

1. はじめに

ブレース付鋼架構は効率良く剛性を確保できる構造形式でありながら、水平力を受けると複雑な挙動を示す。Uriz ら¹⁾は汎用解析ソフト OpenSees²⁾で柔性法に基づくファイバ要素を用いて、ブレースの非線形挙動を精度よく追跡できることを示した。本論は、ブレース付鋼架構の挙動を比較的簡便に解析する手法を確立することが、鋼構造設計の改善につながるとの認識で、Uriz ら¹⁾の方法を参考に、亀岡ら³⁾の部分架構実験、浅田ら⁴⁾のブレース単体の実験を対象として解析を行い、精度を比較検討した。

2. 実験の概要

図 1(a) に亀岡ら³⁾の試験体を示す。スパン 3,000 mm、層高 2,300 mm で K 型ブレースを有する一層一スパン架構であった。ブレースへの平板割込み板をガセットプレートに一面せん断接合した。柱に BCR-250 角形鋼管 200×200×9 を、梁に SS400 電炉材の H-250×125×6×9 を、ブレースに STK400 円形鋼管 76.3×4.2 を用いた。ブレースの降伏強度の実測値は 374 N/mm²、柱と梁の降伏強度はミルシートよりそれぞれ 328、287 N/mm²であった。下梁の北側端を水平、鉛直方向に拘束し、南側端を鉛直方向のみに拘束した。上梁北側端に繰返し水平変位を与えた結果、ブレースが構面外方向に座屈し、ブレース端部の割込み板が、ガセットプレートと鋼管の間で折れ曲がった。割込み板が折れ曲がった部分の間の距離 1,920 mm が、ブレースの座屈長さであった。

図 1(b) に、浅田ら⁴⁾の試験体を示す。材長 2,132mm であり、材料と接合部は亀岡ら³⁾と同一であった。東側端

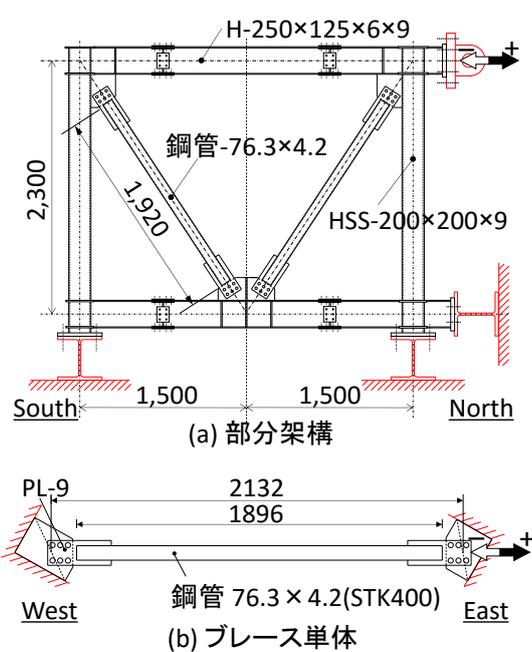


図1. 試験体(単位mm)

を油圧ジャッキに取りつけ水平に繰返し変位を与えた結果、部分架構実験と同様にブレースが座屈し、割込み板が折れ曲がった。割込み板が折れ曲がった部分の間の距離 1,896mm がブレースの座屈長さであった。

3. ブレースモデルの感度解析

亀岡ら³⁾の実験で用いたものと同じ材長 1,920 mm(細長比 75.3)の円形鋼管ブレースについて、OpenSees²⁾によるモデル化方法を確認するために感度解析を行った。Uriz ら¹⁾の方法に倣い、ブレースの中央に材長の 1/1000 の初期不整を与え、大変形小ひずみの定式化を用いた。柔性法に基づくファイバ要素を用い、積分点は Gauss-Lobatto 則に従い、両端を含む 5 点とした。断面を 38×2 のファイバ要素に分割し、材料則を Giuffre-Menegotto-Pinto モデルで表現した。収束計算に Newton-Raphson 法を適用し、軸方向平均ひずみを、振幅 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0% で 2 回ずつ繰返した。

図 2 に平均ひずみの増分が 0.05% と 0.005% の解析結果を比較する。増分が 0.05% の場合、振幅 0.5、1.0% 時の座屈挙動を追跡出来なかった。この問題はひずみ増分を小さくすることで解決でき、0.005% の場合では見られなかった。

図 3 にブレース要素の軸方向分割を、(a) 2 等分割、(b) ブレースの中央に短い要素を集中させた 6 分割、(c) 10 等分割、の 3 つの場合で比較する。(b)、(c)は(a)と比較して圧縮耐力がやや小さく、(b)と(c)の挙動はほぼ一致した。分割数による差異は確認できたものの、微少であったため、計算効率から考えて要素は 2 分割で十分であると考えられる。

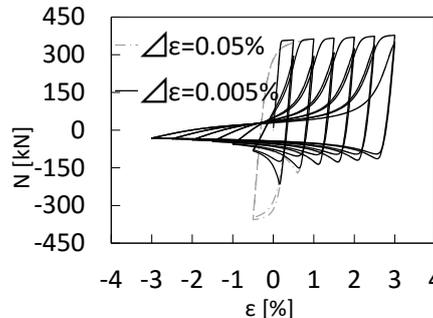


図2. 変位制御の刻みによる違い

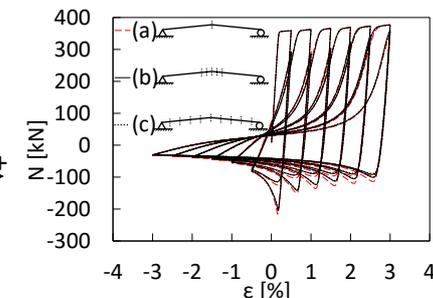


図3. 要素の分割数による違い

4. 試験体のモデル化

上記のような感度解析で確認したモデル化方法を用い、図 4 に浅田ら⁴⁾の実験との比較を示す。実験と解析では、解析で圧縮側の耐力がやや大きくなったが、概ね挙動をとらえていることを確認した。

図 5 に亀岡ら³⁾の試験体の解析モデルを示す。図 5 の丸は節点を表しており、黒丸は剛接合、白丸はピン接合を表現した。このモデルではブレースは軸力のみを負担する。

柱と梁、ブレースにファイバ要素を用い、前節で述べた方法でブレースのモデルを構築した。柱と梁の積分点は、Gauss-Lobatto 則に従い両端を含む 3 点とし、角形鋼管の鋼板をそれぞれ 10×2、H 形鋼梁のフランジとウェブをそ

それぞれ 8×4、30×2 のファイバ要素に分割した。柱と梁の材料則は、ヤング係数 $2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ひずみ硬化係数 0.01 のバイリニアとした。ガセットプレートにより補剛される部位は、ヤング係数を 1,000 倍し剛域として扱った。

試験体を支持した H 形鋼の回転剛性は微小なものとし、両端ともに回転を許すものとし、さらに南側では水平方向の支えがないため、ローラーを組み込んだ。

5. 解析結果と考察

図 6 に解析と実験の水平応答を比較する。層間変形角の増加に伴い、層せん断力の解析値は実験値よりも小さくなった。図 7 に、ブレースとラーメンそれぞれが負担した層せん断力を分けて示す。層間変形角が大きくなるにつれて、ブレースとラーメンの負担する層せん断力はどちらも解析値が実験値より徐々に小さくなった。その原因は、ブレースについては、引張側で十分に耐力を發揮するはずが、図 8 に示すように、引張側での軸方向変形の解析値が実験値よりも小さく、解析では実験を十分に再現できなかったためであると考えられる。これは図 9 に示すように、下梁中央のたわみが実験値より解析値で大きかったためと考えられる。

実験と比較して解析において下梁中央の鉛直たわみが大きく、ラーメンの層せん断力が小さくなった原因として、境界条件および下梁の柱梁接合部のモデル化があると考えられる。実際には、下梁を支持した H 形鋼(図 1(a)参照)の回転剛性がかなり大きかったにも関わらず、これを無視したために、実験と比較して解析で、ラーメンの層せん断力が小さく、下梁のたわみが大きかったと考えられる。また、下梁の柱梁接合部において、柱パネルを考慮しなかったことも影響した可能性がある。これらを考慮し、モデルを改良することで、よりよい精度で実験挙動を再現できる可能性があると考えられる。

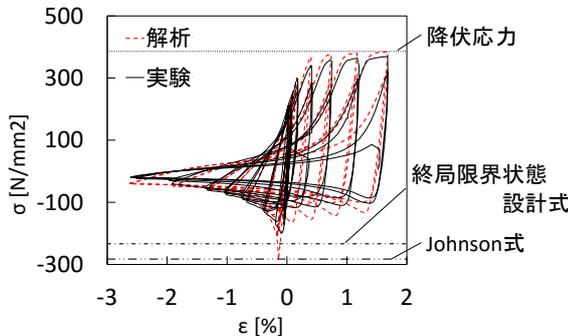


図4. 実験値と解析値の比較

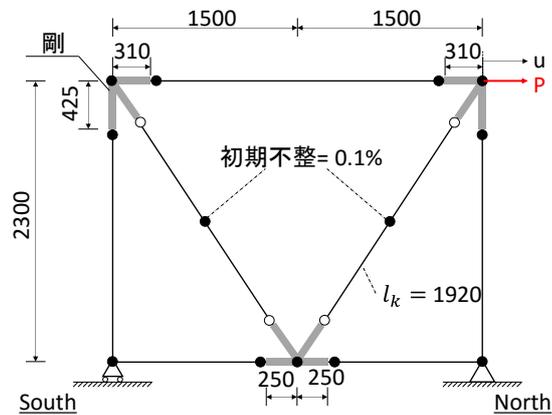


図5. 解析モデル (単位 [mm])

まとめ

OpenSees²⁾でブレース付鋼架構をある程度再現することはできたが、実験値よりやや耐力が小さくなった。支持条件や柱梁接合部のモデル化を改良することで、より良い精度が得られる可能性があると考えられる。

【参考文献】

- 1) Patxi Uriz, Filip C. Filippou, Stephen A. Mahin: Model for Cyclic Inelastic Buckling of Steel Braces. J. Struct. Engrg., ASCE, 134(4), 619-628, 2008.4
- 2) McKenna F.: Object oriented finite element programming frameworks for analysis, algorithms and parallel computing. Ph.D. Dissertation, Univ. California, Berkeley, 1997
- 3) 亀岡優人, 井上桂輔, 岡崎太郎, 浅田勇人, 緑川光正, 麻里哲広: 一面せん断接合部を有する K 形筋交い付き鋼架構の繰返し水平実験 その 1 部分架構実験, 学術講演梗概集, pp1121-1122, 2015.7
- 4) 浅田勇人, 岡崎太郎, 田中剛, 橋岡昇吾: 接合部性能に着目したブレース付ラーメンの耐震性能評価 その 2 円形鋼管ブレース(D/t=18)の載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 学術講演梗概集, pp1123-1124, 2015.7

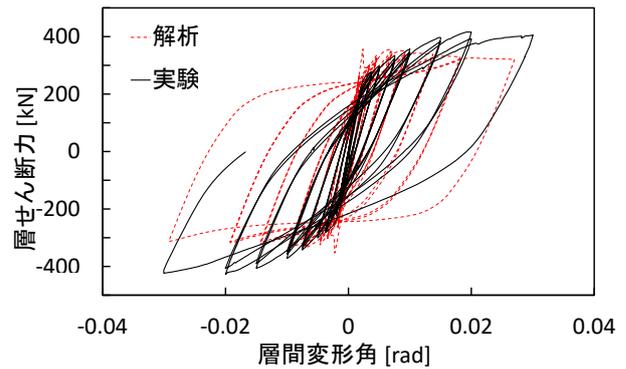


図6. 水平応答

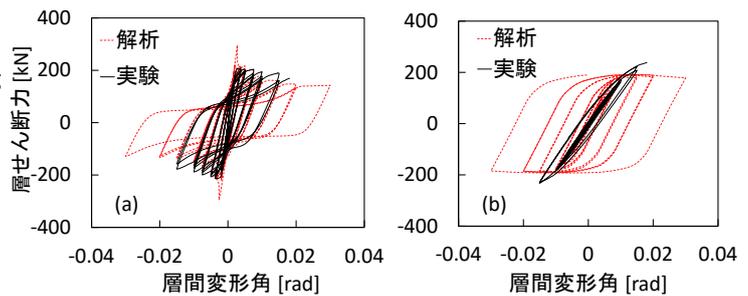


図7. 層せん断力の分担 : (a)ブレース ; (b)ラーメン

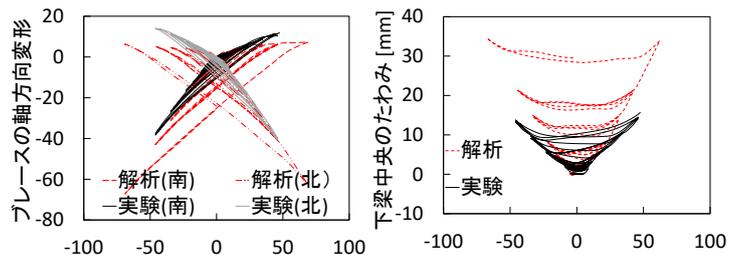


図8. ブレースの変形履歴

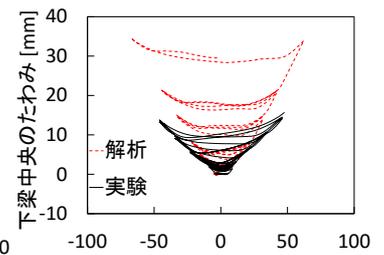


図9. 下梁中央の変形履歴