

# 建物地震被災度即時推定システムの開発

## Immediate Evaluation System for Seismic Damage Level of Buildings

諏訪 仁	Hitoshi Suwa
三浦 耕太	Kota Miura
江村 勝	Masaru Emura
(設計本部)	
中塚 光一	Koichi Nakatsuka
(設計本部)	
三好 夏恵	Natsue Miyoshi
(設計本部)	

### 1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震において首都圏で発生した帰宅困難者を踏まえ、地震後に企業等が施設に留まれるかの判断を迅速に行うことが求められている。地震後においては、建物の応急危険度判定が余震等による建物倒壊に伴う二次的災害の防止を目的に実施される。これまでの応急危険度判定は判定士による建物の目視調査で実施されており、判定結果を得るまでに1週間程度かかっていた。このため、日本建築防災協会は応急危険度判定の迅速化を目的に、応急危険度判定基準に基づく構造モニタリングシステムの技術評価を2021年に開始した。

大林組は建物地震被災度即時推定システムを開発し、2022年3月に構造モニタリングシステムの技術評価（建防災発第30176号）を取得した。本システムを用いることにより、構造躯体の被災程度を地震後に数分程度で判定可能となり、これまでの判定士による目視調査と比較して判定結果を得るまでの時間を大幅に短縮できる。

### 2. 建物地震被災度即時推定システム

#### 2.1 システムの概要

建物地震被災度即時推定システムでは、建物基部（1階）に1台と建物最上部（最上階または最上階より1階下）などに1台以上の計2台以上のセンサを設置する。地震発生時、建物基部で観測した加速度記録を設計モデルに入力して地震応答解析を行い、設計モデルと実建物の違いを考慮して層間変形角を推測する。地震後に数分程度で、被災建築物応急危険度判定マニュアル<sup>1)</sup>における「構造躯体の被災程度は小さいと考えられ使用可能」（以下、Aランクと呼ぶ）か否かを示す。

#### 2.2 システムの特長

センサが設置されていない部分の層間変形角は、3.2節に示す求め方で推測される。このため、センサの設置数の低減が可能になり、システムの設置費用ならびに維持管理費用を安価にできる。また、設計モデルを用いた弾塑性地震応答解析を行うため、層間変形角の推定において弾性時のみならず建物の塑性化による影響も考慮できる。

#### 2.3 システムの適用範囲

対象は、1981年6月以降の新耐震基準において、ルート3（建築基準法施行令第82条 保有水平耐力計算）で設計された高さ60m以下の耐震構造の建物とする。ここで、対象建物をTable 1に示す。耐震構造以外の免震構造や制振構造などの建物は対象外となる。

構造躯体の被災程度がAランクでなかった場合、ならびに構造躯体以外（隣接建築物、周辺地盤、落下ならびに転倒危険物など）の被災程度は対象外となり、建物の応急危険度を判定するには別途調査が必要となる。

#### 2.4 センサ及び収録装置

建物地震被災度即時推定システムで使用するセンサ及び収録装置の必要性能は、Table 2となる。

### 3. 構造躯体の被災程度の判定方法

構造躯体のAランク判定に用いる指標値は層間変形角とし、閾値は3.1節により設定する。つぎに、3.2節により層間変形角を求め、各方向の全ての層における層間変形角が閾値以下であることを確認することで建物全体を

Table 1 対象建物  
Target Building

構造種別	構造形式
RC造 SRC造	ラーメン構造
	耐震壁付きラーメン構造 壁式構造
S造	ラーメン構造
	ブレース付きラーメン構造 ブレース構造

Table 2 センサ及び収録装置の必要性能  
Required Performance of Sensor and Recording Device

項目	必要性能
サンプリング 周波数	100Hz～200Hzの範囲で設定
分解能	0.01gal
測定範囲	±2000gal～±3000galの範囲で設定
周波数特性	DC～(50Hz～100Hz)の範囲で設定
センサ間の 時刻同期精度	0.001sec以内

A ランクと判定する。判定は、地上部分を対象とする。

A ランクの評価フローを、Fig. 1 に示す。A ランクの判定は建物内 PC で演算し、センサと建物内 PC 間の通信は有線 LAN、判定結果の建物内 PC から建物外部への発信は LTE 通信とする。

### 3.1 A ランクの指標と閾値の設定方法

- 立体解析モデルを対象に非線形荷重増分解析を行い、
- ・各層の層間変形角と層せん断力の関係
  - ・構造特性係数  $D_s$  を計算するときの部材群としての種別

などに基づいて、A ランク閾値となる層間変形角を設定する。A ランク閾値は、非線形荷重増分解析を行った正方向と負方向それぞれ算出し、両方向のうち小さい方を建物地震被災度即時推定システムの閾値として用いる。

**3.1.1 RC 造と SRC 造の A ランク閾値** 部材（柱、梁および耐震壁）種別が A~C においてせん断余裕度  $m$ （曲げ終局強度時せん断力に対するせん断終局強度の比率）が小さい場合、実建物の部材耐力が設計モデルから変動すると、破壊モードが曲げ破壊からせん断破壊に移行する可能性がある。このため、A ランク閾値となる  $k$  層の層間変形角  $\delta_{ck}$  は、部材のせん断余裕度  $m$  により Table 3 で区分した後に、Table 1 の構造形式ごとに A ランク閾値を設定する。一例として、せん断余裕度 I のとき、耐震壁付きラーメン構造の A ランク閾値は Table 4 となり、閾値 1 は Table 5 で設定する<sup>2)</sup>。ここで、Table 4 の  $\beta u$  は耐震壁の水平耐力の和を保有水平耐力の数値で除した数値を示す。

**3.1.2 S 造の A ランク閾値** S 造の A ランク閾値となる  $k$  層の層間変形角  $\delta_{ck}$  は、Table 1 の構造形式ごとに設定する。ラーメン構造とブレース付きラーメン構造の A ランク閾値はそれぞれ Table 6 と Table 7 となり、一例として閾値 1 は Table 8 で設定する<sup>2)</sup>。

### 3.2 層間変形角の求め方

**3.2.1 センサ変位の求め方** センサで観測した加速

度波形をフーリエ変換して、複素フーリエ係数を計算する。加速度波形の長周期成分を除去するためハイパスフィルタを適用した後の複素フーリエ係数を計算し、フーリエ逆変換してフィルタ処理後の加速度波形を求める。加速度波形を時間積分して速度波形を計算し、基線補正の後に速度波形を時間積分して変位波形を求める。

**3.2.2 各層の層間変形角の求め方** 各層の層間変形角と層せん断力の関係は、立体解析モデルを対象とした非線形荷重増分解析により求める。質点系の設計モデルは、層間変形角と層せん断力の関係をトリリニア型に置換して作成する。応答値の求め方を、Fig. 2 に示す。建物

Table 3 せん断余裕度による区分 (RC 造, SRC 造)  
Classification by Shear Margin

	梁、柱、耐震壁のせん断余裕度 $m$
せん断余裕度 I	梁の $m \geq 1.1$ かつ柱の $m \geq 1.2$ かつ耐震壁の $m \geq 1.25$ のとき
せん断余裕度 II	梁の $m < 1.1$ または柱の $m < 1.2$ または耐震壁の $m < 1.25$ のとき

Table 4 耐震壁付きラーメン構造の A ランク閾値 (RC 造, SRC 造)  
Damage Level "rank-A" for the Moment Resisting Frame with Earthquake Resisting Wall

		柱および梁の部材群としての種別			
		A	B	C	D
耐震壁の部材群としての種別	A	閾値1			閾値2
	B				
	C				
	D	$\beta u \leq 0.3$	閾値2		閾値3
		$\beta u > 0.3$	閾値3		

Table 5 耐震壁付きラーメン構造の閾値の設定 (RC 造, SRC 造)  
Definition of the Threshold for the Moment Resisting Frame with Earthquake Resisting Wall

閾値1	非線形荷重増分解析において、層の部材（柱、梁および耐震壁）に最初に曲げ降伏ヒンジが発生した時点における層間変形角
-----	--

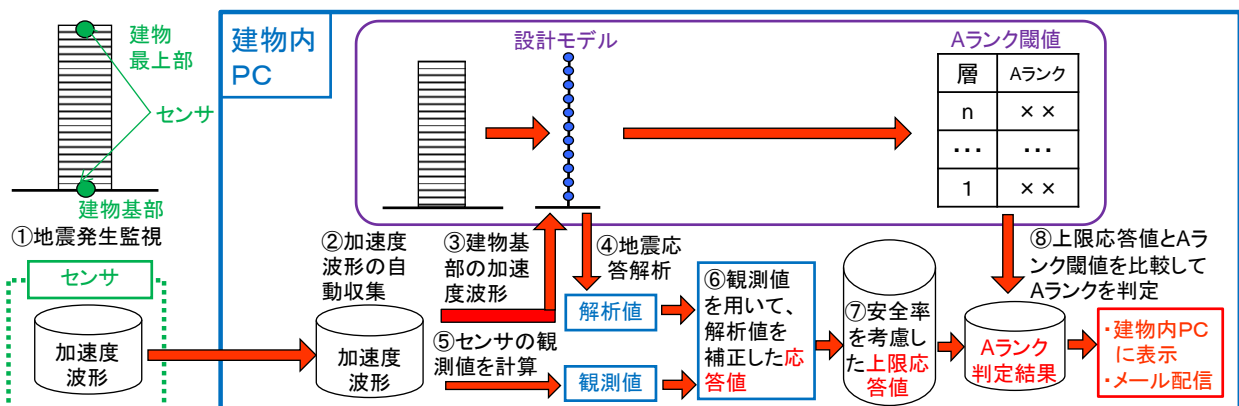


Fig. 1 A ランクの評価フロー  
Evaluation of Damage Level "rank-A"

階数が  $n$  で、センサ設置階が  $i$  階と  $j$  階 (ただし、 $i < j$ ) とする。建物基部 (1 階) のセンサで観測された加速度波形を設計モデル (質点系モデル) に入力して地震応答解析を行い、センサ間の最大相対変位 (解析値)  $d_{aji}$  と  $k$  層の最大層間変形角 (解析値)  $\delta_{ak}$  を計算する。 $1 \leq k \leq n$  として ( $n+1$ ) 階は  $R$  階とする。

$$d_{aji} = \max |P_j(t) - P_i(t)| \quad (0 \leq t \leq T) \quad (1)$$

$$\delta_{ak} = \frac{\max |P_{k+1}(t) - P_k(t)|}{h_k} \quad (0 \leq t \leq T) \quad (2)$$

ここに、 $P_j(t)$ ,  $P_i(t)$ :  $j$  階,  $i$  階の相対変位波形 (解析値)  
 $P_{k+1}(t)$ ,  $P_k(t)$ :  $k+1$  階,  $k$  階の相対変位波形 (解析値)

$h_k$ :  $k$  層の階高

$T$ : 波形の継続時間

つぎに、 $i$  階と  $j$  階のセンサで観測された加速度波形を時間積分して絶対変位波形を計算し、 $i$  階と  $j$  階のセンサ間の最大相対変位 (観測値)  $d_{oji}$  を計算する。

$$d_{oji} = \max |D_j(t) - D_i(t)| \quad (0 \leq t \leq T) \quad (3)$$

ここに、 $D_j(t)$ ,  $D_i(t)$ :  $j$  階,  $i$  階の絶対変位波形 (観測値)

このとき、解析値と観測値の乖離を補正するため、センサ間の最大相対変位 (解析値)  $d_{aji}$  とセンサ間の最大相対変位 (観測値)  $d_{oji}$  を用いて補正係数  $\alpha_{ji}$  を計算する。

$$\alpha_{ji} = d_{oji} / d_{aji} \quad (4)$$

最大層間変形角 (応答値)  $\delta_k$  は、センサ (建物上部) の設置階  $j$  に応じた補正係数  $\alpha_{ji}$  を最大層間変形角 (解析値) に乗じて評価する。

1) 建物上部のセンサ設置階  $j$  が ( $n+1$ ) のとき

$$\delta_k = \alpha_{n+1,i} \times \delta_{ak} \quad (i \leq k \leq n) \quad (5)$$

2) 建物上部のセンサ設置階  $j$  が  $j \leq n$  のとき

Table 6 ラーメン構造の A ランク閾値 (S 造)  
 Damage Level "rank-A" for the Moment Resisting Frame

柱および梁の部材群としての種別	A	閾値1
	B	
	C	
	D	

Table 7 ブレース付きラーメン構造の A ランク閾値 (S 造)  
 Damage Level "rank-A" for the Moment Resisting Frame with Brace

		柱および梁の部材群としての種別			
		A	B	C	D
ブレースの部材群としての種別	A	閾値3			閾値4
	B				
	C				

Table 8 閾値の設定 (S 造)  
 Definition of the Threshold for Steel Frame

閾値1	非線形荷重増分解析において、層の部材 (柱および梁) に最初に曲げ降伏ヒンジが発生した時点における層間変形角
-----	--

$$\delta_k = \alpha_{ji} \times \delta_{ak} \quad (i \leq k \leq n) \quad (6)$$

建物地震被災度即時推定システムでは、最大層間変形角 (観測値)  $\delta_{ok}$  と最大層間変形角 (応答値)  $\delta_k$  から求められる応答誤差を考慮するため、最大層間変形角 (応答値)  $\delta_k$  に安全率  $S$  を乗じた最大層間変形角 (上限応答値)  $\delta_{sk}$  を用いる。

$$\delta_{sk} = S \times \delta_k \quad (7)$$

センサが建物基部 (1 階) と建物最上部 (最上階より 1 階下) に 2 台設置されたとき、(7) 式の安全率  $S$  は文献 3) の検討結果に基づき 1.5 に設定する。

### 3.3 判定結果の示し方

判定結果の内容は建物内 PC に表示し、かつ、建物所有者、建物管理者等へメールにより判定結果を報告する。建物内 PC ならびにメールに表示される A ランク判定は、Table 9 とする。

## 4. 建物地震被災度即時推定システムの設置例

### 4.1 システムの設置条件

対象は、都内に建つ S 造 4 階のブレース付きラーメン構造の建物<sup>4)</sup>となる。被災度判定に用いるセンサは、1 階と 4 階の 2 箇所に設置する。3.2 節の層間変形角の求め方を検証するため、検証用センサを 2 階と 3 階の 2 箇所に設置する。4 階のセンサ配置図を、Fig. 3 に示す。

構造特性係数  $D_s$  を決定するときの部材群としての種別を用いて、3.1 節の手法に従い建物各層の A ランク閾値を求めると Table 10 となる。ラーメン構造の閾値 1 は Table 8 となり、ブレース付きラーメン構造の閾値 3 は文献 2) により設定する。ブレース付きラーメン構造の層間変形角  $\delta_{ck}$  は、(1) 柱および梁部材の曲げ降伏に基づく値  $\delta_{hk}$  と、(2) ブレースの降伏に基づく値  $\delta_{bk}$  の内で小さい方

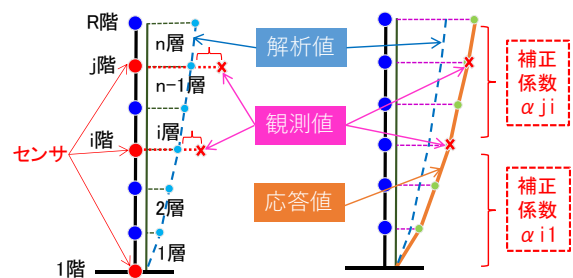


Fig. 2 応答値の求め方  
 Evaluation of the Response Value

Table 9 A ランク判定の表示  
 Indication of Damage Level "rank-A"

A ランク判定の場合	応急危険度判定基準に基づく構造モニタリングシステム技術評価を受けた KA 判定結果: 『KA』
A ランク判定でなかった場合	応急危険度判定基準に基づく構造モニタリングシステム技術評価を受けた KA 判定結果: 『判断するには別途調査が必要』

の値として(8)式より求める。

$$\delta_{ck} = \min \{ \delta_{hk}, \delta_{bk} \} \quad (8)$$

#### 4.2 観測値と上限応答値の比較

2018年11月～2022年3月に観測した合計93地震を対象に、(7)式により安全率を考慮した最大層間変形角(上限応答値)を計算する。最大層間変形角(観測値)と最大層間変形角(上限応答値)を比較すると、Fig. 4となる。最大層間変形角(観測値)が大きくなるに従い、最大層間変形角(上限応答値)は最大層間変形角(観測値)と比較して大きくなる。最大層間変形角(観測値)が約0.00015以上の範囲では、最大層間変形角(観測値)が最大層間変形角(上限応答値)を超過する割合は0となる。従って、最大層間変形角(上限応答値)を用いることにより、センサが設置されていない部分の最大層間変形角は、構造躯体のAランク判定が必要となる最大層間変形角の範囲において安全側に評価できることが検証された。

#### 4.3 判定結果の表示例

2021年10月7日に発生した千葉県北西部の地震(M5.9)を対象に、建物内PCに表示された判定結果をFig. 5に示す。図中に赤枠で示すように、この地震における判定結果はAランク(応急危険度判定基準に基づく構造モニタリングシステム技術評価を受けたKA判定結果:『KA』)となった。

### 5. まとめ

大林組が開発した建物地震被災度即時推定システムを対象に、構造躯体の被災程度がAランクの判定方法を紹介した。本システムを設置した建物を日本建築防災協会に登録することにより、Aランク判定が技術評価を受けた判定結果として地震直後に表示可能となり、建物内の残留可否の判断などに活用できる。今後、システム設置手順書を作成して建物登録を支援し、応急危険度判定の迅速化を実現することにより顧客のBCPに貢献する所存である。

#### 参考文献

- 1) 一般財団法人 日本建築防災協会, 全国被災建築物応急危険度判定協議会: 被災建築物応急危険度判定マニュアル, 1998.6
- 2) 諏訪仁, 江村勝, 中塚光一, 三好夏恵, 三浦耕太: 建物地震被災度即時推定システムの設置・判定・管理指針, 建築防災, 通巻535号, 2022.8
- 3) 諏訪仁, 三浦耕太, 江村勝, 三好夏恵: 建物の地震被災度判定における応答値の評価法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2022.7
- 4) 諏訪仁, 三浦耕太, 江村勝, 三好夏恵: 地震直後に

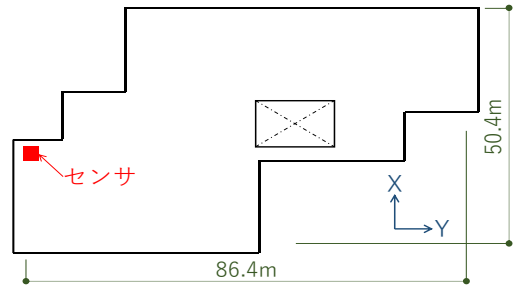


Fig. 3 4階のセンサ配置図  
Placement of the Sensor at the 4th Floor

Table 10 建物各層のAランク閾値  
Damage Level “rank-A” at Each Story

層	X方向	Y方向
4	閾値1	閾値1
3	閾値3	閾値3
2	閾値3	閾値3
1	閾値3	閾値3

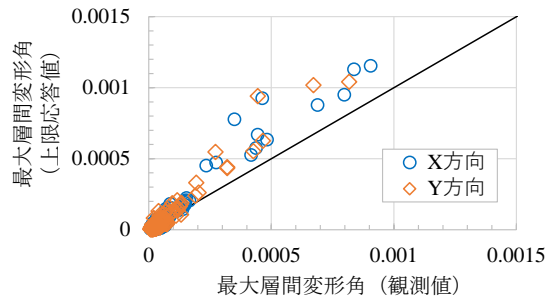


Fig. 4 観測値と上限応答値の比較  
Comparison between Observed Values and Upper Response Values

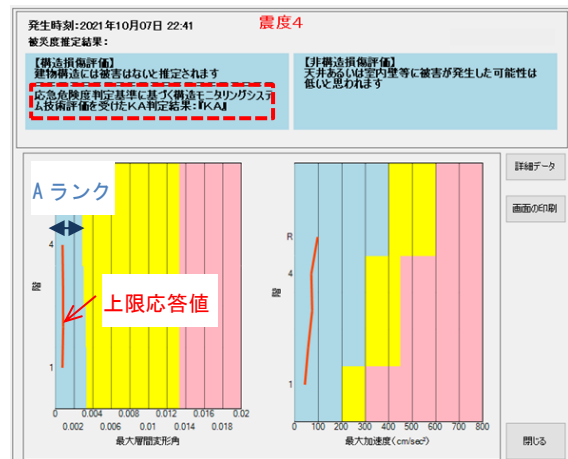


Fig. 5 判定結果の例

#### Evaluation of the Seismic Damage Level for the Building

における建物の被災度判定法-2021年2月13日福島県沖の地震への適用-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021.