

## 免震支承の付加によって補強されたRC橋脚の地震時挙動

## Nonlinear Earthquake Response of RC Bridge Pier Retrofitted with HDR Seismic Isolator

伊津野和行\* ウィリヤム・タンゾ\*\* 家村浩和\*\*\* 山田善一\*\*\*\*

by Kazuyuki IZUNO, William TANZO, Hirokazu IEMURA and Yoshikazu YAMADA

Effectiveness of a seismic isolator in retrofitting an RC bridge pier was studied using hybrid experimental system and numerical simulations. A high-damping rubber (HDR) bearing was tested using the substructured hybrid experimental system. The results were then compared with the analytical response of the original non-isolated pier. The effectiveness of the HDR isolator was shown numerically using the acceleration responses and the hysteretic responses. Furthermore, the effectiveness of the isolator to the slightly damaged pier for retrofit work was also discussed. After the numerical simulations using weak input motions (pre-loading), isolators were assumed to be installed on the damage piers for retrofitting. Then, the response of the isolated damaged structure for the second loading (main loading) was compared with the first loading case of the isolated new structure. The first loading without isolators using weak input motions did not affect the response under second loading with isolators using strong input motions.

Key Words: seismic isolator, hybrid experiment, retrofit, RC bridge piers

## 1. はじめに

既存構造物の耐震補強は、都市全体の耐震安全性を高めるためにも重要な問題である。近年、免震支承を用いた免震橋梁の研究が盛んになり、実際に免震橋梁の建設も実施されるようになった。それにともない、免震支承の設置による既存橋梁の耐震補強も実現可能な段階になったと考えられるが<sup>1)</sup>、我国ではまだ実施例がない。建築構造物の耐震補強の手法としては、既に免震構造が採用された例も数多く見受けられる<sup>2-4)</sup>。既存橋梁の耐震補強として免震支承を設置する場合、新しく免震橋梁を設置する場合と比較をすると、橋梁が既にある程度劣化しているかどうか大きな違いとなる。交通荷重や地震被害など、何らかの原因で既に劣化している橋梁に免震支承を設置した際に、新しい免震橋梁と同等な免震効果が得られるかどうか検討することは重要だと考えられる。本研究では、新しい橋脚と、一度小規模な地震を経験した橋脚をモデル化し、その免震化による免震効果を実験的に検討して、橋梁の初期条件の違いが免震橋梁の地震応答に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。前半部では、主に免震橋梁と非免震橋梁の地震応答の違いについて考察し、後半部では、劣化の有無という橋脚の初期条件の違いが地震応答に及ぼす影響について考察する。

\* 工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科 (〒603 京都市北区等持院北町56-1)

\*\* 工博 埼玉大学助手 工学部建設工学科 (〒338 浦和市下大久保255)

\*\*\* 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

\*\*\*\* 工博 中部大学教授 工学部土木工学科 (〒487 春日井市松本町1200)

## 2. 実験概要

本実験では、免震支承として高減衰ゴム支承を対象とし、一辺25cmの正方形断面で、層厚12mmのゴムを4層、間に1mmの鋼板をはさんで重ねた図1に示す縮尺モデルを用いた。本実験で用いた高減衰ゴム支承の基本的動特性については、既報を参照されたい<sup>5)</sup>。

ここで取り上げた免震支承は基本的にバイリニア型の履歴復元力特性を示すが、大変形領域に入るとゴム特有のハードニング現象が現われる。本研究では免震支承の大変形領域における非線形挙動を明らかにするため、サブストラクチャーハイブリッド実験の手法<sup>6)</sup>を用いた実験を実施した。ハイブリッド実験は、コンピューターによる地震応答計算に、供試体の非線形履歴復元力特性を実験から直接取り込むサブルーチンを組み合わせたシステムであり、ここでは構造物の一部分だけ取り出して実験を行うサブストラクチャー実験として実施している。つまり、免震支承のみを実験要素、他の橋脚および桁は解析要素と考え、その動的挙動をコンピューターで統合して解析するシステムになっている。実験システムの概要を図2に示す。

図中の3台のアクチュエーターの内、上から吊るした2台で供試体に一定軸力を与えている。パソコンによって橋脚の地震応答を計算し、水平に設置された1台のアクチュエーターによってその応答変位を与えている。アクチュエーターに設置されたロードセルによって復元力を計測し、それをパソコンに取り込んで、次のステップの地震応答計算を行なっている。

耐震補強を行う対象構造物としては、図3に示す1本柱T型RC橋脚<sup>7)</sup>を選び、図4(1)のように非線形せん断型バネを用いた1自由度系としてモデル化を行った。図4(1)は、免震支承をつけていないオリジナル橋脚のモデルであり、図4(2)は、免震支承で耐震補強された橋脚のモデル(全体で2自由度系)である。橋脚の履歴復元力特性としては、繰り返し载荷による劣化を考慮した劣化型トリリニアモデルである、3パラメーターモデル<sup>8)</sup>を採用した。これは、繰り返し载荷による剛性劣化と強度劣化、及びせん断変形によるピンチング効果を3つのパラメーターによって表現するモデルであり、RC構造物の非線形履歴応答をよく表現することができると報告されている。剛性劣化はその時点までの最大応答値と除荷時の指向点によって決まり、強度劣化はその時点までの履歴エネルギー吸収量の関数で決まるため、最大応答値や履歴エネルギー吸収量の初期値を設定することによって、劣化した構造物をモデル化することが可能となる。なお、本研究でモデル化した橋脚は曲げ変形が卓越するものと仮定し、せん断変形によるピンチング効果を示すパラメーターは考慮しなかった。

入力地震動は、道路橋示方書・耐震設計編<sup>9)</sup>に記載された標準波形を用いた。用いた免震支承モデルがスケールモデルのため、入力地震波のスケールリングも考慮する必要がある。ここでは、実験による免震支承の最大応答変形量がゴム総厚の100%及び200%程度になるよう、加速度波形の最大値をそれぞれ60gal及び120galに修正して入力した。実験では各地盤種別毎に設定された3種類の地震波を用いたが、ここではI種地盤に対応する地震波を入力したケースを中心に報告する。なお、II種およびIII種地盤に対応する地震波を入力した場合も、ほぼ同様な傾向を示した。

まず、1自由度オリジナル橋脚モデルに対して、入力波形の最大加速度を60galとして、少し非線形応答を示す程度の地震応答数値シミュレーションを行った。このシミュレーションの終了時の履歴復元力特性を初期値として、引き続き耐震補強をした場合の再度の強い入力(最大加速度120gal)に対するハイブリッド地震応答実験を実施した。つまり、はじめのシミュレーションによってある程度劣化した橋脚モデルを作成することになり、それまでの応答の最大値、エネルギー吸収量、劣化した剛性などを初期値として用いて、地震応答実験を行なうわけである。同様に、数値シミュレーション終了時の値を初期値として、耐震補強を施さない場合に対しても、再度の地震に対する地震応答を数値シミュレーションによって求めた。これらの比較をすることによって、耐震補強効果を明らかにすることができると考えた。さらに、橋脚の履歴復元力特性として劣化していないものを用いて、耐震補強された橋脚のハイブリッド地震応答実験を実施し、橋脚

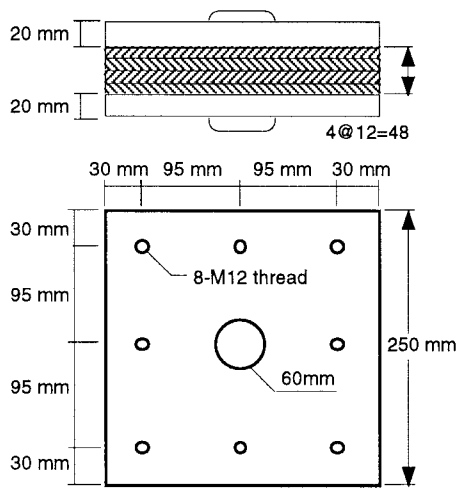


図1 高減衰ゴム(HDR)支承の供試体

表1 荷重ケースと荷重順序 (表中-は無荷重を表す)

荷重ケース	前荷重		主荷重	
	最大入力 加速度	免震支承	最大入力 加速度	免震支承
Case A	60 gal	なし	120 gal	有り
Case B	--	-	120 gal	有り
Case C	60 gal	なし	120 gal	なし
Case D	-	-	120 gal	なし

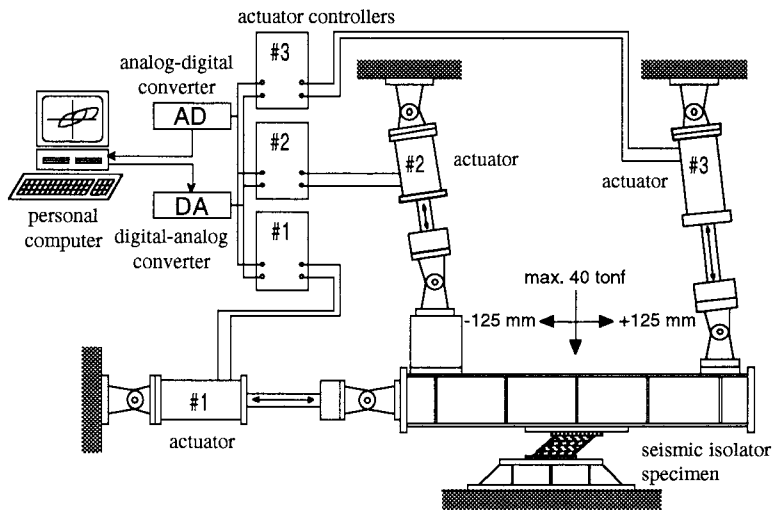


図2 ハイブリッド地震応答荷重実験システム

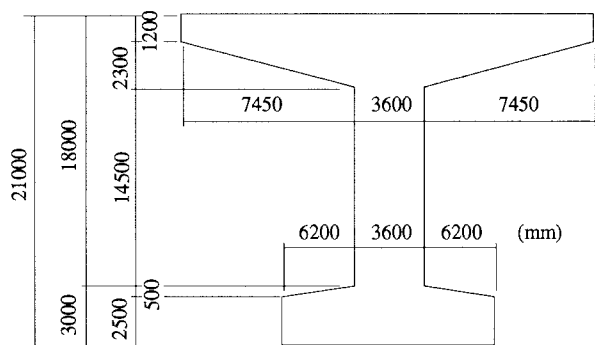
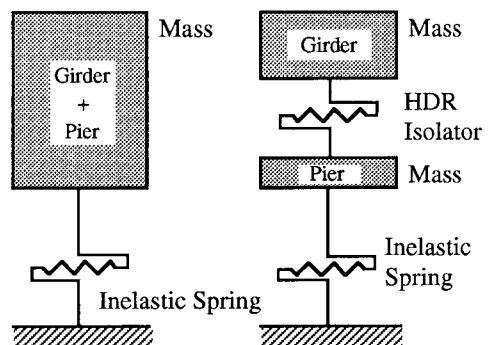


図3 T型一本柱橋脚



(1) 非免震橋脚モデル (2) 免震橋脚モデル

図4 数値計算に用いる橋脚モデル

の劣化が橋脚の地震応答に及ぼす影響について検討した。

実験ケースを表1に示す。橋脚の状態として、非線形領域に少し入る程度の応答（最大塑性率が1.2程度）を経験して多少劣化している場合と、過去に地震応答を経験していない場合の2通り、そしてそれぞれ免震支承を付けた場合と付けない場合の2通りについて、最大加速度を120galに修正した地震波形に対する応答を検討した。表中Aは劣化した橋脚に免震支承を付け加えたケース、Bは劣化していない橋脚に免震支承を付けたケース、Cは劣化した橋脚に補強を加えなかったケース、Dは劣化していない橋脚をそのまま用いたケースである。ケースAとCの1度目の弱い地震波入力による応答と、ケースCとケースDの強い地震波入力による応答は数値シミュレーションで求め、ケースAとケースBの強い地震波入力による応答をハイブリッド実験によって求めた。

### 3. 免震支承の有無による応答の相違

まず、劣化していない橋脚を仮定したケースBとケースDを比較して、免震支承の有無による地震応答の相違について検討する。

図5に免震化していないケースDの加速度応答波形を示す。卓越周波数は2Hz前後である。図6は免震化したケースBの加速度応答波形であり、図6(1)が支承の下の橋脚部分の応答を示し、図6(2)が支承の上の桁の応答を示す。桁の重量が橋脚部に比較してかなり重いこともあり、橋脚は7Hz程度で細かく振動しており、最大加速度もケースDの144galより大きい210galとなっている。桁は免震化によって周期2秒に長周期化され、加速度応答も多少小さくなった。最大値は128galと9割程度にしか小さくなっていないものの、最大値を示す载荷開始2秒後の大きな1波以外は小さく抑えられている。

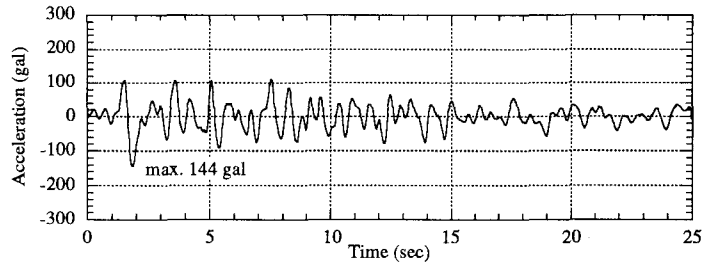


図5 免震化していないCase Dの加速度時刻歴応答波形

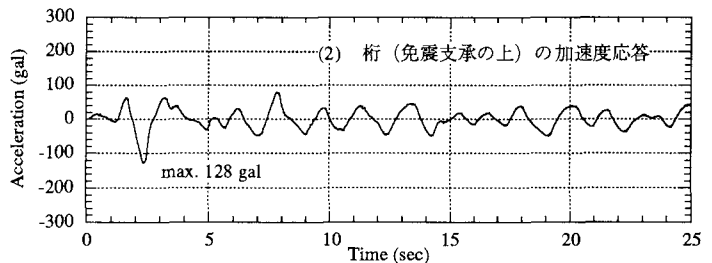
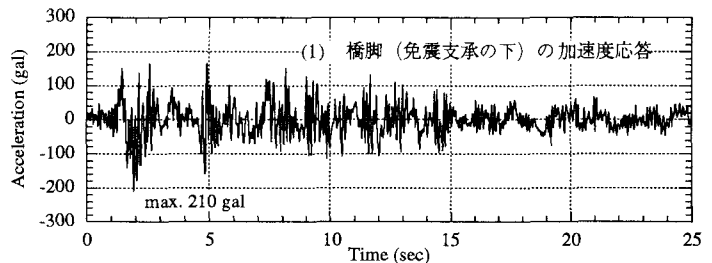


図6 免震化したCase Bの加速度時刻歴応答波形

この時の変位-復元力関係の履歴曲線を図7と図8に示す。免震化されていないケースDでは、図7のように最大3 $\delta_y$ 程度の大きな塑性変形を繰り返している。これに対して免震化したケースBでは、橋脚が図8(1)のようにほぼ線形応答を示している。塑性域に大きく入っているのは一度だけであり、これは载荷2秒後の大きな1波によるものである。この時免震支承は図8(2)の最大応答を示す曲線に示されるように、大きく非線形領域に入ってハードニング現象をおこしており、安定なバイリニア型履歴復元力特性からはずれていることがわかる。前述したように、橋脚の加速度応答は非免震時より大きくなったが、これは橋脚の応答では2次モードが支配的になったことに加え、橋脚がこのように線形応答をするためであり、非免震のケースDで橋脚の応答を線形と仮定した場合と比較すれば、免震化されたケースBの加速度応答は約90%と小さい値である。つまり、免震化によって橋脚の損傷を防ぐことができたために、加速度応答値は大きく

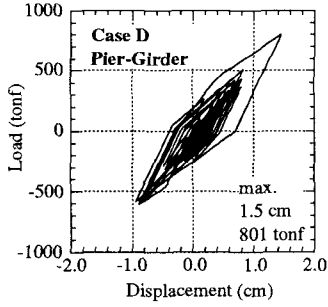
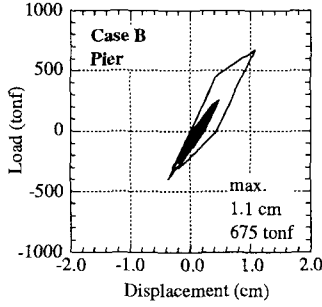
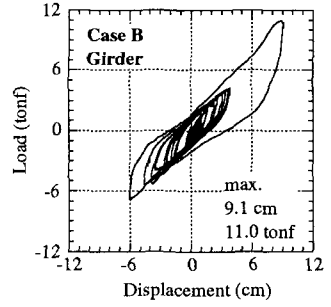


図7 Case Dの履歴応答曲線  
(非免震)

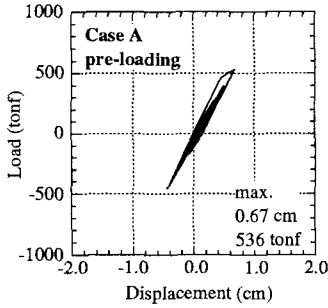


(1) 橋脚の履歴応答

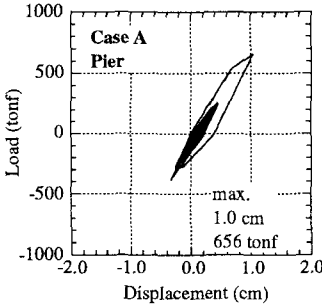


(2) 桁の履歴応答

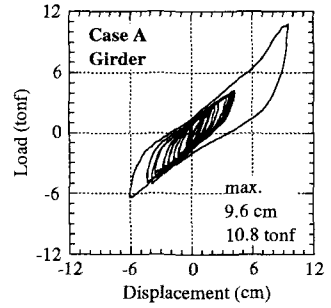
図8 免震化したCase Bの履歴応答曲線



(1) 弱い入力による前載荷



(2) 主載荷時の橋脚



(3) 主載荷時の桁

図9 免震支承を設置して補強したCase Aの履歴応答曲線

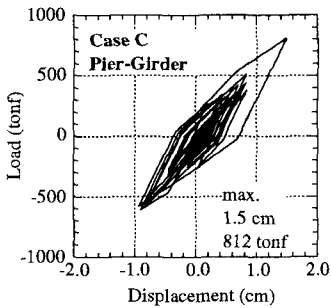


図10 Case Cの主載荷時の履歴応答

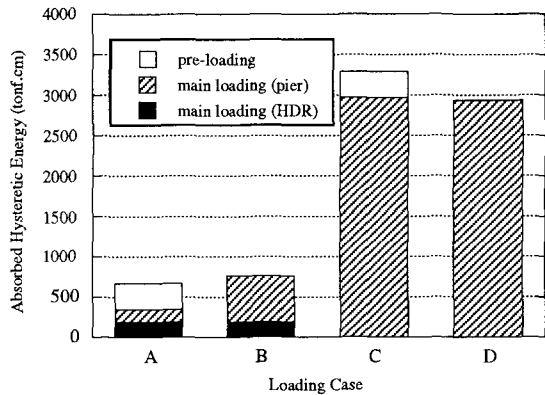


図11 履歴吸収エネルギー量の比較

なったとすることができる。また、橋脚の変形は非免震時の1.5cm（図7）から、図8(1)の1.1cmへ小さくなるが、桁の橋脚に対する最大相対変形は図8(2)のように9.1cmと大きくなる。図7と図8から、それぞれ橋脚の履歴エネルギー吸収量を計算すると、非免震のケースDに比べて、免震化したケースBでは約25%と小さな値となった。塑性変形によって消費したエネルギー量がこのように小さいということは、橋脚の損傷もそれだけ少ないことが予想され、この点からも免震支承の効果は大きい。

なお、他の地盤種別に対応した地震波や、最大加速度を60～120galに変えた地震波を入力した場合に対しても同様な実験と解析を行ない、表2の結果が得られた。この表2は、免震化した場合の最大加速度・橋脚の最大変形・橋脚基部の最大せん断力・橋脚の履歴エネルギー吸収量を、それぞれのケースで免震化しない場合に対する比で示したものである。この表から総合して検討すると、免震化によって桁の最大加速度は50～90%、橋脚の最大変形は40～75%、基礎部せん断力の最大値は50～85%、履歴エネルギー吸収量は6～25%と小さくなった。いずれも本論文で示したI種地盤用地震波を最大120galで入力したケースが、最も効果が小さかった。これは、前述したような載荷開始2秒後の大きな応答が、一度だけとはいえず生じることが原因となっている。それ以外のケースでは、免震化された橋脚はほぼ線形応答を示し、ほとんど損傷を受けない結果となっている。

表2 免震化した場合の各指標が非免震の場合に対する比率

入力地震波	入力地震波の最大加速度	橋脚の最大加速度応答	桁の最大加速度応答	橋脚の最大変形	橋脚基部の最大せん断力	橋脚の履歴エネルギー吸収量
I種地盤用	60 gal	1.16	0.63	0.49	0.63	0.13
	90 gal	1.45	0.80	0.50	0.75	0.15
	120 gal	1.46	0.89	0.73	0.84	0.26
II種地盤用	60 gal	1.13	0.57	0.42	0.52	0.13
	90 gal	1.12	0.62	0.33	0.57	0.07
	120 gal	1.15	0.67	0.36	0.58	0.08
III種地盤用	60 gal	1.22	0.55	0.40	0.50	0.12
	90 gal	1.18	0.57	0.32	0.52	0.06
	120 gal	1.26	0.66	0.32	0.59	0.06

#### 4. 橋脚の初期条件による応答の相違

ここでは、橋脚の劣化の有無によって地震応答がどのように異なってくるかという点について検討した。まず図9は、ケースAの劣化した橋脚に免震支承を付け加えた場合の履歴曲線である。図9(1)は最大加速度60galの入力地震動による免震設置前のオリジナル橋脚の地震応答シミュレーション結果であり、この1度目の応答によって応答が多少非線形領域に入っていることがわかる。最大塑性率は約1.2である。この応答計算終了時の履歴復元力特性を初期値として、最大加速度120galの入力地震動による免震設置後のハイブリッド地震応答実験を行なった結果が、橋脚の応答図9(2)と桁の応答図9(3)である。免震支承の付加によって固有周期が長周期化し、桁の応答は復元力が小さく変形が大きくなっている。最大応答付近では、ゴムのハードニング現象が若干見られる。これに対して前述の図8は、劣化の無い橋脚に免震支承を付け加えた場合のケースBの結果である。同様に図8(1)が橋脚の応答、図8(2)が桁の応答を示している。

初期劣化のある図9(2)のケースAと初期劣化のない図8(1)のケースBを比較すると、橋脚の応答は初期剛性の違いによって多少非線形領域における履歴曲線に違いが見られる。しかし応答量は、免震支承を取り付けないケースC（図10）及びケースD（図7）の応答が大きく非線形領域に入っていることを考えると非常に小さい。最大応答値もほぼ同様で、最大変位で1mm、最大復元力で19tonfの差でしかない。加速度応答で比較すると、最大値は初期劣化のあるケースAの方が、劣化のないケースBより小さい値を示した。これは、

初期剛性が低下しているケースAの初期固有周期が1割程度長くなっているためであり、低減率は入力される地震波によって異なってくる。その差は、I種地盤用地震波を入力した場合で20%、II種およびIII種地盤用地震波を入力した場合で5%程度であった。

また桁（免震支承）の応答は、橋脚に初期劣化のある図9(3)のケースAと初期劣化のない図8(2)のケースBでは、ほとんど違いが見られない。最大変位で5mm、最大復元力で0.2tonfの差であり、履歴応答曲線の形状もほぼ同じである。本研究で示す最大塑性率1.2程度の応答を過去に経験した橋脚に対する検討では、橋脚の初期劣化の有無は、免震化された桁や免震支承の応答にはほとんど影響を与えないことがわかる。

さらに、免震化していないケースC（図10）とケースD（図7）の比較では、この場合初期剛性の違いなど問題にならないほど大変形の繰り返し入力を受けており、応答挙動はほぼ同じとなっている。構造物の抵抗強度をはるかに越えた地震入力を受けた場合、多少の劣化の有無に関わらず、構造物が大きな損傷を受けることに対応している。

これらの各ケースにおける履歴吸収エネルギー量を比較した図が図11である。免震支承を付けたケースAとBは履歴エネルギー吸収量が小さく、損傷も少ないことが予測される。また、免震支承による履歴エネルギー吸収量は、ケースAとケースBとで同じである。このことは、1度非線形応答を経験した既存構造物に対しても、免震支承が十分効果的に動作することを示している。また、ケースAにおいて2度の地震で吸収した履歴エネルギー量と、ケースBにおいて1度の地震で吸収したエネルギー量はほぼ同じとなった。これはケースAの2度目の地震において橋脚が吸収したエネルギー量が少なくなったためであり、免震支承による補強をすることによって、橋脚本体に対して特別に補修を行わなくとも橋脚の損傷を小さく抑えられることが期待できる。

なお、ここではI種地盤用の地震波を入力した場合について示したが、他の地盤種別に対応した地震波を入力した場合も同様に、最大塑性率1.2程度の地震応答を経験した橋脚に対する検討を行なった。結果をまとめたものを表3に示す。この表3は、A～Dの各ケースにおける最大加速度・橋脚の最大変形・橋脚基部の最大せん断力・橋脚の履歴エネルギー吸収量を、初期劣化も免震支承もないケースDにおける値に対する比で示したものである。いずれもI種地盤用の地震波を入力した場合と同様な傾向が得られ、既存橋梁に対する免震効果が期待できる結果となった。

表3 各指標に対する初期劣化や免震化の影響（ケースDにおける値に対する比率）

入力地震波	入力地震波の最大加速度	橋脚の最大加速度応答	桁の最大加速度応答	橋脚の最大変形	橋脚基部の最大せん断力	橋脚の履歴エネルギー吸収量
I種地盤用	A	1.14	0.87	0.70	0.82	0.05
	B	1.46	0.89	0.73	0.84	0.20
	C	1.01	1.01	1.03	1.01	1.01
	D	1	1	1	1	1
II種地盤用	A	1.12	0.60	0.28	0.50	0.05
	B	1.15	0.67	0.36	0.58	0.13
	C	1.00	1.00	1.00	1.00	1.08
	D	1	1	1	1	1
III種地盤用	A	1.24	0.65	0.35	0.58	0.05
	B	1.26	0.66	0.32	0.59	0.12
	C	0.99	0.99	1.00	0.99	1.01
	D	1	1	1	1	1

## 5. まとめ

以上本研究では、何らかの原因で既に劣化している橋梁に免震支承を設置した際に、新しい免震橋梁と同等な免震効果が得られるかどうか実験的・解析的に検討した。

得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) RC橋脚を劣化型トリリニアモデルで表わし、弱い地震波入力による数値シミュレーション結果を次の載荷の初期値として用いることによって、劣化した既存橋梁をモデル化した。その上でサブストラクチャーハイブリッド実験を行なうことにより、免震支承を取り付けた既存橋梁の地震応答を予測する手法を示した。
- (2) 免震支承がなければ大きく塑性変形を繰り返す地震入力を受ける場合にも、免震支承を設置すれば橋脚の応答はほぼ線形領域に留まった。橋脚の応答は高次モードが支配的となるうえに線形応答を示すため、橋脚の最大加速度応答値は免震支承がない場合より大きくなったが、エネルギー吸収量や橋脚の変形量は小さくなった。したがって、免震支承の設置によって、橋脚の損傷を小さく抑えることが可能である。
- (3) 橋脚の初期劣化として過去に最大塑性率1.2程度の地震応答を経験した橋脚を考えた場合、初期剛性の違いによって橋脚の履歴応答曲線には差が生じた。しかし、橋脚の最大応答値や桁の履歴応答は初期劣化のない場合と同じであった。特に、桁（免震支承）の応答は、最大値もエネルギー吸収量もほぼ同じであった。これは、設計時と比べて何らかの原因で既に劣化している可能性のある既存橋梁の耐震補強に免震支承を用いても、十分免震効果が期待できる結果である。

今後、初期劣化の程度の及ぼす影響の検討や、さらには橋脚を多自由度でモデル化し、予測される損傷箇所の検討などを進めることが必要だと考えられる。

## 謝辞

実験にあたって協力していただいた中西伸二技官をはじめとする京都大学工学部土木工学教室耐震工学研究室の方々、橋脚のモデル化にあたって助言していただいた京都大学工学部の井上晋助手と阪神高速道路公団の広瀬鉄夫氏に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) I. G. Buckle and R. L. Mayes: Seismic Retrofit of Bridges Using Mechanical Energy Dissipators, Proc. of the 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Vol. 3, pp. 305~314, 1990.
- 2) F. Braga and G. Zampino: Seismic Isolation of the Ancient Bell-Tower of Melfi, Proc. of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 4, pp. 2301~2304, July 1992.
- 3) H. E. Keshkar and R. D. Hanson: Rehabilitation of Buildings Using Multiple Levels of Passive Control, Proc. of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 9, pp. 5155~5158, July 1992.
- 4) G. C. Delfosse and P. G. Delfosse: Seismic Rehabilitation of a Shear Wall Building by means of Base Isolation, Proc. of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 9, pp. 5159~5162, July 1992.
- 5) 山田善一・家村浩和・William Tanzo・鶴野禎史・中村鎮雄：ハイブリッド地震応答載荷実験手法による高減衰ゴム支承の免震効果，構造工学論文集，Vol. 37A, pp. 851~862, 1991年3月。
- 6) W. Tanzo, Y. Yamada, Y. Uno and S. Nakamura: Substructured Hybrid Loading Tests of High-Damping Rubber Seismic Isolators for Inelastic Earthquake Response of Bridge Structures, Proc. of 10th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 4, pp. 2233~2236, July 1992.
- 7) 阪神高速道路公団：鉄筋コンクリート構造物標準図面集，1991年。
- 8) Y. J. Park, A. M. Reinhorn and S. K. Kunnath: Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings, Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VII, pp. 211~216, August 1988.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，1990年2月。

(1993年9月16日受付)