

気泡セメント改良土の一軸圧縮強度への影響因子

林泰弘¹・鈴木敦巳²

¹正会員 修(工) 熊本大学助手 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)

²正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)

気泡セメント改良土は新しい地盤材料である軽量土の代表的なものであり、建設発生土の有効利用、軟弱地盤対策として施工実績が増加している。しかしながら、物性を左右するファクターが非常に多いため、この材料の一般的物性評価方法はまだ確立されていない。本研究では、改良土特性を評価する最も一般的な指標である一軸圧縮強度に着目し、影響因子について室内実験を行うことで検討した。その結果、気泡セメント改良土の一軸圧縮強度は間隙比の影響が非常に大きいことを示した。また、原料土の物性は液性限界を用いることで一般化できること、セメント混合量が多くなるとその量の違いは無視し得ること、養生日数が56日を越えると影響が小さくなること、混合方法の影響は小さいことを確認した。さらに、混合直後に圧力を加えると、密度が増加し、それに応じて強度が増加することがわかった。

Key Words: *lightweight soil, soil stabilization, unconfined compression strength, void ratio, standard deviation*

1. はじめに

従来の土質安定処理工法には、締め固め、圧密促進など密度増加によって強度を増進させる物理的方法、石灰、セメントや樹脂などを土に混合させ化学的に固化する方法、熱などを用いて安定させる方法がある。新しい土質安定処理方法である軽量安定処理は、化学的安定処理により必要強度を確保するのと同時に軽量材料を混入することで土の単位体積重量を減らすことが目的である。軽量土を地盤材料として盛土などに用いることによって上載荷重の低減、構造物に作用する土圧の軽減など地盤構造物全体として有利な点が多く、軟弱地盤上の構造物に対して特に効果が期待され、このような地盤に限まれている日本では、世界的にも先端の研究・実践が行われている。土に混合する軽量材料は、発泡ビーズ、気泡が主流であり、水碎スラグ、石炭灰なども用いられる。本研究では気泡を用いたため、以降では気泡を用いた軽量地盤材料(気泡混合改良土)について記す。

気泡混合改良土の原料土や適用場面は研究・実施機関によって異なっているが、代表的な例として、運輸省では浚渫粘土を用いて主に護岸工事における裏込め材料や、埋め立て材料としての利用¹⁾を、建設省では建設発生土を母材とし橋台・擁壁への裏込め、山岳地での腹付け盛土、締め固めが困難な場所での利用などを考えている²⁾。また、日本道路公団では、砂質土を原料とした軽量盛土工法の設計・施工指針を作成している^{3),4)}。

気泡混合改良土の利用において、まず問題となるのは改良土の強度や密度をいかにコントロールするかということである。気泡は不安定であるため、混合中に潰れたり体積が変化したりするため、改良土中にとどまる気泡量をあらかじめ知っておく必要がある。このような気泡量の減少割合は消泡率と呼ばれ、砂についてはある程度研究が行われている⁵⁾。粘性土については、打設の際の流動性を考慮すると、含水比は液性限界の2.0-2.5倍に調整することが望ましい⁶⁾といわれているが、混合中の消泡率との関係は明らかではない。

気泡混合改良土の混合方法は、土、固化材、気泡を一つのプラントで混合する方法が主流である^{1),2)}。この方法は密度の管理が比較的簡単である。しかし、原料土を地盤から混合プラントへ、そして再び地盤へという過程が必要で、処理能力の大きな混合プラントが必要である。一方、この問題を解決するために、一般的な表層地盤改良や深層混合処理⁷⁾のように改良材のみをプラントで作成し、現地盤中へ圧送して、直に現位置で混合するという方法⁸⁾も研究されている。

セメント系の固化材による改良土の物性について多くのデータが蓄積されていている⁹⁾が、気泡混合改良土についてはまだ不充分なのが現状である。気泡混合改良土を目標とする品質に管理する上で、まず最初に問題となるのは密度の管理であり、密度はせん断、変形、透水特性などの物性に与える影響も大きい。また、気泡混合改良土は、本来地盤材料に適さない材料を軽量化とともに、あるレ

表-1 試料土の特性

	w(%)	$\rho_l(\text{g/cm}^3)$	e	$w_L(\%)$	$w_p(\%)$	I_p	sand(%)	silt(%)	clay(%)
C'H	95.0	1.44	2.63	57.8	35.9	21.9	3.8	59.7	36.5
ML1	54.7	1.62	1.58	43.1	34.3	8.8	19.0	58.7	22.3
ML2	68.3	1.59	1.85	35.8	28.3	7.5	19.0	58.5	22.5
MH1	68.6	1.59	1.86	50.5	33.5	17.0	35.2	40.2	24.8
MH2	67.7	1.58	1.83	53.8	34.3	19.5	23.1	61.3	15.6
SM1	50.0	1.58	1.42	38.6	31.8	6.8	57.3	25.2	17.5
SM2	50.0	1.69	1.41	29.6	26.4	3.2	50.6	35.4	14.0

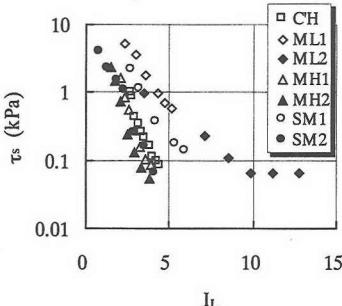


図-1 試料土のベーンせん断強度

表-2 気泡製造条件

タイプ	希釈倍率	発泡倍率
A	4倍	34倍
B	20倍	20倍

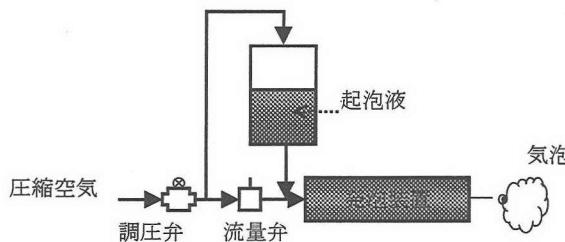


図-2 発泡装置の概略図

ベルの強度を持たせることが目的であるため、品質管理を行う基本的指標は、湿潤密度と一軸圧縮強度がよく用いられる。一軸圧縮強度は、圧密特性やせん断、変形特性を評価する場合に簡易的な基準として用いられる^{10), 11), 12)}ことが多い。

セメント系の固化材を用いた改良土の強度に与える影響は固化材配合量、母材の含水比、養生条件、養生期間などが主な要因であり、気泡セメント改良土ではこれらに加え、気泡の混入量や質の影響が考えられる。本論文ではこれらについて一軸圧縮強度を指標として検討を行った。

2. 実験方法

(1) 原料土及び改良材

原料土は熊本港付近の航路浚渫により発生した表-1 に

示す土を用いた。これらの土は、日本統一土質分類を用いて、C'H, ML1, ML2, MH1, MH2, SM とした。液性限界以下の粘性土は流動性が不足し、気泡が安定して混合できないため加水して用いることが多く、流動性の確保と材料分離の関係から、液性限界の2.0-2.5倍の含水比が望ましいという報告がある⁹⁾。まず、土の硬軟と含水比の関係を求めるために、原料土を適当な含水比で練り返した後、容器に投入し、ベーンせん断試験によってせん断強度(τ_s)を測定した(図-1)。ただし、いずれの土についても土と水が分離しない範囲で行った。指標は、土の硬軟を表す指標とされている液性指数(I_L)を用いた。 I_L の増加に従って τ_s は指數関数的に減少しており、最終的に0.1kPa程度まで低下した。

改良材である気泡セメントはセメント、気泡、水の混合体である。セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。気泡の製造にはさまざまな方法があるが¹³⁾、たんぱく質系の起泡剤と図-2 の装置を用いてプレフォーム式で製造した。

表-3 実験ケース

Case	I	II	III	IV
試料土	C'H, ML1, MH1, SM1	ML2, SM2	ML2	SM2
C/S (%)	5-20	20	20	20
F/C (%)	10	5-20	5-20	5-20
気泡の種類	A	A, B	B	A
混合方法	手混ぜ	手混ぜ	手混ぜ	手混ぜ 機械混ぜ
養生日数(日)	7	1-730	28	7-56
養生圧 (kPa)	0	0	0-200	0

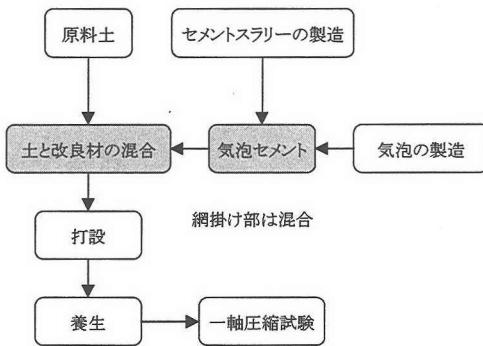


図-3 気泡セメント改良土作成の流れ

気泡は表-2に示すように、A, B の 2 タイプを用いた。気泡セメントの配合については水セメント比(W/C)を 100%とし、気泡セメント比(F/C)は後で述べるように実験ケースによって適当な範囲に設定した。

(2) 実験方法

実験は表-3で示した I-IV の 4 通りで行った。I は物性の異なる原料土において基本的な配合特性を確認するため、II は養生期間の影響、III は養生圧の影響、IV では混合方法の影響を評価することをそれぞれの目的として行った。表-3 中の C, S, F はそれぞれセメント、乾燥土、気泡の質量を表し、C/S は乾燥土質量に対するセメント添加質量の割合を、F/C はセメント質量に対する気泡質量の割合をそれぞれ 100 分率で表したものである。改良土の作成の基本的な流れは図-3 の通りである。まず、発泡装置で気泡を製造し、別途作成しておいたセメントストラリーと混合し改良材となる気泡セメントを作成する。これを別途調整しておいた原料土に加え均一になるまで混合する。混合土は直径 50mm、高さ 100mm の塩ビ製モールドにタンピング充填され、温度管理された室内($20 \pm 3^\circ\text{C}$)で養生された。数日養生後モールドより脱型し、質量、寸法測定の後、乾燥を防ぐためにポリエチレンフィルムで密閉し、引き続き養生した。所定の養生後、軸ひずみ速度 1.0%/min で一軸圧縮試験を行った。各ケースの詳細な実験方法は以下に示す。

a) ケース I

このケースでは、気泡セメントの配合は一定で、土に混合する気泡セメント量を変えて供試体を作成した。

b) ケース II

セメント系の固化材を用いた改良土では化学反応により時間の経過とともに固化が進むため材令の影響を無視することができない。そこで、材令が 1-730 日の範囲で養生し、配合が異なる数種類の供試体を用いて一軸圧縮試験を行った。

c) ケース III

フレッシュな気泡セメント改良土は圧力を受けることによって圧縮、変形を起こしやすい。そこで、混合直後から水圧及び空気圧を作用させた養生タンクの中で 4 日間養生した。その後大気圧に開放し、その後は他のケースと同様に養生した。

d) ケース IV

同じ気泡を用いても混合方法によって消泡率が異なり固化後の密度や内部の気泡の状態は異なると考えられる。この違いが強度へ与える影響を調べることを目的とした。図-3 の土と改良材を混合する過程を I-III のケースで用いた手混合と、試作した混合機による機械混合¹⁴⁾の 2 種類で行った。機械混合は手混合に比べ激しく混合体を攪拌するため、気泡の形状や消泡量が変化することを期待した。また、機械混合では原料土の含水比が低い場合、著しく混合性が低下することから、本ケースでは混合方法によらず原料土を $I_L=4.0$ に加水調整したものを用いた。

3. 実験結果と考察

(1) 気泡セメント改良土の基本的配合特性

図-4 に MH1 を原料土とした気泡セメント改良土の湿潤密度(ρ_w)と一軸圧縮強度(q_u)の関係を示す。図中の記号○●□■△▲は C/S = 5, 10, 15, 20, 25, 30% を示している。C/S の増加に従って粒子間のセメントーションは増加し、F/C が一定のため、気泡混入量も増加し密度が減少する。その湿潤密度の減少に伴って一軸圧縮強度が極大値($q_{u(\text{peak})}$)を示

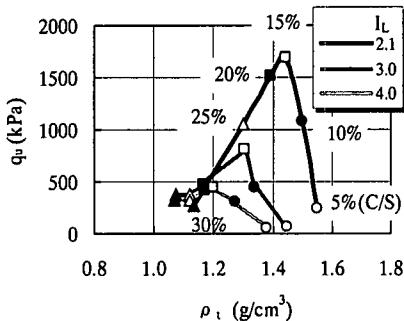


図-4 濡潤密度と一軸圧縮強度の関係(MH1)

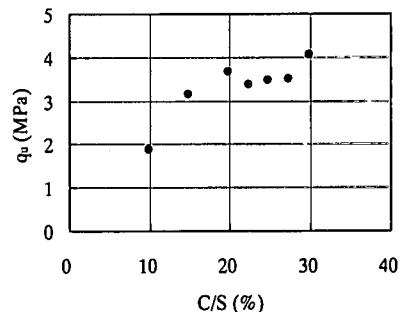


図-5 セメント添加量と一軸圧縮強度の関係(MH2)

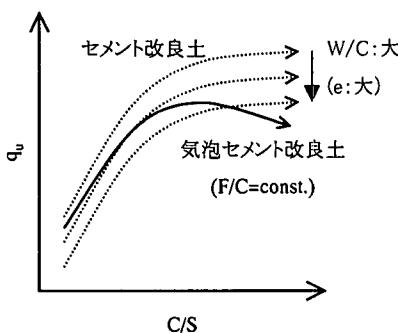


図-6 改良材添加率と強度変化模式図

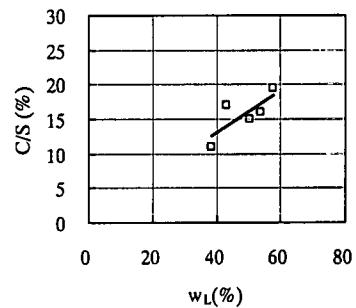


図-7 ピーク強度を与えるセメント添加率

す、上に凸の関係が得られた。また、 $q_{u(\text{peak})}$ は含水比が高いものほど小さくなっている。一般にセメント改良土の一軸圧縮強度は、コンクリートと同様に水セメント比(W/C)が小さいほど大きい¹⁵⁾といわれ、同様の結果が得られた。しかし、湿潤密度が小さい、すなわち、C/Sが大きい範囲では、混入された気泡量の増加によって、含水比の影響が小さくなっている。

改良材添加率の増加によって、 $q_{u(\text{peak})}$ を示すこの傾向は、 $q_{u(\text{peak})}$ やそのときのC/Sの値は原料土によって異なるものの、C'H, ML1, SM1にも共通に見られた現象である。そこで、この現象が見られるメカニズムについて考察する。まず、セメントのみで改良した事例を図-5に示す。C/Sが小さい範囲ではC/Sの増加にしたがって q_u は単調に増加するが、徐々にその割合が低下する。これは、セメントが土に対して過剰でありセメントーションの新たな増加に有効に働いていないためであると考えられる。このことを踏まえて、セメント改良土のセメント添加率と一軸圧縮強度の関係は、一般に図-6中の点線のような傾向を示すと考えられる。それぞれの点線は、原料土の含水比が等しいものを示している。つまり、C/Sの増加とともに q_u は大きくなるがその関係は非線形性である。また、原料土の含水比を増加させた場合(つまり、W/Cが大きくなった場合)には、同一のC/Sにおいて q_u は低下する。また、このことは間隙比の増加でも同じことが起

こると考えられ、このケースⅠのようにF/Cを一定とした改良材による気泡セメント改良土の場合の一軸圧縮強度は、C/Sの増加による q_u 增加によって土-セメント粒子の結合力は増加する(図-6)の点線上を右上へ移動しようとするものの、気泡量増大により、より下方の点線へシフトして行く。セメント添加率が小さい範囲では固結力の増加割合が大きく、間隙比の増加による強度低下を上回るために全体として強度増加が得られるが、これらの効果が逆転するところで一軸圧縮強度の極大点($q_{u(\text{peak})}$)が現れると考えられる。

$q_{u(\text{peak})}$ となるC/Sは、原料土の含水比には依存せず種類で異なった。これは、セメント改良効果は細粒分の性質を主とした、土固有の性質が大きく影響するといわれている¹⁶⁾ためであろう。そこで、 $q_{u(\text{peak})}$ を与えるC/Sを細粒分の物理化学的性質をあらわす液性限界(w_L)を用いて示した(図-7)。 w_L が大きくなるほど $q_{u(\text{peak})}$ を得るためのC/Sが大きくなっていることがわかる。これは、細粒分粒子表面の活性が影響しているためであると考えられる。

セラミックスなどの多孔質材料の破壊強度は気孔率依存性があるといわれ、強度 σ と気孔率(空隙率) P との関係を表す多くの実験式が提案されている¹⁷⁾。これらの実験式の中で燃結体、水和物を問わずあらゆる種類の多孔体について成り立ち、適用される気孔率の範囲も他の式よりも広いものとして、

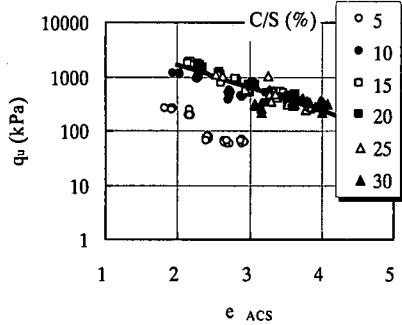


図-8 間隙比と一軸圧縮強度の関係(MH1)

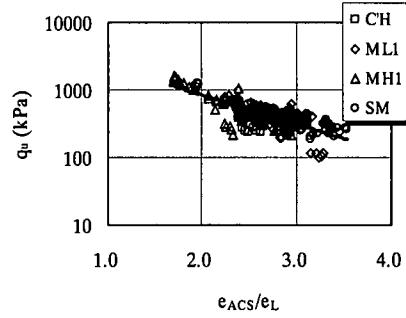


図-10 正規化した間隙比と一軸圧縮強度の関係

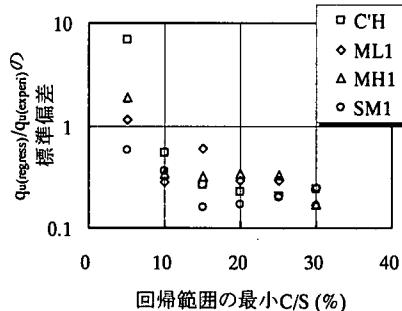


図-9 回帰範囲の最小 C/S と標準偏差

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-bP) \quad (1)$$

が提案されている。ここで、 σ_0 は $P=0$ における強度もしくは実質部分の強度、 b は正の定数である。この関係を山内・浜田は気泡セメントに適用し、以下の式を提案した¹⁰⁾。

$$q_u = C_1 \cdot q_{u0} \exp(-0.396e_0) \quad (2)$$

ここで、 q_u は一軸圧縮強度、 C_1 は起泡剤の混入率に関する定数、 e_0 は圧縮前の間隙比、 q_{u0} は起泡剤とセメント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 ($e_0=0$) の一軸圧縮強度である。これを気泡セメント改良土に適用して一軸圧縮強度を改良土の間隙比 (e_{ACs}) で表したものうち、MH1 のものを図-8 に示す。それぞれの C/S において $e_{ACs} \cdot \log(q_u)$ が直線関係にあることがわかる。これらの関係はセメント添加率 (C/S) をパラメータとして式(3)で表せる。

$$q_u(C/S) = \alpha(C/S) \cdot \exp(-\beta(C/S) \cdot e_{ACs}) \quad (3)$$

図からわかるように C/S が大きくなるにつれ、C/S の違い

による差が小さくなっている。そこで、複数の C/S をひとまとめにして間隙比 e_{ACs} と一軸圧縮強度 q_u の関係について式(3)を用いて回帰分析を行い、それぞれの回帰式の持つばらつきについて検討した。その C/S の範囲は、C/S(%)=5-30, 10-30, 15-30, 20-30, 25-30, 30 のみとした。実験で得られた間隙比と一軸圧縮強度 ($q_{u(expon)}$) 及び回帰式から得られた一軸圧縮強度 ($q_{u(regress)}$) を用いて強度比 ($q_{u(regress)} / q_{u(expon)}$) を算出し、この比の標準偏差を求めた。図-9 は、回帰範囲の最小値に対して標準偏差をプロットしたものである。つまり、横軸 5% 上の点は、5-30% の範囲のデータを用いて回帰した場合の標準偏差である。C/S の増加にしたがって、標準偏差は急激に低下し C/S ≥ 15% の範囲ではほとんど変化が見られず、0.2 程度を示している。C/S 毎に回帰して得られた結果の標準偏差は 0.09-0.28 であり、この一定となる値と同レベルであった。このことは、C/S の影響が小さい範囲であることを示しており、いずれの原料土に対しても $q_{u(expon)}$ を得た C/S とほぼ一致した。このような範囲の回帰線は図-8 中の直線である(ただし、C/S ≥ 15%)。この直線に対するデータのばらつきが正規分布に従うと仮定すると、実験値は両側 90% の確率で回帰式の 30% 程度の範囲になることがわかる。

次に、原料土の違いによる影響を検討した。C/S に依存しない範囲であっても原料土の特性が影響するため、 $e_{ACs} \cdot \log(q_u)$ の直線は原料土によって異なる。そこで、図-7 で用いたように液性限界に原料土の特性を代表させることとし、液性限界で飽和している場合の原料土の間隙比 (e_L) を用いて気泡セメント改良土の間隙比を正規化した e_{ACs}/e_L を新たなパラメータとして用い、C/S ≥ C/S($q_{u(expon)}$) の範囲のものを図-10 にプロットした。セメント改良土において強度に影響を及ぼす因子は数多くあるが、セメント固化反応に比べ間隙比の影響が大きいため、原料土の違いによらない式(4)のような関係が得られた。

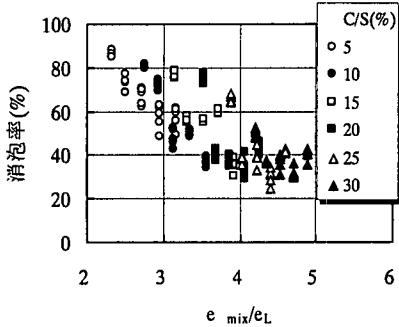


図-11 間隙比と消泡率の関係(MH1)

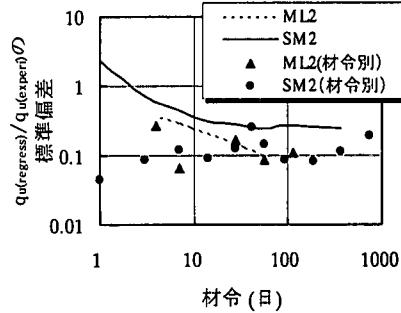


図-12 回帰範囲の材令と標準偏差

表-4 消泡率が一定となる条件

	C/S (%)	I _L	τ_s (kPa)	w/w _L	e _{mix} /e _L	一定となる消泡率(%)
C'H	10	2.7	0.8	1.6	3.5	約35-40
ML1	20	1.3	5.2	1.1	3.5	約35-45
MH1	20	2.5	1.0	1.5	3.7	約30-40
SM1	20	2.7	0.8	1.3	3.2	約30-35

$$q_u(\text{kPa}) = 6.31 \times 10^3 \cdot \exp(-0.987 \frac{e_{ACS}}{e_L}) \quad (4)$$

但し、 $C/S \geq C/S(q_{u(\max)})$

この式の決定係数は 0.76、標準偏差は 0.37 であり、まずまずの精度であるといえる。

混合効率を確保することは土質安定処理において重要な課題であり、特に気泡セメント改良土では改良材を均一に混合することに加え、消泡を抑制したり、消泡量をあらかじめ把握しておくことが非常に重要である。気泡を放置したときの消泡については三島らが報告している⁹が、気泡の製造から混合終了までの時間は、それほど問題にならず、土と混合する際の摩擦抵抗による消泡が更に大きいと思われた。消泡の度合いを表す指標として消泡率を以下のように定義した。

$$\text{消泡率} (\%) = \frac{\text{固化後の空気量}}{\text{混合開始時の空気量}} \times 100 \quad (5)$$

消泡は土と気泡の摩擦抵抗によって起こることから、土の硬軟を示す指標を用いて整理することにした。この指標には液性指数が考えられたが、気泡の添加量が考慮できないため十分な指標とはならなかった。そこで、再び間隙比を用いた。この時の間隙比は消泡により関係の深いものとして、混合初期の間隙比(消泡が起こっていない)とし、液性限界時の間隙比で除したもの、 e_{mix}/e_L を用いた。図-11 は MH1 の結果を示しており、間隙比が小さい部分で消泡率は高く、C/S が多くなるにつれ消泡率が低下し、30-45% 程

度に収束した。

消泡率がほぼ一定となる最小の C/S 及び I_L は表-4 の通りであり、原料土の含水比、混合体の間隙比を、それぞれ液性限界の原料土の含水比(w_L) 及び間隙比(e_L)に対する割合で示した。また、表中の τ_s は原料土の I_L と図-1 から求めたせん断強度である。これらは原料土により大きく異なり、 e_{mix}/e_L が土の性質によらない最も一般的な指標であることがわかる。原料土の含水比を液性限界の 2.0-2.5 倍にすればよいという報告¹⁰があるが、今回の結果ではそれ以下であり、必ずしも原料土の含水比のみでなく気泡を含めた混合体全体の間隙比で考えることが有効であることがわかった。

(2) 気泡セメント改良土における養生期間の影響

セメント系の固化材を用いた改良土は化学反応により時間の経過とともに固化が進む。齊藤¹¹は日本全国の 16 種類の海成粘土について、普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を用いて異なる材令の一軸圧縮強度を調べ、以下のようないくつかの関係を得た。

$$\begin{aligned} q_{u(28)} / q_{u(7)} &= 1.4 - 2.8 \\ q_{u(91)} / q_{u(7)} &= 1.8 - 5.9 \\ q_{u(365)} / q_{u(7)} &= 2.2 - 10.0 \end{aligned} \quad (6)$$

括弧内の数字は材令(日)を示している。また、湯ら¹²は材令が 90 日までの気泡軽量混合土において、一軸圧縮強度は時間の対数との関係でよく表すことができるとしている。

ここでは、ケース II の実験により検討を行った。用いた供試体は ML2(材令 4, 7, 28, 56, 112 日)と SM2(材令 1, 3, 7, 14, 28, 42, 56, 91, 184, 365, 730 日)である。

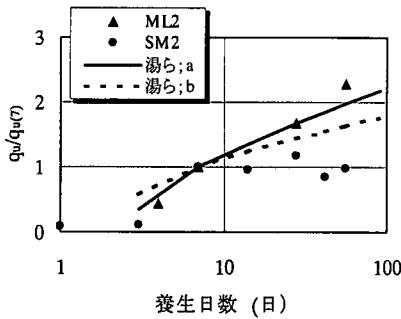


図-13 7日強度で正規化された一軸圧縮強度

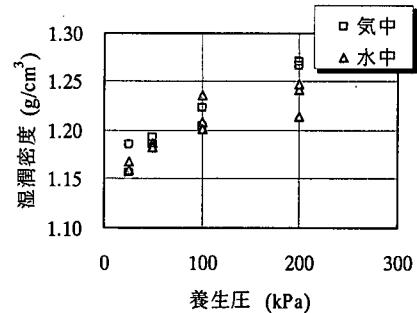


図-15 養生圧と湿潤密度の関係

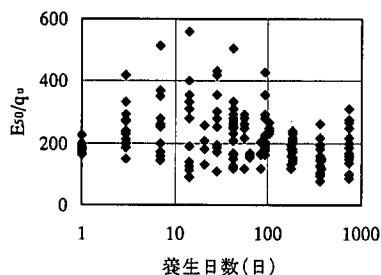


図-14 E_{50}/q_u の養生日数による変化

まず、材令が影響する範囲を3(1)で検討したものと同様の方法で検討することにした。つまり、材令毎に式(3)で回帰線を作成し、回帰線から得られた一軸圧縮強度($q_{u(\text{regress})}$)と実験値の $q_{u(\text{exp})}$ から強度比($q_{u(\text{regress})}/q_{u(\text{exp})}$)を算出し、この比の標準偏差を求める。次に、任意の材令から最大材令までのデータをひとまとめにし、同様の分析を行い、標準偏差を比較することとした。図-12がその結果であり、図中の点はそれぞれの材令での標準偏差、曲線は任意の材令から最終材令までを一つの回帰式で分析した場合の標準偏差である。SM2については材令28日-56日位で曲線がほぼ水平になっており、それ以降は材令の影響があまり見られないことがわかる。ML2は試験期間が短く曲線が右下がりのまま終わっているが、それぞれの材令内での標準偏差と同レベルであることから56日程度以降ではあまり変化しないことが予測された。つまり、いずれの場合も材令56日以降では、材令が強度、つまり、 $e_{AC5}-\log(q_u)$ 関係に大きな影響を及ぼさないことがわかった。

材令が56日以下のものについて、それぞれの材令における回帰式から、湿潤密度 1.1 g/cm^3 に相当する一軸圧縮強度を求め、材令7日のものの($q_{u(7)}$)で正規化して示したもののが図-13である。図中に湯ら¹⁸⁾により得られた結果を曲線で示した。湯らの結果は目標密度が 1.1 g/cm^3 で、28日養生後の

目標強度がそれぞれ約400kPa(4.0 kgf/cm^2)のもの(a、実線)及び約200kPa(2.0 kgf/cm^2)のもの(b、点線)であり、今回のML2、SM2については約400kPa、約640kPaである。いずれもほぼ同様の結果を示しており、また、その範囲も齊藤らの結果と同等であった。そのため、気泡セメント改良土は、材令による強度の変化はセメント改良土のそれと同様であること、原料土によらないことがわかった。

安定処理土の変形係数 E_{50} に関しては一軸圧縮強度と関連して評価していることが多い、 $E_{50}=(80-250)q_u$ ¹⁹⁾や $E_{50}=640q_u$ ²⁰⁾などの報告がされており、一般に言われる自然地盤の粘性土における $E_{50}=105q_u$ と比較してかなり大きく、ばらつきも大きい。図-14に E_{50}/q_u と材令の関係を示した。材令による変化は見られず $E_{50}=(100-400)q_u$ となっているが、ばらつきは大きく一般の安定処理土と同様の傾向を示した。

(3) 養生時の縮泡

外圧を受けた気泡セメント改良土は即時的に大きな圧縮が起こり、その後セメントの固化反応とともに3日程度で収束する²¹⁾。田中らは、加圧養生した気泡混合処理土の密度は加圧により増加し、消泡を考慮すればボイルの法則に従い、強度は、加圧により増加しその変化は密度変化と関連する²²⁾と報告している。また、久野らは、軽量充填材を三軸室に入れ大気圧(1気圧)から2気圧に圧力を増加させた場合、空気圧、水圧の違いによらず1日載荷後には空気量は加圧前の0.6-0.7倍程度になる²³⁾と報告している。そこで、ケースIIIの実験を用いて検証した。

図-15は大気圧下で養生した場合の密度が 1.1 g/cm^3 になる配合で作成された混合体を、気中、水中で圧力を負荷し養生した場合の湿潤密度の変化をプロットしたものである。養生圧が高くなるに従って密度は増加するが、久野らの報告と同様、養生が気中か水中かの違いは見られなかった。これは、改良土中の気泡は独立しているために、水が進入しにくい構造になっているため²⁴⁾であると考えられる。次に、

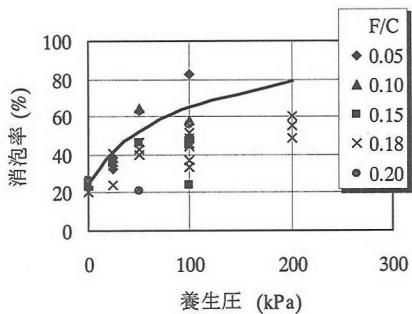


図-16 養生圧と消泡率の関係

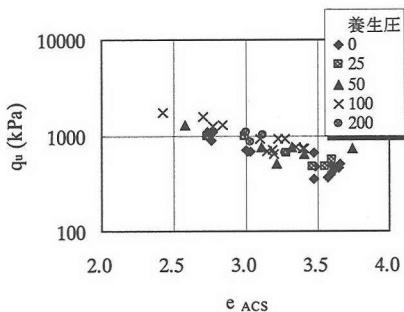


図-17 養生圧の異なる ACS の間隙比と一軸圧縮強度の関係

気泡混入量の異なる改良土について消泡率の変化を示したグラフが図-16である。図中の曲線は、大気圧下での養生における消泡率を25%（平均値）とし、養生圧による消泡率を、ボイルの法則に従って気泡が圧縮したと仮定して求めたものである。気泡セメント改良土では、土粒子とセメント間の固結力により圧力に対して抵抗するために、ボイルの法則ほどに圧縮されなかつた。

このように養生中に圧縮された気泡セメント改良土の一軸圧縮強度を間隙比との関係で示したものが図-17であり、混合時のF/Cは0.05-0.20の範囲である。養生圧に関係なく、間隙比と一軸圧縮強度は一つの関係で示された。養生圧力を開放したときに気泡が膨張に転じ、引張破壊を起こした事例も報告されている¹⁸⁾が、今回の実験では4日目の一軸圧縮強度を間隙比から推定し、養生圧開放時の供試体の持つ固結力と養生圧を比較すると全てのケースで固結力が上回っていたこと、十分な時間をかけて圧力を開放したことから、応力開放による引張破壊が起らなかつたものであると考えることができる。

セメント改良土の応力依存性については、土と異なりモール・クーロンの破壊基準が適用できないのではないかという議論が度々行われている。上記の結果では、未固化時に圧力を与えると圧縮し強度増加が明らかに起こることから、

表-5 目標密度と気泡添加量

湿潤密度 (g/cm ³)	F/C	
	手混合	機械混合
1.0	0.114	0.096
1.2	0.070	0.070
1.4	0.026	0.044

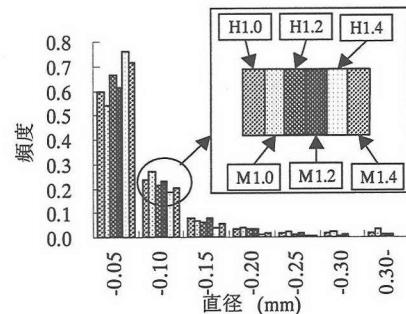


図-18 気泡径分布

拘束圧を受ける時期と気泡セメント改良土の圧縮変形と強度に関して間隙比と一軸圧縮強度の関係は以下の2通りの挙動が考えられる。

- (A) 未固化の状態で拘束圧を受ける場合: この場合、同時に気泡が収縮し密度が増加する。この状態のまま固化し、密度減少に相応の強度増加が起こる。
- (B) 固化後に拘束圧を受ける場合: 拘束圧による気泡の収縮が少ない。拘束圧によってはセメントーションが破壊されるため、本来持っていた大きな間隙ゆえに大きく圧縮するが、それに伴う強度増加は見られず、逆に強度が低下する場合がある。

実際の地盤では改良土は(A)の環境下にあるが、地盤の応力状態を再現しようとして行う三軸圧縮試験では一般に(B)の条件で行っており、この範囲で拘束圧依存性の有無が議論されていることが多い。しかし、この方法は(A)に比べ適切な強度定数が求められているとは考えられないが、その環境を三軸圧縮試験で再現することは容易ではない。田中らは、加圧条件に関わらず強度と密度はよい相関を示し、気泡混合量を加圧状態の間隙比に調整することで、無加圧でも加圧試験を模擬できる可能性がある²²⁾としている。今回の結果は田中らの提案を裏づける一つのデータであるといえる。

(4) 混合方法の違いによる影響

気泡セメント改良土の作成方法は、確立されていない。これまで述べたように気泡はさまざまな条件で影響を受けやすいが混合方法によってどのような違いが出るか、また、それが改良土の物性に影響が出るのかどうかを評価しておく

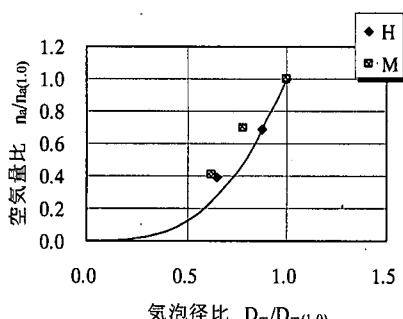


図-19 気泡径と空気量の関係

必要がある。そこで実験ケース IV を行った。まず、混合時の消泡への影響については、気泡セメント改良土の目標湿潤密度と気泡添加率(F/C)の関係で表-5に示す。目標密度が小さい範囲では F/C は機械混合のほうが小さく、目標密度が大きい範囲ではその逆であることがわかった。混入気泡量が違うにも関わらず固化後の密度が同じであることは、混合中の消泡率に違いが生じたものであると考えられる。その過程で気泡の寸法が変化すると考えられ、気泡の形状変化について調べるために、それぞれの方法で作成した供試体の断面を、顕微鏡を用いて写真撮影し、画像処理を施して気泡の分布を調べた。図-18 は気泡径の頻度分布を示したものであり、凡例の H, M はそれぞれ手混ぜ、機械混ぜの区別、数字は供試体の湿潤密度を表している。気泡は必ずしも正円(球)ではないが、気泡面積を正円で置き換えたときの円相当径として求めた。大部分の気泡は 0.05mm 以下であり、この範囲は同じ密度で比較した場合、手混合の方が頻度が高く、機械混合のほうが粗い気泡に変化することがわかる。また、密度が大きいものほど気泡径が小さくなっている、気泡量と密度に関連性があるように考えられた。そこで、気泡量と平均径との関係について、気泡径、空気量をそれぞれ湿潤密度が 1.0g/cm^3 のもので除したものをグラフに示した(図-19)。興味深いことに空気量は気泡径の 3 乗に比例して(図中の曲線)大きくなっている、気泡寸法を同体積の等価球の直径で近似じ得ることが明らかになった。本実験では気泡径が改良土の一軸圧縮強度に与える影響を考察する目的で行われたが、気泡径に顕著な違いが見られなかつたためであろうか、一軸圧縮強度特性についてもばらつきの範囲といえる結果しか得られなかつた²⁵⁾。

4. 結論

気泡セメント改良土の一軸圧縮強度とその影響因子の検討を行い、以下の結論を得た。

(1) 気泡セメント改良土の一軸圧縮強度はセメント量、間隙比に依存する。特に C/S $\geq 15\%$ 程度のセメント量が多い範囲ではセメント量の影響は小さく、 $e_{ACS} \cdot \log(q_u)$ が一義的な関係を示す。更にこの関係を、液性限界間隙比(e_L)を原料土の代表特性値として用い、 $e_{ACS}/e_L \cdot \log(q_u)$ 関係で一般化できることを示した。

(2) 消泡率は土のコンシスティンシーだけでなく気泡の混入量にも依存する。そのため、消泡率に関しては、混合体の初期間隙比が支配的要因の一つと考えられる。

(3) 材令が 56 日程度までは、一軸圧縮強度は材令の経過とともに対数的に増加し、その割合は一般のセメント改良土と同等である。その後の強度増加は小さい。変形係数と一軸圧縮強度の関係は、一般的の改良土と同等であり、ばらつきも大きい。

(4) 混合直後から圧力下で養生すると気泡の収縮が起こる。その割合は土—セメント混合体が抵抗するためにボイルの法則以下の圧縮しか起こらない。また、これらの一軸圧縮強度は大気圧下で養生したものと同じ $e_{ACS} \cdot \log(q_u)$ 関係で示された。

(5) 気泡寸法は気泡セメント改良土の密度が小さくなるほど大きく、同体積の等価球で近似しうることがわかった。

気泡セメント改良土はばらつきの大きい材料であることから、本論文では数多くの実験が可能な一軸圧縮試験によってのみ評価し、一定の成果は得られた。しかし、気泡セメント改良土が地盤材料である以上、拘束圧、排水条件を考慮するためにも三軸圧縮試験による確認は必要であり、その結果との比較を行うことで一軸圧縮試験の位置付けを考えて行く必要があると考えられる。

謝辞:本研究は熊本大学、㈱双葉工務店、日本舗道㈱の共同研究の一環として行われたもの一部であり、ここに関係各位に謝意を表します。また、実験にあたり一貫して協力を頂いた熊本大学工学部の丸山繁技術専門職員に深く感謝致します。

参考文献

- 1) たとえば、土田孝、横山裕司、水上純一、清水和也、笠井寿太郎:港湾における軽量混合土の用途と現地打設実験、港湾技研資料、No.833、1996.6.
- 2) たとえば、森範行、草刈太一、佐藤常雄、桑原正彦:気泡混合補強土工法、基礎工、pp.28-36、1994.10.
- 3) たとえば、日本道路公団:気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針、1996.9.
- 4) 三嶋信雄、星野克之:気泡混合軽量盛土工法(FCB 工法)、基礎工、pp.16-21、1994.10.
- 5) 三嶋信雄、星野克之、別井智之:気泡混合軽量土の材料特性、日本道路公団研究所報告、Vol.32、pp.1-9、1995.11.

- 6) 土田孝, 笠井寿太郎, 水上純一, 横山裕司, 梶田和徳:軽量混合土に及ぼす発生条件の影響, 港湾技研資料, No.834, 1996.
- 7) たとえば, Okumura, T.: Deep mixing method of Japan, Grouting and deep mixing, A.A.Balkema, pp.879-887, 1996.
- 8) 鈴木敦巳:軟弱地盤の軽量安定処理に関する研究総括報告書, 1994.7.
- 9) たとえば、セメント系安定処理土の物理・力学特性に関する研究委員会:セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集, (社)地盤工学会, 1996.2.
- 10) 山内豊聰, 浜田英治: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 /III-11, pp.283-290, 1989.
- 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土の強度変形特性 II—非排水せん断特性—, 生産研究, 34 卷 8 号, pp.23-26, 1982.8.
- 12) 矢島寿一, 丸尾茂樹, 小川正二: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-3, pp.251-257, 1996.12.
- 13) 軽量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, (社)地盤工学会, pp.13-15, 1998.7.
- 14) 内丸由加里:軽量安定処理の力学特性に及ぼす間隙の影響, 熊本大学卒業論文, 1998.
- 15) 馬場崎亮一, 寺師昌明, 鈴木健夫, 前川淳, 川村政史, 深沢栄造:安定処理土の強度に及ぼす影響因子, セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集, pp.20-41, 1996.2.
- 16) 近藤連一:多孔材料, 技報堂出版, 1978.
- 17) 斎藤聰:深層混合処理工法によるセメント改良地盤の工学的性質に関する実験的研究, 日本大学学位論文, 1988.
- 18) 湯怡新, 土田孝, 竹内大輔, 鏡田昌孝, 西田登:軽量混合土の三軸圧縮試験結果と考察, 港湾技研資料, No.845, 1996.9.
- 19) 水野恭男, 苗村康造, 松本淳之介:深層混合処理工法による山砂の改良実験, 第23回土質工学研究発表会, pp.2301-2304, 1988.6.
- 20) 青木雅路, 丸岡正夫, 幾田悠康:山留めにおける根切り地盤の壁状改良効果—ソイルセメント改良壁—, 第 22 回土質工学研究発表会, pp.1305-1306, 1987.6.
- 21) 安部俊宏:軟弱地盤の軽量安定処理工法に関する研究, 熊本大学卒業論文, 1987.3.
- 22) 田中政典, 佐藤正一, 吉国洋二郎, 森田博夫, 高橋秀夫, 安藤裕:浚渫粘土を使用した気泡混合処理土の材料特性(その2)—発生条件が及ぼす影響—, 第 29 回土質工学研究発表会, pp.2415-2417, 1994.
- 23) 久野悟郎, 高橋守男, 吉原正博:軽量充填材への圧力の影響について, 土木学会第 44 回年次学術講演会講演概要集第 3 部, pp.752-753, 1989.
- 24) Suzuki, A., Kitazono, Y., Maruyama, S., Hayashi, Y. and Yang, J.: On the Influence of Ca^{2+} Leached out of the Light Weight Stabilized Soils, Proceedings of First International Congress on Environmental Geotechnics, pp.65-70, 1994.
- 25) 林泰弘, 鈴木敦巳, 丸山繁, 内丸由加里:気泡混合安定処理土の一軸圧縮特性・透水特性への影響, 第 33 回地盤工学研究発表会, pp.111-112, 1998.7.

(1999.4.26 受付)

INFLUENTIAL FACTOR IN THE UNCONFINED COMPRESSION STRENGTH OF THE AIR-CEMENT TREATED SOIL

Yasuhiro HAYASHI and Atsumi SUZUKI

The air-cement treated soil (ACS) is one of the typical lightweight geomaterials, which has a few merits as making good use of waste soil or countermeasure for soft ground. The evaluation method of the ACS has not been generalized because of the variety of the factor to fix its property. Unconfined compression strength was selected out as an index to evaluate the ACS in this study.

As a result, it was shown the unconfined compression strength of the ACS decreased exponentially against the void ratio. Then, using a relationship of the two indices we found the following fact. Namely, cement ratio in the high level, curing term exceeded 56 days and mixing method gave less effect. Confining pressure when the ACS was fresh, however, gave a great influence to the unconfined compression strength.