

# 模型砂地盤の支持力実験における砂箱側壁面摩擦の影響 II

## —砂と平板の間の摩擦力の測定—

Influence of Side Wall Friction of Sand Box in Bearing Capacity Test on Model Sand Ground

—Measurements of Frictional Forces between Sand Mass and Platens—

龍 岡 文 夫\*・生 原 修\*

Fumio TATSUOKA and Osamu HAIBARA

### 1. はじめに

砂と平板の間の摩擦力を軽減する方法についての定量的研究は、そのメカニズムが意外と複雑なこともあって、これまでにそれほど多くの研究はなされていない。本報告では、砂と平板の間の摩擦力および、砂と平板の間に各種の摩擦を軽減させる層を挿入した場合の摩擦力を定量的に測定し、また、その結果から、砂箱の側壁面摩擦力について得ることのできた知見について報告する。

### 2. 低摩擦角用直接せん断試験機<sup>8),9)</sup>

砂と平板の間の小さい摩擦力を直荷重の大きさ、せん断速度の大きさを制御し、繰り返してせん断しながら測定できる装置を製作した (図 9, 10 および写真 3)<sup>8),9)</sup>

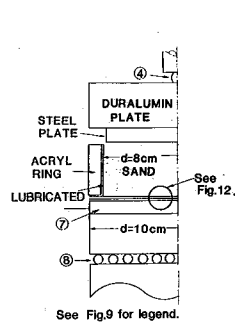


図 10 せん断部詳細図

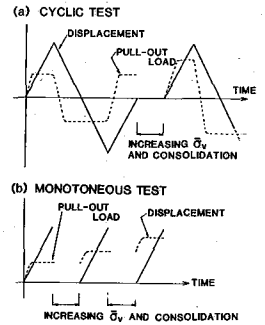
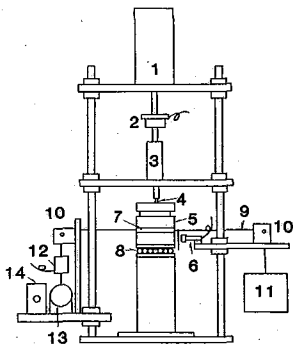


図 11 直接せん断試験方法



1. Bellofram cylinder to control vertical load.
2. Load cell to measure vertical load.
3. Bearing house to guide loading piston.
4. Steel ball
5. Sand mass or steel platen
6. Proximeter to measure horizontal displacement of 7.
7. Acryl plate or glass plate
8. Bearing, 9. Steel wire 10. Pulleys.
11. Dead weight (5kg or 10kg)
12. Load cell (capacity : 200N)
13. Reversible moter
14. Speed and direction control panel for 13.

図 9 低摩擦測定用直接せん断試験機

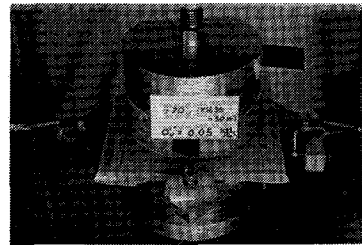


写真 3 せん断部の近接写真 (タイプ 1,  $\bar{\sigma}_v = 0.05 \text{ kgf/cm}^2$ )

図 10 に示すアクリル円筒内に空気乾燥豊浦砂を空中落下法で投下した (間隙比約 0.64)。次に所定の上載圧を表 2 のように加えて、プレート⑦を 1 つの実験を除いて定速度 0.2 mm/分 で片振幅 2 mm 引き出した。このプレート⑦は右方からおもり⑪ (図 9) で引張られているから、ワイヤー⑨を右方向へ送り出すことによって右方向に変位させることもできる。このようにして、1 例を除いて変位片振幅 2 mm の繰返し載荷を 1 回行った (図 11 a)、引き続き上載圧を所定の値まで増加させて、以上の手順を繰り返した。ただし、タイプ 1 に対しては、後に述べる理由によって常にせん断変位を片方向にのみ加える試験 (図 11 b) も行った。

砂層と平板の間の摩擦力を軽減する方法として、図 12

\* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

研究速報

表2 直接せん断試験での圧密時間

$\bar{\sigma}_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.05	0.10	0.20	0.40	0.80	1.60
圧密時間 (分)	10	10	30	30	30	60

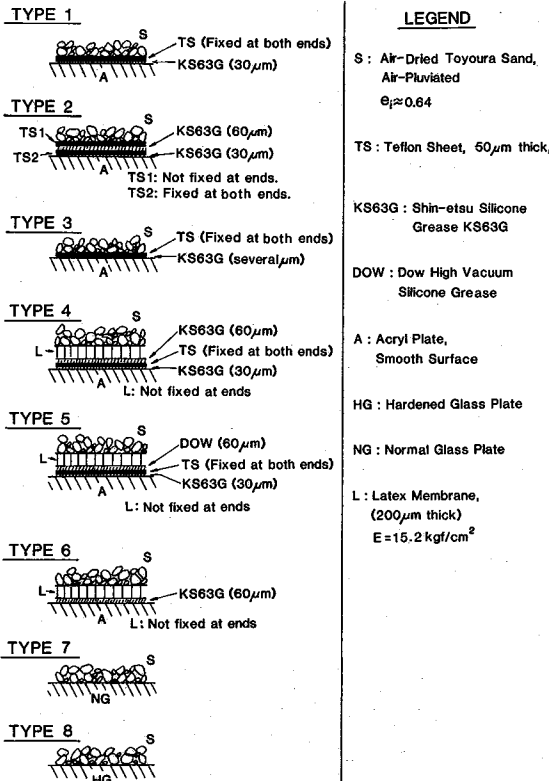


図12 砂と平板の間の各種の条件

に示す8つの方法を試みた。この内タイプ1は図6に示すように、これまでに砂箱側面に採用してきた方法である。テフロンシートは両端で固定してある。後で詳しく述べるように、タイプ1における砂とアクリル平板間の水平相対変位(滑り)のメカニズムは単純ではない。すなわち、砂とテフロンシート表面の間で滑ったり、テフロンシートとアクリル板の間で自由に滑ったり、この両方ともに生ぜず、テフロンシートが伸びたりすることが混在して生ずることがわかってきた。そこで、タイプ2として、テフロンシートにはさまれたグリース層内部でせん断変形が生ずるようにしたもの、タイプ3として、砂とテフロンシート表面の間に滑りが生ずるようにしたものを用意した。タイプ2では上側のテフロンシート(TS1)の両端は固定していない。下側のテフロンシート(TS2)を用いたのは、砂箱実験の際にこのようにしたほうが、アクリル表面が傷つかないように保護できるであ

ろうと考えたからである。タイプ3ではシリコングリースKS63Gを、テフロンシートをアクリル平面に密着させる目的で数ミクロンの厚さで塗布してあり、シリコングリース内部でせん断変形が生じにくいようにしてあり、かつテフロンシートの両端は固定してある。タイプ4, 5, 6は三軸圧縮試験や平面ひずみ圧縮試験における端面摩擦を軽減する方法としてよく用いられてきた方法である。<sup>8),9)</sup>タイプ4, 5の場合、テフロンシートは単にアクリル表面を保護する目的である。タイプ6ではこのテフロンシートは用いていない。この方法では、ラテックスメンブレンが厚いほど、砂粒子がラテックスメンブレン内に貫入している場所の直下のグリース層内の応力集中の程度が小さくなり、このためグリース残留率が高くなり、グリース層内でのせん断変形が生じやすくなる。しかし、砂箱実験のときのように砂内部にひずみが生じると、それに伴ってラテックスメンブレンに生ずる張力がより大きくなるという欠点が生じてくる。グリースは粘性が低いほど、加圧領域から横へ逃げるため、ラテックスメンブレンとその下のテフロンシート、あるいは平板とが直接接触し、かえって摩擦が増加する、という現象が生じる。粘性が高いグリースの場合はこのような現象は生じにくい、グリースのせん断抵抗自体は相対的に大きくなる。シリコングリースKS63Gはダウ(DOW)グリースよりも粘性が低い。<sup>8),9)</sup>タイプ7, 8は通常よく用いられる方法であり、<sup>3),4),6)</sup>比較のため調べてみることにした。タイプ7では普通板ガラス、タイプ8では耐熱ガラスを用いた。

3. 実験結果

図13に各タイプでの平均上載圧  $\bar{\sigma}_v = 0.4 \text{ kgf/cm}^2$  (1例だけ  $\bar{\sigma}_v = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ )のときの引き出し力と、引き出し量の関係を示す。タイプ2~8では通常の剛塑性の性質が見られる。このようなデータから、次式で見かけの摩擦角  $\phi_\mu$  (度)を求めた。<sup>8),9)</sup>

$$\phi_\mu = \arctan(\bar{\tau}_{max} / \bar{\sigma}_v) \tag{1}$$

ここで平均最大せん断応力は

$$\bar{\tau}_{max} = (P_{max} / 2 - F) / A \tag{2}$$

$P_{max}$ は図13に示すように両振幅の摩擦力である。片振幅の摩擦力は両振幅の摩擦力を測定して、その1/2とした方が精度良く求められることが経験的にわかっている<sup>8),9)</sup>。Fは図12に示すプリー⑩、ベアリング⑧の摩擦力であり非常に小さい。Aはアクリルリングの内面積(57.28 cm<sup>2</sup>)である。

タイプ1の場合で繰返し載荷を行った場合は、図13(a)に示すように特異な滑り抵抗を示した。観察によると、\*印を付した状態では、図14(a)に模式的に示した様な現象が生じていた。すなわち、1つの前の試験段

階 ( $\bar{\sigma}_v$  のより小さい段階) での繰り返しせん断のときに砂とテフロン間の滑りが生ぜず、テフロンシートと平板の間で滑ったため、テフロンシートが部分的に伸びることによって生じたしわが伸びて、テフロンシートと平板の間で滑っている。しかしこのしわが伸びきってからは、図 14(b) に示すように砂粒子とテフロンシートの間で滑ろうとするため、摩擦抵抗力が大きくなっているのが図 13(a) で +印で示す状態である。P<sub>max</sub> の値はこの状態に対して求めた。砂粒子とテフロンシートとの摩擦力だけを純粹に測定するために、タイプ 1 だけについては図 11(b) に示す方法で一方せん断を行って、図 13(b) に示すような結果を得た。このようにして求めたタイプ 1 での  $\phi_\mu$  の値を図 15 に示す。図中の●印のデータはほぼ純粹にテフロンシートと砂粒子の間の摩擦力を示していると考えてよいが、◆印のデータは砂とテフロンシートとの摩擦力とテフロンシートとアクリル平板の間の摩擦力の複合したものであると考えられる。おそらく、 $\bar{\sigma}_v$  が大きくなるほど図 14 に示すしわが大きくなるから後者の成分が卓越してくるものと思われる。一方せん断をした場合は、常に砂粒子とテフロンシートの間で滑りが生じている。図 15 に示す結果を見てまず気が付くこ

とは、テフロンと砂粒子の間の摩擦抵抗が意外と大きいことである。試験後テフロン表面を顕微鏡で観察したところ、所どころで豊浦砂の粒子がテフロンに食い込み、ひっかき傷が生じていた(写真 4)。この事実から推察すると、グリース量が多すぎたため、図 16 に模式的に示したように砂粒子がテフロン+グリース層に貫入し、砂粒子が両端固定されたテフロンシートの表面での滑りが生じようとするが抵抗が大きくなっていたのであろう。したがって、砂箱側壁面にタイプ 1 を用いた場合、砂内部に生ずるひずみのために、図 17 に模式的に示すように砂粒子は各種の方向に動こうとするから、各部分のテフロンシートは部分的に固定された状態になりうるので、側壁面摩擦は非常に大きくなりうる。

タイプ 2 の場合は、砂粒子に接しているテフロンシートは固定しておらず、また直接せん断試験では砂は剛体的に挙動するので、常に上側のテフロンシート(TS1)と下側のテフロンシート(TS2)の間で滑りが生じた。このときの  $\phi_\mu$  は図 15、図 18 に示すように小さい値であり、 $\bar{\sigma}_v$  が大きくなるにつれて減少してゆく、平均せん断抵抗力  $\bar{r}_{max} = \tan \phi_\mu \cdot \bar{\sigma}_v$  は  $\bar{\sigma}_v$  の増加とともにやや増加してゆく傾向にある。シリコングリースが完全な Newton 粘性体ならば  $\bar{r}_{max}$  は  $\bar{\sigma}_v$  の値によらないであろうが、テフロンが薄いため、 $\bar{\sigma}_v$  が増加すると砂粒子の個所でテフロンシートどうしが直接接している個所が、少しずつ増加してゆくから、 $\bar{\sigma}_v$  の増加によって  $\bar{r}_{max}$  が増加して行くのかも知れない。ここで注意すべきことは、前にも述べたように、砂箱を用いた模型実験では砂にひずみが生ずるためこのタイプ 2 を側壁に用いても、直接せん断試験の場合のように  $\bar{r}_{max}$  が小さい値となること、保証されないということである。

タイプ 3 の試験は平滑なテフロンシート平面と砂粒子

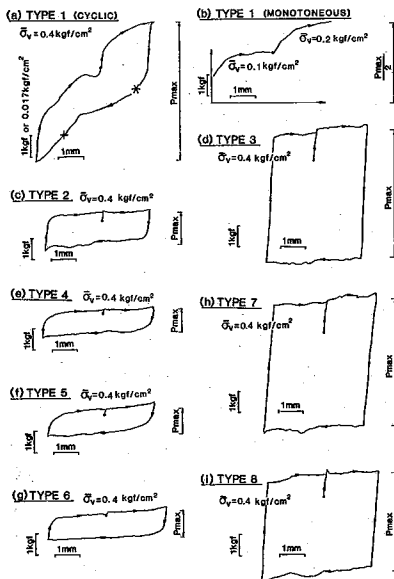


図 13 実測された引き出し力と引き出し変位の例

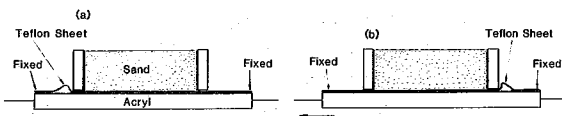


図 14 タイプ 1 におけるメカニズム

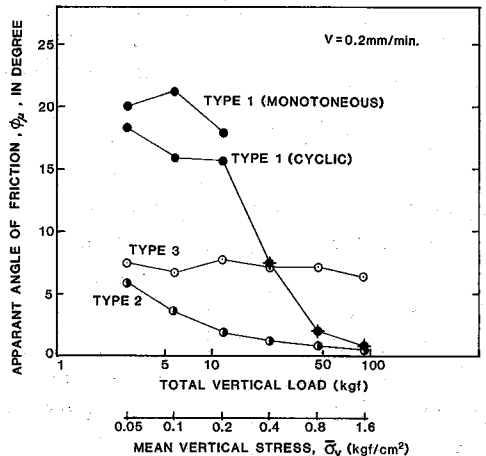


図 15 タイプ 1, 2, 3 における摩擦角

研 究 速 報

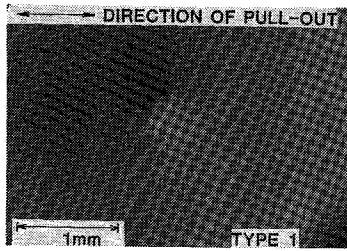


写真 4 試験後のタイプ1のテフロンシートの表面(中央凹みは砂粒子貫入への跡、横筋は砂粒子がひっかいた跡)



図 16 タイプ1における砂粒子の(テフロンシート+グリース)層への貫入の模式図

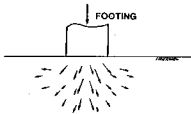


図 17 フーチング直下の砂粒子の動き(模式図)

の間の摩擦力を推定するために行った。観察によっても、実際に砂粒子とテフロンシートの間で滑りが生じていた。実験後に顕微鏡によりテフロンシートの表面を調べたが、引っかき傷はまったく認められなかった。実験結果(図15, 19)を見ると、 $\phi_\mu$ の値は $\bar{\sigma}_v$ の値によらず摩擦性の抵抗であることを示唆している。また摩擦角は6.5~7.5度でありかなり小さいが、タイプ2の場合よりは相当大きい。特に $\bar{\sigma}_v$ が大きくなるとその差は大きくなる。

以上のことから、テフロンシートを用いて砂箱側面の摩擦を軽減しようとする場合、砂に接しているテフロンシートの裏側に厚目(60µm程度)のシリコングリースを塗布した場合、テフロンシートとアクリル平板の間の摩擦抵抗力は相当小さくなるが、砂が放射状あるいは多方向に動こうとする場合はテフロンが自由に変形できなくなり、テフロンシートの大きな引張抵抗力のためにテフロンシートと砂箱側面との間のすべりは生じにくくなる。さらに多めのグリースのため砂粒子がテフロンシートへ貫入するためその表面を滑ることも困難になるため、けっきょく摩擦抵抗力は相当大きくなってしま(摩擦角で15~20度)。むしろ、テフロンシートと砂箱側面とのシリコングリース量は極力少なくし、平滑なテフロンシート表面を用意すれば、砂粒子がテフロンシート表面を滑りやすくなり、摩擦角を6.5~7.5度程度小さくできる。

4. ま と め

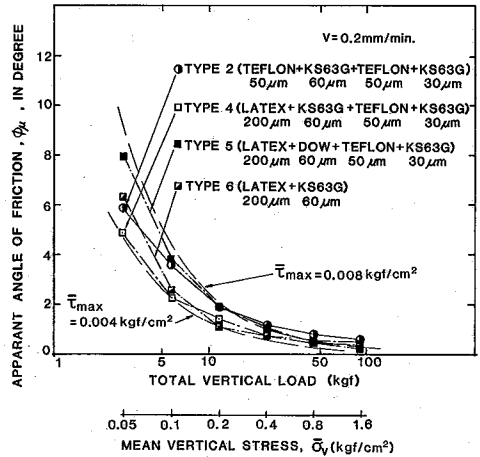


図 18 グリース層内にせん断変形が集中したときの $\phi_\mu$ の値

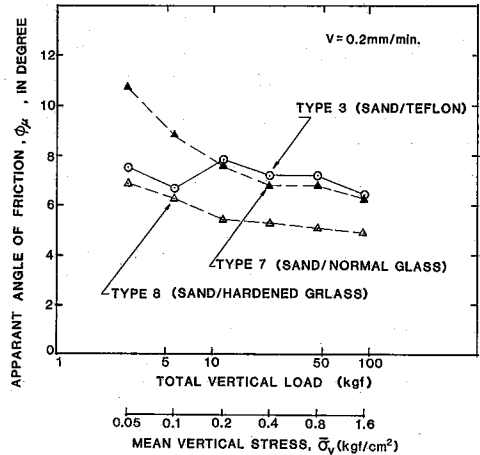


図 19 砂が平面上を滑って行くときの $\phi_\mu$ の値

テフロンシートを砂と平板の間に介在させると、その滑りのメカニズムはなかなか複雑であることがわかった。全体として、どのような方法を用いても、砂とテフロンシートが直接接している限り、砂箱を用いた模型実験での側壁面の摩擦角を非常に小さくすることはむずかしい。たとえば、タイプ2を用いても、砂層内のひずみが大きくなるにつれて、テフロンシートの張力がだいに大きくなってきてしまう。次回は、他のタイプでの実験結果とまとめを示す。(1983年10月31日受理)

参 考 文 献

- 龍岡文夫・鳥居剛(1983), "室内せん断試験における供試体端面摩擦軽減法,"土と基礎, 31巻, 7号, 65~67頁.
- F. Tatsuoka F. Molenkamp, T. Torii and T. Hino, (1984), "Behavior of Lubrication Layers of Platens in Element Tests" Soils and Foundations, Vol. 24, No.1.