

製紙スラッジ焼却灰を用いた 泥土改良材の開発と適用

吉野広司¹・斎藤悦郎²・望月美登志¹・石田敬³・小野健司¹・小方高明⁴

¹正会員 工修 株式会社フジタ 技術センター（〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1）

²正会員 工博 株式会社フジタ 土木本部（〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-25-2）

³株式会社フジタ 技術センター（〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1）

⁴株式会社ティエムディ（〒182-0004 東京都調布市入間町1-10-9）

製紙製造過程で発生する製紙スラッジ(PS)の焼却灰を高温再焼成処理することによって製造した再焼成PS灰の高吸水性に着目し、軟弱地盤改良や建設排泥処理を目的としたFTマッドキラー工法を開発した。本工法は、再焼成PS灰を用いることで土の余剰水に対して物理的な吸水改良を行い、土本来の締め固め強度を養生期間を必要とせず発揮させ、また化学的な問題のない環境にやさしい改良を行うものである。本論文では、PS焼却灰と建設発生土の有効利用の促進という観点を踏まえながら、改良マッドキラーの基本的な物性や泥土改良特性、泥土圧シールドの排泥処理や河川や湖沼の浚渫土等の建設工事における適用事例について報告する。

キーワード：PS灰、建設発生土、廃棄物、リサイクル、地盤改良、軟弱地盤、環境

1. はじめに

建設工事において発生する建設系廃棄物は、近年増大の一途をたどっている。こうした建設系廃棄物の過半を占める汚泥の処理・処分問題は、きわめて重要な課題となっており、有効利用の促進が周辺環境に十分配慮しながらできるかぎり手間やコストを最小限に抑えて、建設工事等へ再利用させることが理想と考えられる。汚泥処理や軟弱地盤の改良については、従来セメントや石灰系の固化剤を添加混合させ、強度の発現・増加を図る安定処理方法が一般的であったが、仮置きヤード、養生時間、アルカリ溶出、改良土の過剰固化による施工性等の問題から、泥土圧シールド排泥の処理などでは、混合直後に改良効果が現れ、化学的に問題のない安価な改良材の開発が切望されている。また、養生期間の許容される軟弱地盤改良においてもセメント系固化材では六価クロムの溶出が問題視されており、環境にやさしい改良工法が必要になっている。これまで筆者らは、建設系廃棄物同様処分の問題が深刻化しつつある製紙ス

ラッジ(PS)焼却灰の建設分野への有効利用方法について研究開発^{1)~7)}を行い、再焼成処理した高吸水性PS灰が軟弱地盤改良や排泥の改良処理材に適していることを確認してきた。ここでは、泥土改良材として製品、工法化させたFTマッドキラーの基本的な土質改良性能と実施工での適用結果について報告するものである。

2. PS灰の基本的性質

(1) PS灰の性状

製紙製造工程から発生する汚泥廃棄物PSを減量化させるため流動床、ストーカ、サイクロンといった燃焼炉によって焼却したものがPS灰となる。PS灰の主成分は、植物繊維の灰であるが、製紙製造時の添加物である炭酸カルシウム、カオリン等も含まれているので、主な成分はシリカ、アルミナ、石灰分である。pHは、組成分の違いによりほぼ中性に近いものから12程度のもので広範囲な値を示す。一般的にPS灰は、発生

場所により各々の物理化学的性質が異なってくる
 ことが大きな特徴といえる。その要因としては、もとも
 との紙原料の違い、焼却炉の形式の違いが影響して
 いるものと考えられる。粒子密度は $2.4 \sim 3.3 \text{ g/cm}^3$ 程
 度、最大乾燥密度は $0.65 \sim 0.95 \text{ g/cm}^3$ 、粒子の大きさは
 $5 \sim 425 \mu\text{m}$ の範囲であり、シルト～細砂分に分類され
 る粒子が大半である。PS灰の強度に関しては、自硬性
 のあるものや固化材を添加しても強度増加が発揮し
 にくいものなどがある。これは成分中のCaO分や未燃
 カーボン分が原因となっているものと考えられる。
 また、PS灰は、発生源によりその性質は異なってくる
 ものの、一定の工業製品から発生する廃棄物である
 ことより同一場所から発生するものに関しては、他
 の焼却灰と較べて比較的安定した品質のものが排出
 されることも大きな特長と考えられる。

(2) PS灰の焼成処理

FTマッドキラーは、**図-1**で示されるとおりサイ
 クロン炉より燃焼されるPS灰を再焼成処理すること
 により製造している。再焼成には、サイクロン炉より
 排出される燃焼ガスを再利用することで、補助燃料
 を使用せずにPS灰中の未燃カーボン約3～5%を燃焼
 させる。これにより、本材料特有の微細孔を多く有す
 る吸水性を特徴とする改良材を製造することができ
 る。

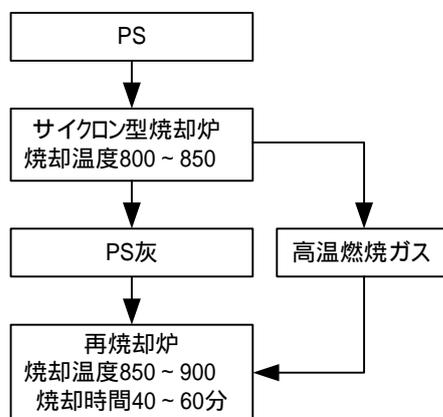


図-1 再焼成PS灰の製造工程

(3) FTマッドキラーの物性

表-1にFTマッドキラーの化学分析結果を示す。
 本材料は、灰白色、多孔質で、主成分のシリカとアルミ
 ナが硬い結合結晶に変化し、化学的にも安定度の高い
 物質となっている。FTマッドキラー自体のpHは8
 程度で、土と混合する場合には、ほとんどアルカリ性
 は出てこなくなる。材料成分中に有害物質は含まれ
 ておらず、溶出試験においても土壌環境基準（環境
 庁告示第46号）を満たしている。FTマッドキラー
 の粒度分布は、**図-2**に示すとおりで、一般のPS灰

（A：ストーカPS灰、B：流動床PS灰）より粒径が大
 きく、細砂と同様の粒度特性をもっていることがわ
 かる。**写真-1**に示されるようにFTマッドキラーに
 は、無数の微細孔があり、親水性に優れ、高い吸水能力
 を有する。**表-2**に示すように、細骨材の吸水試験で
 40%程度、灰自身が許容しうる限界含水比（吸水性能）
 が115%となっている。この吸水性能を生かして
 汚泥処理、軟弱地盤改良材に用いることが可能となる。
 締固め度については、**図-3**に示されるように幅広い
 含水比の範囲で一定の締固め値を保持していること
 がわかる。支持力は、材料自身に固化、固結する機能
 がないため、一般のPS灰より最大CBR値は小さくなる
 が、締固め特性同様、広い範囲で一定の支持力を有
 することが確認できる。

表-1 FTマッドキラーの化学成分

化学成分	含有率(%)
Al_2O_3	22.6
SiO_2	33.8
CaO	18.1
MgO	5.2
Fe_2O_3	1.8
ZnO	0.2
P_2O_5	0.7
TiO_2	2.6
K_2O	0.3

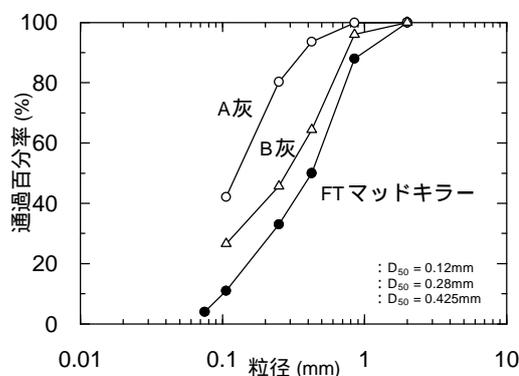


図-2 FTマッドキラーの粒度分布

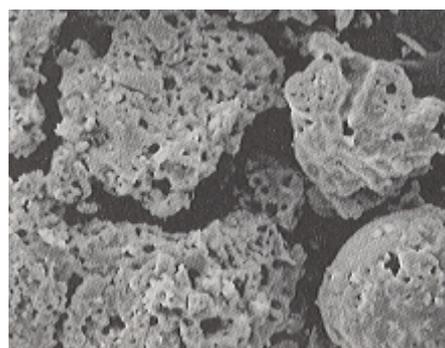


写真-1 FTマッドキラーの電子顕微鏡写真

表-2 FTマッドキラーの物性

項目	物性値
粒子密度(g/cm ³)	2.376
かさ比重(g/cm ³)	0.67
吸水率(%)	39.2
吸水性能(%)	115

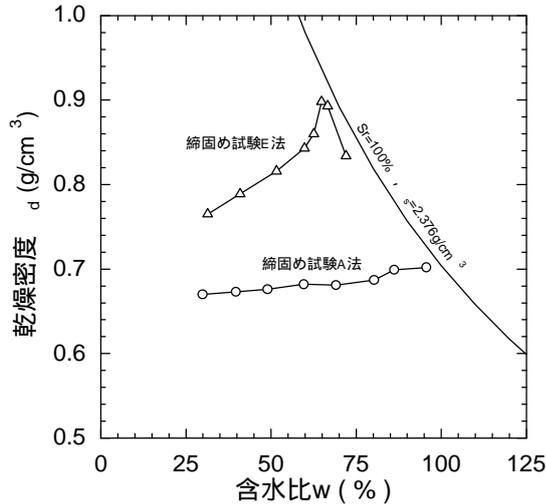


図-3 FTマッドキラーの締固め特性

3. FTマッドキラーの改良効果

(1) 適用試料の物性および試験方法

改良効果を調べるために、表-3に示すような20種類の試料を対象にして改良効果試験を行った。各々の試料は、現場での改良検討を行うために採取したもので、対象工事に応じて種々の強度試験を実施しているが、ここではコーン試験の結果を中心にまとめている。試験方法については、供試体作製基準(JIS A 1210)、締固めた土のコーン指数試験方法(JIS A 1228)に基づいている。各試料土の含水比も35%から100%程度までの広い範囲となるよう選択した。尚、通常安定処理を行う場合には、供試体作製時に養生期間を設けるが、FTマッドキラーには養生期間が必要ないため、改良直後に試験を実施している。

(2) 改良効果

コーン試験結果の一覧を表-4にまとめ、含水比改良率の関係を図-4に示した。含水比の増加とともに改良率が増加していくこと、また含水比に対する改良率の割合は、塑性指数I_pが小さい砂質土系の土質の場合小さく、I_pが大きい粘土、シルト系の土質の場合に大きくなるのがわかる。

表-3 試験に用いた泥土の物性

項目	密度 _s (g/cm ³)	含水比W (%)	液性限界 W _L (%)	塑性限界 W _p (%)	塑性指数 I _p	粒度			
						50%粒径 D ₅₀ (mm)	均等係数 U _c	曲率係数 U _c	最大粒径 (mm)
a	2.668	40.0	NP	NP	NP	0.377	20.5	0.12	37.5
b	2.625	43.3	51.5	29.8	21.7	0.250	197.2	1.06	26.5
c	2.862	35.3	NP	NP	NP	0.100	26.7	2.96	2.0
d	2.608	110.0	104.7	51.6	53.1	0.013	-	-	2.0
e	2.747	72.0	51.5	43.8	7.7	0.050	-	-	19.0
f	2.885	138.7	163.5	103.9	59.6	0.110	-	-	9.5
g	2.817	56.3	100.3	60.9	39.4	0.090	89.3	3.20	19.0
h	2.698	10.2	274.5	33.8	240.7	-	-	-	0.02
i	2.729	45.8	74.5	41.7	32.8	0.140	-	-	26.5
j	2.565	75.0	96.7	61.6	35.1	0.700	56.0	1.03	37.5
k	2.719	44.7	52.7	27.2	25.5	0.050	-	-	19.0
l	2.624	424.0	195.0	81.0	114.0	0.010	-	-	2.0
m	1.565	956.0	690.0	218.2	471.8	-	-	-	-
n	2.645	42.0	172.0	99.0	73.0	0.2	133.3	5.3	2
o	2.643	49.1	67.3	28.2	39.1	0.003	-	-	0.85
p	2.734	28.6	45.7	26.0	19.7	0.05	100	1	0.85
q	2.700	63.0	41.5	24.7	16.8	0.012	7.78	3.21	0.425
r	2.700	52.0	41.5	24.7	16.8	0.012	7.78	3.21	0.425
s	2.700	45.0	41.5	24.7	16.8	0.012	7.78	3.21	0.425
t	2.646	13.2	83.3	41.5	41.8	0.045	-	-	0.25
u	2.721	63.6	33.9	23.9	10.0	0.0082	-	-	2
v	2.651	80.0	74.9	65.3	9.6	0.15	400	0.141	26.5
w	2.651	100.0	74.9	65.3	9.6	0.15	400	0.141	26.5

表-4 試験に用いた泥土の物性

項目	試験時 含水比 (%)	第4種建設発生土 (q _c =200kN/m ² 以上)		第3種建設発生土 (q _c =400kN/m ² 以上)	
		改良率 (%)	添加量 (kg/m ³)	改良率 (%)	添加量 (kg/m ³)
a-1	40.0	13	139	15	161
a-2	35.0	8	89	9	100
b	43.3	11	130	12	142
c	35.3	6	85	11	155
d	110.0	59	393	61	407
e-1	72.0	31	276	32	284
e-2	100.0	60	422	61	429
f-1	277.0	100	325	107	345
f-2	183.0	45	200	49	220
g	92.0	21	150	24	175
h-1	300.0	240	669	260	725
h-2	400.0	320	742	335	777
i	-	-	-	-	-
j	75.0	7	62	9	80
k	44.7	10	122	13	158
l-1	424.0	310	663	320	684
l-2	372.3	245	597	250	609
l-3	300.0	200	590	205	605
m	690.0	369	345	394	368
n	172.0	11	135	12	145
o	67.3	15	165	24	266
p	45.7	0	0	2	28
q	41.5	38	411	42	453
r	41.5	28	323	32	366
s	41.5	23	275	27	328
t	85.0	21	172	27	223
u	33.9	26	267	31	317
v	74.9	24	213	29	260
w	74.9	38	304	44	349

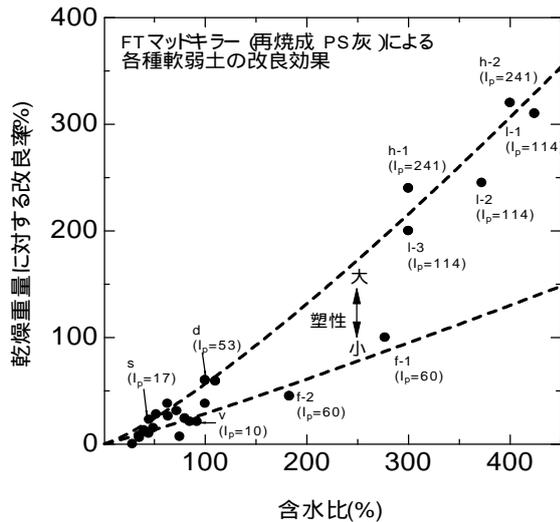


図-4 FTマッドキラーの改良特性

4. 適用実績

(1) FTマッドキラー工法の適用事例

現時点(平成15年7月現在)でのFTマッドキラー工法の施工実績は、表-5で示されるとおり工事件数で28件、使用量で12,794tとなっている。写真-2~5、表-6に代表的な工事適用事例を示した。写真-2は、泥土圧式シールド工事における排泥処理への適用例であり、掘削とともに変動する排泥土の物性を迅速に確認し、最適の改良率(第3種建設発生土)を判断しながら改良処理を実施した。特にシールド工事は、都市部での施工が多く、養生場所を確保することが困難なことから本工法の適用が有効となり、28件の実績を上げている。写真3は、浚渫河川底泥の改良である。FTマッドキラー工法は、従来の固化工法と比較すると攪拌ムラの影響を受けにくく、粉塵も少ないという施工上の長を有する事から基本的にはスタビライザーやパドルミキサーといった攪拌混合装置を用いる必要がなく、バックホー攪拌による施工が可能である。写真4,5は、浚渫湖沼底泥の改良を示している。ここでは対象土の粘着性が非常に高く、均一混合が困難であったこと、周辺環境上の制約から粉塵を完全にシャットアウトする必要があったため、一軸式攪拌オーガーによる改良装置を用いた。写真2~5で紹介した工事適用事例では、すべて改良直後に改良土を運搬し、盛土等の建設材料として有効利用している。

表-5 適用実績

適用工種	適用件数	使用量(t)	発注者
シールド排泥	7	3,526	地方自治体
建設発生土改良	9	1,739	地方自治体、官公庁
軟弱地盤改良	6	445	官公庁、民間
道路路床改良	1	274	民間造成工事
池、河川泥土改良	4	6,410	地方自治体、官公庁、民間
その他	1	400	民間
合計	28	12,794	

表-6 代表的な工事例

工法	工事概要	改質土量(m³)	発生土の種類	改質品質	添加量(kg/m³)
泥土圧式シールド工法	内径1350mm 路線長1621m	5,800	礫混じりシルト質砂	$q_c=400$ kN/m²	180
			シルト質砂		140
			粘土質シルト		230
オープンケーソン工法	外径16m 内径13.5m 深さ28.5m	6,150	腐植土	$q_c=400$ kN/m²	345
			シルト	70-値120mm以下	50
			砂質土	$q_c=400$ kN/m²	130
真空ポンプ式浚渫工法	橋梁下の河川延長220m	9,695	浚渫土	$q_c=400$ kN/m²	420
一軸改質機による改良工法	湖浚渫土	随時	浚渫土	$q_c=500$ kN/m²	350



(改良前) (改良後)
写真-2 シールド排泥改良



(河川堆積土の浚渫状況)



写真-5 湖底泥浚渫土の改良
(造成有効利用)



(改良状況)

写真-3 河川浚渫土の改良

(2) 攪拌プラントを利用した改良工法の開発

今後,都市部におけるシールド工事では,掘削排泥を改良するための高性能改良システムが必要になると判断されることから,湖沼底泥改良に用いた改良装置に対して下記に示すような項目について改良を加え,施工性の向上を図った。

狭隘な発進立坑基地にも対応できるようコンパクトな2段式タイプにした(写真-6)。

現場にあわせたレイアウトが可能となるよう上段,下段の接続部の角度を変更できるようにした。

土砂をスムーズに投入できるよう土砂ホッパーに攪拌羽根を取り付けた。

取り込みと攪拌のスクリーを分離し,それぞれのスクリー回転数を独立に調整する事で,取り込み量と充填率を管理できるようにした。



写真-4 湖底泥浚渫土の改良
(改良状況)



写真-6 2段式スクリー

(3) 既存改良材との比較

基本性能および施工実績をふまえた上でF Tマッドキラーと既存地盤改良材との比較を行った結果を表-7に示す.特に環境面,即効性,施工性についてF Tマッドキラーが有効であることが確認できる。

表-7 地盤改良材の比較

	再焼成PS灰	石灰系	セメント系	高分子系
危険物	中性で毒性がなく長時間放置しても問題はない。	生石灰は消防法で危険物第3種に指定。貯蔵、施工時の取り扱いに注意。pHがあがり発熱がある。	危険物でない。PHはあがる。また六価クロムに対する不安がある。	中性で毒性がなく長時間放置しても問題はない。
改良原理	吸水による水の含水比低下に伴う物性改良。	吸水、発熱による水の含水比低下に伴う物性改良。	セメントの水和・固結化作用によって土の強度増加をはかり改良をおこなう。	泥土の自由水に作用。水分吸着、固定化、土表面の被覆・架橋・団粒化。
改良効果	再焼成PS灰が行き渡らない部分も吸水作用により改良効果が期待できる。	石灰が行き届かない部分の改良も、石灰の吸水作用により期待でき均一な改良効果が得られる。	セメントが行き渡らない部分は固まらないため改良効果にムラがやすい。	液体タイプは均一作業性にすぐれる。
適用土質	粘性土、砂質土とも適している。	粘性土の改良に適している。	砂質土系の改良に適している。粘土及び有機物含有量により改良効果が敏感に影響をうける。	粘土・シルトの泥土、含水比が多い場合注意。
適用可能な土の含水比	高含水比土であっても適当な添加量により十分な改良効果を期待できる。	石灰混合後の状態が泥状になるような高含水比土には改良効果は期待できない。	高含水比土であっても適当なセメント添加量によって充分硬化し改良効果を期待できる。	対象土質にもよるが概ね砂系では50%程度まで、粘土系では100%程度である。

5. 今後の展開

PS灰を再焼成処理した土質改良材FTマッドクラについてその特長および適用事例を紹介した。本材料を用いた泥土改良工法は、特にシールド排泥処理のように早急な改良を必要とする場合や改良土の環境問題が問われるようなケースに有効であり、近年急激な需要増加が見込まれるようになってきた。今後さらに本工法を定着、普及させていくためには、以下にあげるような課題に対して、善処していく必要がある。

改良原理が吸水効果によるもので、セメント系固化材などに比べると改良率や処理土の量が若干増加する。

輸送時および施工時のシステム、施工方法の検討

土木工事に独特な需要量の時間的、量的変動に対応できる貯蔵ならびに供給体制の確立

工場別の成分変動と品質管理体制の確立

コストパフォーマンス（運搬コストの効率化）
特に将来土木分野へ大量に有効利用していくためには、
の条件をいかにニーズに合うようシステムとして確立できるかが重要であり、現在は
生産（再焼成）拠点の拡大
大型サイロ等の貯蔵施設の充実
再焼成方法以外のPS灰処理方法の開発、
立地および適用条件に合ったPS灰以外のリサイクル材料の選定ならびに処理方法の開発
一定の品質を保証できる処理方法の検討
等の対応策を講じているところである。

尚、本工法の開発と適用においては、産業廃棄物であるリサイクル材料を活用し、産業間でのゼロエミッション化を進めるような背景があるため、対象となる地域の特徴をよく考慮に入れて、社会貢献度の高い用途に対し、自治体、地域の主力産業、建設業の3者が互いに長所と短所をカバーしあい、無駄のない効率的なシステムを作るということが肝心である。システム運営上の留意点としては、環境評価（有害物質を含まない、周辺環境に問題をない等）、品質評価（産廃を資材として利用する場合の品質性能）、コスト評価（有効利用にかかる費用と処分コストの関係）といった評価方法を適切に定めなければならない。また、焼却炉や処理機械導入計画の段階からプラントメーカーも交えて、システムを検討しておくことも必要である。

参考文献

- 1) 望月美登志, 阪本廣行, 小方高明: 製紙スラッジ焼却灰を用いた土質改良材, 電力士木 NO298 PP103-106.
- 2) 吉野広司, 齊藤悦郎, 望月美登志, 田中知樹, 茶園祐二他: 再焼成PS灰によるソイルセメント柱列壁工法の排泥改良に関する研究, 第57回土木学会年次学術講演会, 2002.
- 3) 大井隆資, 齊藤悦郎, 望月美登志, 吉野広司, 田中知樹, 茶園祐二他: 再焼成PS灰を用いたシールド排泥の改良処理(その2), 第57回土木学会年次学術講演会, 2002.
- 4) 望月美登志, 茶園祐二, 齊藤悦郎, 吉野広司, 田中知樹他: 再焼成PS灰による軟弱掘削排泥の改良について, 第57回土木学会年次学術講演会, 2002.
- 5) 岡野幹雄, 吉野広司, 望月美登志, 川中子基他: PS灰による河川浚渫土の改良処理, 第58土木学会年次学術講演会, 2003.
- 6) 吉野広司, 望月美登志, 田中知樹, 茶園祐二, 小方高明: PS灰と高分子による泥土改良, 第58土木学会年次学術講演会, 2003.
- 7) 財団法人先端建設センター: 建設汚泥リサイクル指針, 1999.