

III-85 土工機械作業部分の土砂礫による摩耗について

京都大学工学部 正員 畠 昭治郎
 福井大学工学部 正員 〇室 達 朗

1. まえがき 近年、土工機械は目覚ま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。それによってもって掘削機械などの作業部分の土砂による摩耗劣化はいちぢるしく施工の合理化を追究するうえに大きなネックとなっている。とくに、ブルドーザのカッティング・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きわめて深刻な問題であり、摩耗対策の重要性が再認識されるのである。こゝでは、乾燥した堆積土砂による工具・部品などの金属材料の摩耗について、その摩耗の発生機構について解析し、摩耗量を算定する理論式を考案する。

土砂による金属材料の摩耗は主として金属面上を土粒子が滑動するとき土粒子によるひ、かき作用によって発生する。金属面上の土粒子の運動機構、すなわち転動・滑動および静止については、ゆるく堆積した土砂中を金属面が進行するとき、その進行方向と金属面とのなす角度、すなわち横すくい角による運動機構の差異について解析する。さらに、滑動する土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論ずる。

2. 斜面上の土粒子の運動 金属面上を土砂が移動するとき、土砂による金属材料の摩耗機構を説明するためには、各金属面上において個々の土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。まず、最も単純な土粒子の運動として、斜面上におかれた砂粒の挙動については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、ある土粒子群から個々の粒子の金属面に対する摩擦角 ϕ の大きさの分布形状を示したものである。図中ハッチした部分はある斜面の傾斜角 θ に対して土粒子が滑動しないことを意味している。すなわち、図-1(b)は、同じ土粒子群から個々の粒子の重心と底辺端とを結ぶ転倒角 β の分布形状であり、ハッチした部分はある斜面の傾斜角 θ に対してその部分の土粒子は転動しないことを意味する。金属面と土粒子群との摩擦力は土粒子が静止または滑動しているとき作用し、転動している土粒子との間にはほとんど作用しないと考えられる。また、土粒子群による金属面の摩耗は金属面を滑動する土粒子によるひ、かき作用によるのみ発生し、静止または転動する土粒子によって直接金属母材からの剥離摩

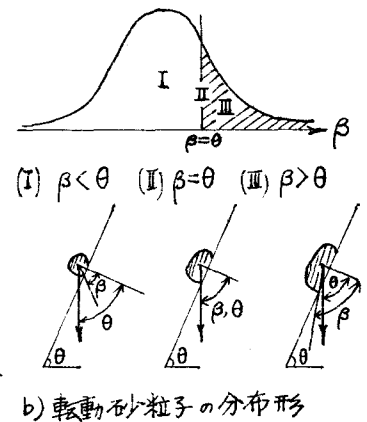
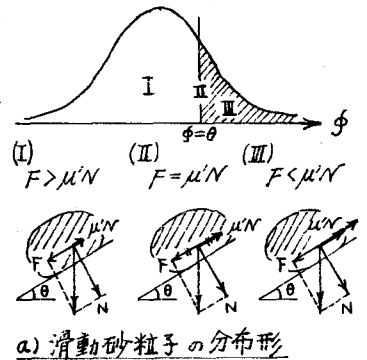


図-1 斜面上の砂粒子の挙動

耗はない。今仮に、与えられた土粒子群が土粒子相互の間げきが十分大きく互に拘束されることなく、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 θ に対して滑動および転動する土粒子の分布形が図-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(I),(II)は図-2のようになる。ある斜面の傾斜角 θ において、転動しない土粒子の個数は全土粒子数 $\overline{DE}$ (=1.0)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土粒子の数は $\overline{AC} \times \overline{BC} / \overline{DE}$ で与えられる。したがって、実際に斜面上を滑動する土粒子の数 $\phi(\theta)$ はつぎの式で与えられる。

$$\phi(\theta) = \overline{AC} - \overline{AC} \times \frac{\overline{BC}}{\overline{DE}} = \overline{AC} \left(1 - \frac{\overline{BC}}{\overline{DE}} \right) \quad (1)$$

各斜面の傾斜角 θ に対して、上式によって滑動土粒子の数 $\phi(\theta)$ を算定することができ、それらの関係は図-3のようになる。すなわち、斜面上の土粒子の運動は斜面の傾斜角によってその様相は異なり、傾斜角がゆるくなるほど転動する土粒子の数は少くなり、ほとんどの土粒子は転動せずわずかに滑動する土粒子があっ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60度近傍に達すると転動する土粒子の数は比較的少く、ほとんどの土粒子は斜面上で静止することはなく滑動し、滑動土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土粒子の数が次第に増加し、滑動する土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、個々の土粒子と金属面との間の摩擦角および各土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。これにもとづいて摩擦および摩擦の機構について考察する。

3. 掘削刃面の横すくい角と土粒子の滑動 乾燥堆積土砂の掘削において、ここでは掘削刃面がつねに鉛直であり、掘削刃の進行方向と刃面とのなす横すくい角が変化する場合の刃面上の土粒子の挙動について考える。とくに、刃面を構成する金属面と土砂との間の摩擦および金属材料の摩擦機構を解析するためには、主として土粒子の滑動と個々の土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。掘削刃が堆積土砂中を進行する場合、掘削刃面上の土粒子は互に密実に拘束され、個々の土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、個々の土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 $N_i(m_i, \alpha_i)$ なる正規分布をなすとする。その平均値 m_i は横すくい角 α_i で与えられ、その分散 σ_i^2 は土粒子相互の密実性、すなわち刃面上の間げき比の大きさによるものでありdense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、個々の土粒子に作用する力の方向と刃面とのなす角 γ_{ij} は次式で与えられる。

$$\gamma_{ij} = \alpha_i + \sigma_i \cdot t \quad (2)$$

種々の角度 γ に対して掘削刃面上の土粒子の運動について図-4に示した。個々の土粒子に作用する外力の方向を先に述べた斜面上の土粒子に作用する重力の方向と一致させることによって掘削刃面上の土粒子の挙動が静止、滑動および転動のいずれの運動形態をとるかにについて判別することができる。したがって、掘削刃

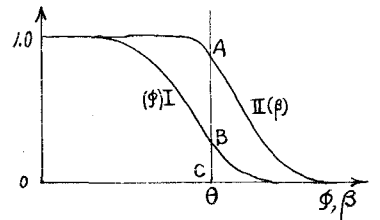


図2 摩擦角および転倒角に対する累積度数分布図

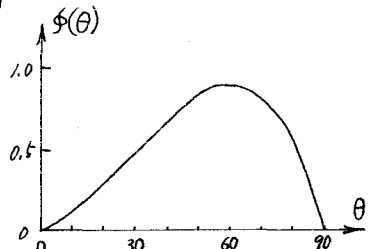


図3 斜面傾斜角 θ と滑動土粒子数

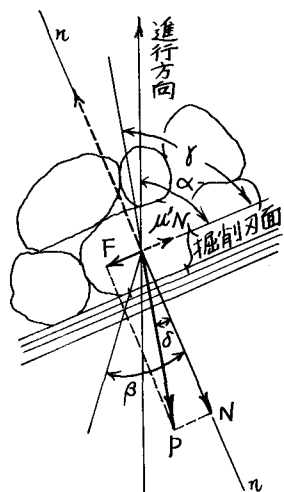
面上を滑動する土粒子の数を算定するためには、図-3の横軸角を土粒子に対する作用力と刃面とのなす角 γ と読みかえることにより可能である。すなわち、与えられた横すくい角 α に対して作用力の方向が $N_c(m_i, \alpha_i)$ なる正規分布をなすとき、全土粒子数を Δn に等分割する各 δ_{if} の値に対して $\phi(\delta_{if})$ を読みとることによって、刃面上を滑動する土粒子数は次式で与えられる。

$$\phi(\alpha_i) = \Delta n \cdot \sum_f \phi(\delta_{if}) \quad (3)$$

このようにして、横すくい角 α に対して掘削刃面上を滑動する土粒子の数 $\phi(\alpha_i)$ が算定できれば、これが直接掘削刃面の摩擦に参与する粒子の数であると考えられる。ただし、ここで個々の土粒子に作用する外力の分布形はある瞬間時における値をとらえたものであり、つぎの瞬間においてその外力の方向は異なるが、全体としての分布形はいつの瞬間においても同じであると考ええる。また、個々の土粒子については滑動、転動および静止の状態がづづづつて発生すると同時に掘削刃面上の出没についても多種多様である。したがって、掘削刃面上の全体の土粒子群を対象として滑動する割合、転動する割合および静止する割合について考察し、個々の土粒子については滑動、転動あるいは静止という同じ運動形態が連続するものとして算定する。

つぎに、個々の土粒子に作用する力の大きさ、とくに掘削刃面に対して垂直な力成分について考える。掘削刃面に作用する合力は、掘削刃の進行方向に作用するが、掘削刃面と土粒子群との間の摩擦抵抗の大きさにより掘削抵抗の方向は必ずしも進行方向とは一致しない。すなわち、個々の土粒子に作用する外力が図-4に示したように掘削刃面との角度をなすとき掘削刃面から受ける摩擦抵抗は μN であり、外力の刃面に平行な成分 F の大きさによって抵抗の方向は土粒子が静止するとき外力の方向と一致するが、滑動または転動するときには刃面の法線方向に傾向する。したがって、滑動または転動する土粒子数が多いほど合力の方向も刃面の法線方向に傾向する。しかし、外力の掘削刃面に垂直な成分は摩擦抵抗の大きさによって変化することではなく、この力成分が土粒子の金属面への貫入深さをきめるのであり、金属の摩擦量を算定する上で重要な要因となる。なお、個々の土粒子に作用する外力の大きさは、掘削刃面に作用する合力の大きさを土粒子径および間げき比から算定される刃面上の土粒子数で除すことにより求めることができる。

4. 摩擦の機構と摩擦係数の大きさ 個々の土粒子と刃面である金属材料との間に作用する摩擦現象は、土粒子の刃面上での運動形態によって根本的に異なる。金属面上での単粒子によるひき試験において、ひき係数 μ 、垂直力 N に対して摩擦抵抗は μN で与えられる。図-4に示したように、ある外力に対して土粒子が静止している場合には、摩擦抵抗は μN より小さい $N \cdot \tan(90^\circ - \delta)$ で釣合っている。また、 μ は土粒子の形状、金属の性質によって異なるが摩擦係数 $\tan \phi$ と対応させると、滑動する土粒子に対して摩擦抵抗は $N \cdot \tan \phi$ となる。したがって、外力の刃面方向の力成分が、この摩擦抵抗より大きな値をとるとき、その力差は刃面上の土粒子に加速力を与えすべし運動を起こさせるのである。なお、転動土粒子に対しても同様にこの摩擦抵抗 $N \cdot \tan \phi$ が作



静止	$\delta \leq \beta, F \leq \mu' N$
滑動	$\delta \leq \beta, F > \mu' N$
転動	$\delta > \beta$

図-4 掘削刃面上の土粒子の運動

用する。さて、掘削刃面上の土粒子群について静止、滑動および転動の3つの運動形態の割合が、刃面の進行方向となす角 α によってどのように変化するかについて考える。滑動土粒子の割合については、前述した方法で図-3より求めることができる。また、転動および静止する土粒子の割合についても同様に算定することができ、図-5に示すように滑動土粒子数 n_1 、静止土粒子数 n_2 および転動土粒子数 n_3 を直接読みとることができる。今、個々の土粒子に作用する外力の大きさ、方向および金属面との摩擦角がすべて各平均値 P_m 、 α および ϕ_m 、 ϕ_m' について算定するとき、滑動土粒子による摩擦抵抗は $n_1 P_m \sin \alpha \tan \phi_m$ で与えられる。また、静止土粒子に対しては $n_2 P_m \sin \alpha \tan (90^\circ - \alpha)$ 、転動土粒子に対しては $n_3 P_m \sin \alpha \tan \phi_m'$ で与えられる。個々の土粒子に作用する垂直力はすべて $P_m \sin \alpha$ であるとして全垂直力は $(n_1 + n_2 + n_3) P_m \sin \alpha$ である。したがって、掘削刃面と土粒子群との間の摩擦係数 μ は次式によって算定することができる。

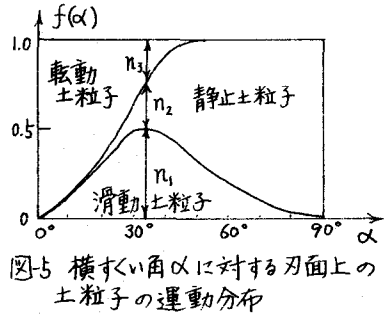


図-5 横すくい角 α に対する刃面上の土粒子の運動分布

$$\mu = \frac{n_1 \tan \phi_m + n_2 \tan (90^\circ - \alpha) + n_3 \tan \phi_m'}{n_1 + n_2 + n_3} \quad (4)$$

上式を用いて、掘削刃面の進行方向となす横すくい角 α に対して、摩擦係数がどのように変化するかについて検討することができる。なお、掘削刃面での土粒子の拘束性すなわち土粒子の間げき比によつて摩擦係数は変化すると考えられるが、これは前述したように個々の土粒子に作用する外力の方向の分布形が間げき比によって変化するために土粒子の運動形態自身その割合 n_1 、 n_2 および n_3 の値が変化するので、上式で与えられる摩擦係数は土粒子の拘束性についての関数でもある。

5. 摩擦の機構と摩擦量の算定 掘削刃面上の土粒子の運動形態において、静止している土粒子によつては刃面の摩擦は発生しないが、滑動している土粒子による金属面のひっかけ作用による刃面の摩擦が最も著しく、それに比べて転動する土粒子による金属の摩擦において実質的に金属母材からの遊離による摩擦量はきわめて少ない。したがって、ここでは滑動土粒子による金属面のひっかけ摩擦についてその機構を解析し、摩擦量を理論的に算定する。まず、個々の土粒子に作用する外力 P に対し、金属面へ貫入する平均垂直力 $P_m \sin \alpha$ に対して金属面と i となす外力には $P_m \sin \alpha / \cos(\alpha_i t) = N_i$ なる垂直力が作用する。前報において述べたように土粒子による金属面への貫入深さ α_i は次式で与えられる。また、

$$\alpha_i = \left\{ \frac{k^2 N_i \sin \theta/2}{4 H_v \tan^2 \theta/2} \right\}^{1/2}, \quad N_i = \frac{P_m \sin \alpha_i}{\cos(\alpha_i t)} \quad (5)$$

金属の摩擦量は滑動土

粒子数を算定すること

$$M = \frac{K P}{N} \tan \theta/2 \sum_{i=1}^S \phi(\alpha_i) \times \alpha_i^2 \times \frac{n_1}{n_1 + n_2 + n_3} \times \frac{A}{1 + e} \times \frac{1}{a_n^3 \sum_{j=1}^S (1/a_j)} \quad (6)$$

により次式で与えられる。

6. あとがき 刃面上の個々の土粒子について、その運動形態は決して一定の状態を保持することではなく常に変動しているために金属面上の摩擦痕跡は不連続となる。その摩擦痕跡の長さは土粒子の大きさ、形状および拘束状態などによつ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土粒子数の割合は一定であるから同一土粒子によるひっかけ作用が連続して発生するとして解析し、上式をえた。この理論解は乾燥堆積土砂について前報において発表した実験の結果をよく説明できる。