

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

Hybrid Loading Test of the High Damping Rubber Bearings Subjected to
Sinusoidal and Random Earthquake Ground Motion

山田善一* 家村浩和** ウィリアム タンゾー***
 鶴野禎史**** 中村鎮雄*****

by Yoshikazu Yamada, Hirokazu Iemura, William Tanzo,
 Yosifumi Uno, Sizuo Nakamura

A new loading system both for establishing the engineering properties and for simulating the earthquake response of seismic isolators has been developed. The loading system can be operated at quasi-static test mode and on-line hybrid test mode suitable for testing recent and future innovations in seismic isolator system. Compared to conventional quasi-static testing or shaking table testing, the newly developed loading system provides more detailed and realistic information on the static and dynamic behavior of seismic isolators. The high damping rubber bearings are tested with the system and verified to have energy absorbing capacity equivalent to about 15% damping ratio of the linear elastic models.

1. まえがき

最近になって、構造物の地震応答に基づく作用断面力を低減する手法として、免震構造が注目されている。建築分野ではすでに実用化が進められ、土木分野の橋梁構造物においても設計や建設が一部で開始されている。免震構造の原理は、構造系の振動周期を増長させ、入力地震動の卓越周期との重合を防ぐとともに、慣性力を低減させ、さらに減衰機構の付加により、変位応答の増大を防止しようとするものである。免震支承の力学的なメカニズムは、バネ支持型、粘性減衰型、摩擦減衰型、弾塑性履歴減衰型などに大別されるが、実用化されている支承は、各種のメカニズムを合せもった、複雑なものが多い。

各種の免震支承の効果を検討するために、種々の確認実験が行われている。免震支承そのものの静的載荷実験、免震支承を有する模型構造物の振動台実験、実構造物の自由振動実験、起振機強制振動実験あるいは地震観測などである。しかしながら、静的載荷実験では構造物の応答との関係が直接明らかでないこと、振動台実験では縮小模型を利用せねばならないこと、実構造物では大振幅領域でのデータの取得が困難なこと、など各々に短所がある。

*	工博	京都大学教授	工学部土木工学科	(〒606 京都市左京区吉田本町)
**	工博	京都大学助教授	工学部土木工学科	(〒606 京都市左京区吉田本町)
***	工修	京都大学大学院	工学研究科土木工学専攻	(〒606 京都市左京区吉田本町)
****		川口金属工業(株)	橋梁設計課長	(〒530 大阪市北区芝田2の7の18)
*****		日東技術開発(株)	主任技師	(〒550 大阪市西区西本町1の12の19)

著者の3名は、構造部材の耐震安全性の合理的確証法として、部材の載荷実験と構造物の地震応答解析をオンラインで進める HYLSE (Hybrid Loading System of Earthquake Response)を開発し、コンクリートや部材に適用して来た。今回、3台のアクチュエーターを用いた免震支承試験用の載荷システムを構築するとともに、振動台実験とほぼ等価なスイープ波形入力共振応答試験法ならびに構造物の地震時応答観測にほぼ等価な実地震波入力応答試験法を開発・提案した。免震支承としては、構造が比較的簡単で、施工も容易であると考えられる高減衰ゴム (HDR) 支承を取り上げ、ハイブリッド載荷試験を実施したので、その結果を報告する。

2. 高減衰ゴム支承のハイブリッド載荷実験の概要

(1) ハイブリッド実験の特長

ハイブリッド地震応答載荷実験とは、次式で示される構造物の運動方程式

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + F(x) = -M(1)\ddot{z}$$

の復元力項 $F(x)$ を載荷実験よりザブルーチンとして検出するとともに、構造物全体の地震応答解析プログラムを電算機により、オンラインで実行するものであり、次の特長を有している。

- a) 構造物の復元力特性を数学的モデルによることなく、直接、時刻歴応答解析に取り込むことができる。
- b) 数学的モデルを設定することが困難で、複雑な履歴形状や劣化特性を有する部材でも、比較的容易に扱うことができる。
- c) 実際の復元力特性に対応する地震応答を正確に算出でき、更にその応答値に対する正しい復元力を検出できる。
- d) 強震時における構造物や部材の破壊、崩壊の過程を精度よく予測することができる。

上記の特長から、ハイブリッド載荷実験は、免震支承の免震効果を検討する上で、極めて合理的な手法であると言える。通常、実現象よりもゆっくりとした載荷を行うことから、米国では pseudo-dynamic (擬動的) 実験と呼ばれている。

(2) 載荷装置の概要

従来よりのシステムにアクチュエーター1台を追加した計3台による載荷装置を開発した。その概要を図-1および写真-1に示す。水平に設置された1号機により、免震支承を水平方向に変形させ、その復元力をロードセルより検出する。鉛直に設置された2、3号機は、水平載荷ビームを介して免震支承に軸力を加える。全てのアクチュエーターは、両端に自由回転継手を有している。水平載荷ビームは回転ベアリングにより、一定面内で水平方向のみに変形するように拘束されている。

計測データは全てアナログ(A)量からデジタル(D)量に変換(A→D変換)され、計算機に取り込まれ、計算された変位応答は、D→A変換の後、試験機に送られるフィードバックシステムとなっている。

(3) 免震支承の形状とゴムの特性

試験に用いた高減衰ゴム免震支承の平面形状は、1辺250mmの正方形で、ゴムの総厚は36mm(12mm×3層)、48mm(12mm×4層)、108mm(12mm×9層)の3種類とした。それらを図-2および写真-2に示す。ゴム間に挿入した鉄板の厚さは全て1mmである。

ゴム材料としては、材料のもつ等価粘性減衰定数(heq)の大きさにより、15%を目標としたA配合、10%を目標としたB配合の2種類を採用した。ゴム材料の配合及び物理特性を表-1に示す。

一般の積層用に使われるゴムは、天然ゴムを主体として各種の配合剤を添加したものであり、 h_{eq} は 2～4 % 程度と低い。一方、高減衰ゴムとは、天然ゴムに高減衰を示すゴムや充填剤を添加したものであり、 h_{eq} が 10 % 以上を示すものをいう。

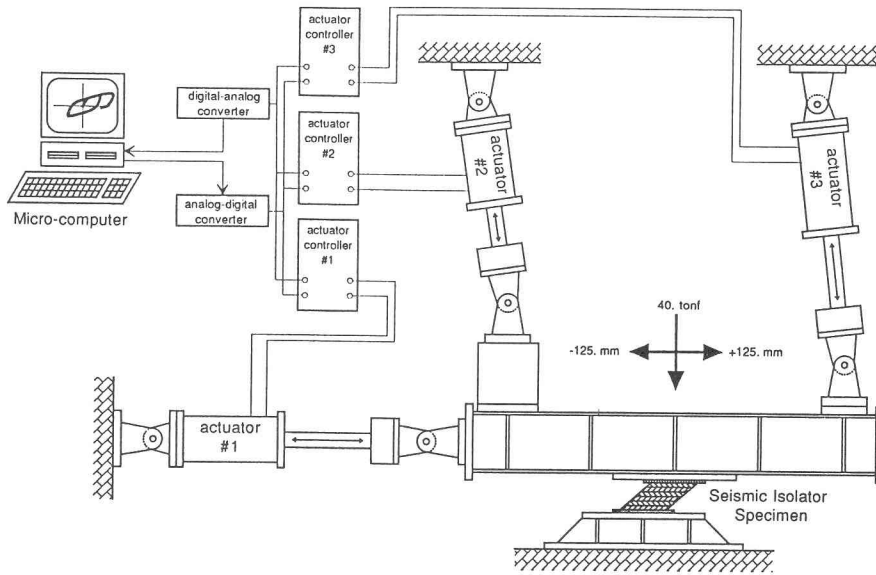


図-1 ハイブリッド載荷実験装置の概要

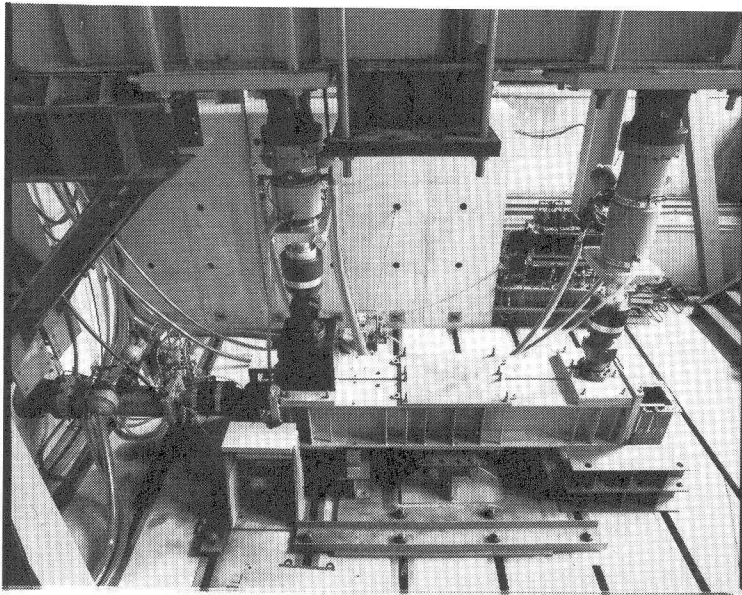


写真-1 ハイブリッド載荷実験装置全景

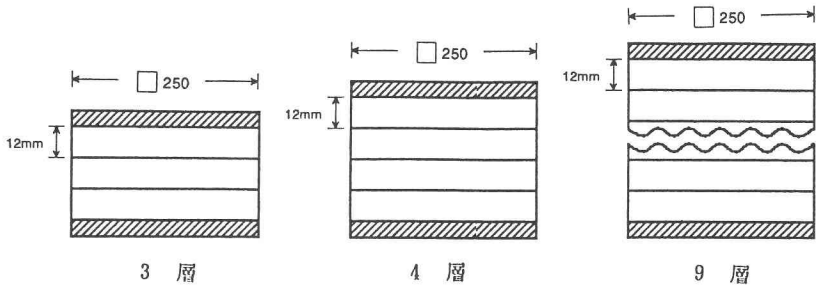


図-2 試験した高減衰ゴム支承

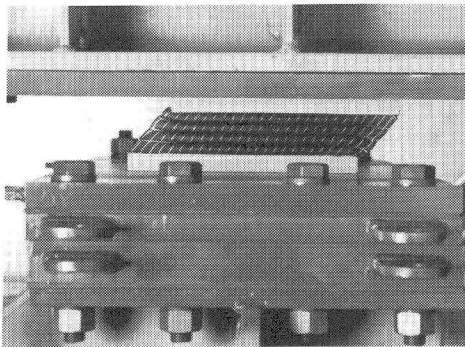


写真-2 供試体載荷時における
変形状（4層）

表 I - 1 - 1 ゴムの配合及び物理特性

		単位	A配合	B配合
配合 (重量比)	天然ゴム系ゴム	%	58	59
	補強剤	%	30	29
	加硫剤及び促進剤	%	2	2
	老化防止剤、その他	%	10	10
物性	硬さ 注1)	度	64	60
	静的せん断弾性係数	kgf/cm ²	10	10
	引張強さ	kgf/cm ²	164	245
	伸び	%	510	520
目標等価粘性減衰係数 (heq)		%	15	10

注 1) JIS K6301 A 形硬度計による

(4) 載荷実験の種類

本研究では、次に示す3種類の載荷実験を行い、免震支承の復元力特性と、構造物の免震効果とを総合的に判定することにした。

(i) 振幅漸増繰り返し載荷実験

免震支承の基本的な水平変位 — 復元力の履歴特性を検討するために、同一振幅で2回繰り返し、振幅を漸増させる静的な載荷実験を行った。図-3に4層の免震支承（厚さ48mm）の場合の強制変位波形を示す。層厚に対する水平変位量を、ひずみ率($\gamma\%$)と定義することにし、 $\gamma = 200\%$ までの載荷試験を行った。

なお、免震支承に作用する軸重としては、無載荷、20tonf（面圧32kgf/cm²）、40tonf（面圧64kgf/cm²）の各一定荷重を与えた。また載荷速度は6cm/secに設定した。この実験をQS（Quasi Static）テストと呼ぶことにする。

(ii) スウィープ波形入力ハイブリッド共振応答実験

振動台実験においては、試験体の共振応答特性を検出するため、入力波形の加速度を一定とし、

その周波数を漸変させるスイープ振動試験がよく実施される。本研究では、このスイープ試験を、ハイブリッド載荷システムで実施した。すなわち、図-4に示すように、その周期が5秒から0.5秒に漸変する一定加速度調和波形を入力とし、免震支承を有する1自由度構造物の地震応答をオンラインで計算した。構造物の固有周期は、 $\gamma = 100\%$ 時の履歴復元特性の等価剛度から、2秒となるよう設定した。この実験をHS (Hybrid Sweeping Frequency) テストと呼ぶことにする。

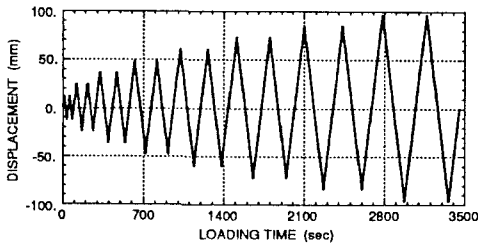


図-3 振幅漸増繰り返し載荷実験に用いた強制変位波形

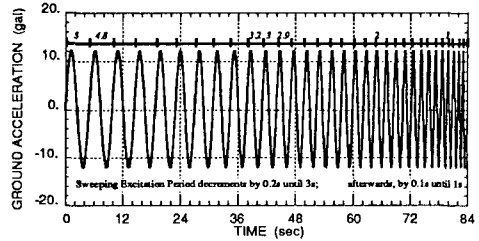


図-4 スweep試験入力波形

(iii) ハイブリッド地震応答実験

地震時に、免震支承を有する構造物がどのような応答を示すかを検証するため、ハイブリッド地震応答実験を実施した。この実験は、実構造物の地震応答観測による確認試験とほぼ同等の結果を与えるものである。入力地震波形としては、比較的良好な地盤上での代表的記録例として、図-5に示す1940年のインペリアル地震時におけるエルセントロ加速度波形記録のNS成分、および比較的軟らかい地盤上での代表的記録例として、図-6に示す1968年の十勝沖地震における八戸加速度波形記録NS成分の2種類を採用した。図-5、6の両波形は、最大加速度が100 galとなるようにスケールされたものである。これらの実験をHE (Hybrid Response of El Centro-NS Input) テストおよびHH (Hybrid Response of Hachinohe-NS Input) テストと呼ぶことにする。構造物の固有周期は、HSテストの場合と同様、 $\gamma = 100\%$ の時の等価固有周期が2秒となるように設定した。

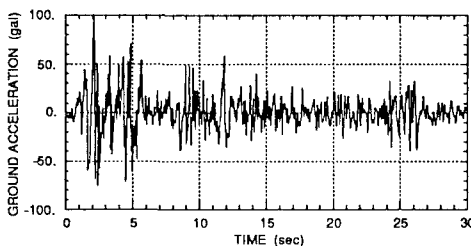


図-5 エルセントロ加速度波形記録NS成分
(1940年インペリアル地震)

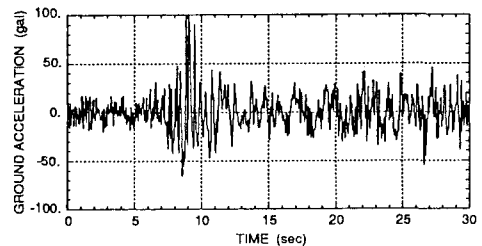


図-6 八戸加速度波形記録NS成分
(1968年十勝沖地震)

3. 結果の考察および計算結果との比較

(1) 振幅漸増繰り返し載荷実験結果と考察

等価粘性減衰定数15%を目標としたゴムを4層利用した免震支承のQSテストによる変位-復元力の履歴曲線を図-7に示す。水平変位が支承の厚さ(48mm)に等しくなる($\gamma = 100\%$)

までは、ほぼバイリニアア型の履歴形状を示すが、それ以上の領域では、ゴム材料特有の硬化型の形状を示している。この時の面圧は設計荷重相当の64 kgf/cm²である。同種の実験を3層及び9層のゴムを有する免震支承についても実施し、各ひずみ率(γ%)における等価剛度(K_h)と等価減衰定数(h_{eq})を算出し、図-8、9にプロットした。但し、K_hは履歴のピークにおける最大復元力を最大変位で除すことより、またh_{eq}は周知の次式より求めた。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{4\pi} \frac{\text{履歴消費エネルギー}}{\text{弾性ポテンシャルエネルギー}}$$

図-8より、等価剛度はゴム層数にかかわらず、γ=100%までは、変形が増大するに従って低下している。低下率は層数の少ないものほど大きい。剛度の絶対値は層数の大きいものほど低いことなどがわかる。

図-9より、等価減衰定数は層数にかかわらずほぼ似かよった値を示すと共に、変形(ひずみ率)の増大に伴って減少することなどがわかる。

図-10には、9層ゴム支承の等価剛度の面圧依存性を示した。面圧の増加に伴って水平方向の剛度は減少する。一方、図-11に示した等価減衰定数は、面圧の増加に伴って大幅に増大する。

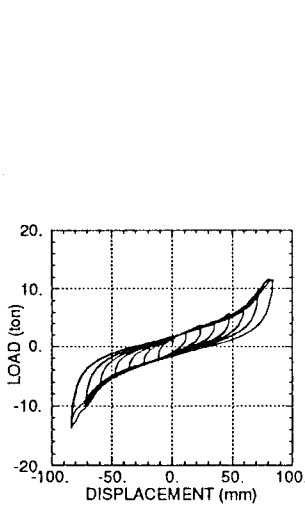


図-7 4層ゴムの免震支承の
Q Sテスト結果

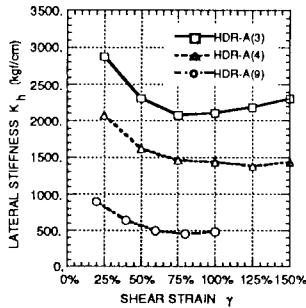


図-8 等価剛度のひずみ率依存性
(面圧64 kgf/cm²)

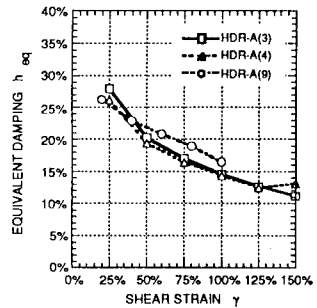


図-9 等価減衰定数のひずみ率依存性
(面圧64 kgf/cm²)

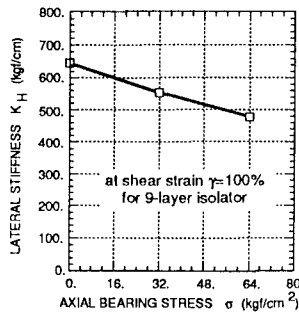


図-10 等価剛度の面圧依存性
(9層ゴム支承)

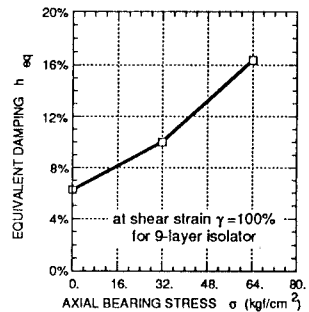


図-11 等価減衰定数の面圧依存性
(9層ゴム支承)

(2) スウィープ波共振応答実験と計算結果の比較

スウィープ波形入力による4層ゴム支承のハイブリッド共振応答実験の変位応答を図-12に示す。またその時の変位-復元力の履歴応答を図-13に示す。変位応答波形は、応答時刻が50～60秒の時点で、入力波の周期が約2.4秒の時に最大値を示している。これは、せん断ひずみ率

$\gamma = 100\%$ (変位量で4.8mm)の時の等価固有周期が2秒となるように設定したが、履歴形状の特性のため、それよりやや周期の長い時点で共振ピークを迎えたものと考えられる。履歴復元力応答は極めて安定したループ形状となっており、繰り返しによる劣化もほとんど見られない。また、ひずみ率100%以内の振幅領域では復元力の硬化現象も見られず、履歴減衰特性が有効に発揮されているものと考えられる。

周期が2秒で減衰定数が11%の1自由度線形モデルの、同一スウィープ波形入力に対する応答値を算出し、図-12中に点線で示した。スウィープ実験前半の周期の長い領域では、両者の位相はよく一致しているが、実験結果が線形モデルより大きな振幅となっている。実験結果が周期約2.5秒で共振点を示すのに対し、線形モデルでは2秒で共振点を迎えている。しかし、振幅の最大値は両者でほぼ等しく、最大応答で評価するとすれば、履歴特性と等価な減衰定数は、11%と言うことになる。周期が2秒より短い領域では、実験結果が線形モデルの計算値を下回り、より強い減衰性を示している。

図-13に示したゴム支承の履歴復元力特性をバイリニア型履歴モデルで表示し、スウィープ波形入力に対する応答を算出し、実験結果と同時に示したのが図-14である。両者の位相は殆どの周期帯でよく一致し、共振点のピークの振幅も殆ど等しく、バイリニアモデルはゴム支承の応答特性をよく再現するものであると判断できる。しかし、長周期領域ではバイリニアモデルの減衰性が大きく、一方、短周期領域ではゴム支承の減衰性が大きい傾向にある。図-15に示したバイリニ

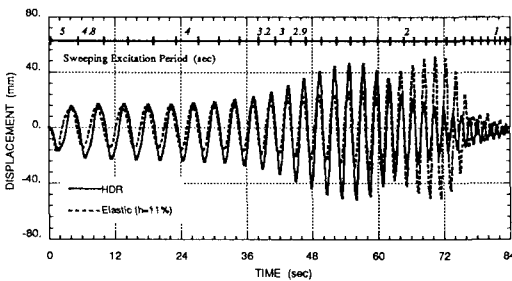


図-12 スウィープ波共振応答実験と等価線形モデルの共振応答の比較

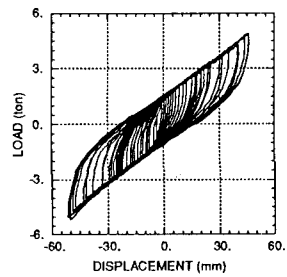


図-13 スウィープ波共振応答実験におけるゴム支承の履歴復元力応答

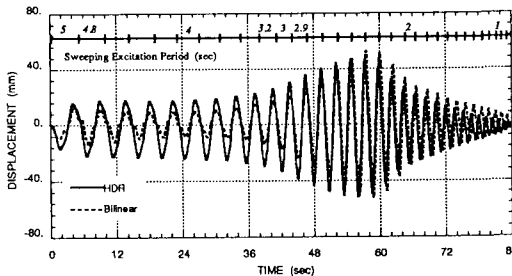


図-14 スウィープ波共振応答実験とバイリニア履歴モデルの共振応答の比較

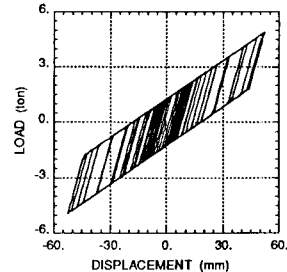


図-15 バイリニアモデルの履歴復元力特性

アモデルの履歴応答は、図-13に示したゴム支承のそれと、最大変位・最小変位直後の復元力の細部が若干異なるものの、全体的履歴形状は極めて良く一致している。

(3) ハイブリッド地震応答実験と計算結果の比較

(i) エルセントロ波入力の場合

エルセントロ加速度波形を入力とした4層ゴム支承のハイブリッド地震応答実験の絶対加速度応答、相対変位応答および履歴応答を、図-16(a)、(b)、(c)にそれぞれ示した。入力波形が不規則であること、また復元力が非線形な履歴特性を有していることから、応答加速度や変位は単純な調和波形とならず、やや複雑な時刻歴応答を示している。絶対加速度の最大値はマイナス側で発生し、入力加速度に対する応答倍率は約0.25倍である。応答変位の最大値はプラス側で発生し、その時の免震支承のひずみ率は約60%であり、振動周期は約2.4秒である。同図(c)の履歴応答は、地震入力の影響により非対称な形状を示している。

図-16(a)、(b)には、等価減衰定数15%、等価固有周期2秒の線形1自由度モデルの応答計算値を点線で同時にプロットした。最大変位応答時の振幅と位相はよく一致しているが、その他では振幅・位相ともかなり異なった波形をしている。特に加速度波形では、実験値の最大値が計算値のそれをかなり下回っている。これは、加速度を低減させるための免震装置の有効性(15%以上の等価減衰効果)を示している。減衰定数1%、固有周期2秒の線形モデルの加速度応答値を別途計算し、免震支承による加速度低減率を算出したところ1/2.8倍となった。

図-17(a)、(b)には、バイリニア履歴モデルの応答計算値を点線で同時に示した。また同図(c)には、この時の履歴復元力応答をプロットした。等価線形モデルの場合と比較して、絶対加速度応答、変位応答とも実験値によく一致した結果を与えていることが判る。バイリニア型の履歴応答特性も実験結果を比較的よく再現している。

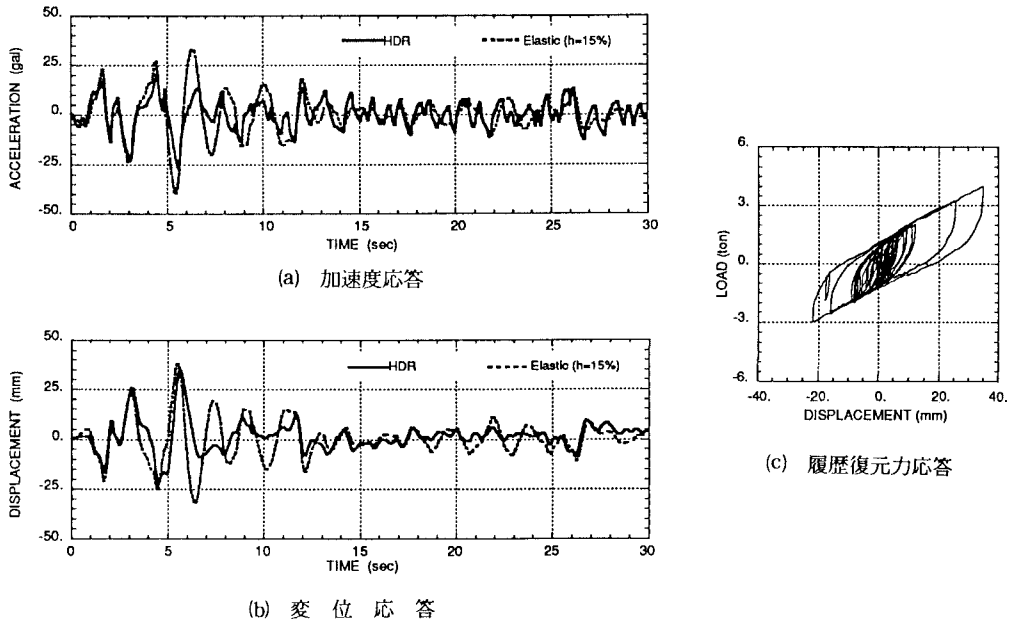
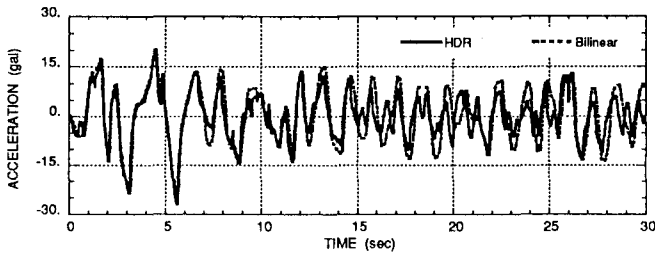
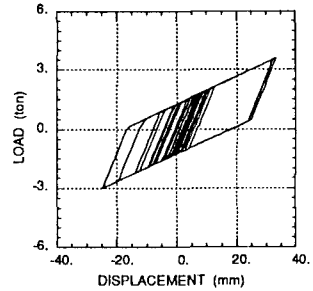


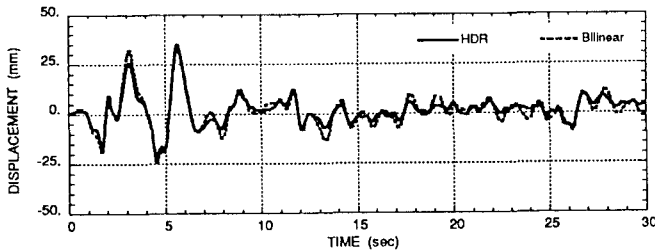
図-16 エルセントロ波地震応答実験と等価線形モデルの地震応答との比較



(a) 加速度応答



(c) 履歴復元力応答



(b) 変位応答

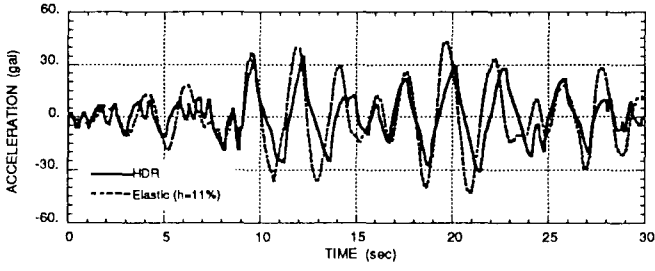
図-17 エルセントロ波地震応答実験とバイリニアモデルの地震応答との比較

(ii) 八戸波形入力の場合

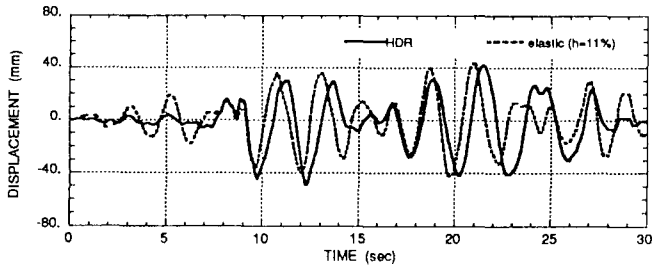
八戸加速度波形を入力とした場合の4層ゴム支承のハイブリッド地震応答実験結果を、図-18(a)、(b)、(c)に示した。応答波形が単純な調和波的な傾向にあるのは、構造物の固有周期付近に入力波形の卓越があるためであり、加速度の応答倍率も0.3倍となり、エルセントロ波の場合よりも大きくなっている。変位応答は約50mmで、ひずみ率は100%に達しているが、この領域ではゴム特有の硬化現象は見られず、大きな履歴面積を確保している。

図-18(a)、(b)には、等価減衰定数11%、等価固有周期2秒の線形1自由度モデルの応答計算値を点線で同時にプロットした。変位応答の最大値は実験値に等しく、波形の位相も比較的よく一致している。この理由は、実験結果の応答が調和波的で、1自由度線形モデルでもかなりの再現性を有していることによる。絶対加速度応答は、実験結果が、計算値よりも小さく、等価減衰定数11%以上の免震効果を有している。減衰定数1%、固有周期2秒の線形モデルの場合と比較すると、免震支承による加速度低減率は、 $1/3.6$ となった。

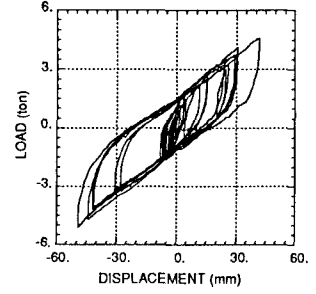
図-19(a)、(b)には、バイリニア型履歴モデルの応答計算値を点線で同時に示し、また同図(c)には、その時の履歴復元力応答をプロットした。エルセントロ地震入力の場合と同様に、加速度応答、変位応答ともに実験結果を極めてよく再現している。これらのことから、ひずみ率100%以内の領域では、ゴム支承の復元力特性をバイリニア型履歴特性で精度よくモデル化できるものと考えられる。



(a) 加速度応答

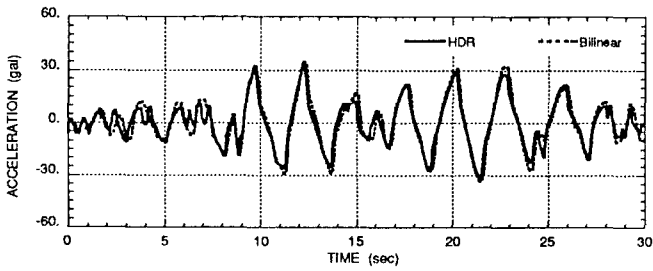


(b) 変位応答

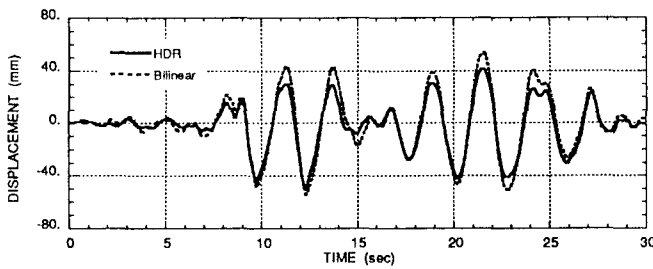


(c) 履歴復元力応答

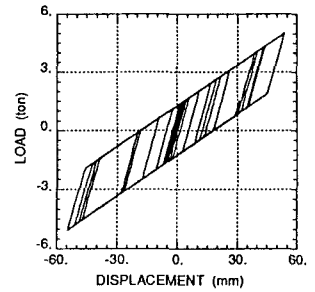
図-18 八戸波地震応答実験と等価線形モデルの地震応答との比較



(a) 加速度応答



(b) 変位応答



(c) 履歴復元力応答

図-19 八戸波地震応答実験とバイリニアモデルの地震応答との比較

4. あとがき

本研究により得られた成果をとりまとめると次のとおりである。

- (1) 2台の電気油圧式アクチュエーターにより高軸力を発生するとともに、他の1台のアクチュエーターにより水平方向の载荷を行う免震支承のハードな実験システムを構築し、これらを計算機とオンラインで結合するハイブリッド地震応答载荷システムを開発した。さらにこのシステムを用いて、高減衰ゴム免震支承の各種確認実験を行った。
- (2) 振幅を漸増させる繰り返し载荷試験より、水平変形量がゴム支承の厚さよりも小さい範囲(ひずみ率100%以下)では、ゴム材料特有の硬化現象が発生せず、ほぼバイリニア型の履歴特性が得られること、等価剛度や等価減衰定数は、ひずみ率の増大とともに減少すること、また面圧の増加により水平剛度は減少するが、減衰性能は増大することなどが明らかになった。
- (3) 振動周期を5秒から0.5秒に漸減させるスイープ調和波入力に対する、免震構造物の共振応答をオンラインで計算したところ、免震支承の非線形復元力特性のため、設定した固有周期2秒よりも2割程度長い周期で共振ピークを示した。等価線形モデルやバイリニア型履歴モデルの数値計算応答値と比較すると、免震支承の減衰効果は、長周期側で小さく、短周期側で大きい傾向にある。
- (4) エルセントロ記録波や八戸記録波を入力としたハイブリッド地震応答実験の結果から、4層の高減衰ゴム支承の免震効果は、加速度応答については、減衰定数15%程度となり、静的な繰り返し試験により得られた減衰定数にほぼ一致するが、変位応答については、減衰定数で11~15%程度になることが判明した。これらの値は、静的な繰り返し試験より得られた減衰定数よりも絶対値で3~5%程度低い値であり、免震設計等に当たっては注意を要する。
- (5) 等価線形モデルで、高減衰ゴム免震支承を有する構造物の絶対加速度応答および相対変位応答の両者の時刻歴波形を同時に精度よく予測するのは困難であるが、バイリニア型履歴モデルは、振幅・位相ともよく一致した結果を与える。

本研究で示したハイブリッド地震応答载荷実験システムは、免震支承の確認実験を極めて合理的に実施できる手法であり、今後は各種の異なる免震支承にも適用したいと考えている。なお本研究での実験を進めるに当たって高減衰ゴム支承の提供ほかの種々の御支援を頂いた東洋ゴム工業株式会社、载荷ビームの製作に御助力頂いた片山鉄工所株式会社、実験の計測や数値計算等に御協力頂いた京都大学工学部土木工学教室の伊津野和行助手、中西伸二技官に感謝する次第である。

参考文献

- 1) P.C.Jennings : Periodic Response of a General Yielding Structures, Proc. of ASCE, EM2, April 1964, pp.131~ 166.
- 2) 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/1-3, 1985年 4月, pp.1~10.
- 3) Kelly, J.M., Buckle, I.G. and C.-G., Koh: Mechanical Characteristics of Base Isolation Bearings for a Bridge Deck Model Test, Univ. of California at Berkeley, EERC Report No. 86/11, 1986.
- 4) 武田寿一編 : 構造物の免震・防振・制振, 技報堂出版, 1988年 5月.
- 5) Masanori Izumi: Base Isolation and Passive Seismic Response Control, Special Theme Session SE, Proc. of 9WCCE, Vol. VIII, 1988, pp.385~396.
- 6) (財) 国土開発技術センター : 道路橋の免震設計法ガイドライン(案), 1989年 3月.
- 7) 日本建築学会 : 免震構造設計指針, 1989年 9月.

- 8) Yamada, Y., Iemura, H., Tanzo, W. and K. Endo : Inelastic Response of Structures — Analytical Methods and Substructured Hybrid Experiments, Proc. of 8th Japan Earthquake Engineering Symposium - 1990.
- 9) Iemura, H., Ohshima, K. and T. Nakata : Earthquake Energy Partitioning and Reliability of Bridge Structures with Seismic Isolators, Proc. of 8th Japan Earthquake Engineering Symposium - 1990.

(1990年10月12日受付)