

緊急地震速報を活用した事業継続のための地震情報システムの開発



金子 治*

藤堂 正喜*
保井 美敏*
稲井 慎介*

概 要

地震時の事業継続マネジメント(BCM)のため、①平常時の減災対策として、建物および機器・設備類の耐震性を確保するためのリスク評価と合理的な耐震補強工法の提案を行う耐震ソリューションシステム、②地震発生時の減災対策として、緊急地震速報システムを活用して地震到達前に適切な対応判断を行い重要機器の機能維持を図るための地震情報システム、③地震後の対策としての災害復旧支援システム、の3段階の支援ツールの整備を進めている。

このうちの地震情報システムは、従来の緊急地震速報システムを高精度化、高機能化するために、配信された地震情報とあらかじめ計算しておいた対象建物の振動特性データベースと照合して建物各部の震度を瞬時に予測し、より適切な対応、判断を行うための減災システムである。

本報告では、システム全体概要の紹介と地震情報システムの考え方およびシステム構築にあたって実施されるパラメトリックスタディの例について示す。

Development of an Earthquake Information System for Business Continuity Using Earthquake Early Warning

Osamu KANEKO*
Masanobu TOHDO*
Mitoshi YASUI*
Shinsuke INAI*

The authors have developed supporting tools for Business Continuity Management. The tools consisted of three systems: 1) Aseismic Solution System for Buildings to estimate seismic risk and propose effective retrofitting method for buildings, machines or equipments before the earthquake attacking, 2) Earthquake Information System using Earthquake Early Warning to judgment and take a countermeasures of machines or equipments while the earthquake is propagating before the time of arrival and 3) Disaster Recovery Supporting System after the earthquake.

Earthquake Information System, estimating seismic intensity exactly compared arranged response of each floor of the building or each machine obtained by preliminary simulations with information of Earthquake Early Warning, realize more accurate judgment and more functional countermeasure than conventional Earthquake Early Warning system

This report introduced the outline of these systems, the summary of Earthquake Information System and examples of techniques and results preliminary simulations to build up Earthquake Information System.

* 戸田建設(株) 技術研究所

* Technical Research Institute, Toda Corp.

緊急地震速報を活用した事業継続のための地震情報システムの開発

金子 治*
 藤堂 正喜*
 保井 美敏*
 稲井 慎介*

1. はじめに

建築物の耐震性の確保については、構造体の破壊防止、人命の保護を主な目的として検討が進められてきたが、最近発生した地震においては被災による生産活動の停止の拡大が社会問題となっており、地震後の事業継続についても注目されるようになってきた。

戸田建設では地震時の事業継続マネジメント(BCM)のため、①平常時の減災対策として、建物および機器・設備類の耐震性を確保するためのリスク評価と合理的な耐震補強工法の提案を行う耐震ソリューションシステム¹⁾、②地震発生時の減災対策として緊急地震速報システム²⁾を活用して地震到達前に適切な対応判断を行い重要機器の機能維持を図るための地震情報システム、③地震後の対策としての災害復旧支援システム、の3段階の支援ツールの整備を進めている。

本報告ではシステム全体の概要と、地震発生時に重要機器の対応判断が適切に行えるよう高精度化、高機能化された地震情報システムの開発について紹介する。

2. 事業継続マネジメント(BCM)支援システム

最近の地震において、2004年新潟県中越地震での被

災地にあった半導体工場の操業停止がメーカー全体の経営に影響した例や、2007年新潟県中越沖地震での自動車部品工場の事業中断が全国の自動車メーカーの生産停止をもたらした例などが報告され、地震後の事業継続の確保が重要課題となっている。

事業継続計画(BCP)において建物の耐震性の評価は、減災対策の立案、実施のための重要項目であり、構造体(上部構造)のみでなく、地盤・基礎構造や天井や内外装材などの非構造部材や設備機器、さらに建物内の、生産施設であれば生産ライン、病院であれば手術室の医療設備などといった事業継続にかかわる重要業務のための機器・設備の機能維持についても検討対象に含まれる。

そこで、地震に対する事業継続支援のため、以下の4つの観点から、施設の減災対策を検討することとした。

- ・建物の耐震補強による減災(平常時の対策)
- ・機器・設備の耐震補強による減災(平常時の対策)
- ・緊急地震速報による(機器・設備、従業員の)減災(地震発生時の対策)
- ・災害復旧支援(地震後の対策)

これらの対策が事業中断期間、復旧時間の短縮に及ぼす効果を図-1に示す。

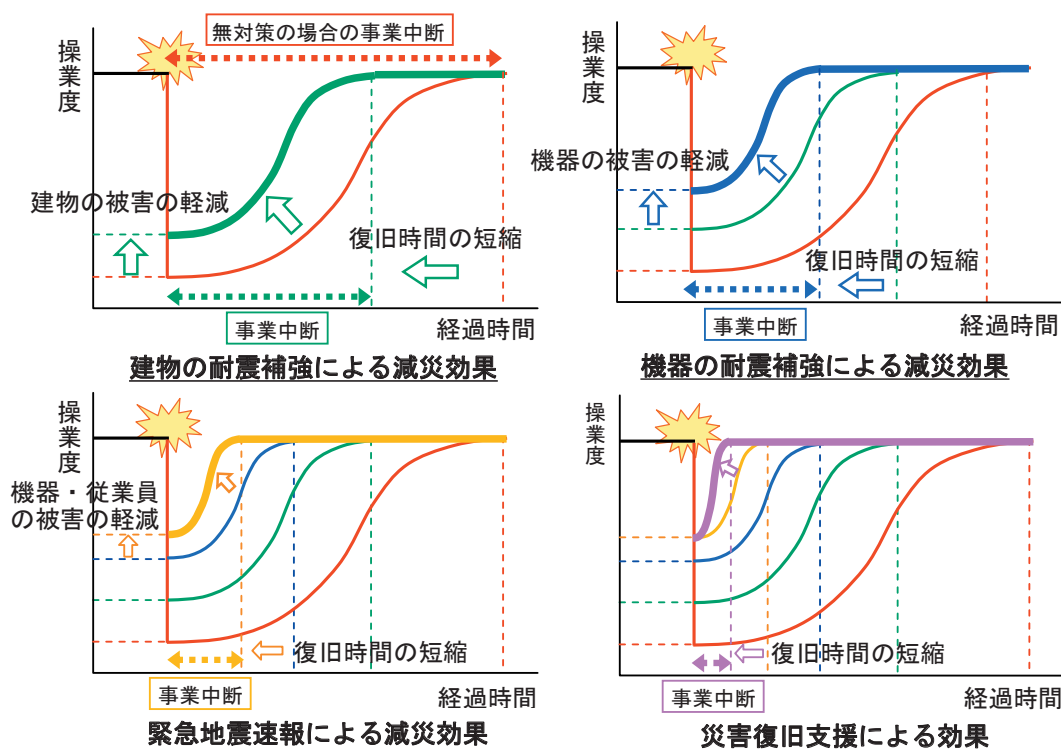


図-1 減災対策の効果

* 戸田建設(株) 技術研究所

これらの対策のための支援を行うため、以下の3つのシステムの構築を進めている。

①耐震ソリューションシステム¹⁾

平常時の減災対策として、耐震補強により建物および機器類の耐震性を向上させ、地震時の損傷の軽減と復旧時間の短縮を図るため、地震リスクや建物の損傷度、予想最大損失(PML)の評価、および耐震補強工法の提案を行う。本システムの中心となる考え方については文献1)で報告しているが、今回のシステムでは図-2に示すように、工法ごとに耐震補強の効果額と補強に要する費用、期間を比較検討し、合理的な耐震性向上対策の提案を行うよう改良している。

これに加えて、機器・設備類の損傷度および補強効果、さらに、建物についても構造体のみではなく、地盤・基礎や内外装材などの被害と事業継続への影響についても定量的に評価を行うための検討を進めている。

②地震情報システム

地震時の機器・設備の被害を低減させ、機能維持および早期復旧を図るため、緊急地震速報システム²⁾の情報(震源位置、マグニチュード)を受けて、データベース化

された震動特性に基づいて、瞬時に建物各部位、機器・設備の震度の予測を行い、地震到達前に重要機器を停止させるなどの適切な対応判断を行う。(詳細は次章)

③災害復旧支援システム

地震後に迅速かつ適切な復旧支援を行うため、顧客情報を一括管理し、それぞれの位置・建物情報を用いて被災状況の解析を行った上で、組織的な対応を行う。(現場地震速報システムによる作業所の減災対策により復旧対策のための要員を確保することも含む。)

以下では、②の緊急地震速報システムを活用した地震情報システムについて、考え方と効果について示す。

3. 緊急地震速報システムを活用した地震情報システム

3.1 緊急地震速報システム

緊急地震速報システムは、地震発生直後に気象庁および防災科学技術研究所の地震観測網で検知した初期微動(P波)から、警報装置設置場所での震度と到達時間を瞬時に予測し、その場所に主要動(S波)が到達する数秒から数十秒前に警報を発するシステムである(図-3)。たとえば、東京都千代田区における想定される地震と震度、主要動(S波)の到達時間の解析結果は表-1に示すようになり、この時間内に、事故を未然に防ぎ、安全を確保するための対策を行うことで、地震後も作業を継続して、あるいは最小限の中断により進めていくことが可能となるシステムである。

表-1 地震発生から作業所に到達するまでの時間の例

地震名	マグニチュード	距離	予測震度	到達時間
関東地震(1923)	7.9	68km	6弱	19秒
想定東海地震	8.0	222km	6弱	61秒
東京湾北部地震	7.3	14km	6強	5秒
多摩直下地震	7.3	48km	5強	14秒

戸田建設では、2007年10月の一般利用開始に先行して、建設作業の安全を図るため2006年7月よりこの

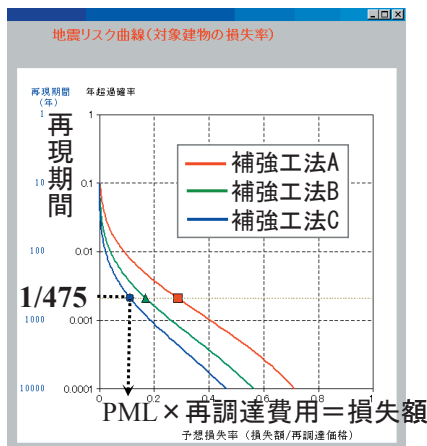


図-2 耐震補強工法ごとのPMLの比較例

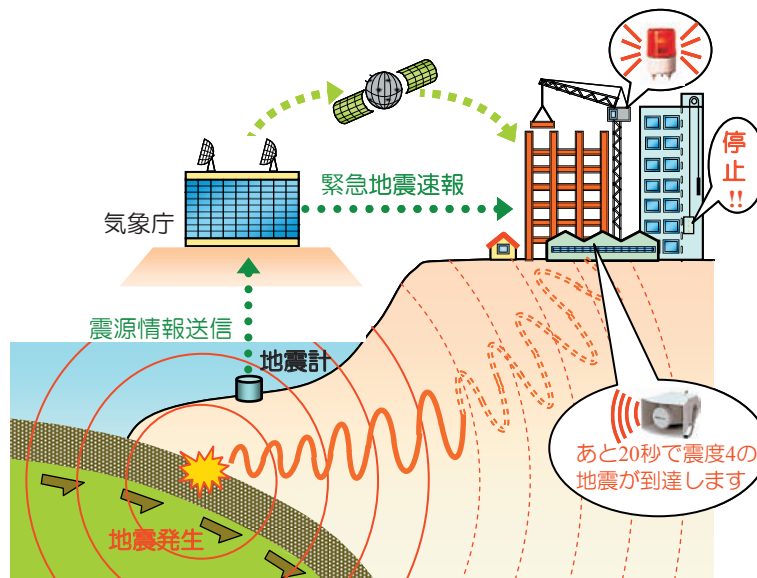


図-3 緊急地震速報システムの概念図

システムを作業所に導入、運用してきたが、さらにバージョンアップして、全国の作業所の位置情報、地盤情報を集中管理し、専用サーバーで予測震度、主要動到達時間を一括解析して、震度が閾値を超えた作業所のみ社内LANを通して瞬時に警報の配信を行うことのできる現場地震速報システム「ユレキテル」を2007年4月から導入し、全社展開している。このシステムでは平常時の警報装置の動作状況の確認や警報配信状況の集中管理も専用サーバーを通して可能であり、顧客情報と関連付けることで復旧支援体制を立ち上げるため災害復旧支援システムの一環としても利用可能である。

このシステムにおいては、作業所への警報配信の目的は作業員の安全性確保が主であり、地盤増幅のみを考慮して表面の最大速度の増幅度により震度を予測している。(高層建物やタワークレーンなどでは建設段階に応じて増幅率を変えることも検討中。)これに対して、緊急地震速報を生産施設や病院などの重要機器の緊急制御のために用いる場合には、地震の特性と建物の振動特性や機器の設置場所の関係を考慮した精度の高い震度の予測を行い、機器の性能に応じた閾値を設定して警報装置、制御装置を設けることが必要であり、「ユレキテル」システムを一般建物向けに拡張、高機能化することとした。

3.2 地震情報システム

緊急地震速報を活用した、機器、設備の制御による減災対策としては、たとえば生産施設であれば地震到達直前に振動を嫌う機器を停止させて歩留りを防止することや、病院であれば医療行為の一時的な中断や非常電源への切替えなどが考えられるが、より効果的なものとするためには精度の高い震度予測が必須である。たとえば、

2004年新潟県中越地震では震源から200km以上離れた東京都港区の超高層建物のエレベータが長周期震動により破損、停止した例が報告されており、地表面レベルの震度だけでなく、地震の規模・種類、地盤、建物の振動特性の関係を考慮した機器の設置場所や対象となる施設の位置ごとの綿密な予測が必要である。同時に、機能に影響を及ぼさない程度の地震で、生産ラインや医療行為を停止、中断させるようなことは避けるべきであり、このような過剰反応を防ぐためにも、精度の高い震度の予測と的確な判断が必要である。

ただし、精度の高い震度(応答値)の予測のために、対象となる地盤および建物に対して、超高層建物の設計に用いるような建物の地震応答解析を行うには多大な解析時間を要するが、緊急地震警報として用いるためには瞬時に予測、判断する必要がある。そこで、事前に対象となる建物、地盤の詳細情報を用いて想定される地震の種類(震源位置、マグニチュード)ごとに応答解析を行った結果をデータベースとして整理しておき、緊急地震速報が発信された場合には配信された地震情報とデータベースと照合し、建物各部の震度を瞬時に予測できる「地震情報システム」を搭載した高機能化された緊急地震速報システムの整備を進めている。本システムの考え方を図-4に示す。

3.3 パラメータスタディ

システムの構築にあたって、モデル建物に対する地震応答解析によるパラメータスタディを行い、各種の地震に対する応答値のデータベース化と、迅速かつ高精度な警報の配信システムの可能性について検討した。

地震応答解析は、同じ地盤に以下に示すような規模、

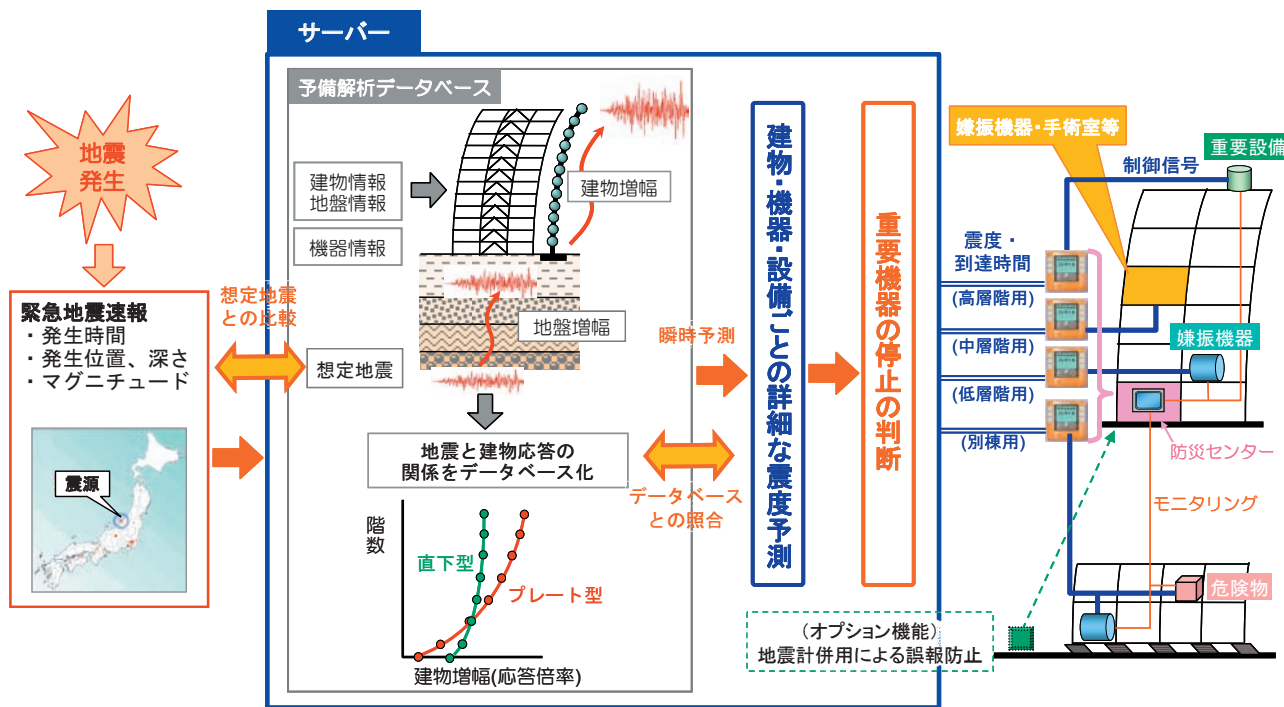


図-4 地震情報システムの概念図

構造の異なる3つ建物が建設されていたと仮定し、性質の異なる地震動を与えて、それぞれの建物の振動特性の違いを比較検討することとした。解析には、弾塑性振動解析プログラムRESP-M/IIを用い、建物は等価せん断ばねを用いた質点モデルにモデル化した。

建物1 生産施設

鉄骨造5階・地下なし、免震構造

建物2 事務所建物

鉄骨造37階・地下4階、制震構造

建物3 集合住宅

RC造30階・地下1階

入力地震動の一覧を表-2に、時刻歴波形を図-5に示す。検討に用いた入力地震動は地震の種類としてプレート型(地震A)および直下型(地震B)を想定し、震度6弱相当として作成したサイト波(模擬波)、東京で震度5弱が観測された地震の観測波(地震C:観測地点の計測震度は3.4、震源距離約30km)である。

応答解析結果のうち建物1のR階床における応答加速度の時刻歴を図-6に示す。ここで、建物1は免震建物であり、長周期成分が卓越し、最大加速度は入力に比べて小さくなり、かつ地震A、地震Bの最大値は同程度、地震Cとの差も入力波に比べて小さくなっており、地震動の種類の違いによる差が小さくなっており、(特にこの建物のような免震構造では)地震の種類よりも建物の振動特性が支配的であることがわかる。

各建物の最大応答加速度の高さ方向の分布を図-7、最大応答速度(相対速度)の分布を図-8に示す。なお、これらの図では代表的な階以外の結果は省略した。ここで、応答値の分布は建物により異なる傾向を示しており、建物2、3では建物1に比べれば地震の種類により応答値にも差があらわれており、特に、鉄骨造・制振構造の建物2では高さ方向の応答値の分布形状も異なっている。

表-3に各建物の代表的な階について、応答結果を用いて計測震度を算定した結果、および基礎の計測震度と各階の計測震度の比(倍率)の一覧を示す。

ここで、計測震度の分布および基礎からの倍率は建物、地震の種類、大きさにより異なっており、これらの複合した影響を受けることがわかる。言い換えれば、このような倍率を建物、地震の種類、大きさごとに適切に評価することができれば、その値を用いて建物の振動特

表-2 想定した地震の諸元

	マグニチュード	予測震度	最大加速度(gal)	地震の種類
A	8.0	6弱	300	プレート型
B	6.6	6弱	476	直下型
C	6.0	4	63	観測波

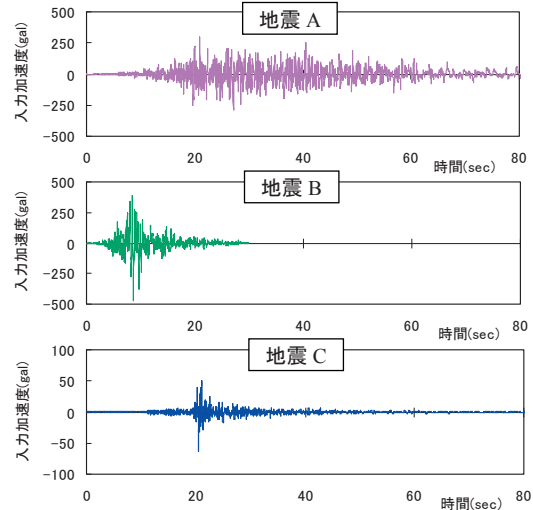


図-5 解析に用いた入力地震動

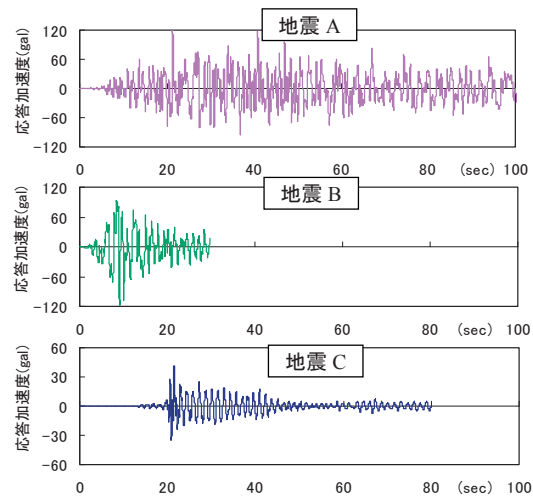


図-6 建物1の5階床の応答加速度時刻歴

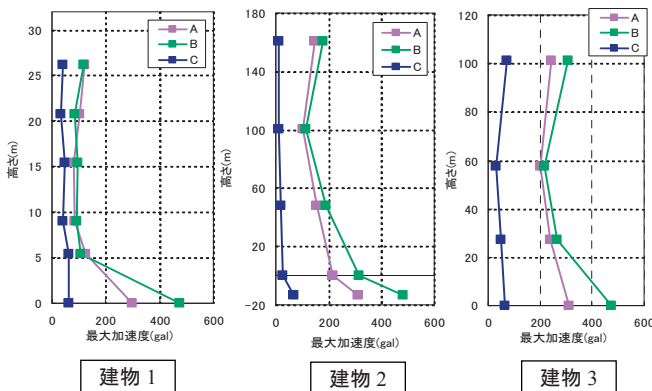


図-7 応答加速度分布

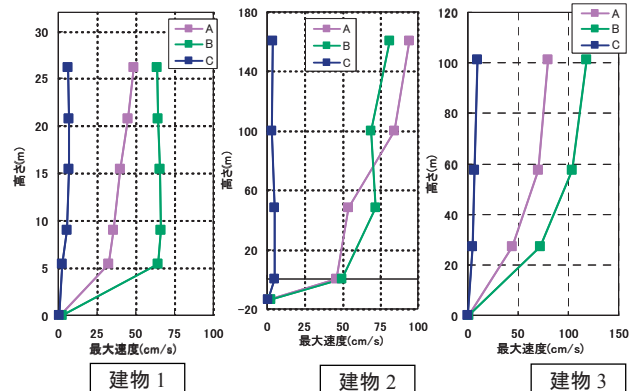


図-8 応答速度分布

性のある程度評価できることが示唆される。

以上から、ここで示したような解析を積み重ねることで建物の振動特性をデータベース化し、緊急地震速報を受けて、瞬時に建物の部位ごとの震度を予測することのできるシステムの構築の可能性について確認した。

ただし、今回の検討では解析ケースが少なく、建物、地震の種類ともに限られていたために、可能性を検討したことに留まったが、今後は地盤もパラメータとするなど解析ケースを積み重ね、システムの確立を図って行く。

表-3 応答結果による計測震度と基礎との応答倍率

建物 1

	地震 A(プレート)		地震 B(直下)		地震 C(観測)	
	計測震度	倍率	計測震度	倍率	計測震度	倍率
5階	4.9	0.91	4.8	0.87	3.8	1.09
3階	4.5	0.84	4.6	0.82	3.4	1.00
1階	4.7	0.87	4.6	0.82	3.7	1.07
基礎	5.4	1.00	5.5	1.00	3.4	1.00

建物 2

	地震 A(プレート)		地震 B(直下)		地震 C(観測)	
	計測震度	倍率	計測震度	倍率	計測震度	倍率
37階	5.1	0.94	5.5	0.99	3.0	0.87
24階	4.8	0.89	5.3	0.96	3.0	0.86
12階	5.3	0.98	5.5	0.99	3.2	0.93
基礎	5.4	1.00	5.5	1.00	3.4	1.00

建物 3

	地震 A(プレート)		地震 B(直下)		地震 C(観測)	
	計測震度	倍率	計測震度	倍率	計測震度	倍率
30階	5.6	1.04	5.8	1.04	3.9	1.15
15階	5.2	0.96	5.3	0.96	3.5	1.01
5階	5.3	0.99	5.4	0.97	3.4	1.00
基礎	5.4	1.00	5.5	1.00	3.4	1.00

5. おわりに

地震時の事業継続マネジメント(BCM)支援ツールとして整備を進めている、①耐震ソリューションシステム、②地震情報システム、③災害復旧支援システムの概要を示した。

そのうち、地震時の機器・設備の被害を低減させ、機能維持および早期復旧を図るため、緊急地震速報システムを活用して、瞬時に建物、機器・設備の震度の予測を行い、地震到達前に重要機器を停止させるなどの適切な対応判断を行う地震情報システムの考え方について紹介した。このシステムにおける震度予測は、迅速化と高精度化の両方が要求されるが、個々の地盤・建物ごとに予備解析(パラメータスタディ)によりデータベース化された震動特性に基づいて、緊急地震速報の情報(震源位置、マグニチュード)から予測を行うことにより、この条件を満たすことができると考えられ、その可能性を検討するための解析例について紹介した。

今後は、地震観測および解析の集積により予測の精度の向上を図るとともに、実物件への適用を通じて、ユーザの意向に沿えるような、より実用性の高いシステムにしたいと考えている。

また、BCM支援システムとしても、機器の制御装置

との接続の高機能化、施設内地震計との連動システムの開発やサプライチェーンの被害予測との連携など、拡張、向上を図っていく予定である。

【謝辞】

本システムは、著者ら以外にも多くの関係者の長年の努力と協力によって構築されたものである。また、現場地震速報システム「ユレキテル」および災害復旧支援システムは、建築企画室および建築工務部が主体となって開発したシステムである。関係各位に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 藤堂、千葉、大井「地震被害調査に基づく地震リスク評価」戸田建設技術研究報告、vol.28、2002
- 2) 保井他「緊急地震速報システムを用いた建設現場の安全管理」日本建築学会大会、A-1、pp.595-596、2007