

座屈拘束ブレースの実験的研究

～「ハイパー・ブレース」の製作工場追加と疲労性能～

An Experimental Study on the Buckling Restrained Brace

谷ヶ崎 庄二 *1
YAGASAKI Syoji

田中 康一 *2
TANAKA Koichi

内野 卓 *3
UCHINO Suguru

川田工業(株) (以下、当社) では、座屈拘束ブレース (商品名「ハイパー・ブレース」) を 2016 年度に実用化した。ハイパー・ブレースは、耐震・制振ブレースとして使用するものであり、神奈川大学が保有する特許の実施権許諾を受け、当社が追加実験等を行い実用化したものである。2018 年度及び 2019 年度は製作工場の追加、疲労曲線式の作成、強軸方向局部崩壊の検討を目的として各種実験を実施し、耐震ブレースについて一般財団法人日本建築センターの鋼構造追加・変更評定を取得した。本稿では、製作工場の追加実験、疲労性能及び強軸方向局部崩壊の検討結果について報告する。

キーワード：ハイパー・ブレース、座屈拘束ブレース、実験、疲労性能、強軸方向局部崩壊

1. はじめに

ハイパー・ブレースは、芯材である鋼材を周囲の拘束材で補剛することで圧縮時においても座屈させることなく、引張と圧縮の両域において安定した弾塑性履歴特性を有するブレースである。主に大規模及び超高層建築物の耐震ブレースや制振ブレースとして用いられる。

2. ハイパー・ブレースの概要

ハイパー・ブレースの部材構成を図 1 に示す。軸力を負担する芯材と、鋼モルタル板の座屈拘束材で構成されている。芯材の表面にはアンボンド材を貼り、適正なクリアランスを確保して座屈拘束材への応力伝達を防止する。座屈拘束材は、鋼板を曲げた溝形断面にモルタル (耐震ブレースはコンクリートも使用可) を充填した鋼モルタル板であり、芯材を両側から挟んだ後、鋼板の重ね合わせ部を溶接して一体化する。

芯材の加工形状は、以下の 2 タイプがある (図 2)。

① ストレートタイプ

拘束材内部の芯材幅が一定で、本ブレースの基準となるタイプである。

② 端部拡幅タイプ

芯材塑性化部端部に拡幅を設けたタイプである。

ハイパー・ブレースは、以下の優れた特徴がある。

- ・高歪でも安定した復元力特性を有する
- ・端部拡幅タイプは高い疲労性能を有する
- ・確実な品質管理が可能である
- ・スレンダーな見栄えである

なお、各特長の詳細については文献 1) を参照されたい。

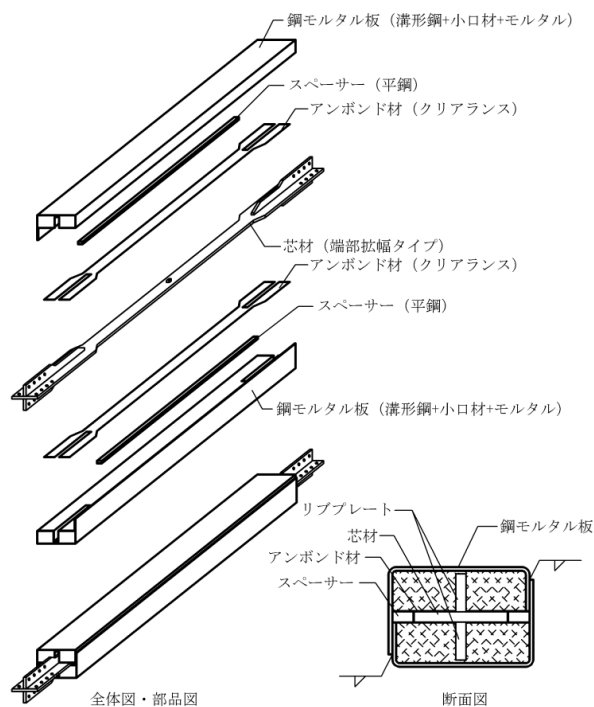


図 1 ハイパー・ブレース部材構成図

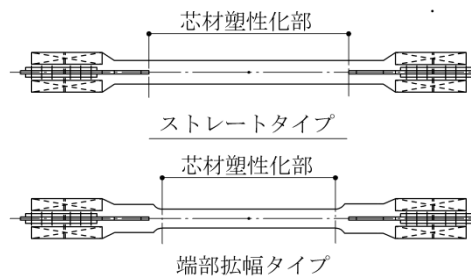


図 2 芯材タイプ

*1 川田工業(株)建築事業部 技師長

*2 川田工業(株)建築事業部設計部設計一課 課長

*3 川田工業(株)建築事業部設計部設計一課

3. 実験概要

(1) 実験目的

以下の項目を確認するために実験を行った。

- ・ 当社の栃木工場で製作した試験体の製作精度及び性能。
- ・ 芯材が LY225 の低歪振幅域疲労性能。
- ・ 端部拡幅タイプの拡幅率を変えた時の性能。
- ・ 強軸方向局部崩壊発生時の芯材状況（2018 年度の実験で設計式を満足させていたにも関わらず、強軸方向局部崩壊を生じた試験体が 2 体あったため、2019 年度に実験を計画）。

(2) 試験体

試験体は、ストレートタイプ 4 体、端部拡幅タイプ 6 体の計 10 体である。試験体寸法記号を図 3、試験体の緒元を表 1~2 に示す。栃木工場で製作した試験体は (KBS11C37G, KBL8M52G, KHL8M62C0.5) の 3 体である。実験目的別としては、低歪振幅域(定振幅 1.0% 及び 0.5%) の疲労試験は 5 体 (KHL8M62C1, KBL8M65C1, KBL8M47C0.5, KHL8M62C0.5, KHL8M64C0.5) 計画した。端部拡幅率 wBc/dBc は 1.5, 1.25, 1.0 の 3 種類とし、高歪振幅域における性能の違いを見るために 2 体 (KHL6M55G, KHL8M48G) を追加した。2019 年度の強軸方向局部崩壊確認試験体は、局部崩壊を生じ易くするために芯材とスペーサーとの間のクリアランスを 3mm に大きくした試験体である。芯材と座屈拘束材との間のクリアランス比 (クリアランス値/芯材厚さ) の測定平均は、7.1%~13.0% であった。

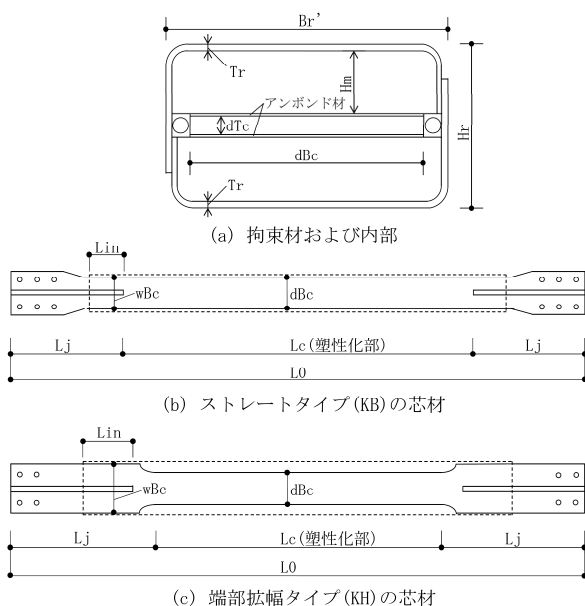


図 3 試験体寸法記号

表 1 試験体緒元 (拘束材)

年度	試験体名	製作	鋼材種類	鋼材断面 $T_r \times B_r' \times H_r$	充填材種類	充填材 圧縮強度 (N/mm^2)	充填材 厚さ Hm (mm)
2018	KHL6M55G	富山	SS400	4.5×158.5×107.8	モルタル	54.6	40.3
	KHL8M48G			4.5×174.2×137.7		47.7	56.6
	KBL8M47C0.5			4.5×174.0×138.3		52.0	55.6
	KBS11C37G	栃木		4.4×164.4×136.1	コンクリート	37.1	55.1
	KBL8M52G			4.5×172.8×138.7	モルタル	61.6	55.3
	KHL8M62C0.5			4.3×205.1×137.4		46.9	55.5
2019	強軸方向 局部崩壊確認	栃木	SS400	4.3×176.3×136.6	モルタル	62.0	56.0
	KHL8M62C1	富山		4.5×174.8×139.6		61.6	56.3
	KHL8M64C0.5			4.5×174.7×139.3		63.6	56.2
	KBL8M65C1			4.5×175.0×138.8		65.1	55.9

表 2 試験体緒元 (芯材)

年度	試験体名	製作	鋼材種類	拘束 指標 R ($=P_E/P_Y$)	芯材 板厚 d_{Tc} (mm)	芯材 幅 d_{Bc} (mm)	塑性化 端部 拡幅率	芯材 降伏 応力度 (N/mm^2)	備考	
2018	KHL6M55G	富山	LY225	4.17	16.0	95	1.50	234.0	漸増載荷	
	KHL8M48G			6.05	16.0	128	1.25	234.0		
	KBL8M47C0.5			6.11	16.0	128	1.00	234.0		一定振幅
	KBS11C37G	栃木		SN490B	4.91	12.2	133	1.00	340.0	漸増載荷
	KBL8M52G			LY225	6.19	16.2	128	1.00	234.0	
	KHL8M62C0.5			LY225	6.63	16.1	128	1.50	234.0	
2019	強軸方向 局部崩壊確認	栃木	LY225	5.80	16.1	127.5	1.25	234.0	漸増載荷	
	KHL8M62C1	富山		6.29	16.1	128	1.25	234.0	一定振幅	
	KHL8M64C0.5			6.26	16.1	128	1.25	234.0	一定振幅	
	KBL8M65C1			6.21	16.1	128	1.00	234.0	一定振幅	

注) 拘束指標 $R = P_E / P_Y$

P_E : 座屈拘束材のオイラー座屈荷重

P_Y : 芯材の降伏荷重

リブプレート貫入長さ比 L_{in} / wBc は全て 1.0

(3) 載荷装置と載荷概要

載荷実験は、神奈川大学の実験施設で実施した。図 4 に載荷装置の全体図、写真 1 に試験体設置状況を示す。載荷には 1000kN 用のアクチュエータを使用し、試験体の設置角度は 45° とした。図 5~7 に載荷履歴図の例を示す。漸増載荷の最終 3% 歪載荷は、荷重が 80% に低下するまで繰り返す。ただし、強軸方向局部崩壊確認用試験体は、強軸方向局部崩壊が発生して芯材に圧縮歪が残った状態で載荷を終了する。

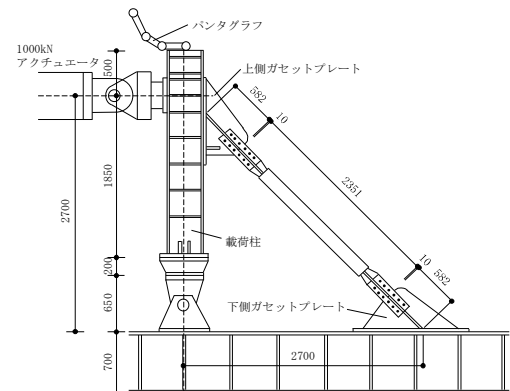


図 4 載荷装置全体図



写真1 試験体設置状況

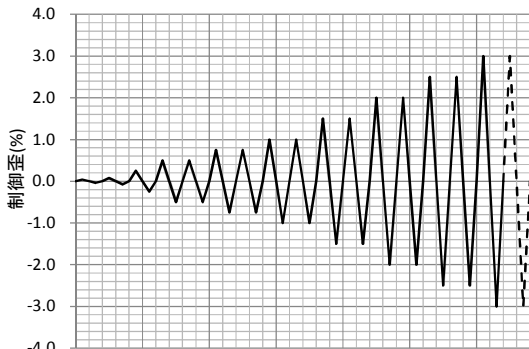


図5 漸増載荷の載荷履歴

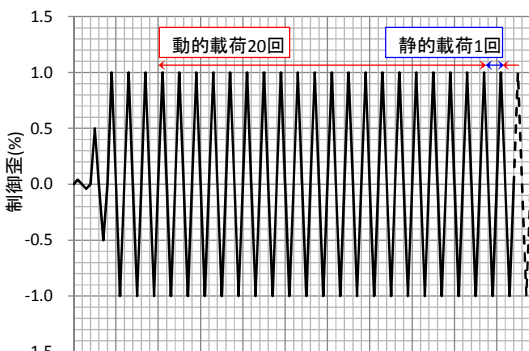


図6 一定振幅載荷(1%歪)の載荷履歴

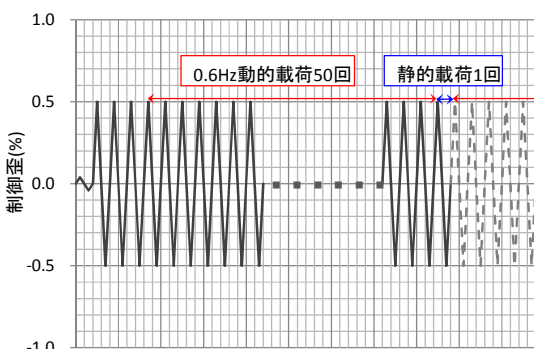


図7 一定振幅載荷(0.5%歪)の載荷履歴

4. 実験結果

表3に実験結果一覧, 写真2に芯材の破断及び局部崩壊位置, 図8に履歴ループを示す。本実験の終局状態は, 強軸方向局部崩壊確認用試験体以外は最終的に

引張破断であった。しかし, KHL8M48G と KBL8M52G は, 3%歪繰り返し載荷途中で強軸方向局部崩壊(拘束材の膨らみ)を生じたが, 荷重低下は生じていない。強軸方向局部崩壊確認用試験体は, 3%歪2回目圧縮時に明らかな強軸方向局部崩壊が観察されたため, 荷重低下は生じていないが載荷を終了し, 試験体を解体して芯材の状況を確認した。また, 端部拡幅率1.25の試験体は, 全て芯材塑性化部にて引張破断し, 0.5%歪一定振幅の耐用回数は, 拡幅率1.5の試験体と大きな差は見られなかった。しかし, 拡幅率1.00(ストレート)の試験体は, 拡幅率1.25以上よりも耐用回数は低い結果となった。

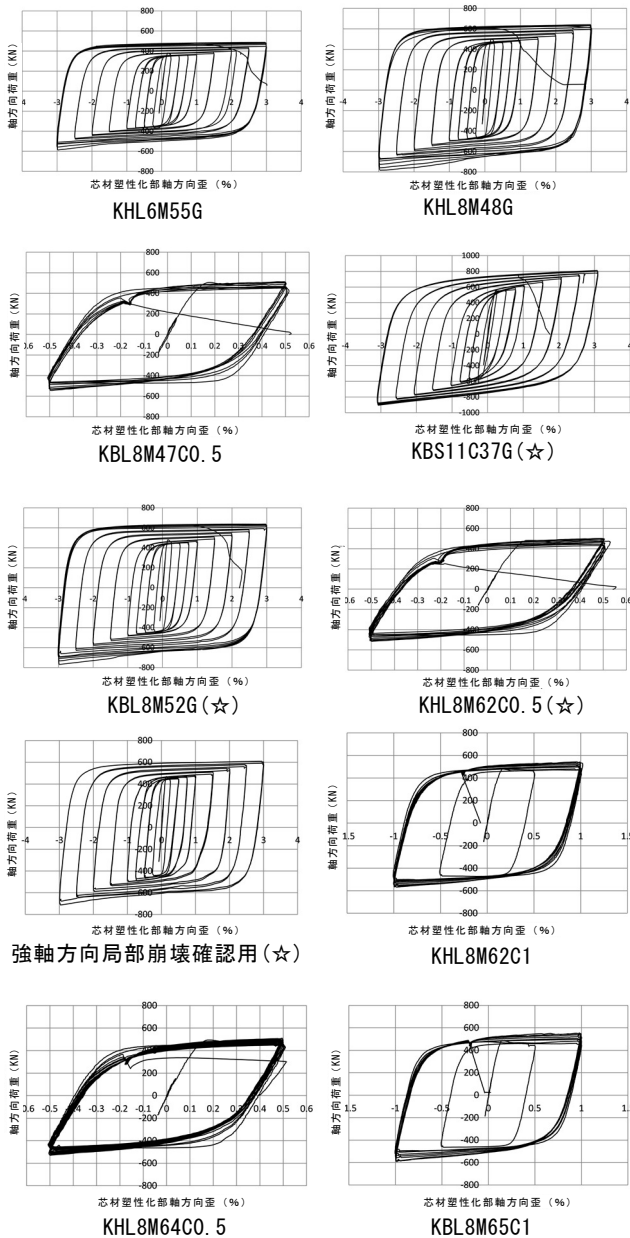
表3 実験結果一覧

年度	試験体名 (塑性化部 端部拡幅率)	製作	降伏 荷重 P_y (kN)	最大耐力(kN)		圧縮 引張 耐力比 P_{max}/P_{max}	実験終了時 載荷数	終局状態
				引張 P_{max}	圧縮 P_{max}			
2018	KHL6M55G (1.50)	富山	355.7	566.7	587.1	1.03	3.0%歪 6回目引張	〃
	KHL8M48G (1.25)		479.2	641.2	783.3	1.22	3.0%歪 7回目引張	強軸方向 局部崩壊
	KBL8M47C0.5 (1.00)		479.2	513.4	545.4	1.06	0.5%歪 684回目引張	引張破断
	KBS11C37G (1.00)	栃木	551.7	811.4	905.0	1.12	3.0%歪 8回目引張	〃
	KBL8M52G (1.00)		485.2	637.7	768.3	1.20	3.0%歪 7回目引張	強軸方向 局部崩壊
	KHL8M62C0.5 (1.50)		482.2	505.9	515.6	1.02	0.5%歪 939回目引張	引張破断
2019	強軸方向局部 崩壊確認(1.25)	栃木	480.4	608.9	712.1	1.17	3.0%歪 2回目圧縮	強軸方向 局部崩壊
	KHL8M62C1 (1.25)	富山	482.2	542.9	565.7	1.04	1.0%歪 134回目引張	引張破断
	KHL8M64C0.5 (1.25)		482.2	509.9	526.2	1.03	0.5%歪 970回目引張	〃
	KBL8M65C1 (1.00)		482.2	555.2	589.0	1.06	1.0%歪 119回目引張	〃

年度	試験体名	芯材写真
2018	KHL6M55G	
	KHL8M48G	
	KBL8M47C0.5	
	KBS11C37G	
	KBL8M52G	
	KHL8M62C0.5	
2019	強軸方向 局部崩壊確認	
	KHL8M62C1	
	KHL8M64C0.5	
	KBL8M65C1	

注) 〇印が破断位置, ○印が局部崩壊位置

写真2 芯材の破断及び局部崩壊位置



注) KHL8M62C1 及び KBL8M65C1 は 1%歪の, KHL8M62C0.5, KBL8M47C0.5 及び KHL8M64C0.5 は 0.5%歪の履歴ループを示す。
(☆)は栃木工場で製作した試験体を示す。

図 8 各試験体の履歴ループ

5. 考察

(1) 栃木工場で製作した試験体の製作精度と性能

栃木工場で製作した, KBS11C37G, KBL8M52G 及び KHL8M62C0.5 の芯材クリアランス寸法を表 4 に示す。クリアランス寸法精度は, 弱軸側及び強軸側とも既評定で定めた管理許容差内に収まっており, 精度よく製作されている。

実験結果は, KBS11C37G は弱軸側及び強軸側で局部崩壊を生じず, 3%軸歪 8 回目に引張破断し, KBL8M52G は 3%歪繰り返し载荷途中に強軸方向局

部崩壊を生じたが, 荷重低下は生じず, 3%軸歪 7 回目に引張破断して終了した。荷重-歪関係は, 圧縮側と引張側で同程度の荷重を負担し, 安定した履歴ループを描いており, 拘束材は有効に働いている。よって, 要求性能の 2.5%歪以下においては局部崩壊及び急激な耐力低下を生じないため, 耐震ブレースとして十分な性能を有している。

表 4 栃木工場製作試験体のクリアランス寸法検査結果

試験体名	測定・検査項目	測定寸法(mm)	管理許容差	可否
KBS11C37G	芯材弱軸側クリアランス 2S	1.0~1.8	0.5mm ≤ 2S ≤ 2.0	合格
	芯材強軸側クリアランス 2Sr	4.4~5.9	2.0mm ≤ 2Sr ≤ 6.0	合格
KBL8M52G	芯材弱軸側クリアランス 2S	1.8~2.3	0.6mm ≤ 2S ≤ 2.3	合格
	芯材強軸側クリアランス 2Sr	3.1~4.0	2.0mm ≤ 2Sr ≤ 6.0	合格
KHL8M62C0.5	芯材弱軸側クリアランス 2S	0.7~2.3	0.6mm ≤ 2S ≤ 2.3	合格
	芯材強軸側クリアランス 2Sr	4.4~6.0	2.0mm ≤ 2Sr ≤ 6.0	合格

(2) エネルギー吸収性能

累積塑性歪エネルギー率 ω_u と拘束指標 R の関係を示す評価式を, 神奈川大学の岩田教授らが提案²⁾している(図 9 の実線)。同図に本実験と 2016 年度及び 2017 年度の制振ブレース実験結果^{1)及び3)}を重ねると, 全て評価式を上回る結果である。なお, 定振幅 1%以下の全実験は, ω_u の値が 2500 を超えるため, 図 9 には表示していない。また, 栃木工場で製作した試験体は, 全て評価式を十分上回っている。

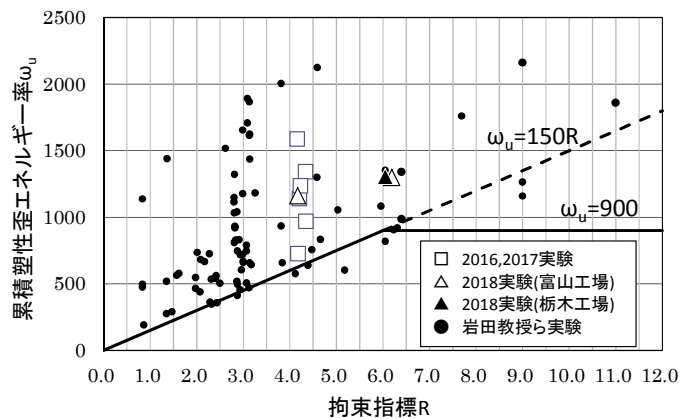
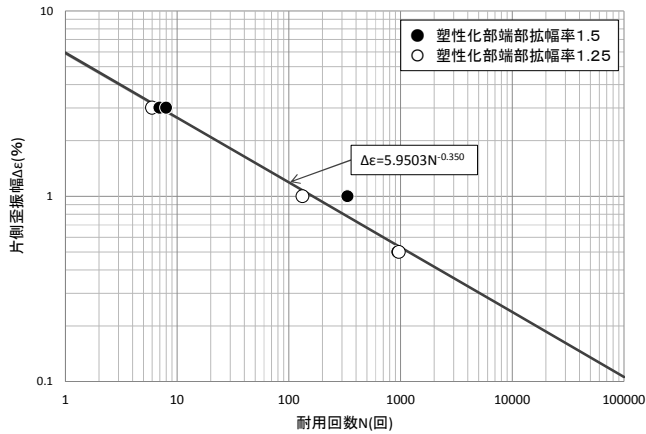


図 9 制振ブレースの ω_u -R 関係

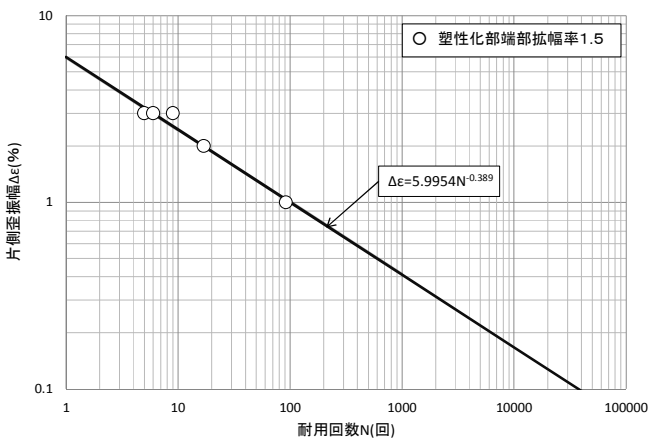
(3) 疲労曲線式

本実験と 2016~2017 年度の実験のうち, 芯材に LY225 を使用した試験体の漸増载荷と疲労試験の実験結果を用いて疲労曲線式を算出した(図 10)。疲労曲線式は, 芯材端部形状毎に算出し, 端部拡幅タイプについては, さらに芯材塑性化部断面の幅厚比が 6 と 8 の疲労曲線式をそれぞれ算出している。歪振幅 Δe は圧縮または引張の片側歪振幅とし, 耐用回数 N は所定の歪振幅における繰り返し回数を示す。なお, 3%歪に採用した漸増载荷の試験体は, 当該歪振幅時の繰り返し回数を使用した。また, 疲労

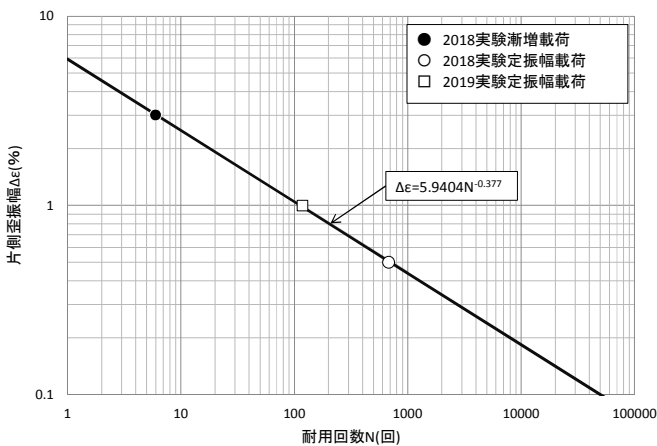
性能を比較するためにそれぞれの疲労曲線を重ねたグラフを図 11 に示す。高歪振幅域は耐用回数に大きな違いが見られないが、低歪振幅域では差が大きくなり、端部拡幅タイプ（幅厚比 8）が最も回数が多く、次に端部拡幅タイプ（幅厚比 6）、ストレートタイプ（幅厚比 8）の順となる。



端部拡幅タイプ（芯材塑性化部幅厚比 8）疲労曲線図



端部拡幅タイプ（芯材塑性化部幅厚比 6）疲労曲線図



ストレートタイプ（芯材塑性化部幅厚比 8）疲労曲線図

図 10 疲労曲線図（芯材 LY225）

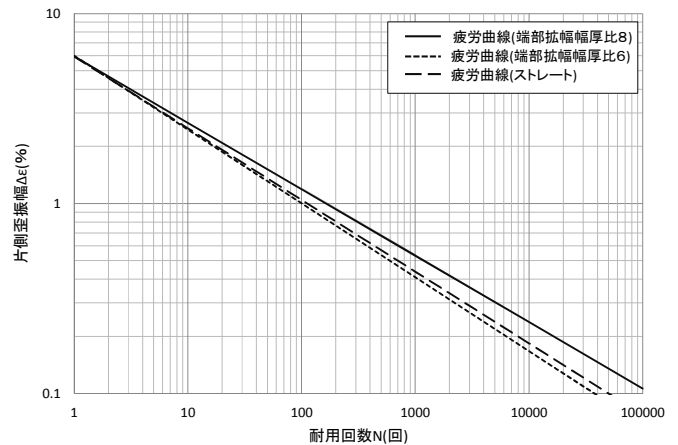


図 11 疲労曲線の比較（芯材 LY225）

(4) 強軸方向局部崩壊時の芯材状況

実験中に強軸方向局部崩壊を生じ、最終的に引張破断した KBL8M52G 試験体と、強軸方向局部崩壊が生じた時点で载荷終了した、強軸方向局部崩壊確認用試験体について、解体調査と考察を行う。

a) KBL8M52G 試験体の解体後芯材状況

芯材の破断位置は、中央部から 150mm の位置であった（写真 3）。破断箇所と強軸方向局部崩壊の生じた箇所の、解体後芯材幅と厚さを図 12 に示す。実験前の芯材幅は 128.0mm であったが、実験後の幅は 4.8mm 小さくなっている箇所があり、局部的に 7.5% の引張歪が残っていたと推定される。

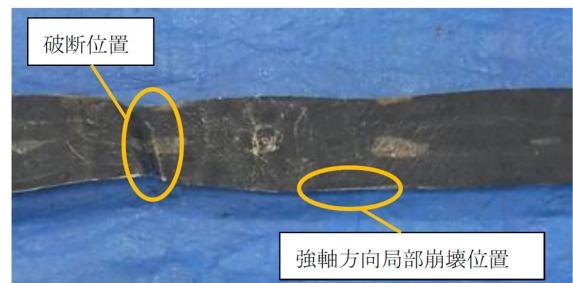


写真 3 KBL8M52G 試験体の芯材状況



図 12 KBL8M52G 試験体の芯材寸法（解体後）

b) 強軸方向局部崩壊確認用試験体

解体後の芯材状況を写真 4 に示す。また、強軸方向局部崩壊の生じた箇所の、解体後芯材幅と厚さを図 13 に示す。実験前の芯材塑性化部幅は 127.5mm であったが、実験後は 2.5mm 小さくなった所があり、

局部崩壊発生時は局所的に 4.0%の引張歪が残っていたと推定される。



写真4 局部崩壊確認用試験体の解体後状況



図13 局部崩壊確認用試験体の芯材寸法（解体後）

c) 局所的な引張歪の増大が及ぼす影響

強軸方向局部崩壊の発生した試験体は、芯材の局部崩壊位置で局所的に 4.0~7.5%の引張歪が残っていた。芯材塑性化部の全体歪は 3.0%であるが、それより大きな引張歪が局所的に残っていたことになる。このことは、あたかも芯材とスパーサー間のクリアランスが増大したことに等しい。これにより補剛力が増大し、強軸方向局部崩壊を早めたと推定される。この局所的な引張歪の増大は、過去の芯材材質が SN490B の実験では見られず、LY225 の試験体に限られる。よって LY225 を用いる場合は、この現象を考慮して拘束材を設計する必要がある。

d) 補剛力計算式の検討

試験体の強軸方向局部崩壊の検討は、(1)式⁴⁾の補剛力Bを用いている。

$$B = 2 \times \frac{2s_r + v_c \epsilon_t d B_c}{\ell_p} \cdot P_{max} \quad (1)$$

ここで、 $2s_r$: 強軸方向クリアランス、 v_c : 芯材の塑性ポアソン比=0.5、 ϵ_t : 芯材塑性化部の引張応力軸歪、 $d B_c$: 芯材の板幅、 ℓ_p : 芯材の高次座屈モード波長(図14)。

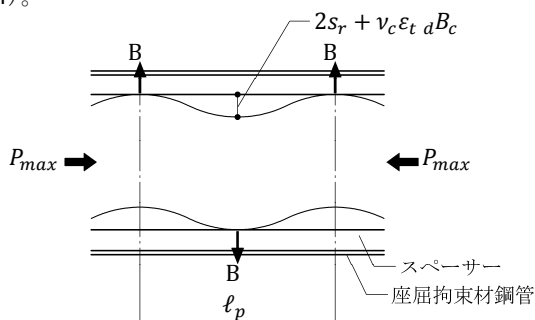


図14 強軸方向の補剛力

また、試験体の拘束材耐力 P_{rib} は(2)式⁴⁾を用いている。

$$P_{rib} = 2t_r^2 \sigma_{ry} \quad (2)$$

ここで、 t_r : 拘束材鋼管板厚、 σ_{ry} : 拘束材鋼管の降伏応力度。

次に、強軸方向局部崩壊を生じた KHL8M48G、KBL8M52G の試験体について、全体歪の補剛力(軸歪 $\epsilon_t = 0.03$)、局所的引張歪(軸歪 $\epsilon_t = 0.075$)で計算した補剛力、及び拘束材耐力を表5に示す。両試験体は、局所的引張歪で計算した補剛力が座屈拘束材耐力を上回る結果となり、実験結果と整合する。よって補剛力の計算には、局所的な引張歪の増大を考慮する必要があると考える。

表5 補剛力の比較

	① $\epsilon_t = 0.03$ の補剛力 (kN)	② $\epsilon_t = 0.075$ の補剛力 (kN)	③ 拘束材耐力 P_{rib} (kN)	②/③
KHL8M48G	11.6	16.3	15.7	1.04
KBL8M52G	8.73	13.3	11.7	1.14

6. まとめ

- (1) 当社栃木工場で試験体を製作した。クリアランス寸法は既評定で定めた管理許容差内に収まっており、精度良く製作できた。また、製作した試験体は、実験で軸歪 2.5%以下の繰り返し載荷において局部崩壊及び急激な耐力低下を生じず、耐震ブレースとしての十分な性能が得られた。
- (2) 芯材の端部拡幅率が 1.25 の試験体は、1.5 の試験体と比べても疲労の耐用回数に大きな差はなく、累積塑性歪エネルギー率 ω_u は性能評価式を上回った。
- (3) 本実験と過去の実験結果より、芯材に LY225 を使用したときの、芯材端部形状毎の疲労曲線式を算出した。高歪振幅域は耐用回数に違いは見られないが、低歪振幅域では耐用回数に大きな差が見られ、疲労性能の高い順から並べると、端部拡幅タイプ(幅厚比 8)、端部拡幅タイプ(幅厚比 6)、ストレートタイプ(幅厚比 8)になる。
- (4) 芯材に LY225 を使用した実験で強軸方向局部崩壊が生じた試験体があり、解体して原因を調査したところ、局部崩壊位置で局所的に 4.0~7.5%の引張歪が残っていた。その結果、クリアランスが増大して補剛力が増加し、強軸方向局部崩壊を早めたと推定する。よって、芯材に LY225 を用いる場合は、局所的な引張歪の増大を考慮して補剛力を決める

必要がある。

7. 謝辞

技術的ご指導を頂いた神奈川大学工学研究所の岩田衛教授，神奈川大学工学部建築学科の藤田正則教授，中村慎特別助手，(有)ISBT の村井正敏技術部長，構造実験にご協力を頂いた神奈川大学工学部建築学科藤田研究室の学生に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 谷ヶ崎庄二，田中康一，内野卓：座屈拘束ブレースの実用化，川田技報，Vol.37，pp.34-40，2018
- 2) 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701号，pp.1015-1023，2014.7.
- 3) 谷ヶ崎庄二，田中康一，内野卓：座屈拘束ブレースの実験的研究，川田技報，Vol.38，pp.3-1~3-6，2019
- 4) 竹内徹，松井良太，ジェロム・ハジャー，西本晃治，イアン・アイケン：座屈拘束ブレースにおける芯材局部座屈の拘束条件，日本建築学会構造系論文集，第73巻，第634号，2231-2238，2008.12.