

## 軟鋼うす板のせん断加工特性におよぼす歪速度の影響\*

大森 正 信\*\* 吉 永 芳 豊\*\*

Masanobu Ohmori and Yoshitoyo Yoshinaga: Strain Rate Effect on the Shearing of a Steel Sheet (Study on the Dependence of Mechanical Properties of Metals upon the Strain Rate, 5th Report). Using a parallel-straight-edged shearing tool, the behaviors in shearing of the annealed sheet, 0.6 mm in thickness, made from a killed carbon steel with 0.14% C were investigated, as a function of the shear rate, in a wide range of rates from  $1.1 \times 10^{-2}$  to  $2.8 \times 10^4$  1/sec. The present main findings are summarized as follows:

(1) The present shearing resistance has two strain rate sensitivities, i.e., a larger sensitivity beyond the rate of 11/sec and a much smaller one below the rate of it as the deformation resistances under the other states of stress such as simple tension, compression and torsion have two sensitivities, respectively. The shearing resistance, though it is somewhat smaller than the maximum shearing stress observed under simple torsion of the thin walled cylinder, increases with the shear rate in quite parallel with the maximum shearing stress.

(2) Defining the tensile and shear strain rate which should give an equal octahedral shear rate as an equivalent strain rate, the ratio of the shearing resistance to the tensile strength in a higher speed deformation was found to be appreciably smaller than the ratio 0.78 obtained in a quasi-static deformation.

(3) When the sheet was sheared in an impact manner with the present highest rate of 2.8 m/sec, the sheared edge showed the change characterized by the slight decrease of shear droop. However, no change was found in the edge at lower rates than 2.8 m/sec.

(Received April 24, 1967)

## I. 結 言

前報までに軟鋼の各種応力状態における塑性変形挙動の歪速度依存性について報告してきたが<sup>(1)~(4)</sup>、今回は軟鋼うす板の単純打抜き試験の結果についてのべる。単純打抜きは、理想的な場合には単純せん断応力状態となる。本実験が行なわれた理由の第一は、金属うす板の打抜き加工におけるせん断特性の測定が実際上重要であるにもかかわらず、広範な速度下での研究がほとんど見当たらないためである。前田による比較的せまい速度域での研究<sup>(5)</sup>があるが、著者らの知るかぎりではこれが現在までのところ最も系統的な研究である。理由の第二はすでに報告した軟鋼のうす肉中空丸棒を振つたときのせん断変形挙動<sup>(3)</sup>や1軸引張り変形挙動<sup>(1)</sup>との比較を試みることであり、その第三は、単純打抜きでは高いせん断歪速度が容易に得られるからである。

## II. 実 験 方 法

試料は従来まで用いていたものと同じ0.14% C キルド鋼で、その化学組成を Table 1 に示す。500 kg インゴットより鍛造して作った 80 mm × 80 mm 断面、800 mm 長さ

\*\* 広島大学工学部 (Faculty of Engineering, Hiroshima University, Hiroshima)

\* 金属の機械的性質の歪速度依存性に関する研究 (第5報)

(1) 大森, 吉永, 武井: 本誌, 29 (1965), 1087.

(2) 大森, 吉永: 本誌, 30 (1966), 794.

(3) 大森, 吉永: 本誌, 30 (1966), 1131.

(4) 大森, 吉永: 本誌, 31 (1967), 433.

(5) 前田: 精密機械, 25 (1959), 364, 439.

の角棒を適当な長さに切断後もとの鍛造方向と直角に4 mm 厚さまで鍛伸した。この鍛伸材を冷間圧延によって厚

Table 1 Chemical composition of specimen. (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.14	0.20	0.49	0.008	0.013	0.04

さ0.6 mm にした。この圧延材から巾 25 mm、長さ約70 mm の短冊形試片をその長手方向が圧延方向に対して0°, 45° および 90° となるように採取した。巾はあらかじめせん断機によって幾分大きくとつておき、形削盤で25 mm に仕上げた。これらの短冊形試片は真空中で920°C, 1 hr 焼鈍した。

せん断工具は直線複刃方式で、両ダイスの間隔は25.6 mm、ポンチ巾 25.4 mm、クリアランス (片側)  $c=0.10$  mm (板厚の約16%) と一定にした。ダイスおよびポンチはSKS 3 鋼を焼入、焼戻後平面研削盤で研削仕上げを行ない、実験はすべて板抑えを用いて行なつた。Fig. 1 にせん断工具を示す。

使用せる試験機は、油圧万能試験機 (クロス・ヘッド速度  $v \sim 2.5$  mm/sec), 急速負荷万能試験機 ( $v=33$  mm/sec) および落錐型衝撃試験機 (落錐重量 100 kg, 落錐高さ 40 cm,  $v=2800$  mm/sec) の3種<sup>(1)</sup>である。理想的な単純せん断応力状態と考えればせん断歪速度は  $v/c$  で表わせるので、ここではその値をもつてせん断歪速度とし測定結果を整理した。以上の3試験機を用いて得たせん断歪速度は、 $1.1 \times 10^{-2}$ ,  $1.6 \times 10^{-1}$ , 1.7,  $2.5 \times 10$ ,  $3.3 \times 10^2$  および  $2.8 \times 10^4$  1/sec の6速度である。

歪速度  $\dot{\gamma}=1.71/\text{sec}$  以上の場合のせん断荷重は、ワイヤ・ストレーンゲージ貼付のロード・セルからの出力をシンク

は 100 倍とした) を用いて行なつた。

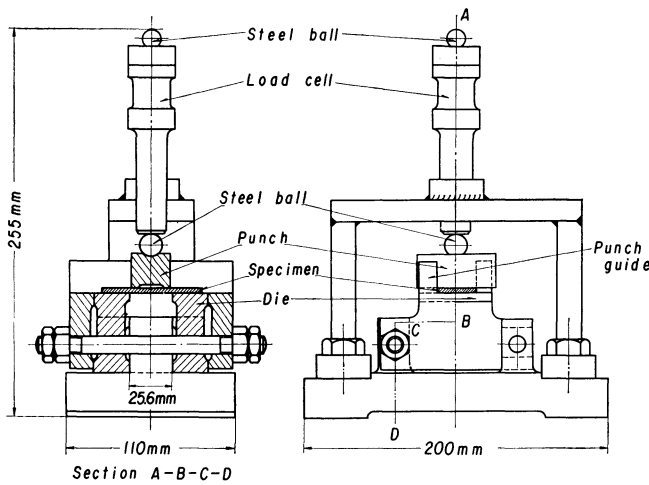


Fig.1 Parallel-straight-edged shearing tool.

ロスコープに入れて荷重-時間曲線を記録して測定した。うす板のせん断現象は極めて短時間に終るので、とくに最高歪速度におけるせん断荷重の測定には注意が肝要である。荷重の検出位置はポンチ側 (Fig.1) またはダイス下側のいずれかが考えられる。ダイス下側すなわちロード・セルの上に Fig.1 に示した工具全体をのせるような測定系では、せん断工具の全重量が約 15 kg に達するのでこの測定系の固有振動数は低く、1500 c/sec となる。この固有振動数は  $\dot{\gamma}=2.8 \times 10^4 1/\text{sec}$  のときのせん断現象とほぼ同程度になつてしまい、したがつてこの測定方式では  $\dot{\gamma}=2.8 \times 10^4 1/\text{sec}$  以下の場合の荷重測定は可能であつても  $\dot{\gamma}=3.3 \times 10^4 1/\text{sec}$  の場合には不可能である。ただし原理的にはロード・セルの剛性を高めれば固有振動数を上げることができるが、測定感度が減少して實際上この方式は採用できない。そこでせん断荷重を測定するときには Fig.1 に示すようにポンチ上端にロード・セルを設けた。この場合の測定系の固有振動数は  $\dot{\gamma}=2.8 \times 10^4 1/\text{sec}$  のせん断現象を測定するのに十分高いが、静止質量(ポンチ部、約 400 g) を極めて大きい加速度で運動させることになるため、慣性力とせん断加工力の和を測定することになり、加工力のみを分離して測定し得ない欠点があったに生ずる。そこで試片を取除き、強さを無視できる細い銅線でポンチ部分を実際の試験条件に合わせて吊り下りして衝撃荷重を加え、そのときの慣性力を測定してせん断試験で記録した荷重-時間曲線が示す荷重からその慣性力を差し引いた値をもつてせん断加工力とした。

比較のために、圧延方向に対して  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  および  $90^\circ$  の軸をもつ各試片につき準静的引張り試験を行なつた。この試片の形状は、平行部長さ 40 mm、標点距離 30 mm、巾 15 mm である。

せん断切口形状の測定は日本光学製の 万能投影器 (倍率

### III. 実験結果と考察

前述のように、衝撃せん断 ( $\dot{\gamma}=2.8 \times 10^4 1/\text{sec}$ ) の場合、せん断荷重はポンチ側で測定し (せん断荷重+慣性力)-(慣性力) によつて求めたので、慣性力のみを測定結果を Table 2 に示す。平均値に対する最大偏差は +2.7%、-6.8% である。このようにして求めた最高歪速度におけるせん断力の測定精度は、これより低い歪速度における測定精度より悪いことは避けられない。この反映として、のちに示すせん断抵抗の測定点は最高歪速度においてかなりばらついている。 $\dot{\gamma}=3.3 \times 10^4 1/\text{sec}$  以下の速度では、ポンチ側とダイス下側で測定した荷重は全く同じであり、結果に示したこの速度範囲の測定点は両側で測定した値を用いてある。

せん断試片を引張り 歪速度  $\dot{\epsilon}=1 \times 10^{-3} 1/\text{sec}$  で

Table 2 Force of inertia of the punch system when it was impacted.

No.	1	2	3	4	5	6	mean
Force (kg)	279	255	278	268	281	280	273.5

Table 3 Quasi-static tensile properties of the present sheet. (strain rate,  $\dot{\epsilon}=1 \times 10^{-3} 1/\text{sec}$ ).

Direction of pulling	Lower yield stress(kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength(kg/mm <sup>2</sup> )	Total elongation (%)
Parallel to rolling direct. (R.D.)	24.0	40.8	37.3
45° to R.D.	23.8	40.0	46.0
Perpendicular to R.D.	24.3	40.0	43.5

準静的に引張つたときの結果を Table 3 に示す。これは各方向の試片をそれぞれ 3 本ずつ試験して得られた値の平均である。板の方向性は強度にはほとんど現われておらず、延性量のみに見われている。

#### 1. せん断抵抗の歪速度依存性

ふつうに行なわれているように、最大せん断荷重を (板厚) × (せん断線長さ) で除した値、すなわち見かけの最大せん断応力をもつてせん断抵抗と定義する。Fig. 2, 3 および 4 はせん断線の方向が圧延方向に対して平行、 $45^\circ$  および直角のときのせん断抵抗の歪速度による変化を示したものである。準静的引張りにおける強度が引張り方向によつてほとんどちがわなかつたように、ここに示したせん断抵抗もそのせん断線の方向には関係なく結果は全く同一になつている。せん断歪速度約 11/sec を境にして、二つの歪

速度依存性, すなわち低歪速度側における小さい依存性と高歪速度側における大きいそれがみられる. この有様は,

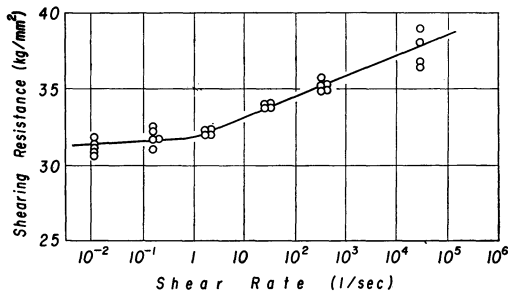


Fig. 2 Dependence of shearing resistance on shear rate. Shearing line is parallel to rolling direction (R.D.).

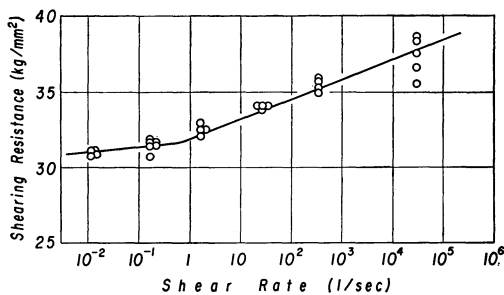


Fig. 3 Dependence of shearing resistance on shear rate. Shearing line is 45° to R.D.

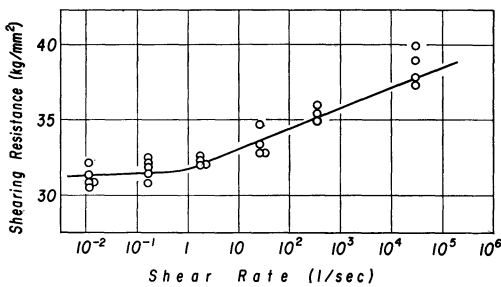


Fig. 4 Dependence of shearing resistance on shear rate. Shearing line is perpendicular to R.D.

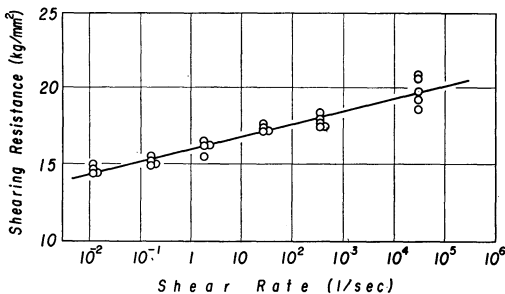


Fig. 5 Dependence of shearing resistance with an annealed copper sheet on shear rate<sup>(6)</sup>. Shearing line is perpendicular to R.D.

同じ鋼を用いて行なった1軸引張り<sup>(1)</sup>, 1軸圧縮<sup>(4)</sup>ならびに単純振り<sup>(3)</sup>などの応力状態の下で観察された変形抵抗の

歪速度依存性と全く同様で, Fig. 5 に示した銅板 (CuP1-O 材) のせん断抵抗が全歪速度域で一つの歪速度依存性しか示さないこと<sup>(6)</sup>と対照的である. 最高せん断歪速度  $2.8 \times 10^4$  1/sec における測定点のばらつきが他の速度におけるばらつきより著しいのは, 前述のように精度の落ちた荷重測定方法に起因するものである. 本実験に用いた鋼のせん断抵抗  $k_s$  は, 以上の測定結果から次式で示すような関数でよく表わすことができる.

$$k_s = A + B \log \dot{\gamma} \quad (1)$$

ここで,  $\dot{\gamma}$  はせん断歪速度,  $A$  および  $B$  は常数である. 歪速度依存性の尺度としての上式中の  $B$  の値を Table 4 に示す.

Table 4 Values of  $B$  (kg·sec/mm<sup>2</sup>) in the equation (1).

Shear rate $\dot{\gamma}$ (1/sec)	Present shearing resistance	Max. shearing stress under simple torsion <sup>(3)</sup>
$\dot{\gamma} < 1$	0.18	0
$\dot{\gamma} > 1$	1.3	1.3

## 2. せん断抵抗と単純振りによる最大せん断応力との比較

Table 4 には, うす肉中空丸棒を用いて振り試験<sup>(3)</sup>を行なったときの常温における最大せん断応力に対する  $B$  の値をも比較のために併記してある. これから, せん断抵抗の歪速度依存性と単純振りでの最大せん断応力のそれは實際上全く同じであるといえる. Fig. 6 は本実験の結果と比

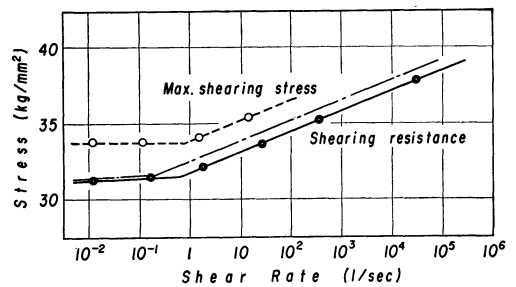


Fig. 6 Comparison between the present shearing resistance (solid line) and maximum shearing stress under simple torsion (dotted line)<sup>(3)</sup>. Thin line shows modified shearing resistance assuming that shear rate is a quarter of that defined in the present paper.

較するため, 単純振りで得た最大せん断応力の歪速度による変化を同一図上に示したもので, 実線は本実験の結果を, 点線は前報の振りの結果を示す. せん断抵抗の歪速度による増加割合は最大せん断応力の増加割合と全く同じであるが, せん断抵抗それ自体の値は最大せん断応力よりかなり低くなっている. この理由としてはつぎの二つが考えられる. まず第一に, せん断抵抗として見かけのせん断応力を採用していることからくる. つまり, 最大荷重時にその荷重を支えている真の面積は (板厚) × (せん断線長さ) よ

(6) 大森, 吉永: 未発表.

りかなり小さくおつており、それゆえ真のせん断抵抗は、ここに示したせん断抵抗よりかなり上まわつてゐるはずで

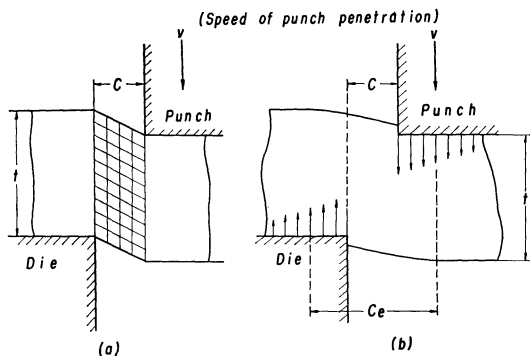


Fig.7 Two types of shearing models; (a) : simple shear and (b) : actual shear state.  $c_e$  represents an equivalent clearance<sup>(7)</sup>.

ある。第二は、せん断歪速度の定義からくるものである。Fig.7(a)は本実験でせん断歪速度を定義するに当たつて採用した最も単純なせん断模型で、クリアランス部分のみに変形が集中しているとしているのに反して、Fig.7(b)は実際に近い変形状態を示す。実際のせん断過程では、クリアランス部分の左右かなりの領域にわたつて塑性変形が広がり、その結果実質的なクリアランスは図に示した  $c$  ではなく、それより大きい等価クリアランス  $c_e$  になつてゐるはずである<sup>(7)</sup>。このことは、せん断抵抗の各歪速度において示した測度定点がより低速側にプロットされねばならぬことを物語る。工具圧痕の測定に基づく計算<sup>(7)</sup>によれば、等価クリアランス  $c_e$  は次式で与えられる。

$$c_e \doteq c + 0.5 t \quad (2)$$

ここで、 $t$  は板厚である。本実験では  $c=0.1$  mm,  $t=0.6$  mm であるから  $c_e \doteq 0.4$  mm となり、したがつて真のせん断歪速度は本報告で採用した値の約 1/4 程度になる。このことを考慮すると、Fig.6 に示したせん断抵抗 (実線) は同図中に示した一点鎖線のようになり、前報の単純振りて求めた最大せん断応力 (点線) に近づいてくる。

上にのべた二つの原因が重なつて、本実験のせん断抵抗が振りによる最大せん断応力より低く現われるものと考えられる。

### 3. せん断抵抗と引張り強さの比較

多くの金属のせん断抵抗と引張り強さの比は経験的に約 0.8 になるとされており<sup>(8)</sup>、機械や構造物の設計などでもよく利用される関係である。事実、準静的変形の場合の両者の比は 0.78 となつてゐる。しかし、高速変形の場合には互いに等価なせん断歪速度と引張り歪速度の下で両者を比較することが必要になるが、歪が大きいところであるので前報で行なつたせん断降伏応力と引張り降伏応力の比較

(3)のように簡単にはいかない。

前に論じた<sup>(3)</sup>と同じように、ここでも等しい八面体せん断歪速度を与えるようなせん断歪速度と引張り歪速度を互いに等価な歪速度であると考えて議論を進めることにする。Fig.7 (a) に示したような単純せん断における主対数歪  $\epsilon_i$  ( $i=1,2,3$ ) は、せん断歪を  $\gamma$  とすると次式で表わせる<sup>(9)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \ln(\sqrt{1+\gamma^2/4} + \gamma/2) = \sinh^{-1} \gamma/2 \\ \epsilon_2 &= 0 \\ \epsilon_3 &= \ln(\sqrt{1+\gamma^2/4} - \gamma/2) = -\sinh^{-1} \gamma/2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

かかる平面歪状態での八面体せん断歪  $\gamma_{oct}$  は、

$$\gamma_{oct} = 2\{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2\}^{1/2}/3 = 2(2/3)^{1/2}\epsilon_1$$

すなわち、

$$\begin{aligned} \gamma_{oct} &= (2/3)^{1/2} \ln(\sqrt{1+\gamma^2/4} + \gamma/2) \\ &= (2/3)^{1/2} \ln\{1 + \gamma^2/2 + \gamma\sqrt{1+\gamma^2/4}\} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。したがつて、上式を時間で微分した八面体せん断歪速度は、

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma_{oct}}{dt} &= \left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} \frac{\gamma + (1+\gamma^2/4)^{1/2} + \gamma^2(1+\gamma^2/4)^{-1/2}/4}{1+\gamma^2/2 + \gamma(1+\gamma^2/4)^{1/2}} \frac{d\gamma}{dt} \\ &= F(\gamma) \frac{d\gamma}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。

一方、1軸引張りの場合の主対数歪の間には、 $\epsilon_1 = -2\epsilon_2 = -2\epsilon_3$  の関係があるから八面体せん断歪は、

$$\gamma_{oct} = \sqrt{2} \epsilon_1 = \sqrt{2} \ln(1 + \epsilon_c) \quad (6)$$

となる。ここで、 $\epsilon_c$  は公称引張り歪である。上式より  $d\gamma_{oct}/dt$  はつぎのようになる。

$$\frac{d\gamma_{oct}}{dt} = \frac{\sqrt{2}}{1 + \epsilon_c} \frac{d\epsilon_c}{dt} \quad (7)$$

(5)および(7)式の八面体せん断歪速度はそれぞれせん断歪および引張り歪の関数となり、とくに(5)式の  $d\gamma/dt$  の係数  $F(\gamma)$  は  $\gamma$  の複雑な関数形になつてゐる。 $F(\gamma)$  は、Fig.8 に示したように  $\gamma$  の増加とともに単調に減少する関数である。(5)式と(7)式を等置すれば、八面体せん断歪速度を

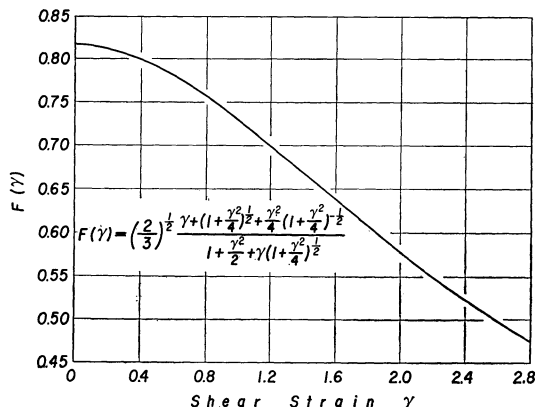


Fig.8 Variation of  $F(\gamma)$  in the equation (5).

(7) 前田：精密機械，25(1959)，248。

(8) たとえば、春日：プレス加工，共立出版(1965)，p.169。

(9) A.Nadai: *Theory of flow and fracture of solids*, Vol.1, McGraw-Hill, (1950), p.146.

通じて互いに等価なせん断歪速度と引張り歪速度の関係が次式のように得られる。

$$\frac{\sqrt{2}}{(1+\epsilon_c)F(\gamma)} \frac{d\epsilon_c}{dt} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (8)$$

高速変形におけるせん断抵抗と引張り強さは、単純せん断における最大せん断荷重時のせん断歪 $\gamma$ と1軸引張りにおける引張り強さを示すときの公称引張り歪 $\epsilon_c$ がわかれば、(8)式によつて互いに等価な歪速度がわかるから比較が可能になる。ただし、最大せん断荷重時のクリアランス部分における実際の変形は複雑であるから、そのときのせん断歪 $\gamma$ を正確に知ることは困難である。しかし粗い推定は可能である。単純振りの場合の最大せん断歪(破断までの歪)は、 $d\gamma/dt=1.1 \times 10^{-2} \sim 141/\text{sec}$ の歪速度範囲で、歪速度に関係なくほぼ1.25であつたから本実験における最大せん断荷重時のせん断歪はその値を越えないであろう。また、本実験の場合と大約等しいと考えられるクリアランス $c=11\%$ 板厚の直線復刃工具を用いての軟鋼(0.24%C)の準静的せん断<sup>(10)</sup>によれば、約20%板厚のポンチストロークで最大せん断荷重を示している。これらのことから、最大せん断荷重時のせん断歪を約 $\gamma=1.0$ としても実際とは大きくちがわないであろう。

そこで、最大せん断荷重時におけるせん断歪を $\gamma=1.0$ 、1軸引張りの引張り強さにおける公称歪を $\epsilon_c=0.2$ とすると(8)式は、

$$1.62 \frac{d\epsilon_c}{dt} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (8)'$$

となる。せん断歪速度を $d\gamma/dt=v/c$ とした場合(Fig.7(a)参照)には、 $d\epsilon_c/dt=10^2 1/\text{sec}$ 、 $d\gamma/dt=1.62 \times 10^2 1/\text{sec}$ のときのせん断抵抗( $k_s$ )と引張り強さ( $\sigma_B$ )との比は、 $k_s/\sigma_B=0.705$ となる。また等価クリアランスの考えを導入して $d\gamma/dt=v/c_c=v/4c$ とした場合(Fig.7(b)参照)には、上の場合と同じ引張りおよびせん断歪速度での両者の比は $k_s/\sigma_B=0.720$ となる。ここで用いた引張り強さの値は前報<sup>(1)</sup>からとつてある。前報<sup>(1)</sup>の準静的引張り強さはTable 3に示したそれとほとんど同じであるから、本実験試片の高速引張りにおける引張り強さも前報のそれと同じであると考えられる。以上のことは、たとえ議論の途中で若干の仮定が入っているにもかかわらず、高速変形になると $k_s/\sigma_B$ が明らかに減少を示すといえよう<sup>†</sup>。著者らは現在、以上の

(10) 神馬：塑性と加工，6(1965)，243。

† (8)式より(8)'式を得るに当たつて、最大せん断荷重時におけるせん断歪を $\gamma=1.0$ と仮定したが、これよりさらに粗い仮定でもなお同様の結論が得られることを示しておく。極端な例として(いまの場合、このようなことは起こりそうもない) $\gamma=0.4$ および $\gamma=2.0$ と仮定すると、(8)式はそれぞれ(A-1)および(A-2)式のようになる。

$$\gamma=0.4 \text{ のとき, } 1.48 \frac{d\epsilon_c}{dt} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (\text{A-1})$$

$$\gamma=2.0 \text{ のとき, } 2.02 \frac{d\epsilon_c}{dt} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (\text{A-2})$$

ただし、本文と同じように $\epsilon_c=0.2$ とした。

(i)  $d\gamma/dt=v/c$ でせん断歪速度を定義するとき(すなわち、せん断抵抗をFig.6の実線とするとき)。

(A-1)式の場合には、たとえば $d\epsilon_c/dt=10^2 1/\text{sec}$ 、 $d\gamma/dt=1.48 \times 10^2 1/\text{sec}$ がたがいに等価な歪速度で

議論の前提である互いに等価な歪速度という概念を用いて、他の金属(銅とアルミニウム)の $k_s/\sigma_B$ が高低両歪速度でどのようにちがうのか実験を行ない、検討をすすめている。

#### 4. せん断切口面について

Fig.9はせん断切口面の説明図で、aはだれの大きさ、bはせん断面、cは破断面、dはかえり、eはだれの巾およびfは工具圧痕の巾である。

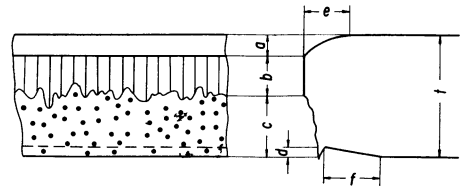


Fig.9 Schematic view of sheared edge.

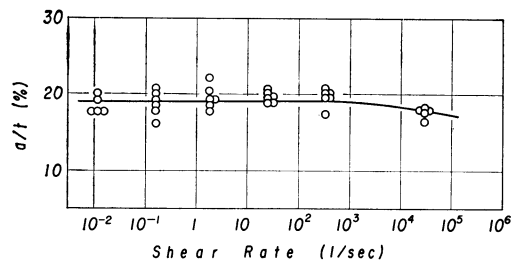


Fig.10 Length of shear droop (thickness %) as function of shear rate.

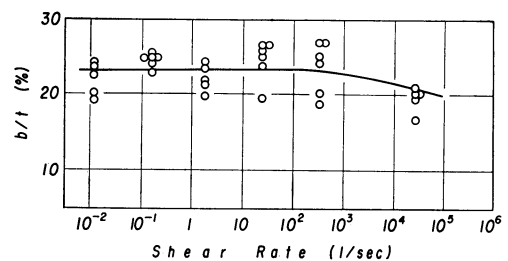


Fig.11 Height of burnished portion (thickness %) as function of shear rate.

びfは工具圧痕の巾である。だれの大きさをFig.10に、せん断面の高さをFig.11に、歪速度の関数としてそれぞれ

あるから、このとき $k_s/\sigma_B=0.703$ となる。また、(A-2)式の場合には $d\epsilon_c/dt=10^2 1/\text{sec}$ 、 $d\gamma/dt=2.02 \times 10^2 1/\text{sec}$ のとき $k_s/\sigma_B=0.708$ となる。

(ii)  $d\gamma/dt=v/4c$ でせん断歪速度を定義するとき(すなわち、せん断抵抗をFig.6の一点鎖線とするとき)。

(A-1)式および(A-2)式の場合、それぞれ(i)のときと同じ等価な歪速度の下で、 $k_s/\sigma_B=0.719$ および $k_s/\sigma_B=0.723$ となる。

最大せん断荷重時のクリアランス部分におけるせん断歪を、 $\gamma=1.0$ として高速変形時の $k_s/\sigma_B$ を求め、それが準静的変形をさせたときの $k_s/\sigma_B$ よりかなり小さくなることを本文では示したが、上にみた例からわかるように、 $0.4 \leq \gamma \leq 2.0$ の範囲でも $k_s/\sigma_B$ の値は本文にのべた $\gamma=1.0$ のときのそれとほとんど変わらない。

れ板厚に対する 100 分率で示してある。せん断線方向のちがいがよつて切口面の形状はほとんど変わらなかつたので、図にはせん断線方向が異なるときの測定点を一緒に示してある。極めて高速の打抜きではだれが極度に小さくなることが知られている<sup>(11)</sup>が、Fig.10 からわかるように、本実験の最高歪速度においてわずかにだれが減少しはじめの程度である。また、Fig.11 が示すように、同じく最高歪速度でせん断面の高さがわずかに減少する。a, b, c 以外の諸量は、本実験の速度範囲では速度に関係なくそれぞれほぼ一定値を示した。一方、1~2.8 m/sec の速度で行なつた鋼板のアイゾット式衝撃せん断によつて得た切口面は、準静的にせん断した切口面の様子と変わらないという報告もある<sup>(12)</sup>。しかし、本実験によれば、切口面形状は約 3 m (本実験の最高せん断速度は 2.8 m/sec) 以上の速度になると、だれの減少で特徴づけられるような変化を示すようになる。

#### IV. 結 論

直線複刃せん断装置を用いて、0.14% C キルド鋼のうす板のせん断加工特性を  $1.1 \times 10^{-2} \sim 2.8 \times 10^4$  1/sec の広範な歪速度域で調べた結果、つぎのような結論を得た。

(1) せん断抵抗は、他の応力状態(引張り、圧縮、振り)

(11) C. Zener: *Fracturing of Metals*, ASM, (1948) p.3.

(12) 前田: 精密機械, 20(1954), 52.

下の変形抵抗と同じように、ある歪速度を境にして二つの歪速度依存性を示す。すなわち、高速度側では大きい依存性を、低速度側では極めて小さいそれをもつ。また、せん断抵抗はせん断歪速度の対数の増加 1 次関数でよく表わせる。

(2) せん断抵抗は、その絶対値ではうす肉中空丸棒を振つたときの最大せん断応力より小さいが、歪速度が増すにつれて最大せん断応力と同じように増加する。すなわち、せん断歪速度  $\dot{\gamma}$  が、 $\dot{\gamma} < 1$  1/sec の場合にはほとんど速度に関係なく一定値を示し、 $\dot{\gamma} > 1$  1/sec の場合には振りによつて得られる最大せん断応力と平行に変化する。

(3) 八面体せん断歪速度を等しくするようなせん断歪速度と引張り歪速度を互いに等価な歪速度であるという考えの下に、せん断抵抗と引張り強さの比を求めると、準静的変形では経験的に認められている 0.8 に近い値を示すが、高速変形になるとこの比はいくらか小さくなる。

(4) せん断切口面は、本実験の最高せん断速度 2.8 m/sec になるとわずかながらだれの減少で特徴づけられるような変化を示すが、それ以下の速度では切口面形状は速度に関係しない。

おわりに、本研究遂行当時本学卒業研究学生であり、現在それぞれプレス工業株式会社および村田機械株式会社勤務の石井誠一、菊地秀一両君は熱心に実験に協力された。また、株式会社日本製鋼所広島製作所長ならびに同所技術課長、本間猛郎氏には試料のご配慮をいただいた。以上の方々に深く御礼申し上げます。