

超高層 RC マンションにおける建物統合モニタリングシステム

THE INTEGRATED MONITORING SYSTEM COMBINED WITH STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM AND BUILDING MANAGEMENT SYSTEMS OF HIGH RISE RC CONDOMINIUM FOR EARTHQUAKE DISASTER PREVENTION

保井美敏*¹, 山本健史*², 鈴木宏昌*³, 清水隆*⁴

Mitoshi YASUI, Takeshi YAMAMOTO, Hiromasa SUZUKI and Takashi SHIMIZU

The Integrated monitoring system for Life Continuity Plan combine with structural health monitoring system with soundness diagnosis and building management systems is applicable to disaster prevention major earthquake. A Practical implementation of system is applied to high-rise RC condominium at the downtown area. The monitor of system is utilized Normal time, during an earthquake and after earthquake. During an earthquake, the monitor shows building seismic intensity and structure soundness of building. After earthquake, the building is safety, the monitor shows life necessary information. When the building is to be completed, Microtremors are measured. The measurement results are compatible with design vales.

Keywords : *Structural Health Monitoring, Building Diagnosis, Earthquake, Disaster Prevention, LCP*
構造ヘルスマニタリング, 建物診断, 地震, 防災, 生活継続計画

1. はじめに

東日本大震災では東北地方から関東地方までの広範囲で被害が発生し、建築構造物の応急危険度判定や被害調査に多くの人手や時間を要した。東京都心では、躯体構造が十分安全であるにも関わらず建物から外へ避難したため混乱が生じたり、多くの帰宅困難者が発生した。また、高層マンションが急増するなかで、地震災害時にライフラインやエレベータが停止し、地上との行き来が困難な状況下で住民が混乱・孤立する震災時高層難民の発生が懸念されている。

このような背景の中、事業継続や帰宅困難者対策を目的とした構造ヘルスマニタリングが超高層建物を中心に展開されている¹⁾。

さらに、震災などの大災害に対してしなやかに環境変化を乗り越えるレジリエントな建物を目指して、高層住宅などにおいては、震災時高層難民対策も含め、LCP といわれる生活継続計画に対応できる設備と地震時の構造ヘルスマニタリングを結びつけた防災技術が展開され、設備関連の管理システムと構造ヘルスマニタリングシステムを連携した統合管理システムとして開発されている^{2)~5)}。

本報告では、都内の物件に実装した、一連のレジリエンスを目指した統合管理システムの中で用いられている地震災害時に情報発信できる「建物モニタリング診断システム」(「ビルメディカルシステム」)の内容について報告する。

2. システムの概要⁴⁾

採用した建物モニタリング診断システムの概要を図-1に、機器の仕様を表-1に示す。

適用建物は高層棟と中層棟があり、MEMS 型加速度センサ(富士電機製、以下「IT センサ」)を高層棟5台、中層棟に3台それぞれ設置している。建物利用者などへは、エレベータホールやエントランスホールに設置したモニタで情報を提供している。エレベータホールのモニタには直近3階分を代表した建物震度(気象庁と同じ方法により算出した建物の計測震度相当値から求めた震度)が表示されるようになっており、地震時に自分が現在いる位置の建物震度が即時にわかるようになっている。

共用部モニタには、平常時(地震時以外)は街のインフォメーションを流すようにしており、モニタの有効利用が図られている。建物診断情報はITセンサから得られた記録を基に統合サーバを用いて分析した診断結果をコメントしている。高層棟EVホールでのモニタ表示状況、地震発生時及び揺れの収束後の表示画面例をそれぞれ図-2~図-4に示す。電子掲示版は、高層マンション、各階エレベータホールとエントランスホール、集会室、中層棟、エレベータホール(3階~7階)にそれぞれ配置している。

本システム¹⁾はITセンサ、データ収録・処理部、解析部及び表示部から構成される。計測された振動データはネットワークを介して自動的にデータ取

*1 戸田建設開発センター 工学修士

*2 戸田建設開発センター 修士(工学)

*3 戸田建設(株)計画設計部

*4 戸田建設(株)構造設計部

Research and Development Center, Toda Corporation, M.Eng.

Research and Development Center, Toda Corporation, M.Eng.

Architectural Design Division, Toda Corporation.

Structural Design Division, Toda Corporation.

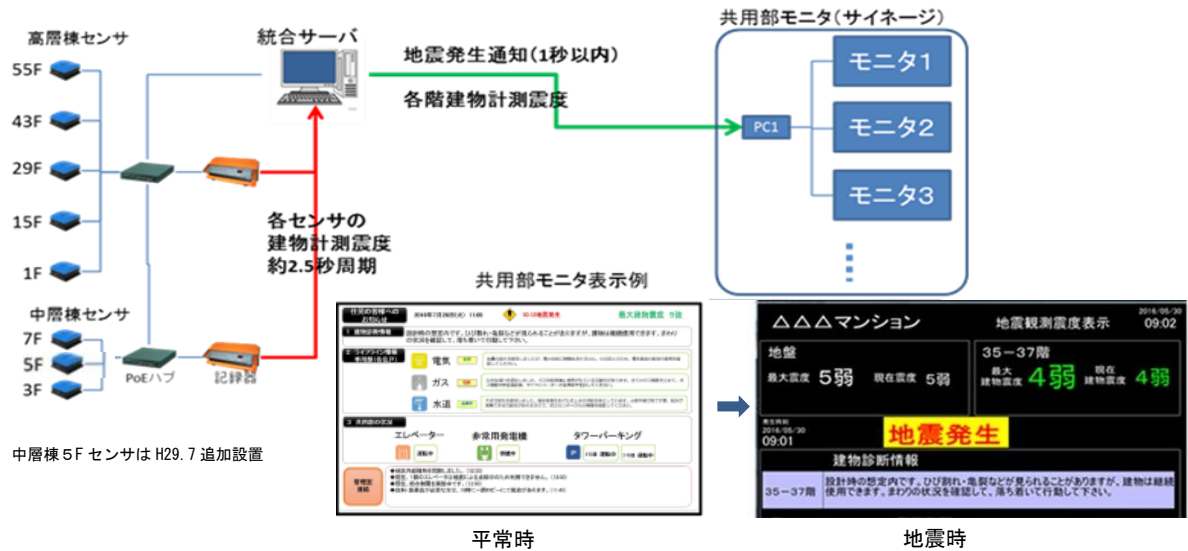


図 - 1 災害対応型建物管理システムと統合された建物モニタリング診断システム概要



図 - 2 エレベータホールの表示部



図 - 3 地震発生時(揺れの最中)の画面イメージ



図 - 4 電子掲示板(モニター画面)における表示画面例
【収束後/被災生活期】: 時間の経過に応じて、情報を提供

表 - 1 ハード仕様一覧

| 名称 | 項目 | 仕様 |
|--------|-----------|--------------|
| 簡易型地震計 | 検出方向 | 3成分(x, y, z) |
| | 測定範囲 | ±2000gal |
| | サンプリング周波数 | 200Hz |
| | センサー間時刻同期 | 1msec以下 |
| データ収集部 | メモリ | フラッシュメモリ |
| | 計算機能 | 計測震度 |
| 表示部 | 時刻サーバ | センサー時刻マスタ |
| | 市販モニタ | ビデオ端子接続 |

録・処理部へ送信する仕様となっており、設定した計測震度を超えると、地震発生とみなして収録・処理部はデータを解析部へ送る。解析部は健全性診断のため、予め設計時の応答解析モデルによって予測したモード形状を利用して、IT センサが取得する加速度波形を基に各階の最大加速度と最大層間変形角を求める解析を行ったうえで、表示部に対して各階の震度等の情報を送る。表示例は図 - 3 に示す通りである。建物計測震度として、2.5 秒ごとに求めたリアルタイムの建物震度とその地震中に生じている建物最大震度を表示し、建物の震度が一目でわかるようになっている。さらに、解析部で求めた最大加速度値と最大層間変形角の分布と設定している健全性閾値に対する診断結果のコメントを表示する。また、システムは各機器間の通信が途切れた時に通信エラーメッセージを発する自己診断機能を有している。なお、本システムは、マンション住民のためのシステムなので、外部に送信する仕組みは構築していない。

本システムの特長は以下の通りである。

- ① 平常時、非常時を通じて、地域の重要な情報を住民の方といち早く共有するしくみを構築した。
- ② 本システムを導入することで、震災で大きな揺れに見舞われた際にも、建物健全性をいち早く診断することが可能になる。避難するべきかどうかの判断に必要な情報を、モニタ画面を通じて、住民にいち早く伝える。
- ③ 避難の必要がない場合には、時間の経過に応じて、生活の継続に必要な情報(電気、ガス、水道、エレベータの状況や備蓄品に関する情報)を、モニタ画面を通じて、建物管理者から随時、住民に向けて伝える。

3. 観測結果例

本システムを導入以降、関東地方ではいくつかの

地震が発生しており、本システムでは震度 2 以上のデータを蓄積している。また、本システムは常時微動観測が可能であることから、導入設置時には常時微動観測を実施した。以下は高層棟を例として観測結果を紹介する。

3-1 導入時常時微動観測結果

本システムで導入時に設定したモード形状の確認、竣工時の建物固有振動数の確認を目的として、IT センサによる常時微動計測を実施した。本設で設置したセンサを用いるため、計測階は図 - 1 に示した通りで、4 次モード（高層棟は 5 台設置しているのので 4 次モードまで解析対象にできる。）までを対象とした。

図 - 5 に X, Y 両方向での、解析時のモード形状と観測結果を比較して示す。図 - 5 より、X, Y 方向ともに解析値と実測値は良く対応しており、各階の波形を補間して求めるのに用いるモード形状が妥当であることが確認できた。

図 - 6 には 55F と 1F の伝達関数の振幅比と位相差を示す。X 方向は 5 次モードまで、明瞭な振幅比のピークと位相のシフトを示す。一方、Y 方向は各固有振動からわずかずれた振動数に多少のねじれの影響がみられるが、各並進時の 5 次モードまで明瞭な振幅比のピークと位相のシフトを示す。伝達関数から推定される固有振動数は設計値よりわずかに大きく、RC 構造物の常時微動観測の結果として一般に報告されている傾向と同じであった。ここで得られた振動数を竣工時の振動特性値とし、今後の地震観測等によって得られる振動特性値との比較の基準値として用いる予定である。

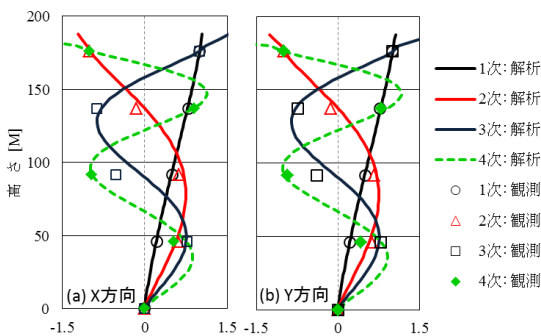


図 - 5 モード形状比較

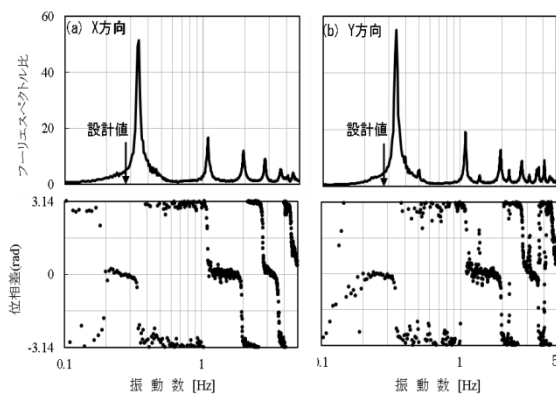


図 - 6 伝達関数 (55F/1F)

3-2 地震観測結果

これまでに得られた地震記録の 1 例として、小地震であるが、2016 年 2 月 5 日茨城県南部地震の例を示す。表示例であるが、エレベータホールでは見える化とわかり易さに重点をおいた図 - 3 のような表示に対し、管理室に表示される画面にはすべての階の情報が表示され、住民へのサービスに有効に活用できるようになっている。管理室では健全性判定も含め建物状況の詳細が一見してわかるような画面設定がされている。地震時の管理室用の表示画面例を図 - 7 に示す。また、通常時における建物健全性の自動判定に直接は用いないが、観測記録を分析した例として 55F/1F の伝達関数を導入時の常時微動観測の結果（竣工時の値）と重ねて図 - 8 に示す。震源が近い地震の影響もあり、X 方向の 1 次固有振動数付近の振幅比は常時微動時のように大きくなっていないが、固有振動数は竣工時と変わらず、構造躯体の剛性は変化してないことがわかった。このように、設計時の解析値とよく整合したモード形状が得られていることや、伝達関数の振幅比や位相差が安定して得られていることから、振動測定の高精度と考えられる。地震時には、これらの記録に基づいて、建物の健全性を評価した結果を住民らに通知することができることから、安全・安心のための情報提供システムとして有効に活用されていくことが期待できる。

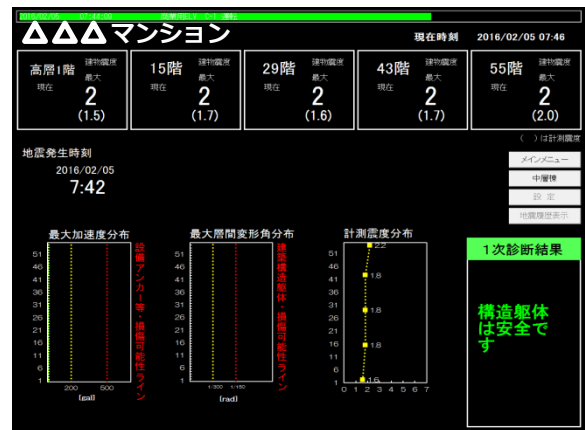


図 - 7 管理室の表示画面イメージ

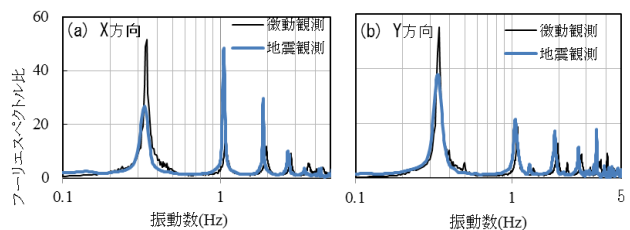


図 - 8 伝達関数 (55F/1F) の比較

4. 長周期地震動に関する検討

高層棟は超高層建物であることから、長周期地震動に関する課題を抱えており、対応を検討する必要がある。ここでは、現状考えられる課題をまとめた。

東日本大震災では、震源から遠く離れた地点に於いて、長周期地震動によって被害を受けた例が報告されている。この例のように、震度は小さくても、長周期地震動により建物が大きく応答する可能性があることは否定できず、震度とは別に長周期地震動のレベルに関する情報のニーズが増している。

気象庁では、長周期地震動に関しては震度とは別に、長周期地震動階級として階級1～階級4までの4レベルを設定している⁶⁾。また、構造ヘルスマニタリングにおいても長周期地震動の有無を表示させる工夫がなされたシステムが開発されている⁷⁾。

本システムにおいても、今後の南海・東南海・東海の南海トラフや相模トラフを想定した広域な断層が活動する地震に対応するため、現状の気象庁震度による建物震度にプラスして長周期地震動に対応する情報の提供を行うなど、システムの機能向上の検討が必要になってくると考えられる。気象庁の提案する長周期地震動階級を表示するのも1案であるが、

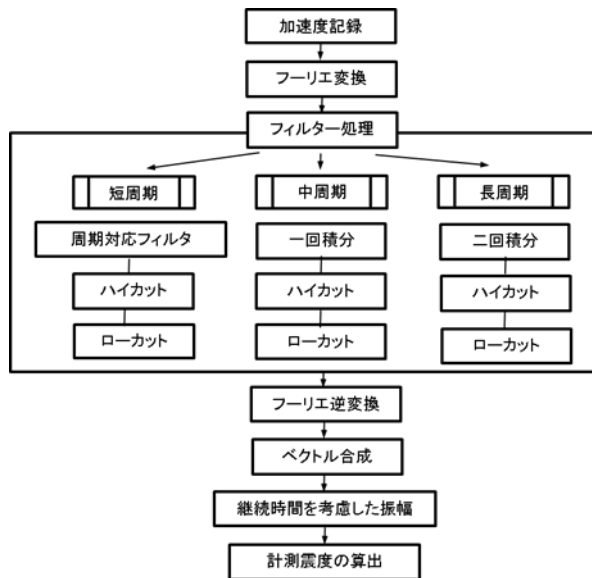


図 - 9 組合せ震度決定の手順⁸⁾

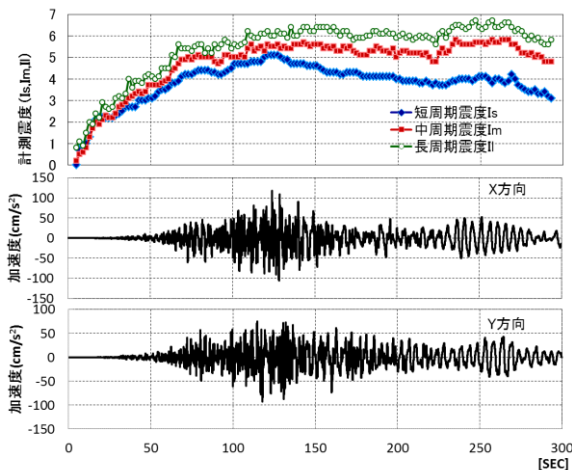


図 - 10 組合せ震度の時間変化状況(高層階の応答結果例)

震度(10階級)と長周期地震動階級(4階級)の2つの指標が、レベルが相違する基準で表示されることは、混乱を招く可能性もあることから、ここでは、現状のリアルタイムな計測震度情報提供にプラスする形を検討した。1例として、清野らが提案する組合せ震度⁸⁾により、高層階部分の状況を確認した。入力地震動は東日本大震災で記録された K-NET 新宿(TKY007)の波形を用い、超高層建物の応答解析を行い、高層階の応答値を組み合わせ震度で求めた。計算手順は図-9に示すとおりで、通常計測震度(短周期震度)の他に、速度波形を対象とした中周期震度、変位波形を対象とした長周期震度を求めた。

短・中・長周期の各震度の変化を2.5秒毎に求め、その遷移を確認した結果を図-10に示す。東日本大震災のように、長周期成分の強い後揺れが続く地震では、短周期震度が小さくなくても、ここで定義する長周期震度は小さくはない。このように高層階では、ある程度長い周期で大きく揺れることが想定され、この状況において住民に混乱のないように情報を提供し、安心・安全を与えるシステムとしてさらに有効に活用できるようにしたいと考えている。実際にどのような情報をどのような内容で伝達していくかは今後の課題とするが、具体的事例(将来起こりうる地震動による表示のシミュレーションなど)を通して、住民の希望を取り込むようなシステムとすることも重要と考えられる。

5. まとめ

東海・東南海・南海の3連動の南海トラフ地震、相模トラフや首都直下地震など巨大地震への減災や企業活動・生活のすみやかな復旧を想定すると、本システムを利用し、すみやかに建物の健全性診断を行い情報配信することが、LCPに有効と考えている。技術的な課題とともに、情報の表現方法など運用面での条件整備を進めていくことが今後の展開には重要である。

現在も、

- ① システムの運用主体の明確化
- ② システムの活用方法と体制
- ③ 建物の総合的なモニタリングシステムの建物の保全業務への応用

等の課題について運用面とモニタリング技術の応用面から検討を実施している。

特に③の建物の保全業務への応用については、本システムの有効活用には不可欠な課題と考えており、地震時の健全性評価に加え、毎日の定時のデータを取得し、これを時間経過に伴う劣化診断や異常検出に適用できないか等、得られたデータを基にした評価手法の技術的検討を行っている。地震時の健全性評価から建物保全まで、住民の方には本システムの効果を理解頂くようにつとめて行く必要がある。

本システムは様々な情報配信技術やロボット技術等との組合せが可能で、ユーザーのニーズを吸い上げて改良していく所存である。ネットワーク化やクラウドシステムの利用をさらに進めることにより、

IOT を利用した多機能なシステムへと展開が可能となり、今後の普及は急速になると考えている。

謝辞

統合管理システムは芝浦工業大学増田准教授をリーダーとして開発されたシステムで、建物モニタリング診断システム部分は富士電機株式会社と共同研究開発の成果である。また、本システムは、広島工業大学渡壁教授が戸田建設在籍時に、モニタリング技術の実用化に向けて精力的に取り組んできた成果内容でもあり、教授からは論文作成にあたり丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。ここに関係者各位に感謝の意を表します。

防災科学研究所の K-NET データを利用しました。

参考文献

- 1) 保井美敏、渡壁守正、成田修英、山本健史、篠田正紀、北川慎治:建物モニタリング診断システムの開発と改良展開、日本地震工学会大会,2015
- 2) 増田幸宏:重要業務継続を目的とした建物管理システムの開発、日本建築学会環境系論文集、Vol.79, No.700,pp535-544,2014
- 3) 日経アーキテクチャー:早期に日常を取り戻す建物管理を導入,pp68-71, 3-25,2015
- 4) 増田幸宏:地震災害時の生活継続計画(Life Continuity Plan)を支援する「建物統合モニタリングシステム」と、コミュニティで共有する「防災・減災情報システム」の開発・実装、建築設備士、pp34-38,2016.4
- 5) 渡壁守正、増田幸宏、保井美敏:建物モニタリング診断システムの導入事例—超高層ビルに実装された災害対応型統合管理システム,建物の構造・機能評価に関するシンポジウム,,pp65-68,2017.2
- 6) http://www.data.jma.go.jp/svd/eww/data/ltpgm_explain/about_level.html
- 7) <https://www.mori.co.jp/company/press/release/2013/08/20130828110000002687.html>
- 8) 清野純史、藤江恵悟、太田裕:組合せ震度の提案・定式化とその応用について、土木学会論文集, No.612, I-46,pp143-151,1999.1