



緊急地震速報を活用した長周期地震動予測と 超高層ビルのエレベータ制御への適用

久保 智弘¹⁾、久田 嘉章²⁾、堀内 茂木³⁾、山本 俊六⁴⁾

1) 正会員 ABSコンサルティング、工修

e-mail : tkubo@absconsulting.co.jp

2) 正会員 工学院大学建築学科、教授 工博

e-mail : hisada@cc.kogakuin.ac.jp

3) 防災科学技術研究所、理博

4) 正会員 鉄道総合技術研究所、工博

要 約

本研究では、超高層ビルを対象に緊急地震速報を利用して長周期地震動を対象としたエレベータの地震時管制運転の手法について提案した。そして、東京新宿区に位置する超高層ビルをキャンパスとして利用している工学院大学新宿キャンパスを対象に提案する手法を適用して有効性の検証を行った。

緊急地震速報を利用することを前提に、事前に長周期地震動の到達時間とマグニチュードと震源深さ、震央距離ごとの長周期地震動と建物応答を求めておき、エレベータの地震時管制運転を行う条件を整理し、緊急地震速報を受信した際に長周期地震動が到達する前に停止するためのフローを提案した。長周期地震動の到達時間に関しては、理論的方法によって求められた伝播速度を用いた。長周期地震動の大きさと建物応答については、グリーン関数法により長周期地震動を予測し、その結果から建物応答を求めた。停止条件については、既往の研究を参考に長周期地震動用の閾値を求めて、条件を整理した。

本研究で提案する手法を超高層ビルをキャンパスとしている工学院大学に適用し、観測記録と比較を行った。その結果、到達時間については理論的方法と観測結果から求めた表面波速度がおおむね一致した。次に地震動と建物応答については、平行成層のグリーン関数法による評価は周期4秒から6秒以上においては関東平野における堆積層表面波の影響のため、過小評価となったが、周期2秒から4秒においておおむね一致した。次にエレベータの地震時管制運転への適用について、緊急地震速報から得られる震源情報が限られるため、安全側に評価できるように震源モデルに仮定条件を与えることで、エレベータを事前に停止できることを確認した。

キーワード： 緊急地震速報、長周期地震動、エレベータ、超高層ビル、グリーン関数法、質点系応答解析、地震時管制運転、リアルタイム地震観測システム

1. はじめに

近年、2004年中越地震や2005年福岡県西方沖地震、2007年中越沖地震というマグニチュード6.8以上の大きな地震が発生し、震源近傍において半導体工場やRC造マンション、原子力発電所、一般住宅といった短周期構造物の地震災害が多く見られた^{1),2),3)}。一方、2003年十勝沖地震や2004年東海道沖の地震、2004

年新潟県中越地震、2007年中越沖地震といった地震により発生した長周期地震動により、石油タンクや超高層ビルといった長周期構造物にも被害が発生した。特に2003年十勝沖地震では、震源から200km以上はなれた苫小牧で、石油タンクのスロッシング現象により、火災が発生し⁴⁾、2004年中越地震では、震源から約190km以上はなれた首都圏で長周期地震動により超高層ビルが共振現象により大きく揺れ、エレベータのケーブル類が破損する被害が発生した^{5,6)}。このような関東平野における長周期地震動による被害は以前から指摘されており、1983年の日本海中部地震においても新宿にある超高層ビルのエレベータで被害が報告されている⁷⁾。そのため現在、超高層ビルのエレベータにおける長周期地震動対策が三菱電機株式会社⁸⁾や株式会社日立製作所⁹⁾、森ビル株式会社⁵⁾、鹿島建設株式会社⁶⁾などによって行われており、これらの多くは長周期地震動の到達後にエレベータを制御する仕組みになっており、建物に設置された地震計で観測された地震動から長周期地震動や建物の共振を予測し、エレベータを制御する仕組みになっている。

地震調査推進本部¹⁰⁾によると今後30年間の首都圏におけるM7クラスの地震発生確率が70%程度と評価されており、また東海地震については、86%程度と評価されている。この東海地震が発生した場合、首都圏において長周期地震動が発生することが予測されている¹¹⁾。このため、首都圏にある超高層ビルでは、首都圏直下で発生する地震以外にも、遠く離れた所で発生する巨大地震による長周期地震動に対しても対策を行う必要があると考えられる。

一方、気象庁では、2007年10月1日より、地震災害を軽減するために緊急地震速報の一般配信が始まった¹²⁾。この緊急地震速報では、気象庁は初期微動であるP波と被害を及ぼす主要動であるS波の伝播速度の違いを利用し、震源位置と震源規模を計算する。その情報をそのまま利用者に伝えるものが高度利用者向け緊急地震速報と呼ばれ、利用者側では、用意した機器を用いて情報を受信し、気象庁により認定された手法により、対象地点における震度の大きさを予測することができる。一方、ラジオやテレビでの利用を想定した一般向け配信は、気象庁により対象地域における震度の大きさを推定し、条件を満たした場合に情報を配信するしくみになっている。緊急地震速報は、震源近傍においてP波とS波がほぼ同時に到達するため、直下で発生する地震の場合、緊急地震速報を利用した対応への時間的猶予は無いものという問題¹⁶⁾や大規模な地震場合、マグニチュードが時間と共に大きく成長し、はじめに予測した地震規模と異なることがあり、そういった情報も順次配信されるが、利用者側で過小評価した推定となる問題も考えられる。しかし、長周期地震動はP波やS波に比べて伝播速度が遅く、また震源から遠く離れた所で起こった地震により発生することから、長周期地震動に対応するための時間的猶予と地震規模の評価精度が十分あると考えられる。

そこで本研究では緊急地震速報を用いて長周期地震動が到達する前に到達時間と建物の応答値を予測し、事前にエレベータ制御への適用を検討する。

2. 長周期地震動を考慮としたエレベータ地震時管制運転について

緊急地震速報を利用したエレベータの地震時管制運転については、リアルタイム地震情報利用協議会により検討され、現在短周期地震動の地震動指標である加速度や震度を緊急地震速報から予測し、その大きさに応じてエレベータの地震時管制運転を行っている。しかし、上述のとおり長周期地震動によりエレベータの被害が発生しており、長周期地震動が到達する前にエレベータの地震時管制運転も必要であると考えられる。したがって、本研究では、短周期地震動を対象とした制御方法に加え、緊急地震速報を活用して長周期地震動を考慮したエレベータの地震時管制運転する手法を提案する。提案する手法では、事前に長周期地震動の到達時間を評価し、同時に事前に地震動予測と建物応答解析からエレベータを事前停止するための条件を整理して、緊急地震速報を受信時に即時にエレベータを制御する手法を提案する。本研究で利用する緊急地震速報は、震源規模、震源位置を配信する高度利用者向け配信を対象とする。図1に本研究で提案する手法を示す。

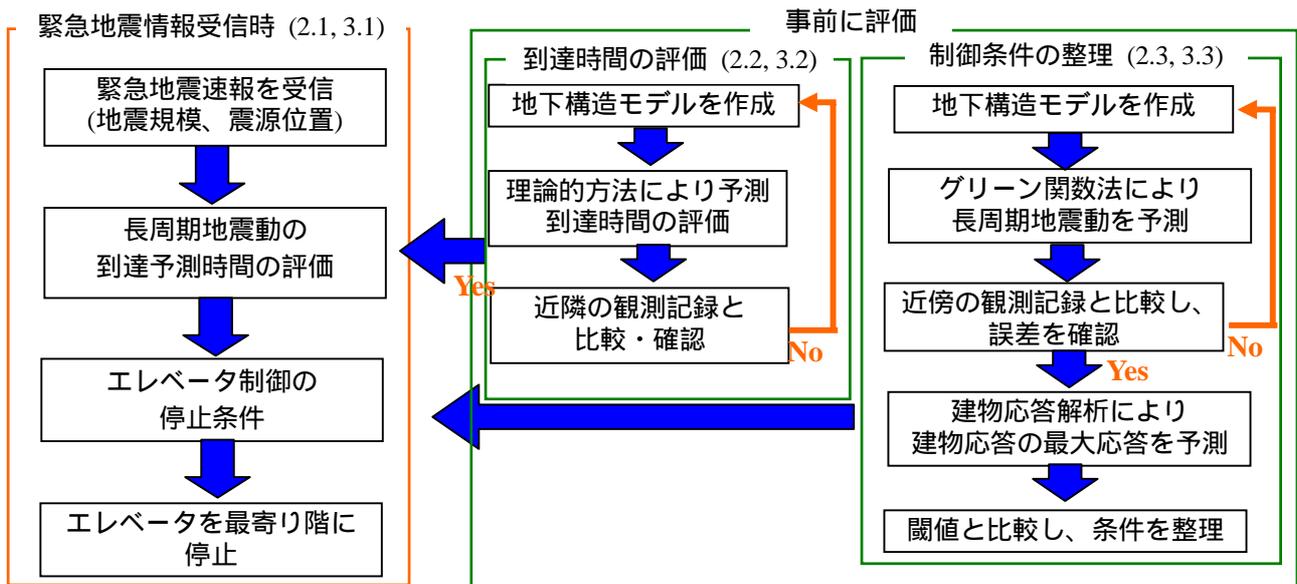


図1：長周期地震動を対象としたエレベータ制御のフロー図

図1より緊急地震速報を受信した場合の制御方法は、短周期地震動におけるエレベータの地震時管制運転方法とほぼ同じ方法により制御を行うが、本研究の手法では、事前に伝播速度と長周期地震動による建物応答を評価しておき、さらに緊急地震速報から得られる震源情報に応じて、エレベータの地震時管制運転を行う条件を整理しておく。表面波は地殻を伝わる表面波と、堆積層で発生する表面波があり、地殻を伝わる表面波が早く伝播する。本研究では、表面波の初動部分で停止することを想定しているため、事前に到達時間を予測する場合、地殻を伝わる表面波を対象としてエレベータを制御することから、地殻を想定した地下構造モデルを緊急地震速報で使用する走時データなどを参考に作成する。その地下構造モデルを用いて理論的方法により表面波の伝播速度を求め、理論的方法によって求められた伝播速度について、近隣の観測記録から得られる表面波の到達時間と比較し、確認する。次に表面波による超高層建物の応答を把握するため、堆積層を考慮した地下構造モデルを作成し、グリーン関数法により長周期地震動を予測する。過去の地震を対象に予測を行い、近隣の観測記録と比較して作成した地下構造モデルの精度を確認する。次に質点系などによる建物応答解析から建物応答を評価する。最後に既往のエレベータ制御方法や過去のエレベータの停止事例を参考に閾値を設定し、様々な深さやマグニチュードの地震について、地震動予測と建物応答評価を行い、エレベータの地震時管制運転の条件を整備する。

本研究では提案する手法を検証するため、首都圏(新宿区西新宿)にある超高層ビルをキャンパスとしている工学院大学を対象に提案する手法を適用し、有効性の確認を行う。図1中の数字は、本論文に対応する節を示し、2.1ではエレベータの地震時管制運転と制御するための閾値について、2.2では理論的方法による到達時間の評価について、2.3では長周期地震動の予測と建物応答解析について説明する。3章では2章に挙げた手法について工学院大学に適用した事例を示し、3.1ではエレベータの閾値の設定について、3.2では観測記録を用いて2.2節で検討した到達予測時間について比較を行い、3.3では同様に観測記録を用いて2.3で提案した長周期地震動と建物応答の評価及び、エレベータ制御への適用について検討を行った。

2.1. エレベータの地震時管制運転と地震被害、長周期地震動用閾値について

上述のように、エレベータは短周期地震動のみならず、長周期地震動によりケーブルなどで被害が発生している。図2に社団法人エレベーター協会のエレベータの概念図¹³⁾を参考に作成したエレベータの概略図を示す。図2に示すようにエレベータは制御盤や巻上機、つり合いおもり、かご、ロープなどから成る。このうちつり合いおもりやかごは2から10Hz程度で、メインロープやテールコードといったロープ

類は0.1Hzから5Hz程度の固有振動数を持つ¹⁴⁾。そのため、1978年宮城県沖地震や1994年兵庫県南部地震のように短周期地震動が大きい地震では、つり合いおもりやかご、巻上機、制御盤といった高振動数の固有振動数を持つものに多く被害が発生し¹⁵⁾、2004年東海道沖の地震や2004年中越地震において、東京の超高層ビルでロープやケーブルなどの低振動数の固有振動数を持つものに被害が発生している^{6, 16)}。また、エレベータメンテナンス会社へのヒアリングを行い、エレベータが運行中に長周期地震動によりロープやケーブルなどが大きく揺れた場合、ロープ類がレールやかごなどに絡まりロープ類が破断や損傷の恐れがあるということを確認した。さらに国土交通省社会資本整備審議会建築分科会建築物等事故・災害対策部会の報告書¹⁷⁾によるとケーブル類が絡まった状態でエレベータを運行させてしまうとつり合いおもりの落下や巻上機の故障の恐れがあるとされている。

一般的にエレベータの地震時管制運転のための設定値は、表1にあるように加速度により運転を制御されている。図3に急行ゾーンのないエレベータにおける地震時管制運転の制御フローを示す。

表1：耐震指針別の地震感知器の設定値(昇降機技術基準の解説¹⁵⁾より)

	建物高さ	特低 (gal)	低 (gal)	高 (gal)
現行指針 1998年以降	60m以下	80又はP波	150	200
	60m超120m以下	30, 40, 60又はP波	60, 80, 100	100, 120, 150
	120m超	25, 30又はP波	40, 60, 80	80, 100, 120
81年指針 1981年～1998年	60m以下	80又はP波	120	200
	60m超120m以下	30, 40, 60又はP波	60, 80, 100	100, 120, 150
	120m超	25, 30又はP波	40, 60, 80	80, 120, 150

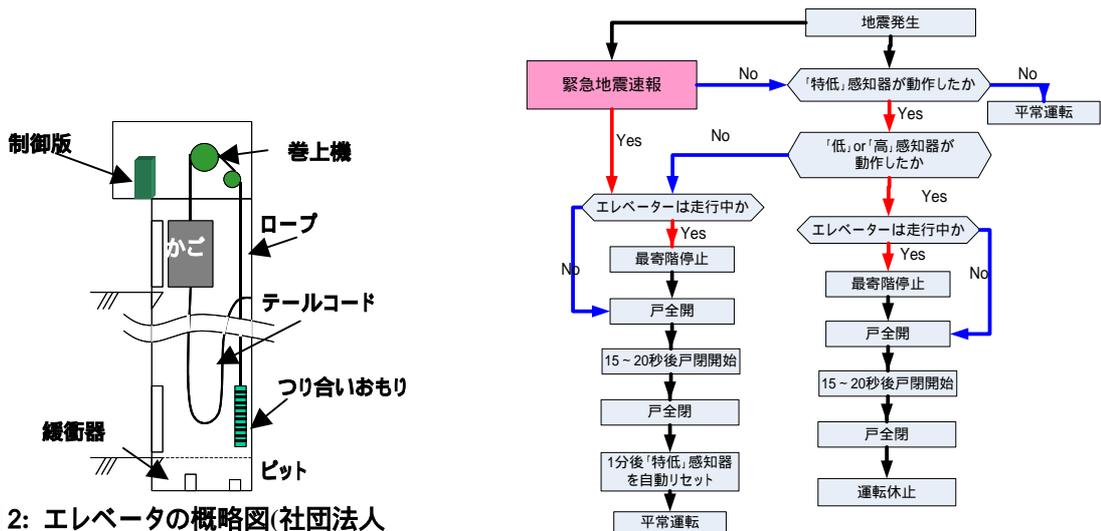


図2：エレベータの概略図(社団法人エレベータ協会の概念図¹³⁾を参考)

図3：急行ゾーンのないエレベータの地震時管制運転の例

表1にある設定値が異なるのはエレベータ設置の設計を行う場合、建物応答の影響とエレベータ性能を考慮してエレベータ制御の設定値が決められており、このため建物高さやメーカーによって設定値が異なっているためである。表1と図3にある地震感知器の「特低」が感知すると、エレベータが最寄り階に一時停止し、一定期間後障害が無ければ、メンテナンス業者の点検なしに平常運転を開始する。一方、地震感知器の「低」及び「高」が感知すると急行ゾーンのないエレベータは最寄り階に停止する。これら「低」と「高」により停止した場合、復旧するためにメンテナンス業者による安全確認が必要となる。

エレベータの地震被害として、エレベータによる閉じ込めがある。エレベータの閉じ込めは、最寄り階へ着床している途中にかごと乗り場スイッチが接触したり、つり合いおもりがレールから外れてかごと衝突したり、ケーブルが絡まったりすることなどにより起こる¹⁸⁾。2005年千葉県北西部地震において、首都圏のエレベータで多くの閉じ込めが発生したが、この多くが最寄り階に着床中にエレベータのかごと乗り場スイッチが地震の揺れにより接触してしまい、安全装置が働き停止したことによるものであ

た²²⁾ .このため、翠川(2004)¹⁹⁾によると運行中のエレベータが停止するまでに約5秒程度かかることから、できる限り早急にエレベータを停止させる必要がある．したがって、地震動により揺れ始める前にエレベータを最寄り階に停止することが必要である．そこで、主要動が到達する前にエレベータの地震時管制運転を行うために、緊急地震速報を利用したエレベータ制御がリアルタイム地震情報利用協議会により検討され、図3に示すように緊急地震速報の信号を「特低」に送る方法が、一般的なエレベータで適用されている．ここで、「特低」に信号を送るようすることで、緊急地震速報が誤報であった場合などでもエレベータを停止してもメンテナンス業者による安全確認の必要なく自動復旧するためである．

次にエレベータの地震時管制運転の制御閾値は、表1からエレベータは主に加速度により運転制御を行っているため、超高層ビルの場合、長周期地震動により大きく揺れることがあり、このとき短周期の地震動である加速度はあまり大きくないため、地震感知機が感知せずエレベータが動き続けると問題点がある．このため、建物周期を考慮してエレベータを制御する方法として、小野田・ほか⁹⁾による波動エネルギーセンサーによる制御方法がある．この波動エネルギーセンサーによる制御方法は、日立エレベータサービスにより研究されたもので、日本海中部地震の際、都内のビルにおいてエレベータのテールコード等の長尺物が引っかかる恐れがある±10cmの揺動が観測されたが、センサーが設置されていた建物上部の加速度が小さかったためエレベータが従来のセンサーの設定値では停止できなかったことから、超高層ビルなど固有周期の長い建物のエレベータを制御するためのセンサーとして開発された．式(1)と式(2)に小野田・ほかにより、変位と波動エネルギー係数の関係及び、波動エネルギー係数と加速度の関係を表した式を示し、表2に小野田・ほかによる波動エネルギーと震度、加速度、速度の関係を示す．

$$a = 4\pi\sqrt{\pi * e} f^{1.5} \quad (1)$$

$$e = \pi * \left(\frac{D^2}{T} \right) \quad (2)$$

ここで、a:加速度(gal)、e:波動エネルギー係数(kine・cm)、D:建物変位(cm)、T:周期、f:振動数

表2：小野田・ほかによる波動エネルギーと震度、加速度、速度について

震度階	0							
波動エネルギー(kine・cm)	0～0.003	0.003～0.003	0.03～0.3	0.3～3	3～30	30～300	300～3000	3000以上
加速度(gal)	0～0.8	0.8～2.5	2.5～8	8～25	25～80	80～250	250～400	400以上
速度(kine)	0～0.13	0.13～0.4	0.4～1.3	1.3～4	4～13	13～40	40～130	130以上

波動エネルギー係数は、式(2)に示すように速度(D/T)と変位(D)の積によって表される．式(1)から、例えば建物高さ120m、周期3秒の超高層ビルを対象とすると地震時管制運転の設定値を表2から震度相当となる波動エネルギー係数を3～30kine・cmとした場合、加速度が7gal～23gal程度となり、式(2)から変位が2.7～4.7cm程度になる．本研究では、長周期地震動へも対応した既往の制御方法としてこの波動エネルギーによる制御方法を参考にして、エレベータの地震時管制運転の閾値を設定する．

2.2. 理論的方法による長周期地震動の到達予測時間の評価

本研究では、理論的手法を用いて長周期地震動の到達予測時間の評価を行う．上述の通り、本研究では地殻を伝わる表面波を対象に到達予測時間の評価を行う．図1に示したように、まず対象地点の地下構造モデルを作成する．このとき、地殻を伝わる表面波の伝播速度を求めるため、緊急地震速報で用いている防災科学技術研究所の走時データからモデル化した地盤を使用する．表3にその地盤モデルを示し、このモデルを用いてHisada and Bielak²⁰⁾により表面波の分散曲線を求め、地殻を伝わる表面波の伝播速度として、Rayleigh波の基本モードにおけるエアリー相の速度を読み取った．図4にRayleigh波とLove波の分散曲線における群速度とメディアムレスポンス²¹⁾を示す．

表3：日本の地殻モデル
(防災科学技術研究所 走時データベースより)

層番号	密度 (t/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Q	層厚 (m)
1	2.3	5450	3179	300	1000
2	2.3	5501	3209	300	1000
3	2.3	5527	3224	300	2500
4	2.3	5816	3392	400	3000
5	2.3	6035	3521	500	4000
6	2.3	6206	3620	600	3000
7	2.3	6381	3722	600	3000
8	2.3	6684	3899	1000	5000
9	2.3	7201	4200	1000	8000

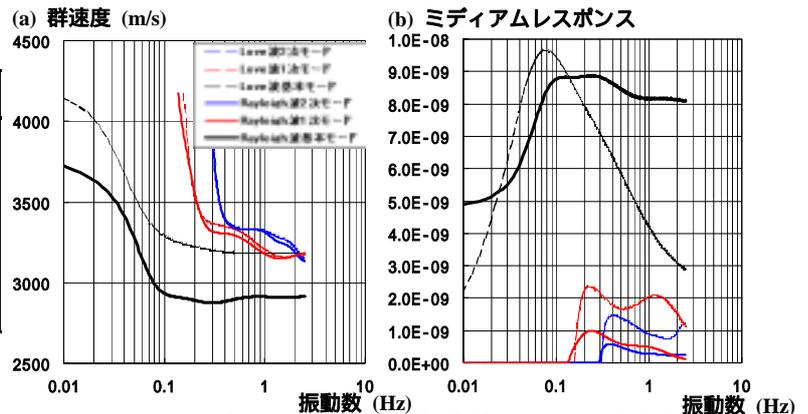


図4: Rayleigh 波と Love 波の分散曲線における群速度と
メディアムレスポンス

長周期地震動の伝播速度は図4から読み取り、本研究ではRayleigh波の基本モードの伝播速度から2.9km/sとする。ここでRayleigh波の基本モードとしたのは、Rayleigh波の伝播速度はLove波の伝播速度よりも遅くなっているが、メディアムレスポンスにおいて、超高層ビルに影響のある0.2Hz以降でRayleigh波がLove波よりも大きいことから、最も影響のあるRayleigh波の基本モードの値を長周期地震動の伝播速度とした。

2.3. 長周期地震動の予測と建物応答の評価

本研究では事前に様々な地震における長周期地震動波形と建物応答を予測し、エレベータに影響を与える恐れがある地震の条件を整理し、エレベータ制御に適用する。そのために長周期地震動を予測し、その結果を用いて、建物応答を評価する。

長周期地震動を予測する手法は、経験的手法と理論的手法があり、経験的手法としては、Shabestari・Yamazaki²²⁾や内山・翠川²³⁾による工学的基盤におけるスペクトルの距離減衰式や座間・ほか²⁴⁾によるやや長周期地震動を対象とした加速度フーリエスペクトルの経験的な評価方法などがある。しかし、長周期地震動は地震基盤より上部の深部地下構造の影響を受けるため、工学的基盤におけるスペクトルの距離減衰式では深部地下構造の影響を過小評価する可能性がある。座間・ほかによるやや長周期地震動を対象とした加速度フーリエスペクトルの経験的な評価方法は、海溝型地震と内陸の地震について、地震規模を考慮した標準スペクトルと地震地体構造区分ごとに気象台や港湾における観測記録を用いて伝播特性とサイト特性を地域特性として評価し、標準スペクトルと地域特性を乗じることにより予測スペクトルを求める。このため、これに習って地域特性を評価するためには地震地帯構造区分ごとに十分な長周期地震動の観測記録が必要となる。

一方、理論的手法²⁵⁾のうち近似的方法として、地下構造を平行成層として仮定し波数積分法などにより解析的に計算する手法があり、厳密的方法として、対象地域の地下構造を3次元的にモデル化し、有限要素法や有限差分法で数値的に計算する手法がある。これらの方法は、観測記録のない地点においても地震動を評価できる利点があるが、解析的に計算する手法では、短い計算時間で地震動を計算できるが平行成層を仮定するため盆地効果を取り入れることが出来ないという問題がある。また3次元の地下構造モデルにより計算する厳密な方法では、計算時間を必要とすることや計算機の性能と技術が求められるため、計算が難しいといった問題がある。

そこで本研究では、事前に様々な条件の長周期地震動を予測するため、3次元地下構造を用いた有限要素法や差分法では計算時間が多くかかることから、第一次近似として平行成層を仮定したHisada²⁶⁾によるグリーン関数法により地震動を計算する。Hisadaによるグリーン関数法では、式(3)に示すAki and Richards²⁷⁾による表現定理により地震動を求める。

$$U_k^S(X_O; \omega) = M^S(\omega)(e_i n_j + e_j n_i)U_{ik,j}(X_O, X_S; \omega) \quad (k=x,y,z) \quad (3)$$

ここで、 X_0 は観測点、 X_s は点震源、 e_i はすべりの単位ベクトル成分、 n_j は下盤側を基準とした断層面の単位法線ベクトル成分、 $M^s(\)$ は小地震の震源スペクトル、 U_{ikj} はj方向のグリーン関数、添え字 i, j, k は x, y, z 軸に対応する。 $M^s(\)$ は地震モーメントと震源時間関数で決まり、ここでは ω^{-2} モデルによって与えられ、地震モーメントとコーナー周波数(f_c)、 F_{max} により決まる^{28,29}。コーナー周波数は、地震モーメントと応力降下量から与えられる²⁸。 $(e_i n_j + e_j n_i)$ は放射特性の項となり、震源の放射特性により決まる。緊急地震速報から得られる震源情報はマグニチュードと震源位置のため、グリーン関数法により長周期地震動を予測する場合、緊急地震速報から得られない情報について、仮定条件が必要となる。本研究では、仮定条件として震源モデルを点震源で定義し、地震モーメントは武村³⁰から気象庁マグニチュードを求め、 F_{max} と応力降下量は既往の研究成果を参考に決める。放射特性については、過小評価とならないようSH波とLove波、SV波とRayleigh波をとともに1と仮定する。

一方、建物応答については、多質点系モデルや3次元の立体フレーム解析による応答解析では、計算時間とモデル化に時間を必要とし、また長周期地震動を対象としていることから建物応答が1次モードによる揺れが支配的と考え³¹、1次モードによる等価な1質点系モデルによる応答解析により評価を行う。1質点系モデルによる応答解析では、固有周期と減衰定数、刺激係数から求めることができるため、簡易に評価することが出来る。

またエレベータの地震時管制運転の閾値は、既往の超高層ビルにも対応した閾値として2.1で述べた小野田・ほか⁹があり、本研究では、小野田・ほかを参考にエレベータの閾値を設定する。このとき、エレベータのメンテナンス記録に地震による停止事例など参考となる資料がある場合は、それも参考に設定する。以上の結果を用いてマグニチュードと震源深さ、震央距離からエレベータを制御する条件を整理する。

3. 超高層ビルを対象とした緊急地震速報を利用した長周期地震動におけるエレベータ制御の適用について

ここでは、図1に示した提案した手法を首都圏に超高層ビルをキャンパスとして利用している工学院大学に適用する。工学院大学では地震観測を行っており、この記録を利用して提案する手法の有効性を確認する。

3.1. 工学院大学における観測システムとエレベータの地震時管制運転の閾値について

(a) 工学院大学における観測システムとエレベータの地震時管制運転

工学院大学は新宿副都心にキャンパスとして超高層ビルを利用しており、図5(a)に示すようにこの超高層ビルは、高さ約143mの29階建て、1次固有周期3秒の大学棟(工学院大学)と約119mの27建てのオフィス棟(エステックビル)の2棟からなる。この2棟の超高層ビルでは1990年から強震・強風観測を行っており、2007年8月にシステムを更新してリアルタイムでの強震・強風観測を行っている。図5(a)の赤いボックスは、計測器の設置位置を示す。これまで強震観測システムにより、2005年千葉県北西部地震といった短周期地震動のみならず、2004年東海道沖の地震、2004年新潟県中越地震などの長周期地震動の記録も観測されている。しかし、2007年能登地震や2007年中越沖地震については、システムの更新中のため、観測記録が得られなかった。

図5(b)は工学院大学の大学棟を示し、エレベータが3種類11台設置されている。これらエレベータは1990年以降のエレベータ新耐震基準(水平震度1.0G)で設計されている¹⁵。このうち高層階(28階)まで利用できるエレベータは中・高層用の6台と非常用の1台である。これらエレベータは、用途ごとにメーカーが異なり、地震感知器の種類や設定値も異なっており、中・高層用の地震感知器の設定値を表4に、非常用の地震感知器の設定値を表5に示す。表4から中・高層用のエレベータにP波センサーが設置されていないが、(株)東京測振により製造された波動エネルギーセンサーが設置されている。この波動エネルギーセンサーでは、観測された地震動(加速度)を積分して速度と変位を計算し、その最大速度と最大変位の積をとり、その値を波動エネルギー係数としてエレベータを制御している。一方、表5から非常用エレベータには、一般的な地震感知器であるP波、S波センサーが取り付けられているが、長周期地震動用セ

センサーは設置されていない。図6には、中・高層用におけるエレベータの地震管制運転のフローを示し、非常用エレベータにおける地震管制運転のフローは急行ゾーンがないため、一般的な地震管制運転となるため、図3と同じフローとなる。

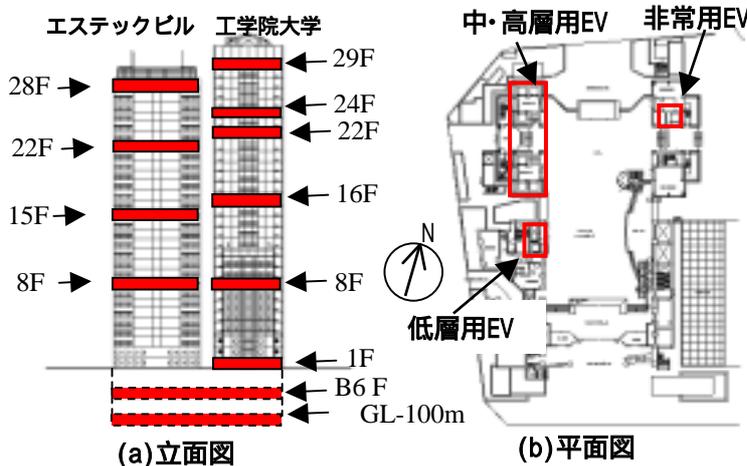


図5：工学院大学における地震計配置とエレベータ配置の立面図及び平面図

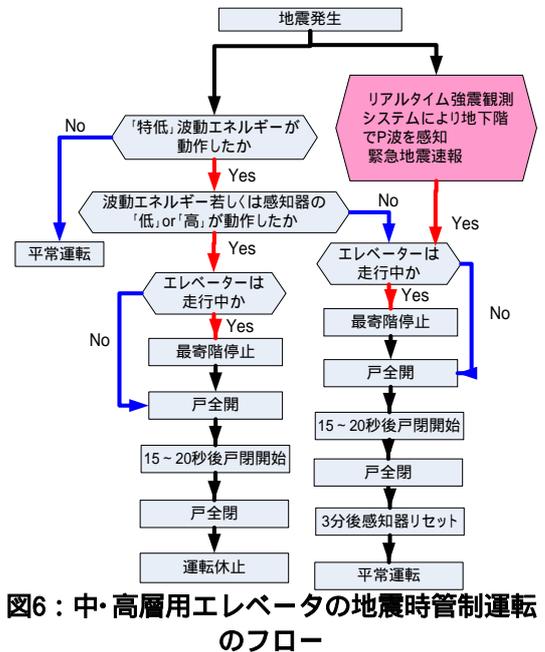


図6：中・高層用エレベータの地震時管制運転のフロー

表4：中・高層用エレベータの地震感知器の設定値

P波センサー (特低)			S波センサー (低)			S波センサー (高)		
Gal	設置階	停止時間	Gal	設置階	停止時間	Gal	設置階	停止時間
			80	PH(29階)	手動復旧	120	PH(29階)	手動復旧
波動エネルギー (特低)			波動エネルギー (低)			波動エネルギー (高)		
kine・cm	設置階	停止時間	kine・cm	設置階	停止時間	kine・cm	設置階	停止時間
10	PH(29階)	自動復旧(3分)	30	PH(29階)	手動復旧	100	PH(29階)	手動復旧

表5：非常用エレベータの地震感知器の設定値

P波センサー (特低)			S波センサー (低)			S波センサー (高)		
Gal	設置階	停止時間	Gal	設置階	停止時間	Gal	設置階	停止時間
5	Pit下(B6レベル)	自動復旧(1分)	40	PH(29階)	手動復旧	80	PH(29階)	手動復旧

図3と図6から、表4と表5にある地震感知器の「特低」が感知すると、エレベータが最寄り階に一時停止し、一定期間後障害が無ければ、メンテナンス業者の点検なしに平常運転を開始する。一方、地震感知器の「低」及び「高」が感知すると工学院大学のエレベータは急行ゾーンがないため、最寄り階に停止する。

現在工学院大学にあるエレベータは、2004年新潟県中越地震での長周期地震動による被害⁵⁾を踏まえ、地震対策用にケーブルの引っかかり防止対策などを行っている。しかし、1990年に設置されたもので、エレベータ設備としては古い。エレベータ制御装置として各エレベータ会社から公表された自動エレベータ復旧装置などのシステムを取り込むことは難しく、そういったシステムを取り付ける場合、エレベータを再設置するのと同じくらい費用がかかると評価された。また、エレベータメンテナンス会社へのヒアリングを行い、エレベータが運行中に長周期地震動によりロープやケーブルなどが大きく揺れた場合、ロープ類がレールやかごなどに絡まり破断や損傷の恐れがあることを確認している。

そこで工学院大学では、既存のシステムを利用して安価に行えるエレベータの地震対策として、リアルタイム地震情報利用協議会によるエレベータ制御のフロー¹⁴⁾を参考にして、現在受信している緊急地震速報から大きな主要動や長周期地震動の到達が予測された場合に加え、表3から中・高層用エレベータにはP波センサーが無い場合、緊急地震速報が間に合わない直下地震への対策としてリアルタイム観測

システムにおける地下6階の上下動記録を用いて、エレベータの制御も行う。現在工学院大学と防災科学技術研究所は共同研究として長周期地震動を対象とした緊急地震速報の活用に関する研究を行っており³²⁾、このため本研究では防災科学技術研究所からHi-netを利用したネットワークによる緊急地震速報を利用する³³⁾。この防災科学技術研究所により配信されている緊急地震速報は気象庁による緊急地震速報の情報(震源位置及び震源規模)も含まれており、本研究では気象庁による緊急地震速報の情報を基に長周期地震動対策を検討する。

図3と図6の図中の赤いボックスが、緊急地震速報とリアルタイム観測システムを利用したエレベータの地震時管制運転を制御するフローを示す。これら図3と図6のように、緊急地震速報やリアルタイム観測システムにより、エレベータを停止すると判断された場合、エレベータを一時停止するフローに信号を送ることで、速やかにエレベータを最寄り階に停止することが出来る。仮に緊急地震速報が誤報であっても一定期間後、メンテナンス業者の安全確認なしに、正常運転することが出来る。長周期地震動の場合、主要動では「特定」や「低」などのセンサーが感知せず、その後到達する長周期地震動の揺れによりケーブル類の固有振動数の低いものが大きく揺れ、運行中のエレベータでケーブルが絡まり、緊急停止する可能性もある。したがって、緊急地震速報を活用して短周期地震動のみならず、大きな長周期地震動の到来が予測された場合、事前にエレベータを一時停止させることは必要であると考えられる。

(b)長周期地震動を対象としたエレベータの地震時管制運転用の閾値

緊急地震速報を用いて長周期地震動を対象としたエレベータ制御するための閾値について工学院大学を対象として検討した。既存のエレベータの地震時管制運転の閾値として小野田・ほか⁹⁾による波動エネルギー係数を参考にして、工学院大学でこれまでエレベータが停止した地震を調査し、その結果を利用して長周期地震動用のエレベータ制御の閾値を検討した。表6に工学院大学やエレベータメンテナンス会社に記録が残っていた2004年以降の停止事例について、調査した地震とその時の停止状況及び地震観測システムで得られた観測記録、29階における観測記録から求めた波動エネルギー係数を示す。ここで求められた波動エネルギー係数は、地震時に中・高層用エレベータの波動エネルギーセンサーで観測された値ではなく、29階における観測記録から最大速度と最大変位を求めて、乗じた推定値である。予測応答値は、本研究で提案する手法により求められた建物応答値であり、詳しくは後述する。

表6：エレベータ停止事例について

月日	Mjma	震源地	震源深さ	29階				エレベーター		予測 応答値 (cm)
				最大加速度 (cm/s ²)	最大加速度 (cm/s ²)	最大変位 (cm)	波動エネルギー係数	中・高層用	非常用	
2004年9月5日	7.4	東海道沖(23時)	44km	3.7	14.9	5.7	28.5	運休	記録無し	8.5
2004年10月23日	6.8	新潟県中越地方	13km	5.6	27.3	7.4	61.7	運休	記録無し	10.1
2005年7月23日	6.0	千葉県北西部	73km	36.4	85.0	3.6	29.5	運休	運休	- - -
2005年8月16日	7.2	宮城県沖	42km	6.7	29.7	4.5	29.5	自動復旧	自動復旧	7.4
2005年10月16日	5.1	茨城県南部	47km	7.6	13.6	0.3	0.2	異常なし	自動復旧	- - -
2007年7月16日	6.8	新潟県中越沖	17km	---	---	---	---	運休	運休	10.0
2008年5月8日	7.0	茨城県沖	35km	5.1	31.0	4.7	55.1	運休	自動復旧	12.6

表6の停止事例と表4、5のエレベータの設定値を比較すると、首都圏で長周期地震動が観測された東海道沖地震や中越地震、宮城県沖地震、中越沖地震、茨城県沖の地震において、中・高層用エレベータが停止している(表中の薄青部分)。一方、非常用エレベータでは、宮城県沖地震においてP波センサーの「特低」により一時停止しているが停止後1分程度で復旧するため、エレベータが稼動している状態に長周期地震動が遅れて到達することにより、周期の長いケーブル類などが大きく揺れて絡まり、エレベータに被害が生じる可能性がある。このため、長周期地震動が予測される場合には、長周期地震動が到達する前にエレベータを停止し、長周期地震動が到達後もしばらくの間エレベータを停止させる必要がある。

次に長周期地震動用のエレベータ制御の閾値について、表6のエレベータ停止事例と観測記録、小野田・ほかによる波動エネルギー係数による制御方法を参考に検討する。小野田・ほかでは、エレベータを制御する場合、震度は1995年以前の震度階の震度 相当で制御するよう検討されており、2.1から周期3秒の超高層ビルの場合、変位が約2.7～4.7cmになり、表6から変位が3cm程度の場合に停止している。したがって、閾値を3cmとした場合、式(2)から波動エネルギー係数は9.4kine・cmと得られ、表4の工学院大

学における波動エネルギーセンサーによる制御の「特低」とほぼ一致する．同様にこの変位3cmを周期2秒～5秒の超高層を想定した場合、5.7～14.1 kine・cmとなり震度階 相当となる．

以上のことから、長周期地震動の到達前にエレベータを停止させる閾値については、本来エレベータケーブルなどの地震応答解析からエレベータが影響を受けると考えられる閾値を求める必要があるが、本研究ではここで得られた3cmを閾値としてエレベータを制御する．ここで、建物応答速度や変位は予測値のため、最大速度と最大変位を乗じて波動エネルギー係数を求めた場合、それぞれに観測値と予測値の誤差があり、2つの誤差を重ね合わせてしまうため、本研究では簡易的に変位を閾値として利用する．

3.2. 理論的手法による到達予測時間と観測記録による到達予測時間の比較

本研究では、図1と2.2に示したように理論的方法により地殻を伝わる表面波を対象として、到達時間を予測し、エレベータ制御を行う．ここでは理論的方法による伝播速度と工学院大学の観測記録から得られる到達予測時間の比較を行う．

理論的手法による表面波の伝播速度と観測記録から得られる表面波の伝播速度を比較するために、工学院大学の観測システムにより1994年から2007年1月までの観測記録を用いて(174個のうち97個を使用)、P波、S波、表面波(約3秒を対象)の到達時間を読み取り、表面波の伝播速度を求めた．地震発生時刻については、気象庁の震度データベース³⁴⁾にある地震発生時刻(時分秒)を利用し、工学院大学で観測された時間と合わせて、到達時間を評価した．はじめに、図7に2004年新潟県中越地震における工学院大学で観測された事例を示し、P波、S波、表面波の読み取り位置について説明する．図7は観測された工学院大学のGL-100mにおける加速度記録(黒線)と工学院大学29階における変位の観測記録(青線)、工学院大学から約2.3km離れた所にあるK-Net新宿(TKY007)における加速度記録(赤線)を示し、矢印は読み取った到達時間を示す．

図7から工学院大学のGL-100mにおける観測記録とK-Net新宿における観測記録は共に、P波、S波、表面波の到達がほぼ一致しており、地震発生後P波が約37秒後、S波が59秒後、表面波が93秒後に到達している．このことから、やや離れているK-Netの観測記録でもほぼ同じ結果が得られることから、観測記録のない地点においても近隣にK-Netなどの観測記録があればそれを利用して、理論的手法によって得られた到達予測時間と比較することが出来る．

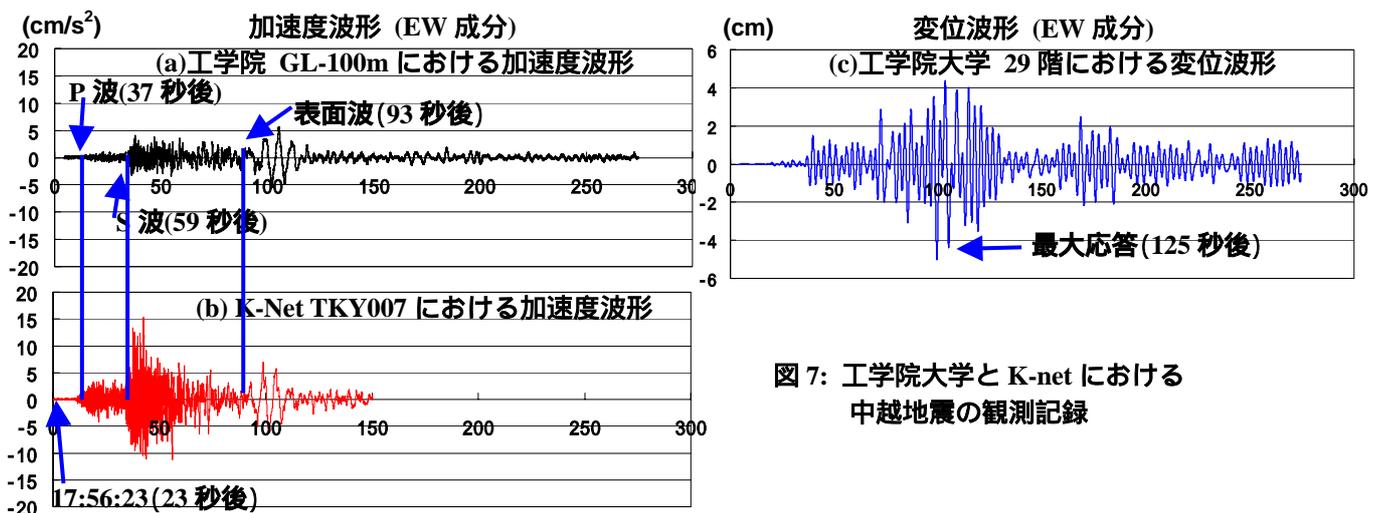


図7: 工学院大学と K-net における中越地震の観測記録

一方、長周期地震動による揺れは、29階での最大応答は地震発生から約125秒後にS波による揺れよりも表面波による揺れにより大きく揺れていることが分かり、さらに地震発生から最大応答まで十分な時間がある．このため超高層建築物において長周期地震動への対応を行う必要がある、地震発生から長周期地震動の到達まで十分な時間があることから、長周期地震動に対して到達前に十分に対応することが出来ると考えられる．ここで、長周期地震動到達から最大応答まで十分な時間があるが、長周期地震動

の到達が予測できた段階でいち早くエレベータを停止させることでさらに被害を低減することが出来る。

次に理論的手法によって求められた表面波の伝播速度と観測記録から得られた表面波の伝播速度の比較を行う。図9に利用した震源の位置と規模、震源深さを示し、図10に震央距離とP波、S波、表面波の到達時間を示す。利用した記録のうち表面波が観測された観測記録は15個ある。

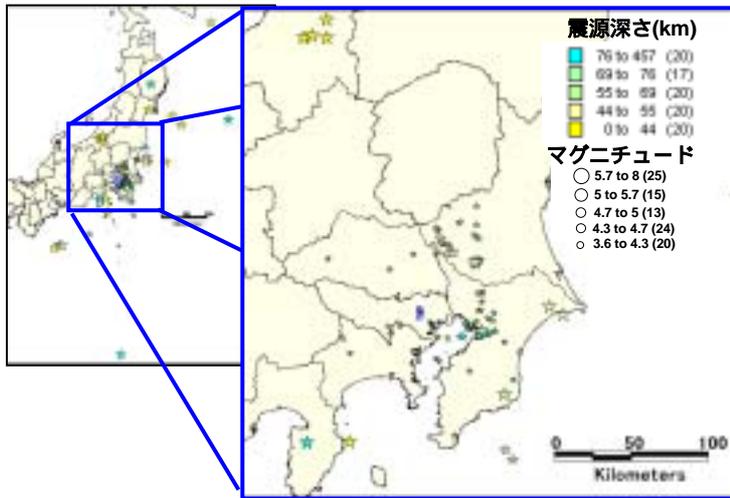


図 9:到達時間の整理に利用した地震

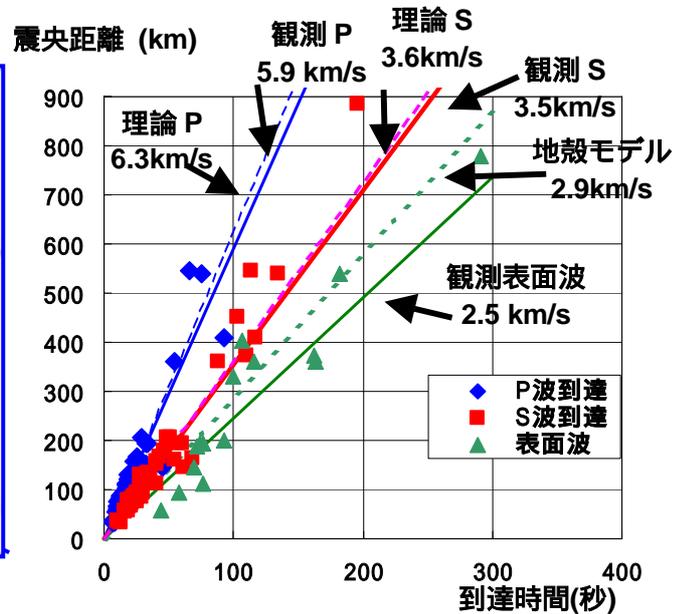


図 10: 工学院大学における観測記録の到達時間

図10から、観測記録から得られたP波速度とS波速度、表面波速度はP波が5.9km/s(青線)とS波が3.5km/s(赤線)、表面波が2.5km/s(緑線)で到達しており、理論的手法により得られたP波速度は6.3km/s(青破線)で、S波速度は3.6km/s(赤破線)、表面波速度が2.9km/s(緑点線)となり、理論的方法と観測記録による到達速度がほぼ一致した。一方、既往の研究³⁵⁾によると、関東平野において1秒以上のS波速度が約2.6km/s ~ 3.4km/sで伝播する事が確認されており、今回整理した観測記録と理論的方法によって得られた速度とほぼ一致する。また、Furumura and Kenntte³⁶⁾によると日本におけるLg波の伝播速度が約2.8km/s ~ 3.5km/sであることから、本研究で得られた観測記録による伝播速度と理論的方法から得られた伝播速度は、この伝播速度とおおむね一致している。このことから、観測記録から得られた表面波の伝播速度は、表面波のうち堆積層で発生する表面波ではなく、地殻を伝わってくる表面波により超高層ビルが揺れ始めていると考えられる。したがって、地殻を伝わってくる表面波により超高層ビルは揺れ始めており、このため長周期地震動への対応としてこの地殻を伝わってくる表面波を対象として事前にエレベータ制御を行うことで、より早期に対応することが出来ると考えられる。

以上のことから、理論的手法によるP波とS波、表面波の到達時間は観測記録から得られた到達時間とほぼ一致しており、理論的手法により得られた長周期地震動の到達予測時間を利用できる。

3.3. 観測記録と理論的方法による長周期地震動予測と建物応答の比較

上述のように本研究では、様々な長周期地震動を予測するため、簡易にかつPCでも計算できる平行成層を仮定した波数積分法によるグリーン関数法を用いる。応答解析についても長周期地震動を対象としており、建物応答が1次モードによる揺れが支配的であることから、1質点系モデルによる応答解析により評価を行う。ここでは、2004年9月5日23時に発生した東海道沖の地震、2004年新潟県中越地震の本震、2006年宮城県沖の地震を対象に工学院大学における観測記録を用いて比較を行った。表8に使用した地震の諸元を示す。

(a) 地下構造モデル及び震源モデルの設定

はじめに対象地点の地下構造モデルを作成するため、山田・山中³⁷⁾と地震ハザードステーションにより公開されている地下構造データ³⁸⁾を参考に、関東平野内を想定した堆積層モデルを作成した。堆積層より深い部分については、日本の地殻モデルと同様に防災科学技術研究所の走時データからモデル化した。ここで作成した堆積層モデルを表7に示す。

表7：堆積層モデル

層番号	密度 (t/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Q	層厚 (m)	Data
1	1.85	1840	500	100	400	山田・山中 (2003) 地震ハザードステーション
2	1.9	1900	750	100	800	
3	2	2200	1350	150	650	
4	2	3863	2287	300	650	
5	2.3	5527	3224	300	2500	防災科学技術研究所 走時データベース
6	2.3	5816	3392	500	3000	
7	2.3	6035	3521	500	4000	
8	2.3	6206	3620	600	3000	
9	2.3	6381	3722	600	3000	
10	2.3	6684	3899	1000	5000	
11	2.3	7201	4200	1000	8000	
12	2.3	7775	4364	1000	9000	
13	2.3	7804	4380	1000	10000	

震源モデルの仮定条件は2.3の仮定条件に加え、応力降下量とFmaxについてKagawa et al³⁹⁾と鶴来・ほか⁴⁰⁾を参考に応力降下量を3Mpa、Fmaxを6Hzと設定した。ここで、点震源の傾斜と震源の深さについては、震源深さと断層面上端深さが異なるため、図11のように震源位置が深く上端深さが浅い場合、表面波を過小評価する可能性があることから、マグニチュードの大きさから佐藤⁴¹⁾を参考に断層幅を求めて、傾斜角を90°と仮定して断層幅だけ震源深さを浅い(震源深さ - 断層幅)と仮定して強震動予測を行った。このとき、マグニチュードが大きく震源深さが浅い場合、地表(深さ0km)を超えると仮定してしまうため、上端深さの上限を5kmと設定した。震央距離についても震源深さと同様にマグニチュードの大きさから断層長さを求めて、断層長さだけ震央距離を近い(震央距離 - 断層長さ)と仮定した。すべり角については、すべり角0°を横ずれ断層によるLove波の影響を考慮するためTransverse成分を用いて、すべり角90°を逆断層によるRayleigh波の影響を考慮するためRadial成分を用いる。

図12に強震動予測に用いた工学院大学の位置及び震源位置を久保・ほか⁴²⁾による500mメッシュの地形分類図に重ねて表示したものを示す。この図から今回検討した地震動は、震央距離が約200km以上あり、地震発生後山地などの岩盤を通り、関東平野に入射してくることが分かる。

表8：検討した地震の諸元

Earthquake	Date	Depth (km)	Mjma	Mo (dyne-cm)	Stress Drop (Mpa)	fmax (Hz)
東海道沖	2004年9月5日	44	7.4	2.39E+26	3	6
中越地方	2004年10月23日	13	6.8	4.74E+25	3	6
宮城県沖	2006年8月16日	42	7.2	1.39E+26	3	6

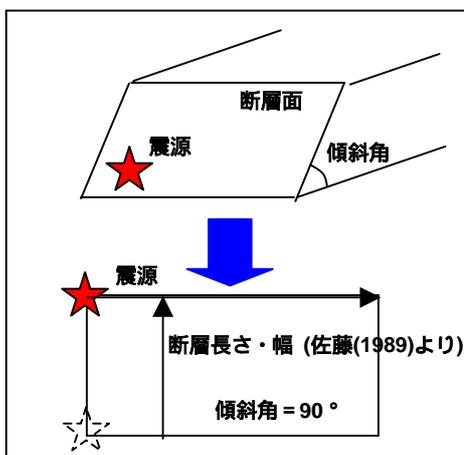


図11：震源深さの仮定条件

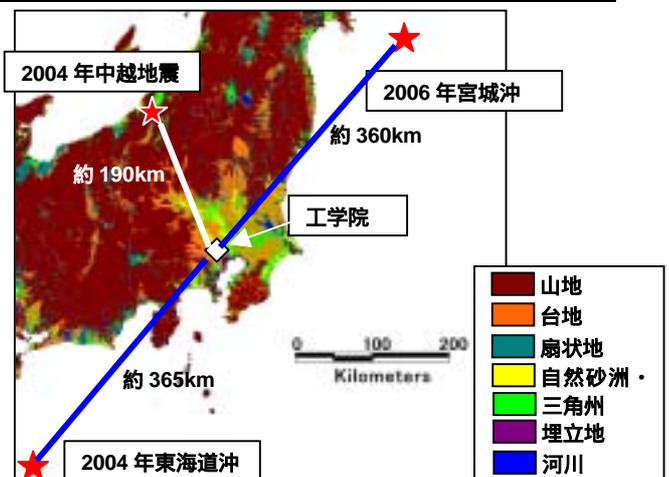


図12：波数積分法による強震動予測に用いた観測記録と震源位置

(b) 予測波形と観測記録の比較

ここでは、建物応答のEW成分とNS成分を比較するため、各地震の走向、すべり角はF-netを参考に与えた。それ以外の震源モデルは上述の仮定条件により長周期地震動を求めた。今回対象とした3つの地震における工学院大学の観測記録(GL-100m)の変位波形(黒線)と予測結果の変位波形(赤線)を図13に示す。ここで変位波形にはバンドパスフィルター(0.1Hzから10Hz)を用いて、フィルター処理している。図中の0秒は、気象庁の震度データベース³³⁾にある地震発生時刻(時分秒)を利用して、地震発生時刻にあわせて示した。

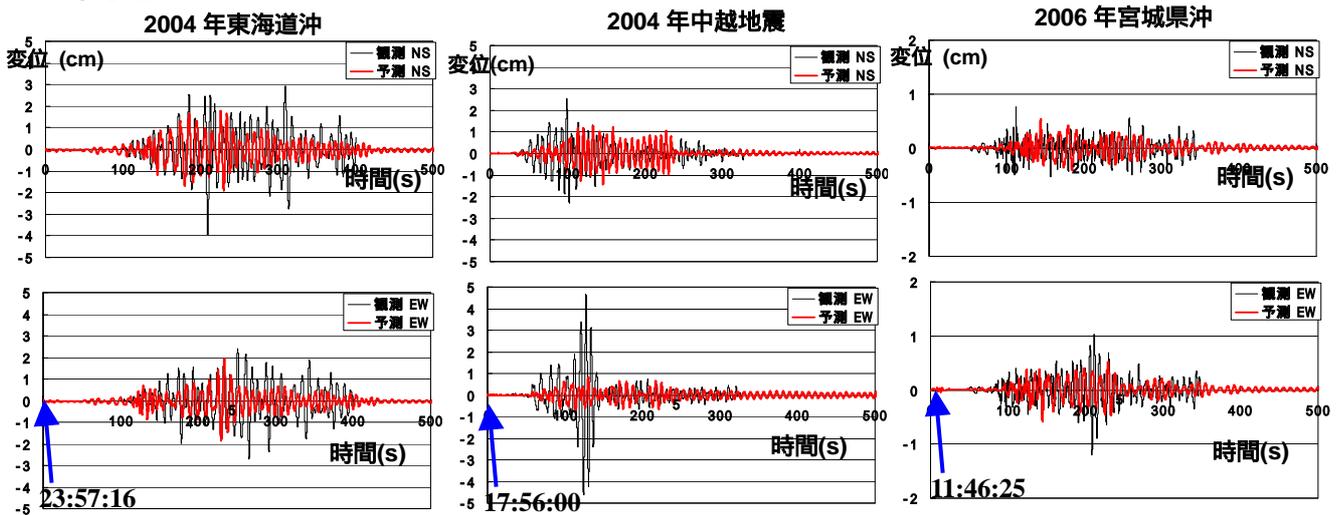


図13：観測記録とグリーン関数法による強震動予測結果

図13から、観測記録と予測結果において、表面波の初動部分の振幅がほぼ一致している。しかし、中越地震のNS成分では、あまり一致していない。表面波の後半部分では観測記録と予測結果の差が大きくなっており、これは観測記録の表面波が関東平野の盆地効果の影響を受けて大きくなっていると考えられ、平行成層を仮定したグリーン関数法ではこの盆地効果が表現できないためである。

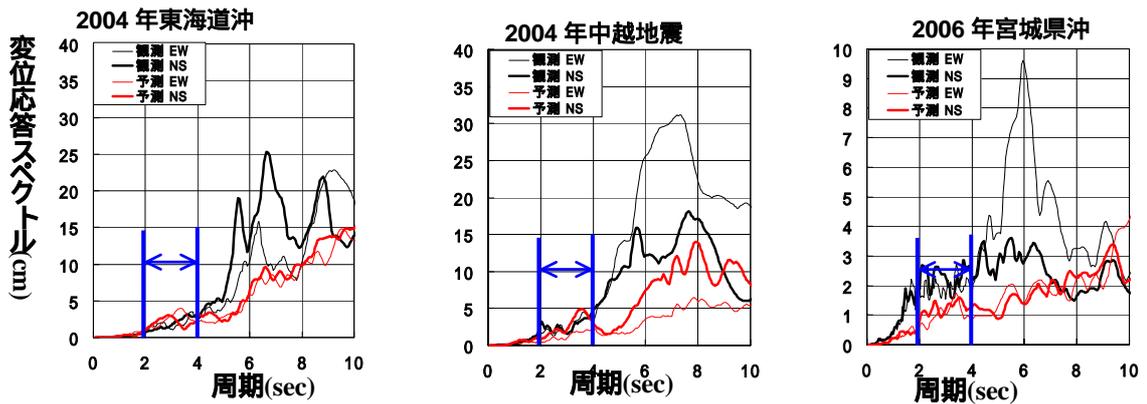


図14：観測記録と強震動予測による応答スペクトル結果

図14には、3つの地震における変位応答スペクトルの比較を観測記録(GL-100m)を黒線(細線NS成分、太線EW成分)で、予測結果を赤線(細線NS成分、太線EW成分)で示す。この図から、東海沖地震や中越地震において予測結果と観測記録は、周期2秒から4秒程度までにおいて、概ね一致している。一方、周期4秒から6秒まででは、3つの地震ともに予測結果と観測記録を比較すると予測結果はNS、EW成分ともに過小評価となっており、これは予測結果が3次元地下構造の影響を考慮できていないためと考えられる。このため、図14中の青線で挟まれた周期2秒～4秒では平行成層によるグリーン関数法ではおおむね一致

しているが、周期4秒～6秒では3次元地下構造の影響を受けており、平行成層によるグリーン関数法では、過小評価となっているため、注意が必要であると考えられる。

次に既往の研究との比較として、座間・ほか²⁴⁾による方法と比較を行った。ここで座間・ほかによる東京における地域特性 $R(t)$ は、気象庁(大手町)の1倍強震計記録を基に作られたものであるため、今回対象とした工学院大学(新宿)とサイト特性と震源距離が異なる可能性がある。そこで地盤モデルについて、新宿と大手町における山田・山中²³⁾のコンターマップを用いて比較を行い、直下の地下構造に大きな差異がないことを確認した。対象地点については、予測対象地点を新宿から大手町に変更して平行成層によるグリーン関数法により予測を行った。観測記録については、気象庁の95型震度計による観測記録を用い、観測記録の継続時間は各地震で約180秒程度である。図15に対象とした3つの地震におけるフーリエスペクトルを示し、バンド幅0.1HzのParzen Windowで平滑化した観測記録(黒線)とグリーン関数法による予測結果(赤線)、座間・ほかによる結果(青、紫、緑)の比較を示す。ここでは、EW成分とNS成分の2成分について検討したが、このうち予測結果と観測結果に差が見られたEW成分を示す。また図15の東海道沖の地震では、座間・ほかによる方法において地域特性のデータ数があまりないため±の値はない。

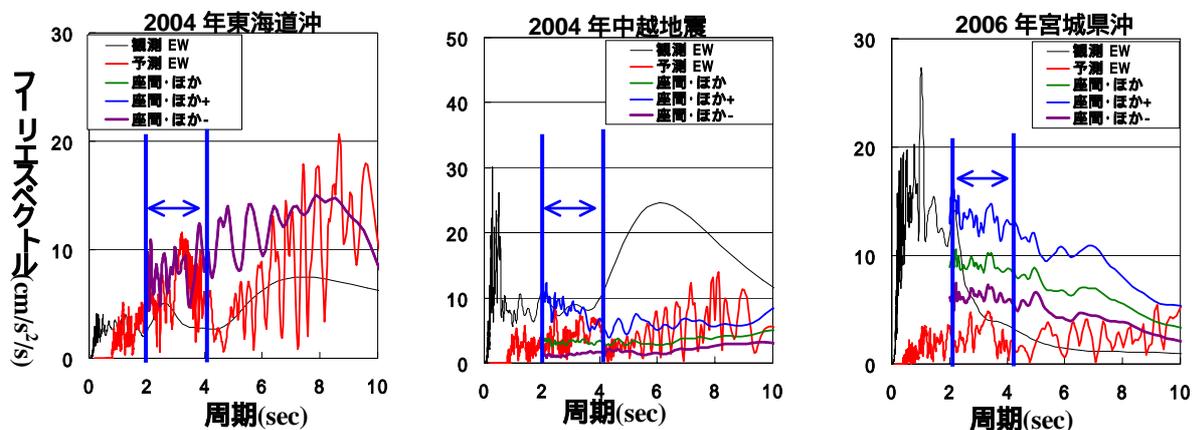


図15：大手町における観測記録と予測結果、座間・ほかのフーリエスペクトルの比較

図15において、座間・ほかによる方法とグリーン関数法による予測結果を比較すると、東海道沖の地震と中越地震においては周期2秒から4秒においてはほぼ一致しており、両者は観測記録とも一致している。一方中越地震の4秒以降では、両者ともに過小評価となっている。宮城県沖の地震では、座間・ほかによる結果は過大評価となっているが、グリーン関数法による予測結果は周期2秒から4秒においてやや過小評価となっている。

以上から、本研究で用いた平行成層によるグリーン関数法では、観測記録や座間・ほかによる結果と比べて周期2秒～4秒程度においてはほぼ一致しているが、中越地震の周期4秒～6秒では、3次元地下構造の影響により過小評価となっている。このため本研究で使用した平行成層によるグリーン関数法は、周期2秒～4秒程度において経験的手法である座間・ほかなどによる方法と比べても、長周期地震動を適切に評価することができる。しかし、経験的手法による評価では過去の様々なパターンの観測記録が必要となることから、本研究で使用した平行成層によるグリーン関数法であれば、観測記録が少ない地点においても評価でき、さらに予測波形として評価することが出来ることは理論的手法のメリットであると考えられる。

(c) 観測記録と建物応答予測の比較

建物応答解析については、工学院大学とほぼ同じ固有周期の3秒とした1質点系を仮定し、事前に応答解析結果から得られている刺激係数1.43を用いて、応答を評価した。ここでは建物応答解析の比較として、グリーン関数法による地震動を入力地震動として1質点系解析による建物応答と工学院大学における29階での観測記録と比較を行った。図16には、3つの地震における工学院大学の29階での観測記録(黒

線)と1質点系による応答解析から求めた応答変位(赤線)を示す。EW成分とNS成分の2成分について比較を行ったが、おおむね同じ傾向が見られたため、ここでは建物がNS成分にゆれやすいことからNS成分について示す。

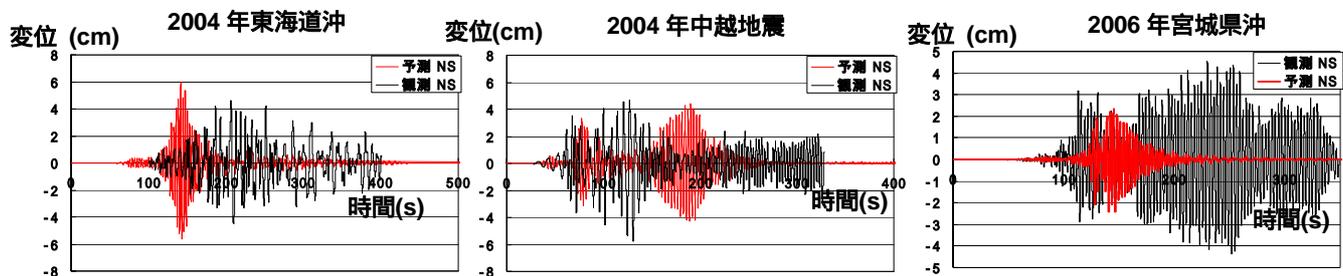


図16：観測記録と1質点系による応答解析結果

図16から東海道沖の地震では、表面波の初動部分の揺れが観測記録と比べて大きくなっているが、中越地震や宮城県沖地震では、表面波の初動部分における揺れは概ね一致している。一方、堆積層表面波の影響を受ける後半部分の長周期地震動による応答は、いずれの地震においてもあまり一致していない。しかし、最大応答値においては、宮城県沖地震を除いておおむね一致している。

以上より、建物応答については、3.3(c)の地震動予測において堆積層表面波による影響が過小評価となっているため、建物応答においても堆積層表面波による建物応答が過小評価となっている。

(c) 長周期地震動を対象としたエレベータの地震時管制運転の条件整理

ここでは、本研究で提案した手法により長周期地震動を対象としたエレベータの地震時管制運転を行うために、表6で挙げたエレベータの停止事例のうちこれまで長周期地震動によりエレベータが停止した事例を対象に提案した手法により求めた建物応答値と29階における観測記録から求めた建物応答を用いて、本研究で求めた閾値3cmをエレベータの地震時管制運転に使用する閾値として比較した。

表6からこれまでエレベータが停止した事例が残っていた2004年東海道沖地震(23時)と2005年中越地震(17時)、2006年8月の宮城県沖地震、2008年茨城県沖の地震において、本研究で提案した手法により求められた予測応答値がいずれの地震においてもエレベータの地震管制運転を行う閾値3cm以上となり、エレベータを事前に停止することが出来る。また、3.3(c)で求めた2005年宮城県沖では、4cm以上の建物応答が観測されているが、断層のすべり方向に条件を与えることで過大評価となり、観測記録と比べて約2.4倍程度となっていることが分かる。このため、3.3(c)で過小評価となっていた2005年宮城県沖において、予測応答結果が3cmを超え停止することが出来るようになる。

次に工学院大学で観測記録の得られなかった2007年中越沖地震について、観測記録がない例題として提案する手法を適用した。その結果、2007年中越沖地震においても、本研究で設定した閾値(3cm)を超えた応答が得られ、このためエレベータを停止することになる。表6のエレベータの停止事例と比較すると、中越沖地震では中・高層用エレベータで「運休」となっていることから、本研究で提案した手法を利用してエレベータを長周期地震動の到達前にエレベータを停止することができることを確認した。

したがって、本研究で提案した手法を用いて、事前に様々な震源位置やマグニチュードの大きさ、震央距離の長周期地震動と建物応答を予測して、その結果からエレベータの地震時管制運転用の閾値を超える条件を整理しておく。

表9に、本研究で提案した手法を工学院大学に適用して、緊急地震速報を利用してエレベータの地震時管制運転を行う条件を整理した一例を示す。表9は、本研究で提案する手法に基づいて建物応答予測を行い、応答変位が閾値3cm以上となった条件を整理した。ここで震源深さと震央距離は、図11に示すようにマグニチュードの大きさから佐藤⁴¹⁾を参考に断層幅と長さを求めて、その断層幅と断層長さ分を考慮した震源深さと震央距離である。表6に挙げた長周期地震動によりエレベータが停止した事例に対して、表9のエレベータの地震時管制運転を行うための震源情報により制御できることを確認した。例えば、表6の東海道沖地震の場合、M7.4で震源深さが44kmであるが、表9の震源深さと震央距離において断層幅と

断層長さを考慮した値になっているため、工学院大学において緊急地震速報により得られた震源情報から表9の気象庁マグニチュードと震源深さ、震央距離の条件を参照し、速やかにエレベータの地震時管制運転を行うことが出来る。またM8クラスの東海地震や南海地震においても同様に、表9のエレベータの制御条件からエレベータの地震時管制運転を行う条件となり、長周期地震動が到達する前にエレベータを制御することができる。ここでは一例のためマグニチュードをM6.0、M7.0、M7.5、M8.0の場合を示すが、本研究で提案する手法は簡便に建物応答予測を求めることが出来るため、様々なマグニチュードや震源深さ、震央距離の条件で計算し、エレベータ制御の条件を求めることが出来る。今後は、この条件を利用して緊急地震速報を受信した際、速やかにエレベータの地震時管制運転を行う。

表9：長周期地震動を対象としたエレベータの地震時管制運転を行うための震源情報の一例
(工学院大学の場合)

	気象庁 マグニチュード	断層幅	断層長さ	震源深さ*	震央距離**
長周期 地震動	6.5 以上	12km	24km	35km より浅い	200km 以内
	7.0 以上	21km	42km	50km より浅い	450km 以内
	7.5 以上	37km	74km	80km より浅い	500km 以内
	8.0 以上	66km	132km	120km より浅い	650km 以内

*マグニチュードの大きさから断層幅を求めて、上端深さを断層幅分浅いことを考慮した震源深さ

**マグニチュードの大きさから断層長さを求めて、断層端部からの距離を断層長さ分近いこと考慮した震央距離

4. まとめ

本研究では、長周期地震動を対象とした緊急地震速報を活用したエレベータの地震時管制運転制御方法を提案した。本研究で提案した手法では、事前に理論的方法により表面波の到達予測時間を評価し、同時に平行成層を仮定したグリーン関数法と1質点系解析により、建物応答を評価しておき、エレベータ制御の閾値を参考にしてエレベータの制御条件を整理し、緊急地震速報を受信した際にその制御条件を基にエレベータの地震時管制運転を行う。そして、提案する手法を首都圏に位置する超高層ビルをキャンパスとして利用している工学院大学に適用して、観測記録と比較を行った。

その結果、エレベータ制御を行うために必要となる長周期地震動の到達予測時間については、表面波の伝播速度と既往の研究や観測記録と比較しておおむね一致することを確認した。

次に平行成層を仮定したグリーン関数法により長周期地震動予測を行い、その結果を利用して1質点系による建物応答予測を行った。工学院大学で得られた観測記録と比較した結果、平行成層を仮定したグリーン関数法では盆地構造による堆積層表面波の影響を考慮できないため、周期4秒以降においては過小評価となったが、一般的な超高層ビルを対象とした周期2秒から4秒においておおむね一致することを確認した。また、緊急地震速報から得られる震源情報は震源位置と震源規模のため、マグニチュードから求められる断層幅と長さ考慮して震源深さと震央距離を仮定し、すべり角についても横ずれ断層と縦ずれ断層の2つのモデルを仮定することにより、建物応答をやや過大評価することができ、安全側に建物応答を評価できることを確認した。長周期地震動を対象にしたエレベータの地震時管制運転の閾値については、既往の研究を参考に建物頂部における変位を用いる方法を適用した。この閾値を利用して実際にエレベータが停止した2007年中越沖地震を対象に提案する手法を適用した結果、予測した建物応答値が閾値を超える結果となり、エレベータを事前に停止できることを確認した。

以上のことから、本研究で提案する手法により長周期地震動を対象としてエレベータの地震管制運転を行うことが出来ることを確認した。したがって、提案する手法に従い、事前に長周期地震動予測と建物応答予測からエレベータの地震時管制運転の閾値を超える条件を整理することで、緊急地震速報を利用して、早急にエレベータを制御することができ、長周期地震動によるエレベータの被害を軽減することが出来る。今後工学院大学ではこの到達予測時間とエレベータ停止条件を利用して、長周期地震動対

策としてエレベータ制御を行っていく予定である。

しかし、本研究による方法は、あくまでエレベータの防災対策のいちアプリケーションに過ぎないため、事前にエレベータの耐震性能の向上やケーブルの引っかかり防止措置、閉じ込め時の救助方法を事前に講習しておくなどといった防災対策が重要である。

今後は、3次元地震動シミュレーションによる長周期地震動予測結果の活用やエレベータケーブルなどの応答解析から長周期地震動対策用閾値を設定するための経験的評価方法の検討、超高層における減災対策として緊急地震速報によるアナウンスの周知方法や超高層建物応答による内部被害予測などについて、研究する予定である。

謝辞

本研究は、文部科学省の学術フロンティア事業「工学院大学地震防災・環境研究センター」、および国土交通省の建設技術研究開発助成「首都圏震災時における帰宅困難者・ボランティアと地域住民・自治体との協働による減災研究」、文部科学省平成19年度・教育研究装置「長周期地震動を対象とした超高層建築のリアルタイム地震観測システム」による研究助成により行われました。本研究は防災科学技術研究所と共同研究として行われました。データ整理について工学院大学建築学科西村亜希さん、鯉沼たけるさんに、工学院大学における時刻歴応答解析結果について工学院大学大学院星幸男さんに、エレベータの被害情報について工学院大学建築学科村上正浩准教授と工学院大学施設課の皆様、防災センターの皆様、エレベータメンテナンス会社の皆様にご協力頂きました。消防庁消防研究センター座間信作博士には座間・ほかのプログラムを利用させていただきました。また、観測記録としてK-NET及び気象庁、震源情報として気象庁及びF-NET、関東地方の地下構造データとして地震ハザードステーションのデータを使用いたしました。査読者の皆様から貴重なご意見を頂き、改善させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：2004年10月23日新潟県中越地震災害調査報告、2006年
- 2) 日本建築学会：2005年福岡県西方沖地震災害調査報告、2005年
- 3) 東京電力：柏崎刈羽原子力発電所の状況について、<http://www.tepco.co.jp/nu/kk-np/chuetsu/index-j.html>
- 4) 畑山健、座間信作、西晴樹、山田實、廣川幹浩、井上涼介：2003年十勝沖地震による周期数秒から十数秒の長周期地震動と石油タンクの被害、地震 第2輯、第57巻、2004年、pp 83-103
- 5) 森ビル株式会社：プレスリリース、2005年10月21日
- 6) 渡部裕一、那須正、鈴木芳隆：長周期地震によるロープ揺れに対応したエレベーター地震時管制運転方法の開発、電気設備学会全国大会講演論文集、2007年、pp 97-98
- 7) 太田外氣晴、座間信作：巨大地震と大規模構造物 -長周期地震動による被害と対策-、共立出版、2005年
- 8) 三菱電機株式会社：ニュースリリース、2007年3月22日
- 9) 小野田芳光、山腰喬任、青木勝美：波動エネルギー式地震感知器の開発、日立評論、Vol67、No.6、1985年、pp65-70
- 10) 地震調査推進本部：<http://www.jishin.go.jp/main/>
- 11) 例えば、Furumura, T., T. Hayakawa, M. Nakamura, K. Koketsu and T. Baba: Development of long-period ground motions from the Nankai Trough, Japan, earthquakes: Observations and computer simulation of the 1944 Tonankai (Mw8.1) and the 2004 SE Off-Kii Peninsula (Mw7) Earthquakes, Pure Appl. Geophys., 2007
- 12) 気象庁：緊急地震速報について、<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/index.html>
- 13) 社団法人エレベーター協会：<http://www.n-elekyo.or.jp/>
- 14) リアルタイム地震情報利用協議会 (REIC)：高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクト総括成果報告書、2008年

- 15) 国土交通省住宅局建築指導課、(財)日本建築設備・昇降機センター、(社)日本エレベータ協会：昇降機技術基準の解説 2002年版、2002年
- 16) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、2007年
- 17) 国土交通省社会資本整備審議会建築分科会建築物等事故・災害対策部会：第3回、2005年
- 18) 国土交通省社会資本整備審議会建築分科会建築物等事故・災害対策部会：建築物等事故防止対策部会(第2回)、2005年
- 19) 翠川三郎：地震によるエレベータ被害軽減のための緊急地震速報の利用、緊急地震速報利活用システムに関するシンポジウム、2004年
- 20) Hisada, Y. and J. Bielak: A Theoretical Method for Computing Near-Fault Strong Motions in Layered Half-Space Considering Static Offset due to Surface Faulting, with a Physical Interpretation of Fling Step and Rupture Directivity, Bull. of the Seism. Soc. of America, Vol.93, No.3, 2003, pp.1154-1168
- 21) 西川孝夫、荒川利治、久田嘉章、曾田五月也、藤堂正喜、山村一繁：建築の振動 応用編、朝倉書店、2008年
- 22) Shibestari, T.K and F. Yamazaki.: Attenuation Relation of Response Spectra in Japan Considering Site-Specific Term, 12th World Conference on Earthquake Engineering, 1432, 2000
- 23) 内山泰生、翠川三郎：震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、No.606、2006年、pp.81-88
- 24) 座間信作、細川直史、畑山健、遠藤真：やや長周期地震動の早期予測システムの構築、第11回日本地震工学シンポジウム、2002年
- 25) 日本建築学会：地盤震動 -現象と理論-、2005年
- 26) Hisada, Y: Broadband strong motion simulation in layered half-space using stochastic Green's function technique, Journal of Seismology, Vol.12, No.2, 2008, pp 265-279
- 27) Aki K. and Richards P.G.: Quantitative seismology, University Science Books, second edition, 2002
- 28) Brune J.N.: Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquake, J Geophys Res, Vol.75, 1970, pp 4997-5009
- 29) Boore D.M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. Bull Seism Soc Am, Vol.74, 1983, pp 1615-1621
- 30) 武村雅之：日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係、地震 第2輯、第43巻、1990年、pp257-265
- 31) Nakagawa, Y., K. Kamae, H. Kawabe and K. Irikura: Damage prediction of long-period structures during subduction earthquakes Part2: Prediction of damage to high-rise buildings in the Osaka basin in future Nankai earthquakes, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, S10-032, 2008
- 32) 久保智弘、久田嘉章、堀内茂木、山本俊六：緊急地震速報とリアルタイム地震観測システムを活用した超高層建築の地震防災対策、日本地震工学会大会、2007年、pp362-363
- 33) 山本俊六、堀内茂木、根岸弘明、卜部卓：DVB衛星通信を利用した即時地震情報の配信・受信システム、地震 第2輯、第58巻、2005年、pp71-76
- 34) 気象庁：震度データベース、http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/shindo_index.html
- 35) 佐口浩一郎、元木健太郎、瀬尾和夫：やや長周期地震動を構成する堆積層表面波の生成伝播過程に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第619号、2007年、pp49-56
- 36) Furumura, T. and B.L.N.Kennett: Variation in Regional Phase Propagation in the Area around Japan, Bull. of the Seism. Soc. of America, Vol.91, No.4, 2001, pp.667-682
- 37) 山田伸之、山中浩明：関東平野における地下構造モデルの比較のための中規模地震の地震動シミュレーション、地震 第2輯、第56巻、2003年、pp111-124
- 38) 地震調査研究推進本部：三浦半島断層群の地震を想定した強震動評価について、2003年
- 39) Kagawa, T., K. Irikura and P.G. Somerville: Difference in ground motion and fault rupture process between

the surface and buried rupture earthquake, Earth Planet Space, 56, 2004, pp3-14

- 40) 鶴来雅人、香川敬生、岡崎敦、羽田浩二、入倉孝次郎：強震動予測のための高域遮断フィルターに関する研究 -1995年兵庫県南部地震の観測記録に基づく検討-、日本地震工学会論文集、第6巻、第4号、2006年、pp94-112
- 41) 佐藤良輔：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック、鹿島出版会、1989年
- 42) 久保智弘、久田嘉章、柴山明寛、大井昌弘、石田瑞穂、藤原広行、中山圭子：全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化、および、面的な早期地震動推定への適用、地震 第2輯、第56巻、2003年、pp21-37

(受理 : 2008 年6 月2 日)
(掲載決定 : 2009 年2 月9 日)

Application of Long-period Ground Motion Prediction using Earthquake Early Warning System to Elevator Emergency Operation Control System of a High-Rise Building

KUBO Tomohiro ¹⁾, HISADA Yoshiaki ²⁾ HORIUCHI Shigeki ³⁾ and
YAMAMOTO Shunroku ⁴⁾

1) Member, ABS Consulting, M. Eng.

2) Member, Professor, Kogakuin University, Dr. Eng.

3) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci

4) Member, Railway Technical Research Institute, Dr. Eng

ABSTRACT

We propose the method of the elevator operation control for the long-period ground motion using Earthquake Early Warning System (EEWS) and apply this method to the elevator operation control system of the 29-story building of Kogakuin University in the downtown Tokyo, Shinjuku, Japan.

First, we estimate the velocity of surface wave that travels through the crustal calculated by the theoretical method, and we estimate the long-period ground motion by Green's function and calculate the lumped mass model response by the estimated long-period ground motion. Next we develop the trigger condition stopping the elevator based on above results. When EEWS is received, we reference the trigger condition and stop the elevator.

Next, we apply the elevator operation control for the long-period ground motion proposed method to Kogakuin University, which is high-rise building and located at the central of Tokyo. We compare the estimation the long-period ground motion by the wavenumber integration with the observation data. As a result, the estimated waves between 2 sec and 4 sec almost correspond the observed waves, but the estimated waves between 4 sec and 6 sec underestimate the observed waves because of the 3D effects of the Kanto sedimentary basin. Thus, we estimate the long-period ground motion to the estimation on the side of prudence given the assumption of the source model, because EEWS provides only the location and magnitude of an earthquake. We confirm that the proposed method is able to control the elevator for the long-period ground motion.

Key Words: Earthquake Early Warning, Long-period Strong Ground Motion, Elevator, High-Rise Building, Green's function, Response Analysis of Lumped Mass Model, Elevator Emergency Operation Control System, Real-time Strong Motion Monitoring System