

# 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

近藤義正<sup>1</sup>・仲山貴司<sup>2</sup>・赤木寛一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 有限会社 マグマ (〒247-0051 神奈川県鎌倉市岩瀬 1306)  
E-mail:maguma7@nifty.com

<sup>2</sup>正会員 財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail:nakayama@rtri.or.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 早稲田大学教授 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)  
E-mail:akagi@waseda.jp

掘削土砂に体積比で 15~40%の気泡及び適量の水を加えた懸濁液である気泡安定液は、地中連続壁工法の安定液としての諸機能を有している。掘削土砂の粒度やコンシステンシー特性等は気泡安定液の物性に影響を与えるが、気泡と水の添加量を調整することにより、各種の土質特性に対し溝壁の保持性、流動性等々を管理限界内に保つことができることを実験的手法により証明した。それに基づいて、安定した施工を行うための気泡安定液の管理手法を考案した。この管理手法を 2 箇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結果、気泡安定液による TRD 掘削が適切に管理できることが実証された。また、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。

**Key Words :** diaphragm wall excavation, bentonite clay suspension, air foam, consistency, wasted soil

## 1. 目的

地中連続壁工法は 1950 年頃ヨーロッパで土留め壁や止水壁を構築する工法として採用され、日本では 1959 年に河川締切用の止水壁として初めて導入された。その後、市街地周辺の建設工事において、鋼矢板や既成杭の打設時に生ずる騒音、振動、周辺地盤の沈下や地下水位への影響等が社会問題となり、このような社会・環境問題に対する有効な工法として採用されている。近年では大深度化、大型化のみならず、仮設構造物から永久構造物にも採用されるようになってきている。またコンクリート構造物だけではなく、ソイルセメント地中壁構造物としての利用が拡大している。

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しているが、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で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。

掘削土砂に体積比で 15~40%の気泡及び適量の水を加えた懸濁液(以下、気泡安定液と称す)は安定液

としての諸機能を有しており、気泡安定液を使用する地中連続壁施工方法は従来工法と特に変わるものではなく、掘削機械の掘削先端部から所要量の気泡及び水を吐出させ掘削土砂と混合・攪拌すると、この懸濁液が溝壁を安定化し、流動性等の機能を持った気泡安定液となり、連続した掘進を行うことができる。排泥土中の気泡は気中に放置する、あるいは消泡剤を添加すると容易に消泡するので後処理が容易である。このため、排泥土量はベントナイト系安定液に比較し 1/2 以下に減少するので、気泡安定液は環境負荷、経済性に優れていると言える。

本論文では気泡安定液の消泡・分離条件、単位体積重量、溝壁の安定性、流動性等、気泡安定液の基本的な物性を実験的に調査した。この結果に基づいて、気泡安定液により安定した状態で施工を行うための気泡安定液の管理限界値を解明し、これらの範囲を気泡安定液の単位体積重量~テーブルフロー値(以下、TF 値と称す)関係図にプロットした現場管理手法を考案した。この管理手法を 2 箇所の TRD (Trench Cutting Re-mixing Deep Wall Method) 掘削機によるソイルセメント地中連続壁の施工に適用し、その妥当性を検証した。

## 2. 気泡安定液の基本性能

地盤掘削に気泡を利用した例として、気泡シールド工法がある<sup>1)</sup>。気泡シールド工法は、土圧系シールド工法における加泥材として気泡を用いた工法で、気泡添加により掘削土砂のチャンバ内とスクリーコンベアによる排土時の流動性と止水性を高めるとともに、粘性土の付着を防止するものである。また、排泥土中の気泡は自然消泡または消泡剤により消泡されるので、排泥土は気泡注入前の状態に戻り、後処理が容易であるとされている。しかしながら、気泡を含むチャンバ内土圧により、シールド切羽土圧に抵抗する機構は概念的に示されているが、気泡自体による切羽地盤安定化機構について詳細な検討は行われていない。

一方、気泡安定液はベントナイト系安定液と同様に直接的に掘削溝壁の安定性に関与するので、気泡シールドの場合に比べてその安定化機構、性能について詳細に検討する必要がある。特に、気泡安定液の主要材料が気泡であることより、溝壁の安定性、流動性等においてはその機能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。さらに経済性、環境負荷においても、排泥量、処理費用等に大きな差異が生じる。

ベントナイト系安定液を用いた地中連続壁工事では、比重とファンネル粘性の測定結果をもとに図-1<sup>2)</sup>に示すようなベントナイト安定液の性状管理図を用いて管理が行われ、多くの優れた施工実績が得られている。この図の網目及び斜線が施された領域では、ベントナイト安定液が良好またはやや良好な性状を保持するが、領域外にその状態が変化する場合にはベントナイトの配合量を増やしたり、CMCなどの助剤を加えたりして適切な対策をとる必要がある。

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り、“掘削土砂、気泡及び水の均質な懸濁液であり、溝壁の安定性、止水性、流動性等に優れた安定液”と定義できる。しかしながら、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の影響も強く受ける。したがって、気泡安定液を利用した地下掘削時にはそれらの影響を評価しうるベントナイト安定液の比重とファンネル粘性に相当する適切な管理指標を設け、気泡と水の添加量により調整を行いつつ掘削管理を行う必要がある。

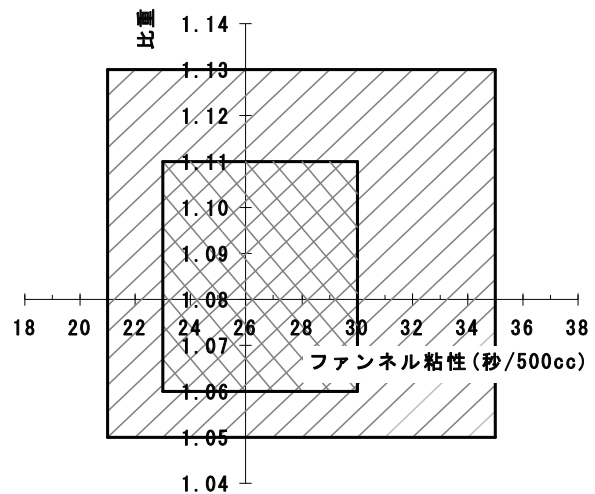


図-1 ベントナイト安定液の性状管理図<sup>2)</sup>

表-1 土質記号と基本的性質

分類	土質名	記号	物 性
粗粒土	豊浦砂	To	$D_{50}=0.188\text{mm}$ , $S=1236\text{m}^2/\text{kN}$
	珪砂 6号	K6	$D_{50}=0.334\text{mm}$ , $S=639\text{m}^2/\text{kN}$
	珪砂 5号	K5	$D_{50}=0.517\text{mm}$ , $S=451\text{m}^2/\text{kN}$
	珪砂 4号	K4	$D_{50}=0.941\text{mm}$ , $S=248\text{m}^2/\text{kN}$
	珪砂 3号	K3	$D_{50}=1.494\text{mm}$ , $S=156\text{m}^2/\text{kN}$
	NS30	NS30	$D_{50}=1.361\text{mm}$ , $S=172\text{m}^2/\text{kN}$
細粒土	カオリン	Ka	$w_L=44.6\%$ , $I_p=27.0$
	木節粘土	Ki	$w_L=62.0\%$ , $I_p=36.5$
	ベントナイト	Be	$w_L=331.4\%$ , $I_p=321.4$

## 3. 実験用材料<sup>4), 5), 6)</sup>

### (1) 起泡剤

本研究においては、コンクリート用起泡剤として多く使用されている3種類の起泡剤（アニオン系界面活性剤、蛋白系起泡剤及び非イオン系界面活性剤）を用いて機能の比較を行った。安定液の機能として最も要求されるものは溝壁を安定した状態に保ち続けることにあるので、消泡し難く、化学的安定性に優れ、かつ起泡能力の大きい起泡剤としてアニオン系界面活性剤を使用した。

### (2) 試験用土試料

試験用土試料は、粗粒土として豊浦砂、珪砂6号、珪砂5号、珪砂4号、珪砂3号、NS30を、細粒土としてコンシステンシー特性の異なるカオリン、木節粘土、ベントナイトを使用し、適宜粗粒土と細粒土を混合し試料とした。なお、図中の凡例においては、試料に表-1のように記号をつけ表記した。粗粒土と粘土の混合土は To-Ka のようにハイフンで結合し表記した。なお、 $S$ は土試料の粗粒分の50%粒径に基づく比表面積（以下、比表面積）であり、式(1)で求めた。

$$S = \frac{50\% \text{ 粒径表面積}}{50\% \text{ 粒径重量}} = \frac{\pi D_{50}^2}{\gamma_s \frac{\pi}{6} D_{50}^3} = \frac{6}{\gamma_s D_{50}} \quad (1)$$

ここで、 $S$  : 比表面積( $\text{m}^2/\text{kN}$ )、 $D_{50}$  : 粗粒分の50%粒径( $\text{m}$ )、 $\gamma_s$  : 土粒子の単位体積重量( $\text{kN}/\text{m}^3$ )である。

### (3) 気泡安定液の作製方法

本研究での気泡安定液の作製方法は図-2に示すように、起泡剤原液を水で20倍に希釈し、これをさらに25倍の体積になるようにハンドミキサーで泡立てた気泡と水を試料土に添加し、試料土、気泡と水が均一に分散するように混合した。なお、気泡添加率 $Q$ は式(2)で定義した。

$$\text{気泡添加率 } Q(\%) = \frac{20\text{倍希釈起泡剤の重量(g)}}{\text{土砂の乾燥重量(g)}} \times 100 \quad (2)$$

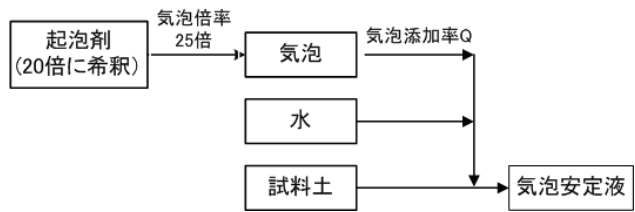


図-2 気泡安定液作製フロー

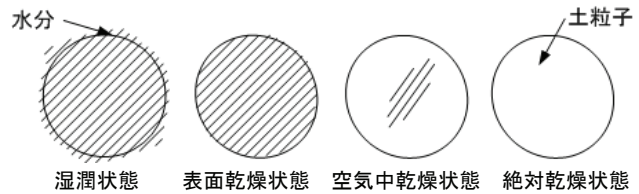


図-3 骨材土粒子の含水状態

表-2 一般的な土の収縮限界含水比 (%)<sup>3)</sup>

砂	シルト	粘土	コロイド	雲母	泥炭	カオリン
—	19	11	6	160	44	36

## 4. 気泡安定液の物性と性能<sup>4), 5), 6)</sup>

気泡安定液の物性と性能は添加する気泡や水による影響だけでなく、掘削土砂の粒度やコンシステンシー特性等の影響を受けるので、これらの因子の影響度を実験的に解明した。

### (1) 気泡安定液の懸濁安定性条件

気泡と混合する土砂の含水比が適切であると懸濁状態を保つ安定した気泡安定液となるが、土砂が乾燥状態にあると土粒子の吸水作用によって気泡の水が吸収され消泡が生じる。これとは逆に加水量が多く含水比が高くなると、土粒子は分離・沈降を生じ気泡安定液は不均質な状態となる。気泡が消泡する含水比を最小含水比、土粒子が分離・沈降を生じる含水比を分離含水比と名付けると、それぞれ以下のように定義される。

#### a) 消泡条件

気泡安定液に消泡の生じない最小の含水比を最小含水比  $w_{\min}$  とする。気泡安定液に含まれる土砂の性状の違いが最小含水比に及ぼす影響を、安定液に含まれる土砂の粗粒分と細粒分に分けて考える。

#### ・粗粒分の影響

粗粒分の影響は、コンクリートの骨材配合設計時に用いられる表面乾燥状態含水比に着目して評価した。コンクリート工学では骨材土粒子の含水状態を図-3のように4段階に分けており、この中で土粒子が気泡を吸着し、消泡現象が起こるのは、表面乾燥状態を下回る含水比のときと考えられる。よって、粗粒分の場合、最小含水比は表面乾燥状態に相当す

る含水比(表面乾燥含水比)とした。

#### ・細粒分の影響

細粒分に関しては、表面乾燥含水比の測定が困難である。そこで、粘土などの細粒分の含水比低下に伴う体積収縮状態の変化に着目した。

細粒分は含水比の低下によって、正規収縮、残留収縮、無収縮という段階を経て収縮する。無収縮時には土粒子骨格体積は変化せず、間隙液体体積のみが減少する。したがって、残留収縮が停止する収縮限界に相当する含水比以下では、細粒分が気泡を吸着し消泡させると考えられる。よって、細粒分の場合には最小含水比に収縮限界に相当する含水比(収縮限界含水比)を採用した。

#### ・気泡安定液の最小含水比の決定

上記の気泡安定液に含まれる粗粒分と細粒分が消泡条件に及ぼす影響を考慮して、掘削した土砂に対応する最小含水比を決定する。気泡が土粒子に吸着されず消泡しないとすれば、粗粒分と細粒分から構成される掘削土砂の中には最低でも粗粒分の表面乾燥状態に対応する水量と細粒分の収縮限界に対応する水量が存在しなければならない。粗粒分と細粒分の寄与を考慮して、この水量の和を全ての土に対する含水比の形で表し、以下のように掘削土砂の最小含水比  $w_{\min}$  を定義した。

$$w_{\min} = \text{表面乾燥含水比} \times \frac{100 - P}{100} + \text{収縮限界含水比} \times \frac{P}{100} \quad (3)$$

ここで、 $w_{\min}$  : 最小含水比(%),  $P$  : 細粒分含有率(%)である。

細粒分を含まない5種の珪砂に関し表面乾燥含水比を測定した結果、平均値は6.97%であった。一方、細粒分から構成される一般的な土の収縮限界含水比は表-2に示すとおりである。式(3)に表面乾燥含水比の平均値6.97%及び一般的な粘土の収縮限界含水比11.0%を代入すると、式(4)のように表すことができる。

$$w_{\min} = 6.97 + 0.0403P \quad (4)$$

b) 分離条件

土粒子、水及び気泡が分散し安定した懸濁状態にある気泡安定液に徐々に水を加えると、懸濁状態が崩れ土粒子の沈降を生じる含水比が存在する。この懸濁状態が崩れる含水比を分離含水比  $w_{\text{sep}}$  とする。

試料土は、表-1に示したものと同様とした。分離実験は図-4に示す相欠き継ぎ手のあるプラスチック円筒(内径90mm, 高さ100mm)を上下に組み合わせ分離含水比測定装置とした。分離含水比測定装置に気泡安定液を満し重量を測った後に静置し、1時間経過後に上層の容器と下層の容器を注意深く分割し、下層の重量を計測し、上下の単位体積重量を求めた。上下の単位体積重量の比を式(5)の重量比で表すと、気泡安定液内で土粒子の分離・沈降が生じると、下部容器の単位体積重量が大きくなるので重量比は上昇する。そこで、重量比が急激に大きくなる時の含水比を分離含水比とした。

$$\text{重量比} = \frac{\text{容器下部の安定液の単位体積重量}}{\text{容器上部の安定液の単位体積重量}} \quad (5)$$

この実験では、分離含水比に影響を及ぼす要因として、気泡安定液の含水比  $w$ 、気泡添加率  $Q$ 、粗粒分の50%粒径に基づく比表面積  $S$ 、細粒分含有率  $P$ 、液性限界  $w_L$  に着目し、これらの影響を実験で確かめ、分離含水比の推定式を求めた。

表-3は、分離実験の結果を要因区分ごとに整理するとともに、後述の推定式(8)による推定値を取りまとめたものである。

・粗粒分の影響

まず、掘削土砂に含まれる比表面積の影響を調べるために、表-1の各種珪砂について気泡添加率を2%の一定量とし、含水比を変化させた気泡安定液を製作し、重量比を求めた結果を図-5に示す。図中の凡例において、 $S$ は各試料の粗粒分の50%粒径に基づく比表面積( $\text{m}^2/\text{kN}$ )を表す。図-5によると、いずれの試料についても重量比が約1.02以上になると重量比は急激に上昇し、気泡安定液が分離することがわかる。そこで、重量比が1.02に対応する含水比を図上で求め、分離含水比  $w_{\text{sep}}$  とした。豊浦砂の場合の分

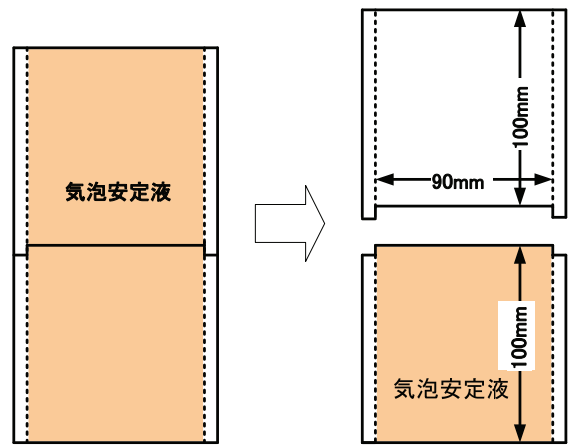


図-4 分離含水比測定装置

表-3 分離含水比の計測値と推定値の比較

要因区分	試料	比表面積 ( $\text{m}^2/\text{kN}$ )	細粒分 含有率 (%)	液性 限界 (%)	気泡 添加率 (%)	分離含水比(%)	
						計測値	推定値
S	To	1,236	0	0	2.0	31.0	34.7
	K6	699	0	0	2.0	25.0	21.1
	K5	451	0	0	2.0	16.5	14.8
	K4	248	0	0	2.0	11.5	9.7
	K3	156	0	0	2.0	6.0	7.4
P	To-Ka	1,236	7.5	44.6	2.0	35.0	35.4
	To-Ka	1,236	15.0	44.6	2.0	46.0	36.2
	To-Ka	1,236	20.0	44.6	1.6	45.0	36.3
	To-Ka	1,236	30.0	44.6	1.4	42.0	37.1
	To-Ka	1,236	40.0	44.6	2.0	47.0	38.6
$w_L$	K6-Ka	699	10.0	44.6	2.0	20.0	23.4
	K4-Ka	248	15.0	44.6	2.0	18.0	14.9
	K3-Ka	156	20.0	44.6	1.6	15.0	14.4
	To-Ki	1,236	15.0	62.0	1.7	35.0	38.5
	To-Be	1,236	2.5	331.4	2.0	35.0	42.0
Q	To-Be	1,236	10.0	331.4	2.0	43.0	64.3
	To-Be	1,236	15.0	331.4	1.7	64.0	78.9
	K5	451	0	0	4.0	22.0	17.2
	K6	699	0	0	8.0	14.0	28.1
	To	1,236	0	0	0.5	30.0	32.9
Q	To	1,236	0	0	1.0	30.0	33.5
	To	1,236	0	0	2.0	35.0	34.7
	To	1,236	0	0	4.0	42.5	37.0
	To	1,236	0	0	8.0	43.0	41.7
	To	1,236	0	0	10.0	50.0	44.0

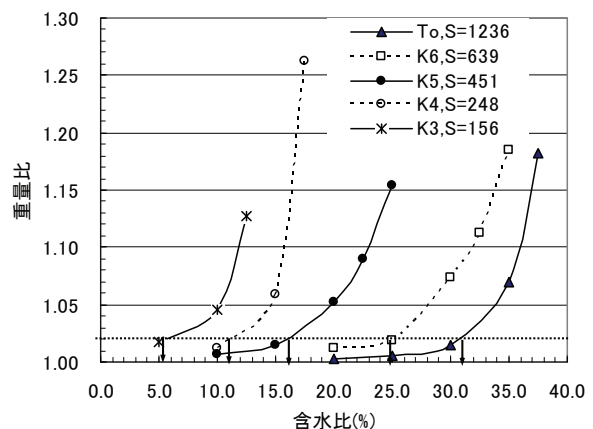


図-5 分離含水比に及ぼす比表面積の影響

離含水比は 31.0%，珪砂 6 号では 25.0%，珪砂 5 号では 16.5%，珪砂 4 号では 11.5%，珪砂 3 号では 6.0% となり，土粒子の比表面積と分離含水比は比例関係にあることがわかった．これは土粒子と気泡の付着力のために，比表面積が大きいほど気泡の浮力の影響を受けるためと考えることができる．この結果は表-3 の要因区分 S 欄に示されている．

さらに，気泡添加率の影響を調べるために，豊浦砂と珪砂に，気泡添加率を 0～10% の範囲で変化させた試料を準備してそれぞれの分離含水比を求めた結果についても，表-3 の Q 欄に示されている．

粗粒分の影響は表-3 における細粒分を含まない試料土のデータ(要因区分 S と Q) を使用し，比表面積及び気泡添加率を変数とし重回帰分析を行い，式(6)を得た．

$$w_{sep1} = 0.0253S + 1.17Q + 1.07 \quad (6)$$

ここで， $w_{sep1}$ ：粗粒分の分離含水比(%)， $S$ ：比表面積( $m^2/kN$ )， $Q$ ：気泡添加率(% )である．

・細粒分の影響

次に，掘削土砂に含まれる細粒分含有率の影響を調べるために，豊浦砂にカオリンを重量比で 0～40% の範囲で添加した試料を使用し，気泡添加率は 1.4～2.0% として，含水比を変化させて気泡安定液を作製した．この場合も重量比が 1.02 付近になると分離が急激に生じたので，重量比 1.02 に対応する含水比を求め分離含水比とした．この結果を表-3 の P 欄に示す．

また，豊浦砂と珪砂にコンシステンシー特性の異なる粘土（カオリン，木節粘土，ベントナイト）を添加した試料を使用し，気泡添加率 Q がほぼ 2% の

場合の分離含水比を求め，表-3 の  $w_L$  欄にあわせて示す．液性限界と分離含水比は比例関係にあり，液性限界が大きい粘土ほど気泡安定液の粘性を増加させるので分離が生じ難くなると考えられる．

細粒分の影響は表-3 の細粒分を含んだデータ（要因区分 P と  $w_L$ ）を使用し，液性限界及び気泡添加率を変数とし，重回帰分析を行った．その結果，液性限界の有意性が高いと判断されたので細粒分の分離含水比として液性限界を採用した．物理的には，細粒分が塑性的な状態から液体状態に移行する含水比である液性限界が気泡安定液の分離現象を支配すると考えられる．

$$w_{sep2} = w_L \quad (7)$$

ここで， $w_{sep2}$ ：細粒分による分離含水比(% )， $w_L$ ：液性限界(% )である．

・気泡安定液の分離含水比の決定

気泡安定液の分離含水比についても，最小含水比と同様に粗粒分と細粒分の分離含水比に対応する水量の和を全ての土に対する含水比の形で表すと，式(8)となる．

$$w_{sep} = w_{sep1} \frac{100 - P}{100} + w_{sep2} \frac{P}{100} = (0.0253S + 1.17Q + 1.07) \frac{100 - P}{100} + w_L \frac{P}{100} \quad (8)$$

なお，分離含水比の計測値と式(8)による推定値を要因別に別けて比較した結果は図-6 に示すとおりであり，バラツキはあるが，実地盤で想定されるほぼ 5(% )から 50(% )までの含水比の範囲では，式(8)において分離含水比を求めても差し支えないものと考えられる．

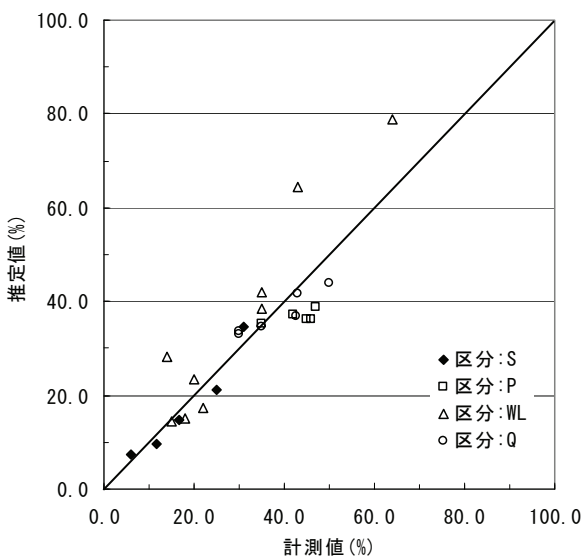


図-6 分離含水比の計測値と推定値の関係

(2) 気泡安定液の溝壁安定性条件

溝壁の安定は安定液圧で地山の崩壊を抑えることにより保たれるので，安定液の単位体積重量の管理が重要である．さらに，砂質地盤では安定液圧を溝壁に対する垂直全応力として有効に作用させるために，溝壁における難透水層の形成が必要である．

ベントナイト系安定液では，図-1 に示すように安定液の単位体積重量に相当する比重と安定液の粘性に関係するファンネル粘性で管理されている．砂質地盤では，ベントナイト系安定液の濾過に伴って溝壁面に難透水性の泥膜が形成されて，安定液圧が溝壁面に有効に作用することが認められている<sup>2)</sup>．この場合，ベントナイト系安定液の比重とファンネル粘性の両者が泥膜形成に関係していると考えられる．

一方，気泡安定液では，気泡の添加による単位体

積重量の検討とあわせて、砂質地盤ではベントナイト系安定液のような泥膜の形成が期待できないので、砂質地盤における気泡による難透水層形成及び破壊時のメカニズムに関する検討を実験的に行った。なお、細粒分を多く含む粘性土地盤では難透水層が容易に形成され、安定液圧は溝壁に対する垂直全応力として有効に作用すると考えられるので、以下の検討では細粒分含有率の小さい砂質地盤を対象とした。

**a) 気泡安定液の単位体積重量**

気泡安定液は、土粒子（粗粒分，細粒分），間隙水及び気泡から構成されるので、次式のようにその単位体積重量を求めることができる。

$$\begin{aligned} \gamma_c &= \frac{W_s + W_w + W_b}{V_s + V_w + V_b} \\ &= \frac{100 + w + Q}{\frac{100 - P}{\gamma_{ss}} + \frac{P}{\gamma_{sc}} + \frac{w}{\gamma_w} + \frac{Q}{\gamma_b}} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $\gamma_c$ ：気泡安定液の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)、 $W_s$ ：土粒子の重量(kN)、 $W_w$ ：間隙水の重量(kN)、 $W_b$ ：気泡の重量(kN)、 $V_s$ ：土粒子の体積(m<sup>3</sup>)、 $V_w$ ：間隙水の体積(m<sup>3</sup>)、 $V_b$ ：気泡の体積(m<sup>3</sup>)、 $\gamma_{ss}$ 、 $\gamma_{sc}$ ：各々粗粒分と細粒分土粒子の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)、 $\gamma_w$ 、 $\gamma_b$ ：各々水と気泡の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)、 $w$ ：含水比(%)、 $P$ ：細粒分含有率(%)、 $Q$ ：気泡添加率(%)である。

溝壁の安定を保つのに必要な安定液の単位体積重量は、図-1に示すベントナイト系安定液の性状管理図における比重の最小値 1.05 に対応する 10.3 (kN/m<sup>3</sup>)以上である。この値を気泡安定液においても使用すると  $\gamma_c \geq 10.3$  となり、式(9)を利用してこの不等式の  $\gamma_c$  に土の物性値を代入すると気泡添加率  $Q$  と含水比  $w$  が満たすべき不等式が決まる。

**b) 難透水層の形成状況と透水特性**

気泡安定液とベントナイト系安定液による難透水層の形成状況と透水特性を実験的に比較するために、図-7に示す安定液透過試験装置を用い透水量を計測し、透水量の時間的変化状況をもとに難透水層の形成状況を調査した。

試験手順は以下の通りである。試料土は豊浦砂、珪砂7号、珪砂6号、珪砂5号、珪砂4号、珪砂3号とし、 $\gamma_c=10.3$ (kN/m<sup>3</sup>)の気泡安定液および $\gamma_c=10.3$ (kN/m<sup>3</sup>)、ファンネル粘性 24.5sec としたベントナイト安定液を使用した。なお、気泡安定液は、実際の掘削状況を想定して飽和状態の各試料に気泡を加え、気泡添加量を変化させて目標の $\gamma_c$ となるように調整した。まず、シリンダーA (Φ106mm) 内に試料土を高さが 100mm になるように3層に別けて突き固めて模擬地盤を作製し、シリンダーB 内の水位

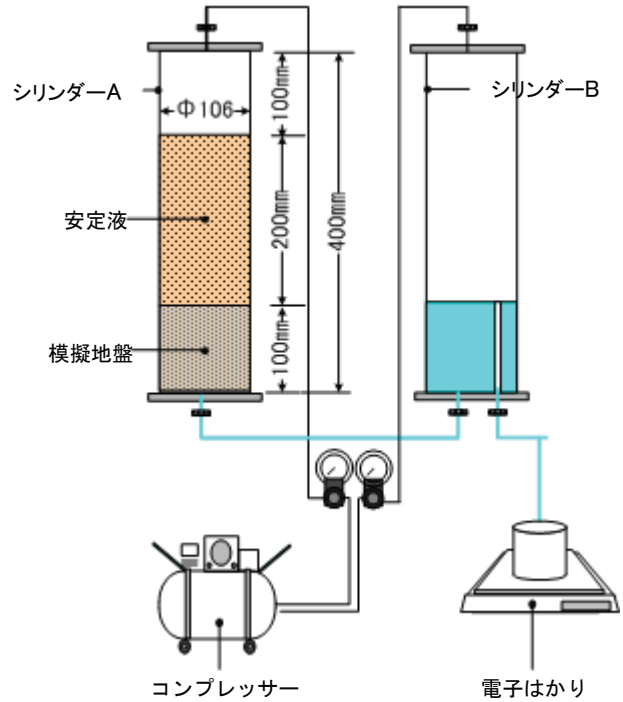


図-7 安定液透過試験装置

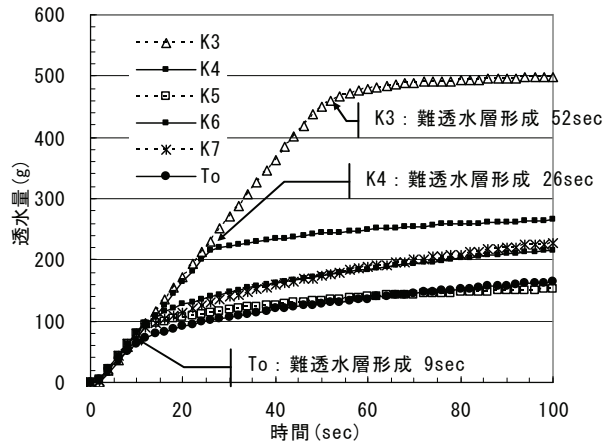


図-8 透水量と時間の関係(気泡安定液)

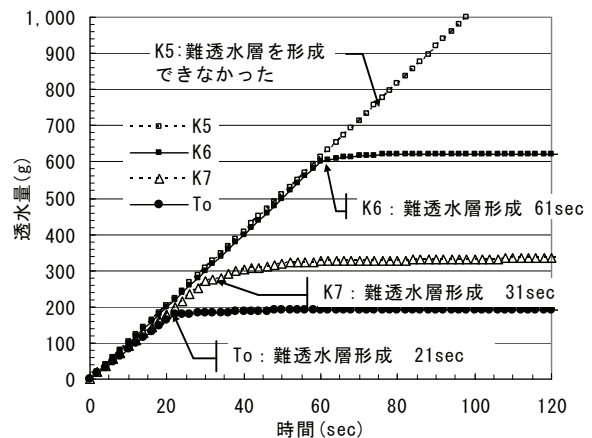


図-9 透水量と時間の関係(ベントナイト安定液)

をシリンダーAの模擬地盤と同じ高さにあわせ、模

表-4 難透水層形成までの時間と透水量 (水頭 19.6kN/m<sup>2</sup>)

試料土		To	K7	K6	K5	K4	K3
気泡安定液	難透水層形成時間(sec)	9	10	12	11	26	52
	難透水層形成までの透水量(g)	58	79	97	89	214	458
ベントナイト安定液	難透水層形成時間(sec)	21	31	61	難透水層が形成できない		
	難透水層形成までの透水量(g)	172	273	602			

表-5 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見かけの透水係数(cm/sec)

試料土	To	K7	K6	K5	K4	K3
原地盤の透水係数	1.83×10 <sup>-2</sup>	1.75×10 <sup>-2</sup>	4.21×10 <sup>-2</sup>	6.62×10 <sup>-2</sup>	9.73×10 <sup>-2</sup>	9.13×10 <sup>-2</sup>
気泡安定液による透水係数	1.81×10 <sup>-5</sup>	4.78×10 <sup>-5</sup>	7.42×10 <sup>-5</sup>	2.57×10 <sup>-5</sup>	1.45×10 <sup>-5</sup>	1.30×10 <sup>-5</sup>
ベントナイト安定液による透水係数	2.58×10 <sup>-6</sup>	2.90×10 <sup>-6</sup>	3.39×10 <sup>-6</sup>	難透水層が形成できない		

擬地盤を飽和させた。

次に、模擬地盤の上に気泡安定液もしくはベントナイト安定液を初期高さ 200mm となるように入れ、シリンダーA 上部に水頭200cmに相当する 19.6 (kN/m<sup>2</sup>) を空気圧で加え、シリンダーB から流出する単位時間当たりの透水量が一定になるまで1秒毎に計測した。

気泡安定液及びベントナイト安定液における透水量と時間の関係をそれぞれ図-8, 図-9 に、難透水層形成までの時間及び透水量を表-4 に示す。実験により得られた透水量と時間の関係によると、透水量は難透水層が形成されると図-8, 図-9 に示すように急激に減少し、透水速度は十分小さい値で一定となる。この曲線の最大曲率となるまでの所要時間を、図中に矢印で示すように難透水層形成時間とした。気泡安定液を用いた場合は、豊浦砂, 珪砂 7 号, 珪砂 6 号, 珪砂 5 号では約 10 秒で、珪砂 4 号では 26 秒, 珪砂 3 号では 52 秒で透水量は急激に減少し、透水速度は一定になり難透水層が形成される。一方、ベントナイト安定液を用いた場合は、豊浦砂では 21 秒, 珪砂 7 号では 31 秒で、珪砂 6 号では 61 秒で透水量は急激に減少し透水速度は一定となり泥膜による難透水層が形成されるが、珪砂 5 号では透水量の減少は生じず、難透水層が形成されない。これらのことより、気泡安定液はベントナイト安定液よりも短時間で難透水層を形成する性能があり、かつ、粗粒分を多く含む地盤への適用が可能であると判断できる。

難透水層が形成された後の透水速度を模擬地盤断面積で除して求めた見かけの透水係数(動水勾配  $i \div 2(m)/0.1(m) = 20$ )を表-5 に示す。気泡安定液の場合には、見かけの透水係数は 10<sup>-5</sup>(cm/s)オーダーであり、ベントナイト安定液の場合、透水係数は 10<sup>-6</sup>(cm/s)オーダーであり、原地盤の透水係数よりも 3 桁以上小さい。

以上の実験観察結果より、砂質地盤においては気泡

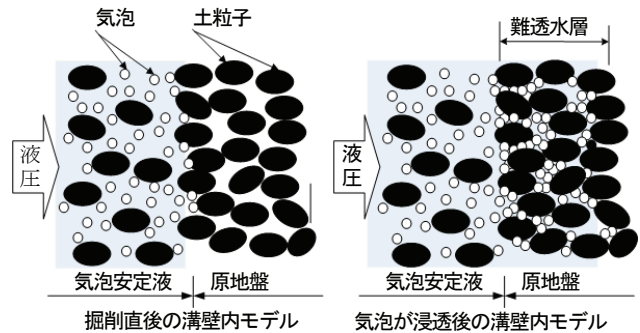


図-10 気泡安定液による難透水層形成概念図

安定液とともに砂質土の間隙径よりも小さな気泡 (Φ20~500μm) は細粒分土粒子とともに周辺の地盤の間隙部分に入り込み、原地盤の土粒子の骨格と一体となって不飽和化し、ベントナイト泥膜の数倍の厚さを持った難透水層を形成すると想定できる。この状況を模式的に示すと、図-10 のようになる。

c) 難透水層崩壊時の安定液圧と地盤地下水圧の関係

掘削時に安定液圧より大きな被圧地下水に遭遇することを想定して、図-11 に示す実験装置を用いて、安定液で難透水層が形成されて液圧により安定を保っている溝壁に対して、模擬地盤内部の地下水圧を徐々に増加させることにより溝壁面を崩壊させた時の安定液圧と水圧の関係を調査した。

試料土は豊浦砂および安定液による難透水層の形成が比較的困難な珪砂 5 号, 珪砂 4 号を使用した。安定液は、前節と同一の方法で準備したものを用いた。模擬地盤内の水圧は、溝壁面から 5~25cm の間の土槽底面に 5 個の間隙水圧計を設置し計測した。

まず、模擬地盤土槽 (L1000×H250×W250mm) に試料土を入れ良く締固め、飽和状態とした。上部の載荷ジャッキで、模擬地盤上面に上載荷重 (9.8~39.2kN/m<sup>2</sup>) を加えた。安定液円筒に安定液を入れ、円筒内に安定液圧に相当する空気圧 (19.6~39.2kN/m<sup>2</sup>)

を加えた。次に、安定液と模擬地盤を分離している仕切板を、難透水層が形成されるように5分以上の十分な時間をかけてゆっくりと引抜いた。仕切板除去後、給水用の水シリンダーから模擬地盤内に加圧水を供給した。加圧水圧は3分間に $9.8\text{kN/m}^2$ の割合で増加させた。この時、模擬地盤内の間隙水圧の測定値の平均値が、加圧後3分以上経過しても上昇しない状態が続く、あるいは目視により崩壊を確認することにより溝壁の崩壊とした。これらの実験条件および実験結果を表-6に示す。

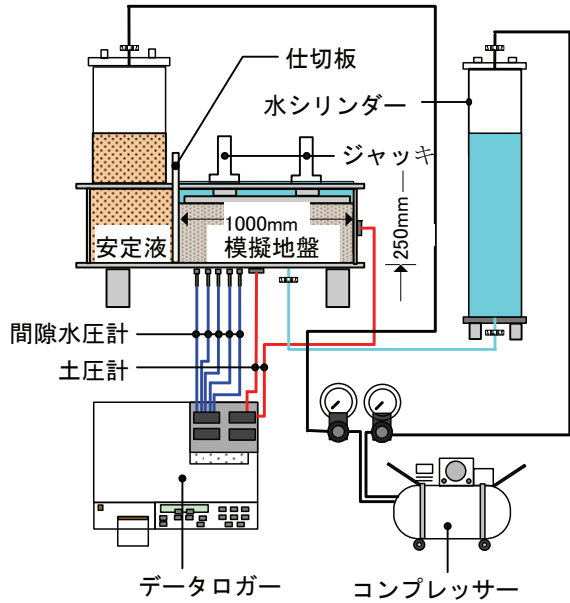
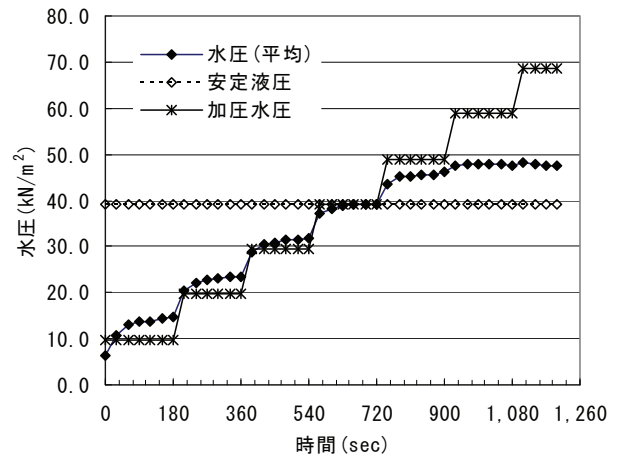


図-11 溝壁崩壊試験装置

表-6 溝壁崩壊試験結果

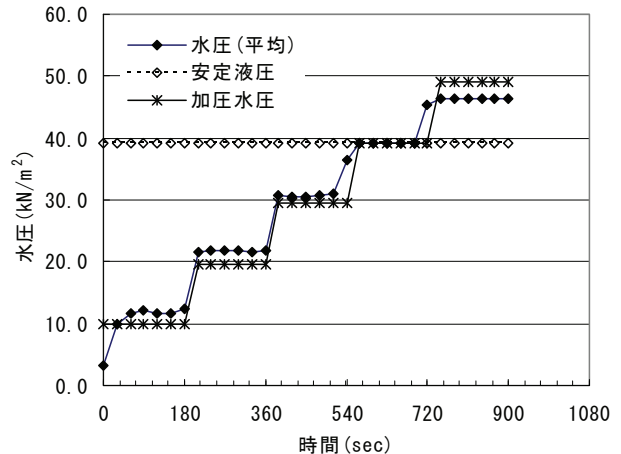
試料土	安定液種別	安定液圧 ( $\text{kN/m}^2$ )	上載荷重 ( $\text{kN/m}^2$ )	崩壊時		
				崩壊水圧 ( $\text{kN/m}^2$ )	加圧水圧 ( $\text{kN/m}^2$ )	時間 (sec)
To	気泡	19.6	9.8	28.4	29.4	440
To	気泡	19.6	19.6	23.4	29.4	440
To	気泡	19.6	29.4	30.4	39.2	720
To	気泡	19.6	39.2	28.2	29.4	440
To	気泡	39.2	9.8	47.2	58.8	940
To	気泡	39.2	19.6	51.4	68.6	1160
To	気泡	39.2	29.4	47.6	58.8	930
To	気泡	39.2	39.2	44.9	44.9	780
To	ベントナイト	19.6	9.8	21.2	29.4	400
To	ベントナイト	19.6	29.4	29.6	39.2	570
To	ベントナイト	39.2	9.8	42.9	49.0	740
To	ベントナイト	39.2	29.4	46.3	49.0	740
K5	気泡	19.6	19.6	22.0	39.2	580
K5	気泡	19.6	39.2	22.5	29.4	520
K5	気泡	39.2	19.6	58.8	58.8	980
K5	気泡	39.2	39.2	42.7	49.0	900
K5	ベントナイト	19.6	19.6			
K5	ベントナイト	19.6	39.2			
K5	ベントナイト	39.2	19.6			
K5	ベントナイト	39.2	39.2			
K4	気泡	19.6	19.6	25.9	29.4	500
K4	ベントナイト	19.6	19.6	難透水層が形成できない		

豊浦砂を模擬地盤として気泡安定液及びベントナイト安定液を使用した場合の安定液圧  $P_w=39.2\text{kN/m}^2$ 、上載圧  $P_s=29.4\text{kN/m}^2$  とした時の実験結果を各々図-12、図-13に示す。気泡安定液を用いた図-12によると、加圧水圧を $9.8\text{kN/m}^2$ とした状態では模擬地盤内の間隙水圧平均値は $14.9\text{kN/m}^2$ に増加しているが、安定液圧 $39.2\text{kN/m}^2$ の約40%にすぎず難透水層を介して安定液圧が充分作用して、溝壁が安定した状態といえる。その後、段階的に加圧水圧を増加させると、加圧水圧が安定液圧を超えない範囲では模擬地盤内の間隙水圧は単調に増加するが、加圧水圧が安定液圧を超えると間隙水圧は安定液圧より $8.4\text{kN/m}^2$ 高い $47.6\text{kN/m}^2$ をピークとして増加しなくなった。これは加圧により模擬地盤内の間隙水が安定液中に流れ込んでいる状態であり、溝壁の崩壊を意味する。ベントナイト安定液を用いた図-13では、泥膜の透水係数が十分小さいので、加圧水圧が安定液圧よりも小さい範囲では、地盤内の間隙水圧は加圧水圧にほぼ相当する値となった。



(To, 気泡安定液,  $P_w=39.2$ ,  $P_s=29.4$ )

図-12 安定液圧 - 水圧 - 加圧水圧の関係



(To, ベントナイト安定液,  $P_w=39.2$ ,  $P_s=29.4$ )

図-13 安定液圧 - 水圧 - 加圧水圧の関係



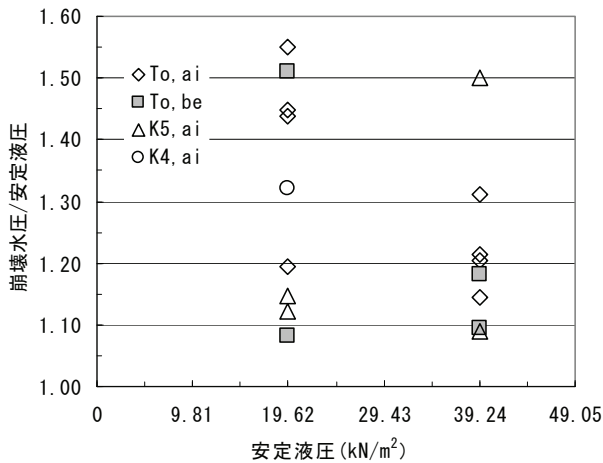


図-14 崩壊水圧と安定液圧の関係

しかしながら、加圧水圧が安定液圧を上回ると地盤間隙水圧は気泡安定液の場合と同様にほぼ  $46.3\text{kN/m}^2$  で増加しなくなったので、溝壁が崩壊したものと判断できる。なお、試料土として珪砂 5 号、珪砂 4 号を使用した場合には、安定液透過試験と同様に気泡安定液では難透水層を形成できたが、ベントナイト安定液は難透水層を形成できず、仕切板を引抜くと同時に溝壁が崩壊した。

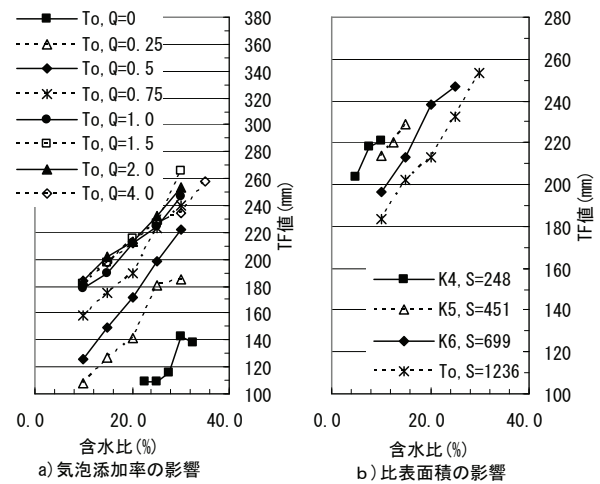
壁の崩壊が生じた時の実験結果を示す表-6 をもとに崩壊水圧と安定液圧との比を図-14 に示す。気泡安定液、ベントナイト安定液ともに崩壊水圧と安定液圧の比は安定液圧に拘わらず 1.1~1.5 の範囲に分布しており、気泡安定液はベントナイト安定液と同等の性能を有しているといえる。なお、図中の凡例の ai は気泡安定液、be はベントナイト安定液である。

(3) 気泡安定液の掘削性能に係わる特性

a) 気泡安定液の流動性の推定

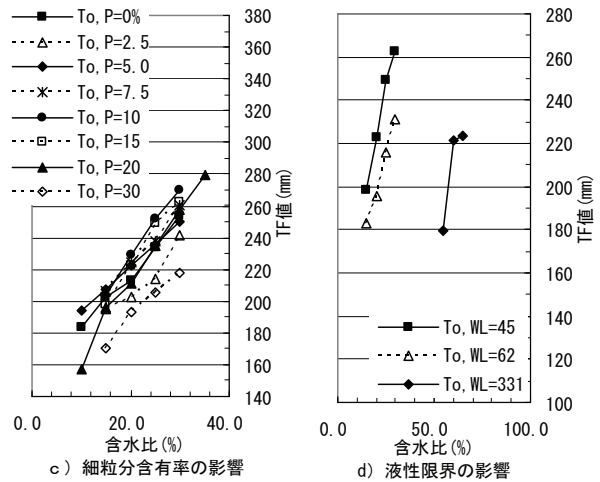
(2) で述べたように、ベントナイト系安定液では溝壁安定性を含む掘削性能に関係する流動性を表す指標として、ファンネル粘性が使用される。ファンネル粘性は安定液のみの粘性を表す指標であるのに対して、TF 値は掘削土砂を含んだより広い範囲の流動性を表すことができるので、本研究では気泡安定液の流動性の指標として TF 値を採用することにした。なお、TF 値の測定はセメントの物理試験方法 (JIS R 5201) に規定されたモルタルのフロー値を計測する装置、計測方法によった。

TF 値に影響を及ぼす要因としては、含水比、気泡添加率、掘削土の比表面積、細粒分含有率、液性限界等が考えられる。そこで、気泡添加率、比表面積、細粒分含有率、液性限界をパラメーターとして TF 値と含水比の関係を調べた。



a) 気泡添加率の影響

b) 比表面積の影響



c) 細粒分含有率の影響

d) 液性限界の影響

図-15 TF 値と含水比の関係

まず、試料土として豊浦砂を使用し気泡添加率を 0~4% の範囲で 8 段階に設定し、この各々の状態に対し含水比を変化させた気泡安定液を作製し、TF 値を計測した。パラメーターとして気泡添加率を用いた TF 値と含水比の関係を図-15 a) に示す。

次に、試料土は各種珪砂を使用し気泡添加率  $Q=2.0\%$  とし、含水比を変化させて気泡安定液を作製し、比表面積をパラメーターとして TF 値と含水比の関係図を描くと図-15 b) となる。

また、豊浦砂にカオリンを 0~30% の 8 段階に分け添加した試料土を使用し、気泡添加率 2% の状態で、気泡安定液を作製し、細粒分含有率をパラメーターとしたときの TF 値と含水比の関係図を図-15 c) に示す。

同様に、コンシステンシー特性の異なる粘土鉱物が TF 値に及ぼす影響を調べるために、豊浦砂にカオリン、木節粘土、ベントナイトを添加した試料を使用し、気泡添加率  $Q=2.0\%$  としたときの TF 値と含水比の関係を図-15 d) に示す。

図-15 a), b), c), d) を見ると TF 値は選択したパラ

メーターに拘わらず，含水比とほぼ比例関係にあることがわかるので，TF 値は式(10)で表すことができる．

$$TF = \alpha_n w + \beta_n \quad (10)$$

ここに， $\alpha_n$ ， $\beta_n$  は係数である．

$\alpha_n$ ， $\beta_n$  の決定に先立ち，図-15 a) , c) をそれぞれ含水比をパラメーターとして描き直すと図-16，図-17となる．図-16 から，気泡添加率が0~1%の間では気泡量の増加に伴いTF 値は急激に増加し比例関係にあることがわかる．しかしながら，気泡添加率が1%を越すと気泡添加率が増加してもTF 値は変化せず，むしろわずかな減少傾向が見られる．これは気泡添加率が1%までは気泡が土粒子間に入り摩擦力を減少させるが，1%を超えると土粒子間の接触はなくなるためではないかと考えられる．

一方，図-17 では細粒分添加に伴う潤滑性増加と粘性増加の相反する効果による影響が反映した結果となっている．具体的には，細粒分含有率が0~2.5%の範囲では細粒分添加による粘性増加によってTF 値はわずかに低下するが，2.5~10%の範囲では細粒分による土粒子間の潤滑性が増してTF 値が増大し，10%以上になると細粒分が過剰になって粘性が増加しTF 値が再び低下している．大局的には10%以下では細粒分添加による土粒子間の潤滑効果が卓越してTF 値が増加し，10%以上になると過剰な細粒分により粘性が増加しTF 値は減少している．

以上の事実を踏まえて， $\alpha_n$ ， $\beta_n$  の決定にあたっては，気泡添加率  $Q$  が1%以上とそれ以下の領域，細粒分含有率  $P$  が10%以上とそれ以下の4つの領域で個別に係数  $\alpha_n$ ， $\beta_n$  を求めることとした． $\alpha_n$ ， $\beta_n$  は気泡添加率，比表面積，細粒分含有率，液性限界の影響を受けるので，これらを変数として重回帰分析を行い，得られた  $\alpha_n$ ， $\beta_n$  の推定式を式(10)に代入すると，各領域におけるTF 値を求めることができる．

領域1：  $Q < 1, P < 10$

$$TF_1 = (-0.78Q + 3.90)w + (0.817Q + 0.180)(-0.0422S + 1.71P + 199) \quad (11)$$

領域2：  $Q < 1, P \geq 10$

$$TF_2 = (0.200Q + 3.90)w + (0.817Q + 0.180)(-0.0363S - 0.601w_L + 196) \quad (12)$$

領域3：  $Q \geq 1, P < 10$

$$TF_3 = (-0.231Q - 0.00628w_L + 3.86)w + (-0.0422S + 1.71P + 199) \quad (13)$$

領域4：  $Q \geq 1, P \geq 10$

$$TF_4 = (-0.257Q + 0.00316w_L + 4.10)w + (-0.0363S - 0.601w_L + 196) \quad (14)$$

以上のようにして得られたTF 推定値とTF 計測値

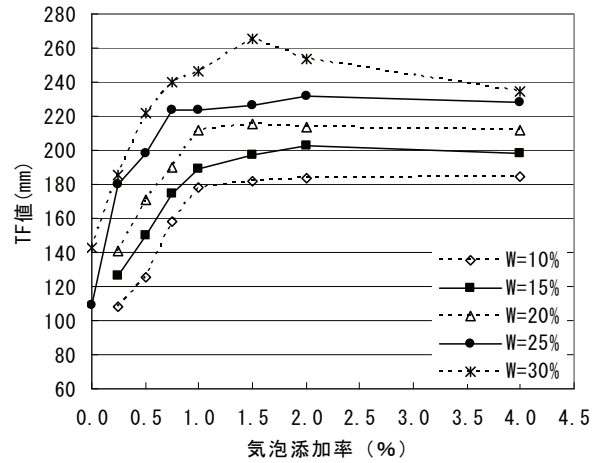


図-16 TF 値と気泡添加率の関係

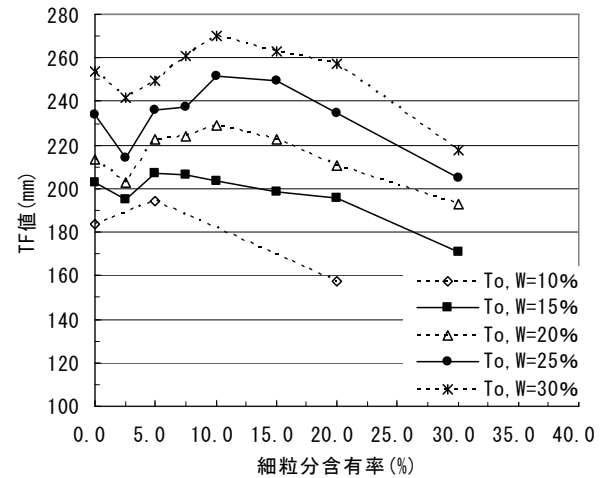


図-17 TF 値と細粒分含有率の関係

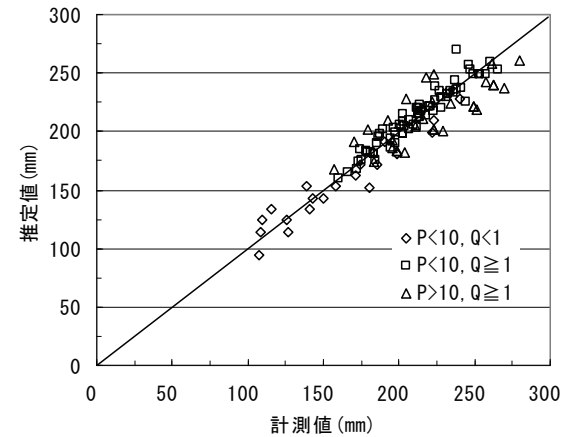


図-18 TF 値の推定値と計測値の関係

を領域別に求めて，比較すると図-18となる．これより，実用的に意味のあるTF 値が100(mm)から300(mm)の範囲では，式(11)から式(14)を用いてTF 値を推定することは可能と判断できる．

b) 気泡安定液の適用深度

気泡安定液中の気泡は掘削深度が大きくなると拘束圧により圧縮されて，気泡安定液の基本性状に変化

が生じることが懸念される。実験的に検討した結果、掘削深度 30m に相当する約 310(kN/m<sup>2</sup>)までの拘束圧の範囲では、安定液としての流動性を保持することを確認している<sup>5)</sup>。これ以上の拘束圧の下でもある程度の機能を保持することが推定されるが、実工事等で確認する必要がある。

## 5. 気泡安定液の現場管理手法

### (1) 気泡安定液の管理項目及び管理限界値

前章までの気泡安定液の物性と基本性能に関する実験結果に基づいて、気泡安定液の現場適用における管理項目として、下記の性能指標に着目した。

- ・ 掘削に関わる安定液の流動性
- ・ 安定液の懸濁安定性に関わる最小含水比、分離含水比
- ・ 溝壁の安定に関わる単位体積重量、難透水層形成性能

これらの性能指標を支配する管理指標として、ベントナイト安定液の比重とファンネル粘性に相当する、気泡安定液の単位体積重量  $\gamma_c$  と TF 値を採用した。 $\gamma_c$  と TF 値はともに、式(9)、式(11)～式(14)に示されるように、掘削土砂の物性値 ( $P, S, w_L, \gamma_{ss}, \gamma_{sc}$ ) と水と気泡の単位体積重量( $\gamma_w, \gamma_b$ )が与えられると、気泡安定液の気泡添加率  $Q$  と含水比  $w$  の2つの変数の関数となる。そこで下記のような手順で、 $Q$  と  $w$  の限界値を定め、それをもとに  $\gamma_c$  と TF 値による気泡安定液の管理図を作成した。

#### a) 掘削性能より定まる管理限界値

掘削性能を支配する安定液の流動性は、TRD 工法では TF 値で 150～200mm を管理目標としている<sup>7)</sup>。前章 4. (3)の結果によれば、TF 値は細粒分含有率 10%以上と以下の土において、各々気泡添加率  $Q$  が 1%以上と以下の4種の領域  $n(=1,2,3,4)$ において、式(11)から式(14)で表されるので、TF 値の管理条件式は式(15)となる。

$$TF_n = \alpha_n w + \beta_n \geq 150 \quad (15)$$

ここで、 $TF_n$ : 領域  $n(n=1\sim4)$  の TF 値、 $\alpha_n, \beta_n$ : 領域  $n$  における係数。 $\alpha_n, \beta_n$  の推定式に掘削土砂の物性値 ( $P, S, w_L$ ) を代入すると、 $\alpha_n, \beta_n$  は気泡添加率  $Q$  の一次式となり、かつ  $\alpha_n$  は常時正の値である。したがって、この不等式の等号成立は気泡安定液の含水比  $w$  が最小含水比  $w_{min}$  の時であり、 $w_{min}$  を代入して得られた気泡添加率以上に保つことが必要である。この気泡添加率を最小気泡添加率  $Q_{min}$  とすると、TF 値を所定の管理値以上に保つための管理限界は最小

気泡添加率  $Q_{min}$  となる。

#### b) 安定液の懸濁安定性より定まる管理限界値

気泡安定液の含水比は気泡の消泡限界を表す最小含水比  $w_{min}$  より大きく、分離限界である分離含水比  $w_{sep}$  より小さく保たねばならないので懸濁安定性に関する管理限界は式(16)で表される。

$$w_{min} \leq w \leq w_{sep} \quad (16)$$

$w_{min}, w_{sep}$  は式(4)及び式(8)で表されるので、これらに掘削土砂の物性値( $P, S, w_L$ )を代入すると  $w_{min}$  は定数となり、 $w_{sep}$  は  $Q$  の単調増加関数となる。一般に気泡安定液の気泡添加率  $Q$  が大きいほど、含水比は大きくなる。分離含水比  $w_{sep}$  は土粒子の分離が生じる最小の含水比なので、気泡添加率  $Q$  の値としては前項 a) の  $Q_{min}$  を代入すると  $w_{sep}$  が計算できる。よって、気泡安定液の懸濁安定性に関する管理限界値である  $w_{min}, w_{sep}$  が決まる。

#### c) 溝壁安定性より定まる管理限界値

溝壁安定性に関しては、前述のように気泡安定液の単位体積重量による管理が重要である。管理限界値は地下水圧に対抗するために、図-1 のベントナイト系安定液の管理図で比重 1.05 に相当する単位体積重量 10.3 (kN/m<sup>3</sup>)以上を目標とすることができる。気泡安定液の理論単位体積重量は式(9)で表されるので、管理条件は式(17)で表される。

$$\gamma_c = \frac{100 + w + Q}{\frac{100 - P}{\gamma_{ss}} + \frac{P}{\gamma_{sc}} + \frac{w}{\gamma_w} + \frac{Q}{\gamma_b}} \geq 10.3 \quad (17)$$

式(17)に掘削土砂の物性値( $\gamma_{ss}, \gamma_{sc}, P$ ) 及び水と気泡の単位体積重量( $\gamma_w, \gamma_b$ )を代入すると、次式のような含水比  $w$  と気泡添加率  $Q$  の不等式となる。

$$Q \leq a - bw \quad (18)$$

ここに、 $a, b$  は掘削土砂、水、気泡の物性値によって決まる定数であり、 $b$  は正である。この不等式(18)の等号成立は気泡安定液に許容される最大の含水比である分離含水比  $w_{sep}$  の時であり、気泡添加率の最大値 (=最大気泡添加率  $Q_{max}$ ) が決まる。

### (2) 気泡安定液の管理、管理図の作成及びその利用

前述のように、気泡安定液の単位体積重量  $\gamma_c$  (式(9)) 及び TF 値(式(11)～式(14))は  $Q$  と  $w$  をパラメータとした関数なので、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、 $\gamma_c$  と TF 平面上で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

加率線図において、前節(1)で求めた最小含水比  $w_{min}$ 、分離含水比  $w_{sep}$ 、最大気泡添加率  $Q_{max}$ 、最小気泡添加率  $Q_{min}$  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。以上のようにして求めた、気泡安定液管理図の一例を図-19に示す。

図-19に示す気泡安定液管理図の利用と対応手順は、下記のように要約することができる。

- ・ 気泡安定液の単位体積重量及び TF 値が[A]の領域内にあるときは安定した施工が可能である。
- ・ [B]の領域では、気泡安定液の単位体積重量が小さく、溝壁の崩壊が生じる危険がある。気泡安定液の状態が[A]から[B]の境界に近づいたときには、気泡添加量を減少させ単位体積重量を増加させる。
- ・ [C]の領域では土粒子の分離・沈降が生じるので、[A]から[C]の境界に近づいたときは加水量を減少させ、分離・沈降を防ぐ。
- ・ [D]の領域では TF 値が急激に小さくなり、流動性が損なわれるので、[A]から[D]の境界に近づいたときは気泡添加量を増やす。
- ・ [E]の領域では気泡の消泡が生じるので、[A]から[E]の境界に近づいたときは加水量を増加させる。

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み合わせることにより達成できる。

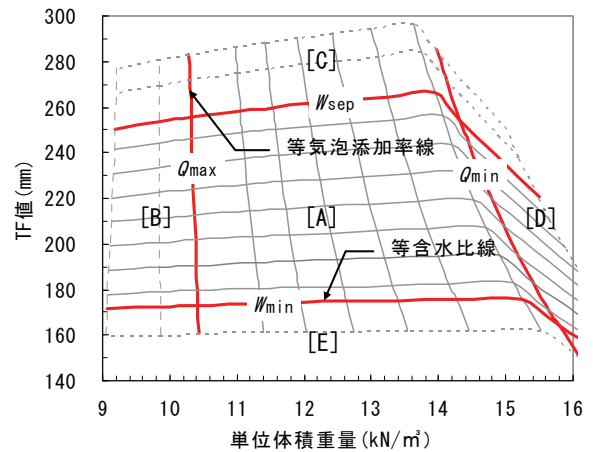


図-19 気泡安定液管理図

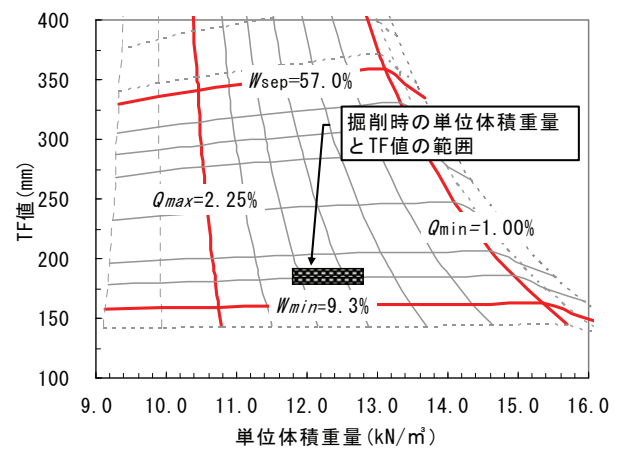


図-20 気泡安定液管理図(強風化凝灰岩)

## 6. 気泡安定液によるソイルセメント地中連続壁の施工

強風化凝灰岩及び天満砂礫層を TRD 掘削機により気泡安定液を利用してソイルセメント地中連続壁を施工した実績をもとに、前章 5. で考案した気泡安定液の現場管理手法の妥当性を検証した。

### (1) 強風化凝灰岩の掘削

#### a) 工事概要

- ・ 施工場所：青森県 (2 工区)
- ・ 施工法：TRD 工法によるソイルセメント地中連続壁
- ・ 施工規模：施工延長=500m，掘削深度(最大)=26m，掘削幅=0.55m
- ・ 表層からの土質構成：盛土；0~1m，火山灰質シルト；1~3m，強風化凝灰岩(全体にローム状で礫混じり)3~16m，風化凝灰岩(カッターで容易に傷がつく)；16~28m
- ・ 物性値(各層の混合土)：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%

#### b) 施工状況

施工管理のために、掘削予定地点の採取土の物性試験及び気泡安定液の配合試験を行った。配合試験では排泥土量を少なくするために気泡添加率は 1.0%とし、加水量を変化させて、気泡安定液を作製した。その結果、単位体積重量=10.3kN/m<sup>3</sup>，TF 値=180mm の気泡安定液を得るための初期配合量を、掘削土 1m<sup>3</sup> 当たりの気泡量 0.305 m<sup>3</sup> (気泡添加率=1.0%に相当)、加水量 0.290 m<sup>3</sup> とした (第 2 工区では 0.350 m<sup>3</sup>)。

図-20 に施工に使用した安定液管理図ならびに施工中の気泡安定液の単位体積重量と TF 値の計測値の範囲をプロットした。初期配合で決めた気泡量、加水量をほぼ変えることなく安定した掘削が可能であり、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 で安定していた。

#### c) 排泥土量

掘削時の掘削土量、気泡添加量、加水量ならびに掘削時の排泥土量を表-7 に示す。排泥土量が気泡と水の添加量の和より少ないのは、ソイルセメント壁造

表-7 掘削土量と1m<sup>3</sup>当たりの排泥土量収支

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	2,056	0.305	0.350	0.321
平均	2,444	0.305	0.320	0.286

成時に気泡を消泡させたこと及び気泡安定液が溝壁から透水したことによると推定される。

掘削に伴う排泥土量率を式(19)で求めると、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実績値55~70%と比較すると1/2以下であった。

$$\text{排泥土量率} = \frac{\text{排泥土量}}{\text{掘削土量}} \times 100 \quad (19)$$

(2) 天満礫層への適用

a) 工事概要

- ・ 施工場所：大阪府
- ・ 施工法：TRD 工法によるソイルセメント地中連続壁
- ・ 施工規模：施工延長=80m, 掘削深度=26m, 掘削幅=0.55m
- ・ 表層からの土質構成：盛土；0~2m, 砂混じりシルト, シルト混じり砂層の互層；2~12m, 砂礫層(天満層)；12~28m
- ・ 物性値(各層の混合土)：粗粒分, 細粒分の土粒子単位体積重量=26.5kN/m<sup>3</sup>, 粗粒分の50%粒径=0.0007m, 細粒分含有率=34%, 液性限界=70%

b) 施工状況と排泥土量

掘削土の物性試験及び気泡安定液の配合試験をもとに、単位体積重量=10.3kN/m<sup>3</sup>, TF 値=180mm の気泡安定液を得るための初期配合量を、掘削土1m<sup>3</sup>当たりの気泡添加量を0.391 m<sup>3</sup>(気泡添加率1.25%に相当), 加水量を0.162 m<sup>3</sup>とした。

現場で使用した気泡安定液の管理図及び施工中の気泡安定液の単位体積重量とTF 値の計測値の範囲を図-21に示す。この現場の掘削土砂は掘削対象層の約1/2が天満礫層であることより、前節(1)の青森の現場に比較して粗粒分が多いので含水比の許容管理幅が狭かったが、気泡安定液の単位体積重量11.8~13.7kN/m<sup>3</sup>, TF 値は190~200mmの範囲で安定した施工ができた。また、掘削に伴う排泥土量は約170 m<sup>3</sup>であり、全掘削土量1140 m<sup>3</sup>の14.7%であった。これは同様な土層構成の地盤をベントナイト系安定液で掘削した場合の実績値の1/3程度であった。

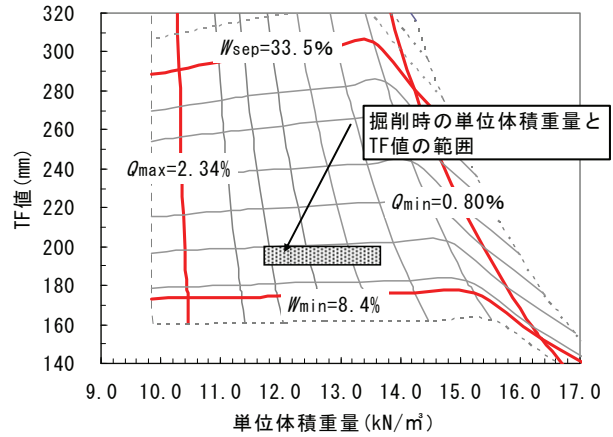


図-21 気泡安定液管理図(天満礫層)

7. 結論

本研究は、掘削土砂に適量の気泡及び水を加えた懸濁液である気泡安定液の物性、基本性能を実験的に検討するとともに、現場での施工管理方法を考案し、施工実績をもとにその妥当性を検証したものである。その結果、気泡安定液は地盤掘削用安定液として必要な機能は有しており、これらは気泡添加率と加水量により適切にコントロールできることを実証した。また、気泡安定液を利用した2箇所の工事の実績によると、排泥土中の気泡は容易に消泡できるので、掘削に伴う排泥土量はベントナイト系安定液の場合の1/2~1/3になることを確認した。以下に、得られた結論を記す。

- (1)気泡安定液は掘削土砂に気泡と水を加えた懸濁液であるので、掘削土砂の物性(土粒子の単位体積重量, 比表面積, 細粒分含有率, 液性限界)の影響を受けるが、気泡添加率と加水量により安定液として要求される基本性能(単位体積重量, 流動性等)を容易にコントロールすることができる。
- (2)気泡安定液によって、掘削時の溝壁安定に不可欠な難透水層が形成され、その対象土質はベントナイト系安定液よりも広い。
- (3)気泡安定液は、安定液の懸濁安定に関係する最小含水比と分離含水比、溝壁安定と掘削性能に関係する単位体積重量とTF 値の4種類の項目によってその基本性能が決まる。これらの4種の項目は、それぞれ掘削土砂の物性値, 気泡添加率, 含水比を変数とする関数で表示できる。
- (4)気泡安定液は、約310(kN/m<sup>2</sup>)の拘束圧のもとでも安定液としての機能を保持しうる。
- (5)現場における掘削管理は、気泡安定液管理図を用いて行うことができる。管理図は気泡安定液の単位

体積重量と TF 値の関係図中に、最小含水比と分離含水比及び最小気泡添加率と最大気泡添加率の 4 本の管理線に囲まれた領域として表示される。この領域内では、気泡安定液としての機能を発揮する。掘削時に気泡安定液の単位体積重量と TF 値で表される状態がこの領域外に移行する場合には、気泡添加量あるいは加水量の増減により対応可能である。

(6)強風化凝灰岩(掘削土量、約 2500m<sup>3</sup>×2 工区)及び天満礫層(掘削土量 1140m<sup>3</sup>)を気泡安定液で掘削した良好な実績に基づいて、本研究で考案した気泡安定液管理手法の妥当性を実証した。また、気泡安定液中の気泡は容易に消泡できるので掘削に伴う排泥土量はベントナイト安定液の場合の約 1/2～1/3 になることを確認した。

謝辞：本研究の実施に当たり、室内実験については早稲田大学赤木研究室の学生諸君の協力を、現地試験に関しては太洋基礎工業株式会社の故今井金次氏、土屋敦雄氏の協力を得た。記して、謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) シールド技術協会：気泡シールド工法，2007.6.
- 2) 堀井陽三，今野昭三，大津正良，塩田堂太郎：地下連続壁工法，鹿島出版会，p.96，1980.
- 3) 嘉門雅史，浅川美利：新体系土木工学 16 土の力学(1)，技報堂出版，pp.115-157，1988.
- 4) Akagi, H., Kondo, Y., Nakayama, T. and Naoe, H.: 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.
- 5) 赤木寛一：気泡材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，2006.3
- 6) 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.1523-1524，2002.7
- 7) TRD 工法協会：TRD 工法技術資料，2001.8.

(2007. 11. 5 受付)

## PRODUCTION OF AIR FOAM SUSPENSION FOR DIAPHRAGM WALL EXCAVATION USING EXCAVATED SOIL AND ITS APPLICATION

Yoshimasa KONDO, Takashi NAKAYAMA and Hirokazu AKAGI

A novel stabilizing liquid using an air foam rather than bentonite clay slurry, i.e. an air foam suspension was employed in order to stabilize the trench wall surface during a diaphragm wall excavation. An air foam suspension is created by mixing excavated soil with air foam made from a surfactant. The performance of the air foam suspension depends on its density and consistency, that is, its table flow value (TF). By comparing the trench stabilization capacity of an air foam suspension with that of bentonite clay slurry in model tests, the performance of air foam suspension was confirmed. The performance of air foam suspension for diaphragm wall excavation is presented with two actual trial construction case records, which shows the superiority of air foam suspension to bentonite clay slurry as a stabilizing liquid. This method reduces the wasted soil volume produced from the diaphragm wall excavation and the construction costs of working on an underground diaphragm wall.