

活性化した下水汚泥焼却灰スラードライ粉の

コンクリートへの適用に関する研究

日大生産工(院)○ 齊藤 育己 日大生産工 鶴澤 正美（日本ヒューム(株)）井川 秀樹

1. 緒言

下水汚泥とは下水処理の際に下水処理施設の反応タンク、沈殿池から発生する汚泥であり、下水汚泥焼却灰とは、下水汚泥を減容化させるために脱水し、焼却処理してできた灰である。国内の産業廃棄物排出量は年間約 3.7 億 t であり、下水汚泥が 2 割を占める。利用用途は大きく 3 つあり、1)レンガやブロックなどの建設材料やセメント原料としての利用、2)コンポスト化し、肥料や土壌改良材などによる緑農地での利用、3)都市ガスや自動車燃料などによるエネルギー分野での利用がある。しかし、資源として有効利用ができていのはごく一部であり、約 3 割が埋め立て処分されている。そのため、資源としての価値を高め、利用用途の拡大および利用量の増大を促進させることが重要である。下水汚泥焼却灰を粒度調整した粒度調整灰（以下 SA と略記）はセメントの主成分と同様に酸化ケイ素や酸化カルシウムが主成分でかつ粉体であるため、セメント製造時の代替原料として可能性を有している。SA にはセメント分野の材料として 5 の特徴がある。1)SA 中のシリカ成分とセメントの水和反応で生じた $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が、ポゾラン反応を起こすことにより、ケイ酸カルシウム水和物が生成し、圧縮強度を増進させる可能性をもつこと。2)都市部の下水道普及によって、安定した供給が可能であること。3)年間を通して含有成分が一定範囲内にあることで、強度などの物性に差が生じにくいことであること。4)SA 内のリン成分がセメントの硬化を遅らせる凝結遅延現象を引き起こすこと。5)多孔質であることから高い吸水性があり、コンクリートのワーカビリティに悪影響を与えてしまうことである。

高炉スラグ（以下 BFS と略記）は銑鉄製造過程において副産される BFS を水により急冷し、粉砕したものである。高炉スラグは高炉セメントなど様々な利用方法が確立されている。中でも高炉セメント B 種（以下 BB と略記）はセメント国内出荷量の約 2 割を占めている。一方で、

BFS 生産量は 2014 年に 25,000 千 t であるに対し、2021 年には 21,650 千 t にまで減少しつつある。これは国内市場の縮小に伴い、高炉の操業が休止していることやカーボンニュートラルに則った高炉から電炉への移行が要因として挙げられる。BFS には混和材として 4 つの特徴がある。1)セメントの水和反応により生じた水酸化カルシウムなどのアルカリ性物質や石膏が刺激剤となり硬化する、潜在水硬性を起こすことで強度増進する効果を持つこと。2)スラグを含有した硬化体は水密性が大きい。高炉セメントは一般に耐海水性や化学抵抗性が高いと言われているが、スラグ自身に耐性があるということではない。すなわち BFS が潜在水硬性を発現し硬化体を高強度化することで緻密性を上げ、水密性を向上させることが要因である。これにより、塩化物遮蔽性や化学抵抗性が大きいと、塩害やアルカリ骨材反応などの化学的な耐久性に優れること。3)水和速度が遅くなるため、温度上昇が小さくひび割れが生じにくくなること。4)長期強度の増進が大きいと、構造物の耐久性に優れること。

筆者らの研究チームは、SA をはじめとした各種コンクリート混和材の有効利用を促進させるために付加価値のあるコンクリート混和材に改質する手法を研究している。これまでの研究成果として、SA を活性化処理して乾燥させた SA ドライ粉（SA-D と略記）を使用することにより、乾燥させる前の SA スラリーが最大添加量 20% であったのに対し、30% までの添加が可能であった。

本研究では、SA と BFS の現状を鑑み、BFS 使用量を減らし、SA 使用量を増加させるための取り組みである。研究目的は、BFS の代わりに SA-D を使用した時の有効性を確認することを目的とした。また、BFS の置換率を変え、代わりに SA-D を使用した際の圧縮強度発現性と耐海水性および塩分浸透性を明らかにした。

2. SA スラリーおよびドライ粉の作製方法

既往の研究では、SA を混和材として利用し

Activated Sewage Sludge Incinerated Ash Slurry Dry Powder
Application of Activated Sewage Sludge Incinerated Ash Slurry Dry Powder to
Concrete

Ikumi SAITO, Masami UZAWA, Hideki IKAWA

た際の凝結遅延を低減させるため、SA と水酸化カルシウム溶液でかくはん処理を行った。その結果、40 分程度の凝結遅延改善効果を確認した。活性化処理の手順は、セラミックスボールと樹脂製ポットを使用したモルタル実験を参考にした。SA スラリーのボールミル混合による活性化処理のイメージを図-1 に示す。本実験においては量産を見据えボールとポットをステンレス製に変えて行った。モルタル実験の範囲での最適条件は、ステンレスポットミル(外径 84mm、長さ 70mm、内容量 420mm)に SA・飽和水酸化カルシウム溶液・水・標準砂・ステンレスボール(密度 7.93g/cm³)を加え、2 段式ボールミル混合の配合を表-1 に示す。ボールミル混合の混合条件は、添加する SA の重量に対して 1)飽和水酸化カルシウム溶液 40%、2) 水量 180%、3)砂量 60%に固定し、回転架台の回転数 20rpm、混合条件 35 分であった。ボールミルの材質をセラミックスからステンレスに移行することにより、回転数が 40rpm から 20rpm となるとともに、混合時間も 60 分から 35 分と、25 分間の混合時間の短縮をすることが可能となった。またドライ粉は上述の工程で得られたスラリーをステンレスバットに移し、105℃の乾燥を 24 時間行い試料とした。

3. 水中養生での圧縮強度比較

3.1 概要

2.で示した SA の最適混合条件でボールミル混合を行い、内割置換した活性化 SA-D 置換モルタルの圧縮強度結果をまとめ、水中養生での強度増進性について検討を行った。

3.2 実験方法

3.2.1 使用材料

使用材料は普通ポルトランドセメント(C:密度 3.16g・cm⁻³)、下水汚泥焼却灰(SA:密度 2.60g・cm⁻³)、高炉スラグ微粉末(BFS:密度 2.91g・cm⁻³)、水道水(W)、標準砂(S:セメント協会強さ試験用)、飽和水酸化カルシウム溶液(関東化学、特急を融解)である。加えて、SA-D を使用した。混和材の置換率はセメント質量比の 40%を最大としてセメントの内割置換を行った。混和材の置換率変化パターンは表-2 にあるように SA-D 置換率を 0%、10%、20%、30%、40%の 5 種類とし、行った。

3.2.2 実験手順

供試体の作製は、JIS R 5201 に準拠し行った。練り混ぜには JIS モルタルミキサーを使用

表-1 ボールミル混合の配合表

SA (g)	Ca(OH) ₂ (g)	W (g)	S (g)	合計 (g)
90	36	162	54	342

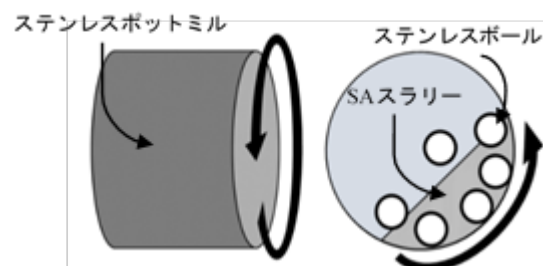


図-1 ボールミル混合のイメージ図

表-2 モルタルの配合表

SA-D置換率 (%)	C (g)	S (g)	SA-D (g)	BFS (g)	W (g)
0	270	1350	0	180	225
10	270	1350	45	135	225
20	270	1350	90	90	225
30	270	1350	135	45	225
40	270	1350	180	0	225

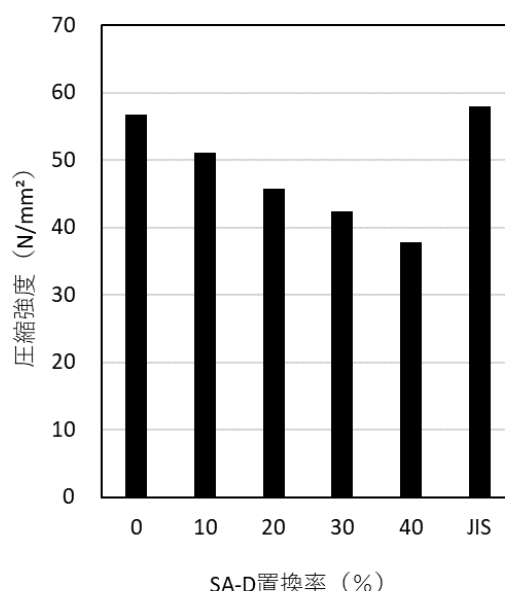


図-2 水中養生における圧縮強度

し、型枠は 40×40×160mm の角柱型とした。供試体の作製後 20℃、60%R.H.の恒温槽で 24 時間の前置き養生し、脱型を行った。活性化 SA-D 置換モルタルは、前述のボールミル混合後の SA-D にセメント、水、標準砂および BFS

を加え、混練し作製した。

3.3 実験結果と考察

SA-D を内割置換した BB モルタルにおける材齢 28 日の圧縮強度結果を図-2 に示す。図-2 より、圧縮強度は JIS モルタルが最も高い値となり、SA-D 置換 BB モルタルは、置換率が上がるごとに低下に移行した。また、置換率 0% および 10% の圧縮強度が JIS モルタルとほぼ同等の値となった。これらの結果から、水中養生における SA-D 置換 BB モルタルでは、SA-D の最大置換率は 10% であり、SA-D を BFS の代替材料として用いることが可能であることが判明した。

4. 蒸気養生での圧縮強度比較

4.1 概要

ボールミル混合法によって作製した SA-D は、水中養生と同様に蒸気養生でも有効かを検証するため、養生条件を蒸気養生に変化させ、活性化 SA-D 置換モルタルの圧縮強度増進率を比較することにより、蒸気養生での活性化 SA-D の利用可能性について検討を行った。また 3.3 の結果と合わせて、養生条件の違いによる強度発現性への影響について検討を行った。

4.2 実験方法

使用材料は 3.2 と同様の材料で行った。SA-D の置換率および供試体の作製は 3.2 と同様の手順で行い、脱型後は蒸気養生を行った。蒸気養生は、十分に水分を含ませた濡れウェスで供試体全体を覆い、密閉可能なプラスチック製耐熱容器に入れて密閉した後、定温乾燥器（株式会社東洋製作所製 ADVSNTEC 定温乾燥器 DRN320DB）で高温を付加させることで蒸気を提供し、湿潤高温環境を再現し行った。昇温速度 $20^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ で、3h-15min かけて 65°C を 3h 維持した後、 30°C まで徐冷し供試体を取り出した。蒸気養生後は材齢期間すなわち 28 日、 20°C 、60%R.H. の恒温恒湿室で気中養生した。SA-D 置換モルタルの表 3 と同様である。圧縮強度試験は 3.2 と同様の手順で行った。

4.3 実験結果と考察

蒸気養生での SA-D 置換 BB モルタルにおける材齢 28 日の圧縮強度試験結果を図-3 に示す。図-3 より、蒸気養生において、圧縮強度は置換率 10% で最も高い値となった。圧縮強度の伸びは、10% で上がりにくくなり、20% で低下に移行した。また、置換率 0% および 20% での圧縮強度は JIS モルタルとほぼ同等の値となった。

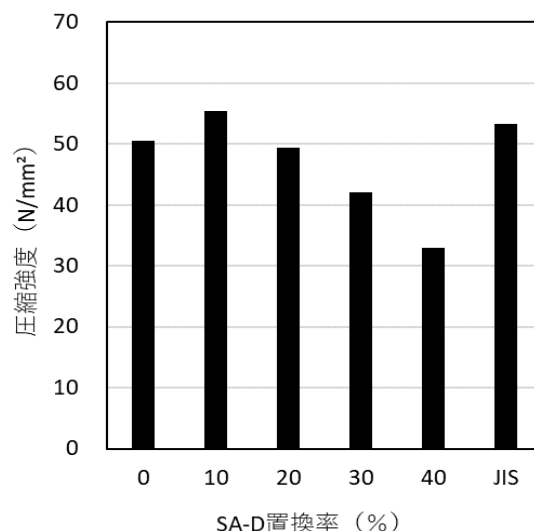


図-3 蒸気養生における圧縮強度

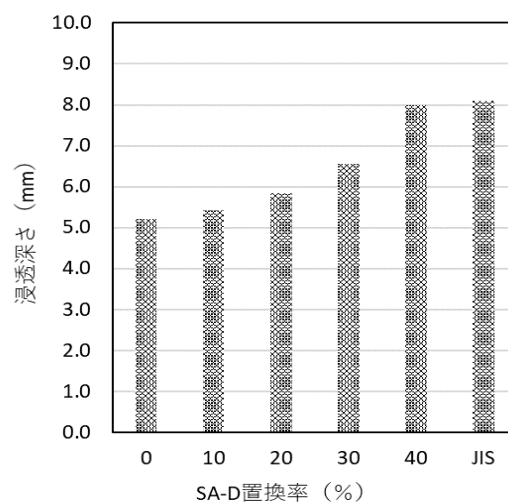


図-4 水中養生における塩分浸透性

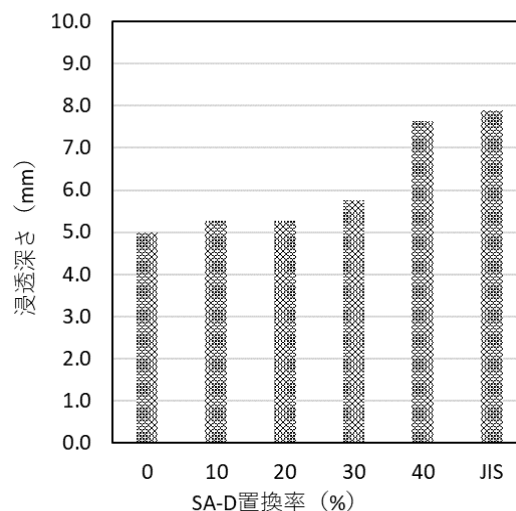


図-5 蒸気養生における塩分浸透性

これらの結果から、蒸気養生での SA-D の最大置換率は置換率 20%であり、SA-D 置換 BB の代替材料として用いることが可能であることが判明した。

5. 活性化 SA ドライ粉の耐海水性

5.1 概要

SA-D のさらなる用途展開のため、SA-D 置換 BB モルタルの耐海水性について、養生条件の影響と合わせて検討を行った。

5.2 実験方法

使用材料および各配合は 2.2 と同様である。SA-D の置換率は、セメントの質量比で 60%とし、セメントと置換した。型枠はφ50×100mm の円柱型とした。供試体の成型後 20℃、60% R.H.の恒温恒湿室で 24 時間の前置き養生を行った。その後脱型を行い、蒸気養生を行うものは 4.2 の蒸気養生を行った。蒸気養生後は 20℃、60%R.H.の恒温恒湿室で 28 日間気中養生した。水中養生を行うものは 28 日間 20℃で水中養生を行った。耐海水性試験は、JSCE-G572-2013 を参考にし、養生が終了した供試体の底面以外にエポキシ樹脂(コニシ株式会社、金属・コンクリート用ボンド E250)で覆い、十分に硬化させた後、NaCl 濃度 10%、20℃の人工海水(塩化ナトリウムは関東化学株式会社、特級試薬を溶解)に 28 日間浸漬した。その後、供試体を簡易軽量携帯型コンクリートカッター(株式会社マルイ製 MIC-194-0-06 型)で乾式割裂し、断面に 0.1mol/L の硝酸銀溶液(関東化学株式会社、鹿 1 級試薬を溶解)を噴霧して、塩分浸透深さを計測した。

5.3 実験結果と考察

図-4 に水中養生での添加率別の活性化 SA-D モルタルの塩分浸透深さの計測結果を示す。図-4 より、養生条件と置換率によらず、SA-D を置換した BB モルタルは無添加の JIS モルタルより塩分浸透深さは浅くなり、SA-D 置換率 0%が最も浅く、置換率を上げていくごとに塩分浸透深さが深くなっていた。しかし置換率 10%と 20%では、JIS と比較すると浸透深さが同程度であることから、SA-D は BB モルタルにおける BFS の代替材料として用いることが可能であると考えている。また、SA-D 置換モルタルは、水中養生と比して蒸気養生では塩分浸透深さがやや浅くなった。蒸気養生が水中養生より塩分浸透深さがやや浅くなった要因として、材齢 28 日において、蒸気養生は水中

養生より未水和部分が少ない、すなわち緻密な硬化体を形成しているためと考えられる。

結言

- 1) SAを活性化処理して乾燥させたSAドライ粉をBBに使用することにより、BFSの代替材料として、水中養生では10%、蒸気養生では20%までの置換が可能であることが判明した。
- 2) SA ドライ粉のさらなる用途展開のため、SA-D 置換 BB モルタルの耐海水性について、検討を行った結果、養生条件によらず、置換率 20%まで、置換率 0%の BB モルタルと同程度の効果を確認できた。

参考文献

- 1) 齊藤 育己, 鶴澤 正美, 藤原 颯, 井川 秀樹::活性化した下水汚泥焼却灰スラードライ粉のコンクリートへの適用に関する一考察, Vol.46, No.1, pp.85-90, 2024
- 2) 環境省環境再生・資源循環局廃棄物規制課:令和4年度事業産業廃棄物排出・処理状況調査報告書, pp24-46, 2023.
- 3) 前田正博, 石井義章, 井川秀樹, 肥後康秀:改質した下水汚泥焼却灰のコンクリート利用の有効性について, コンクリート工学, Vol. 42, No.7, pp.15-23, 2004
- 4) 鶴田浩章, 木場宏:下水汚泥焼却灰の品質変動とモルタルの凝結及び強度への影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No.1, pp.1897-1902, 2009
- 5) E. Sakai, et al.: Effect of Chemical and Mineral Compositions on the Pozzolan Reactivity of Incineration Ash of Sewage Sludge, *J. Soc. Inorg. Mater., Japan*, Vol.10, pp.19-24, 2003
- 6) A. Fukunaga, et al.: Effect of Various Conditions on Compressive Strength Development of Mortar Using Highly Activated Sewage Sludge Burned Ash, *J. Soc. Inorg. Mater., Japan*, Vol. 29, pp.210-216, 2022
- 7) R. Ito, et al.: Setting Delay of Concrete by Phosphorus in Sewage Sludge Burned Ash Powder and Its Countermeasures, *J.Soc.Inorg. Mater., Japan*, Vol. 25, pp21-27, 2018
- 8) Y. Ibukuro, et al.: Investigation of Compressive Strength of Mortar with Sewage Sludge Burnt Ash and its Availability as Concrete Admixture, *J. Soc. Inorg. Mater., Japan*, Vol. 27, pp.3-8, 2020