

砂の直接せん断と三軸せん断の比較

COMPARISON BETWEEN DIRECT SHEAR AND TRIAXIAL SHEAR OF SAND

井上 広胤*

By Hirotane Inoue

1. まえがき

筆者はさきの論文¹⁾で砂の直接せん断について述べ、下部可動型試験機では側面摩擦の影響がかなり大きいことを示すとともに、わが国では現在ほとんど使用されていない上部可動型試験機についても研究の余地があることを指摘しておいた。その後この形式の試験機による実験を重ね、三軸試験および下部可動型試験機による測定値との比較を行なったので、その結果を報告する。試料、試験機などは前論文で報告したものと同一であり、また測定値についての検討、考え方も同じであるから、この小論は前論文を補足するものと考えていただきたい。

2. 各種せん断試験の比較

(1) 砂のせん断抵抗の要素

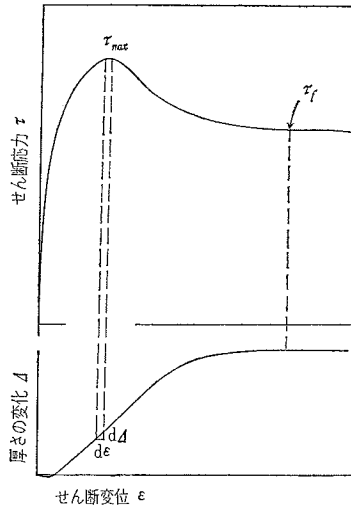
砂のせん断抵抗は粘着力を除いた Coulomb の式 $S = \sigma \tan \phi$ であらわされる。いうまでもなく σ は垂直応力であり、 ϕ はせん断抵抗角**であるが、この式は単に強度と垂直応力の関係をあらわす一般式にすぎない。砂のせん断抵抗が粒子間の摩擦抵抗と体積変化に対する抵抗より成ることを示すためには、直接せん断の場合つぎの表現が適当である¹⁾。

$$S = \tau_{\max} = \sigma \tan \phi_{r,f} + \sigma \left(\frac{d\Delta}{d\varepsilon} \right)_{\tau=\max} \dots\dots\dots (1)$$

ここに $\phi_{r,f}$ は膨張がないとしたときのせん断抵抗角、すなわち真の意味での内部摩擦角である。また $(d\Delta/d\varepsilon)$ は赤井教授²⁾が三軸せん断において膨張指数と仮称したもので、直接せん断においては単位せん断変位の増加に対する、試料の厚さの変化を示すものである (図-1 参照)。

上部可動型試験機においては側面摩擦の影響を無視するので、 τ_{\max} 、 $(d\Delta/d\varepsilon)_{\tau=\max}$ の測定値を用い上式によって $\tan \phi_{r,f}$ を計算することができる。しかし下部可動型試験機を使用した場合は、密な砂ではかなり大きな側面摩擦が働くので、測定値は式(1)を満足せずしたがって $\tan \phi_{r,f}$ は求められない。この場合には $\tan \phi_{r,f}$

図-1



の近似値として $\tan \phi_{r,f}'$ を考える。図-1の応力-変位曲線上の τ_f は体積変化がとまったときのせん断応力で、砂粒子のかみ合わせがゆるんだのちの摩擦抵抗をあらわしている。摩擦抵抗は砂粒子間に働く圧力、したがって垂直応力 σ に比例すると

考えられるので、つぎの関係が成立するとしてよいであろう。ただし粘着力に相当する部分は無視するものとする。

$$\tau_f = \sigma \tan \phi_{r,f}' \dots\dots\dots (2)$$

最大せん断応力 τ_{\max} が測定されるとき垂直応力は体積変化がとまった状態での垂直応力より大きいので、 τ_{\max} 中にふくまれる摩擦抵抗は τ_f と等しくはないが、試料の厚さを十分薄くすれば $\tan \phi_{r,f}'$ は $\tan \phi_{r,f}$ の近似値として使用することができる¹⁾。

$\tan \phi$ 、 $\tan \phi_{r,f}$ 、 $\tan \phi_{r,f}'$ および $(d\Delta/d\varepsilon)_{\tau=\max}$ などの値を比較することによって、上部可動型試験機と下部可動型試験機の相違および直接せん断と三軸せん断の相違を検討することができる。

(2) $\tan \phi$ の比較

試料の厚さを十分薄くし (径 60 mm に対し厚さ 10 mm)、上部可動型および下部可動型試験機によって得られる $\tan \phi$ の値と三軸試験から求められる値を比較すると、図-2 および図-3 のようになる。下部可動型では上の実線は側面摩擦の影響をふくんだものであり、破線はこれを除去したものである。これらの値からせん断抵抗角を求めると表-1 のような値が得られる。ただし三軸試験の場合は、両図に見られる直線性が広範囲の間引き比にわたって成立するとして推定した値を示したもの

* 正員 東京都立大学助教授 工学部土木工学科
 ** 砂の場合には従来の内部摩擦角と同じものであるが、砂のせん断抵抗は摩擦抵抗のほかに体積変化に対する抵抗をもふくむものであるから、この名称の方が適当であると考えらる。

である。外国の文献^{3),4)}によれば砂のせん断抵抗角は $28^{\circ}\sim 45^{\circ}$ とされており、この値と比較し上部可動型試験機と三軸試験機による値は大体妥当と考えられる。下部可動型試験機では、側面摩擦の影響を除去しても上限の値は $50^{\circ}30'$ あるいは 53° であり、砂質の相違があるにしてもなおいくぶん過大である。

図-2 $\tan \phi$ の比較 (標準砂)

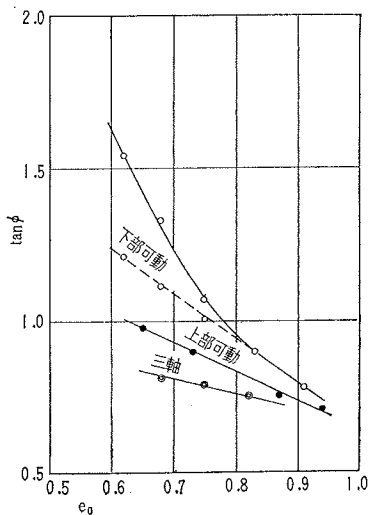


図-3 $\tan \phi$ の比較 (笛吹粗砂)

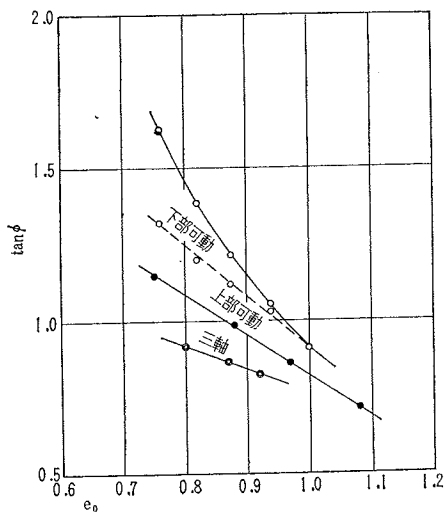


表-1 せん断抵抗角の比較

試験機	試料	標準砂 $e_0=0.62\sim 0.94$	笛吹粗砂 $e_0=0.75\sim 1.05$
下部可動(側面摩擦を含む)		$36^{\circ}30'\sim 57^{\circ}00'$	$39^{\circ}40'\sim 59^{\circ}00'$
下部可動(側面摩擦を除く)		$36^{\circ}30'\sim 50^{\circ}30'$	$39^{\circ}40'\sim 53^{\circ}00'$
上部可動		$35^{\circ}10'\sim 45^{\circ}00'$	$36^{\circ}50'\sim 48^{\circ}50'$
三軸		$34^{\circ}40'\sim 40^{\circ}20'$	$35^{\circ}55'\sim 43^{\circ}45'$

(3) 上部可動型試験機と下部可動型試験機の比較

上部可動型試験機と下部可動型試験機の相違は、機構的にはせん断箱の上半部を動かすか下半部を移動させるかの違いであるが、結果的にはこれが測定値に大きく影響し、その大きな原因は側面摩擦にあることはすでに明らかにされている⁴⁾。しかし図-2および図-3に見られるように、側面摩擦の影響を除去してもなお下部可動

型試験機によるせん断抵抗角は、上部可動型試験機による値より大きい。この相違が摩擦抵抗によるものであるか、あるいは体積変化に対する抵抗によるものであるかを検討してみよう。

a) $\tan \phi_{rf}'$ の比較

前述のように下部可動型試験機の場合は $\tan \phi_{rf}$ を求めることができない。したがってここでは $\tan \phi_{rf}'$ の比較によって、摩擦抵抗が両試験機でどのように異なるかを推定する。図-4および図-5はそれぞれ標準砂と笛吹粗砂について、上部可動型試験機と下部可動型試験機による $\tan \phi_{rf}'$ を比較したものである。両試験機によるこの値の差はかなり大きく、標準砂で $0.07\sim 0.18$ であり笛吹粗砂では $0.12\sim 0.19$ であるが、この差が側面摩擦の影響を除去した下部可動型試験機による $\tan \phi$ と上部可動型試験機による $\tan \phi$ の値の差に大体一致していることは注目値する。

図-4 $\tan \phi_{rf}'$ の比較 (標準砂)

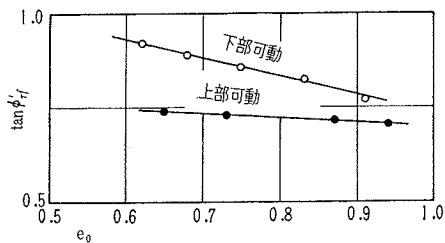
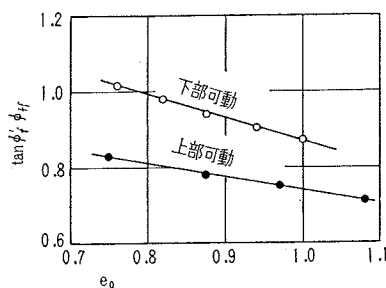


図-5 $\tan \phi_{rf}'$ の比較 (笛吹粗砂)



b) $(dA/d\varepsilon)_{\varepsilon=\max}$ の比較

体積変化に対する抵抗の相違は $(dA/d\varepsilon)_{\varepsilon=\max}$ の比較によって検討できる。図-6および図-7はこの比較を示すものであるが、試料が密な場合でもゆるい場合でも両試験機は大体同様な値を示し、体積変化に対する抵抗は試験機による差がほとんどないことが明らかである。

以上のような2係数の比較によって、上部可動型試験機と下部可動型試験機による測定値の差異は、側面摩擦の影響を除去して考えれば主として摩擦抵抗の差によるものであることがわかる。もちろん $\tan \phi_{rf}'$ は $\tan \phi_{rf}$ の近似値にすぎないがこのように考えて大過ないと思われる。

体積変化がとまって摩擦抵抗のみが働いている状態について考察すると、下部可動型の場合はせん断箱両半部

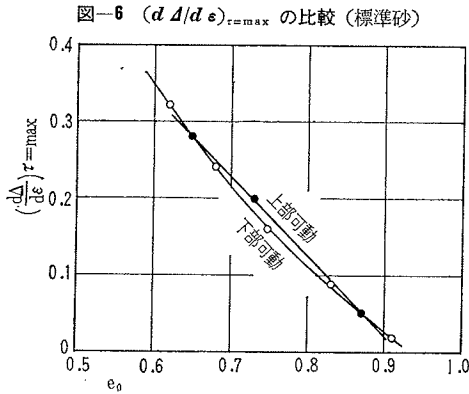
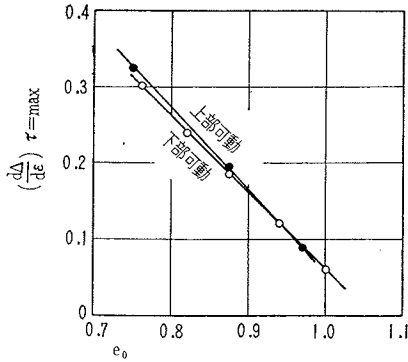


図-6 $(dA/d\varepsilon)_{\tau=\max}$ の比較 (標準砂)



の上下方向の移動がなく、せん断面は非常に限定された範囲内にあり、砂粒子の水平方向の移動は相当に拘束されていると考えられる。一方上部可動型では試料が膨張する際にせん断箱の上半部が押し上げられるので、体積変化がとまったときには箱の両半部の間隔はかなり開いており、せん断領域での砂粒子の移動、回転などは下部可動型にくらべて自由度が大きい。特にせん断面の周辺部では砂粒子の移動に対する拘束はきわめて小さい。このような砂粒子の水平方向の移動に対する拘束の相違は、最大せん断応力が測定されるときにも大体同様であると推定される。

かくして上部可動型試験機と下部可動型試験機による測定値の大きな差異は、側面摩擦の影響と砂粒子の移動に対する拘束の程度が異なることによるものであるといえることができる。

(4) 上部可動型試験機と三軸試験の比較

表-1 に示したように上部可動型試験機によって求められる砂のせん断抵抗角は、三軸試験から求められる値に比較的近いものであり、下部可動型試験機による値よりは信頼性が高いと考えられる。また上部可動型試験機においては側面摩擦の影響は無視しうる程度のものであるが、垂直応力とは無関係に試料の密度によって大体一定した値をとるので²⁾、せん断抵抗角の値に影響しない。これらのことから砂の直接せん断には上部可動型試験機

を採用すべきであると考えられる。

この形式の試験機と三軸試験とから求められる値について前項と同様な比較を試みよう。定側圧三軸試験においては破壊時の強度は次式であらわされ²⁾、右辺第一項は直接せん断試験における式(1)の $\tan \phi_{rf}$ に対応する。

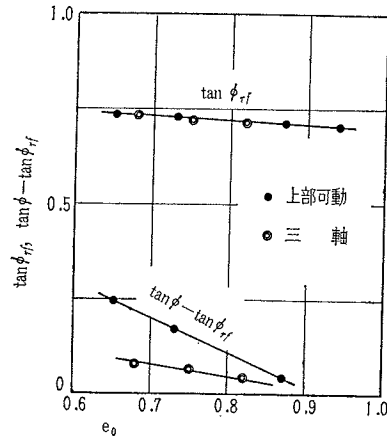
$$\frac{\sigma_{vf}}{\sigma_L} = \frac{\sigma_{rf}}{\sigma_L} + \left(\frac{dA}{d\varepsilon} \right)_{\max} \dots\dots\dots (3)$$

ここに σ_{vf} : 破壊時の軸差応力, σ_L : 液圧,

σ_{rf} : σ_{vf} のうち粘着力と内部摩擦とだけに打ち勝つに要する部分

三軸試験の場合は、破壊時の軸差応力 σ_{vf} のうち $\sigma_L (dA/d\varepsilon)_{\max}$ が体積変化に対する抵抗についてやされ、 σ_{vf} とこの値との差が粘着力と内部摩擦に打ち勝つに必要な部分であると考えられる。したがって σ_{vf} のうち $[\sigma_{vf} - \sigma_L (dA/d\varepsilon)_{\max}]$ のみを取りだし、この値についてモール円の包絡線から $\tan \phi_{rf}$ を求めることができる。2種類の砂について、上部可動型試験機による $\tan \phi_{rf}$ を三軸試験の結果から求められる値と比較すると図-8 および図-9 のようになる。標準砂ではこの値には

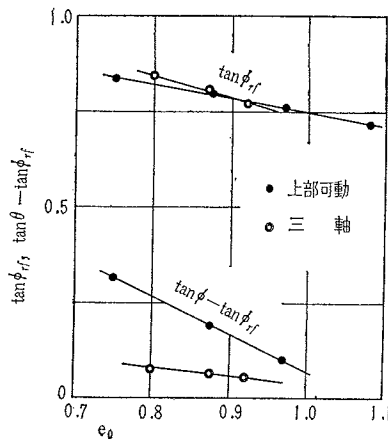
図-8 (標準砂)



ほとんど差が認められず、また笛吹粗砂でも大体同様な値を示しており、摩擦抵抗は両試験法の間あまり差がないことが知られる。

他方体積変化に対する抵抗の係数は $(\tan \phi - \tan \phi_{rf})$ によ

図-9 (笛吹粗砂)



て与えられ、両図の下方に示されている。この係数は両試験法の間明らかに差があり上部可動型が大きな値を示しているが、この差は図-2 および図-3 に示された $\tan \phi$

の値の差と大体一致している。

これら2係数の比較から、上部可動型試験機と三軸試験によるせん断抵抗角の差は、おもに体積変化に対する抵抗の相違によるものであることがわかる。砂粒子間の摩擦抵抗のみに着目すれば、直接せん断と三軸せん断の間に大きな差があるとは考えられないが、図-8 および図-9 に示された $\tan \phi_{rf}$ の比較はこれを裏がきしている。これに反しせん断時の体積変化は両試験法の間に明らかな差異がある。すなわち三軸せん断では体積変化は3次元で行なわれるが、直接せん断では主として上方向のみに限られている。直接せん断におけるこのような拘束は体積変化に対する抵抗を大きくし、三軸せん断にくらべて大きなせん断抵抗を与える原因になっていると考えられる。

従来直接せん断と三軸せん断によるせん断抵抗角の差は中間主応力の影響によるものと解釈されてきた。もちろんこの影響はあるであろうが、そのほかの要素の影響を明らかにしたうえで中間主応力をとりあげるべきであり、現在の段階では直接せん断と三軸せん断の差は2次元のせん断と3次元せん断の差であるとした方が無難であろう。

3. 結 語

わが国に普及している直接せん断試験機は下部可動型

が大部分であり、これによって得られる密な砂のせん断抵抗角があまりにも過大であるため、直接せん断試験は不当な悪評をうけてきたように思われる。この点はこの小論および前論文¹⁾によって明らかになったと考えている。この研究のむすびとして、砂の直接せん断には上部可動型試験機か、下部可動型のもでもせん断箱の上半部を固定しない構造のものを使用すべきことをくり返し提案したい。これによって得られるせん断抵抗角は2次元せん断の結果として妥当な値である。下部可動型試験機を使用した場合には、側面摩擦の影響を除去した値¹⁾について $\tan \phi$ を求め、密な砂ではその85%、ゆるい砂では90%をとれば、上部可動型試験機による値と大体同程度の値が得られる。

砂以外の土では不飽和の粘性土が直接せん断試験の対象になりうるものであり、これについては現在研究を進めているので別の機会に報告する予定である。

参 考 文 献

- 1) 井上広胤：砂の直接せん断に関する研究，土木学会論文集 第101号，1964
- 2) 赤井浩一：砂のせん断におけるダイレイタンスー効果，土木学会論文集 第58号，1958
- 3) Tschebotarioff : Soil Mechanics, Foundation, and Earth Structures, 1953
- 4) Terzaghi・Peck : Soil Mechanics in Engineering Practice, 1960

(1964.2.29・受付)