

種々の乾湿繰返し作用を受けた石炭灰混合材料の力学特性

福岡大学工学部 学生会員 久次隆二 行徳大輝
 福岡大学工学部 正会員 佐藤研一 藤川拓朗 古賀千佳嗣
 (独)国立環境研究所 正会員 肴倉宏史

1.はじめに 火力発電所から副次的に生成される石炭灰の有効利用が求められている昨今、電力会社、大学や建設会社を中心に石炭灰混合材料の開発が進められている¹⁾。しかしながら、公共工事等で定常的に活用されるまでには至っておらず、今後も有効利用の促進に向けた取り組みが求められている。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することが利用用途の拡大に必要な不可欠であり、様々な環境劣化作用に伴う耐久性を把握しておくことが重要である。コンクリート構造物が酸性雨や硫酸塩地盤の影響を受けて劣化している事例²⁾が報告されていることを鑑み、石炭灰混合材料においても、これらの劣化に対する耐久性を把握しておくことが重要である。そこで本研究では、種々の乾湿繰返し履歴を作用させた石炭灰混合材料の力学特性について検討した結果を報告する。

2.実験概要

2-1 供試体作製方法 表-1 及び表-2 に使用する試料の物理特性及び化学組成を示す。本研究では、土質材料にカオリン粘土及び石炭灰（原灰）を、固化材に高炉セメント B 種をそれぞれ使用し、これらを混練したものを石炭灰混合材料と定義している。その際、カオリン粘土の含水比は、液性限界の 3.5 倍（ $w=181.0\%$ ）に調整し、セメントと石炭灰をカオリン粘土の湿潤重量に対し外割り配合で添加している。供試体の打設は、これらの材料を所定量混ぜ合わせ、ホバートミキサーにて 5 分間の攪拌を行った後、直径 5 cm、高さ 10cm の塩ビ製モールドに安定処理土の突固めをしない供試体作製方法 (JGS 0813) に準じて行った。また、供試体の目標強度は養生 28 日において、 $q_u=1,000\text{kN/m}^2$ となるように配合を検討した。

2-2 乾湿繰返し試験方法 乾湿繰返し試験履歴の与え方は、Wetting and Drying of Solid Wastes (ASTM D-4843)³⁾ に準拠して行った。乾湿繰返し試験は、表-3、表-4 に示す実験条件のとおり、最長で 15 サイクル実施した。今回、酸性雨及び硫酸塩地盤を模擬する為、溶媒を蒸留水、1N HCl で酸性雨を模擬した溶媒、硫酸塩濃度 1%及び 5%に設定した 4 種類の溶媒を使用した。各サイクルの乾燥・湿潤過程終了後に供試体の高さ、直径、質量を測定している。また奇数サイクルの湿潤過程終了後には、一軸圧縮試験を行っている。その際、供試体の剥離が生じたものについては、ジェットセメントを用いて端面補正（キャッピング処理）を行った。さらに、一軸圧縮試験後の破砕片を用いて、環告 46 号法試験と環告 19 号法試験を行った。

なお、各サイクルにおける供試体の劣化状態は、表-5 に示す健全度評価⁴⁾を用いてを評価を行った。

3.試験結果及び考察 図-1 にサイクル数と強度比の関係を示す。今回、0 サイクルにおける一軸圧縮強さに各実験条件でばらつきが見られたため、0 サイクルの一軸圧縮強さを正規化したものを強度比（各サイクルの $q_u / 0$ サイクルの q_u ）として整理を行っている。図中のアルファベットは表-5 に示す健全度ランクを意味しており、Case1（蒸留水）及び Case2（酸性雨）においては、サイクルの経過にともない供試体中にクラックが発生し健全度ラン

表-1 試料の物理特性

試料	カオリン粘土	石炭灰(原灰)
含水比(%)	0	0
土粒子密度(g/cm^3)	2.731	2.223
液性限界(%)	51.7	NP
塑性限界(%)	34.3	NP
砂分(2mm-75 μm)	0	21.3
シルト分(75 μm -5 μm)	35.4	69
粘土分(5 μm)	64.6	9.8
lg-loss(%)	3.11	6.64

表-2 化学組成

	石炭灰(原灰)
SiO ₂ (%)	59.5
CaO(%)	0.7
Al ₂ O ₃ (%)	24
Fe ₂ O ₃ (%)	1.7
MgO(%)	0.3
Na ₂ O(%)	0.1
K ₂ O(%)	2.6

表-3 乾湿繰返し試験方法³⁾

試験条件	乾燥過程	湿潤過程
	炉乾燥 (60±3°C)	溶媒に浸水 液固比 5
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 実験条件

	目標強度 q_{u28} (kN/m^2)	灰種	セメント 添加率 (%)	石炭灰 添加率 (%)	養生日数 (日)	溶媒
case1	1000	石炭灰(原灰)	7	100	28	蒸留水
case2						酸性雨
case3						硫酸塩1%
case4						硫酸塩5%

表-5 健全度評価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	供試体により大きく欠落
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。

クが低下するものの、15 サイクルを通して崩壊まで至ることはなかった。一方で、Case3（硫酸塩 1%）及び Case4（硫酸塩 5%）の硫酸塩溶媒に着目すると、硫酸塩濃度の増加に伴い劣化が進行し、Case4 においては供試体の表面剥離が著しく、5 サイクル以降は一軸圧縮試験を実施することが出来なかった。このことから、硫酸塩の存在は石炭灰混合材料の耐久性に影響を与える因子であると考えられる。また、いずれの条件も概ね7 サイクルにおいて強度の最大値が得られていることを鑑み、この領域の前後を強度増加域と強度低下域とし、以降の考察を行っていく。7 サイクル付近でピークを得る理由については、乾燥過程における高温養生による安全処理効果の促進⁵⁾と水浸過程による水和の促進による強度増加と乾湿繰返しに伴う劣化速度のバランスが起因しているものと捉えている。

図-2にサイクル数と伸縮率の関係を示す。ここで伸縮率とは、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。Case1 は一定値を示し、Case2 は、圧縮傾向を示している。一方、Case3 においては、強度低下域において膨張傾向が見られた。この膨張については、硫酸塩溶媒を用いたことによるエトリングタイトの析出によるものであると考えられる。過度のエトリングタイトの析出は強度低下を引き起こす原因になる⁵⁾ことが知られており、実際に Case4 において激しい表面剥離がみられたことから、供試体が大きく膨張して劣化に至ったと考えられる。次に、**図-3**にサイクル数と質量変化率の関係を示す。各条件ごとに2本のグラフを示しており、塗りつぶしは湿潤過程後の、白抜きは乾燥過程後の質量変化をそれぞれ結んだものである。いずれの条件も湿潤過程において差は見られないが、Case2 及び Case3 は Case1 と比べて乾燥と湿潤における質量変化の差、すなわち水の出入りによるポーラス化の進行が大きく、またその傾向は Case3 において顕著である。このことは、**図-4**に示すサイクル数と Ca 含有量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 含有量は低下する傾向にあり、特に劣化の進行の著しい Case3 及び Case4 の条件において Ca 含有率の低下も著しくなることを裏付けている。

以上の結果から、乾湿履歴を受けた石炭灰混合材料の劣化メカニズムは、サイクル経過に伴う乾燥収縮や体積膨張、質量変化に伴うポーラス化やスレーキングであり、これらの劣化因子は Ca の溶脱を助長することが判明した。なお、石炭灰混合材料の実施工を考慮すると、硫酸塩地盤においては、施工後に膨張に伴う強度低下や表面剥離の可能性があるため、周辺地盤と完全に被覆するなどの対策が必要である。

4.まとめ 1) 乾湿履歴を受けた石炭灰混合材料は、溶媒の影響によらず劣化の進行とともに強度低下を引き起こす。2) 劣化のメカニズムは溶媒の種類に依存し、酸性雨溶媒では乾燥収縮が、硫酸塩溶媒では膨張による剥離が要因となる。3) 硫酸塩溶媒に曝した石炭灰混合材料は、他の条件と比べて劣化の進行が著しく、その進行は硫酸塩濃度に依存すると考えられる。

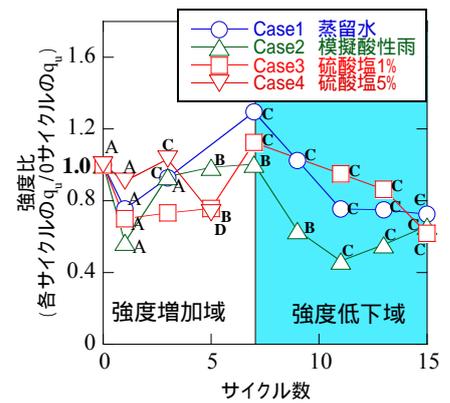


図-1 サイクル数と強度比の関係

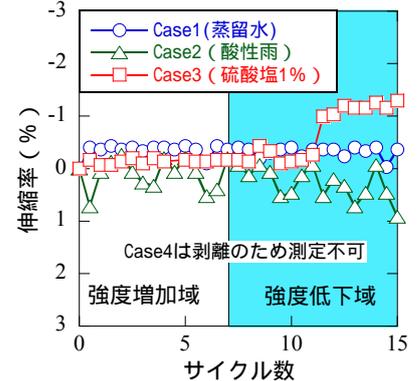


図-2 サイクル数と伸縮率の関係

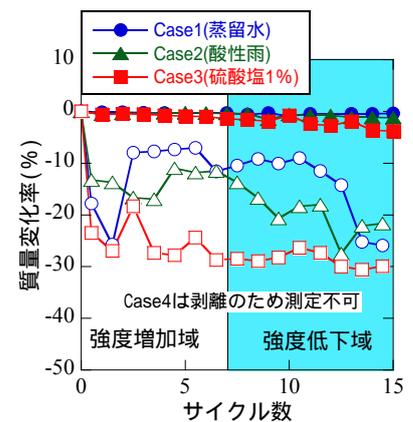


図-3 サイクル数と質量変化率の関係

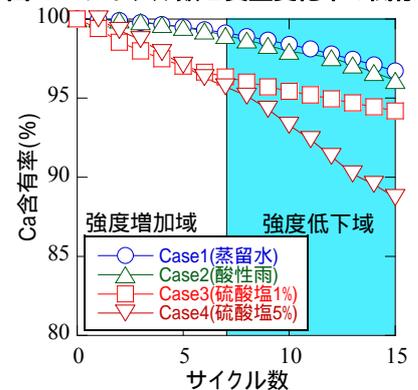


図-4 サイクル数とCa含有率の関係

【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) 吉田夏樹:硫酸ナトリウムの結晶成長によるコンクリートの劣化現象 www.gbrc.or.jp/contents/documents/.../GBRC145_731.pdf 3) Standard Test Method for Wetting and Drying Test of Solid Wastes, Designation: D4843-88, ASTM International, 2009. 4) 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.69-99, 1983. 5) 高野・酒巻:セメント系固材による安定処理土の耐久性, セ技年報 38, pp.528-531, 1984.