

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

亀井 健史*, 松尾 和俊**, 志比 利秀*

*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 mixing water on unconfined compressive characteristics of foamed mixture lightweight soils utilizing coal ash

Takeshi KAMEI*, Kazutoshi MATSUO** and Toshihide SHIBI*

*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

Coal ash is generated in vast quantities as a by-product of burning coal at electric power plants. When some coal ashes are mixed with water, they are self-hardening, and set to create a high-strength, lightweight, low-permeability material. These properties make coal ash useful as a construction material. However, about 30% of coal ash in Japan is disposed of by burial in landfills or storage in lagoons. If the coal ash is effectively utilized as a construction material, the problems of coal ash disposal in power stations and shortage of natural resources for construction will be solved. Recently, coal ash has been widely used for stabilizing soils. Use of foamed mixture lightweight soils has also had a significant impact on countermeasures lessening soft ground deformation, earth pressure, overburden pressure, and the like.

This paper describes the effects of mixing water (fresh water or seawater) on unconfined compressive characteristics of foamed mixture lightweight soils utilizing coal ash. The effects of curing time on stress-strain behavior of foamed mixture lightweight soils are quantitatively shown. The unconfined compressive strength of foam mixture lightweight soils can be represented as a hyperbolic relationship between unconfined compressive strength and curing time. Empirical relationships between unconfined compressive strength and water content and dry densities have been also developed. Our findings suggest that seawater is more effective than fresh water. Selection of the best mixing water is thus essential.

1. はじめに

我が国には、高い圧縮性があり、強度が極めて弱いという性質を持つ軟弱地盤が多く分布している。このような軟弱地盤は、地下水位が高く飽和状態である地盤や堆積してから十分に圧密されていない強度の小さな地盤であり、主に沖積平野に広く分布している。また我が国は、交通や物流の面で便利であることから沖積平野に人口が集中し、そこに多くの都市が形成されているため、軟弱地盤の問題と直面する機会が多くなっている。

軟弱地盤上に構造物を建設する際の問題として、構造

物自体の安定問題以外に、軟弱地盤の鉛直方向の変位(沈下)と水平方向の変位(側方流動)の変形問題が挙げられる。そのため、軟弱地盤上に構造物を建設するために、軟弱地盤を改良することが必要とされ、地盤の状況に合わせ種々の軟弱地盤対策工法が用いられてきた。その中でも、近年、荷重軽減を目的とした軽量盛土工法が注目されるようになってきている。この軽量盛土工法の一つに軽量化のために気泡を混合した気泡混合軽量土がある。この気泡混合軽量土を用いた工法を日本道路公団¹⁾では、気泡セメント工法(Foamed Cement Banking Method)と称している。この工法の特徴としては、締固めが不要であ

軽量土の効果	適用事例		軽量土の効果	適用事例		
(1) 上載荷重の低減	① 沈下量および不同沈下の抑制	② 構造物取り付け部の段差防止	(2) 土圧の低減	① 片壁面	② 両壁面を有する盛土の土圧低減	
	③ 鉛直土圧の低減			(3) 充填	地盤沈下地帯における建物下の空洞充填	
	④ 安定性の確保				(4) 振動および騒音低減	建物
i) 掘削部の置き換え		ii) 地すべり抑制				

図-1 軽量土の適用場所の事例^{3), 4)}

り、硬化後は自立するので狭小な場所での施工が可能である。また、流動性に富むため、ポンプでかなりの距離を圧送できる。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といった点が挙げられる²⁾。以上のような気泡混合軽量土の特性を活かし、図-1^{3), 4)}に示すように、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・騒音の低減といった効果が指摘されている。

一方、この気泡混合軽量土のもう一つの特徴として、状況に応じて現地発生材を母材として使用できる点が挙げられる。この点から、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。さらに、現場発生土のみならず、産業発生土である石炭灰や焼却灰も母材としての利用が可能と考えられている。

とくに、石炭火力発電所の運転に伴い発生する石炭灰は、石炭を燃焼した場合に発生する残滓（副産物）であり、原炭量の約20%にも達する。現在、発生量の約70%が有効利用されているが、その大半はセメント分野での利用であり、その他では土木・建築分野などにおいて若干量が使用されているのに過ぎない。有効利用されていない残りの約30%の石炭灰は、廃棄物として埋め立て処分されているのが現状である⁵⁾。今後も石炭灰の発生量の増加が予測されることから、石炭灰の建設分野での有効利用方法の拡大が必要不可欠であるといえる。

土質分類からみた石炭灰（フライアッシュ）は、シル

トから粘土に相当し、粘着性はないが化学的性質として、ポゾラン活性に富み、自硬性を有する⁶⁾。石炭灰は、適度な水分が存在する状態で締固めた場合には、材齢の経過に伴って強度が増加するという路盤・盛土材としての優れた性質を有する。また、その水分が海水である場合には、海水中に含まれる塩分が石炭灰の硬化作用を増進するために、強度増加が望める⁷⁾。

例えば、養生方法の違いが石炭灰を用いた気泡混合軽量土に及ぼす影響について検討が行われており、水中養生を行った場合は、気中養生を行った場合に比較して、養生期間の経過に伴って強度・剛性とも大きくなること、さらに水中養生の場合でも、海水養生を行った場合には、淡水養生を行った場合よりも強度・剛性とも大きくなること報告されている⁸⁾。また、石炭灰の強熱減量の影響から発生する消泡に着目し、気泡混合軽量土に適用可能な石炭灰に関する考察が行われており、強熱減量の大きさが10%を超えるような場合には、気泡混合軽量土の母材として適さないことが報告されている⁹⁾。さらに、最近では、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）の範囲を明らかにするとともに、一軸圧縮特性に及ぼすS/C、W/Cおよび養生日数の影響を定量的に評価し、石炭灰の気泡混合軽量土への適用性についても検討されている¹⁰⁾。

気泡混合軽量土には、一般に河川水・湖沼水・地下水・水道水など安価に入手できる水を使用し、強度発現に支障となるゴミや泥、油などを含む水は使用してはならな

いと報告されている¹⁾。しかしながら、実際の施工を行う場合、蒸留水を使用することは困難であり、河川水や地下水などの淡水を使用する機会が多くなるが、淡水という観点からは大差がないものと考えられる。また、海岸付近の施工においては、海水を利用する場合も考えられる。そこで、上水道以外の河川水や地下水などの淡水を使用する場合や、海水のような塩分を含んだ水を使用する場合には、混練水の違いが、セメントの凝結反応および気泡混合軽量土の強度に及ぼす影響を明らかにする必要がある。なお、海水を使用する場合、内部に鉄筋を使用すると海水中の塩分により、鉄筋の腐食が問題となるが、無筋コンクリート構造物の場合には、海水を気泡混合軽量土の混練水として用いることも可能となる。

強度発現に大きな影響を及ぼす混練水であるが、混練水（蒸留水、海水）の違いが気泡混合軽量土の強度変形特性に及ぼす影響については、あまり着目されていなかったのが現状である。また、石炭灰を利用した気泡混合軽量土の研究例も少なく、不明な点が多い。

本研究では、母材として石炭灰を用いた気泡混合軽量土を混練水に蒸留水と海水の2種類の水を用いて供試体を作製し、種々の養生日数（1～28日）において一軸圧縮試験を行うことにより、混練水の違いが石炭灰を用い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することを試みている。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

2.1.1 母材（石炭灰）

石炭灰は、粒子が多孔質であることから、石炭灰粒子の比重は通常の土に比べて小さい。本研究では、中国電力の三隅火力発電所から産出した石炭灰を用いた。試料の物理特性を表-1、化学成分を表-2に示す。

石炭灰は、ポゾラン反応を有する材料であり、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（ SiO_2 ）が水和反応により生成される水酸化カルシウム（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）と結合し、セメント水和物を生ずるポゾラン反応に優れている⁴⁾。また、本研究で用いた石炭灰は、強熱減量が3.1%と低いため、気泡を混合した際に気泡を消泡させる可能性は、低いものと考えられる⁹⁾。

2.1.2 固化材（セメント）

気泡混合軽量土に用いる固化材には、経済性や環境問題を考慮し高炉セメントB種や普通ポルトランドセメントが使用されることが多い。本研究でも、上記の点を考慮して高炉セメントB種を使用した。

表-1 石炭灰の物理的特性

ρ_s (g/cm^3)	I_p	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)
2.170	NP	6.9	73.1	22.0

表-2 石炭灰の化学成分

化 学 成 分 (%)							
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
66.9	22.4	4.28	1.96	1.16	0.29	0.39	0.86

2.1.3 起泡剤

気泡混合軽量土に用いる気泡には、スラリー化した地盤材料に混入しても均一な形状で材料内に一様に分散することや、消泡しにくいことなどが求められる。本研究では、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を用いた。この起泡剤は、高級アルコールの硫酸エステル化合物を主成分としており、密度が $1.020\sim 1.040 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、pHが7～9を示す暗褐色の液体である。

2.1.4 水

気泡混合軽量土を作製する際に用いる水には、セメントスラリー作製用の混練水と気泡作製用の希釈水が必要となる。本研究では、混練水の違いを研究対象としているため、混練水には蒸留水と海水を使用した。なお、コンクリート用練混ぜ水として、塩類含有量35.0%以上の海水は、有害であることが報告されている¹¹⁾。海水は、島根県八束郡島根町の加賀港で採取した海水で、塩分濃度が32.0%、pHが7.98のものを使用した。一方、起泡剤の希釈には、清水が望ましく、地下水や海水を用いると発泡作用に悪影響を及ぼす可能性がある。そのため、希釈水には蒸留水を用いた。

2.2 品質管理項目

母材に石炭灰を用いた場合の品質管理基準は、現在のところ、明確に示されていない。本研究では、日本道路公団のFCB工法の設計・施工指針¹⁾を参考にして、下記に示すような品質管理基準を設けることとした。

2.2.1 湿潤密度（生比重）

湿潤密度は、所定の原料土、セメント、水および気泡が適正に混合され、設計に使用した湿潤密度が得られて

表-3 配合条件

セメント C (kg/m ³)	細骨材 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 (m ₁ +m ₂ +m ₃) (kg/m ³)
233.0	233.0	1.7	25.5	322.3	349.5

表-4 品質試験結果

混練水 の種類	湿潤密度 (kg/m ³)	フロー値 (cm)	空気量 (%)
蒸留水	0.747	19.00	55.0
海水	0.558	19.50	65.0

いるか確認するものである。本研究では、 $0.65 \pm 0.1 \text{g/cm}^3$ を基準とした。

2.2.2 フロー値

フロー値は、所定の流動性を確認する指標である。石炭灰モルタルは、通常の砂モルタルに比べ約 1/3 の粗度係数、すなわち 3 倍の圧送が可能であることが報告されている¹²⁾。

本研究では、石炭灰自体の流動性を考慮し、フロー値の基準値を $200 \pm 20 \text{mm}$ とした。フロー値は、JHS A 313-1992「エアモルタルおよびエアミルク試験法」のコンシステンシー試験法のシリンダー法¹⁾に基づいて測定した。

2.2.3 空気量

空気量は、所定の空気が混入され、所定の軽量性が得られているかを確認するもので、JHS A 313-1992「エアモルタルおよびエアミルク試験法」の空気量測定法¹⁾から求めた。本研究では、空気量の基準値を $60 \pm 5\%$ とした。

2.3 供試体の作製方法

本研究で用いた配合条件を表-3 に示す。また、供試体の作製は以下のように行った。まず、石炭灰とセメントに混練水を入れてよく混ぜ、モルタルを作製する。つぎに起泡剤を希釈水で薄め、手混ぜにより約 10 分間攪拌し、気泡を作製した。その後、モルタルと気泡が均質になるようにミキサーで約 2 分間混合することにより気泡混合軽量土を作製した。ここで試料の品質（作製時の湿潤密度、フロー値、空気量）を測定した。作製した気泡混合軽量土の品質試験結果を表-4 に示す。品質を確認した後、試料をモールド（ $\phi=50 \text{mm}$, $H=100 \text{mm}$ ）に三層程度に分

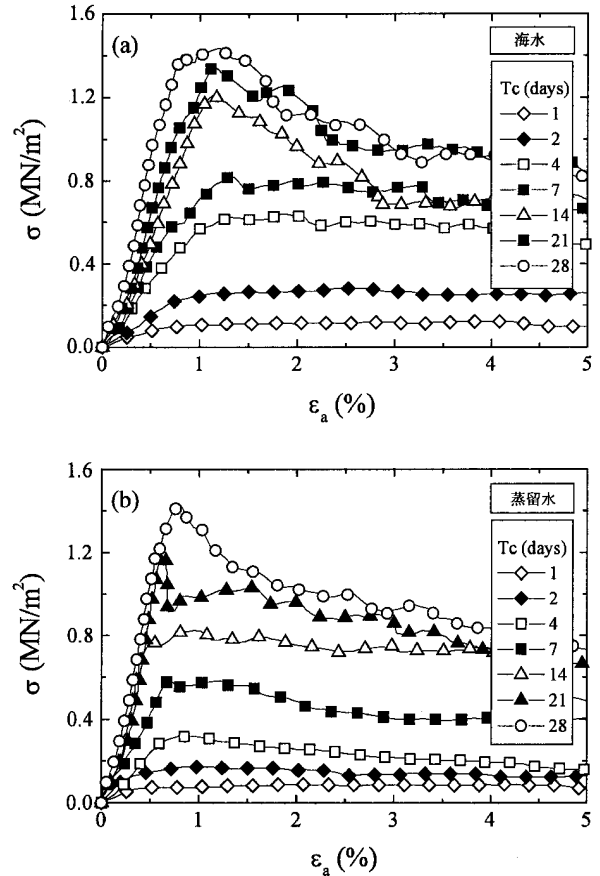


図-2 気泡混合軽量土の代表的な応力-ひずみ曲線

けて入れ、各層ごとに気泡が消泡しない程度にゴムハンマーなどで軽くたたき、試料が均質になるように打設した。試料を打設したモールドをビニール袋で被い、約 20°C で 24 時間保管する。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°C) で所定の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た供試体は、両端面を成形し、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 $1\%/ \text{min}$ 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) は、それぞれ海水および蒸留水を混練水とした気泡混合軽量土の代表的な応力-ひずみ曲線を

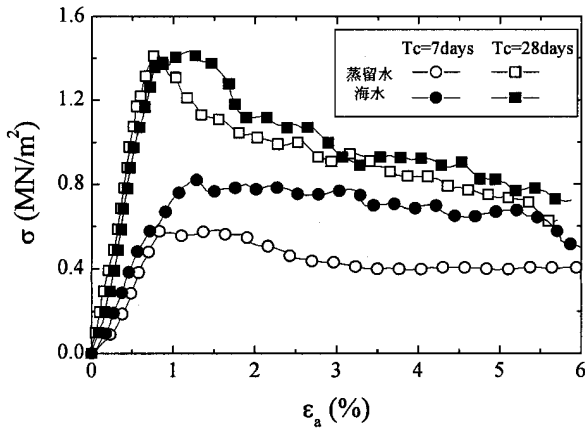


図-3 混練水の違いが応力-ひずみ曲線におよぼす影響 (Tc = 7, 28 days)

示している。

混練水に海水を用いた場合の応力-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、1.1~1.3%程度においてピークに達する。応力-ひずみ曲線にピークが認められた後、応力値は载荷の継続に伴い、徐々に減少していく。一軸圧縮強さ (q_u) は、養生日数 (Tc) の長期化に伴い増大する傾向にあり、Tc = 1 日では 0.12 MN/m² であったが、Tc = 28 日では 1.42 MN/m² に達している。そのときの破壊ひずみ (ϵ_f) は、1.1~1.3%程度であった。とくに、Tc = 14 日以降では、明瞭な応力値のピークが認められ、 ϵ_f 値は、Tc の長期化に伴い減少する傾向を示している。Tc の長期化に伴い q_u 値は増加し、 ϵ_f 値は減少するため、変形係数 (E_{50}) は、Tc の長期化に伴い増加する ($E_{50}=14\sim 200\text{MN/m}^2$) 傾向を示している。

混練水に蒸留水を用いた場合においても、 q_u 値は、Tc の長期化に伴い増大しており、Tc = 1 日では 0.07 MN/m² であったが、Tc = 28 日では 1.41 MN/m² まで増加している。とくに、Tc = 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。しかし、 ϵ_f 値と Tc の間には、明瞭な関係は認められず、いずれの Tc においても 0.5~0.7%程度であった。また、 E_{50} 値は、Tc の長期化に伴い増加する ($E_{50}=20\sim 240\text{MN/m}^2$) 傾向を示している。

つぎに、混練水に蒸留水と海水を用いた場合の応力-ひずみ曲線の比較を試みる。図-3 は、Tc = 7, 28 日の応力-ひずみ曲線を示している。Tc = 7 日では、海水を用いた場合の q_u 値は、蒸留水を用いた場合の q_u 値の約 1.5 倍程度となっている。しかし、Tc = 28 日では、両者の差はほとんど認められない。図より蒸留水を用いた場合の Tc = 28 日の q_u 値は、Tc = 7 日の q_u 値の約 2.5 倍となっている。一方、初期に強度増加の大きい海水を使用した場合には、Tc = 28 日の q_u 値が、Tc = 7 日の q_u 値の約 1.8 倍となっている。このことから、混練水の q_u 値への影響は、短期間の Tc において表れるが、設計値として用いられている Tc = 28 日における q_u 値に関しては、混練水の違いによる q_u 値の差は、あまり認められないものと評価

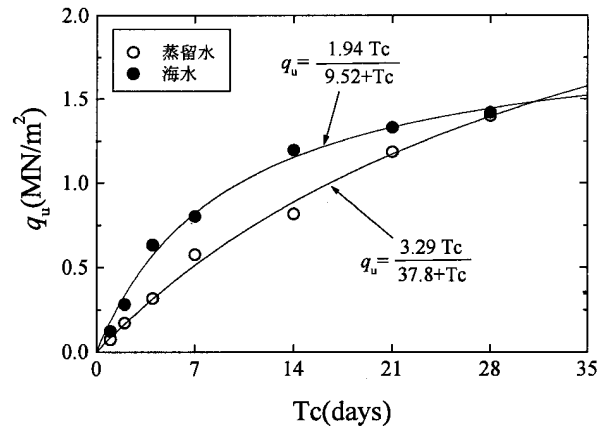


図-4 一軸圧縮強さと養生日数の関係

できる。また、いずれの Tc においても、混練水に海水を用いた場合の ϵ_f 値は、蒸留水を用いた場合の ϵ_f 値より大きくなる傾向が認められた。

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 (Tc) の関係を示すと図-4 のようになる。海水を混練水に用いた場合の q_u 値は、養生初期の範囲では、急激に増加しているが、Tc が長くなるのに伴い、 q_u 値の増加率が減少している。一方、混練水に蒸留水を用いた場合の q_u 値は、Tc の経過に伴い q_u 値の増加率が僅かに小さくなるものの、ほぼ直線的に増加していく傾向が認められた。この結果、 q_u 値に及ぼす混練水の影響は、先述したように Tc が短期間の場合において明瞭に表れるが、Tc = 28 日の q_u 値には大きな影響を及ぼさないことが明らかとなった。

既往の研究結果では、土セメント比 (S/C) が 1.0 や 2.0 のように小さな場合には、Tc の経過に伴い q_u 値の増加率が僅かに小さくなり、 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¹⁰⁾。S/C を 1.0 と設定した本研究では、混練水の違いによらず、 q_u 値と Tc の関係は、双曲線近似により表現できることが明らかとなった。JIS A 5308-附属書 9-6.2「モルタルの圧縮強度によるコンクリート用練混ぜ水の試験方法」では、基準水 (蒸留水あるいは上水道水) を用いた $\phi=50\text{mm}$ 、 $H=100\text{mm}$ のモルタルを作製し、これと同様の形状および水セメント比を有する、検水を行った供試体を作製して、Tc = 7 日および 28 日において後者の圧縮強度が前者の 90% 以上であるときには、練混ぜ水として用いることができるとしている¹³⁾。上記の基準は、気泡混合軽量土のものではないが、本研究の結果を照らし合わせると、Tc = 7 日および 28 日ともにこの条件を満たしているため、気泡混合軽量土の混練水として、海水は十分に使用できる可能性が示された。

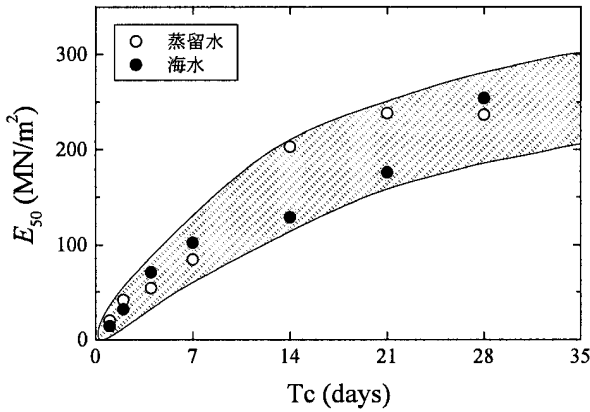


図-5 変形係数と養生日数の関係

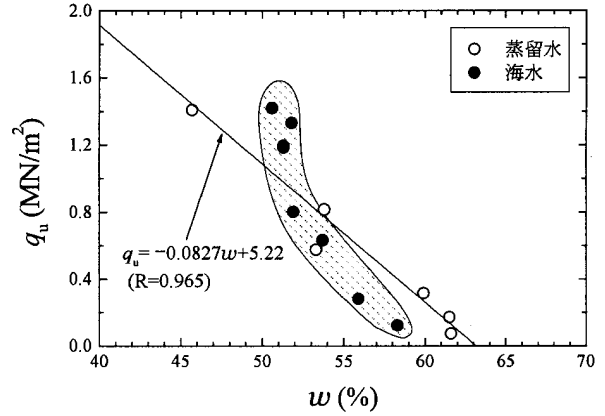


図-7 一軸圧縮強さと含水比の関係

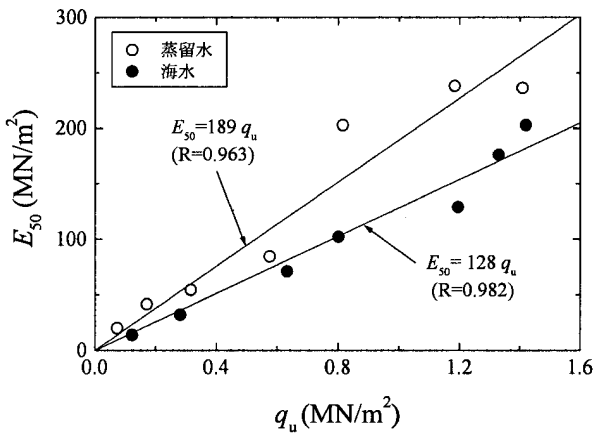


図-6 変形係数と一軸圧縮強さの関係

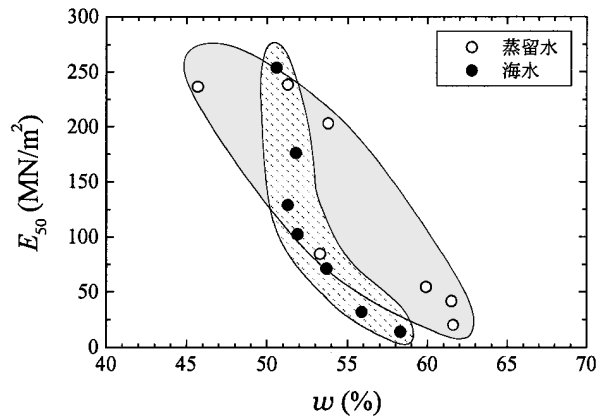


図-8 変形係数と含水比の関係

3.3 変形係数と養生日数の関係

図-5は、変形係数 (E_{50}) と養生日数 (T_c) の関係を示している。混練水の違いによらず、 E_{50} 値は T_c の長期化に伴い増加している。また、混練水に海水を用いた場合には、 T_c の経過に伴い、 E_{50} 値は増加しているが、混練水に蒸留水を用いた場合には、 $T_c = 14$ 日以降の E_{50} 値の大きな変化は認められなかった。

3.4 変形係数と一軸圧縮強さの関係

気泡混合軽量土の場合には、変形係数 (E_{50}) と一軸圧縮強さ (q_u) の間に、高い相関関係が認められている。例えば、亀井・松尾¹⁰⁾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。また、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。本研究から得られた E_{50} 値と q_u 値の関係を図-6 に示す。図より、混練水の違いによらず、蒸留水、海水ともに E_{50} 値は、 q_u 値の増大に伴い直線的に増加する傾向が認められた。また、混練水に海水を用いた場合は、蒸留水を用

いた場合より、 q_u 値の増大に伴う E_{50} 値の増加率は、僅かに小さくなることが明らかとなった。

以上のことから、混練水に海水を用いた場合の E_{50} 値と q_u 値の関係は、蒸留水を使用した場合と同様の傾向を示すが、 q_u 値の増加に伴う E_{50} 値の増加傾向は、蒸留水を用いた場合に顕著になる傾向にある。しかしながら、混練水に海水を用いた場合の E_{50} 値と q_u 値の関係は、混練水に蒸留水(淡水)を用いた気泡混合軽量土の E_{50} 値と q_u 値の関係の下限値^{2), 10)} とほぼ同程度である。このことから、混練水として海水を用いた場合においても E_{50}/q_u 値は、これまでの気泡混合軽量土にみられるような一般的な値を示しているものと考えられる。よって、混練水の違いが E_{50}/q_u 値に関してもあまり大きな影響を及ぼしていないものと評価できる。

3.5 含水比の変化が一軸圧縮強さおよび変形係数に及ぼす影響

養生日数 (T_c) の経過に伴う一軸圧縮強さ (q_u) と含水比 (w) の関係を図-7 に示す。混練水に蒸留水を用いた場合には、 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いる。また、混練水に海水を用いた場合

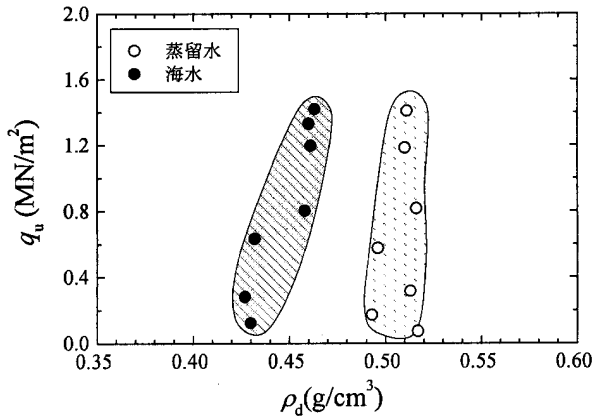


図-9 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

でも、同様の関係が認められているが、海水を用いた場合には、 w 値が 52% に達すると、 w 値の減少量が小さくなり、それに伴い、 q_u 値の増加量も小さくなっていることがわかる。このような現象が生じた原因としては、海水中の塩分により凝結が促進され、セメント水和物の結晶が緻密化し、未水和セメント粒子への水の浸透を阻害すること^{14), 15)}が考えられる。その結果、水和反応による w 値の減少量が小さくなり、 q_u 値の増加量も小さくなるものと推察される。

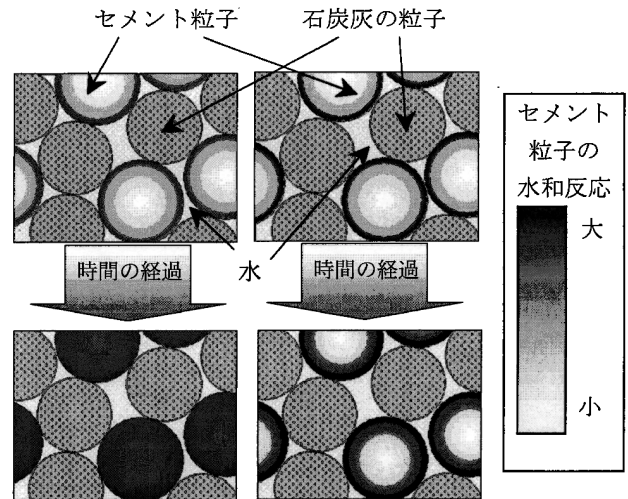
図-8 は、変形係数 (E_{50}) と w 値の関係を示している。 E_{50} 値は、 w 値の減少に伴い増大する傾向を示している。しかし、海水を用いた場合のみ、 w 値が 52% に達すると、 w 値の減少量が小さくなるにもかかわらず、 E_{50} 値は増加し続けている。

3.6 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

図-9 は、一軸圧縮強さ (q_u) と乾燥密度 (ρ_d) の関係を示している。図より、蒸留水の場合の ρ_d 値は、ほぼ一定となっているが、海水を用いた場合の ρ_d 値は、養生日数 (Tc) の増大に伴い、僅かに増加する傾向を示している。このような Tc の長期化に伴う ρ_d 値の増加は、上記に示したような含水比の減少も影響しているものと考えられる。すなわち、構造内に存在する水分が、Tc の経過に伴い水和反応により消費され、内部構造が発達することにより ρ_d 値が増加しているものと推察される。

3.7 内部構造と一軸圧縮強さ

図-4 に示したように、混練水に蒸留水と海水を用いた場合で、強度発現の時期に違いが認められた原因としては、つぎのようなことが考えられる。混練水の違いがセメントの水和反応および内部構造（気泡を除いたマトリクス部分）に及ぼす影響の概念を図-10 に示す。試料を混合後、セメント粒子に水が接することで、徐々に溶解性のシリカが溶出し、水和反応が進行していく（図-10



(a) 蒸留水を用いた場合の内部構造 (b) 海水を用いた場合の内部構造

図-10 混練水の違いがセメントの水和反応および内部構造に及ぼす影響の概念

(a). 水和反応により、セメント粒子の外側から次第にセメント水和物が形成されるが、反応初期の水密性はあまり高くないため、徐々に未水和セメント粒子にも水が浸透してゆき、全体的に強度増進が図られる。しかし、混練水に海水を使用した場合（図-10 (b)）には、セメント粒子の外側の凝結が促進されるため、初期の強度は急激に増加する。しかし、海水との反応によりセメント水和物の結晶が緻密化することで水密性が増し、粒子の表面を薄い膜で覆ったような状態となり、未水和セメント粒子への水の浸透を阻害するため、水和反応が進みにくく、長期養生での強度の伸びは小さくなっているものと考えられる。

4. 結論

混練水の違いが石炭灰を用いた気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす影響を検討した結果、以下のようなことが明らかとなった。

海水を混練水に用いた場合の一軸圧縮強さ (q_u) は、蒸留水を用いた場合に比べ、養生初期には急激な増加傾向を示すが、養生日数が長期化するのに伴い、増加率は減少する。しかしながら、海水を用いた場合の養生 28 日の q_u 値や E_{50} 値が、蒸留水を用いた場合と同程度の値を示していることから、蒸留水（淡水）の利用が困難な場合には実用上、気泡混合軽量土の混練水として使用できる可能性を示唆した。なお、コンクリートの練混ぜ水の水質基準と同様に、今後は気泡混合軽量土においても、混練水としての適否の判定基準を確立しておく必要がある。

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) 久楽勝行：軽量盛土工法の特徴とその適用, 基礎工, Vol.22, No.10, pp.2-9, 1994.
- 4) 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.
- 5) 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), 2000.
- 6) 地盤工学会：土質ハンドブック, pp.1256-1257, 1995.
- 7) 斎藤栄一, 齋藤 直, 半沢 稔, 浜田純夫, 松尾英治：ネオ・アッシュクリート (NA クリート) を用いた消波ブロックの製造試験, 土木学会 第56会年次学術講演論文集, pp.424-425, 2001.
- 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) 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.
- 10) 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 (掲載予定).
- 11) 岸谷孝一：コンクリート材料ー水・骨材中に含まれる不純物(第1回), コンクリートジャーナル, Vol.4, No.9, pp.38-48, 1966.
- 12) 内田祐二, 樋野和俊, 斎藤 直：石炭灰を使ったエアモルタルの特性, 電力土木, No.291, pp.65-69, 2001.
- 13) 財団法人 日本企画協会：JIS ハンドブック 10 生コンクリート (第1版), pp.48-53, 2002.
- 14) 仕入豊和：コンクリート練りまぜ水の基準化に関する実験的研究ーその3・水中の不純物による乾燥収縮の変化ー, 日本建築学会論文報告集, No.187, pp.1-7, 1979.
- 15) 長滝重義, 町田篤彦, 関 博：新体系土木工学, 28.コンクリート材料, 土木学会編, pp.133-140, 1980