

原子力発電所における電気計装関係機器の耐震設計

Some Studies on Aseismic Design of Nuclear Instrumentation

内 山 祐 一* 佐 藤 英 之** 宮 崎 芳 雄**
Yûichi Uchiyama Hideyuki Satô Yoshio Miyazaki

As nuclear power plants grow in capacity and become more improved in efficiency, the demands on their safety are also becoming greater. In Japan, the study on the safety of nuclear power plant facilities under earthquakes is gaining importance increasingly, and various types of aseismic designs have been attempted under stringent conditions. Already, design method in this direction have been established to a considerable degree, and many data on seismic analyses have been made available.

Recently, similar aseismic consideration has been demanded for electric measuring instruments and currently various researches in their aseismic characteristics are proceeding.

At Hitachi, Ltd. a series of vibration experiments have been conducted for electric measuring instruments for nuclear power plant use thereby to confirm the effectiveness of their aseismic designs and to check the reliability of computer codes.

In this article a part of such experimental researches and analyses as well as points to be considered in the aseismic design of electric appliances are introduced.

1. 緒 言

近年、多数の原子力発電所が建設あるいは計画され、その安全性の確保には十分な努力がなされている。世界でも有数の地震多発国であるわが国においては、原子炉施設の耐震性の確保が重要であって、万一にも地震による破損のため周辺環境が汚染されることのないように耐震設計が行なわれている。

電子計算機の高速、大形化に伴い、各方面において構造物の振動解析が行なわれ、原子力発電設備に関しても、建物、機器配管系については体系だった地震応答解析⁽¹⁾が可能となってきた。ここで取り扱う制御盤など電気計装関係機器（以下電気品と称する）に対する耐震設計の特徴は、一般的に構造的な強度は従来の経験から十分な場合が多く、むしろ内蔵しているリレーなどの機能保持の検討のほうがより重要であるという点にある。地震時の電気品類の機能保持についての検討はその実施例⁽²⁾が少なく、また応答解析の手法も現在まだ完全に確立されたものではない。

日立製作所においては電気品の耐震性を重視し、一連の振動実験および振動解析コードの作成を行ない、制御盤構造の検討、地震応答解析手法の検討などを重ねてきた。

ここでは、すでに確立されつつある原子力発電所の耐震設計の流れに合わせて電気品の耐震設計について検討を加えていくことにする。

なお、ここでは屋外変電設備など電力関係機器については取り上げていないが、これらに対する耐震設計の考え方を述べたものとして参考文献⁽³⁾などがあるので参照されたい。

2. 耐震設計の概要

原子力発電所の耐震設計は、地震条件の設定および建物の動的地震応答解析から機器配管の耐震性の検討に至る一連の作業であり、電気品もこの一環として扱われている。

2.1 重要度分類と設計震度

建物構造物および機器配管系は、それぞれの発電所の安全性に対する重要度に応じて分類され、それぞれの重要度に適した設計がなされている。重要度分類の定義およびそれらに考慮される耐震設計の内容についての一例を表1に示す。

AsおよびAクラスについては建設地点に想定される最大規模の地震波について動的に解析され安全性の検討が行なわれており、十分な耐震性を有することが確認されている。

2.2 建物から電気品へ

地震波は直接電気品に加わるわけではなく、電気品が設置されている建物などを介して作用するものである。したがって電気品の耐震設計においても建物の解析からスタートすることが必要である。原子力発電所の耐震設計においては、設置点の強震記録が

表1 重要度分類の定義と設計震度の一例

クラス	定 義	解 析 方 法	制御盤など機器に対する設計震度
As	原子炉格納容器および安全停止系のように安全対策上特に緊要な施設	動的解析および静的解析	建物の動的解析により得られる当該機器設置点の水平震度および当該機器設置点における建物の静的設計震度の大きいほうの1.2倍
A	機能の喪失が核の事故に至るものおよび核の事故発生の場合公衆を核的災害から保護するために必要なもの	動的解析および静的解析	静的設計震度は建築基準法に定める設計震度の3倍（AsクラスのものについてはAクラスの1.5倍の地震（安全余裕検討用地震）に対して機能を保持することを確認する）
B	高放射性物質に関連する施設であって上記AsおよびAクラス以外のもの	静的解析を行なうが特に必要と認められるものについては、動的に検討する。	Aクラスに対する設計震度の1/2
C	As, AおよびBクラス以外のすべての施設	必要なものについて解析する。	建築基準法に定める設計震度の1.2倍

* 日立製作所日立工場
** 日立製作所大みか工場

ない場合が多いので、一般的には類似の地盤で得られた強震記録を3種類ほど用いることが多い。

原子炉建物は図1(a)に示すような質量とばねの振動モデルに置き換えられ、各質点の地震応答は基盤に加わる地震波の経過に従って計算される。この解析によって得られた地震応答を用いて電気品などの積載機器の応答を求める。

たとえば電気品として図1(b)に示すような1質点モデルが図1(a)の質点番号6に相当する建物床に設置された場合を考える。図1(a)の質点6で得られた地震応答 $\alpha_0(t)$ が図1(b)に示す1質点モデルに加えられた場合の振動方程式は(1)式で表わされる。

$$\ddot{y} + 2h\omega y + \omega^2 y = -\alpha_0(t) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 y ：相対変位
 ω ：電気品の固有円振動数
 h ：減衰定数

減衰定数 h をパラメータとして固有円振動数 ω または固有周期 T と応答加速度 $\ddot{y}$ の最大値との関係の求めると一つの曲線が得られ、床応答スペクトルと呼ばれている。この曲線は電気品などの機器が固有角周波数 ω と減衰定数 h を持っていた場合、ある地震波に対して示す最大応答加速度の最大値を示している。

図2は床応答スペクトルの一例を示したものである。これは図1(a)に示す建物解析モデルにエル・セントロ地震波を最大加速度0.18gで加えた場合の質点番号3から6の床応答スペクトルで、減衰定数 h を0.01とした場合である。固有周期0.35秒と0.15秒のピークは、エル・セントロ地震波が建物の一次および二次固有周期により強調されて表われたものである。ここで注意を要することは、建物と電気品などの機器が共振した場合は非常に大きな加速度が機器に加わることである。たとえば図2の場合、質点6の位置にある固有周期0.35秒の機器には、4.3gの加速度が加わるこ

とがわかる。したがって電気品の耐震設計においても建物の振動特性を考慮し、電気品と建物との共振を避けるように設計することがぜひとも必要となってくる。

2.3 電気品類の機能保持

制御盤など電気品類の耐震性は、おもにこれらに取り付けられる計測器、リレーなど（以下器具類と称する）により左右される。制御盤などを十分剛に設計し建物との共振を避けうる構造とするとともに、器具類の耐振動特性を考慮する必要がある。

耐震的に見ておもに検討が必要と考えられる器具類として継電器があるが、これは概略以下のように分類される。

- (1) 電磁的吸引力により接点の開閉を行なうもの
- (2) 電磁的な回転力により接点の開閉を行なうもの
- (3) トランジスタなど使用した無接点リレー
- (4) 液面変化により直接動作するスイッチ
- (5) 単に重力のみによって接点の開あるいは閉を保つもの

電磁吸引力により接点の保持を行なうものについては吸引状態ではかなり電磁力も強く接点の保持力は十分大きい。非吸引時は接点保持力が小さくなる。誘導円板タイプのものは完全にバランスがとれていれば回転力は働かないはずであるが、振動が継続すると実際には回転が生ずる。この種の形式を持つ差動継電器などは検出感度を保持する必要上抑制トルクが小さく接点の保持が困難である。水銀など液体を用いた接点、単に重力により接点の保持を行なっているものも耐震的に十分な検討が必要である。トランジスタなどを用いた無接点式リレーは耐震的に見てすぐれているため、振動に対して弱い継電器は無接点化を図るとか、フェイル・セーフにするなど体系的な対策を行なうことが必要である。また器具類に振動的に弱い方向がある場合には、これらが取り付けられる盤の振動特性を考慮して、誤動作の生じにくい方

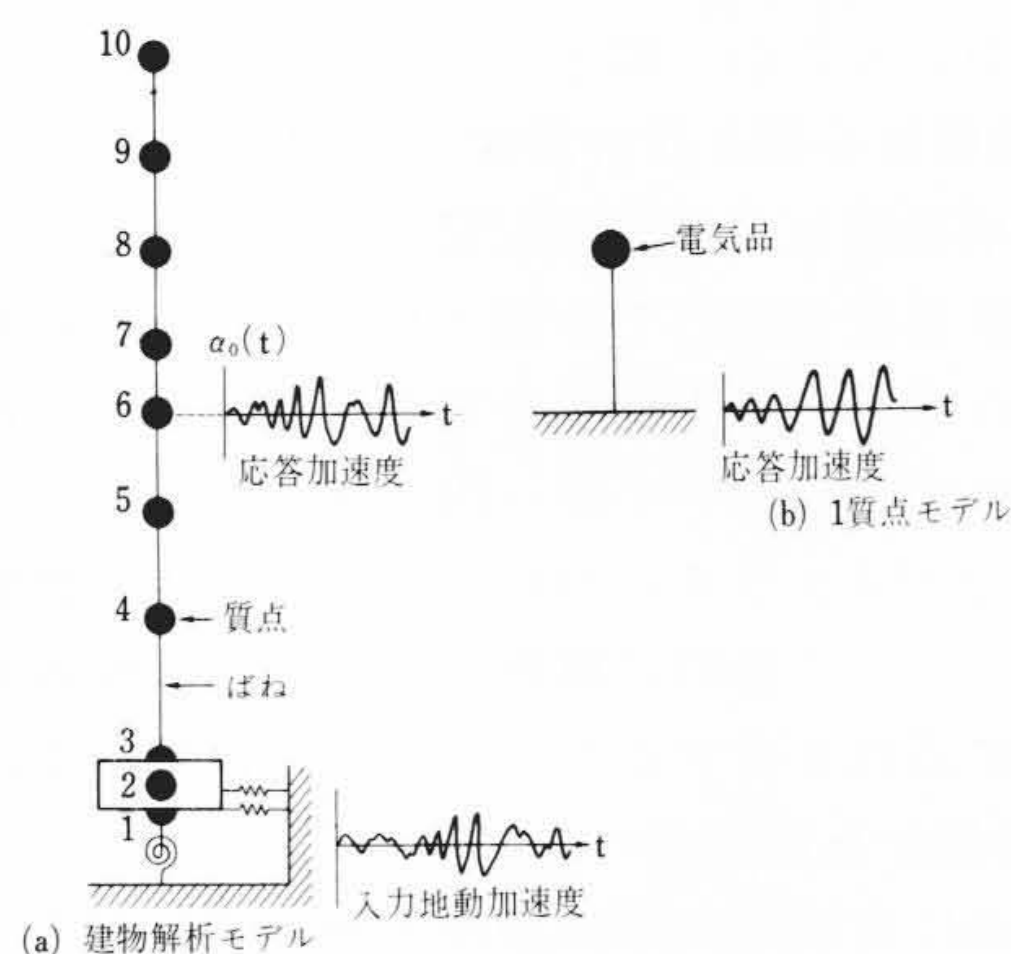


図1 電気品の地震応答解析

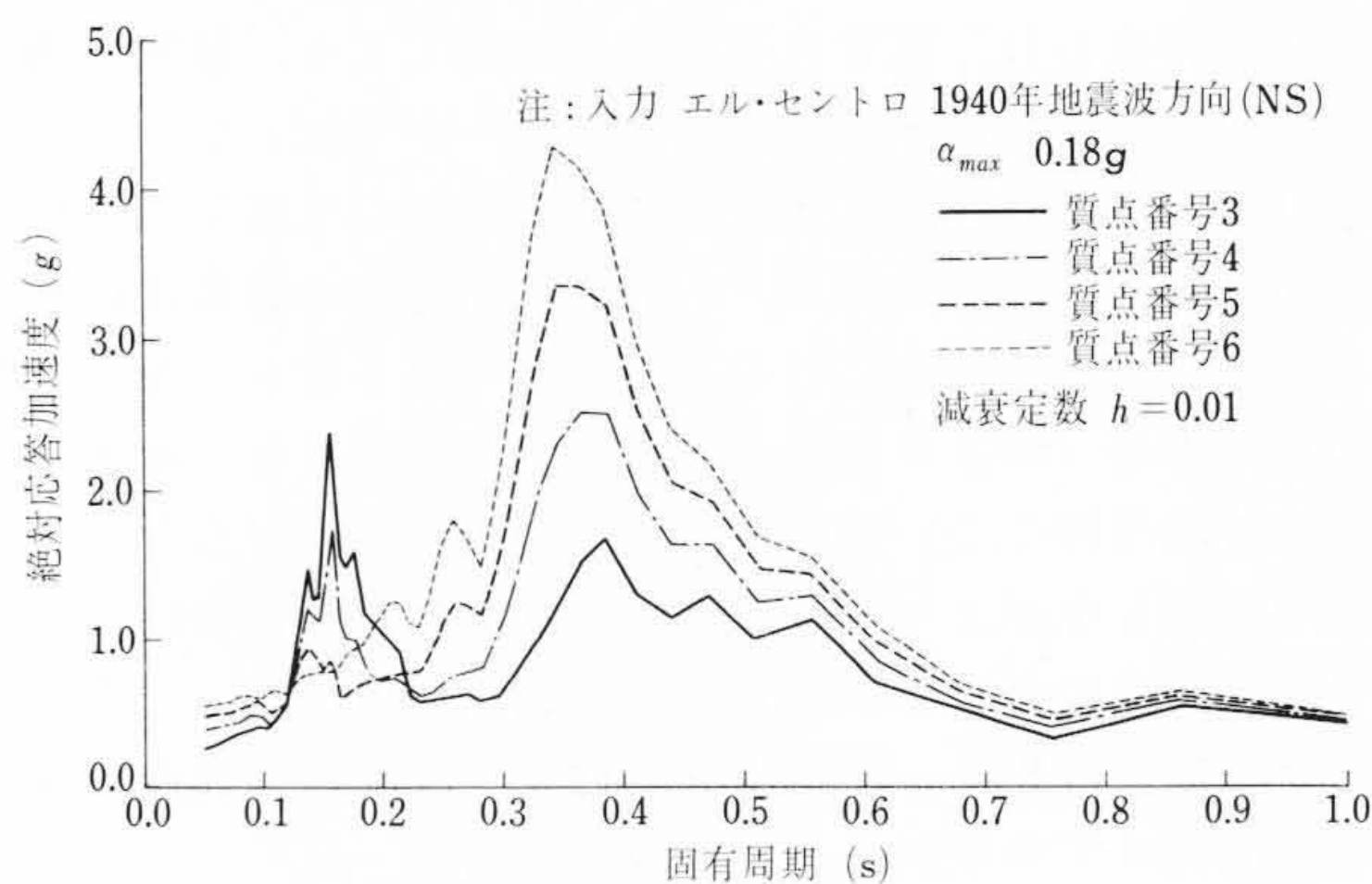


図2 床応答スペクトル

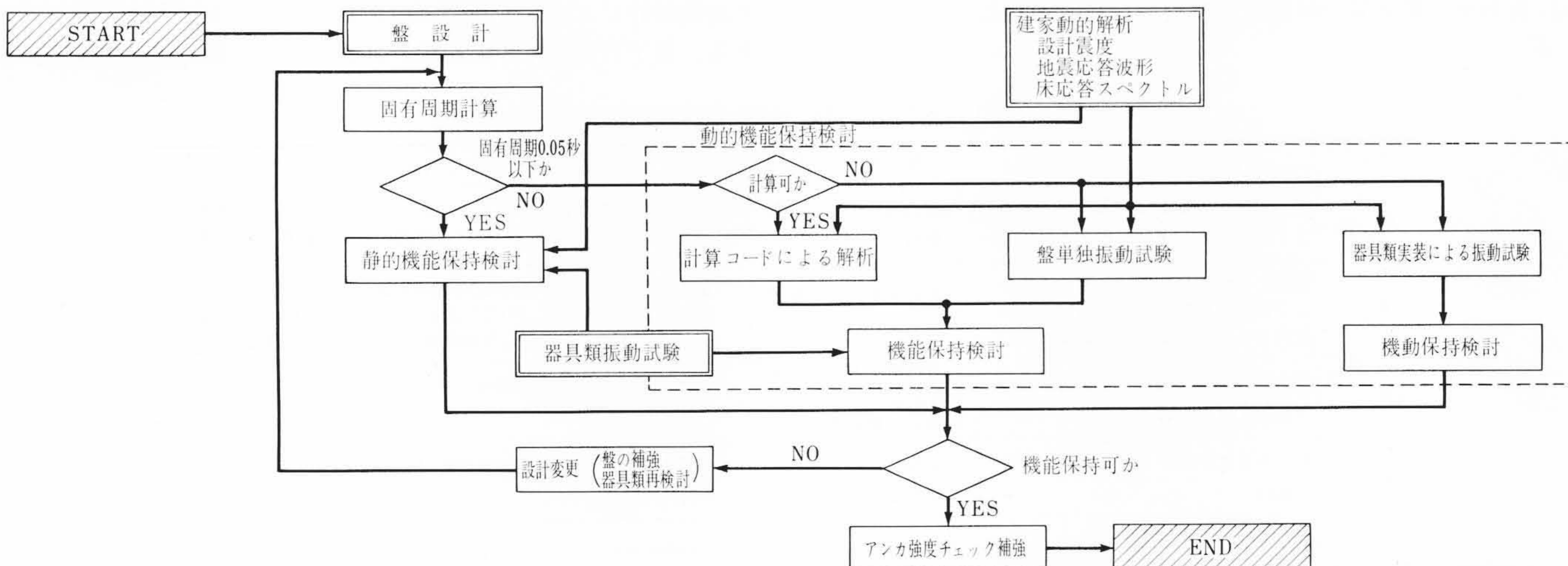


図3 制御盤機能保持検討フローチャート

向に取り付けるような注意が必要である。

2.4 制御盤の耐震設計

図3は主としてAクラスに属する制御盤の耐震設計の概略流れを示したものである。固有周期が0.05秒以下の電気品については地震との共振はないものと考え静的な解析を行なう。また、固有周期0.05秒以上の電気品については動的な解析を行ない機能保持の検討を行なう。

制御盤の機能保持検討方法としては以下のものが考えられる。

- (1) 計算コードによる盤応答の算出と器具類の振動特性の比較
- (2) 盤単独の振動試験結果と器具類の振動特性の比較
- (3) 器具類を実装した盤を加振し、機能保持の確認

系統的な制御盤耐震設計を進めるうえで最も望ましいのは(1)、(2)の方法である。盤をいくつかの類型に分類し、それぞれの類型ごとに固有周期あるいは応答加速度の最大値を、実験または計算コードにより求めておき、これと器具類の振動特性とを比較しつつ制御盤設計を進めることが効果的と考えられる。このためにも器具単品の振動特性に関するデータを十分に蓄積しておくことが電気品の耐震設計上非常に重要である。

制御盤は上下に細長い構造のものが多く底部のみの支持では、かなり固有周期が長くなるものが見られる。したがって重要な盤に対しては、上部を支持するなどして積極的に剛にすることが望ましい。

また重量物を内蔵する盤については、重量物をできるだけ下方に配置するなどの工夫が必要である。

制御盤の取扱いやすさの点から、ドア部分に器具類を配置したり、引出し式のユニット構造を取っている盤については極力がたつきのない構造とする必要がある。制御盤とドアあるいはユニットとががたつきのため打ちつけ合う場合、非常に大きな加速度を発生するためこれらの取り付けには十分注意を払い、ドアなどに重要な機具を取り付けることは極力避けるべきである。

3. 制御盤の振動実験

制御盤の耐震設計にあたって盤類の体系化を行ない、それぞれの形式の盤について加速度応答倍率を測定し標準化しておくことが望ましい。盤構造には骨組箱形構造、板構造あるいは現場ラックのように比較的単純な骨組構造など種々のものが考えられるが、ここではわれわれの行なった実験のうちから、板構造のコントロ

ールセンタおよび骨組板張り構造の制御盤を取り上げてみた。

3.1 コントロールセンタ振動実験

コントロールセンタは図4に示すような縦長の制御盤で概略寸法は高さ2.3m、幅1.65m、奥行き0.4mである。かなりの重量のトランスなどを内蔵し、側面板がそのまま強度部材となっている。正面にとつてのついた部分は引出し式のユニット構造となっており内部に継電器、トランスなどがある。ユニットの一例は図5に示すとおりである。実験においては壁などから容易に上方を支持することが可能であったため、図4に示す支持フレームを用意し、コントロールセンタ上部を支持できるようにした。

加速度応答倍率の測定は、上記コントロールセンタを振動台上に実際に使用される状態で設置したうえで、加速度計を側面板およびユニット内に配置(図5)し、振動台上に置かれた加速度計との応答値の比をとることにより行なわれた。

コントロールセンタ単独の共振特性は図6に示すとおりである。最も高い応答の観測された8.64Hzにおける各加速度計の位置と加速度応答倍率の関係を図7に示すが、本図によれば加速度応答はコントロールセンタ底面より直線的に増加している。これはコントロールセンタが底部を中心とした首振り運動をしているため、基礎部の強度が耐震性の点で不足していることを示している。

図8には同様の測定条件でコントロールセンタ頂部を支持した場合の共振特性が示されている。実験に使用した支持フレーム(図4)の強度が十分でないため、相変わらずコントロールセンタ頂部の加速度が最も大きい。それでも一次固有振動数は16Hzにまで向上し地震で問題となる範囲での応答は十分低く押えられていることがわかる。実際には壁などからより強固な支持を行なうことができるので、さらに安全な制御盤となることが推定できる。

次にコントロールセンタ内部のユニットに対する試験結果の一部を示すことにする。ユニットの固定が十分行なわれていない場合、ユニットのがたつきは耐震的に見て問題となる。図9は耐震性の検討が十分行なわれていない場合の実験結果であってユニット内の仕切板あるいは背面板(図5参照)で測定した共振特性である。この場合ユニットのがたつきによって、ユニットが盤と異なった複雑な動きをし、ユニット支持わくに打ちつけられることにより大きな加速度を発生することがわかる。重要な盤についてはユニットの固定を十分に行なう必要がある。

なおコントロールセンタ頂部サポートおよびユニットの強化に

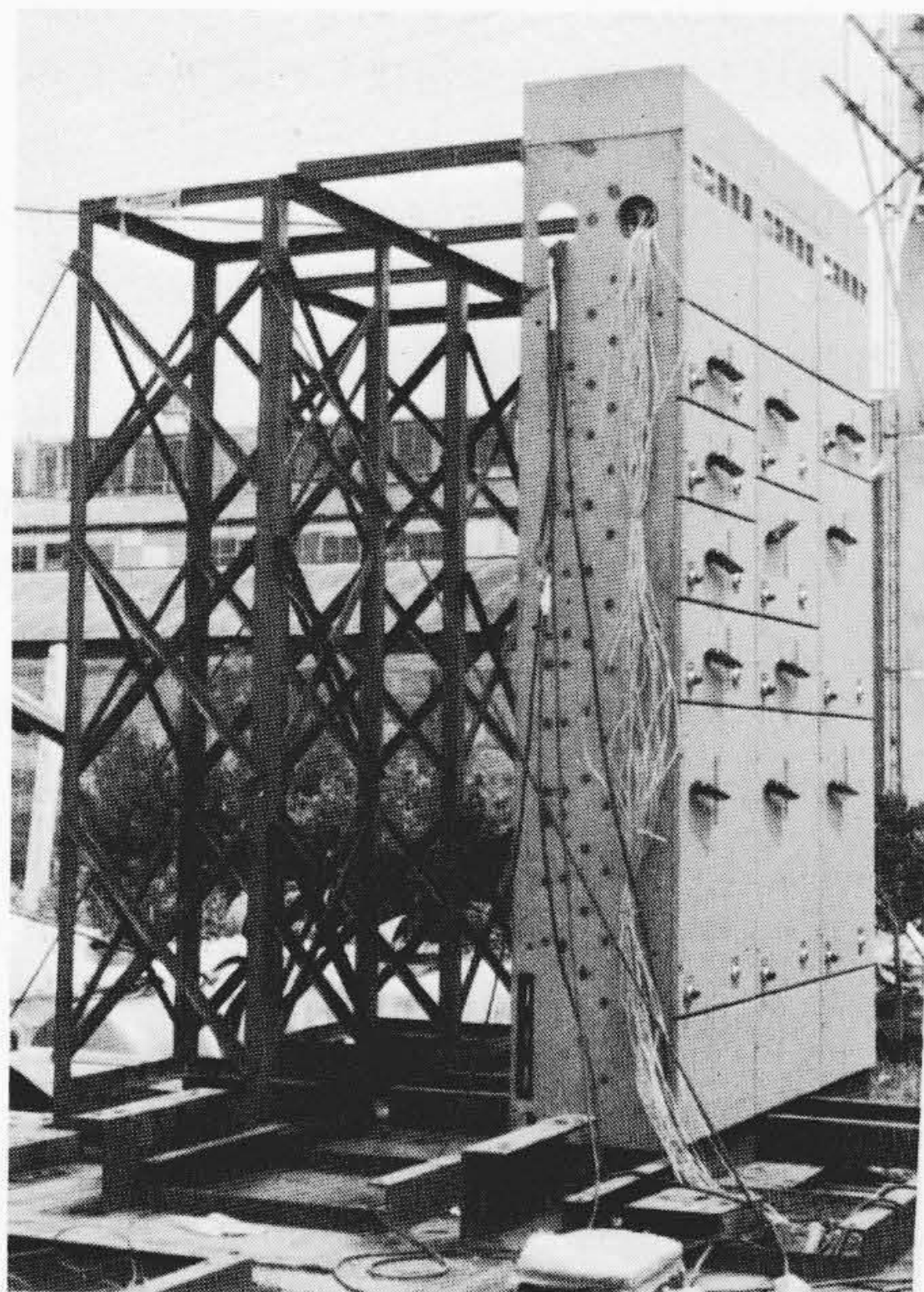


図4 コントロールセンタ振動実験

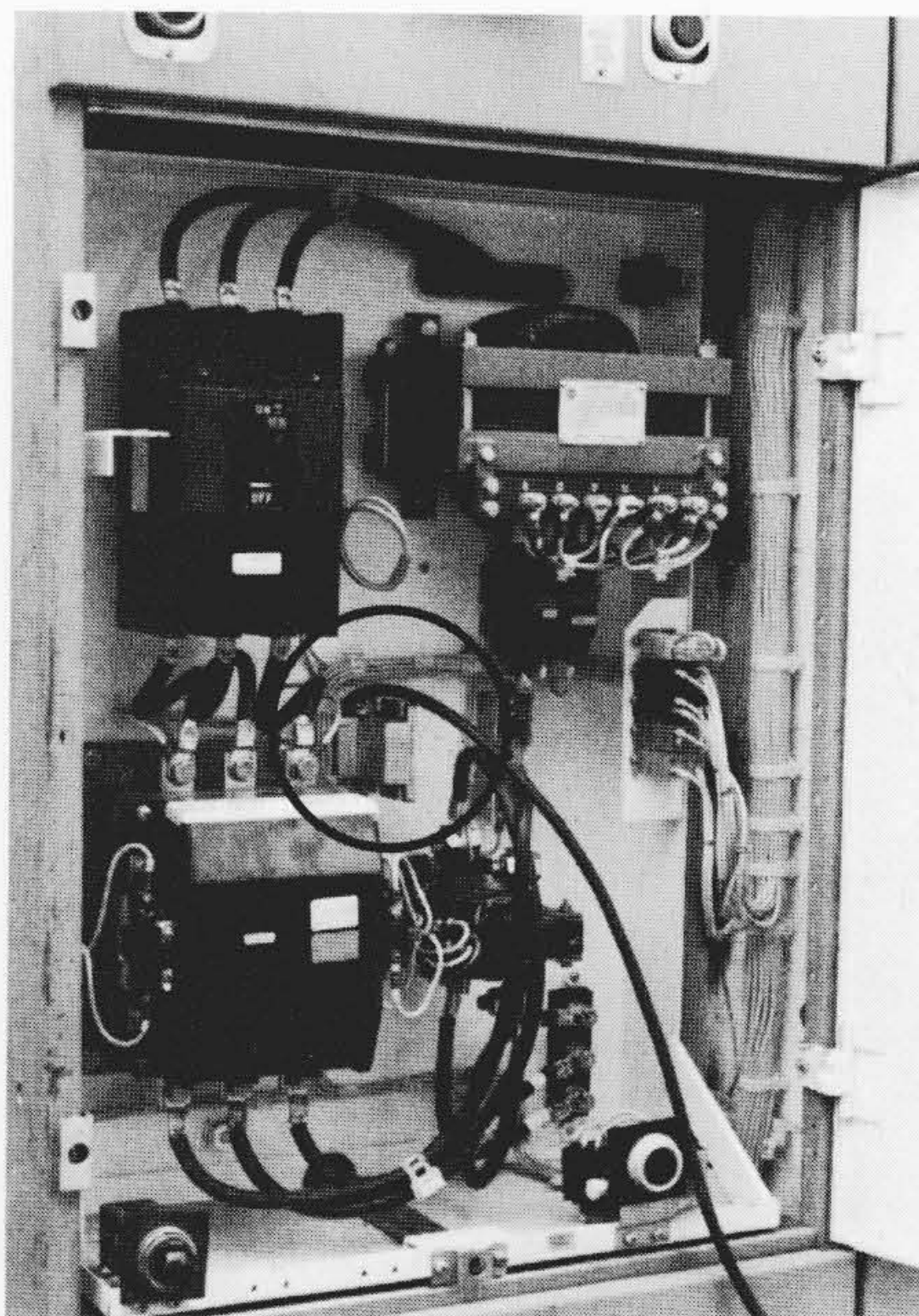


図5 ユニット内部および加速度計の取付け(○印内)

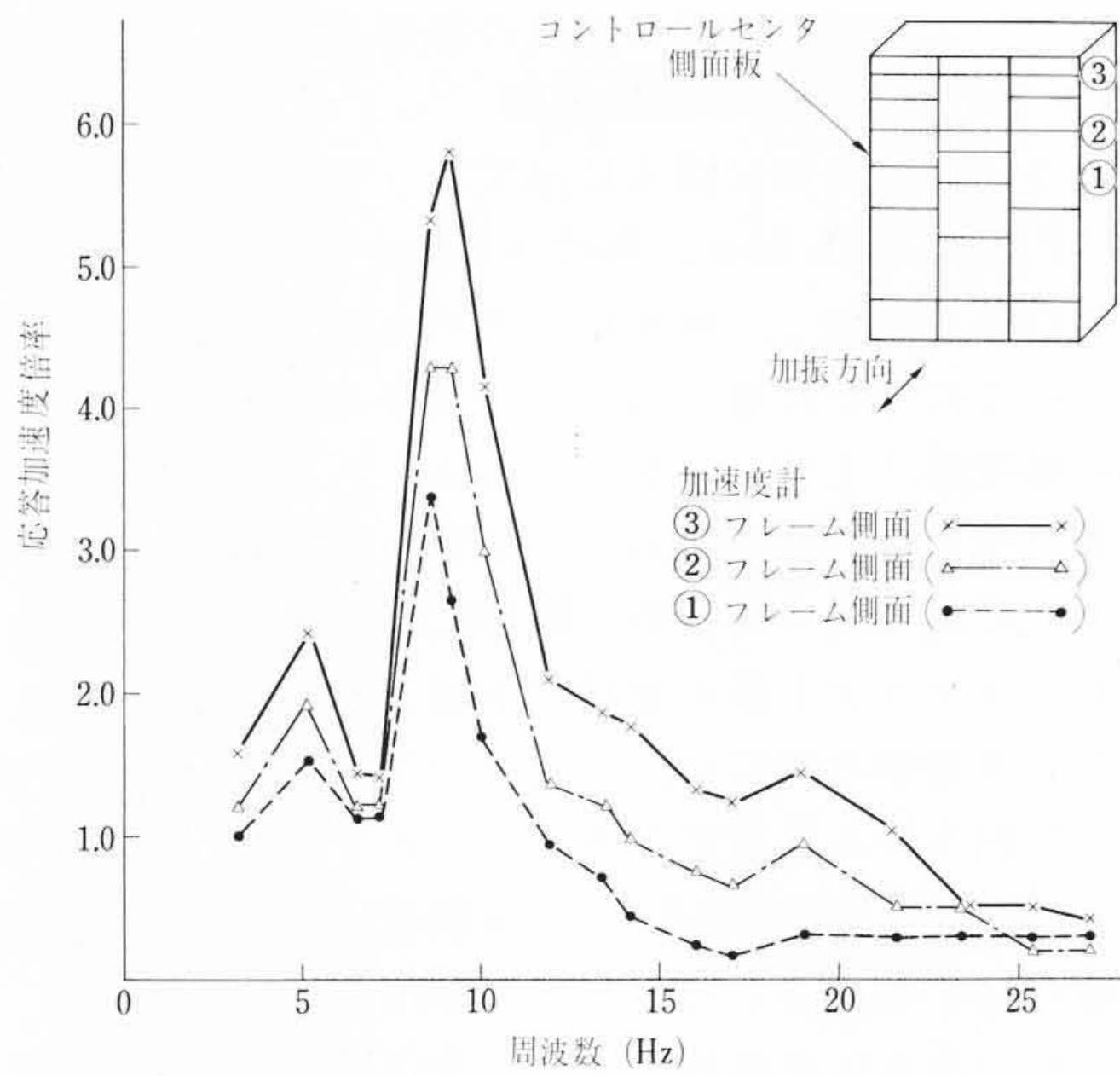


図6 コントロールセンタ共振特性(支持フレームなし)

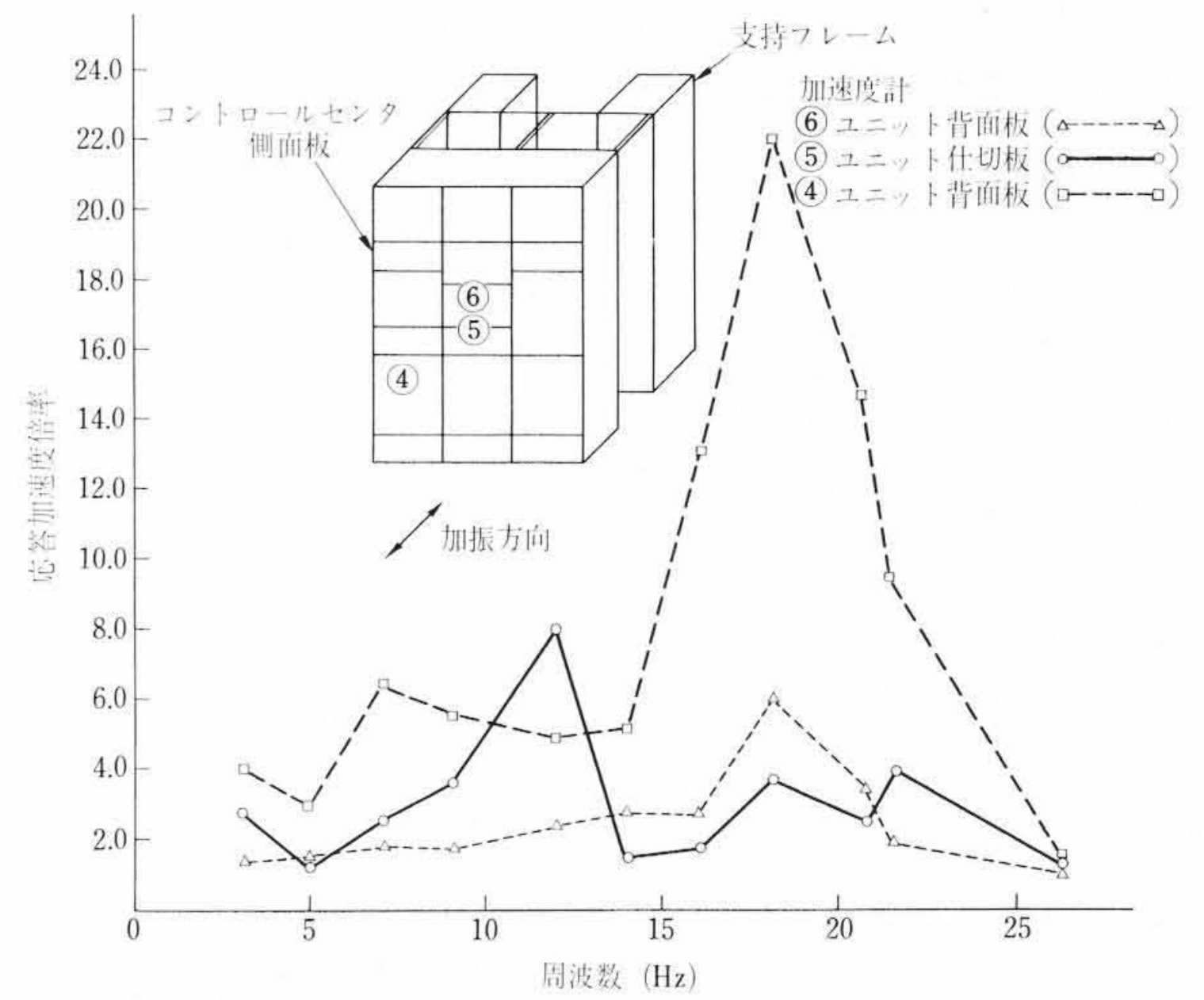


図9 ユニット共振特性(支持フレーム付き)

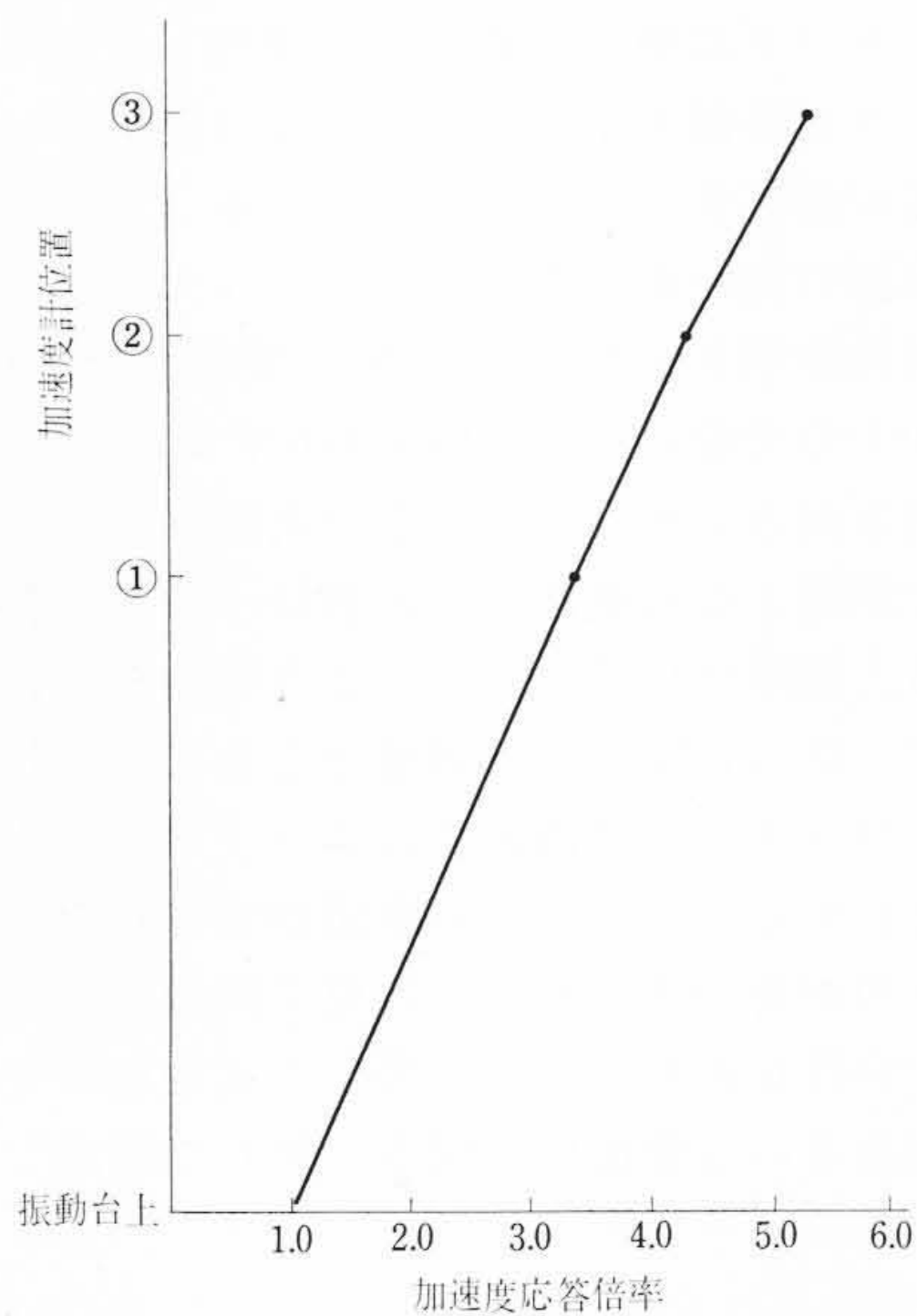


図7 コントロールセンタ加速度応答(8.64Hz)

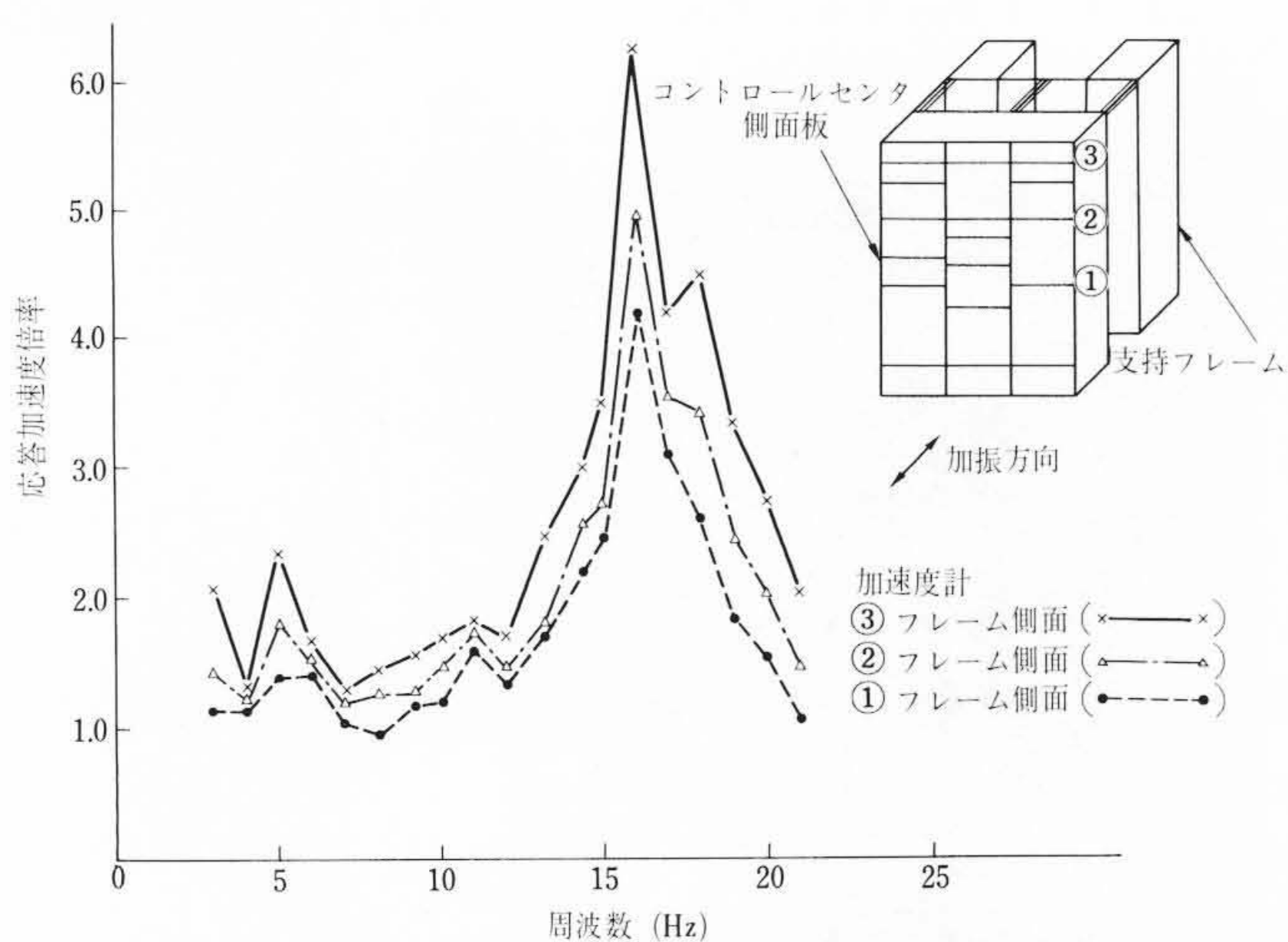


図8 コントロールセンタ共振特性(支持フレーム付き)

より、ユニット内部の応答加速度を図8に示す側面板の値程度とすることができ、Aクラス相当の加振実験に対しても十分機能を保持できることを確認している。

3.2 骨組構造制御盤振動実験

骨組構造の制御盤についての実験例を次に示す。制御盤は図10に示すように概略寸法が高さ2.2m、幅0.7m、奥行0.69mの直方体骨組構造に板張りをしたもので、前面パネルに多数のヒンジ式接点を持つ電磁吸引形リレーを実装している。前面パネルについては薄い板に多数のリレーが実装されるため、かなりの重量となる。このため盤の耐震性を考慮し図11に示す補強を取り付けた場合と取り付けない場合との両方について実験を行なってみた。加速度計はパネル面および後部フレームに図11に示すように取り付けられている。

加振実験の結果によれば、フレーム自体の固有振動数は前面パネルの補強によらずほぼ一定で、左右方向の固有振動数が約9Hz、前後方向のものが約19Hzであった。実験に供した制御盤はリレーの配置上パネル面の前後振動がリレー接点に影響しやすい。このため前後方向加振時のパネル面の加速度応答を中心に述べる。

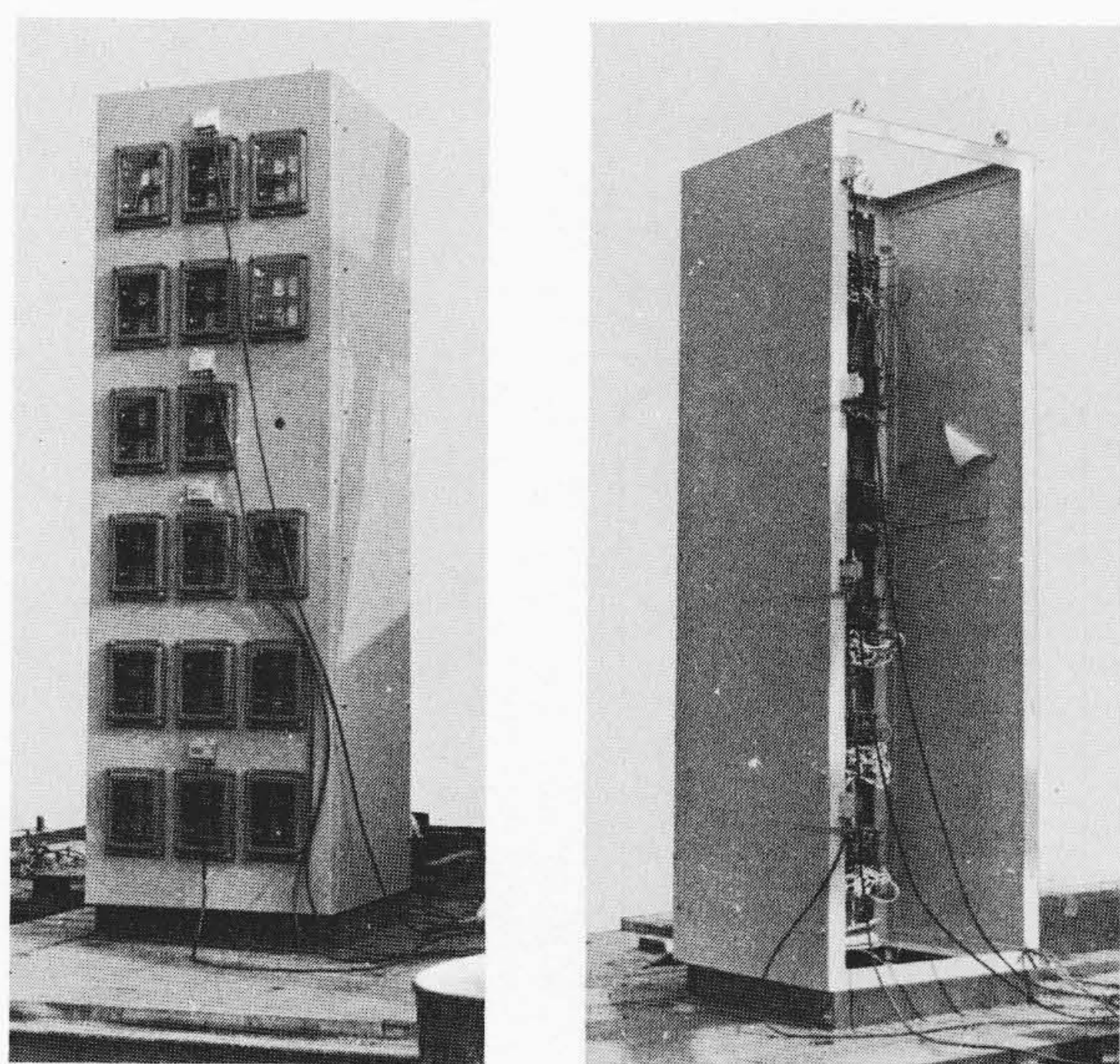
図12はパネル面に補強のない場合の共振特性で、前面パネルが1枚板のためフレームと別個に複雑な動きをし、低い周波数でパネル面の振動が発生している。一方、図13は前面パネルを補強した場合の共振特性を示したものである。パネル面の部分振動が消え、フレームと一体となって振動するため、固有振動数は耐震的にみて十分高いものとなっている。補強は図11に示すように小さな鋼材をパネル面に溶接した簡単なものであるが、耐震性は非常に向上することが判明した。

9Hz付近の左右方向の振動は、前後方向に加振した場合にはほとんど現われない。ここでは実験結果を省略したが、左右方向に加振した場合には観測されている。なお4.2で述べる数値解析によれば側板の剛性はほぼ全面が有効に作用し、前後方向の固有振動数を高くすることに役立っている。側板は単にボルトでフレームに締め付けたのみであるが、非常に有効なものであることを付記しておく。

機能保持の検討はAクラス相当の加速度で加振し、リレー接点の動作を観測することにより行なわれた。前後方向加振時には、固有振動数が十分高いため問題なく、左右方向についてもリレーアームの運動方向が加振方向と直角であり、この方向の振動に対して強いため、誤動作などは観測されなかった。

4. 数値解析

制御盤の耐震性を考慮するうえで、計算コードによる解析が可能であれば非常に好都合である。多自由度系の振動方程式の解法は、直接積分法、時刻歴モータリアナリシスおよび床応答スペク



(a)制御盤正面

(b)制御盤背面(後部フレームに加速度計が取り付けられている)

図10 骨組構造制御盤加振実験

トル法が用いられることが多いが、制御盤の場合は数値計算の精度、計算時間の経済性を考慮すると床応答スペクトル法が適当であろう。数値解析の一例として任意形状の三次元骨組構造に対する地震応答解析コードによる制御盤の振動解析結果を以下に示す。

4.1 計算方法の概要

地震工学における多自由度系の振動方程式は2式で表わされる。

$$M(\ddot{Y} + \ddot{Y}_0) + C\dot{Y} + KY = 0 \quad \cdots(2)$$

ここに、 M ：質量マトリックス

C ：減衰マトリックス

K ：剛性マトリックス

Y ：相対変位ベクトル

$\ddot{Y}_0$ ：地動加速度ベクトル

(2)式において減衰マトリックス C は一般に小さいことから、減衰ゼロの自由振動方程式 $M\ddot{Y} + KY = 0$ を解いて得られる n 次の固有値、固有ベクトルをそれぞれ λ_n および ϕ_n とし、 n 次の時間関数 q_n を用いて(2)式の解が $Y = \sum_n \phi_n q_n$ で表わせるものとすれば(2)式は次のように書き換えられる。

$$M \sum \phi_n \ddot{q}_n + C \sum \phi_n \dot{q}_n + K \sum \phi_n q_n = -M \ddot{y}_0 I \quad \cdots(3)$$

ここで I は加振方向のみ1の大きさを持ち他はゼロ要素を持つベクトルである。 n 番めの固有ベクトルの転置行列を ϕ_n^T とするとき、(4)～(6)式の直交条件が満足される場合は、(3)式の左側に ϕ_n^T を掛け、変形することによって(7)式が得られる。

$$M_n = \phi_n^T M \sum \phi_n = \sum_i m_i \phi_{in}^2 \quad \cdots(4)$$

$$C_n = \phi_n^T C \sum \phi_n = \sum_p \sum_q C_{pnq} \phi_{pn} \phi_{qn} \quad \cdots(5)$$

$$K_n = \phi_n^T K \sum \phi_n = \sum_p \sum_q K_{pnq} \phi_{pn} \phi_{qn} \quad \cdots(6)$$

ここで(4)～(6)式はそれぞれ n 次の等価質量を表わしている。

$$\ddot{q}_n + \frac{C_n}{M_n} \dot{q}_n + \frac{K_n}{M_n} q_n = -\frac{\phi_n^T M I}{M_n} \ddot{y}_0 \quad \cdots(7)$$

各振動次ごとの等価一質点方程式(7)を解いて得られる q_n と固有ベクトル ϕ_n を用いて $Y = \sum_n \phi_n q_n$ より地震応答を求めることができる。(7)式の $\ddot{q}_n$ の最大値をあらかじめ求めておけば、床応答スペクトル法となる。なお $\phi_n^T M I / M_n$ は振動系の励振されやすさを示すもので刺激係数と呼ばれている。

4.2 制御盤の解析例

3.2で述べた骨組構造制御盤に対する振動解析結果は以下に示すとおりで、計算は前節に述べた方法によって行っている。また(2)式の剛性マトリックスは、局所座標系の剛性マトリックスから直接作成さ

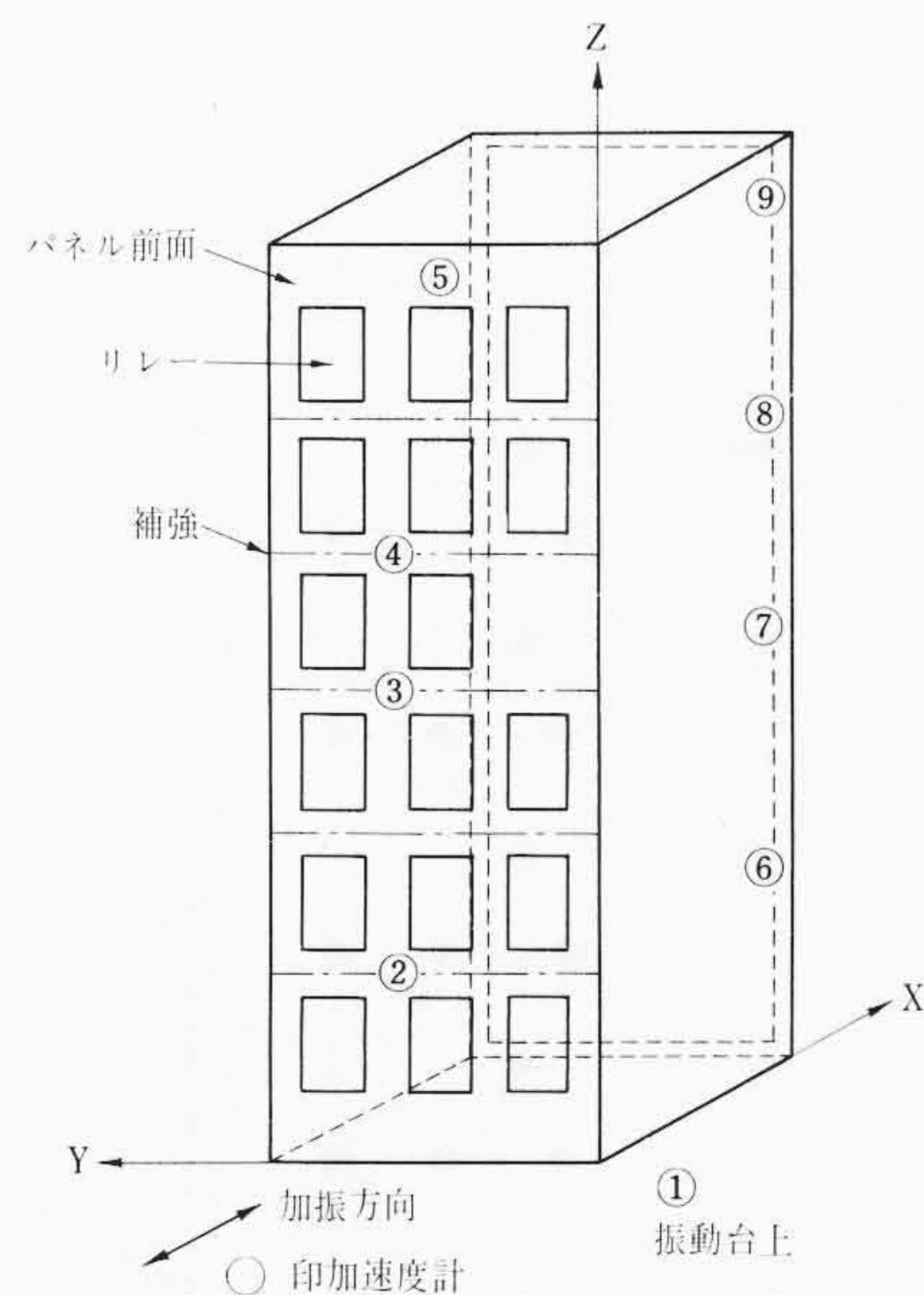


図11 加速度計位置

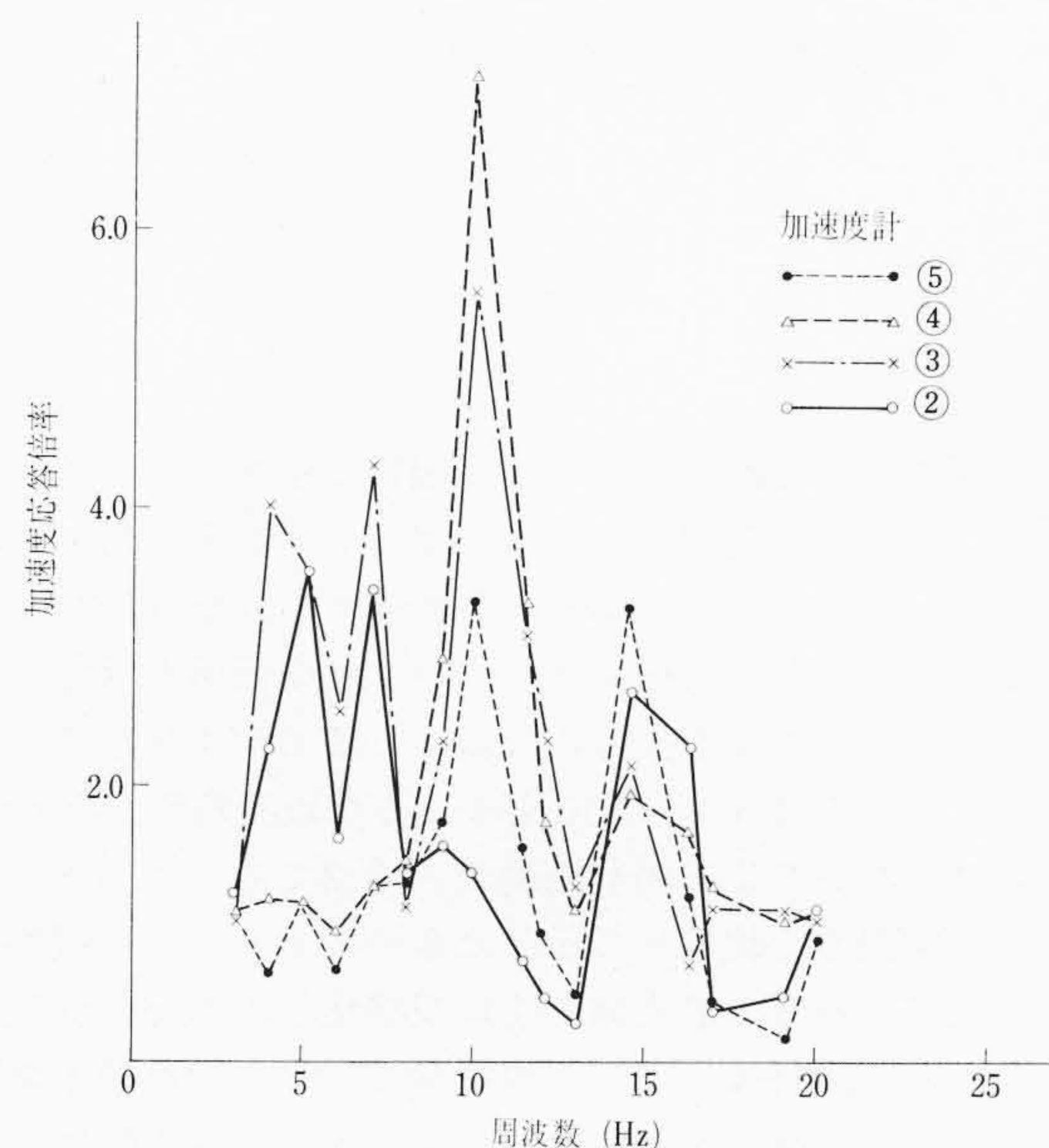


図12 前面パネル共振特性(補強なし)

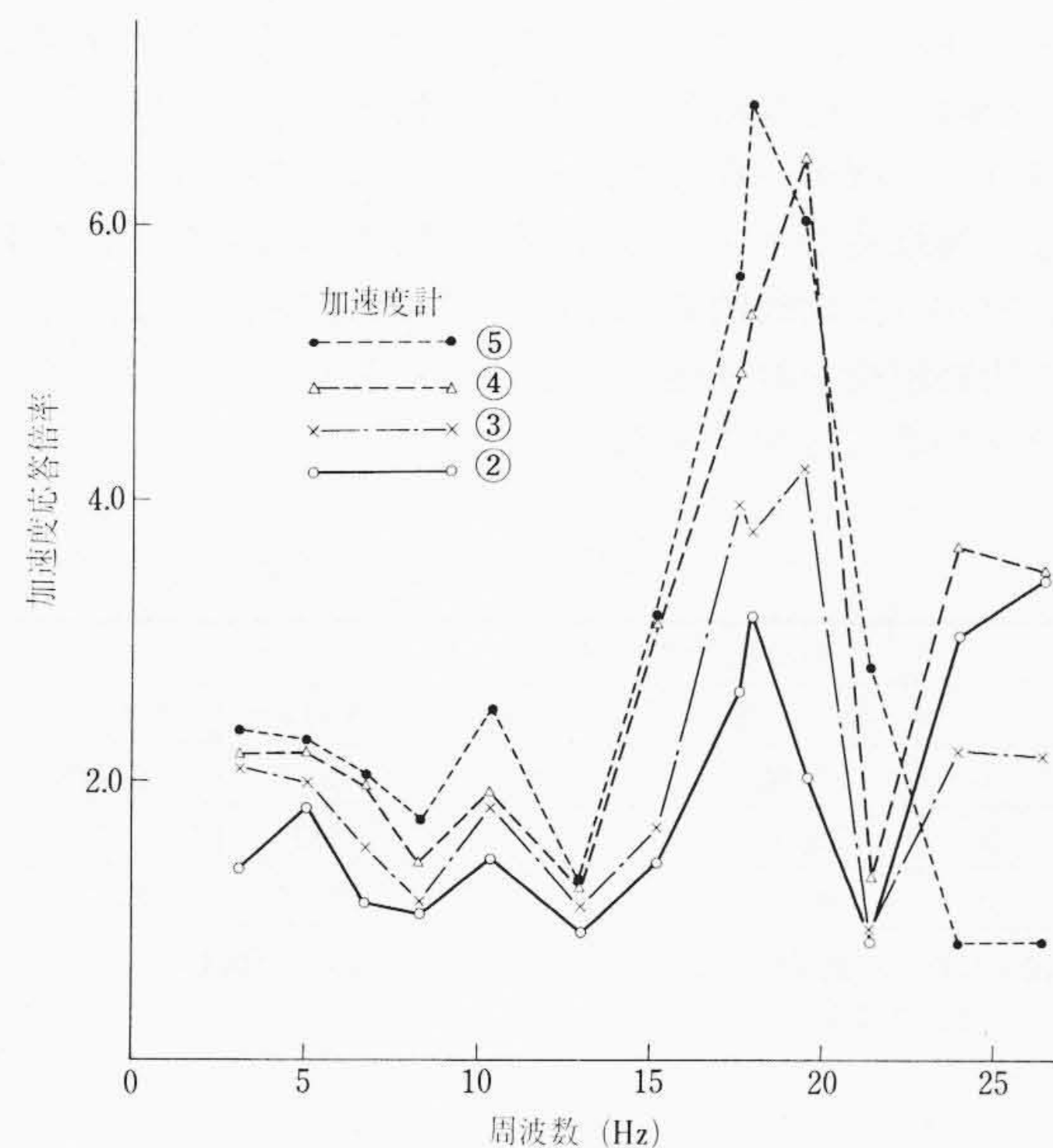


図13 前面パネル共振特性(補強付き)

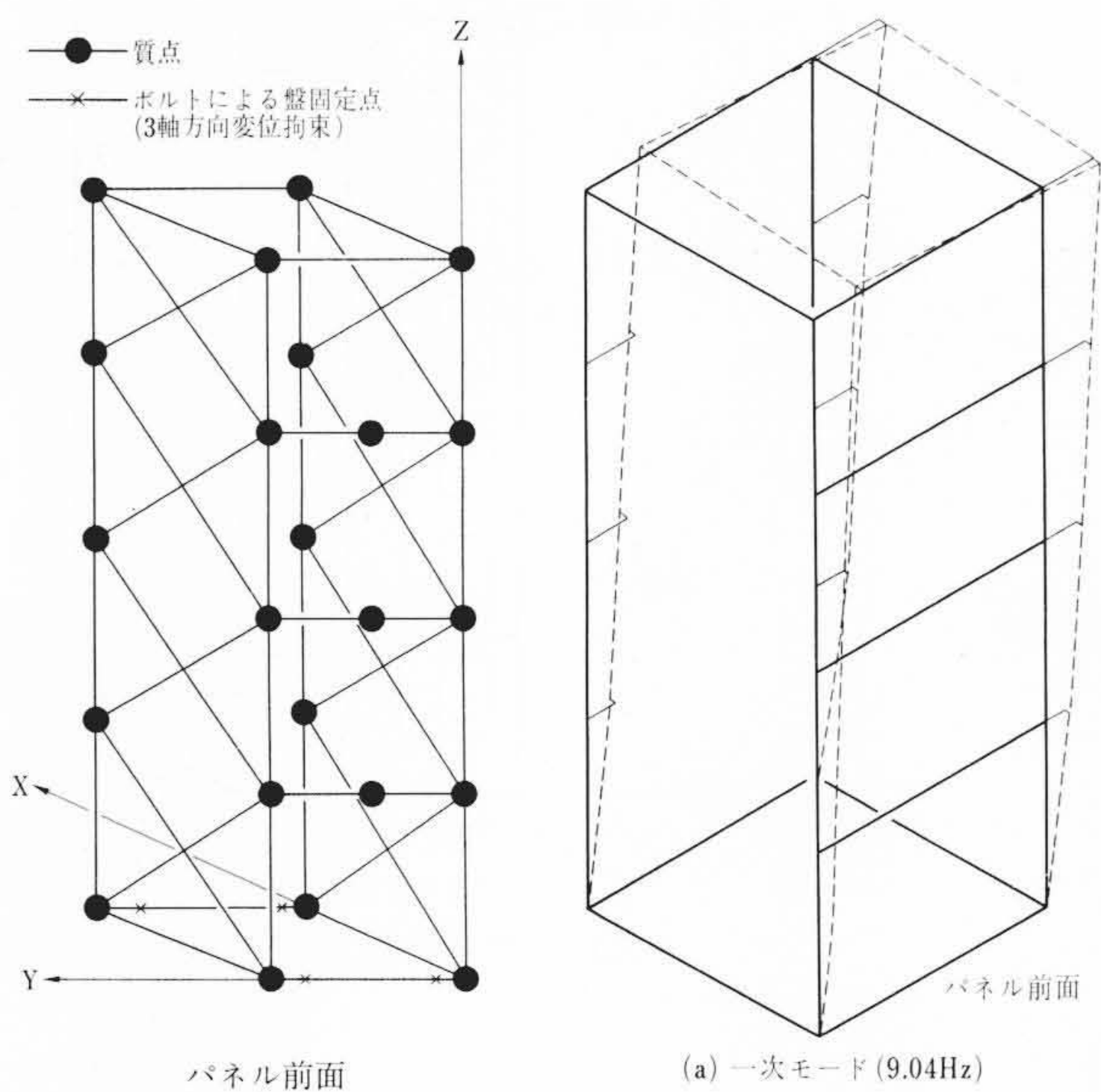


図14 制御盤の解析モデル

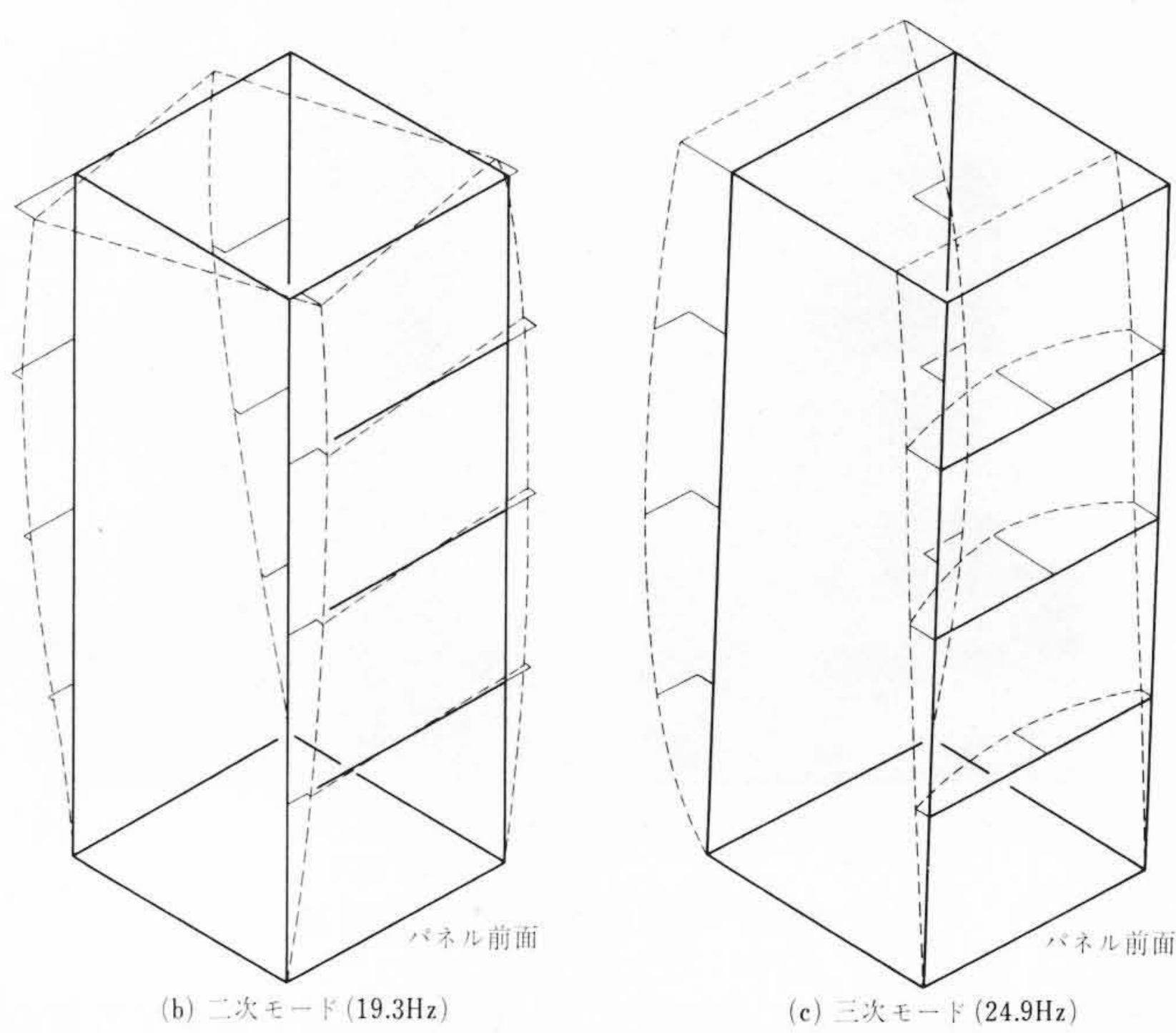


図15 制御盤の(一～三次)振動モード

れている。

解析に用いた23質点モデルは図14に示すとおりである。盤は同図に示すように基礎フレームにボルトで固定されているが、解析上は固定点における3軸方向の変位のみ拘束されているものとし、回転は自由とした。側面板については全面積を考慮し、フレームに対しては、たすき掛けの骨組としてモデル化している。前面パネルについてはリレー穴などがあるため実効断面を考慮している。

表2は計算による固有振動数を3.2で述べた実験によって求めた固有振動数と比較して示したものである。また振動モードの各座標軸方向成分の最大値を1に規格化した場合の刺激係数も表2に示した。図15は一～三次の振動モードの計算結果を図示したものである。表2の刺激係数が示すように一次振動は左右方向、二次振動は前後方向に励振されやすい。三次振動は実験では観測されていないが、ねじり振動のため刺激係数が小さいことおよび実験は20Hz以下を対象としていたことによるものと思われる。

全般的に固有振動数および振動モードは実験とよく一致し、計算コード解析が有効であることを示している。本項で示したような骨組構造が主体の盤については理論的振動解析が可能であり、したがって比較的簡単な電気品の耐震設計では、理論解析に適当な実験解析をおり込むことにより系統的、かつ効果的に耐震設計を進めることができる。

表2 制御盤の固有振動数

モード	固有振動数 (Hz)		刺激係数		
	計 算	実 験	前後方向	左右方向	上下方向
1	9.04	9	0	1.478	0
2	19.3	19	0.913	0	0.032
3	24.9	—	0	0.178	0

注：ただし刺激係数は変位モードのX, Y, Z軸成分(図14)中最大のものを1に規格化した場合のものである。

5. 結 言

原子力発電所における電気品類に対しては、以上述べてきたように慎重な耐震設計が行なわれ、安全性の確保に多くの努力がなされている。原子力発電の発展に伴い耐震設計にもますます精度と経済性の向上が望まれ、さらに詳細な実験および解析によって電気品耐震設計を行なうための資料を得る必要がある。また電気品の機能保持検討のための実験に際しては、実際の地震時の状態とは異なり大幅に安全側の条件を課しているが、これら実験条件についても実際の地震に近い条件によりさらに効率化を図る必要があるだろう。

耐震設計は広範囲にわたる内容を持っており、各分野の密接な協力が必要である。ここに述べたような実験においても関係電力会社などのご協力をいただいた。これらのご協力に感謝するとともにさらにいっそう耐震技術確立のために努力していきたいと念願する次第である。

参 考 文 献

- (1) 電気技基準調査委員会：原子力発電所耐震設計技術指針(1970 電気協会)
- (2) 通産省公益事業局：電力流通設備の地震対策(昭45 日本電気協会)
- (3) 落合、長山：日立評論 52, 887(昭45-10)