

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	エネルギー法の主架構とダンパーの剛性分布が異なる場合への拡張に向けた検討, その1, 解析モデルの設定と等価繰返し数の分析
Title	
著者(和文)	渋谷政斗, 佐藤大樹, 北村春幸, 佐藤利昭, 山口路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太
Authors	Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Toshiaki Sato, Michio Yamaguchi, Naoya WAKITA
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2015, 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/110009947863">http://ci.nii.ac.jp/naid/110009947863</a>

エネルギー法の主架構とダンパーの剛性分布が異なる場合への拡張に向けた検討

その1：解析モデルの設定と等価繰返し数の分析

構造—振動	正会員	○ 渋谷政斗 <sup>*1</sup>	〃	佐藤大樹 <sup>*2</sup>	〃	佐藤利昭 <sup>*1</sup>
鋼構造建物	制振構造	履歴減衰型ダンパー	〃	北村春幸 <sup>*1</sup>	〃	山口路夫 <sup>*3</sup>
エネルギー法	時刻歴解析	等価繰返し数	〃	綿貫雄太 <sup>*3</sup>		脇田直弥 <sup>*3</sup>

1. はじめに

制振構造の応答評価法の1つであるエネルギーの釣合に基づく応答評価法<sup>1)</sup>(以後、エネルギー法)は、秋山により、主架構とダンパーの剛性分布が等しいことを前提に提案されている。筆者らは、その前提が成立しない場合にエネルギー法を拡張することを目的に、高さ方向の剛性が極端に不均一な主架構を用いて、主架構の剛性を考慮したダンパーの最適降伏せん断力係数分布 $\overline{\alpha}_s$ および $\overline{\alpha}_i$ に基づくダンパーの降伏耐力の設定法を提案した<sup>2)</sup>。本報では、提案設定法による制振構造を用いて、エネルギー法を構成する指標ごとにそれぞれの既往の評価式を最検証した結果を報告する。

本報その1では、最大変形と累積塑性変形の対応を表し、エネルギー法において最大応答の予測に用いられる等価繰返し数 $n_{eq}$ について検討する。

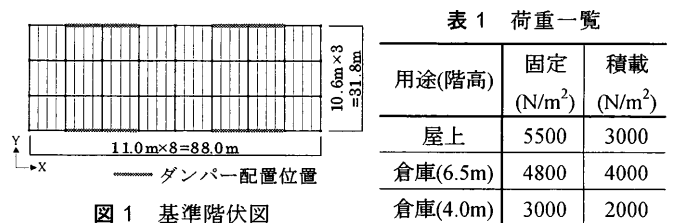


図1 基準階伏図

表1 荷重一覧

用途(階高)	固定 (N/m <sup>2</sup> )	積載 (N/m <sup>2</sup> )
屋上	5500	3000
倉庫(6.5m)	4800	4000
倉庫(4.0m)	3000	2000

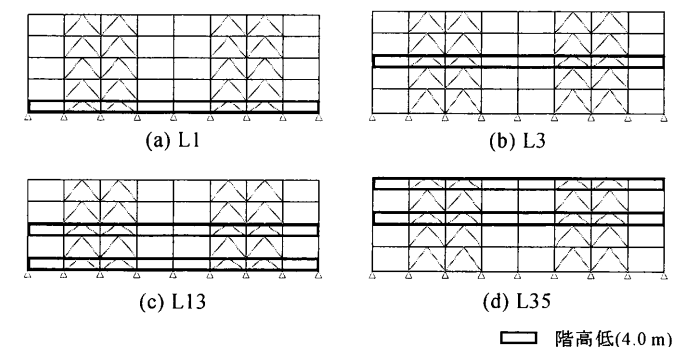


図2 軸組図

2. 検討建物、ダンパーおよび入力地震動概要

2.1 検討建物概要

高さ方向に剛性が不均一な主架構として、物流施設を模擬した5層鋼構造建物を想定する<sup>2)</sup>。図1に検討建物の基準階伏図、図2に軸組図を示す。検討建物の基準となる階高を1階7.5m、2~5階6.5mとし、高さ方向に剛性が不均一な建物とするため、図2に示すように1つないし2つの階高を4.0mとする。検討建物を階高を低くした階からそれぞれL1、L3、L13、L35モデルと呼ぶ。本報では、X方向について検討する。表1に荷重一覧、表2に部材断面一覧を示す。柱および大梁の鋼材種にはそれぞれBCP325、SN490を使用し、部材断面はダンパーの付与を見込み、各モデルごとに標準せん断力係数 $C_0 = 0.10$ に対する許容応力度設計より決定した。図3に層質量 $m_i$ 、図4に静的解析より算出した主架構の初期剛性 $f_k$ の高さ方向分布を示す。図3より、表1の荷重の違いによって、階高の低い層の直下の $m_i$ は他の層の約6割となること、図4より、階高の低い層の $f_k$ は、上下の層と比べ極端に大きくなるのがわかる。表3に全重量 $W$ と1次固有周期 $fT_1$ を示す。解析において、検討建物を各階を剛床と仮定した3次元立体骨組でモデル化し、主架構は弾性とする。構造減衰は $fT_1$ に対して減衰定数 $h = 0.02$ となる剛性比例型として主架構のみに与える。

表2 部材断面一覧

柱	□-500×500×19 ~□-600×600×32
大梁	H-588×300×12×20 ~HY-750×350×14×28

表3 全重量 $W$ と1次固有周期 $fT_1$

	$W$ (kN)	$fT_1$ (s)
L1	142264	1.83
L3	131041	1.89
L13	131041	1.63
L35	120293	1.65

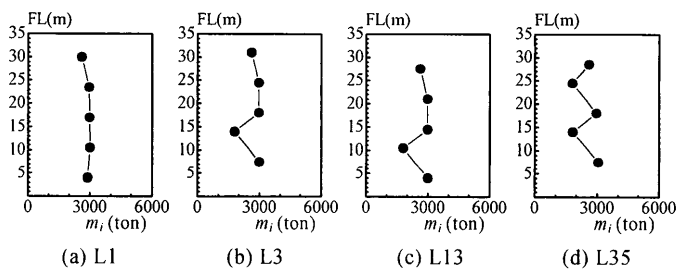


図3 層質量

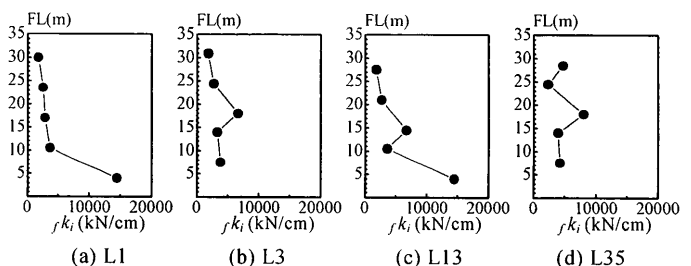


図4 主架構の初期剛性 $f_k$

## 2.2 ダンパー概要

ダンパーには、図5に示す軸材にLY225を使用し、塑性化部と弾性部で構成された座屈拘束ブレースを用いることとし、検討建物の図1,2に示した位置に1層につき16基ずつ付与する。座屈拘束ブレースは、解析において等価な一様断面でモデル化し、復元力特性を完全弾塑性型とする。図5において $L_{ci}/L_i=0.25$ ,  $L_{1i}/L_i=0.325$ ,  $A_{1i}/A_{ci}=2.0$ ,  $A_{2i}/A_{ci}=1.0$ とすることで、表4のように階高ごとにダンパーの降伏変位 ${}_s\delta_{yi}$ と降伏層間変形角 ${}_sR_{yi}$ が定まる<sup>3)</sup>。いずれの階高においても ${}_sR_{yi}$ は1/700 rad程度となる。

ダンパーの降伏耐力 ${}_sQ_{yi}$ の設定について述べる。主架構の剛性を考慮したダンパーの最適降伏せん断力係数分布 ${}_s\alpha_i$ を、秋山による最適降伏せん断力係数分布 $\bar{\alpha}_i$ とダンパーの初期剛性 ${}_s k_i$ と全体架構（主架構+ダンパー）の初期剛性 ${}_f k_i + {}_s k_i$ を用いて下式で表す<sup>2)</sup>。

$${}_s\alpha_i = \bar{\alpha}_i \cdot \frac{{}_s k_i / ({}_f k_i + {}_s k_i)}{{}_f k_i / ({}_f k_i + {}_s k_i)} \quad (1)$$

(1)式を満足するため、任意の $k$ 層のダンパー降伏層せん断力係数 ${}_s\alpha_{yk}$ （以後、ダンパー量）を与え、 ${}_s\delta_{yi}$ 時に全体架構で $\bar{\alpha}_i$ を満たす下式より ${}_sQ_{yi}$ を算定する。

$${}_sQ_{yi} = \left\{ ({}_f\alpha_k + {}_s\alpha_{yk}) \cdot \frac{\bar{\alpha}_i}{\alpha_k} - {}_f\alpha_i \right\} \cdot \sum_{j=i}^N m_j \cdot g \quad (2)$$

ここに、 ${}_f\alpha_i$ :  ${}_s\delta_{yi}$ 時の主架構の負担せん断力係数、 $g$ : 重力加速度、 $N$ : 層数である。(2)式によって、エネルギー法の基準状態をおおむね実現できることを確認している<sup>2)</sup>。本報では、各モデル間で ${}_f k_i$ の差異が少ない第2層を基準( $k=2$ )としたダンパー量 ${}_s\alpha_{y2}$ を与える。 ${}_s\alpha_{y2}$ が小さいと ${}_f k_i$ が相対的に高い層で ${}_sQ_{yi} < 0$ となることがあるが、 ${}_sQ_{yi} > 0$ となる ${}_s\alpha_{y2}=0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.15, 0.20$ を用いる。図6に、第2層で基準化したダンパー降伏せん断力係数分布 ${}_s\alpha_{yi}/{}_s\alpha_{y2}$ と秋山による最適降伏せん断力係数分布 $\bar{\alpha}_i/\bar{\alpha}_2$ の関係を示す。図6より、 ${}_f k_i$ の高い層の ${}_sQ_{yi}$ は小さく設定され、 ${}_s\alpha_{y2}$ が増加するに従い ${}_f k_i$ の影響が小さくなり、 ${}_s\alpha_{yi}/{}_s\alpha_{y2}$ は、 $\bar{\alpha}_i/\bar{\alpha}_2$ と一致に向かうことが確認できる。

## 2.3 入力地震動概要

入力地震動には、コーナー周期 $T_c=0.64$ s以降で擬似速度応答スペクトル ${}_pS_V=1.0$  m/s ( $h=0.05$ )となる模擬波2波を用いる。位相特性は、海溝型地震に分類される1968年の十勝沖地震におけるHACHINOHE EW成分と、直下型地震に分類される1995年の兵庫県南部地震におけるJMA KOBE NS成分を採用する。以後、これらの模擬波をART HACHI, ART KOBEと呼ぶ。図7に入力地震動の加速度波形、図8に擬似速度応答スペクトル ${}_pS_V$ とエネルギースペクトル $V_E$ を示す。

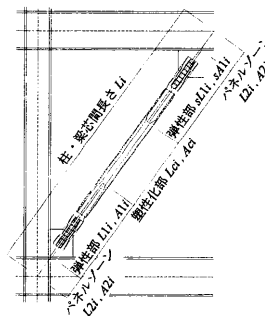


図5 ダンパー配置図

表4 ダンパー降伏変位 ${}_s\delta_{yi}$ と降伏層間変形角 ${}_sR_{yi}$

階高(m)	${}_s\delta_{yi}$ (cm)	${}_sR_{yi}$ (rad)
7.5	1.08	1/695
6.5	0.90	1/719
4.0	0.58	1/693

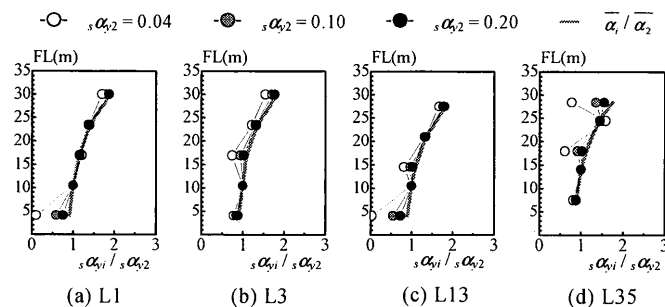


図6 ダンパーの降伏せん断力係数分布 ${}_s\alpha_{yi}/{}_s\alpha_{y2}$ と $\bar{\alpha}_i/\bar{\alpha}_2$

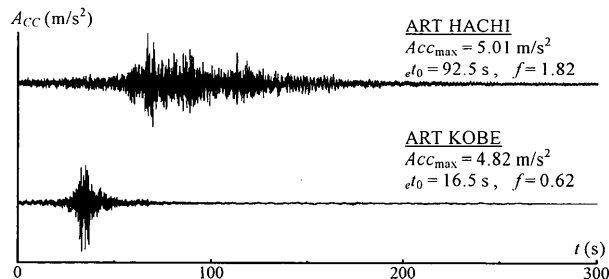


図7 入力地震動の加速度波形

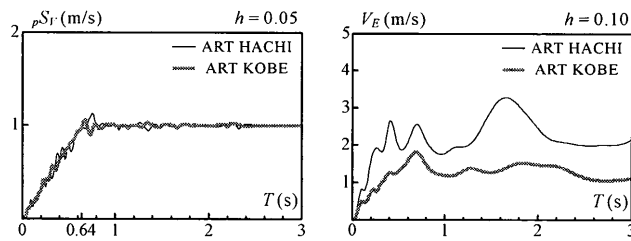


図8 擬似速度応答スペクトル ${}_pS_V$ とエネルギースペクトル $V_E$

す。図7中には最大加速度 $A_{max}$ とともに実効継続時間 $t_0$ <sup>4)</sup>と単位地震動の反復数 $f$ 値<sup>4)</sup>も併せて示す。図8より、ART HACHIは、ART KOBEと比べ、 $V_E$ が最大で2倍程度大きいことが確認できる。

## 3. 等価繰返し数の分析

等価繰返し数 $n_{eqi}$ は、最大変形と累積塑性変形の対応、言い換えればダンパーのエネルギー吸収効率を表す指標であり、エネルギー法において最大応答の予測に用いられる。本章では、応答解析結果の $n_{eqi}$ の傾向

を分析し、既往の評価式との対応について検討する。

### 3.1 高さ方向分布による検討

はじめに、建物モデルごとに  $n_{eqi}$  の高さ方向分布の傾向を把握する。図9に、ダンパー量  $s\alpha_{y2} = 0.10$  における応答解析結果とダンパー降伏耐力  $sQ_{yi}$  の高さ方向分布を示す。応答解析結果は、 $n_{eqi}$ 、最大層間変形  $\delta_{maxi}$ 、ダンパーの塑性歪エネルギー  $sW_{pi}$  について示す。 $n_{eqi}$  は下式より求められる。

$$n_{eqi} = \frac{sW_{pi}}{4sQ_{yi} \cdot (\delta_{maxi} - s\delta_{yi})} \quad (3)$$

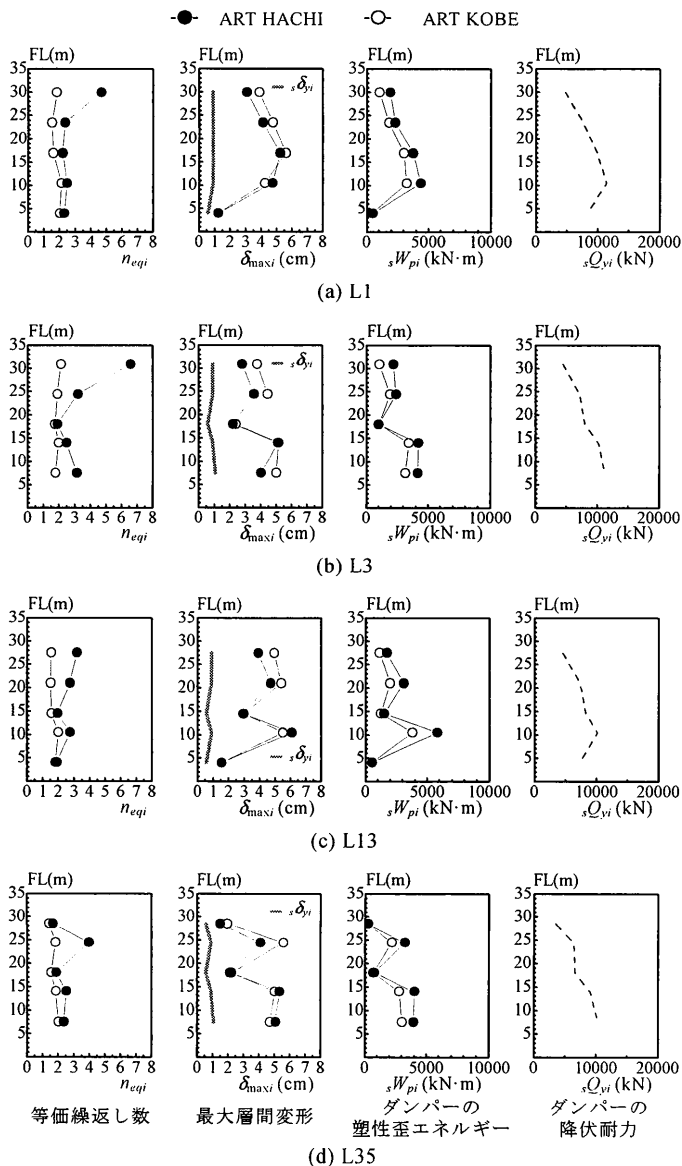


図9 応答解析結果とダンパーの降伏耐力  $sQ_{yi}$  ( $s\alpha_{y2} = 0.10$ )

図9より、ART KOBE と比べ ART HACHI の方が、 $\delta_{maxi}$  が小さく、 $sW_{pi}$  が大きいことで、 $n_{eqi}$  が大きい傾向にある。ART HACHI において、最上層である第5層は、他の層と比べ  $\delta_{maxi}$  および  $sQ_{yi}$  が小さいことで、 $sW_{pi}$  は

大きくないのにも関わらず、 $n_{eqi}$  が最大になっていることがわかる。続いて、 $s\alpha_{y2}$  の変化による傾向を検討する。図10に、L1モデルにおける応答解析結果とダンパー降伏耐力  $sQ_{yi}$  の高さ方向分布を示す。

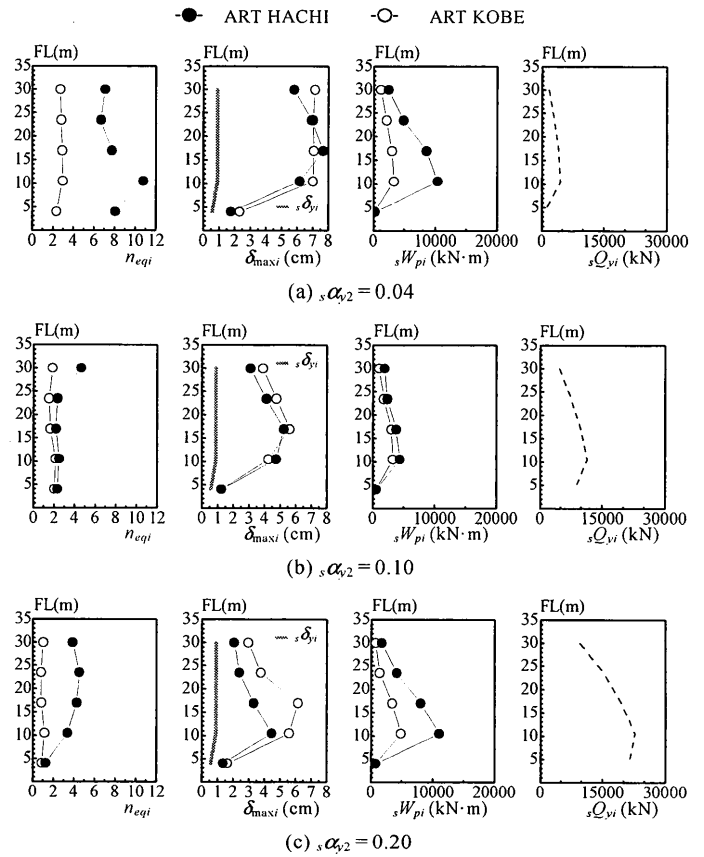


図10 応答解析結果とダンパーの降伏耐力  $sQ_{yi}$  (L1モデル)

図10より、ART KOBE において、 $s\alpha_{y2}$  の増加によって  $n_{eqi}$  が小さくなる傾向が見受けられる。ART HACHI の  $s\alpha_{y2} = 0.20$  において、 $s\alpha_{y2} = 0.10$  と比べ  $n_{eqi}$  が大きい層が存在するのは、エネルギースペクトルとの関係で、 $sW_{pi}$  が2倍程度大きくなったことによる。

### 3.2 主架構とダンパーの負担せん断力比との関係

$n_{eqi}$  は主架構とダンパーの負担せん断力比  $r_{qi}$  との関係式として下式で与えられている<sup>1)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} n_{eqi} &= 1.0 + r_{qi} & r_{qi} < 1.0 \\ n_{eqi} &= 2.0 & r_{qi} \geq 1.0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$r_{qi}$  は下式で定義される。

$$r_{qi} = \frac{fQ_{maxi}}{sQ_{yi}} \quad (5)$$

ここに、 $fQ_{maxi}$ : 主架構の最大せん断力である。図11に、建物モデルごとに分類した  $n_{eqi}$  と  $r_{qi}$  の関係を示す。なお、設計上、エネルギー吸収効率の高い層の損傷を適切に評価することが重要であるため、 $n_{eqi}$  が高い層

に着目し、各ケースごとに全5層の中で  $n_{eqi}$  が最大の層と2番目に大きい層の結果をプロットしている。ただし、図9(a),(b)のように、 $sW_{pi}$  が少ないのにも関わらず、 $n_{eqi}$  が最大となるケースを除外するため、 $sW_{pi}/sW_p$  が0.2以下のものはプロットしない。ここに、 $sW_p$ :ダンパー全層の塑性歪エネルギーである。

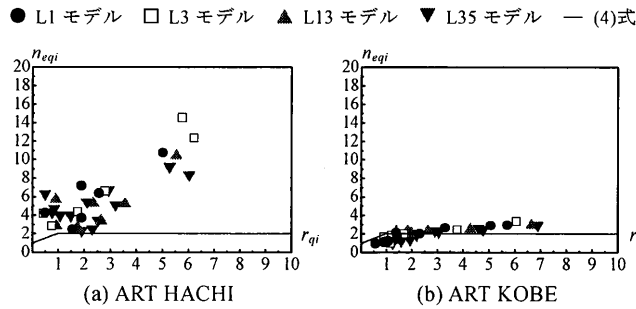


図 11 等価繰返し数  $n_{eqi}$  と負担せん断力比  $r_{qi}$  の関係

図 11 より、建物モデルの違いによる特徴的な傾向はないことがわかる。ART HACHI における  $n_{eqi}$  は、最大で 15 程度と広くばらついて分布している。一方、ART KOBE における  $n_{eqi}$  は、比較的ばらつきが小さく、ほとんどが 2~3 の範囲に集中している。 $r_{qi}$  が小さくなるほど、 $n_{eqi}$  も小さくなる傾向が見られ、図 10 の結果と対応する。(4)式は応答解析結果の下限値とおおむね対応するが、ART KOBE における  $r_{qi} < 3.0$  において、(4)式を下回るプロットが目立つことがわかる。

### 3.3 単位地震動の反復数 $f$ 値を用いた評価

文献 5 では、海溝型地震や直下型地震などの広範な地震動に対応するため、 $n_{eqi}$  を  $f$  値で基準化することで、異なる特性を持つ地震動による  $n_{eqi}$  を評価している。本検討でも同様に、 $n_{eqi}/f$  とすることで  $n_{eqi}$  の傾向を整理する。図 12 に、 $n_{eqi}/f$  と  $r_{qi}$  の関係を示す。

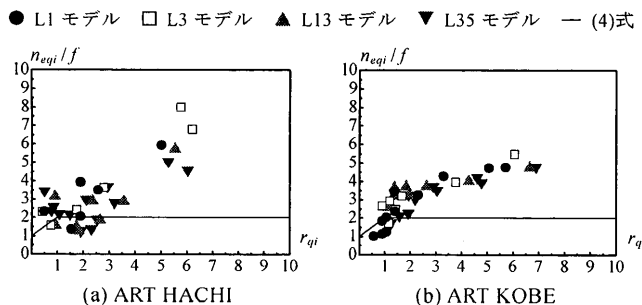


図 12 等価繰返し数  $n_{eqi}$  と負担せん断力比  $r_{qi}$  の関係

図 12 より、図 11 と比べ ART HACHI と ART KOBE による差異は小さくなる傾向にあり、本検討においても  $f$  値の有効性が確認できる。このことから、 $n_{eqi}$  と  $r_{qi}$  の関係式に  $f$  値を導入した下式<sup>5)</sup>を用いることで、本検討においても、異なる地震動による  $n_{eqi}$  の傾向に応

じた評価が行えるものとする。

$$\left. \begin{aligned} n_{eqi} &= 1.0 \\ n_{eqi} &= 1.0 + r_{qi} \cdot (2f - 1) \quad r_{qi} < 1.0 \\ n_{eqi} &= 2.0 \cdot f \quad r_{qi} \geq 1.0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} f &< 0.5 \\ f &\geq 0.5 \end{aligned} \quad (6)$$

## 4. まとめ

本報その 1 では、高さ方向に剛性が不均一な主架構に、主架構の剛性を考慮したダンパーの最適降伏せん断力係数分布  $\overline{\alpha}_i$ <sup>2)</sup> を用いた制振構造を対象に、エネルギー法において最大応答の予測に用いる等価繰返し数  $n_{eqi}$  について検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 高さ方向分布の検討より、ART KOBE (直下型位相の模擬波) と比べ、ART HACHI (海溝型位相の模擬波) の方が  $n_{eqi}$  は大きい傾向にあった。
- (2)  $n_{eqi}$  と  $r_{qi}$  (主架構とダンパーの負担せん断力比) の関係より、 $n_{eqi}$  は、ART HACHI において広くばらつき、ART KOBE において比較的狭い範囲に集中する傾向を確認した。(4)式<sup>1)</sup>は、応答解析結果の下限値とおおむね対応するが、ART KOBE において  $r_{qi} < 3.0$  となると(4)式を下回るプロットが目立った。
- (3)  $n_{eqi}$  を単位地震動の反復数  $f$  値<sup>3)</sup>で基準化することで、ART HACHI と ART KOBE における差異は小さくなる傾向にあり、 $f$  値を導入した(6)式を用いることで、異なる地震動による  $n_{eqi}$  の傾向に応じた評価が行えるものとする。

## 謝辞

本論文は、新日鉄住金エンジニアリング株式会社、東京理科大学北村研究室、東京工業大学佐藤研究室によるエネルギー法研究会の成果の一部を用いたものです。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1999.11
- 2) 渋谷政斗，佐藤大輔，佐藤利昭，北村春幸，山路口夫，脇田直弥，綿貫雄太：主架構との剛性比が各層で異なる履歴ダンパーの最適強度分布に関する検討 その 1：最適強度分布の導出と検証，日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(構造 II)，pp.677-678，2014.9
- 3) 佐伯栄一郎，前田泰史，中村秀司，緑川光正，和田章：実大アンボンドブレースに関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 476 号，pp.149-158，1995.10
- 4) 秋山宏，北村春幸：エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応，日本建築学会構造系論文集，第 608 号，pp.37-43，2006.10
- 5) 佐藤大輔，北村春幸，佐藤大樹，佐藤利昭，山路口夫，脇田直弥，綿貫雄太：履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した制振構造のエネルギーの釣合に基づく応答予測法，日本建築学会構造系論文集，第 699 号，pp.631-640，2014.05

\*1 東京理科大学 \*2 東京工業大学

\*3 新日鉄住金エンジニアリング株式会社