

破断を考慮した真応力-ひずみ関係の簡易なモデル化方法の1提案

九州工業大学 学生会員○大塚 貴広

九州工業大学 正会員 高井 俊和

1. 目的

著者らは、鋼材の大きな変形を伴う FEM 解析に適用することを目的に真応力-ひずみ関係の簡易なモデル化方法をこれまで検討してきた[1]。鋼材の製品検査証（ミルシート）に基づいたモデル化であり、降伏点、引張強さの応力値と、それ以外は材料特性値間の関係により補完したトリリニア型の応力-ひずみモデルである。破断挙動が再現されていない課題があった。本検討では、破断ひずみの設定による破断挙動の簡易的な再現と、規格下限値を参考とした真応力-ひずみモデルを検討した。

2. 簡易な応力-ひずみモデルの概要

トリリニア型で不足する値を補完するため、鋼材の材料試験結果[2]～[5]をもとに図 1 のように材料特性値間の関係式を回帰分析により作成した。材料特性値の組合せは、文献や相関性を勘案して決定した。その関係式を式(1)～式(4)に示す。

$$uEL = -0.398YR + 44.301 \quad (1)$$

$$\varphi = -0.0071\sigma_T + 71.569 \quad (2)$$

$$\sigma_F = 0.5369\sigma_T + 62.193 \quad (3)$$

$$EL = -0.0333\sigma_Y + 51.463 \quad (4)$$

ここに、YR：降伏比 ($=\sigma_Y/\sigma_T$)， φ ：絞り (%)，その他の記号は表 1 に示す。

式の値は公称応力-ひずみ関係における値であり、一様変形である引張強さまでは式(5)、式(6)で真応力-ひずみに変換した。ネッキングが生じる引張強さ以降は、塑性変形の非圧縮性 ($A_0L_0 = AL$ ：体積一定) を考慮して式(7)、式(8)で変換した。

$$s = \sigma(\varepsilon + 1) \quad (5) \quad e = \ln(\varepsilon + 1) \quad (6)$$

$$s = \sigma(A_0/A) \quad (7) \quad e = \ln(A_0/A) \quad (8)$$

ここに、 σ ：公称応力 (N/mm^2)， ε ：公称ひずみ (-)， s ：真応力 (N/mm^2)， e ：真ひずみ (-)， A_0 ：原断面積 (mm^2)， A ：断面積 (mm^2)

3. 破断を考慮した応力-ひずみモデルの検討

図 2 に材料試験を実施した鋼種が SM490Y、板厚が 28 mm の鋼板のミルシートの降伏点、引張強さをもと

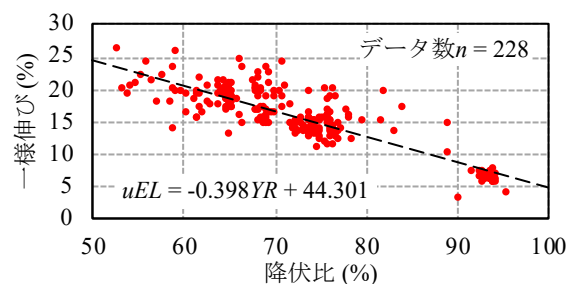


図 1 一様伸びと降伏比の関係

表 1 応力、ひずみの記号

	公称応力-ひずみ			真応力-ひずみ	
	応力 (N/mm^2)	ひずみ (-)	伸び (%)	応力 (N/mm^2)	ひずみ (-)
降伏点	σ_Y	ε_Y	-	s_Y	e_Y
引張強さ	σ_T	ε_T	uEL	s_T	e_T
破断	σ_F	ε_F	EL	s_F	e_F

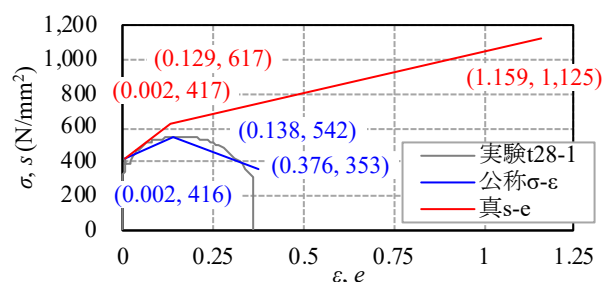


図 2 応力-ひずみ関係

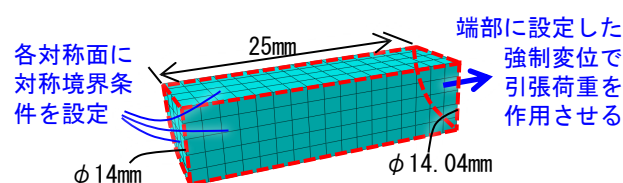


図 3 解析モデルの概要

にしたトリリニア型の応力-ひずみ関係を示す。ヤング率は $200,000 \text{ N/mm}^2$ ，ポアソン比は 0.3 とした。それ以外の値は式(1)～式(4)を用いて補完した。

解析プログラムは Abaqus Standard 6.14 を用いた。図 3 に解析モデルの概要を示すように、解析対象は材料試験の JIS 4 号試験片の平行部とした。直径が 14 mm，標点距離 L_0 が 50 mm である。対称性を考慮し 1/8 モデルとした。1 次の 8 節点低減積分ソリッド要素を用い、要素の 1 辺の長さはおおむね 1.4 mm とした。標点側の直径を 0.3%ほどわずかに大きくして対称面側でネッキングを生じさせた。

キーワード 真応力-ひずみ，破断ひずみ，トリリニア，FEM 解析

連絡先 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1 九州工業大学 大学院工学研究院 建設社会工学研究系 TEL:093-884-3123

図4に解析結果を示す。引張強さを少し超えた辺りまでは材料試験結果とよく一致し、それ以降の破断応力はやや高くなった。この原因は、破断時の絞り ϕ 、真ひずみ e が材料試験と異なることから、ネッキングの度合いの整合性と考えられる。

材料試験の公称破断ひずみ $\varepsilon_F=0.357$ 時における解析のネッキング部の真ひずみ e_F が1.094であったことから、これを破断ひずみのしきい値とした。破断のモデル化はAbaqusの延性損傷の機能を用い、破断ひずみ e_F と係数(0.5, 0.1, 0.01)を組合せて3ケースを設定した。

その結果を図4に合わせて示す。材料試験の破断に近いところで応力が低下しはじめ、破断挙動がおおむね再現された。係数が小さいほど急激に応力が低下したが、計算収束性が低くなった。

4. 規格下限値による真応力-ひずみモデルの検討

表2にモデル化した応力-ひずみ関係をまとめる。JISに規定される値を参考に、塗りつぶしで示した値を補完して設定した。破断ひずみは、3.の手順で求めた値である。解析対象はJIS4号試験片の平行部とし、ヤング率は200,000 N/mm²、ポアソン比は0.3、破断の係数は0.1とした。

図5に解析で得られた公称応力-ひずみ関係と設定した公称応力-ひずみモデルを合わせて示す。いずれのケースとも引張強さ以降、破断までの応力が高めではあるものの、降伏点、引張強さと、破断までの応力低下の挙動がおおむね再現された。破断のモデル化により、破断後に応力が急減する挙動も再現された。計算収束性が低く応力が0に低下するまでは結果が得られず、モデル化の改善の余地がある。

参考文献

- [1] 大塚 貴広, 高井 俊和: 鋼材の局部伸びを考慮した真応力-ひずみ関係の簡易的なモデル化の検討, 令和2年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, I-9, pp. 17-18, 2021.3
- [2] 土木学会 本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会 鋼材分科会: 本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書 別冊4 鋼上部構造用鋼板の所要性能, 土木学会, 1973.3
- [3] 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 日本鉄鋼連盟: 鋼材の破断伸びに及ぼす試験片形状の影響, 国土技術政策総合研究所資料, 第662号, 2011.12
- [4] 土田 紀之, 井上 忠信, 榎並 啓太郎: 様々な金属材料を用いた断続引張試験とBridgmanの式による破断直前までの真の応力-ひずみ関係の推算, 日本金属学会誌, 第76巻, 第10号, pp. 579-586, 2012

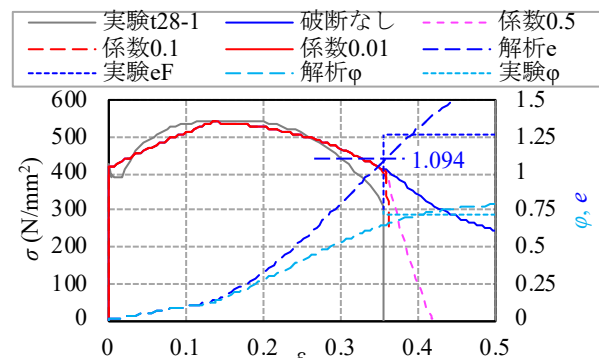
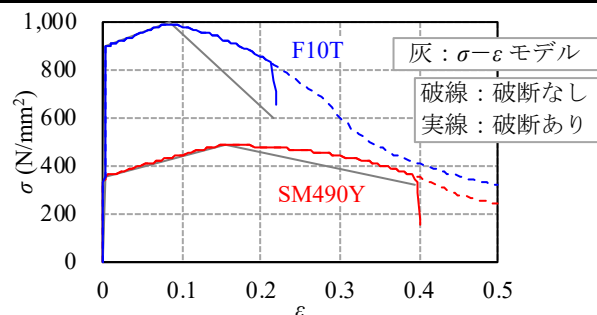


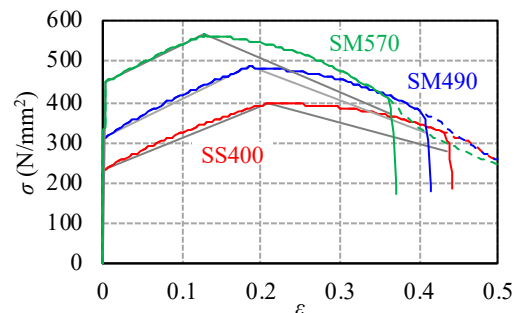
図4 解析結果 (破断のモデル化)

表2 モデル化した応力-ひずみ関係

鋼種	状態	公称応力-ひずみ		真応力-ひずみ		破断モデル化	
		σ (N/mm ²)	ε	s (N/mm ²)	e	e_F	係数
SS400	降伏	235	0.001	235	0.001	1.086	0.1
	引張強さ	400	0.209	484	0.190		
	破断	277	0.436	920	1.201		
SM490	降伏	315	0.002	315	0.002	1.121	0.1
	引張強さ	490	0.187	582	0.172		
	破断	325	0.410	1,061	1.182		
SM490Y	降伏	355	0.002	356	0.002	1.178	0.1
	引張強さ	490	0.155	566	0.144		
	破断	325	0.396	1,051	1.173		
SM570	降伏	450	0.002	451	0.002	1.176	0.1
	引張強さ	570	0.129	643	0.121		
	破断	368	0.365	1,164	1.151		
F10T	降伏	900	0.005	904	0.004	0.716	0.1
	引張強さ	1,000	0.085	1,085	0.081		
	破断	599	0.215	1,720	1.055		



(a) SM490Y, F10T



(b) SS400, SM490, SM570

図5 解析結果 (規格下限値)

- [5] 岩田 善裕, 石原 直, 向井 昭義, 西山 功, 青木 博文: 鋼材の素材引張試験における一様伸びと破断伸びの関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 78, No. 683, pp. 223-232, 2013.5