# 小型センサーを用いた 構造物の地震被害の即時判定法の提案

小野祐輔<sup>1</sup>·清野純史<sup>2</sup>·小林望<sup>3</sup>·新垣芳一<sup>4</sup>·高橋天平<sup>5</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 助教 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター) E-mail:ysk@quake2.kuciv.kyoto-u.ac.jp <sup>2</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 教授 (同上) E-mail:kiyono@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp <sup>3,4,5</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 修士課程(同上)

ー般的な構造物の被害の即時的な把握法では、ネットワーク化された高精度の地震計で観測された地震 動波形に基づき、対象とする構造物地点での地震動強度を推定し、被害程度を評価する.本研究では、通 常の地震計に比べると精度は劣るが安価な小型センサーを構造物に設置し、センサー単体で構造物で実際 に観測された地震動を利用して被害推定を行う手法を提案する.提案する手法で用いる小型センサーには 対象の構造物のモデル特性を組み込んでおき、センサー内でほぼリアルタイムに応答解析を行った結果に 基づいて被害程度を表示する.このようなセンサーは、用途が単純で対象とする地震動レベルも制限でき るため、きわめて安価で容易に制作することができる.

Key Words : earthquake damage inspection, MEMS sensor, response analysis

## 1. はじめに

独立行政法人科防災科学技術研究所が運営してい Kyoshin-Netは、全国に1000点を超える観測点を持ち、 質の高い地震記録を公開している.この他にもさま ざまな機関で、地震計を用いた観測が実施されてい る.

このような観測で得られた記録の活用方法の一つ として,被害状況の即時的な把握が挙げられる.一 般的には,ある範囲を代表するような地震計が設置 されており,そこで得られた記録から,被害推定を 行う構造物の存在する地点での地震動強さを推定し, 対象構造物の特性に応じたフラジリティ関数やバル ナラビリティ関数を用いて被害率や被害程度を推定 する.

構造物地点における地震動強度の推定には,あら かじめ調査しておいた地盤データを用いてサイト特 性を考慮することが行われるが,データの空間的な 解像度が十分であるとは言い難い.また,一つの地 震計が代表する地域は,少なくとも数キロから数十 キロの範囲に達しているのが現状であり,構造物地 点のサイト特性を,地震動強度の推定に十分に反映 させることは難しい. 本研究では、上で述べた一般的な構造物の地震被 害推定法に対して、多数の小型センサーを用いた手 法を提案する.提案手法では、構造物一つ一つに対 して、基礎部に安価な小型センサーを設置する.こ の小型センサーには、設置された構造物の特性が入 力されており、基礎部で観測した地震動を用いて即 時的に被害推定を行うので、地震動の特性を正確に 反映した推定が可能となる.

小型センサーはMEMSと呼ばれる半導体技術を用 いた安価な加速度センサーと,汎用マイコン制御ボ ードを利用して制作する.MEMSセンサーは近年急 速に利用が増えており,たとえば,家庭用ビデオゲ ーム機や携帯電話の操作,デジタルカメラの傾き検 知,あるいはラップトップ型PCのHDDの保護機能 などに用いられており,非常に安価に入手すること ができる.汎用のマイコン制御ボードも,プログ ラミング可能な開発キット付きで数千円程度で入手 できる.

#### 2. 提案手法と小型センサーの制作

(1) 提案手法

マイクロ コントローラ	ATmega168 AD変換10ビット
動作電圧	5 V
入力電圧	$7 \sim 12 \text{ V}$
入力電圧 (限界)	6~20 V
デジタルI/0	14本
アナログ入力	6本
デジタル出力 の最大負荷	40 mA
フラッシュ メモリ	16 KB
SRAM	1 KB
EEPROM	512 B
クロック 周波数	16 MHz

表-1 Arduino Duemilanove の主な仕様

地震時に構造物がどの程度の被害を受けたのかを 判定するために、小型センサーで得られた加速度時 刻歴を用いて構造物の応答を計算する.搭載する CPUの性能やメモリ量に応じて複雑な構造モデルを 用いることもできるか、通常は1自由度の質点モデ ルで十分であろう.今回の小型センサーの試作では、 1自由度バイリニアモデルを用いて非線形応答を解 析して得られる応答塑性率を被害程度の判定に用い る.

このように、1自由度系の応答計算を行うためだけのセンサーであり、この1自由度系がある種のフィルタとして振舞うので、細かなノイズを除去するためのフィルタ操作は行わない.

なお、本研究で提案する手法で推定される被害程 度はあくまでも一次的なものであり、この手法での 結果を踏まえて、詳細な被害調査を行うことを想定 している.

#### (2) 小型センサーの制作

本研究では、先に述べたように、設置された構造 物の基礎で観測した地震動を用い、その構造物の応 答塑性率を算定し、構造物の危険性を判定する機能 を有する小型センサーを作成した.

判定結果は次のように表示する. 応答塑性率が小 さく,構造物に問題がないと予想される場合には, 青色LEDが点灯する.構造物に何らかの損傷が期待 される大きさの塑性率が算出されると黄色LEDが点 灯する.構造物が重大なダメージを受けている恐れ がある塑性率に達すると,赤色LEDが点灯する. こ のようにすることで,構造物の危険性を視覚的,か つ単純に認知できるようにした.

小型センサーを制御するマイコンボードとして, Arduino Duemilanoveを採用した.**表-1**にその仕様一



図-1 小型センサーの制御プログラムのフロー



図-2 作成した小型センサーの回路図

覧を示す. Arduinoは単純な入出力を備えた基板と Processing/Wiring言語を実装した開発環境で構成さ れるオープンソースウェアのシステムである.

Arduinoには様々な種類があるが、今回の小型地 震計に使用するDuemilanoveモデルは、USB端子が 搭載されおり、ホストとなるPC経由で容易にプログ ラムを書き込むことができる.このマイコンボード を用いれば、小型センサーにさまざまな解析プログ ラムを実装することが容易である.

構造物の危険性を判定するプログラムをマイクロ コントローラのフラッシュメモリ上に書き込み,そ



写真-1 作成した小型センサー

のプラグラムに対応できるように回路を組んだ. プ ログラムのフローチャートを図-1に,作成した回路 図を図-2に示す.写真-1は実際に作成した小型セン サーの試作機である.総制作費は5,000円以内であ った.

1自由度非線形モデルの地震応答解析では,非線 形の運動方程式を時刻に対して積分する必要がある. 本研究ではハイブリッド実験等で広く用いられてい るoperater splitting法を実装した.

#### (3) AD変換の解像度の影響

Arduino Duemilanoveに搭載されているマイクロコ ントローラATmega168のAD変換の分解能は10ビッ トである.通常,地震計として使用されている地震 計の分解能は16ビット以上であり,地震計として10 ビットでは解像度が十分でない.しかし,今回の小 型センサーの目的は,広い加速度レベルでの地震動 の加速度データの取得ではなく,地震動による構造 物の被災度を判定することである.すなわち,数百 から千ガルを超えるような大きな加速度レベルでの み精度が求められ,構造物に被害をもたらさないよ うな中小レベルの地震動では,ある程度の測定誤差 が許容され得る.

そこで、Kik-netで実際に記録された地震動に対し て最大振幅を1倍、0.5倍、0.25倍したものを、加速 度のフルスケールを2500galとして、8ビット、10ビ ット、12ビットでそれぞれ再デジタル化したデータ と、元データ(Kik-net では18ビットでAD変換され ている)の1自由度モデルの線形応答を比較した. ここでは、以下のように誤差量*q*を定義して用いる.

## $q = \frac{Abit数で求めた変位 - 元データの変位}{元データの変位} \times 100$ (%)

なお,元データの絶対値が小さいときは正しく評価できないので,元データの絶対値が「その質点での最大値の二分の一以下の点」を検証の対象にした.このqの絶対値の,平均値と最大値を**表-2**に示す.

表-2よりビット数が大きくなるほどqが減ること,

**表-2** ビット数による誤差量qの変化

地震波1倍 [max1435gal]	qの平均[%]	qの最大値[%]
6bit	2.3084	8.1
8bit	0.4659	1.7457
10bit	0.092	0.3421
12bit	0.0405	0.1172
地震波×1/2 [max717gal]	qの平均[%]	qの最大値[%]
6bit	2.4596	6.425
8bit	0.6153	1.9554
10bit	0.256	0.7197
12bit	0.041	0.1151
地震波×1/4 [max359gal]	qの平均[%]	qの最大値[%]
6bit	6.1307	13.1144
8bit	2.3084	8.1
10bit	0.4659	1.7457
12bit	0.0785	0.0676



最大加速度の小さい地震動ほどqが増えることが確認できる.また、分解能が10ビットと元データ(18ビット)の場合の、構造物の応答変位をしたものを図-3に示す.図より、分解能が10ビットでは、応答変位には顕著な差異は認められない.

以上のことから、構造物に被害が生じるようなある程度大きい加速度を持つ地震動なら分解能が10ビットでも、応答値は十分な精度で求められていると 判断できる.

#### (4) 精度の検証

作成した小型センサーで加速度が正確に観測され ることを確認するため、市販の加速度センサーとの 比較を行った.比較する加速度計として、立山科学 工業の「USB振動計測システムTUM\_WL」である.静 電容量型の三軸加速度センサモジュールを有してお り、AC変換の分解能は10ビット、出力周波数帯域は

表-3 応答計算で用いたモデルの諸元

周期	0.43 sec
質量	700 ton
一次剛性	1.5×10 <sup>5</sup> kN/m
二次剛性	0.225×10 <sup>5</sup> kN/m
減衰	0.01
履歴法則	バイリニア
降伏変位	0.0229m
降伏荷重	3450kN







図-6 1自由度系の応答加速度の比較

DC~80Hzである.

検証にあたっては振動台を用いて,作成した小型 センサー(以下,試作機)とTUM\_WL(以下,市販機) で計測した加速度波形を比較した.さらに,計測し た加速度を用いて1自由度バイリニアモデルの応答 計算を行い,得られた応答の時刻歴も比較する.応 答計算は試作機ではその内部で,市販機では計測し たデータを保存しオフラインで計算した.応答計算 で用いたモデルの諸元を表-3に示す.

**図-5**に振動台上で計測した加速度の時刻歴を比較 したものを示す.試作機においても精度よく加速度 の計測ができている.

一方,図-6,7に計測した加速度に対する1自由度 系の応答の加速度,変位をそれぞれ示す.図-8は1 自由度系の応答の復元力-変位関係を示したもので ある.いずれも,試作機において市販機によるもの



図-7 1自由度系の応答変位の比較



図-8 1自由度系の復元力-変位関係の比較

とよく一致した結果が得られている.

3. まとめ

本研究では,通常の地震計に比べると精度は劣る が安価な小型センサーを構造物に設置し,センサー 単体で構造物で実際に観測された地震動を利用して 被害推定を行う手法を提案した.

また,提案する手法で用いる小型センサーを制作 した.このセンサーには対象の構造物のモデル特性 を組み込むことで,センサー内でほぼリアルタイム に応答解析を行った結果に基づいて被害程度を表示 することができる.

制作した小型センサーは、構造物の被害を即時的 に判定するという機能のみに絞り込んだものである ため、通常の地震計よりも精度は劣るものの、大幅 にコストを削減することができる.

本研究で提案する手法で推定される被害程度はあ くまでも一次的な判定結果であり、この手法での結 果を踏まえて、詳細な被害調査を行うといった利用 を想定するものである.

### RAPID DAMAGE INSPECTION PROCEDURE BY USING A SMALL SENSOR

## Yusuke Ono, Junji Kiyono, Nozomi Konayashi, Yoshikazu Shingaki and Tempei Takahashi

We propose a new approch to facilitate damage inspection following an earthquake and a new small sensor for measuring the ground motion at the place of the target structure has been developed. The SDOF model corresponding to the structure is programmed on the sensor and the response is calculated during the earthquake excitation. The damage which the target structure suffers can be evaluated by using the result of the near real-time response analysis. The cost of the sensor is quite low because less accuracy is acceptable compared to usual earthquake observation sensors.