

排泥のリサイクル利用が可能な新しい高圧噴射攪拌工法の開発 (排泥抑制型マルチジェット工法)

前田建設工業株式会社 正会員 ○山内 崇寛
手塚 広明 安井 利彰
川西 敦士 井手内 俊憲

1. はじめに

深層混合処理工法の一つである高圧噴射攪拌工法は、小型のボーリングマシンを用いてセメントミルクとエアの混合体を超高圧で地中に噴射して原地盤と混合攪拌することでセメント改良地盤を造成する。セメントミルクの噴射量や噴射圧力等を調節して異なる改良径を形成する各種の高圧噴射攪拌工法が実用化され、これまで主に土留め壁の欠損防護・先行地中梁・底盤改良、シールド工事の発進・到達防護等の仮設利用として広く用いられ、近年では既設施設の耐震補強で適用される事例が増加している。

高圧噴射攪拌工法は、同じ深層混合処理工法の機械攪拌工法に比べ、施工機械が小さく大口径で高強度の改良体を造成できる合理的な地盤改良工法であるが、一方で改良体を造成する際に、地中で噴射したセメントミルク同等量のセメント混り排泥を地表面に排出させる必要がある。セメント混り排泥自体は良質な地盤改良材となるため、現場条件によっては自ら利用として表層改良に利用されるケースもあるが、産業廃棄物として場外処分するのが一般的である。そのため、高圧噴射攪拌工法は産廃処分費による工費増大と環境負荷の増大という課題がある。

そこで、産廃処分費縮減と環境負荷軽減を目的として、セメント混り排泥を循環利用して廃棄処分量を抑制できる新しい高圧噴射工法を開発し、ここで報告する。

2. マルチジェット工法概要

マルチジェット工法(図-1、以下標準型マルチジェット工法と記す)とは、円形状改良以外の、壁状、扇形、格子状の自由形状改良(図-2)と、最大半径4.0m(直径8.0m)と国内最大級の大口径改良(図-3)を可能とした高圧噴射攪拌工法である。



図-1 マルチジェット工法

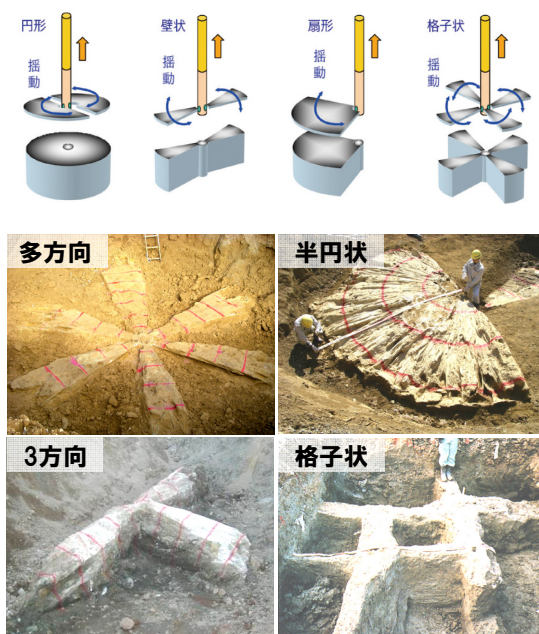


図-2 自由形状

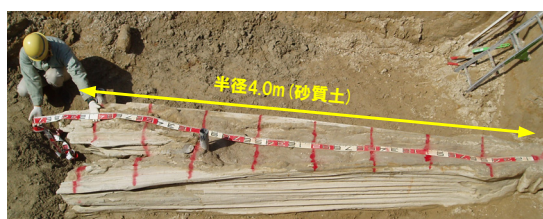
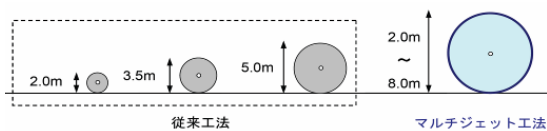


図-3 大口径改良

3. 排泥抑制型マルチジェット工法概要

3.1 システム概要

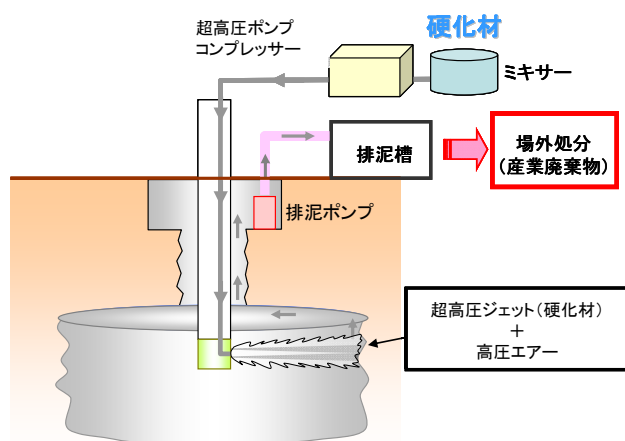
標準型マルチジェット工法を含む高圧噴射攪拌工法では、セメントミルクを超高圧で噴射するが、粒径 $75\mu\text{m}$ 以上の材料は、超高圧ポンプとノズル径 (2～5mm 程度) の問題から圧送・噴射することが不可能である。そのため、発生した排泥をリサイクル循環するには、土砂分離により排泥中の $75\mu\text{m}$ 以上の土粒子を取り除く作業が必要となる。しかし、排泥中にセメント等の微粒子が多く混入していると、排泥の粘性が高くなり、土砂分離を行うことが不可能となる。

そこで、標準型マルチジェット工法の専用ロッドが、それぞれのラインが独立している多孔管方式 (図-4) を採用していることに着目し、排泥中のセメント分混入の抑制を目的として、噴射するラインを2系統に分割した。



図-4 多孔管

標準型



排泥抑制型

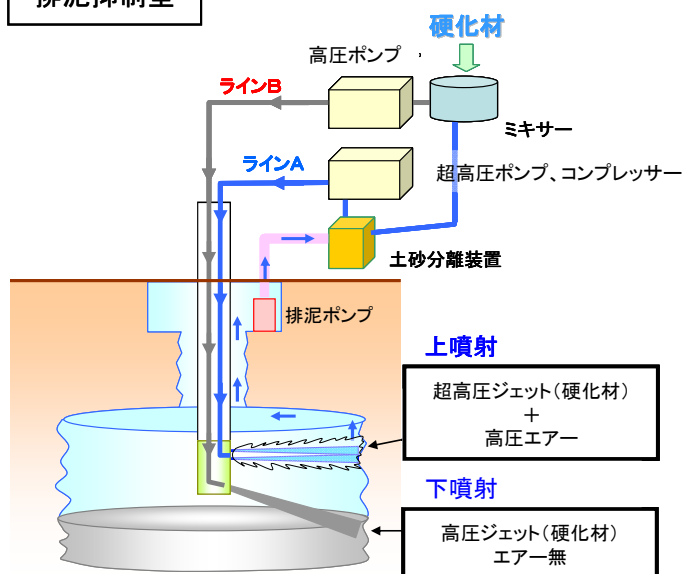


図-5 排泥抑制型マルチジェット工法概要図

標準型と排泥抑制型を比較した工法概要図を図-5に示す。上側の噴射ライン (以下、上噴射と称す) は、地盤の切削を目的としたものであり、セメント分を含まない泥水を超高圧ポンプ (40MPa, 適用最大粒径 $74\mu\text{m}$) と高压エアを併用して噴射する。

下側の噴射ライン (以下、下噴射と称す) は、地盤の切削された部分へのセメントミルク (以下、硬化材と称する) の置換を目的としているため、地盤を切削するための超高圧ポンプが不要である。そこで、下噴射には流量確保のための高压ポンプ (7.0～10.0MPa, 適用最大粒径 40mm) と専用ノズル ($\phi 15\sim 20\text{mm}$) を適用した。

そして、上記の上噴射と下噴射の距離を確保することで地上に排出される排泥中にセメント分が混入することを抑制し、排泥の粘性を土砂分離処分でできる程度まで低下させることを可能とした。

なお、排泥抑制型マルチジェット工法は、標準型マルチジェット工法と比較して以下の特徴を有する。

- ① 排泥処分量 50%程度低減
- ② トータルコスト最低 10%程度低減可能
- ③ 砂質土 (中砂・細砂) での適応性を確認

4. 試験施工による検証

4.1 試験施工概要

(1) 試験施工場所

試験施工は、茨城県つくば市の社有地（図-6）で実施した。



図-6 試験施工場所

(2) 土質条件

試験施工位置における土質柱状図を図-7 に示す。GL-0.8m までは埋土であり、GL-0.8～2.0m までは、関東ロームが堆積し、それ以深については、N 値 15 前後の中砂および細砂主体の地盤となっている。

(3) 試験施工配置図

試験施工における試験施工配置図を図-8 に示す。CASE1 で噴射テスト用のための 1 改良体、CASE2 でケーススタディ用改良体を 7 改良体、CASE3 で品質・出来形確認のための掘り起こし用改良体を 4 改良体造成した。

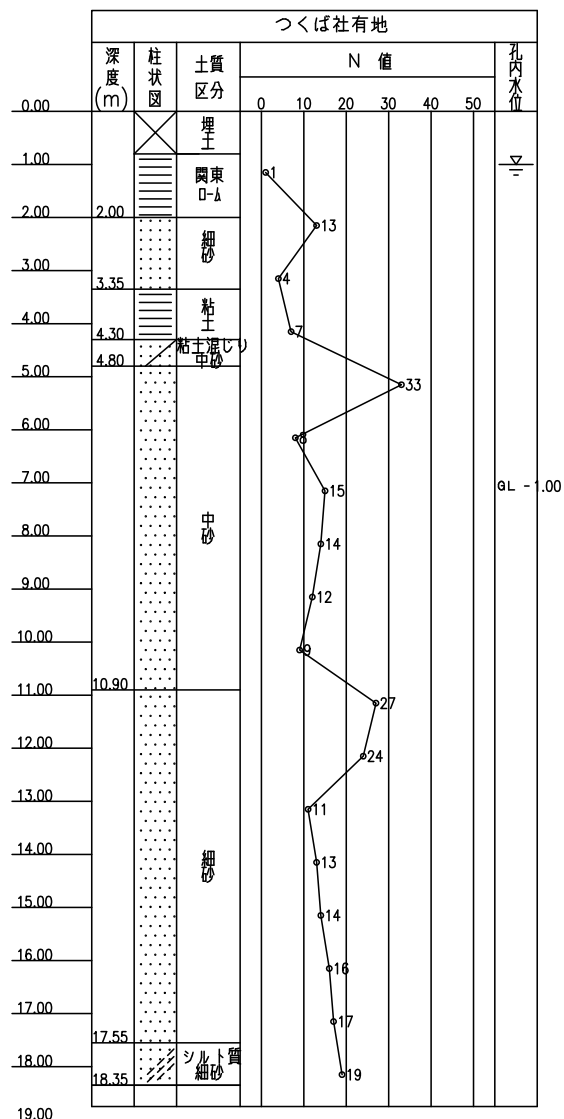


図-7 土質柱状図

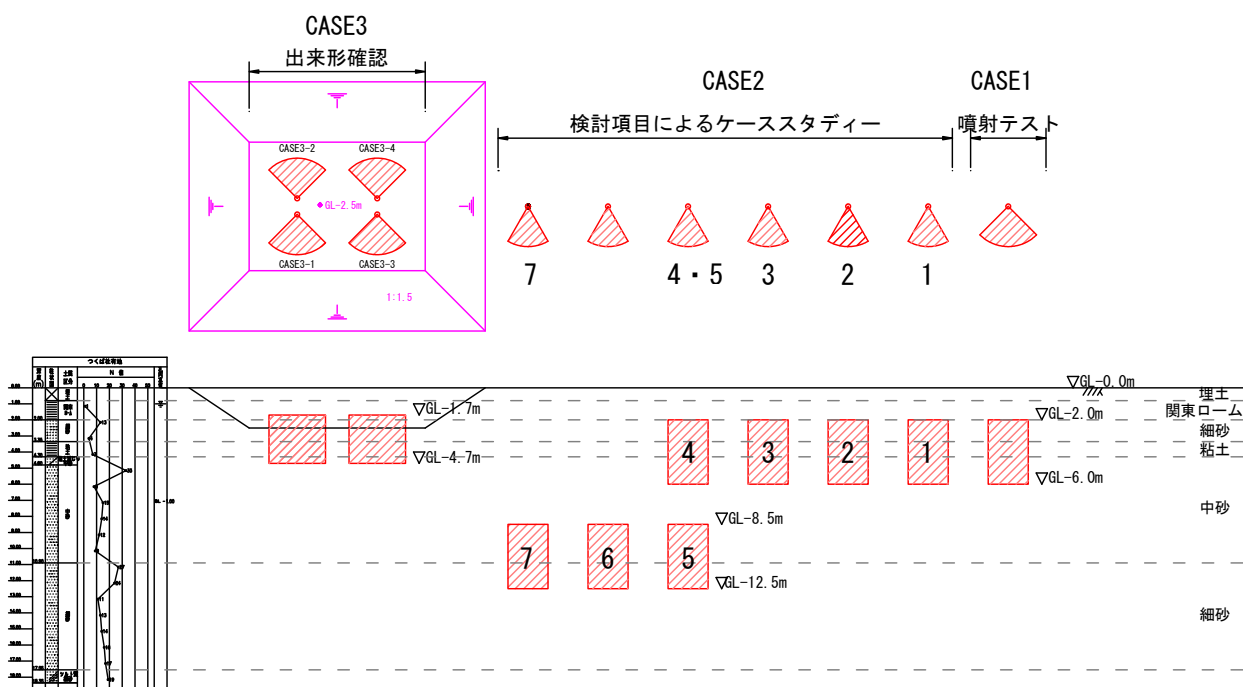


図-8 試験施工配置図

4.2 試験施工での検討項目

排泥抑制型マルチジェット工法の開発に当たり、検討項目を以下に示す。

①噴射可能な低 W/C 材料の配合設定及び上下噴射量比率の検討

図-9 に示すように、高圧噴射攪拌工法では地中に噴射した同体積分が地上への排泥として排出される。排泥発生量を抑制するためには、噴射可能な範囲で極力 W/C を小さくする必要があることから、配合の検討を実施する。なお、排泥のリサイクル効率を向上させるため、リサイクル泥水を練水として使用するものとした。

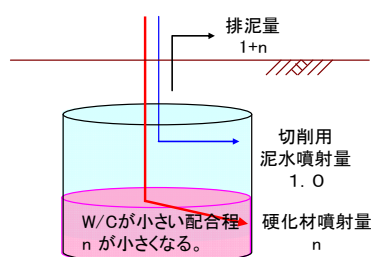


図-9 発生排泥量

②上下噴射の距離の検討

図-10 に示すように、上下噴射の距離を変化させた場合に排泥に混入するセメント量を測定し、極力セメント分が混入しない上下噴射の距離を把握する。

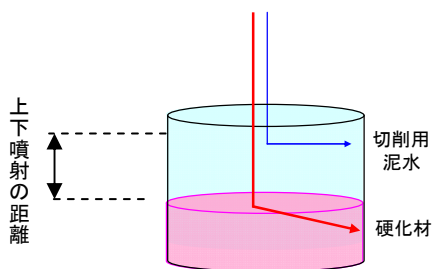


図-10 上下噴射の距離

③掘起しによる品質・出来形確認

パラメータスタディにより決定した仕様を用いて改良体を造成し、掘起しにより改良体の品質と出来形を確認する。併せて、リサイクル率と排泥抑制率の計測を実施する。

④排泥リサイクル率と排泥抑制率の検証

⑤コスト試算による検証

4.3 検討結果

(1) 噴射可能な低 W/C 材料の配合及び上下噴射比率の検討結果

噴射可能な低 W/C 材料の配合を設定するため、表-1 に示す硬化材の配合で噴射テスト（約 12 分間）を実施した。練水にはリサイクル泥水を使用した。土砂分離機により処理した泥水の実績（削孔排泥のリサイクル実績）が $\rho \approx 1.05 \sim 1.15$ 程度であったため、配合設計に使用する泥水の比重は安全側に見て 1.2 とした。噴射テストの試験結果を表-2 に示す。この結果から、排泥抑制型マルチジェット工法に適用する配合は W/C=75% が適当であることを確認した。

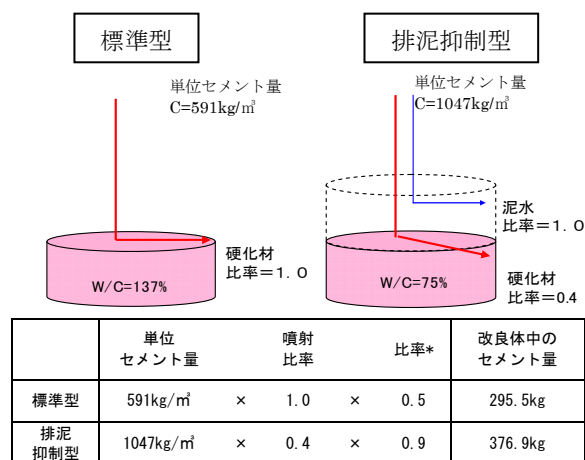
表-1 配合表

W/C	単位	高炉 B	練混ぜ泥水 ($\rho=1.2$)	混和剤
85	kg/m ³	963	799	19
75	kg/m ³	1047	765	21
70	kg/m ³	1095	745	22

表-2 試験結果

W/C	試験結果	判定
85	練混ぜ、噴射共に問題なし	○
75	練混ぜ、噴射共に問題なし	○
70	ミキサーで練混ぜ不可	×

次に W/C=75% の材料を適用した場合の、上噴射と下噴射の噴射量比率の検討を実施した。改良体の強度自体は標準型マルチジェット工法と同等程度を目標として、改良体内のセメント量が同等になるように検討した。検討結果を図-11 に示す。



*比率とは、改良体中に占める硬化材の割合、排泥抑制型は硬化材を置換することを目的としているため 90%相当（地上に 10% 排出）と仮定した。

図-11 上下噴射量比率

上噴射：下噴射=1.0：0.4 とした場合に、改良体中のセメント量をほぼ同等とすることができることを確認した（安全率 1.27 確保）。なお、実際の強度特性の確認については、改良体を掘起した際のサンプリングによる強度試験で検証を行った。

表-3 噴射距離の検討

上下噴射の距離	確認内容
1. 10m	・土砂分離後の排泥比重計測 ・土砂分離後の排泥沈降試験
1. 85m	
2. 60m	

(2) 上下噴射の距離の検討結果

上下噴射の距離を設定するため、表-3 に示す検討を実施し、土砂分離後の排泥比重計測結果を図-12 に示す。

上下噴射の距離が 1.10m では、下噴射開始直後に排泥比重が増加しているのに対し、1.85・2.60m のケースでは、下噴射の有無に関わらず排泥比重がほぼ一定であった。土砂分離後の排泥沈降試験では、排泥を A:上噴射直後、B:下噴射直後、C:下噴射後 20 分後でサンプリングを行い、採取直後、30 分後、12 時間後、24 時間後の沈降状況を確認した。沈降試験結果を表-4 に示す。上下噴射の距離が 1.10m の場合、下噴射開始後 20 分の排泥は 12 時間後に固結したのに対し、1.85・2.60m のケースでは排泥は固結しない結果となった

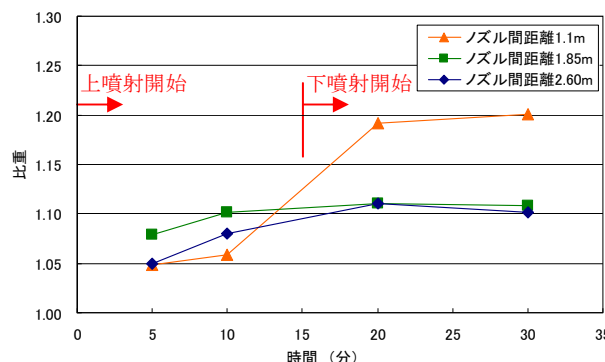


図-12 排泥比重計測結果

また、造成時間が進むにつれ、細粒分の沈降量も全体的に増加しているが、これはセメント混入量に関わらず、リサイクル排泥を循環していくと地盤の細粒分が累積していくため考えられる。

以上の排泥比重計測と排泥沈降結果から、上下噴射距離を 1.85m が適当であることを確認した。

表-4 沈降試験結果

経過時間	上下噴射の距離 2. 60m	上下噴射の距離 1. 85m	上下噴射の距離 1. 10m
採取直後			
30分			
12時間			
24時間			
評価	○	○採用	×

(3) 掘起しによる品質・出来形確認結果

前述のパラメータスタディより設定した改良仕様で、掘起し用改良体の造成を実施した。改良仕様と出来形確認結果を表-5 に示し、掘起しによる改良体の出来形状況を図-13～17 に示す。

標準型マルチジェット工法に対して同等以上の改良径を確保できていることが確認できた。なお、排泥抑制型マルチジェット工法の改良体表面が乱れているのは、早期材齢（中 1 日）で、改良体が固結する前に掘起したのが原因であると考えられる。

表-5 出来形確認用改良体（CASE3）

	CASE 3-1	CASE 3-2	CASE 3-3	CASE 3-4
タイプ	標準型	標準型	排泥抑制型	排泥抑制型
設計改良径	5.0m	3.5m	5.0m	3.5m
実測改良径	5.4m	5.0m	6.8m	5.0m



図-13 掘起し改良体全景

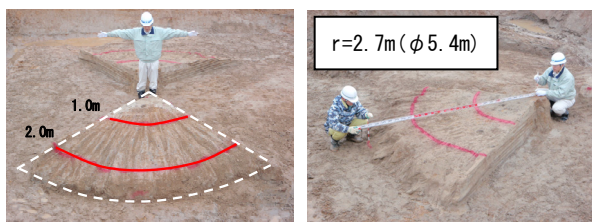


図-14 CASE3-1 掘起し改良体

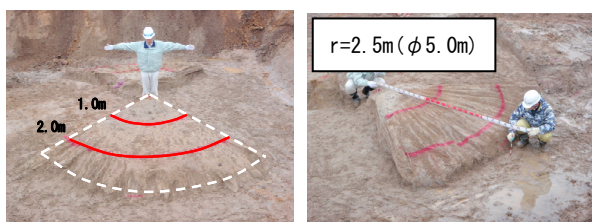
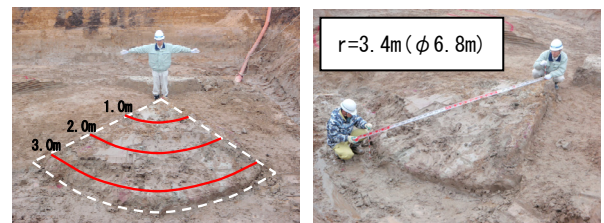
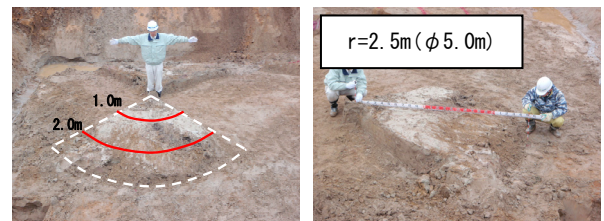


図-15 CASE3-2 掘起し改良体



*早期掘起しのため、表面に乱れが発生

図-16 CASE3-3 掘起し改良体



*早期掘起しのため、表面に乱れが発生

図-17 CASE3-4 掘起し改良体

次に、図-18 に示す位置において、改良体のブロックサンプリングを行い、室内で一軸圧縮試験（材齢 150 日）を実施した。試験結果を図-19 に示す。

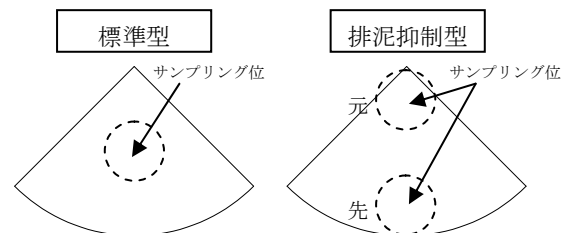


図-18 ブロックサンプリング位置図

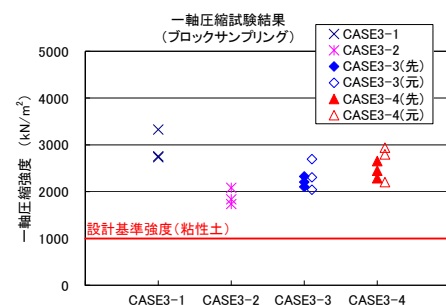


図-19 一軸圧縮試験結果（ブロックサンプリング）

試験結果から、標準型マルチジェット工法に対して、排泥抑制型マルチジェット工法の改良体強度はほぼ同等の値を示している。また、改良体の中心と外側で強度の値がほぼ同等であり、排泥抑制型マル

チジェット工法の改良体の強度にバラつきがなく均一であることが確認できた。

(4) 排泥リサイクル率と排泥抑制率の検証結果

CASE3 の改良体造成時に、排泥リサイクル率と排泥抑制率の計測を行なった。検証結果を表-6 に示す。

表-6 排泥リサイクル率と排泥抑制率

項目	硬化材 噴射量比	リサイク ル率	排泥 処分量	排泥 抑制率
標準	1.0	0%	1.0	---
排泥抑制	1.4	70%	0.42	58%

排泥抑制型マルチジェット工法は、排泥のリサイクルを 70%程度可能とし、標準型マルチジェット工法に対して排泥処分量を 50%程度縮減できることが確認できた。また、標準型マルチジェット工法では、排泥が泥土であるため通常はバキューム車による運搬であるのに対し、排泥抑制型マルチジェット工法の排泥は 90%がセメント混り土砂となるため、ダンプ運搬が可能であり、量だけでなく運搬方法の面でも排泥処分費のコストダウンが見込める。

(5) コスト試算による検証結果

前述の排泥抑制率から、標準型マルチジェット工法と排泥抑制型マルチジェット工法のコスト比較を行うため、都市圏を想定した標準的な施工規模にてコスト試算を行った。表-7 に検討条件を示す。

表-7 検討条件

施工場所	関東近辺
対象土層	砂質 (N ≤ 50)
改良直径	φ 5.0m
角度	180°
本数	20 本
削孔長	15.0m
造成長	10.0m
排泥処分費 (バキューム運搬)	8,000 円/m ³
排泥処分費 (ダンプ運搬)	4,000 円/m ³

試算結果を表-8 に示す。標準型マルチジェット工法と比較して、排泥処分量が約 50%減となるのに加え、排泥運搬方法の違いによる単価差の発生で排泥処分費が約 70%減であるのに対し、排泥抑制に必要

な追加の資機材で機械損料費が 60%増となり、全体工費は 10%減となった。しかし、地方部など排泥処分費が割高な地域では、さらなるコストダウン効果に期待できる。

表-8 コスト比較

項目	標準型	排泥抑制型
全体工費	1.0	0.92

内訳 (コスト比)

項目	標準型	排泥抑制型
材料費	1.0	0.84
労務費	1.0	1.04
機械損料・整備費	1.0	1.16
消耗費	1.0	1.59
燃料費	1.0	1.04
運搬費	1.0	1.17
排泥処分量	1.0	0.53
排泥処分費	1.0	0.31
プラント組立解体	1.0	1.00
特許権使用料	1.0	1.00
現場管理費	1.0	0.92
一般管理費	1.0	0.92

5. 最後に

試験施工を踏まえた検証結果から本施工への適用が十分可能であることが確認された。なお、本施工に向けては以下に示す課題および留意事項がある。

①シルト、粘性土地盤への適用性の拡大

試験施工においては、砂質土 (中砂・細砂) に対して、本工法の検証を実施した。今後、シルト、粘性土に対しても適用可能とするため、本工法適用の際、データを蓄積し検討を進めていきたい。

②適切な強度特性の把握

試験施工においては、強度特性の確認として、標準型マルチジェット工法の改良強度に対して、ブロックサンプリングにより確認を実施した。今後は、合理的な設計を可能とするため、適用現場に対して室内試験でデータを蓄積し検討を進めていきたい。

③上下噴射の距離による歩掛りロス

本工法は、排泥をリサイクル循環するために、噴射ラインを 2 系統に分割し、上下噴射の距離を 1.85m 確保した。このため、標準型マルチジェット工法に対して、削孔長・造成長が 1.85m 増加することになる。従って、1 本当たりの改良長が短い場合など、歩掛りロスによりコストが増大する場合があるため、注意が必要である。