



# 不飽和土の一面せん断試験における限界状態について

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, 1:50-55

(Issue Date)

2009

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81002722>



## 不飽和土の一面せん断試験における限界状態について

金 秉洙<sup>1\*</sup>・加藤 正司<sup>2</sup>・澁谷 啓<sup>2</sup>

<sup>1</sup>工学研究科市民工学専攻博士後期過程

<sup>2</sup>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、定圧一面せん断試験、SSM、サクシヨン応力、限界状態

本研究では飽和および不飽和土の一面せん断試験における応力経路および体積変化挙動について調べ、限界状態に至る挙動について検討した。その結果、SSM から得られたサクシヨン応力を考慮した応力パラメーターを用いることにより、飽和状態での最大体積圧縮線が、飽和及び不飽和状態の限界状態線に対応することが判明した。また、 $(\ln(p_{net}^*), \nu)$  空間において一面せん断試験の結果と比体積  $\nu$  が同じ供試体を用いて行われた三軸試験での限界状態線と一致する挙動を示すことが分かった。さらに、正規圧密線に関連した等価圧密応力( $p_e'$ )を用いて応力経路を正規化した結果、せん断が進むにつれて Hvorslev 面に対応する経路を示すことが確認された。したがって、以上の結果は、飽和土と不飽和土の一面せん断試験における限界状態線の存在を示しているものと考えられる。

### 1. はじめに

土の限界状態は一面せん断試験装置を用いた研究により最初に指摘された<sup>1)</sup>。その後、応力状態と体積変化をより正確に測定することができる三軸試験により研究が行われた。Roscoe et al.<sup>2)</sup>, Schofield and Wroth<sup>3)</sup>は、得られた限界状態に関する実験事実に基づきカムクレイモデルを提案した。そのモデルは現在、飽和土の力学挙動を理解する際の基礎的理論となっている。三軸試験と同様な限界状態が一面せん断試験においても見られるかどうかを検討するには、ある仮定を設けてモールの応力円に基づく最小最大主応力の定義を行い、カムクレイタイプの応力パラメーター

( $p', q$ ) を用いることが必要であり、現在までそのような検討はほとんど行われていない。

Kim et al.<sup>4)</sup>は、締め固めたまき土供試体を用いた定圧一面せん断試験を行い、最大最小主応力を決定するためにSSM (Suction stress - SWRC Method)を適用してサクシヨン応力を求めた。そして金ら<sup>5)</sup>は、 $\sigma_v \sim \tau$ 面上でサクシヨン応力の大きさを $\sigma_v$ 軸切片とし、その点を供試体せん断面に作用している応力状態による応力点を結んで定義される応力状態線に対し破壊時のモールの応力円が接するという仮定に基づき、一面せん断試験での最大最小主応力を決定する方法を提案した。本研究では金ら<sup>5)</sup>の結果に基づいて最大最小主応力を決定し、一面せん断試験中の応力状態をカムク

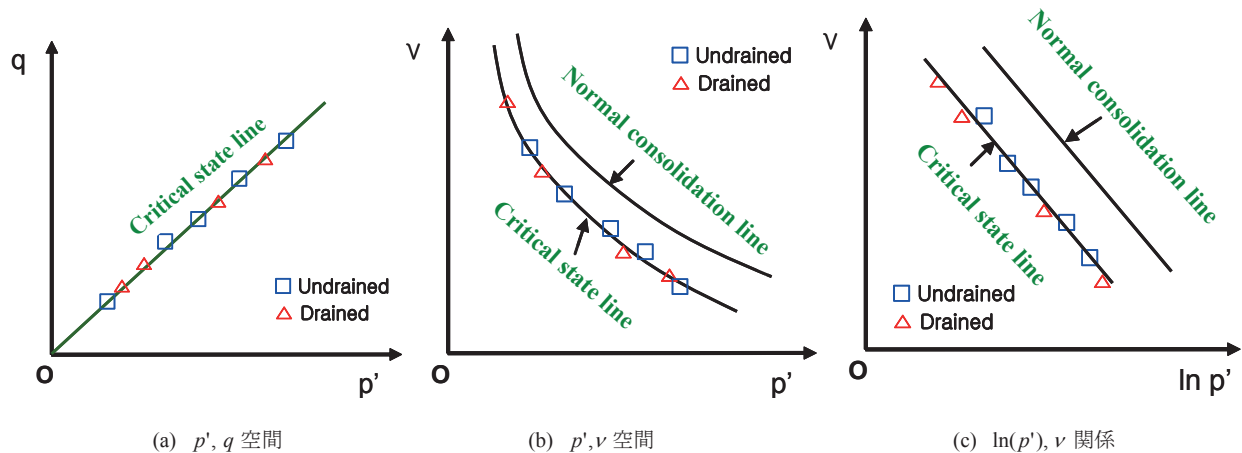


図-1. 限界状態線

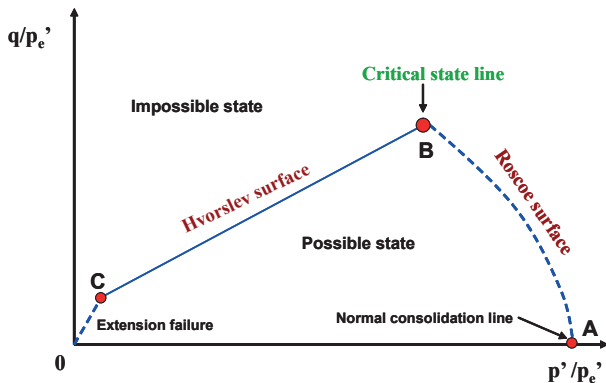


図-2. 等価応力  $p_e'$  を用いて正規化したパラメーター  $p'/p_e'$ ,  $q/p_e'$  による2次元空間での限界状態面

レイタイプの応力パラメーターにより表して限界状態に至る挙動について検討した。このために、まず、圧密試験を行って正規圧密線を決した。また、圧密排水条件の三軸試験を実施し、限界状態の破壊線および破壊に至るまでの間隙比変化を確認した。またこれらの結果に基づき一面せん断試験中の応力経路および間隙比挙動を整理して、限界状態に至る挙動について検討した。

## 2. 飽和土に関する限界状態

繰り返した、構造を持たない飽和粘土を用いて排水及び非排水条件で三軸試験を行った場合、供試体の状態は、最終的に限界状態線に到達することが分かっている。限界状態線は図-1(a), (b), (c)のように示される。図-1(a)に示すように  $p', q$  空間では原点を通る破壊線として表される。また図-1(b)に示すように、 $p', v$  空間では正規圧密線に対応する曲線として示される。この曲線は図-1(c)に示すように  $\ln(p'), v$  関係においては正規圧密線と平行な直線として表される。これらの飽和状態の限界状態線は、次式で与えられる。

$$q = Mp' \quad (1)$$

$$v = \Gamma - \lambda \ln p' \quad (2)$$

ここで、 $p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$ ,  $q = \sigma_1' - \sigma_3'$ ,  $M$  は傾きである。 $\Gamma$  は限界状態線の  $p' = 1.0 \text{ kN/m}^2$  に対応している比体積  $v$  の値であり、 $\lambda$  は正規圧密線の傾きである。

図-2は、等価応力  $p_e'$  を用いて正規化したパラメーター  $p'/p_e'$ ,  $q/p_e'$  による2次元空間での限界状態面を示している。ここで、等価応力  $p_e'$  は、正規圧密線上の同一な比体積に対する点での  $p'$  の値である。等価応力  $p_e'$  を用いることにより、各試験での比体積に対する影響に関わらず、応力経路の比較が可能になる。正規圧密状態の試料は、せん断開始により点Aから点Bの限界状態線までユニークな応力経路を示す。点Aから点Bまでの経路は、一つの状態境界面でありRoscoe面と呼ばれている。

一方、Hvorslevは、過圧密試料の場合の強度を評価するため等価応力  $p_e'$  を適用して供試体の破壊応力状態を検討した。その結果、図のように  $p'/p_e'$ ,  $q/p_e'$  空間でユニークな破壊状態面BCが存在するとしている。この面BCはHvorslev面と呼ばれている。また、点Cから原点までの線分は、引張破壊状態線を示している。

飽和土に関しては以上のような限界状態線が存在すると考えられている。不飽和土に関しては、三軸試験結果に基づいて、幾つかの限界状態に関する検討が行われている。しかし、実験結果として統一的な見解は得られていないのが現状である。その理由としては、不飽和土の三軸圧縮試験におけるサクシジョンの評価方法が確立されていないことや、実験上、体積変化測定の精度に問題があることが挙げられる。

## 3. 試料および試験方法<sup>4)</sup>

試験に用いた一面せん断装置は不飽和土用に改良されたものである。せん断箱はセル内に設置され、セル内に与えた空気圧が間隙空気圧として供試体に作用する。下箱底面に半月型のセラミックディスクとポーラスメタルを備えており、それぞれに連結した排水経路を通じて、排水量の測定および供試体の飽和を行う<sup>5)</sup>。

試験に用いた試料は、兵庫県北部で採取したまさ土である。その物理特性は、土粒子密度  $\rho_s = 2.652 \text{ g/cm}^3$ 、液性限界はNPである。本研究で用いた供試体の大きさは、H20mm,  $\phi$  60mmであり、2mmふるい通過試料を用いて初期含水比；7%、乾燥密度； $1.71 \text{ g/cm}^3$ に合せて静的締固め方法で準備された。飽和状態の試験は、供試体を水浸後に一定の載荷圧を与えて圧密し、その後、せん断過程を行った。不飽和状態の試験は水浸飽和した供試体を圧密後に一定の空気圧( $u_a = 50 \text{ kPa}$ ,  $100 \text{ kPa}$ )を圧力室に与えて供試体を不飽和化した後、せん断過程を行った。なお、せん断過程の前には、上箱を持ち上げて上下せん断箱の間に3mmの間隙を与えた。せん断速度は飽和状態では  $3.33 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ 、不飽和状態では  $3.33 \times 10^{-4} \text{ mm/s}$ であり、排水条件でせん断を行った。

## 4. $p', q$ 空間における限界状態に関する検討

一面せん断試験ではせん断中、主応力の方向が変化するため、主応力を決めることは難しいと考えられている。しかし、金ら<sup>5)</sup>は、SSM(Suction stress - SWRC Method)を用いてサクシジョン応力を決定した。そして、 $\sigma_v - \tau$ 面上でサクシジョン応力の大きさを  $\sigma_v$  軸切片とし、供試体せん断面に作用している応力状態による応力点を結んで定義される応力状態線に対し破壊時のモールの応力

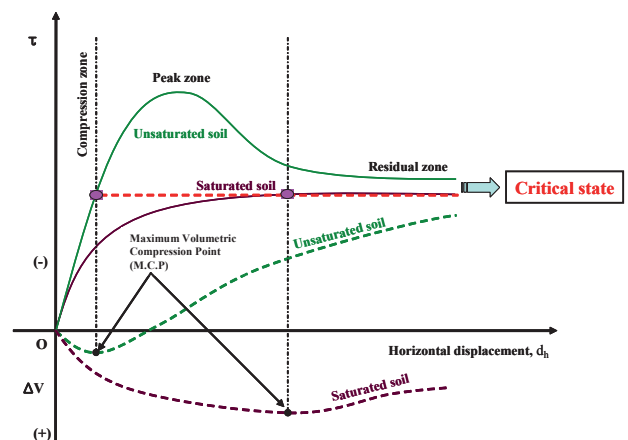
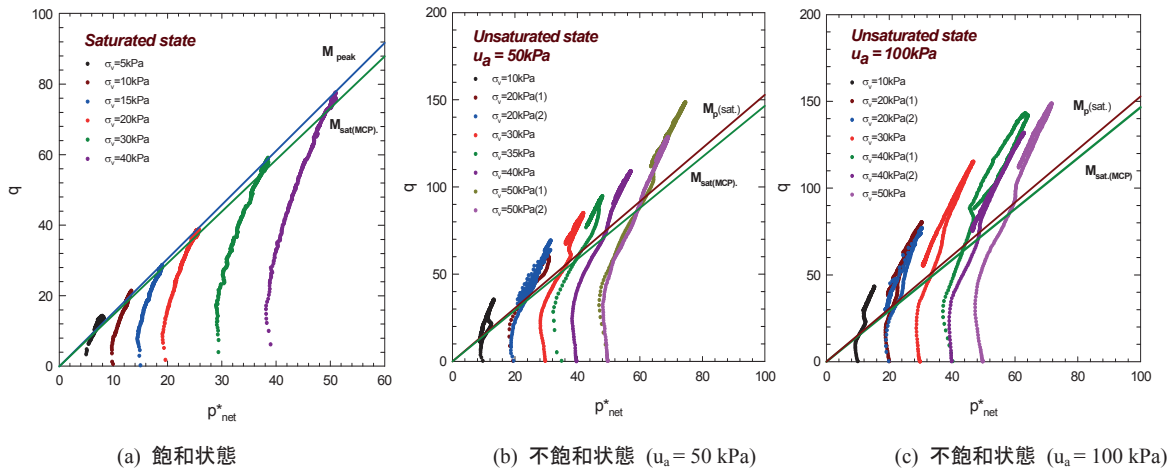


図-3. 飽和土と不飽和土の一般的な応力~ひずみ関係を説明する概念図


図-4. 飽和状態および不飽和状態の ( $p^*_{net}$ ,  $q$ ) 関係

円が接するという仮定に基づき、一面せん断試験での最大最小主応力を決定した。このように、SSMを用いて得られた  $p$  を  $p^*_{net}$  と表現する。なお、飽和状態の場合は、サクシオン応力はゼロであるので、応力状態線は原点から延びる直線となる。

図-3はせん断試験時の飽和土と不飽和土の一般的な応力~ひずみ関係を説明する概念図である。飽和土の場合、せん断とともに最大体積圧縮状態に至り、その後ピーク強度に至った後、残留状

態になる。不飽和土の場合、最大体積圧縮点を経てサクシオンの影響で飽和土の限界状態線を超える状態でピーク強度を迎える。その後、飽和土と同じ残留状態に至っており、このときの最大体積圧縮点と同じせん断強度を示すものと考えられる。

図-4(a)は、飽和状態の場合の ( $p^*_{net}$ ,  $q$ ) 関係を示している。せん断開始後、応力経路は右側にカーブしているが、このような傾向は、一面せん断試験における理論曲線と一致している<sup>5)</sup>。また、図-3のように、最大体積圧縮点が残留状態、すなわち限界状態を示しているため、本研究では、最大体積圧縮線 (Maximum Volumetric Compression Point line : M.C.P line) を限界状態線として定義する。したがって、飽和状態の限界状態線は次式で与えられる。

$$q = M \cdot p^*_{net} = 1.466 p^*_{net} \quad (3)$$

図-4(b), 3(c)は、不飽和土の結果を飽和状態のピーク強度線と最大体積圧縮線とともに示したものである。図に示すように、不飽和土の応力経路は飽和土の限界状態線を超えて進行している。図-5は、飽和土の限界状態線と不飽和土の最大体積圧縮状態での応力点を比較したものである。この結果から、飽和土の限界状態線と不飽和土の最大体積圧縮状態での応力点がほぼ対応しているということが分かる。図-6は飽和土と不飽和土の試験終了時での応力点を示している。図中の実線は飽和土の限界状態線である。図では、試験終了時での応力点は限界状態線と一致していないが、せん断がもっと進行した場合、Tollの研究<sup>6)</sup>のように限界状態線に近接することと予想される。

## 5. 三軸試験結果との比較による限界状態の検討

限界状態線を求めるために、飽和状態の供試体を用いた三軸試験を行った。三軸試験は圧密排水条件でせん断速度は  $0.1 \text{ mm/min}$  で実施し、供試体の初期条件は表-1で示している。図-7は、三軸試験の応力~ひずみ関係を示している。拘束圧  $19.05 \text{ kPa}$  以外の結果では、せん断ひずみが15%を超過してもずっと圧縮挙動を示していることがわかる。

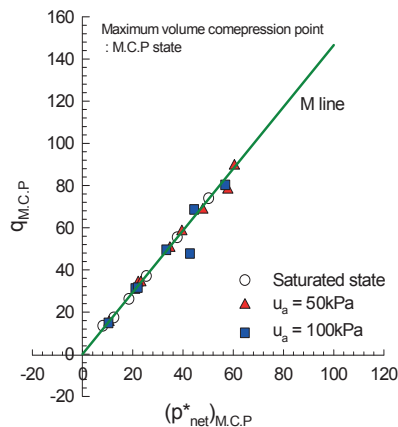


図-5. 飽和土の限界状態線と不飽和土の最大体積圧縮状態での応力点の比較

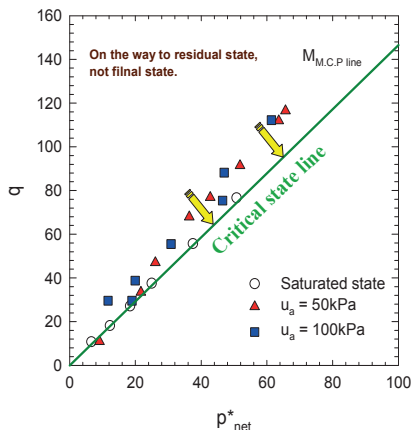


図-6. 飽和土と不飽和土の試験終了時での応力点と最大圧縮線との比較

表-1. 三軸試験での供試体の初期状態

Specimen number	$\sigma_c$ (kPa)	Water content, $w$ (%)	Dry density, $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Void ratio, $e$
TC1	19.62	6.73	1.702	0.565
TC2	49.05	6.83	1.700	0.567
TC3	78.48	7.37	1.700	0.569

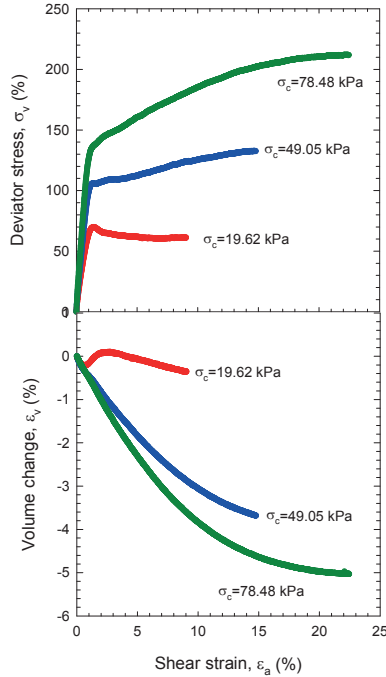


図-7. 三軸試験の応力～ひずみ関係

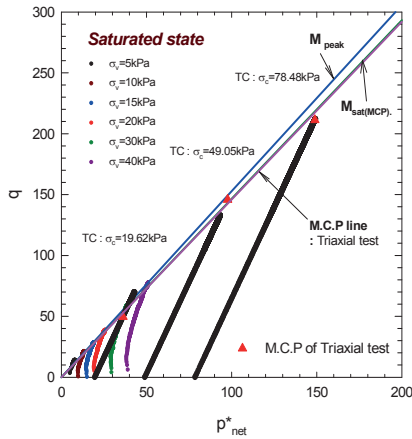


図-8. 三軸試験の応力経路と飽和状態の一面せん断試験の破壊線および最大圧縮線の比較

図-8は、三軸試験の応力経路と飽和状態の一面せん断試験の破壊線および最大圧縮線を比較したものである。最大体積圧縮点の応力状態は△印で表示として示している。ここで拘束応力 49.05kPaおよび78.48 k Paの場合、最大体積圧縮点まで到達しなかったため、最大体積圧縮点の状態を推定して求めた。このように得られた三軸試験の最大体積圧縮点是一面せん断試験の飽和状

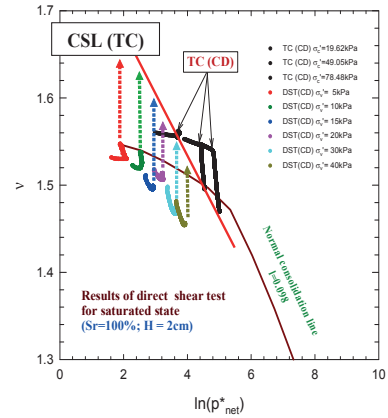


図-9. 飽和状態の結果と圧縮曲線および 三軸試験での間隙比変化の比較

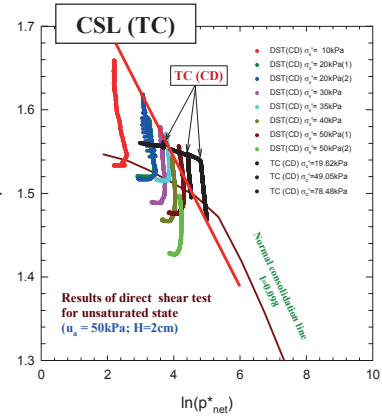


図-10. 不飽和状態( $u_a=50kPa$ )の結果と 圧縮曲線および三軸試験での 間隙比変化の比較

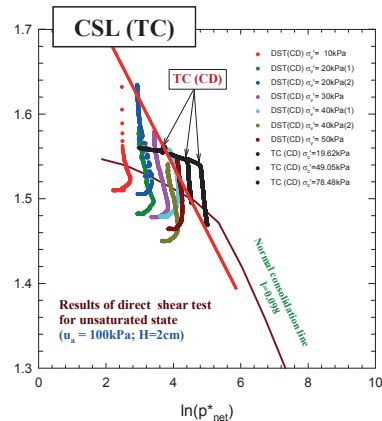


図-11. 不飽和状態の結果( $u_a=100kPa$ )と圧縮曲線および三軸試験での間隙比変化の比較

態の最大体積圧縮線とほぼ一致しているということが分かる。  
本研究では供試体の圧縮曲線を標準圧密試験により求めた。図-9では飽和状態の一面せん断試験結果と圧縮曲線および三軸試験での間隙比変化を比較している。図から、三軸試験結果により推定される限界状態線と圧縮曲線の正規圧密状態の勾配がほ



ば平行していることが分かる。しかし、飽和土の一面せん断試験の結果はせん断開始と共に圧縮挙動を示した後、せん断が進行されるほど僅かに膨張しているが、最終的には三軸試験の限界状態線まで達していない。この理由としては、飽和土の場合、サクシジョンの影響がないため試料内部の非一様性がせん断開始とともに高まり、せん断変形が進行した影響であると考えられる。なお、不飽和土の場合、サクシジョンの影響により飽和土より一様性が高まるものと考えられる<sup>7)</sup>。

図-10と11は、間隙空気圧 $u_a=50\text{kPa}$ 、 $100\text{kPa}$ の結果を示している。両図において、一面せん断試験は三軸試験の限界状態線まで達する傾向を示していることが分かる。この結果は不飽和土の一面せん断試験の結果でも限界状態に至るということを示している。

図-12は、以上の結果を3次元空間で表現した概念図である。サクシジョンが異なっても円内に示されているように2次元的な投影面では同一の限界状態線のように見えている。サクシジョン軸を加えた3次元空間では、この限界状態線は、同じ傾きをもって存在していると考えられる。

## 6. 一面せん断試験結果における Hvorslev 面の検討

本研究では過圧密状態で試験が実施されたので、Hvorslev面について検討した。この検討においては、正規圧密線との関係から式(4)を用いて飽和土及び不飽和土の結果に対する等方応力 $p_e'$ を求めて適用した。

図-13は、正規化された $p_{net}^*/p_e'$ 、 $q/p_e'$ パラメータの2次元空間における飽和土の応力経路を示している。せん断とともに応力経路は上昇し、図中の点線付近に達すると、それに沿った方向に応力経路が変化している。よって、この点線は一面せん断試験でのHvorslev面に対応するものと考えられる。なお、図中には異なる初期乾燥密度(A)1.8 g/cm<sup>3</sup>、(B)1.9 g/cm<sup>3</sup>の実験結果も示しており、ほぼ同様な傾向を示している。飽和状態の一面せん断試験の場合、供試体の初期密度にかかわらずユニークなHvorslev面が存在する傾向を示している。

図-14と15は、間隙空気圧 $u_a=50\text{kPa}$ 、 $100\text{kPa}$ に対する不飽和土の一面せん断試験結果を示している。図中には、飽和土の結果と同様に、応力経路から推定されたHvorslev面も点線で示されてい

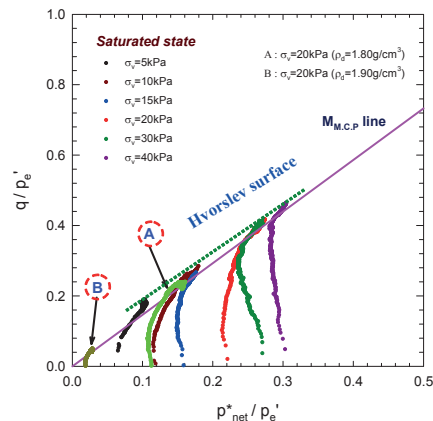


図-13. 正規化された空間における飽和土の応力経路 不飽和土の応力経路

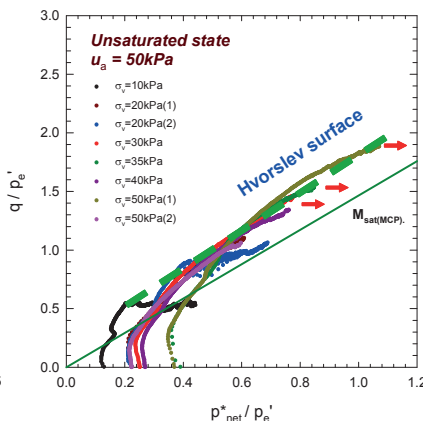


図-14. 正規化された空間における不飽和土の応力経路 ( $u_a=50\text{kPa}$ )

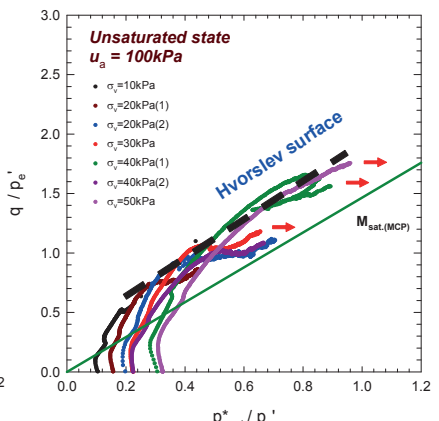


図-15. 正規化された空間における不飽和土の応力経路 ( $u_a=100\text{kPa}$ )

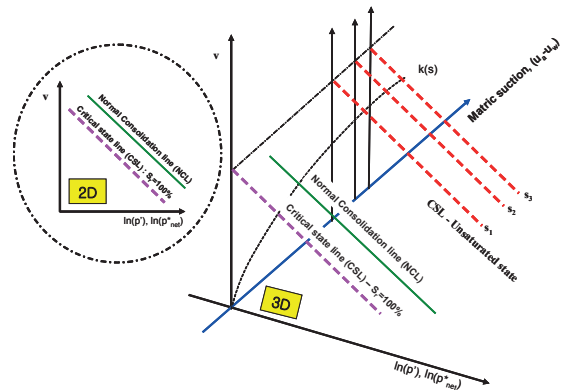


図-12. 3次元空間で表現した限界状態線

る。不飽和土の場合、飽和土と同様にせん断とともに応力経路は上昇し、図中の点線付近に達すると、それに沿った方向に応力経路が変化している。これらの点線は一面せん断試験でのHvorslev面に対応するものと考えられる。両図を比較すると、Hvorslev面は与えられた間隙空気圧の大きさによって異なる縦軸切片を持っているようである。図-16は、以上の結果を模式的に示している。最大体積圧縮線の上側にHvorslev面が形成され、せん断とともに応力経路は上昇し、Hvorslev面付近に達すると、それに沿った方向に応力経路が変化していることを示している。

## 7. まとめ

本研究では飽和土及び不飽和土に対する一面せん断試験の結果を用い、限界状態の存在について考察した。合わせて圧縮試験及び圧密排水条件の三軸試験圧縮試験を実施し、この結果から飽和土の限界状態線を得て検討を加えた。得られた限界状態線と一面せん断試験の結果を比較し、また、等価応力( $p_e'$ )を用いて限界状態面に対しても検討した。本研究で得た結果は次のようである。

- (1) SSMから得られたサクシジョン応力に基づいて、一面せん断試験中の応力状態をカムクレイタイプの応力パラメータにより表した。試験中の応力経路について検討した結果、飽和状態の最大体積圧縮線を限界状態線として定義する

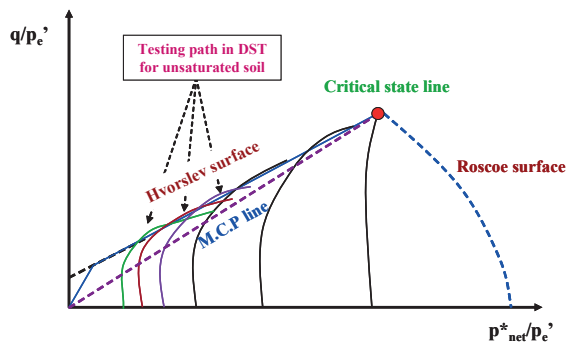


図-16. 正規化された空間における不飽和土の応力経路の概念図

ことが可能であることが分かった。また、不飽和土の応力経路については、この限界状態線を通してピーク応力状態に達することが分かった。

- (2) 一面せん断試験結果の検討のため、三軸試験圧縮試験を実施して、限界状態線を求めた。この試験結果では、供試体は継続的な圧縮挙動を示した。また、最大体積圧縮点に対応する応力状態が一面せん断試験の最大体積圧縮線とほぼ一致することが分かった。
- (3)  $\ln(p^*_{net}), \nu$  の空間での検討の結果では、飽和土は三軸試験の限界状態線に達しなかった。しかし、不飽和土の場合、サクシオンにかかわらず、限界状態線に達することが分かった。飽和土の場合、サクシオンの影響がないため試料内部の非一様性がせん断開始とともに高まり、せん断変形が進行した影響であると考えられる。
- (4) 等価応力 ( $p_e'$ ) を用いて、一面せん断試験での Hvorslev 面の存在を検討した。その結果、飽和土と不飽和土において、縦軸切片の大きさの異なる Hvorslev 面が存在する可能性が示された。

## Critical state behaviors of unsaturated soil in the direct shear test under constant pressure

Byeong-Su KIM<sup>1</sup>, Shoji KATO<sup>1</sup> and Satoru SHIBUYA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Department of Civil Engineering

**Key words:** unsaturated soil, direct shear test, SSM, suction stress, critical state

This paper examined the existence of the critical state in direct shear test for saturated and unsaturated soils. Firstly, the maximum volumetric compression point line was decided and defined as the critical state line for saturated soil and for unsaturated soil on the basis of the suction stress obtained by SSM in  $(p^*_{net}, q)$  space. It was also found that the result of direct shear test agreed with the critical state line obtained with triaxial test in  $(\ln(p^*_{net}), \nu)$  space. Moreover, the existence of the state boundary surface, that is, Hvorslev surface was verified by applying the equivalent stress ( $p_e'$ ) from the normal consolidation line. These results mean that the critical state line for saturated and unsaturated soils existed and agreed with each other in direct shear test.

## 参考文献

- 1) Casagrande, A.; "Compaction test and critical density investigation of cohesionless materials for Franklin Falls dam", U.S. Engineer Corps, Boston District, (1938)
- 2) Roscoe, K. H., Schofield, A. N., and Wroth, C. P.; "On the yielding of soils", Geotechnique, 8, pp. 22-53, (1958)
- 3) Schofield, A. N. and Wroth, C. P.; "Critical state soil mechanics", McGraw-Hill Book Co., London, (1968)
- 4) 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)
- 5) Kim, B.S., Kato, S. and Shibuya, S.; "Definition of the principal stresses of for constant pressure shear test for unsaturated soil", Memoir of Graduate school of Engineering, Kobe university, (2009) (in Japanese) (under contribution)
- 6) Toll, D. G., "A framework for unsaturated soil behaviour", Geotechnique, 40, No. 1, pp. 31-44, (1990).
- 7) Kohgo, Y., Nakano, M., and Miyazaki, T.; Theoretical aspects of constitutive modeling for unsaturated soils", Soils and Foundations, Vol.33, No.4, pp.49-63, (1993).