

1. はじめに

繰返し荷重を受ける鋼材ブレースの塑性変形性能は、局部変形が最も集中した箇所を起点に、亀裂を生じた時点で決まる。いったん生じた亀裂は、急速に進展し、部材の耐力低下と破断を導くからである。鋼材ブレースの実験データは数多くあるが、細長比 30 以下の太短いブレースの試験体が寡少で、両端をピン支持された試験体がほとんどである。そこで、本研究は、太短く、両端を剛接合されたブレースについて、実験と数値解析を実施し、局部変形が挙動に及ぼす影響を検証した。

2. 実験計画

図 1 に示す試験装置を用いて、荷重方向に対して斜めに設置した鋼材ブレースの試験体を、正負交番の変位制御で繰返し荷重した。材端が剛接合となるように、ブレースをエンドプレートに突合せ溶接して、そのエンドプレートを柱治具と梁治具に高力ボルトで接合した。試験体のパラメータは、ブレース断面（円形鋼管または角形鋼管）、有効細長比（15 から 42）、幅厚比・径厚比（24 から 39）とした。

3. 実験結果

図 2 に、細長比が 15 と太短いブレースについて得た、荷重と変形の関係を示す。軸力は、加力ジャッキに設けたロードセルで、変位は、試験体両端のエンドプレート間に設けた変位計で測定した。図 2(a) に示すように、円形鋼管ブレースは、荷重振幅 $\pm 1.5\%$ で、全体曲げ座屈を生じ、圧縮耐力が半分まで劣化した。荷重振幅 $\pm 3\%$ までに、材中央と材端部に局部座屈を生じ、その後、材中央の局所変形が集中した箇所亀裂を生じ、破断した。図 2(b) に示す角形鋼管ブレースは、荷重振幅わずか $\pm 0.4\%$ で、材端近くに局部座屈を生じ、圧縮耐力が劣化し始めた。図 3 に示すように、荷重振幅の増加につれて、材端部の局所変形が進展し、全体曲げ座屈を生じることなく、荷重振幅 $\pm 1.5\%$ で材端部に亀裂を生じた。

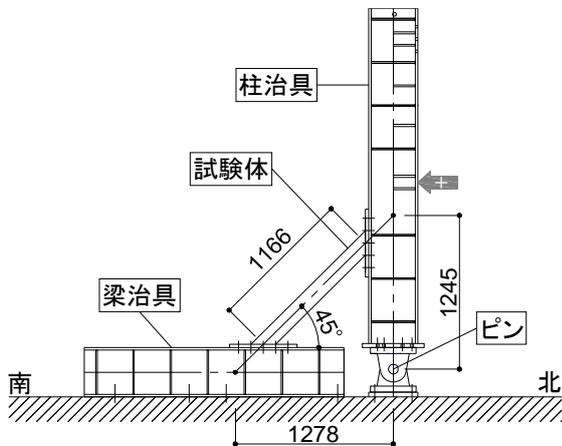


図1 試験装置と試験体
(円形、細長比15.7、径厚比38.8の試験体の場合)

層変形角は、試験体両端を剛域と仮定すると、軸変形を初期長で除した等価軸歪とほぼ同等であり、亀裂を生じた際の層変形角は、細長比 15 の円形鋼管で 1/40 だったのに対し、細長比 42 の角形鋼管では 1/250 であった。

累積等価軸歪を計算すると、材端部で局部変形した角形鋼管では 10~38%、材中央で局部変形した円形鋼管では 27~61%であった。細長比が同じでも、明らかに、角形鋼管が塑性変形性能で劣っていた。

4. 数値解析

汎用有限要素解析ソフト ADINA ver. 9.7¹⁾を用いて、角形鋼管ブレース試験体の実験挙動を数値的に再現した。図 4 に示すように、エンドプレート間のブレースを解析モデルで模擬した。ブレースを、板厚方向に 7 つ、平面内に 4 つの積分点を有するアイソパラメトリックなシェル要素でモデル化した。両端固定となるように、材端面を支持した。局部変形した材中央と材端部は、要素の一边を 5 mm 程度と他の領域より細分割した。塑性則を、von Mises の降伏条件と関連流れ則、バイリニア型の等方硬化則と Armstrong-Frederick 移動硬化則を組み合わせた複合硬化則でモデル化した。大変形・大歪の構成式を用いた。線形座屈解析で得た 1 次座屈モードに基づいて、部材長の 1/2000 のたわみを部材の中央に与えて、初期不整とした。

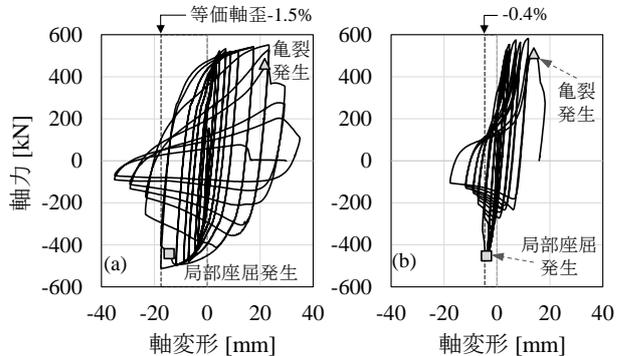


図2 荷重－変形関係：(a) 円形、細長比15.7、径厚比38.8；(b) 角形、細長比15.3、幅厚比35.1

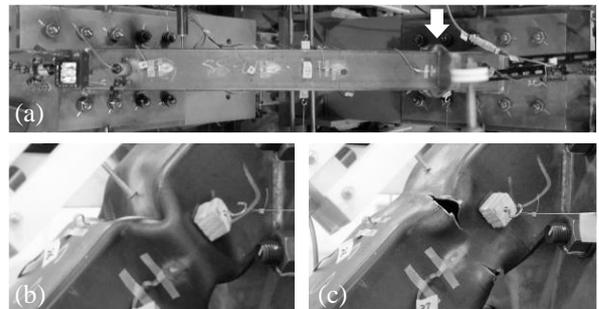


図3 試験体挙動：(a) 局部座屈；(b) 局所変形；(c) 亀裂

5. 解析結果と考察

図5に、解析で得た履歴応答を、実験結果と併せて示す。解析は、実験の圧縮耐力をよく捉えたが、座屈後の耐力劣化が、実験よりやや早く進んだ。図6に、細長比41.3、幅厚比35.1の角形鋼管ブレースに見られた局部変形と、この箇所における、軸方向応力のコンター図を示す。載荷振幅 $\pm 0.15\%$ の弾性範囲では、剛接合の影響で全長にわたって生じた曲げ応力は、軸応力に比べて小さく、断面が一様に圧縮される純圧縮の応力状態であった。等価軸歪 -0.17% で材端部の上部鋼壁に局部座屈を生じると、軸応力に対する曲げ応力の比率はさらに小さくなり、下部鋼壁に局部座屈を生じた。その後、局部座屈により軸圧縮応力が低下し、ブレースの破壊モードは全体曲げ座屈に移行することなく、材端部の局部変形が進展した。

角形鋼管ブレースは、全体曲げ座屈を生じる前に、局部座屈によって圧縮抵抗能力を喪失した。この破壊モードにより塑性変形性能は、全体曲げ座屈による破壊モードを示した円形鋼管ブレースの半分となった。SS400相当であれば細長比が32以下のブレースは、断面形状や幅厚比に関わらず、塑性変形能力に優れると考える、建築基準法²⁾の想定に反することを強調したい。どのような角形鋼管ブレースに、早期の局部座屈を生じる懸念があるかを把握するために、断面の厚さ(幅厚比)、全長(細長比)を変えて、同じ解析を実施した。細要素の一边の長さを10mmとし、単調載荷で座屈挙動を分析した。AISC 341-16³⁾、限界状態設計指針⁴⁾、建築基準法²⁾を参照し、2種の細長比と3種の幅厚比からなる計5体のモデルを構築した。

図7に、解析より得られた角形鋼管ブレースの破壊モードと、細長比、幅厚比との関係を示す。細長比が40程度で

建築基準法²⁾のBBランクに相当する場合、幅厚比が30を下回ると、全体曲げ座屈の破壊モードを示した。局部座屈が破壊モードとなる幅厚比40より塑性変形性能は大きい値を示した。一方、細長比が15程度でBAランクに相当する場合、局部座屈による破壊モードが見られた。

6. まとめ

- 1) 細長比15~42、幅厚比・径厚比24~39のブレースの繰返し載荷実験を実施し、挙動を検証した。円形鋼管は全体曲げ座屈、角形鋼管は材端部の局部座屈を生じた時点で最大圧縮耐力に達した。円形鋼管は材中央、角形鋼管は材端部で、局部変形を生じ破断した。細長比42とBBランクに相当する角形鋼管ブレースは、層変形角1/250に相当する変形量で亀裂を生じた。
- 2) 実験から得た角形鋼管ブレースの座屈挙動を有限要素解析で再現した。圧縮耐力と材端部において局所変形が集中する破壊モードを再現した。
- 3) 実験結果の再現性がある有限要素解析により、角形鋼管ブレースでは、細長比が小さく幅厚比が大きいほど、全体曲げ座屈より、材端部で局部座屈が生じる破壊モードを示す傾向があることを見出した。

参考文献

- 1) ADINA R&D, Inc.: Theory and Modeling Guide ADINA 9.7, 2021.4
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所など: 2020年版建築物の構造関係技術基準解説書, 2020.10
- 3) AISC: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, 2016.7
- 4) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説、丸善出版、2010.2

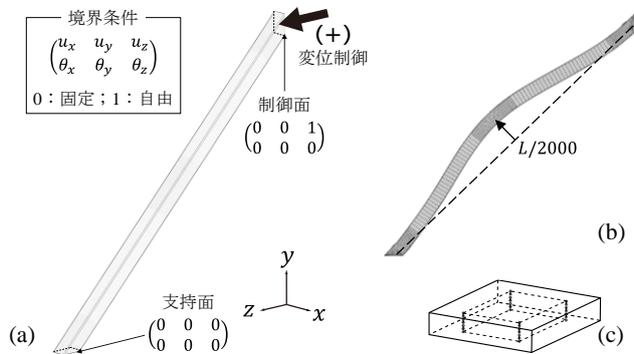


図4 解析条件: (a)解析モデル; (b)初期不整; (c)シェル要素

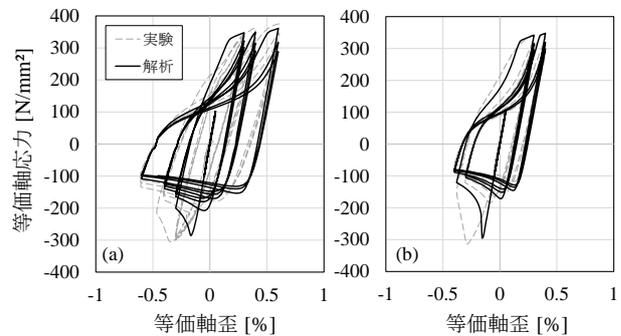


図5 実験結果と解析結果の比較: (a) 細長比15.3、幅厚比35.1; (b) 細長比41.3、幅厚比35.1

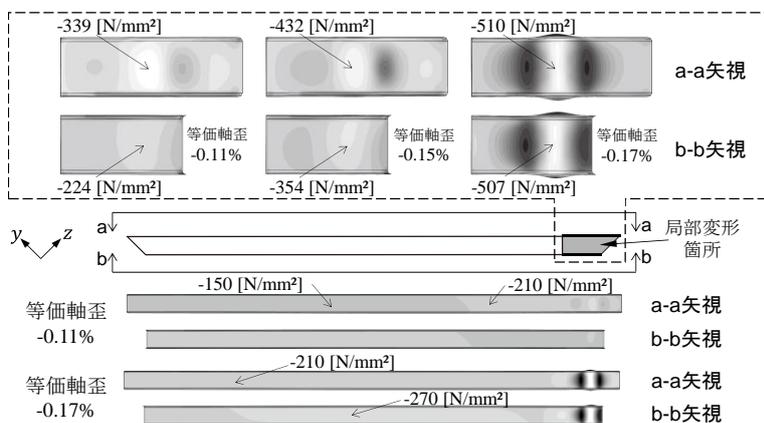


図6 軸方向応力コンター図

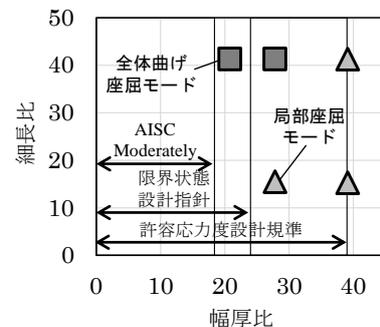


図7 細長比・幅厚比と破壊モードの関係