

気泡掘削工法を適用した柱列式ソイルセメント壁の排泥量低減効果

前田建設工業(株)	正会員	○安井	利彰
前田建設工業(株)		川島	要一
		野田	和政
		田仲	郁之
早稲田大学	正会員	赤木	寛一
(有)マグマ		近藤	義正

1. 目的

ソイルセメント壁等に代表されるセメント系懸濁液を用いた原位置攪拌工法においては、従前より、コスト低減および環境負荷低減の両側面から、排泥量の低減が課題となっている。このような背景の中、各社さまざまな排泥量低減工法を開発し、実用化されている。排泥量低減の原理は、大きく2つに分類できる。1つは余剰泥土を注入材としてリユース（Reuse）する工法、もう1つはセメント系懸濁液の注入量を低減し、その結果として排泥をリデュース（Reduce）する工法である。

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地盤掘削は、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、以下に示すようなメリットがあり、建設発生土の低減にも貢献している。

- ① 溝壁（孔壁）の止水性が高い。
- ② 適用可能地盤が砂礫層から粘性土層までと幅広い。
- ③ 消泡剤を用いることで容易に処理できる。

赤木ら¹⁾は、気泡掘削工法を等厚式ソイルセメント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、ソイルセメント壁体品質、排泥量低減効果および芯材挿入性能等を確認した。また、その後本施工へ適用し、大幅に排泥量を低減することができた。本報では、試験工事結果および本施工適用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攪拌するため、水セメント比を $W/C=200\sim300\%$ 程度に設定したセメント系懸濁液を注入する。すなわち、水を添加することにより、混合攪拌時の流動性を向上させている。しかし、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系懸濁液量を減らすのが、最も効果的である。

そこで、水の代わりに写真-1に示すような気泡を添加することにより、加水量を減らし、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、注入するセメント系懸濁液量を低減できる。写真-2に掘削土と気泡を混合したもの（以下、気泡混合土）のフロー試験（JIS R5201）（以下、TF試験）状況を示



写真-1 気泡



写真-2 気泡混合

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，溝壁安定性，消泡

連絡先 〒101-0064 東京都千代田区猿樂町 2-8-8 前田建設工業(株) 土木設計・技術部 TEL 03-5217-9563

す。非常に流動性が高い性状であることが分かる。以下に、気泡混合土の特徴を示す。

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、加水量を減らしても気泡混合土の流動性が確保できるとともに、掘削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-1¹⁾ 参照）。図-2²⁾に気泡添加率(%)とTF試験結果（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。

② 溝壁安定性

図-3¹⁾ 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い。特に粗粒分を多く含む地盤において、難透水層の早期形成が可能であり、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-4³⁾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-5³⁾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、模擬地盤には珪砂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までに要する時間が短い。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。

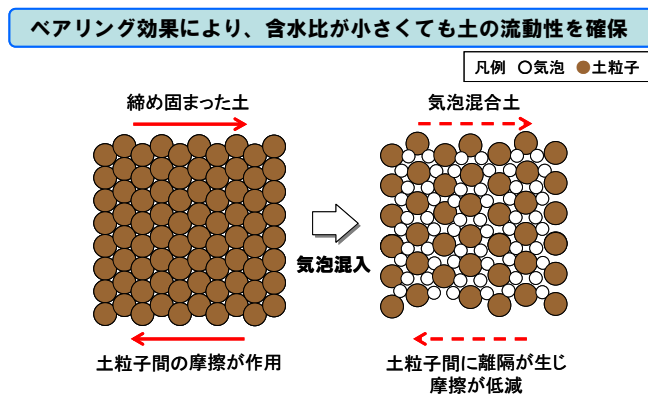


図-1 ベアリング効果¹⁾

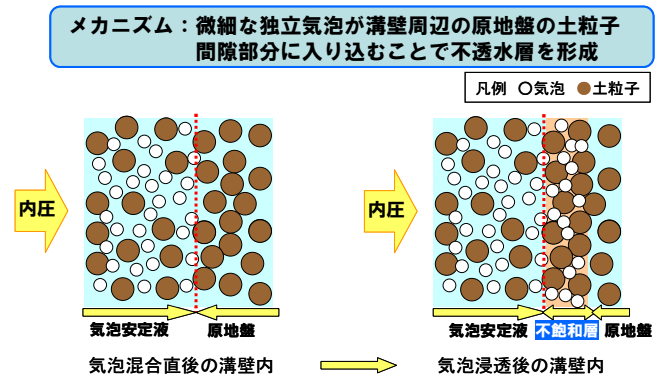


図-3 溝壁安定性¹⁾

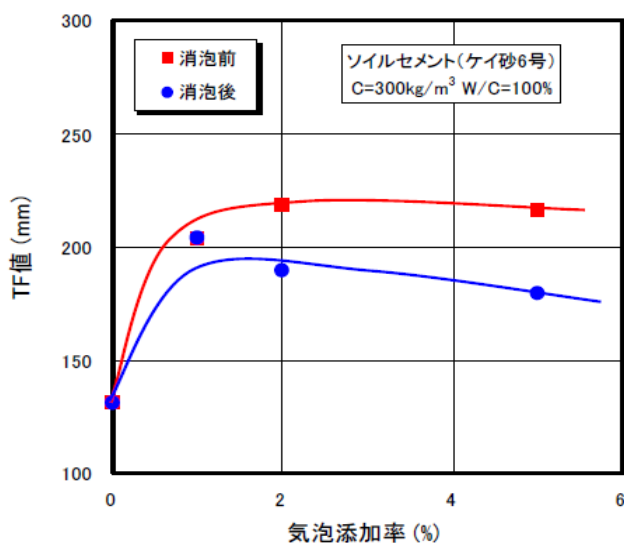


図-2 気泡添加率(%)とTF値との関係²⁾

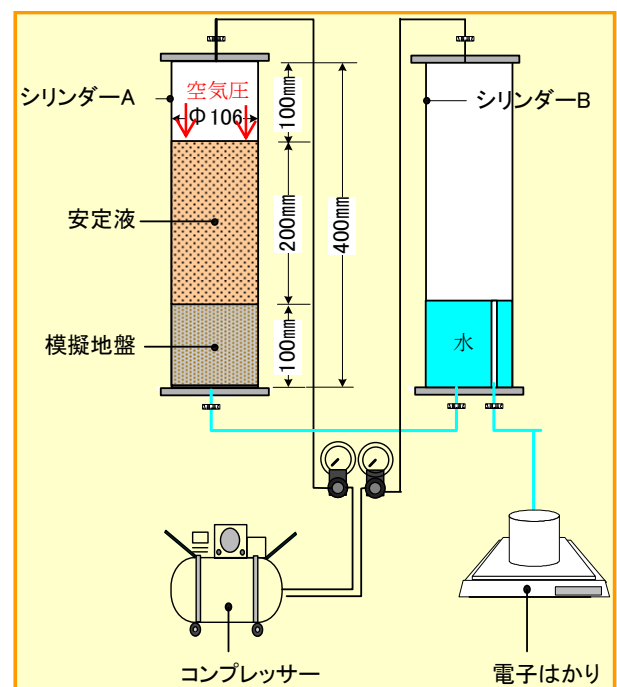


図-4 溝壁安定性確認試験

③ 消泡による排泥量の低減

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系懸濁液を注入しながら、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、地上に発生する排泥量を低減できる（図-6¹⁾ 参照）。

3. 試験工事

今回、都内の再開発工事現場において、気泡掘削工法を試験的に SMW 工事に適用した。施工時期は、2012 年 1 月である。図-7 に実施箇所を示す。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 までが細砂層であった。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

ソイルセメント壁の設計基準強度は $\sigma_{28} = 500\text{kN/mm}^2$ であった。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、一軸圧縮強度試験(28 日強度)を実施し、セメント添加量を決定した。

決定したセメント添加量の条件で配合試験を実施し、気泡添加率を設定した。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⁴⁾。使用する気泡は、起泡剤原液を水で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希釈水溶液質量の割合を気泡添加率 $Q(\%)$ とする。配合試験により決定した配合を表-2 に示す。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(240kg/m^3)に対して 25% 程度低減することができた。

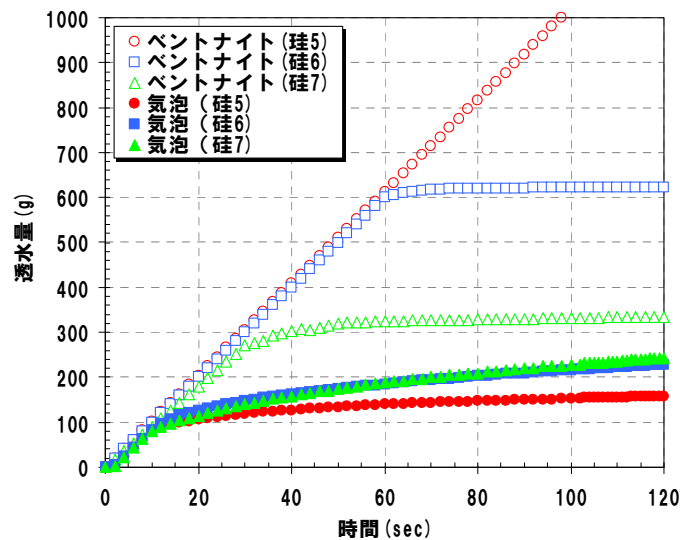


図-5 遮水層形成時間³⁾

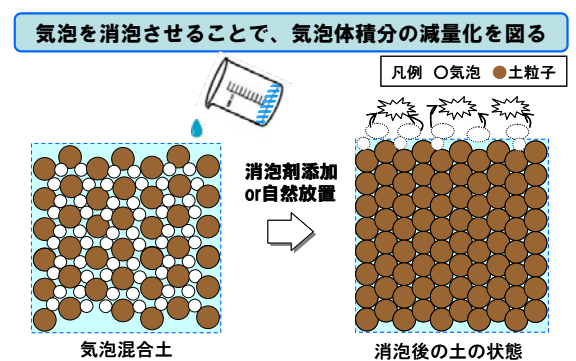


図-6 消泡による減量化¹⁾

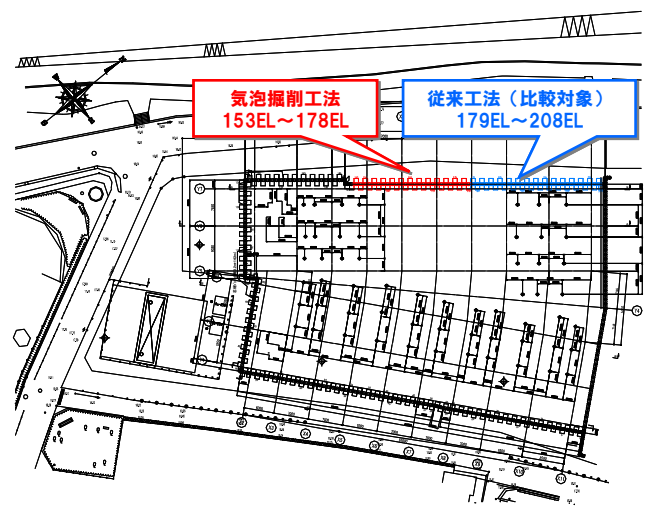


図-7 試験施工箇所

表-1 改良対象土の物理特性一覧

項目		埋土層	細砂層
湿潤密度 ρ_t	g/cm ³	1.586	1.800
乾燥密度 ρ_d	g/cm ³	0.928	1.398
土粒子の密度 ρ_s	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)

表-2 気泡掘削工法配合一覧(改良対象土 1.0m³あたり)

対象土	セメント(kg/m ³)	気泡(l/m ³)	水(l/m ³)	消泡剤(l/m ³)
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 1.0m³あたり)

対象土	セメント(kg/m ³)	水(l/m ³)	ベントナイト(kg/m ³)
埋土層	240	650	10
細砂層	240	650	10

3. 3 施工手順

施工の流れを図-8に示す。3軸オーガーの両端から固化液と気泡を注入，中央から圧縮空気を噴射しながら掘削した。掘削時には，地上のトレンチ内に気泡、固化液および土が混ざった排泥が滞留する。掘削完了後は3軸オーガーの両端から固化液注入，中央から消泡剤と圧縮空気を噴射した。消泡により，ソイルセメント壁内にスペースが生じるため，トレンチ内に滞留していた排泥は地中に引き込まれていく（排泥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-9に示す。

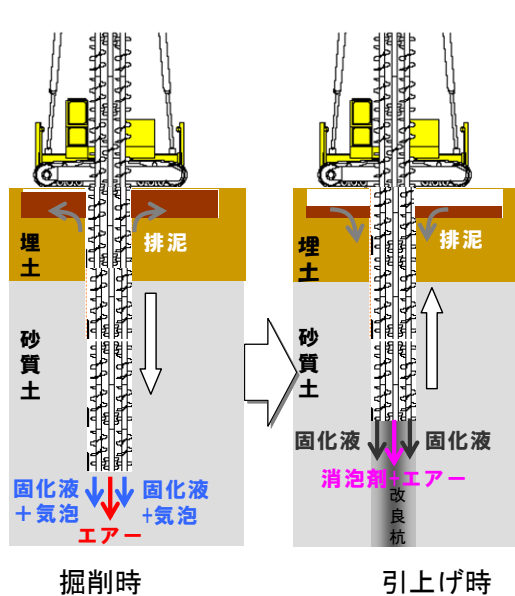


図-8 施工手順

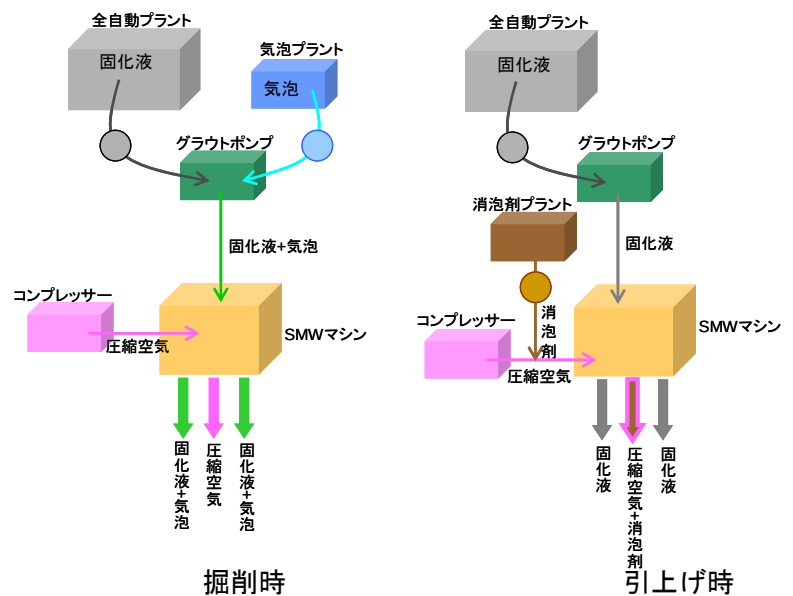


図-9 プラントフロー

今回，図-8,9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業廃棄物扱いとなる。よって，圧送ラインを分けることで，無駄な廃棄物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SMW工の施工状況を示す。

3. 4 試験工事結果

(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-10 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る。



写真-3 施工状況

(2)ソイルセメント壁強度

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により確認した（写真-4、表-4 参照）。計測結果を図-11、12 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る。

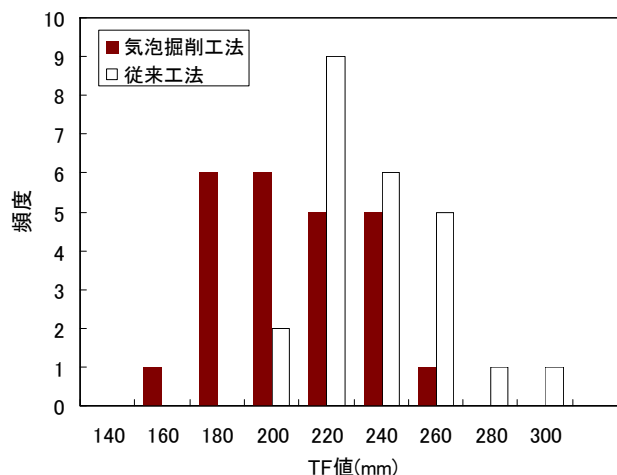


図-10 流動性の確認結果

(3)芯材挿入性

今回の施工箇所においては、図-13 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。ソイルセメント壁の凝結開始を勘案すると、後行エレメント造成完了後、迅速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した。図-14 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



写真-4 低強度用シュミットハンマ

表-4 低強度用シュミットハンマ仕様

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

- ・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。

(4)排泥低減量

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 1.0m³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。

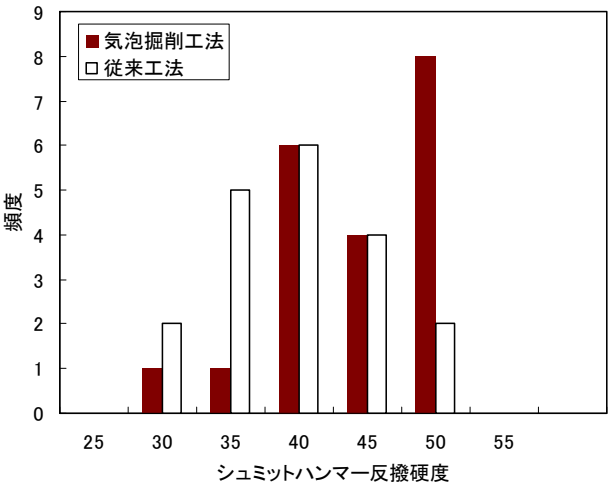


図-11 改良強度確認結果（埋土層）

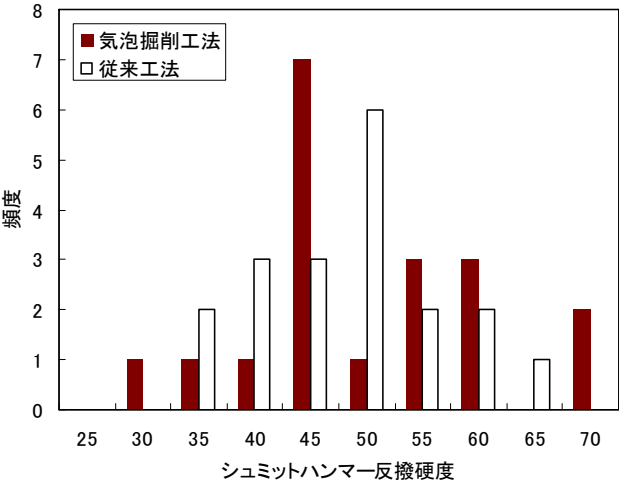


図-12 改良強度確認結果（細砂層）

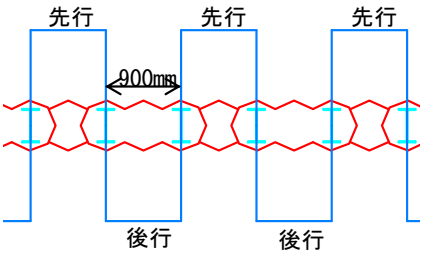


図-13 芯材挿入位置

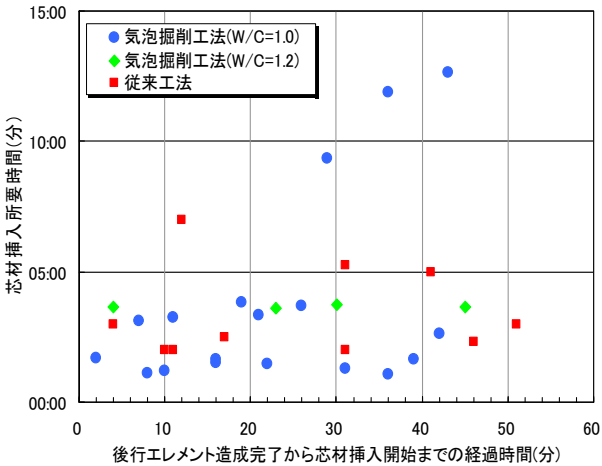


図-14 芯材挿入所要時間

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^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

4. 実施工への適用

都内の集合住宅建設工事の SMW 工において、本工法を採用した。施工範囲は、図-15 の赤枠部分であり、5570.8 m^2 を本工法で施工した。施工期間は、2012.年 8 月～10 月である。当該現場の山留め杭の仕様を表-6 に示す。

4. 1 対象土質

改良長は、施工盤から 35.5m であり、改良対象土質は、GL-15.0m までが粘性土層、GL-15.0～35.5m までが主に砂質土層であり、GL-30.0～32.0m 付近に $N > 50$ の砂礫層が介在している。表-7 に粘性土層および砂質土層の物理特性を示す。

4. 2 配合設計

当初配合（SMW 工法）を表-8 に示す。W/C が 220% で注入量が多い。他現場ではあるが、前述の試験工事の実績データを参考にして、気泡添加率、セメント添加量および W/C を変化させて、配合試験を実施した。決定した配合を表-9 に示す。気泡添気泡添加の効果により、W/C は 150% に低減することができ、更に、セメント添加量も当初配合に比べて 50～100 kg/m^3 低減できた。セメントスラリー注入量（対象土 1.0 m^3 あたり）は、当初

配合に対して、粘性土層で約 40%、砂質土層で約 60%低減した。

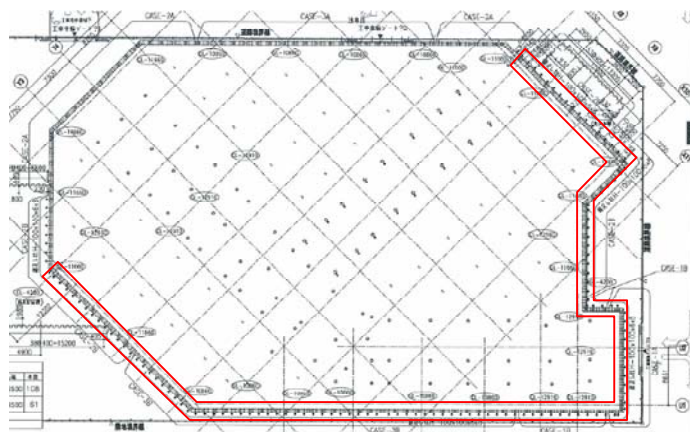


図-15 施工範囲平面図（赤枠が施工範囲）

表-8 従来工法標準配合（改良対象土 1.0m³あたり）

対象土	セメント(kg)	水(ℓ)	ベントナイト(kg)
粘性土	250	550	15
砂質土	250	550	15

表-6 柱列式ソイルセメント壁の仕様

施工条件	仕様
改良長（ソイル長）	37m（上段）、35.5m（下段）
ソイルセメント杭径	φ 650mm
芯材ピッチ	450mm、675mm
芯材挿入長	14.5、15.0、15.5、16.0、17.5m
施工見つけ面積	9260.28m ²
先行削孔	有り、@900mm
オーガー軸数	5軸オーガー

表-7 改良対象土の物理特性一覧

試料名称	粘性土層	砂質土層
湿潤密度 ρ_t g/cm ³	1.600 ~ 1.830	1.806 ~ 1.871
乾燥密度 ρ_d g/cm ³	0.940 ~ 1.375	1.336 ~ 1.529
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.589 ~ 2.963	2.663 ~ 2.777
自然含水比 w_n %	24.7 ~ 73.1	19.9 ~ 37.7
間隙比 e	1.012 ~ 1.866	0.816 ~ 1.007
飽和度 S_r %	88.0 ~ 101.3	65.8 ~ 97.8
細粒含有率 F_c %	9.7 ~ 99.4	5.9 ~ 20.4
液性限界 w_L %	66.5	NP
塑性限界 w_P %	28.7	NP
塑性指数 I_P	37.8	NP
地盤材料の分類名	砂質粘性土	粘性土まじり砂
分類記号	(CsS)	(S-Cs)

表-9 気泡掘削工法標準配合（改良対象土 1.0m³あたり）

対象土	セメント(kg/m ³)	水(ℓ/m ³)	気泡(ℓ/m ³)	消泡剤原液(ℓ/m ³)
粘性土	200	300	431	0.324
砂質土	150	225	273	0.205

4. 3 施工手順

施工手順は、基本的に前述の試験工事と同じである。写真-5に施工状況を示す。5軸オーガーであるため、掘削時には両端および中央の3本から固化液および気泡を、残り2本からはエアを注入した。一方、引き抜き時には両端および中央の3本から固化液を、残り2本からはエアと消泡剤を注入した。



写真-5 施工状況（実施工 5軸オーガー）

4. 4 実施工結果

材料の使用量はほぼ計画どおりであり、施工歩掛りも従来工法と同等であった。本工法は、使用材料および使用機械に若干の追加は生じるが、ソイルセメント壁の造成手順は従来工法と変わらないため、工程に与える影響はほとんどない。

(1) ソイルセメント壁強度

ソイルセメント壁造成中に採取したウェットサンプリング供試体の一軸圧縮強度試験結果を図-16に示す。28日強度において、設計基準強度 $\sigma_{28}=500\text{kN/m}^2$ を満足している。写真-6に、山留め掘削時のソイルセメント壁の写真を示す。目視レベルではあるが、従来工法と同等の改良品質であることを確認した。

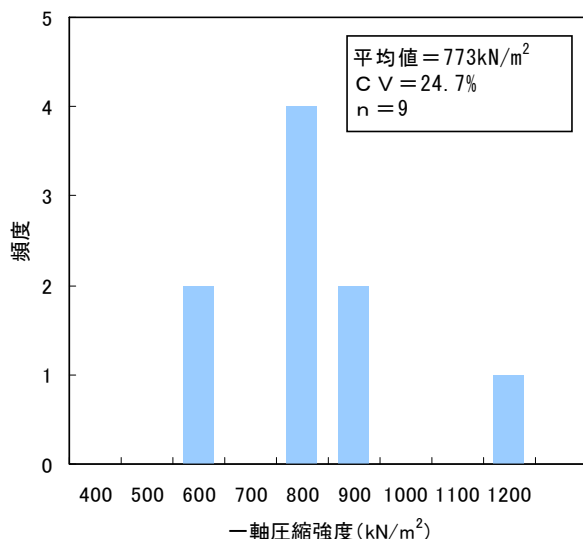


図-16 一軸圧縮強度試験結果



写真-6 ソイルセメント壁

(2) 排泥量低減

気泡掘削工法の実施工における泥土発生率は、表-10 に示すように 31.2(%) であった。泥土発生率(%)とは、造成対象土量（ここでは、3309m³）に対する泥土発生量（ここでは、1034m³）の体積比を 100 倍したものである。

一方、従来工法については、SMW 連続壁標準積算資料を参考に算出した⁵⁾。その結果、同等の施工対象土量において泥土発生量 $V=2907\text{m}^3$ となった。これより、従来工法に比べて約 60%程度排泥を低減することができた。

表-10 気泡掘削工法の泥土発生率

施工数量 (m²)	対象土量 (m³)	注入率 (%)	W/C (%)	泥土発生量 (m³)	泥土発生率 (%)
5570.8	3309.0	32.6	150	1034	31.2

5. まとめ

今回、SMW 工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 ソイルセメント壁の品質（強度）、芯材挿入性能および施工歩掛りは、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) 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. 64No. 3, 505-518. 2008. 7
- 4) TRD 工法技術資料, TRD 工法協会
- 5) SMW 連続壁標準積算資料（設計・施工・積算編） SMW 協会