金属表面にV形溝を切りくず無しにつける

過程について (第1報)*

——くさび形およびそろばん玉形剛体の垂直方向押込み——

工藤 英明**, 田村 清**

On the Process of Forming V-shaped Groove on Metal Surface (Ist Report)

——Indentation of Wedge-and Abacus' bead-shaped Rigid Body——

Hideaki KUDO, Kiyoshi TAMURA

The process of forming of a single groove by a rigid body is considered as a simplified model for the deformations that occur in thread rolling, knurling, chipless ruling, grinding and processes of friction and wear.

In the first report, plane strain indentation by a wedge- and semi-plane strain indentation by an abacus' bead-shaped rigid body on to the surface of a semi-infinite rigid-perfect plastic body are analyzed using the energy method. The indentation force and piled up shape of the specimen surface are obtained. They are compared with experimental results obtained for cold-rolled copper plates and show a good coincidence.

1. 緒 言

本研究は半無限体の表面に固定または回転剛体刃によってV形断面をもつ溝を切りくずなしに成形する過程の理論および実験的研究である。このような過程はねじの転造、ローレット加工、非切削刻線加工¹⁾、砥粒加工(砥粒の角が鋭くない場合)および固体接触面における摩擦、摩耗現象などの素過程あるいは単純化されたモデルの一つと考えることができる。それ故、このV形溝成形における成形用剛体の形式と形状、摩擦条件が剛体刃に対する垂直および接線反力と材料の変形状態に及ぼす影響を調べることは、上述の諸現象の解明に必要な何らかの基礎的知識を与えるであろう。これが本研究の第1の目的である。

本研究の目的の第2は上記の諸現象にさらに接近する、すなわち、より近いモデルを見出すのに必要な解析手段の開発である。すなわち、この単純なV形断面溝の成形問題を取上げて解析および実験結果を比較することにより、考案された解析手段の信頼性と有効度を検証できれば、この手段をもちいてさらに複雑な過程の解明に自信をもって取りかかることができる。

本研究で対象としたV形溝付け用剛体刃の形式と成形方式は

- (i) くさび形剛体刃による平面ひずみ押込み (図1(a))
- (ii) そろばん玉形剛体の押込み (図1(b))

(iii) くさび形剛体刃の斜方向押込み (図1(c))

(iv) 稜線傾斜くさび形剛体による引っかかり (図1(d))

(v) そろばん玉形自由回転剛体による引っかかり

(図1(e))

(vi) そろばん玉形非回転剛体による引っかかり (図1(f))である。(i)に関しては剛完全塑性体材料に対する正しい解がすべり線場法によってすでに解かれている。本研究の解析に用いたエネルギー法の信頼性は同法による解析結果と上記厳密解とを比較することによって確かめるこ

図1 V形溝付け成形様式

*原稿受付 昭和42年12月25日。昭和42年度春季大会学術講演会(昭和42年4月日)にて発表。

**正会員 横浜国立大学工学部(横浜市区大岡町702)

とができる。また加工硬化した金属を用いて得られた平面ひずみ押込み圧力の実測値と理論値の比較によって剛体刃と材料間の摩擦抵抗を実験的に定めることができる。

(ii) のそろばん玉形剛体刃の押込みにおいては変形はもはや厳密には平面ひずみでなく、V溝底にそって押込み深さが異なる。しかし、この状態を平面ひずみ変形要素の算術的総和と考えれば、このことは簡単になる。このような考えによる解析結果と実験値の比較によって、準平面ひずみの変形に対する本解析法の当否が確かめられる。

(iii) 以下においては剛体刃と材料の間には刃の稜線ないし溝底線方向に大なり小なりのすべりが生じる。そのため材料の変形部分は溝底線方向にも流れる。このような場合には(i) (ii)に用いた平面ひずみ変形モデルを3次元的に修正しなければならない。(iii)の問題においては変形状態は溝底線方向に一樣であるが、本問題は前述の修正されたモデルに基づく計算結果と実験結果を比較することにより、解析方法の有効性を調べるために取上げた。(iv) (v) (vi)においては変形は溝底線方向に一樣でもないし、また材料の同方向への流れも起こっている。

本第1報においては前述の(i)と(ii)に関する結果を報告する。

2. 試 験 材 料

2.1 試験材料の準備

本実験に使用した材料は加工硬化による解析の困難さを避けるために完全塑性体に近似できるように大きな圧下率(60%)で冷間圧延した銅板(厚さ:17mm,成分:銅99.89%)を使用した。圧延表面を2mmだけフライスで削り取って厚さ15mmにし、実験に使用する面はエメリーペーパー(2000メッシュ)で仕上げた。

材料表面の各部分のビッカースかたさを試験荷重を変えて測った結果を表1に示す。低荷重ではかたさが高くばらついているが、高荷重になると一定値に収れんしている。材料は表面に薄い加工硬化層があるが全体として均質であることがわかる。

冷間圧延材であるから繊維組織をもっているが、本研究における実験ではつねにV形溝が繊維方向に直角となるようにした。しかし、繊維方向に平行に溝をつけた2,3の実験でも直角の場合と差はほとんど認められなかった。このことは田村・工藤²⁾の研究結果と一致している。

押込みが半無限体に対すると同様な条件の下でおこなわれるように、D.S. Dugdale³⁾の実験結果を参考にして

表1 試験片の硬度試験

測定荷重 (kg)	測定回数	ビッカース硬度 (kg/mm ²)		
		最大値	最小値	平均値
1	6	123	115	119
5	8	119	110	114
20	11	113	110	111
50	5	110	109	110

図2 実験材料の $\bar{k}-\epsilon$ 関係

試験片寸法を決定した。すなわち、押込み深さは板厚の20%以下になるようにし、また溝の縁と板の縁の間隔は4倍、溝と溝の間隔は2倍以上になるようにした。

2.2 平面ひずみ圧縮試験

試験材料が完全塑性体に近似できるかどうかを調べ、また材料のせん断降伏応力 $\bar{k}$ を定めるために材料の平面ひずみ圧縮試験をおこなった。この試験片の幅は30mm、長さは20mmとし、幅方向の伸びを剛体壁によって拘束した。圧縮板、拘束壁面と試験片間の摩擦の影響を無くするために潤滑剤にラードを使用した。圧縮荷重を途中で止めて、試験片の形状修正をした後に潤滑剤をつけ直して圧縮するいわゆる繰返し圧縮をおこない、図2の応力-ひずみ曲線を得た。この曲線から試験材料をせん断降伏応力 $\bar{k}=19.2\text{kg/mm}^2$ (図中鎖線)の完全塑性体と近似してもたいした誤りでないことがわかる。

3. くさび形剛体刃による押込み

3.1 実験

以後の解析に用いるエネルギー解法の正当性を確かめるために平面ひずみくさび押込みの実験を、ダイセットおよびリーレ型50t油圧式万能試験機を使用してくさびが試験片に垂直に押込まれるようにしておこなった。実験に使用したくさび角は45°と90°の2種類である。

押込みの際、くさびと試験片の摩擦条件を一定にする

図3 くさび形剛体刃による平面ひずみ
押込み荷重と押込み深さの関係

ために、押込みごとにくさびと試験片をエメリーペーパーでみがいた後にベンジンで油をふきとった、いわゆる無潤滑状態で実験をおこなった。なお、押込み速度は約1〔mm/min〕にし、荷重は試験機から、また押込み深さはダイヤセットに取付けたダイヤルゲージの読み（弾性変形を補正）から定めた。図3に押込み荷重と試験片のものの表面から測った押込み深さの関係を示す。

3.2 エネルギ法

くさび形刃の平面ひずみ押込みは擬定常変形の一つであり、種々のくさび角度 2φ および摩擦係数 μ に対して平均押込み圧力と k の比はすべり線場理論によってすでに求められている。本節においては後述の非平面ひずみ変形への応用も考えて、比較的単純な変形様式を仮定し、エネルギー法によって押込み圧力および表面盛りりの計算をし、これが上述のすべり線場解にどのくらい近似するかを調べる。

使用する変形様式はいわゆる動的可容⁹⁾、すなわち与えられた表面速度の条件と材料の密度一定の条件を満足しなくてはならないが、現在の問題に対してはさらに平面ひずみ変形および擬定常変形という条件が加わる。本研究においてはこのような条件を満たす変形様式の中で最も簡単なものとして、従来この種の解析にしばしば用いられている変形域を何個かの剛体三角形領域に分け、それらの境界におけるすべりによって変形が起こると考えるものである。

微小変形問題で接触面上における摩擦が摩擦応力の形（もしくは k との比の形）で与えられている場合には、仮定された任意動的可容変形の場合から計算されるエネルギー消費量ないし変形荷重は正しいそれらの値より決して

図4 くさび押込みの塑性変形領域とホドグラフ

低くないという上界定理が存在する⁹⁾。したがって、この三角形領域の形を外部剛体の単位前進量当りのエネルギー消費量ができるだけ低くなるように選択すれば、そのときの押込み荷重は正しい値に近くなるはずである。

今の押込みの問題にもこの方法を適用するのであるが、この場合材料表面の有限量の盛りりがある、表面形状はあらかじめわかっていない、そのためこの上界定理を適用できない。しかし、著者はこの本法をあえて使用し、正しい解と比較することによってその正当性を調べることにした。このため本法を上界接近法とは呼ばず、エネルギー法と称しておく。したがって仮定した変形様式に対しても厳密解および実験観察結果と一致させて、材料表面の盛りり部は直線的であり、かつ凹み部は剛体刃と全面的に接触するという条件を課した*。それによって変形様式をできるだけ現実のものに近づけ、正しい解に近い答えが得られるようにした。

図4において、くさびを微小量 δ だけ試験片に食込ませた時の二つの剛体三角形の移動方向および移動量は図4(b)のホドグラフによって表わされる。くさびを δ だけ食込ませるために必要な紙面に垂直な方向の単位厚さ当りのエネルギー δW は、ab, ad, bd, be を三角形境界の面積、 $\overline{TA}$, $\overline{AW}$, $\overline{AB}$, $\overline{TB}$ はそれらの境界上の相対すべり量であるから

$$\begin{aligned} \frac{\delta W}{2} &= k \times ab \times \overline{TA} + \tau \times ad \times \overline{AW} + k \times bd \times \overline{AB} \\ &\quad + k \times be \times \overline{TB} \\ &= k \times \frac{h \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \times \frac{\delta \sin \varphi}{\sin \beta} + \tau \times \frac{h \delta \sin(\varphi + \beta)}{\sin \beta} \\ &\quad + k \times \frac{h \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \\ &\quad \times \frac{\delta \sin \varphi \times \sin\{(\alpha + \beta) - \angle dbe\} \sqrt{D}}{l \sin \beta \cdot \sin(\gamma - \alpha)} \\ &\quad + k \times \sqrt{D} \times \frac{\delta \sin \varphi \times \sin(\alpha + \beta) \times \sqrt{D}}{l \sin \beta \sin(\gamma - \alpha)} \quad (1) \end{aligned}$$

* できるだけ低い押込み荷重を与える変形様式ということだけでは、材料がくさび形刃と先端の一部のみで接し、凹みの斜面はくさび面から離れて摩擦仕事を消費しないという（非現実的な）ものが最も低い荷重を与えるであろう。

のように表わされる。ここで

- k : 材料のせん断降伏応力
- τ : くさびと試験片の摩擦応力
- l : リップの長さ
- h : 材料と刃面の接触長さ
- φ : くさびの半角
- α, β, γ : 三角形の角度

$$D \equiv \left\{ \frac{h \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right\}^2 + l^2 - 2lh \frac{\sin \beta \cos(\gamma - \alpha)}{\sin(\alpha + \beta)}$$

一方、幾何学的条件およびくさびを押込む前の試験片表面以下に生じるくぼみの容積と盛上った体積が等しいという条件から

$$C^2 \times \tan \varphi = \left(h - \frac{C}{\cos \varphi} \right) \times l \sin \gamma \quad (2)$$

ここで、

C : 試験片のものと表面から測った押込み深さ

なる関係が導かれる。そこで、 α, β, γ 中 α, β を独立変数とすれば、まず γ を決めると、つぎに $h/c, l/c$ が定まり、 δW が計算できる。計算にあたっては日本電気(株)製の電子計算機を用いて、いろいろな α, β の値および(2)式を満足させる γ の値を代入し、 δW の極小値から押込み圧力を、また δW を極小とするような α, β, γ の値から表面の盛上り形状を定めた。

3.3 エネルギー法の結果とすべり線場理論解との比較

$2\varphi = 45^\circ, 90^\circ$ のくさびについて、 $\tau = 0.0k, 0.35k, 0.5k, 0.6k, 0.7k, 0.8k, 1.0k$ の7種類の値を代入してそれぞれについて δW が最小となる塑性変形領域 oe/c を定めた。そして最小エネルギーから無次元化押込み圧力 L/kc (L は紙面に垂直な単位厚さ当りの荷重) とくさび面に作用する平均面圧が計算され、また接触面にクーロン摩擦が働くことと仮定すれば、くさびと試験片間の平均摩擦係数 μ が求まる。その結果を表2に示す。

同じ問題についてすべり線場理論から得られた結果を表3に示す。この二つの表より、両者はかなり良く一致す

ることがわかった。さらに、今の場合エネルギー法による押込み圧力はつねにすべり線場法による値より多少高い。

3.4 摩擦応力の決定

本試験条件の下におけるくさび押込みにおける刃と試験片間の摩擦応力を決定するために、押込み圧力と盛上り比 (材料が盛上りを起こし始めた点から凹み中心までの距離に対する押込み深さの比、図4の oe/c) について測定と計算値 (エネルギー法) を比較すれば良い。実験結果を表4に示す。

この結果、くさび角が 90° および 45° の場合の実験値は $\tau = 0.7k$ とした時の計算値にかなり良く一致しているので、摩擦応力を $0.7k$ と決めることができる。*

表2 くさび形剛体刃による平面ひずみ押込み問題のエネルギー法による解析結果

くさび角	摩擦応力	α	β	エネルギー	面圧	摩擦係数	押込み圧	盛上り比
2φ	τ			$\delta W/2$	q	$\mu = \tau/q$	L/kc	oe/c
90°	$1.0k$	48°	60°	$3.55h\delta k$	$4.01k$	0.25	13.5	4.00
	$0.8k$	52°	60°	$3.33h\delta k$	$3.90k$	0.21	12.8	3.80
	$0.7k$	56°	58°	$3.22h\delta k$	$3.84k$	0.18	12.4	3.90
	$0.6k$	58°	54°	$3.10h\delta k$	$3.79k$	0.16	12.0	3.75
	$0.5k$	60°	52°	$2.97h\delta k$	$3.70k$	0.14	11.6	3.70
	$0.35k$	60°	50°	$2.78h\delta k$	$3.58k$	0.10	11.0	3.70
	0.0	60°	46°	$2.32h\delta k$	$3.28k$	0.00	9.4	3.30
45°	$1.0k$	40°	68°	$2.15h\delta k$	$3.25k$	0.31	5.73	2.40
	$0.8k$	42°	64°	$1.93h\delta k$	$3.11k$	0.26	5.15	2.15
	$0.7k$	46°	58°	$1.80h\delta k$	$3.07k$	0.23	4.88	2.10
	$0.6k$	46°	58°	$1.70h\delta k$	$3.00k$	0.20	4.57	2.10
	$0.5k$	46°	58°	$1.58h\delta k$	$2.92k$	0.17	4.29	2.15
	$0.35k$	46°	58°	$1.41h\delta k$	$2.84k$	0.12	3.88	1.95
	0.0	48°	52°	$1.00h\delta k$	$2.61k$	0.00	2.79	1.85

表3 くさび形剛体刃による平面ひずみ押込み問題のすべり線場理論による解析結果

くさび角	摩擦応力	エネルギー	面圧	摩擦係数	押込み圧	盛上り比
2φ	τ	$\delta W/2$	q	$\mu = \tau/q$	L/kc	oe/c
90°	$1.0k$	$3.46h\delta k$	$3.93k$	0.26	13.1	3.99
	$0.8k$	$3.27h\delta k$	$3.82k$	0.21	12.5	3.87
	$0.7k$	$3.16h\delta k$	$3.79k$	0.18	12.2	3.82
	$0.6k$	$3.06h\delta k$	$3.72k$	0.16	11.8	3.72
	$0.5k$	$2.96h\delta k$	$3.65k$	0.14	11.5	3.69
	$0.35k$	$2.76h\delta k$	$3.55k$	0.10	10.9	3.64
	0.0	$2.22h\delta k$	$3.14k$	0.00	9.0	3.37
45°	$1.0k$	$2.10h\delta k$	$3.14k$	0.32	5.50	2.34
	$0.8k$	$1.91h\delta k$	$3.07k$	0.26	5.10	2.26
	$0.7k$	$1.80h\delta k$	$3.01k$	0.23	4.82	2.21
	$0.6k$	$1.68h\delta k$	$2.95k$	0.20	4.51	2.18
	$0.5k$	$1.56h\delta k$	$2.88k$	0.17	4.24	2.14
	$0.35k$	$1.39h\delta k$	$2.78k$	0.13	3.80	2.07
	0.0	$0.89h\delta k$	$2.31k$	0.00	2.42	1.88

表 4 くさび形剛体刃の押込みの実験結果

くさび角	押込み圧力 L/kc	盛りり比 oe/c
90°	12.4	3.9
45°	4.8	2.2

図 5 そろばん玉形剛体の押込み

4. そろばん玉形剛体の押込み

4.1 実験方法

くさび押込みに使用したダイセットに治具をつけ、そろばん玉形剛体が取付けられるようにして、前述の硬化銅試験片に対して押込み実験をおこなった。剛体刃の頂角、潤滑条件および押込み速度は前の場合と同じである。

4.2 実験結果

そろばん玉形剛体を最大深さ c まで試験片に押込んだ状態を図5に示す。この場合はくさび形剛体を押込んだ時とは異なり、押込み深さが場所によりゆるやかに変化する非平面ひずみ、非擬定常問題となる。この問題に対し、いままでの平面ひずみくさび押込みのモデルを利用するために次のような仮定をもうけてこの問題を解析した。

仮定(1) 図5のごとく押込みをおこなっている部分のそろばん玉形剛体および材料を x 方向に20等分して、それぞれの要素の一つがくさび押込みと同じ平面ひずみ変形をするとみなす。そして、これらの要素間の影響を無視して個々の要素は独立にエネルギー最小の変形を行なうものとする。

仮定(2) そろばん玉形剛体を押込んだ時、材料は垂直方向に盛り上がるものとする。この仮定は押込み深さが比較的小さく、刃の稜線と試験片との接触角度が最大で 30° となる本実験ではほぼ満足されるものと思われる。表面に線を引いた試験片に対するそろばん玉形剛体の押込みにおいて、材料の移動方向を観察した結果からもこの仮

図 6 そろばん玉形剛体を押込んだ時の表面に引いた線の変形と盛りり部の広がり（頂角45°）

図 7 そろばん玉形剛体による押込みにおける押込み荷重と最大押込み深さの関係

定がほぼ満足されることがわかる。この観察結果を図6に示す。

仮定(3) 各要素における刃の垂直面内頂角は場所によって異なるが、一定の平均角度を使用する。したがって、すべての要素について角度 α, β, γ は一定である。

仮定(4) そろばん玉形剛体の押込み力は個々の要素に対する押込み力の総和で表わされる。

このような仮定に基づき、表2に示した計算結果を利用して計算した押込み力は図7に破線で示されている。実験値と比較すると両者はかなり良く一致した。また、そろばん玉形剛体を押込んだ時の材料盛りり部の広がりの実測と仮定したモデルによる広がりがかかなり良く一致していることが図6でわかる。よって今の場合のように押込み深さが場所によって異なるような問題も、その異なり方がわずかならば平面ひずみモデルを使用して解析することができるといえよう。

5. 結 論

- (1) 半無限体に平面ひずみ状態で頂角 90° 以下のくさ

* この τ の値は刃の表面あらかでも変わる。

び形剛体刃を押込んだ時に生じる塑性変形領域を二つの剛性三角形で表わして最小エネルギー法を用いて解析したところ、良く知られているすべり線場理論から得られた結果とかなり良く一致した。

(2) 加工硬化した銅板に対して脱脂したくさび形剛体刃の押込み実験の結果、最小エネルギー法の解およびすべり線場理論の解を比較したところ、くさびと試験片間の摩擦応力(τ)は $0.7k$ であることがわかった。

(3) 押込み深さが場所によりゆるやかに変化するようなそろばん玉形剛体の押込みの問題も上と同じ最小エネルギー法で準平面ひずみ問題として解析することができる。

(4) このことから、補足的にヌーブ硬度の物理的意味を知ることができる。これは Haddow⁷⁾ がヌーブ硬度の

問題を準平面ひずみ問題と考えて解析した方法に一致している。

参 考 文 献

- 1) 山田弥彦他2名：ルーリング・エンジンの試作，日本機械学会誌，575(1966)1557.
- 2) 田村公男，工藤英明：加工硬化した純銅のナイフ形刃切断における切断力と切断時期，塑性と加工，66(1966)360.
- 3) D. S. Dugdale: Cone Indentation Experiments, J. Mech. Phys. Solids, 2(1954)265.
- 4) たとえば，山田嘉昭：塑性力学，日刊工業新聞社，(1965)225.
- 5) 工藤英明，高橋裕男：平面ひずみ定常押し出し問題の完全解について 塑性と加工，39(1964)237.
- 6) J. Grunzweig, I. M. Longman and N. J. Petch: Calculations and Measurement on Wedge Indentation, J. Mech. Phys. Solids, 2(1954)81.
- 7) J. B. Haddow: A Study of the Knoop Hardness Test, Trans. ASME, 88, 3(1966)682.

情 報

鉄鋼加工のJIS

日本金属熱処理工業会JIS原案作成委員会(委員長 川崎貢氏=東洋熱錬社長)は、鉄鋼の焼入れ焼もどし加工についての日本工業規格原案を作成した。同原案は工業技術院の標準規格作成専門委員会で検討されたうえ、今秋までに規格化され、来年3月ごろから実施に移される予定。

この原案は、今年3月に制定された「鉄鋼の焼ならしおよび焼なまし加工」「鉄鋼の高周波焼入れ、焼もどし加工」の2種目に続く、金属熱処理加工技術JIS化の第3弾として昨年から同委員会が作成作業をすすめていたもの。

適用範囲は、鉄鋼系加工材料を水、油、空気など通常の冷却剤のほか、マルクエンチ、オーステンパなど熱浴中での冷却を含めて焼入れ、焼もどし加工するばあいに限っており、誘導加熱、炎加熱または電解加熱による加工は除外されている。原案のおもな内容は次のとおり。

〔加工品区分〕

▽1号=主として部品を加工したもので、とくに良品質のもの(軸受、航空機部品等)

▽2号=主として部品を加工したもので、1号以外のもの

▽3号=主として材料を加工したもの(焼入性の低い鉄鋼種と大型のものを除く)。

▽4号=主として材料を加工したもので、3号以外のもの

〔加工材料〕

▽加工材料の鉄鋼種=(1)構造用合金鋼(機械構造用炭素鋼鋼材ほか7品目) (2)特殊用途鋼(ステンレス鋼鋼材ほか8品目) (3)鍛造品(炭素鋼鍛鋼品ほか5品目)

▽加工材料の履歴=加工材料の履歴については(1)材料試験成績 (2)製造方法の別 (3)前加工方法の別 (4)前熱処理の有無および方法の別 (5)前加工の度合および基準寸法に対する寸法の狂いの度合 (6)金属組織の6項目が原則として明らかにされたものでなければならない。

▽加工材料の外観、形状、寸法=加工材料は(1)外観(われ、きず、さび、黒皮の有無) (2)形状(特異形状、内厚の不同、穴部の形状と位置) (3)寸法および精度(焼入部の加工しろ、全体の加工しろ、焼入部の表面あらさ、寸法精度、形状精度、位置精度)の各項目が原則として明らかにされたものでなければならない。

〔加工設備〕

▽焼入加熱設備=(1)有効加熱帯内において加工目的のための保技温度が加工材の目的温度に対し一定の精度に保持または調整できる設備であること (2)燃料を熱源とする空気炉においては炎が直接加工材にふれて品質をい

(67頁へつづく)