

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	架構応答に弾性, 弾塑性が混在する場合の制振構造建物のエネルギー配分に関する研究 その1 エネルギー配分手法の提案と等価繰返し数の検討
Title	
著者(和文)	松澤祐介, 佐藤大輔, 佐藤大樹, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥, 松蔭知明
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, Michio Yamaguchi, Naoya WAKITA
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 82, No. ,
Citation(English)	, Vol. 82, No. ,
発行日 / Pub. date	2012, 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: http://ci.nii.ac.jp/naid/110009571487

架構応答に弾性、弾塑性が混在する場合の制振構造建物のエネルギー配分に関する研究

(その1: エネルギー配分手法の提案と等価繰返し数の検討)

構造-振動

正会員 ○松澤祐介^{*1} 準会員 佐藤大輔^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*1}

鋼構造建物 履歴型ダンパー エネルギーの釣合

// 北村春幸^{*1} // 山小路夫^{*2} // 脇田直弥^{*2}

エネルギー配分 時刻歴解析 等価繰返し数

// 松蔭知明^{*2}

1. はじめに

エネルギーの釣合から構造物の耐震性を論じようとする試みは、棚橋、Housner らによって提案された。その後、秋山は、弾性挙動をする主架構（柔要素）と弾塑性挙動をするエネルギー吸収部材（剛要素）の柔剛混合構造において、エネルギーの釣合に基づく応答予測法（以後、エネルギー法と呼ぶ）を示している¹⁾。さらに北村らは、制振構造において、主架構降伏後は、柔要素（弾性要素）が消滅するため、耐震構造と同様になるという考え方の基に、秋山が提唱したエネルギー法を、主架構が塑性化する場合にまで拡張している²⁾。このエネルギー法を扱う上では、主架構が弾性である状態と主架構が塑性している状態の2つに区別をすることが必要である。

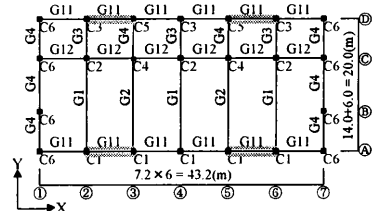
そこで本報その1では、架構応答に弾性、弾塑性が混在する場合でのエネルギー配分の手法を提案する。さらに、本配分手法の妥当性を、時刻歴解析に基づく等価繰返し数を用いて検証する。

その2では、その1で妥当性を示した、時刻歴解析におけるエネルギー配分と2005年に告示として公布、制定されたエネルギー法告示でのエネルギー配分を比較し、エネルギー法告示における耐震設計フローを検証する。

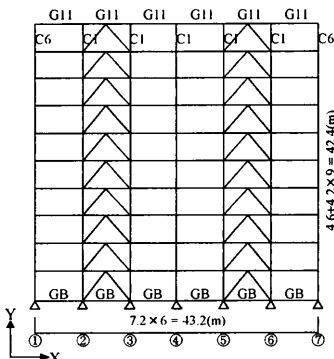
2. 検討対象建物、及び入力地震動の概要

2.1 検討対象建物の概要

検討対象建物は、10階建てを対象とし、高さ42.4m、(1階4.6m、2~10階4.2m)、長辺方向(X方向)7.2m×6スパン=43.2m、短辺方向(Y方向)14.0m+6.0m=20.0mの鋼構造建物とし、鋼材は大梁にSN490、小梁にSN400を用いる。図1(a)、(b)に対象建物の基準階伏図と軸組図を示す。なお、本報での解析対象は、X方向とする。主架構での固有周期は、2.01(s)である。本報では、柱、大梁にSN490、小梁にSN400を用いたモデルをtypeA、柱、大梁、小梁の降伏耐力の値を半分にしたモデルをtypeBと呼ぶ。制振建物は、ダンパーを図1(a)に示す位置に1層あたり8基付与したモデルとする。なお、ダンパーの軸材にLY225材を用いた座屈拘束ブレースを使用する。ダンパー降伏耐力の高さ方向



(a) 基準階伏図 — ダンパー設置位置



(b) ①、④通り軸組図

図1 検討対象建物 単位(m)

表1 部材断面一覧

	符号	断面
外柱	C6	□-500×500×16~19
内柱	C1	□-500×500×16~32
梁 (X方向)	G11	H-600×250×12×22~25
梁 (Y方向)	G11	H-600×250×12×22~25

分布は、A_i分布に基づく設計用層せん断力Q_iの分布に従って決定する。本報での1層のダンパーの降伏層せん断力Q_{y1}は、下式で求められる。

$$Q_{y1} = \alpha_{y1} \sum_{i=1}^N m_i \cdot g \tag{1}$$

ここに、 α_{y1} :ダンパーの降伏層せん断力係数、N:全層数、 m_i :i層の質量、g:重力加速度である。また、本研究で用いる座屈拘束ブレースは、塑性化部と弾性部で構成される。本解析では、ダンパーを1要素(一様断面)でモデル化した³⁾。減衰は主架構の f_{T1} に対して $h=2\%$ となる剛性比例型とし、主架構のみに与えた。また、特に記載がない限り、主架構は弾塑性設定とする。

2.2 入力地震動の概要

解析に用いる入力地震動は、コーナー周期 $T_c = 0.64(s)$ 以降の領域で、 $S_1 = 200 \text{ cm/s}$ ($h=5\%$)となる位相特性HACHINOHE 1968 EW(以下ART HACHI)と最大速度を100 cm/sに基準化した位相特性El Centro1940NS(以下El Centro)模擬地震動を用いる。また図2(a)、(b)にそれぞれの速度応答スペクトルとエネルギースペクトルを示す。

3. 主架構の復元力特性

主架構のみの静的増分解析における各層の $Q-\delta$ の関係から、完全弾塑性型のせん断モデルを作成する。式(2), (3)から、 W_i :増分法より求めた i 層の履歴曲線の面積と、せん断モデルにおける i 層の復元力特性の履歴面積が等しくなるように、主架構の降伏耐力 $f\delta_{yi}$ を設定する。

$$f\delta_{yi} = f\delta_{ui} \pm \sqrt{f\delta_{ui}^2 - \frac{2W_i}{fK_{ei}}} \quad (2)$$

$$fK_{ei} = \frac{fQ_{ei}}{f\delta_{ei}} \quad (3)$$

ここに、 $f\delta_{ui}$:終局時の i 層の変形である。本報では、プッシュオーバー限界時を終局と定義した。ただし、 $0 < f\delta_{yi} < f\delta_{ui}$ とする。
 fK_{ei} :主架構の i 層の1次剛性、 fQ_{ei} 、 $f\delta_{ei}$:架構全ての部材が弾性範囲での、ある状態の i 層の主架構のせん断力と層間変形である。設定したせん断モデルの主架構の降伏耐力 $f\delta_{yi}$ 、 $f\delta_{yi}$ を、表2にそれぞれ示す。制振構造でのせん断モデルは、ダンパーの実効変形を考慮した実効せん断型モデル³⁾を採用する。

4 主架構の塑性化に伴うエネルギー配分

1章でも述べたように、主架構が塑性化する場合において、エネルギー法では、主架構の塑性化の有無による塑性歪エネルギーの配分が、重要な基点となる。そこで本章では、架構応答に弾性、弾塑性が混在する場合での全体架構 (= 主架構 + ダンパー) が吸収する塑性歪エネルギー W_{pi} (= $fW_{pi} + aW_{pi}$) の配分手法を提案する。図4に、主架構及びダンパーのエネルギー配分を示す。 i 層において、主架構が塑性化していない制振構造と見なせる状態を状態1と定義し、その時に全体架構が吸収した i 層の塑性歪エネルギーを ${}_1W_{pi}$ 、等価繰返し数を ${}_1n_i$ とする。また、主架構が塑性化していて耐震構造と見なせる状態を状態2と定義し、その時に全体架構が吸収した i 層の塑性歪エネルギー

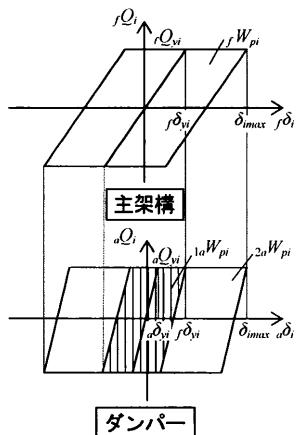


図4 状態1, 2のエネルギー配分

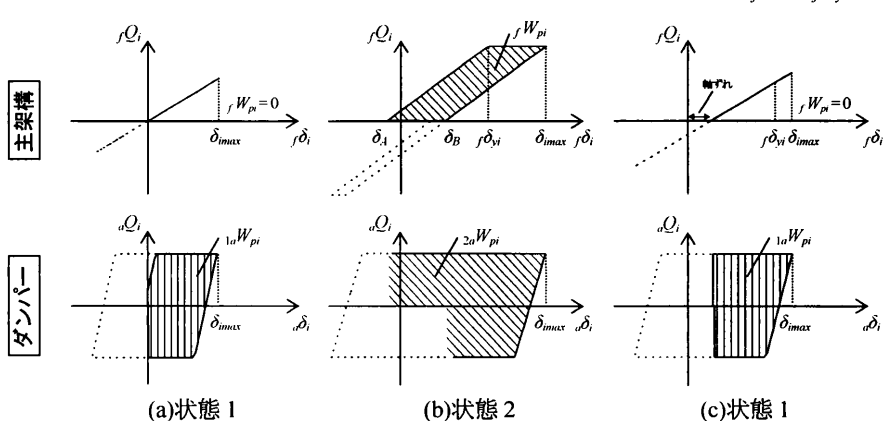


図5 状態1, 2での半ループ

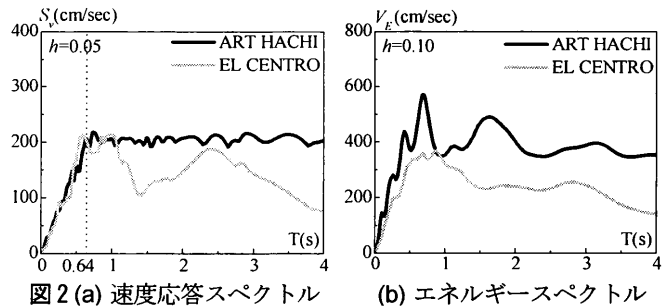


表2 主架構の降伏耐力と降伏変形

FL	typeA		typeB		共通
	fQ_{ei} (KN)	$f\delta_{ei}$ (cm)	fQ_{ei} (KN)	$f\delta_{ei}$ (cm)	
10	6169	2.41	3084	1.20	9062
9	8866	3.46	4433	1.73	6487
8	11026	4.22	5513	2.11	6493
7	13195	4.94	6598	2.47	6516
6	14757	5.39	7378	2.69	6520
5	16140	5.76	8070	2.88	6529
4	17284	6.03	8642	3.01	6538
3	18228	6.09	9114	3.04	6552
2	18996	5.82	9498	2.91	6575
1	19578	4.13	9789	2.06	6639

ギーを ${}_2W_{pi}$ 、等価繰返し数を ${}_2n_i$ とする。状態1で i 層のダンパーの塑性歪エネルギーを ${}_1aW_{pi}$ (= ${}_1W_{pi}$)、状態2で i 層のダンパーの塑性歪エネルギーを ${}_2aW_{pi}$ とする。最終的にダンパーが吸収した i 層の塑性歪エネルギー ${}_aW_{pi}$ は、 ${}_1aW_{pi}$ と ${}_2aW_{pi}$ の和で表される。 ${}_2aW_{pi}$ と主架構の塑性歪エネルギー ${}_fW_{pi}$ の和を、 ${}_2W_{pi}$ (= ${}_2aW_{pi} + {}_fW_{pi}$) とし、 ${}_1W_{pi}$ 、 ${}_2W_{pi}$ と弾性振動エネルギー (${}_fW_{ei} + {}_aW_{ei}$) との和が、 i 層の損傷に寄与するエネルギー E_{Di} ²⁾ となる。なお、時刻 t における、 i 層のエネルギーの釣合式は、次式で表される。

$${}_fW_{ei}(t) + {}_fW_{pi}(t) + {}_aW_{ei}(t) + {}_1aW_{pi}(t) + {}_2aW_{pi}(t) = E_{Di}(t) \quad (4)$$

以下に、せん断モデルによる時刻歴解析から、 ${}_1aW_{pi}$ 、 ${}_2aW_{pi}$ を算出する方法を述べる。本報では、主架構のせん断力 fQ_i が0となる半ループより求めた ${}_fW_{pi}$ の有無により状態1, 2を判定し、図5に示すように、それと同時刻の ${}_aW_{pi}$ を ${}_1aW_{pi}$ 又は ${}_2aW_{pi}$ に分配する。図5(a)は、状態1、(b)は、状態2、(c)は、軸中心位置のずれが発生した場合を示しており、この場合、 $f\delta_i$ が $f\delta_{yi}$ を超えて

も、主架構は弾性応答となるために状態1となる。ここに、 $\delta_{i\max}$: 軸中心位置のずれを考慮していない半ループでの最大層間変形、 δ_A, δ_B : 主架構の層せん断力が0となる時の変形 ($\delta_A < \delta_B$) である。なお、それぞれの図中の点線は、実線の1つ後の半サイクルを表している。

図6に、地震終了時の $1aW_{pi}$ 、 $2aW_{pi}$ と fW_{pi} の高さ方向での関係を示す。図6(a),(b)より、 α_{y1} の値が大きくなるにつれ、主架構の塑性化度合いが小さくなり、 E_{Di} に対し fW_{pi} の割合が小さくなることを確認できる。また図6(a),(c)より、全体的にtypeBでは、主架構の降伏耐力の大きいtypeAと比較して fW_{pi} の割合が大きくなり、 $2aW_{pi}$ の割合も増加することが確認できる。

5 等価繰返し数 $1n_i, 2n_i$ の検証

5.1 $1n_i, 2n_i$ の算出法

ダンパーと主架構の復元力特性が、2次剛性を0とする完全弾塑性型のため(図4)、ダンパーと主架構が塑性すると、軸中心位置のずれた振動となりやすい(図5(c))。その場合、等価繰返し数をより精度高く評価するため、軸中心位置のずれを考慮した最大層間変形を用いる必要がある。状態1, 2での $1n_i, 2n_i$ の算出式を式(5), (6)に示す。

$$1n_i = \frac{1W_{pi}}{4 \cdot aQ_{yi} \cdot (f\delta'_{yi} - a\delta_{yi})} \quad (f\delta_{yi} \leq \delta_{i\max}) \quad (5a)$$

$$1n_i = \frac{1W_{pi}}{4 \cdot aQ_{yi} \cdot (\delta'_{i\max} - a\delta_{yi})} \quad (f\delta_{yi} > \delta_{i\max}) \quad (5b)$$

$$2n_i = \frac{2W_{pi}}{4 \cdot (fQ_{yi} + aQ_{yi}) \cdot (\delta'_{i\max} - f\delta_{yi})} \quad (6)$$

ここに、 $aQ_{yi}, a\delta_{yi}$: ダンパーの降伏耐力と降伏変形、 $\delta'_{i\max}$: 軸中心位置のずれを考慮した半ループの最大層間変形であり、次式で表される。

$$\delta'_{i\max} = \delta_{i\max} - \frac{\delta_A + \delta_B}{2} \quad (7)$$

5.2 耐震構造、制振構造での $1n_i, 2n_i$ の比較

本節では、前節で求めた $1n_i, 2n_i$ を、主架構を弾性とした制振モデル(以後、制振弾性モデル)の等価繰返し数 $1n'_i$ と主架構(完全弾塑性)のみ(以後、耐震モデル)の等価繰返し数 $2n'_i$ を比較し、4章で示したエネルギー配分の妥当性を検証する。 $1n'_i$ 及び $2n'_i$ は、式(8)及び(9)により得られる。

$$1n'_i = \frac{1W_{pi}}{4 \cdot aQ_{yi} \cdot (\delta'_{i\max} - a\delta_{yi})} \quad (8)$$

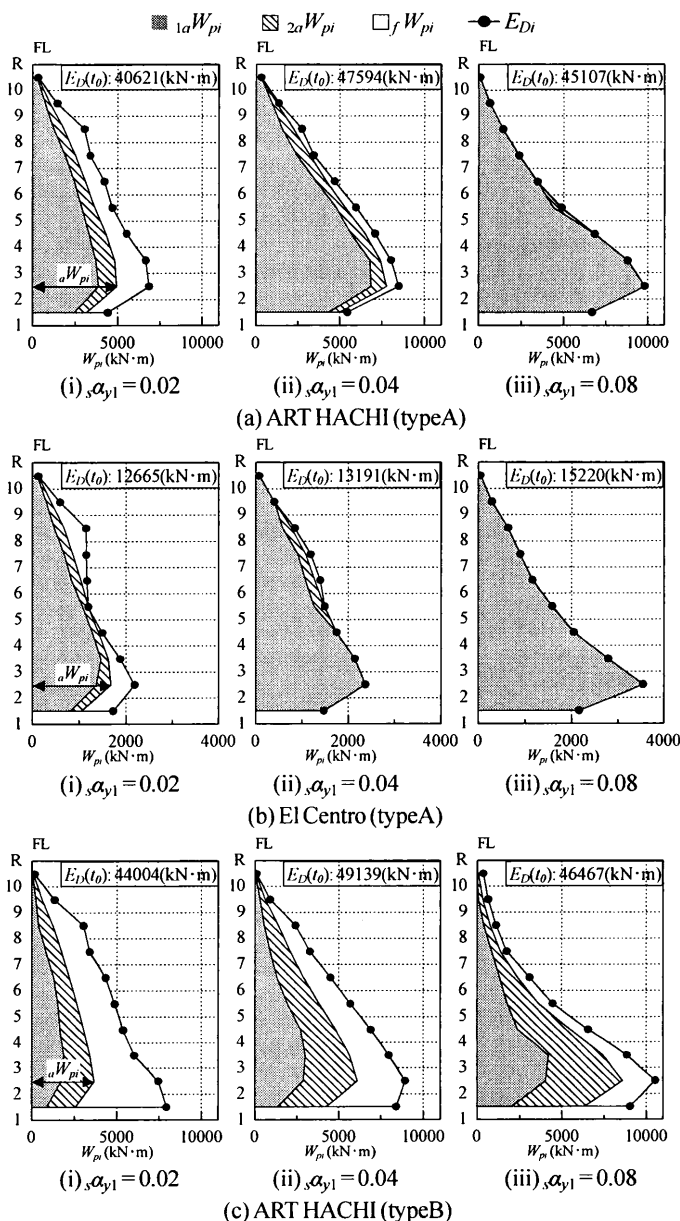


図6 高さ方向でのエネルギー分布

$$2n'_i = \frac{2W_{pi}}{4 \cdot fQ_{yi} \cdot (\delta'_{i\max} - f\delta_{yi})} \quad (9)$$

$1n_i, 2n_i$ と $1n'_i, 2n'_i$ をそれぞれ比較した結果を図7に示す。(a)にはART HACHI (typeA), (b)にはEl Centro (typeA), (c)にはART HACHI (typeB)の結果である。はじめに、図7(i)の $1n_i$ について検証する。図7(a)での $\alpha_{y1}=0.02$, (b)での $\alpha_{y1}=0.08$, (c)での $\alpha_{y1}=0.02$ の場合で、 $1n_i$ と $1n'_i$ の値で傾向に多少違いがあるものの、全体的に各ダンパー量で、同様の値を示すことが確認できた。 α_{y1} の値が大きくなる程、 $1n_i$ の値は小さくなる傾向も一致する。また、 α_{y1} の値が大きくなる程、主架構の塑性化の程度が小さくなるため、 $\alpha_{y1}=0.08$ の $1n_i$ と $1n'_i$ が一致していることが分かる。図7(a)と(b)で、同じダンパー量で比較すると、地震波の違いにより、 $1n_i$ の値が異なることが分かる。

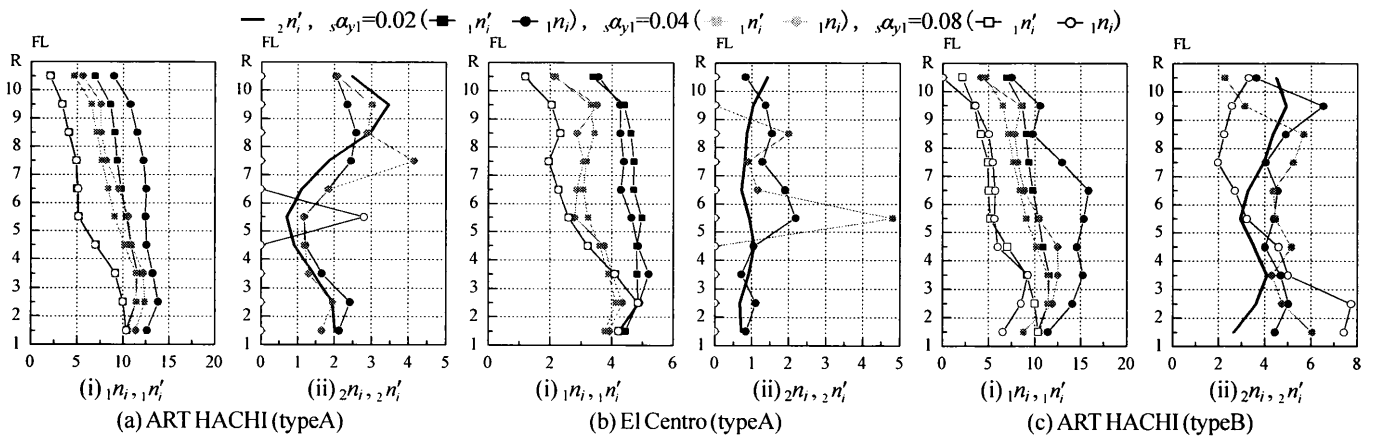


図7 等価繰返し数 n_1, n_2 の検討

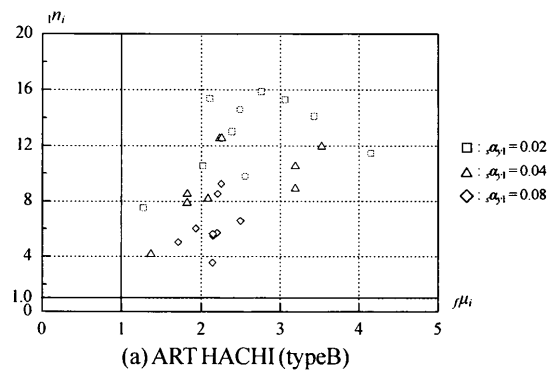
次に、図7(ii)の n_2 について検証する。いくつかの層で、 n_2 の値が、 n_2' と比べて大きくなっているが、全体的に、 n_2' と n_2 で、同様な傾向を示していることが確認できる。以上より、4章で示した手法は、概ね妥当であると言える。

次に、 n_1 と $f\mu_1$ の関係について述べる。図8に、 n_1 と $f\mu_1$ の関係を示す。(a)には、ART HACHI (typeB)、(b)には、El Centro (typeB) の結果である。図8(a)の ART HACHI (typeB)では、 $f\mu_1$ の値が大きくなるにつれ、 n_1 の値も大きくなっている。それに対して、(b)El Centro (typeB)では、 $f\mu_1$ の値が大きくなるにつれ、 n_1 の値が、概ね一定であり、 n_1 と $f\mu_1$ の関係は、地震波により異なることを確認した。

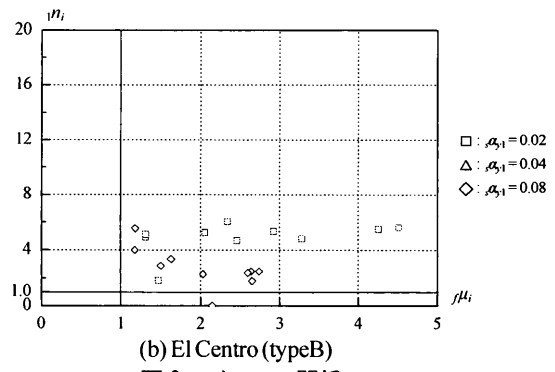
6 まとめ

本報では、架構応答に弾性、弾塑性が混在する場合でのエネルギー配分を提案した。さらに、一般的な耐力を要するモデル (typeA) と耐力を半分にしたモデル (typeB) を用いて、エネルギー配分を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 架構応答に弾性、弾塑性が混在する場合での全体架構が吸収する塑性歪エネルギーの配分手法を提案した。また、その配分手法を用いた、高さ方向分布では、typeA では、ダンパー量が大きくなるにつれ、建物の損傷に寄与するエネルギーに対する主架構弾性時におけるダンパーの塑性歪エネルギーの占める割合が大きくなることを確認した。typeA と typeB を比較すると、typeB は主架構の塑性歪エネルギーの割合が大きくなり、主架構塑性時におけるダンパーの塑性歪エネルギーの割合も増加することを確認した。
- (2) エネルギー配分と軸中心位置のずれを考慮した最大層間変形の二つを用いた等価繰返し数の算出方法を示し、主架構を弾性とした制振モデル及び耐震モデルの等価繰返し数を比較することで、本報で示したエネルギー配分手法の妥



(a) ART HACHI (typeB)



(b) El Centro (typeB)

図8 n_1 と $f\mu_1$ の関係

当性を示した。

- (3) 主架構弾性時のダンパーの等価繰返し数と主架構の塑性率を比較し、検証すると、双方の関係は、地震波により異なることを確認した。

謝辞

本研究は、新日鉄エンジニアリング株式会社、東京理科大学によるエネルギー法研究会の成果の一部である。

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，技術堂出版，1999.11
- 2) 北村春幸，財津和廉，馬谷原伴恵：主架構の塑性化を考慮した制振構造物のエネルギーの釣合に基づく応答評価，日本建築学会関東支部研究報告集，2006.1，pp.341-344，2010年度日本建築学会関東支部研究報告集，pp.341-344，
- 3) 栗林晃司，佐藤大樹，北村春幸，山口路夫，西本晃治：実効変形を考慮した履歴減衰型制振部材を有する鋼構造物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76巻，第661号，543-552p，2011.3

*1 東京理科大学

*2 新日鉄エンジニアリング株式会社