。

免震支承の諸元に関して,表-2 に示す基準となる降 伏耐力および等価剛性を有する免震支承 QR に対して, 等価剛性がほぼ等しく降伏耐力が異なるものを免震支承 QL および免震支承 QH,降伏耐力が等しく等価剛性が異 なるものを免震支承 KL および免震支承 KH とした。こ こで,基準となる免震支承 QR の力学的特性は,参考文 献 6)に掲載されている断面を基に道路橋支承便覧<sup>5</sup>に従 って算定したものである。表-1 に示す橋脚 A と橋脚 B それぞれに対して表-2 に示す免震支承を設置した構造 系の名称について, RC 橋脚と免震支承の名称をそれぞ れ組み合わせて表-3 に示すように呼ぶこととする。

#### 2.2 動的解析モデル

時刻歴応答解析は、免震支承-RC 橋脚系を 2 質点 2 自由度系でモデル化し、Newmark  $\beta$  法( $\beta$ =1/4)により行っ た。各部材の履歴復元力特性について、免震支承は**図**-1 に示すハードニングを考慮したトリリニアモデル、RC 橋脚は骨格曲線をバイリニア型とした Takeda 型モデル<sup>7)</sup> を用いた。免震支承の復元力特性モデルに関して、ハー ドニングはせん断ひずみ 200%で生じるものとし、各剛 性の関係は道路橋支承便覧<sup>5</sup>に記載されている特性式を 用いて  $K_1:K_2=1:0.15$  とした。3 次剛性については足立<sup>8)</sup> と同様に等価剛性  $K_{BEQ}$  との比を  $K_{BEQ}:K_3=1:2.59$  とし、除 荷剛性は全てのひずみ領域で  $K_1$  と等しいものとした。等 価剛性  $K_{BEQ}$  は参考文献 6)と同様に、**図**-1 に示す有効せ ん断ひずみ 150%相当の水平変位における割線剛性である。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減衰を仮定した。

## 2.3 入力地震動

道路橋示方書<sup>2</sup>)に記載されている I 種地盤上における レベル 2 地震動について、タイプ I の標準波 3 波形およ びタイプ II の標準波 3 波形を入力地震動として用いた。 タイプ I 地震動およびタイプ II 地震動のそれぞれ 3 波形 は同一の弾性加速度応答スペクトルに調整されている。 また、設計地震動を超過する強度の地震動作用下におけ る免震支承および RC 橋脚の応答を検討するために、そ れぞれの標準波の加速度振幅を 100%として、位相特性 は変化させずに、加速度振幅を 150%および 200%に調整 したものを調整波 150%、調整波 200%として用いた。

# 2.4 免震支承-RC 橋脚間の降伏耐力比および剛性比の 評価方法

降伏耐力比 Roおよび剛性比 RK は次式で定義する。

$R_Q = Q_{YB}/Q_{YC}$	(1)	)
	(1)	ĺ

$R_K = K_{BEO}/K_C$	(2)
2	~ ~ /

ここに, *Q*<sub>YB</sub>: 免震支承の降伏耐力, *Q*<sub>YC</sub>: RC 橋脚の降 伏耐力, *K*<sub>BEQ</sub>: 図-1 に示す免震支承の等価剛性, *K*<sub>C</sub>: RC 橋脚の降伏剛性である。表-3 にそれぞれの構造系に おける降伏耐力比 *R*<sub>Q</sub>および剛性比 *R*<sub>K</sub>を示す。

### 2.5 終局限界状態に対する余裕度の評価方法

免震支承, RC 橋脚および構造系としての余裕度 SB,



図-3 各地震動強度に対する降伏耐力比と余裕度との関係(タイプ II 地震動)

Scおよび Ssについて,設計で考慮されている限界状態の うち,免震支承および RC 橋脚の水平変位に関する終局 限界状態に着目し,それぞれ次式で定義する。

$S_B = 1 - \gamma_B / \gamma_{BU}$	(3)
$S_C = 1 - \mu_C / \mu_C \mu_C$	(4)

$$S_{S} = S_{R} S_{C} \tag{5}$$

ここに、*SB*: 免震支承の終局限界状態に対する余裕度, *yB*: 免震支承の最大せん断ひずみ, *yBU*: **表**-2 に示す免 震支承の破断ひずみ, *Sc*: RC 橋脚の終局限界状態に対 する余裕度, *µc*: RC 橋脚の応答塑性率, *µcU*: **表**-1 に 示す RC 橋脚の靭性率, *Ss*: 構造系としての余裕度である。

各部材の終局限界状態について,免震支承は破断ひず み,RC橋脚は道路橋示方書<sup>2)</sup>に基づく終局変位とした。 免震支承の破断ひずみについて,曽田ら<sup>9)</sup>が実橋梁から 取り出した積層ゴムのせん断試験において,劣化による 性能低下が生じた可能性はあるものの,せん断ひずみ 300%程度で破断に至っていること,足立<sup>8)</sup>の研究におい て,複数のLRBのせん断試験から統計的に破断ひずみの 平均値を330%としていることを考慮して,本研究では 免震支承の破断ひずみを足立と同様に330%とした。

また,免震支承-RC橋脚系としての余裕度に関して, 免震支承および RC 橋脚の応答のいずれかが終局限界状 態に達した場合に構造系としても終局限界状態に至ると 考え,式(5)に示すように各部材の余裕度の積で表すこと とした。なお、本検討では、地震動に対する応答のばら つきを踏まえて、道路橋示方書<sup>2)</sup>に記載されているタイ プI地震動およびタイプII地震動それぞれ3波に対する 応答の平均値を用いて余裕度を算出する。

# 免震支承-RC 橋脚間の降伏耐力比が免震支承-RC 橋脚系の余裕度に及ぼす影響

免震支承-RC橋脚間の降伏耐力比が免震支承-RC橋 脚系の終局限界状態に対する余裕度に及ぼす影響につい て検討する。検討に際して、剛性比が余裕度に及ぼす影 響を小さくするために, 橋脚 A および橋脚 B それぞれに ついて, 表-2 に示す等価剛性がほぼ等しい免震支承 QR, QL および QH を設置した計 6 ケースの構造系を対象と した。図-2および図-3にタイプI地震動およびタイプ Ⅱ 地震動それぞれについて、降伏耐力比と標準波、調整 波150%および調整波200%に対する各構造系の3波平均 の余裕度との関係を示す。図中の直線は全6ケースの構 造系における各地震動強度に対する降伏耐力比と余裕度 との関係を示す回帰直線であり,最小二乗法により算出 した。なお、標準波に対する免震支承および RC 橋脚の 応答は共に設計上の許容値である許容せん断ひずみおよ び許容塑性率を下回っているため、終局限界状態に対し ては相応の余裕度が確保されている。

タイプ I 地震動 3 波に対する免震支承の余裕度の平均



図-4 構造系 A-QL および構造系 A-QH における水平荷重-水平変位関係 (I-I-1 標準波)



図-5 構造系 A-QL および構造系 A-QH における水平荷重-水平変位関係 (I-I-1 調整波 200%)

値について、図-2(a)より、いずれの地震動強度に対し ても降伏耐力比の増加に伴って上昇している。一方, RC 橋脚の余裕度について、図-2(b)より、同一の RC 橋脚 の場合,標準波および調整波 150%に対しては降伏耐力 比の増加に伴ってわずかに低下するが、調整波 200%に 対しては,降伏耐力比の増加に伴って余裕度は上昇する。 その結果、構造系の余裕度は図-2(c)に示すように、全 ての地震動強度に対して降伏耐力比の増加に伴って上昇 している。一方, RC 橋脚が異なる構造系を比較すると, 調整波 200%に対して,構造系 A-QL(Ro=0.331, RK=0.199) における RC 橋脚の余裕度は構造系 B-QL(Rg=0.321, RK=0.280)と比較して 53%低下しており, RC 橋脚の降伏 耐力、構造系の固有周期と地震動の卓越周期帯との関係 等が構造系の応答に及ぼす影響は大きい。ここで、図-2(b)について、各地震動強度に対する全6ケースにおけ る RC 橋脚の余裕度を比較すると、地震動強度の増大に 伴って RC 橋脚の塑性化が進展する結果,回帰直線に対 するばらつきは大きくなっている。タイプⅡ地震動に対 しても、図-3より、タイプ I 地震動に対する応答と同 様の関係が見られ, RC 橋脚の余裕度のばらつきは地震 動強度の増大に伴って大きくなり、調整波 150%および 調整波 200%に対しては、降伏耐力比の増加に伴って同 一の RC 橋脚の余裕度は上昇する傾向にある。

ここで、各地震動強度に対する免震支承-RC 橋脚間の損傷配分を検討するために、構造系 A-QL(*Rg*=0.331, *R<sub>K</sub>*=0.199)および構造系 A-QH(*Rg*=0.419, *R<sub>K</sub>*=0.189)におけ

る各部材の水平荷重-水平変位関係を比較する。図-4 および図-5にタイプI地震動である I-I-1 標準波および I-I-1 調整波 200%に対する構造系の水平荷重-水平変位 の履歴を示す。図の横軸について,諸元の異なる部材の 応答を基準化して比較するため,免震支承はせん断ひず み, RC 橋脚は応答塑性率で評価している。

図-4(a)より,免震支承 QH は免震支承 QL と比較し て降伏耐力が増加するため,最大せん断ひずみが 30%低 減している一方で,最大水平荷重は 4%増加している。 その結果,免震支承から RC 橋脚へ伝達される水平荷重 が増加するため,図-4(b)のように構造系 A-QH におけ る RC 橋脚の応答は構造系 A-QL の応答よりも 5%増加し ている。このように,RC 橋脚がほぼ弾性応答に留まる 強度の標準波に対しては,降伏耐力比の増加に伴って免 震支承の余裕度は上昇し,RC 橋脚の余裕度は低下する。

一方,図-5(a)より,I-I-I 調整波 200%に対する最大せん断ひずみは免震支承 QL において 245%まで進展してハードニングが生じている一方で,免震支承 QH においては 199%に留まっている。その結果,免震支承 QH では免震支承 QL と比較して最大水平荷重が 24%低減しているため,図-5(b)より,構造系 A-QH における RC 橋脚の応答塑性率は構造系 A-QL よりも 27%低減している。このように,RC 橋脚の塑性化が進展する強度である調整波 200%に対しては,同一の RC 橋脚の場合,降伏耐力比の増加に伴って免震支承の減衰性能が向上する結果,免震支承および RC 橋脚の余裕度は共に上昇する。



# 4. 免震支承-RC 橋脚間の剛性比が免震支承-RC 橋脚 系の余裕度に及ぼす影響

免震支承-RC橋脚間の剛性比が免震支承-RC橋脚系の終局限界状態に対する余裕度に及ぼす影響について検

討する。図−6および図−7に、タイプI地震動3波およ びタイプII地震動3波について、剛性比と各地震動強度 に対する構造系の余裕度との関係を示す。前節と同様に、 降伏耐力比が余裕度に及ぼす影響を小さくするために、 構造系 A および構造系 B それぞれについて,表-2 に示 す降伏耐力の等しい免震支承 QR, KL および KH を設置 した計 6 ケースの構造系を対象として検討を行う。

図ー6(a)および図ー7(a)より,タイプI地震動およびタ イプII地震動の両者に対する免震支承の余裕度は,地震 動強度の増大に伴ってわずかにばらつくものの,剛性比 の増加に伴って低下する傾向にある。一方,RC橋脚の 余裕度についても,図ー6(b)および図ー7(b)より,同一 のRC橋脚の場合は剛性比の増加に伴って低下する傾向 にある。また,図ー6(b)より,タイプI地震動に対して, 剛性比のみが異なる構造系 B-KL(*Rq*=0.362, *Rx*=0.233)と 構造系 B-KH(*Rq*=0.362, *Rx*=0.360)における RC橋脚の余 裕度を比較すると,剛性比の大きい構造系 B-KH におけ る余裕度は,構造系 B-KL に比べて標準波で1%,調整波 150%では14%低下しており,調整波 200%では 28%まで 低下している。このように,降伏耐力比が等しい構造系 を比較した場合,剛性比が大きい程,地震動強度の増大 に伴って RC橋脚の余裕度はより大きく低下する。

ここで,図-8および図-9にタイプ II 地震動である II-I-3 標準波および II-I-3 調整波 200%に対する構造系 B-KL および構造系 B-KH の水平荷重-水平変位の履歴 を示す。なお、各構造系について、表-1および表-2 に示す RC 橋脚の降伏剛性と免震支承の等価剛性を用い た等価固有周期は構造系 B-KL で 2.08s,構造系 B-KH で 1.76s である。図-8(a)および図-8(b)より, 免震支承 KH は免震支承 KL と比較して最大せん断ひずみが 48%,最 大水平荷重は43%増加しており、その結果、構造系 B-KH における RC 橋脚の応答塑性率は構造系 B-KL に比べて 6%増加している。これは、剛性比の増加に伴って構造系 の等価固有周期が短くなり、地震動の卓越周期帯に近づ いたためである。また,図-9(a)および図-9(b)より, 調整波 200%に対しても標準波と同様に、構造系 B-KH における部材の応答は構造系 B-KL における応答に比べ て増加しており,剛性比の増加に伴って余裕度は低下する。

### 5. まとめ

本研究では、地震動強度が異なる降伏耐力比および剛 性比を有する免震支承-RC 橋脚系の損傷配分に及ぼす 影響に関する基礎的検討を行った。以下に本研究で得ら れた知見をまとめる。

- 設計地震動に対して、RC 橋脚に対する免震支承の 降伏耐力の比である降伏耐力比の増加に伴って免 震支承の変形が抑制される結果,免震支承の終局限 界状態に対する余裕度は上昇する傾向にある。一方, 免震支承の水平荷重は増大するため、RC 橋脚の余 裕度は降伏耐力比の増加に伴ってわずかに低下する。
- 2) 設計地震動を超過する強度の地震動に対して、降伏

耐力比の増加に伴って免震支承の応答が低減する 結果,免震支承の余裕度は上昇する。一方,RC 橋 脚は塑性化が進展するために,その余裕度は大きく ばらつくものの,同一のRC 橋脚の場合,降伏耐力 比の増加に伴って余裕度は上昇する。

3) 設計地震動およびそれを超過する強度の地震動に 対して、免震支承と RC 橋脚の余裕度は剛性比の増 加に伴って低下する傾向にある。特に、降伏耐力比 が等しい場合、剛性比が大きい程、地震動強度の増 大に伴って RC 橋脚の余裕度はより大きく低下する。 ただし、本研究で用いた構造系の諸元は限定されたも のであり、より広範な諸元で検討を行う必要がある。今 後、構造系の降伏耐力比と損傷配分との関係を整理した 上で、構造系の終局限界状態に対して所定の余裕度が確 保されるような降伏耐力比の同定を行う必要がある。

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。こ こに記して関係各位に謝意を表します。

#### 参考文献

- 庄司学,川島一彦,斎藤淳:免震支承とRC橋脚が ともに塑性化する場合の免震橋の耐震性に関する 実験的検討,土木学会論文集,No. 682/I-56,pp. 81-100,2001.7
- 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
- Zhang, J. and Huo, Y.: Evaluating effectiveness and optimum design of isolation devices for highway bridges using the fragility function method, Engineering Structures, Vol. 31, No. 8, pp. 1648-1660, Aug. 2009
- 鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同 解説 耐震設計,丸善出版,2012
- 5) 日本道路協会:道路橋支承便覧,丸善出版,2004
- 6) 日本道路協会:道路橋の耐震設計に関する資料, 1997
- Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 96, No. 12, pp. 2557-2573, Dec. 1970
- 8) 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,2002.1
- 9) 曽田信雄,山田金喜,木水隆夫,広瀬剛,鈴木基行: 東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支 承の性能試験,構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 516-526, 2013.3