

様々な環境下におけるスラリー型石炭灰混合材料の劣化特性

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 昨今、石炭灰は石炭灰混合材料^{1), 2), 3)}として港湾部を中心に有効利用がなされているが、発生量の増加に伴う用途開発が喫緊の課題に上げられている。石炭灰混合材料の有効利用を進めていくには、品質の保証や周辺環境への安全性のみならず長期にわたる材料の耐久性の担保が重要である。著者ら⁴⁾は、これまで石炭灰混合材料の利用用途の拡大を目的に、長期にわたる種々の暴露条件下における材料の力学・溶出特性について一連の検討を行っている。その結果、石炭灰混合材料(塑性材)においては、蒸留水と海水にそれぞれ浸漬させた場合、養生日数に伴う強度発現が異なることを明らかにしている。そこで今回の検討では、スラリー型石炭灰混合材料(以下、スラリー材)に着目し、長期強度特性及び劣化の進行状況について報告する。

2. 実験概要

2-1 実験条件 実験には、石炭灰(JIS 灰)及び固化材(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直径 5cm、高さ 10cm の塩ビ製モールド供試体を作製した。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 $q_{u28} \approx 300 \sim 1000 \text{ kN/m}^2$ 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 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、配合条件を決定した。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内で養生を行った。

2-2 暴露試験方法 供試体作製後、7 日間気中養生させた供試体を用い、様々な自然環境を模擬するためラップを外し水浸及び海水養生を行った。地下水や降雨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加圧式の濾過を行い、浮遊物を撤去した海水を使用した。ここで、溶媒は固液比や体積比などは考慮しておらず、供試体の上部が十分に水で覆う程度に浸漬させており、月に一回溶媒の交換を行っている。

2-3 劣化の把握方法 塩ビ製モールドを用いて 7 日間養生させた供試体を用い、上面のみを開放させた状態(写真-1)で水浸、海水暴露で養生を行った。溶媒に関しては、2-2 と同様のものを使用した。供試体上端面からの深さ方向の強度変化を把握するため供試体を半割にし、図-1 に示すように供試体上端面から 10mm ピッチに針貫入試験を行い、そこから換算一軸圧縮強度を求めた。

3. 試験の結果及び考察

3-1 基本力学特性の把握 養生 7 日及び養生 28 日におけるスラリー材の一軸圧縮試験の結果を図-2 に示す。養生日数の増加に伴い、一軸圧縮強さと剛性の増加が見られた。また、目標強度である $q_{u28} = 300 \text{ kN/m}^2$ 程度以上を全ての配合条件において満たしていることから、この配合条件を用いて、次節に示す暴露試験による劣化進行の把握を行った。

3-2 暴露条件の違いにおける力学特性の把握 図-3 に、暴露条件下の一軸圧縮試験及びカルシウム溶出結果を示す。暴露日数の増加に伴い、一軸圧縮強さが増加していることが分かる。水浸暴露では、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、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、いずれの条件ともに暴露日数 91 日以降において、強度が低下する傾向にあることが分かる。一般的に、水酸化カルシウムが溶脱すると供試体内部が多孔化し劣化を促

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.
細粒含有率(%)	99.7

表-2 化学組成

化学組成式	石炭灰
SiO_2 (%)	58.2
CaO (%)	7.9
Al_2O_3 (%)	20
FeO (%)	5.0
MgO (%)	1.7
Na_2O (%)	0.5
K_2O (%)	1.9

表-3 スラリー材の配合条件

セメント添加量 C (kg/m^3)	石炭灰 (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	湿潤密度 (t/m^3)	フロー値 (mm)
50 (5.1%)	985	564	1.599	222

※()内は石炭灰に対するセメント質量を百分率で表している。



写真-1 供試体状況

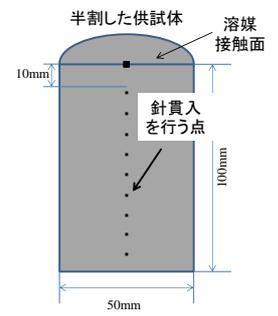


図-1 針貫入試験の計測位置

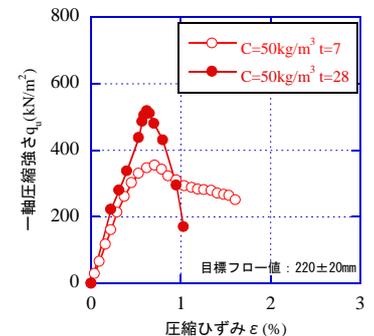
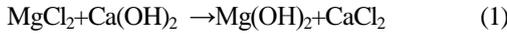


図-2 一軸圧縮試験結果

進させる⁵⁾ことから、今回の劣化の要因として、供試体内のカルシウムの溶出が原因と考えられる。カルシウム溶出量は水浸暴露より海水暴露の方が多くみられた。その理由として、セメント処理土と海水が接触することで以下の反応式を示すことが報告⁶⁾されている。



(1), (2)より、ブルーサイトの生成とともに水酸化カルシウムが塩化カルシウムや硫酸カルシウムの形態となって溶出することを示すものである。今回実験で用いた海水にも多くの Mg^{2+} を含んでいると考えられるため、供試体を海水に曝すことで上記の反応が起き、ブルーサイトと呼ばれる不溶解性の水酸化マグネシウムが塩化カルシウムや硫酸カルシウムを生成し溶出していると推察される。この溶出現象が、水浸暴露よりも多くのカルシウムを溶出させる要因であり、供試体内部を多孔化させることで強度低下を引き起こしたと考えられる。図-4 に暴露日数と変形係数の関係を示す。全条件において、暴露日数が増加することで変形係数も増加傾向にあるが、暴露試験で強度低下を示した暴露 91 日以降において、低下あるいは収束する傾向を示した。

3-3 暴露条件の違いにおける劣化深さの把握

図-5 に今回実験に用いた供試体の養生 28 日における貫入抵抗値と一軸圧縮強さの関係を示す。貫入抵抗値と一軸圧縮強さには相関性が見られたことから、以降劣化の結果の整理には、針貫入試験の結果から換算した換算一軸圧縮強さを用いることとする。接触面からの距離と一軸圧縮強さの関係を図-6 に示す。図-3 に示す水浸、海水暴露試験結果と比較すると、同日数における一軸圧縮強さは同程度であることが分かる。また、溶媒に蒸留水を用いた場合における暴露日数 91 日では溶媒接触面より 2cm 深部まで、海水を用いた暴露日数 56 日においては溶媒接触面より 2cm 深部、暴露日数 91 日においては溶媒接触面より 4cm 深部まで、僅かではあるが供試体深部より強度が低いことが見て分かる。これらのことから、溶媒との接触面より劣化は進行し暴露日数の増加に伴い供試体深部まで広がって行くことが分かる。これは上述したように、カルシウムが供試体表面から溶脱し組織が粗となり溶媒接触面から強度低下したと考えられる。以上の結果より、図-3 に示す暴露試験において 91 日以降に強度低下を起こした理由についても、針貫入試験で確認されたように表面劣化が深部まで進行し、強度が低下したと考えられる。

4. まとめ 1)スラリー型石炭灰混合材料は、水浸・海水のいずれの暴露試験においても、暴露日数 91 日以降に強度低下を引き起こす。2)強度低下の主要因はカルシウムの溶出であり、水浸暴露に比べ海水暴露の方がカルシウムの溶出量は多くなる。3)劣化の進行は、供試体表面から深部に向かって進行し、海水暴露の方が進行は早くなる。以上のことから、スラリー型石炭灰混合材料を利用する場合、水あるいは海水に直接接触するような場合での施工は、長期的な耐久性の点から注意を払う必要があることが示された。

<参考文献> 1) 一般財団法人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, 2011. 2) 一般財団法人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), 2014. 3) 一般財団法人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) 豊永ら: 第 12 回環境地盤工学シンポジウム, pp.155-160, 2017. 5) 寺師ら: 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), 港湾技術研究所報告, 第 22 巻, 第 1 号, pp.69-96, 1983. 6) 原ら: 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, pp469-479, 2013.

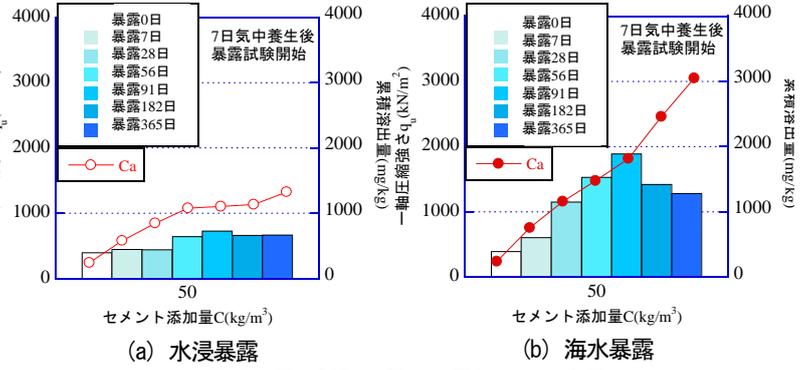


図-3 暴露試験結果及び累積 Ca 溶出量

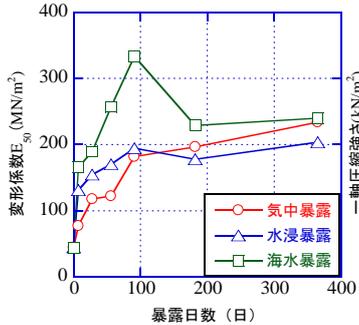


図-4 暴露日数と変形係数

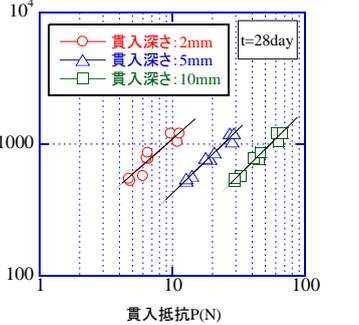


図-5 貫入抵抗値と一軸圧縮強さの関係

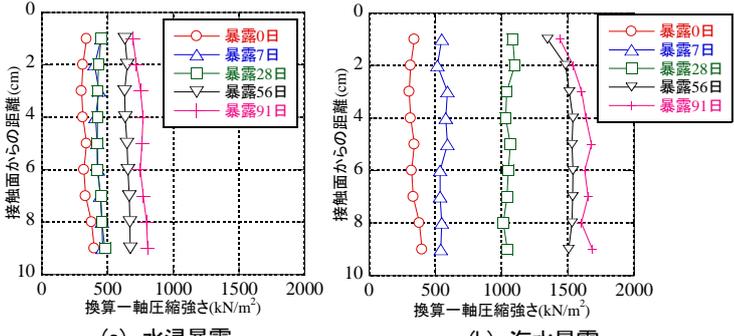


図-6 接触面からの距離と換算一軸圧縮強さ