

排泥抑制およびフライアッシュ利用による改良型マルチジェット工法の開発

安井 利彰・手塚 広明^{*1}・山内 崇寛^{*1}・井手内 俊憲^{*1}

Development of Sludge Reduction System and Effective Utilization System of Coal Fly-ASH for Multi-Jet Method

Toshiaki YASUI, Hiroaki TEDUKA, Takahiro YAMAUCHI, Toshinori IDEUCHI

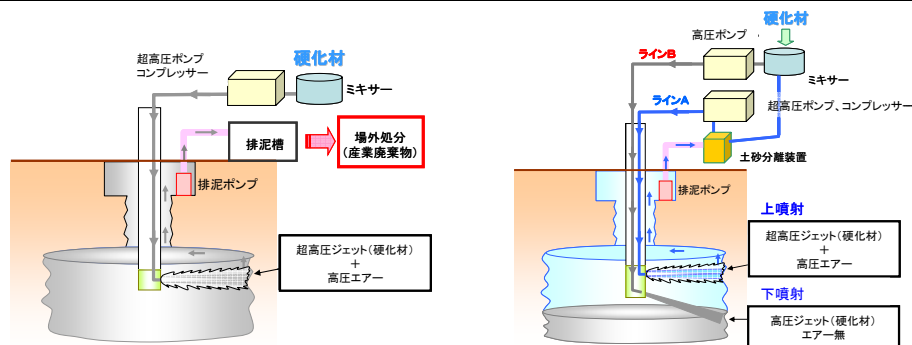


図-1 標準型マルチジェット工法

図-2 改良型マルチジェット工法

研究の目的

マルチジェット工法とは、高圧噴射攪拌工法の一つである。マルチジェット工法の大きな特徴として、「壁状・扇状、格子状等、円形以外の自由形状改良」と、「国内最大級の大口径改良（最大半径 4.0m：直径 8.0m）」を可能としたことにある。これら自由形状改良と大口径改良の組み合わせにより、設計改良範囲に対して無駄の少ない合理的な改良を行うことができるため、従来工法に対して 30%程度の工期短縮とコスト削減を可能とした。マルチジェット工法は、民間を主体に液状化対策等の恒久対策目的で施工実績を伸ばしており、2011 年 7 月現在で 13 件の施工実績を有しているが、近年では各社が様々な高圧噴射攪拌工法を開発しており、地盤改良工事の受注競争が激化している。そこで、他工法との差別化を目的として、環境負荷低減・循環型社会への貢献に着目し、排泥抑制及びフライアッシュ利用を可能とする改良型のマルチジェット工法を開発した。

技術の説明

排泥抑制のため、排泥をリサイクルするには、超高压ポンプやノズル径（ $\phi 2 \sim 5\text{mm}$ 程度）の問題から、 $75\mu\text{m}$ 以上の土粒子を取り除く必要があるが、排泥中にセメント等の微粒子分を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、排泥にセメント混入を抑制し、排泥を土砂分離することでリサイクル可能とする新しいシステムを開発した。また、JIS 規格外フライアッシュを硬化材の混和材として適用するためには、分級処理されていない粒径の比較的大きな材料（最大粒径 2mm 程度）でも圧送・噴射可能である必要がある。そこで、最大粒径が 2mm 程度でも適用可能な新しいシステムを開発した。さらに、硬化材のセメントに対するフライアッシュの置換率と強度特性の関係と重金属類溶出特性について室内配合試験で確認を行った。

主な結論

排泥抑制型マルチジェットでは、標準型マルチジェット工法に対して発生排泥量を 50%程度（他工法比 55%～65%程度）抑制できることを確認した。トータルコストでは、都市圏など排泥処分費が安価な地域において最低でも 10%程度のコストダウンが可能であり、地方部など排泥処分費が割高な地域においては、さらなるコストダウンが可能である。

フライアッシュ利用型マルチジェット工法では、硬化材のセメントに対してフライアッシュを 50%まで置換可能であり、重金属類溶出量も土壌環境基準（環告第 18 号）を満足することを確認した。また、最大粒径 2mm 程度でも問題なく圧送・噴射が可能であることを確認した。

*1 本店 土木事業本部 土木設計・技術部

排泥抑制およびフライアッシュ利用による 改良型マルチジェット工法の開発

安井 利 彰 手塚 広 明^{*1}
山内 崇 寛^{*1} 井手内 俊 憲^{*1}

要 旨

マルチジェット工法とは、高圧噴射攪拌工法の一つである。マルチジェット工法の大きな特徴として、「壁状、扇状、格子状等、円形以外の自由形状改良」と、「国内最大級の大口径改良（最大半径4.0m（直径8.0m））」を可能としたことがある。これら自由形状改良と大口径改良の組み合わせにより、設計改良範囲に対して、無駄の少ない合理的な改良を行うことができるため、従来工法に対して30%程度の工期短縮とコスト削減を可能とした。マルチジェット工法は、民間を主体に液状化対策等の恒久対策目的で施工実績を伸ばしており、2011年7月現在で13件の施工実績を有しているが、近年では、各社が様々な高圧噴射攪拌工法を開発しており、地盤改良工事の受注競争が激化している。そこで、他工法との差別化を目的として、環境負荷低減・循環型社会への貢献に着目し、排泥抑制及びフライアッシュ利用を可能とする改良型マルチジェット工法を開発した。本報は、その内容について報告するものである。

キーワード 高圧噴射攪拌工法／マルチジェット工法／排泥減容化／フライアッシュ／有効活用

目 次

- | | |
|---------|--------------|
| 1. はじめに | 3. 試験施工による検証 |
| 2. 工法概要 | 4. まとめ |

DEVELOPMENT OF SLUDGE REDUCTION SYSTEM AND EFFECTIVE UTILIZATION SYSTEM OF COAL FLY-ASH FOR MULTI-JET METHOD

Toshiaki YASUI
Takahiro YAMAUCHI

Hiroaki TEDUKA
Toshinori IDEUCHI

Synopsis:

Multi-Jet Method is kind of high pressure injection mixing method, and extensively used for temporary works, seismic reinforcement, prevention of liquefaction, and so on. However in recent years, much kind of these type methods which has some original advantages has been developed and increasing competition in the soil improvement works.

Therefore achieving competitive advantage strengthen, the new systems had been developed as followings. One is the sludge reduction system, which is possible to reduce sludge by reusing as a foundation material. The other is the effective utilization system of coal fly-ash, which is possible to reuse fly-ash as a foundation material. The purposes of these systems are the reduction of environmental impacts and contribution toward society with an Environmentally-Sound material cycle.

In this paper, we report the verification results of these new developed systems by the test construction.

1. はじめに

マルチジェット工法とは高圧噴射攪拌工法の一つである（図-1、以下標準型マルチジェット工法と称する）。マルチジェット工法の大きな特徴として、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）を可能としたことがある。



図-1 マルチジェット工法

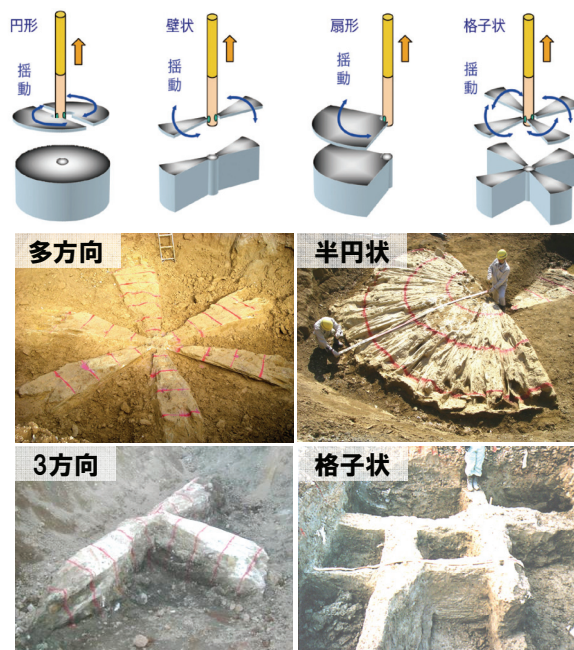


図-2 自由形状

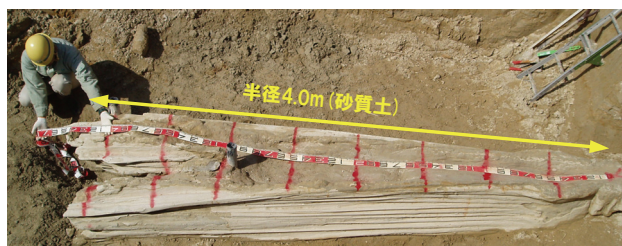
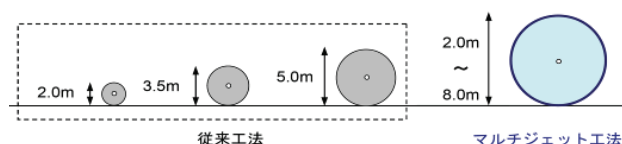


図-3 大口径改良

これら自由形状と大口径改良の組み合わせから、設計改良範囲に対して、無駄の少ない合理的な改良を行うことができるため、従来工法に対して30%程度の工期短縮とコスト削減を可能とした（図-4）。

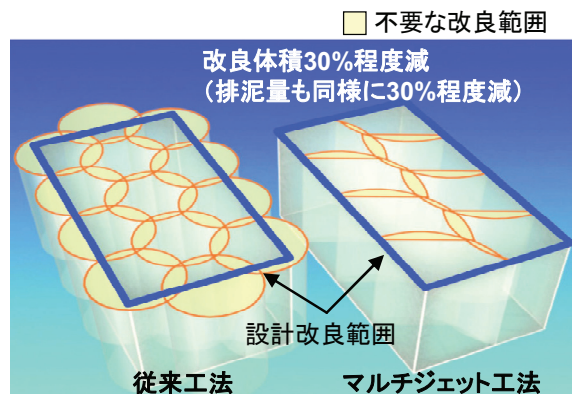


図-4 改良体配置例

近年では、民間を主体に液状化対策等の恒久対策目的で施工実績を伸ばしており、2011年7月現在で13件の施工実績を有している。

しかし、近年では、各社が様々な高圧噴射攪拌工法を開発しており、地盤改良工事の受注競争が激化している。そこで、他工法との差別化を目的として、環境負荷低減・循環型社会への貢献に着目し、以下に示す2点について新しい工法を開発した。本報は、その内容について報告するものである。

1.1 排泥抑制型マルチジェット工法

高圧噴射攪拌工法は、改良体と同品質のソイルセメントスラリーが排泥として排出されるため、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。しかし、一般的には産業廃棄物として処分するため、環境負荷が増大し、産廃処分費による工費の増大という課題がある。本来、標準型マルチジェット工法は他工法より発生する排泥量が少ない工法であるが、さらなる環境負荷軽減を目的として、排泥を循環利用することで廃棄処分量を抑制する新しい工法を開発した。

1.2 JIS規格外フライアッシュ利用型マルチジェット工法

現在、火力発電所で発生する石炭灰は年々増加傾向にあり、分級管理されたフライアッシュ（JIS規格品）についてはコンクリート混和材、裏込め材、二次製品等として有効利用されている。しかし一方で、JIS規格外のフライアッシュについては、品質のバラつき等によりリサイクル率が低く、各火力発電所内の埋立処分場の容量に限界に迫っており、JIS規格外フライアッシュの有効利用が各電力会社において急務の課題となっている。そこで、硬化材にJIS規格外フライアッシュを有効活用できる新しい工法を開発した。

2. 工法概要（66 期開発工法）

2.1 排泥抑制型マルチジェット工法

(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-5）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-5 多孔管

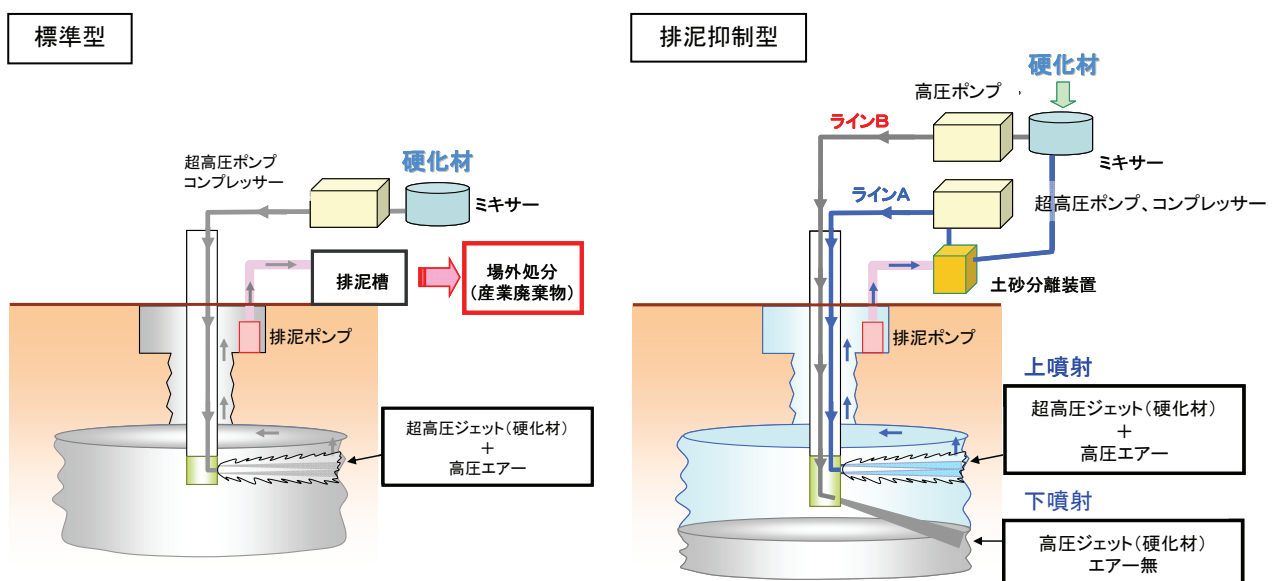


図-6 排泥抑制型マルチジェット工法概要図

標準型と排泥抑制型を比較した工法概要図を図-6 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 $74\mu\text{m}$ ）と高圧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）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圧ポンプ（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ができる程度まで低下させることを可能とした。

(2) 工法の特徴

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。

a. 排泥処分量 50%程度低減

前述のとおり、本来、標準型マルチジェット工法は他工法よりも発生排泥量が 30%程度少ない工法である。排泥抑制型マルチジェット工法では、標準型マルチジェット工法に対し、さらに 50%程度の排泥量抑制を可能とした。（他工法比で 55%～65%程度低減）

b. トータルコスト最低 10%程度低減可能

他工法では、排泥の循環利用を目的として数種の工法が開発されているが、循環用機材や材料費等によりコストアップとなっているのが現状である。

しかし、本開発工法は排泥の循環利用による処分量抑制に併せ、排泥の運搬方法にも配慮してコストダウンを可能としている。都市圏などの排泥処分費が割安な地域では 10%程度のコストダウンが可能であり、地方など割高な地域では、さらなるコストダウンが可能である。

c. 砂質土（中砂・細砂）での適応性を確認

66 期の試験施工により、砂質土（中砂・細砂）までの適用性を確認した。シルト・粘性土に対しては、排泥中の細粒分が多くなり、粘性が高くなることからリサイクル循環することに多くの課題を残しているが、今後適用できるよう検討を進めていく予定である。

2.2 J I S 規格外フライアッシュ利用型マルチジェット工法

(1) システム概要

JIS 規格外フライアッシュを硬化材の混和材として適用するためには、分級処理されていない粒径の比較的大きな材料（最大粒径 2mm 程度）でも圧送・噴射できるシステムが必要である。

そこで、前述した排泥抑制型マルチジェット工法のシステムにおいて、硬化材を噴射する下噴射のラインで、最大粒径が 2mm 程度であれば圧送・噴射が可能であることに着目した。標準型とフライアッシュ利用型を比較した工法概要図を図-7 に示す。このシステムを採用すれば、最大粒径 2mm 程度の材料についても適用可能であり、併せて排泥抑制を行うことも可能である。

(2) 工法の特徴

フライアッシュ利用型マルチジェット工法は以下の特徴を有する。

a. JIS 規格外フライアッシュの利用が可能

前述の通り、高圧噴射攪拌工法では粒径 $75\mu\text{m}$ 以上の材料を圧送・噴射することが不可能であるが、フライアッシュ利用型マルチジェット工法では、最大粒径 2mm 程度までの適用可能であることを試験施工にて確認した。

b. フライアッシュ置換率（重量比）で 50%まで適応可能

JIS 規格外フライアッシュのセメントに対する置換率（重量比）は、50%まで適用することが可能である。改良体の設計強度は、標準配合が砂質土 $3,000\text{kN}/\text{m}^2$ 、粘性土 $1,000\text{kN}/\text{m}^2$ であるのに対し、フライアッシュ置換率 50%では $1,000\text{kN}/\text{m}^2$ 、粘性土で $300\text{kN}/\text{m}^2$ となる。設計上必要な強度とリサイクル効率を勘案した上で、フライアッシュ置換率を案件毎に設定することを可能とした。

c. 重金属類溶出量の基準値の満足

フライアッシュを有効活用するには、重金属類溶出に対して基準値（土壤環境基準 環告第 18 号）を満足する必要がある。本工法では、JIS 規格外フライアッシュをセメントに置換して利用するため、セメントによる封じ込め効果で、重金属類溶出量が基準値以下であることを確認している。

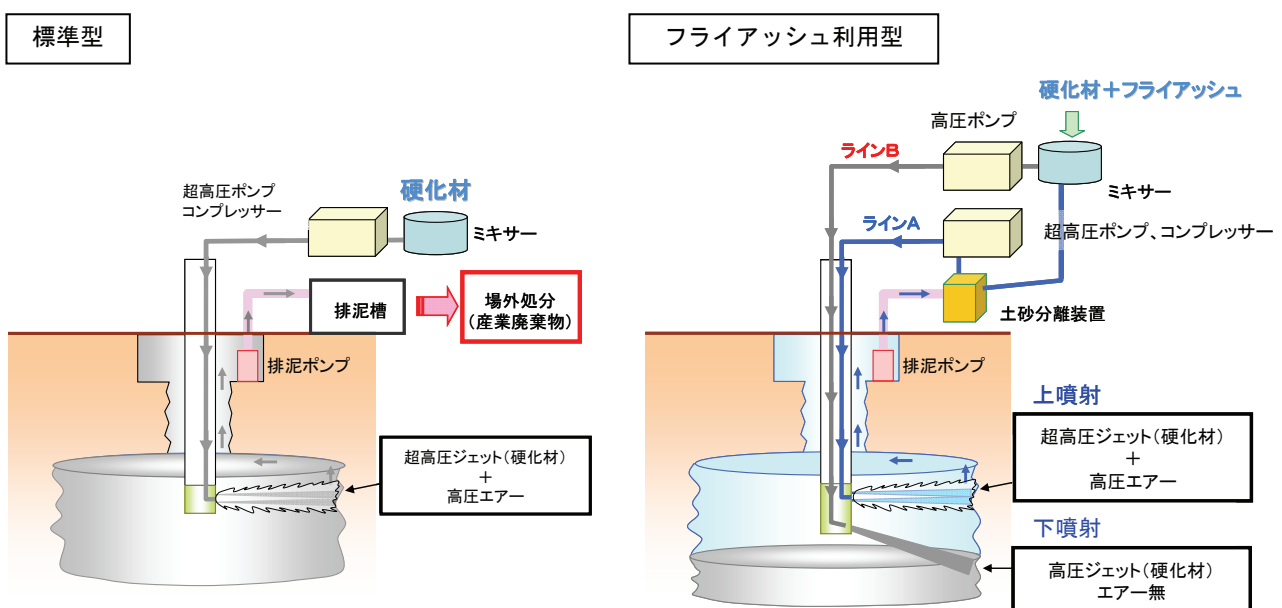


図-7 フライアッシュ型マルチジェット工法概要図

3. 試験施工による検証

3.1 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-8）で実施した。



図-8 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-9 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、それ以降については、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-10 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。

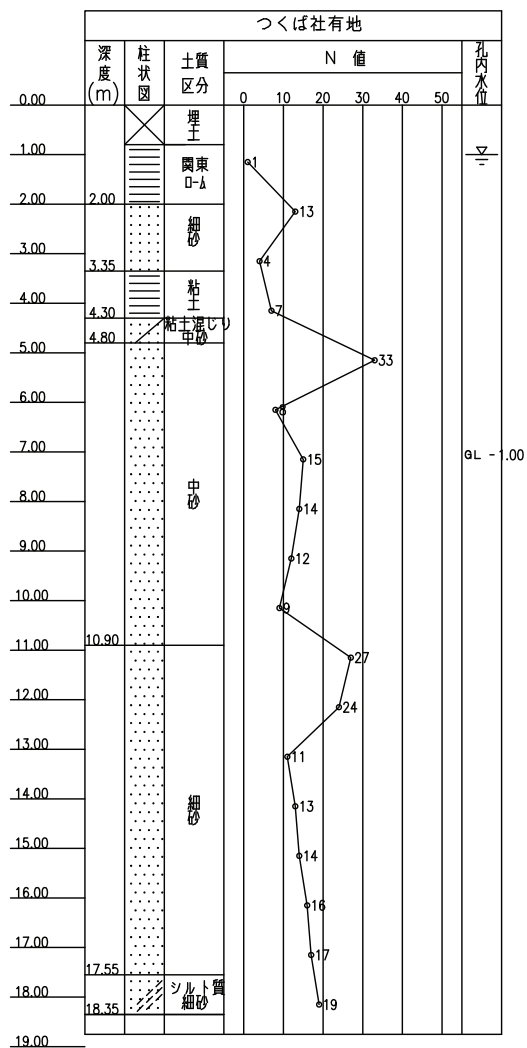


図-9 土質柱状図

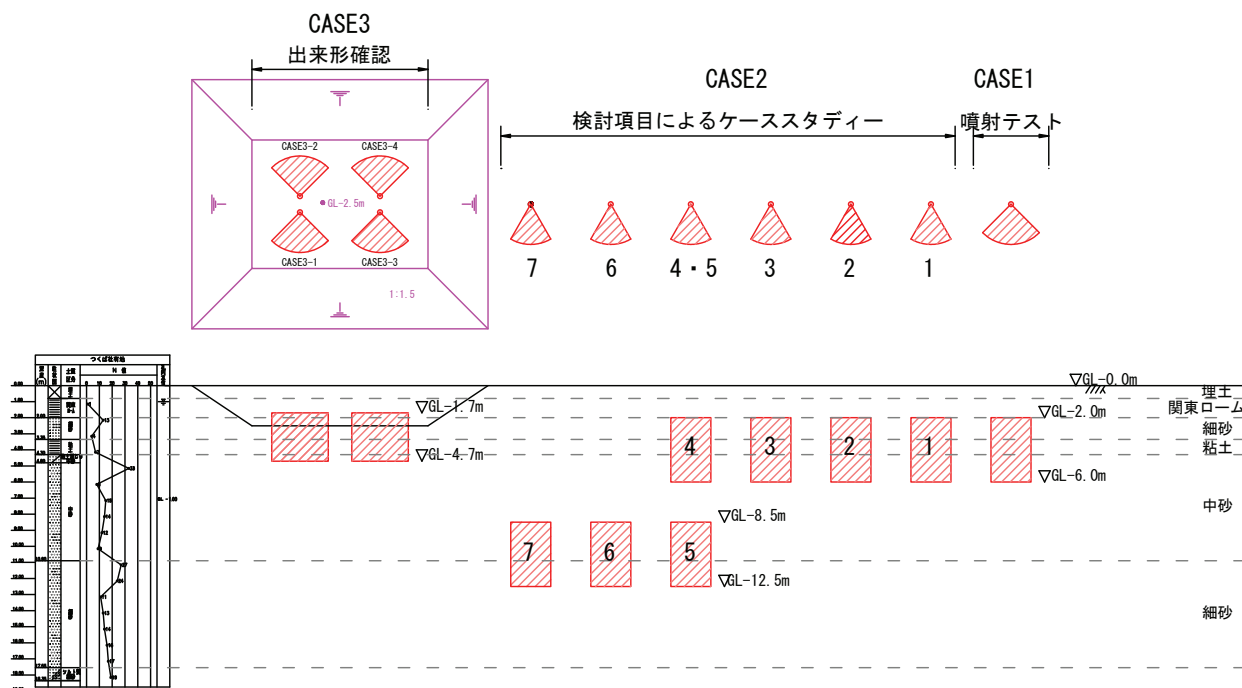


図-10 試験施工配置図

3.2 排泥抑制型マルチジェット工法

(1) 試験施工時検討項目

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。

a. 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-11 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。

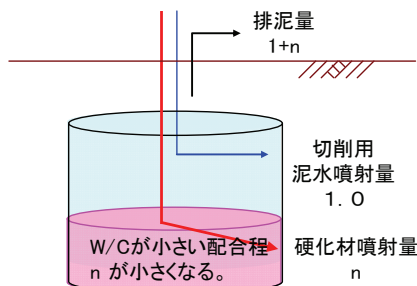


図-11 発生排泥量

b. 上下噴射の距離の検討

図-12 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。

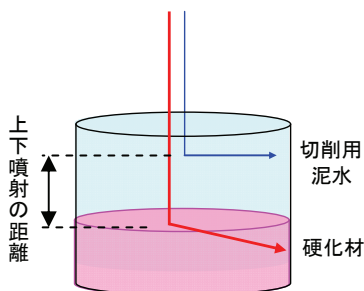


図-12 上下噴射の距離

c. 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。

d. その他

排泥リサイクル率と排泥抑制率の検証及び、検証結果を用いた標準型・排泥抑制型マルチジェット工法のコスト比較を行う。

(2) 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。

表-1 配合表

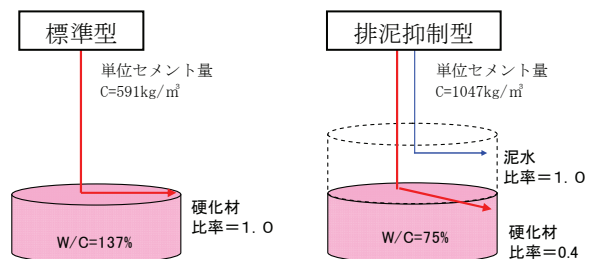
W/C	単位	高炉B	練混ぜ泥水 ($\rho=1.2$)	混和剤
85	kg/m ³	963	799	19
75	kg/m ³	1047	765	21
70	kg/m ³	1095	745	22

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-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	×

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-13 に示す。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。



	単位 セメント量	噴射 比率	比率*		改良体中の セメント量	
標準型	591kg/m ³	×	1.0	×	0.5	295.5kg
排泥 抑制型	1047kg/m ³	×	0.4	×	0.9	376.9kg

*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-13 上下噴射量比率

(3) 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	

土砂分離後の排泥比重計測結果を図-14 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。

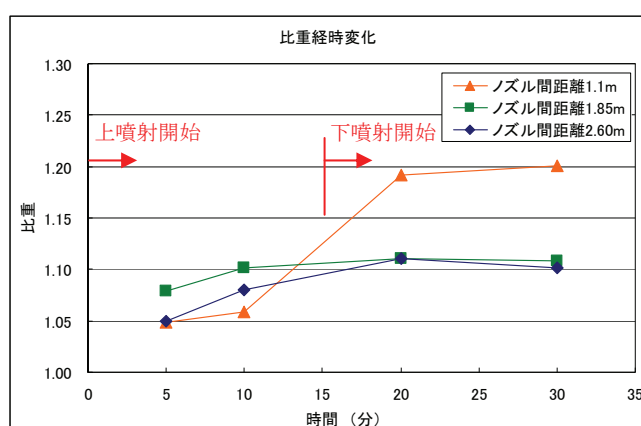


図-14 排泥比重計測結果

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。

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。

(4) 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-15～19 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-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	×

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-15 掘起し改良体全景

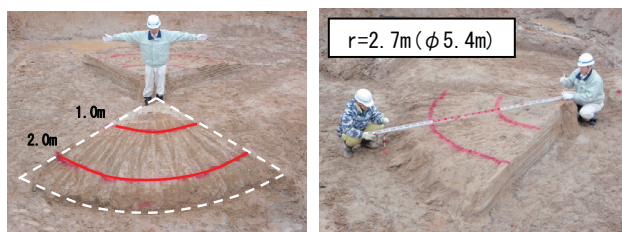


図-16 CASE3-1 掘起し改良体

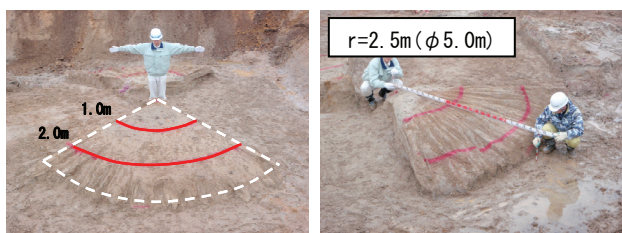


図-17 CASE3-2 掘起し改良体

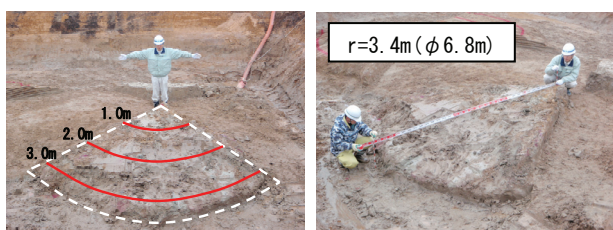


図-18 CASE3-3 掘起し改良体

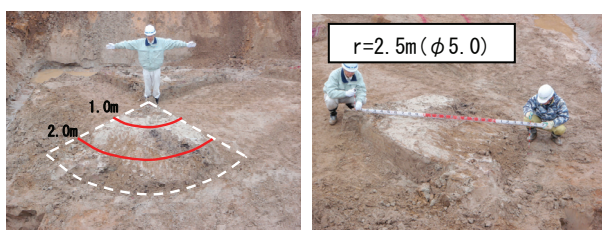


図-19 CASE3-4 掘起し改良体

次に、図-20 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-21 に示す。

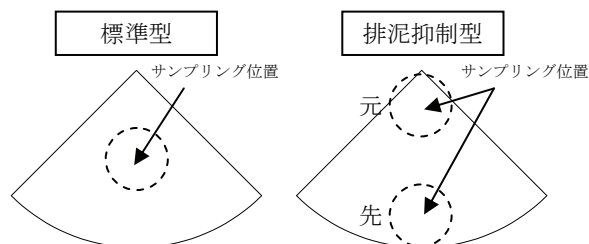


図-20 ブロックサンプリング位置図

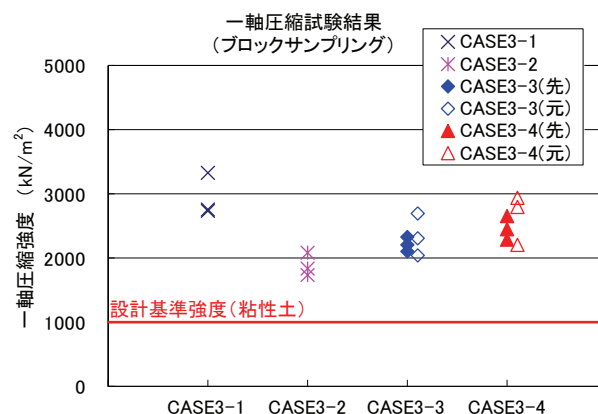


図-21 一軸圧縮試験結果（ブロックサンプリング）

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。

(5) 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。

(6) コスト試算結果

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	φ5.0m
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

3.3 フライアッシュ利用型マルチジェット工法

(1) 試験施工時検討項目

フライアッシュ利用型マルチジェット工法の開発に当り、検討事項と目的を以下に示す。

a. 強度特性確認 (室内試験)

硬化材のセメントに対してフライアッシュを置換した場合、適用可能な置換率とその強度特性を確認する必要がある。よって、事前に某電力会社から受領した JIS 規格外フライアッシュのサンプルを用いて置換率をパラメータとした室内配合試験を実施する。フライアッシュを混合した場合、長期強度の発現に期待できるため、材齢 90 日までの確認を行う。

b. 重金属類溶出特性の確認 (室内試験)

フライアッシュには、重金属類の溶出が土壤環境基準値を超える場合があり、重金属類溶出特性の確認を行う必要がある。フライアッシュの重金属類溶出特性は、石炭灰の産地や燃焼温度等に影響を受け、重金属類溶出量にバラつきが生じることが知られている。そこで、石炭火力発電所より受領した実サンプルによる重金属類溶出試験に追加して、電力会社のこれまでのデータを参考に重金属溶出量の過去最大値を模擬したフライアッシュを試薬添加により作成し重金属類溶出試験を実施する。

c. 噴射テスト (試験施工)

フライアッシュ利用型マルチジェット工法では、JIS 規格外の有効利用を目的としている。JIS 規格外のため、粒径にばらつきがあるフライアッシュを適用するためには、粒径の大きな材料 (最大粒径 2mm 程度を想定) を安定的に圧送・噴射できる必要がある。そこで、試験施工により、粒径の大きな材料 (硅砂 2 号で模擬) を使用して噴射テストによる確認を行う。

(2) 強度特性の確認結果 (室内試験)

標準型マルチジェット工法の標準的な硬化材配合 (設計基準強度 砂質土 : 3,000kN/m², 粘性土 : 1,000kN/m²) をベースに、某電力会社から受領したフライアッシュサンプルを用いて、硬化材のセメントに対してフライアッシュを 0, 20, 50, 80%で置換 (重量比) した。表-9 に配合表を示す。

表-9 配合表一覧

配合	石炭灰置換率 (重量比) α (%)	石炭灰セメントスラリー					使用土砂	注入率 (体積比) β (%)
		水粉体比 W/F (%)	高炉C C (kg/m ³)	石炭灰 F (kg/m ³)	練混水 W (kg/m ³)	混和剤 a (kg/m ³)		
ケース1	0	100	760	0	740	12	標準砂 ブレンド Fe=34%	50
ケース2	20	100	597	149	727	12		
ケース3	50	100	364	364	709	11		
ケース4	80	100	142	568	691	11		

*注入率とは硬化材に対する土砂の体積比である。

上記 4 ケースの配合で一軸強度試験を実施した。材齢は長期強度を評価するため、3 ヶ月強度（実材齢 113 日）までの確認を行った。図-21 に試験結果を示す。

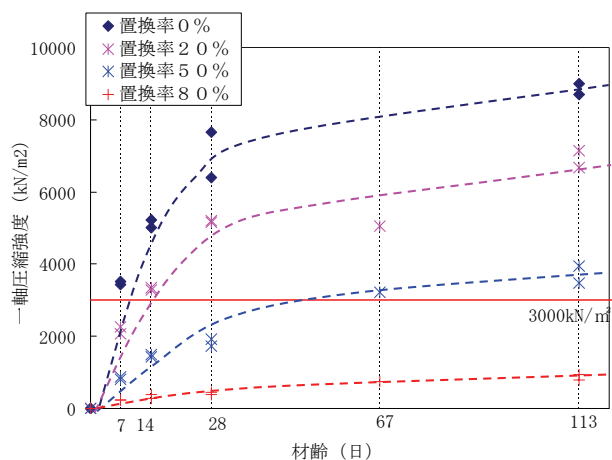


図-22 一軸圧縮試験結果

フライアッシュの置換率が高くなれば、一軸圧縮強度が低下する一方、フライアッシュ添加により材齢 28 日以降の強度増加が確認できた。

以上の結果から、室内現場強度比=2 を考慮して砂質土地盤で $1,000\text{kN/m}^2$ (28 日強度) を確保できる置換率 50% を標準配合とした。

(3) 重金属類溶出特性の確認結果（室内試験）

重金属類溶出試験で使用するフライアッシュは、石炭火力発電所の実サンプルと、電力会社の実データを参考に過去最大溶出量を模擬したフライアッシュの 2 ケースで実施した。重金属類溶出量基準は土壤環境基準に準拠し、土壤環境基準に関わる測定項目は 27 項目中、フライアッシュの生成過程を考慮して、溶出する可能性のある、六価クロム、砒素、セレン、ふっ素、ほう素の 5 項目を対象とした。表-10 にフライアッシュのみの重金属類溶出試験結果を示す。

表-10 重金属類溶出試験結果
(フライアッシュのみ)

項 目	pH	ク 六 ロ △ 価 Cr6+ mg/l	砒 素 As mg/l	セ レ ン Se mg/l	ふ っ 素 F mg/l	ほ う 素 B mg/l
計 量 方 法	—	JIS K 0120 65.2.1	JIS K 0120 61.2	JIS K 0120 67.2	JIS K 0120 34.1	JIS K 0120 47.3
基 準 値	—	0.05	0.010	0.010	0.8	1.0
C A S E 1 実 サンプル 混 合 供 試 体	11.2	0.04	0.011	0.083	1.1	2.3
C A S E 2 最大溶出量模擬 混 合 供 試 体	12.1	1.8 (0.19)	0.20 (0.16)	2.4 (0.55)	5.7 (5.5)	15.6 (10)

()内 過去最大溶出量

その結果、CASE1 の実サンプルのフライアッシュでは、砒素、セレン、ふっ素、ほう素で基準値を超える結果となり、CASE2 の最大溶出量模擬のフライアッシュでは、全項目で大きく基準値を超える結果となった。

次に、2 つのフライアッシュを用いて、フライアッシュ 50%置換配合（(2) 強度特性の確認結果で決定した配合）において重金属類溶出試験を実施した。

試験方法は、最も重金属類溶出量が多くなると考えられる硬化材練混ぜ直後のスラリー状態において、特にセレン、ふっ素、ほう素に対して溶出抑制効果のある不溶化剤をフライアッシュに対して 15%（重量比）添加した。

上記の手順で作製した試料を土壤環境基準（環告第 18 号）に準じて重金属類溶出試験を実施した。なお、試験に用いる試料を練混ぜ直後としたのは、セメント固化により重金属類溶出の抑制効果が報告されており、固結前の練混ぜ直後のスラリー状態で行うことが安全側であると判断したためである。

試験結果を表-11 に示す。5 項目いずれも基準値を満足する結果となった。

表-11 重金属類溶出試験結果
(フライアッシュ混合硬化材)

項 目	pH	ク 六 ロ △ 価 Cr6+ mg/l	砒 素 As mg/l	セ レ ン Se mg/l	ふ っ 素 F mg/l	ほ う 素 B mg/l
計 量 方 法	—	JIS K 0120 65.2.1	JIS K 0120 61.2	JIS K 0120 67.2	JIS K 0120 34.1	JIS K 0120 47.3
基 準 値	—	0.05	0.010	0.010	0.8	1.0
C A S E 1 実 サンプル 混 合 供 試 体	12.3	0.02	<0.005	<0.002	0.16	<0.1
C A S E 2 最大溶出量模擬 混 合 供 試 体	12.4	0.03	<0.005	0.005	0.36	<0.1

(4) 噴射テスト結果（試験施工）

粒径の大きな材料（最大粒径 2mm 程度）が安定的に圧送・噴射できるかを確認するため、試験施工にて噴射テスト（7.5 m³、約 40 分間）を実施した。使用する硬化材は、排泥抑制型マルチジェット工法で決定した標準配合（W/C=75%、表-12）を使用し、硬化材 1 m³に対し硅砂 2 号(最大粒径 2mm、表-13)を 40kg 混合した。

噴射テストの状況を図-22, 23 に示す。高压ポンプの圧力も一定しており、配管・ノズルに対しても、詰まりや磨耗によるトラブルが発生しなかった。

表-12 噴射テスト用配合表配合表

W/C	単位	高炉B	練混ぜ泥水 ($\rho=1.2$)	混和剤
75	kg/m³	1047	765	21

*排泥抑制型の標準配合と同じ配合。硬化材 1 m³に硅砂 2 号を 40kg 混合

表-13 珪砂 2 号の粒度分布

フルイ網 (mm)	4.75	3.35	2.36	1.70	1.18	PAN
フルイ 残留率 (%)	3 以下	40～ 60	20～ 40	5～ 15	3 以下	1 以下



図-22 噴射テスト状況（珪砂混合状況）



図-23 噴射テスト状況（噴射状況）

4. まとめ

排泥抑制型マルチジェット工法，及びフライアッシュ利用型ジェット工法において，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．

4.1 排泥抑制型マルチジェット工法

①シルト，粘性土地盤への適用性の拡大

本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

本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．

4.2 フライアッシュ利用型マルチジェット工法

①JIS 規格外フライアッシュの有価性

フライアッシュ自体は産業廃棄物であるため，フライアッシュを有効活用するには有価性が求められる．その場合，フライアッシュの価格設定を電力会社と調整する必要がある．

②フライアッシュの運搬距離とコスト

フライアッシュを供給できる火力発電所施設と適用現場の距離によっては，運搬費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．

③長期的な重金属類溶出特性の評価方法

フライアッシュの重金属溶出特性の長期的な評価手法が明確に基準化されていないのが現状である．しかしながら，現在土木学会の石炭灰有効活用分科会（新技術エネルギー小委員会）で，石炭灰有効活用に関わるガイドライン制定が進められており，今後の評価方法の参考にしていきたい．

謝辞：本工法開発のため，試験施工に御協力いただいた（株）ミヤマ工業，基盤技研（株），地下防水（株），（株）トーメックの関係者各位におきまして，この場をかりて感謝の意を表します．

参考文献

- 1) マルチジェット工法－技術／積算資料－，マルチジェット工法協会，平成 22 年 7 月
- 2) 技術審査証明 報告書 マルチジェット工法，（社）日本建設機械化協会，平成 21 年 6 月
- 3) 佐藤厚子・西本聡，セメントを用いた石炭灰の環境基準物質の溶出低減効果，第 6 回環境地盤工学シンポジウム，2005 年 5 月
- 4) 高橋邦夫ら，石炭灰有効利用技術について－循環型社会を目指して－，土木学会全国大会研究討論会，平成 15 年 9 月