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¹⁾.そし



(a) Large type specimen



(b) Small type specimen (Unit: mm)





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4mm)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(Pexp)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 (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 (を多直線近似し、切り欠き底のひずみが (のときの



Before test

Maximum nominal strain: 0.64 (True strain: 0.5)

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 $\epsilon_i^{(i)}$).

FEA で得られる負荷荷重(P_{FEM})を P_{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 $\epsilon^{(0)}$ に対する $\sigma^{(i)}$ を変化させ、繰り返し計算で解を収束さ せる. この同定を ϵ_i の小さい方から順次実施し、i番目 の $\epsilon_i (\epsilon_i^{(0)})$ に対する真応力 $\sigma^{(i)}$ 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.





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¹⁾.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

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