

# 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<sup>1</sup>・川島要一<sup>1</sup>・赤木寛一<sup>2</sup>・近藤義正<sup>3</sup>・土屋敦雄<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>前田建設工業(株)・<sup>2</sup>早稲田大学理工学術院・<sup>3</sup>(有)マグマ・<sup>4</sup>太洋基礎工業(株)

## 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、従前より、発生汚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、各社さまざまな発生汚泥量低減工法を開発し、実用化されている。低減工法の原理は、大きく2つに分類できる。1つは発生汚泥をリサイクルする工法、もう1つはセメントスラリーの注入量を低減し、その結果として発生汚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、シールド工事や基礎工事、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、気泡のベアリング効果により流動性を高め掘削を行う工法で、溝壁の止水性が高い、適用地盤が砂礫層から粘性土層まで幅広い、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、建設発生土の低減にも貢献している。赤木ら<sup>1)</sup>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。

今回、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、排泥低減効果および芯材挿入性能等を確認した。以下、試験工事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、セメントと地盤を均質に混合するため、水セメント比をW/C=270%程度に設定したセメントスラリーを注入する。すなわち、水分を添加することにより、改良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）のモルタルフロー試験（JIS R5201）状況を示す。非常に流動性が高い材料である。

気泡混合土の特徴を以下に示す。

### 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く、掘削抵抗が低減し、掘削性能が向上する（図-1<sup>1)</sup>参照）。図-2<sup>2)</sup>に気泡添加率とテーブルフロー値（以下TF値）との関係を示す。気泡を添加することによる流動性の向上が見られる。



写真-1 気泡



写真-2 気泡混合土

### ② 溝壁安定性：

図-3<sup>1)</sup>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-4<sup>3)</sup>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-5<sup>3)</sup>に示す。図-4のシリンダーA内の安定液に空気圧を加え、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、気泡混合土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-5より、気泡混合土は、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。

Decrease in the volume of sudge by application of air form excavation for soil mixing wall method

Toshiaki Yasui<sup>1</sup>, Youichi Kawashima<sup>1</sup>, Hirokazu Akagi<sup>2</sup>, Yoshimasa Kondou<sup>3</sup>, Atsuo Tsuchiya<sup>4</sup>(<sup>1</sup>Maeda corp, <sup>2</sup>Waseda University, <sup>3</sup>Maguma, <sup>4</sup>Taiyoukisokougyo Corp)

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-6<sup>1)</sup> 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

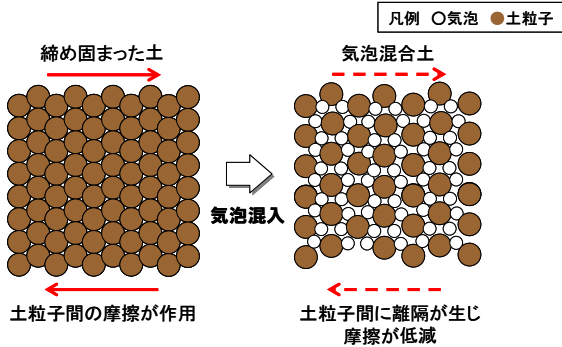


図-1 ベアリング効果<sup>1)</sup>

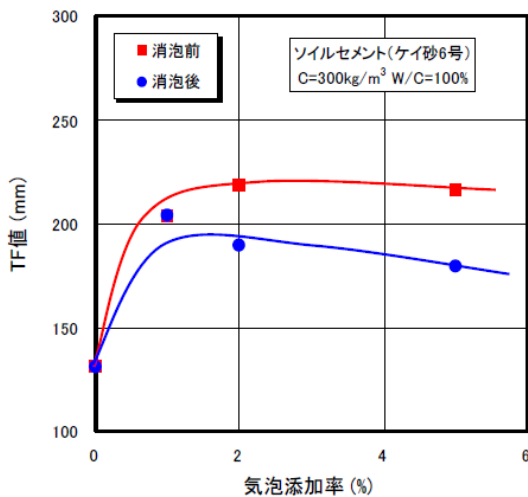


図-2 気泡添加率とTF値との関係<sup>2)</sup>

メカニズム：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ことで不透水層を形成

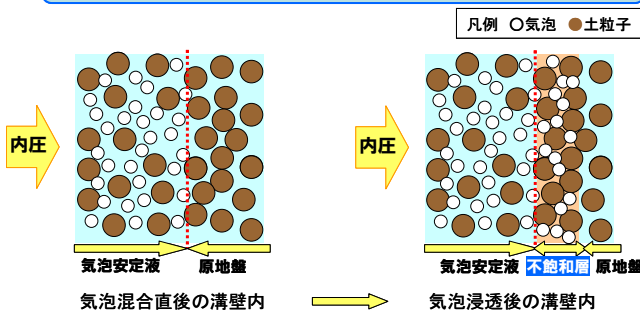


図-3 溝壁安定性<sup>1)</sup>

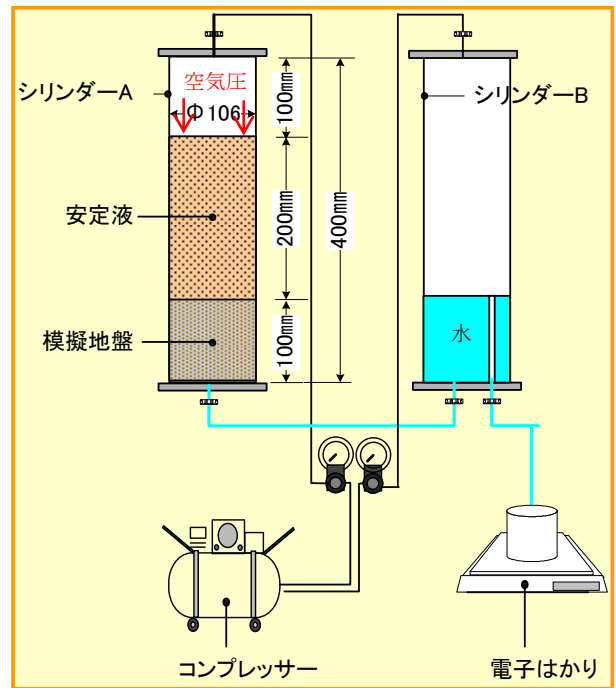


図-4 溝壁安定性確認試験装置

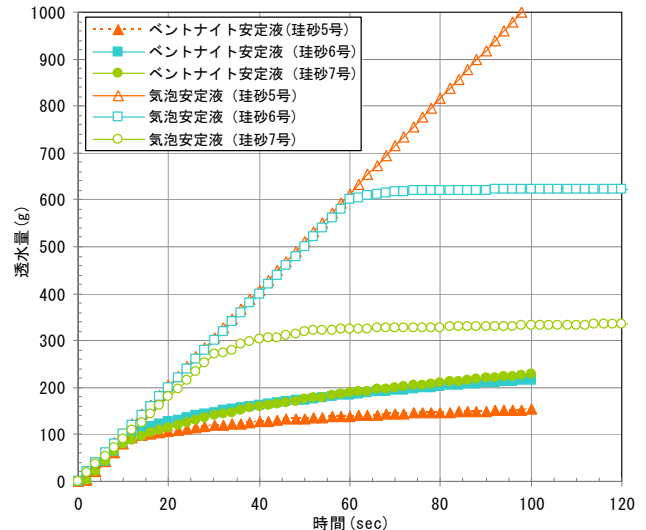


図-5 遮水層形成時間<sup>3)</sup>

気泡を消泡させることで、気泡体積分の減量化を図る

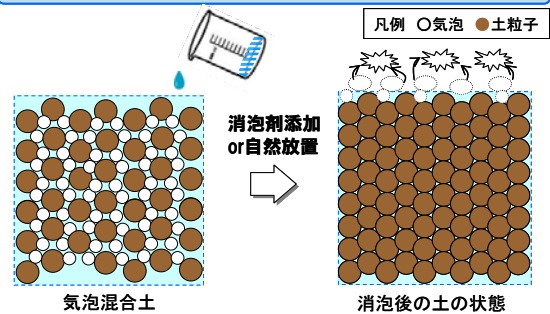


図-6 消泡による減量化<sup>1)</sup>

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-7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、隣接部の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

改良長は、施工盤から 15.5m 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。

### 3. 2 配合設計

#### 3. 2. 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  $\sigma_{28} = 500 \text{ kN/m}^2$  である。気泡添加による流動性向上効果を期待し、W/C=100% の条件でセメント添加量を変化させて、一軸圧縮強度(28日強度)を確認した。図-8 に試験結果を示す。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  $1500 \text{ kN/m}^2$  以上を満足するセメント添加量は細砂層で  $150 \text{ kg/m}^3$  以上、埋土層で  $200 \text{ kg/m}^3$  以上である。約 10% 程度の余裕を見込んで、配合は細砂層で  $160 \text{ kg/m}^3$ 、埋土層で  $215 \text{ kg/m}^3$  に設定した。

#### 3. 2. 2 気泡添加量の決定

3.2.1 で決定したセメント添加量の条件において、掘削時に注入する気泡の添加量を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必要から、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、TF 値で 150~230mm としている<sup>4)</sup>。使用する気泡は、起泡剤原液を水で 40 倍に希釈した起泡剤水溶液を 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起泡剤 40 倍希釈水溶液質量の割合を気泡添加率 Q(%) とする。気泡添加率と気泡混合土(気泡と改良対象土の混合物)の TF 値(mm)との関係を図-9 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、細砂層で 0.75%、埋土層で 2.0% 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。

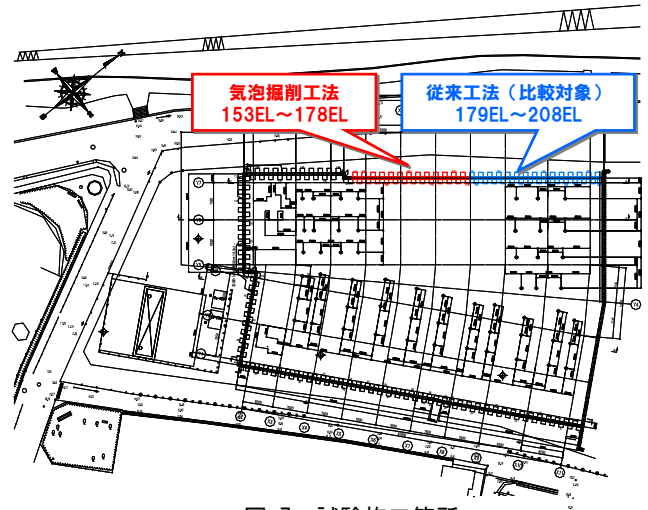


図-7 試験施工箇所

表-1 改良対象土の物理特性

項目		埋土層	細砂層
湿潤密度 $\rho_t$	$\text{g/cm}^3$	1.586	1.800
乾燥密度 $\rho_d$	$\text{g/cm}^3$	0.928	1.398
土粒子の密度 $\rho_s$	$\text{g/cm}^3$	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	mm	2.0	9.5
50%粒径 $D_{50}$	mm	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)

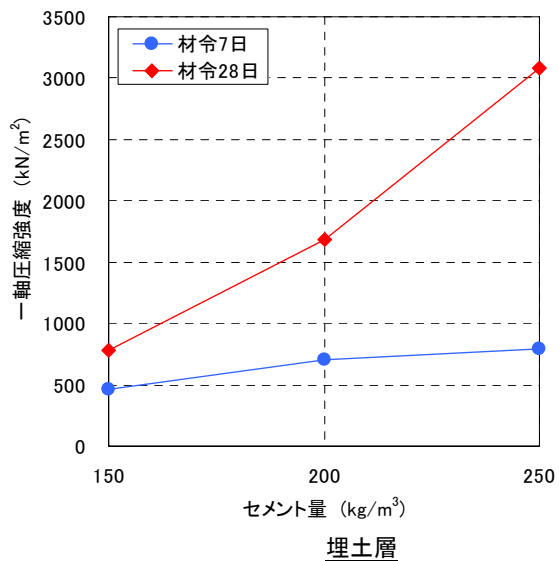
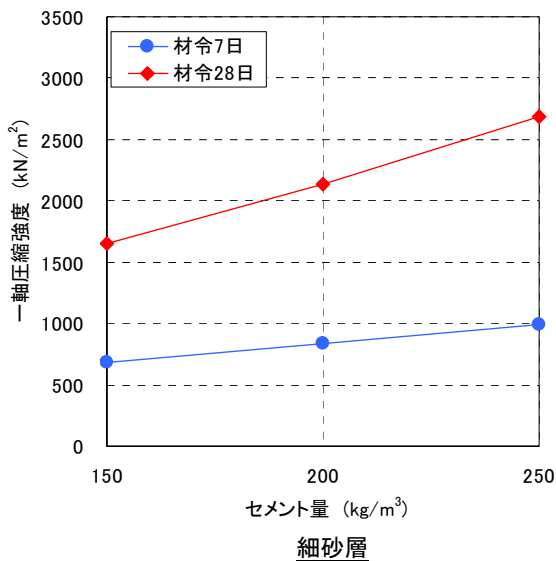
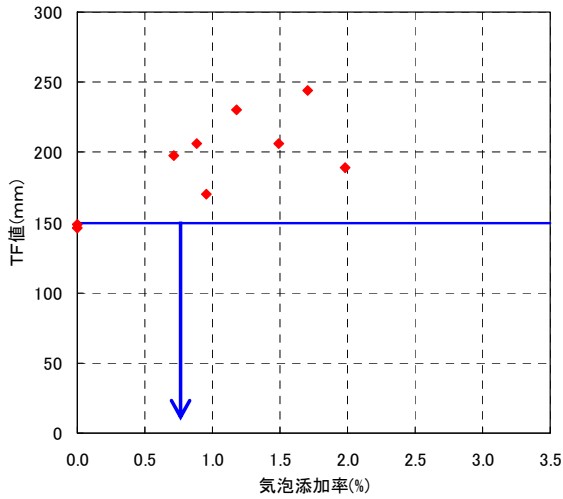
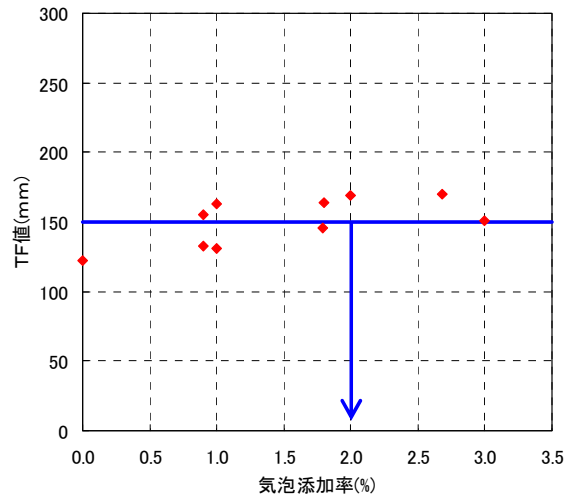


図-8 配合試験結果 (改良強度)



細砂層



埋土層

図-8 気泡添加率と気泡混合土のTF値との関係

以上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<sup>3</sup>)を従来工法(240kg/m<sup>3</sup>)に対して25%程度低減することができた。

表-2 気泡掘削工法配合一覧(改良対象土1.0m<sup>3</sup>あたり)

土質	セメント(kg)	気泡(ℓ) <sup>※</sup>	水(ℓ)	消泡剤(ℓ) <sup>※</sup>
埋土層	215	450	215	0.338
細砂層	160	260	160	0.195

表-3 従来工法配合一覧(改良対象土1.0m<sup>3</sup>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

※気泡:40倍希釈、25倍発泡、消泡剤:原液

#### 4. 施工手順

施工の流れを図-10に示す。3軸オーガの両端から固化液と気泡を注入、施工機の3軸オーガ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軸オーガの両端から固化液注入、3軸オーガ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(余剰土中の気泡も消泡する)。以上より、最終的にトレンチ内に残留する排泥量は従来工法に比べて大幅に低減する。施工時のプラントの流れを図-11に示す。

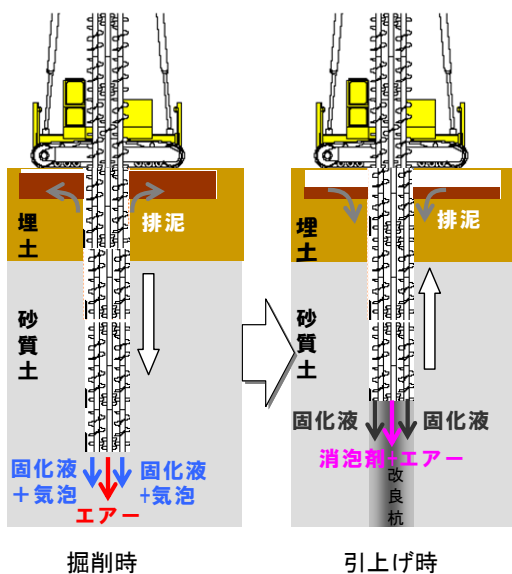


図-10 施工フロー

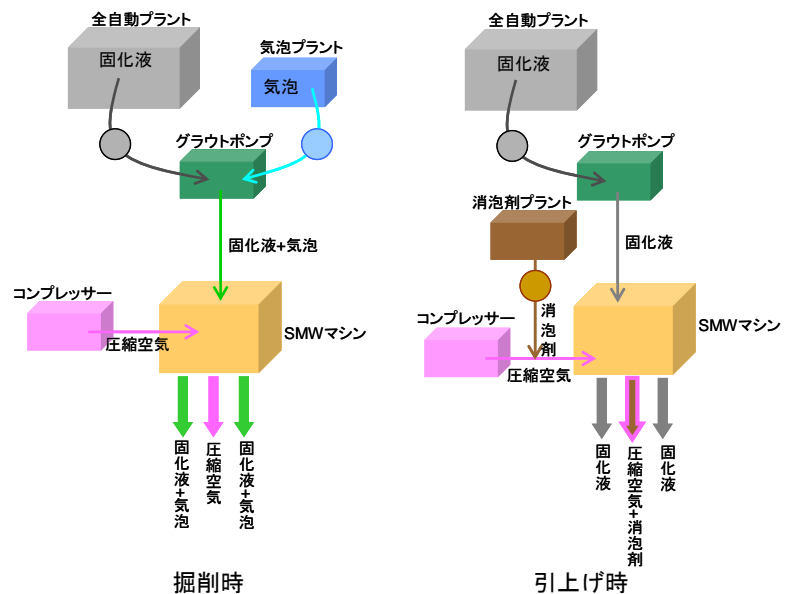


図-11 プラントフロー

今回、図-10.11 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（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。これにより、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。

## 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余剰土を採取して流動性を確認した。結果を図-12 に示す。従来工法および気泡掘削工法適用ケースのTF 値は、ともに 150mm 以上を満足している。従来工法と比較すると、全体的に気泡掘削工法のTF 値は小さい傾向にあるが、施工において、特に問題がない範囲であると考えられる。

### 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、山留掘削進捗に応じて、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-13、14 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られる。



写真-3 施工状況



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 <sup>2</sup>
ケース寸法	240×200×70mm
重量	2.6kg

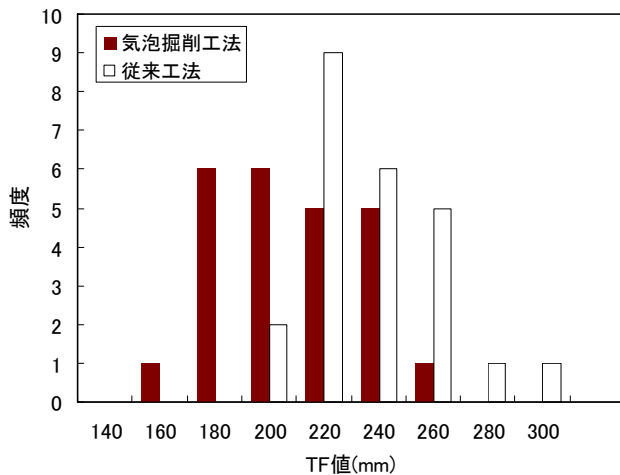


図-12 流動性の確認結果

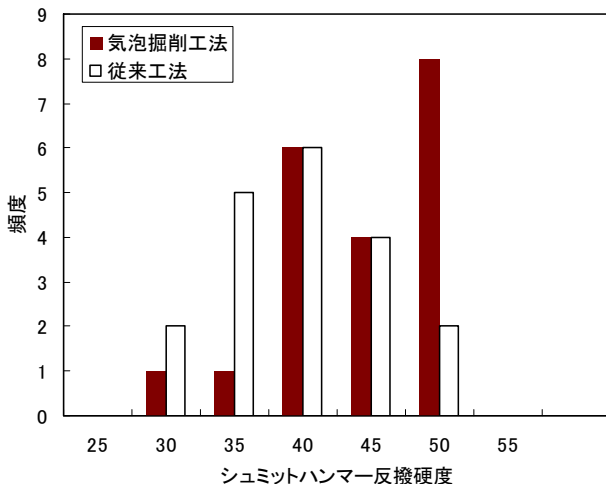


図-13 改良強度確認結果（埋土層）

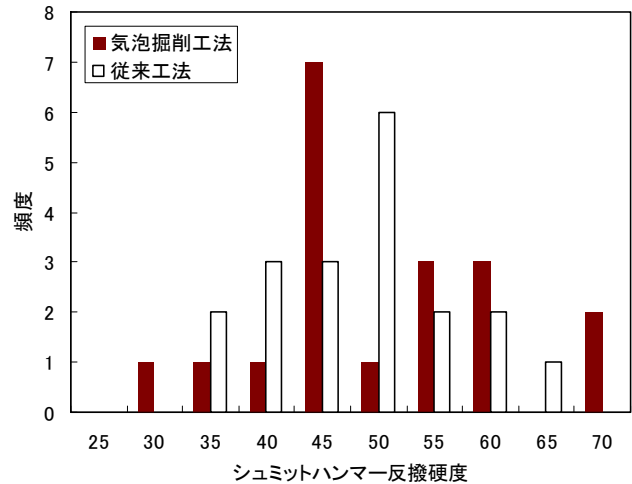


図-14 改良強度確認結果（細砂層）

## 5.2 芯材挿入性

今回の施工箇所においては、図-15 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-16 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/m<sup>3</sup>, 水 258kg/m<sup>3</sup>
- ・細砂層：セメント 160kg/m<sup>3</sup>, 水 192kg/m<sup>3</sup>

においては、より良好な芯材挿入性を得ることができた。

## 5.4 排泥量

排泥量は、ダンプトラックの運搬台数により計量した。結果を表-5 に示す。気泡掘削と従来工法の施工エレメント数が異なるため、改良体積 1.0m<sup>3</sup> 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。

## 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 低減効果およびセメント添加量低減効果により、注入する固化液量が従来工法に比べて大幅に低減した。その結果、排泥量が従来工法と比較して約 60% 低減した。
- ③ 芯材挿入性能は、従来工法とほぼ同等であった。
- ④ 改良体の品質は従来工法と同等であった。

表-5 排泥発生量の比較

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

### 【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) 栗橋, 赤木, 近藤, 印南, 森, 土屋: 気泡を用いたソイルセメント壁工法用掘削安定液の流動特性, 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp715-716, 2009. 9
- 3) 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
- 4) TRD 工法技術資料, TRD 工法協会

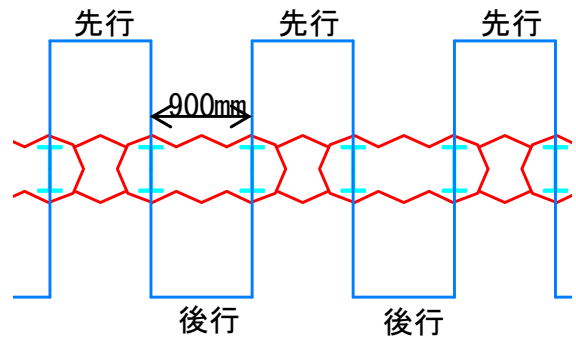


図-15 芯材挿入位置

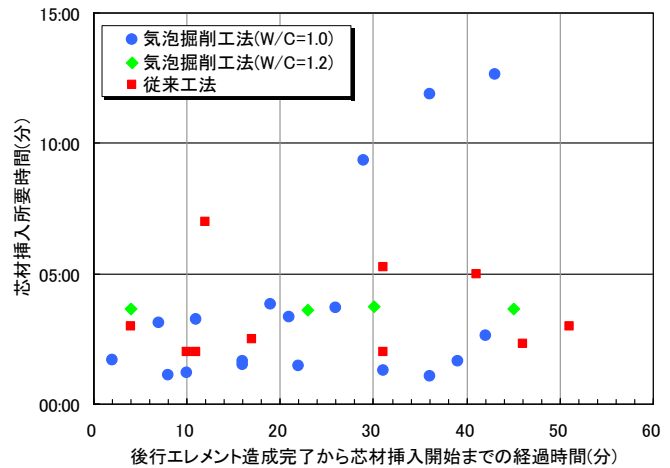


図-16 芯材挿入所要時間