

急速ソイルセメント地中連続壁工法「AWARD-Para 工法」の開発

気泡掘削工法を併用したソイルセメント地中連続壁の急速施工技術に関する研究

DEVELOPMENT OF RAPID SOIL CEMENT UNDERGROUND DIAPHRAGM WALL METHOD “AWARD-Para METHOD”

Research of rapid construction technique underground diaphragm walls of soil cement using the air-foam drilling work method

田中 孝*1, 下坂 賢二*2, 田中 宏典*3, 若竹 亮*4

Takashi TANAKA, Kenji SHIMOSAKA, Hirofumi TANAKA and Ryo WAKATAKE

The method of constructing a soil cement-based diaphragm wall underground, because of its versatility, has been used widely for open excavation works. Since the soil cement mixture must have high fluidity, the amount of waste mud generated is 90 to 100% of the underground diaphragm wall volume to be created. Moreover, the construction machine used for the soil cement underground continuous wall is a large special machine, so the cost of machinery and equipment is high. In addition, since the land on the surface must be occupied for an extended period, it is desirable to shorten the construction period.

In response to these issues, the authors developed and applied the AWARD-Para method (AWARD-Parallel Processing) to reduce the environmental impact and significantly shorten the work period by utilizing the features of the air-foam drilling method and a practical construction method.

In this report, an overview and features of the construction method are explained, and the response to development issues and the test construction conducted to verify the effectiveness of the construction method are described.

Keywords : Soil cement, Underground diaphragm wall, Air-foam, Temporary solidified soil, Solidification Process dedicated machine

Work period shortening, Environmental load reduction

ソイルセメント, 地中連続壁, 気泡, 仮固化工土, 固化工程専用機, 工期短縮, 環境負荷低減

1. はじめに

道路や鉄道の開削トンネルやビルの地下部の工事等で広く用いられるソイルセメント地中連続壁の構築では柱列式, 等厚式の原位置混合攪拌方式が汎用性の高い工法として知られている。これらの工法は, 掘削工程で施工機の先端部から固化材スラリーを添加しつつ掘削・混練により固化材スラリー混合土を造成する。また, 固化工程においても固化材スラリーを添加・混練し, 均質なソイルセメント壁体を造成し, その中に芯材を建て込む。この際, 均質, かつ, 芯材を挿入するためにソイルセメント混合土に高い流動性を持たせる必要がある。そのため, 例えば造成地盤が粘性土の場合, 造成する地中連続壁体積の 90~100%もの固化材スラリーを添加し, この体積に相当する排泥土量が発生するため環境負荷が大きく, この低減が大きな課題であった。一方, ソイルセメント地中連続壁に使用する施工機械はクローラタイプの三点式杭打機に多軸オーガ攪拌方式の掘削機を装着した大型の特殊機械である。市街地で施工する場合, 周辺住民や歩行者, ビルの利用者に対して威圧感を与える他, 工事に伴う騒音・振動の発生, 地上用地の長期占用により周辺環境に与える影響が大きく, 工事期間の短縮が望まれていた。

著者らは, これらの課題に対し, 掘削時に気泡を加えて気泡混合土を造成し, さらに気泡混合土に固化材と消泡剤を添加・混練したソイルセメントの地中構造物を構築する気泡掘削工法の特徴を活かし, かつ, 合理的な施工法を行うことにより, 環境負荷の低減と大幅な工期短縮を実現する AWARD-Para 工法 (AWARD-Parallel Processing Method) を早稲田大学と気泡工法研究会にて共同開発し

た。本報告では, 工法概要および特徴を示すと共に, 開発における課題への対応, さらに本工法の有効性を検証するために実施した試験施工について述べる。

2. 工法の概要

2.1 気泡掘削工法の概要

気泡掘削工法は, 気泡の特徴を利用し地盤を掘削する工法である。土と気泡を混合した気泡混合土 (気泡安定液) (図 1, 図 2 参照) は流動性, 止水性, 溝壁の安定性, 固化材の混合性に優れ, 品質と施工性の向上が図れる。従来工法では施工が難しい地盤でも対応が可能な場合もある。また, 気泡を消泡させることにより排泥土量が大幅に削減できるため環境負荷低減が図れ, さらに施工サイクルの短縮や固化材量の削減が可能のため, コスト削減も期待できる。なお, 気泡掘削工法は, ソイルセメント地中連続壁の他, 深層混合処理の地盤改良に適用し実用化されている。



図1 プレフォーミング気泡



図2 気泡混合土

*1 戸田建設株式会社技術開発センター マネージャー

*2 戸田建設株式会社技術開発センター 主管

*3 戸田建設株式会社技術開発センター 主管

*4 戸田建設株式会社技術開発センター 係員

Manager, Research and Development Center, TODA CORPORATION
Section chief, Research and Development Center, TODA CORPORATION
Section sub-chief, Research and Development Center, TODA CORPORATION
Member, Research and Development Center, TODA CORPORATION

(1) 気泡掘削工法の特徴

1) ベアリング効果

使用する気泡は、80~120 μ mの微細な粒径であり、図3に示すように掘削時に土粒子間に気泡が混入してベアリングの役割を果たし、流動性が増加する。その結果、加水量を低減しても高い流動性が得られる。

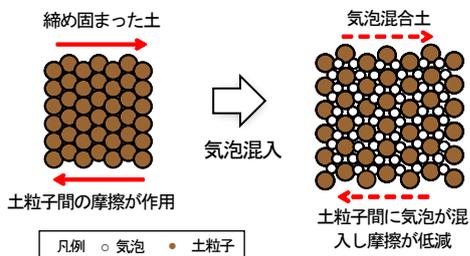


図3 ベアリング効果概念図

2) 不飽和層形成

掘削した溝壁面に、微細な気泡が貫入して不飽和層を迅速に形成し、不透水層が造成されて、溝壁に内圧が有効に作用するため、溝壁の安定性と止水性が確保される。

3) 固化材量の低減

気泡の添加により少ない加水量で高い流動性が得られるため、固化材スラリーの水セメント比 (W/C) が抑えられ、少ない固化材量でも均質で所定の強度を有する壁体の造成が可能となる。

4) 排泥土量の削減

気泡混合土に消泡剤を添加すると、気泡は集積・浮上して消泡し減容化できる (図4 参照)。

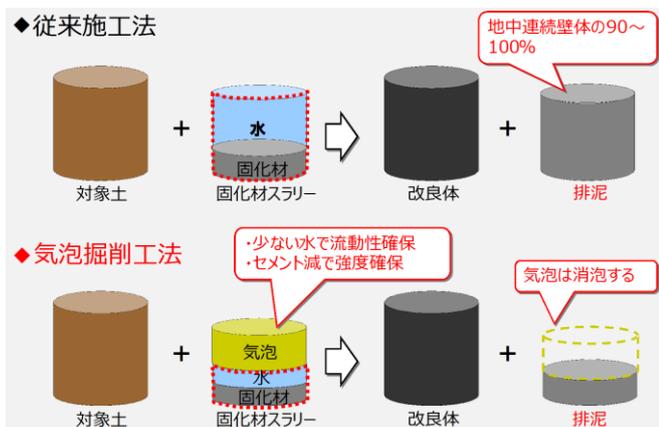


図4 排泥減容化メカニズム図

(2) 気泡混合土の生成

気泡混合土は起泡剤原液 (合成界面活性剤) を水により約 20 倍に希釈後、気泡発生装置にて 25 倍に起泡させた気泡を掘削土に添加・混合攪拌して生成する。

(3) 気泡混合土の管理

気泡混合土の管理は、含水比と密度および流動性によって管理される。掘削土の含水比が小さい場合は気泡が消泡し流動性が確保で

きなくなり、含水比が大きい場合は気泡と土が分離しベアリング効果が期待できなくなる。一方、気泡添加量が大きい場合は密度が低下し溝壁の安定性が損なわれる。また、流動性はテーブルフロー値 (TF 値) によって管理されるが、TF 値は含水比と気泡添加量によって変動し、所定の値を下回ると品質や施工性に影響を及ぼす。これらを踏まえ気泡混合土は、事前に配合試験を実施し、土質性状に応じた含水比、密度および流動性の適正範囲を設定し管理することになる。

2.2 AWARD-Para 工法の概要および特徴

AWARD-Para 工法は、気泡掘削工法の特徴を活かした新たな施工法を具現化し、工期短縮と環境負荷低減を実現したソイルセメント地中連続壁の急速施工法である。

工期短縮のために、従来のソイルセメント地中連続壁の施工方法を見直した。従来の施工方法では、掘削・固化材スラリーの添加・混練の掘削工程、引上げ・固化材スラリーの添加・混練の固化工程および芯材建込みの芯材工程を一連作業として繰り返し施工していたが、これら3つの工程を分離し並行的な作業とすることで、工期が大幅に短縮できる。また、気泡掘削工法を併用することで、品質が確保できるほか、固化材量と排泥土量が削減できる。

本工法の概要を図5に示す。掘削工程は従来のソイルセメント地中連続壁で用いられている施工機械を使用して低強度の仮固化土を造成し、固化工程では新たに開発した固化工程専用機を用いて、掘削工程より1日遅れで施工し、固化材スラリーと消泡剤を注入して混合攪拌する。芯材工程は固化工程終了後直ちに芯材を挿入することになる。

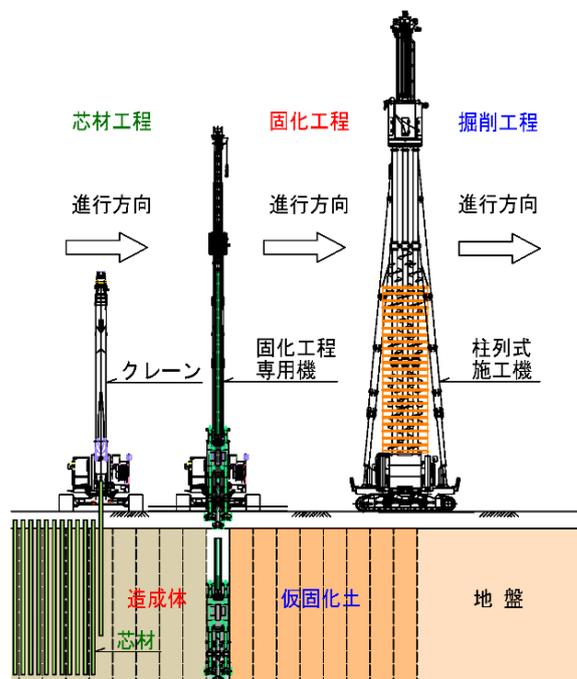


図5 AWARD-Para 工法概要図

以下に AWARD-Para 工法の特徴を示す。

(1) 施工機械の稼働率向上

従来の地中連続壁工法では 1 台の施工機械で掘削・固化工程でソイルセメント壁を造成し、その後 H 形鋼等の芯材を建込む芯材工程を 1 サイクルとして実施し、次のパネルの施工を行っていた。深さ 20m 程度の土留めでは、およそ午前と午後各 2 パネル、計 4 パネル程度の施工となる。この場合、午前、午後とも施工時間に余裕があったとしても 1 サイクルを施工するために必要な時間が確保できなければ、時間を延長しない限り施工数量を増やすことはできない。一方、AWARD-Para 工法では 3 つ工程を分離することで、各工程の施工サイクル時間が短くなり、かつ、3 の工程を並行作業とするため、各工程が午前、午後の施工可能時間にはほぼ余すことなく割り付けられるようになり、時間の有効利用が図られ、施工機械の稼働率が向上する (図 6 参照)。

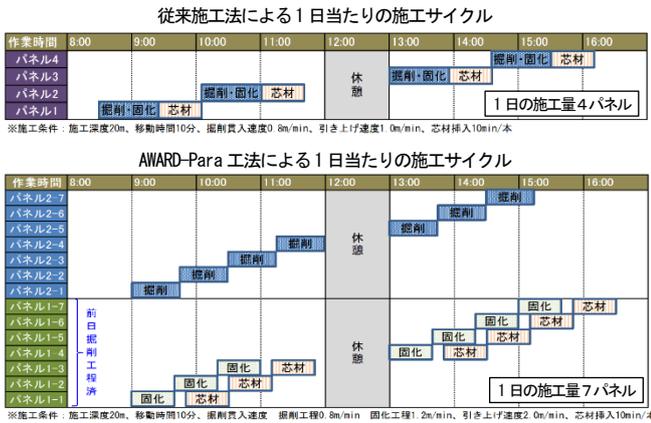


図 6 施工サイクル比較図

(2) パネル間ラップ長の低減

柱列式ソイルセメント地中連続壁工法では 3 軸もしくは 5 軸タイプの施工機械が多く用いられている。AWARD-Para 工法では各工程の日施工量のバランスを考慮する必要がある。固化工程専用機は 3 軸タイプの施工機械であるため、掘削工程で使用する施工機械は 3 軸タイプの SMW 機を想定している。

パネル間のラップは、従来の施工法の場合、壁体の連続性を確保するために 3 軸のうち 1 軸を完全ラップさせたパネル配置 (完全ラップ方式) で施工する。これに対して AWARD-Para 工法のパネル配置は、軸芯の間隔が 450mm になるように 3 軸の端部を部分的にラップさせた半接円方式とする (図 7 参照)。これは掘削工程と固化工程の分離により、同じ孔の位置を 2 回掘削・混練することになり、施工位置を 1 軸分移動させることで、掘削工程の半接円箇所

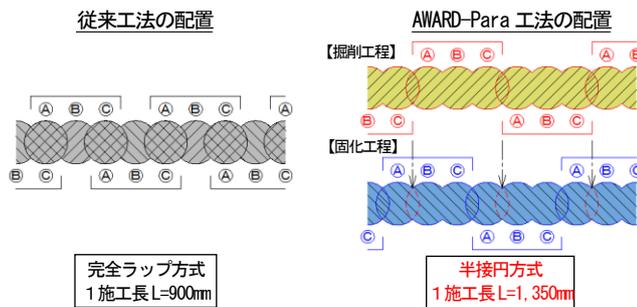


図 7 パネル配置比較図

を固化工程の 3 軸でオーバーラップさせて施工することで、壁体の連続性が確保される。よって、パネル間のラップ長の低減が可能となる。

(3) 工期短縮と施工品質の確保

掘削・固化工程を分離することで施工速がを向上しサイクルタイムの短縮も可能となる。同じ孔を掘削と固化工程で 2 回の掘削・混練で混合攪拌性が高まり、また、掘削工程時の気泡添加によるベアリング効果もあるため、掘削・貫入着底後の引き上げ速度や固化工程の貫入速度の高速化を図っても、従来と同等以上の攪拌性が得られる。

前記のように施工機械の稼働率の向上、パネル間ラップ長の低減および施工の高速化によって、従来の施工法に比べ、最大 1/2 程度の工期短縮が可能となる。また、半接円方式による杭配置や高速施工においても同等の品質が得られることになる。

(4) 固化材量と排泥土量の削減

AWARD-Para 工法では気泡掘削工法の併用により、加水量の低減が可能となり固化材量の削減、および固化材スラリーの注用量を低減できる。また、固化工程時の消泡効果によって、排泥土量が減容化する。施工条件によって異なるが、固化材添加量と排泥土量は、従来の施工法に比べて概ね 30% 程度の削減が期待できる。

3. 技術課題と対応

3.1 仮固土

原位置土に気泡を添加し混合攪拌した気泡混合土は、非硬化性で高い流動性が得られ、かつ、地下水位以下の粗粒層でも溝壁の安定性・止水性が持続的に確保できる。開発当初はこの特徴を活かし、掘削工程から固化工程に移行するまでの間は気泡混合土を安定液として掘削工程を連続施工し、続いて固化工程を施工することとした。しかし、固化工程専用機先端から固化材スラリーを注入しながら掘削貫入する際に、消泡剤を添加した固化材スラリーは、1 工程の造成範囲に留まらず流動性が高い隣接部の気泡混合土に拡散することが明らかとなった。これにより、隣接部の気泡混合土は消泡して土砂が沈降し、さらに固化材スラリーの混入により凝結が生じるなど、気泡混合土が劣化することになる。一方、1 工程の造成範囲に固化材スラリーが留まらないため、造成体が不均質で所定の強度発現が得られないなど品質低下が懸念された (図 8 参照)。

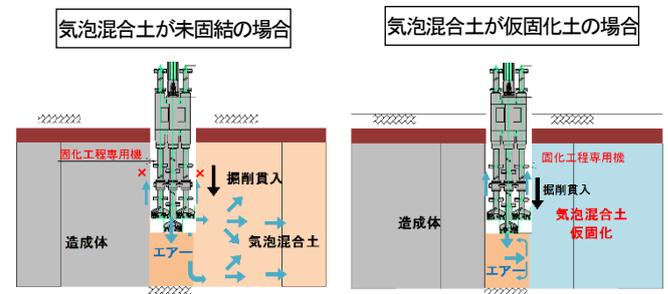


図 8 気泡混合土の仮固土

溝壁の持続的な安定性および造成体品質を確保する対策として掘削工程時に貧配合した固化材スラリーを添加して、気泡混合土を

低強度に仮固化させることにした。気泡混合土の仮固化によって、掘削工程から固化工程への移行期間と固化工程施工時の溝壁の安定性が確保できる他、固化材スラリーの逸脱防止や固化工程専用機の姿勢制御にも寄与することになる。

3.2 固化工程専用機

ソイルセメント地中連続壁工法の3つの施工工程を分離し並行作業とするためには、固化工程の専用機を開発する必要があった。従来の施工法に比べ施工機械が1台増加することから、用地や経済性を踏まえてコンパクトで安価な固化工程専用機の開発を目指した。開発に当たって、固化工程の施工機械として具備すべき以下の諸条件を考慮して杭打ち機や地盤改良機など、既存の機械装置を活用し組み合わせた施工機械とすることにした。

- ①仮固化土に対する掘削性能
- ②施工精度（掘削工程使用機と同等）
- ③掘削、貫入抵抗に対する姿勢制御
- ④施工速度（掘削工程と同等以上）
- ⑤安価な機械器具損料（コスト縮減）

AWARD-Para 工法で使用する固化工程専用機は、当初、大深度への適用を考えクローラークレーンに特殊先端多軸混練掘削機（以下、先端多軸掘削機、と呼ぶ）を吊り下げた施工機械とした。先端多軸掘削機の頂部に油圧モーターを装着し、かつ、掘削時の反力を得るために3tonのカウンターウェイトを装備した。しかし、掘削貫入時のエアブローによる浮力や先端多軸掘削機と溝壁との摩擦等も作用して貫入力不足が生じ十分な掘削性能が得られなかった。また、掘削開始時の位置合わせが容易ではない他、攪拌翼の回転反力によるねじれ、溝壁への接触による傾きなども生じた。

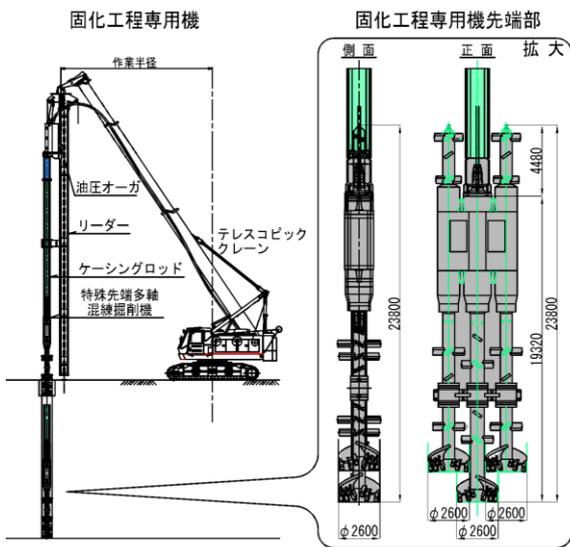


図9 固化工程専用機概要図

これら掘削性能や姿勢制御等の課題を踏まえて固化工程専用機を改良することにした。油圧式クレーンをベースマシンに、ブーム先端に油圧モーターを備えた懸垂式のリーダーを装着するアボロン工法と先端多軸掘削機を組み合わせることで固化工程専用機とした（図9

参照）。駆動力はアボロン工法の油圧モーターとすることで、地盤に応じて選択が可能となる。また、固化材スラリーやエアは油圧モーターと先端多軸掘削機と繋ぐケーシングロッド内を通すことで送液・送気用の配管を外部に別途設ける必要がなくなる。さらに、施工時はリーダーがガイドとなり、かつ回転を抑制するため鉛直性と姿勢が保持できる。

本掘削装置は汎用性が高く、施工機械の組立・解体が簡易であるため、三点式杭打ち機をベースとする従来の施工機械に比べ、小型で作業性が良く、機械器具損料を低く抑えることが可能となった。

4. 試験施工による検証

4.1 試験施工概要

試験施工では柱列式ソイルセメント地中連続壁を対象に、フィールドにて掘削、固化、芯材の各工程を施工しAWARD-Para 工法の有効性を検証した。なお、本来掘削工程は従来の施工機械（SMW 機）を用いて施工することを原則とするが、本試験施工の主目的が固化工程の施工性と品質を確認すること、原地盤に対する掘削性能が確認できることから固化工程専用機にて実施した。施工手順としては、気泡工法を併用して掘削工程を先行施工して仮固化させた気泡混合土を造成し、翌日の固化工程で固化材スラリーを注入してソイルセメント壁を造成し、芯材工程を実施した。仮固化土と最終造成体の配合は事前に試料土を採取し、配合試験を実施して決定した。

(1) 施工概要

試験施工の概要を以下に示す。

- 施工深度：GL-1.5～10m（造成高 H=8.5m）
- 施工数量：掘削工程 φ650mm×3本 4パネル
固化工程 φ650mm×3本 3パネル
- 杭配置：半接円方式（図10参照）
- 施工速度：固化工程貫入時 1.2m/min（目標値）
掘削・固化工程引上速度 2.0m/min（目標値）

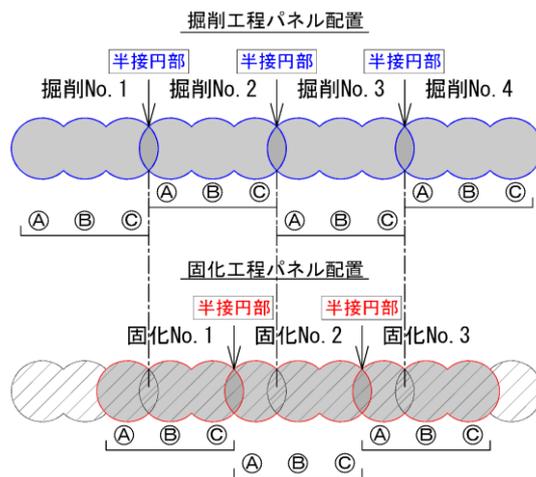


図10 試験施工パネル配置（半接円方式）図

(2) 地盤条件

試験施工の対象土質は図11に示すようにN値が概ね10～30の砂質土で、地下水位はGL-3.7mである。

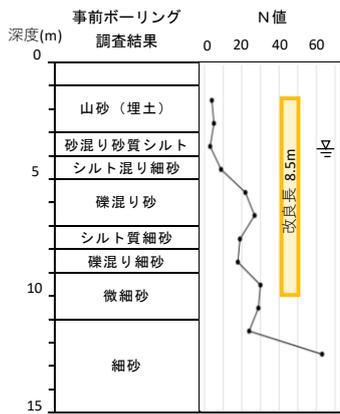


図 11 試験施工地盤条件図

表 1 性能確認事項一覧表

No.	掘削工程確認事項
1	掘削・引上性能 (原位置土)
2	気泡混合土の性状
3	仮固化土の強度
No.	固化工程確認事項
1	掘削・引上性能 (仮固化土)
2	鉛直精度
3	ソイルセメント性状
4	芯材挿入性
5	造成体の均質性
6	壁体の連続性
7	造成体強度
8	溝壁の安定性
9	排泥土量

4.2 事前配合試験

(1) 試料土

試験施工位置で事前に採取した試料土の性状を表2に示す。なお、試験施工の配合試験は、採取した試料土を十分混合攪拌し均質な混合試料土(シルト質細砂)にして実施している。

表 2 調整試料土の物性

土質名称	シルト質細砂
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.685
含水比 w_n (%)	20.8
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	2.02
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.672
飽和度 S_r (%)	92.2

(3) 性能確認

1) 性能確認事項

掘削工程と固化工程の施工における確認事項を表1に示す。掘削工程では、固化工程専用機の原地盤での掘削・引上性能、気泡混合土の性状、仮固化土の強度(配合の妥当性)を確認する。固化工程では、仮固化土に対する掘削・引上性能(掘削・引上速度)、造成体の品質としてソイルセメントの性状と混合攪拌性(高速施工における品質)、造成体の強度(配合の妥当性)、半接円方式による壁体の連続性(施工精度)、溝壁の安定性(仮固化土の効果)、排泥土量(気泡掘削工法の効果)を確認する。

芯材工程では H 形鋼 (H-350×350) を用いて挿入性を確認する。

2) 確認試験

上記確認事項の内、施工機械の性能は計測装置、掘削土の性状はフレッシュサンプリングにより、強度および壁体の連続性、溝壁の安定性はコアサンプリングによって確認する。性状、強度に関する試験は下記のとおりである。

混合攪拌性：ふるい分け試験

掘削土性状：密度試験，含水比試験，テーブルフロー試験

仮固化土，造成体強度：硬度計，一軸圧縮試験

(4) 使用機械

固化工程専用機の仕様を下記に示す。

ベースマシン：50t テレスコピッククレーン

油圧モーター：トルク 最大 61.6kN・m

リーダー：□330×330，L=17.5m

ケーシングロッド：φ460mm，L=8.0m

先端多軸掘削機：φ650mm×3本，H=5950mm，約 7ton

試験施工時の設備配置を図12に示す。

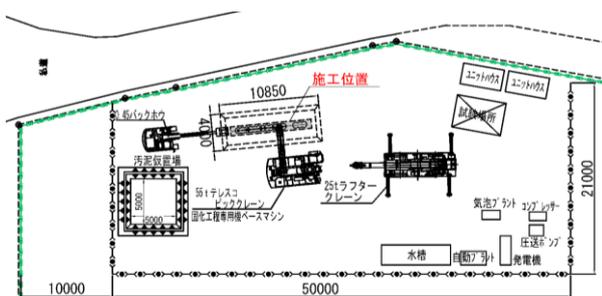


図 12 試験施工設備配置図

(2) 使用材料

配合試験は試験施工と同様に以下の材料を用いている。

起泡剤：WTM 起泡剤 (主成分 アルキルフェート系界面活性剤)

気泡：起泡剤を 20 倍希釈，起泡装置にて 25 倍に発泡

消泡剤：BFD 消泡剤 (主成分 鉱物系配合物)

固化材：高炉セメント B 種

(3) 配合試験の手順

1) 第 I 混合試験 (仮固化土)

第 I 混合試験は掘削工程で造成する仮固化土の配合試験となる。試料土に固化材スラリーと気泡を添加した気泡混合土の流動性と強度を確認し，施工性と経済性に優位な固化材添加量 (C) と水固化材比 (W/C)，気泡添加率 (Q) を決定する。

配合試験では，固化材スラリーの W/C を仮設定した後，同一 C に対し Q を，または，同一 Q に対して C を，それぞれ 3 ケース程度設定し，気泡混合土の物性値 (湿潤密度 γ_t ，含水比 w)，流動性 (テーブルフロー値 (TF 値)) と材齢に伴う強度 (q_u) の変化を確認する。同様に W/C を変えた場合の物性値，流動性と強度を求める。第 I 混合試験結果から W/C，C，Q および TF 値， q_u との関係性を回帰分析により求め，第 II 混合試験で使用する仮固化土の配合を決定する (図 13 参照)。

なお，強度試験は材齢が短く低強度であるため，山中式土壌硬度計により一軸圧縮強度を推定する。



図 13 第 I 混合試験フロー図

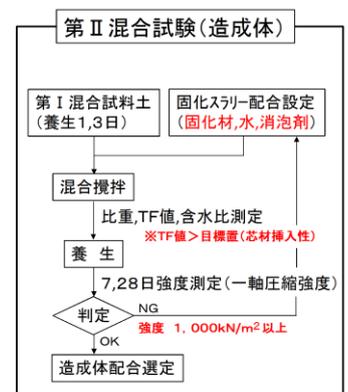


図 14 第 II 混合試験フロー図

2) 第II混合試験 (造成体)

第II混合試験では固化工程が掘削工程から何日後の施工になるかを想定し、仮固化土の材齢を設定する。今回は材齢1日の仮固化土を用いて第II混合試験を実施することにした。粒径10mm以下に粉碎した仮固化土に消泡剤と固化材スラリーを加え混合攪拌直後のソイルセメント(造成体)の物性値と流動性を測定する。強度の確認は、1週と4週強度である。各仮固化土の配合に対して固化材スラリーのW/CとCをそれぞれ2ケース程度設定して第II混合試験を実施する。試験結果より、所定の流動性と強度を満足する配合を決定する(図14参照)。

(4) 要求性能

第I混合試験および第II混合試験求められる仮固化土とソイルセメントの管理目標値を表3に示す。仮固化土の目標値のうち密度は溝壁の安定性、TF値は混合攪拌性、強度は固化工程時の溝壁の安定性と掘削の容易性から設定している。

表3 仮固化土と造成体の管理目標値

項目	第I混合試験 (仮固化土)	第II混合試験 (造成体)
密度 (kN/m ³)	≥1.0	—
テーブルフロー値 (mm) (TF値)	≥130 (混合攪拌直後)	≥160 (混合攪拌直後)
一軸圧縮強度 (kN/m ²)	50~200 (材齢1日)	≥1,000 (材齢28日)

(5) 配合試験結果

1) 第I混合試験 (仮固化土)

第I混合試験は試料土の土質と物性値を考慮してW/CI, CI, Qを表4の範囲で設定した。第I混合試験の結果を表5に示す。

表4 第I混合試験配合設定

水固化材比 W/CI	固化材添加量 CI	気泡添加率 Q
80~160%	50~150kg/m ³	0.25~1.00%

なお、気泡添加率は、試料土の乾燥重量に対する起泡剤の重量百分率である。また、表中の起泡倍率nは気泡混合土の密度から逆算して求めた起泡倍率である。

表5 第I混合試験結果

Case No.	気泡添加率 Q %	固化材添加量 C kg/m ³	水固化材比 W/CI %	気泡倍率 n	第I混合試験結果	
					テーブルフロー値 TF mm	1日圧縮強さ qu1 kN/m ²
S-1	0.91	141.4	80	32	227	—
S-2	0.75	141.4	80	31	221	—
S-3	0.75	104.2	80	44	212	—
S-4	0.50	50.5	80	62	198	—
S-5	0.25	50.5	80	126	188	—
S-6	0.30	50.2	80	76	191	25.0
S-7	0.30	150.5	80	51	214	102.0
S-8	1.00	50.2	80	40	195	4.8
S-9	1.00	150.5	80	69	204	5.4
S-10	0.25	50.2	80	89	188	52.8
S-11	0.25	150.5	80	51	235	134.3
S-12	0.25	100.3	120	58	227	93.8
S-13	0.25	100.3	80	91	207	93.8
S-14	0.25	100.3	160	32	234	80.8

試験ケースのS-1~S-5は予備配合試験であり、S-6~S-14が本試験である。Qが1.00%の場合の強度は目標値を大きく下回る。これは、材齢1日と小さい仮固化土のquに対し、Qの影響が大きいことを示す。また、CIはquと、W/CIはTF値と相関性が高いことがわかる。また、添加時に起泡倍率と気泡添加率が同一であっても混合攪拌によって起泡倍率(逆算起泡倍率n)が増大した場合、quへ影響が大きくなりquは低下する。試験結果を回帰分析して求めたTF値と強度に関する回帰式を以下示す。

$$TF I = 140 + 1770Q + 0.252CI + 42.3W/CI \quad (1)$$

$$Qu I = 146 - 12500Q + 0.453CI - 32.8W/CI - 0.675n \quad (2)$$

2) 第II混合試験 (造成体)

第II混合試験で用いる仮固化土の配合は、第I混合試験結果の流動性と強度より表6の値とした。

表6 第II混合試験仮固化土配合設定

水固化材比 W/CI	固化材添加量 CI	気泡添加率 Q
80%	50, 150kg/m ³	0.3, 1.00%

また、造成体となるソイルセメントの配合は、仮固化土の配合と材齢、および混合攪拌直後の流動性(芯材挿入性)と最終強度を想定して表7の値に設定した。なお、消泡剤の添加量は起泡剤と同量である。

表7 第II混合試験造成体配合設定

水固化材比 W/CII	固化材添加量 CII	消泡剤添加量
120~180%	45, 80kg/m ³	起泡剤と同量

第II混合試験の結果を表8に示す。TF値は第I混合試験のQと総水量(WI+WII)と相関があり、quは固化材総量(CI+CII)およびW/CIIの影響を受けており、仮固化土の材齢が小さいことからquにCIが大きく寄与している。

表8 第II混合試験結果

Case No.	第I混合試験			第II混合試験			テーブル フロー値 TF mm	28日 圧縮強さ qu28 kN/m ²
	気泡添加率 Q %	固化材添加量 C kg/m ³	水固化材比 W/CI %	固化材添加量 C kg/m ³	水固化材比 W/CII %			
S-15-1	0.30	50.2	80	80.0	120	157	1,074	
S-15-2	0.30	50.2	80	80.0	160	174	880	
S-15-3	0.30	50.2	80	45.0	120	130	421	
S-15-4	0.30	50.2	80	45.0	160	145	353	
S-16-1	0.30	150.5	80	80.0	120	178	1,405	
S-16-2	0.30	150.5	80	80.0	180	213	992	
S-16-3	0.30	150.5	80	45.0	120	153	1,361	
S-16-4	0.30	150.5	80	45.0	180	178	915	
S-17-1	1.00	50.2	80	80.0	120	169	796	
S-17-2	1.00	50.2	80	80.0	180	224	521	
S-17-3	1.00	50.2	80	45.0	120	133	464	
S-17-4	1.00	50.2	80	45.0	180	163	339	
S-18-1	1.00	150.5	80	80.0	120	194	1,369	
S-18-2	1.00	150.5	80	80.0	180	239	879	
S-18-3	1.00	150.5	80	45.0	120	165	1,202	
S-18-4	1.00	150.5	80	45.0	180	184	894	

これらの結果を第 I 混合試験と同様に回帰分析し、整理した回帰式を以下に示す。

$$TF II = -110 + 2140Q + 0.231C I + 1.06C II + 55.8W/C II \quad (3)$$

$$Qu II = 762 + 5.46C I - 12900Q + 7.02C II - 541W/C II \quad (4)$$

(4) 試験施工時の基本配合

配合試験結果から試験施工時の基本配合を設定する。基本配合の設定条件を以下に示す。

① 送液量, 送気量

試験施工時に使用する気泡および固化材スラリーのポンプ能力(送液・送気量の下限值)を上回る送量とする。ポンプ能力の下限値を以下に示す。

気泡用ポンプ : 100ℓ/min

スラリー用ポンプ : 50 ℓ/min

② 固化材添加量

掘削・固化工程で使用する固化材の総添加量は、従来工法の標準値 280kg/m³(砂質土)以下とする。

③ 気泡添加率

気泡掘削工法の特長である排泥土量の削減効果を高めるため、Qの最小値を0.5%とする。

④ 消泡率

固化工程では気泡が100%消泡するものとし、配合設定する。上記①～④の設定条件において、仮固化土と造成体の管理目標値を満足する試験施工時の基本配合を表9、表10に示す。

表9 試験施工基本配合(掘削工程)

配合ケース	適用箇所	掘削工程 (仮固化土)			
		気泡添加率 Q	固化材添加量 C	水固化材比 W/C	貫入時注入率
1	掘削No.1～3 固化No.1～2	0.5%	70kg/m ³	120%	100%
2	掘削No.4 固化No.3	0.5%	50kg/m ³	120%	100%

表10 試験施工基本配合(固化工程)

配合ケース	適用箇所	固化工程		
		固化材添加量 C	水固化材比 W/C	貫入時注入率
1	掘削No.1～3 固化No.1～2	80kg/m ³	110%	100%
2	掘削No.4 固化No.3	120kg/m ³	80%	100%

4.3 試験施工結果

本工法の現場適用性の検証を目的にフィールドにて実施した試験施工の状況を図15、試験結果を以下に示す。



図15 フィールド試験施工状況

(1) 掘削工程

1) 掘削・引上性能

掘削工程では、半接円方式の杭配置で気泡と固化材スラリーを注入して地盤を掘削する。4パネルの内No.1～3の3パネルは基本配合のケース1、No.4はケース2とした。掘削・引上時に測定した固化工程専用機の施工速度、トルクおよびオーガの回転速度を表11に示す。

掘削速度は0.64～0.98m/min、引上速度は1.68～2.44m/min、トルクは36～48kN・m、回転速度は12～18rpmであった。引上速度の目標値2.0m/minは概ね満足し、トルクは装備能力の80%以下、回転数は70%以下での施工であった。固化工程専用機は、本装備において砂質土でN値30程度の地盤に適用できることが確認できた。

表11 掘削性能測定結果一覧表(掘削工程)

施工位置	掘削No.1	掘削No.2	掘削No.3	掘削No.4	
施工速度 (m/min)	掘削時平均	0.66	0.98	0.68	0.64
	引抜時平均	1.68	2.44	2.35	2.02
トルク (kN・m)	掘削時平均	37.9	47.9	45.7	46.2
	引抜時平均	36.0	44.9	37.3	45.2
回転速度 (rpm)	掘削時平均	17	12	18	14
	引抜時平均	12	14	12	13

2) 気泡混合土性状

気泡混合土の性状を確認するためパネルNo1とNo.4のGL-5.0mとGL-9.0mで試料採取し、採取直後のγtとTF値を測定した結果を表12に示す。なお、混合攪拌性を確認するために実施したふるい分け試験では採取した試料は全て9.5mmの網目を通過しており、良好な攪拌が確認できた。

表12 気泡混合土性状一覧表(掘削工程)

No.	深度	湿潤密度 γt kN/m ³		テーブルフロー値 TF mm	
		実測値	設計値	実測値	設計値
掘削No.1	GL-5m	1.617	1.54	266	217
	GL-9m	1.534		186	
掘削No.4	GL-5m	1.674	1.54	184	212
	GL-9m	1.453		175	

配合設計値との比較においては、 γ_t は設計値 1.54kN/m^3 に対して実測の平均が 1.57kN/m^3 ($1.45\sim 1.67\text{kN/m}^3$)、TF 値は設計値がおおよそ 215mm に対して平均 203mm ($175\sim 266\text{mm}$) と採取する位置でばらつきが生じたが、概ね設計値に近い値となった。

3) 仮固化土強度

材齢 1 日の仮固化土の強度は、表 13 に示すようにパネル No.1 は $23.2\sim 24.3\text{kN/m}^2$ で設計値の約 50%であったが、No.4 では $28.5\sim 47.3\text{kN/m}^2$ と設計値に近似した強度であった。

表 13 仮固化土強度一覧表 (掘削工程)

No.	深度	圧縮強度 q_u kN/m^2	
		実測値	設計値
掘削No.1	GL-5m	24.3	50.5
	GL-9m	23.2	
掘削No.4	GL-5m	47.3	41.5
	GL-9m	28.5	

(2) 固化工程

1) 掘削・引上性能

固化工程は掘削工程の翌日に施工した。パネル No.1 と No.2 の配合はケース 1、No.3 はケース 2 とした。仮固化を掘削・貫入、引上した際の固化工程専用機の測定結果を表 14 に示す。掘削・貫入速度は目標値 1.20m/min の約 83% (平均 1.00m/min) と下回ったが、引上速度は設計値 2.0m/min の約 96% (平均 1.92m/min) と目標値と同程度の結果であった。掘削・引上時のトルク値は $40\sim 51\text{kN}\cdot\text{m}$ 、回転数は $11\sim 19\text{rpm}$ と掘削工程時と大きな差はなかった。

表 14 掘削性能測定結果一覧表 (固化工程)

施工位置		固化No.1	固化No.2	固化No.3
施工速度 (m/min)	掘削時平均	1.15	0.94	0.90
	引抜時平均	2.21	1.83	1.73
トルク (kN・m)	掘削時平均	50.8	45.1	41.9
	引抜時平均	39.8	45.1	44.8
回転速度 (rpm)	掘削時平均	18	19	15
	引抜時平均	11	13	13

2) 鉛直精度

掘削・固化工程施工時の鉛直精度を表 15 に示す。鉛直精度は掘削前と着底後の先端多軸掘削機もしくはケーシングロッドの偏心とスラントによる傾きを計測した (図 16 参照)。中心位置の偏心量は壁体軸方向が大きく、掘削工程時の精度が影響していると推測され、掘削工程の精度の向上により精度確保は可能と考えられる。傾きは $0\sim 0.5^\circ$ で概ね $1/150\sim 1/200$ の鉛直精度となっている。

3) ソイルセメント性状

消泡剤と固化材スラリーを混合攪拌した直後のソイルセメントの性状は、TF 値が $164\sim 182\text{mm}$ と芯材挿入性を確保できる 160mm 以上であった (図 17 参照)。また、気泡が消泡せずソイルセメント内に留まる気泡残留率は 5%前後であり、従来の気泡掘削工法と同

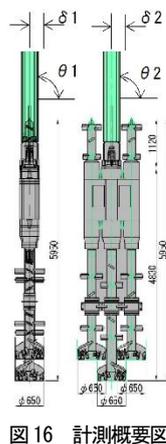


図 16 計測概要図

表 15 鉛直精度計測結果

計測パネル	傾き		偏心量	
	$\theta 1$	$\theta 2$	$\delta 1$	$\delta 2$
掘削No.1	90.0°	90.0°	+6mm	0mm
掘削No.2	89.5°	90.0°	+22mm	+50mm
掘削No.3	89.5°	89.5°	+18mm	+80mm
掘削No.4	90.0°	90.0°	+23mm	+23mm
固化No.1	90.0°	90.0°	+15mm	+63mm
固化No.2	90.0°	89.0°	+5mm	-6mm
固化No.3	90.0°	90.0°	+10mm	+80mm

程度の消泡が生じている。ふるい分け試験では掘削工程時と同様に 9.5mm 網目に残留するダマは確認されなかった。

4) 芯材挿入性

固化工程施工後、H 形鋼を用いて芯材を建て込み挿入性を確認した。掘削した溝壁が保持され、造成したソイルセメントが芯材挿入に適した流動性を有していることが確認できた。

5) コアサンプリング結果

コアサンプリングは、固化工程施工時における溝壁の安定性、半接円部における壁体の連続性および配合による強度の違いを確認するために実施した。コアサンプリングの位置を図 17 に示す。

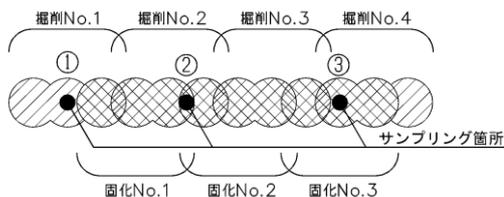


図 17 コアサンプリング位置図

a) 造成体の均質性

コアボーリングにより採取した造成体について深度方向に約 500mm ピッチで密度を計測した結果を図 18 に示す。密度は深度に関わらず概ね 18kN/m^3 であり、混合攪拌が良好であったと考えられる。

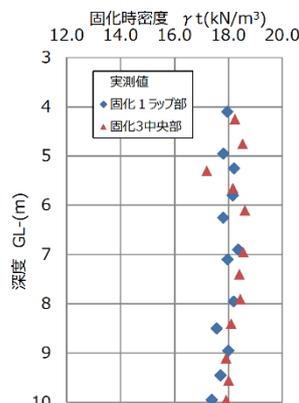


図 18 造成体密度分布図

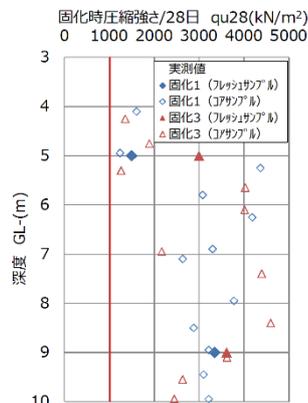


図 19 造成体強度図

b) 造成体強度と壁体の連続性

半接円部およびパネル No.3 位置で採取したコアの強度は、深度方向でばらつきはあるが、目標強度の 1,000kN/m² 以上を満足した(図 19 参照)。固化材添加量を従来工法の 70%以下とした配合においても目標強度を満足したことは、気泡掘削工法の効果と考えられる。また半接円部の壁体の連続性も確保できたと判断できる。

c) 溝壁の安定性

固化工程施工時の注入圧やエアブローに対する仮固化土の溝壁の安定性はパネル No.1 脇でのコアボーリングによって確認した。採取したコアに固化工程施工時の固化材スラリーの混入は観察されず、また土壤硬度計による測定でも混入による強度変化は確認されなかった。これにより仮固化土強度が 25kN/m² 程度であれば溝壁の安定性が保持できると考えられる。

(3) 排泥土量

排泥土量は、掘削工程時と固化工程時にガイド溝に堆積する土量の高さを測定することで把握した。消泡による排泥土量削減効果により、従来工法に比べ約 30%削減(従来 4600/m³→3200/m³)された。

4.4 有効性の検証

今回の試験施工に基づく検証結果を表 16 に示す。AWARD-Para 工法は従来工法に比べ合理的な施工法と高速施工による大幅な工期短縮、気泡掘削工法の併用による固化材量と排泥土量の削減、および環境負荷の低減とコスト縮減が期待できることを試験施工によって確認し、本工法の有効性を検証できた。

表 16 試験施工検証結果一覧表

検証項目	検証結果
固化工程専用機の掘削性能	N 値 30 程度の原地盤、仮固化土に対する掘削性能の保有
工期短縮の実現	固化工程専用機による高速施工検証 (掘削 1.0m/min、引上 1.92m/min)
施工品質の確保	従来と同等の鉛直精度 (1/150~1/200 程度)
	均質なソイルセメント
	半接円ラップ施工による壁体の連続性
	目標強度を上回る強度 (500kN/m ² 以上)
	安定性を保持した仮固化土溝壁
固化材量の削減	約 30% 削減 (従来施工との対比)
排泥土量の削減	約 30% 削減 (従来施工との対比)
コスト縮減	固化材量、排泥土量削減、工期短縮による縮減
環境負荷低減	固化材量、排泥土量削減、工期短縮による縮減

5. おわりに

本工法は気泡掘削工法の優位性をさらに高めるために開発した工法である。ソイルセメント地中連続壁工事に適用でき、大幅な工期短縮と環境負荷低減を実現する汎用性が高い工法である。今後、実現場への適用に向け、試験施工で得られた知見をもとに、技術資料の整備を進めるとともに施工実績を積み重ね、技術の確立を図る予定である。

謝辞

本工法の開発は、早稲田大学創造理工学部赤木寛一教授のご指導のもと気泡工法研究会 AWARD-Para 工法開発プロジェクトチームとの共同研究であり、ここに関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中宏典 他 「AWARD-Para 工法のフィールド試験 (その 1 : 試験概要)」, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会講演概要集 VI-640 2019
- 2) 大山哲也 他 「AWARD-Para 工法のフィールド試験 (その 2 : 配合試験)」, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会講演概要集 VI-641 2019
- 3) 吉野修 他 「AWARD-Para 工法のフィールド試験 (その 3 : 施工性・品質の評価)」, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会講演概要集 VI-642 2019
- 4) 気泡工法研究会 「AWARD-Ccw 工法 技術・積算マニュアル」 2014.4