

自然地震動を利用した機器免震確証試験計画

蛸沢勝三¹・安藤和博¹・柴田勝之¹・穂高志郎²・長屋雅文²・伊東守²・
亀岡裕行³・加治木茂明⁴

¹ 日本原子力研究所 安全性試験研究センター(〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4)

² 佐藤工業(株) 中央技術研究所(〒103 東京都中央区日本橋本町 4 丁目 12-20)

³ (株)CRC 総合研究所 耐震技術部(〒136 東京都江東区南砂 2-7-5)

⁴ オイレス工業(株) 技術部(〒252 神奈川県藤沢市桐原町 8)

著者等は、確率論的手法に基づく機器免震の有効性評価手法及び評価コードを開発した。また、安全上重要な碍管付き起動変圧器の免震設計を行い、免震化の有効性を評価した結果、免震効果が非常に大きいことが分かった。更に、実際の性能を確認するため、鹿島灘に面した原研大洗研究所敷地内で自然地震動を利用した機器免震確証試験を平成8年度から開始している。鹿島灘は、我が国有数の有感地震の発生地域であると共に、周波数特性の異なる地震動の震源域でもある。試験では、水平用免震装置を取り付けた試験体と、水平・鉛直両用免震装置を取り付けた試験体をテストベッドに設置し、両者の振動挙動を比較する。そして、ロッキング振動に伴う免震装置の3次元振動挙動や水平及び鉛直それぞれの免震効果を確認すると共に、評価コードの検証及び改良に反映する。

Key Words: Verification Test Program, Seismic Base Isolation, Equipment, Earthquake Motion

1. まえがき

著者等は、原子力施設の耐震安全性の向上を図るために、原子力機器へ免震技術を導入した場合の有効性評価手法と評価コードの開発を行っている。これまでに、確率論的手法に基づく機器免震の有効性評価手法¹⁾及び評価コード²⁾を開発すると共に、経済性評価手法³⁾及び機器免震設計の考え方⁴⁾を提案した。この考え方に基づき安全上重要な機器として挙げられている碍管付き起動変圧器の免震設計を行い、免震構造化の有効性を評価した結果、免震効果が非常に大きいとの結果を得た⁵⁾。これらの評価手法の開発に引き続き、設計で用いた免震装置の性能確認と評価コードの検証及び改良を図るために、機器免震有効性の確証試験を進めている。

確証試験では、水平用及び水平・鉛直両用免震装置それぞれを取り付けた試験体を対象とし、自然地震動に対する両者の振動挙動を比較する。そして、ロッキング振動に伴う免震装置の3次元振動挙動と、水平及び鉛直を含む1次元免震装置の免震効果等を確認する。

本報では、自然地震動を利用した機器免震確証試験計画について述べる。

2. 実施場所

機器免震の有効性の確証試験を実施する場所の主要な条件は、以下の通りと考える。

①周波数特性が異なる大きな地震動が多く得られる。

②地震動観測が行われ、記録が整備されている。

③硬い地盤が浅い場所にあり、試験装置設置上の地盤条件が良い。

試験の実施場所としては、上記条件を満足する原研大洗研究所敷地を選定した。大洗研究所は、茨城県大洗町にあり、鹿島灘に面している。鹿島灘沖は、我が国有数の有感地震の発生地域であると共に、周波数特性の異なる地震動の震源域でもある⁶⁾。また、大洗研究所では、1987年から加速度計(水平2成分、鉛直1成分)を鉛直方向4箇所に設置し、鉛直アレー観測を行っている⁷⁾。観測に当たっては、敷地内の地盤を対象として、浅層反射法探査、ボーリングコアの室内土質・岩石試験、PS検層等詳細な地盤調査も行っており、硬い地盤(せん断波速度:350m/sec以上)が地表から約3mのところにあることが確認されている⁷⁾。

3. 鉛直アレー観測システムと観測記録

(1)鉛直アレー観測システム

鉛直アレー観測機器は、地震計、増幅器、収録装置、無停電電源装置等からなる。これらの仕様は以下の通りである。地震計は、NS、EW、UDの3成分を有するサーボ型加速度計で、周波数特性は0.05~35Hz、帯域内感度差は±2%、固有振動数は5Hzである。加速度に関しては、最大測定値±1000Gal、最小

分解能 0.01Gal 以下で、周波数特性は 0.1～30Hz である。収録装置は、スターター、磁気記録、遅延、時計の各装置等からなる。スターター装置では、信頼性工学での“OR”及び“AND”ゲートを用いて作成された 3 チャンネル構成のトリガーシステムにより、任意の地震動レベルを検知する。継続時間は、地震波終了後の約 30 秒までである。磁気記録装置では、サンプリング時間 1/10 秒から 1/1000 秒の範囲の 7 レンジのいずれかで、デジタルテープに記録される。トリガーの設定は、トリガー前 10 秒まで可能である。

地震計は、地表面から 1.2m、32.1m、95.15m、173.6m の場所にそれぞれ 1 個設置されている。

(2)観測記録

1987 年から地震動を観測している。1991 年までの約 100 個の地震動の概要について述べる。図 1 に地震のマグニチュード及び震央距離のヒストグラムを示す。地表面での水平地震動の最大加速度が、約 20Gal 以上のものが約 28 個観測されている。これらのうちの主なものの諸元を表 1 に示す。

水戸気象台での大正 14 年から昭和 62 年までの地震記録によれば、震度 III(約 10～25Gal)の地震が、1 年に約 5～6 回程度、震度 IV(約 25～80Gal)の地震が、1 年に 1 回程度、震度 V(約 80～250Gal)の地震が、10 年に 1 回程度襲来している。図 2 に 1990 年 8 月 5 日に観測された地震(マグニチュード：5.8、震央距離：51km)の地表面での加速度応答スペクトルを示す。

4. 地盤の調査・試験

サイト地盤に関する調査・試験としては、ボーリング調査、ボーリングコアによる室内土質及び岩石試験、原位置試験としての標準貫入試験、PS 検層、孔壁加圧試験及び浅層反射法探査等が行われている。

以下、これらの主な概要について述べる。

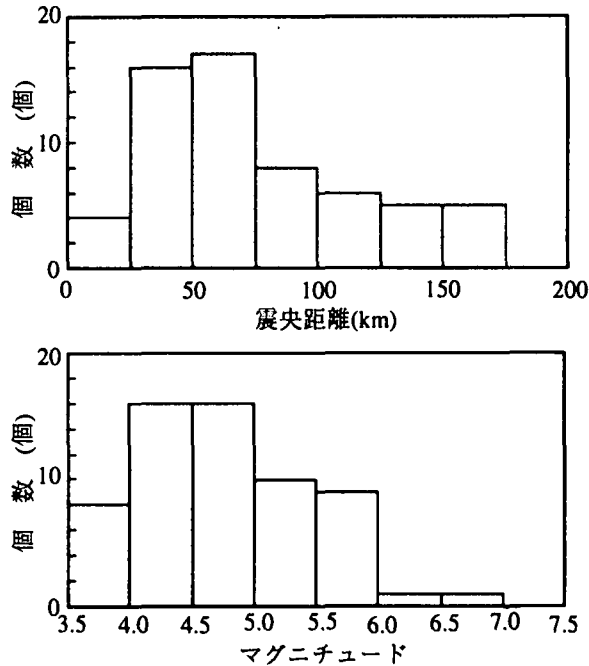


図 1 地震のマグニチュードと震央距離のヒストグラム

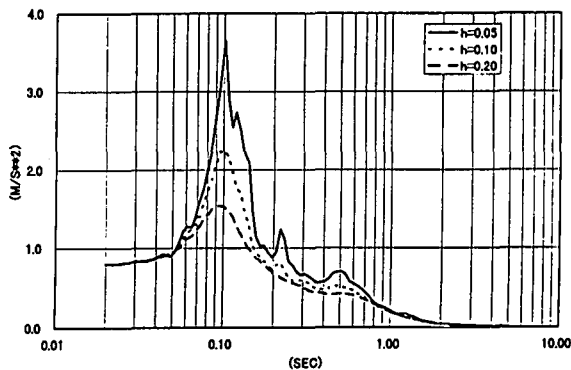


図 2 観測地震動の加速度応答スペクトルの例

表 1 主な観測地震動の諸元

No.	発生年月日	マグニ チュード	震源深さ (km)	震央距離 (km)	最大加速度(Gal)			応力降下量 (Bar)	備考
					NS	EW	LD		
1	1987/12/17	6.7	58	101	43.9	42.4	24.9	—	千葉県東方沖
2	1989/02/19	5.6	55	64	116.4	65.8	26.3	550	茨城県西南部
3	1989/03/06	6.0	56	64	19.4	18.1	8.2	490	千葉県北部
4	1990/02/15	5.3	38	46	69.9	28.9	25.9	180	茨城県沖
5	1990/05/03	5.3	52	27	187.0	116.4	69.3	—	鹿島灘
6	1990/08/05	5.8	39	51	78.0	49.0	28.3	320	茨城県沖
7	1990/10/06	5.0	51	25	129.1	123.4	47.5	420	鹿島灘
8	1991/06/25	5.1	49	56	133.5	80.9	65.7	310	茨城県沖
9	1991/08/06	5.9	43	74	25.5	18.4	9.3	240	茨城県沖
10	1991/12/12	4.6	48	25	80.4	48.8	27.2	—	鹿島灘

(1)ボーリング調査

深さ200mのボーリングが3本、100mのボーリングが6本試掘された。孔径は、2種類で、不攪乱試料が採取された。表2にボーリングにより得られた地質柱状図を示す。

(2)原位置試験

PS 検層では、9本のボーリング孔を対象として、サスペンション法と板たたき法により原位置でのP波及びS波速度を求めている。表2中にPS 検層結果を示す。孔壁加圧試験では、静的及び動的加圧試験を行い、静的及び動的地盤定数(初期側方圧、降伏応力、破壊応力、地盤反力係数、静的変形係数)を求めている。標準貫入試験によりN値も求めている。

(3)浅層反射法探査

ボーリング孔間の地層の連続性と地盤速度値を把握するために、東西・南北方向200mの測線長を対象とし、P波による重錘落下方式とS波による電磁ハンマー板たたき方式によりP波とS波を測定し地盤構造を作成している。

表2 ボーリング調査及びPS 検層の結果

地 層	深さ GL(m)	地盤計 設置位置 (m)	平均 層厚 (m)	PS 検層			
				サスペンション法		板たたき法	
				P波 速度 (m/s)	S波 速度 (m/s)	P波 速度 (m/s)	S波 速度 (m/s)
地層名	地層区分	1.26	TP+37.17				
ローム層	Lm	4.57	(GL:-1.2)	3.3	880	170	270
見 和 層	上 部 層	Mu-S1	9.97	5.4	930	350	610
		Mu-C	11.47	1.5	1000	300	330
	下 部 層	Mu-S2	17.67	6.2	1070	430	750
		Mm-Sg1	19.57	1.9	1200	490	420
		Mm-S	22.17	2.6	1050	450	
		Mm-Sg2	27.87	5.7	1370	610	1390
石 嶋 層		Ig-S1	40.57	12.7	1580	430	1640
		Ig-C	41.67	1.1	1590	370	410
		Ig-S2	67.17	25.5	1580	370	1640
		Ig-Sc	73.47	6.3	1580	390	380
		Ig-S3	85.87	12.4	1630	440	1720
		Ig-Sg	87.27	1.4	1700	510	450
		Ig-S4	92.37	5.1	1680	500	1840
						1790	520
鮮 新 統	Tm(上)	138.37	TP-56.78	46.0	1630	480	1680
	Tm(下)	161.97	(GL:-95.2)	23.6	1680	580	1630
	Ts	173.77	TP-135.23	11.8	1760	620	1820
中新統	Tm,s		(GL:-173.6)	—	2170	1010	2450
						1020	

5. 試験装置

(1) 試験体の概要

試験体は、図3に示す模擬機器と免震装置からなる。これらの試験体は、せん断波速度350m/sの地盤上に設置した基礎ベツト上に取り付けられる。せん断波速度350m/sの地盤であれば、地盤と基礎との動的相互作用による機器応答への影響が小さい⁸⁾。模擬機器は約20tonのコンクリート製ブロックで、高さ×幅×奥行き3.2×1.6×1.6mのものである。免震装置はベアリング支承タイプとし、水平用と水平及び鉛直両用のものとする。水平用免震装置のトリガー荷重は、できるだけ大きな地震動での免震性能データを多く取ることができるよう約20Galを計画している。

(2) 模擬機器

a)機器免震で対象とする原子力機器

原子力発電所は、約200万個の機器からなる複合構造体である。これらの機器は、運転関連の常用系機器と事故発生時に事故の進展を緩和するための安全系機器に大別される。原子力発電所の地震PSAでは、約40のカテゴリライズされた安全系の機器を対象とする⁹⁾。安全上重要な機器を対象とする機器免震では、これら安全系機器を対象とする。これらの機器は、設置場所が建屋内外に大別され、構造や重量も多種多様である⁴⁾。重量に着目し機器を分類すると、起動変圧器に代表される約100tonクラス、非常用ディーゼル発電機のような30tonクラス、電気計測

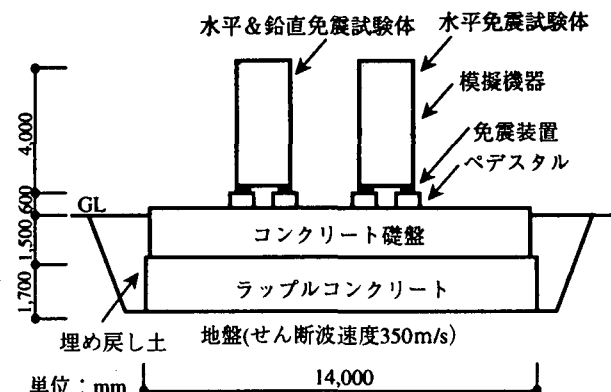


図3 機器免震有効性の確認試験用試験体

制御盤のような1tonクラスの3クラスに大別できる。

b)模擬機器の諸元

試験では、免震装置の性能に関する多くのデータを得ることを最優先とし、縮小モデルを採用することとした。模擬機器の重量は、免震装置の設計条件から約20tonとした。

構造寸法は、ロッキング振動に伴う免震装置の3次元振動挙動と水平及び鉛直を含む1次元免震装置の免震効果を確認することができるよう、高さ(3.2m)と幅(1.6m)の比を2対1とした。

(3) 免震装置

a)機器用免震装置の要件

機器免震で対象とする機器は、建屋内外の種々の

場所に設置されており、このような機器を免震化する場合には、設置場所によって免震構造のタイプを変える必要がある。そのためには、まず、機器の設置場所の違いによって機器を建屋内か外かに大別し、更に、建屋内の機器は非免震建屋のものか免震建屋のものかに分ける。次いで、非免震建屋内機器の場合は、水平免震か水平及び鉛直両用免震のいずれかにする。免震建屋内機器の場合は、現行建屋免震が水平免震しか実用化できないため、鉛直免震だけとする。建屋外機器の場合は、水平免震か水平及び鉛直両用免震のいずれかにする。水平用免震装置には、建屋免震に実用化されている積層ゴムタイプと、床免震に実用化されているコイルバネ、粘性ダンパ、及びボールベアリングを組み合わせたもの等がある。機器用のものとしては、これらのタイプに属するものが考えられる。水平及び鉛直両用のものについても当面既存の水平用と鉛直用を組み合わせたものが考えられる。

b) 免震装置の諸元

① 水平用免震装置

機器用水平免震装置としては、最大支持荷重が100ton 以下の場合、ベアリング支承や鉛入り積層ゴムが望ましいとの結果を得ている¹⁰⁾。そのため、確証試験では、これらの免震装置タイプを想定した上で、固有周期を2～3秒の範囲を対象として設計を行っている。

水平用免震装置のトリガーとしては、5年間の鉛直アレー観測で20Gal以上の地震動が28回得られているので、20Gal以上の地震動が年に5回程度期待できると判断し、20Galを想定している。

大洗町に隣接している水戸気象台での63年間の地震記録によると、震度Ⅲ(約10～25Gal)の地震動が年に約5～6回、震度Ⅳ(約25～80Gal)が年に1回、震度Ⅴ(約80～250Gal)が10年に1回程度得られている。これらのデータからも、20Gal以上の地震動が年に5回程度期待できると考える。

② 水平及び鉛直両用免震装置

鉛直免震装置の固有振動数帯域は、1～5Hz程度の範囲を対象としている。1Hz以下では柔らかすぎて通常運転時に支障をきたし、5Hz以上では硬すぎて免震効果が少ないと考えたためである。最終的には、観測地震動の周波数特性を考慮して設定する。鉛直応答の最大低減率は約1/2、減衰定数は約10～20%程度を想定している。

(4) 計測装置

模擬機器及び免震装置の挙動は、速度計および相対変位計で測定する。これらは、地震動の鉛直成分で励起される鉛直応答と、模擬機器のロッキングで励起されるものを分離できることを中心に設置する。

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) 蛭沢勝三：機器免震の経済性評価法とその応用、JCROSSAR'95、1995.
- 4) 蛭沢勝三他：機器免震設計の考え方、第1回免震・制震コロキウム、No.57、1996.
- 5) K.Ebisawa, et al.: Influence of various parameters on effectiveness of seismic base isolation of nuclear equipments, SMiRT 13, KB08, 1995.
- 6) 井元良、服部禎男：「高速増殖炉技術確証試験」の役割と高速炉免震技術の現状・将来展望、原子力工業、第35巻、第6号、1989.
- 7) 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.
- 8) K.Ebisawa, et al.: Influence of various parameters on effectiveness of seismic base isolation of nuclear equipments, SMiRT 14, 1997.
- 9) 蛭沢勝三他：地震動下での建屋・機器の現実的応答評価法と応用、日本原子力研究所JAERI-Research 96-059、1996.
- 10) 蛭沢勝三他：機器免震における免震装置の選択基準、第9回日本地震工学シンポジウム、1994.