

建物地震被災度即時推定システムの開発

諏訪 仁・江村 勝・中塚 光一

地震による建物の応急危険度判定を迅速に実施するため、日本建築防災協会は2021年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開始した。本報告では、建物内にセンサを設置し地震直後に応急危険度判定を行うシステム（以下、建物地震被災度即時推定システム）がその技術評価を取得したので、システムによ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）の判定方法について紹介する。今後、建物地震被災度即時推定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、構造躯体のAランク判定が技術評価を受けたものとして地震直後に実施できる。

キーワード：応急危険度判定、構造モニタリング、センサ

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、建物の応急危険度判定¹⁾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。従来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4~5日程度²⁾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。

このような背景を踏まえ、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、従来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の概要

(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¹⁾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）か否かを示す。

センサが設置されていない部分の層間変形角は、3章の求め方で推測されるため、センサの設置数の低減が可能となる。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) 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、対象建物を表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

表1 対象建物

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

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。

(3) 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、表一2となる。

3. 構造躯体の被災程度の判定方法³⁾

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(1)節により設定する。つぎに、(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Aランクと判定する。判定は、地上部分を対象とする。

建物地震被災度即時推定システムの構成を、図一1に示す。Aランクの判定は建物内に設置した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通信を用いる。

(1) Aランクの指標と閾値の設定方法

Aランクの評価フローを、図一2に示す。

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Ds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。

(a) RC造とSRC造のAランク閾値

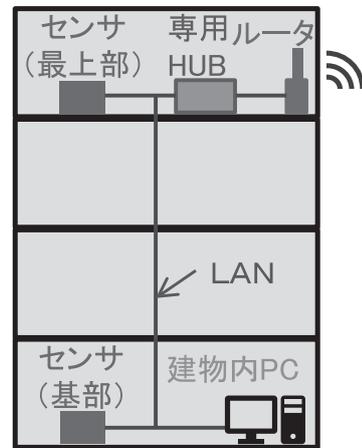
部材(柱、梁および耐震壁)種別がA~Cにおいてせん断余裕度(曲げ終局強度時せん断力に対するせん断終局強度の比率)が小さい場合、実建物の部材耐力が設計モデルから変動すると、破壊モードが曲げ破壊からせん断破壊に移行する可能性がある。このため、Aランク閾値となるk層の層間変形角 δ_{ck} は、部材のせん断余裕度に応じて区分した後に、表一1の構造形式ごとにAランク閾値を設定する。

(b) S造のAランク閾値

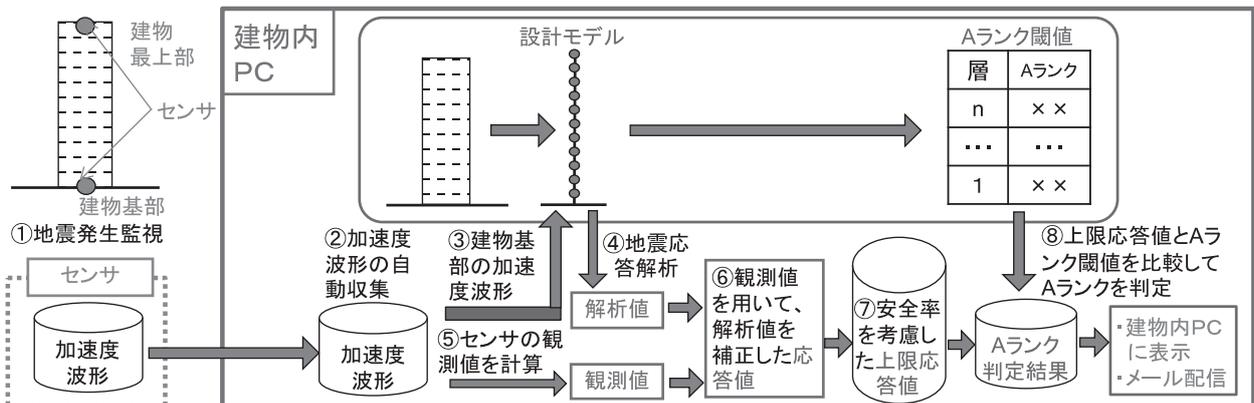
S造のAランク閾値となるk層の層間変形角 δ_{ck} は、表一1の構造形式ごとに設定する。

表一2 センサ及び収録装置の必要性能

項目	必要性能
サンプリング周波数	100 Hz~200 Hz の範囲で設定
分解能	0.01 gal
測定範囲	±2,000 gal~±3,000 gal の範囲で設定
周波数特性	DC~(50 Hz~100 Hz)の範囲で設定
センサ間の時刻同期精度	0.001 sec 以内



図一1 建物地震被災度即時推定システムの構成



図二 Aランクの評価フロー

(2) 層間変形角の求め方

(a) 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、基線補正をした後に速度波形を時間積分して変位波形を求める。

(b) 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、図-3に示す。建物階数が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） δ_{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。

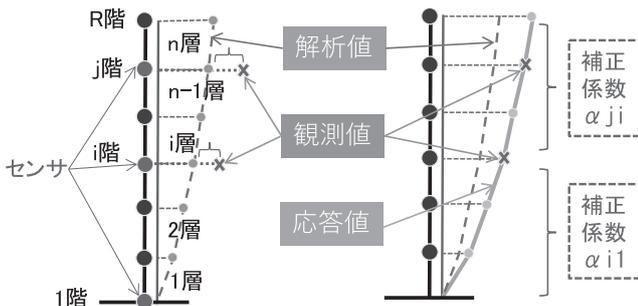


図-3 応答値の求め方

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

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 α_{ji} を計算する。

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

最大層間変形角（応答値） δ_k は、センサ（建物上部）の設置階jに応じた補正係数 α_{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

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

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） δ_{Ok} と最大層間変形角（応答値） δ_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） δ_k に安全率Sを乗じた最大層間変形角（上限応答値） δ_{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4)の検討結果に基づき1.5に設定する。

(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、表-3とする。

表-3 Aランク判定の表示

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なかった場合 KA判定結果：『判断するには別途調査が必要』

4. 建物地震被災度即時推定システムの設置例

(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⁵⁾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章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図-4に、センサ設置写真を写真-1に示す。また、建物内PCの設置写真を写真-2に示す。

構造特性係数Dsを決定するときの部材群としての種別を用いて、3章の手法に従い建物各層のAランク閾値を求める。ブレース付きラーメン構造の層間変形角 δ_{ck} は、(1)柱および梁部材の曲げ降伏に基づく

値 δ_{hk} と、(2)ブレースの降伏に基づく値 δ_{bk} の中で小さい方の値として(8)式より求める。

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

(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、図-5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。

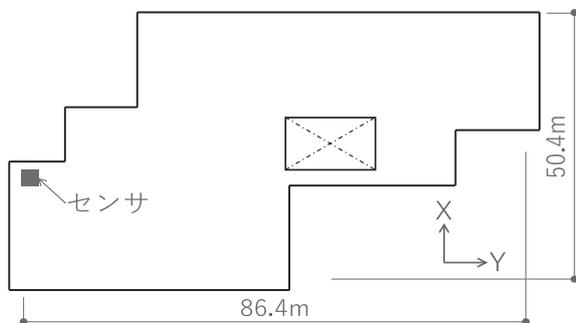


図-4 4階のセンサ設置図

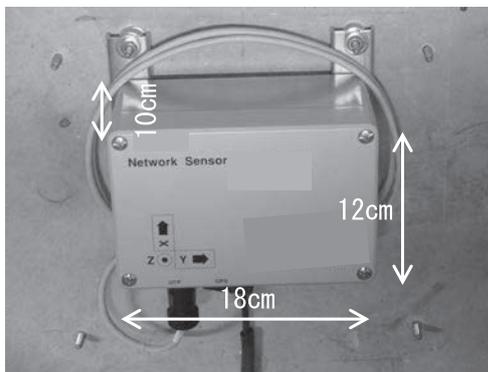


写真-1 センサの構造躯体(床)への設置



写真-2 建物内PCの設置

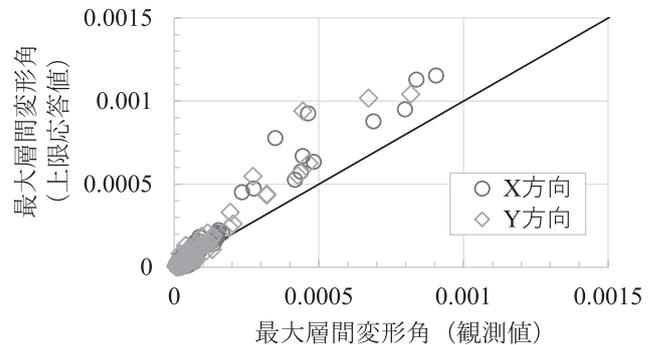


図-5 観測値と上限応答値の比較

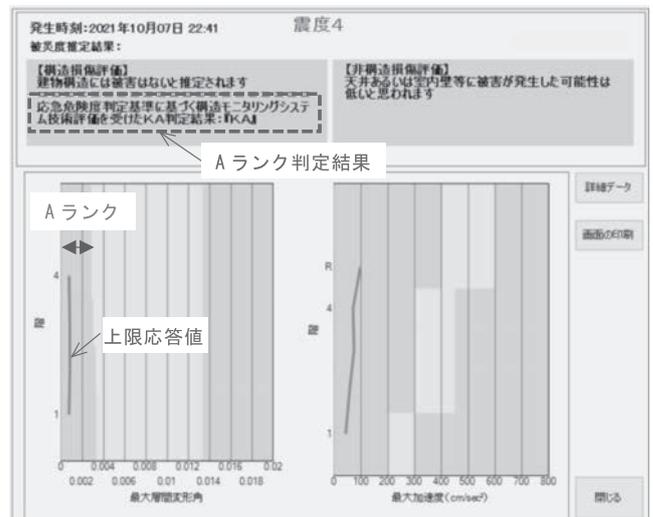


図-6 判定結果の例

(3) 判定結果の表示例⁶⁾

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図-6に示す。図中に点線枠で示すように、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. おわりに

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。本システムを都内に建つS造4階の建物に設置し、これまでに観測した地震を対象にセンサを用いた建物応答値などについて検証した。本システムを建物に設置し日本建築防災協会に建物登録することにより、構造躯体のAランク判定が技術評価を受けたものとして地震直後に実施可能となる。今後、本システムを用いて応急危険度判定の迅速化を行い、在館者の残留可否の早期判断などの震災時BCPの実現を予定している。

JCMA

《参考文献》

- 1) (一財)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) 国土交通省, (社)国際建設技術協会: 平成14年度 建設技術移転指針策

定調査(応急危険度判定)報告書, 平成15年3月

- 3) 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
- 4) 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
- 5) 諏訪仁, 三浦耕太, 江村勝, 三好夏恵: 地震直後における建物被災度判定法-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
- 6) 諏訪仁, 三浦耕太, 江村勝, 中塚光一, 三好夏恵: 建物地震被災度即時推定システムの開発, 大林組技術研究所報, No.86, 2022

【筆者紹介】



諏訪 仁 (すわ ひとし)
 (株)大林組
 技術研究所 構造技術研究部
 副部長



江村 勝 (えむら まさる)
 (株)大林組
 設計本部
 統括部長



中塚 光一 (なかつか こういち)
 (株)大林組
 設計本部
 統括部長