座屈拘束ブレースの小塑性歪振幅における疲労性能の研究

FATIGUE PERFORMANCE OF THE BUCKLING-RESTRAINED BRACE IN THE SMALL PLASTIC STRAIN AMPLITUDE

小谷野一尚 — * 1   小出秀一 — * 2
中込忠男 — * 3   緑川光正 — * 4
岩田 衛 — * 5

Kazuhisa KOYANO — * 1   Shuichi KOIDE — * 2
Tadao NAKAGOMI — * 3   Mitsumasa MIDORIKAWA — * 4
Mamoru IWATA — * 5

キーワード:

座屈拘束ブレース, 疲労性能, 小塑性歪振幅, 耐用回数, 累積塑性歪エネルギー率

Keywords:

Buckling-restrained brace, Fatigue performance, Small plastic strain amplitude, Tolerable loading cycles, Cumulative plastic strain energy ratio

In the past study, authors have conducted the fatigue performance tests of the buckling-restrained braces using high-performance type and the basic-type specimens, and discussed the fatigue performance in the large plastic-strain amplitude.

In this paper, the fatigue performance tests of the buckling-restrained braces are carried out in the small-plastic strain amplitude. The linear relations from the small plastic-strain amplitude to large plastic-strain amplitudes of the buckling-restrained braces have been shown on a logarithmic scale from the test results. The fatigue performance of the buckling-restrained braces is able to be evaluated on the basis of these relations.

1. 序

近年、日本では中小地震が多発しており、首都直下地震も懸念されている。また、2011年東北地方太平洋沖地震では、長周期・長継続時間の地震動が観測された。一方、台風や竜巻、ビル風における風外力についても話題となることが多い。風外力は地震力に比べて一般に力は小さいが、地震動とは比較できないほど、長時間に渡って繰返し作用する。日々、建築物はこれらのような多種多様な地震や風外力を受けており、目に見える被害や損傷が現れなくとも、構造部材には疲労が蓄積されている。

優れた耐震および制振部材の一つとして、座屈拘束ブレースがある。座屈拘束ブレースは、超高層や高層建築物では主に制振ブレースとして、中層建築物では主に耐震ブレースとして、適用されることが多い。他の構造部材と同様に、座屈拘束ブレースにおいても、疲労性能について把握しておく必要がある。しかし、大地震を想定した大塑性歪振幅による低サイクル疲労性能の研究^{1)~6)}はかなり進

められてきてはいるが、回数の多い小地震や風外力を想定した小塑性歪振幅による疲労性能の研究は、ほとんど行われてきていない。

筆者らは、既往の研究⁷⁾において、図1に示すような鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの疲労性能の研究をした。大塑性歪振幅でも対応できる、エネルギー吸収性能を高くした高性能な座屈拘束ブレース⁸⁾は、疲労性能においても高性能であるのかを確認した。ここでエネルギー吸収性能が高いというのは、累積塑性歪エネルギー率 ω が大きいことを指す。累積塑性歪エネルギー率 ω は、復元力特性から算出した累積塑性歪エネルギー E_p を、芯材の降伏荷重 P_y と弾性限界変形量 δ_y を乗じた値 W_y で除した無次元化量である。累積塑性歪エネルギー率 ω を大きくするために、芯材塑性化部の両端部に絞りを設け、芯材塑性化部からリブ溶接による熱影響部を無くし、その空いたスペースに強軸変形を抑制するためのスペーサーを設けているのが特徴である。

疲労性能を把握するため、高性能な座屈拘束ブレースは歪振幅4.0%、3.0%、2.0%で、比較のために基本的な座屈拘束ブレースは歪振幅2.5%、1.5%、0.5%で実験を行った。その結果、図2のような歪振幅 ϵ と耐用回数の近似曲線が求められ、両対数軸で線形関係になることが分かった。

本研究では、既往の研究⁷⁾を踏まえ、図2に示すような未確認領域の小塑性歪振幅についても実験により確認を行い、大塑性歪振幅から小塑性歪振幅までの疲労曲線を完成することで、座屈拘束ブレースの疲労性能を推定するデータの蓄積を図る。このため、小塑性歪振幅での疲労実験を行い、既往の研究⁷⁾で求められた大塑性歪振幅での疲労性能との関係性を示す。また、エネルギー吸収性能についても確認する。

図1 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレース

¹⁾ 神奈川大学工学部建築学科 助手・修士(工学)
(〒221-8686 神奈川県横浜市神奈川区六角橋3-27-1)

²⁾ 神奈川大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生

³⁾ 信州大学 名誉教授・工博

⁴⁾ 北海道大学大学院工学研究院 教授・工博

⁵⁾ 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

¹⁾ Research Assoc., Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ., M. Eng.

²⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ.

³⁾ Prof. Emeritus, Shinshu Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

⁵⁾ Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ., Dr. Eng.

図2 歪振幅 ε -耐用回数関係(既往研究⁷⁾)

表1 試験体諸元

試験体	芯材(SN400B)							拘束材(SS400)						モルタル
	寸法 (mm)	断面積 (mm ²)	幅厚 比	σ_y (N/mm ²)	P_y (kN)	芯材長さ (mm)	塑性化部長さ (mm)	高さ (mm)	幅 (mm)	板厚 (mm)	$I \times 10^4$ (mm ⁴)	P_E (kN)	拘束指標 $R(=P_E/P_y)$	圧縮強度 (N/mm ²)
H05,H15E,H11E	PL- 112×16	1,792	7.0	289	518	2,351	1,176	146.0	181.2	3.2	1,299	4,755	9.2	75.4
B15E				300	538		1,251	98.0	139.2		440	1,610	3.0	71.3
B11E				289	518								3.1	75.4

(a) 平面図

1) 高性能タイプ (H シリーズ)

(b) A-A' 断面図

(a) 平面図

2) 基本タイプ (B シリーズ)

(b) A-A' 断面図

図3 試験体

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体諸元を表1に、平面図および断面図を図3に示す。試験体は、塑性化部に絞り、スぺーサーを設けた高性能タイプ(Hシリーズ)を3体(H05、H15E、H11E)、塑性化部に絞りのない基本タイプ(Bシリーズ)を2体(B15E、B11E)とする。試験体名の数字は歪振幅を表し、Eが付いた試験体の数字は降伏歪 ε_y の係数倍を表す。

両シリーズ試験体ともに、芯材長さは2351mmとし、塑性化部は幅112mm、厚さ16mm、幅厚比は7.0とする。

1) 高性能タイプ (H シリーズ)

塑性化部長さを1176mmとする。高いエネルギー吸収性能および高い疲労性能を得るために、拘束指標 $R(=P_E/P_y)$ 、 P_E :拘束材のオイラー座屈荷重)は9.0前後とし、芯材強軸回りには強軸変形を抑制するための絞り、スぺーサーを設ける。

2) 基本タイプ (B シリーズ)

塑性化部長さを1251mmとし、拘束指標 R は3.0前後とする。芯材強軸回りには丸鋼を設ける。

2.2 載荷方法

載荷は 1000kN 水平アクチュエータを用い、軸方向変位制御による一定歪振幅繰返し載荷とする。載荷装置は柱脚部をピン支持とし、試験体の設置角は 45 度とする(図 4)。

既往の研究⁷⁾では、H シリーズで歪振幅 4.0%、3.0%、2.0%、B シリーズで歪振幅 2.5%、1.5%、0.5%が行われている。ここでは、歪振幅 0.15%までのより小さい歪振幅時の疲労性能を確認する。弾性域と塑性域では違う性能を示すと考え、塑性域に限定し、芯材の降伏軸歪 ϵ_y より 1 割程度大きい値までとした。

なお、芯材の軸歪は、スプライスプレートを取り付ける接合部、および十字のリブを取り付ける弾性部は十分な剛性を有しているため弾性範囲とし、塑性化部のみが塑性変形をするものとして、変形量の和から算出をしている⁹⁾。

H シリーズでは、軸歪 $1.5\epsilon_y$ に相当する歪振幅 0.21%(H15E 試験体)、軸歪 $1.1\epsilon_y$ に相当する歪振幅 0.15%(H11E 試験体)で載荷する。既往の研究⁷⁾との疲労曲線を補うため、歪振幅 0.5%(H05 試験体)についても行う。B シリーズでは、軸歪 $1.5\epsilon_y$ に相当する歪振幅 0.22%(B15E 試験体)、軸歪 $1.1\epsilon_y$ に相当する歪振幅 0.15%(B11E 試験体)で載荷する。ここで、H15E 試験体と B15E 試験体の歪振幅が若干異なるのは、降伏応力度 σ_y が異なるためである。

試験体や治具のならしのために $1/3\epsilon_y$ の載荷を 1 回行った後(H05 および B05 については、更に所定の歪振幅の半分である 0.25%を 1 回)、所定の歪振幅において、耐力が最大耐力の 80%まで低下、または引張破断するまで繰返し載荷をする。この直前までの繰返し回数を耐用回数とする。試験体の軸変形量は、芯材の第一ボルト間(図 4、AB 間)の試験体手前と奥側に変位計を設置し測定を行い、平均値を軸変形量 δ とする。

3. 実験結果

各試験体の最終状況を表 2 および写真 1 に示す。参考に既往の研究⁷⁾の B05 試験体も示す。

すべての試験体において、最終状況は引張破断であった。H05 試験体は軸歪 0.5%の 926 回目、H15E 試験体は軸歪 0.21%の 12,158 回目、H11E 試験体は軸歪 0.15%の 17,265 回目、B15E 試験体は軸歪 0.22%の 1,799 回目、B11E 試験体は軸歪 0.15%の 3,671 回目で引張破断している。B05 試験体は軸歪 0.5%の 523 回目で引張破断している。

図 4 セットアップ

破断位置を写真 1 中に丸印で示す。H05、H15E 試験体は上端側の塑性化部端部、H11E 試験体は下端側の塑性化部端部で引張破断している。B15E、B11E 試験体は上端側のリブ溶接部で引張破断している。B05 試験体も同様に上端側のリブ溶接部で引張破断している。

各試験体の降伏耐力比 P/P_y (P :軸方向荷重)と芯材の軸歪 ϵ (軸変形量 δ /塑性化部長さ)の関係を図 5 に示す。各試験体とも引張破断するまで、安定した復元力特性を示している。

表 2 に各試験体の降伏耐力比の最大値を示す。歪振幅が大きい試験体ほど、降伏耐力比も大きくなっている。引張時で 0.83~1.20、圧縮時で 0.90~1.24 とポアソン比の影響による芯材の断面変形で、引張時よりも圧縮時の方が若干大きくなっている。

表 2 最終状況および降伏耐力比

試験体	最終状況	降伏耐力比(最大)	
		引張側	圧縮側
H05	0.5%歪926回目引張	1.20	1.24
H15E	0.21%歪12,158回目引張	0.94	0.96
H11E	0.15%歪17,265回目引張	0.83	0.90
B05※	0.5%歪523回目引張	1.00	1.02
B15E	0.22%歪1,799回目引張	0.94	0.94
B11E	0.15%歪3,671回目引張	0.92	0.92

※参考：既往研究⁷⁾より

写真 1 最終状況

※参考：既往研究⁷⁾より

表 3 性能評価

試験体	耐用回数	累積塑性歪エネルギー Et (kN・m)	累積塑性歪エネルギー率 ω
H05	925回	5,532	6,444
H15E	12,157回	12,062	14,050
H11E	17,264回	5,959	6,941
B05※	522回	5,916	3,850
B15E	1,798回	1,987	2,019
B11E	3,670回	3,552	4,137

※参考：既往研究⁷⁾より

図5 P/P_y -軸歪 ε 関係

図6 歪振幅 ε - 耐用回数関係

4. 性能評価

4.1 疲労性能

表3に各試験体の耐用回数、図6に歪振幅 ε (%)と耐用回数の関係を既往の研究⁷⁾と本研究の結果を合わせて近似曲線で示す。耐用回数はHシリーズの歪振幅0.5%で925回、0.21%で12,157回、0.15%で17,264回、Bシリーズの0.22%で1,798回、0.15%で3,670回であった。 ε と耐用回数は両対数軸上で両シリーズともに、既往の研究⁷⁾の大塑性歪振幅から本研究の小塑性歪振幅まで線形関係になっている。これにより、本座屈拘束ブレースの塑性域での疲労性能を推定することができる。また、HシリーズとBシリーズは平行にはならず、歪振幅が小さくなるほど耐用回数の差が大きくなり、直線に開きが生じている。

HシリーズとBシリーズでは破断位置が異なる。Hシリーズでは、芯材塑性化部を絞ったことにより、断面積が変化する端部に応力が集中している。一方、Bシリーズでは、リブ溶接による熱影響部に応力が集中している。このことにより、芯材形状によって破断位置が異なることが分かる。塑性化部を絞った端部よりも、溶接熱影響部の疲労性能の方が低いことが予想され、HシリーズとBシリーズとでは耐用回数に差が生じている。

4.2 累積塑性歪エネルギー率 ω

表3に、実験結果より求めた各試験体の累積塑性歪エネルギー E_p と累積塑性歪エネルギー率 $\omega(=E_p/P_0\delta_p)$ を示す。また、図7に本研究と既往の研究⁷⁾で得られた ω と拘束指標 R の関係と、既往の研究⁸⁾で提案した下限値 ω を表す性能評価式($\omega=150 \times R(R \leq 6)$ 、 $\omega=900(R > 6)$)を合わせて示す。

H05、H15E、H11E、B15E、B11E試験体の ω はそれぞれ6,444、14,050、6,941、2,019、4,137と性能評価式を上回り、すべての試験体で高いエネルギー吸収性能を示している。

図8に累積塑性歪エネルギー率 ω と耐用回数、および軸歪 ε の関係を示す。既往の研究⁷⁾で求められた大塑性歪振幅では、耐用回数が多いほど、軸歪 ε が小さいほど ω は大きくなっており、相関性があるのが分かる。しかし、本研究の小塑性歪振幅においては、H15E試験体よりもH11E試験体の方が耐用回数は多いにも関わらず、 ω が小さくなっている。また、H15E試験体よりもH11E試験体の方が歪振幅 ε は小さいにも関わらず、 ω が小さくなっている。これらより、小塑性歪振幅ではあまり相関性はないと考えられるが、今後の研究において確認をしていく必要がある。

5. 結

鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースを対象に、高性能タイプと基本タイプにおいて、小塑性歪振幅の一定歪振幅繰返し载荷実験を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 塑性域内での歪振幅 ε と耐用回数の関係は、大塑性歪振幅から小塑性歪振幅まで両対数軸で線形関係になる。
- 2) 高性能タイプと基本タイプでは、塑性化部の溶接熱影響部の有無によって、歪振幅が小さくなるほど耐用回数の差が大きくなる。
- 3) 小塑性歪振幅では、累積塑性歪エネルギー率 ω は既往の研究⁸⁾で提案した性能評価式を上回り、十分なエネルギー吸収性能を示す。

図7 累積塑性歪エネルギー率 ω -拘束指標 R

図8 累積塑性歪エネルギー率 ω -耐用回数および軸歪 ε 関係

謝辞

本研究の実験は、平成26年度住宅・建築関連先端技術開発助成事業費の補助を受けて実施いたしました。また、元神奈川大学学部の魚本幸平氏にご協力いただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 前田泰史, 中村博志, 竹内徹, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 実大アンボンドブレースの疲労性能その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp813-816, 1999.9
- 2) 前田泰史, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 軸降伏型履歴ダンパーの疲労特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第503号, pp109-115, 1998.1
- 3) 中込忠男, 岩本剛, 加村久哉, 下川弘海, 原山浩一: 低降伏点鋼を用いた鋼管補剛平鋼ブレースの疲労特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第530号, pp155-161, 2000.4
- 4) 寺田岳彦, 佐武直紀, 堀江竜巳, 真瀬伸治, 小川雄一郎, 磯田和彦: 溝形鋼で補剛された座屈拘束ブレースダンパーの低サイクル疲労特性と累積損傷度評価, 日本建築学会技術報告集, 第16号, pp111-116, 2002.12
- 5) 御手洗達也, 吉敷祥一, 山田哲, 西本晃治: 座屈拘束ブレースの低サイクル疲労試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp943-944, 2010.9
- 6) 石井匠, 高木伸之, 藤澤一善, 清水孝憲, 宮川和明, 喜多村亘: 二重鋼管座屈補剛ブレースの低サイクル疲労性能その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp781-784, 2012.9
- 7) 小谷野一尚, 宮川和明, 小出秀一, 喜多村亘, 岩田衛: 疲労性能の高い座屈拘束ブレースの研究, 日本建築学会技術報告集, 第21巻, 第47号, pp137-140, 2015.2
- 8) 飯塚亮太, 小谷野一尚, 緑川光正, 岩田衛: 累積塑性歪エネルギー率の大きな座屈拘束ブレースの研究, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第701号, pp1015-1023, 2014.7
- 9) 中村慎, 山下哲郎, 村井正敏, 岩田衛: 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究 -芯材の降伏耐力および軸剛性の調節-, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻, 第629号, pp1143-1150, 2008.7

[2015年6月2日原稿受理 2015年8月3日採用決定]