

第Ⅲ部門

焼却灰の一軸圧縮強さに及ぼす鉱物組成と養生日数の影響

立命館大学 学生会員 ○筒井 祐貴

立命館大学 正会員 石森 洋行

立命館大学 正会員 建山 和由

1. はじめに

焼却灰の化学組成はセメントに類似し、水を加えるとカルシウム Ca、硫酸 SO_4 、アルミニウム Al からなるエトリンガイトと呼ばれる針状の結晶鉱物を形成し、焼却灰の一軸圧縮強さが増加するといわれている。従来より、この性質に着目して焼却灰を土木資材としての有効利用方法に関する研究が行われてきたが、(1) 強度発現の要因であるエトリンガイト量と一軸圧縮強さの関係が定量的には明らかにされておらず、(2) どのような化学組成をもつ焼却灰であれば所要のエトリンガイト量を生成できるのかは未だ解明されていない。そこで本研究では、所要の一軸圧縮強さを得るための焼却灰の条件を明らかにすることを目的として、所定の養生日数を経た焼却灰の一軸圧縮強さを測定するとともに、その原因分析のためにエトリンガイト発生に寄与する化学物質量を溶出試験により測定し、その溶出量から期待できるエトリンガイト等の鉱物発生量を熱力学的平衡計算により評価した。以上より一軸圧縮強さに及ぼす焼却灰の条件を調べた。

2. 実験内容・方法

2.1 使用材料

本研究に用いた試料は、焼却施設より採取した(1) S 焼却灰（産業廃棄物）、(2) O 焼却灰（一般廃棄物）、(3) K 焼却灰（医療系廃棄物）である。表-1 に各試料の特性

表-1 試料特性

		試験方法	使用した試料		
			S 焼却灰	O 焼却灰	K 焼却灰
土粒子密度 (kg/m^3)		JIS A 1202	2610	2680	2590
自然含水比 (%)		JIS A 1203	0.14	58.6	40.9
強熱減量 (%)		JIS A 1226	0.25	16.9	15.2
化学組成 (%)	SiO_2	XRF	69.3	22.4	29.2
	Al_2O_3		12.2	17.6	13.7
	Fe_2O_3		4.1	7.2	4.4
	CaO		5.6	33.9	21.0
	MgO		2.4	3.0	2.8
酸化率 (%)			671	91	152

を整理した。試料を構成する化学組成は波長分散型蛍光 X 線分析装置（フィリップス社 Magix PRO）を用いて測定した。既往研究によれば、焼却灰は、次式で与えられる酸化率 $= (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})$ が小さいほど一軸圧縮強さは高くなる¹⁾といわれている。使用した試料に対する酸化率を算出することで固化の目安とした。これによれば、焼却灰のなかでは O 焼却灰が最も高い一軸圧縮強さを発揮すると予想される。

2.2 焼却灰の一軸圧縮試験

高さ 10 cm、直径 5 cm のプラスチック製モールドに焼却灰を所定の含水比および乾燥密度で供試体を作製し、脱型後パラフィルムで全体を巻き養生した。養生日数は 1, 7, 28, 56, 91, 365 日である。養生期間中は濡れたキムタオルで供試体を覆い高湿度を保つことで、養生中の供試体からの水分蒸発を防いだ。所定の養生日数後に JIS A 1216 に従い一軸圧縮強さを調べた。

2.3 溶出試験

焼却灰に含まれる化学物質、特に強度発現の要因となるエトリンガイト生成に寄与する成分が含まれているか否かを調べるために、環境省告示第 18 号溶出試験を行った。粒径 2 mm 以下に調整した焼却灰 50 g に対してその 10 倍量の純水を容器に入れ 200 rpm で振とうし、その 6 時間後の溶出液に含まれる化学物質濃度を測定した。無機元素については ICP 発光分析装置（Thermo Scientific iCAP6500）を用いて、硫酸等のイオンは分光光度計（島津製作所 UVmini-1240）を用いて測定した。

2.4 熱力学的平衡計算

焼却灰から溶出する化学物質から期待されるエトリンガイト等の鉱物生成量を計算した。計算には熱力学的平衡計算用ソフトウェア phreeQC を用いた。入力条件には焼却灰から溶出される化学物質濃度や、供試体作製時の含水比と乾燥密度を考慮した。これらの入力値からその Ca, Al, SO_4 から発生し得る鉱物を対象に解析を行うので、エトリンガイト $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ や水

Yuki TSUTSUI, Hiroyuki ISHIMORI, Kazuyoshi TATEYAMA

rv0020xf@ed.ritsumei.ac.jp

酸化カルシウム $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、ベーマイト $\text{AlO}(\text{OH})$ 等を対象に各鉱物生成量を評価した。

3. 結果

図-1 に O 焼却灰に関する応力ひずみ曲線を示す。最も大きく強度が発現した 365 日養生では 3 日養生と比べ、圧縮ひずみが小さくなり、ピーク時の応力（一軸圧縮強さ）が増加していることから、養生日数とともに焼却灰の固化反応が生じていることがわかる。図-2 に各焼却灰における一軸圧縮強さと養生日数の関係を示す。K 焼却灰は養生日数 56 日目において最も高い一軸圧縮強さが得られたものの、養生日数をそれ以上長くすると供試体にひび割れが生じ一軸圧縮強さは低下した。O 焼却灰は養生日数 91 日以降では一軸圧縮強さに変化は無く、焼却灰中の固化反応は終了したものと考えられる。

溶出試験の結果を表-2 に示す。最も大きな一軸圧縮強さを示した K 焼却灰は、Ca の溶出量が大きい結果となった。各焼却灰中のエトリンガイト等の生成量を熱力学的平衡計算で計算した結果を表-3 に示す。K 焼却灰は生成する鉱物の 94.6%が水酸化カルシウムであることから、K 焼却灰の一軸圧縮強さ 495 kPa は水酸化カルシウムの影響によるものと考えられる。一方で S 焼却灰もまた水酸化カルシウムの割合が 83.4%であり支配的であるものの、絶対量が K 焼却灰より約 1/100 倍と少ないため大きな一軸圧縮強さが得られなかったものと考えられる。O 焼却灰では、水酸化カルシウム生成量は S 焼却灰の 4 倍程度であるものの、一軸圧縮強さに関しては 60 倍もの高い強度を得た。これは焼却灰の一軸圧縮強さに及ぼす支配因子は水酸化カルシウムとエトリンガイトであると考えられるが、後者の方が一軸圧縮強さに及ぼす影響は強いことを示唆している。表-2, 3 から Al や SO_4 に対して Ca の溶出量が多い焼却灰には水酸化カルシウムが多く生成し、Ca の溶出量が相対的に少なければエトリンガイトを生成しより大きな一軸圧縮強さを発現し得る。

4. 結び

Al や SO_4 に対する Ca 溶出量の大小によって生成する鉱物や強度が異なることがわかった。今後は示差熱分析を用いた鉱物生成量の実測し検証を行う予定である。

謝辞：本研究は、一般財団法人レントオール奨学財団の助成を受けて実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- ¹⁾ 土居洋一他：一般廃棄物焼却灰の土質特性の経時変化，土木学会論文集，Vol.659／III-52，pp.103-112

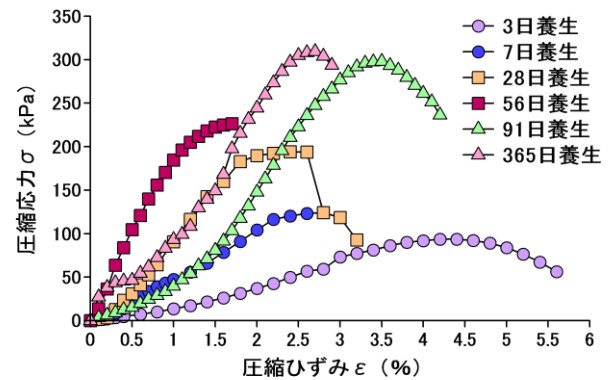


図-1 O 焼却灰に関する応力ひずみ曲線

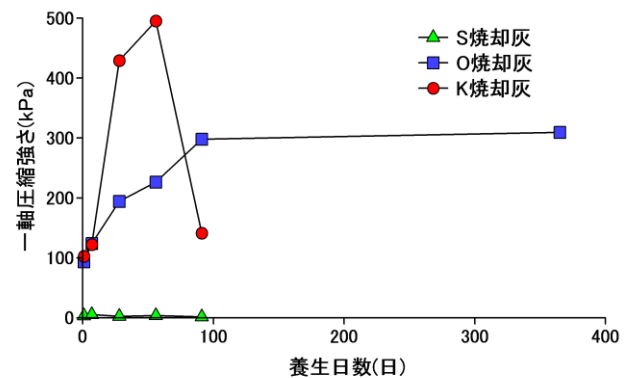


図-2 一軸圧縮強さと養生日数の関係

(養生 365 日目の S, K 焼却灰は破損のため測定不可)

表-2 溶出試験の結果

	単位	S 焼却灰	O 焼却灰	K 焼却灰
pH	—	9.6	12.1	10.6
電気伝導度	mS/m	10.5	434	758
Ca	mg/L	15.8	31.2	764
Al	mg/L	0.36	12.6	0.54
SO_4	mg/L	< 5.0	118	420
Ca/Al	—	43.9	2.5	1410
Ca/ SO_4	—	3.2	0.3	1.8

表-3 熱力学的平衡計算による解析条件と結果

	単位	S 焼却灰	O 焼却灰	K 焼却灰
含水比	%	19.6	44.2	41.3
乾燥密度	kg/m^3	1640	1140	1190
エトリンガイト	mg/kg, (%)	29.5, (8.5)	1130, (45.2)	190, (0.85)
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	mg/kg, (%)	289, (83.4)	932, (37.1)	21300, (94.6)
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	mg/kg, (%)	0, (0)	0, (0)	1020, (4.5)
$\text{AlO}(\text{OH})$	mg/kg, (%)	7.6, (2.2)	447, (17.8)	0, (0)
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	mg/kg, (%)	20.5, (5.91)	0, (0)	10.4, (0.05)
一軸圧縮強さ	kPa	5.3	310	495

※括弧内の数字は構成比を表わす