

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	頂部相対変形からの最大層間変形の簡易評価
Title	
著者(和文)	戸張涼太, 佐藤大樹, 北村春幸
Authors	Ryota Tobar, daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 83, , 2025
Citation(English)	, Vol. 83, , 2025
発行日 / Pub. date	2013, 3
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110009769771">http://ci.nii.ac.jp/naid/110009769771</a>

頂部相対変形からの最大層間変形の簡易評価

構造—振動

正会員 ○ 戸張涼太<sup>\*1</sup> 同 佐藤大樹<sup>\*1</sup>  
同 北村春幸<sup>\*1</sup>

最大相対変位 最大層間変形 鉄骨構造  
履歴ダンパー セン断モデル 時刻歴応答解析

1. はじめに

建物の維持管理において地震時の応答観測を行う場合、地震計を設置する事が多い。しかし、コストの関係やデータ管理が煩雑になることから全層に地震計を設置することは難しく、最上階・中間階・一階など特定の層に限定して用いられるのが一般的である。当然、地震計非設置階の応答は不明である。地震経験後の建造物の損傷評価は今後の建築物の耐用性評価につながり、それに応じた対策を講じる上でも重要といえる。建造物の損傷を評価する手法としては応急危険度判定があり、東日本大震災でも震度の大きかった地域を中心に実施された<sup>1)</sup>。しかし、応急危険度判定は判定士が損傷を目視で判定するため、すべての建物を判定するのに多大な時間を要する。大まかな損傷が推定出来れば、応急危険度判定や補強工事の実施優先順位を判断するのに役立つ。

1 質点応答スペクトルと建物頂部応答の関係または建物頂部応答と最大層間変形の関係がわかれば、1階または最上階の加速度計の情報から最大層間変形の簡易な推定が可能である。本報では、1質点変位応答スペクトルと多層建物頂部の最大相対変位の対応関係および、頂部の最大相対変位と最大層間変形角の関係について検討する。

2. 解析概要

2.1 検討モデル

検討モデルは5階建て、8階建て、21階建て、35階建ての鋼構造建物とする。平面図と軸組図を図1に示す。全モデル階高は1階のみ他の階に比べ高く、平面形状は各階同一とする。構造減衰は主架構の弾性1次固有周期 $fT_1$ に対して2%となる剛性比例型とする。建物モデル諸元を表1に示す。1次の等価高さ ${}_1\bar{H}$ は式(1)によって算出される<sup>2)</sup>。

$${}_1\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot {}_1u_i \cdot H_i}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot {}_1u_i} \quad (1)$$

ここで、 $m_i$ : $i$ 層の質量、 ${}_1u_i$ : $i$ 層の1次固有モード、 $H_i$ : $i$ 層の高さ、 $N$ :層数である。

制振モデルでは、履歴ダンパーとして座屈拘束型ブレースを想定し、建物高さ方向に連層配置とする。ダンパーは塑性化部と弾性部で構成され、部材長さ $L_d$ に対して塑性化部の長さを $L_d/3$ とし、塑性化部断面積 $A_d$ に対して弾性部断面積を $2A_d$ とする。塑性化部にはLY225材(降伏応力度225 N/mm<sup>2</sup>)を用い、ダンパーの履歴性状は完全弾塑性型とする。5層モデルと8層モデルにおける各層のダンパーの降伏層せん断力 $Q_{yi}$ は、第1層のダンパーの降伏層せん断力 $Q_{y1}$ と同じ一律分布とする( $Q_{yi} = Q_{y1}$ )。21層モデルと35層モデルにおいては $Q_{y1}$ を基準とし、地震層せん断力係数の高さ方向分布(Ai分布)に基づく設計用層せん断力分布をもとに4段階とした。 $Q_{y1}$ の層せん断力係数換算値 $\alpha_{y1}$ をパラメータとし、各モデル $\alpha_{y1} = 0.02, 0.05, 0.08, 0.10$ の4モデルについて検討する。

2.2 セン断モデルの設定方法

2.2.1 主架構の設定

主架構に対する静的荷重増分解析より得られた各層の層せん断力—層間変形の関係から、3次剛性を0とするトリリニア型復元力特性を作成する。層のすべての梁端でヒンジができた時の層間変形を終局変形 $\delta_i$ と定義し、 $\delta_i$ に達しない層はバイリニア型、降伏変形に達しない層は弾性とした。本検討モデルでは、21層モデルの1、19~21層、35層モデルの28~34層をバイリニア型、35層モデルの35層を弾性、それ以外の層をトリリニア型とした。図2に5層モデルと35層モデルの荷重変形曲線と設定した復元力特性を示す。

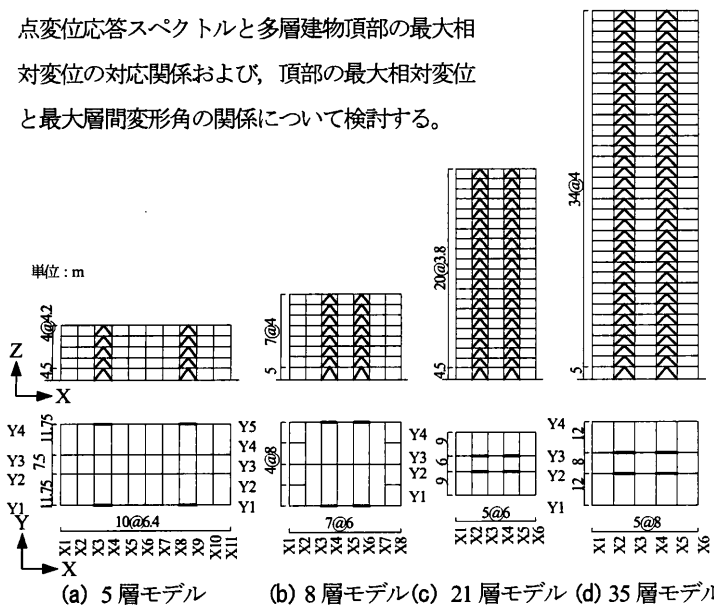


図1 検討モデル

表1 検討モデル諸元

	高さH(m)	重量(kN)	$fT_1$ (s)	1次等価高さ ${}_1\bar{H}$ (m)	${}_1\bar{H}/H$
5層モデル	21.3	74910	1.10	15.7	0.74
8層モデル	33.0	78009	1.54	23.7	0.72
21層モデル	80.5	115347	2.41	53.7	0.67
35層モデル	141.0	373868	4.07	94.5	0.67

### 2.2.2 制振構造の設定

本報では、笠井・岩崎<sup>3)</sup>、石井・笠井<sup>4)</sup>により報告された「骨組特性値」を用いた簡易モデルの作成手法を採用する。提案されている骨組特性値を用いた制振構造に有用なせん断モデル<sup>3, 4)</sup>は、擬以ブレースとダンパー要素を直列結合により構成される(図3)。骨組特性値 $\alpha_N$ および擬以ブレース剛性 $K_{bs}$ は、主架構のみの弾性部材モデル(状態 $N$ )および主架構の制振部材設置位置に剛性が極端に大きい弾性バネを挿入した(状態 $R$ )2ケースの静的解析結果から得られ、式(2)によって算出される<sup>3, 4)</sup>。なお、静的解析時の荷重は $A_i$ 分布に基づくものとする。

$$\alpha_N = \delta_{dN} / \delta_N, \quad K_{dR} = F_{dR} / \delta_R, \quad K_{bs} = \alpha_N \cdot K_{dR} \quad (2a, b, c)$$

ここで、 $K_{dR}$ :ダンパー設置箇所の架構の曲げ剛性、 $\delta_i$ :ダンパー設置箇所の相対変形の水平成分、 $\delta$ :架構の層間変形、 $F_d$ :ダンパー設置箇所の弾性バネが負担する軸力の水平成分、右下の添え字 $N$ および $R$ は、状態 $N$ および状態 $R$ の計算値であることを示す。

本論文では、主架構に擬以ダンパーと擬以ブレースを含めた制振構造全体をシステムと呼ぶ<sup>5)</sup>。

### 2.3 入力地震動

検討用入力地震動は、速度応答スペクトルを $S_V=0.8\text{ m/s}$  ( $h=5\%$ )とした模擬波2波と観測波2波を用いる。模擬波の位相特性はHACHINOHE 1968 EW(以降ART HACHI)、JMA KOBE 1995 NS(以降ART KOBE)を採用する。観測波は、最大速度を $0.5\text{ m/s}$ に基準化したEL CENTRO 1940 NS波(以降El Centro)と、TOMAKOMAI 2003 EW波の原波(以降Toma)を採用する。以上の4波を基準とし、それぞれ加速度波形を1.0倍、1.5倍、2.0倍した地震動を検討に用いる。図4に、基準(1.0倍)とする地震波の加速度波形と最大加速度を、図5に擬以速度応答スペクトル $\rho S_V$  ( $h=5\%$ )と変位応答スペクトル $S_D$  ( $h=2\%$ )を示す。

### 3. 1 質点変位応答スペクトルとの対応

本章では、各モデルの時刻歴応答解析より算出した頂部最大相対変位と、1質点変位応答スペクトルとの対応関係について検討する。図6に1質点変位応答スペクトル $S_D$ に対する頂部最大相対変位 $x_{Nmax}$ の比率を示す。ここで $S_D$ は $h=2\%$ の1質点変位応答値を用いており、対応する周期は、耐震モデルにおいては主架構のみの1次固有周期とし、制振モデルにおいてはシステムの1次固有周期としている。

入力地震動の種類に着目すると、ART HACHIとEl Centroの5層モデルと8層モデルにおいて、他の入力・モデルに比べ $x_{Nmax}/S_D$ は小さくなるケースが見られるが、全モデルに共通して確認できる傾向はこの図からは確認できない。入力地震動の倍率に着目すると、倍率が大きいほど $x_N/S_D$ が小さくなる傾向が確認できる。これは主

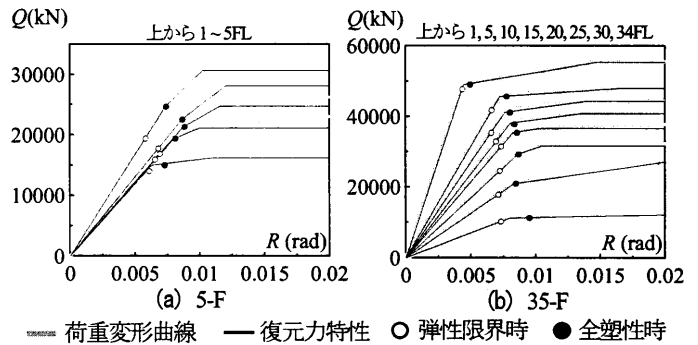


図2 荷重変形曲線と復元力特性

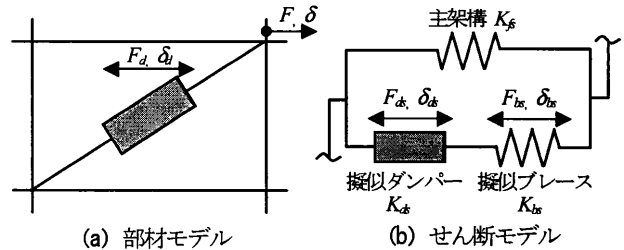


図3 部材モデルとせん断モデルの対応

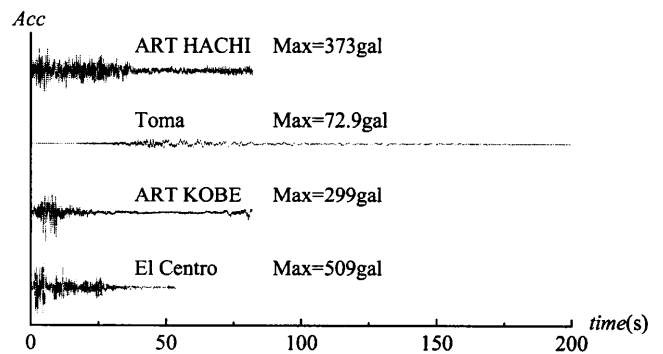


図4 入力地震動加速度波形

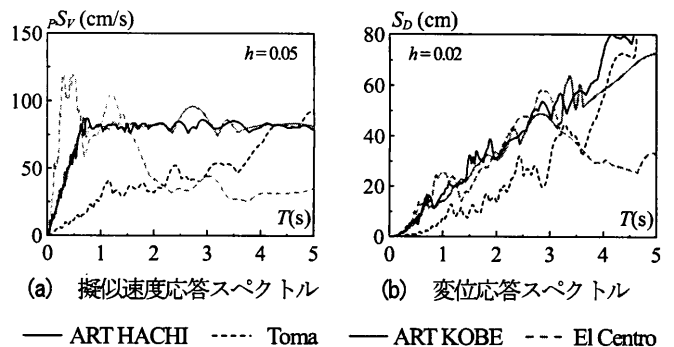


図5 入力地震動のスペクトル

架構またはダンパーが塑性化したことにより等価減衰が増加、 $x_{Nmax}$ が抑えられたためと考えられる。

モデル別に比較すると、5層・8層モデルでは21層・35層モデルに比べ $x_{Nmax}/S_D$ は若干小さいことがわかる。これは表1に示した等価高さ $\bar{H}$ が影響していると考えられる。1次モード形が直線と仮定すれば、頂部の相対変位の1次モード成分 $x_N$ は等価高さ位置の相対変位の $H/\bar{H}$ 倍で表すことができる。また、 $S_D$ は等価高さ位置での相対変位ともいえるので、 $x_N/S_D$ は $H/\bar{H}$ の値に近くなると考

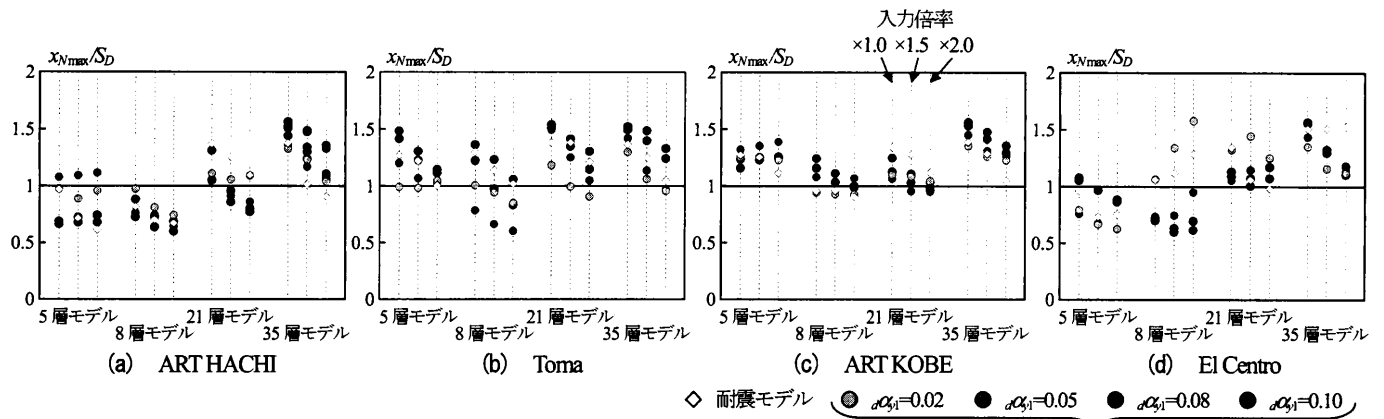


図6 頂部最大相対変位  $x_{Nmax}$  と 1 質点変位応答スペクトル  $S_D$  制振モデル

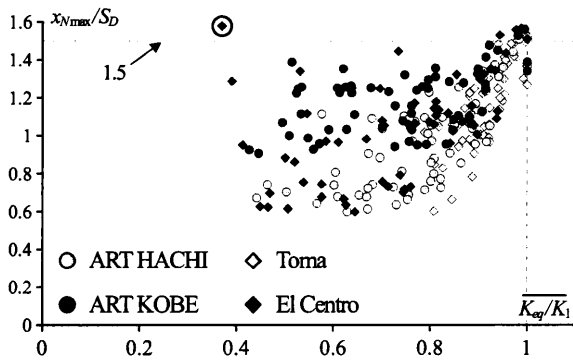


図7  $x_{Nmax}/S_D$  と  $K_{eq}/K_1$  の関係

えられる。 $H_1/\bar{H}$  は 5 層モデルにおいて 1.35, 8 層モデルにおいて 1.39, 21 層モデルおよび 35 層モデルにおいて 1.50 となっており, 5 層・8 層モデルでは 21 層・35 層モデルに比べ  $x_N/S_D$  も小さくなると考えられる。

主架構またはダンパーの塑性化による影響を考察するため, 図 7 に  $x_{Nmax}/S_D$  と  $K_{eq}/K_1$  の関係を示す。 $K_{eq}$  は最大層間変形時のシステムの等価剛性,  $K_1$  はシステムの初期剛性を表す。図 8 に  $K_{eq}$  および  $K_1$  について図示す。 $K_{eq}/K_1$  は各層の  $K_{eqi}/K_{1i}$  の全層平均値とした。なお, 図 7 では, 図 6 に示した全パターンをプロットしている。

図 7 より,  $K_{eq}/K_1$  が 1 (システムが弾性状態) の時, 概ね  $x_{Nmax}/S_D = 1.3 \sim 1.6$  の範囲を示し,  $K_{eq}/K_1$  の低下に伴い  $x_{Nmax}/S_D$  も低下する傾向が確認できる。 $K_{eq}/K_1 = 0.8$  程度まで  $x_N/S_D$  は低下し続けるが, それ以下の領域では横ばいとなっている。塑性化状態が同程度の時の  $x_N/S_D$  のばらつきに着目すると,  $K_{eq}/K_1$  が低下するほど  $x_{Nmax}/S_D$  のばらつきも大きくなり,  $K_{eq}/K_1 = 0.8$  以下では  $x_{Nmax}/S_D = 0.6 \sim 1.5$  の広範囲に分布していることがわかる。以上の現象は主架構またはダンパーが塑性化することにより, 減衰が増大し  $x_{Nmax}$  が小さくなるが, その分等価周期が長くなり変位応答スペクトルの関係 (図 5(b) より,  $x_{Nmax}$  が增大する関係にあるためと考えられる。

入力地震動の違いについて着目すると,  $K_{eq}/K_1$  が同程度でも, ART KOBE・El Centro の 2 波では ART HACHI・Toma の 2 波に比べ

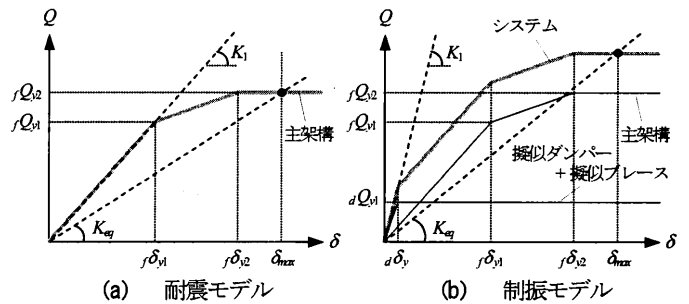


図8  $K_1$  と  $K_{eq}$  の定義

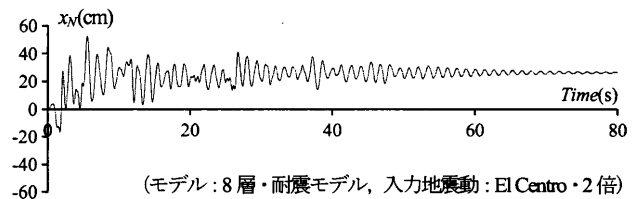


図9 頂部相対変位の時刻歴

$x_{Nmax}/S_D$  が大きい範囲に分布する傾向が確認できる。特に ART KOBE では  $K_{eq}/K_1$  が大きく低下しても  $x_{Nmax}/S_D = 0.9 \sim 1.4$  の範囲に分布している。図 9 に,  $K_{eq}/K_1$  が最も小さいが  $x_{Nmax}/S_D$  が 1.58 と高い値を示した図中 A で示す応答の時刻歴を示す。残留変形により, 過大な最大相対変位が生じていることがわかり, 大きな残留変形が生じるような応答の場合  $x_{Nmax}/S_D$  が大きくなると見られる。

#### 4. 頂部最大相対変位と最大層間変形角の関係

本章では, 各モデル頂部の最大相対変位と, いずれかの層で発生した最大層間変形角の関係について検討する。

図 10 に最大層間変形角  $R_{max}$  と等価最大層間変形角  $R_{eq}$  の比率を示す。等価最大層間変形角  $R_{eq}$  は式(3)によって定義される。

$$R_{eq} = x_{Nmax} / \sum_{i=1}^N H_i \quad (3)$$

入力地震動の種類に着目すると, Toma において比較的  $R_{max}/R_{eq}$  は小さくなっており, 入力地震動の倍率に着目すると, 倍率が大きいほど  $R_{max}/R_{eq}$  は大きくなる傾向が確認できる。塑性化が進むほど  $R_{max}/R_{eq}$  は大きくなると予想できる。Toma は図 4, 5 より入力加速度, 応

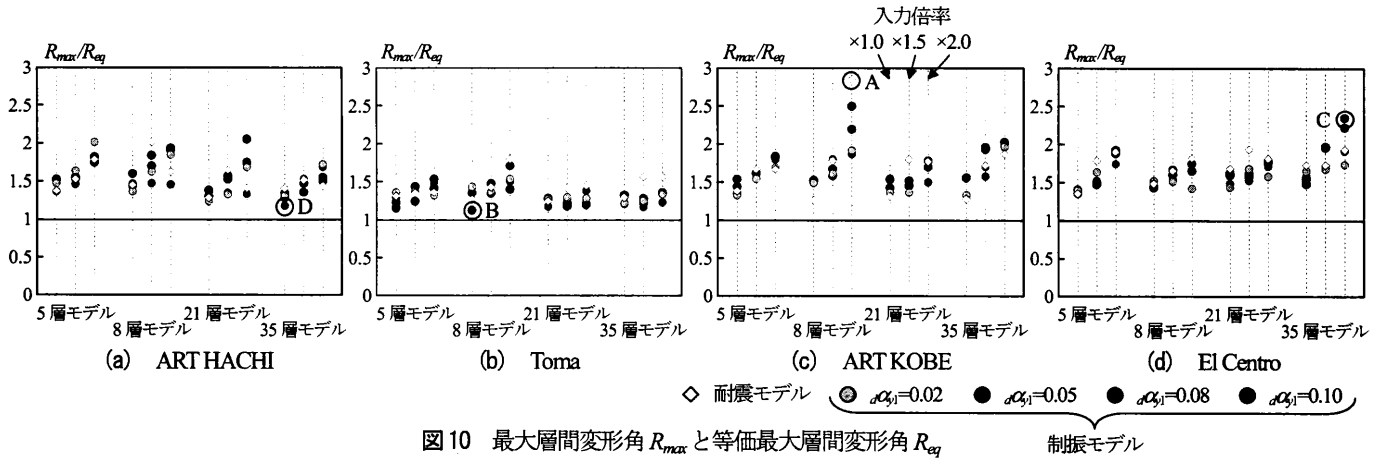


図10 最大層間変形角  $R_{max}$  と等価最大層間変形角  $R_{eq}$  制振モデル

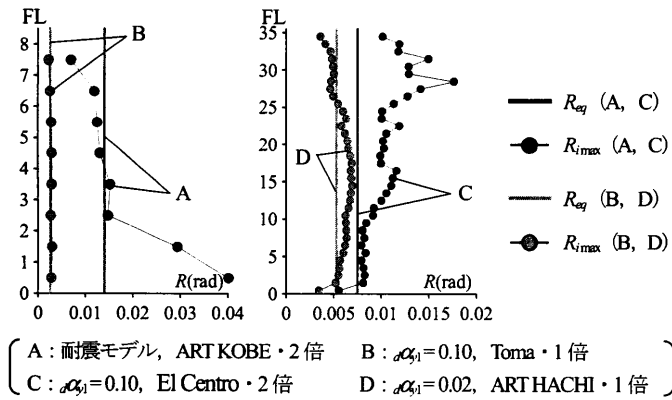


図11 各層の最大層間変形角  $R_{i,max}$

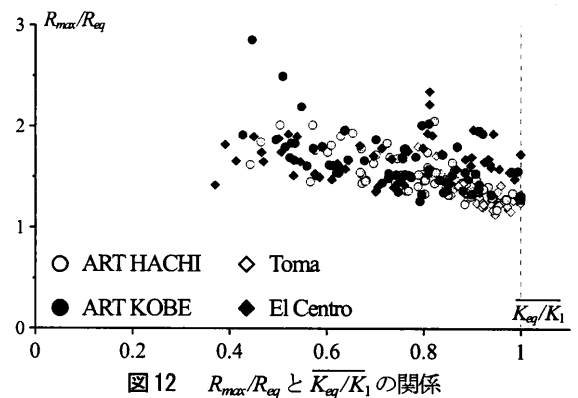


図12  $R_{max}/R_{eq}$  と  $K_{eq}/K_1$  の関係

答スペクトル共に比較的小さく、塑性化が進まなかったため  $R_{max}/R_{eq}$  が小さくなったといえる。モデル別および制振構造の有無による  $R_{max}/R_{eq}$  の傾向はこの図からは確認できない。

特に  $R_{max}/R_{eq}$  の大きかった図10, AおよびCの各層の最大層間変形角  $R_{i,max}$  を、 $R_{max}/R_{eq}$  の小さい図10, BおよびDと比較して図11に示す。A, Cの層間変形角に着目すると、特定層に過大な層間変形角が生じており、このような場合は  $R_{max}$  が極端に大きくなり、 $R_{max}/R_{eq}$  も大きくなるのがわかる。B, Dのように変形が特定層に集中していない場合、 $R_{max}/R_{eq}$  は1に近づくと考えられる。

塑性化の程度と  $R_{max}/R_{eq}$  の関係について検討する。図12に  $R_{max}/R_{eq}$  と  $K_{eq}/K_1$  の関係を示す。  $K_{eq}/K_1$  が小さくなるほど  $R_{max}/R_{eq}$  は大きくなっていく傾向が確認できる。  $K_{eq}/K_1$  が概ね1の場合、  $R_{max}/R_{eq}$  は概ね1.2~1.8程度、  $K_{eq}/K_1$  が1以下になると徐々に大きくなり、  $K_{eq}/K_1$  が0.8を下回る範囲では概ね1.3~2.8である。地震動の違いに着目すると、塑性化の程度が同程度である時の  $R_{max}/R_{eq}$  の特徴は見られず、  $R_{max}/R_{eq}$  は塑性化の程度による影響が強いものと言える。

### 5. おわりに

本報では多質点せん断モデルを用いた時刻歴応答解析より、頂部の最大相対変位と1質点変位応答スペクトルとの対応関係、および

頂部の最大相対変位と、最大層間変形角の関係について検討した。以下に知見を示す。

- (1) 本検討において、頂部最大応答変位は1質点変位応答スペクトルに比べ、弾性状態において1.3~1.6倍、主架構またはダンパーが塑性化すると低下、大きく塑性化するとばらつきも大きくなり0.6~1.5倍の範囲に分布した。
- (2) 変位応答スペクトルに対する頂部最大応答変位の比率は層数の少ないモデルにおいて若干小さく分布した。
- (3) 頂部の最大相対変位を建物高さで除した等価な層間変形角に対する最大層間変形角の比率は、塑性化の程度に影響し、本検討では弾性状態において概ね1.2~1.8程度、塑性化が進むと最大2.8であった。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会：長周期地震動対策に関する公開研究会，2012.3
- 2) 柴田明徳：最新 耐震構造解析 第2版，森北出版株式会社
- 3) 笠井和彦，岩崎啓介：様々な形式の制振構造における自由度縮約法と水平パネ系への変換法，日本建築学会構造系論文集，No.605，pp.37-46，2006.7
- 4) 石井正人，笠井和彦：多層制振構造の時刻歴解析に用いるせん断棒モデルの提案，日本建築学会構造系論文集，No.647，pp.103-112，2010.11
- 5) パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第2版，(社)日本免震構造学会 (JSSI)，2005.9

\*1 東京理科大学