

気泡掘削工法

Excavation and Mixing Method Using Air Foam Suspension

赤木 寛一 (あかき ひろかず)
早稲田大学 教授 理工学術院

近藤 義正 (こんどう よしまさ)
(株)マグマ 代表取締役社長

1. はじめに

土に気泡さらに水を添加し混練した気泡混合土は、流動性と止水性が増加し、密度が減少する。気泡シールド工法や軽量盛土工法は、これらの特性を生かしている。土粒子、水及び気泡を適切に配合した気泡混合土は、各々の密度は2.7, 1.0, 0.04 g/cm³と大きな差があるにもかかわらず、それらは分離することなく懸濁状態を保つ。この懸濁物の安定液としての性質を調べた結果、地中に掘削された溝壁を保持する機能があることを確認し、ソイルセメント地中連続壁等の施工時の安定液として利用し、これらを気泡安定液と呼んでいる。

また、深層混合処理工法において改良対象土が火山灰質粘性土のように粘性が高い場合にはセメント系懸濁液の混練は容易ではない。このような場合、前もって火山灰質粘性土と気泡を混練した気泡混合土にセメント系懸濁液を混合すると、水セメント比が小さくても土とセメントの混練性が向上し、少ないセメント量でも均質な強度発現が得られやすいので、深層混合処理工法でも気泡が使用可能である。

以上のように、ソイルセメント地中連続壁や深層混合処理工法において、掘削土に気泡を添加した気泡混合土の特性を利用した施工法を気泡掘削工法と称している。

2. 気泡について

気泡掘削工法に用いられる気泡は、生分解性のアルキルサルフェート系界面活性剤の起泡剤を使用して作成される。20倍希釈した起泡剤を、体積比で起泡剤1と空気24の割合で発泡機に送り込み発泡させた密度0.04 g/cm³、気泡径200 μmの気泡を標準状態としている。気泡安定液に使用する気泡は、土中の水や掘削時の圧力の変動によっても破泡しないことが必要である。

また、破泡剤を気泡安定液や気泡混合土に混合すると、気泡は容易に破泡し、それらの体積は減少する。環境への負荷を減らすために、起泡剤のみならず破泡剤も生分解性を有する種類を選ぶことが望ましい。

3. 気泡安定液について

気泡安定液の物性は、下記のとおり混合土の物性(細粒分含有率P、細粒分の液性限界w_L、粗粒分の比表面積S)と気泡添加率Q(混合土の乾燥質量に対する起泡剤の質量百分率)と含水比wの関数で表せ、Qと加水

量Wによりその物性を管理することができる。具体的な現場配合設計例や管理方法などについては、参考文献¹⁾に示されているので参照されたい。

3.1 最小含水比

乾燥状態の土に、気泡を添加・混練すると気泡は水分を土に奪われて破泡する。破泡の生じない気泡混合土の最小の含水比を最小含水比w_{min}(%)と称し、Pの関数として式(1)で求めている。

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

3.2 分離含水比

懸濁状態の気泡安定液に徐々に水を加え含水比を高くすると土、水、気泡の分離が生じる。この含水比を分離含水比w_{sep}(%)と称し、Q, P, w_L, Sにより式(2)で求めている。

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

3.3 単位体積重量

地中に掘削された溝壁の安定を保つためには、ベントナイトを利用した安定液と同様に気泡安定液の単位体積重量を10.3 kN/m³以上に保つ必要があるが、その単位体積重量は気泡の添加量Qで容易に調節することができる。たとえば、Qを2.3%とすると気泡安定液の単位体積重量は10.3 kN/m³となる。

3.4 流動性

ソイルセメント地中連続壁の施工においては、安定液の流動性は芯材の挿入性を左右する。気泡安定液の流動性はQとWにより容易に調整が可能であり、その定量的評価はテーブルフロー値TFにより行うこととし、次式(3)のような気泡安定液の含水比wの一次式で表し、係数α, βは土の物性値(P, w_L, S)とQを用いて決定することができる¹⁾。

$$TF = \alpha w + \beta \dots\dots\dots (3)$$

3.5 溝壁の安定

溝壁の安定を保って掘削するには、溝壁面に安定液の液圧を垂直全応力として有効に作用させるために、溝壁面に難透水路を形成するとともに、地盤の崩壊圧以上の液圧を溝壁面に加える必要がある。安定液の溝壁面における難透水路の形成状況を調査するために、豊浦砂や珪砂を対象として、気泡安定液とベントナイト安定液により形成された難透水路の透水係数kを室内浸透実験で測定したところ、表-1に示すような結果となった。

ベントナイト安定液では、粒径の大きな砂では浸透し

表-1 気泡安定液、ベントナイト安定液による難透水路形成後の透水係数 (m/s)

地盤材料	豊浦砂	珪砂7号	珪砂6号	珪砂5号	珪砂4号	珪砂3号
平均粒径 D ₅₀ (mm)	0.188	0.196	0.334	0.571	0.941	1.49
地盤材料の透水係数	1.80×10 ⁻⁴	1.70×10 ⁻⁴	4.21×10 ⁻⁴	6.62×10 ⁻⁴	9.73×10 ⁻⁴	9.10×10 ⁻⁴
気泡安定液による透水係数	1.80×10 ⁻⁷	4.78×10 ⁻⁷	7.40×10 ⁻⁷	2.57×10 ⁻⁷	1.45×10 ⁻⁷	1.30×10 ⁻⁷
ベントナイト安定液による透水係数	2.50×10 ⁻⁸	2.90×10 ⁻⁸	3.30×10 ⁻⁸	浸透により難透水路不形成		

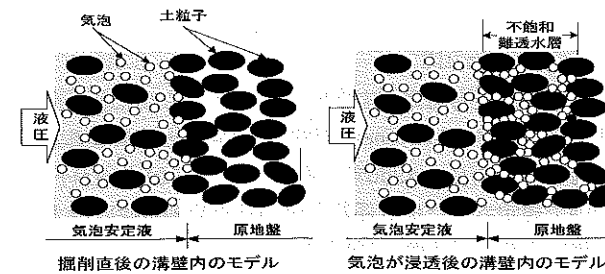


図-1 難透水路形成概念図

て難透水路に相当する泥膜が形成されないが、気泡安定液では幅広い粒径範囲の砂で地盤材料よりも3ケタ程度小さい透水係数の難透水路が形成されていることがわかる。

この気泡安定液による難透水路の形成メカニズムは、図-1に示すように気泡安定液の液圧により気泡が土粒子間の隙間に侵入し、土粒子と水、気泡よりなる不飽和帯が形成されることによるためと考えられている。

3.6 気泡安定液の管理

気泡安定液の施工時における品質は、図-2に示すように、前述の安定液のTF値に関係する最小含水比w_{min}、分離含水比w_{sep}、単位体積重量に関する最小気泡添加率Q_{min}、最大気泡添加率Q_{max}で囲まれた領域([A])内部に位置するように気泡量と加水量の組合せにより管理する。

4. 気泡掘削工法

気泡掘削工法に分類される具体的な工法として、3種類が挙げられる。気泡安定液を使用する工法としては、①AWARD-Trend(アワード・トレンド)工法、②AWARD-Ccw(アワード・シーシーダブリュー)工法があり、気泡混合土を利用する工法として、③AWARD-Demi(アワード・デミ)工法がある。

4.1 AWARD-Trend工法(口絵写真-6)

AWARD-Trend工法では、施工機械として等厚式ソイルセメント壁を造成するTRD施工機械を使用する。施工機械の下端から所定量の気泡と水を添加しつつ掘削・混練を行い、掘削土、気泡及び水の懸濁した気泡安定液を造成しながら掘削を行う。ソイルセメント壁造成時には、破泡剤を添加したセメント系懸濁液を気泡安定液と混練し固化体を造成する。

礫を含む掘削の困難な地盤や掘削深度が大きい地盤での対応性が良く、掘削時の機械負荷が小さく、破泡により排泥土量が1/2~1/3に減少するので環境負荷が少ない。

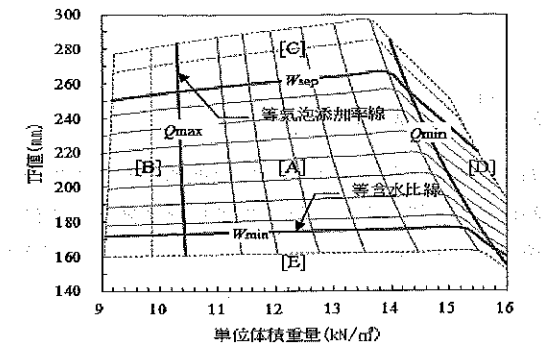


図-2 気泡安定液管理図

4.2 AWARD-Ccw工法(口絵写真-7)

AWARD-Ccw工法は、柱列式地中連続壁施工機械を用いて施工する。施工機械の下端部から気泡及び水を添加しつつ、掘削・混練を行い、混合攪拌翼の引上げ時に、破泡剤を含んだセメント系懸濁液を添加しつつ気泡安定液と混練する。この時、気泡安定液中の気泡は破泡し、空気分は安定液中を通過して地上部まで上昇するので、ソイルセメント固化体の残存気泡量は数%程度である。

掘削深度が深い場合や、障害物があり掘削に時間がかかる場合などには非硬化性の気泡安定液は適しており、さらに排泥量が従来工法に比し1/2~1/3になるので環境負荷が小さい工法と言える。

なお、気泡を破泡させずに固化させると低強度の柔構造固化体を造成することができるので、地震動等によりクラックの入り難い靱性の高い地中連続壁を造成することもできる²⁾。

4.3 AWARD-Demi工法(口絵写真-8)

AWARD-Demi工法は、深層混合処理施工機械を利用する。掘削混合時に施工機械下端より気泡を添加しつつ気泡混合土を造成し、攪拌翼を引き上げる時に破泡剤を添加したセメント系懸濁液を注入し固化させる。

粘性の高い火山灰質粘性土にセメント系懸濁液を直接添加して混練するよりも、気泡混合土を介することでより均質な固化体が得られることが確認されている。

参考文献

- 1) 近藤義正・仲山貴司・赤木寛一：掘削土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, pp. 505~518, 2008年7月。
- 2) 赤木寛一：起泡剤を利用した地盤掘削用安定液の研究開発，平成16年度~平成17年度科学研究費補助金研究成果報告書，2006年3月。

(原稿受理 2012.7.4)

気泡掘削工法

Excavation and Mixing Method Using Air Foam Suspension

赤木 寛一 (あかき ひろかず)
早稲田大学 教授 理工学術院

近藤 義正 (こんどう よしまさ)
(株)マグマ 代表取締役社長

1. はじめに

土に気泡さらに水を添加し混練した気泡混合土は、流動性と止水性が増加し、密度が減少する。気泡シールド工法や軽量盛土工法は、これらの特性を生かしている。

土粒子、水及び気泡を適切に配合した気泡混合土は、各々の密度は2.7, 1.0, 0.04 g/cm³と大きな差があるにもかかわらず、それらは分離することなく懸濁状態を保つ。この懸濁物の安定液としての性質を調べた結果、地中に掘削された溝壁を保持する機能があることを確認し、ソイルセメント地中連続壁等の施工時の安定液として利用し、これらを気泡安定液と呼んでいる。

また、深層混合処理工法において改良対象土が火山灰質粘性土のように粘性が高い場合にはセメント系懸濁液の混練は容易ではない。このような場合、前もって火山灰質粘性土と気泡を混練した気泡混合土にセメント系懸濁液を混合すると、水セメント比が小さくても土とセメントの混練性が向上し、少ないセメント量でも均質な強度発現が得られやすいので、深層混合処理工法でも気泡が使用可能である。

以上のように、ソイルセメント地中連続壁や深層混合処理工法において、掘削土に気泡を添加した気泡混合土の特性を利用した施工法を気泡掘削工法と称している。

2. 気泡について

気泡掘削工法に用いられる気泡は、生分解性のアルキルサルフェート系界面活性剤の起泡剤を使用して作成される。20倍希釈した起泡剤を、体積比で起泡剤1と空気24の割合で発泡機に送り込み発泡させた密度0.04 g/cm³、気泡径200 μmの気泡を標準状態としている。気泡安定液に使用する気泡は、土中の水や掘削攪拌時の圧力の変動によっても破泡しないことが必要である。

また、破泡剤を気泡安定液や気泡混合土に混合すると、気泡は容易に破泡し、それらの体積は減少する。環境への負荷を減らすために、起泡剤のみならず破泡剤も生分解性を有する種類を選ぶことが望ましい。

3. 気泡安定液について

気泡安定液の物性は、下記のとおり混合土の物性(細粒分含有率 P 、細粒分の液性限界 w_L 、粗粒分の比表面積 S)と気泡添加率 Q (混合土の乾燥質量に対する起泡剤の質量百分率)と含水比 w の関数で表せ、 Q と加水

量 W によりその物性を管理することができる。具体的な現場配合設計例や管理方法などについては、参考文献¹⁾に示されているので参照されたい。

3.1 最小含水比

乾燥状態の土に、気泡を添加・混練すると気泡は水分を土に奪われて破泡する。破泡の生じない気泡混合土の最小の含水比を最小含水比 w_{min} (%)と称し、 P の関数として式(1)で求めている。

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

3.2 分離含水比

懸濁状態の気泡安定液に徐々に水を加え含水比を高くすると土、水、気泡の分離が生じる。この含水比を分離含水比 w_{sep} (%)と称し、 Q, P, w_L, S により式(2)で求めている。

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

3.3 単位体積重量

地中に掘削された溝壁の安定を保つためには、ベントナイトを利用した安定液と同様に気泡安定液の単位体積重量を10.3 kN/m³以上に保つ必要があるが、その単位体積重量は気泡の添加量 Q で容易に調節することができる。たとえば、 Q を2.3%とすると気泡安定液の単位体積重量は10.3 kN/m³となる。

3.4 流動性

ソイルセメント地中連続壁の施工においては、安定液の流動性は芯材の挿入性を左右する。気泡安定液の流動性は Q と W により容易に調整が可能であり、その定量的評価はテーブルフロー値 TF により行うこととし、次式(3)のような気泡安定液の含水比 w の一次式で表し、係数 α, β は土の物性値(P, w_L, S)と Q を用いて決定することができる¹⁾。

$$TF = \alpha w + \beta \dots\dots\dots (3)$$

3.5 溝壁の安定

溝壁の安定を保って掘削をするには、溝壁面に安定液の液圧を垂直全応力として有効に作用させるために、溝壁面に難透水層を形成するとともに、地盤の崩壊圧以上の液圧を溝壁面に加える必要がある。安定液の溝壁面における難透水層の形成状況を調査するために、豊浦砂や珪砂を対象として、気泡安定液とベントナイト安定液により形成された難透水層の透水係数 k を室内浸透実験で測定したところ、表-1に示すような結果となった。

ベントナイト安定液では、粒径の大きな砂では浸透し

表-1 気泡安定液、ベントナイト安定液による難透水層形成後の透水係数 (m/s)

地盤材料	豊浦砂	珪砂7号	珪砂6号	珪砂5号	珪砂4号	珪砂3号
平均粒径 D_{50} (mm)	0.188	0.196	0.334	0.571	0.941	1.49
地盤材料の透水係数	1.80×10^{-4}	1.70×10^{-4}	4.21×10^{-4}	6.62×10^{-4}	9.73×10^{-4}	9.10×10^{-4}
気泡安定液による透水係数	1.80×10^{-7}	4.78×10^{-7}	7.40×10^{-7}	2.57×10^{-7}	1.45×10^{-7}	1.30×10^{-7}
ベントナイト安定液による透水係数	2.50×10^{-8}	2.90×10^{-8}	3.30×10^{-8}	浸透により難透水層不形成		

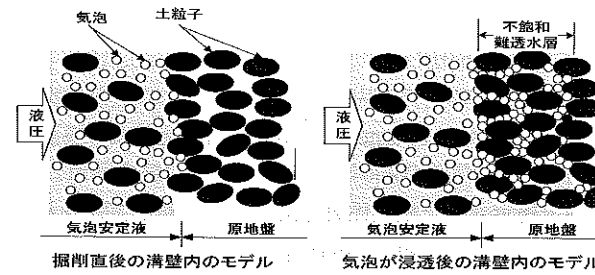


図-1 難透水層形成概念図

て難透水層に相当する泥膜が形成されないが、気泡安定液では幅広い粒径範囲の砂で地盤材料よりも3ケタ程度小さい透水係数の難透水層が形成されていることがわかる。

この気泡安定液による難透水層の形成メカニズムは、図-1に示すように気泡安定液の液圧により気泡が土粒子間の隙間に侵入し、土粒子と水、気泡よりなる不飽和帯が形成されることによるためと考えられている。

3.6 気泡安定液の管理

気泡安定液の施工時における品質は、図-2に示すように、前述の安定液の TF 値に関する最小含水比 w_{min} 、分離含水比 w_{sep} 、単位体積重量に関する最小気泡添加率 Q_{min} 、最大気泡添加率 Q_{max} で囲まれた領域([A])内部に位置するように気泡量と加水量の組合せにより管理する。

4. 気泡掘削工法

気泡掘削工法に分類される具体的な工法として、3種類が挙げられる。気泡安定液を使用する工法としては、①AWARD-Trend(アワード・トレンド)工法、②AWARD-Ccw(アワード・シーシーダブリュー)工法があり、気泡混合土を利用する工法として、③AWARD-Demi(アワード・デミ)工法がある。

4.1 AWARD-Trend工法(口絵写真-6)

AWARD-Trend工法では、施工機械として等厚式ソイルセメント壁を造成するTRD施工機械を使用する。施工機械の下端から所定量の気泡と水を添加しつつ掘削・混練を行い、掘削土、気泡及び水の懸濁した気泡安定液を造成しながら掘削を行う。ソイルセメント壁造成時には、破泡剤を添加したセメント系懸濁液を気泡安定液と混練し固化体を造成する。

礫を含む掘削の困難な地盤や掘削深度が大きい地盤での対応性が良く、掘削時の機械負荷が小さく、破泡により排泥土量が1/2~1/3に減少するので環境負荷が少ない。

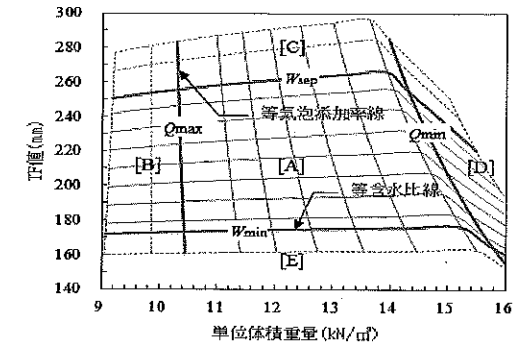


図-2 気泡安定液管理図

4.2 AWARD-Ccw工法(口絵写真-7)

AWARD-Ccw工法は、柱列式地中連続壁施工機械を用いて施工する。施工機械の下端部から気泡及び水を添加しつつ、掘削・混練を行い、混合攪拌翼の引上げ時に、破泡剤を含んだセメント系懸濁液を添加しつつ気泡安定液と混練する。この時、気泡安定液中の気泡は破泡し、空気分は安定液中を通過して地上部まで上昇するので、ソイルセメント固化体の残存気泡量は数%程度である。

掘削深度が深い場合や、障害物があり掘削に時間がかかる場合などには非硬化性の気泡安定液は適しており、さらに排泥量が従来工法に比し1/2~1/3になるので環境負荷が小さい工法と言える。

なお、気泡を破泡させずに固化させると低強度の柔構造固化体を造成することができるので、地震動等によりクラックの入り難い靱性の高い地中連続壁を造成することもできる²⁾。

4.3 AWARD-Demi工法(口絵写真-8)

AWARD-Demi工法は、深層混合処理施工機械を利用する。掘削混合時に施工機械下端より気泡を添加しつつ気泡混合土を造成し、攪拌翼を引き上げる時に破泡剤を添加したセメント系懸濁液を注入し固化させる。

粘性の高い火山灰質粘性土にセメント系懸濁液を直接添加して混練するよりも、気泡混合土を介することでより均質な固化体が得られることが確認されている。

参考文献

- 1) 近藤義正・仲山貴司・赤木寛一：掘削土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, pp. 505~518, 2008年7月。
- 2) 赤木寛一：起泡剤を利用した地盤掘削用安定液の研究開発，平成16年度~平成17年度科学研究費補助金研究成果報告書，2006年3月。

(原稿受理 2012.7.4)



口絵写真-1 気泡掘削工法：AWARD-Trend 工法



口絵写真-2 気泡掘削工法：AWARD-Ccw 工法



口絵写真-3 気泡掘削工法：AWARD-Demi 工法