

引張り応力を考慮した不飽和土の強度特性

地盤工学研究室 大淵 貴
指導教官 豊田 浩史

1. 研究目的

我が国のように多雨多湿の国では、土が不飽和状態で存在する事が珍しく、盛土あるいは舗装版下の路床・路盤や高盛土など、施工時には不飽和な状態の土も、時と共に次第に飽和状態に近づく傾向にある。したがって、我が国では実用的には多少不飽和な状態の強度、また多少不飽和な土が飽和された後の強度特性を知る必要がある程度で、最適含水比より乾燥側で締め固められたような飽和度の低い土というのは実際面では少ないであろう。しかしながら、飽和度が100%よりわずかに低下する、あるいは土中の間隙に気泡が生じて間隙水圧が負となっている状態まで考えると不飽和土の範囲は拡大され、多くの問題が不飽和土の問題となる。例を挙げると、急斜面などの表層は不飽和化しており、切土工事等に伴う応力解放 ($\sigma_3 = 0$) により破壊を引き起こすことが考えられる。

現在、不飽和土における強度特性として破壊規準が提唱されている。しかし、不飽和土は地表付近の低拘束圧領域で多く見られるが、破壊規準の低拘束圧領域での適用は確認されていない。

そこで本研究では、中空ねじりせん断試験機の特徴を活かし、三軸試験機では再現できない引張り応力状態まで至るせん断試験を行い、低拘束圧領域での破壊規準の適用について検討する。

2. 試験概要

2.1 試験機

中空ねじりせん断試験機の概要を Fig.1 に示す。各データはコンピューターにより自動計測され、応力とひずみの自動制御を行う。サクシオンは加圧板法で制御し、供試体上部より空気圧をかけた。排水は供試体下部のセラミックディスク (AEV=450kPa) より行った。

2.2 供試体

実験試料は、新潟県柏崎市米山付近より採取した粘性土 (ラテライト系) を用いた。以下、この粘土を米山粘性土と呼ぶ。試験には、採取した米山粘性土を気乾状態にした後、840 μm ふるいを通過したものを使用

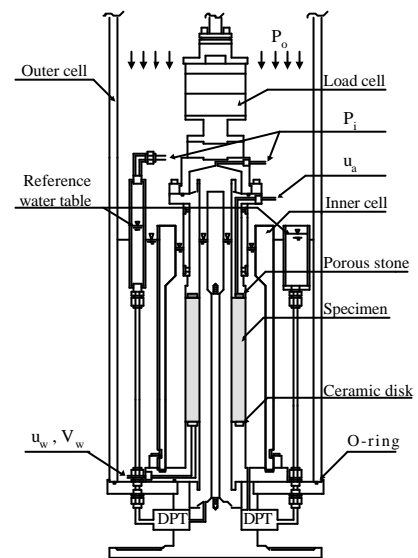


Fig.1 中空ねじりせん断試験機

した。米山粘性土の物理的性質を Table.1 に示す。実験にはスラリー状の試料を使用し、試料圧密器を使って45kPa で予圧密 (K_0 状態) を行い、トリミング法により高さ $h = 16\text{cm}$ 、外径 $d_o = 8\text{cm}$ 、内径 $d_i = 5\text{cm}$ の供試体を切り出した。供試体の飽和には二重負圧法を用いた。

Table.1 米山粘性土の物理的性質

s (%)	WL (%)	WP (%)	IP	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)
2.76	52.4	29.9	22.5	23.6	57	19.4

2.3 試験手順および試験条件

まず、飽和状態で切り出した供試体を試験機に設置し、平均有効主応力 $p' = \text{const}$ で等方圧密を行う。次にサクシオン、基底応力一定で加圧板法により供試体を不飽和化させる。その後、サクシオン、基底応力一定でせん断試験を行った。

圧密時間および脱水時間は 3t 法で決定した。せん断時は最大主応力方向 $= 45^\circ$ 、中間主応力係数 $b=0.5$ で、せん断ひずみ速度一定で試験を行った。

3. 試験結果

3.1 サクシオンの影響

試験結果を p_{net} ごとにまとめ、サクシオンによる影響を考察する。

$p_{\text{net}}=100\text{kPa}$ 、 $s=0$ (飽和土), 100, 200kPa の試験結果より、偏差応力 - せん断ひずみ ($q - \epsilon_s$) 関係を Fig.2-(a) に、体積ひずみ - せん断ひずみ ($\epsilon_v - \epsilon_s$) 関係を Fig.2-(b) に示す。

$q - \epsilon_s$ のグラフを見ると、サクシオンを受けた供試体の最初の立ち上がりが、 $s=0\text{kPa}$ の供試体(飽和土)と比べてきわめて急であるのがわかる。サクシオンの大きさによって立ち上がりの傾きが変化している。そして ϵ_s が比較的小さい領域で破壊に至っている。破壊に至るまでの ϵ_s の値はサクシオンが大きくなるに連れて逆に小さくなっている。これより、供試体の剛性が大きくなっているのがわかる。

供試体が破壊した後には、 q は急激に低下する。この傾向は飽和土とは明らかに違う。飽和土は、せん断面が入った後も、 q はほとんど低下しない。不飽和化

した供試体は、供試体内の水分の減少によるサクシオンの増大に伴い脆性的な性質へと変化して、 q が急激に減少するといった現象が現れたといえる。 $\epsilon_v - \epsilon_s$ 関係を見てもわかるとおり、サクシオンの大きさが、せん断開始から破壊までの体積変化量に影響を与えている。サクシオンが大きくなるにつれ、供試体の体積収縮量が減少し、破壊後には体積が膨張しやすいという傾向が見られる。

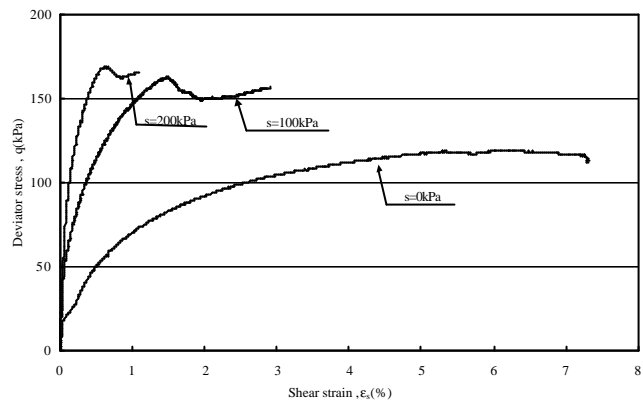


Fig. 2-(a) $q - \epsilon_s$ 関係 ($p_{\text{net}} = 100\text{kPa}$)

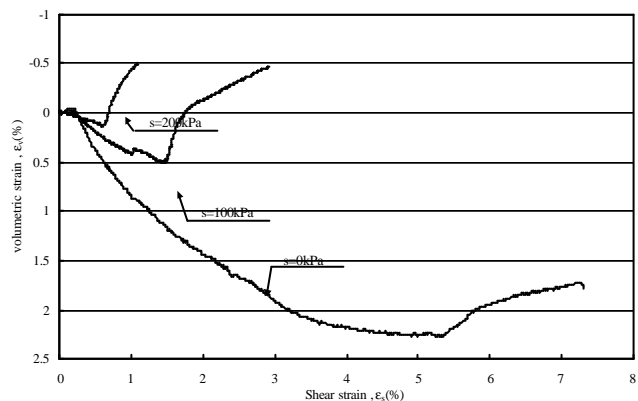


Fig. 2-(b) $\epsilon_v - \epsilon_s$ 関係 ($p_{\text{net}} = 100\text{kPa}$)

3.2 基底応力の影響

試験結果をサクションごとにまとめ、 p_{net} による影響を考察する。

$s=100\text{kPa}$ 、 $p_{net}=25\text{kPa} \sim 300\text{kPa}$ の試験結果より、偏差応力 - せん断ひずみ ($q - \epsilon_s$) 関係を Fig.3-(a)に、体積ひずみ - せん断ひずみ ($\epsilon_v - \epsilon_s$) 関係を Fig.3-(b)に示す。

$q - \epsilon_s$ 関係を見ると、 p_{net} が大きくなるにともない、 q もまた大きくなっている。しかし、その立ち上がり方はほとんど変わらず、傾きもほぼ同じである。強度の増加率は一定ではなく、低拘束圧領域と高拘束圧領域で異なる。

供試体破壊時のせん断ひずみ ϵ_s の大きさは飽和土のそれとは大きく異なっている。飽和土の供試体破壊時の ϵ_s は p' によらずほぼ同じであるが、不飽和土では、 p_{net} が小さいほど供試体破壊時の ϵ_s は小さい。

また、 p_{net} が小さい領域で、体積収縮量が少なく、破壊後は膨張しやすいという不飽和土の体積変化特性がよく現れているのがわかる。

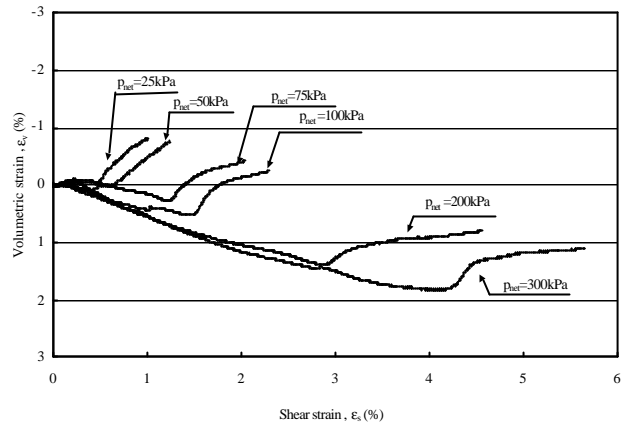


Fig. 3(a) $q - \epsilon_s$ 関係 ($s=100\text{kPa}$)

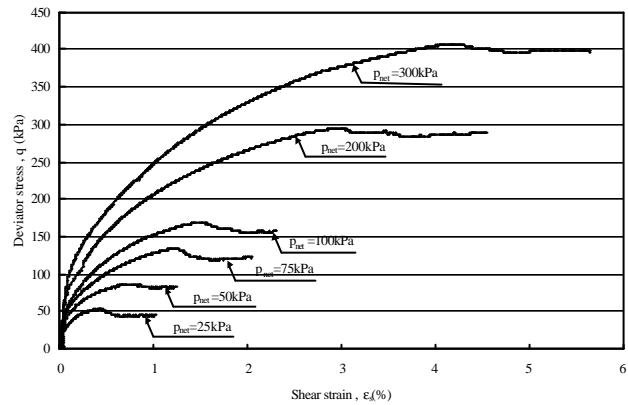


Fig. 3(b) $\epsilon_v - \epsilon_s$ 関係 ($s=100\text{kPa}$)

3.3 引張り応力の影響

比較的拘束圧が低い範囲 ($p_{net}=25 \sim 100\text{kPa}$) での試験結果 (Fig.4 参照) を見ると、 q が従来の不飽和土の破壊規準¹²⁾ による破壊線を下回っているのがわかる。この原因としては、せん断試験中に発生する引張り応力の影響が考えられる。

Fig.5 は $s=100\text{kPa}$ 、 $p_{net}=75\text{kPa}$ の条件でせん断試験を行ったときの主応力 - せん断ひずみ ($\sigma - \epsilon_s$) 関係である。せん断時の中間主応力係数は $b=0.5$ であるため、せん断開始後 σ_1 は増加し、 σ_2 は一定、 σ_3 は減少するように制御し、せん断していくことになる。グラフを見るとわかるように σ_3 がマイナス(引張り)に達したのち、供試体は破壊している。

$p_{net}=50, 75, 100\text{kPa}$ の試験についても同様に σ_3 がマイナス、あるいはゼロに近い値に達し、破壊

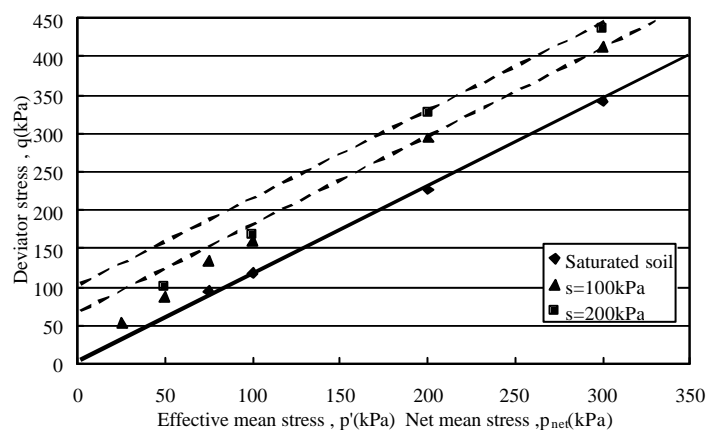


Fig. 4 不飽和土の破壊規準

している。つまり、供試体はせん断破壊ではなく、引張り破壊する事により従来の破壊規準で予測された強度を下回っていることを確認することが出来た。

これらの傾向より、不飽和土は飽和土と同様に引張り強度が低いことが確認できる。

3.4 新たな破壊規準

$b=0.5$ の応力条件下において、低拘束圧領域では、供試体は引張り破壊し、強度が低下していることが確認された。また、 $b=0.5, \sigma_3=0$ の条件をもとに $q = \sqrt{3}p_{net}$ の式を得た。この式をもとに描いた破壊線が、試験結果とよく一致することが確認された。

そこで、飽和土の破壊線を平行移動したものに、低拘束圧領域での強度低下を考慮した破壊線を新たに付け加えて、応力条件 $b=0.5$ における不飽和土の破壊規準とする。

$s=100\text{kPa}, 200\text{kPa}$ のデータに新たな破壊規準を用いて破壊線を描いたものを Fig. 5 に示す。

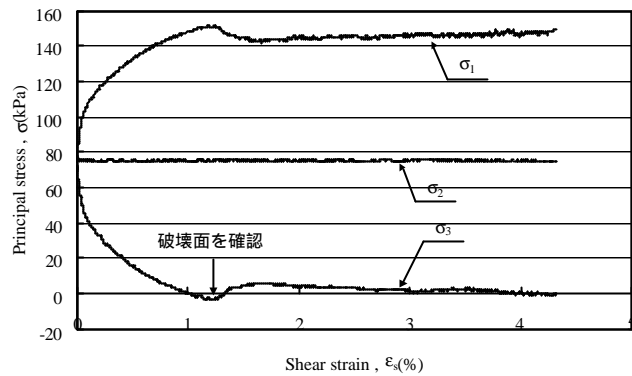


Fig. 5 $s - \epsilon_s$ 関係 ($s = 75\text{kPa}, p_{net} = 100\text{kPa}$)

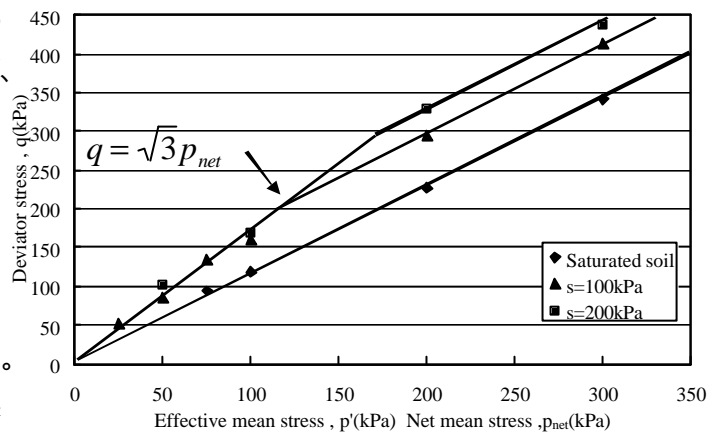


Fig. 6 不飽和土の新たな破壊規準

4. 結論

q は、基底応力およびサクシジョンの増加に伴い大きくなる。つまり q の増加は、間隙比 e の減少や拘束圧、土粒子同士のメニスカスにより生じる力が影響している。

体積ひずみ ϵ_v の挙動はサクシジョンに大きく影響される。サクシジョンが大きいほど降伏後に膨張しやすくなる。

供試体の不飽和化が進むにつれて、剛性が大きくなり、脆性的な性質が現れてくる。

高拘束圧領域での破壊規準の適用を確認した。

低拘束圧領域では、 σ_3 がゼロ付近に達して破壊がおきていることを確認した。

低拘束圧領域での引張り応力発生による強度低下を考慮し、新たな破壊規準を求めることができた。

参考文献

- 1) 軽部大蔵, 本田道識, 加藤正司, 鶴ヶ崎和博(1997): 不飽和土のせん断挙動と間隙水の状態の関係について, 土木学会論文集, No.575, -40, pp.49-58
- 2) 松本住幸(1997): 不飽和粘性土のせん断特性に与える影響, 長岡技術科学大学修士論文