

気泡を混入した不飽和軽量土の破壊基準

矢島寿一¹・丸尾茂樹²・小川正二³

¹正会員 工修 鉄建建設(株) 技術研究所 研究員 (〒286 千葉県成田市新泉9-1)

²正会員 鉄建建設(株) 技術研究所 部長 (〒286 千葉県成田市新泉9-1)

³正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部 建設系 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

本研究では不飽和軽量土の力学的特性を解明することを目的として、不飽和軽量土が有する初期サクション力測定試験・等方圧密試験・圧密排水排気・圧密排気非排水せん断試験を行った。

その結果、不飽和軽量土そのものは初期サクション力を持たず、圧密降伏応力以下の等方応力下ではコラプス現象を生じない。このような特性を持つ不飽和軽量土の応力経路・体積変化経路および破壊基準は軽量土独自の有効応力式で整理すると決定できることが判明した。

Key Words: unsaturated light-weight soil, suction, triaxial compression test, stress pass, failure criterion

1. まえがき

近年、土と固化材を泥水状態にし、これに気泡を混入した軽量土の実施工に関する報告がなされている¹⁾。

土は通常、土粒子、水、空気の混合体であるが、わが国においては湿潤な気候のために自然地盤では水で飽和している場合が多い。しかし、ここで対象とする軽量土は、気泡を混入して土の単位体積重量を軽減しようすることを目的として用いられるので、作成される軽量土は不飽和状態であることが多い。

Bishop ら²⁾は、一般的な不飽和状態の土の工学的性質を研究するにあたり、不飽和土に作用する応力成分を全応力 (σ)・間隙空気圧 (u_a)・間隙水圧 (u_w) に分類し、不飽和土の有効応力 (σ') を式 (1) で表した。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w) \quad (1)$$

χ : Bishop の有効応力係数

その後、この Bishop の不飽和土の有効応力の定義の欠陥を補おうとする研究が Bligh³⁾ や Fredlund ら⁴⁾によって行われ、Fredlund ら⁵⁾は不飽和土に作用する応力成分をサクション力 ($S = (u_a - u_w)$)・平均有効主応力 (p') = $(\sigma_1 + \sigma_3)/3 - u_a$ ・軸差応力 ($q = (\sigma_1 - \sigma_3)$) の 3 成分と考え、これらを 3 次元 (q , p' , S) 平面で表し、不飽和土の破壊基準を式 (2) で与えている。

$$q = M_1 p' + M_2 S + M_3 \quad (2)$$

M_1 , M_2 , M_3 : p' , S に関する係数

著者らは^{6),7)}、気泡を混入した軽量土の飽和状態でのせん断特性や破壊基準について検討を行ってきたが、気

泡を混入した軽量土の不飽和状態での力学的特性についてはほとんど未解明なのが現状である。そして、気泡を混入し固化した不飽和軽量土は一般的な不飽和粘性土とは基本的な性質が異なることが予想される。

本文では、不飽和軽量土の有するサクション力や等方圧密時の圧密特性を検討し、不飽和軽量土の破壊基準を求める目的としてせん断試験結果に基づいて、せん断時の応力経路、破壊基準の検討を行い、Bishop ら²⁾および Fredlund ら⁵⁾の考え方の適用性について述べている。また、不飽和軽量土のせん断時の応力経路や体積変化経路を考慮して、不飽和軽量土独自の破壊基準について提案している。

2. 不飽和軽量土の作成方法と物性値

試験に用いた母材である米山粘性土は表-1 に示す物性を持つ粘性土であり、固化材としては普通ポルトランドセメントを使用した。

気泡を発生させるためには起泡剤を水との重量比で 5% に希釀した水と 5 kgf/cm² の圧縮空気を直径 (ϕ) が 1.0~2.0 mm のガラスビーズの詰まった管に同時に圧送しシェイビングクリーム状の気泡を発生させる方法をとった⁶⁾。

軽量土は土・水・固化材を表-2 に示す配合条件で、ソイル・ミキサーで十分混合した後、気泡混入率が軽量土供試体の体積に対する割合で 5.1% となるよう気泡を入れて再び混合して、型枠に投入し、温度 20°C の水中に 8 週間以上養生した。そのときの、軽量土の物性値は

表-1 米山粘性土の物性値

G_s	2.82
w_L (%)	64.2
w_P (%)	36.6
I_F	27.6
砂分 (%)	42.5
シルト分 (%)	29.5
粘土分 (%)	28.0

表-2 軽量土の配合条件

配合含水比 : w_{mix} (%)	75
セメント量 : C (kg/m³)	100
気泡混入率 : a (%)	5.1

表-3 不飽和軽量土の物性値

含水比 : w (%)	74.4
湿潤密度 : γ (gf/cm³)	1.39
間隙比 : e	2.49
飽和度 : S_r (%)	83.3

表-3 のとおりで、軽量土は不飽和状態にある。

3. 不飽和軽量土の基本的特性

ここでは不飽和土の工学的特性を解明するために必要とされる、不飽和軽量土そのものが持っているサクション力（初期サクション力 : S_i ）と等方圧密を受けた時の圧密特性について述べる。

(1) 軽量土の初期サクション力

三軸試験装置を用いて、軽量土を飽和したセラミックディスク ($A.E.V.$ 値 = 4.0 kgf/cm^2) 上に設置し、初期の拘束圧力 (σ_c) および供試体上部から与える空気圧 (u_a) をそれぞれ零とした状態で間隙水圧 (u_w) の経時変化を測定し、初期サクション力 ($S_i = (u_a - u_w)$) の経時変化を検討した。なお、不飽和軽量土の初期サクション力と不飽和粘性土の初期サクション力を比較するため不飽和粘性土についても同様な試験を行った。

不飽和軽量土と不飽和粘性土の初期サクション力 ($S_i = (u_a - u_w)$) の経時変化は図-1 のとおりである。すなわち、不飽和粘性土の S_i は経過時間 10 分程度で $S_i = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ 程度となり、その後はほぼ一定となる。一方、不飽和軽量土の S_i は経過時間 1000 分となつてもほとんど零である。このように不飽和軽量土で初期サクション力 (S_i) を生じないのは、不飽和粘性土と構造や水分分布が異なるためと思われる。不飽和軽量土の拡大断面をみると写真-1 に示すとおりであり、断面中に直径が $\phi=0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ の気泡の存在が確認される。この断面を模式的に示すと図-2 のようになり、気泡の

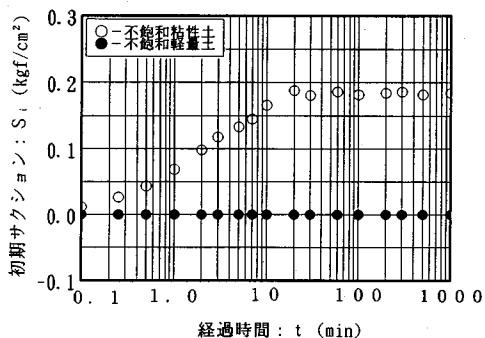


図-1 初期サクション測定試験結果

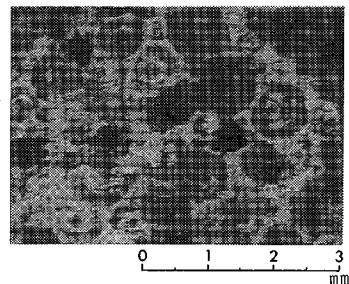


写真-1 不飽和軽量土の拡大断面写真

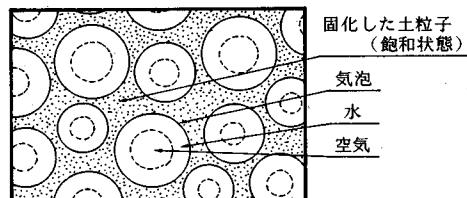


図-2 不飽和軽量土の断面模式図

中は空気と水（自由水）が存在する不飽和状態となっている。しかし、気泡間の土骨格部すなわち固化した土粒子の部分は軽量土作成時の配合含水比が液性限界の約 1.2 倍と高く、そのまま養生水槽中に放置されているために飽和状態である。したがって、各気泡は連結されておらず気泡の中の水にサクション力が存在しないために初期サクション力 (S_i) 発生の主原因である毛管現象が発生せず、不飽和軽量土の S_i は零となっているものといえる。

(2) 等方圧密ループ試験での間隙比・含水比変化

式 (1) によれば不飽和土の破壊基準はサクション力 ($S = (u_a - u_w)$) と平均有効主応力 ($p' = (\sigma_1 + \sigma_3)/3 - u_a$) の 2 成分の関数である。このことを考慮して、 S と p' の変化が間隙比 (e) や含水比 (w) に与える影響を検討するために、図-3 に示すように等方応力を変化させたときの、A 点 ($S = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$, $p' = 0.25 \text{ kgf/cm}^2$),

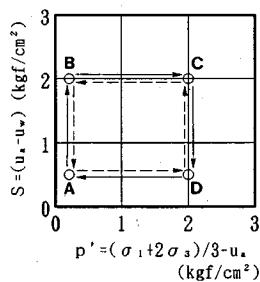


図-3 等方圧密ループ試験の応力経路

B点 ($S=2.0 \text{ kgf/cm}^2$, $p'=0.25 \text{ kgf/cm}^2$), C点 ($S=2.0 \text{ kgf/cm}^2$, $p'=2.0 \text{ kgf/cm}^2$), D点 ($S=0.5 \text{ kgf/cm}^2$, $p'=2.0 \text{ kgf/cm}^2$) での e と w について検討する。このとき、初期間隙水圧 (u_w) は $u_w=0.0 \text{ kgf/cm}^2$ とし、応力経路はループ状に正転・反転 ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ と $A \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$) させた。

なお、 p' の値は後述する等方圧密時の圧密降伏応力 (σ_y) を越えない $p' < \sigma_y$ とした。

不飽和軽量土の試験により得られた各等方応力状態での間隙比の変化量 (Δe) は図-4 (a) のとおりである。なお、比較のため軽部ら⁸⁾による不飽和カオリンでの試験結果を図-4 (b) に示す。これらの結果をみると、固化されている不飽和軽量土の Δe は不飽和カオリンの Δe に比べ小さく、いずれの応力経路を通っても最終応力状態である A 点での Δe は小さく、不飽和軽量土は応力経路によらず弾塑性的な挙動を示していることがわかる。また、不飽和カオリンでみられる平均有効主応力 (p') が一定で、サクション力 (S) の減少する C→D 間での Δe の増加すなわちコラプス現象⁹⁾ は不飽和軽量土ではみられない。このときの、各等方応力状態での含水比の変化量 (Δw) を軽部らの不飽和カオリンでの結果と比較すると図-5 (a) (b) のとおりである。すなわち、不飽和カオリンは初期サクション力 (S_i) を持っているため、いずれの応力経路を通っても最終応力状態である A 点での Δw は小さいが、不飽和軽量土は初期サクション力 (S_i) が零であるために、 p' や S の変化によって排水された図-2 に示す不飽和軽量土の気泡の中に存在する水 (自由水) が最終応力状態である A 点に戻っても、排水されたままで吸水されないことがわかる。

(3) 等方圧密時の $e \sim \log \sigma'_c$ 関係

等方圧密時の不飽和軽量土と飽和軽量土の $e \sim \log \sigma'_c$ 関係の差を知るために、有効拘束圧力 ($\sigma'_c = (\sigma_c - u_a)$) を表-4 に示すように $\sigma'_c = 0.50 \sim 5.00 \text{ kgf/cm}^2$ と 8 段階変化させた。このとき、不飽和軽量土では空気圧 (u_a) の大きさが $e \sim \log \sigma'_c$ 関係に与える影響を知るために、有効拘束圧力 ($\sigma'_c = (\sigma_c - u_a)$) を $\sigma'_c = 1.00, 2.00, 4.00$

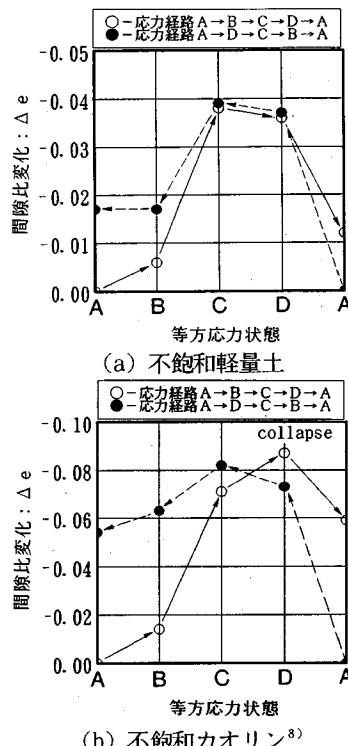


図-4 等方圧密ループ試験での間隙比の変化

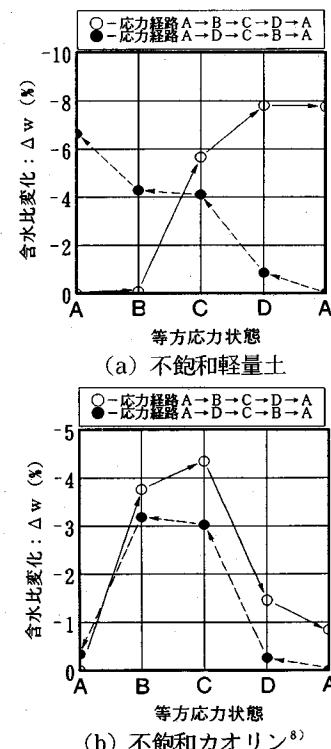


図-5 等方圧密ループ試験での含水比の変化

表-4 等方圧密試験条件

拘束圧力 : $\sigma'_c = \sigma_c - u_a$ (kgf/cm ²)	空気圧 : $u_a = S (= (u_s - u_w))$ (kgf/cm ²)
0.5	0.5
1.0	0.5, 1.0, 2.0
1.5	0.5
2.0	0.5, 1.0, 2.0
2.5	0.5
3.0	0.5
4.0	0.5, 1.0, 2.0
5.0	0.5

kgf/cm² とし、空気圧 (u_a) を $u_a = 0.50, 1.00, 2.00$ kgf/cm² と変化させ、飽和軽量土では等方圧密圧力 (σ'_c) を $\sigma'_c = 0.50 \sim 4.00$ kgf/cm² の範囲で 7 段階変化させて行った。

不飽和軽量土と飽和軽量土の等方圧密時の $e \sim \log \sigma'_c$ 関係は図-6 のとおりであり、圧密降伏応力 (σ_y) は飽和軽量土では $(\sigma_y)_{st} = 2.40$ kgf/cm²、不飽和軽量土で空気圧 (u_a) が $u_a = 0.5$ kgf/cm² の場合には $(\sigma_y)_{us} = 3.00$ kgf/cm² となり、不飽和軽量土の $(\sigma_y)_{st}$ が飽和軽量土の $(\sigma_y)_{us}$ より大きな値となっている。このとき、 $\sigma'_c > \sigma_y$ の範囲での軽量土の等方圧密時の $e \sim \log \sigma'_c$ 関係は不飽和・飽和に区別なく一つの直線上に表されるが、 $\sigma'_c < \sigma_y$ の範囲では σ'_c が同じであれば不飽和状態にあると間隙部が水よりも圧縮性の高い空気を持っているため同じ間隙比でも飽和軽量土に比べ体積変化が大きいことがわかる。

一方、不飽和軽量土において空気圧 (u_a) が $u_a = 0.5, 1.0, 2.0$ kgf/cm² と変化したときの $e \sim \log \sigma'_c$ 関係への影響をみると図-6 のようになり、空気圧 (u_a) の大きさが $e \sim \log \sigma'_c$ 関係に与える影響は試験条件が少ないため明確に認められない。しかし、図-5 (a) にみられるように不飽和軽量土では空気圧 (u_a) を高くすることにより含水比は低下し、飽和度も低下し、飽和度が低下すれば不飽和軽量土供試体中には圧縮性の高い空気がより多く存在することになるので、 $u_a > 0.5$ kgf/cm² となれば $\sigma'_c < \sigma_y$ の範囲での $e \sim \log \sigma'_c$ 関係の勾配は $u_a = 0.5$ kgf/cm² の勾配よりも急になることが予想できる。

4. 不飽和軽量土のせん断挙動

(1) 排気排水せん断挙動

不飽和軽量土のせん断挙動を知り、飽和軽量土の排水せん断挙動と比較するために排気排水せん断試験を行った。このとき、空気圧 (u_a) を $u_a = 0.5, 1.0, 2.0$ kgf/cm² と変化させ、間隙水圧 (u_w) は $u_w = 0.0$ kgf/cm²一定としたときの $q \sim \epsilon_a$ 関係は図-7 (a) (c) のとおりであり、拘束圧力 (σ'_c) が同じならば飽和軽量土・

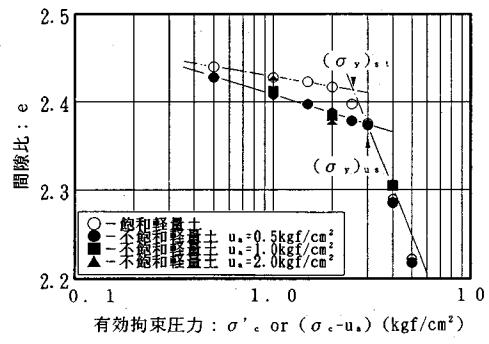
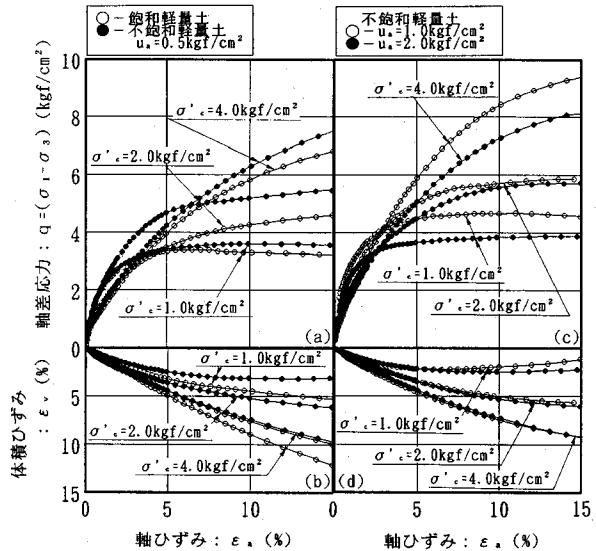
図-6 不飽和・飽和軽量土の $e \sim \log \sigma'_c$ 関係

図-7 圧密排気排水せん断試験結果

不飽和軽量土とも初期ひずみ領域での勾配はほぼ同じである。また、不飽和軽量土でも飽和軽量土と同様に σ'_c と圧密降伏応力 (σ_y) との関係が $\sigma'_c < \sigma_y$ である $\sigma'_c = 1.0, 2.0$ kgf/cm² の初期ひずみ領域での勾配は $\sigma'_c > \sigma_y$ である $\sigma'_c = 4.0$ kgf/cm² の初期ひずみ領域での勾配よりも高いことがわかる。しかし、不飽和軽量土の q は軸ひずみが増加するにつれ飽和軽量土の q よりも大きくなり、不飽和軽量土に与えた空気圧 (u_a) が大きいほど q は大きくなっている。

このときの体積ひずみ (ϵ_v) は図-7 (b) (d) に示されるように、飽和・不飽和軽量土とも拘束圧力 (σ'_c) の大きさによらず圧縮側にあるが、 σ'_c が同じであれば、不飽和軽量土の ϵ_v は飽和軽量土の ϵ_v よりも小さい。しかし、不飽和軽量土に与えた空気圧 (u_a) の大きさの ϵ_v への影響はほとんどみられない。

いま、最大軸差応力 (q_{max}) と大変形を受けたときの

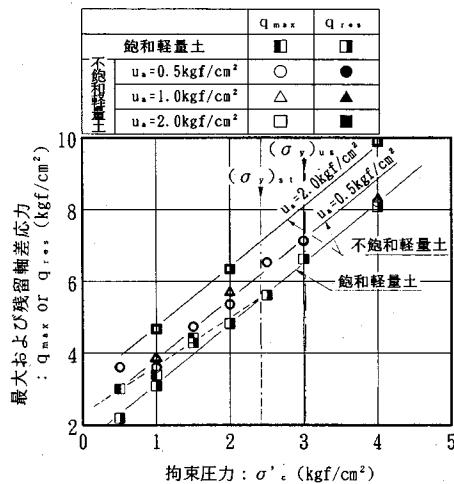


図-8 鮎和・不鮎和軽量土の q_{\max} ・ q_{res} と σ'_c の関係

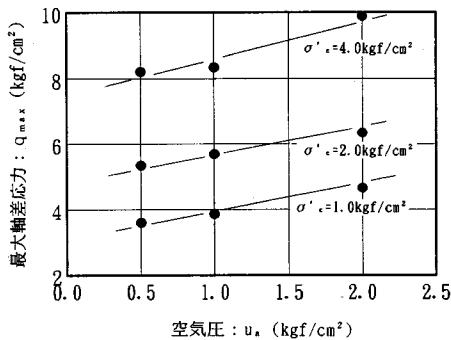


図-9 不鮎和軽量土の q_{\max} と空気圧 (u_a) の関係

軸差応力 ($\epsilon_a=15\%$ 時の軸差応力：ここでは残留軸差応力と呼ぶ： q_{res}) を比較するために鮎和軽量土および不鮎和軽量土の q_{\max} と q_{res} を拘束圧力 (σ'_c) との関係でみると図-8 のように、どの拘束圧力でも不鮎和軽量土の q_{\max} は鮎和軽量土の q_{\max} に比べ大きい。また、鮎和軽量土では拘束圧力 (σ'_c) が圧密降伏応力 ($(\sigma_y)_{st}$) 以下であれば明確に q_{\max} と q_{res} は区別できるが、不鮎和軽量土では σ'_c が圧密降伏応力 ($(\sigma_y)_{us}$) 以下であっても $q_{\max} \approx q_{res}$ である。このとき、不鮎和軽量土の最大軸差応力 (q_{\max}) は図-9 に示すように、拘束圧力 (σ'_c) が同じであれば与えた空気圧 (u_a) の増加とともに直線的に増加し、この傾きは σ'_c が異なってもほぼ一定である。

(2) 排気非排水せん断挙動

不鮎和軽量土の排気排水せん断試験結果と比較するために、供試体上部に与える空気圧 (u_a) は $u_a=0.5$ kgf/cm^2 として不鮎和軽量土の排気非排水せん断試験を行った。排気非排水せん断試験での軸差応力 (q)～軸ひ

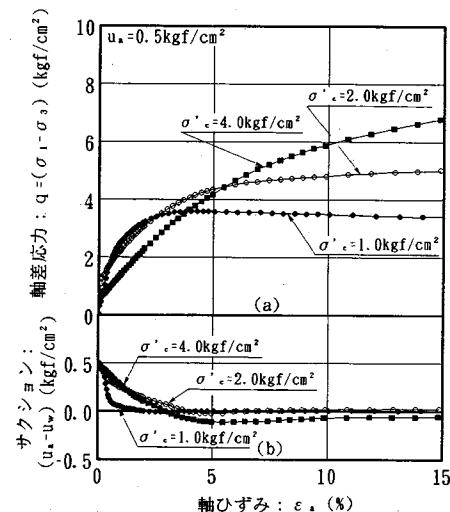


図-10 圧密排気非排水せん断試験結果

ずみ (ϵ_a) 関係は図-10 (a) に示すように、拘束圧力 (σ'_c) と圧密降伏応力 (σ_y) との関係が $\sigma'_c < \sigma_y$ である $\sigma'_c = 1.0, 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ の初期ひずみ領域での勾配は $\sigma'_c > \sigma_y$ である $\sigma'_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ の初期ひずみ領域での勾配よりも高い。また、排気非排水試験での $q \sim \epsilon_a$ 関係は排気排水試験での $q \sim \epsilon_a$ 関係と酷似している。不鮎和土の排気非排水せん断試験での結果は鮎和土の非排水せん断試験の結果と対応すると言われ¹⁰⁾ているが、鮎和軽量土の非排水せん断時の $q \sim \epsilon_a$ 関係は σ'_c と σ_y の大小に関係なく、すべてひずみ硬化軟化型であり⁷⁾、不鮎和軽量土の排気非排水せん断試験での $q \sim \epsilon_a$ 関係は鮎和軽量土の非排水せん断試験の $q \sim \epsilon_a$ 関係と対応していない。

等方圧密後のサクション力 ($S=(u_a-u_w)$) は供試体上部に空気圧 (u_a) を $u_a=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ かけているため $S=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ である。そして、せん断に伴い間隙水圧 (u_w) が発生するため、 S は図-10 (b) に示すように変化する。 $\sigma'_c < \sigma_y$ 条件である $\sigma'_c=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には、せん断変形に伴い与えた初期サクション力より急激に減少し、 $S=0.0 \text{ kgf/cm}^2$ となりその後一定となる、これに対し、 $\sigma'_c > \sigma_y$ である $\sigma'_c=4.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には、サクション力は徐々に減少し、 $S=-0.1 \text{ kgf/cm}^2$ 付近で一定となっている。このように、サクション力の変化が σ'_c と σ_y との大小関係で異なるのは、 $\sigma'_c < \sigma_y$ の場合には $q \sim \epsilon_a$ 関係の初期ひずみ領域の勾配が $\sigma'_c < \sigma_y$ のときの勾配よりも急であるため、間隙水圧 (u_w) は急激に発生し、 $\sigma'_c > \sigma_y$ の場合では $q \sim \epsilon_a$ 関係の初期ひずみ領域の勾配が緩やかとなり、間隙水圧 (u_w) は徐々に発生するためであると考えられる。

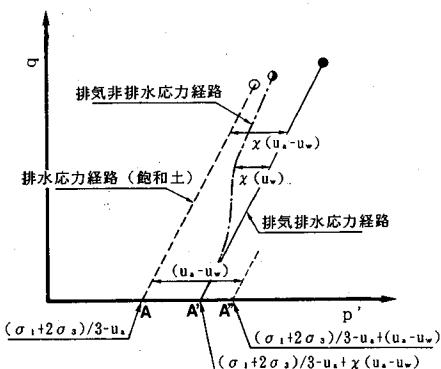


図-11 Bishop らの応力経路の考え方

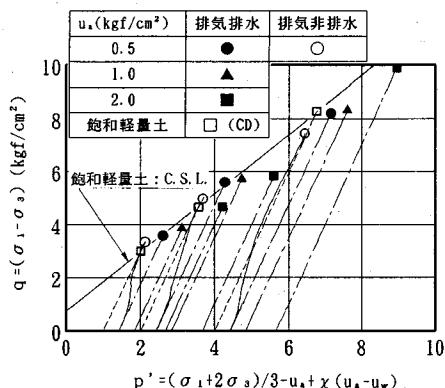


図-12 Bishop らによる破壊基準の整理

5. 不飽和軽量土の破壊基準の検討

不飽和軽量土のせん断時の最大軸差応力 (q_{max}) と $\epsilon_a = 15\%$ の時の軸差応力（残留軸差応力： q_{res} ）は図-8 に示したようにほぼ等しく、 q_{max} と q_{res} の区別ができるので、残留軸差応力のみを対象として破壊基準を検討する。

(1) Bishop らの考え方による破壊基準

Bishop ら²⁾は不飽和土の有効応力式として式(1)を提案したが、式(1)の有効応力式を平均有効主応力 (p') に置き換えると式(3)のようになる。

$$p' = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (3)$$

Bishop ら²⁾の考え方によれば、不飽和土のせん断時の排気排水せん断時の応力経路は図-11 のように、 p' 軸上の A' 点 $((\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 - u_a + \chi(u_a - u_w))$ を原点とし、1:3 の傾きをもつ直線経路で示される。また、排気非排水せん断時の応力経路も A' 点より排気排水応力経路から $\chi(u_w)$ だけ左に移動した応力経路となる。

この応力経路を確定するためには有効応力係数 (χ)

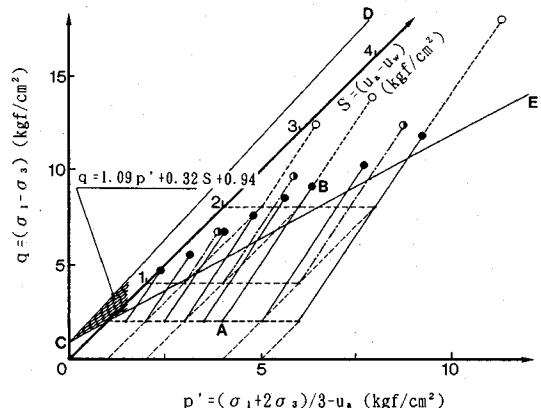


図-13 Fredlund らによる破壊基準の整理

の値が必要であり、この χ は飽和度 (S_r) と相関があると考えられているが、いまだ統一的な関係には至っていない^{9), 11)}。

Bishop ら¹¹⁾は数種の粘性土について、飽和度 (S_r) が $S_r = 80\%$ 以上では $\chi = S_r/(100)$ と述べている。ここでも Bishop ら¹¹⁾にならって、不飽和軽量土の初期飽和度が $S_r = 83\%$ であるので、 $\chi = 0.83$ と仮定すると不飽和軽量土の排気排水および排気非排水せん断時の応力経路は図-12 となり、排気排水・排気非排水せん断時の応力経路はそれぞれ一点鎖線・実線となり、残留応力状態は排気非排水せん断時には ●▲■ で排気非排水せん断時には ○ で示され、残留応力状態 (●▲■○) は右上がりとなる。しかし、残留軸差応力 (q_{res}) が空気圧 (u_a) の増加に伴い増加することや、不飽和軽量土の残留応力状態 (●▲■○) が飽和軽量土の破壊線 (限界状態線: C.S.L.) よりも下方に位置しており、飽和軽量土が不飽和軽量土より強度が高いという矛盾を生じている。このような結果となるのは、式(3)中に第3項のサクション力 ($(u_a - u_w)$) を含んでいることや、 χ の値の決定に問題があるためであり、不飽和軽量土に Bishop らの破壊基準を用いると、飽和度が $S_r = 83\%$ と $S_r = 80\%$ 以上であっても $\chi = S_r/(100)$ は成り立たない。

(2) Fredlund らの考え方による破壊基準

Fredlund ら⁵⁾は不飽和土の破壊状態を軸差応力 ($q = (\sigma_1 - \sigma_3)$)・平均有効主応力 ($p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3 - u_a$) とサクション力 (S) の関係で示し、破壊基準を三次元平面 (q, S, p') 面で示す式(2)で表した。

不飽和軽量土の排気排水せん断時の応力経路を三次元平面 (q, S, p') 面で示すと図-13 のようになり、排気排水せん断時の応力経路は $p' \sim S$ 平面の A 点を原点とし、排気排水であるから試験時に与える空気圧 (u_a) がサクション力 (S) となりせん断中の S は一定で、 $q \sim$

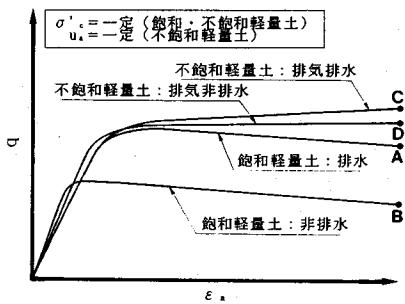


図-14 排気排水条件の違う $q \sim \epsilon_a$ 関係の比較

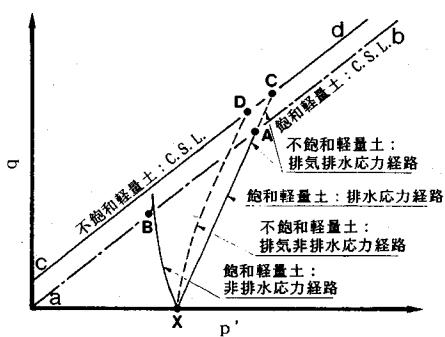


図-15 排気排水条件の違う応力経路の比較

p' 面では $1:3$ の傾きを持った直線 AB で示される。この応力経路から示される残留応力状態 (●○) での破壊線は三次元平面上の一平面 (CDE) で示され、 q が p' や S に比例して増加し、この破壊面は

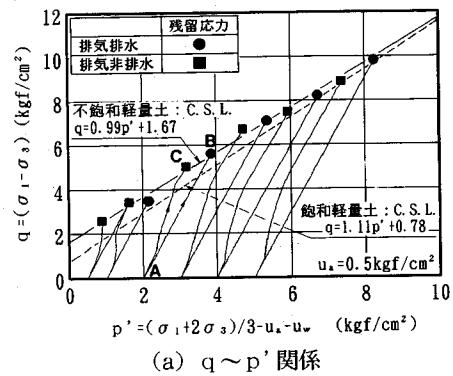
$$q = 1.09p' + 0.32S + 0.94 \quad (4)$$

で表される。このように、破壊状態を三次元平面 (q , S , p') 面で示す Fredlund らによる破壊基準は不飽和軽量土への適用性が比較的高い。

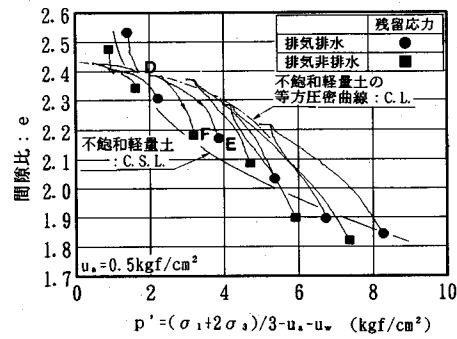
(3) 不飽和軽量土の破壊基準

Bishop ら²⁾や Fredlund ら⁵⁾は不飽和土のサクション力に着目し、不飽和土の応力経路や破壊基準を軸差応力 (q)・平均有効主応力 (p') とサクション力 (S) で整理している。しかしここでは、不飽和軽量土の排気排水・排気非排水せん断時の残留応力状態に着目し、不飽和軽量土の応力経路および破壊基準について述べる。

飽和軽量土の排水・非排水試験と不飽和軽量土の排気排水・排気非排水試験を拘束圧力 (σ'_1) 一定、不飽和軽量土に与える空気圧 (u_a) 一定のもとで軸差応力 (q)～軸ひずみ (ϵ_a) 関係を比較すると図-14 のようになり、残留軸差応力 (q_{res}) は飽和軽量土の排水試験では A 点、非排水試験では B 点、不飽和軽量土の排気排水試験では C 点、排気非排水試験では D 点で示され、 q_{res} の大きさは $B < A < D < C$ である。この残留軸差応力に至るまで



(a) $q \sim p'$ 関係



(b) $e \sim p'$ 関係

図-16 式 (5) を用いた破壊基準の整理

の応力経路を $q \sim p'$ 面上に示すと図-15 のようになり、飽和軽量土の応力経路は当然のことながら p' 軸上の圧密時の応力状態 X 点を原点とする線 XA (排水経路)、線 XB (非排水経路) で示される。ここで、残留応力状態を限界状態と考えれば限界状態線 (C.S.L.) は点 A, B を通る線 ab となる。これに対し、不飽和軽量土の限界状態線 (C.S.L.) は飽和軽量土の C.S.L. の上方に位置する線 cd となり、排気排水試験での残留軸差応力は線 cd 上の C 点で示され、応力経路は、 p' 軸上の圧密時の応力状態 X 点を原点とし、飽和軽量土の排水試験同様 $1:3$ の傾きを持つ線 XC となる。しかし、排気非排水試験での残留軸差応力を考えると図-14 に示すように $A > D > C$ であり、排気非排水試験での残留軸差応力は cd 線上の D 点で示され、不飽和軽量土の排気非排水試験での応力経路は線 XD となることが予想できる。この応力経路となるような平均有効主応力 (p') は、式 (5) となる。

$$p' = ((\sigma_1 - u_a - u_w) + 2(\sigma_3 - u_a - u_w)) / 3 \\ = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3 - u_a - u_w \quad (5)$$

この式は、 u_a をバック・プレッシャー、 u_w を間隙水圧と考えれば Terzaghi の有効応力式¹²⁾と同様である。

式 (5) を用いて試験中に与えた空気圧 (u_a) = 0.5 kgf/cm^2 の排気排水および排気非排水せん断時の応力経

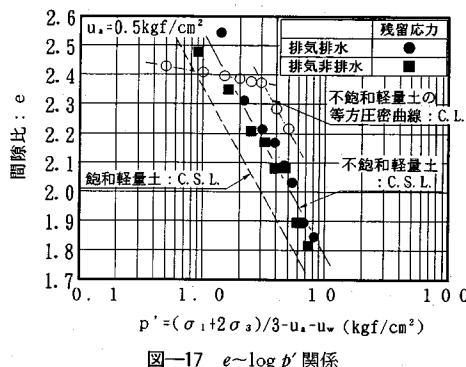
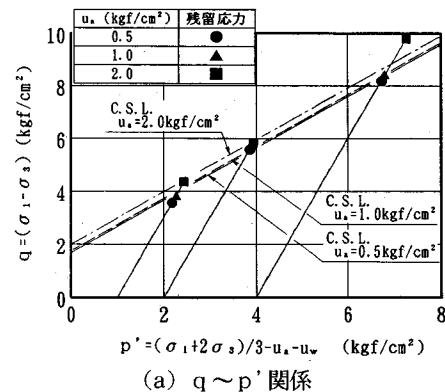


図-17 $e \sim \log p'$ 関係

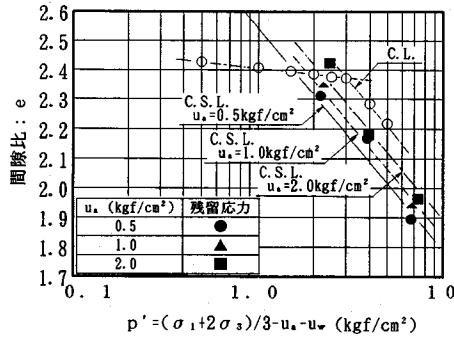
路・間隙比変化経路 ($q \sim e \sim p'$ 関係) を示すと図-16 のようになり、排気排水せん断時の応力経路は p' 軸の A 点を原点とし、1:3 の傾きを持つ線 AB で示される。また、排気非排水せん断時の応力経路も p' 軸の A 点を原点とし、排気排水せん断時の応力経路から u_w だけ左に移行した線 AC となる。このとき、排気排水せん断時の間隙比の変化経路は図-16 (b) の線 DE となり、排気非排水せん断時の間隙比の変化経路は線 DF で示される。このように応力経路および間隙比の変化経路から示される残留応力状態 (●■) は一つの直線および曲線上で示され、限界状態線 (C. S. L.) が求まり、式(5)の正当性がわかる。また、図-16 (b) の残留応力状態 (●■) の $e \sim p'$ 関係について p' 軸を対数として $e \sim \log p'$ 関係で表すと図-17 のようになり、不飽和軽量土の C. S. L. は一つの直線で表され、飽和軽量土の C. S. L. よりも上方に位置し、不飽和軽量土の C. S. L.・飽和軽量土の C. S. L.・等方圧密曲線 ($p' > \sigma_3$) の 3 つの直線は平行であり、Schofield ら¹³⁾が粘土で示したように $e \sim \log p'$ 関係の圧密曲線と限界状態線が平行であることが傾向は一致する。

また、試験時に供試体上部より与えた空気圧 (u_a) の大きさが異なると $q \sim p'$ 関係、 $e \sim \log p'$ 関係は図-18 のようになり、 u_a が大きいほど不飽和軽量土の C. S. L. は上方に移動するが、いずれの関係も平行であることがわかる。

不飽和軽量土の破壊線を $q = M_1 p' + M_2$ で表し、不飽和軽量土の破壊基準として適用性の高かった Fredlund らの考え方による式(4)と、ここで提案した式(5)の係数 M_1 、 M_2 を比較する。ここでは、Fredlund らの方法による式(4)については S の値を u_a で計算した。その結果、不飽和軽量土の破壊線の係数 M_1 、 M_2 は表-5 のようになり、係数 M_1 は式(4)でも式(5)でも飽和軽量土の破壊線に近い値であり、不飽和軽量土の破壊線の傾きは飽和軽量土の破壊線の傾きと同等であることがわかる。



(a) $q \sim p'$ 関係



(b) $e \sim \log p'$ 関係

図-18 u_a の違いによる破壊基準の変化

表-5 Fredlund らと不飽和軽量土独自の破壊線の係数 M の比較

		$q = M_1 p' + M_2$			
		Fredlund らによる方法:(4)式		不飽和軽量土独自の方法:(5)式	
	u_a (kgf/cm²)	係数: M_1	係数: M_2	係数: M_1	係数: M_2
不飽和軽量土	0.5	1.09	1.10	0.99	1.67
	1.0	1.09	1.26	0.99	1.75
	2.0	1.09	1.58	0.99	2.00
飽和軽量土	---	1.11	0.77	1.11	0.77

Fredlund らによる方法での $q = M_1 p' + M_2 + M_3 S + M_4$ について、ここでは $S = u_a$ とし、 $M_3 = M_1 S / M_1$ として計算した。

一方、係数 M_2 は、式(5)の係数 M_2 が式(4)の係数 M_2 よりも若干大きな値であるが、式(5)の係数 M_2 は式(4)の係数 M_2 と同様に試験で与えた空気圧 (u_a) が増加すると増加しており、Fredlund ら⁵⁾が軸差応力 (q)～サクション力 (S) 関係で示したように S の増加に伴い q も増加することと対応している。

6. む す び

不飽和軽量土の基本特性および不飽和軽量土の破壊基準の検討を行った結果を要約すると以下のとおりであ

る。

(1) 不飽和軽量土自身が持っている初期サクション (S_i) は不飽和粘性土が 0.2 kgf/cm^2 程度なのに対して 0.0 kgf/cm^2 である。

(2) 等方圧縮ループ試験での間隙比の変化により、不飽和カオリンではコラプス現象がみられるのに対し、不飽和軽量土ではコラプス現象はみられない。また、含水比の変化をみると、不飽和軽量土は応力を減少させても排水された水は排水された今まで吸水されない。

(3) 不飽和軽量土の等方圧密試験の結果、圧密降伏応力 (σ_y) は飽和軽量土よりも不飽和軽量土が大きな値となる。そして、 σ_y よりも σ'_c が大きくなると不飽和と飽和の区別はなく一つの直線で表せる。

(4) 不飽和軽量土の排気排水せん断時の $q-\epsilon_a$ 関係は飽和軽量土に比べ σ'_c が同じであれば不飽和軽量土の q が大きく、また、不飽和軽量土でも u_a の値が大きいほど q は大きくなる。せん断時に発生する体積ひずみ (ϵ_v) は飽和軽量土と不飽和軽量土で比較すると、飽和軽量土よりも不飽和軽量土の ϵ_v がどの拘束圧力 (σ'_c) であっても小さい。

(5) 不飽和軽量土の排気非排水せん断時の $q-\epsilon_a$ 関係は排気排水での $q-\epsilon_a$ 関係と同じように拘束圧力 (σ'_c) と圧密降伏応力 (σ_y) との大小関係で初期ひずみ領域での勾配が異なり、不飽和軽量土の排気非排水せん断時の $q-\epsilon_a$ 関係は飽和軽量土の排水せん断時の $q-\epsilon_a$ 関係に近い挙動である。せん断時に発生するサクション力 (S) は σ'_c と σ_y の大小関係でその挙動が異なる。

(6) 不飽和軽量土の破壊基準を Bishop らの方法、Fredlund らの方法によって整理し、その妥当性を検討したが、Bishop らの方法よりも Fredlund らの方法が妥当性が高いことがわかった。

(7) 不飽和軽量土の応力経路や体積変化経路を求めるため、不飽和軽量土独自の整理の方法で p' を式(5) とすると、不飽和軽量土の応力経路や体積変化経路が求まる。そして、残留応力状態で一つの直線で示される。

そしてこの線は与える u_a が大きいほど飽和軽量土の C.S.L. よりも上方となる。

参考文献

- 1) たとえば、久野悟朗、松下正憲、深田久、吉原正博：軽量ソイルセメントによる建築物基礎下空洞充填工法、土と基礎、Vol.37、No.2、Ser. No.373、pp.61-66、1989.
- 2) Bishop, A.W., I.Alpan, G.E. Blight and I.B. Donald : Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils, Proc. ASCE Colorado Conf., pp.503-532, June, 1960.
- 3) Blight, G.E. : Effective stress evaluation for unsaturated soils. Proc. ASCE, Vol.93, SM2, pp.125-148, 1967.
- 4) Fredlund, D.G. : Soil mechanics principles that embrace unsaturated soils, Proc. 11th IC-SMFE, Vol.2, pp.465-472, Aug., 1975.
- 5) Fredlund, D.G. and Rahardjo,H. : Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons, INC., 1993.
- 6) 矢島寿一、丸尾茂樹、小川正二：気泡を混入した軽量土のせん断特性、土木学会論文集、No.499、III-28、pp.197-205、1994.9.
- 7) 矢島寿一、丸尾茂樹、小川正二：飽和軽量土のせん断特性への気泡混入率の影響（土木学会論文集投稿中）。
- 8) 軽部大蔵、加藤正司、勝山潤一：不飽和カオリンの有効応力と力学定数、土木学会論文集、第370号、pp.179-188、1986.
- 9) Jennings, J.E. and Burland, J.B. : Limitation to use of effective stress in partly saturated soils, Geotechnique, Vol.12, pp.125-144, 1962.
- 10) 軽部大蔵、阿部廣史、鈴木 壽、畠山政則：不飽和土の三軸試験における試験方法、三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集、pp.125-130、1991.
- 11) Bishop, A.W. and G.E. Blight. : Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils, Geotechnique, Vol.13, No.3, pp.177-197, 1963.
- 12) Terzaghi, K., : Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons, 1943.
- 13) Schofield, A.N. and C.P. Wroth : Critical state soil mechanics, McGraw-Hill, London, 1968.

(1994.7.29 受付)

FAILURE CRITERION OF FOAM COMPOSITE UNSATURATED LIGHT-WEIGHT SOIL

Juichi YAJIMA, Shigeki MARUO and Shoji OGAWA

In this study the mechanical properties of unsaturated light-weight soil were investigated. Laboratory test regarding initial suction, isotropic consolidation, consolidated drained and constant water tests were performed.

It was learned that initial suction didn't exist and collapse phenomena don't occur when the isotropic stress is below consolidated yield stress. As a result it was found that the stress path, volumetric change and the failure criterion of this peculiar unsaturated light-weight soil should be described with a independent effective strength formula.