

バイオマス燃焼灰に「デナイトSE」とセメントを配合した高含水比泥土改質材について

若築建設株式会社 技術研究所地盤・環境グループリーダー 水野 健太

1. はじめに

私が所属する建設会社はマリコントラクター（マリコン）とも呼ばれ、国内外で多くの海洋土木事業を手掛けています。私は千葉県袖ヶ浦市にある技術研究所（地盤・環境グループ）に所属しており、各種地盤改良工法の品質や出来形に関わる支援業務をはじめ、これらに関連した調査研究や技術開発を行っています。

さて、この度、技術情報誌CEM'Sに寄稿することとなったきっかけを述べたいと思います。所属会社の客先は、国、地方自治体、民間企業とさまざまですが、臨海部に立地する民間事業所から、岸壁前面の水深を維持するために発生する浚渫土砂の減容化や改質・固化改良、産業廃棄物の有効利用などに関する相談を多く受けます¹⁾。そのうちの一つに、再生可能エネルギーであるバイオマス発電所を運営する電力事業者から、発電に伴い発生する灰（以下、バイオマス燃焼灰）の有効利用に関する相談がありました。バイオマス燃焼灰には電気集塵機で回収される飛灰と炉底に堆積する主灰がありますが、どちらも産業廃棄物として大半は埋立処分されているのが現状です。そこで、これまで改質材や固化材を用いた泥土改質に取り組んできた経験²⁾を生かし、バイオマス燃焼灰の中でも吸水性があり、カルシウム成分を含有する飛灰に着目し、高含水比泥土改質材としての適用性の検討を始めました。後述する開発コンセプトで述べるように、海域

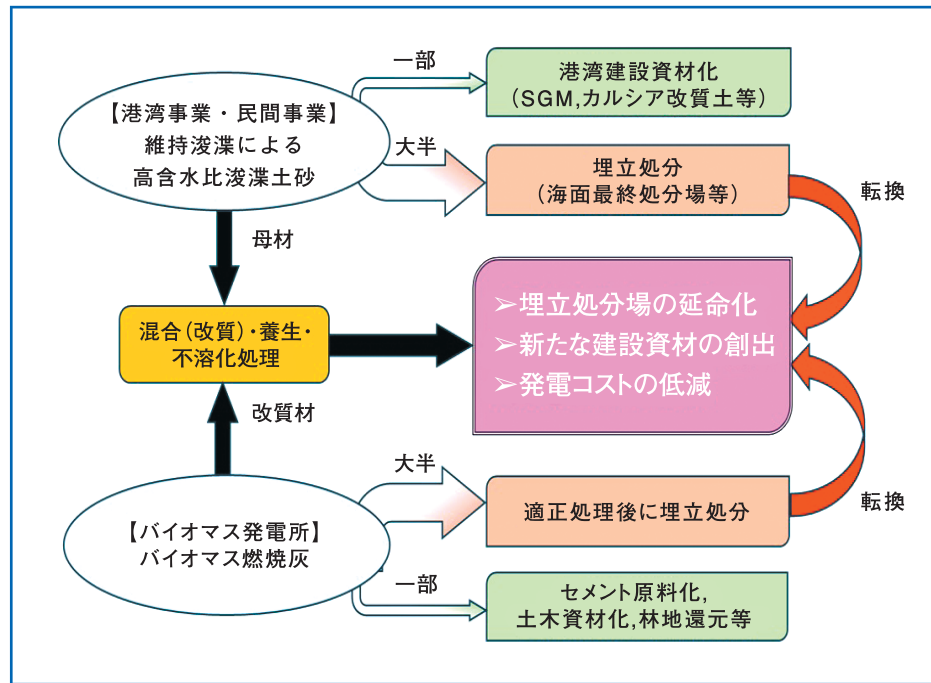


図-1 開発コンセプト

浚渫土砂のようなヘドロ状で高含水比の泥土に対して多量の飛灰を添加すれば、瞬時にダンプ運搬が可能な程度に改質できるだけでなく、2～3日程度の養生で弱く固化することが分かり、このような改質土は再生資材として活用できる見通しを得ました。

ここで大きな課題に直面しました。それは、土壤環境基準値を超過する有害重金属類が改質土から溶出する問題です。燃料種、発電所、時期により値は変動しますが、検討の対象とした飛灰単独からは、鉛、六価クロム、セレン、ふっ素が土壤環境基準値を超過して溶出します。一方、泥土に多量の飛灰を添加して作製した改質土からは、固化の副次的効果として鉛、六価クロム、ふっ素が溶出しなくなりました。しかし、

セレンの溶出量は飛灰単独からの値と変わらず、ほう素の溶出量は改質土とすることで逆に増加するという新たな問題が出てきました。さまざまな不溶化材によるラボ試験を実施しても有効な対策を見い出せないでいましたが、太平洋セメント(株)へ不溶化材の提供をお願いしたことをきっかけにヒアリングの場を経て、「デナイトSE」とセメントの少量添加の提案を受けました。

本稿では、まず泥土改質材の開発コンセプトを概説し、「デナイトSE」とセメントによるセレンとほう素の不溶化効果に関するラボ試験結果の一部を紹介します。なお詳細は、一連の既発表文献³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾を参照ください。

2. バイオマス(PKS)灰系改質材の開発コンセプト

本検討で対象とする飛灰は、燃料種としてパーム椰子殻(PKS)を採用しているバイオマス発電所起源のため、これを主材とした泥土改質材を、バイオマス(PKS)灰系改質材(以下、改質材)と呼ぶことにします⁸⁾。改質材の開発コンセプトを図-1に示します。海域の浚渫土砂は含水比が非常に高く、有機分の影響でセメント系固化材による固化改良が難しいことが多く、ほとんどが埋立て処分されています。しかし、浚渫土砂の含水比を塑性限界程度まで低下させることができれば、厄介者の浚渫土砂を新たな建設資材として扱うことができます。一方、飛灰は集塵機からの回収直後では乾燥状態であり吸水性を期待できます。そこで、高含水比の浚渫土砂に飛灰を多量に混合すれば、浚渫土砂を粒状に改質できるのではないかと考えました。これにより、ひっ迫する埋立処分場の延命化、バイオマス発電コストの低減、新たな再生資材の創出を期待できると考えています。

写真-1は、浚渫土砂、飛灰、改質土の外観、図-2は、飛灰の添加量と改質土のフォールコーン貫入量の関係を示したものです⁵⁾。ここで、飛灰(3種類)には後述する不溶化材や助剤は含まれていません。試験時の浚渫土砂の含水比は253%です。フォールコーン貫入量(JGS 0142)は、締め固めた土のコーン指数試験(JIS A 1228)と調和的な指標であり、コーン指数へ換算することが可能です²⁾。図-2に示すように、飛灰の添加量が増えるほどフォールコーン貫入量は線形的に小さくなり(コーン指数は指数関数的に大きくなります)。また、図-3に示すように、養生3日後には $qc=400kN/m^2$ 相当の強度が発現することを確認できます。

浚渫土砂の状態を液体状から団粒状あるいは粒状に変相させるためには、乾燥状態である飛灰を大量に添加し、見かけの含水比を低下させればよいことは、土質力学の観点からは自明です。

特徴的なのは、飛灰にはカルシウム成分が多く含まれており、水和反応で弱く固化し(養生効果)、結果としてハンド

リング性の高い材料となること、一部の有害重金属類が不溶化される副次的効果があることです。

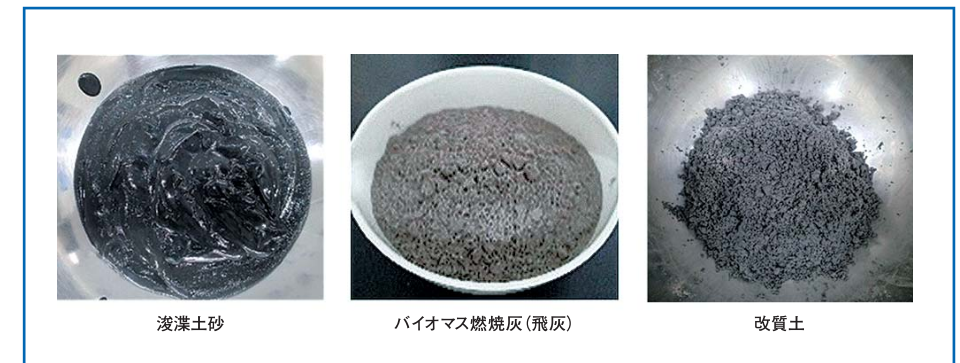


写真-1 試料の外観

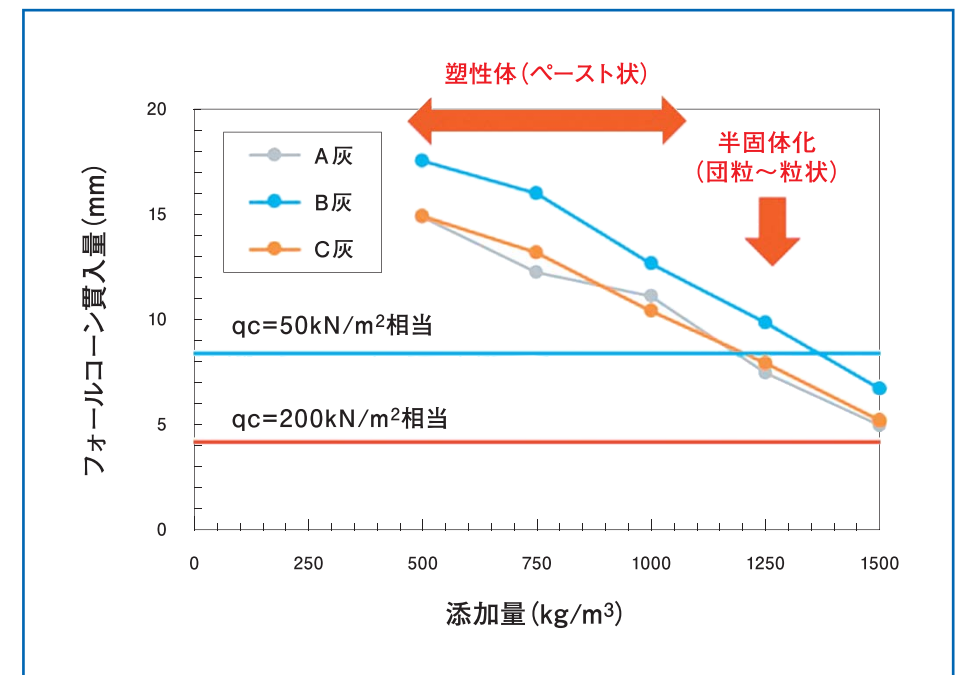


図-2 飛灰の添加量と改質土のフォールコーン貫入量の関係

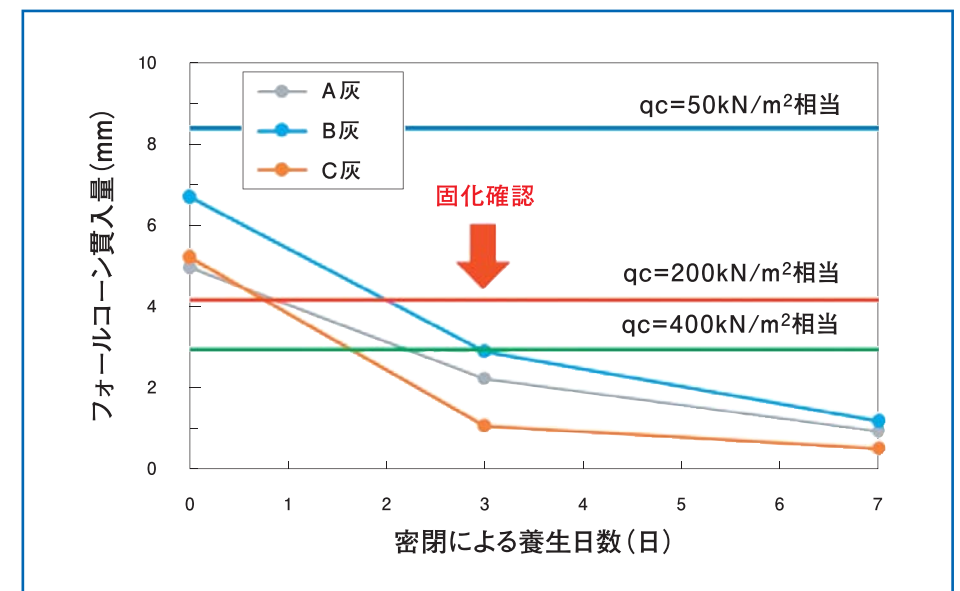


図-3 フォールコーン貫入量の経時変化

3. 改質土からの有害重金属類の溶出

バイオマス燃焼灰から有害重金属類が溶出する問題は、多くの研究で従前より指摘されています。本稿で対象とした飛灰単独の溶出量試験結果(環告46号)を表-1に示します。表中の赤字箇所は、土壤環境基準値を超過したものを示しています。いずれの飛灰も六価クロムおよびふっ素の溶出量が土壤環境基準値を超過しています。これに加えて、B灰およびC灰ではセレン、C灰では鉛が土壤環境基準値をわずかに超過しています。

これ対して、改質土の溶出量試験結果(環告46号)を表-2に示します。対象とした浚渫土砂は図-2に示したものと同じで、改質土はこれに飛灰を1,500kg/m³添加して作製したものです。養生条件は開封養生で、養生日数は28日です。表-2に示すように、飛灰単独で土壤環境基準値を超過していた六価クロム、鉛およびふっ素については、改質土では土壤環境基準値をクリアしています。XRDによるX線回析やSEM画像から、エトリンガイトが生成されていることを確認しており³⁾、生成されたカルシウム系無機化合物にこれらの有害重金属類が固定化されたと思われます。しかし、セレン溶出量は、飛灰単独での値と同程度であり、土壤環境基準を超過しています。また、ほう素溶出量は、飛灰単独よりも増大しています。

飛灰の多量添加という力技で、高含水比浚渫土砂を力学的に優れた土系材料として再生できましたが、有害重金属問題を解決しないことには前へ進めません。いくつかの不溶化材を試しましたが、セレンの不溶化が一筋縄ではい

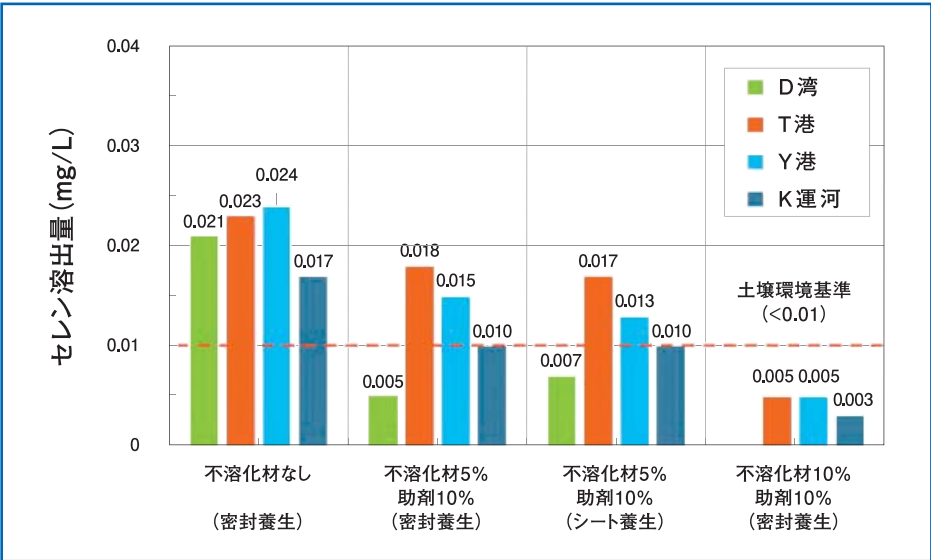


図-4 セレンの溶出量試験結果

きませんでした。前述したように、太平洋セメント(株)に相談し、不溶化に関する多くの助言と不溶化材のサンプル提供を受けたことがターニングポイントとなり、一気に検討が加速しました。重要なのはセレン価数であり、6価セレンは不溶化が難しいこと、還元作用が重要であること、不溶化効果の持続にはセメントの力を借りることが有効なこと、セレンよりもほう素の不溶化が難しいことなど、多くの知見が得られました。

4. 「デナイトSE」による不溶化効果

結論を述べると、改質土からのセレン溶出量を土壤環境基準値以下に抑制するためには、不溶化材として「デナイトSE」、助剤として普通ポルトランドセメントを配合することが有効でした。ほう素については、開封養生すると空気中の二酸化炭素と飛灰中のカルシウム成分が反応して改質土が炭酸塩化し、経時的に中性化が進むことは分かっていたので、できるだけ空気に触れさせな

い条件で養生すれば、溶出量を抑制できました。図-4および図-5は、4種類の浚渫土砂を対象に、最も有害重金属類の溶出リスクが高いC灰を用いた場合の不溶化材と助剤の効果を検証した結果です⁶⁾。飛灰の添加量は、D湾、T港およびY港が1,000kg/m³、K運河が800kg/m³です。いずれの浚渫土砂も不溶化材を配合しない場合は、セレンは土壤環境基準値の1.7～2.4倍の溶出量、ほう素は1.4～3.3倍の溶出量を示していることが分かります。これに対して、D湾については不溶化材を飛灰添加量の外割5%、その他のT港、Y港およびK運河については不溶化材を同10%配合することにより、土壤環境基準値を満足していることが分かります。ほう素に関してもほぼ同様の傾向です。

不溶化材と助剤を配合した改質土は、普通ポルトランドセメントを飛灰添加量の10%(80～100kg/m³)配合していることになるため、一種のセメント安定処理土に近い力学挙動を示します。図-6は改質土の一軸圧縮試験結果を示したもの

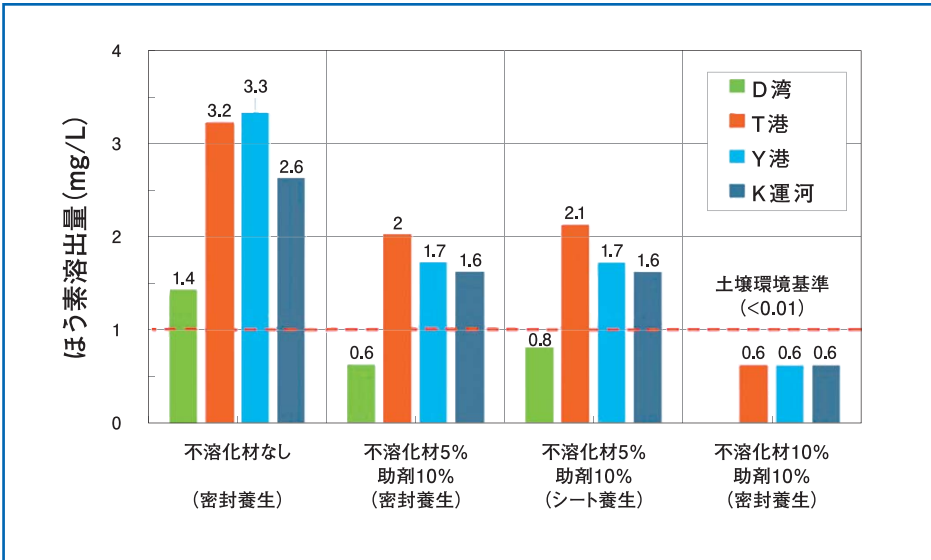


図-5 ほう素の溶出量試験結果

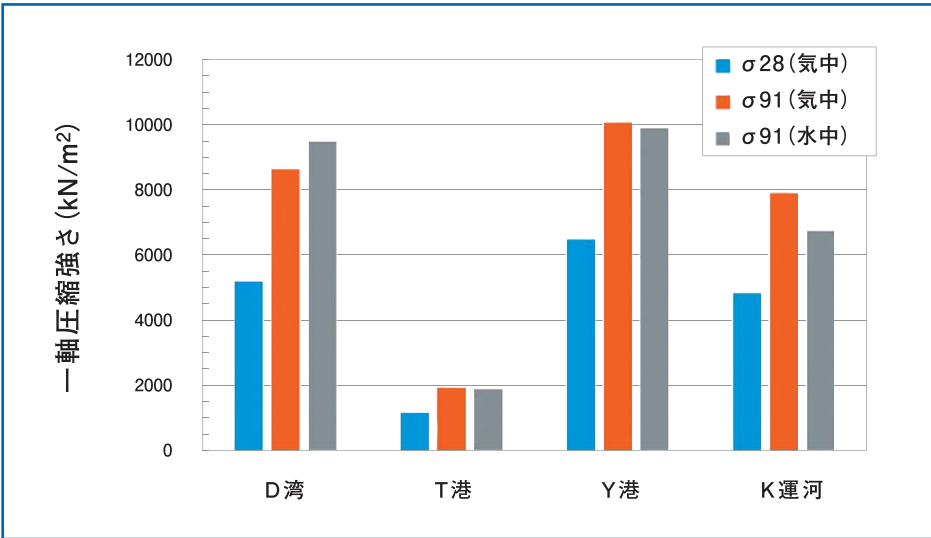


図-6 改質土の一軸圧縮試験結果

です⁷⁾。T港は有機分や油分を多く含み一般に強度発現が小さい浚渫土砂ですが、それでも28日で1,000kN/m²以上の強度を発現し、91日では2,000kN/m²に強度増加していることを確認できます。いずれの改質土においても、水浸させても再泥化せず、安定した状態にあることが分かります。

5. おわりに

本稿では、バイオマス燃焼灰(飛灰)に「デナイトSE」と普通ポルトランドセメントを配合した「バイオマス(PKS)灰系泥土改質材」により改質した、高含水比浚渫土砂の改質効果と有害重金属類の溶出抑制効果について、ラボ試験の結果を紹介しました。助剤として添加した普

通ポルトランドセメントの効果で、化学的に安定した改質土となりましたが、当初の設計思想よりはやや大きな強度となってしまうため、飛灰添加量をもう少し減らせる配合を検討しています。また、有害重金属類の溶出挙動については、より詳細な検討を実施する必要があると考えています。具体的には、酸性条件およびアルカリ条件を模擬した溶出試験法⁹⁾に準拠して、pHと改質土の溶出特性の関係についての長期評価を進める予定でいます。

【参考文献】

- 1) 水野健太・松本浩二：遠心脱水機と自走式土質改良機による浚渫土砂減容化・再資源化システムの適用事例, 第15回環境地盤工学シンポジウム, pp.4-2, 2023.11
- 2) 水野健太：各種改質材を用いた高含水底泥の改良効果に関する検討, 第14回地盤改良シンポジウム, pp.11-18, 2020
- 3) 水野健太・松坂昇：バイオマス燃焼灰の吸水性と高含水比浚渫土に対する改質効果, 第58回地盤工学研究発表会, 13-5-2-03, 2023
- 4) 水野健太・松坂昇：バイオマス燃焼灰の泥土改質材としての適用性および重金属の不溶化対策, 「無機・有機系改質材による発生土の改質とその利活用の普及・高度化の取り組みに関するシンポジウム」論文集, 2024.12
- 5) 水野健太：バイオマス燃焼灰の吸水性と高含水比浚渫土に対する改良効果, 基礎工, Vol.53, No.2, pp.45-48, 2025
- 6) 水野健太・松坂昇：バイオマス(PKS)灰系改質材による改質土の重金属類溶出特性, 第16回環境地盤工学シンポジウム, 2025
- 7) 水野健太・松坂昇：様々な高含水比浚渫土砂に対するバイオマス(PKS)灰系改質材の適用性, 土木学会第80回年次学術講演会, III-57, 2025.9
- 8) 地盤工学会関東支部「無機系吸水性材料を用いた土の改質技術の利活用に関する研究委員会」：無機系吸水性材料を用いた土の改質技術に関する手引き(案)ーバイオマス(PKS)灰系改質材編ー, 2024.12
- 9) 一般社団法人土壌環境センター：GEPC技術標準重金属等不溶化処理土壌のpH変化に対する安定性の相対的評価方法 (GEPC・TS-02), 平成20年3月7日

みずの・けんた

【著者略歴】

1995年 名古屋大学工学部土木工学科卒業
1997年 同大学院工学研究科土木工学専攻修了
1997年 若築建設株式会社入社
2008年 広島大学大学院社会人博士課程修了博士(工学)
現在 若築建設株式会社技術研究所地盤・環境グループリーダー