

# 気泡を混入した軽量土のせん断特性

矢島寿一\*・丸尾茂樹\*\*・小川正二\*\*\*

本研究ではセメント改良に気泡を混入した軽量土の力学的特性を解明することを目的として、土を軽量化してゆく過程、すなわち粘性土・セメント改良土・軽量土のせん断挙動の変化について検討している。その結果、セメント改良土および軽量土では等方圧密時に特有の圧密降伏応力が存在し、その圧密降伏応力と拘束圧力の大小関係によって応力-ひずみ関係、体積ひずみ、間隙水圧が異なることから、破壊線は過圧密・正規圧密飽和粘性土のように区別できることがわかった。

**Key Words** : light-weight soil, triaxial compression test, shear strength

## 1. ま え が き

近年、道路構造の直線化、宅地開発の拡大のために軟弱地盤上での盛土施工が急増し、その後の圧密沈下による問題が生じている。そのために、盛土荷重の軽減による沈下量低減、擁壁に作用する土圧低減という利点を有する土の軽量化工法が注目されている。このような、土の軽量化の方法は大別すると2種類に分類できる。一つは単位体積重量が小さい材料（例えば石炭灰<sup>1)</sup>、EPS<sup>2)</sup>など）を利用する方法。他は土に軽量の材料（例えば発泡スチロール片<sup>3)</sup>など）を混入しこれを固化材によって封じ込める方法である。後者の場合は、現在一般に行われている土質改良工法に土の軽量化という付加価値を付け加えた方法であり、また、現地発生土の有効利用という利点も加わることになる。

一般に、セメント等で改良された土では、一軸圧縮強さは数十 kgf/cm<sup>2</sup> のオーダーと非常に大きく、その時の変形量も小さく、現位置での応力状態を考えた場合、改良土の破壊ということがほとんど生じない強度特性を有している。したがって、セメント改良土の改良効果の判定基準としては試験の簡単な一軸圧縮強さが用いられている。

しかし、本研究で対象とする軽量土は一軸圧縮強さが数 kgf/cm<sup>2</sup> と小さく、また、気泡を含んでいるので、せん断特性が拘束圧力の大きさによって異なることが考えられる。そのために、拘束圧力を変化させられる三軸圧縮試験を行い、その強度・変形特性を把握する必要がある。

軽量土のような多孔質の材料のせん断特性を把握する

ために山内ら<sup>4)</sup>は気泡セメントについて三軸圧縮試験を行い、等方圧密による静水圧降伏が生じる以前では有効拘束圧力の増加に伴う軸差応力の増加はみられず、むしろ低下する傾向にあることを示し、モール・クーロンの破壊基準が適用できないことを指摘している。また、足立ら<sup>5)</sup>は、多孔質凝灰岩（大谷石）について三軸圧縮試験を行い、やはりこのような多孔質材料ではモール・クーロンの破壊基準が適用できないことを指摘し、多孔質凝灰岩独自の破壊基準を提案している。さらに小林ら<sup>6)</sup>は、軽量土ではないがセメント改良土のせん断特性は、有効拘束圧密圧力の大きさが一軸圧縮強さより大きいか否かによって大きく異なることを指摘している。

本研究での土の軽量化は、母材としての現地発生土に流動性の高い状態とするために適量の水を混合した後、固化材および気泡を混合する方法によって行った。したがって、この方法で作成された軽量土は土中に多くの気泡が存在する多孔質の材料である。

本論文では飽和試料を対象として、軽量土を作成する過程での、

- (1) 軽量化を行う前の母材である粘性土
- (2) 粘性土に適量の水および固化材を混入したセメント改良土
- (3) 気泡を混入した軽量土

のせん断特性の比較を行い、セメントおよび気泡混入によるせん断特性の変化を明確にし、セメント改良土および軽量土の破壊基準について検討した結果について述べている。

## 2. 試験方法

### (1) 試験材料および配合条件

試験に用いた母材である土は、新潟県米山付近より採取した表-1に示す物性を持つ粘性土（以下米山土と呼ぶ）である。固化材としては普通ポルトランドセメント

\* 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)

\*\* 正会員 鉄建建設(株) 技術研究所部長

\*\*\* 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部建設系

表-1 米山粘性土の物性値

G <sub>s</sub>	2.82
w <sub>L</sub> (%)	64.2
w <sub>P</sub> (%)	36.6
I <sub>P</sub>	27.6
砂分 (%)	42.5
シルト分 (%)	29.5
粘土分 (%)	28.0

表-2 セメント改良土の配合条件

配合含水比 w <sub>mix</sub> (%)	75
セメント量 C (kg/m <sup>3</sup> )	100

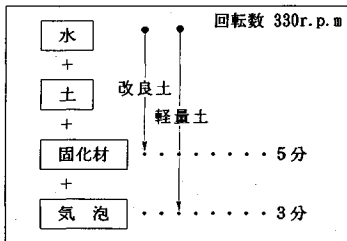


図-1 改良土・軽量土の作成手順

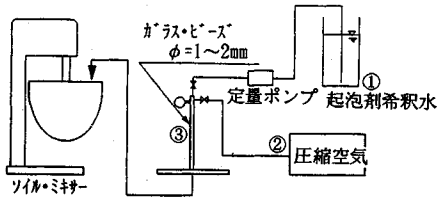


図-2 気泡発生装置

を使用し、起泡剤としては動物性蛋白系の材料を使用した。

これらの材料を混合することによって土を軽量化したが、その場合、施工の容易さと強度条件を考慮し、軽量土をポンプ圧送できる状態<sup>(7),8)</sup>であること、気泡を混入しないセメント改良土の4週間後の一軸圧縮強さが2.0 kgf/cm<sup>2</sup>以上であることの2条件を満足するように配合試験より表-2に示すように条件を決定した。

(2) 供試体作成方法および試験方法

飽和粘性土は、表-1に示す母材を懸濁状態にして、これを圧密圧0.70 kgf/cm<sup>2</sup>で予圧密して作成した。

セメント改良土(以下改良土と呼ぶ)は、図-1に示す手順で母材と水とを所定の配合含水比に調整し、懸濁状態にした後、固化材を加え、ソイル・ミキサーで十分に混合して、1200×200×200 mmの型枠に打設し、材令1日を経た後に温度20℃の水中で8週間以上養生して作成した。

軽量土は、図-1に示すように改良土と同様に水・母材・固化材をソイル・ミキサーで十分混合した後に、気

表-3 試験条件

	米山土	改良土	軽量土
$\sigma_{BP}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.00	1.00	3.00
有効拘束圧力 $\sigma'_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.00	0.50	0.50
	2.00	1.00	1.00
	3.00	1.50	1.50
	4.00	2.00	2.00
		3.00	2.50
		4.00	3.00
		5.00	4.00
		6.00	4.00

表-4 飽和供試体の物性値

	米山土	改良土	軽量土
湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.80	1.64	1.46
含水比 (%)	40.3	60.5	77.6
間隙比	1.18	1.74	2.40
一軸圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )	----	2.63	2.02

泡を混入して再び混合し、型枠に投入し、やはり20℃の水中で8週間以上養生して作成した。

気泡を発生させるためには、図-2に示すように起泡剤を5%混入した水①と5 kgf/cm<sup>2</sup>の圧縮空気②を直径φ1.0~2.0 mmのガラスビーズの詰まった管③に同時に圧送する方法をとった。なお、供試体中の気泡の混入率は、5%起泡剤希釈水の流入量を変化させて調整した。今回は一定の気泡を混入させるために、希釈水の混入量は懸濁状態の処理土10リットルに対して70 ccとした。

改良土・軽量土の8週間水中養生後の飽和度は $S_r=100\%$ とはならなかったため、飽和度を高めるために養生したブロックを真空槽中で脱気水に3時間以上浸水した後に整形して、供試体を作成した。なお、一軸・三軸圧縮試験に用いた供試体の直径および高さはφ=50 mm、H=100 mmである。

米山土、改良土には $\sigma_{BP}=1.00$  kgf/cm<sup>2</sup>、軽量土には $\sigma_{BP}=3.00$  kgf/cm<sup>2</sup>のイニシャル・バックプレッシャーを与えた。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。

各試験の有効拘束圧力は予備試験の結果、等方圧密圧力の大きさがせん断挙動に影響することがわかったので、表-3に示すように拘束圧力を $\sigma'_c=0.50\sim 6.00$  kgf/cm<sup>2</sup>の範囲で4~9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。

(3) 供試体の物性値

上記の方法で作成し、8週間水中養生した後の飽和供試体の物性値は表-4に示すとおりである。

気泡を混入しない改良土と気泡を混入した軽量土の一軸圧縮試験での応力~軸ひずみ関係は図-3に示すとおりであり、軸ひずみの小さい範囲での初期勾配は両者ではほとんど差異はない。しかし、気泡を混入しない改良土では軸ひずみが増大し、応力と軸ひずみの直線関係が失われても、せん断抵抗力の増加する範囲が存在する。

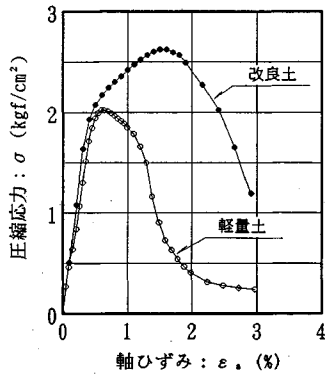


図-3 改良土・軽量土の一軸圧縮試験結果

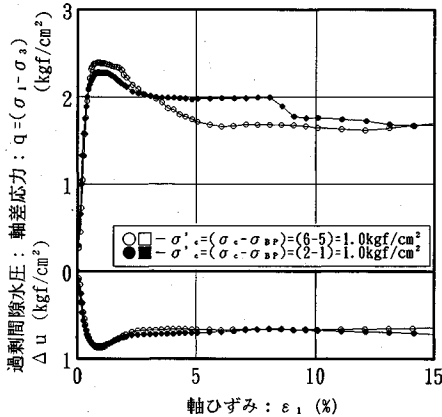


図-4 有効拘束圧力一定試験結果 (CU-TEST)

これに対し気泡を混入した軽量土では応力～軸ひずみ曲線の直線関係が失われた後には、せん断抵抗力は次第に低下している。このように応力～軸ひずみ関係で直線関係を失った後にせん断抵抗力に差が生ずるのは、気泡を混入した軽量土では改良土よりも間隙部が多いため、セメンテーションが降伏した後に土粒子間の摩擦が改良土よりも小さく、せん断抵抗力が低下するためと考えられる。

(4) 有効応力の原理の適用性に関する検討

小林ら<sup>9)</sup>は締固めたセメント改良土のように透水係数が低い場合でも有効応力の原理が成り立つと報告している。ここで対象とするような気泡を混入した多孔質の軽量土についても有効応力の原理が成り立つか否かを確認するために、以下に述べる方法でその適用性を検討した。

有効拘束圧力 ( $\sigma'_c$ ) を一定とするために拘束圧力 ( $\sigma_c$ )、バック・プレッシャー ( $\sigma_{BP}$ ) の大きさは異なるが、 $(\sigma_c - \sigma_{BP}) = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  と同一にした軽量土の圧密非排水試験の結果をみると図-4に示すように、 $\sigma_c$ 、 $\sigma_{BP}$  の値が異なっても、 $(\sigma_c - \sigma_{BP})$  が同じならば軸差応力～軸ひずみ関係、過剰間隙水圧～軸ひずみ関係はほぼ同じである。したがって、 $(\sigma_c - \sigma_{BP})$  はせん断前の有効拘束圧力

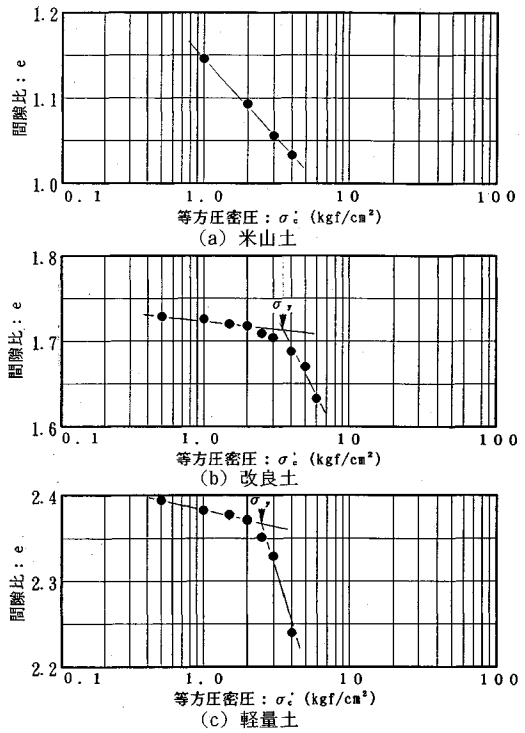


図-5  $e \sim \log \sigma'_c$  関係

なので、軽量土に対しても有効応力の原理が成り立つといえる。

3. 等方圧密時の  $e \sim \log \sigma'_c$  関係

米山土・改良土および軽量土で等方圧密圧力を  $\sigma'_c = 0.5 \sim 6.0 \text{ kgf/cm}^2$  の範囲で変化させたときの  $e \sim \log \sigma'_c$  関係は図-5のとおりであり、米山土の試験の等方圧密圧力範囲では、正規圧密状態であり、圧密降伏状態を示す圧密降伏応力はみられないが、改良土・軽量土ではセメンテーションが降伏する圧密降伏応力 ( $\sigma_y$ ) が明確に求められ、それぞれ  $\sigma_y = 3.40 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_y = 2.40 \text{ kgf/cm}^2$  である。したがって、改良土および軽量土では、 $\sigma_y$  より低い等方圧密圧力では粒子間のセメンテーションの作用のために体積変化は小さいが、 $\sigma_y$  より高い等方圧密圧力となるとセメンテーションが降伏し体積変化が急激に増大していることがわかる。

寺師ら<sup>10)</sup>はセメント改良土の圧密試験より得られる圧密降伏応力 ( $p_c$ ) と一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) の間には一次的な関係があり、 $p_c = 1.2 \sim 1.3 q_u$  で表されるところとしている。本実験の結果でも  $p_c = \sigma_y$  とすれば改良土および軽量土の  $p_c$  と  $q_u$  の関係は  $p_c = 1.2 \sim 1.3 q_u$  と表され、両者の間には一次的な関係があった。なお、この種のセメンテーションの降伏を山内ら<sup>11)</sup>は静水圧降伏、小林ら<sup>12)</sup>は第1種の降伏と呼んでいる。

粘性土では圧密降伏応力と作用している圧密応力の大

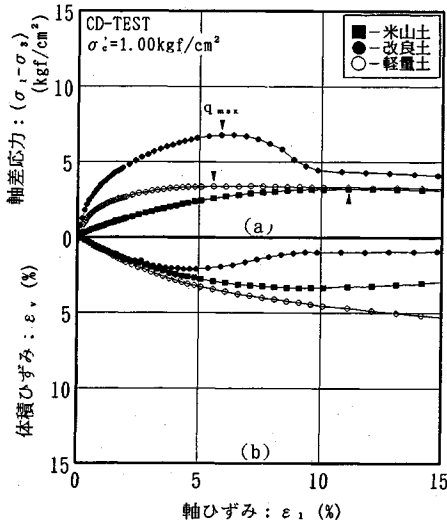


図-6  $\sigma'_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  時の CD 試験結果

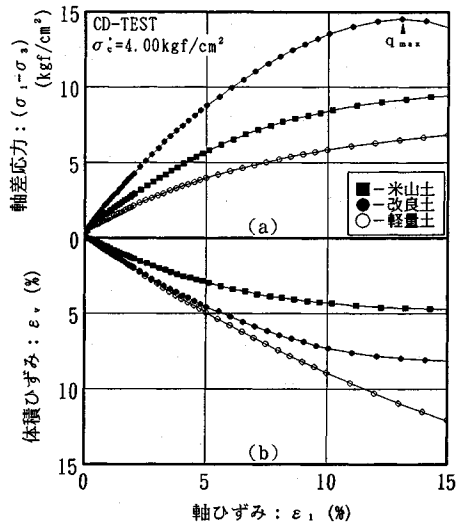


図-7  $\sigma'_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$  時の CD 試験結果

小関係で過圧密比 (OCR) が異なり, そのせん断挙動も異なる. このことを考えると, 改良土および軽量土でも  $\sigma'_v$  と圧密拘束圧力の大小関係でせん断挙動は異なることが想定される.

#### 4. 排水せん断時のせん断挙動

軸差応力 ( $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ ) ~ 軸ひずみ ( $\epsilon_1$ ) 関係において最大軸差応力 ( $q_{max}$ ) を生じる軸ひずみは拘束圧力 ( $\sigma'_c$ ) が  $\sigma'_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の場合には図-6 (a) に示すように, 米山土では  $\epsilon_1 = 11\%$  であるが,  $\sigma'_c$  が圧密降伏応力 ( $\sigma'_v$ ) よりも小さい改良土では  $\epsilon_1 = 6\%$ , 軽量土では  $\epsilon_1 = 5\%$  である. 一方, 拘束圧力を  $\sigma'_c > \sigma'_v$  となるよう  $\sigma'_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$  と大きくすると,  $q_{max}$  を生じる軸ひずみは図-7 (a) にみられるように, 改良土では  $\epsilon_1 = 13\%$  となり, 米山土および軽量土では明確な  $q_{max}$  はみられなくなる. このように, 改良土・軽量土では  $\sigma'_c$  が  $\sigma'_v$  より低い場合, 供試体はセメンテーションが破壊されていないため低いひずみ量で  $q_{max}$  を示し,  $\sigma'_c$  が  $\sigma'_v$  より高くなると供試体のセメンテーションが破壊され, 明確な  $q_{max}$  を示さず, 母材である粘性土に近い  $q \sim \epsilon_1$  挙動を示すことがわかる.

そこで, 初期ひずみ領域での勾配を比較するために, 変形係数 ( $E_{50}$ ) と拘束圧力 ( $\sigma'_c$ ) の関係を示すと図-8 のようになる. ここで  $E_{50}$  は  $q_{max}/2$  に相当する軸差応力とその時の軸ひずみより求めている. 図-8 に示すように, 米山土は正規圧密状態であるから  $E_{50}$  は  $\sigma'_c$  の増加に比例して増加している. これに対し, 改良土の  $E_{50}$  は  $\sigma'_c = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$  付近まで  $\sigma'_c$  の増加に反比例して低下し, それ以降は一定もしくは若干増加している. 軽量土の場合も同様な傾向を示し,  $\sigma'_c = 2.5 \text{ kgf/cm}^2$  付近まで  $E_{50}$  は低下している. このように, 改良土・軽量土で

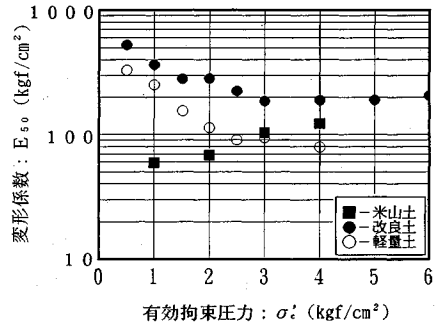


図-8 変形係数と拘束圧力の関係 (CD-TEST)

は  $\sigma'_c$  が圧密降伏応力 ( $\sigma'_v$ ) より小さい場合には, 変形係数の高い, 過圧密粘性土のようなせん断挙動を示し,  $\sigma'_c$  が  $\sigma'_v$  より大きくなると変形係数の低い, 正規圧密粘性土のようなせん断挙動を示していることがわかる.

一般的に過圧密粘性土のせん断過程での体積ひずみはせん断初期より膨張に移行し, OCR の増加に伴い膨張量も増加する. 一方, 正規圧密粘性土のせん断過程での体積ひずみは収縮側である. そこで体積ひずみ ( $\epsilon_v$ ) ~ 軸ひずみ ( $\epsilon_1$ ) 関係を示す図-6 (b), 図-7 (b) をみると,  $\sigma'_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の場合, 改良土では  $q \sim \epsilon_1$  関係が過圧密粘性土のような挙動を示すため, 最大軸差応力 ( $q_{max}$ ) を示すまで  $\epsilon_v$  は収縮傾向にあり, その後膨張傾向となり, OCR の小さい過圧密粘性土と同様の傾向を示し, 正規圧密状態である米山土の  $\epsilon_v$  と比較すると小さくなっている. また, 軽量土では  $q_{max}$  を示した後も  $\epsilon_v$  は収縮傾向であり, 過圧密粘性土のような挙動は示さない. 一方,  $\sigma'_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$  となると, 改良土・軽量土では  $q \sim \epsilon_1$  関係が正規圧密粘性土のような挙動を示すため,  $\epsilon_v$  は常に収縮側となる. そして,  $\epsilon_v$  の値は

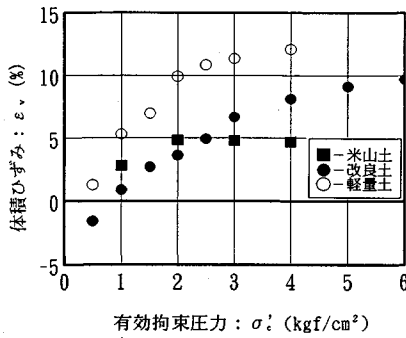


図-9  $\epsilon_1=15\%$  時の体積ひずみと拘束圧力の関係

米山土<改良土<軽量土となり、供試体の間隙比が影響している。いま、拘束圧力 ( $\sigma'_c$ ) が体積ひずみ ( $\epsilon_v$ ) に及ぼす影響を軸ひずみ  $\epsilon_1=15\%$  時の  $\epsilon_v$  と  $\sigma'_c$  の関係で示すと図-9 のようになる。米山土の  $\epsilon_v$  は  $\sigma'_c$  に若干影響されているが  $\sigma'_c=2.0 \text{ kgf/cm}^2$  以上ではほぼ一定である。しかし、改良土の  $\epsilon_v$  は  $\sigma'_c$  が低いと小さな値となり、 $\sigma'_c=0.5 \text{ kgf/cm}^2$  では膨張側である。したがって、 $\sigma'_c$  が小さいと OCR が大きな過圧密粘性土と同様な傾向を示している。一方、軽量土の  $\epsilon_v$  も  $\sigma'_c$  が低いと小さな値となるが  $\sigma'_c=0.5 \text{ kgf/cm}^2$  でも収縮側である。このように、軽量土では  $\sigma'_c=1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の時、 $q-\epsilon_1$  関係は過圧密粘性土のような挙動を示すのに、 $\epsilon_v-\epsilon_1$  関係はその傾向を示さないのは、改良土・軽量土で  $\text{OCR}=\sigma_v/\sigma'_c$  と考えれば、 $\sigma'_c=1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の場合、改良土の OCR は 3.4 となり、軽量土では  $\text{OCR}=2.4$  であり、軽量土は改良土に比べ OCR が小さく、また、軽量土ではせん断過程における供試体中の気泡部の多さから、この気泡部のつぶれが生じるために改良土と異なる体積変化の傾向となっているものと考えられる。

### 5. 非排水せん断時のせん断挙動

軸差応力 ( $q$ )~軸ひずみ ( $\epsilon_1$ ) 関係において最大軸差応力 ( $q_{max}$ ) を生じる軸ひずみは拘束圧力 ( $\sigma'_c$ ) が  $\sigma'_c=1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の場合には図-10 (a) に示すようになり、米山土では  $\epsilon_1=15\%$  でも明確な  $q_{max}$  はみられないが、 $\sigma'_c$  が圧密降伏応力 ( $\sigma_v$ ) よりも小さい改良土では  $\epsilon_1=6\%$ 、軽量土では  $\epsilon_1=1\%$  で明確な  $q_{max}$  がみられる。一方、拘束圧力を  $\sigma'_c > \sigma_v$  となるよう  $\sigma'_c=4.0 \text{ kgf/cm}^2$  と大きくすると、 $q_{max}$  を生じる軸ひずみは図-11 (a) に示すように、米山土ではやはり明確な  $q_{max}$  はみられないが、排水せん断時に明確な  $q_{max}$  を示さなかった改良土・軽量土では  $\sigma'_c > \sigma_v$  にもかかわらず、改良土では  $\epsilon_1=8\%$ 、軽量土では  $\epsilon_1=2\%$  で明確な  $q_{max}$  がみられる。また、初期ひずみ領域での立ち上がり部の変形係数 ( $E_{50}$ ) は図-12 のように、改良土および軽量土とも多少のばらつきはあるが拘束圧力の大きさによらずほとんど一定となり、こ

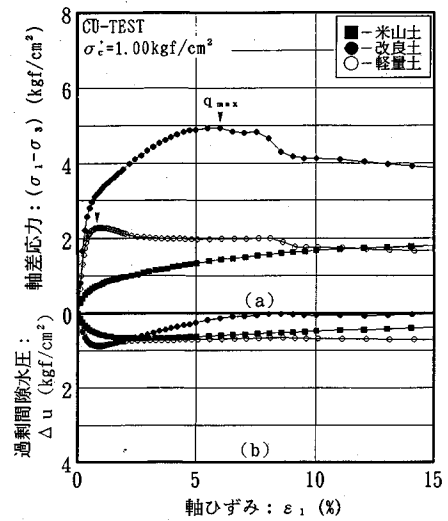


図-10  $\sigma'_c=1.0 \text{ kgf/cm}^2$  時の CU 試験結果

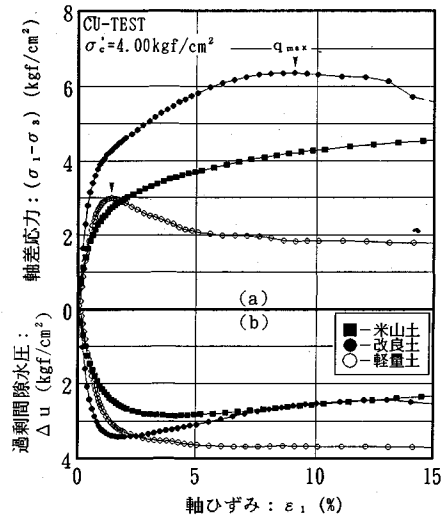


図-11  $\sigma'_c=4.0 \text{ kgf/cm}^2$  時の CU 試験結果

の値は正規圧密米山土の変形係数よりも大きい。このように、改良土・軽量土の非排水条件の  $q-\epsilon_1$  関係は排水条件の  $q-\epsilon_1$  関係とは異なり、 $\sigma'_c$  が  $\sigma_v$  より大きくなってからも明確な  $q_{max}$  がみられ、変形係数も拘束圧力の大きさに影響を受けず、排水条件のような明確な過圧密のような挙動がみられない。

しかし、過剰間隙水圧 ( $\Delta u$ )~軸ひずみ ( $\epsilon_1$ ) 関係をみると図-10 (b)、図-11 (b) のようになり、改良土では、拘束圧力が  $\sigma'_c=1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の場合には、せん断に伴う体積変化が収縮から膨張傾向となるため、 $\Delta u$  は  $(\Delta u)_{max}$  を示したのち急激に低下し、負圧に移行する。また、 $\sigma'_c=4.0 \text{ kgf/cm}^2$  の場合は、せん断に伴う体積変化は膨張傾向とはならないため、 $\Delta u$  は最大過剰間隙水圧 ( $(\Delta u)_{max}$ ) を示したのち一定もしくは徐々に低下し

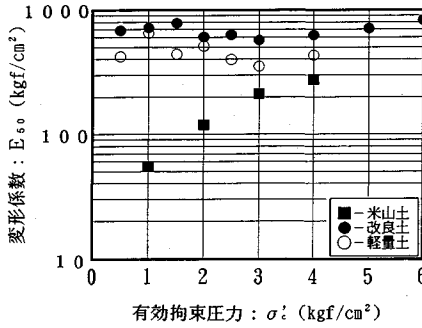


図-12 変形係数と拘束圧力の関係 (CU-TEST)

ている。これに対し、軽量土では、 $\sigma'_c=1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の場合には、せん断に伴う体積変化が収縮傾向であるため、 $(\Delta u)_{\max}$  を示した後も過剰間隙水圧は一定である。このように、 $\Delta u \sim \epsilon_a$  関係は排水条件での体積ひずみ-軸ひずみ関係の特性に対応しており、改良土では正規圧密・過圧密粘性土のような非排水条件でのせん断過程の挙動の違いが  $\Delta u \sim \epsilon_a$  関係で顕著にみられ、軽量土では過圧密粘性土のような挙動は示さない。

### 6. 改良土および軽量土の破壊基準

排水・非排水せん断過程における、改良土および軽量土の有効応力経路を図-13 (a)、図-14 (a) に示す。図-13 (b)、図-14 (b) は図-13 (a)、図-14 (a) の非排水条件の部分拡大した図である。図中に示す実線の残留応力線や点線の最大応力線は後述する図-15、16において決定される関係を用いて図上に描いている。改良土の排水条件での有効応力経路は、等方圧密応力 ( $\sigma'_c$ ) が圧密降伏応力 ( $\sigma'_y$ ) より小さい場合には、図中の直線 AA' に示すように、せん断によって軸差応力 ( $q$ ) は増加し、白ぬき角印 (□) で表される最大応力点に至るが、それ以降は減少に移行し、最終的には黒ぬり角印 (■) で表される残留応力状態 (軸ひずみ  $\epsilon_1=15\%$  時の応力状態) に到達する。しかし、等方圧密応力 ( $\sigma'_c$ ) が圧密降伏応力 ( $\sigma'_y$ ) より大きくなると、直線 BB' のように最大応力点 (□) と残留応力状態 (■) が同一点で示される。一方、非排水条件での有効応力経路は等方圧密応力 ( $\sigma'_c$ ) が圧密降伏応力 ( $\sigma'_y$ ) より小さい、いわゆる過圧密状態では、図中の曲線 CC' に示すように、等方圧密状態からせん断による経路の勾配が急であり、最大強度線に到達すると、それ以降は最大強度線に沿って軸差応力は増加し、白ぬき丸印 (○) で表される最大応力点に至る。それ以降、軸差応力は減少し最終的には黒ぬり丸印 (●) で表される残留応力状態に到達する。これに対し、等方圧密応力 ( $\sigma'_c$ ) が圧密降伏応力 ( $\sigma'_y$ ) より大きくなる、いわゆる正規圧密状態では、曲線 DD' のように等方圧密状態からせん断による経路の勾

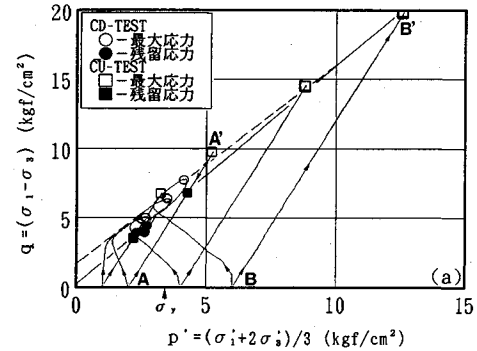
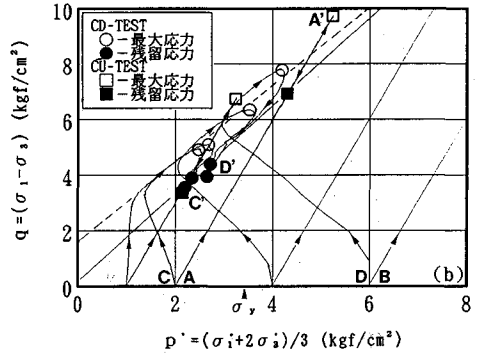


図-13 改良土の有効応力経路

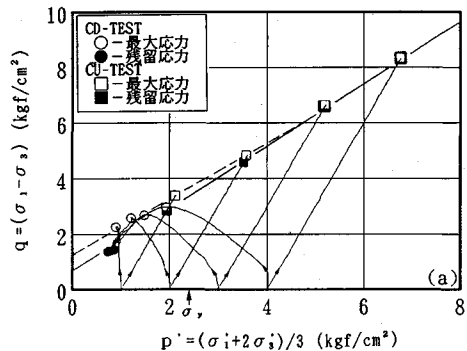
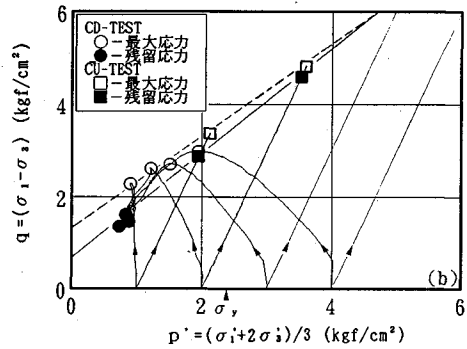


図-14 軽量土の有効応力経路

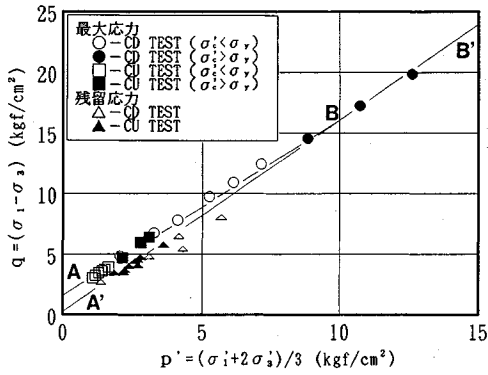


図-15 改良土の  $q \sim p'$  関係

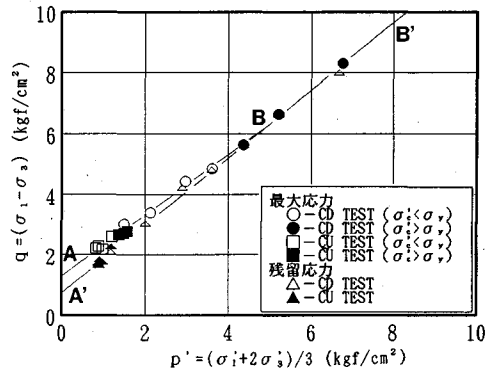


図-16 軽量土の  $q \sim p'$  関係

配が緩やかになる。

軽量土の排水状態での有効応力経路は改良土の有効応力経路と同様に残留応力状態 (■) となる応力状態が等方圧密応力 ( $\sigma'_c$ ) と圧密降伏応力 ( $\sigma_y$ ) の大小関係で異なる。また、非排水状態での有効応力経路も改良土と同様に等方圧密状態からせん断による経路の勾配が等方圧密応力 ( $\sigma'_c$ ) と圧密降伏応力 ( $\sigma_y$ ) の大小関係でやはり異なる。しかし、改良土のように最大強度線に到達した後の最大強度線に沿った応力の増加はみられず、最大強度線到達時に破壊する挙動を示す。

改良土および軽量土の最大応力 ( $q_{max}$ ) と残留応力 ( $q_{red}$ )  $\sim$  平均有効主応力 ( $p'$ ) 関係を示すと図-15, 16 のようになる。ここで最大応力状態は拘束圧力 ( $\sigma'_c$ ) < 圧密降伏応力 ( $\sigma_y$ ) の条件の場合には白ぬき印 (○ (CD), □ (CU)) で示している。一方、 $\sigma'_c > \sigma_y$  の場合には黒印 (● (CD), ■ (CU)) で示している。また、残留応力状態は三角印 (△ (CD), ▲ (CU)) で示している。これらの図に示されるように、改良土・軽量土とも最大応力状態は  $\sigma'_c < \sigma_y$  の条件では線 AB (最大応力線) で表され、残留応力状態では線 A'B' (残留応力線) となる。そして、排水試験での  $\sigma'_c > \sigma_y$  条件 (●印) では最大応力 ( $q_{max}$ ) = 残留応力 ( $q_{red}$ ) であるから排水

表-5  $q = Mp' + \alpha$  の係数

状態	最大応力状態		残留応力状態	
	AB	( $\alpha$ ) <sub>AB</sub>	A'B'	( $\alpha$ ) <sub>A'B'</sub>
米山土	1.39	0.0	1.39 (CSL)	0.0
改良土	1.44	1.75	1.49	0.44
軽量土	0.99	1.33	1.11	0.76

試験での  $\sigma'_c > \sigma_y$  条件は線 A'B' で示される。排水・非排水試験での残留応力状態は飽和粘性土という限界状態 (Critical State) と同等であるので、線 A'B' は限界状態線 (Critical State Line : CSL) に相当する。このように、セメントで改良することを疑似的な応力履歴と考え、セメント改良土および軽量土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・正規圧密状態と同様に、2本の破壊線で規定することができる。

しかし、寺師ら<sup>10)</sup>や小林ら<sup>12)</sup>はセメント改良土の破壊基準を検討し、 $q = (\sigma_1 - \sigma_3) \sim p' = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3$  面上で明確に規定してはいない。また、山内ら<sup>4)</sup>も気泡を混入した気泡セメントの破壊基準を検討しモール・クローンの破壊基準が適用されないと述べている。

いま、セメント混合、気泡混合による破壊線の変化を明確にするために、米山土、改良土および軽量土の破壊線を  $q = Mp' + \alpha$  の関係で表わし、その係数  $M$ ,  $\alpha$  を求めると表-5 となる。なお、米山土の ( $M$ )<sub>A'B'</sub> は限界状態線 (Critical State Line : CSL) より求めた値である。

改良土の最大応力線の係数 ( $M$ )<sub>AB</sub>、残留応力線の係数 ( $M$ )<sub>A'B'</sub> は米山土の係数 ( $M$ )<sub>A'B'</sub> に比べ大きく、また、改良土では最大応力線で係数 ( $\alpha$ )<sub>AB</sub> を有することになる。このように、セメントを混合することは最大強度状態での係数 ( $M$ )<sub>AB</sub> を増加させ、なおかつ係数 ( $\alpha$ )<sub>AB</sub> を持たせることになる。また、残留応力状態での係数 ( $M$ )<sub>A'B'</sub> も増加させることになる。

一方、軽量土の最大応力線の係数 ( $M$ )<sub>AB</sub>、残留応力線の係数 ( $M$ )<sub>A'B'</sub> は米山土の係数 ( $M$ )<sub>A'B'</sub> に比べ小さいが、軽量土でも最大応力線で係数 ( $\alpha$ )<sub>AB</sub> を有することになる。また、改良土の最大応力線の係数 ( $M$ )<sub>AB</sub> と ( $\alpha$ )<sub>AB</sub> および残留応力線での係数 ( $M$ )<sub>A'B'</sub> に比べると、軽量土の係数 ( $M$ )<sub>AB</sub>、( $\alpha$ )<sub>AB</sub>、( $M$ )<sub>A'B'</sub> は小さい。このように、軽量土は米山土に比べると最大応力状態では係数 ( $\alpha$ )<sub>AB</sub> を有するが、気泡の混入によって供試体中に占める空隙部が多くなり、せん断時の土粒子間の摩擦抵抗が減少するため米山土・改良土に比べ最大応力状態での係数 ( $M$ )<sub>AB</sub> および残留応力状態での係数 ( $M$ )<sub>A'B'</sub> は減少する。

## 7. む す び

土の軽量化に伴う土のせん断特性の変化について比較を行い、改良土および軽量土の破壊基準について検討を行って得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 改良土および軽量土では等方圧密時に圧密降伏応力 ( $\sigma_v$ ) 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、 $\sigma_v = 1.2 \sim 1.3 q_u$  で表される。

(2) 改良土および軽量土の排水せん断時には軸差応力 ( $q$ ) と軸ひずみ ( $\varepsilon_1$ ) の関係は拘束圧力 ( $\sigma'_c$ ) と圧密降伏応力 ( $\sigma_v$ ) との大小関係で異なる。すなわち、 $\sigma'_c < \sigma_v$  場合には、初期ひずみ領域での  $q \sim \varepsilon_1$  関係の勾配が大きい過圧密粘性土のような挙動を示し、 $\sigma'_c > \sigma_v$  場合には、初期ひずみ領域での  $q \sim \varepsilon_1$  関係の勾配が小さい正規圧密粘性土のような挙動を示す。また、このせん断時の体積ひずみ ( $\varepsilon_v$ ) と軸ひずみ ( $\varepsilon_1$ ) の関係は、 $\sigma'_c < \sigma_v$  場合、改良土では体積収縮から体積膨張傾向となり軽過圧密粘性土のような挙動を示すが、軽量土では体積収縮のみが生じ過圧密粘性土のような挙動を示さない。その原因としては軽量土では改良土に比べ粘性土という OCR が小さく、供試体中の気泡部がせん断につぶれ体積収縮するため体積膨張とはならず過圧密粘性土のような挙動を示さなかったと考えられる。

(3) 改良土および軽量土の非排水せん断時には軸差応力 ( $q$ ) と軸ひずみ ( $\varepsilon_1$ ) の関係は拘束圧力 ( $\sigma'_c$ ) と圧密降伏応力 ( $\sigma_v$ ) の大きさに関係なく初期ひずみ領域での  $q \sim \varepsilon_1$  関係の立ち上がりが高く、明確な最大応力がみられる。したがって、排水条件の  $q \sim \varepsilon_1$  関係のように明確な過圧密・正規圧密粘性土のような区別はできない。しかし、過剰間隙水圧 ( $\Delta u$ ) と軸ひずみ ( $\varepsilon_1$ ) 関係は、改良土では  $\sigma'_c < \sigma_v$  の場合には最大過剰間隙水圧に達した後に低下傾向となり、 $\sigma'_c > \sigma_v$  の場合には最大過剰間隙水圧が発生した後の過剰間隙水圧は一定もしくは徐々に低下しており、過圧密・正規圧密粘性土のような  $\Delta u \sim \varepsilon_1$  関係の違いが顕著にみられる。一方、軽量土では  $\sigma'_c$  と  $\sigma_v$  の大きさに関係なく、最大過剰間隙水圧が発生した後の過剰間隙水圧は一定であり、過圧密粘性土のような傾向を示さない。これらの  $\Delta u \sim \varepsilon_1$  関係は、排水条件での体積ひずみ ( $\varepsilon_v$ ) と軸ひずみ ( $\varepsilon_1$ ) 関係と対応した結果となっている。

(4) セメント改良土および軽量土の破壊線はセメントで改良することを疑似的な応力履歴と考え、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

力状態で規定できる。この破壊線は  $q = Mp' + \alpha$  で表され、母材である米山土にセメントを混合することは最大強度状態での係数 ( $M$ )<sub>AB</sub> を増加させ、なおかつ係数 ( $\alpha$ )<sub>AB</sub> を持たせることになる。また、残留応力状態での係数 ( $M$ )<sub>A'B'</sub> も増加させることになる。一方、軽量土では米山土に比べると最大応力状態では係数 ( $\alpha$ )<sub>AB</sub> を有するが、気泡の混入によって供試体中に占める空隙部が多くなり、せん断時の土粒子間の摩擦抵抗が減少するため米山土・改良土に比べ最大応力状態での係数 ( $M$ )<sub>AB</sub> および残留応力状態での係数 ( $M$ )<sub>A'B'</sub> は減少する。

## 参 考 文 献

- 1) たとえば、嶋津晃臣：石炭灰の利用技術と展望、土木施工、27巻15号、pp.161~165、1986、11臨。
- 2) たとえば、浜田栄治・山内豊聡：軽量盛土材としての発泡スチロールの力学的特性、土と基礎、Vol.37, No.2, Ser No.373, pp.13~18、1989。
- 3) たとえば、山田純男・長坂勇二・西田登・白井忠雄：発泡スチロール片と砂とを混合した軽量土、土と基礎、Vol.37, No.2, Ser No.373, pp.25~30、1989。
- 4) 山内豊聡・浜田栄治：軽量盛土材としての気泡セメントの力学的特性と降伏基準に関する一考察、土木学会論文集、第406号、pp.283~290、1989。
- 5) 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。
- 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Ⅲ、生産研究、34巻、8号、pp.27~30、1982。
- 7) たとえば、久野悟郎・佐藤雅男・高橋守男・豊田光男・今井俊雄：関東ロームの『流動化処理』に関する二、三の実験、第21回土質工学研究発表会、pp.1929~1930、1986。
- 8) 矢島寿一・永岡高：軽量流動化処理土の一軸圧縮特性、第25回土質工学研究発表会、pp.2095~2096、1990。
- 9) 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Ⅲ、生産研究、34巻、8号、pp.23~26、1982。
- 10) 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。
- 11) 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。
- 12) 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Ⅶ、生産研究、34巻、12号、pp.27~30、1982。

(1993.12.8 受付)



---

## DEFORMATION AND STRENGTH PROPERTIES OF FOAM COMPOSITE LIGHT-WEIGHT SOIL

Juichi YAJIMA, Shigeki MARUO and Shoji OGAWA

The purpose of this study is to evaluate the deformation and strength properties of light-weight soil, which is a mixture of clay, cement and foam. Shear strengths of original clay, cement-treated clay and cement-treated light-weight soil were investigated by unconfined compression tests, and consolidated drained and undrained triaxial compression tests. The cement-treated clay and light-weight soil exhibited an insotropic consolidation yield stress close to the respective unconfined compression strength. The failure lines of cement-treated clay and light-weight soil were equivalent to those of over and normally consolidated clays. The behavior depends on the relative magnitude of the consolidation pressure relative to the isotropic consolidation yield stress.

---