

論文 活性化した下水汚泥焼却灰スラリードライ粉のコンクリートへの適用に関する一考察

齊藤 育己^{*1}・鶴澤 正美^{*2}・藤原 颯^{*3}・井川 秀樹^{*4}

要旨：活性化した下水汚泥焼却灰のスラリーがコンクリートに適用可能であることはすでに明らかにしている。しかしスラリー故に含有する水が単位水量を制限するため、添加量は 15%に留まった¹⁾。そこで今回は 105℃で乾燥させたスラリードライ粉を作製し、スラリーとの違い、添加量の上限さらにはコンクリートへの適用可能性を明らかにすることを目的とした。その結果、スラリードライ粉の混合によるフレッシュ性状への影響はほぼなく、圧縮強度は添加量 20%まで増加した。遠心成形でも通常通り成形でき圧縮強度もより増強した。よって活性化した下水汚泥焼却灰スラリードライ粉もコンクリートへ適用可能であると結論付けた。

キーワード：コンクリート、下水汚泥焼却灰、ボールミル混合、遠心成形

1. はじめに

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。2011 年以降、東日本大震災の影響でリサイクル率は 55%まで減少したが、2021 年には 77%まで上昇傾向に転じている²⁾。また、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 2~3 割を占める³⁾。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築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²⁾。しかし、資源として有効利用ができていな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²⁾。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⁴⁾(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の可能性を有している³⁾。SA にはセメント分野の材料として 3 つの長所がある。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を生成し、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⁵⁾ことで、強度などの物性に差が生じにくいことである。しかし、SA を混和材として利用するにあたり 2 つの短

所がある。1)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。2)多孔質であることから高い吸水性があり⁶⁾、コンクリートのワーカビリティーに悪影響を与えてしまうことである。

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、ボールミル混合法における高活性化処理を SA に行い、混合条件の最適化をした⁷⁾。詳細は、後述の 2. 章に示す。さらに今回は、SA スラリーを 105℃で乾燥した SA ドライ粉を作製し、圧縮強度発現性の比較をモルタル供試体で行い、さらにコンクリートでの適用性について論じたものである。

乾燥の必要性は、前報⁷⁾で明らかになったように、スラリーでの利用は含有する水が配合時の単位水量を制限してしまうためである。SA スラリー添加率は水比 36%のコンクリートでは 15%が限界の添加量であった。同様にモルタルでも 20%の添加が限界となる。これは、後述の表-1 の配合を使用することに伴いスラリーで SA を添加する場合、その量に比例した水分も含有するためである。そのため本研究では、SA スラリーを 105℃-24 時間の乾燥によって水分を除いた SA ドライ粉を使用して更に添加率を高め、SA 添加率の限界値とそのときの圧縮強度発現性を明らかにすることを目的とした。また、SA の課題であったリンやワーカビリティーへの影響を確認する目的で、SA ドライ粉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、コンクリートに適用可能であることを確認した。供試体の成形は振動成形と遠心成形とし、蒸気養

*1 日本大学 大学院生産工学研究科 (学生会員)

*2 日本大学 生産工学部環境安全工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 大学院生産工学研究科 (学生会員)

*4 日本ヒューム(株) 技術開発センター 博士(工学) (正会員)

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 スラリーおよび SA スラリードライ粉の作製方法

既往の研究⁷⁾では, SA を混和材として利用し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⁵⁾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最適条件を探索した。その結果, 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 420ml)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 段式ボールミル回転架台を使用しボールミル混合を行う。また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, 混合時間 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 となり, 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。コンクリートへの試料も同様に作製し, 多バッチ処理で必要量を確保した。

3. モルタル実験の概要

3.1 使用材料と配合

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), 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, 特級を溶解)である。加えて, ボールミル混合による活性化 SA スラリーと, それを 105℃で 24 時間乾燥させた SA ドライ粉を使用した。SA ドライ粉添加モルタルの配合を表-2 に示す。SA ドライ粉の添加率は, セメント重量比で 10%, 20%, 30%とし, それぞれ標準砂の部分に外割置換した。

3.2 練り混ぜ方法および成形と養生条件

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.の恒湿室で 24 時間の前置き養生し, 脱型を行った。その後, 材齢期間すなわち 7 日, 14 日, 28 日 20℃で水中養生し, 圧縮強度試験を行った。また, SA スラリ

表-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

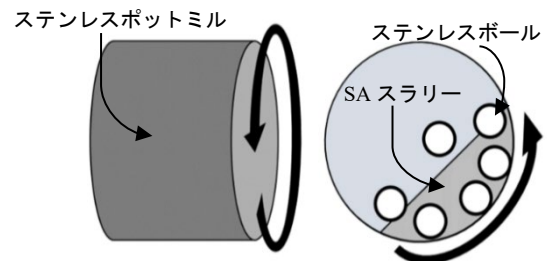


図-1 ボールミル混合のイメージ図

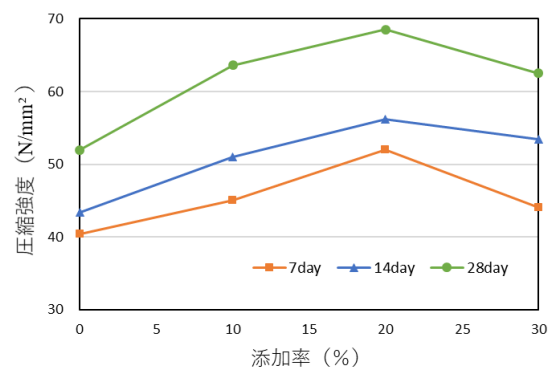


図-2 SA ドライ粉添加モルタルの圧縮強度

表-2 SA ドライ粉添加モルタルの配合

置換率 (%)	W (g)	C (g)	SAドライ粉 (g)	S (g)
0	225	450	0	1350
10	225	450	45	1305
20	225	450	90	1260
30	225	450	135	1215

ーにおける圧縮強度結果¹⁾との比較も行った。

4. 実験結果と考察

SA ドライ粉添加モルタルにおける材齢ごとの圧縮強度結果を図-2 に示す。図-2 より, 材齢に関わらず, 圧縮強度は SA ドライ粉添加率 20%で最も高い値であった。圧縮強度の伸びは添加率 20%以上で上がりにくくなり, 30%では低下に移行した。しかし添加率 30%で添加率 10%とほぼ同等の圧縮強度となり, 無添加の JIS モルタルよりも高い値であった。これらの結果から, SA ドライ粉添加モルタルにおける最大の添加率は約 20%近傍に

あることが判明した。

次に、SA スラリーと SA ドライ粉の圧縮強度の比較を行った。材齢および SA 添加率ごとの圧縮強度推移を図-3 に示す。図-3 より、SA 添加率と材齢が増加するとともに SA スラリーと SA ドライ粉の圧縮強度はともに増大する傾向が得られた。また、同材齢・同添加率において 2 つのモルタルはほぼ同等の圧縮強度となった。これはスラリーの場合もドライ粉の場合も同一重量の SA を含有しているためであると考えている。これらの結果から、モルタルの混和材としての SA ドライ粉は、SA スラリー同様に有効であり取り扱いができることが判明した。

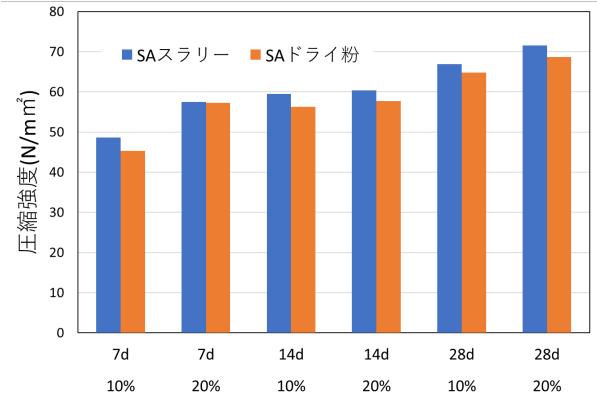


図-3 SA スラリーと SA ドライ粉の圧縮強度比較

5. コンクリート実験の概要

5.1 使用材料と配合

実験に使用する材料を表-3 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。SA ドライ粉は、前報⁷⁾の活性化処理してスラリー化した粒度調整灰 (SA スラリー) を、105℃・24h で乾燥させたもの (以下 SAp と略記) を用いた。粒度調整灰は、前報と同様に東京都下水道サービス株式会社より提供頂いた。SAp に含有する活性化処理前の粒度調整灰 (SA₂) と C の主要化学成分値を表-4 に示す。コンクリートの配合を表-6 示す。コンクリートの設計基準強度は 40N/mm² とした。SAp の添加率はセメントに対する重量比で示した。SAp の密度は細骨材と概ね同じであることから、配合計算上細骨材と同様に扱った。目標スランブは、超固練りのプレキャストコンクリートを想定し、1.0cm±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ブを満足する添加率とした。

5.2 練り混ぜ方法および成形と養生条件

試験項目と試験方法を表-5 に示す。練り混ぜには強制二軸型ミキサを使用し、1 バッチの容量を 30L とした。SAp を十分にコンクリート中に分散させるため、モルタル先行練りとした。すなわちミキサ内に細骨材、セメント、SAp を入れ、空練り 30 秒の後、SP と水を入れ、90 秒間練り混ぜた。モルタルの流動性を目視確認した後、粗骨材を入れて更に 120 秒間練り混粗骨材を入れて更に 120 秒間練り混粗骨材を入れて更に 120 秒間練り混ぜた。ミキサから排出後、振動成形により円柱供試体 (内径

表-3 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ドライ粉	SAp	SAスラリーを乾燥させた粉末 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

表-4 SA₂ および C の主要化学成分値⁷⁾

	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	—	—

表-5 各試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランブ試験	JIS A 1101 コンクリートのスランブ試験方法
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 遠心力締固めコンクリートの圧縮強度試験方法

表-6 コンクリートの配合

配合 No.	SAp混入 率(%)	Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
							W	C	SAp	S	G	Sp
1	0	15	1.0± 1.0	2± 1.0	36.0	48.2	151	419	0	879	978	1.00%
2	10								41.9	837	978	1.35%
3	15								62.9	816	978	1.40%
4	20								83.8	795	978	1.60%
5	30								125.7	753	978	2.40%

100mm, 高さ 200mm) を, 遠心成形により遠心成形供試体 (内径 120mm, 外径 200mm, 高さ 300mm) を作製した。使用した遠心成形機を併用して材料が型枠内に十分に行き渡るようにした。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, 振動をかけながら上面を小手で仕上げた。遠心成形方法は, 型枠内に 16 kg のコンクリートを投入し, 表-7 に示す回転数と時間にて成形した。成形後のコンクリートの養生は, 蒸気養生と封緘養生とした。使用した遠心成形型枠と遠心成形機を写真-1 に示す。蒸気養生では SAp 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。実験で用いた蒸気養生パターンを図-4 に示した。蒸気養生後脱型し, 所定材齢まで恒湿恒温室 (室温 20℃±1℃, 湿度 60%±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恒温室で養生し, 所定材齢で脱型し圧縮強度試験を行った。

6. 実験結果と考察

6.1 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表-8 に示す。配合 No.1 は SAp 無添加, No.2~No.5 はそれぞれ SAp をセメントの重量比で 10%, 15%, 20%, 30% 添加し, 配合上細骨材と外割置換したものである。SAp を添加することで SP 添加率は増加し, 添加率 10% で 1.35%, 20% で 1.60%



写真-1 遠心成形型枠と遠心成形機

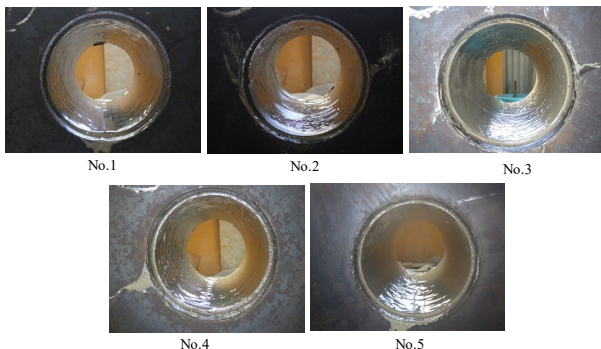


写真-2 遠心成形後の内面性状

表-7 遠心成形法の成型条件

	低速	中速	高速	合計
遠心力 (G)	5	15	35	
型枠回転数 (rpm)	236	409	625	
時間 (分)	2	1	7	10

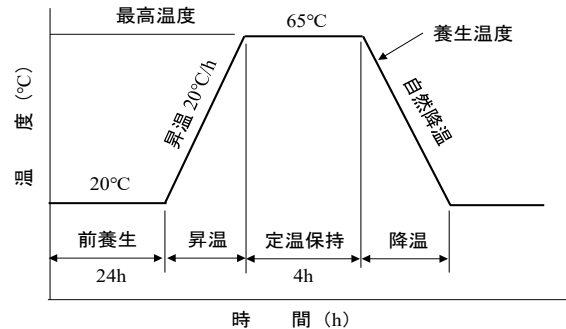


図-4 蒸気養生パターン

表-8 コンクリートのフレッシュ性状

配合 No.	SAp混入率 (%)	スランブ (cm)	コンクリート 温度 (°C)	SP添加率 (%)
1	0%	2.0	23.0	1.20
2	10%	1.5	22.3	1.35
3	15%	0.5	22.5	1.40
4	20%	1.5	21.8	1.60
5	30%	2.0	22.0	2.40

表-9 各コンクリートの圧縮強度

配合 No.	材齢 (日)	円柱供試体		遠心供試体
		蒸気養生 圧縮強度 (N/mm ²)	封緘養生 圧縮強度 (N/mm ²)	蒸気養生 圧縮強度 (N/mm ²)
1	脱型時	42.0	---	48.8
	7d	56.7	---	---
	14d	59.6	---	65.0
	28d	61.6	---	---
2	脱型時	49.4	---	55.8
	7d	63.1	---	---
	14d	66.0	---	70.4
	28d	67.9	---	---
3	脱型時	51.8	---	57.4
	7d	64.9	64.9	---
	14d	69.5	74.6	71.9
	28d	71.3	83.5	---
4	脱型時	53.3	---	58.3
	7d	66.3	---	---
	14d	73.0	---	73.1
	28d	76.2	---	---
5	脱型時	50.3	---	56.8
	7d	63.0	---	---
	14d	69.7	---	72.2
	28d	71.9	---	---

まで増加した。しかし添加率を 30% まで増加させると SP 添加率は 2.40% と 0% 添加の倍量となった。コンクリートのフレッシュ性状は良好であったが, SP の添加がこれ

以上は使用規定量を超えるため、SApの添加限界値が添加率30%付近に有ることが示唆された。遠心成形性では、成形後の内面仕上がり状態を目視確認した。遠心力によってコンクリート中の骨材よりも軽量の微粒子が内面に排出されるため、その仕上がり性状が特に重要になる。写真-2は各配合の遠心成形後の内面状況である。概ね仕上がり状態は配合による変化は見られず良好であった。

6.2 圧縮強度

圧縮強度の結果を表-9に示した。強度発現状況をわかりやすくするため、SApを添加した蒸気養生による円柱供試体（配合No.2～No.5）の圧縮強度を、無添加（配合No.1）の脱型時強度を100としてその相対強度を図-5に示した。SAp無添加では材齢28日の相対強度が147であるのに対し、SApを20%添加したものは181と明らかな強度増進が認められた。SApに含まれるSAには既往の文献⁹⁾で述べられているように非晶質シリカが含まれているため、ポズラン反応による強度増進の可能性があると考えている。一方、SApの主成分であるSAに含まれる多くのリン成分の影響については前報⁷⁾でも考察しているが、セメントの凝結遅延を起こすと言われている^{8,9)}。特に蒸気養生などの促進養生を行う場合には、圧縮強度に影響を及ぼすとの報告¹⁰⁾もある。しかしSApの作製過程のSAスラリーでは、水酸化カルシウム水溶液を用いて活性化処理するため、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、遅延作用は少なくなる^{8,9)}。このことは、前報⁷⁾と同様にSAスラリーを乾燥させたSApのコンクリート実験でも再現できた。さらに前置き時間を24時間にして十分な硬化時間を確保したことも、このような結果が得られた一因であると考えている。次に、SApの最適添加量を判断することを目的に、図-5の横軸をSApの添加率として圧縮強度の値を整理し図-6に示した。図-6も図-5と同様に、No.1の脱型時強度を100とした。図-6からSApの添加率が約20%にピークがあることが判明した。この結果はモルタルの実験と同様であった。20%以上で圧縮強度が減少する原因は明らかではないが、ポズラン反応に必要な十分な水酸化カルシウムがセメントの水和によって生成・供給されないことも一因としてあると考えている。いずれにしても配合に対して適正な添加量が存在すると考えている。

封緘養生は、蒸気養生と比較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SApの作製過程である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、セメントの凝結阻害を防止できるのかの確認である。その結果を図-7に示す。SApを15%添加したもの（配合No.3）の封緘養生と蒸気養生では、材齢7日での圧縮強度に大きな変化は見られないことから、セメントの凝結

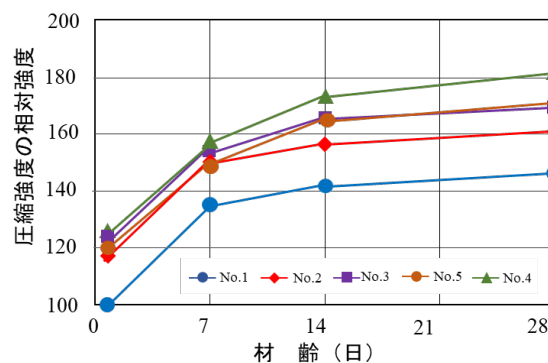


図-5 各材齢の圧縮強度の相対強度
(円柱供試体・蒸気養生)

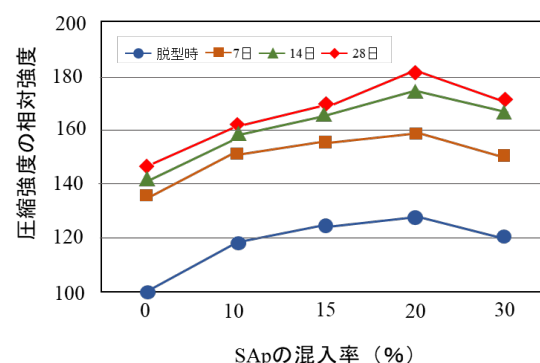


図-6 SAp混入率と圧縮強度の相対強度
(円柱供試体・蒸気養生)

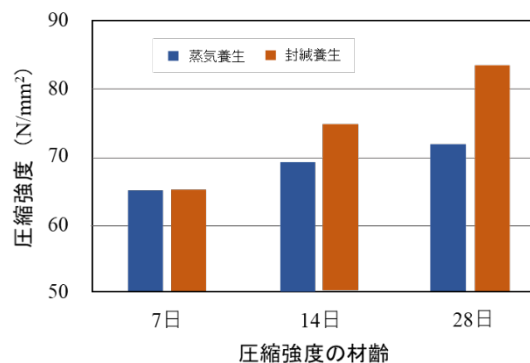


図-7 蒸気養生と封緘養生 (SAp15%添加)

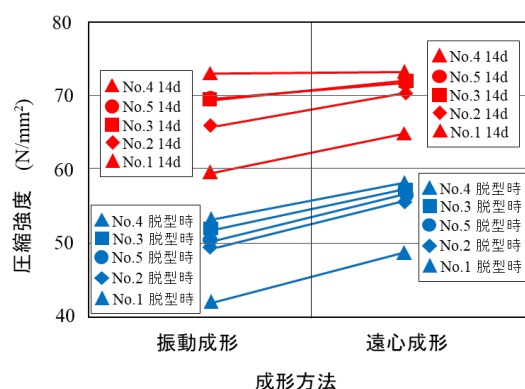


図-8 振動成形と遠心成形の圧縮強度の違い

阻害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かったと推察される。その後の材齢においては、封緘養生の方が強度の増加が大きく、材齢 28 日では 10N/mm^2 以上の強度増進が認められた。円柱供試体（振動成形）と遠心供試体（遠心成形）での圧縮強度の違いを図-8 に示す。同一のコンクリートを用いても遠心成形の方が圧縮強度は大きくなる傾向にあった。これは、混練に必要な余剰水が遠心成形時に脱水され、水セメント比が僅かに低下したためと考えられる。しかし、SAp の添加率が増え材齢 14 日以上になると、強度の伸びは鈍化し、NO.4 水準ではほぼ同等の強度を示した。これは振動成形と遠心成形では僅かではあるが水セメント比が違うことによる現象の可能性も考えられる。詳細は不明であるが、成型方法によって最大強度を示す適正な添加率があると考えている。以上のことから、SAp をコンクリートに混和しても、無添加（配合 No.1）と同様に遠心成形が可能で圧縮強度も増加することは、SA スラリーと同様であることが確認できた。

7. まとめ

活性化した下水汚泥焼却灰である SA スラリーを乾燥させて粉体化した SA ドライ粉のコンクリート用混和材としての適用可能性について判断することを目的に実験を行った。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にも適用できることが可能であるとの結論を得た。

- 1) SA を活性化処理して乾燥させた SA ドライ粉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 15% であったのに対し、30% までの添加が可能であった。これは、モルタルとコンクリートで同様な傾向を示した。
- 2) SA ドライ粉を添加したモルタルおよびコンクリートの圧縮強度は、添加率が約 20% でピークとなった。この原因は明らかではないが、ポズラン反応に必要な水酸化カルシウムがセメントの水和によって生成・供給されないことも一因としてあると考えている。
- 3) SA ドライ粉を使用したコンクリートは、円柱供試体への充填も良好で、遠心成形も可能であった。またフレッシュ性状も混和剤で調整可能であり、SA スラリーと同様にコンクリートへの適用性があると判断した。

謝辞

本研究の SA ドライ粉の製作に使用した粒度調整灰の提供において、東京都下水道サービス株式会社に多大なご協力を賜った。ここに感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 藤原 颯, 福永晃久, 鶴澤正美, 井川秀樹 : 活性化した下水汚泥焼却灰のコンクリートへの適用に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No.1, pp.106-111, 2023
- 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) 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, pp.24-46, 2023.
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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