ペーパスラッジ灰の地盤改良材への適用検討

西松建設（株）　正会員　○岩谷　隆文，正会員　吉野　修
宮城大学食産業学部　正会員　北辻　政文，学生会員　阿部　有里恵

１．はじめに

紙・パルプ製造業では，年間 3,200 万 t の産業廃棄物が排出されており，その量は我が国の産業廃棄物の全発生量の約 8.3%を占めている。廃棄物の約 7 割がペーパースラッジ(以下，PS)と呼ばれる有機汚泥であり，それを減容化のため焼却処理したものがペーパースラッジ灰(以下，PS 灰)である。この PS 灰の CaO 含有率は 40～50%と高く，地盤改良材として使用されている生石灰の代替材料にできれば，産業廃棄物を有効活用した経済性に優れた地盤改良材となる。既往研究[1)]では，PS 灰による改良効果を検討し，強度発現が確認したが，同時に PS 灰に含まれる重金属（ふっ素）の溶出量が土壌環境基準を超えるケースを確認した。

本研究では，既往研究[2)]をもとにエトリンガイト生成によるふっ素の不溶化を検討した。また，不溶化検討時の配合をもとに，地盤の改良効果を室内試験にて検討した。

２．実験概要

２．１ 改良材のふっ素不溶化

PS 灰について，エトリンガイトの生成によるふっ素の不溶化検討を行った。不溶化確認試験としては，PS 灰に無水石膏（以下，石膏），高炉セメント B 種（高炉 B）を添加し，改良材と蒸留水を重量比 1：1 で混練し，室温 20℃で三日間養生したものを溶出試験に使用した。実験に使用した材料の物性値を表-1，溶出試験に使用した供試体の配合を表-2 に示す。配合は，石膏，高炉 B を添加しないもの，石膏+高炉 B を添加するものを含め計 5 種の配合とした。ふっ素の溶出試験は，環境省告示 46 号法(ふっ素溶出基準：0.8mg/L 未満)に準じて行った。また，エトリンガイトの生成を確認するため，供試体の XRD 測定及び顕微鏡を使用した目視確認を行った。

表-1　使用材料の物性値

材料名	密度（g/cm³）	比表面積（cm²/g）
PS 灰	2.87	7,300
無水石膏	2.90	3,600
高炉セメント B 種	2.91	6,170

表-2　不溶化の試験配合

配合名	単位量（g）		
	PS 灰	石膏	高炉 B
P100	100	—	—
P100S50		50	—
P100S10		10	—
P100S5		5	—
P100S2B1		2	1

２．２ 地盤改良効果の確認

PS 灰の不溶化検討の結果をもとに，PS 灰，石膏，高炉 B を用いた地盤改良材による改良効果の確認を行った。表-3 に地盤改良材の配合を示す。C1 系は模擬土 1m³ 当たりの改良材添加量 50kg とし，C2 系は添加量 100kg とした。また，改良対象土は粘性土を想定した模擬土を使用し，珪砂 5 号，シルトおよび粘土を重量比 4:4:2 で混合したものを使用した。表-4 に模擬土の物性と実験時の含水比を示す。

表-3　地盤改良材の配合（模擬土 1m³ 当たり）

ケース	PS 灰（kg）	石膏（kg）	高炉 B（kg）
C1	50	—	—
C1-1	47.62	2.38	—
C1-2	48.54	0.97	0.49
C2	100	—	—
C2-1	95.24	4.76	—
C2-2	97.08	1.94	0.98

表-4　模擬土の物性値

試験項目	模擬土
土粒子密度ρ_s（g/cm³）	2.52
細粒分含有率 F_c（%）	60
液性限界 w_L（%）	31.7
塑性限界 w_P（%）	24.4
塑性指数 I_p	7.3
実験含水比 w_i（%）	30
コーン指数 q_c（%）	0.0

改良効果の確認方法は，表-3 の配合を模擬土へ添加・混合した後，円柱供試体(φ50mm×100mm)を作製し，一軸圧縮試験（JIS A 1216）を行い，改良後の一軸圧縮強さ q_u を確認した。材齢は，3 時間，6 時間，1 日，3 日，7 日および 28 日とした。本試験では，改良効果の目標値として，第三種改良土の基準[3)]であるコーン指数 qc=400kN/m²以上に設定した。今回は，強度確認として一軸圧縮試験のみを行ったことから，一軸圧縮強さとコーン指数の関係式[4)] q_c=5×q_u からコーン指数を算出した。そのため，本稿では換算コーン指数として「q_c^*」と表記する。

キーワード　ペーパースラッジ灰，重金属，不溶化，エトリンガイト，地盤改良
連絡先　〒105-0004　東京都港区新橋 6-17-21　西松建設㈱　技術研究所　　TEL 03-3502-0279

© Japan Society of Civil Engineers

３．実験結果および考察

３．１ 改良材のふっ素不溶化

各配合（表-2）によるふっ素の溶出試験の結果を図-1 に示す。図中の P100（粉体）は，蒸留水と混練していない初期の PS 灰の結果である。試験結果から，全ての配合で土壌環境基準を下回った。P100S5 が最も不溶出化効果が高い結果となった。図-2 に，P100S5 の顕微鏡写真を示す。P100S5 では針状結晶であるエトリンガイトの生成が確認できた。また，P100 以外の配合においてもエトリンガイトの生成が確認できた。図-3,4 に P100,P100S5 の XRD 測定結果を示す。P100S5 では，2θ=9.1° 付近にエトリンガイトのピークが確認できた。一方，P100 ではピークが確認できなかった。その他配合においても，ピークが確認できた。これにより，P100 以外の配合では，エトリンガイト生成によりふっ素溶出量が抑えられたと考えられる。P100 は，エトリンガイトは生成されていないが，PS 灰に含まれる CaO の固化反応により，ふっ素溶出量が抑えられたと考えられる。

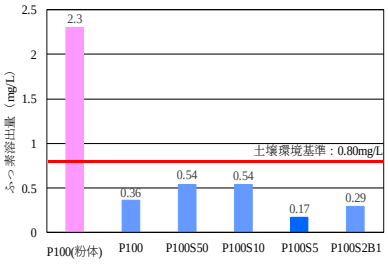

図-1　溶出試験結果

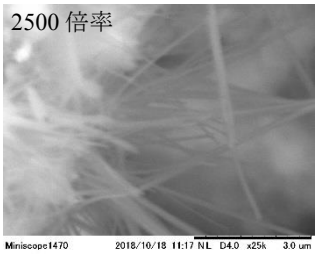

図-2　顕微鏡写真（P100S5）

２．２ 地盤改良の効果

表-3 の配合による改良結果を図-5，6 に示す。図-5 より，材齢 6 時間で全ての配合で目標強度を達成した。また，3 日強度までは C2，C2-1 が最も高い強度を示した。また，PS 灰に石膏+高炉 B を混合した配合（C1-2，C2-2）は，改良初期 3～6 時間では他に比べ低い強度となった。

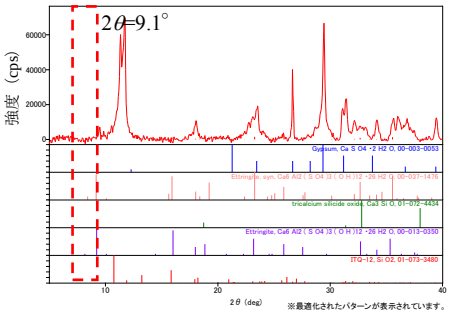

図-3　XRD 測定結果（P100）

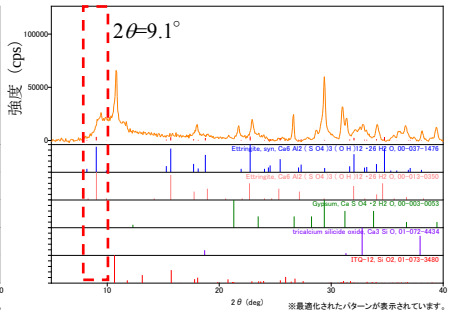

図-4　XRD 測定結果（P100S5）

28 日強度を比較すると，PS 灰単体の C1，C2 よりも PS 灰に石膏，高炉 B を添加した方が，高い強度を示した。これは，石膏，セメントを添加することによりエトリンガイトが生成されたことなどが寄与したためと考えられる。C2-1（PS 灰+石膏）が最も高い強度を示した。 C1，C2（PS 灰のみ）は， 3 時間～1 日後まで強度が高くなるが，3 日～28 日後では，石膏，高炉 B を配合したものに比べ，強度増加を確認できなかった。

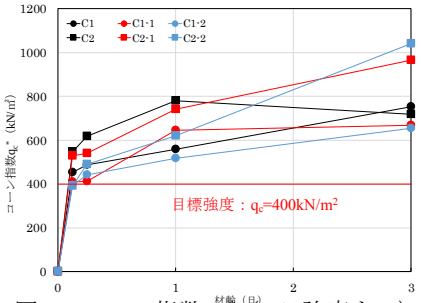

図-5　コーン指数 q_c^*（3 日強度まで）

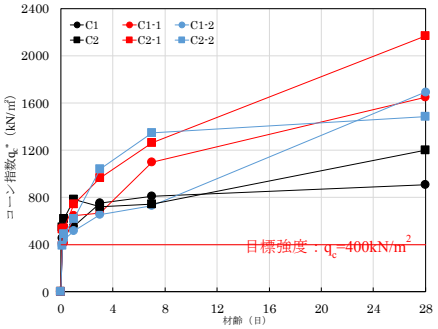

図-6　コーン指数 q_c^*（28 日強度まで）

４．まとめ

以上の結果から，本研究で得られた知見を示す。

- PS 灰に石膏，高炉 B を添加することで，エトリンガイトの生成及びふっ素の溶出を抑えること（土壌環境基準：0.8mg/L 以下）ができた。
- ふっ素の不溶化では，石膏を PS 灰重量比 5%添加すると最もふっ素溶出量が低い結果となった。
- 模擬土（粘性土を想定）に各配合 50kg，100kg（模擬土 1m³ 当たり）添加後 3 時間で目標であるコーン指数 400kN/m² 以上を達成した。
- PS 灰に石膏のみを添加したものが最も高い強度（28 日後）を示した。
- PS 灰単体では，改良後 1 日後までは強度が増加したが，3 日～28 日後では石膏，高炉 B 添加の配合ほど強度増加は確認できなかった。

参考文献 ：1)中瀬喬之，北辻政文(2014):ペーパースラッジ灰の地盤改良材としての基礎的研究，廃棄物資源循環学会東北支部研究発表会 PP.3-4．2)本條貴之ら(2018):焼却灰のセメント固化処理における二水石膏によるフッ素の不溶化効果，第 29 回廃棄物資源循環学会研究発表会 PP.217-218．3)セメント系固化材による地盤改良マニュアル第 4 版，セメント協会．4)地盤調査の方法と解説，地盤工学会．

© Japan Society of Civil Engineers