

# エレベーターの耐震性強化と実証試験

## Reinforcement and Vibration Tests of Earthquake-proof Ability of Elevators

昭和55年7月14日付けで建築基準法施行令の改正が公布となり、建築物の耐震規定の強化改訂とともにエレベーターについても耐震規定が盛り込まれた。更に、技術基準としての「エレベーター耐震設計・施工指針」が策定され、設計用震度のアップを含め耐震強化の方針が明確になった。これらを背景として、エレベーターの耐震強化構造の確立が急務となった。

日立製作所では、従来から進めてきたエレベーターの耐震性向上のための研究に加え、大形振動台及び反力壁を用いて耐震実証試験を行ない、各機器の振動特性を明らかにするとともに建築物の地震応答を考慮して強化構造を決定し、地震に対するエレベーターの安全性を確認した。

奈良俊彦\* Toshihiko Nara  
太田正寿\* Masatoshi Oota  
重田政之\*\* Masayuki Shigeta  
和田忠之\*\*\* Tadayuki Wada

### 1 緒言

昭和55年7月14日付けで建築基準法施行令の一部改正が公布となり、建築物の耐震規定が50年ぶりに強化改訂された。エレベーターに対しても宮城県沖地震に代表される従来の被害例及び建築物の耐震性を考慮して耐震規定が盛り込まれ、強化の方針が明確になった。更に、技術基準として「エレベーター耐震設計・施工指針<sup>1)</sup>」が策定され、耐震性に対する考え方及び具体策が示された。一方、エレベーターは都市の発展、建築物の高層化、大形化に伴い今や不可欠の建築設備となり、人命を預かる公共的性格をもつ交通機関として、安全性の確保が至上の命題となっている。

このような背景のもとに、日立製作所では従来から進めてきたエレベーターの耐震性向上のための研究<sup>2)</sup>に加え、地震に対する安全性を確認するために大形振動台、及び反力壁を用いた耐震実証試験を実施し、耐震強化構造及び耐震設計施工方法の確立を図った。この論文では、エレベーターの耐震性強化の考え方と実証試験について概要を紹介する。

### 2 エレベーターの耐震性強化の動向

近年、エレベーターに多くの被害をもたらした事例として、アメリカでは1971年(昭和46年)に発生したサンフェルナンド地震、我が国では昭和53年に発生した宮城県沖地震があり、従来とは比較にならない多数の被害が発生したことは記憶に新しい。これらの地震の被害状況をみると、直接被害としてつり合いおもりの脱レールがその半数以上を占め、その他に機械室設置品の移動又は転倒、ロープ類の引っ掛かり損傷などがあり、更に、高架水槽の破損などによる冠水又は浸水、コンクリートの損傷などによる間接被害が目立っている。

エレベーターの耐震性強化の動向を図1に示す。従来は旧建築基準法施行令第88条に示された水平震度<sup>\*1)</sup>0.2の地震力をベースとして耐震設計を行なってきた。しかし、社団法人日本エレベータ協会では、前記のサンフェルナンド地震での

エレベーターの被害などを参考に、自主基準として昭和47年に「昇降機防災対策標準<sup>3)</sup>」を制定し、エレベーター業界共通の指針としてエレベーターの耐震性強化に努めてきた。

一方、建築物でもかなりの被害が生じたこと、各種の地震記録の蓄積などから、従来の耐震規定が必ずしも十分なもの

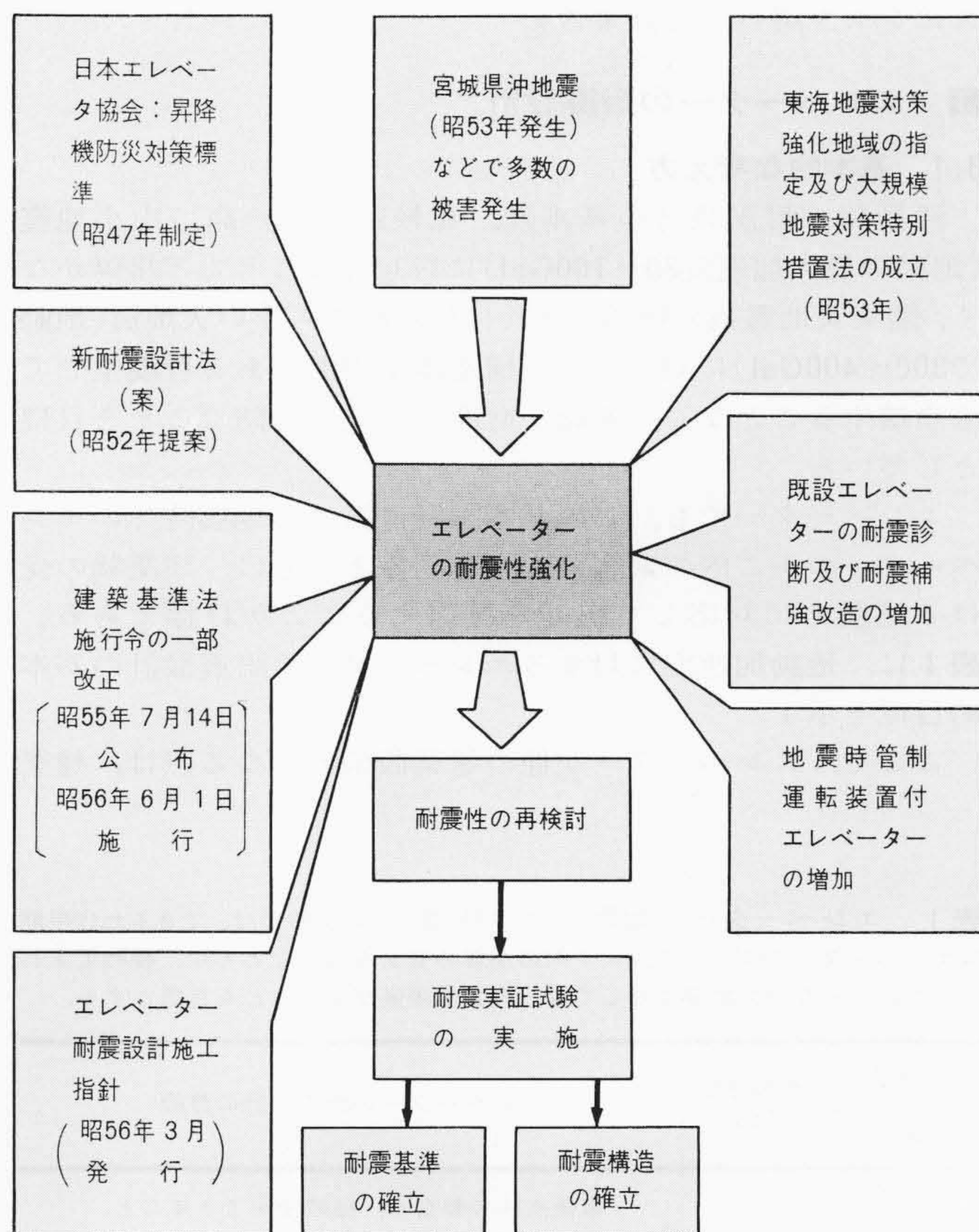


図1 エレベーターの耐震性強化の動向 社会的に地震対策が取り上げられ、建築基準法施行令の改正により、エレベーターの耐震性強化の方針が明らかとなった。

\*1) 「震度」：加速度を重力の加速度( $G=980\text{cm/s}^2$ )で除した値を示す。  
水平震度0.2は加速度0.2Gを意味する。



ではないことが明らかとなり、超高層建築物の実現を可能とした動的設計法、振動工学や構造計算での解析手法の進歩などを背景として、建設省は昭和47年度から官・学・民一体となった研究開発を進め、昭和52年に「新耐震設計法(案)」としてその成果を公表した。

昭和55年7月14日付政令により建築基準法施行令の一部が改正され、上記の「新耐震設計法(案)」の内容を盛り込み、建築物の耐震設計基準が大幅に強化改訂された。この中で建築設備について、最近の地震被害状況にかんがみ、配管設備及びエレベーターに関する耐震規定が新たに設けられた。エレベーターについては、建築基準法施行令第5章の3第2節(昇降機)に次の4項目が追加された。

- (1) 主索(ロープ)が綱車から外れないようにすること。
- (2) かご又はつり合いおもりがガイドレールから外れないようにすること。
- (3) ロープ、テールコードなどが昇降路内の突出物に引っ掛からないようにすること。
- (4) 機械室設置品が転倒又は移動しないようにすること。

これらの耐震規定(昭和56年6月1日施行)の統一的な解釈と運用を図るための具体的な技術基準として、建設省委託による財団法人日本建築センター「建築設備耐震構造調査委員会」でまとめられた指針をもとに、「エレベーター耐震設計・施工指針」(以下、「指針」と略す。)が策定され、昭和56年3月に発行された。なお、この「指針」は高さ60m以下の建築物に設置するエレベーターを対象とするものである(高さが60m/minを超えるものについては、後述するようにフロアレスポンスを用いて設計する)。

3 エレベーターの耐震設計

3.1 基本的な考え方

建築物の耐震設計の基本は、比較的頻度の高い中小地震(地動の最大加速度80~100Gal)に対してはほとんど損傷がなく、関東大地震級の極めてまれにしか起こらない大地震(地動で300~400Gal)に対しては、構造体の損傷がある程度生じても崩壊することなく、人命、財産への被害を防ぐことを目標としている。

エレベーターでも、この基本方針に沿って地震時でのエレベーターのかご内の乗客の安全を図るとともに、建築物の受ける地震力に対応して機能を確保することが目標である。

表1に、地動加速度に対するエレベーターの耐震設計の基本的目標を示す。

ここで、エレベーターが他の建築設備と異なる点は、建築

表1 エレベーターの耐震設計の目標 地震時では、できるだけ早期にエレベーターを停止して、かご内の乗客の安全を図るとともに、極めてまれにしか起こらない大地震に対しては、大きな損傷がないことを目標とする。

| 相当する<br>気 象 庁<br>震 度 階 | 地動加速度<br>(Gal) | エレベーターの耐震設計の目標                                 |                              |
|------------------------|----------------|------------------------------------------------|------------------------------|
| 3(弱震)                  | 25             | 事後点検の要なく、継続使用できること。                            |                              |
| 4(中震)                  | 40             | 乗客に危害が及ばないようにする。事後点検は要するが、主要構造部には被害が生じないようにする。 | 地震発生時、速やかにかごを最寄り階に停止し、戸を開ける。 |
| 5(強震)                  | 80             |                                                |                              |
| 6(烈震)                  | 250            |                                                |                              |
| 7(激震)                  | 400            | 機器に若干の被害が生じても、乗客の安全を保つようにする。                   |                              |

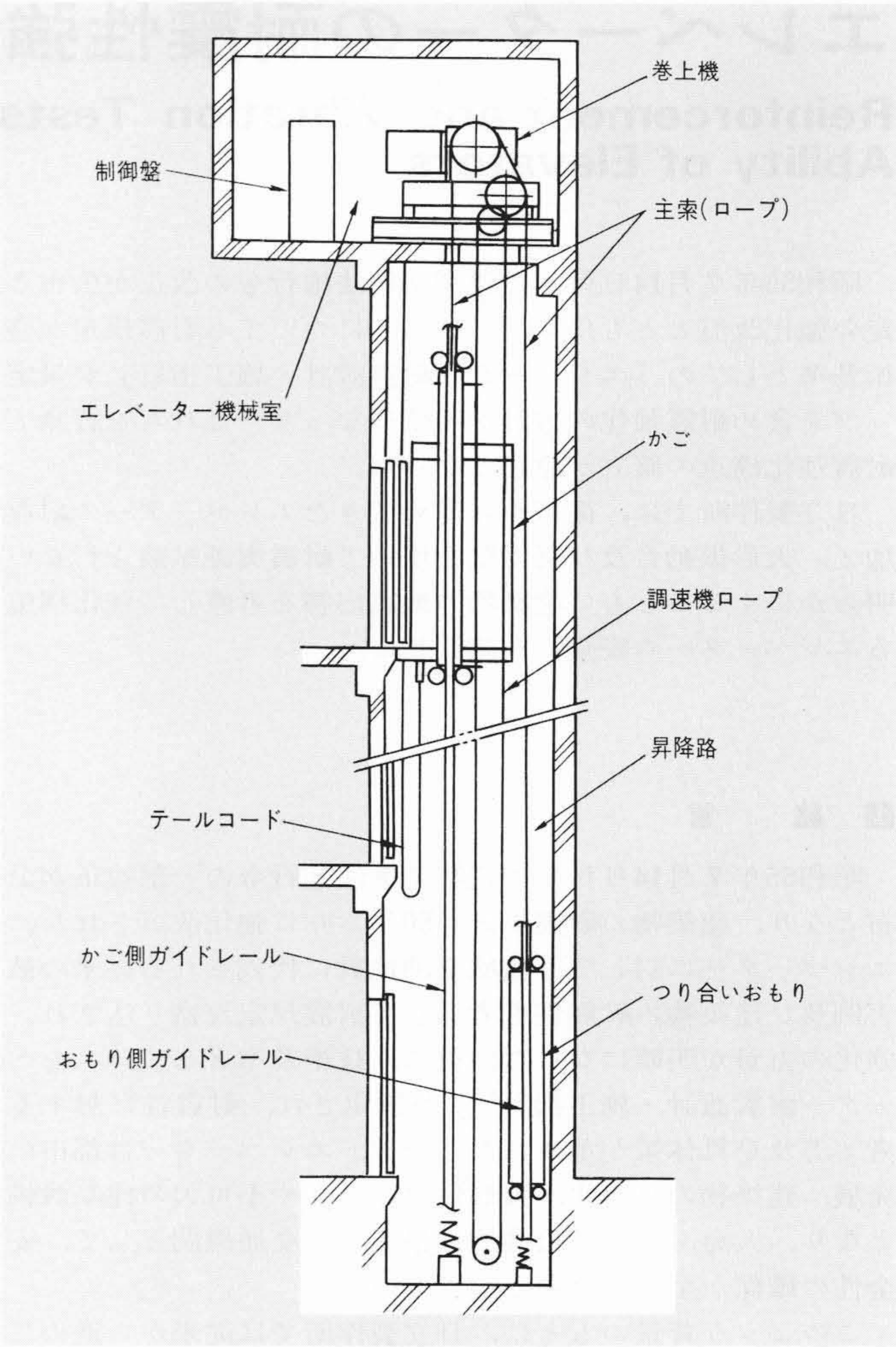


図2 エレベーターの概略構造 エレベーターは、かごやつり合いおもりのようにガイドレールに沿って移動する機器と、ロープ、テールコードなどのように案内装置のない長尺懸垂物を使用している。

物内にあって人を上下に輸送する装置であり、図2に示すように、機能上かごやつり合いおもりのようにガイドレールに沿って移動する機器と、ロープやテールコードなどのように案内装置のない長尺懸垂物を使用していることである。したがって、エレベーターの耐震設計は建築物を含めたこれら要素の特性を十分考慮して、次の3点について実施する。

- (1) 定められた設計震度に基づく地震荷重に対して、機器の転倒や移動がなく、危険な変形が生じないようにする。
- (2) 地震時のロープやテールコードなどの長尺懸垂物の挙動は、建築物の主として水平動により派生する現象で、建築物の振動特性、エレベーターの昇降行程の大小などに左右され極めて複雑である。また、昇降路内の突出物を皆無にすることは現実には困難である。したがって、引っ掛かるおそれのある突出物に保護措置を施すものとする。
- (3) 地震時には昇降路や機械室の建築物の損傷や電源系統の故障など、外部要因によってもエレベーターの運行に支障を生ずることが考えられ、万全を期すことは困難である。このような観点から、地震時にはエレベーターをできるだけ早く最寄り階に停止させ、乗客の安全な避難を図るとともに機能を確保し地震後の復旧を容易にするため、運行上の地震対策として地震感知器との連動による「地震時管制運転装置」を設けることを推奨する。



3.2 設計用震度と地震力

エレベーターに作用する設計用地震力は、次式により求められる。

水平地震力  $F_H = K \cdot W$  .....(1)  
鉛直地震力  $F_V = K' \cdot W$  .....(2)

ここで  $W$ は機器の重量、 $K$ は水平震度、 $K'$ は鉛直震度( $K' = \frac{1}{2} \cdot K$ )を示す。また、「指針」により地震力は、機器の重心に水平及び鉛直同時に作用するものとする。

(1) 高さが60m以下の建築物に設けるエレベーターの設計用震度

「指針」に定められた設計用震度を表2に、また、図3に機械室の地上高さと水平震度との関係を示す。これは建築物の耐震設計の基本方針に合わせ、地盤面の加速度を従来の0.2Gを0.3G(「震度」表現では0.3)に引き上げ、機器の設計加速度も建築物の床応答倍率(屋階で約3倍)を考慮して従来の約2倍としたもので、建築設備の耐震設計に共通である。

(2) 高さが60mを超える建築物に設けるエレベーターの設計用震度

高さ60mを超える高層建築物は、日本建築センターの構造評定を受け、建設大臣の承認を得る必要がある。したがって、建築物ごとに地震応答解析が行なわれており、それによって得られる応答加速度、その他の資料に基づいて設計用震度を決定するものとする。

図3に相当する建築物の地震応答解析による資料として、「フロアレスポンス」がある。これは、建築物の地盤に地震波が作用したとき、建築物はその振動特性に応じた応答を示すが、その応答加速度の最大値を各階ごとに求めたものである。高さ60mを超えるいわゆる高層建築物にあっては図3とは異なり、中、上層階の応答加速度は必ずしも下層階に比べて大きいとは限らない。表2の震度によれば過大な設計となる場合があり、建築物ごとのフロアレスポンスにより設計するほうが合理的である。この場合、基準となる地盤面の震度は図3に合わせ0.3として各階の設計用震度を決定する。

(3) フロアスペクトルによる設計用震度

前記(1)及び(2)による計算は静的な取り扱いであるが、建築物の床に設置した機器が地震時に示す応答は床のそれとは一致しない場合があり、床と機器の振動特性を考慮して動的に取り扱う必要がある。このときの設計用震度は、次式で示される。

$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2$  .....(3)

ここで  $K_0$ : 基準震度(0.3とする。)  
 $K_1$ : 機器の設置階での建築物の地震応答倍率  
 $K_2$ : 設置床に対する機器の地震応答倍率

このための方法として、各階の床応答スペクトル(フロア

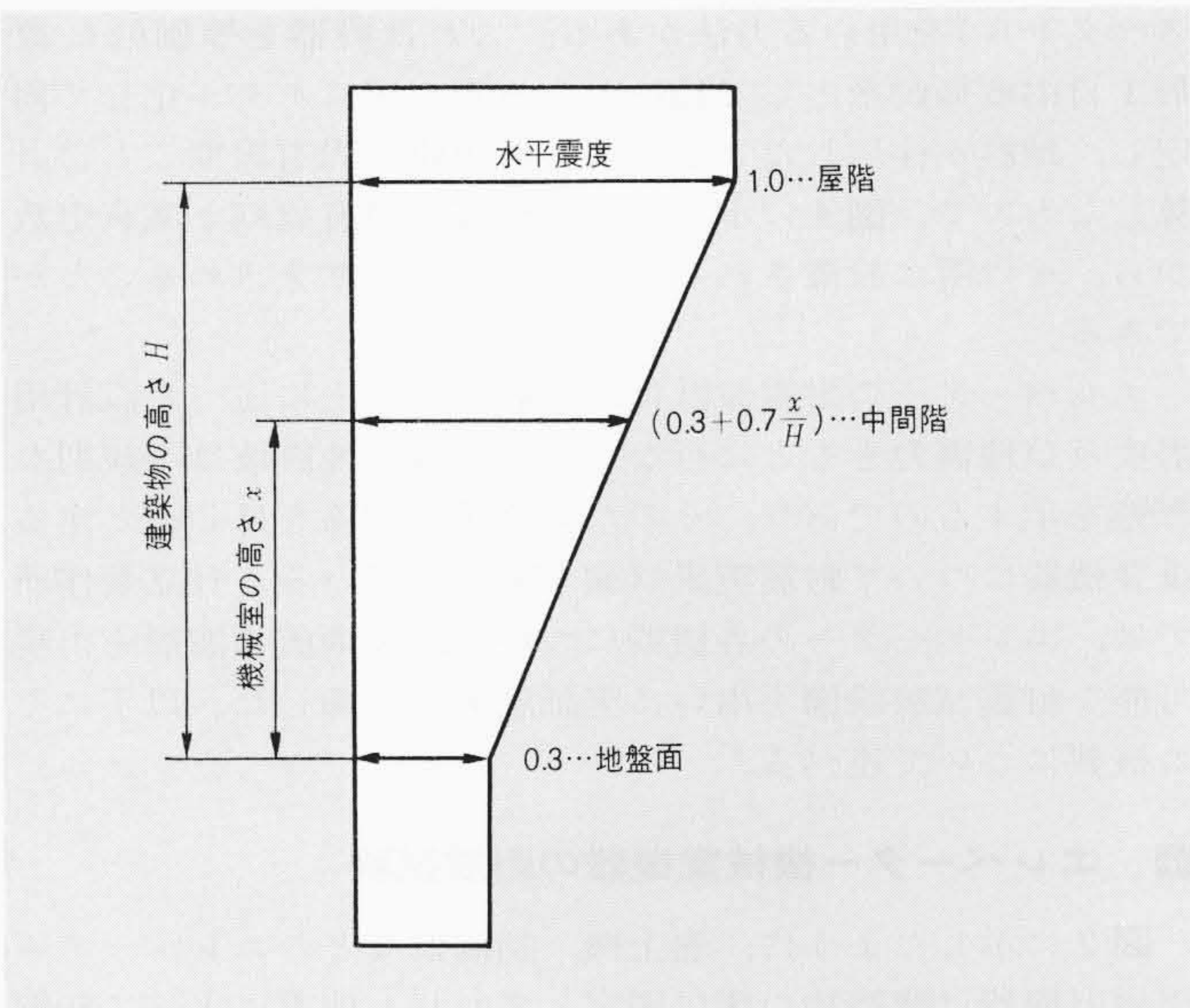


図3 機械室の地上高さと水平震度の関係 従来の建築基準法施行令での震度は、高さ16m以下では0.2、高さ4m増すごとに0.01加えるものとした。今回の改正で大幅にアップとなり、建築設備の耐震設計に共通である。

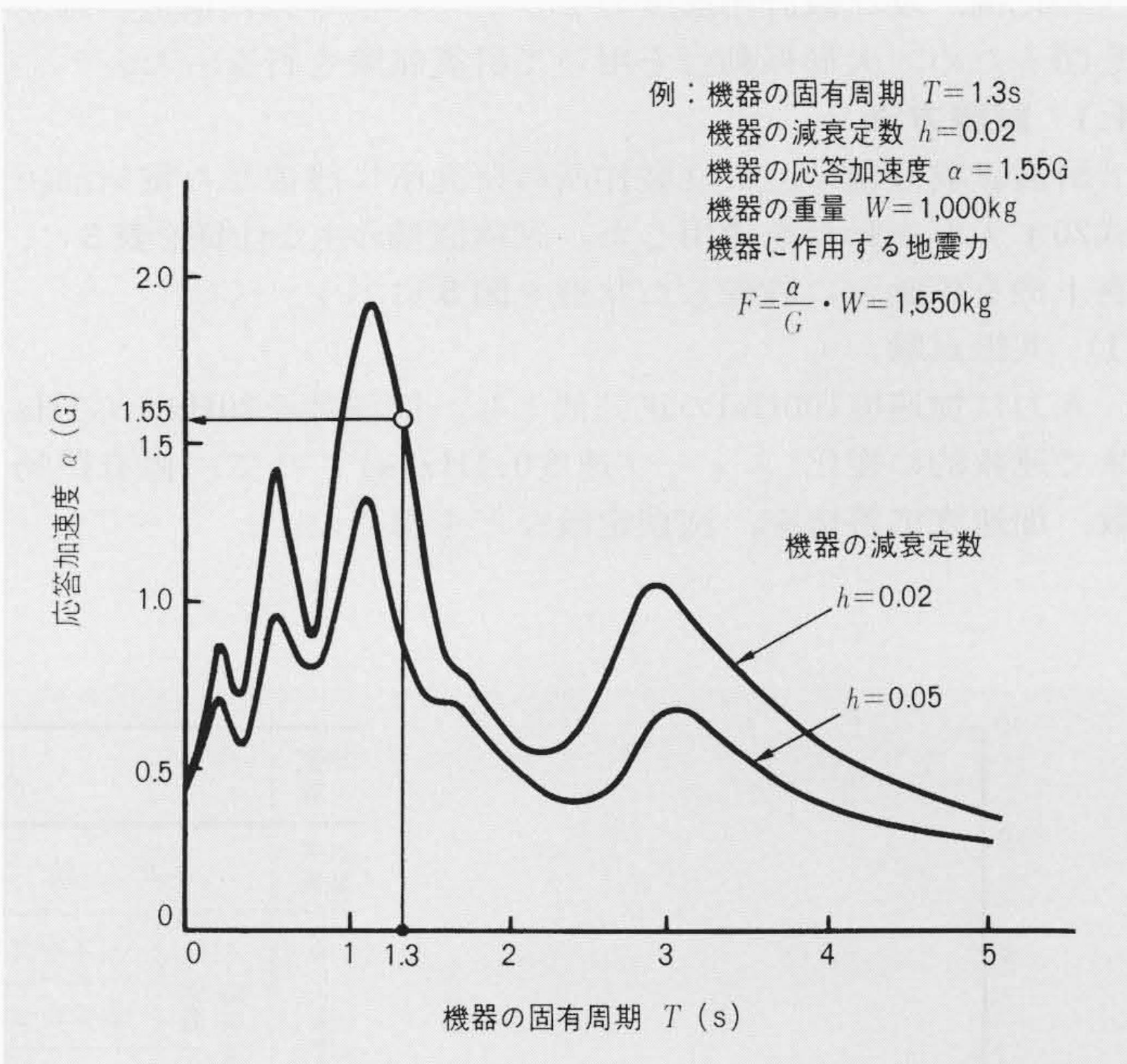


図4 フロアスペクトルによる応答加速度の求め方 機器の固有周期及び減衰定数が既知であれば、フロアスペクトルから機器の応答加速度を知ることができ、地震力を計算できる。

表2 エレベーターの設計用震度 水平震度は従来の約2倍に引き上げられた。頂部、中間及び下部機械室はそれぞれ建築物の屋階、中間階及び1階又は地階にある場合を示す(図3参照)。

| 対象機器     | 乗用・人荷用・寝台用エレベーター        |                                              | 荷物用・自動車用エレベーター          |                                              | (参考)従来のエレベーター |         |
|----------|-------------------------|----------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------|---------------|---------|
|          | 水平震度 K                  | 鉛直震度 K                                       | 水平震度 K                  | 鉛直震度 K                                       | 水平震度 K        | 鉛直震度 K' |
| 昇降路内の機器  | 0.6                     | ——                                           | 0.45                    | ——                                           | 0.3           | ——      |
| 頂部機械室の機器 | 1.0                     | 0.5                                          | 1.0                     | 0.5                                          | 0.5           | 0.5     |
| 中間機械室の機器 | $0.3 + 0.7 \frac{x}{H}$ | $(0.3 + 0.7 \frac{x}{H}) \times \frac{1}{2}$ | $0.3 + 0.7 \frac{x}{H}$ | $(0.3 + 0.7 \frac{x}{H}) \times \frac{1}{2}$ |               |         |
| 下部機械室の機器 | 0.3                     | 0.15                                         | 0.3                     | 0.15                                         |               |         |

注：略語説明 x(機械室の高さ)、H(建築物の高さ)



スペクトル)を用いる方法がある。これは機器を等価的に線形1自由度振動系として建物のある階の床にモデル化して固定し、地震が作用したときの応答最大値を固有周期ごとに計算したもので、図4に示すように機器の固有周期と減衰定数から、その階に設置される機器の設計用震度を求めることができる。

エレベーターの耐震設計は、一般には以上に述べた設計用震度及び地震力をもとに行なうが、一方、地震波は不規則な形態を示すものであり、そのため原子力関係をはじめとする重要機器について耐震実証試験を実施している。日立製作所では、エレベーターの各機器について、大地震の波形を再現可能な耐震試験設備を用いて実証試験を実施した。以下にその概要について述べる。

4 エレベーター機械室機器の耐震試験

図2に示したように、巻上機、制御盤などのエレベーター機械室機器は建築物の床に固定しており、地震によって転倒又は移動しないように設計施工しなければならない。これらの耐震計算は、前記したように機器の重心に地震力が作用するものとして行なうのが一般的であるが、巻上機での防振構造品、制御盤での箱体品などは形状的にロッキング振動などを生じやすい。そこで、日立製作所では各機器の地震応答特性の把握、及び設計用震度のアップに対する強化構造の確立を図るため、大形振動台を用いて耐震試験を行なった。

4.1 試験方法

耐震試験設備は、日立製作所の研究所に設置した電気油圧式20t大形振動台を使用した。試験設備の主な仕様を表3に、巻上機を振動台に設置した状態を図5に示す。

(1) 共振試験

入力加速度100Galの正弦波とし、周波数を20Hzから1Hzまで連続的に変化(スweep速度0.1Hz/s)させて、固有振動数、加速度応答倍率、減衰定数などを求めた。

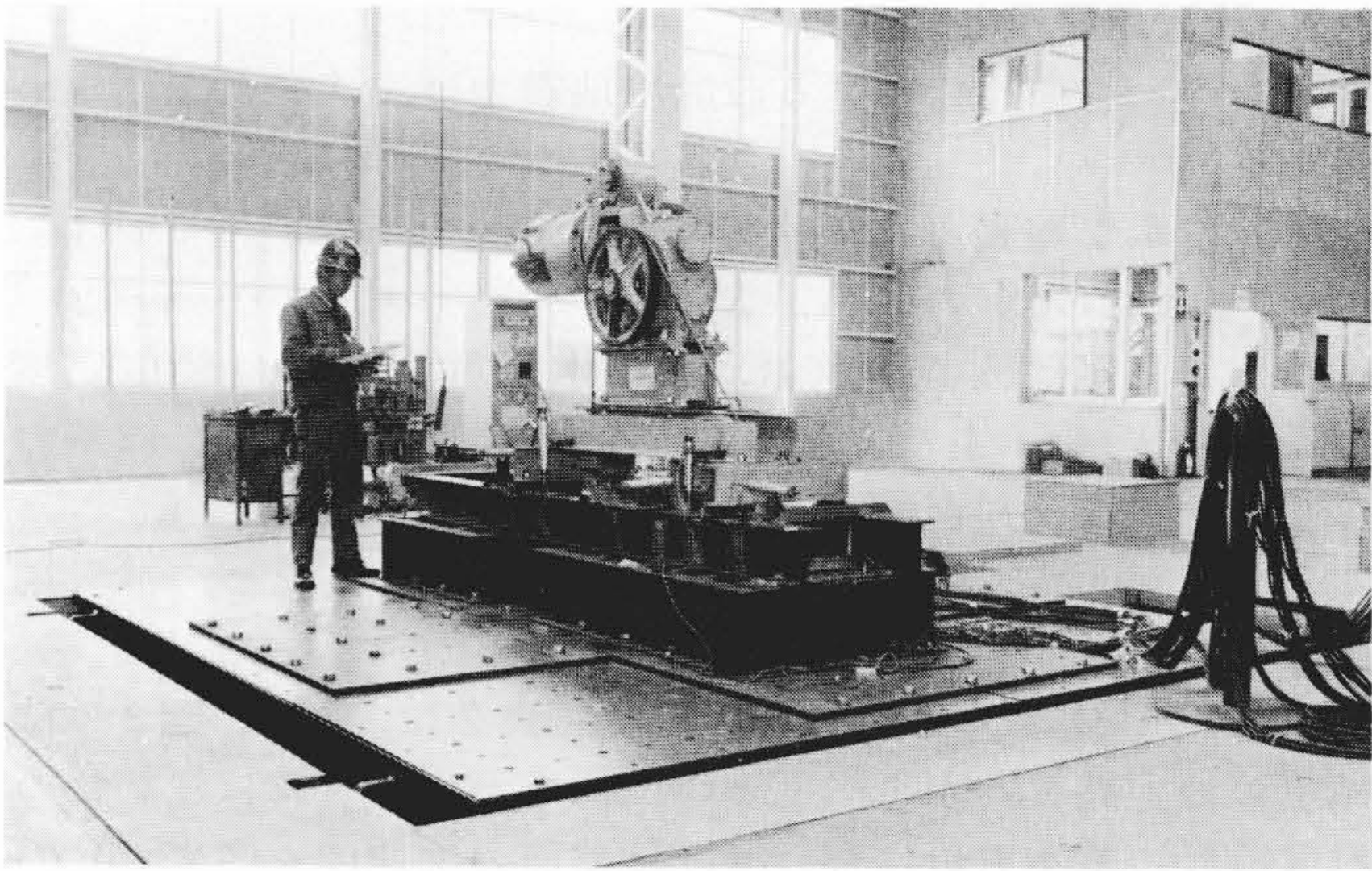


図5 巻上機の振動台設置状態 4m×4mの振動台に、実際と等価な条件で試験品を設置して、共振特性及び強度確認のための加振試験を実施した。

表3 振動台の主な仕様 高応答性の大容量サーボ弁及び静圧継手の採用並びに加速度制御により、精度の良い1G以上の地震波形を再現できる大形耐震試験用設備である。

| 項 目         |     | 水 平       | 垂 直      |
|-------------|-----|-----------|----------|
| 最 大 積 載 荷 重 |     | 20t       |          |
| 台 寸 法       |     | 4 m × 4 m |          |
| 台 可 動 部 重 量 |     | 9 t       | 11 t     |
| 最 大 振 幅     |     | ±15cm     | ±7.5cm   |
| 最 大 速 度     | 単 独 | ±100cm/s  | ±50cm/s  |
|             | 同 時 | ±70cm/s   | ±35cm/s  |
| 最 大 加 速 度   | 単 独 | ±2 G      | ±2 G     |
|             | 同 時 | ±1.5G     | ±0.75G   |
| 加 振 周 波 数   |     | 0.1～30Hz  | 0.1～30Hz |

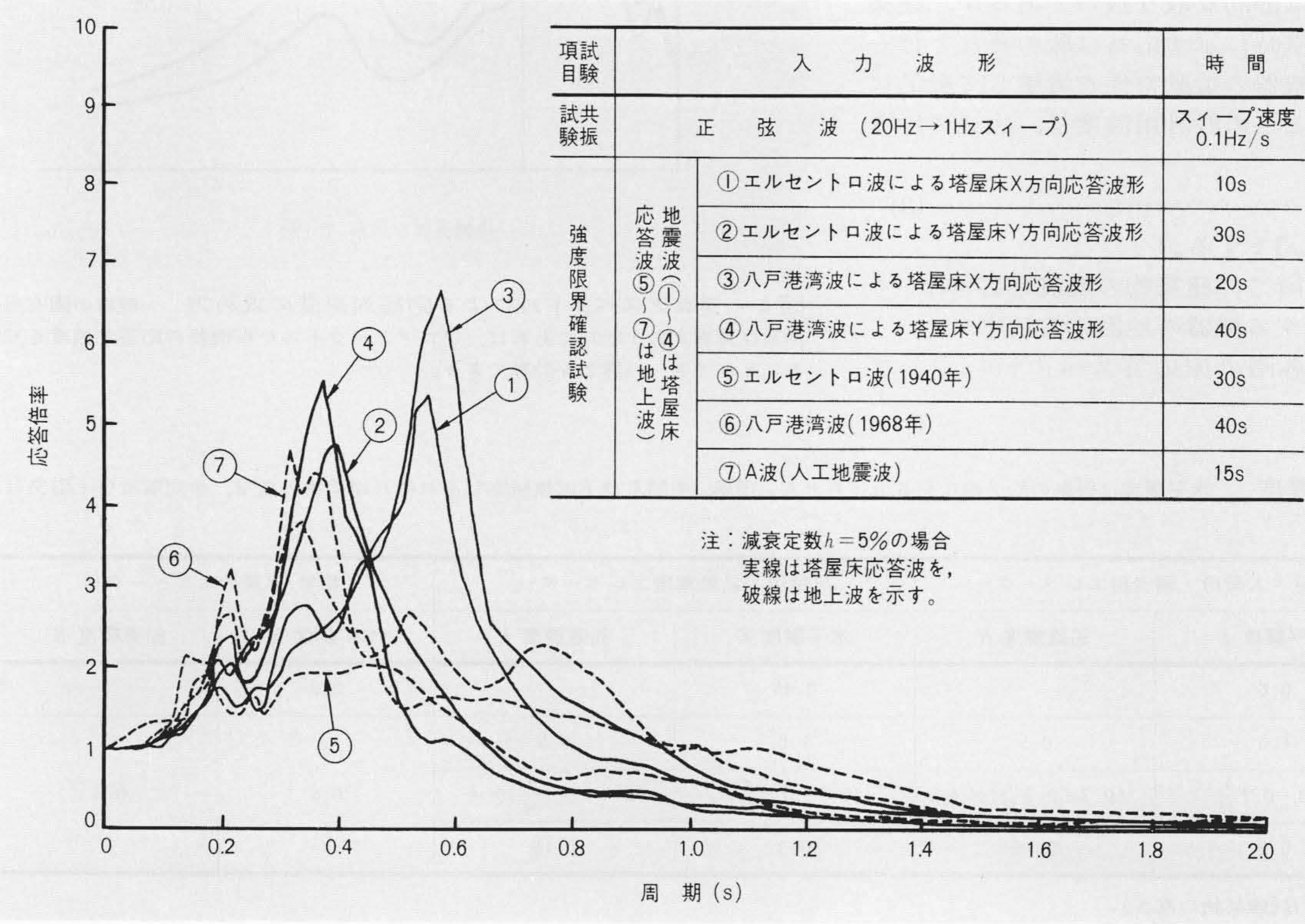


図6 加振台入力波とスペクトル ①～④は地震応答解析によるフロアレスポンスを、⑤、⑥は観測波を、⑦は人工地震波を示す。それぞれのカーブは入力波を床応答として、計算により求めたフロアスペクトルである。



## (2) 強度限界確認試験

加振台への入力波として、周期成分を広く選択するため、建物の固有周期成分が卓越する床応答波(フロアレスポンス)と比較的広い周期成分を含む地上波を選択し、図6に示す⑦波を採用した。各地震波の最大加速度は1.0~1.5Gとして加振を行ない、このときの加速度、変位、応力などを測定して各機器の動作及び強度を確認した。

## 4.2 試験結果及び検討

### (1) 各機器の固有振動数と加速度応答倍率

図7に試験により得られた各機器の固有振動数と地震波入力に対する重心相当位置の加速度応答倍率[(3)式の $K_2$ に相当する。]を示す。なお、同図中の曲線は図6に示した地震波のフロアスペクトルの包絡線である。

建屋床への振動絶縁のため防振ゴムで支持をする巻上機、電動発電機、油圧パワーユニットなどの固有振動数は3~5Hz程度と比較的低く、共振時には大きな変位が発生しやすいため防振ゴムのストッパ(振れ止め)を設けることが有効である。また、加速度応答倍率としては2~3倍程度である。

一方、建屋床に直接固定する制御盤、フロアコントローラなどの箱体品の固有振動数は、6~10Hz若しくはそれ以上であり、加速度応答倍率は1.5~2倍程度である。

### (2) 建築物の地震応答特性に対する検討

エレベーターの機械室機器は、一般に建築物の上部に設置される。一方、地震時には建築物の上部は一次固有周期で応

答し、その周期 $T$ は高さを $H(m)$ とすると一般のコンクリート構造の建築物で、 $T=0.02H(s)$ で示される。そこで、一般にエレベーターが設置される6階床( $H=18m$ )以上の建築物では $T \geq 0.36$ 秒、すなわち固有振動数( $\frac{1}{T}$ )は2.8Hz以下であるから、固有振動数が3Hz程度の構造品は共振現象に十分注意する必要がある。一方、一般に長周期成分が卓越する高層建築物に対しては、共振する可能性はほとんどないといつてよい。

### (3) フロアスペクトルに対する検討

図7に示した曲線は、前記したように地震波をフロアレスポンスとし、機器を線形1自由度振動系(減衰定数5%)として固定したときの応答最大値を、固有周期ごとに計算したフロアスペクトルである。一方、試験によって得た測定点がほぼその線上にあることから、図4に示したように機器の固有周期と減衰定数が既知であれば、フロアスペクトルから加速度応答倍率、すなわち設計用震度を求めることができる。

## 5 ガイドレール関係の耐震試験

地震時のエレベーター被害中、つり合いおもりの脱レール件数はほぼその半数を占め、かつ、かごとの衝突により人身事故につながる可能性があるため、ガイドレール関係は最も耐震性を重視しなければならない。日立製作所では、これまでも建築物とエレベーター系をモデル化した解析、及び実機による加振試験を進めてきたが、今回、設計用震度が引き上げられたことに対して強化構造の確立を図るため、日立製作所の研究所に設置した反力壁を用いて耐震試験を行なった。

図8に試験装置を示す。反力壁に固定した4台の油圧加振器により、レールの支持点(3スパン4点支持)を加振して実際と等価な条件とし、そのときのレールの応力、たわみ、つり合いおもり及びかごの応答、並びにレールに作用する力などを測定した。入力波として正弦波及び地震波を使用した。

つり合いおもり及びかごとレールとの間には、滑りやギャップによる集中非線形要素をもっているため複雑な振動応答を示すが、レールに発生する最大応力及びたわみは、レールを3スパン4点支持はりの中央に荷重 $P$ が作用するとして、次式により計算した値とほぼ一致することを確認した。

$$\text{最大応力 } \sigma = \frac{7}{40} \times \frac{Pl}{Zx} \quad \text{最大たわみ } \delta = \frac{11}{960} \times \frac{Pl^3}{EIx} \cdots (4)$$

ここで  $l$  : レールブラケットの間隔(レールの支持点)

$Zx$  : ガイドレールの断面係数

$E$  : ガイドレールの縦弾性係数

$Ix$  : ガイドレールの断面二次モーメント

ガイドレールの耐震構造として、レール及びその固定間隔の選定、ガイドシューの外れ止め(レールへの掛かりしろ)、レールに作用する慣性力を分散低減する効果をもつつり合いおもりの中間ストッパ、左右1対のレールを連結して広がり防止するタイブラケットなどがあるが、それぞれについて地震波入力0.6~1.0Gに相当する地震力に対して耐震性を確認した。

## 6 ロープなどの長尺懸垂物の耐震試験

エレベーターの昇降路内には、図2に示したようにかごの昇降に伴って移動する各種のロープやテールコードなどの長尺懸垂物がつり下げられており、地震の際の建築物の揺れの影響を受けてこれらが振れ、周囲の機器に接触して異常音が発生したり、引っ掛かって損傷することがある。特に長周期の揺れが持続しやすい超高層ビルのエレベーターで顕著で

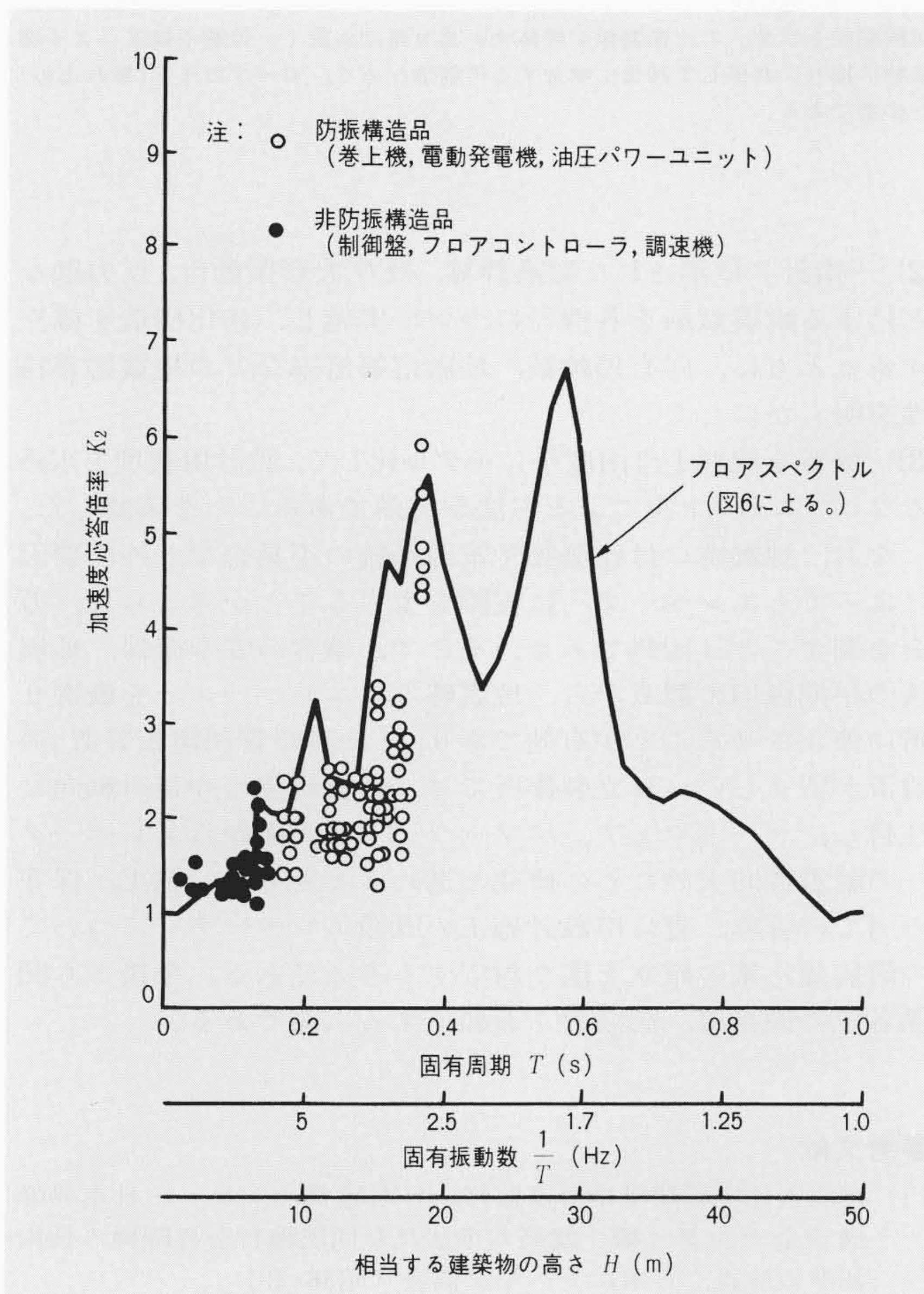


図7 機器の固有振動数と応答倍率 防振構造品の固有振動数は3~5Hzで応答倍率 $K_2$ は2~3倍、非防振構造品の $K_2$ は1.5~2倍である。なお、機器の固有振動数は設置する建築物の固有振動数に一致しないように選定する必要がある。



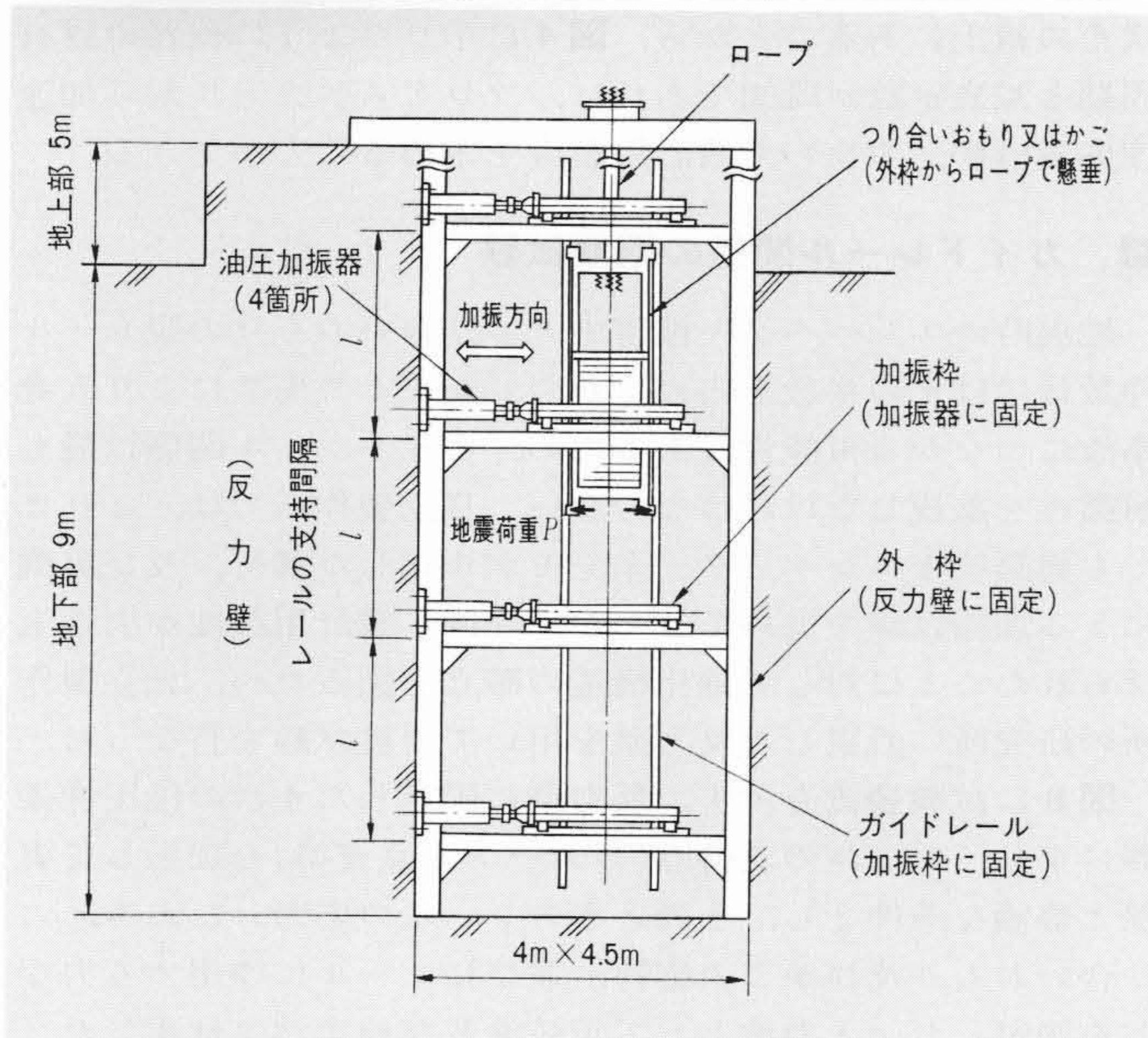
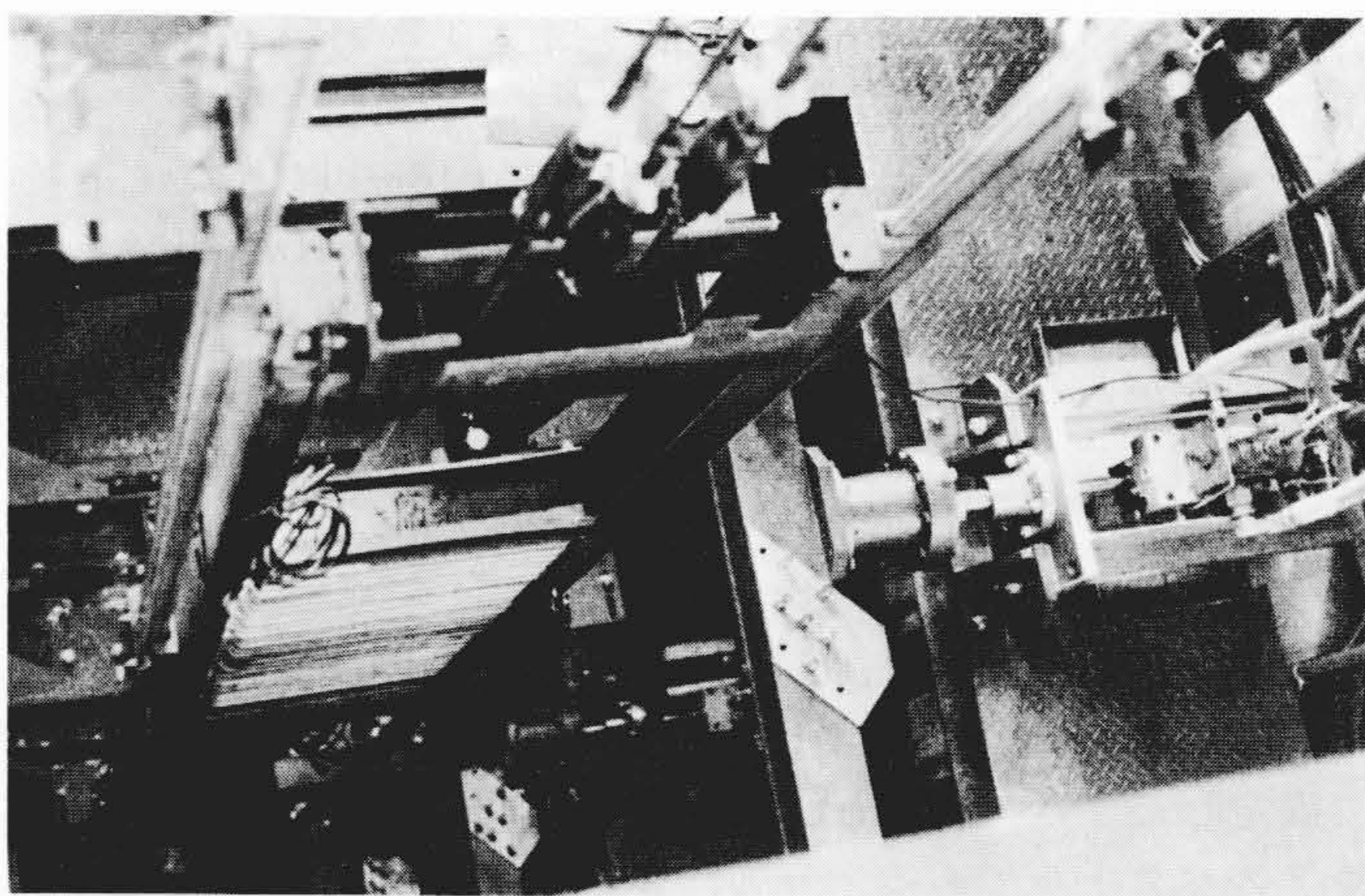


図8 ガイドレールの耐震試験装置 つり合いおもり又はかごをロープで懸垂し、ガイドレールを加振棒を介して反力壁に固定した加振器で加振することにより、実際と等価な条件とした。

ある。

そこで、これらの長尺懸垂物の振動特性を明らかにするため、加振試験を行なった。入力波としては、高層ビル頂部の地震時の揺れは建築物の固有周期が卓越し、かつ持続する傾向にあるため正弦波を使用した。

図9に調速機ロープの共振特性の例を示す。建築物の固有周期に近い二次モードでは振幅応答倍率は20倍程度に共振する可能性があり、これを防止するために振れ止め(ロープガイド)が有効である。

以上の試験結果及び建築物の変位とのシミュレーション解析から、地震時だけでなく強風時にも揺れ(変位)の大きい高層建築物で特に問題であることが明らかとなり、各部の振れ止め、外れ止めなど建築物の高さや構造に対応した保護措置を確立した。

## 7 結 言

以上、建築基準法施行令改正に伴うエレベーターの耐震性強化に対する考え方、及び耐震実証試験の概要を中心に紹介した。それらの内容をまとめると、

- (1) エレベーターの耐震設計は建築物に準じ、地動加速度0.3Gをベースとして設置床及び機器の応答倍率を考慮して行なう。

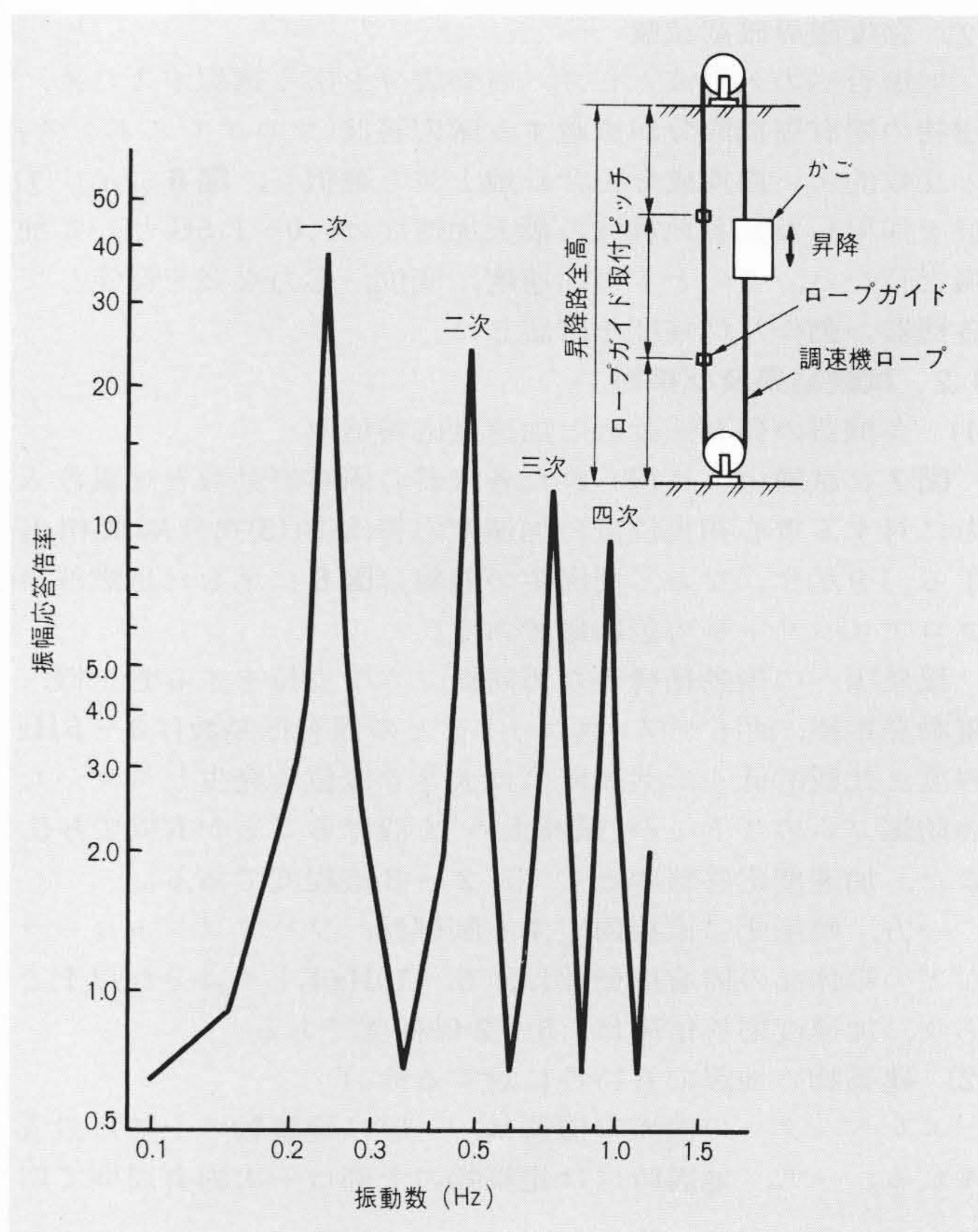


図9 調速機ロープ(φ10)の共振特性 ロープ長さ74mの場合の加振試験結果を示す。二次振動数が建築物の固有周期に近く、地震や強風による建築物の揺れに共振して20倍に増加する可能性があり、ロープガイド(振れ止め)が必要である。

- (2) 「指針」に示された耐震計算、及び大形振動台、反力壁などによる耐震試験を各機器について実施し、強化構造を確立するとともに、固有振動数、地震応答倍率などの地震応答特性を明らかにした。

- (3) 機器を線形1自由度系にモデル化して、設計用震度を求めるフロアスペクトルによる方法が有効であることを確認した。

なお、地震時には建築物や電源系統の不具合など外部要因によってもエレベーターに支障を生ずることが考えられ、万全を期することは困難である。そこで、乗客の安全確保、地震後の早期復旧の観点から、地震時にはエレベーターを最寄り階に停止させることが有効であり、「地震時管制運転装置」の設置が望ましい。日立製作所では、耐震研究の今後の動向に注目し、ハードウェア、ソフトウェアの両面からエレベーターの耐震性向上のための研究を進めるとともに、施工、保守の面での管理、更に旧設計施工の既設エレベーターについての耐震強化策の確立を図り対応する考えである。今後とも関係各位の御指導、御協力をお願いする次第である。

## 参考文献

- 1) 建設省住宅局建築指導課監修、日本建築センター・日本昇降機安全センター編：建築基準法及び同法施行令昇降機の技術基準の解説、日本エレベーター協会(昭56-3)
- 2) 奈良、外：エレベーターの耐震性能の向上、日立評論、61、7、505～510(昭54-7)
- 3) 日本エレベーター協会：エレベーター防災対策標準、JEAS-A 405A(昭52-12)