

◇特集技術紹介 Technical Report

地震時における建物被災度の即時推定技術

Technology for Instantaneous Estimation of Structural Damage

中村 充 Mitsuru Nakamura
 圓 幸史朗 Koshiro En
(本社技術本部原子力本部)
 石川 理都子 Ritsuko Ishikawa
 三浦 耕太 Kota Miura

1. はじめに

2013年4月に施行された東京都の「帰宅困難者対策条例」とそのガイドラインでは、大地震が発生した場合、発災後3時間までに、建物にとどまることが可能かどうかを事業者が判断することを求めている。すなわち、建物管理者あるいは建物所有者は、余震による二次災害を防止するため、建物が被害を受けていないか早急に判断する事を求められている。このような背景を受けて、大地震直後に建物被災度判断を支援するシステムへのニーズが急速に高まってきている。

本報告では、このようなニーズに対応するために開発された2つの技術を紹介する。

まず、RC建物を対象として、多数の小型AEセンサおよび加速度センサを無線ネットワークで接続し、センサから得られた情報に基づいて、地震時の建物構造被害の即時推定を行う「構造ヘルスマonitoringシステム¹⁾」について紹介する。

次に、主に超高層鉄骨造を対象として、1台の地震計によって観測された地震波を用いて設計モデルの応答計算を自動実行し、その結果に基づき建物被災度の即時推定を行う「建物地震被災度即時推定システム」の概要を紹介する。

2. 中低層RC建物を対象とした「構造ヘルスマonitoringシステム」

2.1 システム概要

このシステムは、小型センサを微弱電波による無線ネットワークで接続したものであり、低コストでかつ既存建物への設置も容易なシステムの実現を通じて、RC建物を対象とした構造ヘルスマonitoringの普及を図ることを目指して開発を進めてきた¹⁾。

システムの基本構成をFig.1に示す。システムの構成要素は2種類のセンサユニットSAE(Smart Acoustic Emission)とSVA(Smart Vibration Analyzer)、無線親機、複数の無線親機を統括するマスター親機からなる。

SAEとSVAはいずれも10.5cm×7.0cm×2.0cmの筐体中に無線モジュールと加速度センサ、センサ信号を処理する小型のCPUを内蔵している。SAEは、外部にAEセンサモジュールを装備している。SAEセンサユニットおよび無線親機の外観をPhoto1に示す。

2種類のセンサのうちSAEは、コンクリートのひび割

れ発生に伴うAE(超音波)を検出することで、局所的な構造損傷を検出すること(ローカルモニタリング)を目的としている。一方SVAは、損傷によって生じた振動特性の変化、具体的には固有振動数の低下を応答加速度指標の変動から検知しようとするものであり、構造物全体の変状を監視するグローバルモニタリングを実施する。

建屋各所に多数設置したこれら2種類のセンサから得られた損傷指標を独自のアルゴリズムにより処理することにより、建物全体の被災度を3段階の結果として即時評価する。評価結果は、無線親機あるいはマスター親機とLAN接続されたPCからブラウザ経由で確認することができる。さらに、警報灯による結果の表示機能や、メールによる結果の配信機能などを備えている。

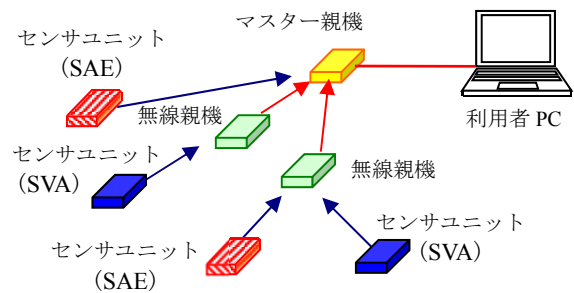
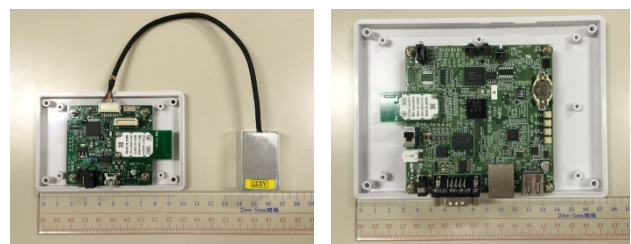


Fig. 1 システム構成例
Outline of the Monitoring System



SAE センサユニット
(外観カバー解放)

無線親機(外観カバー解放)

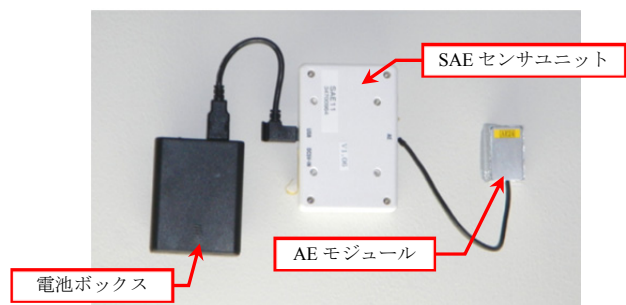


Photo 1 センサユニット外観
Outline of Sensor Units

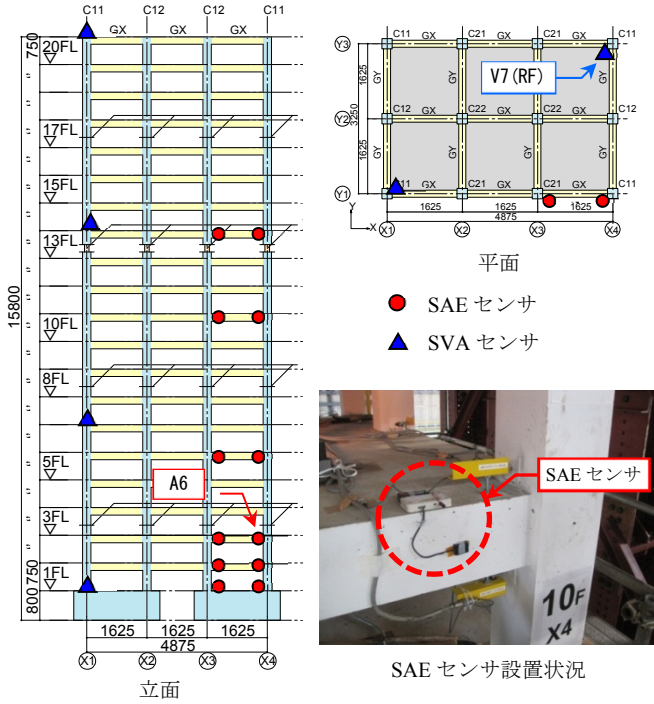


Fig. 2 試験体とセンサ設置位置概要³⁾
Sensor Location on the Test Structure

Table 1 主要なケース一覧
The List of Main Test Case

ケース	波形(倍率)	固有周期 (加震後)[sec.]	最大応答 層間変形角[rad.]
#1-3	東京観測波(40%)	—	—
#1-5	東京観測波(100%)	0.76	1/234
#2-2	東京観測波(200%)	0.89	1/137
#2-6	東京観測波(300%)	1.02	1/86
#3-2	津島波(150%)	1.08	1/64
#3-5	津島波(200%)	1.28	1/35

2.2 震動台実験における損傷指標の検証³⁾

本システムでは、SVAにおける加速度損傷指標として、ゼロクロス回数・加速度絶対値和を、また、SAEにおいては単位時間当たりのAE発生回数(AE計数)を、いずれも独自の損傷指標として採用している。

これらの損傷指標の有効性確認ならびにシステム全体の動作検証のため、縮小20層RC造建物試験体の震動台実験²⁾において、開発したシステムを設置した³⁾。

実験は、(独)防災科学技術研究所のEディフェンスにおいて実施された。試験体は、標準的な超高層RC造純ラーメン架構を想定した、縮尺1/4の20層試験体である。この試験体に、SVAを7台、SAEを12台設置した。Fig.2に試験体の概要と各センサの設置概要を示す。加震レベルを増加させながら5ケースの本加震が実施された。試験体の損傷状況は、最初の本加震において最大層間変形角1/234、最終加震時では1/35となっている。Table 1に主要な加震ケースの一覧を示す。

まず、SVAにおける加速度損傷指標であるが、加震ケ

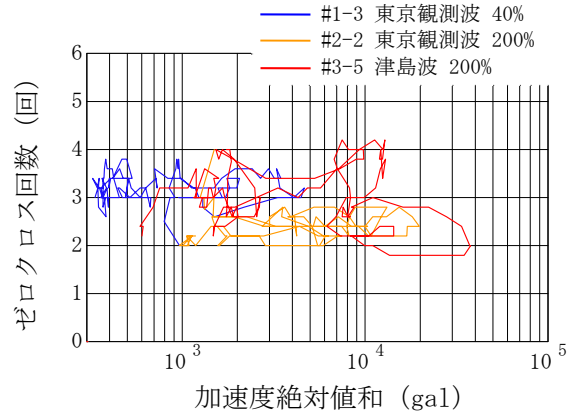


Fig. 3 SVA損傷指標例 (V7の結果)
Damage Evaluation Results by SVA

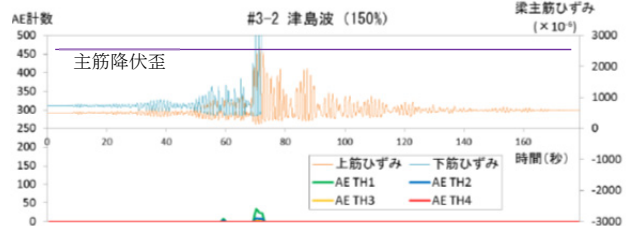
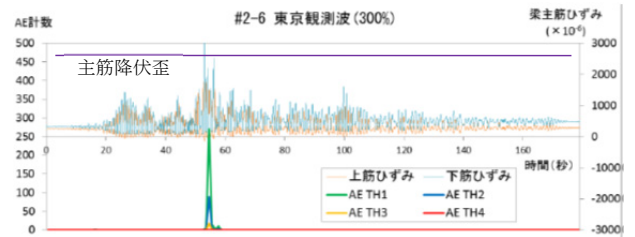
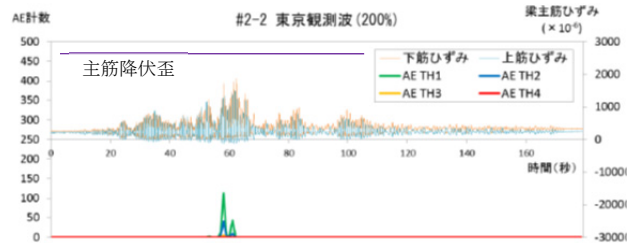


Fig. 4 AE計数と梁主筋歪み時刻歴データの比較例³⁾
Comparison of AE Index and Rebar Strain

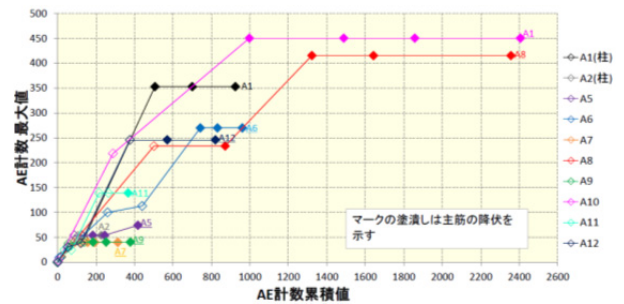


Fig. 5 SAE損傷指標例³⁾
Damage Evaluation Results by SAE

ースのうち3ケースについて、縦軸にゼロクロス回数を、横軸に加速度絶対値和をとった結果を Fig. 3 に示す。これらの図から、加震ケースに従って損傷が進展し、それに伴いゼロクロス数が低下(固有振動数が低下)していく傾向が顕著にみられる。すなわち、ゼロクロス数は、ケース#1-3 から#3-5 に至る間で、約 3 から 2 以下まで30%以上低下している。これは試験体の固有振動数が約 1.5Hz から 1.0Hz に長周期化したことを意味する。さらに、入力振幅の増大と固有振動数の低下に伴い、図の右下方向に結果が移動していく傾向が顕著にみられる。このように SVA においては、加速度振幅の増加に伴う固有振動数の低下として構造損傷を評価することを図っている。

これらの震動実験による検証結果から、ゼロクロス数と加速度絶対値和を組み合わせた指標が簡便な損傷指標として効果的であることが示された。

次に SAE による AE 損傷指標であるが、梁主筋歪みと AE 計数の比較結果から、梁主筋歪みが大きくなると AE 計数が大きくなるが、主筋降伏後は計数の値は小さくなる一方で計数が観測される時間が長くなる傾向が確認された。3 階の梁に設置したセンサ A06 で計測された AE 計数およびその近傍の梁主筋のひずみデータの時刻歴の例を Fig. 4 に示す。図中の TH1~TH4 は AE の強度に対する 4 段階の閾値レベルを表しており、TH1 が最も感度が高くなっている。

Fig. 5 に、横軸を AE 計数の累積値、縦軸を過去に経験した AE 計数の最大値とし、各加震ケース終了時点の各値を計測点ごとにプロットしたものを示す。図中の白抜きの点は主筋降伏前を、塗潰した点は加震中に主筋が降伏したものを示す。図より、横軸の AE 計数の累積値は加震ケースが進むに従い増大するが、最大値は主筋降伏付近で頭打ちとなり、加震ケースが進んでも増大しない傾向となっている。本実験の部材については、AE 計数の累積値が 200 程度、最大値が 100 程度で主筋の降伏の有無を概ね判別できることがわかる。

これらの震動実験による検証結果から、AE 計数の累積値と最大値を組み合わせた指標が簡便な損傷指標として効果的であることが示された。

2.3 省電力と無線の強化

現在、本システムについて、さらなる性能向上を目指した改良を行っている。改良点は、センサユニットの省電力化と無線の強化である。

省電力化については、センサユニットで採用しているデバイスの見直し・回路再設計等の改良により、市販のアルカリ電池で2年以上の継続使用を可能とした。また、無線については、920MHz 帯の無線採用により、建物内での無線通信状況の改善を実現している。

これらの改良により、より実用性の高いシステムを実現することが可能となった。改良後のシステムは、複数の実建物(オフィス)への実装を完了しており、システム

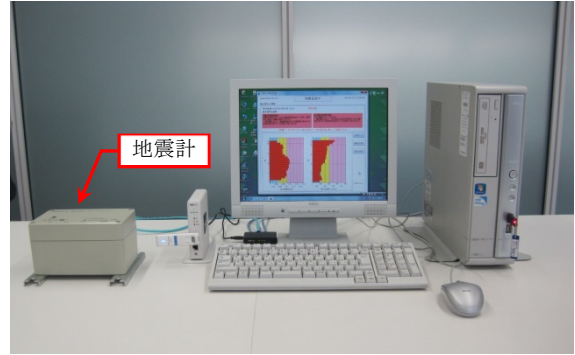


Photo 2 「建物地震被災度即時推定システム」外観
Instantly Damage Estimation System

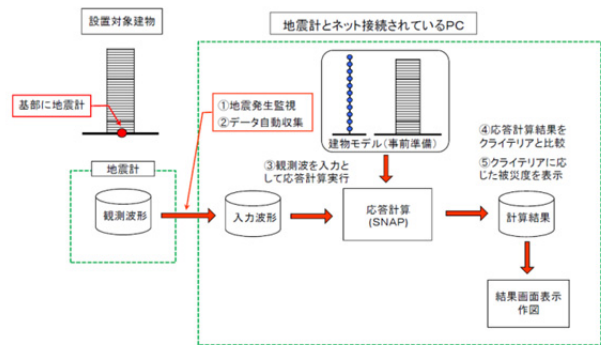


Fig. 6 「建物地震被災度即時推定システム」構成図
Configuration of the Instantly Damage Estimation System

全体の検証作業を継続的に実施している。

3. 超高層鉄骨造建物を対象とした「建物地震被災度即時推定システム」

3.1 システム概要

このシステムは、主に超高層鉄骨造を対象としたものであり、建物1階などに設置した1台の地震計の観測結果と建物応答計算用の数値モデルから、自動的に建物の被災度を推定し、建物管理者などによる震災時判断を支援することを意図したものである。

システムの基本構成は、建物1階もしくは地階などに設置した1台の地震計とPCという簡易な構成となっている。Photo 2 にシステムの外観を、Fig. 6 にシステムの構成をそれぞれ示す。

まず、地震が発生したかどうかは、あらかじめ設定された加速度において地震計が自動判断し、地震波の記録を行う。地震計と接続されたPC上で常時稼働しているシステムは、地震計を常に監視することで地震の発生を検知する。

地震が発生したことを検知すると、地震計に記録された地震波形をPCに転送し、あらかじめ用意された応答計算モデルを用いて地震応答計算を実施する。計算結果は、あらかじめ設定された損傷指標と比較され、被災度

推定が行われる。被災度の推定に用いる損傷指標は、各階の最大加速度と各層の最大層間変形角を用いており、これらを総合的に判断して、建物構造と非構造部材とに対してそれぞれの被災度推定を行う。被災度推定結果は、画面表示により利用者へ提示されるとともに、音により注意喚起を行う。

システムでは、以上の一連の動作がすべて自動的に実行される。利用者は、被災度推定結果を参照して、必要に応じた避難などの防災対策の判断に役立てることが可能となる。

3.2 システムの特徴

このシステムの最大の特徴は、1 台の地震計と PC という簡易な構成により、大幅なコスト減を実現したことにある。多数の地震計やそれらを接続するケーブルの敷設を必要としないので、既存建物へもコストをかけずに容易に設置することができる。複数の地震計を用いる従来システムと比較して、大幅なコストダウンが可能となっている。

このシステムでは、被災度の推定は、超高層建物設計時に建物応答計算に用いる数値モデルを利用して自動的に行われる。このため、被災度の推定精度は、モデルによる応答予測精度に大きく左右される。東日本大震災においては、複数の超高層建物における地震観測結果および観測結果と設計モデルの比較等の情報が公開されている(例えば 4)~6)など)。これら社外の事例に加えて当社独自の観測結果の分析を通じて、設計用モデルが、被災度即時推定の目的として十分な予測計算精度を持つことを確認している。

次に、このシステムの特徴の一つとして、情報の受取手に合わせて推定結果の提示を 2 種類に分割したことが挙げられる。被災度の推定結果は、まず地震直後に、システムが設置されている防災センターなどに常駐する管理者向けに、わかりやすい 3 段階評価で画面表示される。

推定結果が一定以上の被害規模であった場合、システムは、管理者に対して、保存されている観測結果と計算結果を建物設計者等の専門家に提示して指示を仰ぐことを促す。専門家はこれらの保存結果を活用して、建物被災状況の詳細な分析を速やかに行うことが可能となり、地震後の迅速な復旧対策が可能となる。

開発したシステムは、都内墨田区の鉄骨造超高層建物(33 階、高さ 134m、1994 年竣工)に設置され、継続的に検証を行っている。

4. まとめ

大地震直後に建物被災度判断を支援するシステムへのニーズの高まりに対応して開発した、RC 建物を対象とした「構造ヘルスマonitoringシステム」、および主に超高層鉄骨造を対象とした「建物地震被災度即時推定システム」の概要を紹介した。

いずれのシステムとも、新築のみならず既存建物への設置を低コストにて実現できる点を最大の特徴としており、BCP ツールの一つとして、建物管理者などの地震直後の迅速な防災対策に活用することが期待される。

今後、地震時BCP支援ツールとして積極的に提案・展開を図っていく予定である。

謝辞

本報告2章で示した結果は、平成24年度国土交通省建築基準整備促進事業(27-1 長周期地震動に対する鉄筋コンクリート造建築物の安全性検証方法に関する検討)の成果を利用させていただきました。また、同じく2章の結果は日本電気(株)殿および(株)ジャスト殿との共同研究に基づく成果です。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村, 圓: RC 構造物の地震時構造被害判定を可能にする構造ヘルスマonitoringシステム, 大林組技術研究所報, No.76, 2012.12
- 2) 杉本, 他: 「縮小 20 層 RC 造建物試験体の長周期地震動による震動実験(1~11)」日本建築学会大会梗概集, C-2, pp.653-674, 2013.8
- 3) 中村, 他: 「RC 構造物を対象とした構造ヘルスマonitoringシステムの開発(その 12~13)」建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.69-70, 2014.9
- 4) (独)建築研究所: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告, 2012
- 5) 荒川, 他: 2011 年東北地方太平洋沖地震における超高層建築の強震観測と地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.305-310, 2011.8
- 6) 永島, 他: 東北地方太平洋沖地震における超高層制振建物の地震応答評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.315-318, 2011.8