

(211) 強震下における免震橋のサブストラクチャーハイブリッド実験

京都大学工学部 家村 浩和 中部大学工学部 山田 善一  
立命館大学理工学部 伊津野和行 阪神高速道路公団 南荘 淳  
京阪電気鉄道(株) 野村 武司 京都大学大学院 渡辺 典男

1. はじめに 本研究では、免震支承試験用のハイブリッド実験システムを用いて、高減衰積層ゴム支承(HDR)、鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)、および摩擦型ダンパー・積層ゴム併用型支承(SRB)の3種類の支承に対してハイブリッド地震応答実験を行い、各種地震波形に対する応答値を比較、検討した。さらに、LRBを有する橋梁モデルに対してサブストラクチャー・ハイブリッド地震応答実験を行い、得られた結果と非免震橋梁モデルの数値シミュレーション結果を比較することにより加速度の低減効果を定量化するとともに、地震動の入力レベルや橋脚モデルの違いが構造系全体の免震効果におよぼす影響について検討した。

2. 実験システムの概要と供試体 本実験で用いた免震支承用のハイブリッド実験システムの全容を図-1に示す。鉛直に設置された2台のアクチュエーターにより、水平载荷ビームを介して免震支承に設計荷重相当の40tonfの軸力を与え、もう1台の大ストロークのアクチュエーター(±250mm)により、免震支承を水平方向にせん断変形させる、大変形試験が可能なシステムである。

計測されたデータは全てAD変換されて計算機内に取り込まれ、計算された応答変位はDA変換された後、载荷システムに送られるフィードバックシステムになっている。また、本実験で用いた各支承の形状は表-1に示すとおりで、平面寸法は300×300mmに統一されている。SRBは高減衰積層ゴム支承の直下に滑り摩擦型のダンパーを有する構造になっている。

3. 1自由度モデルのハイブリッド

地震応答実験の概要 1自由度にモデル化された上部構造-免震支承系の運動方程式は次のように表される。

$$m\ddot{x}_t + c\dot{x}_t + f_t^{expt} = -m\ddot{z}$$

振動質量mは静的繰り返し载荷実験から得られた各支承の等価剛性より、構造物モデルの等価固有周期が2.0秒になるよ

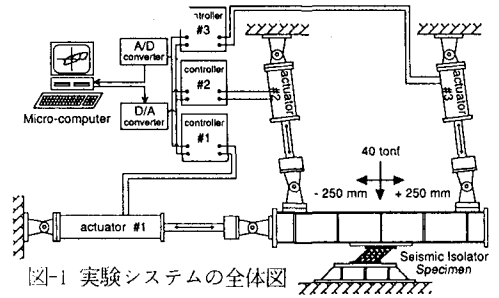


図-1 実験システムの全体図

表-1 各支承の形状 (mm)

	総厚	ゴム層	プレート	備考	
HDR	142.8	15@4.8	14@2.2		
LRB	140.0	11@7.0	10@2.3	鉛プラグφ60	
SRB	ゴム	134.0	6@11.0	5@6.0	高減衰ゴム使用
	ダンパー	摩擦面	400×330		純テフロン & ステンレス

表-2 各地震波形の最大入力加速度 (gal)

	レベル1	レベル2
I種地震用	105	125
II種地震用	95	180
III種地震用	80	SRB実験時 160

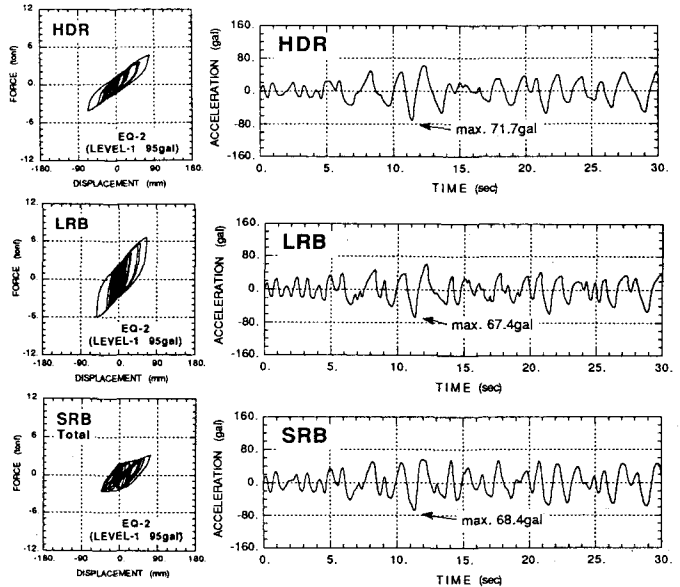


図-2 ハイブリッド実験の結果 (レベル1、II種)

履歴曲線を描くことができる。この図はレベル2のII種地盤用の地震波に対するものであるが、大変形時においては滑り遊間のゴム製パッキン材によってスライディングプレートの変位が拘束されている様子がよく分かる。次に、各支承を用いて一般の構造物を免震化することにより、加速度応答をどの程度抑えることができるか検討した。非免震モデルには1自由度線形モデル（固有周期T、減衰定数5%）を仮定し、このモデルの最大応答加速度に対する実験の最大応答加速度の比率を加速度低減率と定義した。非免震モデルの固有周期をパラメータとする加速度低減率を入力レベル別に図-5と図-6にそれぞれ示した。固有周期1秒以下の非免震モデルを免震化した時の加速度応答は、レベル1の入力に対しては30%~45%、レベル2の入力に対しては30%~65%に低減されており、全体的にレベル2の入力に対しては低減効果は小さくなっている。

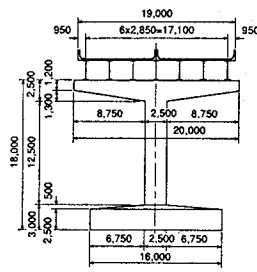


図-7 免震構造物

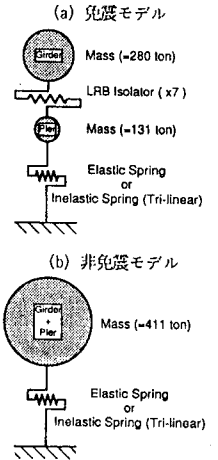


図-8 構造物のモデル化

### 5. 免震橋梁モデルのサブストラクチャー・ハイブリッド地震応答実験の概要

サブストラクチャーモデルとしては、図-7に示す免震橋梁を対象とし、これを図-8(a)のように2自由度系にモデル化した。免震支承部分を載荷実験し、橋脚部分は数値計算による解析を行い、構造物全体を中央差分法による数値解析を行うことにより、サブストラクチャー・ハイブリッド実験を行った。図-9に本実験のフローチャートを示す。供試体には前述のLRBを用いた。橋脚モデルとしては、線形および非線形の2種類のモデルを採用し、非線形モデルの復元力特性は、剛性低下型Tri-linearとした。なお、図-10に橋脚の変位-荷重関係の包絡線を示す。一方、線形モデルの剛性はTri-linearモデルの初期剛性と一致させた。入力地震波形には、保有水平耐力レベルの検討に用いるI種からIII種地盤用の地震波波形を最大加速度50, 100, 200および300galと相似的に変化させて用いた。なお積分時間間隔は0.01秒として、数値解析を行った。

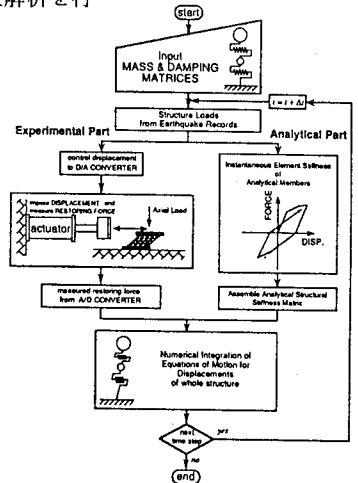


図-9 フローチャート

6. サブストラクチャー・ハイブリッド実験結果と考察 最大加速度200galのII種地盤用の地震波に対する、上部構造および橋脚頂部の加速度時刻歴を橋脚モデル別に図-11と図-12にそれぞれ示した。なお、この図中には数値シミュレーションによる非免震橋梁モデルの加速度も示した。この非免震橋梁モデルは図-8(b)に示すような、免震支承部分を剛とする1自由度モデルである。非免震橋梁モデルの応答に比べて、免震モデルの上部構造の応答は長周期化し、橋脚頂部の応答は逆に短周期化している。上部構造の最大加速度は、線形橋脚モデルでは免震化により免震前の約53%に低減されており、非線形橋脚モデルでは約68%に低減されていることが分かる。次に、各地震波の各入力レベルにおける免震効果について検討するため、最大入力加速度に対する上部構造の最大応答加速度の値を加速度応答倍率として図-13(a)~(c)に示した。これらより、線形橋脚モデルの場合、最大加速度100gal~200galの入力に対しては、免震化により上部構造の最大加速度を免震前のおよそ50%~70%に低減できることが分かる。また、非線形橋脚モ

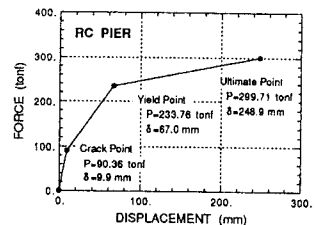


図-10 橋脚の変位-荷重関係包絡線

うに換算し、モデルには免震支承の履歴減衰とは別に1%の粘性減衰を仮定した。計測された復元力を上記の方程式に取り込み、中央差分法による数値解析を行うことによりハイブリッド地震応答実験を行った。地震動の入力レベルとしては、各支承のひずみ率が100%~150%、200%~250%を目標とする2段階を設定し、それぞれレベル1、2と呼ぶことにした。レベル1の入力地震波形には道路橋示方書・同解説（V耐震設計編）に示されたI種からIII種地盤用の地震波形を、レベル2の入力地震波形には保有水平耐力レベルの検討に用いるI種からIII種地盤用の地震波形を用いた。各地震波の最大加速度は表-2のように設定したが、SRBの実験においてはスライディングプレートの浮き上がりの危険回避のため入力小さく

した。なお、積分時間間隔は0.01秒として数値解析を行った。

#### 4. ハイブリッド実験結果と考察

レベル1、2のII種地盤用の地震波に対する、各支承の履歴曲線と加速度時刻歴を入力レベル別に図-2と図-3にそれぞれ示した。最大入力加速度に対する最大応答加速度の比率である応答倍率は、レベル1の入力に対しては0.71~0.76、レベル2の入力に対しては0.63~0.97となっており、LRB以外の支承ではレベル2に対する値がレベル1のそれに比べて若干大きくなっている。履歴曲線を見ると分かるように、レベル2の入力に対してはHDR、SRBともにハードニング現象が若干現れており、このため加速度の低減効果が小さくなったと考えられる。一方、LRBについてはハードニング現象は起きておらず、

レベル2における加速度の低減効果はレベル1よりもさらに大きくなっていることが分かる。SRBの実験時には、摩擦ダンパー部分単独の水平変位も計測したので、図-4に示すように摩擦ダンパー部分(Slide)とゴム支承部分(Bearing)のそれぞれの

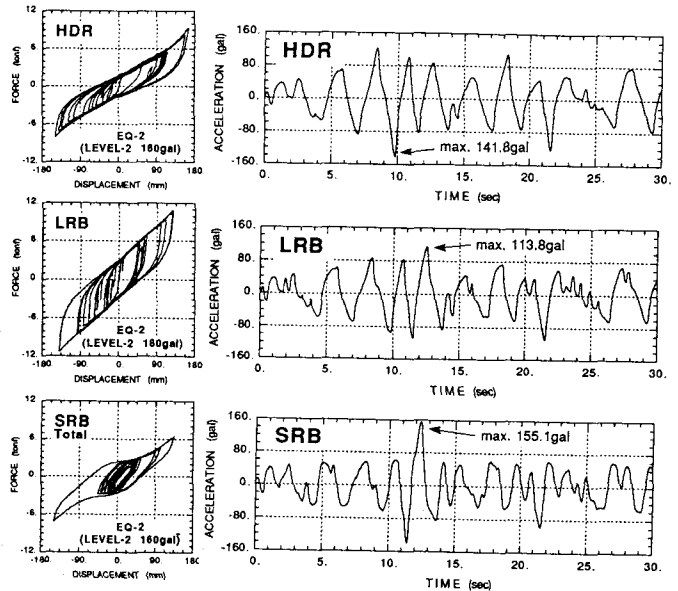


図-3 ハイブリッド実験の結果（レベル2、II種）

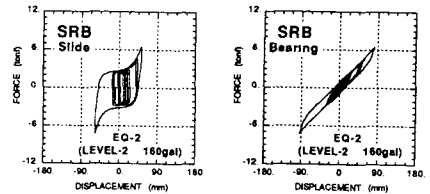


図-4 SRBの履歴曲線の分離（レベル2、II種）

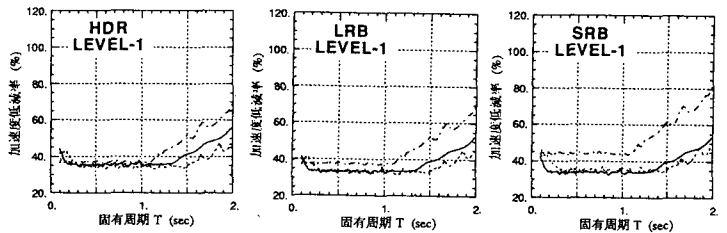


図-5 加速度応答の低減率（レベル1、II種）

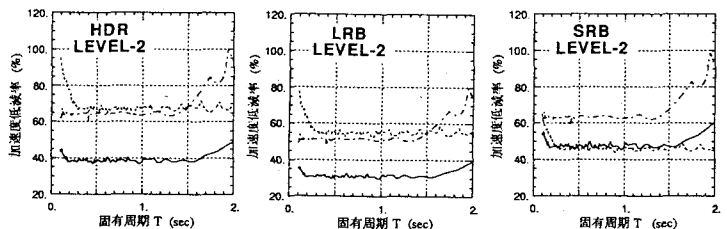


図-6 加速度応答の低減率（レベル2、II種）

デルの場合は、100gal~200galの入力に対しては、免震前のおよそ50%~85%に低減できる。しかしながら、さらに大きな300gal入力に対しては、線形・非線形橋脚モデルともに加速度の低減効果が小さくなっていることが分かる。この原因を検討するために、最大加速度200galおよび300galのⅡ種地盤用の地震波に対する、非線形橋脚モデルの免震支承部分の履歴ループを図-14(a)および(b)に一例として示した。これらより、200gal入力までは免震支承にハードニング現象は起きていないが、300gal入力ではひずみ率にして約200%以上の領域において、免震支承にハードニングが起きており、このため応答加速度が増大したと考えられる。

**7. まとめ** 本研究より得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 免震支承の設計変位内ではほぼ満足する免震効果を有するものの、支承の応答振幅が増大すると、ハードニング現象のため免震効果は低下する。
- (2) 橋脚の非線形性により、上部構造の応答加速度はさらに低減される。
- (3) 非線形橋脚モデルの場合では、非免震構造においても加速度応答は大きく低減されるため、免震化による上部構造の加速度低減効果としては、線形橋脚モデルと比べて若干小さくなる。

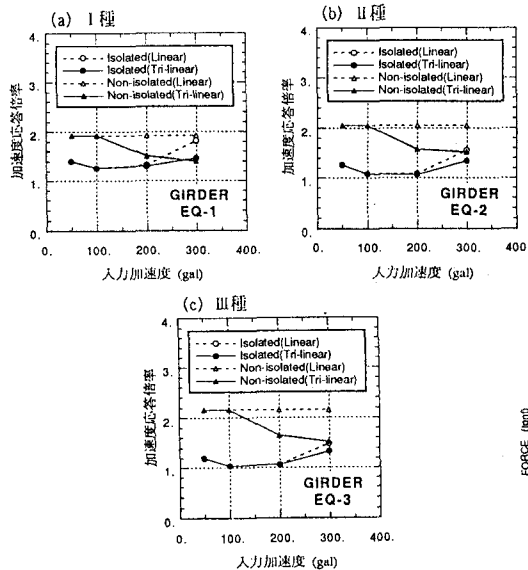


図-13 加速度応答倍率

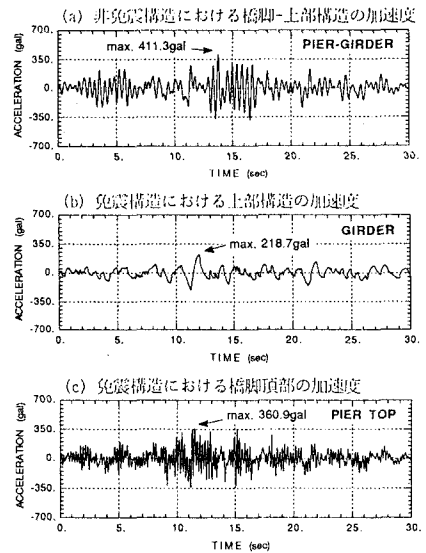


図-11 加速度時刻歴 (線形橋脚、Ⅱ種-200gal)

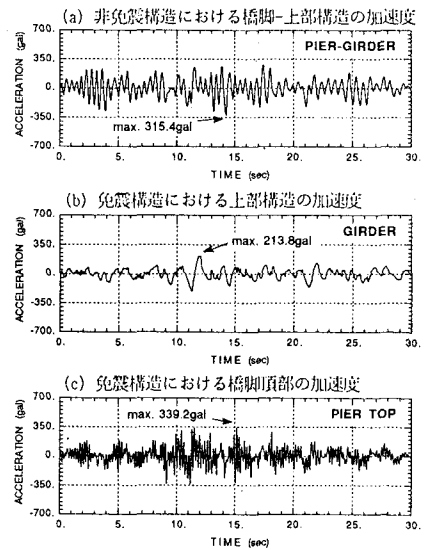


図-12 加速度時刻歴 (非線形橋脚、Ⅱ種-200gal)

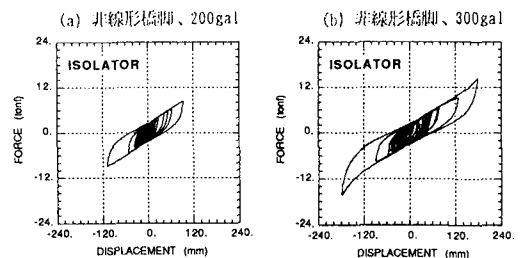


図-14 支承の履歴曲線 (Ⅱ種)