

養生条件の違いが石炭灰を利用した気泡混合軽量土の一軸圧縮強さに及ぼす影響

亀井 健史*, 松尾 和俊**

*島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

**島根大学大学院総合理工学研究科 地球資源環境学専攻

Effects of Curing Conditions on Unconfined Compressive Strength of Foamed Mixture Lightweight Soils Utilizing Coal Ash

Takeshi KAMEI* and Kazutoshi MATSUO**

*Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

**Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering,
Graduate School of Shimane University

Abstract

Use of foamed mixture lightweight soils has had significant impact on countermeasures mitigating soft ground settlement, on earth pressure exerted on retaining walls, and in similar situations. This paper presents the effective utilization of coal ash as a geomaterial of foamed mixture lightweight soils produced in abundance from coal-fired power stations. We investigated effects of curing conditions (air, fresh water and seawater) on the strength and stiffness of foamed mixture lightweight soils utilizing coal ash by unconfined compression tests measuring stress-strain. We found that the strength and deformation characteristics are considerably influenced by curing conditions. The relationship between unconfined compressive strength and curing time was also expressed by the hyperbolic equation over a wide range of mix proportion conditions irrespective of the curing conditions. These properties show that seawater is more effective for curing foamed mixture lightweight soils than air and fresh water.

1. はじめに

石炭火力発電所で微粉炭を燃焼したあとの残渣(残滓)として発生する石炭灰は、年々増加する傾向にある。現在、発生量の約7割は種々の分野に有効利用されているが、残りの約3割は廃棄処分されているのが現状である。また、今後も石炭灰の発生量の増加が予測されていることから、石炭灰の有効利用の拡大が急務となっている。石炭灰は、粘着性がなく、化学的性質としてポゾラン活性に富み、自硬性を有している¹⁾。さらに、石炭灰の発生量の約9割は、土質分類からみると、シルトから粘土の粒径に相当し、粒子が多孔質の球状であることから、軽量性、流動性に優れているといえる。このような特性から石炭灰は、これまで主にセメント・コンクリート用の混和材として利用されてきた。とくに建設分野において石炭灰は、少量のセメントや石膏を混合し、締固め・

転圧することにより路盤材として利用されるほか、最近ではセメントと保水性のある粘土分を混合して粒造することで海砂代替材としての利用も進められてきている²⁾。しかしながら、締固めた石炭灰は、養生条件の違い(気中養生、水中養生)により一軸圧縮強さや体積変化が大きく異なることも報告されている³⁾。

一方、近年、道路などの路盤材料として気泡混合軽量土(Foamed Mixture Lightweight Soil)が多用されるようになってきている。気泡混合軽量土は、軽量性、流動性、固化後の自立性などの特徴を有し、盛土荷重の低減、狭小部の充填、鉛直盛土の施工などに適している。また、もう一つの特徴としては、建設残土などの現地発生材を母材として利用できる点が挙げられる⁴⁾。このような特徴から、気泡混合軽量土工法は、建設残土や産業廃棄物の処理問題および地盤材料不足等に応用できる工法となる可能性を有している。

産業廃棄物の中でも石炭灰は、上述したような軽量性や流動性に優れているという特徴を有しており、気泡混合軽量土の母材として非常に有効な地盤材料であるものと考えられ、近年注目されてきている。石炭灰を利用した気泡混合軽量土に関しては、石炭灰の強熱減量が気泡の消泡に及ぼすの影響⁵⁾や品質管理基準の関係から作製可能な土セメント比 (S/C) および水セメント比 (W/C) の範囲とその一軸圧縮特性⁶⁾について明らかにされている。最近では、石炭灰を利用した気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす混練水の影響⁷⁾についての報告例もある。しかしながら、実際に気泡混合軽量土を施工する場合には、施工位置が地下水位以下となる場合なども想定され、水浸が気泡混合軽量土に及ぼす影響を把握しておく必要がある。この点について安原ほか^{8), 9)}は、石炭灰を利用した気泡混合軽量土を淡水で養生した場合の28日強度が気中で養生した場合の約1.1倍程度となり、海水で養生した場合の28日強度が淡水で養生した場合の約2倍程度となることを報告している。しかしながら、得られた試験結果は、極めて限られた試験条件において実施された結果であり、不明瞭な点がかなり多く残されている。

本研究では、石炭灰を母材に利用した気泡混合軽量土の供試体を作製し、3種類の異なる養生条件(気中養生、淡水養生、海水養生)の下で所定の期間、養生を行った後、一軸圧縮試験を実施した。その結果、石炭灰を利用した気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす養生条件の影響について、定量的な観点からその違いを検討している。

2. 試料および試験方法

2.1 試料

気泡混合軽量土を作製するためには、母材、固化材、起泡剤、水(希釈水、混練水)が必要である。母材には、中国電力(株)の三隅火力発電所から産出した石炭灰を使用した。石炭灰の物理特性を表-1、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。また、石炭灰はセメントおよび石灰を添加することにより、可溶性のシリカ(SiO₂)と水和反応によって生成される水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)とが結合し、セメント水和物を生ずるポゾラン反応に優れている^{10), 11)}。さらに、本研究で用いた石炭灰の強熱減量は3.1%であり、混合した気泡が消泡する可能性は少ないものと考えられる⁵⁾。

固化材には、強度特性と経済性を考慮し、高炉セメントB種を用いた。起泡剤には、独立した気泡を得やすいとされている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。セメントスラリー作製の混練水⁷⁾と気泡作製の希釈水の水質が

表-1 石炭灰の物理的特性

ρ_s (g/cm ³)	w_L	w_P	I_P	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
2.170	NP	NP	NP	6.9	73.1	22.0

表-2 石炭灰の化学成分

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
66.9	22.4	4.28	1.96	1.16	0.29	0.39	0.86

単位 (%)

表-3 配合条件

セメント C (kg/m ³)	母材 S (kg/m ³)	起泡剤 m ₁ (kg/m ³)	希釈水 m ₂ (kg/m ³)	混練水 m ₃ (kg/m ³)	水量 W* (kg/m ³)
87.5	437.5	1.3	19.5	285.5	306.3

(* W = m₁+m₂+m₃)

強度発現や起泡剤の発泡に大きな影響を及ぼすことから、混練水と希釈水には蒸留水を使用した。

2.2 品質管理項目¹²⁾

気泡混合軽量土は、作製時の湿潤密度とフロー値と空気量の項目に対して品質管理が行われている。湿潤密度は、原料土、セメント、水および気泡が適正に混合され、設計に用いた湿潤密度が得られているかどうか確認するものである。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。空気量は、所定の空気が混入され、十分な軽量性が得ら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。

2.3 供試体の作製方法と養生条件

本研究では、石炭灰の有効利用を拡大するという観点から、石炭灰の使用量を増やすことを考えて、土セメント(石炭灰セメント)比(S/C)を5.0とし、水セメント比(W/C)は、品質管理基準に基づき作製可能なS/CおよびW/Cの範囲⁶⁾の中から、W/C=3.5を選択した。なお、配合条件は、表-3とした。

試料の作製手順は、以下に示すとおりである。まず、母材と固化材に混練水を加え良く混ぜてセメントスラリーを作製する。つぎに、起泡剤を希釈水で16倍に薄めた後、手混ぜにより攪拌し気泡群を作る。気泡作製時間は、試し練りにより、標準発泡倍率の約7割の発泡倍率とした。最後にセメントスラリーと気泡群の両者をミキサーで混合することにより、気泡混合軽量土が得られる。

試料の空気量、フロー値および作製時の湿潤密度(生

表-4 品質管理試験結果

項目	目標値	結果
湿潤密度 (g/cm ³)	1.000±0.1	0.989
フロー値 (mm)	180±20	177.0
空気量 (%)	45±5	47.0

比重)が、設定した目標の範囲内にあることを確認した後、試料をモールド(φ=50mm, H=100mm)に打設した。使用したモールドの内部には、OHPシートを貼り、さらにシリコングリスを薄く塗布することにより、モールドへの試料の付着を防いだ。

本研究では、供試体を水中養生するため気泡作製時間を調整し気泡量を減らすこと¹³⁾により、水浸が可能となるように品質管理項目の目標値を設定した。表-4に本研究で品質管理項目の目標値と試験結果を示す。

モールドに打設した試料は、全体をビニール袋で被い、約20℃で24時間保管した。その後、モールドから供試体を外し、種々の養生条件で養生した。養生条件に関しては、陸上構造物を想定して、気中養生と水中養生(淡水養生)とした。また水中養生では、港湾構造物での使用の可能性を検討するために淡水養生のほかに海水養生も設定した。気中養生は、温度を約20℃に保ち、供試体をプラスチック製の円筒容器内で保管した。淡水養生には、一般の水道水を使用し、海水養生には、島根県八束郡島根町の加賀港で採取した塩分濃度が32.0(PSU)、pHが7.98の海水を使用した。水中養生は、いずれもプラスチック製のトレーに供試体を置き、供試体全体が水浸する程度まで水道水、海水を満たし、トレーに蓋をして密封状態とした。養生日数は、3、7、14、21、28、56日の6種類とした。所定の養生期間を経た供試体をプラスチック製の円筒容器およびプラスチック製のトレーから取り出し、両端面を成形した後、実験に用いた。ただし、水中養生を行った供試体は、プラスチック製のトレーから取り出した後、やわらかい布で表面をふきとり、約15分静置した後、成形して実験に用いた。

2.4 実験方法

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。また、試験終了後に供試体の含水比を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 応力-ひずみ曲線

図-1は、養生日数(Tc)7日および28日の応力-ひずみ

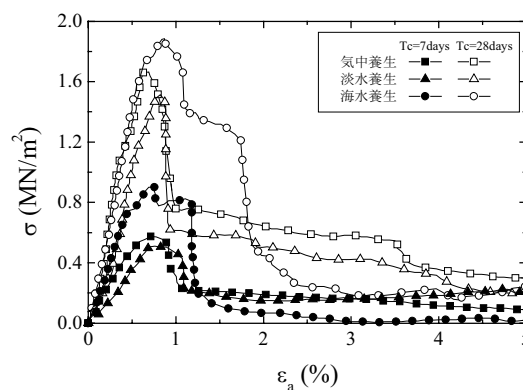


図-1 養生条件の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響

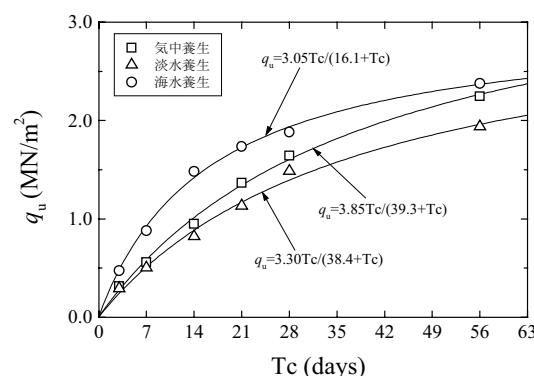


図-2 一軸圧縮強さと養生日数の関係

み曲線を示している。応力は、養生条件によらず、軸ひずみの増加に伴い、顕著な立ち上がりを示し、0.5~1.0%程度においてピーク値に達する。その後、応力は急激な低下を示し、一定値に達する。Tc=7日では、海水養生を行った場合のqu値は、気中養生を行った場合のqu値の約1.6倍程度を示しているが、Tc=28日では、海水養生を行った場合のqu値は、気中養生を行った場合のqu値の約1.1倍程度となり、両者の差は小さくなっている。また、淡水養生を行った場合のTc=7日のqu値は、気中養生を行った場合のqu値の約0.9倍程度を示しており、Tc=28日に至っても両者の差は変化していない。このことから、海水養生を行った供試体は、Tcが短い期間では早急に強度が増加するものの、Tcの期間が長くなるのに伴い、気中養生および淡水養生を行った場合との差が小さくなることが明らかとなった。一方、E50値に着目すると、Tc=7日および28日いずれの場合も、E50値は、海水養生の場合が最も大きく、次いで気中養生、淡水養生の順となっている。また、いずれの養生条件を行った場合にもεf値は、0.9%程度を示し、明確な違いは認められなかった。

3.2 一軸圧縮強さと養生日数の関係

一軸圧縮強さ(qu)と養生日数(Tc)の関係を図-2に示す。養生条件によらずqu値は、Tcの増加に伴って増加

表-5 試験条件の比較

条件		本研究	安原ほか ⁸⁾
材 料	石炭灰	フライアッシュ	
	セメント	高炉セメント B 種	普通ポルトランドセメント
	起泡剤	界面活性剤系起泡剤	動物性淡白系起泡剤
土セメント比 (S/C)		5.0	6.9
水セメント比 (W/C)		3.5	4.4
生比重 (湿潤密度)		0.989 (g/cm ³)	1.000 (g/cm ³)
養生水	淡水	水道水	
	海水	天然海水	人工海水
供試体		φ = 50 mm, H = 100 mm	
W/ (S+C)		0.583	0.556

しているが、Tc=28 日以降の q_u 値の増加率は、減少している。とくに海水養生を行ったものは、Tc=14 日までは大きな強度増加を示すが、Tc=14 日以降は、急激に強度増加率が小さくなっている。気泡混合軽量土におけるこのような q_u 値と Tc 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^{6), 13)} が、本研究においても、養生条件の違いによらず q_u 値と Tc の関係は、双曲線近似により表現することができた。

既往の研究では、水中養生を行った場合には、気中養生を行った場合より強度・剛性ともに Tc の経過に伴って大きくなること、とくに、海水養生の場合には、淡水養生の場合より強度・剛性ともに大きくなること⁸⁾ が報告されている。本研究では、海水養生を行った場合の q_u 値は、既往の報告どおり、いずれの Tc においても、淡水養生を行った場合の q_u 値よりも大きくなった。しかし、気中養生を行った場合の q_u 値は、いずれの Tc においても淡水養生を行った場合の q_u 値より大きくなっており、本研究結果と既往の報告例⁸⁾ との間に違いが認められた。本研究と安原ほか⁸⁾ では、いずれも作製時の生比重 (湿潤密度) は、1.0 g/cm³ 程度で一定としているが、試験条件の違いが認められる (表-5)。すなわち、強度の発現に大きな影響を及ぼす水セメント比と土セメント比の違いがその主要因と考えられる。また、使用した起泡剤の種類も異なっている。このことは、起泡剤の種類によって発泡特性も異なることが予想されるため、供試体の内部構造も異なることが推察される。以上のことから、今後の実施工を考えた場合、石炭灰を用いた気泡混合軽量土の力学的特性と試験条件の関係を総合的に解明しておく必要があるといえる。

3.3 養生日数の経過に伴う含水比の変化が一軸圧縮強さに及ぼす影響

養生日数 (Tc) の経過に伴う含水比 (w) の変化を図-3 に示す。淡水養生および海水養生を行った場合の w

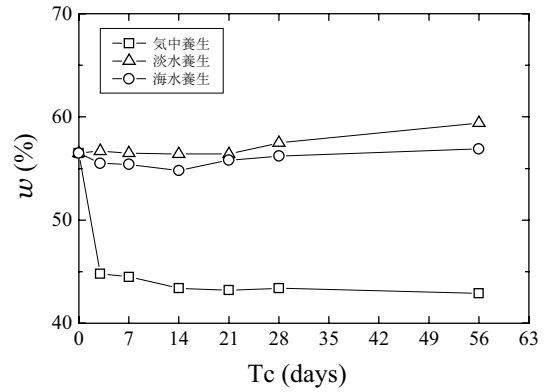


図-3 養生日数の経過に伴う含水比の変化

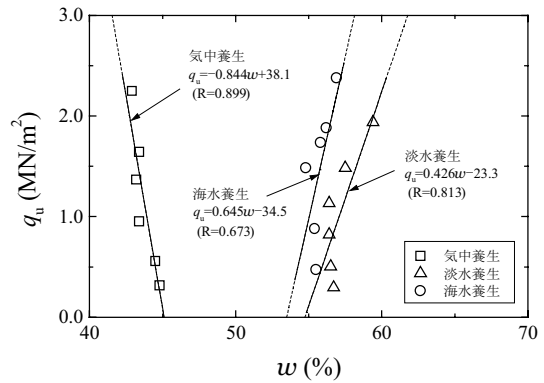


図-4 一軸圧縮強さと含水比の関係

値は、Tc の経過に伴い、ほぼ一定か、わずかに増加する傾向を示している。一方、気中養生した供試体の w 値は、Tc=3 日まで急激に、それ以降は緩やかに減少している。

一軸圧縮強さ (q_u) と w 値の関係を示すと図-4 となる。気中養生の場合に着目すると、w 値の減少に伴い q_u 値が直線的に増加する傾向を示している。一般的に同一の試料では、w 値が減少するのに伴い、 q_u 値は増加すること^{6), 13)} から、本研究の結果の気中養生を行った場合の q_u 値が、比較的大きくなっているのは、w 値の低下による影響が考えられる。しかし、水中養生 (淡水養生、海水養生) を行った場合は、気中養生の場合とは異なり、w 値の増加に伴い q_u 値も直線的に増加する傾向を示している。この q_u 値の増加は、水和反応等の進行に伴う内部構造の発達に起因するものと考えられる。一方、供試体内の w 値は、水和反応によって供試体内の水分が消費されるものの、消費した量より多くの水分が養生水から供給されることによって、増加したものと推察される。

よって、気中養生を行った場合と、水中養生を行った場合の供試体の w 値が異なるため、単純な q_u 値の比較は困難であるが、いずれの供試体も w 値が同値であるとすれば、水中養生を行った場合の q_u 値は、気中養生を行った場合の q_u 値よりも大きくなることが予測される。

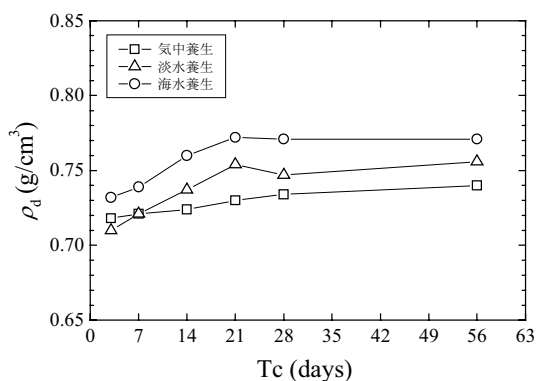


図-5 養生日数の経過に伴う乾燥密度の変化

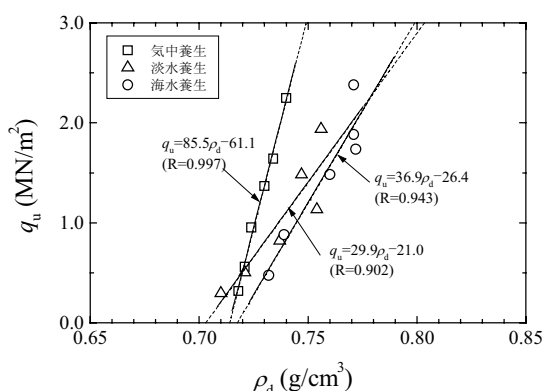


図-6 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

3.4 養生日数の経過に伴う乾燥密度の変化が一軸圧縮強さに及ぼす影響

図-5は、養生日数 (Tc) の経過に伴う乾燥密度 (ρ_d) の変化を示している。図より、いずれの養生条件を用いた場合においても、Tcの経過に伴い、 ρ_d 値には増加する傾向が認められる。とくに海水養生および淡水養生を行った場合の養生初期 (21日まで) における ρ_d 値の増加量は大きくなっている。

このような ρ_d 値の差は、 q_u 値に大きな影響を及ぼすことが容易に推定できる。そこで図-6に一軸圧縮強さ (q_u) と ρ_d 値の関係を示す。図より、いずれの養生条件の場合も、 ρ_d 値の増加に伴い q_u 値が直線的に増加する傾向を示している。淡水養生および海水養生を行った場合には、 ρ_d 値の増加に対する q_u 値の増加傾向は類似している。しかし、気中養生を行った場合には、 ρ_d 値の増加量は水中養生の場合と比較して少なくなっているにもかかわらず、 q_u 値の増加率は大きくなっている。このことは、気中養生の供試体における乾燥収縮に伴う q_u 値の増加が一要因であると考えられる。

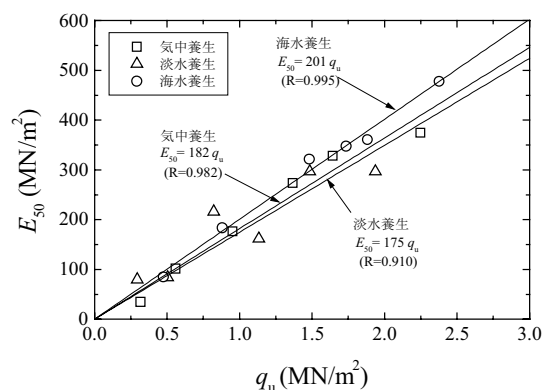


図-7 変形係数と一軸圧縮強さの関係

3.5 変形係数と一軸圧縮強さの関係

養生条件の違いが E_{50} 値と一軸圧縮強さ (q_u) の関係に及ぼす影響を図-7に示す。図より、養生条件の違いが E_{50} 値と q_u 値の関係に及ぼす明瞭な影響は認められなかった。 E_{50} 値と q_u 値のほとんどは、 $E_{50}=175 \sim 200 q_u$ の範囲内にあり、養生条件によらず高い相関性が認められた。このような傾向は、既往の研究例⁹⁾ともよく一致している。

3.6 養生条件の違いが内部構造に及ぼす影響

安原ほか^{8), 14)}は、養生条件の違いが石炭灰を利用した気泡混合軽量土の強度・変形特性に及ぼす影響について検討しており、海水養生を行った供試体が淡水養生を行った供試体よりも大きな強度発現を示すことを報告している。この原因としては、海水養生を行った供試体は淡水養生を行った供試体に比べ、エトリンガイト系の化合物の生成量が多く、内部構造が発達している点を挙げている。一方、海水中での硬化セメントペーストは、 $MgSO_4$ の作用によって、エトリンガイト系の化合物 $3CaO(Al,Fe)_2O_3 \cdot 3Ca(SO_4,OH)_2 \cdot 31H_2O$ に変化し、その際、Feの含有量の少ない (Fe-poor) 化合物が大きな膨張を起こす。このエトリンガイト系の化合物の生成による膨張と $Ca(OH)_2$ および $CaSO_4$ の溶出がセメントペーストの組織を弛緩させることにより、供試体内部への海水の浸透を容易にし、エトリンガイトの生成が促進された可能性を指摘している^{14), 15)}。

本研究では、気中養生、淡水養生および海水養生の違いによらず、明瞭なエトリンガイトの生成は確認できなかった。気中養生を行った供試体は、多少乾燥しているものの、均等に反応が進んでいることが確認できた。淡水養生を行った場合は、供試体の表面より養生水の浸入が確認されたが、供試体内部まで侵入した形跡は認められなかった。また、海水養生を行った供試体に関しては、供試体の表面付近は、非常に硬化しており、とくに供試体と養生水の接する部分に、薄く白い膜のようなものが

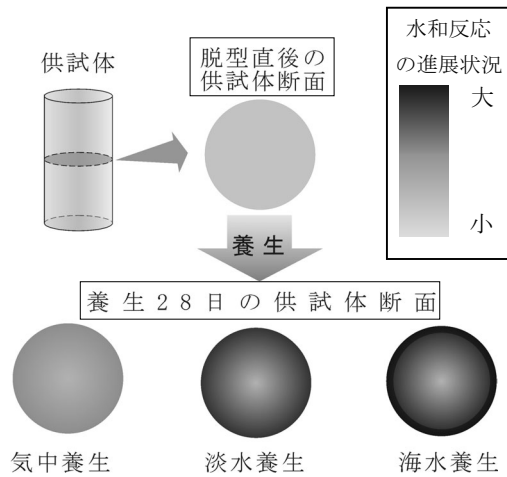


図-8 養生条件の違いが供試体内の水和反応の進展状況に及ぼす影響

形成されていた。しかし、表面が硬化している影響から、内部構造への海水の浸入は淡水養生を行った場合よりも小さくなっている。また、このことは淡水養生を行った供試体よりも、海水養生を行った供試体の w 値が低い値を示していることからわかる(図-3)。以上のようなことから、海水養生を行った場合は、養生初期に養生水と接する供試体表面で水和反応およびポズラン反応が促進される反面、この硬化反応により養生水の供試体内部への侵入を妨げている可能性が考えられる。以上のことから、養生 28 日における水和反応に関して図-8 のような概念図が推定できる。

本研究の結果から、海水養生を行った場合の 28 日強度は、気中養生を行った場合の 1.1 倍程度および淡水養生を行った場合の 1.3 倍程度となり、海水で養生することは、気中および淡水で養生する場合と比較して、力学的特性を向上させる方法として、有効な養生方法であることが明らかとなった。しかしながら、既往の報告例のように養生条件(気中、淡水、海水)の違いによる強度・変形の発現に大きな差が認められなかった。これは、海水養生に伴うエトリングタイトの明瞭な生成が認められなかったためと推察される。したがって、同じ養生条件を用いた場合においても試験条件(材料、配合条件)の違いにより、エトリングタイトの生成などにも違いが認められる。よって、海水を用いて養生を行った気泡混合軽量土地盤の力学的特性を評価する場合、気中養生および淡水養生による場合と比較して著しく大きな強度増加を見込むことは、その地盤の安定性を過大評価している可能性が考えられるため、実施工に際しては十分に注意が必要であろう。

4. 結論

養生条件(気中、淡水、海水)の違いが石炭灰を利用した気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす影響を定量

的な観点から明らかにした。一軸圧縮強さ(q_u)および変形係数(E_{50})は、いずれの養生を行った場合においても養生初期には急激な増加を示し、養生日数(T_c)が長期化するのに伴い増加傾向が緩やかとなる双曲線により定式化できた。また、海水養生を行った場合の q_u 値および E_{50} 値は、いずれの T_c においても気中養生および淡水養生を行った場合よりも大きくなった。以上のことから、石炭灰を利用した気泡混合軽量土を作製する場合には、気中や淡水で養生するよりも、海水中で養生することで、より優れた強度・変形特性を有する地盤材料となる可能性を示唆した。

謝辞

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

参考文献

- 1) 地盤工学会：土質ハンドブック，pp.1256-1257，1995.
- 2) 山本 健：石炭灰の再資源化への取組み，地盤と建設，Vol.18，No.1，pp.9-17，1993.
- 3) 佐野博昭，山田幹雄，太田 実，山本三千昭：養生条件の違いが締固めた石炭灰供試体の一軸圧縮強さおよび体積変化に及ぼす影響，土木学会論文集，No.463/III-22，pp.45-53，1993.
- 4) 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.
- 5) 山澤文雄，西川純一，佐藤厚子，小林 仁，榊原敦仁：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.
- 6) 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.
- 7) 亀井健史，松尾和俊，志比利秀：石炭灰を利用した気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす混練水の影響，島根大学総合理工学部紀要シリーズ A，Vol.36，pp.25-32，2002.
- 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) 規矩大義，安原一哉，堀内澄夫，大谷 順：軽量地盤材料の物性評価と適用，3.軽量地盤材料の物性とその評価方法(その3)，土と基礎，Vol.49，No.6，pp.47-52，2001.
- 10) 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.
- 11) 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.

- 12) 三島信雄, 益村公人: FCB 工法—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.
- 13) 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.
- 14) 安原一哉, 金澤浩明, 村上 哲, 飯久保 勉, 堀内澄夫: 石炭灰を利用した気泡軽量土の力学的性質に及ぼす微視的要因の影響, 土と基礎, Vol.48, No.6, pp.9-12, 2000.
- 15) 岩崎訓明: コンクリートの特性, コンクリートセミナー1, 共立出版, pp.47-49, 178-179, 1975.