

空気含有量の多い軽量土の強度・変形特性の評価

Evaluation of strength-deformation properties of form composite lightweight soil with much air.

渡邊 康夫*, 海野 隆哉**

Yasuo WATANABE, Takaya KAINO

* 工修, 東日本旅客鉄道(株), 上信越工事事務所 (〒370-8543 群馬県高崎市栄町 6-26)

** 工博, 長岡技術科学大学教授, 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町)

The strength characteristic of Foam Composite Lightweight soil (abbr. FCL) has not been sufficiently clarified until now. The shear strength increases as the confining pressure increases when air content is low in FCL. However, the shear strength decreases as the confining pressure increases when FCL has much air. We carried out the unconfined compression tests and unconsolidated-undrained triaxial compression tests of FCL with much air (air contents are from 40% to 60%). And we carried out FEM analysis of FCL model. The calculated results were compared with the test results. This paper described the calculated results and the failure behavior of FCL with much air.

Key Words: Lightweight soil, FEM analysis, Shear strength, Failure mechanism

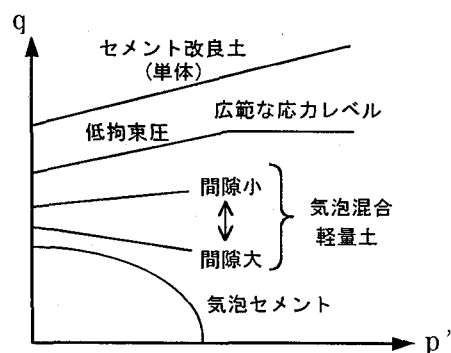
キーワード: 軽量土, FEM, せん断強さ, 破壊特性

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隘個所での盛土工事に適用可能という利点を持っている. 道路や鉄道で使用する軽量土は一軸圧縮強さが 1N/mm^2 から 1.5N/mm^2 であり^{2),3)}, 実構造物の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ではない. 従って, 現在のところかなり大きな一軸圧縮強さ等をもとに, 軽量土の配合設計が行われている. 軽量土の特性についていくつかの機関で研究が進められているが, 軽量土の設計手法が確立されたとは言えない. 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より小さな一軸圧縮強さを採用するなど合理的な設計に変えるには, 軽量土の強度・変形特性を明確にする必要がある.

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ら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, 等方圧力による等方圧密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, 実際の盛土を形成している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. 筆者ら⁶⁾は気泡の含有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. 混合材料の破壊基準は, 図-1⁷⁾のような模式図で表される. この図において q は主応力差, p' は平均有効主応力を示している. 軽量土は気泡含有量の比較的小さい場合には拘束圧の増加とともに破壊時の主応力差は増加し, ある拘束圧を超えると主応力差はほぼ一定となる. 気泡含有量が大きくなると拘束圧の増加に伴う強度増加の割合が小さくなり, 条件によっては拘束圧の増加とともに主応力差は低下

図-1 破壊基準の模式図⁷⁾

表－1 軽量土の配合表

配合	粘土	セメント	水	気泡
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	ℓ/m ³
LS40	262	262	415	400
LS45	240	240	381	450
LS50	218	218	346	500
LS55	196	196	311	550
LS60	174	174	276	600
MO	436	436	692	0

することとなる。大嶺ら⁹⁾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。また軽量地盤材料の物性評価に関する研究委員会⁹⁾では軽量土に対する構成式の適用性を検討するため、いくつかの構成式を用いてシミュレーションを行っている。対象とする軽量土の物性は多様であり、母材が砂質土系の場合は弾完全塑性型の構成式により、母材が粘性土系の場合は双曲線フィッティングの方法により限られた条件での試験結果を表現することが可能であることを確認したが、解析上の物性値の決定方法等に課題が残っている。

本論文では、軽量化を目的として空気量を多く混入した盛土材料としての軽量土を対象をしぼり、筆者ら⁹⁾が確認した軽量土力学特性を、軽量土の内部の構造をモデル化した数値解析を行なうことにより説明し、さらにその軽量土の破壊基準について考察したのでその結果について報告する。

2. 気泡含有量の多い軽量土の試験結果⁶⁾

本論文では鉄道盛土に使用する軽量土を対象にしており、荷重強度が大きい列車荷重の繰返し载荷を受けるため高い品質を確保する必要がある。そのために、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とし、固化材はスラグ系のセメントを使用している。また軽量土の一軸圧縮強さの決定において、固化材と土の配合割合は重要な要素であるが、本論文においては空気量の違いにのみ着目し、固化材と土の重量比を過去に実工事¹⁰⁾で用いられた軽量土にあわせて1：1に固定し、さらにセメント水比を0.63（一定）として軽量土を作成している。本論文で対象とした軽量土の配合を表－1に示した。目標とした空気量は40%～60%の範囲とし、試料名はLSのあとに配合時に目標とした空気量の数字を示している。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（MO）を作成して試験を行っている。表－2に一軸圧縮試験で得られた一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} を示した。

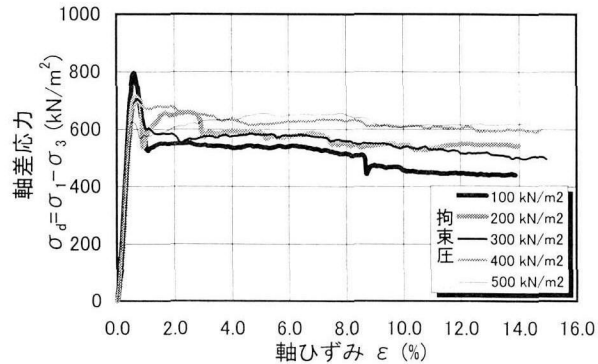
表－3に、表－1の配合の軽量土に対して三軸圧縮試験を行った結果得られた最大軸差応力を試験時の拘束圧毎に示

表－2 一軸圧縮強さと変形係数

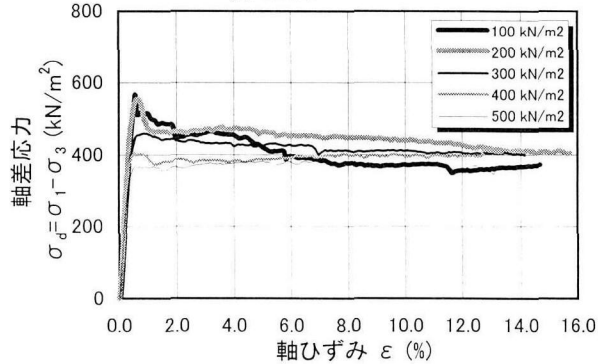
配合	(kN/m ²)					
	LS40	LS45	LS50	LS55	LS60	MO
圧縮強さ q_u	804	700	574	414	256	3500
変形係数 E_{50}	156,000	138,000	111,000	85,200	46,300	702,000

表－3 三軸圧縮試験結果（最大軸差応力）

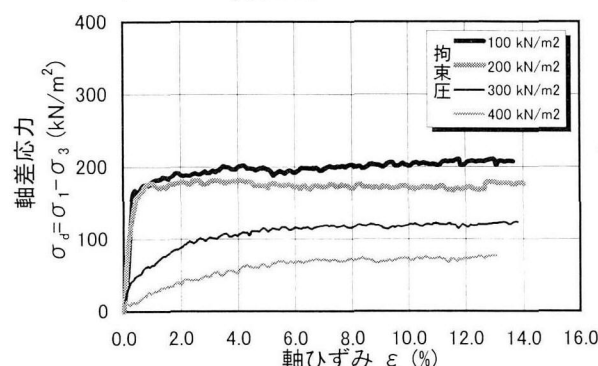
拘束圧	(kN/m ²)				
	LS40	LS45	LS50	LS55	LS60
100	800	604	566	388	202
200	714	578	550	345	181
300	705	535	458	302	122
400	694	523	405	233	69.6
500	580	498	376	203	—



(a) LS40



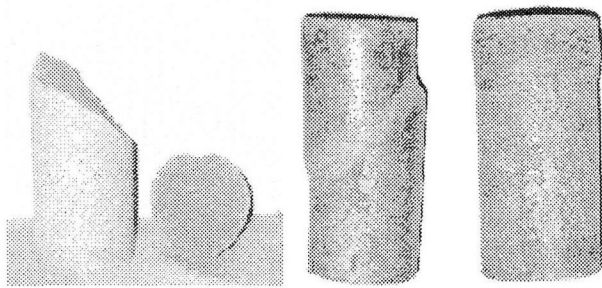
(b) LS50



(c) LS60

図－2 軸差応力－軸ひずみ関係

した。また、図－2には代表的な試験結果となったLS40、LS50、LS60の各拘束圧で行った三軸圧縮試験の軸差応力



(a) せん断 (b) せん断+圧縮 (c) 圧縮

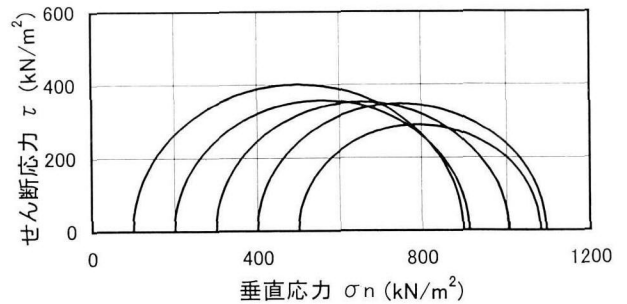
写真-1 破壊形態別の試験体破壊状況

($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) と軸ひずみの関係を示す。なお LS60 は一軸圧縮強さの約 2 倍の 500 kN/m^2 の拘束圧を作用させたところ、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等方圧破壊と呼ぶこととする。

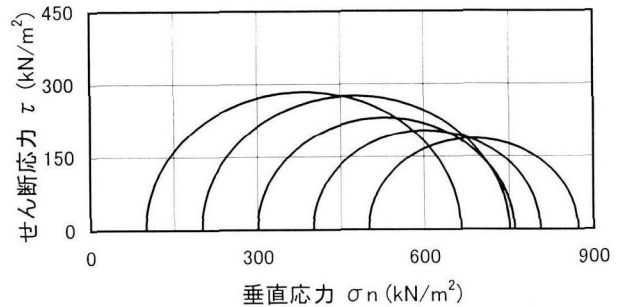
LS40 においてはいずれの拘束圧とも、軸差応力が軸ひずみ約 0.5% でピークを示し、その後残留応力状態となるひずみ硬化-軟化型の挙動を示すのに対し、気泡混入量の多い LS60 ではいずれもピーク強度を示さなかった。また LS60 では、拘束圧が 200 kN/m^2 までは初期の軸差応力の立ち上がりが大きいが、拘束圧 300 kN/m^2 、 400 kN/m^2 では軸差応力は徐々に増加する緩勾配のひずみ硬化型である。一方、この破壊形式と軸差応力-軸ひずみ関係を関連付けるといくつかの傾向に区分することができる。試験体の破壊形態をせん断破壊、せん断+圧縮破壊、圧縮破壊と区分し代表的な破壊の状況を写真-1 に示す。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 LS40 の拘束圧 100 kN/m^2 では写真-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 LS60 の拘束圧 300 kN/m^2 と 400 kN/m^2 では、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した。

図-3 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。これらの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の包絡線で示されるせん断抵抗角は負となる。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っており、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。

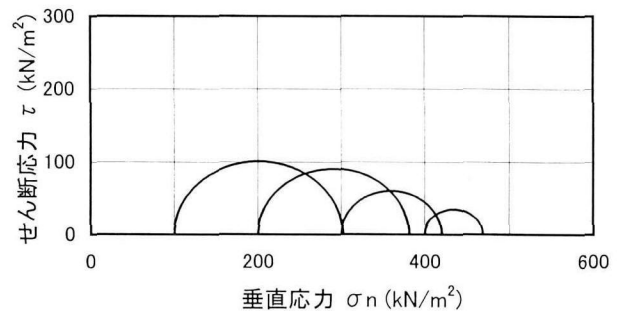
図-4 には、一軸圧縮強さ q_u で正規化した最大軸差応力 σ_{dM}/q_u と同じく q_u で正規化した拘束圧 σ_3/q_u の関係をセメント水比別に示した。また表-4 は、各拘束圧における破壊形態と、それぞれの配合での軽量



(a) LS40



(b) LS50



(c) LS60

図-3 モールの応力円

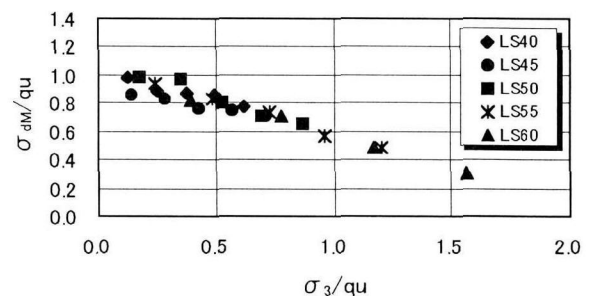


図-4 一軸圧縮強さで正規化した軸差応力と正規化された拘束圧の関係

土の σ_{dM}/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。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。

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

表一四 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

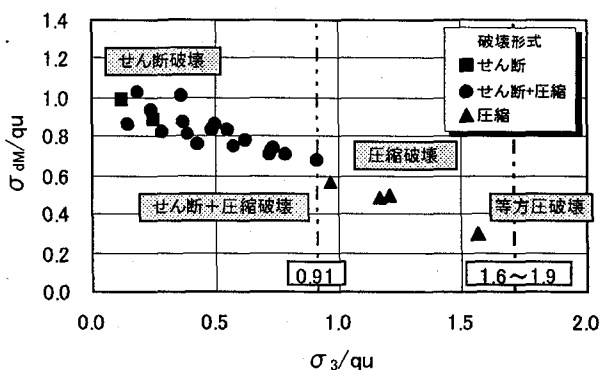
	各拘束圧(kN/m ²)毎の破壊形態					線形関係	
	100	200	300	400	500	傾き	切片
LS40	■	■	●	●	●	-0.360	1.013
LS45	●	●	●	●	●	-0.266	0.896
LS50	●	●	●	●	●	-0.436	1.103
LS55	●	●	●	▲	▲	-0.456	1.159
LS60	●	●	▲	▲	—	-0.453	1.020

ここで ■ : せん断破壊 ● : せん断+圧縮破壊
▲ : 圧縮破壊 — : 静水圧破壊

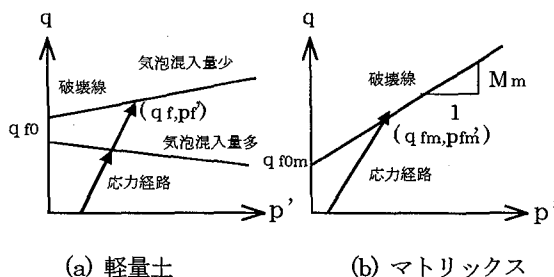
Rはおおよそ0.4であった。表一四に、図一四のデータを線形近似して求めた傾きと切片を示す。傾きが負となっている場合、拘束圧の増加に伴う軸差応力の低下率を表す。今回試験を行った軽量土の低下率Rは、傾きが特に小さかったLS45を除いてR=0.36~0.46であり、飽和気泡セメントの排水強度の拘束圧に対する低下率Rとほぼ同様な値となった。

すべての軽量土において、試験で得られた最大軸差応力と拘束圧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一五に示す。せん断破壊は正規化された拘束圧が0から0.25の間に分布し、正規化された最大軸差応力は0.9より大きい。圧縮破壊は正規化された拘束圧が約0.97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。せん断破壊または圧縮破壊に明確に区別できないせん断+圧縮の破壊形態は0.14から0.91までの間に分布する。等方圧破壊を起こしたLS60の拘束圧500 kN/m²のケースにおける正規化された拘束圧は1.96であった。圧縮破壊となった軽量土で正規化された拘束圧の最大値はLS60の1.56であり、圧縮破壊と等方圧破壊の境界線は1.6~1.9の間にあると考えられる。すなわち軽量土に一軸圧縮強さの1.6~1.9倍程度の拘束圧を与えると等方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、等方圧破壊の各破壊形態をおおよそ区別できる境界線を図一五にあわせて示した。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0.14から0.91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。

3. 軽量土の破壊基準



図一五 一軸圧縮強さで正規化した最大軸差応力と拘束圧の関係（破壊形式で区別）



図一六 軽量土の破壊状態の説明図

3.1 解析モデル

軽量土の破壊時の応力状態を図一六に示す。ここでqは主応力差、p'は平均有効主応力を示す。気泡の混入量が比較的小さい場合には、破壊時の主応力差は拘束圧の増加とともに増加し、気泡の混入量が大きくなると拘束圧の増加に伴う強度増加の割合が小さくなっていく。そして、今回対象としているような気泡混入量40%以上となると拘束圧の増加とともに強度が低下することとなる。以下ではこのような拘束圧の増加とともに強度が低下する軽量土の破壊基準を評価するための破壊モデルを検討する。軽量土は気泡含有量に応じて異なる破壊形態や応力状態で破壊に達するが、母材であるマトリックスに着目すると、いずれの気泡含有量においても同じ破壊線で最大強度に達すると思われる。そこでマトリックスの破壊線は切片q_{fm}と傾きM_mを持つ直線で表されるものとする。

3.2 解析モデル

気泡混合軽量土のように、内部に弱点を有する混合材料は、等方応力状態においてもマトリックスにはせん断応力が発生し、破壊に至ると考えられる。このような軽量混合材料の特性を把握するために、気泡とその周りを構成するマトリックスをモデル化しFEM解析を行った。適正な発泡倍率に発泡させた気泡は直径約0.2mm程度となるといわれており、写真一2の拡大写真で示されるように、軽量土は直径約0.2~0.3mm程度の独立気泡を持つため、0.2mmの均一な気泡がマトリックス中に均等に配置した状態を考慮し、

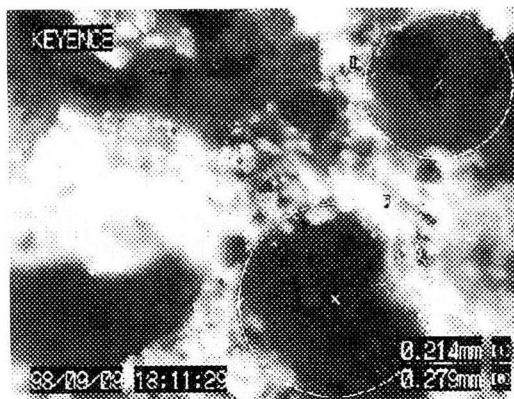
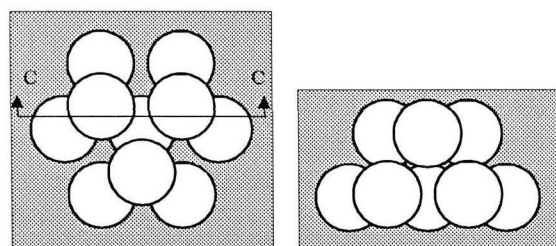
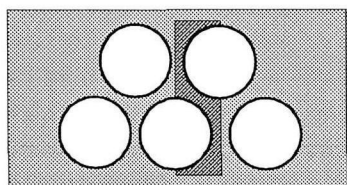


写真-2 軽量土拡大写真（約 100 倍）



(a) 平面図

(b) 側面図



(c) 解析断面（C-C 断面）

図-7 解析モデル

正四面体の各頂点の位置に気泡を配置した図-7 のモデルとした。このモデルにおいて気泡間の距離が一番小さくなる断面で切断した要素を取り出し、2 次元平面ひずみ FEM 解析を対象として行なった。解析に用いたメッシュを図-8 に示す。マトリックスはモール・クーロンの破壊基準に従うものとして線形弾性完全塑性材料でモデル化し、母材 MO の一軸圧縮試験結果よりマトリックスの弾性係数を 702MN/m^2 、引張強さを一軸圧縮強さの $1/10$ と仮定して、粘着力を 550kN/m^2 、内部摩擦角を 54° 、ポアソン比を 0.2 、単位体積重量を 15.5 kN/m^3 として解析を行った。気泡の混入量は実験の条件と同じとし各空気量におけるモデルの寸法を表-5 に示す。また、この試験体に作用する拘束圧及び軸差応力は気泡の存在を考慮していない平均的な応力であるため、モデルに作用させる応力はマトリックスの実断面積を気泡混入量で評価し、次式より σ_i^* を求めた。

$$\Sigma \sigma_i = (1 - a/100) \sigma_i^* \quad (1)$$

ここで、 σ_i^* ：マトリックスに作用する応力

σ_i ：垂直応力

a ：空気量（%）

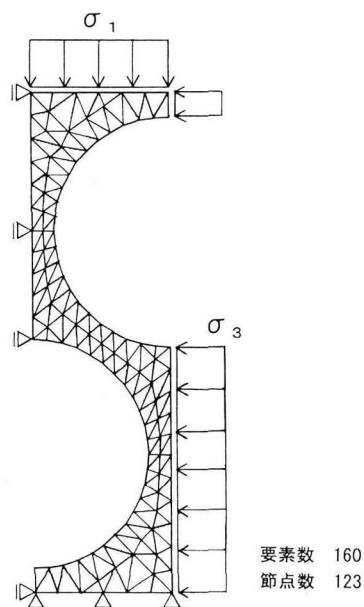


図-8 解析メッシュ

表-5 解析モデル寸法

単位(mm)				
	b	h	c	d
LS40	0.121	0.426	0.232	0.044
LS45	0.116	0.416	0.222	0.340
LS50	0.112	0.410	0.214	0.025
LS55	0.109	0.408	0.209	0.019
LS60	0.106	0.404	0.203	0.013

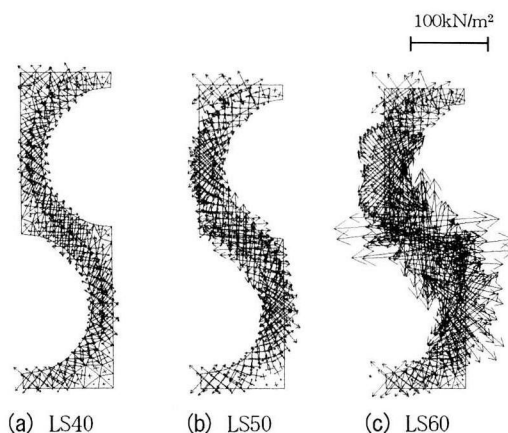


図-9 等方応力状態 ($\sigma_3 = 100\text{ kN/m}^2$ 作用時) におけるせん断応力図

なお、軽量土に作用する応力の方向にはいろいろな方向が考えられるが、今回は図-8 に示す σ_1 、 σ_3 の方向に応力を作用させて解析を行った。

3.3 解析結果

(1) 等方応力状態

等方応力状態における軽量土の主応力分布の解析例として、LS40、LS50、LS60 のモデルにおける拘束圧

100 kN/m²作用時のせん断力図を図-9に示す。この図より、マトリックス内部には等方応力下でもせん断応力が発生しており、空気量が多いほどマトリックスの部材厚（例えば表-5のd）が薄くなるため大きなせん断応力が発生していることがわかる。拘束圧 500kN/m²作用時に等方圧破壊が生じたLS60では拘束圧 500kN/m²を作用させた解析時で 1130kN/m²のせん断応力が発生しており、このときの応力状態から計算されたマトリックス要素の安全率は0.97となっている。ここで要素の安全率FSは

$$FS = (2C \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi) / ((1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)) \quad (2)$$

で計算されており、理論上安全率が1となると要素のせん断破壊が進行していくものと考えられるが、今回の解析はマトリックスの断面積が最小となる断面で行っており、このケースにおいて解析上の安全率が1となる拘束圧作用時に等方圧破壊を生じたのは、軽量土内部の気泡の分布に偏り等があるためと考えられる。ここではどの軽量土も同じように偏りがあると仮定し、解析による要素の安全率が1となる拘束圧を等方圧破壊が発生する拘束圧 p_f と考える。それぞれの空気量に対して FEM 解析により得られた値を基にした等方圧破壊発生時の拘束圧と試験で得られた一軸圧縮強さの関係を図-10のように整理した。解析で算出した等方圧破壊が発生する拘束圧 p_f と一軸圧縮強さは比例関係にあり、この関係を式(3)であらわせることがわかる。

$$p_f = 1.67 q_u \quad (3)$$

また、図-11に三軸圧縮試験時に等方圧破壊を生じた試験ケース⁹⁾について拘束圧 σ_3 と一軸圧縮強さの関係を示した。この図より、等方圧破壊は解析から求められた式(3)を上回る場合に破壊が生じている。これは、この関係式を超える拘束圧を受けた場合に等方圧破壊が生じるという解析結果と同様な結果を示しており、この解析においてはマトリックスの断面積が最小となる断面で解析した影響と気泡分布の偏りによる強度低下の影響により解析結果には誤差が生じるものと考えられるが、それぞれの誤差が相殺されたため、解析はほぼ妥当な結果を示しているものと考えられる。

(2) 一軸圧縮状態

一軸圧縮試験を想定して拘束圧 σ_3 を作用させずに垂直応力 σ_1 を載荷させた状態の解析を行い、マトリックスにせん断破壊が発生する垂直応力と一軸圧縮試験の結果得られた圧縮強さの関係を図-12に示す。この解析により得られたせん断破壊発生時の軸差応力は、一軸圧縮試験によって得られた一軸圧縮強さよりも小さく算定される傾向にあるが、おおむね本モデルを使用した解析により一軸圧縮試験を評価できるものと考えられる。なお、軽量土の一軸圧縮強さは、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であることを確認している⁹⁾。

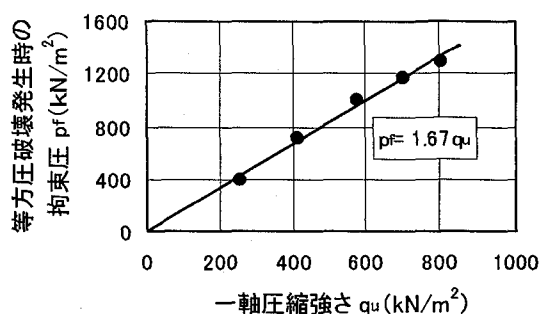


図-10 解析上の等方圧破壊発生応力と一軸圧縮強さとの関係

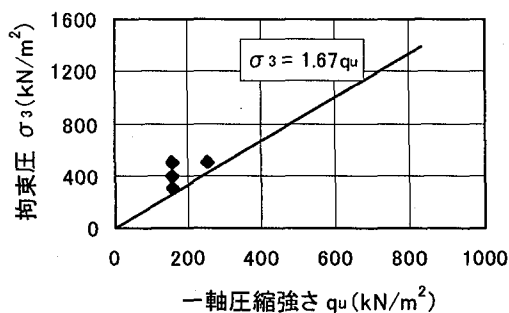


図-11 三軸圧縮試験で等方圧破壊発生した拘束圧応力と一軸圧縮強さとの関係

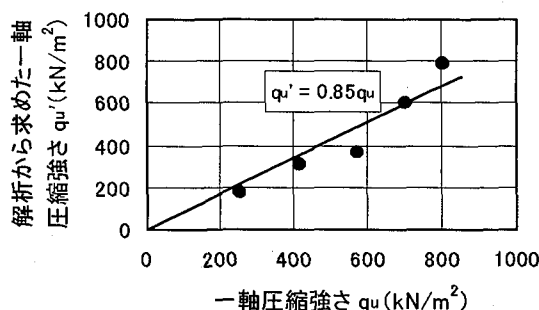


図-12 一軸圧縮試験解析結果と試験結果

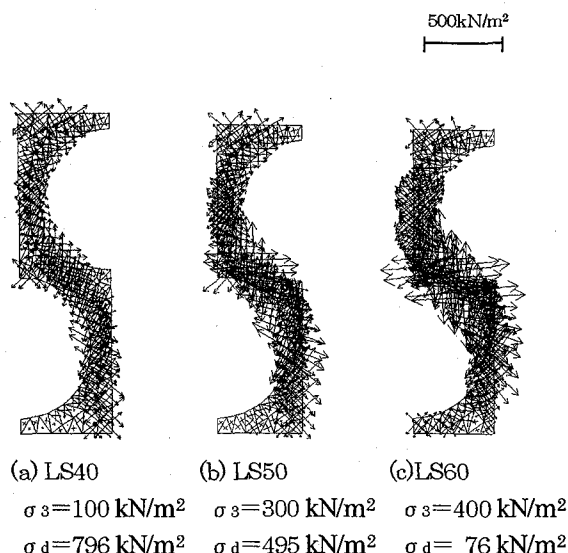


図-13 三軸圧縮試験解析例における最大せん断応力図

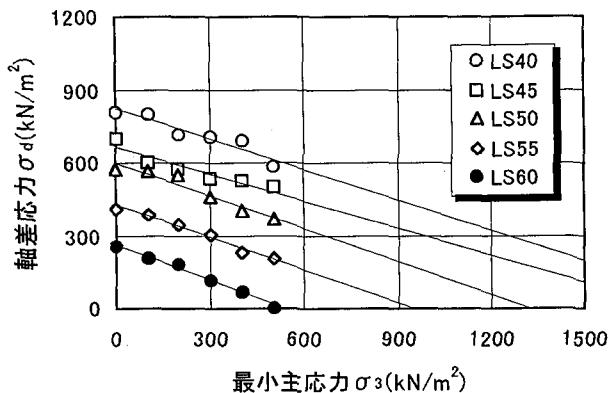


図-14 実験結果から得られた軽量土の破壊基準

$$q_u = (1 - a/100)^{2.9} q_{umo} \quad (4)$$

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)

$$q_{umo} = 26,500 (C/W) - 13,100 \quad (5)$$

ここに、C/W : セメント水比

(3) 三軸圧縮状態

次に、拘束圧を作用させてから軸差応力を載荷させ、三軸圧縮状態を想定した解析を行った。図-13は三軸圧縮試験を想定して行った解析結果のうち最大せん断応力度分布を示したものであり、破壊形式で明確に区分できる。LS40の拘束圧 100kN/m²、LS50の拘束圧 300 kN/m²、LS60の拘束圧 400 kN/m²の各モデルに三軸圧縮試験時の最大軸差応力を作用させたときの解析結果である。LS40のせん断応力図を見るとせん断応力の向きが規則的に並んでおり、その方向も各部位で鉛直方向から約 45° 方向となっている。このようなせん断応力分布は空気量が少なく比較的拘束圧が小さい場合の解析結果にみられ、表-4で示した破壊形態においてせん断破壊となっている試験ケースに見られた。このケースの破壊は、軸差応力の増加に伴いこのせん断応力の方向にそってマトリックスが 45° 方向にせん断破壊し、破壊後はせん断面で徐々にずれていく破壊形態となっている。このときの応力-ひずみ曲線はせん断破壊発生まではひずみ硬化型で、せん断破壊発生時に最大軸差応力を示した後に軸差応力はいったん低下し、せん断面の摩擦力によって一定の残留応力を示すこととなる。一方、一軸圧縮強さに対して拘束圧の大きいLS60の拘束圧 400kN/m²では、気泡と気泡の間のマトリックスが一番薄いところでせん断応力が集中して局所的な破壊が生じるため、マトリックス部分が気泡をつぶしていくような形で壊れ、軸ひずみの進行に伴い破壊範囲が広がっていく破壊形態(写真-1(c)の圧縮破壊)となるものと考えられる。このときの応力-ひずみ曲線は、試験体の弱い部分から徐々に破壊が生じていくため軸ひずみの進行に伴い徐々に軸差応力が上昇して行く形となる。また、LS50のケースのように最大せん断応力の方向が不規則な場

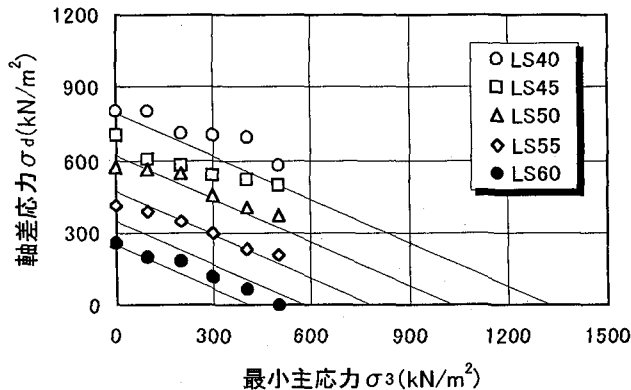


図-15 軽量土の破壊基準(実験結果と提案式の比較)

合には、写真-1(b)のようなせん断破壊と圧縮破壊の中間的な破壊形態となると考えられ、応力-ひずみ関係においてせん断初期の傾きはせん断破壊するケースと同じであるが、明確なピークを持たずに残留応力に移行する形となる。今回の解析からは、気泡含有量の高い軽量土の破壊形態と一軸圧縮強さ・拘束圧との明確な関連付けはできなかったが、骨格を構成するマトリックスのせん断破壊の形態によって、軽量土の破壊形態の違いを説明することができた。

4. 軽量土の破壊基準

図-14は試験結果から得られた破壊時の軸差応力と拘束圧の関係を示したものである。この図から、気泡を多く含む軽量土の破壊線は拘束圧の増加とともに減少する傾向が示されている。また、図より等方応力が大きくなると等方圧破壊を生じることが推定される。ここでは破壊線が直線的に減少するものとして破壊基準を以下の一次式で表現する。

$$\sigma_d = M\sigma_3 + q_u \quad (6)$$

ここで M : 破壊基準線の傾き (値は負)

ここで軽量土の一軸圧縮強さ q_u は式 (4) により求めることができる。またこの q_u と図-10の等方圧破壊となる拘束圧 $p_f (=1.67 q_u)$ より M を求めることができる。図-15は式 (4) により算出した q_u と、この q_u と p_f より算出した M ($=-0.6$) を使用して求めた軽量土の破壊基準と実験結果を比較したものである。この図より、提案式は軽量土の空気量が最大軸差応力に与える影響や、実験結果の最大強度が拘束圧とともに減少する傾向をおおむね示しており、気泡を含まない改良土の強度特性から任意の気泡量を持つ軽量土の強度の破壊形態を推定することができる。

5. まとめ

気泡の混入を考慮して行った三軸圧縮試験をモデル化した解析を行い、軽量土の破壊基準の提案をおこ

なった。その結果以下のことが分かった。

- (1) 軽量土をモデル化した要素の数値解析をもとに、等方圧破壊が発生する等方応力を求め、改良土の特性と空気量の関係から求まる軽量土の一軸圧縮強さを利用して、軽量土の破壊基準の定式化を行った。
- (2) 提案する気泡混合軽量土の破壊基準により、空気含有量が多い軽量土の特徴である拘束圧の増加によって強度が減少するという現象を評価することができた。
- (3) 今回のモデルを使用した解析から、軽量土の破壊形態の違いをマトリックスの破壊形態から説明することができた。

参考文献

- 1) 横田聖哉・三島信夫：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㈱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) 渡辺・海野：気泡含有量の多い軽量土の強度特性と破壊機構，土木学会論文集，No.680/III-55, pp.131-139, 2001.
- 7) 軽量土地盤材料の物性評価に関する研究委員会：軽量地盤材料の物性と適用の現状，地盤工学会，1998.
- 8) 大嶺・落合：混合体モデルに基づく軽量地盤材料の強度・変形特性の評価，軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム発表論文集，pp.187-192，地盤工学会，2000.
- 9) 軽量土地盤材料の物性評価に関する研究委員会：軽量地盤材料への構成式の適用，軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム発表論文集，pp.23-46，地盤工学会，2000.
- 10) 今井政人・風間武治・五十川好治：赤羽駅高架化気泡モルタル盛土，基礎工，Vol.22, No.10, pp.91-95, 1994.

(2001年9月14日受付)