

下水汚泥焼却灰中のリンによる凝結遅延とその対策

日大生産工(院) ○衣袋 雄太 日大生産工 鶴澤 正美

1. 諸言

下水汚泥焼却灰とは下水処理場の沈澱池や反応タンクに発生した汚泥を焼却したものである (Fig.1). 産業廃棄物排出量は年間3.8億トンであり, 下水汚泥はそのうち約234万トン占める¹⁾. 東日本大震災の影響でリサイクル率が55%まで低下したが, リサイクル率は2017年に73%まで回復した. しかし, 資源としての利用はごく一部に限られており, いまだ下水汚泥の約3割が埋め立て処分されている.²⁾ 汚泥処分費には下水道維持管理費の約9% (約450億円) を占めるまでになっている³⁾. そのため, 下水汚泥焼却灰を資源として有効利用するための開発により環境にやさしい製品としての価値を高めることが重要である. 下水汚泥焼却灰の主な用途として建築資材としての再利用が行われている⁴⁾. さらに近年ではエネルギー問題への取り組みとして下水汚泥を利用したバイオマス発電などの研究も行われている⁵⁾.

本研究では下水汚泥焼却灰の主成分であるシリカ成分に着目した混和材としての利用を検討した. シリカ成分はセメントの硬化反応である水和の際にカルシウムと再結合することによりポゾラン反応を生じる. この際生じたケイ酸カルシウム水和物はコンクリートの強度増進効果を持つ. また, 年間を通して含有成分のばらつきが少なく安定している⁶⁾ことから有望な未利用資源の一つである. しかし下水汚泥焼却灰にはリン成分が多量に含まれる. リン成分はセメントの硬化に悪影響を与えることが分かっている. すなわちセメントが水和反応する際にリン成分がセメントの主成分であるAliteやBeliteと反応し, 水和を遅延させる凝結遅延現象が生じることが一般に知られている. 加えて下水汚泥焼却灰を添加した際, 多孔質性である⁷⁾ことから高い吸水性を持ち, セメントの流動性に関して影響が出る. そのため, コンクリートの混和材としては2~3%程度の添加率にとどまっているのが現状であり, 大量使用可能な技術開発が望まれている. コンクリート混和材成分としての使用が可能となれば, 下水汚泥焼却灰の利用率の向上, 埋め立て処分費の低減, コンクリート製品のエコ認証, 高強度化など, 産業的にも波及効果が大きな成果につ

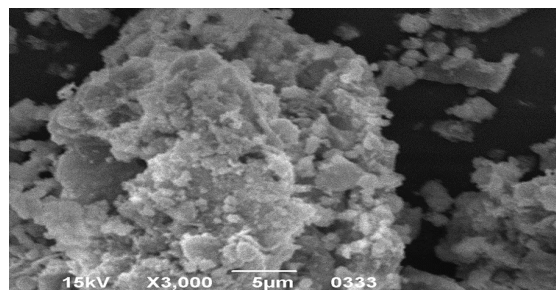


Fig.1 The scanning electron microscope image of sewage sludge burned ash.

ながる基礎技術であると考えている. 凝結遅延を解消する, または大量使用が可能となる独自技術の開発が急務となるため, 本研究の目的とした.

これまでに著者らの研究チームは, 下水汚泥焼却灰に関する検討では混和材として使用した際の影響に関する検討やモルタルの微細構造に関する検討を行っている⁸⁾. また, モルタルの養生条件について検討を行い, 強度特性について検証することで下水汚泥焼却灰の強度増進が見られることを解明している⁹⁾. 加えて, 凝結遅延現象を抑制するための対策として水酸化カルシウムによる攪拌処理条件や攪拌による下水汚泥焼却灰中の成分変化に関する検討¹⁰⁾を行ってきた. 特に飽和水酸化カルシウム水溶液を用いた攪拌処理について検討した. その結果改善効果が得られたが, 問題を完全に解消するには至らなかった. そこで本研究では, 長期養生を行った上での圧縮強度について検討を行ったものである. また, 既存のコンクリート混和材であるフライアッシュと高炉スラグを使用し, 圧縮強度や強度特性の比較検討も行った. さらに, 添加率の異なる供試体についても同様に比較検討を行い, 下水汚泥焼却灰のコンクリート混和材としての利用可能性について検討を行ったものである.

2. 材齢24時間の圧縮強度

2.1 概要

下水汚泥焼却灰に対して事前に対策を施すことで凝結遅延を解決することは難しいことから長期的強度変化について検討した. これまでの研究

Study on Setting Delay of Concrete by Phosphorus in Sewage Sludge Burned Ash Powder and its Countermeasure

Yuta IBUKURO, Masami UZAWA

Table.1 Composition of mortar for compressive strength test

W/C /%	SA content /%	Composition of mortar /kg・m ⁻³			
		W	C	SA	Standard sand
50	0	225	450	0	1350
	10			45	1305

ではモルタル凝結の極めて初期の段階について検討を行ってきた。そこで今回は24時間後の脱型強度について検討することで、リン成分による凝結遅延現象が24時間後の脱型強度にどの程度影響を及ぼすのか確認した。

2・2 実験方法

1) 使用材料配合条件

使用材料使用材料は普通ポルトランドセメント(C:密度 $3.16\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),下水汚泥焼却灰(SA:密度 $2.60\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),上水道水(W),標準砂(セメント協会強さ試験用),飽和水酸化カルシウム水溶液(関東化学 鹿1級を溶解)である。

2) 実験手順

練混ぜの手順は「JIS R 5201セメントの物理試験方法」に準拠した。配合表はTable.1に示した。下水汚泥焼却灰は未処理のものと飽和水酸化カルシウム溶液で攪拌処理を2回行った後、乾燥させたものを使用した。圧縮強度試験用の供試体は練混ぜ終了後、 $\phi 5\times 10\text{cm}$ のスチール製円柱型枠を用いて供試体を作製した。材齢は20°Cの恒温室内で練混ぜ、成形24時間後に脱型を行ったものを供試体とした。圧縮強度試験ではアンボンドキャッピングを使用して測定を行った。圧縮強度試験は「JIS A 6201 附属書2」に準拠して測定した。荷重速度は $0.2\text{N}/\text{sec}$.で行い、4本の測定値を平均した値を結果とした。

2・3圧縮試験結果および考察

Fig.2に処理別に下水汚泥焼却を10%添加した供試体の24時間後の圧縮強度試験の結果を示す。未処理の下水汚泥焼却灰を添加した供試体や飽和水酸化カルシウム溶液処理を行った供試体では無添加条件と比較しても強度の差がほとんどない結果であった。これより24時間後の脱型強度に関しては大きな差はなく、下水汚泥焼却灰中のリンによる遅延現象の影響は小さいと確認できた。結果として下水汚泥焼却灰を10%使用した際、凝結初期段階での遅延現象は24時間後の強度に対して大きな影響を与えないと思われる。そして処理を行わなかったとしても圧縮強度に関しても大きな差異が発生しない。この結果よりさらに長期間の養生を行うことにより凝結遅延の影響は解消されると推察した。また、実用化を目標とする上で未処理の状態でも十分に利用の可能性が高いと考えられる。この結果は下水汚泥焼却灰

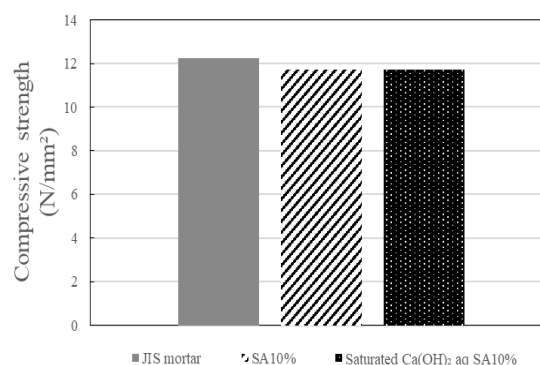


Fig.2 Relationships between various treatment conditions and compressive strength.

を混和材として用いる際、大きなメリットとなると考えている。

3. 種々の混和材によるモルタル強度特性比較

3・1概要

上記の圧縮試験結果から、下水汚泥焼却灰を攪拌処理しない状態で混和材として使用しても供試体の圧縮強度はJIS規格に基づいたモルタル供試体と大きな差異は生じなかった。これに基づき下水汚泥焼却灰による凝結遅延現象は凝結初期に対して大きく作用するが、短期、長期的な強度変化に対して大きな影響を及ぼすものではないと考えた。そのため24時間以降の材齢についても未処理の状態でも混和材として使用して圧縮強度試験を行うこととした。本研究では材齢を7日、14日、28日、56日、91日と設定した。加えて、添加量を変化させた場合についても検討した。これは、添加した際の強度変化の特性と適正な添加量を把握するためである。加えて現在用いられている他のコンクリート混和材との強度比較を行い、混和材としての可能性について検討した。

3・2 実験方法

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 $3.16\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),下水汚泥焼却灰(SA:密度 $2.60\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),高炉スラグ(BFS:密度 $2.80\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),フライアッシュ(FA:密度 $2.23\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),上水道水(W),標準砂(セメント協会強さ試験用),減水材(NS:ナフタレンスルホン酸塩系)である。

2) 配合条件, 供試体成形

Table.2, Table.3, Table.4それぞれに圧縮強度用供試体の配合表を記す。下水汚泥焼却灰は未処理の状態でも添加した。下水汚泥焼却灰, 高炉スラグ, フライアッシュをセメントの質量比で5%, 10%, 20%の割合でそれぞれ標準砂と外割り置換した。下水汚泥焼却灰は添加が増加すると吸水性の高さから供試体成形に支障をきたす可能性が

Table.2 Composition of mortar for compressive strength test in Sewage sludge burned ash.

W/C /%	SA content /%	Composition of mortar /kg・m ⁻³				
		W	NS	C	SA	Standard sand
50	0	225	0		0	1350
	5			450	22.5	1327.5
	10	222.75	2.25		45	1305
	20	220.5	4.5		45	1260

Table.3 Composition of mortar for compressive strength test in Blast furnace slag.

W/C /%	BFS content /%	Composition of mortar /kg・m ⁻³			
		W	C	BFS	Standard sand
50	0			0	1350
	5			22.5	1327.5
	10	225	450	45	1305
	20			45	1260

Table.4 Composition of mortar for compressive strength test in Fly ash.

W/C /%	FA content /%	Composition of mortar /kg・m ⁻³			
		W	C	FA	Standard sand
50	0			0	1350
	5			22.5	1327.5
	10	225	450	45	1305
	20			45	1260

あったため減水剤を上水道水と内割り置換した。練混ぜの手順は2.の実験と同様である。供試体は練混ぜ終了後、φ5×10cmのスチール製円柱型枠を用いて供試体を作製した。

3) 養生条件、圧縮試験

スチール製円柱型枠を用いて供試体を成形後、20℃の恒温槽で24時間の前置養生を行った。その後脱型を行い、20℃の水中養生を材齢期間すなわち7日、14日、28日、56日、91日行った。圧縮強度試験では2.と同様である。

3・3圧縮強度試験結果および考察

Fig.3に下水汚泥焼却灰、Fig.4に高炉スラグ、Fig.5にフライアッシュを混入させた供試体の圧縮強度試験結果を記す。Fig.3より、下水汚泥焼却灰を混和材として使用すると無添加の圧縮強度よりも高い強度を得られることが確認できた。これより下水汚泥焼却灰を添加した際、凝結遅延は長期の養生期間を経ることで凝結に対する影響は少なくなると推察される。混和材無添加の供試体よりも高い圧縮強度を得た要因としてはポズラン反応による強度増進効果によるものと推察した。また、今回の結果では、下水汚泥焼却灰の添加量を変えても、圧縮強度に大きな差異は生じてい

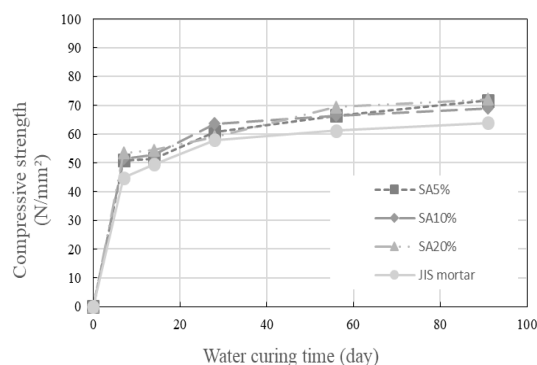


Fig.3 Relationship between Water curing time and Compressive strength in Sewage sludge burned ash

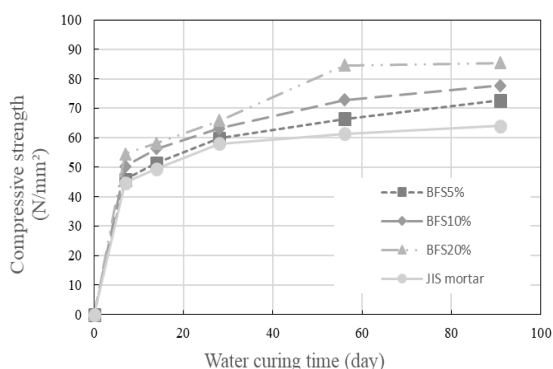


Fig.4 Relationship between Water curing time and Compressive strength in Blast furnace slag.

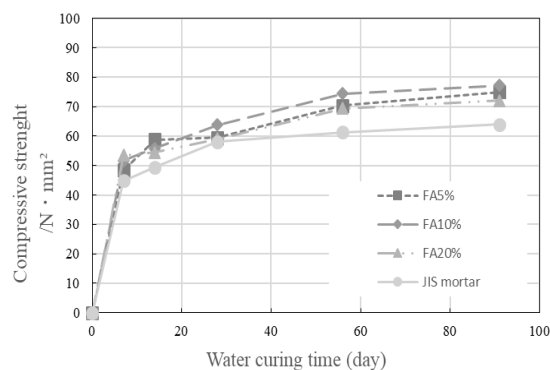


Fig.5 Relationship between Water curing time and Compressive strength in Fly ash.

ない。加えて、20%の添加量であっても圧縮強度この点は大量使用を実現していく上で大きなメリットであると推察される。結果として、リン成分を含んでいる下水汚泥焼却灰であってもポズラン反応による強度促進は行われると推定している。加えて、添加率の低下することはなかった。この点は大量使用を増加に伴う強度低下が見られないことから、高い混合率でも十分に利用可能な可能性があると推定している。一方、高炉スラグを使用した供試体の強度は下水汚泥焼却灰を使用したものより

Table.5 Compressive strength increase rate. (%)

day	7	14	28	56	91
JIS mortar	100	110	130	137	143
SA5%	100	101	119	131	141
SA10%	100	103	124	129	134
SA20%	100	102	110	130	135
BFS5%	100	112	131	145	159
BFS10%	100	112	125	145	154
BFS20%	100	107	121	155	157
FA5%	100	122	123	145	155
FA10%	100	108	124	144	150
FA20%	100	107	124	150	158

大きく増加している。長期的に高い強度を得る混和材として下水汚泥焼却灰は適していないと思われる。この強度の差がリン成分による影響なのか下水汚泥焼却灰中のシリカ成分の量に起因するものなのかは今後の課題である。また、下水汚泥焼却灰を20%添加した圧縮強度がフライアッシュを使用した圧縮強度と大きな差異が見られなかった。本実験条件においては下水汚泥焼却灰を混和材として使用すると主にフライアッシュを添加したものと同等の強度を得られることが確認された。Table.5に材齢7日の圧縮強度を100%として、その後の強度増進を示したものを示した。下水汚泥焼却灰を添加した供試体の強度増進は他の供試体に比べてやや低いことが分かる。また、91日でも強度低下を起こしていないことも確認できた。下水汚泥焼却灰を添加した際、強度発現は養生短中期的に顕著となる性質が確認された。以上の点から下水汚泥焼却灰をコンクリート混和材として使用した場合、利用の可能性は十分ある材料であると考えられる。

4. 今後の展望

以上の結果から下水汚泥焼却灰はコンクリート混和材として使用した際に凝結遅延が発生する。しかし、リンによる凝結遅延はモルタルの凝結段階における極めて初期の段階において影響が大きいものの長期間の養生を経ることにより影響は小さくなっていくことが明らかとなった。加えて、JISモルタルよりも高い強度を得ることが出来た。今回の実験条件の範囲においては、下水汚泥焼却灰のコンクリート混和としての利用は可能であると推察される。使用用途の例としては、コンクリート凝結時の水和熱抑制が挙げられる。JISモルタルと比べて凝結初期からゆっくりと強度上昇をしていく特性から、構造物内で発生する水和熱の抑制に効果的であると推察される。例えばダムや大型構造物を施工する際の温度ひび割れ防止として提案の可能性を考えている。一方で実際にコンクリート

混和剤として使用するためには注意点もある。まず、下水汚泥焼却灰は吸水性が高い。練混ぜの際にワーカビリティが低下することから、添加量が多い場合には必要に応じて減水剤の使用を検討する必要がある。加えて、フローロスも大きいことから、施工には注意が必要となる。また、凝結遅延の影響は凝結初期の段階で大きな影響が生じることから特にコンクリート打ち込み直後の養生が重要である。十分に水分を与えて湿潤状態を保ち、高温にすることなく室温程度の安定した温度で養生する必要がある。これより脱型に問題ない強度を得ることが可能である。以上の点に関して考慮すれば、下水汚泥焼却灰は、コンクリート混和材として十分使用可能な資源と推察される。

5. 結言

- 1) 下水汚泥焼却灰を混和材として使用する前に凝結遅延対策を行うことで改善は見られるが完全な解決は難しい。
- 2) 下水汚泥焼却灰を未処理の状態で添加したとしても凝結遅延の影響は長期的には大きいものではない。長期材齢においても影響は少ないと推察される。
- 3) 本研究の範囲では、下水汚泥焼却灰の添加率20%まで強度低下は確認されなかった。そのためコンクリート混和材としての使用できる可能性が高いと考えられる。

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科学技術ガイドライン 平成29年度版pp.1-3, (2018)
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 下水道部 下水道広域利用検討マニュアル pp.4-5, (2019)
- 3) 日本下水道施設管理業協会,第4回下水道のこと業運営のあり方に関する検討会,資料4
- 4) 鶴田 浩章, 木場 宏, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, 2009
- 5) 坂井 悦郎, 二戸 信和, 鯉渕 清, 大門 正機, Journal of the Society of Inorganic Materials , Japan, Vol.10, pp.19-24 (2003)
- 6) 井手野下 俊明, 鶴澤 正美, 山口 晋, 前田 正博, 井川 秀樹, Journal of the Society of Inorganic Materials , Japan, Vol.23, PP.278~283 (2016)
- 7) 井手野下 俊明, 鶴澤正美, 山口晋 前田正博, 井川秀樹, 保坂成司, 材料, Vol.66, No.10, pp.752-757 (2017)
- 8) 伊藤 遼哉, 鶴澤 正美, 前田 正博, Journal of the Society of Inorganic Materials , Japan, Vol.25, PP.21~27 (2018)