

金属材料引張試験のくびれ部の応力状態を考慮した簡易な真応力-真ひずみモデル

九州工業大学 正会員○高井 俊和

九州工業大学 学生会員 谷井 健信

1. 目的

著者らはこれまでに鋼構造物の終局挙動を扱う弾塑性 FEM 解析に用いることを想定し、鋼材のミルシートの情報をもとにしたトリリニア型の真応力-真ひずみの簡易なモデル化方法を検討してきた[1]. そのモデルは、引張強さから破断までにおいて高めの応力を与える課題があった. 本検討では、真応力-真ひずみモデルで、金属材料引張試験のくびれ部の応力状態を考慮することで整合性が向上することを確認した.

2. くびれ部の応力状態

材料試験では、一般的に引張強さよりやや遅れてくびれ（ネッキング）が生じる. くびれが生じると多軸応力状態となり、くびれ部のミーゼス応力 σ_{eq} と引張荷重方向の直応力 σ_{ave} に差が生じる. Bridgman[2]は、 σ_{eq} と σ_{ave} の比が図 1 に示すくびれ部の半径 a と曲率半径 R に関係することを示している.

$$\zeta_B = \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{ave}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right)} \quad (1)$$

ζ_B は補正係数 (correction factor [2]) と呼ばれている.

3. 解析方法

解析対象は JIS 4 号試験片を用いた材料試験である. 試験片の標点距離は 50 mm, 断面は直径 14 mm の円形である. 試験片材料の鋼材の鋼種は SM490Y で、ミルシートの降伏点は 416 N/mm², 引張強さは 542 N/mm², 伸びは 30% である.

解析ケースを表 1 に示す. まず P15 の標点間のみのモデル化でも、F15 の全体モデルと同様の結果が得られることを確認する. 文献[1]を参考にした P15 の真応力 s -真ひずみ e モデルに対し、補正係数 ζ を考慮した P15r の整合性が高いことを確認する. さらに要素サイズの影響を確認する (P10, P20, P10r, P20r).

解析プログラムは Abaqus Standard v6.13 を用いた. 幾何学的非線形性を考慮した. 解析モデルの概要を図 2 に示す. 対称性を考慮し 1/8 モデルとした. 1 次の 8 節点 6 面体低減積分ソリッド要素を用いた. 要素のサイズは 1.5 mm 程度を基本とした. 全体モデルはチャック部の表面に、標点間モデルでは端部に与えた強制変位により引張荷重を作用させた.

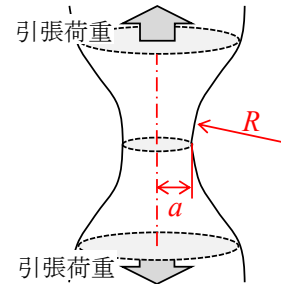


図 1 材料試験のくびれ部のイメージ

表 1 解析ケース

	モデル化	要素サイズ	破断点の補正
F15	全体		
P15	標点間	1.5 mm	なし
P15r			あり
P10			なし
P10r		1 mm	あり
P20			なし
P20r			あり

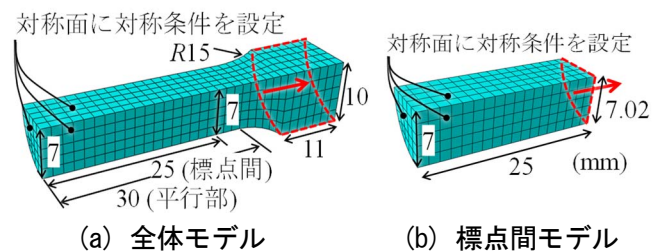


図 2 解析モデルの概要

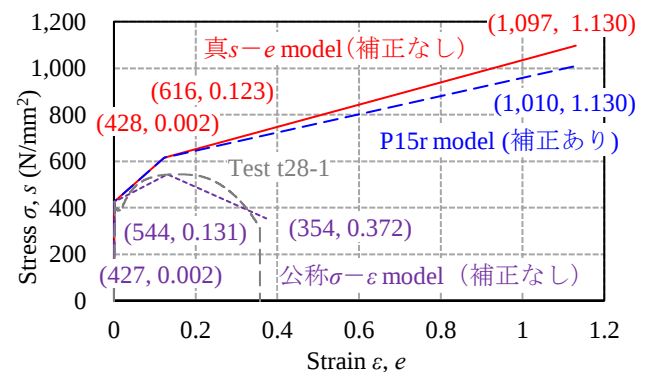


図 3 応力-ひずみモデル

応力-ひずみモデルを図 3 に示す. 解析対象の材料試験結果の公称応力 σ -公称ひずみ ε 関係も併せて示す. ミルシートの情報をもとに文献[1]を参照して σ - ε 関係, s - e 関係をモデル化した. ヤング率は 200,000 N/mm², ポアソン比は 0.3 とした. 降伏はミーゼス則を用いた. なお、青破線は後述の P15 ケースで得た補正係数で破断点の応力を低減した P15r モデルである.

4. 解析結果および考察

図4に破断ひずみに達した時点の変形と Mises 応力分布を示す。いずれのケースとも引張強さ以降、対称面付近でくびれが1か所再現された。図5に解析で得られた σ - ϵ 関係を示す。 σ は引張荷重を初期断面積で、 ϵ は伸びを標点距離の50 mmで割って求めた。図中には材料試験結果とモデルの σ - ϵ 関係も示している。図4の変形や応力分布と、図5の σ - ϵ 関係でF15とP15の結果がほぼ同じであり、標点間モデルでも全体モデルと同等の結果が得られていることが確認された。

図6に解析結果のミーゼス応力と直応力の比で求めた補正係数 ζ_A と式(1)に解析で得られたくびれ部の半径 a と曲率半径 R を代入して求めた ζ_B を示す。解析結果のくびれ部の R は、図7に示すように対称面上の節点とその隣の節点の座標から

$$R^2 = \beta^2 + (R - \alpha)^2 \quad (2)$$

より

$$R = (\alpha^2 + \beta^2)/2\alpha \quad (3)$$

と求めた。図6より ζ_A と ζ_B は引張強さ以降、ほぼ同様に低下し、破断時点で ζ_A 、 ζ_B とも92%となった。 ζ_A を破断点の応力に乗じてモデル化した s - e 関係が図2の青破線(P15r)である。その解析結果は図5に示した。引張強さ以降の応力が低減し、補正前のP15よりモデルに近づき整合性が向上した。くびれ部の応力状態を s - e モデルの破断点の応力に反映することで整合性が向上することが確認された。

要素サイズが異なるケースの結果を図8に示す。引張強さを超えて、 $\epsilon = 0.25$ 前後以降での応力に差が生じた。破断時点の ζ_A もP10で91%、P20で93%と少し差がみられた。得られたくびれ部の要素の変形に差が生じたためである。くびれ部の変形の再現性によっては、解析モデルの要素サイズに応じた補正係数を用いる必要があることを示唆している。

謝辞 本研究は日本鉄鋼連盟の研究助成を受けて行いました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 高井 俊和, 大塚 貴広: 鋼材の真応力-真ひずみ関係の簡易なモデル化方法の1提案, 鋼構造年次論文報告集, 第29巻, pp.158-167, 日本鋼構造協会, 2021.11
- [2] P. W. Bridgman: Studies in large plastic flow and fracture with special emphasis on the effects of hydrostatic pressure, First edition, McGraw-hill, 1952

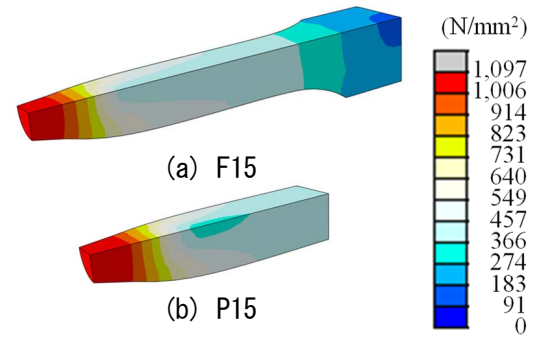


図4 破断ひずみ時点の変形, Mises 応力分布

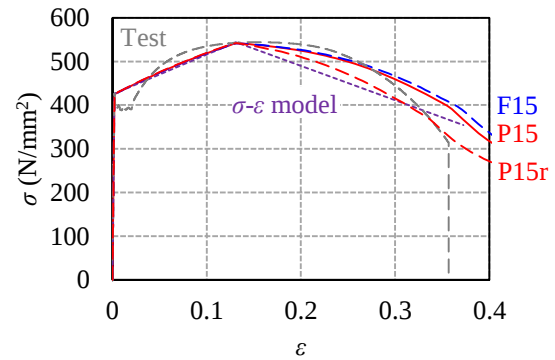


図5 公称応力-公称ひずみ (F15, P15, P15r)

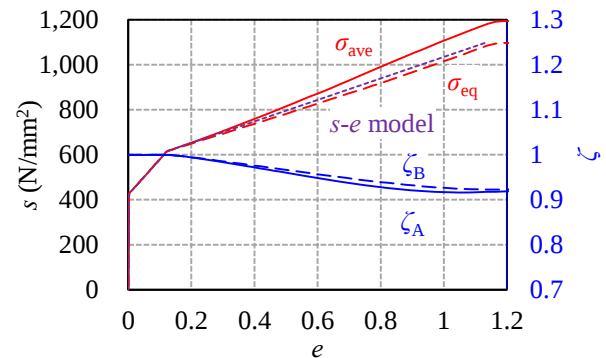


図6 真応力-真ひずみと ζ_A , ζ_B (P15)

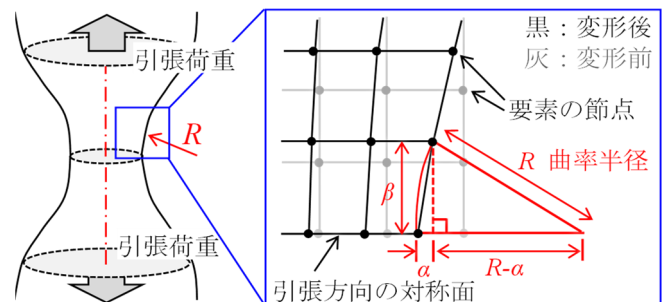


図7 くびれ部の曲率半径 R の計算

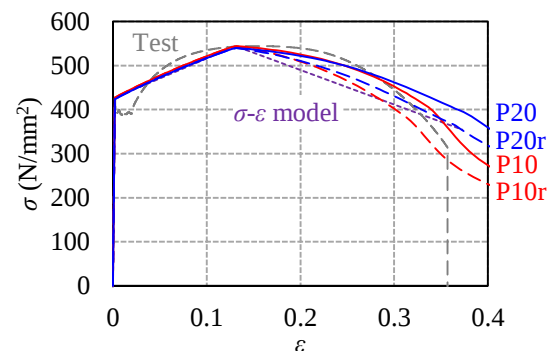


図8 公称応力-公称ひずみ (P10, P10r, P20, P20r)