

気泡混合軽量土への石炭灰の有効利用

亀井健史¹・松尾和俊²

¹正会員 工博 島根大学助教授 総合理工学部地球資源環境学科 (〒690-8504 松江市西川津町 1060)

²島根大学大学院 総合理工研究科地球資源環境学専攻 (〒690-8504 松江市西川津町 1060)

気泡混合軽量土は、その軽量性から軟弱地盤の変形の抑制、擁壁に対する土圧や土かぶり圧の低減を図ること等が可能な材料である。本研究では、異なる3種類の母材(石炭灰、シルト、粘土)を用いた気泡混合軽量土に対して一軸圧縮試験を実施し、気泡混合軽量土の母材の違いが一軸圧縮特性に及ぼす影響について、定量的な観点から検討している。その結果、気泡混合軽量土の一軸圧縮強度と養生日数の関係は、母材の違いによらず、双曲線近似によって表現できることが明らかとなった。さらに、石炭灰を母材として用いた気泡混合軽量土は、粘土やシルトを用いた場合よりも長期的な強度発現に優れており、地盤工学的に優れた地盤材料であることを示唆した。

Key Words : coal ash, lightweight soil, soil stabilizer, soil structure, unconfined compressive strength

1. はじめに

日本道路公団では、気泡混合軽量土(Foamed Mixture Lightweight Soil)を用いた軽量盛土工法が数多く実施されており、その工法をFCB工法(Foamed Cement Banking Method)と称している¹⁾。この工法は、打設後の締固めが不要であり、硬化後は自立するという特徴を有していることから、狭小な場所での施工が可能となる。また、流動性に富むことから、ポンプ圧送による配管で、材料分離せずに500m程度の圧送が可能である¹⁾。さらに、軽量性に優れているため、地盤や構造物等に作用する荷重を軽減することができ、任意の単位体積重量を選択することが可能である²⁾。FCB工法は以上のような特徴を有していることから、盛土などによる上載荷重の低減、土圧の低減、空洞の充填、および振動・騒音の低減などの効果が得られる。最近のFCB工法の施工例としては、エアミルクの道路盛土^{3), 4)}や気泡モルタルの鉄道盛土⁵⁾への利用および橋台の裏込め土³⁾などがある。

気泡混合軽量土は、上記のような地盤工学的な特徴のほかに、状況に応じて現地発生材を母材として利用できる特徴を有する。この特徴から、建設残土の処理問題の解決方法としても注目されている。一般的には、気泡混合軽量土の母材として砂が用いられているが、良質な砂が慢性的に不足していることや、重力の影響により打設した材料の上部と下部の湿潤密度に差が生じ、不均一な

強度・変形特性を有する地盤が作製される可能性などが指摘されている^{1), 6)}。このような理由から、母材を使用せず、セメント、水、気泡のみで作製するエアミルクが多く用いられるようになってきた。しかし、セメントのみではコストがかかることから、最近では砂以外の材料を母材(細骨材)として用いた気泡混合軽量土の研究も進められている。

砂以外の母材を用いた代表的な例として石炭灰が挙げられる。石炭灰は、石炭火力発電所等で石炭燃焼時に発生する残滓であり、その基本的特性から、セメント等の製造材料として用いられているものの、発生量の約3割程度は廃棄処分されているのが現状である。今後の発生量の増大を視野に入れた場合、更なる石炭灰の有効利用の拡大が急務となっている。石炭灰の有効利用を拡大させることは、現在問題となっている循環型社会の構築という観点からも、大きく貢献できるものと考えられる。

山澤ほか⁷⁾は、石炭灰の気泡混合軽量土への適用性について検討しており、石炭灰を気泡混合軽量土の母材として用いる場合には、強熱減量の大きさが7%未満のものが望ましいことを報告している。また、石炭灰を利用した気泡混合軽量土を海水で養生すると、淡水で養生した場合の約2倍程度の強度が得られることが報告されている。その原因として、海水の塩化ナトリウム分によって結晶生成物(エトリンガイト)の生成が増進されることを示している⁸⁾。さらに、最近では、石炭灰を気泡混

合軽量土の母材に用いる場合について、品質管理基準を満たし、作製可能な土セメント比 (S/C) および水セメント比 (W/C) の範囲が検討されている。その結果、一軸圧縮特性に及ぼす S/C, W/C および養生日数の影響について明らかにされている⁹⁾。一方、砂および石炭灰以外の母材に着目すると、建設現場等で建設残土として発生する軟岩を用いた気泡混合軽量土は、十分な強度を有する盛土材料となることが報告されている¹⁰⁾。しかし、高含水比の粘性土や粘土を母材として適用する場合には、砂などの良質な材料を母材として用いた場合と比較すると、強度や軽量性などの点について不均質になりやすいことから、品質管理を徹底する必要があることも報告されている¹⁾。このように、種々の母材を用いた気泡混合軽量土の研究が行われているが、配合条件の違いなどから、母材の違いが気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす影響について、定量的に明らかにされていないのが現状である。

本研究では、気泡混合軽量土の母材としての石炭灰の有効性を検討するために、異なる3種類の母材(石炭灰, シルト, 粘土)を用いて、同配合条件で気泡混合軽量土を作製し、それらの供試体に対して一軸圧縮試験を実施した。その結果、気泡混合軽量土の母材の違いが一軸圧

表-1 母材の物理的特性

	石炭灰	シルト	粘土
α (g/cm ³)	2.170	2.650	2.679
w_L (%)	NP	NP	73.1
w_p (%)	NP	NP	36.7
I_p	NP	NP	36.4
Sand (%)	6.9	0	0
Silt (%)	73.1	89.6	35.3
Clay (%)	22.0	10.4	64.7

表-2 母材の化学成分

	石炭灰	シルト	粘土
SiO ₂	66.9	53.6	68.1
Al ₂ O ₃	22.4	32.2	24.8
Fe ₂ O ₃	4.28	0.4	0.14
CaO	1.96	—	0.02
MgO	1.16	0.4	0.02
SO ₃	0.29	—	—
Na ₂ O	0.39	—	0.56
K ₂ O	0.86	—	1.54
TiO ₂	—	—	0.15

単位: (%)

縮強さおよび変形係数と養生日数の関係に及ぼす影響について定量的に示し、気泡混合軽量土の母材としての石炭灰の有効性を明らかにしている。

2. 試料および試験方法

(1) 試料

本研究では、産業廃棄物として排出される石炭灰の有効利用を検討するために、中国電力の三隅火力発電所から産出した石炭灰を使用した。また、石炭灰との比較を行うために市販されているシルトと粘土を用いた。3種類の母材の物理的特性を表-1に、その粒径加積曲線を図-1に示す。また、3種類の試料の化学成分を表-2に示す。石炭灰の粒子は、多孔質であることから、比重が普通の土に比べて小さいという特徴がある。石炭灰の主成分は、シリカ(SiO₂)とアルミナ(Al₂O₃)であり、鉄(Fe₂O₃)やカルシウム(CaO)等も若干含んでおり、ポゾラン反応に優れている^{11), 12)}。ポゾラン反応とは、可溶性のSiO₂とAl₂O₃とセメントの水和反応によって生成される水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)が、常温でゆっくりと反応することによって、結合能力をもつ化合物を生ずる現象である¹²⁾。一方、シルトと粘土も主にSiO₂とAl₂O₃からなっているが、石炭灰のようなポゾラン反応には、富んでいない。また、本研究で用いた石炭灰の強熱減量は3.1%と低いことから、気泡を混合した際に消泡が生じる可能性は低いものと考えられる⁷⁾。なお、本研究で用いたシルトは、0.01mm以下の細粒分を極力除去したものであり¹³⁾、粘土は、主に粘土分からなる市販のカオリンクレーである。

気泡混合軽量土の固化材には、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種が多用されている。とくに高炉セメントB種は、普通ポルトランドセメントに比べ一軸圧縮強さを得やすいことから、高炉セメントB種を使用することにより、単位セメント量を少なくすることができ、経済的にも優れていると報告されている⁶⁾。さらに、セメント安定処理土においても高炉セメントB種が普通

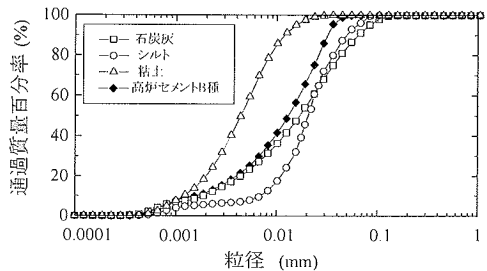


図-1 試料の粒径加積曲線

表-3 配合条件

セメント	母材	起泡剤	希釈水	混練水	水量
C	S	m ₁	m ₂	m ₃	W*
(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
174.8	174.8	1.3	19.5	241.4	262.2

* W : (m₁+m₂+m₃)

表-4 品質試験結果

	石炭灰	シルト	粘土
湿潤密度 (g/cm ³)	0.747	0.653	0.882
フロー値 (mm)	190	180	140
空気量 (%)	60.0	65.0	50.0

ポルトランドセメントと比較して長期強度の発現に優れていること¹⁴⁾が報告されており、本研究では高炉セメントB種を用いた。3種類の母材と固化材の粒度を比較するために、高炉セメントB種の粒径加積曲線も図-1に示した。起泡剤には、独立した気泡を得やすいとされている合成界面活性剤系の起泡剤（主成分：高級アルコールの硫酸エステル化合物）を使用した。また、供試体作製に使用した水は、水質の違いが強度発現に影響を及ぼす可能性があることから、スラリー作製の混練水と気泡作製の希釈水には蒸留水を使用した。

(2) 品質管理項目¹⁾

気泡混合軽量土の品質管理には、作製時の湿潤密度とフロー値と空気量の項目が用いられている。湿潤密度を計測することによって、母材、セメント、水および気泡が適正に混合され、予定した品質が得られているかどうか確認することができる。なお、気泡混合軽量土の湿潤密度は、一般的に0.5~1.3g/cm³程度である。また、フロー値は、所定の流動性を確認する指標であり、一般的には140~220mmの範囲である。フロー値は、ポンプで圧送する場合の指標であり、母材の性質に依存するところが大きい。空気量は、所定の空気が混入されているかを確認するものであり、一般的には、30~70%程度となっている。

(3) 供試体の作製方法

母材として石炭灰を用いて、土セメント比(S/C)が1.0の気泡混合軽量土を作製する場合には、水セメント比(W/C)を1.5とすることによって、安定した気泡混合軽量土が作製されることが報告されている⁹⁾。この報告例を参考にして、表-3に示す配合条件により供試体を作

製した。まず、母材とセメントに混練水を入れてよく混ぜ、モルタルを作製した。つぎに起泡剤を希釈水で16倍に薄め、手混ぜにより約10分間攪拌する方法¹⁵⁾で発泡倍率28倍程度となるように気泡群を準備した。その後、モルタルと気泡が均質になるようにソイルミキサーで約2分間混合し、気泡混合軽量土を作製した。ここで、作製した試料の品質を測定した。それぞれの気泡混合軽量土の品質試験結果を表-4に示す。

いずれの母材を用いた場合にも、品質試験結果は、気泡混合軽量土の一般的な値の範囲内であった。石炭灰とシルトを用いたものの空気量に着目すると、シルトは65.0%であったが、石炭灰は60.0%と消泡量が多くなっている。また、粘土の空気量はとくに減少しており、50.0%であった。

品質を確認した後に、試料をモールド(φ=50mm, H=100mm)に三層程度に分けて入れ、層ごとにゴムハンマーを用いて、消泡しない程度にモールドの側面に打撃を与え、試料が均質になるように打設した。打設したモールドをポリエチレン袋で被い、恒温室(20±2℃)で24時間保管した。その後、モールドから供試体を取り出し、供試体をプラスチックケースに入れ、恒温室(20±2℃)で所定の養生日数まで気中養生し保管した。養生日数は、1, 2, 4, 7, 14, 21, 28日の7種類を設定した。所定の養生日数を経過した供試体は、両端面を成形し一軸圧縮試験に用いた。なお、本試験では、それぞれの養生日数(Tc)において複数本実験を行った。

(4) 試験方法

本研究では、気泡混合軽量土の強度・変形特性を評価するために一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験は、ひずみ制御方式で行い、せん断時のひずみ速度は1%/minとした。また、強度・変形特性に及ぼす端面摩擦の影響を軽減するために、一軸圧縮試験装置の上下加圧板の表面にシリコングリスを薄く塗布した。試験終了後には、供試体の含水比を測定した。

3. 実験結果および考察

(1) 応力-ひずみ曲線

図-2(a), (b), (c)は、それぞれ石炭灰、シルトおよび粘土を母材とした気泡混合軽量土の代表的な応力-ひずみ曲線を示している。

石炭灰を用いた場合の応力-ひずみ曲線に着目すると、応力は軸ひずみの増加に伴い、顕著な立ち上がりを示し、0.5~1.3%程度においてピーク値に達する。その後、応力値はひずみの増加に伴って、徐々に減少する。一軸圧縮強さ(q₀)は、養生日数(Tc)の増加に伴い増大する

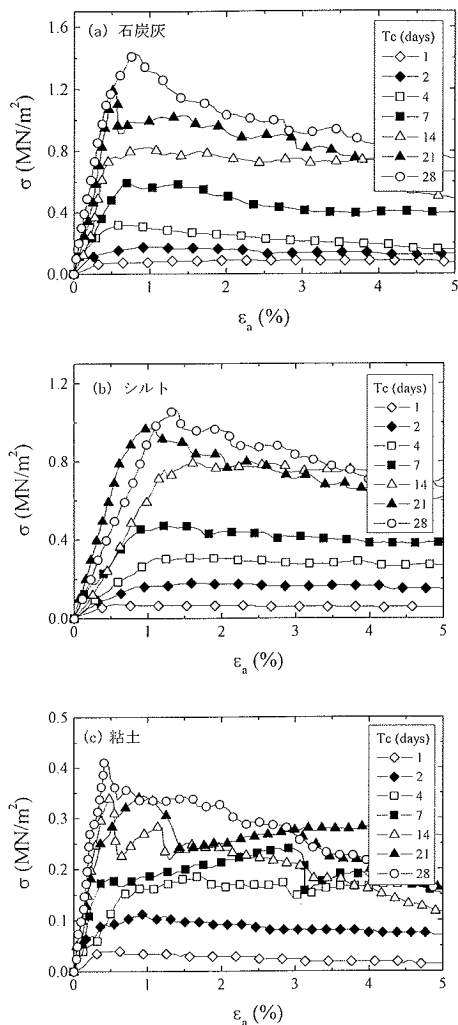


図-2 応力-ひずみ曲線

傾向にあり、 $T_c = 1$ 日においては、 0.07 MN/m^2 であったが、 $T_c = 28$ 日では 1.41 MN/m^2 に達している。とくに、 $T_c = 21$ 日以降の応力-ひずみ曲線においては、明瞭なピークが認められた。変形係数 (E_{50}) は、 T_c の増加に伴い増大する ($E_{50} = 20 \sim 240 \text{ MN/m}^2$) 傾向を示している。しかし、破壊ひずみ (ϵ_f) と T_c の関係には、明瞭な関係は認められなかった。

また、母材にシルトおよび粘土を用いた場合も、石炭灰の場合と同様に、 T_c の増加に伴い q_u 値および E_{50} 値ともに増大している。

つぎに、3 種類の母材を用いた場合の応力-ひずみ曲線の比較を試みる。図-3 は、 $T_c = 7, 28$ 日の応力-ひずみ曲線を示している。 $T_c = 7$ 日では、石炭灰を用いた場合の q_u 値は、粘土を用いた場合の q_u 値の約 2.5 倍程度、シルトを用いた場合の q_u 値は、粘土を用いた場合の q_u

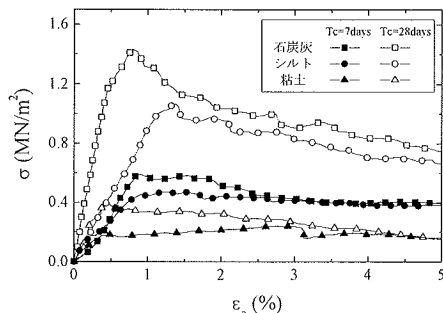


図-3 母材の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響

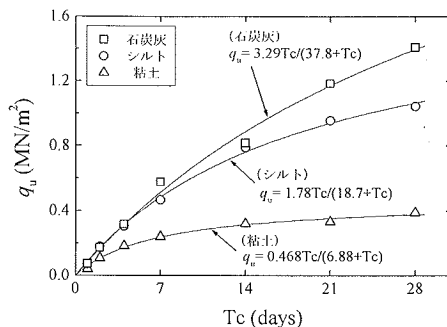


図-4 一軸圧縮強さと養生日数の関係

値の約 2 倍程度を示している。また、 $T_c = 28$ 日では、石炭灰を用いた場合の q_u 値は、粘土を用いた場合の q_u 値の約 3.6 倍程度、シルトを用いた場合の q_u 値は、粘土を用いた場合の q_u 値と比較して、約 2.7 倍程度の値を示している。

一方、養生日数の経過に伴う q_u 値の増加率に着目すると、石炭灰を用いた場合の $T_c = 28$ 日の q_u 値 (q_{u28} 値) は、 $T_c = 7$ 日の q_u 値 (q_{u7} 値) の約 2.5 倍となっているのに対して、シルトを用いた場合の q_{u28} 値は、 q_{u7} 値の約 2.3 倍、粘土を用いた場合の q_{u28} 値は、 q_{u7} 値の約 1.6 倍の値を示している。一般に、エアミルクおよび母材に砂を用いた気泡混合軽量土の場合の q_{u28} 値は、 q_{u7} 値の約 2.3 倍程度であることが報告されている^{1), 6)}。このことから、石炭灰を用いた場合は、一般的な気泡混合軽量土に比べ、 q_{u7} 値から q_{u28} 値の増加率は大きく、逆に粘土を用いた場合は、 q_{u7} 値から q_{u28} 値の増加率は小さくなっていることが明らかとなった。

(2) 一軸圧縮強さと養生日数の関係

図-4 に一軸圧縮強さ (q_u) と養生日数 (T_c) の関係を示す。なお、 q_u 値は複数本の中から代表的なものを選定しており、 q_u 値のばらつき範囲は、それぞれの条件において、いずれも $\pm 0.1 \text{ MN/m}^2$ 程度であった。いずれの母

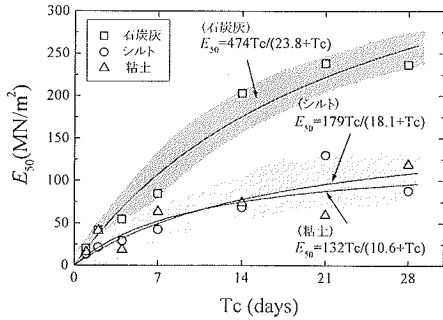


図-5 変形係数と養生日数の関係

材の場合にも q_u 値は、養生初期では急激に増加するが、 T_c が長くなるのに伴い、 q_u 値の増加率が減少している。このように q_u 値の増加率が T_c の増加に伴って減少する傾向は、エアミルクや母材に砂および軟岩を用いた場合においても報告されている^{6), 10), 16)}。また、気泡混合軽量土における q_u 値と T_c の関係は、双曲線近似により表現できることが報告されている^{9), 10), 16)}。本研究の結果においても、母材の違いによらず q_u 値と T_c の関係は双曲線近似により表現できることが確認できた。シルトを用いた場合の q_u 値は、初期の強度増加が大きく、 $T_c = 14$ 日では 0.8 MN/m^2 まで増加しているが、その後の強度増加は、徐々に緩やかになり、 $T_c = 28$ 日においては 1.0 MN/m^2 程度の値を示した。

一方、石炭灰を用いた場合には、 $T_c = 14$ 日程度まではシルトと同様の強度増加傾向を示すが、 $T_c = 14$ 日以降も強度は増加を続け、 $T_c = 28$ 日においては 1.4 MN/m^2 程度まで増加している。また、粘土を用いた場合には、 $T_c = 7$ 日までの q_u 値の増加は、比較的大きいものの、 $T_c = 7$ 日以降の q_u 値の増加はごく僅かなものとなっている。

(3) 変形係数と養生日数の関係

変形係数 (E_{50}) と養生日数 (T_c) の関係を図-5 に示す。 E_{50} 値と T_c の関係には、多少のばらつきが認められるが、いずれの母材を用いた場合にも E_{50} 値の増加率は、養生初期では増加率が大きいものの、 T_c が長くなるのに伴い減少している。なお、本研究では、地盤工学において最も重要な q_u 値に着目して試験結果を整理しているため、 E_{50} 値と T_c の関係は、 q_u 値と T_c の関係と比べると、多少ばらつきが大きくなっている。とくに、石炭灰を用いた場合には、シルト、粘土を用いた場合と比較して、 $T_c = 7$ 日から 14 日の間に E_{50} 値が急激に増加している。なお、 E_{50} 値と T_c の関係は、母材の違いによらず双曲線近似により表現できた。また、シルトと粘土を用いた場合の E_{50} 値と T_c の関係には、大きな違いが認められず、ほぼ同様な変化を示している。このことから、ハッチで示すよう

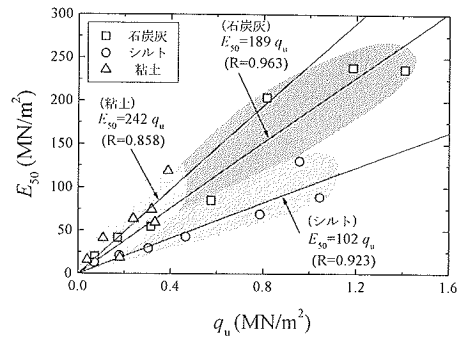


図-6 変形係数と一軸圧縮強さの関係

に E_{50} 値に関しては、シルトおよび粘土の場合と石炭灰とで違いが認められた。

(4) 変形係数と一軸圧縮強さの関係

図-6 は、変形係数 (E_{50}) と一軸圧縮強さ (q_u) の関係を示している。母材の違いによらず E_{50} 値は、 q_u 値の増加に伴い直線的に増加する傾向が認められた。ここで、図中の R は、近似式の相関係数を示している。石炭灰を用いた場合、その関係式は、 $E_{50} = 189 q_u$ と表現でき、同様にシルトの場合が $E_{50} = 102 q_u$ 、粘土の場合が $E_{50} = 242 q_u$ と表された。この結果から、シルトを用いた場合は、 q_u 値に対しての E_{50} 値が小さく、反対に粘土を用いた場合は、 q_u 値があまり大きくないにもかかわらず、 E_{50} 値は大きくなっている。石炭灰は、シルト、粘土両者の中間の値を示していることがわかる。

従来の気泡混合軽量土の研究でも、変形係数 (E_{50}) と一軸圧縮強さ (q_u) は、比例関係にあることが報告されている。例えば、横田・三嶋²⁾では、砂を母材とする気泡混合軽量土の E_{50} 値は、 q_u 値の 100 から 200 倍の範囲内となることを報告している。また、亀井・松尾⁹⁾では、母材に石炭灰を用いた気泡混合軽量土の E_{50} 値は、 q_u 値の 100 から 300 倍の範囲内となるという結果が得られている。したがって、石炭灰、シルトおよび粘土と、いずれの材料を気泡混合軽量土の母材として用いた場合においても E_{50}/q_u 値は、これまでに報告されている気泡混合軽量土の E_{50}/q_u 値^{2), 9)} と一致していることがわかる。

(5) 含水比の変化が一軸圧縮強さと変形係数に及ぼす影響

本研究では、気中養生によって養生を行っているため、各供試体の含水比 (w) の低下は、セメントの水和反応によるものと、乾燥によるものとを考慮する必要がある。しかしながら、いずれの母材を用いた場合も供試体寸法および養生条件は同じであることから、乾燥に伴う w 値の減少は同程度と考えられる。養生日数 (T_c) の経過に

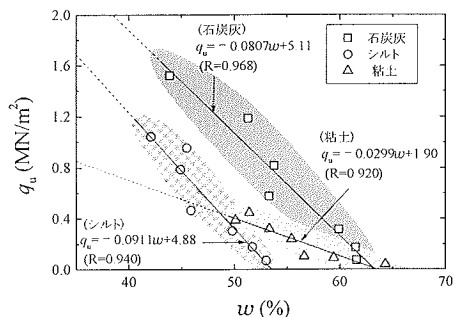


図-7 一軸圧縮強さと含水比の関係

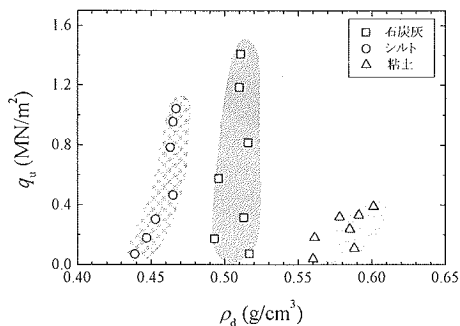


図-9 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

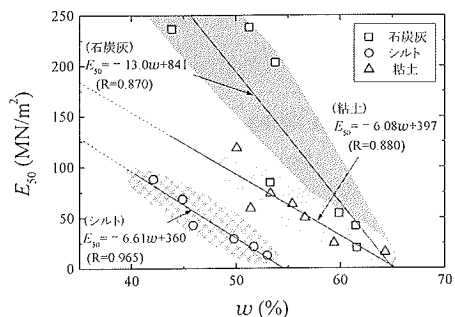


図-8 変形係数と含水比の関係

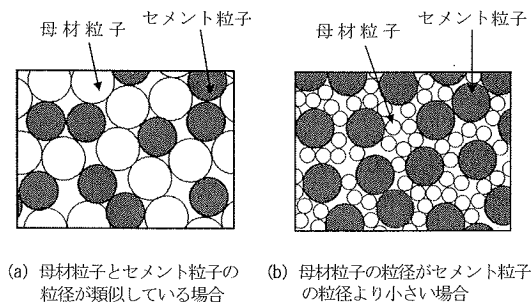


図-10 母材の粒径が内部構造に及ぼす影響

伴う一軸圧縮強さ (q_u) と w 値の関係を図-7 に示す。いずれの母材を用いた場合にも q_u 値は、 w 値の減少に伴い直線的に増大する傾向を示しており、その相関性は高く、それぞれ一次関数によって近似することができた。 w 値の減少に伴う q_u 値の増加率は、粘土を用いた場合には、石炭灰およびシルトを用いた場合と比較して、小さな値となった。なお、 q_u 値が小さな範囲では、シルトを用いた場合の w 値が石炭灰や粘土を用いた場合に比べて低い値を示している。このことは、シルトの粒径が最も大きい、すなわちその保水性が小さいこと等に起因しているものと考えられる。

図-8 は、変形係数 (E_{50}) と含水比 (w) の関係を示している。 E_{50} 値も、 q_u 値と同様、 w 値の減少に伴い直線的に増大する傾向を示している。このような傾向は、母材の違いによらず認められ、いずれも E_{50} 値と w 値の関係は一次関数によって近似することができた。しかしながら、 w 値の減少に伴う E_{50} 値の増加率は、石炭灰を用いた場合には、シルトおよび粘土を用いた場合と比較して、大きな値を示した。

(6) 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

一軸圧縮強さ (q_u) と乾燥密度 (ρ_d) の関係を図-9 に示す。図より、母材にシルトおよび粘土を用いた場合は、

ρ_d 値の増大に伴い、 q_u 値が増加する傾向を示している。しかしながら、石炭灰を用いた場合、多少のばらつきはあるものの、ほぼ一定の ρ_d 値の下で、 q_u 値は増加する傾向を示している。セメントによる硬化反応は、セメントの水和に伴って水和化合物の網目構造が緻密化してゆくことによるものとされている¹⁷⁾。したがって、養生日数 (Tc) の増加に伴いセメントの水和反応が進展し、内部構造 (網目構造) の緻密化と ρ_d 値の増加が認められ、その結果 q_u 値が増加したものと考えられる。

(7) 母材の粒度が一軸圧縮特性に及ぼす影響

石炭灰、シルトおよび粘土を母材として用いた場合のセメントによる固化作用に着目すると、図-10 のような違いが推察される。石炭灰粒子 (平均粒径 0.017mm) とシルト (平均粒径 0.021mm) は、セメント粒子 (平均粒径 0.013mm) とほぼ類似した粒度分布を示している。したがって、石炭灰、シルトを用いた場合には、比較的類似した構造となっており、図-10 (a) に示すように、母材粒子とセメント粒子が交互に配列し、セメントの固化作用によりセメント粒子と母材粒子が連結され、強度が増加しやすくなっているものと考えられる。一方、粘土を用いた場合は、粘土 (平均粒径 0.004mm) がセメント

粒子より比較的細かいため、セメント粒子が粘土粒子を十分に結びつけることが困難な構造となっており、強度の発現が難しいものと考えられる (図-10 (b)).

また、母材粒子の比表面積の違いに着目すると、粘土の粒度は、石炭灰およびシルトと比較して小さいことから粘土の比表面積は、石炭灰およびシルトと比較してかなり大きくなるのがわかる。土セメント比一定の条件では、比表面積が大きな材料を用いた場合には、比表面積が小さな材料を用いた場合と比較して、表面積当たりのセメント量が低下し、セメント粒子と土粒子の接触面積が減少する。その結果、強度の発現も小さくなるものと考えられる。以上のことから、粘土を用いた場合の強度発現が石炭灰やシルトを用いた場合と比較して小さくなった理由として、セメント粒子と土粒子の接触面積の違いが一要因である可能性が考えられる。このことは、粘土のような粘土質の多い母材を用いた場合でも、セメント量を増やすことにより、石炭灰やシルトのようなシルト質の多い母材を用いた場合と同程度まで強度増加を図れる可能性を示している。したがって、気泡混合軽量土に用いる母材の粒度は、形成されるマトリクス部分の構造に違いを生じさせ、強度発現に大きな影響を及ぼすことが推察される。

さらに、比較的粒度の類似した石炭灰とシルトの強度発現に違いが認められるのは、前述したように、母材自体の化学成分の違いから、すなわち、石炭灰がポズラン反応に富む材料であり、自己硬化性を有することによるものと考えられる。このような化学的特性の面からも、石炭灰を気泡混合軽量土の母材に利用することは、有効であると考えられる。

4. まとめ

本研究から得られた主要な結果を以下に列記する。

- (1) 石炭灰、シルト、粘土を利用した気泡混合軽量土は、品質および力学試験結果から十分に施工が可能な材料となることが明らかとなった。
- (2) 種々の母材 (石炭灰、シルト、粘土) を利用した気泡混合軽量土の一軸圧縮強さと養生日数の関係は、母材の粒度分布の違いによらず、いずれも双曲線近似により定式化できた。
- (3) 石炭灰を用いた場合は、シルト、粘土を用いた場合に比べ、養生初期から長期間にわたって大きな強度発現を得られることが明らかとなった。
- (4) 母材の違いによらず、一軸圧縮強さおよび変形係数は、含水比の減少に伴い直線的に増加する傾向が認められた。

以上のような結果から、今回使用した材料の中でも石

炭灰は、ポズラン反応の影響等により長期的な強度発現にも優れており、良質な地盤材料となることから地盤工学的には非常に有益であるものと考えられる。また、石炭灰が地盤材料として再利用されると、廃棄するための処分場などのリサイクル問題および環境問題を解決できるとともに良質な地盤材料の不足という問題点の解決についても有意である。

なお、気泡混合軽量土に用いる母材の粒度および化学的性質の違いにより、強度発現に違いが認められることから、使用する母材に対して土セメント比や水セメント比の配合を十分に検討する必要がある。

また、気泡混合軽量土を実務に適用する場合には、施工に伴う重要な問題として、セメントの水和反応に伴う発熱現象の問題が挙げられる。この温度上昇に関しては、研究が進められており、一回の打設における施工厚の低減や現場における十分な温度管理が極めて重要であるという知見が得られつつある¹⁶⁾。さらに、気泡混合軽量土は、薄い殻で多孔質な骨格構造であり、この骨格構造の長期レベルにおける安全性の検討も必要視されている。

さらに、室内試験を行う場合、本研究で用いた供試体寸法 ($\phi=5\text{cm}$, $H=10\text{cm}$) においては、供試体寸法による影響は認められていない。なお、供試体寸法と気泡径には大きな影響があると考えられることから、極小供試体において、試験を行う場合には、十分な注意が必要であると考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、中国電力(株)より石炭灰を提供していただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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，pp.1-58，1996。
- 2) 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，pp.5-8，1996。
- 3) 赤井公昭：エアームルクの道路盛土への利用，基礎工，Vol.18，No.12，pp.40-49，1990。
- 4) 都築敏樹：エアームルクの道路盛土への適用例，基礎工，Vol.18，No.12，pp.102-109，1990。
- 5) 海野孝也，八巻一幸，古谷時春：気泡モルタルの鉄道盛土への利用，基礎工，Vol.18，No.12，pp.50-58，1990。
- 6) 三嶋信雄，益村公人：FCB 工法一気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法，理工図書株式会社，pp.41-55，2000。
- 7) 山澤文雄，西川純一，佐藤厚子，小林 仁，榎原敦仁：石炭灰の気泡混合固化土への適用性，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.155-158，2000。
- 8) 安原一哉，村上 哲，金澤浩明，飯久保励，羽根 司，吉野博之，堀内澄夫，川野 整：石炭灰を利用した気泡軽量土の強度・剛性と微視的要因の関係，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.149-154, 2000.
- 9) 亀井健史, 松尾和俊: 石炭灰を利用した気泡混合軽量土の一軸圧縮特性, 土木構造・材料論文集, No.18, pp.161-168, 2002.
 - 10) 亀井健史, 前川晴義, 堀切保則: 気泡混合軽量土への軟岩の有効利用, 土木構造・材料論文集, No.18, pp.177-184, 2002.
 - 11) 安原一哉, 土田 孝, 小橋秀俊: 軽量地盤材料の物性評価と適用, 2.地盤の軽量化技術と軽量土の物性, 土と基礎, Vol.49, No.3, pp.56-58, 2001.
 - 12) 環境技術協会, 日本フライアッシュ協会編: 石炭灰ハンドブック (第3版), pp.20-36, 2000.
 - 13) 亀井健史, 榎本雅夫: 締固めた粘土の水浸に伴う膨潤特性, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.57-64, 1996.
 - 14) 亀井健史, 大本一樹, 松尾和俊: セメント種類の違いがセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす影響, 島根大学総合理工学部紀要シリーズA, Vol.37, pp.29-35, 2003.
 - 15) 亀井健史, 前川晴義, 堀切保則: 気泡作製時間の違いが気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす影響, 地盤と建設, Vol.20, No.1, pp.27-33, 2002.
 - 16) 亀井健史, 前川晴義, 堀切保則: 気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす初期養生温度の影響, 地盤と建設, Vol.20, No.1, pp.35-42, 2002.
 - 17) 岩崎訓明, 西村新蔵, 青柳征夫: 土木学会編 新体系土木工学 29 フレッシュコンクリート・硬化コンクリート, pp.31-34, 1981.

(2003.07.01 受付)

EFFECTIVE USE OF COAL ASH TO FOAMED MIXTURE LIGHTWEIGHT SOILS

Takeshi KAMEI and Kazutoshi MATSUO

This paper describes the effects of geomaterials on unconfined compressive characteristics of foamed mixture lightweight soils, utilizing clay (kaolin clay), silt and coal ash as geomaterials. The effects of geomaterials and curing time on stress-strain behavior of foamed mixture lightweight soils are shown quantitatively. The unconfined compressive strength of foam mixture lightweight soils can be represented as a hyperbolic relationship between unconfined compressive strength and curing time. Several empirical relationships have been also developed. These properties show that coal ash is more effective than clay and silt when used in foamed mixture lightweight soils as a construction material.