

論文・報告

座屈拘束ブレースの実験的研究

～「ハイパー・ブレース」の充填材変更～

Experimental Study on the Buckling Restrained Brace

谷ヶ崎 庄二 *1
Syoji YAGASAKI

田中 康一 *2
Koichi TANAKA

内野 卓 *3
Suguru UCHINO

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。2017 年度は充填材の変更を目的として各種実験を実施し、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、これらの追加実験と実験中に発生した弱軸方向局部崩壊の探究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、充填材、弱軸方向局部崩壊

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
- ・接合部ガセットプレート形状を小さくできる

なお、各特長の詳細については文献 1) を参照されたい。

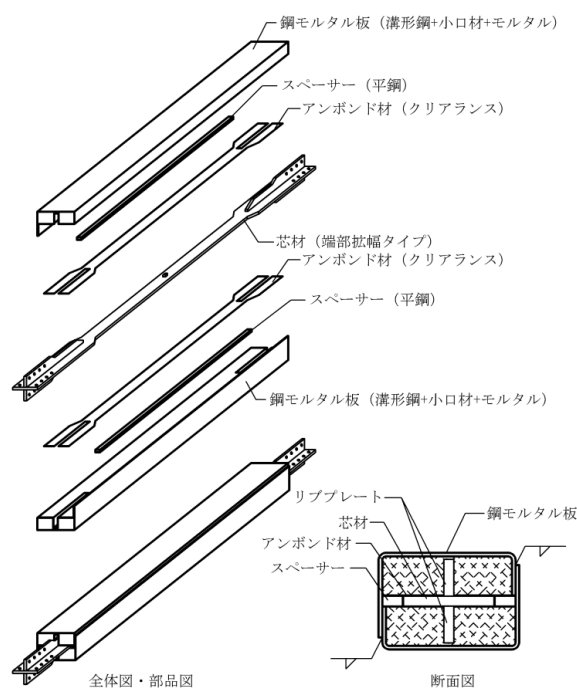


図 1 ハイパー・ブレース部材構成図

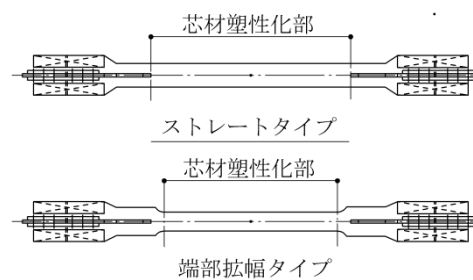


図 2 芯材タイプ

*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

前年度に実用化したハイパー・ブレースから、充填材に関する以下の変更点を確認する。

- ・ 充填材にコンクリートを使用した場合の性能
- ・ 耐震用及び制振用の各ブレースにおける充填材の必要圧縮強度

(2) 試験体

試験体は、ストレートタイプ 3 体、端部拡幅タイプ 6 体の計 9 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。充填材にコンクリートを使用した試験体は 8 体であり、圧縮強度の性能差を確認するために漸増载荷の試験体は 4 種類の強度 (Fc27, 36, 45, 55) で計画した。また、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、5.4%~9.3%であった。試験体は全て当社の富山工場で作製した。

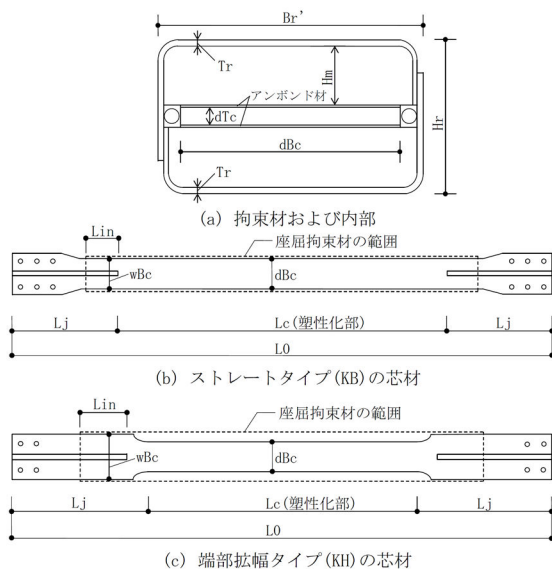


図 3 試験体寸法記号

表 1 試験体緒元 (拘束材)

試験体名	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)
KB11M39G	SS400	4.5 × 174.5 × 92.3	モルタル	39.1	35
KB11C55G	SS400	〃		55.5	
KH8C25G	SS400	4.5 × 159.5 × 126.3	コンクリート	25.2	52
KH8C34G	SS400	〃		34.1	
KB11C34G	SS400	3.2 × 155.2 × 105.7		34.2	43
KH6C44G	SS400	4.5 × 152.0 × 106.5		44.4	
KH6C44C1	SS400	〃		44.4	40
KH6C45C2	SS400	〃		45.5	
KH6C46C3	SS400	〃		46.1	

表 2 試験体緒元 (芯材)

試験体名	芯材タイプ	鋼材種類	拘束指標 R (=P _E /P _y)	芯材板厚 dT _c (mm)	芯材幅 dB _c (mm)	幅厚比 dB _c /dT _c	塑性化部長さ比 L _c /L ₀	備考
KB11M39G	KB	SN490B	1.90	12	132	11	61%	漸増载荷
KB11C55G	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	
KH8C25G	KH	〃	5.08	〃	96	8	53%	
KH8C34G	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	
KB11C34G	KB	〃	1.62	〃	132	11	61%	疲労 1%
KH6C44G	KH	LY225	3.87	16	96	6	54%	
KH6C44C1	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	
KH6C45C2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	
KH6C46C3	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	

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} / w_{Bc} は全て 1.0 とした

(3) 载荷装置と载荷概要

载荷実験は、神奈川大学の実験施設で実施した。図 4 に载荷装置の全体図、写真 1 に試験体設置状況を示す。载荷には 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 に载荷履歴図の例を示す。漸増载荷の最終 3% 歪载荷は、荷重が 80% に低下するまで繰り返した。

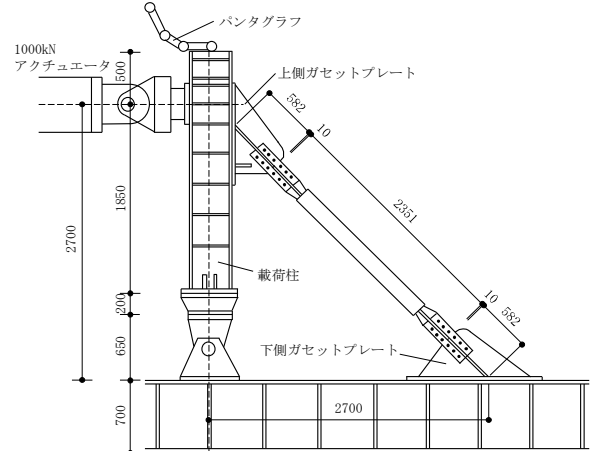


図 4 载荷装置全体図



写真 1 試験体設置状況

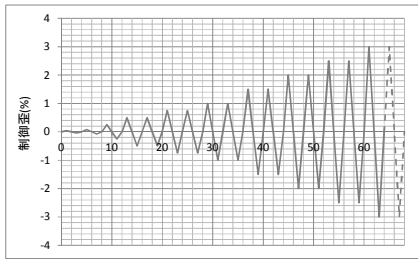


図5 漸増載荷の载荷履歴

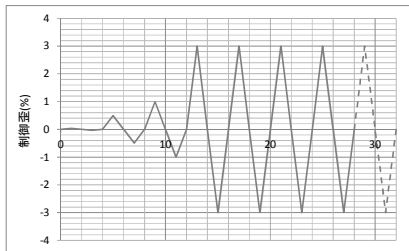


図6 疲労試験载荷(3%歪)の载荷履歴

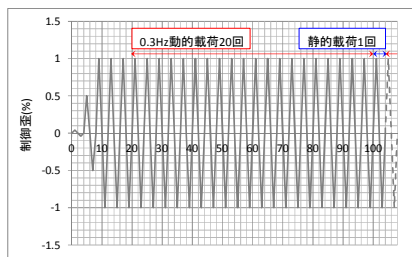


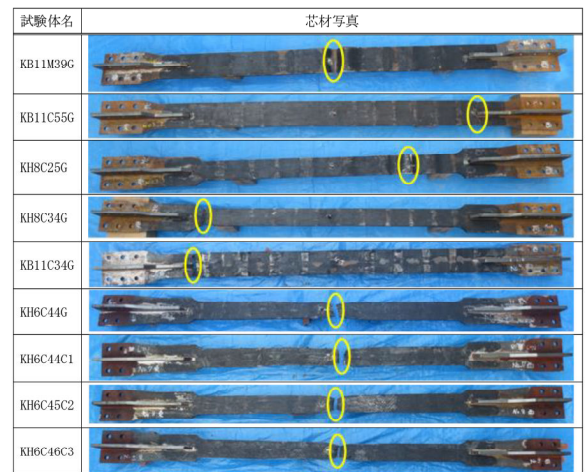
図7 疲労試験载荷(1%歪)の载荷履歴

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。実験の終局状態は、KB11M39GとKH8C25Gが弱軸方向で局部崩壊を生じ、その他の試験体については引張破断であった。また、充填材がコンクリートの試験体は、モルタルを使用した前年度の実験結果と比べても履歴ループに差は見られなかった。

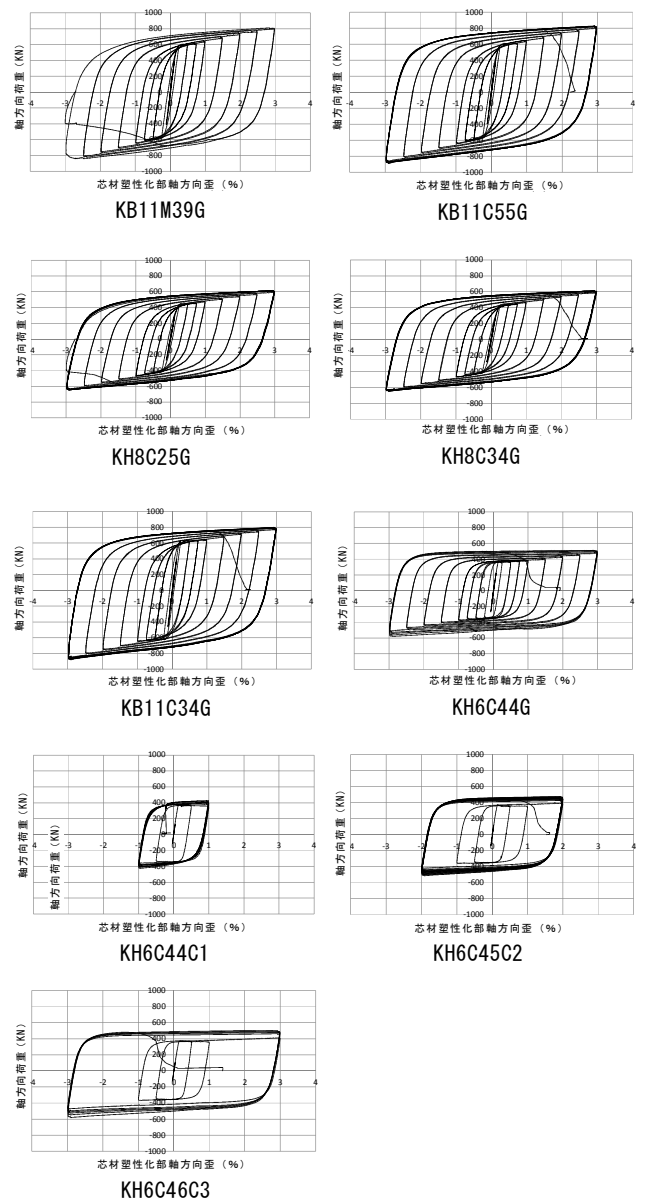
表3 実験結果一覧

試験体名	降伏荷重 P_y (kN)	最大耐力(kN)		圧縮引張 耐力比 P_{-max}/P_{+max}	崩壊時载荷数	終局状態
		引張 P_{+max}	圧縮 P_{-max}			
KB11M39G	610.6	811.6	841.0	1.03	3.0%歪 1回目圧縮	弱軸局部崩壊
KB11C55G	610.6	825.2	889.3	1.08	3.0%歪 10回目引張	引張破断
KH8C25G	444.1	614.3	646.5	1.05	3.0%歪 12回目圧縮	弱軸局部崩壊 (支圧圧壊)
KH8C34G	444.1	612.2	648.8	1.06	3.0%歪 13回目引張	引張破断
KB11C34G	650.3	798.5	881.2	1.11	3.0%歪 14回目引張	
KH6C44G	374.3	510.5	581.3	1.14	3.0%歪 6回目引張	
KH6C44C1	372.0	428.8	424.0	0.99	1.0%歪 93回目引張	
KH6C45C2	374.3	474.4	512.4	1.08	2.0%歪 18回目引張	
KH6C46C3	376.6	502.6	579.2	1.15	3.0%歪 7回目引張	



注) ○印が破断及び局部崩壊位置

写真2 芯材の破断及び局部崩壊位置



注) KH6C44C1は1%歪の、KH6C45C2は2%歪の、KH6C46C3は3%歪の試験履歴ループを示す。

図8 各試験体の履歴ループ

5. 考察

(1) 充填材の必要圧縮強度

充填材の必要圧縮強度を調べるために 25N/mm² と 34N/mm² の実験結果を比較検討する。実験後の解体調査において、34N/mm² の試験体は充填材表面が健全であるのに対し、25N/mm² の試験体は充填材表面に支圧圧壊が発生していた。さらに表4に示す Hertz の接触理論を用いた検討では、軸歪 3% に対し 34.4N/mm² の支圧圧壊下限強度を得ている。従って、実験試験体が少ないことも考慮し、軸歪 2% 以下の使用（耐震用）においては 36N/mm² 以上、軸歪 3% 以下の使用（制振用）においては 45N/mm² 以上を必要圧縮強度とした。

表 4 Hertz の接触理論を用いた検討

芯材断面 (mm)	芯材軸力 (KN)	補剛力 (KN)	接触幅 (mm)	接触応力 (N/mm ²)	必要圧縮強度 (N/mm ²)
12×132	849.4	40.3	4.5	68.7	34.4
40×440	9438.0	265.3	14.0	43.2	21.6

注) 芯材軸力は 3% 歪時の座屈拘束材設計用軸力とする
 接触幅は芯材の高次モード波形を正弦波とした時の接触部曲率半径より Hertz の接触理論を用いて計算した
 必要圧縮強度は支圧強度を 2Fc (圧縮強度の 2 倍) とした

(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)。同図に本実験と前年度の制振ブレース実験結果¹⁾を重ねると、評価式を上回る結果であった

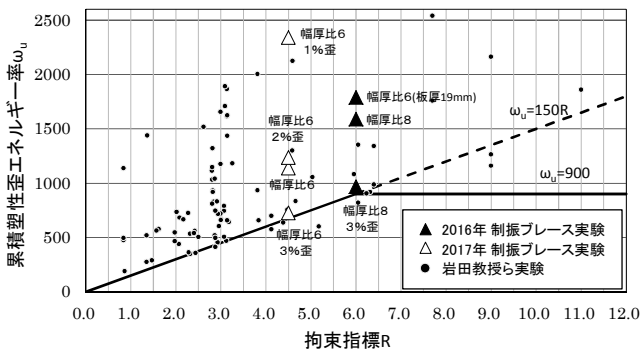


図 9 各試験体の ω_u -R 関係

(3) 疲労性能

疲労曲線を岩田教授らが提案³⁾している (図 10 の実線)。同図に本実験と前年度の一定振幅載荷実験結果¹⁾を重ねると、提案式を若干下回る結果となった。原因としては、岩田教授らは芯材が SN400B、当社は LY225 を使用している差と思われる。また、2016 年度と 2017 年度では芯材幅厚比が異なっており、幅厚比 8 (□印) は幅厚比 6 (■印) よりも疲労性能が高い結果となった。

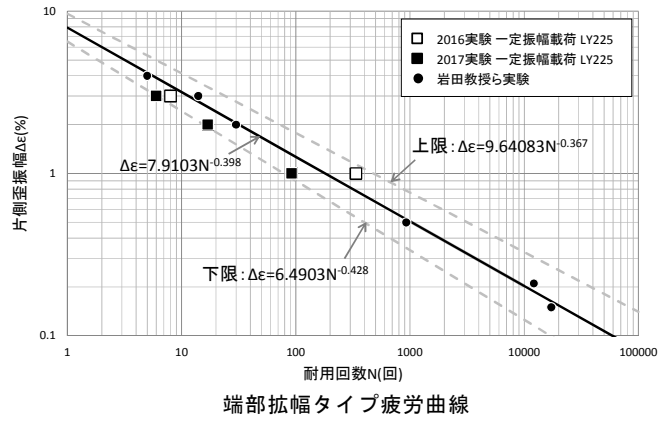


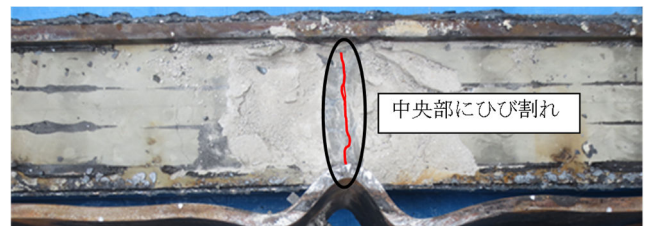
図 10 疲労曲線図

(4) 弱軸方向局部崩壊

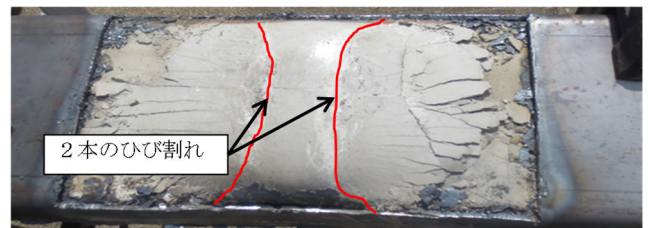
本節では、最終状態が弱軸方向局部崩壊であった KB11M39G 試験体と KH8C25G 試験体に対して考察を行う。

a) 解体調査結果

試験体の壊れ方を把握するために、充填材の表面 (図 3 断面図にて芯材と接する面のこと、写真 3(a)、4(a)) だけではなく、拘束材を切断して充填材の裏面 (写真 3(b)、4(b)) も確認した。写真 3 に KB11M39G 試験体の破壊状況を示す。表面に着目すると、芯材が当たって凹んだ部分の底に、幅方向に延びるひび割れが見られた。また、モルタル裏面を見ると、拘束材の幅方向に 2 本の大きなひび割れが見られた。写真 4 に KH8C25G 試験体の破壊状況を示すが、表面の凹んだ部分の底にひび割れは見られず、裏面においても拘束材の幅方向に延びるひび割れは確認できなかった。解体調査結果から、両試験体を比較すると、同じ局部崩壊ではあったが充填材の壊れ方に違いがあることがわかった。



(a) 充填材の表面



(b) 充填材の裏面

写真 3 KB11M39G 試験体の解体状況



(a) 充填材の表面

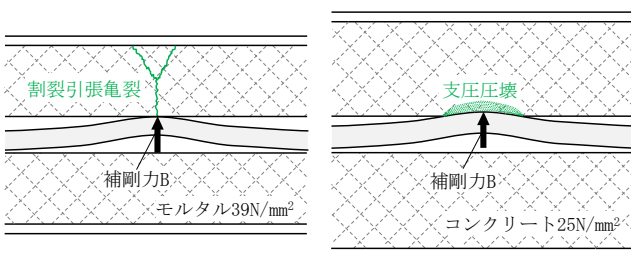


(b) 充填材の裏面

写真 4 KH8C25G 試験体の解体状況

b) 破壊形式

解体調査から試験体の破壊形式の推定を行う。KB11M39G 試験体は、圧縮強度が 39N/mm² と高めであったが充填材が薄いために図 11(a)の様な割裂引張亀裂が発生し、同時に補剛点がめり込んでクリアランスが大きくなり、局部崩壊に至ったのではないかと推定される。一方、KH8C25G 試験体は、充填材は厚いが圧縮強度が 25N/mm² と低く、図 11(b)の様な支圧圧壊が発生してクリアランスが大きくなり、局部崩壊に至ったのではないかと推定される。この 2 体の試験体は、充填材において異なった破壊形式となっており、後者の破壊は充填材の圧縮強度を制限して防ぐことができる。そこで、次は前者の破壊形式に着目し、充填材の必要厚さや必要強度を検討する。



(a) 割裂引張破壊

(b) 支圧圧壊

図 11 充填材の破壊イメージ

c) 充填材に必要な厚さと強度

弱軸方向局部崩壊の検討には(1)式の補剛力Bを用いる。

$$B = \frac{2(2s + \nu_c \epsilon_t T_c)}{\ell_n} \cdot P_{max} \quad (1)$$

ここで、2s：弱軸方向クリアランス、 ν_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、 T_c ：芯材の板厚、 ℓ_n ：芯材の高次座屈モード波長。(1)式は、鋼構造座屈設計指針⁴⁾の補剛力式と係数が異なっている。ハイパー・ブレースは、芯材をアンボンド材で圧を掛けて挟んでいることから、芯材は充填材間の中央に位置し、軸力は部材心に働くと考えて補剛力の値は指針式の半分にした(図 12)。

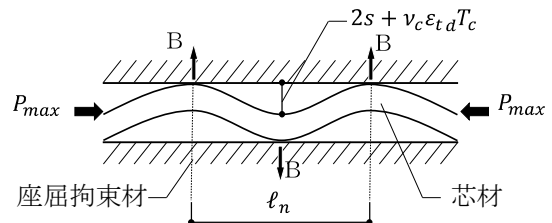


図 12 弱軸方向の補剛力

次に、局部崩壊を起こした充填材に割裂引張亀裂が見られたことから、(2)式で示す充填材の割裂引張耐力 P_t と補剛力Bの関係を調べる。

$$P_t = \frac{\sigma_t \cdot \pi \cdot H_m \cdot d B_c}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_t = 0.291 \times \sigma_B^{0.637} \quad (3)$$

ここで、 σ_t ：充填材の割裂引張強度⁵⁾、 H_m ：充填材厚さ、 $d B_c$ ：芯材塑性化部の幅、 σ_B ：充填材の圧縮強度。図 13 に、縦軸が B/P_t 、横軸が圧縮強度の関係を示す。グラフにはクリアランスが詳細に計測されている文献⁶⁾の試験体も三角マークでプロットされている。 B/P_t が 1.0 を境に引張破断と局部崩壊が分かれており、終局状態と割裂引張耐力に高い相関性が見られた。

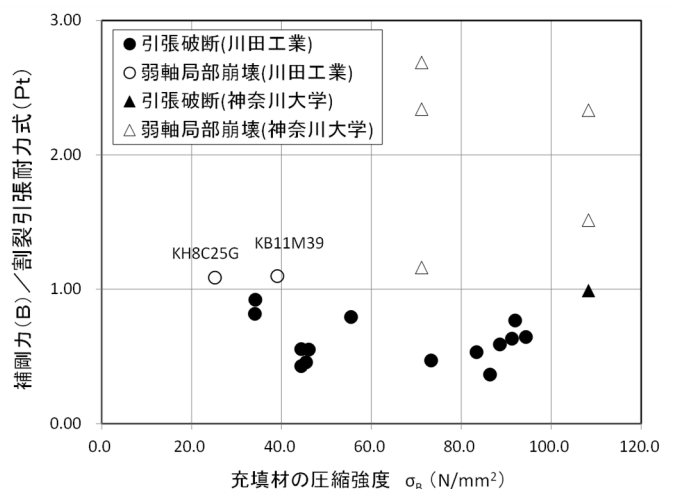


図 13 B/P_t指標－充填材圧縮強度関係

6. まとめ

- (1) 実験結果より、充填材にコンクリートを使用した場合においても復元力特性と疲労性能に差はなかった。
- (2) 充填材が支圧圧壊を生じない圧縮強度として、耐震用においては 36N/mm^2 以上、制振用においては 45N/mm^2 以上とした。
- (3) 弱軸方向局部崩壊が生じた試験体があり原因を調査したところ、充填材に2種類の破壊形式（支圧圧壊、割裂引張破壊）が存在した。両者とも充填材の破壊をきっかけとしてクリアランスが増大して補剛力が増加し、弱軸方向局部崩壊に至ったと推定する。そこで割裂引張破壊の破壊形式について、割裂引張耐力と補剛力の関係を調べ、終局状態と高い相関性があることを確認した。

7. 謝辞

技術のご指導を頂いた神奈川大学工学研究所の岩田衛教授、小谷野一尚特別助手（当時）、有限会社 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岩田研究室の大学院生と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.34-40，2018.1.
- 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) 小谷野一尚，小出秀一，中込忠男，緑川光正，岩田衛：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，日本建築学会技術報告集，第 50 号，pp.115-119，2016.2.
- 4) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針 2018 改定
- 5) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第 472 号，11-16，1995.6.
- 6) 小谷野一尚，成井涼平，菊池剛和，岡崎太一郎，緑川光正，岩田衛：鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースのクリアランスとモルタル強度が力学性能に及ぼす影響，神奈川大学工学研究，第 1 号，pp. 1-6，2017. 12.