

# 大山倉吉軽石不攪乱試料のサクシオン測定一面せん断試験

清水 正喜・山本 大輔\*  
鳥取大学工学部土木工学科・\*株式会社ウエスコ

Shear Box Tests with Measurement of Suction on Undisturbed Samples of Daisen Kurayoshi  
Pumice

Masayoshi SHIMIZU, Daisuke YAMAMOTO\*  
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering  
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan  
E-mail: mshimizu@cv.tottori-u.ac.jp

\* Wesco Co. Ltd., Shimane Branch Office, Matsue, 630-0047 Japan

**Abstract:** Shear strength characteristics of a volcanic cohesive soil, Daisen Kurayoshi Pumice (DKP), which is a representative problematic soil in Japan, are complicated because of its partial saturation and inhomogeneous nature. A direct shear box testing machine was newly developed to measure the suction in both stages of consolidation and shearing. Direct shear tests were carried out under a normal stress lower than the consolidation yield stress  $p_c$ . The results showed that: (1) shear strengths were different between specimens although they were tested under a particular normal stress; (2) however, the difference was rationally explained by using the variables of the suction and the normal stress measured below the base of the shear box that is fixed in the vertical direction; and (3) the relationship between the shear strength and the suction was non-linear.

**Key Words:** Suction, Direct shear box tests, Unsaturated soil, Volcanic cohesive soil

## 1. はじめに

日本を含め極東および東南アジアは世界でも有数の火山地帯でありいわゆる火山灰質土に広く覆われている。我が国の火山灰質粘性土（細粒分が支配的な火山灰質土）の多くは工学的な取り扱いが困難な問題土である[1]。

本研究は西日本で代表的な問題土である大山倉吉軽石（DKP）のせん断強度特性を明らかにすることを目的としている。この土は比較的飽和度の高い不飽和の状態が存在し、高含水比・高間隙比を有し、攪乱によって極端に強度が低下する超鋭敏な土である。

飽和土のせん断強度特性は間隙比および有効応力とその履歴で説明できるが、この土の不飽和状態でのせん断強度特性をそのようなパラメーターで説明することは容易でない[2]。特に、垂直応力が圧密降伏応力より低い場合、例えば、通常の定圧一面せん断試験において同じ垂直応力を作用させてもせん断強さが大きくばらついたり、垂直応力を大きくするとせん断強さが低くなったりす

ることもある。

これまでにサクシオンを考慮すれば試料のせん断強度特性をより合理的に評価できることを明らかにしている[3]が、せん断中のサクシオンの挙動が不明であった。そこで新たにサクシオン測定が可能な一面せん断試験装置を開発した。本論文は、主としてその装置を用いて行った一面せん断試験の結果に基づいて圧密・せん断過程におけるサクシオンの挙動、ならびにせん断強さと垂直応力およびサクシオンとの関係について考察するものである。

## 2. 試料

鳥取県倉吉市で採取した不攪乱試料を用いた。本研究で用いた試料は過去の研究[1]で用いたものと区別するために DKP3 と呼称する。不攪乱試料ブロックを識別するために B4 や T5 などの記号を用いる。

主な物理的性質は次のようである：

$\rho_s=2.81(\text{g}/\text{cm}^3)$ ,  $w_L=125\%$ ,  $w_P=81\%$ , 細粒分含有

率 30%以上. これらの指標は試料の乾湿履歴の影響を強く受け[4], 一義的に決定できないので平均的な値を記した.

図 1 に力学試験用に整形した供試体から測定した試料の初期状態を間隙比と含水比の関係にして示す. 参考までに過去の研究[2]で用いた試料(DKP2)のデータも併せて示している.

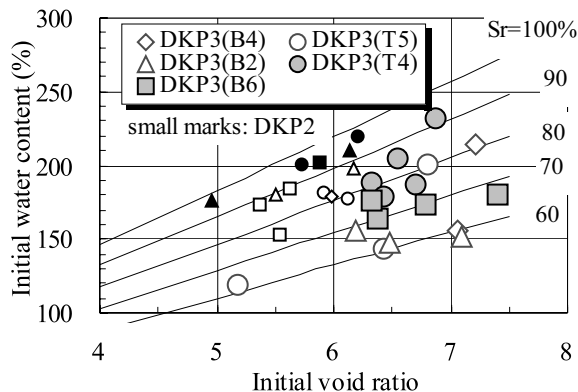


図 1. 供試体の初期状態

DKP3 (B4, B2, T5) は最も最近に試験に供したものでやや乾燥が進んで含水比が低い. DKP2のうち黒く塗りつぶしたマークは強制的に真空脱気したものである. それらを除いて含水比が150%以上, 間隙比が5以上, 飽和度が約80%である. 試料採取時に測定した値と大きな差はない.

これまでに行った試験から, この試料の圧密降伏応力  $p_c$  は 160kPa 程度, 圧縮指数  $C_c$  は 3.8 と推定されている[3].  $C_c$  はコンシステンシー限界から予測される値より大きい[2].

### 3. 装置と方法

#### 3.1 試験装置

不飽和土用一次元圧密試験装置[5]と2種類の一面せん断試験装置を用いた. せん断試験装置の一つはサクシオンの測定ができないもので改良型一面せん断試験機(三笠式)である. 他は新しく開発したもので圧密およびせん断の両過程でサクシオンの測定が可能である.

サクシオン測定が出来ない装置でせん断試験を行った場合は圧密過程を不飽和土用一次元圧密試験装置で実施し, 圧密過程およびせん断直前のサクシオンを測定した. この方法で試験した結果の一部は既に公表している[3]が考察を進める上で再度引用することもある.

#### 3.2 サクシオン測定可能な一面せん断試験装置

この装置は市販の一面せん断試験装置を改良したものである(図2). 装置は上箱が水平方向固定で下箱が水平方向可動であり, 下箱の下の荷重計で垂直応力(反力板垂直応力;  $\sigma_v$ )を測定する形式である.

次の二点を改良した. まず加圧版側の垂直応力( $\sigma_v$ )を測定できるように加圧板上部に荷重計を設置した. 次に, 供試体底面でサクシオンを測定できるようにした. 即ち, 下箱の底部に, 供試体底面が接するようにセラミック円板を設置し, 下箱外部に圧力変換器を取り付けた. また, 供試体の間隙空気圧を測定・制御できるようにせん断箱全体を圧力セルで覆った.

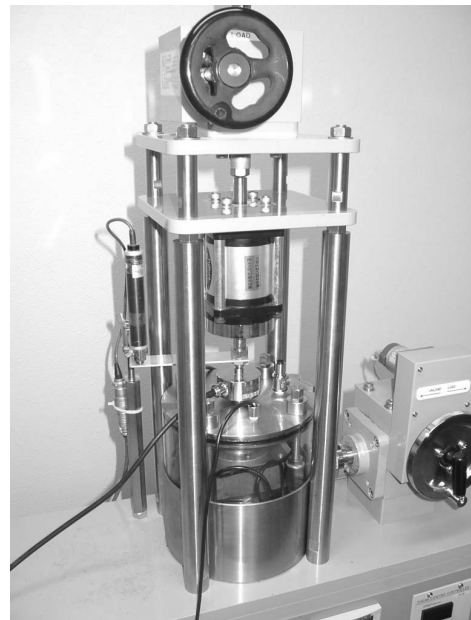


図 2. サクシオン測定が可能な一面せん断試験装置

#### 3.3 方法

サクシオン測定可能な装置を用いて行った一面せん断試験の方法を述べる. 圧密中の間隙水圧またはサクシオンの挙動を調べるために底面非排水・上面排水で圧密した. 垂直応力  $\sigma_v=80\text{kPa}$  で圧密した後, 定圧または定体積の条件でせん断した. 圧密降伏応力  $p_c (=160\text{kPa})$  より低い垂直応力でのせん断強度特性を解明するためである. せん断速度は 0.05mm/分または 0.02mm/分で行った.

## 4. 結果と考察

### 4.1 圧密圧力によるサクシヨンの変化挙動[3]

一つの供試体に対して圧密圧力  $p$  を段階的に 640kPa まで作用させ、次に 80kPa まで除荷してせん断した。人工的な過圧密の履歴を与えたことになる。この供試体の試験結果を利用して圧密時のサクシヨンの挙動について述べる。

一定の間隙空気圧  $u_a$  を作用させ、圧密荷重  $p$  を段階的に作用させると間隙水圧  $u_w$  は  $p$  とともに上昇する。 $p$  が低いときは  $u_w$  は  $u_a$  より小さいが  $p$  がある大きさ以上になると  $u_w$  は  $u_a$  と等しくなる。

間隙水圧  $u_w$  は時間的に変化する。荷重の瞬間に  $u_w$  はある量だけ上昇し時間とともに低下して一定になる。 $p$  が相対的に低い場合は、荷重の瞬間も平衡時にも  $u_w$  は  $u_a$  より小さい、即ち、サクシヨンは常に正である。一方、相対的に大きい荷重を載荷すると、 $u_w$  は瞬間に上昇して  $u_a$  を超え、時間が経つと  $u_a$  と等しい大きさで収束する。この実験では 320kPa 以上の荷重を作用させるとサクシヨンはゼロになった。

除荷時には  $u_w$  は一旦減少し、時間とともに回復する。平衡時には  $u_w$  と  $u_a$  が等しくなった。即ちサクシヨンはゼロのままである。

荷重変化量に対する間隙水圧変化量の割合 (B 値) と  $p$  の関係について述べる。この供試体では、 $p$  が低い段階では B 値は 0.2 程度と小さいが  $p$  が 400kPa 以上になると 0.5 を超えた。サクシヨンが 0 になるような高い  $p$  に対しても B 値はせいぜい 0.6 程度であった。ただし、このような高い荷重段階では供試体の上面から排水が生じた。また、計算上も飽和度は 100% に達した。

### 4.2 サクシオン測定一面せん断試験の結果

#### (1) 圧密段階の挙動

圧密圧力を載荷する前に供試体の初期サクシヨンを測定した (図 3)。この例では  $u_w$  は約 100 分以降ほとんど変化せず、 $u_a$  と  $u_w$  の差が 55kPa で平衡状態に達している。即ち、初期サクシヨンは 55kPa である。

図 4 は 80kPa の垂直応力を作用させたときの  $u_a$ 、 $u_w$ 、加圧板側垂直応力  $\sigma_U$ 、反力板側垂直応力  $\sigma_L$  および鉛直変位 (圧密量)  $d$  の時間的変化である。まず、 $u_w$  は垂直応力載荷とともにやや時間的な遅れを伴って増加しその後減少している。鉛直変位  $d$  は載荷とともにほぼ瞬間的に生じ、その後、わずかに二次圧密的な挙動を示している。反力板

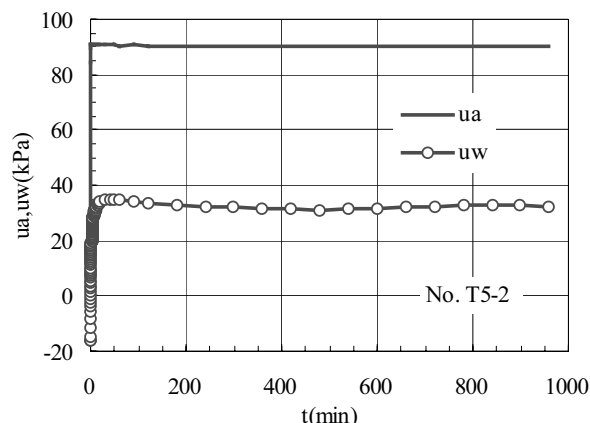


図 3. 供試体の初期サクシヨンの測定例

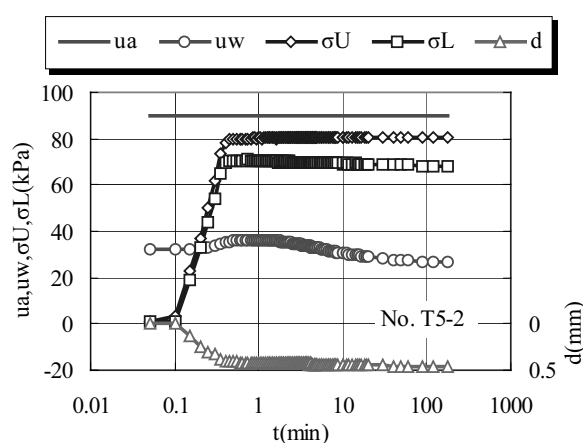


図 4.  $\sigma=80\text{kPa}$  を作用させたときの  $u_a$ 、 $u_w$ 、 $\sigma_U$ 、 $\sigma_L$  および  $d$  の時間的変化

側垂直応力  $\sigma_L$  は作用させた垂直応力 ( $\sigma_U$ ) の変化と同時に変化しているが低い値で収束している。これは圧密によって供試体が圧縮し、供試体周面に上向きの摩擦力が働いたためである。この周面摩擦の影響は、後述するように、せん断強度を評価する際にも問題を複雑にする要因になる。

#### (2) せん断時の挙動

せん断過程での  $u_a$ 、 $u_w$ 、 $\sigma_U$ 、 $\sigma_L$ 、 $d$  およびせん断応力  $\tau$  とせん断変位  $\delta$  の関係を図 5 に示した。

加圧板側の垂直応力  $\sigma_U$  は設定通り一定値 (=80kPa) に保たれていることがわかる。一方、反力板側垂直応力  $\sigma_L$  はせん断開始時にわずかに増加し、すぐに減少に転じてせん断終了まで減少傾向を続けている。

せん断の進行とともにせん断応力は増加してこの例では  $\delta=2\text{mm}$  でピークに達し、その後緩やかに減少している。鉛直変位 (ダイレタンシー量)

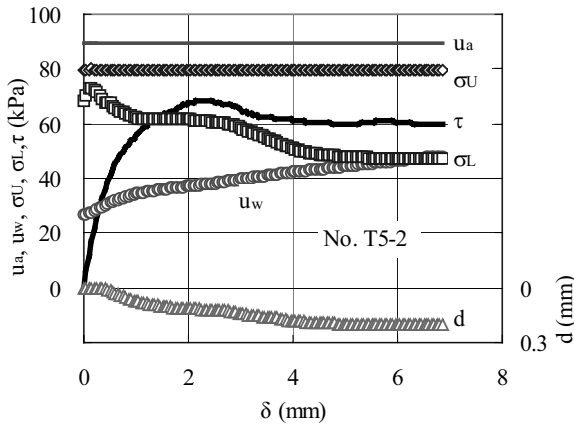


図5. せん断過程での  $u_a$ ,  $u_w$ ,  $\sigma_U$ ,  $\sigma_L$ ,  $d$  および  $\tau$  と  $\delta$  との関係

$d$  はせん断開始時に極めて微小であるが膨張しその後すぐに体積収縮に転じ、せん断終了まで体積は収縮しつづけた。この  $d$  の変化挙動は上述の  $\sigma_L$  の変化挙動と符合している。即ち、体積が膨張する時は供試体周面に下向きの摩擦力が作用しその結果  $\sigma_L$  は上昇する。体積が収縮する時は反対に上向きの周面摩擦力が作用して  $\sigma_L$  は減少する。

間隙水圧はせん断中上昇を続けている。定圧条件の試験（飽和土の排水試験に相当）を企図したがこのように供試体底面の間隙水圧が変化した。この供試体のせん断速度は 0.05mm/分であったが、速すぎた可能性もあったので、他の供試体に対してせん断速度を 0.02mm/分と遅くした。遅い速度せん断してもやはり間隙水圧は変化した（間隙水圧が変化しなかった場合もある）。間隙水圧を測定しているので、間隙水圧の応答に対処できる速度であれば問題がないと考えられる。この問題は飽和土の場合にも起こりうることで今後検討する必要がある。

### 4.3 せん断強度特性

#### (1) せん断強度と垂直応力の関係

過去の研究[2][3]から明らかになったせん断強度に関する基本的な特性をまず述べる。

この試料は圧密降伏応力  $p_c$  以上の垂直応力の下ではせん断強度は Mohr-Coulomb の破壊基準で説明できるが、 $p_c$  より低い垂直応力の下では複雑なせん断強度特性を示す（図6参照）。

飽和土の場合、 $p_c$  以下の垂直応力の下での強度は過圧密の履歴を考慮することによって説明できる。この試料は、先に示したように、 $p_c$  以下では不飽和であり、また、人工的な過圧密の履歴を与

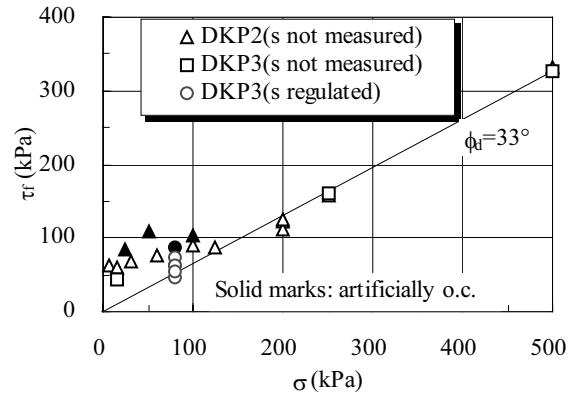


図6. DKP2 および 3 の基本的強度特性[1][2]

えない限り、圧密の履歴が明らかでない。

不飽和土のせん断強度は正味の垂直応力  $\sigma_{net}$  ( $=\sigma-u_a$ ) とサクシオンの関数である、というのが定説である。そこで、 $p_c$  より十分小さい  $\sigma=80\text{kPa}$  のもとで供試体のサクシオンを制御してせん断強さに対するサクシオンの影響について調べた（図の○DKP3(s regulated)）。図では同じ垂直応力に対して異なったせん断強さがあるように見えるがサクシオンが異なっているためである。サクシオンと垂直応力の関係については詳細を後述する。

次に、サクシオン測定可能な一面せん断試験によって得られた結果に基づいてせん断強度と垂直応力の関係をより詳細に検討する。図7にせん断中のせん断応力  $\tau$  と二種類の垂直応力 ( $\sigma_U$ ,  $\sigma_L$ ) の関係を示す。原点を通る直線は、 $p_c$  より十分大きい垂直応力で試験した時のせん断強度線と図6の直線と同じである。

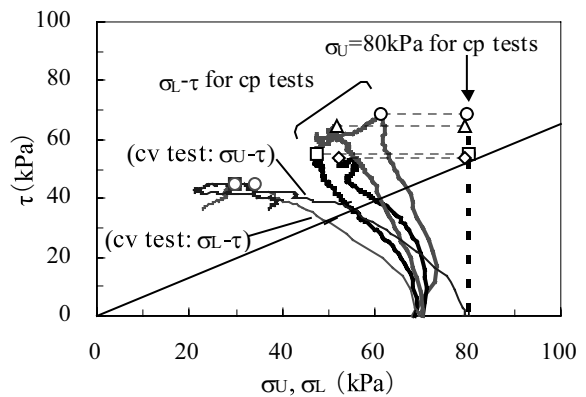


図7. せん断中のせん断応力  $\tau$  と垂直応力 ( $\sigma_U$ ,  $\sigma_L$ ) の関係

まず、定圧せん断試験 (cp test) の結果について考察する。上に述べたように $\sigma_L$ はせん断中に減少する。せん断強さ ( $\tau$  のピーク値:  $\tau_f$ ) を $\sigma_U$  に対してプロットすると同じ垂直応力に対してせん断強さが異なり、強度がばらつくという認識に至る。一方、 $\tau_f$ を $\sigma_L$ に対してプロットすると、やはりばらつきは見られるものの、 $\sigma_L$ が大きいほど $\tau_f$ が大きいという相関性が見られる。このばらつきは後述するようにサクシジョンの隠れた効果に起因する。

次に定体積せん断試験 (cv test) の結果を見る。この試験では $\sigma_U$ も $\sigma_L$ も変化している。ピーク強度  $\tau_f$  と $\sigma_L$  の関係は先の定圧試験で見られた傾向と矛盾していない。

## (2) せん断強度とサクシジョンの関係

図8はせん断中のせん断応力  $\tau$  とサクシジョンの関係である。○はせん断開始時のサクシジョン  $s_c$  と  $\tau_f$  の関係を表している。また、過去の研究で得られたせん断強さと圧密終了時のサクシジョン ( $s_c$ ) の関係も併せて示している (図の△)。

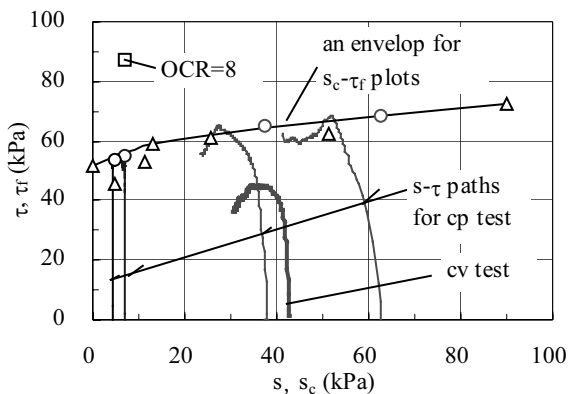


図8. せん断中のサクシジョン  $s$  とせん断応力  $\tau$  との関係およびせん断開始時のサクシジョン  $s_c$  と  $\tau_f$  の関係

せん断中にサクシジョンは変化した場合とほとんど変化しなかった場合があった。せん断開始時のサクシジョンが大きいものはせん断中のサクシジョンが大きく減少する傾向がある。せん断応力のピーク  $\tau_f$  と  $s_c$  の関係を連ねて一つの包絡線を引くと図のようになった。定体積試験を除いて、この包絡線は過去の研究の結果 (一部を除いて) をも説明し得ることがわかる。また、せん断強さと垂直応力の関係 (図6) で指摘したばらつきが解消されていることに注意したい。

なお、包絡線は直線ではなく、非線形性を有して

いる。この種の非線形性は多くの研究者によって指摘されていて (例えば[6], [7]), Fredlund らの提案式[8]の適用性の限界を示していると言える。

## 5. 結論

一次元圧密におけるサクシジョンの挙動として次の知見を得た:

圧密降伏応力  $p_c$  より小さい圧密荷重  $p$  を載荷すると載荷直後に底面間隙水圧  $u_w$  は上昇するが時間とともに低下し、ある大きさのサクシジョンは保たれる。一方、 $p_c$  より大きい  $p$  を載荷すると載荷直後に  $u_w$  は間隙空気圧  $u_a$  よりも大きくなり、時間とともに低下して  $u_a$  に等しくなる、即ち、サクシジョンは消滅する。サクシジョンが消滅するような大きな  $p$  を載荷すると供試体は飽和状態に至る。

サクシジョン測定可能な一面せん断試験の結果に基づいて次の知見を得た。

同じ垂直応力 (加圧板側垂直応力) でせん断した場合、せん断強さは供試体によって異なるが、反力板側垂直応力が大きい場合ほどせん断強さが大きいという相関性が見られた。せん断強さとせん断開始時のサクシジョンとの間には極めて高い相関性がある。その関係は Fredlund らの提案式[8]のように線形ではない。

## 謝辞

不撓乱試料の採取に際して西谷技術コンサルタント(株)新仁修氏にお世話になった。試験装置の開発に本学技術職員岩成敬介氏の助力を得た。また、本研究の一部は科学研究費補助金 (No.1365043 研究代表者清水正喜) による成果に基づいている。記して謝意を表す。

なお、本論文の主要部分は第二著者の本学大学院工学研究科博士前期課程在学中に行った研究の成果であることを付記する。

## 参考文献

- [1] Shimizu, M. (1998) "Geotechnical features of volcanic-ash soils in Japan." Special Report B, Proc. Int. Sym. on Problematic Soils, IS-Tohoku'98, Japanese Geotechnical Society, 2, 907-927.
- [2] Shimizu, M. (2004) "Shear strength of undisturbed samples of weathered pumice soils." Advances in Geotechnical Engineering: the Skempton Conference, ICE, UK, 1, 618-629.
- [3] Shimizu, M., Yamamoto, D. and Tahara, Y.

- (2006) "Suction and its effects on shear strength of unsaturated undisturbed samples of a volcanic pumiceous soil", *Proc. of the 4th Int. Conf. on Unsaturated Soil*, UNSAT2006, ASCE, Vol.1, pp.1235-1246.
- [4] 清水正喜・山本大輔(2004) 大山倉吉軽石不攪乱試料の物理的性質：測定方法の影響，鳥取大学工学部研究報告，第 35 号，pp.31-34.
- [5] Shimizu, M. and Nambu, K. (2003) "One-dimensional consolidation of unsaturated soils and problems in experiments." *Proc. of the 2nd Asian Conference on Unsaturated Soils (UNSAT-ASIA 2003)*, Japanese Society of Geotechnical Engineering, 117-122.
- [6] Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. (1996) "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction." *Can. Geotech. J.* 33, 379-392.
- [7] Gan, J. K. M., Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1988) "Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test." *Can. Geotech. J.* 25, 500-510.
- [8] Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. (1978) "The shear strength of unsaturated soils." *Can. Geotech. J.* 15, 313-321.

(受理 平成 18 年 12 月 8 日)