

# (139) 橋梁における免震支承の地震入力エネルギー分担率

京都大学工学部 ○家村浩和、山田善一

京都大学大学院 William tanzo、野村武司

## 1. はじめに

橋梁における高減衰積層ゴム支承の免震効果を入力エネルギーの観点から評価するため、まず高減衰積層ゴム支承のハイブリッド実験結果より、同支承のエネルギー吸収効果を定量化した。次に、この復元力特性を有する支承のモデル化を試み、これを免震橋モデルに適用して地震入力エネルギーとその分担率を弾塑性地震応答解析よりシミュレーションした。

## 2. ハイブリッド実験の荷装置と供試体

荷装置の概要を図-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号機は水平荷重ビームを介して、免震支承に軸力を与える。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おり、水平荷重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。計測されたデータはすべてアナログ→デジタル変換されて計算機に取り込まれ、計算された地震応答変位はデジタル→アナログ変換のあと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。

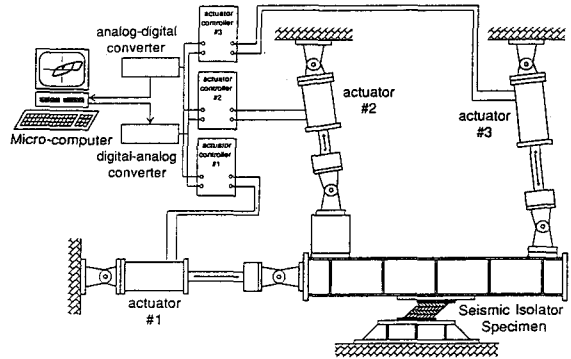


図-1 荷装置の概要

試験に用いた高減衰積層ゴム支承の平面形状は1辺250mmの正方形で、ゴム総厚は48mm(12mm×4層)、ゴム間に挿入した鉄板の厚さは全て1mmである。ゴム材料の等価粘性減衰定数は15%である。

## 3. 振幅漸増繰り返し荷重実験による免震支承の復元力特性の算定

同一振幅で2回繰り返し、振幅を漸増させる静的荷重実験を行った。ここでは、総厚に対する水平変位量を歪率  $\gamma$  (%)と定義し、 $\gamma=150\%$ までの荷重を行った。

図-2に履歴曲線を示す。これを見ると $\gamma=100\%$ まではほぼBi-linear型の履歴形状を示しているが、それ以上になるとゴム素材特有の硬化が起こり、剛性が増加していることがわかる。 $\gamma=100\%$ におけるLinear型の復元力特性を表-1(a)に、Bi-linear型の復元力特性を表-1(b)にそれぞれ示す。

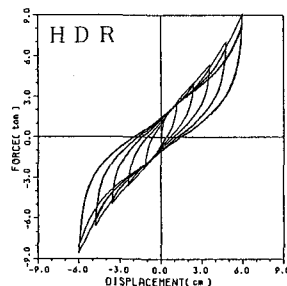


図-2 履歴曲線

表-1 復元力特性

(a) Linear 型	
等価剛性(t/cm)	1.46
等価減衰定数	0.15
(b) Bi-linear 型	
初期剛性(t/cm)	3.71
粘性減衰定数	0.01
降伏変位(cm)	0.42 ( $\gamma=8.75\%$ )
弾塑性傾斜率	0.811

## 4. ハイブリッド地震応答実験による免震効果の定量化

構造系の固有周期は $\gamma=100\%$ 時の等価固有周期が2secとなるように設定し、入力地震波形には最大加速度が98galとなるようにスケール化したエルセントロ(NS)記録及び八戸(NS)記録を用いた。エルセントロ(NS)を入力とする場合のエネルギー分担率の時刻歴を図-3に示す。同図には等価固有周期2sec・等価減衰定数3%、等価固有周期0.5sec・等価減衰定数15%、等価固有周期0.5sec・等価減衰定数3%の線形1自由度モデルのエネルギー分担率もそれぞれ示した。但し、 $W_c$ :粘性吸収エネルギー、 $W_H$ :塑性歪エネルギー、 $W_E$ :弾性歪エ

エネルギー、 $W_k$ :運動エネルギーとし、各エネルギーは単位質量当たりの量である。また、八戸(NS)を入力とする場合についても同様に図-4に示した。

エルセントロ(NS)を入力とする場合について検討する。等価固有周期2secの場合の入力エネルギーは0.5secの場合の47~64%とかなり減少している。また、等価減衰定数15%の場合、 $W_k + W_E$ の値は極めて小さく地震応答は大幅に低減されるが、3%の場合には長時間にわたって地震応答が継続している。そして、高減衰積層ゴム支承は地震入力エネルギーの低減および動的応答低減の両方の効果が期待できるものと言える。

次に、八戸(NS)を入力とする場合について検討する。等価減衰定数15%の場合、動的応答が大幅に低減されるのはエルセントロ(NS)の場合と同様である。しかし、等価固有周期2secの場合の入力エネルギーは0.5secの場合の200~250%に増大している。これは、八戸(NS)記録の卓越周期が2sec付近であることから共振またはそれに近い状態となり地震エネルギーが入力され易い構造物になったためと考えられる。

免震支承の復元力特性をBi-linear型で表現したモデルの、エルセントロ(NS)および八戸(NS)入力に対するエネルギー分担率を図-5にそれぞれ示したが、実験値に良く一致した結果を与えていることがわかる。このことより、 $\gamma=100\%$ 以内の領域では、高減衰積層ゴム支承の復元力特性をBi-linear型履歴特性で精度良くモデル化できることがわかる。

### 5. 橋梁構造物および免震支承のモデル化

RC道路橋の基礎部・橋脚部・支承部・桁部を図-6のようにモデル化した<sup>1)</sup>。モデル化にあたっては以下の事項に留意した。

- (1) 質量は、鉄筋コンクリートの単位体積重量を $2.5 \text{ (tf/m}^3\text{)}$ として算出・換算する。
- (2) 初期剛性は、設計強度・断面などにより変化するが、ここでは設計強度 $240 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ 、鉄筋コンクリートのヤング率を $2.7 \times 10^5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ としてEIを求め、簡単に片持梁と考えて次式より初期剛性を近似的に算出・換算する。

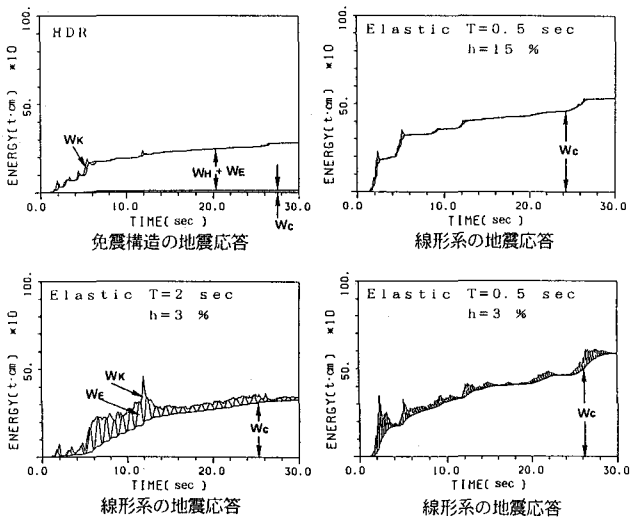


図-3 時刻歴エネルギー分担率(エルセントロ(NS)入力)

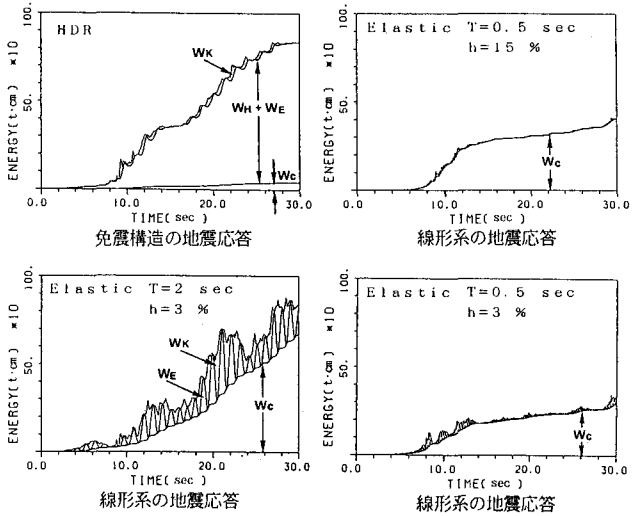


図-4 時刻歴エネルギー分担率(八戸(NS)入力)

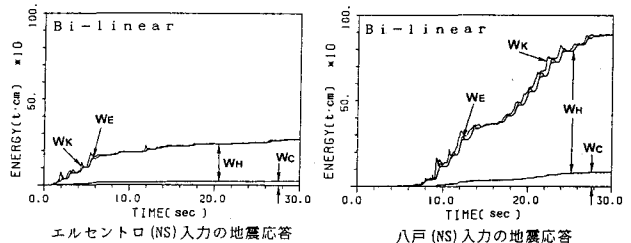


図-5 Bi-linearモデルの時刻歴エネルギー分担率

$$k = 3EI/h^3$$

- ただし k : 初期剛性  
 E : 鉄筋コンクリートのヤング率  
 I : 断面二次モーメント  
 h : 部材の高さ (長さ)

(3) 粘性減衰定数は、「道路橋の免震設計法ガイドライン (案)」を参考に適当な値を与えるものとする。

(4) 降伏変位・弾塑性傾斜率は適当な値を定めて与えるものとする。

モデル1は免震支承を用いない場合であり、下方から質量 : 0.36, 0.21, 0.10, 0.74 t·sec<sup>2</sup>/cm、初期剛性 : 1000, 230, 230, 300 t/cm、粘

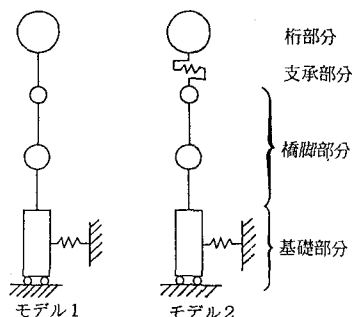


図-6 道路橋のモデル

性減衰定数 : 0.1, 0.04, 0.04, 0.02 とし、降伏変位・弾塑性傾斜率は全ての層で1.0 cm、0.95とした。一方、モデル2は免震支承を用いる場合であり、第4層の特性値は免震支承の特性に合わせて変化させた。

免震支承のモデル化 (Bi-linear型) においては以下の手順に従い、ゴム総厚の影響を検討するため9.6, 14.4, 19.2 cmの3種類を想定した。なおこれらの免震支承をそれぞれHDR1, HDR2, HDR3と呼ぶことにする。

(1) ゴム総厚の増大に伴い受圧面積を増大させることで、支承部と桁部よりなる系の等価固有周期 ( $\gamma=100\%$ 時) を2secに設定する。

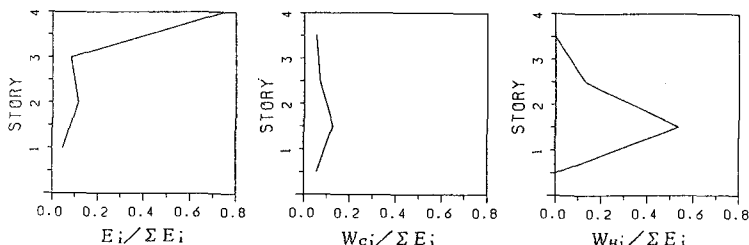


図-7 エネルギー分担率 (エルセントロ (NS) 入力、モデル1)

(2) 粘性減衰定数は0.01とする。

(3) 降伏変位は  $\gamma=8.75\%$  時の変位とする。

(4) 弾塑性傾斜率は0.811とする。

## 6. シミュレーション結果

入力地震波形は、最大加速度が200galとなるようにスケール化したエルセントロ (NS) 記録および八戸 (NS) 記録を用いた。まず、エルセントロ (NS) を入力とする場合のモデル1のエネルギー

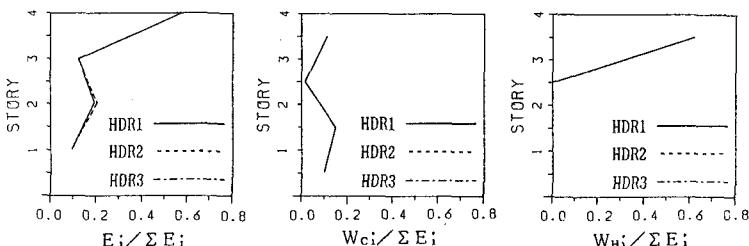


図-8 エネルギー分担率 (エルセントロ (NS) 入力、モデル2)

分担率を図-7に、モデル2のエネルギー分担率を図-8にそれぞれ示した。又、八戸 (NS) を入力とする場合のモデル1、モデル2のエネルギー分担率を図-9、図-10にそれぞれ示した。但し、 $\Sigma E_i$  : 総入力エネルギー、 $E_i$  : 各質点の入力エネルギー、 $W_{ci}$  : 各層の粘性吸収エネルギー、 $W_{hi}$  : 各層の塑性歪エネルギーとする。さらに、各種エネルギーの総量および橋梁の各部分のエネルギー量を表-2に示した。

エルセントロ (NS) を入力とする場合について検討する。免震支承を用いない場合、粘性吸収エネルギーおよび塑性歪エネルギーの分担率は第2層 (橋脚部分) で大きく、特に塑性歪エネルギーについてはその傾向が顕著である。そして、第1~3層 (基礎・橋脚部分) に蓄積される塑性歪エネルギーは総入力エネルギーの約67%を占めており、強震時に基礎・橋脚部分が受ける損傷は大きいといえる。一方、免震支承を用いる場合は、用いない場合に比べて入力エネルギーの分担率には差ほどの変化はみられない。また、総入力エネルギー量は36~38%と大幅に減少しており、しかも第4層 (支承部分) に蓄積される塑性歪エネルギーがその61~63%を占め、第1~3層の塑性歪エネルギーはほぼゼロになることから、基礎・橋脚部分の損傷はかなり軽減できるものといえる。そして、これらの効果にはゴム総厚の影響はほとんど見られない。

次に、八戸 (NS) を入力とする場合について検討する。免震支承の有無による各エネルギーの分担率の変化は、エルセントロ (NS) の場合と同様であるが、総入力エネルギー量については免震支承を用いることで140%以上に増加しており、これはエルセントロ (NS) の場合と比較すると大きく異なる。しかし、その83~85%が第4層の塑性歪エネルギーで吸収されており、その結果第1~3層の塑性歪エネルギーはほぼゼロになっていることから、確かに基礎・橋脚部分の損傷は軽減されるであろう。しかし、

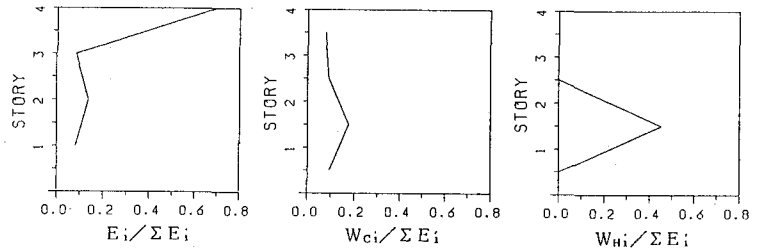


図-9 エネルギー分担率 (八戸 (NS) 入力、モデル1)

支承部分のエネルギー入力量が極めて大きいため免震支承の破壊を招く危険性が高くなると言える。各モデルの一次固有周期を別途計算したが、モデル1は0.66sec、モデル2 (HDR1) は1.37secである。これらは各層の初期剛性を用いて算出しているが、実際の応答は塑性領域にはいると剛性が小さくなることから一次固有周期は若干大きな値となる。モデル2 (HDR1) において、 $\gamma=100\%$ 時の等価剛性を用いた場合の一次固有周期は2.07secとなる。そして、八戸 (NS) 記録の卓越周期が2sec付近であることから共振またはこれに近い状態となり、地震エネルギーが入力され易い構造になったものと考えられる。

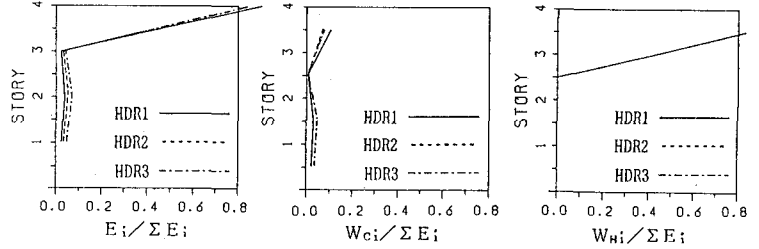


図-10 エネルギー分担率 (八戸 (NS) 入力、モデル2)

表-2 地震入力エネルギーの分担率

(a) エルセントロ (NS)

(単位: t·cm)

	支承	$\Sigma E$	$\Sigma W_c$	$\Sigma W_H$	$W_{c4} + W_{H4}$	$\frac{3}{1} (W_c + W_H)$	$W_{H4}$	$\frac{3}{1} W_H$
モデル1	—	4142.1	1274.0	2770.2	222.2	3822.0	0.0	2770.2
モデル2	HDR1	1505.4	553.7	936.9	1100.8	389.8	936.9	0.0
	HDR2	1484.6	529.1	932.1	1088.5	372.7	932.1	0.0
	HDR3	1564.3	572.4	957.7	1135.0	395.2	957.7	0.0

(b) 八戸 (NS)

	支承	$\Sigma E$	$\Sigma W_c$	$\Sigma W_H$	$W_{c4} + W_{H4}$	$\frac{3}{1} (W_c + W_H)$	$W_{H4}$	$\frac{3}{1} W_H$
モデル1	—	1435.9	620.5	651.4	107.0	1164.9	0.0	651.4
モデル2	HDR1	3465.3	567.8	2887.2	3257.4	197.5	2887.2	0.0
	HDR2	2657.3	367.1	2266.0	2454.5	178.6	2266.0	0.0
	HDR3	1984.8	321.5	1634.9	1781.4	175.0	1634.9	0.0

7. おわりに 本研究により得られた結果をまとめると次のようである。

- (1) 高減衰積層ゴムは $\gamma=100\%$ 以下ではゴム材料特有の硬化現象は起こらず、履歴復元力特性をBi-linear型で精度良くモデル化することができる。
- (2) 免震支承を用いることで動的応答の低減を図ることができるが、総入力エネルギー量については入力地震波形の周波数特性に依るところが大きい。
- (3) 本研究で用いた免震橋モデルでは、基礎・橋脚部分の履歴吸収エネルギーをほぼゼロにすることができ、この部分の強震時における損傷を大幅に軽減することができる。

謝辞: 免震支承のハイブリッド地震応答載荷実験を行うにあたって、川口金属工業・東洋ゴム工業・日本技術開発の各株式会社からの援助を受けたことを付記する。

参考文献: 1) 阪神高速道路公団、(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) (免震装置を有する道路橋の耐震設計研究報告書)、平成元年3月