スマート AE センサを使用した 構造物の実用的ヘルスマニタリ ング

PRACTICAL HEALTH MONITORING FOR THE STRUCTURE WITH SMART AE SENSOR

柳瀬高仁 — * 1   池ヶ谷 靖 — * 2
圓 幸史朗 — * 3   米山健一郎 — * 4
中村 充 — * 5

Takahito YANASE — * 1   Sei IKEGAYA — * 2
Koshiro EN — * 3   Kenichiro YONEYAMA — * 4
Mitsuru NAKAMURA — * 5

キーワード：
スマートセンサ, AE, ヘルスマニタリング, 損傷検出, 鉄筋コンクリート造

Keywords：
Smart sensor, Acoustic emission, Health monitoring, Damage detection, Reinforced concrete

We developed Health monitoring system for the structure with Smart AE sensor. The Smart AE sensor, which included a composite transducer, CPU and memory on the substrate, transmits only important information to the monitoring system. We conducted the experiments using the health monitoring system. The system can detect the occurrence and propagation of a crack by the AE count as the index of damage. The health monitoring system with Smart AE sensor is useful to detect the damage for the structure.

1. はじめに

構造物に配したセンサから得られる情報に基づき、構造物の損傷を検出したりその構造健全性を監視したりする、いわゆる構造ヘルスマニタリングに関する研究は、この 10 年余りのあいだに度重なった地震被害を背景に高まりを見せているが、いまだ広範な普及には至っていないのが現状である。その一因として、システムを構成するハードウェアが高価なものになってしまうという問題点が指摘されている¹⁾。構造ヘルスマニタリング関連分野のハードウェア面に関する最近の研究では、新たなセンサ開発²⁾やセンサネットワークの研究³⁾などとともに、廉価なセンサの開発⁴⁾といったコスト面を重視した取組みも行われている。

筆者らは、図 1 に示すように AE (Acoustic Emission) センサ^{5),6)}を用いて構造物の局所的損傷を検出することを目的としたローカルモニタリングと、構造物全体としての振動性状変化を捉えるグローバルモニタリング⁷⁾を組み合わせた構造ヘルスマニタリングシステムを提案している⁸⁾。このシステムの特徴は、センサ本体の簡便化を図るとともに、センサから得られた情報をセンサに付属した CPU によって簡単な損傷指標に置き換えることにより、センサからシステム全体を統括する PC に送られる情報量の低減を図っていることにある。これらの結果、消費電力の小さな無線の利用を可能とすると共に、電池駆動の採用と低コスト化を実現することが可能となったものである。

本稿では、この構造ヘルスマニタリングシステムのうち、ローカルモニタリングを構成する AE センサユニット (スマート AE センサ) のハードウェア面における特徴と静的な構造実験および振動実

図 1 構造物全体のヘルスマニタリングの概念図

験に適用した結果について報告を行なう。

2. ローカルモニタリングのための検知システム

筆者らが提案するローカルモニタリングのための検知システムは、構造物全体の損傷検出や構造健全性を監視する構造ヘルスマニタリングのうち、構造物の局部的 (部材レベル) なひび割れや損傷の発生をそれらの損傷に伴い放射される超音波を検知する AE 法の原理を用いて検知するものであり、超音波を検知する振動子と CPU を搭載しデータを転送するセンサユニット (スマート AE センサ)

*1 (株)ジャスト技術部 部長
(〒225-0012 横浜市青葉区あざみ野南2-4-1)

*2 (株)ジャスト仙台営業所

*3 (株)大林組原子力本部技術部 課長

*4 (株)大林組原子力本部技術部 副主査

*5 (株)大林組技術研究所 主任研究員

*1 Manager, Just Co., Ltd., Technical Department

*2 Just Co., Ltd., Sendai Office

*3 Manager, Obayashi Corporation, Nuclear Facilities Division

*4 Deputy Manager, Obayashi Corporation, Nuclear Facilities Division

*5 Chief Research Engineer, Obayashi Corporation, Technical Research Institute

と、各センサユニットから転送されるデータを統合処理するPCとから構成される。

このシステムでは、システム全体を統括するPC上で膨大なAE波形を処理するのではなく、各センサユニット上で計測されたAE波形を簡便な損傷指標に変換し、少ない情報量からなる指標データのみをモニタリング用PCに転送することを特徴としている。

ローカルモニタリングにおける損傷指標は、単位時間あたりにAE波が閾値を越える回数（AE計数）としている。

2.1 スマートAEセンサ

スマートAEセンサは、写真1に示すように振動子、CPU、メモリおよび通信用端子を、大きさが約20mm×80mmの1つの基板上に集約したものであり、以下に示す特長を有する。

- ①スマートAEセンサがデータ処理、通信の機能を有する。
- ②音波を電気信号に変換する振動子には、小型化と感度を確保するために、コンポジット振動子を使用する。
- ③損傷指標は、AE波が閾値（振幅）を超える単位時間当たりの頻度（AE計数）とし、4段階の閾値（TH1:0.03V, TH2:0.1V, TH3:0.3V, TH4:0.9V）を設定する。4段階の閾値は、AE信号の振幅の確認とノイズとの弁別を図るために既往のデータから設定した。
- ⑤パソコンに通信するデータは、時刻と各閾値に対応するAE計数のデジタルデータであり、データ容量は非常に少なくなる。

2.2 記録装置、通信方法

スマートAEセンサはデータ処理の機能を有しているため、記録装置へのデータ通信の方法は色々な方法が考えられる。現状は、記録装置をパソコンとし通信媒体にUSBを用いるタイプ（写真2）と記録装置をメモリとし通信媒体にツイストペア線を用いるタイプ（写真3）を用意している。この他の通信方法には、LAN（有線、無線）や電話線などを使用する方法が考えられる。

写真1 スマートAEセンサ外観

写真2 スマートAEセンサ外観
（USB接続タイプ）

写真3 スマートAEセンサ外観
（ツイストペア線接続タイプ）

3. 静的载荷実験による検証

本計測システムを検証するために、実物の約1/2の縮尺の鉄筋コンクリート造柱部材の载荷実験に適用した⁹⁾。試験体は、部材の断面寸法が275mm×350mmで、試験区間の内法高さが700mmの柱試験体であり、せん断破壊するように鉄筋の量および強度を設定したものである。写真4に示すように、スマートAEセンサを加力方向と直交する面の中央高さ位置に取り付けた。スマートAEセンサ上で処理された損傷指標（AE計数）は、USB経由でパソコンに送信され、試験体の損傷をパソコンで常時モニタリングした。AE計数累積のための単位時間は1.0秒とした。

荷重と変形角との関係を図2に示す。試験体は、载荷初期にせん断ひび割れが発生し、変形角が15/1000rad時に最大荷重を示した。それ以降は、せん断ひび割れの幅が大きく開き、耐力低下を起した。AE計数と変形角との関係は、図3に示すようにせん断ひび割れが発生した時に最初にAEが確認され、ひび割れ本数の増加および

写真4 試験体形状およびスマートAEセンサ貼付け状況

図2 荷重と変形角との関係

図3 変形角とAE計数の推移

びびり割れ幅の増大に伴い、A E 計数が多くなった。しかし、最も多くの A E 計数を観測したのは、せん断びびり割れが発生した時であった。これに対し、最大荷重付近では、単位時間当たりの A E 計数は多くないが、変形の大きさに関わらず断続的に発生しており、びびり割れの発生よりはびびり割れの開閉またはずれにより A E が断続的に発生していることが考えられる。また、同じ変形での繰り返し時の A E 計数は少なく、カイザー効果（過去に受けた応力以下の状況下では A E 波の発生数が少なくなる現象）が認められる。

以上の静的載荷実験の結果、せん断びびり割れが顕著となる鉄筋コンクリート造柱では、本検知システムは、せん断びびり割れの発生および本数の増加を検出することが可能である。また、最大荷重以降における A E は、変形の大きさに関わらず断続的に発生する傾向が認められた。

4. 振動台実験による検証

4.1 実験概要

防災科研大特プロジェクト（文部科学省委託）の一環で実施された R C 4 層建物模型振動台実験¹⁰⁾で、スマート A E センサを用いた計測システムにより損傷の検知を行った。試験体は、写真 5 に示すように 1 × 3 スパンの 4 層建物で、構面ごとに開口耐震壁や袖壁、腰壁を有している。縮尺は実大規模の約 1/4 で、1 スパンの長さが 1.5m、各層階高が 0.75m で、試験体有効重量は約 320kN である。この模型試験体を 3 次元振動台上に載せ、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台観測波を RUN1 から RUN9 の実験ケースについて入力させた。各実験ケースの加振レベルは、それぞれ原波形の 0.05、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.25、1.25 倍である。

実験では加速度計や変位計、ロードセルやひずみゲージなどを用いて、各部の物理量を計測している。スマート A E センサについては、図 4 に示すように事前解析⁴⁾により損傷が多く発生すると予想された最下層の開口壁および四隅の柱脚部にセンサを配置した。最下層の柱脚部にスマート A E センサを取付けた状況を写真 6 に示す。モニタリングは、U S B でセンサとパソコンを接続する検知システムを用いて、A E 計数累積のための単位時間を 0.1 秒に設定した。

4.2 実験結果

図 4 に示した隅柱に取付けたセンサ A の A E 計数の推移を、加振レベルを段階的に上げた実験ケース（RUN2～9）毎に図 5 に示す。図中の凡例（THA/1～THA/4 はセンサ A の 4 段階の閾値に対応した実験ケースごとに A E 計数を合計したものを表し、THA/1 から THA/4 へ閾値が高くなる。なお、RUN1 については目視およびスマート A E センサを使用した検知システムは共に損傷が認められなかった。

センサ A では、RUN2 で初めて A E 計数が観測された。目視によると腰壁と柱との境にびびり割れが発生しており、これを検知システムが検出したと考えられる。最も低い閾値（THA/1）に対する A E 計数の推移は、加振レベルの上昇に応じて RUN7 までは増加している。RUN8 および RUN9 については、加振レベルが同程度の RUN7 と比較すると損傷は激しくなるが、A E 計数は減少している。最も高い閾値（THA/4）に対しては、加振レベルの上昇に応じて RUN6 までは増加した。RUN7～RUN9 については、加振レベルが RUN6 に比べて高くなり損傷程度は激しくなっているにもかかわらず A E 計数は減少した

写真 5 試験体外観

図 4 スマート A E センサ配置

写真 6 センサ貼付け状況

図 5 入力レベルに応じた A E 計数の推移

RUN6 における試験体最下層の層間変形角は 1/40rad. であり、試験体全体として最大耐力を超えていると考えられる。静的載荷実験では、最大荷重以降の A E 波は変形の大きさに関係なく断続的に発生している。振動台実験では閾値が高い THA/4 の A E 計数が RUN6 で最大値を示し、閾値が低い THA/1 の A E 計数が RUN7 で最大値を示している。このことは、最大荷重付近の A E 波は、損傷が特定のびびり割れに集中し、新たなびびり割れの発生が抑制されることや、幅が広がったびびり割れにより A E 波の伝播が遮断されることが要因で、振幅が小さいが発生度数が多くなると考えられる。

A E 計数の推移をセンサ設置位置の違いにより比較したものを図 6 に示す。なお、図に示した A E 計数は最も低い閾値（TH1）に対するものである。図より、A E 計数の測定位置による違いは明確に表れている。びびり割れが早期に生じ、加振レベルが大きくなった時も構造物のねじれの影響で変形量が大きかった腰壁・短柱フレームの柱脚部（A、B）では、実験を通じて A E 計数が多い傾向が認められる。損傷が比較的少ない袖壁フレーム（C、F）では実験を通じて A E 計数が他の部材に比べて少なく、両者は同程度の結果を示した。開

口壁 (E) では、A E 計数が RUN7 でピーク示しており、A E 計数と損傷の程度が良く対応している。

図6 入力レベルに応じたA E 計数の推移

(センサ設置位置の違いによる反応) 閾値 TH1 の計測結果

また、この加振時のセンサAのA E 計数の時間的変化をセンサ設置位置における層間変位絶対値と比較し図7に、層せん断力-層間変形関係と、各時間ステップでのA E 計数との比較を図8に示す。(A E 計数をドットの大きさに示している)。層間変位が増大する時刻にA E 計数が大きく、最も感度の高い(閾値の小さい)場合 (TH1)には変形角が約1/2,000以上で初期ひび割れを検知している。このことから、処理するデータ量を最小限に抑えたスマートA E センサでも、ひずみレベルの小さな損傷の発生を充分かつ的確に検知できることが確認できる。

図7 A E 計数と層間変位絶対値の比較 (センサA, RUN2, 20%入力)

図8 A E 計数と壁のせん断履歴の関係 (センサA)

振動台を用いたRC建物模型振動台実験を通して、ひび割れを目で観察することが困難な小さな加振レベルから大破状態まで、スマートA E センサはその近傍に生じたひび割れや損傷から発生したA E 波を検知し、センサ上で計算したA E 計数により、部材の損傷

程度を評価できる可能性が示された。このことから、RC構造物の局所的(部材レベル)な損傷を検知するローカルモニタリングにスマートA E センサを用いた検知システムを適応する有効性を確認できたと考えられる。

5. まとめ

構造物の損傷を常時モニタリングする道具として、センサ上で測定した物理量を損傷指標に処理し、パソコンに送信するヘルスマニタリングシステムを開発した。部材レベルのローカルモニタリングを行うために開発したスマートA E センサは、損傷の発生に伴い放射されるA E 波を検知することが可能で、損傷指標を単位時間あたりにA E 波が閾値を越える度数(A E 計数)とした。

このスマートA E センサを静的載荷実験および振動台実験に適用し、モニタリングシステムが初期のひび割れ発生から破壊付近まで、A E 計数を指標にして構造物の損傷を検知できることを示した。損傷と損傷指標(A E 計数)との関係は、静的実験および振動台実験で概ね把握することができたが、定量的に把握するにはデータが不足しているため、今後の課題としたい。

センサ上で測定した物理量を処理し、モニタリングする上で重要な情報のみをパソコンに送信する損傷検出システムは、A E センサのみでなく、種々のセンサに適用でき、構造物ごとに適切なスマートセンサを使用した損傷検出システムを提案できると考えている。

謝辞

本研究を行うに当たり、静的載荷実験では東京工業大学の林静雄教授にご指導を頂きました。防災科研大特プロジェクトの一環で実施された振動台実験では、大林組技術研究所の勝俣英雄氏、白井和貴氏より貴重なデータを提供して頂きました。ここに記して関係各位に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 中村充：構造ヘルスマニタリングと地震観測，建築学会大会PD「建築物の地震時挙動を知るために」資料，pp.9-16，2006
- 稲田裕，熊谷仁志，岩城英朗，ほか：自己診断材料を用いたRC構造物の損傷検知の実用化に向けた検討(その1)～(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集B-2，pp.49-52，2007
- 倉田成人，猿渡俊介，ほか：ユビキタス・センサネットワーク用加速度センサモジュールの開発，日本建築学会大会学術講演梗概集A-2，pp.419-420，2006
- 福和伸夫，ほか：建物観測用の普及型低コスト地震計の試作，日本建築学会大会学術講演梗概集B-2，pp.871-872，2003
- 圓幸史朗，池ヶ谷靖，米山健一郎，ほか：スマートA E 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(1/3)～(3/3)，日本建築学会大会学術講演梗概集B-2，pp.23-28，2005
- 柳瀬高仁，米山健一郎，白井和貴，ほか：スマートA E センサを用いたRC建物の構造ヘルスマニタリング(その1)～(その3)，日本地震工学会大会梗概集B-2，pp.406-411，2005
- 濱本卓司：性能評価のためのヘルスマニタリング技術，建築防災，pp.9-15，2004
- 圓幸史朗，池ヶ谷靖，中村充，柳瀬高仁：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，掲載予定
- 柳瀬高仁，池ヶ谷靖，林静雄，ほか：スマートA E センサを用いた損傷検出システム(その1)，(その2)，建築学会大会学術講演梗概集A-1，pp.195-196，2004
- 白井和貴，壁谷沢寿海，勝俣英雄，ほか：RC造4層壁フレーム構造物の多方向入力振動台実験，コンクリート工学年次論文集，vol.28，No.2，pp.379-384，2006

[2007年10月15日原稿受理 2007年12月11日採用決定]