

石炭灰・製鋼スラグ混合破碎材料の耐久性および長期安全性評価

福岡大学大学院 学生会員 池田 茄生  
 福岡大学工学部 正会員 佐藤 研一 藤川 拓朗 古賀 千佳嗣  
 日鉄スラグ製品(株) 柳 正人

1. はじめに 副産物である石炭灰や製鋼スラグは生成量が多く、定常的な有効利用を推進する必要がある材料である<sup>1), 2)</sup>。現在、石炭灰を用いたリサイクル材である石炭灰混合破碎材<sup>3)</sup>は、修正 CBR やすりへり減量の面から、主に下層路盤材としての利用が進められている。しかしながら、利用用途の拡大に向け、今後は上層路盤材や土木資材への適用など更なる検討が求められている。そこで本研究では、石炭灰混合破碎材の利用用途拡大を目指し、骨格構造の強化や重金属等の溶出抑制効果に



図-1 石炭灰・製鋼スラグ混合破碎材の製造過程

着目し、石炭灰に製鋼スラグを混合した石炭灰・製鋼スラグ混合破碎材(以下、破碎材)の開発を行っている。その際、図-1 に示す製鋼スラグを石炭灰に混入するタイミングの違いから、プレミックス・ポストミックス方式の2種類による混合方式について検討を行っている<sup>4)</sup>。本報告では、2種類の混合方式により作製した破碎材の①乾湿繰返し試験を用いた耐久性評価、②土研式雨水曝露試験を用いた長期安全性評価を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 実験試料 本実験では、製鋼スラグ(転炉系)および石炭灰(原粉)を用いている。プレミックス方式はプラントにて製鋼スラグと石炭灰を混合して石炭灰・製鋼スラグ混合材料を作製し破碎処理を行ったものであり、ポストミックス方式はプラントにて石炭灰混合材料を作製・破碎処理した後、実験室にて製鋼スラグと混合して作製を行ったものである。なお、製鋼スラグは蒸気エージング処理を施したものを使用した。また、いずれの混合方式も再生路盤材(RC-40)に相当する粒度に調整を行っている。石炭灰と製鋼スラグの混合割合については質量比で、石炭灰混合破碎材単体(10:0)、プレミックス方式では、9:1, 7:3、ポストミックス方式は、9:1, 7:3, 5:5の割合としている。

2.2 乾湿繰返し試験方法 供試体は、最適含水比に調整した破碎材を塩ビ製モールド(直径 D=10cm×高さ H=12.7cm)に3層に分けて入れ、ランマー(2.5kg, 落下高さ 30cm)で突固め回数 25 回として作製している。乾湿繰返し試験は、表-1 に示す Wetting and Drying Test (ASTM D-4843)に準拠して行った。乾燥過程では、60±3°Cに設定した炉乾燥機に 24 時間静置し、その後 20±3°Cの恒温室で 1 時間冷却した後、湿潤過程に供した。湿潤過程においては、溶媒(水道水)に 23 時間浸漬した。上記一連の過程を最長で 15 サイクル実施しており、各サイクルの乾燥・湿潤過程終了後には供試体の質量を測定している。0, 5, 10, 15 サイクルの湿潤過程終了後には、コーン指数試験(JIS A 1228)および環状 46 号試験を行っている。また、プレミックス方式により作製した破碎材に対して、スレーキング試験(JGS 2124)を実施した。

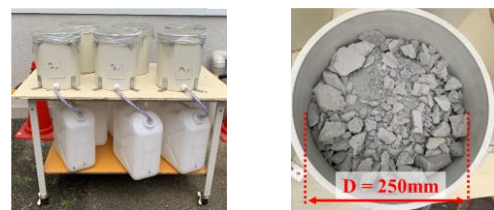
表-1 乾湿繰返し試験条件

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		
石炭灰:製鋼スラグ	プレミックス	10:0	9:1	7:3
	ポストミックス	9:1	7:3	5:5

表-2 土研式雨水曝露試験条件

試料量・容器サイズ		約10kg φ256×234×297mm		
採水間隔		1回/月程度		
試験開始		2021年11月16日		
石炭灰:製鋼スラグ	プレミックス	10:0	9:1	7:3
	ポストミックス	9:1	7:3	5:5
分析項目		Cd, Pb, F, B		

2.3 土研式雨水曝露試験方法 土木資材として利用を考えると、重金属等の長期的な溶出特性を把握する必要があることから、本研究では土研式雨水曝露試験<sup>5)</sup>を行った。表-2 に実験条件、写真-1 (a), (b) に土研式雨水曝露試験の外観および内部を示す。充填密度 1.0Mg/m<sup>3</sup> に調整して直径 250mm のワグネルポットへ深さ 200mm 程度に充填し、屋外に設置して試験を行った。雨水により生じた浸出水を約



(a) 外観 (b) 内部  
写真-1 土研式雨水曝露試験の様子

3000ml 毎に採水して 0.45 $\mu$ m のメンブレンフィルターでろ過を行い、得られた検液の pH、電気伝導率(EC)、酸化還元電位(ORP)の測定を行っている。

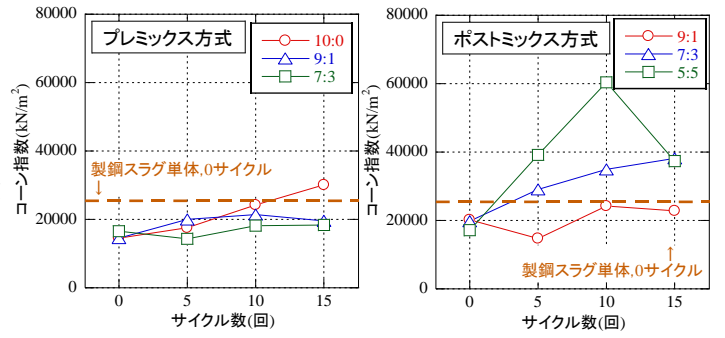
3. 実験結果及び考察

3.1 乾湿繰返し試験結果 図-2 (a), (b)にサイクル数とコーン指数の関係を混合方式別に示す。プレミックス方式では、スラグ混入率に関わらず、サイクル数の増加に伴う著しい強度の増減は確認されず、一定値で推移している。一方、ポストミックス方式では、スラグ混入率の増加に伴いコーン指数も増加しており、サイクル数の増加に伴う強度増加も確認された。これは、ポストミックス方式では製鋼スラグ単体(RC-40 相当)を混合しているため、製鋼スラグの水硬性による影響によるものと考えられる。また、図-3 にサイクル数と質量変化の関係を示している。供試体から細粒分の漏出が確認されたものの、混合方式に関わらず大きな質量変化はなく、一定の変化で推移していることがわかる。さらに、表-3 に示すようにプレミックス破碎材に対してスレーキング試験を実施したが、スラグ混入率に関わらず細粒化は起きていないため、耐スレーキング性を有する材料であることが明らかとなった。以上より、混合方式の異なる破碎材はどちらも、耐久性を有する材料であると言える。

3.2 土研式雨水曝露試験結果 図-4 に累積液固比と pH の関係、図-5 に累積液固比と EC の関係を示す。混合方式により多少のばらつきは見られるが、pH はアルカリ性を呈しており、EC は液固比の増加に伴い減少傾向を示している。鉛(Pb)、カドミウム(Cd)はすべての条件で溶出は確認されなかった。図-6、図-7 にそれぞれフッ素(F)、ホウ素(B)濃度と累積液固比の関係を示す。どちらも緩やかに減少する傾向を示しており、長期的に高い値を示す可能性は低いと考えられる。また、どちらも同じ溶出挙動を示していることから、混合方式による差はないことがわかる。

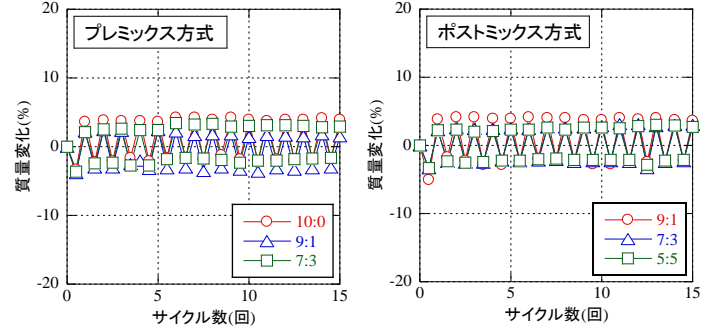
4. まとめ 混合方式の異なる破碎材はどちらも長期的な物理的安定性を有していることが示唆された。また、長期安全性においても Pb, Cd は溶出が見られず、F, B においても長期的に高い値を示す可能性は低いと考えられる。

【参考文献】1) 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(統合改訂版), pp.72-74, 2018. 2) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報(2018 年度版), pp.6-10, 2019. 3) 土木学会：石炭灰混合材料を地盤・土構造物に利用するための技術指針(案), コンクリートライブラリ 159, 2021. 4) 大原ら：ポストミックス方式による石炭灰・製鋼スラグ混合材料の上層路盤材としての性能評価, 令和元年度土木学会西部支部研究発表会, III-071, pp.411-412, 2020. 5) 品川ら：岩石に含まれる自然由来重金属等の溶出特性評価方法, 土木技術資料 52-6, 2010.



(a) プレミックス (b) ポストミックス

図-2 サイクル数-コーン指数の関係



(a) プレミックス (b) ポストミックス

図-3 サイクル数-質量変化の関係

表-3 スレーキング試験結果

試験手順	サイクル数	プレミックス方式		
		10:0	9:1	7:3
乾燥過程 (24h, 110°C) ↓ 湿潤過程 (24h, 20°C)	0サイクル			
	15サイクル			

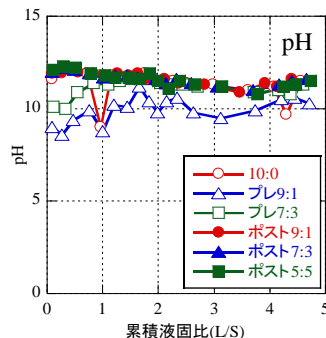


図-4 累積液固比-pH

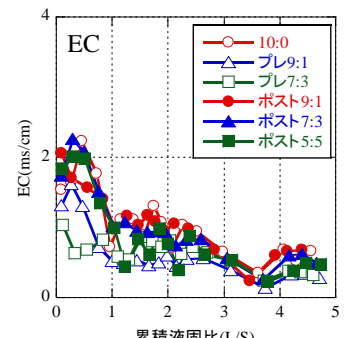


図-5 累積液固比-EC

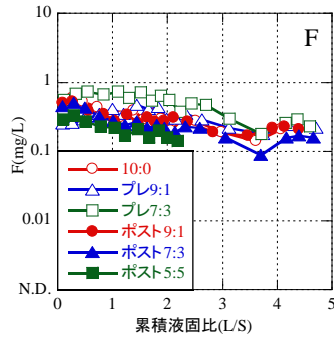


図-6 累積液固比-F 濃度

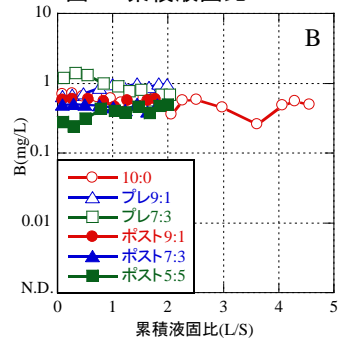


図-7 累積液固比-B 濃度