

粒状固化工法による建設汚泥リサイクルに伴う石炭灰の有効利用

野口 真一*
沼田 淳紀**
山田 康弘***

概要 建設工事に伴って副次的に発生する泥土は、従来は埋立て処分や海洋投棄されていたが、環境問題や処分場の残余容量が逼迫している現状から、減量化や再生利用の技術開発が行われている。粒状固化工法（イーキューブシステム[®]）は、泥土の流動程度に応じ、高分子凝集剤および産業副産物であるフライアッシュ（石炭灰）あるいは製紙スラッジ焼却灰を主原料とする固化材等を添加し、約 30 秒程度の極めて短い時間の攪拌・混合により、粒状に固化した処理土を連続的に生成し、路床材、埋戻し材や堤体材料等に再利用することができる。フライアッシュを再利用した場合には、強アルカリ性となること、微量に含まれる重金属類の溶出が課題である。本稿では粒状固化工法の概要ならびにこのような課題の解決策として添加剤アッシュスターを用いた場合の工学的性質について述べる。

キーワード：建設汚泥、リサイクル、廃棄物、安定処理、フライアッシュ

1. はじめに

依然として向上しない建設汚泥リサイクルに対し、環境省ならびに国土交通省は、『建設汚泥リサイクル向上』を目指し一層の取り組み・環境整備を行っている。

しかしながら、その運用面とともに技術上の課題についてもまだまだ議論する必要があり、建設汚泥処理（以下、泥土処理という）に携わる排出事業者、材料・機械メーカー、産業廃棄物処理業者等がそれぞれの立場から問題提起を行い、土木工学や応用化学の専門家等の意見を多面的に取り込むことにより技術の革新を行うことが重要である。

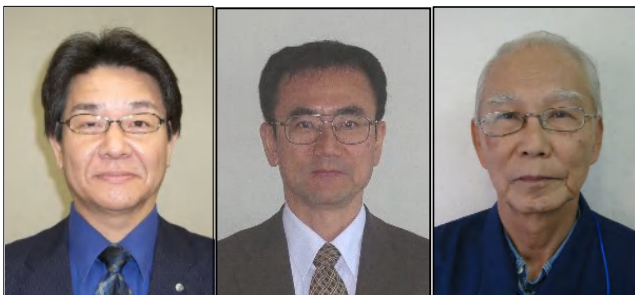
本稿では、これらに鑑み開発された、泥土再資源化システムである「粒状固化工法（イーキューブシステム）」（以下、本技術と呼ぶ）ならびに建設汚泥や浚渫土等の流動性を呈する高含水比の泥土（以下、泥土という）用に開発されたフライアッシュを再利用した場合の工学的性質について述べる。

2. 粒状固化工法の概要

(1) 諸元・性能

写真-1 に本技術に用いる粒状固化処理装置の一例を示す。装置はコンパクトな可動式で、標準型の場合は 10t トラック 1 台で、また、大型処理装置の場合は 20t トレーラー 1 台で運搬・組立解体が可能である。

図-1 にユニット型移動式装置システム図の一例を示す。主要装置は、①連続式攪拌・混合装置、③泥土定量供給機、⑤⑥⑦固化材定量供給機などから構成される。攪拌・混合装置は、移動翼と攪拌翼から構成されている。泥土は高分子凝集剤および固化材が添加されながら連続的に混練され、ベルトコンベヤから排出される。必要とする固化処理プラントのヤードの大きさは、ユニット型では幅 10m×長さ 30m、セパレート型では幅 15m×長さ 30m 程度である。攪拌・混合時



野口 真一

沼田 淳紀

山田 康弘



写真-1 粒状固化装置（セパレート型）全景

* 飛鳥建設株式会社 土木事業本部 新規事業統括部 重点分野推進G 担当部長 (shinichi_noguchi@tobishima.co.jp)

** 飛鳥建設株式会社 技術研究所 第二研究室 室長 (atsunori_numata@tobishima.co.jp) 会員

*** 東海テクノ株式会社 材料研究員 (有限会社ラトナ 代表取締役社長) (ratna@trust.ocn.ne.jp)

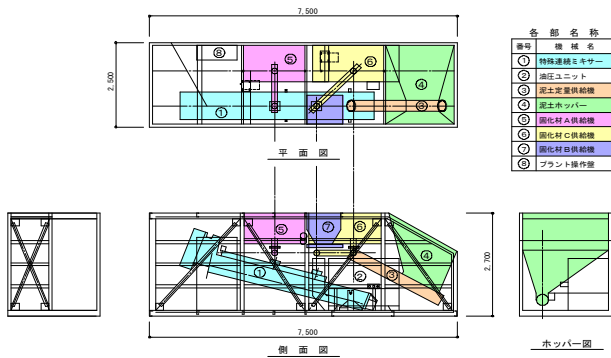


図-1 ユニット型移動式装置システム図の一例

間は約 30 秒程度の極めて短い時間であり、処理能力は 25(標準型)~40m³/h (大型)程度である。

(2) 技術の特徴

本技術の特徴は以下のとおりである。

- ① 高含水の流動性を呈する建設汚泥や浚渫土等の泥土に対応できる。特に含水比140%以上の高含水泥土においては、貯泥・調泥^{2),3),5),7)}を実施することで泥土の含水比を制御可能である。これにより、固化材の添加量の低減(コスト縮減)と、安定した処理土の品質を確保できる。
- ② 石炭灰、中性および弱アルカリタイプ、有機質対応タイプなどの固化材を用いることで、泥土の性状や使用目的、要求品質に応じた強度(第2~4種処理土相当)の粒状の処理土が生産できる。
- ③ 攪拌・混合装置では連続処理が可能である。このため、従来工法と比べて生産処理効率が高く、産業廃棄物として処理するよりも経済的である。
- ④ 処理土は粒状を呈している。このため、処理後のハンドリング性に優れている。
- ⑤ 処理装置がコンパクトで可搬式のため現場環境の制約が少ない。
- ⑥ 処理時に粉塵の発生や騒音・振動が少ない。

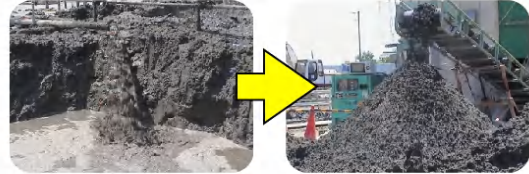
(3) 本技術の適用範囲と適用事例

本技術の対象は、汚染されていない泥土等、土壤環境基準に適合しているものとする。これは、主として建設汚泥があるが、建設汚泥に含まれない港湾・河川等の浚渫土なども適用可能である。写真-2に施工状況を示す。

平成 14 年以降、地盤改良工事¹⁾、SMW工事⁶⁾、基礎杭工事等から排出される泥土の処理、および、河川・湖沼等の浚渫土の改良技術として採用されている。

また、平成 19 年度には NETIS の「公共工事等における新技術活用システム」において評価の結果、現場での試行を行う技術として認められている。

▼高圧噴射攪拌工法排泥



▼泥土圧シールド工法排泥



▼港湾浚渫土



写真-2 施工状況

3. フライアッシュの有効利用

(1) フライアッシュを材料とする場合の問題点

処理した泥土の要求性能が圧縮強度またはコーン指数のみである場合には、一般にフライアッシュとセメントの併用が最も安価である。しかしながら、これだけの要求性能では、①処理土のpHが強アルカリとなり溶出する、②フライアッシュに微量に含まれる重金属等の有害物が溶出する、といった問題がある。

これらの溶出を抑制するために、数種類の無機化合物を混合した添加剤(ドライビースター)をフライアッシュに混入させることが有効である。これにより、フライアッシュが持っている「流動性が高く、フライアッシュを用いるとコンクリート施工時の流動性が増大する」という物理学的性質や「ポズラン活性があり、安定材の添加で自硬する」といった化学的性質を変化させることなく、アルカリ溶出の基であるカルシウムあるいは重金属等有害物の粒子表面を石膏化し、その溶出を防止・抑制する。このような処理を施したフライアッシュとセメントの混合材を以降では、アッシュスターと呼ぶ。

(2) アッシュスターの特徴

アッシュスターによる泥土の固化特性を以下に列記する。

① 速やかな水分の吸収

フライアッシュはボイラで高温で燃焼された残りの灰で、乾燥状態であるとともに多くの空隙をもっており、泥土中の水分を速やかに吸収し泥土の流動性を抑制する。

② ポズラン反応

フライアッシュやセメントが泥土中の水分と反応し

て、ケイ酸カルシウム水和物を始めとする各種の水和物が形成される。(ポゾラン反応生成物)

③ イオン交換反応

上記の各種水和物と泥土粒子との間にイオン交換(カルシウムイオン Ca^{++} が泥土粒子表面のイオンとイオン交換吸着する)が生じ、その結果、泥土粒子表面の帯電状態が変わり、泥土粒子を凝集して団粒化させて、泥土の物理的状态を変化させ、通常の土壌の態様(形態)を呈する。

④ 組織の緻密化・硬化体組織強化

その後材令が進むと、ポゾラン反応生成物がマトリックス状のセメント水和物皮膜層に入り込み、絡み合っただけでなく、一方、結晶成長に伴う体積変化は水和物を緻密化し、硬化体の組織を強化することになる。

⑤ セメント固化による重金属等有害物の不溶化とカルシウム表面の石膏化

アッシュスターはセメントを混合しているため、セメント固化による重金属等有害物の不溶化作用も生じる。これは、セメントの諸成分と水分および微細粒子の間で、

- (イ) 微細粒子のイオン交換反応
- (ロ) エトリンタイト生成反応
- (ハ) ポゾラン反応
- (ニ) 炭酸塩生成反応
- (ホ) 非結晶ゲル状生成反応

などの反応が単独もしくは複合的に作用して行われ、中でも(ロ)～(ニ)の過程において、セメント鉱物であるアルミネート相($3CaO \cdot Al_2O_3$)と反応してエトリンタイト($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)、モノサルフェート水和物($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$)、アルミン酸カルシウム水和物($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$)等の水和反応物質が生成される。これらの水和鉱物は、針状結晶と六角板状結晶で互いに絡み合っており、溶解性の集団のイオンを形成するTi, Cr, Mn, Zn, Feなどは、エトリンタイトの Al^{3+} と置換固溶し、Asなどは SO_4^{2-} と置換固溶して水和物の結晶内に固定される。また、Hgなどはセメント水和物の大半を占める微細なケイ酸カルシウム水和物(一般にC-S-Hと表わす)との表面に吸着されることにより、重金属化合物を硬く閉じ込め不溶化させない構造体が形成されることとなる。

これらの反応に加え、前述したように添加剤中の成分がカルシウムや重金属等有害物の粒子表面を石膏化(粒子表面に石膏結晶を成長させる)して、それらを溶出しないようにする。

⑥ 凝集沈殿効果その他

添加剤は、無機の凝集沈殿剤や硫酸カルシウム、炭酸カリウム等数種の炭酸塩、有機物含有度の高い泥土向け

にはさらに数種の無機金属塩類を混合したものである。すなわち、この添加剤には、活性アルミニウム、活性炭酸ナトリウムと活性カルシウムが含まれるため、無機の凝集沈殿剤の性質をもつこととなる。また硫酸カルシウム(石膏)は、カルシウムや重金属等有害物の粒子表面に石膏結晶を成長させ、それらを溶出しないようにするために使われる。また、添加剤は上記のような成分構成なので、その他にも硬化の過程で初期強度の小さいフライアッシュの欠点を補う機能も持っている。

(3) アッシュスターの成分

アッシュスターの成分は、泥土処理後の再利用時の要求品質によってフライアッシュとセメントの割合を変えている。表-1に普通ポルトランドセメントの平均的な化学組成を示す。アッシュスターは、フライアッシュそのものの成分が相当の差異をもっているため固定化した成分を示すことはできないが、1例として、ある火力発電所から発生したフライアッシュ:普通ポルトランドセメントを7:3にして製造したアッシュスターの成分を表-2に示す。なお、添加剤は数%と微量であり、表-2では、その他に含まれる。

表-1 普通ポルトランドセメントの平均的な化学組成

酸化成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O+K ₂ O
組成範囲%	60~67	17~25	3~8	0.5~6	0.1~4	1~3	0.5~1.3

(大門正機編訳 JMB 材料科学「セメントの科学」⁸⁾)

表-2 アッシュスターの化学組成

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaSO ₄	その他
組成範囲%	33~43	33~43	10~20	1.5	1	1.2	5.3

4. アッシュスターを使用した泥土処理の工学特性

(1) 粒度組成⁴⁾(JIS A 1204)

SJM工法排泥および泥土圧シールド工法排泥に本技術を適用した事例の原泥および処理後の粒度組成を図-2、図-3に示す。泥土圧シールドの排泥に対しては高分子凝集剤を10kg/m³添加し、固化材として用いたアッシュスターは80~250kg/m³の範囲で変化させ処理を行った。図中nなる値は、Talbot⁹⁾が提案した式(1)で表される指数である。

$$P = \left(\frac{d}{D} \right)^n \times 100 \quad (1)$$

ここで、P: 通過質量百分率、d: 任意粒径、D: 最大粒径、n: 粒度分布を表す指数

図-3に示すとおり、シールド汚泥におけるnの値は、固化材の添加量が多い処理土ほど大きく、添加量の少ない処理土ほど小さい。また、自硬性汚泥を処理した場合の処理土は概

ね $n=0.3\sim0.5$ の範囲にある。大根¹⁰⁾はフィルダムの築堤用土として泥岩材料やまさ土を用いた場合、撒出・転圧による粒度組成と強度低下の関係を調べ、強度低下を起こさないための n の値として $n\approx 0.3$ を提案している。また、Lee¹¹⁾は $n=0.25\sim0.50$ のTalbot曲線はアースダム用の天然材料を選ぶ場合の基準となり得ることを提案している。固化材の添加量により粒度組成は、 $n=0.2\sim0.5$ の範囲に調整でき、多種多様な処理土の生産が可能である。

また、発生泥土および処理後の粒度組成をまとめて図-4の三角座標に示す。細粒分含有率が60%以上であった細粒な泥土が、細粒分含有率が60%以下の砂質土に改質されていることがわかる。

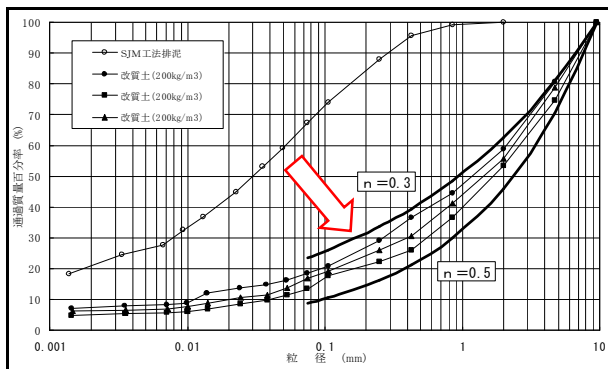


図-2 S J M工法排泥の処理前後の粒度組成

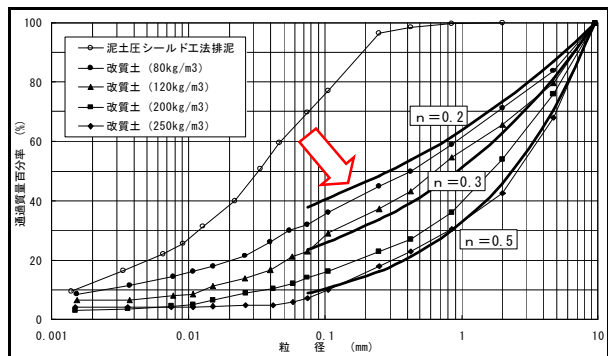


図-3 泥土圧シールド工法排泥の処理前後の粒度組成

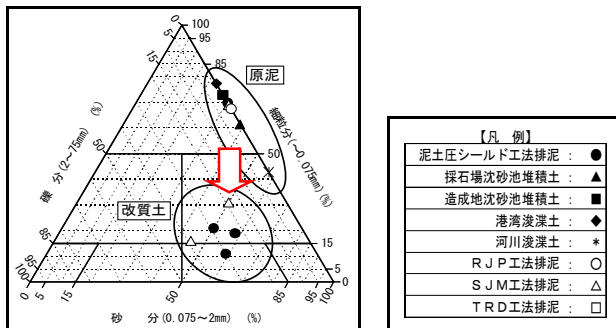


図-4 泥土の処理前後の三角座標

(2) コーン指数⁷⁾ (JIS A 1228)

コーン指数について、道路建設工事においてSMW工法から排出される建設汚泥をダンプトラックのトラフカビリィ

ティ確保のために必要となる要求品質として「3日後にコーン指数 $q_c=1,300\text{kN/m}^2$ 以上」が求められた事例を示す。この際の添加剤および添加量を表-3に、また、各材料の添加量、スランプ、含水比、コーン指数を表-4に示す。

図-5に材料ごとのコーン指数を要求品質値および各基準値と比較して示す。ただし、 $1,400\text{kN/m}^2$ 以上のコーン指数の値は、試験時コーンが貫入不能となるので、貫入不能となった時点の値を示した。

いずれの材料においても、各基準値を大幅に上回り要求品質を満足していることがわかる。

表-3 使用添加剤および添加量

	添加剤名称	添加量 (kg/m ³)
高分子凝集剤	S-1 T	13~15
固化材	アッシュスター	100~150

表-4 コーン指数試験結果

材料記号	添加量 (kg/m ³)		スランプ (mm)	含水比 w (%)	コーン指数 q_c (kN/m ²) (3日後)
	高分子凝集剤	固化材			
A	15	150	15.0	90	1,620
B		100	14.5	97	1,840
C		150	14.5	97	1,870
D	13	100	9.5	99	2,040
E			6.0	92	1,460
F			6.0	92	1,350

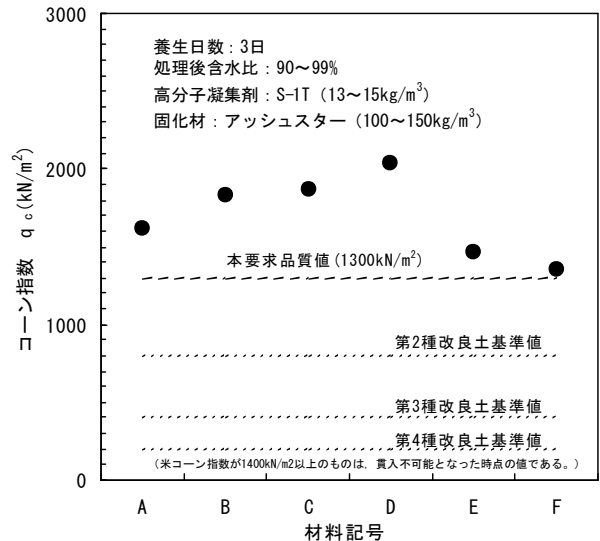


図-5 処理後のコーン指数

(3) SS分析による再泥化試験⁷⁾

処理土を有効利用する場合、処理後仮置きすることが多く、仮置き期間中は降雨により処理土が流出しないようにしなければならぬ。

そこで、SMW工法排泥、港湾浚渫土、湖沼浚渫土天日乾

乾燥土の3種類の泥土について、泥土そのままのものと本技術により処理した材料（28日養生したもの）について、以下の方法で濁水のSS（浮遊物質質量）分析を「昭和46年環境庁告示59付表8」により実施し再泥化の検討を行った。

- (1) 泥土と処理したものについて、それぞれ乾燥質量で約10, 100, 300gづつの3ケースを準備する。
- (2) メスシリンダーに上記で準備した試料を入れ、加水し合計1,000cm³とする。
- (3) 加水後、24時間静置する。
- (4) 24時間経過後、メスシリンダーに蓋をして、これを逆さにしたり戻したりを5回繰返し、内容物を攪拌する。
- (5) 5回攪拌後直ぐにメスシリンダーの内容物を2mmふるいに注ぐ。
- (6) 2mmふるいを通過した濁水をSS分析する。

なお、各処理後材料の濁水作製時（採水後）に2mmふるいに残留した粒状固化材は、目視の限り水浸前に比べて大きな変化は見られなかった。

濁水の濃度比を図-6に示す。泥土のSS濃度が大きくなるほどややSS濃度比が大きくなる傾向が認められるが、試験試料や濁水濃度を変化させても、処理後のSS濃度は泥土のSS濃度の概ね10%未満であり、ほとんど再泥化しないことがわかる。

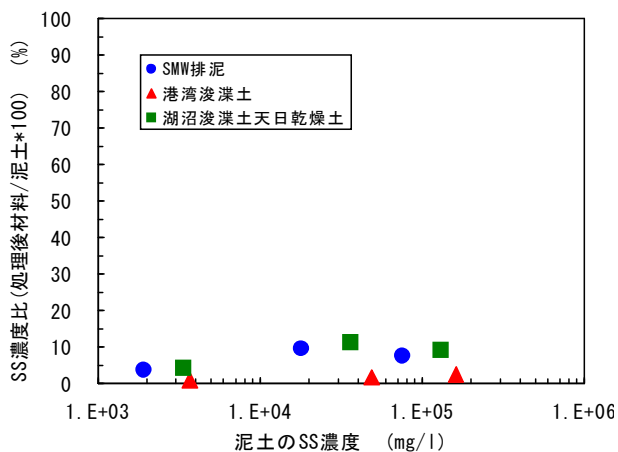


図-6 濁水のSS濃度比による再泥化の評価

5. まとめ

粒状固化工法の概要を示すとともに、この固化材にフライアッシュを用いた場合にアルカリと重金属の溶出を抑制する添加剤を添加しセメントと混合したアッシュスターの概要を示した。

このアッシュスターを固化材として用いて処理した泥土について、泥土の粒度組成が改質することで砂質土となること、コーン指数による要求品質が1,300kN/m²以上といった通常の基準をはるかに上回るような厳しい品質も満足でき

ること、水浸による再泥化はほとんど認められないことを実際の事例に基づき示した。

参考文献

- 1) 野口真一. 粒状固化工法による建設汚泥の再資源化システム. 環境管理. Vol.38, 11月号, 2002, p.35-39.
- 2) 野口真一, 鴫田稔. 粒状固化工法による建設汚泥の再資源化システム. 建設の機械化. No.645, 11, 2003, p.33-38.
- 3) 野口真一. 粒状固化工法による建設汚泥の再資源化. 建設機械. Vol.40, No.8, 2004, p.45-50.
- 4) 永松郁生, 野口真一, 定岡直樹, 中村吉男, 奥村哲夫, 成田国朝, 大根義男. 循環型社会形成を目指した泥土（建設汚泥）の再生利用技術について. 土木学会 土木建設技術シンポジウム2005 論文集. 2005, p.75-80.
- 5) 野口真一, 定岡直樹. 泥土再資源化技術「イーキューブシステム」. 月刊推進. Vol.20, No.4, 2006.
- 6) 三浦正博, 村上清基, 高橋工, 沼田淳紀, 伊藤良治. 仙台市東西線遮水性土留調査工事における粒状固化工法の適用事例. 第7回環境地盤工学シンポジウム発表論文集. 地盤工学会. 2007.8, pp.307-310.
- 7) 社団法人 日本建設機械化協会. イーキューブシステム建設技術審査証明報告書. 建審証第0702号, 2007.
- 8) 大門正機編訳. JME 材料科学 セメントの科学. 内田老鶴圃. 1989.
- 9) W.B.Fuller&S.E.Thompson. The Laws of Proportioning Concrete. Trans.A.S.C.E.. 1907, p.67-143.
- 10) 大根義男. 盛立材料としての岩塊としての諸問題. 土と基礎. 32-7, 1984, p.3-8.
- 11) C.H.Lee. Selection of Waterials for Rolled-Fill EarthDams. Trans.A.S.C.E.. 1938, p.1-18

