第23回 国土技術開発賞 優秀賞受賞

吸水性泥土改質材と改質土の活用技術「ワトル」による軟弱泥土のほぐし造粒改質技術

〔受 賞 者〕 五洋建設株式会社/ジャイワット株式会社

〔本稿執筆者〕 ジャイワット株式会社

山内 裕元

五洋建設株式会社

和栗 成樹

以下に, 第23回 国土技術開発賞 優秀賞 を受賞した「吸水性泥土改質材と改質土の活 用技術」を紹介します。

1. はじめに

高含水状態の浚渫土や建設汚泥のような泥土を 処理する場合,天日干しやセメント・石灰等によ る固化処理が用いられてきた。しかし,時間やコ ストあるいはアルカリ化等の課題があり,軟弱な 建設発生土の有効利用は進んでいない。一方で, こうした発生土を河川等の築堤改修・補強,湖沼 生態系の環境修復等の目的で,"積極的に利用し たい"というニーズが高まっている。

そこで、不良土を安価に現地で良質土に改質する改質材を開発するとともに、地盤構造物に汎用的に利用できる改質土の活用技術も併せて開発した。

2. 開発技術の概要

本技術は、ペーパースラッジ焼却灰(PS 灰)を基材とした吸水性改質材を用いて泥土を改質する技術である。吸水性泥土改質材「ワトル」(写真-1)は、吸水性の高い PS 灰に改質効果を向上させるための補助剤(カルシウム成分、硫酸成分、アルミ成分等)を添加している。 PS 灰の吸水による物理的改質と補助材による水和反応の化学的改質により、高含水泥土を効率的に改質することができる(写真-2)。すなわち、混合直後の吸水効果による物理的改質と、その後のエトリンガイト等の水和物生成による化学的改質の2つの効果により、泥土中の余剰水を拘束することで良質土に改質することを特徴にもつ技術である(図-1)。



写真-1 吸水性泥土改質材「ワトル」







写真-2 改質状況

改質材添加前 自由水 改質材



改質材添加・混合直後



- 改質材による吸水
- ・自由水の一部は改質材の 拘束水になり「即時改質」



図-1 ワトルの改質原理

ほぐし造粒後



- ・水和物生成による拘束水増加
- ・蒸発による自由水減少
- ・空気との接触による中性化

自由水 改質材拘束水 改質材 土粒子

開発技術の特徴

PS灰系改質材による泥土改質技術は従来から 存在するが、本技術は従来にない以下の特徴を有 する。

(1) 泥土改質材「ワトル」の改質原理

PS 灰の有する多孔質により、軟弱泥土の余剰 水分を速やかに吸水し、見かけの含水比を低下さ せる。さらに、時間経過に伴い水和反応が進行し て改質土が程よく固化する。ただし、セメントの ように「カチカチ」に固結はしないので、このタ イミングで解きほぐすことで改質土は顆粒状にな り、曝気作用により乾燥が促進される (図-1)。 この解きほぐしによる顆粒化の処理を,「ほぐし 造粒」と命名した。

(2) 改質土の粒度と締固め特性

ワトルで改質されたほぐし造粒土は、適度な粒 度 $(\mathbf{Z} - \mathbf{Z})$ と含水比に調整され、締固めに効く 良質土として利用できる。

図-3は土の締固め曲線を模式的に示してい る。原土の締固め曲線に対して、自然含水比が最

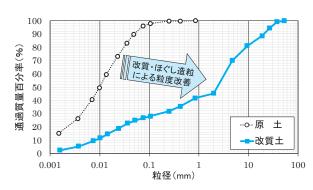


図-2 ほぐし造粒土の粒度改善特性

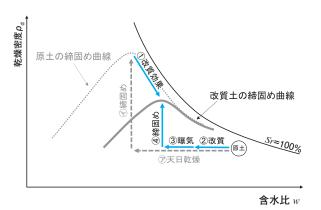


図-3 改質土の締固め特性

適含水比よりもかなり大きく、そのままの状態で は締固めができない (図中の○原土の状態)。ワ トル改質土の締固め曲線は、原土よりも最大乾燥 密度 ρ_{dmax} は小さくなり,最適含水比 w_{opt} は大き

くなる (図中の①の改質効果)。

高含水の原土を最適な状態で締固めるためには、まず天日乾燥等で含水比を最適含水比付近にまで下げ(図中の⑦の工程)、その上で締固める(図中の①の工程)というのが従来の方法である。しかし、⑦の乾燥作業は非常に手間暇がかかる。高含水粘性土は塊状(塑性状)を呈するため、乾きにくいからである。

一方,高含水土にワトルを添加すると乾燥状態にあるワトルの添加分だけ固形分が増加するため,含水比が低下する(図中の②の改質効果)。さらに、余剰水分を吸水・拘束することで土が改質され、この改質土をほぐし造粒することで土粒子表面の水分の乾燥が促進される(図中の③の曝気効果)。しかも、改質土の最適含水比は原土よりも高くなっているので、原土のように大きな労力と長い養生期間を要しない。

また、改質土は自然土と同じように最適含水比において最大乾燥密度を示す締固め特性を示すため、従来の含水比と乾燥密度による締固め管理(施工管理)がそのまま適用できる。

(3) 吸水率を考慮した配合設計手法

ワトルを土に添加すると自由水の一部がワトルに取り込まれ、拘束水としての挙動を示す。一方、JIS A 1203 による含水比測定では、乾燥炉で110 ± 5℃の温度に調整して水分を蒸発させて含水比を測定するので、拘束水は自由水とともに蒸発(消失)してしまう。したがって、拘束水分を補正しないと含水比に対応する土の挙動が実態と合わないことになる。

そこで、拘束水分を水分としてではなく固体分として含水比の補正(補正含水比 w*)を行う。別途実施したワトルの吸水量を測定する試験で得られた吸水率より改質土の補正含水比を求め、原土との締固め特性を比較した。その結果、図ー4に示すように補正した最適含水比 w*opt が概ね一致することが判明した。この結果を利用すると、改質材の吸水率が既知であれば未改質試料の締固め試験を行うだけで必要な添加量を設定することが

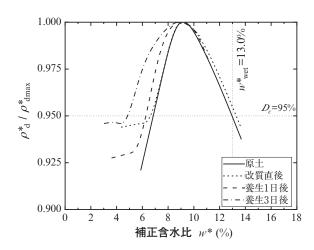


図-4 補正含水比 w^* と D_e の関係

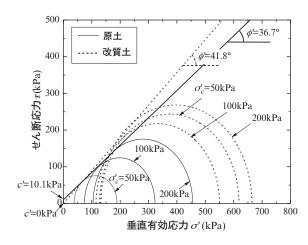


図-5 モールの有効応力円と強度定数

できる。

すなわち,ワトルの添加量は、対象泥土(原土)の締固め特性とワトルの吸水特性を事前に把握することで、配合試験をしなくても設定が可能であり、改質土の締固め特性も事前に推定することができる。これにより配合設計が簡略化できる。

さらに、改質土で締固めた土は、同じ条件で締固めた原土よりも強度が増加することを併せて確認した($\mathbf{20-5}$)。

(4) 環境負荷の低減効果

改質材はアルカリ性であり、改質直後の改質土 もアルカリ性を呈するが、ほぐし造粒によって空気 に触れやすくなることで空気中の二酸化炭素と反 応して中性化が促進される。また、土壌中の有害 重金属等の溶出を低減する効果も認められている。

4. 開発技術の適用事例とその効果

現場への適用事例を以下に示す。

写真-3は、貯泥ピットにてワトルで泥土を改質している状況を示したものである。所定の養生時間(通常は $1\sim3$ 日程度)を経て、泥土は塑性状から半固体状に変質する。その段階でバックホウ等により解きほぐすと、写真-4のように顆粒状の土砂(ほぐし造粒土)になる。ほぐし造粒土は自然土と同様に、締固めの効く良質土として利用できる。ほぐし造粒土を盛土材として利用した事例が写真-5である。最適含水比付近で転圧した盛土は、コーン指数 $qc \ge 800 \, \mathrm{kN/m^2}$ の強度を有し、安定した地盤構造物として利用することができる。

次に、河川堆積土での適用例を示す。改質の対象となる堆積土は、河川流域に位置する調整池内に堆積した土砂であり、細粒分に富む高液性限界シルトに分類された。深さ30cm程度までの表土を撤去後、深さ約1mまでの堆積土を改質した。ワトルの配合量は、50kg/m³に設定した。

堆積土およびワトル改質土の室内土質試験(締固め試験)の結果を図ー6に示す。堆積土では $w_{\rm opt}$ =32.5%, $\rho_{\rm dmax}$ =1.284 g/cm³が得られた。締固め曲線から分かるように,堆積土(原土)の自然含水比(w=50.3%)では D_c ≥ 90%の範囲を満足することができない。

一方、改質土では w_{opt} = 36.7%、 ρ_{dmax} = 1.229 g/cm^3 が得られた。改質土の含水比は 46.5% であり、 $D_c \geq 90\%$ を満足した。これは、ワトルを混合することで乾燥密度が小さくなるとともに、最適含水比が大きくなるという吸水による見かけの含水比低減効果が現れたことによるものである。

ワトルを添加した直後 (約30分後), 1日,3日,7日後の改質試料をA法に基づき突固め,締固めた土のコーン指数試験 (JISA 1228) を実施した。結果を図ー7に示す。堆積土のコーン指数は331 kN/m²であり、 $qc \ge 400$ kN/m²を満足しなかったが、改質土では添加直後から795 kN/m²の



写真-3 ワトルによる改質状況



写真-4 ほぐし造粒土



写真-5 盛土材としての使用例

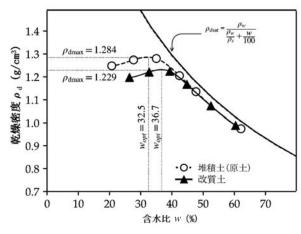


図-6 締固め試験の結果

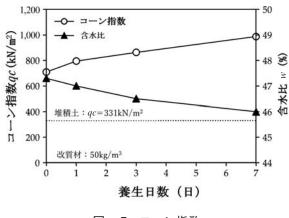


図-7 コーン指数

値を示した。養生とともにコーン指数は増大し、 3 日養生後には $qc \ge 800 \text{ kN/m}^2$ の値(909 kN/m^2)を示した。

室内試験結果を踏まえ、30 cm/層×3層の現地にて盛土を施工した。土砂採取場で50 kg/m³のワトルを添加し、スタビライザで攪拌混合し改質土を作製した。事前にワトルで表層改良した試験ヤードに改質土を敷均し、タイヤローラー(8トン級)で2回転圧後、砂置換法およびRI法により締固め度を、ポータブルコーン貫入試験および締固めた土のコーン指数試験により地耐力を評価した。

各層の砂置換法および RI 法による乾燥密度と含水比の関係を図-8に示す。いずれの層においても、室内試験から設定された含水比の目標管理値($36.6\sim50.0\%$)以内で締固め度 $D_c\geq90\%$ を満足し、適正な品質が確保されていた。

各層で実施したポータブルコーン貫入試験(測定 15 地点),および締固めた土のコーン指数試験(測定 3 地点)の結果を図ー 9 に示す。図中のエラーバーは最大値と最小値を示す。ポータブルコーン貫入抵抗 qc の平均値はおよそ 800 kN/m^2 程度であり,宅盤としての地耐力($qc \geq 400 \text{ kN/m}^2$)を十分に有していた。また,締固めた土のコーン指数は各層とも管理目標値 400 kN/m^2 を大きく上回った。上記のように,タイヤローラーによる 2 回転圧後の盛土が宅盤として十分な地耐力を有し,当該改質土が高規格堤防の盛土材料として適用できることを確認した。

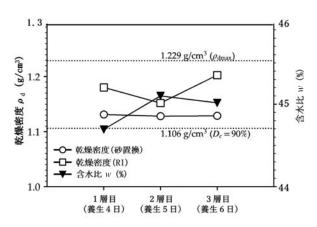


図-8 乾燥密度と締固め度

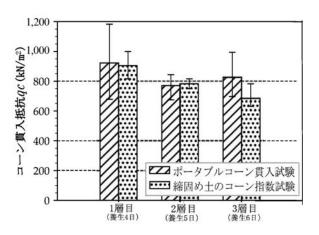


図-9 各層ごとのコーン貫入抵抗

橋梁下部工の構築工事への適用事例では、基礎掘削時に排出される発生土をセメント固化後に産廃処分する当初計画に対し、発生土の一部を吸水性泥土改質材による改質後、埋戻材として再利用することにより、約50,000千円(約30%)のコストダウンを実現した。また、廃棄物処理量7,840 m³のうち3,270 m³をリサイクル利用し、処分量を4,570 m³まで(42%)削減した(表-1)。

また、改質土の pH 等の問題がなく生石灰による改良が可能な場合を想定し、生石灰と吸水性泥土改質材を比較すると、それぞれの添加量を 180 kg/m^3 、 200 kg/m^3 とした場合、材料費を 21 %低減可能である (表-2)。

表-1	従来工法	(セメン	ト固化)	との比較
-----	------	------	------	------

指標	従来工法	吸水性泥土改質材使用	効果
泥土処理方法	全量セメント固化・建設汚泥として処分	一部改質埋戻材として再利用,他セメント 固化・建設汚泥として処分	_
コスト	固化材混合費・汚泥処理費合計 171,354,410 円	改質材混合費,改質土仮置き・埋戻し費, 固化材混合費・汚泥処理費合計 119,886,070円	30%低減
廃棄物の処理	7,840 m³	4,570 m ³	42%削減
環境への配慮	_	pH 上昇抑制,重金属等の溶出抑制	環境負荷低減

表-2 生石灰処理との材料費の比較

指標	従来工法生石灰	吸水性泥土改質材ワトル	効果
コスト	18 t × 21,000 円 /t = 378,000 円	20 t × 15,000 円 /t = 300,000 円	21%低減

[※]生石灰およびワトルの単価は、「建設物価 2020 年 10 月号」(建設物価調査会)に掲載のものを使用 添加量は、試験結果をもとに設定した NETIS 掲載の値を使用

おわりに

本技術の肝は、セメント系固化材のようにカチ カチに固まらない土の改質方法にある。「ワトル」 を開発した当初は、利用いただいた現場から「固 まらないじゃないか!」という批判を度々いただ いた。こうした現場の声が逆転の発想につなが り、カチカチに固めるのではなく、自然界にある

良質土と同じように締固めることで、強靱な地盤 構造物を構築する改質技術の開発につながった。 本技術が、国土強靱化のためのひとつのツールと して普及することを祈念する次第である。

最後に、本技術の開発にあたり、ご協力いただ いた関係者の方々に対し、この場をお借りして厚 く御礼申し上げます。