

砂粒子による金属材料の摩耗特性について

京都大学工学部 正員 畠 昭治郎
同 正員 〇室 達 朗

まえがき 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帰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への応用に十分な意義と価値を有すると考えられる。

ここでは、まず土工作中最も摩耗のげしい固結砂質土について炭素鋼板との間の摩擦抵抗およびそれ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報告する。

摩擦の機構 金属面と固結砂質土との間のすべり摩擦は、主として砂粒子によるひっかけ作用に帰因するものであり、局部的に観察すれば、砂粒子による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。砂粒子が金属板上を移動するときに粒子は破砕されないと仮定すると、金属と固結砂質土との間の接触面圧と摩擦抵抗との関係は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。ここでは、単粒子によるひっかけ試験とは、砂粒子の先端の形状を正四角錐と仮定し、破砕されない単一砂粒子を代表するものとしてダイヤモンド圧子を用いて金属板に対するひっかけ試験を行なったものである。使用したダイヤモンド圧子の対面角は100度および136度の2種類で、それぞれ硬度の異なる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、そのひっかけ抵抗を実測した。いずれの場合にもひっかけ抵抗は垂直力の増加とともに直線的に増加するので、両者の比を一定の係数 μ' で表わし表-1に示した。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。また、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、ひっかけみぞの両側へ金属が流動し盛り上がる部分が多く、その盛り上がり高さがひっかけみぞの深さの約8割に達しており実際に金属はく離して摩耗しきるのはごくわずかなものであることが観察された。さらにダイヤモンド圧子が鋼板に貫入する場合、その移動時における貫入量は圧子を引張る方向、金属の種類および垂直力に関係なく静止時の約6割しか貫入していないことが明らかとなった。

一方、後述するように、固結砂質土として砂粒子をセメントで凝結させたソイルセメントと炭素鋼板との摩擦試験の結果から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し、接触面圧を 10 kg/cm^2 まで上げて行なった場合にもその直線性は実証された。しかし、実際の摩擦抵抗は土粒子の破砕による目づまりの

表-1 ダイヤモンド圧子によるひっかけ試験で求めた係数 μ' 値

対面角		136度		100度	
すべる方向		☒→	⬠→	☒→	⬠→
μ' 値	Hv 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

ためにひっかき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、その大きさは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。

摩擦の機構¹⁾ 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。

$$\alpha_i = \left\{ \frac{\rho^2 N_i \sin^2 \theta/2}{4 H_v \tan^2 \theta/2} \right\}^{1/2} \quad (1)$$

こゝに、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。 ρ 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。

金属の摩擦量 M は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、(1)式で表わされる α_i を用いて次式で与えられる。

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

こゝに、 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擦痕跡の消失状態、および摩擦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擦量との関係を算定することができる。後述するように種々の金属の硬度および土粒子の粒度分布に対して計算した結果、次式に示すように種々の金属の摩擦量 M_t は接触面圧 p の 0.84 乗に比例して増加することが判明した。

$$M_t = K_1 p^{0.84} \quad (3)$$

こゝに、 K_1 は金属の硬度および土粒子の粒度分布によってきまる定数である。

実験装置 および その方法

高面圧に対する摩擦および摩擦試験を行なうために、図-1 に示す試験装置を試作した。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 の厚さで円環状型枠の中に充填打設し

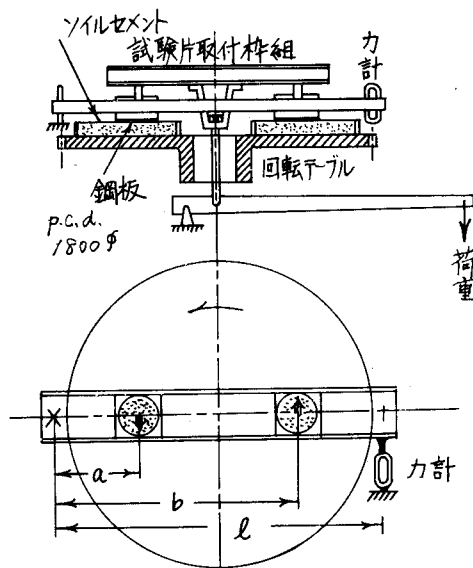
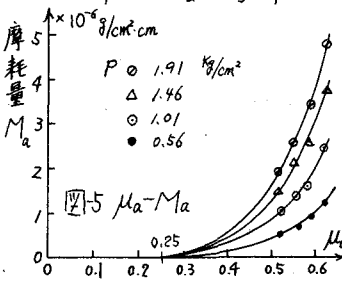
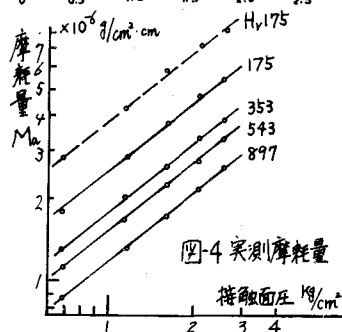
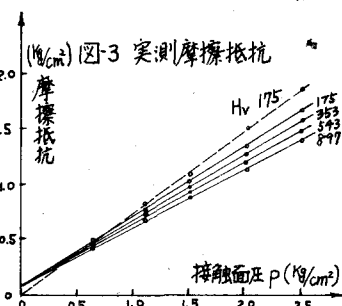
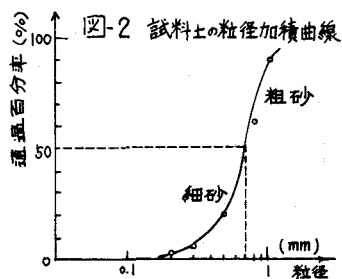


図-1 摩擦および摩擦試験機概略図

1) 一部昭和42年度関西支部年次学術講演会にて発表

た。その後表面を平滑にし、7日間養生した後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擦試験片をおき、種々の載荷圧に対して、摩擦抵抗および金属の摩擦量を実測した。すなわち摩擦試験片取り付け枠組は図に示すように摩擦試験時の固結砂質土と試験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摩擦抵抗力の反力を測定する構造とした。また、載荷装置は試験片を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えられるように回転部下部に組み立て最大約1tonまで載荷しうるものとした。試料土は図に示す粒径加積曲線をもつ硬質の砂粒子であり、ここでは通過百分率50%以上の砂を粗砂、それより粒径の細かい砂を細砂と命名する。また、試験片は炭素鋼板に種々の熱処理を施して硬度を変化させたもので、その大きさは $70 \times 77 \times 1$ mmの矩形板であり、その摩擦量の測定には面圧 10 kg/cm^2 にいたる各面圧に対して鋼板が8mm移動した場合の摩擦損量として直接鋼板の重量変化を測定した。



実験結果とその考察 接触面圧に対する摩擦抵抗および摩擦量の関係は図3、図4に示す。摩擦抵抗は面圧の増加とともに正比例して増大するが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。なお破線で示したのは砂粒子の破砕片を除き、つねに鋼板が新しい面を通過する状態に行なった結果であり、摩擦抵抗は原点を通り破砕粒子をともなう場合にくらべて非常に増大する。また、摩擦量については一定の面圧に対して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、摩擦量 M_a は接触面圧の0.84乗に比例することが判明した。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5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、すでに土粒子による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いずれも直線となり、 M_a は $(\mu_a - \mu_0)$ の約3.1乗に比例することが判明した。したがって、一般に摩擦量 M_a と摩擦係数 μ_a および面圧 p 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。

$$M_a = k' (\mu_a - \mu_0)^{3.1} p^{0.84} \quad (4)$$

また、粒度分布の相異によって鋼板($H_v=175$)との摩擦係数および鋼板の摩擦量について実測した

結果を図-6、図-7に示す。摩擦係数は見かけ上粗砂の方が細砂より大きい。これは破碎粒子による目づまりのために、固結土粒子に作用する荷重分担率が両者で異なるためであると考えられる。一方、摩擦量はいずれも接触面圧の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、理論的に摩擦量を算定するために、砂粒子の平均対面角を推定する。すなわち、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-8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き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110度であると推定される。したがって、 $\theta = 110^\circ$ 、 $K = 0.6$ として(1)式から M_t を(2)式によって算定することができる。ただし、この場合 $K = 1$ 、 $\theta' = 130^\circ$ として計算した。その結果を図-9に示す。図から明らかに、鋼板の硬度にかかわらず、固結砂質土に対する金属の摩擦量は接触面圧の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実証された。

また、実際の摩擦量 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(3)式で与えられる理論摩擦量 M_t から次式で算定することができる。

$$M_a = K_2 f^{0.84} M_t \quad (5)$$

$$f = (\mu_a - \mu_0) / (\mu_t - \mu_0) \quad (6)$$

ここに、 K_2 は土粒子の破碎およびボンド力の消滅による摩擦痕跡の消失状態および摩擦痕からの金属の遊離率によってきまる定数である。なお、この荷重分担率 f および定数 K_1, K_2 がいずれも摩擦係数と関数関係にあることを考慮すると、理論的に実験式(4)における指数が3.1になることを実証することができた。

あとがき 固結土粒子に対する鋼板の摩擦係数および摩擦量

は、土粒子の破碎による目づまりに大きく左右されるために、実際の摩擦量を推定するには、摩擦係数を実測することによって荷重分担率 f を算定し、(1)、(2) および (5) 式によって計算が可能であること、および直接実験式(3)が適用できることを示した。しかし、相互に固結していない砂粒子については、鋼板の摩擦機構が根本的に異なり、砂粒子によるひきき摩擦もその一部をなし、粒子の転動によるころがり摩擦をはじめ、粒子の金属面への衝突にともなう衝撃摩擦などが複雑に錯綜し、また砂粒子相互の拘束条件によっても金属の摩擦量に大きな影響を及ぼすと考えられる。また、このような摩擦機構の相異によっても金属の耐摩擦性は異なるために、自ら金属自身の特性を把握する必要がある。これを今後の研究課題として実験を主体とし、種々の摩擦特性を解析していく予定である。

