

原子力発電所用電気計装品の耐震設計

Seismic Design of Electrical Equipment and Instrumentation for Nuclear Power Stations

地震発生時の原子力発電所の安全性を確認するためには、機器配管などと同様、電気計装品の耐震性を確立しておく必要がある。機器配管などでは主として機械的強度が問題になるのに対し、電気計装品の場合は機能保持も重要な問題で、独自の設計とする必要があり、従来種々の耐震性確認法が検討されてきた。そのうちでも、電気計装品の剛性を高めて耐震性を確認する静的耐震性確認法は簡便で汎用性がある。この手法をベースに、主要電気計装品(制御盤、閉鎖形配電盤、モータコントロールセンタ、計装ラック、蓄電池)の耐震性の検討及び試験を行ない評価した結果、それらの耐震性を実証し、電気計装品の耐震データを集約化し、耐震性確認法の確立を行なった。

鈴木康晴* *Suzuki Yasuharu*
西沢和雄** *Nishizawa Kazuo*
宮崎芳雄** *Miyazaki Yoshio*
三浦 巧*** *Miura Takumi*

1 緒 言

地震国である我が国では原子力発電所の地震に対する安全性確保は極めて重要であり、設計上十分考慮しておく必要がある。日立製作所でも1960年代後半には、独自に機器配管などの耐震性検討を行ない¹⁾、電気計装品についても従来から発電用として実績のある代表的盤について実証試験を実施した²⁾。この時代には原子力発電所の電気計装品の耐震設計として統一された基準はなく、各電機メーカーは個々に独自の設計を行っていた。このような状態はアメリカでは1968年まで、我が国では遅れて1972年まで続いた。

1968年アメリカIEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)の小委員会としてSC 2 (Subcommittee 2 on Equipment Qualification)が発足し、その成果としてIEEE Std 344-1971³⁾が発行された。この指針によりアメリカのGE社やWH社などでは電気計装品の耐震設計を行なっている。我が国でも1972年ごろから電力会社や電機メーカーの代表によって電気計装品の耐震設計法に関する検討が行なわれ、共通のベースができた。更に原子力平和利用委託研究として電気計装品の耐震試験が行なわれ⁴⁾、耐震性確認法や振動試験法の基礎を与えた。このような状況の中で、日立製作所では電気計装品に対して剛設計に基づく静的耐震確認手法(以下、単に静的手法という)を確立してきた。この手法をベースとした主要電気計装品の耐震性確認法や耐震試験の結果を総合的に検討し、集大成した成果を以下に報告する。

2 電気計装品の耐震設計の考え方

電気計装品は形状、機能などから(1)盤(制御盤、閉鎖形配電盤など)、(2)器具(各種検出器、継電器など)、(3)装置(変圧器、蓄電池など)、(4)回路類(ケーブルトレイ、電線管など)の4種類に分けて、耐震性の検討を行なうのが便利である。以下、耐震Aクラス²⁾電気計装品の耐震性確認法について述べる。

2.1 剛設計に基づく耐震性確認法

電気計装品の耐震性を確認するに当たって、その固有振動数を建屋の固有振動数より高くし共振を避けること(剛設計)

により地震力を静荷重として扱う静的手法を用いることが可能となる。

(1) 盤と器具

盤とそれに収納される器具は一体となって所定の機能を果たすものであり、図1に示すような手順で耐震性の確認を行なうことができる。

まず器具は盤の設置される床の静的設計震度に十分余裕をとって定めた一般検定条件(5~33Hz正弦波で水平3G、垂直1G)で振動試験を行ない、機能上問題なければ一般検定スペクトルを得、もし問題あれば各振動数ごとの誤動作するまでの加速度を求めて限界スペクトルを求めておく。

盤は極力静的手法を用いることが可能となるよう剛設計を行ない、固有振動数を建屋の振動数より十分高くする(一般には20Hz以上)ことができれば、盤の設置される床の静的設計震度²⁾の1.2倍⁴⁾と上記の限界スペクトルと比較して静的機能保持の判定を行なう。一般検定スペクトルが得られている場合は、上記比較をしなくても機能保持しているとみなすことができる。

剛設計ができぬ場合は、計算コードによる解析や器具をダミーで模擬した集合体での試験と器具振動試験結果とを突き合わせる方法か、又は器具を盤に実装した集合体での試験による方法により機能保持の検討を行なう。

次に基礎ボルトの強度チェックを行ない、ボルトの許容応力を超える応力が発生するときは、ボルトの員数、サイズを変えるなどの補強を行なう。

(2) 装置

変圧器などの装置は一般に剛な構造を持っているので多くは静的解析を行なう。ただし、蓄電池は架台の影響を調べるため振動試験を行なって機能保持の検討を行なった。

(3) 回路類

回路類は配管に準ずるので主に計算による強度的検討を行なう。剛な構造とするためのスパンを定めて、そのスパンで支持固定する方法(定ピッチスパン法)を採用し、本体及びサポートの形状、取付方法は標準化を行なって汎用性を持たせている。

* 日立製作所電力事業本部 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所国分工場

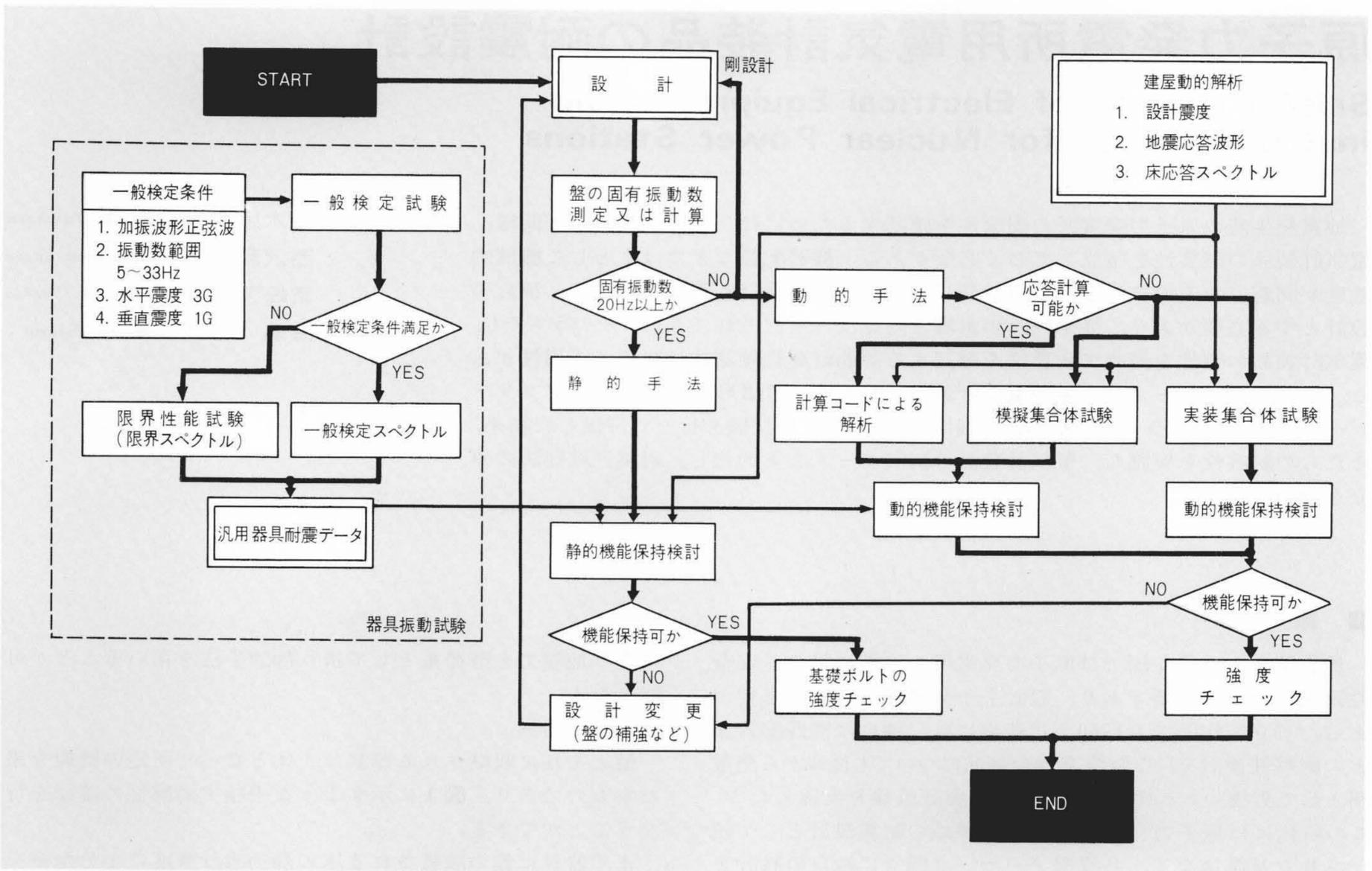


図1 盤と器具の耐震設計手順の概要 静的手法では設計段階で盤の剛性を高める工夫をして、静的機能保持検討が極力行なえるようにする。

以上のような静的手法は、発電所敷地や設置床などによる設計震度の違いに対して次のような特長を持っている。

- (a) 同種の電気計装品すべてに適用できるので汎用性がある。
- (b) 応力の検討は基礎ボルトの検討だけで簡単な対策がとれる。
- (c) 器具の機能保持検討は一般検定スペクトルがあれば、その器具が収納されるあらゆる盤に無条件で適用できる。

2.2 振動試験の方法

振動試験の目的は、理論的解析の妥当性、振動特性(固有振動数、応答倍率、減衰定数など)の解明、電気計装品の機能保持の確認、強度の確認などを実証することである。更に重要なことは静的手法の前提である剛設計のための構造的検討、実証である。これらの実証のために表1に示す各種振動試験を行なう。電気計装品の剛性の判定に用いられる自由振動試験には数種類あり、どの試験によっても固有振動数はよく一致する。中でも打振法は最も簡便な方法で実用的である。応答倍率試験は振動性状が十分に把握できるので、剛設計法を確立するための有効な手段である。耐加速度試験は、盤及び器具の機能保持やその強度を実証する手段で、地震波や人工地震波などを使用する方法が直接的、かつ实际的で、連続正弦波を使用する方法はより厳しい条件となる。

3 各電気計装品の振動試験

静的手法を採用するために次に述べる試験を実施した。

3.1 制御盤

制御盤はベンチ形、直立形及び門形構造を持つ計装形の3種類に分類できる。これら3種類のモデル盤について耐震性を実

表1 各種振動試験 応答倍率試験は剛な構造とする補強の方法を、耐加速度試験は機能の保証を検討するのに使用し、自由振動試験は製品の剛性の判定に使用する。

試験種類	自由振動試験	応答倍率試験 (共振検索試験を含む)	耐加速度試験
試験の方法	試験体をハンマなどで強制加振する打振法、試験体をワイヤなどで引張り、ワイヤを切断、又は切り離す変位法、及び試験体を加振機、又は加振台で一定加振し、急停止させる加振法の3種がある。	加速度一定の連続正弦波とし、5~30Hzの振動数範囲で試験体を強制加振し、応答特性を測定する。地震波、各種関数波などについても適用できる。	設計加速度の連続正弦波で任意の振動数、又は試験体の共振振動数で15秒以上加振し、構造的機能的健全性を確認する。実地震波、人工地震波、各種関数波などについても適用できる。
測定項目	1.固有振動数 2.減衰定数	1.共振振動数 2.振動モード 3.減衰定数 4.非線型性(減衰特性) 5.入力波の相違による応答波の比較	1.構造的健全性 2.機能的健全性 3.入力波の相違による応答波の比較

証した。図2に各種制御盤の共振特性を示す。またこのほかに次の試験を行なった。

(1) 共振検索試験と自由振動試験の比較

共振検索試験による共振振動数と自由振動試験による固有振動数との関係を図3に示す。この結果は、これらが偏差±15%程度以内でよく一致していることを示している。

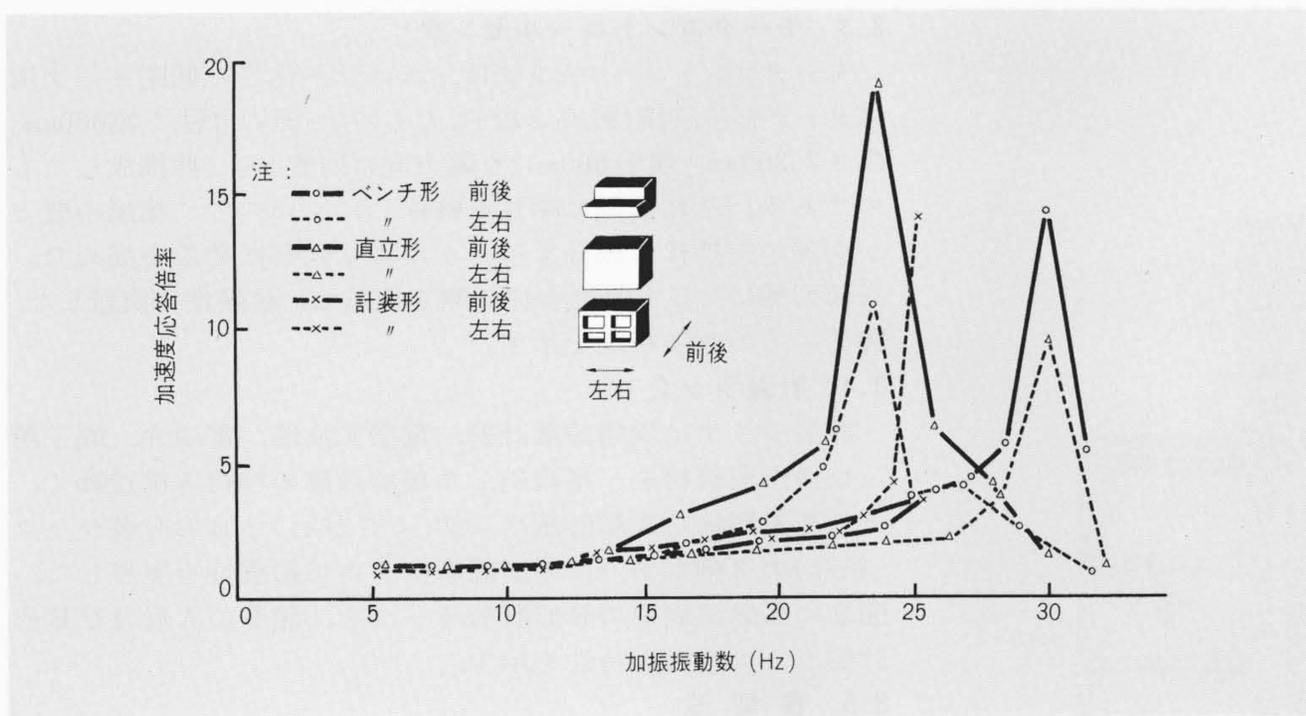


図2 制御盤の共振特性 各種制御盤は、応答倍率試験によって正弦波入力に対する共振振動数が20Hz以上であることが分かる。

(2) 列盤効果及び盤幅と固有振動数の関係

盤が列盤で構成される場合の左右方向の耐震性を評価するために、列盤又は盤幅による固有振動数の関係を図4に示す。盤幅を大きくすることは、列盤による盤幅の増加と同様の傾向を示し、盤幅の増加により固有振動数は増大する。列盤で構成される盤は、この列盤効果を利用して設計するのが効果的である。

(3) 穿孔面積と固有振動数の関係

閉鎖形盤ではパネル面を穿孔して計器などを取り付けるが、その穿孔面積は盤の固有振動数に影響を与える。穿孔面積が大きくなると左右方向の固有振動数は小さくなるが、前後方向の固有振動数には全く影響を与えないという試験結果を得た。これは左右方向の剛性に前面板が関係していることを示している。

(4) 盤重量と固有振動数の関係

盤を一質点系の単純なモデルと考えた場合、固有振動数は重量の平方根に反比例するため、枠の重量を m_1 、全重量(枠と計器や配線材の重量の和)を m_2 、それぞれの固有振動数を f_1 、 f_2 として、

$$\eta = \frac{\sqrt{m_2} f_2}{\sqrt{m_1} f_1}$$

η : 盤のばね定数 K の比の平方根

なる値を求めると1に近くなるはずである。試験結果ではこの値の偏差は±10%程度以内であった。この関係を用いれば、枠だけの固有振動数を実測し、計器や配線材の重量を計算で求めておけば、盤の完成時の固有振動数を予測することができる。

3.2 閉鎖形配電盤

閉鎖形配電盤では一連の解析、振動試験を行ない次のように盤の基本構造、機器の取付方法を決定した。

- (1) 片側だけであった盤側面のバリヤを両側面に設け、枠のねじれを防止し剛性を高めた。
- (2) 磁気遮断器は水平引出し形とし、全体の重心を低くし、ピンとボルトで枠に固定した。
- (3) 扉は継電器取付部と遮断器引出し部の二分割とし、扉の周辺を補強して剛性を高めた。

図5に振動試験中の閉鎖形配電盤を、図6にその共振特性を示す。また動的機能保持検討である実装集合体試験も行ない、遮断器や保護継電器の機能が正常であることが確認された。

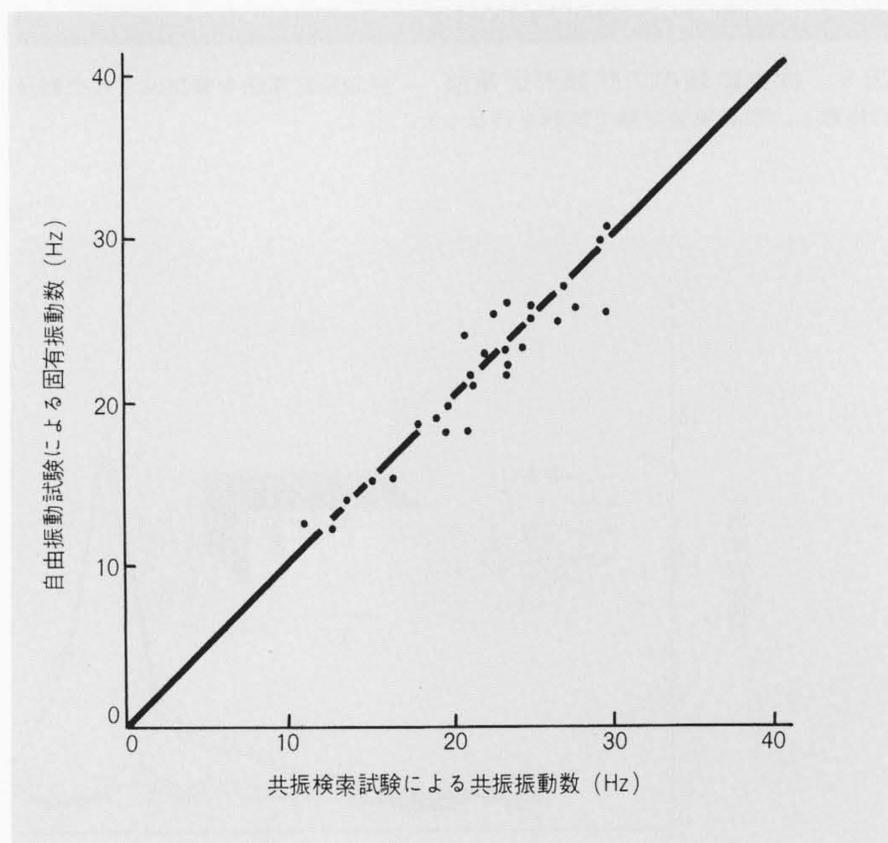


図3 共振検索試験結果と自由振動試験結果の関係 電気計装品について、共振検索試験による共振振動数と自由振動試験による固有振動数とはよく一致していることが分かる。

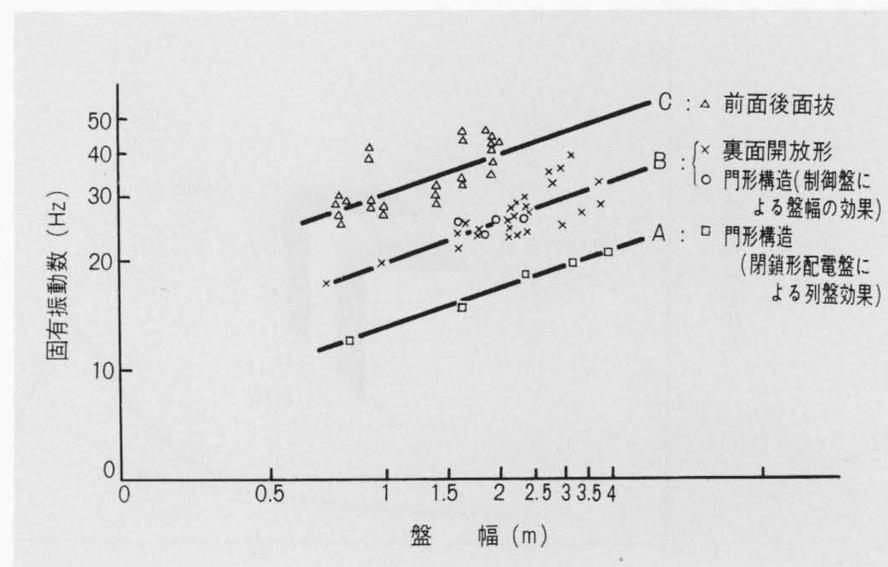


図4 盤幅と固有振動数の関係 盤を列盤にして面数を増した場合、固有振動数が増加する傾向は、盤の幅を増した場合にも見られることが分かる。

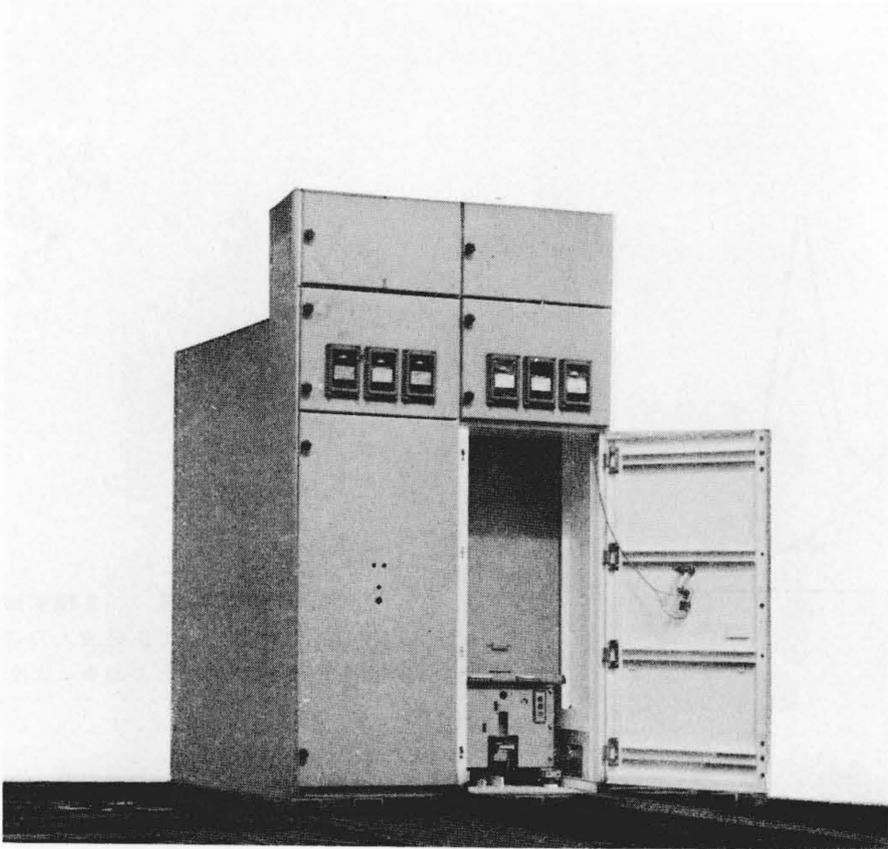


図5 振動試験中の閉鎖形配電盤 閉鎖形配電盤を電気油圧式振動台に搭載し、器具実装状態で試験を行なった。

3.3 モータコントロールセンタ

モータコントロールセンタは、ユニット化した低圧モータ用スタータを多段積(最高8段)したもの(一面の寸法:幅600mm,高さ2,300mm,奥行600mm)を幅方向に列盤とし、群構成したものである。それ自体で剛性を確保しにくいので、建屋の壁とか別置の支持枠に結合することにより固有振動数を高めた。三面列盤にして実装集合体試験を実施し、耐震性を実証した。図7にその共振特性を示す。

3.4 計装ラック

計装ラックは現場設置計器、電空変換器、電磁弁、端子箱及び検出配管材を一括収納した現場設置の枠組み構造物で、その基本形状にA形計装ラック(くさび形)とB形計装ラック(箱形)の2種類あり、その両者について耐震性を実証した。図8に振動試験中のB形計装ラックを、図9にA形及びB形計装ラックの共振特性を示す。

3.5 蓄電池

蓄電池設備は、蓄電池支持枠をもつ架台の上に単電池(2V電池)を配列したもので、架台はL形鋼、C形鋼及びU形鋼を使用し、主要部材間は溶接、その他はボルト締めである。種類の振動試験を行なった結果、蓄電池と支持枠の間のスペースを挿入しない場合は蓄電池と架台が別々の動きをする結果、

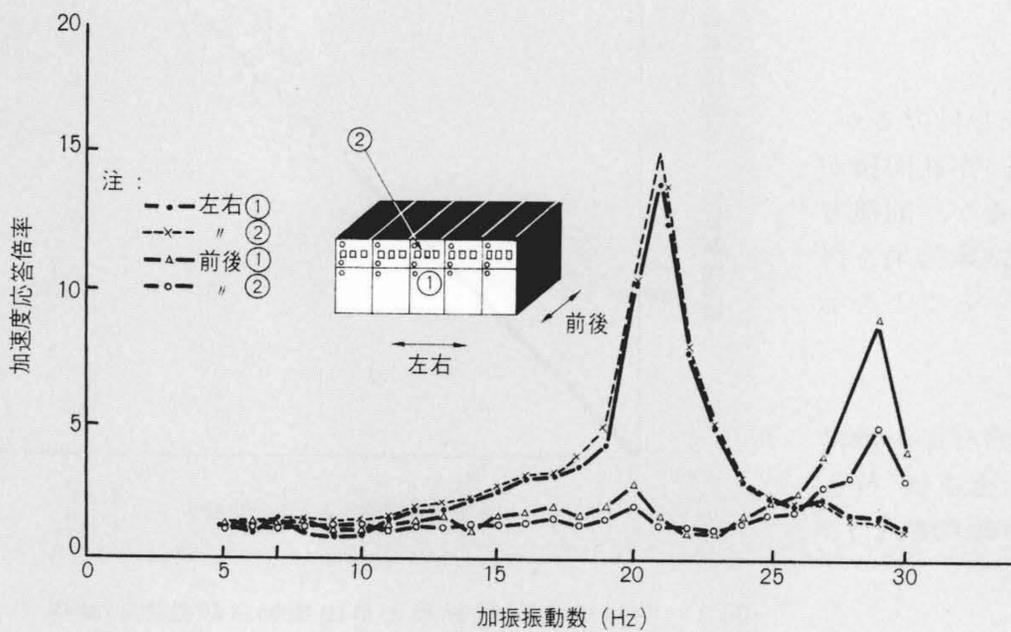


図6 閉鎖形配電盤の共振特性 応答倍率試験によって、正弦波入力に対する共振振動数が20Hz以上であることが分かる。

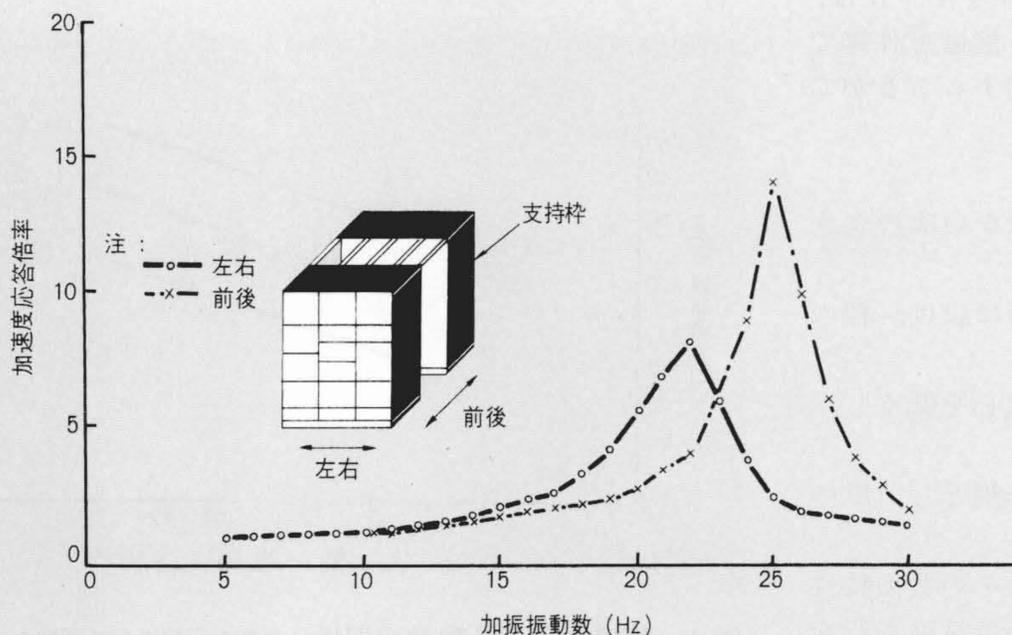


図7 モータコントロールセンタの共振特性 建屋の壁を想定した支持枠より、サポートを取ったときの応答倍率試験によって正弦波入力に対する共振振動数が20Hz以上であることが分かる。

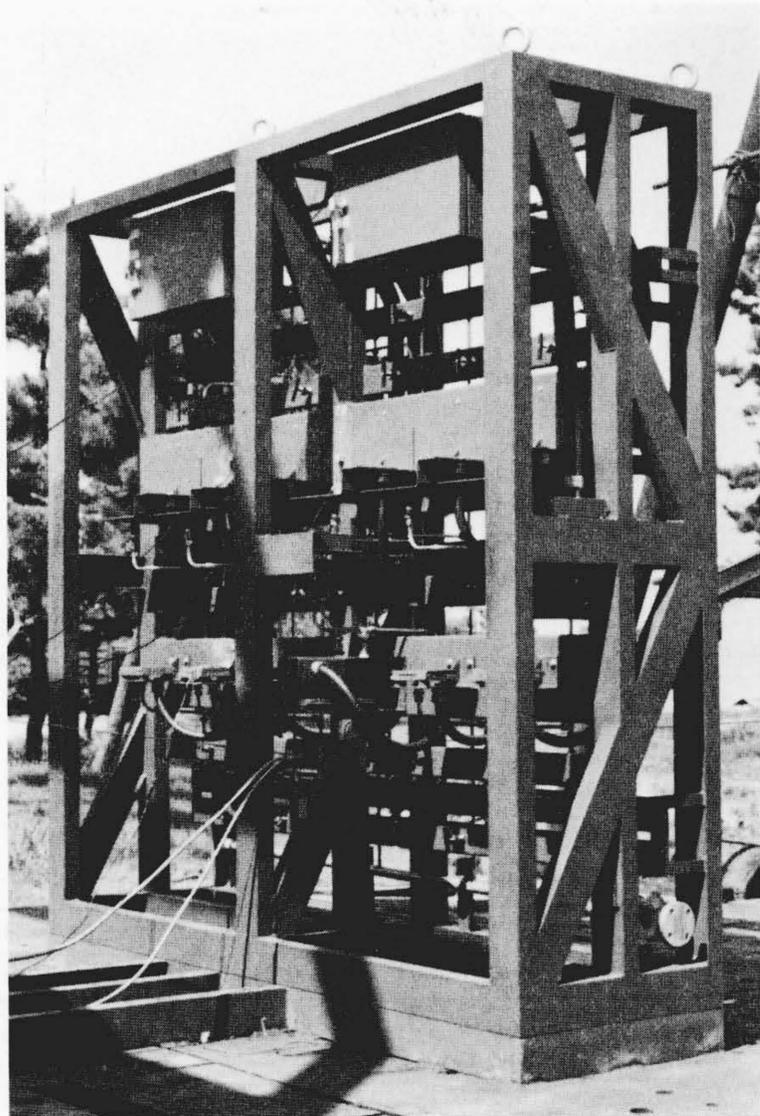


図8 振動試験中のB形計装ラック B形計装ラックを電気油圧式振動台に搭載し、器具は模擬し、配管材などは実装状態で試験を行なった。

蓄電池が支持枠に打ち当たり、大きな加速度を発生させることが分かった。また逆にスペーサを挿入した場合は、架台と蓄電池がほぼ一体となって振動し、固有振動数を上げるために役立つことが分かり、耐震性を実証した。図10に振動試験中の蓄電池を、図11に蓄電池の共振特性を示す。

3.6 器具

盤に取り付く器具は多種多様であり、これらの耐震データの収集が非常に重要な課題である。類似の器具から代表的形式約100種を選定し、図1に示す一般検定条件で次のように試験を実施した。

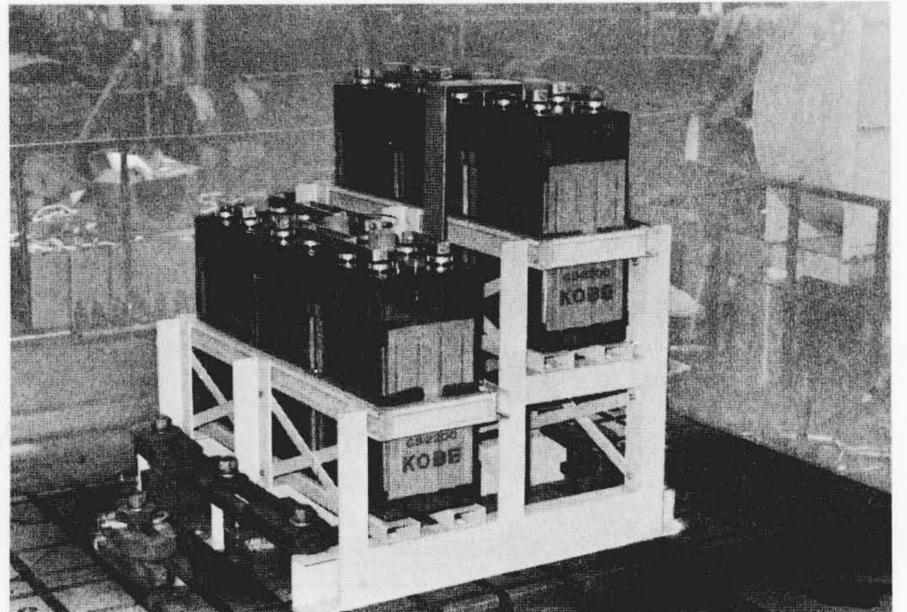


図10 振動試験中の蓄電池 アンバランス式振動台に搭載し、実装状態で試験を行なった。

3.6.1 補助継電器

補助継電器は安全系のインタロックに使用され、補助リレー、タイマ、コンタクタなど、接点の誤動作が評価判定基準となる。コイル電圧、a、b接点などのパラメータにより各種の試験を実施した。無励磁でb接点が最も弱いのが、試験に供されたすべての補助継電器は3G以上の耐震性があることを確認した。

3.6.2 保護継電器

保護継電器は短絡、地絡、過電流などから補機を保護する目的がある。一部の保護継電器に3G以下で誤動作するものがあったが、建屋の床応答スペクトルの値を上まわっており、盤に組み込んだ実装集合体試験でも誤動作しないことが確認された。

3.6.3 その他

プロセス計装、中性子計装及び放射線計装の器具についてもそれぞれの特性に応じた判定基準を設定して、振動試験を実施した。これらは、すべて一般検定条件を満足することが確認された。

4 計算機による振動解析

振動解析には、有限要素法による構造計算用コードを使用

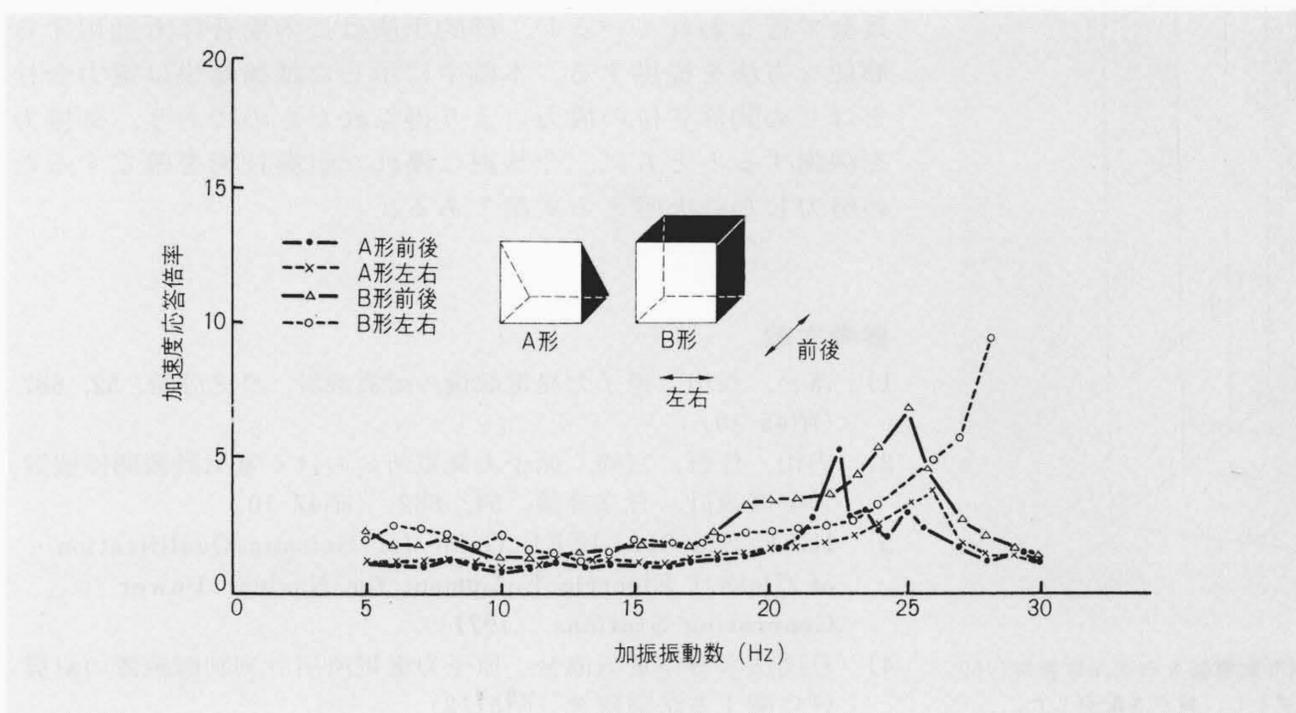


図9 計装ラックの共振特性 A形及びB形計装ラックは、応答倍率試験によって正弦波入力に対する共振振動数が20Hz以上であることが分かる。

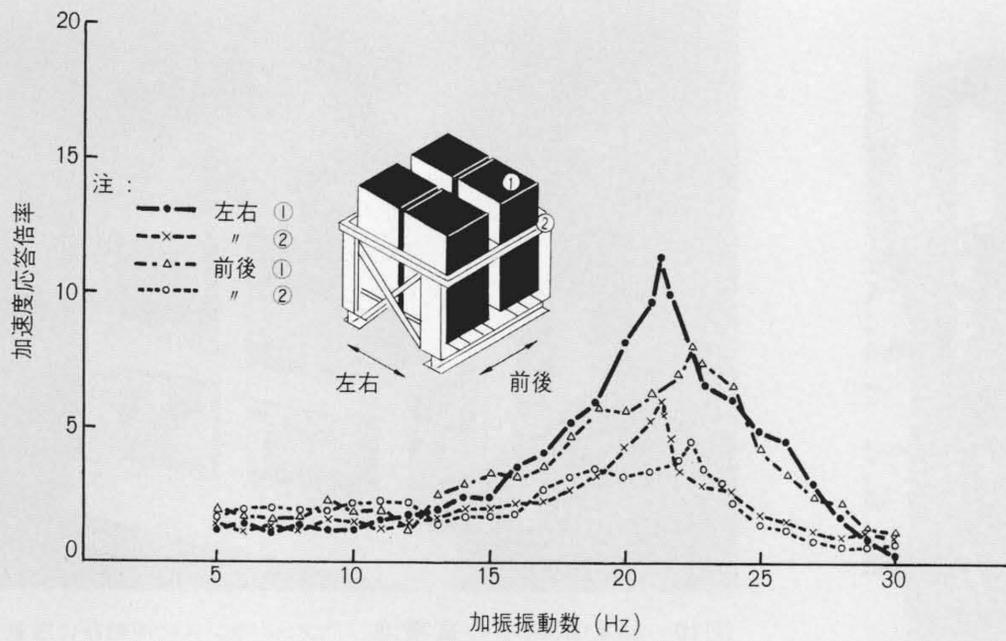


図11 蓄電池の共振特性 応答倍率試験によって、正弦波入力に対する共振振動数が20Hz以上であることが分かる。

表2 固有振動数の比較 計算結果は実験結果とよく一致し、±10%程度の偏差であった。電気計装品は計算によっても十分耐震性を評価できることが分かる。

振動モード	モデル(1) (Hz)		モデル(2) (Hz)		モデル(3) (Hz)		モデル(4) (Hz)		モデル(5) (Hz)	
	計算	実験								
一次	19.5	16	22.0	23.8	26.7	26.5	14.0	12.8	16.5	19.6
二次	24.1	20以上	31.7	27.6	27.8	29.0	16.0	14.5	26.7	30以上
三次	25.5	20以上	37.5	30以上	34.4	30以上	27.5	23.9	34.2	30以上

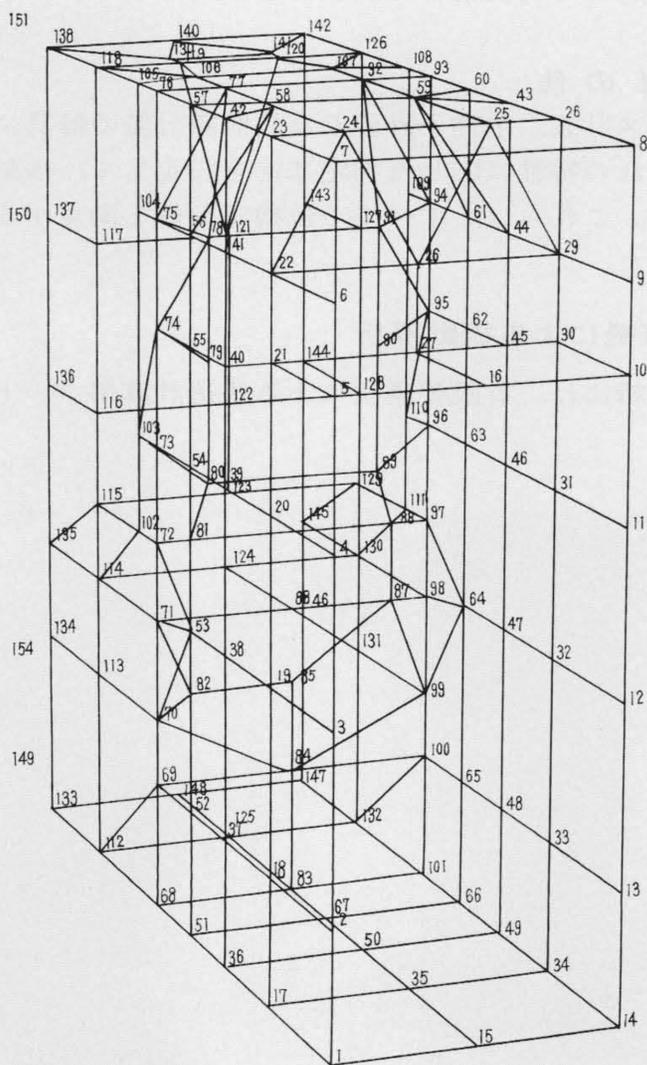


図12 閉鎖形配電盤の解析モデル 閉鎖形配電盤を三次元梁要素(160点)に分割し、基礎ボルト部をピン結合の拘束節点とし、質点を配分した。

した。図12に閉鎖形配電盤を例にした解析モデルを示す。盤の構造上から節点数は100~200点程度とった。基礎ボルト固定部はピン支持、又は等価ばね系とした。表2は種々の盤の解析結果と実験結果を示すものであるが、実験値に対する計算値の偏差は±10%程度でよく一致している。

5 結 言

以上述べてきたように、原子力発電所での電気計装品の耐震性確認法の中で剛構造設計に基づく静的手法は、簡便で汎用性があり、主要電気計装品の耐震試験結果はこれを裏付けた。近年、原子力技術や地震工学などの急速な進歩を反映して、重要度分類や設計地震の見直しが耐震審議機関の各種委員会で行なわれているが、静的手法はこの場合にも通用する簡便な方法を提供する。本稿中に示した試験結果は電力会社をはじめ関係各位の協力により得られたものであり、御協力を深謝するとともに、今後更に優れた耐震技術を確立するため努力したいと考える次第である。

参考文献

- 1) 落合, 長山: 原子力発電設備の耐震設計, 日立評論, 52, 887 (昭45-10)
- 2) 内山, 佐藤, 宮崎: 原子力発電所における電気計装関係機器の耐震設計, 日立評論, 54, 882 (昭47-10)
- 3) IEEE Std 344: IEEE Guide for Seismic Qualification of Class I Electric Equipment for Nuclear Power Generating Stations (1971)
- 4) 社団法人日本電気協会: 原子力発電所用計測制御装置の耐震性に関する試験研究 (昭51-2)