

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	座屈拘束ブレースの疲労損傷度に影響を与える平均歪みの導出
Title(English)	
著者(和文)	高橋真人, 植木卓也, 佐藤利昭, 北村春幸, 宮川和明, 佐藤大樹
Authors(English)	Takuya Ueki, Toshiaki Sato, Haruyuki Kitamura, Kazuaki Miyagawa, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 561-564
Citation(English)	, , , pp. 561-564
発行日 / Pub. date	2016, 3

座屈拘束ブレースの疲労損傷度に影響を与える平均歪みの導出

構造—振動

疲労損傷度 中低層建物

時刻歴応答解析 履歴減衰型ダンパー

正会員 ○ 高橋真人<sup>\*1</sup> 同 植木卓也<sup>\*2</sup> 同 佐藤利昭<sup>\*1</sup>  
正会員 北村春幸<sup>\*1</sup> 同 宮川和明<sup>\*3</sup> 同 佐藤大樹<sup>\*4</sup>

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震以降、建物を早期に復旧させて継続的に使用する必要性が高まり、建物には高い耐震性能が要求されている。高耐震化を図る手立ての1つに、地震動による入力エネルギーをダンパーに集中させる制振構造が挙げられ<sup>1)</sup>、現在では多くの建物に適用されている。一方、想定を上回る地震動の発生を受け、近年では強震動予測による地震動の見直しが進められ、南海トラフを震源とする東海、東南海、南海地震、およびそれらの連動地震に代表される長周期地震動の発生が懸念されている<sup>2)</sup>。これらの想定地震動は、これまでの設計用外力を上回るものであり<sup>3)</sup>、制振構造の要となるダンパーの変形増大による破断よりも、地震動の繰返し入力による疲労損傷が破断に大きく影響を与える可能性があり、今後において疲労損傷度の評価が重要になると考える。

筆者らはこれまで入力地震動であるランダム波形をエネルギー等価な一定振幅波形に置き換えた等価平均歪みによる座屈拘束ブレースの疲労損傷度評価法を提案し、地震動加力実験結果を用いることでその妥当性を確認してきた<sup>4),5)</sup>。しかし、上記の評価法により疲労損傷度を算出する場合は応答波形を振幅に分解する作業が必要不可欠であり、それに伴い検討が煩雑になってしまうことが問題となっている。

そこで、本報ではより簡易的に疲労損傷度を評価することを目的として、ダンパーの疲労損傷度に影響を与える平均歪み振幅を導出する方法を提案する。

2. 検討対象建物及び解析用入力地震動概要

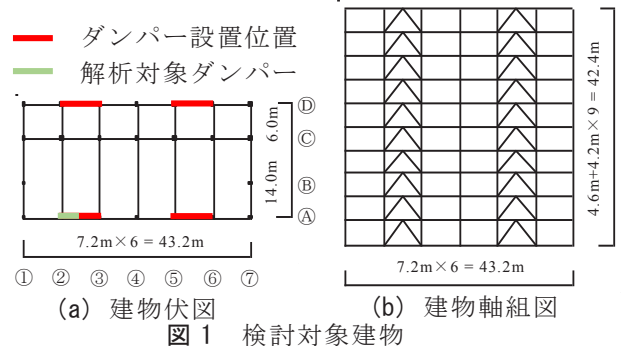
2.1 検討対象建物

検討対象建物は図1に示す10層の鋼構造建物とし、地上10階、高さが42.4m(1階4.6m, 2~10階4.2m)、長辺方向が43.2m(7.2m×6スパン)、短辺方向が14.0m+6.0m=20.0m<sup>6)</sup>、主架構のみの場合における1次固有周期 $T_1$ は2.0sである。ダンパーは軸材にLY225材を用いた履歴減衰型ブレースを採用し、長辺方向に各層8基設置している。本解析では、ダンパーを弾性部、塑性化部を含めた1要素でモデル化している<sup>7)</sup>。ダンパーの種類は2種類を想定し、ダンパーの塑性化部長さ $L_p$ を柱梁芯間長さの1/3(タイプA)と1/2(タイプB)

に設定した。ダンパー弾性時における建物の1次固有周期は $T_{1A}=1.77s$ (タイプA)、 $T_{1B}=1.80s$ (タイプB)である。第*i*層のダンパー1本分の降伏軸力 $dN_{yi}$ は $A_i$ 分布に基づき、

$$dN_{yi} = \frac{dQ_{yi}}{n \cdot \cos\theta_i} \quad dQ_{yi} = d\alpha_y \times Mg \times \frac{Q_i}{Q_1} \quad (1-a,b)$$

として決定した。ここで、 $dQ_{yi}$ :第*i*層のダンパー水平方向降伏層せん断力、 $n$ :ダンパー本数、 $\theta_i$ :第*i*層ダンパーの取付け角度、 $d\alpha_y$ :ダンパーの降伏層せん断力係数、 $M$ :建物全質量、 $g$ :重力加速度、 $Q_i$ : $A_i$ 分布に基づく第*i*層の層せん断力である。以降、ダンパーの降伏層せん断力係数 $d\alpha_y$ をダンパー量と呼ぶ。本報ではダンパー量 $d\alpha_y$ を0.01に設定し、検討対象ダンパーは図1に緑線で示すように、A通り2,3間の外側のダンパーとする。時刻歴応答解析は各検討対象建物の長辺方向のみを対象とし、主架構を弾性とする。



2.2 解析用入力地震動

本報における入力地震動は、1940年Imperial Valley地震における観測波(El Centro)、1968年十勝沖地震における観測波(HACHINOHE)、1952年Kern County地震における観測波(Taft)、2011年東北地方太平洋沖地震における築館地方での観測波(MYG004)、1995年兵庫県南部地震における観測波(JMAKOBÉ)、十勝沖地震を位相特性として、コーナー周期 $T_c=0.64s$ 以降の擬似速度応答スペクトル $pS_v$ が80cm/sで一定となる告示波(ART-HACHI)、兵庫県南部地震を位相特性として、 $T_c=0.64s$ 以降の $pS_v$ が80cm/sで一定となる告示波(ART-KOBE)、MYG004の加速度入力倍率を2倍にした地震波(MYG004\_2)の計8種類を採用した。図2に入力地震動の擬似速度応答スペクトル $pS_v$ (減衰定数 $h=5\%$ )とエネルギースペクトル $V_E(h=10\%)$ を示す。

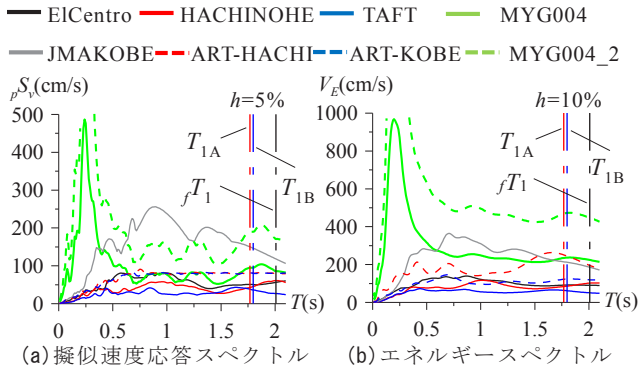


図2 解析用入力地震動のスペクトル

### 2.3 時刻歴応答解析によるダンパーの応答

各地震動が建物に入力された時の応答結果として、ダンパーの最大片振幅歪み  $\varepsilon_{\max}$  を図3に、累積塑性変形倍率  $\eta$  を図4にダンパーのタイプ毎に示す。ダンパーの片振幅歪み  $\varepsilon$  とダンパーの累積塑性変形倍率  $\eta$  は、

$$\varepsilon = \frac{d \delta_{ai}}{L_p} \quad \eta = \frac{W_p}{d N_{yi} \cdot d \delta_{yi}} \quad (2-a,b)$$

と示される。ここで、 $d \delta_{ai}$ : 第  $i$  層ダンパーの軸方向変位、 $L_p$ : ダンパーの塑性化部長さ、 $W_p$ : ダンパーの累積塑性歪みエネルギー、 $d \delta_{yi}$ : 第  $i$  層ダンパーの軸方向降伏変位である。図より、JMAKOBE 入力時を除き、ダンパーの最大片振幅歪み  $\varepsilon_{\max}$  と累積塑性変形倍率  $\eta$  に共通して第2、第3層にて応答が最大値をとっていることがわかる。また、ダンパーのタイプにより応答値が異なり、最大で1.5倍程度変わることが確認できる。

- ElCentro
- HACHINOHE
- TAFT
- MYG004
- JMAKOBE
- ART-HACHI
- ART-KOBE
- MYG004\_2

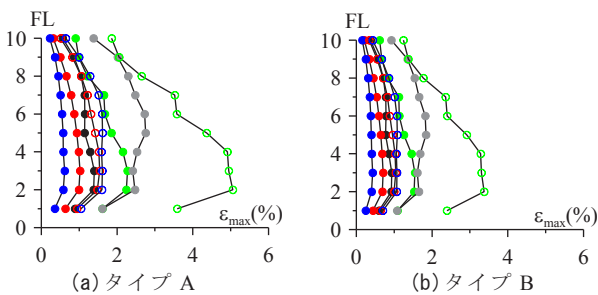


図3 ダンパーの最大片振幅歪み

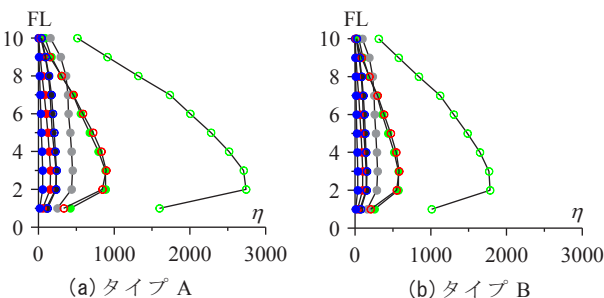


図4 ダンパーの累積塑性変形倍率

### 3. ダンパーの疲労損傷度評価方法

本章では、次章で用いる疲労損傷度の評価方法であるマイナー則<sup>4)</sup>とエネルギー等価法<sup>4)</sup>について説明し、本報での検討項目について述べる。

#### 3.1 マイナー則による疲労損傷度評価

マイナー則による疲労損傷度評価において、疲労に影響を与える歪みの振幅をダンパーの応答波から算出する方法として、レインフロー法<sup>8)</sup>を用いる。レインフロー法により地震動の波形を個々の半波長の振幅に分解し、それぞれの歪み振幅  $\Delta \varepsilon_i$  に対する限界繰返し回数  $N_{cri}$  を算出する。 $1/2N_{cri}$  を半波長あたりの疲労損傷度としたとき、半波長数  $N$  の地震動入力1回に対する疲労損傷度  $D_m$  は、

$$D_m = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta \varepsilon_i}{\alpha} \right)^{-\beta} \quad N_{cri} = \left( \frac{\Delta \varepsilon_i}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3-a,b)$$

と示される。ここで、 $N_{cri}$ : 限界繰返し数、 $\Delta \varepsilon_i$ : 全歪み振幅(%),  $\alpha = 15.83$  (タイプ A),  $\alpha = 8.724$  (タイプ B),  $\beta = -0.44$  (タイプ A),  $\beta = -0.33$  (タイプ B) である<sup>4), 9)</sup>。なお、歪み振幅が弾性歪み範囲 ( $\Delta \varepsilon \leq 0.22\%$ ) のものは除いている。

#### 3.2 エネルギー等価法による疲労損傷度評価

エネルギー等価法とは、図5に示すように、地震動波形を総エネルギー吸収量が等しく、かつ波形分解して得られた歪み振幅を平均歪み振幅とする一定振幅とみなして評価する方法であり、疲労損傷度  $D_{eq}$  は、

$$D_{eq} = \left( \frac{n_{eq}}{N_{cri}} \right) \quad n_{eq} = \left( \frac{W_p}{W_{peq}} \right) \quad (4-a,b)$$

$$W_{peq} = 4 \cdot d N_{yi} \cdot (\varepsilon_{eq} - \varepsilon_y) \cdot L_p \quad (4-c)$$

と示される。ここで、 $n_{eq}$ : 等価繰返し数、 $W_{peq}$ : 1波長あたりの累積塑性歪みエネルギー、 $\varepsilon_{eq}$ : 平均歪み、 $\varepsilon_y$ : 降伏歪みである。エネルギー等価法は総エネルギー吸収量と平均歪み  $\varepsilon_{eq}$  を求めることで疲労損傷度  $D_{eq}$  を算出することができる。しかし、従来の方法の場合<sup>4)</sup>、波形分解した歪み振幅の単純累加平均値を平均歪み  $\varepsilon_{eq}$  としており、波形分解法を必要としていた。そこで次章より、波形分解法を用いずにマイナー則による評価と同様な結果になるような平均歪み  $\varepsilon_{eq}$  を算出する方法の提案を行う。

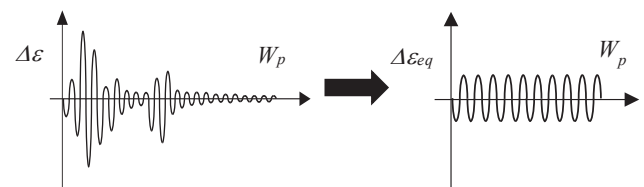


図5 エネルギー等価法の考え方

#### 4. 簡易的な平均歪みの導出

簡易的にダンパーの平均歪み  $\varepsilon_{eq}$  を導出する方法として、前章の(4)式に着目する。総エネルギー吸収量が既知であり、マイナー則により算出した疲労損傷度  $D_m$  が正解値であるという仮定のもとで、(4-c)式中の平均歪み  $\varepsilon_{eq}$  を逐次変化させ、エネルギー等価法により算出した疲労損傷度  $D_{eq}$  が  $D_m$  と等しくなる  $\varepsilon_{eq}$  を求めた。図6にタイプA、図7にタイプBのダンパーの疲労損傷度と平均歪み  $\varepsilon_{eq}$  の関係を入力地震動毎に示す。図6、図7より、JMAKOBEやART-KOBEのような入

力レベルが大きい直下型の地震動がダンパーに入力された場合、各層の疲労の度合いがほぼ類似していることがわかる。一方、MYG004やART-HACHIのような入力レベルの大きい長周期地震動や、それ以外の入力レベルの小さい地震動がダンパーに入力された場合、各層によって疲労の度合いが異なり、ばらつきが生じている。また、ダンパーの種類によっても疲労の度合いが大きく異なっていることがわかる。次に、図6、図7中に赤丸で示した、各疲労損傷度  $D_{eq}$  と  $D_m$  が最初に一致 ( $D_{eq}/D_m=1.0$ ) した層のダンパーにおける

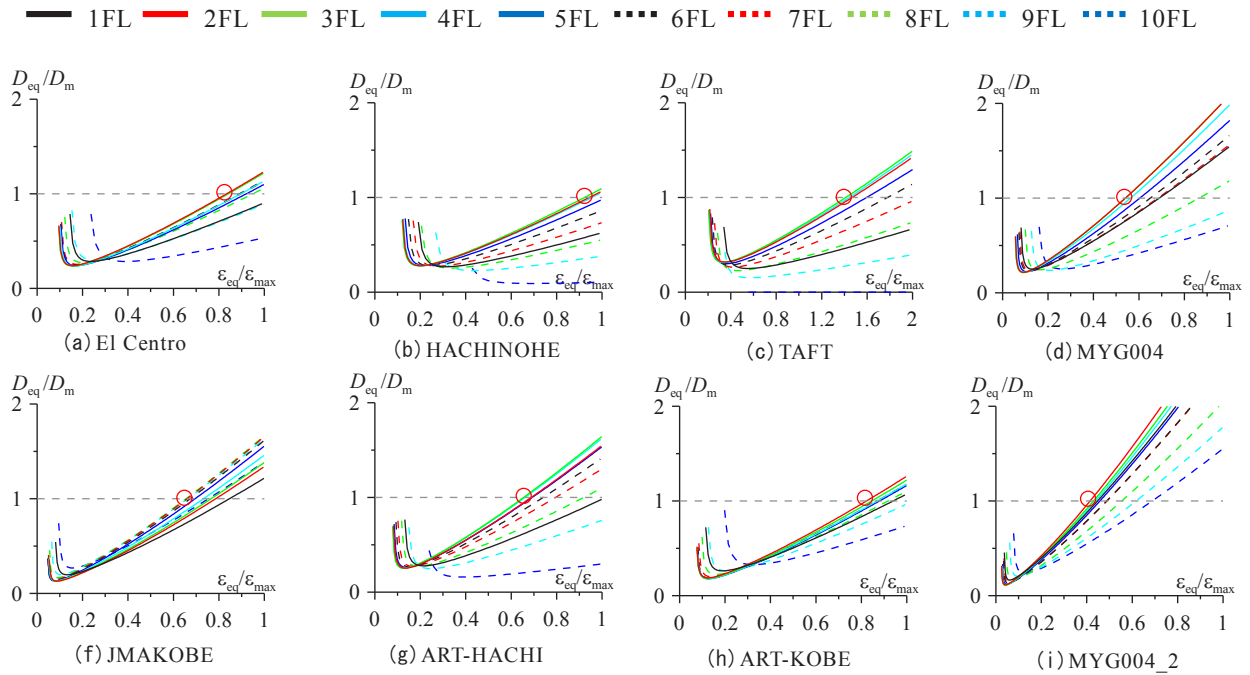


図6 疲労損傷度と平均歪みの関係(タイプA)

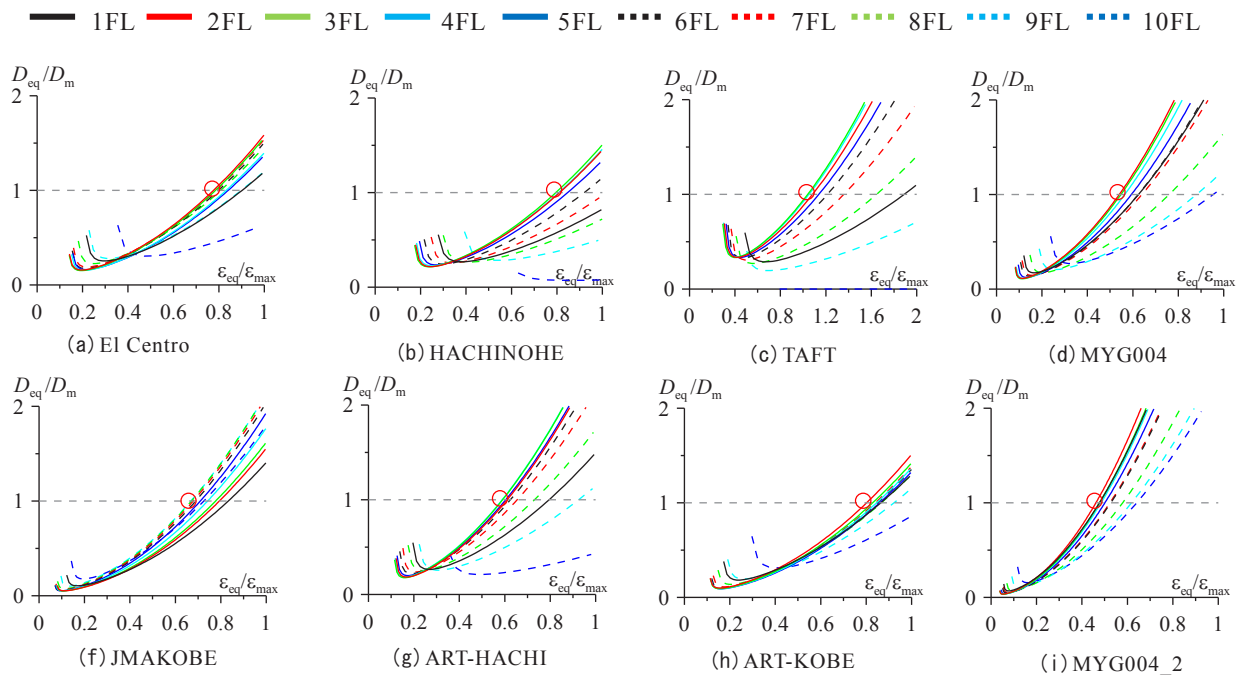


図7 疲労損傷度と平均歪みの関係(タイプB)

$\epsilon_{eq}/\epsilon_{max}$  の値を表 1 に示す。図 6 と図 7 にて、ダンパーの種類により疲労の度合いは大きく異なっていたが、TAFT 入力時を除き、表 1 の  $\epsilon_{eq}/\epsilon_{max}$  の値に着目するとダンパーの違いによる影響はほぼないことが窺える。TAFT 入力時にばらつきが生じている理由としては、ダンパーの応答が小さいことから弾性歪みが支配的になり、疲労損傷度の値が小さくなったからだと考える。以上のことから、ダンパーの種類に関わらず、各疲労損傷度  $D_{eq}$  と  $D_m$  が一致するように決定した平均歪み  $\epsilon_{eq}$  は入力地震動毎でほぼ同じとなる傾向が見られる。図 8 に地震動のエネルギースペクトル  $V_E$  と擬似速度応答スペクトル  ${}_pS_v$  の関係を示す。図中のプロットと表 1 に着目すると、 $V_E$  と  ${}_pS_v$  が一定の範囲である時に、数種類の地震動にて  $\epsilon_{eq}/\epsilon_{max}$  の値が類似していることがわかる。このことから、 $V_E$  と  ${}_pS_v$  の大きさに準じて、図中に点線で示す範囲で地震動を 4 種類に仮分類し、平均歪みの値  $\epsilon_{eq}$  をグループ毎に、最大歪み  $\epsilon_{max}$  の 0.4 倍(グループ 1)、0.6 倍(グループ 2)、0.8 倍(グループ 3)、1.2 倍程度(グループ 4)に設定することで、マイナー則により算出した疲労損傷度  $D_m$  とほぼ一致するようなエネルギー等価法による疲労損傷度  $D_{eq}$  を算出できると考える。今後の課題として、様々な入力地震動に対して同じ検討を行い、グループ毎に決める平均歪みの精度を上げる必要があると考える。

表 1  $D_{eq}=D_m$  である時の  $\epsilon_{eq}/\epsilon_{max}$  の値

入力地震動	ダンパー種類		グループ
	タイプA	タイプB	
	$\epsilon_{eq}/\epsilon_{max}$	$\epsilon_{eq}/\epsilon_{max}$	
MYG004_2	0.40	0.45	G1
MYG004	0.55	0.55	G2
ART-HACHI	0.65	0.60	
JMAKOBE	0.65	0.65	
EI Centro	0.85	0.80	G3
ART-KOBE	0.80	0.80	
HACHINOHE	0.90	0.80	
TAFT	1.40	1.00	G4

○EI Centro △HACHINOHE □TAFT ◇MYG004  
●JMAKOBE ▲ART-HACHI ■ART-KOBE ◆MYG004\_2

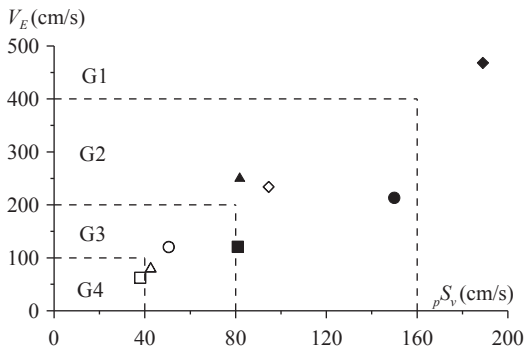


図 8  $V_E$  と  ${}_pS_v$  の関係による地震動の分類

## 5. おわりに

本報では、より簡易的に疲労損傷度を評価することを目的として、ダンパーの疲労損傷度に影響を与える平均歪み振幅を導出する方法の提案をした。得られた知見を以下に示す。

- (1) マイナー則により算出した疲労損傷度と一致するように決定した平均歪みは、ダンパーの種類に関わらず入力地震動毎でほぼ同じになる傾向が見られる。
- (2) 地震動の擬似速度応答スペクトルとエネルギースペクトルの値の関係より地震動を 4 つのグループに分類し、また分類毎に平均歪みを設定することで、波形分解法を用いずに疲労損傷度を算出することができる。
- (3) グループ毎に定める平均歪みの精度向上のため、今後も様々な入力地震動に対しての検討および検証を行いたい。

## 謝辞

本報は JFE スチール株式会社、JFE シビル株式会社、東京理科大学北村研究室、東京工業大学佐藤研究室の共同研究の成果によるものです。

## 参考文献

- 1) 秋山宏：建築物の耐震極限設計 第 2 版，東京大学出版会，1987
- 2) 日本建築学会長周期地震動 WG：長周期地震動に対する公開研究会集，対象とする巨大地震動と地域，2011.3
- 3) 大下優作，佐藤大樹，北村春幸，長江拓也：E-ディフェンス実験に基づくエネルギー法を用いた損傷配分評価，日本建築学会関東支部研究報告集 87(I)，pp277-280，2011.3
- 4) 植木卓也，石井匠，宮川和明：長周期・極大地震に対する制振ブレースの有効性検証，JFE 技報 31 号，2013.1.
- 5) 植木卓也，宮川和明，北村春幸，佐藤利昭，橋本奨吾，高橋真人：極大地震に対する二重鋼管ブレースの性能評価その 2，日本建築学会学術講演梗概集，pp1117-1118，2014.9.
- 6) 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：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 1，2011 年度日本建築学会関東支部研究報告集 82(I)，pp193-196，2012.3
- 7) 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建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 76(661)，pp543-552，2011.3
- 8) 遠藤達雄，松石正典，光永公一，小林角市，高橋清文：「Rain Flow Method」の提案と応用，九州工業大学研究報告(工学)28，pp33-62，1974.3
- 9) 高橋真人，植木卓也，宮川和明，橋本奨吾，佐藤利昭，北村春幸：極大地震に対する二重鋼管ブレースの性能評価その 1，日本建築学会学術講演梗概集，pp1115-1116，2014.9.

\*1 東京理科大学 \*2 JFE スチール株式会社

\*3 JFE シビル株式会社 \*4 東京工業大学