

慣用工具による棒材のせん断加工

大森宮次郎*, 山崎 明*

(昭和58年9月6日受理)

Bar Cropping by Conventional Cutter

MIYAJIRO OHMORI* and AKIRA YAMAZAKI*

Abstract — This paper describes the effects of several factors in round bar cropping using a conventional tool apparatus on the shearing resistance and the geometrical properties of the cut end surface. One side or both sides cropping test for two commercial plain carbon steel bars and a commercially pure aluminum bar with each 9.5mm diameter was performed under the changing clearance to diameter ratios from 0 up to 11%.

The shearing resistance decreases gradually with the increase in clearance, whereas the average shearing resistance τ_s increases with the increase in the ultimate tensile strength σ_B , and the following linear equation has been derived;

$$\tau_s = A + B\sigma_B$$

where A and B are both constants.

Since the inclination angle between the cropped section and the normal cross section of the bar varies with the clearance, the cut end surfaces are perpendicular to the bar axis between 2 and 4% of the clearance to diameter ratio. Consequently, this clearance to diameter ratio may provide the proper value for round bar cropping.

The burnish depth and the shear droop are strongly related to the ductility of the bar, and the higher the ductility, the greater these properties.

Of course, the both sides cropping process has shown superior geometrical properties of the cut end surface in comparison with those of the one side cropping.

The effect of the clearance in the round bar cropping on the shearing resistance has been discussed employing a simple upper bound solution for a plane strain problem.

1. 緒 言

冷間加工用の素材取りには、帯鋸、丸鋸、砥石等を用い、切粉を排出しながら切断する方法とせん断力により切断する方法が用いられる。せん断による切断は、現今のように冷間加工品の量産という観点からは、生産性が高く、素材取りの重要な方法である¹⁾。しかしながら、せん断加工は、必然的に切口面に破断面が生成し、これが、

いわゆるせん断面と必ずしもなめらかに連続した面を形成せず、むしろ傾斜する傾向を示す。したがって、慣用工具による通常のせん断加工では、冷間鍛造等の際して座りの良い素材とは言いがたい。

そのため、座りがよく、棒材軸線と垂直な面をもち、しかも破断面の小さいせん断加工面を得るため、工具刃先周辺に静水圧応力を加えてせん断する方法が開発され、実用化されている²⁾。しかし、素材直径が小さく、素材長さが大きい場合には、軸方向の圧縮応力の付加によって

* 茨城大学工学部機械工学科 (日立市中成沢町)

座屈を起したりする恐れがあり、簡便な慣用工具によるせん断加工も見なおす必要があろう。

そこで本研究では、比較的直径の小さい棒材を用い、慣用工具によりせん断する場合のせん断加工に関する基礎的資料を得ることを目的として、せん断における重要パラメータであるクリアランス、せん断面の数、被せん断棒材の材質を変え、それらのせん断抵抗およびせん断加工面の幾何学的性質への影響を詳細に調査した。以下にその結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 せん断工具

片面および両面せん断実験ができるように、Fig. 1 に示すように中央に移動カッタ、その両側に固定カッタを配置し、ダイセット内に治めた。固定カッタは、内径 $D=10\text{mm}$ の丸穴カッタであり、移動カッタは、半径5mmの円弧をもつ半丸穴カッタである。工具材質は、ダイス鋼SKD11で、規定の熱処理を行い、ロックウエルかたさRc65を得ている。

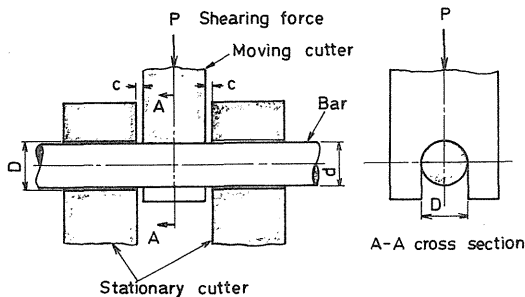


Fig. 1 Schematic diagram of cropping apparatus

2.2 実験材料

実験には、市販のアルミニウム、機械構造用炭素鋼 S15C および S45C の棒材 (直径10mm) を用いた。これらの棒材より、直径5mm、標点距離40mmの JIS 2号引張試片を製作し、その引張特性を測定した値を Table 1 に示す。

Table 1 Mechanical properties of materials used

Material	Ultimate tensile strength kg/mm ²	Elongation %	Reduction of area %
S 15 C	70.5	8.8	53.3
S 45 C	88.6	5.6	33.4
Al.	11.7	11.5	90.1

2.3 実験方法

実験には、荷重源として容量50tonの万能材料試験機を用い、速度2~5mm/minでせん断試験を行った。被せん断材と固定カッタ間に0.5mmの直径すき間を与えるため、被せん断材直径 d を9.5mmに切削した。固定カッタ側の材料把持方法は、自由支持とした。また、固定カッタおよび移動カッタ間のクリアランス c/d を0、5%および11%に変化させてせん断実験を行った。さらに、実験は、片面および両面せん断で行い、同一条件で4回繰り返した。

せん断切口面の幾何学的性質の測定に関しては、側面ならびに正面から接写した写真を引伸ばし、その写真上で測定した。また、加圧方向とその直交方向の直径のゆがみは、ノギスを用いて直接測定した。

3. 実験結果と検討

3.1 せん断荷重—ストローク曲線とせん断抵抗

Fig. 2 および 3 に相対せん断ストローク s/d (d : 材料直径) とせん断荷重の関係を示す。工具の押し込みとともにせん断荷重は急激に上昇し、アルミニウムでは、相対ストローク s/d が0.2~0.4の間で最高荷重に達し、最高荷重点付近のせん断荷重曲線は、比較的大きな丸味を帯び、さらにストロークの増加により下降する。軟鋼S15Cでは、ストローク s/d が0.2~0.3の範囲で最高荷重に達する。しかも荷重—ストローク曲線は、先端の尖った鋭い形状を示し、以後相対ストローク s/d の増加により急激に降下する。S45Cでは、さらに最高荷重点付近の曲線の形状が鋭くなる。また、相対クリアランス c/d が0%のせん断条件の場合、アルミニウム、鋼および片面および両面せん断を問わず、相対ストローク s/d 0.5以上の範囲に段がみられ、また相対ストローク s/d が約1.4程度の範囲までせん断荷重が存在する。これは、固定カッタ側材の二次せん断現象によるものである。

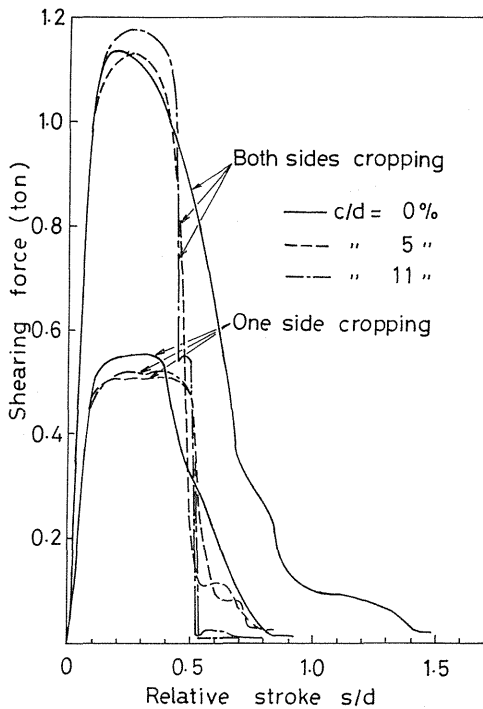


Fig. 2 Shearing force-relative stroke diagram of aluminum bar

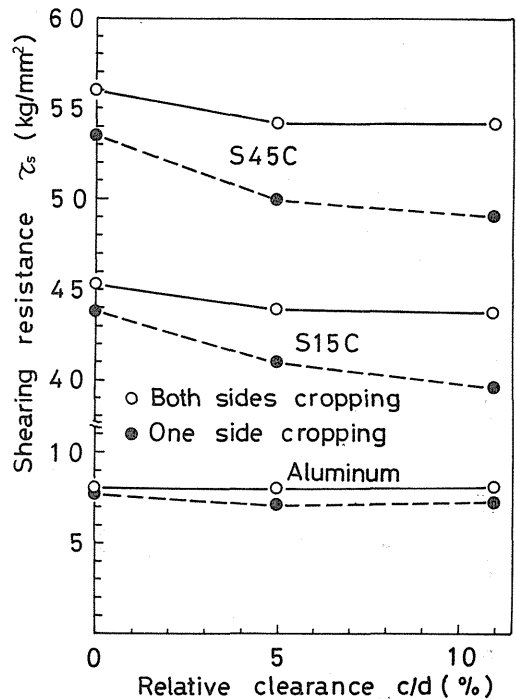


Fig. 4 Shearing resistance vs. relative clearance curves

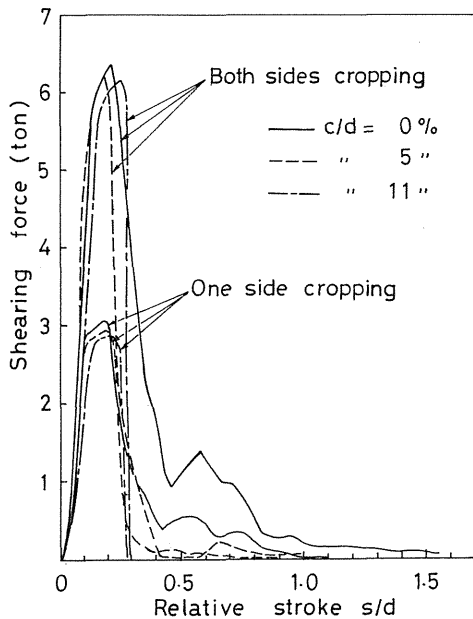


Fig. 3 Shearing force-relative stroke diagram of S15C steel

Fig. 4 は、最大せん断荷重 P_{max} を棒材の横断面積 F で除した公称せん断抵抗 τ_s 、すなわち

$$\tau_s = \frac{4P_{max}}{\pi d^2} \quad (1)$$

の相対クリアランス c/d による変化を両面および片面せん断について比較したものである。クリアランス c/d の増加により、せん断抵抗 τ_s が漸次低下し、その傾向は、鋼材で多少大きく、アルミニウムではほとんど低下しない。また、片面せん断の方が、両面せん断の場合よりもせん断抵抗 τ_s の値が低い。このようにクリアランス; 片面、両面等のせん断条件および被せん断材の材質により、せん断抵抗 τ_s は変化するが、被せん断材の引張強さ σ_B とせん断抵抗 τ_s の関係を描いたのが Fig. 5 である。両面せん断と片面せん断でわずかに相違が生じ、また、アルミニウムおよび鋼材でせん断抵抗 τ_s と引張強さ σ_B の関係は直線的となる。前述のように、両面せん断と片面せん断の場合とも、クリアランス c/d の相違によってせん断抵抗にわずかの差異が生ずるが、両場合をそれぞれ図に示す平均的な1本の直線で代表すると、せん断

抵抗 τ_s (kg/mm^2) と引張強さ σ_B (kg/mm^2) の関係は次式で与えられる。

$$\tau_s = A + B\sigma_B \quad (2)$$

ただし、 A, B はともに定数で、両面せん断に対し $A = 0.91(\text{kg}/\text{mm}^2)$, $B = 0.61$, 片面せん断に対しては $A = 0.75(\text{kg}/\text{mm}^2)$, $B = 0.57$ である。

なお、本実験結果では、せん断抵抗 τ_s の引張強さ σ_B に対する値 τ_s / σ_B は、57~69% であり、引張強さの大きい鋼材ほどその値が低くなるのが観察された。

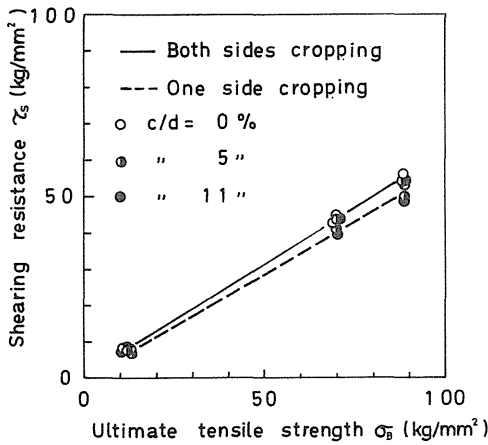


Fig. 5 Shearing resistance-ultimate tensile strength relation

3.2 せん断加工面の幾何学的性質

3.2.1 せん断加工面の傾斜

せん断加工面には、工具の押し込みによって形成されるだれ (shear droop), 工具によるせん断面 (burnish surface), 破断面 (fracture surface) およびかえり (burr) のそれぞれの部分が、ある割合をもって存在することはよく知られている³⁾。これらのうちで、次工程の冷間鍛造等の二次加工の際に、素材の鍛造型内への座りと密接でしかも重要な性質は、せん断加工面の傾斜であり、この傾斜は、工具によるせん断面と破断面によって定まる。本研究では、Fig. 6 の挿入図に示すように、だれとせん断面の接合点から棒材軸線に垂直に引いた面を基準面に定め、この面に対するせん断加工面の傾斜角を α として表わすことにした。両面せん断の場合、固定カッタおよび移動カッタ側とも、クリアランス c/d の増加とともに傾斜角 α が減少し、傾斜 0 を通り負の角と

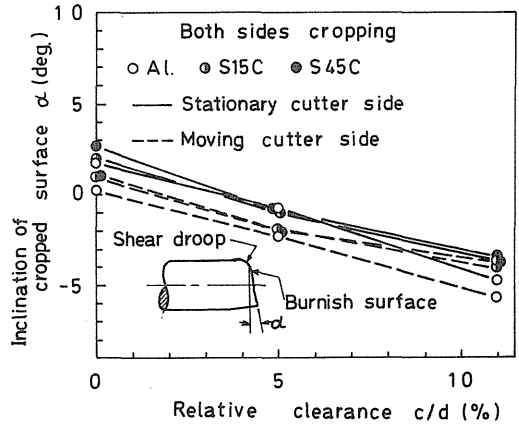


Fig. 6 Inclination angle of cropped surface as a function of relative clearance for both sides cropping

なる。また、両面せん断では、固定カッタ側および移動カッタ側で傾斜角に大差がない。片面せん断の場合、Fig. 7 にみられるように固定カッタ側のせん断面の傾斜角は、両面せん断の場合とほとんど同じであるが、移動カッタ側のせん断面の傾斜角は、軟質材ほど大きくなる傾向がみられる。すなわち、両面せん断および片面せん断の固定カッタ側では、せん断面の傾斜角は、クリアランスのみの影響を受け、材質の影響はあらわれないが、片面せん断の移動カッタ側では、傾斜角に見かけ上、被せん断材の材質の影響が、クリアランスの影響に重畳してあらわれる。これより、片面せん断、すなわち片持ばり形のせん断加工では、移動カッタ側のせん断面の傾斜が大となり、座りの悪い素材となることがわかる。片持ばり形のせん断加工では、せん断の進行とともに片持ばりの曲がりが増大し、それがせん断面形成に大きな影響を与える。このことは、片面せん断でも、切り落される側の棒材に曲がりを生じないような拘束を付加することも、せん断加工面の傾斜を改善する 1 手法となる⁴⁾ ことを示唆する。この点、両面せん断加工では、せん断荷重は、片面せん断の場合の 2 倍以上になるが、せん断加工面の傾斜の小さいことは有利である。

前述のように、クリアランス c/d の増加とともにせん断面の傾斜角 α が減少し、正から負の角へと単調に変化するので、両面せん断の場合、固定カッタ側ではクリアランス c/d が 3~4% の間で、また移動カッタ側では 1~2% の c/d の間で傾斜角 α が 0 となる。すなわち、

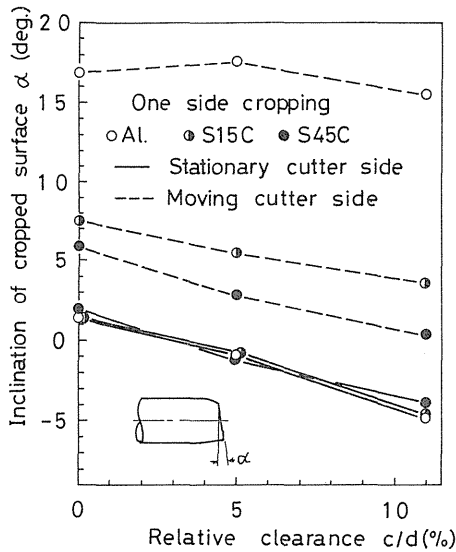


Fig. 7 Inclination angle of cropped surface as a function of relative clearance for one side cropping

せん断加工面が棒材軸線に垂直になる。また、片面せん断の場合、せん断加工面の傾斜が0となるのは、固定カッタ側で $c/d = 2.5 \sim 3.5\%$ の範囲であり、移動カッタ側では11%以上となり、これではせん断加工不能となる。このように、棒材のせん断加工では、せん断が可能で、その軸線に垂直なせん断面を得るには、クリアランス c/d を比較的小きな $2 \sim 4\%$ の範囲とすべきであることがわかる。

3.2.2 せん断加工面の直径のゆがみ

棒材の円筒母線に沿ってせん断力を加えることにより、せん断力方向の直径が縮み、それに直角方向の直径が伸びるが、せん断過程の末期では、せん断条件の相違によって、かえりが発生したり、またわずかに絞りが生じたりして、せん断加工面の直径のゆがみは、必ずしも単純ではない。ここでは、せん断方向の直径 d_1 とそれに直角方向の直径 d_2 を測定し、せん断面のゆがみを d_1 / d_2 (%) で表わすことにする。その結果をFig. 8および9に示す。これらの結果をみると、クリアランスの相違により、せん断面のゆがみ d_1 / d_2 の値は、傾向的变化を示さない。両面せん断では、 d_1 / d_2 の値は、本実験のクリアランスの範囲内で約95~98%であり、片面せん断では約89~110%の範囲となっている。少し詳細に調べると、両面せん断では、固定カッタ側のゆがみ d_1 / d_2 は、鋼ではクリアランスの影響をほとんど受けず、アルミニウムでは、クリアランスの増加にともない直径ゆがみが増し、

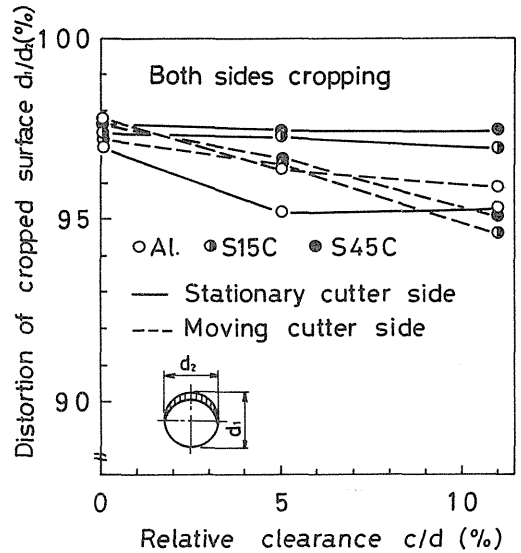


Fig. 8 Diametral distortion of cropped surface as a function of relative clearance for both sides cropping

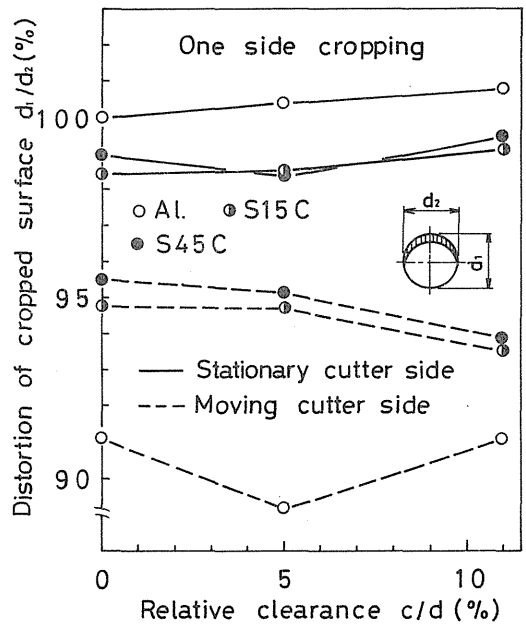


Fig. 9 Diametral distortion of cropped surface as a function of relative clearance for one side cropping

また、移動カッタ側のせん断面のゆがみ d_1 / d_2 もクリアランスの増加により、わずかに増す傾向がみられる。すなわち、固定カッタ側せん断面のゆがみ d_1 / d_2 は、材質の影響をわずかに受け、移動カッタ側では、むしろクリアランスの影響を大きく受ける。せん断面の直径ゆがみ d_1 / d_2 は、せん断条件と被せん断材の材質の両方の影響を受けることが推測される。片面せん断の場合、Fig.9にみられるように、せん断面の直径ゆがみ d_1 / d_2 が、被せん断材の材質およびせん断条件の両者の影響を受けていることが、明瞭にあらわれている。

3.2.3 せん断面の大きさ

せん断加工では、工具が材料中にある深さまで侵入すると、工具刃先付近より材料内にき裂が発生し、き裂の成長伝ばにより瞬時にして破断が起る。この場合、可能な限り工具を深く押し込み、できるだけ広いせん断面を形成させ、破断面を小さくするようにせん断条件を定めるのが、せん断加工面の傾斜を小さくする上で重要である。しかし、慣用工具を以ってしては、せん断面を増大させるせん断条件には限界があり、大半が破断面となる。この破断面は、き裂の伝ばによって形成されたものであり、その形状等は制御しがたく、クリアランスのみ適正にして、移動カッタおよび固定カッタの刃先付近から発生したき裂をうまく合致させる程度の制御しかなし得ない。したがって、慣用工具により棒材のせん断加工では、クリアランス等のせん断条件を変化させ、どの程度のせん断面大きさが得られるかを詳細に見きわめることが大切である。

Fig.10 および11は、せん断面の最大深さ a とせん断面のせん断方向の直径 d_1 に対する比 a/d_1 (%) で、せん断面の大きさを表わした結果を示したものである。アルミニウムでは、両面および片面せん断のいずれの場合も、大きなせん断面を形成するのに対し、鋼では、両面および片面せん断とも、固定カッタ側せん断面で、せん断深さが10%未満であることがわかる。すなわち、鋼では、せん断過程のきわめて早期にき裂が発生し、破断に至っていることになる。慣用工具せん断による破断面形成に対する制御のむずかしいことを明瞭に物語るものである。また、Fig.10 および11から明らかなように、せん断深さは、クリアランスの効果よりも材質の影響を強く受けることもわかる。

被せん断材の延性を表わす絞りとせん断深さの関係を示したのがFig.12 および13である。被せん断材の絞りの増加により、せん断面深さが放物線的に急激に増大する傾向を示し、このことは、大きなせん断面を得るため、

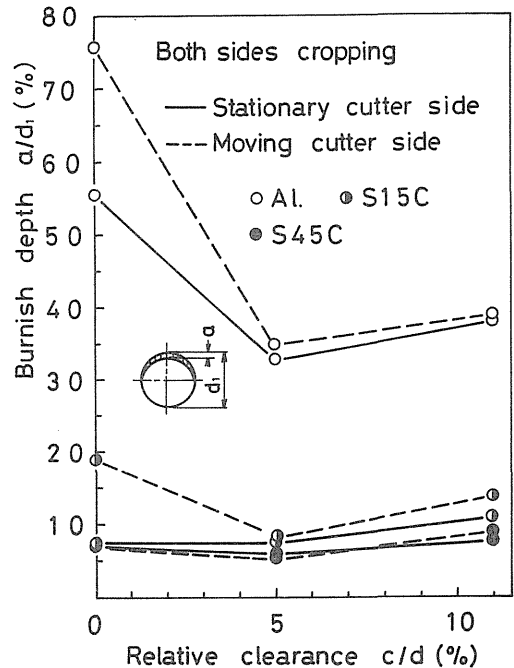


Fig. 10 Effect of relative clearance on burnish depth for both sides cropping

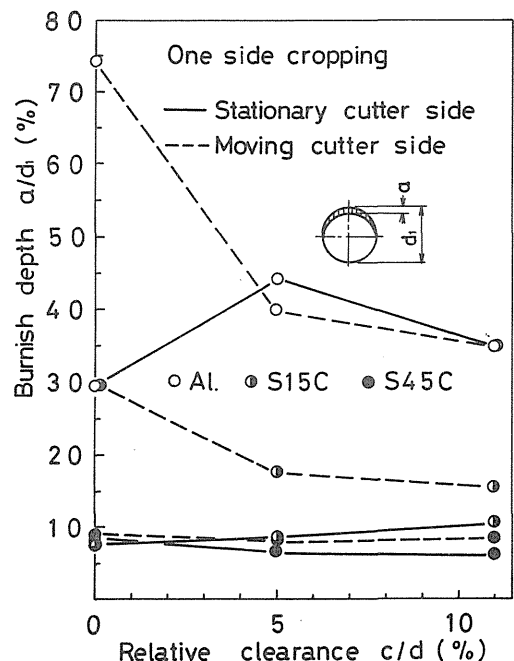


Fig. 11 Effect of relative clearance on burnish depth for one side cropping

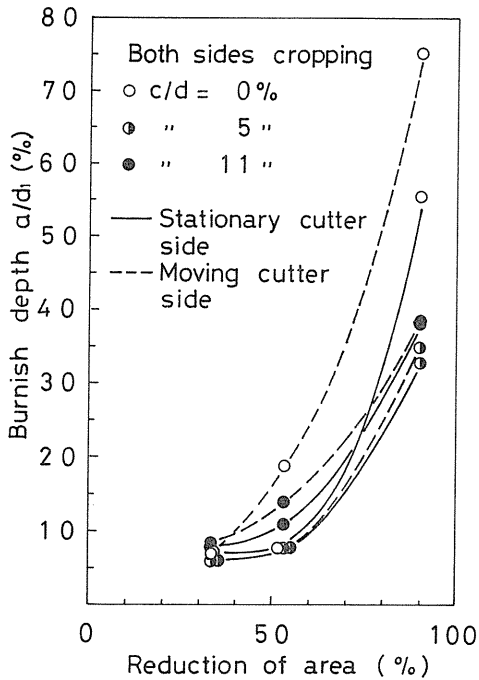


Fig. 12 Relation between burnish depth and reduction of area for both sides cropping

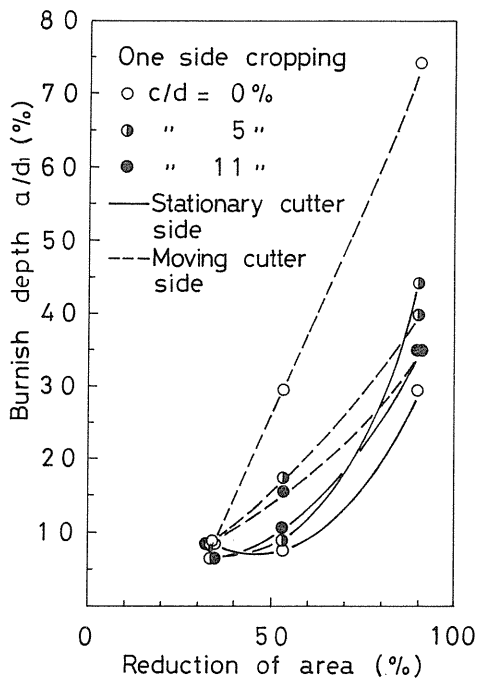


Fig. 13 Relation between burnish depth and reduction of area for one side cropping

工具刃先近傍に高い静水圧応力成分を加え²⁾たり、昇温⁵⁾によって被せん断材の延性を増す手法の根拠を与えるものであろう。

3.2.4 だれおよび工具圧印面

これらは、せん断面と言うよりも、被せん断材のせん断面近傍の棒材円筒外周面の形状変化であり、材料の塑性によるものであるが、せん断条件の影響も受けることが予想される。工具を材料に押し込むことによって、工具直下の円周面上に圧印部があらわれ、工具と接触せず、その工具直下の材料と連続する材料円周面上に工具押し込み初期に生ずる表面沈下がだれとなる。

Fig.14 および15に、クリアランスによるだれ h_1/d (d : 被せん断材直径) の変化を示す。両面せん断では、クリアランスの増加とともにだれがほぼ直線的に増大し、延性の高くなるS45C, S15C, アルミニウムの順にだれが大きくなる。片面せん断の場合、クリアランスの増加によるだれの増加は小さい。この結果からも明らかのように、だれは、せん断条件のクリアランスおよび被せん断材の延性に強く関与すると言えよう。

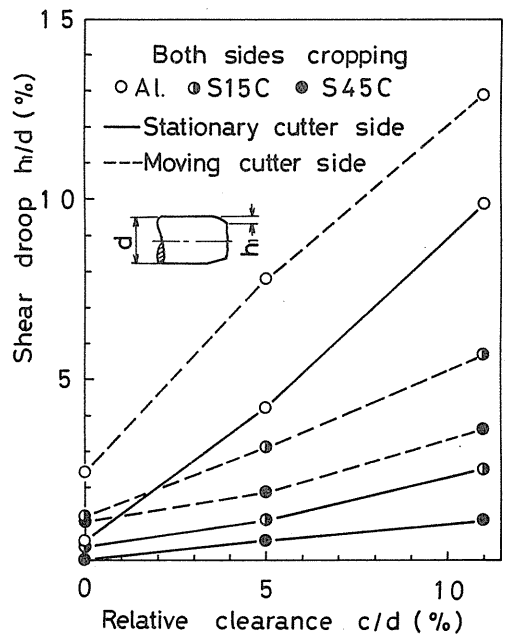


Fig. 14 Effect of relative clearance on shear droop for both sides cropping

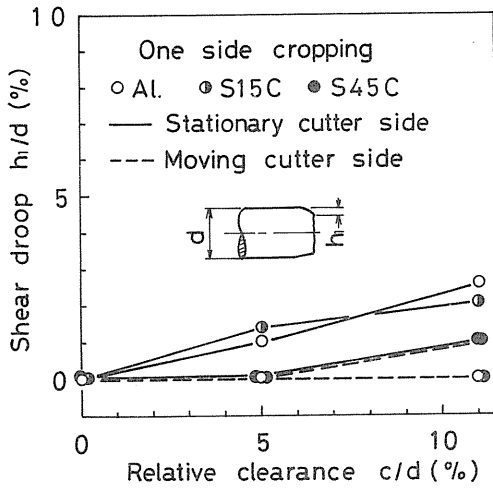


Fig. 15 Influence of relative clearance on shear droop for one side cropping

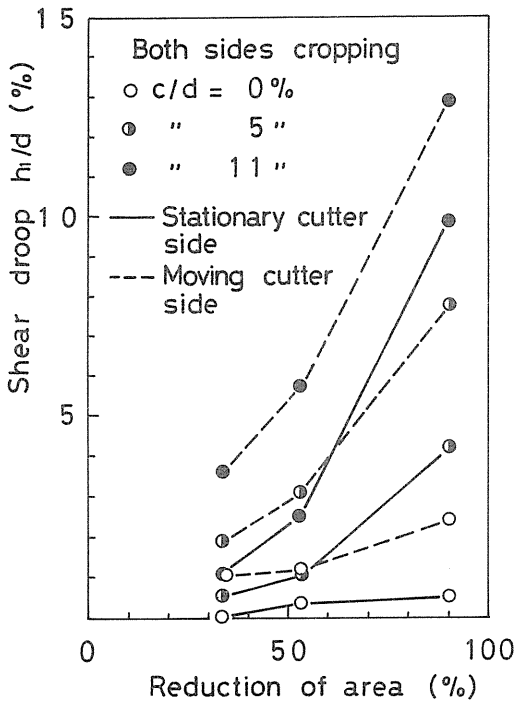


Fig. 16 Relation between shear droop and reduction of area for both sides cropping

Fig.16 は、両面せん断の場合の被せん断材の絞りとだれの関係を示したものである。被せん断材の延性増加にともない、だれが急激に大きくなる事がわかる。前述のように、延性の大きいアルミニウムでは、せん断面およびだれともに大きくなる事がわかる。せん断面を大きくし、だれを小さくするには、クリアランスをできるだけ小さくする必要のあることをFig.12, 13および16が示唆している。

次に、Fig.17および18に工具圧印面深さの変化を示す。両面せん断および片面せん断の固定カッタ側せん断面の圧印面深さ h_2/d は、2%未満の低い値を示し、移動カッタ側で h_2/d の値が5~18%と高い値を示す。また、前者の場合、クリアランスは、圧印面深さにほとんど影響しない。片面せん断で移動カッタ側せん断面の圧印面深さが、大きな値を示すのは、工具押し込みによって切り落される側の片持ばりの曲がりの増大によるものである。すなわち、クリアランスというせん断条件の相違によって圧印面深さの大きな値を示すのではなく、片持ばりの曲がりの増加という二次的な条件変化に起因するものと言えよう。

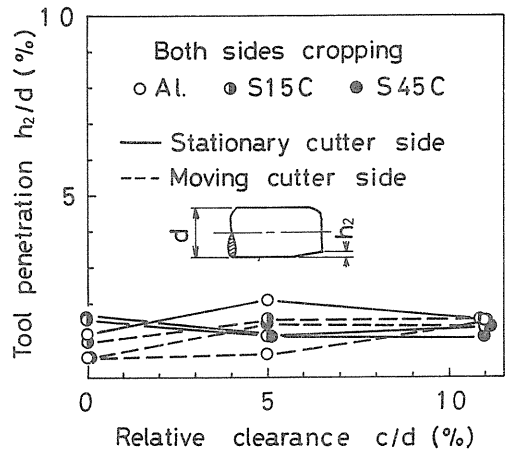


Fig. 17 Tool penetration as a function of relative clearance for both sides cropping

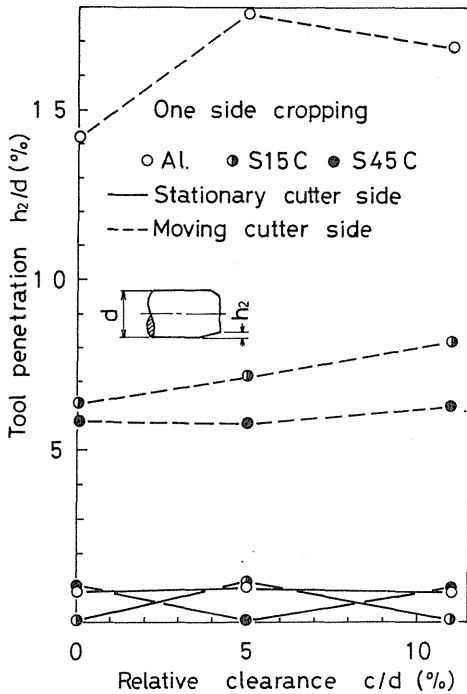


Fig. 18 Tool penetration as a function of relative clearance for one side cropping

以上より、せん断加工面の幾何学的性質のうち、せん断面の傾斜は、クリアランスの影響を受け、片面せん断では、せん断過程の進行による曲がりの発生によって、結果的に材質の影響があらわれる。すなわち、片面せん断でも曲がりの発生を拘束することによって、せん断面傾斜は、材質の影響を受けず、クリアランスのみの影響を受けることになる。換言すれば、せん断面傾斜を支配する因子は、クリアランスのみであると言えよう。

これに対し、せん断面の直径ゆがみ d_1 / d_2 は、クリアランスの影響をわずかに受けるとともに、被せん断の材質の影響も受ける。

次に、せん断深さ a / d_1 は、主として被せん断材の材質、特に延性の影響を強く受ける。また、だれ h_1 / d は、クリアランスおよび材料の延性の両者の影響を受け、圧印面深さ h_2 / d は、切り落される部分の曲がりが生じなければ、クリアランスの影響を受けず、ほぼ一定の 0 ~ 2% の範囲の値をとる。このことは、圧印面深さは、棒材のせん断加工では、ほとんど無視できることを意味する。

このほか、せん断加工面には、二次せん断面や棒材せん断の特徴である階段やかさぶた等の特色ある形状があら

われた。二次せん断面は、クリアランスが小さいほど多く発生し、階段やかさぶたは、アルミニウム材にはみられず、鋼材にのみわずかに観察された。

3.3 検 討

3.3.1 棒材せん断の適正クリアランス

丸棒材のせん断加工では、断面上の位置によってせん断高さが変化する点が、板材のせん断の場合と異なる。厚さ t の板材のせん断に対する相対クリアランス C_p / t の適正值を

$$a \leq C_p / t \leq b \tag{3}$$

で表わすとき、 $a = 6\%$ 、 $b = 12\%$ なる値が推奨される⁶⁾。いま、丸棒材のせん断加工において、棒材の断面中心、すなわち直径位置に対して C_b なるクリアランスを与えたとき、適正クリアランスとなる断面上の位置は、Fig.19

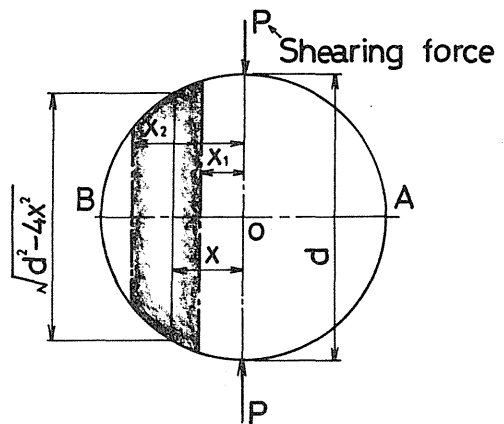


Fig. 19 Schematic representation of shearing height in circular section

および式 (3) より

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{2} \sqrt{d^2 - (C_b / a)^2} \leq x \\ &\leq x_2 = \frac{1}{2} \sqrt{d^2 - (C_b / a)^2} \end{aligned} \tag{4}$$

なる $x_1 \sim x_2$ の範囲となる。ここで、棒材の断面中心、すなわち直径位置における適正相対クリアランスを e とすれば、 $e = C_b / d$ であるから、式 (4) は

$$\frac{d}{2} \sqrt{1 - (e/a)^2} \leq x \leq \frac{d}{2} \sqrt{1 - (e/b)^2} \tag{5}$$

となる。 x は実数だから

$$1 - (e/a)^2 \geq 0 \text{ および } 1 - (e/b)^2 \geq 0$$

が成立せねばならないから、小さな値 a をとると

$$e \leq a \tag{6}$$

が得られる。すなわち、丸棒材直径に関して与えた丸棒材せん断に対する適正相対クリアランスは、板材に対する適正相対クリアランスの最小値より小さい。本実験結果では、前述のように $e \div 2 \sim 4\%$ であり、 $a \div 6\%$ であるから式 (6) を満たしている。

上述のように、丸棒のせん断加工では、断面上の位置によって、せん断高さが異なるので、一定の固定したクリアランスの値では、断面全体で適正クリアランスとならない。断面上の各位置で適正クリアランスとするには、クリアランスを断面位置 x の関数として変化させる必要がある。Fig.19 において、中心より x の位置のクリアランスを C とし、適正クリアランスを e とすれば、

$$\frac{C}{\sqrt{d^2 - 4x^2}} = e \tag{7}$$

が成り立ち、変形すると

$$\frac{C^2}{(ed)^2} + \frac{x^2}{(d/2)^2} = 1 \tag{8}$$

となる。すなわち、棒材中心における $C = ed$ なるクリアランスから外周で 0 となるように、式 (8) にしたがう楕円形で表わされるクリアランスを与えればよいことがわかる。

3.3.2 上界解によるせん断抵抗へのクリアランスの影響に関する簡単な考察

丸棒材のせん断加工では、前述のように断面の位置によってせん断高さが異なり、一定のクリアランスを与えた場合、Fig.19 の A, B 点では、相対クリアランスが無限大となり、せん断不能になることが考えられる。このように、丸棒材のせん断過程は複雑となるが、上界法の適用にあたって、その簡便さを失わないようにするため、丸棒を長方形断面におきかえ、平面ひずみ変形を仮定した方が扱いやすい。一定のクリアランスを与えた場合、前述のように、適正クリアランスとなる x の位置までの 2 倍の幅をもつ長方形断面に換算する方が適切かも知れないが、ここでは簡単にするため、高さ d 、幅 $\pi d / 4$ の長方形断面に換算する。このようにすると、面積は円断面と同じであり、中心位置における相対クリアランス c/d を用いることができる利点がある。このような長方形断面に換算し、せん断の各段階で平面ひずみ変形を仮定する

Fig.20 にせん断過程の任意段階を示す⁶⁾。 s はストロークである。いま、AB, BC なる 2 本の速度不連続を仮定し、移動工具 (ポンチ) が速度 1 で下降するとし、AB, BC 上での降伏せん断応力を k 、AC 面上の摩擦応力を

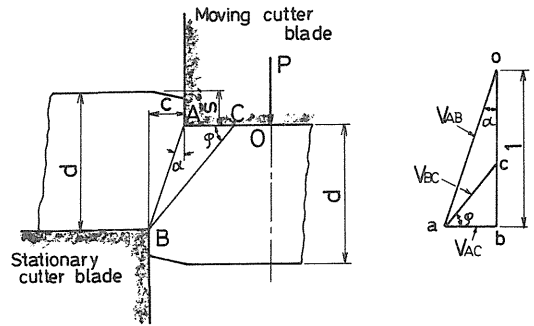


Fig. 20 Shearing process for plane strain cropping and hodograph

mk ($0 \leq m \leq 1$) と仮定して上界定理を適用すると、せん断荷重 P は、図の諸量を用いて次のように表わされる。

$$P = k \left\{ \frac{(d-s)^2 + C^2(1-m)}{d-s} + C(m \cot \phi + \sec \phi \times \operatorname{cosec} \phi) \right\} \frac{\pi}{4} d \tag{9}$$

P は片刃あたりのせん断荷重である。これは、理想的なせん断過程に対する結果であり、被せん断材の曲がりなど考慮されていない。ここで $dP/d\phi = 0$ より $\tan \phi = \sqrt{1+m}$ が得られ、これを用いると、公称せん断応力 τ は

$$\tau = k \left\{ 1 - \frac{s}{d} + (1-m) \left(\frac{c}{d} \right)^2 \times \frac{1}{1-s/d} + 2\sqrt{1+m} \times \frac{c}{d} \right\} \tag{10}$$

で表わされる。

材料の応力-ひずみ曲線を次式のように仮定する。

$$\begin{cases} k = Fr^n & (r < r_0 = 9) \\ k = \nu F & (r > r_0) \end{cases} \tag{11}$$

ただし、 r はせん断ひずみ、 F 、 ν および n は定数である。せん断加工では、 $r = s/c$ であり、また $1/(1-s/d) \div 1+s/d$ で近似すると、式 (10) は、

$$\tau = F \left(\frac{s}{c} \right)^n \left\{ 1 - \frac{s}{d} + (1-m) \left(1 + \frac{s}{d} \right) + 2\sqrt{1+m} \times \frac{c}{d} \right\} \tag{12}$$

となる。この τ は

$$\frac{s}{d} = \frac{n}{n+1} \times \frac{1+2\sqrt{1+m} \times \frac{c}{d} + (1-m) \left(\frac{c}{d}\right)^2}{1 - (1-m) \left(\frac{c}{d}\right)^2} \quad (13)$$

のとき極大となる。 τ の極大値がせん断抵抗 τ_s であるから、応力-ひずみ曲線が式(11)の第1式の範囲では、

$$\tau_s = \frac{F}{(c/d)^2} \times \frac{n^n}{(n+1)^{n+1}} \times \frac{\left\{1+2\sqrt{1+m} \times \frac{c}{d} + (1-m) \left(\frac{c}{d}\right)^2\right\}^{n+1}}{\left\{1 - (1-m) \left(\frac{c}{d}\right)^2\right\}^n} \quad (14)$$

で与えられ、応力-ひずみ曲線が、式(11)の第2式の場合、

$$\tau_s = \nu F \frac{1+2\sqrt{1+m} \times \frac{c}{d} + (1-m) \left(\frac{c}{d}\right)^2}{n+1} \quad (15)$$

で与えられる。

Fig. 21に式(14), (15)を用いて計算したせん断抵抗 τ_s/F と相対クリアランス c/d の関係を示す。ただし、 $n=0.10$ のとき $\nu=1.25$, $n=0.20$ のとき $\nu=1.55$, $n=0.25$ のとき $\nu=1.74$ として計算してある。 m, n の相違によるせん断抵抗 τ_s/F への相対クリアランス c/d の効果の異なる模様がよくあらわれている。 n が小さい場合、せん断抵抗 τ_s/F は、相対クリアランス c/d の影響が小さく、 n の大きい場合、相対クリアランス c/d の増加によってせん断抵抗 τ_s/F が徐々に降下する。この傾向は、Fig. 4に示す実験結果と類似することがわかる。

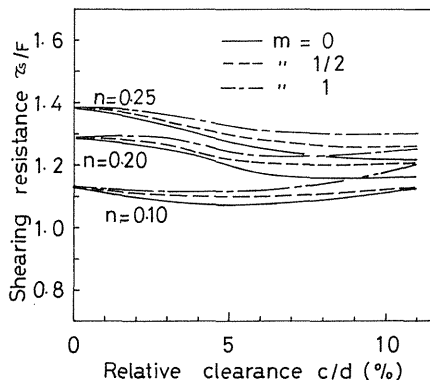


Fig. 21 Shearing resistance-relative clearance relation calculated from the upper bound solution for Fig. 20

4. 結 論

丸穴および半丸穴をもつ慣用工具により丸棒材のせん断加工を行い、せん断抵抗、せん断加工面の形状特性におよぼす被せん断材の材質、クリアランス、両面、片面せん断等の影響を調査してきた。得られたおもな結果をまとめると、次のようになる。

- (1) せん断抵抗は、クリアランスおよび片面、両面せん断によってその影響を受け、クリアランスの増加により、せん断抵抗がわずかに低下する。片面せん断では、クリアランスの増加にともなうせん断抵抗の低下度合いが大きい。
- (2) せん断抵抗 τ_s は、引張強さ σ_B とともに次の直線関係で増加する。

$$\tau_s = A + B\sigma_B \quad (\text{kg/mm}^2)$$

ただし、 A, B は定数である。

- (3) 上界解を用いてせん断抵抗へのクリアランス、被せん断材の材質の影響を考察し、実験結果と類似の傾向が得られた。
- (4) せん断加工面の傾斜は、クリアランスとともに変化するが、棒材軸線と直交するせん断加工面が得られる適正クリアランス c/d は、約2~4%の範囲となった。
- (5) 工具せん断面深さは、クリアランスの影響をわずかに受けるが、被せん断材の延性の影響を強く受け、延性の大きい材料ほど、せん断深さが大となる。
- (6) 工具押込みによるだれは、クリアランスとともにわずかに増加するが、被せん断材の延性の影響も強く受け、延性の大きい材料ほど大きなだれを生ずる。

なお、せん断加工面の上記特性は、片面せん断の場合よりも、両面せん断の場合の方が優れていることは言うまでもない。

参 考 文 献

- 1) 田村, 機械技術研究所報告, 97 (1978), 32.
- 2) 中川, 前田, 宮本, 生産研究, 22-9 (1970), 384.
- 3) たとえば, 鈴木, 塑性加工, 改訂22版, 裳華房 (1980), 222.
- 4) 中川, 工藤, 田村, 塑性と加工, 24-271(1983), 830.
- 5) 中川, 鈴木, 大川, 生産研究, 31-1 (1979), 29.
- 6) たとえば, 葉山, 塑性学と塑性加工, 第2版, オーム社 (1982), 197.