

◇技術紹介 Technical Report

# 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ニタリングシステム

中村 充 Mitsuru Nakamura  
 圓 幸史朗 Koshiro En

(本社 技術本部 原子力本部)

## Structural Health Monitoring System Applied to RC Buildings with Smart Sensors and Wireless Network

### 1. はじめに

RC 構造物における地震時の構造被害を迅速に検出し、地震後の建物使用性判定に供することを目的として、構造ヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring) システムを開発した<sup>1)~5)</sup>。

このシステムは、RC のひび割れを検出する AE センサと従来の加速度センサの 2 種類のセンサを併用していること、独自の損傷指標の採用により分かりやすい判定結果を迅速に得ることができること、低コストセンサを多数配置することによりコストを抑えながら信頼性の高い損傷検出機能を実現したこと、消費電力を抑えた無線ネットワークの採用により既存建物に対しても容易な設置を可能にしたこと、などの特徴を有している。

システム機能の検証を行うため、プロトタイプシステムを作成して既存建物における試験実装を行った。

本報告では、システムの概要、試験実装を通じて得られた成果などについて紹介する。

### 2. システム概要

#### 2.1 構造ヘルスマニタリングとは

構造ヘルスマニタリングとは、センサから得られた情報に基づき構造物の損傷を検出評価したり、あるいはその構造健全性を監視したりする技術であり、主に、地震時の構造損傷を対象として開発がすすめられている。

歴史をさかのぼると、1995 年の兵庫県南部地震などをきっかけに建物損傷の検出評価に対する関心が高まり、さまざまな研究、提案が行われるようになったが、ハードウェアが高コストであることなどに起因して本格的な普及が見られないまま現在にいたっている<sup>6), 7)</sup>。

本報告で紹介するシステムは、低コスト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、構造ヘルスマニタリングの普及を図ることを目指して開発を進めてきた。

#### 2.2 システム基本構成とセンサユニット

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)、無線ルータ、無線の親局となるコーディネータ、観測結果を分析表示する PC からなる。

2 種類のセンサのうち SAE は、ひび割れなどの損傷が最も生じやすいと考えられる部位に設置し、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。これら 2 つの方法を併用することにより、信頼性の高いヘルスマニタリングを構築することを図っている。

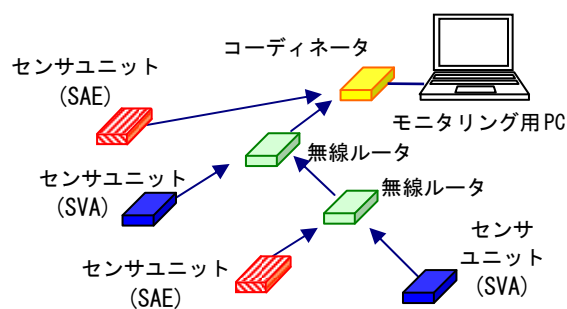


Fig. 1 システム基本構成  
Outline of the Monitoring System



Photo 1 センサユニット外観 (SAE)  
Sensor Unit

SAE と SVA はいずれも 10.5cm×6.5cm×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 センサユニットの外観を Photo 1 に示す。

センサユニットは、省電力のため通常はスリープ状態となっているが、あらかじめ設定された以上の加速度を検知すると起動し、内蔵プログラムに従って、加速度センサあるいは AE センサ信号を処理し、ネットワークを通じてモニタリング用 PC に処理結果を送信する。

### 2.3 無線ネットワーク

無線は、小電力無線規格 Zigbee によるメッシュタイプネットワークを採用している。メッシュタイプネットワークは、無線の伝搬状況に応じて、個々のセンサユニットとルータとの接続関係が刻々と変化し柔軟な対応を可能とするものである。例えば、無線の伝搬を妨げる障害物がシステムの設置環境に新たに追加され、特定のセンサユニットとルータ間の通信が遮断された場合など、自動的に新たな無線ルートを探索し再接続を行う仕組みとなっている。

無線規格として Zigbee を採用したのは、センサユニットにおける消費電力を可能な限り抑えることで電池駆動を可能とすることを図ったためである。

一方、Zigbee に代表される微弱無線通信では、通信速度の遅さによる実用性の低下が問題となることが懸念されるが、このシステムでは、センサによる測定データそのものを送信するのではなく、センサユニット内において測定データから損傷指標への変換を行うことにより送信すべきデータ量を圧倒的に低減することで、微弱無線の採用を可能としている。

さらに、小電力無線ネットワークを採用した結果、システム設置に際してセンサケーブル等の配線が不要となり、特に既存建物への設置が容易なシステムを実現することが可能となっている。

### 2.4 損傷指標

SVA における加速度損傷指標として、ゼロクロス回数・加速度絶対値和を設定している。

ゼロクロス回数は、加速度波形が一定時間間隔にゼロ線を横切る回数をカウントするものである。RC 構造物では、損傷により固有振動数が大きく低下することが想定される。ゼロクロス回数は、この固有振動数の概略を把握することを図った損傷指標である。なお、SVA では、卓越振動成分をより確実に抽出するため、デジタルフィルターによる前処理を併用している。

加速度絶対値和は、一定時間内の加速度の絶対値を累積したものであり、エネルギー的な指標として応答の大きさを評価するものである。

これら 2 つの指標はいずれも簡単な演算処理により求めることができるため、センサユニットに搭載されてい

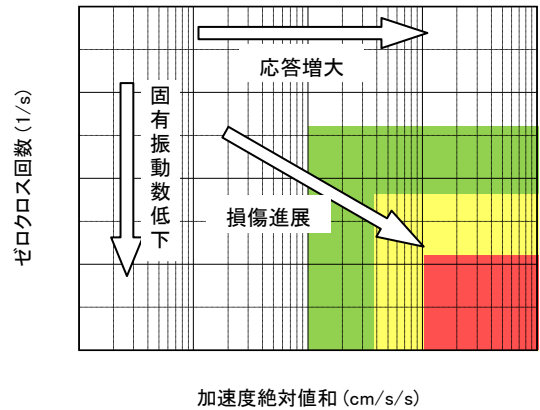


Fig. 2 加速度損傷指標の概念  
Outline of the Vibration Damage Index

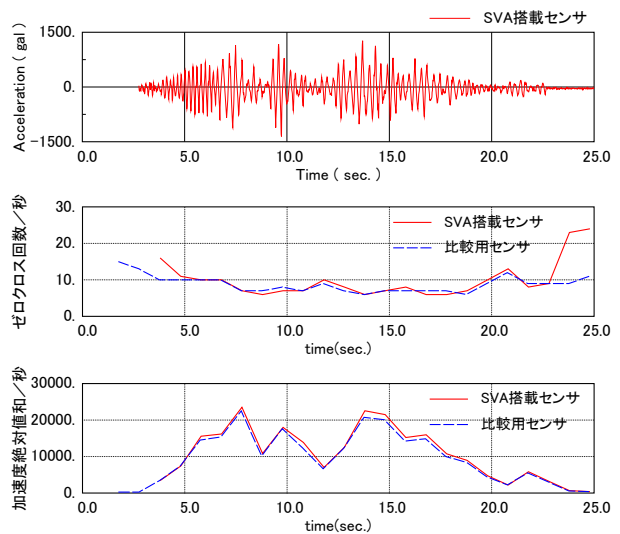


Fig. 3 加速度損傷指標の例<sup>4)</sup>  
Example of the Vibration Damage Index

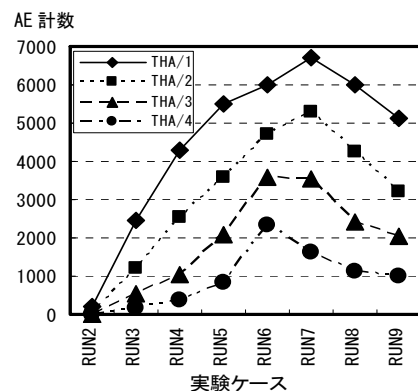


Fig. 4 AE損傷指標の例<sup>8)</sup>  
Example of the AE Damage Index

る簡便な CPU でも処理可能となっている。

これら 2 つの指標をもとに損傷判定を行う概念を Fig.2 に示す。この図は、横軸を加速度絶対値和、縦軸をゼロクロス回数として、一定時間ごとに得られた損傷指標をプロットするものである。図中右下に行くほどゼロクロ

ス回数, すなわち固有振動数が低下し, 同時により大きな応答が観測されたことを表しており, 損傷度が進展していると推定することができる。そこで, 図を左上から右下に向かっていくつかのゾーンに分割することで, 損傷判定結果をわかりやすく提示することを図っている。

Fig.3 は, システムの基本動作を検証するため実施した振動台試験において, SVA センサから送信された損傷指標と, 比較用のセンサ信号を処理して得られた損傷指標の比較を示したものである。図から, SVA センサユニット内で想定通りの処理が実行されていることが確認できる<sup>4)</sup>。

SAE センサユニットにおいては, 単位時間当たりの AE 発生回数 (AE 計数) を損傷指標としている。サンプリング周期 100 マイクロ秒にて測定した AE 信号を, 4 段階に設定した閾値ごとに, 1 秒ごとの閾値を越えた回数のみを送信している。加速度損傷指標と同様に, 送信データ量が極めて少ないことが特徴となっている。

Fig.4 に, 縮小試験体振動台実験において, SAE センサで得られた損傷指標の事例を示す。図の横軸は振動台の加振ケースであり, 右に行くほど大きな加振すなわち大きな損傷が発生したケースとなっており, 図中には 4 段階の AE 閾値 (THA/1~4) に対応する AE 計数が示されている。図から, 損傷の進展に伴って AE 計数が増加している様子が確認できる<sup>8)</sup>。なお, RUN7 以降においては, 損傷が進み, ひび割れの新規発生が減少しているため AE の発生も低下している。

### 3. 実建物への試験実装

#### 3.1 試験実装を行った建物概要

開発したプロトタイプシステムについて, 実用化への検証を目的として, RC 建物への試験実装を行った。

実装対象としたのは, 神奈川県内に位置する 2 棟の低層 RC 事務所ビルである。試験実装は, 2010 年 5 月および 2010 年 7 月からそれぞれ開始したが, 現在までに両建物で合わせて 10 地震でデータを収録している。ここでは, このうち横浜市青葉区に位置する建物への実装結果について紹介する<sup>9)</sup>。

Photo 2 に試験実装を行った建物の外観を示す。この建物は, 耐震壁付 RC 構造 3 階建て, 平面は約 27m×15m である。

建物内に 1 台の SVA センサと 3 台の SAE センサを設置した。SAE は地震時に損傷が生じると想定される 1 階の梁端部 (SAE10) と 2 階の耐震壁 (SAE5), 梁 (SAE4) に配置した。SVA は, 3 階柱の頂部 (SVA11) に配置した。モニタリング用 PC とコーディネータは 3 階に設置し, 1 階~3 階の各所に無線ルータを 5 台設置し, 無線ネットワークを構築している。コーディネータへの電源供給は AC 電源によって行っているが, 無線ルータへの電源供給は電池と AC 電源を併用し, SVA センサと SAE センサの電源供給は, 単 3 アルカリ乾電池により行っている。



Photo 2 試験実装を行った建物  
Testing Building



Photo 3 センサユニット実装状況 (SVA)  
Sensor Unit in the Testing Building



Photo 4 センサユニット実装状況 (SAE)  
Sensor Unit in the Testing Building

#### 3.2 東北地方太平洋沖地震における観測結果

2011 年 3 月 11 日, 東北地方太平洋沖地震が発生し, 横浜市青葉区では震度 5 弱を記録した。試験実装中のシステムでは, 各センサユニットにおいて 30gal 以上の加速度を検知すると起動する設定となっていたが, 本震をはじめ 2 つの余震で起動し, データが記録された。

Table 1 に, システムが起動した地震の諸元と, 近隣の K-NET 観測点 (KNG002: 横浜) における観測最大加速度, 起動したセンサユニットの一覧を示す。

3 月 11 日 14:46 分に発生した本震では, 設置した全てのセンサが起動した。同日 15:15 分に発生した余震 (茨城県沖 M7.7) と, 3 月 15 日 04:59 に発生した地震 (東京湾 M4.1) では, SVA11 と SAE5 のみが起動した。SAE4,

Table 1 地震時のデータ計測状況（「最大加速度」はK-NET 観測点の値）  
Observed Results during the Earthquakes

計測日	発生時刻	震源	マグニチュード	最大加速度(gal)		SVA11(gal)		SAE4	SAE5	SAE10
				NS	EW	NS	EW			
3月11日	14:46	三陸沖	M9.0	138.3	164.8	254	112	○	○	○
	15:15	茨城県沖	M7.7	—	—	35	33	—	○	—
3月15日	04:59	東京湾	M4.1	—	—	30	33	—	○	—

SAE5, SAE10 から転送されたデータには、ひび割れの発生を示す AE 計数は計測されていなかった。SAE を設置した周辺のコンクリート躯体の状況を目視で確認したところ、ひび割れ等の損傷は見られず、AE 波が発生していなかったと考えられることから、SAE の記録が妥当であることが確認できた。

Fig.5 は、SVA により得られた加速度損傷指標を示したものであり、3 つの観測地震のそれぞれの結果を示している。図中には、実装している建物を対象として設定した3つの判定基準を併記している。観測された地震の振幅に応じて評価結果の傾向が異なるが、いずれも「注意」未満の判定となっていることが分かる。

#### 4. まとめ

RC構造物における地震時の構造被害を迅速に検出し、地震後の建物使用性判定に供することを目的として、構造ヘルスマニタリングシステムを開発した。

システム機能の検証のため実施した既存建物における試験実装期間中に東北地方太平洋沖地震が発生し、観測された結果からシステムが想定通りの機能を果たすことが確認された。

開発したシステムは、BCPツールの一つとして、地震直後の迅速な構造被災度判定に活用することが期待される。今後、多数のRC構造物が存在するインフラ施設等への適用を目指している。

#### 謝辞

本報告で示した結果は、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ある。ここに記して関係各位に謝意を表します。また、地震情報は防災科学技術研究所が運用しているK-NETの観測結果を利用致しました。

#### 参考文献

- 1) 圓, 他: スマートセンサと無線ネットワークを用いた構造ヘルスマニタリングシステムの開発, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第6号, pp.17-30, (2007)
- 2) 圓, 他: スマートセンサを用いた構造ヘルスマニタリング, 建築防災, pp.15-20, (2009)

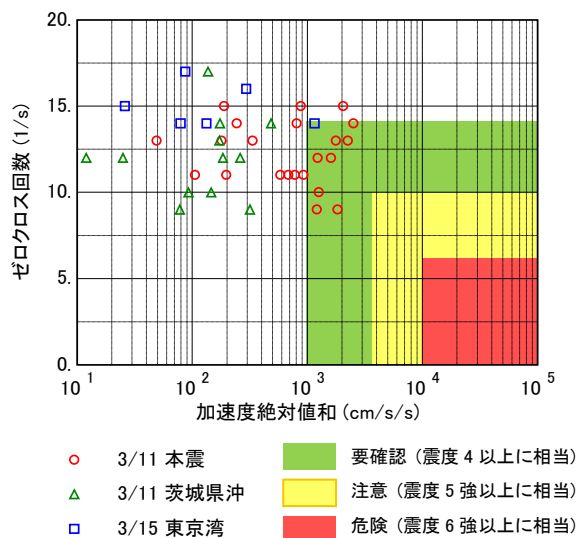


Fig. 5 観測結果から得られた加速度損傷指標  
Observed Vibration Damage Index

- 3) En, K. et al.: "STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM APPLIED TO RC BUILDINGS WITH SMART SENSORS AND WIRELESS NETWORK", Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, (2010)
- 4) 柳瀬, 他: RC 構造物を対象とした構造ヘルスマニタリングシステムの開発(その 8~10), 建築学会大会学術講演梗概集, B-2 pp.183-188, (2010)
- 5) 柳瀬, 他: RC 構造物を対象とした構造ヘルスマニタリングシステムの開発(その 11), 建築学会大会学術講演梗概集, B-2 pp.849-850, (2011)
- 6) 中村: SHM 技術の現状と課題, 日本建築学会大会構造部門(振動)パネルディスカッション資料, pp.15-24, (2008)
- 7) 中村: 建物の強震観測と構造ヘルスマニタリング, 日本建築学会 第 5 回 強震データの活用に関するシンポジウム「社会に役立つ強震観測」資料, 31-38, (2008)
- 8) 圓, 他: スマート AE センサを用いた RC 建物の構造ヘルスマニタリング実用化研究, (その 1~3), 建築学会大会学術講演梗概集, B-2 pp.23-28, (2005)