土木学会論文集 No. 511／III-30, 173-180, 1995. 3

飽和軽量土のせん断特性への気泡混入率の影響

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）

本文では気泡を混入した軽量土のせん断特性を解明することを目的とし，気泡混入率が軽量土のせん断特性に及ぼす影響について検討している．

その結果，気泡混入率がせん断挙動に影響を及ぼすのは軸ひずみが5% 以上であり，体積ひずみは気泡混入率の高いほど大きくなり，軽量土の破壊基準は q と p' の関係のみでなく体積ひずみを考慮した関係でも示され，この破壊基準も気泡混入率によって変化することが判明した．

Key Words：*light-weight soil, foam volume ratio, triaxial conpression test, shear strength*

1. まえがき

土を軽量化することによる利点は，軟弱地盤上盛土の荷重軽減による沈下低減や擁壁に作用する土圧軽減等である．本研究で用いた土に適量の水を混合してある程度の流動性を持たせた後に固化材を投入し，最後に気泡を混合する土の軽量化の方法は，母材としている材料が粘性土であり，今後多く発生すると考えられる現地発生土の有効利用の一手段となりうる．さらに，この方法で作成される軽量土は固化材を混入しているため自硬性を有し，締固め作業を必要としない等の利点を有している．

気泡を混入した軽量土の基本的な特性に関する研究は久野ら[1]をはじめとして多くの研究者が行っており，軽量土の単位体積重量は気泡の混入率で決定され，その一軸圧縮強さは固化材の混入率で任意に選定できることが実験的に確認されている．また，著者らは[2]この軽量土と軽量化を行う母材である飽和粘性土および固化材を添加したのみのセメント改良土のせん断特性を比較検討し軽量土およびセメント改良土では等方圧密時の圧密降伏応力（σ_y）は一軸圧縮強さの約 1.2 倍であること，また，せん断時の応力～ひずみ関係および破壊線は，σ_y を境にして飽和粘性土の過圧密および正規圧密状態での特性と同様の特性を有することを明らかにしている．

しかし，固化材や気泡の混入率が軽量土のせん断特性に与える影響は明らかにされているとは言いがたく，この気泡を混入した軽量土のような多孔質の材料の圧密排水せん断時の体積変化は一般の粘性土に比べ大きく，軽量土特有の挙動を示す．

このようなことを考えて，本文では，軽量土に混合する固化材の混合率および配合含水比を一定とし，軽量土にとって重要な要因である気泡の混入率のみを変化させたときに，気泡混入率の変化が軽量土のせん断特性に与える影響について述べている．さらに，足立ら[3]が提案した多孔質凝灰岩（大谷石）の応力と体積ひずみの関係を考慮した破壊基準にならって，軽量土の応力条件と体積ひずみ条件を考慮した破壊基準および，気泡混入率が軽量土の破壊基準に及ぼす影響について検討した結果についても述べている．

2. 供試体の条件と試験方法

試験に用いた母材である土は表—1 に示す物性を有する米山粘性土である．固化材としては普通ポルトランドセメント，起泡剤としては動物性蛋白系の液体材料を使用した[2]．それらの配合条件は表—2 に示すとおりで，軽量土の気泡混入率は軽量土供試体の体積に対する割合で示し，処理土 10 リットルに対する起泡剤を 5% 混入した希釈水の流入量で変化させている．しかし，初期の配合含水比は表—2 のように $w_{mix}=75\%$ と一定とした．以下には，この気泡混入率の異なる軽量土を Light-1, Light-2, Light-3 と呼ぶことにする．

気泡は起泡剤 5% 希釈水と 5 kgf/cm^2 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[2]をとり，軽量土は土・水・固化材をソイル・ミキサーで十分混合した後，この気泡を入れて再び混合し，その後，型枠に投入して，温度 20°C の水中に 8 週間以上養生して作成した[2]．

表—1　米山粘性土の物性値

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

表—2　軽量土の配合条件と物性値

	Light-1	Light-2	Light-3
配合含水比：w_{mix} (%)	75		
セメント量：C (kg/m³)	100		
気泡混入率：a (%)	3.5	5.1	7.9
材令8週後湿潤密度 (g/cm³)	1.45	1.37	1.19
飽和状態湿潤密度 (g/cm³)	1.53	1.46	1.43
乾燥密度 (g/cm³)	0.88	0.79	0.73
飽和状態含水比 (%)	74.4	84.7	95.2
初期間隙比：e_0	2.19	2.40	2.82
一軸圧縮強さ：q_u (kgf/cm²)	2.52	2.02	1.07

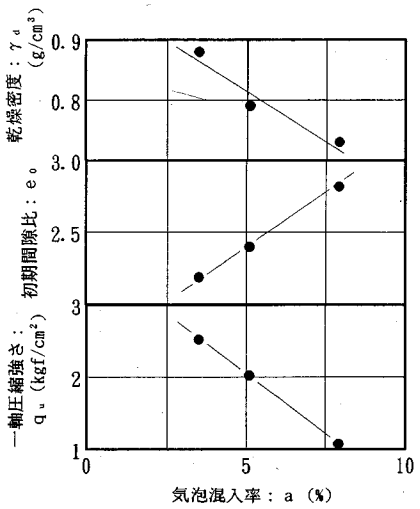
気泡混入率：(気泡混入量)／(軽量土の体積)*100で表し，処理土10ﾘｯﾄﾙに対する起泡剤5%希釈水流入量(cc)で調整．

8週間水中養生後の軽量土供試体の飽和度はS_r＝100%とならなかったが，飽和させるために軽量土をブロック状にして，脱気水中に3時間以上浸し，その後，直径50 mm 高さ100 mm の供試体に整形した．

上記の方法で作成された軽量土の飽和度はS_r＞93%となりほぼ飽和状態である．この飽和軽量土供試体の物性値は表—2のとおりであり，気泡混入率（a）と乾燥密度（γ_d），初期間隙比（e_0）および一軸圧縮強さ（q_u）の関係は，気泡混入率の増加とともに乾燥密度はγ_d＝0.88～0.73 g/cm³，初期間隙比はe_0＝1.74～2.82，一軸圧縮強さはq_u＝2.52～1.07 kgf/cm² の範囲で図—1のように直線的に変化している．

三軸試験ではS_r＞93% の供試体にσ_{BP}＝3.0 kgf/cm² のイニシャル・バックプレシャーを与え，供試体中に残存する気泡をつぶすようにした．この操作により，いずれの供試体もB値が0.95以上となった．したがって，供試体はほぼ飽和しているものと判断できる．

等方圧密時に作用させる等方圧密圧力（σ'_c）が圧密降伏応力（σ_y）より大きいか否かによって，気泡を混入した軽量土のせん断挙動が異なることが知られているので[2]，等方圧密圧力の大きさが軽量土のせん断挙動に与える影響を知るために有効拘束圧力は表—3に示すようにσ'_c＝0.25～5.00 kgf/cm² の範囲で7～8段階に変化させた．なお，せん断時の軸ひずみ速度は0.05%/min とした．



図—1　気泡混入による軽量土物性値の変化

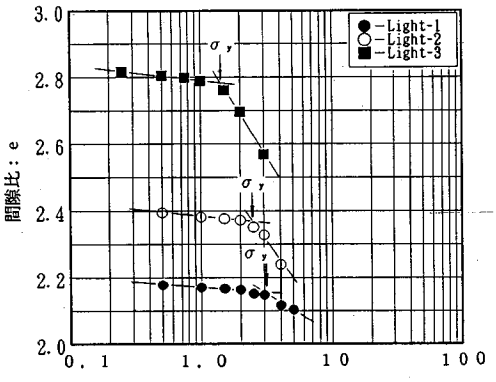
表—3　試験条件

	Light-1	Light-2	Light-3
σ_{BP} (kgf/cm²)	3.00	3.00	3.00
有効拘束圧 σ'_c (kgf/cm²)	0.50 1.00 1.50 2.00 2.50 3.00 4.00 5.00	0.50 1.00 1.50 2.00 2.50 3.00 4.00	0.25 0.50 0.75 1.00 1.50 2.00 3.00

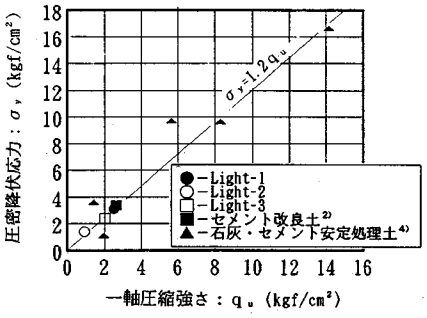
3.　等方圧密時の e～log σ'_c 関係

気泡混入率（a）の異なる3種類の軽量土を等方圧密した時のe～log σ'_c関係は図—2のように，気泡混入率に関係なく，いずれの軽量土とも圧密降伏応力（σ_y）が明確に存在し，このσ_yの圧力状態でセメンテイションが降伏しているものと考えられる．このσ_yの値は気泡混入率の増加につれて低下し，Light-1ではσ_y＝3.1 kgf/cm²，Light-2ではσ_y＝2.4 kgf/cm²，Light-3ではσ_y＝1.4 kgf/cm² である．

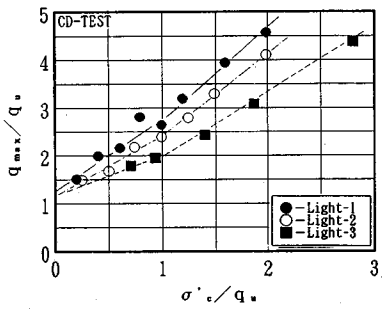
気泡混入軽量土の等方圧密時の圧密降伏応力（σ_y）と一軸圧縮強さ（q_u）の関係は図—3に示すとおりで，気泡混入率に関係なく，等方圧密時のσ_yはq_uと比例関係にあり，ほぼσ_y＝1.2 q_uと表せる．同図には矢島ら[2]のセメント改良土，寺師ら[4]が行った石灰・セメント改良土での結果も併記してあるが，この関係は寺師ら[4]がセメント改良土で求めたp_c＝1.2～1.3 q_uの関係とほぼ同じであると言える．なお，寺師ら[4]は圧密降伏応力をp_cで表している．



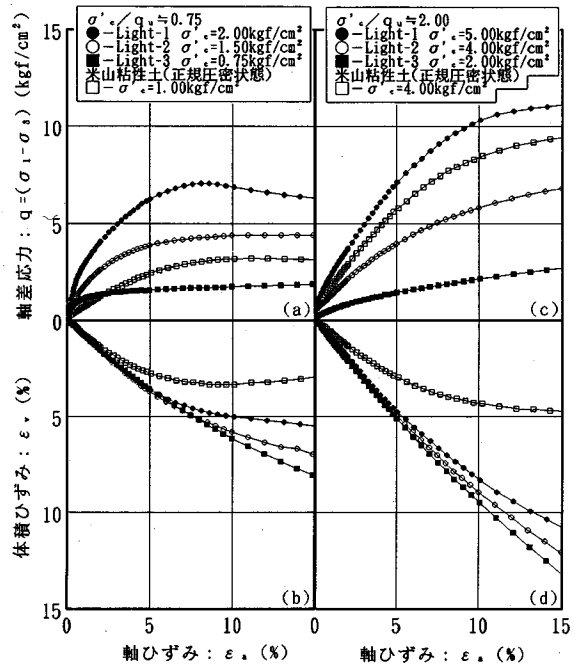
図—2　等方圧密時の e～log σ_c' 関係



図—3　圧密降伏応力と一軸圧縮強さの関係



図—4　q_{max}/q_u と σ_c'/q_u の関係



図—5　CD 試験結果

4.　せん断挙動への気泡混入率の影響

(1)　CD-Test

軽量土の CD 試験において作用させる有効拘束圧力（σ_c'）が圧密降伏応力（σ_y）より大きいか否かによってせん断挙動が異なることがすでに知られている[2]．また，前述の図—2 に示すように等方圧密時の e～log σ_c' 関係は圧密降伏応力（σ_y）を境にして異なり，また，σ_y と一軸圧縮強さ（q_u）の間には $\sigma_y=1.2\,q_u$ の関係があるので，最大軸差応力の拘束圧力依存性を知るために拘束圧力（σ_c'）と最大軸差応力（q_{max}）を q_u（$=0.83\,\sigma_y$）で正規化し，q_{max}/q_u と σ_c'/q_u の関係をみると図—4 のように，q_{max}/q_u～σ_c'/q_u 関係は気泡混入率（a）によって勾配が異なるが，いずれの場合も σ_c'/q_u の増加とともに q_{max}/q_u は増加し，最大軸差応力は拘束圧力に依存している．また，q_{max}/q_u～σ_c'/q_u 関係の勾配は気泡混入率に関係なく，いずれの場合も $\sigma_c'/q_u=1.0$ 付近で変化している．σ_c'/q_u の値は $\sigma_y=1.2\,q_u$ であるから，$1.2\,\sigma_c'/\sigma_y$ と同等であり，σ_c'/σ_y は飽和粘性土で言う過圧密比（OCR）の逆数に対応するので，$\sigma_c'/q_u=1.0$ の値は，OCR≒1 の状態を意味している．

いま，気泡混入率（a）の違いが軸差応力（$q=(\sigma_1-\sigma_3)$）～軸ひずみ（ε_a）関係に与える影響を明白にするために，飽和粘性土で言う OCR＝1.6，0.6 となる $\sigma_c'/q_u\fallingdotseq0.75$ と 2.00 の拘束圧力（σ_c'）の場合について検討する．その時の，q～ε_a 関係は図—5（a）（c）のようになり，拘束圧力（σ_c'）の条件が $\sigma_c'/q_u\fallingdotseq0.75$ の場合には，$\sigma_c'<q_u$ であるので図—2 の e～log σ_c' 関係に示されるように等方圧密時にセメンテイションは降伏していない．そのために，気泡混入率が $a=3.5\%$ と小さい Light-1 の q～ε_a 関係は図—5（a）に示されるように，せん断により $\varepsilon_a=7.5\%$ で明確な最大軸差応力（q_{max}）がみられる．しかし，気泡混入率が $a=5.1$，7.9% と高くなる Light-2，3 では序々に明確な q_{max} がみられなくなる．

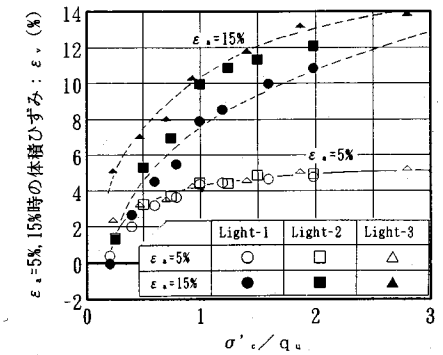
このときの体積ひずみ（ε_v）をみると図—5（b）に示すように，気泡混入率に関係なく ε_v は常に圧縮側で

あり，$\sigma_c'/q_u \fallingdotseq 0.75$ では OCR＝1.6 と同等であり，軽度の過圧密状態であるが，ε_v が圧縮側となるのは，気泡混入による気泡部（間隙部）の増加のため，間隙部は常に圧縮されるためと考えられる．そして，$q \sim \varepsilon_a$ 関係でセメンテイションが降伏し，q の増加がゆるやかになる ε_a＝5% までの ε_v は気泡混入率に関係なくほぼ同じであるが，ε_a＝5%以上となると気泡混入率の小さい Light-1 では供試体中の気泡部（間隙部）が少なくせん断時にせん断面が生成されるため ε_v の増加量は小さく，気泡混入率の大きい Light-2, 3 では間隙部の多さからせん断面が生成されず間隙部が圧縮されるだけとなるため ε_v の増加量は Light-1 よりも大きい．したがって，せん断時のせん断面の生成が影響し気泡混入率の増加に伴って明確な q_{max} がみられなくなるといえる．

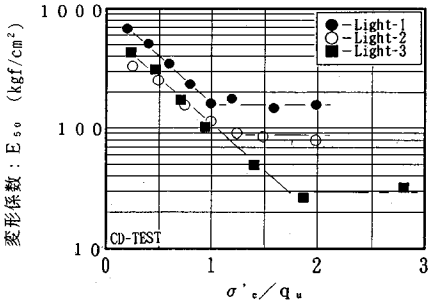
一方，σ_c' の条件が $\sigma_c'/q_u \fallingdotseq 2.00$ の場合には，$\sigma_c' > q_u$ であり等方圧密時にセメンテイションが降伏しているため，図—5（c）に示されるように，気泡混入率の違いによる $q \sim \varepsilon_a$ 関係の形状の差異はみられず，すべてひずみ硬化型であり，このときの体積ひずみ(ε_v)は図—5(d)に示すように，$\sigma_c'/q_u \fallingdotseq 0.75$ の ε_vよりも大きいが，$\sigma_c'/q_u \fallingdotseq 0.75$ の場合と同様に，$q \sim \varepsilon_a$ 関係で q の増加がゆるやかになる ε_a＝5% までの ε_v は気泡混入率に関係なく同じであるが，ε_a＝5% 以上となると ε_v は気泡混入率の高い Light-3 ほど大きくなる．いま，圧縮量の小さい ε_a＝5% と圧縮量の大きい ε_a＝15% の時の ε_v と σ_c'/q_u の関係をみると図—6 のように，ε_a＝5% での ε_v は気泡混入率に影響されず，$\sigma_c'/q_u \fallingdotseq 1$ まで増加し，$\sigma_c'/q_u > 1$ となるとほぼ一定となる．しかし，ε_a＝15% の時の ε_v は σ_c'/q_u の増加にともない増加し，その値は気泡混入率の高い Light-3 ほど大きい．

また，$q \sim \varepsilon_a$ 関係における軽量土の初期ひずみ領域での勾配は $\sigma_c'/q_u \fallingdotseq 0.75$ の場合には未改良土（米山粘性土）に比べ大きく，$\sigma_c'/q_u \fallingdotseq 2.00$ の場合よりも大きい．いま，気泡混入率の違いが $q \sim \varepsilon_a$ 関係における初期ひずみ領域での勾配すなわち変形係数（E）に及ぼす影響を知るために，変形係数（E_{50}）を $q_{max}/2$ に相当する軸差応力とその時の軸ひずみの比とし，σ_c'/q_u との関係をみると図—7 となり，変形係数（E_{50}）は気泡混入率の差異によって異なり，ある σ_c'/q_u まで σ_c'/q_u の増加とともに減少し，それ以上になると一定となる傾向を示している．このときの変曲点は Light-1 では σ_c'/q_u＝1.00，Light-2 では σ_c'/q_u＝1.25，Light-3 では σ_c'/q_u＝1.75 となり，気泡混入率が高い軽量土ほど拘束圧によって E_{50} は低下し，$E_{50} \sim \sigma_c'/q_u$ 関係の変曲点は気泡混入率の影響を受けていることがわかる．

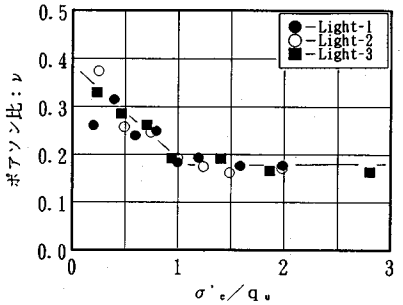
さらに気泡混入率の違いがポアソン比（ν）に及ぼす影響を知るために ν と σ_c'/q_u の関係をみると図—8 のようになり，$\sigma_c'/q_u < 1$ の範囲では気泡混入率に関係なく，



図—6　ε_a＝5, 15% 時の体積ひずみと σ_c'/q_u の関係



図—7　変形係数（E_{50}）と σ_c'/q_u の関係

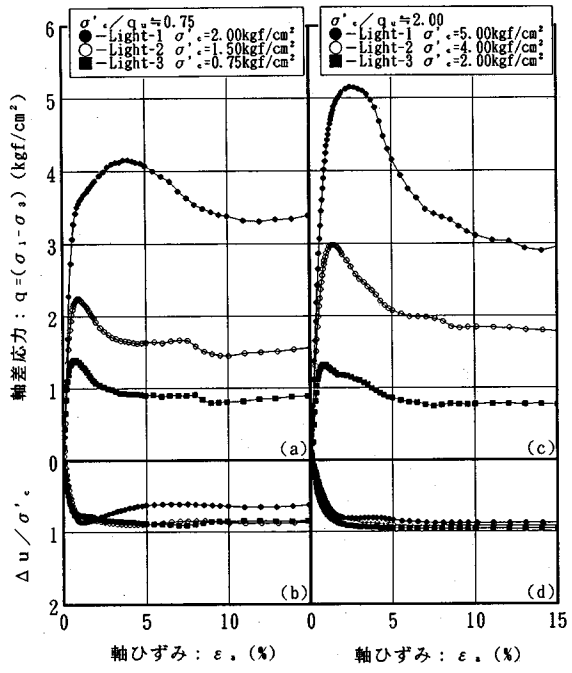


図—8　ポアソン比（ν）と σ_c'/q_u の関係

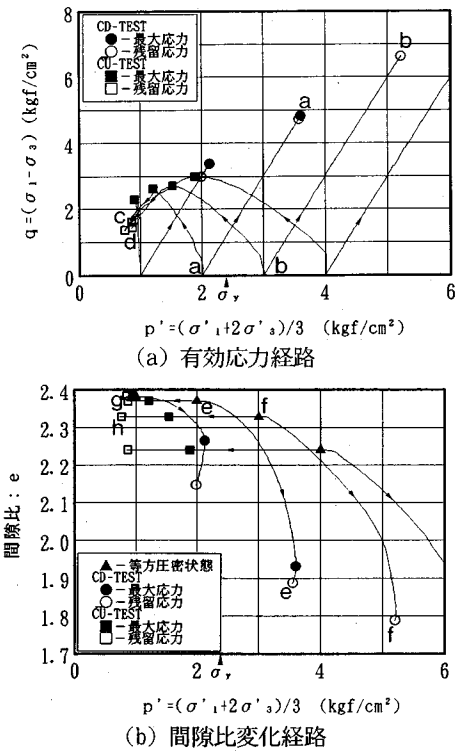
ν は σ_c'/q_u の増加とともに低下するが，$\sigma_c'/q_u > 1$ となると σ_c'/q_u の大きさに関係なく ν＝0.18 付近で一定となる2つの直線で表される．

(2) CU-Test

気泡混入率の違いが CU 試験結果に及ぼす影響を知るために CU 試験を行った．そのときの軸差応力($q=(\sigma_1-\sigma_3)$)～軸ひずみ（ε_a）関係は図—9（a）（c）のとおりであり，気泡混入率や σ_c'/q_u が異なっても，せん断初期のひずみ領域の勾配が大きく，明確な最大軸差応力（q_{max}）を示す典型的なひずみ硬化-軟化型の $q \sim \varepsilon_a$ 曲線となっている．したがって，非排水試験で得られる $q \sim \varepsilon_a$ 関係は，排水試験で得られる $q \sim \varepsilon_a$ 関係のように気泡混入率の違いや，σ_c'/q_u の大きさによる形状の差異は



図—9　CU 試験結果



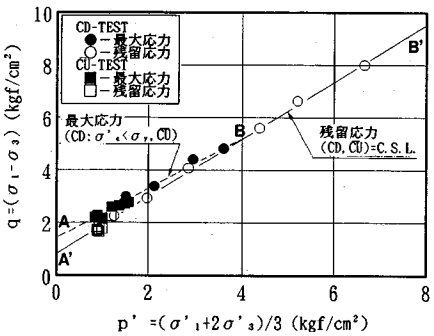
図—10　Light-2 の有効応力経路と間隙比変化経路

みられない．このとき間隙水圧（Δu）は σ_c' で正規化した $\Delta u/\sigma_c'$ でみると図—9（b）（d）の $\Delta u/\sigma_c' \sim \varepsilon_a$ に示すようになり，$\sigma_c'/q_u \fallingdotseq 0.75$ の場合，気泡混入率（a）が $a=3.5\%$ の Light-1 では明確なせん断面が生成するため，せん断に伴い $\Delta u/\sigma_c'$ は 1 付近まで上昇した後に低下しており，このせん断面付近の局部的な体積膨張が Δu の変化に影響を与えているといえる．しかし，気泡混入率が $a=5.1, 7.9\%$ と高くなる Light-2, 3 では Light-1 と同様に $\Delta u/\sigma_c'$ は 1 付近まで上昇するが，その後一定となっている．$\sigma_c'/q_u \fallingdotseq 2.00$ の場合でも，気泡混入率に関係なく，せん断に伴い $\Delta u/\sigma_c'$ は 1 付近まで上昇した後，一定となっている．このように $\Delta u/\sigma_c'$ が 1 付近まで上昇するのは，足立ら[3]や小林[5]らが軟岩やセメント改良土のような体積圧縮係数の大きな材料に対して生じる $(\Delta u)_{max}$ は σ_c' に近い値となると述べているのと同様の結果である．

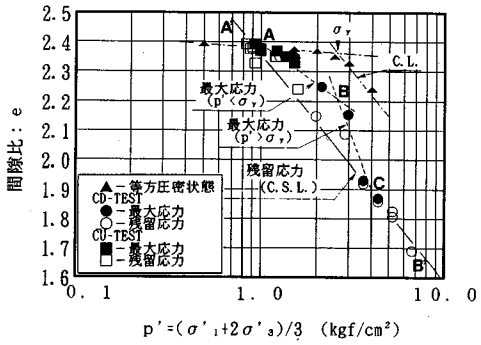
5.　軽量土の破壊基準

気泡を混入した軽量土の圧密排水・非排水せん断時の有効応力経路および間隙比変化経路を明白にし，破壊基準を求めるために，一例として Ligth-2 の排水・非排水せん断試験より得られる有効応力経路（$q=(\sigma_1-\sigma_3) \sim p'=(\sigma_1'+2\sigma_3')/3$）と間隙比変化経路（$e \sim p'$）を図—10（a）（b）に示す．排水せん断時の有効応力経路は等方圧密応力（σ_c'）が圧密降伏応力（σ_y）より小さいと，図中の直線 $a-a$ に示すように，せん断によって軸差応力（q）は増加し，最大軸差応力（●）に至るが，それ以降は減少に移行し，残留軸差応力（○：ここでは軸ひずみ（ε_a）が $\varepsilon_a=15\%$ 時の応力状態）に到達する．しかし，等方圧密応力（σ_c'）が圧密降伏応力（σ_y）より大きいと，応力経路は直線 $b-b$ のようになり，最大軸差応力（●）と残留軸差応力（○）は同一点で示される．このとき，排水せん断時の間隙比変化経路は等方圧密応力（σ_c'）が圧密降伏応力（σ_y）より小さいと，図中の曲線 $e-e$ に示すように，せん断によって間隙比（e）は減少し，最大軸差応力（●）に至り，それ以降も間隙比は減少し，残留軸差応力（○）に到達する．しかし，等方圧密応力（σ_c'）が圧密降伏応力（σ_y）より大きいと，曲線 $f-f$ のように最大軸差応力（●）と残留軸差応力（○）は同一点で示される．

一方，非排水せん断時の有効応力経路は等方圧密応力（σ_c'）と圧密降伏応力（σ_y）の大小関係に関係なく，図中の曲線 $a-c$ と $b-d$ に示すように，等方圧密状態からせん断により最大軸差応力（■）に到達し，それ以降，軸差応力は減少し，残留軸差応力状態（□）に到達する．また，間隙比変化経路は等方圧密応力（σ_c'）と圧密降伏応力（σ_y）の大小関係に関係なく，図中の直線 $e-g$ と $f-h$ に示すように，等方圧密状態からせん断により最大

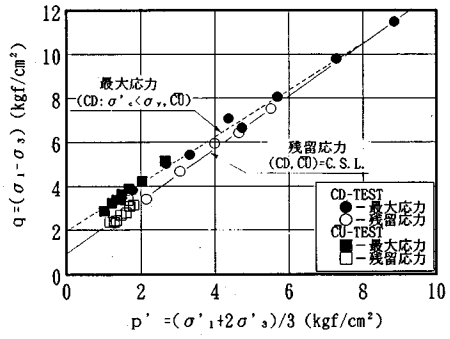


(a) q～p'関係

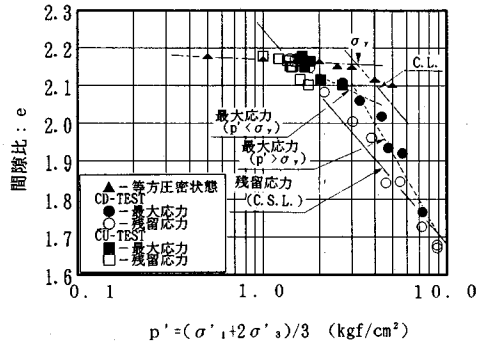


(b) e～log p'関係

図—11 Light-2の破壊基準



(a) q～p'関係



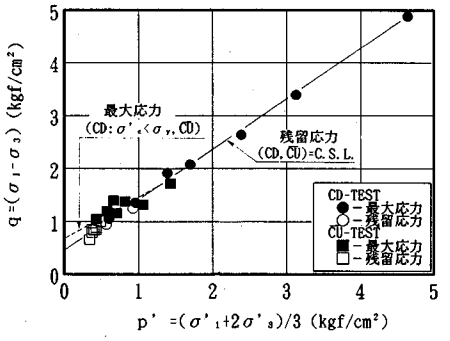
(b) e～log p'関係

図—12 Light-1の破壊基準

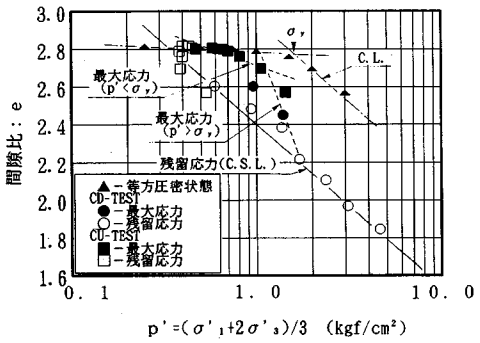
軸差応力（■）に到達し，それ以降，軸差応力は減少し，残留軸差応力（□）に到達する．

いま，軽量土の破壊基準を求めるため，$q=(\sigma_1-\sigma_3)$～$p'=(\sigma_1'+2\sigma_3')/3$ 関係と e～$\log p'$ 関係で最大軸差応力と残留軸差応力をプロットすると図—11（a）（b）のようになり，q～p' 関係では排水・非排水条件での最大軸差応力状態（●，■印）は一つの点線AB上にプロットされ，残留軸差応力状態（○，□印）は実線A′B′上にプロットされている．このように，軽量土の破壊線は一般的な粘性土での過圧密・正規圧密状態と同様に，2本の破壊線で規定できる．

残留応力状態の破壊線は飽和粘性土でいう限界状態（Critical State）と同等であるので，破壊線A′B′は飽和軽量土の限界状態線（Critical State Line：CSL）に相当することになる．また，e～$\log p'$ 関係の最大軸差応力状態（●，■印）は排水せん断時にセメンテイションが降伏する応力状態（$p'>\sigma_y$）となると体積変化が急激に大きくなるため圧密降伏応力（σ_y）付近を境とした点線ABとBCの2直線で表され，残留軸差応力状態（○，□印）は実線A′B′の一つの直線で示される．この実線A′B′の直線勾配は一点鎖線で示す等方圧密曲線の圧密降伏応力（σ_y）以上の直線勾配と等しく，Schofield ら[7]が粘土で示した e～$\log p'$ 関係での圧密曲線と



(a) q～p'関係

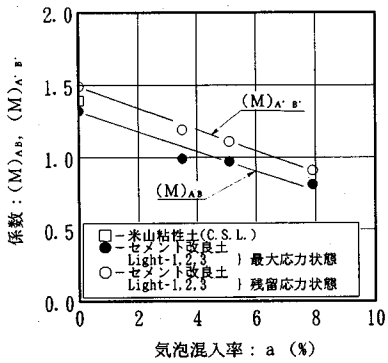


(b) e～log p'関係

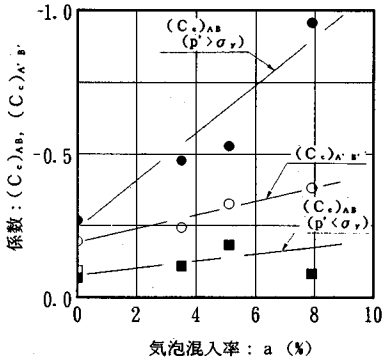
図—13 Light-3の破壊基準

表—4　$q=Mp'+\alpha$, $e=e_c-C_c\ln(p')$ の係数

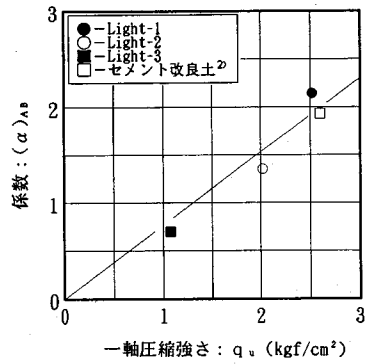
	q～p'：q＝Mp'＋α				e～log p'：e＝e$_c$＋C$_c$ln(p')			
状態	最大応力状態		残留応力状態		最大応力状態		残留応力状態	
破壊線	AB		A' B'		AB		A' B'	
係数	$(M)_{AB}$	$(\alpha)_{AB}$	$(M)_{A'B'}$	$(\alpha)_{A'B'}$	$(e_c)_{AB}$	$(C_c)_{AB}$	$(e_c)_{A'B'}$	$(C_c)_{A'B'}$
米山粘性土	1.39	0.00	1.39	0.00	1.119	-0.094	1.119	-0.094
セメント改良土	1.44	1.75	1.49	0.44 (CSL)	1.742	-0.068 ($p'<\sigma_y$)	1.877	-0.195 (CSL)
					2.058	-0.268 ($p'>\sigma_y$)		
Ligth-1	1.08	1.97	1.20	0.96 (CSL)	2.197	-0.108 ($p'<\sigma_y$)	2.252	-0.244 (CSL)
					2.707	-0.476 ($p'>\sigma_y$)		
Ligth-2	0.99	1.33	1.11	0.78 (CSL)	2.386	-0.182 ($p'<\sigma_y$)	2.363	-0.327 (CSL)
					2.671	-0.529 ($p'>\sigma_y$)		
Ligth-3	0.79	0.68	0.95	0.45 (CSL)	2.756	-0.081 ($p'<\sigma_y$)	2.396	-0.382 (CSL)
					2.786	-0.957 ($p'>\sigma_y$)		



図—14　係数 M と気泡混入率の関係



図—16　係数 C_c と気泡混入率の関係



図—15　係数 $(\alpha)_{AB}$ と一軸圧縮強さの関係

限界状態線の関係と同様である．

この傾向は図—12，13 に示すように，気泡混入率に関係なく Ligth-1，Ligth-3 でも同様である．

6.　気泡混入率が破壊基準に及ぼす影響

前述のように軽量土の破壊線は最大応力状態と残留応力状態によって異なる 2 つの直線関係となるので，q～p' 面での破壊線および e～log p' 面での破壊線は

$$q=Mp'+\alpha \qquad (1)$$

$$e=e_c-C_c\ln(p') \qquad (2)$$

で表され，係数の値を破壊線より求めると表—4 のようになる．表中には母材の米山粘性土および気泡を混入しないセメント改良土の係数も付記している．

係数 M は表—4 に示すように，母材をセメント改良することで最大応力状態の係数 $(M)_{AB}$ は若干小さくなるが，残留応力状態の係数 $(M)_{A'B'}$ は若干大きくなっている．さらに，気泡混入率 (a) と係数 M の関係をみると図—14 のようになり，セメント改良土に気泡を混入すると，母材である米山粘性土の係数 M よりも小さくなり，気泡混入率 (a) の増加とともに最大応力状態

での係数 $(M)_{AB}$ も残留応力状態での係数 $(M)_{A'B'}$ も直線的に低下する．気泡混入率（a）と初期間隙比（e_0）の間には図—1のように比例関係があり，a の増加によって e_0 は増加している．係数 M は土粒子間の摩擦成分を意味するので粒子間の摩擦力が低下していることがわかる．しかし，最大応力状態で米山粘性土では $\alpha=0$ であるのに対し，軽量土では $\alpha\neq0$ となっている．このとき，最大応力状態の係数 $(\alpha)_{AB}$ と一軸圧縮強さ（q_u）の関係で示すと図—15のようになり，係数 $(\alpha)_{AB}$ は q_u と一次的な関係を示し，$(\alpha)_{AB}=0.7\,q_u$ で表される．

一方，気泡混入率（a）と最大応力状態および残留応力状態での式（2）の傾きを表す係数 C_c をみると図—16に示されるようになり，気泡混入率（a）の増加に比例して最大応力状態の係数 $(C_c)_{AB}$ および残留応力状態の係数 $(C_c)_{A'B'}$ が直線的に増大していることがわかる．

7. むすび

気泡を混入した軽量土のセメント混入率および配合含水比を一定とし，気泡の混入率のみを変化させた軽量化のせん断挙動および体積変化挙動の変化について検討を行い，軽量土の破壊基準について応力のみの関係から応力と体積変化を考慮した破壊基準へと拡張した結果を要約すると以下のとおりである．

（1） 気泡混入率が異なる軽量土はセメント改良土と同じように等方圧密時にセメンテイションが降伏する圧密降伏応力（σ_y）が存在し，その圧密降伏応力は一軸圧縮強さ（q_u）と一次的な関係を持ち，$\sigma_y=1.2\,q_u$ で表される．

（2） 気泡混入率が異なる軽量土の排水せん断挙動は，拘束圧力が $\sigma_c'/q_u\fallingdotseq0.75$ の場合，気泡混入率の増加に伴い q_{max} がみられなくなり，このときの体積ひずみ（ε_v）の挙動から気泡混入率が影響している．また，ε_v は σ_c'/q_u が同一であれば気泡混入率が異なっても，$\varepsilon_a=5\%$ までは同じであるが，$\varepsilon_a=5\%$ 以上となると気泡混入率が多い供試体ほど ε_v は大きくなる．

（3） 気泡混入率の異なる軽量土の非排水せん断時の $q\sim\varepsilon_a$ 関係をみると，気泡混入率や σ_c'/q_u が異なっても，初期ひずみ領域での勾配が高く，明確な最大応力がみられる典型的なひずみ硬化—軟化型の $q\sim\varepsilon_a$ 関係となる．

（4） 軽量土の $q\sim p'$ 面での破壊線は，一般的な粘性土で用いられているような過圧密・正規圧密状態にある土の破壊線と同様に，2つの最大応力状態と残留応力状態となり，残留応力状態での破壊線は粘土でいう限界状態（Critical State）に相当する．また，$e\sim\log p'$ 面での破壊線も最大応力状態では圧密降伏応力を境にした2つの直線，残留応力状態は1つの直線となる．

（5） $q\sim p'$ 面での破壊線を $q=Mp'+\alpha$，$e\sim\log p'$ 面での破壊線を $e=e_c-C_c\ln(p')$ として表したとき，気泡混入率が増加すると，係数 M は直線的に低下し，また，最大応力状態での係数 α は一軸圧縮強さ（q_u）と一次的な関係が認められた．係数 C_c は気泡混入率の増加とともに大きくなる．

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. 373，1989.
2) 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.
3) 足立紀尚，小川豊和：堆積軟岩の力学特性と破壊基準，土木学会論文集，第295号，pp. 51-63，1980.
4) 寺師昌明，田中洋行，光本司，新留雄二，本間定吉：石灰・セメント系安定処理土の基本的特性に関する研究（第2報），港湾技術研究所報告，第19巻，第1号，pp. 33-59，1980.
5) 小林　晃，龍岡文夫：セメント混合により改良した飽和軟弱粘性土の強度変形特性Ⅱ，生産研究，34巻，8号，pp. 23-26，1982.
6) 小林　晃，龍岡文夫：セメント混合により改良した飽和軟弱粘性土の強度変形特性Ⅳ，生産研究，34巻，9号，pp. 27-30，1982.
7) Schofield, A.N. and C.P. Wroth : *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, London, 1968.

(1994.6.16 受付)

INFLUENCE OF FOAM VOLUME RATIO ON MECHANICAL PROPERTIES IN LIGHT-WEIGHT SOIL

Juichi YAJIMA, Shigeki MARUO and Shoji OGAWA

This paper describes on the mechanical properties of light-weight soil which were improved cement and foam. Especially, the influence of foam volume ratio on shearing strength in light-weight soil is studied.

As result of these studies, it is clear that the influences of foam volume ratio on shearing strength are affected at axial strain above 5% and high volimetric strain are occured with increment of foam volume ratio. And the failure criteria of light-weight soil is not only indicated the relation q and p' but also is indicated by consideration of volumetric strain, and it is different by the magnitude foam volume ratio.