

低強度石炭灰混合材料の新しい耐久性評価手法の検討

福岡大学工学部 学生会員 梅田真志 松尾典映
 福岡大学工学部 正会員 佐藤研一 藤川拓朗 古賀千佳嗣

1.はじめに 東日本大震災以降、原子力発電所の稼働が停止し、その代わりとなる火力発電所の稼働が増加している。そのため、火力発電所から副次的に生成される石炭灰の発生量が増加し、さらなる石炭灰の有効利用が求められている。このような背景の中、電力会社や大学、建設会社を中心に石炭灰(飛灰)を主材とした石炭灰混合材料の開発が進められているが、産業副産物であることの環境への影響の懸念や長期耐久性が保証されていないことが足かせとなり、公共工事等において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¹⁾。一般的に石炭灰混合材料は $q_{u28}=300\sim 1,000\text{kN/m}^2$ の範囲で使用されていることが多い。しかしながら、セメント改良土等の長期的な耐久性を検討する際に用いられる乾湿繰返し試験では、 $q_{u28}=500\text{kN/m}^2$ 程度以下の低強度な石炭灰混合材料(低強度石炭灰混合材料と定義)において、初期の湿潤過程においてスレーキングが生じ、細粒化による崩壊により耐久性の評価が難しいことが判明している²⁾。そのため、本研究ではこのような強度レベルにおいてもスレーキングを生じさせず、耐久性を評価することが可能な乾湿履歴の条件を設定することを目的としており、まずは乾湿繰返し試験が実施可能な設定温度について把握すべく、乾燥温度に着目した結果について報告する。

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 本実験には、石炭灰(原灰)と土質試料としてカオリン粘土、固化材には高炉セメント B 種を使用し、これらに所定量の水を加え混練してスラリータイプの石炭灰混合材料を作製した。表-1 に使用した試料の物理特性を示す。供試体の作製において、カオリン粘土の含水比は液性限界を基準に調整を行った(液性限界の 2.5 倍の $2.5W_L=127.3\%$ 、3.5 倍の $3.5W_L=181.0\%$ 、4.5 倍の $4.5W_L=232.7\%$ にそれぞれ調整)。セメント(C)と石炭灰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。打設は、安定処理土の突き固めをしない供試体作製方法(JIS 0813)に準じて行った。また、供試体の目標強度を養生 28 日において $q_{u28}=500\text{kN/m}^2$ 程度以下、比較材料として $q_{u28}=1,000\text{kN/m}^2$ 程度となるように予備実験を経て配合条件を設定した。実験に用いた配合条件を表-2 に示す。

2-2 乾湿繰返し試験の方法 乾湿履歴の与え方は、Wetting and Drying Test (ASTM D-4843)³⁾ に準拠して行った。なお、ASTM では炉乾燥温度 60°C と定められているが、低強度な石炭灰混合材料は、湿潤過程において供試体内に侵入する水の影響で間隙中の空気が圧縮されスレーキング破壊が生じることがわかっている。そのため、本研究では乾燥温度を 40°C 、 30°C とし、乾燥過程の設定温度が乾湿繰返し試験結果に及ぼす影響について検討を行った。試験時間および乾湿繰返し試験の 1 サイクルの行程については表-3 に示すとおりであり、一連の過程を最長で 15 サイクル実施した。各サイクルの乾燥・湿潤過程終了後には供試体の高さ、直径、質量を測定している。初期の力学特性の把握を行うために一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行い、奇数サイクルの湿潤過程終了後には針貫入試験(JIS S 3008)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⁴⁾を用いて評価している。

3. 実験結果及び考察

3-1 設定温度の違いによる供試体の破壊状況 表-5 に設定温度の違いによる供試体の破壊状況を示す。この表より、設定含水比に関係なく $q_{u28}\approx 750\text{kN/m}^2$ 程度の強度があると全ての温度でスレーキングが生じず、耐久性の評価が可能であった。しかしながら、 $q_{u28}=500\text{kN/m}^2$ 程度以下の低強度な石炭灰混合材料ではほぼ全ての供試体でスレーキング破壊が生じ、耐久性の評価が難しいことが判明した。また、図-1 に乾湿繰返し試験を行った全ての条件での質量低下率を示す。ここで質量低下率とは、初期状態の供試体の質量と乾湿繰返し試験 1 サイクル目の乾燥過程終了後

表-1 石炭灰の物理特性

試料	カオリン粘土	石炭灰
土粒子密度(g/cm^3)	2.731	2.234
含水比(%)	0	1.33
液性限界(%)	51.7	N.P.
塑性限界(%)	34.3	N.P.
砂分(2mm-75 μm)	0	2.9
シルト分(75 μm -5 μm)	35.4	68.87
粘土分(5 μm)	64.6	28.23
lg-loss(%)	3.11	11.58

表-2 実験条件

	目標強度 q_u (kN/m^2)	セメント添加率 C (%)	設定含水比 w (%)	石炭灰添加率 ash (%)	養生日数 (日)
Case1	500	3	2.5 W_L 3.5 W_L 4.5 W_L	100	28
Case2					
Case3					
Case4		5			
Case5					
Case6					
Case7	1000	7			
Case8					
Case9					

表-3 乾湿履歴の与え方

試験条件	乾燥過程	湿潤過程
	炉乾燥(30, 40 \pm 3 $^\circ\text{C}$)	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 健全度評価基準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壊 (~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示す。

の供試体の質量の比を意味している。この質量低下率に着目すると設定 30℃と 40℃では 2~4%程度の差しか生じていないことが分かる。しかしながら、この温度範囲においてスレーキングに伴う細片化の閾値があることから、質量の変化は石炭灰混合材料の耐久性において二次的な因子であり、細片化が進展する過程での温度の影響に伴う空隙構造や吸水率の変化によるものが主要因と考えられるが、この点については今後更なる検討が必要である。以上の結果から、低強度においてもスレーキングを生じさせず、耐久性を評価することが可能な乾湿履歴の設定温度を 30℃と決定し、後述する乾湿繰返し試験を行った。

3-2 健全度評価による劣化の把握 図-2 に各条件における目視の健全度評価⁴⁾を行った結果を示す。Case2 では 3 サイクルまで劣化は見られず、その後急激な劣化の進行が見られた。一方、Case3 においては、1 サイクル乾燥過程終了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、スレーキングに伴う崩壊・細粒化が見られ、その後は試験を行うことができなかった。Case5 においてはほとんど劣化の進行が見られず、安定した様子を示した。Case6 においては前半に局部的な表面剥離が見られたものの、その後は劣化の進行があまり見られず、Case5 と同様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あるいはセメント添加量が起因していると考えられ、低強度石炭灰混合材料だと乾湿繰返しに対する抵抗性が劣ることを表わしている。

3-3 乾湿繰返し試験に伴う物理・力学特性の変化 図-3 に 3.5W_L 及び 4.5W_L の条件(Case2, 3, 5, 6)で作製した石炭灰混合材料の、乾湿繰返し試験によって得られた質量変化、換算一軸圧縮強さの実験結果を示す。なお、換算一軸圧縮強さは、貫入抵抗値から一軸圧縮強さを換算して求めたものであり、両者には一義的な関係があることが知られている⁵⁾。また、(a)c=3%のグラフについては 6 サイクル目の湿潤過程で供試体が崩壊し、以降は試験を継続することができなかった。(b)c=5%のグラフについてはいずれの条件においても強度低下は見られず、サイクル数の増加に伴い若干強度は増加している傾向にあることがわかる。このような乾湿繰返し試験のサイクル初期に見られる強度増加の要因は、乾燥過程における養生による水和の促進と水浸過程による水和の促進によるものと捉えている。また、質量変化においては、どの条件もサイクル数が増加していくと変化率が減少する傾向にあることから、乾湿繰返しに伴い、ポーラス化やスレーキング等の物理劣化が進行していることが唆される。

4. まとめ 1)乾燥過程における乾燥温度は、劣化の促進に寄与する重要な因子であり、耐久性を評価し得る適切な温度領域が存在することが明らかとなった。2)今回用いた配合では、乾燥温度 30℃においてスレーキングが生じることなく乾湿繰返し試験を実施することが可能であることが判明した。今後は、実地盤に打設した低強度な石炭灰混合材料との比較を行い、耐久性を評価し得る適切な設定温度やサイクル数について検討を行っていく必要がある。

表-5 設定温度による供試体の破壊状況

	セメント添加率 (%)	設定含水比 (%)	q _{0.28} (kN/m ²)	炉乾燥温度(℃)	
				30	40
Case1	3	2.5W _L	541.6	○	×
Case2		3.5W _L	409.6	○	×
Case3		4.5W _L	293.2	×	×
Case4	5	2.5W _L	739.9	○	○
Case5		3.5W _L	566.5	○	×
Case6		4.5W _L	491.3	○	×
Case7	7	2.5W _L	971.0	○	○
Case8		3.5W _L	855.9	○	○
Case9		4.5W _L	737.3	○	○

※表中の×は全て 1 サイクルの湿潤過程で崩壊

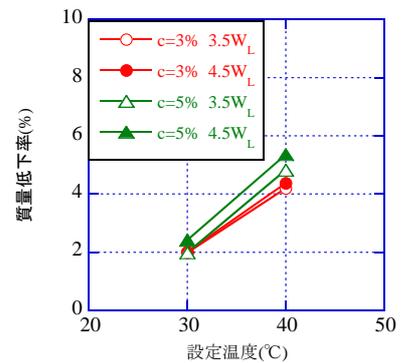


図-1 設定温度と質量低下率の関係

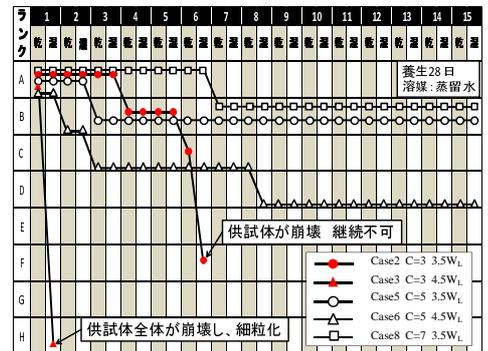


図-2 健全度評価結果

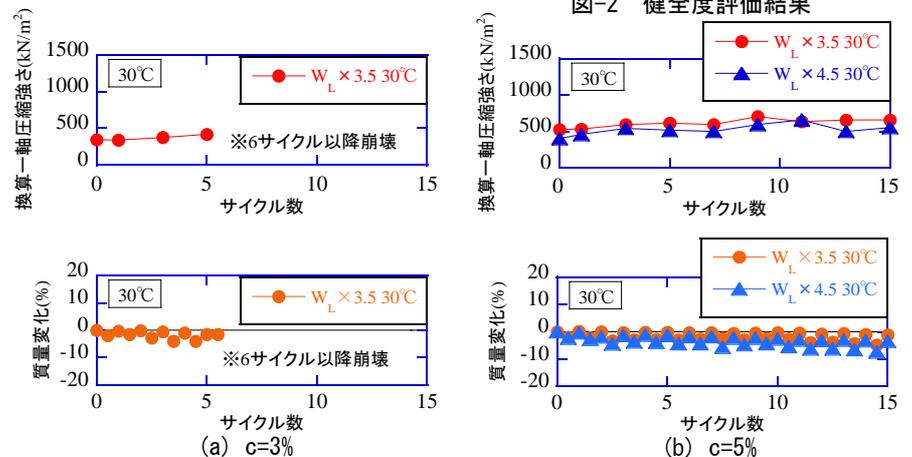


図-3 乾湿繰返し試験結果

【参考文献】1) (公)土木学会：石炭灰有効利用技術について一循環型社会を目指して一、土木学会全国大会・研究討論会、報告書、2003.p29 2) 日隈ら：乾湿繰返し履歴を受けた石炭灰混合材料の耐久性、土木学会西部支部発表会、III-019,pp385-386,2012. 3) Standard Test Method for Wetting and Drying Test of Solid Wastes, Designation: D4843-88, ASTM International, 2009. 4) 森ら：繊維質固化処理土の乾湿繰返し試験による耐久性に関する実験的研究、資源と素材(Shigen-to-sozai) Vol.121, pp37-43, 2005. 5) 中村ら：セメント安定処理土の耐久性に関する室内試験、港湾空港技術研究所試料, No.1128, pp5-6, 2006.