

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

Effect of Curing Conditions on Unconfined Compressive Characteristics
of Foamed Mixture Lightweight Soil Utilizing Coal Ash

亀井健史 Takeshi KAMEI

(島根大学総合理工学部)

松尾和俊 Kazutoshi MATSUO

(島根大学大学院総合理工研究科)

気泡混合軽量土は、軽量性、流動性に優れており、火力発電所から産出される石炭灰を母材として有効利用できる点などからも注目されている。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）の下で養生を行った後、一軸圧縮試験を実施した。その結果、一軸圧縮強さおよび変形係数は、いずれの養生条件でも養生初期には急激な増加を示し、養生日数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、石炭灰を利用した気泡混合軽量土は、海水養生することによって、他の養生条件よりも一軸圧縮強さと変形係数が大きくなることが示された。

キーワード：一軸圧縮強さ、軽量土、固化材、石炭灰 (IGC : D06, M05)

1. はじめに

気泡混合軽量土 (Foamed Mixture Lightweight Soil) 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。日本道路公団では、気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法を FCB 工法 (Foamed Cement Banking Method) と称している^{1), 2)}。FCB 工法の施工例としては、エアミルクの道路盛土への利用^{3), 4)}や気泡モルタルの鉄道盛土への利用⁵⁾および橋台の裏込め土³⁾などがあり、その施工例は、近年確実に増加している。この気泡混合軽量土のもう一つの特徴には、現地発生材などを母材として利用できる点が挙げられる⁶⁾。このような特徴は、現代社会の目標としている循環型社会の構築における建設リサイクルの取り組むべき問題として極めて有意であると考えられる。すなわち、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の解決策として注目されよう。

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割は灰捨て場に埋め立て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、さらなる有効利用の拡大が極めて重要となっている。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。また、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する。このような特性から石炭灰は、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。特に土木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・転圧することで路盤材として利用されるほか、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いる⁷⁾。また、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が明らかとなっている⁸⁾。

石炭灰は軽量性や流動性にも優れており、気泡混合軽量土の母材としての利用も注目されている。石炭灰を利用した気泡混合軽量土に関しては、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⁹⁾や石炭灰の強熱減量が気泡の消泡に及ぼす影響¹⁰⁾などが報告されている。また、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。安原ほか^{11), 12)}は、石炭灰を利用した気泡混合軽量土を海水で養生すると、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、海水で養生した場合の気泡混合軽量土の強度は、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、養生条件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関する検討例は少なく、不明瞭な点も多く残されている。

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。その結果に基づき、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評価をしている。

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 (%)

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㈱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^{13), 14)}。本研究で用いた石炭灰は、酸化カルシウム分が比較的少なく、石炭灰の強度発現および耐久性を高めるためにも石灰やセメントを添加することが有効な方法であると考えられる。一方、石炭灰の強熱減量に着目すると、その値は3.1%であることから、混合した気泡が消泡する可能性は少ないものと推測できる¹⁰⁾。

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。混練水、希釈水の水質が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²⁾

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。

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

 (* $W = m_1 + m_2 + m_3$)

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

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⁹⁾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¹⁵⁾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‰、pHが

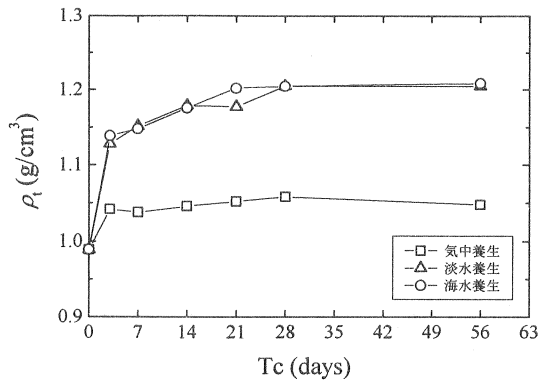


図-1 湿潤密度と養生日数の関係

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 (T_c) 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、やわらかい布で表面をふきとり、約15分静置した後、成形し湿潤密度 (ρ_f) を測定し、実験に用いた。なお、 T_c と ρ_f 値の関係を図-1に示す。気中養生供試体の ρ_f 値は、モールド打設時に僅かに増加するものの、以後の変化はほぼ一定であった。また水中養生を行った供試体の ρ_f 値は、淡水養生および海水養生ともに水浸直後は、大きな増加を示し、その後養生28日まで緩やかに増加している。しかし、養生28日以降は、淡水養生および海水養生ともに ρ_f 値は、一定の値を示しており、その値は、一般の土と比較して十分な軽量性を維持している。

2.4 試験方法

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-2 (a), (b), (c) は、母材として石炭灰を用いた気泡混合軽量土に対して、それぞれ気中養生、淡水養生および海水養生を行った場合の代表的な応力-ひずみ曲線を示している。

気中養生を行った場合の応力-ひずみ曲線は、軸ひずみの増加に伴い、顕著な立ち上がりを示し、0.5~1.0%程度においてピークに達する。ピーク後、応力は急激な低

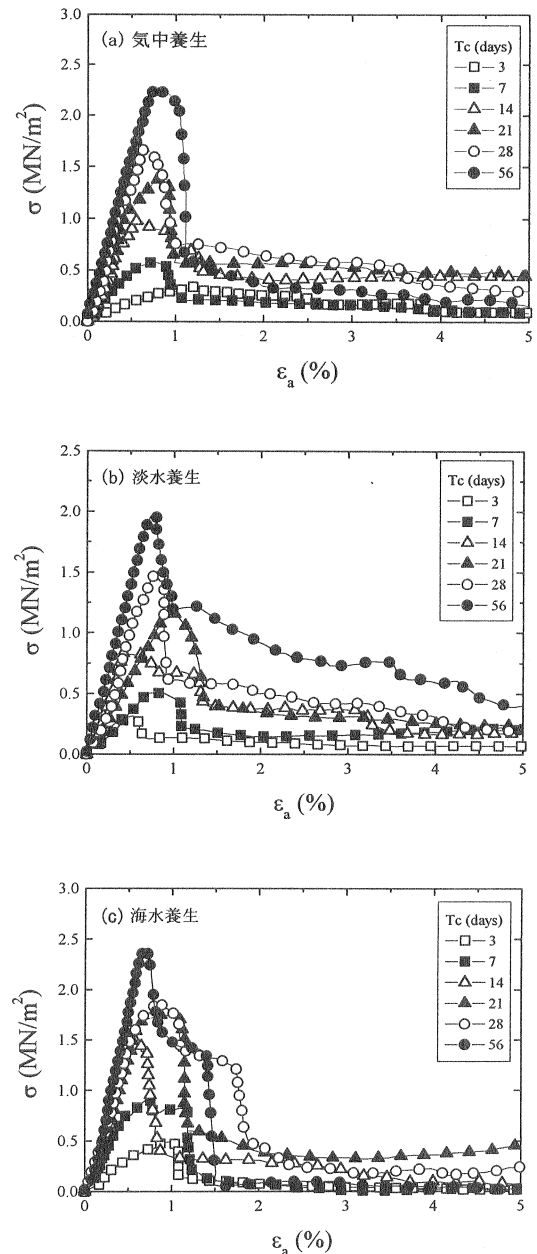


図-2 応力-ひずみ曲線

下を示し、その後ひずみの増加に伴い、徐々に減少する。一軸圧縮強さ (q_u) は、養生日数 (T_c) の長期化に伴い増大する傾向にあり、 $T_c = 3$ 日においては、0.32 MN/m²であったが、 $T_c = 56$ 日では2.25 MN/m²に達している。また、変形係数 (E_{50}) は、 T_c の長期化に伴い増加する ($E_{50}=30\sim370$ MN/m²) 傾向を示している。しかし、破壊ひずみ (ϵ_f) と T_c の間には、明瞭な関係は認められず、 ϵ_f 値はいずれの T_c においても0.5~1.0%程度であった。

淡水養生を行った場合においても、 q_u 値は、 T_c の長期化に伴い増大しており、 $T_c = 3$ 日では0.29 MN/m²であったが、 $T_c = 56$ 日では1.94 MN/m²まで増加している。 E_{50} 値は、 T_c の長期化に伴い増加する傾向を示している。また、海水養生を行った場合においても、他の2種の母材を用いた場合と同様に、 q_u 値は、 T_c の長期化に伴い増大

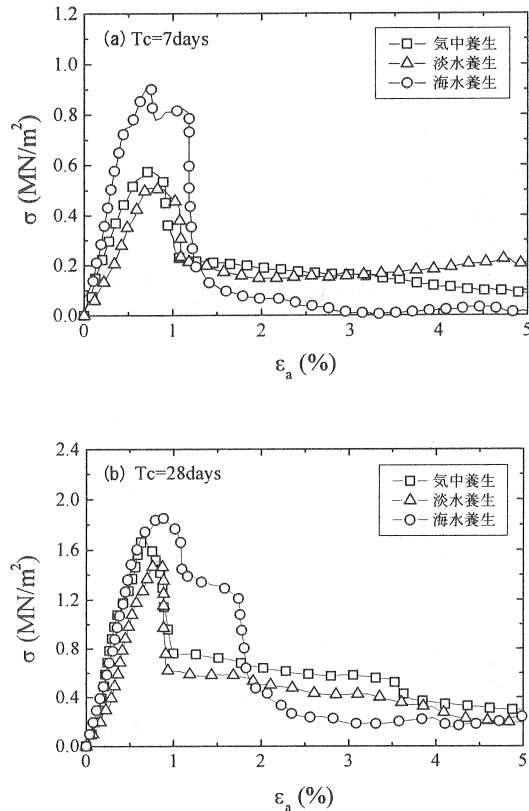


図-3 養生条件の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響

しており、 $T_c = 3$ 日の 0.48 MN/m^2 から $T_c = 56$ 日の 2.38 MN/m^2 まで増加しており、 E_{50} 値もまた、 T_c の長期化に伴い増加する傾向を示している。

つぎに、各養生条件間の応力-ひずみ曲線の比較を試みる。図-3 (a), (b) は、それぞれ $T_c = 7, 28$ 日の応力-ひずみ曲線を示している。 $T_c = 7$ 日では、海水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 値の約 1.6 倍程度となっているが、 $T_c = 28$ 日では、海水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 値の約 1.1 倍程度となり、両者の差は縮まっている。また、淡水養生を行った場合の $T_c = 7$ 日の q_u 値は、気中養生を行った場合の q_u 値の約 0.9 倍程度となっており、 $T_c = 28$ 日に至っても両者の比率は変化していない。このことから、海水養生を行った供試体は、 T_c が短い期間では早急に反応が進むものの、 T_c の期間が長くなると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のがわかった。 E_{50} 値に着目すると、 $T_c = 7$ 日および 28 日いずれの場合も、 E_{50} 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、 ε_f 値には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 (q_u) と養生日数 (T_c) の関係を図-4 に示す。いずれの養生条件の場合にも q_u 値は、養生初期では急激に増加する。しかしながら、 T_c が長期化するのに

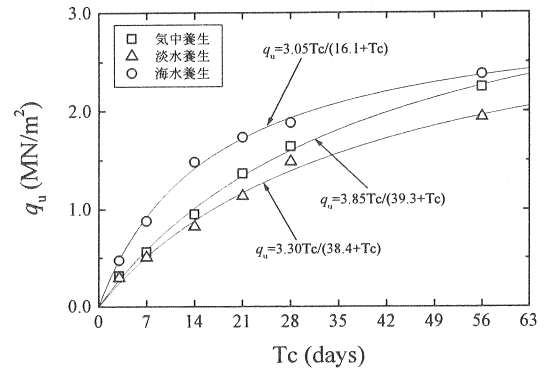


図-4 一軸圧縮強さと養生日数の関係

表-5 試験条件の比較

条件		本研究	安原ほか ¹¹⁾
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	動物性蛋白系起泡剤
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		$\phi = 50 \text{ mm}$, $H = 100 \text{ mm}$	
W/ (S+C)		0.583	0.556

伴い、 q_u 値の増加率は、減少している。特に海水養生を行ったものは、 $T_c = 14$ 日までは大きな強度増加を示すが、 $T_c = 14$ 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 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⁾。

¹⁵⁾ 本研究の結果でも、養生条件の違いによらず、 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 T_c の経過に伴って大きくなること¹¹⁾ が報告されている。特に、海水養生を行った場合には、淡水養生を行った場合より強度・剛性ともに大きくなること¹¹⁾ 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 T_c 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 T_c 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¹¹⁾ との間に違いが認められた。本研究と安原ほか¹¹⁾ では、いずれも作製時の生比重 (湿潤密度) は、 1.0 g/cm^3 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

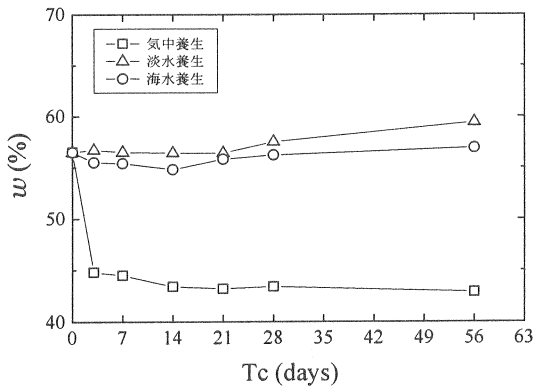


図-5 養生日数の経過に伴う含水比の変化

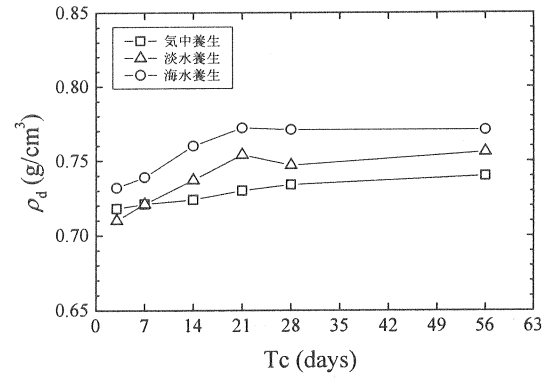


図-7 養生日数の経過に伴う乾燥密度の変化

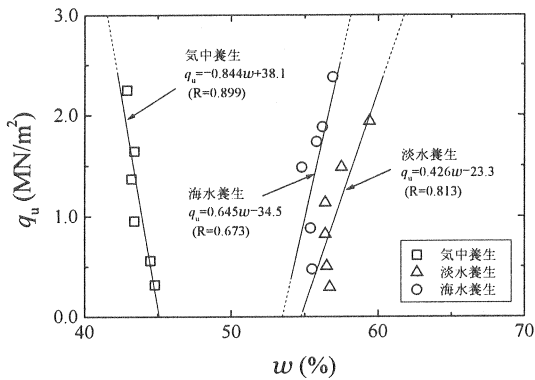


図-6 一軸圧縮強さと含水比の関係

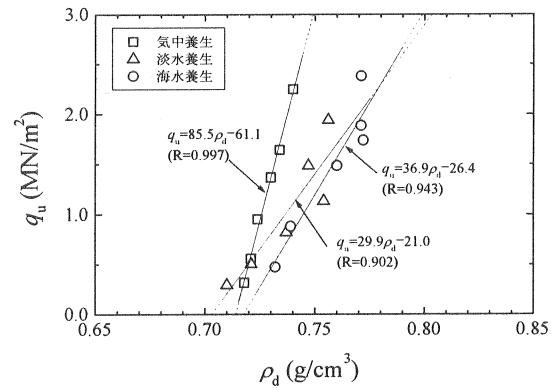


図-8 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

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。

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 (T_c) の経過に伴う含水比 (w) の変化を図-5 に示す。淡水養生および海水養生を行った場合の w 値は、 T_c 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、 $T_c=3$ 日まで急激な減少を示し、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-6 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^{9), 15)} 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。

以上のことから、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。

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-7 は、養生日数 (T_c) 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、 T_c の経過に伴い、 ρ_d 値には増加する傾向が認められる。特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-8 に一軸圧縮強さ (q_u) と ρ_d 値の関係を示す。図より、養生条件の違いによらず、 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ことから、いずれの養生条件を用いた供試体も水

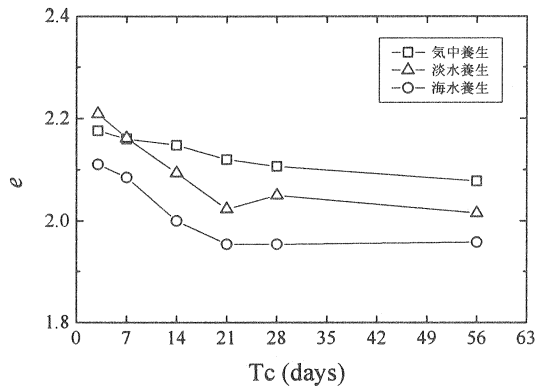


図-9 養生日数の経過に伴う間隙比の変化

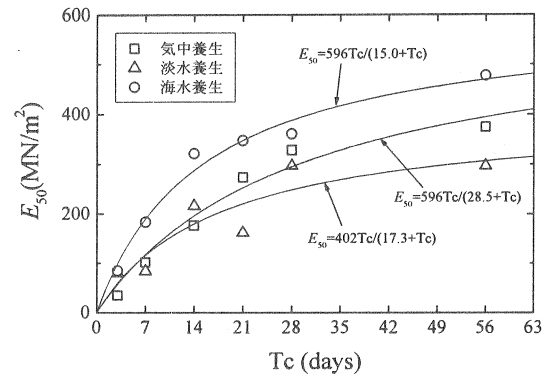


図-11 変形係数と養生日数の関係

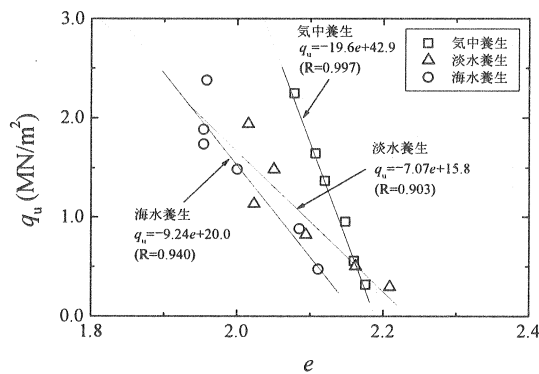


図-10 一軸圧縮強さと間隙比の関係

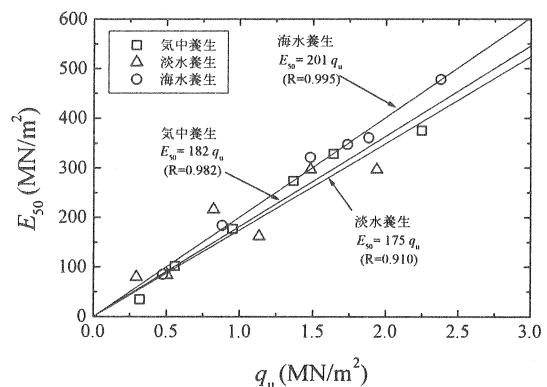


図-12 変形係数と一軸圧縮強さの関係

和反応およびポゾラン反応によって内部構造が発達するのに伴い、 ρ_d 値が増加しているものと考えられる。特に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、水和反応およびポゾラン反応の進行のみならず、気中養生の供試体における乾燥収縮に伴う q_u 値の増加も一要因と考えられる。

3.5 養生日数の経過に伴う間隙比の変化が一軸圧縮強さに及ぼす影響

養生日数 (Tc) の経過に伴う間隙比 (e) の変化を図-9 に示す。いずれの養生を行った場合においても、Tc の経過に伴い、e 値は減少する傾向にある。特に淡水養生、海水養生では、養生初期から Tc=21 日までの e 値の減少量が大きく、Tc=21 日以降は比較的緩やかな減少となっている。

e 値の変化と一軸圧縮強さ (q_u) の関係を検討する (図-10)。図より、いずれの養生条件を用いた場合も、e 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。このような e 値の減少は、水和反応およびポゾラン反応によって内部構造が発達するのに伴い、供試体内の間隙を反応生成物が埋めているためと考えられる。この

ことから、海水養生、淡水養生、気中養生の順で内部構造が発達しているものと推察される。

3.6 変形係数

図-11 は、変形係数 (E_{50}) と養生日数 (Tc) の関係を示している。 E_{50} 値は、いずれの養生を行った場合にも、養生初期では急激に増加するが、Tc が長くなるのに伴い、 E_{50} 値の増加率が減少している。特に海水養生を行った場合には、Tc=14 日までの E_{50} 値の増加率が、その他の気中養生や淡水養生を行った場合に比べて大きくなっている。また、淡水養生を行った場合には、多少ばらつきが認められるものの、基本的には養生条件の違いによらず、 E_{50} 値と Tc の関係は、それぞれ双曲線近似により表現できた。

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-12 に示す。図より、養生条件の違いが E_{50} 値と q_u 値の関数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、 $E_{50}=175 q_u$ から $E_{50}=200 q_u$ の範囲内にあり、各養生条件ともに高い相関性を有する比例関係が認められた。このような傾向は、既往の研究例ともよく一致している⁹⁾。以上のことから、養生条件が異なる場合でも E_{50} 値と q_u 値の関係には同様の傾向が認められた。

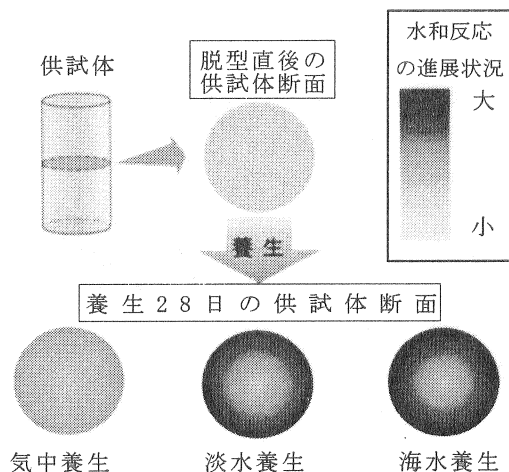


図-13 養生条件の違いが供試体内の水和反応の進展状況に及ぼす影響の概念

3.7 養生条件の違いが内部構造に及ぼす影響

安原ほか^{11), 16)}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^{16), 17)}。

本研究では、双眼実体顕微鏡による供試体の観察を行ったが、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。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、エトリンガイトの生成量などにも違いが発生するものと考えられる。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侵入が確認されたが、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、特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侵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-5)。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ボゾ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-13のような概念が推定できる。

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、海水養生を行った場合の28日強度が、気中養生を行った場合の3.0倍程度および淡水養生を行った場合の2.5倍程度なるような大きな違いは認められなかった。以上のことから、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、エトリンガイトの生成量などにも違いが発生するものと考えられる。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. まとめ

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。得られた結果を以下に列記する。

- (1) 養生条件の違いによらず、一軸圧縮強さ (q_u) および変形係数 (E_{50}) は、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。
- (2) 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は、海水中で養生することによって、気中や淡水で養生するよりも優れた強度・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) 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) 三島信雄，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.
- 3) 赤井公昭: エアーミ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: エアーミ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) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 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) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 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) 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.
- 17) 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.