

製紙スラッジ焼却灰およびその他工業副産物の水和固化特性

愛媛大学大学院 学生会員 ○金子美波

正会員 木下尚樹

正会員 安原英明

1. はじめに

近年，産業廃棄物の有効活用の確立が求められている．愛媛県は製紙産業が盛んな地域であり，紙・パルプの製造過程で製紙スラッジが大量に発生する．製紙スラッジは焼却され，製紙スラッジ焼却灰（PS 灰）となり，埋め立て処分や再生利用される．PS 灰の化学組成は普通ポルトランドセメント（OPC）と類似していることから，建設材料や地盤改良材への実用化が期待されている．本研究では，製紙スラッジ焼却灰にフライアッシュ等の副産物を加えることにより改良を加え，より水和固化する方法を見出し，強度発現メカニズムを解明した．

2. 実験概要

本実験では，硅砂 6 号に PS 灰を添加し供試体を作製する．PS 灰の混合率を PS 灰水比（p/w）として定義し，p/w=1.0 で供試体を作製する．また，p/w=1.0 の PS 灰を，石膏（CaSO₄），フライアッシュ（FA），シリカフューム（SF），普通ポルトランドセメント（OPC）で 10%，30% で代替する．本実験で作製した供試体の配合を表 1 に示す．作製した供試体のうち，SF を代替した配合では固化が速く供試体作製が困難であったため，遅延剤（記号：R）を加えた．さらに固化材の配合比を変化させたときの強度に及ぼす影響を確認するため，p/w を変化した供試体を作製する．供試体の寸法は，高さ 100 mm，直径 50 mm の円柱形で各配合 3 本ずつ作製する．養生条件は，室温 20℃で湿潤・密封状態とし，養生日数は 28 日間とする．

作製した供試体の強度特性を評価するため，一軸圧縮試験を実施する．供試体がき裂または破壊するまで载荷し，最大荷重から圧縮強さを求める．供試体の圧縮試験結果は式(1)で算出する．

$$f_c = \frac{P_{\max}}{\pi \times \left(\frac{D}{4}\right)^2} \quad (1)$$

ここで， f_c ：圧縮強度 [N mm⁻²]， $P_{\max}$ ：最大荷重 [N]， A ：接触部の断面積 [mm²]， D ：直径 [mm²]とする．

さらに X 線回折分析を用いて PS 灰の水和反応物や鉱物を同定する．また，走査型電子顕微鏡を用いて，供試体の微視的構造観察を行う．

表 1 供試体の基本配合表

	硅砂 6 号	水	PSA	代替材料
	[g]	[g]	[g]	[g]
p/w=1.0	1350	450	450	—
代替 10%	1350	450	405	45
代替 30%	1350	450	315	135

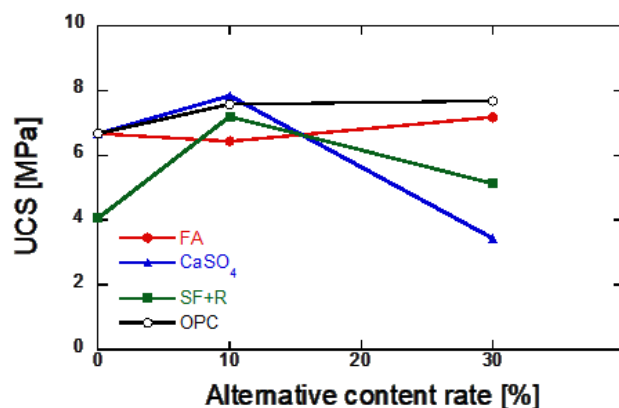


図 1 代替割合別の一軸圧縮強度

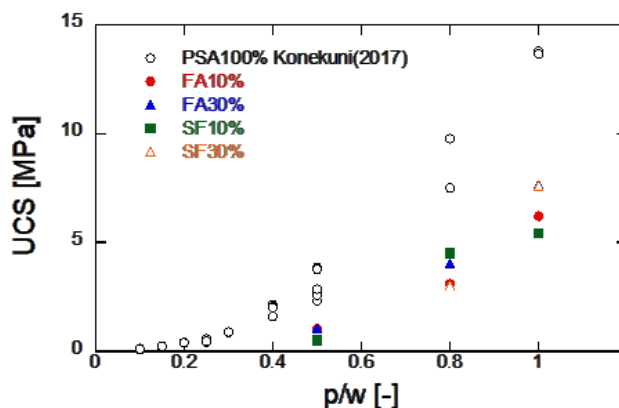


図 2 PS 灰水比（p/w）と一軸圧縮強度

3. 実験結果

図 1 に代替材料の代替割合と一軸圧縮強度の関係を示す。PS 灰単体の供試体と比較すると、代替率 10 %では同程度の強度が得られ、FA 以外の代替材料ではわずかな強度増加が確認できた。また、代替率 30 %では石膏で代替した場合に著しい低下が確認されたが、石膏以外の代替材料では同程度の強度が得られた。図 2 に PS 灰水比 (p/w) における製紙スラッジ焼却灰および FA, SF で代替したときの一軸圧縮強度の関係を示す。既往の研究²⁾より、PS 灰の増加に伴い強度が増加していることが確認されており、代替材料を加えた場合にも同様の傾向が確認できた。また、代替材料を加えた場合、p/w=0.5 未満の配合では水の割合が多すぎるため、供試体作製が困難であった。

図 3 に X 線回折分析 (XRD) の結果を示し、鉱物名の略称を正式名称とともに化学式にまとめたものを表 2 に示す。PS 灰単体モルタルでは石英 (SiO_2)、アルバイト ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$: 曹長石) の反応が確認された。石英の反応強度が最も大きいのは、供試体作製に硅砂を用いていることによるものと考えられる。FA を 10 %代替したモルタルでは、PS 単体モルタルとほぼ同じ反応であった。

図 4 に走査型電子顕微鏡観察 (SEM) 結果を示す。生成物として、針状生成物のケイ酸塩粘土鉱物と棒状生成物のアルミノ珪酸塩が観察された。PS 灰は粘土鉱物の持つイオン交換性が作用し、他の物質と結合することで固化反応および水和反応が起きていると考えられる。

4. おわりに

本研究では、PS 灰に FA および石膏、SF、OPC を加えることにより改良を加え、より水和固化を促進する方法を検討した。PS 灰に工業副産物を代替した場合、強度が得られ、固化発現の要因である鉱物を確認することができた。このことから、建設材料や地盤分野への有効活用が期待される。今後は代替材料を加えた場合のより詳細なメカニズムの解明および生成物の特定が必要である。

参考文献

- 1) 木下尚樹, 川口隆, 松尾暁, 本田美紀, 安原英明: 製紙スラッジ焼却灰造粒材料を用いたモルタルのプレキャスト材料としての性能評価, Journal of MMIJ, Vol.128, pp.611-619, 2012.
- 2) 小根國裕美: 製紙スラッジ焼却灰の水和固化メカニズムと固化体の強度評価, 愛媛大学工学部環境建設工学科卒業論文, 22pp., 2017.

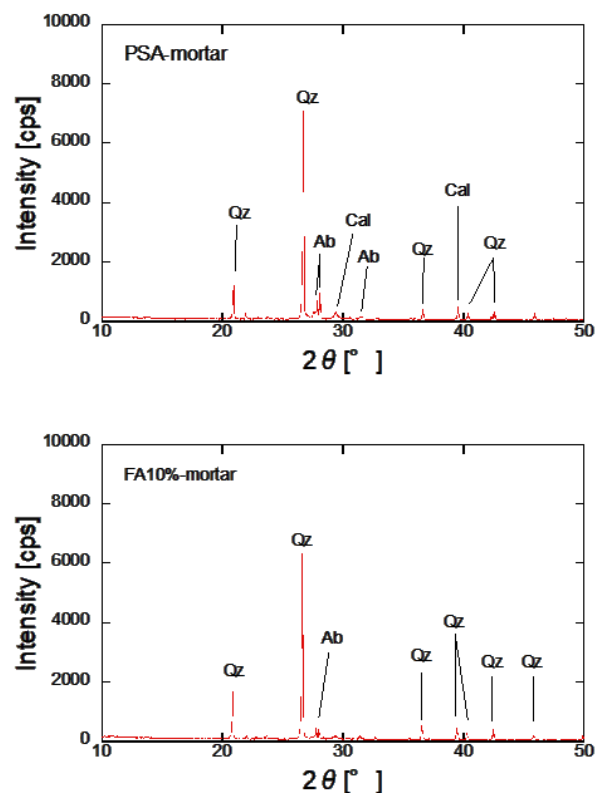


図 3 X 線回折分析結果

(上: PS 灰単体モルタル

下: PS 灰に FA を 10 %代替したモルタル)

表 2 X 線回折分析結果で確認された鉱物

鉱物名	略称	化学式
Calcite	Cal	CaCO_3
Dolomite	Dol	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Quartz	Qz	SiO_2
Gehlenite	Gh	$\text{Ca}_2(\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7)$
Anhydrite	Anh	CaSO_4
Albite	Ab	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
Anorthite	An	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

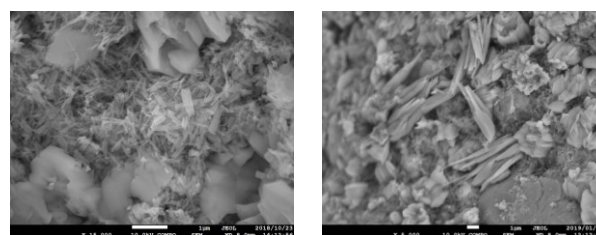


図 4 SEM 画像

(左: 針状生成物 ケイ酸塩粘土鉱物

右: 棒状生成物 アルミノ珪酸塩粘土鉱物)