

III-142 掘削工具エッジ部分の土砂礫による摩耗特性について

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

日本道路公団 正員 西田 行宏

1. まえがき 土作業において、掘削工具の土砂礫による摩耗はいろいろしく、摩耗の機構を究明することは施工合理化上きわめて重要な問題である。本文では、工具・部品の摩耗に重要な影響を及ぼすエッジ部分の摩耗について、その機構を解明し、その摩耗特性の把握に努める。

2. 金属エッジ部分の摩耗機構

2.1 単粒子によるエッジ摩耗の顕微鏡観察 単一土粒子が一定の垂直力を与えられ、金属平面を引掻く場合を考えると、その痕跡は一定の幅と、一定の深さを有する条痕を形成する。しかし、金属面の曲率が増大すると、引っかき作用による破壊領域が増大する。これが、金属エッジ部における摩耗量がいちじるしく増大する一つの要因となる。また、E. Rabinowicz は固体の表面エネルギーについて論じているが、自由面が多くなるほど表面エネルギーは増大し、一定の破壊エネルギーに対して摩耗量が増大することを述べている。ここでは、種々の曲率をもった金属エッジを作成し、マルテンス引掻硬度計を用いてその痕跡特性を金属顕微鏡によって観察した。単粒子は尖端の対面角 90 度のダイヤモンド圧子（円錐形）を使用し、50 g の荷重を曲率の法線方向にかけて引掻き試験を行なった。（図-1）前報¹⁾において述べたように、貫入係数 k をそれぞれの曲率半径 r について実測し、それらの関係について図示すると 図-2 がえられた。

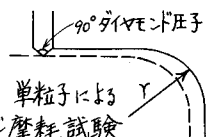


図-1 単粒子によるエッジ摩耗試験

2.2 エッジ部分に作用する喰込み抵抗とその形状変化

まず、問題を2次元に限るとし、図-3に示すように、 $y(x, t)$ なる金属面が時間 t とともに摩耗によって変化していく場合について考える。ここに、 S は x, y, t なる直交座標系において曲面の x, y 平面への投影である。すなわち、 S は次式で与えられる。

$$S = \int \frac{\partial y}{\partial t} dt dx \quad (1)$$

一方、 dt 時間中に土粒子は dx まで v なる速度で進行するとし、 dx 区間に存在する土粒子数を n とする。単一区間に存在する土粒子数を m とすると次式が成立する。

$$n = m dx = m v dt \quad (2)$$

$$\text{また、} \{\alpha(x)\}^2 = \frac{k^2(x) \cdot \sin^2(\theta/2)}{4 H_v \tan^2(\theta/2)} \cdot N(x) = a k^2(x) \cdot N(x) \quad (3)$$

各 x の値に対して n 個の土粒子が通過するので

$$S = \int n \{\alpha(x)\}^2 dx = m v a \int k^2(x) \cdot N(x) dt dx \quad (4)$$

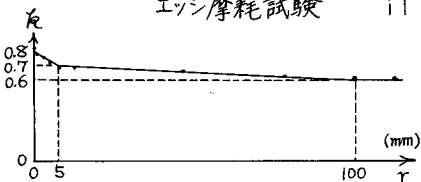


図-2 曲率半径 r と貫入係数 k の関係

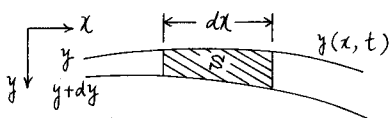


図-3 摩耗による形状変化

今、金属面が平面であるとする、 $k^2(x) = C$ (一定値) となり、また $N(x)$ が x の一次式 $C_1 x$ (C_1 は定数) で表わされるとき、金属表面の形状は次式で与えられる。

$$\int \frac{\partial y}{\partial t} dt dx = C_1 \int x dt dx \quad (5)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = C_1 x \longrightarrow y = C_1 x t + C_2(x) \quad \begin{matrix} t=0, y=f(x) \text{ より} \\ C_2(x) = f(x) \end{matrix}$$

$$\therefore y = C_1 x t + f(x) \quad (6)$$

エッジ部分の金属表面の形状変化については、エッジ表面の曲率によって k の値は異なるので、各点における曲率半径を算定した後、それに対応する k の値を図-2 から読みとる必要がある。また、エッジ部に作用する垂直力 $N(x)$ は、いわゆる刃先に作用する喰い込み抵抗が作用し、刃先角度と進行方向によって種々の関数形をとり得る。ここで、エッジ部においては v が増加しても、 m が減少し、 n は一定であると考えるとき次式が成立する。

$$\begin{aligned} S &= \int n \{ \alpha(x) \}^2 dx = m v a \int k^2(x) \cdot N(x) dt dx \\ &= C_1 \int k^2(x) \cdot N(x) dt dx \end{aligned} \quad (7)$$

$$\therefore \int \frac{\partial y}{\partial t} dt dx = C_1 \int k^2(x) \cdot N(x) dt dx$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = C_1 k^2(x) \cdot N(x) \longrightarrow y = C_1 k^2(x) N(x) \cdot t + C_2(x) \quad (8)$$

$$t=0 \text{ のとき } y=f(x) \text{ であるから } C_2(x)=f(x)$$

$$\therefore y = C_1 k^2(x) N(x) t + f(x) \quad (9)$$

ただし、 $k(x)$ 、 $N(x)$ は t のある微小時間に対して x に無関係であるとする。したがって、 $t=0, 1, 2, \dots, n$ まで繰返し計算を行なうことにより、時間 t が経過した後のエッジの形状は、次式で与えられる。

$$f(x, t) = C_1 \iint k^2(x, t) N(x, t) dt dx + f_0(x) \quad (10)$$

3. 丸鋼によるエッジ摩耗の実験的考察

3.1 実験の装置と方法 試料土は、琵琶湖砂(粒度分布は $m=0.70 \text{ mm}$, $\phi=0.244$ の対数正規分布をなす硬質細砂)を使用し、気乾燥状態でローラで成形し、締め固めを行なうものである。また、試料土は外径 6.0 m 、内径 3.0 m 、深さ 0.7 m の円環土槽内に充填され、連続摩耗試験に供するために、引掻柵、掻ならし板およびローラによって、常に新鮮試料土を供しうる。金属供試材として、図-4に示す直径 30 mm 、長さ 300 mm の炭素鋼を使用し、砂表面より 80 mm 貫入させ、丸鋼の方向を回転させることなく一定速度 (50 cm/sec) で一定時間走行させるものである。

供試体エッジ部分は、2つの部分、すなわち、円筒面と底部から形成される。底部は直径 30 mm の円筒を軸を含む面と切断した縦断面であり、直交した2面から形成されている。

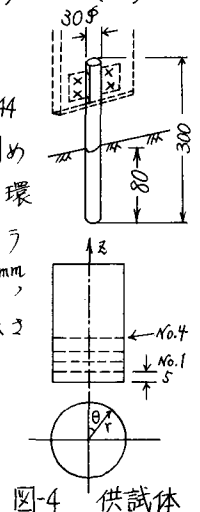


図-4 供試体

3.2 エッジ摩耗による形状変化特性

まず、一例として、丸鋼の進行方向を $\theta = 0$ とするとき、 $\theta = 0$, $f(r, z)$ なる縦断面の母線が摩耗によってどのように形状変化するかについて実測した。図-5(a)は、以下に述べる方法により、電子計算機によって計算した理論曲線である。また、同図(b)は、上図と同図面中に、丸鋼を約 1,000 km 走行させた後の実測結果を黒点で示したものである。底部エッジ部が顕著に摩耗されており、喰い込み抵抗がきわめて大なることを示すものである。つぎに、円筒面の摩耗による形状変化について、前図-4において z 軸方向に 5 mm 間隔で 16ヶ所、 z 軸と直角方向に切断し、その形状変化を実測した結果は、図-6で示す黒点で表わされる。図より明らかなように、 $\theta = 30$ 度近傍において、いちじるしく摩耗されて変形していく状態がよくわかる。同図(a)は、横軸に θ の角度を正負 $16/3$ 両側にとり、各横断面の形状変化を中心からの距離を実測することにより求めたものである。 $\theta = 0$ においても、断面が底部に近づくにつれて次第に摩耗されていく状況がよくわかる。

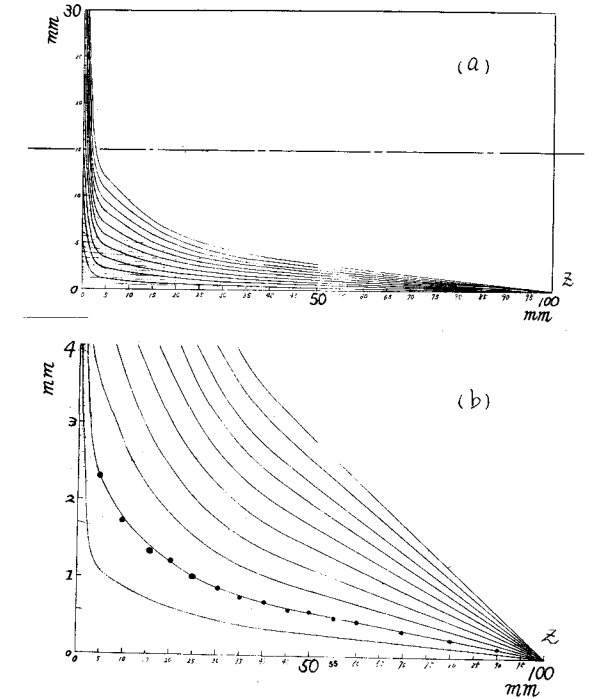
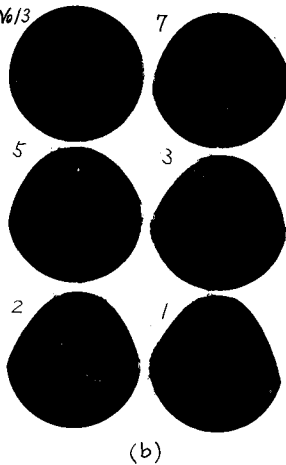


図-5 丸鋼縦断面の摩耗による形状変化特性

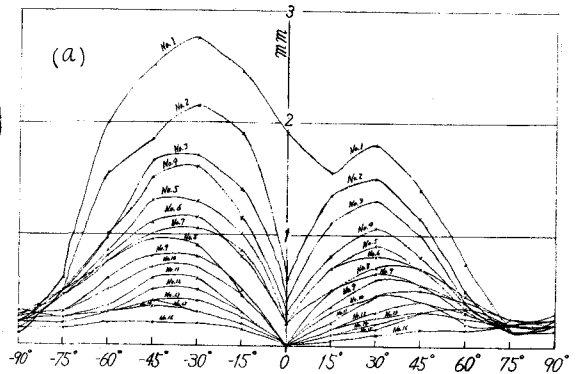


図-6 丸鋼横断面の摩耗による形状変化特性

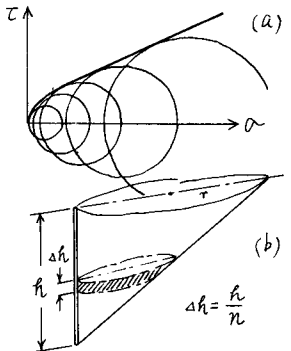


図-7 丸鋼による土塊

3.3 丸鋼に作用する土圧反力分布

丸鋼による表土掘削においては、垂直応力が微小な場合(この場合は $0 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$)を取扱うので、土の性質により、図-7(a)に示すように、 $T \sim \theta$ の関係で、原点に、モールの応力円が集中する場合がある。

今仮に、この関係が垂直応力の微小範囲において $T = C_1 \sqrt{\theta}$ なる簡単な関係があるとき、丸鋼に作用する土圧反力分布曲線を求める。図-7(b)に示すように、丸鋼によるすべり土塊を円錐であると仮定す

るとき、ある点の深さにおいて、存在するすべり面は、この円錐の周面を形成する。このすべり面上に作用するせん断力の合力を求めるために、図中ハッチした部分のせん断面 dS_i に作用するせん断力を求める。

$$\Delta S_i = 2\pi r \cdot \frac{i}{n} \cdot \Delta h = 2\pi \cdot c_2 h \cdot \frac{i}{n} \cdot \frac{h}{n} = 2\pi c_2 \frac{i}{n^2} \cdot h^2 \quad (10)$$

$$\sigma = r \cdot i \cdot C_3 \cdot \Delta h \longrightarrow \tau_i = \sqrt{r \cdot \frac{i}{n}} \cdot \sqrt{h} \quad (11)$$

$$\therefore \sum_i \tau_i \Delta S_i = C_4 \cdot h^{2.5} \quad (12)$$

したが、て、受働破壊に対する壁面土圧は深さの2.5乗に比例する。

また、 $\tau = \alpha \tan \phi$ なる直線関係があるとき、その壁面土圧は高さの 3.0 乗に比例する。

なお、土の自重による壁面土圧は静土圧と考えてよいから、深さの1.0乗に比例して増加する
と考えられる。

したがって、エッジ部分に作用する圧力分布を Σ^{α} とするとき、丸鋼にはゆるく盛り上った部分から先端に到るまで、自重による圧力分布 $K_1 \Sigma$ および地表面以下において受働土圧による圧力分布 $K_2 \Sigma^{2.5}$ または $K_2 \Sigma^3$ が作用し、先端エッジ部には Σ^{α} なる土圧が作用する。

3.4 電子計算機による摩耗形状変化の算定

丸鋼の縦断面について、式(9)によって算定した計算結果は、前図-5の実線で示したように、実測した断面形状とよく一致した。なお、喰込み抵抗関数として先端から 5.0 mm の位置から始まる Σ^4 なる関数に対してよく合致した。

また、丸鋼の横断面の形状変化については、前報²⁾において述べたように、土粒子と接触面とのなす角度の相異による滑動土粒子数、垂直面圧および滑動速度の積として、磨耗量と円筒の中心角 θ との関係を算定することができる。その計算結果は、図-6(a)に示す実線で与えられ、実測値とを比べてよく対応することが分る。なお、プログラムの一例を下欄に示す。

4. あとがき 掘削工具のエッジ部分は 金属強度上破壊しやすいこと、および刃先などの喰込み抵抗 がきわめて増大することが主要因となってその摩耗の機構を大きく支配していることが判明した。 また、曲率半径の大なる部分では、土粒子の移動速度、滑動土粒子数、面圧の変動を算定することにより、その形状変化特性が理論的に説明することができた。 なお、刃先先端の角度による摩耗特性についても、以上の理論解によって説明することが可能であり、刃先の掘削性能と摩耗特性の密接な連繫に立ちより合理的な摩耗対策を樹立することができる。

参考文献

1) Shōjirō Hata, Tatsuro Muro; Mechanism of Friction and Wear of Steel Plate, Memoirs of F. E. Kyoto Uni. 31.4, 1969.

2) 昌昭治郎, 室達朗; 中々堆積性の砂質土中を走行する金属面の摩耗機構について, 土学会論文報告集, 投稿中

[illegible]