

座屈拘束ブレースの実用化

～商品名「ハイパー・ブレース」～

Practical Application of Buckling Restrained Brace, Named “Hyper Brace”

谷ヶ崎 庄二*¹
Syoji YAGASAKI

田中 康一*²
Koichi TANAKA

内野 卓*³
Suguru UCHINO

「ハイパー・ブレース」は、耐震・制振ブレースとして使用する座屈拘束ブレースであり、神奈川大学が保有する特許の実施権許諾を受け、川田工業(株)（以下、当社）が追加実験等を行い実用化したものである。実用化の手順としては、初めに各種確認実験を実施し、構造性能、製作精度および品質管理方法等を確認した。次に設計方法と設計式を決定し、一般財団法人日本建築センターの鋼構造評定を取得して建築物に使用できる体制を整えた。さらに、設計の効率化を目的として数種類の設計ソフトを開発した。本稿では、ハイパー・ブレースの特徴とこれらの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、評定、ソフト開発

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・超高層建築物等の耐震ブレースや制振ダンパーとして用いられる。

2. ハイパー・ブレースの特徴

(1) 部材構成と製造方法

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から構成されるブレースである。芯材の表面にはアンボンド材を貼り、決められた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2組の鋼モルタル板で構成されており、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り、主に耐震ブレースとして使われる。

② 端部拡幅タイプ

芯材塑性化部端部を拡幅したタイプであり、主に制振ブレースとして使われる。

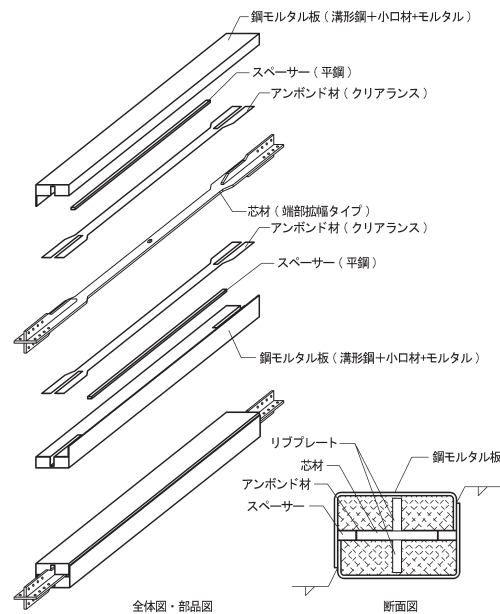


図1 ハイパー・ブレース部材構成図

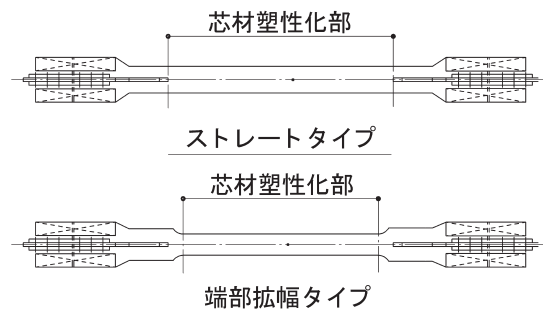


図2 芯材タイプ

*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

(2) 主な特徴

ハイパー・ブレースの優れた特徴を以下に示す。

a) 高歪時でも安定した復元力特性を有する

芯材塑性化部最大歪3%（層間変形角 $R=1/33$ 相当）の繰り返し载荷においても安定した履歴性状を示し、エネルギー吸収性能に優れている（図3）。

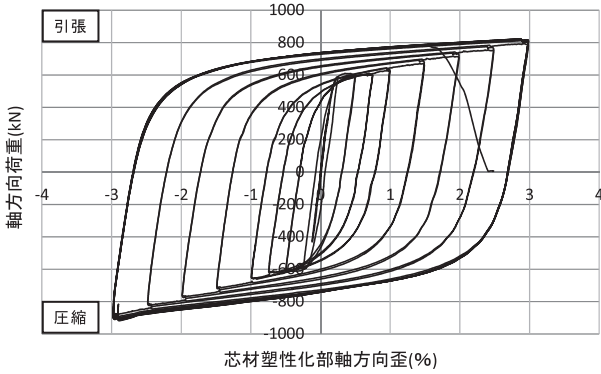


図3 構造性能確認実験の履歴ループ例

b) 端部拡幅タイプは制振用途として高性能である

端部拡幅タイプは、図4のように塑性化部端部を拡幅して塑性化部長さを短くし、軸剛性を大きくすることが可能であり、制振ダンパーとして使用する場合は芯材の塑性化を早めることができる。さらに、リブプレートは芯材塑性化部から離して脆性破壊が起こり易い溶接部を降伏させないため、低歪振幅域の高サイクル疲労性能が高い（図5）。

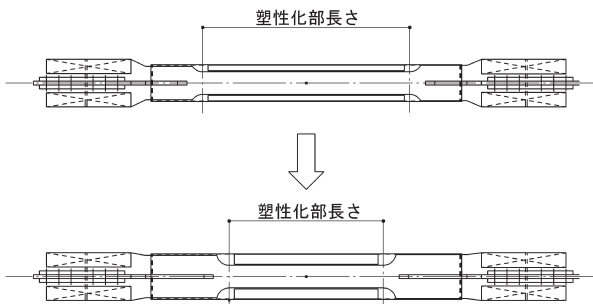


図4 端部拡幅タイプの軸剛性を大きくする場合

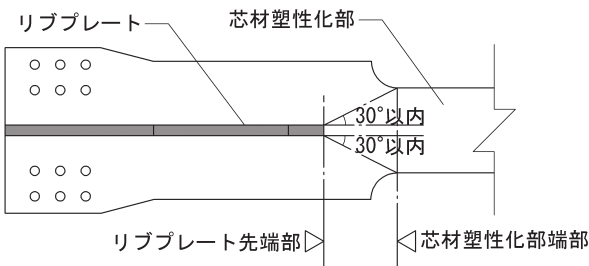


図5 端部拡幅タイプのリブプレート納まり

c) 確実な品質管理が可能である

性能の良い座屈拘束ブレースは、高歪時においても局部的な崩壊を起こさずに安定した履歴性状を有する。そのためには、充填モルタルは均一かつ平滑であり、芯材と拘束材との間に適切なクリアランスを確保することが重要である。その点ハイパー・ブレースは、製造過程でモルタルの充填状況の目視確認や、各部位寸法の測定値よりクリアランス寸法が求められるので、品質管理が確かである。性能に影響を与える部位についての品質管理記録を残すことで、製品毎のトレーサビリティが確保されている。



写真1 座屈拘束材の寸法検査状況

d) スレンダーな見栄えである

ハイパー・ブレースは、芯材を鋼モルタル板で挟んで製造するため、拘束材断面は高力ボルト接合部の幅寸法より大きくする必要はなく、設計に必要な寸法で納めることができる。また、座屈拘束材の向きは縦置き・横置きが選べるので、横置きにすることでさらに見栄えを良く（細く）見せることができる（図6）。



図6 芯材横置きの見栄え

e) 接合部ガセットプレート形状を小さくできる

座屈拘束材断面の大きさが高力ボルト接合部に影響しないため、図7のように高力ボルト本数が多いときにはボルト配置を変えて接合部の長さを短くし、接合部ガセットプレート形状を小さくすることも可能である。

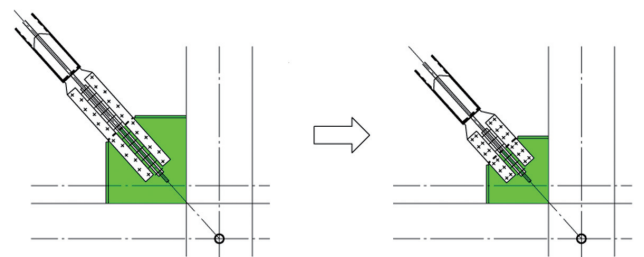


図7 ボルト配置変更によるガセット形状の違い

3. 構造性能確認実験

(1) 目的

耐力、変形性能および履歴性状等を確認することを目的に、構造性能確認実験を実施した。なお、試験体製作においては、製作試験を兼ねて製作方法、製作精度および品質管理方法を確認した。

(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4体の計7体である。試験体図を図8、試験体緒元を表1～2に示す。芯材と座屈拘束材との間の平均クリアランス比（クリアランス測定値/芯材厚さ）の測定値は、8.1%～12.9%であった。試験体は全て当社の富山工場で作成した。

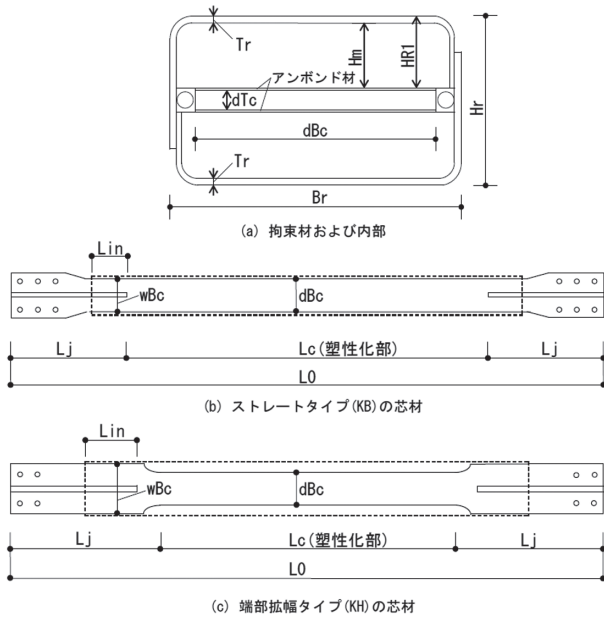


図8 試験体図

表1 試験体緒元（芯材）

試験体名	タイプ	鋼材種類	拘束指標 R ^(注) (=P _E /P _y)	芯材板厚 d _c T _c (mm)	芯材幅 d _c B _c (mm)	幅厚比 d _c B _c /d _c T _c	リブプレート貫入長さ比 L _m /wB _c	塑性化部長さ比 L _c /L ₀	備考
KB11R1.5G	KB	SN490B	1.5	12	132	11	1.0	61%	漸増載荷
KB11R1.2G	KB	SN490B	1.2	12	132	11	1.0	61%	漸増載荷
KB11R1.5G0	KB	SN490B	1.5	12	132	11	1.0	61%	構面外変形後 漸増載荷
KH8R6.0C1	KH	LY225	6.0	16	128	8	1.0	50%	疲労試験
KH8R6.0C3	KH	LY225	6.0	16	128	8	1.0	50%	疲労試験
KH6R6.0G	KH	LY225	6.0	19	114	6	1.0	50%	漸増載荷
KH8R6.0G0	KH	LY225	6.0	16	128	8	1.0	50%	構面外変形後 漸増載荷

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

表2 試験体緒元（座屈拘束材）

試験体名	鋼材種類	鋼材断面 T _r ×B _r ×H _r	モルタル厚さ H _m (mm)
KB11R1.5G	SS400	3.2×158.4×91.4	35.5
KB11R1.2G	SS400	3.2×158.4×83.2	31.4
KB11R1.5G0	SS400	3.2×158.4×91.4	35.5
KH8R6.0C1	SS400	3.2×208.4×126.0	50.8
KH8R6.0C3	SS400	3.2×208.4×126.0	50.8
KH6R6.0G	SS400	3.2×192.4×135.0	53.8
KH8R6.0G0	SS400	3.2×208.4×126.0	50.8

(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9に載荷装置の全体図、写真2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10～12に載荷履歴図を示す。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し行った。試験体KB11R1.5G0およびKH8R6.0G0は、あらかじめブレース構面外方向に層間変形角1/100相当の水平変形を与えて漸増載荷実験を行い、構面外不安定機構を確認した。

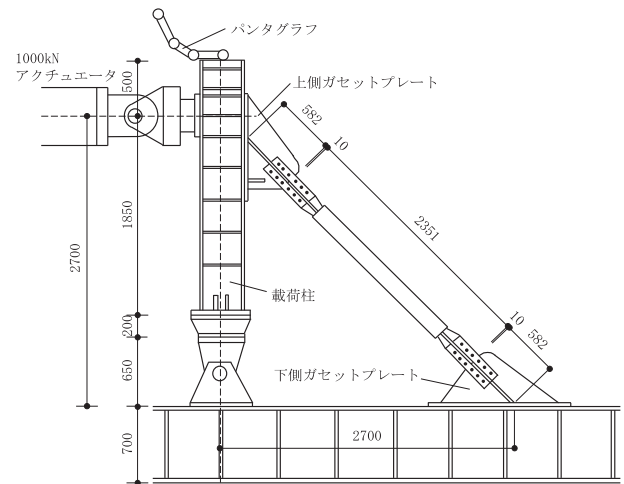


図9 載荷装置全体図



写真2 試験体設置状況

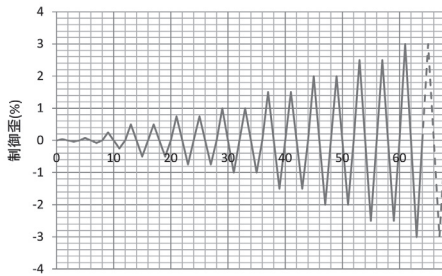


図 10 漸増载荷の载荷履歴

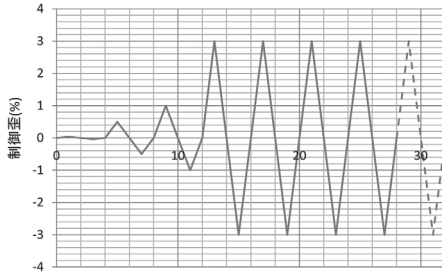


図 11 疲労試験载荷 (3%歪) の载荷履歴

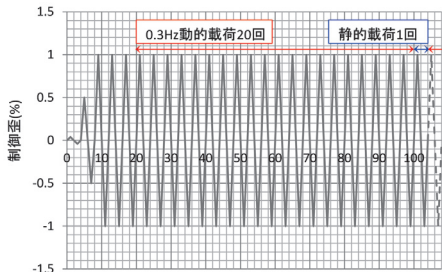


図 12 疲労試験载荷 (1%歪) の载荷履歴

(4) 実験結果

表 3 に実験結果一覧, 写真 3 に芯材破断状況写真, 図 13 に履歴ループを示す。本実験の終局状態は, 全試験体が引張破断であった。しかし, KH8R6.0C3, KH6R6.0G 及び KH8R6.0G0 の 3 体においては, 3 %歪の繰り返し载荷途中に強軸側の拘束材表面でふくらみ (局部崩壊) が発生したが, 目立った耐力低下は起こっていない。構面外変形を与えた試験体には構面外不安定機構は生じなかった。

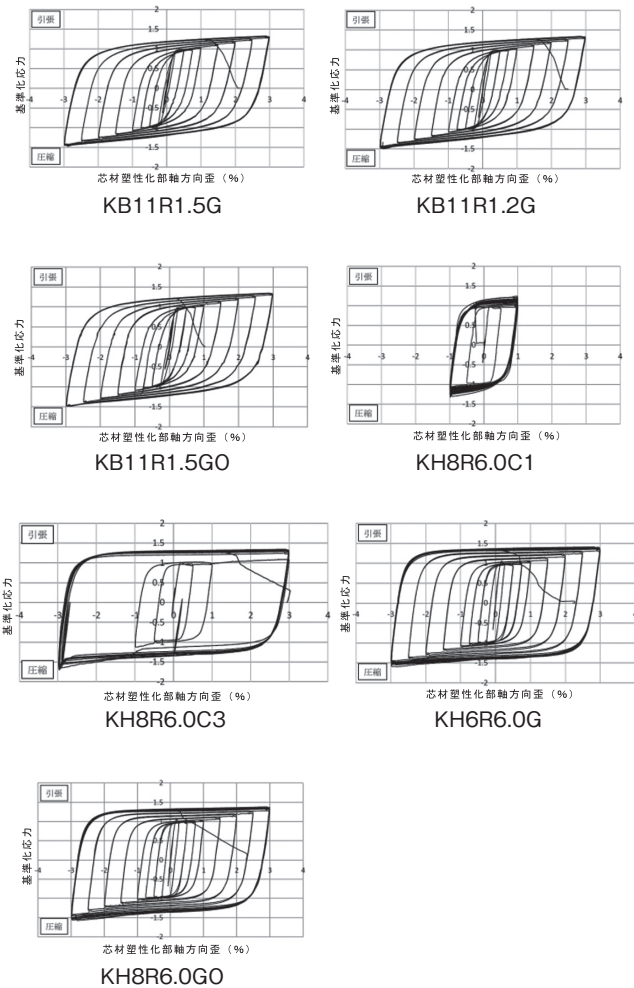
表 3 実験結果一覧

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}	実験終了時 载荷数	終局状態
		引張 P _{+max}	圧縮 P _{-max}			
KB11R1.5G	620.7	823.2	912.2	1.10	3.0%歪 11 回目引張側	引張破断
KB11R1.2G	615.6	822.8	917.2	1.11	3.0%歪 12 回目引張側	引張破断
KB11R1.5G0	610.6	804.3	906.1	1.13	3.0%歪 8 回目引張側	引張破断
KH8R6.0C1	493.3	613.0	652.3	1.06	1.0%歪 337 回目引張側	引張破断
KH8R6.0C3	493.3	666.8	841.2	1.26	3.0%歪 9 回目引張側	3.0%歪 8 回目引張側時に局部崩壊発生 最終は引張破断
KH6R6.0G	497.6	701.8	794.3	1.13	3.0%歪 10 回目引張側	3.0%歪 7 回目引張側時に局部崩壊発生 最終は引張破断
KH8R6.0G0	496.5	659.8	757.8	1.15	3.0%歪 10 回目引張側	3.0%歪 5 回目引張側時に局部崩壊発生 最終は引張破断

試験体名	芯材写真
KB11R1.5G	
KB11R1.2G	
KB11R1.5G0	
KH8R6.0C1	
KH8R6.0C3	
KH6R6.0G	
KH8R6.0G0	

注) ○印が破断位置

写真 3 芯材破断状況写真



注) KH8R6.0C1 は 1%歪の, KH8R6.0C3 は 3%歪の疲労試験履歴ループを示す。

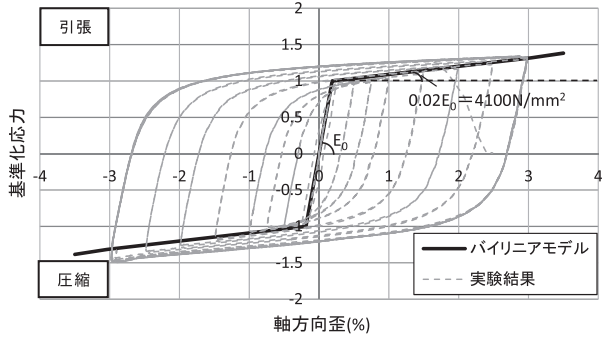
図 13 各試験体の履歴ループ

(5) 実験の考察

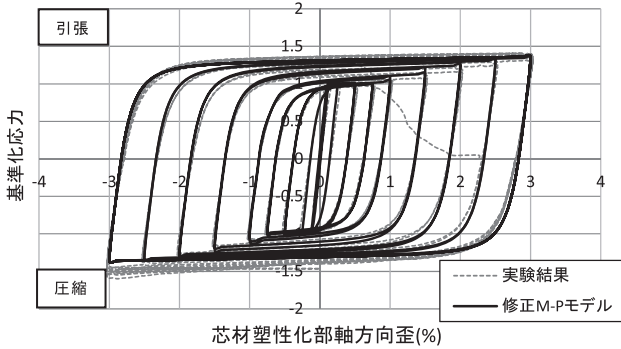
主な考察を以下に示す。

a) 履歴ループ

本実験の履歴ループをバイリニアモデルと修正 Menegotto - Pinto (修正 M - P) モデルで比較した (図 14)。3%歪以下においては、各履歴モデルは実験を精度よく再現できることを確認した。



KB11R1.2G とバイリニアモデルの比較



KH6R6.0G と修正 M-P モデルの比較

図 14 各履歴モデルとの比較

b) 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¹⁾しており、提案式と今回の実験結果を図 15 に示す。本実験は提案式を十分に上回る結果であった。

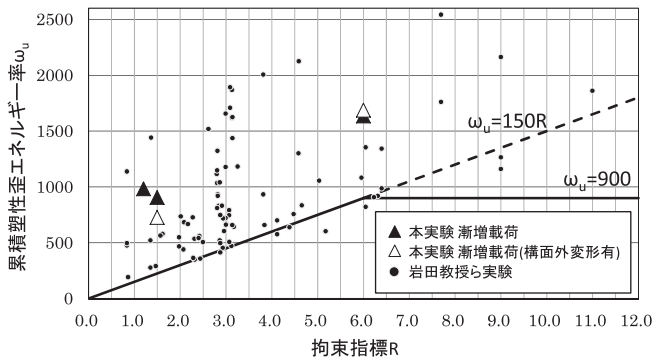
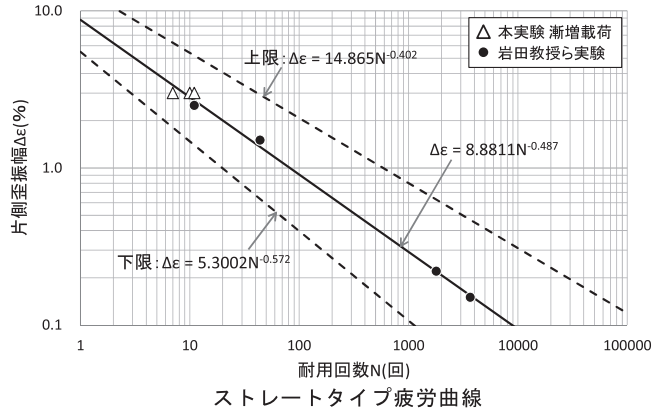


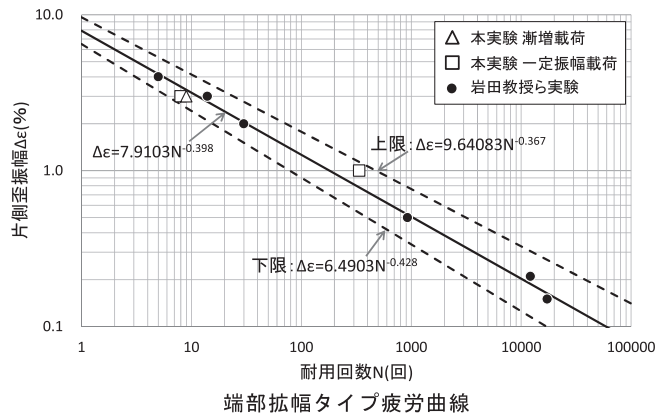
図 15 各試験体の ω_u -R 関係

c) 疲労性能

疲労曲線を岩田教授らが提案²⁾しており、提案式と今回の実験結果を図 16 に示す。本実験は提案式の実験と鋼種は異なるが、両タイプとも疲労曲線の上下限式内であった。



ストレートタイプ疲労曲線



端部拡幅タイプ疲労曲線

図 16 疲労曲線図

4. (社)日本建築センターの鋼構造評定取得

(1) 評定取得の目的

第三者機関より技術評価を得ることで、公的に性能・品質が認められ、建築物の確認申請審査において、ハイパー・ブレースの設計審査が簡略化されるメリットがある。

(2) 評定審査と評定取得

概要書、設計要領書、建築物設計上の留意点、製作要領書、実験報告書、試設計例等をまとめた評定資料を作成し、評定申込みを行い、鋼構造委員会にて受理された。その後、数回の評定部会が開催されて、評定資料の内容について質疑応答が行われ、評定書を取得することができた。

(3) ハイパー・ブレースの設計方法

設計フローを図 17 に示す。建築物設計者が設定した条件に基づいて、当社にて部材各部を設計する。使用する

る設計式は、構造性能確認実験において妥当性を確認している。建築物設計者は、接合部を含む全体系の検討を行って設計が完了する。

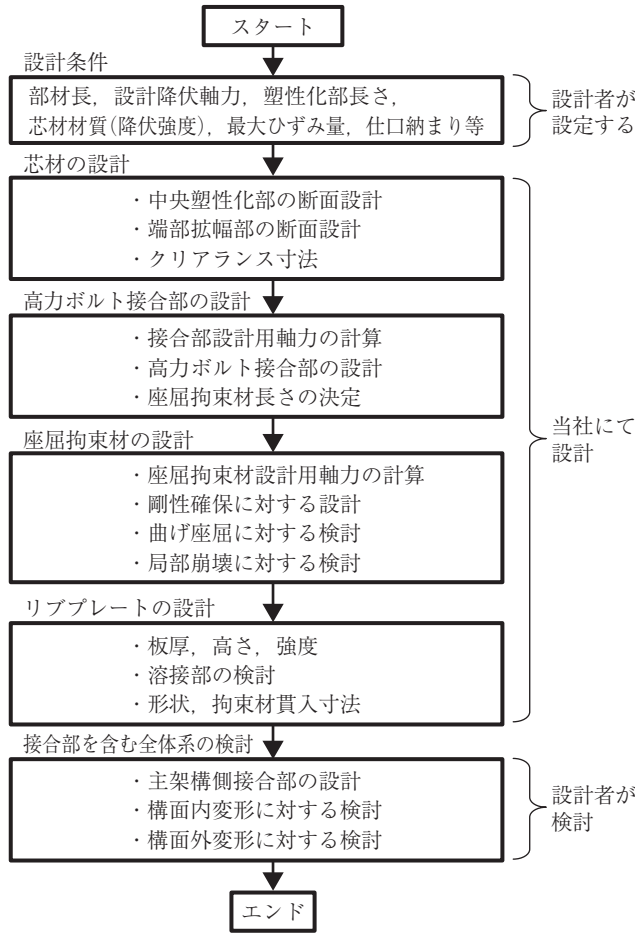


図 17 設計フロー図

5. 設計ソフトの開発

(1) 開発した設計ソフト

設計・製図および見積作業の効率化を目的として設計ソフト「ハイパー・ブレース設計システム」を開発した。ソフト開発は、川田テクノシステム(株)に委託した。その他にハイパー・ブレースの構面内変形・構面外変形に対する検討を行うエクセル計算シートおよび、ガセットプレート接合部の構面外曲げ耐力と回転剛性を計算する「RBSM 板曲げ要素弾塑性解析ソフト」を自社開発し、建築物の構造設計者をサポートできる体制を整えた。

(2) 「ハイパー・ブレース設計システム」の紹介

このソフトは、設計要領書に記載した検討事項について計算し、計算書および部材リストの出力ができる(図 18, 19)。計算書は確認申請書類に利用でき、部材リストは基準図として利用できる。

ハイパーブレースの設計

設計条件

部材長，設計降伏軸力，塑性化部長さ，芯材材質(降伏強度)，最大ひずみ量，仕口納まり等

設計者の設定

- 中央塑性化部の断面設計
- 端部拡幅部の断面設計
- クリアランス寸法

設計者の設計

- 接合部設計用軸力の計算
- 高力ボルト接合部の設計
- 座屈拘束材長さの決定

設計者の設計

- 座屈拘束材設計用軸力の計算
- 剛性確保に対する設計
- 曲げ座屈に対する検討
- 局部崩壊に対する検討

設計者の設計

- 板厚，高さ，強度
- 溶接部の検討
- 形状，拘束材貫入寸法

設計者の設計

- 主架構側接合部の設計
- 構面内変形に対する検討
- 構面外変形に対する検討

図 18 計算書の出力

部材リストの出力

設計条件

部材長，設計降伏軸力，塑性化部長さ，芯材材質(降伏強度)，最大ひずみ量，仕口納まり等

設計者の設定

- 中央塑性化部の断面設計
- 端部拡幅部の断面設計
- クリアランス寸法

設計者の設計

- 接合部設計用軸力の計算
- 高力ボルト接合部の設計
- 座屈拘束材長さの決定

設計者の設計

- 座屈拘束材設計用軸力の計算
- 剛性確保に対する設計
- 曲げ座屈に対する検討
- 局部崩壊に対する検討

設計者の設計

- 板厚，高さ，強度
- 溶接部の検討
- 形状，拘束材貫入寸法

設計者の設計

- 主架構側接合部の設計
- 構面内変形に対する検討
- 構面外変形に対する検討

図 19 部材リストの出力

(3) 「RBSM 板曲げ要素弾塑性解析ソフト」の紹介

座屈拘束ブレースは、構面外に層間変位が生じた状態で圧縮軸力を受けることがあるため、接合部を含む全体系において不安定挙動が生じる危険性が指摘されており、文献 3) において構面外安定条件式が提案されている。この条件式の適用にあたっては、ガセットプレート接合部の構面外曲げ耐力と回転剛性を求める必要があるため、RBSM (剛体ばね要素) 平面曲げ要素を用いた弾塑性解析ソフトを開発した。このソフトは、スプライスプレートの影響や、サイドスチフナの曲げ降伏も考慮できるようにしており、解析例として解析モデルと拘束材端部(節点 7)の荷重-変位関係を図 20 ~ 21 に示す。曲げ耐力と回転剛性は図 21 の結果より算出できる。

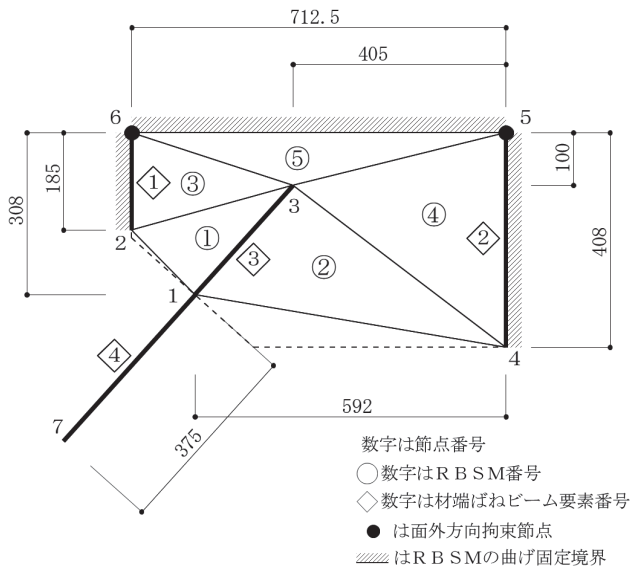


図 20 K形ブレース交点部ガセットプレートの解析モデル

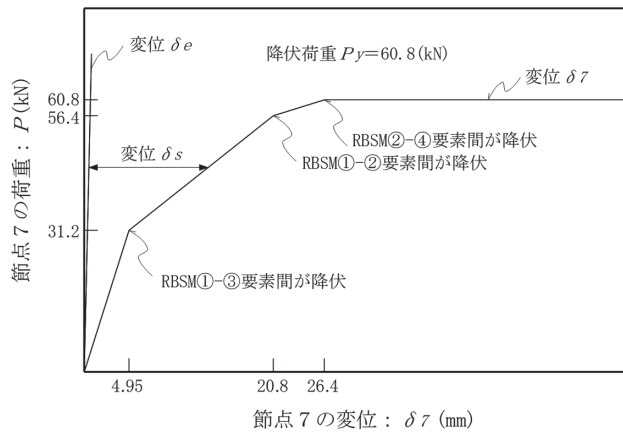


図 21 拘束材端部（節点7）の荷重－変位関係

6. 今後の予定

さらに製作コストを抑えることを目指して追加の実験と再評定取得を予定している。また、実績づくりとして、当社の富山工場新事務所と四国工場新事務所に使用することが決定している。

7. まとめ

当社の新しい商品として販売することを目的にハイパー・ブレースを実用化した。実用化手順としては、各種確認実験を行い、構造性能、製作精度および品質管理方法を確認した。実験結果と部材の設計式等をまとめた評定資料を作成し、日本建築センターの鋼構造評定を取得した。また設計ソフトを開発して設計作業の効率化や技術サポートが行える体制ができた。

8. 謝辞

技術的なご指導を頂いた神奈川県工学部建築学科の岩田衛教授、小谷野一尚特別助手、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県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) 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.
- 2) 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.
- 3) 日本建築学会: 鋼構造物の座屈に関する諸問題 2013, 2013.6.