



主応力表示による不飽和土の一面せん断試験結果に関する考察

金, 秉洙
加藤, 正司
澁谷, 啓

(Citation)

神戸大学大学院工学研究科紀要, 1:43-49

(Issue Date)

2009

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81002721>



主応力表示による不飽和土の一面せん断試験結果に関する考察

金 秉洙^{1*}・加藤 正司²・澁谷 啓²

¹ 工学研究科市民工学専攻博士後期課程

² 工学研究科市民工学専攻

(受付: September 9, 2009 受理: March 3, 2010 公開: March 15, 2010)

キーワード: 不飽和土, 一面せん断試験, SSM, 主応力, サクション応力

一面せん断試験では、得られた実験結果は鉛直応力とせん断応力に基づいた整理が行われている。その理由は、せん断中に主応力方向が回転し、その大きさはある仮定を設けないと決定できないためであると考えられている。本研究では、締固めたまさ土供試体に対して低圧条件での飽和及び不飽和状態の一面せん断試験結果を行い、その破壊時の応力状態について主応力に基づく応力パラメータを用いて整理を行った。動員されている鉛直応力とせん断応力による(σ , τ)面上の応力点について、その点と原点(飽和状態の場合)あるいはサクション応力の σ 軸切片(不飽和状態の場合)を結んだ応力状態線を考え、その応力状態線に対してモールの応力円が接するものとして主応力を決定した。なお、サクション応力については現在提案しているSSM(Suction stress - SWCC Method)を適用して求めた。その結果、飽和及び不飽和土の一面せん断試験における破壊応力状態が、主応力に基づく応力パラメータによりユニークな破壊線を示すことがわかった。この結果は、従来の飽和・不飽和状態の三軸試験結果と対応しており、一面せん断試験結果を主応力に基づくパラメータで整理することの適用性を示している。

1. はじめに

一面せん断試験では、鉛直応力とせん断応力に基づき、強度やせん断変位に関する挙動について研究されてきた。また一面せん断試験は、三軸試験より試験時間が短いという長所のため、実務で多く利用されている。不飽和土の一面せん断試験の場合、試料の排水距離が短いという特性は、試験時間短縮に繋がるのでその長所はさらに有用であるといえる。しかし現在まで、不飽和土の一面せん断試験に関するデータは、十分に得られているとは言えない。

飽和土に対する一面せん断試験は、多くの研究者や実務者に有用な試験結果を提供している。この理由の一つは、三軸試験などと比較して短時間で現場の設計に用いる強度定数を得ることができるためである。しかし、三軸試験と応力条件が異なり、鉛直応力とせん断応力のみが測定されるという特性がある。この特性のため、せん断中の主応力を一般には規定することができないとされている。過去に行われた、飽和土の一面せん断試験装置の改良に関する一連の研究(Shibuya et al.¹⁾、北島ら²⁾、大島ら^{3), 4)})においても、装置構造や試験方法などの検討が行われているが、鉛直応力とせん断応力ではなく、主応力に基づく試験結果の整理に関しては検討されていない。

一方、不飽和土の一面せん断試験の場合では、不飽和土の三軸試験の結果に基づいた理論との実験結果を比較する試みがなされている(Donald⁵⁾、Escario⁶⁾、Escario and Saez⁷⁾、Satija⁸⁾、Gan et al.⁹⁾)。しかしこれらの研究では、不飽和土に対する一面せん断試験

結果の評価に関しては、未だ確立されていないと考えられる。

本研究では、一面せん断試験結果に対して一般的な結果整理を脱して主応力を規定して整理する方法を提案している。そのために、不飽和まさ土を用いた一面せん断試験を実施した。また、この結果の解析のために、Kim et al.¹⁰⁾により提案されたSSM(Suction stress - SWCC Method)を適用して求めたサクション応力を用いた。このサクション応力を、応力状態を規定する線の σ 軸切片とし、その応力状態線に接するモールの応力円に基づいて主応力を規定した。(以後、モールの応力円をモール円と略する。)そして、飽和土および不飽和土の一面せん断試験における破壊応力状態について解析した結果、主応力に基づく応力パラメータを用いて整理することによりユニークな破壊線を示すことがわかった。この結果は、従来の飽和・不飽和状態の三軸試験結果と対応している。またこの結果は、サクション応力が一面せん断試験に対する主応力を規定する場合に重要な役割を果たすことを意味している。

2. Suction stress-SWRC Method (SSM)

Suction stress-Soil-water retention curve Method(SSM)は、不飽和土に対する一面せん断試験結果において、サクション応力を水分特性曲線を利用して求める方法である。不飽和土の一面せん断試験を行う時、せん断過程では上下のせん断箱に間隙を与えているため排水条件が明らかではない。この影響から、せん断過程中、せん断面に作用するサクションが間隙空気圧(圧力室内に与えている空気圧)と間隙水圧の差と等しいとするのは実際の状

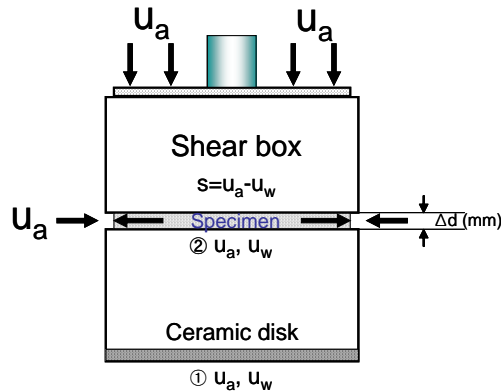


図-1. せん断箱の隙間による破壊面上に対する u_a と u_w

況とは対応しないものと考えられる。このことは図-1 で示すように、供試体底面をセラミックディスクにより排水条件としても、せん断中の破壊面上の排水条件を制御することは不可能であるので、セラミックディスク上の① u_a-u_w と、破壊面上の② u_a-u_w が等しい関係になるとは断定できないことを意味している。この結果、排水条件の制御の難しい一面せん断試験において、‘サクシオンをどのように決定するか’が問題となる。

本研究で注目したのは、不飽和土の斜面安定解析などで利用される水分特性曲線である。水分特性曲線によると水分量に従ってサクシオンが求められる。これを用いて不飽和状態の斜面解析などで、降雨に対する不飽和土のせん断強度及び安全率を推定することが可能となる。SSMは、水分量と水分特性曲線に基づき、破壊面上のサクシオンを推定する。水分特性曲線を利用すれば、一面せん断試験でせん断中の水分量からせん断面に作用するサクシオンが求められる。これにより、飽和度からサクシオン応力の定義に基づき、不飽和土のせん断強度を推定することが可能になる。

図-2 は試料に対する空気圧力 50kPa、鉛直応力 10kPa の水分特性曲線である。例えば、図で示すように体積含水比(水分量) $\theta_w = 0.207$ の時、この水分量に対応する水分特性曲線上でのサクシオンは、 $s = 26.32\text{kPa}$ となる。SSM ではこのサクシオンが破壊面上に作用するものと仮定して、サクシオン応力の推定に利用する。もし、空気圧力によるサクシオンが $s = (u_a - u_w) = 50 - 0 = 50\text{kPa}$ とすると、体積含水比は $\theta_w = 0.188$ になる。よって、この SSM を用いる場合と従来の方法による場合の二つのケースでは、全体の水分量で $\Delta\theta_w = 0.019$ 、サクシオンで $\Delta s = 23.68\text{kPa}$ の違いが生じている。

サクシオン応力は、式(3)に基づき求めることができる。水分特性曲線においては、理論上 1 000 000kPa までのサクシオンの載荷が可能である。このことを考慮して、残留飽和度については、SSM においては $S_{r0} = 0$ を適用する。よって、供試体の飽和状態は、完全飽和状態 ($S_r = 1.0$) から完全乾燥状態 ($S_{r0} = 0$) まで表され、サクシオン応力は次式のようなである。

$$p_s = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \cdot s = S_r \cdot s^* (S_{r0} = 0) \quad (1)$$

ここで、 s^* は水分特性曲線から得られたサクシオンである。

3. 一面せん断試験装置および試験方法¹⁰⁾

3-1 一面せん断試験装置の概要

本試験に用いた不飽和土用一面せん断試験装置は、飽和土用一面せん断

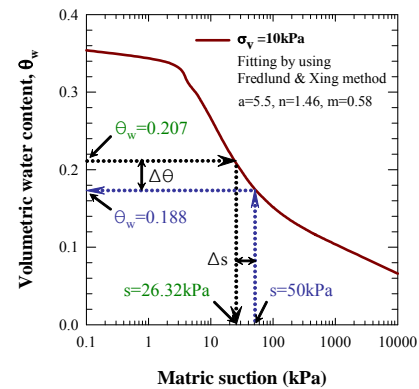


図-2. SSM における SWRC に基づくサクシオンの決定

試験装置を改良した試験装置である。図-3 は、試験装置およびシステムの概要を示している。自動測定システムによって、すべてのデータがコンピュータに保存される。せん断箱はセル内部に設置され、セル圧は試料上部のポーラスメタルを通じて間隙空気圧として作用する。下箱の反力板には半月形のセラミックディスク (Air-entry value = 500kPa) とポーラスメタルが設置され、それぞれに排水経路が接続されている。

試料を飽和させる時はポーラスメタルを用いて通水を行う。飽和状態から供試体を不飽和化する場合、ポーラスメタルの排水経路を閉じ、空気圧 (セル圧) を加えてセラミックディスク下の排水経路を通じて排水させる。また、セラミックディスク下の排水経路には間隙水圧計が接続されており、バルブを閉じて非排水状態とすると供試体の間隙水圧を測定することも可能である。

この装置では、試料に与える鉛直応力を下箱の下部に設置された二個のロードセルによって測定していることが特長である。このようなロードセルの設置位置については、Shibuya et al.¹⁾ によって検討され、試料に加えられる鉛直応力をより正確に測定することができることが報告されている。ここで、ロードセルの許容値はそれぞれ供試体断面に対して 50kPa である。セル外部のベロフラムシリンダーにより、一定の鉛直応力が供試体に載荷するように鉛直力は自動制御される。せん断過程ではセル外部のメガトルクモーターにより下箱に水平荷重が加えられ、側面に装着されたせん断力用ロードセルで測定されている。また、せん断中の供試体体積変化は、載荷ピストンに取り付けられた鉛直変位計により、排水量の変化は、排水経路に連結されたビューレットに取り付けられた差圧計によりそれぞれ測定されている。

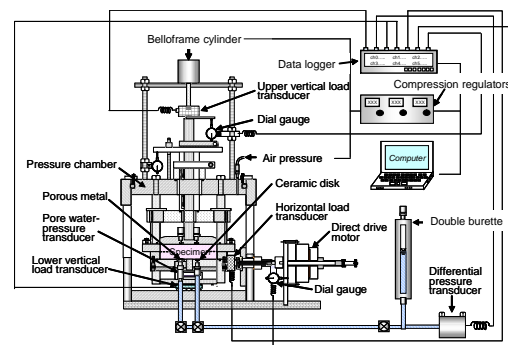


図-3. 一面せん断試験装置

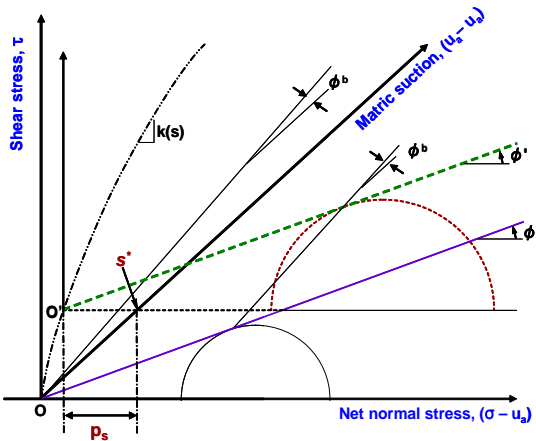


図-4. 3次元空間でのサクシオン及びサクシオン応力の概念

3-2 試料及び試験方法

本研究で用いた試料は、兵庫県北部地域で採取したまさ土である。まさ土は日本地域に広く分布している風化残積土である。試料の物理特性は土粒子密度 2.652 g/cm^3 、液性限界は NP であり、最大乾燥密度は標準縮固め試験(JGS0711 A 法)により $\gamma_{d \max} = 1.931 \text{ g/cm}^3$ と求められた。各試験では 2mm フリーの通過分を試料として用いた。初期含水比 7% に調整された試料を、最大乾燥密度の 88% となるよう縮固め用モールドを用いて定圧で縮固めて供試体を作製した。供試体のサイズは直径 6cm、高さ 2cm である。せん断箱の上箱と下箱の隙間を上箱端面に取り付けられた O リングで密閉させた状態で、供試体をせん断箱内に設置した。供試体の飽和過程では、ポーラスメタルを通して脱気水を注入して供試体を飽和させ、各鉛直応力条件 (10kPa から 50kPa までの低い鉛直応力) で圧密させた。なお、飽和供試体の場合はその後せん断過程を行った。不飽和供試体の場合は、圧密後に各条件の空気圧 ($u_a = 50 \text{ kPa}$, 100 kPa) を加えて、約 48 時間を基準として排水量が一定となるのを待ち、せん断過程を排水条件で行った。せん断過程の前には、上下せん断箱の間に隙間を 3mm を開け、その後、排水条件でせん断過程を開始した。飽和状態では $3.33 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ 、不飽和状態では $3.33 \times 10^{-4} \text{ mm/s}$ のせん断速度を用いた。飽和化過程からせん断過程までの間、供試体からの排水量は差圧計によって測定された。

4. 一面せん断試験におけるサクシオン応力

一面せん断試験の応力状態は、一般に鉛直応力 (σ) とせん断応力 (τ) による (σ , τ) 面で 2 次的に表現することができる。さらに

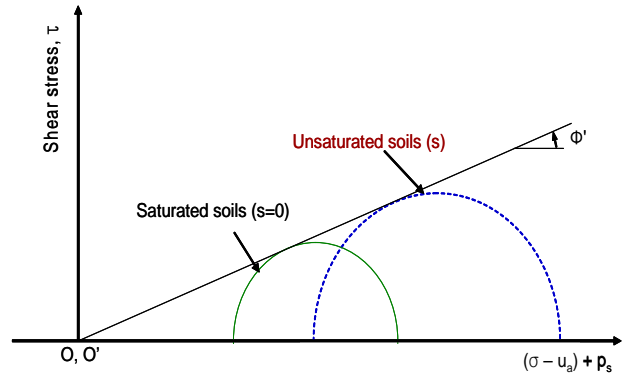


図-5. 2次元空間でのサクシオン応力の適用結果

Fredlund et al. ¹¹⁾ は、不飽和土に対して図-4 のようにサクシオンに対する軸を加えた 3 次元空間で破壊状態面を提案し、パラメーター ϕ^b (サクシオンの増加によるせん断強度の増加に関するパラメーター) に対して検討した。Kim et al. ¹⁰⁾ は、図-4 におけるサクシオンとして SSM によって求めたサクシオン (s^*) を用いて、これに対するサクシオン応力 (p_s) を取り入れて不飽和土の一面せん断試験結果の整理を行っている。

サクシオン応力 (p_s) は軽部ら ¹²⁾ によって提案された。彼らは、メニスカス水の影響で生じる応力成分をメニスカス応力 (p_m)、バブル水の影響で生じる応力成分をバブル応力 (p_b) で名付けた。また、二つの応力成分の和が次式のようにサクシオン応力 (p_s) を構成するとした。

$$p_s = p_m + p_b \quad (2)$$

また、彼らはサクシオン応力として、次式を提案した。

$$p_s = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \cdot s \quad (3a)$$

ここで、 S_r は飽和度、 S_{r0} は残留飽和度、 s はサクシオンである。本研究では、式(3a)のサクシオン項に、SSM によって得られたサクシオン、 s^* として用いる。すなわち、次の式になる。

$$p_s = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \cdot s^* \quad (3b)$$

一面せん断試験について、これまで飽和土と不飽和土の強度関係を説明できる実験結果はほとんど得られていない。Kim et al. ¹⁰⁾

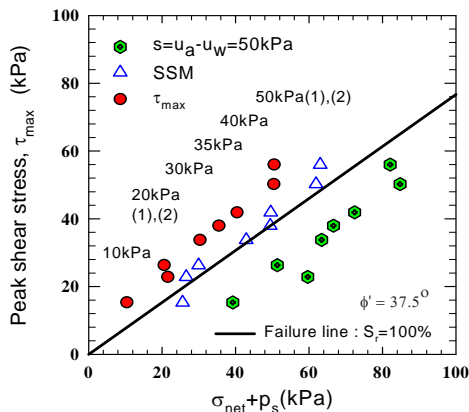
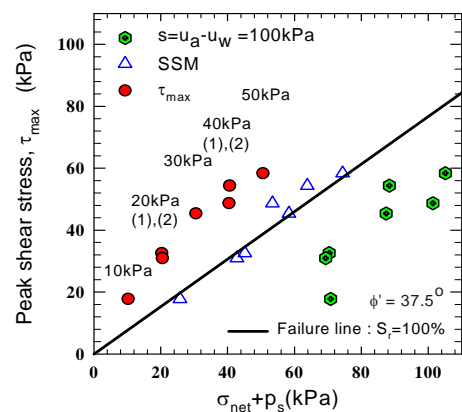

(a) $u_a = 50 \text{ kPa}$

(b) $u_a = 100 \text{ kPa}$

図-6. 既存のサクシオンの適用方法と SSM 適用結果の比較

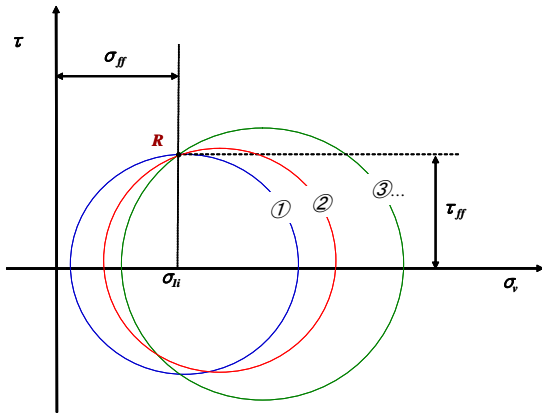


図-7. 一面せん断試験の応力状態に対するモールの応力円

は、新しく提案したSSMを用いてサクシオン応力を適用すると、図-5, 6 のように不飽和土の結果が飽和状態の破壊線と一致することを示した。この結果は、せん断試験の結果において飽和と不飽和状態の強度関係を説明するのにSSMを適用することができることを示している。

5. 一面せん断試験結果に対する主応力の表現

土中の微小要素に対する応力状態はモール円で表示することが可能である。しかし、一面せん断試験では図-7 のように、ある応力状態に対して、無数のモール円を描くことが可能である。そこで、何らかの条件を仮定してモール円を決定することができれば、主応力を規定することができる。そして、応力パラメーター(p, q)を通じてせん断中の応力経路を表示することが可能となる。ここで、最大・最小主応力, σ_1 , σ_3 により、応力パラメーターp, q は次式で定義される。

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad (4)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (5)$$

図-8 は、飽和土と不飽和土の一面せん断試験結果に対する鉛直応力とせん断応力(σ , τ)の2次元応力面での概念図である。図のよ

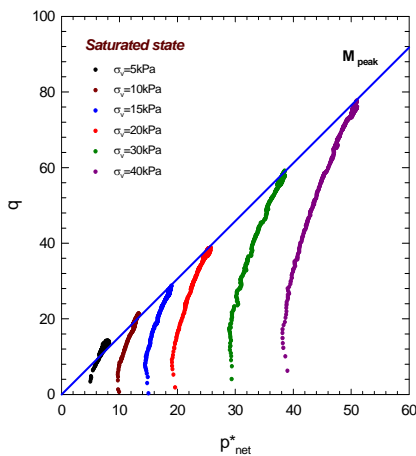


図-9. 飽和状態

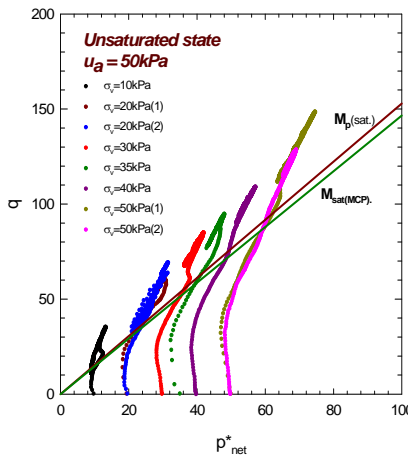


図-10. 不飽和状態 ($u_a=50\text{kPa}$)

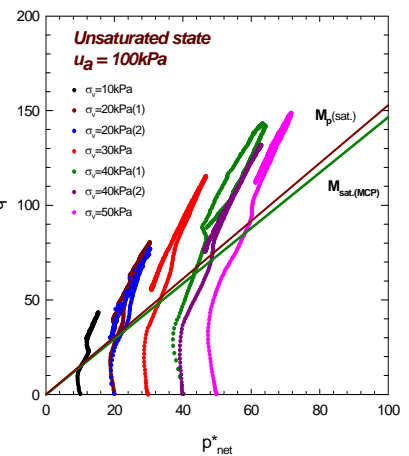


図-11. 不飽和状態 ($u_a=100\text{kPa}$)

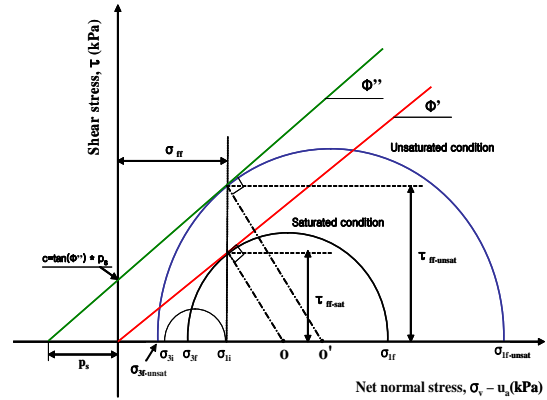


図-9. サクシオン応力を基準として主応力を求める概念

うに、一面せん断試験における主応力を決めるために($\sigma-u_a$)軸の切片としてサクシオン応力を適用し、現在の応力点を結ぶ応力状態線を考える。このとき、応力点を通り応力状態線に接するモール円を決定することができる。なお、不飽和土の場合、SSM から得られたサクシオン応力(p_s)を用いるものとする。飽和土の一面せん断試験では、サクシオン応力を0とすることにより、同様にモール円を決定することができる。このモール円により最大最小主応力を求めることができる。

6. 一面せん断試験における(p, q)面での応力経路

前章で述べたように、サクシオン応力と現在の垂直・せん断応力に基づいて一面せん断試験における最小及び最大主応力を決定できると、それを用いて(p, q)応力面での応力経路を示すことが可能である。以後、このようにして求められpを既存のpと区別するため、 p^* と表示する。飽和土の一面せん断試験の結果については図-9 で示している。飽和状態の応力経路はせん断とともに右側にカーブする傾向を示している。この時のせん断応力のピーク点による破壊線の傾き M_p は 1.529 である。不飽和土の一面せん断試験結果に関して、 $u_a = 50 \text{ kPa}$, 100 kPa に対してそれぞれ図-10, 11 で示している。不飽和土の結果では $p^*_{\text{net}} (= p^* - u_a)$ を用いているが、飽和土の結果と同様な傾向を示していることが分かる。

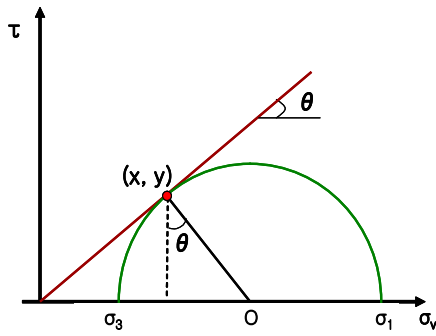


図-12. 飽和応力状態線と最大最小主応力の関係

(p^* , q)の応力パラメーターは、図-12 に示すような幾何学的関係から応力状態線の傾き θ により以下のように表示される。

$$x = \sigma_v, \quad y = \sigma_v \cdot \tan \theta \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = x + y \cdot \tan \theta \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{y}{\cos \theta} \quad (8)$$

$$p^* = \frac{1}{3} \left\{ 3\sigma_v + \sigma_v \cdot \tan \theta \cdot \left(3 \tan \theta - \frac{1}{\cos \theta} \right) \right\} \quad (9)$$

$$q = \sigma_v \cdot \tan \theta \cdot \frac{2}{\cos \theta} \quad (10)$$

図-13 は、 θ を変化させた場合の式(9), (10)に基づく応力経路の理論値と実測値を圧密時の応力で正規化して比較したものである。図から飽和土の場合、理論線と実験値がほぼ一致することを分かる。この結果は、せん断過程に図-12 に示すような幾何学的関係が保たれていることを意味している。すなわち、応力状態線に対してモール円が接するとする仮定が適切であることを示している。図-14, 15 は $u_a = 50 \text{ kPa}$, 100 kPa の結果について示したものである。不飽和土の場合、サクシオン応力を p_{net}^* 軸切片として、理論値を求めている。実測値は理論線から右側にわずかに外れているが、ほぼ同じ傾向を示している。この結果は、不飽和状態においても、図-12 のような幾何学的関係が保たれ、応力状態線に対してモール円が接するとする仮定が適切であることを示している。

7. サクシオン応力を取り入れた最大圧縮線と破壊線の検討

図-16 は、最大体積圧縮点(Maximum Volumetric Compression Point; M.C.P)での応力状態に対するモール円を示したものである。ここで、図-8 と同様に、サクシオン応力を σ 軸切片とした応力状態線に接するモール円を考えて、それに基づいて応力パラメーターを決定する。この図から、サクシオン応力 p_s の大きさが小さい場合は、飽和土と不飽和土の最大体積圧縮点の応力状態がユニークな直線として整理されることが理解される。

軽部ら¹³⁾は、不飽和土のサクシオン一定三軸圧縮試験における最大体積圧縮点での応力状態について整理した。そして、サクシ

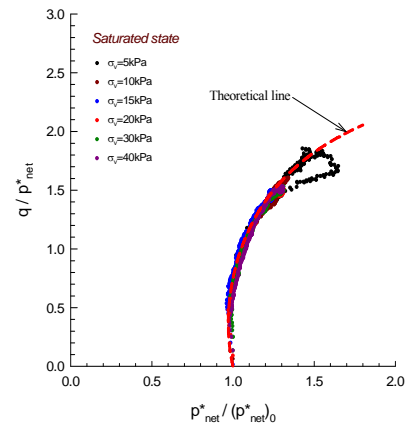


図-13. 飽和状態

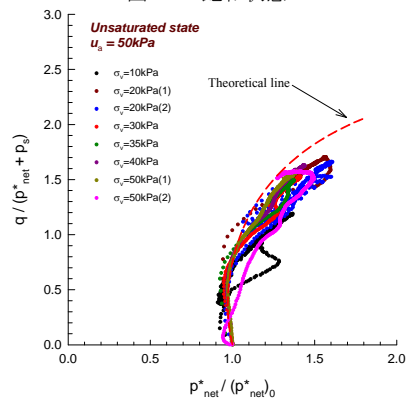
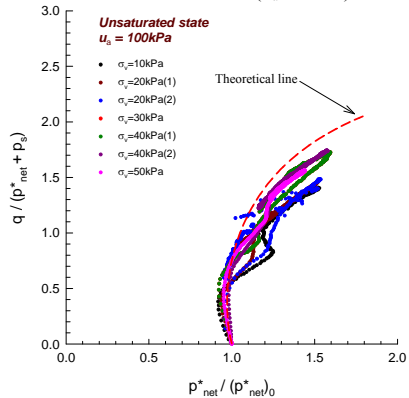
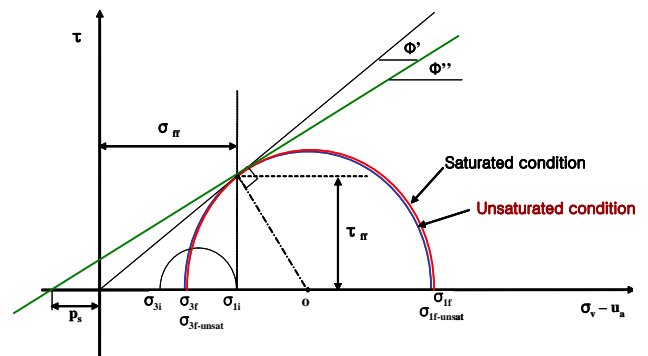

 図-14. 不飽和状態 ($u_a = 50 \text{ kPa}$)

 図-15. 不飽和状態 ($u_a = 100 \text{ kPa}$)


図-16. 最大圧縮点に対する飽和と不飽和土の Mohr 円の状態

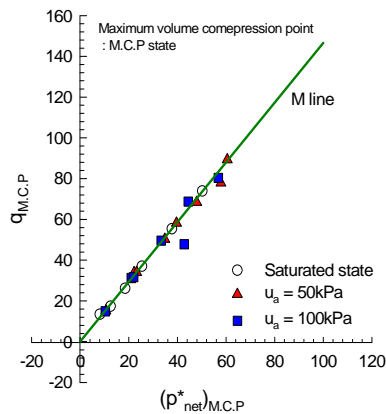


図-17. 最大圧縮点での比較

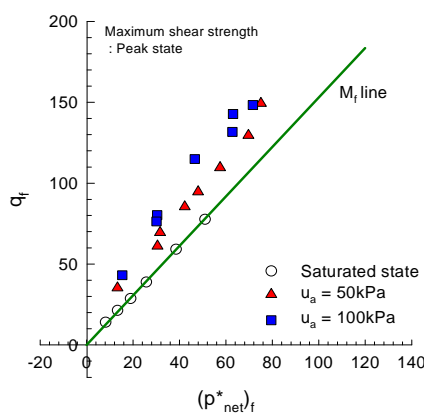


図-18. ピーク点での比較

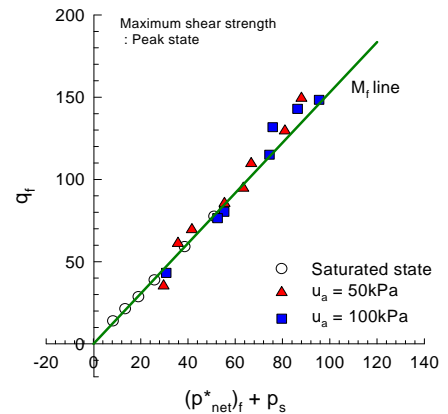


図-19. ピーク点でのサクション応力適用

ョン応力を加えた、 $(p_{net} + p_s)$ の応力成分に対して最大体積圧縮点での応力状態が飽和、不飽和状態にかかわらずユニークな直線で表されると報告している。

図-17 は飽和および不飽和状態の $u_a = 50 \text{ kPa}$, 100 kPa 条件における応力状態を、 p^*_{net} に対して整理した結果を示している。また、図-18 は、同じ試験についての最大せん断強度を p^*_{net} に対して整理した結果を示している。図-17 の結果では、飽和と不飽和土の結果は、軽部らの結果と同様にユニークな関係を示している。今回の結果は、 p^* を決定する応力状態線にサクション応力の影響を取り入れた形で整理しているため、軽部らの結果と同様にサクション応力の影響を取り入れた整理方法であると解釈される。しかし図-18 の結果では、飽和と不飽和土の結果はユニークな関係になっていないことが分かる。

図-19 は、軽部ら¹³⁾の整理方法を参考に、最大せん断強度を $(p^*_{net} + p_s)$ に対して整理した結果を示している¹⁰⁾。この結果では、飽和と不飽和土の結果はユニークな破壊線を示していることがわかる。この結果は、軽部らの三軸圧縮試験における最大体積圧縮点での応力状態について整理と同様、一面せん断試験の最大せん断強度を $(p^*_{net} + p_s)$ で整理することの有効性を示していると考えられる。ただし、サクション応力の影響を取り入れた p^*_{net} を用いており、三軸圧縮試験では p_{net} を用いている。このような違いは、実験時の拘束圧条件の範囲の違いが影響しているものと考えられる。

8. まとめ

本研究では、締め固めたまま土供試体に対して低圧条件での飽和及び不飽和状態の一面せん断試験結果を行い、その破壊時の応力状態について主応力に基づく応力パラメータを用いて整理を行った。動員されている鉛直応力とせん断応力による (σ, τ) 面上の応力点について、その点と原点(飽和状態の場合)あるいはサクション応力の σ 軸切片(不飽和状態の場合)を結んだ応力状態線を考え、その応力状態線に対してモールの応力円が接するものとして主応力を決定した。なお、サクション応力については現在提案している SSM を適用して求めた。実験時の応力経路は、図-12 に示すような幾何学的関係から応力状態線の傾き θ により規定される理論線とほぼ対応し、幾何学的関係が保たれ、応力状態線に対してモールの円が接するものとする仮定が適切であることを

示した。

また、サクション応力の影響を考慮した p^*_{net} の応力成分に対して整理することによって、最大体積圧縮点での応力状態が飽和、不飽和状態にかかわらず、ユニークな直線で表されることを示された。この結果は、 p^*_{net} にサクション応力を取り入れた形で整理しているため、軽部らの三軸圧縮試験結果と同様な結果であると解釈される。また、ピーク時の応力状態についても、 $(p^*_{net} + p_s)$ で整理することにより、飽和と不飽和土の結果はユニークな破壊線を示すことが判明した。ただし、一面せん断試験ではサクション応力の影響を取り入れた p^*_{net} を用いており、軽部らの三軸圧縮試験の整理では p_{net} を用いている。このような違いは、実験時の拘束圧条件の範囲の違いが影響しているものと考えられる。

今回のように三軸試験結果との対応関係を検討した結果、一面せん断試験結果を主応力表示で表現することは可能であり、有効な整理方法であると考えられる。

参考文献

- 1) Shibuya, S., Mitachi, T. and Tamate, S.; "Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear", *Geotechnique* 47(4), 769-790 (1997)
- 2) Kitajima, A., Iwahashi, T., Shibuya, S., Mitachi, T. and Takada, M.; "Drained shear strength of sand in direct shear box test as compared to those from other element tests" (in Japanese), 29th Japan national conference on Geotechnical Engineering, 441-444 (1994)
- 3) Oshima, A., Takada, N. and Sakamoto, Y.; "Comparison between ordinary and true split box shear tests under constant pressure condition" (in Japanese), 31th Japan national conference on Geotechnical Engineering, 665-666 (1995)
- 4) Oshima, A., Takada, N. and Sakamoto, Y.; "Effect of opening upper and lower shear boxes of split box shear test under constant pressure condition" (in Japanese), 31th Japan national conference on Geotechnical Engineering, 667-668 (1995)
- 5) Donald, I.B.; "Shear strength measurements in unsaturated non-cohesive soils with negative pore pressures", *Proceedings, 2nd Australian and New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 200-205 (1956)
- 6) Escario, V.; "Suction controlled penetration and shear tests",

- Proceedings, 4th International Conference on Expansive Soils, Denver, Co, 2, 781-797 (1980)
- 7) Escario, V. and Saez, J.; “The shear strength of partly saturated soils”, *Geotechnique* 36(13), 453-456 (1986)
- 8) Satija, B.S.; “Shear behaviour of partly saturated soils”, Ph.D. Thesis, Indian Institute of Technology, Delhi, India, (1978)
- 9) Gan, J.K.M., and Fredlund, D.G., and Rahardjo, H.; “Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test”, *Canadian Geotechnical Journal*, 25(8), 500-510 (1988)
- 10) Kim, B.S., Shibuya, S., Park, S.W. and Kato, S.; “Application of suction stress for estimating unsaturated shear strength of soils using direct shear testing under low confining pressure”, *Canadian Geotechnical Journal*, (2010) (in press).
- 11) Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A.; “The shear strength of unsaturated soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321 (1978)
- 12) Karube, D., Kato, S., Hamada, K. and Honda, M.; “The relationship between the mechanical behavior and the state of pore-water in unsaturated soil” (in Japanese), *Geotechnical Engineering Journal, JSCE*, 535, 83-92 (1996)
- 13) Karube, D., Honda, M., Kato, S. and Tsurugasaki, K.; “The relationship between shearing characteristics and the composition of pore-water in unsaturated soil” (in Japanese), *Geotechnical Engineering Journal, JSCE*, 575(III-40), 49-58 (1997)

Definition of the principal stresses of for constant pressure shear test for unsaturated soil

Byeong-Su KIM¹, Shoji KATO¹ and Satoru SHIBUYA¹

¹*Graduate School of Engineering, Department of Civil Engineering*

Key words: unsaturated soil, direct shear test, SSM, principal stress, suction stress

Ordinary direct shear test has been just analyzed with using the vertical stress and the shear stress. This paper presents a determination method of the principal stresses for saturated and unsaturated soils in the direct shear test. In order to verify it, direct shear tests for saturated and unsaturated soils were carried out using a modified direct shear test apparatus for unsaturated soil. Matric suction and the suction stress for these results were obtained by using SSM (Suction stress – SWCC Method). It is found that the suction stress obtained with SSM becomes a basis to determinate the principal stresses of the direct shear test. Moreover, the effectiveness of analysis with the stress parameters based on the principal stress was confirmed for the stress states at the maximum compression point and the peak stress.