

原位置せん断試験装置開発に関する基礎的研究

地盤研究室 徳山英之
指導教官 豊田浩史

1. はじめに

地盤のせん断強度を求めるための方法としての一つに、原位置で直接せん断試験を行うことが考えられる。例えばベーンせん断試験など原位置で直接せん断試験する方法がいくつか実際に利用されているものの、種々の地盤に対して、有効応力で評価できる強度定数を直接求める試験機は、いまだに実用化されていない。そこで、ボーリング孔内で直接せん断試験を行い、強度定数 c 、 ϕ を決定するという方法を用い、種々の地盤を対象に直接せん断試験を行う孔内ねじりせん断試験装置が開発され運用され始めている。

本研究では、この開発された原位置試験機から得られる強度定数 ϕ を、標準的な供試体としてカオリン粘土、豊浦砂を利用し試験を行い、通常室内試験結果と比較してその妥当性を検討するものである。本試験機では、定圧法、定体積法いずれも可能ではあるが、現場での使用を考慮し、試験時間的に有利な定体積法での検討を行い、さらには、せん断中に定体積という条件が保たれているかの検証も行った。

2. 概要

本研究で対象とする原位置せん断試験装置の概要を Fig. 1 に示す。ここでは、名称を孔内ねじりせん断試験装置¹⁾(Borehole Torsional Shear Test, BTST)とする。現在試験運用が行われている。

2.1 試験装置概要

ここでは、Fig. 1 に示すように2つの主な部分を中心に説明する。切り込み溝と数枚のせん断羽根を下端に設け、円筒形をしたせん断試験部(①)内のシリンダー部にポンプによって水圧を調整供給し、所定の垂直圧力 W により孔底地盤に圧着させ、所定の鉛直応力で圧密をして、これに回転装置部(②)で回転変位を加えて地盤内にせん断破壊を生じさせて、

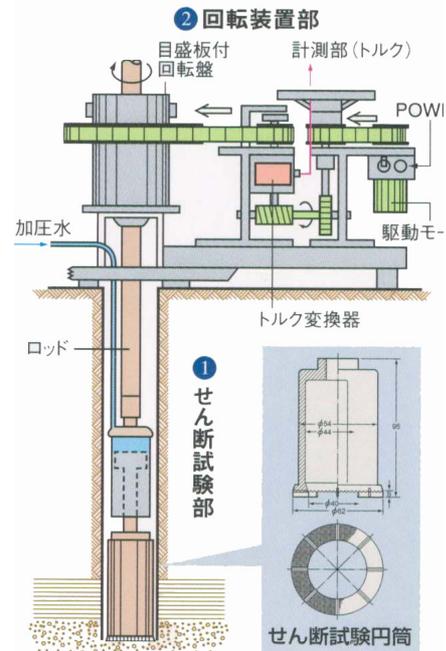


Fig.1 試験装置概略図(原位置用)

せん断抵抗と垂直応力を計測記録部によって記録する。このとき圧密圧力を段階的に数回変えて試験を行い、それぞれ所定の圧密圧力における地盤内垂直応力 σ_n とせん断抵抗 τ との関係を求めて整理することで、せん断強度定数 c' 、 ϕ' を求めることができる。

なお、本試験法では「定圧試験」「定体積試験」のいずれも可能である。定圧試験は加圧調整部で水圧を一定に保つことによって一定垂直応力を保持する試験法であり、定体積試験は加圧調整部の弁を締め、シリンダー部の水の体積を一定に保ち、せん断部の鉛直変位をなくすことで定体積を保つ試験法である。

またこの試験装置では、試験が簡便である。ボーリング孔を利用して、深さ方向の測定が可能である。原位置試験では唯一、有効応力経路の測定が可能である、などの利点が挙げられる。

2.2 試験方法

BTST でボーリング孔内において標準的な

試験条件として定体積条件で行った。

一方で BTST を室内用に改造し定体積試験を行い、他に一面せん断試験を定体積条件で、三軸圧縮試験を非排水条件で行った。用いた試料はカオリンと豊浦砂である。

カオリン ($I_p=17.2$, $C_f=39.8\%$) は液性限界の倍程度のスラリー状にし、正規圧密状態で圧密圧力を 100, 200, 300kPa で試験を行った。一方、豊浦砂は気乾状態のものを、密な状態 ($D_r=60\%$)、緩い状態 ($D_r=30\%$) としたものを、圧密圧力を 100, 200, 300kPa のもと試験を行った。

三軸圧縮試験では、飽和したカオリンを $P' = 100, 200, 300\text{kPa}$ で正規圧密したものを、飽和豊浦砂では、 $P' = 100\text{kPa}$ で密詰め状態 ($D_r=60\%$) でせん断試験を行った。

3. BTST を室内で行うための改良点

室内で BTST を行うために、Fig. 1 での原位置用試験装置に対し、次に述べるような改良を施し、より精密な試験ができるようにした。

①せん断試験部 (Fig. 1)

試験時の鉛直変動を計測するため、せん断刃の鉛直変位をダイヤルゲージにより計測できるようにした。

②回転装置部 (Fig. 1)

ロッドを固定する部分が、ロッドにかかる力により、鉛直変動する可能性があるため、ロッドの先端部を回転板の上盤に固定した。

粘性土用にモーターの速度を、元の速度の $1/10$, $1/100$ に変更し、 $0.1\text{mm}/\text{min}$, $0.01\text{mm}/\text{min}$ の速度でせん断することを可能にした。

③加圧調整部

定体積試験時に水圧によるチューブの膨張の影響を抑えるため、ポンプからシリンダーに至るシーフレックスチューブを短くした。シリンダー部の水圧を正確に評価するため、水圧計の位置をピストンシリンダー上部に変更し、正確な水圧を計測できるようにした。

試験時の供試体部には、通常使われるボーリング孔と同様の直径 76mm の透明アクリル円筒を利用し供試体部を作製した。

4. 試験結果と考察

ここでは、原位置、室内で行った BTST の試験結果について、室内試験結果と対比し、その有効応力経路と ϕ の値を比較することで、それぞれの試験結果の検証を行った。

4.1 原位置で行った BTST 試験結果について

Fig. 2 は BTST を実際に現場において行った試験結果例である。(a)粘土地盤、(b)砂質地盤において定体積条件で行った。

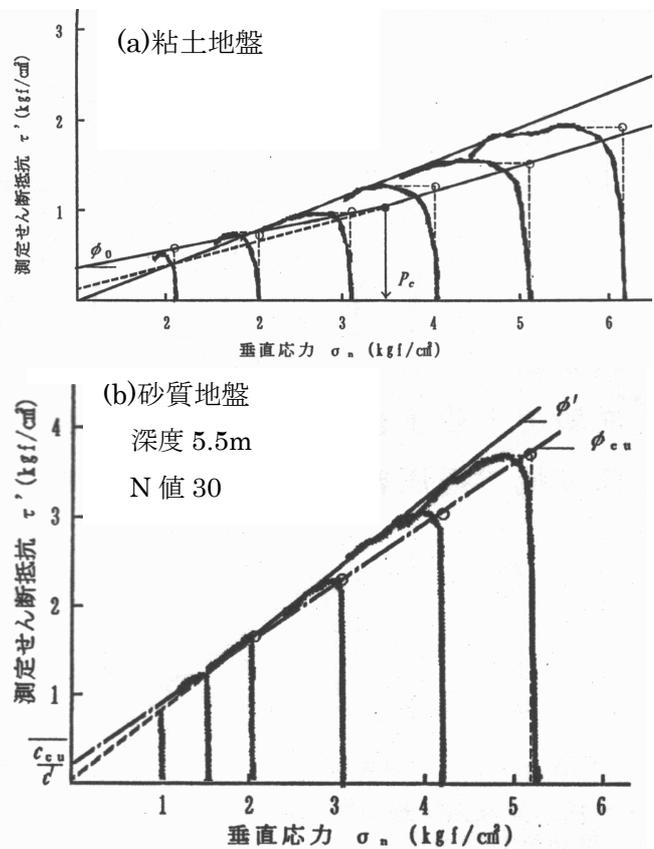


Fig. 2 BTST による原位置試験結果

(a)では、鉛直圧 300kPa 以下は過圧密、それ以上は正規圧密に分けられる。ここで、過圧密領域にあたる 300kPa までの有効応力経路をみると、一般的に室内で見られるような挙動を示さず、せん断応力は大きめな値を示す傾向がある。一方、正規圧密領域では、鉛直圧の減少が確認され負のダイレイタンシ

一と同様の挙動が起きているのがわかる。

一方、(b)の現場は、N 値 30 を示す非常に固い砂地盤である。この場合、室内試験では密な砂に対する定体積試験と同様な、体積膨張による正のダイレイタンス挙動が確認されるはずである。しかし、圧密圧力にかかわらず全く観測されず、鉛直応力の減少に伴うせん断応力の低下がどの圧密圧力に関してもみられている。この挙動は通常の定体積条件を考えると説明が困難なため、条件を整えた室内試験との比較検討により原因の究明を行う必要がある。

4.2 室内で行った BTST と室内試験との比較

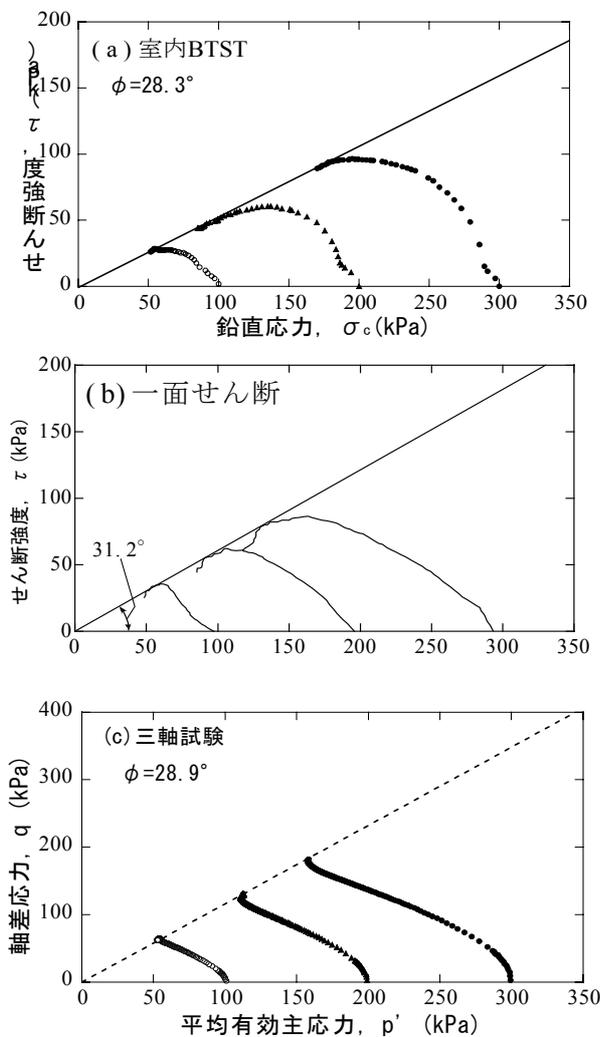


Fig. 3 応力経路((a)BTST, (b)一面せん断, (c)非排水三軸圧縮試験)

(1) カオリン粘土(正規圧密)

ここでは、Fig. 2(a)の試験結果を踏まえ、粘土に対し正規圧密状態での検討を行った。Fig. 3(a) (b) (c)はカオリン粘土を用い、鉛直応力 100, 200, 300kPa で応力経路を描き、破壊線を描いた、一面せん断試験、三軸圧縮試験、BTST の試験結果である。特にせん断機構の似ている一面せん断試験での有効応力経路をみると、鉛直応力の減少を表す部分がよく表れている。一方で、 ϕ を比較すると 3° 以内の差を示し極めていい一致を示している。しかし、せん断刃の鉛直変位を計測していなかったため、定体積条件が保っていたかについては疑問が残る。

(2) 豊浦砂(密な状態)

ここでは、Fig. 2(b)の試験結果検証のため、密な砂に対して試験を行った。最初に有効応力経路に注目する。Fig. 4 に示される一面せん断試験、三軸圧縮試験とも、砂が密詰め、緩詰めの場合それぞれで、鉛直応力の増加(正

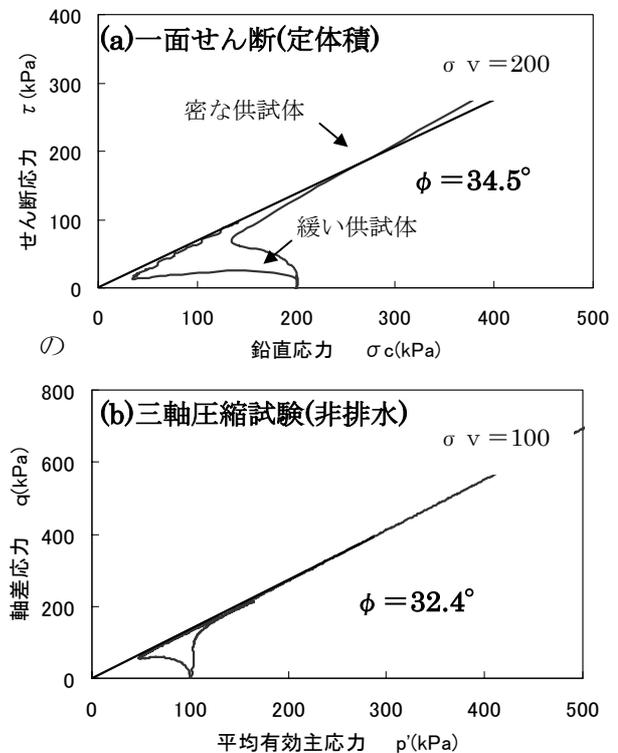


Fig. 4 応力経路

((a)一面せん断, (b)非排水三軸圧縮試験)

ダイレイタンス) がはっきりみられ、破壊線に沿っていることが明らかである。φ の値も 3° 以内の間でそろっていることから精度のよい結果が得られていることがわかる。

これらの結果を踏まえ、BTST による一般的に行われている定体積条件 (鉛直変位を制御しない) での試験結果を Fig. 5 に示す。有効

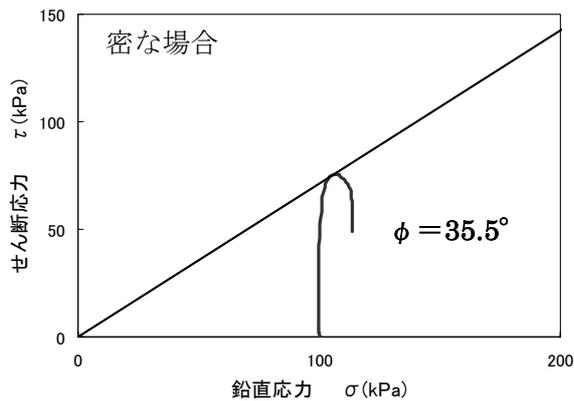


Fig. 5 BTST による応力経路

応力経路をみてみると、最初、鉛直にせん断応力が上昇し、破壊線に到達後、鉛直応力の増加いわゆる正のダイレイタンス挙動を示し始めるが、すぐにせん断応力が減少し、破壊線に沿って上昇する挙動は見られない。そこでそのときのせん断変位と鉛直変位の関係 (Fig. 6) をみてみると、せん断開始後、せん

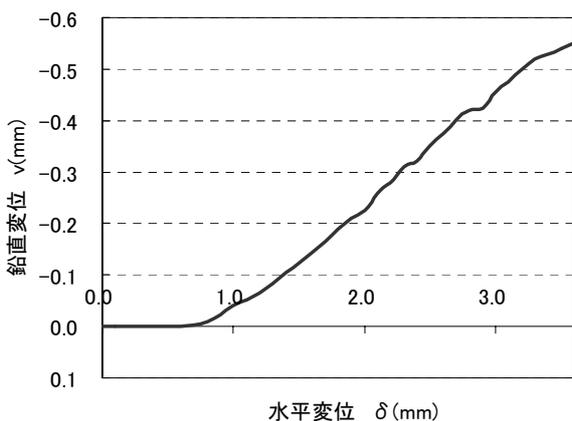


Fig. 6 鉛直変位-水平変位曲線

断変位の進行とともに鉛直変位が線形的に増加していく挙動が見られる。これは、BTST で

いう定体積条件が守られていないことを示す。

そこで、計測している鉛直変位を監視し、常にゼロに合わせるように、鉛直圧を制御して行った試験の結果を Fig. 7 に示す。鉛直応

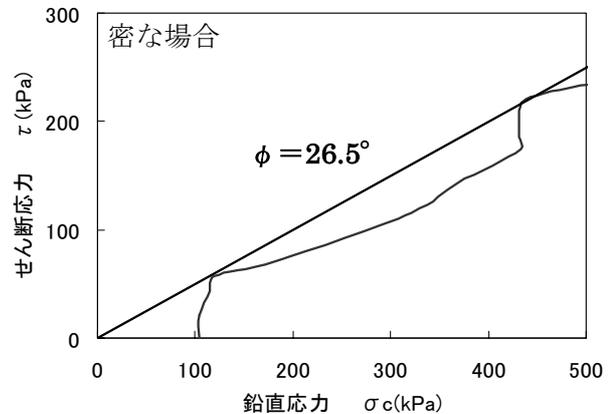


Fig. 7 BTST で変位制御をした時の応力経路

力の増加に伴うせん断応力の増加は見られるが、描かれた破壊線は他の室内試験で得られるものと比較すると、明らかに小さな値を示していることが明らかである。これはまず、鉛直圧を制御しているポンプの精度が悪く、滑らかな圧力変動を与えられないためであると考えられる。この方法は、一面せん断試験の定体積条件で行われている方法²⁾であり、鉛直圧の制御が詳細にできれば精度の良いφを示すことが期待される。

5. まとめ

室内で詳細な検討を行い、室内試験と BTST とを比較し検討したところ、BTST では厳密な定体積試験が行われていないことが明らかになった。鉛直変位を制御する定体積試験を行えば、ある精度を持つ強度定数 c 、 ϕ を評価できる可能性がある。今後、試験装置の改良により、精度を上げていく必要がある。

参考文献

1) 勇野喜正裕他, 孔内における直接リングせん断試験法の有効応力におけるせん断強度の適用について, 第2回地盤力学における現場計測に関する国際シンポジウム, 1988.

2) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 第7編, 第4章, 一面せん断試験, 563-600, 2000.