

機器免震試験システムの力学及び振動特性

山田 博幸¹・安藤 和博²・堤 英明³・蛭沢 勝三⁴・柴田 勝之⁵

¹正会員 工修 日本原子力研究所 地震情報伝達研究特別チーム (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4)

²工修 佐藤工業 (株) 中央技術研究所 (〒243-0211 神奈川県厚木市三田 47-3)

³工修 原研 同上 ⁴正会員 工博 原研 同上 ⁵工博 原研 同上

日本原子力研究所 (原研) では、平成 8 年度から、安全上重要な機器に免震技術を導入した場合の有効性評価手法開発の一環として、自然地震動利用による機器免震確認試験を行っている。試験に供するため、ベアリング支承とコイルばねからなる 2 次元免震試験システムと、同システムに鉛直免震装置の空気ばねを加えた 3 次元免震試験システムを原研大洗研究所敷地内屋外テストベッド上に設置した。免震システムの特性を把握するため、2 次元及び 3 次元システムについて、それぞれ静加力及び自由振動試験を行い、両システムの基本性能を確認した。現在、これらのシステムを用いて、自然地震動下での 2 次元及び 3 次元免震試験システムの応答を観測している。本報では、特性試験結果と 1999 年 3 月 26 日に発生した地震での地震応答観測結果について述べる。

Key Words : Dynamic Characteristics, Seismic Base Isolation, Nuclear Equipment, Earthquake Motion

1. はじめに

原研では、原子力機器に免震技術を導入した場合の有効性評価手法¹⁾及び評価コード EBISA²⁾を開発した。また、安全上重要な機器の 1 つである碍管付き起動変圧器を対象として、免震有効性評価のケーススタディを行い、免震効果を明らかにした³⁾。EBISA コードの検証及び高度化のため、自然地震動を利用した機器免震有効性確認試験を計画し、2 次元及び 3 次元機器免震試験システムを設計・製作し、原研大洗研究所敷地内に設置した。両システムの特性を確認するため、静加力試験と自由振動試験からなる特性試験を行った。試験後、自然地震動利用による機器免震有効性確認試験を開始し、平成 11 年 3 月 26 日に茨城県日立市付近を震源とするマグニチュード 5.1 の地震による地震動に対する応答挙動を観測した。観測データから、鉛直免震性能を確認した。

本報では、2 次元及び 3 次元機器免震試験システムの設計仕様、特性試験結果及び上記地震に対する鉛直免震性能の概要について述べる。

2. 機器免震試験システムの概要

2 次元及び 3 次元機器免震試験システムの配置外観と構造を図-1 に、主な設計仕様を表-1 に示す。両機器免震試験システムは共に、機器模擬試験体 (試験体) と免震装置から構成される。

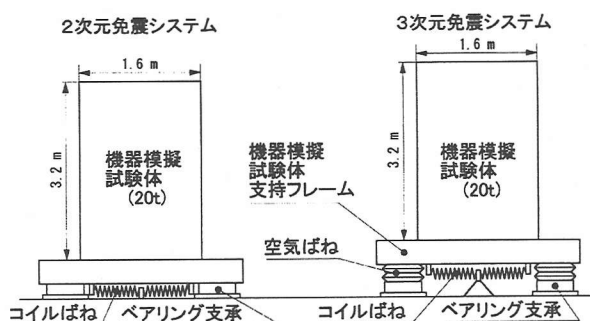
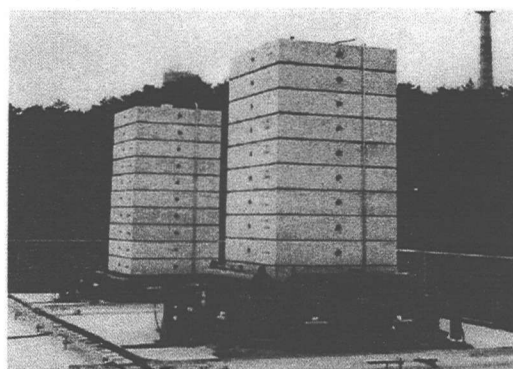


図-1 機器免震試験システムの配置外観と構造図

(1) 機器模擬試験体

試験体は、1 個 2 t のコンクリート製ブロック 10 個からなり、重量は 20 トンである。この重量は、機器免震化で対象とする安全上重要な原子力機器の重量が約 1 t から 100 t の範囲にあるため、免震設計が比較的難しい軽い機器に着目して決定した。試験体の形状は、高さ 3.2 m、幅 1.6 m で、高さとの比を 2/1 になるように設定

表 - 1 2次元・3次元免震システムの設計仕様一覧

	3次元システム	2次元システム
水平固有振動数	0.33Hz (NS・EW)	
水平最大変位	±100mm (NS・EW)	
コイルばね剛性	98.6kgf/cm (NS・EW)	
ボールベアリング摩擦係数	0.005 (NS・EW)	
鉛直固有振動数	1Hz	—
鉛直最大変位	±30mm	—
空気ばね剛性	886.4 kgf/cm	—
空気ばね内圧	4.38kgf/cm ²	—
機器模擬試験体寸法	1.6 (W)×1.6 (L)×3.2 (H)	
機器模擬試験体重量	20 t	

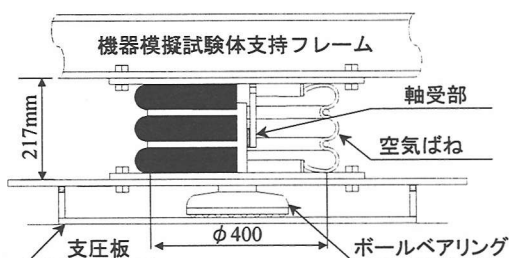


図 - 2 鉛直免震装置の構造

した。これは、3次元免震システムのロッキング振動挙動を明らかにするため、ロッキングし易いように、高い重心位置をもつような構造にしたためである。

(2) 免震装置

2次元免震システムの免震装置は、ボールベアリング支承4基とコイルバネ8本から構成される。3次元免震システムの免震装置は、水平免震装置と空気ばね4基の鉛直免震装置からなる。ボールベアリング支承は、図-2に示すように支圧板上を水平方向に滑動する。コイルバネは、水平方向の復元力を与える。空気ばねは、試験体支持フレームとボールベアリング支承の間に設置され、試験体を支持すると共に、鉛直方向の復元力を与える。空気ばねの内圧の調整は、レベリングバルブによって行われる。内圧が低くなると、支持フレームが下がりレベリングバルブが作動し、補助タンクを介しコンプレッサから圧縮空気が供給される。これに対し、内圧が高くなると、支持フレームが上がり空気が排出される。

3. 静加力試験

(1) 試験及び計測方法

静加力試験として、2次元及び3次元システムを対象

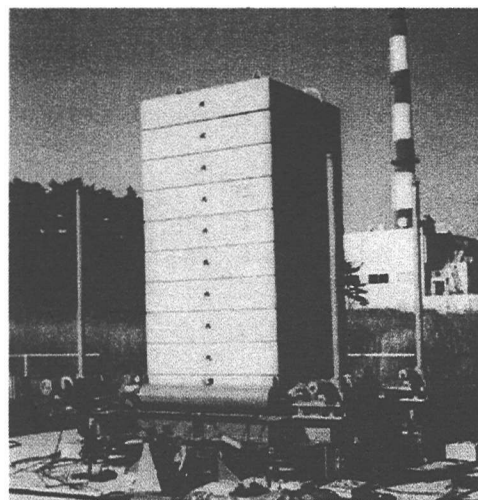


図-3 鉛直静加力試験状況

としたNS、EW、2方向の水平加力試験と、3次元システムのみを対象とした鉛直加力試験を行った。水平加力試験では、ボールベアリング支承の摩擦特性を得るため、コイルばねを外した状態での試験も行った。また、鉛直加力試験では、3次元システムの回転剛性を得るためのロッキング静加力試験も行った。水平加力試験方法は、2台の電動スクリージャッキを試験体支持フレーム両端に水平に設置し、両ジャッキを同期させながら所定の圧縮最大変位から引張最大変位までの間を連続3サイクル加力した。免震装置に作用する荷重は、ジャッキ先端に取り付けたロードセルで、免震装置の変位はテストベッド上の変位計によって計測した。

鉛直加力試験方法は、図-3に示すように4台の電動スクリージャッキを免震装置フレームの4隅に鉛直に設置し、水平加力試験と同様の方法で行った。ロッキング加力試験方法は、鉛直加力試験での4台のスクリージャッキのうち、2台を圧縮方向に、他の2台を引張方向に同時に加力した。

(2) 計測結果

図-4に3次元システムについて振幅2cmの引張-圧縮荷重を与えたときの鉛直荷重-変位履歴曲線を示す。図から、鉛直剛性の平均値955.1kgf/cmを求めた。この値は、設計値886.4kgf/cmより8%大きい結果となった。同様に、2次元及び3次元免震システムを対象としたNS及びEW方向の静加力試験による水平荷重-変位履歴曲線から、それぞれの水平剛性の平均値を求めた。また、ロッキング加力試験から、回転剛性を求めた。これら静加力試験結果の一覧を表-2に示す。これらの試験から、2次元及び3次元システムの復元力特性は、ほぼ設計通りであることを確認したが、ベアリング支承の摩擦特性については、支圧板の水平度や平滑度等に起因すると考えられる摩擦特性のばらつきが見られた。

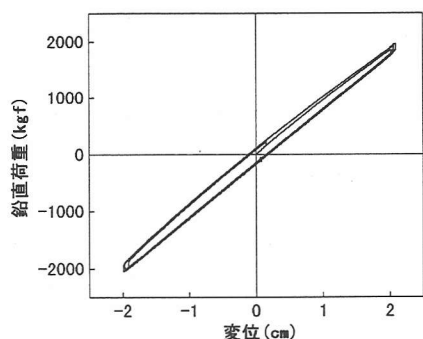


図-4 鉛直復元力特性

表-2 静加力試験結果一覧

	3次元システム	2次元システム
水平剛性 (kgf/cm)	115.7 (NS) 114.4 (EW)	113.6 (NS) 116.1 (EW)
摩擦係数	0.006 (NS) 0.007 (EW)	0.006 (NS) 0.005 (EW)
鉛直剛性 (kgf/cm)	955.1	—
回転剛性 (kgm/rad)	5.8×10^4 (NS) 5.7×10^4 (EW)	—

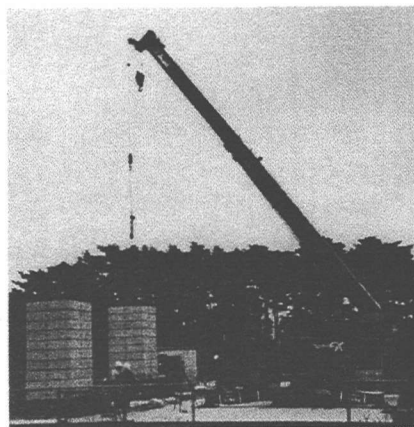


図-5 3次元システムによる鉛直自由振動試験状況

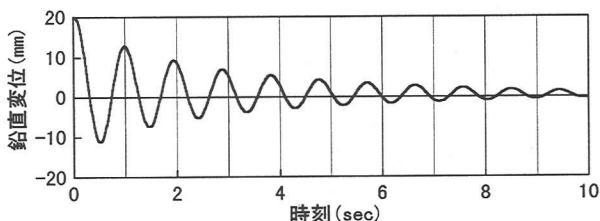


図-6 鉛直自由振動試験による変位時刻歴波形

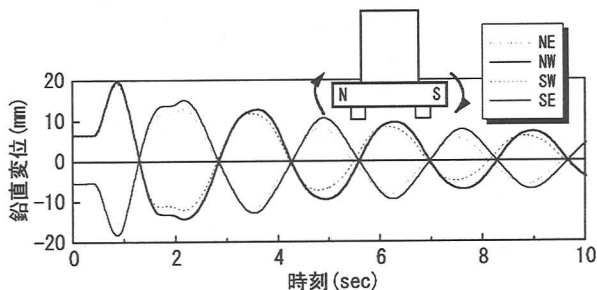


図-7 水平自由振動試験に伴うロッキング挙動

表-3 自由振動試験結果一覧

	3次元システム	2次元システム
水平固有振動数 (Hz)	— (NS) — (EW)	0.36 (NS) 0.39 (EW)
ロッキング固有 振動数 (Hz)	0.37 (NS) 0.38 (EW)	—
水平減衰比	— (NS) — (EW)	0.16 (NS) 0.18 (EW)
鉛直固有振動数 (Hz)	1.06	—
鉛直減衰比	0.05	—

4. 自由振動試験

(1) 試験及び計測方法

2次元システムに対しては水平自由振動試験を、3次元システムに対しては水平及び鉛直両自由振動試験を行った。水平自由振動試験では、テストベッド上の反力ブロックと免震装置間にチェーンブロック、ワイヤー及び切断用鉄筋棒を取り付け、チェーンブロックによって免震装置を引き寄せて初期変位(最大約90mm)を与えた後、鉄筋棒を切断して荷重を解放することによって水平自由振動とロッキング振動を発生させた。鉛直自由振動試験では、図-5に示すように3次元システムをクレーンによって荷重が均等になるように調整しながら吊り上げて初期変位(最大約20mm)を与えた後、クレーンのワイヤーを解放することによって自由振動を発生させた。

水平及び鉛直振動試験では、テストベッド上の変位計によって免震装置の水平、ロッキング及び鉛直変位を計測した。また、試験体頂部に設置した速度/加速度計によってNS、EW、UD3成分の速度/加速度を計測した。

(2) 試験結果

図-6に3次元免震システムを対象とした鉛直自由振動試験による変位時刻歴波形を示す。図から3次元システムの固有振動数1.06Hz、減衰定数0.05を求めた。固有振動数は、設計値1Hzとほぼ同じであった。3次元免震システムを対象とした水平自由振動試験の結果、水平自由振動は発生しなかったが、ロッキング振動は発生した。図-7にロッキング振動の変位時刻歴波形を示す。図からNS方向のロッキング振動数0.37Hzを得た。水平自由振

動が発生しない理由は、ロッキングにより水平振動の運動エネルギーが相殺されたため、ボールベアリングと支圧板の摩擦力以上の慣性力が働かなかったことが考えられる。また、ロッキング振動では、最初加力方向に生じていたロッキングが、徐々に対角方向へ遷移する現象(振動数0.35Hz)が見られた。これは、空気ばね剛性に偏りがあるため、直交方向に比べ対角方向の回転剛性が低いことが原因であると考えられる。この振動モードについて、今後詳細な検討が必要である。

一方、2次元システムを対象とした水平自由振動試験では、NS方向の固有振動数0.36Hz、EW0.39Hzを得た。これらの値は、設計値0.33Hzよりも10%程度小さかった。表-3に2次元及び3次元システムでの自由振動試験結果の一覧を示す。

5. 機器免震試験システムの地震動応答観測

(1) 地震動応答観測方法

2次元及び3次元システムでの地震動観測は、テストベッド上及び両システムの試験体頂部に設置した速度/加速度計と、両システムの支持フレームに取り付けた変位計11個によって行った。観測データは、データ収録装置に自動収録した。地震動検知のトリガーは、機器免震確認システム施設に隣接する鉛直アレー地震動観測施設⁴⁾の地下250mの加速度計によって行った。

(2) 地震動応答観測結果

平成11年3月26日に茨城県日立市付近を震源とするマグニチュード5.1、震源深さ50kmの地震による地震動応答を観測した。テストベッド上での最大加速度は、N S86 Gal, EW58 Gal, 鉛直方向25.2 Galであった。図-8にテストベッド及び3次元免震システム試験体頂部での鉛直加速度時刻歴波形を示す。図から試験体頂部での最大加速度応答値は約1/3の9.5 Galに低減しており、鉛直免震効果を確認した。図-9は、図-8中の時刻歴波形の加速度フーリエスペクトルを表す。図からテストベッドでの地震動の卓越振動数が5Hz近傍であることと、3次元免震システムの卓越振動数が鉛直免震装置の固有振動数1Hz近傍であり、免震装置によって2Hz以上の高周波数振動成分がカットされていることが分かる。図中の伝達関数(テストベッドと試験体頂部での加速度フーリエスペクトルの比)が示すように、伝達比が2Hz以上で1を大幅に下回っており、鉛直免震装置でのフィルター効果が顕著であることが分かった。

原子力機器のうち、多くの安全系機器の1次固有振動数は10Hz～25Hzの範囲で、減衰定数は1%程度である。図-10は、図-8中の時刻歴波形の減衰定数1%での加速度応答スペクトルを表す。図から、非免震機器と免震機器の加速度応答が比較でき、上記機器を免震対象とした場合、大きな鉛直免震効果が期待できることが分かる。

6. まとめ

著者等は、2次元及び3次元免震システムを設計・製作し、静加力試験と自由振動試験からなる特性試験を行い、両システム共にほぼ設計値通りの特性を持つことを確認した。また、3月26日に発生した地震において、鉛直加速度応答が約1/3に低減されるとともに、高周波数

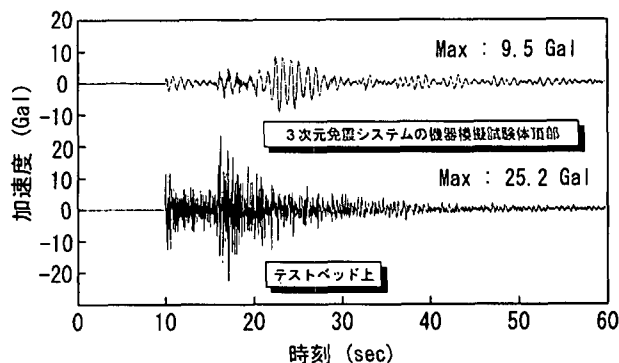


図-8 観測加速度時刻歴波形

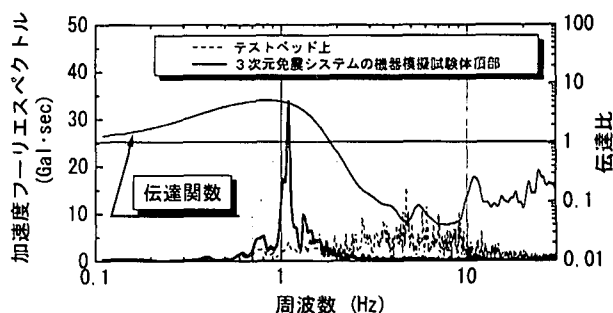


図-9 鉛直地震動の加速度フーリエスペクトル

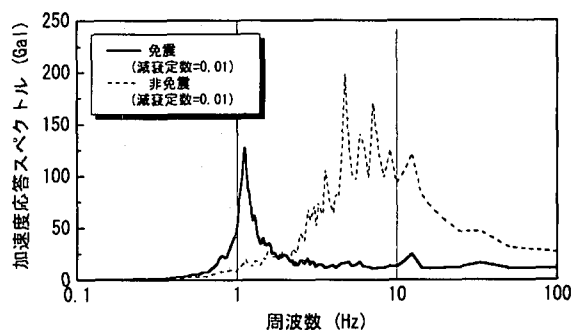


図-10 鉛直地震動の加速度応答スペクトル

振動成分が明瞭にカットされており、顕著な鉛直免震効果を確認した。

今後は、自然地震動利用による機器免震確認試験を継続し、種々の周波数特性の地震動に対する免震効果を確認すると共に、特性試験結果に基づき詳細な解析モデルを作成し、大規模地震に対する3次元免震効果を検討する予定である。

参考文献

- 1) K.Ebisawa and T.Uga: Evaluation methodology for seismic base isolation of nuclear equipments, Nuclear Engineering and Design, Vol.142,1993.
- 2) 蛭沢勝三: 機器免震の有効性評価法と評価コードEBISA, RIST ニュース, No. 20, 1994.
- 3) K.Ebisawa, et al.: Influence of various parameters on effectiveness of seismic base isolation of nuclear equipments, SmiRT13, KB08, 1995.
- 4) 蛭沢勝三他: 硬質地盤における鉛直アレー観測で得られた地震動特性, 第23回地震工学研究発表会, 1995.