発電用新型炉に適用する 3 次元免震装置の開発* (油圧機構によるロッキング抑制機能をもつ 3 次元免震装置の開発)

島田 貴弘^{*1}, 大谷 章仁^{*1}, 岩本 浩祐^{*2}, 北村 誠司^{*3}

Development Study on Hydraulic Three-Dimensional Seismic Isolation System Applied to Advanced Nuclear Power Plant (Development Study on Hydraulic Rocking Suppression System)

Takahiro SHIMADA^{*1}, Akihito OTANI, Kousuke IWAMOTO and Seiji KITAMURA

^{*1} IHI Corporation, Products Development Center, Dept. of Mechanical Development
Shin-Nakahara-cho 1, Isogo-ku, Yokohama, 235-8501 Japan

Three-dimensional (3D) seismic isolation devices have been developed for the base isolation system of the Fast Breeder Reactor (FBR) that is an advanced nuclear reactor power plant building. The developed seismic isolation system consists of the hydraulic type vertical springs with rocking suppression mechanism and the laminated rubber bearings for horizontal direction. The isolation performances, i.e. natural period, damping, and rocking-suppression, have already been evaluated by the technical feasibility study and performance tests on a system which consists of down-sized devices on the shaking table, but in the seismic simulation on the real size building with this system, high hydraulic pressure was generated by rocking-suppression device under an extremely large seismic motion. In this paper, it is reported the frictional characteristics on high hydraulic pressure condition from the experiments on the 1/2 size of real device. To improve the damping performance of rocking-suppression, the orifice was added to the cylinder. At first the linear seismic simulation model of the real size system was constructed and damping coefficient was optimized by using that linear model. Finally, the detailed nonlinear simulation model was constructed, and time history analysis under simultaneous horizontal and vertical seismic motion was carried out, and the damping performance of rocking-suppression device was verified.

Key Words : Seismic Isolation, Three-Dimensional, Damping, Rocking, Hydraulic Equipment

1. はじめに

発電用新型炉の一つであり、ウラン資源の利用効率の最も高い高速増殖炉（以下 FBR）の実用化研究が進められている。FBR は軽水炉に比べて高温・低圧で運転されることから、機器・配管は大きな熱荷重による破損防止に重点が置かれ、薄肉構造となる。これは地震荷重に対する強度低下につながる。そのため、地震荷重を大幅に低減することができる技術として 3 次元免震装置の採用が期待されている。

筆者らは、平成 12 年度から「油圧機構を用いた建屋全体 3 次元免震装置」の開発を進めてきた⁽¹⁾。本免震システムは清水建設と IHI により立案され、日本原子力発電・核燃料サイクル開発機構（現：日本原子力研究開発機構）の協力の下で開発された⁽²⁾⁽³⁾。これまでの開発過程では、最大で 1/7 サイズの縮小試験体による単体の特性確認試験、および複数の装置を組み合わせたシステムの振動台試験を実施し、免震性能（各方向の周期及び減衰）および油圧機構による免震装置の特徴であるロッキング（建屋転倒方向の振動）抑制機能がほぼ設計どおりに実現可能であることを確認した⁽²⁾。さらにその時点での諸元を基に想定実機の装置の試設計を行い、建屋の動特性

* 原稿受付 2010 年 11 月 11 日

^{*1} 正員, (株) IHI (〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1)

^{*2} (株) IHI (〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1)

^{*3} (独) 日本原子力研究開発機構

E-mail: takahiro_shimada@ihi.co.jp

を含めた全体シミュレーションを行った。これにより、1 基あたり 9.8 MN の支持荷重を持ち、ロッキング振動を最小限に抑えつつ水平周期 2.8 秒・上下周期 2.0 秒・減衰比 0.2 以上という高い免震性能を実現する見通しを得た。

その一方で、同シミュレーションの結果では、ロッキング方向（建屋の転倒方向）の変位は非常に小さく抑えられるものの、ロッキング方向の回転加速度がやや大きくなるという結果が得られた。ロッキング方向の回転加速度の増大は油圧シリンダの大きな圧力変動（最小 2MPa～最大 48MPa）の発生を招く。一方、装置の簡素化・低コスト化のためには、発生する圧力変動や最大圧力を小さく抑えることが必要である。これまでの試設計ではロッキング方向に積極的な減衰機構を設けていなかったため、ロッキング方向の加速度は入力地震動に比較的容易に励振されるようになっていた。その結果、ロッキングによるモーメントが大きくなり、これを支持するために高い圧力変動が発生したと考えられる。したがって、装置の圧力変動を軽減するための第一義的な対策としては、ロッキング抑制装置にロッキング方向に有効な減衰機構を付与することである。

また、装置の強度設計・健全性の観点では、油圧シリンダ類の鋼材部分については公的な設計基準⁽⁴⁾に沿った耐圧設計を行なっていることから健全性が担保されている。一方、樹脂であるシールシステムの耐圧性や高圧時の摺動性については公的な設計基準がなく、実験により十分な耐圧性・摺動性を有することを確認する必要がある。また、シールの耐圧性・摺動性には、シールの断面寸法とシリンダ・ロッド間の隙間寸法の関係が影響することが知られている。そのため、試験では極力実物大に近い寸法の試験体を用いる必要がある。

そこで本研究では、まず想定実機の 1/2 口径の試験体を製作してシール部の耐圧試験及び高圧時の摺動特性を取得し、想定実機に近い寸法でのシール部の健全性を確認した。さらに、高い圧力変動の原因であるロッキング方向の加速度を低減するため、ロッキング方向にのみ有効な減衰付与方法を考案した。この減衰付与方法を簡易モデル化し、与えるべき減衰の大きさを最適化した。その上で、各要素の非線形性や今回本研究で計測された摺動特性を考慮した詳細モデルによるシミュレーションを行い、3 次元免震システム全体としての性能を確認した。

2. 提案する 3 次元免震装置の概要

2・1 装置の構成

油圧機構による 3 次元免震装置の原理図を図 1 に示す。提案している 3 次元免震装置は、鉛プラグ入り積層ゴム（以下 LRB）、支持シリンダ（以下 LC）、ロッキング抑制シリンダ（以下 RC）、アキュムレータ（以下 ACC）で構成される。これらのうち、水平方向の免震機能は LRB が担い、上下方向の免震装置は LC・RC・ACC の組み合わせで実現する。LC は LRB の直下に鉛直方向に設置した片ロッド式の油圧シリンダで、建屋の荷重を支持する。LC は両ロッド式シリンダである RC の片側のポートに接続され、RC のもう一方のポートは ACC に接続される。地震時には LC の圧縮／伸長により流れてくる作動油が RC を介して ACC に伝達され、ACC 内に封入されている N_2 ガスの圧縮／膨張の柔性により上下方向の免震周期（2.0 秒）が得られる。また、ACC の N_2 ガス室の内部に設けられた絞りの圧力損失により減衰比（0.25）が得られる。

隣り合う RC のロッドは接続されており、隣り合うユニットの油圧変化の同位相成分は ACC に、位相差成分はロッドの軸力にそれぞれ伝達される。これにより、上下方向（同位相分）の動きには ACC による柔性を、ロッキング振動（位相差分）の動きには高い剛性を持つようになっている。本研究ではさらに、ロッキング振動（位相差分）に対してのみ減衰力を付与させる機構として、RC のピストンにオリフィスを追加した。

2・2 想定実機の仕様

想定実機の計画では、図 3 のように 1 ユニットあたり 4 本の LC の油圧ポートが横置き両ロッド式シリンダである RC の片側のポートに接続し、RC のもう一方のポートは 4 本の ACC に接続する。対象としている FBR プラント（Na 中型炉（750MWe））での配置図を図 2 に、想定実機的主要仕様を表 1 に示す。これらの仕様のうち、周期と減衰は既往の研究⁽¹⁾⁽⁵⁾において免震周期と減衰のパラメータスタディによって作成された成立性マップの中で、比較的裕度の高い領域にある周期・減衰を選択して決定したものである。装置のストロークはこれらの周期・減衰の組み合わせで実施した応答解析によって得られた最大変位（約 200mm）の 1.5 倍以上となるよう 350mm に設定している。

Fig.1 Principal of rocking-suppression, and the orifices in the RC to get rocking-damping force

Fig.2 Horizontal layout for 750MWe FBR plant building

Table 1 Specifications of real-size Hydraulic 3D isolation system for 750MWe FBR plant

Item		Value	Remarks
Horizontal	Period [s]	2.83	Bi-linear restoring force
	Damping ratio	0.20	
	Stroke [mm]	±400	Linear-limit
Vertical	Period [s]	2.0	Polytropic-change
	Damping ratio	0.25	
	Stroke [mm]	±350	

Fig.3 Unit plan of hydraulic 3D-isolation system

2・3 シールシステム

LC・RCの大気圧との圧力境界となる部分のロッドシールの構成を図4に示す。メインのシールは自己潤滑性を有し長期非作動による油膜切れに強いPTFE（四フッ化ポリエチレン）を主成分とする特殊樹脂製のT型リングである。この特殊樹脂リングをロッドとの摺動部分に設け、圧力によってOリングで押し付けられる構造とな

っている。さらに、低圧側の肩部にはポリイミドを主成分とする硬質のバックアップリングを組み込み、ロッドとシリンダの隙間へのはみ出しを防止する。そのほか、ロッドをガイドしてこじりを防止するウェアリング・スライドラッシングや、異物の混入を防止するダストシールを組み合わせるシールシステムを構成している。なお、想定実機ではメインのシールを 2 段設置し、余裕を持たせている。

3. シール部の摺動性・耐圧性試験

3・1 試験体

想定実機のシリンダ類のうち、大気圧との圧力境界となるのは全てロッドシールであるため、ロッドシールの試験を実施した。想定実機において最大径のロッドシールは LC ($\phi 720\text{mm}$) であり、本来は同径のシールで試験体を製作すべきであるが、製作コストの都合から 1/2 の $\phi 360\text{mm}$ のロッドのシリンダを製作した。ただし、シール部の耐圧性・摺動性に強く関連するシール断面の寸法は実機で使用するものと同じとし、ロッドとシリンダの隙間寸法に関しても加工公差を想定実機と同等（本来 $\phi 360$ で要求される公差の 2 倍）にとりて設計した。

試験体の概略図及び写真を、図 4 及び図 5 にそれぞれ示す。試験体は、シールシステムを上下に設け、その間の隙間に手動ポンプで圧力を作用させる構造とした。作動油の供給口と圧力計設置ポートをロッド側に設けた。加圧時の安全のため、事前に開放圧力を 150MPa に設定したリリーフ弁をポンプとシリンダ間の流路に設けた。所定の圧力に加圧後シャットオフ弁を閉じ、試験中の圧力を保持した。ロッド上部は疲労試験用の油圧アクチュエータに接続し、正弦波による強制変位を与えた。

3・2 試験方法

今回の試験では、メインの組み合わせシールを合計 6 組用意し、順次上部のシールを交換して合計 3 組について試験を実施した。試験ケースと順序をまとめて表 2 に示す。各試験ケースの条件設定について、以下に示す。

(1) 高圧下での摺動性確認試験

表 2 上段に示すように、圧力を 0~50MPa の間の 6 段階での各圧力まで加圧して保持し、正弦波により強制的に摺動させ、圧力・変位・反力を計測した。強制加振の振動数 (0.5Hz) は実機装置の上下固有振動数に合わせて設定した。なお 25MPa の圧力条件では、摺動速度の依存性を確認する目的で 0.2Hz、0.1Hz のケースを実施した。

ストロークは油圧アクチュエータの性能上の制約から、0.5Hz で加振できる最大のストロークとして $\pm 25\text{mm}$ を設定した。想定実機の地震時の最大変位量は約 $\pm 200\text{mm}$ であり、約 8 倍の差異がある。そこで、摩擦により発生するエネルギーを試験体と想定実機の間で合わせ、地震応答の継続時間 (70 秒) $\times$ 変位比 (8 倍) = 560 秒とした。この仮定は 70 秒間連続で $\pm 200\text{mm}$ の変位が発生し続けることに相当し、累計摺動距離は 28000mm となる。想定実機のシミュレーションでは常に最大変位で摺動するわけではなくこれより必ず小さくなる。事前に実施した XYZ 同時入力時の時刻歴解析における建屋端部の上下方向変位と累積摺動距離の時刻歴変化を図 6 に示す。なお、同図中の①~④の番号は建屋平面図上の 4 隅である。地震時の免震装置の累積摺動距離は最大約 9000mm であり、累積摺動距離の観点では $28000/9000 \approx 3.1$ 倍の余裕をみた設定となっている。

なお、実機では構造上、LC は LRB から水平荷重とこじりモーメントが加わり、これによる摺動抵抗が発生する。ただし、水平荷重とこじりモーメントはシールではなくウェアリングによって伝達されるので、摺動抵抗はウェアリングの摩擦係数から設計できる。このことは、別途実施した 1/7 サイズの試験体による要素試験⁽²⁾により、確認されているので今回の試験項目からは除外し、高圧を受けるシールの摺動抵抗計測に絞って試験を行った。

(2) 耐圧性確認試験

表 2 下段に示すように、摺動性確認試験終了後ロッドを中立位置に固定し、圧力を段階的に変化させた。各圧力で 600 秒間保持して圧力の時間変化を計測し、漏れによる異常な変動が起らないことを確認した。1 組目・2 組目については目標圧力を 100MPa (実機で想定される最大発生圧力: 48MPa の 2 倍) とし、漏れの無いことを確認して終了した。3 組目に関しては、鋼材部分を含めた試験装置の設計最大圧力である 150MPa を上限としてシールの破損が発生するまで加圧した。

Fig.4 Schematic drawing of test equipments and sealing-system

Fig.5 Test equipments

Fig.6 Vertical displacement and cumulative displacement on the edges of building

Table 2 Cases and sequence of the frictional resistance measurement test and of the proof pressure verification

Test Category	Stroke [mm]	Pressure[MPa]	Frequency[Hz]	Test time[s]	Sample		
					1 st	2 nd	3 rd
Frictional resistance measurement	±25	10	0.5	560	○	○	○
	±25	20	0.5	560	○	○	○
	±25	25	0.5	560	○	○	○
	±25	25	0.2	60	○	○	○
	±25	25	0.1	60	○	○	○
	±25	30	0.5	560	○	○	○
	±25	40	0.5	560	○	○	○
	±25	50	0.5	560	○	○	○
Proof pressure verification	(0)	25	(0)	600	○	○	○
	(0)	50	(0)	600	○	○	○
	(0)	100	(0)	600	▼○	▼○	○
	(0)	150	(0)	600			▼○

4. 試験結果

4・1 高圧下での摺動性

1 組目～3 組目のシールに対し、摺動性確認試験で計測された変位-荷重線図（ヒステリシスカーブ）を図 7 に示す。また、これらのヒステリシスループが囲む面積（＝消散エネルギー）を S とし、同じ変位振幅 d でクーロン摩擦型のヒステリシスループ（長方形）を仮定した場合の面積（ $=4dF_{eq}$ ）とを等値して求めた F_{eq} を等価摺動抵抗力と定義し、圧力を横軸としてプロットした結果を図 8 に示す。同図では、等価摺動抵抗力は圧力に概ね比例している。このことから、これまでシミュレーションで使用してきた、摺動抵抗の圧力に対する線形性の仮定が概ね正しいことを、地震時に想定される最大圧力である 50MPa までの圧力範囲でも確認することができた。

さらに、この等価摺動抵抗力を同じ圧力下での支持荷重（＝圧力×ロッド断面積）で除して摩擦係数に換算し、圧力に対してプロットした結果を図 9 に示す。この結果、摩擦係数は最大でも 0.003 と極めて低い値であること

が分かる。摩擦係数の圧力による変化が計測されたが、その変動幅は小さく、なおかつ摩擦係数自体が極めて低いことから免震装置としての動特性に与える影響は軽微であると考えられる。

4・2 耐圧性

今回の試験体の作動油の体積は非常に小さく、漏れが発生した場合、漏れ量がわずかでも圧力は急激に低下する。耐圧試験の結果、25MPa～100MPa まで加圧した 3 組のシールいずれも圧力保持時間中の圧力の低下は確認されなかった。また、3 組目のサンプルは装置の設計耐圧力である 150MPa まで加圧したもののリークには至らず、150MPa 圧力の保持時間中の圧力の顕著な低下も確認されなかった。したがって、6 サンプル全てにおいて耐圧性の目標値であった 100MPa 以上の条件を満たすことが確認でき、且つ、2 サンプルではあるが 150MPa 以上の耐圧性能を確認することができた。

Fig.7 Load-displacement curves (hysteresis curve) on frictional resistance measurement tests

Fig.8 Equivalent frictional resistance force as assumed that the areas of hysteresis loop equal to coulomb friction

Fig.9 Friction coefficient (frictional resistance force per supporting load)

4・3 試験終了後のシールの性状

摺動試験・耐圧試験終了後のシールの状態を目視確認した結果、以下の 2 つの特徴が確認された。

- (1) PTFE リング表面の摺動痕：図 10 に示すように、PTFE リングとロッドとの摺動面に、摺動方向の筋状の痕跡が認められた。ただし、試験中の漏れは確認されておらず、隙間へのはみ出しもないことから、シール性能には影響していないと考えられる。
- (2) O リングのヒダ状の剥離：図 11 に示すように、PTFE リングの背面にある O リングを取り出したところ、極薄くヒダ状に剥離していることが確認された。剥離部分の大きさと取り外し時の状況から、原因はシール溝の分割溝の面取り部分への食い込みであると判断された。通常、ロッドシールを装着する際には

シールをハート型に曲げた状態でシリンダ内側の溝に装着する。しかし、今回の試験体ではシール断面積を実機相当としたため、シール径に対して相対的に太くなっており、ハート型にまげて装着する方法が取れなかった。そこで、試験体ではシリンダ溝に分割溝構造を採用することとした。したがって、この剥離は試験体特有の問題であり、想定実機のサイズでは発生しない事象である。

Fig.10 Friction mark on PTFE ring

Fig.11 Exfoliation (peeling off) on O-ring (HNBR)

5. 最適ロッキング減衰値の選定

5・1 簡易モデル化

ロッキング減衰を最適に選定する際の負荷を軽減するために簡易モデル化を検討した。図1の動作原理図に示すように、ロッキングモーメントはLCの支持反力の差分によって支持される。LCの支持反力の差はRCのロッドの引張力・圧縮力によって比較的剛に支持されるためACCにはほとんど伝達されない。したがって、LCの支持反力のほとんどはRCの左右の油室の差圧となる。一方、鉛直方向の振動による圧力変動はRCのロッドが動くことによりACCに伝達され、差圧にはほとんど寄与しない。したがって、図1右側に示すようにRCのピストンに連通孔を設け、差圧をこの連通孔の圧力損失を介して開放することにより、ロッキング振動にのみ減衰を付与することができる。

連通孔の圧力損失で生じる減衰力はRCのピストンを介してRCのロッドに伝達される。連通孔のない状態を考えると、ロッキングモーメントによるLCの支持反力の差分はLRB・作動油・RCのロッドの順に直列に支持される。そのため、ロッキングの周期と減衰はこれらの要素の剛性・減衰特性の直列接続となる。逆に、連通孔が非常に大きい状態（すなわちピストンがない状態）を考えると、油圧機構による免震装置のLCの支持反力はほとんどACCに伝達される。このとき、ロッキング抑制は効かない状態となっているため、空気ばねもロッキングモーメントを直接負担する。したがって、ロッキングの周期と減衰はACCおよび空気ばねの剛性・減衰特性の並列接続となる。

これらの考察から、油圧機構による装置と空気ばねによる装置を組み合わせたシステム全体としてのロッキング方向の特性は、図12に示すように簡易モデル化できる。

Fig.12 Simplified model of whole 3D-isolation system with orifice damping in RC

Fig.13 The way to reduce the vertical properties of LCs and Air-springs to rocking property

5・2 解析方法

図 12 から各剛性要素・減衰要素の構成を考察すると、ロッキング方向の特性（回転ばね・減衰の組み合わせ）において、連通孔の減衰は RC のロッドの剛性と直列接続となっており、ACC と空気ばねの特性とは並列接続になっている。このことから、ロッキング方向の特性はいわゆる Maxwell モデルを含んだ形となっており、最適な有限の減衰値が存在することが推察された。そこで、図 12 のモデルにおいて連通孔の減衰値をパラメータとした水平方向入力の周波数応答解析を実施し、最適減衰値を探索した。解析に用いた各免震装置（空気ばね装置・油圧機構による装置）の 1 基あたりの特性を表 3 に示す。周波数応答解析のため、ここではすべての特性を線形化して用いた。なお、図 12 における各ばね要素・減衰要素はシステム全体の装置の総和をとった特性である。"Rocking"の注釈がある回転系の要素の特性は、図 13 に示すように、ある 1 基の免震装置（LC または空気ばね）の鉛直方向の特性 p_{vi} （剛性または減衰）に対し、平面配置図上の弾性主軸からの距離 L_i の二乗を乗じて総和をとって計算した。

Table 3 Properties of equipments for the simplified model (for one device)

Equipment	Item	Value
Hydraulic system	Stiffness of ACC [MN/m]	9.76
	Damping coefficient of ACC [MN/s/m]	1.57
	Stiffness of oil [MN/m]	625.6
	Stiffness of RC-rod [MN/m]	5056.
	Damping coefficient of RC-rod [MN/s/m]	2.84
	Damping coefficient of RC-orifice [MN/s/m]	$C (= 0 \text{ to infinity})$
Air-spring	Stiffness [MN/m]	9.36
	Damping coefficient [MN/s/m]	7.47
	Damping coefficient of extra oil-damper [MN/s/m]	0.623
LRB	Horizontal stiffness [MN/m]	5.036
	Horizontal damping coefficient [MN/s/m]	0.987
	Vertical stiffness [MN/m]	15700.
	Vertical damping coefficient [MN/s/m]	5.01

5・3 解析結果

解析結果（周波数応答関数）を図 14 に示す。上述の推測のとおり Maxwell 型の回転剛性の特長が発現している。すなわち、連通孔の減衰値 C を変化させたとき、共振周波数が遷移する現象が確認できる。

図 14(a)は水平方向入力に対するロッキングの回転加速度の周波数応答曲線である。同図において、0.25Hz 付近の共振点はロッキング抑制装置がない場合の共振点で、同図の 2.2Hz 付近の共振点はロッキング抑制装置があって連通孔がない場合の共振点である。 C を大きくしてゆくと、0.25Hz のピーク値が徐々に下がってゆき、 $C=10 \text{ MN/s/m}$ で 0.25Hz と 2.2Hz のピーク値がほぼ同じとなり、全域で応答が最小となる。さらに C を大きくしてゆくと、0.25Hz のピーク値との関係が逆転し、2.2Hz のピーク値が大きくなっている。

図 14(b)は水平方向入力に対する水平方向の応答加速度の周波数応答曲線である。同図において、0.23Hz 付近の共振点はロッキング抑制装置がない場合の共振点、0.32Hz 付近の共振点はロッキング抑制装置があって連通孔がない場合の共振点である。図 14(a)の場合と同様に、 C の値を大きくしてゆくと共振点が遷移している。ロッキングの応答が全域で小さくなる $C=10 \text{ MN/s/m}$ では、水平方向の共振周波数は連通孔がない場合の 0.32Hz に近くなっており、ピーク値は最小ではない。しかしながら、水平方向の応答に関しては連通孔がない場合の応答特性（周期 2.8 秒以上、減衰比 0.25 以上）が目標値であり、問題は生じない。

以上より、ロッキングに応答に関しては連通孔の減衰係数については $C=10 \text{ MN/s/m}$ が最適値と決定した。

Fig. 14 Frequency response curves for horizontal input acceleration

6. 詳細シミュレーションによる性能評価

ここまで最適化した連通孔の減衰係数と、各要素の非線形性や今回本研究で計測された摺動特性を考慮した詳細モデルを作成し、シミュレーションによって3次元免震システム全体としての性能を確認した。

6・1 モデル化

詳細シミュレーション用の解析モデルを図15に、モデル内で用いた要素の諸元値を表4に示す。諸元値の中で、定数で表現できない特性について図16・図17にグラフで示す。詳細モデルでは、現時点で考慮しうるすべての剛性要素および減衰要素を含めた。

(1) 空気ばね装置

空気ばね装置は二つの空気室をオリフィスで結合した形式となっている。それぞれの空気室の圧縮弾性をポリトロプ指数 $\gamma=1.4$ のポリトロプ変化で定義し(図16(a)),オリフィスの減衰は速度二乗比例減衰で定義した。これらを空気ばねのモデル化で一般に使用されている3要素モデルで表現した。

(2) 油圧機構による装置

鉛直方向のACCの特性に関しては空気ばね装置と同様の考えかたで、 $\gamma=1.6$ のポリトロプ変化(図16(b))とオリフィスの速度二乗比例減衰を組み合わせた3要素モデルで表現した。このほか、既往の研究⁽²⁾により得られた水平力に対する摩擦係数と、本研究の摺動抵抗計試験で得られた図17に示すような圧力依存の摩擦特性を考慮した。RCのオリフィスの減衰も厳密には速度二乗比例減衰となるため、最大流量で前節までに求められた速度比例の減衰係数 $C=10\text{MN/s/m}$ と、最大流量で等価なエネルギー吸収量となるような速度二乗比例減衰係数を求め、モデルに適用した。図15に示すように、オリフィスの減衰要素の一端はロッドに接続し、もう一端はLRBの鉛直ばねの鉛直方向と接続した。

Fig. 15 Detailed model of whole 3D-isolation system (using nonlinear properties of each devices of equipment)

 Fig. 16 Stiffness characteristics of ACC gas (N_2) and Air

Fig. 17 Friction dependent on oil pressure

Table 4 Properties of equipments for the detailed nonlinear model (for one device)

Equipment	Item	Value
Hydraulic system	ACC gas stiffness (polytropic change; $\gamma=1.6$)	(Fig.16)
	Gas-orifice damping coefficient (proportional to velocity ²) [MNs^2/m^2]	25.1
	Oil stiffness [MN/m]	625.6
	Stiffness of RC-rod [MN/m]	5056.
	RC-orifice damping coefficient (proportional to velocity ²) [MNs^2/m^2]	24.95
	Friction coefficient (vertical friction force / horizontal force)	0.1008
	Friction of seals (depend on pressure)	(Fig.17)
Air-spring	Air chamber stiffness (polytropic change; $\gamma=1.4$)	(Fig.16)
	Air-orifice damping coefficient (proportional to velocity ²) [MNs^2/m^2]	18.0
	Extra oil damper [MNs/m]	0.623
LRB (Bi-linear)	1 st stiffness [MN/m]	39.48
	2 nd stiffness [MN/m]	5.036
	Yielding force [MN]	0.98

6・2 解析方法

詳細モデルの下部基礎版に水平 2 方向と鉛直方向の 3 方向に同時に地震波を入力した解析を行った。各方向の入力地震波（既往の研究⁽⁵⁾で FBR の免震装置の検討用に作成されたケーススタディ S2 波）の時刻暦波形と応答スペクトルを図 18 に示す。解析には ABAQUS/Standard 6.9-3 を用いた。連通孔の効果を検証するために、連通孔を設けないモデル（連通孔の減衰値を非常に大きくしたモデル）についても解析を実施した。

Fig. 18 Seismic input acceleration wave and response spectrum for each direction

6・3 評価結果

(1) 応答波形および最大応答値

代表的な応答値の時刻歴波形を図 19 に、最大値を抽出してまとめた結果を表 5 に示す。並進 3 方向 (X, Y, Z 軸方向) の応答加速度波形および最大応答値は, RC の連通孔の有無でほとんど差がないことが確認できる。一方, ロッキングによる回転加速度については, 連通孔を設けた場合, 連通孔がない場合と比較して約 0.8 倍 (約 20% 減) に低減されている。これらより, 連通孔によりほぼロッキングにのみ減衰を付与できていることが確認できた。なお, 建屋端部の上下変位については, 連通孔を設けた場合のほうが約 1.2 倍に増加しているが最大値は高々 208mm であり, 終局限界である装置の上下ストローク (=350mm) の 1/1.5 以下となっている。

(2) 並進方向の床応答スペクトル (FRS)

図 20 に炉容器支持位置での各方向 (水平・鉛直方向) FRS を示す。同図では連通孔のない場合と連通孔を設けた場合の FRS を重ねて表示しているが, 両者に有意な差はほとんどないことが確認できる。つまり, 連通孔の設置による基本的な要求性能 (水平・鉛直方向の周期・減衰特性) への悪影響がないことを示している。

(3) ロッキングによる上下床応答スペクトル (FRS)

図 21 にロッキングによる上下方向の FRS (回転応答加速度の応答スペクトルに建屋の幅の 1/2 の長さを乗じて計算した FRS) を示す。連通孔がない場合の FRS では周期 0.45 秒 (=2.2 Hz) 付近にロッキングの固有振動数によるピークが顕著に現れているが, 連通孔を設置した場合にはそのピークの高さが 1/2 程度まで大幅に減少している。(2) の結果と併せ, 本研究で考案した連通孔による減衰機構がロッキング方向にのみ効果を発揮することが確認できた。

Fig. 19 Response history data of isolation system (XYZ input)

Table 5 Maximum response value

Item	With RC-orifice(A)	Without RC-orifice(B)	Ratio (A/B)
Acc. (X-direction) [gal]	272.5	280.5	0.97
Acc. (Y-direction) [gal]	282.8	299.0	0.95
Acc. (Z-direction) [gal]	219.4	218.0	1.01
Rotational Acc. (around X-Axis) [rad/s ²]	0.0426	0.0512	0.83
Rotational Acc. (around Y-Axis) [rad/s ²]	0.0467	0.0562	0.83
Vertical Disp. on the edge of upper-mat [mm]	207.7	174.0	1.19

Fig.20 Floor Response Spectrums (FRS) at the reactor support point on the plant building

Fig.21 Floor Response Spectrums (FRS) calculated by using rocking acceleration

7. まとめ

想定している実機の 1/2 口径の試験体を製作してシール部の耐圧試験及び高圧時の摺動特性を取得し、実機大に近い寸法でのシール部の健全性を確認した。さらに、高い圧力変動の原因となっているロッキング方向の加速度を低減するための減衰付与方法を考案した。この減衰発生機構を簡易モデル化し、まず与えるべき減衰の大きさをパラメータスタディによって求めた。次に、各要素の非線形性や本研究で計測された摺動特性を考慮した詳細モデルを用いた時刻歴シミュレーションを行い、考案した減衰付与方法の妥当性を含めた 3 次元免震システム全体としての性能を確認した。これらの検討の結果、主に以下の成果が得られた。

(1) シール部の摺動性・耐圧性試験

- a) 耐圧試験では、計画しているシールシステムは実機大で想定される最大隙間寸法において、シールの耐圧力は少なくとも目標値であった 100MPa 以上を有することが確認され、実機スケールで想定されている最大発生圧力 (48MPa) の少なくとも 2 倍以上の裕度を確保できることが分かった。
- b) 一部のシールに対しては装置の設計耐圧力である 150MPa まで圧力を上昇させたが、終局状態には至らなかった。今後、さらに十分なサンプル数の試験を実施して 150MPa 以上の耐圧性や、50MPa 以上の圧力での摺動性能を確認／実証できれば、装置の高压化によるコンパクト化、もしくは、免震装置の 1 基あたりの支持荷重を増加させることによる装置個数低減の可能性を示した。
- c) 摺動性に関する試験では、設計用地震動 (ケーススタディ S2 波) で想定される累積摺動距離の 3 倍以上の摺動を与えてもシール性能に影響はなく、作動油の漏れや摺動抵抗の特性の変化は認められなかった。
- d) 摺動抵抗力は 50MPa までの範囲で、支持荷重に対して高々 0.3% 程度で、免震性能にはほとんど影響しないレベルであることを確認した。

(2) 最適ロッキング減衰値の選定

- a) RC に設ける連通孔による減衰機構について考察し、装置全体の特性を線形の要素の組み合わせで表現した簡易モデルを作成した。簡易モデルは、連通孔の減衰値の大きさによって共振点が遷移する Maxwell モデルに似た特性を持っており、連通孔の減衰値には有限な最適値が存在することがわかった。
- b) 連通孔の減衰値をパラメータとした周波数応答解析を実施し、共振点の遷移現象を利用してロッキングの応答が最小となる最適な減衰係数を決定した。

(3) 詳細シミュレーションによる性能評価

- a) 簡易モデルで求められた連通孔の減衰係数と、各要素の非線形性や本研究で計測された摺動特性を考慮した詳細モデルを作成し、3 方向同時入力の時刻歴シミュレーションを実施した。
- b) 連通孔のない場合と連通孔を設けた場合での比較の結果、並進方向 (水平方向・鉛直方向) の応答にはほとんど有意差が確認されなかった。
- c) 同様にロッキング方向の応答を比較した結果、連通孔のない場合に FRS 上に現れていた 2.2Hz 付近の共振ピークを、連通孔を設けることによって 1/2 程度に低減できることがわかった。
- d) 以上より、RC のピストンに連通孔を設置することにより、これまで検討してきた並進方向の免震性能および設計手法には影響を与えずに、ロッキング抑制性能を向上させることができることが確認された。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、指導・助言をいただいた横浜国立大学 森下信教授に深謝いたします。

文 献

- (1) 高橋健司, 井上和彦, 伏見実, 加藤朝郎, 森下正樹, 藤田隆史, “発電用新型炉へ適用する 3 次元免震システムの研究 (開発計画の検討: その 5)”, Dynamics and Design Conference 2005 CD-ROM 論文集, 433
- (2) 島田 貴弘, 大谷 章仁, 高橋 健司, 生玉 真也, 須原 淳二, 松本 良一郎, “発電用新型炉へ適用する 3 次元免震システムの研究 (油圧機構を用いた 3 次元免震システム: その 3)”, Dynamics and Design Conference 2005 CD-ROM 論文集, 433
- (3) 松本 良一郎 **ほか**, “発電用新型炉へ適用する 3 次元免震システムの研究 (ローリングシールばね: その 3)”, Dynamics and Design Conference 2005 CD-ROM 論文集, 431
- (4) 原子力専門部会編, “原子力発電所免震構造設計技術設計指針 (JEAG 4614-2000)”, p.7-48, 日本電気協会
- (5) Kato, M., Watanabe, Y., Kato, A., Suhara, J., “Design study of the seismic-isolated reactor building of demonstration FBR plant in Japan”, Transactions of the 13th SMiRT, Vol.3, Div. K(1995), pp.578-584