

25. 水底砂質土の掘削

京都大学： 畠 昭治郎

1. 砂地盤掘削

水底に入る前に、まず地上での砂質土の掘削について述べる。掘削抵抗を土圧論で解くことは困難である。理由は土圧論では刃面上の抵抗分布が三角形分布であるが、実際は刃の下端で応力集中が生じて三角形分布にならない。もう一つの理由は、土の特性値 c や ϕ の正確な掘削時の値を測定することができず、計算方式も確立していない。従って、著者は約38年前から、図-1に示すような比掘削抵抗 R_s を用い、実抵抗がこれに正比例することを実験的に求め、次のような実験式を導いている。

$$H\alpha = 1.8 \cdot R_s \cdot B \cdot t^2 \cdot 10^{-m\alpha}, \quad V\alpha = H\alpha \cdot \tan(\delta - \alpha) \dots (1)$$

ここで、 $H\alpha$ 、 $V\alpha$ はそれぞれ、すくい角 α のときの掘削抵抗水水平分力および鉛直分力、 B は刃幅、 t は掘削深さ、 m は α をラジアンで表わしたとき0.45の値を取る。 δ は刃面と土との間の摩擦角である。比掘削抵抗 R_s は次のような性質をもっている。

- (i) 均質な砂質土では深さに無関係に一定値を取る。
- (ii) 相対密度に比例し、粒度分布のよい角ばった砂ほど大きい。
- (iii) 水中の R_s を直接測定することはできないが、15%粒径 D_{15} 、平均粒径 D_{50} および85%粒径 D_{85} をもとめることによって図-2で推定できる。ただし、

$$\bar{R} = (D_{15}/D_{50})^2 \cdot (D_{50}/D_{85})$$

従って、粒度分析を確実に行うことができれば、水底の R_s を推定することができる。

2. 水底砂地盤掘削

水底砂質土の掘削において、水深は無関係と考えられるから、深さ1メートル、長さ5メートル、幅2メートルの水槽に砂質土と水を入れ、図-3に示すような刃の模型で掘削実験を行った結果を図-4に示す。図中の破線は(1)式によるもので、水中においても水中の R_s を用いれば(1)式によって推定できることが証明された。このとき用いた刃の模型は、すくい角 α を 0° 、

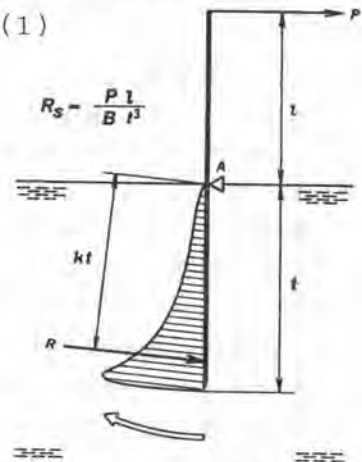


図-1 比掘削抵抗 R_s の測定方法

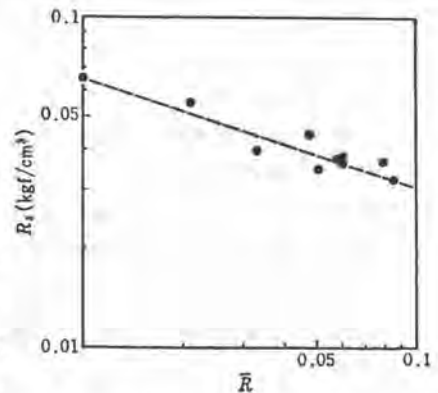


図-2 粒度分布からの R_s の推定

30°, 40° および 60°, 横すくい角 β を 0°, 30°, 40° および 60°, 幅を 100, 150, 200, 250 および 300, 高さを 100, 150, および 200 の 3 段階, 総計数百枚を用い, 刃の上端が常に地表面と一致するようにセットしてから 3 cm/sec くらいの掘削速度で実験を行ったものであり, 図-4 はそれらの平均値をプロットしている。

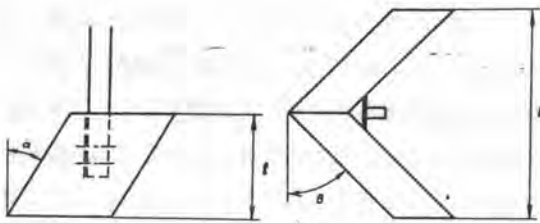


図-3 すくい角 α , 横すくい角 β の影響をみるために用いた刃の形状

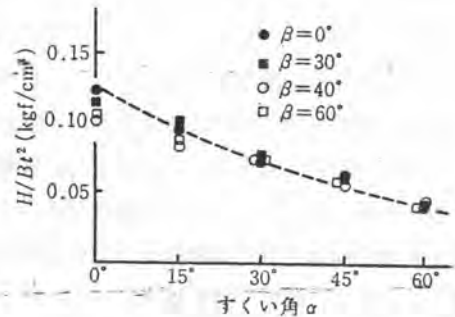


図-4 掘削抵抗に及ぼす α, β の影響

3. 多段刃

(1)式にみられるように砂質土の場合, 掘削抵抗は掘削深さの自乗に比例するから, 所用深さを 1 段刃で掘らず多段刃で掘ることが有効と考えられる。いま, R_s の値は深さに拘らず一定であるから, α を固定すれば, 幅 B , 深さ t の溝を掘るときの抵抗は

$$H_1 = K \cdot B \cdot t^2 \quad (\text{但し, } K = 1.8 \cdot R_s \cdot 10^{-0.45\alpha})$$

となる。次に n 枚の刃でそれぞれ t/n ずつ掘って行くとき, 最後尾の刃幅を B , その前段の刃幅が等差級数的に増え, 先行刃の掘り取った砂が後続刃に負担をかけないとすれば, 全抵抗 H_n は

$$H_n = K \left(\frac{t}{n} \right)^2 \left\{ nB + \frac{n(n-1)}{2} a \right\}$$

ここで, a は前後の刃幅の差である。

$$\frac{H_n}{H_1} = \frac{1}{n} + \frac{(n-1)}{2n} \frac{a}{B}$$

仮に $a = B$ とすれば

$$\frac{H_n}{H_1} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2n}$$

となり, 多段刃の方が抵抗が小さくなるのがわかる (図-5)。図-6 は後段刃として $B=100\text{mm}$, $t=200\text{mm}$ を前段刃として $t=100\text{mm}$ 一定, 刃幅 $B=150, 200, 300\text{mm}$ の 3 種をおき, 両刃の間隔 d を変えたとき全抵抗がどうなるかを示したものである。破線は後段刃のみのときの抵抗を示す。

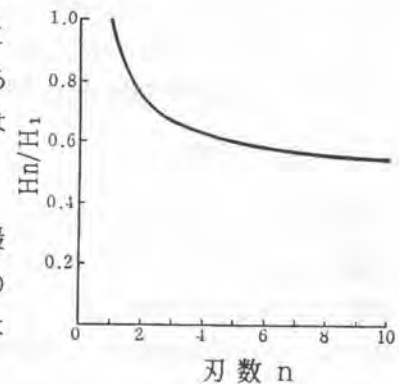


図-5 掘削抵抗と刃数 n の関係

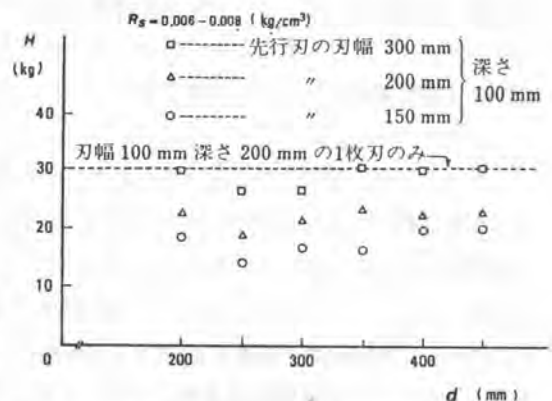


図-6 全掘削抵抗 H と 2 枚刃刃間距離 d の関係

この図から、前段の刃幅は150で間隔dは250のとき最小値を示すことがわかる。

4. 水 の 影 響

著者は二十数年前にポンプ船のカッターの掘削を研究したことがあり、その際水の影響が著しいことに驚いた経験をもっている。本来、砂質土が乾燥もしくは湿潤状態にあるとき、1~2m/sec程度の掘削速度に対しその掘削抵抗はあまり変化しないものである。しかしながら、一旦水底に堆積した状態になると、速度・抵抗特性は急変する。すなわち、掘削抵抗は掘削速度に比例して急増するようになる。この理由については次のように考えた。砂質土がせん断されるとき、もとの密度によって体積が膨張したり、収縮したりする。この現象はダイレイタンスーという名称でよく知られている。また、このとき、せん断変形前後で全く体積変化がないようなもとの密度を、限界密度といっている。水底に堆積した砂質土は一般に、限界密度を越えているから、せん断時に体積膨張をおこす。水中で急激な膨張をおこすとその部分に負の間隙水圧が発生する。つまり、その部分の間隙水圧が、体積変形をおこしていないまわりの部分よりも低くなる。掘削速度が小さいときには、砂の透水係数が大きいので、まわりから直ちに水が流入して、この間隙水圧をもとの値に戻すであろう。しかし、掘削速度が大きくなって、透水係数の10~100倍に達すると、まわりから水が流入してくるヒマがなくなり、低間隙水圧はそのまま保存される。こうなると砂粒子同志の押し付け力が大きくなり、したがってせん断抵抗、ひいては掘削抵抗も増大する。この推論が正しいければ掘削抵抗は掘削速度に比例し、透水係数に逆比例することになる。

5. 実 証 実 験

掘削速度を4~5m/secまで上げると、かなり長い距離を掘削しないと安定した値は得られない。そこで、粘性土地盤上に、長さ30m、幅3m、深さ1mのピットを掘り、その中にある一定の透水係数をもった砂質土を60cm深さに入れて平に均し、さらにその上に水を張ったものを用意した。その上を両側に幅の広いソリを持った掘削装置をのせ、この装置には掘削刃(図-3)、抵抗・速度測定装置を積み、全体をジープで曳行することにした。このような装置で砂試料を3種類変えて実験した結果を図-7に示すが前節で述べた推論の正しいことを示している。

ここで、一つの疑問点がある。すなわち、負の間隙水圧というのは最大1気圧(真空)であるから、掘削速度による掘削抵抗の増大も頭打ちになるのではないかということである。しかし、よく考えてみると、掘削抵抗には上述のもの他に、掘削速度の自乗に比例する流体抵抗が作用する筈である。この流体抵抗は速度の小さいときには殆ど現われないが、速度が大きくなるに従ってどんどん増大する

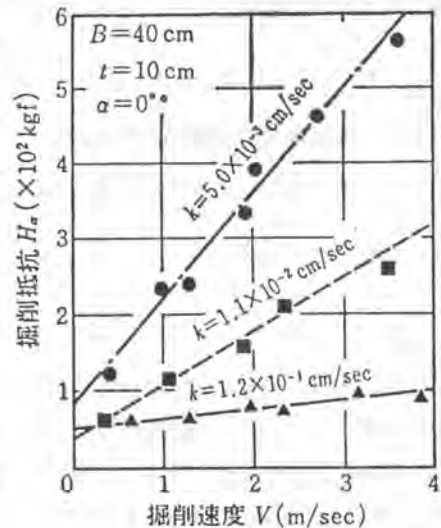


図-7 掘削抵抗と掘削速度との関係

ので、これらの和として考えると、掘削抵抗は土こまでも速度に比例して増大する（図-8）と思われる。つまり、図中の 1 がダイレタンシーによる抵抗増加、2 が流体抵抗によるもので、全体としてその和になるというものである。

6. 掘削速度の影響を低減する方法

3節で多段刃について詳述したが、これを用いて種々の実験を重ねるうちに重大なことに気が付いた。それは他の一段刃と異なり、多段刃の場合は掘削速度の影響をあまり受けないことである。すなわち、図-9のようになることである。この理由について考察した結果、1枚刃のときは自由水面からせん断面までの距離が大きく、従って負の間隙水圧を消すために流入する水の抵抗が大きいが、多段刃のときはそれぞれの刃が負担する掘削深さが小さいため、水の流入抵抗も小さく、従ってそれほど掘削速度に対して敏感ではないのではなかろうか。

実物大のものを用いた実験は図-10のようになり、掘削速度が大きくなると抵抗が漸増し、深さが少し浅くなる様子がよくわかる。

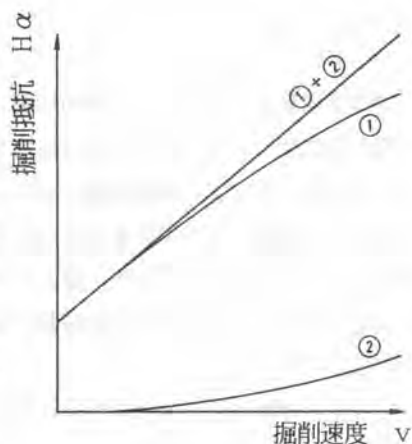


図-8 掘削抵抗に及ぼす速度の影響

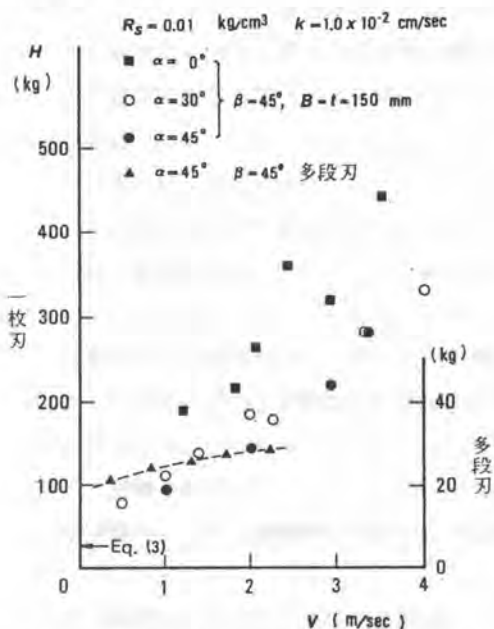


図-9 水底砂地盤の掘削抵抗Hと掘削速度v

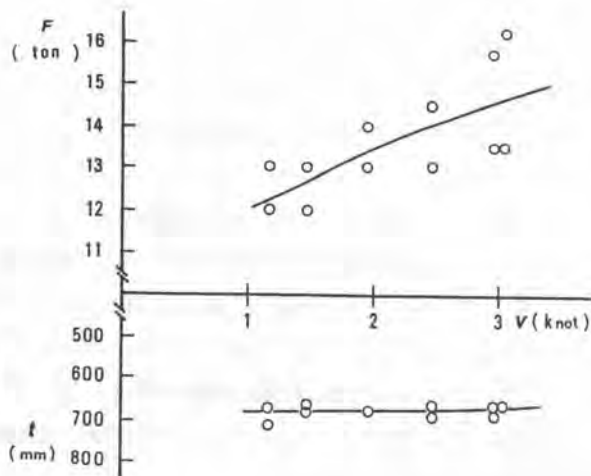


図-10 海浜実験結果 (KDDによる)

参考文献：畠昭治郎著「建設機械学」鹿島出版会発行，1987年