

ひずみ硬化とひずみ時効を経た鋼材の延性破壊則を検証する単調引張試験

南出 怜音

1. 背景と目的

鋼構造で部材のリユースを実現するためには、地震を受けてひずみ硬化を伴う塑性変形を生じ、さらに時間を経てひずみ時効を生じたあとの機械的特性、つまり強度の上昇や変形能力の低下、破壊靱性の低下を把握する必要がある。そこで、ひずみ硬化とひずみ時効の有無が、延性破壊条件に与える影響を検証する目的で、異なる応力状態を生じる切欠き試験体の単調引張試験を実施した。

2. 鋼材の破壊則

鋼材の破断は、不純物や微小欠損の周囲に空隙を生じ、その空隙が拡大して繋がって延性亀裂に成長し、破壊に至る現象だと理解されている¹⁾。式(1)は、延性破壊に至った時点の相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}$ を、応力三軸度 η と正規化 Lode 角 $\bar{\theta}$ と関係づける関数²⁾で、機械・建築分野で広く使用されている。

$$\bar{\epsilon} = \left[\frac{1}{2} (D_1 e^{-D_2 \eta} + D_5 e^{-D_6 \eta}) - D_3 e^{-D_4 \eta} \right] \bar{\theta}^2 + \frac{1}{2} (D_1 e^{-D_2 \eta} - D_5 e^{-D_6 \eta}) \bar{\theta} + D_3 e^{-D_4 \eta} \quad (1)$$

上式で、 D_1 から D_6 は、材料に固有の係数である。また、 η と $\bar{\theta}$ は、式(2)および(3)で定義される。

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (2)$$

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos \left(\frac{27(\sigma_1 - \sigma_m)(\sigma_2 - \sigma_m)(\sigma_3 - \sigma_m)}{2\bar{\sigma}^3} \right) \quad (3)$$

ここで、 σ_m は平均応力（静水圧応力）、 $\bar{\sigma}$ は相当応力で、主応力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 と以下のように関連付けられる。

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (5)$$

3. 実験計画

ひずみ硬化とひずみ時効の有無で、材料係数 D_1 から D_6 がどのように異なるかを評価する目的で、合計 30 体の引張試験を実施した。製鉄会社の異なる 2 枚の SS400 電炉鋼板 PL-22×2000×200 を、鋼材 A と B と命名した。表 1 に、ひずみ時効に関連する炭素 (C)、全窒素 (TN)、自由窒素 (FN) の含有量と、引張試験で測定した機械的特性を示す。C はミルシートに記載された値、TN と FN は、別途 JIS G 1228-1 アンモニア蒸留分離アミド硫酸滴定法で計測した値である。いずれの鋼材も、TN の多寡の基準と考えられる 0.006 wt% を超えたが、特に鋼材 B の TN が多かった。

鋼材 A と B から、表 2 に示す通り、切欠き無し（形状 0）、円形切欠き（形状 I）と長方形切欠き（形状 II）の 3 つの形状、

全 7 種類の試験体を、圧延方向が引張方向と一致するように採取し、容量 1,000 kN の万能試験機を用いて、1 段階または養生期間を挟んだ 2 段階で単調引張荷重した。

形状 0 は、試験部が直径 10 mm の円形断面、標点間距離が 50 mm の引張試験片で、3 体ずつ製作した。予ひずみ 2% の有無、予ひずみ後の養生期間（7 日と 30 日）をパラメータに試験した。単軸引張状態を実現するので、理論的に $\eta = 1/3$ 、 $\bar{\theta} = 1$ である。図 1 に、鋼材 B の 3 体から得た応力とひずみの関係を示す。当初の降伏強度を σ_{y0} 、養生期間 30 日後の 2 段階目で測定した降伏強度を σ_y と表記して区別する。養生を経たあと、降伏棚が再出現し、降伏強度が上昇したが、引張強度と伸びはあまり変わらなかった。

形状 I と II は、異なる応力状態を生じさせる目的で、円形断面の中央部に切欠き加工を施した試験体で、Smith ら³⁾を参考に、図 2 に示す寸法を定めた。形状 I も II も、寸法が異なる 3 種類を 2 体ずつ製作した。2 体のうち一方には、はじめから切欠き加工を施し、もう一方には、予ひずみ 2% を与えたあと、30 日の養生期間中に切欠き加工を施した。形状 I と II は、最小断面の中央に破断起点を形成するが、その起点の応力環境を表現したのが、表 2 に示す応力状態パラメータである。形状 I については、理論的に塑性状態の応力三軸度 η_f が式(6)で近似され²⁾、 $\bar{\theta} = 1$ である。

$$\eta_f = \frac{1}{3} + \sqrt{2} \ln \left(1 + \frac{D_{\min}}{4R_N} \right) \quad (6)$$

4. 数値解析

有限要素法解析ソフト Adina ver. 23.00⁴⁾を用いて、形状 I を円筒座標系の有限要素法モデルで弾性解析した。図 3 に、最小断面について算定した η と $\bar{\theta}$ の分布を示す。中心付近で $\bar{\theta}$ はおおよそ 1 だ

表 1 鋼材の化学成分と機械的特性

鋼材	化学成分 [wt%]			機械的特性		
	C	TN	FN	σ_{y0} [N/mm ²]	σ_{u0} [N/mm ²]	伸び [%]
A	0.12	0.0089	0.0083	263	428	37.9
B	0.10	0.0118	0.0103	275	430	36.3

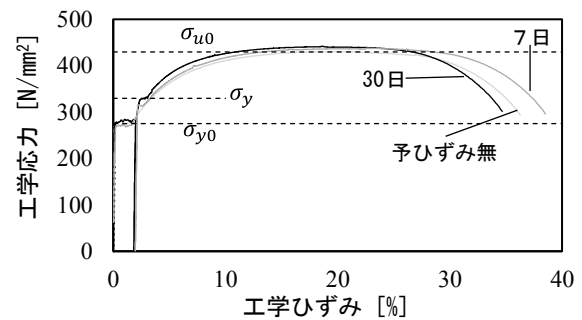


図 1 鋼材 B の工学応力-工学ひずみ関係

表2 試験体の形状・寸法と応力状態パラメータ

形状	No.	寸法					応力状態パラメータ		
		D_{UN}	R_N	D_{min}	t_S	t_L	η_e	η_f	$\bar{\theta}_e = \bar{\theta}_f$
0	1	10	-	-	-	-	0.33	0.33	1
	2	20	3	14	-	-	0.74	1.47	1
I	3	16	3	10	-	-	0.82	1.19	1
	4	16	3	8	-	-	0.89	1.06	1
II	5	20	3	-	4	8	有限要素法解析により 今後、特定する		
	6	20	4	-	4	5			
	7	20	3	-	4	14			

が、 η が 1/3 より高いことは、直交方向の拘束が大きいことを表している。この弾性解析によって求められた切欠き中央点の応力三軸度を η_e として、表 2 に示す。

5. 実験結果

図 4 に、試験体 2、4、7 で得た荷重 P と標点間変位の関係と、予ひずみ有りの破断面の写真を示す。ここに示さないが、予ひずみの有無で破断面に違いは見られなかった。荷重を、最小断面積の初期値 A_{min0} で除し、形状 0 で測定した σ_{y0} と σ_{u0} を参考値として示す。式(1)に代入する $\bar{\epsilon}$ 、 η 、 $\bar{\theta}$ の値を採取する時点、つまり延性破壊を生じたと判断する時点を三角形印で示す。拘束効果により、見かけ上の降伏強度と引張強度は、 σ_{y0} と σ_{u0} を大きく超えた。予ひずみ有りは、予ひずみ無しと比較して、引張耐力が最大で 9% 高く、伸びは 10% から 25% 小さかった。 η_e で表現される図 5 に、形状 I について、0.2% オフセット法に基づいて定めた見かけ上の降伏応力 P_y/A_{min0} と η_e の関係を示す。軸対称性とミーゼスの降伏条件から、式(7)の関係式を導出した。

$$\frac{P_y}{A_{min0}} = \sigma_y \left(\eta_e + \frac{2}{3} \right) \quad (7)$$

降伏強度に、予ひずみの有無に応じた値をとった。 η_e は、直交方向の拘束を表しており、この値が大きいほど、降伏荷重が大きくなるという(7)式に、形状 I の試験結果はよく整合した。

図 4 中の破断面をみると、例外なく、中央付近にささくれだった荒い破面があり、その外周に光沢のある比較的滑らかな破面を確認できた。前者は、空隙の成長によって形作られた繊維状破面で、後者は、中央の亀裂が進展した後に破断したシェアーリップと考えられる。破断面から、形状 I や II の切欠き付き試験片では、切欠き中心が延性破断の起点であったことが確認された。

6. まとめと今後の展望

3 つの形状のいずれも、ひずみ時効による降伏強度と引張強

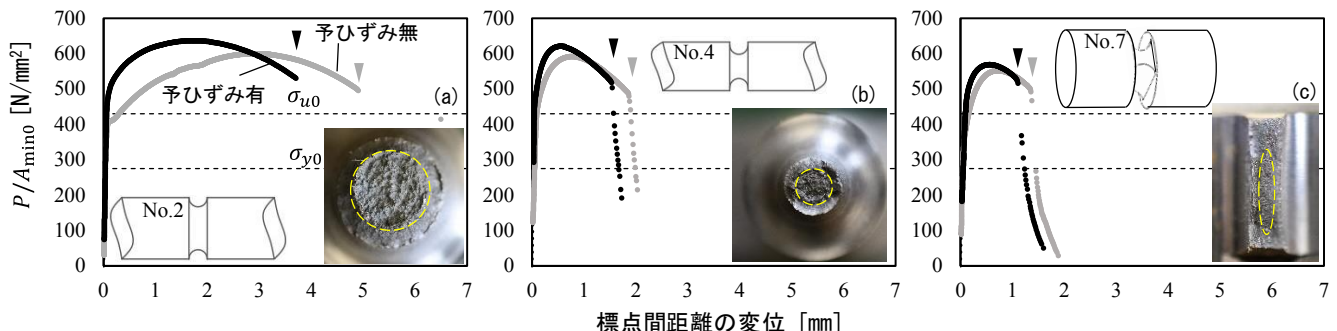


図4 鋼材B 荷重と標点間変位関係 破断面 (a) No. 2 (b) No. 4 (c) No. 7

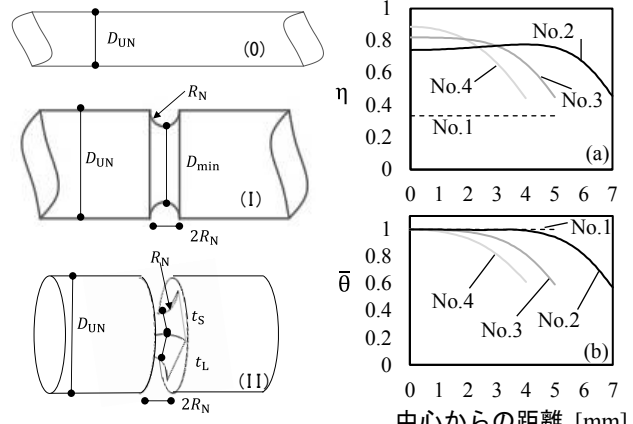


図2 試験体形状

図3 応力状態 (a) η (b) $\bar{\theta}$

度の上昇を示した。円形切欠きの形状 I について、有限要素法解析によって、弾性範囲の η と $\bar{\theta}$ を求めた。

今後、非線形材料モデルを用いた有限要素法解析を実施して、延性破壊を生じる時点の $\bar{\epsilon}_f$ 、 η_f と $\bar{\theta}_f$ を算定し、式(1)に代入して、鋼材種と予ひずみ有無の両方について、延性破壊を規定するパラメータ D_1 から D_6 を特定する。さらに、同じ鋼材 A と B から製作した試験体 No. 2 から 7 について、引張・圧縮繰返し載荷試験も実施して、延性破壊条件の適用性を検証する計画である。

7. 参考文献

- 1) Rice, Tracey: ON THE DUCTILE ENLARGEMENT OF VOIDS IN TRIAXIAL STRESS STATES 1969
- 2) Bai, Wierzbicki : A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence 2008
- 3) Smith C, Deierlein G, Kanvinde A: A Stress-Weighted Damage Model for ductile fracture initiation in structural steel under cyclic loading and generalized stress states 2014
- 4) Bentley Systems, Inc. (2023) Theory and Modeling Guide ADINA 23.00

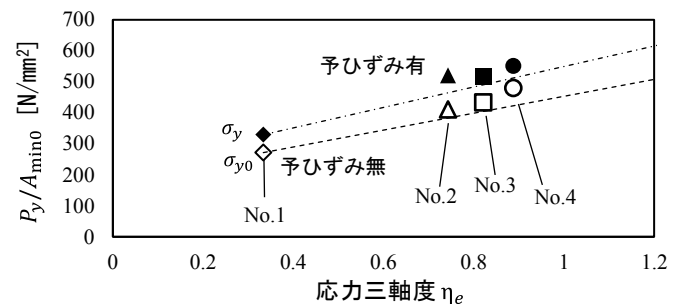


図5 鋼材B 円形切欠き試験体の降伏荷重