

ペーパースラッジ灰(PS 灰)を用いたセメント系固化材による強度の検討

ペーパースラッジ灰 一軸圧縮試験 地盤改良

早稲田大学 学生会員 ○園田 真帆
 早稲田大学 国際会員 赤木 寛一
 早稲田大学 学生会員 李 理
 福岡建材合材(株) 非会員 福岡 大造

1 研究目的

現在日本では、毎年大量の古紙から再生紙を製造するが、その過程において大量のペーパースラッジが発生する。通常は焼却された後、焼却灰として埋め立て処理されるが、埋立地の不足が厳しい現状である。そのため、ペーパースラッジ灰(以下 PS 灰)を有効利用するリサイクル方法が求められている。そこで、PS 灰の特性に応じてセメント、石膏などの添加剤を混合ブレンドし、地盤改良材を開発することを試みている。また、PS 灰をセメントの代替物としてセメント系固化材に用いることで、セメント量を減らし、コスト削減と環境負荷の軽減につながる。本研究では、PS 灰の物理的、化学的な分析を行い、既往の研究結果に基づいた適切な添加剤(セメント、再生石膏、石灰など)を選択し作成したブレンド材料を対象地盤サンプルと混合、改良土の強度の実験的検討を行う。

2 試験概要

カオリンと水の混合土を対象土として、セメント、PS 灰、石膏などを添加する。その後、直径 50mm、高さ 100mm の供試体を作り、一軸圧縮試験の結果をもとに PS 灰の地盤改良性能を評価する。今回の試験では、土質区分基準が第 2 種改良土に相応する。目標一軸圧縮強度を 300kN/m²としている。

焼却灰を利用するうえで、焼却灰由来の六価クロム等の重金属の溶出とその特性が安定していないことに注意する必要がある。特に、重金属の溶出では、六価クロムとフッ素が問題となることがある。また、PS 灰を再利用するときには、環境庁告示 46 号に示されている土壌環境基準を満足することが必要となるので、有害金属の溶出試験を行った。

固化材添加量があまりにも少ない場合、改良対象土と固化材の混合むらが発生し、強度発現性に影響し要求性能を満足できない場合がある。そこで今回の試験において、固化材の最小添加量を 50kg/m³に設定した。

3 使用する試料の基本的性質

本試験で使用する試料の物性値と化学組成を表 3.1、3.2 にまとめる。

表 3.1 PS 灰, カオリン, 石膏の物性値

	PS 灰	カオリン	石膏
比重(g/cm ³)	2.682	2.688	3.249
含水比(%)	0.527	0.475	18.806

表 3.2 PS 灰とカオリンの化学組成(mass%)

	CO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO
PS 灰	13.12	3.16	21.66	13.97	48.25
カオリン	3.74		21.71	72.60	0.10

4 試験手順

供試体の作成は JGS 0821(2009)、土の一軸圧縮試験は JIS A 1216(2009)に基づき実験を行った。

5 試験結果

表 5.1 カオリン 100(g)あたりの改良土の配合表

水(g)	表記	PS 灰(g)	石膏(g)	セメント(g)
80	PCe15	1	/	5
	PCe24	2		4
	PCe33	3		3
	PCe42	4		2
	PGCe114	1	1	4
	PGCe223	2	2	3
60	PGCe114	1	1	4
	PGCe223	2	2	3

今回試験を行ったカオリンと水と固化材の配合割合を表 5.1 にまとめる。ただし PS 灰を P、石膏を G、セメントを Ce と略称し、PGCe114 はカオリン 100g に対して、PS 灰 : 石膏 : セメント = 1g : 1g : 4g と表すこととする。また水 80g 添加したものを含水比 80%、60g 添加したものを含水比 60%とする。

含水比 80%の場合、PS 灰、石膏、セメントの合計が 6g の時添加量が 51.3kg/m³となり、固化材の最小添加量を満たす。そのため、固化材が 6g 以上になる配合割合で試験を行った。

図 5.1、図 5.2 は表 5.1 の配合割合で作成した供試体の養生期間中の強度変化を示したものである。

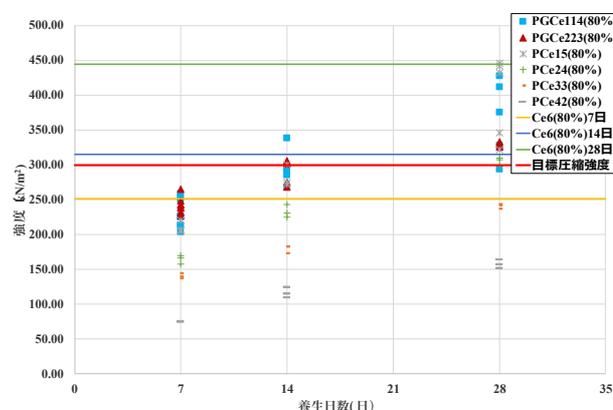


図 5.1 含水比 80%の供試体における強度の時間的変化

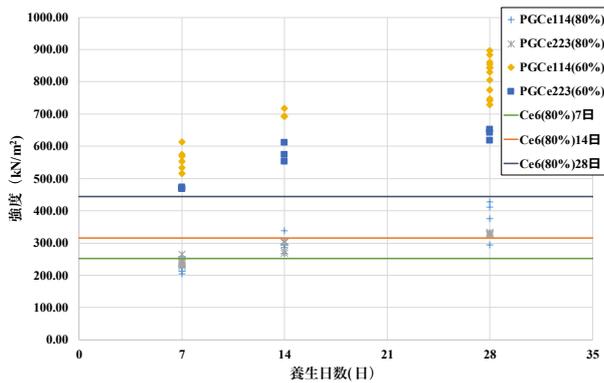


図 5.2 PGCe の供試体における強度の時間的变化

図 5.1 に着目すると、固化材をセメントのみで作成したサンプルの方が強度は高く、固化材を PS 灰、セメントで作成した PCE のサンプルに関しても、セメントをより多く配合すると強度が高くなる。しかし、PGCe114 と PCE24 を比較した場合、セメントの添加量は同量にも関わらず、PGCe114 の強度の方が高く、28 日養生のサンプルは目標圧縮強度 300kN/m² を満たしている。これより、PS 灰と石膏を固化材に添加した場合、セメントの代替物として使用し、セメントの添加量を低減することが可能であるといえる。

図 5.2 では、PGCe の供試体に関して異なる含水比で試験を行い強度の比較した。これより、サンプルの含水比が低いほど強度が高いことが分かる。

ただし、含水比 60% では対象土を混ぜにくく、施工性を考慮した場合適していない。逆に、水を大量に配合する場合、強度を満たすために固化材を更に添加する必要がある。これは、環境的、経済的によくない。以上より、含水比 80% のサンプルは施工性、経済性が高く、環境負荷が低いと考えられる。

溶出試験に関しては、すべて基準値以下であり、安全性が確認された。

6 考察

セメント系固化材を用いた地盤改良において、強度発現は水和反応とポズラン反応によると考えられている。セメントやセメント系固化材は、土と混合すると水和反応により速やかに針状のエトリンガイト(3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O)を生成する。このエトリンガイトが粘土粒子を架橋し強固な骨格を形成させ、土を迅速に固化させる。さらに、カルシウムシリケート水和物などが、架橋構造をより強固なものにする。

PS 灰は多種の元素が含まれており、その中の大量のカルシウム(Ca)、ケイ素(Si)、アルミニウム(Al)がエトリンガイトの生成を促し、さらに長期的にポズラン反応で地盤の強度を上げることが期待できる。また、エトリンガイトの針状構造も有害金属を阻み、溶出を抑制できると考えられる。

加えて、石膏には硫酸イオンが含まれており、PCE より PGCe の方が、エトリンガイトが生成しやすいと考えられる。これにより、PGCe114 と PCE24 では PGCe114 の強度が高くなったと考えられる。

PS 灰を添加したサンプルの固化メカニズムを調査するために、汎用多機能 X 線回折装置(XRD)を用いて、一軸圧縮試験後の結晶構造を観察し、SEM 画像を撮影する

こととする。XRD ではマクロな結晶分析、SEM ではミクロな結晶分析を行い、総合的な固化メカニズムの考察を行った。PGCe114(含水比 80%) 養生期間 28 日 XRD 分析結果を示す。図 6.1 から、エトリンガイトに対応する 2θ = 16° の位置にピークが確認された。また SEM で同サンプルを観察した図 6.2 より、針状のエトリンガイトの発現が見られた。これらより強度基準が確認されたことは、エトリンガイトの発現によるものと考えられる。

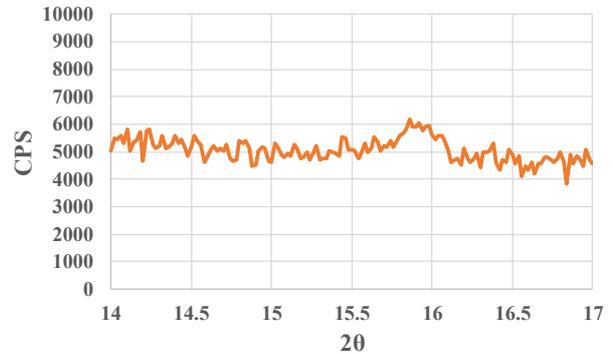


図 6.1 PGCe114(80%)28 日の XRD 分析結果

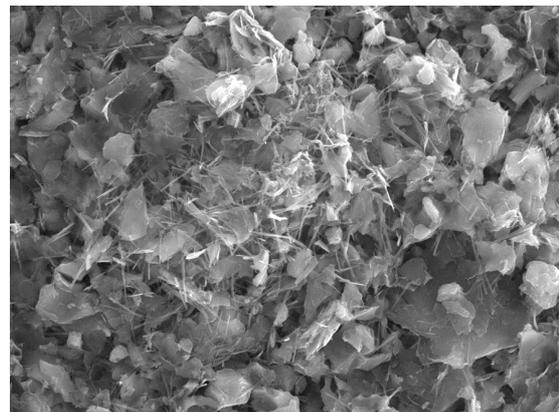


図 6.2 PGCe114(80%)28 日の SEM 画像

7 まとめ

本試験において、PS 灰、石膏、セメントを混合することで、セメントと同程度の改良強度を得られ、セメントの代替物として使用することができるとわかった。

今回用いた PS 灰は、大量のカルシウムを含有しているため、エトリンガイトの生成を促し、より強度の高いサンプルが作成されたと推測される。

特に供試体 PGCe114 はエトリンガイトが発現し、目標基準強度を満たしていることから、経済的負担の軽減や環境負荷の低減につながると考えられる。

8 参考文献

- 1) 亀井健史, 小川靖弘, 志比利秀: 半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の強度変形特性とその内部構造 -ハイブリッド型地盤材料の創出-, 地盤工学ジャーナル, Vol. 5, No. 1, 2009, p35-43
- 2) セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル, 第 4 版, 技報堂出版, 2012, 442p
- 3) 地盤工学会. 地盤改良の調査・設計と施工-戸建住宅から人工島まで-.2012,255p