

せん断応力載荷型試験による 高有機質土の強度特性

荻野俊寛¹・及川 洋²・対馬雅己³・三田地利之⁴

¹正会員 工修 秋田大学助手 工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町1番1号)
E-mail:ogino@ce.akita-u.ac.jp

²正会員 工博 秋田大学教授 工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町1番1号)

³正会員 工博 秋田工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒011-8511 秋田市飯島文京町1番1号)

⁴フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

室内試験による高有機質土の強度評価手段の一つとして、せん断応力載荷型試験の適用が可能であることを示している。乱した高有機質土を用いて、一面せん断試験およびリングせん断試験を定体積、定圧それぞれの条件で実施し、得られるせん断特性や強度定数について粘土を用いた場合の実験結果と対比して比較、検討している。また、一面せん断試験、リングせん断試験の結果を等方圧密非排水三軸試験の結果と比較した上で、せん断応力載荷型試験の有効性について述べている。

Key Words : direct shear box test, ring shear test, highly organic soil, strength parameters

1. はじめに

せん断応力載荷型試験は、圧密が K_0 状態である、せん断面上の直応力とせん断応力の関係が直接測定できる、など実務上有利な点が多い。それに関わらず、室内試験で高有機質土のせん断強度を求める場合、ほぼ例外なく一軸圧縮試験が用いられており、研究目的で高有機質土の強度特性や変形特性を求める場合でも、その大半が三軸試験によっている。これは高有機質土の強度特性が基本的には粘性土のそれと類似しているため、粘性土の試験方法をそのまま踏襲したことによるところが大きい。しかし、一軸圧縮試験、三軸試験に代表される主応力載荷型の試験を高有機質土に対して適用した場合、しばしば試験中に脱水が生じる、排水条件のコントロールが困難である、等の要素試験としての問題点も指摘されており、粘土の場合ほどその有効性を発揮しているとは言い難いように思われる。

このような問題が認識されながらも、これまで高有機質土のせん断強度を求める試験として、主応力載荷型試験が用いられ続けてきた背景には、普通の土と同様に強度評価が一軸圧縮強度 q_u に依存していることと、それ以外の試験方法の基準が整っていなかったことによるところが大きいと考えられる。しかし近年、地盤工学会における一連の試験方法に関する基準整備の中で、一面せん断試験に関しても、1997年に基準が制定され¹⁾、今後せん断応力載荷型試験を含め、状況に応じて適切な試験方

法を選んで強度を評価することが求められていくと予想される。本文は高有機質土の強度評価手段の一つとして、せん断応力載荷型試験の有効性を示すことを目的としたもので、一面せん断試験およびリングせん断試験を用いた高有機質土の一連の実験結果を、粘土試料を用いた実験結果や三軸圧縮試験結果と比較することによって、せん断応力載荷型試験の有効性について検討するものである。

2. 既往の研究

三軸試験による高有機質土の強度特性に関する報告は比較的数量多く見ることが出来る。例えば海外では Adams²⁾ や Ozden & Wilson³⁾、Edil & Dhowian⁴⁾などが挙げられよう。国内においても三田地、対馬⁵⁾や対馬ら⁶⁾などによって研究が進められている。これらの報告ではおおむね 50° 以上であり、非排水強度増加率は 0.5 前後となっていることが認められる。また、せん断中にダイレイタンスー傾向が逆転したり⁷⁾、側方向応力がほとんど 0 になる⁸⁾などの特異な挙動を示すといった報告例も見られる。

一方、周知のように一面せん断試験はせん断応力載荷型試験の中でも古くから用いられている試験で、主に粘土、砂試料に対して多くの報告例を見ることが出来るが、高有機質土に適用した報告例は国内はもとより、海外を

含めてもほとんど見ることができない。その中で、三田地ら⁹⁾はブロックサンプリングで採取した乱さない熱帯性の泥炭に対し、定体積条件で一面せん断試験を実施し、せん断応力-せん断変位関係が明瞭なピークを示すこと、また従来報告されている三軸試験結果よりもかなり小さな ϕ を得る等、一面せん断試験の有効性を報告している。

一方、リングせん断試験は、装置が複雑であり一般的な試験ではないことから、報告例は一面せん断試験に比べてはるかに少ない。また報告の内容は、残留強度特性を求めるといった試験の特徴を反映して、その多くが粘土を対象とした、地すべり問題に関するものである。本報告のように、残留強度以外に主眼をおいたリングせん断試験の報告例はあまり見ることができないが、その中において三笠ら¹⁰⁾はリングせん断試験をあくまで一面せん断試験の一種としてとらえ、リングせん断試験と一面せん断試験との違いは「せん断箱がエンドレスである」ことだとして、両試験の結果を比較している。その他、高有機質土にリングせん断試験を適用した例としては、Landva & La Rochelle¹¹⁾がカナダの高有機質土に対して行った一連の定体積および定圧リングせん断試験の結果、 $\phi(\phi_0)=27\sim 32^\circ$ と三軸試験の ϕ よりも小さな値を報告しており、その原因について三軸試験では繊維の引張り力がせん断応力に寄与しているためと説明している。加えて、彼らはペーン試験など試料との境界が剛な試験で生じる破壊は局所的な圧縮によるものであり、このような試験は例えば盛土破壊のような局所的圧縮の影響が少ない場合の地盤の応力状態を表していないとしている。彼らが高有機質土にリングせん断試験を適用した理由は後述するように局所的圧縮が少ないという一点につきると考えられるが、これはいうまでもなく三笠らのいう、「せん断箱がエンドレスである」というリングせん断試験の構造的特徴によるものであり、後述する一面せん断試験結果との対比において注目すべき点である。

3. 実験

(1) 試料

試料は秋田市内で深度約1mより採取された高有機質土を含水比約500%になるように蒸留水を加えて練り返し、ペースト状にしたものを用いている。試料の物性値は $\rho_s=1.64\text{g/cm}^3$ 、強熱減量 $L_d=76.5\%$ 、分解度 $H=75.5\%$ であり、比較的繊維質の少ない、分解の進んだ試料である。また、対照実験で用いた粘土試料には市販の粉末粘土を液性限界の2倍程度の含水比になるよう蒸留水を加えて練り返し、ペースト状にしたものを用いている。粘土の物性値は $\rho_s=2.72\text{g/cm}^3$ 、液性限界 $w_L=70\%$ 、塑性指数 $I_p=62$ である。

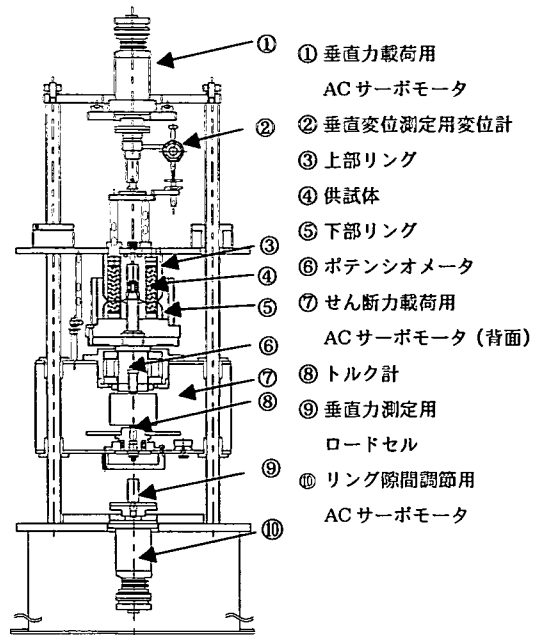


図-1 リングせん断試験装置の概略図

(2) 実験装置

せん断応力載荷型の試験として一面せん断試験およびリングせん断試験を実施している。一面せん断試験装置は基本的に著者らの一人が開発した¹²⁾ものと同様の構造であるが、高有機質土の高い圧縮性を考慮して上せん断箱の高さを下せん断箱に比べ大きくするよう工夫している(上箱55mm, 下箱20mm)。供試体断面は一辺70mmの正方形である。

一方、リングせん断試験装置の概略は図-1のようであり、リングの寸法は外径 $2r_o=120\text{mm}$ 、内径 $2r_i=60\text{mm}$ である。せん断時には下部リングが回転する構造となっており、一面せん断試験装置同様、上部リングの高さを工夫している(上部80mm, 下部20mm)。垂直応力、せん断応力は基本的にACサーボモータによる変位制御で制御されるが、フィードバック制御によって応力による制御も可能としており、定体積、定圧せん断の他、載荷速度一定、応力一定などの制御もすることができる。また、上下リングの隙間の調整もACサーボモータによって行われ、0~5mmの範囲で0.001mmの精度で調節することができる。なお、本研究では一面、リングせん断試験とも、上下せん断箱(リング)のすき間は0.2mmに設定している。

(3) 実験方法

一面せん断試験およびリングせん断試験についてはべ

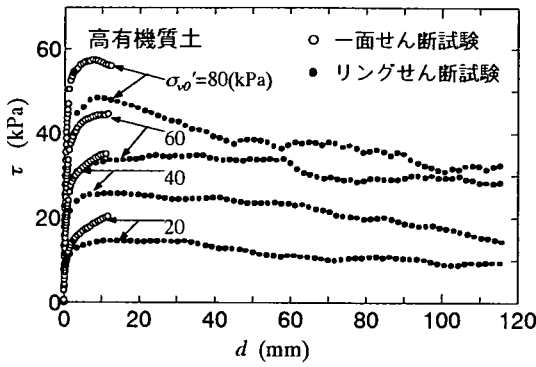


図-2 定体積せん断試験のせん断応力-変位関係(高有機質土)

一スト状の試料をせん断箱(またはリング)内で所定の圧密応力($\sigma'_v=20, 40, 60, 80\text{kPa}$, ただし粘土の場合 $\alpha'_v=40, 60, 80\text{kPa}$)で48時間圧密し, その後せん断速度 0.1mm/min で一面せん断試験では 11mm , リングせん断試験では 150° までせん断する。以上の試験を定体積, 定圧それぞれのせん断条件について行う。なお, 全ての試験で圧密時間は3t法による圧密時間を下回ることなく, 過剰間隙水圧は消散していると考えられる。また, 供試体毎のばらつきを極力減らすよう, せん断直前の供試体高さが約 40mm になるよう, 予め試料の分量を調節している。三軸試験は, まず試料をあらかじめ別途用意したアクリルセル内($\phi=70\text{mm}$)において $\alpha'_v=20\text{kPa}$ の条件で7日間一次元圧密する。その後, 試料を抜き出して, カッターナイフで上下端面のみを成形し, 直径 70mm , 高さ 160mm の供試体を作成する。供試体を試験装置にセットし, 三軸セル内で所定の等方応力($\sigma'_v=40, 60, 80\text{kPa}$)で再圧密する。過剰間隙水圧の消散を待って非排水条件の下, せん断速度 $0.1\%/min$ で軸ひずみが 18% になるまでせん断する。

4. 実験結果及び考察

(1) 一面せん断試験とリングせん断試験の比較

a) 定体積せん断試験

リングせん断試験ではせん断変位 d の大きさが供試体の中心軸付近と外周付近で異なっており, せん断応力 τ の分布も一様でない。本論文ではこれらの代表値として τ および d を式(1)によって定義している。

$$\tau = \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)}, \quad d = \frac{(r_o + r_i)\theta}{2} \quad (1)$$

ここに, T はトルク, θ は回転角度である。

図-2は定体積条件のリングせん断試験, 一面せん断試

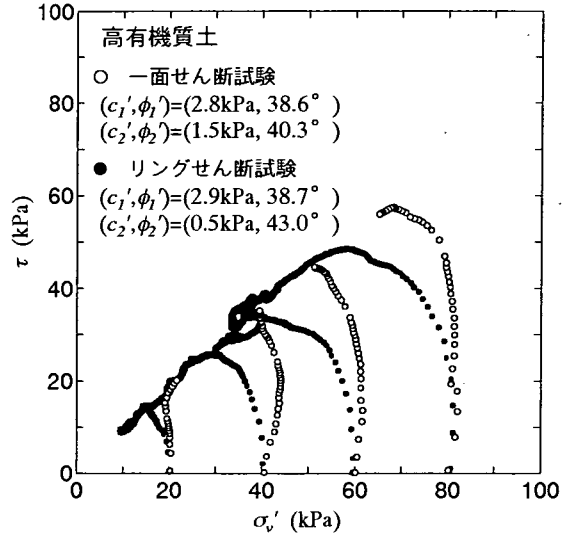


図-3 定体積せん断試験の応力経路(高有機質土)

験について $\tau-d$ 関係を示している。式(1)で定義した d と一面せん断試験のせん断変位は, 厳密に同等ではないが, 便宜上, 同一軸でプロットしている。リングせん断試験の $\tau-d$ 関係は $d=10\text{mm}$ 付近でピーク強度を示した後, τ が減少する, ひずみ軟化型の挙動を示しており, この傾向は圧密応力 α'_v が大きくなるにつれて顕著になっている。これに対し一面せん断試験ではピーク強度が確認できる結果も一部あるものの, 全体としてはこのような傾向は明確には認められず, 両試験の $\tau-d$ 関係の形状は異なっている。同一 α'_v で比較すると, 全般的に一面せん断試験の方が大きな τ を示しているようである。一般に高有機質土は一軸, 三軸試験を含め, このようにピーク強度を示さない場合が多いことから, 定体積リングせん断試験の結果は特に注目される。

図-3は図-2に対応する実験の有効応力経路を示している。一面せん断試験ではリングせん断試験よりも垂直有効応力 α'_v の減少が少なく, 経路が上方に直立するような形状をしており, リングせん断試験の有効応力経路とかなり異なっている。さらに α'_v が小さい場合には破壊線の付近でダイレイタンス性状が逆転し, α'_v が増加する傾向が見られる。本来, 一面せん断試験とリングせん断試験は異なる試験であるから, 両試験の有効応力経路が一致する必然性はないが, リングせん断試験装置と一面せん断試験装置には構造的に類似した部分が多く, 有効応力経路も基本的小およそ近いものと推測される。実際, 図-4, 図-5はそれぞれ, 粘土試料について, 両試験の定体積条件における $\tau-d$ 関係および応力経路を示したものであるが, 図-4において, $\tau-d$ 関係はいずれの試験でも共通してピーク強度を示した後, 顕著に τ が減少する傾向を示しており, 定体積せん断強度 τ_{max} の差も最大で

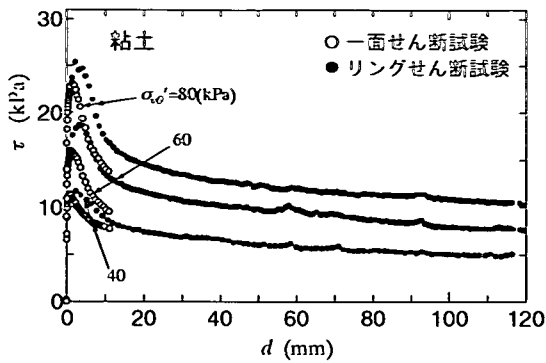


図-4 定体積せん断試験のせん断応力-変位関係(粘土)

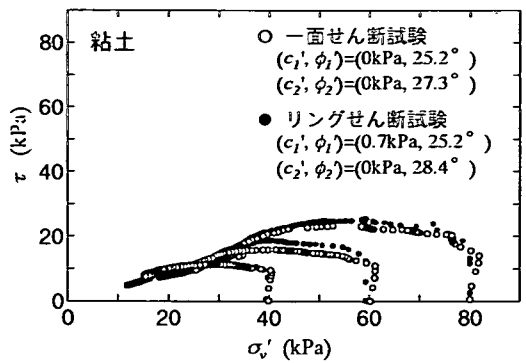


図-5 定体積せん断試験の有効応力経路(粘土)

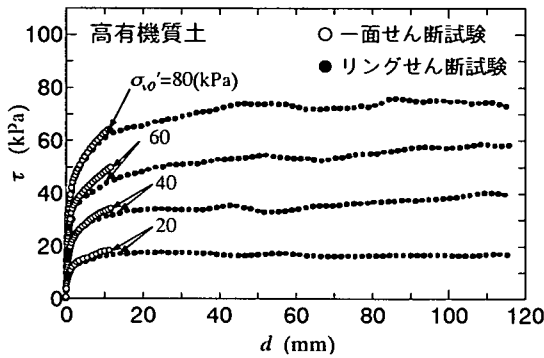


図-6 定圧せん断試験のせん断応力-変位関係(高有機質土)

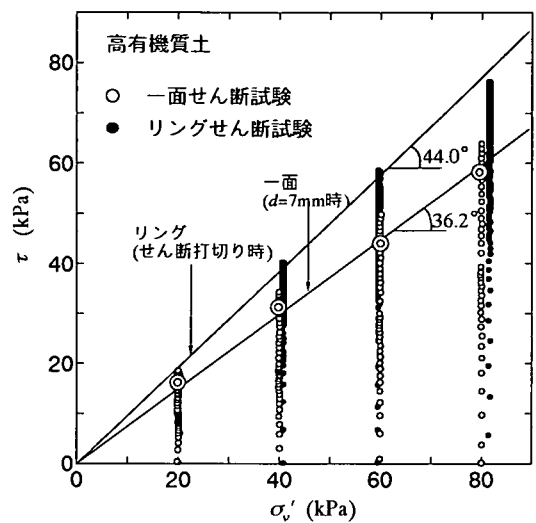


図-7 定圧せん断試験の応力経路(高有機質土)

3kPa程度と小さい。さらに有効応力経路(図-5)もほとんど一致しており、粘性土試料について見る限り、試験方法の差は無視できるほどで、一面せん断試験のせん断モードとリングせん断試験のそれは基本的に近いものと考えてよさそうである。しかしこれに比べると、高有機質土の有効応力経路の差異(図-3)はいささか大きいように感じられ、高有機質土の場合、一面せん断試験とリングせん断試験はほぼ等しい結果を与えるという、粘性土の場合と同様な解釈をすることには疑問が生じる。

一面せん断試験とリングせん断試験のせん断モードで唯一決定的に異なる点はせん断方向における供試体端部の有無、すなわち三笠ら¹⁰⁾のいう「せん断箱がエンドレスである」か否かという点であろう。つまり、一面せん断試験の場合、せん断方向に対し、供試体が有限であり、その境界はせん断箱の側面によって剛に拘束されているのに対し、リングせん断試験ではこの境界を連結することによって、供試体は、せん断方向に無限の長さを有すると考えることができるので、供試体は境界の影響を受けることがない。この影響について、一面せん断試験では、端部拘束による強度増加と、進行性破壊による強度減少といった二つの要因が互いに相殺することで、大き

な影響は生じないと解釈されている¹⁾が、これはあくまで普通の土についてのものである。高有機質土は、例えば Landva & La Rochelle¹¹⁾がベーンの刃先などの周辺における「局所的な圧縮」を指摘しているように、応力が集中する点に変形が集中する性質から、せん断箱端部においても、著しい変形の集中が生じていると考えられ、その結果引き起こされる端部拘束の影響がふつうの土の場合よりも大きく、このような差異が生じる原因になっていると考えられる。事実、高有機質土の有効応力経路の差異はこのことを裏付ける結果となっており、高有機質土においては、一面せん断試験とリングせん断試験は基本的に異なる結果を与えるようである。

b) 定圧せん断試験

図-6は定圧条件で行った一面せん断試験とリングせん断試験について、 $\tau-d$ 関係を示している。両試験とも τ は d の増加に伴って総じて増加傾向を示す、いわゆるひずみ硬化型の形状をしている。これは高有機質土にお

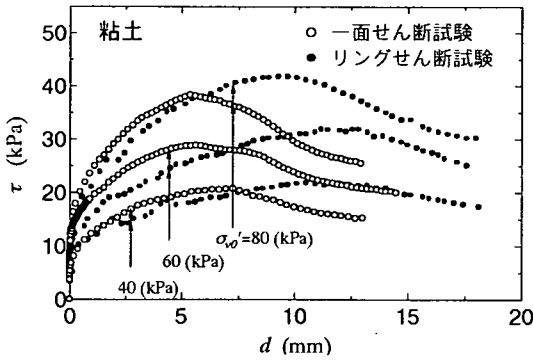


図-8 定圧せん断試験のせん断応力-変位関係(粘土)

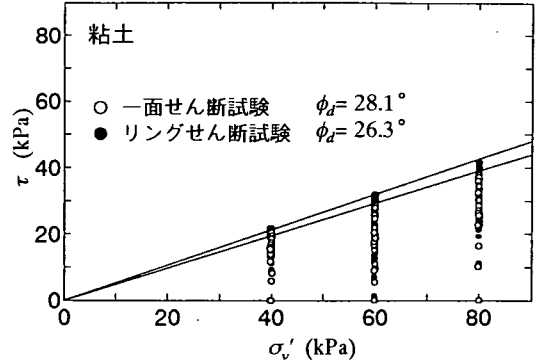


図-9 定圧せん断試験の応力経路(粘土)

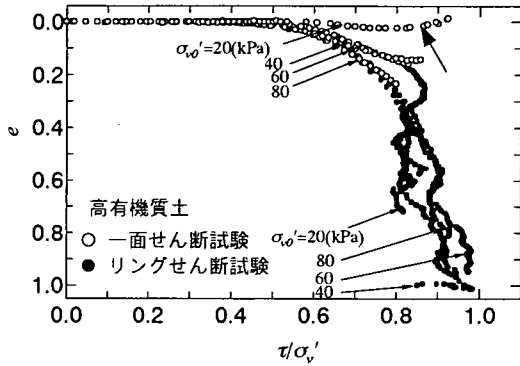


図-10 定圧せん断中の間隙比変化(高有機質土)

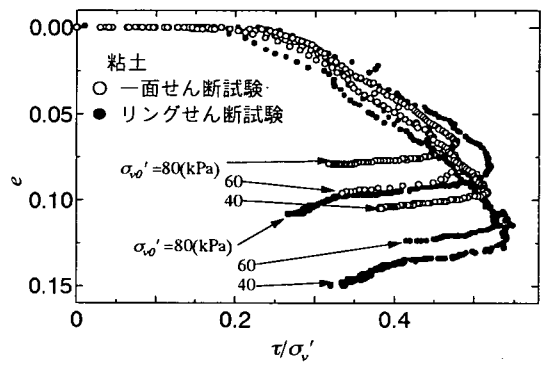


図-11 定圧せん断中の間隙比変化(粘土)

る典型的な挙動であり、一軸圧縮試験、三軸試験においてもこれと類似した挙動を示すことが多い。

図-7は図-6に示す実験に対応する応力経路を示している。応力経路の頂点に着目すると、全般的にリングせん断試験の方が上方にあることがわかる。これは、図-6において(一面せん断試験とリングせん断試験の d は全く等しくはないとしても)、リングせん断試験のせん断打切り変位が一面せん断試験のそれよりもはるかに大きく、一方で τ は単調に増加しているため、応力経路は常に上方に伸び続けるため、せん断打切り変位の大きなリングせん断試験の方が一面せん断試験よりも結果として経路の頂点が上方に位置しているものと説明される。つまり、これは両試験の応力経路に、せん断打切り変位の影響が明確に現れているということの意味している。図-8、図-9は粘土試料について τ - d 関係、応力経路を示しているが、粘土ではこのような差はほとんど見られず、応力経路の頂点はほぼ一致している。これは図-8からわかるように、いずれの実験でも τ がピークを示しており、せん断打切り変位によって応力経路の頂点が変わらないためである。もちろん全ての粘土がこのようにピークを示すとは限らないが、そのような場合であっても粘土では、一面せん断試験のせん断打切り変位(通常は7mm)の範囲で τ はほぼ

収束し、高有機質土のような大きな差にはならない。このことは後述するように高有機質土の定圧せん断試験からCoulombの強度定数を求める場合に、特に問題となっている。

ところで、定圧せん断試験の場合ダイレイタンスーの変化は直接体積変化に現れる。図-10はせん断中の e の変化量をそのときの応力比 τ/σ'_v に対して示したもので、体積が減少した場合を正としてある。リングせん断試験ではせん断打切りまで一貫して e は減少を続けているのに対し、一面せん断試験では特に $\alpha_{\sigma'_0}=20\text{kPa}$ で、ある点を境に e が増加に転じており、ダイレイタンスー傾向が異なっている。これは $\alpha_{\sigma'_0}$ が小さい $\alpha_{\sigma'_0}=20\text{kPa}$ のときに最も顕著であるが、 $\alpha_{\sigma'_0}=40, 60\text{kPa}$ の場合にも同様の傾向が見られる。このようなダイレイタンスー傾向は先述の定体積一面せん断試験においても観察されていることから、定体積、定圧の条件如何に関わらず高有機質土の一面せん断試験に共通しているようである。また、図-10、図-11からは、試験方法、試料の違いによるダイレイタンスー量の違いを読みとることができる。高有機質土の e の減少量はリングせん断ではおおむね1.0程度なのに対し、一面せん断試験では最大でも0.15程度と、試験法による差が大きい。これに対して粘土の場合 e の減少量は

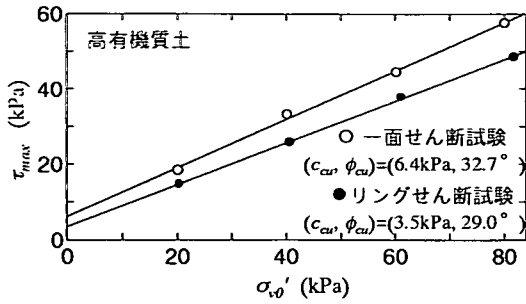


図-12 全応力にもとづく強度定数(高有機質土)

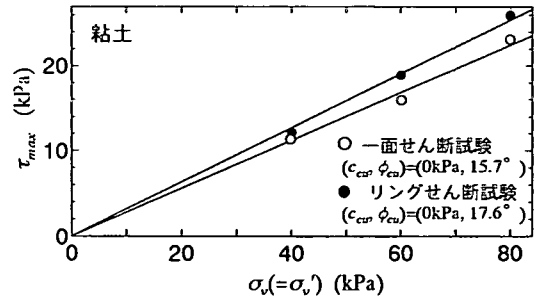


図-13 全応力にもとづく強度定数(粘土)

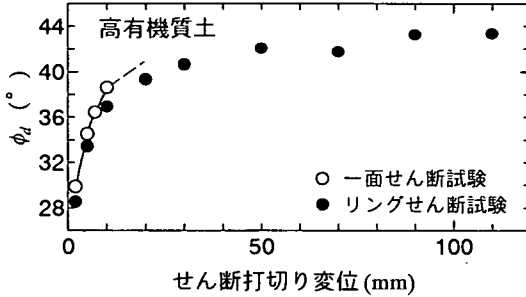


図-14 高有機質土のφ_dに及ぼすせん断打切り変位の影響

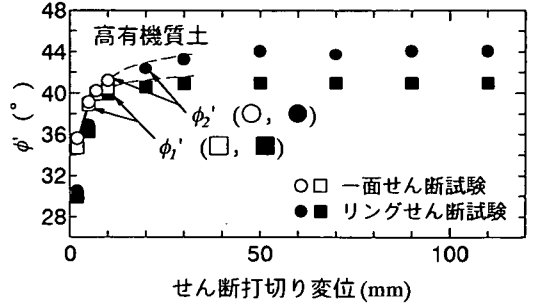


図-15 高有機質土のφに及ぼすせん断打切り変位の影響

0.08~0.15 程度で一面せん断試験とリングせん断試験の間に高有機質土の場合ほど大きな開きはない。このようなダイレイタンスー傾向の特徴、すなわち粘土では試験法による差は小さい一方で、高有機質土では一面せん断試験のダイレイタンスーがリングせん断試験に比べて著しく小さく、途中、ダイレイタンスー傾向が逆転する点は、定体積せん断試験のそれと一致する点が多く、基本的に定体積せん断試験と定圧せん断試験のダイレイタンスー傾向は類似している。

(2) 強度定数に関する検討

不完全ながらも、高有機質土に対して Mohr・Coulomb の破壊基準が適用できることは、これまで多くの研究者によって確かめられているところである。本報告においても一面せん断試験、リングせん断試験に Coulomb の破壊基準が適用可能であることは、図-3、図-7 からも異論のないところと思われ、実験結果を見る限りでは、Coulomb の破壊基準は相当の説得力を持っていると考えられる。

図-12 は図-3 に示す各実験について、 α'_0 と τ_{max} の関係を示している。なお、 τ - d 関係がピークを示さない一面せん断試験については一面せん断試験の基準¹⁾に従い、 $d=7\text{mm}$ までの τ の最大値を τ_{max} としている。全応力に基づく強度定数(c_{cu} , ϕ_{cu})の値は一面せん断試験、リングせん断試験でそれぞれ(3.5kPa, 32.7°), (6.4kPa, 29.0°)であり、有効応力経路の形状(図-3)が異なるにも関わらず試

験の種類による c_{cu} , ϕ_{cu} の差は比較的小さいが、高有機質土の ϕ_{cu} は図-13 に示す粘土の ϕ_{cu} と比べるとかなり大きな値を示している。高有機質土の非排水強度増加率が粘土よりも大きな値を示すことは、三軸試験においては従来から言われており、例えば対馬⁹⁾は 0.52~0.54、及川・宮川⁷⁾は 0.63 などの値を報告している。この傾向は本報告の三軸試験結果においても同様であり、高有機質土の ϕ_{cu} (非排水強度増加率)が粘土に比べて大きな値を示すという特徴は試験方法によらないようである。

図-3 には高有機質土の一面せん断試験、リングせん断試験について定体積せん断試験におけるせん断応力最大 (τ_{max}) 時で定義した c'_1 , ϕ'_1 およびせん断応力比最大 ($(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$) 時で定義した c'_2 , ϕ'_2 の値を示している。前者の定義では(c'_1 , ϕ'_1)は一面せん断試験、リングせん断試験でそれぞれ(2.8kPa, 38.6°)および(2.9kPa, 38.7°)、後者の定義では(c'_2 , ϕ'_2)は(1.5kPa, 40.3°)および(0.5kPa, 43.0°)である。いずれの方法で定義した場合でも試験方法による差は小さく、試験の精度、試料の不均一性などを考えれば、差はほとんどないといつてよいであろう。先に述べたように、応力経路の形状やダイレイタンスー傾向は、基本的に一面せん断試験とリングせん断試験では異なっているにも関わらず、強度定数の差が小さい点は注目される。また、この ϕ の値(38.7°~40.3°)は、Landva & La Rochelle によるリングせん断試験結果($\phi=27\sim32^\circ$)よりは若干大きいものの、従来報告されている三軸試験

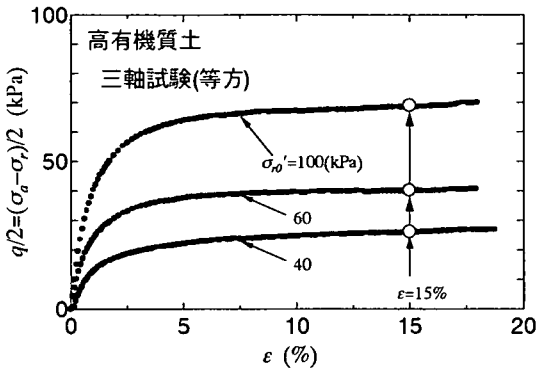


図-16 非排水三軸試験の軸差応力-軸ひずみ関係(高有機質土)

結果^{9), 13)} ($\phi=50^\circ$ 以上)に比べるとかなり小さく, せん断応力載荷型試験は三軸試験よりも小さな ϕ を与えるようである。なお, このことは後述の三軸試験結果からも裏付けられている。

他方, 定圧せん断試験による強度定数 c_d , ϕ_d は図-7の応力経路の頂点を結んで得られる。しかし前述のように高有機質土の場合, 定圧条件では両試験とも $\tau-d$ 関係がピークを示さず q が増加し続けることから, 有効応力経路の頂点は上方に伸び続けることになり, c_d , ϕ_d がせん断の打ち切り変位の影響を受けることは明白である。仮にリングせん断試験のせん断打ち切り時と一面せん断試験の $d=7\text{mm}$ 時で ϕ_d を比較すると, 両者の開きは約 8° であり, この影響のため, 定体積せん断試験の ϕ よりも試験方法による開きが大きい。図-14は高有機質土試料について, せん断打ち切り変位が変化した場合の ϕ_d の変化であり, ϕ_d に及ぼすせん断打ち切り変位の影響を示している。なお, c_d はせん断打ち切り変位によらず小さな値であることから $c_d=0$ として ϕ_d を計算している。リングせん断試験ではせん断打ち切り変位 50mm より大きな範囲では ϕ_d の変化は小さく, 41° から 44° の範囲で収束しているとみてよいであろう。これに対し, 一面せん断試験では ϕ_d の値は収束しておらず, 仮にせん断打ち切り変位をさらに大きくすれば ϕ_d の値は増加すると考えられる。ただその場合, 曲線の形状から判断してせん断打ち切り変位を等しくすれば, ϕ_d の値はリングせん断試験の値に近づいていくと見られ, 結局, せん断打ち切り変位が大きい範囲では, ϕ , ϕ_d に及ぼす試験方法の違いは小さいと結論づけてよさそうである。図-15は図-14と同様の関係を定体積試験による ϕ' , ϕ'_d について示している。前述のように試験方法による差はもともと小さいものの, ϕ についても ϕ_d と同様にせん断打ち切り変位が大きい範囲では試験方法による差がさらに小さくなる傾向は共通している。また, この範囲ではリングせん断試験の ϕ_d の値は定体積せん断試験の ϕ と近い値であり, これは一般に言われている $\phi_d \approx \phi$ という事

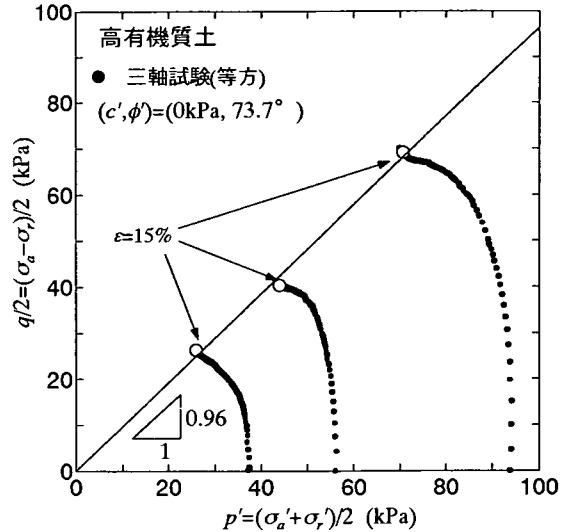


図-17 非排水三軸試験の有効応力経路(高有機質土)

実にも合致している。

以上の実験結果は高有機質土に対するせん断応力載荷型試験の適用の可能性はもちろんのこと, せん断応力載荷型試験が高有機質土に対して相当の有効性を持っているということを示すものといえよう。特にリングせん断試験の結果は高有機質土に対するCoulombの破壊基準の適用を今まで以上に確信させるものであり, ダイレイタンシー傾向やせん断モードの点からも要素試験として理想的なせん断に近いものと推測される。また一面せん断試験の強度定数は基本的にリングせん断試験の値と近いことから, せん断打ち切り変位の問題はあるものの, 強度定数を求めるという目的においては, 試験がより簡便な一面せん断試験によるのが実用的に有効であると考えられる。

(3) 三軸試験結果との比較

せん断応力載荷型試験と一軸, 三軸試験のような主応力載荷型試験の強度特性の比較は, 両者の関係を把握する意味において重要である。言うまでもなく, せん断応力載荷型試験と主応力載荷型試験は, 強度の定義が異なっている(主応力載荷型試験では非排水強度を破壊時のモール円の半径で定義している), 破壊面の傾きが一致しないことによる強度の異方性, などの点から両者の強度差そのものに必ずしも直接的な意味があるとはいえないが, おおよその関係を把握することや, 粘土など他の試料との対比は有用であると考えられる。

図-16, 図-17はそれぞれ高有機質土の三軸試験について軸差応力 $q/2$ -軸ひずみ ϵ の関係および有効応力経路を示している。なお, 図において, σ'_a , σ'_r はそれぞれ軸方向有効応力, 側方向有効応力であり, $q = \sigma'_a - \sigma'_r$,

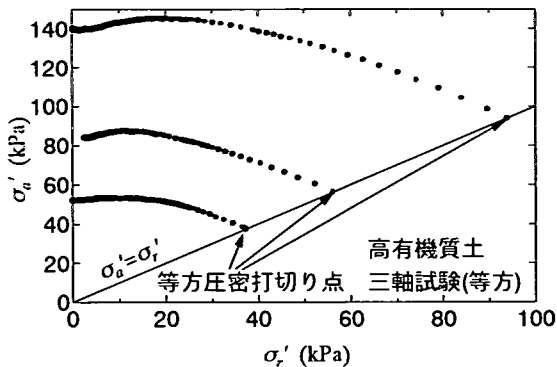


図-18 せん断中の側方向応力の減少

$p'=(\sigma_v'+\sigma_r')/2$ である。非排水強度 $(q/2)_{max}$ は ϵ が15%以下における q の最大値で定義している。図-16、図-17から $q/2-\epsilon$ 関係はピークを示さず $q/2$ は増加し続けていること、 p' は基本的にせん断打切りまで減少傾向を示しており、ダイレイタンスーは一貫して負であることが確認できる。また、図-18からせん断中の σ_r' はせん断の進行に伴ってほぼ0になっていることがわかる。このような実験結果はこれまでの報告にも多く見られ、本報告で用いた試料についても、従来からの報告内容と相違ないことが改めて確認できる。

図-17からは強度定数として、 $c'=0$ 、 $\phi'=73.7^\circ$ が得られる。 ϕ' の値は一面せん断試験、リングせん断試験に比べると著しく大きい、三軸試験による ϕ' の値としてはこれまでの報告例と類似している。この結果、得られる ϕ' の値にはせん断応力載荷型試験と主応力載荷型試験の間で大きな開きが生じているが、Khattak & Das¹⁴⁾は三軸試験でこのような大きな ϕ' を与えるのは発生する過剰間隙水圧が非常に大きいためであるとしている。これは言い換えれば図-18のように σ_r' がほぼ0になるということと同義であるが、このような状態で得られる ϕ' が現実的なものでないことはその値の大きさからも疑問の余地のないところであり、せん断応力載荷型試験による ϕ' の値は三軸試験の値よりも妥当な値を与えるといえそうである。

図-19は $(q/2)_{max}$ と有効圧密応力 p' の関係を示している。三軸試験における非排水強度増加率は0.73となっており、この関係から求められる非排水強度と図中に併せて示してある一面せん断試験、リングせん断試験の関係(図-12)による非排水強度との間に大きな差はない。これは図-15と図-17で ϕ' に大きな差が見られたのとは対照的であるが、図-19の関係を求める上では、この差を生じさせる原因となっているせん断中の過剰間隙水圧が全く関与しないためである。このことは、より簡便な一面せん断試験で得られる非排水強度増加率の値が三軸試験の値と大きな差を生じないということであり、設計上非常に重要

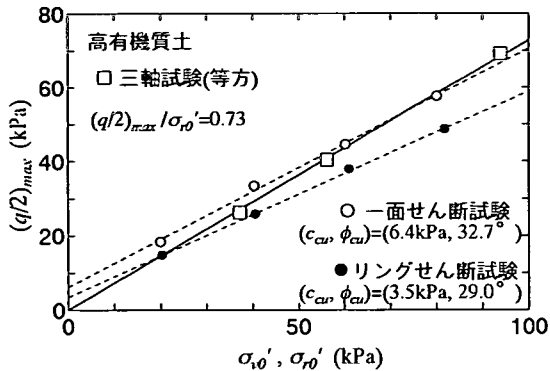


図-19 各試験による非排水強度増加率の比較

なパラメータである非排水強度増加率が簡単に得られるという点で一面せん断試験装置の有用性を示すものであるといえる。そもそも両者の値は強度の定義方法や圧密条件の相違点から、本質的に等しくなるべきものではないが、仮にこれらの値の差が大きいとしても、原位置での実際の破壊状態と照らし合せた場合、 K_0 状態での圧密が可能な一面せん断試験の方がこれに近いことや、せん断面上の応力を直接測定しているという点からも、一面せん断試験による値は、より理にかなったものであると考えられる。

5. 結論

高有機質土および粘土に対し、一面せん断試験、リングせん断試験を実施し、せん断応力載荷型試験の高有機質土への適用性について示した。その結果粘土試料では両試験の差はほとんど認められなかった一方、高有機質土試料では、得られる強度定数には有意な差は生じないこと、定体積せん断試験の有効応力経路は試験方法により大きな差が生じること、などいくつかの実験事実が確認された。また、高有機質土に対して等方圧密非排水三軸試験を行い、せん断中のダイレイタンスー傾向や得られる強度定数について、従来からの報告内容と違いがないことを確かめた。その上で一面せん断試験、リングせん断試験の結果と比較し、高有機質土に対してこれらのせん断応力載荷型試験の適用が有効なものであることを示した。

本論文から得られた知見は以下のようにまとめられる。

1. 高有機質土試料の場合、一面せん断試験のダイレイタンスーはリングせん断試験よりも小さく、またせん断中に性状が逆転するなど、リングせん断試験とは基本的に異なる。これに対して、粘土試料の場合、両試験の結果はほぼ一致し、試験方法の差はほとんどない。

2. これに起因して、高有機質土において一面せん断試験のせん断応力-変位関係、有効応力経路はリングせん断試験とは異なる。すなわち、せん断応力-変位関係は基本的にピークを示さないが、定体積リングせん断試験の場合でのみせん断変位 10mm 程度でピークを示す。また、定体積試験では、一面せん断試験の有効応力経路はリングせん断試験よりも上方に直立した形状を示し、 α_0' の減少が小さい。定圧試験ではせん断打ち切り変位の影響のため、リングせん断試験の応力経路の頂点は一面せん断試験よりも上方に位置する。
3. せん断応力載荷型試験による高有機質土の強度定数について、 $\tan\phi_{cu}$ から求めた非排水強度と三軸試験の非排水強度増加率から求めた非排水強度は近い値を示す一方で、 ϕ 、 ϕ_d に関しては三軸試験による ϕ よりも小さな値を示した。各々の試験方法によるこれらの値は、一面せん断試験の場合、 $(c_{cu}, \phi_{cu})=(6.4\text{kPa}, 32.7^\circ)$ 、 $(c_1', \phi_1')=(2.8\text{kPa}, 38.6^\circ)$ 、 $(c_2', \phi_2')=(1.5\text{kPa}, 40.3^\circ)$ であり、リングせん断試験の場合、 $(c_{cu}, \phi_{cu})=(3.5\text{kPa}, 29.0^\circ)$ 、 $(c_1', \phi_1')=(2.9\text{kPa}, 38.7^\circ)$ 、 $(c_2', \phi_2')=(0.5\text{kPa}, 43.0^\circ)$ であり、これらの値については試験方法による差は小さかった。
4. ϕ_d の値はせん断打ち切り変位の影響から、一面せん断試験のせん断打ち切り変位を 7mm とした場合、リングせん断試験と約 8° の差が生じたが、せん断打ち切り変位の増加に伴い収束する傾向を示した。この傾向は ϕ についても認められ、このときの ϕ および ϕ_d の値は $41^\circ \sim 44^\circ$ であった。
5. 一面せん断試験、リングせん断試験と三軸試験の比較において、せん断応力載荷型試験は主応力載荷型試験に比べて、得られる強度定数、圧密条件、せん断モード、せん断中のダイレイタンスー挙動などの点から見ても高有機質土に対してその有効性を発揮できるものと考えられる。特に要素試験として考えた場合、リングせん断試験は最も変形が一樣で単純せん断モードに近いと考えられることから、これら

三者の中で最も理想的であるが、強度定数などを求めるという目的においては、せん断打ち切り変位の問題はあるものの、リングせん断試験結果と同等の値が得られることから一面せん断試験が実用的に有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 地盤工学会, 土質試験の方法と解説-第一回改訂版-, pp.563-600, 2000.
- 2) Adams, J. I. : The Engineering Behaviour of a Canadian Muskeg, *Proceedings of 6th ICSMFE*, Vol.1, pp.3-7, 1965.
- 3) Ozden, Z. S. & Wilson, N. E. : Shear Strength Characteristics and Structure of Organic Soils, *Proceedings of 13th Muskeg Research Conference*, NRC, Canada, pp.8-26, 1970.
- 4) Edil, T. B. & Dhowian, A. W. : At-Rest Lateral Pressure of Peat Soils, *Proceedings of ASCE*, Vol.107, No.GT2, pp.201-217, 1981.
- 5) 三田地利之, 対馬雅己: 泥炭の一軸および三軸強度に及ぼすサンプリング時の応力解放の影響, 高有機質土に関するシンポジウム発表論文集, pp.47-50, 1989.
- 6) 対馬雅己, 岩崎恒明, 宮川 勇: 有機質土の強度試験結果に関する二, 三の考察, 土と基礎, No.235, pp.13-18, 1977.
- 7) 及川 洋, 宮川 勇: 乱さない泥炭の非排水せん断特性について, 土質工学会論文報告集, vol.20, No.3, pp.91-100, 1980.
- 8) Hanrahan, E. T., Dunne, J. M. and Sodha, V. G. : Shear Strength of Peat, *Proceedings of Geotechnical Conference*, Oslo, Vol.1, pp.193-198, 1967.
- 9) 三田地利之, 工藤 豊, 真田昌慶, 荻野俊寛・神谷光彦: ベンダーエレメント併用一面せん断試験による熱帯性泥炭の強度・変形特性, 第56回年次学術講演会, pp.620-621, 2001.
- 10) 三笠正人, 高田直俊, 寺田正治: 新たに試作したねじりせん断試験機について, 第3回土質工学研究発表会発表講演集, pp.295-298, 1968.
- 11) Landva, A. O. & La Rochelle, P.: Compressibility and Shear Characteristics of Radforth Peats, *ASTM special technical publication 820*, pp.157-191, 1982.
- 12) 澁谷 啓, 三田地利之, 高田増男: 粘性土の一面せん断試験に関するいくつかの提案, 直接せん断試験の方法と適用に関するシンポジウム発表論文集, pp.127-134, 1995.
- 13) Adams, J. I. : Laboratory Compression Test on Peat, *Proc. 7th Muskeg Res. Conf. Tec. Memo 71*, pp.36-54, 1961.
- 14) Khattak, A. S. & Das, B. M. : Effect of High Excess Pore Pressure on Strength Parameters of Organic Soils, *Soils & Foundations*, Vol.25, No.1, pp.99-104, 1985.

(2001.10.22 受付)

STRENGTH CHARACTERISTICS OF HIGHLY ORGANIC SOIL OBTAINED BY DIRECT SHEAR TESTS

Toshihiro OGINO, Hiroshi OIKAWA, Masaki TSUSHIMA and Toshiyuki MITACHI

In this paper, it is examined whether the type of direct shear tests can be applied to highly organic soil to evaluate strength characteristics in the laboratory. A series of shear box tests and ring shear tests are performed on a remolded samples. Based on the test results, strength characteristics of peat soil obtained from direct type shear tests are discussed comparing with those on clay soil. Direct type shear test data are also compared with those by consolidated undrained triaxial tests. It is concluded that direct type shear tests provide more reliable strength parameters on highly organic soil than triaxial or unconfined compression tests. Practical usefulness of the direct type shear test, especially shear box test, is also suggested for the determination of the strength parameters of highly organic soils.