

石炭灰混合材料の乾湿繰返し特性に及ぼす養生日数と溶媒の影響

福岡大学工学部	正会員	○藤川 拓朗
福岡大学工学部	正会員	佐藤 研一
福岡大学工学部	正会員	古賀 千佳嗣
国立環境研究所	正会員	肴倉 宏史

1. はじめに 石炭灰の有効利用として、電力会社、大学や建設会社を中心に石炭灰混合材料¹⁾の開発が進められているが、公共工事等で定常的に活用されるまでには至っていないのが現状である。これは、有効利用に関する歴史が比較的浅く、材料の品質、耐久性や安全性を長期に亘って保障する仕組みや試験法を体系化できていない点にあると考えられる。そのため、石炭灰混合材料の品質の保証をはじめ、耐久性や安全性を担保していくためにも、長期的なモニタリングの実施やデータの蓄積が必要不可欠である。またその一方で、有効利用を促進するためには、適用用途を拡幅していくことも重要な課題であり、種々の劣化環境下における石炭灰混合材料の耐久性を把握しておくことが肝要である。そこで本報告では、乾湿繰返し試験に使用する石炭灰混合材料の養生日数及び溶媒の違いが力学特性に及ぼす影響について報告する。

表-1 試料の物理特性及び化学組成

試料	カオリン粘土	石炭灰A (JIS)	石炭灰の化学組成 (%)	
土粒子密度 (g/cm ³)	2.731	2.375	SiO ₂	58.8
含水比 (%)	0	0	CaO	5.0
液性限界 (%)	51.7	N.P.	Al ₂ O ₃	25.9
塑性限界 (%)	34.3	N.P.	FeO	2.3
砂分 (2mm-75μm)	0	0.3	MgO	0.9
シルト分 (75μm-5μm)	35.4	65.3	Na ₂ O	0.2
粘土分 (<5μm)	64.6	34.4	K ₂ O	2.3
Ig-loss (%)	3.1	5.8		

2. 実験概要

2-1 石炭灰混合材料の作製方法及び実験条件 本実験では、土質材料にカオリン粘土と石炭灰 (JIS 灰)、固化材に高炉セメント B 種を使用し、これらに所定量の水を加え混練したものを石炭灰混合材料と定義している。表-1 に使用した試料の物理特性及び石炭灰の化学組成を示す。供試体の作製におけるカオリン粘土の含水比は、液性限界の 2.5 倍 (w=129.3%) に調整し、セメント (C) と石炭灰 (Ash) をカオリン粘土の湿潤質量に対し外割り配合で添加している。また、実験に用いた配合条件を表-2 に示す。供試体の目標強度を養生 28 日において、 $q_{u28}=1,000\text{kN/m}^2$ となるように配合を設定した。溶媒には、蒸留水と近年の硫酸塩による劣化被害が注視されていることを鑑み、硫酸塩溶媒 (1%の硫酸ナトリウム溶液) の 2 種類を用いた。

表-2 実験に用いた配合条件

	セメント添加量 (%)	土質材料	石炭灰添加量 (%)	目標強度 q_{u28} (kN/m ²)	溶媒	養生日数 (日)
Case1	5	カオリン粘土	100	1000	蒸留水	28
Case2					硫酸塩溶媒	
Case3					蒸留水	91
Case4					硫酸塩溶媒	

2-2 乾湿繰返し試験方法 乾湿繰返し試験の履歴の与え方は、表-3 に示す Wetting and Drying of Solid Wastes (ASTM D-4843)²⁾ を参考にした。乾燥過程では、60±3℃に保った乾燥炉内に 24 時間静置し、その後 20±3℃の恒温室内で 1 時間放置冷却し、湿潤過程に供した。湿潤過程においては、供試体が完全に浸水する体積 (L/S=5) を基に溶媒を設定し、各溶媒中に 23 時間静置した。乾燥及び湿潤過程の前後に供試体の高さ、直径、質量を測定し、上記の一連の過程を最長で 15 サイクル実施した。奇数サイクルの湿潤過程終了後には一軸圧縮試験を行い、試験後の供試体をサンプリングし、環告 19 号法および環告 46 号法試験を行った。各サイクルの湿潤過程終了後には、浸漬液を対象としてタンクリーチング試験を行い、劣化に影響を及ぼす Ca 溶出量についても把握を行っている。また、目視による石炭灰混合材料の劣化状況を把握するため、本研究では、表-4 に示す健全度評価³⁾を用いている。

表-3 本研究における乾湿履歴の与え方

試験条件	乾燥過程	湿潤過程
	炉乾燥 (60±3℃)	蒸留水に浸水
試験時間	24h	1h冷却+23h
サイクル	乾燥→冷却→湿潤を15サイクル	

表-4 健全度評価基準³⁾

	クラック状況	欠落状況
A	外見上、ほとんど変化なし	
B	微細クラック、局部クラック発生	表面剥離が局部的に発生
C	明瞭なクラックが一部に発生	供試体の一部が僅かに欠落
D	明瞭なクラックが全体に発生	供試体より大きく欠落
E	供試体の一部または全体が崩落（～20%程度）	
F	供試体全体的に崩壊、崩落、供試体としての形は存在	
G	供試体全体が崩壊し、片々は塊状	
H	供試体全体が崩壊し、片々は細粒化～泥状化	
ここで、細粒化とは粒径2mm程度に細分化された状況を指す。		

キーワード 石炭灰, 石炭灰混合材料, 乾湿繰返し試験, 耐久性, 硫酸塩, 一軸圧縮試験

連絡先 〒814-0180 福岡市城南区七隈 8 丁目 19-1 福岡大学工学部 TEL 092-871-6631(ext.6481)

3. 実験結果及び考察

3-1 健全度評価による劣化の把握 図-1 に健全度評価結果を示す。

いずれの条件においてもサイクルの増加に伴い徐々に表面劣化が進行する様子が伺える。さらにその劣化の進行は、溶媒の影響よりも養生日数の影響を受けることが分かる。これは、養生日数が長いほどセメントの水和反応の進行とポズラン反応の影響により構造が緻密化され、乾湿履歴に対する耐久性が増加するためと考えられる。

3-2 養生日数及び溶媒の違いが力学特性に与える影響

図-2 にサイクル数と一軸圧縮強さの関係、図-3 にサイクル数と変形係数の関係を示す。養生 28 日においては、溶媒に関係なくサイクル初期に強度増加が見られ、ピークを示した後に強度低下が生じている。一方、養生 91 日においては、剛性が高く比較的安定した値で強度は推移し、劣化の進行も養生 28 日と比べて遅いことが分かる。図-4 及び図-5 は 15 サイクル経過した供試体の質量変化率を経過日数ごとに示したものである。養生 91 日においては、養生 28 日と比べて初期の質量変化率が小さいものの、経過日数の増加（サイクル数の増加）に伴い供試体中への水の出入りが増加し質量変化率の差も次第に大きくなっていることから、劣化が進行していると考えられる。図-6 はサイクル数と伸縮率の関係を示している（伸縮率とは、供試体の鉛直方向における長さ変化を表しており圧縮を正としている）。硫酸塩溶媒においては、硬化後のエトリンガイト生成に伴う膨張（AFm から AFt の再転化）が懸念されたが、1%の硫酸塩溶媒においては、養生に関係なくその影響は見られなかった。その一方で、図-7 に示すサイクル数と Ca 含有率の関係からも分かるように、いずれの条件においてもサイクル数の増加に伴い Ca 含有量が低下しているものの、特に硫酸塩溶媒を用いた条件において顕著であることが分かる。このことから、硫酸塩地盤においては、施工後に Ca 溶脱に伴う強度低下や劣化の可能性も考えられるため、今後さらに高濃度での検討が必要である。

4. まとめ 1) 養生日数の影響は、乾湿履歴に対する耐久性に影響を及ぼすことが明らかとなった。すなわち、養生日数が長いほど構造が緻密化し、乾湿履歴の影響を受けにくくなると考えられる。2) 溶媒の違いは Ca 溶脱量に影響を及ぼし、硫酸塩溶媒では養生日数に関係なく表面劣化の影響を受けやすいことが示唆された。

謝辞 本研究は、「東アジア標準化に向けた廃棄物・副産物の環境安全品質管理手法の確立」環境省環境研究総合推進費補助金（K113004）の一部として実施された研究である。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献 1) 財団法人石炭灰エネルギーセンター：港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン，H23.3. 2) Standard Test Method for Wetting and Drying Test of Solid Wastes, Designation: D4843-88, ASTM International, 2009. 3) 寺師昌明・田中洋行・光本司・本間定吉・大橋照美：石炭・セメント系安定処理土の基本特性に関する研究（第3報），港湾空港技術研究所報告，第22巻，第1号，pp.69-96，1983。

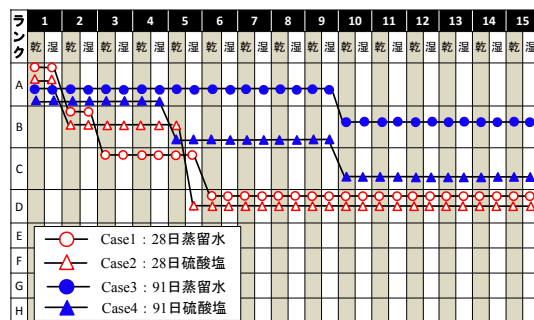


図-1 各 Case における健全度評価

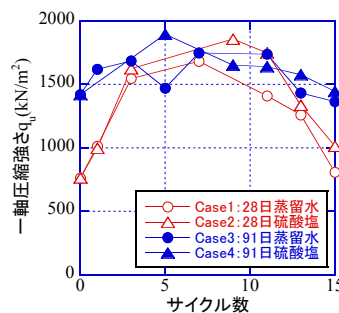


図-2 サイクル数と一軸圧縮強さ

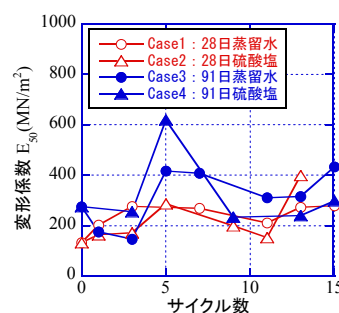


図-3 サイクル数と E_{50} の関係

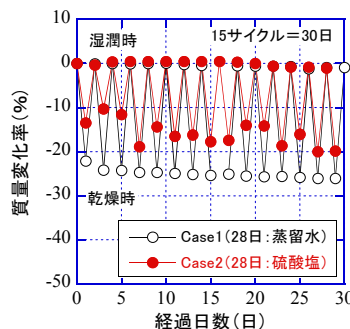


図-4 経過日数と質量変化率
(養生 28 日)

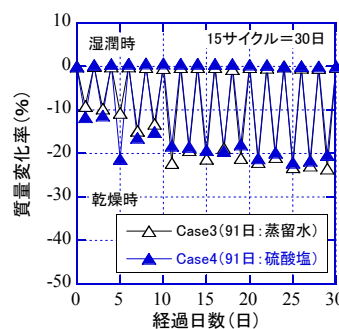


図-5 経過日数と質量変化率
(養生 91 日)

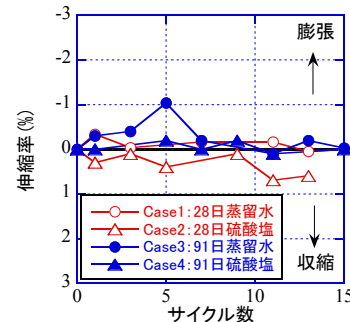


図-6 サイクル数と伸縮率

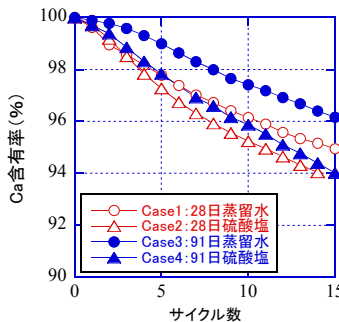


図-7 サイクル数と Ca 含有率