

# 充水鋼管の凍結時に作用する内圧によって起る 降伏と引張および振り試験の比較\*

松 田 和 夫\*\*

金 山 公 夫\*\*

(昭和40年10月4日受理)

## Comparisons between Yield Points of the Thin-Walled Cylinders (Mild Steel) at Pressure Test as Internal Water Freezes and those at Tension and Torsion Test

by Kazuo MATSUDA and Kimio KANAYAMA

### Abstract

The measurements of the elastic and plastic behaviors of the thin-walled cylinders of mild steel at pressure test when internal water froze were carried, and yield points at pressure test were compared with those at tension test and torsion test.

The results are summerized as follows:

1. The elastic and plastic behaviors of the specimen when internal water froze were the same as hydraulic internal pressure subjected to.
2. There existed fine agreement between a half tensile stress strength on yield point at tension test of the thin-walled cylinders and the shear strength introduced from equation (3) at internal pressure test and the shear strength at torsion test.
3. The thin-walled cylinders must be used when the shear strength was found by tension test because the shear yield strength and other mechanical characteristics were affected by the thickness of cylinders.
4. The stress-strain diagram and yield points of the thin-walled cylinders depended on the strain rate at tension test.

### 1. ま え が き

これまで、充水鋼管が氷点下の外気中に露されて内部の水が冷却し、氷結する際の管内の温度変化、凍結開始時間、凍結完了時間、凍結開始後の圧力速度および氷の成長速度にたいして、外気の状態(気温、風速)、管内初期水温および管の太さがおよぼす影響を実験的に明らかにし、これに伝熱学的解析を加えて、固体の冷却理論との比較を行なってきた。

その結果、鋼管内の静水の冷却・凍結に関する主として熱的な分野については、その概要

\* 日本機械学会第43期全国大会(九州大学)で発表予定・日本機械学会講演前刷集, No. 141, p. 113.

\*\* 北見工業短期大学機械科

を把握し得たものとおもう<sup>1),2),3),4)</sup>。

この報告では、鋼管内に密封された水が凍るときの体積膨脹に起因する内圧によって、鋼管は破損するが、その際の材料の降伏ならびに弾塑性的挙動の問題を、引張試験と捩り試験で得た材料特性と比較して、巨視的な材料強度学の立場で扱ってみたい。

## 2. 主な記号および単位

$d_1=2r_1$ ; 円管内径 mm	添字
$d_2=2r_2$ ; // 外径 mm	$\theta$ ; 円周方向
$t$ ; // 肉厚 mm	$r$ ; 半径方向
$r=d_2/d_1$ ; 肉厚比	$l$ ; 軸方向
$E$ ; 縦弾性係数 $\text{kg/mm}^2$	$y$ ; 降伏点
$\nu$ ; ポアソン比	$y_l$ ; 下降伏点
$\varphi$ ; 伸び率 %	$y_u$ ; 上降伏点
$\lambda$ ; 外径収縮率 %	$u$ ; 極限荷重点
$\sigma$ ; 主応力 $\text{kg/mm}^2$	
$\tau$ ; 最大剪断応力 $\text{kg/mm}^2$	
$p$ ; 内圧 $\text{kg/cm}^2$	
$T$ ; 回転トルク $\text{kg-cm}$	
$\varepsilon$ ; 主歪み	
$\dot{\varepsilon}=\frac{d\varepsilon}{dt}$ ; 歪み速度 $\text{sec}^{-1}$	

## 3. 基礎理論および概念

### 3.1 円管の内圧、および歪み

弾性学によれば、円管に流体内圧が作用したときの応力と歪みの関係は管表面において

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{\theta} + \nu\varepsilon_l) \\ \sigma_l &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_l + \nu\varepsilon_{\theta}) \\ \sigma_r &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

内圧と応力の関係は

$$p = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2r_1^2} \sigma_{\theta} = \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_1^2} \sigma_l \quad (2)$$

となる。したがって管中央部の表皮歪み  $\varepsilon_{\theta}$ 、 $\varepsilon_l$  を測定して、(1) 式から主応力  $\sigma_{\theta}$ 、 $\sigma_l$  が求まり (2) 式から内圧が算定できる。

### 3.2 内圧による降伏条件

最大剪断応力説に従えば、薄肉円管\*の降伏内圧  $p_y$  は

$$p_y = 2\tau_y \log_e r \quad (3)$$

で示される<sup>5)</sup>。

### 3.3 引張試験による降伏剪断強度の算定

一般に、軟鋼の降伏は最大剪断応力による剪断破損であるから、降伏時のこり面で破断するものとすれば、破断面は荷重方向と  $45^\circ$  の傾斜面でなければならない。

しかるに、軟鋼丸棒の引張試験による破断面はすり鉢状 (cup-and-cone 形) を呈し、断面中心部は軸に直角なあるいは平面 (fibrous fracture) で、周辺部は軸と  $45^\circ$  をなす滑らかな斜面 (shear fracture) となり<sup>6)</sup>、巨視的には中心部の引張主応力による引張破断と、周辺部の最大剪断応力による剪断破断の組合わせとみなされる。したがって、この考えを降伏点に延長すると、丸鋼を中空にくりぬいた薄肉円管について引張試験を行なえば、全断面が最大剪断応力による剪断破損をおこし、降伏点における引張応力の  $1/2$  を、均一応力分布のもとでの材料固有の降伏剪断強度と考えることができよう。

### 3.4 中空試片の肉厚による降伏応力の変化

軟鋼の降伏が全断面にわたって最大剪断応力による剪断破損だとすれば、試験片が中実であつても中空であつても、また中空試験片において肉厚が変化しても降伏応力は一定で、材料固有値でなければならない。

しかし、材料強度におよぼす確率論的寸法効果の影響があるならば、中実より中空のほうが、また肉厚が薄い方が大きな強度を示すはずである。

一方、降伏点におけるこりは、試験片周辺ほどこり易く、中心ほど拘束されてこりがたくなり、中空より中実、薄肉より厚肉のほうが、降伏点強度が増大すると考えられる。これら二つの相反する効果は、その程度が同じ場合以外は、中実と中空あるいは薄肉と厚肉によって降伏点強度は変化するものと想像される。

### 3.5 降伏応力の歪み速度依存性

今日、もっぱら使用されている Instron 型の試験機によれば、軟鋼の降伏応力は荷重速度や試験機剛性に依存することが認められている。したがって、材料の機械的性質を論ずるには試験機特性を含めた測定系全体の reholological な取扱いが必要になる。

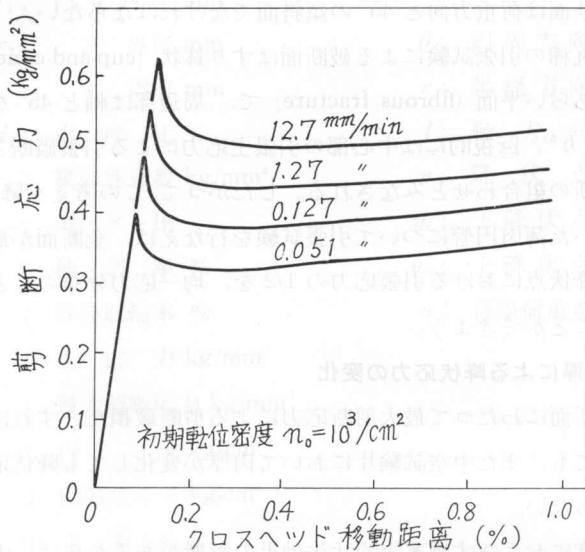
この考えに立脚して、Johnston らは単結晶材料 (LiF) について、転位の密度  $n$  およびその移動速度  $v$  によって結晶の歪み速度が規定されるとして、これに試験機特性を加味することにより材料の巨視的な塑性的性質を表現する次のような関係式を導いている<sup>7)</sup>。

$$\frac{d\tau}{dy} = C - B(\tau/D)^m(Cy - \tau) \quad (4)$$

\* 中西理論によれば、内圧が作用する場合に薄肉円管として扱えるのは  $r < 1.55$  である。

ここで、 $C=K/2A$ 、 $B=2b\alpha/S$ 、 $m$ 、 $D$ 、 $\alpha$ は材料定数、 $b$ はバーガースベクトル\*、 $A$ は材料断面積、 $K$ は試験機バネ定数、 $S$ はクロスヘッドの移動速度をあらわす。

材料にかかる応力 $\sigma$ とクロスヘッドの位置 $y$ の関係は(4)式を積分することによって求まり、数値計算の結果は第1図の通りで、顕著な降伏現象と、歪み速度依存性を示している。この理論は、多結晶材料の結晶粒度と降伏応力の関係がわかっているならば、現象論的には多結晶金属材料にも適用しうるであろう<sup>8)</sup>。



第1図 降伏点の歪み速度依存性

### 3.6 結晶粒の大きさと降伏応力の関係

多結晶金属材料の降伏点は、結晶粒度によっても影響を受け、粒度が小さくなるほど降伏点は増大する傾向にある。Roberts らの実験によれば、一般の鉄鋼の下降伏応力は平均フェライト長さを  $L$  とすると

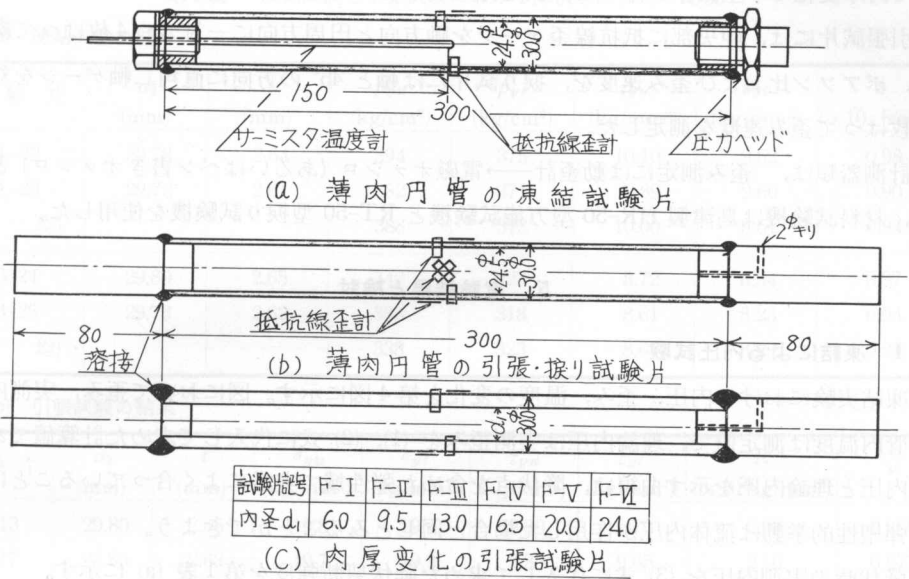
$$\sigma_{yl} \propto L^{-1/2} \quad (5)$$

であらわされ、下降伏応力は炭素量に無関係に平均フェライト長さの平方根の逆数に比例することになる<sup>10)</sup>。

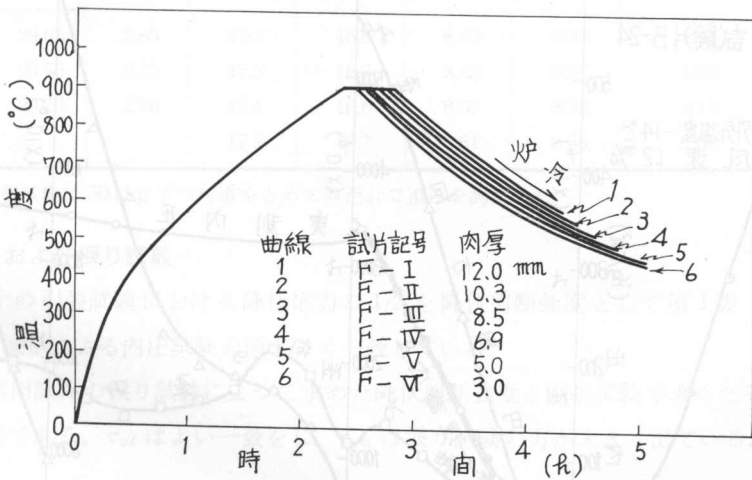
## 4. 実験方法

実験の種類は凍結による内圧試験、引張試験および振り試験の三種類で、供試管はいずれも一般構造用丸鋼 (32φ) を旋盤で中空に加工し、凍結試験用の管は両端に雌ねじを溶接し、引張と振り試験片は両端につかみを溶接してから完全焼鈍 (900°C で肉厚 1 mm につき約 2 分

\* Burgers Vector は、転位強度とも云われ、向き方向における原子間距離に等しい<sup>9)</sup>。



第2図 試験片形状と概略寸法



第3図 焼鈍温度曲線

間保持する)を行なつて材質の調整をしたものを用いた。試験片の形状と概略寸法は第2図の通りである。肉厚変化試片の焼鈍時の温度曲線を第3図に示す。

凍結実験の方法は既に報告してあるから<sup>1)</sup>、引張および捩り試験について述べる。

凍結実験と同じ二種の素材(材料Aは $C=0.15\%$ 、材料Bは $C=0.13\%$ )で同一寸法の薄肉円管について引張試験を行なつて降伏剪断強度を求める。その際、引張荷重速度を附属の strain pacer を併用して種々変えて歪み速度依存性を調べた。別な素材(材料G)で同様の薄肉試片を作り、同じ歪み速度のもとに引張と捩り試験を行なつて降伏剪断強度を比較し、他の材料

(F) で肉厚変化の中空試片を作って降伏応力および材料諸値の変化を調べた。

引張試片には、中央部に抵抗線歪ゲージを軸方向と円周方向に一つづつ4枚はって縦弾性係数、ポアソン比および歪み速度を、振り試片には軸と45°の方向に直角二軸ゲージを対称的に2枚はって歪み速度を測定した。

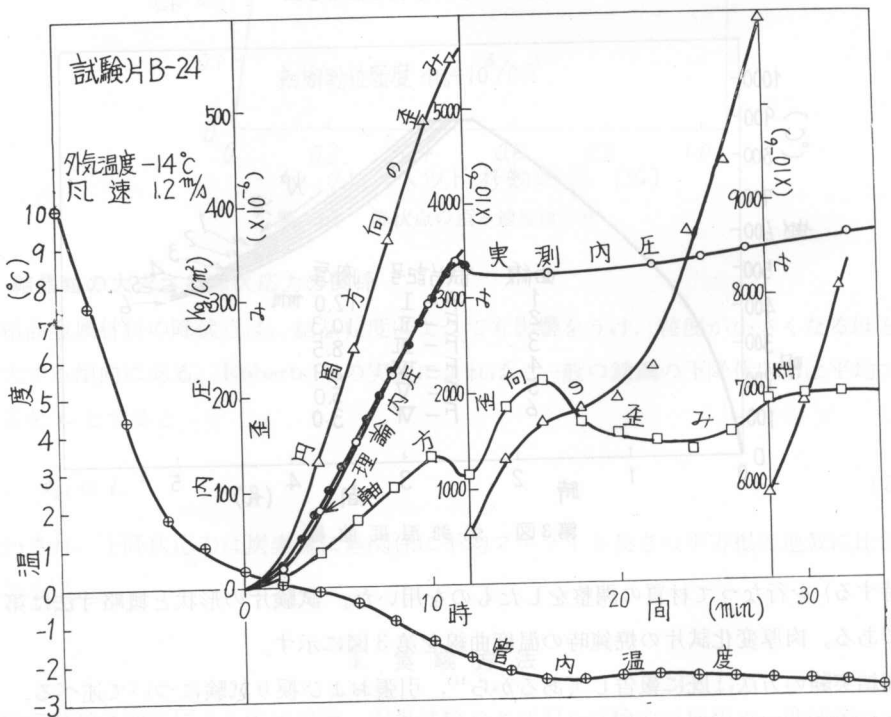
計測器類は、歪み測定には動歪計→電磁オシロ（あるいはペン書きオシロ）と静歪計を、材料試験機は島津製 HR-50 型万能試験機と RT-50 型振り試験機を使用した。

## 5. 実験結果と検討

### 5.1 凍結による内圧試験

凍結実験における内圧、歪み、温度の変化を第4図に示す。図において歪み、実測内圧および管内温度は測定値で、理論内圧は実測歪みを(1)、(2)式に代入して求めた計算値である。実測内圧と理論内圧を示す曲線は、降伏点を含めた弾性域で非常によく合っていることは、鋼管の弾塑性的挙動は流体内圧が作用した場合と同じとみることができよう。

降伏時の実測内圧を(3)式に代入して求めた降伏剪断強度を第1表(a)に示す。



第4図 凍結試験の結果

第1表 凍結試験と引張試験における降伏剪断強度の比較

(a) 凍結試験の結果							
試験片	$d_2$ (mm)	$t$ (mm)	$p_{yu}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$p_{yl}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau_{yu}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\tau_{yl}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\dot{\epsilon}$ ( $\times 10^{-6}$ sec <sup>-1</sup> )
A-22	29.78	2.64	394	375	10.10	9.62	0.98
A-23	29.72	2.61	382	371	9.89	9.60	0.90
(平均)			388	373	10.00	9.61	0.94
B-24	29.80	2.65	342	327	8.72	8.34	0.97
B-25	29.73	2.62	333	318	8.61	8.23	0.94
(平均)			338	323	8.67	8.29	0.96

(b) 引張試験の結果								
試験片	$d_2$ (mm)	$t$ (mm)	$\sigma_{yu}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{yl}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\tau_{yu}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\tau_{yl}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$E$ ( $\times 10^4$ kg/mm <sup>2</sup> )	$\nu$
A-13	29.80	2.65	19.8	19.4	9.90	9.70	2.09	0.260
A-17	29.85	2.68	19.7	19.3	9.85	9.65	2.16	0.277
A-21	29.85	2.68	19.9	19.3	9.95	9.65	2.15	0.261
(平均)			19.8	19.3	9.90	9.67	2.13	0.266
B-26	29.65	2.63	17.2	16.8	8.62	8.38	2.11	0.293
B-27	29.75	2.73	17.3	16.7	8.63	8.37	1.99	0.288
B-28	29.70	2.70	17.1	16.6	8.57	8.32	2.13	0.287
(平均)			17.2	16.7	8.61	8.36	2.08	0.289

註： 引張試験は 500 kg ずつ荷重をとめて静歪計で歪みを測定した。

### 5.2 引張および振り試験

薄肉試片の引張試験における降伏応力の 1/2 を降伏剪断強度として第1表 (b) に示す。  
 $\tau_{yu}$ ,  $\tau_{yl}$ とも凍結による内圧試験の値とよく一致している。

また、薄肉試片の振り試験によって求めた降伏剪断強度と引張試験で求めたそれを比較したのが第2表である。 $\tau_{yl}$ はよい一致をし、 $\tau_{yu}$ は振り試験の方が大きく出ているが、 $\tau_{yu}$ は一

第2表 振り試験と引張試験における降伏剪断強度の比較

(a) 振り試験の結果							
試験片	$d_2$ (mm)	$t$ (mm)	$T_{yu}$ (kg-cm)	$T_{yl}$ (kg-cm)	$\tau_{yu}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\tau_{yl}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\dot{\epsilon}$ ( $\times 10^{-6}$ sec <sup>-1</sup> )
G-19	29.70	2.45	32.3	25.0	11.28	8.74	6.5
G-20	29.82	2.61	30.1	26.4	9.91	8.70	—
G-21	29.80	2.60	30.0	26.4	9.93	8.74	—
G-22	29.83	2.65	31.4	28.0	10.21	9.11	5.8
G-27	29.78	2.59	30.0	26.7	9.95	8.87	4.1
(平均)					10.26	8.80	5.5

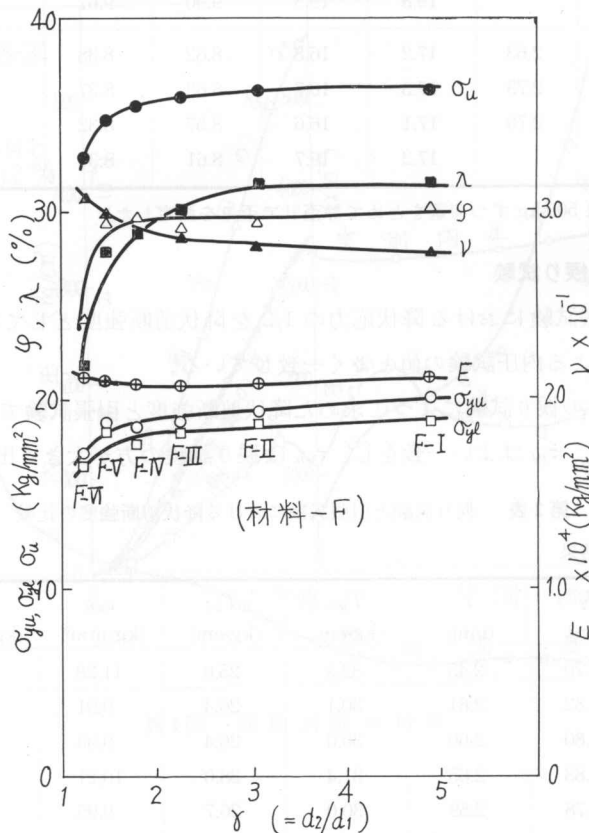
(b) 引張試験の結果

試験片	$d_2$ (mm)	$t$ (mm)	$\sigma_{yu}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{yl}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\tau_{yu}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\tau_{yl}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\dot{\epsilon}$ ( $\times 10^{-6} \text{sec}^{-1}$ )
G-23	29.80	2.60	18.2	17.3	9.12	8.67	4.8
G-24	29.80	2.60	17.6	17.3	8.79	8.67	5.7
G-25	29.78	2.59	18.1	17.6	9.05	8.82	—
G-26	29.83	2.62	18.0	17.9	8.98	8.91	—
G-28	29.87	2.64	17.5	17.1	8.77	8.55	4.8
G-29	29.82	2.59	18.1	17.4	9.05	8.71	—
(平均)					8.96	8.72	5.1

般に不安定で応力状態によって変化するものであるから、試験方法によるこの程度の差異はむしろ当然かも知れない。

これらの測定値の比較により、軟鋼の降伏剪断強度は、試片形状を中空薄肉円管にして引張試験を行なって求め得ることがわかった。

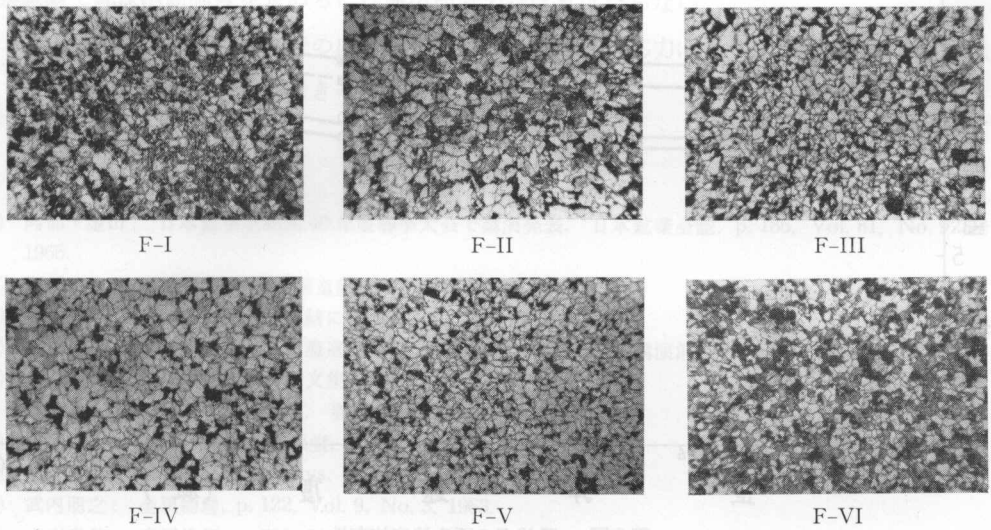
つぎに、中空試片の肉厚が変化した場合の強度、その他材料特性の実験結果を第5図に示



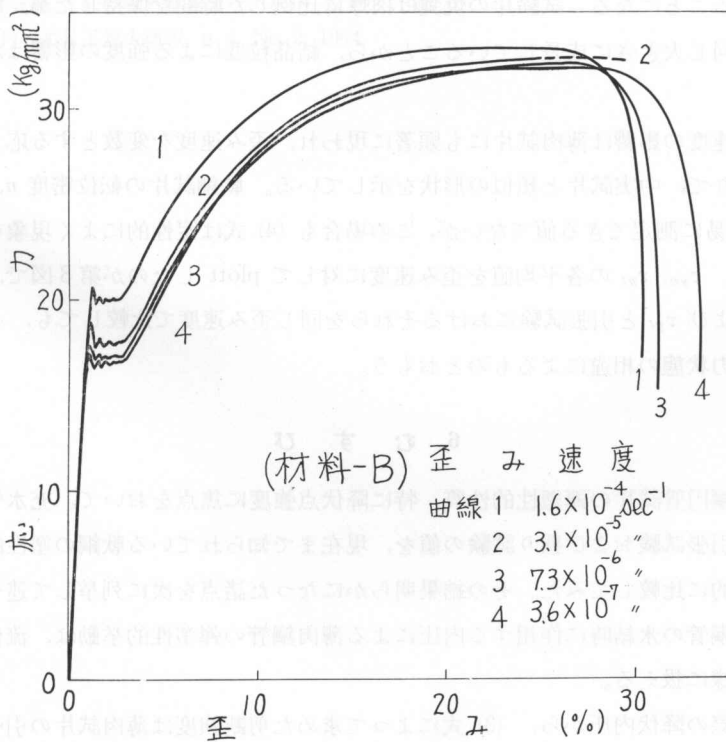
第5図 肉厚変化試験片の引張試験成績



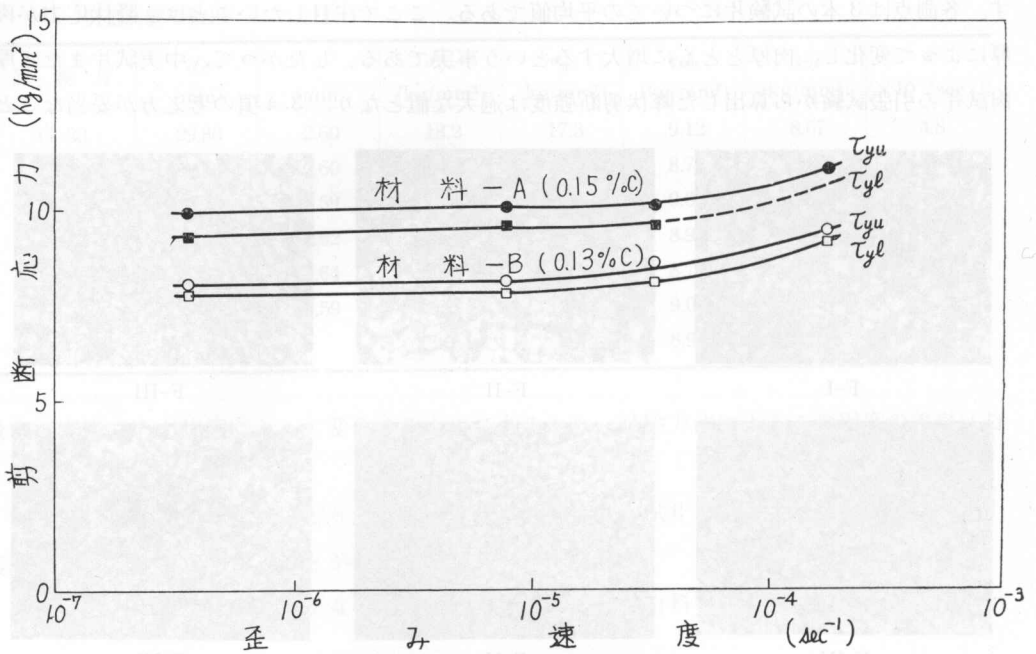
す。各測点は3本の試験片についての平均値である。ここで注目したいことは、降伏応力が肉厚によって変化し、肉厚とともに増大するという事実である。したがって、中実試験片または厚肉試験片の引張試験から算出した降伏剪断強度は過大な値となり、3.4項の考え方が妥当なこと



第6図 肉厚変化試験片の結晶粒度の比較 (25倍)



第7図 薄肉中空試験片の歪み速度依存性



第8図 降伏点の歪み速度依存性

を示唆していることになる。試験片の焼鈍は肉厚に比例した時間を保持したが、結晶粒は第6図の通り大体同じ大きさに成長していることから、結晶粒度による強度の影響はないものとおもう。

引張荷重速度の影響は薄肉試片にも顕著に現われ、歪み速度を変数とする応力-歪み線図は第7図の通りで、中実試片と類似の形状を示している。軟鋼試片の転位密度  $n$ 、その移動速度  $v$  などは容易に測定できる値でないが、この場合も(4)式は定性的によく現象を表現していると言えよう。 $\tau_{yu}$ 、 $\tau_{yl}$ の各平均値を歪み速度に対して plott したのが第8図で、凍結実験における  $\tau_{yu}$  および  $\tau_{yl}$  と引張試験におけるそれらを同じ歪み速度で比較しても、必ずしも一致しないのは応力状態の相違によるものとおもう。

## 6. む す び

以上、軟鋼円管試片の弾塑性的性質、特に降伏点強度に焦点をおいて、充水管の凍結による内圧試験、引張試験および振り試験の値を、現在まで知られている軟鋼の塑性的性質を考慮して、現象論的に比較してみた。その結果明らかになった諸点を次に列挙して述べる。

1) 充水鋼管の水結時に作用する内圧による薄肉鋼管の弾塑性的挙動は、流体内圧が作用する場合と同様に扱える。

2) その際の降伏内圧から、(3)式によって求めた剪断強度は薄肉試片の引張降伏応力の1/2とよく一致する。

3) 薄肉試片の引張降伏応力の  $1/2$  と捩り試験で得た降伏剪断強度は、特に下降伏点でよく一致し、引張試験から降伏剪断強度を算出し得ることが証明できた。

4) 中空試片の肉厚が変化すると、引張降伏応力その他材料特性も変化する。したがって引張試験で降伏剪断強度を求めるには薄肉円管でなければならない。

5) 薄肉円管の引張試験での応力-歪み線図および降伏応力は歪み速度に依存し、現象としては定性的に (4) 式で表現できる。

#### 参 考 文 献

- 1) 阿部・金山：日本鋳業会昭和40年度春季大会で講演発表。日本鋳業会誌，p. 186, Vol. 81, No. 922, 1965.
- 2) 阿部・金山：昭和40年度北海道鋳山学会春季講演会で発表。
- 3) 阿部・金山：「充水鋼管の凍結に関する実験，第3報」未発表。
- 4) 阿部・金山：日本機械学会北海道支部第10回講演会で発表。同講演前刷集，p. 169, 1965.
- 5) 中西不二夫：日本機械学会論文集，p. 67, Vol. 18, No. 56, 1952.  
益田森治ほか：工業塑性力学。養賢堂，p. 143, 1961.
- 6) 横堀武夫：材料強度学。技報堂，p. 75, 1955.
- 7) Johnston WG：J. Appl. Phys. p. 2718, Vol. 33, No. 9, 1962.
- 8) 武内朋之：金属物理，p. 122, Vol. 9, No. 3, 1963.
- 9) 大川章哉：応用物理，p. 720, Vol. 32, No. 10, 1963.
- 10) 横堀武夫：6) に同じ，p. 40.  
日本金属学会編：転位論の金属学への応用，p. 123, 1957.
- 11) 追分・金山：北見工短大研報，p. 4, No. 2, 1964.