

砂質土の掘削抵抗と掘削刃前面の土圧分布について

CUTTING RESISTANCE OF SAND AND ITS INTENSITY DISTRIBUTION ON A CUTTING BLADE

島 昭治郎*・金子 義信**

By Shojiro HATA and Yoshinobu KANEKO

1. 概 説

土の掘削に関する研究はかなり古くから数多く行われているが、そのうち Rathje¹⁾, Payne²⁾, Osman³⁾ などの研究では、直線あるいは対数線あるいはすべり線を仮定することによって、掘削抵抗を受働土圧の考え方で土圧論を用いて計算することができるとしている。これに対して Selig と Nelson⁴⁾ は、掘削の際に観察されるすべり線は土圧論によるものとはかなり異なっていることを指摘している。

著者らは、掘削抵抗はたして受働土圧の考え方で求められるものかどうかを確かめる目的で、掘削刃にかかる抵抗合力の大きさ、方向および着力点の位置を知ることのできる新しい装置を考案製作し、これを用いて種々の条件のもとで測定を行って来た。

その結果、掘削抵抗の大きさは土圧論から求めたものよりもはるかに大きいこと、乾燥砂においては着力点の位置が刃の下端から掘削深さのほぼ 1/4 のところにあることなどがわかり、刃面上での抵抗分布が深さに比例せず、下端に近いほどより大きくなるのではないかと考えられるので、次にこの抵抗分布を実測しようと試みた。

用いたものは直径 10 mm ほどのゴム球に水を封入してその圧力(平均主応力に相当する)の変化を記録でき

るようにしたもので、ゴム球の体積圧縮率を砂のそれとほぼ等しくなるように製作した。この測定の結果、掘削刃の下端付近に土中応力の集中現象がみられ、この傾向は刃のすくい角(刃面と鉛直面とのなす角)が小さいほど著しいことがわかった。

2. 掘削抵抗合力の大きさ、方向および着力点

(1) 実験方法

図-1 に掘削刃にかかる抵抗合力の大きさ、方向および着力点の位置を求めるために新しく製作した実験装置を示す。掘削刃は図ではすくい角 $\alpha=0^\circ$ となっているが、刃の中央後部にあるピンにより任意のすくい角を与えることができるようになっている。台車の中には砂試料を入れ、掘削刃は固定で台車の方がレール上を動くが、その移動速度は 0.9~15.5 cm/sec の間無段階に変えることができる。掘削刃を支えている測定用支持具というのが、掘削刃にかかる合力の大きさ、方向および着力点の位置を計算によって求めるためのトラス構造で、

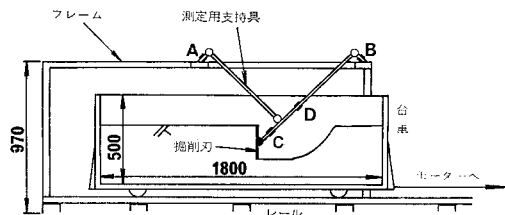


図-1 掘削抵抗測定用実験装置

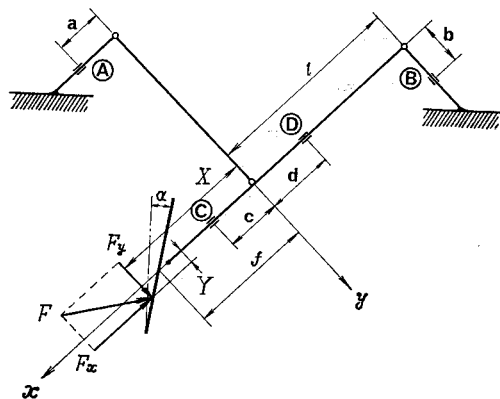


図-2 掘削抵抗の大きさ、方向および着力点を求める計算式の説明図

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室
** 正会員 ソイル・アンド・ロック・エンジニアリング(株)

図の A, B, C および D 点に貼付けられたひずみ計によって読みとられる各点でのモーメントの値から次式によって計算できるものである。トラス部分を拡大して示したのが 図-2 であるが、図のように x, y 軸をとり、抵抗合力 F の x 方向成分を F_x , y 方向の成分を F_y , 刃面を示す方程式を $y=ex-f$ とすれば、

$$F_x = M_B/b, F_y = (M_A/a) - M_D/(l-d)$$

となり、着力点の座標を X, Y とすれば、

$$X = \frac{\frac{c}{a}M_A + \frac{f}{b}M_B + M_C - \frac{c}{l-d}M_D}{\frac{1}{a}M_A + \frac{e}{b}M_B - \frac{1}{l-d}M_D}$$

$$Y = \tan(\pi/4 - \alpha)X - f$$

で表される。ここで M_A は A 点におけるモーメント, M_B は B 点の, M_C は C 点の, M_D は D 点のモーメントであり, e は刃の x 軸に対する傾斜で $\tan(\frac{\pi}{4} - \alpha)$ で与えられる。また, a, b, c, d はそれぞれ A, B, C, D のヒンジからの距離である。これから A, B, C, D 4 点でのモーメントがわかれば, 抵抗合力 F の大きさ, 方向および着力点の位置が求められることになる。

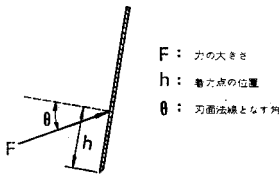


図-3 掘削抵抗合力測定装置の評価項目

実験にさきだち, この装置の精度を検証するため, 図-3 に示すように掘削刃面に既知の力を種々の方向 θ , 位置 h を変えて考え, 各点のモーメントを測

定して上式から計算で求めたものと, 実際に与えた値とを比較したところ, 測定誤差は着力点の位置に対して $\pm 5\%$, 力の方向に対して $\pm 3.8\%$, 力の大きさに対して $\pm 4\%$ となり, 十分実用に耐えることがわかった。また, 力があまり大きくなると支持具のたわみにより掘削刃全体が下がるが, これもキャリブレーションを行って, 補正することにした。

(2) 実験試料

用いた試料の粒径加積曲線は 図-4 に示すようなものでその物理性質を 表-1 に示す。試料 ①~④ は比較的粒径のそろった砂で, 試料 ⑤ は配合のよい湿潤砂である。

(3) 実験結果

試料 ①~④ はほとんど同様の結果がみられたので, ここでは代表として試料 ① のものについて図示する。

a) 掘削抵抗合力と着力点の位置

図-5~7 は試料 ① についてすくい角を $0^\circ, 22.5^\circ$ お

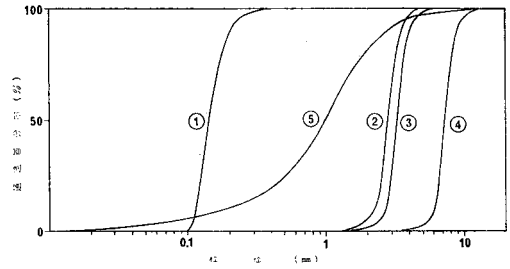


図-4 試料の粒径加積曲線

表-1 試料の物理特性

	1	2	3	4	5
ϕ	32.0°	—	—	—	28.4°
c (kg/cm ²)	0	0	0	0	0.14
γ_d (g/cm ³)	1.34	1.52	1.67	1.67	1.63
D_{60}/D_{10}	1.41	1.32	1.22	1.21	6.50

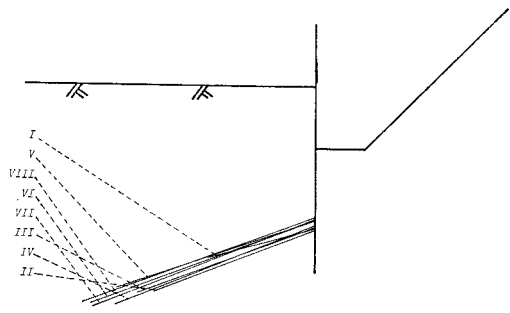


図-5 掘削抵抗合力の着力点と方向 (すくい角 0°) 試料 ①

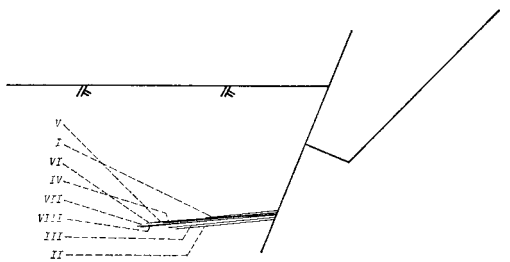


図-6 掘削抵抗合力の着力点と方向 (すくい角 22.5°) 試料 ①

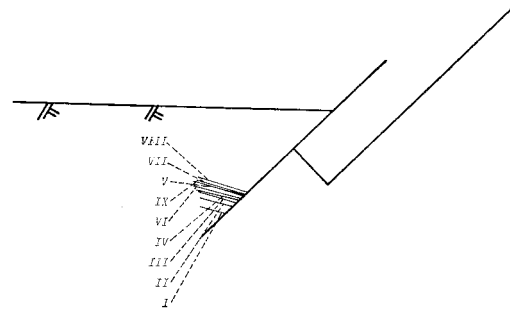


図-7 掘削抵抗合力の着力点と方向 (すくい角 45°) 試料 ①

よび 45° にしたときの掘削抵抗合力の大きさ、方向および着力点を示す。図中の I, II, III, ... は掘削開始時から、平均 5 cm 程度移動して定常と考えられる掘削抵抗が得られるまでの個々の時点での掘削抵抗合力を示している。これらの3つの図から、合力の方向は刃面の法線に対してほぼ一定の角度をなし、これが刃面と砂との間の摩擦角と考えられること、着力点の位置は刃の下端から深さのほぼ $1/4$ の点に作用することがわかる。

図-8 は試料⑥を用いたすくい角 $\alpha=22.5^\circ$ の場合である。図のようにある程度粘着性のある土では、力の

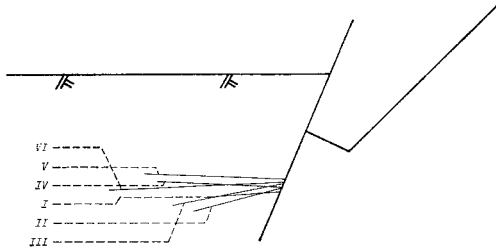


図-8 掘削抵抗合力の着力点と方向 (すくい角 22.5°) 試料⑥

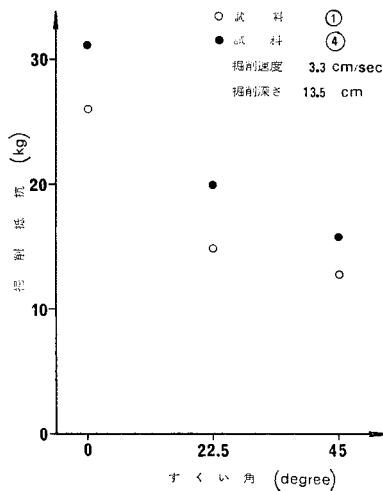


図-9 すくい角と掘削抵抗

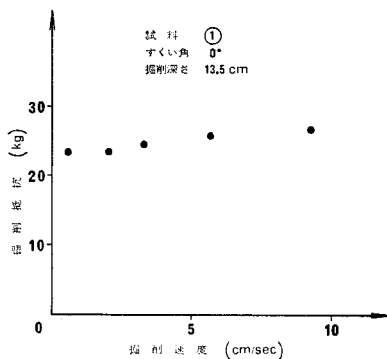


図-10 掘削速度と掘削抵抗

方向がある範囲で動くことおよび着力点の位置が下端から深さの $1/4$ よりも少し上になることがわかる。

b) すくい角 α の影響および掘削速度と掘削抵抗

掘削抵抗はすくい角が大きくなるほど小さくなることおよび掘削速度の影響はほとんど受けないことが、図-9 および 図-10 から認められる。

(4) 考 察

図-5~7 のように乾燥砂の場合には掘削抵抗合力の着力点が刃の下端から深さの $1/4$ のところにあるということは、刃前面の土圧分布が普通にいわれるような水压様の分布ではなく、刃の下端付近に集中現象が起きていることを示していると考えられる。これを確かめるためにはじめ 図-11 に示すような方法で土中の平均主応力を測定してみた。すなわち 図-11 のゴム球①が土中において圧力が上昇するのを、水銀入りU字管でAの面が動かないように、いわゆるヌルバランス方式でBの側にビュレットから水銀を入れ、力がかかる前後の圧力差 ($h'-h$) を測るものである。その結果の一例は 図-12 に示すように刃の下端付近で応力集中があるようにみえた。

3. 土中応力の測定

さきに述べた土中応力測定装置は、ヌルバランスを手で行うなど精度の点で問題があるため、新しく考案した方法を用いて主として試料①について多くの測定を行

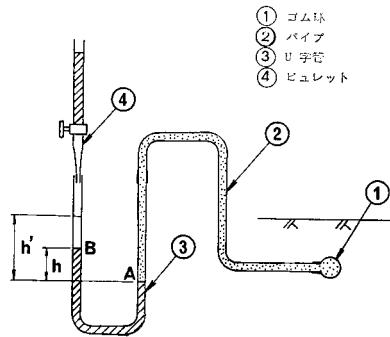


図-11 土中応力測定法①

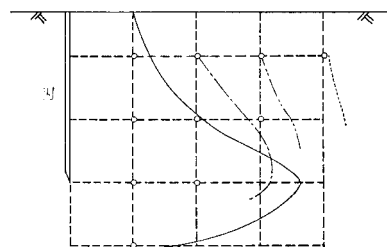


図-12 土中応力分布

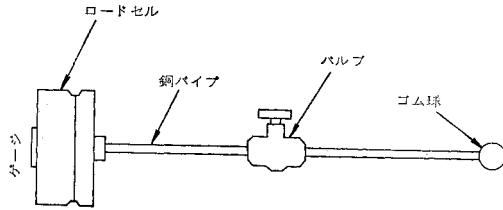


図-13 土中応力測定法 ②

った。

(1) 土中応力測定装置

応力測定球の体積圧縮率と砂のそれとの相異が測定値にどのように影響するかを検討するため、測定値が連続的にすみやかに記録できるように、模式的に図-13に示すような装置を使用した。ゴム球、パイプおよびロードセル内部には水が封入されており、ゴム球に加えられた圧力をロードセルの受圧板におけるひずみとして取り出し記録するようになっている。中央にあるバルブは、この系内を完全に水で満たすのに必要なものである。

測定球の体積変化に関係する要素をあげると、

- 1) 水自体の体積変化
- 2) ゴム膜の厚さの変化
- 3) パイプの内圧による変形
- 4) 受圧板のたわみ

となる。そこで、受圧板の厚さ、パイプの材質および全長、球の体積を表-2のように変え、測定球の体積圧縮率を1 kg/cm² 圧力あたり 10⁻¹ のオーダーから 10⁻⁵ のオーダーに4段階に変化させた。

これらの4種類の測定装置をできるだけ等しい条件のもとで比較

表-2

	受圧板厚さ (mm)	パイプ材質	パイプ長 (m)	球体積 (cm ³)	体積圧縮率 (1/kg/cm ²)
1	0.5	ナイロン	10	2	2.12×10 ⁻¹
2	0.5	ナイロン	1	2	4.51×10 ⁻²
3	1.0	銅	1	2	3.04×10 ⁻³
4	1.5	銅	1	5	4.76×10 ⁻⁵

するため、次のような方法をとった。すなわち、掘削刃としては幅 480 mm の広いものを用い、4種類の測定装置の中から2個ずつとり出して、刃の前方のまったく対称的位置においた。つまり、深さと刃からの距離が等しく刃の中心線から左右へ等距離（相互に干渉しない程度）はなし、刃の両端の影響が入ってこない程度に内側に）の位置に埋めこんで実測を行った。こうして4個中2個計6種類の測定装置の組合わせで多くの実験を行った結果、いずれの場合も測定値にほとんど差はなく、ばらつきの範囲内であった。また、別に試料の体積圧縮率を測定したところ、ゆるぶめの状態で 3.64×10⁻³ kg/cm² であった。それで、さきの検定で測定球の体積圧縮率の影響はないとの結論はでているものの、念のため試料の体積圧縮率にほぼ等しい表-2の3番目のものを用いる

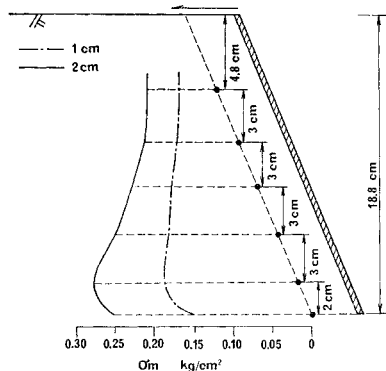


図-14 刃前面の土中応力分布 (α=-20°, 試料①)

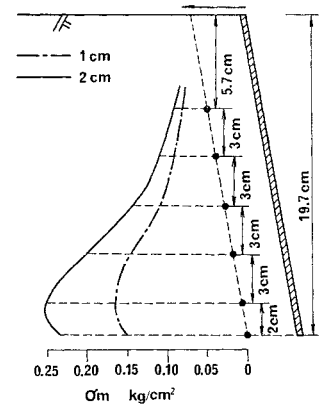


図-15 刃前面の土中応力分布 (α=-10°, 試料①)

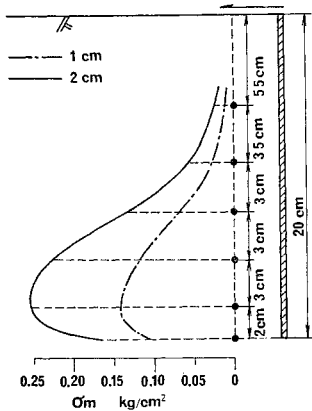


図-16 刃前面の土中応力分布 (α=0°, 試料①)

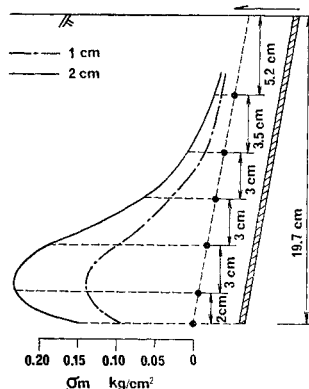


図-17 刃前面の土中応力分布 (α=10°, 試料①)

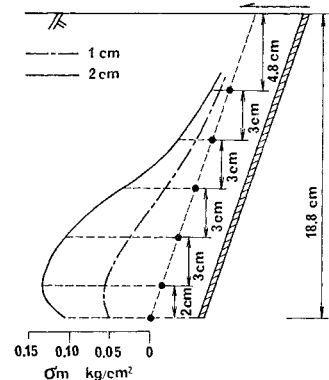
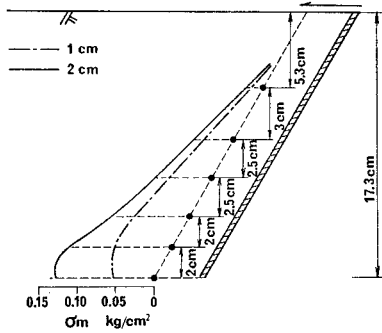


図-18 刃前面の土中応力分布 (α=20°, 試料①)



図—19 刃前面の土中応力分布
($\alpha=30^\circ$, 試料①)

こととした。

(2) 実測結果

実測の結果を 図—14~19 に示す。ゴム球は刃の前方 3 cm のところに、それぞれ 図に示してある・の位置に埋めておき、刃を 1 cm および 2 cm 移動させたときの平均主応力の値を描いている。

図—14 のように、すくい角が負でしかも大きいときは、土砂を刃が上から押しつけるようになるため、全体に拘束力が大きくなり、図のように全体に応力が大きくなり特に下端付近で集中現象を起こしているようにはみえない。

図—15~17 のように、すくい角 α が 0° の前後では刃の下端付近に明らかに応力集中現象がみられる。このことはさきに試験を行ったものでもある程度でているが、この図でははっきりと断言できる。この結果、抵抗合力の着点点が下から $1/3$ よりももっと下に作用した

ことが説明づけられるわけである。

図—18, 19 のように α が大きくなると、刃による拘束性はかなり小さくなり、土砂は上部へ流れやすくなる。この結果、刃の下端付近での応力集中現象は前のものよりも弱くなっている。

4. 結 論

以上のように、新しい実験装置によって掘削抵抗およびその分布を測定したところ、乾燥した砂質土の場合には掘削抵抗の分布は刃の下端付近で大きくなり、その結果抵抗合力の着点点は刃の下端から深さの $1/4$ の付近に作用すること、そしてこの傾向は刃のすくい角が小さいほど著しいことがわかった。掘削抵抗の値も土圧論を用いて計算したものより著しく大きくなる。なお湿潤砂についてはデータが少なく、着点点がやや上にくることのほかは結論は得られなかった。

参 考 文 献

- 1) J. Rathje: Schnittvorgang im Sande, V.D.I. Forschungsheft 350, 1937.
- 2) P.C.J. Payne: The Relationship between the Mechanical Properties of Soil and the Performance of Simple Cultivation Implements, Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 1, 1956.
- 3) M.S. Osman: The Mechanics of Soil Cutting Blades, Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 9, 1964.
- 4) E.T. Selig and R.D. Nelson: Observation of Soil Cutting with Blades, Journal of Terramechanics, Vol. 2, 1964.

(1977.4.22・受付)