

角形鋼管ブレースにおける亀裂発生条件の数値解析的検討

Numerical Investigation of Crack Initiation Condition in Steel Square Hollow-Structural-Section Braces

建築都市空間デザイン専攻 空間防災講座 建築構造工学研究室 岩佐郁希

Abstract

A numerical study was conducted to examine the crack initiation condition in square hollow-structural-section (SHS) steel braces subjected to cyclic inelastic loading. Cyclic material properties and mesh convergence was carefully studied to assure that the finite-element-method analysis can reproduce local buckling deformation and the associated stress and strain field with high fidelity. The computed strain and stress values were combined with crack initiation criteria reported in the literature to probe the location and condition of fracture. Calibrated against the detailed simulation, a simplified methodology was introduced to predict the crack initiation of SHS steel braces without using finite element analysis.

Keywords: Steel braces, Finite element analysis, Crack initiation, Stress triaxiality

1. 序

弾塑性設計では、部材の変形要求と変形性能を適切に捉えることが求められる。繰返し载荷を受けるブレースの変形性能を決定する一要因は、局部座屈により塑性歪が集中して生じる亀裂である。繰返し载荷を受ける鋼材の亀裂発生条件として、式(1)で表される相当塑性歪 $\bar{\epsilon}_p$ と、式(2)で表される応力三軸度 η で評価する空隙進展モデル¹⁾が挙げられる。

$$\bar{\epsilon}_p = \frac{\sqrt{2\{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2\}}}{3} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2}} \quad (2)$$

ここに、 $\epsilon_1 \sim \epsilon_3$ は主歪、 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ は主応力を表す。

空隙進展モデルは、繰返し载荷を受けるブレースの亀裂発生を精度よく予測できるが、計算量の多い連続体有限要素解析を駆使し、適切な材料特性を選ぶ必要がある。一方、破壊力学ではなく、部材全体の変形を参照し亀裂発生条件を経験的に評価する方法²⁾も見られる。本研究では、後者の方法で角形鋼管ブレースの局所における相当塑性歪を推定し、亀裂発生を評価する手法を検討した。

2. 亀裂発生条件を検討するための解析条件

有限要素法解析ソフト ADINA ver. 9.6.2³⁾を用い、角形鋼管ブレースの载荷性能を分析した。平面方向に4つ、板厚方向に5つの積分点を持ち、幾何学的非線形性を考慮した4節点のアイソパラメトリックシェルなシェル要素で、鋼板を模擬した。ヤング率を $2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比を 0.3 と

した。鋼材のひずみ硬化を、バイリニア型の等方硬化則と Armstrong-Frederick 則の移動硬化則⁴⁾を合わせた複合硬化則で規定した。後述の実験^{5), 6)}で採用された試験体の载荷性能を模擬するため、降伏強度が同等の高張力鋼 HT590 の繰返し試験結果⁷⁾を参照し、ひずみ硬化に関する材料特性を決めた。図1に、単一シェル要素について得た、真応力-真歪関係を示す。この材料挙動は、実験結果⁷⁾と対応していると判断し、以降採用した。

空隙進展モデルでブレースの亀裂発生条件を分析するために必要な、要素分割の要領を検討した。図2に、Baoら⁸⁾が空隙進展モデルで鋼材の

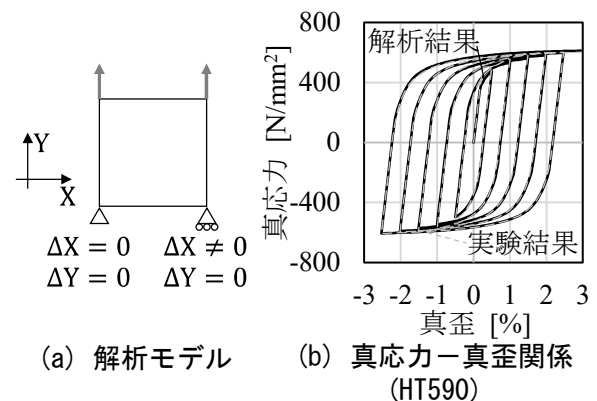


図1 1要素解析モデル

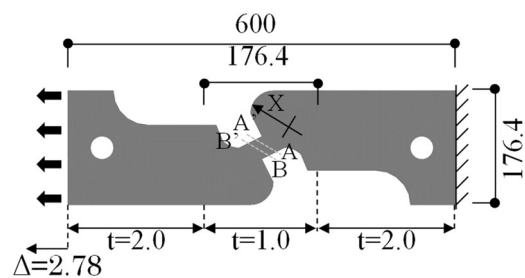


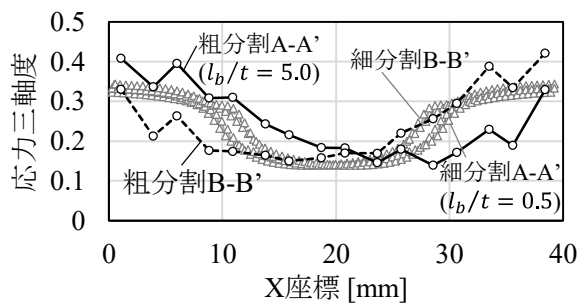
図2 解析モデル

亀裂を検証した試験片を示す。塑性歪が集中した領域を、平面方向長さ l_b が板厚 t の0.5倍と細く分割したモデルと、5倍と粗く分割したモデルを作成した。図3に、区間A-A'およびB-B'の範囲で得られた応力三軸度分布、累積相当塑性歪を示す。細く分割したモデルで得た、各区間における平均的な応力三軸度および相当塑性歪は、粗く分割したモデルや、Baoら⁷⁾によるソリッド要素の結果に十分に近かった。以上より、シェル要素でもソリッド要素と同等に、空隙進展モデルを議論できる応力歪が得られ、シェル要素の幅と厚さの比の歪分布に対する敏感性は小さいことを確認した。

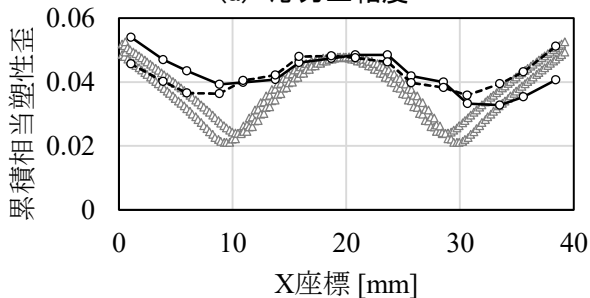
3. ブレースの実験再現解析

局部座屈を伴う角形鋼管ブレースの亀裂発生条件を検討するために、松本ら⁵⁾およびFellら⁶⁾による実験を参照し、有限要素法解析で座屈挙動の再現を試みた。試験体として、有効細長比が $\lambda = 61$ 、幅厚比が $B/t = 25$ で、鋼材にBCR295を用いたB6.0-61⁵⁾と、 $\lambda = 77$ 、 $B/t = 14$ でA500を用いたHSS1-1⁶⁾を選定した。試験体B6.0-61とHSS1-1の材端は、それぞれピンとガセットプレートで接合された。

図4に、有限要素解析モデルを示す。一端の面の材軸方向変位を制御することで、繰返し载荷した。前章で示した要素を採用し、塑性化が顕著だと想定した軸方向中央で、鋼管幅の2倍の長さにあぶ範囲を、 $l_b/t = 0.45 \sim 1.02$ のシェル要素で分割した。初期不整には、線形座屈解析により得られたブレースの1次座屈モードの形状を採用し、中



(a) 応力三軸度



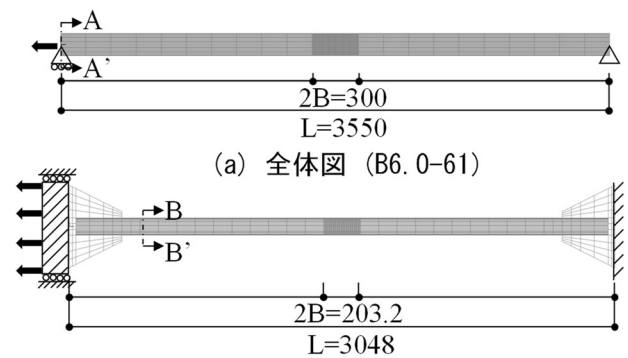
(b) 累積相当塑性歪

図3 応力三軸度・累積相当塑性歪分布

央の振幅に部材全長の1/1000倍の初期たわみを導入した。なお、初期たわみを1/2000倍としても、座屈後の挙動に違いは見られなかった。

図5に、局所変形によって、塑性歪が最も集中した要素の積分点から抽出した歪履歴を示す。ここで、図6(b)の $\Delta \epsilon_n$ は、等価軸歪振幅の2倍の値に相当する。軸方向歪は、平板部より角部に集中し、厚さ方向と同程度で、周方向の10倍の大きさを示した。図6に、ブレースの軸変形を全長で除した等価軸歪 $\epsilon_n = 1.0\%$ 、 1.3% と局部変形が進展した時点における、平板部と角部の軸方向歪の分布を示す。軸方向歪の最大値は0.74から0.90で、最大値と比較して要素の細粗による差は16%以内に収まった。

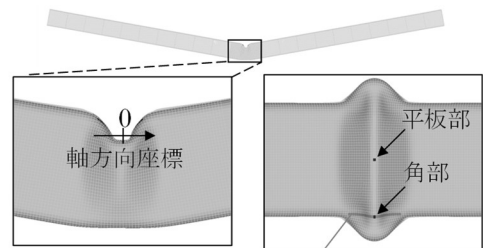
以降では、B6.0-61に $l_b/t = 0.55$ 、HSS1-1に $l_b/t = 0.45$ の要素を採用した場合を取り上げる。図7に、得られたブレースの応力-歪関係を実験結果と併せて示す。等価軸応力は、荷重をブレース



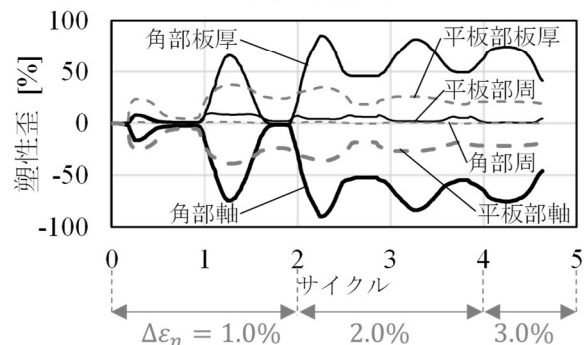
(a) 全体図 (B6.0-61)

(b) 全体図 (HSS1-1)

図4 解析モデル



(a) 局所変形



(b) 塑性歪履歴

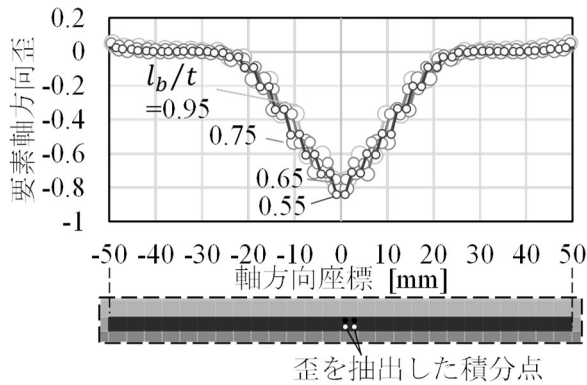
図5 局所変形および塑性歪履歴 (B6.0-61)

スの初期断面積で除した応力とした。有限要素解析による圧縮側耐力、引張側耐力、圧縮後のピーク時における耐力劣化は、実験結果と概ね対応した。以上より、繰返し载荷を受ける角形鋼管ブレースの亀裂発生条件を議論できる有限要素解析モデルが構築できたと考えられる。

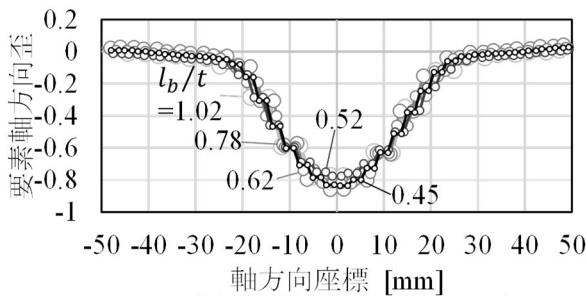
4. ブレースの亀裂発生条件

繰返し载荷を受ける鋼部材の亀裂発生条件を検証した最新の研究例として、Saykin ら⁹⁾の検討が挙げられる。Saykin ら⁹⁾は、空隙進展モデルを応用し、繰返し载荷を受ける梁部材を対象に、以下のような亀裂発生条件を提示した。要素が亀裂を生じるまでの累積相当塑性歪 $\bar{\epsilon}_p^{FI}$ を、式(3)のように応力三軸度 η の関数と定義した。

$$\bar{\epsilon}_p^{FI} = \begin{cases} \infty & (\eta \leq 0) \\ \alpha e^{-\beta\eta} & (\eta > 0) \end{cases} \quad (3)$$

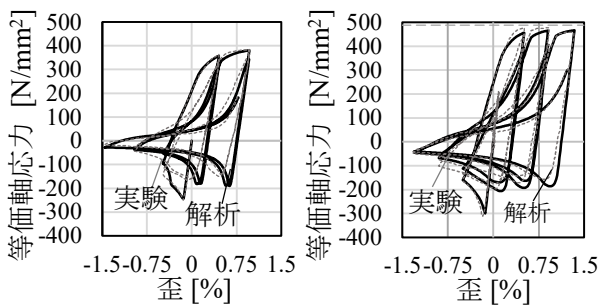


(a) B6.0-61 ($\epsilon_n = -1.0\%$)



(b) HSS1-1 ($\epsilon_n = -1.3\%$)

図6 歪分布



(a) B6.0-61

(b) HSS1-1

図7 応力-歪曲線

ここに、 α , β は材料による係数である。 $\bar{\epsilon}_p^{FI}$ は、引張応力状態である $\eta < 0$ の場合のみ有限値で、圧縮応力状態では無限大となる。この $\bar{\epsilon}_p^{FI}$ と、相当塑性歪の増分値 $d\bar{\epsilon}_p$ との比を取り、式(4)に示すように積分した値が1となる場合で、部材に亀裂が発生すると判定した。

$$\int \frac{d\bar{\epsilon}_p}{\bar{\epsilon}_p^{FI}} = 1 \quad (4)$$

この手法に倣い、ブレースに亀裂が生じる時点を予測した。解析より得られた $\bar{\epsilon}_p$ を $\bar{\epsilon}_p^{FI}$ で除した比の累積値を、式(5)のように損傷度 D と定義した。

$$D = \sum \frac{\Delta\bar{\epsilon}_p}{\bar{\epsilon}_p^{FI}} \quad (5)$$

図8に、B6.0-61の解析結果より得られた、ブレース中央における平板部と角部の応力三軸度 η と $\bar{\epsilon}_p^{FI}$ の推移を示す。応力三軸度 η は2/3のときに、等二軸引張の応力状態となり、最も亀裂が生じやすく、 $\bar{\epsilon}_p^{FI}$ は最も小さい値を示す。平板部の方が、等二軸引張に近い状態となり、総じて角部より高い $\bar{\epsilon}_p^{FI}$ を示した。図9にB6.0-61の損傷度の推移を示す。なお、係数 α , β は実験と整合するよう調整した。角部における $\bar{\epsilon}_p^{FI}$ は平板部より小さいものの、相当塑性歪は大きく、局部座屈を生じた後、角部における損傷度は平板部を上回り、実験で確認された角部から亀裂が生じる挙動と整合した。

5. 歪振幅拡大係数による亀裂発生条件の評価

文献2)では、塑性歪が集中する局所に生じる平均的な歪を、等価軸歪から推定する歪振幅拡大係数が提示された。図10に同手法で推定した角形鋼管ブレースにおける歪分布を示す。平板部における軸方向歪は、歪振幅拡大係数より得た平均歪と概ね対応した。これより平均歪から、局所における最大の相当塑性歪を評価するため、解析結果をもとに以下の仮定を設けた。1) 塑性歪が集中する局所の領域は、局部座屈半波長の0.5倍とした。

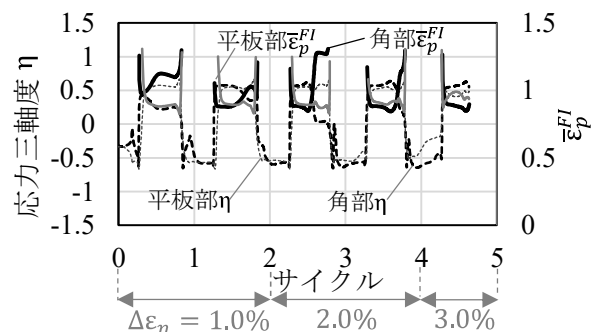


図8 応力三軸度履歴 (B6.0-61)

2) 局所における最大の相当塑性歪は、局所領域の平均歪の4倍とした。3) 角部における相当塑性歪を、平板部の2倍とした。4) 局所の周方向、板厚方向の歪は、それぞれ軸方向の0.1倍、1.0倍とした。図11に、1)~3)の仮定をふまえて推定したB6.0-61の局所における軸方向歪を示す。解析結果と概ね対応する値が得られた。以上の仮定で得られた相当塑性歪による損傷度の評価値と実験値は、B6.0-61で29%、HSS1-1で41%の誤差で対応した。

6. 幅厚比の影響

角形鋼管ブレースの幅厚比と細長比が、損傷度に与える影響を、有限要素法解析で検討した。B6.0-61の解析モデルを基準とし、細長比を $\lambda=60$ 、幅厚比を $B/t=13, 17, 21$ と設定した。図12に、有限要素解析より得た損傷度が1となるまでの推移を示す。幅厚比が大きいほど、小さい軸歪振幅で大きな損傷度を示す傾向が見られた。表1に、有限要素法解析で得られた損傷度を、5章の評価法で得た結果と併せて示す。評価値は33%までの誤差で、解析結果と対応した。

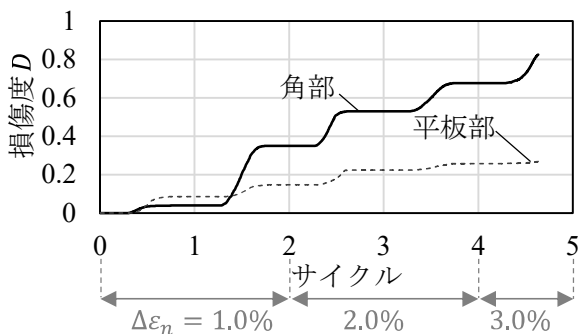


図9 損傷履歴 (B6.0-61)

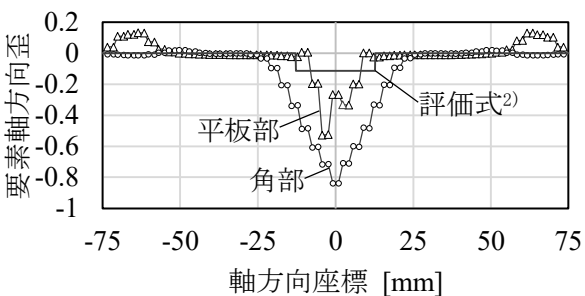


図10 評価式と解析結果の歪分布 (B6.0-61)

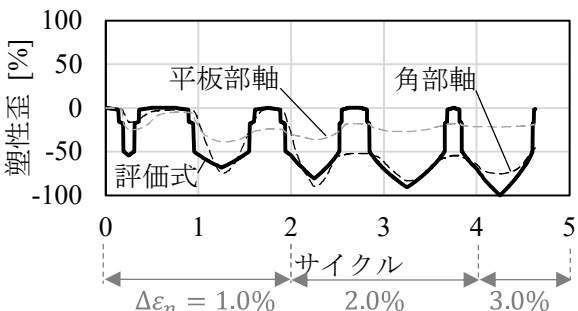


図11 評価式と解析結果の局所歪 (B6.0-61)

7. まとめ

有限要素解析で、繰返し荷重を受ける角形鋼管ブレースが、局部座屈に起因した亀裂を生じる挙動について検討した。以下に総括する。

- 1) 幅が厚さの半分となるシェル要素を用いて、鋼材の亀裂発生条件を検討するために十分な精度で、塑性歪の分布と集中を計算できることを確認した。
- 2) 幅が厚さの半分となるシェル要素で、局部座屈を生じた角形鋼管ブレースにおいて塑性歪が集中する挙動を再現できた。
- 3) 歪振幅拡大係数を用いて局所に集中する相当塑性歪を推定する手法を提示した。推定した相当塑性歪を用い、既報の亀裂発生条件で判定したブレースの損傷度は、数値解析結果と29%から41%の誤差で対応した。

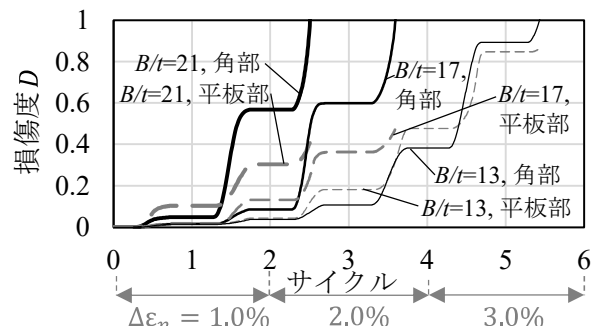


図12 損傷履歴 ($\lambda=60$)

表1 損傷度

細長比	幅厚比	解析	評価値
60	13	1.0	0.91
60	17	1.0	0.75
60	21	1.0	0.67

参考文献

- 1) Kanvinde et al.: Cyclic Void Growth Model to Assess Ductile Fracture Initiation in Structural Steels due to Ultra Low Cycle Fatigue, Journal of Engineering Mechanics, pp.701-712, 2007.6
- 2) Takeuchi et al.: Cumulative Cyclic Deformation Capacity of Circular Tubular Braces under Local Buckling, Journal of Structural Engineering, Vol.137, pp.1311-1318, 2011.11
- 3) ADINA R&D, Inc, Theory and Modelling Guide, ADINA 9.6.2, 2020.8
- 4) Huang et al.: Simulating the Inelastic Seismic Behavior of Steel Braced Frames Including the Effects of Low-Cycle Fatigue, PEER Report, 2010/104, 2010.4
- 5) 高橋他：座屈後破断が生じるブレースの塑性変形性能に関する実験的研究 (その2：実験概要)，日本建築学会関東支部研究報告集I, pp.469-472, 2016.3
- 6) Fell et al.: Large-Scale Testing and Simulation of Earthquake induced Ultra Low Cycle Fatigue in Bracing Members Subjected to Cyclic Inelastic Buckling,
- 7) 小野他：金属系素材の応力-歪度関係の定式化，日本建築学会構造系論文集，第532号，pp.177-184, 2000.6
- 8) Bao et al.: Prediction of Ductile Crack Formation in Uncracked Bodies, 2003.9
- 9) Saykin et al.: The effect of triaxiality on finite element deletion strategies for simulating collapse of full-scale steel structures, Eng. Struct., Vol.210, 2020.5