

気泡掘削工法を適用した柱列式ソイルセメント壁の発生汚泥量低減効果

安井 利彰^{*1}・川島 要一^{*2}・野田 和政^{*3}・森泉 尚之^{*2}・小峰 隆行^{*2}・西郷 陽一^{*2}

Decrease in the Volume of Suldge by Application of Air Form Excavation for Soil Mixing Wall Method

Toshiaki YASUI, Youichi KAWASHIMA, Kazumasa NODA, Naoyuki MORIIZUMI, Takayuki KOMINE, Youichi SAIGOU

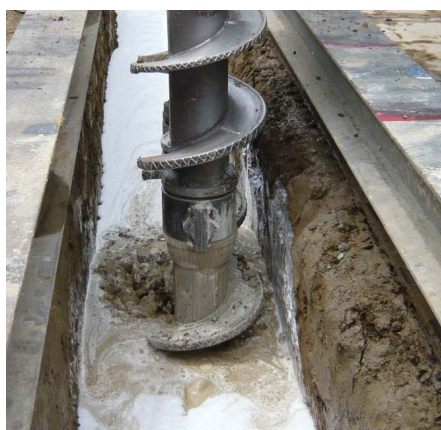


写真-1 気泡による掘削状況

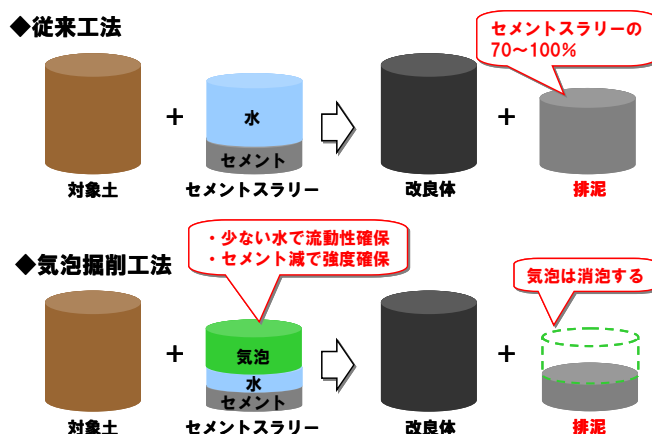


図-1 気泡掘削による排泥低減メカニズム

研究の目的

セメントスラリー系の原位置攪拌工法においては、従前より環境負荷低減およびコスト縮減という目的から排泥量低減が大きな課題であった。現在、発生抑制あるいはリサイクルという手段で多くの排泥低減工法が実用化されているが、コスト面で課題が残っている。

一方、気泡掘削工法は流動性向上、溝壁安定性、消泡剤により処理が容易などの特性を保持しており、原位置攪拌工法の排泥量低減への可能性について研究が進められている。その結果、低コストで排泥を低減できることが報告されている。

今回、建築現場における「環境への取り組み」の一環として、気泡掘削工法を適用した柱列式ソイルセメント工事を試験的に施工し、その排泥低減効果等を確認した。

技術の説明

従来の柱列式ソイルセメント壁の施工においては、掘削・攪拌中の流動性を確保するために、大量の水を使用していた（W/C：250%程度）。これに対し気泡掘削工法は、水の代わりに気泡を地盤に注入することにより、少ない水分で流動性を確保できる。これにより、注入するセメントスラリーのW/Cを低減することができる（W/C：100%程度）。掘削時には、気泡、セメントスラリーおよび改良対象土の混合した余剰土が発生するが、引き上げ時に消泡剤で消泡することにより、最終的に処分する排泥が大幅に低減する。また、同等の目標改良強度であれば、セメント添加量の低減も可能である（W/C低減効果による）。

主な結論

今回実施した試験施工により、以下の結果が得られた。

- ・ 排泥量：従来工法に対して約 60%低減
- ・ セメント添加量：従来工法に対して約 25%低減
- ・ 改良体品質：従来工法と同等
- ・ 芯材挿入性：従来工法と同等

*1 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ
*2 東京建築支店 飯田橋再開発住宅棟作業所

*3 本店 建築部 技術支援グループ

気泡掘削工法を適用した柱列式ソイルセメント壁の発生汚泥量低減効果

安井 利彰^{*1}
野田 和政^{*3}
小峰 隆行^{*2}

川島 要一^{*2}
森 泉尚之^{*2}
西郷 陽一^{*2}

要 旨

セメントスラリー系の原位置攪拌工法においては、従前より環境負荷低減およびコスト縮減という目的から排泥量低減が大きな課題であった。特に、柱列式ソイルセメント壁の施工においては、掘削・攪拌中の流動性を確保するために、多くの水を使用しており（W/C=250%程度）、大量の排泥が発生している。現在、発生抑制あるいはリサイクルという手段で多くの排泥低減工法が実用化されているが、コスト面で課題が残っているのが現状である。

一方、気泡掘削工法は流動性向上、溝壁安定性、消泡剤により処理が容易などの特性を保持しており、原位置攪拌工法の排泥量低減への可能性について研究が進められている。水の代わりに気泡を地盤に注入することにより、少ない水分で流動性を確保できる。これにより、注入するセメントミルクのW/Cを低減することができる。掘削時には、気泡、セメントスラリーおよび改良対象土の混合した余剰土が発生するが、引き上げ時には消泡剤で消泡する。その結果、低コストで排泥を低減できることが報告されている¹⁾。

今回、建築現場における「環境への取り組み」の一環として、気泡掘削工法を適用した柱列式ソイルセメント工事を試験的に施工し、その排泥低減効果等を確認した。

キーワード 気泡掘削工法／柱列式ソイルセメント壁／排泥量低減／コストダウン／溝壁安定性／消泡

目 次

- | | |
|-------------|-----------|
| 1. はじめに | 4. 施工手順 |
| 2. 気泡混合土の特徴 | 5. 試験工事結果 |
| 3. 試験工事の概要 | 6. まとめ |

DECREASE IN THE VOLUME OF SLUDGE BY APPLICATION OF AIR FORM EXCAVATION FOR SOIL MIXING WALL METHOD

Toshiaki YASUI
Kazumasa NODA
Takayuki KOMINE

Youichi KAWASIMA
Naoyuki MORIIZUMI
Youichi SAIGOU

Synopsis:

It has been the problem that many sludge are discharged from soil mixing wall method before. Because this method use many water to keep fluidity of improved soil. Now, many reduce and recycle methods are used, but they have a problem about construction costs.

While, air form excavation has many merits, improvement of fluidity, stabilizing trench wall and easy disposal with deforming agent. Therefore research and development has proceeded about decrease in the volume of sludge with this method.

This time we apply application of air form excavation for soil mixing wall in building site tentatively. As a result, we can decrease in the volume of sludge discharged from soil mixing wall method.

* 1 技術研究所 基盤技術研究G

* 2 東京建築支店 飯田橋再開発住宅棟作業所

* 3 本店 建築部技術支援G

1. はじめに

ソイルセメント壁等に代表されるセメントスラリー系の原位置攪拌工法においては、従来より、排泥量の低減が課題となっている。昨今、環境負荷低減に対する気運が高まっており、各社さまざまな排泥量低減工法を開発し、実用化している。低減工法の原理は、大きく2つに分類できる。1つは排泥をリサイクルする工法、もう1つはセメントミルクの注入量を低減し、その結果として排泥量を低減する工法である。リサイクル材料の品質管理、リサイクル設備の規模などから判断すると後者の方が、工事への適用性は高いと考える。

一方、気泡は建設の分野において、シールド工法や基礎工事、地盤改良など様々な用途で利用が広がっている。この中でも気泡を利用した掘削は、止水性が高い、適用地盤が砂礫層から粘土層までと幅広い、消泡材を用いることで容易に処理できるなどの利点が挙げられ、建設発生土の削減にも貢献している。赤木ら¹⁾は、気泡掘削工法を等厚式ソイルセメント地中連続壁工法や地盤改良工法に適用することにより、溝壁安定性の確保、排泥量低減が実現できると報告している。

本論文では気泡掘削工法を柱列式ソイルセメント壁工事（以下 SMW 工事）に試験的に適用し、壁体品質、排泥低減効果、芯材挿入性能等を確認した結果について報告する。

2. 気泡混合土の特徴

通常、SMW工事では、セメントスラリーと地盤を均質に混合するため、セメントスラリーの水セメント比を $W/C=250\sim300\%$ 程度に設定して掘削土の流動性を向上させている。その結果、大量の排泥が発生する。排泥量を減らすためには、地盤に注入するセメントスラリー量を減らすのが、最も効果的である。そこで、水分の代わりに写真-1に示すような気泡を添加することにより、水分量を減らし、かつ流動性を確保することとした。これにより、 W/C を小さくできれば、注入するセメントミルク量が低減できる。写真-2に掘削土と気泡を混合したもの（以下、気泡混合土）のテーブルフロー試験状況を示すが、非常に流動性のある材料である。

気泡混合土の特徴を以下に示す。



写真-1 気泡



写真-2 気泡混合土のテーブルフロー試験状況

(1) 気泡によるベアリング効果

気泡のベアリング効果により、加水量が少なくても気泡混合土の流動性が確保できるとともに、カッタービットへの掘削土の付着が少ないため、掘削抵抗が低減し、掘削性能が向上する（図-1 参照）。

ベアリング効果により、含水比が小さくても土の流動性を確保

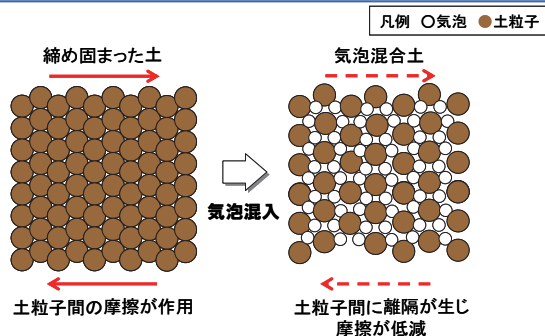
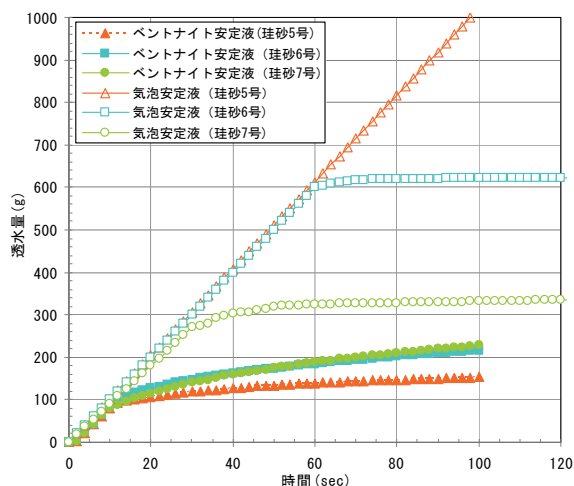
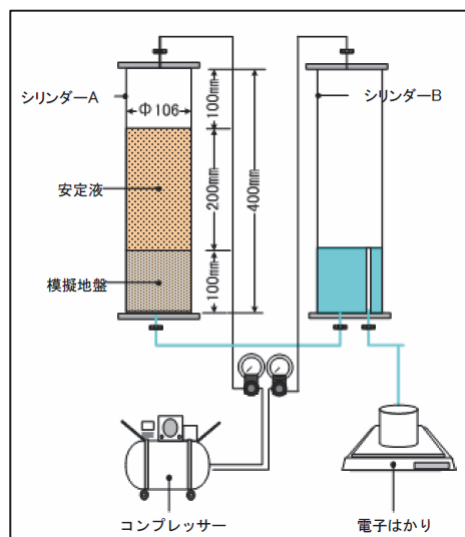
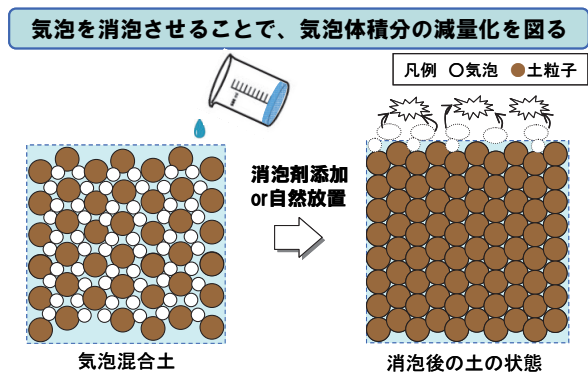
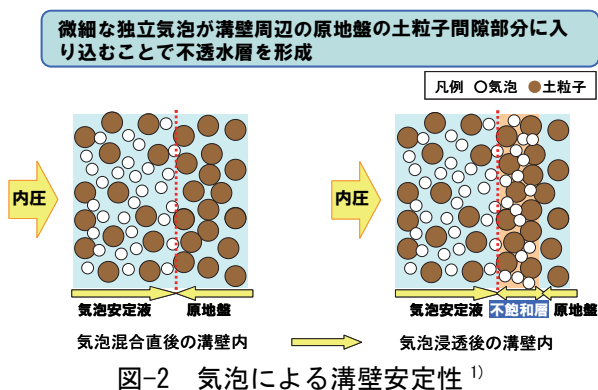


図-1 気泡のベアリング効果¹⁾

(2) 溝壁安定性

図-2¹⁾に示すように、気泡混合土中の微細な独立気泡が溝壁周辺の原地盤の土粒子間隙部分に入り込む。その結果、不飽和領域が発生し、難透水層を形成する。従来のベントナイト安定液に比べて溝壁内の難透水層の形成が早く、特に粗粒土分を多く含む地盤においても難透水層の形成が可能であり、掘削時の溝壁安定性に優れている。この特性を検証するために、図-3²⁾に示す実験装置を使用し、気泡混合土の溝壁安定性を確認した結果を図-4²⁾に示す。図-3のシリンダーA内の安定液に空気を加え、シリンダーBから流出する透水量を計測した。安定液には、気泡安定液とベントナイト安定液を使用し、模擬地盤には硅砂5号、6号および7号をそれぞれ使用した。図-4より、気泡安定液は、ベントナイト安定液に比べて、透水量が一定になる時間が早い。すなわち、短時間で溝壁に難透水層を形成できるため、安定液圧による溝壁保持性能が高いと考えられる。

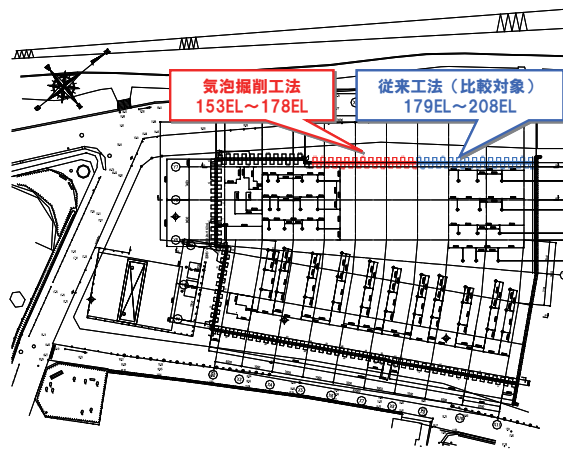


(3) 消泡による発生汚泥量の減量化

掘削時に気泡を添加することにより、少ない加水量で改良対象土の流動性が向上する（気泡混合土）。引上げ時に消泡剤を添加したセメントスラリーを注入しながら、気泡混合土と混合攪拌することで、気泡混合土中の気泡を消泡しながら改良体を造成することができる。これにより、地上に発生する余剰汚泥の量を低減できる（図-5¹⁾参照）。

3. 試験工事の概要

今回、都内の建築工事現場において、気泡掘削工法を試験的に SMW 工事に適用した。図-6 に試験実施箇所を示す。153～178 エレメントの 26 エレメント分を施工した。試験結果の比較対象として、隣接区間の 179～208 エレメントで施工した従来工法のデータを使用した。



3.1 対象土質

改良深度は、施工盤から GL-15.5m までであり、改良対象土質は、GL-6.0m までが埋土層、GL-6.0～-15.5m までが細砂層である。埋土層は基本的に粘性土である。表-1 に各層の物理特性を示す。

表-1 改良対象土の物理特性

項目	埋土層	細砂層
湿潤密度 ρ_t	1.586	1.800
乾燥密度 ρ_d	0.928	1.398
土粒子の密度 ρ_s	2.718	2.679
自然含水比 w_n	71.0	28.8
石分 (75mm 以上)	0.0	0.0
礫分 (2～7.5mm)	0.0	0.5
砂分 (0.075～2mm)	7.2	70.1
シルト分 (0.005～0.075mm)	47.2	19.4
粘土分 (0.005mm 未満)	45.6	10.0
最大粒径	2.0	9.5
50% 粒径 D_{50}	0.0066	0.1575
液性限界 w_L	78.7	30.7
塑性限界 w_P	28.9	25.1
塑性指数 I_P	49.8	5.6
地盤材料の分類名	砂まじり細粒土	細粒分質砂
分類記号	(F-S)	(SF)

3.2 配合設定

(1) セメント添加量の決定

ソイルセメント壁の設計基準強度は 500kN/m^2 である。
 $W/C=100\%$ でセメント量を変化させて、一軸圧縮強度 (28 日強度) を確認した。図-7 に配合試験結果を示す。室内現場強度比 (= 室内強度/現場強度) を 3.0 と設定したため、一軸圧縮強度が 1500kN/m^2 以上を満足するセメント添加量に決定した。埋土層で 200kg/m^3 以上、細砂層で 150kg/m^3 以上とした。

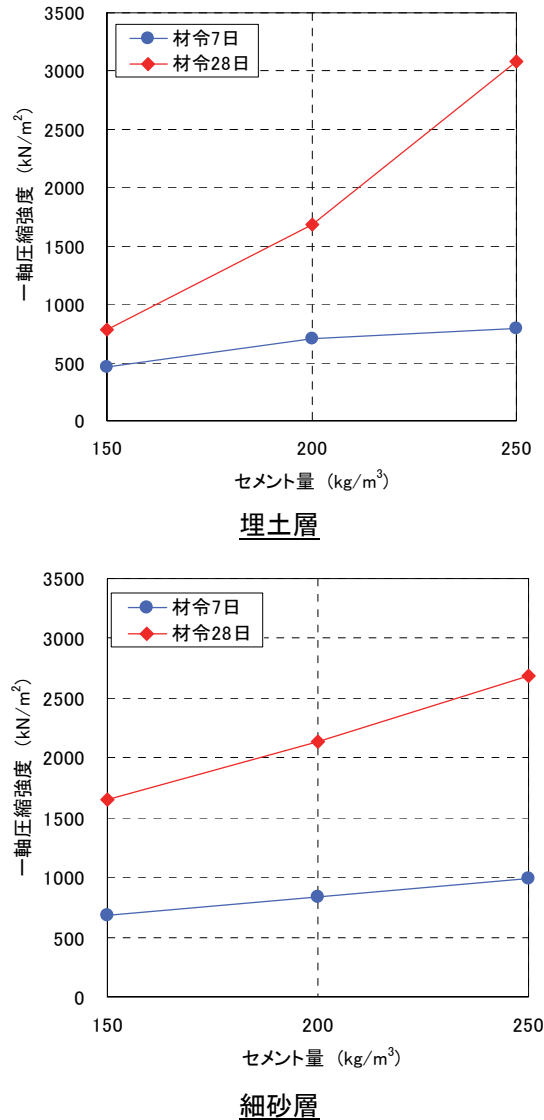


図-7 配合試験結果 (改良強度)

(2) 気泡添加量の設定

掘削時に注入する気泡の添加量を事前配合試験により決定した。ソイルセメント壁の施工においては、混合攪拌性や芯材挿入性を満足することが必要であるため、固化液と改良対象土が混合された改良体スラリーの流動性を確保する必要がある。一般的な目安として、テーブルフロー値 (以下、TF 値) で 150~230mm としている場合が多い³⁾。気泡は、起泡剤原液を水で 40 倍に希釈した水溶液を 25 倍に発泡して製造する。改良対象土の乾燥質量に対す

る 40 倍希釈水溶液質量の割合を気泡添加率とした。 $W/C=100\%$ 相当の加水量 (セメント添加量: 埋土層で 215kg/m^3 , 細砂層で 160kg/m^3) における気泡添加率と気泡混合土の TF 値 (mm) との関係を図-8 に示す。これより, TF 値 150mm 以上を満足する気泡添加率として, 埋土層で 2.0%, 細砂層で 0.75% と設定した。一方, 消泡剤原液は起泡剤原液の 0.75 倍を添加することにした。

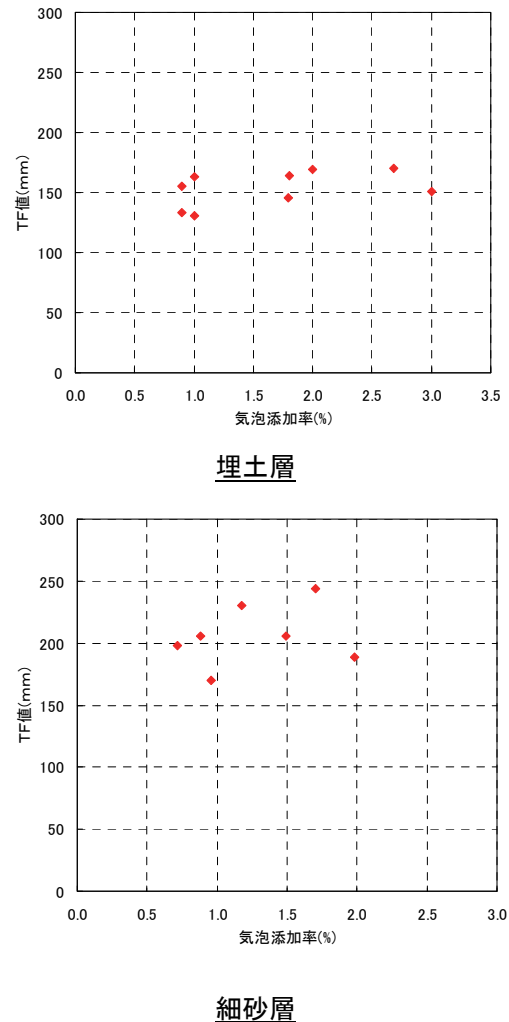


図-8 気泡添加率と気泡混合土の TF 値との関係

以上の事前配合試験より決定した配合を表-2 に示す。また、参考までに従来工法の配合一覧を表-3 に示す。気泡添加により、従来工法の配合に比べて加水量を大幅に低減した。また、 W/C を低減したことにより、セメント添加量 (平均添加量: 約 180kg/m^3) を、従来工法に対して 25% 程度低減することができた。

表-2 気泡掘削工法配合 (対象土 1.0m^3 あたり)

土質	セメント(kg)	気泡(ℓ) ^{※1}	水(ℓ)	消泡剤(ℓ) ^{※2}
埋土層	215	450	215	0.338
細砂層	160	260	160	0.195

※1: 気泡: 起泡剤を40倍希釈・25倍発泡した体積

※2: 消泡剤: 原液量

表-3 従来工法配合（対象土 1.0m³あたり）

土質	セメント(kg)	水(L)	ベントナイト(kg)
埋土層	240	650	10
細砂層	240	650	10

4. 施工手順

施工の流れを図-9 に示す。施工機械の 3 軸オーガーの両端から固化液（セメントスラリー）と気泡を注入，3 軸の中央から圧縮空気を噴射しながら掘削した。このとき，地上のトレンチ内に気泡と固化液と地山が混合した余剰土が滞留する。掘削完了後は，3 軸オーガーの両端から固化液注入，3 軸の中央から消泡剤と圧縮空気を噴射した。消泡により，改良杭中にスペースが生じるため，トレンチ内に滞留した余剰土は地中に引き込まれていく。最終的にトレンチ内に残留する排泥量は大幅に低減する。プラントの流れを図-10 に示す。

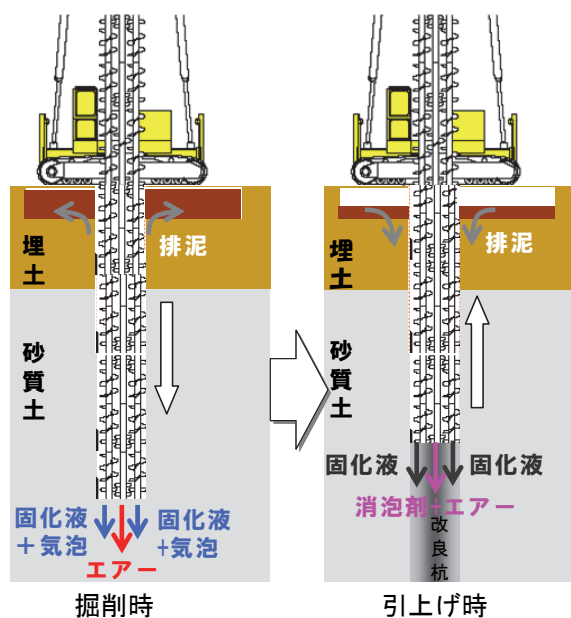


図-9 施工フロー

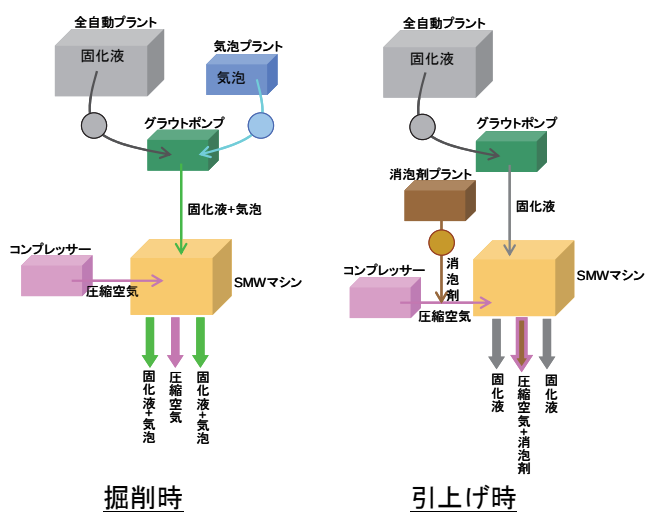


図-10 プラントフロー

今回，図-9, 10 に示すように気泡と消泡剤の圧送ラインを分けた．同一ラインで圧送すると，各エレメントの施工ごとに配管内を洗浄する必要がある（引上げ完了後の消泡剤が残留している配管に，気泡を送ると消えてしまうため）．この洗浄水はすべて産廃扱いとなる．今回の施工方法により，無駄な産廃を減らすことができた．写真-3 に気泡掘削工法を適用した施工状況を示す．



写真-3 施工状況

5. 試験工事結果

5.1 流動性

掘削中に，トレンチ内に溜まっている排泥を採取して流動性を確認した．結果を図-11 に示す．TF 値 150mm 以上であり，従来工法とほぼ同等の流動性を満足していることを確認した．

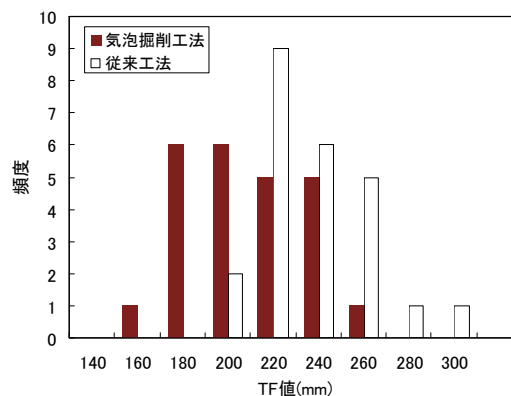


図-11 流動性の確認結果

5.2 改良強度

改良強度については，現場の工程上の制約によりチェックボーリングによるコア採取が難しかったため，掘削進捗に応じて，低強度用のシュミットハンマーにより確認した（写真-4，表-4 参照）．計測結果を図-12, 13 に示す．設計基準強度は $\sigma_{28} : 500\text{kN/m}^2$ であり，シュミットハンマーの反撥硬度が 15 以上であればこれを満足する．埋土層および細砂層の両方において，設計基準強度を満足している．また，セメント添加量を約 25%程度低減しているが，従来工法と同等の改良強度を確保している．これ

は、従来工法では $W/C=270\%$ 程度であるが、気泡を添加することで $W/C=100\%$ にまで低減できたことが理由と考える。



写真-4 低強度用シュミットハンマー

表-4 低強度用シュミットハンマー仕様

衝撃エネルギー	0.09mkg
強度測定範囲	0.2N~5N/mm ²
ケース寸法	240×200×70mm
重量	2.6kg

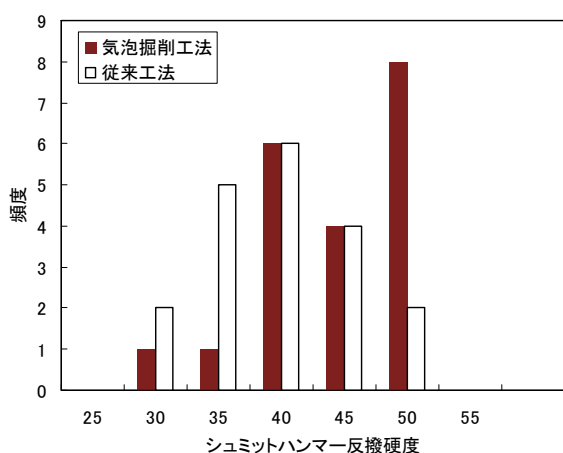


図-12 改良強度確認結果（埋土層）

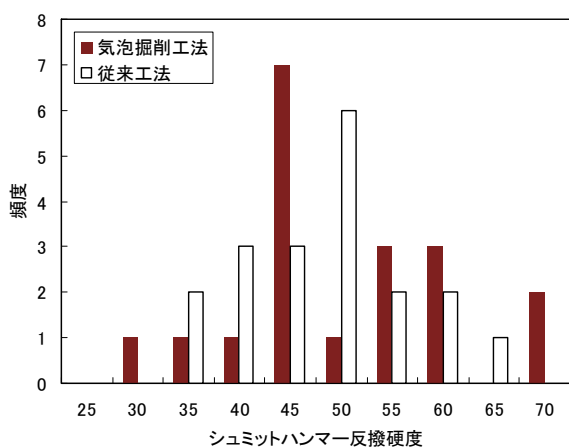


図-13 改良強度確認結果（細砂層）

5.3 芯材挿入性

今回の施工箇所においては、図-14 に示すように、芯材は 900mm ピッチで挿入する計画である。従って、後行エレメントの造成完了後に芯材を挿入する手順である。改良体の凝結開始を勘案すると、後行エレメント造成完了後、極力時間を空けずに芯材を挿入し始めることが望ましい。よって、芯材挿入性は「後行エレメント造成完了後から芯材挿入開始までの経過時間(分)」と「芯材挿入所要時間(分)」との関係により評価する。図-15 に整理した結果を示す。後行エレメント造成完了から芯材挿入開始までの経過時間が長かった場合、芯材の挿入に時間を要したケースも一部あるが、おおむね従来工法と同等の芯材挿入性を確保できている。また、固化液の W/C を試験的に 120% に設定したケース

- ・ 埋土層：セメント 215kg/m³, 水 258kg/m³
- ・ 細砂層：セメント 160kg/m³, 水 192kg/m³

においては、より良好な芯材挿入性を得ることができた。

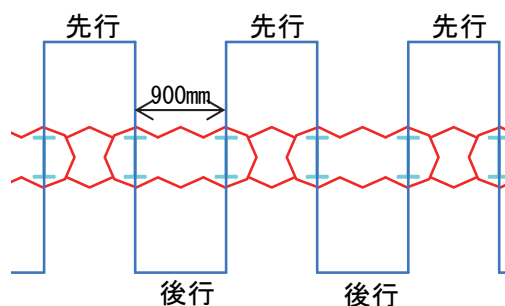


図-14 芯材挿入位置図

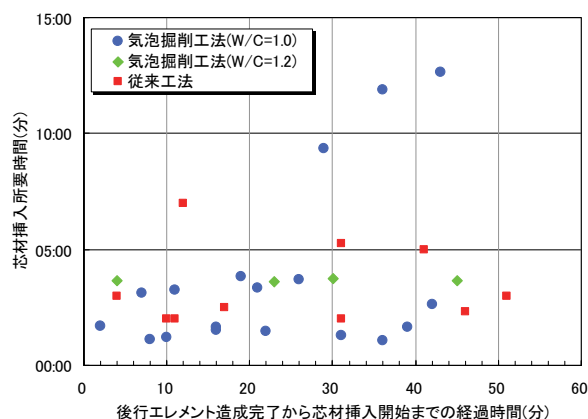


図-15 芯材挿入所要時間

5.4 排泥量

排泥量は、ダンプトラックの運搬台数により算出した。結果を表-5 に示す。気泡掘削工法と従来工法の施工エレメント数が異なるため、改良体積 1.0m³ あたりに発生した排泥量を比較した。従来工法に対して、約 60%程度排泥を低減することができた。

表-5 排泥量の比較結果

工法	施工エレメント数 (エレメント)	全排泥量 (m ³)	改良体積 (m ³)	改良体積あたり排泥量 (m ³ /m ³)
従来工法	31	135	232.5	0.58
気泡掘削工法	26	46	197.2	0.23

謝辞：

今回の試験施工実施にあたり，早稲田大学理工学術院
赤木教授，(有)マグマ 近藤さま，上原さま 太洋基礎工業
株式会社さまには，技術的なアドバイスをいただきました。
この場を借りて，お礼を申し上げます。

6. まとめ

今回，柱列式ソイルセメント壁に気泡掘削工法を適用することにより，以下の結果が得られた。

- ① 気泡添加による流動性向上効果により，固化液の W/C を低減し，その結果セメント添加量を約 25%低減することができた。
- ② 固化液の W/C 低減効果により，排泥量を従来工法と比較して約 60%低減できた。
- ③ 芯材挿入性能は，従来工と同等であった。
- ④ 改良体の品質は従来工法と同等であった。

参考文献

- 1) 赤木，請川，安井，佐久間，土屋，近藤：気泡掘削工法（地盤改良，等厚式ソイルセメント壁への適用），震災からの復旧・復興，住環境の再生に役立つ地盤技術シンポジウム，2011. 12
- 2) 近藤，仲山，赤木：掘削土砂に気泡と水を添加した地盤掘削用安定液の開発と適用，土木学会論文集C Vol. 64 No. 3, 505-518. 2008. 7
- 3) TRD工法技術資料，TRD工法協会