

乾湿繰返し履歴を受けた石炭灰混合材料の耐久性

福岡大学工学部 学生会員 日隈 厚志 久富 優二
福岡大学工学部 正会員 佐藤 研一 藤川 拓朗

1. はじめに リサイクル材を用いたセメント系安定処理土の有効利用を進めていく上で重要なことは、品質の保証をはじめ、耐久性や安全性を担保することである。これら安定処理土を盛土材や路盤材等の建設材料として利用を考えた場合、所定の強度を満足するだけで耐久性までも担保されているかどうかについては疑問が残る。一般的にセメント安定処理土の耐久性評価は、繰返し荷重による物性変化と、気象条件等の環境変化に伴う物性変化に大別される¹⁾。後者については凍結融解、中性化、乾湿繰返し等が考えられるが、特に乾湿繰返しにおいては乾燥・水浸における条件設定(履歴、溶媒 pH、溶媒交換サイクル等)のパラメータが耐久性に与える影響についての詳細な検討が不足している状況にある。そこで本研究では、乾湿繰返しの評価指針を得ることを目的とし、石炭灰を混合したセメント改良土(以後、石炭灰混合材料)を用いた長期耐久性評価手法の検討を行っている。本報告では、ASTM²⁾に準拠した乾湿繰返しの条件設定を用いた石炭灰混合材料の耐久性について述べる。

2. 実験概要

2-1 供試体作製方法 実験試料にはカオリン粘土及び石炭灰(フライアッシュⅡ種)を用い、固化材には高炉セメント B 種を使用した。表-1 にカオリン粘土及び石炭灰の物理特性値を示す。供試体作製にはカオリン粘土の含水比を液性限界の 2.5 倍である $w=129.25\%$ に調整し、セメント(C)と石炭灰(ash)の添加量は湿潤質量に対し外割り配合で添加している。また、供試体の目標強度を養生 28 日において、 $ash=0, 50, 100\%$ で $q_u=500, 1000\text{kN/m}^2$ となるように配合を行い、含水比を調整したカオリン粘土に、石炭灰を加えて 5 分間、さらに高炉セメント B 種を加えて 5 分間攪拌を行い、その後直径 5cm、高さ 10cm のモールドに安定処理土の締め固めを行わない供試体作製方法³⁾に準じてスラリー状で打設を行った。予備試験より得られた配合条件を表-2 に示す。本報告では、石炭灰混合材料の Case1(C:3%, ash:100%)及び Case2 (C:5%, ash:100%)の乾湿繰返し試験結果について報告する。

2-2 乾湿繰返し試験方法 乾湿繰返し試験における履歴の与え方については、既往の研究を調査し、多機関で多く用いられていた Wetting and Drying of Solid Wastes (ASTM D-4843)²⁾を採用した。その試験条件を表-3 に示す。乾燥過程においては、 $60\pm3^\circ\text{C}$ に保った乾燥炉内に 24 時間静置し、その後 $20\pm3^\circ\text{C}$ の恒温槽で空気中に 1 時間放置し冷却し、湿潤過程に供した。湿潤過程においては、供試体が完全に浸かるだけの体積(液固比 5)の蒸留水中に 24 時間整置した。なお、乾燥及び湿潤過程の前後に供試体の高さ、直径、質量を測定している。本実験では、上記の一連の過程を最長で 15 サイクル実施した。1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 サイクルの湿潤過程終了後には、一軸圧縮試験、溶出濃度分布にも着目し、供試体の内側と外側をサンプリングし環境省告示 46 号法試験を行い、全サイクルの湿潤過程終了後、浸漬液を対象としてタンクリーチング試験を行った。また、乾湿繰返し試験のサイクル毎の供試体の状態を、表-4 に示す健全度評価⁴⁾を用いて劣化の進行を把握した。

3. 実験結果及び考察

3-1 乾湿繰返しによる供試体劣化の様子 図-1 に各条件における目視の健全度評価を行った結果を示す。Case1 においては、1 サイクル乾燥後の湿潤過程において水浸直後に供試体内から気泡が噴出し、すべての供試体においてスレーキングに伴う崩壊・細粒化が見られその後の圧縮試験を行うことが出来なかった。一方、Case2 では Case1

表-1 物理特性

試料		カオリン粘土	フライアッシュⅡ種
土粒子密度	(g/cm^3)	2.731	2.357
含水比	(%)	0	0
液性限界	(%)	51.7	N.P.
塑性限界	(%)	N.P.	N.P.
粒度分布			
砂分 (2mm-75 μm)		0	0.3
シルト分 (75 μm -5 μm)		35.4	65.3
粘土分 (5 μm -)		64.6	34.4
Ig-loss	(%)	3.11	5.83
pH		-	-

表-2 実験条件

	目標強度	セメント添加量 (%)	石炭灰添加量 (%)
Case1	$q_u=500\text{kN/m}^2$	3	100
Case2	$q_u=1000\text{kN/m}^2$	5	

表-3 試験条件²⁾

試験条件	乾燥過程	湿潤過程
	炉乾燥 ($60\pm3^\circ\text{C}$)	蒸留水に浸水 液固比 5
試験時間	24h	1h冷却+24h
サイクル	乾燥→冷却→湿潤を15サイクル	

表-4 健全度(指標)⁴⁾

	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	供試体がより大きく欠落
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。		

と同様に気泡の噴出が生じ、初期に局部的な表面剥離が見られたものの、その後3サイクル移行は劣化の進行が見られず安定した様子を示した。これらの差異は、初期の一軸圧縮強さが起因しており、一軸圧縮強さが低いと乾湿繰返しに対する抵抗性が劣ることを表している。併せて、 $q_u=500\text{kN/m}^2$ 程度の条件において、乾燥過程における高温養生は早期にスレーキングを生じさせる原因となり、耐久性評価の条件設定として適していない可能性を示唆している。

3-2 乾湿繰返しに対する耐久性

Case1 は供試体の崩壊により試験が困難であったため耐久性の評価は全て Case2 について行う。図-2 に累積 Ca 溶出量と pH の関係、図-3 サイクル数と一軸圧縮強さの関係を示す。乾湿繰返しを受けることにより、供試体から Ca の溶脱が見られ、pH はアルカリ領域から中性領域へと移行していることが分かる。また、一軸圧縮強さに着目すると、経過日数の増加や高温養生による安定処理効果の促進⁵⁾により、乾湿繰返し初期で強度増加が見られ、その後5サイクルをピークに緩やかな強度低下が見られる。この強度低下の要因は、供試体の劣化の進行や Ca の溶脱によるものと思われ、Ca については15サイクル終了までに7%程度の溶脱が生じることが判明した。また、15サイクル終了までに大幅な強度低下や劣化の進行が見られなかった理由は、図-4(a)、(b)に示す乾湿繰返しに伴う質量変化と収縮率(長さ変化)の関係から分かるように、5サイクルと15サイクルで質量変化や収縮率に差異が見られないことが考えられる。

また、乾湿繰返しによる劣化は、乾燥収縮による供試体内部のひずみの蓄積により生じるものの、今回の条件においては乾燥収縮が見られておらず、供試体内部に歪が0蓄積されていないことも要因と考えられる。図-5に0, 5, 15サイクルにおける湿潤過程終了後の石炭灰混合材料のX線回折図を示す。湿潤後の石炭灰混合材料のX線回折結果からは、いずれもエトリンガイトが確認され、鉱物組成に差異は見られず強度低下に影響を与えていないと思われる。しかしながら、乾燥過程では脱水によるエトリンガイトの非晶質化が起こり、乾湿繰返しに伴いエトリンガイトや粘土鉱物の脱水・再水和¹⁾が繰返され耐久性に影響を及ぼす可能性もあることから、今後は乾燥・湿潤の両過程での検討が必要と思われる。また、今回得られた各種パラメータを、実地盤や曝露条件下での結果と比較し長期的な耐久性評価を行っていくことが必要である。

4. まとめ 1)本研究で用いたような石炭灰混合材料の乾湿繰返し耐久性に対し、高温養生による乾燥手法は、一軸圧縮強度の低い条件($q_{u28}=500\text{kN/m}^2$ 未満)には適していない可能性がある。2)本実験における供試体の強度低下は、乾湿繰返しに伴う劣化の進行と Ca の溶脱が主であり、サイクル終了までに7%程度の溶脱が生じることが判明した。

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) 高野・酒巻：セメント系固化材による安定処理土の耐久性、セ技年報 38, pp.528-531, 1984. 2) 地盤工学会, 土質試験の方法と解説—第一回改正版—, 「安定処理土の締固めをしない供試体作製」, PP.308-316, 3) Standard Test Method for Wetting and Drying Test of Solid Wastes, Designation: D4843-88, ASTM International, 2009. 4) 資源と素材(Shigen-to-sozai) Vol.121 p37-43 (2005) 5) 嘉門・勝見・今西：セメント系安定処理土の乾湿繰返し耐久性, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.744-749, 1991.

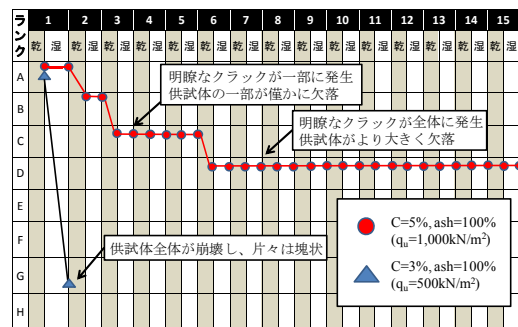


図-1 健全度評価

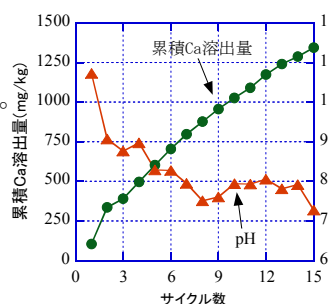


図-2 累積 Ca 溶出量及び pH とサイクル数

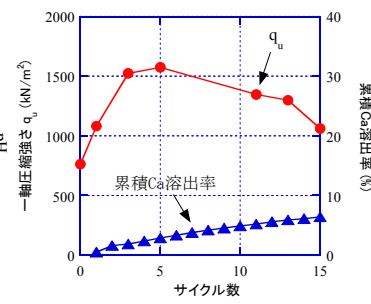
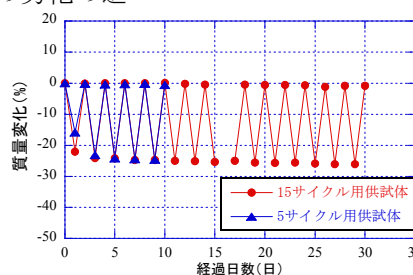
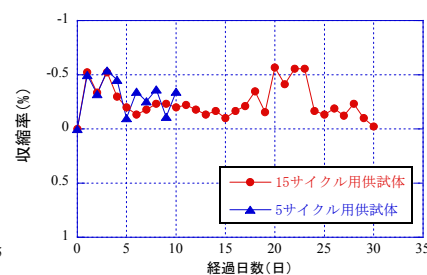


図-3 一軸圧縮強さ及び累積 Ca 溶出率とサイクル数



(a) 経過日数に伴う質量変化



(b) 収縮率(長さ変化)

図-4 経過日数に伴う質量及び収縮率の関係

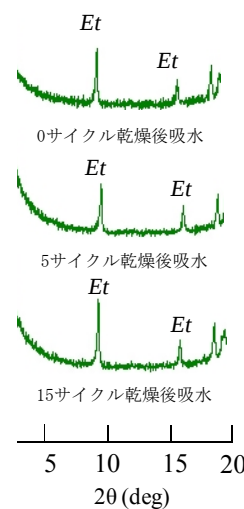


図-5 石炭灰混合材料の X 線回折図