

活性化下水汚泥焼却灰を混合したモルタルおよびコンクリート 硬化体の圧縮強度特性に関する研究

日大生産工(院) ○藤原 颯 日大生産工 鶴澤 正美

1. はじめに

下水汚泥とは、下水汚泥処理の過程で処理場の沈殿池や反応タンクで生じる汚泥であり、減容化のために脱水・焼却したものが下水汚泥焼却灰である。国内の産業廃棄物排出量3.8億トンのうち、約2割を下水汚泥が占める¹⁾。東日本大震災の影響により、下水汚泥のリサイクル率は78%から55%にまで低下したが、2016年には73%まで回復した²⁾。しかし、いまだ下水汚泥の約3割はリサイクルできずに埋め立て処分されている²⁾。そのため、下水汚泥焼却灰の資源としての価値を高めることにより、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³⁾(以下SAと略記)はシリカやカルシウムを多く含んでいるため、セメント混和材として利用できる可能性がある³⁾。SAのシリカ成分には非晶質状のものも含まれていることを粉末X線回析のハローの回析で確認しているため、子のシリカ成分に注目して研究を進めている。SAをコンクリート混和材として使用するうえでメリットが3つある。1)セメントの水和によって生成した水酸化カルシウムとSA中の非晶質シリカが再結合し、ポゾラン反応を起こし強度増進する。2)都市部への人口集中、下水道の普及により下水汚泥が多く発生するため、安定した供給が可能である。3)年間を通して含有成分のばらつきが少ない⁴⁾ため、強度など諸物性に影響が出にくいことである。しかしSAには課題もある。1)リン成分がセメントの構成鉱物であるユーライトおよびビーライトに作用することで、セメントの硬化を遅らせる凝結遅延を引き起こす。2)多孔質性であるため吸水性が高く⁵⁾、コンクリートのワーカビリティに悪影響を与える。3)ヒューム管の製造時に、SAの密度が小さく微粒子であることから、スラッジ排出量が増えたり内面の仕上がりに悪影響が出たりする懸念がある。そのため、コンクリート用混和材として利用可能な新たな技術開発が必要で

ある。著者ら研究チームは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、高付加価値なコンクリート混和材に改質する手法を検討している。これまでの研究成果として、SAのボールミル混合条件の最適化を行った⁶⁾。詳細は後述の2.SAスラリー作製方法に示す。本研究では、SAの課題であるリンやワーカビリティへの影響を改善する目的で、活性化処理しスラリー化した粒度調整灰(以下SAスラリーと称する)をコンクリートに混和する実験を行った。評価項目はフレッシュ性状および圧縮強度を主として行い、コンクリートに使用可能であるかを確認した。また、供試体の成形は振動成形と遠心成形とし、蒸気養生を施すことでよりプレキャストコンクリートの製造を想定した実験とした。

2. SAスラリーの作製方法

既往の研究⁷⁾では、水酸化カルシウム溶液でSAを活性化処理することで、約40分の凝結遅延改善効果を確認している。活性化処理の手順は、セラミックボールと樹脂製ポットを使用したモルタル実験⁸⁾を参考にした。

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更し最適条件を探索した。その結果、モルタル実験の範囲では、ステンレスポットミル(内径84mm、高さ70mm、内容量420ml)にSA、飽和水酸化カルシウム溶液、水、標準砂とステンレス製ボール(密度7.93g/cm³)を15.875mm10個と9.525mm5個を加え、2段式ボールミル回転架台を使用し、回転混合を行うこと、さらにボールミル混合の条件は、回転架台の回転数20rpm、混合時間35分、SA重量に対して水酸化カルシウム溶液量40%、水量180%、砂量60%が最適であった。ボールミルの材質を変更することにより、60分を要したセラミックボール⁹⁾に比して35分と、25分間混合時間を短縮することが可能となった。以上からコンクリートへの供試スラリーの各条件も同様とし、後述する多バッチで必要量を確保した。また、作製からの保管時期はSAスラリーが安定な14日以内⁹⁾

Study on Compressive Strength Properties of Hardened Mortar and Concrete
with Activated Sewage Sludge Incineration Ash

Hayate FUJIWARA, Masami UZAWA

とし、混練りする7日前に作製しコンクリート試験に供した。なお念のためコンクリート試験の前にコンクリート用細骨材を使用した実験を行い、圧縮強度発現性について確認を行った。すなわちステンレスポットミルでSAスラリーを作製し使用する細骨材のみコンクリート用細骨材に変更し、水セメント比を0.5のままとした。その結果、JIS標準砂を用いたモルタルとコンクリート用骨材を使用した場合とで、圧縮強度ではほぼ同様の傾向が得られることを確認している。

2.1 ボールミル混合の配合

ボールミル混合の配合をTable.1に示す。ポットミル1つに対し作製可能なSAスラリー量は342gである。合計35バッチを混合し、本実験に必要なSAスラリー量である11,940gを1週間で作製し1週間以内に実験に供した。

3. 実験概要

3.1 使用材料と配合

実験に使用する材料をTable.2に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを、骨材には洗砂および砕石を用いた。SA₂は東京都下水道サービス株式会社より提供頂いた。SA₂とCの主要化学成分値をTable.3に示す。

コンクリートの配合をTable.4に示す。コンクリートの設計基準強度は40N/mm²とした。SAはセメントに対する重量比で示し、砂置換として配合した。すなわちSAスラリーの固形分濃度は表-1から(SA+S)/合計により42%と計算できるので、固形分を砂置換し、W/Cが同じになるように単位水量で調整した。またSAスラリー中のSA固形分はSA/合計により26.3%となる。これをもとにSAスラリーの配合量を調整し、置換率0~15%とした。

目標スランプは、固練りのプレキャストコンクリートを想定し、4.0cm±1.0cmとした。SPの調整は、事前の試験練りにより目標スランプを満足する添加率とした。

3.2 練り混ぜ方法と成形・養生条件

練り混ぜには強制二軸型ミキサを使用し、

Table.1 ボールミル混合の配合

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

(Ca(OH)₂:水酸化カルシウム飽和水溶液,W:水道水,S:モルタル用JIS標準砂)

Table.2 使用材料の種類と物性値

材料名	記号	種類および物性値
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm ³
細骨材	S	洗砂, 表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率1.51%, 粗粒率2.97
粗骨材	G	砕石1505, 表乾密度2.67g/cm ³ , 吸水率0.32%, 粗粒率6.62
SAスラリー	SA ₁	SA ₂ を活性化処理したSAスラリー (SA固形分26.3%の液体)
粒度調整灰	SA ₂	東京都下水道サービス 密度2.60g/cm ³
混和剤	SP	高性能AE減水剤 コンクリート製品用ポリカルボン酸系

Table.3 SA₂およびCの主要化学成分値

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅
SA ₂	33.33	13.43	6.10	12.76	4.00	1.92	22.06
C	23.00	3.80	3.60	65.00	2.30	-	-

1バッチの容量を30Lとして、空練り60秒、注水後90秒の合計120秒間練り混ぜた。ミキサから排出後、振動成形では円柱供試体(内径100mm,高さ200mm)と遠心成形供試体(内径120mm,外径200mm,高さ300mm)を作製した。円柱供試体では、各材齢の数量をテーブルバイブレーターに載せ、型枠容量の半分を詰めた後に30秒加振し、一旦停止してから型枠上部まで詰め、振動をかけながら上面を小手で仕上げた。遠心成形は、型枠内に16kgのコンクリートを投入し、低速(5G,236rpm,2分)、中速(15G,409rpm,1分)、高速(35G,625rpm,7分)にて成形した。コンクリートの養生は、蒸気養生と封緘養生とした。

Table.4 コンクリートの配合

配合 No.	SA置換率 (%)	Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
							W	C	SA ₁	SA ₂	S	G	SP
1	0	15	4±1.0	2±1.0	36.0	48.2	151	419	0	0	879	978	1.0%
2	10					47.0	59	419	159	0	812	978	1.0%
3	15					46.3	13	419	239	0	779	978	1.1%
4	10					47.0	151	419	0	41.9	838	978	1.2%

蒸気養生ではSAに含まれるリン化合物による凝結遅延の影響を考慮し、前置き時間を長く設定し24時間とした。蒸気養生後脱型し、所定材齢まで恒湿高温室(室温 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,湿度60% $\pm 5\%$)で気中養生した。封緘養生は、コンクリート打設後に上面をラッピングして所定の材齢まで恒湿高温室で養生し、所定材齢で脱型し圧縮試験を行った。

3.3 試験項目と試験方法

試験項目と試験方法をTable.5に示す。遠心成形時には、余剰水として脱水された遠心スラッジをカップに受け取り、質量と容積を測定し、排出量と密度を測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状をTable.6に示す。配合No.1はSA無混和、No.2とNo.3はSAスラリーを10%と15%砂に置換したものである。SAを10%程度まで置換しても、SP添加率は変わらずスランプも規定値範囲内であった。未処理のSAを使用した配合No.4では、置換率10%の場合SP添加率は1.2%必要であった。以上より、SAスラリーを15%まで置換してもコンクリートフレッシュ性状は良好である。

遠心成形後に排出したスラッジ量をTable.7に示す。表中のスラッジ発生率は、型枠に投入したコンクリート重量(本実験では16kg)に対しスラッジの重量を除いて百分率にしたものである。結果より、SAの混和の有無に関わらず、スラッジ排出量に大きな差異は見られず、その密度もほぼ同等であった。なお一般的な遠心力スラッジの排出量は、経験的に3%程度と言われている。

4.2 圧縮強度

圧縮強度の結果をTable.8に示す。結果より、SAスラリーを混和したものは、無混和・未処理のSAと比して全ての材齢で圧縮強度が増進した。SAには非晶質シリカが含まれているため、セメントと反応してポゾラン反応による強度増進のポテンシャルはあるが、未処理のSAではその効果は少ないものと考えられる。対してSAスラリーでは、強度発現性が高いことが確認された。Fig.1は、No.1の脱型時強度を100としたときの各配合、各材齢の相対強度を示した。SAスラリー無混和では、材齢28日の相対強度が149であるのに対し、SAスラリーを15%混和したものは179となり2割強度が増進した。SAには多くのリン成分が含まれており、セメントの凝結遅延を起こすことが報告されている^{7,8)}。特に蒸気養生などの促進養生を行う場合には、SA

Table.5 各試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランプ試験	JIS A 1101 コンクリートのスランプ試験方法
スラッジ採取	遠心供試体から排出するスラッジをディスポカップにて採取する。
圧縮強度試験	JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法
遠心供試体圧縮強度試験	JIS A 1136 遠心力締めコンクリートの圧縮強度試験方法

Table.6 コンクリートのフレッシュ性状

配合No.	SA置換率 (%)	スランプ (cm)	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	SP添加率 (%)
1	0%	4.0	17.2	1.00
2	10%	3.0	18.7	1.00
3	15%	4.0	18.7	1.10
4	10%	4.0	17.8	1.20

Table.7 スラッジの物性

配合No.	スラッジの重量 (g)	スラッジ発生率 (%)	スラッジの容積 (cc)	スラッジの密度 (g/cc)
1	220.2	1.4%	206.5	1.07
2	265.7	1.7%	240.6	1.10
3	228.2	1.4%	209.5	1.09
4	249.7	1.6%	226.9	1.10

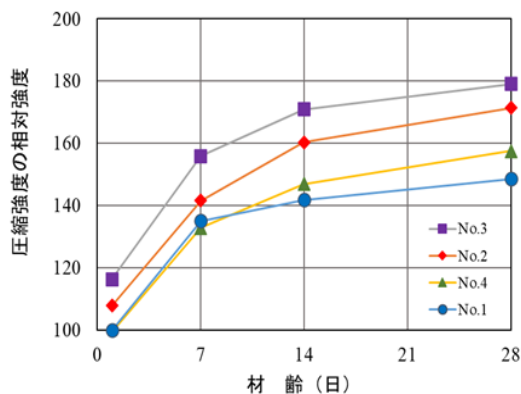
Table.8 各コンクリートの圧縮強度

配合No.	材齢 (日)	円柱供試体 (振動成形)		遠心供試体 (遠心成形)
		蒸気養生	封緘養生	蒸気養生
		圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)
1	脱型時	36.8	---	42.8
	7d	49.7	---	---
	14d	52.2	---	59.0
	28d	54.7	---	---
2	脱型時	39.7	---	49.0
	7d	52.1	53.8	---
	14d	59.0	60.3	68.1
	28d	63.1	65.5	---
3	脱型時	42.8	---	54.7
	7d	57.4	---	---
	14d	62.9	---	71.0
	28d	65.9	---	---
4	脱型時	36.6	---	44.3
	7d	48.9	---	---
	14d	54.1	---	62.2
	28d	58.0	---	---

に含まれるリン成分の影響で圧縮強度に影響を及ぼすとの報告⁹⁾もある。しかし,SAスラリーでは,作製過程で水酸化カルシウム水溶液を用いて活性化処理することで,SA中のリン成分をリン酸カルシウムとして固定化できるため,遅延作用は減少する^{7,8)}。これらの作用がコンクリート実験でも今回初めて確認できた。

封緘養生は,蒸気養生と比してコンクリートへの硬化初期における熱の影響について確認するために実施した。これは,SAスラリーの活性化時に用いた水酸化カルシウムがSA中のリンを固定化し,セメントの凝結遅延を防止できるかの確認である。その結果,配合No.2の封緘養生と蒸気養生では,圧縮強度に大きな変化は見られなかったため,セメントの凝結遅延はなく,コンクリートへの硬化初期における熱の影響もほとんどないと推察される。

Fig.1 各材齢の圧縮強度の相対強度
(円柱供試体・蒸気養生)



5. まとめ

活性化した下水汚泥焼却灰であるSAスラリーのコンクリートへの適用可能性の可否を判断することを目的とした実験を行った。その結果,本実験の範囲内では以下のことが判明し,プレキャストコンクリートへの適用が可能であると結論付けた。

- 1) SAを活性化処理することで,SA添加率の増加に伴うSP添加率の上昇が抑えられ,圧縮強度も増進することから,プレキャストコンクリートへの適用が可能である。
- 2) 排出された遠心スラッジの量と密度は,SAスラリー混和の有無に関わらず変化がないことから,SAスラリーが排出されることはない。

- 3) SAスラリーを10%混和した供試体の蒸気養生と封緘養生を比較した結果,強度発現性に大きな違いは見られなかった。これは,活性化処理を行うことでSA中のリンを固定化しセメントの凝結遅延を防止したためであると考ええる。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局 下水道部：“下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン” -平成29年度版, pp.1-4, 2018
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 下水道部：“下水汚泥広域利活用検討マニュアル”, pp.4-6, 2019
- 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 Pozzolanic 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, pp.21-27, 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
- 9) T. Idenoshita, et al.: Compressive Strength Properties and Microstructure of Mortar Mixed with Sewage Sludge Burned Ash in Various Curing Conditions, *J. Soc. Inorg. Mater., Japan*, Vol. 66, pp.752-757, 2017