

各種暴露及び乾湿繰返し試験を用いたスラリー型石炭灰混合材料の耐久性評価

福岡大学大学院 学生会員 豊永麻依
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 東日本大震災発生以降、火力発電所の稼働が増えことに伴い、石炭灰の発生量が増加している。そこで、石炭灰を主材とした石炭灰混合材料の更なる有効利用が求められており、電力会社、大学および建設会社等で開発が進められている^{1),2),3)}。石炭灰混合材料の種類には、固化体破砕材、固化体造粒材、スラリー材、塑性材等があり、施工実績も報告されているが公共事業等での利用をさらに推し進めることが求められている。しかしながら、長期的な力学特性、耐久性、環境安全性の評価については、ほとんどデータの蓄積がなく、今後、石炭灰混合材料の有効利用において重要な課題となっている。そこで、本研究ではまず、締固めが不要で狭隘な部分への埋戻しに優れているスラリー型石炭灰混合材料に着目し、耐久性の評価を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 供試体の作製方法 実験には、石炭灰 D(JIS 灰)を、固化材には高炉セメント B 種を用い、これらを混合しスラリー型石炭灰混合材料(以後、スラリー材)の供試体を作製した。表-1, 2 に石炭灰 D(JIS 灰)の物理特性、化学組成式を、表-3 に供試体配合条件を示す。養生日数 28 日における目標強度を $q_{0.28}=300\sim 1000\text{kN/m}^2$ 程度となるようにスラリー材 1m^3 あたりセメント添加量を 50, 75, 100kg/m^3 に固定し、フロー値が $220\pm 20\text{mm}$ になるように予備練り試験を経て、配合を決定した。供試体の打設は、石炭灰 D(JIS 灰)とフロー値に応じて水を加え 5 分間ホバートミキサーにて攪拌を行い、さらにその後高炉セメント B 種を加えて 5 分間攪拌を行った。その後、直径 5 cm、高さ 10cm の塩ビ製モールドに流し込んで打設した。翌日整形、翌々日に脱型し、供試体をラップに包み 20°C 一定の恒温室内で 7 日間養生を行った。

2-2 暴露試験方法 7 日間養生させた供試体を用いて、種々の暴露条件下(気中暴露、水浸暴露、海水暴露)で実験を行った。気中暴露では供試体を $20\pm 3^\circ\text{C}$ の恒温室内でラップに包み養生を行った。水浸暴露には蒸留水を、海水暴露では二次処理された海水を使用した。水浸及び海水暴露試験は、各種暴露水を満たした水槽内に供試体を静置し、 $20\pm 3^\circ\text{C}$ の恒温室内で養生を行った。表-4 に暴露試験期間を示す。また、所定の暴露期間経過後、針貫入試験(JIS S 3008)と一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行った。

2-3 乾湿繰返し試験方法 28 日間養生させた供試体を用いて、乾湿繰返し試験を行った。乾湿繰返し試験の履歴の与え方は、表-5 に示す Wetting and Drying of Solid Wastes(ASTM D-4843)⁴⁾を参考にした。乾燥過程では、 $60\pm 3^\circ\text{C}$ に保った乾燥炉乾に 24 時間静置し、その後 $20\pm 3^\circ\text{C}$ 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(本サンプルにおいては $L/S=5$)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、奇数サイクルの湿潤過程終了後には針貫入試験を行った。また、各サイクル終了時の供試体の状況については表-6 に示す目視による健全度評価⁴⁾を用いて劣化の進行を把握した。

表-1 試料の物理特性

試料	石炭灰D
土粒子密度(g/cm^3)	2.347
含水比(%)	0
液性限界(%)	N.P.
塑性限界(%)	N.P.

表-2 化学組成式

化学組成式	石炭灰D
$\text{SiO}_2(\%)$	58.2
$\text{CaO}(\%)$	7.9
$\text{Al}_2\text{O}_3(\%)$	20
$\text{FeO}(\%)$	5.0
$\text{MgO}(\%)$	1.7
$\text{Na}_2\text{O}(\%)$	0.5
$\text{K}_2\text{O}(\%)$	1.9

表-3 配合条件

セメント量 (kg/m^3)	石炭灰 (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	湿潤密度 (g/cm^3)	フロー値 (mm)	S/C	W/C
50	985	564	1.599	222	19.7	11.3
75	975	560	1.610	219	13.0	7.5
100	960	558	1.618	212	9.6	5.6

※()内はセメント添加率を示している

表-4 暴露試験期間

暴露条件	セメント添加量(kg/m^3)	暴露期間(日)
気中暴露	50	0, 7, 28, 56, 91, (182, 365)
水浸暴露	75	
海水暴露	100	

※7日養生後暴露試験開始

表-5 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 ($60\pm 3^\circ\text{C}$)	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	

※28日養生後暴露試験開始

表-6 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。

キーワード 石炭灰混合材料, 暴露試験, 乾湿繰返し試験, 耐久性

連絡先 〒814-0180 福岡市城南區七隈 8-19-1 福岡大学工学部 TEL092-871-6631(ext.6464)

3. 実験結果及び考察

3-1 暴露条件下における力学特性

種々の暴露条件下において実施した一軸圧縮試験の結果を図-1に示す。いずれの条件においても、セメント添加率及び養生日数の増加に伴い一軸圧縮強度が増加していることが分かる。また、気中・水浸暴露試験での強度発現は小さいが、海水暴露試験では強度発現が大きいことも分かる。この理由として、固化材に高炉セメントを使用していることから海水に浸漬することでアルカリ刺激を受けスラグの潜在水硬性により、強度が大きく発現したと考えられる。次に、暴露環境下における

セメント安定処理土の劣化が表面から進行⁵⁾することを考慮し、暴露面付近の劣化の状況を把握すべく針貫入試験を行った。セメント添加量 75kg/m^3 の結果を図-2に示す。いずれの条件においても養生日数 91 日まで劣化傾向は見られなかった。しかしながら、暴露期間が半年以上経過すると劣化が進行するという報告⁶⁾もあることから、引き続き実験を行っていく予定である。

3-2 乾湿繰返しによる耐久性評価 表-7に健全度評価を行った結果を示す。セメント添加量 75 、 100kg/m^3 では、表面劣化はあまり見られなかったが、セメント添加量 50kg/m^3 については、乾湿 2 サイクルを超えた辺りから徐々に劣化が確認された。次に、貫入抵抗と一軸圧縮強さの関係を図-3に示す。貫入抵抗と一軸圧縮強さには相関性が見られたことから、以降の結果の整理には、針貫入試験の結果から換算した一軸圧縮強さを用いている。図-4に乾湿繰返し試験によって得られたサイクル数と一軸圧縮強さの関係を示す。なお、図中にはセメント添加量 $C=50\text{kg/m}^3$ における暴露期間 91 日の気中・水浸暴露の一軸圧縮強さも併せて示している。乾湿繰返し試験による強度変化は、同一セメント添加量($C=50\text{kg/m}^3$)において、気中暴露や水浸暴露と同等な一軸圧縮強さを有することが分かる。また、気中暴露や水浸暴露では、暴露期間 91 日においても強度は増加傾向にあるが、乾湿繰返し試験においては 5 サイクル付近でピークを示していることから、暴露試験に比べて劣化の進行が早いことが分かる。今後さらに暴露試験を継続し、乾湿繰返し試験との関係性についてデータの蓄積を行っていく予定である。

4. まとめ 1) 暴露環境下に曝したスラリー材は、いずれの条件においても暴露 91 日までにおいて劣化の進行は見られなかった。2) 今回設定した暴露条件では、スラグの潜在水硬性により海水暴露において著しい強度増加が見られた。3) スラリー型の石炭灰混合材料の長期的な耐久性を検討する場合、各種暴露試験に比べて乾湿繰返し試験は劣化の進行が早いことが示された。

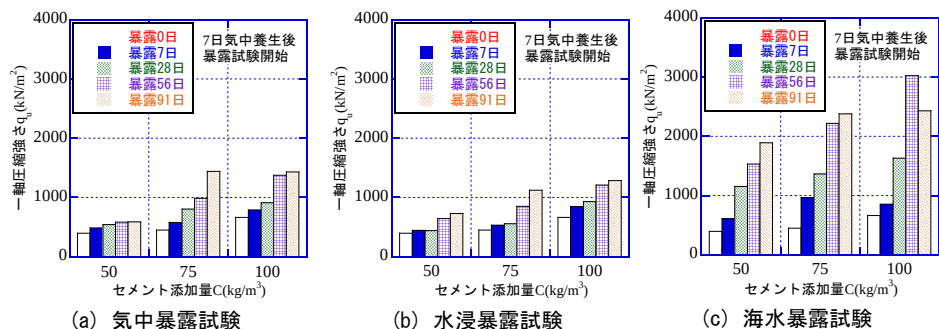


図-1 暴露試験における一軸圧縮試験結果

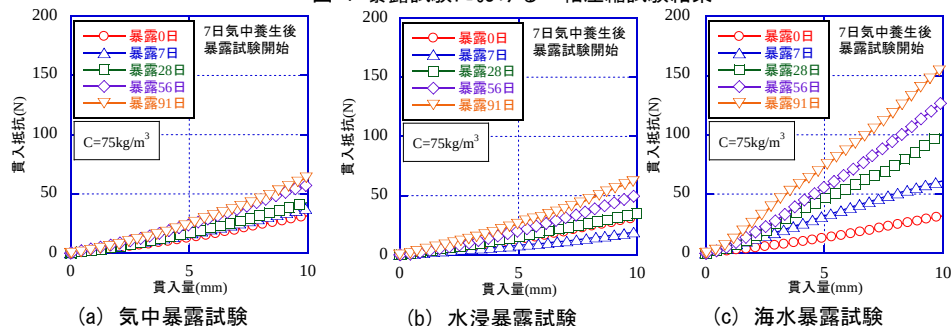


図-2 暴露試験における針貫入試験結果

表-7 健全度評価

ラン	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ラン	乾	湿	乾	湿	乾	湿	乾	湿	乾	湿	乾	湿
A	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
B	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
C	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
D	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
E	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
F	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
G	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
H	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

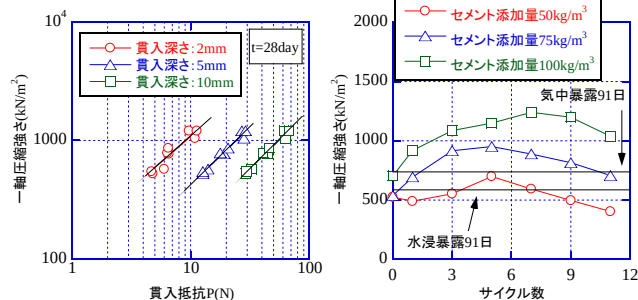


図-3 貫入抵抗と一軸圧縮強さの関係

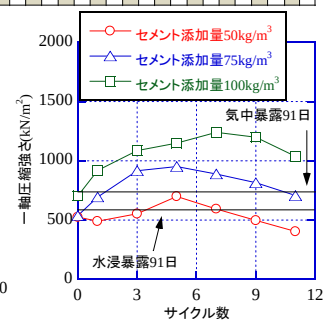


図-4 サイクル数と一軸圧縮強さ

〈参考文献〉1) (財)石炭エネルギーセンター, 港湾工事に於ける石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン, pp.2-11, 2011. 2) (財)石炭エネルギーセンター, 石炭灰混合材料有効利用ガイドライン(震災復興資料編), pp.1-3, 2014. 4) (財)石炭エネルギーセンター, 石炭灰混合材料有効利用ガイドライン(高規格道路盛土編), pp.3-7, 2015. 3) Standard Test Method for Wetting and Drying Test of Solid Wastes, Designation: D4843-88, ASTM International, 2009. 5) 林宏親・西本聡・大石幹太・寺師昌明: セメント安定処理土の長期強度特性 その2-室内実験による検討, 北海道開発土木研究所月報, No.612, pp.28-36, 2004. 6) 中村健・北詰昌樹: 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資料, No.1128, 2006.