## 717

### ステンレス鋼の引張強さを超える真応力・ひずみ曲線

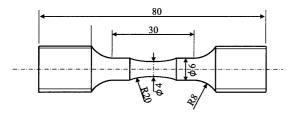
㈱原子力安全システム研究所 〇釜谷昌幸, 川久保政洋

# True Stress-Strain curve of Stainless Steel over Ultimate Strength Masayuki KAMAYA and Masahiro KAWAKUBO

#### 1 緒 言

構造不連続部や欠陥などを有する構造物の変形では、変形の局所化により局部的には 1.0 を超えるような大きなひずみが発生することも想定される.このような変形を有限要素解析により模擬する場合、十分大きなひずみまでカバーする応力・ひずみ関係が必要となる.しかし、通常の引張試験で得られる応力・ひずみ関係は、試験片のネッキングが生じるまでの一様伸びの範囲に限られ、一般的な構造材料では 0.3~0.5 程度がそのひずみの最大値となる.

著者らは、砂時計型試験片を用いた引張試験と有限要素解析を組み合わせることで、一様伸びを超える範囲の 真応力・ひずみ曲線を得る試験手順を開発した<sup>1)</sup>. そし



(a) Large type specimen

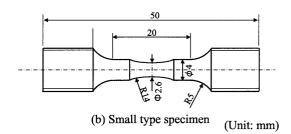


Fig. 1 Geometry of hourglass type tensile specimen.

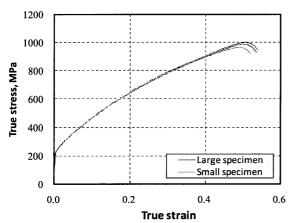


Fig. 2 Stress-strain relationship obtained by conventional tensile tests.

て、炭素鋼の応力・ひずみ曲線を正確に得ることができることを示した.本報では、この方法を延性材料であるステンレス鋼に適用し、その適用性について検討した.

#### 2 真応力・ひずみ曲線の同定方法

2.1 引張試験 4B Sch160 の304 ステンレス鋼管から軸方向に平行に試験片を切り出した. Fig.1 に示す大型(最小径 4 mm)と小型(同2.6 mm)の2種類の砂時計型試験片を用いた. 同様の形状で切り欠きのない平滑な試験片を用いて通常の引張試験も実施した. 得られた応力・ひずみ関係を Fig.2 に示す. それぞれ2本の試験を行っており、一様伸びは0.5程度であった.

クロスヘッド速度 0.5 mm/m で砂時計型試験片を変形させた. 曲率を有する切欠き底におけるひずみは,3 次元デジタル画像相関法 (VIC-3D)を用いて測定した. Fig.3 に計測されたひずみの分布の例を示す. 試験片表面にはターゲットとなるパターンが付与されている. デジタル画像相関法では,試験片の変形にともない変化するパターンを画像解析することでひずみ分布を同定する.2 台のカメラによる3次元測定を行うことにより,奥行き方向の変位も同定される. 得られたひずみ分布は滑らかで,ひずみ測定が適切に実施されていることが分かる.

**2.2** 真応力・ひずみ関係の同定 Fig.4 に真応力・ひずみ曲線の同定手順を示す. 試験荷重( $P_{\rm exp}$ )とデジタル画像相関法で測定された切欠き底表面のひずみ $\epsilon$ の関係を有限要素解析(FEA)で再現することで、材料の真応力・ひずみ関係を得る. 具体的には、まず連続的に得られている $\epsilon$ を多直線近似し、切り欠き底のひずみが $\epsilon$ ( $\epsilon$ )のときの

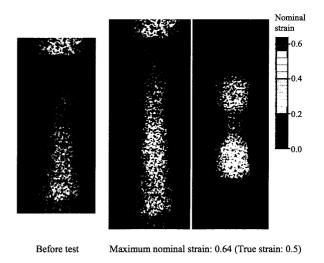


Fig. 3 Strain measurement using 3D digital image correlation system.

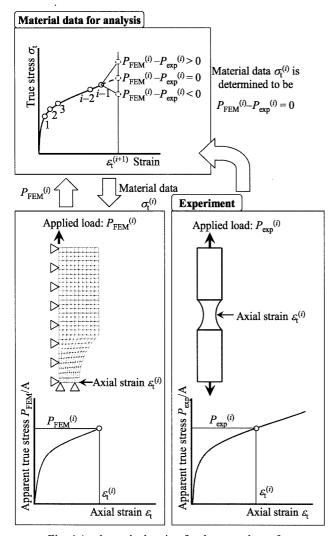


Fig. 4 A schematic drawing for the procedure of determining stress-strain curve using hourglass type tensile specimen (for determining  $\sigma_t^{(i)}$  at  $\varepsilon_t^{(i)}$ ).

FEA で得られる負荷荷重( $P_{\text{FEM}}$ )を  $P_{\text{exp}}$ に一致させる. このとき、FEA の入力データである真応力・ひずみ曲線の $\mathbf{a}^{(i)}$ に対する $\mathbf{a}^{(i)}$ を変化させ、繰り返し計算で解を収束させる. この同定を $\mathbf{a}$  の小さい方から順次実施し、i 番目の $\mathbf{a}$  ( $\mathbf{a}^{(i)}$ )に対する真応力 $\mathbf{a}^{(i)}$ を同定する時には、既に求まっている i-1 番目以前の真応力・ひずみ曲線は変更しない. 有限要素解析は ABAQUS による大変形解析 (NLGEOM オプション)を適用した.

#### 3 結果および考察

Fig.5 に同定された真応力・ひずみ曲線を示す. 大型試験片の場合,全部で49点のひずみに対する応力をおおよそ200回の繰り返し計算で同定できた. 図中の赤色のプロットは平滑試験片から得られた一様伸びまでの曲線を示す. 同定された応力・ひずみ曲線は,この曲線とよく一致しており,かつ平滑試験片の一様伸びを大きく上回るひずみまで曲線が同定できている. 降伏強度を超える範囲では,真応力・ひずみ関係がほぼ直線で近似できることが分かる.

試験片の標点間変位と公称応力(荷重/初期断面積)

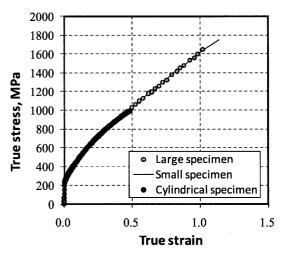


Fig. 5 Identified true stress-strain relationship for Type 304 stainless steel.

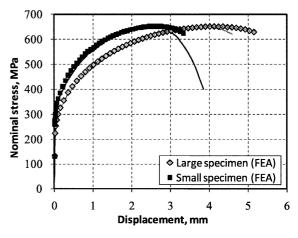


Fig. 6 Relationship between nominal stress and displacement during tensile tests.

の関係を Fig.6 に示す. 得られた応力・ひずみ関係を用いた有限要素解析の結果も併せて示しているが, ひずみが大きくなると実験と解析に差異が生じていた. これは, 曲線の同定に用いられた切り欠き底のひずみと変位の関係が, 実験と計算で一致しなかったことを示している. 炭素鋼を用いた実験では, 両者は試験片破断の最終段階までよく一致していた<sup>1)</sup>. 今回のステンレス鋼においてこれが一致しなかった要因については, 今後の課題となる. 実験と解析の結果が逸脱するときのひずみはおおよそ0.7 であることから, これより小さい範囲での応力・ひずみ曲線の精度は確認できたと考えられる.

#### 4 結 言

大変形有限要素解析で重要となる真応力・ひずみ曲線をステンレス鋼について求めた. その結果, 最大 0.7 程度までの真ひずみの範囲において, 応力・ひずみ関係を同定することができた.

#### 参考文献

1) M. Kamaya and M. Kawakubo, Mechanics of Materials, 53, 243-253 (2011).