Vol.14, No.1, 1996

# 改良した直接せん断試験機による正規圧密状態の不飽和土の強度定数

Measurement of Strength Parameters of Unsaturated Soils Under Normally Consolidated Conditions Using Modified Direct Shear Test

西村友艮	Tomoyoshi NISHIMURA	(足利工業大学土木工学科助教授)
平林康成	Yasunari HIRABAYASHI	(足利工業大学大学院院生)
桃井 徹	Tohru MOMOI	(足利工業大学土木工学科教授)
豊田浩史	Hirofumi TOYOTA	(長岡技術科学大学建設系助手)

不飽和土の応力状態が正規圧密状態あるいは過圧密状態かを明確に区別し、せん断面に作用する拘束圧力と サクション力を測定・制御した不飽和土の直接せん断特性を明らかにすることを目的とし改良型直接せん断 試験機を製作し、ゆる詰めにしたシルト質土の不飽和土に対して低レベルから高レベルの拘束圧力およびサ クション力を制御した試験を行った.正規圧密状態の不飽和土の応力ーひずみ関係.不飽和土の内部摩擦角 や見かけの粘着力について考察している.

キーワード:不飽和土,サクション力,直接せん断試験,応力ーひずみ曲線,内部摩擦角,粘着力 (IGC:D6)

1 まえがき

近年、不飽和地盤に関する工学的研究が盛んに行 われている。不飽和土の研究分野は有効応力、せん 断特性,体積変化,不飽和浸透,締固め土,原位置 計測方法に大別される1)。不飽和土が飽和土と異な る点は間隙中に間隙水と間隙空気が存在し、土粒子 同士接点近傍のメニスカスに働く表面張力によって サクション力が作用していることである<sup>2)</sup>。このサ クションが粘着力として不飽和土のせん断抵抗力に 寄与している。不飽和土のせん断抵抗力を取り扱っ た実験的研究には、せん断応力のピーク値に関する 研究と大きな変形が進行した後の残留強度に関する 研究がある3)4)。最大せん断抵抗力と残留強度を表 現するにはBishopの有効応力式の中に含まれる拘束 圧力とサクション力を重要な有効応力成分として取 り扱わなければならない。また2つの有効応力成分 とせん断応力を三次元の座標空間にプロットするこ とで破壊状態および残留状態における不飽和土の規 準線が明確になると考えられる5)。このような不飽 和土のせん断特性の把握を目的とした実験的研究お よび報告のほとんどは以下の項目を備えた不飽和土 用三軸圧縮試験機を用いて行われている<sup>6)</sup>。①微細

孔のセラミックデイスクを装着したペデスタル。② 供試体の体積変化の測定が可能。③間隙水圧、間隙 空気圧の測定・制御が可能。さらに三軸圧縮試験に 用いられる不飽和供試体は目標含水比に調整された 試料を突固めあるいは締固めによって作成される。 不飽和供試体は試験機内で所定の拘束圧力とサクショ ン力の制御を等方圧縮応力下で受けた後、軸圧縮力 を載荷される。ところが試料の最大乾燥密度の大き さ近くまで締固められた不飽和供試体は一般的に先 行圧縮応力が大きいために、過圧密状態で三軸圧縮 試験を行われていることが多い。鵜飼ら<sup>7)</sup>は、締固 められた不飽和土の圧縮性などの性状が、その締固 め土の圧縮降伏応力を境にして変化することを述べ ている。また、太田ら<sup>8)</sup>は定体積型の一面せん断試 験機を用いて締固め土のせん断抵抗力を求め、その せん断強さが締固め土の先行圧縮応力の値で正規化 されることで、定量的に把えられ、さらに強度定数 が求められることを示している。しかし、拘束圧力 とサクション力を測定・制御した不飽和土の直接せ ん断特性に関する報告は少ない?)10)。

不飽和土のせん断強さを解明していく上で,拘束 圧力やサクション力との関係に加えて,不飽和土の

表一1 試料の物理的性質		
Gs	2.65	
Ip(%)	NP	
Maximun grain size(mm)	0.1	
Sand(%)	0.1	
Silt(%)	90.4	
Clay(%)	9.5	



Confining pressure (kPa)	Suction pressure (kPa)
	30.1
	100
100	200
	300
	400
	31.5
	100
200	200
	300
	400
	32.1
300	100
	200
	300
la set	32.7
400	100
	200

表一2 実験条件-2の広力条件

応力履歴を知り,応力状態が正規圧密状態あるいは 過圧密状態かどうかを明確にして考察されることは, これまでの研究成果にはあまり見られなかったこと である。同時に大切な研究領域であると考える。本 研究では通常三軸試験機に使用される円筒型アクリ ル製セルの中にせん断箱を設置し,不飽和供試体中 の所定のせん断面にたいして拘束圧力とサクション 力を制御し,直接せん断を実施可能な直接せん断試 験機を製作した。

直接せん断試験機は古くから用いられているせん

断試験機の一つであり、実際の地盤の応力状態を容 易に再現でき、かつ特定のせん断面に垂直応力とせ ん断応力を作用させることが可能である。また、土 の強度特性を直接的にクーロン式の形で求められる 方法でもあり、土の破壊規準を理解するには容易な 試験方法である。また、原理的にわかりやすいとも いえる。試験機自体の構造やせん断時の主応力方向 が回転するなどの検討を必要とする点はあるが、実 務や研究機関で用いられているのが現状である。

改良した定圧型の直接せん断試験機を製作し,せ ん断試験機中においてゆる詰めにしたシルト質の不 飽和供試体を低い応力レベルから高い応力レベルの 範囲にわたって一次元的に締固める。締固めた不飽 和土中のせん断面上の拘束圧力とサクション力を測 定・制御し,直接せん断試験を行い,正規圧密状態 の不飽和土の応力一ひずみ関係を明白にする。さら に正規圧密状態の不飽和土のせん断抵抗力を表わす ための強度定数を拘束圧力とサクション力に関して 考察することを目的としている。

#### 2 試料と実験方法

実験に用いた試料は、DL-Clayと呼ばれる非塑性の シルト質土を最適合水比(17%)に対して乾燥側の 含水比13%に調整したものを用いた。試料の物理的 性質を表-1に示す。

改良した定圧型の直接せん断試験機を図-1に示 す。一辺105mmのせん断箱は、内径220mm、高さ 325mmの円筒セル内に設置され、せん断箱の下箱が 可動、上箱が固定である。上箱と下箱の間には、表 面にテフロンコーティングを施した厚さ1mmのリン グ型のスペーサ(ステンレス鋼)が5枚挟まれている。 5mmのスペーシングによるせん断変形は、プラダン ら<sup>111</sup>の報告によれば単純せん断に近い変形状態であ ると考えられる。せん断中に土粒子が上下箱の隙間 からこぼれ出さないように供試体はゴムスリーブで 覆われている。5枚のリング型スペーサ同志の摩擦 力が下箱を可動させた際に無視出来る程度の大きさ であることは予備実験において確認した。下箱には AEV値500kPaのセラミックデイスクを装着している。

実験は、脱気水槽内で、十分に飽和させた下箱に ゴムスリーブを取り付け、5枚のリング型スペーサ および上箱の順に重ね、試料180gをゴムスリーブの 内側に詰め、直径60mm、高さ51mmの供試体を作成 した。初期状態の供試体の間隙比は1.42、飽和度は24



%であった。

供試体上面にポーラスストーン付のキャップを被 せ、ゴムスリーブをキャツプにまで被せ、オーリン グで止めた。供試体の作成にあたり試料には応力を 加えていないので供試体は実験前から正規圧密状態 であった。

本実験では2つの実験条件を設定した。実験条件-1では、非排水状態で供試体に0kPaから60kPaまでの 低いレベルの垂直応力( $\sigma_c$ )を載荷し、水平変位を 与え、ロードセルでせん断力を、ダイヤルゲージで 垂直変位を計測した(図-1)。一方、実験条件-2では、排気排水状態の供試体に表-2に示す拘束 圧力( $\sigma_c - u_a$ )とサクション力( $u_a - u_w$ )を制御 および載荷して、実験条件-1と同様にせん断力と 垂直変位を計測した。実験条件-2は排水状態でサ クション力を制御しているので供試体中の含水比が 変化した。

# 3 低レベルの垂直応力を受けた不飽和土のせん断 特性(実験条件-1) 無負荷状態の供試体と10kPa, 30kPa, 60kPaの垂直

応力を受けた供試体の直接せん断時の応力一ひずみ 関係を図-2、図-3に示す。図-3で垂直変位の 正が供試体高さの増大を表す。図中のNormal stress OkPaは、供試体の間隙比の大きさが1.42であり、最も ゆるい密度である。垂直応力が大きくなるにつれて、 どの水平変位にたいしてもせん断応力が大きくなっ ている。垂直応力が大きいほどせん断前の供試体の 間隙比が小さくなっていることや、せん断前の供試 体のサクション力が間隙比の減少によって変化して いるためと考えられる。供試体のサクション力を測 定したところ垂直応力0,10,30,60kPaの順にサク ション力が22.3kPa, 23.9kPa, 27.1kPa, 28.9kPaであ り、わずかであるが増加している。このように不飽 和土は低レベルの垂直応力を受けても、間隙比の減 少(密度の増大)と土粒子間に作用するサクション カの増大によってせん断抵抗力が高まることが明確 になった。

また, せん断中の垂直変位は負, 即ち供試体高さ (供試体体積) が減少している。また, 垂直応力が 大きい程, 供試体高さが減少し, 一般的な正規圧密 状態の土が示すダイレイタンシー特性が不飽和土の 正規圧密状態についても見られた。

## 4 正規圧密状態の不飽和土の強度定数

不飽和供試体が正規圧密状態であることを保ちつ つ、所定の拘束圧力(100,200,300,400kPa)を載 荷し、またサクション力を制御した。実験条件-2 で行った試験の結果を図-4から図-7に示す。3 節で述べた実験条件-1とは異なり、この実験条件 はサクション力の制御を排水状態で行うので、供試 体の含水比がサクション力の大きさによって変化す る。供試体の含水比の変化をサクション力にたいし てまとめた結果が図-8である。

図-4から図-7は、拘束圧力の大きさを一定に してサクション力の大きさが異なる供試体の応力-ひずみ関係である。応力-ひずみ関係はサクション 力によって変化し、せん断応力が高くなっているが、 拘束圧力100kPaの場合は、サクション力による応力-ひずみ曲線に明確な相違が見られない。

また同一のサクション力を有する供試体であって も拘束圧力が高くなれば、せん断抵抗力は大きく示 されている。

このように正規圧密状態の不飽和土のせん断抵抗 力の増大は、拘束圧力の増大による間隙比の減少(密





度の増大)とサクション力による土粒子間力の増大 によってもたらされる。ただし、図-8のサクショ ン力と供試体の含水比の関係から、サクション力の 増大は供試体の含水比の減少に深く関わりを有して いることが理解できる。

正規圧密状態の不飽和土の水平変位と垂直変位の



図-5(b) 垂直変位と水平変位の関係(拘束圧力200kPa)



図-6(b)垂直変位と水平変位の関係(拘束圧力300kPa)

関係(図-4(b),図-5(b),図-6(b),図-7(b)) を見ると全ての応力条件において、供試体の垂直変 位が負の値を示し、せん断中に供試体高さ(供試体 体積)が減少している。またサクション力が小さい 供試体ほど、せん断中の供試体の体積が収縮しやす いという定性的な傾向が見られる。よって、不飽和



土中のサクション力が小さいということは,外的な せん断力を受けた時の間隙構造を保とうとする抵抗 力が小さいことを示している。

最大せん断応力と拘束圧力およびサクション力と の関係をまとめた結果が図-9、図-10である。得 られた応力--ひずみ曲線はひずみ硬化型を示してお り、せん断応力のピークが見られなかったので水平 変位12mmにおけるせん断応力を最大せん断応力とし た。

拘束圧力と最大せん断応力の関係(図-9)を見



るとサクション力が同一であれば,破壊線はほぼ直 線で近似できる。それぞれの破壊線の傾きを拘束圧 力に関する不飽和土の内部摩擦角として定義する。 図-11にサクション力と内部摩擦角の関係を示した。



この図から本実験で用いたシルト質材料の場合に, 拘束圧力に関する内部摩擦角は,サクション力の大 きさによって,大きく変わることはないといえる。 一方,図-9中のSuction pressure < 100kPa (◆)の 供試体が示す破壊線の切片(見かけの粘着力)の値 が零に近いことがわかる。このことは正規圧密飽和 土の破壊線が表現する見かけの粘着力が零に近いこ とと同様な物理的意味があると考えられる。ところ が,サクション力が100kPaから400kPaに増大すると 見かけの粘着力が大きくなり,見かけの粘着力は正 規圧密状態の不飽和土において存在し,その大きさ はサクション力に依存していることが明白である。

図-10のサクション力と最大せん断応力の座標上 に描かれる破壊線の傾きをサクション力に関する不 飽和土の内部摩擦角として定義する。その内部摩擦 角は図-12に示されるように拘束圧力の大きさに影 響を受けず,ほぼ一定値を示していることがわかる。 本研究の実験条件ではサクション力を400kPaまでで あるが,さらにサクション力を増大させた場合,サ クション力と最大せん断応力を結んだ破壊線が直線 性を保持するかどうかは検討する必要がある。

5 結論

正規 圧密状態を明確にした不飽和土のせん断特性 に関する報告は少ない。本研究では拘束圧力とサク ションカの測定・制御が可能な直接せん断試験機を 製作し,拘束圧力およびサクションカの制御を受け た正規 圧密状態の不飽和土の応カーひずみ関係や強 度定数について検討を行った。以下に得られた結果 をとりまとめる。

(1)正規圧密状態の不飽和土の応力一ひずみ関係はひ ずみ硬化型を示す。

(2)正規圧密状態の不飽和土のせん断応力は拘束圧力

の増大による間隙比の減少とサクション力による土 粒子間力の増大によってもたらされる。

(3)正規圧密状態の不飽和土はせん断中に体積が減少し、サクション力が小さいほど体積が収縮しやすい。
(4)不飽和土の強度定数として拘束圧力に関する内部 摩擦角とサクション力に関する内部摩擦角を定義した。正規圧密状態の不飽和土において2つの内部摩 擦角はそれぞれほぼ一定値を示す。また見かけの粘着力は正規圧密状態においても存在し、その大きさ はサクション力に依存する。

### 参考文献

1)Fredlund,D.G. and Rahardjo,H., Soil mechanics for unsaturated soils, A Wiley-Interscience Publication, JOHN WILEY & SONS,INC,1993. 2)山口柏樹,土質力学 3 版,技報堂,pp.33-40,1986. 3)Fredlund,D.G., Second Canadian Geotechnical Colloquium Appropriate concepts and technology for unsaturated soils, Can.Geotech.J.,16,pp.121-139,1979. 4)Toll,D.G., A framework for unsaturated soil behaviour, Geotechnique 40,No.1,pp.31-44,1990. 5)佐々木健一,西村友良,桃井徹,不飽和土のせん断特性 に与える拘束圧力とサクション力の影響,第31回地盤 工学研究発表会,pp.831-832,1996.

6)土質工学会,不飽和土の工学的測定,不飽和土の工学 的測定に関する信州セミナーテキスト,pp.69-104 1988

7)鵜飼恵三,花里利二,榎戸源則,締め固めた土の圧縮特 性に関する基礎的検討,土と基礎,34-5 (340),pp.31-36,1986.

8)太田秀樹,伊藤雅夫,石黒健,米谷敏, 締固められた粘 性土の先行圧縮応力と強度の推定,土木学会論文集, No.436,III-16,pp.27-36,1991.

9)Gan,J.K.M., Fredlund,D.G. and Rahardjo,H., Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test,

Can.Geotech. J., 25, pp. 500-510, 1988.

10)Campos,T.M.P. and Carrillo,C.W., Direct shear testing on an unsaturated soil from Rio de Janeiro, Proceedings of the first international conference on unsaturated soils, A A.BALKEMA,pp.31-389,1995. 11)プラダンテージ,本郷隆夫,水上純一,土の一面せん 断試験に関する検討課題,直接型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.12-21,1995.