

(23) トンネル掘進機に作用する摩擦力について

西松建設機技術研究所 正会員 稲葉 力

西松建設機技術研究所 正会員 石山宏二

Friction force working on tunnelling machine surface

Tsutomu INABA, Nishimatsu constructin co., LTD.

Koji ISHIYAMA, Nishimatsu constructin co., LTD.

Abstract

Friction force working on surface is taken into consideration in case of designing shield machine in urban area. Shield tunnelling method is employed at deeper ground from year to year, but depths of almost cases are shallower than 50 m below ground level. In those cases, earth pressure acting on machine surface is smaller than 100tf/m^2 . As for in mountain areas, we have been employing TBM. There are no problem of friction. On the other hand, adaptability of shield machine like TBM is expanding for many kind of ground, that method gets to be popular in case that drilling and blasting method has been employed so far or ground condition is very difficult. So, friction force acting on machine surface becomes principal problem.

Author designed and developed an equipment to measure friction force working on surface of metal surface with vertical pressure. Series of friction tests are conducted for artificial specimen and Neocene mudstone. Consideration as for relation between strength of specimen, friction force and shear force are described.

1. はじめに

主として都市部で用いられるシールド工法では、スキンプレートに作用する摩擦力を考慮してマシンを設計している。シールド工法は年々施工深度が深くなっているが、それでもほとんどがGLから50m以内であり、土圧にしても 100tf/m^2 を越えることはない。一方、山岳トンネルでは古くからTBM工法が用いられているが、マシンの周囲は解放されておりスキンプレートに作用する摩擦力が問題になることはほとんどなかった。ところが、シールドタイプの掘削機の施工範囲が広がり、従来は山岳トンネル工法を採用したか施工に難渋したところで採用されるケースが増えてきた。それに伴って、スキンプレートに作用する土圧も大きくなり摩擦力が設計の重要な要素となってきた。

また、最近大深度地下開発に関する研究が活発であるが、大深度の地下空間はシールドタイプの掘削機を用いるケースが多いであろうと考えられる。その際には、マシンに作用する摩擦力が問題になるであろうと考えられる。

筆者らは、摩擦実験用の装置を作成し、人工試料と新第三紀の泥岩を用いて摩擦実験を行った。試料の強度と摩擦力の関係、摩擦力とせん断強度の関係等について考察した。

§ 2. 既往の研究

周面摩擦力についての研究は、杭について行われたものがほとんどのようである。摩擦力の原理としては、トンネル掘削機も杭も同じと考えてよいであろうから、ここでは杭についての既往の研究を取り上げる。

極限摩擦力度 f_u は、剛体と土との間のすべり抵抗と同様に、杭と土との付着力と摩擦力との二つの異な

った要素の和として次式で表される¹⁾。

$$f_u = c_a + p_h \cdot \tan \delta \quad (1)$$

ここに c_a : 杭と地盤との間の単位面積当りの付着力

p_h : 破壊時に杭の周面に作用する平均垂直応力度

δ : 杭の周面と地盤との間の摩擦角

粘性土地盤の場合、設置された杭の周面摩擦抵抗を評価する方法には、全応力解析と有効応力解析とがある。全応力解析は摩擦抵抗が付着力 c_a に等しく、その付着力は乱さない粘土の非排水せん断強度 c_u に比例すると仮定するものである。

$$f_u = c_a = \alpha c_u \quad (2)$$

ここに c_u : 杭の埋め込み部分の平均非排水せん断強度

α : 付着応力係数

Vesic¹⁾によると、柔らかい正規圧密粘土では、乱さない粘土の非排水せん断強度 c_u が約 0.5 kgf/cm^2 以下で $\alpha = 1$ とみなしうる。このことは、 c_u が約 0.5 kgf/cm^2 以下ではすべり破壊が地盤のなかで生じ、摩擦抵抗は c_u にほぼ等しいことを意味している。 c_u がこれより大きくなると、 α 値は 1 より小さくなり、すべり破壊が杭と地盤との間で生ずるようになることを示している。

しかし、過圧密のやや硬い粘土および硬質粘土地盤においては、非排水せん断強度から f_u を推定することには無理があり、軟弱粘土も含めて有効応力解析の方がよい結果を与えるとされている¹⁾。

有効応力解析による杭の周面摩擦応力度は式 (1) と同形で表されるが、付着力 c_a はほぼ 0 とみなすことができ、周面摩擦応力度 f_u は次式で与えられる。

$$f_u = K_s p_v \tan \phi' = N_{fu} p_v \quad (3)$$

ここに K_s : 杭周面上の平均側圧係数

p_v : 杭の周面に沿う平均有効上載圧

ϕ' : 土の有効せん断抵抗角

N_{fu} : 摩擦の支持力係数

正規圧密粘土に打ち込んだ杭では横方向の応力変化は比較的に少ないので、側圧係数 K_s は正規圧密粘土の静止土圧係数 K_0 に等しいと仮定できる。よって、式 (3) の N_{fu} は次式で表される。

$$N_{fu} = (1 - \sin \phi') \tan \phi' \quad (4)$$

正規圧密粘土に対する一般的な有効せん断抵抗角 $\phi' = 15 \sim 30^\circ$ に対して N_{fu} 値は $0.2 \sim 0.3$ となる。Vesic¹⁾ による、種々の場所で行われた既往の杭の载荷試験結果から求めた N_{fu} 値を整理したものとすると、 N_{fu} 値は地盤種別、杭の種別および有効上載圧に対する変化は少なく、 N_{fu} 値は 0.25 から 0.4 の間に分布することがわかる。Burland¹⁾

は地下水が静水圧分布していると仮定して杭の载荷試験結果を式 (4) で解析し、 N_{fu} 値は 0.25 から 0.4 の範囲にあり、平均値は 0.32 であることを見いだしている。

井上¹⁾ は日本の沖積粘土における打ち込み杭の負の摩擦力の検討から、 N_{fu} 値

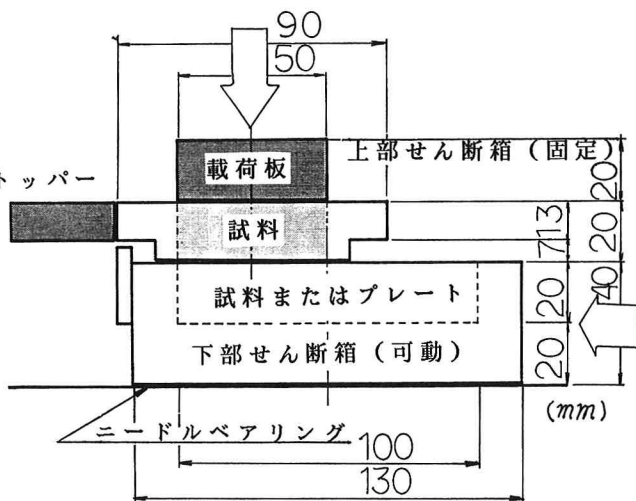


図1 摩擦試験器

として0.25~0.35を提案している。これらの実測結果は、前述の粘土の排水せん断試験による有効せん断角 ϕ' で求めた理論値とよく一致しており、正規圧密粘土の周面摩擦抵抗の支持力係数 N_{ru} 値は、ほぼ0.3といえる。

§ 3. 実験方法

＜実験装置＞

実験装置を図1.に示す。一軸圧縮試験機のラム上に装置を載せ、上方からブルーピングリングを介して垂直荷重をかけた。上部のせん断箱の中に試料を入れ、試料と同じ大きさの載荷板の上に載せて荷重をかける。上部のせん断箱は、ストッパーで位置を固定するので、垂直荷重は常に試料の中心に作用する。下部せん断箱がハンドルを回すことで前方に進む。下部せん断箱の中には、スキンプレートをもしたプレートまたは試料を入れる。下部せん断箱の左右と下面には、L型のニードルベアリングを入れた。このため無負荷時の抵抗は、ほとんど生じなかった。

摩擦試験の時は、下部せん断箱には真鍮プレート(50×100×20mm)を入れて、上部せん断箱に50×50×20mmの試料を入れて、真鍮プレートと試料土の摩擦力を求めた。プレートは長さが100mmあるので、試験中は常に試料の全面積がプレートと接触していることになる。真鍮プレートの表面は滑らかである。

直接せん断試験をする場合には、下部せん断箱と上部せん断箱に50×50×40mmの試料を入れ、下部せん断箱の残りのスペースに50×50×20mmのプレートを入れる。直接せん断の場合は、最初だけがせん断面積25cm²であり、あとは進行にともなって面積が減少する。

垂直荷重は、試験中に増加あるいは減少するので手動でできるだけ一定になるように調整した。せん断力は出力付きのブルーピングリングで測定し、出力をデタロガー(TDS-301)を経由して、GPIBを介してパソコンに取り込んだ。変位・せん断力も同様である。実験の後半は、データの取り込み速度の関係からAD変換器で直接パソコンに取り込むようにした。これは、変位が0.05mm変化する毎に記録するようにした。

＜試料＞

試料は、トンネル現場から採取した新第三紀の泥岩試料と、別に実施した実験で使用した泥水固化の模型地盤からブロック試料を採取して作成したものをを用いた。泥岩試料は、含水比が20

表 1 実験ケースおよび結果の一覧表

(単位: 度または kgf/cm²)

	人工試料						泥岩	
	A	B	C	D	E	F	G	H
q_u	3.1	8.6	9.6	12.1	16.2	18.3	2.3	5.2
ϕ_u	----	7.8	----	10.8	8.6	----	0	0.1
ϕ'	----	----	----	23.0	20.2	----	----	----
c_u	----	3.9	----	4.0	4.0	----	2.0	5.8
c'	----	----	----	----	4.8	----	----	----
ϕ_s	9	8	9	10	14	12	9	----
ϕ_f	11	18	21	26	26	20	21	34
Pc	0	12.6	14.3	14.0	14.0	11.4	30	30

ϕ_s : せん断試験の摩擦角 ϕ_f : 摩擦試験の摩擦角
 P_c : 人工試料は先行圧密荷重、泥岩は土被り荷重

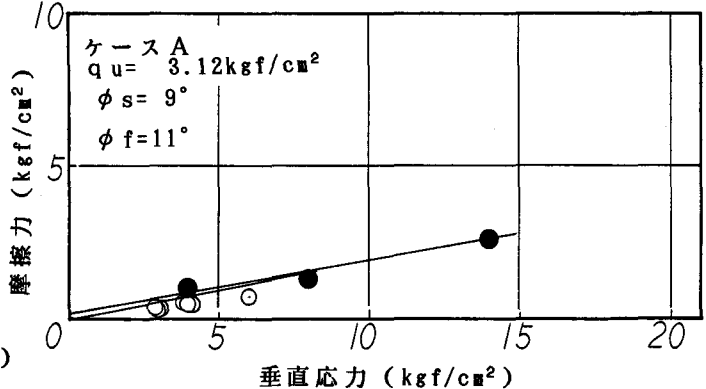


図2 せん断・摩擦試験結果(ケースA)

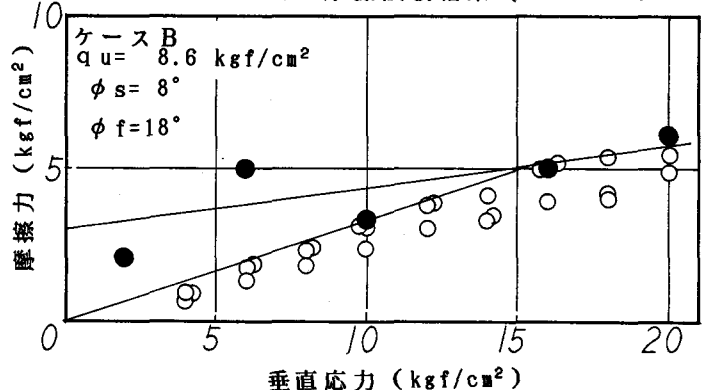


図3 せん断・摩擦試験結果(ケースB)

～30%で一軸圧縮強度が3～5kgf/cm²程度であった。模型地盤は、次の配合が標準で先行圧密荷重が約10kgf/cm²作用している。含水比は200%前後であった。

粘土（木節粘土）-300kg
 ベントナイト（浅間）-80kg
 早強セメント-200kg
 水-1000kg

試料の物理試験結果を表1に示す。

また、同じ試料を用いて繰り返して試験を実施したので、その度に試料の底面を削って新しい面を露出させた。同じ試料を用いて、異なった垂直荷重をかけるときは、低い方から高い荷重に進めるようにして、圧密の効果が出ないようにした。

§ 4. 実験結果と考察

図2～7は人工試料A～Fの試験結果である。A→Fと一軸圧縮強度が増大する。（●）印は直接せん断試験の結果で（○）印は摩擦試験の結果である。各図中の実線は回帰を求めたものではなく、（●）に関しては線形回帰に近い値を目測で、（○）に関しては最大値に近いところに引いた。摩擦力は最大値が実態に近いと考えたからである。ケースAからケースFを通してわかるのは、平均垂直応力が小さい内はせん断抵抗力が摩擦抵抗力を上回っていること、平均垂直応力がある値を上回ると摩擦抵抗力はせん断抵抗力に一致することわかる。同じく表

1と図2～7から、直接せん断試験の摩擦角は三軸圧縮試験（UU）で求めた摩擦角に近いようであり、摩擦試験の摩擦角は三軸圧縮試験（CU）から求めた摩擦角に近いようである。これは実験条件を考えると矛盾がないように思える。

この結果は、平均垂直応力が小さいときは、スキンプレートと地盤の間で滑りが生じるが、平均垂直応力が一定の値より大きくなると、今度はスキンプレートにごく近傍の地盤中でせん断破壊が生じていることを示していると考えられる。一定の値とは、ケースAからケースFの結果から判断すると $C_u + p_v \tan \phi_u =$

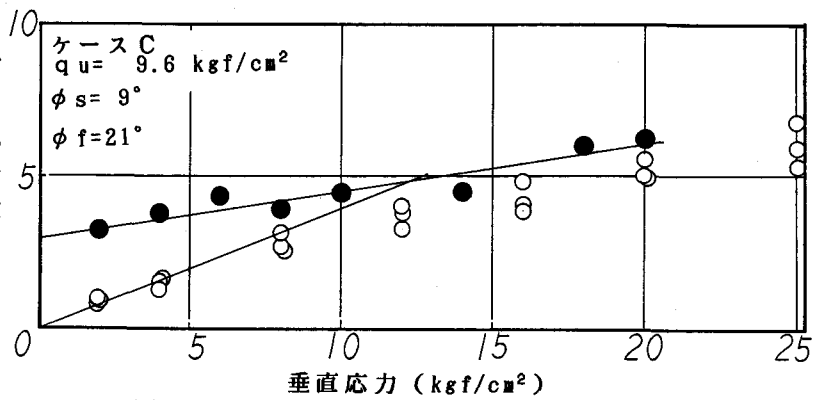


図4 せん断・摩擦試験結果（ケースC）

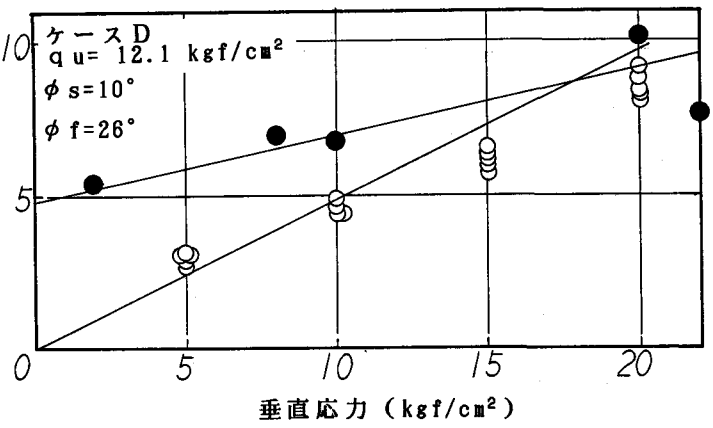


図5 せん断・摩擦試験結果（ケースD）

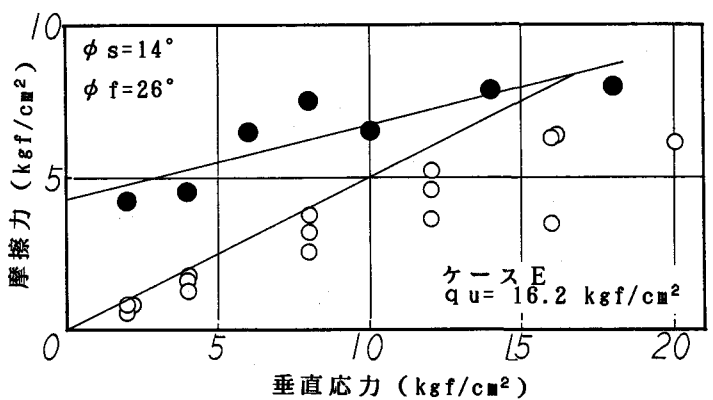


図6 せん断・摩擦試験結果（ケースE）

$p_v \tan \phi'$ となる垂直応力のときと考えられ、そのとき摩擦力度あるいはせん断力度はほぼ $1/2 q_u$ である。つまり、これまで指摘されているように、摩擦抵抗とせん断抵抗の内、小さい方で極限摩擦力は決まると考えられる。

次に実際への適用を考えると、簡単には式(3)を用いればよいが、土被りが大きいときはせん断抵抗力を採用しなければ安全側過ぎると考えられる。式(3)を用いた場合、土被りが小さい条件では危険側であり、土被りが大きい条件では安全側である。

そのとき人工試料では、試料の強度に応じて(4)の値が図2～7から0.2～0.5であった。 $q_u < 10 \text{ kgf/cm}^2$ ならば0.3程度の値であった。次に図8の自然試料について考える。(○)印と(●)印はほぼ同じ地点の試料である。(□)印は別の地点で採取した試料であるが力学試験試験の結果以外は前者とほとんど同じである。この図によると、やはり強度によって摩擦抵抗力が異なることがわかる。ただしCU試験

が困難で ϕ' を求めていないので、その対応が困難である。(4)の値は0.25～0.3程度となった。直接せん断試験の結果との関係が人工試料の場合と大きく異なるように考えられる。しかし、試料にクラックがあり一軸圧縮強度はその影響を受けていると考えると、ケースHの場合には三軸圧縮試験の C_u から考えて、前述の人工試料の結果と矛盾はなさそうである。ケースGの場合は、三軸圧縮試験からの C_u を用いても説明できない。いずれにしても、自然試料の場合は試験の件数が少なすぎて結論は引き出せないと考えられる。

§5. まとめ

- ①泥水固化による人工試料を用いた一連の実験により、スキンプレートに作用する摩擦力は式(3)で考えてよいことがわかった。極限摩擦力度は $p_v \tan \phi'$ を越えることはないことと、摩擦試験の摩擦角は ϕ' に近いこと、直接せん断試験の摩擦角は ϕ_u に近いことが示唆された。
- ②新第三紀の泥岩を用いた実験結果からは、スキンプレートに作用する摩擦力はやはり式(3)で表せる可能性が示された。摩擦角と ϕ' 、 ϕ_u の関係は今回の実験からわからなかった。せん断力と摩擦力の相互関係もついても同様である。
- ③今後、各種の人工・自然試料についての実験が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) (社)土質工学会：土質工学ハンドブック 1982年版
- 2) (社)土質工学会：杭基礎の設計法とその解説
- 3) 稲葉 力、平田篤夫、石山宏二：「軟岩地山で作用する摩擦力について」第24回土質工学研究発表会概要集 1713-1714p 平成元年6月

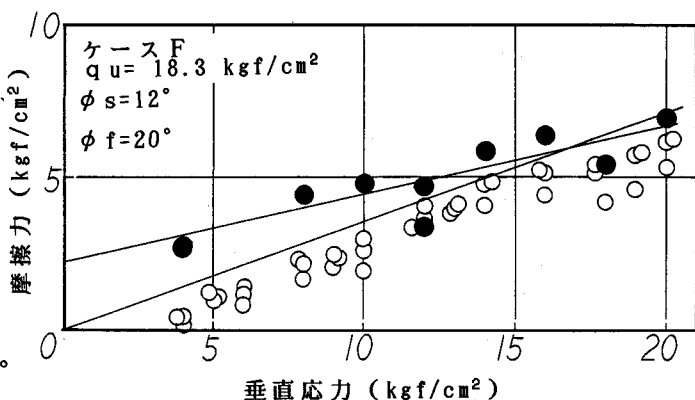


図7 せん断・摩擦試験結果(ケースF)

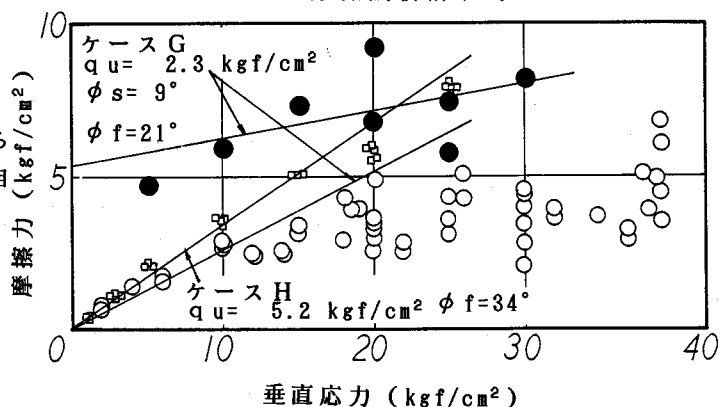


図8 せん断・摩擦試験結果(ケースG、H)