

下水汚泥焼却灰を混入したモルタルの蒸気養生における強度特性と微細構造

日大生産工(院) ○井手野下俊明 日大生産工 鶴澤正美

1 諸 言

下水汚泥焼却灰は下水汚泥の焼却時に発生する燃焼灰 (Fig.1) のことであり, 下水道普及率の増加に伴い発生量は増加傾向にある. Table1は本実験で使用した下水汚泥焼却灰の主成分の化学組成である. この表よりリン (P_2O_5) が約20%含まれているが, 筆者らが着目したのはリンではなくシリカ成分 (SiO_2) である. 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してポズラン反応を生じ強度増進効果がある.

本研究では, 下水汚泥焼却灰の特徴を捉えコンクリート混和材としての可能性を見出し, 下水汚泥焼却灰の利用率向上をめざし, 結果として埋め立て処分量, 処分費の削減を目的として,

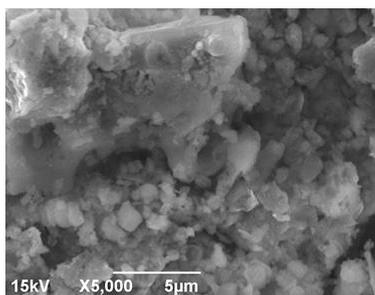


Fig. 1 The scanning electron microscope image of sewage sludge burned ash.

Table 1 Main components of sewage sludge burned ash.

Component	(%)
SiO_2	33.33
Al_2O_3	13.43
Fe_2O_3	6.10
CaO	12.76
MgO	4.00
K_2O	1.92
P_2O_5	22.06

下水汚泥焼却灰のコンクリート混和材への適用性の可否について, モルタルの凝結時間への影響, フライアッシュとの比較を蒸気養生における強度変化と微細構造の観点から研究を行った.

2 実験方法

2.1 使用材料

実験に用いた使用材料は, 水道水, 普通ポルトランドセメント (密度 $3.16g/cm^3$, 粒径 $10\mu m$), 下水汚泥焼却灰 (SA: 密度 $2.6g/cm^3$, 粒径 $80\mu m$ 以下), フライアッシュ (FA: 密度 $2.2g/cm^3$), 珪石粉末 (密度 $2.6g/cm^3$, 粒径 $24\mu m$), 珪砂 (密度 $2.56g/cm^3$, 粒径 $0.8-0.3mm$), 高性能減水剤としてナフタレンスルホン酸塩系のマイティー150(以下 NS), ポリカルボン酸エーテル化合物のレオビルト SP8HU(以下 SP)の2種類を使用した.

2.2 試験項目

1) 凝結時間試験: 下水汚泥焼却灰を混和材として利用する最大の課題はリンが含まれていることである. リンはセメントの硬化反応である水和を大幅に遅らせたり, 停止させたりする. よって下水汚泥焼却灰中にあるリンの影響を知るためにコンクリートの凝結試験方法「JIS A 1147 コンクリートの凝結時間試験方法」に基づき貫入抵抗試験装置を用いて行った.

2) モルタルフロー試験: 下水汚泥焼却灰を添加するごとの流動性の変化を測定するため, 流動性を一定にする目的で減水剤を使用し, 0打モルタルフロー試験で簡易に測定した. 今回の実験において試料の練り上がり時の0打モルタルフロー値は $170mm \pm 10mm$ の範囲に収まるように減水剤の種類および添加量を調節した.

3) 強度試験: 圧縮強度試験を行った. 蒸気養生後と水中養生後の供試体を用いて行った.

Compressive Strength Properties and Microstructure of Mortar Mixed with Sewage Sludge Burned Ash in Steam Curing

Toshiaki IDENOSHITA and Masami UZAWA

Table 2 Composition of mortar in setting time test.

W/C (%)	SA content (%)	(kg/m ³)			
		W	C	SA	standard sand
50	0	225	450	0	1350
	5			23	1328
	10			45	1305
	15			68	1283
	20			90	1260

Table 3 Mortar composition for flow test.

W/C (%)	SA content (%)	(kg/m ³)			
		W	C	SA	standard sand
50	0	225	450	0	1350
	5			23	1328
	10			45	1305
	15			68	1283
	20			90	1260

Table 4 Composition of mortars for measuring compressive strength.

W/C (%)	SA Content (%)	(kg/m ³)				
		W*	C	SA	Q	S
40	0	260	650	0	234	1138
	5			33	201	
	10			65	169	
	15			98	136	
	20			130	104	
W/C (%)	FA Content (%)	(kg/m ³)				
		W	C	FA	Q	S
40	0	260	650	0	234	1138
	5			33	196	
	10			65	157	
	15			98	119	
	20			130	80	

試験の載荷速度は 0.5kN/sec とした。なお、圧縮強度は 4 本の測定値を平均した値を結果とした。

4) 微細構造の解析：水銀圧入法を用い、細孔直径測定を行った。範囲は 3nm~100μm とした。解析試料は蒸気養生後と水中養生後の供試体を、ダイヤモンドカッターで 3~5mm の角片に切断し、30 分間アセトンに浸け水合を停止した後、72 時間の D-dry 処理を施したものを使用した。

5) 粉末 X 線回折測定：ポズラン反応を生じ強度増進効果を期待するシリカ成分の一種であるアノサイト(NaSi₃AlO₈)および水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)の確認を目的として CuKα 線による粉末 X 線回折測定を行った。

測定条件は走査範囲 5~60°, 走査速度 2°/min, 管電圧 30kV, 管電流 15mA とした。解析試料には圧縮強度試験後の供試体の欠片を金属製乳鉢で粗く砕いた後、メノウ製乳鉢で粉末状にしたものを用いた。

2・3 配合および供試体作製

練り混ぜは 20°C の恒温室内でホバート機を用いて行った。

Table 2 に凝結時間試験の配合を示す。凝結時間試験は「JIS R 5201 セメントの物理試験方法」の練り混ぜ手順をもとに行い、下水汚泥焼却灰はセメントの質量比で 5% 刻みで 20% まで添加し、セメント強さ試験用標準砂と置換した。

Table 3 にモルタルフロー試験の配合表、Table 4 に圧縮強度試験の配合表を記す。モルタルフロー試験高性能減水剤は各配合から外割でセメントの質量比で添加し、圧縮強度試験は高性能減水剤を水と内割りで添加した。下水汚泥焼却灰はセメントの質量比で上記と同様に 20% まで添加し、けい石粉末と置換した。

3 試験結果および考察

3・1 凝結時間試験に関する検討結果

fig.2 に凝結時間試験の結果を記す。始発(貫入抵抗値 3.5N/mm²)になるまでの時間を始発時間といい、終結(貫入抵抗値 28N/mm²)になるまでの時間を終結時間という。Fig.2 より下水汚泥焼却灰を添加するごとに凝結時間が遅延する結果となった。無添加の始発時間が 4 時間、終結時間が 8 時間となっている

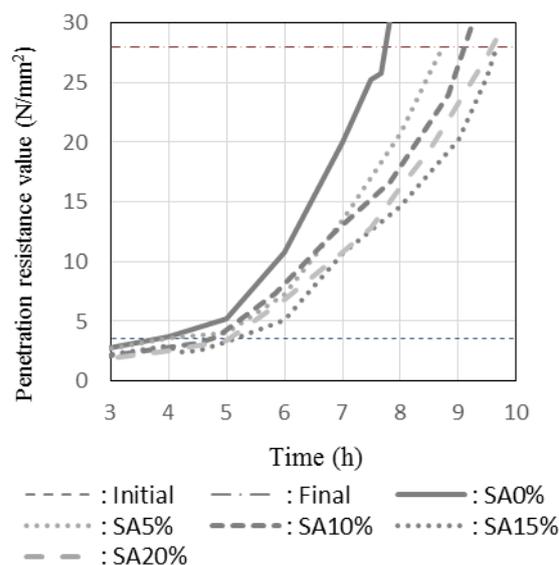


Fig.2 Relationship between time and penetration resistance value in setting test.

が添加するごとに始発、終結時間の両方に遅れがでる結果が認められた、その凝結遅延は最大添加率15%、20%をピークに始発時間は最大で1時間、終結時間は約2時間の遅延が認められた。以上の結果から、下水汚泥焼却灰はセメントの硬化反応である水和を遅延させるが、停止させるまでには至らなかったことがわかる。

3・2 モルタルフロー試験に関する検討結果

Fig.3にモルタルフロー試験結果を示す。無添加である0%のモルタルフロー値を減水剤で調整した結果、マイティーでセメント比2.2%で範囲内に収めることができたが、下水汚泥焼却灰を5%添加すると添加率が2.5%と増える結果となった。また焼却灰添加率10%以降はSPに使用変更をした。SPに使用変更した焼却灰添加率10%以降も同様に焼却灰の添加増加に伴い高性能減水剤の量も増加した。この結果は既往の文献でも示されている⁹⁾。この結果から同等のモルタルフロー値を得るには、減水剤の添加量の調整もしくは種類を適切に選定することで、流動性をコントロールできることは判明した。

3・3 圧縮強度に関する検討結果

Fig.4に圧縮強度試験結果を記す。蒸気養生65°Cの場合の結果であるが、フライアッシュでは添加をしても強度は変わらない傾向であった。一方、下水汚泥焼却灰では添加するごとに強度が上がる傾向が認められ、特に添加率20%ではフライアッシュと比べて約15(N/mm²)強度に差があることがわかる。フライアッシュの反応性SiO₂は混合することでポズラン反応により高強度を発現するが、65°C環境下ではフライアッシュによるポズラン反応は生じないことが判明した。これに対して、下水汚泥焼却灰の場合では、けい石粉末よりも下水汚泥焼却灰中のSiO₂の方が反応をより活発に反応を引き起こしたことで、下水汚泥焼却灰の添加による高強度発現が得られたと推察した。この強度発現機構を解明するために、微細構造解析を行った。

3・4 微細構造に関する検討結果

供試体を水銀圧入法で測定した空隙分布をFig.5、に示す。下水汚泥焼却灰の添加率が増えるごとに全空隙量が減少し、3~6nmのゲル空隙量が增加する傾向が認められた。また、ゲル空隙と圧縮強度の関係の結果から両者には直線的な高い相関性があり、圧縮強度の増加はゲル空隙量に大きく依存しているといえる。既往の研究結果より3~6nmのゲル空隙はケイ酸カルシウム水和物の非晶質体であるC-S-Hに対応し²⁾、C-S-Hは空隙を充填して組織を緻密

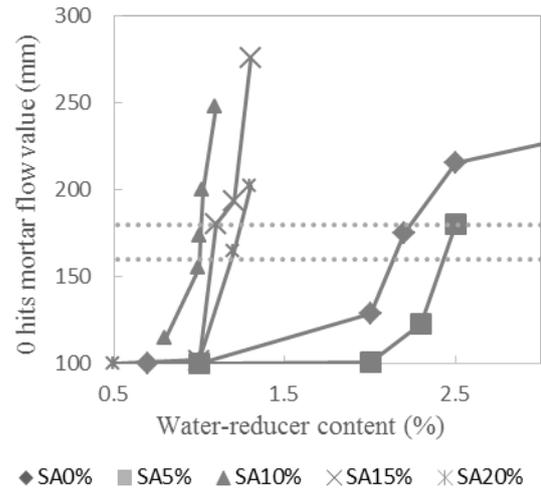


Fig.3 Relationships between water-reducer contents and mortar flow values (0 hits).

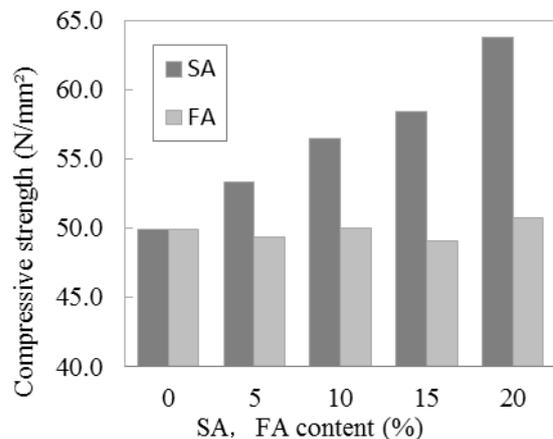


Fig.4 Relationships between contents of admixtures and compressive strength cured at 65°C.

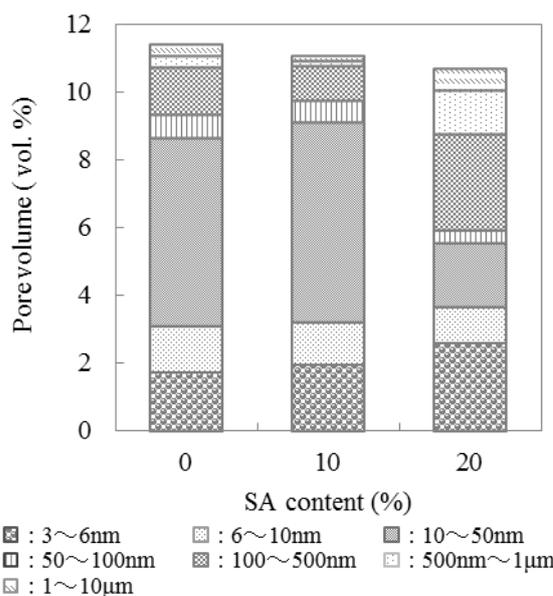
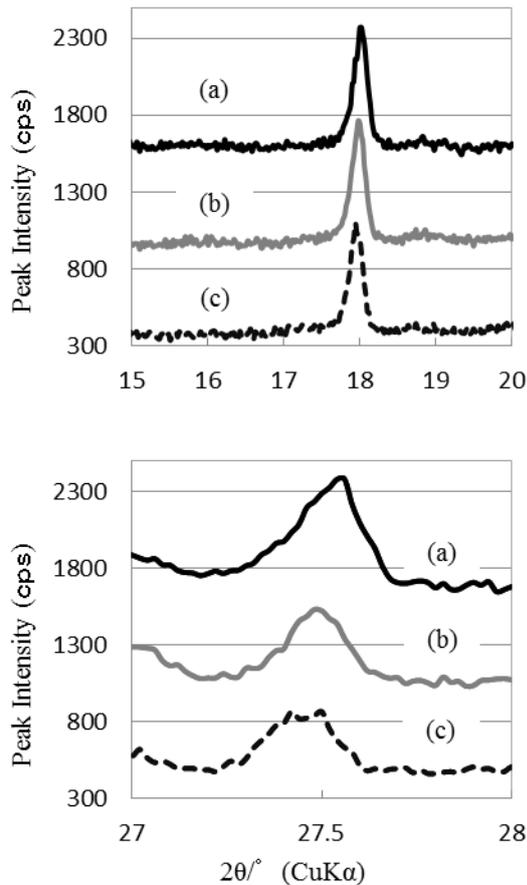


Fig.5 Pore distribution diagram of mortar cured at 65°C.



SA content (%), (a) : 0, (b) : 10, (c) : 20

Fig.6 X-ray diffraction patterns of Calcium hydroxide and Anorthite under various conditions.

化させることで高強度を発現するとされている。すなわち下水汚泥焼却灰の増加によってポズラン反応を生じ強度増進効果が促進されたためと推察した。

3・5 粉末 X 線回折に関する検討結果

Fig.6に粉末X線回折結果を示す。基本的な鉱物は同定不能なリン酸塩とアノーサイトおよびQuartzであった。27.5°付近にある回折はアノーサイトに対応する。下水汚泥焼却灰の添加率が増えるごとにアノーサイトピークが減少していることがわかる。また水酸化カルシウム量に変化はなかった。この結果から、圧縮強度試験を踏まえて考察すると、圧縮強度が増加傾向に対して、アノーサイトピークが減少していることから下水汚泥焼却灰のアノーサイトが反応しCSHを生成、強度を増進させたのではないかと考えている。しかし水酸化カルシウムのピーク強度には大きな変化がないことから、フライアッシュのようなポズラン反応によるものではなく、水砕スラグのような潜在水硬性によるものではないかと推定している。アノ

ーサイトがセメント中でどのような水和活性を有するのかが文献が見当たらなかったため、今後独自にアノーサイトを合成しさらに検討していく。

4 下水汚泥焼却灰の混和材としての可能性

以上の実験結果から下水汚泥焼却灰中のリンは凝結の遅延効果があるが、混和材として用いたモルタルの蒸気養生65°Cの場合、圧縮強度が増加したことから下水汚泥焼却灰の添加は、今回の実験の範囲ではセメント用混和材として非常に有効であることが明らかとなった。しかし、モルタルフロー実験から明らかなように、多くの減水剤を使用している。このことが工業化への律速になる可能性もあるため、汚泥焼却灰を用いる場合、地域ごと焼却場ごとに組成や形状が異なることから、より一層の検討が必要になると考えている。

5 結 言

- 1) 下水汚泥焼却灰を混入したモルタルの凝結試験ではセメントの硬化反応である水和を最大約2時間遅延させた。
- 2) モルタルフロー実験から流動性の向上には減水剤添加量や種類の適切な選定が必要である。
- 3) 下水汚泥焼却灰添加による65°C蒸気養生では、モルタルの圧縮強度は添加量を増やすと約2割程度上昇した。同様の条件でフライアッシュでは増加は見られなかった。
- 4) 圧縮強度とゲル空隙量には良い相関があり、圧縮強度の上昇は、全空隙量の低下とC-S-Hの生成によるものと結論付けられた。
- 5) 圧縮強度増加のメカニズムは詳細には解明されていないが、下水汚泥焼却灰中のアノーサイトが反応に関与していると推定している。

「参考文献」

- 1) 前田正博, 石川義章, 井川秀樹, 肥後康秀, コンクリート工学, Vol.42, No.7, (2004) p.15-23.
- 2) 深谷泰文, 露木尚光, “セメント・コンクリート材料科学”, 技術書院出版, (2003) p.153.