

日の字補剛ブレース付架構の復元力特性に関する研究

高松 隆夫*・山西 央朗**・深澤 拓真***

(平成27年10月30日受付)

Restoring force characteristics of plate stiffened H-shaped steel braced frame

Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI and Takuma FUKAZAWA

(Received Oct. 30, 2015)

Abstract

Compressive loading tests of H-shaped steel member stiffened plate are carried out to examine buckling strength and strength after buckling. Numerical analyses of braced frames using H-shaped members with/without stiffened plate as the brace member are conducted to clarify restoring force characteristics of the braced frame. The cyclic behavior of the frame with the stiffened brace is bi-linear-type and models of the restoring force characteristics are proposed to evaluate experimental results.

Key Words: stiffened H-shaped steel brace, restoring force characteristics

1. はじめに

鋼構造における耐震のための構造要素として、最も一般的なものにブレースが挙げられる。低層建築物などに用いられるブレースには通常軽微な部材が利用されることが多く、細長比が大きいため圧縮力を受けるとすぐに座屈することから、圧縮抵抗力を期待せず引張抵抗力のみを期待する引張ブレースとして用いられる。一方、中低層建築物などにあっては、構造上効果的な役割を果たさせるためにはある程度の断面をもつ部材が要求される。このようなブレースの細長比が中程度となる場合、圧縮力が作用するブレースを無視することはできない。また、ブレースを含む架構の性状はブレースの座屈による不安定現象により複雑な性状を示す。このような複雑な復元力特性を簡単に表現するモデルはまだ適当なものが提案されていない。よって、ブレース付架構の性状はできる丈単純な復元力特性であることが望ましいといえる。著者等は、中低層建築物に幅広く使用される H 形鋼圧縮ブレースを対象として、ブレース

材軸の中央部を日の字型断面に補剛プレートを溶接した日の字補剛ブレースの研究を行っている。このブレースの特徴として、補剛プレートを設置することによる補剛部分の曲げ剛性の向上から、細長比が小さくなることが予想される。よって、このブレースを K 型に配置した場合のブレース付架構は、比較的安定した紡錘型に近い復元力特性を示すと考えられる。そこで本論文では、まず、単調圧縮載荷実験を行い、日の字型断面補剛された H 形鋼圧縮ブレースの耐力・軸剛性の評価方法を検証する。次に、日の字補剛ブレースを用いた 1 層 1 スパンラーメン架構の有限要素法解析を行い、日の字補剛ブレース付架構の復元力特性を明らかにする。最後に、解析結果をもとに簡単な復元力特性モデルを提案することを目的とする。

2. H 形鋼材圧縮ブレースの単調圧縮載荷実験

2.1 試験体

試験体は、ブレースには H-100×50×5×7 の材長 1350 mm を、補剛プレートには板厚 4.5 mm、幅 110 mm、長さ

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島大学大学院

*** 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

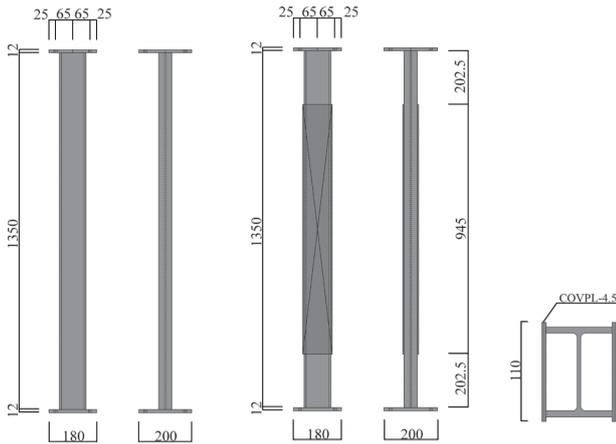


図1 試験体形状

945 mm を、それぞれ、用いる。ブレースと補剛プレートはブレースのフランジ側部に隅肉溶接によって取り付けられている。尚、ブレース端部にはエンドプレートを取り付け、荷重装置にボルト4本で固定している。実験変数は以下に示す、計2種類とする。

- ・補剛をしていないもの (N type)
- ・材軸の中央部を補剛をしたもの (R type)

2.2 荷重装置・計測位置

図2に荷重装置・計測位置を示す。

ブレース端部の支持条件は、両端ピン支持とし、ブレースの弱軸方向をピン回転方向として設置している。通常、ブレースは勾配を持って設置されるが、作用する軸方向力に対して抵抗する部材であるため、本実験では鉛直に設置して荷重実験を行っている。荷重方法は、ブレースが圧縮状態となる方向に荷重装置上部に設置した油圧ジャッキにより圧縮力を加える。計測値は、鉛直ジャッキ先端に設置したロードセルにより圧縮軸力 N を、ブレース上下端のエンドプレートに設置した変位計により縮み量 δ_p を、それぞれ、計測する。

2.3 有限要素法解析

図3に有限要素法モデルを示す。

有限要素法解析には、汎用有限要素法解析プログラム「ADINA ver. 8.9」を用いる。H形鋼・補剛プレートをシェル要素で作成し、上端を荷重点、下端を支持点とする。それぞれ、実験荷重条件と一致するような境界条件を入力している。尚、座屈解析の初期不整として、荷重点と支持点をY軸方向に0.5 mm 偏心させている。解析変数は荷重実験で行ったものを含み、ブレース材長に対して0%から90%補剛したものを10%刻みでごととして10体行う。また、補剛プレートのヤング係数を10倍としたものを10体行い、計20体とする。

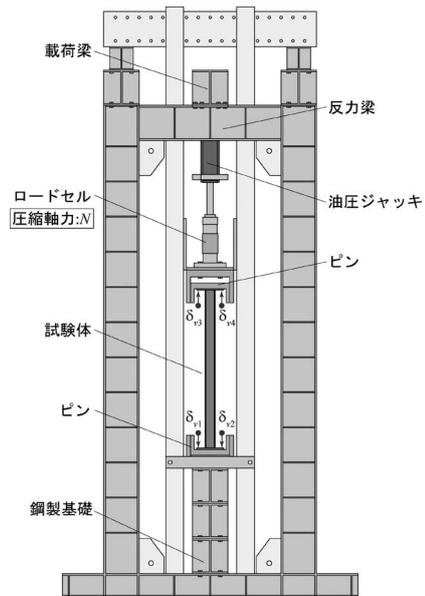


図2 荷重装置

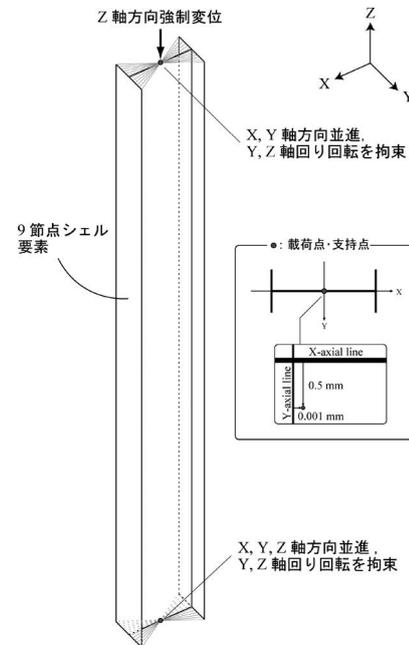


図3 有限要素法モデル

2.4 耐力・軸剛性の評価方法

図4に耐力評価モデルを、図5に軸剛性評価モデルを、それぞれ、示す。まず、耐力の評価方法においては、補剛プレートを設置した領域（部材中央の l_R 部分）の曲げ剛性は無限大と仮定しており、これを考慮して部材の曲げ座屈長さを判定する。よって曲げ座屈長さは、 $2l_N (=l_R)$ となり、文献5) に示す座屈耐力式を用いて耐力算定を行う。次に、軸剛性の評価方法においては無補剛部分・補剛部分を直列バネに置換し、無補剛部分・補剛部分の各軸剛性 K_N 、 K_R を用いて、全体の軸剛性 K を算出する。

$$K_N = \frac{A_N \cdot E}{l_N} \quad (1)$$

$$K_R = \frac{A_R \cdot E}{l_R} \quad (2)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_N} + \frac{1}{K_R}} = \frac{1}{\frac{l_N}{A_N \cdot E_N} + \frac{l_R}{A_R \cdot E_R}} \quad (3)$$

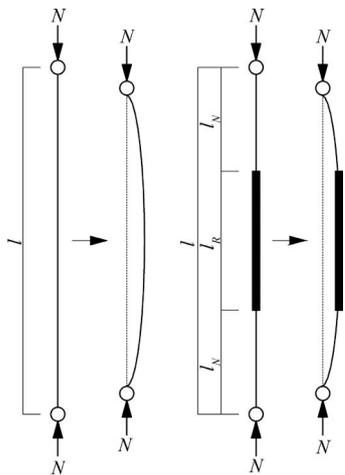


図4 耐力評価モデル

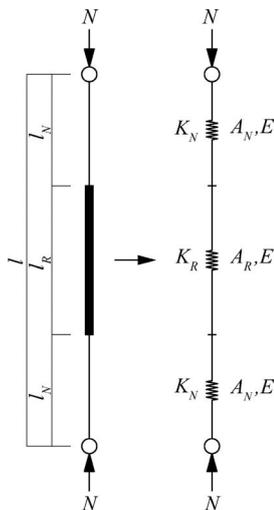


図5 剛性評価モデル

2.5 実験結果・解析結果

図6に圧縮軸力 N -縮み量 δ_v 関係を、図7に座屈耐力 N_c -曲げ座屈細長比 λ_c 関係を、図8に座屈後耐力 N_u -曲げ座屈細長比 λ 関係を、それぞれ、示す。同時に、図6は(1)式による計算値を、図7、図8には文献5)に示す耐力曲線、補剛プレートのヤング係数を10倍にした E_{10} を、それぞれ、示している。尚、図8に示す座屈後耐力においては、部材の縮み量が10 mm生じた時点での耐力としている。図6 (a), (b)より、補剛プレートを用いることで座屈耐力・座屈後耐力が増大している。また、N typeとR typeどちらも実験結果と解析結果が概ね対応していることから、

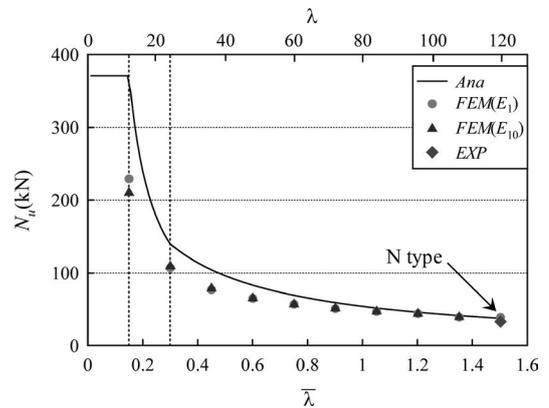


図7 座屈耐力 N_c -曲げ座屈細長比 λ_c 関係

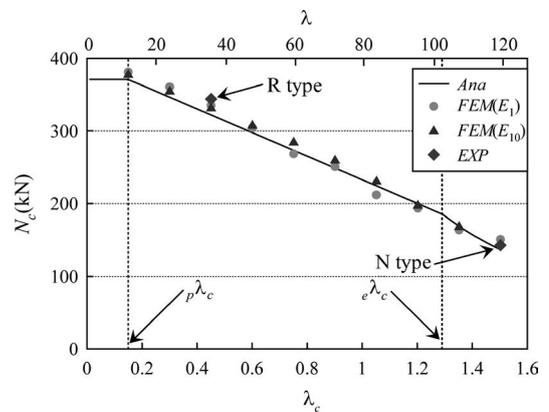
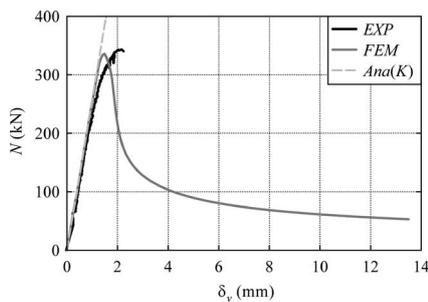
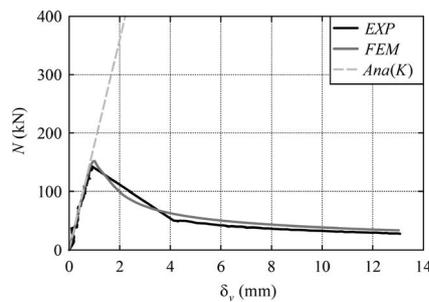


図8 座屈後耐力 N_u -曲げ座屈細長比 λ 関係



(a) N type



(b) R type

図6 圧縮軸力 N -縮み量 δ_v 関係

H形鋼圧縮ブレースの座屈挙動を有限要素法解析により評価できることがわかる。さらに、(1)式による軸剛性の計算値とも良好に対応している。尚、R typeの実験結果は座屈を生じるまでとなっているが、これは座屈による急激な耐力低下により計測が困難となったためである。図7、図8より、曲げ座屈長さを無補剛部分の長さで換算して算出した曲げ座屈細長比による耐力曲線と実験結果・解析結果が概ね対応していることから、曲げ座屈長さを無補剛部分の長さとする事で、一般的なH形鋼圧縮ブレースと同様に耐力の算出が可能である。また、補剛プレートのヤング係数を10倍とした E_{10} の耐力と、通常のヤング係数とした E_1 の耐力はほぼ同様となっている。これは、実験及び解析に使用したH-100×50×5×7は、補剛プレートPL4.5によって、図4に示す耐力評価モデルに適合していることを表している。

3. 日の字補剛ブレース付架構の有限要素法解析

3.1 解析対象

図9にラーメン架構、ブレース及びガセットプレート詳細を、表1にブレース性状を、それぞれ、示す。解析対象

は、1層1スパンのラーメン架構に日の字補剛ブレースをK型に配置したもの(K-R type)、補剛していない従来型のブレースを用いたもの(K-N type)とする。また、架構の弾性剛性の算出のために、ブレースのないラーメン架構のみの解析も行う。ラーメン架構の柱と梁にH-125×125×6.5×9を使用している。尚、本解析では、ブレースを除く柱と梁は弾性範囲に留まる断面性能を有している。ブレースには、BH-80×80×4.5×4.5を、補剛プレートには板厚6mm、幅90mm、長さ1080mmを、それぞれ、用いる。また、ブレースの曲げ座屈長さの算定にあたり、ガセットプレートの面外可撓域をフィンスチフナ端に設けていることから⁶⁾、ブレース端部をピン支持と仮定し、その可撓間距離としている。

3.2 有限要素法解析

図10に有限要素法解析モデルを示す。

有限要素法解析には、汎用有限要素法解析プログラム「ADINA ver. 9.0」を用いる。柱・梁・ブレースをシェル要素で作成し、架構に発生する水平力を再現するために、梁の軸心位置にX軸方向強制変位を与えている。また、座屈

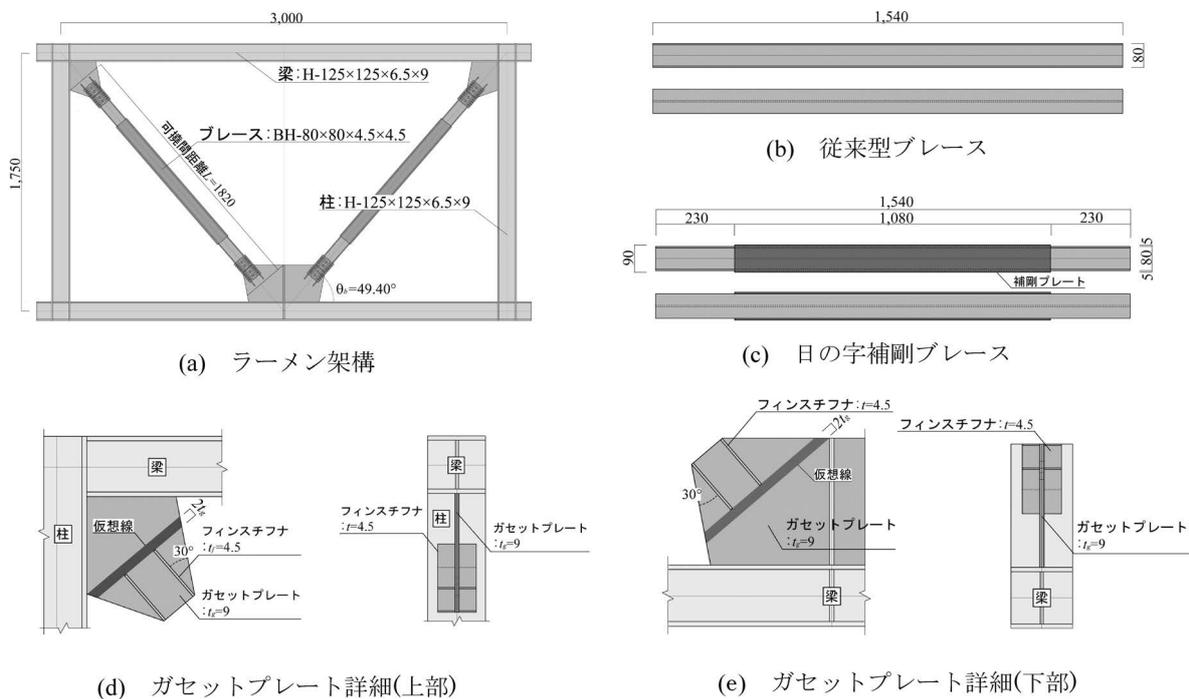


図9 解析対象

表1 ブレース性状

ブレース	ブレース断面	曲げ座屈長さ (可撓間距離) L_k (mm)	λ_c	$\bar{\lambda}$	λ	N_c (kN)	N_u (kN)
従来型	BH-80×80×4.5×4.5	1,820	1.15	0.86	95	174.8	40.2
日の字	BH-80×80×4.5×4.5	1,820	0.47	0.35	39	268.1	105.2

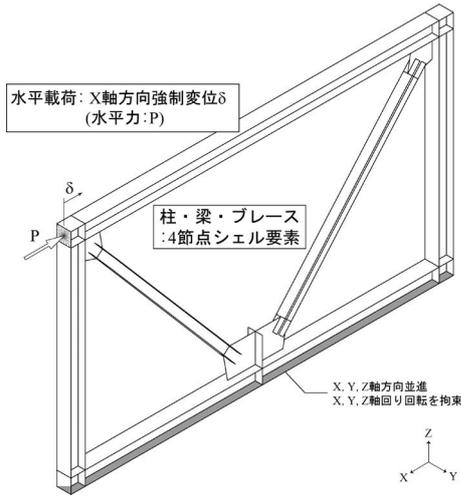


図10 有限要素法解析モデル

解析のための初期不整として、K-N type はブレース中央部に、K-R type は補剛プレート上端部に弱軸方向の水平力を加えている。各要素の素材特性には、ヤング係数は 205000 N/mm^2 、ポアソン比は 0.3 、降伏応力は 300 N/mm^2 を入力している。応力度-ひずみ度関係は、完全弾塑性型とする。荷重プログラムは、層間変形を層高さで除した層間変形角の振幅を $1/1000, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100 [\text{rad}]$ と漸増させるものとする。

3.3 復元力特性モデル

図11に復元力と特性モデルを示す。ブレース架構の復元

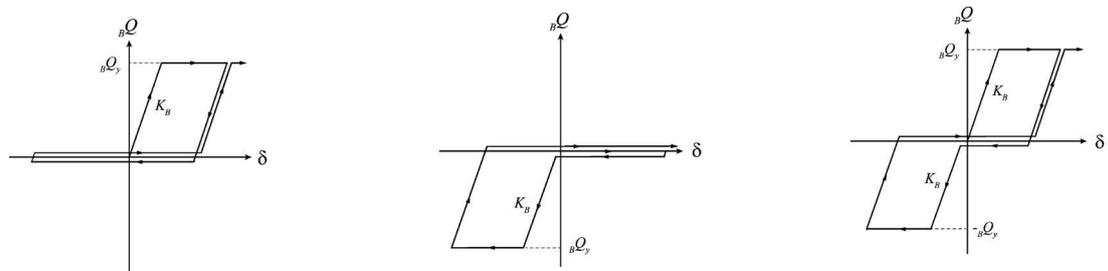
力特性は、架構とブレースを含むトラス構造に分解して、それぞれの復元力特性を算出したものの総和で求めることができる。

3.3.1 架構

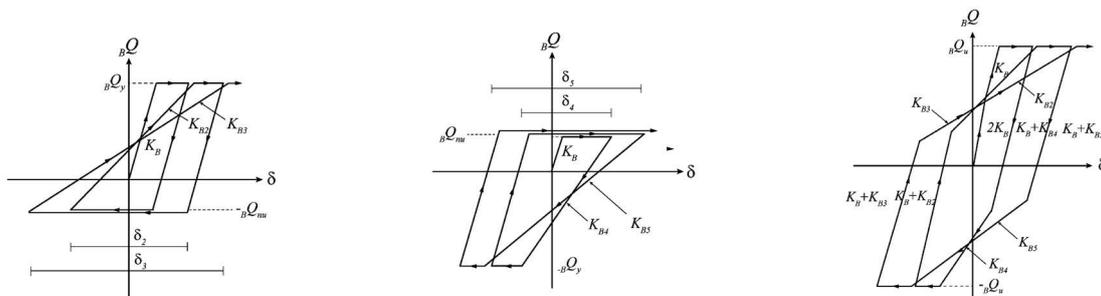
架構の弾性剛性は、柱の上端部にガセットプレートが取り付けられており、柱の曲げ剛性の算出が複雑なため、架構のみの有限要素法解析により算出した弾性剛性を用いる。

3.3.2 ブレース

従来型ブレースは、細長比が中程度のために小さいながらも圧縮側の耐力が存在すると考えられるが、本論文においてはスリップ型の復元力特性モデルを用いる。日の字補剛ブレースは、補剛プレートを用いることで細長比が小さくなるため、圧縮側の耐力を考慮した復元力特性モデルを用いる。尚、圧縮側の耐力として、座屈後耐力で一定になるものとしている。これは、鋼材が繰返し弾塑性荷重を受けるとバウシンガー効果により座屈耐力が低下するが、この履歴を表現した復元力特性モデルは複雑になると考えられるためである。またブレースの伸び剛性は、ブレースが圧縮力を受けて座屈が生じると、ブレースがほぼ真っ直ぐになるのは前回の引張荷重の除荷点であると考えられるため、その間を直線で結ぶことによって近似的な ${}_B Q\delta$ 関係が得られるものとする。よって、ブレースの伸び剛性は、繰返しの振幅の増加と共に低下するものとなる。ブレースの耐力、及び、弾性剛性は以下の式で示すことができる。



(a) 従来型ブレース



(b) 日の字補剛ブレース

図11 復元力特性モデル

$${}_B Q_y = A \cdot \sigma_y \cdot \cos \theta \quad (4)$$

$${}_B Q_{nu} = N_u \cdot \cos \theta \quad (5)$$

$${}_B Q_u = {}_B Q_y + {}_B Q_{uu} \quad (6)$$

$$K_B = \frac{A \cdot E}{L} \cdot \cos^2 \theta \quad K_{B2} = \frac{{}_B Q_u}{\delta_2} \quad K_{B3} = \frac{{}_B Q_u}{\delta_3}$$

$$K_{B4} = \frac{{}_B Q_u}{\delta_4} \quad K_{B5} = \frac{{}_B Q_u}{\delta_5} \quad (7-11)$$

ここに、 A ：ブレースの断面積、 σ_y ：ブレースの降伏応力度、 E ：ブレースのヤング係数、 EA/L ：ブレースの軸剛性、 θ ：ブレースの設置角度、 N_u ：ブレースの座屈後耐力、 δ ：繰返し振幅である。尚、日の字補剛ブレースの軸剛性は(1)式、座屈後耐力は文献5)に示す耐力式を用いる。

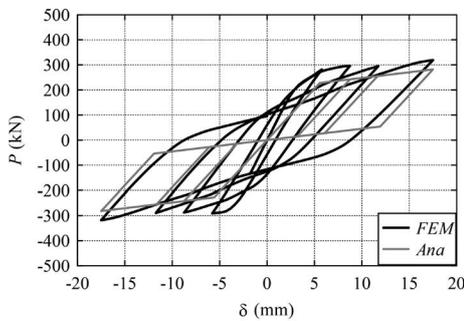
3.4 解析結果

図12に水平荷重 P -水平変位 δ 関係を、図13にブレース負担せん断力 ${}_B Q$ -水平変位 δ 関係を、それぞれ、示す。尚、図13は架構のみの有限要素法解析から得られた、架構の負担するせん断力を水平荷重から差し引いたものとしている。図12より、従来型のブレースを用いた K-N type は、ブレースの細長比が大きいため圧縮側の耐力が小さくなっている。よってスリップ型に近い復元力特性を示している。日の字

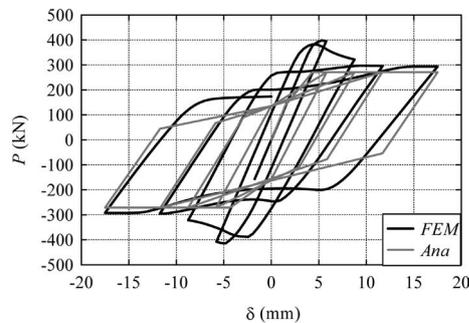
補剛ブレースを用いた K-R type は、補剛プレートを用いることにより細長比が小さくなったことから、圧縮側の耐力が増大し、紡錘型に近い復元力特性を示していることがわかる。また、解析結果と復元力特性モデルを比較すると、圧縮側の耐力として座屈後耐力を採用しているため安全側となっているが、提案するモデルで概ね評価できると考えられる。尚、座屈耐力を考慮することで、より実際の性状に近いモデルを算出することが可能であると考えられ、このことについては今後検討する。図13より、K-N type がスリップ型に近い復元力特性を示しているのに対し、K-R type 紡錘型に近い復元力特性を示している。しかしながら繰返し回数の増加に伴い、弾性剛性が低下していることがわかる。これは、座屈により横撓みが発生したブレースは、横撓みがゼロになるまでは引張抵抗力を持たないことによる、ブレースの伸び剛性の低下が起因していると考えられる。よって、弾性剛性は単純にブレース2本分とはならず、繰返し回数の増加に伴い低下するが、ブレースの伸び剛性の低下を考慮したモデルで概ね評価できることがわかる。

4. まとめ

本論文では、日の字型断面補剛された H 形鋼圧縮ブレースの単調圧縮荷重実験、及び、日の字補剛ブレースを用いた1層1スパンラーメン架構の有限要素法解析を行い、以下の知見が得られた。

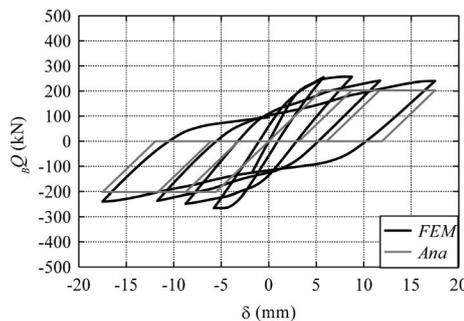


(a) K-N type

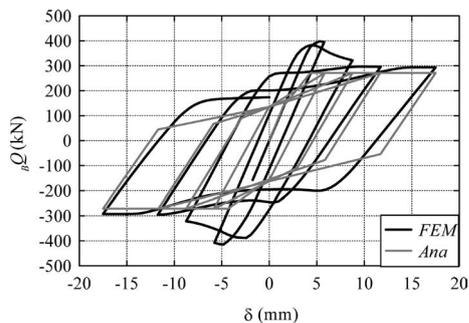


(b) K-R type

図12 水平荷重 P -水平変位 δ 関係



(a) K-N type



(b) K-R type

図13 ブレース負担せん断力 ${}_B Q$ -水平変位 δ 関係

1) H形鋼圧縮ブレースに補剛プレートを用いることで、座屈耐力・座屈後耐力の増大が可能である。また、その座屈挙動を有限要素法解析により評価できる。

2) 曲げ座屈長さを無補剛部分の長さとするこゝで、一般的なH形鋼圧縮ブレースと同様に耐力の評価が可能である。

3) 日の字補剛ブレースを用いることにより、K型ブレース付架構の復元力特性は紡錘型となる。

4) 提案する復元力特性モデルにより、日の字補剛ブレース付架構の履歴を安全側で評価できる。

文 献

- 1) 木村潤一，李文聡：一部分が日の字型に補剛されたH形鋼部材の曲げ座屈解析，日本建築学会九州支部研究報告，第46号，pp. 453-456, 2007.3
- 2) 竹の谷幸宏，赤羽正寛，石鍋雄一郎，新井祐一郎，半貫敏夫，秋山宏：繰返し荷重を受けるH形鋼筋違材の実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）
- 3) 高松隆夫：軸組筋違の復元力特性について，日本建築学会論文報告集，第260号，1977.10
- 4) 加藤勉，秋山宏：軸組筋違付骨組の復元力特性，日本建築学会中国支部研究報告集，第25巻，2002.3
- 5) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針・同解説，2014.4
- 6) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，第3版