

気泡含有量の多い軽量土の 強度特性と破壊機構

渡邊康夫¹・海野隆哉²

¹正会員 工修 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 (〒151-8587 東京都渋谷区代々木 2-2-2)

²正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

気泡混合軽量土(以下軽量土)の強度・変形特性に関する既往の研究では、盛土工事等で使用される空気量 50% 程度の軽量土の不飽和状態での特徴が不明であるため、軽量土の骨格を構成する改良土の一軸圧縮強さと空気量を変化させた軽量土を不飽和状態で一軸圧縮試験・三軸圧縮試験等を行った。軽量土の強度特性などについて以下のような結果が得られた。1)軽量土の一軸圧縮強さは、軽量土の骨格を構成する改良土の一軸圧縮強さ及び空気量によって決定される。2)三軸圧縮試験における試験体の破壊形態は、せん断破壊、圧縮破壊、及びその中間的な破壊に分けられ、圧縮破壊及び中間的な破壊の場合、拘束圧の増加により破壊強度は低下することを示した。

Key Words : *lightweight soil, foam treated soil, unconfined compression strength, shear strength, failure behavior*

1. はじめに

土と固化材を泥水状態にし、これに気泡を混入した気泡混合軽量土(以下軽量土)が実施工¹⁾でも使用されてきている。この軽量土は盛土荷重の軽減による沈下の抑制、擁壁等に作用する土圧の軽減などとともに、ポンプ圧送可能な施工性から都市部の狭隙個所での盛土工事に適用可能という利点を持っている。道路や鉄道で使用される軽量土は一軸圧縮強さが 1MN/m^2 から 1.5MN/m^2 であり^{2),3)}、現位置での応力状態を考えた場合、軽量土の破壊はほとんど生じることはなく、現状の設計では軽量土の配合を、密度や一軸圧縮強さをもとに決定している。軽量土を使用した構造物の設計手法についていくつかの機関で研究が進められているが、その設計手法が確立されているとは言えない。今後、軽量土の適用範囲を広めるために、あるいは合理的な設計を目指して一軸圧縮強さを低減(固化材量を低減)した配合を選定していくためには、軽量土のせん断特性を明確にして設計法を確立する必要がある。

軽量土のような多孔質材料のせん断特性を把握するために山内・浜田⁴⁾は飽和した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破壊が生じる以前では有効拘束圧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、矢島ら⁵⁾は水中養生により作成した不飽和軽量土(空気量 24%)の破壊基準を、軸差応

力・平均有効応力とサクシオン力で整理しているが、実際の盛土のような気泡中に水が存在しない気中養生の軽量土への適応は難しい。渡邊・海野⁶⁾は気泡の混入量が多い不飽和軽量土における三軸圧縮試験を行って、拘束圧の増加に伴う軸差応力の低下の傾向を確認しており、軽量土においてもモール・クーロンの破壊基準が適用できないことを示している。また大嶺・落合⁷⁾はこのような軽量土のせん断挙動を、微視的な構造を模擬した要素の数値解析結果をもとに破壊基準の提案を行なっているが、実際の軽量土に対する適用性は今後の検討課題となっている。その他にも軽量土に関する研究が行われているが、盛土材料として使用される空気量 50% 程度の軽量土の不飽和状態でのせん断特性あるいは破壊基準は確立されていない。

本論文では、軽量化を目的として気泡を多く混入した軽量土を対象をしぼり、軽量土の骨格を構成する改良土の一軸圧縮強さと気泡混入量を変えて作成した軽量土の一軸圧縮試験および三軸圧縮試験を不飽和状態で行い、軽量土の力学特性の検討を行ったのでその結果について報告する。

2. 試験方法

(1) 気泡混合軽量土の作成方法

試験に用いた軽量土の配合を、表-1 に示した。軽量土は空気量で単位体積重量を、空気量とセメントの

表-1 配合表

| 配合 | セメント水比 C/W | 粘土 kg/m ³ | セメント kg/m ³ | 水 kg/m ³ | 気泡 l/m ³ |
|--------|------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| LS1-40 | 0.698 | 274.3 | 274.3 | 393.1 | 400 |
| LS1-50 | | 228.6 | 228.6 | 327.6 | 500 |
| LS1-60 | | 182.9 | 182.9 | 262.1 | 600 |
| LS2-40 | 0.631 | 261.8 | 261.8 | 414.5 | 400 |
| LS2-45 | | 240.0 | 240.0 | 380.2 | 450 |
| LS2-50 | | 218.6 | 218.6 | 346.2 | 500 |
| LS2-55 | | 196.3 | 196.3 | 310.7 | 550 |
| LS2-60 | | 174.5 | 174.5 | 276.2 | 600 |
| LS3-40 | 0.578 | 250.4 | 250.4 | 434.1 | 400 |
| LS3-50 | | 208.8 | 208.8 | 361.2 | 500 |
| LS3-60 | | 167.0 | 167.0 | 289.4 | 600 |
| MO1 | 0.698 | 457.2 | 457.2 | 655.2 | — |
| MO2 | 0.631 | 436.3 | 436.3 | 692.4 | — |
| MO3 | 0.578 | 417.6 | 417.6 | 722.4 | — |

表-2 粘土の物性値

| 比重 Gs | W _L % | W _p % | I _p | 50%粒径 | 比表面積 cm ² /g |
|----------|---------------------|---------------------|----------------|-------|----------------------------|
| | | | | μm | |
| 2.67 | 32.6 | 22.0 | 10.6 | 6.30 | 5500以上 |

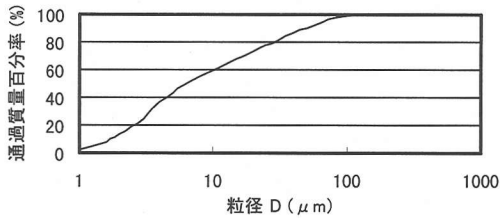


図-1 粘土の粒径加積曲線

混入量で一軸圧縮強さを制御して実際に使用する配合を決定するため、ここではセメントの混入量をセメント水比 (=セメント重量/水の重量) で制御し、セメント水比を変化させた LS1 から LS3 のシリーズにそれぞれ気泡の混入量を変化させた 11 種類の軽量土を作成し、試験を行った。軽量土の試料名は LS1 がセメント水比 0.698, LS2 が 0.63, LS3 が 0.578 の軽量土を示し、そのあとの数字が配合時に目標とした空気量を示している。目標とした空気量は 40%~60% の範囲とした。また、軽量土の骨格を形成する改良土の一軸圧縮強さを確認するため、気泡を混入していない改良土の試料も作成して試験を行っており、試料名はセメント水比が同じ軽量土の番号にあわせ MO1~MO3 とした。

軽量土の作成に用いた土は、粘土系鉱物を微粉末化した粘土で、粒径加積曲線を図-1 に、物性値を表-2 に示す。固化材はスラグ系のセメント (表-3) を使用し、起泡剤は蛋白系起泡剤 (比重 1.16) を 15 倍に希釈して使用した。軽量土の一軸圧縮強さの決定におい

表-3 セメントの物性値

| 品名 | 比重 | 比表面積 | 備考 |
|--------|------|--------------------|------------|
| | Gs | cm ² /g | |
| スミシールド | 3.03 | 3300以上 | 住友大阪セメント社製 |

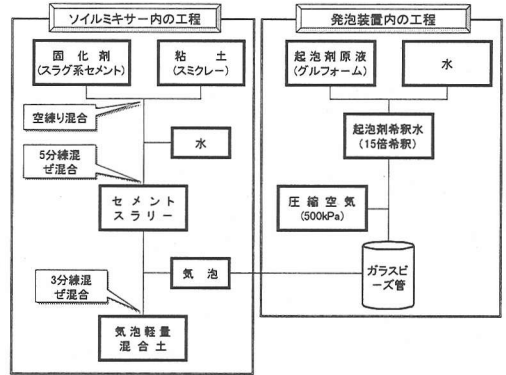


図-2 気泡混合軽量土作成手順

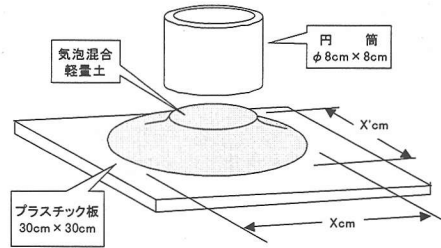


図-3 フロー試験概要図

て、固化材と土の配合割合も重要な要素であるが、本論文においては固化材と土の重量比を過去に実工事で用いられた 1 : 1 に固定して軽量土を作成している。

図-2 に軽量土の作成手順を示した。軽量土は、30 リットルのソイルミキサーの中で粘土とセメント、水を練り混ぜてセメントスラリーをつくり、さらに気泡発生装置で発泡させた気泡を混入することにより作成した。

練り混ぜ終了時には軽量土の状態を確認するために、生比重・空気量およびフロー値を測定した。ここで、軽量土の生比重とは、混練直後のまだ固まらない流動性のある軽量土の比重で、配合どおりの軽量土が作成されたかどうかの指標となる。この生比重は硬化後の比重に対して水分が蒸発していない分だけ大きな値となる。この生比重は、一定量の容器に入れた軽量土の試料の質量から計算した。また、フロー値は、ポンプ圧送の容易さや流動性等、軽量土の施工性を確認するための指標であり、図-3 に示す内径 8cm 高さ 8cm の円筒形の容器に軽量土を満ちし、ゆっくり容器

を引き上げた時の広がり の最大値とその直角方向の長さを測定し、その平均値をフロー値とした。空気量 $a(\%)$ は軽量土中の空気の体積割合であり、計測方法は図-4 に示す手順で、500ml のメスシリンダーに 200ml の軽量土と 200ml の水を入れて攪拌し、静置後に上部に集まった気泡を 100ml のアルコールで消して、残った容量を測定して空気量を計算する消泡法を採用した。

作成した軽量土は、 $450 \times 300 \times 300$ の型枠に打設し、塩化ビニール製モールドを挿入して恒温室 ($20 \pm 3^\circ\text{C}$) で 3 日間養生を行った。試験体は 3 日後にモールドから脱型し、乾燥を防ぐためポリエチレンフィルムおよびパラフィンで 2 重に包んで密閉し、ふたたび所定の期間、恒温室で養生を行った。一軸圧縮試験及び三軸圧縮試験に用いた供試体の大きさは $\phi 5\text{cm} \times 12.5\text{cm}$ とした。

(2) 試験方法

一軸圧縮試験は軽量土作成後、養生期間 3 日、7 日、14 日、28 日で行った。一軸圧縮試験時のせん断過程における軸ひずみ速度は $1\%/min$ とした。また、三軸圧縮試験は 28 日養生後に $100 \text{ kN/m}^2 \sim 500 \text{ kN/m}^2$ の拘束圧を作用させて、軸ひずみ速度 $0.2\%/min$ でせん断を行った。試験条件は、軽量土が体積の半分程度を気泡で構成していること、軽量土の骨格を形成する改良土も飽和度が低く、拘束圧作用時に間隙水の移動がないと考えられたため、三軸圧縮試験装置の排気・排水バルブを閉めた状態でせん断を行った。なお、拘束圧（等方圧力）を作用した段階で圧縮破壊（静水圧破壊）してしまう軽量土があるため拘束圧作用後、30 分静置したあとにせん断を開始している。試験時には垂直荷重、拘束圧、軸ひずみを測定しており、せん断中に気泡の周りの骨格が破壊して体積変化が生じるので、2 重セルを利用して差圧計により体積変化も測定した。拘束圧を作用させてから試験開始までの間の体積変化は、静水圧破壊をおこした LS2-60 の拘束圧 500 kN/m^2 および LS3-60 の拘束圧 300 kN/m^2 以上の試験時以外では生じなかった。

試験時には、質量、寸法を測定するとともにせん断終了後含水比を測定して軽量土の品質を確認した。

3. 試験結果

(1) 品質管理試験結果

図-5 に配合設計上の生比重 G_{L50} と生比重試験により測定された生比重 G_{IS} の関係を示す。この図の中で黒丸は各配合における試験結果をプロットしたもので、直線は $G_{L50} = G_{IS}$ の関係を示している。計測された生比重の値は、ほぼ配合設計上の生比重となっているが、生比重が 0.9 以上では計測された生比重は配合設計上

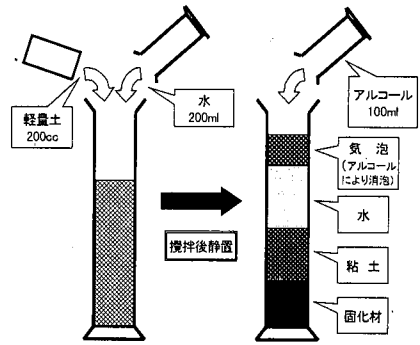


図-4 空気量確認試験（消泡法）

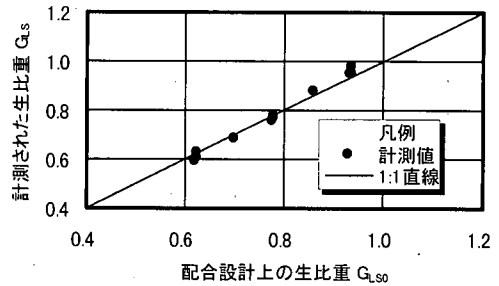


図-5 配合設計上の生比重と計測された生比重の関係

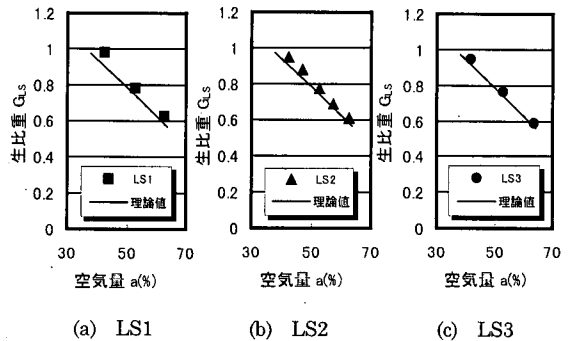


図-6 空気量と生比重の関係

の生比重より大きめの値を示している。これは、気泡混入量を気泡の発泡倍率と気泡材希釈水の発泡装置への流入量で管理したために、実際に混入された気泡量が設計値より少なくなったためと考えられる。また、図-6 に、LS1~LS3 の軽量土を水セメント比ごとに計測された生比重と消泡法により計測された空気量 a の関係を示した。この図中のプロットは各配合での試験結果であり、直線は配合設計における空気量と生比重の関係を示している。計測値は全体的に直線より右側に位置しており、消泡法によって計測された空気量は実際の空気量よりも大きめの値を示している。これは、気泡混入量を気泡の発泡倍率と気泡剤希釈水の発

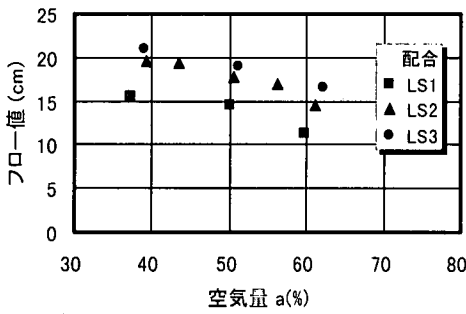


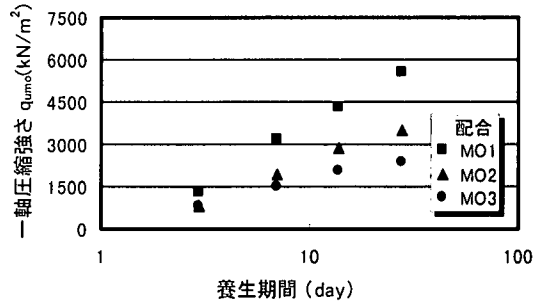
図-7 フロー値と空気量の関係

泡装置への流入量で管理したために、目標とする空気量が確保されなかったためと考えられる。また、図-6に、LS1~LS3の軽量土を水セメント比ごとに計測された生比重と消泡法により計測された空気量 a の関係を示した。この図中のプロットは各配合での試験結果であり、直線は配合設計上の生比重と空気量の関係から計算された理論上の空気量の関係を示している。計測値は全体的に直線より上側に位置しており、消泡法によって計測された空気量は実際の空気量よりも大き目に計測されている。消泡法による空気量の計測に比べて生比重の計測方法は単純であり、配合がきちんと管理されている場合には空気量をより正確に計測することが可能と考えられる。以後、空気量は計測された生比重から配合設計にもとづいて計算された値とする。

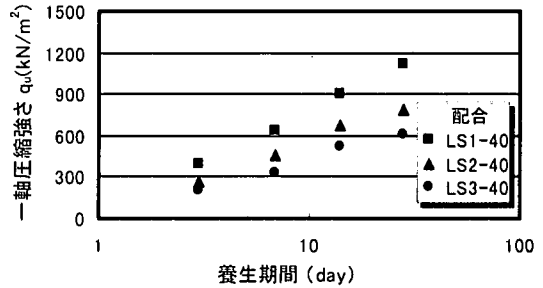
図-7 にフロー試験より求めたフロー値と空気量の関係を示す。フロー値は空気量の増加とともに減少し、またセメント水比の上昇とともに減少する。実際に施工される軽量土はフロー値が 18cm 以上を要求されるため、LS3 あるいは空気量が 60% 程度のもは実際に適用できないこととなるが、セメント水比の変更や流動化剤等の添加によりフロー値を改善することが可能であり、本試験では、試験体の作成時に弱点が生じないように十分注意をして一軸圧縮試験、三軸圧縮試験を行なうこととした。

(2) 一軸圧縮試験結果

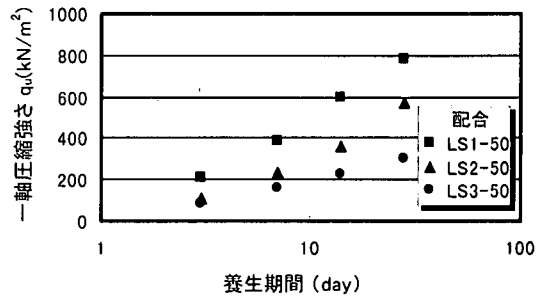
図-8 に各配合の 3 日、7 日、14 日、28 日養生後にいった一軸圧縮試験の圧縮強さ q_u と養生日数の関係を空気量 a ごとに示した。表-3 には 28 日養生後での一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} を示した。養生日数の進行とともに改良土の一軸圧縮強さは増進し、軽量土の一軸圧縮強さは増加していく。図-9 に同じセメント水比で同じ養生日数 (7 日~28 日) の改良土の一軸圧縮強さで正規化した軽量土の一軸圧縮強さと、軽量土を構成する改良土の割合 ($=1-a/100$) の関係を両対数グラフで示した。改良土の一軸圧縮強さで正規化された軽量土の一軸圧縮強さと軽量土を構成する改良土の割合は、両対数グラフ上でほぼ線形の関係で示され



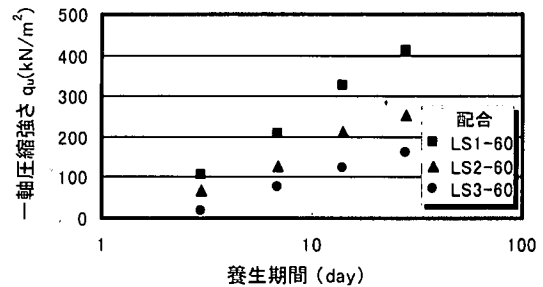
(a) 改良土



(b) 軽量土 (空気量 40%)



(c) 軽量土 (空気量 50%)



(d) 軽量土 (空気量 60%)

図-8 一軸圧縮強さの経時変化

る。すなわち、軽量性を得るため気泡の混入量を増やし骨格の割合が小さくなると一軸圧縮強さは小さくなる。この関係を用いることにより改良土の一軸圧縮強さ q_{umo} と軽量土の空気量 a (%) から、次式により軽量土の一軸圧縮強さ q_u を推定することが可能となる。

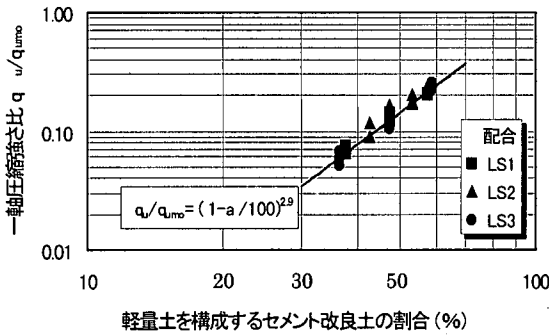


図-9 改良土の一軸圧縮強さで正規化した軽量土の一軸圧縮強さと改良土の割合との関係

$$q_u = (1-a/100)^{2.9} q_{umo} \quad (1)$$

ここに、 q_u : 軽量土の一軸圧縮強さ(kN/m²)

q_{umo} : 改良土の一軸圧縮強さ(kN/m²)

また、コンクリートの一軸圧縮強さはセメント水比と線形関係で示されることが知られており⁸⁾、図-10に示した改良土の一軸圧縮強さとセメント水比 C/W の関係から、改良土の一軸圧縮強さ q_{umo} の推定式は

$$q_{umo} = 26,500 (C/W) - 13,100 \quad (2)$$

ここに、C/W : セメント水比

の関係式であらわすことができ、式(1)、(2)より、本試験で対象とした軽量土については、その一軸圧縮強さを改良土のセメント水比 C/W と空気量 a (%) より求めることができる。

また表-4には、一軸圧縮強さ q_u の他に変形係数 E_{50} と E_{50}/q_u も示している。軽量土の一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} の間には既存の研究⁹⁾により $q_u \approx (100 \sim 200) E_{50}$ の関係となることが報告されているが、今回試験を行った軽量土の変形係数は一軸圧縮強さの 180 ~ 220 倍であり、

$$q_u \approx 200 E_{50} \quad (3)$$

で近似することが可能である。

(3) 三軸圧縮試験

表-5に28日養生後に行った三軸圧縮試験の最大軸差応力を示し、図-11, 12には代表的な LS2-40, LS2-60 の三軸圧縮試験の軸差応力 ($\sigma_a = \sigma_1 - \sigma_3$) と軸ひずみの関係、体積ひずみと軸ひずみの関係、モールの応力円を示す。図-11, 12の(a)は各拘束圧で行った試験の軸差応力 σ_a と軸ひずみ ϵ_a の関係を示している。LS2-40においてはいずれの拘束圧とも、軸差応力が軸ひずみ約 0.5% でピークを示し、その後残留応力状態となるひずみ硬化-軟化型の挙動を示すのに対し、気泡混入量の多い LS2-60 においてはいずれもピーク強度を

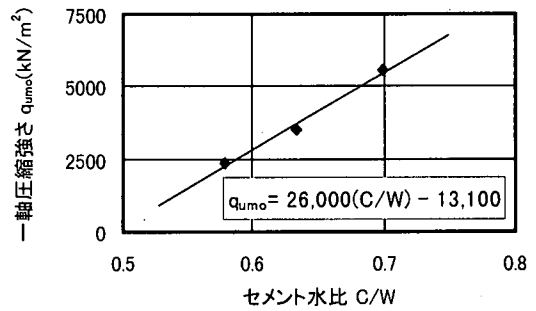


図-10 改良土の一軸圧縮強さとセメント水比の関係

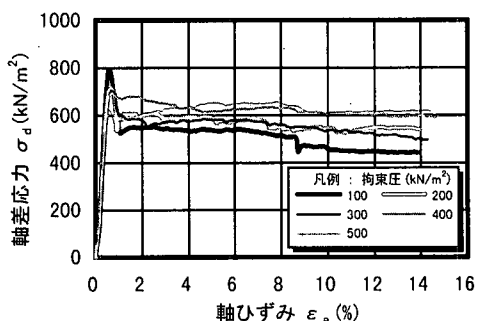
表-4 一軸圧縮強さと変形係数 (28日養生後)

| 配合 | 一軸圧縮強さ q_u | 変形係数 E_{50} | E_{50}/q_u |
|--------|----------------------|----------------------|--------------|
| | (kN/m ²) | (kN/m ²) | |
| LS1-40 | 1115.0 | 202400 | 181.5 |
| LS1-50 | 781.8 | 144800 | 185.2 |
| LS1-60 | 409.3 | 81600 | 199.4 |
| LS2-40 | 804.3 | 155500 | 193.3 |
| LS2-45 | 700.1 | 138300 | 197.5 |
| LS2-50 | 573.5 | 111000 | 193.5 |
| LS2-55 | 414.2 | 85200 | 205.7 |
| LS2-60 | 255.7 | 46300 | 181.1 |
| LS3-40 | 706.0 | 135800 | 192.4 |
| LS3-50 | 302.2 | 63000 | 208.5 |
| LS3-60 | 159.2 | 36000 | 226.1 |
| MO1 | 5655.9 | 1133200 | 200.4 |
| MO2 | 3498.2 | 701700 | 200.6 |
| MO3 | 2193.1 | 440700 | 200.9 |

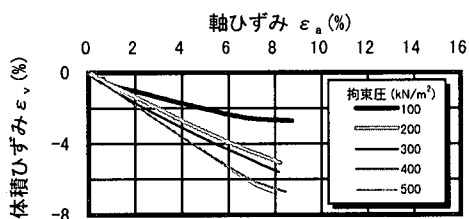
表-5 三軸圧縮試験結果 (最大軸差応力)

| 拘束圧 | 単位: kN/m ² | | | | |
|--------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| LS1-40 | 1313.7 | 1339.3 | 1403.2 | 1410.0 | 1476.7 |
| LS1-50 | 826.4 | 789.8 | 737.6 | 691.6 | 676.9 |
| LS1-60 | 419.8 | 390.8 | 354.5 | 328.6 | 318.8 |
| LS2-40 | 795.7 | 714.0 | 704.0 | 694.3 | 625.8 |
| LS2-45 | 603.9 | 577.8 | 535.3 | 522.8 | 498.2 |
| LS2-50 | 566.4 | 553.8 | 459.0 | 405.2 | 372.6 |
| LS2-55 | 387.7 | 345.0 | 301.5 | 233.0 | 203.0 |
| LS2-60 | 208.4 | 181.4 | 123.9 | 76.5 | — |
| LS3-40 | 690.5 | 694.5 | 670.1 | 646.1 | 614.7 |
| LS3-50 | 322.4 | 290.0 | 301.0 | 250.3 | 230.0 |
| LS3-60 | 216.0 | 170.2 | — | — | — |

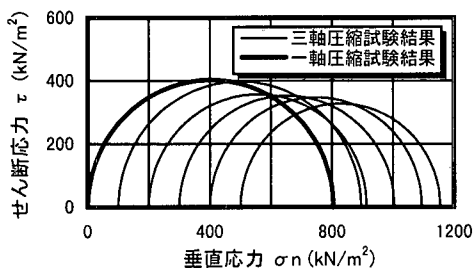
示さない。また、拘束圧が 200 kN/m² までは初期の軸差応力の立ち上がりが大きい拘束圧 300 kN/m², 400 kN/m² では軸差応力は徐々に増加する緩勾配のひずみ硬化型である。LS2-60 において拘束圧 200 kN/m² までは、軽量土の一軸圧縮強さが拘束圧より大きいため、軸差応力-軸ひずみ関係は初期の立ち上がりが大きいひずみ硬化-一定応力型となった。一方、一軸圧縮強さの約 2 倍の 500 kN/m² の拘束圧を作用させた



(a) 軸差応力-軸ひずみ関係

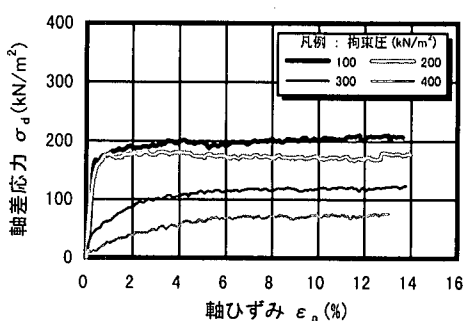


(b) 体積ひずみ-軸ひずみ関係

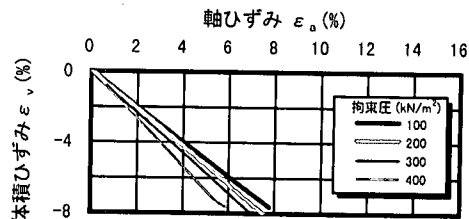


(c) モールの応力円

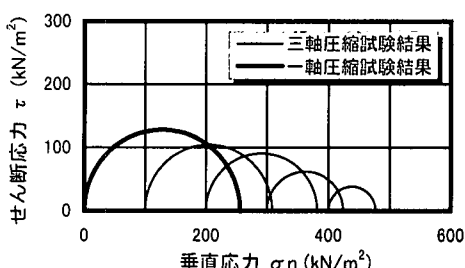
図-11 三軸圧縮試験結果 (LS2-40)



(a) 軸差応力-軸ひずみ関係



(b) 体積ひずみ-軸ひずみ関係

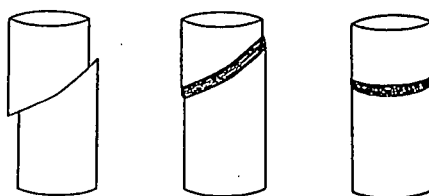


(c) モールの応力円

図-12 三軸圧縮試験結果 (LS2-60)

ところ、その時点で試験体が破壊してしまった。これは軽量土の骨格が拘束圧に耐え切れなくなり、徐々に軽量土が萎んでいくような破壊形態であり、このような破壊形態を静水圧破壊と呼ぶこととする。

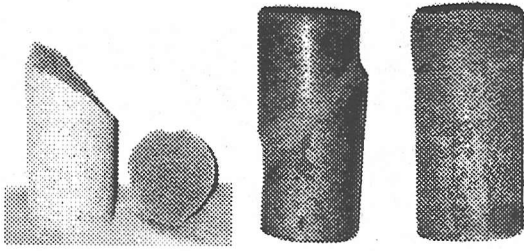
この破壊形式と軸差応力-軸ひずみ関係を関連付けると、明確なひずみ硬化-軟化型の軸差応力-軸ひずみ関係を示したLS2-40の拘束圧100kN/m²では図-13(a)、写真-1(a)のようにせん断面を形成してその面で徐々にずれていくせん断破壊を示した。一方、一軸圧縮強さより拘束圧が大きかったLS2-60の拘束圧300kN/m²と400kN/m²では、図-13(c)、写真-1(c)のように試験体中央部が水平面上でつぶれる圧縮破壊となった。その他のケースではせん断面方向に破壊が進行するが骨格が徐々に圧縮破壊する図-13(b)、写真-1(b)のような、せん断と圧縮の中間的な破壊形態であった。このような破壊形式をせん断+圧縮破壊として整理する。



(a) せん断 (b) せん断+圧縮 (c) 圧縮

図-13 試験体破壊状況概要図

図-11,12の(b)には差圧計を利用して計測した体積ひずみ ϵ_v と軸ひずみ ϵ_a の関係を示している。ここで体積ひずみの正の値は体積の減少を示す。体積ひずみは試験中の試験体の体積変化量が大いため、軸ひずみ8%程度までしか測定できなかった。また、どのケースも軸ひずみが0.5%程度までのせん断初期は $\epsilon_v = \epsilon_a$ の関係で表され、この関係から $\epsilon_3 = 0$ となり、ポア

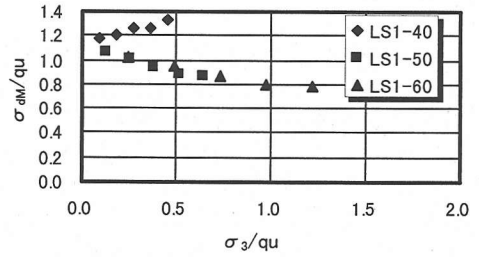


(a) せん断 (b) せん断+圧縮 (c) 圧縮
写真-1 破壊形態別の試験体破壊状況

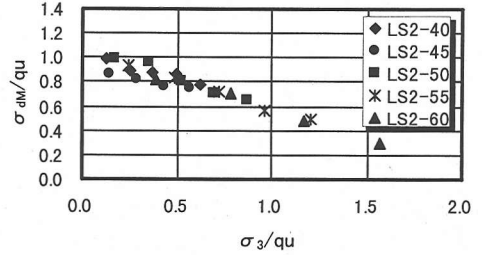
ソノ比 ($\nu = \varepsilon_3 / \varepsilon_a$) はほぼ 0 である。せん断破壊となった LS2-40 の拘束圧 100kN/m^2 ではせん断断面形成後、せん断面上でずれが生じるため、体積変化は他の軽量土に比べ小さい。圧縮破壊となった LS2-60 の拘束圧 300kN/m^2 と 400kN/m^2 では、せん断初期では体積ひずみと軸ひずみがほとんど同じであるが、荷重増加に伴う圧縮破壊により骨格が崩れ、拘束圧による破壊も生じるため体積ひずみ $>$ 軸ひずみとなった。せん断 + 圧縮破壊の他のケースはこの中間的な体積ひずみ - 軸ひずみ関係を示した。

図-11,12 (c)には、最大軸差応力をモールの応力円で整理したものを示す。モールの応力円から拘束圧の増加に伴い最大軸差応力が減少する傾向がはっきりと確認でき、本論文で対象としている軽量土ではモール・クーロンの破壊基準で考えた場合、負のせん断抵抗角を持つこととなる。これは、軽量土を構成する改良土が空隙によりハニカム構造のようになり、強い等方圧縮応力を受けた場合に圧縮破壊を起こす性質を持っていると考えられ、軽量土にはモール・クーロンの破壊基準は適用できないものとする。

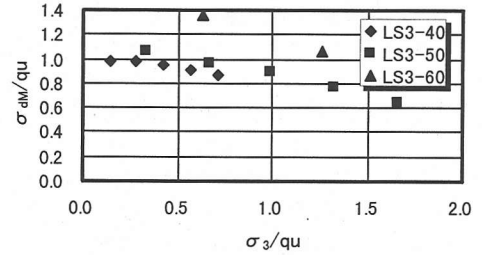
図-14 は、一軸圧縮強さ q_u で正規化した最大軸差応力 σ_{am}/q_u と同じく q_u で正規化した拘束圧 σ_3/q_u の関係をセメント水比別に示した。また表-6 は、各拘束圧における破壊形態と、それぞれの配合での軽量土の σ_{am}/q_u と σ_3/q_u の関係を直線関係で示したときの傾きと切片を示した。LS1-40 はすべての拘束圧でせん断破壊が生じ、正規化された最大軸差応力は拘束圧の増加によって大きくなった。これは、骨格を形成する改良土の一軸圧縮強さが大きく、気泡混入量は小さいため、骨格の破壊による局所的な破壊よりも構造体全体としてのせん断破壊が生じたためと考えられる。LS1-50, LS1-60 は拘束圧の増加に伴い最大軸差応力は小さくなる傾向にあり、LS1-60 の拘束圧 400kN/m^2 と 500kN/m^2 は圧縮破壊を示した。LS2 の各軽量土は拘束圧の増加により最大軸差応力は減少する傾向にあり、正規化された拘束圧と正規化された最大軸差応力はほぼ線形の関係で示される。LS3 の軽量土も拘束圧の増加に伴い最大軸差応力は減少傾向にあ



(a) LS1



(b) LS2



(c) LS3

図-14 一軸圧縮強さで正規化した軸差応力と正規化された拘束圧の関係

表-6 三軸圧縮試験時の破壊形態及び正規化した軸差応力と拘束圧を線形関係で近似した場合の傾きと切片

| | 各拘束圧 (kN/m ²) 毎の破壊形態 | | | | | 線形関係 | |
|--------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|---------|-------|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 傾き | 切片 |
| LS1-40 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | 0.397 | 1.139 |
| LS1-50 | ■ | ● | ● | ● | ● | -0.397 | 1.105 |
| LS1-60 | ● | ● | ● | ▲ | ▲ | -0.264 | 1.080 |
| LS2-40 | ■ | ■ | ● | ● | ● | -0.360 | 1.013 |
| LS2-45 | ● | ● | ● | ● | ● | -0.266 | 0.896 |
| LS2-50 | ● | ● | ● | ● | ● | -0.436 | 1.103 |
| LS2-55 | ● | ● | ● | ▲ | ▲ | -0.456 | 1.159 |
| LS2-60 | ● | ● | ▲ | ▲ | - | -0.453 | 1.020 |
| LS3-40 | ■ | ● | ● | ● | ● | -0.251 | 1.024 |
| LS3-50 | ● | ● | ▲ | ▲ | ▲ | -0.317 | 1.180 |
| LS3-60 | ● | ▲ | - | - | - | -0.449 | 1.646 |
| 平均値 | | | | | | -0.365* | 1.124 |

ここで ■ : せん断破壊 ● : せん断+圧縮破壊
▲ : 圧縮破壊 - : 静水圧破壊
* : LS1-40を除いた平均値

るが、LS3-50 の拘束圧 300kN/m^2 以上と LS3-60 は破壊形式が圧縮破壊であり、軸差応力 - 軸ひずみ曲線が緩勾配漸増タイプのひずみ硬化型で、空気量が増えても最大軸差応力が比較的大きくなったため、全体

の傾きは小さかった。

山内ら⁴⁾は飽和した気泡セメントの三軸圧縮試験を行い、拘束圧の増加による排水強度の低下率をRで定義している。山内らの行った飽和気泡セメント（間隙率n=88%）の拘束圧の増加による排水強度の低下率Rは0.4であった。表-6に、図-14のデータを線形近似して求めた傾きと切片を示す。ここで傾きの負の値は、拘束圧の増加に伴う軸差応力の低下率を表している。今回試験を行った軽量土において拘束圧の増加に伴う軸差応力の低下率を低下率Rとすると、表-6より、せん断破壊のみのLS1-40を除いて、R=0.25~0.45となり、平均値は0.37であり、飽和気泡セメントの排水強度の拘束圧に対する低下率Rとほぼ同様な値となった。

すべての軽量土の試験結果を一軸圧縮強さで正規化し、破壊形式ごとに記号を変えて整理したものを図-15に示す。せん断破壊は正規化された拘束圧が0から0.5の間に分布し、正規化された最大軸差応力は1.0より大きい。圧縮破壊は正規化された拘束圧が約0.95以上の場合に発生しており、軸差応力と軸ひずみの関係は、ひずみ硬化型で最大軸差応力もピークを持たずに上昇するため、正規化された最大軸差応力のばらつきは大きい。せん断破壊・圧縮破壊の明確に区別できないせん断+圧縮の破壊形態は0.2から0.95までの間に分布する。静水圧破壊を起こしたLS2-60およびLS3-60の正規化された拘束圧は1.96, 1.88であった。また、圧縮破壊となった軽量土のうち、正規化された拘束圧の最大値はLS2-55の1.65であった。このことから、圧縮破壊と静水圧破壊の境界線は1.8程度にあり、軽量土に一軸圧縮強さの1.8倍程度の拘束圧を与えると静水圧破壊に移行するものと考えられる。せん断破壊、せん断+圧縮破壊、圧縮破壊、静水圧破壊の各破壊形態をおおよそ区別できる境界線を図-15にあわせて示した。この境界線は、軽量土の骨格を構成する改良土の応力状態の違いからくるものと考えられる。せん断破壊が卓越する範囲は改良土が連続体としての性格をもつ範囲であり、圧縮破壊が卓越する範囲は軸方向圧縮応力の作用により局所的には骨格部分にせん断破壊が発生しているが、せん断破壊が連続して発生せずに試験体が軸方向圧縮応力作用方向につぶれていくものと考えられる。このせん断破壊と圧縮破壊の境界は明確ではないため、正規化された拘束圧が0.45から0.95の間でその中間的な破壊形態となっているものと考えられる。

4. 結論

気泡の混入量とセメント水比を変化させて行った一軸圧縮試験、三軸圧縮試験の結果から、軽量土の強度

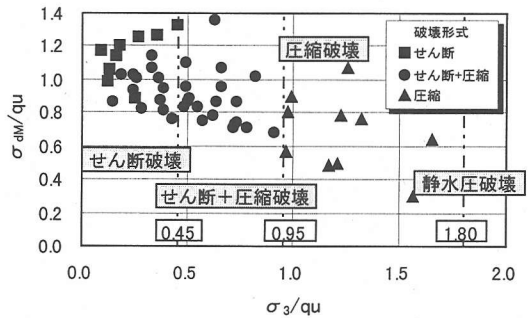


図-15 一軸圧縮強さで正規化した軸差応力と正規化された拘束圧の関係（破壊形式で区別）

特性と破壊基準について検討を行った。その結果、今回使用した粘土とセメントの比が1:1の軽量土について以下のことが判明した。

- (1) 軽量土の骨格を構成する改良土の一軸圧縮強さで正規化された軽量土の一軸圧縮強さは、軽量土を構成する改良土の体積割合 $(1-a/100, a: \text{空気量}(\%))$ の2.9乗との関係であらわされる。また、改良土の一軸圧縮強さとセメント水比の間には線形関係があることから、セメント水比C/Wと空気量a%より軽量土のおおよその一軸圧縮強さを求めることができる。
- (2) 三軸応力状態において、試験体の破壊形態をせん断破壊、圧縮破壊とその中間的な形態（せん断+圧縮破壊）の3種類に分類できた。一軸圧縮強さで正規化された拘束圧が0.45より小さく軽量土の一軸圧縮強さが大きい場合にせん断破壊が見られ、正規化された拘束圧が0.95より大きい場合には圧縮破壊となる。また、正規化された拘束圧が0.4から0.95の場合にはせん断+圧縮破壊となる。
- (3) 軽量土の一軸圧縮強さで正規化した最大軸差応力と同じく一軸圧縮強さで正規化された拘束圧の間にはほぼ線形の関係がある。せん断+圧縮破壊または圧縮破壊を起こす軽量土の拘束圧増加に伴う最大軸差応力の低下率Rは、R=0.25~0.45の範囲にある。一方、改良土の一軸圧縮強さが大きく空気量が少ない場合でせん断破壊をする軽量土では拘束圧の増加に伴い最大軸差応力が増加する。このように軽量土の最大軸差応力の拘束圧への依存性は、その破壊形態によって変化する。

今回対象にした軽量土は、材料に粘土を用いており、改良土部分が均等に流動化され、気泡もほぼ均一でかつ混入量が多い材料である。一般の気泡混合軽量土では土質材料に再生土を使用する場合もあるため、均一な性能の軽量土を作成するのが難しい場合もあるが、均一な軽量土が作成された場合には同様に整理することが可能であると考えられる。

謝辞：本論文をまとめるにあたり，長岡技術科学大学修士課程修了者である高橋幹君（現交通建設株），羽田英樹君（現旭調査設計株）には実験・データ整理などご協力をいただいた。また，住友大阪セメント株の近藤氏，サンオリエント科学株の五井氏には材料を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 横田聖哉，三嶋信雄：気泡混合軽量土を用いた人工軽量地盤，土と基礎，Vol.44，No.5，Ser. No.460，pp.5-8，1996.
- 2) 日本道路公団試験研究所：気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針，1996.
- 3) 東日本旅客鉄道株東京工事事務所：気泡モルタル設計・施工指針，1992.
- 4) 山内豊聡，浜田英治：軽量盛土材としての気泡セメントの力学特性と降伏基準に関する一考察，土木学会論文集，No.406/Ⅲ-11，pp.283-290，1989.
- 5) 矢島寿一，丸尾茂樹，小川正二：不飽和軽量土の初期間隙比・一軸圧縮強さと破壊基準の関係，土木学会論文集，No.554/Ⅲ-37，pp.251-257，1996.
- 6) 渡邊康夫，海野隆哉：気泡混合軽量土の非圧密非排水せん断特性，第44回地盤工学シンポジウム平成11年度発表論文集，pp.257-260，1999.
- 7) 大嶺聖，落合英俊：軽量混合土の破壊基準に関する一考察 -複合材モデルの適用-，第34回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.773-774，1999.
- 8) 岡田清，六車熙編：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，1981.
- 9) 土田孝，横山祐司，水上純一，清水和也，笠井寿太郎：港湾・海岸環境における軽量混合処理土の用途と現地打設実験，港湾技研試料No.833，pp.3-30，1996.

(2000. 4. 13 受付)

**STRENGTH CHARACTERISTICS AND FAILURE BEHAVIOR
OF FOAMED LIGHTWEIGHT SOIL WITH MUCH AIR**

Yasuo WATANABE and Takaya KAINO

A series of unconfined and tri-axial compression tests were performed to evaluate confirm strength characteristics and failure behavior of foamed cement lightweight soil with much air. The followings were obtained from the present study; 1) Unconfined strength was evaluated by two parameters, i.e., air content and water cement ratio; 2) Failure patterns were classified as following three based on the tri-axial compression tests; shear, compression, and shear and compression failures. Thus, strength should be evaluated in each failure pattern. The shear and compression strength were evaluated, including the characteristics of strength decrease with the increase of effective confining stress.