

複合型免震支承（SPRS）の復元力特性に関する 実大ハイブリッド実験

党 紀¹・高橋 良和²・五十嵐 晃³・鶴野 禎史⁴・高井 博之⁴
秋池 佑香⁵・宇津木 太一⁶

¹正会員 工博 埼玉大学助教 大学院理工学研究科（〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255）

²正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科（〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂）

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

⁴正会員 株式会社川金コアテック（〒307-0017 茨城県結城市若宮8-43）

⁵正会員 工修 NEXCO西日本コンサルタンツ 構造技術部（〒336-0018さいたま市南区南本町2-1-2）

⁶正会員 飛島建設(株)名古屋支店（〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-5-11）

1. はじめに

近年、橋梁の耐震補強では減衰性能を発揮する部材として用いられてきた高減衰ゴム支承や鉛プラグ入りゴム支承が多く採用されてきているが、本研究では、これらそれぞれの減衰要素である特殊配合のゴムおよび鉛プラグを1つの支承の中で組み合わせた新しい支承形式“複合型免震支承”（SPRS）を対象とする。

これまでに2軸載荷装置を用いた準静的な正弦波加振等により、基礎的な復元力データが十分に得られ、検証が行われている状況であるが、SPRSが有する高い減衰性能による地震時応答の低減効果を詳細に検討するためにハイブリッド応答実験が必要である。

本研究ではSPRSと高減衰ゴム支承の一種であるHDRSを用いた実寸法のハイブリッド実験を行った結果を報告する。さらに、橋梁の地震応答を正確に再現するためにバイリニアモデル、それぞれを用いた解析を行い、ハイブリッド実験の結果と解析結果の比較を行い、地震時応答を再現できる解析モデルを検討した。

2. 免震ゴム支承の復元力履歴特性

ハイブリッド実験に先立ち、ゴム支承の基本的な

履歴特性を得るために、準静的正負交番漸増載荷実験を行なった。準静的実験とハイブリッド実験で使用された試験体、載荷装置、載荷条件などが基本的に同様である。

載荷装置として、図-1に示すように、川金コアテックが所有する2軸載荷装置を使用する。この載荷装置では、鉛直方向に最大の24000kNの荷重を加えながら、水平方向に正負650mmの静的繰り返し載荷が可能となり、橋梁に使用する実大のゴム支承を破壊まで載荷可能となっている。載荷装置の諸元について表-1にまとめている。



図-1 載荷装置

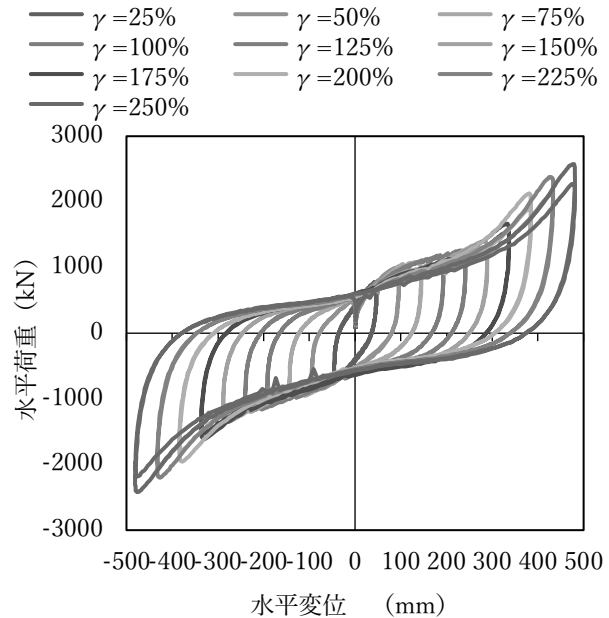
表-1 荷重装置の諸元

項目	仕様
最大鉛直荷重(圧縮)	24000 kN
最大水平荷重	+ 13000 kN - 10000kN
最大水平変位	± 650 mm
最大速度	10 mm/sec

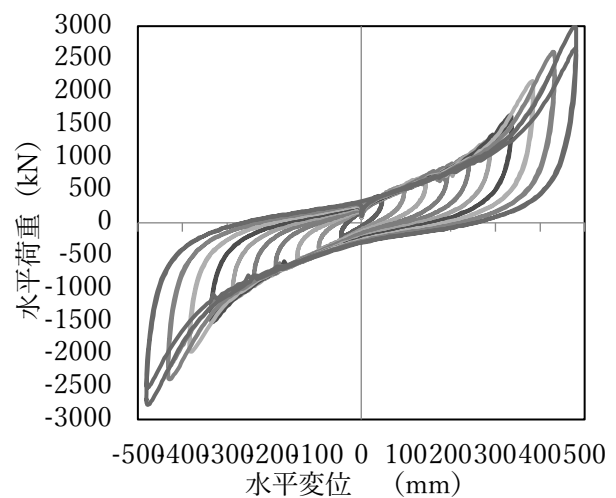
実験で使用された試験体は、図-2に示しているように、平面寸法900mm×900mmの正方形断面、192mmの総厚を有する実大積層免震ゴム支承を使用している。一次形状係数は14.7、二次形状係数は4.69となっている。設計死荷重反力は2580kNである。試験体の諸元は表-2に示す。荷重では常温で行い、事前の予備荷重を行わず、ゴム支承のせん断ひずみが250%まで、25%づつ1サイクル漸増荷重を行なった。実験で得られた履歴曲線は図-3に示す。

表-2 試験体の諸元

ゴムの弾性率	1.2(N/mm ²)
ゴム層厚	192(mm)
第一次形状係数	14.7
第二次形状係数	4.69
有効面積	900×900(mm ²)



(a) SPRS



(b) HDRS

図-3 正負交番荷重実験で得られた履歴曲線

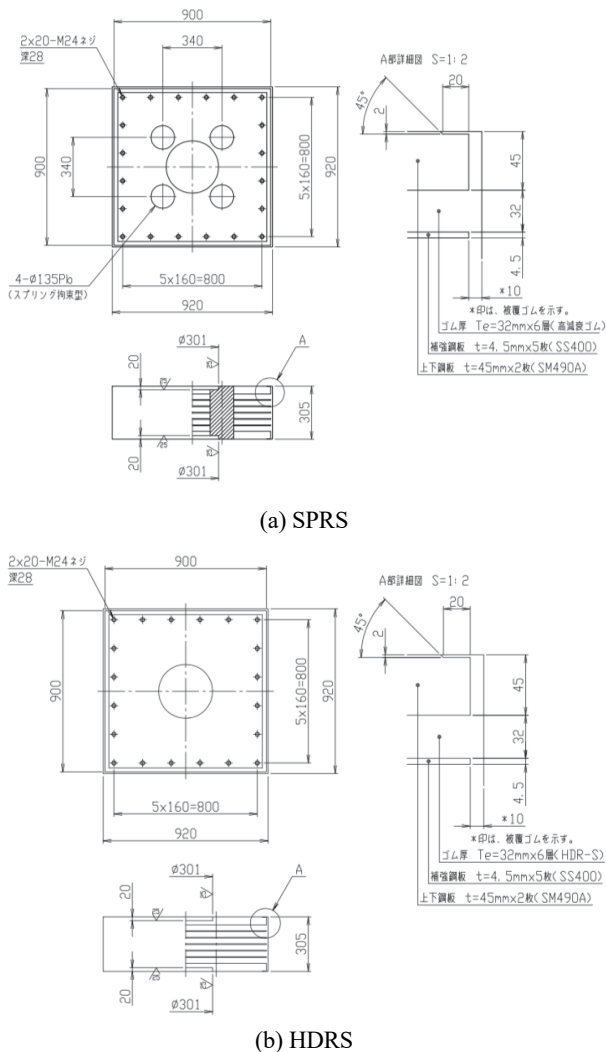
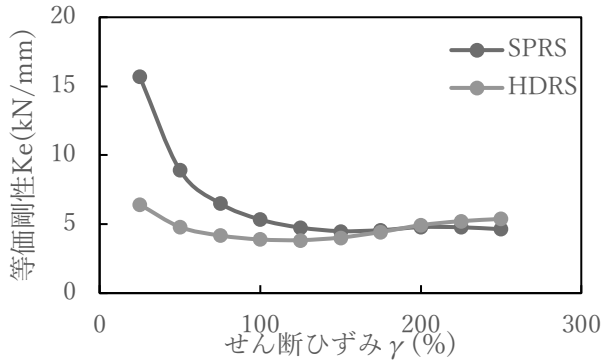


図-2 試験体の詳細図

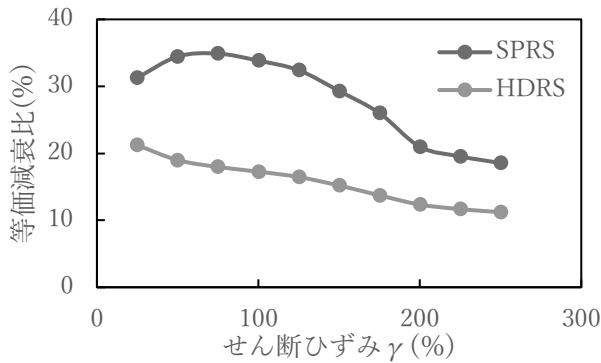
静的繰り返し実験で得られた履歴曲線から、荷重振幅ごとの履歴曲線から、履歴曲線の等価剛性と等価減衰を求め、それぞれHDRSとSPRSの履歴特性を図-4に示す。図に示すように、振幅が小さい時に、SPRSの等価剛性は、鉛プラグの作用によって、高くなっているが、最終的に、HDRSの等価剛性とほぼ同じ大きさとなった。これはゴムの面積が鉛プラグとなることによって、大変形領域における剪断力

のハードニング効果が緩和されたと見られる。

なお、等価減衰について、250%においては、SPRSの等価減衰比が約20%となり、HDRSの倍となっていることが図から分かる。



(a) 等価剛性



(b) 等価減衰比

図-4 試験体の等価線形化特性

実験の各サイクルで得られた履歴曲線から、バイリニアを適用する時に、実験値ともっとも合致する一次、二次剛性および幸福荷重を最適化計算で決めルことができる。最適化計算においては、解析と実験で得られた履歴曲線の差が最小するように、ニュートン法の数値解法の一つであるKH法で算出した。

次に、式(1~4)を用いてそれぞれせん断弾性係数を計算した。得られたせん断弾性係数を図-5および図-6に示す。

$$K_1 = \frac{G_1(\gamma_{uB})A_e}{\Sigma t_e} \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{G_2(\gamma_{uB})A_e}{\Sigma t_e} \quad (2)$$

$$Q_d = \tau_d A_e \quad (3)$$

$$\tau_d = \gamma_{ub}(G_e(\gamma_{ub}) - G_2(\gamma_{ub})) \quad (4)$$

ただし、 K_1 : 一次剛性 (N/mm), K_2 : 二次剛性 (N/mm), Q_d : 降伏荷重 (N), γ_{uB} : 設計せん断ひずみ

み, A_e : 有効圧縮面積 (mm²), Σt_e : 総ゴム厚 (mm) である。

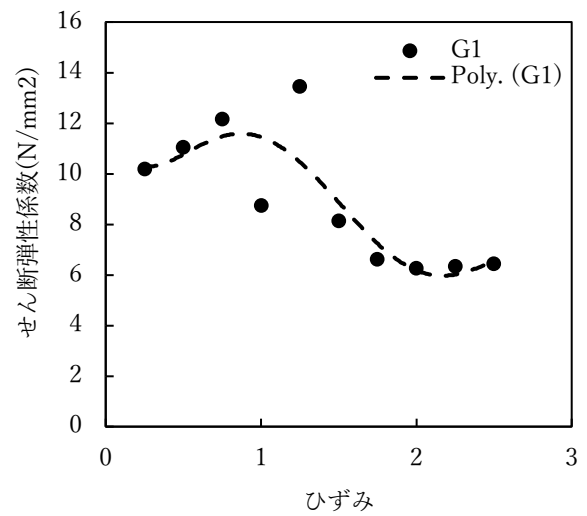
次に、図に示すせん断弾性係数のひずみ依存性を最小二乗法で決められた最適の近似多項式(5~7)で近似する。

$$G_1(\gamma_{uB}) = a_0 + a_1\gamma_{uB} + a_2\gamma_{uB}^2 + \dots + a_i\gamma_{uB}^i \quad (5)$$

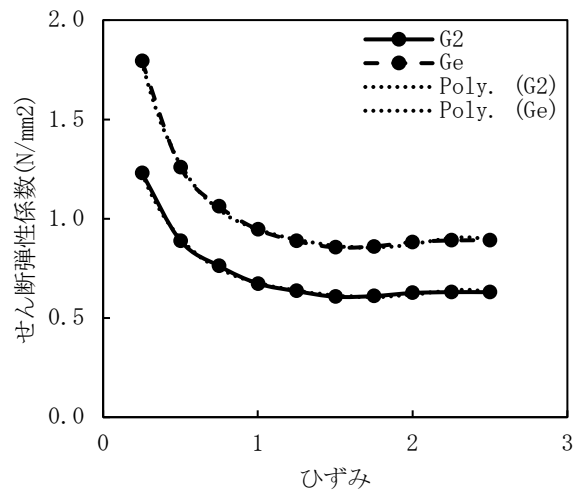
$$G_2(\gamma_{uB}) = b_0 + b_1\gamma_{uB} + b_2\gamma_{uB}^2 + \dots + b_i\gamma_{uB}^i \quad (6)$$

$$G_e(\gamma_{uB}) = c_0 + c_1\gamma_{uB} + c_2\gamma_{uB}^2 + \dots + c_i\gamma_{uB}^i \quad (7)$$

$G_1(\gamma_{uB})$: 一次剛性に相当するせん断弾性係数 (N/mm²), $G_2(\gamma_{uB})$: 二次剛性に相当するせん断弾性係数 (N/mm²), $G_e(\gamma_{uB})$: 等価せん断弾性係数 (N/mm²) である。

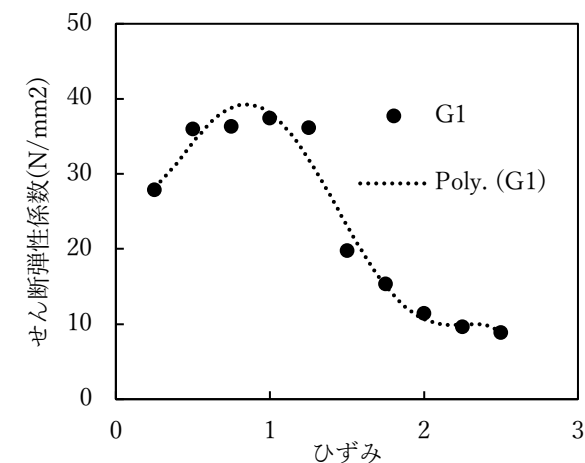


(a) G1

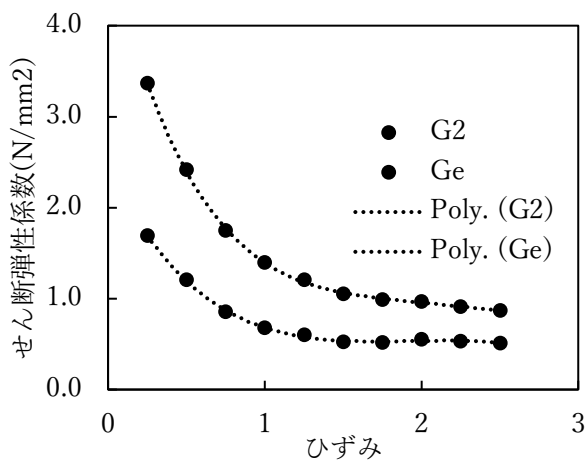


(b) G2 と Ge

図-5 HDRS におけるせん断弾性係数



(a) G1



(b) G2 と Ge

図-6 SPRS におけるせん断弾性係数

表-3 SPRS のパラメータ同定

a0	31.6	b0	2.44	c0	4.81
a1	-52.1	b1	-3.57	c1	-6.90
a2	210	b2	2.57	c2	4.91
a3	-237	b3	-0.937	c3	-1.66
a4	100	b4	0.193	c4	0.244
a5	-14.5	b5	-0.0204	c5	-0.0100

表-4 HDRS のパラメータ同定

a0	12.2	b0	1.89	c0	2.85
a1	-16.1	b1	-3.61	c1	-5.82
a2	44.6	b2	4.51	c2	7.36
a3	-44.0	b3	-2.98	c3	-4.84
a4	17.0	b4	0.991	c4	1.60
a5	-2.26	b5	-0.129	c5	-0.206

$G_1(\gamma_{uB})$, $G_2(\gamma_{uB})$, $G_e(\gamma_{uB})$ におけるa,b,c,dの係数は各ひずみにおける値から近似曲線を求めその係数をa,b,c,dの値とし、そのパラメータを表-3, 4にまとめている。

3. 実大ハイブリッド実験

ハイブリッド実験では、前述した静的繰り返し実験と同様な載荷装置と試験体を用いる。ハイブリッド実験では均一の載荷速度で行い、仮動的載荷実験である。実験の構造モデルは、橋台や橋脚基礎などの下部構造が非常に剛的で、ゴム支承の変形がもっとも顕著であることを想定し、簡易的橋梁構造を1自由度モデルで解析する。

実験では図-7に示すように、ゴム支承の部分だけが変形し、上部構造が1集中質点としている。入力地震動による構造応答をPCの解析部で行い、ゴム支承の変形を実大試験体を載荷しながら、荷重フィードバックで応答を修正する。

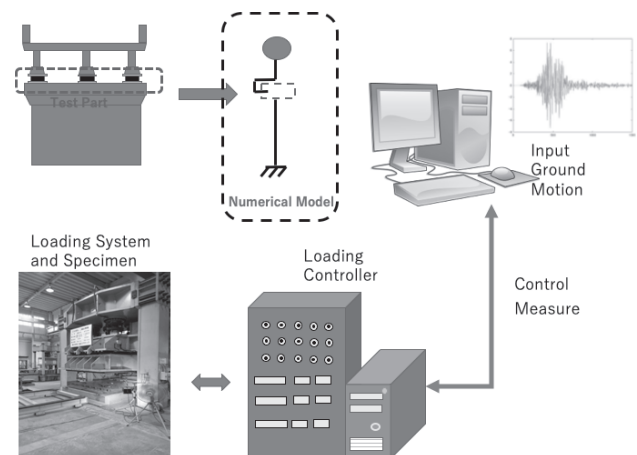


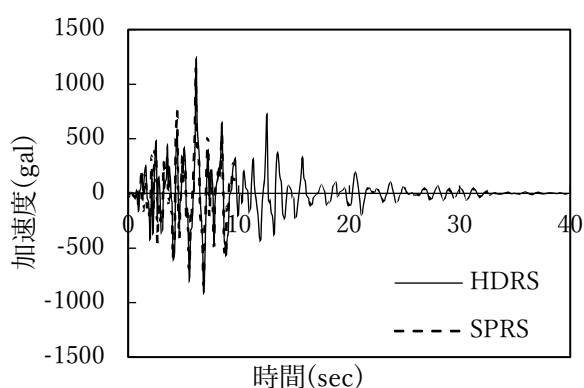
図-7 ハイブリッド実験システム

解析では、兵庫県南部地震JR鷹取駅で記録した地震動のNS成分を入力地震動として用いる。上部構造の質量は、ゴム支承の設計死荷重反力から計算した。構造物の剛性は基本的にゴム支承の剛性と同じであり、実験で得られたHDRSの等価剛性とした。

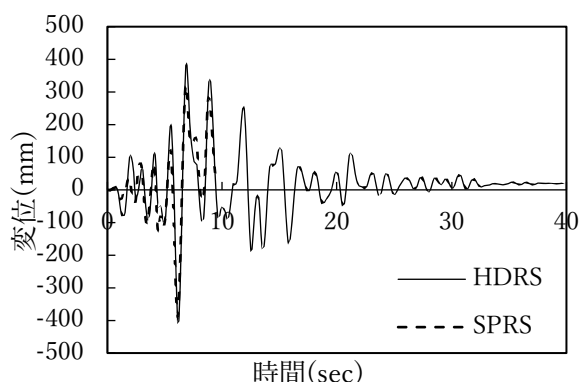
表-5 解析モデルの設定

上部工質量 m	263ton
減衰係数 c	103kNs/m
剛性 k	$4.06 \times 10^3 \text{ kN/m}$
固有周期 T	1.4sec

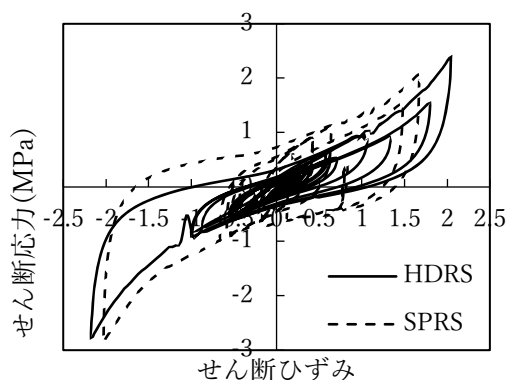
載荷システムを安全に載荷するため、入力地震動のそれぞれ2%, 20%, 50%, 100%の入力による応答実験を漸増的に行なった。最後の100%入力実験の結果を図-8に示す。(a)では横軸が時間(sec)、縦軸が応答加速度(gal)の加速度時刻履歴、(b)では横軸が時間(sec)、縦軸が応答変位(mm)の変位時刻履歴、(c)では横軸がせん断ひずみ、縦軸がせん断応力(mPa)の復元力履歴曲線を表したグラフである。実線が高減衰ゴム支承(HDRS)、破線がスプリング拘束型鉛プラグ入り積層ゴム支承(SPRS)のハイブリッド実験結果を表している。



(a) 応答加速度時刻履歴



(b) 応答変位時刻履歴



(c) 復元力 (せん断ひずみ-応力) 履歴

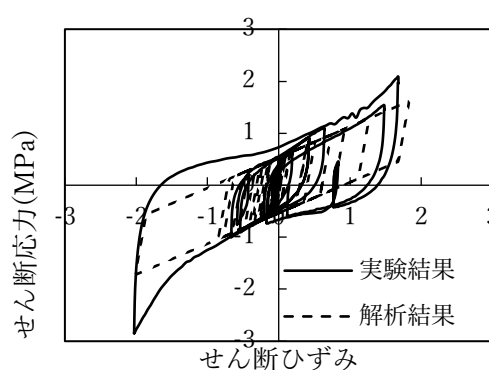
図-8 100%ハイブリッド実験

図に示すように100%の入力実験では、2種類のゴム支承で得られた応答が非常に近い履歴を示した。これは前述した静的繰り返し実験ではゴム支承のせん断ひずみが250%付近では、両方の等価剛性が近いことが原因と考えられる。

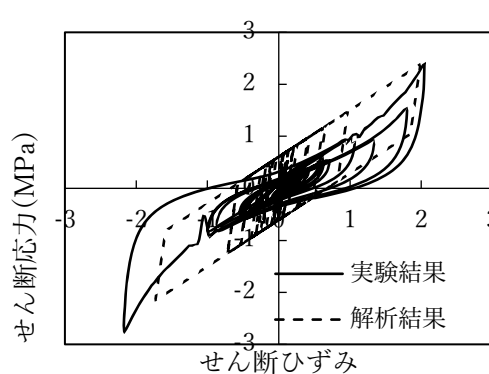
4. ゴム支承の履歴特性と応答性状

実務設計ではバイリニアモデルでの地震応答解析を行い、構造物の地震時応答性能を照査する必要がある。そこで、一般的に前述したせん断弾性係数に対して、事前に初期値を設定し、解析結果に合わせてゴム支承の応答ひずみに合わせて、試行錯誤的に実施する必要がある。

ここで、同様に、バイリニアモデルで解析を行い、得られたゴム支承の最大応答ひずみを用いて、パラメータを式(1~7)および表-3, 4で修正する。このように設定時のひずみと応答ひずみの差が少なくなるまで繰り返し、現行の地震応答解析を行なった。得られたSPRSおよびHDR-2の復元力履歴および応答変位時刻履歴を下記の図に示す。

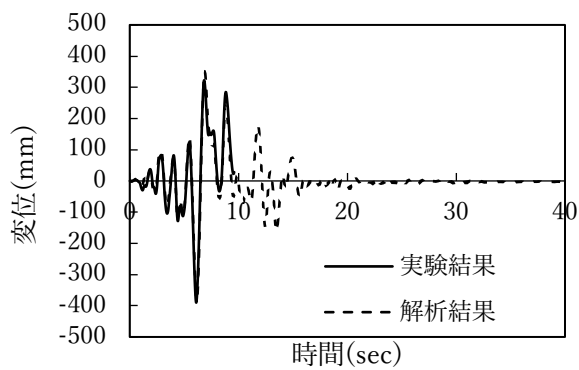


(a)SPRS100%

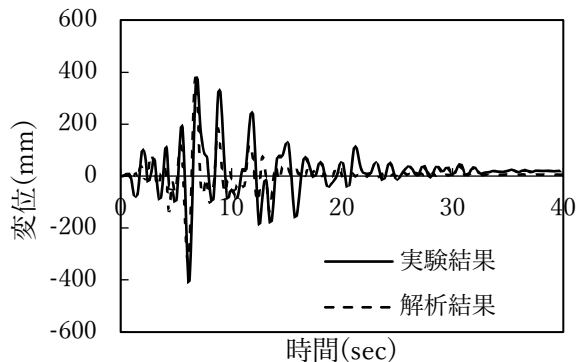


(b)HDRS100%

図-9 バイリニアモデルで得られた復元力履歴



(a)SPRS100%



(b)HDRS100%

図-10 バイリニアモデルで得られた応答変位

図に示すように、実験と多少の差があるものの、解析と実験結果が概ね一致していることが分かった。

5. まとめ

本研究ではスプリング拘束型鉛プラグ入り高減衰積層ゴム支承(SPRS)と高減衰ゴム支承(HDRS)に対してハイブリッド実験を行い、橋梁支承としての免震性能を比較した。バイリニアモデルにおけるスプリング拘束型鉛プラグ入り高減衰積層ゴム支承(SPRS)の係数を決定し、バイリニアモデルや修正Park-Wenモデルがハイブリッド実験によって得られた地震時の応答挙動と一致するかを確認した。本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- 1) スプリング拘束型鉛プラグ入り高減衰積層ゴム支承(SPRS)は高減衰ゴム支承(HDRS)と比べてひずみの大きい場合は等価剛性が近い値となった。
- 2) スプリング拘束型鉛プラグ入り高減衰積層ゴム

支承(SPRS)のバイリニアモデルによる解析するためのパラメータを同定した。

- 3) ハイブリッド実験では、エネルギー吸収能力が大きいSPRSの応答変位が小さいが、構造モデルの等価周期が近いため、HDRSを使う場合と比べ、応答変位における差が大きい。
- 4) 本研究によりスプリング拘束型鉛プラグ入り高減衰積層ゴム支承(SPRS)の地震時応答挙動を確認し、免震設計の際にスプリング拘束型鉛プラグ入り高減衰積層ゴム支承(SPRS)のモデル化にはバイリニアモデルを用いた場合でもある程度に再現することができると確認した。

参考文献

- 1) 袁涌、家村浩和、五十嵐晃、青木徹彦、山本吉久：実時間ハイブリッド実験による高減衰免震ゴム支承の耐震性能の評価,土木学会論文集 A,Vol63 No.1,pp265-276,2007.
- 2) 家村浩和、山田善一、伊野津和行、南莊淳、野村武司、渡辺典男：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,地震工学研究発表会講演概要,Vol22,pp807-810,1993.
- 3) Hirokazu Iemura, Akira Igarashi, Tetsuhiko Aoki, Yoshihisa Yamamoto: Real-Time Substructure Hybrid Earthquake Loading System for Super-High-Damping Rubber Bearings, 1st International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering,Nagoya(401-408), 2005.
- 4) 家村浩和：ハイブリッド実験の発展と将来,土木学会論文集 第356号/I -3,1985.
- 5) 伯野元彦、四俣正俊、原司：計算機によって制御された、はりの動的実験,土木学会論文報告集 第171号,1969.
- 6) 中島正愛、石田雅利、安藤和博：サブストラクチャー仮動的実験のための数値積分法,日本建築学会構造系論文報告集 第471号,1990.
- 7) 宇佐美勉、才塚邦宏、木曾英滋、伊藤義人：ハイブリッド地震応答実験による鋼製橋脚の強震時挙動,土木学会論文集 No.519/I -32,pp101-113,1995.
- 8) 金井宏司、鶴野禎史、炭村透：スプリング拘束型鉛プラグ入りゴム支承の基本特性,土木学会第57回年次学術講演会/I-461,1996.
- 9) 道路橋の免震構造研究委員会：道路橋の免震制震設計法マニュアル,土木研究センター,2011.