

## 高減衰積層ゴム支承の有限要素モデルの地震応答予測性能

東京大学大学院 学生会員 吉田純司  
 東京大学大学院 フェロー 藤野陽三  
 東京大学大学院 正会員 阿部雅人

### 1. はじめに

近年、高減衰積層ゴム支承 (HDRB:High Damping Rubber Bearing) を用いた免震構造を採用している橋梁、建築物が増加している。HDRB は、構成ゴム材料の柔軟性および減衰性能により、構造物に作用する地震力ならびに変位応答を低減する。このように HDRB は、動力学的な効果を積極的に利用しているため、構造物の地震時の応答は、支承の力学特性に大きく依存する。従って免震構造物の応答予測を精緻に行うためには、HDRB のモデルの精度が重要になる。

本研究では、HDRB のハイブリッド地震応答載荷実験を行い、実験結果と構築した HDRB の有限要素モデル<sup>1), 2)</sup>による解析結果とを比較してモデルの地震応答予測性能を検討することを目的とした。

### 2. ハイブリッド地震応答載荷実験

本ハイブリッド地震応答実験では図-1に示すように、積層ゴム支承<sup>1)</sup>に支持された 1 質点系の構造系を想定し、この構造系が水平 1 方向または水平 2 方向に地震動を受けるものと考えた。この構造系の運動方程式は、構造減衰が小さいと仮定すると

$$m \ddot{u}_x + f_x = -m \ddot{z}_x \quad (1a)$$

$$m \ddot{u}_y + f_y = -m \ddot{z}_y \quad (1b)$$

となる。ここに、 $m$  は質点の質量、 $u_x$  および  $u_y$  は  $x$  方向ならびに  $y$  方向の変位応答、 $f_x$  および  $f_y$  は  $x$  方向ならびに  $y$  方向における支承の復元力、 $\ddot{z}_x$  および  $\ddot{z}_y$  は  $x$  方向ならびに  $y$  方向の地震加速度である。ただし、時刻  $t_n$  における応答  $\{u_x(n), u_y(n)\}$  の算出に必要な積層ゴム支承の復元力  $\{f_x(n-1), f_y(n-1)\}$  は、時刻  $t_{n-1}$  での変位応答  $\{u_x(n-1), u_y(n-1)\}$  を積層ゴム支承に載荷し得られたものをコンピュータにフィードバックして用いている。

運動方程式(1)はコンピュータ内で中央差分法<sup>2)</sup>により数値積分した。ただし、入力地震動は、変位応答の最大値が積層ゴム支承のせん断ひずみ 150%前後となるように兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測された実地震記録をスケールして用いた。なお載荷は、実時間の 20 倍のスケールで行った。

### 3. FEM モデル

HDRB は、高減衰ゴム材料と鋼材料を積層状に組み合わせた複合構造部材である。そのため HDRB の有限要素モデルを構築するに際しては、高減衰ゴム材料を超弾性体と弾塑性体とを並列に組み合わせた構成則によ

り、鋼材料を弾塑性体によりモデル化している<sup>1)</sup>。また、ゴム材料は、微圧縮性を有しているため、ゴム層に相当する部分では変位とともに圧力を内挿する射影混合法<sup>1), 4)</sup>を用いた。この射影混合法では、変位の離散化に Lagrange8 節点のアイソパラメトリック 6 面体要素を用い、圧力の離散化では要素ごとに不連続な要素内一定(圧力 1 節点)のものを用いている。一方、鋼板に相当する部分には、変位のみを独立変数とした Lgrange8 節点のアイソパラメトリック 6 面体要素を用いている。表-1 に対象とした HDR の有限要素モデルにおける要素分割を示す。

### 4. ハイブリッド実験との比較

図-2 および図-3 にそれぞれ水平 1 方向および水平 2 方向に地震動を入力した場合のハイブリッド実験結果と、FEM による解析結果の比較を示す。図-2、図-3 をみると応答、復元力特性ともに有限要素モデルを用いた応答解析により実験結果を再現できていることがわかる。

### 5. まとめ

本研究では、高減衰積層ゴム支承の有限要素モデルの地震応答予測性能を検討した。その結果、水平 1 方向および水平 2 方向の地震応答ともに、ハイブリッド実験で得られている応答を FEM モデルにより精度よく再現できることがわかった。このことより FEM モデルの地震応答予測性能を検証することができた。

<謝辞> 有限要素法のプログラムの開発では、東京大学新領域創成科学研究科環境学の渡辺講師にご指導頂いた。また、ハイブリッド実験で利用した積層ゴム支承の設計・製作は、川口金属(株)の比志島氏および鶴野氏、(株)プリジストンの水津氏および須藤氏、横浜ゴム(株)の山根氏および遠藤氏、オイレス工業(株)の伊関氏および横川氏に協力して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献： 1) 吉田純司：画像解析を用いた連続体の計測システムの構築と積層ゴム支承のモデル化への応用，東京大学学位論文，工学系研究科社会基盤工学専攻，2001． 2) 吉田純司，阿部雅人，藤野陽三：高減衰ゴムの 3 次元有限要素解析，土木学会第 55 回年次学術講演会 I-B，2000 3) 柴田明德：最新耐震構造解析，森北出版，1981． 4) 渡辺浩志：非圧縮性超弾性体の混合型有限要素解析に関する研究，東京大学学位論文，1995．

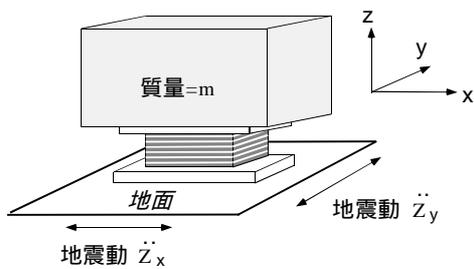
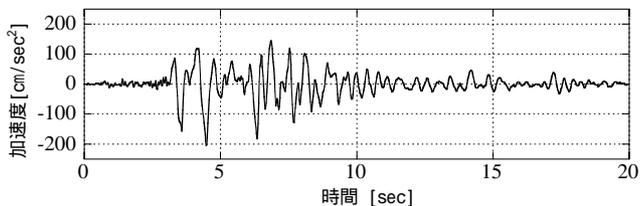


図-1 ハイブリッド実験で想定した構造系

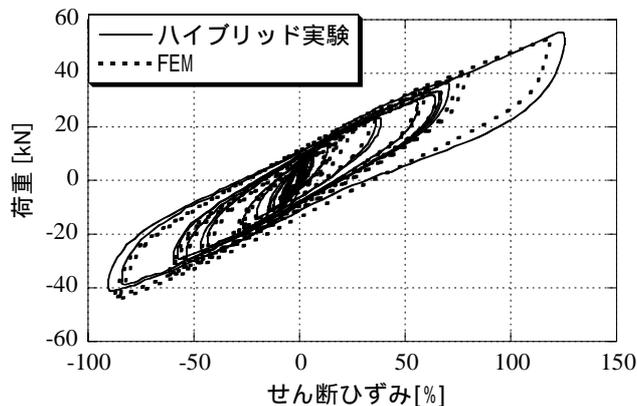
表-1 解析に用いた要素数

		要素数
平面方向 <sup>注1)</sup>		6×6
高さ 方向	ゴム1層あたり	4
	鋼板1層あたり	1
総要素数		1224

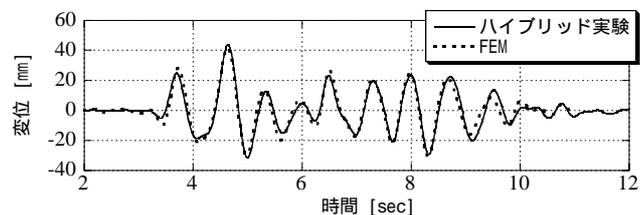
注1) 要素数は、支承全体でメッシュを作成すると考えた場合



(a) 入力した地震動

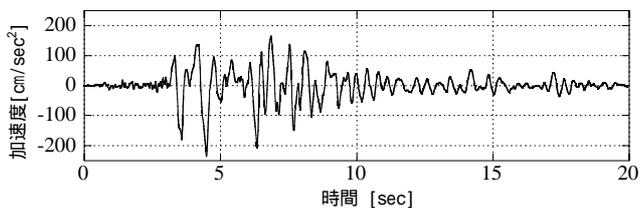


(c) 復元力特性の比較

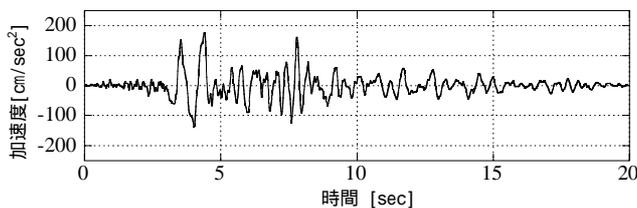


(b) 変位応答

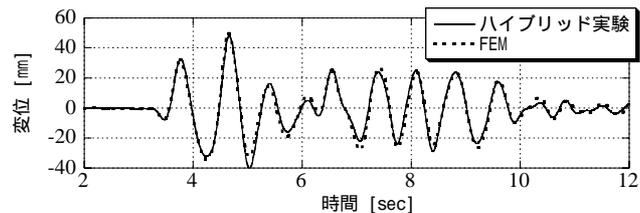
図-2 水平1方向ハイブリッド実験とFEMの比較



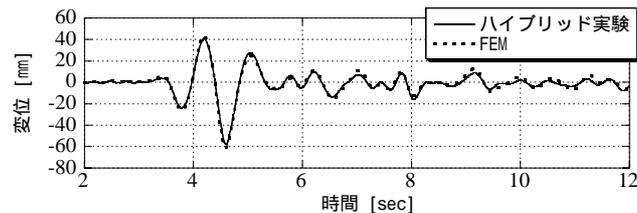
(a) X方向に入力した地震動



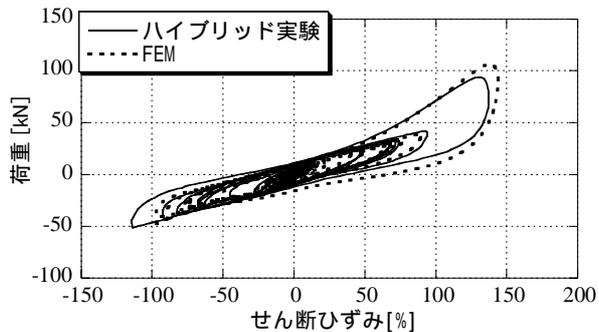
(b) Y方向に入力した地震動



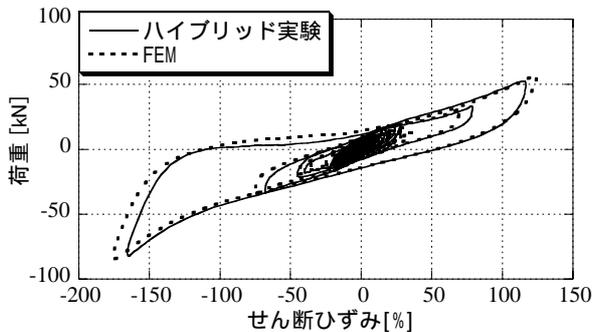
(c) X方向の変位応答



(d) Y方向の変位応答



(e) X方向の復元力特性



(f) Y方向の復元力特性

図-3 水平2方向ハイブリッド実験とFEMの比較