

低降伏比円形鋼管部材の変形能  
(短柱圧縮試験結果による考察)

正会員○越智健之<sup>1</sup> 正会員 中島 隆<sup>2</sup>  
正会員 黒羽啓明<sup>3</sup>

1. はじめに

冷間成形材は高降伏比であり、熱間圧延材よりも変形性能が低いとされている<sup>1)</sup>。しかし、両者の変形能を比較した研究は少なく、熱間圧延材の変形性能が優れているとする根拠は乏しい。

既往の報告では、冷間成形材を熱処理した材料や熱間圧延材から試験片を削り出した材料が使用されている。それらの報告では、総合的に変形能の評価がなされておらず、冷間成形材との定量的な比較がなされていない。

ここでは、熱処理工程を経た円形鋼管の引張試験と短柱圧縮試験を行い、既往の実験と併せて考察する。

2. 材料と実験概要

実験に使用した材料は、高炉メーカーによる特殊工程品であり、STK41材の規格を満足するものである。また、一般の電縫鋼管の製造工程の後にSR工程(バッチ炉600°C, 30分)を受けた熱処理材である。2本の鋼管を製造しているの、同一ロットではあるが、引張試験と圧縮試験を2種類行った。引張試験は一断面から3本の12号B試験体を切り出し、ひずみゲージを表裏に貼付して実験を行った。圧縮試験では、軸方向中央に4枚のひずみゲージを貼付し、高感度変位計により軸方向変位を測定し、平押し条件で載荷した。実験結果を図.1.2および表.1.2に示す。ただし、図.2の圧縮試験は軸方向変位を試験体の長さで除した平均ひずみである。表.3に青木ら<sup>2)</sup>による圧延材の調査結果を引用する。ただし、青木らはひずみ

硬化開始点を全ひずみ  $\epsilon_{ST}$  として与えているので、塑性ひずみの  $\epsilon_{ST}$  の平均値は  $\epsilon_{ST}$  の平均値から  $\epsilon_y$  の平均値を引いた値とする。また、弾性係数の変化を考えなければ、 $\epsilon_{ST}$  と  $\epsilon_{ST}$  の標準偏差は同じ値になるので、 $\epsilon_{ST}$  の標準偏差は  $\epsilon_{ST}$  の標準偏差としてよい。表.1に示した実験結果は、表.3の調査結果の平均値とほぼ等しい。

図.2に示したように圧縮試験はかなり早期に耐力が低下を始めた。このような部材は規準(案)の考えにしたがうと、P-III区分(弾性設計用部材)に属する。規準(案)の冷間成形材に対する規定では、ここで実験した鋼管と同じ径厚比(47)の冷間成形鋼管はP-II区分(塑性設計用部材)であり、ここで実験した熱処理材は冷間

表.1 引張試験結果

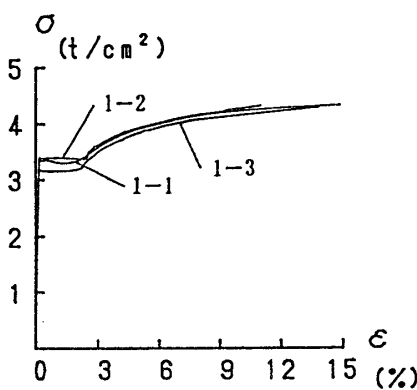
番号	$\sigma_y$ t/cm <sup>2</sup>	$\sigma_y^*$ t/cm <sup>2</sup>	$\epsilon_{ST}$ %	$\sigma_u$ t/cm <sup>2</sup>	降伏比	E.L. %	E t/cm <sup>2</sup>	m
1-1	3.29	3.38	--	4.35	0.76	39.6	1930	4.7
1-2	3.36	3.40	2.29	4.36	0.77	40.4	1980	4.7
1-3	3.14	3.22	1.90	4.37	0.72	40.7	2030	4.5
平均値	3.26	3.33	2.09	4.36	0.75	40.2	1980	4.6
2-1	3.31	3.35	1.79	4.41	0.75	39.2	2010	4.9
2-2	3.26	3.34	1.98	4.37	0.75	39.4	2180	4.7
2-3	3.14	3.21	1.80	4.30	0.73	40.7	2090	4.7
平均値	3.24	3.30	1.86	4.36	0.74	39.8	2090	4.8

$\sigma_y$ : 降伏点  $\sigma_y^*$ : 上降伏点  $\sigma_u$ : 引張強さ  
 $\epsilon_{ST}$ : ひずみ硬化開始塑性ひずみ E.L.: 破断伸び率 m: 硬化指数(2)式

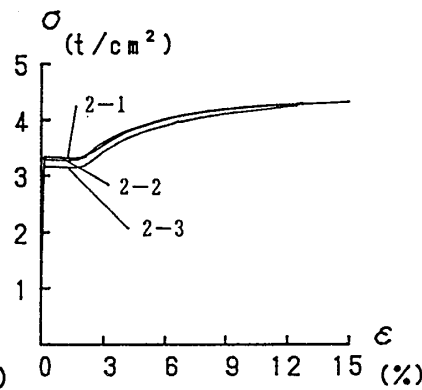
表.2 圧縮試験結果

番号	L cm	D cm	t cm	D/t	$\sigma_m$ t/cm <sup>2</sup>	$\epsilon_m$ %	E t/cm <sup>2</sup>
1	46.3	16.50	0.354	46.6	3.46	0.190	2100
2	46.3	16.50	0.353	46.8	3.35	0.190	2120

$\sigma_m$ : 最大応力  $\epsilon_m$ : 耐力低下ひずみ D: 外径 t: 管厚 L: 試験体長



(a)



(b)

図.1 引張試験の応力-ひずみ関係

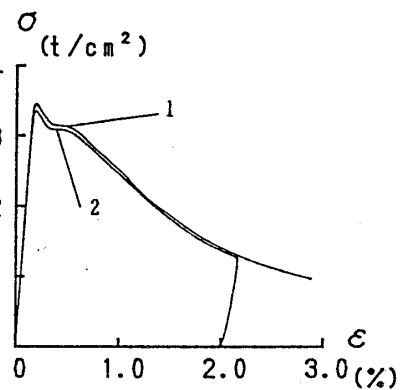


図.2 圧縮試験の応力-ひずみ関係

\*1: 熊本大学・助手 \*2: 同・大学院生 \*3: 同・教授・工博

成形材よりも変形性能が低下しているといえる。

### 3. 応力-ひずみ関係のモデル

冷間成形材と直接比較できるようにRamberg-Osgood式を使用する。すなわち、図.3のような関係を仮定して、ひずみ硬化領域における応力-ひずみ曲線を次式とする。

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_{ST} \left(\frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^m \quad (1)$$

(1)式は $\epsilon_{ST}$ が変数であり冷間成形材のモデルよりも自由度が増える。しかし、圧延鋼板の $\epsilon_{ST}$ は統計量を与えられているので、 $\epsilon_{ST}$ を用いることは統計的な一般化には問題を生じない。

冷間成形材のモデル<sup>3)</sup>と同様に引張強さ時の条件から次式が得られる。

$$\ln(\sigma_v/\sigma_u) = 1/m \{1 - \ln(1/m/\epsilon_{ST})\} \quad (2)$$

前述の引張試験の近似結果の例を図.3に示す。(1)式はひずみの大きな領域で実験値と離れているが、これは(2)式における仮定から、(1)式が真応力-対数ひずみ関係を与えるためであり、(1)式と実験結果はよく一致しているといえる。

一般的な考察をするために、統計量は表.3の数値を用いて、一次近似による $m$ の平均値と変動係数は(2)式から次の結果となる。

$t \leq 6$ (mm) の場合	Mean=4.83	COV=0.225
$6 < t \leq 40$ (mm) の場合	Mean=4.26	COV=0.185

ただし、(2)式が陽関数ではないので、変動係数の計算には数値微分<sup>3)</sup>により一次近似に必要な数値を与えた。また、一次近似式には $\sigma_v$ と $\sigma_u$ の相関を考慮した。なお、 $\epsilon_{ST}$ と降伏応力あるいは引張強さとの相関は調査結果がないので無視した。

文献5)に示した冷間成形鋼管材の硬化指数と比較すると、熱間圧延材の硬化指数の平均値はかなり低く、応力-ひずみ曲線は冷間成形材と熱間圧延材では大きく異なることになる。また、その要因は(2)式から降伏比の違いにある。引張強さには冷間成形材と熱間圧延材に大した違いはないので塑性加工による降伏応力の上昇が主因である。また、硬化指数の変動係数を冷間成形材と比較して図.4に示す。厚肉の領域では冷間成形材の変動係数は径厚比により変化し、厚肉の熱間圧延材との差は著しいが、薄肉の熱間圧延材の変動係数と比較すると、その数値に大した差はない。

### 4. 変形能の考察

表.3 圧延材料(SS41, SM41)の統計量(青木ら<sup>2)</sup>)

$t \leq 6$ (mm)			
	平均値	標準偏差	変動係数
$\sigma_v$	3.330 (t/cm <sup>2</sup> )	0.439 (t/cm <sup>2</sup> )	0.1318
$\sigma_u$	4.451 (t/cm <sup>2</sup> )	0.454 (t/cm <sup>2</sup> )	0.1020
$\epsilon_{ST}$	2.03 (%)	0.58 (%)	0.2857

$6 < t \leq 40$ (mm)			
	平均値	標準偏差	変動係数
$\sigma_v$	3.106 (t/cm <sup>2</sup> )	0.389 (t/cm <sup>2</sup> )	0.1252
$\sigma_u$	4.562 (t/cm <sup>2</sup> )	0.307 (t/cm <sup>2</sup> )	0.0673
$\epsilon_{ST}$	1.83 (%)	0.48 (%)	0.2623

$$\epsilon_{ST} = \epsilon_{ST} + \epsilon_v \quad \epsilon_v = \sigma_v / 2100 \text{ (t/cm}^2\text{)}$$

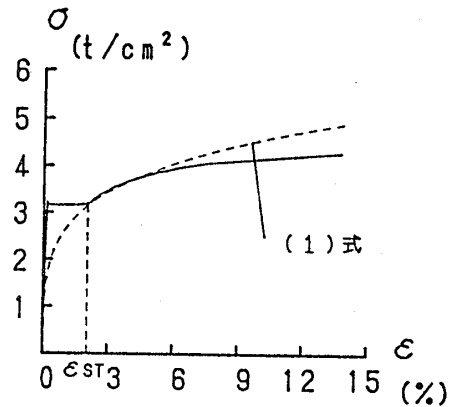


図.3 応力-ひずみ関係のモデルと実験結果

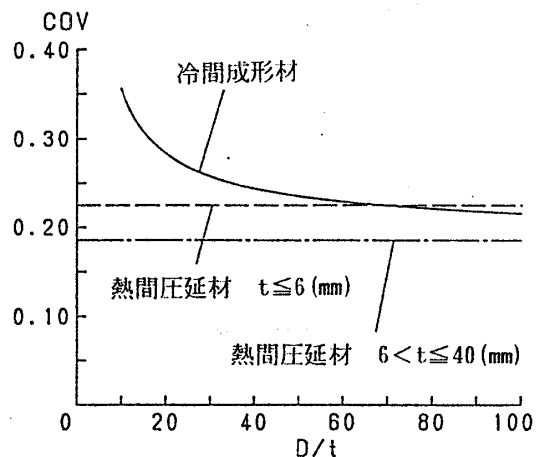


図.4 硬化指数の変動係数

### CASE1 終局耐力の理論式に基づいた場合

文献4)によれば、熱間圧延材の局部座屈終局耐力も冷間成形材と同様に(3)式とよく一致する。

$$\sigma_{cr} = \frac{2}{3} \sqrt{E_t \cdot E_s} \cdot \frac{t}{r} \quad (3)$$

ただし、 $r$ :平均半径  $E_t$ :接線係数  $E_s$ :割線係数  
降伏応力を超えたひずみ硬化後の耐力は、部材の変形

能にのみ関係している。ひずみ硬化以前に局部座屈を生じて耐力が低下する領域とひずみ硬化後に耐力が低下する領域との境界の径厚比は、(3)式から導かれている<sup>4)</sup>。しかし、現実的な応力-ひずみ関係が用いられていないので、前述の応力-ひずみ関係のモデルを使用して、その境界の径厚比の平均値と変動係数を求める。

(3)式に必要な係数は $E_t, E_s$ であるから、(1)式にひずみ硬化をはじめるときの条件として $\sigma = \sigma_v$ とすると

$$E_t = \frac{1}{1/E + \epsilon_{ST} \cdot m / \sigma_v} \quad E_s = \frac{1}{1/E + \epsilon_{ST} / \sigma_v}$$

さらに、 $\epsilon_v = \sigma_v / E$ として上記の係数を(3)式に代入すると

$$\frac{r}{t} = \frac{2}{3\epsilon_v} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\epsilon_{ST}}{\epsilon_v} (m+1) + \left(\frac{\epsilon_{ST}}{\epsilon_v}\right)^2 \cdot m}} \quad (4)$$

硬化指数 $m$ は(2)式で与え、必要な $\epsilon_{ST}$ と $\sigma_v / \sigma_u$ の統計量は表.3の値を用いて、一次近似による(4)式の平均値と変動係数を求めた。ただし、変動係数を求める際に必要な一次微分の値は数値微分で与えている。それらの結果をCASE1として表.4に示す。表.4によればかなり厚肉の鋼管でなければ、ひずみ硬化にいたるまでに局部座屈で耐力が低下する可能性があることが分かる。また、管厚などの幾何学的な変動を無視しているにもかかわらず表.4中の変動係数はかなり大きく、径厚比の規定を行う場合にはこの変動を無視することはできない。

**CASE2 耐力が低下を始めるときの変形量を与える実験式に基づいた場合**

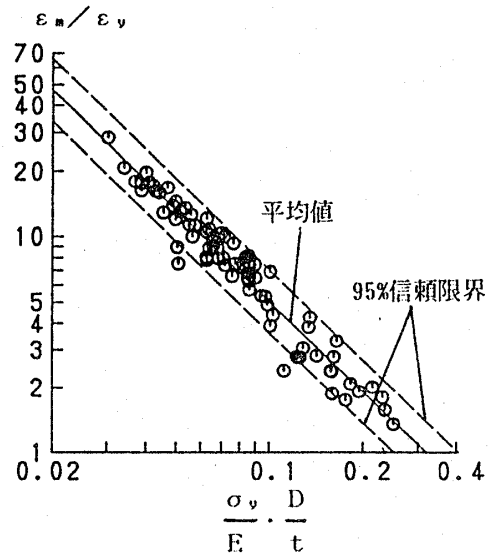
図.5(a)に冷間成形材の既往の実験結果と実験式<sup>5)</sup>を示す。図.5(b)に熱間圧延鋼管あるいは熱処理材の既往の実験結果を示す。また、図.5に冷間成形材の平均値を実線で、95%信頼限界を破線で示す。表.3によると $\epsilon_{ST} / \epsilon_v$ の平均値は12程度であり、図.5(b)において $\epsilon_m / \epsilon_v$ が12に至らない実験資料は、ひずみ硬化をする以前に耐力低下を起こしている。

図.5(b)によると、ひずみ硬化領域で耐力低下をするような径厚比であれば冷間成形材の平均値と熱間圧延材の実験値の関係はほぼ一定比の関係にある。しかし、降伏棚の領域で耐力が低下する場合には冷間成形材よりも塑性率は著しく小さい。ひずみ硬化する以前に耐力が低下を始める現象は、座屈波形の変化をとめないひずみ硬化後に耐力が低下をする現象よりも複雑であり、一本の曲

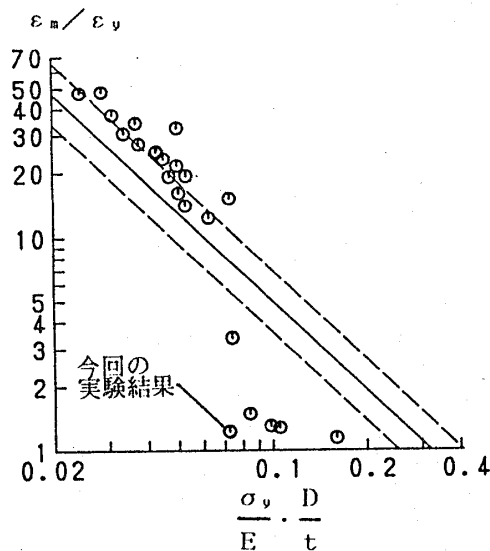
表.4 ひずみ硬化する以前に耐力が低下する径厚比

板厚(mm)	CASE1		CASE2	
	$t \leq 6$	$6 < t \leq 40$	$t \leq 6$	$6 < t \leq 40$
平均値(D/t)	31.8	37.4	43.7	47.9
変動係数(D/t)	0.235	0.216	0.346	0.323

$$D/t = 2 \cdot r/t + 1$$



(a) 冷間成形材



(b) 熱間圧延材, 熱処理材

図.5 短柱圧縮試験の耐力が低下を始めるときのひずみと無次元化細長比の関係

線で図.5(b)の関係を表現することは困難であるので、ここではひずみ硬化後に耐力が低下した実験のみを考察の対象とする。冷間成形材の平均値を $(\epsilon_m / \epsilon_v)_{m.c}$ とすると次式が得られている。

$$\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{y, m.c.}}\right) = 0.205 \cdot \left(\frac{\sigma_y \cdot D}{E \cdot t}\right)^{-1.39} \quad (5)$$

図.5(b)に示したように、ひずみ硬化後に耐力が低下する領域の実験値は冷間成形材の $\varepsilon_m$ を基準にすれば説明できるので、熱間圧延材の塑性率を(6)式とする。

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_y} = \alpha_\theta \cdot \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{y, m.c.}}\right) \quad (6)$$

(6)式の $\alpha_\theta$ の平均値と変動係数を実験資料から求めると次の結果となる。

$$\alpha_\theta = 1.524 \quad COV = 0.182$$

冷間成形材の(5)式の変動係数(0.167)はこの値よりも若干小さい。この実験式を用いてひずみ硬化領域に至らずに耐力が低下する径厚比の領域を求める。すなわち、(5)式から、 $\varepsilon_m$ は降伏ひずみ $\varepsilon_y$ を用いて

$$\varepsilon_m = 0.312 \cdot \varepsilon_y^{-0.39} \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.39}$$

$\varepsilon_y$ の計算に表.3の降伏応力の統計量を用いると、 $\varepsilon_m$ の平均値と変動係数は

$t \leq 6$  (mm) の場合

$$\text{Mean} = 3.87 \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.39}$$

$$COV = \sqrt{0.39^2 \cdot 0.132^2 + 0.182^2} = 0.189$$

ひずみ硬化を生じなくて耐力が低下をする条件式の境界は

$$\varepsilon_{st} = \varepsilon_m$$

であるので、この条件を満足する径厚比の一次近似の平均値と変動係数を求めた。その結果をCASE2として表.4に示す。表.4には $t \leq 6$  (mm) の計算と同様に $6 < t \leq 40$  (mm) の場合を計算した結果を併記している。CASE1と比較してCASE2の平均値と変動係数は大きい。

CASE1と比べてCASE2の平均値が高いのは、ひずみ硬化後に局部座屈で耐力が低下をした実験結果から得た(6)式を使用したためである。すなわち、図.5(b)に示したように、ひずみ硬化に入るのと入らないのとでは塑性率に格段の差を生じており、その効果を(6)式のみでは表現できないためであり、CASE2の値が径厚比の上限に近い数値であるといえる。

表.4に示した径厚比以上では、ひずみ硬化領域に至らないのでその部材は規準(案)に従うとP-IIIの区分である。文献6)では厚肉の熱間圧延部材の実験を行っており、その結果は冷間成形部材の変形能力を大きく上回っ

ている。これらの結果から、熱間圧延円形鋼管部材ではP-IIの領域はなく、P-IとP-IIIの境界は表.4の平均値でよい。つまり、ひずみ硬化領域で耐力が低下するのがあるいは、それ以前で耐力が低下するのにかによって変形能が大きく変化し、P-II領域のように中間的な変形能を有する部材は存在しないといえる。

#### 4.まとめ

熱処理の工程を加えて製造された円形鋼管の短柱圧縮試験と引張試験を行い、基本的な性状を把握した。応力-ひずみ関係のモデルを提案し、耐力が低下を始める時のひずみの実験式を誘導して、ひずみ硬化以前に耐力が低下する径厚比の領域について考察した。その結果、規準(案)において規定されている塑性設計に必要な条件を満足するのは、熱間圧延材が冷間成形材よりも小さい径厚比でなければならないことが明らかになり、必ずしも熱処理材が冷間成形のままの鋼管よりも優れているとはいえないことが明らかになった。

#### 謝辞

住友金属(株)より鋼材の提供を受けた。ここに記して感謝します。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計規準(案)・同解説、1990.2
- 2) 青木博文、増田正之：素材引張試験結果による構造用鋼材の力学的性質に関する統計的調査、日本建築学会構造系論文報告集、第358号、pp.94-104、1985.12
- 3) 越智健之、黒羽啓明：曲げと圧縮を受ける冷間成形円形鋼管部材の終局耐力の統計的評価、日本建築学会構造系論文報告集、第408号、pp.55-65、1990.2
- 4) 加藤 勉、秋山 宏、鈴木弘之：軸圧縮力を受ける鋼管の塑性局部座屈耐力、日本建築学会論文報告集、第204号、pp.9-17、1973.2
- 5) 越智健之、黒羽啓明：冷間成形円形鋼管部材の耐力と変形能の統計的評価、日本建築学会構造系論文報告集、第391号、pp.59-71、1988.9
- 6) 蓑田 茂、越智健之、黒羽啓明：熱間圧延円形鋼管部材の耐力と変形能に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1125-1126、1989.10