

【論文】

珪藻土系改良材を用いた堆積土砂の改良および盛土築造に関する実証実験

FIELD TEST ON IMPROVEMENT OF SEDIMENTARY SOIL USING DIATOMACEOUS-BASED MATERIAL AND CONSTRUCTION OF EMBANKMENT USING THE TREATED SOIL

林 泰弘*1, 犬丸 恭兵*1, 藤 龍一*2, 笠羽 豊大*2, 松尾 雄治*1

Yasuhiro HAYASHI, Kyohei INUMARU, Ryuich TOU, Toyohiro KASABA, Yuji MATUO

The authors have been studying on a diatomaceous earth-based improving material. The material immediately improves soft soil to good quality soil which can be transported. The improving material is a material with a low environmental impact because it improves the strength without significantly changing the physical and chemical characteristics of the soil. Field test was conducted on sedimental ground with cohesive soil. The ground was improved by a shallow soil stabilization using the improving material. The embankment was constructed by the improved soil. The degrees of compaction and the cone index of the embankment were satisfied the target values.

Keywords : *Diatomaceous earth-based improving material, Soil stabilization, Embankment, Field test*
珪藻土系改良材, 土質安定処理, 盛土, 現場実験

1. はじめに

建設廃棄物は、全産業廃棄物排出量の約2割を占め、その発生抑制、再利用、再生利用は重要な課題である¹⁾。平成30年度の建設廃棄物の全体の再資源化・縮減率は97.2%であるが、建設汚泥は94.6%、建設廃棄物に含まれない建設発生土の有効利用率は79.8%¹⁾と土砂に関しては今後もさらなるリサイクルの推進が必要である。

発生土砂の利用については防災面にも関係が深い。令和元年台風19号による河川氾濫等の大規模な浸水被害等が相次いだ。被災後の復旧を考慮しても、維持管理のための河川等の浚渫(堆積土砂の撤去)が重要という認識のもと、「緊急浚渫推進事業²⁾」が創設された。この事業は河川維持管理計画等で緊急的に実施する必要がある箇所として位置づけられた河川、ダム、砂防、治山に係る浚渫を対象として地方財政措置を講じるものである。この事業により今後大量の浚渫土砂が新たに発生することになるが、一般的に浚渫土砂は軟弱で、そのままでは建設工事等に利用することが困難である。

軟弱な発生土砂を有効利用するために、乾燥によって含水比を低下させたり、良質の土砂と混合したり、改良材を添加したりして土質を改良する方法がある。乾燥して含水比を下げる場合に自然乾燥に頼ると長い時間がかかるし、

熱を与えて乾燥する場合にはコストや環境負荷が大きくなる。また、良質の土砂と混合する場合には、全体として体積が大きくなってしまふことから、改良材を添加して改良する方法が主流となっている。

改良材としては、比較的安価で強度が得やすい石灰やセメント系固化材などのカルシウム系固化材が用いられることが多い。しかし、カルシウム系固化材の添加は土のpHを高アルカリ域に変えるため周辺環境へ影響を及ぼす懸念がある。近年では、環境への配慮から改良土についても中性であることが求められることが多くなっていることから、マグネシウム系固化材や石膏などの利用も研究されている。

筆者らは高分子材と珪藻土からなる泥土改良材デイスアットを開発し、デイスアット工法として国土交通省の新技術情報提供システム(NETIS)に登録している。このデイスアットをさらに改良するため、珪藻土の高い吸水性³⁾に着目して、泥土の改良に活用する研究⁴⁾に取り組んできた。珪藻土は泥土に含まれる余分な水分を取り込むことで土の流動性を瞬時に低下させ、締固めが可能になる。しかしながら、珪藻土だけでは十分な改良効果が得られないため、高分子材を混合することで土粒子を凝集し団粒構造を形成し強度を高めることを期待している。珪藻土単体または高分子材を添加しても土のpHは大きく変化しないため環境にやさしい改良材である。

今回、現場でシリカ系材料材を用いた土質安定処理およ

*1 建築都市工学部都市デザイン学科

*2 株式会社ワールド・リンク

表1 試料の物理・化学特性

	原土	改良土	参考値
土粒子の密度(g/cm ³)	2.638	2.705	2.654
自然含水比(%)	50.7	48.5	35.0
礫分(%)	0.0	0.0	0.0
砂分(%)	4.9	2.8	15.6
シルト分(%)	89.1	92.3	63.5
粘土分(%)	6.0	4.8	20.9
最大粒径(mm)	0.85	0.85	4.75
均等係数	2.0	1.7	10.5
液性限界(%)	79.1	69.9	-
塑性限界(%)	43.3	39.4	-
塑性指数I _p	35.7	30.5	-
地盤材料の分類名 分類記号	シルト(高液性限界) (MH)	シルト(高液性限界) (MH)	砂質細粒土 (FS)
pH(H ₂ O)	7.04	7.05	-
強熱減量(%)	7.52	6.07	-

び盛土築造に関する実証実験を実施したので報告する。

2. 実証実験概要

実証実験は茨城県の利根川土砂堆積地で実施した。まず、植生を含む表土をはがしたうえで対象土を採取した。この試料を用いて実験室で事前配合試験を実施し、所定のコーン指数が得られる配合を決定した。

現地での改良は浅層混合処理工法を採用した。その改良土を掘削、運搬し、重機で転圧して盛土を築造した。

この実証実験において評価すべき項目のうち、本論文では以下の内容について報告する。

- ① 基本性能：盛土の施工性を良くし、特に締固めが容易に行えるように建設発生土を改良できること
- ② 品質・出来形：高い密度を与える粒度分布であり、適度に細粒分が含まれること。改良土による盛土が施工機械のトラフィカビリティを確保できること
- ③ 安全性：周辺地下水等への pH の影響が少ないこと

3. 事前配合試験

実証実験予定地で採取した試料を用いて堆積土の特性評価と実証実験で用いる配合の検討を行った。

表1に試料の特性を示す。参考値は対象地域内の別の地点(ストックヤード)の試料から得られた値である。原土と参考値は近接の場所ではあるが、含水比粒度などに若干の違いがみられた。原土はシルト分が卓越した細粒土で、液性限界も比較的高く、pHは中性であった。

改良土の作製は以下の手順で行った。自然含水比の原土を4.75mmふるいを通してふるいに解きほぐし、ホバート

型ミキサーで5分間練り混ぜたのち、珪藻土系改良材を添加して再度5分間練り混ぜて改良土を作製した。事前配合試験で用いた珪藻土系改良材は、珪藻土乾燥品と細粒子及び高分子材の混合物である。なお、珪藻土系改良材の添加量は解きほぐした原土(湿潤密度0.945g/cm³)に対するものとして算出した。

改良土作製直後に「締め固めた土のコーン指数試験方法(JIS A 1228)」を実施した。改良材添加量とコーン指数、乾燥密度の関係を図1に示す。解きほぐしただけの未改良土(非練り返し)は第4種建設発生土に相当するコーン指数が得られたが、練り返しによって未改良土(練り返し)のコーン指数は泥土に相当する値まで低下した。乾燥密度の差は小さいことから、堆積期間もチキソトロピーを発揮したと考えられる。掘削、転圧あるいは改良による利用を考えた場合には練り返しが起こるため、改良効果を評価するには練り返した試料のコーン指数を基準にすべきである。珪藻土系改良材の添加量が増加するにつれコーン指数は直線的に増加し、乾燥密度も緩やかに増加した。改良材によって土骨格の強度の増加と締固め特性の改善の両方が得られたと考える。

実証実験では重機による転圧によって盛土を築造するため、コーン指数が400kN/m²以上が得られるよう珪藻土系改良材の添加量を30kg/m³とした。

未処理土では練り返しによるコーン指数の低下が確認されたため、改良土についても現場での過転圧によるコーン指数の低下の可能性が考えられた。そこで、珪藻土系改良材の添加量を30kg/m³とした改良土の締固めにおいて、JIS A 1228で指定されているA法の締固め仕事量

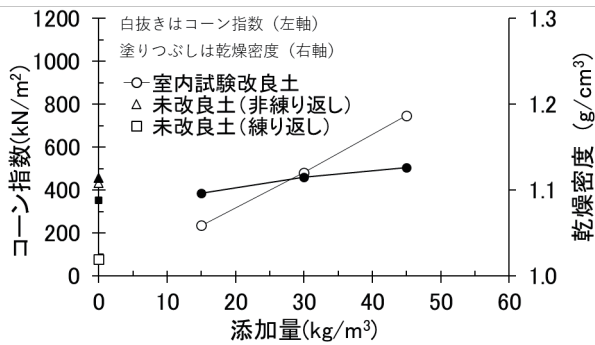


図1 改良材添加量と乾燥密度，コーン指数の関係

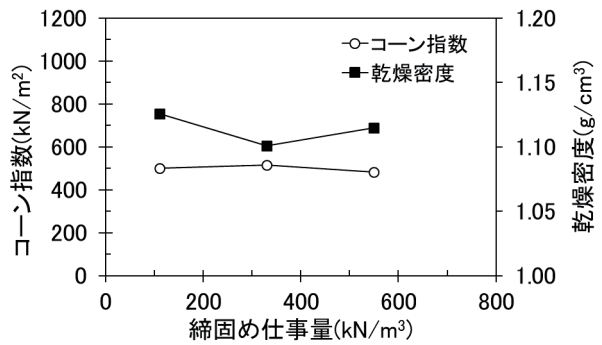


図2 締固め仕事量とコーン指数，乾燥密度の関係



写真1 改良前の状況



写真2 地山の状況



写真3 改良状況



写真4 改良前（左）と改良後（右）の外観

$E_c=550\text{kN/m}^2$ のほか、 $E_c=330\text{kN/m}^2$ 、 110kN/m^2 についても供試体を作製し、コーン指数試験を実施した。図2に締固め仕事量とコーン指数，乾燥密度の関係を示す。乾燥密度については締固め仕事量の影響がみられなかった。コーン指数については $E_c=110\text{kN/m}^2$ よりも $E_c=330$ 、 550kN/m^2 のほうが若干低下していたが大きな強度低下とはいえず、オーバーコンパクションのリスクは少ないと判断した。

4. 浅層混合処理による改良土作製

表土部分をはがした幅約10m×長さ約30mの堆積土地盤(写真1)を改良対象とした。写真2に示すように地山は重機の走行が可能な程度には固結していた。地表面に珪藻土系改良材を散布し、東洋スタビ社製のスタビライザー(CS360SD)で深さ1mの範囲で浅層混合処理を行った(写真3)。本スタビライザーで砂質土を対象とした浅層改良処理における混合精度は高い⁵⁾とされている。



写真5 まき出し、転圧の状況



写真6 2層目転圧後の状況

珪藻土系改良材は珪藻土細粒子とポリマーの混合物を用い、添加量は地山 1m^3 あたり 30kg とした。なお、この添加量を乾燥土に対する珪藻土系改良材の添加率として算出すると 4.8% となる。砂置換法による土の密度試験 (JIS A 1214) によって地山の湿潤密度と含水比を後日、近傍で測定したところ湿潤密度が $1.254\text{g}/\text{cm}^3$ 、含水比が 30.7% と事前配合試験とは大きく異なった。これをもとに解きほぐし土 1m^3 あたりの改良材添加量を算出すると 23kg となり事前配合試験の約 75% 、乾燥土に対する珪藻土系改良材の添加率では 2.4% となり事前配合試験の約 50% である。

改良前後の土の状況を写真4に示す。改良前 (写真左) は固結しているが、改良によって解きほぐされ、珪藻土系改良材によって団粒状を呈した。また、改良材の添加量が少なく、対象土が粘性土であるにもかかわらず、全体の改良状況を目視した範囲では施工状況は良好であったと判断した。

5. 試験盛土の築造

改良から5日後に改良土を掘削し、 10t ダンプ車で運搬の上、バックホウで試験盛土のヤードにまき出し、 D3 ブルドーザ 6.8t 級で転圧して盛土を築造した。試験盛土のヤードは $13.6\text{m} \times 23.6\text{m}$ で、のり面勾配 $1:2$ 、1層のまき出し厚 33cm 、仕上がり目標厚さ 30cm で3層とした。写真5にまき出し、転圧の状況、写真6に2層目転圧後の状況を示す。転圧は2日間にわたって実施し、初日終了後から2日目にかけて小雨に見舞われたが、転圧に大きな支障は見られなかった。

各層の転圧後に、ポータブルコーン指数試験 (JGS 1431) を各層9か所、2、3層目の転圧後に砂置換法による土の密度試験を各層9か所実施した。

6. 現場改良土および盛土の特性

現場で改良した土を持ち帰り、実験室で改良土の物理特性、化学特性、締固め特性、コーン指数を調べた。

カルシウム系固化材を用いると、土粒子同士を固結する作用があるため粒度が大きくなり、締固め特性も変化する。また、 pH が大きく上昇するため周辺環境への影響が大きいが、珪藻土系改良材は原土の性質を大きく変えないことが特徴である。改良土の物理特性と化学特性は表1に示している。コンシステンシー特性 (液性限界と塑性限界) を除き、原土と改良土に大きな違いがみられない。液性限界が低下しており、土が砂っぽい状態に変化したことで、締固めの作業性が向上するとともに、後にカルシウム系改良材で改良する場合には改良効果発揮に寄与することが期待される。 pH についても原土と改良土はほぼ同じで中性を保っている。

未処理土、室内試験改良土、現場改良土を用いて「突固めによる土の締固め試験 (JIS A 1210)」をA-a法で実施し、得られた締固め特性を図3に示す。改良土の改良材添加量はいずれも $30\text{kg}/\text{m}^3$ である。現場改良土については試験前の乾燥の程度が異なる2種類の試料 (12.4% と 30.4%) を用いている。未処理土と事前配合試験による室内試験改良土を比較すると、改良土の方が最適含水比は低く、最大乾燥密度が大きくなっている。現場改良土は試験前含水比の違いによって異なる (連続しない) 締固め曲線を示しており、低い含水比まで乾燥した試料は、最適含水比と最大乾燥密度が得られた。このような傾向は粘性土にみられる特徴である。室内試験改良土と2種類の現場改良土の締固め曲線を比較する。最適含水比より湿潤側の締固め曲線は一致しているが、乾燥側は現場改良土の乾燥密度が大きい。これは、試験前含水比の影響も受けていることも考えられるため、混合方法の影響であるかどうかは不明である。次に、試験盛土の地盤と突固めによる締固めで作製した供試体の特性を比較する。盛土2層目、3層目のデータは原地盤で測定したものであるためばらつきが大きいが、室内試験のものと比較して乾燥密度が含水比のわりに大きく、締固め度は2層目が $85.2 \sim 95.2\%$ (平均値 90.0%)、3層目が $86.3 \sim 90.4\%$ (平均値 88.5%) であり、十分な転圧がなされ

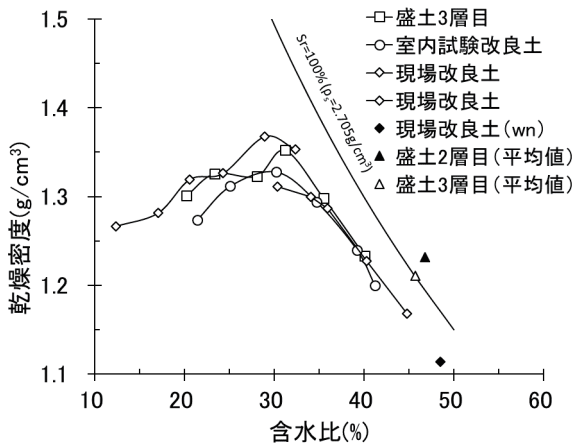


図3 締固め曲線

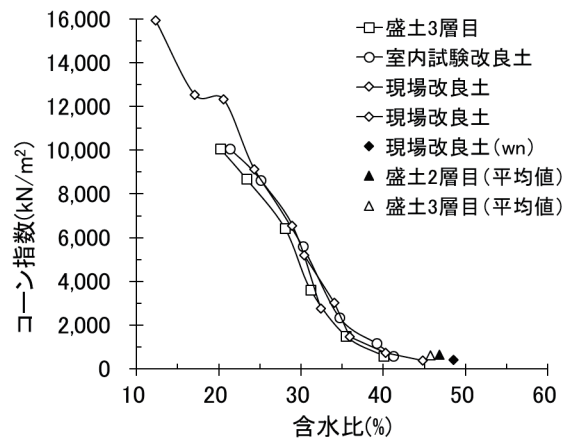


図4 含水比とコーン指数の関係

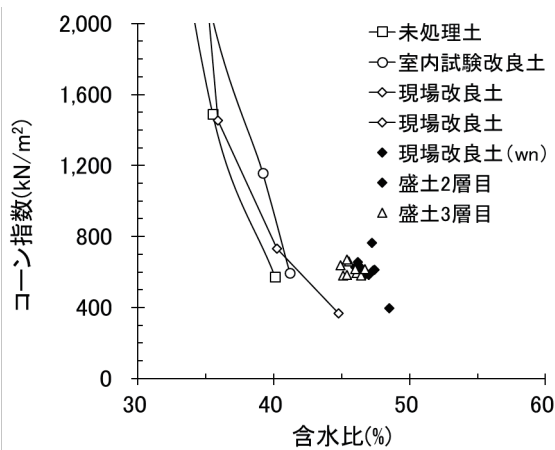


図5 含水比とコーン指数の関係

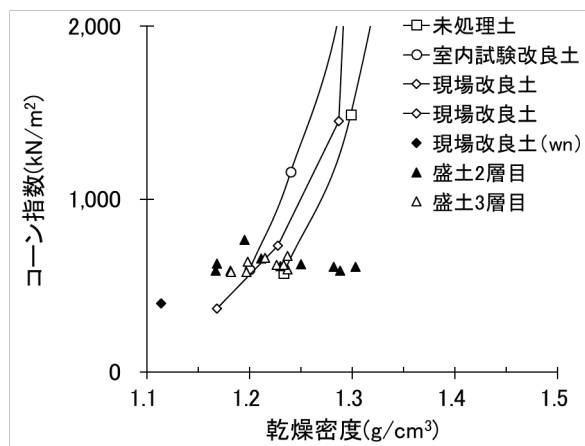


図6 乾燥密度とコーン指数の関係

ていた。ゼロ空気間隙曲線より上方にプロットされた点があるのは、土粒子密度や現場密度のばらつきによるものと推察する。

締固め試験の各含水比においてコーン指数も求め、両者の関係を整理したものが図4である。盛土では各層どの含水比レベルでも改良土の方が未処理土よりもコーン指数が大きいが、含水比低下によるコーン指数の増加に比べるとわずかである。しかし、大規模の工事において、時間や敷地が必要な乾燥作業は容易ではないため、改良材による改良の優位性はあると判断できる。

今回の実証実験ではコーン指数 400kN/m² 以上を目標として配合を決定している。図4では対象とするコーン指数の範囲での違いが明確でないため、コーン指数が1200kN/m² 以下の含水比とコーン指数の関係を図5に乾燥密度とコーン指数の関係を図6に示す。盛土の含水比は室内試験改良土よりも大きい、コーン指数は2層目が585~765kN/m² (平均値 630kN/m²)、3層目が580~670kN/m² (平均値 618kN/m²) であり、目標値だけでなく、室内試験改良

土 (482kN/m²) や現場改良土 (396kN/m²) の値をすべての地点で上回っていた。盛土の乾燥密度はばらついており、乾燥密度との関連も見られないことから、十分な締固めによってコーン指数が大きくなったとは考え難い。粘性土の強度低下の要因の一つに練り返しがある。図2は締固めによる練り返しを想定した実験であったが、締固めの試料準備段階にも練り返しの要因がある。すなわち、JIS A 1228のコーン指数試験は9.5mmふるい通過分(改良土の場合)の試料を用いるため、解きほぐしによって強度低下を引き起こしている可能性がある。一方で本実証実験では、改良～転圧の間に土塊の乱れが少なく、強度がある程度維持されたまま改良材が添加されたことで、予想以上の改良効果が得られたと推察する。

以上の結果より、今回の浅層混合処理による珪藻土系改良材を用いた堆積土の改良およびその改良土を用いて築造された盛土の品質は室内実験で得られた品質を十分に満足していることが確認された。

7. まとめ

新たに開発中の珪藻土系改良材による泥土の改良処理を実際の堆積地盤を対象に浅層混合処理で改良したところ、施工状況は良好であった。また、改良土を掘削、運搬しブルドーザで転圧した盛土地盤は、目標とした締固め度とコーン指数を得ることができた。

今回の実証実験対象地盤は、繰り返さない限り比較的良質な地盤であったため、今後はさらに軟弱な地盤に対する適用性を確認したい。

謝辞

実証実験に際しては株式会社森本組ほか多数の方の協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省編：国土交通白書 2020 令和 2 年度版，pp. 372, 2009
- 2) 総務省：緊急浚渫推進事業, https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/c-zaisei/chihosai/kinkyushunsetsu.html , 2021.1 閲覧
- 3) 山内豊聡監修・土質工学会九州支部編：九州・沖縄の特殊土，九州大学出版会，pp. 83-92, 1983. 7.
- 4) 松尾雄治・林泰弘・田中誠也・藤龍一：中性改良材を用いた泥土の即時改良とその後の固化処理による強度改善，第 14 回地盤改良シンポジウム論文集，pp. 19-22, 2020. 12.
- 5) 若原千恵・成瀬慎司・吉村優治：浅層安定処理における施工機械の混合精度，第 14 回地盤改良シンポジウム論文集，pp. 115-118, 2020. 12.