

引張り応力を考慮した不飽和土の破壊規準

地盤工学研究室 安齋 勝
指導教官 豊田 浩史

1. 研究目的

現在、不飽和土の強度特性として、一般に、三軸試験や一面せん断試験の結果による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いが、破壊規準の低拘束圧領域での適用は確認されていない。また、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 ($\sigma_3 \leq 0$) により破壊を引き起こすことが考えられる。

そこで、前年度まで、中空ねじりせん断試験機を用いて、三軸試験機では再現できない応力状態でせん断試験を行い、低拘束圧領域での破壊規準の適用について検討してきた。その結果、低拘束圧領域での引張り応力発生を考慮して、**Fig.1** に示すような新たな破壊規準を求めることができた。

本年度の研究では、中間主応力係数 b を変化させ、前年度提案した破壊規準に適用性があるかどうかを検討する。

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.2** 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、 $840\mu\text{m}$ ふるいを通過したものを使用した。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。

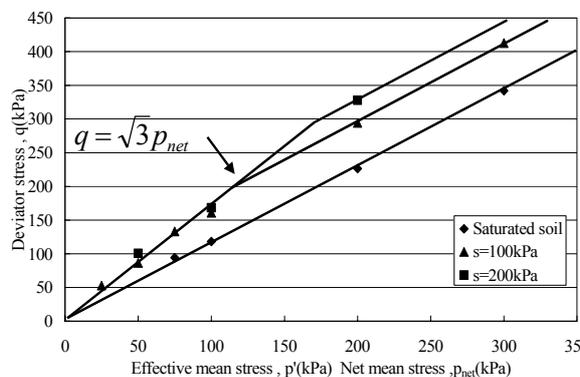


Fig.1 不飽和土の破壊規準

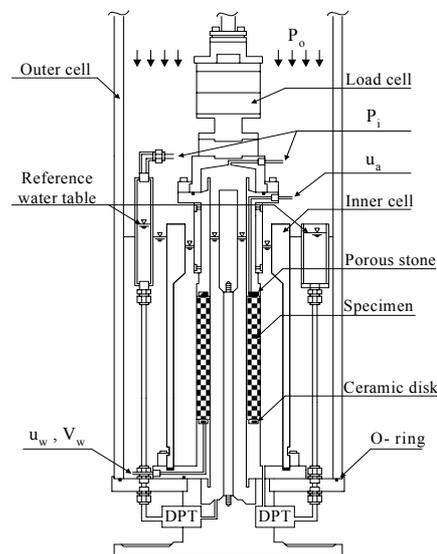


Fig.2 中空ねじりせん断試験機

Table.1 米山粘性土の物理的性質

ρ_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。次にサクション、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、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 $\alpha = 45^\circ$ 、中間主応力係数 $b = 0.25, 0.75$ の 2 ケースで、せん断ひずみ速度一定で試験を行った。

3. 試験結果

3.1 中間主応力係数 $b = 0.25, 0.75$ の力学特性

せん断時の試験条件が、サクション $s = 200 \text{ kPa}$ 、最大主応力方向 $\alpha = 45^\circ$ 、中間主応力係数 $b = 0.25, 0.75$ における力学特性について考察する。

$s = 200 \text{ kPa}$ 、 $b = 0.25$ 、 $p_{\text{net}} = 50, 100, 200, 300 \text{ kPa}$ の試験結果を Fig.3-(a)、Fig.3-(b)に示す。Fig.3-(a)は、偏差応力-せん断ひずみ($q-\epsilon_s$)関係、Fig.3-(b)は、体積ひずみ-せん断ひずみ($\epsilon_v-\epsilon_s$)関係を示す。

$q-\epsilon_s$ 関係 (Fig.3-(a)) 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。また、飽和粘性土の供試体破壊時の ϵ_s は、 p' の大小に関係なく、ほぼ同じ傾向を示すが、不飽和粘性土は、 p_{net} が小さいほど、供試体破壊時の ϵ_s は小さい。

$\epsilon_v-\epsilon_s$ 関係 (Fig.3-(b)) を見ると、供試体破壊時のせん断ひずみ ϵ_s の傾向は、飽和粘性土の傾向とは大きく異なる。 p_{net} が小さい領域では、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不飽和土の体積変化特性が見られる。

中間主応力係数 $b = 0.75$ においても、 $b = 0.25$ と同じ条件でせん断試験を行い、Fig.4-(a)、Fig.4-(b)に示すような結果が得られた。 $q-\epsilon_s$ 関係、 $\epsilon_v-\epsilon_s$ 関係とも、 $b = 0.25$ と同様の傾向が見られる。

3.2 引張り応力の影響

中間主応力係数 $b = 0.25, 0.75$ とともに、比較的拘束圧が低い範囲 ($p_{\text{net}} = 50 \sim 100 \text{ kPa}$) での試験結果は、 q が従来の不飽和土の破壊規準¹⁾²⁾による破壊線を下回って

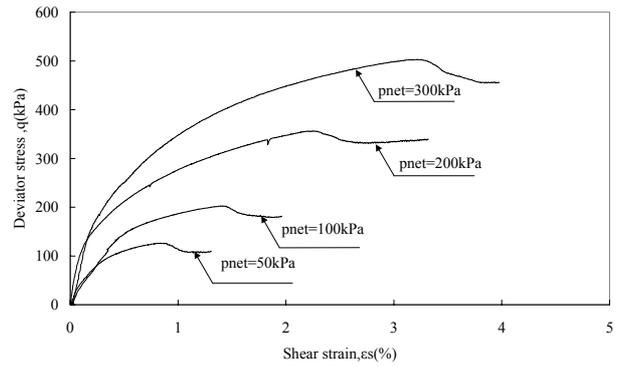


Fig.3-(a) $q-\epsilon_s$ 関係 ($b=0.25$)

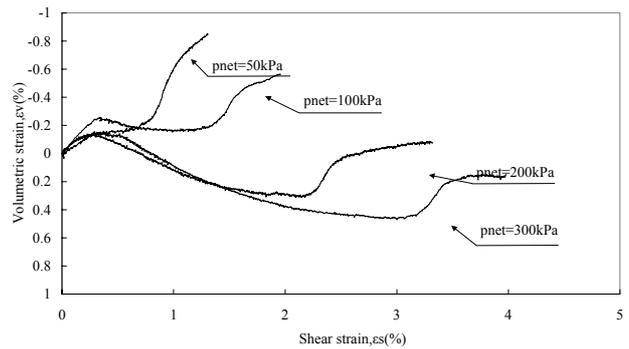


Fig.3-(b) $\epsilon_v-\epsilon_s$ 関係 ($b=0.25$)

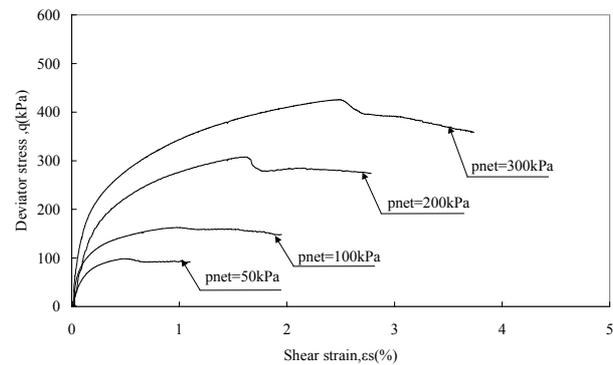


Fig.4-(a) $q-\epsilon_s$ 関係 ($b=0.75$)

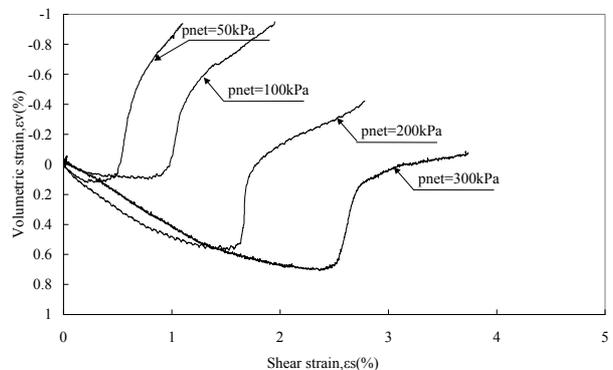


Fig.4-(b) $\epsilon_v-\epsilon_s$ 関係 ($b=0.75$)

いる。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 $b=0.25, s=100\text{kPa}, p_{\text{net}}=100\text{kPa}$ 、**Fig.6** は $b=0.75, s=100\text{kPa}, p_{\text{net}}=100\text{kPa}$ の条件でせん断試験を行ったときの基底主応力-せん断ひずみ ($\sigma_{\text{net}}-\varepsilon_s$) 関係である。せん断時の中間主応力係数は $b=0.25, 0.75$ であるため、 $b=0.25$ においては、せん断開始後 $\sigma_1\text{-ua}$ は増加、 $\sigma_2\text{-ua}$ 、 $\sigma_3\text{-ua}$ は減少、また $b=0.75$ においては、せん断開始後 $\sigma_1\text{-ua}$ 、 $\sigma_2\text{-ua}$ は増加、 $\sigma_3\text{-ua}$ は減少するように制御し、せん断していくことになる。グラフを見てわかるように、 $\sigma_3\text{-ua}$ がゼロに近い値に達した後、供試体は破壊している。

$p_{\text{net}}=50\text{kPa}$ の試験については、 $\sigma_3\text{-ua}$ が若干マイナスになるもののゼロに近い値で、破壊している。つまり、供試体はせん断破壊ではなく、引張り破壊すること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 引張り応力を考慮した破壊規準

・ q - p_{net} 平面で表した破壊規準

$b=0.25, 0.75$ とともに、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。そこで、 $b=0.25, \sigma_3=0$ および $b=0.75, \sigma_3=0$ の条件をもとに q の式を展開することで、低拘束圧領域における破壊線を、 $b=0.25$ で $q = \frac{3\sqrt{13}}{5} p_{\text{net}}$ の式、 $b=0.75$ で $q = \frac{3\sqrt{13}}{7} p_{\text{net}}$ の式で表した。この式をもとに描いた破壊線は、試験結果とよく一致することが確認された。

その結果、**Fig.7**、**Fig.8** に示すように、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、応力条件 $b=0.25$ および $b=0.75$ における不飽和土の破壊規準とする。

・ π 面上で表した破壊規準

Fig.9、**Fig.10** は、 π 平面上に Mohr-Coulomb の破壊規準と試験結果を比較したものである。**Fig.10**、**Fig.11** とともに、Mohr-Coulomb の破壊規準は、内部

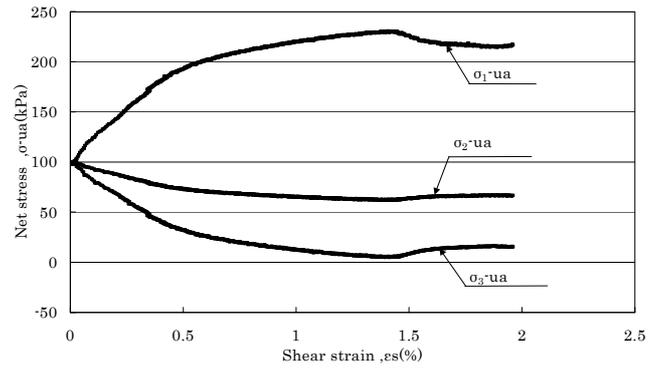


Fig.5 $\varepsilon_s-\sigma$ 関係

($s=200\text{kPa}, p_{\text{net}}=100\text{kPa}, b=0.25$)

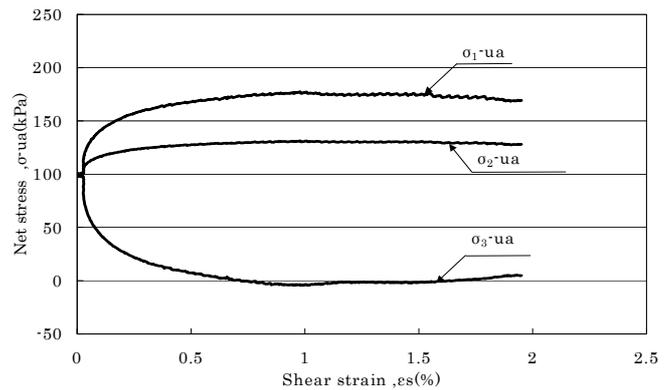


Fig.6 $\varepsilon_s-\sigma$ 関係

($s=200\text{kPa}, p_{\text{net}}=100\text{kPa}, b=0.75$)

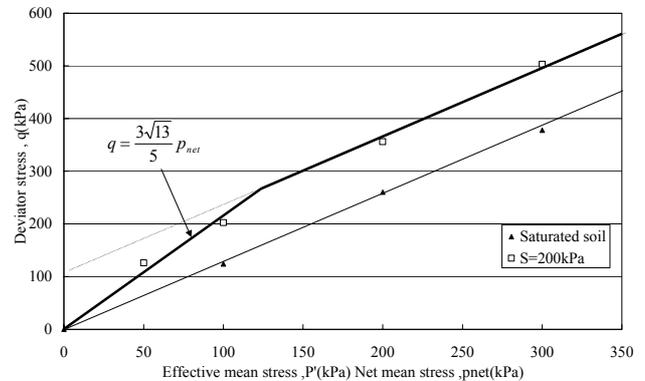


Fig.7 引張り応力を考慮した破壊規準($b=0.25$)

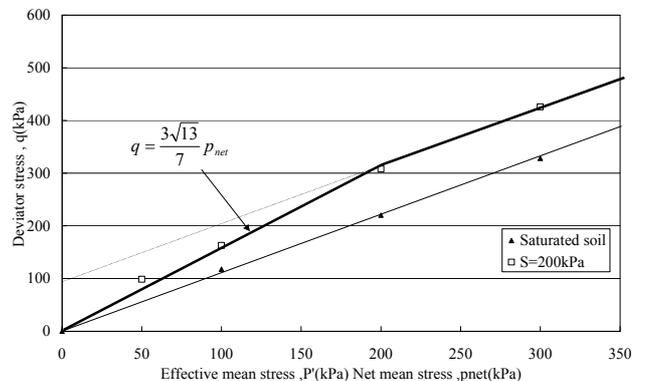


Fig.8 引張り応力を考慮した破壊規準($b=0.75$)

摩擦角 $\phi = \text{const.}$ を示す直線となる。

Fig.10 は、高拘束圧領域における飽和土、不飽和土の Mohr-Coulomb の破壊規準、高拘束圧領域における飽和土、不飽和土の試験結果を π 平面上に示している。高拘束圧領域における内部摩擦角 ϕ は、飽和土、不飽和土ともに、中間主応力係数 $b=0$ のときの $\phi=36^\circ$ を用いた。

その結果、高拘束圧領域における Mohr-Coulomb の破壊規準は、飽和土では、ひずんだ六角形で表され、不飽和土では、 ϕ が飽和土と同じ値であるので、飽和土の破壊規準をサクションによる見かけの粘着力の分だけ大きくした形で表される。試験結果と比較すると、Mohr-Coulomb の破壊規準は、 ϕ の値が一定で表されるのに対し、試験では b の変化により、 ϕ の値も変化するので、多少の差が見られる。

Fig.11 は、低拘束圧領域における飽和土、不飽和土の Mohr-Coulomb の破壊規準、低拘束圧領域における飽和土、不飽和土の試験結果を π 平面上に示している。低拘束圧領域における内部摩擦角 ϕ は、飽和土では中間主応力係数 $b=0$ のときの $\phi=36^\circ$ を用いた。しかし、不飽和土では、引張り応力を考慮した Mohr-Coulomb の破壊規準を表すため $\phi=90^\circ$ を用いた。

その結果、低拘束圧領域における Mohr-Coulomb の破壊規準は、飽和土では、高拘束圧領域と ϕ は変わらないので、高拘束圧領域と同じ形で表され、不飽和土では、 $\phi=90^\circ$ であるので、三角形で表される。

試験結果と比較すると、飽和土では高拘束圧領域と同様、 b の変化により、 ϕ の値が若干変化している。しかし、不飽和土の試験結果は、 $\phi=90^\circ$ の Mohr-Coulomb の破壊規準とほぼ同じ値を示している。すなわち、低拘束圧領域においては、引張り破壊に近い破壊をすることがいえる。

3.5 斜面崩壊解析事例

引張り応力を考慮した破壊規準を実際問題で考えると、斜面崩壊の問題に適用できる。そこで、有限差分法による数値解析を行った。解析に用いた構成則は、引張り応力を考慮したモールクーロン型弾完全塑性モデルである。

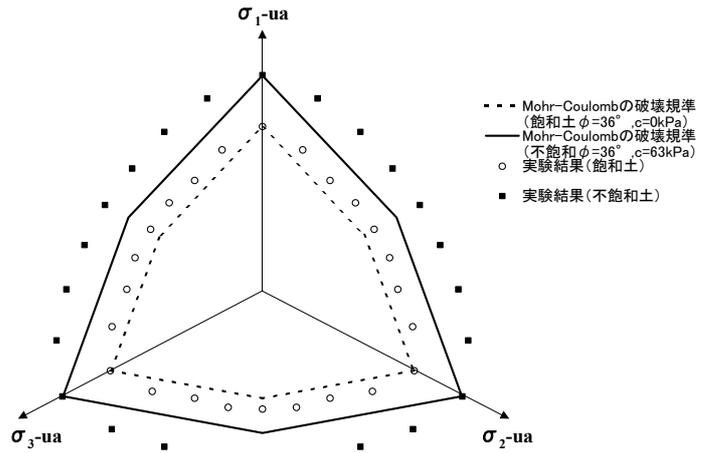


Fig.10 π 面上で表した破壊規準
(せん断破壊 ; $p_{\text{net}}=100\text{kPa}$)

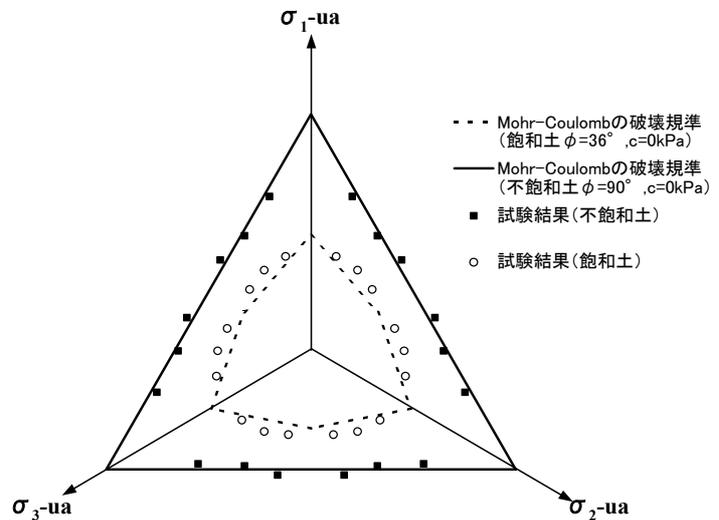


Fig.11 π 面上で表した破壊規準
(引張り破壊 ; $p_{\text{net}}=200\text{kPa}$)

・解析パラメータ

本解析で用いた、破壊時の挙動を支配する主なパラメータは、内部摩擦角、粘着力、ダイレタンシー角である。

(1)内部摩擦角 ϕ

Fig.12 は、中間主応力係数 b の変化における内部摩擦角 ϕ の変化を $b=0$ における $\phi/\phi_{comp.}$ を 1 として示す。ここで、 $\phi_{comp.}$ は、 $b=0$ における ϕ である。解析では、逐次中間主応力係数を計算し、内部摩擦角 ϕ は、このグラフの近似直線の式である $\phi/\phi_{comp.}=0.15b+1.0$ を用いて変化させた。

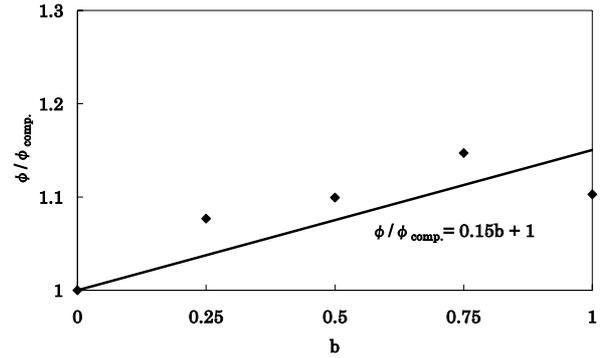


Fig.12 $b-\phi/\phi_{comp.}$ 関係

(2)粘着力 c

Fig.13 は、中間主応力係数 b の変化における粘着力 c の変化を $b=0$ における $c/c_{comp.}$ を 1 として示す。ここで、 $c_{comp.}$ は、 $b=0$ における c である。解析では、粘着力 c も内部摩擦角と同様、このグラフの近似直線の式である $c/c_{comp.}=0.31b+1.0$ を用いて計算した。

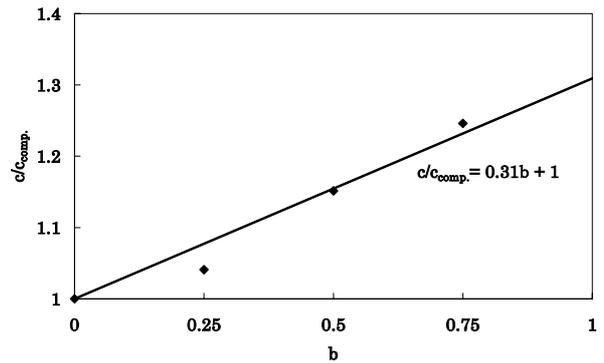


Fig.13 $b-c/c_{comp.}$ 関係

(3)ダイレタンシー角 ϕ_d

Fig.14 は、せん断試験時の体積ひずみ-せん断ひずみ ($\epsilon_v - \epsilon_s$) 関係を示す。解析におけるダイレタンシー角 ϕ_d は、引張り破壊がおきる低拘束圧領域においては、破壊後の膨張が大きく、Fig.14 に示す角度が大きいため、関連流れ則を用い、 $\phi_d = \phi$ とした。また、せん断破壊がおきる高拘束圧領域においては、破壊後の膨張が小さく、Fig.14 に示す角度が小さいため、非関連流れ則を用い、ここでは $\phi_d = 5^\circ$ とした。

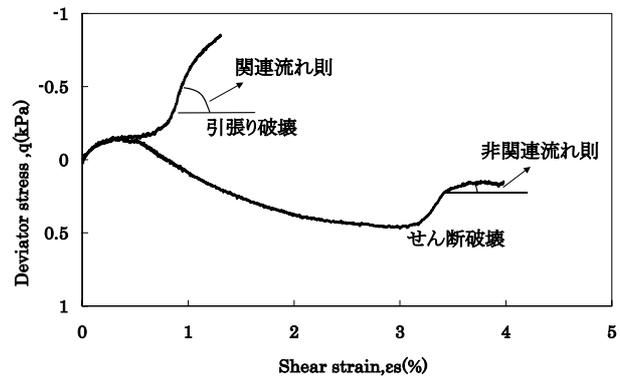


Fig.14 $\epsilon_v - \epsilon_s$ 関係

・解析方法

降雨により、地盤のサクシオンは減少し、雨が降らない時期が続くとサクシオンは増加する。また、サクシオンの減少により、見かけの粘着力も減少する。これらのことから、降雨によるサクシオンの減少は粘着力の低下によって表現できる。そこで本解析では、粘着力 c を $c=150\text{kPa}$ から小さくしていき、従来の破壊規準と今回提案した破壊規準で解析した場合の斜面崩壊時の粘着力や破壊面(せん断ひずみの局所化)を調べた。本解析に用いたメッシュ図を Fig.15 に示す。図からわかるように、ひずみの局所化を見るため、メッシュは非常に細かく設定した。

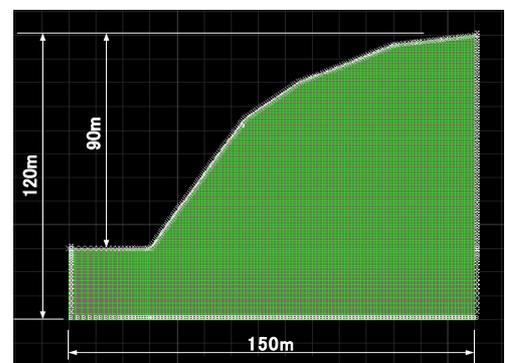


Fig.15 メッシュ図

・解析結果

従来の破壊規準(a)および今回提案した引張り破壊による強度低下を考慮した破壊規準(b)での解析結果を解析 step ごとに Fig.16、Fig.17 に示す。Fig.16 においては、従来の破壊規準を用いた解析では、ひずみは法尻から法肩に進行しているのに対し、今回提案した破壊規準を用いた解析では、ひずみは、法尻からの進行に加え、法肩にテンションクラックと思われるひずみが発生している。Fig.17 で、破壊面をみると、従来の破壊規準を用いた解析では、法尻からのひずみが法肩に進行し破壊面を形成しているのに対し、今回提案した破壊規準を用いた解析では、法尻からのひずみと法肩からのテンションクラックのひずみがつながり破壊面を形成している。

また、従来の破壊規準を用いた解析では、粘着力 $c=44\text{kPa}$ で斜面崩壊したのに対し、今回提案した破壊規準を用いた解析では、粘着力 $c=48\text{kPa}$ で斜面崩壊した。破壊面の形に大きな違いがないため、破壊粘着力にそれほど違いが出ないことがわかる。

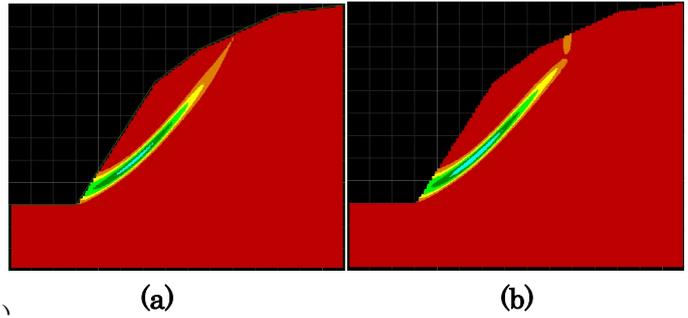


Fig.16 解析 step.1

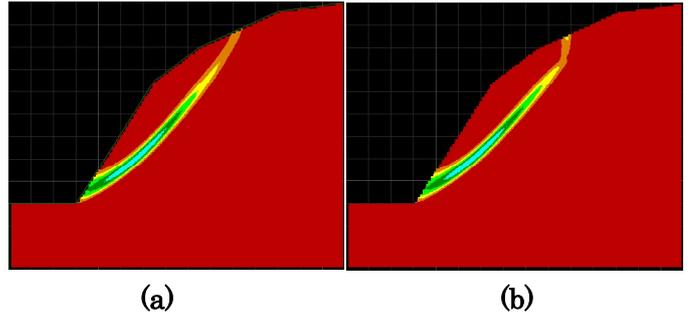


Fig.17 解析 step.2

4.結論

- ① 体積ひずみ ε_v の挙動は、飽和土においては、中間主応力係数 b 、平均有効応力 p' の大小に関係なく、ほぼ同じ傾向を示すが、不飽和粘性土においては、基底応力 p_{net} が小さいほど供試体破壊時の ε_s は小さい。
- ② 中間主応力係数 b の変化における破壊時の偏差応力 q は、 b が 1 から 0 に小さくなるにともない、 q は大きくなる。
- ③ 中間主応力係数 $b=0.25, 0.75$ とともに、低拘束圧領域では、最小主応力 σ_3 がゼロないしマイナス（引張り応力）に達すると即座に破壊することを確認した。
- ④ 中間主応力係数 $b=0.25, 0.75$ とともに、高拘束圧領域においては、既往の破壊規準、低拘束圧領域においては、引張り応力発生による強度低下を考慮し、新たな破壊規準を提案した。
- ⑤ 低拘束圧領域での引張り応力を考慮した破壊規準は、中間主応力係数 b の値に関係なく、適用性できた。
- ⑥ 今回提案した破壊規準を斜面崩壊解析に用いることにより、テンションクラックの位置、大きさ、進行過程の予測の可能性を示した。

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, III-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.