波動エネルギー式地震感知器とその超高層ビル用エレベータ地震時管制運転装置への適用

正員 小野田 芳 光 (日立エレベータ)
非会員 池 田 瑛 司 (日立)

1. 緒 言

1971年にアメリカでサンフェルナンド地震が発生し、ロスアンゼルス市内のエレベータが大きな被害を受けたため、ロスアンゼルス市とカリフォルニア州では対策に力を入れ、エレベータ安全条例を作成した⁽¹⁾。

そのころ、我が国では多くの超高層ビルが建設されつつあり、かつそれらのビルには 300 m/min を超える超高速のエレベータが多数設置されることになっていったため、世界有数の地震国の我が国として当然地震による被害が心配された。

日本エレベータ協会ではロスアンゼルス市の対策案を参考に昭和 47 年に昇降機防災対策標準を制定したが、そこでは地震時管制運転装置の採用が推奨されている⁽²⁾。

この地震時管制運転装置は既に昭和 45 年に完成した世界貿易センタビルで採用されていたが⁽³⁾、これを契機に他の超高層ビルにも普及した。続いて、昭和 53 年 6 月に宮城県沖地震があり、一般のビルのエレベータが大きな被害をうけたため一般のビルにも普及するようになった⁽⁴⁾。

ところで、これらの地震時管制運転装置に指令を与える地震感知器には、地震動の振動加速度によって動作する加速度式地震感知器が採用されてきた。

しかし、これまでの実績から加速度式地震感知器は一般のビルのエレベータでは有効に動作しているが、超高層ビルのエレベータでは必ずしも有効に動作しない場合があることがわかった。

そこで、我々はその原因の解明と対策について検討し、新しく波動エネルギー式地震感知器の開発に成功するとともに、その感知器を採用した場合の地震時管制運転装置を開発した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

この波動エネルギー式地震感知器を採用した地震時管制運転装置は、既に超高層ビルのエレベータで実用化されており所期の性能を示している。

本論文では、まず、加速度式地震感知器を採用した従来の超高層ビル用エレベータの地震時管制運転装置の動作の状況と、その要改善点について説明する。

次に、この要改善点を満足するために開発した波動エネルギー式地震感知器の原理と、それを超高層ビル用エレベータの地震時管制運転装置に適用した場合実際に有効に動作することについて述べる。

更に、超高層ビルの地震時の揺動について理論的に解析し、波動エネルギー式地震感知器が超高層ビル用エレベータの地震時管制運転装置の地震感知器として理論的にも適当であることを明らかにする。

2. 従来の超高層ビル用エレベータの地震時管制運転方式とその動作

従来の超高層ビル用エレベータの地震時管制運転方式として東京都における代表的な超高層ビルである A ビルにおけるものを表 1 に示す。

すなわち、加速度式地震感知器が 30 Gal を感知したときはエレベータを最寄り階に停止させて 10 分間待機し、その間 60 Gal を感知しなければ平常運転に

表 1 A 超高層ビルの地震時管制運転の例

Table 1. Operational control during earthquakes for building "A".

低加速度感知	高加速度感知
設定レベル 30 Gal 最寄り階に停止し、10分間 待機、その後復帰。	設定レベル 60 Gal 最寄り階停止して休止、点 検後復帰。

Seismic Wave Energy Sensing Earthquake Detector and Its Application to Operation Control System during Earthquake for Elevator of Super High-rise Buildings. By Yoshimitsu Onoda, Member (Hitachi Elevator Engineering and Service Co., Ltd.) & Eiji Ikeda, Non-member (Industrial Equipment Dept., Hitachi Ltd.).

小野田芳光：正員，日立エレベータサービス株式会社
池田 瑛司：非会員，(株)日立製作所，機電事業本部

表 2 Aビルの振動の状況
Table 2. Situation during earthquakes of building "A".

	振動の状況	管制の状況
58.5.26 (日本海中部地震) ビル最上階	0.2 Hz ±16 Gal ±10 cm	管制すべきであったが装置動作せず
58.8.8 (神奈川県西部地震) ビル最上階	(3 Hz, ±30 Gal ±0.08 cm)→ (0.2 Hz, ±1.6 Gal, ±1 cm)	管制装置が不必要に動作
昇降路ピット (常時微振動)	50 Hz ±13 Gal ±0.13 μm	

備考：このビルの固有振動数は 0.2 Hz (1 次固有周期 5 秒)

自動的に復帰させるなどというものである。

ところで、このビルでは表 2 に示すように昭和 58 年 5 月 26 日に発生した日本海中部地震で、ビルの最上階にあるエレベータ機械室が ±10 cm という大きな揺動を示した。この程度の揺れが生ずるとエレベータのかごとと機械室を連絡している移動ケーブルが共振してその振動が ±2 m に達し、釣合いおもり等に引っかかるなどの事故発生の恐れがあるので地震時管制運転を行うべきであったが、振動加速度が 30 Gal に達していなかったので管制運転は行われなかった。

昭和 58 年 8 月 8 日の神奈川県西部地震では、このビルの最上階の振動はエレベータを停止させるほどのものではなかったが、加速度が 30 Gal に達したため加速度式地震感知器が感知して管制運転が行われた。

その後、このビルでは地震観測を強化するため地震観測装置が増設された。この装置はビルの最下階であるエレベータ昇降路のピットの床面の振動加速度が 5 Gal を超えると自動的に記録を開始するようにしていたが、センサをピットの床面に取付けるとただちに記録を開始するという現象が認められた。ピットの床面は震動しているとは全く考えられないほどの静止状態であったが、調査したところ近くにあったコンプレッサの振動が伝わり、50 Hz, ±13 Gal, ±0.13 μm の震動が生じていることがわかった。

すなわち、このビルでは 13 Gal から 30 Gal の振動加速度を感知したが、50 Hz, 13 Gal のときは震動しているとは全く考えられないほどの静止状態であり、3 Hz, 30 Gal のときは地震動とは感じられたが、エレベータを停止させるほどのものでなく、0.2 Hz, 16 Gal のときは ±10 cm という大きな揺動でエレベータを停止させる必要のあるものであった。

従って、超高層ビル用エレベータの地震時管制運転装置では加速度のみを感知する従来の地震感知器には問題があることは明らかである。

3. 波動エネルギー式地震感知器の開発

気象庁の震度階の定義によれば建物に被害が発生しはじめるのが震度 V である。また、東京都が定めた震度階解説表ではエレベータに関する説明があり、震度 V の下位レベルでカウンタウェイトが外れたり、配線やワイヤが巻きついたりして運転不能になることがあるということが述べられている。

一方、昭和 59 年 3 月に発行されたエレベータ耐震設計施工指針では、気象庁震度階 V の上位レベルで地震感知器と連動の管制運転によってかごを最寄り階に停止させるようにすることになっている⁽⁷⁾。

この震度を検出するには河角氏らの定められた加速度と震度の関係⁽⁸⁾を利用した加速度式地震感知器が採用されてきたのであるが、勝又⁽⁹⁾、市川⁽¹⁰⁾氏らの調査によればあまり相関が大きくない。

このため、震度を適切に測定できる装置の研究が各方面で行われている。高木氏は震度と各種物理量の関係について調査し、波動エネルギーの最大値ともっともよい相関があることを報告している⁽¹¹⁾。

そこで、我々はこの波動エネルギーを利用した地震感知器を開発することにした。

エネルギー的には初期微動である P 波は考える必要がないので、主要動である S 波のみを考える。

いま、図 1 に示すように S 波がある微小面積 dS に到達してから半周期 $T/2$ だけ経過すると、地震波は半波長すなわち $\lambda/2$ だけ前方へ進む。

S 波は横波であるから、進行方向と直角の方向に振動変位 y が生じている。この y を時間 t で微分したのがその点の振動速度 v_y である。

$dS \cdot (\lambda/2)$ の体積内の波動エネルギーを W とすれば、この W は一方向に作用する波動エネルギーの最大値となる。いま、振動変位 y が

注： dS ：微小面積， λ ：波長， y ：振動変位， v_y ：振動速度， x ：進行方向の距離

図 1 地震波動の状況

Fig. 1. Situation of seismic S-wave.

$$y = D \cdot \sin(2\pi t/T) \dots\dots\dots (1)$$

であらわされるものとすると、

$$W = \pi^2 \cdot dS \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho} \cdot (D^2/T) \dots\dots\dots (2)$$

となる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。ここで、 ρ は媒質の単位体積当りの質量、 μ は媒質の剛性率（せん断弾性係数）である。

(2)式で、 $\pi^2 \cdot dS \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho}$ はほぼ一定であるから、 D^2/T を求めれば W が求まるのであるが、 D^2/T を地震時にリアルタイムで求めることは容易でない⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

そこで、波動エネルギーの最大値 W を容易に求めることについて検討した。すなわち、振動変位 $y(\text{cm})$ と振動速度 v_y (kine, kine は速度の単位で cm/s と同じ) の積を e_i (kine $\cdot\text{cm}$) とすると、

$$\begin{aligned} e_i &= y \cdot v_y \\ &= D \cdot \sin(2\pi t/T) \cdot \{(2\pi D/T) \cos(2\pi t/T)\} \\ &= \pi \cdot (D^2/T) \cdot \sin(4\pi t/T) \\ &= e \cdot \sin(4\pi t/T) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 e は e_i の振幅で、

$$\begin{aligned} e &= \pi \cdot (D^2/T) \\ &= (\pi \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho} \cdot dS)^{-1} \cdot W \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$(\pi \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho} \cdot dS)^{-1}$ はほぼ一定であるから、 e は W に比例する。そこで、 e を波動エネルギー係数と名付けたが、この関係を次に述べる波動エネルギー式地震感知器に適用した場合、管制信号の発生は e_i と比較してもでき、かつ実際にはそのようにしているので e_i も波動エネルギー係数と考えることができよう。

波動エネルギー係数は、図2に示すような回路で容易に得ることができる。平面内の任意の方向の波動エネルギー係数は平面内直角2方向の振動変位の振幅を D_1, D_2 、波動エネルギー係数を e_{11}, e_{12} とすると、

$$e_i = \pi \left(\frac{D_1^2 + D_2^2}{T} \right) = e_{11} + e_{12} \dots\dots\dots (5)$$

となるので、 e_{11}, e_{12} を求めて加算することにより得られる。このようにして求めたものを、比較器で設定レベルと比較して管制信号を発生するようにすることにより波動エネルギー式地震感知器を開発した⁽⁵⁾。

波動エネルギー係数 e と震度 I の関係については、高木⁽¹¹⁾、村松⁽¹²⁾氏らの研究を整合させ次のように定

図2 波動エネルギー係数とその検出

Fig. 2. Block diagram of seismic wave energy sensing-type earthquake detector.

図3 松代群発地震のシミュレーション結果

Fig. 3. Simulation results of Matsushiro earthquake swarm.

図4 改正メルカリ震度階Ⅷのときの卓越周期と加速度最大値の関係

Fig. 4. Relation between predominant period and maximum acceleration in the case of MM seismic intensity scale VIII.

めた。

$$I = 4 + \log_{10}(e/3) \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $e < 3 \times 10^{-4}$ の場合は $I = 0$ とする

図3は松代群発地震に対する結果であるが、波動エネルギー係数の方がよく合っている。

アメリカをはじめ多くの国では改正メルカリ震度階を採用している。F. Neumann氏は改正メルカリ震度階Ⅷの場合の最大加速度 $a_{\max}$ と卓越周期 T の関係を求めたが⁽¹³⁾、図4に示すように $e = 3 \text{ kine} \cdot \text{cm}$ としたときの加速度と周期の関係にはほぼ一致している。

すなわち、 $a_{\max}$ と D の間には

$$a_{\max} = (2\pi/T)^2 \cdot D \dots\dots\dots (7)$$

なる関係があるから、これと(4)式より

$$a_{\max} = 4\pi \cdot \sqrt{\pi \cdot e} \cdot T^{-1.5} \dots\dots\dots (8)$$

となり、ここで $e = 3 \text{ kine} \cdot \text{cm}$ とすれば図4の関係が得られる。

4. エレベータの地震時管制運転での比較

加速度と震度の関係から得られる震度を加速度震度、波動エネルギー係数と震度の関係から得られる震度を波動エネルギー震度とすると、波動エネルギー式地震感知器は波動エネルギー震度で動作するといえ

表 3 Aビルにおける加速度震度と
波動エネルギー震度

Table 3. Acceleration seismic intensity and
wave-energy seismic intensity measured at
building "A".

	振動の状況	加速度震度	波動エネルギー震度
58.5.26 (日本海 中部地震) ビル最上階	0.2 Hz ±16 Gal ±10 cm	Ⅲ (管制運転の必要 あるも装置動作せず)	V
58.8.8 (神奈川県 西部地震) ビル最上階	(3 Hz, ±30 Gal ±0.08 cm)→ (0.2 Hz, ±1.6 Gal ±1 cm)	Ⅳ→Ⅰ (管制装置が不 必要に動作)	Ⅱ→Ⅲ
昇降路ピット 常時微振動	50 Hz ±13 Gal ±0.13 μm	Ⅲ	0

表 4 超高層ビルにおける地震感知器の動作

Table 4. Actuation status of earthquake
detectors installed in superhigh-rise buildings.

	加速度式	波動エネルギー式
震源が遠い大規模地震で管制が必要とき (例: 日本海中部地震)	× (動作した例なし)	○ (動作)
震源が近い小規模地震で管制が不要とき (例: 神奈川県西部地震)	× (動作する場合あり)	○ (動作せず)
震源が近い大規模地震で管制が必要とき (例: 関東大震災時の地震)	○ (動作)	○ (動作)

注: ○(動作適切), ×(動作不適切)

る。

加速度震度は周波数に無関係に加速度が一定であるが、波動エネルギー震度は周波数の1.5乗(周期 T の -1.5 乗)に比例して加速度が変化する。その結果、表3に示すように波動エネルギー式地震感知器は適切な動作を示すことになる。

なお、これまではAビルについて述べたが、その他の超高層ビルについても表4に示すように同様の結果であり、波動エネルギー式はすべての地震に対して適切な動作をすることが期待できる。

5. 波動エネルギー式地震感知器を採用した場合の地震時管制運転について

これまで観測してきた多くの地震時における実測データなどから、波動エネルギー式地震感知器を採用したときの感知レベルの設定値と、そのときの地震時管制運転をどのようにすべきかについて検討した結果、表5に示すものを標準とすることにした。

このような地震時管制運転方式を採用したとき、実際の地震動でどのようになるか検討する。

図5は昭和59年9月14日の長野県西部地震における東京都の超高層ビルBビルの最上階における揺動を

表 5 波動エネルギー式地震感知器を
採用した場合の地震時管制運転

Table 5. Operational control during earthquakes using seismic wave energy sensing-type earthquake detector.

波動エネルギー係数	波動エネルギー震度	地震時管制運転指令
[0, 10 kine·cm)	[0, 4.5)	平常運転
[10, 30 kine·cm)	[4.5, 5.0)	最寄り階に停止し、 3分後自動復帰
[30, 100 kine·cm)	[5.0, 5.5)	最寄り階に停止し、 10分後自動復帰
[100 kine·cm 以上]	[5.5 以上]	非常停止

図 5 長野県西部地震における超高層ビルの揺動

Fig. 5. High-rise building top motion at the Nagano Prefecture western area earthquake.

示したものである。

地震波がこのビルに到達してから11秒後に10 kine·cmに達しており、前記の方式を採用していたとすれば最寄り階停止3分の指令が発生され、走行中のエレベータは最寄り階停止の動作を開始することになる。

更に32秒経過すると揺動は30 kine·cmとなり、最寄り階停止10分の指令が発生される。その後、更に5秒が経過すると、すなわち、地震波が到達してから48秒後に揺動は100 kine·cmとなり、非常停止の指令が発生されることになるが、その直後にビルの最上階は±16 cmという極めて大きな揺れを示している。

しかし、最寄り階停止の指令が発生してから非常停止の指令が発生するまで37秒を経過しているため、エレベータが急行区間を走行中であっても既にエレベータは最寄り階に到達しており、乗客は安全にかごの外へでて避難しているであろう。

ところで、振動加速度はの場合、最大でも20 Galと小さかったため加速度式地震感知器は、全く動作し

なかった。

10 kine・cm の揺動に達してから 100 kine・cm の揺動に達するまでの時間が、この場合は 37 秒となっている。この時間は、我々がこれまで観測した多くのデータの中で、100 kine・cm を超える 5 例中最も短い場合であり、その他はすべて 37 秒よりも大きかった。

それゆえ、最寄り階停止の最初の指令を発生する揺動の大きさを 10 kine・cm とすれば、最寄り階に到着する前に非常停止の指令が発生されることはまずなく、いわゆるかん詰事故になることはまずないものと判断される。

6. 建物が損傷しはじめる地震動と波動エネルギー係数の関係の理論的検討

波動エネルギー式地震感知器は建物が損傷しはじめる地震動、すなわち、気象庁震度階 V を適切に検出できることがこれまでの実測結果などから推定できるが、理論的にはどのようにするか検討する。

図 6 に示すように地震波動は大地を経てビルの基礎部に伝わり、ビル内を伝搬する。地表面に近づくにしたがい、地震波の伝搬速度が低くなるので、ほとんどの場合地震波はビルの基礎部に垂直に到達する。

エネルギー的には S 波のみを考えればよいが、 S 波は横波であるからビルの基礎部を水平に振動させる。

更に、超高層ビルは一般に柔構造（せん断形構造物）、すなわち、各階の質量は床に集中し、それらの床が弾性体である構造部材で支持されているので水平方向に振動しやすく、水平方向の振動のみを考えればよいであろう。このように考えると次の式が成立する。

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \quad (9)$$

上式の左辺は単位体積当りの慣性力、右辺は単位体積当りのせん断歪み力である。また、この場合 ρ は単

図 6 超高層ビルへの地震波動の伝播

Fig. 6. Propagation of seismic wave to high-rise building.

位体積当りの平均質量、 μ は平均剛性率で、 y は高さ z における水平方向の変位である。いま、ビルの断面積を一定とすれば上式の解は次のようにおけよう。

$$y(z, t) = D \cdot \sin(2\pi f t - 2\pi z/\lambda) \quad (10)$$

ここに、 D は変位の振幅、 λ は波長、 f は周波数で $f = 1/T$ (11)

(11) 式を (10) 式に代入すると、ビル内の S 波の伝搬速度 v_s は次のようになる。

$$v_s = \lambda \cdot f = \sqrt{\mu/\rho} \quad (12)$$

一般にビルが大きく揺動するのは、地震動の周波数とビルの固有振動数がほぼ等しく共振状態にあるときである。

共振している状態では、基礎部における地震動の変位に比べビルは十分大きく揺動するので、近似的に基礎部はほとんど震動していない、すなわち、ビルは自由振動していると考えることができよう。そこで、ビルは一端固定、他端自由の状態で揺動しているとして解析する。すなわち、

$$z=0 \text{ で } y(0, t)=0 \quad (13)$$

$$z=h \text{ で } \partial y/\partial z=0 \quad (14)$$

ここに、 h はビルの高さである。

ビルが地震波の卓越周期 T と共振していると仮定しているのでこの場合 y を次のようにおくことができる。

$$y(z, t) = B \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} z - \frac{2\pi}{T} t\right) + B \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} z + \frac{2\pi}{T} t\right) \\ = D_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} z \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (15)$$

ここに、

$$D_0 = 2B \quad (16)$$

で、ビルの上端部における変位の振幅である。

(15) 式は $z=0$ で $y(0, t)=0$ となるので (13) 式は満足される。(14) 式に上記 $y(z, t)$ を代入すると、

$$\frac{\partial y(h, t)}{\partial z} = \frac{2\pi D_0}{\lambda} \cos \frac{2\pi}{\lambda} h \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t \\ = 0 \quad (17)$$

従って、

$$\lambda = \frac{4}{2n-1} h \quad (18)$$

ここに、

$$n=1, 2, 3, \dots \quad (19)$$

$n=1$ のときの λ を λ_1 とすると、

$$\lambda_1 = 4h \quad (20)$$

$n=2$ のときの λ を λ_2 とすると、

$$\lambda_2 = 4h/3 = \lambda_1/3 \quad (21)$$

図 7 地震動によるビルの揺動
Fig. 7. Building motion by earthquake.

となり、このビルは $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ の波長の地震動に共振する。

次に、(15)式を(10)式に代入すると、

$$\lambda/T = \sqrt{\mu/\rho} \quad (22)$$

が得られる。従って、このビルと共振する地震動の周期 T は

$$T_1 = \lambda_1 \cdot \sqrt{\rho/\mu} = T_s \quad (23)$$

$$T_2 = \lambda_2 \cdot \sqrt{\rho/\mu} = T_s/3 \quad (24)$$

ここに、 T_s はビルの一次固有周期であり、 $T_s/3$ は二次固有周期である。

ビルが最も大きく揺れるのはビルの一次固有周期 T_s が地震動の卓越周期 T とほぼ等しく共振するときである。すなわち、

$$T \doteq T_s$$

$$= \lambda_1 \cdot \sqrt{\rho/\mu} = 4h \cdot \sqrt{\rho/\mu} \quad (25)$$

地震動の卓越周期 T が T_s に等しいときは図 7 (a) のようにビルが揺動するが、 T が $T_s/3$ のときは (b) のように揺動し、 T が $T_s/5$ のときは (c) のように揺動する。

振動変位 (15) 式を時間 t で 2 階微分したのが振動加速度 $a(z, t)$ であるから、

$$\begin{aligned} a(z, t) &= \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -D_0 \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \sin \frac{2\pi}{\lambda} z \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t \\ &= -a_m \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} z \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (26) \end{aligned}$$

ここに、

$$a_m = D_0 (2\pi/T)^2 \quad (27)$$

で振動加速度の振幅である。

従って、振動加速度は振動変位と位相は 180° 異なるが同じ動きとなる。

地震動の加速度の最大値は、振動の腹の部分に生ずるが共振状態ではビルの上端は腹となる。

振動加速度の最大値は a_m であるから、ビル全体に

加わる加速度の平均値 a_0 は (a) の場合は、

$$a_0 = (2/\pi) \cdot a_m \quad (28)$$

となり、(b) の場合には

$$a_0 = (1/3) \cdot (2/\pi) \cdot a_m \quad (29)$$

(c) の場合には、

$$a_0 = (1/5) \cdot (2/\pi) \cdot a_m \quad (30)$$

のように小さくなる。

この平均加速度 a_0 がビルの全質量 $m = W/g$ (W : ビルの全重量、 g : 重力加速度) に作用してビルの基礎部におけるせん断力すなわちベースシア Q を生ずる。従って、地震動の卓越周期 T がビルの一次固有周期 T_s に等しいときは、

$$\begin{aligned} Q &= a_0 \cdot m = (a_0/g) \cdot W \\ &= (2/\pi) \cdot (W/g) \cdot a_m \quad (31) \end{aligned}$$

であるが、 T が $T_s/3$ に等しいときは、

$$Q = (1/3) \cdot (2/\pi) \cdot (W/g) \cdot a_m \quad (32)$$

となり、 T が $T_s/5$ に等しいときは、

$$Q = (1/5) \cdot (2/\pi) \cdot (W/g) \cdot a_m \quad (33)$$

となる。すなわち、

$$Q = (T/T_s) \{ (2/\pi) \cdot (W/g) \} \cdot a_m \quad (34)$$

ただし、

$$T = T_s / (2n-1) \quad (n=1, 2, \dots) \quad (35)$$

となる。

以上は、ビルに加わる平均加速度から基礎部におけるせん断力を求めたものであるが、ビルに加わるせん断力を直接求める方法で検討する。

高さ z の点におけるビルの水平断面に加わるせん断力を $Q(z, t)$ とすると、

$$Q(z, t) = \mu \cdot S \cdot \frac{\partial y}{\partial z} \quad (36)$$

ここに、 S はビルの水平断面積である。ここで変位 y は (13) 式であるから、

$$\begin{aligned} Q(z, t) &= \frac{2\pi \cdot \mu \cdot D_0 \cdot S}{\lambda} \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda} z \\ &\quad \dots \quad (37) \end{aligned}$$

せん断力 $Q(z, t)$ は時間的に変化するが、その最大値、すなわち振幅は、

$$Q(z, 0) = \frac{2\pi \mu D_0 S}{\lambda} \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda} z \quad (38)$$

基礎部におけるせん断力の最大値は、

$$\begin{aligned} Q(0, 0) &= \frac{2\pi \cdot \mu \cdot D_0 \cdot S}{\lambda} \\ &= \frac{2\pi \cdot D_0 \cdot S}{T} \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho} \quad (39) \end{aligned}$$

地震動の卓越周期 T がビルの一次固有周期 T_s と

共振したときは、

$$\begin{aligned} Q(0, 0) &= \frac{2\pi \cdot D_0 \cdot S}{T_s} \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho} = \frac{2\pi \cdot D_0 \cdot S \cdot \rho \cdot \lambda}{T_s^2} \\ &= 2\pi \cdot D_0 \cdot S \cdot \rho \cdot 4h / T_s^2 \\ &= (2/\pi) \cdot (W/g) \cdot a_m \dots\dots\dots (40) \end{aligned}$$

となって(31)式と一致する。

地震動の卓越周期 T がビルの n 次固有周期 $T_s/(2n-1)$ と共振したときは、

$$\begin{aligned} Q(0, 0) &= \frac{2\pi \cdot D_0 \cdot S}{T} \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho} \\ &= (T/T_s) \cdot \{(2/\pi) \cdot (W/g)\} \cdot a_m \dots (41) \end{aligned}$$

ただし、

$$T = T_s / (2n-1) \quad (n=1, 2, \dots) \dots\dots\dots (42)$$

となり、(34)式と一致する。

(41)式もしくは(34)式よりわかるように、ビルの耐震上で重要な基礎部のせん断力すなわちベースシアは地震動の卓越周期 T に比例しており、加速度の振幅 a_m が同一でも T が異なれば異なることがわかる。

前述のAビルの例で考えると、昭和58年5月26日の日本海中部地震では加速度が16Galと小さかったが T が5秒であり、一方、昭和58年8月8日の神奈川県西部地震では加速度は30Galであったが T が0.33秒であったので、基礎部のせん断力は日本海中部地震の方が約8倍大きく、ビルの危険度としては日本海中部地震の方がはるかに大きかったといえる。

ところで、最近、W. Housner 氏らの提唱している構造物の終局的破壊に寄与するのは地震時に構造物のもつ運動エネルギーであるという説が注目されている(14)(15)(16)。

この説を小高氏は、次のように説明している⁽¹⁶⁾。図8において、横軸は基礎部より高さ z における変位 y であり、縦軸は基礎部のせん断力 Q である。

地震動によりビルに運動エネルギーが与えられるとビルは変形しその運動エネルギーを吸収する。

変位 y が增大するとせん断力 Q も増加するが、ある変位量 y_0 に達するとせん断力が Q_m に達し、そこ

図8 せん断力と変位の関係

Fig. 8. Relation between base shear and displacement.

で構造部材が降伏し、それより後は変位 y が增大してもせん断力 Q は Q_m の値にほぼ一定に保たれる。そして変位が y_m に達すると構造部材は遂に破壊する。

従って、基礎部のせん断力が同じ Q_m でも変位が y_0 と y_m の場合で大きく異なる。

変位が0から y_0 までのエネルギーを W_0 とすれば、

$$W_0 = \int_0^{y_0} Q dy = \frac{Q_m y_0}{2} \dots\dots\dots (43)$$

であり、変位が0より y_m までのエネルギーを W_m とすれば、 $y_m \gg y_0$ であるから、

$$\begin{aligned} W_m &= \int_0^{y_m} Q dy = W_0 + Q_m(y_m - y_0) \\ &\gg W_0 \dots\dots\dots (44) \end{aligned}$$

で W_m の方が、はるかに大きなエネルギーとなる。

地震時においてビルの破壊に作用する運動エネルギーがもっとも大きくなるのは、地震動の卓越周期 T とビルの一次固有周期 T_s が共振したときである。

両者が共振状態にあるときはビルは一次固有周期 T_s で振動するから、変位 $y(z, t)$ は、

$$y(z, t) = D_0 \cdot \sin \frac{\pi}{2h} z \cdot \cos \frac{2\pi}{T_s} t \dots\dots\dots (45)$$

となる。 z の点における単位体積当りの平均運動エネルギー w_e は

$$\begin{aligned} w_e &= \frac{1}{2} \rho \cdot \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot D_0^2 \cdot \left(\frac{2\pi}{T_s} \right)^2 \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2h} z \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{T_s} t \\ &\dots\dots\dots (46) \end{aligned}$$

ビル全体の運動エネルギー W_e は、

$$\begin{aligned} W_e &= S \cdot \int_0^h w_e \cdot dz \\ &= \frac{\pi^2}{4} \cdot S \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho} \cdot \left(\frac{D_0^2}{T_s} \right) \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{T_s} t \dots\dots (47) \end{aligned}$$

従って、 W_e の最大値を $W_{e\max}$ とすれば、

$$W_{e\max} = \frac{\pi^2}{4} \cdot S \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho} \cdot \left(\frac{D_0^2}{T_s} \right) \dots\dots\dots (48)$$

次に、ビルの上端部における振動変位 $y(h, t)$ と振動速度 $v(h, t)$ の積、すなわち $e_i(h, t)$ は

$$\begin{aligned} e_i(h, t) &= y(h, t) \cdot v(h, t) \\ &= -\pi \left(\frac{D_0^2}{T_s} \right) \cdot \sin \frac{4\pi}{T_s} t \dots\dots\dots (49) \end{aligned}$$

となる。(48)式で $(\pi^2/4) \cdot S \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho}$ は一定であるから、 (D_0^2/T_s) を求めれば $W_{e\max}$ は求まるが、(49)式の振幅は $\pi (D_0^2/T_s)$ であり比例関係にある。

$e_i(h, t)$ あるいは $\pi (D_0^2/T_s)$ は先に定義した波動エネルギー係数であって、波動エネルギー式地震感知

器によって検出できることはいうまでもない。

すなわち、気象庁震度階Ⅴは地震動によって建物が被害が発生しはじめる点をあらわしているが、波動エネルギー式地震感知器はその点を適切に検出でき、地震感知器として適当なものといえることができる。

ところで、緒言で述べたように、一般のビルのエレベータの地震時管制運転装置では、従来の加速度式地震感知器が有効に動作している例が多い。

これは地震動の卓越周期が普通1秒内外の場合が多いのに対し、一般のビルの固有周期も1秒程度であることによるものであろう。

すなわち、波動エネルギー係数が(4)式に示す e のとき、振動加速度の振幅 a_m と振動周波数 f もしくは振動周期 T の間には(8)式の関係がある。

波動エネルギー式地震感知器では表5に示すように感知レベルを波動エネルギー震度が4.5, 5.0, 5.5に相当する10 kine·cm, 30 kine·cm, 100 kine·cmに選んでいるが、 T が1秒であれば e が10 kine·cmのときの a_m は71 Gal, e が30 kine·cmのときの a_m は122 Galとなる。

一般のビルのエレベータの地震時管制運転装置では、加速度式地震感知器を用い、感知レベルを80 Galと120 Galに選んでいる⁽⁷⁾。もしも、地震動の卓越周期とビルの一次固有周期がともに1秒程度とほぼ等しければ、波動エネルギー式地震感知器を採用しその感知レベルを10 kine·cmと30 kine·cmにした場合とほぼ同じ動作になる。

ところが、超高層ビルでは一次固有周期が5秒程度と大きくはなれているため、加速度式地震感知器が有効に動作をすることがあまりないのであろう。

7. 結 言

以上、超高層ビル用エレベータの地震時管制運転装置の問題点とそれを解決するために開発した新しい方式などについて述べた。すなわち、

(1) 従来の加速度式地震感知器を採用した地震時管制運転装置は、遠距離大規模地震で超高層ビルが大きく揺動して管制運転をすべきときに、地震感知器が感知しないため管制運転が行われることがほとんどなかった。

逆に、近距離小規模地震で超高層ビルがあまり揺動せず管制運転を行う必要のないときに地震感知器が感知して管制運転を行う場合がしばしばあるという問題点があった。

(2) 地震感知器について再検討を行い、新しく波動エネルギー式地震感知器を開発した。

この波動エネルギー式地震感知器を採用した場合の地震時管制運転装置も開発したが、この装置の採用により前記の問題点が解決されることを示した。

(3) 更に、超高層ビルの地震時の揺動について理論的に検討し、超高層ビル用エレベータに対しては波動エネルギー式地震感知器を採用した地震時管制運転装置が適当であることを明らかにした。

なお、加速度式地震感知器を採用した従来の方式が一般のビルのエレベータでは有効に動作している理由について検討した結果、地震動の卓越周期は1秒内外が多いのに対し、一般のビルの固有周期も1秒程度と近い値にあることによるものであることを知った。

終りに、本研究に当り御指導をいただいた岐阜大学村松教授、気象庁勝又博士はじめ気象研究所の各位、資料について御便宜をいただいた東京大学生産技術研究所第2部柴田教授、第5部片山教授、佐藤氏、終始御指導御支援をいただいた日立エレベーターサービス(株)安藤社長はじめ日立グループの各位、装置の開発に御協力をいただいた東京測振(株)に厚く御礼申しあげる。(昭和62年3月10日受付、同62年8月27日再受付)

文 献

- (1) Elevator World's 1972 Annual Study: 「Earthquakes and Elevators」(地震とエレベーター翻訳出版委員会訳、日本エレベーター協会他)(1973)
- (2) 日本エレベーター協会: 昇降機防災対策標準(昭47)
- (3) 池田: 「世界貿易センタービルにおける地震時のエレベータの管理」エレベーター界6, 23, 25(昭46-7)
- (4) 奈良・和田・重田・小倉: 「エレベーターの耐震性能向上」日立評論61, 7, 39(昭54-7)
- (5) 小野田・山腰・青木: 「波動エネルギー式地震感知器の開発」日立評論67, 6, 65(昭60-6)
- (6) 小野田・池田: 「波動エネルギー式地震感知器の開発」第7回日本地震工学シンポジウム2101(昭61)
- (7) 日本建築センター、日本昇降機安全センター編: 「昇降機の技術基準の解説付エレベーター耐震設計施工指針」日本エレベーター協会(昭59-3)
- (8) 河角: 「震度と震度階」地震15, 6, 187(昭18)
- (9) 勝又・徳永: 「震度Ⅳの範囲と地震の規模および震度と加速度の対応」地震時報36, 3/4, 89(昭46)
- (10) 市川: Digital Seismogramsによる震度の推定, Journal of Meteorological Research 35, 6, 221(昭58-6)
- (11) 高木: 「地震動の最大エネルギーと震度の関係」気象研究所研究報告20, 1, 79(昭44-4)
- (12) 村松: 「地震危険度——(地震工学)」地震第2輯20, 281(昭42)
- (13) F. Neumann: "Some generalized concepts of earthquake motion" Proc. Symp. Earthq. and Blast Effects on Struct., Los Angeles, Calif. (1952)(金井: 地震工学(共立出版)24-25(昭54))
- (14) G. W. Housner: "Vibration of Structures Induced by Seismic Waves", Shock Vibration Handbook by C. M. Harris & C. E. Crede (1961)
- (15) G. V. Berg & S. S. Thomaides: "Energy Consumption by Structures in Strong Motion Earthquakes" Proceedings of II WCEE Tokyo, Kyoto (1960)
- (16) 小高・那須・桜井・谷: 「耐震・耐風構造」建築構造学7(鹿島出版会)(昭54)