

# 長周期・極大地震に対する制振ブレースの有効性検証

## Damping Effects of Energy Dissipative Braces for Long-Period Ground Motions and Huge Seismic Loads

植木 卓也 UEKI Takuya JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (副課長)  
石井 匠 ISHII Takumi JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)  
宮川 和明 MIYAGAWA Kazuaki JFE シビル システム建築事業部 営業推進部 開発グループ長・博士 (工学)

### 要旨

南海トラフに代表される海溝型巨大地震や直下型極大地震の発生が懸念されており、建物の耐震性強化が喫緊の課題となっている。これらの地震に対して、建物の損傷を軽減するためには、地震エネルギーを効率的に吸収する制振ダンパーの設置が有効とされている。そこで、JFE グループが開発したブレース型制振ダンパーの保有性能を確認すべく、代表的な長周期地震動および内陸直下型地震に対する地震応答解析および動的加力実験を行なった。結果として、想定地震 10 回程度の入力に対して、安定した制振効果を発揮することを確認した。さらに、地震発生後の疲労損傷度を簡易に推定する新たな評価手法を提案し、おおむね実験結果を評価できることを示した。

### Abstract:

It is an urgent issue to reinforce the seismic resistance of buildings, since huge subduction-zone earthquakes, represented by the Nankai Trough, and large-scale inland earthquakes are predicted to occur in the near future. The damping device which absorbs the seismic energy is an effective device to reduce the damage of main structures. This paper discusses damping effects of energy dissipative braces developed by JFE Group. As a result of the seismic response analyses and dynamic loading tests, it was confirmed that energy dissipative braces showed high performance of seismic energy absorption for recurrent earthquakes about 10 times. Furthermore, applicability of the new estimation method of the damage index was evaluated.

## 1. はじめに

南海トラフに代表される海溝型巨大地震は、長周期成分を多く含み、減衰が小さく、継続時間が長いという特徴があり、特に固有周期の長い超高層建物の応答増大が懸念されている。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震では、長周期地震動の影響により、東京や大阪の高層ビルで約 10 分間にわたり揺れが継続し、最大水平変位が 1 m 前後に達したという報告<sup>1)</sup>もある。震災以前からも長周期地震動に対する検討は進められており、2010 年 2 月には超高層建築物などにおける長周期地震動への対策試案についてのパブリックコメント<sup>2)</sup>が国土交通省より公表されている。また、震災直前の 2011 年 3 月 4 日には一般社団法人日本建築学会にて長周期地震動対策に関する公開研究会<sup>3)</sup>が催され、制振ダンパーを用いた効果的な耐震補強などの対策提案がなされている。

一方、兵庫県南部地震のような大振幅のパルス波が加わる内陸直下型地震の発生も危惧されており、建物の応答特

性に関する研究が進められている<sup>4)</sup>。

また、地震の規模が大きくなるほど、その後の余震回数も増加する傾向にあり、気象庁では、東北地方太平洋沖地震の発生後約 1 年間でマグニチュード 5.0 以上の余震を約 600 回観測している<sup>5)</sup>。このことから、地震発生後も長期的に建物の安全性を確保するためには、繰返し入力に対する制振ダンパーの疲労損傷度を適切に評価することが重要となってくる。

本論では、JFE グループが開発したブレース型制振ダンパー (以下、制振ブレース) について、特性の異なる代表的な入力地震動を用いた試設計建物の地震応答解析および地震動加力実験を行ない、その保有性能を確認した結果を報告する。また、地震時の制振ブレースの応答波形を用いて、疲労損傷度を簡易に推定するための新たな評価手法を提案し、地震動加力実験結果を用いてその適用可能性について確認した。

## 2. JFE グループの制振ブレース

JFE グループでは、これまでに要求性能に応じたバリエー

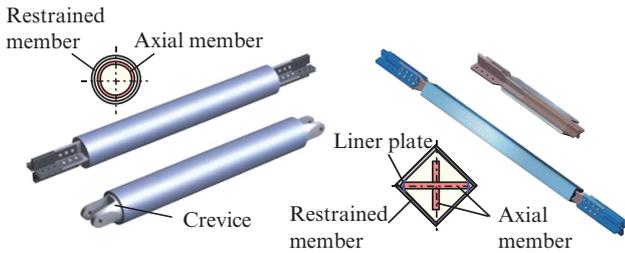


図1 制振ブレース

Fig. 1 Energy dissipative braces

ションに富む制振ダンパーを開発している。そのうち、超高層建物に多く用いられている制振ブレースとしては、**図1**に示すように、低降伏点シームレスパイプと面外変形を拘束する補剛管で構成される意匠性に優れた二重鋼管座屈補剛ブレース（以下、二重鋼管ブレース）と、大振幅時にも高いエネルギー吸収性能を確保できるハーフ十字ブレースダンパー（以下、ハーフ十字ブレース）を用意している。二重鋼管ブレースは高力ボルト接合とピン接合のいずれにも対応でき、鉄筋コンクリート造建物の耐震補強にも適用できる外付けタイプとしての評価も取得している。ハーフ十字ブレースは、溶接4面BOXである補剛管の対角線上に十字型の軸力材を配置した構造である。補剛管に冷間成形角形鋼管を用いた従来工法と比較して、補剛管の後施工が可能であるためクリアランスの調整や端部の拡幅が容易であるとともに、軸力に応じた最適断面を選定できるという特徴がある。

### 3. 長周期・極大地震に対する保有性能評価

#### 3.1 制振ブレースの必要性能

ここでは、二重鋼管ブレースおよびハーフ十字ブレースを組み込んだ建物の試設計を行ない、時刻歴応答解析によりダンパーの必要性能を明らかにすることを目的とする。

解析に用いる入力地震動は、南海地震に対する大阪での想定地震波である OSA NS と WOS EW<sup>6)</sup>、および神戸海洋気象台における兵庫県南部地震の観測波（JMA KOBE NS）の3種類とした。なお、地震波の名称は、地震動到達地点と地震動の方向を略称で表している。それぞれのエネルギースペクトルを**図2**に示す。エネルギー法活用マニュアル<sup>7)</sup>によると、巨大地震による長周期地震動の想定レベルを、特定の周期帯におけるエネルギースペクトルで  $V_E=270\sim 400\text{ cm/s}$  と設定しており、OSA NS は想定レベルのおおむね下限値、WOS EW は上限値に相当している。

試設計建物は、純ラーメン架構の鋼構造建物とし、地震動の影響が大きいと思われる規模として、長周期地震動に対しては(1)地上40階（高さ161 m）の超高層建物、直下型地震動に対しては(2)地上8階（高さ33 m）の中高層建物を設定した（**図3**）。また、制振ブレースは、低降伏点鋼 LY225 を軸力材とするハーフ十字ブレース（全地震波）と、

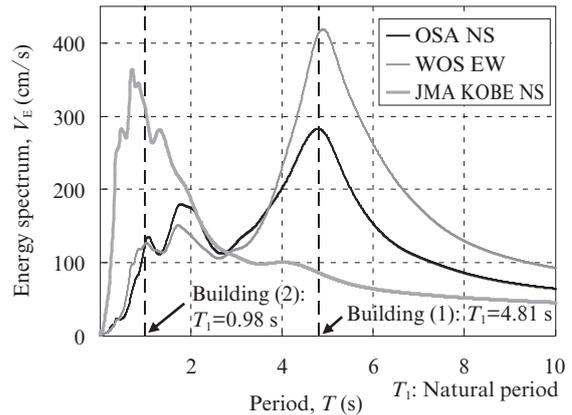


図2 エネルギースペクトル

Fig. 2 Energy spectrum

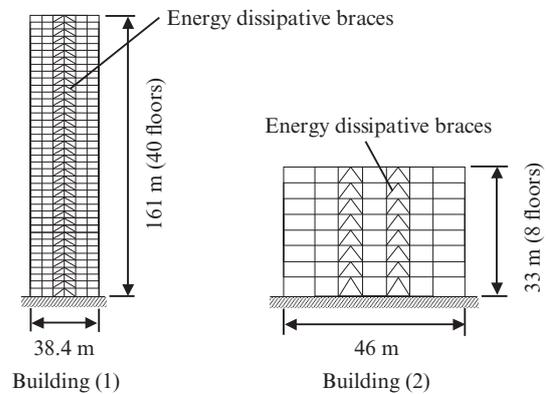


図3 試設計モデル

Fig. 3 Analytical model

LY100 を軸力材とする二重鋼管ブレース（OSA NS のみ）を仮定し、各制振ブレースの設置量は、入力エネルギーに対する制振ブレースの吸収エネルギー比率が最大となるように設定している。

ここで、前述の条件における制振ブレース設置後の建物の1次固有周期  $T_1$ （**図2**中）は、それぞれ入力地震動のエネルギースペクトルのピークにおおむね一致しており、建物に対して最も厳しい入力条件となっている。制振ブレース設置前後の建物の層間変形角分布を**図4**に示す。特に WOS EW と JMA KOBE NS に対して、制振ブレース設置による応答低減効果が顕著に現れており、最大層間変形角は OSA NS および WOS EW に対して約 1/100 以下、JMA KOBE NS に対して約 1/75 以下に抑えられている。制振ブレースの必要性能を示す指標の1つとして、1回の地震入力に対する累積塑性変形倍率  $\eta$  を、実験結果と併せて**表1**に示す。ここでは、制振ブレースの総エネルギー吸収量  $W$  (kN・m) を降伏荷重  $N_y$  (kN)、および降伏荷重時変位  $\delta_y$  (m) で割った値を、エネルギー評価の累積塑性変形倍率  $\eta$  と定義する。

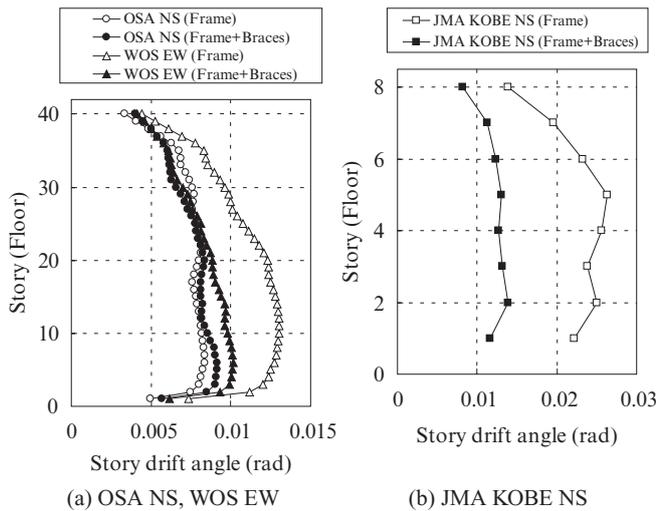


図4 層間変形角の高さ方向分布  
Fig. 4 Distribution of story drift angle

表1 累積塑性変形倍率,  $\eta$

Table 1 Cumulative plastic deformation ratio,  $\eta$

Brace type	Seismic wave	Number of cycles *1		Cumulative plastic deformation ratio, $\eta$	
		Original amp.	1.5 Times amp.	Experiment	Calculation
Cross-shaped	OSA NS	10	2	5 502	127
	WOS EW	10	1	8 807	298
	JMA KOBE NS	11	—	3 050	215
Tube in tube	OSA NS	9	—	16 081	186

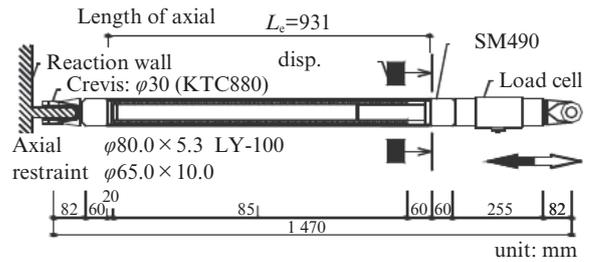
\*1 One before fracture cycle

### 3.2 制振ブレースの保有性能

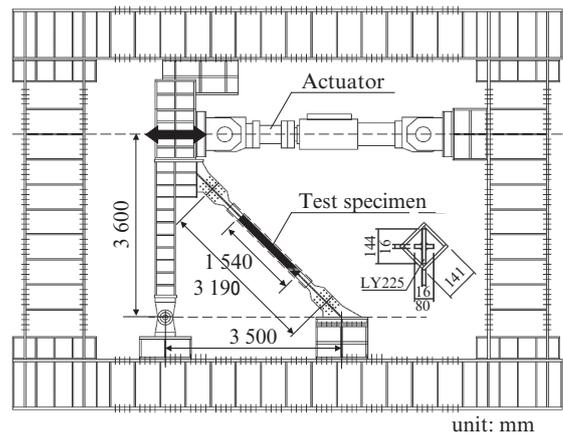
前節の解析で得られた地震時の必要性能に対し、地震動加力試験による制振ブレースの保有性能を検証する。

はじめに、解析における制振ブレースの配置と必要量から設計軸力を算出し、条件に合う実大断面を設計する。次に、軸力材の幅厚比や径厚比、塑性化部長さ比などが実大断面とほぼ同等となるように試験体形状を決定した。二重鋼管ブレース<sup>8,9)</sup>は、内管補剛で両端ピン接合の軸方向荷重とし、ハーフ十字ブレース<sup>10-13)</sup>は、両端高力ボルト接合の45°方向荷重とした。それぞれの荷重装置と試験体の概要を図5に示す。

実験に用いた入力波形は、時刻歴応答解析結果で層間変形角が最大となった階 (OSA NS, WOS EW : 7階, JMA KOBE NS : 2階) の水平変位応答波形をもとに、軸力材塑性化部の応答ひずみが等しくなるように、補正した水平変位にて制御している。また、入力時間は OSA NS, WOS EW で 500 s, JMA KOBE NS で 100 s としている。



(a) Tube in tube type



(b) Cross-shaped type

図5 荷重装置と試験体

Fig. 5 Loading system and test specimen

それぞれの入力地震動に対する制振ブレース軸力材の塑性化部長手方向の応答ひずみ波形を図6(a)に、各入力波1回目に対する応力-ひずみ関係を図6(b)に示す。OSA NS, WOS EW ではひずみの最大振幅は2.0%程度であるが、減衰が小さく、長時間にわたり繰返しひずみを生じている。一方、JMA KOBE NS では主要動が10 s程度で終了しているものの、ひずみの最大振幅は約4.0%に達している。いずれの地震波に対しても、安定した紡錘形の履歴を示しており、繰返しひずみによる耐力低下も見られなかった。

1回目の加力終了後、続けて同じ波形を10回繰返し入力した。なお、塑性化を考慮した試設計建物の再解析は実施していない。

二重鋼管ブレースは、10回目の荷重時に軸力管端部の局部変形による耐力低下を生じ、亀裂を生じて破壊に至った(写真1(a))。ハーフ十字ブレースは、10回目の入力に対しても大きな変化が見られなかったことから、11回目以降は、制御変位を1.5倍に増幅して荷重を行なった。結果として、OSA NSでは13回目の引張側で、WOS EWでは12回目の引張側で耐力が低下して終了した。試験後、補剛管を取り除いて軸力材を確認したところ、軸力材塑性化部の長手中央付近で破断に至っていた。破断の起点は、圧縮時の面外変形により最もひずみが大きくなる十字断面の短手側(補剛管と接触していない側)縁端部となっている(写真1(b))。

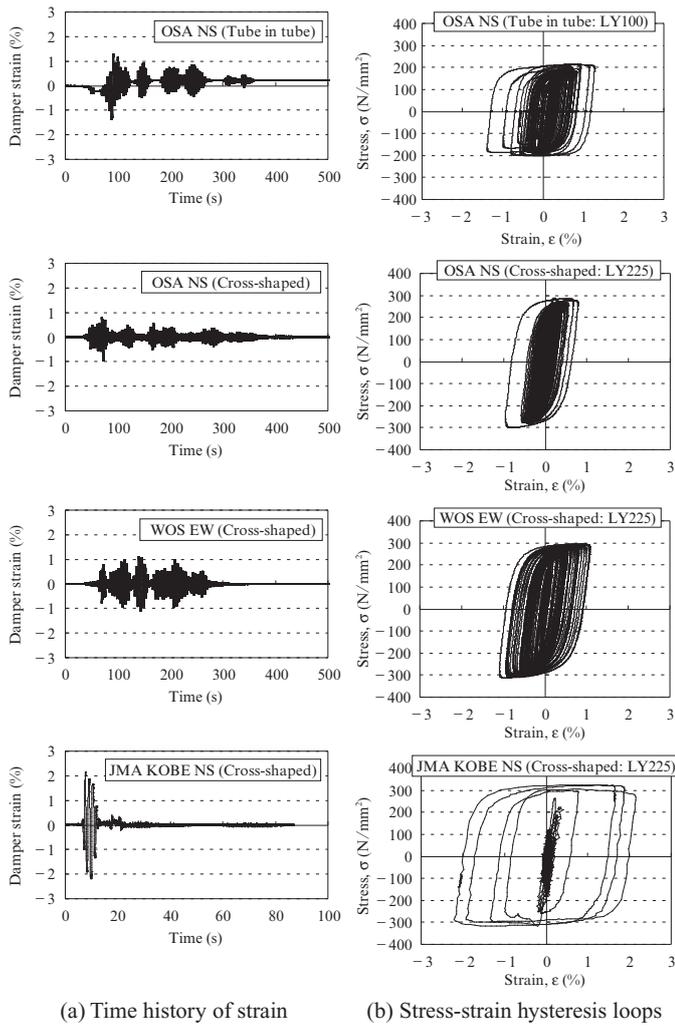


図6 実験結果  
Fig. 6 Test results

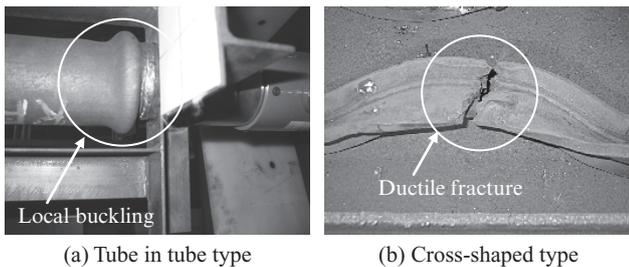


写真1 終局状態

Photo 1 Ultimate condition

JMA KOBE NSでは、徐々に耐力低下が見られたため、10回目以降も入力波形を変えず載荷を繰り返したところ、12回目の入力で破断に至った。

各試験体の破壊に至る前までの地震動入力回数と、制振ブレースの累積塑性変形倍率  $\eta$  を表1に示す。いずれの入力波形に対しても、10回程度の地震動入力に耐え得る高いエネルギー吸収性能を有しており、解析時の応答低減に必要とされる累積塑性変形倍率を大きく上回っていることが分かる。

## 4. 制振ブレースの疲労損傷度評価

### 4.1 疲労損傷度評価法

3章で述べた解析および実験は、想定したある特定の地震動に対する結果であり、震源特性や建物が立地する局所的な地盤特性などの影響により、実際に到達する地震動や建物の応答特性は当然ながら異なってくる。一方、近年の地震観測網の高密度化やセンシング技術の発展により、地震被災後に、建物あるいは部材の応答履歴を解析的に推定することも可能と考えられる。そこで、制振ブレースに生じたランダム応答波形から、どの程度の損傷を生じたかを簡易に推定することを試みる。

変動ひずみ（あるいは応力）を繰返し受ける構造物の疲労損傷度評価には、一般的に累積疲労損傷則（マイナー則）が用いられる。本手法は弾性範囲内の繰返しに対しては、その妥当性が確認されているものの、塑性領域を含む低サイクルの繰返しに対しては、誤差が生じる可能性も指摘されている<sup>14)</sup>。

また、簡易な疲労損傷度評価法として、ランダム応答波形の総エネルギー吸収量と最大ひずみを用いて、疲労損傷度を推定する手法がある<sup>15)</sup>。本手法は簡易に算定できるメリットはあるものの、塑性変形量が小さい場合には安全率が過大となる傾向がある。

本章では、これらの疲労損傷度評価法に加え、新たな簡易評価法を提案し、前節の動的加力実験結果を用いて、その有効性を検証する。

### 4.2 マイナー則評価

一般的な手法として、マイナー則による累積疲労損傷度  $D$  の算定を試みる。

はじめに、実験で得られたランダム応答ひずみ波形から、疲労に影響を与える振幅をどのように抽出するかが重要である。ここでは一般的な手法として、(1) レインフロー法を用いた場合と、(2) 極大極小値間を一定振幅半波長とする振幅法を用いた場合について、抽出される振幅の大きさおよび頻度の比較検討を行なった。OSA NS(ハーフ十字ブレース)の応答ひずみ履歴に対して、それぞれの手法により得られた半波長のひずみ振幅  $\Delta\epsilon$  に対する度数分布を図7に示す。なお、ひずみ振幅が弾性ひずみ範囲 ( $\Delta\epsilon \leq 2\epsilon_y \approx 0.2\%$ ) のものは除いている。レインフロー法の場合、ひずみ振幅が若干大きく評価される傾向にあるが、最大ひずみ振幅および単純累加平均で算定した平均ひずみ振幅はほぼ同等であったことから、設計上簡易な振幅法を用いることとした。

次に、別途実施した一定振幅載荷試験結果に基づく各制振ブレースの部材としての疲労曲線を図8に示す。弾塑性変形をともなう載荷の疲労曲線式には、弾性ひずみと塑性ひずみの足し合わせで表現される Manson-Coffin の式が用いられることが多い。ただし、高ひずみ（低サイクル）領域

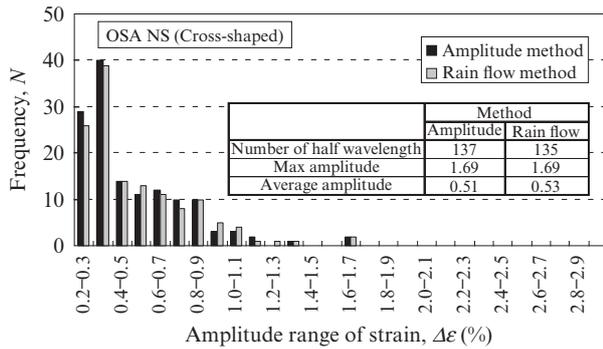


図7 地震時の応答履歴に含まれる全ひずみ振幅の分布  
Fig. 7 Distribution of strain constituted the seismic response

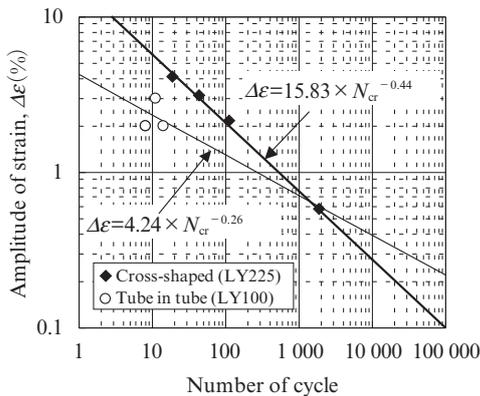


図8 全ひずみ振幅-繰返し回数関係  
Fig. 8 Strain-number of cycle relationship

の制振ブレースの繰返しにおいては、一般的に塑性ひずみが支配的となるため、設計上の簡便さを考慮して、ここでは全ひずみ（弾性ひずみ+塑性ひずみ）を用いた(1)式で表現する。

$$\Delta\epsilon = \alpha \times N_{cr}^\beta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

- Δε：全ひずみ振幅，N<sub>cr</sub>：限界繰返し回数
- α=15.83，β=-0.44：ハーフ十字ブレース（LY225）
- α=4.24，β=-0.26：二重鋼管ブレース（LY100）

前節にて分解した個々の半波長に対して、全ひずみ振幅 Δε に対する限界繰返し回数 N<sub>cr</sub> を(1)式より算出し、1/(2×N<sub>cr</sub>) を半波長あたりの疲労損傷度とすれば、地震動 1 波（半波長総数 n）に対する累積疲労損傷度 D は(2)式で表される。

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\Delta\epsilon_i}{\alpha} \right)^{-1/\beta} \quad \dots\dots\dots (2)$$

それぞれの地震動加力試験結果から、破断に至る前のループまでの累積疲労損傷度 D を表 2 の(1)欄に示す。地震動によってばらつきはあるものの、おおむね D=1 近傍で破断

表 2 評価手法の違いによる累積疲労損傷度

Table 2 Degree of fatigue damage for several methods

Brace type	Seismic wave	Method		
		(1) Myner	(2) Average	(3) Maximum
Cross-shaped	OSA NS	0.71	0.67	1.92
	WOS EW	1.54	1.65	3.37
	JMA KOBE	1.31	0.81	1.87
Tube in tube	OSA NS	2.42	1.19	9.48

に至っており、OSA NS を除くと安全側の評価を与えている。

### 4.3 平均ひずみによる評価

疲労損傷度をより簡便に評価する手法として、ランダムひずみ波形を、総エネルギー吸収量が等しく、かつ波形分解したひずみ振幅の単純累加平均値（等価平均ひずみ：ε<sub>eq</sub>）を振幅とする一定振幅波形とみなし、疲労損傷度を推定することを試みる。

地震終了時までの総エネルギー吸収量 W が等しいという仮定条件から、等価平均ひずみ ε<sub>eq</sub> に対する 1 波長あたりのエネルギー吸収量 W (ε<sub>eq</sub>) を用いて、等価繰返し回数 N<sub>eq</sub> は(3)式で表される。

$$N_{eq} = \frac{W}{W(\epsilon_{eq})} = \frac{\eta}{\eta_{eq}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、η<sub>eq</sub> は等価平均ひずみ ε<sub>eq</sub> に対する 1 波長あたりの累積塑性変形倍率を表す。図 9 に示す一定振幅載荷試験の結果から、等価平均ひずみ ε<sub>eq</sub> と η<sub>eq</sub> の関係は(4)式で表される。

$$\epsilon_{eq} = A \cdot \eta_{eq}^B \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

- A=0.184，B=0.717：ハーフ十字ブレース（LY225）
- A=0.191，B=0.470：二重鋼管ブレース（LY100）

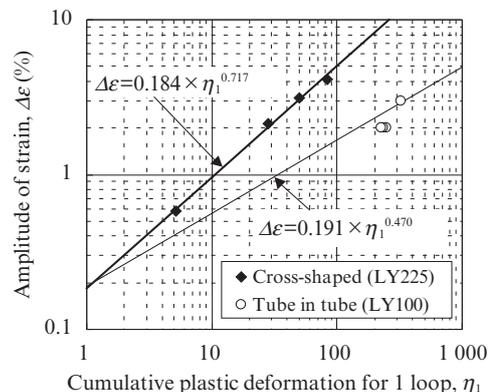


図9 全ひずみ振幅と 1 波長当たりの累積塑性変形倍率関係  
Fig.9 Strain-cumulative plastic deformation for 1 loop relationship

等価平均ひずみ  $\epsilon_{eq}$  に対する限界繰返し回数  $N_{cr}$  は (1) 式で表されることから, (3) 式, (4) 式と合わせて, 地震動 1 波に対する累積疲労損傷度  $R$  は (5) 式で表現できる。

$$R = \frac{N_{eq}}{N_{cr}} = \frac{\eta}{\left(\epsilon_{eq}/\alpha\right)^{1/\beta} \cdot \left(\epsilon_{eq}/A\right)^{1/B}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

結果として, 等価平均ひずみ  $\epsilon_{eq}$  と累積塑性変形倍率  $\eta$  が分かれば, 累積疲労損傷度を算定できる。上記の推定式によって求めた累積疲労損傷度を表 2 の (2) 欄に示す。なお, 等価平均ひずみ  $\epsilon_{eq}$  の代わりに, 波形分解した半波長の最大ひずみ  $\epsilon_{max}$  を用いた場合の結果も併せて表 2 の (3) 欄に示す。

等価平均ひずみを用いた場合の累積疲労損傷度  $R$  は, マイナー則で評価した値  $D$  とほぼ同等の評価となっている。一方, 最大ひずみを用いた場合は,  $R=1$  を大きく超え, 過大に安全側の評価となっている。

地震動加力実験結果から推定した, 破壊に至る 1 つ前のサイクル時点での等価平均ひずみ  $\epsilon_{eq}$  および最大ひずみ  $\epsilon_{max}$  と, 等価繰返し回数  $N_{eq}$ ,  $N_{max}$  の関係を図 10 に示す。ここで, 累積疲労損傷度  $R$  のばらつき要因を疲労曲線式のばらつきと仮定すると, (1) 式の疲労曲線式をばらつき係数  $\gamma$  を用いて (6) 式で表すことができる。

$$\Delta\epsilon = \alpha \times \left(N_{cr}/\gamma\right)^\beta \quad \dots\dots\dots (6)$$

等価平均ひずみで評価した実験値は, いずれもおおむね  $1/1.5 \leq \gamma \leq 1.5$  の領域に収まり, 最大ひずみで評価した場合は  $\gamma < 1/1.5$  の領域に位置している。よって, 等価平均ひずみ  $\epsilon_{eq}$  を用いて累積疲労損傷度を推定する際は, 安全率として  $\gamma=1.5$  とすれば, 安全側の評価が可能となる。さらに, (6) 式をより一般的な疲労曲線式の形に展開すると (7) 式となる。

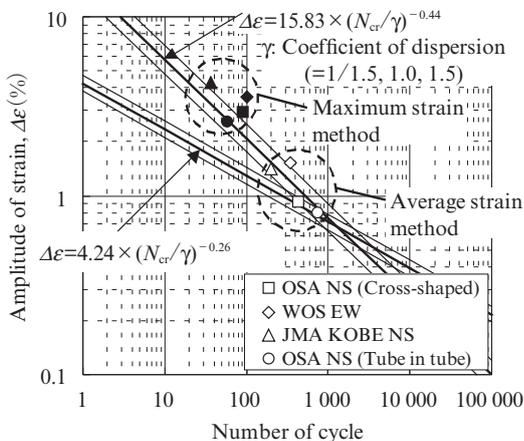


図 10 平均ひずみおよび最大ひずみに対する推定繰返し回数  
Fig. 10 Estimated number of cycle for average and maximum strain

$$\Delta\epsilon = \alpha' \times N_{cr}^\beta \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに,

$$\alpha' = \alpha \cdot (1/\gamma)^\beta \quad \dots\dots\dots (8)$$

安全率  $\gamma=1.5$  に対し, ハーフ十字ブレースでは  $\alpha' \doteq 1.2\alpha$ , 二重鋼管ブレースでは  $\alpha' \doteq 1.1\alpha$  となる。よって, (5) 式の係数  $\alpha$  を  $\alpha'$  に置き換えることで, ばらつきを考慮した安全側の累積疲労損傷度を直接的に求めることが可能となる。

### 5. おわりに

JFE グループが開発した制振ブレースに対して, 代表的な長周期地震動および直下型極大地震に対する応答特性評価を行なった。結果として, 10 回程度の地震動入力に耐えることが可能であり, 高いエネルギー吸収性能を発揮できることを確認した。また, ランダム応答波形の等価平均ひずみを用いた疲労損傷度算定手法を提案し, 実験結果を評価したところ, おおむねマイナー則と同等の累積疲労損傷度が得られること, 安全率 1.5 とすることで安全側の評価が可能となることを確認した。これにより, 現在見直しが進められている南海トラフを震源とする地震や首都直下型地震などに対しても, 制振ブレースの有効性を解析的に検証することが可能と考えられる。

今後は, ばらつき原因の推定や, 多段振幅による影響評価などにより, さらなる精度向上に努めたい。

東北地方太平洋沖地震以降, 地震被災後の建物および制振ブレースの健全性評価が求められている。特に制振ブレースは損傷部の取替えが可能というメリットを有しており, これを最大限に活かすためには, 安全率を見込んだ取替え時期判定が重要となってくる。そこで, 地震計や変位センサーなどを利用した実応答の計測と, 本論で提案した疲労損傷度評価手法を組み合わせた損傷判定システムの構築に注力し, お客様の安心・安全を確実にものとするべく努力していく所存である。

本論の疲労評価検証法に関する研究は, 東京理科大学理工学部建築学科北村研究室との共同研究の成果の一部を使用している。ここに記すとともに, 関係各位に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) たとえば, 内閣府中央防災会議, 「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」, 第 8 回, 資料 6, 2011-08.
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課, 「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」に関するご意見募集について, 2010-12.
- 3) 日本建築学会構造委員会長周期建物地震対応ワーキンググループ, 長周期地震動対策に関する公開研究集会, 2011-03.
- 4) 日本建築学会近畿支部シンポジウム資料, 「パルス性地震動に対する建

- 物の応答特性を考える」, 2010-10.
- 5) 気象庁報道発表資料. 「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」について (第 63 報). 2012-03.
  - 6) Kamae, Katsuhiko; Kawabe, Hidenori; Irikura, Kojiro. Strong Ground Motion Prediction for Huge Subduction Earthquakes Using a Characterized Source Model and Several Simulation Techniques. Vancouver, B. C., Canada, 2004-08-01-06. 13th WCEE. paper no. 655.
  - 7) 技報堂出版. 「鋼構造建築物へのエネルギー法活用マニュアル」. 2008-09.
  - 8) 角田充朗, 飯谷邦祐, 石井匠, 宮川和明, 渥美孝紘, 北村春幸. 長周期地震動に対する二重鋼管ブレースの性能評価. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2006-09. p. 895-896.
  - 9) 加村久哉, 難波隆行, 沖晃司, 船場琢. エネルギー吸収デバイスを用いた超高層建物の制振構造. JFE 技報. 2008, no. 21, p. 31-41.
  - 10) 西井宏安, 植木卓也, 山路宗忠, 石井匠, 佐藤大樹, 北村春幸. 長周期地震動を受ける座屈拘束十字ブレースダンパーの性能評価 (その 1: 入力地震動の選定). 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2010-09. p. 945-946.
  - 11) 加村久哉, 石井匠, 植木卓也, 山路宗忠, 北村春幸, 佐藤大樹. 長周期地震動を受ける座屈拘束十字ブレースダンパーの性能評価 (その 2: 動的載荷試験). 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2010-09. p. 947-948.
  - 12) 植木卓也, 加村久哉, 山路宗忠, 北村春幸, 佐藤大樹, 西井宏安. 長周期地震動を受ける座屈拘束十字ブレースダンパーの性能評価 (その 3: ランダム波形に対する疲労性能評価). 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2010-09. p. 949-950.
  - 13) 植木卓也, 加村久哉, 山路宗忠, 北村春幸, 佐藤大樹, 西井宏安. 座屈拘束十字ブレースダンパーのランダム応答波形に対する疲労損傷度評価. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2011-08. p. 853-854.
  - 14) 日本建築学会. 建築構造用鋼材および金属系素材に関する技術資料. 2002-01.
  - 15) 小川雅人, 青木博文. 繰返し変形を受ける鋼部材の累積損傷評価指標に関する研究. 日本建築学会構造系論文集. 2002-12. no. 562, p. 159-166.



植木 卓也



石井 匠



宮川 和明