

エレベーターの地震対策の現状と課題

Current Practice and Research Needs of Elevator Operation During Earthquakes

加藤 康 広*・山崎 文 雄*・片山 恒 雄**

Yasuhiro KATO, Fumio YAMAZAKI and Tsuneo KATAYAMA

1. はじめに

エレベーターなどの昇降設備は、ビルの高層化に伴って、ますます増加する傾向にあり、その都市機能における役割は重要性を高めている。エレベーターはガイドレールのような連続している部分や、かご、テールコードなど建築物の躯体に固定されていない部分から構成されているため、地震が発生した際には、建築物に影響がない程度の揺れであっても、エレベーターにはさまざまな故障が生じる場合があり、時には閉込事故なども発生している。このため、建築基準法施行令においても、地震に対する構造上の安全の確保が規定されている。また運行上の安全確保として、東京都などでは条例により、一定のレベル以上の振動を感知した際には、かごを安全に停止させる地震時管制運転装置の設置が定められている。本文では最近の被害地震におけるエレベーターへの影響を述べるとともに、今後の地震対策の基礎資料として、現在検討を進めているエレベーターの地震被害推定法についてその概略を紹介する。

2. エレベーターの地震時管制運転

地震が発生した際に、故障が想定されるエレベーターは、閉込事故などの二次災害を未然に防ぐために、機械室に地震感知器を設置して、設定値を越える加速度を感知した際には、エレベーターを安全に停止させている。図1に1993年釧路沖地震における感知器作動率（保守台数に占める感知器の作動したエレベーターの台数）を示す。この地震では、実際に故障の発生した釧路、帯広、八戸で100%が作動したのを始め、青森、函館、苫小牧、室蘭などの都市でも高い割合で作動し、広範囲に影響が生じていることが分

かる。感知器は、設置してある建築物の高さやエレベーターの種類などにより異なっており、45 m 以下の建築物に新設されるエレベーターには、普通級と呼ばれる感知器が用いられる。機械室が2階以上にある場合、特低設定値 (80 cm/s^2) 以上を感知すると最寄り階に一定時間停止し、低設定値 (120 cm/s^2) を感知しなければ、運転を自動的に再開するが、低設定値以上を感知した際には、乗客を解放した後、点検を受けるまで運転が停止する。このため大都市の付近で地震が発生した場合には、多数のエレベーターが一斉に停止し、復旧に時間を必要とする。

この普通級の感知器の所要性能は以下の通りである¹⁾。

- 1) 検出方向 : 水平全方向
- 2) 周波数特性 : 1 ~ 5 Hz でフラット特性
5 Hz 以上で感度は下降特性
- 3) 検出精度 : $\pm (\text{設定値} \times 0.1 + 7) \text{ cm/s}^2$

また現在使用されているほとんどの感知器は、検出範囲内

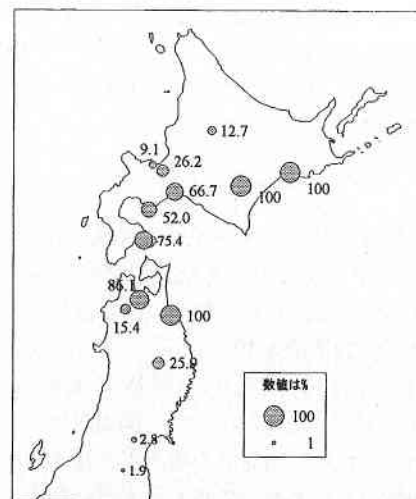


図1 1993年釧路沖地震における地震感知器作動率

*東京大学生産技術研究所 第5部

**東京大学生産技術研究所 付属国際災害軽減工学研究センター

研 究 速 報
 の最大加速度が、設定値を越えるかどうかを判定するのみで、最大加速度値を記録するなどの機能は有していない。本研究では管制運転と故障の現状を定量化し、復旧計画の立案における地震被害の目安の提供を目的としている。

3. 感知器作動率と最大加速度

1992年2月2日に東京湾浦賀水道沖で発生した地震²⁾の際には、ほとんど被害が無かったにも関わらず、都心部を中心に多くのエレベーターの感知器が、低設定値を越える加速度を感知して運転を停止し、その復旧には1日以上を要している。図2には、この地震の際に東京都と埼玉県において、低設定値以上を感知して感知器が作動したエレベーターの台数と作動率を市区単位で表示した。都心部を中心に80%以上のエレベーターが停止し、特に千代田区や練馬区などでは90%以上が停止している。

感知器の作動と地震動強さとの関係を定量的に把握するために、このときの感知器作動率と地盤の最大加速度との関係を図3に示す。加速度は文献³⁾より地盤上の記録を採用した。また同一の市区で複数の加速度が得られる場合には、中高層の建築物が集中している地点に近い観測点のものを採用した。回帰式は感知器作動率 \bar{R}_i と地盤の最大加速度 A_i との関係を次式で仮定し、最小自乗法で求めた。

$$\bar{R}_i = \begin{cases} 0 & A_i < \alpha \\ (A_i - \alpha) / (\beta - \alpha) & \alpha \leq A_i < \beta \\ 1 & \beta \leq A_i \end{cases} \quad (1)$$

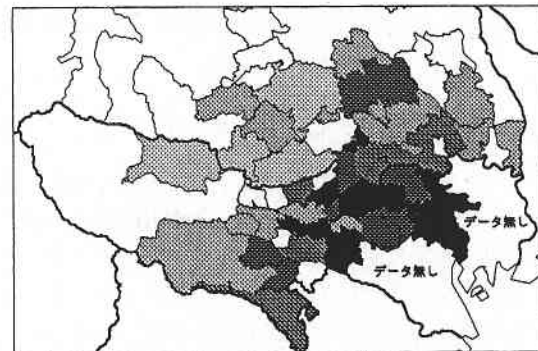
すなわち、加速度が $\alpha \sim \beta \text{ cm/s}^2$ では感知器作動率が直線的に $0 \sim 1$ に変化する単純なモデルを考えた。また採用するデータは地震計が設置してある市区に限られるため、データ数を確保する必要から台数の少ない都市もデータとして用いた。この点を考慮して、各市区に総和が1となるように台数比で重み w_i を与えて、各データの組 (A_i, R_i) と(1)で仮定した \bar{R}_i との残差の二乗和 Δ^2 を次式で定め、この Δ^2 を最小とする α, β の組が求める解となる。

$$\Delta^2 = \sum w_i (R_i - \bar{R}_i)^2 \quad (2)$$

反復法により数値的に解を求めた結果、 $\alpha = 5.7 \text{ cm/s}^2$ 、 $\beta = 108.1 \text{ cm/s}^2$ となった。また、1980年7月に改正された建築基準法施行令が適用される以前に設置されたエレベーターには、低設置値が 100 cm/s^2 とさらに低い値が採用されており、これに関しても同様に求めると、 $\alpha = 9.3 \text{ cm/s}^2$ 、 $\beta = 86.5 \text{ cm/s}^2$ となった。調査対象を市区単位で簡易に分類したため、地震計の観測点とビルの所在地では、同種の地盤の上にあるとは必ずしも言い難く、たとえば地盤上で 120 cm/s^2 を越えた地域でも全ての感知器が作動し



(a) 地震感知器作動台数



(b) 地震感知器作動率

()		は都市の数
0.8 to 1	(15)	
0.6 to 0.8	(8)	
0.4 to 0.6	(9)	
0.2 to 0.4	(16)	
0.001 to 0.2	(8)	
その他	(16)	

図2 1992年2月2日地震における東京都、埼玉県の地震感知器作動状況

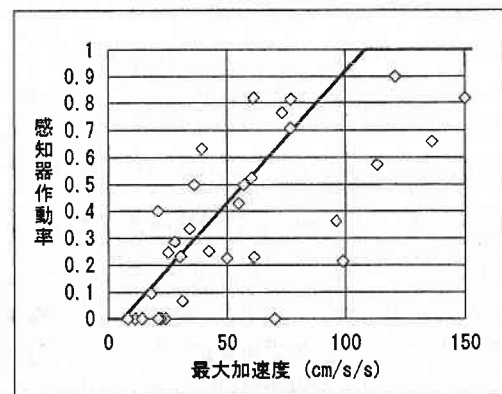


図3 地盤の最大加速度と地震感知器作動率の関係

ていない。また高さや構造など建築物の条件を考慮していないことや、市部では都市部に比べ極端に台数が減ることなどの影響もあり、回帰式のばらつきが大きいと考えられる。

4. 故障の発生率と最大加速度

過去に発生した大規模な地震では、エレベーターにもさ

さまざまな故障が生じている。図4には1983年日本海中部地震以降の地震における故障台数を示す。地震動強さとの関係を求めるため、故障には停電など二次的な被害は除いた。この記録をもとに、過去の地震での地盤上の最大加速度と故障発生率（故障台数/保守台数）との関係を、感知器作動率の推定と同様に重み付きの最小自乗法で求めた。加速度は文献³⁾より SMAC 型以外の地震計の地盤での値を中心に採用し、SMAC 型の値を使用する場合には記録補正後の値を使用した⁴⁾。小さい加速度では故障が発生しないため最低値を50 cm/s²とし、以上の条件を満たす99地点を使用した。また地震対策の向上を考慮して、建築基準法で

の耐震基準改正（1981年6月適用）の前後で区別して計算を行った。各都市での地盤上の加速度 A_i と故障発生率 R_i との関係は、 $A_i \geq A_0$ では R_i が除々に増加するように次式の形で仮定した。

$$R_i = \begin{cases} b \times (A_i - A_0)^a & A_i \geq A_0 \\ 0 & 0 \leq A_i < A_0 \end{cases} \quad (3)$$

(2)式の Δ^2 を最小とする a, b, A_0 の組が求める解となるが、これは非線形の最小自乗法となるため、停止率の計算と同様に各値を反復させることにより、数値的に解を求めることとした。耐震基準が改正される前に設置されたエレベーターに対しては、図5に示す次の結果となった。

$$R = 3.90 \times 10^{-12} \times A^{3.8} \quad (4)$$

改正後の設置されたものに対しては、次式となった。

$$R = 1.78 \times 10^{-10} \times A^{3.2} \quad (5)$$

今回の計算では、耐震基準改正の前後で回帰式には大きな違いが表れなかった。これは日本海中部地震や長野県西部地震などの発生が耐震基準改正から間もなく、改正後のエレベーターが少ないことも影響していると思われる。

既往の研究⁵⁾により、建築物の被害に対しては最大加速度よりも最大速度やSI値⁶⁾の方が相関が良いことが示されている。構造物の地震被害は構造物の固有周期が0.1~0.3秒では最大加速度とよい相関があり、0.3~1.5秒では最大速度やSI値との相関がよいとされている。エレベーターの耐震設計指針¹⁾にある各部の一次固有振動数の目安を参考にすると、カゴ0.25~0.67秒、釣り合い重り0.2~



図4 地震によるエレベーターの故障台数 (1993年日本海中部地震以降)

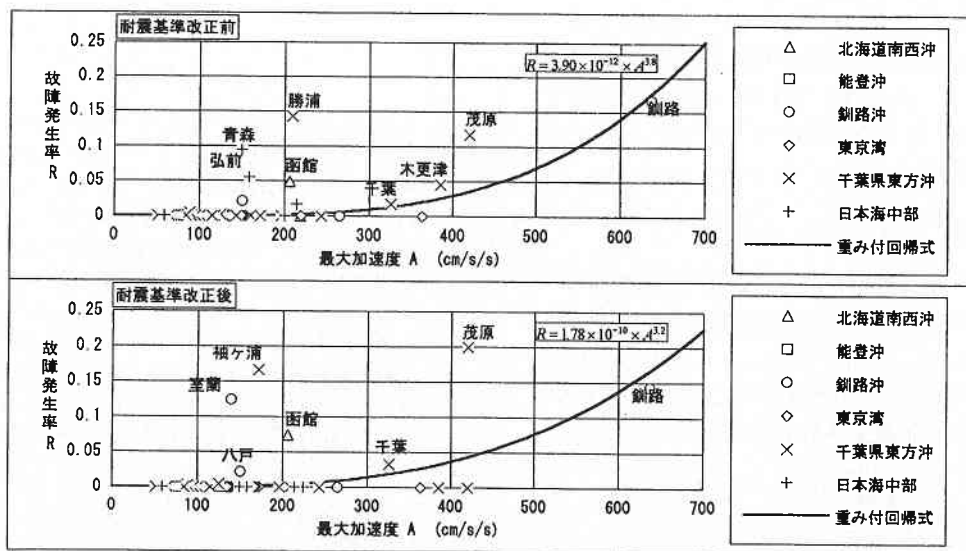


図5 地盤の最大加速度とエレベーターの故障発生率の関係

研 究 速 報

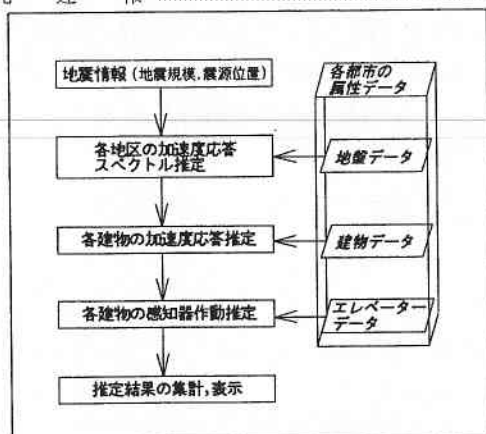


図 6 地震感知器作動率推定の概略

各都市ごとに加速度応答スペクトルを距離減衰式を用いて推定する。ただし距離減衰による応答スペクトルの推定では精度上問題があるため、各地の地震計の実測値により補正することも考えている。次いで推定された加速度応答スペクトルと建物データから地震感知器設置階の加速度応答を計算し、エレベーターのデータより感知器の作動を推定を行う。各データの管理や推定結果の表示には地理情報システム (GIS) を利用し、各地区の属性データとして、地盤、建物やエレベーター等のデータを準備する。第一段階として、以上の方法で感知器作動率の推定を行い、過去の地震での感知器作動率と比較検討し、推定式を補正する。

6. お わ り に

地震発生時のエレベーターの復旧作業の基礎資料とするためにエレベーターの地震被害推定の検討を進めている。まず、地盤の最大加速度と感知器作動率や故障発生率との関係を定量的に把握するために回帰分析を行い、暫定的な関係式を提案した。今後データ数を増やして精度の向上を図り、また故障発生率に関しては最大速度や SI 値による回帰式との比較を行う予定である。しかし現時点では早急な精度向上は望めないため、従来の建築物の地震被害想定で用いられる応答スペクトル法を用いて、地震感知器作動率の推定を行う計画である。第二段階として故障発生率の推定を検討し、将来的には推定結果を用いることにより、今後発生が予想される地震に対してエレベーターへの影響を推定し、復旧人員の確保や配置などに定量的な資料を提供できることと考えている。さらに建物データに用途種別を加えることで医療機関などに優先順位を与えた実用的な最短復旧順路の検討なども可能となると考えている。

(1994年7月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 日本エレベーター協会：昇降機の技術基準の解説，1984。
- 2) 片山，根岸：1992年2月2日・浦賀水道付近の地震の概要，土木学会第47回年次大会，I部門，1992。
- 3) 防災科学技術研究所：強震速報 No. 23, 37, 40-43。
- 4) 童，山崎ほか：被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係，第9回日本地震工学シンポジウム論文集，1994。
- 5) 安藤，山崎ほか：地震動の強さ指標による構造物損傷の評価，第8回日本地震工学シンポジウム論文集，1990。
- 6) 佐藤，片山ほか：新しい制御用地震センサーの開発と試作，第18回地震工学研究発表会，1985。

0.5秒となり、最大速度や SI 値を使用することにより最大加速度を用いるよりも適確に故障発生率を表現できる可能性があると考えられる。

5. エレベーターの地震被害推定法

現在、今後の大規模地震発生に備え、エレベーターの地震被害推定法として、地震感知器の作動と故障の発生状況の推定を検討している。第一段階として、各都市ごとに状況を把握できるようにし、将来的には各建築物ごとに推定を行うことを予定している。推定方法としては地動加速度とエレベーターの被害の回帰式と最大加速度の距離減衰式を併用する方法が考えられるが、回帰式の精度を向上させるためにはデータ数を増やす必要がある。このため、建築物の被害想定等で従来から用いられている応答スペクトル法を用いることとした。これにより感知器作動に関しては、建築物や地盤などに関するデータを作成すれば、感知器設置階の加速度応答を求めることで推定可能となる。故障の発生に関しては、たとえば地盤とカゴの伝達関数 $A(\omega)$ を求めることにより、カゴの加速度応答スペクトル $S_A^c(\omega)$ を地盤上の加速度応答スペクトル $S_A(\omega)$ より

$$S_A^c(\omega) = A(\omega) \times S_A(\omega) \quad (6)$$

などの形で仮定して、地震動のカゴへの影響を検討することになるが、作業量を考慮して、まず感知器作動率の推定から検討することとした。

図6に感知器作動率の推定の概略を示す。始めに地震規模や震源位置などの地震情報や各都市の地盤データから、