

## 報文 気泡安定液の開発と適用

近藤 義正\* / 赤木 寛一\*\*

### 1. 目的

地中連続壁工法では溝壁の安定を保ち、掘削土砂の排泥を容易にするためにベントナイト系安定液を使用するが、排泥土量が多く、さらにベントナイトの混入した排泥土の再利用は困難かつ処理費用が高額になることより、それに代わるものが求められていた。

地盤掘削に気泡を利用した例に気泡シールド工法があり、切羽およびチャンバーの掘削土砂に気泡を添加することにより流動性と止水性を得ているが、気泡添加による効果の数値的な検討はなされていない<sup>1)</sup>。掘削土砂に適量の気泡と水を加えた混合体（以下、気泡安定液と称す）を安定液として使用するには、気泡安定液の主要材料が気泡であることにより、溝壁の安定性・流動性などにおいては、その機構の発現メカニズムにベントナイト系安定液とは大きな違いがあるので、その安定化機構・性能に関し詳細な検討が必要である。

気泡安定液は、以上のような既往の知見・技術を踏まえて考案されたものである。気泡安定液の物性は、後述のように添加する気泡量・水量のみならず掘削土砂の粒度、コンシステンシー特性などの影響も強く受けるので、実験手法により土の物性値、気泡添加率および含水比を用いて、安定液として必要な諸物性の数値化を試みた。それに基づいて、安定した施工を行なうための気泡安定液の管理手法を考案し、この管理手法を2カ所のソイルセメント地中連続壁工事に適用し、TRD掘削機による工事実績をもとにその妥当性を検証した。

その結果、気泡安定液により掘削管理が適切に行なえることが実証でき、掘削時の排泥土量はベントナイト系安定液の約1/2～1/3になることを確認した。

### 2. 実験用材料

起泡剤はアルキルサルフェート系界面活性剤で、かつ生分解性に優れたものを使用した。試験用土試料は粗粒土として各種珪砂類を、細粒土としてコンシステンシーの異なる各種粘土類を使用し、適宜粗粒土と細粒土を混合し試料土とした。気泡安定液の作成はプレフォームした気泡と水を試料土に加えて均一に混合し、この混合体を気泡安定液とした。

### 3. 気泡安定液の基本性能<sup>2),3)</sup>

気泡安定液は掘削土砂と気泡および水の混合体であるので、掘削土砂の物性の影響を受ける。そこで、各種の粗粒土と各種の粘土類を試験目的に応じ適宜な割合で混合した土を使用し各種気泡安定液を作成し、安定液として必要な懸濁性能、溝壁の安定性、掘削時の流動性に関わる物性値の実験的評価を行なった。

#### 3.1 安定液の懸濁安定性に関する管理

気泡安定液中の気泡の消泡が生じない最小の含水比を最小含水比 $w_{min}$ とし、気泡安定液中の土や気泡の分離が生じない最大の含水比を分離含水比 $w_{sep}$ とすると、これらは実験式によると以下のように表される。

$$w_{min} = 6.97 + 0.0403P \dots\dots\dots(1)$$

$$w_{sep} = (0.0253S + 1.17Q + 1.07) \frac{100 - P}{100} + w_L \frac{P}{100} \dots\dots(2)$$

ここで、 $P$ ：細粒分含有率（%）、 $S$ ：粗粒分の比表面積（ $m^2/kN$ ）、 $Q$ ：気泡添加率（%）、 $w_L$ ：液性限界（%）である。式(1)、(2)に掘削土砂の物性値（ $P$ 、 $S$ 、 $w_L$ ）を代入すると、最小含水比 $w_{min}$ は定数となり、分離含水比 $w_{sep}$ は気泡添加率と含水比の一次式で表される。気泡安定液の含水比に関する管理限界は $w_{min}$ と $w_{sep}$ の範囲となる。

#### 3.2 溝壁安定性に関する管理

ベントナイト系安定液では溝壁面に形成されたベントナイト泥膜が不透水層の役割を果たす。一方、気泡安定液では気泡が溝壁周辺の原地盤の土粒子の間隙部分に入り込み、不飽和化した土粒子骨格と一体となって、ベントナイト泥膜の数倍の厚さを持った不透水層を形成すると考えられる。掘削安定液の性能を不透水層の形成時間とその形成までの透水量から判断することとし、気泡安定液とベントナイト安定液との比較実験を変水位透水試験方法に準じて行なった。

透水量と時間の関係を調べると、透水量は不透水層が形成されると急激に小さくなるので、この曲線の最大曲率となるまでの時間を不透水層形成時間とした。不透水層形成時間と不透水層形成までの透水量を図-1に示す。凡例のAは気泡安定液、Beはベントナイト安定液、 $q$ は透水量、 $t$ は不透水層形成時間を表す。図-1によると気泡安定液では不透水層形成時間、透水量ともにベントナ

\*KONDŌ Yoshimasa (株)マグマ 代表取締役社長、技術士

\*\*AKAGI Kan-ichi 早稲田大学 理工学部 社会環境工学科 教授、工博

鎌倉市岩瀬1306

東京都新宿区大久保3-4-1

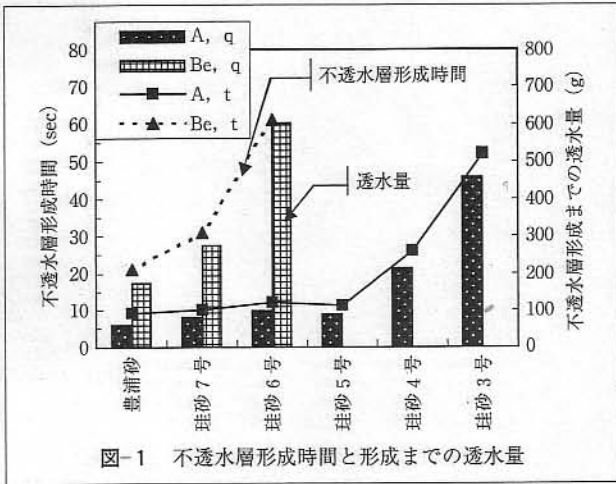


図-1 不透水層形成時間と形成までの透水量

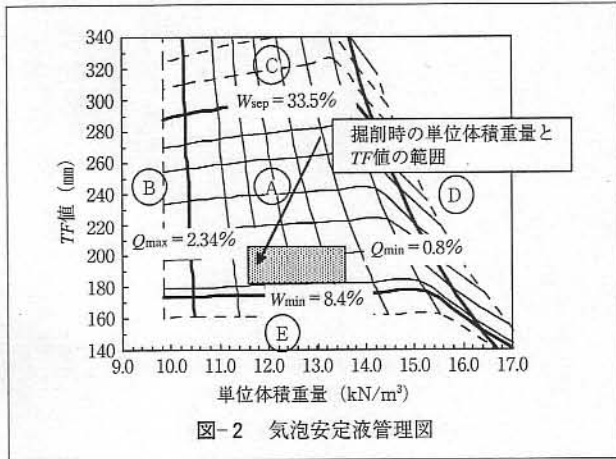


図-2 気泡安定液管理図

イト安定液より小さく、かつ気泡安定液では珪砂3号まで不透水層が形成できるが、ベントナイト安定液では珪砂5号より粗い砂礫層では不透水層が形成できない。

これらの実験結果より、気泡安定液の方がベントナイト安定液より短時間で不透水層を形成し、透水量も少なく、さらにより粗い砂礫層への対応がよいので、不透水層の性能に関し問題はないといえる。

次に、安定液は不透水層を介して安定液圧を溝壁に加え崩壊を防ぐので、気泡安定液の単位体積重量の調整が必要である。溝壁の崩壊を防ぐために安定液の単位体積重量はベントナイト安定液で使用している10.3 (kN/m³) 以上を管理目標とすると、掘削土砂、気泡、間隙水から構成される気泡安定液の単位体積重量  $\gamma_c$  の管理目標は式(3)で表せる。

$$\gamma_c = \frac{100 + w + Q}{\frac{100 - P}{\gamma_{ss}} + \frac{P}{\gamma_{sc}} + \frac{w}{\gamma_w} + \frac{Q}{\gamma_b}} \geq 10.3 \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $\gamma_c$ : 気泡安定液の単位体積重量 (kN/m³),  $\gamma_{ss}$ ,  $\gamma_{sc}$ : 各々粗粒分と細粒分の単位体積重量 (kN/m³),  $\gamma_w$ ,  $\gamma_b$ : 各々水と気泡の単位体積重量 (kN/m³),  $w$ : 含水比 (%) である。式(3)に掘削土砂の物性値 ( $\gamma_{ss}$ ,  $\gamma_{sc}$ ,  $P$ ) および水と気泡の単位体積重量 ( $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma_b = 0.392 \text{ kN/m}^3$ ) を代入し整理すると、気泡添加率  $Q$  と含水比  $w$  の一次不等式になる。この式に含水比として最大値である分離含水比  $w_{sep}$  を入力すると管理限界値で

ある最大気泡添加率  $Q_{max}$  が求められる。

### 3.3 掘削性能に関する管理

流動性を表す指標として、掘削土を含んだ状態の流動性を表す  $TF$  値を使用することにした。 $TF$  値と含水比の関係を各種の試料土を使用し、気泡添加率  $Q$ 、比表面積  $S$ 、細粒分含有率  $P$ 、液性限界  $w_L$  の影響を調べた結果、 $TF$  値は式(4)に示すように含水比  $w$  の一次式で表されることがわかった。掘削土の流動性はTRD掘削機を使用する場合には  $TF$  値は150mm以上とされているので、この値を使用すると管理限界は式(4)で表される。

$$TF = \alpha w + \beta \geq 150 \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $\alpha$ ,  $\beta$ :  $Q$ ,  $S$ ,  $P$ ,  $w_L$  の関数である。 $\alpha$ ,  $\beta$  に掘削土の物性値 ( $P$ ,  $S$ ,  $w_L$ ) を代入し解くと、式(4)が常時成り立つには含水比として最小含水比  $w_{min}$  を入力して求めた最小気泡添加率  $Q_{min}$  以上で管理することが必要であり、 $Q_{min}$  が管理値となる。

### 4. 気泡安定液管理図の作成およびその利用方法

第3章において気泡安定液の管理項目として気泡安定液の単位体積重量と  $TF$  値が必須な項目であり、管理限界が最小含水比  $w_{min}$ 、分離含水比  $w_{sep}$ 、最小気泡添加率  $Q_{min}$  および最大気泡添加率  $Q_{max}$  であることを述べた。

気泡安定液の単位体積重量および  $TF$  値は掘削作業と同時に現場で容易に計測できるので、気泡安定液管理は単位体積重量と  $TF$  値の関係図を作成し、この図中に管理限界である  $w_{min}$ ,  $w_{sep}$ ,  $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$  をプロットした気泡安定液管理図を用いることとした。

気泡安定液管理図の描き方は、表計算ソフトを使用すると以下になる。単位体積重量式(3)および  $TF$  値式(4)は掘削土砂の物性値を入力すると  $Q$  と  $w$  をパラメータとした関数なので、市販の表計算ソフトを利用して、含水比を一定値とし気泡添加率を変化させて  $\gamma_c$  と  $TF$  値を計算し、これらの点を結ぶと等含水比線が描ける。同様にして、 $Q$  を一定値とし  $w$  を変化させて  $\gamma_c$  と  $TF$  値を計算し、これらを結ぶと等気泡添加率線が得られる。このようにして得られた等含水比線、等気泡添加率線の最小含水比  $w_{min}$ 、分離含水比  $w_{sep}$ 、最小添加率  $Q_{min}$ 、最大気泡添加率  $Q_{max}$  で囲まれた内部の領域が気泡安定液で安定した掘削が可能な領域である。

図-2は気泡安定液による掘削工事で使用した気泡安定液管理図である。この図を使用して管理方法の説明を行なうと、管理限界である  $w_{min}$ ,  $w_{sep}$ ,  $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$  に囲まれた①の範囲に気泡安定液の単位体積重量と  $TF$  値がある場合は正常な掘削状態を表し、①から②に近接すると単位体積重量が減少し過ぎないように、気泡添加量を減少させる。①から③に近接すると気泡安定液の分離が生じないように加水量を減少させる。①から④に近接すると  $TF$  値の減少に備え気泡添加量を増加させる。①から⑤に近接すると消泡が起きないように加水量を増やす。以上のように、掘削時の気泡安定液の管理は気泡添加量と加水量を組合わせて行なうことにより達成できる。

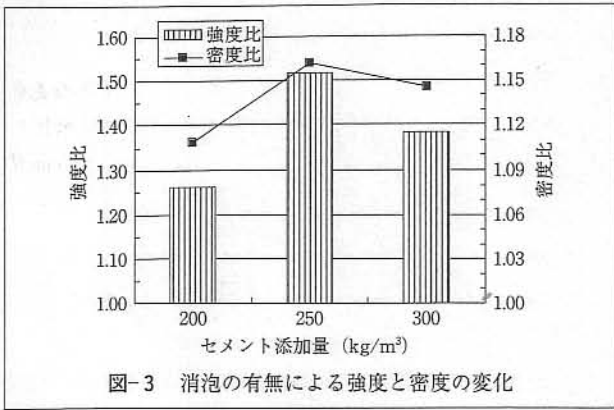


図-3 消泡の有無による強度と密度の変化

### 5. 気泡安定液を含むソイルセメント固化体の力学的特性

気泡安定液に固化材を混合してソイルセメント壁を造成するとき、気泡安定液中の気泡の消泡の有無による固化体の一軸圧縮強度、湿潤密度、透水係数の変化を実験的に調べた。試料土(湿潤密度15.3kN/m³、含水比75.0%)に気泡0.245m³/m³(気泡添加率1.0%に相当)、水312kg/m³を加え、単位体積重量10.3kN/m³、TF値200mmに調整した。この気泡安定液に、固化材として高炉セメント200、250、300kg/m³を水セメント比w/c=80%のセメントミルクとして混合した場合の、強度比(=消泡時の一軸圧縮強度/無消泡時の一軸圧縮強度)および密度比(=消泡時の湿潤密度/無消泡時の湿潤密度)を図-3に示す。なお、消泡させる場合は消泡剤をセメントミルク中に添加し、気泡安定液と混合した。図-3によると強度比は1.25~1.50、密度比は1.11~1.16の範囲に分布し、消泡により明らかに強度および湿潤密度は増加する。

透水係数に関しては消泡前後で各々 $6.01 \times 10^{-7}$ 、 $2.52 \times 10^{-7}$ cm/secであり、さして差異は認められない。これは気泡安定液中の気泡は独立した状態で分布しているので、消泡の有無にかかわらず透水係数に差が出ないものと考えられる。

### 6. 気泡安定液によるソイルセメント地中連続壁の施工

気泡安定液を使用してTRD掘削機によりソイルセメント地中連続壁を施工した2ヵ所の施工実績をもとに、気泡安定液の現場管理手法の妥当性を検証する。

#### 6.1 砂礫地盤層の施工例

本工事は気泡安定液を用いて、TRD掘削機で施工延長80m、掘進深さ26mの施工を行なった。掘削土質は天満砂礫層が約50%であるが、表層から掘削深さまでの各層の土質を層厚に応じて採取し混合した混合土の物性は以下のとおりである。粗粒分、細粒分の土粒子単位体積重量 $\gamma_{ss} = \gamma_{sc} = 26.5$ kN/m³、粗粒分の50%粒径 $D_{50} = 0.0007$ m、細粒分含有率 $P = 34.3\%$ 、液性限界 $w_L = 70\%$

##### 6.1.1 現場管理の手順

現場管理の手順は以下のとおりである。

- 掘削土砂混合土の土質試験により、乾燥密度、粗粒分

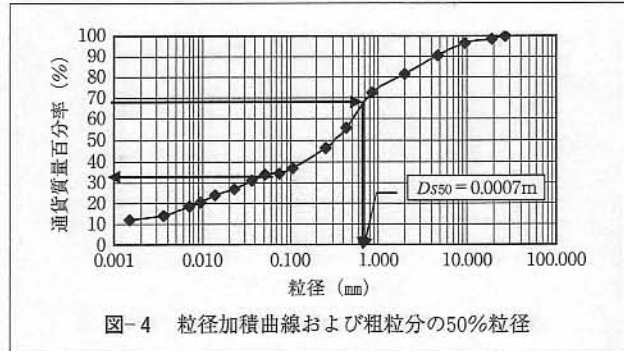


図-4 粒径加積曲線および粗粒分の50%粒径

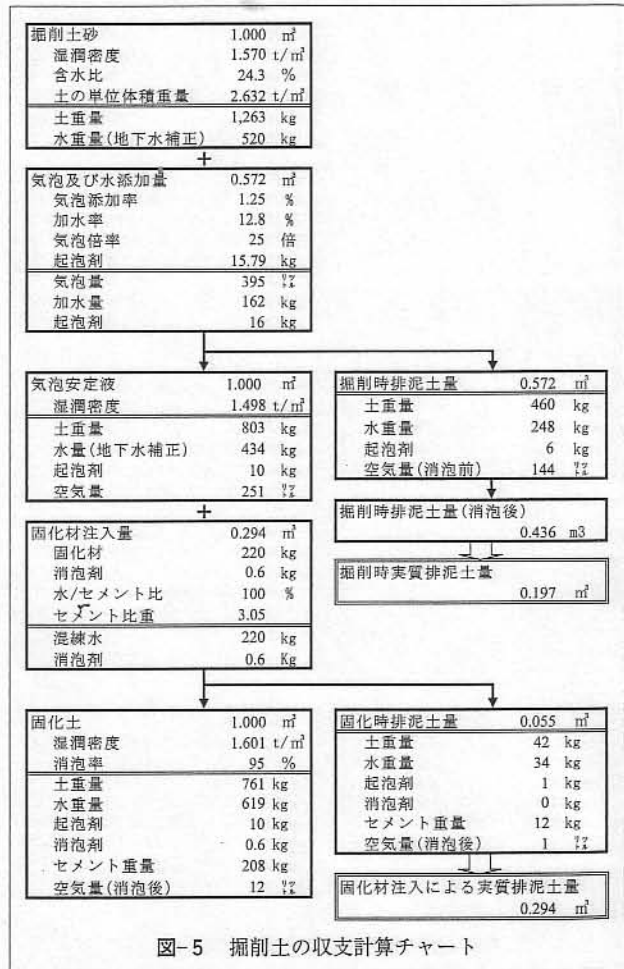


図-5 掘削土の収支計算チャート

と細粒分の土粒子単位体積重量、粗粒分の50%粒径 $D_{50}$ (図-4参照)、細粒分含有率、液性限界を決める。

- 気泡安定液の気泡量、水量を決めるための配合試験を行なう。流動性が最も大きく、排泥土量も少ない気泡添加率1.0%を基本とし、水量を調節し所定の単位体積重量、TF値が得られる気泡量、水量を決める。
- 気泡安定液管理図を描く。

##### 6.1.2 施工実績

掘削土砂の粒度が粗いので、気泡添加率は最も流動状態のよい $Q = 1.0\%$ を下回ると急激に流動抵抗が増える可能性があるため0.25%増して $Q = 1.25\%$ とし、掘削土量1m³当り気泡量0.391m³、加水量は0.162m³とした。現場で使用した気泡安定液管理図を図-2に、掘削に伴う掘削土収支計算チャートを図-5に示す。



表-1 固化土の物性値

測点	一軸圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 (%)	透水係数 (cm/sec)
1	2.10	1.722	30.6	8.99E-08
2	3.12	1.751	32.2	1.63E-08
3	3.62	1.702	38.0	7.15E-08
4	4.53	1.577	36.5	2.05E-08
平均	3.34	1.688	34.3	4.96E-08

固化材：高炉セメント220kg/m<sup>3</sup>，w/c=100%

管理値： $q_u = 0.5\text{N/mm}^2$ 以上， $k = 1.0\text{E}-5\text{ cm/sec}$ 以下

表-2 掘削土 1m<sup>3</sup>当りの排泥土量収支

工区	掘削土量 (m <sup>3</sup> )	添加量 (m <sup>3</sup> )		掘削時排泥土量 (m <sup>3</sup> )
		気泡量	水量	
第1工区	2,829	0.305	0.290	0.250
第2工区	2,059	0.305	0.350	0.321
平均	2,444	0.305	0.320	0.286

## 6.2 強風化凝灰岩層の施工例

本工事は、気泡安定液を用いてTRD掘削機で施工総延長500m、掘削深度(最大)26mを掘削し、ソイルセメント

壁を造成する工事である。表層から掘削深さまでの各層の土質を層厚に応じて採取し混合した混合土の物性は以下のとおりである。

粗粒分と細粒分の土粒子単位体積重量 = 27.1kN/m<sup>3</sup>

粗粒分の50%粒径 = 0.00045m

細粒分含有率 = 57%

液性限界 = 90%

### 6.2.1 施工実績

気泡安定液の単位体積重量 = 10.3kN/m<sup>3</sup>，TF値 = 180mmを得るための配合量として、掘削土 1m<sup>3</sup>に気泡量 0.305m<sup>3</sup> (気泡添加率 = 1.0%に相当)、加水量 0.290m<sup>3</sup>を加えることとした(第2工区では0.350m<sup>3</sup>)。気泡安定液管理図を図-6に示す。施工は最初に決めた気泡量、加水量を変えることなく、気泡安定液の単位体積重量は 11.8~12.8kN/m<sup>3</sup>，TF値は185~200mmで安定した掘削ができた。

掘削時の掘削土量、気泡添加量、加水量並びに掘削時の排泥土量を表-2に示す。排泥土量が気泡と水の添加量より少ないのは、ソイルセメント壁造成時に気泡を消泡させたこと、および気泡安定液が溝壁から透水し減少したことによると推定される。掘削に伴う排泥土量率を求めると、2つの工区の排泥土量率の平均値は28.6%であり、同様な土質でベントナイト系安定液を使用した場合の従来の実績値55~70%と比較すると1/2以下であった。

## 7. ま と め

気泡安定液は掘削土砂に適量の気泡および水を加えた混合体であり、地盤掘削用安定液としての機能を備えている。掘削用安定液として必要な性能を掘削土砂の物性値と気泡添加率および加水量を用いて定量化し、それらは気泡添加率と加水量で適切にコントロールできることを明らかにした。また、現場施工時の管理方法として気泡安定液管理図による管理を行なう方法を考案し、2現場での施工でその有効性を実証した。また、気泡安定液を使用することにより掘削時の排泥土量は1/2~1/3に減少した。

### ■参考文献

- 1) シールド技術協会：気泡シールド工法，平成19年6月。
- 2) Akagi, H., Y. Kondo, T. Nakayama and H. Naoe : Cost reduction of diaphragm wall excavation using air form and case record, Proc. 5th International Congress on Environmental Geotechnics, pp. 685~692, Thomas Telford, London 2006.
- 3) 赤木寛一，仲山貴司，近藤義正：起泡剤を用いた地盤掘削用安定液の溝壁安定化機構，第37回地盤工学研究発表会，pp. 1523~1524，2002年7月。

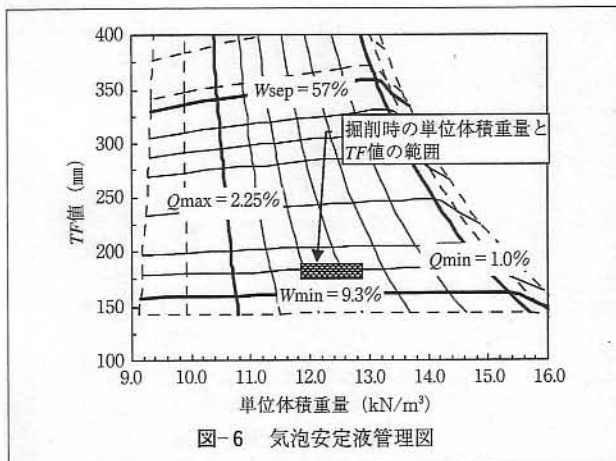


図-6 気泡安定液管理図

図-2の気泡安定液管理図によると、管理限界は $w_{min} = 8.4\%$ ， $w_{sep} = 33.5\%$ ， $Q_{min} = 0.8\%$ ， $Q_{max} = 2.34\%$ であり、掘削時の単位体積重量 = 11.7~13.8kN/m<sup>3</sup>，TF値 = 180~205で安定した施工ができた。単位体積重量が大きく感じるが溝壁の安定上はより安全側であり、流動性は配合設計時の200mmとほぼ同一状態を保っているの、施工上の問題は生じなかった。

図-5の掘削土の収支計算チャートは、掘削土砂 1m<sup>3</sup>に添加した気泡と水による掘削時の排泥量と固化材添加による排泥量などを計算したものである。掘削時には気泡量と加水量の合計に等しい排泥量 (0.572m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)が出るが、この中の気泡を95%消泡すると0.436m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>となる。さらに固化時に安定液中の気泡が消泡するので、この量を加味すると実質上の掘削による排泥量は0.197m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>となる。

掘削時の排泥量の計量値0.147m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>と比較し、理論値の方が多いが、掘削時には気泡安定液が土中に透水し減少したことが原因と思われる。なお、排泥土量0.147m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>は同様な土質についてベントナイト系安定液を用いた場合の従来の実績値の1/3程度である。

造成したソイルセメント壁の物性値を表-1に示す。気泡安定液に消泡剤を添加した固化材(高炉セメントB種、添加量220kg/m<sup>3</sup>，w/c=100%)を注入して混合攪拌し、サンプリングした試料を4週養生し、一軸圧縮試験および透水試験を行なった。これらによると、強度の平均値は3.34N/mm<sup>2</sup>，透水係数は $4.96 \times 10^{-8}\text{ cm/sec}$ であり、いずれの値も管理値を満足していた。