

鋼板の砂質土に対する摩擦および摩耗特性*

FRICITION AND WEAR OF A STEEL PLATE AGAINST SANDY SOIL

皇 昭治郎**・室 達朗***
By Shōjirō Hata and Tatsurō Muro

1. はしがき

建設機械の作業部分における掘削・積み込みおよび運搬の各作業のうち、とくに掘削作業における掘削刃の摩耗は激しく、そのために掘削能力が劣化するだけでなく、刃の交換や補修のため、か働率が低下する。このように、掘削刃の摩耗に起因して発生する諸問題は、機械化施工による土工作業の合理化における大きなネックとなっている。したがって、土砂による金属の摩耗機構について解明し、より合理的な摩耗対策をたてることができれば、掘削工具の設計、製作をはじめ、部品更新計画などの施工計画上、十分な意義と価値を有するものと考えられる。

本文は、この摩耗対策の一貫として、土工作業中最も摩耗のはげしい固結砂質土について、金属面の砂質土に対する摩擦および摩耗機構、とくに摩耗量を支配する法則性を究明し、摩耗の現象を明確には握ることを目的として行なった研究をまとめたものである。

固結砂質土による金属面の摩耗は主として砂粒子によるひっかき摩耗である。従来、金属面のひっかき摩耗に対する機械的性質の影響については種々研究されており¹⁾、とくに J. Goddard²⁾ らは、金属の砥粒によるひっかき試験において、金属の摩耗量が接触面圧に比例するとともに、金属と砥粒間の摩擦係数と、金属と破砕金属間の摩擦係数との差に比例することを実証している。

固結砂質土の場合、その現象はある程度砥粒における現象と類似しているが、高面圧における砂粒子自身の破壊、砂粒子相互の結合力の消滅および破砕粒子による目づまりなどの現象において異なっていると考えられる。しかしながら、摩擦係数は摩耗量を支配する最も重要な要因であるから、ここでも摩耗量と摩擦係数との関係について、鋼板の硬度を変化させながら実験を行なった。さらに土粒子の粒度に着目し、粒度分布による摩擦係数および摩耗量の変化についても実測した。これらの定量的な実験結果にもとづいて、金属摩耗の現象を、土粒子との摩擦係数および土粒子の粒度分布によって理論的に解析し考察したものについて報告する。

* 土木学会第22回年次学術講演会(昭.42.5)および昭和42年度関西支部年次学術講演会(昭.42.11)にて一部発表

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部 土木工学教室

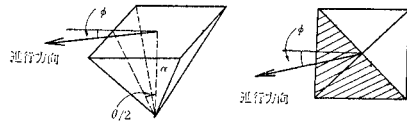
*** 正会員 工修 京都大学助手 工学部 土木工学教室

2. 摩擦および摩耗機構の解析

(1) 摩擦の機構

金属面と砂質土との間のすべり摩擦は、主として土粒子によるひっかき作用に帰因するものであり、局部的に観察すれば、土粒子の鋭いエッジによって金属面を研削する現象であると考えられる。鋼板の表面あらさは、接触面圧のために土粒子が貫入する程度によって左右されるが、十分に金属の摩耗が進行した後は、その表面の条痕はすべて土粒子の進行方向に平行したものとなり、その後に接触する土粒子はこの条痕を横切ることはない。したがってここでは鋼板の表面を、そのあらさを平均化した平面と仮定し、そこへ土粒子が切込んでいくと仮定して解析を行なうこととする。

図—1 正四角錐粒子の移動



土粒子の先端の形状は種々の形が考えられるが、ここでは図—1に示すように正四角錐であるとし、その対面角を θ とする。いま、 N なる力を受けた土粒子が、移動中金属板中に α だけ貫入している場合を考える。図のように土粒子の一つの水平稜とその進行方向とのなす角を ϕ ($-45^\circ < \phi < 45^\circ$) とすると、金属面の切削される断面積(切削痕の進行方向に対する直角な面への投影面積) a_v は、

$$a_v = \sqrt{2} \alpha^2 \tan \theta/2 \cos(45^\circ - \phi) \dots \dots \dots (1)$$

となる。土粒子が金属面上を移動するときの土粒子と金属との間の摩擦係数 μ は、土粒子によるひっかき作用に関する項 μ_p および土粒子と金属との接触部分における付着作用に関する項 μ_a とに分けて考えられる。

土粒子に作用する垂直応力を p_m 、土粒子が金属面に切込んで移動する場合の金属の流動抵抗を p_m' 、金属と土粒子との接触面に作用する切線方向の付着抵抗を S とすると、

$$\begin{aligned} \mu_p &= p_m' a_v / N \\ &= (p_m' / p_m) \frac{\sqrt{2}}{2} \cot \theta/2 \cos(45^\circ - \phi) \dots \dots (2) \end{aligned}$$

$-45^\circ < \phi < 45^\circ$ において、その平均値をとると、

$$\bar{\mu}_p = (\bar{p}_m' / \bar{p}_m) \frac{2}{\pi} \cot \theta/2 \dots \dots \dots (3)$$

同様にして

$$\mu_a = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{S}{\bar{p}_m} \operatorname{cosec} \theta/2 \cos (45^\circ - \phi) \dots \dots \dots (4)$$

$$\bar{\mu}_a = \frac{2}{\pi} \frac{S}{\bar{p}_m} \operatorname{cosec} \theta/2 \dots \dots \dots (5)$$

となる。

したがって、金属と固結土粒子との間の摩擦係数 μ_p および、 μ_a は、土粒子の先端の対面角 θ の大きさに左右され、土粒子の先端がとがってくるほど摩擦係数が増大することを意味している。また、後述の単粒子によるひっかき試験からも明らかなように、式(2)において土粒子の進行方向となす角 ϕ が 45° のとき(切削断面積は最大)よりも 0° のとき(切削断面積は最小)の方が摩擦係数は増大する。すなわち、土粒子が金属面を研削する場合、土粒子と金属との接触面の傾斜角の相違などによって、流動抵抗 \bar{p}_m' はかなり変動すると考えられるから、それぞれの場合に対して実測された \bar{p}_m' について摩擦係数を算定せねばならない。

a) 単粒子によるひっかき試験

上述のように、土粒子の先端の形状を正四角錐と仮定したが、破碎されない単一土粒子を代表するものとして

図-2 ダイヤモンド圧子 ($\theta=136$ 度) によるひっかき試験

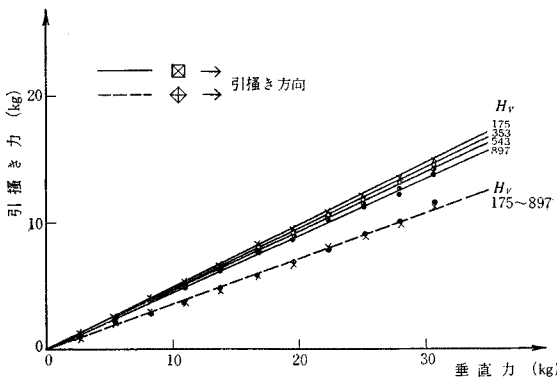
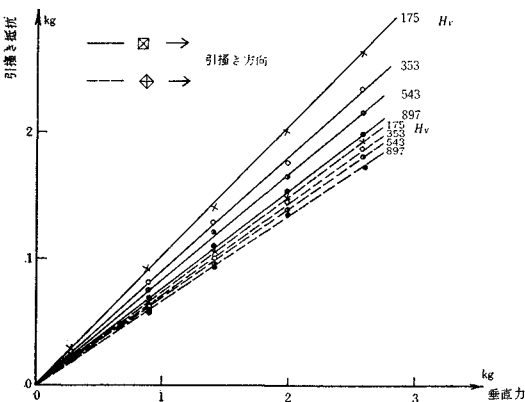


図-3 ダイヤモンド圧子 ($\theta=100$ 度) によるひっかき試験



ダイヤモンド圧子を用いて金属板に対するひっかき試験を行なった。

用いた四角錐ダイヤモンド圧子の対面角は 100° および 136° の2種類で、それぞれ硬度の異なる鋼板上でひっかき試験を行ない直接摩擦係数 ($\mu_p + \mu_a$) を実測した。

図-2 および 図-3 は、それぞれ圧子の対面角 136° および 100° について、鋼板上でダイヤモンド圧子を、その正四角錐底面の辺の方向および対角線の方向にけん引した場合の、ひっかき抵抗と垂直力との関係を示したものである。いずれもひっかき抵抗は垂直力の増加とともに直線的に増加しているから、両者の比を一定の係数 μ' で表わすことができる。一般に、この係数 μ' は金属のビッカース硬度の増加とともにわずかに減少するが、この傾向はダイヤモンド圧子の対面角が小さくなるほど著しい。これらの諸関係については表-1 にまとめて示してある。

表-1 ダイヤモンド圧子によるひっかき試験で求めた係数 μ' 値

対面角	136度		100度		
	引掻き方向	引掻き方向	引掻き方向	引掻き方向	
μ' 値	$H_v 175$	0.49	0.35	1.05	0.75
	353	0.48	0.35	0.90	0.72
	543	0.47	0.35	0.84	0.70
	897	0.45	0.35	0.77	0.67

つぎに、このダイヤモンド圧子の通過した痕跡を顕微鏡で調べた結果、ひっかきみぞの両側へ金属が流動し盛り上がる部分が多く、実際に金属がはく離して摩耗し去るのはごくわずかなものであることが観察された。図-5 は、金属の盛り上がり量を実測した結果で、この盛り上がり高さがひっかきみぞの深さの約8割に達していることを示したものである。また、図-6 は、ダイヤモンド圧子が鋼板に貫入する場合に、静止時における貫入量と移動時における貫入量との比を各垂直力に対してプロットしたものである。この結果、ダイヤモンド圧子を引張る方向、金属の種類および垂直力に関係なく、移動時には静止時の約6割しか貫入していないことが明らかとなった。

図-4 土粒子による金属の研削

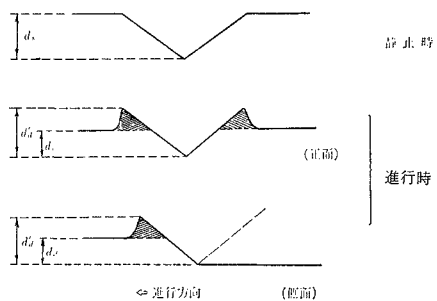


図-5 金属板上をダイヤモンド圧子が移動するときの垂直力と d_a'/d_a の関係

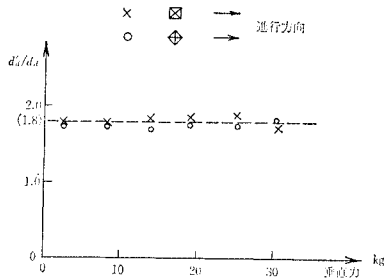
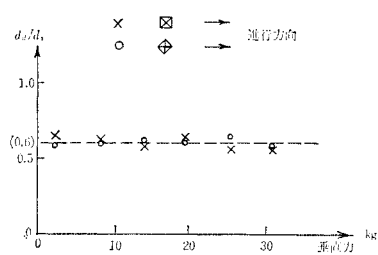


図-6 静止時および移動時における金属板への貫入量の比と垂直力との関係



(2) 摩耗の機構

a) 接触面圧と金属面への土粒子の貫入

鋼板が固結砂質土に対してかなり高い接触面圧のもとで移動するとき、発生する土粒子による金属の摩耗の機構を、つぎに示すいくつかの基本的な仮定にもとづいて解析を行なう。

(1) 土粒子の形状はすべて八面体であり、図-7(a)に示すように、二つの全く等しい正四角錐からなっているとす。また、四角錐の底面である正方形の一辺の長さとしては、土粒子の粒径に等しく a_1, a_2, \dots, a_s とする。ここに、土粒子の粒径 $a_i (i=1, 2, \dots, s)$ は試料土の粒径加積曲線を重量で s 等分する部分の中心粒径として求める。また、この八面体粒子の対面角を θ とする。

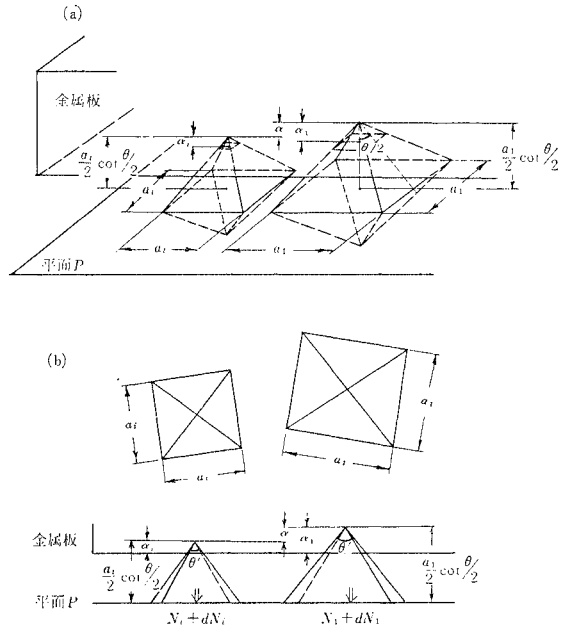
(2) 八面体粒子の重心およびその点を含む角錐の底面(粒径 a_i を一辺とする正方形)は、この場合、同図に示すようにすべて鋼板に平行な一つの平面 P の上にあるとする。

(3) 土粒子の移動方向に直角の面内に土粒子を投影すると、図-7(b)に示すように二等辺三角形を形成する。これらの三角形の頂角は土粒子による金属面上の切削痕の頂角に等しく、土粒子がどの方向をもつ確率も等しいとして、その平均頂角を θ' とする(実際に θ' にあたるものを実測すれば $120^\circ \sim 140^\circ$ の間にある)³⁾。

(4) 鋼板が固結した土粒子の上を移動するとき、土粒子は破碎されず目づまりをおこさない。

以上のように仮定すると、鋼板がある荷重を受けて固結砂質土に接触するのは、まず最も粒径の大きな土粒子であり、接触荷重の増加とともにその土粒子は鋼板中に

図-7 八面体粒子の金属板への貫入



めりこみ、鋼板はつぎの粒径の土粒子に接し、しだいに鋼板と土粒子との接点数が増加する。ここで、 s 等分した各粒径について、同じ粒径をもつ粒子の個数をそれぞれ n_1, n_2, \dots, n_s とし、その粒径をもつ粒子1個に作用する外力を N_1, N_2, \dots, N_s 、その増加分を dN_1, dN_2, \dots, dN_s とする。

$a_1 > a_2 > \dots > a_s$ とし、 s 等分した土粒子の重量はそれぞれ等しいから、一般に次式が成立する(同じ密度をもっているとする)。

$$a_i^3 n_i = a_j^3 n_j = \text{const} \dots \dots \dots (6)$$

固結砂質土と鋼板との面圧を p とすると、 p の増分 dp によって

$$\begin{aligned} n_1 dN_1 + n_2 dN_2 + \dots + n_s dN_s \\ = (n_1 a_1^2 + n_2 a_2^2 + \dots + n_s a_s^2) (1 + e') dp \\ = A_s (1 + e') dp \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

となる。ここに

$$A_s = n_1 a_1^2 + n_2 a_2^2 + \dots + n_s a_s^2 \dots \dots \dots (8)$$

また、 e' は四角錐を平面 P に投影した場合の投影部分の間げき比である。

式(6),(8)から n_i を計算すると

$$\begin{aligned} n_i = A_s / a_i^3 \sum_{j=1}^s (1/a_j) \dots \dots \dots (9) \\ (i=1, 2, \dots, s) \end{aligned}$$

である。

鋼板に荷重が作用すると、まず粒径 a_1 の土粒子が鋼板に貫入する。さらに荷重を増すと a_1 の貫入量が大きくなるが、板がつぎの大きさの粒径 a_2 の粒子に達するまでの接触面圧 p_1 に対しては、

$$dN_1 > 0, dN_2 = dN_3 = \dots = dN_s = 0$$

であり、式 (7) から

$$n_1 dN_1 = A_s(1+e') dp$$

したがって

$$p_1 = n_1 N_1 / A_s(1+e') \dots \dots \dots (10)$$

となる。

いま、最大粒径 a_1 の土粒子が、ある荷重を受けて鋼板上を移動するとき、鋼板中にその土粒子が貫入する深さを α_1 とする。また、つぎの大きさの粒径 a_2 の土粒子が鋼板中に貫入する深さを α_2 とし、順次 $\alpha_3, \alpha_4, \dots, \alpha_s$ とする。金属の硬度および垂直荷重 N が一定であれば、静止時にも移動時にも土粒子と金属との接触面積 A は等しいと考えられる。したがって、図-4 に示すように、土粒子が移動するとき、金属と土粒子の接触面は移動前面にのみ限定され、また土粒子の前面に堆積する金属の切屑のために、土粒子の金属板への貫入量 α は静止時における貫入量 α_0 よりもかなり低下する。

すなわち

$$\alpha = k \alpha_0 \quad (0 < k < 1) \dots \dots \dots (11)$$

と、おくことができる。ここに、 k は実験によって実測するものとする。

つぎに、静止時における土粒子の金属板への圧入痕の対角線の長さを d_0 とすると、

$$d_0 = 2\sqrt{2} \alpha_0 \tan \theta/2$$

となる。また

$$H_V = N/A \\ = (2N \sin \theta/2) / d_0^2$$

であるから

$$\alpha_0^2 = \frac{N \sin \theta/2}{4 H_V \tan^2 \theta/2}$$

となる。

したがって、土粒子が金属板上を移動するときの金属板への土粒子貫入量 α は、次式で計算することができる。

$$\alpha = \left\{ \frac{k^2 N \sin \theta/2}{4 H_V \tan^2 \theta/2} \right\}^{1/2} \dots \dots \dots (12)$$

固結砂質土と金属板との接触面圧 p_1 は、土粒子貫入量 $\alpha_1 = (a_1 - a_2) / 2 \tan \theta/2$ に対して、上式によって N_1 を計算し、式 (10) に代入することによって求めることができる。

つぎに、金属板が粒径 a_1, a_2 の粒子に同時に接し、つぎの大きさの粒径 a_3 の粒子に達するまでの接触面圧に対しては、

$$dN_1 > 0, dN_2 > 0, dN_3 = dN_4 = \dots = dN_s = 0$$

であり、式 (7) から

$$n_1 dN_1 + n_2 dN_2 = A_s(1+e') dp \dots \dots \dots (13)$$

が得られる。

最初は $N_1 > 0, N_2 = 0$ である。粒径 a_1 の土粒子に作

用する力 N_1 が dN_1 増加したときの土粒子の金属板への貫入増加量を $d\alpha_1$ とし、また、それと同時に粒径 a_2 の土粒子に作用する力の増加分を dN_2 金属板への貫入量を $d\alpha_2$ とする。式 (12) から第2近似値をとって計算すると

$$d\alpha_1 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{k^2 N_1 \sin \theta/2}{4 H_V \tan^2 \theta/2} \right\}^{1/2} \left(\frac{dN_1}{N_1} \right) \left(1 - \frac{1}{4} \frac{dN_1}{N_1} \right) \dots \dots \dots (14)$$

また、

$$d\alpha_2 = \left\{ \frac{k^2 dN_2 \sin \theta/2}{4 H_V \tan^2 \theta/2} \right\}^{1/2} \dots \dots \dots (15)$$

ここで、 $d\alpha_1 = d\alpha_2$ であるから式 (14), (15) から

$$dN_2 = \left[\frac{1}{2} \frac{dN_1}{N_1} \left(1 - \frac{1}{4} \frac{dN_1}{N_1} \right) \right]^2 N_1 \dots \dots \dots (16)$$

となる。

さらに、荷重が増加すると、 $N_2 \neq 0$ に対して式 (12) から同様に、

$$d\alpha_1 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{k^2 N_1 \sin \theta/2}{4 H_V \tan^2 \theta/2} \right\}^{1/2} \left(\frac{dN_1}{N_1} \right) \left(1 - \frac{1}{4} \frac{dN_1}{N_1} \right) \dots \dots \dots (17)$$

$$d\alpha_2 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{k^2 N_2 \sin \theta/2}{4 H_V \tan^2 \theta/2} \right\}^{1/2} \left(\frac{dN_2}{N_2} \right) \left(1 - \frac{1}{4} \frac{dN_2}{N_2} \right) \dots \dots \dots (18)$$

となる。 $d\alpha_1 = d\alpha_2 = d\alpha$ とし、式 (17), (18) においてそれぞれ $dN_1/N_1, dN_2/N_2$ について解くと

$$\frac{dN_1}{N_1} = 2 \left[1 - \left\{ 1 - 2 d\alpha \left(\frac{k^2 N_1 \sin \theta/2}{4 H_V \tan^2 \theta/2} \right)^{1/2} \right\}^{1/2} \right] \dots \dots \dots (19)$$

$$\frac{dN_2}{N_2} = 2 \left[1 - \left\{ 1 - 2 d\alpha \left(\frac{k^2 N_2 \sin \theta/2}{4 H_V \tan^2 \theta/2} \right)^{1/2} \right\}^{1/2} \right] \dots \dots \dots (20)$$

である。したがって、最初に与えた dN_1 から式 (16) によって dN_2 を計算し、式 (15) に代入して $d\alpha_2$ を求める。その後、式 (19), (20) において、先に計算された N_1, N_2 に対して $d\alpha$ を適当に与え、 dN_1, dN_2 を求める。この計算をくりかえし、 $\alpha_1 = (a_1 - a_2) / 2 \tan \theta/2$ に達するときの N_1 および N_2 に対して、式 (13) から

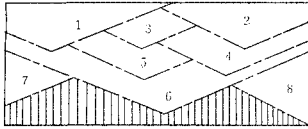
$$p_2 = (n_1 N_1 + n_2 N_2) / A_s(1+e') \dots \dots \dots (21)$$

として計算することができる。さらに荷重が増加して接点数が増加する場合にも、これらの計算をくりかえし行なうことにより接触面圧と土粒子の金属面への貫入量との関係を求めることができる。

b) 土粒子貫入量と摩耗量との関係

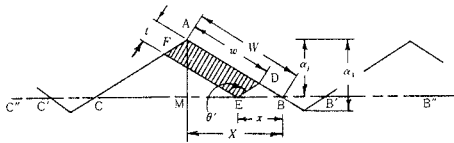
金属面が鋭利な土粒子によって切削された後に発生する切屑の量、すなわち摩耗量は、土粒子の数および接触面圧に対する土粒子の金属面への貫入量によってきまる。しかしながら、土粒子の切刃は決して完全な平面に対して切込んでいるのではなく、図-8 に示すように、土粒子の金属面への貫入量 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q$ をもつ土粒子が金属面上を同時に移動するとき、最終的には α_2, α_3

図-8 摩耗痕跡の形成過程



…、 α_q による摩耗痕は α_i による摩耗痕に包含されると考えられる。すなわち、ある大きさの粒径をもつ土粒子による切削疵はその粒子に後続するより大きな粒径の粒子によって切削されるからである。したがって、与えられた粒度分布を有する土粒子群が、金属面上を無限に移動する場合について考えると大部分の摩耗が最大粒径の土粒子によって発生し、他のそれより小さい粒径の土粒子による摩耗は、その土粒子の数に対して最大粒径の土粒子の貫入量 α_i に対する α_i の比だけ、さきの α_i に対する摩耗痕跡の突起部を切削するとして摩耗量に加算してよいと仮定する。

図-9 土粒子による切込深さと切削幅



すなわち、図-9 においてハッチングした部分で示すように最大粒径による摩耗痕が互いに隣接している場合について考えると、他の粒径の土粒子がその摩耗痕の突起部 $\triangle ABC$ の一部分に切込み底辺 BC 上に切刃先端がくるような任意のつぎの切削疵 ADEF について、この場合の切込深さを t 、切削幅を w とし

$$\overline{AB}=W, \overline{MB}=X, \overline{EB}=x$$

とおけば

$$w = W \left(1 - \frac{x}{2X} \right), t = x \cos \theta'/2$$

となる。疵の先端 E が \overline{MB} 上のどの位置にくる確率も皆等しいから

$$\left. \begin{aligned} w_{mi} &= \frac{1}{X} \int_0^X w_i dx = \frac{3}{4} W_i = \frac{3}{4} \alpha_i \sec \theta'/2 \\ t_{mi} &= \frac{1}{X} \int_0^X t_i dx = \frac{1}{4} W_i \sin \theta' = \frac{1}{2} \alpha_i \sin \theta'/2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(22)$$

となる。したがって、

$$w_{mi} t_{mi} = \frac{3}{8} \alpha_i^2 \tan \theta'/2 \dots\dots\dots(23)$$

である。また、 α_i なる疵の先端はどの位置にくる確率も等しいから、上式によって計算される部分は全体の α_i/α_1 であり、残りの部分 $(\alpha_1 - \alpha_i)/\alpha_1$ は α_1 による後続切削となるから摩耗量には算定しなくてよい。

したがって、単位面積あたりの摩耗量は、与えられた接触面圧に対して金属面中に入貫する土粒子の単位面積あたりの個数 n_i およびその貫入量 α_i に対して、次式に

よって計算することができる。

$$M = K \rho \tan \theta'/2 \left(n_1 \alpha_1^2 + \frac{3}{8} \sum_{i=2}^s n_i \alpha_i^2 \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_1} \right) \quad (24)$$

上式において、 ρ は金属材料の密度、 K は破碎粒子の目づまりによる荷重分担率の影響、土粒子の破碎およびボンドの破壊によるものおよび摩耗痕からの金属の遊離率によってきまる定数である。なお、金属面に貫入する土粒子の個数 n_i 、土粒子の貫入量 α_i は接触面圧だけでなく、金属材料の硬度や土粒子の粒度分布によって変化するので、式(24)における摩耗量もこれらの要素にしたがって変化するものである。

以上、金属板が固結土粒子に対して移動するとき土粒子は破碎されず目づまりを起こさないことを前提として、金属と土粒子との間の摩擦抵抗が単粒子によるひっかき試験の結果から算定できること、および金属材料の硬度および土粒子の粒度分布は与えられたものとして、ある接触面圧に対する土粒子の金属面への貫入量およびその個数から理論的に金属の摩耗量を算定する式を導くことができる。

なお、土粒子の場合とは異なり、研磨紙などのように、砥粒の粒径がそろっている場合には、摩耗量は接触面圧の1乗に比例して増加するという実験例はすでに発表されている²⁾。すなわち、この場合は土粒子に対して砥粒の粒径に差がないためであり、式(12)および式(24)において、接触面圧および摩耗量はともに土粒子貫入量 α^2 に比例するから摩耗量と接触面圧との間に直線関係がなりたつのであると説明される。

3. 摩擦係数および摩耗量の実測

(1) 実験装置およびその方法

高面圧に対する摩擦および摩耗試験を行なうために写真-1 に示す試験装置を試作した。これは直径 1800 mm、厚さ 50 mm の鋼製回転板であり 20 HP の無段変速機付モータによって、1.6 から 75 cm/sec までの摩擦速度が得られる。鋼製回転板上には、試料土を最適含水比状態でソイルセメント(セメント含有量 6%)として 70 mm の厚さで円環状型わくの中に充填打設し、表面を

写真-1

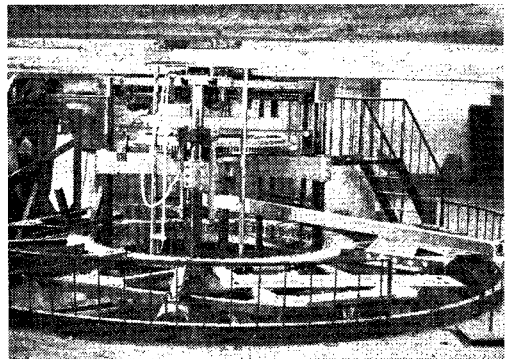
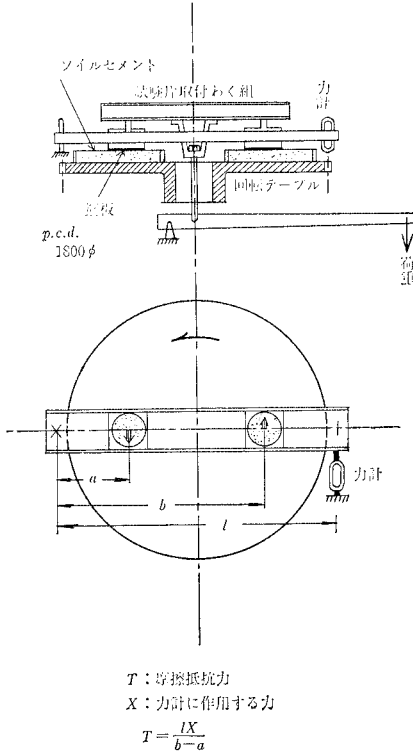


図-10 摩擦および摩耗試験機概略図



平滑にして7日間養生したのち、自然乾燥させて固結砂質土として試験に供した。その上に種々の硬度をもつ鋼板の摩耗試験片をおき、種々の載荷圧に対して摩耗させる。摩耗試験片取り付け組は 図-10 に示すように、摩耗試験時の固結砂質土と試料片との間の摩擦抵抗を測定するために、一端をヒンジ支点とし、他端を1トン用引張計に連結して2個の摩擦抵抗力の反力を取り、直接オシロ グラフに自記させる構造とした。試験片は回転板中央から等距離に設置し、同時載荷によって同じ面圧が得られるように、回転板下部に図に示すような載荷装置を組み立て、載荷比約 10 倍のレバーを通して回転板上の試料片に最大約 1 トン (10 kg/cm²) まで載荷しうるものとした。

試験片は硬度による影響を知るために、炭素鋼板に種種の熱処理を施して硬度を変化させたもので、それぞれについてビッカース硬さ試験を行なった。表-2 に鋼板

表-2 鋼板のビッカース硬度および組成

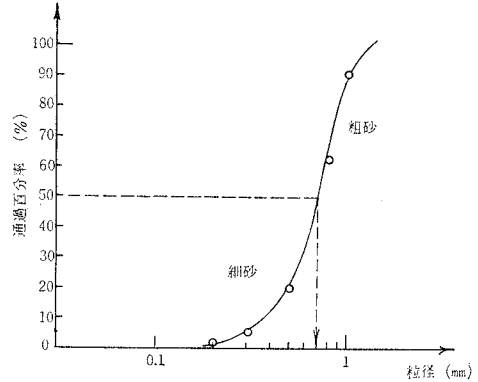
$H_V = 1.8544 P/d^2$ (kg/mm²)
 $P = 30$ (kg)

試料	平均圧痕対角線長 d (μ)	ビッカース硬度 H_V (kg/mm ²)
未処理鋼板	564	175
熱処理鋼板 I	397	353
〃 II	320	543
〃 III	249	897

鋼板の組成 C: 0.3~0.4%, Si: <0.3%, Mn: 0.6~0.8%
 S: <0.06%, P: <0.06%

のビッカース硬度および組成を示してある。鋼板は 70 mm×77 mm×1 mm の長方形板であり、その摩耗量の測定には面圧 10 kg/cm² にいたる各面圧に対して、鋼板が 8 m 移動した場合の摩耗損量として、直接鋼板の重量変化を実測した。天秤は秤量 200 グラム、感量 1 ミリigramの直示天秤を使用し、摩耗量は数百ミリigramの大きさで測定を行なった。

図-11 試料土の粒径加積曲線



試料土は滋賀県琵琶湖湖底から採集した硬質の砂粒子からなり、その粒径加積曲線は 図-11 に示すとおりである。いま、通過百分率が 50% に達する土粒子の粒径を平均粒径とし、その平均粒径より大なる粒径をもつ砂粒子を粗砂、小なる粒径をもつ砂粒子を細砂としてフルイによって分離した。後の計算に便利のように、粒径加積曲線の通過百分率を 20 等分する土粒子の中心粒径をそれぞれ a_1, a_2, \dots, a_{20} ($a_1 > a_2 > \dots > a_{20}$) として計算した結果を表-3 に示した。

表-3 試料土の粒度分布

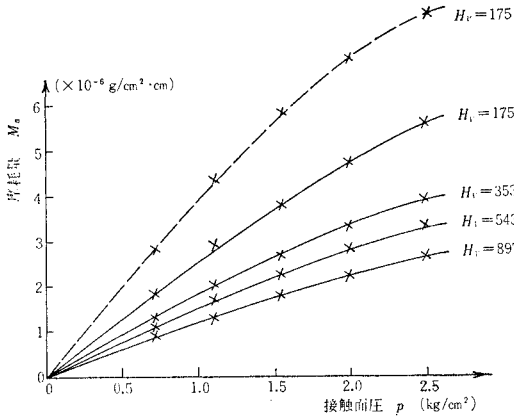
組	a_1	1.10mm	細	a_{11}	0.67mm
	砂	a_2		1.02	a_{12}
a_3		0.95	a_{13}	0.61	
a_4		0.91	a_{14}	0.57	
a_5		0.87	a_{15}	0.53	
a_6		0.83	a_{16}	0.49	
a_7		0.80	a_{17}	0.45	
a_8		0.76	a_{18}	0.39	
a_9		0.73	a_{19}	0.30	
a_{10}		0.70	a_{20}	0.10	

(2) 摩擦係数と摩耗量との関係

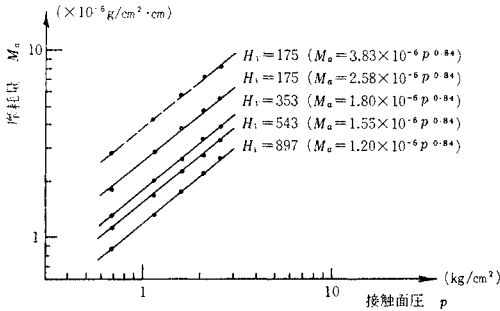
鋼板の摩耗量は、摩擦速度が 10~30 cm/sec の範囲ではほとんど変化しないことがみとめられたが、これは同時に測定した摩擦抵抗の値が変化しないことから裏付けられる。したがって、以下の実験においては鋼板の摩擦速度を 10 cm/sec として一定に保った。

各試験片に対する摩耗量と面圧との関係については 図-12 に示すとおりであり、摩耗量は鋼板が単位距離移動する場合の単位面積あたりの摩耗損量として表わし、それぞれ 12 回の測定値の平均値として示したものである。この際、測定値のバラツキは平均 ±5% であったが、図

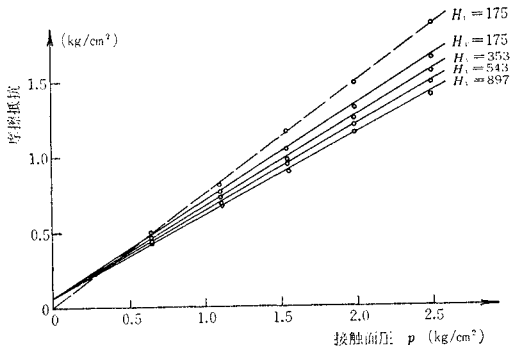
図一12 鋼板の硬度に対する摩擦量と接触面圧との関係



図一13 鋼板の硬度に対する摩擦量と接触面圧との関係



図一14 鋼板の硬度に対する摩擦抵抗と接触面圧との関係



から明らかなように、一定の面圧に対しては鋼板の硬度が増加するとともに摩擦量は減少しており、また、面圧の増加とともに摩擦量の増加率は減少していくことが判明した。これを両対数紙上に記入すると、図一13のようにいずれの場合にも傾斜は一定となるから、摩擦量 M_a と接触面圧 p との間にはつぎの式が成立する。

$$M_a = k_1 p^{0.84} \dots\dots\dots (25)$$

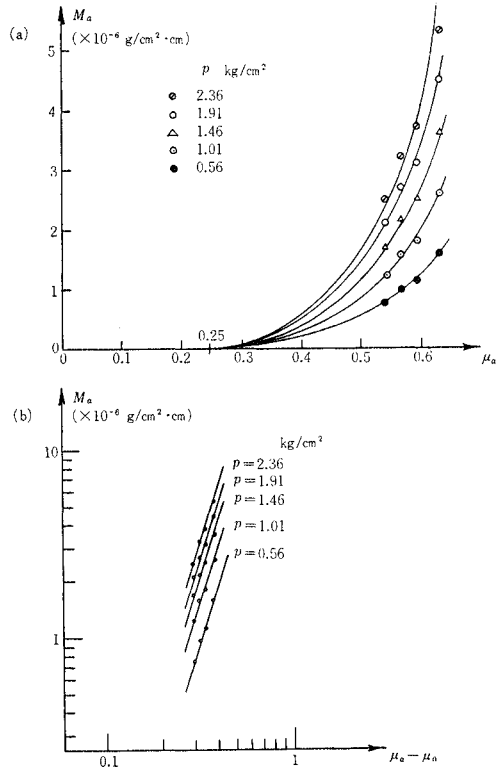
ここに、 k_1 は摩擦係数によって変化する定数である。一方、摩擦試験と同時に測定した摩擦抵抗については、図一14に示すように摩擦抵抗は面圧の増加とともに正比例して増大するから、面圧に対して直線式で表わすことができる。また、鋼板の硬度の増加とともにその摩

擦係数はわずかに減少している。いずれの場合にもこれらの直線が原点をわずかにそれるのは、ソイル セメント上を鋼板が通過する際、土粒子の破碎ともなって発生する細粒子による目づまりのために、土粒子によるひっかけ作用以外にある程度の付着力が作用するためと考えられる。目づまりによる影響を知るために、破碎粒子を除去し、つねに新鮮な試料土上を鋼板が通過する状態にして同じ試験を行なった結果、図一12、図一13および図一14の破線で示すとおり、摩擦抵抗は原点を通る直線となり、かつ摩擦係数は増大する。また、摩擦量もひっかけ作用の増大とともに増加するが、この場合にもやはり面圧の増加とともに摩擦量の増加率は減少している。

つぎに、これらの摩擦係数および摩擦量と面圧との関係から、一定面圧に対する摩擦係数と摩擦量との関係を示すと、図一15(a)のようになり、いずれの面圧に対しても摩擦量 M_a は摩擦係数 μ_a に対して放物線的に増大し、 $\mu_a = \mu_0$ (この場合 $\mu_0 = 0.25$) において摩擦量はゼロとなっている。さらに、 μ_0 より小さい摩擦係数に対しては、すでに土粒子のひっかけ作用による摩擦抵抗は消滅しているから、摩擦はほとんど発生しないものと考えられる。

摩擦量 M_a と摩擦係数間の差 ($\mu_a - \mu_0$) との関係を両対数紙上にとると、図一15(b)に示すように、いずれの面圧に対しても直線となり、 M_a は ($\mu_a - \mu_0$) の約 3.1

図一15 摩擦係数と摩擦量との関係



乗に比例することがわかった。したがって、接触面圧 p が与えられた場合に、摩耗量 M_a と摩擦係数 μ_a との間には次式がなりたつ。

$$M_a = k_2(\mu_a - \mu_0)^{3.1} \dots\dots\dots(26)$$

式 (25), (26) を合成して、一般に摩耗量 M_a と摩擦係数 μ_a および面圧 p との間には、実験式としてつぎのような関係式をたてることができる。

$$M_a = k'(\mu_a - \mu_0)^{3.1} p^{0.84} \dots\dots\dots(27)$$

ここに、 k' は実験の諸条件によって定まる定数である。

(3) 粒度分布と摩擦および摩耗との関係

粒度分布の相違によって鋼板との摩擦係数および鋼板の摩耗量がどの程度変化するかについて実測するために、ピッカース硬度 175 の鋼板についてのみ実験を行なった。図-16 に示したのは、10 kg/cm² までの接触面圧に対する摩耗量の変化を粗砂および細砂についてプロットしたものである。いずれもその摩耗量は接触面圧の 0.84 乗に比例して増大するが、その絶対量は粗砂の方が大である。一方、図-17 は、摩擦抵抗と接触面圧との関係であり、いずれも直線で近似することができる。この勾配を摩擦係数とすると、見かけ上粗砂の方が細砂より大きい、一般にこのような差が生ずるのは、固結した土粒子と破碎遊離粒子からなる目づまり部分とに作用する荷重の分担率が粗砂と細砂とでは異なるためであると考えられる。

図-16 粗砂および細砂に対する接触面圧と摩耗量の関係

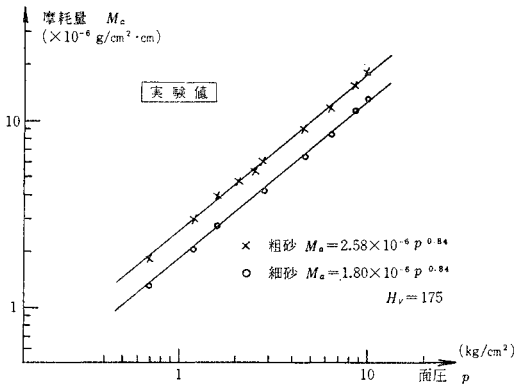
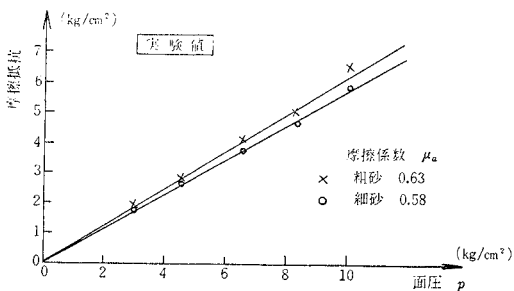


図-17 粗砂および細砂に対する摩擦係数

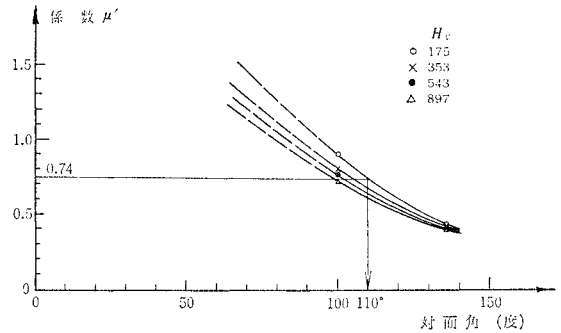


4. 実験結果とその考察

(1) 鋼板と固結土粒子との間の摩擦係数

土粒子の形状およびその先端における頂角などについては、試料土の粒度分布が与えられた場合にも個々の土粒子に対して千差万別であり、これらの値をそれぞれ実測することは非常に困難である。いま仮に土粒子の先端の形状は正四角錐であるとする、試料土の平均対面角は 2. (1) a) においてすでに述べた種々の対面角を有する単粒子によるひっかき試験から求めた係数 μ' と破碎粒子による目づまりがない場合の金属と固結土粒子との間の摩擦係数 μ_t が一致する場合の対面角に相当すると考えてよい。すなわち、3. (2) において破碎粒子による目づまりがない場合の摩擦係数 μ_t は 0.74 であり、図-18 に示すように、同じ金属について行なわれた 2 種類の対面角を有するダイヤモンド圧子によるひっかき試験で求めた係数 μ' とを比較すると、試料土の平均対面角は 112 度であると推定される。

図-18 ダイヤモンド圧子の対面角と係数 μ' の関係



したがって、ピッカース硬度の異なる他の金属との摩擦係数も破碎粒子による目づまりが発生しないと仮定して、理論的に上記平均対面角に対して算定することができる。その結果は μ_t として実測摩擦係数 μ_a と対比させて表-4 に示した。

表-4 荷重分担率 f の計算

H_V	μ_t	$\mu_t - 0.25$	μ_a	$\mu_a - 0.25$	f
175	0.740	0.490	0.630	0.380	0.776
353	0.678	0.428	0.586	0.336	0.785
543	0.650	0.400	0.566	0.316	0.790
897	0.613	0.363	0.541	0.291	0.802

この計算値 μ_t と実測値 μ_a とが絶対量において異なるのは、破碎粒子による目づまりによって荷重分担率に差が生ずるためである。すなわち、固結土粒子と鋼板との接触面圧 p のうちの fp 固結土粒子で受けもち、残りの $(1-f)p$ は鋼板の通過によって破碎した土粒子が固結土粒子間に堆積し目づまりをおこした部分によって受けもたれているとする。また、実験値から求めた摩擦係数 μ_a は、目づまりがないとして計算した摩擦係数 μ_t お

よび破砕粒子と金属板との間の摩擦係数 μ_0 を合成したものであると考えると次式が成立する。

$$\mu_a p A = f \cdot \mu_t p A + (1-f) \mu_0 p A$$

ここに、Aは鋼板の面積である。したがって

$$\mu_a = f \mu_t + (1-f) \mu_0 \dots\dots\dots(28)$$

また、荷重分担率 f については

$$f = (\mu_a - \mu_0) / (\mu_t - \mu_0) \dots\dots\dots(29)$$

によって計算される。

見かけの摩擦係数 μ_a は、荷重分担率 f の大きさによって定められるが、 f の大きさを理論的に算出することは困難であり、現段階においては計算値と実測値とから間接的に求めざるをえない。

(2) 摩耗量と接触面圧との関係

固結砂質土に対する金属の摩耗量は、すでに2.(2)で述べたように金属面への土粒子貫入量によって算定することができる。ただし、式(12)において $k=0.6$, $\theta=110^\circ$ として計算した。表-5は、前節と同じ粗砂において、硬度 H_V の異なる鋼板に対する土粒子貫入量について、接触面圧 p および摩耗量 M_t を計算した結果である。ただし、 M_t は式(24)において $K=1$, $\theta'=130^\circ$ として計算した値である。また、図-19は、接触面圧と摩耗量の関係を両対数紙上に描いたものである。この図

表-5 粗砂に対する金属の接触面圧と摩耗量との関係

土粒子貫入量 α_1 (cm)	接触面圧 $p = \sum_i n_i N_i$ kg/cm ²				金属摩耗量 M_t g/cm ² ·cm
	$H_V=175$	$H_V=353$	$H_V=543$	$H_V=897$	
1.79×10^{-3}	15	20	36	77	3.91×10^{-5}
3.01	55	110	172	286	11.57
3.96	116	232	359	600	21.68
4.79	210	420	658	1009	32.83

から明らかなように、鋼板の硬度にかかわらず、固結砂質土に対する金属の摩耗量は、接触面圧の0.84乗に比例して増加することが理論的な計算によって裏付けられた。摩耗の絶対量は計算値と実測値とでは異なるが、この差は破砕粒子の目づまりに起因すると考えられる。

すなわち、土粒子による金属の摩耗は、固結土粒子との接触面圧 $f p$ によって発生し、破砕粒子で目づまりした部分によっては発生しないと考える。上述したように、目づまりがないとして計算した摩耗量を M_t' とすると一般に次式が成り立つ。

$$M_t = K_1 p^{0.84} \dots\dots\dots(30)$$

上式において、目づまりを考慮した場合の摩耗量 M_t' を計算するには、 p の代りに $f p$ を代入すればよい。したがって、

$$M_t' = K_1 (f p)^{0.84} = f^{0.84} M_t \dots\dots\dots(31)$$

となる。なお、実測した摩耗量 M_a は目づまりによる荷重分担率の影響を受けるだけでなく、鋼板の移動中において土粒子の破砕、土粒子相互の結合力の消滅などによって鋼板に与える摩耗痕跡の分布が異なるために、式(31)で求めた M_t' にある係数 K_2 を乗じたものとして考えるのが妥当である。

$$M_a = K_2 M_t' = K_2 f^{0.84} M_t \dots\dots\dots(32)$$

(3) 摩擦係数と摩耗量との関係

鋼板の硬度が種々異なる場合について、鋼板と固結した粗砂との間の摩擦係数および摩耗量を実測した結果、両者の間には式(27)で表わされる実験式がなりたつことが判明した。ここでは、この実験式の妥当性について、計算で求めた摩擦係数および摩耗量から種々検討を行なう。

まず、目づまりがないとして計算した摩擦係数と摩耗量の関係を両対数紙上に記入すると、図-20に示すように直線とはならないが、これらの関係が直線となるように摩擦係数からある値を差し引いて記入する。この値は試算によって求めるが、 $\mu_0=0.25$ において、直線となり、実験式

図-19 理論式から求めた摩耗量と接触面圧との関係

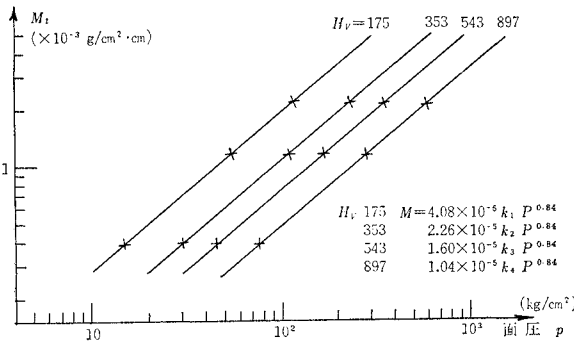


図-20 M_t と $\mu_t - \mu_0$ との関係

μ_t	$\mu_t - 0.25$	M_t
0.740	0.490	4.08×10^{-5}
0.678	0.428	2.26
0.650	0.400	1.60
0.613	0.363	1.04

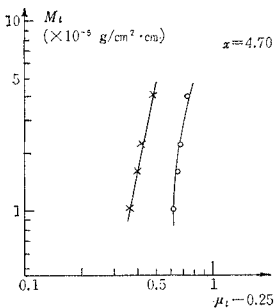


図-21 f と $\mu_a - \mu_0$ との関係

$\mu_a - 0.25$	f
0.380	0.776
0.336	0.785
0.316	0.790
0.291	0.802

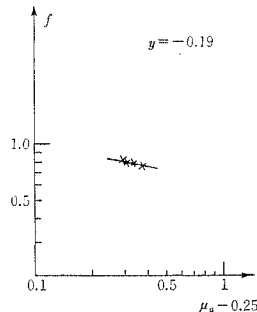
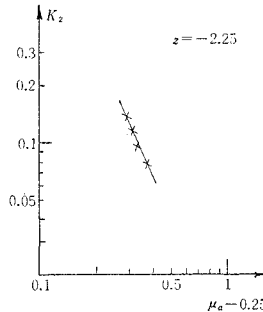


図-22 K_2 と $\mu_a - \mu_0$ との関係

$\mu_a - 0.25$	K_2
0.380	0.0783
0.336	0.0976
0.316	0.1181
0.291	0.1389



における金属と破碎粒子との摩擦係数 μ_0 と一致した。

すなわち、

$$M_t = K_0(\mu_t - \mu_0)^x \dots\dots\dots(33)$$

とおくと、 $x \approx 4.70$ である。

つぎに、目づまりがある場合の実測摩耗量 M_a と実測摩擦係数 μ_a との関係を求める。前述したように M_a は式 (32) を変形して、

$$M_a = K_0 K_2 f^{0.84} (\mu_t - \mu_0)^x \dots\dots\dots(34)$$

一方、式 (29) から

$$\mu_a - \mu_0 = f(\mu_t - \mu_0)$$

また、荷重分担率 f と $(\mu_a - \mu_0)$ を両対数紙上に記入すると 図-21 のように直線となるから

$$f = K_0' (\mu_a - \mu_0)^y$$

と表わす。この場合 $y \approx -0.19$ である。

さらに、 M_a と M_t' との比である K_2 も、摩擦係数の差 $(\mu_a - \mu_0)$ によって変化し、両対数紙上に記入すると 図-22 に示すように一直線上にあり

$$K_2 = K_0'' (\mu_a - \mu_0)^z$$

と表わすことができる。この場合 $z \approx -2.25$ である。したがって、式 (34) を変形して

$$M_a = k' (\mu_a - \mu_0)^{x - xy + 0.84y + z} \dots\dots\dots(35)$$

となる。この場合

$$x - xy + 0.84y + z \approx 3.1$$

となり、実験式として求めた指数と一致した。

なお、上式は固結砂質土と鋼板との接触面圧が 1 kg/cm^2 であるとして解いたものであり、接触面圧が変化す

図-23 金属のピッカース硬度と摩耗量 M_a との関係

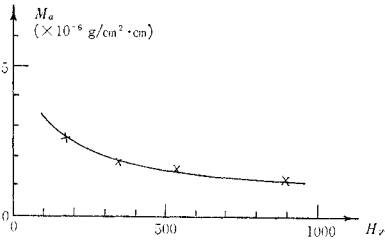


図-24 理論式より求めた粗砂および細砂に対する摩耗量と接触面圧との関係

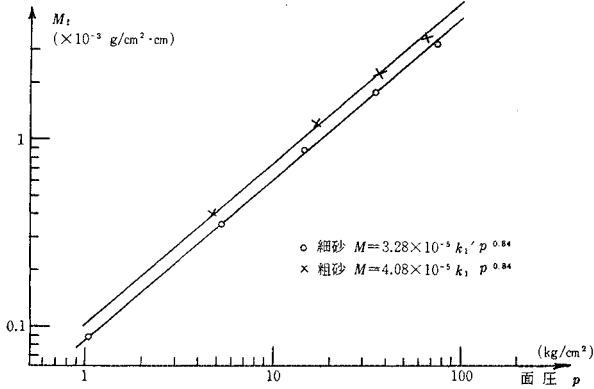


表-6 粗砂と細砂に対する f の計算

試料	摩擦係数		荷重分担率 f
	計算値	実測値	
粗砂	0.74	0.63	0.776
細砂	0.74	0.58	0.673

る場合には、一般に次式が成り立つ。実測摩耗量 M_a は

$$M_a = k' (\mu_a - \mu_0)^{2.1} p^{0.84}$$

となり、実験式 (27) と同じ結果となり、その妥当性が証明されたのである。

なお、金属のピッカース硬度と摩耗量の関係については、図-23 に示すように、理論値および実測値において、ともに硬度の低下とともに摩耗量が著しく増加することが判明した。

(4) 粒度分布と摩擦係数および摩耗量との関係

前述のひっかき試験の結果から、破碎粒子による目づまりがなく、金属の硬度が一定である場合には、土粒子の粒度の差、すなわち粗砂と細砂の間では、鋼板と固結砂質土との摩擦係数は変化しないと考えられる。しかし、実際には粗砂の摩擦係数が細砂の摩擦係数よりはるかに大きいのは、破碎粒子による目づまりのために、粗砂と細砂とではその荷重分担率に差が生ずるためであると考えられる。表-6 は摩擦係数について計算値と実測値との比較を行ない、粗砂と細砂についてそれぞれの荷重分担率を算定したものである。

また、摩耗量について、それぞれの粒度分布に対して式 (24) で計算した結果を 図-24 に示す。鋼板の摩耗量は粗砂および細砂について実測値と全く同じ傾向にあり、摩耗量は接触面圧の 0.84 乗に比例して増加する。しかし、その絶対量において異なるのは、やはり、破碎粒子による目づまりによる荷重分担率の影響、土粒子の破碎および結合力の消滅によって摩耗量が減少すること、および摩耗痕からの金属の遊離率などによるものである。具体的に数式で示すと、つぎのように分析することができる。

まず、粗砂に対しては

$$M_t = 4.08 \times 10^{-5} p^{0.84}$$

$$M_a = 2.58 \times 10^{-6} p^{0.84}$$

なお、式 (32) から

$$M_a = K_2 f^{0.84} M_t$$

である。荷重分担率 f を表-6 から求め、上式に代入すると摩耗痕跡の分布係数 K_2 は

$$K_2 = 0.0783$$

となる。

一方、細砂に対しては

$$M_t = 3.28 \times 10^{-5} p^{0.84}$$

$$M_a = 1.80 \times 10^{-6} p^{0.84}$$

同様に計算して、摩耗痕跡の分布係数 K_2 は

$$K_2 = 0.0764$$

となる。

このように考えると、鋼板の移動中に発生する土粒子の破碎および結合力の消滅などによる摩耗量の減少率は、粗砂と細砂とはあまり差がみられない。粒度分布によって摩耗量が変化するのは、摩擦係数の場合と同様に、主として破碎粒子の目づまり状態が土粒子の粒度分布によって異なるため、鋼板が接触する場合の荷重分担率の差によると考えられる。すなわち、土粒子の粒径が小さくなると破碎粒子が大きな影響をおよぼすために、もとの破碎されていない土粒子に起因する要素が小さくなり、両者の相関関係が最終的に、摩擦係数および摩耗量の絶対量の減少をもたらすのである。

5. む す び

固結した砂質土と金属面との間の摩擦抵抗およびそれらに起因して発生する金属の摩耗現象について、それらの機構を解明し二、三の実験的考察を行なった結果を要約するとつぎのようになる。

(1) 金属と固結土粒子との間の接触面圧と摩擦抵抗との関係は、土粒子が金属板上を移動するときに土粒子は破碎されないと仮定すると、土粒子の形状および金属の硬度を種々に変えて行なった単粒子によるひっかけ試験の結果から直接算定することができる。

その結果、摩擦抵抗はかなりの高面圧に対しても接触面圧の増加とともに直線的に増加するものであり、この直線性は接触面圧を 10 kg/cm^2 まで上げて行なった実験によっても実証された。しかし、実際の摩擦抵抗は土粒子の破碎による目づまりのためにひっかけ試験で求めた値より低下する。すなわち、金属と固結土粒子との間の摩擦抵抗は、固結土粒子によって金属を切削する部分と破碎粒子と金属との間の摩擦の部分から成り立っており、固結土粒子に対する荷重分担率の大きさによって変動すると考えられる。

(2) 土粒子の形状は、上下対称な正四角錐からなる八面体であり、その八面体の基面はすべて金属板に平行な同一平面上に相互に固結されているとする。さらに、土粒子の大きさは基面の大きさで表わすとし、金属板が固結した土粒子の上を移動するとき、土粒子は破碎されず目づまりを起こさないとする。このように仮定すると、与えられた金属板の硬度 H_V に対して、土粒子が金属板上を移動するときの金属板への土粒子貫入量 α_i は、次式で計算することができる。

$$\alpha_i = \left\{ \frac{k^2 N_i \sin \theta / 2}{4 H_V \tan^2 \theta / 2} \right\}^{1/2} \dots \dots \dots (i)$$

ここに、添字 i は個々の土粒子に対して命名したものであり、 N_i は i 番目の土粒子に対する垂直力である。 k は土粒子の金属板への貫入量について土粒子の移動時に対する静止時の比を示すものである。また、 θ は土粒

子の頂角の平均対面角である。

したがって、金属板と固結土粒子との間の接触面圧は、上式において与えられた土粒子の金属面への貫入量 α_i から、個々の粒径の土粒子に作用する垂直力 N_i とその粒径に相当する土粒子の個数とを乗ずることによって算定することができる。

(3) 土粒子が金属板上を移動するときに発生する金属の摩耗量は、金属に接触する土粒子の個数 n_i および与えられた接触面圧に対する土粒子の金属面への貫入量 α_i によって算定することができる。すなわち、ある大きさの粒径をもつ土粒子による切削疵はその粒子に後続するより大きな粒径の粒子による切削疵に包含されることを考慮に入れると、金属の摩耗量は次式によって表わすことができる。

$$M = K \rho \tan \theta' / 2 \left(n_i \alpha_i^2 + \frac{3}{8} \sum_{i=2} n_i \alpha_i^2 \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_1} \right) \dots \dots \dots (ii)$$

ここに、 α_1 は最大粒径の土粒子による貫入量、 ρ は金属材料の密度、 θ' は切削疵の平均頂角である。また、 K は破碎粒子の目づまりによる固結土粒子に作用する荷重の減少、土粒子の破碎および結合力の消滅による摩耗痕跡の消失状態、および摩耗痕からの金属の遊離率によってきまる定数である。

このように、土粒子の金属面への貫入量 α_i を媒介として、金属板と固結土粒子との間の接触面圧と金属の摩耗量との関係を算定することができる。その結果、金属の摩耗量 M_i は接触面圧の 0.84 乗に比例して増加することが判明した。この関係は金属の硬度や土粒子の粒度分布が変化した場合にも理論的に成立する。

(4) 一方、実験によって金属の摩耗量 M_a はいずれの場合にも接触面圧 p の 0.84 乗に比例して増加することが実証された。また、この場合の比例定数は摩擦係数 μ_a から破碎粒子と金属との摩擦係数 μ_0 を差し引いた値 $(\mu_a - \mu_0)$ の 3.1 乗に比例することが判明した。すなわち実験式として次式が成立する。

$$M_a = k' (\mu_a - \mu_0)^{3.1} p^{0.84} \dots \dots \dots (iii)$$

なお、この関係は理論的に妥当であることを証明することができる。

(5) また、実際の摩耗量 M_a は目づまりのために固結土粒子に対する荷重分担率 f によって変化することを考慮すると、式 (ii) で $K=1$ として計算した理論摩耗量 M_i から

$$M_a = K_2 f^{0.84} M_i \dots \dots \dots (iv)$$

として算定できる。

(6) 金属のビッカース硬度が低下するとともに、固結土粒子に対する金属の摩耗量は放物線的に増加する。

(7) 金属板と固結土粒子との摩擦係数は、目づまりがないとした場合にその土粒子の粒度分布の相違によ

ては差を生じない。しかし、実際上目づまりが存在するために、荷重分担率の差によって、粒径が大きくなるほど摩擦係数は増大する。一方、金属の摩耗量は粒度分布によって変化し、粒径が大きくなるほどその絶対量は増大する。実際の摩耗量 M_d は荷重分担率 f によって変化し、式 (iv) によって算定することができる。土粒子の粒度の分布型による荷重分担率 f は直接摩擦試験から求めた摩擦係数とひっかき試験から求めた摩擦係数から算定し、式 (iv) によって実際の摩耗量を推定する。

以上、固結土粒子に対する鋼板の摩擦係数および摩耗量は、土粒子の破砕による目づまりに大きく左右されるために、実際の摩耗量を推定するには、摩擦係数を実測することによって荷重分担率を算定し、式 (i), (ii) および (iv) によって計算が可能であること、および直接実験式 (iii) が応用できることを示した。

また、理論式を誘導する際に与えたいくつかの仮定において、破砕粒子による影響については上述したが、土粒子の形状が八面体であり、頂角の対面角を 110° とし、金属の土粒子による切削疵の頂角は平均 130° とし、解析したが、これは金属の砥粒による研削において実測された値とほぼ一致している³⁾ので、この仮定は妥当であると考えられる。また、八面体粒子の重心およびその点を含む角錐の底面はすべて金属板に平行な平面上にあるとする仮定は、実際問題から少しはずれたものであ

る。本論では、この理想的な土粒子の配列に対して解析を行なったが、実際上は土粒子の粒径分布に関係なく、一般に金属面に圧入する土粒子の個数は増加する。というのは、粒径のかなり小さな粒子は結合力の消滅などによって飛散しやすいが、ある程度の大きさをもつ粒子は最大粒径の土粒子または、それにつづく土粒子の頂点の位置にまで進出している可能性は多い。したがって、金属板に貫入する土粒子の個数は増加するために、土粒子の頂点間隔の分布は小さくなり、4.(4) における粗砂と細砂の解析において、細砂に対する現象解析に近似して行く。すなわち、摩擦係数の大きさについては、理論的にはこのように仮定しても差を生じないが、摩耗量について、実際値より大きく算定している傾向にあることに注意すべきである。

なお、この研究において金属の硬度試験を行なうに際し、京都大学工学部助教授 星鉄太郎博士から多大の便宜をいただいたことを付記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 佐藤健児編：金属の摩耗とその対策，養賢堂，昭 40，pp. 2~9.
- 2) J. Goddard, H. Wlman : A Theory of Friction and Wear During the Abrasion of Metals. *Wear*, 5-2 (1962-3/4), pp. 114~135.
- 3) 小林 昭：1個の砥粒によるプラスチック表面への押し込み，精密機械 20 卷 7 号 (1954), pp. 245-250.
(1968.2.2・受付)