

# 軽量盛土材としての気泡セメントの力学的特性と 降伏規準に関する一考察

## MECHANICAL PROPERTIES OF FOAMED CEMENT AS A LIGHTWEIGHT FILL MATERIAL AND CONSIDERATION FOR YIELD CRITERION

山内豊聡\*・浜田英治\*\*

By Toyotoshi YAMANOUCHI and Eiji HAMADA

It has been unusual to utilize foamed cement (FC) for embankment fill materials, which has been conventionally used as a matrix of lightweight concrete. The FC reported by this paper was produced with the porosity  $n=80\sim90\%$  for the purpose of using as lightweight fill materials because of its dry unit weight  $\gamma_d=0.3\text{ gf/cm}^3$ . To make clear mechanical properties of FC, unconfined compression tests and triaxial compression tests were performed. This paper describes about these results, which are summarized as follows. (1) Unconfined compressive strength of FC firmly correlate with void ratio and water content after curing. (2) Compressive yield stress is inversely proportional to effective confining pressure.

*Keywords: foamed cement, lightweight fill material, yield stress, triaxial compression test, yield criterion*

### 1. はじめに

軟弱地盤上の盛土の沈下対策あるいは擁壁の土圧軽減を目的として、従来から火山灰、石炭灰、水砕スラグなどの軽量盛土材料（単位体積重量  $\gamma=1.2\sim1.6\text{ tf/m}^3$ ）が利用されてきた。ところが近年発泡スチロール（ $\gamma=0.02\sim0.04\text{ tf/m}^3$ ）のような超軽量盛土材料ともいえる人工材料が使われ始め、注目されるようになった。

一方、気泡セメント（Foamed cement, 以下FCと称する）は凍上防止の断熱材として利用されたことはあったが<sup>1)</sup>、特に盛土材料として利用されたことは少なく、主に建築用の軽量コンクリートとして利用されてきた。ここに報告するFCは間隙率（気孔率あるいは気泡率）を  $n=80\%$  以上に高めて乾燥単位体積重量を  $\gamma_d=0.3\text{ tf/m}^3$  程度にし、上記のような軽量盛土材料として利用することを目的に開発されたものである。この材料の利点は現場で生産できること、流動性を有するため充填剤として使用できること、無機質材料なので土とのなじみがよい等であるが、欠点としては、このような高間隙率のFCは現場打設時の品質管理が難しいことが

挙げられよう。

この材料が軽量盛土材として普及するには要求された品質を生産、管理する技術の確立も大切であるが、多孔質体であるがゆえにもつ特有の力学的特性を明らかにすることも不可欠である。本報告はこのような背景から、特にこの材料の力学的特性を明らかにすることに主眼を置いたものである。

Photo 1 に FC 表面の接写写真を、Table 1 に FC の代表的な物性値（透水試験を行った試料の実測値）を示

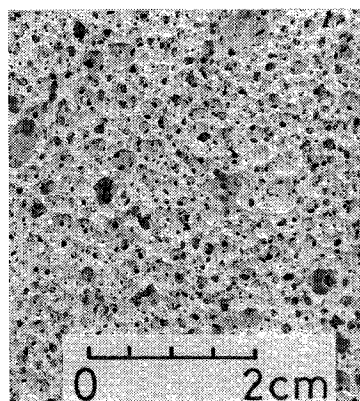


Photo 1 Surface texture of FC specimen.

\* 正会員 工博 九州産業大学教授 工学部土木工学科  
(〒813 福岡市東区松香台 2-3-1)

\*\* 正会員 大洋技術開発(株) (〒852 長崎市家野町 9-9)

Table 1 Representative properties of FC.

粒子の比重	$G_s$	2.441
間隙比	$e_o$	7.30
間隙率	$n$ (%)	87.95
乾燥単位体積重量	$\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	0.295
飽和単位体積重量	$\gamma_{sat}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1.17
透水係数	$k$ (cm/s)	$8.8 \times 10^{-3}$

している。本研究で行った実験はFCの一軸圧縮試験、繰返し一軸圧縮試験および三軸圧縮試験で、これらの結果に基づいて力学的特性を明らかにするとともに、FCの降伏規準についても考察している。

2. FC 供試体の一軸圧縮特性

(1) 供試体の準備と試験方法

今回実験用に準備したFCはセメントスラリー(W/C=50%)に起泡剤(高級アルコースルホン酸とトリエタノールアミン塩の混合液)を配合したもので、間隙率  $n=85\sim95\%$ 、乾燥単位体積重量  $\gamma_d=0.2\sim0.5$  gf/cm<sup>3</sup>の範囲のものを数種調整し、30×30×50 cmのプラスチック製の型枠内で、ふたをして室内において約2か月養生した。供試体は型枠から取り出したFCブロックを小片に切り出し、トリマーで直径5 cm、高さ10 cmの円柱形に成形した。一軸圧縮試験は通常の土質試験法に沿った方法で行い、圧縮荷重はロードセル、軸変位は変位計で測定し、軸圧縮速度は土よりも硬質のため通常の土質の場合( $\dot{\epsilon}=1.0\%/min$ )よりも遅くし、その1/2の $\dot{\epsilon}_a=0.5\%/min$ とした。圧縮中の供試体の上下端面は滑らかな真ちゅうの表面に接している。

(2) 試験結果と考察

a) 間隙比と一軸圧縮強度の関係 Fig.1に圧縮前の間隙比  $e_o$ が異なるFC供試体の一軸圧縮応力  $\sigma_a$ ~軸ひずみ  $\epsilon_a$  曲線を示している。当然のことながら間隙の少ないものほど圧縮強度が高く、初期の剛性も高い傾向を示しているが、特徴的なことは、降伏後に  $e_o=6.836$  と  $7.445$  の  $\sigma_a$  が約  $3$  kgf/cm<sup>2</sup> 程度低下するがその後残留強度を維持しているということである。これは供試体が全体的に破壊するのではなく局部的に破壊していくためと思われ、このことは圧縮中の供試体の観察で供試体の上下端面あるいは中央部分で気孔の骨格がつぶれながら破壊が進行したことからもいえる。Fig.2には  $e_o$  と一軸圧縮強度  $q_u$  の関係を示しているが、この図からわかるように  $e_o$  と  $q_u$  との間に強い相関関係が得られ、最小2乗法により次の実験式(1)が得られた(相関係数  $r=-0.973$ )。

$$q_u = 100.00 \exp(-0.396 e_o) \dots \dots \dots (1)$$

気孔の骨格を構成する材料、つまり起泡剤とセメント

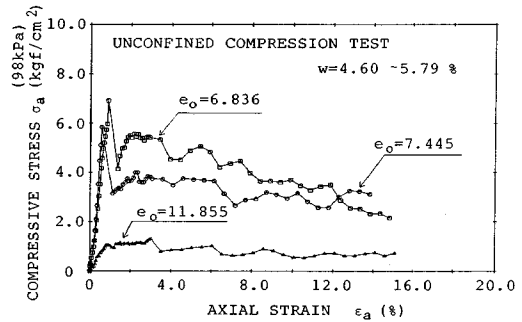


Fig.1 Stress~strain curves in unconfined compression tests.

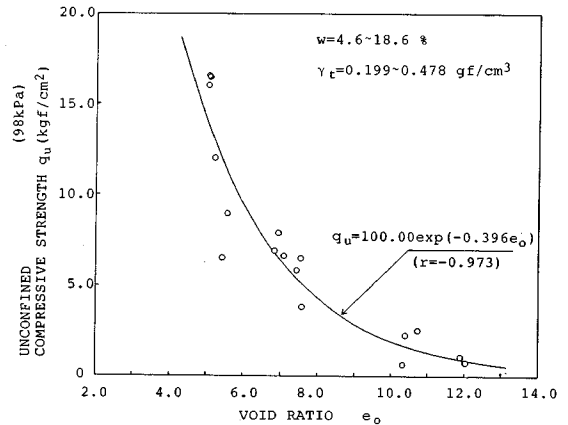


Fig.2 Relationship between void ratio and compressive strength.

スラリーとの混合物が固化した実質固体部分だけからなる材料( $e_o=0$ )の一軸圧縮強度をいま  $q_{u0}$  とおくと、式(1)は次のように表現できよう。

$$q_u = C_1 \cdot q_{u0} \cdot \exp(-0.396 e_o) \dots \dots \dots (2)$$

$C_1$  は起泡剤の混入率に依存する定数で通常  $C_1=0.3\sim0.5$ 、 $q_{u0}$  はセメントスラリーのW/Cによって変化する。

Fig.3は  $e_o$  と弾性係数  $E$  ( $\sigma_a \sim \epsilon_a$  曲線の初期接線勾配)の関係を示すが、 $E$  も  $q_u$  と同様に  $e_o$  の増加に伴って指数関数的に減少し、次式(3)の実験式が得られた(相関係数  $r=-0.947$ )。

$$E = 20910 \exp(-0.431 e_o) \dots \dots \dots (3)$$

これは式(2)と同様に  $C_2$  を定数、 $E_0$  を  $q_{u0}$  に対応する弾性係数とすれば次式(4)となる。 $C_2$  はW/Cによって通常  $0.10\sim0.15$  の値となる。

$$E = C_2 \cdot E_0 \cdot \exp(-0.431 e_o) \dots \dots \dots (4)$$

b) 含水比と一軸圧縮強度の関係 以上は含水比  $w=4.6\sim18.6\%$  の条件下での一軸圧縮強度特性だが、いったん室内乾燥させた供試体を水浸すると、Fig.4に示すように強度は乾燥時に比較して約40%低下する。

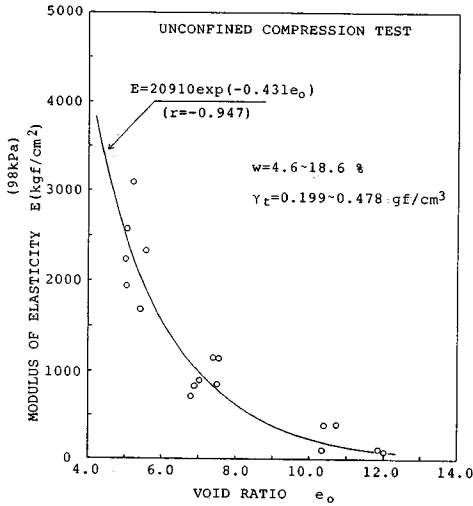


Fig. 3 Relationship between void ratio and modulus of elasticity.

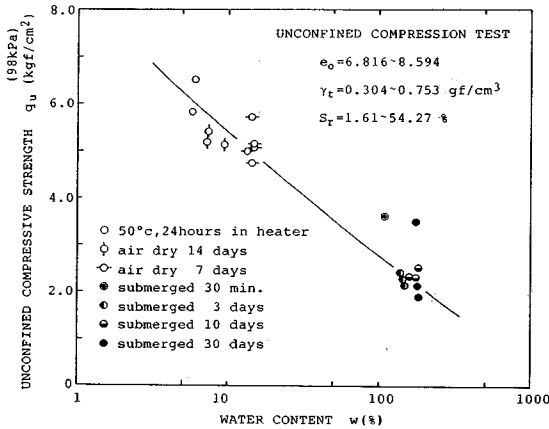


Fig. 4 Relationship between water content and compressive strength.

この原因は現時点では不明であり、今後の研究が必要であるが、Fig. 4 からわかるように水浸した後の強度は、水浸 30 日間ではほとんど変化していない。なお供試体の水浸は、水道水を入れた水槽内に供試体を投入して自然吸水させる方法とし、試験時に供試体を水槽から取り出すときは、供試体からの水の流出を許している。

c) 強度の異方性 FC の強度の異方性については一軸圧縮試験によって確かめ、結果を Fig. 5 に示している。この図からわかるように、一軸圧縮強度は供試体を打設および養生時の重力の方向から 45 度の方向に圧縮したときが、他の方向に比較してやや低い強度を与えているように思えるが、同方向の  $q_u$  のばらつきも無視できないため、サンプル数を増やしてさらに詳しく検証する必要がある。なお、前述の一軸圧縮試験およびこれ

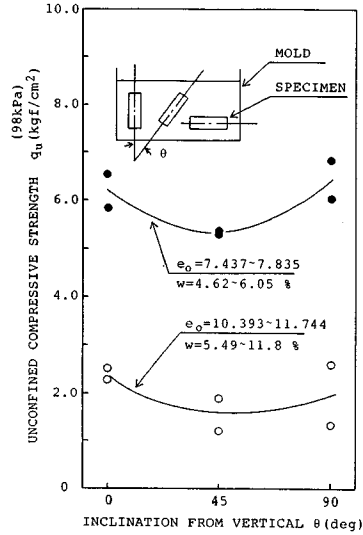


Fig. 5 Relationship between inclination of specimen and compressive strength.

から述べる繰返し一軸圧縮試験、三軸圧縮試験の供試体はすべて  $\theta=0$  の方向に切り出したものである。

### 3. 繰返し一軸圧縮特性

#### (1) 試験方法

一軸圧縮試験に用いた供試体と同じ形状で  $n=88\%$  ( $e_0=7.3\sim7.4$ )、水浸 3 日の条件 ( $q_u=2.29 \text{ kgf/cm}^2$ ) で繰返し一軸圧縮試験を行った。水浸 3 日の供試体を用いたのは、盛土材として利用する場合雨水、地下水の浸透により湿潤することを考慮したためだが、圧縮中の供試体は特にメンブレン等を装着していない。結果は Fig. 6 に示しているが、図中に示すように圧縮応力は初期値  $\sigma_0=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 、応力振幅  $\Delta\sigma=\pm 0.2 \text{ kgf/cm}^2$  と  $\sigma_0=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\Delta\sigma=\pm 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  の 2 通りについて行った。繰返し载荷は 5 Hz で 100 000 回まで連続させた。荷重はロードセル、軸変位は非接触式変位計で測

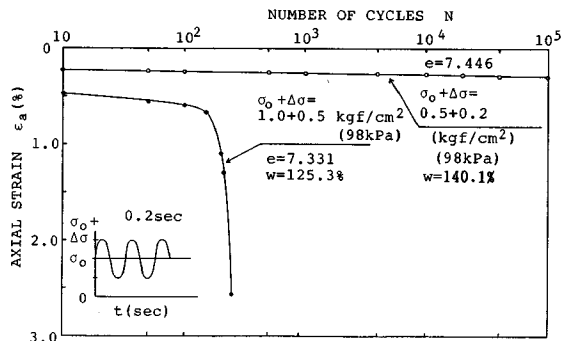


Fig. 6 Relationship between number of cycles and axial strain.

定している。

(2) 試験結果

Fig. 6 は繰返し載荷回数  $N$  と載荷時の軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係を示している。この図から明らかなように、載荷時  $0.7 \text{ kgf/cm}^2$  の応力レベルでは、 $N$  の増加に対しては  $\epsilon_a$  はほとんど変化していないことがわかる。最大圧縮時  $1.5 \text{ kgf/cm}^2$  の応力レベルになると  $N=200$  回付近で  $\epsilon_a$  は急増し、降伏状態となっている。ただし FC を道路盛土として使用した場合、通常の路盤直下で車両の走行時に路床上で発生する鉛直応力が  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  程度以下であることを考えれば、その応力レベルでは湿潤状態でも累積変位は生じないことが、 $5 \text{ Hz}$  の要素試験からが一応確認されたことになる。

4. 飽和した FC 供試体の三軸圧縮特性

(1) 試験方法

試験を行った FC 供試体は、一軸圧縮試験に用いた供試体と同様な方法で作製したもので、 $n=88\%$ 、 $e_0=7.092\sim 7.792$ 、 $\gamma_a \approx 0.3 \text{ gf/cm}^3$  のものとした。供試体は、圧縮中の体積変化を精度良く測定すること、現場に盛土として利用するときは湿潤条件となる場合が多いこと、等の理由から以下に示す方法で完全飽和させた。Fig. 7 に供試体の飽和方法を示しているが<sup>2)</sup>、まず三軸セル内にセットした供試体の内部に  $-1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の、同時にセル室に  $-0.8 \text{ kgf/cm}^2$  の負圧をかけ、有効拘束圧を  $0.2 \text{ kgf/cm}^2$  で保ったまま約 50 分間脱気する。次にその状態で、2 個の脱気水槽の水頭差を利用して脱気水を約 1 時間通水した。この方法により、供試体の飽和度を  $S_r=100\%$  ( $B$  値  $=0.95$  以上) とすることができた。Fig. 8 には三軸圧縮試験装置を示している。この図に示すように供試体の上下端面はテフロンシート、シリコングリース、ラテックスメンブレンシートで摩擦を軽減し、供試体の体積変化は差圧計で、間隙水圧は間隙水圧計で

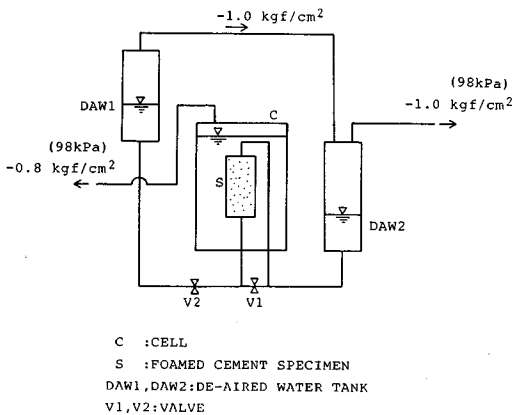


Fig. 7 Method of saturation for FC specimens.

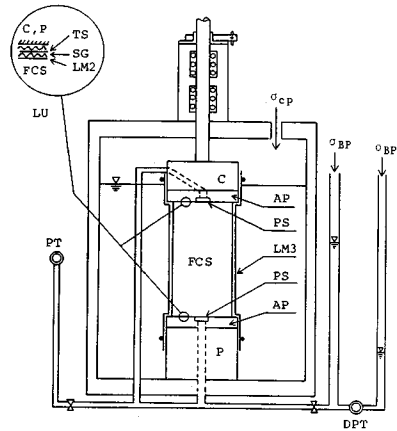


Fig. 8 Triaxial apparatus for FC specimens.

測定した。

試験は等方圧密・排水圧縮試験 (CD) と等方圧密・非排水圧縮試験 (CU) の 2 通り行い、いずれの場合もバックプレッシャーを  $\sigma_{BP}=1.0 \text{ kgf/cm}^2$  かけている。圧密時の有効拘束圧は、CD 試験の場合を  $\sigma'_{c0}=0.1, 1.0, 3.0, 4.0, 4.14 \text{ kgf/cm}^2$  の 5 段階、CU 試験の場合を  $\sigma'_{c0}=1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 4.3 \text{ kgf/cm}^2$  の 5 段階としたが、最大の  $\sigma'_{c0}$  をそれぞれ  $4.14 \text{ kgf/cm}^2$  と  $4.3 \text{ kgf/cm}^2$  にしたのは、後で述べるが、その圧力下の等方圧密過程中に降伏が認められたからである (体積変化が急増し、供試体表面にへこみが観察された)。この試料の間隙水圧や体積変化を実質的に支配するのは気孔の部分であり、透水係数が  $10^{-3}$  のオーダー (細砂に相当) であることから軸圧縮速度は CD, CU 試験とも  $\dot{\epsilon}_a=0.1\%$  /min とした。

この材料に対する有効応力の適用性の可否については、(1) 飽和透水係数  $k=10^{-3} \text{ cm/s}$  と比較的透水性が良い、(2) 固体部分の材料が固化したセメントペーストなのでそれ自体の圧縮率が気泡体の圧縮率に比較して非常に低い、(3)  $e_0=7$  のときの平均接触面積比は  $0.125$  と低い、等の理由により適用できるものと判断した<sup>3)</sup>。

(2) 排水圧縮特性 (CD)

a) 応力と軸ひずみの特性 Fig. 9 は CD 試験から

得られた軸差応力  $q \sim$  軸ひずみ  $\epsilon_a$  曲線である。この図から降伏点を判断することはやや難しいが、それでも  $\sigma'_c$  が増加しても圧縮強度（軸差応力  $q$ ）は増加していないことは判断できる。また圧密過程に降伏現象が認められた  $\sigma'_c = 4.14 \text{ kgf/cm}^2$  の場合は、他の試料に比較して  $q \sim \epsilon_a$  曲線の初期の立ち上がりが鈍く、 $\sigma'_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$  と比べても全体的に  $q$  が低いようである。つまりこれらのことから、FC は通常の土質材料とは異なり、有効拘束圧を増加させても圧縮強度は増加しないということが推定できる。ただし、高い圧密圧力下で FC の密度が高くなった場合は再び圧縮強度が増加するかもしれない。さらに特徴的なことは、降伏後にいったん強度の低下が生じても再び回復し、その後も低下と回復を繰り返している。この現象は粘土や砂が同様な試験で残留強度を維持している状態と異なり、FC の場合は、気孔の骨格（壁面）の破壊が降伏時にまず発生し、それが連鎖的に徐々に周囲に広がっているのではないと思われる。

b) 体積変化と弾性係数 Fig. 10 には軸圧縮過程の初期段階の体積ひずみ  $\epsilon_v \sim$  軸ひずみ  $\epsilon_a$  曲線を示している。この図から軸圧縮中の体積変化は収縮のみ生じ、その割合は  $\sigma'_c$  が高いものほど大きい傾向があることがうかがえる。Fig. 9 の  $q \sim \epsilon_a$  曲線の初期接線勾配から与えられる弾性係数は  $E = 600 \sim 900 \text{ kgf/cm}^2$  で、 $\sigma'_c$  の変化にほとんど無関係のようである。ポアソン比  $\nu$  は最

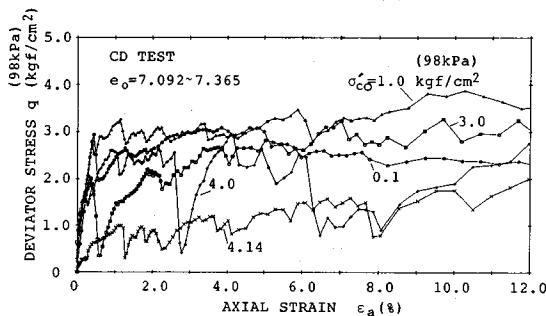


Fig. 9 Deviator stress ~ axial strain curves in CD tests.

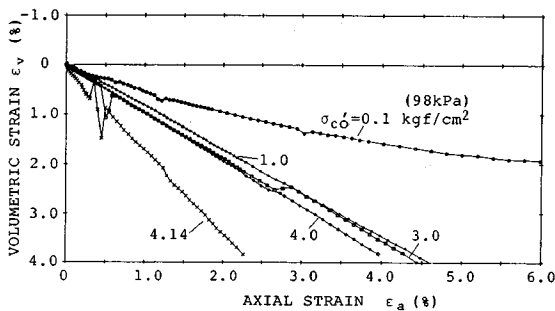


Fig. 10 Volumetric strain ~ axial strain curves in CD tests.

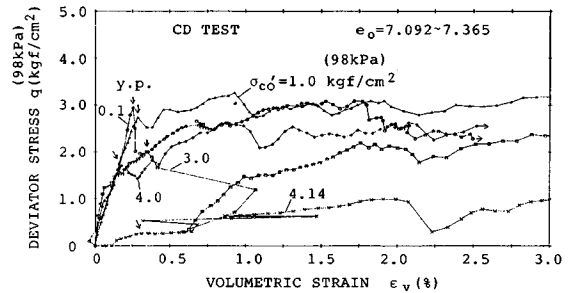


Fig. 11 Deviator stress ~ volumetric strain curves in CD tests.

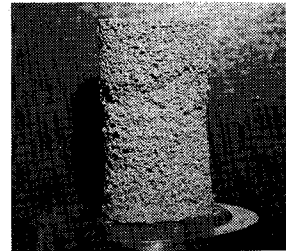


Photo 2 FC specimen after CD test ( $\sigma'_c = 406 \text{ kPa}$ ,  $\epsilon_a = 12\%$ ).

初降伏が起こるまでの弾性領域内の次式(5)で計算した。

$$\nu = (1 - \epsilon_v / \epsilon_a) / 2 \dots \dots \dots (5)$$

それによると  $\nu = 0.02 \sim 0.2$  となり  $\sigma'_c$  の増加とともに減少する傾向が認められた。

c) 降伏特性 Fig. 11 に軸圧縮過程の初期段階の  $q \sim \epsilon_v$  曲線を示している。軸圧縮中の体積は収縮する一方なので  $q \sim \epsilon_v$  曲線において最初に強度が低下し始める点 ( $\sigma'_c = 4.14 \text{ kgf/cm}^2$  については  $q$  の上昇から停滞に移行する最初の点) を降伏点とみなせば、図中に矢印 (y.p.) で示しているように、降伏応力  $q_y$  は  $\sigma'_c$  の増加とともに明らかに低下していることがわかる。しかしながら、先に述べたように等圧密中に静水圧降伏が認められたもの以外は最初の降伏後も強度を回復し、各  $\sigma'_c$  ともほぼ同程度の強度となっている。Photo 2 は CD 試験の軸圧縮後の供試体の状態である ( $\sigma'_c = 4.14 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\epsilon_a = 12\%$ )。この写真からもわかるように供試体にせん断面は認められず、気泡の骨格が供試体の内部に陥没していくような破壊形状になっている。このことから、FC 材料においてはせん断抵抗角なるものは発揮されず、圧縮強度は骨格構造の強さだけに依存しているといえる。

(3) 非排水圧縮特性 (CU)

a) 応力と軸ひずみの関係 Fig. 12 に CU 試験から得られた  $q \sim \epsilon_a$  曲線を示す。この図から降伏点を明瞭に確認することはやや困難だが、最初に圧縮応力が低下 (あるいは停滞) し、その後また回復するパターン

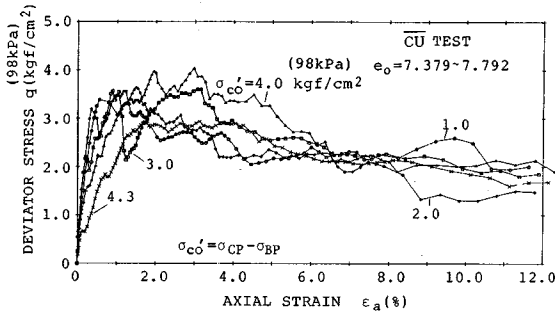


Fig. 12 Deviator stress~axial strain curves in  $\overline{CU}$  tests.

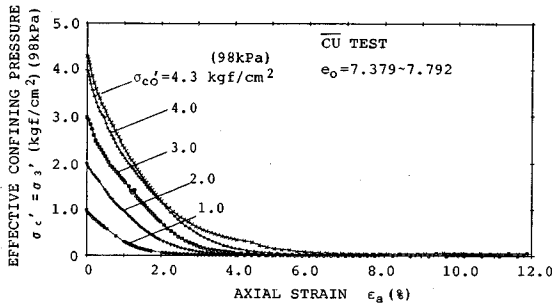


Fig. 13 Effective confining stress~axial strain curves in  $\overline{CU}$  tests.

は CD 試験の結果と共通している。また全体的な傾向として  $\sigma'_{co}$  の増加が圧縮応力の増加に寄与していないことも同様である。なお  $\epsilon_a = 6\%$  以降、各  $\sigma'_{co}$  の  $q$  に大きな差がなくなってくるのは、Fig. 13 の軸圧縮中の有効拘束圧  $\sigma'_c \sim \epsilon_a$  曲線に示すように  $\epsilon_a = 4\%$  以降は全試料とも  $\sigma'_c = 0$  となり、完全に無拘束状態となっているためであろう。

b) 降伏特性 Fig. 14 に  $\overline{CU}$  試験から得られた有効応力径路、 $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3 \sim q = \sigma_1 - \sigma_3$  曲線を示している。Fig. 12 でははっきりしなかったがこの図においては  $q$  が最初に低下あるいは停滞し始める点が認められ、それを降伏点と定義して図中に矢印で示している。

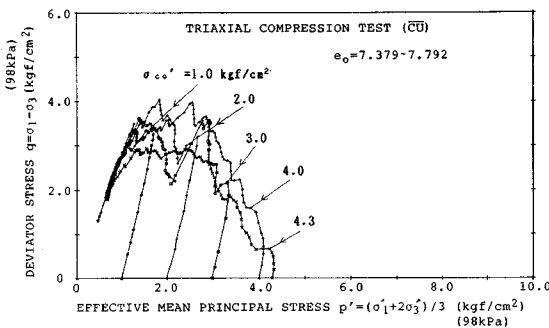


Fig. 14 Effective stress path ( $p' \sim q$ ) in  $\overline{CU}$  tests.

それによれば  $\overline{CU}$  試験の場合も CD 試験と同様に、圧密時の有効拘束圧  $\sigma'_{co}$  が高いものほど降伏応力が低くなっていることがわかる。また等方圧密中に降伏が認められた  $\sigma'_{co} = 4.3 \text{ kgf/cm}^2$  の場合は軸圧縮による最初の降伏応力も低い、その後の強度の回復も鈍いようである。

### 5. FC の降伏規準に関する一考察

三軸圧縮特性で述べたように、FC のように間隙率が非常に高く骨格構造をなす材料は、等方圧密によって静水圧降伏が生じる以前では、モール・クーロンの規準が適用できないようである。つまり土質材料と異なり、有効拘束圧の増加に従って軸差応力が増加せず逆に低下する傾向をもつためである。また Fig. 15 に示す等方圧密応力  $\sigma'_{co}$  ~ 体積ひずみ  $\epsilon_v$  の関係から静水圧降伏点 ( $\sigma'_{co,v}$ ) が明瞭に認められ、それより高い拘束圧下では  $\sigma'_{co} = 4.14, 4.3 \text{ kgf/cm}^2$  で供試体へこみが生じたように骨格構造が破壊され始めるため、圧縮強度はさらに低下するであろう。ただし静水圧降伏後も圧密を続け、ある程度密度が高い材料になった後の強度特性については、今回は議論の対象としていない。

一軸圧縮試験と三軸圧縮試験から得られた応力~ひずみ曲線の形状から、Fig. 16 に示すように一軸圧縮強度

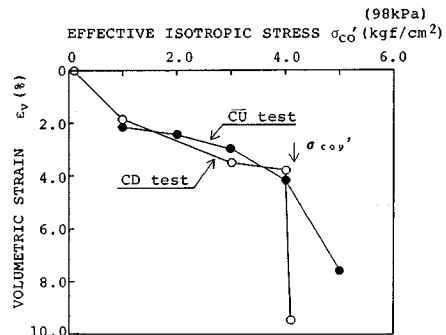


Fig. 15 Relationship between effective isotropic stress and volumetric strain.

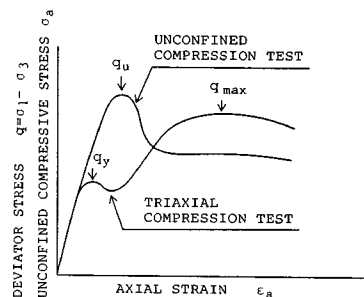


Fig. 16 Definition of yield stress for FC.

$q_u$ , 拘束圧下の降伏応力  $q_y$  および最大圧縮強度  $q_{max}$  をそれぞれ定義する。これらの点を示した簡略化した有効応力経路を Fig. 17 に示しているが、排水、非排水の両条件について平均有効応力に対する降伏曲線が得られ、それらは若干異なった傾向をもつことがわかる。なお、図中に示す  $q_u$  は試料を三軸セル内で通水飽和させ、 $\sigma'_c=0$  (セル水の静水圧のみ) で圧縮して得られたものである。以下、排水強度と非排水強度に分けて考察する。

(1) 排水強度のまとめ

わかりやすく整理するために、Fig. 18 に CD 試験結果の圧縮強度と有効拘束圧をそれぞれ上記の一軸圧縮強度  $q_u$  で正規化した関係図を示す。この図から、 $q_y$  は静水圧降伏応力  $\sigma'_{cov}=1.25 q_u$  までは  $\sigma'_c$  の増加とともに直線的に減少し、拘束圧に対する強度の低下率を式 (6) の  $R$  で定義すれば、今回試験を行った  $n=88\%$  では、 $R=0.4$  となった。その直線は式 (7) で近似される。この式は拡張されたトレスカ規準をも意味する<sup>4)</sup>。

$$R=(q_u - q_y)/\sigma'_c \dots \dots \dots (6)$$

$$q_y = q_u - R \cdot \sigma'_c \dots \dots \dots (7)$$

Fig. 18 の  $x$  軸の 1.0 と  $y$  軸の 1.0 を結んだ直線は、  
 $\sigma_1 = q_u (R=1.0) \dots \dots \dots (8)$

を表わし、これは、降伏は  $\sigma'_c$  にかかわらず最大主応力  $\sigma_1$  が  $q_u$  の値に達したときに始まることを意味している。小林・龍岡はセメント混合により改良した飽和軟弱粘性土の三軸圧縮試験を行い、この種の降伏をセメンテーションの破壊によるもので第 1 種の降伏と名付けている<sup>5)</sup>。FC と同じく軽量盛土材料として利用されつつある発泡スチロール (EPS: 型内発泡法) の降伏規準が、式 (8) で表わされることを著者らは実験的に確かめているが<sup>6)</sup>、FC の排水強度の場合  $R=1.0$  とならないのは、骨格構造をなす固化したセメントスラリーが脆性的な性質をもつからであろう。なお  $q_{max}$  については、 $\sigma'_{cov}$  までは  $q_u$  とほぼ等しい応力となっている ( $q_{max}/q_u = 1.0$ )。

(2) 非排水強度のまとめ

Fig. 19 に  $\overline{CU}$  試験結果の圧縮強度と軸圧縮中の有効拘束圧  $\sigma'_c = \sigma'_3$  を  $q_u$  で正規化した関係図を示す (有効応力表示)。Fig. 18 と比較すると、非排水降伏応力は排水降伏応力とは異なった傾向をもつことがわかる。つまり降伏応力は  $\sigma'_3/q_u < 0.5$  では  $q_u$  にほぼ等しく、それ以降はほぼ  $R=1.0$  となっている ( $n=88\%$ )。

一方、 $q_{max}$  が発揮されるときには間隙水圧の上昇のため有効拘束圧はほぼ失われており、 $q_{max}/q_u$  は 1.0 の近傍に分布している。これは  $q_u$  に近い残留強度が発揮されているともいえるが、別のいい方をすればむしろ前述したように、 $\sigma'_c=0$  の状態で骨格構造 (気孔壁) が連鎖的に破壊するときにはほぼ  $q_u$  に近い強度を与えたので

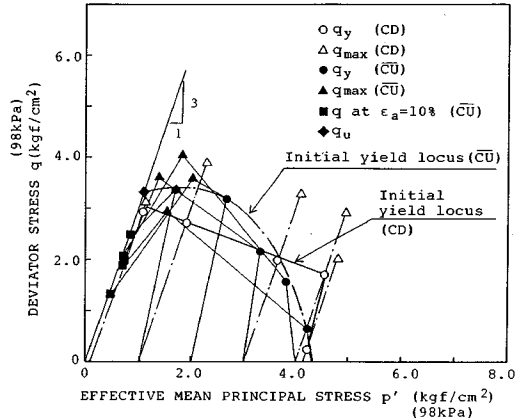


Fig. 17 Simplified effective stress path ( $p' \sim q$ ) and yield locus.

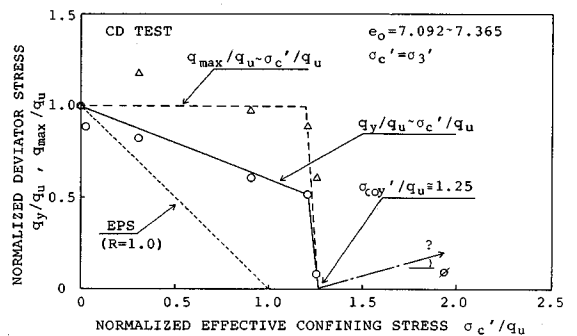


Fig. 18 Yield criterion for FC in CD condition (in total stress).

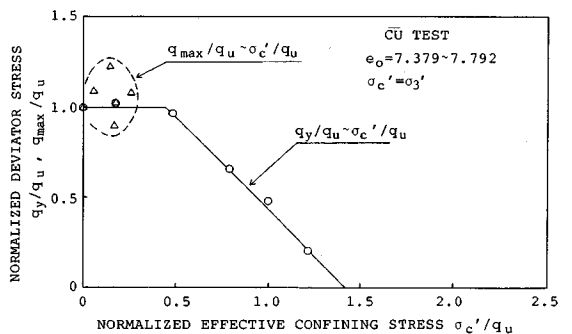


Fig. 19 Yield criterion for FC in CU condition (in effective stress).

あろう。

(3) 降伏規準の適用について

上記の拘束圧下の降伏特性が実際に考慮されるべき場合は、FC 材料による盛土の上部の土被りが厚い場合や擁壁の裏込め材とするときのようにそれ自体の打設厚が厚くなる場合であろう。さらに、今回試験を行った FC

は連通気泡となっているために透水性が良いことから ( $k \approx 10^{-3}$  cm/s), 地盤時以外では排水強度で十分であろう。

## 6. あとがき

今回行った実験から, FCの一軸圧縮強度は多孔体(たとえばセラミックス焼結体, 石膏)の圧縮強度特性として従来から指摘されていたように<sup>7)</sup>, 間隙率の増加とともに指数関数的に減少することがわかった。拘束圧下の降伏特性については, 降伏応力は有効拘束圧の増加に従って減少することがわかった。足立・小川は多孔質凝灰岩(大谷石)の三軸圧縮試験を行い, モール・クーロンの破壊規準が適用できないことを指摘し, 多孔質軟岩の破壊規準を提案している<sup>8)</sup>。FCの場合は間隙率が非常に高く, 強度も土質材料の領域であり, 軟岩とはまた異なった降伏特性をもっている。本報告で述べた降伏特性から FC 材料にも当然モール・クーロンの規準は適用できないが, 静水圧降伏応力が存在し, それまでは有効拘束圧の増加による強度の低下率が与えられることがわかった。

以下に本研究の結果をまとめて記す。

(1) 乾燥した FC の一軸圧縮強度は間隙率の増加とともに指数関数的に減少するが, 間隙比との関係で表わすと式(2)に示したように次式で与えられる。

$$q_u = C_1 \cdot q_{u0} \cdot \exp(-0.396 e_0)$$

(2) 一軸圧縮試験から得られた応力~ひずみ曲線の初期接線勾配で与えられる乾燥した FC の弾性係数は, 式(4)に示したように次式で与えられる。

$$E = C_2 \cdot E_0 \cdot \exp(-0.431 e_0)$$

(3) FC を水浸させた場合の一軸圧縮強度は,  $n = 87 \sim 90\%$  のとき乾燥時に比較して約 40% 低下したが, この原因については今後の研究が必要である。

(4) 湿潤供試体の 5 Hz の要素試験から, 車両走行時に通常の路盤直下で発生すると思われる応力レベル ( $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  程度以下) での繰返し載荷では, 圧縮ひずみは累積しないことがわかった。

(5) 飽和した FC の排水降伏強度は, 静水圧降伏点までは式(7)に示したように次式で与えられ,

$$q_v = q_u - R \cdot \sigma'_c$$

$R$  は有効拘束圧の増加に対する強度の低下率を表わす。

(6) 非排水降伏応力は  $\sigma'_c/q_u < 0.5$  では  $q_u$  にほぼ等しく, それ以降はほぼ  $R=1.0$  となる ( $n=88\%$ )。

以上本研究の結論をまとめたが, 気泡セメントの材料

特性はセメントや起泡剤の配合によって多様に変化する。今回考察を行ったのはその一配合の材料の場合に過ぎず, 気泡セメントの基本的な性質としてとらえるべきであろう。この材料を実用化するにあたっての今後の課題としては, 模型実験や現場実験等を行って盛土材としての適用性を調べる必要がある。また単位体積重量, 強度, 透水性など現場の目的に応じた材料の配合方法を確立させることも大切であろう。

最後に, 材料を提供して頂いた小野田セメント(株)の古谷俊明氏, Fig. 6 の試験にご協力頂いた基礎地盤コンサルタンツ(株)の山田眞一氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 山内豊聡：軽量盛土材とその問題点, 福岡県地質調査業協会昭和 61 年度地質調査に関する技術講演会資料, pp. 55~60, 1987.
- 2) 小山智芳・龍岡文夫：透水性の低い不攪乱砂質シルト試料の簡易飽和化法について, 土木学会第 42 回年次学術講演会講演概要集, pp. 638~639, 1987.
- 3) 龍岡文夫・足立紀尚：新体系土木工学 18 土の力学 (Ⅲ) 一圧密・せん断・動的解析一, 土木学会編, 技報堂出版, pp. 41~45, 1981.
- 4) 成沢郁夫：プラスチックの強度設計と選び方, (株)工業調査会, pp. 43~73, 1986.
- 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Ⅳ, 生産研究, 39 巻 9 号, 1982.
- 6) Hamada, E. and Yamanouchi, T.: Mechanical properties of expanded polystyrene as a lightweight fill material, Proc. 9th Southeast Asian Geotechnical Conf., pp. 9-35~9-48, Bangkok, 1987.
- 7) 近藤連一：多孔材料—性質と利用—, 技報堂出版, pp. 165~183, 1973.
- 8) 足立紀尚・小川豊和：体積軟岩の力学的特性と破壊規準, 土木学会論文報告集, 第 295 号, pp. 51~63, 1980.
- 9) 古谷俊明・山内豊聡・浜田英治：気泡セメントモルタルの力学的特性, 昭和 62 年度土木学会西部支部研究発表会講演集, pp. 406~407, 1988.
- 10) 佐々木典哉・山内豊聡・浜田英治：軽量盛土材としての気泡セメントの三軸圧縮特性, 土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集, pp. 136~137, 1988.
- 11) Maiti, S. K., Gibson, L. J. and Ashby, M. F.: Deformation and energy absorption diagrams for cellular solids, Acta metal, Vol. 32, No. 11, pp. 1963~1975, 1984.
- 12) 丹羽義次・小柳 治・小林昭一：人工軽量コンクリートの三軸圧縮破壊条件, 土木学会論文集, 第 143 号, pp. 28~35, 1967.

(1988. 10. 31・受付)