

# 球面すべり支承の改良に関する研究

舟木秀尊\* 早川邦夫\* 河野政典\*\*

## 1. はじめに

近年、免震建物の適用範囲が拡大していく中で、軟弱地盤や構造規模等の条件により、積層ゴムでの免震化が難しい場面がある。これらの場面で適用できる免震部材のひとつとして、球面すべり支承 (Friction Pendulum System: 以下FPS) が挙げられる。この支承は、建物の重量に関係なく固有周期が設定でき、容易に長周期化を図れることから、低層建物や既存建物の免震化に適している。しかし、高次振動を励起しやすいこと、偏荷重や偏摩擦によるねじれが懸念されること、積層ゴムと比較して性能が劣るなどの理由によって、一般的な建物への普及が進んでいないのが実状である。そこで、適用場面の拡大を図るため、免震性能を向上させる改良方法として、FPSの可動子に弾性体(ゴム系材料)を組み込むことを考案した。本報では、縮小モデルの振動台実験と実機モデルの基本特性試験の結果について報告する。

## 2. FPSの概要

### 2.1 免震部材の機構

FPSの機構概念(改良型)を、図-1に示す。FPSは、すべり材と可動子及び球面板で構成され、球面板上を可動子がすべり運動することによる振り子運動を応用した免震部材である。可動子と球面板の摺動を行う部分には、PTFE(四フッ化エチレン樹脂)等の摩擦係数の低い材料を使用しており、地震時における基礎と建物の滑らかな運動を実現している。周期は、球面板の曲率寸法によってのみ設定され、搭載される重量に依存しない。減衰力は、すべり摩擦によって与えられる。

改良型は、可動子に弾性体(ゴム系材料)を組み込み、上部構造に地震の過大な水平方向力が急激に加わることを防止する仕組みになっている。

### 2.2 作動原理

FPSの作動原理を図-2に示す。建物に一定以上の加速度が発生した時点で球面板と可動子の間にすべりが起こり、球面板の傾斜に沿って振り子運動を開始する。振り子の周期は、球面板の曲率半径によって決定され、減衰力は、すべり材と球面板の間に生じる摩擦抵抗によって与えられる。また、復元力は、重量と球面板上の

可動子の位置によって決まる。図-3に従来型・改良型の復元力特性を示す。従来型は、復元力の勾配(K)と摩擦減衰力の大きさ( $\mu W$ )で表され、改良型は、弾性体の水平剛性( $K_0$ )が1次勾配として与えられる。従来型の場合、支承に作用する水平力がすべり材と球面板の静摩擦力を越えるまでは作動せず、改良型の場合は、弾性体の変形によって免震化する。また、すべりが発生した後、変位の向きが反転する時も同様である。最終的には、水平変形が原点に近くなるほど球面板の傾斜が減少し、復元しようとする力と摩擦力が打ち消し合うところで停止する。

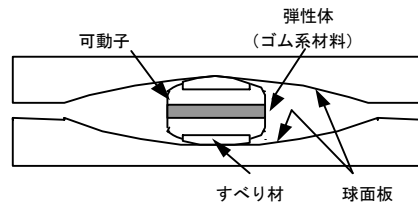


図-1 機構概念図(改良型)

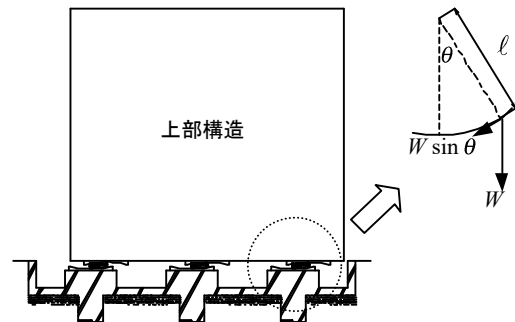


図-2 FPSの作動原理

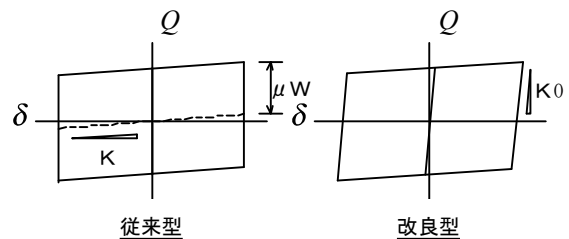


図-3 復元力特性

\*耐震研究室 \*\*建築研究室

### 2.3 周期特性

FPSの免震周期は、球面板の曲率によって設定される。改良型の場合、すべりが発生するまでの周期はゴム材の水平剛性で決まる。よって、周期特性は、(1)式と(2)式で表すことができる。

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_0}} \quad \dots (1) \quad T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} \quad \dots (2)$$

ただし、 $T_0$  : ゴムの剛性で決まる免震周期 (sec)  
 $T_1$  : 球面の曲率で決まる免震周期 (sec)  
 $K_0$  : ゴム材の水平剛性 (t/cm)  
 $K$  : 球面の復元力勾配 (t/cm)  
 $m$  : 上部構造質量 (t)

### 3. 振動台実験

#### 3.1 実験の概要

改良型の免震性能の検証と、FPSの偏荷重・偏摩擦状態における応答性状を確認することを目的に、振動台実験を行った。採用した縮小モデルの免震部材を図-4に示す。支承は、鉄骨フレームの柱脚に設置するため、従来型及び改良型とも各4基ずつ製作した。免震部材の材料を表-1に示す。改良型の弾性材には、厚さ5mmの天然ゴムを採用し、可動子との接合にはエポキシ系の接着材を使用した。また、偏摩擦状態での試験用として球面板の表面にコーティング処理を施さない免震部材を1基別途に製作した。試験体の諸元を表-2に、上部構造の鉄骨フレームを図-5に示す。フレームは4層で構成され、各層の応答加速度と最下層の相対変位を計測した。変位は上屋の回転を検出するためにXY方向とも2ヶ所で計測した。また、免震部材の下部に分力計を設置して軸力と水平力を計測した。偏荷重状態の実験は、基礎梁（最下層）に設置された付加質量の配置を変える方法で実施した。偏摩擦状態の実験は、4基の支承の中に1基だけ摩擦係数の高い免震部材を混入させる方法で行った。実験に使用した地震波を表-3に示す。入力加速度は、非免震と従来型及び改良型を比較するための30、50、100(cm/s<sup>2</sup>)と、大地震時の免震性能を確認するために、最大速度で基準化した25、50(cm/s)の計5段階とした。

#### 3.2 実験結果

##### a. 免震部材の作動性

振動台実験に先だって実施したFPS単体の納入試験では、従来型のすべり摩擦係数は平均で0.024(正弦波、0.064Hz、2cm/s)、改良型が0.026であった。よって、可動子のすべりの発生は、入力加速度で30(cm/s<sup>2</sup>)程度と予測された。実験では、各地震波30cm/s<sup>2</sup>レベルの入力の場合、従来型は殆ど作動せず、改良型はゴムの弾性変形で応答した。また、すべりが発生するレベルにおいては、改良型、従来型とも良好な作動性を示した。加振

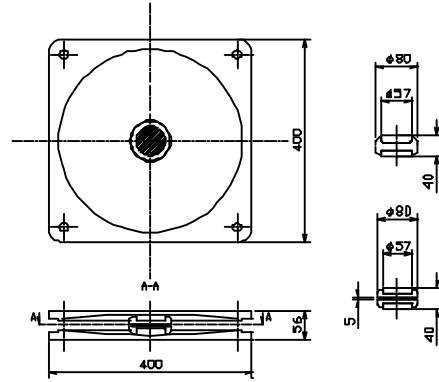


図-4 縮小モデル試験体

表-1 免震部材の材料

球面板 (上下)	可動子		
	胴体	ゴム	すべり材
AC7A	SS400	NR G=0.78N/mm <sup>2</sup>	PTFE

表-2 試験体の諸元

装置		従来型	改良型
球面 R1500	設計重量	4.0 (ton)	
	固有周期	3.5 (sec)	
	変位ストローク	±265 (mm)	
可動子 φ100	すべり 材	サイズ	φ57
		面圧	14.7 (N/mm <sup>2</sup> )
	ゴム	サイズ	φ70
		面圧	9.8 (N/mm <sup>2</sup> )
	周期	0.50 (sec)	
上部構造		フレーム 重量	13.66 (ton)
柱スパン	3.0 (m)	付加質量	1.90 (ton)
階高	1.5 (m)		

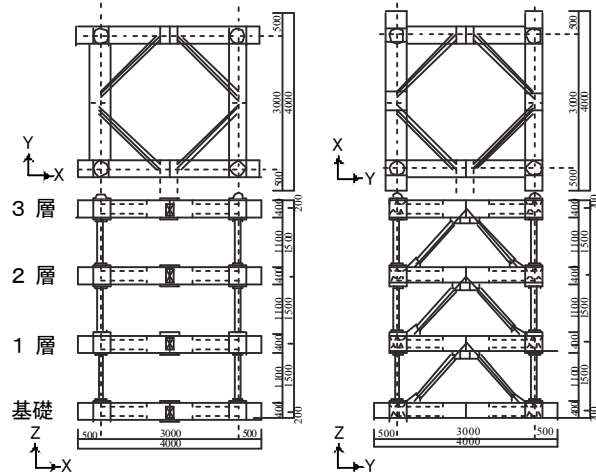


図-5 鉄骨フレーム

表-3 入力地震波

地震波	入力レベル	加振方向
JMA KOBE 1995 NS EW UD	30 (cm/s <sup>2</sup> )	X (NS) or X (NS), Y (EW)
	50 (cm/s <sup>2</sup> )	
EL CENTRO 1940 NS EW UD	100 (cm/s <sup>2</sup> )	X (NS), Y (EW) or X (NS), Y (EW), Z (UD)
	25 (cm/s)	
HACHINOHE 1968 NS EW UD	50 (cm/s)	

後の残留変位は、地震波によって差が見られたが、HACHINOHE NS 波 50 (cm/s) 1 方向加振の 1.33 (cm) が最大であった。これは、すべり摩擦係数を  $\mu = 0.02$  と仮定した際の摩擦力と球面の復元力との釣り合いから計算される残留変位  $\delta = 5.99$  (cm) に比べて、小さい値となった。

b. ゴムの水平周期

改良型の場合、ゴムの水平周期が免震性能の向上に影響を与える。改良効果が十分に発揮されるためにはゴムの水平周期を 0.75 (sec) 程度にすることが求められたが、振動台実験の縮小モデルではゴムの形状係数を確保することが難しく、設計は 0.50 (sec) となった。水平力と水平変形の関係について、実験結果の一例を図-6 に示す。ゴムの水平周期は、設計値に近い 0.54 (sec) であった。

c. 免震性能

鉄骨フレームの3層レベルにおける最大応答加速度の分布を図-7 に示す。入力加速度 150 (cm/s<sup>2</sup>) 以下で実施した非免震（鉄骨フレームを振動台に固定）試験の

結果と比較すると、両タイプとも優れた免震性能を示している。また、50 (cm/s) レベルに対しては、各種地震波において 1/2~1/3.5 程度の低減効果が見られた。一方、可動子にゴム材を組み込んだことによる効果に着目すると、地震波の種類や入力レベルによって差が見られた。改良型の最大応答加速度は、可動子のすべりが発生しない入力加速度 30 (cm/s<sup>2</sup>) の場合、従来型と比較すると、最大で 40% 程度応答を低減できた。一方、大きい入力レベルに対しては、最大で 15% 程度の低減となった。今回、縮小モデルでゴム材の水平周期を十分に確保することができなかったが、実機支承になって理想的なゴムの特性が得られれば、改良型の性能は、さらに向上すると推測される。ELCENTRO NS 波 30 (cm/s<sup>2</sup>) 加振の時刻歴応答波形（非免震、従来型、改良型）を図-8 に示す。改良型は従来型に比べて高次の振動成分が低減されている。また、White Noise を X 方向に 100 (cm/s<sup>2</sup>) 入力した振動台上加速度と鉄骨フレーム3層の応答加速度の伝達

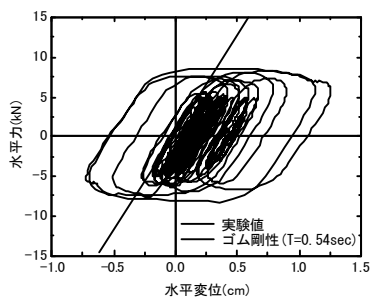
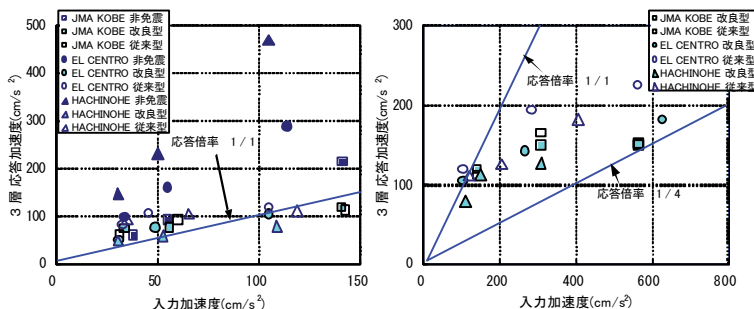


図-6 改良型の履歴特性

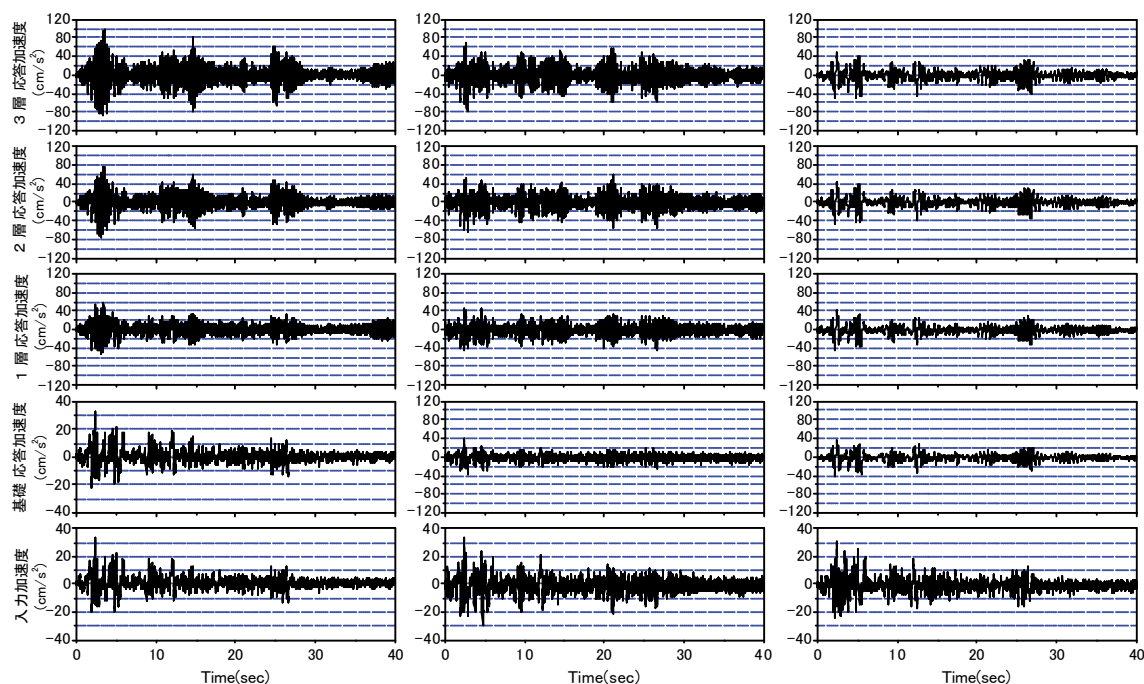
~ EL CENTRO NS 波 100 cm/s<sup>2</sup> ~



a) 入力 150cm/s<sup>2</sup> 以下

b) 入力 150cm/s<sup>2</sup> 以上

図-7 鉄骨フレーム3層レベルでの最大応答加速度の分布



a) 非免震

b) 従来型 FPS

c) 改良型 FPS

図-8 EL CENTRO NS 波 30 (cm/s<sup>2</sup>) 加振の時刻歴応答波形 (X 方向、1 方向入力)

関数を図-9に示す。従来型は、すべりが発生していない状態であり、鉄骨フレームの固有振動数にあたる成分で特に増幅がみられる。一方、改良型は可動子ゴムの弾性変形で応答している状態であるが、従来型と比較すると高次振動の励起を抑制しており、可動子にゴムを組み込んだことによる効果が現れている。

d. 偏荷重と偏摩擦の影響

FPSは、摩擦型の免震部材であり、極端な偏心荷重や摩擦係数に著しい差が生じた場合、上部構造がどのような応答性状を示すのか、免震性能に影響があるのかといった点が不明確であり、設計の際に懸念される問題である。それを実証するために偏荷重、偏摩擦状態の実験を行った。偏荷重試験の付加質量の設置状況を写真-1に、各支承の軸力負担を表-4に示す。また、偏摩擦の試験は球面にコート処理がないものを1基混入させて行ったが、その摩擦特性を図-10に示す。試験順序は、等分布荷重→偏荷重→偏摩擦の順で行った。試験結果の一例として、等分布荷重、偏荷重、偏摩擦の応答分布を図-11に示す。応答加速度の値は、各層柱脚で計測した対角2箇所を平均したものである。偏荷重、偏摩擦とも、等分布荷重と比較すると応答加速度が大きくなっているが、これらには繰り返し加振によるすべり材

の摩擦の影響が含まれていることから、偏荷重による影響分は小さかったと推察される。一方、上屋の回転量を図-12に示す。偏摩擦試験においては、摩擦係数が大きい支承①を支点とした上屋の回転が見られた。回転量はEL CENTRO NS, EW, UD波 50(cm/s)レベルの3方向加振において最大となり、0.015(rad)であった。今回の実験は極めて厳しい条件で行っており、実際にはコート処理も施され、摩擦係数の製品誤差は小さく、支承の数も増えて平均化されることから、偏摩擦や偏荷重による上屋の回転量は、実用上問題ない範囲になると考えられる。



写真-1 付加質量の設置状況  
～ 偏荷重時 ～

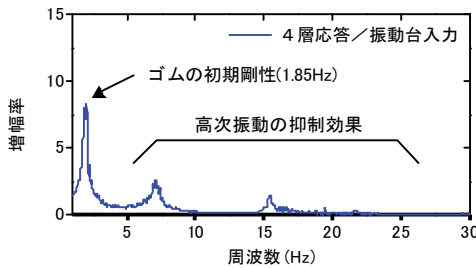
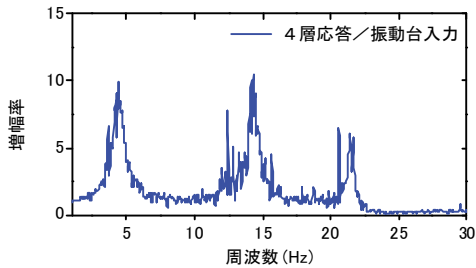


図-9 伝達関数の比較(White Noise 加振)

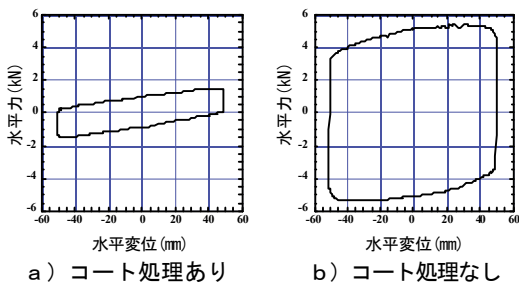


図-10 摩擦特性の比較

表-4 各支承の軸力負担

	等分布荷重	偏荷重
支承①	4.26 (ton)	5.04 (ton)
支承②	3.82 (ton)	3.71 (ton)
支承③	4.33 (ton)	3.75 (ton)
支承④	3.84 (ton)	3.75 (ton)

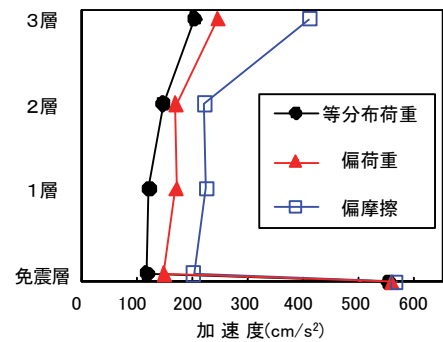


図-11 応答加速度分布の比較 (X方向)  
～ EL CENTRO NS, EW, UD 波 50 (cm/s) 入力 ～

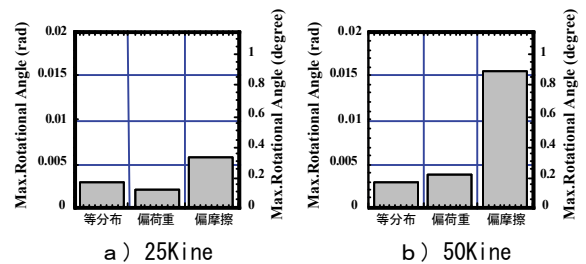


図-12 上屋の回転量 (EL CENTRO NS, EW, UD 波 入力)

#### 4. 実機モデルの基本特性試験

##### 4.1 基本特性試験の概要

改良型FPSの実機モデルについて、支承の基本特性を確認することを目的に要素試験を実施した。試験体の概要を図-13に示す。また、使用材料を表-5に、諸元を表-6に示す。試験体は1体とし、鉛直荷重と加振速度をパラメータとして軸力载荷のすべり試験(写真-2参照)を実施した。すべり材の面圧は、5~30(N/mm<sup>2</sup>)、すべり方向の加振速度は、1~30(cm/s)の各5段階とし、水平変位と水平荷重を計測した。

##### 4.2 試験結果

###### a. 摩擦係数

すべり材と球面のコートには、低摩擦を実現するためにPTFEが使われている。また、摩擦係数は面圧と速度に依存することが既往の文献<sup>1)</sup>からわかっている。摩擦係数と速度及び面圧の関係を図-14に示す。速度が増すと摩擦係数は大きくなり、20(cm/s)付近から緩やかな増加となる。また、面圧が増すと摩擦係数は低下する。これらの傾向は、従来型の傾向と同様であり、改良型となったことによる摩擦係数への影響は確認されなかった。なお、設計荷重における摩擦係数は、速度1、5、10、20、30(cm/s)に対して、それぞれ $\mu = 0.025$ 、0.033、0.041、0.051、0.053と低摩擦であることを実証した。

###### b. 1次剛性と2次剛性

改良型FPSの復元力特性は、ゴムの水平剛性、球面の曲率から与えられる復元力、すべり摩擦力で表される。1次剛性と面圧及び速度の関係について、試験結果をまとめたものを図-15に示す。ゴムの剛性は、面圧が増すにつれて、ほぼ線形的に減少する傾向が見られた。また、速度依存性は確認されなかった。履歴特性の1次剛性と2次剛性について、実験値と設計値を比較したものを図-16に示す。2次剛性は、球面の曲率と軸力によって決まるが、試験結果は、設計値から計算される剛

性(勾配)と良く一致しており、今回の改良型FPSの実機モデルが、設計通りに製作できたといえる。

表-5 試験体の材料

球面板(上下)	可動子		
	胴体	ゴム	すべり材
SS400	SS400	NR G=0.78N/mm <sup>2</sup>	PTFE

表-6 試験体の諸元

球面 R2000	設計重量	120.0(ton)	
	固有周期	4.0(sec)	
	変位ストローク	±535(mm)	
可動子 φ400	すべり材	サイズ	φ319
		面圧	14.7(N/mm <sup>2</sup> )
	ゴム	サイズ	φ391×5(mm)
		面圧	9.8(N/mm <sup>2</sup> )
	周期	0.75(sec)	

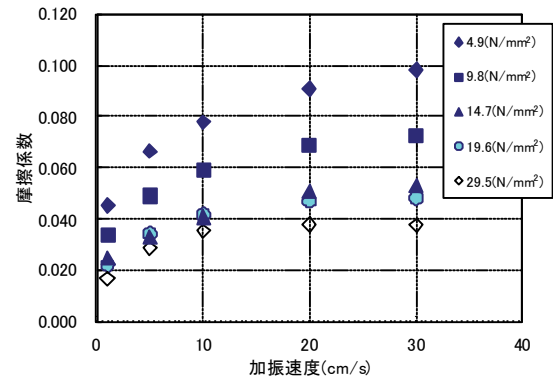


図-14 摩擦係数の速度・面圧依存性



写真-2 軸力载荷のすべり試験

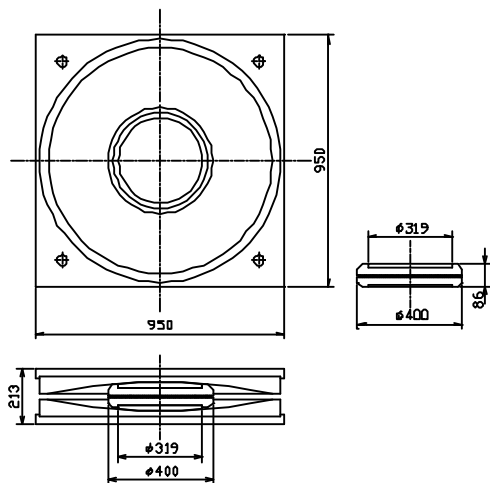


図-13 改良型FPSの実機モデル

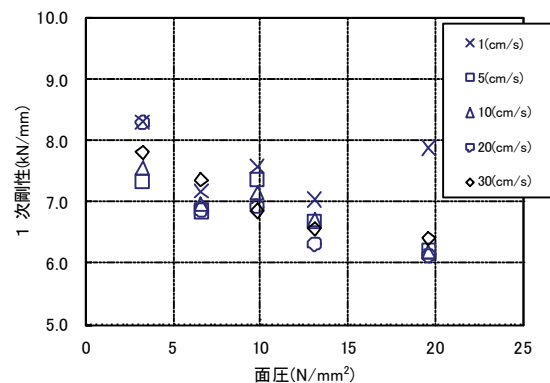


図-15 1次剛性の面圧依存性

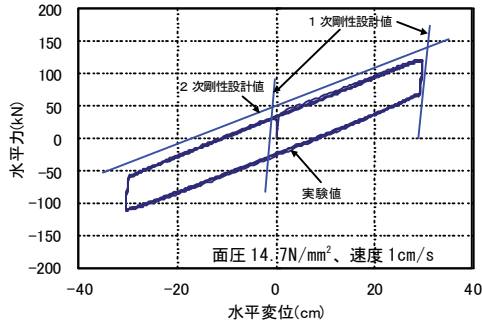


図-16 実機試験の1次・2次剛性

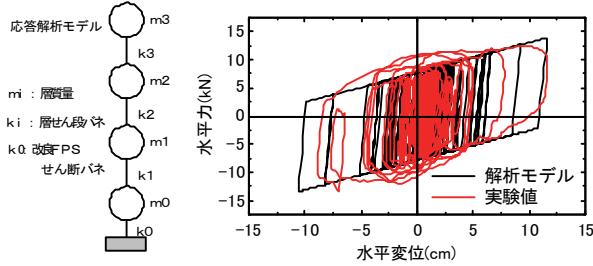


図-17 改良型の応答解析モデルと履歴特性

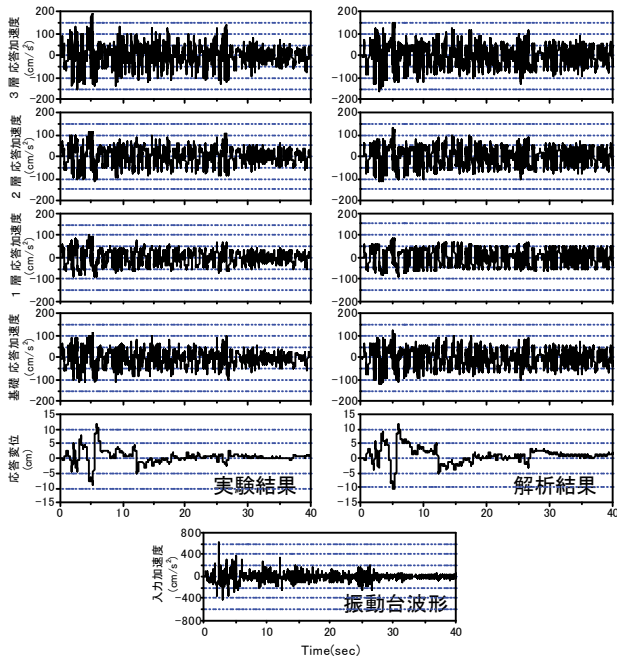


図-18 実験と地震応答解析の応答波形

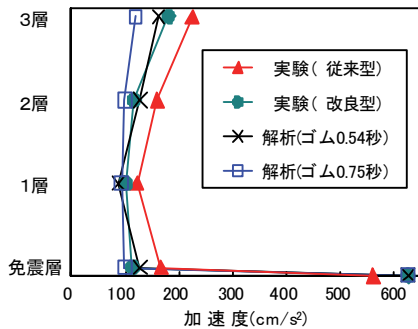


図-19 応答加速度分布の比較

～ EL CENTRO NS 波 50(cm/s) 入力 ～

## 5. シミュレーション解析

### 5.1 解析モデル

振動台実験を対象とした改良型FPSの地震応答解析を行った。応答解析モデルは、上部構造3層と免震層の4質点系等価せん断モデルとし、上部構造は弾性、免震層は図-17に示すようなバイリニア型の復元力特性とした。摩擦係数は、 $\mu = 0.05$  で一定とし、1次剛性と2次剛性については、縮小モデルの実験値を採用した。

### 5.2 解析結果

結果の一例として、EL CENTRO NS 波 50(cm/s) 一方向加振のシミュレーションを図-18に示す。摩擦係数の速度・面圧依存性を考慮していないこともあり、波形の細部まで再現できていないが、大まかな挙動を把握する程度であれば、この簡易な解析モデルが適用できることがわかった。一方、振動台実験で使用した改良型FPSは、縮小モデルの制約により必要なゴムの水平周期を確保できず、大きい入力レベルに対して十分な効果が得られなかった。そこで、ゴムの水平周期を実機モデルの0.75秒としたモデルによりシミュレーションを試みた。実験値と解析値の応答加速度分布を図-19に示す。実機であれば、大規模な地震に対しても、従来型に比べて免震性能が向上できることが、解析的に検証できた。

## 6. おわりに

多層フレームを用いた縮小モデルの振動台実験から、FPSが大規模な地震動入力に対して、加速度を1/2～1/4に低減できることを確認した。また、可動子にゴム系の材料を組み込むことで、小規模な地震動から大規模な地震動入力まで免震効果を発揮でき、さらに高次振動の励起を抑制する効果が得られることがわかった。一方、偏荷重・偏摩擦状態における応答性状は、実用上問題のない範囲であることが実証できた。改良型FPSの実機モデルの要素試験からは、良好な作動性と想定通りの基本特性を得ることができた。改良型の製作方法について妥当性を検証できたことから、支承の実用化に目処がたった。今後は、実施物件に備えて試験データを整備すると共に、設計・解析精度の向上に取り組んでいきたい。

なお、本研究は、オイレス工業株式会社との共同研究である。

### 【参考文献】

- 1) 下田郁夫、「球面すべり支承を用いた免震装置の開発」、日本機械学会機械力学講演論文集 (Vol. B)、1990
- 2) 李同生他、「球面すべり支承を用いた免震装置の開発」、日本建築学会学術講演梗概集、1991、pp609～610
- 3) 藤田聡他、「球面すべり支承を用いた機器免震装置に関する研究」、日本機械学会論文集、59巻 557号、1993、pp11～16