

## ステンレス鋼板の引張破断解析

日大生産工(院) ○真水 大介      日大生産工      高橋 進  
 理研      高村 正人      理研      見原 俊介  
 日大生産工(院)      角田 龍之介      日大生産工(学部) 大沼 航

### 1 緒言

生産技術における FEM シミュレーションは、金型設計に用いることで試作での試行錯誤を大幅に削減し開発期間の短縮およびコストの削減を可能とするほか、鍛造や板金成形などの成形プロセスの検討に用いることが可能である。近年、複雑な形状の部品は生産性向上によるコスト削減のために、切削、焼結、ダイカストから板鍛造への工法転換が検討されている。板鍛造において重要となるせん断加工が施された成形品の破面には、一般にせん断面と破断面が生じる。他の部品の表面上を摺動する場合、破面の品質は非常に重要でせん断面と破断面の制御が必要になる。成形プロセスの開発は時間がかかるため、せん断加工後の断面性状を評価するための FEM による高精度な成形シミュレーションは開発期間を短縮することが出来る<sup>1)</sup>。また、高精度なせん断加工シミュレーションのためには、延性破壊限界の簡便な同定手法が必要となる。

筆者らは、破断の基本形態での解析精度を検証するために、軟鋼の SPCE およびアルミニウム合金の A6061 を使用して FEM による引張試験における破断予測を行い、良い結果が得られている<sup>2), 3)</sup>。本報告では、解析対象をステンレス鋼の SUS304 とし、延性破壊条件式として Cockcroft-Latham の式を用いて引張試験の解析を行い、当該式内の定数の同定を行ったので報告する。

### 2 引張試験

ステンレス鋼の SUS304 を用いて引張試験を行った。試験片形状は JIS 5 号、厚さは 1mm、評点間距離は 50mm とした。引張速度は 2mm/min である。

ここで、解析の同定基準として引張試験における試験片の局所くびれ開始点の計測を行った。筆者らは DIC やレーザ、輝度分布などの手法を用いた、局所くびれ開始点の計測について検討を行った<sup>4)</sup>。その中で、本研究では比較的低コストで精度の良い、2次元レーザ変位計(LJ-V7200 KEYENCE 社製)を用いて局所くびれ開始点の計測を行った。最大荷重および局所くびれ発生後の試験片の表面形状を Fig.1 に示す。くびれの深さは最大荷重時の表面形状から各フレームの表面形状を引いた時の最大値として求めた。破断近傍のく

びれの深さと伸びの関係を Fig.2 に示す。ある点を境にくびれが増加していることから最小二乗法を用いて近似線を引き、交点を局所くびれ開始点として求めた。当該材料における局所くびれ開始点における伸びは 38.0mm であった。引張試験結果における荷重-伸び線図および局所くびれ開始点を Fig.3 に示す。

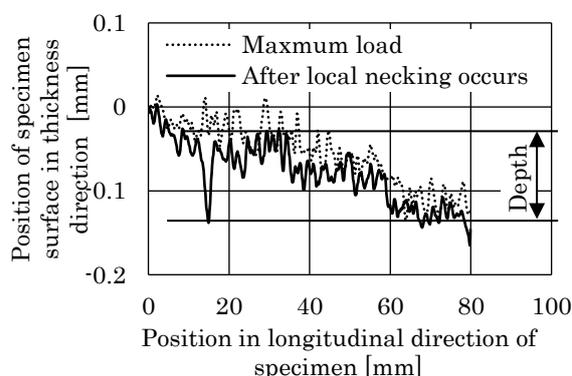


Fig.1 Change in profile of specimen surface

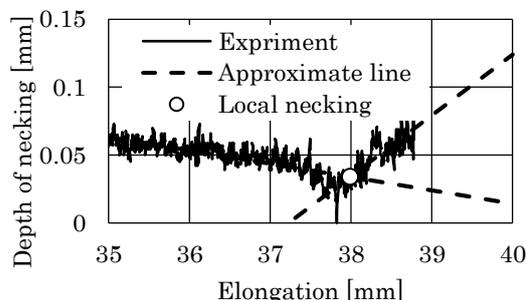


Fig.2 Relationship between depth and elongation

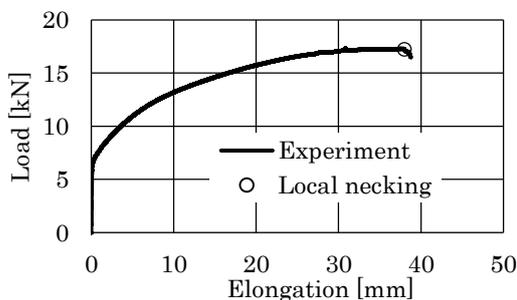


Fig.3 Load-elongation curve and local necking

## Tensile Fracture Analysis of Stainless Steel Sheet

Daisuke SHIMIZU, Susumu TAKAHASHI, Masato TAKAMURA,  
 Shunsuke MIHARA, Ryunosuke KAKUTA and Wataru OHNUMA

### 3 FEM 解析

#### 3.1 FEM 解析結果

FEM 解析では応力-ひずみ関係式として以下に示す Swift 則を用いた。

$$\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^n \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$  : 真応力、 $\bar{\epsilon}$  : 塑性ひずみ、 $K, \epsilon_0, n$  : 材料定数である。材料定数は最小二乗法を用いて試験結果と解析結果の局所くびれ開始点の伸びが一致する値を最適化手法を適用して求めた。Swift の式の材料定数を Table1 に示す。

引張試験の解析は、FEM ソフトウェア TP-STRUCT((株)トライアルパーク社製)を用いた。解析における試験片モデルはチャックされている部分を除いた形状とした。要素は六面体ソリッド要素を適用し、解析精度を考慮して試験片モデル中央部の要素は、立方体に近い形状とした。試験片モデルを Fig.4 に示す。

解析の境界条件は試験片モデルの一端を完全固定し、他端に試験片の長手方向に強制変位を与えた。強制変位端にかかる荷重の総和と評点間の伸びを解析から求めた。実験結果および解析結果における荷重-伸び線図を Fig.5 に示す。実験結果と解析結果の相関係数は 0.987 となりよく近似している。

Table1 Parameters of Swift's equation in rolling direction

$K$	$\epsilon_0$	$n$
1548	0.0448	0.547



Fig.4 Mesh of tensile test specimen model

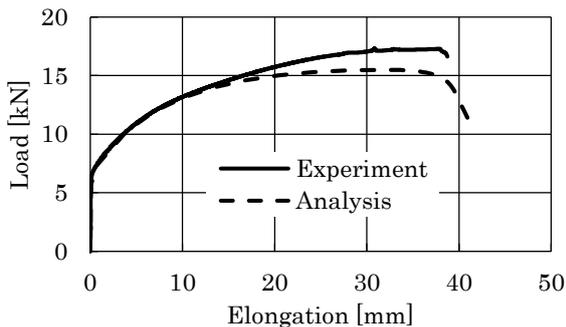


Fig.5 Relationship between load and elongation in an analysis and an experiment

#### 3.2 破断シミュレーション

解析に延性破壊条件式を導入して破断シミュレーションを行った。大矢根の式をはじめとし様々な延性破壊条件式が提案されている<sup>5), 6)</sup>。本研究では引張試験より式中の定数を同定でき、適用が簡便であることから Cockcroft-Latham の式<sup>7)</sup>を用いた。当該式を以下に示す。

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_{max} d\bar{\epsilon} = C \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{max}$  : 最大引張応力、 $\bar{\epsilon}_f$  : 破断限界ひずみ、 $C$  : 定数、である。

解析では式(2)の左辺を各要素ごとに計算し、設定した式(2)の右辺の値を超えた時、要素の剛性を限りなく 0 に近づけることで材料の破断を再現した。式(2)における定数 C 値は実験とシミュレーションを一致させることで求める。そこで、C 値は実験とシミュレーションの破断開始点の伸びが一致する値とした。実験と C 値を変化させたときのシミュレーションによる荷重-伸び線図を Fig.6 に示す。C 値が 400, 800 の場合シミュレーションでは小さなひずみエネルギーで破断が開始するため実験結果と一致しない。最適化手法を適用して解析を行った結果、シミュレーションと試験で同一の破断開始点となる C 値は 1483 であった。

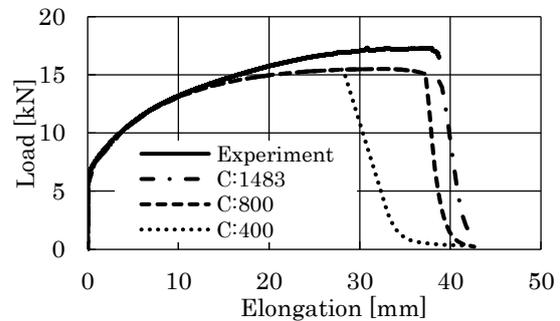


Fig.6 Comparison of fracture behaviors in load-elongation curves with several C values

### 4 結言

ステンレス鋼 SUS304 を供試材に FEM を用いた引張試験の破断シミュレーションを行った結果、以下の結果を得た。

- 1) 最適化手法を用いることで引張試験結果から Swift の式および Cockcroft-Latham の式の簡便なパラメータ同定を行った。
- 2) FEM 解析は実験と解析の局所くびれ開始点が一致するパラメータを求めた結果、相関係数が 0.987 となりよく一致した。
- 3) 破断シミュレーションにおいて延性破壊条件式である Cockcroft-Latham の式を適用してパラメータ C 値を求めた結果 1483 であった。

#### 「参考文献」

- 1) 高村 : 塑性と加工, **53**-620 (2012), 805.
- 2) 真水ほか : 平 29 塑加講論, (2017), 77.
- 3) D.Shimizu et al. : 6th PACME, (2017), USB.
- 4) D.Shimizu et al. : J.Phys.:Conf.Ser. 1063 (2018), 012154
- 5) 大矢根 : 日本機械学会誌, **75**-639 (1972), 596.
- 6) 大矢根 : 塑性と加工, **13**-135 (1972), 265.
- 7) M.G.Cockcroft et al. : J. inst. Metals, **96** (1968), 33.