

京都大学工学部 正員 畠 昭治郎

京都大学工学部 正員 〇 室 達朗

京都大学大学院 学生員 西田 行宏

1. まごかし エ工作業において、もっとも摩耗がひどいと考えられる固結砂質土と掘削刃などの金属材料との間の摩耗機構について、従来、種々の考察を加えてきた。ここでは、金属材料は炭素鋼を対象とし、土粒子の形状や粒度分布に対する金属の摩耗量の変化について検討していくが、固結砂質土の大きな現象である土粒子の破砕に関しては、個々の土粒子の破砕試験にもとづき理論的に摩耗量を算定しうる方法を示し、その結果について報告する。

つまり、土砂粒子の締め固め度や小さく、土粒子相互の移動が比較的自由的な状態について、砂粒子または礫(砕石)と金属材料との間の摩耗機構について理論的に解析するとともに、またとして、金属面上での土粒子の拘束条件である土粒子の形状、間げき比および接触面圧などと金属の摩耗量との関係について、固結土粒子の場合と比較検討を行なう。また、ゆるく締め固まった砂質土による金属の摩耗履歴現象について実験的考察を行なう。

2. 固結土粒子による金属の摩耗 前報¹⁾において述べたように、土粒子が破砕されない八面体であり、土粒子の粒度分布がそのまゝ表面の粗さを表現すると仮定すると、金属の摩耗量 M は、土粒子の硬度 H_v の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 を媒介として次式により算定することができる。

$$M = K \rho \tan \frac{\theta}{2} \left(n_i \alpha_i^2 + \frac{\rho}{8} \sum_{i=2}^n n_i \alpha_i^2 \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_1} \right), \quad \alpha_i = \left\{ k^2 N_i \sin \frac{\theta}{2} / 4 H_v \tan^2 \frac{\theta}{2} \right\}^{1/2}$$

ここに、添字 i は個々の土粒子に対して大ききの順に命名したものであり、 n_i, N_i は i 番目の土粒子に対する個数および垂直力である。 ρ は金属材料の密度、 θ は土粒子頂角の平均対面角、 θ' は切削面の平均頂角、 k は α_i について土粒子の移動時に対する静止時の比であり k は実験条件により定まる定数である。また、金属の摩耗量と接触面圧との関係は α_i を媒介として算定することができる。すなわち、 α_i を与え、それに対する摩耗量を垂直力 N_i と土粒子の個数 n_i との積である接触面圧の関数として求めることができる。この際、土粒子の粒径の大ききの順序に示したおと逐次計算を進めていくのであるが、土粒子に作用する垂直力がその土粒子の破砕強度を超過する場合には、その土粒子は粉砕消失したおとして再度次の大ききの土粒子について算定しなす必要がある。図-1に示すように、一般に、土粒子の圧潰強度は粒径の1.5乗に比例して増大することから判明した。この試算結果にもとづいて、種々のウィークス硬度と有する金属材料についてその金属の摩耗量と接触面圧について算定した。図-2 (a) に示したものは、一例として粒度偏差、 $\sigma = 1.40, 2.03, 3.40$ および 8.20 の固結土粒子に対

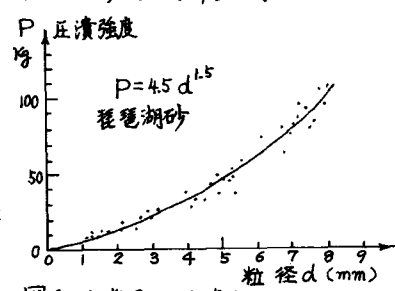


図-1 土粒子の圧潰試験

する金属材料 ($Hv=100$) の磨耗量と接触面圧との関係について、土粒子の粒径の大ききの順に破砕脱落した場合の変化である。接触面圧が増加するとともに脱落粒子は増加するが、その脱落粒子は除外して曲線 1, 2, 3, ... と移行する面圧を見出し、これらの点を連結させると同図 (b) のようになる。

すなわち、ビッカース硬度が増加するとともに破砕粒子は多くなり、磨耗量と接触面圧との関係は図 2 (a) における包絡線に漸近するのである。すなわち、粒度偏差 σ が増加するとともに破砕粒子はますます増加しその関係は包絡線と一致してくることが判明した。すなわち、図 2 (a) に示した諸関係は、粒度偏差が同じである場合、その土粒子の平均粒径に関係なく成立する。同図 (a) は平均粒径 0.1mm の場合であるが、計算の結果、平均粒径が変化した場合にも、破砕の難易にかかわらずこれらの諸関係には顕著な差は見られなかった。このようにして、金属の磨耗量と接触面圧との関係は、金属のビッカース硬度とパラメータとして読み取ることが出来るが、実際問題として土粒子の破砕強度以上の荷重をかけた場合に破砕し消滅してしまうことと前提とする。

すなわち、粒度偏差 σ がよび、土粒子の粒径の変化によって顕著な差は生じないのである。

3. ゆるく堆積した土粒子による金属の磨耗 土粒子相互の移動が比較的自由に行ないうる状態においては、固結土粒子の場合とは異なり、特定の土粒子に荷重の集中することはない。すなわち、個々の土粒子に作用する接触力は、金属面に接する土の強度や拘束条件によって定めらる平均接触力の近傍とバラツキなのである。いま、このバラツキが正規分布すると仮定すると、その平均接触力は与えられた接触面圧に対して粒径、間隔より粒子数れを求めて算定され、すなわち、偏差 σ は、土粒子の粒形、粒度分布および拘束状態などによって与えられるのである。実際問題として金属面上の土粒子の転動は重要な現象であるが、まず、すべての土粒子は転動せず金属面上をひっかいていく

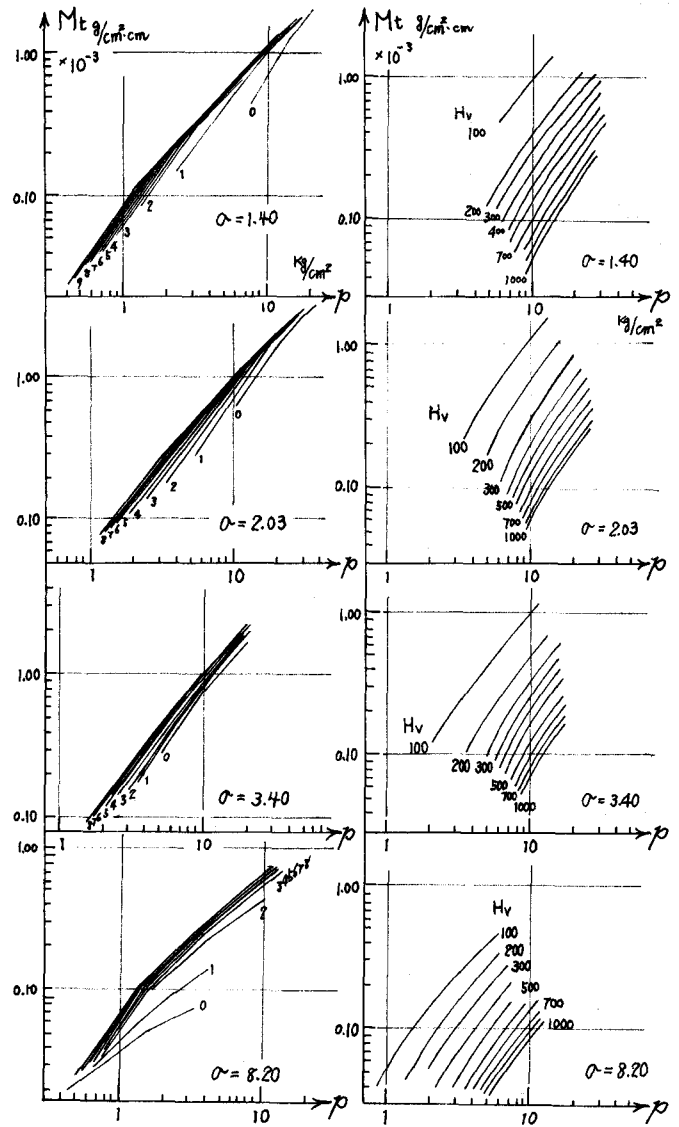


図-2(a) 土粒子の大ききの順に破砕された場合の磨耗量と接触面圧の関係 (ビッカース硬度 100)

(b) 土粒子の破砕を考慮した場合の磨耗量と接触面圧との関係 (ビッカース硬度 100~1000)

として算定する。個々の土粒子による金属面への貫入量は接点力から求められ、前式(2)によって算定することからできる。いま、 n_i 個の土粒子が N_i なる接点力をうけているとすると、金属の摩耗量は次式によって算定することからできる。接点力 N_i が正規分布に従う場合には、 $N_i = m \pm \sigma t_i =$

$$M = K \rho \tan^2 \frac{\theta}{2} \cdot \frac{r^2 \sin \theta / 2}{4 \sqrt{1 + \tan^2 \theta / 2}} \sum_i n_i \cdot N_i \quad (3)$$

ある粒子の個数 n_i は全個数に確率密度 $\phi(t_i)$ と Δt_i を乗じたものとして与えられる。したがって、

$$\sum_i n_i N_i = \sum_i (m \pm \sigma t_i) \cdot n \cdot \phi(t_i) \cdot \Delta t_i = 2 m n \sum_i \phi(t_i) \Delta t_i = m n \quad (4)$$

(4) から (5) 式が導かれる。

$$M = K \rho \quad (5)$$

すなわち、土粒子が比較的自由に移動する場合については、金属の摩耗量は接触面圧に比例して増大することから理論的に判明した。この場合の比例定数は金属の硬度および土粒子の形状等によって定められる定数であり、この段階では土粒子の粒径、粒度偏差および間けき比には一切無関係のように思われる。しかし、先に述べたように土粒子が金属面上で転動する現象は、金属の摩耗量に非常に大きな影響を及ぼすのであり、この土粒子が転動する割合、土粒子形状、土粒子相互間の摩擦係数および土粒子の拘束状態などによって決定される。言い換えると、土粒子が金属面上で転動する割合は、金属面と土との摩擦係数と一義的な関係があると考えると、金属面上の土粒子の間けき比と e_n として、摩擦係数 μ は次式で表現される。²⁾ こゝに、 k_1, k_2, \dots, k_n は正の定数であり、土

$$\mu = \tan \delta = \frac{k_1 - k_2 e_n}{k_3 + k_4 e_n} \quad (6)$$

粒子形状による土粒子間の回転の難易(すなわち土粒子相互の摩擦係数)や

土粒子の粒径、粒度分布によって定められる定数である。上式において e_n は、金属面上を移動する土粒子の拘束状態を表現しているものであり、土粒子が拘束 (e_n が減少する) されていくにしたがって摩擦係数 μ は増加し土粒子は転動せず金属面のひっかき作用は増大すると考えられる。すなわち (5), (6) 式をまとめ金属の摩耗量は、次の (7) 式で与えられると考えられ、後に実験によって検

$$M = K' (\mu - \mu_0)^2 \rho \quad (7)$$

証する。

4. 実験とその考察

ゆるく堆積した琵琶湖砂(粒度分布は $m = 0.70 \text{ mm}$, $\sigma = 0.244$ の対数正規分布となる)による金属材料の摩耗面に作用する垂直面圧 p 、摩擦力 f 及び摩擦係数 $\mu (= f/p)$ を実測するために、ビッカース硬度 120 の軟鋼を供試体(摩耗面積 4.0 cm^2) とし、これを図-3(a)に示す支持具にとりつけ進行方向となす角度 α 及び掘削深さを自由に變えうるようにし、供試体に作用する p 及び f はそれぞれ供試体と支持具とを連結する測定棒に貼付したストレインゲージによって分離測定しうる装置を作成した。金属の摩耗量は、供試体を土槽において一定速度で一定の距離走行させた後、その重量変化を測定した。垂直面圧 p と金属板が進行方向となす角度 α との関係は、掘削深さによってその大きさは異なるが、半対数紙上において p は $\log \alpha$ に比例して増加することが判明した。また、垂直面圧 p についての角度 α について掘削深さの増加とともに直線的に増加する。一方、

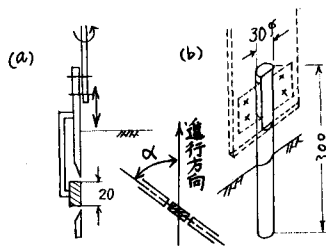
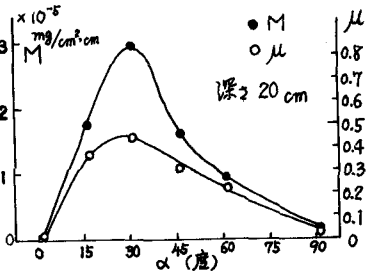
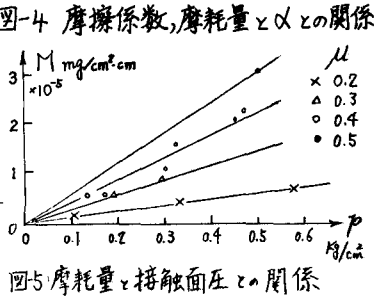


図3 供試体およびその支持具

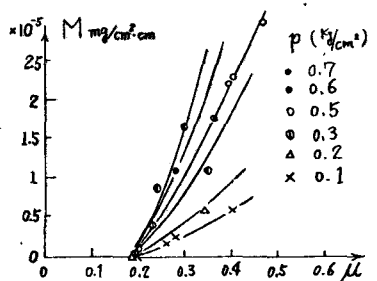
同時に測定された摩擦係数 f については掘削深さの増加とともにほぼ直線的に増加するが、角度 α については30度近傍を頂点として0度から30度まで急激に立ち上がり30度をこえると次第に減少し90度で0となる。摩擦係数および磨耗量と角度 α との関係は、図4に示すように、30度において砂粒子による金属のひびき効果が最も顕著にあらわれたと考えられる。また、摩擦角 δ は α の90度よりも減少するとともに次第に動員された30度において完全に發揮



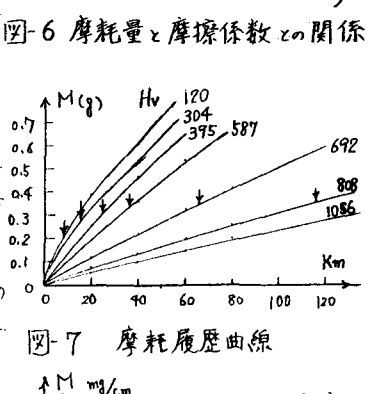
られたのであり、30度をこえると、金属面上の土粒子相互の間げまの大きくなり粒子の転動現象が急に大きくなるために摩擦係数は減少し、それとともに磨耗量も減少すると考えられる。図5に示したのは、摩擦係数 μ をパラメータとして磨耗量 M と接触面圧 p との関係である。また、図6に接触面圧 p をパラメータとして磨耗量 M と摩擦係数 μ との関係を示した。すなわち、前式(7)を示したように、磨耗量は接触面圧に比例して増加し、摩擦係数(この場合 $\mu = 0.2$) の1/2 乗に比例して増加することを実証されたのである。



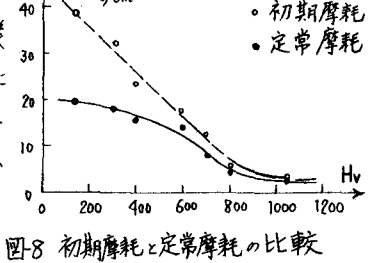
つぎに、磨耗が進行するとともに金属表面に加工硬化層が形成し、磨耗減量が一定値におちつく。この状態を定常磨耗とし、それ以前を初期磨耗とする。図7および図8は、図3(右)に示す直径30mm、長さ300mmの供試体を使用し、琵琶湖砂に対する各種金属材料の磨耗履歴特性を示したものである。ビッカース硬度の小さい材料ほど早く定常磨耗状態に達し、初期磨耗から定常磨耗に移行する



点も明白である。すなわち、加工硬化率が非常に小さくなっている。一方、ビッカース硬度が600をこえると、初期磨耗と定常磨耗の区別が不明確となり、加工硬化率が著しく減少してくる。すなわち、軟鋼が定常磨耗に達した場合の耐磨耗性は、ビッカース硬度600前後の熱処理鋼に相当する。ほぼ同程度の表面エネルギーを得た結果となっている。すなわち、これらの加工硬化現象は微粒子による衝撃作用のかなり大きな影響を及ぼしているためと考えられる。



5. あとがき 固結土粒子およびゆるく堆積した土粒子による金属材料の磨耗機構および金属の磨耗量が接触面圧および摩擦係数の関数であることを明らかにした。なお本論では主として金属面上に作用する砂粒などの外力機構についての解析を行ない、金属材料については金属組織などの見地から可能な限り問題のあるにもかかわらず、硬さの取り上げていない。今後、これらの諸問題についてより多くの実験を重ね、明らかにしていきたい。



文献 1) 島 昭治郎, 屋 達朗; 鋼製の砂質土に対する摩擦および磨耗特性, 工学論文集 第157号 昭和43年9月 PP. 42~53.
2) 島 昭治郎, 屋 達朗; 乾燥土に対する砂粒の運動摩擦特性について, 材料 第17巻 第174号 昭和43年3月 PP. 239~245.