

種々の暴露条件下におけるスラリー型石炭灰混合材料の耐久性の検討

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 我が国において 2011 年に起こった東日本大震災以降、火力発電所の稼働が増えたことにより、石炭灰の発生量が増加している。これまで石炭灰は、石炭灰混合材料として港湾部を中心に有効利用がなされていたが、発生量の増加に伴い用途開発が喫緊の課題に上げられ、今後更なる有効利用が求められる。石炭灰混合材料の種類には、塑性材、スラリー材、固化体破碎材、固化体造粒材^{1),2),3)} 等があり、施工実績も報告されているが、公共事業等において定常的な活用を推し進めることが重要である。しかしながら、これらの長期的な力学特性、耐久性、環境安全性の評価については、データの蓄積が少なく重要な課題となっている。そこで本報告では、締固めが不要で狭い箇所の充填埋め戻しに優れているスラリー型石炭灰混合材料(以下、スラリー材)に着目し、種々の環境を模擬した暴露条件下において長期的な力学・溶出特性の検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 実験条件及びスラリー材の作製方法 実験には、石炭灰(JIS 灰)を、固化材には高炉セメント B 種を用いており、これらを所定の水と混ぜ合わせて供試体を作製した。表-1 に石炭灰(JIS 灰)の物理特性、表-2 に化学組成を示す。試料の力学特性は、一軸圧縮試験(JIS A 1216)と針貫入試験(JIS S 3008)の 2 種類を用いて評価を行っている。スラリー材の供試体の配合条件を表-3 に示す。養生日数 28 日における目標強度を $q_{u28}=300 \sim 1000 \text{ kN/m}^2$ 程度となるようにスラリー材 1 m^3 あたりのセメント添加量を 50, 75, 100 kg/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。供試体作製後は、翌日に整形、翌々日に脱型し、ラップに包み恒温室で養生を行った。

2-2 暴露試験方法 供試体作製後、7 日間ラップに包み養生させた供試体を用い、気中、水浸、海水暴露で養生を行った。水浸、海水暴露との比較のため行った気中暴露では、供試体を $20 \pm 3^\circ \text{C}$ の恒温室でラップに包み養生を行い、地下水を模擬した水浸暴露では蒸留水を用いた。また港湾付近を模擬した海水暴露では、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 $20 \pm 3^\circ \text{C}$ の恒温室で養生させ溶媒は定期的に交換を行っている。表-4 に暴露試験期間を示す。

2-3 利用有姿による溶出試験方法 石炭灰混合材料は、道路路盤材や裏込材といった覆土される環境での利用では摩耗や粉塵飛散はないと考えられることから、本報告では、溶出試験に利用有姿による試験(JIS K 0058-1)を用いた。所定の暴露期間経過後一軸圧縮試験を行った後の試験片を用いて、検討を行っている。本研究で対象とした重金属類は、F (フッ素)、B (ホウ素)、Pb (鉛)、Cr(VI) (六価クロム)、Ca (カルシウム) の 5 つを測定した。F (フッ素) は、イオンクロマトグラフィー(ICS-1000: ダイオネクス社製)を用い、B (ホウ素)、Pb (鉛)、Ca (カルシウム) においては、ICP プラズマ発光分析装置 (ICP7000-Ver.2: 島津製作所製)、Cr(VI) (六価クロム) の分析には分光光度系(SHIMAZU 社製 UVmini-1240 基本測定システム)を用いた。

3. 試験の結果及び考察

3-1 スラリー材の力学特性の把握 養生 28 日におけるスラリー材の一軸圧縮試験の結果を図-1 に示す。セメント添加率の増加に伴い、一軸圧縮強さも増加することが分かる。また、目標強度を全ての配合条件において満たしていることが分かる。

表-1 試料の物理特性

試料	石炭灰
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.
細粒分含有率(%)	99.7

表-2 化学組成

化学組成式	石炭灰
$\text{SiO}_2(\%)$	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

セメント添加量(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)
50	985	564	1.599	222
75	975	560	1.610	219
100	960	558	1.618	212

表-4 暴露試験期間

暴露条件	種類	暴露期間(日)
気中 水浸 海水	スラリー材	0, 7, 28, 56, 91, 182, 365

※7日養生後暴露試験開始

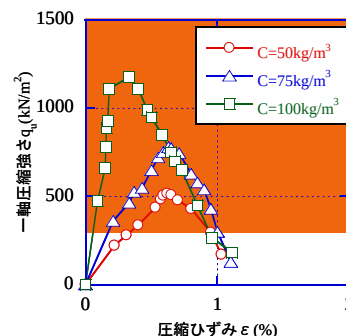


図-1 養生 28 日における一軸圧縮試験結果

3-2 暴露試験における力学特性

図-2 に暴露試験における一軸圧縮試験の結果を示す。セメント添加量及び暴露日数の増加に伴い強度が増加していることが分かる。水浸暴露試験では、水に浸漬させることで水和反応の促進に寄与し、海水暴露では、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硬化、及びポズラン反応により強度が発現したと考えられる。

しかしながら、水浸、海水暴露においては暴露日数365日で、全ての条件で強度低下を示した。また、図-3 に暴露日数と変形係数の関係を示す（以下、同じ

挙動を示した為セメント添加量 75kg/m^3 のみ）。気中暴露、水浸暴露及び海水暴露においては、暴露日数の増加にともない変形係数も増加していることが見てとれる。しかしながら一軸圧縮試験結果と同様に水浸暴露、海水暴露においては暴露日数91日から、変形係数が低下する傾向を示した。強度、変形係数の低下した要因は、図-4 に示す累積Ca溶出結果より、供試体中のカルシウムの溶出が考えられる。また、暴露日数が増加すると水浸暴露より海水暴露の方がカルシウムの溶出が顕著に見られた。その理由として海水暴露においては、海水内に含まれるマグネシウムがカルシウムに置換した影響により、強度が水浸暴露よりも低下したと考えられる⁴⁾。ここで、劣化の状況を把握すべく行った暴露365日における針貫入試験結果を図-5 に示す。今回行った針貫入試験では、同一供試体に上部から10mm間隔で測定を行い貫入量が10mm時の貫入抵抗値を示している(図-6)。一軸圧縮試験結果を裏付けるように、供試体深部では海水暴露の貫入抵抗値が他の条件に比べて大きいことが分かる。しかしながら、暴露面に近い供試体上、下部分において貫入抵抗値を示さなかったことから、徐々に劣化が進んでいることが分かる。

3-3 利用有姿による溶出特性の把握 溶出試験結果を表-4 に示す。いずれの条件においてもF(フッ素)、Pb(鉛)、Cr(VI)(六価クロム)は定量下限値以下であった。B(ホウ素)については、暴露日数の増加に伴い溶出量も増加したが、土壤環境基準値以下であった。しかしながら、時間の経過に伴い、環境安全品質基準を上回る溶出が見られるという報告^{5,6)}もあるため、引き続き長期的なデータの蓄積を行っていく予定である。

4. まとめ 1) セメント添加量及び暴露日数の増加に伴い強度は増加するが、水浸、海水暴露においては劣化が進行し、暴露91日以降、一軸圧縮強度が低下する。2) いずれの条件においても今回測定した重金属類は、暴露182日まで環境安全品質基準を満足していることが明らかとなった。

〈参考文献〉1) (財)石炭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, 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(震災復興資材編), pp.1-3, 2014. 3) (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. 4) 原弘行・末次大輔・林重徳・松田博：海水に曝露したセメント処理土の劣化機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集C, Vol.69, No.4, pp.469-479, 2013. 5) 林ら：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資料, No.1128, 2006.

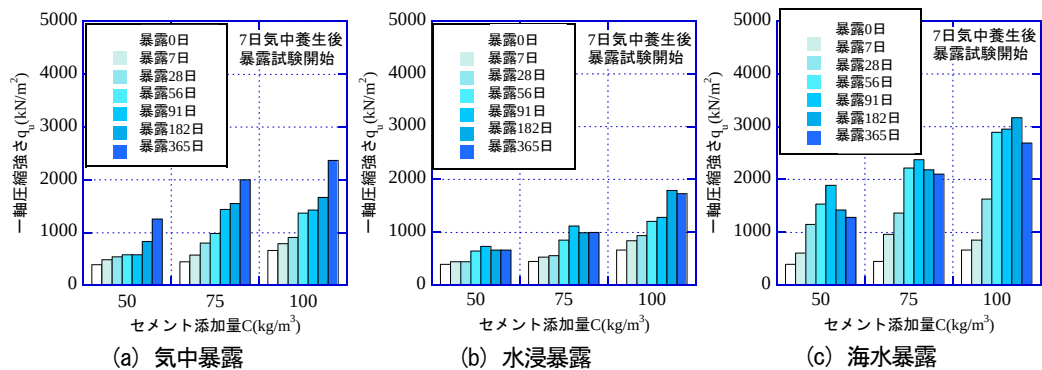


図-2 一軸圧縮試験結果

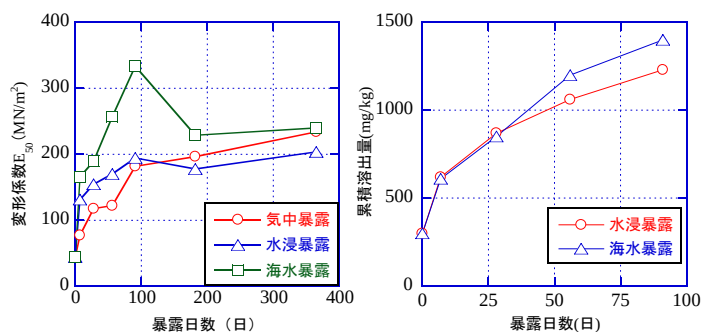


図-3 暴露日数と変形係数の関係

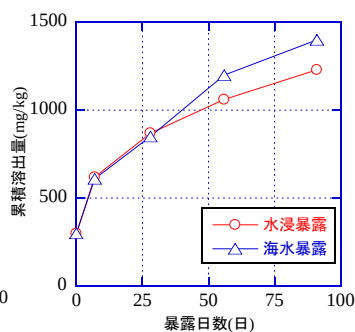


図-4 Ca 溶出結果

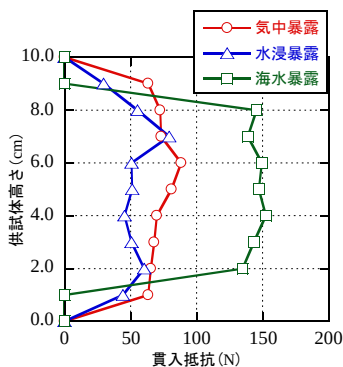


図-5 暴露365日における針貫入試験結果

期間(日)	0	7			28			56			91			182		
種類	-	気中	水浸	海水	気中	水浸	海水	気中	水浸	海水	気中	水浸	海水	気中	水浸	海水
pH	11.1	11.4	11.2	10.1	10.9	11.1	9.4	11.2	10.9	9.9	11.2	10.9	9.9	11.2	10.9	9.9
Cr ⁶⁺	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
B	0.05	0.02	0.02	0.06	0.02	0.04	0.08	0.02	0.05	0.14	0.03	0.09	-	0.07	-	-
F	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Pb	N.D.	-	-	-	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

表-4 溶出試験結果

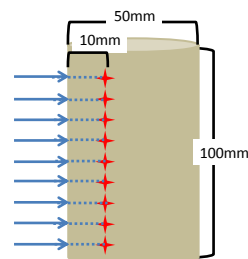


図-6 針貫入試験イメージ図