

応答値評価法を改良した建物地震被災度判定支援システムの開発

諏訪 仁 吉田 治 中塚 光一
(設計本部)

高田 恵美 三好 夏恵
(設計本部)

Immediate Judgement Support System for Seismic Damage Level of Buildings With an Improved Response Value Evaluation Method

Hitoshi Suwa Osamu Yoshida Koichi Nakatsuka
Megumi Takada Natsue Miyoshi

Abstract

To conduct quick post-earthquake inspections of damaged buildings immediately, the Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA) began certifying the structural monitoring system as a technical standard based on the post-earthquake quick inspection criteria in 2021. We developed an immediate judgement support system for determining the seismic damage level of buildings and obtained technical certification in February 2025. By installing sensors at two standard locations on earthquake-resistant buildings under 60 m in height, this system can determine whether the damage level of the structural frame is considered minor ("rank-A") immediately after an earthquake. This system was implemented in the four-story steel-framed building in Tokyo, and it was verified that the response values of the building could be evaluated for earthquakes.

概要

地震後の迅速な建物の応急危険度判定の実施を目的に、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。それを受け大林組は建物地震被災度判定支援システムを開発し、2025年2月に技術評価を取得した。本システムは、高さ60m以下の耐震建物を対象にセンサを2箇所に標準設置することにより、地震直後、構造躯体のみを対象に被災程度は小さいと考えられ使用可能なレベル（Aランク）であるか否かを判定できる。本システムを都内に建つ鉄骨造4階の建物に実装し、これまでに発生した地震に対して建物の応答値を安全側に評価できることを検証した。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に活用し、タイムラインを考慮した震災時BCPを実現する。

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問題を踏まえ、東京都は2012年に帰宅困難者対策条例を制定し、企業等が地震後に建物の健全性などを勘査して施設に留まれるかの判断を迅速に行うことを探している。また内閣府（防災担当）は、2016年に大規模地震発生直後における施設管理者等による建物の緊急点検に係る指針¹⁾を公開し、建物管理者等が応急的に建物の安全確認を行う際の参考となるように、平常時に行うべき事前準備や被災時の建物の安全確認の具体的な方法等を公開した。本指針の中で、モニタリングシステムの整備状況や独自の安全確認体制など、建物ごとに既に実施している安全対策を活用して建物の緊急点検を行うことが推奨された。

余震等による建物の倒壊などの二次的災害を防止するためには、建物の応急危険度判定を迅速に実施して危険性を把握する必要がある。従来は応急危険度判定士が被

災建築物応急危険度判定マニュアル²⁾に基づき、主に中低層建物を対象に目視調査を行って応急危険度を判定していたが、判定結果を得るまでに約4～5日程度かかっていた³⁾。このような背景を踏まえ、地震後の迅速な応急危険度判定を目的に、日本建築防災協会は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。それを受け、大林組は2013年に開発した超高層建物を対象とした建物地震被災度即時推定システム⁴⁾を改良し、2022年3月に技術評価（建防災発第30176号）⁵⁾を取得した。

これに続き、同システムをもとに、建物の応答値評価法を改良して新たに建物地震被災度判定支援システムを開発し、2025年2月に技術評価（建防災発第24131号）を新規に取得した。この建物地震被災度判定支援システムを建物に設置することにより、応急危険度判定基準に基づいた使用可否の判断が地震後数分程度で可能となる。従来の応急危険度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ため、建物管

理者等は在館者等が施設に留まれるか否かを迅速に判断できる。このため震災時BCP (Business Continuity Plan, 事業継続計画) の観点から建物地震被災度判定支援システムに対するニーズは高く、最近、国内のみならず海外からも関心が寄せられている。そこで本論文では、システムの概要と実建物への実装ならびにその検証について述べる。

2. 建物地震被災度判定支援システム

2.1 建物地震被災度判定支援システムの概要

建物地震被災度判定支援システムは、建物内にセンサを設置して地震発生を監視し、地震直後、構造躯体のみを対象に被災程度は小さいと考えられ使用可能なレベル (Aランク) であるか否かを判定するシステムとなる。この結果に加え、別途実施する構造躯体以外(隣接建築物、周辺地盤、天井などの落下危険物ならびに建築設備機器などの転倒危険物など) の目視調査により、応急危険度判定基準に基づく調査済の総合判定の迅速な実施が可能となる。

本システムによる構造躯体のAランクの判定フローを、Fig. 1に示す。センサは建物基部(1階)と建物最上部(最上階または最上階より1階下)の2箇所に設置することを標準とし、必要に応じて他の階にも追加設置する。

構造躯体のAランク判定に用いる指標値は、4章に示す上限応答値とした。これは、地震発生時の各層の最大層間変形角を、計測されたセンサ間の最大相対変位と解析値関係式から算定し、安全率を乗じて求める。一方、Aランク閾値(構造躯体の被災程度がAランクとなる各層の層間変形角)は、3章の方法により設定する。建物各方向の全ての層を対象に上限応答値がAランク閾値以下であることを確認できた場合に、建物全体をAランクと判定する。

上記で述べたAランクの判定作業を建物内PCで計算し、

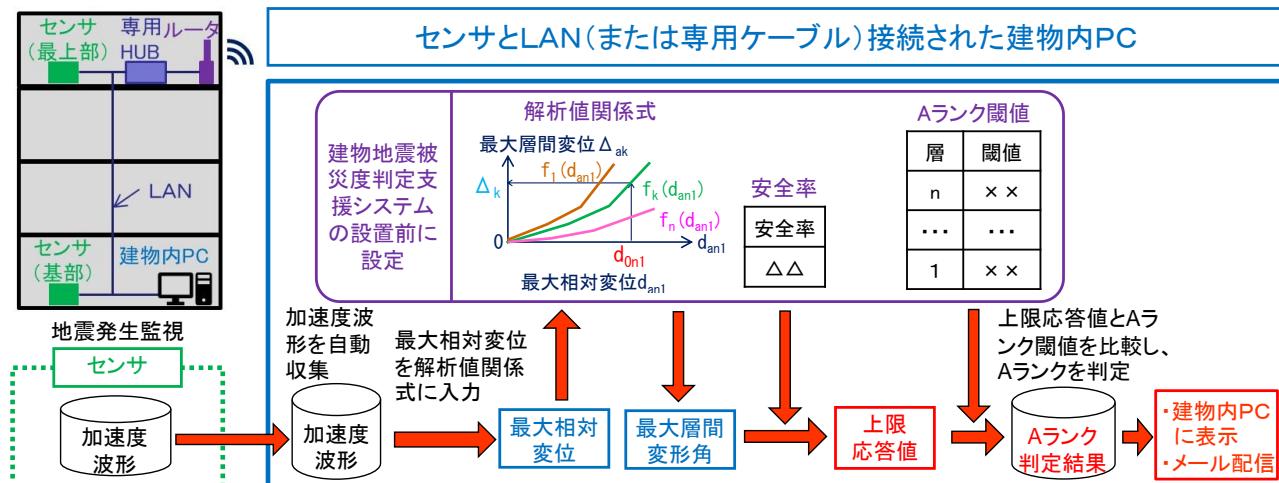


Fig. 1 構造躯体の A ランクの判定フロー
Judgement of Damage Level "Rank-A" in terms of Structural Frame

Table 1 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』

Table 2 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
S造	壁式構造
	ラーメン構造
	プレース付きラーメン構造
	プレース構造

Table 3 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

Table 4 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≥1.1かつ柱のm≥1.2かつ耐震壁のm≥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

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通信で行う。建物内PCとメールに表示されるAランク判定の表示をTable 1に示す。ここで、Table 1の『KA』は、構造躯体の危険度がAランクであることを示す。

2.2 建物地震被災度判定支援システムの特長

建物の挙動を正確に把握するには、各階にセンサを設置する必要があるが、当システムでは建物への標準的なセンサ設置数を2箇所とし、センサが設置されていない部分の最大層間変形角は4章の方法により推定する仕組みとなっている。このため、センサの設置数の低減が可能となり、システムの設置費用ならびに維持管理費用を低減できる。さらに、対象建物の設計情報を用いて解析値関係式ならびに安全率を事前に評価するため、弾性時のみならず建物の塑性化による影響も考慮して各層の層間変形角を求めることができる。

2.3 建物地震被災度判定支援システムの適用範囲

本システムによる判定対象は、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。対象建物をTable 2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する。

なお、構造躯体の被災度がAランクでなかった場合、構造躯体の被災度を判定するには、応急危険度判定士による目視調査が必要となる。また、構造躯体以外（隣接建築物、周辺地盤、天井などの落下危険物ならびに建築設備機器などの転倒危険物など）の被災度は対象外となる。このため、敷地や周辺状況を含めた建物の使用性を対象に応急危険度を判定するには、応急危険度判定士による目視調査が必要となる。

2.4 センサ及び収録装置

建物地震被災度判定支援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 3に示す通りとする。

3. 構造躯体のAランク閾値の設定方法

3.1 構造躯体のAランク閾値の求め方

対象とする建物の立体解析モデルを用いた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を計算する時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についてそれぞれ算出し、両方向のうち小さい方の値を用いる。

3.2 RC造とSRC造のAランク閾値

柱および梁の種別がFA～FC、耐震壁の種別がWA～

Table 5 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
(Reinforced Concrete Structure and Steel Reinforced Concrete Structure)

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

Table 6 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
(Reinforced Concrete Structure and Steel Reinforced Concrete Structure)

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
	次の(1)と(2)の内で小さい方の値で設定する。 (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 (2)せん断部材の破壊に基づいて定められる層間変形角で、次の(2)-1と(2)-2の内の小さい方の値で設定する。 (2)-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）に最初にせん断破壊が発生した時点（せん断強度に達した時点）における層間変形角 (2)-2 RC造耐震診断基準 ⁶⁾ におけるせん断柱、せん断壁の韌性指標Fを1.0として層間変形角1/250
閾値2	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）に最初にせん断破壊が発生した時点（せん断強度に達した時点）における層間変形角で、次の(2)-1と(2)-2の内の小さい方の値で設定する。 (2)-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）に最初にせん断破壊が発生した時点（せん断強度に達した時点）における層間変形角 (2)-2 RC造耐震診断基準 ⁶⁾ におけるせん断柱、せん断壁の韌性指標Fを1.0として層間変形角1/250
閾値3	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）に最初にせん断破壊が発生した時点（せん断強度に達した時点）における層間変形角で、次の(2)-1と(2)-2の内の小さい方の値で設定する。 (2)-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）に最初にせん断破壊が発生した時点（せん断強度に達した時点）における層間変形角 (2)-2 RC造耐震診断基準 ⁶⁾ におけるせん断柱、せん断壁の韌性指標Fを1.0として層間変形角1/250

Table 7 ラーメン構造のAランク閾値 (S造)

Damage Level “Rank-A” for the Moment Resisting Frame (Steel Structure)

柱および梁の部材群としての種別	A	閾値1
	B	
	C	
	D	閾値2

Table 8 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 (Steel Structure)

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

WC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) が小さいとき、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 m に応じて Table 4 で区分した後に、Table 2 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 5 となり、閾値 1～閾値 3 は Table 6 で設定する⁵⁾。ここで、Table 5 の β_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となる。

3.3 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、Table 2 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 7 と Table 8 となり、閾値 1～閾値 4 は Table 9 で設定する⁵⁾。

4. 層間変形角の求め方

4.1 層間変形角の求め方の概要

地震発生時の上限応答値は、Fig. 2 の評価フローにより求める。センサで観測したセンサ間の最大相対変位を k 層の解析値関係式に入力し、 k 層の最大層間変形角を計算する。このとき、設計モデルと実建物の構造特性に乖離が生じた場合でも、解析値関係式より求められた最大層間変形角を観測値と比較して概ね大きく推測する必要がある。上限応答値は、解析値関係式より求められた最大層間変形角に対して、設計モデルの不確定性を考慮した数値となる。 k 層の上限応答値は、 k 層の最大層間変形角に安全率を乗じて求める。安全率は、建物地震被災度判定支援システムの設置前に 4.3 節の方法により設定する。

建物階数が n で、建物基部のセンサを 1 階、建物最上部のセンサを最上階より 1 階下の n 階に設置したとする。このとき、上限応答値の求め方を以下に述べる。

4.2 解析値関係式の求め方

解析値関係式はセンサ間の最大相対変位と最大層間変位との関係式となり、建物地震被災度判定支援システムの設置前に作成する。まず立体解析モデルを対象に非線形荷重増分解析を行い、層間変形角と層せん断力の関係を作成する。次に両者の関係をトリリニア型に置換して、質点系モデルを作成する。その質点系モデルを対象に地震応答解析を行い、センサ設置数と設置階に対応したセンサ間の最大相対変位と k 層の最大層間変位を計算する。このとき、センサ間の最大相対変位と k 層の最大層間変位の関係を用いて回帰分析を行い、 k 層の解析値関係式を求める。

4.2.1 解析値関係式の作成に用いる入力地震波 解

Table 9 閾値の設定 (S造)

Definition of the Threshold for Steel Structure
(Steel Structure)

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
閾値2	非線形荷重増分解析において、層の部材（柱および梁）に最初に局部座屈、横座屈または接合部破断が発生した時点における層間変形角
閾値3	次の(1)と(2)の内で小さい方の値で設定する。 (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 (2)非線形荷重増分解析において、層のプレースに最初に引張降伏または圧縮降伏が発生した時点における層間変形角
閾値4	次の(1)と(2)の内で小さい方の値で設定する。 (1)非線形荷重増分解析において、層の部材（柱および梁）に最初に局部座屈、横座屈または接合部破断が発生した時点における層間変形角 (2)非線形荷重増分解析において、層のプレースに最初に引張降伏、圧縮降伏または接合部破断が発生した時点における層間変形角

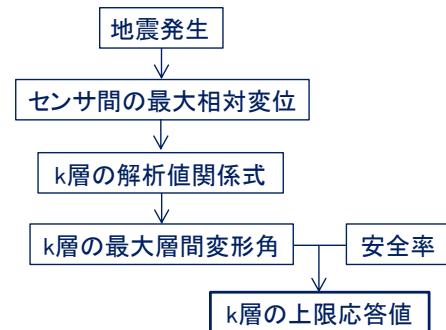


Fig. 2 上限応答値の評価フロー
Evaluation of Upper Limit Response Values

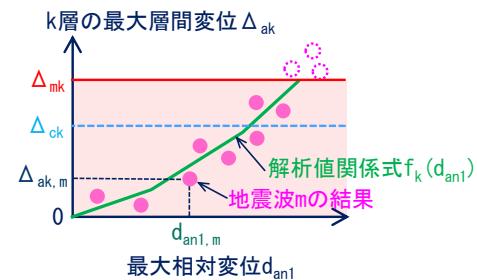


Fig. 3 最大相対変位と最大層間変形の関係図
Relationship between Maximum Relative Displacement and Maximum Story Drift Displacement

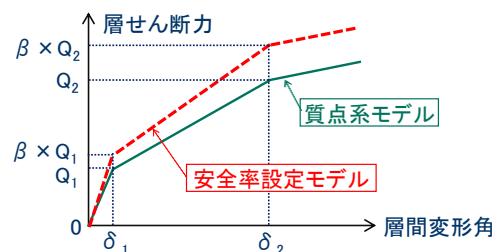


Fig. 4 層間変形角と層せん断力の関係
Relationship between Story Drift Angle and Story Shear Force

析値関係式の作成に用いる入力地震波は、標準波と告示波の2種類とする。標準波として、「高層建築物の動的解析用地震動に関する研究」⁷⁾に示されたエルセントロNS波、タフトEW波、八戸NS波の3波を用いる。告示波は、「告示 平12建告第1461号:超高層建物の構造耐震上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件」における加速度応答スペクトル（以下、告示スペクトル）を用いて作成する。地震応答解析に用いる告示波は、建設地の表層地盤の種類に対応した3波とする。

4.2.2 解析値関係式の定式化 標準波と告示波を対象に、入力地震波の最大加速度を漸増させて合計M個の地震波を作成する。質点系モデルを対象に入力地震波m ($m=1 \sim M$)に対して地震応答解析を行い、1階とn階のセンサ間の最大相対変位 $d_{an1,m}$ とk層の最大層間変位 $\Delta_{ak,m}$ を計算する。合計M個の地震波に対して同様の地震応答解析を行い、 $d_{an1,m}$ と $\Delta_{ak,m}$ ($m=1 \sim M$)を計算する。解析値関係式は、k層の最大層間変位 $\Delta_{ak,m}$ ($m=1 \sim M$)が上限層間変位 Δ_m 以下となる地震応答解析結果（合計N個）を対象に作成する(Fig. 3)。k層の上限層間変位 Δ_{mk} はAランク判定を確実に行うため、Aランク閾値となる層間変位 Δ_{ck} の不確定性を考慮して次式で設定する。

$$\Delta_{mk} = m_a \times \Delta_{ck} \quad (1)$$

ここで、 m_a はAランク閾値となる層間変位 Δ_{ck} に対する余裕率となる。1階とn階のセンサ間の最大相対変位 $d_{an1,m}$ とk層の最大層間変位 $\Delta_{ak,m}$ ($m=1 \sim N$)を用いて回帰分析を行い、1階とn階のセンサ間の最大相対変位 d_{an1} とk層の最大層間変位 Δ_{ak} の解析値関係式 $f_k(d_{an1})$ を求める。

$$\Delta_{ak} = f_k(d_{an1}) = a_k \times (d_{an1})^{b_k} \quad (2)$$

a_k と b_k はk層の解析値関係式の回帰係数となる。

4.3 安全率の求め方

4.3.1 安全率設定モデルの作成法 実際の強震観測記録から伝達関数を計算して固有振動数を求める、実建物の固有振動数は設計モデルを用いて計算された固有振動数より高くなる場合が多い。そこで、設計モデルの不確定性を考慮した上で、観測されたセンサ間の最大相対変位から最大層間変形角を求めるため、実建物を模擬した安全率設定モデルを構築する。安全率設定モデルは、Fig. 4に示すように質点系モデルの第1折れ点変形角 δ_1 および第2折れ点変形角 δ_2 を固定した条件で、第一折れ点耐力 Q_1 と第二折れ点耐力 Q_2 に耐力割増係数 β を乗じて作成する。耐力割増係数 β は、部材の強度評価式と強度の変動^{8), 9)}をもとに、RC造とSRC造について3種類、ならびにS造について3種類、それぞれ設定する。ここで、各層の耐力割増係数 β は、各層の耐力の相関が応答値に与える影響^{10), 11)}を考慮して同一値に設定する。

4.3.2 安全率の求め方 建物地震被災度判定支援システムの設置後に生じる地震波は、システム設置前に解析値関係式の作成に用いた入力地震波とは一般的に異なる。安全率はシステム設置後に用いる係数となるため、安全率設定モデルの地震応答解析では解析値関係式の作

成に用いた入力地震波以外の計算地震波を設定する。安全率設定モデルを対象に計算地震波に対して地震応答解析を行い、センサ設置数とセンサ設置階に対応したセンサ間の最大相対変位とk層の最大層間変形角を計算する。センサ間の最大相対変位をk層の解析値関係式に入力し、k層の最大層間変形角を計算する。つぎに、解析値関係式より推測された最大層間変形角は安全率設定モデルを用いて計算された最大層間変形角より概ね小さくなるため、k層の最大層間変形角に安全率を適用してk層の上限応答値と、計算された最大層間変形角が上限応答値を超過する割合（以下、超過率）を計算する。ここで、超過率の許容値は限界状態設計の目標信頼性指標⁸⁾に従い0.1に、安全率の許容値は構造種別と建物階数をパラメータに検討した結果⁵⁾を参照して1.5に設定する。このとき、安全率かつ超過率がそれぞれの許容値以下に収まることを確認できたとき、建物地震被災度判定支援システムで用いる安全率Sに設定する。なお、安全率または超過率が許容値以下に収まらないときは、センサを追加設置して許容値以下に収まるまで再計算を行う。

4.4 センサ間の最大相対変位の求め方

4.4.1 センサの絶対変位波形の求め方 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計算する。加速度波形を時間積分して絶対速度波形を計算し、基線補正を行った絶対速度波形を時間積分して絶対変位波形を求める⁵⁾。

4.4.2 センサ間の最大相対変位の求め方 1階とn階のセンサで観測された加速度波形を4.4.1に示す通り時間積分して絶対変位波形を計算し、センサ位置におけるセンサ間の最大相対変位 d_{osn1} を計算する。

$$d_{osn1} = \max |DS_n(t) - DS_1(t)| \quad (0 \leq t \leq T) \quad (3)$$

ここで、 $DS_n(t)$ はセンサ位置におけるn階の絶対変位波形、 $DS_1(t)$ はセンサ位置における1階の絶対変位波形、Tは波形の継続時間となる。最大相対変位と最大層間変形角を計算するときの基準座標は、各層の重心位置とする。ここで、立体解析モデルを対象とした非線形荷重増分解析において、重心位置の相対変位とセンサ位置の相対変位に差異が生じたときは、センサ位置による補正係数 λ_{n1} を建物各方向について計算する。1階とn階のセンサ間の最大相対変位 d_{on1} は、センサ位置におけるセンサ間の最大相対変位 d_{osn1} を重心位置に補正して求める。

$$d_{on1} = \lambda_{n1} \times d_{osn1} \quad (4)$$

4.5 上限応答値の求め方

k層の最大層間変形角 δ_{ik} は、1階とn階のセンサ間の最大相対変位 d_{on1} をk層の解析値関係式 $f_k(d_{an1})$ に入力して求める。

$$\delta_k = \frac{f_k(d_{on1})}{h_k} = \frac{a_k \times (d_{on1})^{b_k}}{h_k} \quad (5)$$

ここに, h_k : k 層の階高

a_k と b_k は k 層の解析値関係式の回帰係数となる。

k 層の上限応答値 δ_{sk} は, 最大層間変形角 δ_k に安全率 S を乗じて求める。

$$\delta_{sk} = S \times \delta_k \quad (6)$$

5. 建物地震被災度判定支援システムの検証例

5.1 建物概要とセンサの設置条件¹²⁾

都内に建つS造4階のプレース付きラーメン構造の建物を対象に, 建物地震被災度判定支援システムを検証する。被災度判定に用いるセンサは, 1階と4階の2箇所にいた。一例として, 4階のセンサ配置図をFig. 5に示す。また, 4章で述べた解析値関係式による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か所に設置した。

5.2 Aランク閾値の評価

建物各層の構造形式を, Table 10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, 層間変形角と層せん断力の関係図を求める。一例として, X方向において加力方向が正方向のとき, 各層の層間変形角と層せん断力の関係図をFig. 6に示す。Table 7とTable 8の柱および梁の部材群としての種別(A~D)は, 柱の種別(FA~FD)ごとの水平耐力を用いて求められる^{7), 8)}。一方, Table 8のプレースの部材群としての種別(A~C)は, プレースの種別(BA~BC)ごとの水平耐力を用いて求められる^{7), 8)}。このとき, 各層の柱および梁の部材群としての種別ならびにプレースの部材群としての種別を求めるTable 11となる。

Aランク閾値は, Table 10の構造形式とTable 11の部材群として種別を用いて求められる。各層のAランク閾値は, 3章の方法によりTable 12で設定される。ラーメン構造の閾値1ならびにプレース付きラーメン構造の閾値3は, Table 9の方法により求められる。プレース付きラーメン構造のAランク閾値となる k 層の層間変形角 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)プレースの降伏に基づく値 δ_{bk} の内で小さい方の値として(7)式より計算される。

$$\delta_{ck} = \min \{\delta_{hk}, \delta_{bk}\} \quad (7)$$

一例として, X方向において加力方向が正方向のとき, 層間変形角と層せん断力の関係図に, 柱および梁部材の曲げ降伏に基づく値 δ_{hk} とプレースの降伏に基づく値 δ_{bk} をプロットするとFig. 6となる。このとき, Aランク閾値となる層間変形角は建物各方向についてFig. 7となる。

5.3 解析値関係式の評価

標準波と告示波の最大速度を漸増させて, 複数の入力地震波を作成する。また, 非線形荷重増分解析により求

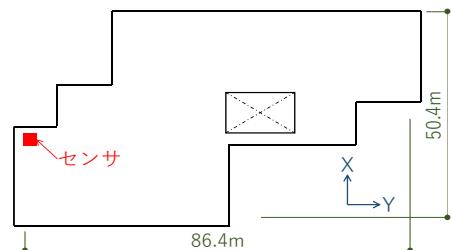


Fig. 5 4階のセンサ配置図

Placement of the Sensor at the 4th Floor

Table 10 各層の構造形式

Structural Type in terms of each Story

層	X方向	Y方向
4	ラーメン構造	ラーメン構造
1~3	プレース付き ラーメン構造	プレース付き ラーメン構造

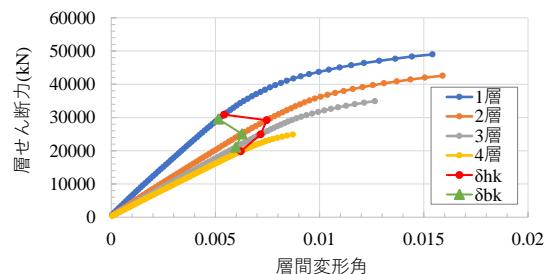


Fig. 6 各層の層間変形角と層せん断力の関係図

(X方向, 加力方向: 正方向)

Relationship between Story Drift Angle and Story Shear Force in terms of each Story
(X Direction, Direction of Force: Forward Direction)

Table 11 各層の部材群としての種別
Classification in terms of the Member Groups

層	X方向		Y方向	
	柱および 梁	プレース	柱および 梁	プレース
4	B		A	
1~3	B	A	A	A

Table 12 Aランク閾値の設定

Set Threshold of Damage Level "Rank-A"

層	X方向	Y方向
4	閾値1	閾値1
1~3	閾値3	閾値3

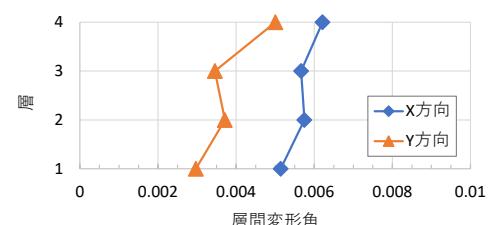


Fig. 7 Aランク閾値となる層間変形角
Story Drift Angle of Threshold of Dagame Level "Rank-A"

められた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質点系モデルを作成する。質点系モデルを対象に複数の入力地震波に対して地震応答解析を行い、1階と4階のセンサ間の最大相対変位とk層の最大層間変位を計算する。なお、地震応答解析を行うとき、各層の復元力特性はノーマル・トリリニア型、減衰は1次の減衰定数が2%の瞬間剛性比例型とした。

1階と4階の最大相対変位 d_{a41} とk層の最大層間変位 Δ_{ak} の解析値関係式 $f_k(d_{a41})$ は、最大層間変位 $\Delta_{ak,m}$ が上限層間変位 Δ_{mk} 以下となる地震応答解析結果を回帰分析することにより求める。

$$\Delta_{ak} = f_k(d_{a41}) = a_k \times (d_{a41})^{b_k} \quad (8)$$

ここで、 a_k と b_k はk層の解析値関係式の回帰係数であり、回帰分析で得られた建物各方向の回帰係数をFig. 8に示す。また、X方向について、一例として1層の解析値関係式をFig. 9に示す。図中には、Aランク閾値となるk層の層間変位 Δ_{ck} を破線で示す。

k層の最大層間変形角 δ_k は、1階と4階のセンサ間の最大相対変位 d_{041} を、(8)式のk層の解析値関係式 $f_k(d_{a41})$ に入力して求める。

$$\delta_k = \frac{f_k(d_{041})}{h_k} = \frac{a_k \times (d_{041})^{b_k}}{h_k} \quad (9)$$

ここに、 h_k : k層の階高

5.4 上限応答値の評価

安全率と超過率の関係は、安全率が大きくなるに従い超過率は単調減少するトレードオフの関係にある。このため、システムで用いる安全率Sは、まず超過率の許容値以下となる超過率充足安全率を求め、超過率充足安全率が安全率の許容値以下となる確認をもって設定できる。なお、4.3節に従い超過率の許容値は0.1に、安全率の許容値は1.5に設定する。このとき、4.3節の方法により超過率ならびに安全率を求める。センサを1階と4階の2箇所に設置したとき、安全率SはX方向について1.39、Y方向について1.42と評価された。k層の上限応答値 δ_{sk} は、(9)式の最大層間変形角 δ_k に安全率Sを乗じて求める。

5.5 建物地震被災度判定支援システムの検証

5.5.1 観測値と上限応答値の比較 2018年11月から2024年12月に発生した地震（合計179地震）を対象とし、建物1階のセンサで観測された計測震度を時系列に示すとFig. 10となる。この179地震を対象に、最大層間変形角に安全率Sを乗じた上限応答値を(6)式より計算する。最大層間変形角の観測値と上限応答値を比較すると、Fig. 11となる。最大層間変形角の観測値が大きくなるに従い、上限応答値は観測値と比較して大きくなる。最大層間変形角の観測値が約0.0002以上の範囲では、観測値が上限応答値を超過する割合は0となる。従って、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ランク判定が特に必要となる最大層間変形角の範囲において安全側

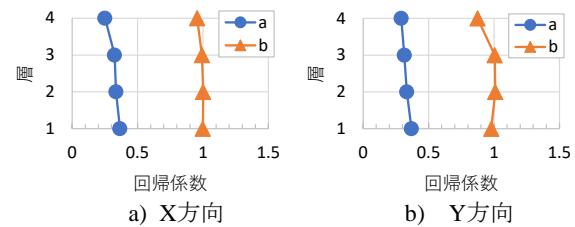


Fig. 8 解析値関係式の回帰係数
Regression Coefficient of Analytical Value Relation

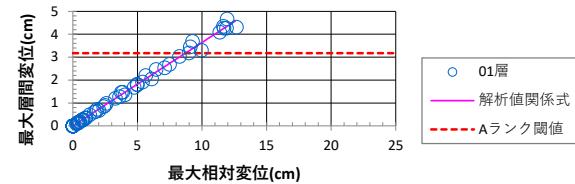


Fig. 9 1層の解析値関係式 (X方向)
Analytical Value Relation (X Direction)

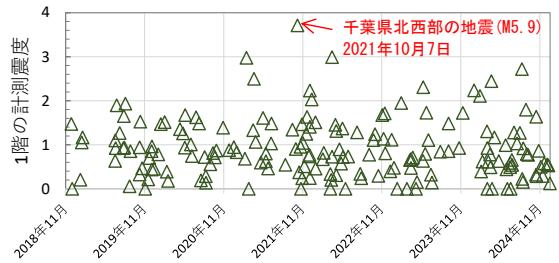


Fig. 10 建物1階の計測震度
Seismic Intensity at the 1st Floor

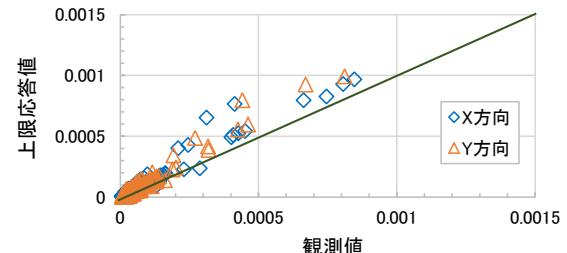


Fig. 11 観測値と上限応答値の比較
Comparison between Observed Values and Upper Limit Response Values

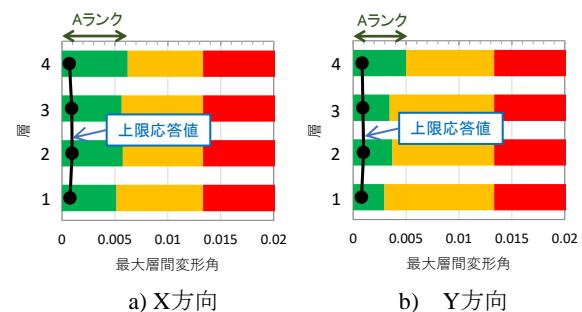


Fig. 12 構造躯体の判定結果の例
Evaluation of the Damage Level of the Structural Frame

に評価できることが検証された。

5.5.2 判定結果の例 2021年10月7日に発生した千葉県北西部の地震(M5.9)における構造躯体の判定結果を、建物各方向についてFig.12に示す。全ての層の上限応答値は、建物両方向ともにAランク閾値となる層間変形角に収まっていることがわかる。従って、この地震における構造躯体の被災程度は、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』)と判定された。ここで、『KA』は、構造躯体の危険度がAランクであることを示す。

6. 構造躯体の応急危険度判定の迅速化

構造躯体の応急危険度判定を迅速化するため、被災建築物応急危険度判定マニュアルの追補¹³⁾が公表された。これにより、日本建築防災協会の技術評価を受けた構造モニタリングシステムが設置され、当該システムにより地震による構造躯体の判定結果がAランクと判定された建物に対して応急危険度判定を行う場合、判定マニュアルの応急危険度判定調査表に基づいて、構造躯体の被災程度は小さく、使用可能と判断できるようになった。これを適用するためには、技術評価を受けた構造モニタリングシステムを設置した建物は、日本建築防災協会に対して設置登録の申請が必要となる。

建物地震被災度判定支援システムは、日本建築防災協会の技術評価を取得している。従って、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、構造躯体のみを対象にAランク判定が可能となる。

7. まとめ

日本建築防災協会の技術評価を取得した建物地震被災度判定支援システムを対象に、構造躯体の被災程度は小さいと考えられ使用可能となるAランク閾値の設定方法、層間変形角の求め方ならびにシステムの検証結果を紹介した。システムの概要と検証によって得られた知見を以下にまとめた。

- 1) Aランク閾値となる層間変形角は、非線形荷重増分解析より求められた層間変形角と層せん断力との関係、ならびに部材群としての種別などを用いることにより、建物の構造種別ならびに構造形式に応じて設定できる。
- 2) 地震時における各層の最大層間変形角は、システムの設置前に解析値関係式を評価することにより、建物基部(1階)と建物最上部(最上階または最上階より1階下)の2箇所にセンサを標準設置することで求められる。
- 3) システムの設置前に設計モデルの不確定性を考慮した安全率を評価して地震時における最大層間変形角の上限応答値を求めるとき、上限応答値は観測値と比較して概ね大きくなり安全側の評価となる

ことを確認した。

- 4) 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、構造躯体のみを対象に被災程度は小さいと考えられ使用可能なレベルであるか否かを判定できる。

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に活用することで、タイムラインを考慮した効果的な震災時BCPの実現に貢献したいと考えている。

参考文献

- 1) 内閣府(防災担当) : 大規模地震発生直後における施設管理者等による建物の緊急点検に係る指針, 平成27年2月
- 2) 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
- 3) 国土交通省, 社団法人 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
- 4) 中村充, 圓幸史朗, 石川理都子, 三浦耕太: 地震時における建物被災度の即時推定技術, 大林組技術研究所報, No.78, 2014
- 5) 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, 日本建築防災協会, 建築防災 通巻535号, 2022.8
- 6) 一般財団法人 日本建築防災協会: 2017年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説, 2017.7
- 7) 一般財団法人 日本建築センター: 高層建築物の動的解析用地震動に関する研究, 平成6年度研究助成報告書No.9404, 研究代表者: 松島豊
- 8) 日本建築学会: 建築物の限界状態設計指針, 2002.11
- 9) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計規準(案)・同解説, 1991.9
- 10) 諏訪仁, 中村充, 三浦耕太: 降伏耐力の相関を考慮した建物の地震応答の統計的特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016.8
- 11) 諏訪仁, 鈴木哲夫, 野畠有秀, 勝俣英雄, 岡田宏, 安井謙: 梁降伏型骨組の耐震信頼性評価に関する手法, 大林組技術研究所報, Vol.51, 1995
- 12) 諏訪仁, 三浦耕太, 江村勝, 三好夏恵: 地震直後に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, 2021.9
- 13) 全国被災建築物応急危険度判定協議会, 一般財団法人 日本建築防災協会: 被災建築物応急危険度判定マニュアル追補, 2023.5