

論文 電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートの材料分離及び摩耗抵抗性の評価

鶴田 浩章*1

要旨：近年、日本では廃棄物の最終処分場の残余年数が約 21 年と予想されている。そのため、産業界における副産物である電気炉酸化スラグ等をコンクリート骨材として有効利用する必要があると考えられている。本研究では電気炉酸化スラグを使用したコンクリートの材料分離や摩耗抵抗性についての検討を行い、高密度で硬いという特徴を有効に活用できるかを確認した。その結果、銅精錬工程の副産物である銅スラグと比較を行うことで、電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートは置換率が 30%以下において、銅スラグの場合より材料分離は大きい、摩耗抵抗性がやや優れることが確認できた。

キーワード：電気炉酸化スラグ、細骨材、高密度、材料分離、摩耗抵抗性

1. はじめに

2021 年 3 月の環境省発表¹⁾によると日本では廃棄物の最終処分場の残余年数が 21.4 年という状況である。また、将来的に天然骨材の使用がこのまま続けば、いずれ枯渇化の問題が生じてくると予想される。そのため、産業界の副産物をコンクリート用骨材として利用することの必要性が増してくると考えられている。有効利用が求められるものの中に電気炉酸化スラグがある。しかし、電気炉酸化スラグは JIS が整備されているものの、電気炉系スラグの 2022 年度の使用可能量 2,884 千トンに対し、5.7%が埋立等で処理されている状況²⁾であり、この割合は微増の傾向である。そのため、コンクリート用骨材の枯渇化等と電気炉酸化スラグのストック量増加の課題の克服のために、電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの利用価値を高め、用途及び普及率を向上させていくことが必要であると考えられる。

電気炉酸化スラグはスクラップ鉄を溶解し、新たに製鋼する際の酸化工程で出た不純物を冷却したものである。電気炉酸化スラグの特徴としては、高密度で硬いことが挙げられ、摩耗抵抗性を必要とするコンクリート水路等の水中環境下におけるコンクリートへの適用による効果が期待できると考えられる。そのため本研究では、電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートで、水利構造物における摩耗現象を再現した流体エロージョン試験を行い、摩耗抵抗性の有無を明確にすることを目的とする。また、電気炉酸化スラグは高密度であることから、ブリーディングを促進する可能性があり、既往の研究³⁾においても重量骨材として用いる場合は、特にブリーディング対策が必要であるとの指摘があるため、ブリーディング試験と材料分離分析試験を行い、材料分離の有無も明確にした。一方、特に関西地区では、電気炉酸化スラグと同様に金属精錬工程の副産物である銅スラグが天然骨

材の代替材料として検討されている。そのため、本研究では銅スラグとの比較を行い、電気炉酸化スラグの位置付けを明確にすることを目指した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した材料を表-1 に示す。川砂は淀川で採取されたものであり、5mm 以下のものを使用した。使用した電気炉酸化スラグ細骨材（以降 EFS と称す）は兵庫県の電炉メーカーで、スクラップ鉄を溶解し、新たに製鋼する際の酸化工程で出た不純物を冷却したものであり、粒径は 5mm 以下の EFS5 に相当する。銅スラグ（以降 CUS と称す）は愛媛県の銅精錬工場で、銅鉱石等を溶解し、銅を製造する際に副生されたスラグを冷却したものであ

表-1 使用材料

材料	種類	特性
水 (W)	水道水	大阪府吹田市水道水
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	密度：3.15g/cm ³
細骨材 (S)	川砂	表乾密度：2.59g/cm ³ 吸水率：0.73% 粗粒率：3.48, 微粒分：0%
	EFS (EFS5)	表乾密度：3.67g/cm ³ 吸水率：0.93% 粗粒率：2.98, 微粒分：5.0%
	CUS (CUS2.5)	表乾密度：3.54g/cm ³ 吸水率：0.31% 粗粒率：2.66, 微粒分：6.0%
粗骨材 (G)	碎石	表乾密度：2.65g/cm ³ 吸水率：1.17% 粗粒率：6.52
混和剤	AE 減水剤 高機能型	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体, 密度：1.07g/cm ³

*1 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科教授 博士（工学）（正会員）

表-2 各細骨材の外観



り、粒径は2.5mm以下のCUS2.5である。また、EFS及びCUSは粒度調整を行わず工場から搬入した状態のまま使用した。各細骨材の外観を表-2に示す。これらはそれぞれ1.2~2.5mmの粒径のものを抽出して撮影したものである。細骨材の外観に関して、川砂は主に茶色で表面が滑らかであり、EFSは灰色で表面がザラザラとしており、CUSは黒色で表面に光沢がある。形状に関しては、川砂とEFSは似ており、角が丸みを帯びているが、CUSは比較的単純な形をしており角張っている。粗骨材は、大阪府高槻市産の碎石を使用した。

2.2 コンクリートの計画配合

コンクリートの配合は水中環境下におけるコンクリートの配合⁴⁾を参考に水セメント比43%、細骨材率47%、目標スランプ10cm、目標空気量4.5%に設定した。計画配合を表-3に示す。EFS及びCUSの細骨材に対する置換率はJISの規定において30%以下が望ましいとされているため、それぞれの置換率は15%及び30%とした。計画配合は、スラグを置換しないN、EFS15%、EFS30%、CUS15%、CUS30%の5条件作成し、単位水量を一定とした。今回は、Nを目標配合に合わせて、EFS及びCUSの置換によって、フレッシュ性状がどのように変化するかを確認した。

2.3 試験方法

(1) ブリーディング試験

ブリーディング試験はJIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に基づいて行った。

容器にコンクリートを3層に分けて詰め、各層は突き棒で25回均等に突き、容器の側面を木槌で10~15回叩いた。コンクリート表面は、平滑な面となるように、

コテでならした。コテでならした直後の時刻を記録し、専用の蓋をして、試料の質量を測定した。なお、水を吸い取るとき以外は常に蓋をした。

記録した最初の時刻から60分間は10分ごとに、コンクリート上面に浸み出した水を吸い取り、その後は、ブリーディングが認められなくなるまで、30分ごとに水を吸い取った。吸い取った水はメスシリンダーに移し、その時までたまった水の累計量を1mLまで記録しブリーディング率を求めた。

(2) 材料分離分析試験

供試体は材料分離の状況を明確にするため、通常の圧縮強度試験に用いられる円柱供試体の2倍の高さである、直径100mm、高さ400mmのボイド管と金属円盤を用いて円柱供試体の型枠を5本作製した。型枠にそれぞれの条件のコンクリートを均等に3層に分けて詰め、試料の中央に振動機を30cm程度の深さまで挿入し、5秒間振動を与えて締め固めた。それらの円柱供試体をコンクリートカッタで100mmごとに切断し、直径100mm、高さ100mmの円柱試験体を条件ごとに4体作製した。切断後、材齢28日まで20±2℃の恒温水で水中養生した。また、切断した4体の試験体はそれぞれ上からA、B、C、Dとした。4体の試験体は圧縮強度を計測した後、さらにコンクリートカッタで縦に切断した。試験体の切断方法を図-1に示す。4体の試験体A、B、C、Dの切断面に対して、顕微鏡を用いて画像解析を行い、粗骨材相を抽出した。この時、セメントペースト相と同色の粗骨材を抽出するために、供試体の切断面に対して

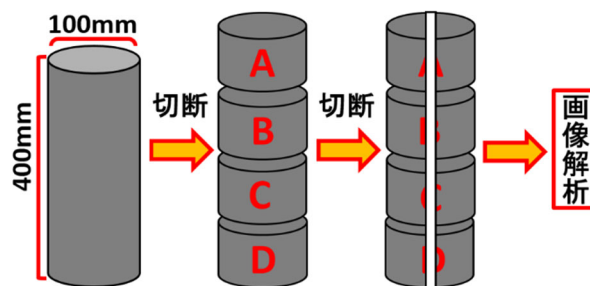


図-1 供試体の切断方法

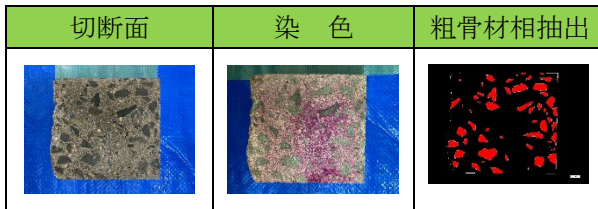
表-3 計画配合

供試体名	G max (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						W	C	S			G	混和剤 AE減水剤
								S	EFS	CUS		
N	20	10	43	4.5	47	175	407	793	0	0	914	1%
EFS15%								673	169	0		
EFS30%								553	338	0		
CUS15%								673	0	163		
CUS30%								553	0	326		

※AE減水剤：セメントの質量に対する%

フェノールフタレイン溶液の噴霧を行い、セメントペースト相のみの染色を行った。得られた画像を表-4に示す。また、マイクروسコープによって得られた画像から供試体の切断面に対する粗骨材の面積率を算出した。

表-4 試験体の取得画像の一例



(3) 流体エロージョン試験

コンクリートの流体エロージョン試験の供試体作製及び試験は ASTM C 1138 Standard Test Method for Abrasion of Concrete (Underwater Method) に準じて行った。供試体は直径 300mm、高さ 100mm の円柱供試体を 5 条件でそれぞれ 2 体ずつ作製した。供試体と試験装置を図-2に示す。

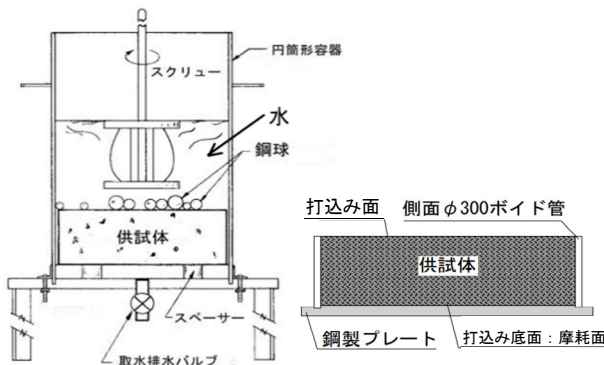


図-2 供試体と試験装置

供試体の打込み底面を試験面として1つの供試体につき1回12時間の試験を6回、合計72時間ずつ試験を行った。また、流体エロージョン試験と同じバッチのコンクリートを用いて、試験開始前と6サイクル目の試験終了時に圧縮強度を計測した。各供試体で、試験前及び12時間の試験終了時毎に0.1g単位で供試体の表乾質量、水中質量を測定し、式(1)を用いて体積を算出し、式(2)より摩耗損失体積を算出した。

$$V_t = \frac{W_{air} - W_{water}}{\rho_w} \quad (1)$$

ここに、

V_t : 求める時間における供試体の体積(cm^3)

W_{air} : 求める時間における供試体の表乾質量(g)

W_{water} : 求める時間における供試体の水中質量(g)

ρ_w : 水温 20°Cにおける水の密度(g/cm^3)

$$V_{Lt} = V_i - V_t \quad (2)$$

ここに、

V_{Lt} : 求める時間における摩耗損失体積(cm^3)

V_i : 試験前の供試体の体積(cm^3)

そして、算出した摩耗損失体積と実測した供試体の表面積から式(3)を用いて平均摩耗深さを算出した。

$$ADA_t = \frac{V_{Lt}}{A} \quad (3)$$

ここに、

ADA_t : 求める時間における平均摩耗深さ(mm)

A : 供試体上面(試験前)の面積(cm^2)

3. 試験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状

5条件の配合のスランブ試験及び空気量試験の結果を表-5に示す。スランブに関して、EFS及びCUSは目標値を大きく超え、Nと比較すると約6cm大きい。置換率で比較すると、EFSは15%より30%の方が1.5cm大きく、CUSは15%より30%の方が0.5cm大きい。空気量に関して、5条件ともに目標値から大きく離れず、有意な差は確認できない。以上の結果から、EFS及びCUSはNと比較して単位水量が一定の場合、スランブが大きく、余分な水が存在する状態となる。そのため、流動性を一定とする場合は、単位水量を減少させる効果があり、置換率を大きくするとその効果も大きくなると考えられる。また、EFSはCUSと比較して、置換率の変化によるスランブへの影響が大きいと言える。

表-5 スランブ及び空気量

	スランブ(cm)	空気量(%)
目標値	10.0	4.5
N	11.0	4.0
EFS15%	16.5	4.8
EFS30%	18.0	4.5
CUS15%	17.0	4.6
CUS30%	17.5	4.4

3.2 ブリーディング試験

ブリーディング試験の結果を図-3に示す。5条件のうちNが最もブリーディング率が小さい。EFS及びCUSを比較すると、EFS15%よりCUS15%の方が0.87%小さく、EFS30%よりCUS30%の方が0.53%小さい。置換率で比較すると、EFSは15%より30%の方が3.90%小さい。

以上の結果から、EFS は CUS と比較してブリーディング率が大きいと、材料分離の抑制効果は小さいと言える。また、置換率で比較すると、EFS は 15%より 30%の方がブリーディング率は小さいため、材料分離の抑制効果は大きいと言える。これらの要因として、図-4 に示すように EFS は CUS と比較して、合成粒度がよくなく、微粒分が少ないということが考えられる。また、EFS30%は EFS15%と比較して、細骨材全体としての合成粒度が若干良く、微粒分が多いということが考えられる。一方、N のブリーディング率が最も小さい要因としては、EFS 及び CUS の場合と比べて余分な水の存在量が少ないことが考えられる。

ここで、今回の試験では単位水量を一定の条件で行っ

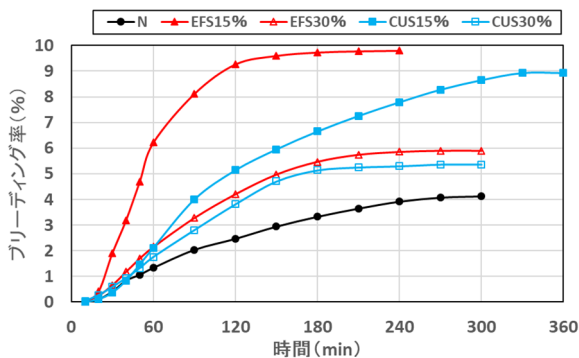


図-3 ブリーディング試験の結果

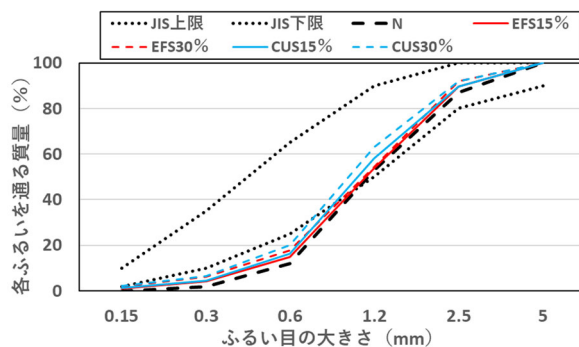


図-4 細骨材の合成粒度分布

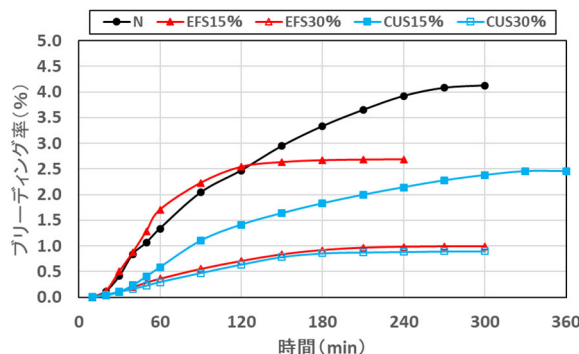


図-5 単位水量を補正した場合のブリーディング率

ているため、スランプ値を目標スランプ値へ配合上で補正することで得られる単位水量、N:175, EFS15%:163, EFS30%:160, CUS15%:162, CUS30%:161kg/m³でブリーディング率を算定して表示したものが図-5 である。つまり、土木材料学や建設材料実験の教科書に示される全国の生コンクリート工業組合の標準配合などを参考に決定した「平均的なコンクリートの単位粗骨材容積、細骨材率および単位水量の概略値の表」^{例え5)}をベースに、実際のスランプ値を目標スランプに合わせるためにスランプを 1cm 小さくする毎に単位水量を 1.2%小さくすることで目標スランプ値の場合の単位水量値を求めたということである。ただし、この 1 回の配合修正により必ずしも最終の配合が求められるわけではないことから、ここではこの 1 回の配合修正により最終の配合が求められたとした場合の単位水量のみを簡易的に考察に用いたことになる。EFS や CUS を置換することで微粒分が増えてブリーディングを抑制することができるかすると、その効果は置換率 30%の方がやや大きいことがわかる。

3.3 材料分離分析試験

5 条件の各位置 A~D における圧縮強度及び粗骨材面積率を図-6、図-7 に示す。5 条件それぞれ基本的には供試体の上の位置の強度及び粗骨材面積率は小さく、下の位置に行くほど強度及び粗骨材面積率は大きい。このことから、5 条件全てにおいて供試体の上部ではブリーディングが促進されており、下部では粗骨材が沈下していると考えられ、材料分離が発生していることが確認できる。

次に、5 条件の各位置 A~D における圧縮強度及び粗骨材面積率のばらつきの大きさに関して、EFS は N と比較してばらつきが約 1/2 小さい。一方、EFS は CUS と比較してばらつきが大きい。置換率で比較すると、EFS は 15%より 30%の方がばらつきは小さい。以上の結果から、EFS は N と比較して A~D の位置による圧縮強度及び粗骨材面積率のばらつきが小さいため、材料分離は小さいと言える。一方、EFS は CUS と比較すると A~D の位置による圧縮強度及び粗骨材面積率のばらつきが大きい

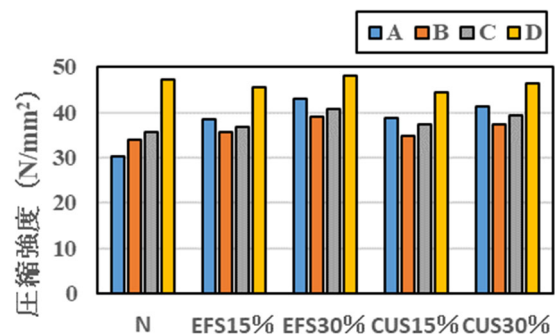


図-6 各位置における圧縮強度の結果

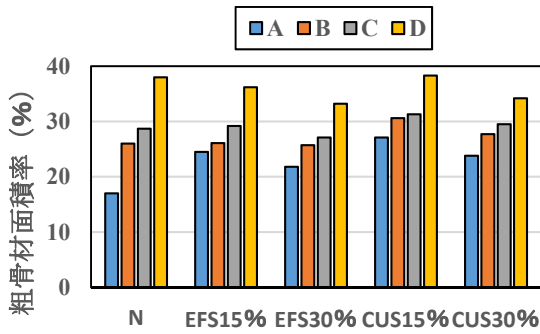


図-7 各位置における粗骨材面積率の結果

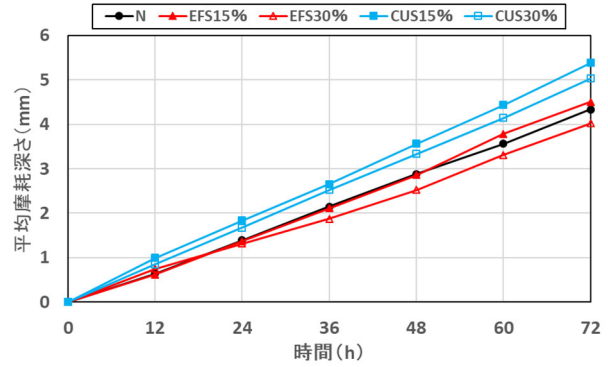


図-8 流体エロージョン試験結果

いため、材料分離は大きいと言える。しかし、圧縮強度に関しては図-6に示されるように、EFSとCUSのいずれにおいても、位置Aでの圧縮強度がNの傾向と異なり大きくなっていることがわかる。これはブリーディングで生じた水分が表面で逸散して水セメント比が低下した結果という可能性もあり、それによる強度のばらつきの縮小の影響も考えられ、圧縮強度のばらつきから材料分離の大小を評価することは難しいとも言える。

また、EFSにおいては置換率が大きい方が材料分離の抑制効果が大きいと言える。その要因としては、EFSは微粒分がNより多く、CUSより少ないということが考えられる。

3.4 流体エロージョン試験

流体エロージョン試験の結果を図-8に示す。図のように時間の経過とともに線形的に平均摩耗深さが増加しているのがわかる。また、Nと比較してEFSは平均摩耗量がほぼ同等であり、CUSは若干平均摩耗量が大きい結果となった。このことからEFSはCUSより若干摩耗に対して強いことがわかる。

次に圧縮強度と平均摩耗深さの関係を図-9に示す。図中には、Nについては既往のデータとしてスランプ15cmの普通コンクリートのデータ⁶⁾と過去のデータをプロットしている。圧縮強度と平均摩耗深さには相関があり、強度は摩耗抵抗性の要因の一つであると報告されており⁴⁾、今回の結果においても同様に確認できる。今回のEFSはNと比較して、同一強度での摩耗深さが同等である。また、Nの既往のデータも含めて考えると、EFSの摩耗抵抗性はNと同等以上と言える。一方、EFSはCUSと比較して同一強度での平均摩耗深さが小さい。そのため、EFSはCUSより摩耗抵抗性が大きいと言える。その要因として、CUSはEFSと比較して、粒径が小さく表面に光沢がありなめらかであるため剥離しやすいが、骨材として硬く摩耗しにくいことの他に、骨材の形状が角張っており摩耗因子である鋼球が引っ掛かりやすいということが考えられる。

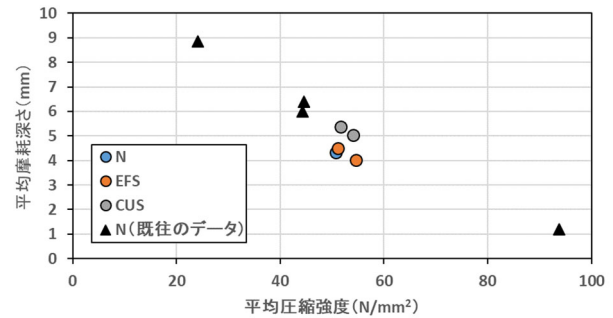


図-9 圧縮強度と平均摩耗深さの関係

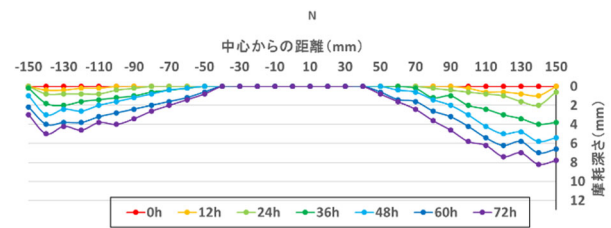


図-10 摩耗深さの経時変化 (N)

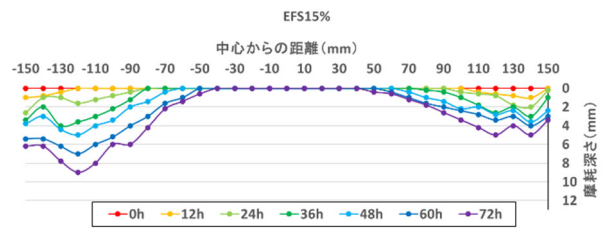


図-11 摩耗深さの経時変化 (EFS15%)

図-10~14は、各サイクルにおける供試体中心からの距離における摩耗量を複数個所で測定して平均化した数値をプロットしたものである。摩耗深さの経時変化を見るとCUSでは、試験時間の経過に伴う摩耗量がNやEFSの場合より多くなっている。このことから前述のEFSはCUSより摩耗抵抗性が大きいことが確認できる。

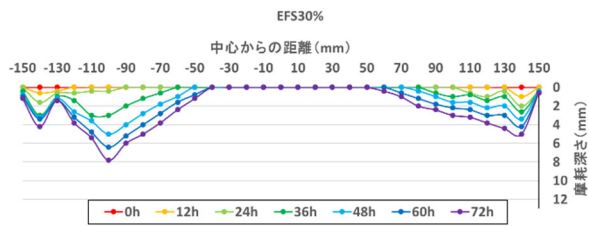


図-12 摩耗深さの経時変化 (EFS30%)

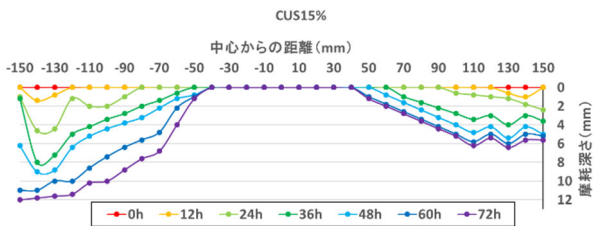


図-13 摩耗深さの経時変化 (CUS15%)

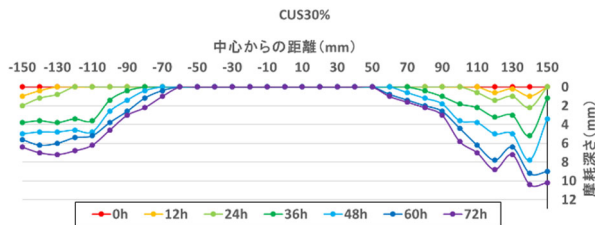


図-14 摩耗深さの経時変化 (CUS30%)

4. まとめ

本研究において、材料分離に関しては、EFSは微粒分が多いため、ブリーディングや材料分離の抑制効果があることが確認できた。しかし、CUSと比較すると、今回のEFSは微粒分がCUSより少なく材料分離はCUSの場合より大きくなることがわかった。

摩耗抵抗性に関しては、置換率が30%以下においては、EFSは流体エロージョン試験における平均摩耗量がNと同等であるが、CUSと比較すると摩耗抵抗性がやや大きいことが確認できた。また、摩耗抵抗性は圧縮強度のみ

に依存せず、骨材の粒径、硬さ、形状も関係しているということが確認できた。

以上のことからEFSは30%以下の置換率においても普通砂と同等の摩耗抵抗性を付与することができ、CUSと比較してやや摩耗抵抗性が大きい利点があることがわかった。ただし、強度レベルが近い範囲での検討であったため、今後はW/Cを変化させた場合の検討や摩耗抵抗性と骨材の硬さ及び形状との因果関係を定量的に評価することの検討が必要だと考えられる。

謝辞：本研究の実験においては、関西大学環境都市工学部都市システム工学科卒業生の宇野光人くんの協力を得て行ったものである。また、スラグ等の材料については電炉メーカーや銅精錬工場のご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 環境省, 環境省."報道発表資料", <https://www.env.go.jp/press/109290.html>, (閲覧日: 2024年1月7日)
- 2) 鉄鋼スラグ協会, 鉄鋼スラグ統計年報 (2022年度版), 電気炉系スラグ利用統計表, p.31, 2023.10
- 3) 岩永 健, 澁上榮治, 松岡滋樹, 津島 寛: 電気炉酸化スラグのコンクリート骨材としての適用性, コンクリート工学, Vol.36, No.12, pp.11-17, 1998.12
- 4) 高野智宏, 寺田哲美, 山中 誠: 水中環境下のコンクリートならびにモルタルの耐摩耗性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.709-714, 2009
- 5) 宮川豊章 監修: 改訂版 図説 わかる材料, 学芸出版社, p.94, 2015
- 6) 鶴田浩章, 村上 真, 上田尚史, 安藤 圭: 護岸に適用する中流動コンクリートの基礎性状とすりへり抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1438-1443, 2014