プラスチックのざらつき摩耗について*

山口章三郎** 大柳 康*** 岩本 勝匡*** 木元 英明***

On the Abrasion of Plastics

by

Yukisaburo YAMAGUCHI, Ko OYANAGI, Katsumasa IWAMOTO and Hideaki KIMOTO
(Kogakuin University, Tokyo)

The formula on the abrasion of plastics has been derived from the scratch hardness test as follows ;

$$V = \beta \cdot P \cdot l \cdot \eta \dots \dots \dots (1)$$

where V is the total abrasion volume, β abrasion coefficient and represented by the term, $\left(\frac{\alpha}{4H_c} \cot \frac{\theta}{2} \cdot n^2\right)$, P vertical load on the abrasion surface, l abrasion distance, and η abrasion efficiency. And H_c is the scratch hardness number, α , $\cot \frac{\theta}{2}$ and n^2 are the constants peculiar to each material and determined by the figure of scratched groove.

It has been proved that the formula (1) nearly corresponds to the results of the actual abrasion test which was carried out by using ASTM type's abrasion tester for several plastics, such as phenolic, polyester, acrylic, polystyrene, polycarbonate and nylon.

Generally, hardness number H_c of thermosetting plastics is greater than that of thermoplastic material, but the values of the above constants, such as α , $\cot \frac{\theta}{2}$ and n^2 , for the thermosetting plastics are so greater than those for thermoplastic material, that the value of abrasion coefficient β for thermosetting plastic becomes greater than that for thermoplastic material.

The effect of the grain size of abrasive Al_2O_3 on the abrasion efficiency, and of the relative speed between the surface of test piece and abrasive on the abrasion efficiency are also experimentally discussed respectively.

(Received Sep. 24, 1964)

1 緒 言

筆者は、さきにプラスチックの、その表面に粒状の固体が圧力下において相対的に動く場合に生ずる、いわゆるざらつき摩耗(Abrasion)に関する実験的考察を行ない、プラスチックにおいては金属におけるような摩耗量が単にかたさ、またはmodellに逆比例する¹⁾というような明快な結果が得られないことを報告した。⁸⁾

本研究においては、同じくプラスチックのざらつき摩耗に関して、その摩耗機構を理論的に解析し、さらにその機構から引かきかたさとの関係を明らかにするとともに、この理論的結論を実験的に検討しようとする。

ついで、このざらつき摩耗試験方法において摩耗剤の粒度、摩擦速度などが摩耗量に与える影響ならびに

摩耗中の試片の温度上昇度などを実験的に明らかにしようとするものである。

2 ざらつき摩耗の理論

固体の粒子がプラスチックの表面と他の表面との間に介在して、両面の相対的運動によって生ずるざらつき摩耗における一つの粒子について考える。この粒子がプラスチック表面に接している場合の代表例として、Fig. 1のような状態を想定する。すなわち鋭い粒子の先端が、プラスチックの表面を引かき去ることによって摩耗が生ずると考え、この粒子の先端の形の代表例として頂角 γ の円錐形ダイヤモンドをとる。この円錐引かき子が同図(a)の位置から、表面に垂直な力 P の下に横方向の力 F が加えられることによって、(b)図のように l の距離だけ引かれたとする。

この場合引かきによって生じたみぞの形は材料によって必ずしも一様でなく、特に粘弾性的なプラスチックにおいては相当異なった様相を呈する。一般的にはFig. 1の(c)図に示すような断面を示し、もとの表面

* 原稿受付 昭和39年9月24日

** 正 会 員 工学院大学 東京都新宿区角管

*** “ ” “ ”

Fig. 1. Sections of scratched groove.

線XXの下にできたみぞの断面 $\Delta GDH(A)$ と、両側の表面線から盛り上る部分の断面 $\Delta BCG(A_1)$ および $\Delta HEF(A_2)$ を形成する*1。

したがって、円錐形引きき子によって、この表面から引き去られた真の断面積を A_0 とすると、 A_0 はこの材料の体積が変わらないという仮定においては、

$$A_0 = \{\Delta GDH - (\Delta BCG + \Delta HEF)\} \\ = \{A - (A_1 + A_2)\}$$

となる。

いま引かいた距離を l とすると、引かき去られた容積 V_0 は次式で表わされる。

$$V_0 = A_0 l \\ = \{A - (A_1 + A_2)\} \cdot l \quad (1)$$

いま見かけのみぞの断面積 A と真に引かき去られた分の断面積 A_0 との比を引かき率 α とすると、

$$\alpha = \frac{A - (A_1 + A_2)}{A} \quad (2)$$

となる。

したがって、 $A - (A_1 + A_2) = \alpha \cdot A$ となるから

$$V_0 = \alpha A l \quad (3)$$

いま引かいたみぞの角を θ とすると、

$$A = \frac{b_1}{2} \cdot h_1 = \frac{b_1^2}{4} \cot \frac{\theta}{2} \quad \text{となり}$$

また(c)図において、 $b_1/b = h_1/h = n$ とすると、

$$b_1^2 = b^2 n^2 \quad \text{となる。}$$

なお垂直圧力を P とし、この材料の引かきかたさを H_c とすると、 $H_c = P/b^2$ (kg/mm²) であるから、*2

$$b_1^2 = \frac{P}{H_c} n^2 \\ \therefore A = \frac{P}{4H_c} \cot \frac{\theta}{2} \cdot n^2 \quad (4)$$

したがって(3)と(4)式から V_0 は次式で表わされる。

$$V_0 = \frac{\alpha}{4H_c} \cdot \cot \frac{\theta}{2} \cdot n^2 \cdot P \cdot l \quad (5)$$

しかし実際の摩擦においては、摩擦剤の粉粒はこのような鋭い先端をもっていない。また同時に無数の多くの粒子で支えられ、そのいずれもが常に先端を表面に接しているわけでもないので、垂直荷重のすべてが個々の粒子の先端に有効にはかかってはいない。

いますべての摩擦粒子がFig. 1のように鋭い先端をもち、かつ、いずれもが垂直に有効に立って、ころがることもなく平行に引かくような場合の摩擦量と、実際の場合の摩擦量との比を摩擦効率 η とすると、垂直圧力 P_0 引かき距離すなわち摩擦距離 l に対する実際の摩擦総量 V は次式で表わされる。

$$V = \frac{\alpha}{4H_c} \cdot \cot \frac{\theta}{2} \cdot n^2 \cdot P \cdot l \cdot \eta \quad (6)$$

いま $(\alpha \cdot \cot \frac{\theta}{2} \cdot n^2 / 4H_c)$ は材料による定数であるとして、これを摩擦係数 β とすると、

$$\beta = \frac{\alpha}{4H_c} \cdot \cot \frac{\theta}{2} \cdot n^2 \quad (7)$$

$$\therefore V = \beta \cdot P \cdot l \cdot \eta \quad (8)$$

となる。

また単位圧力(kg/cm²)、単位摩擦距離(km)、単位摩擦面積(cm²)あたりの摩擦量(mm³)を比摩擦量 V_s [mm³/ {(kg/cm²) × km × cm²}] すなわち {mm³/(kg · km)} とすると、

$$V_s = \beta \cdot \eta \times 10^6 \quad (9)$$

$$\therefore V = V_s \cdot P \cdot l \quad (10)$$

ともなる。ただし(10)式では V はmm³、 P はkg、 l はkmとする。

3 実 験

3.1 摩擦試験機

本実験に用いた摩擦試験機は、ASTM-D 1 242~56 (1956) に定めたもので、所定の円盤回転数 N_1 は23 rpm、試片回転軸の回転数 N_2 が32rpmで、試片軸の円盤軸の回りの直径 d は200mmで、円盤と試片との平均相対速度すなわち摩擦速度は{(235±50) ± 145} = 45 ~ 425 mm/sec、平均235mm/secとなる。

3.2 試験片

摩擦試験片の形状は75mm × 50mmの矩形平板で、摩擦面積35.5cm²、試片軸の試片台に取り付け、一定摩擦距離(実際には回転数)ごとに取りはずして、天びんで秤量して、その摩擦量を測定する。

実験に用いた各種プラスチックの試験片の材料名はTable I に示す。

また、試片の温度を測定するために、試片の表面から5mm隔たったところに、サーミスター温度計感熱部を挿入して、摩擦試験中の温度を測定した。

3.3 摩擦剤の粒度影響実験

*1 Fig. 14 参照

*2 投稿中、山口章三郎ほか、材料、「プラスチックの引かきかたさについて」

アルミナ (Al_2O_3) の粉末を標準ふるいによって、次のように選別した。

- 63 メッシュ は 60~65 メッシュ
- 75 メッシュ は 65~85 メッシュ
- 93 メッシュ は 85~100メッシュ
- 160メッシュ は150~170メッシュ

これらの各摩耗粉を用いて、同じ垂直荷重と摩擦速度で、各プラスチックについて摩擦距離 5.75km まで測定した。

3・4 摩擦速度の実験

上述の摩耗試験機の一部を改造して、円盤軸の回転数 N_1 を11, 23, および42rpm, N_2 を15, 32および58 rpmの3段に変速できるようにして、摩耗剤の粒度を75

メッシュ、圧力を4.5kgでそれぞれ一定として各速度について、各プラスチックにわたって上記摩耗試験を行なった。なお摩耗試験ならびに試片の秤量はすべて20℃, 60%R.H.の恒温恒湿室で行なった。

3・5 圧力の影響試験

試験片に垂直にかかる圧力 P が摩耗量に及ぼす影響を実験するために、試片軸にかかる重錘を、所定のもの10 lbs (4.5kg) のほかに3.1kg, 5.4kg, 6.7kgおよび9 kg のを作り、各垂直荷重について、75メッシュの摩耗粉で、所定速度で、数種のプラスチックに関して上記同様の摩耗試験を行なった。

3・6 摩耗係数測定試験

Table I に示す各材料の試験片をマルテンス引かき

Table I. Values of section constants and specific abrasion volume of various plastics.

Materials	α	H_c (kg/mm ²)	θ°	$\cot \frac{\theta}{2}$	n^2	$\frac{\beta}{\left(\frac{\alpha}{4H_c} \cot \frac{\theta}{2} - n^2\right)}$ (mm ² /kg)	V_s (mm ³ /kg·km)
Phenolic	0.82	33.7	111°	0.69	0.42	1.77×10^{-3}	264
Polyester	0.66	16.2	95°	0.92	0.64	2.54 "	320
Acrylic	0.21	17.3	98°	0.87	0.49	1.50 "	185
Polystyrene	0.11	9.4	87°	1.03	0.41	1.2 "	159
Polycarbonate	0.12	9.2	128°	0.49	0.32	0.41 "	60.6
Nylon	0.25	11.9	149°	0.27	0.24	0.32 "	21.2

かたさ試験機を用い、頂角 90° のダイヤモンド円錐引かき子によって、約 0.6mm/sec の引かき速度で引かき、その引かきみぞの幅を顕微鏡で測定して、引かきかたさ H_c を測定した。またこの引かきみぞ部を鋭利な刃物で切断し、その断面の顕微鏡写真をとって、Fig. 1 に示すような各部の寸法すなわち、 θ, h, h_1 ならびに A, A_1, A_2 の面積を測定して、引かき率 α, n を算出し、さらにこれらの数値から(7)式によって摩耗係数 β の値を求めた。

4 実験結果と考察

Fig. 2. Abrasion curves of polyester by various grain size of abrasive.

4・1 摩耗剤の粒度の影響

3種のプラスチックについて、摩耗剤の粒度が63, 75, 93および160メッシュのものをそれぞれ用いた場合の摩耗試験の結果の一例としてポリエステルについて示すと Fig. 2 になる。同図は垂直荷重4.5kg, N_1 が

Fig. 3. Relations between grain size of abrasive and amount of abrasion.

23rpmの場合の摩耗量と摩擦距離との関係を表わす摩耗曲線を示す。他のプラスチック、フェノールおよびポリカーボネートについてもほぼ同様の結果が得られた。

これらの結果をまとめて、粒度と摩擦距離 1 kmあたりの摩耗量との関係を示すと Fig. 3 となる。同図から明らかなように、この程度の範囲では、粒度の大きさは摩耗量に著しい影響は与えないが、粒度が大きくなるといくぶん摩耗量が増加するという傾向はみられる。

4・2 摩擦速度の影響

試片表面と回転円盤表面との相対速度がただちに摩耗粉と試片表面との相対速度にはならないが、一応こ

こでは両表面間の相対速度を摩擦速度と考えることとする。

この場合も摩擦速度は、円盤の回転周速度と試片の自転による速度との相対速度となるから、試片、軸中心部からの位置と回転の位置によって著しく変化を繰返すわけであるが、ここではそれらの平均相対速度をもって摩擦速度とする。

この摩擦平均速度を前記 3 段の変速装置によって、110、235 および 420 mm/sec の 3 段階に変えて、それぞれの速度について、ポリエステル、フェノール、スチロールおよびポリカーボネートの試片を、垂直力と粒度を一定の下で摩耗試験した結果のうち、代表例としてポリカーボネートの各速度に対する摩耗曲線を示すと、Fig. 4 となる。他の試片についての同様な結果から、これらの結果をまとめて、1 km あたりの摩耗量と

Fig. 4. Abrasion curves of polycarbonate at various speeds.

Fig. 5. Relations between amount of abrasion and friction speed for some plastics.

(a) New abrasive

(b) Abrasive after testing abrasion of 5 km

Fig. 6. Abrasive, Al_2O_3 powder. (Grain size of 93 mesh.)

摩擦速度との関係を図示すると Fig. 5 になる。同図から明らかなように、摩擦速度が大きくなるほど、1 kmあたりの摩耗量はわずかに減少する。

この原因は、引抜き試験において、引抜き速さを大きくすると、わずかにみぞ幅が減少し、引抜きかたさ H_c の値は大きくなるから*3 摩耗係数 β の値が減少して、摩耗量が小さくなると考えられる。

また摩耗係数 β を一定引抜き速度における一定値と考えると、摩擦速度を大きくすると摩耗効率 η がわずかに減少するとも考えられる。

4.3 摩擦距離と摩耗量

(6) または(8)式に示すように、理論的には摩耗量は摩擦距離 l に正比例する。Fig. 2, 4 および 7 に示す各摩耗曲線はいずれも直線とはならないで、摩擦距離が大きくなるに従って下のほうに少しずつ曲がってくる。すなわち Fig. 2, 7 の OB 曲線のようになり、理論式と一致する OA から少しはずれる。

この原因として、摩擦距離が大きくなると表面が荒れてくることも考えられるが、最も大きい原因は、本実験においては摩耗剤を、5.75kmの摩擦距離まで、取り替えず連続使用したため、Fig. 6 に示すように相当に摩擦距離を経過したもの(b)は、使用始めのもの(a)に比べて、摩耗した切りくずが付着して、その先端の鋭さを著しく阻害されるために、だんだん摩耗効率が減じてくるものと考えられる。したがって、もし摩耗剤が同じ状態ならば、 OA 直線に一致して、理論式のようにになると考えられる。

4.4 垂直荷重と摩耗量

(6) または(8)式に示すように、理論的には摩耗量は垂

Fig. 7. Abrasion curves of polystyrene under various vertical loads.

*3 投稿中。山口章三郎, 材料, 「プラスチックの引抜きかたさについて」

直荷重 P に正比例することとなっているが、実験結果は果してどうであろうか。

P を 5 種の各荷重にして、速度と摩耗剤の粒度を一

Fig. 8. Relations between amount of abrasion and vertical load for various plastics.

(a) Phenolic

(b) Acrylic

(c) Nylon 6

Fig. 9. Sections of scratched grooves. ($\times 560 \times 2/3$)

定にして、ポリエステル、フェノール、スチロール、ポリカーボネートおよびナイロンの5種のプラスチック試片についての摩擦実験の中の代表例として、スチロールに関する摩擦曲線を示すと Fig. 7 となる。

これらの結果をまとめて、垂直荷重量と単位摩擦距離あたりの摩擦量 (g/km) との関係として表わすと、Fig. 8 になる。同図から明らかなように、いずれのプラスチックも両者の関係は直線的となり、上記の理論式が実際に妥当することが認められる。

4・5 摩擦係数と比摩擦量

マルテンス引かきかたき試験機による各プラスチック試片の引かきかたき H_c 、および 90° 円錐ダイヤモンド引かき子によるみぞの断面顕微鏡写真例を示す Fig. 9 のような写真から求めた各形状因子 α , θ , $\cot \frac{\theta}{2}$ および n^2 の値を示すと、Table I の各欄の数値となる。

またこれらの数値から(7)式によって摩擦係数 β を求めると同表の各値となる。

また標準試験状態 ($P=4.5\text{kg}$, $N_1=23\text{rpm}$, 摩擦剤粒度 75 メッシュ) における各プラスチック試片の 5.75km までの摩擦試験から求めた平均の 1 kg 荷重あたり、1 km あたりの摩擦量すなわち比摩擦量 V_s の値は図表右端の欄の数値となる。

この β と V_s との関係を図示すると Fig. 10 となり、少し大ざっぱにみて、両者の関係はほぼ正比例すると考えることができ、(8)式が実験結果からも妥当であることが認められる。

Fig. 10. Relations between abrasion coefficient β and specific abrasion volume V_s .

4・6 摩擦効率について

(6) または(8)式における摩擦効率 η を、実験の結果から(9)式によって求めてみよう。

Table II の β と V_s の値のいずれの材料のものからでもよいが、いま Fig. 10 の直線上にあるポリエステ

を代表例としてとると、(9)式から

$$\eta = \frac{V_s}{\beta \times 10^6} = \frac{320}{2.54 \times 10^{-3} \times 10^6} = 0.126$$

すなわち摩擦効率は12.6%となる。

4・7 温度上昇について

フェノール試片について、垂直荷重を 5.4kg, N_1 を 23rpm, 75 メッシュの摩擦剤による摩擦試験においては、測定した試片の温度は、摩擦距離とともに上昇し、4.5km において室温 20°C より 4.2°C の温度上昇が測定された。しかしこの温度は表面から 4 mm 程度隔たったところの温度であり、摩擦部分はこの温度よりかなり高くなっていることが推定される。

特にみぞの盛り上りの大きいナイロン、ポリカーボネートなどは、表面の小さなたびたびの変形によって温度は上昇すると考えられ、Fig. 11 に示すように、温度が高くなって、だれてきて横にはみ出した姿が、その断面の(a), (b)のように見られる。ポリエステルのように盛り上りの小さいものは、このようなはみ出しが見られないで(c)図のようになる。

Fig. 11. Sectional figures of abrasive surfaces.

4・8 総合的考察

粘弾性的な性質を多分に有し、しかも摩擦試験中の温度が、あるものはガラス転移点以上、あるものはそれ以下、またあるものはちょうどその転移点上 (たとえば 4° フッ化樹脂) にあるなど、また充てん剤を含むフェノール類など多彩なプラスチック全般にわたって、かたきだけを摩擦特性の要素とする考え方はあまり簡単すぎたようである。

すなわち鋭い円錐形の引かき子による引かき試験によってできたみぞの形を考察すると、各材料によってその形状は相当広い範囲にわたって異なっている。よって真に引かき去られる断面積なるものを考え、この断面積 A_0 に引かき距離を乗じた容積をもって摩擦量と

して、この A_0 を引かきかたさ H_c と関係づけて数量的に表わすものが摩擦係数 β である。したがって β は言いかえれば単位垂直圧力あたりの A_0 を表わすことともなる。この β の値は H_c には逆比例はするが、 H_c の値の変化範囲よりも、 β に関与する定数 α , $\tan \frac{\theta}{2}$ および π^2 の各数値の変化範囲が特にプラスチックスにおいては大きいので、 H_c が摩擦特性全体に及ぼす影響がより小さくなってしまった。一般に H_c の小さい材料のほうが上記諸定数がより小さいため H_c の影響を消してしまつて余りがあり、やわらかい熱可塑性材料のほうが、ちょうど鉛の上を引かくように、みぞの両側への盛り上りが大きく、 A_0 すなわち β の値が小さくなって摩擦量が小さくなったわけである。

しかし実際の摩擦量と A_0 による理論的な摩擦との比を表わす摩擦効率 η の値は 12.6% で、 β の値で摩擦全体を考えることは、もとでの大ききで全身の大ききを推定する感がしないでもない。

したがってざらつき摩擦においては、 η の値に関与する他の摩擦条件がなお考察されるべき余地として多分に残っていると考えられる。

5 結 論

以上を要約すると次のように結論される。

(1) 円錐引かき子による引かき試験から、ざらつき摩擦式を誘導すると次式となる。

$$V = \beta \cdot P \cdot l \cdot \eta$$

ただし V は摩擦量、 β は摩擦係数、 P は垂直圧力、 l は摩擦距離、 η は摩擦効率。

(2) 摩擦係数 β は引かきかたさ H_c に逆比例し、その他の引かきみぞの形状を決定する定数によって定まるが、プラスチックにおいては H_c の影響度よりその他の定数による影響度が大きい。

(3) (1) の摩擦式は実験結果から検討して妥当と認められる。

(4) 摩擦剤の粒度が 60~170 メッシュにおいては、粒度が大きくなるとわずかに摩擦量が減る傾向があるが、その割合はわずかである。

(5) 摩擦速度が増すほど、単位摩擦距離あたりの摩擦量は少し減少する。

(付記) 本研究は昭和 39 年 5 月、日本材料学会第 13 期総会講演会で発表したものである。

本研究は昭和 36 年度文部省科学研究費の補助によつたもので、実験を手伝っていただいた山口明男君、清水誠一君に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Oberle, T.L., J. Metals, **3**, 438 (1951).
- 2) たとえば曾田範宗, 潤滑, **5**, 109 (1960).
- 3) 山口章三郎, 合成樹脂, **8**, No. 9, 22 (1962).