

エレベーターの耐震性能の向上

Improvement of Earthquake-proof Ability of Elevators

昭和53年6月12日に発生した宮城県沖地震は、仙台市を中心に建物を含め多大の被害をもたらした。これに伴いエレベーターも、つり合おもりの脱レールをはじめとして、従来にない多数の被害が全体として発生した。また、東海大地震などの発生が予想される昨今、ビルの縦の交通機関として重要な役割をもつエレベーターの耐震性向上を図ることが急務である。

日立製作所では、貴重な被災経験をもとに、建物の地震応答を考慮したエレベーターシステムのシミュレーション解析、強度及び動作状態の実験による検証を行ない、ガイドレールの耐震計算式、つり合おもりの中間ストップなど、各部の耐震構造を確立し耐震性能の改善を図るとともに、乗客の安全確保のための地震管制運転方式を確立した。

奈良俊彦* *Nara Toshihiko*
 和田忠之* *Wada Tadayuki*
 重田政之** *Shigeta Masayuki*
 小倉純一*** *Ogura Jynichi*

1 緒言

昭和53年6月12日に発生した宮城県沖地震は、仙台市などを直撃し(震度階5)、建物を含め都市全域に多くの被害をもたらしたことは記憶に新しい。エレベーターも他の建築設備と同様に、今までに経験した地震とは比較にならない多数の被害が全体として発生した。このような状況下で一方では、新耐震設計法(案)を基礎とした政令改正の準備、大規模地震対策特別措置法の成立、東海地震対策強化地域の指定などの地震対策が進められている。エレベーターは、今やビルの縦の交通機関として重要な社会的役割をもち、機能の向上とあいまって安全性の向上、とりわけ耐震性の向上を図ることが急務になっている。

このような背景のもとに、日立製作所では、貴重な被災経験に対する分析、超高層ビル用エレベーターを中心とする耐震・耐風研究、防災拠点向け耐震増エレベーターの開発¹⁾、更に設置台数も多く被害の多く発生した中低層ビルに設置される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、耐震基準を十分満足できる状況で運用を行なっている。この論文では、これまで進めてきたエレベーターの耐震性向上策について概要を紹介する。

2 地震によるエレベーターの被害と教訓

我が国の地震によるエレベーターの被害は、北海道十勝沖地震(昭和43年)、八丈島地震(昭和47年)、伊豆沖地震(昭和49年)などの震度階4~5程度の地震によって発生しているが、被害件数も少なく、その程度も小規模なものであった。一方、アメリカでは、昭和46年にサンフェルナンド地震が発生し、都市型地震としてロサンゼルス市を中心に耐震性の低い多数のエレベーターが大きな被害²⁾(つり合おもりの脱レールに関するものだけで1,261件)を受け、業界はもちろん、社会的に大きな問題となった。その後、カリフォルニア州(昭和51年)、ロサンゼルス市(昭和50年)で耐震に関する条例が制定され、既設のエレベーターを含め、地震対策が実施されつつある。また、我が国でも、昭和47年9月に日本エレベーター協会標準(JEAS)が定められ、これがその後のエレベーターの耐震設計指針となっている。

昭和53年、相次いで発生した伊豆大島近海地震、宮城県沖地震、宮城県沖地震はいずれも震度階5の強い地震で、特に仙台市を直撃した宮城県沖地震は都市型地震として、人的・物的に大きな被害をもたらした。物的被害のうち、エレベーターでも宮城県内の設置台数1,921台に対して365台が被害を受け、そのうち、つり合おもりの脱レールが161台に発生し、直接被害の約半数を占めた。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(45台)が目立った。また、多数のつり合おもりが脱レールしたにもかかわらず、かごとの衝突などによる人身事故が発生しなかったことは、地震と同時に発生した停電によるエレベーターの運転不能が幸いしたともいえる。このことは、エレベーターの耐震性の向上を図る一方、地震時にはエレベーターを停止させることが乗客の安全を守ることになることなど多くの教訓を与えた。

3 エレベーターの耐震設計に対する考え方

3.1 日本エレベーター協会標準(JEAS)

地震に対するエレベーターの安全性の確保を目的として、日本エレベーター協会標準「エレベーター防災対策標準」(JEAS-A405A)³⁾が定められており、現在エレベーター業界共通の耐震設計指針となっている。主な地震対策として、

- (1) かご側、つり合おもり側ガイドレール及びブラケット類は、0.3Gの水平方向加速度又は建物の応答加速度に対してたわみと応力が規定値内で、かつガイドシューがガイドレールから抜け出さないこと。
- (2) 巻上機、電動発電機、制御盤などの機械室設置品は、0.5Gの水平垂直加速度又は建物の応答加速度に対して移動転倒しないこと。
- (3) つり合ロープ、ガバナロープ、移動ケーブルなどがレールブラケット類に引っ掛からないように振れ止又は保護装置を設けること。
- (4) 地震感知器連動による地震時エレベーター管制運転を実施すること。
を推奨するとしている。

* 日立製作所水戸工場 ** 日立製作所機械研究所 *** 日立製作所機電事業本部

表1 エレベーター耐震設計の基本的な考え方 一般に知られている震度階に対するエレベーター耐震設計の基本的な考え方を示す。これに基づいて、地震加速度に対して建物、エレベーターの動的応答を考慮して、エレベーターの耐震設計を行なう。

気象庁震度階	呼び名	相当する地動加速度 (Gal)	耐震設計の基本的な考え方
0	無感	0~0.8	事後点検の要なく、継続使用できるようにする。
1	微震	0.8~2.5	
2	軽震	2.5~8.0	
3	弱震	8.0~25	事後点検をするが、主要構造部には被害を生じないようにする。 「建築基準法」の水平震度、又は特に指定された建物の応答加速度まではエレベーター機器に大きな被害はなく、乗客に危害を与えないようにする。なお、それを超えた地震に対しても乗客の被害が極力少なくなるように配慮する。
4	中震	25~80	
5	強震	80~250	
6	烈震	250~400	
7	激震	400以上	

このほかにも、地震時のエレベーター運転動作、地震感知器の所要性能、地震後の処置について示してあるが、ここでは説明を割愛する。

3.2 耐震設計の基本的な考え方

地震時ではエレベーター自体のほかに、宮城県沖地震にも見られたように昇降路の損傷や電源系統の故障など、予期できない事態の発生が考えられ、これらの状況からエレベーターを早期に着床させ、まず乗客の安全を図ることが最優先とされる。一方、今やビルの縦の交通機関としてなくてはならない存在になったエレベーターは、地震終了後、速やかに復帰できることが必要であり、そのために十分な耐震性をもつものでなければならない。また、設置される建物の耐震設計との調和の上になっても考えなければならない。

表1に一般に知られている気象庁震度階に対するエレベーターの耐震設計の基本的な考え方を示す。震度階3以下の地震では通常運転が可能であり、一般に強いといわれる震度階4以上の地震では、かごを最寄り階に停止させることにより乗客の安全を図るとともに、エレベーターシステムの機能を維持し、地震終了後の復旧を容易にするというものである。なお、エレベーターを停止させる手段としては、後述する地震感知器による方法が合理的である。

4 エレベーターシステムの耐震性能

耐震設計は地震そのものの設定、地震に対する建物の挙動、耐震性能の実証、また経済性との関係など一般に難しい問題を含んでいるが、日立製作所では前章で述べた考え方、指針をもとにエレベーターの耐震性の確認及び向上のための研究を進めてきた。すなわち、実際に各機器を加振して各部の強度、動作状態を検証するとともに、エレベーターを建物を含めた系として地震応答解析を行ない、改善の方向を定めた。以下にその概要を述べる。

4.1 地震荷重

エレベーターの耐震計算は下記の地震荷重 P が作用したとき各部の応力、変形が許容値内に行なう。

$$P = \alpha \times \frac{W}{G} \dots \dots \dots (1)$$

ここに α : 地震時の水平加速度(設計加速度)

W : 機器の重量

G : 重力の加速度

また、設計加速度 α は次式で示される。

$$\alpha = \alpha_0 \times K_B \times K_I \dots \dots \dots (2)$$

ここに α_0 : 建物への地震入力加速度

K_B : 機器の設置階での建物の地震応答倍率

K_I : 機器の地震応答倍率

一般に静的耐震設計に基づく中低層ビルでは、 K_B の値が明確ではないため、3.1に示す静的応答加速度による静的計算を行なっている。しかし、適切な耐震計算を行なうためには地震時の建物・機器系の応答は動的に取り扱うべきである。このための方法として、各階床の応答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1自由度振動系の固有周期ごとに計算したもので、図1に示すように減衰定数をパラメータとしてグラフ化することにより、機器の固有周期と減衰定数とから設計加速度を求めることができる。現在、超高層ビルでは動的耐震設計が行なわれており、これらのデータを入手できるが、中低層ビルについては入手できない場合が多く、従来の地震記録から(2)式で $K_B = 2 \sim 3$ と考えられている。

4.2 ガイドレール関係の耐震性能

地震時のエレベーター被害中、つり合お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。今回、建物とエレベーター系をモデル化したシミュレーション解析及び実機による加振実験を行ない、ガイドレールの耐震設計法を確立した。図2に実験装置の概観を示す。

4.2.1 ガイドレールに作用する地震荷重

つり合おりを集中質量としてモデル化した解析結果及びつり合おりの共振周波数での正弦波加振試験結果から、ガイドレールに作用する地震荷重を P として次式を得た。

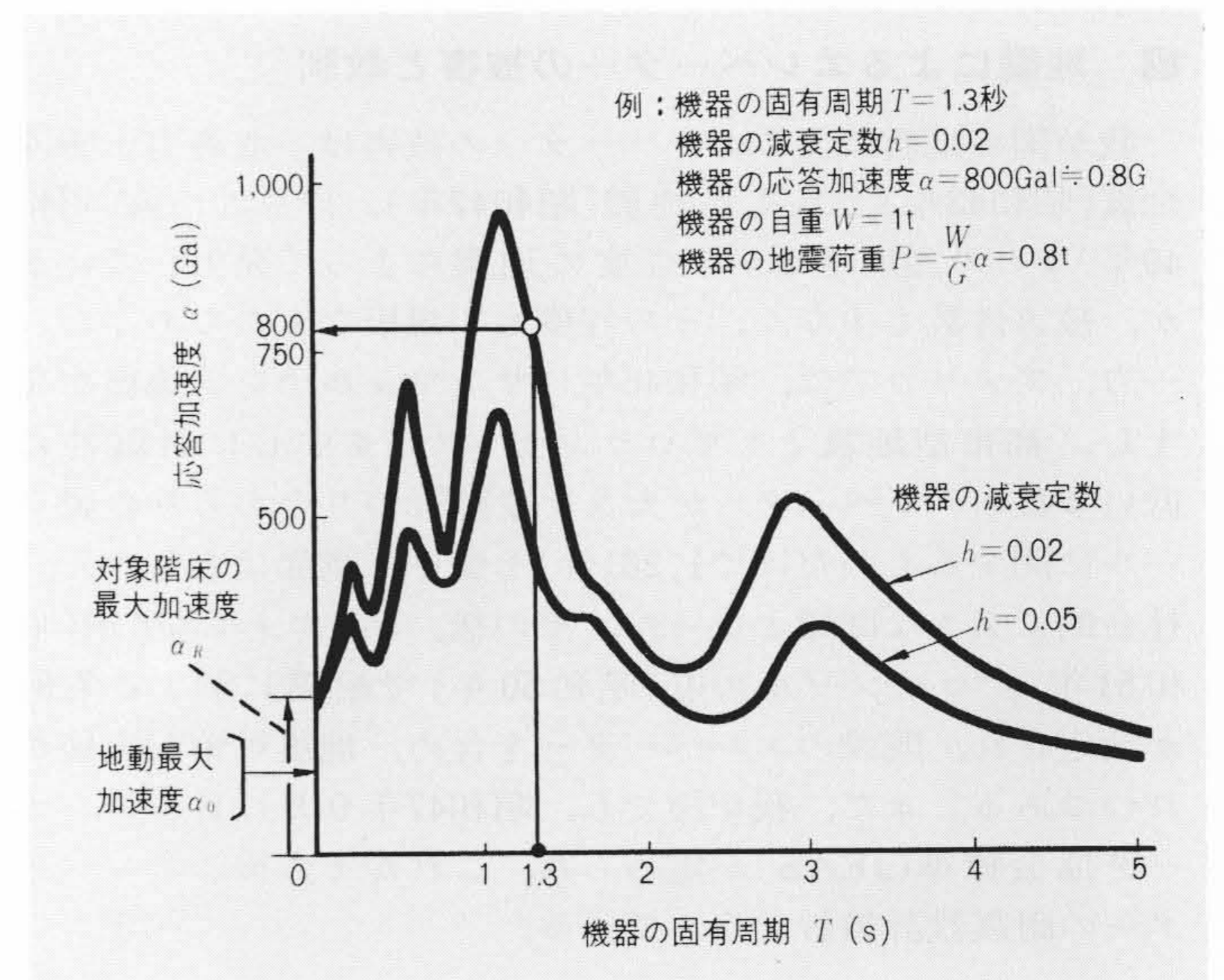


図1 加速度応答スペクトルの例 機器の固有周期及び減衰定数から、その階に設置される機器の地震応答加速度を求めることができる。

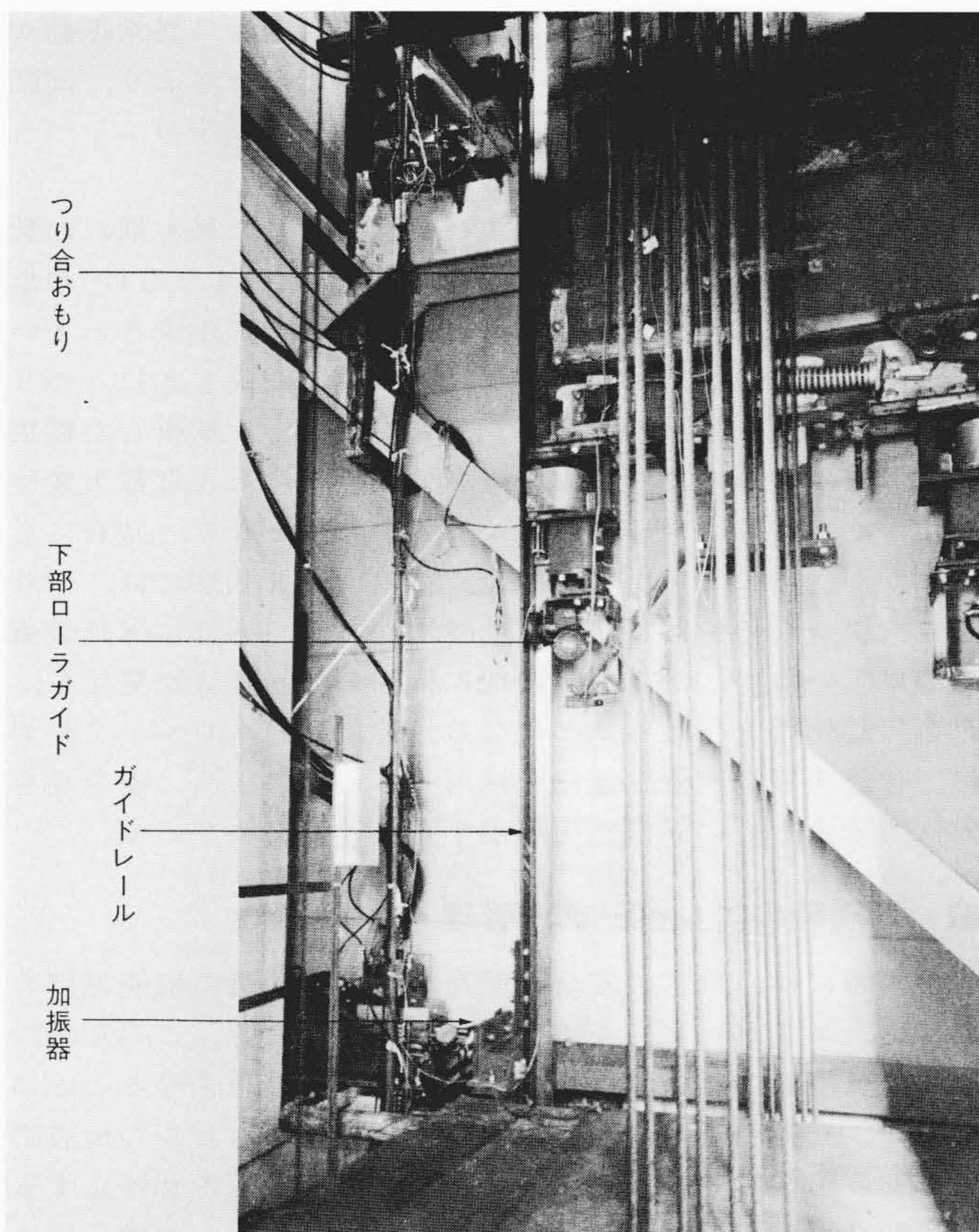


図2 ガイドレール、つり合おりの耐震実験 ガイドレールのレールブラケット部を加振することにより、つり合おりの地震応答特性を求めた。

$$P = \eta_1 \times \eta_2 \times \alpha \times \frac{W}{G} \dots \dots \dots (3)$$

ここに α : 地震時の水平加速度(動的応答加速度)
 W : つり合おりの重量

また、 η_1 はつり合おりを集中質量として解析した場合の最大荷重比率で、0.65⁴⁾である。一方、つり合おりは、形鋼で構成されたわく組みの中に板状のウェートが積層されているため、地震による水平方向の加振状態ではウェート間のすべり、わく組みの弾性変形などが発生するため η_1 に相当する係数が小さくなるのが実験により判明した。図3にその実験結果を示すが、等価質量係数 $\eta (= \eta_1 \times \eta_2)$ から(3)式での動的係数 η_2 は0.6となる。

なお、係数 η_2 はつり合おりの構造によって変わるものであり、実験により求めることができる。

4.2.2 中間ストップによる地震荷重の低減効果

地震時のつり合おりの慣性力は、ガイド部を介してレールに集中質量として作用し、レールの曲げ応力 σ は、図4(a)に示す3スパン4点支持はりの中央に荷重 P が作用したとき最大となり、次式で与えられる。

$$\sigma = \frac{7 Pl}{40 Z_x} \dots \dots \dots (4)$$

ここに l : レールブラケットの間隔
 Z_x : ガイドレールの断面係数

ここで、 P は下部ガイドの荷重を考え、上部ガイド部の荷重はレールブラケット部の近傍に位置するため無視できる。

いま、図4(a)に示すようにつり合おりの縦枠の中間にストップ(特許第890512号)を設けると、下部ガイド部の荷重を P_1 、中間ストップ部の荷重を P_2 として伝達マトリクス法

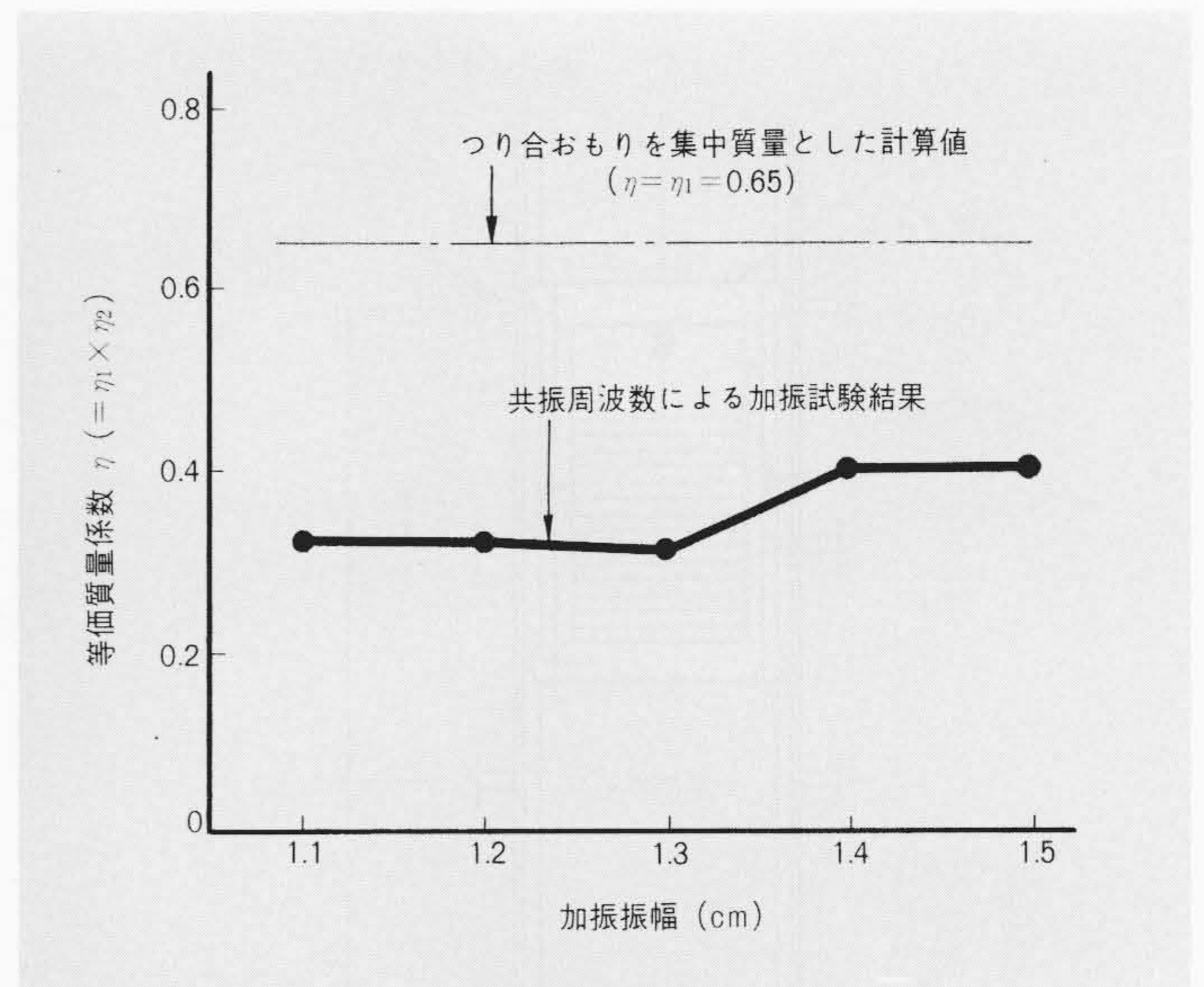


図3 つり合おりの等価質量係数 つり合おりは、ウェートのすべり作用により集中質量として計算した値より小さい質量としてレールに作用することが、加振試験の結果から判明した。

により解くと、最大曲げ応力の発生する下部ガイド部の応力 σ は次式で与えられる。

$$\sigma = K \cdot \frac{7 Pl}{40 Z_x} = K \cdot \sigma \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 K は曲げ応力倍率で加振実験により次式を得た。

$$K = 0.6 - 0.23k(k-1)(k-2) \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $k = \frac{l_s}{l}$ (図4(a)参照)で、図4(b)に k に対する K の

関係を示す。 k はつり合おりのサイズにより変化するが、通常 $0.2 < k < 0.7$ であるから $K < 0.55$ となる。すなわち、中間ストップを設けることによりレールの曲げ応力を低減できる。また、中間ストップを設けることによりガイドレールの耐震強度を2倍にすることができることが分かり、これを標準構造として適用し、(5)式に慣性力分散係数 $K = 0.55$ を導入した。

4.3 エレベーター機械室機器の耐震性能

建物の床に設置する機器の地震応答は、建物の床応答と機器の振動特性との相互関係によって決まる。一般に建物の振動特性は、下層階では短周期成分を含む地動の周期特性が顕著に現われ、上層階では建物固有の周期特性が卓越する。エレベーターの機械室機器としては巻上機、制御盤、電動発電機などがあるが、一般に建物の上部に設置されるため建物の低次の固有周期特性に関係してくる。機器の固有振動数は、防振構造のもので5 Hz前後、その他のものは10 Hz程度であるから一般に長周期成分が卓越する高層ビルでは、加速度共振の可能性は少ない。一方、剛領域にある中低層ビルでは、上層階になるほど加速度の増幅率が高く、比較的短周期で応答すると考えられ、加速度共振に対して十分注意しなければならない。そのため、設置階の応答加速度をもとに耐震計算を行ない、1 Gの加速度に対して移動、転倒しないことを確認し、必要な場合には振れ止などによる固定強化を行なっている。

4.4 ロープなどの長尺懸垂物の耐震性能

エレベーター系特有なものとして、巻上げロープ、つり合ロープ、移動ケーブル(テールコード)、ガバナロープ、フロアコントローラ用テープなどの長尺懸垂物が、かご、つり合おもり、あるいは昇降路内につり下げられており、地震時に

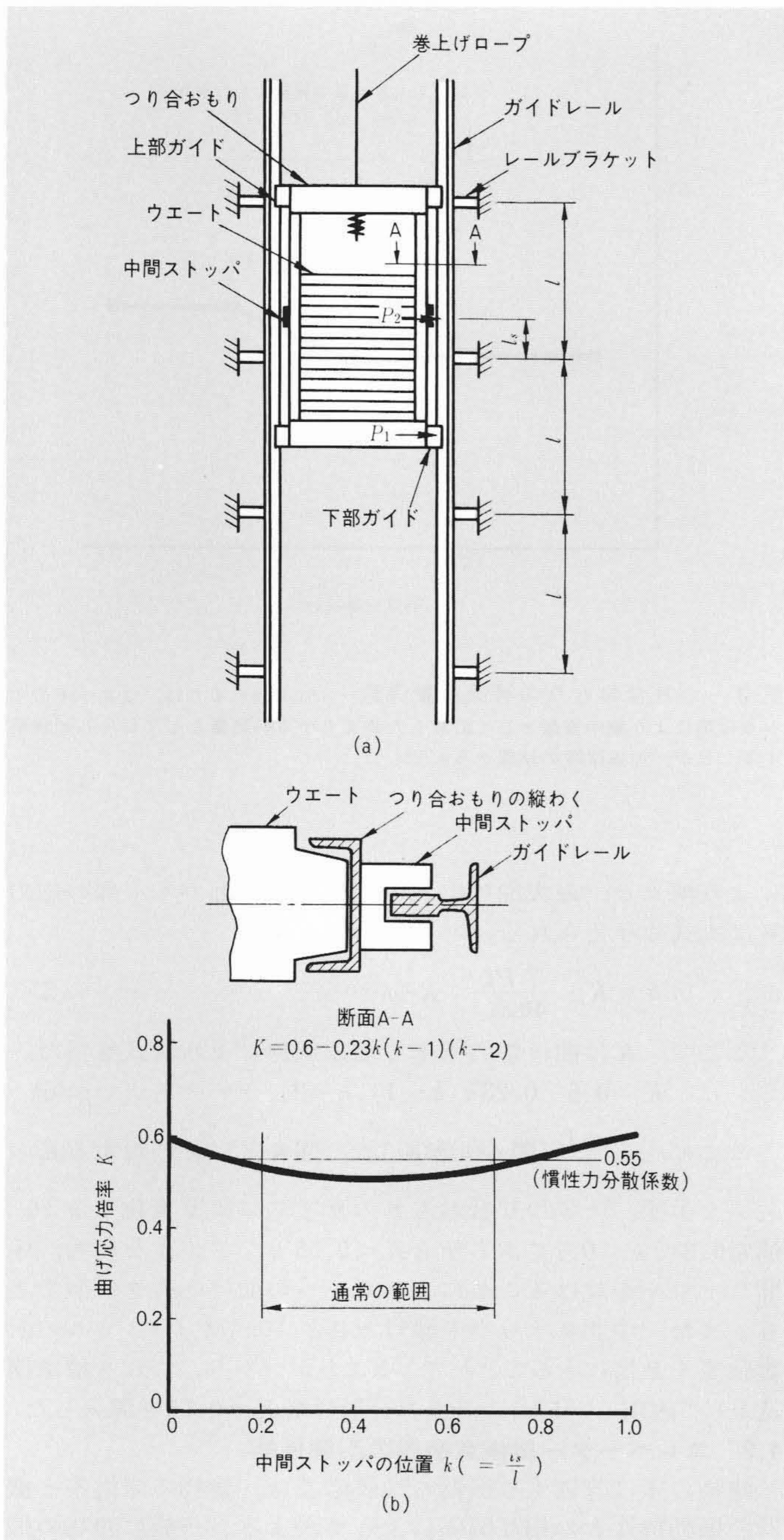


図4 中間ストップによる地震荷重の低減効果
 (a)レールはレールブラケットを支持点とする3スパン4点支持はりとし、中央に下部ガイド部から荷重が加わるとして評価する。つり合おもりに中間ストップを設けることにより、レールへの地震荷重を低減できる。
 (b)つり合おもりに中間ストップを設けることにより、地震荷重の低減係数として慣性力分散係数0.55を得た。

これらが揺れ周囲の機器に接触して異常音を発生したり、引っ掛かって破損することがある。この解決手段として、建物の揺れに対するロープ類の振動解析^{5),6)}及び加振実験を行ない、振れ止などの保護装置を各部に採用している。

特に超高層ビルは、構造上柔構造であるため地震時だけでなく強風時にも揺れやすくロープ類が共振状態となる場合があり、これを本質的に防止することは困難であるが、振れ止などの保護装置により被害を防止することができる。図5に巻き上げロープの振れ止の一例(ロープ穴ダンパ、特許出願中)を示す。図6(a)は、地震時にロープの振れによって発生する

かご上下振動のシミュレーション結果で減速時に異常振動が発生している。ロープ穴ダンパを設置することにより、同図(b)に示すように振動を防止でき、現在超高層ビルのエレベーターに採用している。

また、超高層ビルは地震の主要動が終了した後も揺れが数分間持続し、特にビルの一次固有周期(一般に4~5秒)が卓越するため、加速度は小さいが変位による揺れが大きいという特長がある。図7は超高層ビルの変位記録をもとに、つり合ロープ(図5参照)の変位をシミュレーション解析した結果の一例を示すもので、地震発生2分12秒後にビルは最大変位を示すが、つり合ロープは徐々に共振状態となり、減衰にも時間がかかることを示している。このような状態では、つり合ロープは他の機器に絡まる危険性があり、各部に保護装置を設けているが、かご、その他に接触して異常音が発生し、乗客に恐怖感を与えることになる。特に高速エレベーターでは、後述する地震管制運転を採用することにより、安全性を確保するとともに異常感を解消することに努めている。

5 地震時のエレベーター管理

地震時には、乗客の安全確保及び地震終了後の機能維持の面から、エレベーターを停止させるべきである。このため、ビルの管理者の判断によりエレベーターを停止させることになるが、一方、ビルに地震感知器を取り付け、ビルの地震応答加速度を検出してエレベーターを安全に着床させ停止するほうが合理的である。これに対して、現在、ビルの構造によって40~80Galに設定した地震感知器をエレベーター機械室(一般にビルの頂部付近が多い。)に設置し、この検出によりエ

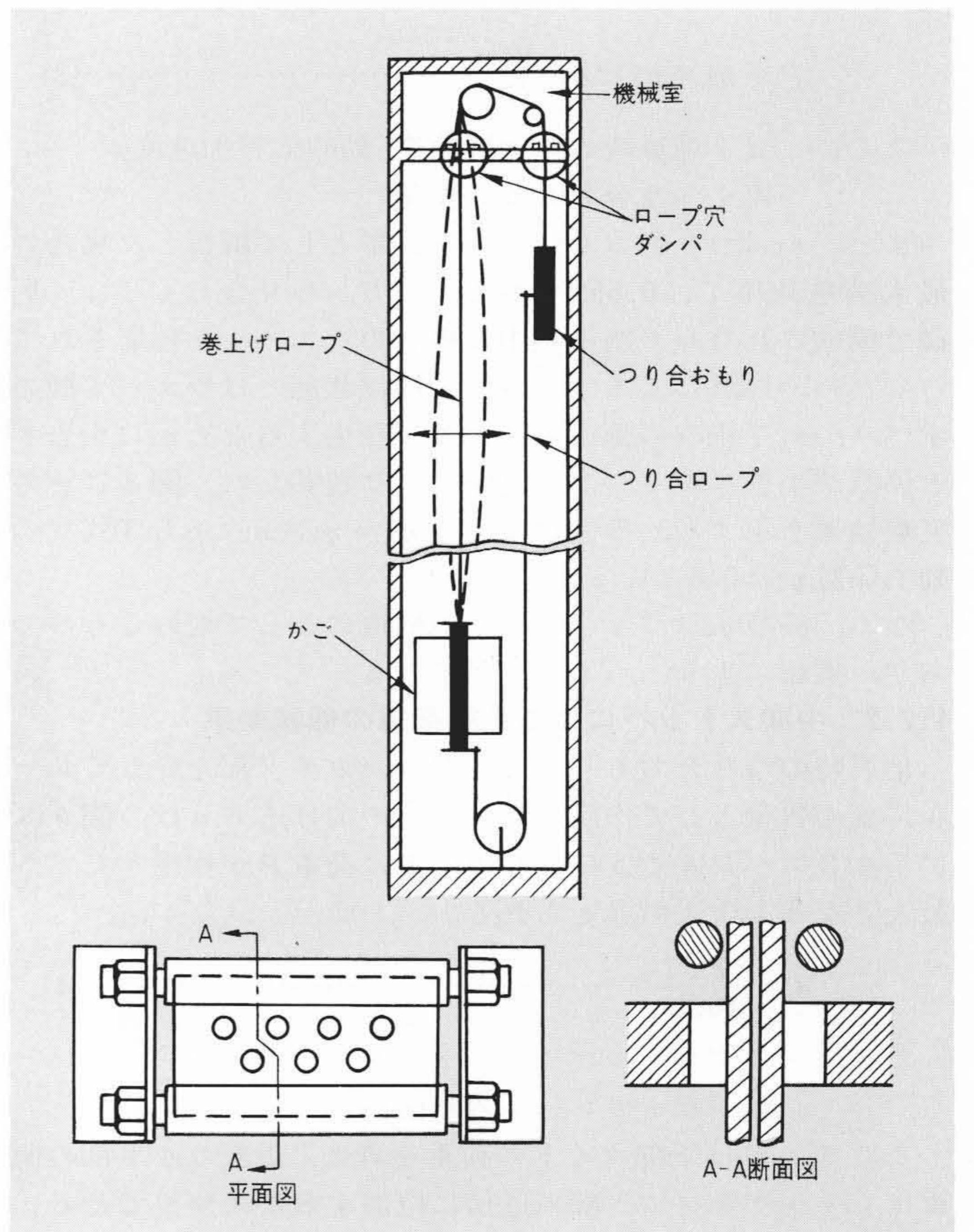


図5 巻き上げロープの振れ止(ロープ穴ダンパ) エレベーター機械室のロープ穴部に巻き上げロープをはさんで設置するロープ制振装置の構造を示す。

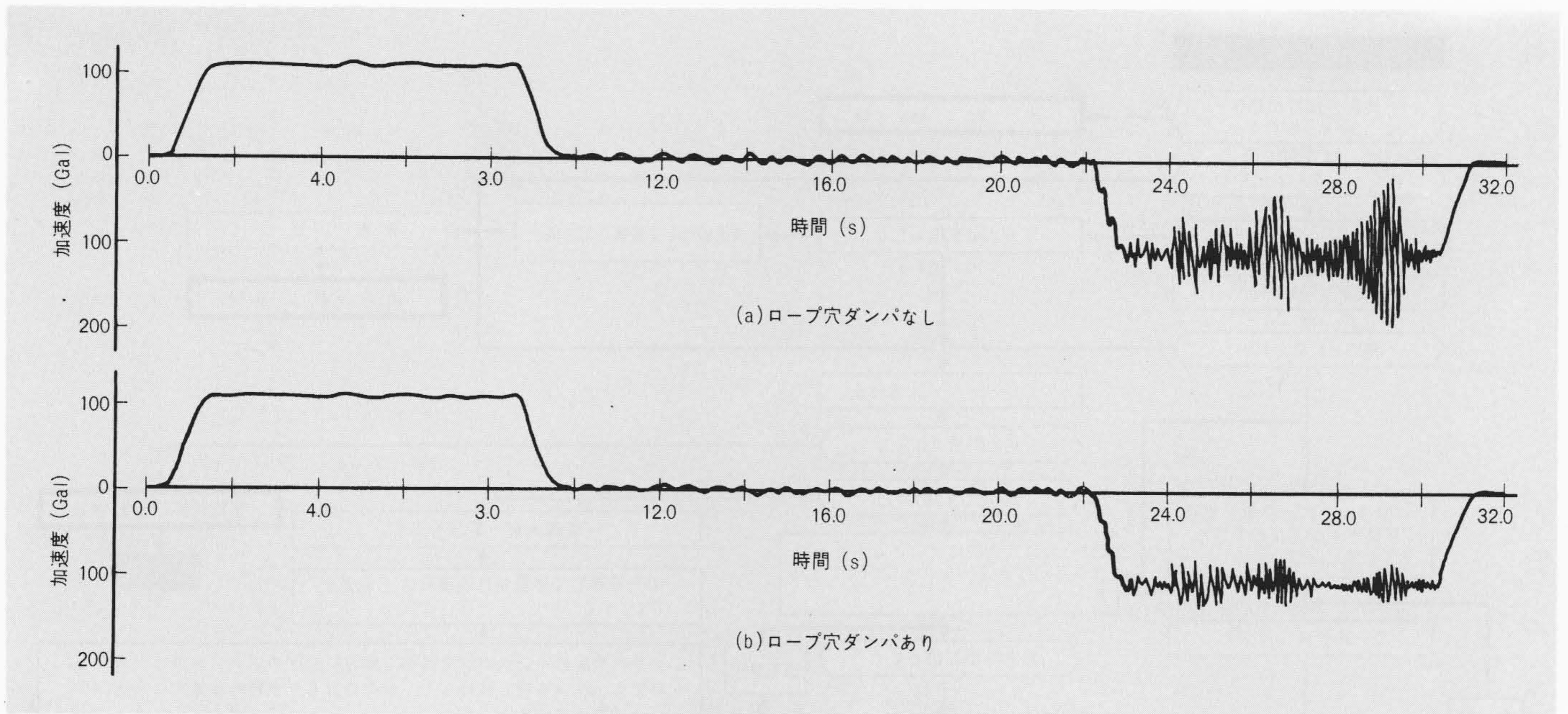


図6 ロープの地震時の振れによって発生する異常振動の例 (a) ロープ穴ダンパなし (b) ロープ穴ダンパあり
ロープ穴ダンパにより、地震時に発生するエレベーターのかごの上下振動を防止することができる。

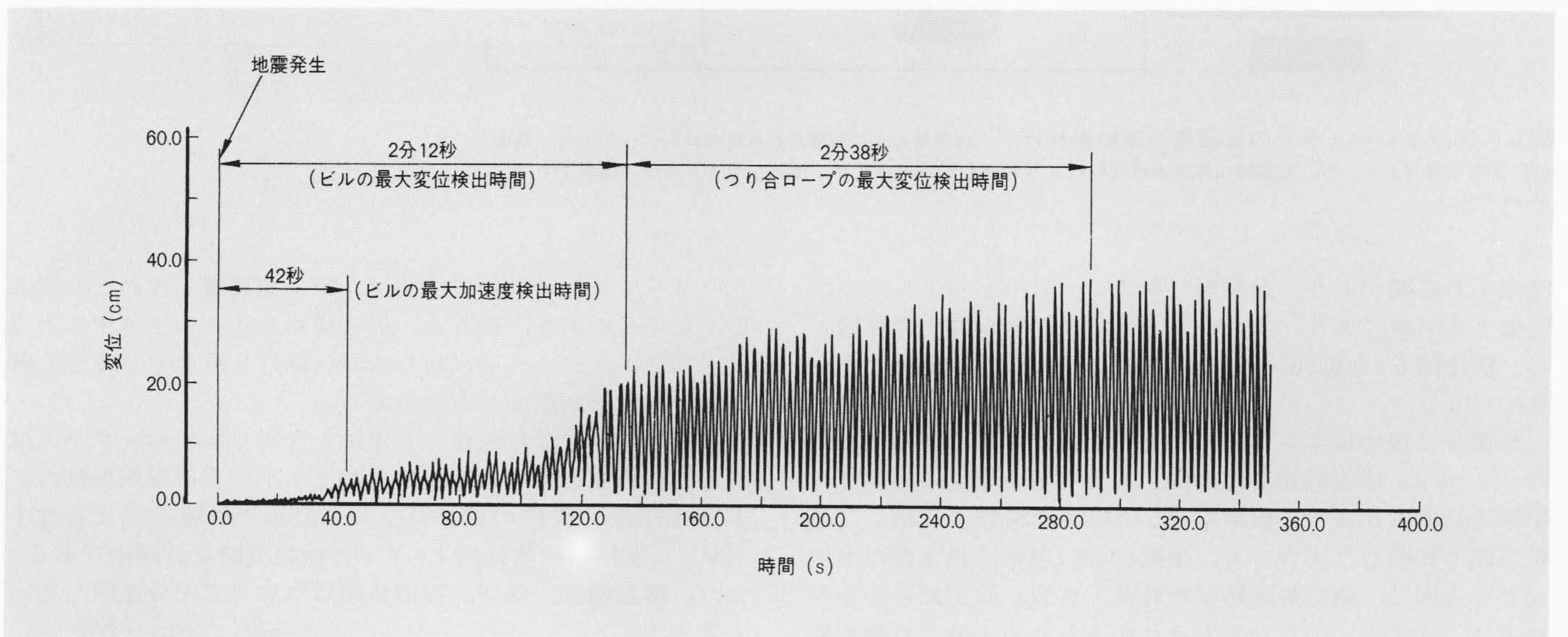


図7 つり合ロープの地震応答の例 超高層ビルの地震時の揺れに対するつり合ロープの変位応答のシミュレーション結果を示す。ビルの揺れに遅れてロープは共振状態となる。

エレベーターを最寄り階に停止させ、乗客の安全を確保するとともに、点検後復旧する方式が採用されている。

一方、超高層ビルは柔構造であるため、剛構造である中低層ビルに比べて加速度応答倍率は小さいが、前記のようにビルの固有周期によるゆっくりした揺れ(変位)が数分間持続するため、ロープ類が共振状態となり昇降路壁やかごなどに接触して異常音が発生する。特に超高速エレベーターで、先般の宮城県沖地震の際、乗客に異常な恐怖感を与えたことが体験談として伝えられている。そこで、これらの異常感を解消し、ロープ類の振れ回りによる被害を防止するために、ビルの揺れ(変位)が大きくなる前にエレベーターを減速徐行させ、ビルの揺れが小さくなってから通常運転に復帰する方法が考えられる。図8にその運転動作の例を示す。すなわち、設定値

30 Gal程度(宮城県沖地震時の都内超高層ビルの地震応答加速度)の地震感知器により、停止階の離れているいわゆる急行ゾーンを走行するエレベーターは、減速徐行して最寄り階に停止させ、その上位設定値の地震感知器が動作しなければ約10分後に通常運転に復帰させるものである。なお、急行ゾーンを走行中に上位設定値の地震感知器が動作した場合には、エレベーターを非常停止させ、低速で最寄り階へ誘導し乗客の安全を確保する。

地震感知器の設定値は、表1に示す考え方に基づき震度階4に相当するビルの地震応答をできるだけ早期に検出するため、その下限値である地動25 Galを基準として定める。一般の中低層ビルでは、ビルの加速度応答倍率を考慮して80 Galが採用されている。すなわち、設定値はビルの地震応答から

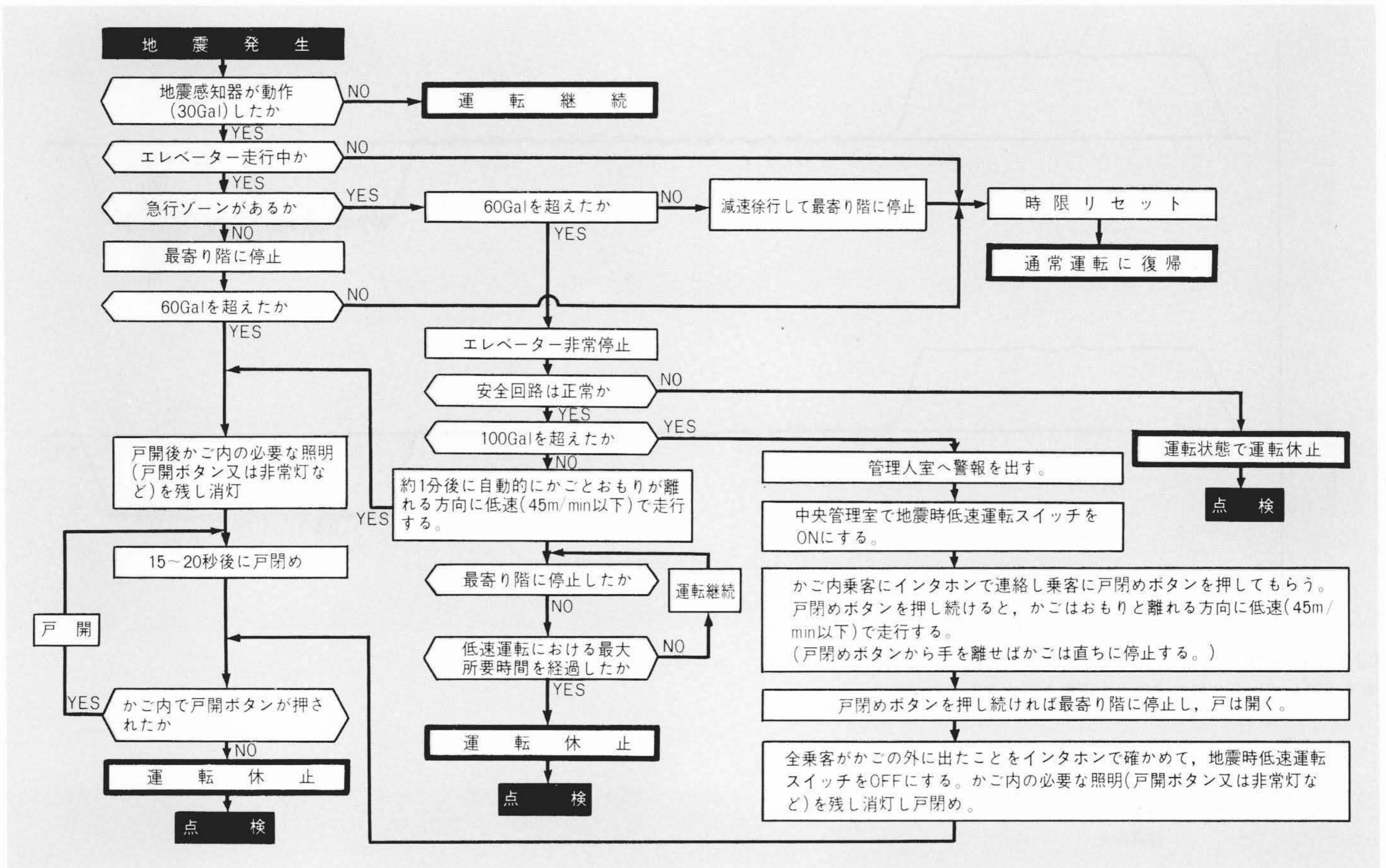


図8 高速エレベーターの地震時の運転動作例 超高層ビルに設置される高速エレベーターは、乗客の恐怖感を解消するため、地震時は減速徐行運転により最寄り階へ停止させ、揺れが治まった後、復帰する方法がよい。

決定する必要があり、超高層ビルでは一般のビルより低い設定値とすべきであり、また一方では乗客の安全優先の見地から、震度階5(地動80~250Gal)に相当する高い設定値とすべきではない。

地震終了後ではエレベーターをできるだけ早く復帰させたい。しかし、地震感知器が動作する震度階4以上の地震では不確定な要素が多く、機械室及び昇降路の機器を点検して運転可能と判断した場合でも、手動(低速)運転で異常音の有無などを点検し、更に昇降路壁の脱落、き裂、固定部のゆるみなどは二次災害につながるおそれがあるため十分な点検を要する。このために、専門技術者による的確な判断を必要とする。

6 結 言

以上、エレベーターの耐震設計に対する考え方について述べ、耐震研究の概要を中心に紹介した。それらの内容をまとめると、

- (1) 地震時のエレベーターの被害は、震度階5になると飛躍的に増加し、特に直接人身事故につながる可能性のあるつり合おもりの脱レールが大半を占める。
- (2) エレベーターの耐震性は、建物の地震応答と密接な関係にあり、応答スペクトルなどの建物の地震応答解析データをもとに合理的な耐震設計を行なう必要がある。
- (3) 地震時には乗客の安全を図ることが第一であり、また地震後の復旧を容易にするためにも、地震感知器による地震管制運転が有効である。
- (4) つり合おもりの耐震構造として、中間ストッパが有効であり、耐震強度は2倍となる。

(5) ロープなどの長尺懸垂物は、特に超高層ビルの揺れと共振する場合があります。揺れ止、引っ掛かり防止策を施すとともに、高速エレベーターに対して減速徐行し乗客の恐怖感を解消する地震管制運転が有効である。

日立製作所では、今後とも建物を含めたエレベーターの地震応答解析を進めるとともに、20t水平・垂直加振振動台による機器の耐震性の確認及び高さ15mの耐震壁によるガイドレール関係の耐震性向上のための検証実験を計画中である。また、耐震施工、保守、復旧体制についても十分監視していく考えである。

終わりに、エレベーターの耐震研究に対して、懇切な御指導、御協力をいただいた関係各位に対し、深く謝意を表わすとともに、今後とも御指導、御協力を併せてお願いする次第である。

参考文献

- 1) 奈良，ほか4名：東京都・白鬚防災拠点向けエレベーターの耐震性，日立評論，60，597~602(昭53-8)
- 2) 福田 訳：ロス地震とその対策(地震とエレベーター)，日本建築センター(昭48-9)
- 3) 日本エレベーター協会：エレベーター防災対策標準，JEAS-A405A(昭52-12)
- 4) 武藤，菅野，井上：超高層ビルにおけるエレベーターの耐震設計を考える，設備と管理，23~28(昭49-5)
- 5) 重田：長行程主索用ロープの横振動解析(第1報)，機学会日立講演会論文集，49~52(昭48-11)
- 6) 重田，藤沢：長行程主索用ロープの横振動解析(第2報)，機学会論文集，750-3，129~132(昭50-4)