

氏名(本籍)	久保智弘(東京都)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第111号
学位授与の要件	学位規則第4条第2項
学位授与年月日	平成23年2月14日
学位論文題目	緊急地震速報と強震観測データを用いた超高層建築の初動対応支援システムの開発と利活用に関する研究
論文審査委員	主査 久田嘉章 副査 宮澤健二 大橋一正 福和伸夫(名古屋大学教授) 翠川三郎(東京工業大学教授)

論文要旨

地震調査推進本部では首都圏において今後30年間に約70%の確率でM7クラスの地震が発生すると評価しており、さらに今後30年間に約80%以上の確率で東海地震や南海地震の発生が予測されており、このため、首都圏に建つ超高層建築では直下地震対策に加え、長周期地震動対策を行う必要がある。

一方、阪神・淡路大震災では、早期初動対応の遅れが被害を拡大させた一つの要因とされている。このため、地震発生後、迅速に建物構造や室内のみならず、周辺地域の被災状況を把握することが重要である。さらに超高層建築は、在館者が多いことから、超高層建築における迅速な初動対応として、地震に関する情報や建物や周辺の被害情報を把握し、その情報を在館者に配信し、不安やパニックを防ぐ必要がある。しかし、超高層建築の安全を管理する防災センターには職員が10名以下の場合が多く、その職員だけで状況を把握し、在館者の対応を行うことは非常に困難である。

気象庁では2007年10月1日から、地震被害を軽減することを目的として、緊急地震速報の一般配信を行った。この緊急地震速報は、エレベータや工場といった自動的に制御する仕組みや、百貨店や小学校では緊急地震速報を受信するとその情報をアナウンスして、在館者の危機回避や誘導などに利用されている。さらに、2009年6月1日から改正消防法により、大規模建築物において防火計画に加え、大規模地震などを考慮した防災計画を策定することになった。このため、これまで防火のみであった対策から、防災対策も必要とされることとなったが、上述の通り、初動対応を主導的に行う防災センターの職

員は、超高層建築の在館者数に対して、非常に少なく、加えて防災センターの多くのシステムは火災対応のみのシステムとなっているため、効率よく、迅速に初動対応を支援する地震防災システムが必要である。

さらに、災害時にこのような地震防災システムを利用するためには、利用者が地震防災システムから提供される情報について理解して利用する必要がある。特に超高層建築では各フロアで様々な被害が発生する可能性があり、防災センターの職員だけでは対応できないため、在館者の協力も必要となる。このため、防災センターよりアナウンスされる地震防災システムの情報について、在館者も理解し、状況に応じた対応を行う必要がある。しかし、多くの地震防災システムでは、システムの導入と直接の利用者への説明のみであるため、災害時に超高層建築の在館者は提供された情報を十分に利用できない可能性がある。

以上の観点から本研究では、地震発生時に超高層建築において迅速な初動対応が行えるように、緊急地震速報と強震観測データを用いた超高層建築の初動対応支援システムを構築した。さらにそのシステムについて実際の超高層建築に適用して、超高層建築全体を対象とした防災訓練により、システムの利活用について検証する。論文の構成は以下の通りである。

第1章「序論」では、既往の超高層建築における地震対策の問題提起と本研究と既往の研究との関連性、及びその成果の位置づけについて述べ、本研究の意義について述べた。

第2章「緊急地震速報と強震観測データ用いた超高層建築の初動対応支援システムの開発」では、緊急地震速報と強震観測データ用いた超高層建築の初動対応支援シ

ステムについて構築した。この初動対応支援システムは3つのシステムからなり、緊急地震速報と建物被害推定、早期震度推定によって構成される。

初動対応支援システムでは、地震発生後、緊急地震速報を基に主要動や長周期地震動の到達について、館内アナウンスを行い、同時にエレベータの自動制御とメール配信により緊急対応メンバーへ地震情報を伝え、緊急参集を行う。さらに、長周期地震動が発生する恐れがある場合は、本章で提案した緊急地震速報を長周期地震動の予測まで拡張させた方法により、長周期地震動の到達予測と超高層建築の重要な動線であるエレベータの地震管制運転を行う。次に主要動や長周期地震動が到達した後、強震観測データを用いた建物被害推定により確認し、建物の被害情報を館内にアナウンスする。これにより、在館者が建物の状況を把握できるため心理的不安が軽減し、パニックを軽減することができる。さらに、本章で作成した表層地盤データベースを使い、周辺の震度分布を推定することで、超高層建築の在館者に広域に強震動が及ぶ地震であるか局所的な地震であるか、鉄道が運休している可能性が高くとどまる必要があるのかといった情報を提供することができる。このように初動対応支援システムによる情報を利用することで、地震発生直後、超高層建築内において迅速に初動対応を行うことができる。

本研究で提案する緊急地震速報を長周期地震動まで拡張させる方法として、到達時間の予測方法と長周期地震動の大きさの予測方法、表層地盤のデータベースの評価について以下に示す。

到達時間の予測方法について、事前に対象地点の周辺地盤をモデル化し、表面波の分散曲線により、ミディアムレスポンスと群速度を求めた。その結果と対象建物の周期から、長周期地震動の伝わる速度を求めた。

長周期地震動の大きさについて、本研究では簡便に評価するため、平行成層を仮定した理論的方法を用いて地表面における地震動を予測し、1質点系による地震応答解析によって求めた。この方法により、事前に様々なマグニチュードと震源深さの条件について地震動波形を計算し、その波形を基に超高層建築の建物応答を求めておき、緊急地震速報による震源情報から、事前に計算した条件と照らし合わせ、長周期地震動が到達する前にその大きさを予測することができる。

さらにこの方法をエレベータ制御へ適用する方法を検討した。長周期地震動を対象としたエレベータ制御については、既往の式を使い閾値を求め、上記方法による建物応答変位と設定した閾値から事前にエレベータを制御

する条件を整備した。

次に建物被害推定では、強震観測データを用いて超高層建築の揺れを把握し、地震計の設置されているフロアの震度、層間変形角を把握することができ、それら情報を基に室内被害や構造的な被害の危険性について簡便に表示して、地震工学の知識がないユーザーにも迅速に情報を把握できるシステムを構築した。さらにこのシステムでは、地震応答解析結果をインポートすることにより、地震防災訓練でも利用することができる。

さらに早期震度推定では、市販の地形分類図から500mメッシュで地形分類と標高のデジタルデータを整備し、既往の経験式から最大速度の増幅率を求めて表層地盤データベースを作成した。表層地盤データの精度を比較するため、PS検層から得られる増幅率を用いて、過去の地震について震度推定を行い精度の確認を行った。

その結果、両者の増幅率で広域の震度分布を精度よく推定できることを確認した。さらに、2009年に防災科学技術研究所から公開された250mメッシュの地盤データベースと比較を行い、250mメッシュの地盤データは、500mメッシュの地盤データよりも入り組んだ沖積層を表現していることを確認した。

以上の結果から、2章では緊急地震速報と強震観測データを用いた超高層建築の初動対応支援システムを開発した。さらに緊急地震速報を長周期地震動の予測まで拡張させたことにより、長周期地震動を対象としたエレベータ制御や館内アナウンスへ利用することができる。しかし、本研究では関東平野を対象として、理論的グリーン関数法を用いて行ったため、堆積層表面波を十分に評価することができないため、適用範囲が周期2秒から4秒であることを確認した。

早期震度推定について、本研究で作成した地盤データベースにより、全国において広域な震度推定が行えることを確認した。

第3章「緊急地震速報と強震観測データを用いた超高層建築の初動対応支援システムの利活用」では、実際の超高層建築を対象に、本研究で開発した初動対応支援システムを初動対応計画とエレベータ制御に適用し、超高層建築全体での地震防災訓練により、システムの利活用について検証を行った。

初動対応支援システムを実際の超高層建築の初動対応に適用し、超高層建築の地震防災訓練で利用した結果、緊急地震速報によりエレベータ制御やメール配信といったシステムによる自動制御を迅速に行えることに加え、初動対応支援システムから提供される情報に基づき、防災センターから館内に地震情報と建物状況のアナウンス

を行うことができた。これにより、建物が倒壊の恐れがないことを在館者に伝えることができ、各フロアで落ち着いて対応を行うことができた。

次に問題点の把握として、アンケートと利用者へのヒアリングにより検証を行った。まず、システム面として、情報の表示方法にわかりにくい部分があるため、表示方法のアルゴリズムを変更した。次に利用面として、在館者が緊急地震速報を受け取った場合の対応行動について、十分に周知されていないことを確認した。さら上層階でも緊急地震速報や建物被害情報が把握できるようにシステムを導入したが、その情報が各フロアで十分に利用されていなかった。このため、初動対応支援システムの利活用方法、特に緊急地震速報を見聞きした場合の対応について周知活動を行った。ここで、周知活動として、事前にマニュアルの配布や口頭での説明、パンフレット、ポスターによる周知を実施した。これら改善策による効果について、翌年に同様の超高層建築を対象とした地震防災訓練を行い、アンケートとヒアリングから再度検証を行った。その結果、導入当初と比べて、周知状況において向上がみられた。

以上の結果から、2章で構築した初動対応支援システムについて、導入するだけでなく、在館者を対象としてシステムから提供される情報の利活用についても周知することが、災害時に実際に利用できるシステムとするためには必要であることを確認した。また、周知活動について、システムの利活用の検証・トレーニングも兼ねて超高層建築での防災訓練の実施や在館者へ直接伝えるといった対応を行うことが必要であることが分かった。さらにこのような周知活動を継続的に実施する必要がある。

第4章「総括」では、各章の小括における結論を整理し、今後の課題を述べた。

論文審査要旨

地震防災システムが震災時に有効に機能し、実際の防災・減災に役立つためには、システムを開発・導入 (Plan & Do) するのみならず、システムの利用法や提供される情報について利用者が理解し、さらに防災訓練とシステムの評価・改善 (Check & Act) という一連の作業 (PDCA サイクル) を継続的に行うことが重要である。

本研究では、初動対応支援システムを開発し、超高層建築に適用するのみならず、導入後にシステムの利活用として、PDCA サイクルにより超高層建築全体を対象とした地震防災訓練により問題の検証・改善することで、システムの周知・教育活動の必要性について考察したも

ので、全4章から構成される。

第1章では、既存の地震防災システムの状況を説明し、超高層建築における地震防災上の問題点や、緊急地震速報とヘルスマonitoringを利用した防災システムの現状の整理など、本研究の背景、目的、意義について述べている。

第2章では、緊急地震速報と建物被害推定、早期震度推定からなる超高層建築の初動対応支援システムを提案・構築している。本システムは以下の3つのシステムで構成されている。まずは緊急地震速報を利用して長周期地震動の予測を行い、長周期地震動が到達する前にエレベータの制御や館内アナウンスができるシステムである。さらに超高層建物では上層階で揺れが増幅する場合があることから、強震観測データを用いて実際の館内の被災状況を把握するシステムである。最後に帰宅困難者などへの情報提供を行うために、全国における表層地盤データベースを500mメッシュで整備し、緊急地震速報から周辺の震度推定を行うシステムを提案している。

第3章では、工学院大学・新宿校舎を対象として、提案した初動対応支援システムの実際の超高層建築に適用し、システムを導入後の問題について、超高層建築全体を使った防災訓練とアンケート調査などによる検証という、一連のPDCAサイクルを実施している。この中で緊急地震速報を導入しても、防災訓練における館内放送では実際には危険回避行動があまり効果的に行われなかったことを示している。このため利用方法の周知活動として、学生や教職員へ呼びかけやポスター、簡便なマニュアル作成・説明などを行って、問題点の改善を行い、この結果、次の防災訓練では退避行動に改善が見られた。よってシステムを導入に加え、在館者への徹底的な周知・教育が必要であることを提示している。

第4章では、各章における結論を整理し、本研究を総括している。

以上のように、本論文は緊急地震速報と強震観測データを用いた超高層建築の初動対応支援システムという工学的・実用的に有用な防災・減災のためのシステムを提案している。加えて、当システムを実際の超高層建築に適用・運用し、さらには防災訓練やアンケート調査を通して、システムの検証を行っている。その結果、システムの有効性の確認に加え、実際に機能するためには、周知・教育活動も併せて行う必要であることを提示している。このような詳細な検証は前例がなく、その成果は地震防災の分野に大きく寄与すると考えられる。よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認める。