

引張伸び率に関する一考察 —第2報—

—丸棒及び平板切欠き試験片のオリバーひずみ分布と
伸び率推定・換算方法について—

山 本 晴 生*

A Study of Tensile Elongation II —The Oliver Strain Distribution in Bar and Plate with Notch Carbon Steel—

by Haruo YAMAMOTO

One of the most important problems in the field of the tension test of materials is shape and dimension of specimens. Tensile strength and tensile elongation of materials are varied by shape and dimension of specimens. In order to determine shape and dimension of specimens, the author performed the following experiments.

For gauge length, this is $L_0 = K\sqrt{A_0}$

Case (1): In bar specimens,

$K=0.3, 0.5, 1.0, 1.61, 2.82, 4, 5.65, 11.3, 20$, (K : arbitrary constant)

$d=14$ mm (d : diameter)

A_0 =initial cross sectional area of tension specimens.

$\alpha=1.5, 2.5, 4.0, 7.3$ (α : form factor)

Case (2): In plate specimens,

$K=2.5, 4, 5.65, 8, 14, 16, 20, 30$,

$W=25$ mm (width)

$t=1.00, 3.20$ mm (thickness)

As a result, for the test on plate specimens, the ϵ and $(\sqrt{A_0}/l_0)$ diagram showed Oliver's low of similarity. On the other hand for the bar specimens, the "skew" appeared in the ϵ and $(\sqrt{A_0}/l_0)$ diagram near by $(\sqrt{A_0}/l_0)=1.0$. But, for the bar and plate Notch specimens, the ϵ_t and $(\sqrt{A_0}/l_0)$ diagram showed Oliver's low of similarity.

1. 緒 言

静的材料試験は材料の機械的性質を知る上で最も基本的な実験であり、材料の静的強度（降伏点、引張強さ、伸び率及び絞り率）を知るために、最も経済的にできる試験方法である。しかし、材料試験に用いられる試験片の幾何学的形状・寸法は JIS 規格をはじめ世界各国においても多数定められているが、試験片の形状・寸法の大小により静的強度のうち特に全伸び率が変化することを前報⁽¹⁾で報告した。板状試験片の幾何学的形状・寸法に関して考察して見ると次のことが言える。

標点距離 L_0 と平行部の横断面積 $A_0=W \times t$, (W : 板幅, t : 板厚) の関係を $L_0 = K\sqrt{A_0} = K\sqrt{W \times t}$ とおくと、平行部の板幅 W を一定とした場合、板厚 t の相異によ

* 理工学部機械工学科助手 材料力学

り K の値は同一の材料であっても試験片の形状・寸法を表わす K の値に差異が生ずることは、JIS 規格金属材料引張標準試験片の 1 号試験片形状・寸法から明らかなことであり、そのため伸び率は変化してオリバーひずみ分布曲線 ($\epsilon_0 = \sqrt{A_0}/l_0$ 線図) に一致することが実験的に明確になっている。同一材料で伸び率が相異なる場合、オリバーの「換算伸び率の方法」によって試験片形状・寸法の相異から生ずる伸び率の差異を比較・検討することができる。しかし、板状試験片の場合は平行部の長さが長くなると (K の値が大きい場合、 $K = L_0/\sqrt{A_0}$)、中央部で破断せず肩部付近で破断することが多く、一方に偏するほど全伸び率は小さく現われるので材料の性質を正しく表わすためには、中央部で破断したときの全伸び率に修正する必要があるためには平行部を細区分 (等分目盛) しくなくてはならない。

一方、丸棒に関しては、ASTM 規格において中央部で破断せしめるために断面直径の 1% のテーパを中央部に付けることを許して破断位置が中央部になるような試験片を考案したが、Kula⁽²⁾ らの軟鋼についての実験結果、標点距離でのひずみ分布は一様性がなくなり、一様伸びは平滑材 (標準試験片) より 16% 以上も低くなって材料規格値と異なる点が現われることを報告している。この結果を考察するに、切欠き脆性の影響から伸び率は少なくなり、又、降伏点や引張強さは増加しているはずである。現在、材料試験の自動化が試験片数量の増加と共に進んでいる。したがって、平行部を細区分する作業は多量の試験片を試験する現在の材料試験においては、経済的及び能率的に不利な点が多いのである。

本研究においては、平行部中央に任意の形状係数を持つ切欠き試験片について実験を行った。このような切欠き試験は必ず切欠き脆性の影響を受けると言われているが、応力集中係数 (形状係数) との関係について定量的な研究結果はあまり多くない。切欠き脆性による伸び率の減少量を補正する方法を導ければ、それにより実験に用いられた形状・寸法の平滑試験片の伸び率が求められ、第 1 報⁽¹⁾ で述べた「換算伸び率の方法」により任意の試験片形状・寸法の伸び率を算出することができる。又、現在、問題になっている定形及び比例試験片の標点距離より短かい小形試験片を用い、試験片切削に用いる工具の数を 1 又は 2 つ程度であるならば経済的であり、又、試験片の取付け、取扱いが容易で能率的に実験が処理することができることを目的とした、省エネルギー・省資源材料試験法に関する基礎的研究に検討を加え、実際に用いられる形状・寸法の伸び率を算出するには「オリバーの換算伸び率の方法」を用いて広く応用することを提案し、その応用を述べるものである。

2. 記号及び単位

W : 平行部の板幅 (mm)	t : 平行部の板厚 (mm)
L_0 : 標点間距離 (mm)	d : 平行部の直径 (mm)
A_0 : 平行部の断面積 (mm^2)	$K : K_0/\sqrt{A_0}$
φ : 全伸び率 (%)	l_0 : 破断部の左右にとった元の長さ (mm)
ψ : 絞り率 (%), ψ' : (切欠き材)	ϵ_t : 全ひずみ (平滑材) ϵ'_t : (切欠き材)
ϵ : ひずみ	σ_s : 降伏点 (kgf/mm^2)
ϵ_s : 基準形状のひずみ	σ_B : 引張強さ (kgf/mm^2), σ'_B : (切欠き材)

オリバーの式： $\epsilon_0 = m(\sqrt{A_0}/l_0)^n$ σ_t ：破断応力 (kgf/mm²)
 m, m', n, n' ：材料によって決まる定数 σ_{ta} ：真破断応力 (kgf/mm²)
 n, n' ： $\sqrt{A_0}/l_0 < 1$ の範囲での直線の傾き α ：切欠き深さ (mm)
 m, n ：平滑材の材料定数
 m', n' ：切欠き材の材料定数
 2ρ ：切欠き直径 (mm)
 α ：形状係数

3. 試験片材料及び形状・寸法と試験方法

試験片材料は機械構造用炭素鋼の丸棒では、S25C, S45C 材で平板材では圧延薄鋼板で板厚 $t=1.00$ および $t=3.20$ mm であり図 1 および表 1 に示す試験片形状・寸法に機械加工を行なった。

試験片形状・寸法及び材質

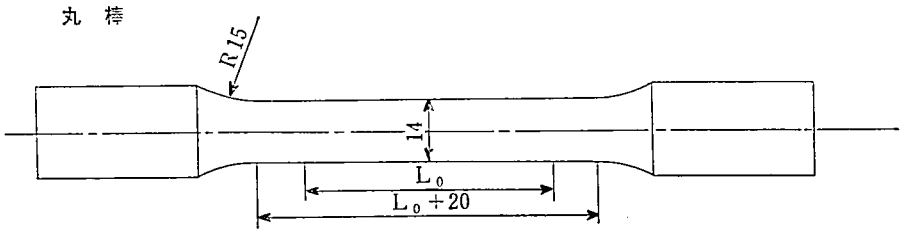


図 1 (a)

表 1 (a)

材 質	K
S25C S45C	0.3, 0.5, 1.0, 1.61, 2.82, 4, 5.65, 11.3, 20

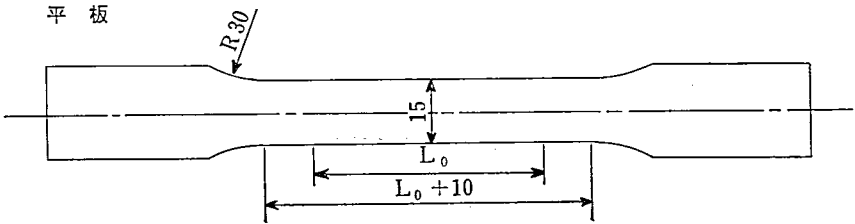


図 1 (b)

表 1 (b)

t	K
1.00	2.5, 4, 5.65, 8, 14, 20, 30
3.20	2.5, 4, 5.65, 8, 16, 30,

表 1 (a)及び(b)に示す形状・寸法に機械加工後、図 2 及び表 2 に示す切欠きを平行部中央に有する切欠き試験片を製作した。

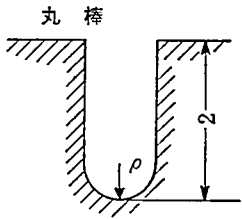


図 2 (a)

切欠き部詳細図

平板

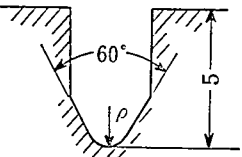


図 2 (b)

切欠き部詳細図

α	1.	1.5	2.5	4.0	7.3
ρ	∞	32.0	3.50	0.88	0.20

表 2 (a)

$\alpha=1+2\sqrt{a/\rho}$

$a=2.0$ (一定)

α	1.	3.5	5.2	8.2
ρ	∞	1.0	0.4	0.1

表 2 (b)

なお、形状係数 α の算出式は丸棒については、だ円孔の引張と考え $\alpha=1+2\sqrt{a/\rho}$ を用いた。又、平板については U 形又は半円形の応用と考えて算出した⁽³⁾。

4. 引張静的強度特性に及ぼす試験片形状・寸法の影響

形状係数 α が同一であれば、形状・寸法が変化しても降伏点及び引張強さはほぼ一定値となる。しかし、引張強さ及び絞り率の切欠き試験片と平滑試験片との比をそれぞれ、切

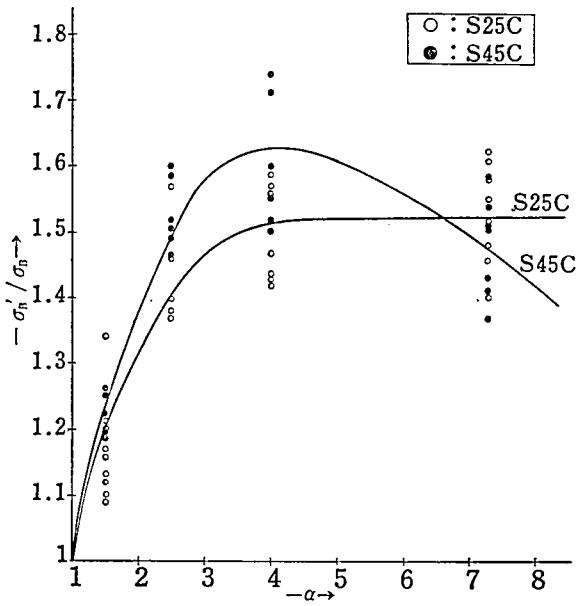


図 3

き強度比 (Notch, Strength, Ratio, NSR 値, σ'_B/σ_B) 及び絞り率減少指数 (ϕ'/ϕ) と呼ぶとき、形状係数 α との関係は図 3 及び図 4 に示す如く変化する。形状係数 α が大きくなるにしたがって S25C 及び S45C 両材料とも切欠き強度比 (σ'_B/σ_B) は $\alpha=4$ まで増加する。又 $\alpha=4$ 以上においては S25C 材ではあまり増加せず $\sigma'_B/\sigma_B=1.52$ で飽和しているのに対して、S45C 材では形状係数 α が 4 以上になると減少する傾向にある。絞り率減少指数については図 4 に示す如く形状係数が増加するにしたがって減少し、 $\alpha=10$ で S25C 材は $\phi'/\phi=0.3$ 、S45C 材は $\phi'/\phi=0.125$ に飽和している。

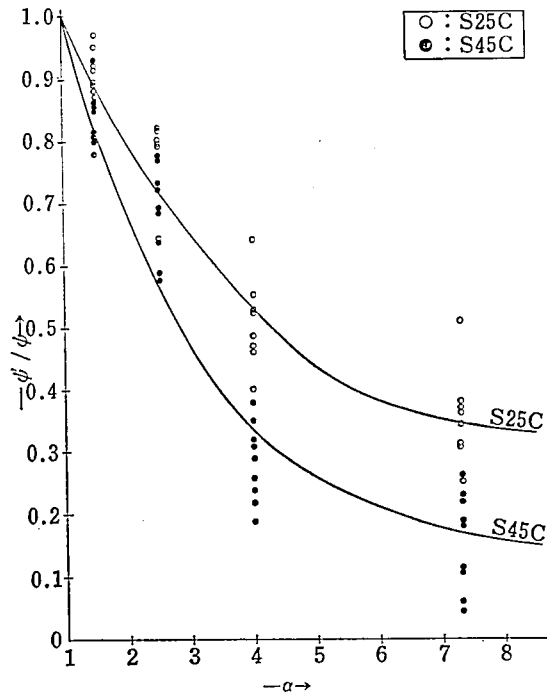


図 4

5. 実験結果

炭素鋼 (S25C, S45C) 及び圧延薄鋼板について標点距離 L_0 を種々に変えた試験片について、破断部の左右に等しくとった元の長さを l_0 とするとき、オリバーのひずみ分布式 $\varepsilon = m(\sqrt{A_0}/l_0)^n$ を用いて両対数グラフ上に $\varepsilon - \sqrt{A_0}/l_0$ 線図として実験結果を示す。丸棒についての結果は図 5 (S25C) 及び図 6 (S45C) に、平板については図 7 に示す。丸棒平滑試験片については $\sqrt{A_0}/l_0=1.0$ 付近において折れ点が現われるので、 $\sqrt{A_0}/l_0 < 1.0$ の範囲での直線の傾きを n と表わし、切欠き試験片については平滑試験片と区別するために、 $\sqrt{A_0}/l_0 < 1.0$ の範囲での直線の傾きを n' と表わし、平滑及び切欠き試験片のオリバーひずみ分布式を表 3 に示す。切欠き試験片のオリバーひずみ分布式における材料定数 m' 、 n' は図 5, 6, 7 に示す如く平滑試験片のそれらの値よりも m' は小さく又、 n' は大きくなる傾向にある。平滑試験片と切欠き試験片との切欠き脆性による全ひずみの減少量を形状係数及び標点距離 L_0 と横断面積 A_0 から求められる $K=L_0/\sqrt{A_0}$ との関係求めて見ると次のようになる。

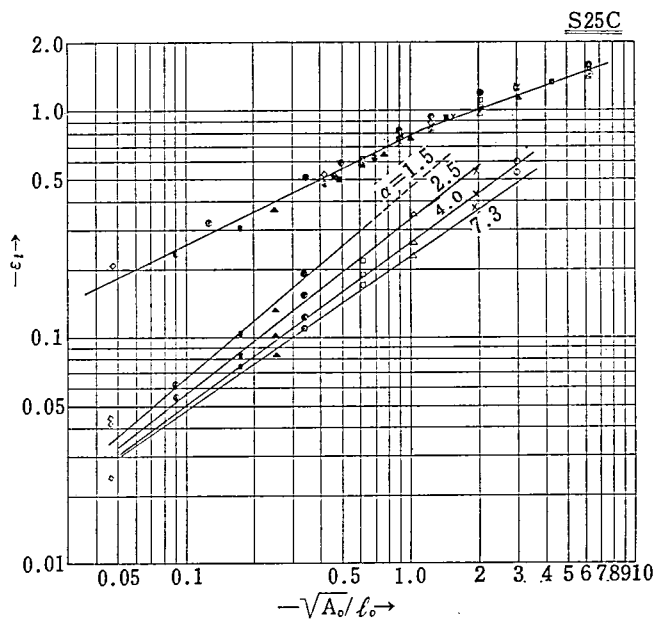


図 5

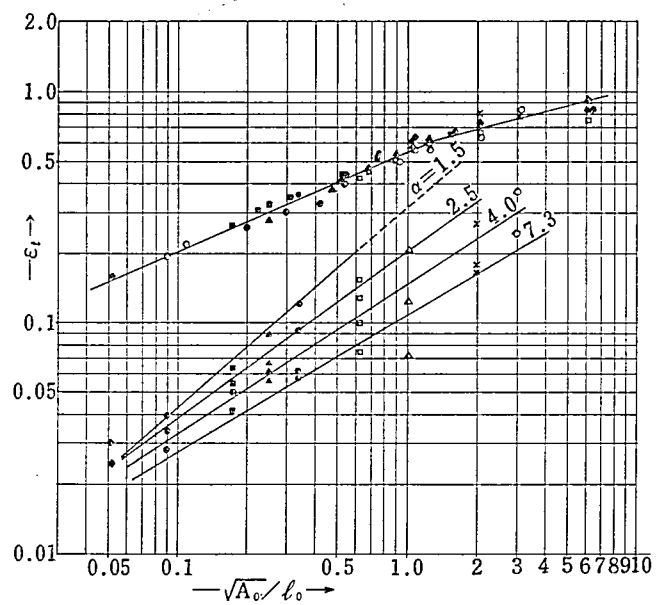


図 6

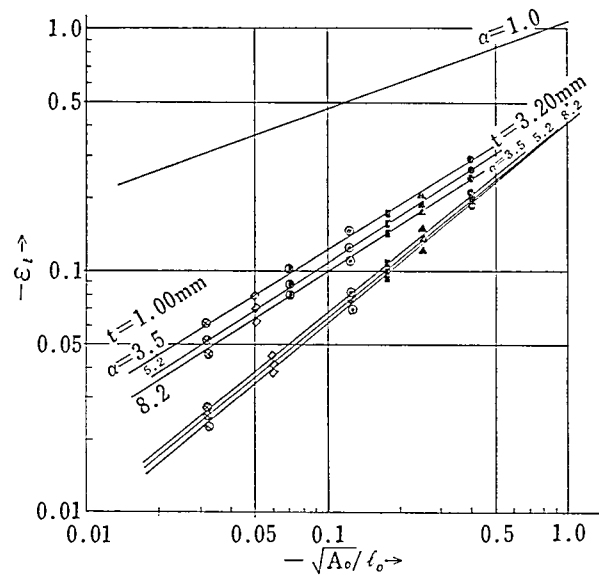


図 7

表 3 (a) オリバーひずみ分布式 (全ひずみ分布式)

α	S25C	S45C
1.0	$\varepsilon_t = 0.78(k^{-1})^{0.453}$	$\varepsilon_t = 0.54(k^{-1})^{0.499}$
1.5	$\varepsilon'_t = 0.46(k^{-1})^{0.647}$	$\varepsilon'_t = 0.315(k^{-1})^{0.577}$
2.5	$\varepsilon'_t = 0.33(k^{-1})^{0.770}$	$\varepsilon'_t = 0.200(k^{-1})^{0.742}$
4.0	$\varepsilon'_t = 0.26(k^{-1})^{0.720}$	$\varepsilon'_t = 0.145(k^{-1})^{0.668}$
7.3	$\varepsilon'_t = 0.225(k^{-1})^{0.676}$	$\varepsilon'_t = 0.108(k^{-1})^{0.600}$

表 3 (b)

α	$t = 1.00 \text{ mm}$	$t = 3.20 \text{ mm}$
1.0	$\varepsilon_t = 1.8(k^{-1})^{0.365}$	
3.5	$\varepsilon'_t = 0.500(k^{-1})^{0.618}$	$\varepsilon'_t = 0.435(k^{-1})^{0.806}$
5.2	$\varepsilon'_t = 0.480(k^{-1})^{0.542}$	$\varepsilon'_t = 0.420(k^{-1})^{0.517}$
8.2	$\varepsilon'_t = 0.450(k^{-1})^{0.647}$	$\varepsilon'_t = 0.410(k^{-1})^{0.625}$

平滑材： $\varepsilon_t = m(k^{-1})^n$ ($k^{-1} = \sqrt{A_0/l_0}$)
切欠き材： $\varepsilon'_t = m'(k^{-1})^{n'}$

平滑試験片，式(1)及び切欠き試験片，式(2)のオリバー全ひずみ分布式を次式のようにおき，その比を求めて見る。

$\varepsilon_t = m(K^{-1})^n \dots\dots\dots(1)$ (平滑試験片)

$\varepsilon'_t = m'(K^{-1})^{n'} \dots\dots\dots(2)$ (切欠き試験片)

式(1)および(2)から

$$\varepsilon_t/\varepsilon_{t'} = m(K^{-1})^n / m'(K^{-1})^{n'} = \frac{m}{m'} (K^{-1})^{n-n'} \dots\dots\dots (3)$$

となる。

本実験において、丸棒では $\alpha=1.5, 2.5, 4.0, 7.3$ の4種について、平板では $\alpha=3.5, 5.2, 8.2$ の3種について行なった結果について式(3)の係数(m/m')及び($n-n'$)を表3(a)及び(b)から求めた結果を表4に示す。両対数グラフ上に(m/m') $-\alpha$ (図8, 10)及び($n-n'$) $-\alpha$ (図9, 11)線図として描いて見るとほぼ直線となる。ここで、(m/m')= M 及び($n-n'$)

表 4 (a)

α	S25C	S45C
1.5	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 1.696K^{0.364}$	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 1.714K^{0.445}$
2.5	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 2.364K^{0.257}$	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 2.700K^{0.313}$
4.0	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 3.000K^{0.237}$	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 3.724K^{0.234}$
7.3	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 3.464K^{0.195}$	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 5.000K^{0.171}$

表 4 (b)

α	$t=1.00\text{mm}$	$t=3.20\text{mm}$
3.5	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 2.16K^{0.257}$	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 2.48K^{0.446}$
5.2	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 2.25K^{0.252}$	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 2.57K^{0.457}$
8.2	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 2.40K^{0.257}$	$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t'}} = 2.63K^{0.465}$

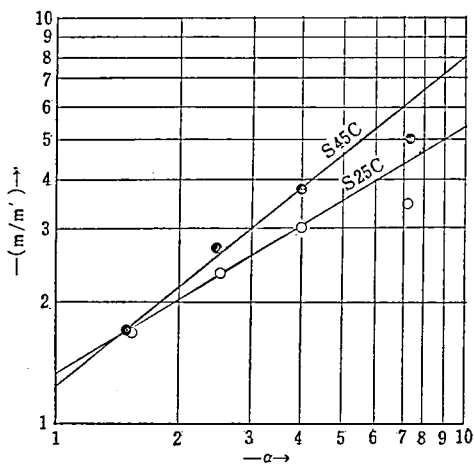


図 8

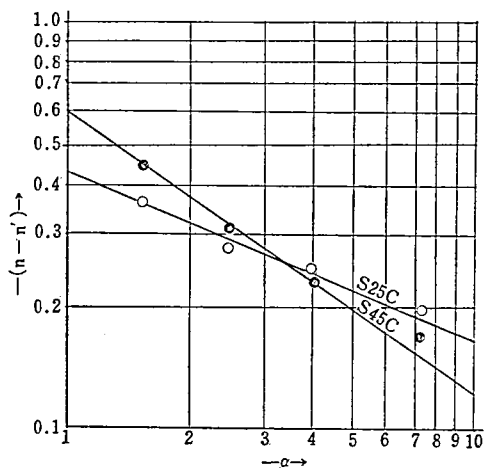


図 9

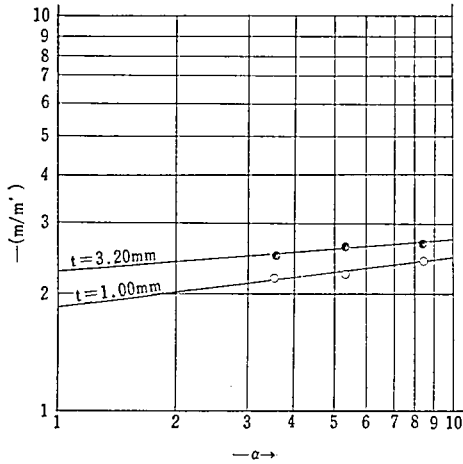


図 10

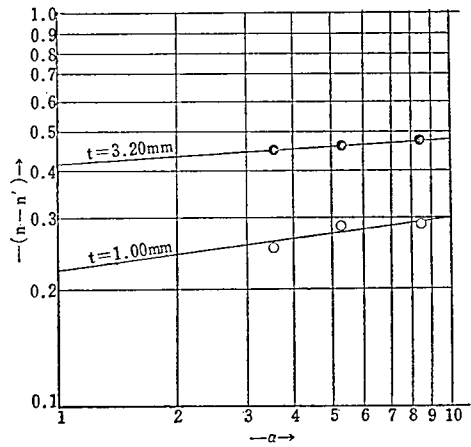


図 11

$=N$ とおくと,

$$M = \beta \alpha^\gamma \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$N = \delta \alpha^\eta \quad \dots\dots\dots(5)$$

と表わすことができる。

したがって,

$$\frac{\epsilon_t}{\epsilon_t'} = \frac{m}{m'} (K^{-1})^{n-n'} = M(K)^N = \beta \alpha^\gamma \cdot (K)^{\delta \alpha^\eta} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\epsilon_t = \beta \alpha^\gamma \cdot (K)^{\delta \alpha^\eta \cdot \epsilon_t'} \quad \dots\dots\dots(6)'$$

となる。ただし、 $\beta, \gamma, \delta, \eta$ は材料定数である。ここで、表 3(a) 及び (b) の n と n' との差 $(n-n')$ の値は実験結果から常に負になるので式 (6) のように示される。 $\beta, \gamma, \delta, \eta$ の値を表 5 に示す。式(6)に表 5 の値を代入し、 K 及び α を任意に定めて計算した結果を $\epsilon_t/\epsilon_t' - \alpha$ 線図に表わすと、図 12 (S25C)、図 13 (S45C)、図 14 ($t=1.00$ mm) 及び 図 15 ($t=3.20$ mm) となる。

S25C 材

$$\frac{\epsilon_t}{\epsilon_t'} = 1.33 \alpha^{0.605} \cdot (K)^{0.427 \alpha^{-0.410}} \quad \dots\dots\dots(6-1)$$

S45C 材

$$\frac{\epsilon_t}{\epsilon_t'} = 1.23 \alpha^{0.610} \cdot (K)^{0.600 \alpha^{-0.690}} \quad \dots\dots\dots(6-2)$$

表 5

材質 係数	S25C	S45C	$t=1.00$	$t=3.20$
β	1.33	1.23	1.880	2.265
γ	0.605	0.810	0.125	0.085
δ	0.427	0.600	0.224	0.417
η	-0.410	-0.690	0.130	0.060

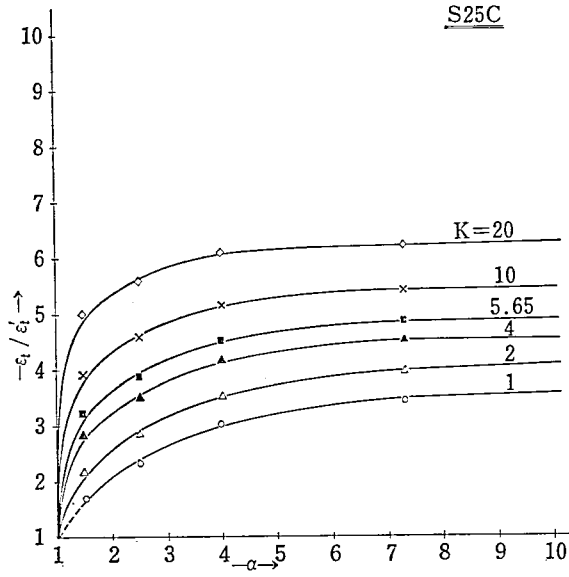


图 12

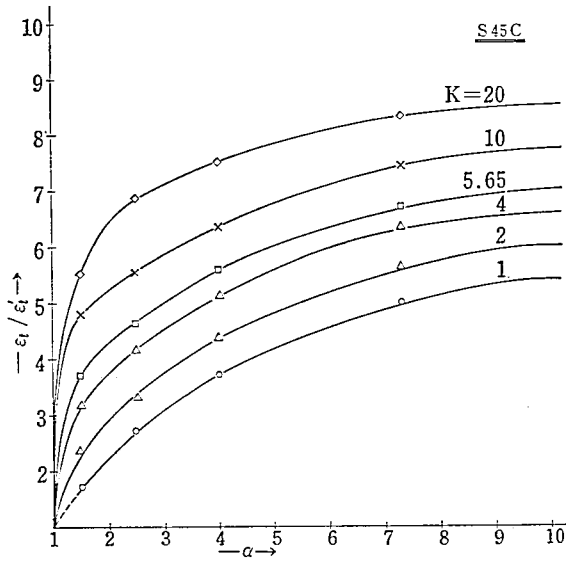


图 13

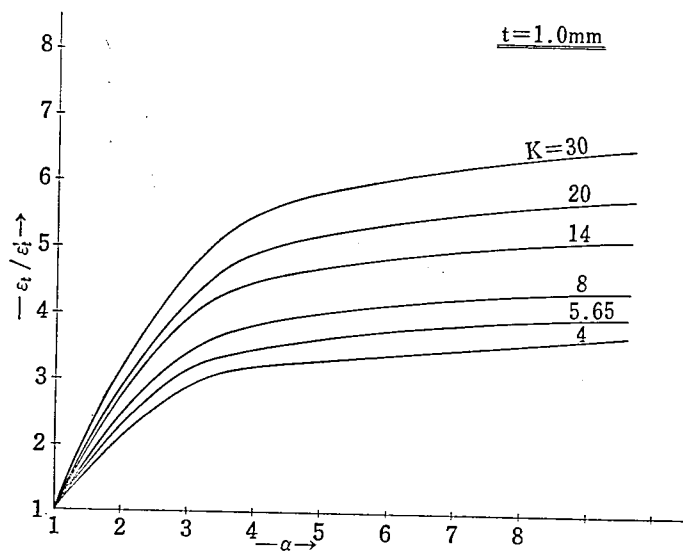


表 14

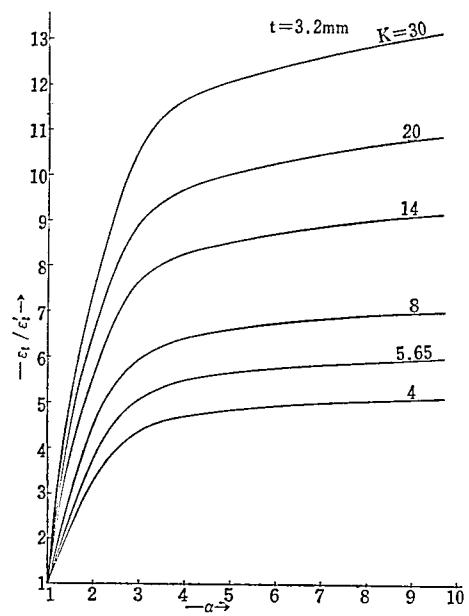


图 15

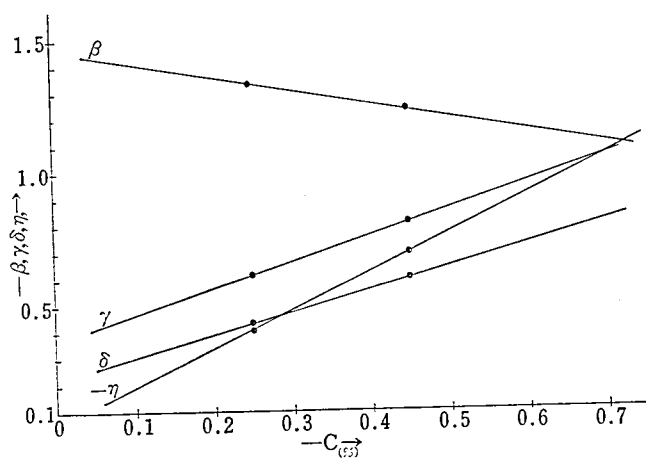


図 16

圧延薄鋼板

$$t=1.00 \text{ mm}$$

$$\frac{\epsilon_t}{\epsilon_t'} = 1.880 \alpha^{0.125} \cdot (K)^{0.224 \alpha^{0.130}} \quad \dots\dots\dots (6-4)$$

$$t=3.20 \text{ mm}$$

$$\frac{\epsilon_t}{\epsilon_t'} = 2.265 \alpha^{0.085} \cdot (K)^{0.417 \alpha^{0.060}} \quad \dots\dots\dots (6-5)$$

6. 考 察

実験結果から次のことが考察できる。

- (1) 切欠き試験片のひずみ分布は、 $\epsilon_t' = m' (\sqrt{A_0/l_0})^{n'}$ の関係があるのでオリバーひずみ分布を示す。(図 5, 6, 7)
- (2) m' 及び n' の値は平滑試験片の m 及び n より形状係数 α が大きくなるにしたがって、 m' は小さく又 n' は大きくなる傾向にある。(図 5, 6, 7)
- (3) 平滑及び切欠き試験片の全ひずみ、 ϵ_t 及び ϵ_t' の比 ϵ_t/ϵ_t' は式(6)のように表わされる。したがって、S25C 及び S45C 材、圧延薄鋼板 ($t=1.00, 3.20 \text{ mm}$) の材料定数 $\beta, \gamma, \delta, \eta$ が求められたので、切欠き試験片の静的強度が実験結果から得られれば、任意の直径および標点距離を有する平滑試験片の伸び率を算出することが可能である。
- (4) 図 8 の $(m/m')-\alpha$ 線図において形状係数 $\alpha=7.3$ の実験結果は線上から離れているのは、切欠き切削時に生ずる加工硬化の影響と考えられるので形状係数 α が大きいすなわち切欠き半径が小さい切欠きを持つ切欠き試験片を用いることはあまり望ましくないと思われる。

7. 結 言

- (1) 任意の直径 d , 切欠き半径 ρ , 標点距離 L_0 を有する切欠き試験片の引張試験結果から $\epsilon_t/\epsilon_t'-\alpha$ 線図の図 12 (S25C), 図 13 (S45C), 図 14 ($t=1.00\text{mm}$), 及び図 15 ($t=3.20\text{mm}$) を用いて平滑試験片の伸び率 ($\varphi = \epsilon_t \times 100\%$) を算出することができる。実験に用いた切欠

き試験片の直径 d 及び標点距離 L_0 から求められる $K(K=L_0/\sqrt{A_0})$ の値が線図に求められていないときは、 K 、 α 及び ϵ_t' を式(6')に代入して ϵ_t を求めることができる。

(2) 省資源材料試験法に関する基礎的研究に検討を加えた結果

切欠き試験片の幾何学的形状・寸法は標準試験片より小さくすることができ (K を小さくする)、又、平行部中央に切欠きを有するため、破断位置は必ず中央部であるので、標点距離の両端に標点をするだけで細区分する作業は必要なく、経済的及び能率的に多量の試験片を処理することができる。切欠き試験片の静的強度が得られたならば、伸び率は $\epsilon_t/\epsilon_t' - \alpha$ 線図、絞り率は $\phi'/\phi - \alpha$ 線図、及び引張強さは $\sigma_B'/\sigma_B - \alpha$ 線図から切欠き底直径が平行部直径 d と同等でその標点距離 L_0 を有する平滑試験片の静的強度が得られる。しかし、伸び率は $K=L_0/\sqrt{A_0}$ の値が相異なる(一般形状)と変化するので「オリバーの換算伸び率の方法」を用いて計算することができる⁽¹⁾。

又、本実験では S25C 及び S45C 材の 2 種について考察を加えたが、材料定数 $\beta, \gamma, \delta, \eta$ と炭素量($c\%$)との関係を近似的に直線と仮定して図 16 に示し、炭素鋼について広く応用することができる。

今後の問題として次のことがある。

(1) 材料の静的変形強度は板厚および断面形状などの幾何学的形状・寸法の複雑な関数となり、部材の受ける変形モード(外力の種類)にも依存している。本研究においては特に丸棒について検討を加えたが、船舶・圧力容器・橋梁などへの高張力鋼板の使用例が多く、しかも一軸ないし二軸方向の引張変形モードで用いられている部材もあり、高強度薄鋼板の効果的な設計・検討が要請されることが多くなっている。基礎的静的材料試験法に関する研究に検討を加える余地が多いのである。

(2) 複合材料と呼ばれる材料が今日急速な進歩を遂げているが、機械的性質を知る材料試験法は画一化されておらず、データを他人の行なった試験結果と比較・検討することができず、非常に不便である。

イギリスにおいては RAE を中心に CFRP 材について繊維方向引張試験片形状・寸法として全長 150 mm、板厚 2 mm の中央に厚さ方向に深さ 0.5 mm 半径 125 mm の切欠きを両面に付けた試験片を提案しているが⁽⁴⁾、製作面からも問題点があり、ひずみの測定にもさらに検討を加える必要がある。特に硬質の材料は伸び率が小さく、平行部に小さい欠陥を有しているとそこが破断面になり正しい伸び率を求めることができない。これらに関してさらに検討を加えることが今後の問題であると考えられる。

参 考 文 献

- (1) 山本：明星大学研究紀要理工学部 第 14 号 (1978.3)
- (2) Kula, E. B. et. al.: Bulletin ASTM (1959)
- (3) 西田：応力集中 (森北出版) (1967) p. 559
- (4) 大谷、木村：炭素繊維(近代編集) (1972) p. 338

(53 年 9 月 11 日受理)