621.951.1.039:678.5/.8

プラスチックのきりもみに関する研究*

津 枝 正 介**, 長 谷 川 嘉 雄**, 安 東 鉄 也***

岩 本 隆 義****, 上 野 了*****

Studies on Drilling of Plastics

by Masasuke TUEDA, Yosio HASEGAWA, Tetuya ANDŌ,
Takayosi IWAMOTO, and Satoru UENO

It is difficult to obtain accurate and smooth holes on plastics by drilling. The object of the present research is to examine the cutting phenomena in drilling of various plastics.

The main results obtained are as follows:

- (1) The torque of drill increases linearly with the depth of hole, which shows that the forces on the margin are distributed uniformly along its length.
- (2) The margin exhibits both frictional and cutting resistances. The cutting action of the margin seems to be a characteristic phenomenon in drilling of plastics.
- (3) In order to avoid the chipping around the edge of the hole, it is effective to use the drill having the very short margins with the relief angle, and having the roundness at the outer corner of cutting edges.

1. 緒 言

プラスチックは軟鋼等の金属とその機械的および熱的性質を異にするために、プラスチックのきりもみにおいては金属の場合にはみられない特異な現象が生じる。単に穴をあけるだけのことは金属にくらべて一般に容易であるが、良好なきりもみを行なうということはきわめて困難である。本研究はこれらの観点の上に立ってプラスチックのきりもみに関する種々な現象を研究したものである。

2. 実験装置および方法

実験には二番立てフライス盤(大阪機工会社製)を用い、直径 20 mm の金属用ドリルおよびねじれ角の異なる 4 種類の平ぎりを使用してきりもみを行なった。第 1 表に使用ドリルの明細を示す。被削材としては硬質塩化ビニル(厚さ 16 mm)、紙積層ベークライト(厚さ 14 mm)、布積層ベークライト(厚さ 8.5 mm)、ガラス布積層ベークライト(厚さ 26 mm)およびユリヤ

樹脂(厚さ 10 mm)の 5 種類のプラスチック板を用い、一辺 40 mm の正方形板を塩化ビニル、紙積層ベークライト、ユリヤ樹脂は 2 枚重ねて、布積層ベークライトは 3 枚重ねて使用した。きりもみは乾式および湿式によって行ない、湿式きりもみにおいては切削剤としてパーデン・パニソール 2% 溶液を用いた。

切削抵抗の測定には電気抵抗線ひずみ計と電磁オシログラフを用い、被削材の温度測定には素線径 0.1 mm の銅-コンスタンタン熱電対と電磁オシログラフを用いた。熱電対は被削材下面より 10 mm 上の水平断面内

第 1 表

略 称	ポイント アングル	のみ刃角	ねじれ角	ウェブの 厚さmm	備 考
ドリル A	変 化	135°	25°	2.5	SKH 3
ドリル B	85.5°	変 化	25°	2.5	"
ドリル C	118°	127°	32°	2.2	SKH 2
ドリル D	118°	132°	30°	3.0	マージンを先端から 3 mm だけ残しそれ 以外を削除したもの
ドリル E	118°	132°	30°	3.0	ドリル D のマージン に逃げ角をつけて切 刃状にし切刃先端に 半径約 2 mm の丸み を与えたもの
平ぎり F	118°	100°	0°	6.3	SKS 2
平ぎり G	118°	108°	11°	6.4	"
平ぎり H	118°	115°	24°	6.3	"
平ぎり I	118°	118°	36°	6.4	"

* 昭和 34 年 3 月 18 日 関西支部第 204 回講演会において講演、原稿受付 昭和 35 年 1 月 7 日。

** 正員、大阪大学工学部(大阪市都島区東野田町 9)。

*** 准員、富士電機会社。

**** 准員、松下電器産業会社。

***** 准員、古河電工会社。

において穴の直径内に2箇所, 直径外に2~4箇所を一直線に配置した. コンスタンタン線は外径約0.5 mmのガラス管を通して銅線との短絡を防ぐとともにその接点が確実に所定の測定位置に存在するようにした.

3. 穴表面の温度上昇

各種プラスチックの熱的性質を軟鋼と比較すると一般に熱伝導率は非常に小さく, 熱膨脹係数は相当大である. このためドリルの切削熱によって穴表面に沿った薄い層の温度のみが局部的に上昇し, その体膨脹によって穴の内径はかえって縮小する傾向を生ずることが容易に考えられる. したがってドリル自身の熱膨脹と相伴って穴表面がドリルのマージンを強く締付け結果となり, マージンにおける摩擦抵抗が増大するばかりでなく, 進んでは縮小した穴表面をさらにマージンの切刃によって切削することが明らかに考えられる. このようにしてプラスチックのきりもみにおいては, 穴表面の近くの被削材の温度はドリルの先端がそこを通過した後, 引続いて相当顕著な上昇を示し, 第1図(a), (b)に一例を示すような測定結果がえられる. 図において曲線1~6はそれぞれ穴の中心から半径0, 7, 10.2, 10.3, 10.7, 11.2 mmの点の温度を示す. 図中のa, b点とはともに当該熱電対がドリルによって切断された瞬間であり, C-C線はドリルのマージンの先端(主切刃の外端)が測定点の深さに達した瞬間を示し, D-D線は同じくマージンの先端が被削材の板の裏面に達し, 所定の直径の穴が貫通した瞬間を示す. D-D線以後においても穴の中でドリルの回転が続く限り上記の各温度は引続き上昇を続けている.

第1図のような測定結果から任意の瞬間における各測定点の温度が求められ, さらに補外法によって穴の

表面温度を推定することができる. このようにして温度の測定断面上における穴の表面温度を推定した値が第2図に黒丸点をもって示されている. 第2図の原点は第1図のC-C線の瞬間と一致し, ドリルの進みはその瞬間以後の進行距離を表わしている. いずれも金属用標準ドリルCによってきりもみを行なった結果である.

プラスチックは一般に熱伝導率の低い物質であるために, 穴の表面に近い部分においてとくに急傾斜の温

第2図

第1図

第2表

被削材	κ cm ² /s	K cal/s cm ² °C
紙積層ベークライト	1.1×10^{-3}	5.43×10^{-4}
ガラス布積層ベークライト	1.9	10.55
硬質塩化ビニル	1.5	6.1

度こう配を示す。上記の穴の表面温度の推定においてはこの最も傾斜の急な部分を推定することになる。そのために推定の精度にやや不安があるので、熱伝導の近似理論式によって同じ表面温度を推算した結果が第2図の実線の曲線であって、黒丸点の推定値とかなりよく一致している。近似理論式による推算は次のようにして行なった。熱伝導の教科書⁽¹⁾によれば内径 r_1 、外径 r_2 の無限に長い円筒の内面に時間 $t=0$ の瞬間から一定の強さの持続熱源が作用する場合に、円筒内部の半径 r の点における t 秒後の温度上昇は次式によって与えられる。

$$\theta = \frac{r_1 F}{K} \log \frac{r_2}{r} + \frac{\pi F}{K} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\kappa \alpha_n^2 t} J_0^2(r_2 \alpha_n) [J_0(r_1 \alpha_n) Y_1(r_1 \alpha_n) - Y_0(r_1 \alpha_n) J_1(r_1 \alpha_n)]}{\alpha_n [J_1^2(r_1 \alpha_n) - J_0^2(r_2 \alpha_n)]} \dots\dots\dots (1)$$

ただし F は単位面積当り、単位時間中にはいる熱量、 K 、 κ はそれぞれ円筒材料の熱伝導率、温度伝導率（第2表）であって、 α_n は $J_0(r_2 \alpha) Y_1(r_1 \alpha) - Y_0(r_2 \alpha) J_1(r_1 \alpha) = 0$ を満足する正根である。 $J_0(x)$ 、 $J_1(x)$ 、 $Y_0(x)$ 、 $Y_1(x)$ はベッセル関数を表す。

(1) 式の解析がドリルによるきりもみの場合に厳密には合致しないことはいうまでもないところであるが、ドリルの回転が相当に早いことと、被削材のプラスチックが熱伝導率のきわめて低い物質であることから、ドリルのマージンの先端が温度上昇を求めようとしている所定の断面を通過する瞬間を時間の原点にとることによって、相当正確な近似がえられるであろうということが考えられる。よって第1図に一例を示した測定記録から求める測定点の半径と温度の実測値を(1)式に代入して単位面積当り、単位時間中にはいる熱量 F を逆算してその平均値を求め、その値を(1)式の F において改めて穴の表面の温度を計算したのが第2図の実線の曲線である。(1)式の r_2 としては一辺 40 mm の正方形の被削材に内接する円の半径を用いた。この際被削材の熱伝導率がきわめて低く、加工時間も短時間であるので、 $r_2=20$ mm の付近では温度上昇は實際上ほとんど零である。

第2図の結果からみればいずれの被削材においても送り量が小さいほど温度上昇は大になっている。また直交する3軸の上に温度上昇、穴表面からの距離および時間をとって一定の送りのもとにおけるこれら3者の間の関係を示せば第3図に一例を示すような一つの曲面がえられる。図の曲面上にある実線の曲線がオシログラムによる測定曲線である。

つぎに湿式きりもみにおける穴表面の温度上昇を乾式の場合と比較するために、一例として温度測定断面からドリルのマージン先端が 6 mm 進んだときの測定断面内における穴表面の温度を補外法によって推定した。第4図は回転数 465 rpm のもとにおいて、このようにして求められた穴表面の温度上昇と送りとの関係を表す。図にみられるごとく、湿式の場合も乾式の場合と同じく、いずれの被削材においても送り量が小さいと温度上昇は大きい。湿式の場合のその最高温度は $70^\circ \sim 80^\circ \text{C}$ である。また紙およびガラス布積層ベーク

第 3 図

第 4 図

ライトでは切削剤の効果は非常に大きい。

4. 切削抵抗に対するマージンの作用

第5図(a)にガラス布積層ベークライトを普通の金属用ドリルCによってきりもみを行なったときのトルク M およびスラスト T の時間的経過を表わすオシログラムの一例を示す。図上のA-A線はドリル切刃の外端が切削を始める位置である。図にみられるようにスラストはきりもみの間ほぼ一定の値を示しているが、トルクはA-A線の位置から後、きりもみの進行とともにほぼ直線的にその大きさを増加している。つぎに第5図(b)にドリルのマージンを先端部3mmだけ残してそれ以外を削除したドリルDを用いて、紙積層ベークライトにきりもみを行なったときのトルクとスラストの変化の一例を示す。図のB-B線はマージンの終端が被削材の上面に達する瞬間である。この図からわかるように、A-A線の位置からさらにきりもみが進むに従い、穴とマージンの接触長さが増加するB-B線までの期間はトルクの大きさもまた漸増するが、それ以後はトルクはほぼ一定の値に止っている。このことから第5図においてもA-A線以後のトルクの増大はマージンと被削材との接触長さが増加するためであり、その際トルクがほぼ直線的に増加することからマージンに作用する力はマージンの長さにそって一様に分布しているものと考えられる。したがってマージンと被削材との間において発生する熱量もまたマージンの単位長さ、単位時間当たり一定となるはずである。この発生熱量がドリルと被削材の両方に流れる割合は両者の表面温度等によって定ま

るものであって一定にはなり得ないが、少なくとも何がかの熱量の供給が継続すれば必ず両者の温度は上昇し、熱膨脹もまた大きくなる。したがって被削材の体膨脹によってドリルを締めつける力も増大し、マージンに作用する摩擦力がしだいに大きくなって行くはずである。いまかりにマージンにおいてはこのような摩擦作用のみが行なわれているものとすれば、ドリルに作用するトルクはドリルの進行とともにほぼ二次曲線的に増大しなければならないことになり、上記の実験結果と大きく矛盾する。上記の考察から被削材の体膨脹によって穴の内径が縮小すれば、その部分は直ちにドリルのマージンによってつぎつぎと削り落されて行くものと考えなければならないことになる。このマージンの切削作用がプラスチックのきりもみにおける一つの特異な現象であると思われる。

上記のようにマージンの存在はプラスチックのきりもみには有害な作用を呈することが考えられるので、試みにマージンの長さを短くしたドリルDならびにドリルDのマージンにさらに逃げ角を与えて切刃状にし、かつ切刃外端に約2mmの丸みを与えたドリルEによりきりもみを行なってえられた結果を第6図、第7図に示す。これらの図において切刃のスラスト、トルクは第5図(b)のA-A線の瞬間の値をとり、マージンのスラスト、トルクは第5図(b)のB-B線の瞬間の値からA-A線の瞬間の値を差引いたものである。なお切刃の外端を丸めたドリルEにおいてはドリルDと同じ深さにおけるこれらの値を採った。図からマージンが与えるスラストはその大きさはわずかではあるが、負の傾向を示しているのが認められる。

(a)

(b)

第 5 図

このことはすでにのべたマージンの切削作用を証明する一つの有力な証拠である。

ドリル D によるきりもみにおいては切刃のトルクは送りが大きくなれば硬質塩化ビニルのほうが紙積層ベークライトよりも大きい値を示すが、マージンのトルクは逆に紙積層ベークライトのほうがはるかに大きい。これは熱可塑性と熱硬化性の材料の性質の差に基づくものと思われる。

マージンの摩擦作用を少なくし、切削作用を主体としたドリル E によるきりもみにおいては硬質塩化ビニル、紙積層ベークライトともマージンのトルクは送りに対してわずかではあるが、増加の傾向をみせており、紙積層ベークライトにおいてはドリル D に比べて著しい減少を示している。ドリル D においてもすでにのべたごとく、マージンには切削作用があるが、その影響はわずかであって摩擦作用が主体をなすために第 7 図 (a) にみられるように、マージンのトルクは両被削材とも送りに無関係となり、ほぼ一定値を示すものと推察される。

また切刃外端を丸めたドリル E では第 6 節にのべるとく、割れを発生しないので硬質塩化ビニルと紙積層ベークライトの材料の差に基づく切刃のトルクの変化がほとんど認められないものと思われる。

5. 切削抵抗と刃先諸角との関係

前節にのべたようにドリルの切削抵抗とくにトルクの値は穴の深さとともに変化するものであるために、本実験においてはドリルの先端（のみ刃）がのみ刃か

ら切刃外端までの高さの 1.5 倍の深さまではいった瞬間のトルクおよびスラストを比較の基準として取扱い、ポイントアングルの影響をしらべるときに限り、マージンの影響を完全に除いて取扱うために第 5 図の A-A 線の瞬間の値を採って比較した。

まず切削抵抗とポイントアングルとの関係を第 8 図に示す。図のようにポイントアングルの増加に伴い、トルクは減少し、スラストは増加する。したがってこ

第 7 図

第 6 図

第 8 図

の図より直ちに最適ポイントアングルを求めることは困難である。そこでこのトルクとスラストの両者を組合わせて大略の目安をうるために次のような取扱いを試みた。すなわちドリルの半径を r_1 、トルクを M 、スラストを T とし、左右の切刃上の半径 $r_1/2$ の点にそれぞれ集中力 M/r_1 および $T/2$ が作用するものと考えてその合力 R を求める。

$$R = \sqrt{(M/r_1)^2 + (T/2)^2} \dots\dots\dots (2)$$

第8図において太い実線が合力 R とポイントアングルとの関係を示す。図の結果からみて金属用ドリルの標準ポイントアングル 118° をプラスチックのきりもみに適用してもほぼ不都合のないことが考えられる。

つぎにのみ刃角とトルクおよびスラストの関係を第9図に示す。トルクはのみ刃角の大小にかかわらずほぼ一定である。スラストはのみ刃角が大になるに従い切りくずの排出がよくなるので減少するが、一方のみ刃の長さが大になるため、のみ刃角が大きすぎるとかえって増加し、 $120^\circ \sim 125^\circ$ の付近において極小値を示している。

第1表に示した4種類の平ぎりを用いて、ねじれ角の影響をしらべた結果を第10図に示す。ポイントアングルはいずれも約 118° に研磨した。図の結果によればスラストはいずれもねじれ角 11° において著しく小さくなっている。トルクのほうはあまり大きな変化はみられないが、概してねじれ角が大きくなるほどわずかに減少する傾向を示している。ねじれ角を選択する際には切削抵抗のほか、後述の割れについても考慮する必要がある。

トルク、スラストと送りとの関係を第11図に示す。トルク、スラストとも紙積層ベークライトが最も大きく、塩化ビニルが最も小さい。また紙および布積層ベ

第 9 図

第 10 図

第 11 図

第 12 図

ークライトにおいては送りの増加に対するスラストの増加の割合が塩化ビニルにくらべて大きい。

6. きりもみによる穴のかどの欠け

ユリヤ樹脂、ベークライト等の比較的にもろいプラスチックのきりもみに際しては、穴入口のかどの部分に円周方向に発生するき裂によってそのかどが欠け落ちる場合がある。本節においてはこの現象について二、三の検討を試みる。ユリヤ樹脂に第1表の4種の平ぎりを用いてきりもみを行なった結果、かどが欠ける領域と欠けない領域との境界が第12図のように求められた。図において斜線を施した側がかどの欠けない領域である。図より送りが大きいほどかどが欠けやすく、回転数 400 rpm 付近において最も欠けにくいことがわかる。またねじれ角が大きくなれば欠けやすくなり、ねじれ角 0° のときが最も欠けにくい。このようなかどの欠けの発生が切刃の外端部において切りくず発生のために生ずるき裂に基くものであるとすれば、この部分の切込み厚さを少なくすれば、これを押えることができるものと推察される。そこでマージン先端を丸めたドリル E によりきりもみを試みた結果を第13図に示す。被削材としては紙積層ベークライトを用い、回転数 465 rpm、送り 0.269 mm/rev できりもみを行なった。図には比較のために金属標準ドリル C を用いた場合の穴上面の状態も示してある。予想されたとおりドリル C ではかどが欠けているが、ドリル E ではぜんぜん欠けていない。これよりかどの欠けの防止にはドリル E のごとく、マージン先端部を丸めたドリルを使用するのが有効なことがわかる。

(a) ドリル C の場合 (b) ドリル E の場合
紙積層ベークライト

第 13 図

7. 穴内面のあらさ

第14図に回転数 465 rpm、送り 0.269 mm/rev で硬質塩化ビニルにきりもみを行なった場合の穴内面の状態を示す。図において (a) はドリル C、(b) はドリル D、(c) はドリル E を用いて乾式きりもみを行なった場合であり、(d) はドリル C により湿式きりもみを行なった場合である。ドリル D によりあけられた穴の内壁をみると、ドリル C の場合にみられるような切削熱による溶着や焼付きは全く起っていないが、切刃外端による送りマークが残るため面の仕上がりはあまり良好とはいえない。これに対しドリル E によりあけられた穴の内壁には送りマークはほとんどなくなり、良好な仕上面である。湿式きりもみの場合送りマークがみえないが、これは穴内壁の温度がわずかなではあるが上昇し、被削材がマージンを締付け、溶着を起すことなく、マージンによってこすられたためであると考えられる。これら (a)、(b)、(c)、(d) 各場合の穴内面のあらさを第3表に示す。なお第3表には紙およびガラス布積層ベークライトの場合も参考

硬質塩化ビニル
第 14 図

のために記してある。この表からも明らかなように、ドリル E によりあけられた穴が最もあらさは小である。湿式きりもみにおいては第 4 図にみられるごとく、穴内壁の温度上昇が小さくなるため、温度上昇により内面に溶着を起す硬質塩化ビニルにおいてはあらさは大分小さくなるが、溶着を起さない熱硬化性の被削材においては乾式の場合とほとんど変らない。

8. 結 論

以上の結果を総括すると次のとおりである。

(1) ドリル切刃の外端が切削を始めてから後、トルクはきりもみの進行とともにほぼ直線的にその大きさを増加し、マージンにはその長さにそって一様な力が作用する。このことからマージンには切削と摩擦の二つの作用があることが推察される。

(2) 切刃外端が切削を始めてから後、スラストが減少の傾向を示すことがマージンの切削作用を示す一つの有力な証拠であって、この切削作用はプラスチックのきりもみにおける一つの特異な現象と思われる。

(3) しかしマージンにおける上記の 2 作用のうち主体をなすのは摩擦作用である。

(4) きりもみのトルクすなわち切刃ならびにマージンから生ずるトルクには熱可塑性と熱硬化性の材料の性質の差に基く相違が認められる。

第 3 表
回転数 465 rpm, 送り 0.269 mm/rev

ドリルの種類	切 削 剤	あ ら さ μ		
		硬質塩化 ビニル	紙積層ペー クライト	ガラス布積層 ペークライト
ドリル C	な し	27	6	12
	あ り	12	7	14
ドリル D	な し	18	6	—
ドリル E	な し	6	3	—

(5) 穴入口のかどが欠けない きりもみを行なうためには、ドリル E のごとく、マージンを先端部だけわずかに残してそれ以外を削除し、かつマージンに逃げ角をつけて切刃状にし、切刃外端に丸みをつけたドリルを用いることが効果的である。なお直径 20 mm のドリルの場合には送りは約 0.3 mm/rev 以下、回転数は 400~600 rpm の範囲が良好な結果を与える。

(6) ポイントアングルは 118° 、のみ刃角は $120^\circ \sim 130^\circ$ 、ねじれ角は $10^\circ \sim 20^\circ$ が適当であると思われる。

本研究は昭和 33 年度文部省科学研究費(各個研究)によるものであり、実験試料について多大の御便宜をいただいた住友ペークライト会社に対し深じんの謝意を表する次第である。

文 献

- (1) Carslaw & Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, (1950), 280, Oxford.