

# ゆるく堆積した砂質土中を走行する 金属面の摩耗機構について

MECHANISM OF WEAR ON A SURFACE OF METAL  
BY LOOSE SANDY SOIL

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

## 1. まえがき

近年、土工機械は目覚しい発展をとげつつあり、機械の大型化によって土工作業量が飛躍的に増大し、また、従来困難とされた岩盤掘削などの作業が可能となってきた。それにともなって、掘削機械などの作業部分の土砂による摩耗劣化は著しく、施工の合理化を追究する上に大きなネックとなっている。特に、ブルドーザのブレードのエッジや掘削バケットの爪などの交換、補修による稼働率の低下は、現実において深刻な問題であり、摩耗対策の重要性が再認識されてきている。

本文においては、ゆるく堆積した砂質土中を走行する金属面の摩耗について、その摩耗の発生機構を解明することによって摩耗対策を樹立するとともに、より合理的な工具、部品の設計指針をえることを主目的とし、基本的な砂粒子の運動形態と摩耗の機構との関係について論じた。

砂質土による金属材料の摩耗は、主として金属面上を砂粒子が滑動するときの砂粒子によるひっかき作用によって発生する。このときの金属面上の砂粒子の運動機構、すなわち、転動、滑動および静止について、ゆるく堆積した乾燥砂中を金属面が走行するとき、その走行方向と金属面とのなす角度、すなわち、横すべり角による運動機構の差異について解析を行なった。さらに、滑動する砂粒子の分布形状から金属の摩耗量を算定する式を誘導し、別に導いた摩擦係数との相関性について述べた。次に、理論式の妥当性について実証するために、いくつかの実験を行なった。まず、砂質土と金属面との間に作用する摩擦力および垂直力を種々の横すべり角に対して測定し、同時に、金属の摩耗量を実測することによって、これらの間の諸関係を求め、実験式を樹立した。

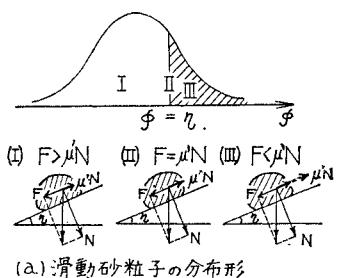
また、砂粒子と金属間の摩擦係数および砂粒子の転倒角の分布形状を実測し、それに基づいて理論的に金属の摩耗量を算定し、与えられた実験式から理論の妥当性を実証することによって、ゆるく堆積した砂質土による金属面の普遍的な摩耗特性およびその機構の把握に努めた。

## 2. 摩擦と摩耗機構の解明

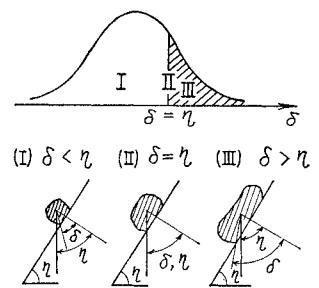
### (1) 斜面上の砂粒子の運動

種々の土工作業において、砂質土と接する作業部分を構成する工具、部品の金属材料の摩耗機構を解明するとき、各金属面上において個々の砂粒子がどのような挙動をするかについて考察する必要がある。それと同時に、各砂粒子に作用する外力の大きさおよび方向について詳細に考察していくことによって、摩擦および摩耗機構を解明することができると考えられる。

まず、最も単純な砂粒子の運動として、斜面上におかれた砂粒の挙動について考える。斜面の傾斜角によって砂粒の運動は静止、滑動および転動の3種類に分けられる。斜面上における砂粒の滑動はいわゆる金属面と砂粒との摩擦



(a) 滑動砂粒子の分布形



(b) 転動砂粒子の分布形

図-1 斜面上の砂粒子の挙動

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工修 福井大学助教授 工学部建設工学科

角によって支配され、また、砂粒の転動については砂粒の粒子形状や扁平率から与えられる転倒角によって左右される。図-1(a)は、ある砂粒子の母集団から個々の粒子の金属面に対する摩擦角 $\phi$ の大きさの分布形状を示したものである。図中、ハッヂした部分はある斜面の傾斜角 $\eta$ に対して砂粒子が滑動しないことを意味している。また、図-1(b)は、同じ砂粒子の母集団から個々の粒子の重心と底辺端とを結ぶ転倒角 $\delta$ の分布形状であり、ハッヂした部分は、ある斜面の傾斜角 $\eta$ に対してその部分の砂粒子は滑動しないことを意味する。

金属面と砂粒子群との摩擦力は、砂粒子が静止または滑動しているとき作用し、滑動している砂粒子との間にあまり作用しないと考えられる。また、砂粒子群による金属面の摩耗は、金属面を滑動する砂粒子によるひっかき作用によってのみ発生し、静止または転動する砂粒子によって直接金属母材が摩耗することはない。

いま仮に、与えられた砂粒子群が砂粒子相互の間げきが十分大きく、また互いに拘束されないとして、砂粒が重力の作用によって斜面上を運動する場合を考える。斜面の傾斜角 $\eta$ に対して滑動および転動する砂粒子の分布形が図-1(a),(b)で与えられたとすると、それらに対応する累積度数分布図

分布図(I),(II)  
は図-2 のように  
なる。ある斜面の  
傾斜角 $\eta$ において、  
転動しない砂  
粒子の個数は全砂  
粒子数 $D\bar{E}$ (=1)

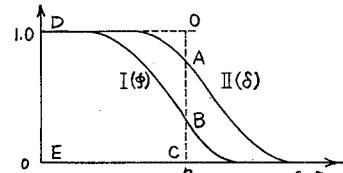


図-2 摩擦角および転倒角に対する  
累積度数分布図

に対し $\overline{AC}$ となる。また、その中でも滑動せず静止している砂粒子の数は $\overline{AC} \cdot \overline{BC}/\overline{DE}$ で与えられる。したがって、実際に斜面上を滑動する砂粒子の数 $f(\eta)$ は次式で与えられる。

$$f(\eta) = \overline{AC} - \overline{AC} \times \frac{\overline{BC}}{\overline{DE}} = \overline{AC} \left( 1 - \frac{\overline{BC}}{\overline{DE}} \right) \dots (1)$$

各斜面の傾斜角 $\eta$ に対して、上式によって滑動砂粒子の数 $f(\eta)$ を算定すると図-3に示す関係を得た。すなわち、斜面上の砂粒子の運動は斜面の傾斜角によってその様相は異なり、傾斜角が減少するほど転動する砂粒

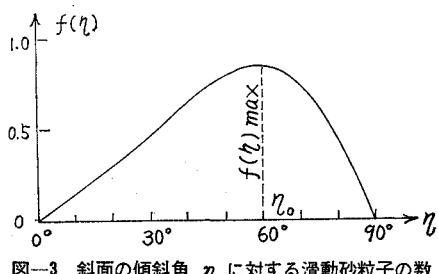


図-3 斜面の傾斜角 $\eta$ に対する滑動砂粒子の数

子の数は少なく、ほとんどの砂粒子は転動せず、わずかに滑動する砂粒子があつても静止の状態に近づくのである。しかし、傾斜角が増大しある角度 $\eta_0$ に達すると、転動する砂粒子の数は比較的小なく、ほとんどの砂粒子は斜面上で静止することなく滑動し、滑動砂粒子の数は最大値となる。また、傾斜角がさらに増大すると転動する砂粒子の数が次第に増加し、滑動する砂粒子は少なくなることが判明した。なお、これらの諸関係は、個々の砂粒子と金属面との間の摩擦角および各砂粒子の転倒角を実測することによって定量的に表現することができる。これに基づいて、ゆるく堆積した砂質土による金属面との摩擦および摩耗の機構について考察する。

## (2) 金属面の横すべり角と砂粒子の滑動

ゆるく堆積した乾燥砂中を金属面が走行するとき、ここでは金属面がつねに鉛直であり、金属面と進行方向とのなす横すべり角が変化する場合の金属面上の砂粒子の挙動について考える。特に、金属面と砂質土との間の摩擦および金属材料の摩耗機構を解明するためには、主として砂粒子の滑動と個々の砂粒子に作用する力の方向および大きさが重要な要素となる。金属面がゆるく堆積した砂質土中を走行する場合、金属面上の砂粒子は互いに拘束され、個々の砂粒子に作用する力の方向および大きさは多種多様である。

まず、個々の砂粒子に作用する力の方向について考える。この力の方向が $N_i(m_i, \sigma_i)$ なる正規分布をなすとすると、その平均値 $m$ は横すべり角 $\beta_i$ で与えられ、その分散 $\sigma_i^2$ は砂粒子相互の密実性、すなわち金属面上の間げき比の大きさによるものであり、密な砂ほど小さく、また粒子の形状にも関係する。したがって、個々の砂粒子に作用する力の方向と金属面とのなす角 $r_{ij}$ は次式で与えられる。

$$r_{ij} = \beta_i + \sigma_i t_{ij} \dots (2)$$

種々の角度 $r$ に対して金属面上の砂粒子の運動について、図-4に示した。個々の砂粒子に作用する外力の方向を前節で述べた斜面上の砂粒子に作用する重力の方向と一致させることによって、金属面上の砂粒子の挙動が静止、滑動および転動のいずれの運動形態をとるかについて判別することができる。したがって、金属面上を滑動す

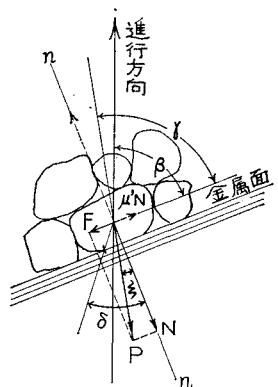


図-4 金属面上の砂粒子の運動



するために砂粒子の運動形態自身、その割合  $n_A$ ,  $n_B$  より  $n_C$  の値が変化するので、上式で与えられる摩擦係数は砂粒子の拘束性についての関数である。

#### (4) 摩耗の機構と摩耗量の算定

金属面上の砂粒子の運動形態において、静止している砂粒子によっては金属面の摩耗は発生しない。しかし、滑動している砂粒子による金属面のひっかき作用によって、金属面の摩耗は最も著しく発生し、それに比べて転動する砂粒子による金属の摩耗については、実質的に金属母材からの遊離による摩耗量はきわめて少ない。したがって、ここでは滑動砂粒子による金属面のひっかき摩耗についてその機構を解明し、摩耗量を理論的に算定することとする。

金属面上の個々の砂粒子について、その運動形態は決して一定の状態を保持することはなく、常に変動しているために、金属面上の摩耗痕跡は不連続となる。その摩耗痕跡の長さは砂粒子の大きさ、形状および拘束状態などによってその分布形は異なるが、ある与えられた条件に対して滑動砂粒子数の割合は一定であるから、同一砂粒子によるひっかき作用が連続して発生するとして解析を行なう。すなわち、砂粒子の運動形態が滑動から転動へ移行する際、またその逆の場合についても、その転換時点において、その摩耗痕跡は他の砂粒子によって連続していくのであり、摩耗量には影響を及ぼさないと仮定してよい。

さて、ある砂粒子がビッカース硬度  $H_V$  なる金属面上を走行する場合について考える。前報<sup>2)</sup>において述べたように、砂粒子が  $N_{ij}$  なる垂直荷重を受けているとき、砂粒子の金属面への貫入深さ  $\alpha_{ij}$  は、次式で与えられる。

$$\alpha_{ij} = \left\{ \frac{k^2 N_{ij} \sin(\theta/2)}{4 H_V \tan^2(\theta/2)} \right\}^{1/2} \quad (5a)$$

ここに、角度  $\theta$  は、砂粒子の形状を正四角錐としたときの砂粒子先端の対面角である。また、 $k$  は砂粒子の静止時および移動時における金属面への貫入深さの比であり、垂直荷重によって変化すると考えられる。

金属面上の個々の砂粒子に作用する垂直荷重の大きさ  $N_{ij}$  は、その平均外力  $P_m$  の金属面となす角度  $\alpha_i$  に対して、外力  $P_{ij}$  とのなす角度  $r_{ij}(=\beta_i \pm \alpha_{itj})$  から次式で与えられる。

$$N_{ij} = \frac{P_m}{\cos(\pm \alpha_{itj})} \cdot \sin r_{ij} \quad (5b)$$

上式で与えられる垂直力  $N_{ij}$  を式 (5a) に代入することにより、滑動砂粒子の個々の貫入深さ  $\alpha_{ij}$  を算定することができる。なお、個々の砂粒子に作用する平均外力  $P_m$  を算定するためには金属面に作用する全外力を面と接する全砂粒子数  $n$  で除すことによって求められ

る。

次に、この砂粒子数  $n$  をいくつかの仮定を設定することにより算定する。すなわち、金属面上に砂粒子を投影したとき、その形状が辺長  $a_i$  なる正方形であり、その投影部分の間げき比は  $e'$  であるとする。また、砂粒子の粒径  $a_l(l=1, 2, \dots, s)$  は砂粒子群の粒径加積曲線を重量で  $s$  等分する部分の中心粒径であり、同じ粒径をもつ粒子の個数をそれぞれ  $n_1, n_2, \dots, n_s$  とする。 $a_1 > a_2 > \dots > a_s$  とし、 $s$  等分した砂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。

$$a_l^3 n_l = a_m^3 n_m = \text{const.} \quad (6)$$

また、面積  $A$  に投影したときの砂粒子実質部分の面積  $A_s$  は次式で与えられる。

$$A_s = n_1 a_1^2 + n_2 a_2^2 + \dots + n_s a_s^2 \quad (7)$$

上式から  $n_l$  を計算すると

$$n_l = A_s / a_l^3 \sum_{m=1}^s (1/a_m) = A / (1 + e') \cdot a_l^3 \sum_{m=1}^s (1/a_m) \quad (8)$$

である。

したがって、単位面積あたりの全砂粒子数  $n$  は次式によって算定することができる。

$$n = \sum_{l=1}^s n_l = \frac{1}{1 + e'} \sum_{l=1}^s 1/a_l^3 \sum_{m=1}^s (1/a_m) \quad (9)$$

また、金属面上を滑動する砂粒子数  $n_a$  は、前述の方法で計算すると次のようになる。

$$n_a = \frac{n_A}{n_A + n_B + n_C} \times n \quad (10)$$

この滑動砂粒子数が多くなるほど砂粒子による金属面のひっかき作用は顕著となり、金属面の摩耗量は  $n_a$  に比例して増大する。なお、個々の滑動砂粒子による切削疵は、それぞれ独立して発生し、先行砂粒子による影響は受けない。

金属面がこの鋭利な砂粒子によって切削される摩耗量は、前述した滑動砂粒子の数  $n_a$  および接触面圧に対する砂粒子の金属面への貫入深さ  $\alpha_j$  から算定することができる。すなわち、砂粒子による切削疵の平均頂角を  $\theta'$ 、金属の密度を  $\rho$  とするとき、単位長さの摩耗痕跡について発生摩耗量は、これを重量で表現すると  $\rho \alpha_j^2 \times 1 \times \tan(\theta'/2)$  で与えられる。なお、個々の滑動砂粒子に作用する外力の金属面とのなす角度  $r$  は、横すべり角  $\beta$  に対して分布しているので、この分布形を等分割し、それぞれに対する頻度数  $\phi(r_j)$  に対して貫入深さ  $\alpha_j$  を算定し、 $\phi(r_j) \cdot \alpha_j^2$  の和を計算すればよい。したがって、砂粒子の単位滑動距離について、単位面積あたりの金属面の摩耗量  $M_0$  は、滑動砂粒子数  $n_a$  および砂粒子の金属面への貫入深さ  $\alpha_j$  に対して、次式によって計算することができる。

$$M_0 = K \rho \tan(\theta'/2) \cdot \sum_j \{\phi(r_j) \cdot \alpha_j^2\}$$



る。すなわち、その平均粒径は 0.70 mm で、標準偏差は 0.244 の対数正規分布をなす細砂である。その含水状態は、気乾燥状態から水浸状態にいたるまで種々の含水比に対してローラで転圧成形を行なった。図-7 は、その場合の含水比—乾燥密度曲線を示したものである。

次に、ゆるく堆積した砂質土と金属面との間に作用する垂直力  $N$

および摩擦力  $F$  を実測するために図-8 に示す計測装置を作成した。供試体として金属面の微小部分に作用する外力を測定するために、摩耗面積  $4.0 \text{ cm}^2$ 、ピッカース硬度 120 の軟鋼 ( $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ ) を使用し、これを図に示した支持具にとりつけ進行方向と金属の摩耗面とのなす角度  $\beta$  および掘削深さ  $D$  を自由に変えうるようにした。また、供試体に作用する外力は、供試体と支持具とを連結する測定棒に貼った 3 組のストレインゲージによって分離測定することができる。

この計測装置を取り付けた金属面の横斜い角および掘削深さを種々に変えて、ゆるく堆積した砂質土中を  $8.8 \text{ cm/sec}$  の一定速度で進行させ、その時に作用する外力を実測するとともに、一定距離走行させた後の供試体の摩耗量を計測し、それらの諸関係について実験的考察を行なった。なお、摩耗量は、試験後供試体を支持具より取りはずし、エーテル、ベンゼンで洗浄後その重量を計測し、その重量減量から算定した。

## (2) 金属面上の砂粒子の運動と作用力

金属面に作用する砂の切削抵抗の方向は、図-9 に示すように、一般に、砂質土との摩擦抵抗により金属面の進行方向とは一致しない。この切削抵抗力を分解すると金属面に垂直な垂直力  $N$  および

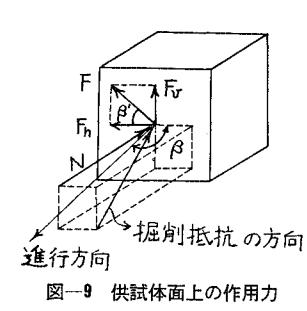


図-9 供試体面上の作用力

金属面に平行な摩擦力  $F$  となる。前述した供試体に作用する垂直力  $N$ 、摩擦力  $F$  の鉛直成分  $F_v$  および水平成分  $F_h$  はそれぞれ 3 方向からペーパーゲージで実測す

ることができるが、解析に際し金属面上における摩擦力の方向を明らかにしておく必要がある。この摩擦力の方向を金属面上を走行する砂粒子の痕跡から推定すると、痕跡の水平軸となす角度  $\beta'$

は堆積土砂の拘束度によって変化するが、完全乾燥および水浸状態においては  $\beta'$  は金属面の進行方向となす角  $\beta$  にはほぼ等しくなる。しかし、図-10 に示すように含水比 4.0% については、 $\beta'$  は深さ  $D$  の増加とともに減少し、一般に次の実験式をえた。

$$\beta' = m^D \cdot \beta \quad (m=0.91 \sim 0.94) \quad \dots\dots\dots\dots(18)$$

なお、粒子の痕跡はすべて金属顕微鏡による写真撮影を行ないその方向を求めたが、一例として、 $w=4.0\%$ 、 $\beta=60^\circ$  および  $D=15 \text{ cm}$  に対する痕跡を写真-1 に示した。

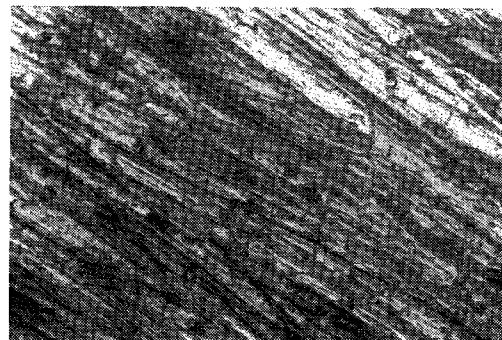


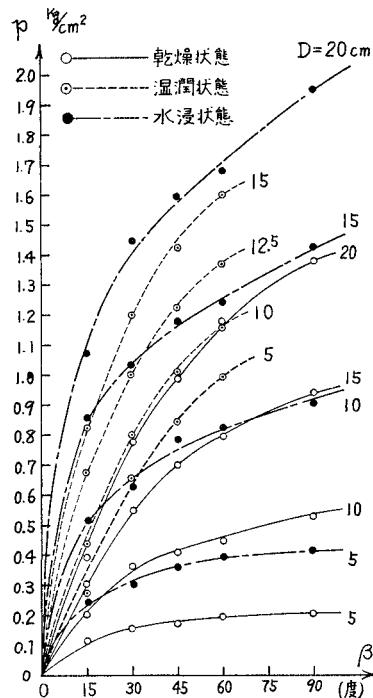
写真-1 砂粒子の痕跡例

## (3) 金属面の横斜い角と垂直面圧、摩擦抵抗との関係

金属面中央部に作用する垂直面圧および摩擦抵抗は、その微小部分を代表せしめる前述の供試体に作用する諸力を種々の掘削深さおよび金属面の横斜い角に対して実測することにより算定される。

表-1 各含水状態に対する試料土の物性

	気乾燥	湿潤	水浸
含水比 (%)	0.3	4.0	23.0
乾燥密度 (g/cm³)	1.25	1.38	1.65
飽和度 (%)	0.71	11.52	100
間げき比	1.12	0.92	0.61
$k_1$	$8.74 \times 10^{-3} D^{1.63}$	1.18	$3.44 \times 10^{-2} D^{1.15}$
$k_2$	$-4.67 \times 10^{-3} D^{1.81}$	$4.20 \times 10^{-2} D - 1.30$	$-1.72 \times 10^{-4} D^{2.39}$

図-11 垂直面圧  $p$  と横すくい角  $\beta$  との関係

試料土の含水状態は、気乾燥、湿潤および水浸の3種類について試験を行ない、それぞれに対する土質条件は表-1にまとめて示した。

垂直面圧  $p$  と横すくい角  $\beta$  との関係は、供試体の地表面からの深さ  $D$  に対して図-11に示される。これを半対数紙上に書きなおすと、図-12に示すように、 $p$  と  $\beta$  の間にはある関数関係が存在する。一方、各横すくい角  $\beta$  に対して垂直面圧  $p$  と深さ  $D$  の関係を求めるとき図-13で与えられる。

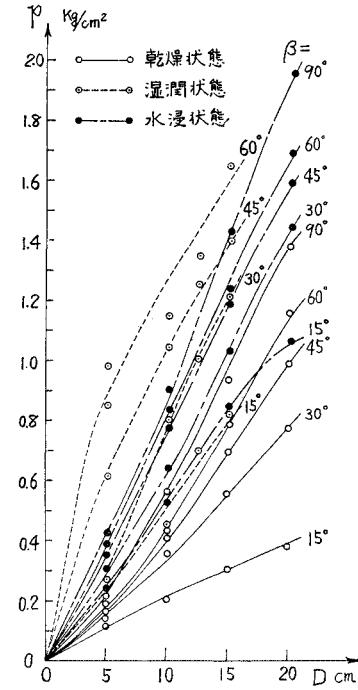
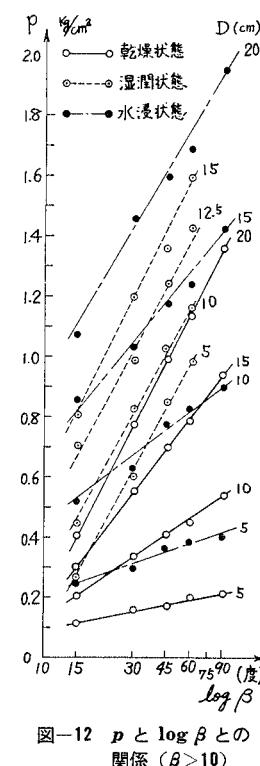
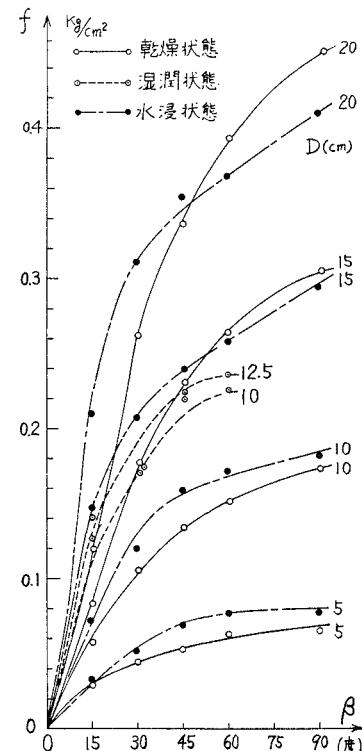
したがって、金属面に作用する垂直面圧  $p$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) と横すくい角  $\beta$  (度) および深さ  $D$  (cm) の間に次式で示す実験式が成立する。

$$p = k_1 \log_{10} \beta + k_2 \quad (\beta > 10) \dots \dots \dots (19)$$

ここに、 $k_1$ ,  $k_2$  は深さ  $D$  の関数であり、各含水状態

に対して、その値は前述の表-1に付記した。

次に、摩擦抵抗力  $f$  と横すくい角  $\beta$  との関係については、図-14で示すように、各横すくい角  $\beta$  で与えら

図-13 垂直面圧  $p$  と掘削深さ  $D$  との関係図-12  $p$  と  $\log \beta$  の関係 ( $\beta > 10$ )図-14 摩擦抵抗力  $f$  と横すくい角  $\beta$  との関係

れる金属面上の砂粒子の運動形態が異なるために垂直面圧とはわずかに異なった傾向を示しており、次節の摩擦係数の値に微妙な影響を与えていている。

#### (4) 金属面の横すくい角の摩擦係数および摩耗量に及ぼす影響

金属面を構成する金属材料と砂質土間の摩擦係数は金属面に作用する摩擦抵抗と垂直面圧との比で表現することができる。すなわち、成形された試料砂は金属面の進行によって一度破壊され、少なくとも限界間げき比以上のゆるい状態から金属面に達するまでに再圧縮されるので正規圧縮の状態にあると考えられるからである。したがって、前述の垂直面圧および摩擦抵抗の実測値から摩擦係数  $\mu$  を算定し、金属面との横すくい角  $\beta$  との関係を求めるとき図-15となる。図より明らかなように、含水状態に関係なく横すくい角  $\beta$  が小さい間は  $\mu$  の増大とともに摩擦係数はわずかに増大する傾向にある。 $\beta=45$  度以上はほぼ一定値にあるか、またはわずかに減少する傾向にある。また、この摩擦係数の大きさは含水比の増大とともに低下していくことが判明した。

次に、金属の実測摩耗量  $M_2'$  と金属面の横すくい角  $\beta$  との関係を掘削深さ  $D$  に対して図示すると図-16がえられる。いずれの場合にも  $\beta=30$  度近傍において摩耗量は著しく増大し、拘束された砂粒子によるひっかき

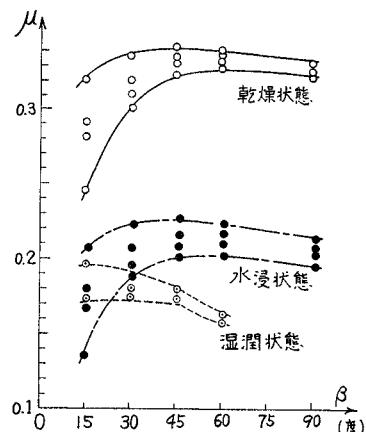


図-15 摩擦角  $\mu$  と横すくい角  $\beta$  との関係

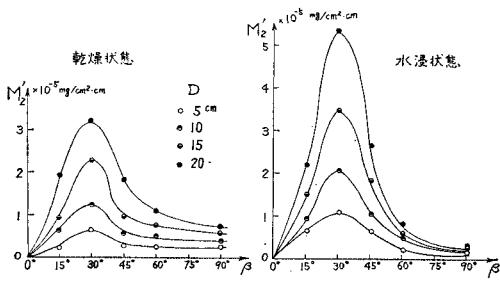


図-16 摩耗量  $M_2'$  と横すくい角  $\beta$  との関係

摩耗が最も顕著に発揮されていると考えられる。また、水浸状態においてはその摩擦係数が気乾燥時よりも低下しているにもかかわらず、摩耗量は逆にきわめて著しく増大することが判明した。なお、湿潤状態においては、金属面上に微細土粒子が付着し、表面を被膜でおおってしまうので、金属はほとんど摩耗されないことが実験により確認された。

#### 4. 実験結果とその考察

##### (1) 金属面上の滑動、転動および静止砂粒子数の算定

個々の砂粒子と金属面との間に作用する摩擦係数を実測するために、所定の金属面上に各砂粒子を載せ、乾燥状態において、滑動はじめるとときの傾斜角をそれぞれ観測し数多くの観測値を得た。この際、転動する砂粒子についてはすべて除外し、転動しない砂粒子についてのみ測定を行なった。その結果は、図-17において、度数分布図(I)に該当し、平均摩擦角 38 度、標準偏差 12.5 の正規分布をした。なお、この平均摩擦角の大き

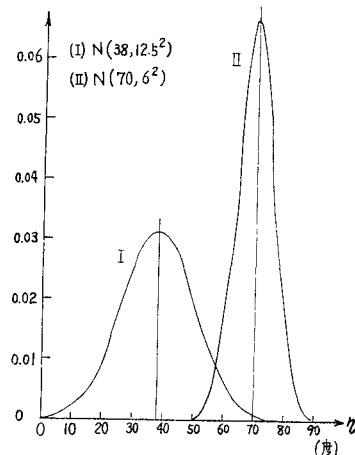


図-17 金属面の傾斜角  $\eta$  に対する滑動(I)および転動(II)砂粒子数の度数分布図

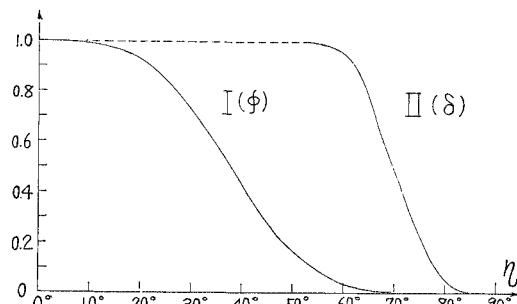


図-18 摩擦角および転倒角に対する累積度数分布図

ゆるく堆積した砂質土中を走行する金属面の摩擦機構について

さは、前報<sup>2)</sup>において述べた単粒子の平均ひっかき係数  $\mu' = 0.74$  とよく近似している。また、個々の砂粒子の転倒角については、それぞれ安定した位置における角度を測定した。数多くの実測値をまとめると、同図において度数分布図(II)に示すように、平均転倒角 70 度、標準偏差 6 の正規分布をなすことが判明した。それぞれの累積度数分布は、図-18 にまとめて示した。前述したように、金属面の傾斜角が与えられた場合に、その面上を滑動する砂粒子数  $n_A$  は式(I)で計算することができる。また、転動する砂粒子数  $n_C$  は、図-2 において  $\overline{OA}$  で与えられるので、自ら静止砂粒子数  $n_B$  も計算できる。このようにして、図-18 は斜面の傾斜角  $\eta$  に対して、斜面上の砂粒子の運動形態を分析した結果である。次に、金属面による乾燥堆積砂質土の掘削において、上述の斜面上の砂粒子の運動形態をどのように適用するかについて考察する。金属面の進行方向となす角度  $\beta$  に対して、金属面に作用する個々の砂粒子の作用方向は  $\beta$  を平均値として分布すると考えられる。

いま、仮に  $\beta$  を平均値とし、標準偏差が 10 である正規分布を仮定すると、その作用方向を斜面上の重力の方向と読みかえることにより、金属面上の砂粒子の運動形態を分析することができる。図-20 は、その計算結果である。ただし、滑動砂粒子数として、作用力の方向が負値をとる場合についても加算したが、摩擦係数の算定

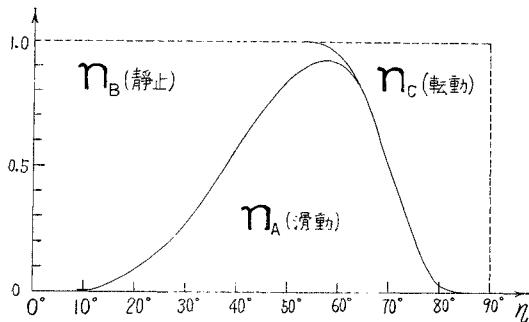


図-19 斜面の傾斜角  $\eta$  に対する滑動、静止および転動砂粒子数

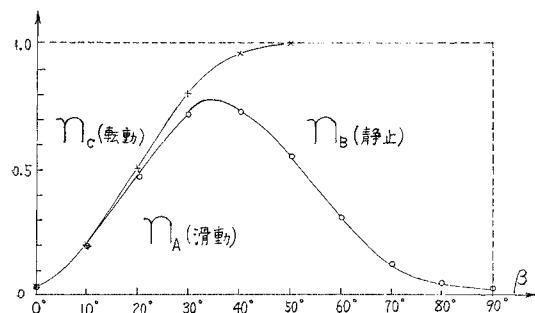


図-20 刃面の横すべり角  $\beta$  に対する滑動、静止および転動砂粒子数

にあたっては減算する必要がある。なお、この場合は、砂粒子が金属面にそって水平面上を移動する 2 次元の問題に限定され、地表面下かなりの深部において砂粒子の鉛直方向の移動が拘束されているときに適用される。

次に、金属面上の砂粒子の移動方向と水平軸とのなす角  $\beta'$  の種々の値に対して、滑動、転動および静止砂粒子数を算定し、砂質土と金属との見かけの摩擦係数と金属の摩耗量が金属面の横すべり角  $\beta$  に対してどのように変化するかについて考察する。

## (2) 摩擦係数の算定

まず、 $\beta'=0$  の場合については、上述のように、金属面上の砂粒子は金属面の横すべり角  $\beta$  に対して図-20 に示す運動形態をとる。式(4)において、 $\phi_m=38$  度、 $\phi_m'=5$  度として、横すべり角  $\beta$  に対して摩擦係数を算定した結果を表-2 に示す。これを図示すると、図-21 がえられる。

次に、 $\beta'=\beta$  の場合について摩擦係数を算定する。これは、砂粒子の金属面上の移動方向が水平と角  $\beta$  をなし

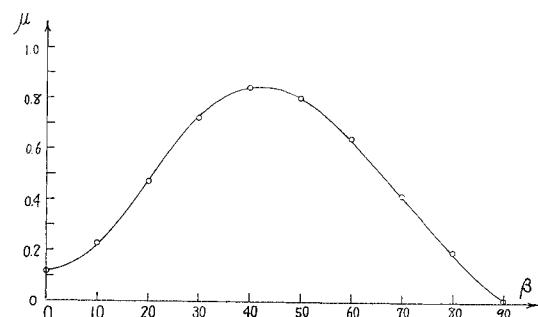


図-21 全砂粒子による摩擦係数 ( $\beta'=0$  の場合)

表-2 摩擦係数  $\mu$  の算定 (乾燥状態)

$\beta$	$n_A$	$n_B$	$n_C$	$n_A \cdot \tan \phi_m$	$n_B \tan (\phi_m - \beta)$	$n_C \cdot \tan \phi_m'$	$\mu$
90	0.0150	0.9850	0	0.0117	0	0	0.0117
80	0.0383	0.9617	0	0.0299	0.1695	0	0.1994
70	0.1287	0.8713	0	0.1005	0.3172	0	0.4177
60	0.3079	0.6921	0	0.2405	0.3996	0	0.6401
50	0.5480	0.4497	0.0023	0.4280	0.3773	0.0002	0.8055
40	0.7325	0.2275	0.0400	0.5721	0.2711	0.0035	0.8432
30	0.7235	0.0813	0.1952	0.5651	0.1408	0.0171	0.7230
20	0.4804	0.0196	0.5000	0.3752	0.0539	0.0438	0.4729
10	0.1924	0.0027	0.8049	0.1503	0.0153	0.0704	0.2360
0	0.0399	0.0001	0.9600	0.0312	0	0.0840	0.1152

$$\tan \phi_m = \tan 38^\circ, \tan \phi_m' = \tan 5^\circ$$

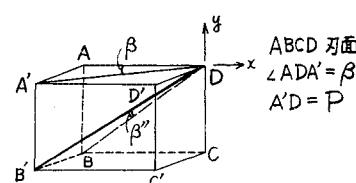
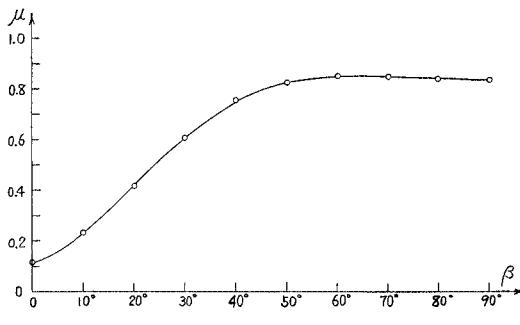
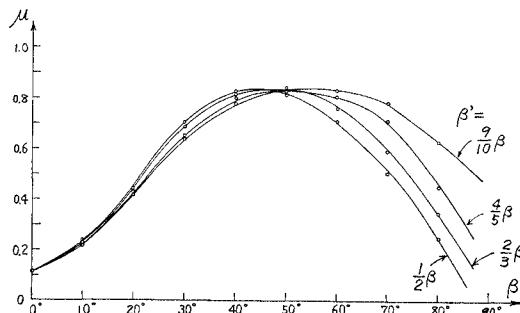


図-22 金属面上の作用力

図-23 全砂粒子による摩擦係数 ( $\beta'=\beta$  の場合)

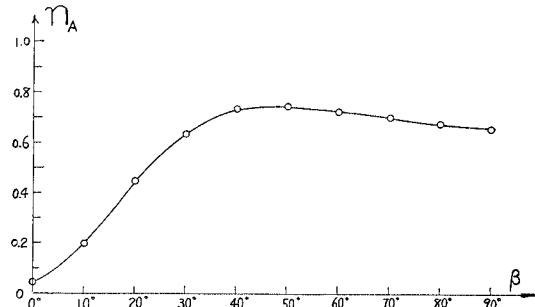
上方に移動する場合であり、ゆるく堆積した砂質土の乾燥状態および水浸状態において表土掘削を行なうとき発生する。図-22 に示すように、砂粒子が移動する面の位置は  $BB'D$  であり、砂粒子の運動形態を解析するとき、金属面とのなす角  $\beta'' (= \angle BDB')$  を用いて算出する必要がある。明らかに、金属面の横すべり角  $\beta$  に対して、 $\beta'' = \tan^{-1}(\sin \beta)$  で与えられる。このとき、全砂粒子による金属面との摩擦係数と金属面の横すべり角との関係を前図(21)より求めると図-23 がえられる。これは、図-15 に示す乾燥堆積砂質土について行なった摩擦係数の実測結果とよく一致していることがわかる。

なお、 $0 < \beta' < \beta$  の場合は、最も一般的な表現として、締め固めた湿潤砂質土など、拘束力が増大するときである。このとき、金属面とのなす角  $\beta''$  は  $\tan^{-1}(\tan \beta \cdot \cos \beta')$  として算定することができる。各  $\beta'$  の値に対して、摩擦係数と横すべり角との関係を図-21 より算定すると、図-24 に示すように変化することが判明した。

図-24 全砂粒子による摩擦係数 ( $0 < \beta' < \beta$  の場合)

### (3) 摩耗量の算定

金属面上を砂粒子が走行する場合に、砂粒子による金属摩耗の大部分は、滑動砂粒子によるひっかき作用に帰因すると考えられる。金属の摩耗量の算定にあたっては、すでに述べたように、金属面上の滑動砂粒子数  $n_A$ 、個々の砂粒子による金属面に作用する力の大きさ  $N_{ij}$  および金属面上を走行する砂粒子の速度  $v$  について考察

図-25 滑動砂粒子数  $n_A$  と横すべり角  $\beta$  との関係

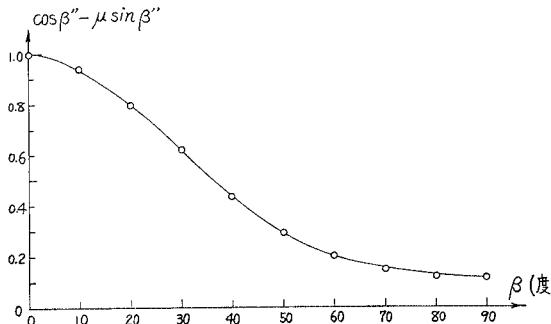
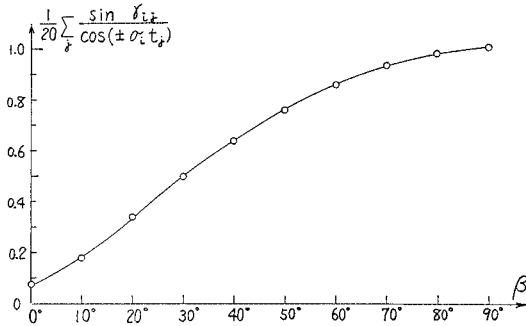
する必要がある。

一例として、乾燥した堆積砂質土に対する金属面の横すべり角と金属の摩耗量との関係について解析を行なう。まず、滑動砂粒子数と横すべり角との関係は、 $\beta = \beta'$  に対応する作用力の金属面となす角  $\beta''$  に対して、図-20 より求めると、図-25 がえられる。次に、個々の砂粒子による金属面に作用する力の大きさ  $N_{ij}$  は式(5 b)によって算定することができる。ここに、 $P_m$  は、図-22 において、 $\beta'=0$  に対応する  $\overline{A'D}$  であるが、 $\beta=\beta'$  においては、作用力は  $\overline{B'D}$  となる。しかし、この場合、 $\overline{B'D}$  の垂直成分は  $\overline{A'D}=P$  としたときの  $P \cdot \sin \beta$  と等しくなる。したがって、単位面積あたりの砂粒子数を  $n$  とした場合に、 $nP$  は実験の結果より深さ 20 cm に対して  $1.108 \text{ kg/cm}^2$  と与えられるので、 $P = 1.108/n$  として計算することができる。また、力の作用方向の分布形を 20 等分するとき、式(13)を書きなおせば、金属面の単位走行距離について単位面積あたりの金属摩耗量は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 M_2 &= K \rho \tan(\theta'/2) \cdot \frac{1}{20} \sum_j \alpha_j^2 \cdot \frac{n_A}{n_A + n_B + n_C} \cdot n \cdot \eta' \\
 &= K \rho \tan(\theta'/2) \cdot \frac{n}{20} \sum_j \left( \frac{k^2 \sin(\theta/2)}{4 H_V \tan^2(\theta/2)} \right) \\
 &\quad \cdot N_j \cdot n_A \cdot \eta' \\
 &= K \rho \tan(\theta'/2) \cdot \frac{n P k^2 \sin(\theta/2)}{4 H_V \tan^2(\theta/2)} \cdot \eta' \cdot \frac{1}{20} \\
 &\quad \cdot \sum_j \frac{\sin r_j}{\cos(\pm \sigma t_j)} \cdot n_A \quad (n_A + n_B + n_C = 1) \\
 &\dots \dots \dots \quad (20)
 \end{aligned}$$

ここに、砂粒子は、金属面上において、その移動方向に作用する力とその逆方向に作用する摩擦抵抗力との差  $((\cos \beta'' - \mu \sin \beta'')$  に比例する)によって運動する。 $\beta = \beta'$  の場合について、金属面の横すべり角  $\beta$  と  $(\cos \beta'' - \mu \sin \beta'')$  とは図-26 に示すように変化する。なお、上式において、金属面上を走行する砂粒子の運動速度と金属面の走行速度との比  $\eta'$  は、砂粒子に作用する力差に比例すると仮定する。

また、同式において、砂粒子による金属面への作用力

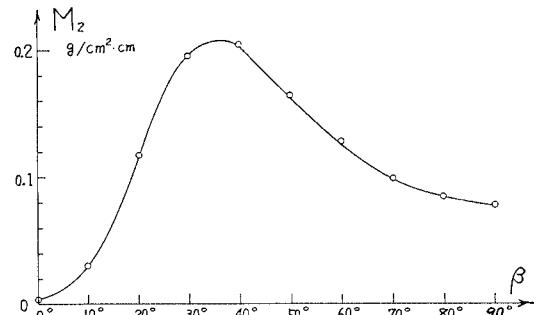
図-26  $(\cos \beta'' - \mu \sin \beta'')$  と横すくい角  $\beta$  との関係図-27 垂直力に關係する項と横すくい角  $\beta$  との関係

の垂直成分に關係する項  $(1/20) \sum (\sin \gamma_j / \cos(\pm \sigma t_j))$  について金属面の横すくい角との關係を求めるとき、図-27 がえられる。

したがって、金属の摩耗量  $M_2$  は、 $nP = 1.108 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\theta = 110^\circ$ ,  $\theta' = 130^\circ$ ,  $k = 0.6$  および  $K = 1$  とするとき、金属面の横すくい角  $\beta$  に対して図-28 に示すように、変化することが判明した。 $\beta = 30^\circ$  の近傍において、摩耗量が最大値となることは、実測値（図-16）とよく一致することが実証された。また、前式（17）に示した定数  $\mu_0$  は表-2 から算定され、 $\beta$  の値に対してほぼ一定値をとる。これは、図-23, 25 からも容易に確認される。

#### （4）金属の摩耗量におよぼす主要因

金属の摩耗量を支配する主たる要因は、金属面上を流動する砂粒子による外力であり、垂直面圧および摩擦係数の大きさによって、その外的条件を表現することができる。すなわち、金属面上の個々の砂粒子の運動形態が摩擦係数の大きさに影響を与え、また、個々の作用力の合力は、垂直面圧および摩擦抵抗力として表現される。一方、摩擦抵抗力の大きさは摩擦係数に依存するので、結局、摩耗量に影響を与える砂粒子の運動形態と作用力の大きさを実測可能な摩擦係数および垂直面圧で表わすことにより、金属の摩耗量との関係を見出すことが可能とな

図-28 摩耗量  $M_2$  と横すくい角  $\beta$  と関係（計算値）

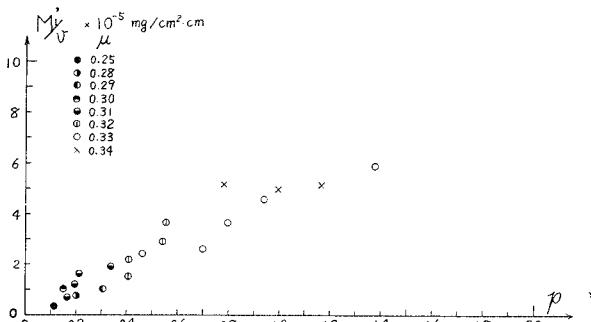
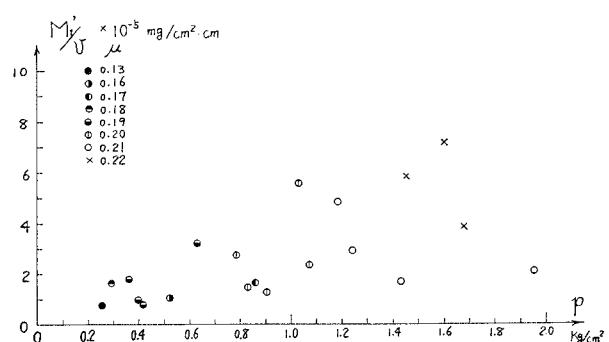
る。

さて、金属面に作用する垂直面圧  $p$  は、一般に式（19）に示すように、掘削深さおよび金属面のすくい角によって変化するが、金属の摩耗量との関係を求めるとき、砂粒子の運動形態を表現する摩擦係数  $\mu$ 、砂粒子と金属面との相対速度  $v$  によって分析する必要がある。いま、 $M'_1/v$  と  $p$  との関係を  $\mu$  に対して求めると図-29 がえられ、 $M'_1/v$  と  $p$  との間にほぼ比例関係があることが判明した。次に、 $M'_1/pv$  と  $\mu$  との関係を最小自乗法によって求めると、図-30 に示すように、両者の間に次式で示す比例関係が成立する。

乾燥状態にあるとき、

$$M'_1/pv = 39.58 \mu - 7.55 \quad (\text{相関係数 } 0.82)$$

水浸状態にあるとき

図-29(a) 乾燥状態における  $M'_1/v$  と  $p$  の関係図-29(b) 水浸状態における  $M'_1/v$  と  $p$  の関係

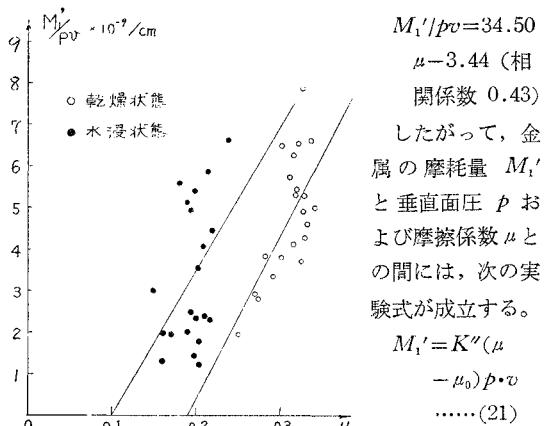


図-30  $M'_1/pv$  と  $\mu$  の関係  
ここに、 $\mu_0$  は、  
気乾燥状態で  $0.190 \pm 0.040$  である、水浸状態では  
 $0.100 \pm 0.040$  である。

すなわち、金属の摩耗量は、摩擦係数、垂直面圧および金属面と砂粒子との相対速度の積として表わされ、前述の理論式の結果とよく一致することが判明した。

なお、前節にも述べたように、金属の摩耗量  $M$  が金属面の位置、すなわち掘削深さ  $D$  に対して金属面の横すくい角  $\beta$  の関数であるとして表示すると次式をえる。

$0 < \beta < \tan^{-1} B$  のとき

$$M = A \left( \sin 2\beta - \frac{\sin^2 \beta}{B} + C \beta \right)$$

$\tan^{-1} B < \beta < \frac{\pi}{2}$  のとき

$$M = A (B \cos^2 \beta + C \beta) \dots\dots(22)$$

ここに、 $A$  は掘削深さに關係する係数、 $B$  および  $C$  は、砂粒子の大きさ、形状および間げき比、金属の材質および含水比などに關係する係数である。

## 5. あとがき

ゆるく堆積した砂質土と金属面との間の摩擦抵抗およびそれらに帰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、次のようになる。

(1) まず、斜面上を砂粒子が重力の作用によって走行する場合の運動形態を静止、滑動および転動に分類し、個々の砂粒子と斜面を形成する金属との摩擦係数および砂粒子形状による転倒角を実測することにより、与えられた斜面の傾斜角に対して斜面上の砂粒子の運動形態を分析することが可能である。

(2) 次に、金属面の横すくい角に対して砂粒子による金属面上に作用する作用力の方向を斜面上の砂粒子に作用する重力の方向と読みかえることにより、金属面上の砂粒子の運動形態を分析することができる。全砂粒子による金属面との摩擦係数は、静止砂粒子に作用する摩

擦力成分、滑動砂粒子および転動砂粒子の摩擦係数から算定される摩擦力の和を全垂直力で除した値として算定される。また、砂粒子のひっかき作用による金属の摩耗量は、滑動砂粒子数、砂粒子に作用する垂直力による粒子の金属面への貫入深さおよび砂粒子と金属面との相対運動速度から理論的に算定することが可能であり、理論式(11)～(13)をえた。なお、掘削深さが増加するにしたがい、砂粒子相互の拘束が増加し、斜面上の砂粒子の運動とは様子が異なるものと考えられる。この場合には、滑動土粒子数に対して拘束度係数を乗じ、修正を行なう必要がある。

(3) 本文では、摩擦および摩耗の機構から理論式(17)を誘導し、ゆるく堆積した砂質土中を走行する金属面の摩耗量と金属面上の砂粒子の進行速度、接触面圧および摩擦係数との関係を解析し、実験式(21)の妥当性について明らかにした。また、金属面の摩耗量が掘削深さおよび金属面の横すくい角によってどのように変化するかについて考察した。

(4) 特に、乾燥した堆積砂質土について、金属面の進行方向となす角度が 30 度近傍において最も厳しく摩耗することが実験より判明したが、これは理論的には、上述の 3 つの要因によって解析を行なうと、式(22)に示す摩耗曲線がえられ、この角度において極大値を与えるなどの摩耗特性を数式化することが可能となった。

(5) 一般に、湿潤堆積砂質土については、金属面上の運動形態および運動方向は乾燥時の場合とは異なり、土中水が金属面の砂粒子の挙動を左右しているが、摩擦および摩耗の機構を考察する場合に、乾燥時における諸機構を原則とし、水の影響に対する詳細な実験的観察を通してこれを修正することにより、より普遍的な摩耗の機構の把握が可能である。

以上は、ゆるく堆積した砂質土による金属面の摩耗特性について個々の砂粒子の運動形態、作用力および金属面上の砂粒子の運動速度に着目し、普遍的な法則性の追究を試みたが、掘削刃のエッジなどの摩耗については未解明の点が多く、今後の研究課題として追究していきたい。なお、本実験に際しては、京都大学大学院学生 西田行宏君、同工学部学生 栗山 保君の多大のご助力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) 畠 昭治郎・室 達朗：鋼板の砂質土に対する摩擦および摩耗特性、土木学会論文集 第157号、昭和43年9月、pp. 42～53.
- 2) Shōjirō Hata, Tatsurō Muro : Mechanism of Friction and Wear of Steel Plate against Solidified Sandy Soil, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University, Vol. XXXI, Part 4, October 1969. pp. 456-489.

(1971.1.7・受付)