

# 孔内ねじりせん断試験の せん断破壊特性に関する実験的研究

中村公一<sup>1</sup>・豊田浩史<sup>2</sup>・酒井直樹<sup>3</sup>・島内哲哉<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 工修 長岡技術科学大学大学院 エネルギー・環境工学専攻  
(〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系(〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1)

<sup>3</sup>正会員 博士(工学) 明治コンサルタント(株) 技術統括部(〒333-0801 川口市東川口1-22-4)

<sup>4</sup>正会員 学士 明治コンサルタント(株) 技術統括部(〒333-0801 川口市東川口1-22-4)

本論文では、室内において調整された試料を用いて、孔内ねじりせん断試験と称される原位置せん断試験の高精度化のための改良とその評価方法について基礎的検討を行った。この試験装置は、土をねじるせん断部分と鉛直力を載荷する圧力部とデータ記録部からなる。はじめに、この試験によるせん断破壊メカニズムを知るために、せん断面の発生位置について観測を行った。次に、拘束リングの長さの影響について、室内リングせん断試験結果と比較することにより検討した。このようにして得られた試験結果は、定圧、定体積とも室内リングせん断試験の結果と同等のものが得られることを示した。

**Key Words :** *in-situ shear test, shear band, shear strength, special shear test, torsional shear*

## 1. はじめに

地盤の強度・変形特性を調べる方法は、不攪乱試料を用いた室内試験と、原位置試験に大別される。室内試験はさまざまな応力条件を制御可能であり、高い試験精度と再現性を確保できる。しかし、砂質土などの不攪乱試料を採取することが困難な地層や、変化の多い互層域では十分な試験が行えない難点がある。また、不攪乱試料を採取できても、試料採取時の応力解放や攪乱の影響は避けたい<sup>1)</sup>。一方、原位置試験は、地盤の力学特性を直接評価できる利点があるが、応力条件が明確でないことから結果の解釈に不明確な点をもつ。

これまで原位置試験では標準貫入試験が主に行われてきたが、最近ではボーリング孔を利用する原位置試験の開発も活発に行われている。ボーリング孔を利用して強度・変形特性を調べる原位置試験は、ベーンせん断試験、孔内水平載荷試験、孔内せん断試験、孔内鉛直載荷試験の4つに大別できる<sup>2)</sup>。この中で標準化されているのは、ベーンせん断試験と孔内水平載荷試験である。しかし、ベーンせん断試験は対象地盤が軟弱粘土地盤に限られ、孔内水平載荷試験は砂礫地盤のように孔壁面がなめらかでない地盤や軟弱粘土地盤など孔壁が乱されやすい地盤への適用が難しいという問題点がある<sup>3)</sup>。本研究で検討する孔内ねじりせん断試験<sup>4)</sup>は、このように現在使用されている原位置試験で対処できない地盤や、不攪乱試料を採取

できない地盤に対処するために開発された試験である。孔内ねじりせん断試験は孔内せん断試験<sup>5)6)</sup>に属し、直接地盤の強度特性を求めることができる。これは標準貫入試験や孔内水平載荷試験などのように間接的に強度定数を求める場合、その値が土質条件の違いで大きく異なったり、大きなばらつきを生じることがない利点を持つ。しかし孔内せん断試験は、試験時の排水条件などが明確でないため、その結果の解釈には問題がある。

そこで本研究では、試験条件を明確に設定できるように室内で試験を行い、他の室内試験の結果と比較することで、この試験装置の検証を行うことが目的である。精度良い測定が可能のように、せん断部直上にロードセルを設置した。はじめに、せん断破壊メカニズムを知るために、せん断面の発生位置について観測を行った。次に、拘束リングの長さの影響について、室内リングせん断試験結果と比較することにより検討した。これらの結果より、ある程度の精度で、孔内ねじりせん断試験における定圧、定体積試験が可能であることを示した。

## 2. 試験法の概要

### (1) 孔内ねじりせん断試験

孔内ねじりせん断試験装置の概要を図-1に示す。ここで孔内ねじりせん断試験(Borehole Torsional Shear Test, 以降BTSTと略す)とは、ある鉛直応力でせん断刃を供試体表面

に密着させ、モーターで回転変位を加えることにより、供試体内にせん断破壊を生じさせ、そのトルクを測定する試験である。鉛直圧はポンプにより水圧を発生させ、それによってシリンダー内部のピストンを押し下げることにより、ロードセル、せん断刃を介して載荷する。トルクはモーターによりロッドを回転させることで載荷する。鉛直力とトルクの計測は、せん断刃(Shear edge)の直上に鉛直力とトルクを同時に計測できるロードセルを取り付けることにより、装置の摩擦分を取り除いた正確な鉛直力、せん断力の計測を可能にした。データの測定は、データロガーとパソコンを使用して自動計測した。

せん断刃は、中実せん断刃と中空せん断刃がある(図-2(a)(b)参照)。本論文では中実せん断刃のみを使用した。使用した拘束リング付き中実せん断刃は外径 62mm であり、せん断刃外径は一般的なボーリング孔径の中で最も小さい 66mm で使用可能であるように決定した。またモールド内径は、最も大きいボーリング孔径 116mm に近い、10cm モールドを使用した。また、サンプリャーから試料を取り出さずに試験機にセットして室内で孔内ねじりせん断試験を行うことも想定している。拘束リング長さとは、図-2(a)に示す矢印の部分の長さである。この拘束リングは、せん断刃とともに回転するようになっている。せん断刃には、土のかみ合わせをよくするため、高さ 2mm の刃が取り付けられている。

せん断試験は、定圧・定体積条件で行った。定体積試験では、鉛直圧を制御し鉛直変位をゼロに保つことで達成している。この方法は、定体積一面せん断試験方法<sup>10</sup>と同様である。せん断応力算定方法は、リングせん断試験と同様に、剛完全塑性を仮定し次式で求めた。

$$\tau = \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \times 1000 \quad (1)$$

$\tau$  : せん断応力 (kN/m<sup>2</sup>)     $T$  : トルク (N・m)

$r_o$  : 外径 (cm)

$r_i$  : 内径 (cm)

### (2) リングせん断試験

供試体サイズは、外径15cm、内径10cm、高さ2cmである。使用した試験装置は、定圧試験、定体積試験が可能<sup>10</sup>である。

### (3) 試料・供試体作製方法

試料、供試体作製方法ともに孔内ねじりせん断試験とリングせん断試験は同様である。試料は、市販の豊浦砂とカオリン粘土を使用した。試料の粒度分布を図-3に、物性値を表-1に示す。豊浦砂の供試体作製方法は、気乾状態のものをモールドに堆積させ、振動により密度を調整した。カオリン粘土は、まず液性限界の2倍程度のスラリーを脱気し、モールド内で試験時の最大先行圧密応力で一次元圧密を約4日間行った。そして試験時にせん断刃を試料に押しつけ、もう一度圧密を行い、圧密終了後

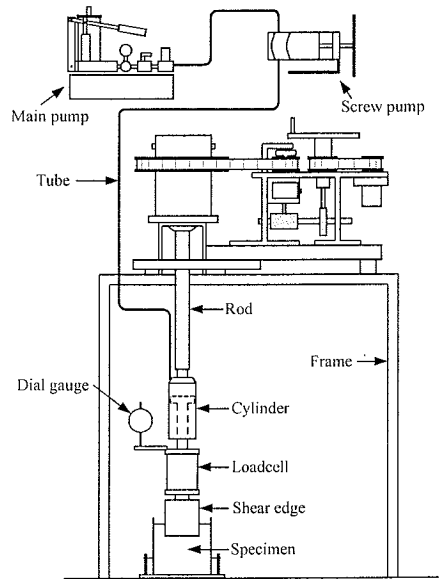


図-1 孔内ねじりせん断試験機概要

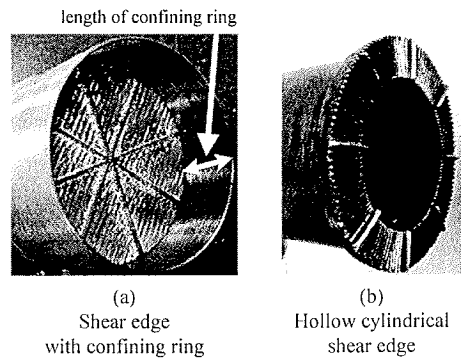


図-2 せん断刃

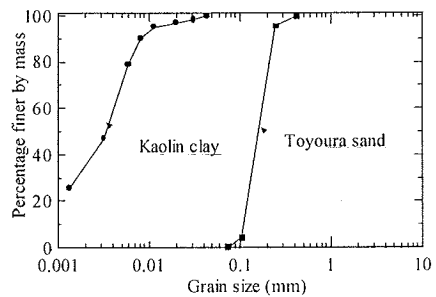


図-3 粒径加積曲線

表-1 物性値

	$w_L$ (%)	$w_P$ (%)	$I_P$	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
Kaolin clay	47.0	29.8	17.2	2.73
Toyouira sand	—	—	—	2.65

せん断試験を行った。

### 3. せん断破壊挙動の検討

拘束リング長さを22mmとした拘束リング付き中実せん断刃を用いて、せん断位置の確認を行った。使用した試料、供試体作製方法は前述したとおりであり、供試体作製後、せん断確認のため中央部へ色砂を投入し、その後せん断を行った。砂の場合は試験後水を注入して、サクシオンにより供試体を自立させた。破壊面の確認は図-4に示すように4断面で確認した。a-a断面は供試体中心部、b-b断面とc-c断面はせん断刃内、d-d断面はせん断刃外である。

図-5は豊浦砂、図-6はカオリン粘土に対して行った結果である。豊浦砂、カオリン粘土ともにa-a断面はせん断刃中心のため、色砂には変形が見られない。b-b断面、c-c断面では色砂に変形が見られ、豊浦砂は拘束リング下端より約5mmまでせん断の影響が見られる。カオリン粘土では拘束リング下端より約10mmの範囲に影響している。せん断刃より外側のd-d断面にはせん断の影響が見られない。よって拘束リング付き中実せん断刃は、豊浦砂、カオリン粘土共に、せん断は拘束リング下端に集中して起きていることを確認した。したがって、リングせん断試験と同様、せん断面発生位置がかなり拘束されており、リン

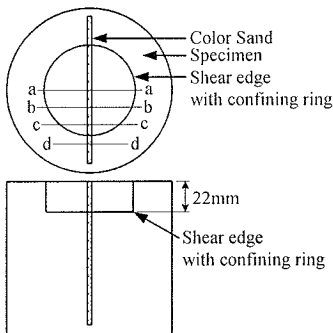


図-4 色砂供試体におけるせん断面確認位置

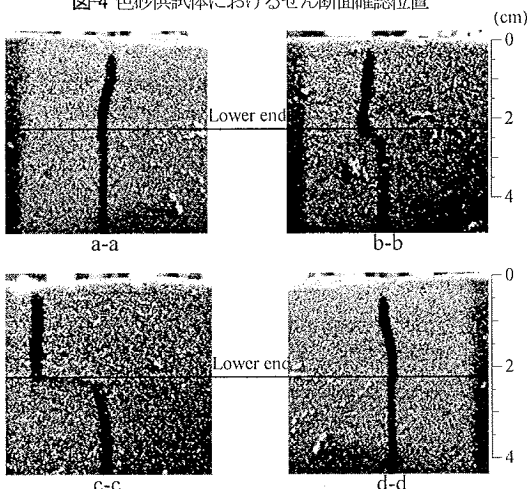


図-5 豊浦砂に対するせん断面確認試験

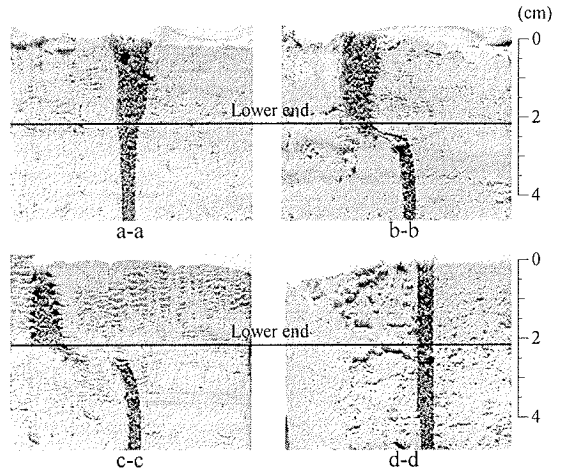


図-6 カオリン粘土に対するせん断面確認試験

グせん断試験と比較できる妥当性を確認できた。

### 4. 試験結果と考察

砂、粘土に対して拘束リング付き中実せん断刃の適切な拘束リング長さを選択するため、各種試験を行い、リングせん断試験結果と比較した。砂では中密、粘土は過圧密にして試験を行った。負のダイレイタンスを示すようなより緩い(軟らかい)供試体に対しても試験可能であるが、定圧試験においては、せん断とともにせん断刃が供試体に潜り込み、ダイレイションを過大評価してしまう傾向が顕著であった。試験は、はじめに定圧試験にて拘束リング長さについて検討した。拘束リング長さは0mm(拘束リングなし)、12mm、22mm、37mmと変化させた。以降、拘束リング長さはc00、c12、c22、c37と略す。つぎに、その決定した拘束リング長さを用いて定体積試験が可能か検討した。なお、せん断時の周面摩擦低減のため、拘束リング外側にグリースを塗布した。

#### (1) 定圧せん断試験

##### a) 砂

図-7にBTSTとリングせん断試験の結果を示す。BTST、リングせん断試験ともに供試体は $D_r=60\%$ の中密とし、せん断時の鉛直応力は100kPaで行った。はじめに、せん断応力一回転角関係について検討する。図-7(a)よりBTST、リングせん断試験ともすべてひずみ軟化挙動を示している。リングせん断試験の強度 $\tau_p$ とほぼ一致しているのは、c22とc37である。しかし軟化量は異なり、リングせん断試験と比較して、BTSTは軟化量を過大に評価する傾向にある。これは、砂の変形が側方へ逃げるにより、拘束力が減り、軟化後の強度が小さくなることが考えられる。

次にダイレイタンスについて検討する。図-7(b)よりリングせん断試験では、密な砂に見られる正のダイレイ

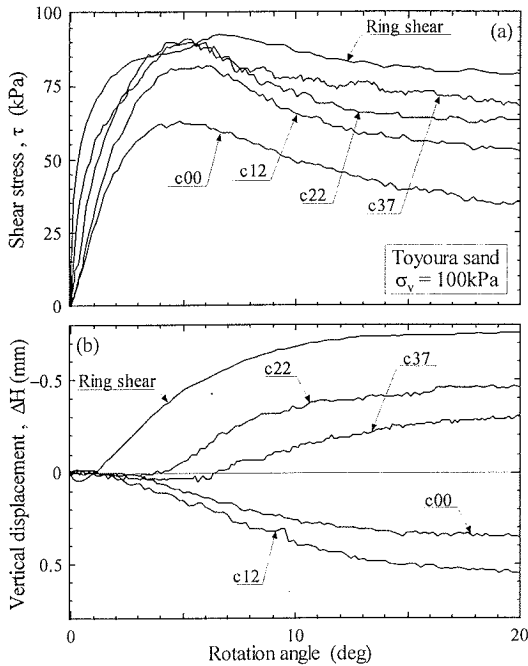


図7 豊浦砂に対する定圧試験

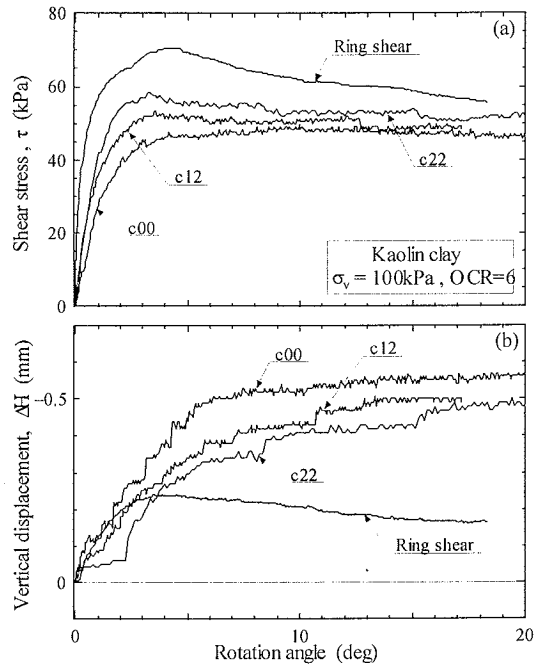


図8 カオリン粘土に対する定圧試験

タンシーを示している。それに対してBTSTでは、c00, c12は圧縮し、c22, c37は膨張している。最も大きく膨張しているのはc22であるが、リングせん断試験の約半分である。したがって、BTSTを使用した場合、リングせん断試験よりダイレクションを過小評価する可能性がある。これも、上下拘束リングで変形が固定されているリングせん断試験に比べ、BTSTでは砂のダイレクション変形が側方へ逃げていくことが考えられる。拘束リングは土に突き刺す必要があり、長すぎると、せん断刃が土と噛み合いにくくなる。そこで砂質土の定圧試験結果より、拘束リング長さは22mmが適当であると判断した。

## b) 粘土

図-8にBTST、リングせん断試験結果を示す。すべての試験は、過圧密比を6、せん断時の鉛直応力は100kPaで行った。c37は試験を行うことができなかった。それは拘束リングが長く、対象とする粘土が固いとせん断刃が十分に刺さらなかったためである。図-8(a)より、砂と比べBTSTの結果におよぼす拘束リング長さの影響は小さいことがわかる。ひずみ軟化挙動を考えると、c22が最もリングせん断試験の結果に近いようである。しかしながら、リングせん断試験では $\tau_p=70.7\text{kPa}$ であるが、c22では $\tau_p=58.4\text{kPa}$ と8割程度の強度しか発揮できていない。また、リングせん断試験と比較してBTSTは軟化量が小さくなっている。

次にダイレイタンスーについて検討する。図-8 (b)よりBTSTでは、拘束リング長さが短いほど、膨張量が大きい。また、BTSTの膨張量はリングせん断試験の結果より大きくなっている。これは、BTSTもせん断変形が集中してい

るものの、リングせん断試験では、さらに薄い部分(上下拘束リングの隙間)にせん断変形が集中しているためと考えられる。粘土の定圧試験結果より、拘束リング長さは22mmが適当であると考えられるものの、拘束リングの影響は小さく、 $\tau_p$ を過小評価する傾向にあることがわかる。

孔内ねじりせん断試験では、リングせん断試験と比較してダイレイタンスー挙動が砂では小さく、粘土では大きくなる傾向になった。これは、粘土の場合は孔内ねじりせん断試験で形成されるせん断帯が若干広く、砂においては、粘着力がないため変形が拘束リング外側へ逃げやすいため、このようになったと考えられる。

## (2) 定体積せん断試験

### a) 砂

変形が拘束リングの外に逃げることを考えると、厳密な意味での定体積試験は不可能であるが、定体積リングせん断試験と比較することにより、この試験の適用性について検討する。ここでは、定圧せん断試験結果から最適であると決定したせん断刃(拘束リング長さ22mm)を使用する。図-9はBTSTの試験結果、図-10は定体積リングせん断試験結果である。図-9(a)と図-10(a)を比較する。BTST、リングせん断試験とも傾向は似ているものの、BTSTでは、密度の影響があまり明確に現れていない。応力経路を示す図-9(b)と図-10(b)を比較すると、 $\theta$ はBTSTが $38^\circ$ 、リングせん断試験が $37^\circ$ でよく一致している。リングせん断試験では変相点が明確に現れており、相対密度に応じて右にシフトしている。応力経路に変相点が現れ、その後破壊線に沿って動く挙動は、砂の三軸非排水試験結果と

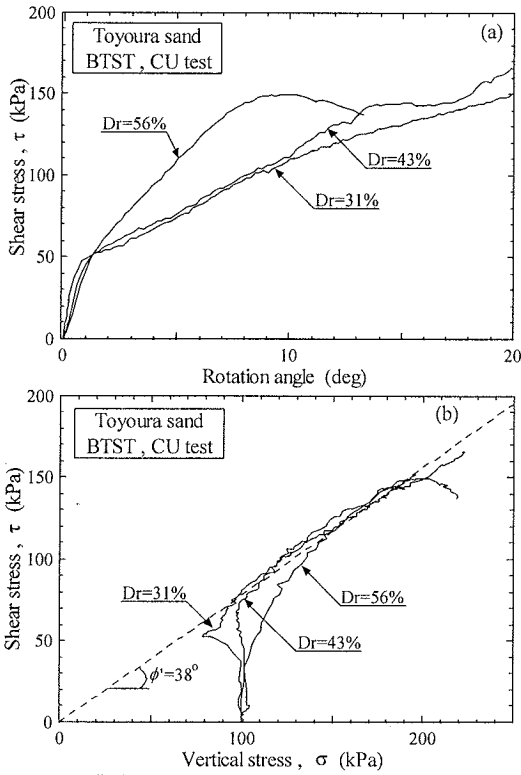


図-9 豊浦砂に対する定体積孔内ねじりせん断試験

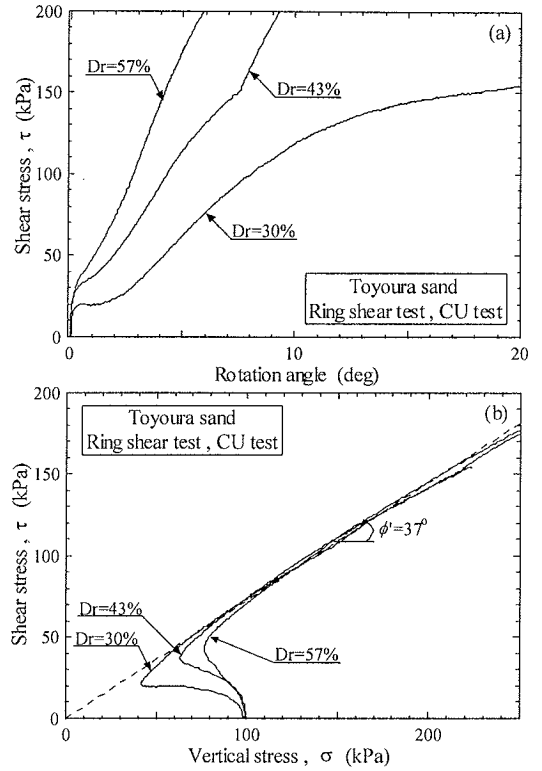


図-10 豊浦砂に対する定体積リングせん断試験

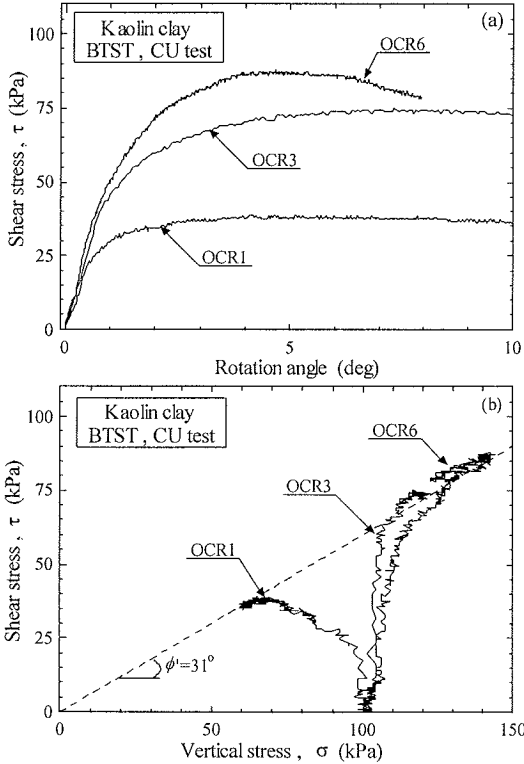


図-11 カオリン粘土に対する定体積孔内ねじりせん断試験

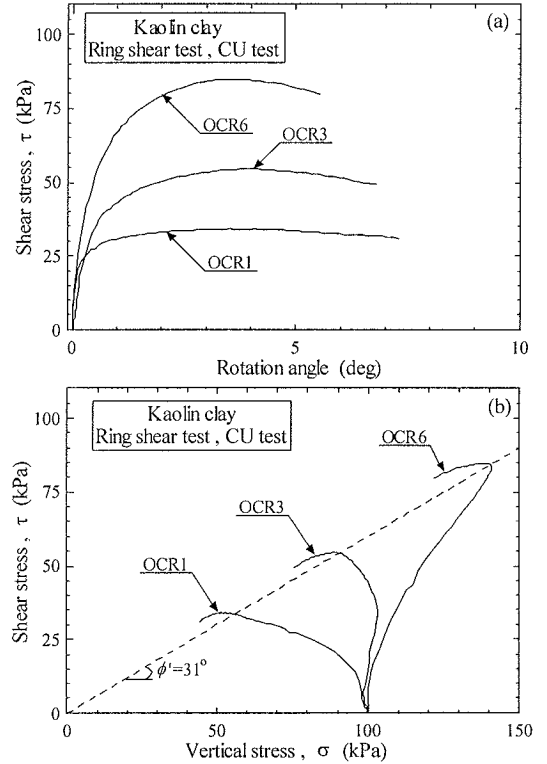


図-12 カオリン粘土に対する定体積リングせん断試験

同様である<sup>9),10)</sup>。これに対してBTSTでは、緩詰めの場合には変相点が現れているものの、リングせん断試験と比べ、鉛直応力の低下が小さくなる傾向にある。以上の結果より、BTSTにおいて砂の定体積試験を行うと、応力経路は若干異なるものの傾向的には一致し、リングせん断試験と同じ強度定数が得られることがわかる。

#### b) 粘土

ここでも定圧せん断試験結果から決定したせん断刃を使用して検討する。したがって、砂と同じく拘束リング長さを22mmとした。図-11はBTSTの試験結果、図-12は定体積リングせん断試験結果である。

図-11(a)と図-12(a)を比較する。BTST、リングせん断試験ともに、OCR1、OCR3はピークがほとんど見られない。OCR6はどちらの試験でもピーク後、試料漏出等による軟化挙動を示しており<sup>9)</sup>、傾向は非常に似ていることがわかる。つぎに応力経路を示す図-11(b)と図-12(b)を比較すると $\phi$ はBTST、リングせん断試験ともに $31^\circ$ であり一致している。また、BTSTのOCR1、OCR6の応力経路は、リングせん断試験とよく一致している。しかし、OCR3においてBTSTはリングせん断試験に比べ、せん断終了時まで膨張傾向(鉛直応力の増加)を維持する傾向が強い。砂と同様、過圧密比により応力経路は大きく変化するものの、 $\phi$ がほとんど変化しないのは粘土の三軸非排水試験結果と同様である<sup>9)</sup>。以上の結果を総合的に見てみると、粘土に対するBTST定体積試験でも、リングせん断試験とほぼ同等の結果を得ることができるといえる。

## 5. 結論

本論文では、孔内ねじりせん断試験(BTST)に対してせん断破壊メカニズムを知るためのせん断面の観測と、リングせん断試験との比較により強度特性の評価方法について検討した。その結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 拘束リング付き中実せん断刃でせん断試験を行った場合、せん断は拘束リング下端に集中して起こる。

- (2) 砂または粘土に対して定圧せん断試験を行った結果より、中実せん断刃の拘束リング長さを22mmにしたとき、リングせん断試験ともっとも近い結果を得ることができる。ただし、粘土の場合は、拘束リングの影響は小さい。
- (3) 定圧せん断試験で決定した拘束リング長さ(22mm)を用いて定体積試験を行った結果、リングせん断試験と同等の結果が得られることを確認した。

室内試験との比較により、以上のような結論を得たが、今後の課題として、実地盤に適用するにはもっとも固い供試体や中間土などへの適用性についても検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会：土の強さと地盤の破壊入門，第3章 原位置での土の強度をどう求めるか，pp.175-270，1987。
- 2) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック，1.7 ボーリング孔を利用する原位置試験，pp.385-394，1999。
- 3) 地盤工学会：地盤調査法，第6編 サウンディング，pp.189-267，1995。
- 4) 連保政英：孔内直接リングせん断試験機—原位置での $c, \phi$ 測定—，土と基礎，Vol.44，No.3，p.66，1996。
- 5) 岡本敏郎，土屋尚：変形・強度を求めるための現地調査法，土と基礎，Vol.36，No.1，pp.87-91，1988。
- 6) Handy, R.L. and Fox, N.S. : A soil bore-hole direct shear test device, *Highway Research News*, No.27, pp.42-51, 1967.
- 7) Luttenegger, J.A. and Hallberg, G.R. : Borehole shear test in geotechnical investigations, *American Society of Testing Materials*, Special Publication, 740, pp.566-578, 1981.
- 8) 土質試験の方法と解説，地盤工学会，2000。
- 9) 酒井直樹，豊田浩史，中村公一，杉本光隆：リングせん断試験による残留状態の評価と残留強度測定法に関する検討，土木学会論文集，No. 743 / III-64, pp. 223-228, 2003.
- 10) Ishihara, K. : Liquefaction and flow failure during earthquakes, *Geotechnique*, Vol.43, No.3, pp.351-415, 1993.

(2003.5.30 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANISM OF SHEAR FAILURE IN BOREHOLE TORSIONAL SHEAR TEST

Kouichi NAKAMURA, Hirofumi TOYOTA, Naoki SAKAI and Tetsuya SHIMAUCHI

This paper describes an improvement and an estimation of the in-situ shear equipment for an accurate testing. This equipment, which is referred to as Borehole torsional shear test (BTST), consists of a shearing part for shearing soils, a pressure control part to apply a vertical stress and a recorder part. First, the place of shear plane was observed to realize the mechanism of shear failure in this test. Second, the effect of the length of a confining ring was examined by comparison with the results from ring shear tests. It is shown that these experimental results from the BTST have a similar tendency with the results from ring shear tests in both constant pressure and constant volume conditions.