

気泡材を利用した地盤掘削用安定液の研究開発

(課題番号 16560437)

平成 16 年度～平成 17 年度科学研究費補助金 (基盤研究(C)(2))

研究成果報告書

平成 18 年 3 月

研究代表者 赤 木 寛 一
(早稲田大学・理工学術院・教授)

はしがき

地中連続壁工法は、1930年頃ヨーロッパで始めて採用されて以来、今日まで掘削溝内を安定液で満たし、水中コンクリートを打ち込み、地中に連続した構造物を構築する施工法として発展してきた。日本では、1960年頃に止水壁として用いられたのが最初であるが、市街地周辺の地下工事において、H鋼の打ち込みやシートパイル施工に伴う騒音、振動が社会問題化したため、徐々に地中連続壁工法が採用されるようになってきた。近年では地中連続壁工法の施工実績も上がり、単なる土留め壁や止水壁にとどまらず、永久構造物として地中壁や杭に用いられ、ケーソン基礎の代替工法、液状化の防止工法としても採用されるようになった。また、現地盤にセメントミルクを噴射しながら攪拌し、その中に鋼材を建て込むSMW工法(Soil Mixing Wall Method)も発達した。将来的には、土地の高度利用から地下空間の利用はますます盛んになり、大深度大壁圧に対応できるような地中連続壁は大型構造物の基礎や土留め壁として用いられるとともに、安価な地中連続壁はシートパイル工法に代わる、低騒音、低振動の基礎や土留め壁として用途が広げられていくと考えられる。

地中連続壁工法は、上記のように掘削溝内を安定液で満たし、水中コンクリートを打ち込み、地中に連続した構造物を構築する施工法として発展してきた。これまで、主として用いられてきた地盤掘削用安定液はベントナイト泥水である。本研究では、気泡シールド工法で採用されているような起泡材を用いた気泡安定液の性質を調査し、設計管理手法を確立するとともに、実施工にも適用することを目的とする。

研究組織

研究代表者： 赤木寛一（早稲田大学・理工学術院・教授）

研究経費

平成16年度	1,800	千円
平成17年度	1,000	千円
計	2,800	千円

研究発表

(1)学会誌等

Y.Kondo, T.Nakayama, H.Naoe and H.Akagi, Cost reduction of diaphragm wall excavation using air foam, Proc. 5th International Conference of TC28 of the ISSMGE, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, pp.413~418, Amsterdam, The Netherlands, June, 2005

赤木寛一, 気泡を利用した地中連続壁掘削用安定液の開発とコスト評価, 基礎工, Vol.31, No.7, pp.22~25, 2003年7月

H.Akagi, Y.Kondo, T.Nakayama and H.Naoe, Cost reduction of diaphragm wall excavation using air foam and case record, Proc. 5th International Congress on Environmental Geotechnics, Cardiff, UK, June, 2006(to be printed)

(2)口頭発表

直江久永, 赤木寛一, 近藤義正: 地盤掘削用気泡安定液におけるブリージング管理, No.798, PP.1593~1594, 第39回地盤工学研究発表会, 2004年7月

直江久永, 赤木寛一, 近藤義正: 石膏を添加した地盤掘削用気泡安定液固化物の強度特性, III-503, pp.1005~1006, 2004年9月

(3)特許

名称: 安定液組成物

出願番号: 特願2000-01358

公報発行日: 2005年12月14日

登録番号: 特許登録第372570号

特許権者: 1.学校法人早稲田大学, 2.有限会社マグマ, 3.太陽基礎工業株式会社

発明者: 1.赤木寛一, 2.近藤義正, 3.今井金次

目 次

はしがき	1
研究発表	2
目次	3
第1章 序論	5
第2章 起泡剤の諸元	8
2.1 概要	
2.2 起泡材の特性	
2.3 起泡材の調査	
2.4 起泡材の決定	
2.5 起泡材の化学的安定性	
第3章 気泡安定液の含水比条件	14
3.1 概要	
3.2 気泡安定液の含水比の下限値	
3.3 気泡安定液の含水比の上限値	
3.4 気泡安定液の含水比の簡易判定方法	
第4章 気泡安定液の比重条件	21
4.1 概要	
4.2 気泡膜の形成	
4.3 気泡安定液の圧縮性	
4.4 気泡添加率の上限値	
4.5 単位体積重量	
4.6 気泡量の検証	
第5章 気泡安定液の固化特性	28
5.1 概要	
5.2 ブリージング特性	
5.3 固化特性	
5.4 透水特性	

第 6 章 気泡安定液の現場管理手法	35
6.1 概要	
6.2 混合土の条件	
6.3 気泡安定液の配合計画	
第 7 章 気泡安定液を利用した試験施工	40
7.1 概要	
7.2 試験施工位置	
7.3 掘削計画	
7.4 プラント	
7.5 配合計画	
7.6 計測結果	
7.7 掘削状況	
7.8 排土量	
7.9 気泡ソイルセメントの強度	
7.10 まとめ	
第 8 章 結論	52
参考文献	53
付録	54
Y.Kondo, T.Nakayama, H.Naoe and H.Akagi, Cost reduction of diaphragm wall excavation using air foam, Proc. 5th International Conference of TC28 of the ISSMGE, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, pp.413~418, Amsterdam, The Netherlands, June, 2005	

第1章 序論



TRD マシンによる掘削

地中連続壁工法は、1930年頃ヨーロッパで初めて採用されて以来、今日まで掘削溝内を安定液で満たし、水中コンクリートを打ち込み、地中に連続した構造物を構築する施工法として発展してきた。日本では、1960年頃に止水壁として用いられたのが最初であるが、市街地周辺の地下工事において、H鋼の打ち込みやシートパイル施工に伴う騒音、振動が社会問題化したため、徐々に地中連続壁工法が採用されるようになってきた。近年では地中連続壁工法の施工実績も上がり、単なる土留め壁や止水壁にとどまらず、永久構造物として地中壁や杭に用いられ、ケーソン基礎の代替工法、液状化の防止工法としても採用されるようになった。また、現地盤にセメントミルクを噴射しながら攪拌し、その中に鋼材を建て込むSMW工法(Soil Mixing Wall Method)も発達した。将来的には、土地の高度利用から地下空間の利用はますます盛んになり、大深度大壁圧に対応できるような地中連続壁は大型構造物の基礎や土留め壁として用いられるとともに、安価な地中連続壁はシートパイル工法に代わる、低騒音、低振動の基礎や土留め壁として用途が広がられていくと考えられる。

地中連続壁工法で、直立に地盤を掘削する深さは用途により様々であるが、掘削深さが地盤の自立高さを超える場合や、地盤の地下水位置が高いために掘削溝に水が流入し、溝壁の崩壊の恐れがある場合、“安定液”が用いられる。これまで、主として用いられてきた安定液はベントナイト泥水であり、地中連続壁の規模も壁厚は約50(cm)で掘削深さも20(m)程度であった。掘削機の発達とともに100(m)クラスの深度の地中連続壁が施工されるようになってくると、安定液もCMC(Carboxyl Methyl Cellulose)とベントナイトの長所を取り入れたベントナイトCMC溶液が用いられるようになってきた。今後の開発目標としては、第一に大深度の施工にも適用可能な安定液、第二に施工コストを低減できる安定液、第三に排出土砂を低減できるような環境に配慮した安定液である。

近年の研究では、高分子材料を主成分とした地盤掘削用安定液が開発された。地中連続壁工法の施工においては通常、掘削によって混入した細粒分によって泥水比重は増加し、粘性も増加する。高分子材料を主成分とした地盤掘削用安定液は、高比重でも低粘性であり、セメントによる劣化が少なく、微生物による腐敗も少ないため、ベントナイトCMC安定液に比べ、溝壁の保持機能が高い。よって、掘削土の混入による泥水の粘性増加を抑制するとともに、長期的に劣化が起こらず安定している高分子材料の安定液は施工実績も徐々に増加し、新たな安定液として機能し始めている。

しかし、高分子材料を主成分とした掘削用安定液は原料コストが高い、安定液を含んだ土砂が産業廃棄物になるため、環境問題になるなどの難点がある。よって本研究では安価で、土砂が産業廃棄物とならない“起泡剤を用いた地盤掘削用安定液”(以下、“気泡安定液”)の開発を目的としている。この気泡安定液は、掘削された土砂と“気泡”の混合物を示し、気泡安定液を溝内に投入することによって従来用いられている安定液と同じ役目を果たす。

起泡剤を用いた工法の一つとして、既に気泡シールド工法技術が確立されている。これ

は、切羽あるいはチャンバ内に特殊起泡材で作られた気泡を注入しながら掘進するシールド工法の一つである。注入される微細なシェービングクリーム状の気泡が、掘削土の流動性と止水性を向上させるとともに、チャンバ内での掘削土の付着が防止できるため、切羽の安定を保持しながらスムーズな掘進ができる。気泡シールド工法は、2005年の時点で約400件の施工実績を持ち、シールド工法の一つとして広く認知されている。

気泡は、土粒子の間隙に存在する地下水が微細な気泡に置換されるため、掘削土の止水性があるという特徴を持つ。また、掘削土が砂礫地盤の場合、気泡のベアリング効果によって掘削土の流動性が高まる。さらに、気泡を混入した建設発生土の処理、処分が容易である。以上の特徴から、地中連続壁工法にも適用可能であると考え、気泡安定液の性質を調査し、管理手法を確立するとともに、実施工にも適用することが本研究の目的である。

第 2 章 起泡剤の諸元

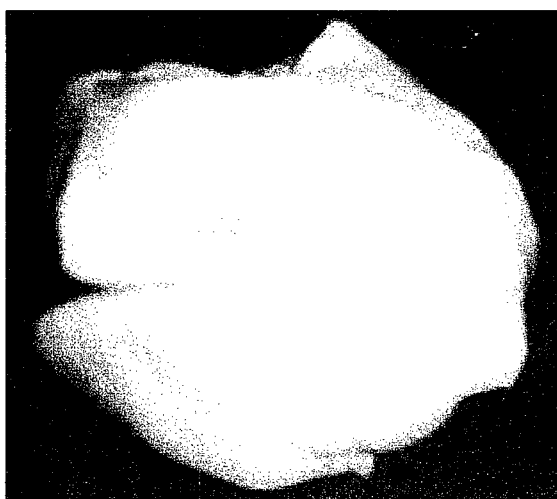
2.1 概要

2.2 起泡材の特性

2.3 起泡材の調査

2.4 起泡材の決定

2.5 起泡材の化学的安定性



実験に用いた気泡

2.1 概要

気泡安定液は、土粒子、間隙水、気泡から成り立っている。気泡は、地盤を掘削する際、溝壁を保持する、流動性を高めて掘削ブリの排出を容易にする、掘削機械のビットへの付着を防止するという目的で注入される。

気泡安定液に求められる主な性能は、掘削溝内に投入された後、H鋼を建て込みセメントミルクを注入して固結するまで溝壁を安定化することである。第2章では、気泡安定液に最も適する起泡材を決定するとともに、消泡性の面から持続性を検証する。

2.2 起泡材の特性

(1) 気泡の発生メカニズム

起泡剤は界面活性剤であり、合成界面活性剤系、樹脂石鹼系、加水分解タンパク系などに大別される。界面活性剤は親水基のイオンの電離によって陰イオン(アニオン)、非イオン(ノニオン)、両性イオンなどに分類される。図2.1に界面活性剤の構造を示した。界面活性剤は、一つの分子の中に親油基(疎水基)と親水基の相反する原子団を持つ化合物である。

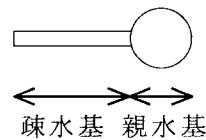


図 2.1 界面活性剤の構造

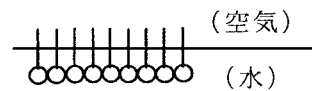


図 2.2 界面活性剤の配列

図2.2に界面活性剤の分子配列を示した。界面活性剤は水、空気の界面に向かって配列した形となり、表面張力が低下する。このとき、攪拌などの物理的作用を加えると空気が巻き込まれ、気泡が発生する。

(2) 気泡の破壊メカニズム

気泡は、気泡内の気体の拡散現象、気泡膜中の圧力差と重力による液体の流動現象を経て崩壊する。

気泡は以下に示されるような過程を経て崩壊する。まず、大きい気泡と小さい気泡が接触していると仮定する。一般に、小さい気泡の方が大きい気泡より圧力は大きい。従って、小さい気泡中の気体は液膜を通して大きい気泡に拡散してゆくため、小さい気泡は大きい気泡に取り込まれるという現象が起こる。これを繰り返しながら気泡は徐々に大きくなる。

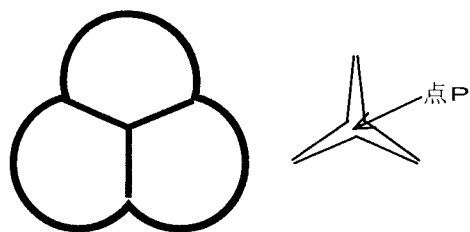


図 2.3 泡膜の模式図

図 2.3 に泡膜の模式図を示す。気泡の接している点 P は plateau's border と呼ばれこの部分は他の膜中の圧力より低いため、膜中で液体の圧力差が生じる。従って、膜中では点 P に向かって液体の流動が起こり膜は次第に薄くなる。さらに点 P に蓄積された液体は重力の影響によりゆるやかに流下し、さらに膜は薄くなる。膜が薄くなろうとする力に抵抗する力が働かなければ膜はどんどん薄くなりやがて破壊する。

2.3 気泡剤の調査

表 2.1 に 3 種類の起泡剤の諸元を示した。どの起泡材が地盤掘削用安定液に適するか実験的に調査した。

表 2.1 起泡剤の諸元

起泡剤	パリック FA100	エスコート K	ファインフォーム 707
製造元	フローリック (株)	株式会社マノール	株式会社エヌエムビー
主成分	アルキルサルフェート系界面活性剤	部分加水分解蛋白質	アルキルエーテル系化合物の複合体
外観	黄褐色液体	黒褐色液体	暗褐色液体
臭気	芳香性の微臭		
比重	1.00±0.02(20℃)	1.16±0.01(20℃)	1.02±0.01(20℃)
pH	7.0±1.0(1%溶液)	6.8±0.5(20℃)	6
凍結温度			-3℃
粘度		24±5(20℃) cps	
主な用途	エアーミルク・エアーモルタル・気泡コンクリート・軽量盛土工法	トンネル裏込め注入空洞の注入充填・タンク底復旧・床の嵩上げ 間仕切・耐火金庫・軽量・断熱・耐火材としての応用等	トンネルの坑口・道路の拡幅等の各種軽量盛土・トンネルの裏込め 傾斜地盤土・軟弱地盤対策等、廃止管等の各種空洞の充填，その他エアーミルク・エアーモルタル・気泡コンクリート工

(1) 起泡力

起泡力を調査するに当たって、希釈倍率、起泡率を以下のように定義した。

$$\text{希釈倍率(倍)} = \frac{(\text{起泡剤の重量(g)} + \text{水の重量(g)})}{\text{起泡剤の重量(g)}} \dots (2.1)$$

$$\text{起泡率(\%)} = \frac{\text{起泡後の液面(ml)} - \text{起泡前の液面(ml)}}{\text{起泡前の液面(ml)}} \times 100 \dots (2.2)$$

図 2.4 に気泡材と起泡率の関係を示した。表 2.1 に示した 3 種類の起泡剤を希釈倍率 20 倍で希釈し、500 (ml) ビーカーに入れて家庭用ハンドミキサーで 3 分間同じ条件で攪拌した後、起泡前と起泡後の液面の差を測定し、どれだけ液体が発泡したかを測定した。

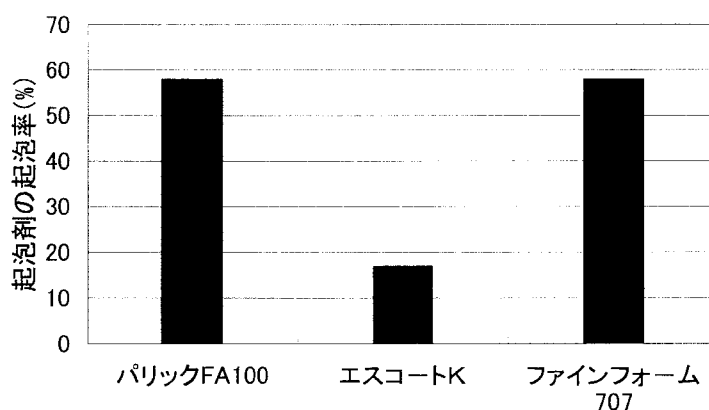


図 2.4 起泡剤と起泡率

図 2.4 から、パリック FA100 及びファインフォーム 707 の起泡率が約 60 (%) と高い値を示すため、起泡材として適することがわかる。

(2) 気泡の持続性

各起泡材の消泡の時間変化を消泡率により評価する。消泡率を以下に定義する。

$$\text{消泡率} = \frac{(\text{最初の気泡の体積}) - (\text{残っている気泡の体積})}{(\text{最初の気泡の体積})} \times 100(\%) \dots (2.3)$$

表 2.1 に示された 3 種類の起泡剤を起泡倍率 20 倍で希釈し、家庭用ハンドミキサーで起泡材の液体部分が完全に消えるまで攪拌し、500 (ml) ビーカーに満たす。各気泡の消泡率を 5 分ごとに測定した。

図 2.5 に消泡率と時間の関係を示す。

いずれの起泡材も、時間とともに単調に消泡率は増加する。60分経過後の消泡率はパリック FA100 が最も低い。

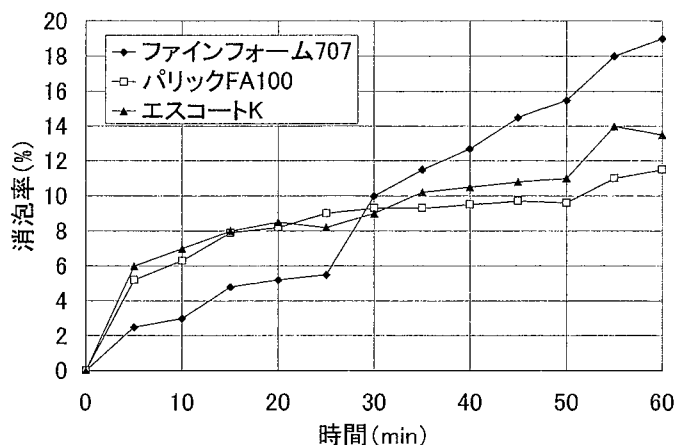


図 2.5 消泡率と時間の関係

2.4 起泡材の決定

溝壁を安定した状態に保ち続けることが安定液の機能として最も重要な機能である。よって、消泡率の最も低いパリック FA100 を起泡材として採用した。パリック FA100 は起泡率も高く、コスト面でも有利である。

図 2.6 にパリック FA100 の写真を示す。起泡方法は製造元の示方により起泡剤は原液を 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。

以下に起泡倍率と、起泡注入率の関係を定義する。

$$\text{起泡倍率} = \frac{\text{起泡後の体積}}{\text{起泡前の体積}} \quad \dots(2.4)$$

$$\text{気泡注入率} = \frac{\text{気泡の注入する体積}}{\text{掘削する地盤の体積}} \quad \dots(2.5)$$



図 2.6 パリック FA100

図 2.7 に気泡安定液の配合フローチャートを示す。

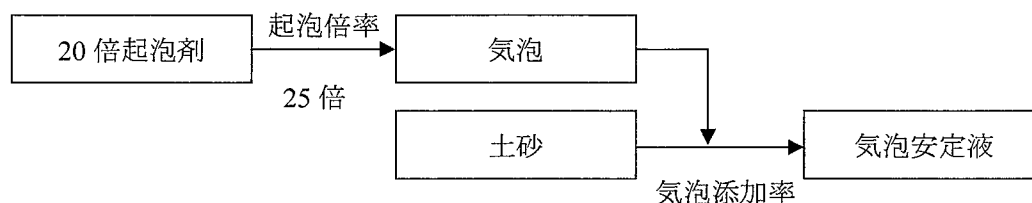


図 2.7 気泡安定液に用いたパラメータと配合フローチャート

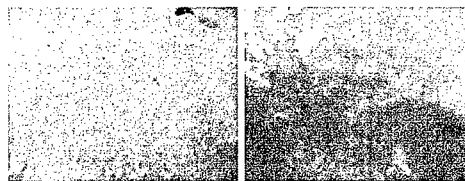
気泡の添加量を示すパラメータとして気泡添加率 Q を採用した。気泡添加率は以下の式で表される。

$$\text{気泡添加率} Q = \frac{\text{20倍希釈起泡材の重量(g)}}{\text{土砂の乾燥重量(g)}} \times 100(\%) \quad \dots(2.6)$$

2.5 起泡材の化学的安定性

AE 剤などとして使用されている起泡剤を本研究では採用しているため、気泡安定液が強アルカリの状態になっても消泡などによって気泡安定液の劣化は起こらない。

図 2.8 に気泡安定液にセメントミルクを混入した場合の状況写真を示す。図 2.8 (a) はセメントミルク混入前であり (pH=7.28), 図 2.8 (b) はセメントミルク混入後 (pH=11.96) である。この場合の消泡率は 0.85(%) となりほぼ消泡は起こらないことが確かめられた。



(a)

(b)

図 2.8 セメント混入の写真

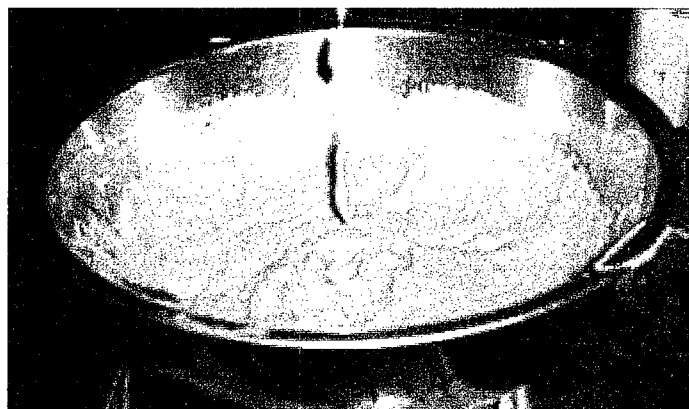
第3章 気泡安定液の含水比条件

3.1 概要

3.2 気泡安定液の含水比の下限値

3.3 気泡安定液の含水比の上限値

3.4 気泡安定液の含水比の簡易判定方法



気泡安定液

3.1 概要

気泡と混合する土砂が乾燥している場合、気泡を混合しても気泡が土粒子に吸着されて消泡する。図 3.1 に乾燥砂に起泡材を添加した直後の写真とそれを攪拌した後の写真を掲載した。気泡がある物質に接触するとき、気泡の媒体となる水が無いとき消泡する。



図 3.1 起泡材の添加直後(左)と攪拌後(右)

また、気泡安定液を作成し静置した場合、その含水状態、土砂の状態によって、土粒子の沈み込みが起こり、気泡安定液が不均一となる。図 3.2 に分離の模式図を、図 3.3 に気泡安定液の分離の写真に掲載した。気泡安定液内の土粒子の粒径、含水比を大きくした場合に分離が起こる。

第 3 章では、気泡安定液の含水比の限界値を示すとともに、気泡安定液の含水比の簡易判定方法を示す。

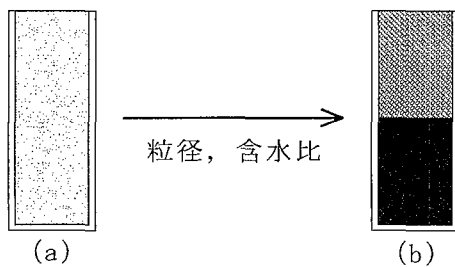


図 3.2 分離の模式図



図 3.3 気泡安定液の分離

3.2 気泡安定液の含水比の下限値

気泡が低含水比の土粒子に衝突すると、気泡膜は衝突した点で局所的に土粒子に水分を奪われるため消泡する。この節では、気泡の消泡が起こらない含水比の下限値を示す。

3.2.1 砂礫分の影響

気泡安定液に混合する土が砂礫分の場合、コンクリートの配合設計時に用いられる表面乾燥状態含水比に着目した。図 3.4 に土粒子の含水状態のモデルを示す。

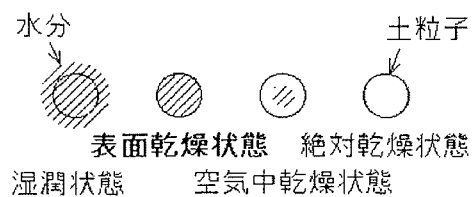


図 3.4 土粒子の含水状態

コンクリートの配合設計をする際、加水量の決

定において土粒子の吸水を考慮してその分だけ多く加水する。この土粒子の吸水量を決定するため、コンクリート工学では土粒子の含水状態を図 3.4 のように 4 段階に分ける。この中で、土粒子が気泡を吸着し、消泡現象が起こる境界は表面乾燥状態と湿潤状態の間であると考えられる。よって砂礫分の場合、最小含水比は表面乾燥状態含水比である。

3.2.2 細粒分の影響

細粒分に関しては表面乾燥状態含水比の測定が困難である。そこで粘土の収縮状態に着目した。

粘土は含水比の状態によって、正規収縮、残留収縮、無収縮という段階を経て収縮する。この過程の中で粘土が気泡を吸着し消泡させる境界は無収縮と残留収縮の間であると考えられる。よって、細粒分の場合には最小含水比に収縮限界含水比を適用した。

3.2.3 気泡安定液の最小含水比の決定

砂礫分と細粒分の影響を鑑みて、掘削した土砂に対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、土砂の中には最低でも砂分、礫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ので、この和の水量を全ての土砂に対する含水比の形で表し、以下のような式で定義した。

$$\omega_a = \frac{100 - F_e}{100} \cdot \text{表面乾燥状態含水比} + \frac{F_e}{100} \cdot \text{収縮限界含水比} \quad \cdots (3.1)$$

ここに、 ω_a ：最小含水比， F_e ：細粒分含有率

砂礫分の表面乾燥状態含水比を測定した結果，6.67(%)であった。

表 3.1 に一般的な土の収縮限界の含水比を示す。

表 3.1 一般的な土の収縮限界

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

一般的な粘土の収縮限界を用いると，式(3.1)は式(3.2)のように変換することができる。

$$\omega_a = \frac{100 - F_e}{100} \cdot 6.97 + \frac{F_e}{100} \cdot 11 \quad \cdots (3.2)$$

3.3 気泡安定液の含水比の上限値

気泡安定液の含水比を徐々に上げていくと、図 3.2, 図 3.3 に示されるような土粒子の沈み込みが起こる。この節では、気泡安定液の上部の単位体積重量と下部の単位体積重量を比較することにより、土粒子の沈み込みの起こらない気泡安定液の含水比の上限値を決定する。

3.3.1 実験概要

気泡安定液内で土粒子の沈み込みが起こるか、起こらないかの境界を分離含水比とする。図 3.5 に実験に用いたシリンダーの写真を、図 3.6 に実験の概要図を示した。

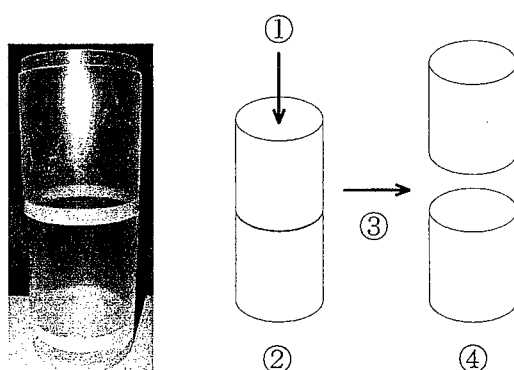


図 3.5 シリンダーの写真 図 3.6 実験の概要図

分離含水比の測定に関して、以下に示す手順で実験を行った。

- (i) シリンダーに気泡安定液を入れ、(図 3.6①)全体の重量を測定する。(図 3.6②)
- (ii) 上部のシリンダーを取り外し、(図 3.6③)下部の重量を測定する。(図 3.6④)
- (iii) 測定結果から上下の単位体積重量を計算する。

上下の単位体積重量の違いを単位体積重量比を用いて比較した。以下に単位体積重量比を定義する式を示す。

$$\text{単位体積重量比} = \frac{\text{シリンダー下部の気泡安定液の単位体積重量}}{\text{シリンダー上部の気泡安定液の単位体積重量}} \quad \dots (3.3)$$

気泡安定液内で土粒子の沈み込みが起これば、単位体積重量はシリンダー下部のほうが大きくなり、単位体積重量比は上昇する。

3.3.2 実験結果

図 3.7 に測定結果を示す。それぞれの土試料において、含水比を上げた場合に単位体積重量比がある点から急激に上昇する。

単位体積重量比の測定結果から、気泡安定液内で土粒子の沈み込みが起こる単位体積重量比は約 1.02 である。

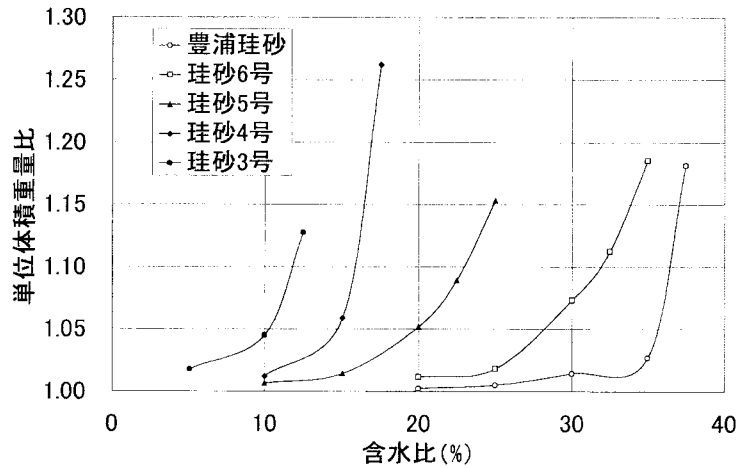


図 3.7 単位体積重量比の測定例

3.3.3 分離含水比の決定

分離単位体積重量比を 1.02 とすると，測定結果から単一粒径の分離含水比は以下の式で表すことができる。

$$\omega_{\text{sep}} = 0.0342 \cdot S \quad \dots (3.4)$$

ここに， ω_{sep} ：分離含水比、 S ：土粒子の比表面積

気泡安定液において，細粒分を含む土が分離する境界は液性限界である．式(3.4)を変形して，細粒分を含めた形式で分離含水比を定義した。

$$\omega_{\text{sep}} = \frac{100 - \text{Fe}}{100} \cdot 0.0342 \cdot \frac{6}{\gamma_s \cdot d_{50}} + \frac{\text{Fe}}{100} \cdot \omega_L \quad \dots (3.5)$$

ここに， ω_L ：液性限界， γ_s ：単位体積重量， d_{50} ：平均粒径

次に，式(3.5)の妥当性を検証する．図 3.8 に測定値と計算値の関係を示す． y 軸に単一粒径の砂に細粒分を加えて分離含水比を測定した値を， x 軸に対応する式(3.5)による計算値の値をとってプロットした。

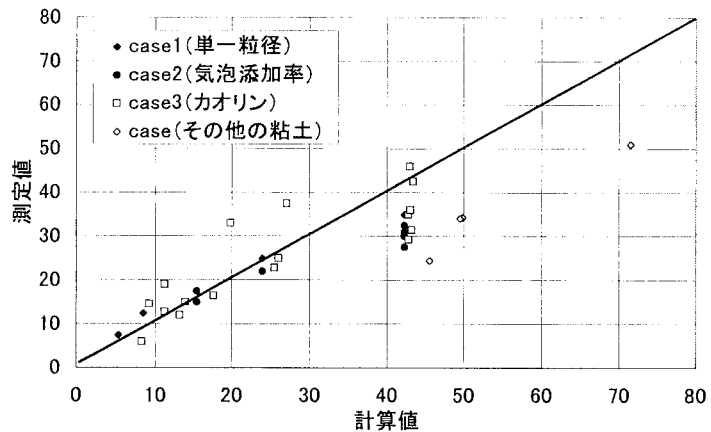


図 3.8 測定値と計算値の関係

計算値と測定値はほぼ 1:1 に対応していることから，式(3.5)の妥当性が確認された。

3.4 気泡安定液の含水比の簡易判定方法

3.4.1 気泡安定液の流動性

気泡安定液の流動性は気泡のベアリング効果によって高く保たれている。図 3.9 にベアリング効果のモデルを示す。ベアリング効果とは土粒子の間隙に気泡が満たされることによって、骨格構造を形成していた土粒子が離され気泡が土粒子の回転、移動をスムーズにする効果である。よって気泡の添加量が多いほど、潤滑材となる含水比が多いほどベアリング効果が期待できる。この節では、フローテーブルを用いて気泡安定液の含水比と気泡添加量関係に関するフィッティングを行うとともに流動性を検証する。

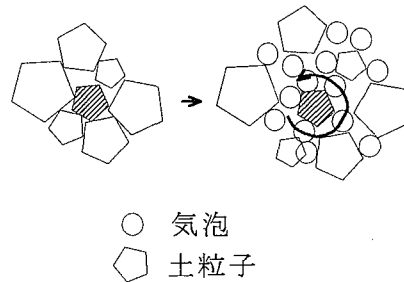


図 3.9 ベアリング効果

3.4.2 実験方法

流動性を定量的に評価するためにテーブルフロー値(以下 TF 値)を採用した。図 3.10 にフローテーブルの写真を示す。測定方法は以下の通りである。

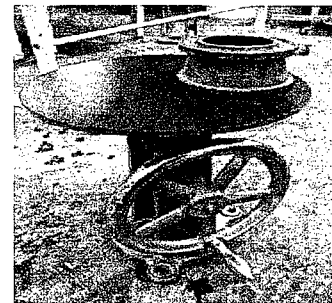


図 3.10 フローテーブル

- (i) 気泡安定液を図中の台形容器の中に十分に満たされるように入れる。
- (ii) 台形容器を取り外し、装置のハンドルを1秒間に1回、計15回まわす。
- (iii) 広がった気泡安定液の最大直径とそれに直交する直径を計る。
- (iv) それを2回繰り返す、測定値の平均をその条件下における TF 値(mm)とする。

3.4.3 測定結果

図 3.11 に気泡添加率と含水比を変化させたときの TF 値を示す。

気泡添加率が高くなると、気泡添加率 1.0(%)付近までは TF 値が増加する。しかし、気泡添加率 1.0(%)以上になると含水比の影響が支配的になり、TF 値は次第に減少する。よって、細粒分量を考慮し、気泡添加率 1.0(%)以下と 1.0(%)以上に分け、図 3.11 に示されたグラフを直線近似した。以下に、気泡添加率と含水比の TF 値との関係式を示す。

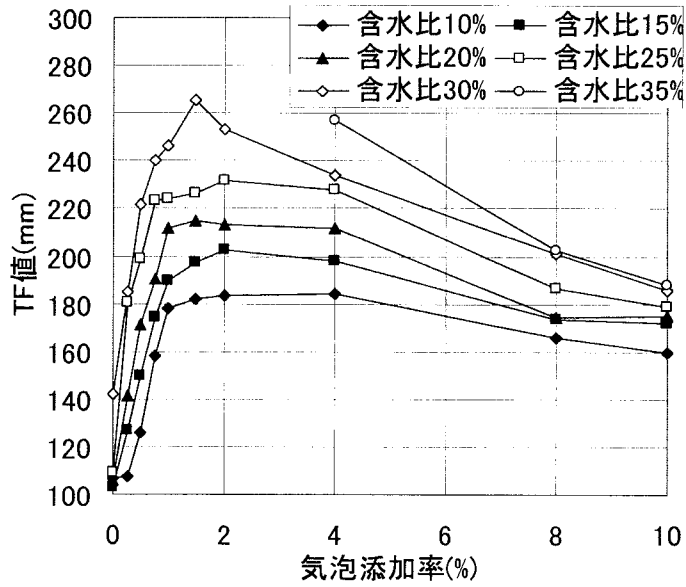


図 3.11 気泡添加率と TF 値の関係

$$TF = \alpha \cdot \omega + \beta$$

$$\textcircled{1} Q < 1, Fe < 10 \rightarrow \alpha = -2.24Q + 3.98, \beta = (0.187Q - 0.180) \cdot \left(-0.041 \frac{6}{\gamma_{ss} \cdot d_{50}} + 197.64\right)$$

$$\textcircled{2} Q < 1, Fe > 10 \rightarrow \alpha = -2.95Q + 5.26, \beta = (0.187Q - 0.180) \cdot \left(-0.041 \frac{6}{\gamma_{ss} \cdot d_{50}} - 0.036Fe \cdot I_p + 190.5\right)$$

$$\textcircled{3} Q > 1, Fe < 10 \rightarrow \alpha = -0.248Q + 3.95, \beta = -0.041 \frac{6}{\gamma_{ss} \cdot d_{50}} + 197.6$$

$$\textcircled{4} Q > 1, Fe > 10 \rightarrow \alpha = -0.328Q + 5.21, \beta = -0.041 \frac{6}{\gamma_{ss} \cdot d_{50}} - 0.036Fe \cdot I_p + 190.5$$

… (3.6)

ここに、TF：TF 値(mm)， γ_{ss} ：砂の単位体積重量(kN/m³)， I_p ：塑性指数

図 3.12 は近似式(3.6)から求めた計算値と測定値の対応関係を示す。

計算値と測定値はほぼ 1:1 に対応することから近似式(3.6)の妥当性が確認された。

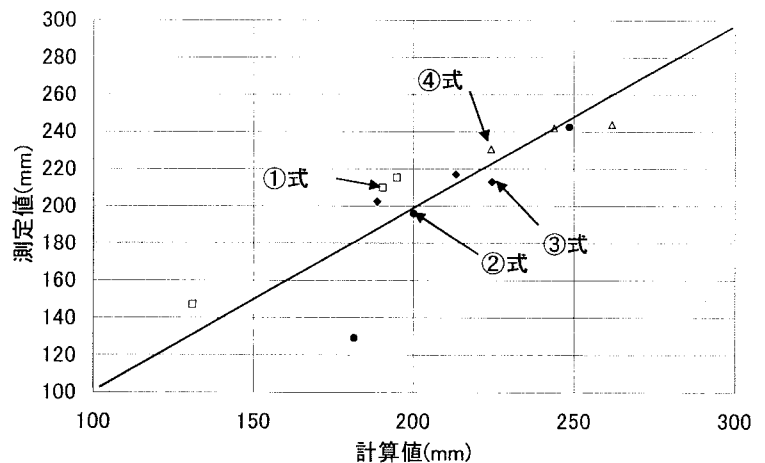


図 3.12 計算値と測定値の関係

第 4 章 気泡安定液の比重条件

4.1 概要

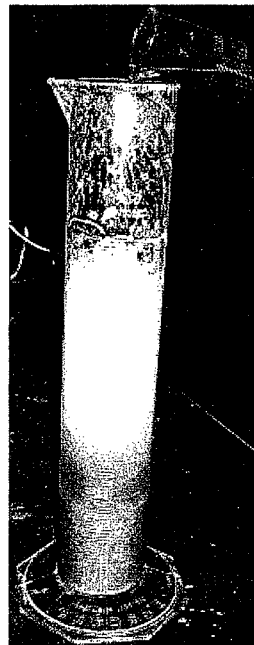
4.2 気泡膜の形成

4.3 気泡安定液の圧縮性

4.4 気泡添加率の上限値

4.5 単位体積重量

4.6 気泡量の検証



気泡安定液の分離

4.1 概要

安定液として求められる機能は以下に示すとおりである。

- a) 溝壁の安定(崩壊防止)
- b) 良質なコンクリートの打ち込み
- c) 掘削土砂の運搬分離

地山を鉛直に掘削した場合、溝壁には土圧が作用しており、安定性を失われた溝壁は崩壊する。この土圧に対抗するのが安定液の液圧であり、ここでは安定液の比重が問題となる。安定液の比重が低い場合、溝壁の主働土圧により崩壊する。泥水系安定液の場合、地盤に安定液が浸透することによって、安定液と溝壁の間にマッドケーキを形成する。この作用の進行によって出来た膜によって、内圧を掘削溝壁面に完全に伝えることが出来るようになり、溝壁の安定は保つことができる。

この章では、気泡安定液の比重に着目して溝壁の安定性を検証する。

4.2 気泡膜の形成

4.2.1 概要

気泡安定液中の気泡量が減少すると、溝壁と気泡安定液との境界で気泡膜が形成されないため、内圧を十分に溝壁に伝えることができなくなる。図 4.1 に気泡安定液投入直後の溝壁内のモデルを、図 4.2 に気泡安定液浸透後の溝壁内のモデルを示した。

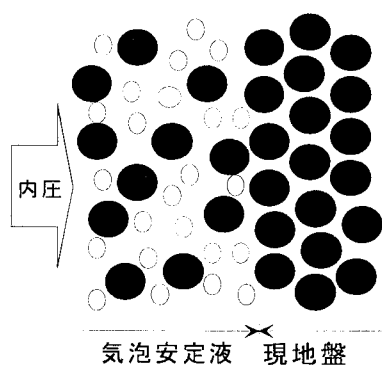


図 4.1 投入直後の溝壁内のモデル

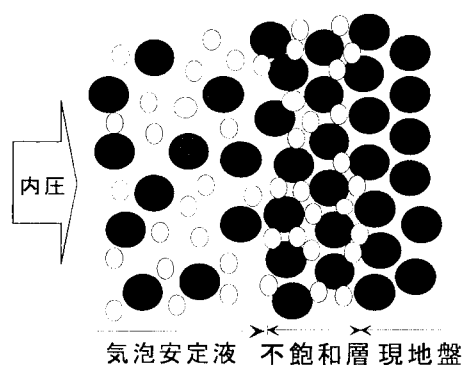


図 4.2 気泡浸透後の溝壁内のモデル

この節では、ベントナイト安定液の透水量の関係をもとに、気泡安定液の透水量を計測することによって、溝壁安定に必要な気泡安定液比重の下限値を示す。

4.2.2 実験方法

図 4.3 に透水実験の模式図を示した。実験方法は以下の通りである

(i) 土試料をシリンダーA に投入し、模擬地盤を作成する。

(ii) 模擬地盤の上に安定液を投入する。

(iii) シリンダーB 内の水位をシリンダーA の地盤と同じ高さに合わせる。

(iv) シリンダーA に水頭差 2(m) に相当する圧力をかける。空気圧に換算すると 20 (kPa) である。

(v) 安定液が模擬地盤中に浸透することによって、押し出された地盤中の間隙水量をシリンダーB で測定する。

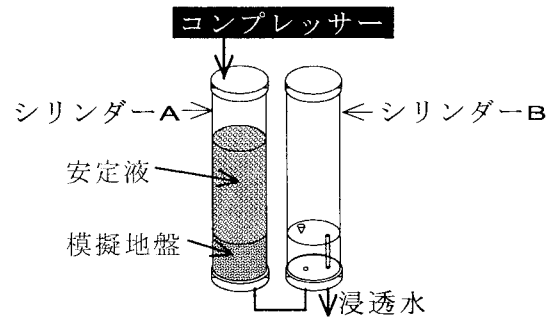


図 4.3 透水実験の模式図

4.2.3 透水実験の結果と気泡添加率の下限值

図 4.4 は、5(%)ベントナイト安定液の浸透水量の測定結果である。

約 60(sec)で透水量は頭打ちになり、300(sec)経過後の透水量上限値は約 350(g)である。

図 4.5 に気泡安定液の透水量上限値と気泡の浸透距離を気泡添加率に対してプロットしたものを示す。

気泡添加率が増加すると気泡安定液の透水量は徐々に減少するとともに、気泡の浸透距離が増し、良好な気泡膜が形成される。ベントナイト安定液の 300(sec)経過後の透水量上限値は約 350(g)であることから、ベントナイト安定液と同等の透水量を満足する気泡添加率は約 1(%)である。

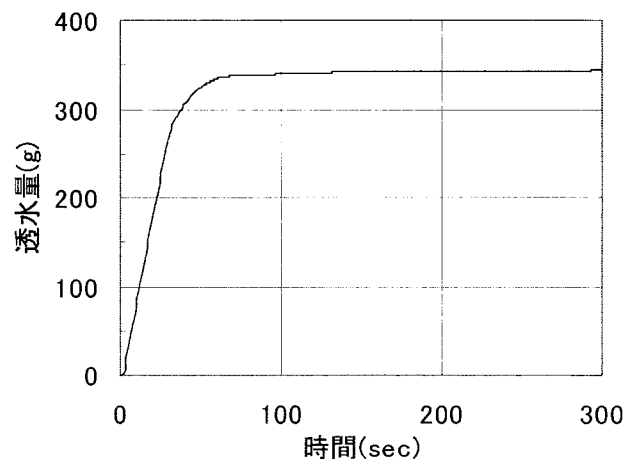


図 4.4 ベントナイト安定液の透水量

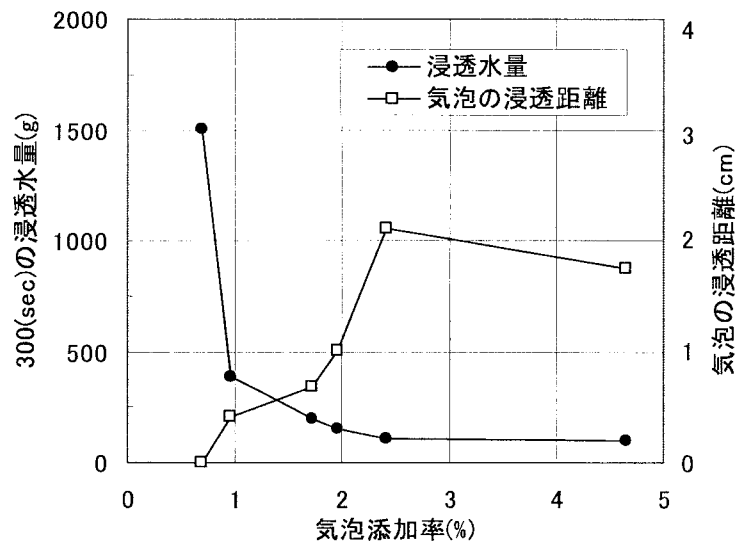


図 4.5 気泡安定液の浸透距離と透水量

4.3 気泡安定液の圧縮性

4.3.1 概要

気泡安定液を構成する材料は、土粒子、間隙水、気泡である。圧力がかかることによって気泡は圧縮し、気泡の混入量は減少する。この節では、気泡安定液に圧力を加えることによって、どれだけ気泡安定液が圧縮するかを検証する。

4.3.2 気泡添加率の下限値の検証

シリンダーに気泡安定液を入れ空気圧で圧力をかけることによって圧縮量を測定する。気泡の体積圧縮率を以下の式で定義した。

$$\text{体積圧縮率} = \frac{\text{圧縮後の気体の体積}}{\text{大気圧下の気体の体積}} \times 100(\%) \quad \dots (4.1)$$

図 4.6 に載荷圧と気泡の体積圧縮率の関係を示す。また、常温常圧時の気体の状態方程式により算出された値を理論値として同時に示した。

初めは気体の状態方程式に沿ってプロットされるが、ある体積圧縮率以下には減少しないことがわかる。これは気泡が圧縮されるとともに、土粒子が骨格構造を形成するためである。図 4.7 に気泡安定液の圧縮過程の概要図を示した。

気泡添加率が約 1.0(%) 以下の場合、体積圧縮率は 95(%) 以上であるため、非圧縮性とみてよい。

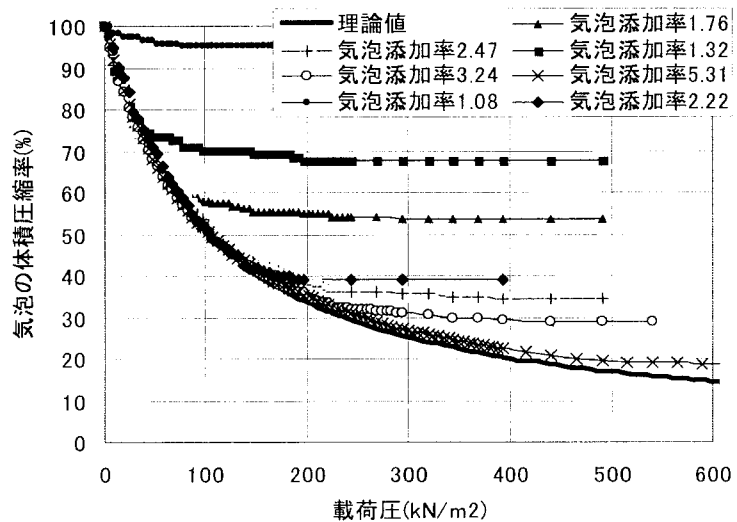


図 4.6 体積圧縮率と載荷圧の関係

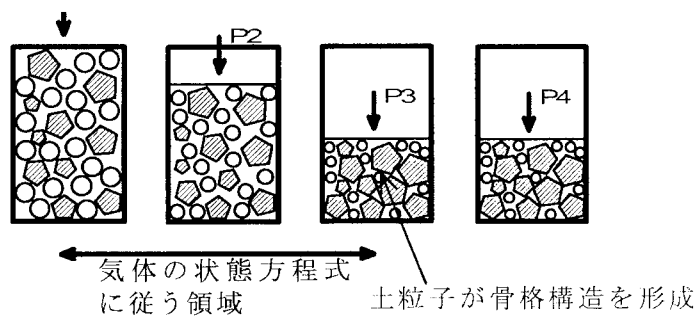


図 4.7 気泡安定液の圧縮過程の概要図

4.4 気泡添加率の上限值

4.4.1 概要

気泡安定液の気泡量が多いとき、溝壁を安定化するだけの内圧がかからず、溝壁は崩壊する。この節では、気泡安定液の気泡添加率の上限值を、ベントナイト安定液の性状管理図における比重の下限值から理論的に導く。

4.4.2 気泡添加率の上限值

図 4.8 に地中連続壁工法に用いられているベントナイト安定液の性状管理図を示す。

ベントナイト安定液の比重が小さいとき、安定液から溝壁に十分な内圧がかからないため、溝壁の主働土圧により崩壊する。このとき、安定液中にベントナイトを加え、比重を高くする必要がある。

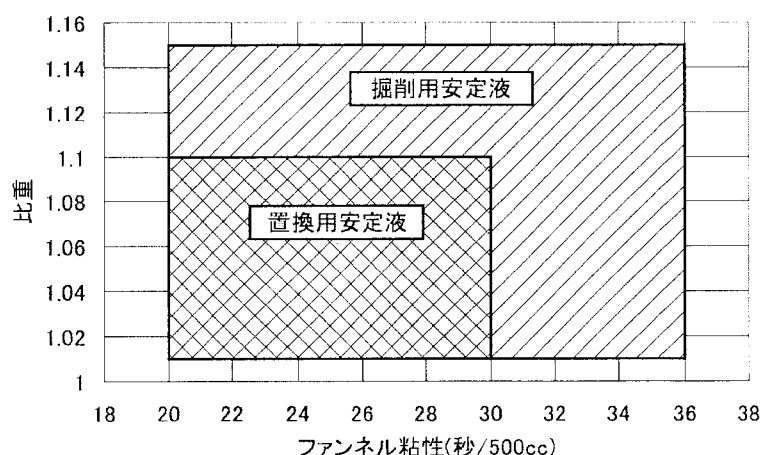


図 4.8 ベントナイト安定液の性状管理図

気泡安定液に関しても、同様にして比重の下限值による限界を設定した。置換用、掘削用ベントナイト安定液の比重の下限値は約 1.01 である。このとき、単位体積重量に換算すると 9.91(kN/m³)である。安全率を加味し、気泡安定液の単位体積重量の下限値は約 10(kN/m³)である。これに対応する気泡添加率の上限值は、約 2.0(%)となる。

4.5 単位体積重量

気泡安定液の単位体積重量の理論式を以下に示す。

$$\gamma_c = \frac{100 + \omega + Q}{\frac{100 - F_c}{\gamma_{ss}} + \frac{F_c}{\gamma_{se}} + \frac{\omega}{\gamma_w} + \frac{Q}{\gamma_b}} \quad \dots (4.2)$$

ここに、 γ_c :単位体積重量(kN/m³)、 ω :含水比(%), Q :気泡添加率(%), F_c :細粒分含有率(%),
 γ_{ss} :砂の単位体積重量(kN/m³), γ_{se} :粘土の単位体積重量(kN/m³),
 γ_w :水の単位体積重量(kN/m³), γ_b :気泡の単位体積重量(kN/m³)

ベントナイト安定液では比重の測定方法としては浮ひょうによる測定方法，またマッドバランスによる測定方法などがある。気泡安定液は粘性が高いため，浮ひょうで測定するよりもマッドバランスのように直接重量を測定する測定方法が適する。

気泡安定液の単位体積重量を1(l)容器を用いて測定した。図 4.9 に実測値と式(4.2)による理論値を比較したものを示す。実測値と理論値はほぼ1対1に対応することから，(4.2)の理論式の妥当性が示された。

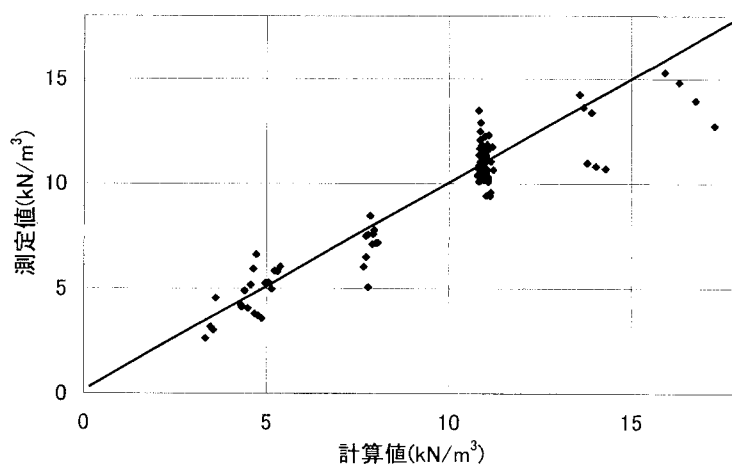


図 4.9 実測値と理論値の関係

4.6 気泡量の検証

4.6.1 概要

気泡安定液の気泡添加率は単位体積重量から，式(4.2)を用いて逆算することによって推定可能である。気泡安定液の気泡量を実験的に決定する方法として，気泡シールド工法などに用いられている空気量測定試験を用いた。

4.6.2 実験方法

- (i) 気泡安定液を 500ml シリンダーに 200ml 添加する。
- (ii) 別のシリンダーに水を 200ml 取り，気泡安定液の入ったシリンダーに添加する。
- (iii) 上部をラップで覆い，気泡安定液と水をよく攪拌する。
- (v) 別のシリンダーにエタノール (99.5%) を 100ml 計量し，(iii)のシリンダーの上部からゆっくり滴下する。
- (vi) 液面の高さを計測し，空気量を求める。

4.6.3 実験結果

空気量を以下の式で定義した。

$$\text{空気量} = \frac{200(\text{ml}) - \text{シリンダー目盛り}(\text{ml})}{500(\text{ml})} \times 100(\%) \cdots (4.3)$$

図 4.10 に含水比 25(%)のときの気泡添加率と気泡量の関係を示す。実測値はほぼ計算値と一致し、空気量から気泡添加率を推定することが可能である。

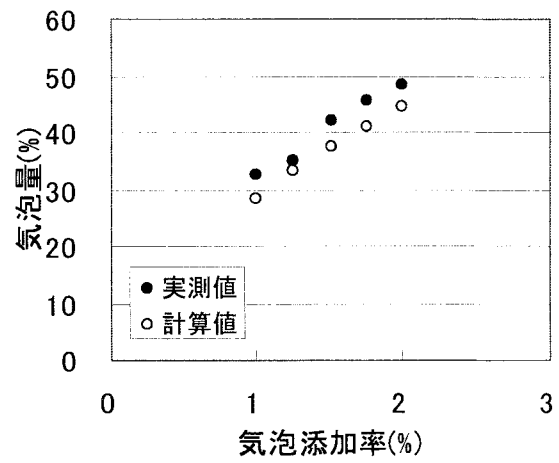


図 4.10 気泡添加率と気泡量の関係

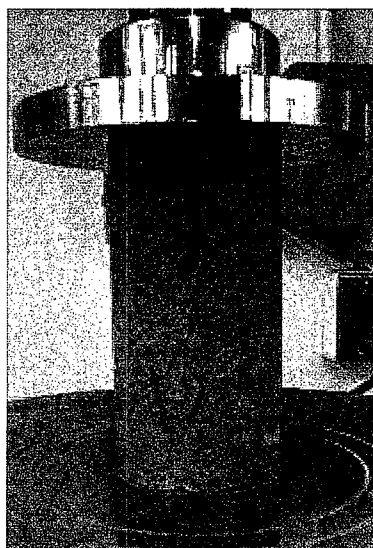
第5章 気泡安定液の固化特性

5.1 概要

5.2 ブリージング特性

5.3 固化特性

5.4 透水特性



気泡ソイルセメント

5.1 概要

地中連続壁工法において、固化剤を用いて連続壁を構築することは最終的な目標であり、重要な要素である。

AE剤はモルタル、コンクリートに添加されるとセメント粒子と水、または気泡と水の界面に吸着、配向してコンクリート中に微細な空気泡を形成する。JIS A 0203によるとAE剤は、“コンクリートなどの中に多数の微小な空気泡を一様に分布させ、ワーカビリティ及び耐凍害性を向上させるために用いる混和剤”と定義されている。要するに、気泡安定液における気泡材はモルタルコンクリート中での起泡作用に優れた界面活性剤に相当している。現在、JIS A 6204 “コンクリート用化学混和剤”に規定されているAE剤に適合するものとしては、樹脂酸系、アルキルベンゼンスルホン酸塩系、高級アルコール硫酸エステル塩系などの陰イオン系のものが代表的である。

パリック FA100 は代表的な AE 減水剤であり、気泡安定液にセメントを混入した気泡ソイルセメントはワーカビリティの良いコンクリートになると考えられる。第 5 章では、TRD 工法の地中連続壁の造成における気泡安定液の固化特性を検討する。

5.2 ブリージング特性

5.2.1 TRD 工法協会の規定

TRD 工法協会の規定において、ブリージング率は 3(%)以内に抑える必要があると示されている。ブリージングの起こりやすいコンクリートは、以下のような特徴がある。

- (1)最大寸法の大きな粗骨材を含むコンクリート
- (2)粗骨材の分布が不均質なコンクリート
- (3)単位体積重量の大きいコンクリート
- (4)粘性の小さいコンクリート
- (5)コンシステンシー (TF 値) が大きいコンクリート
- (6)大きな速度でコンクリートを打設した場合

この節では、気泡安定液に普通ポルトランドセメントを所定の水セメント比で混入したときのブリージング特性を調査した。

5.2.2 実験方法

JSCE-F-522 に規定される実験方法に則り試験を行った。試験方法を以下に示す。

- (i) 気泡安定液にセメントミルクを添加し、固化材混合気泡安定液を作成する。
- (ii) 3 本のメスシリンダー (500ml) に固化材混合気泡安定液を入れ、それぞれの体積を測定する。この時、漏斗などを用い、空気が入らないようにする。
- (iii) 1 時間が経過するまでは 10 分おきに、その後は 30 分おきに湧出水を測定する。

(iv) 3時間経過後のブリージング率を最終ブリージングとしてブリージング率の評価を行う。

5.2.3 実験結果

実験を評価するにあたって、ブリージング率を以下の式で定義する。

$$B_r = \frac{B}{V} \times 100 \quad (\%) \cdots (5.1)$$

ここで、 B_r : ブリージング率 (%), V : 固化材混合気泡安定液の体積 (ml)

B : ブリージングによる湧出水の体積 (ml)

図 5.1 に気泡添加率とブリージング率の関係を示す。このとき、砂セメント比は 2.22, 水セメント比は 1.0 である。また, TRD 工法協会の規準を赤線で示した。

気泡添加率 2(%)以上ではブリージングは生じなかった。気泡添加率が上昇すると、ブリージング率は線形に低下する。以下にブリージング率と気泡添加率の関係式を示す。

$$Br' = -5.69Q + 11.2 \cdots (5.2)$$

Br' : 最終ブリージング率(%),

Q : 気泡添加率(%)

$Br' > 3$ となる時, $Q \leq 1.44$ となる

ことから、気泡添加率 1.5(%)以下の場合には、気泡を添加するまたは水セメント比を低下させるなどの方法で対策を講じる必要がある。

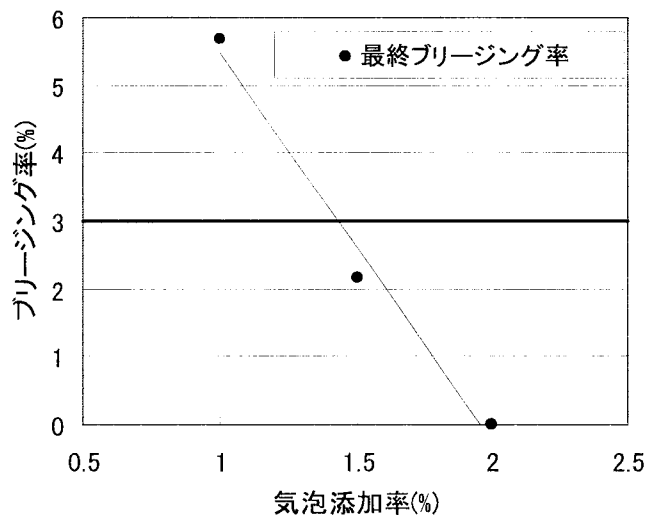


図 5.1 気泡添加率とブリージング率の関係

5.2.4 起泡材によるブリージング低下現象

気泡添加率が上がるほど、ブリージングに関して有利に働く。これは、コンクリートにおける減水剤の効果に類似している。気泡剤は、界面活性剤の効果によって気泡を維持する。起泡材のパリック FA100 は、もともとアルキルベンゼンスルホン酸塩系の減水剤である。減水材を用いるとセメントの分散効果によって、水和が促進する。セメント粒子は

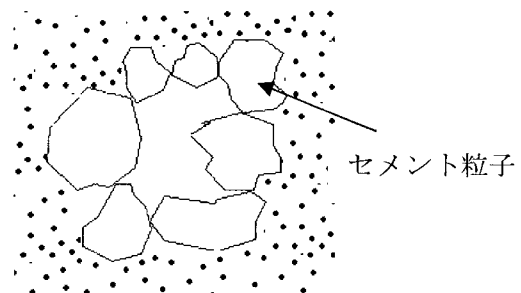


図 5.2 セメント粒子のフロック構造

水との親和力によって、粒子間の凝集力のほうが大きいために、練り混ぜ水で容易には分離せず、図 5.2 に示すようにその一部(10~30%)が凝集してフロック状態になる。この状態に起泡材のような陰イオン界面活性剤に属する減水材を添加すると、これが水中で電離してマイナスイオンとなり、フロック状態のセメント粒子の表面に吸着する。やがて、図 5.3 に示すようにセメント粒子表面に帯電層を形成し、その静電的な相互反発作用にセメント粒子が反発しあい、個々に分散する。

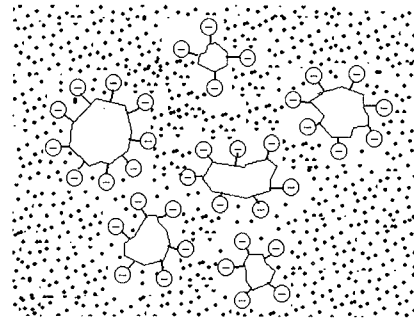


図 5.3 フロック構造の解放

5.3 固化特性

5.3.1 概要

コンクリートを作成する際、減水材を用いることによってセメントに対する水の量を減らしてもセメントミルクの流動性を得ることができる。減水材の役目は、コンクリート中に微小な気泡を混入するものである。これによって、気泡がセメントと骨材の微粒子を浮かし、また水の有効面積を減じ、ブリージングを減らす。また、気泡内への水分の移動が容易なことから、凍結融解に対する抵抗性は著しく大きい。この減水材は、気泡安定液に用いる起泡材と良く似ており、気泡安定液にセメントミルクを混入した場合でも、所定の強度を得ることができると考えられる。

TRD 工法では、地中連続壁材料の一軸圧縮試験における 28 日水中養生時の最大強度が 1.0(kN/mm²)以上あることが求められている。この節では、気泡安定液を普通ポルトランドセメントで固結した気泡ソイルセメントが目標強度を満足しているかを検証する。

5.3.2 実験方法

実験方法は以下の通りである。

- (i) 気泡安定液を作成する。
- (ii) 普通ポルトランドセメントでセメントミルクを作成する。
- (iii) (i), (ii)を混合する。
- (iv) 図 5.4 に示されるようなプラモールド(φ=5cm, L=10cm)に(iii)を詰め、プラモールドを叩き、空気を追い出す。
- (V) 1日空気養生する。
- (vi) プラモールドから脱形し、所定の日数水中養生する。

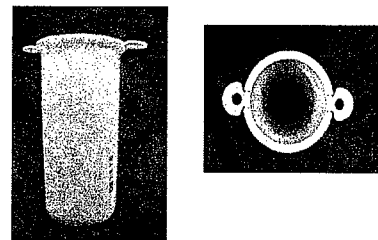


図 5.4 プラモールド

測定には3ケースの試料を採取し、計測された強度の平均値を求めた。

5.3.3 養生日数による強度特性の変化

一般的に普通ポルトランドセメントにおいて、28日間水中養生したものの強度は、7日間水中養生した場合の強度の約2倍発現することが認められている。これを検証するために、水セメント比1、砂セメント比2.22の気泡ソイルセメントの強度を計測した。表5.1に7日強度と28日強度の関係を示す。

表 5.1 7日強度と28日強度の関係

7日強度 N/mm ²	28日強度 N/mm ²	(28日強度/7日強度)
1.56	3.12	2.00
1.15	2.21	1.92

7日強度と28日強度比は、概ね1:2の関係となる。よって、7日強度が0.5(N/mm²)を上回ればTRD工法協会の示す規準を上回る。

5.3.4 気泡量による強度特性の変化

図5.5に気泡添加率と一軸圧縮強度の関係を示した。このとき、水セメント比は1.0、セメント比は2.22である。また養生日数は7日である。また、TRD工法協会の定める規準を赤線で示した。

気泡添加率が上昇すると一軸圧縮強度が低下する。これは、気泡添加率が増加すると、気泡ソイルセメント内に混入される空隙が増大するからである。

気泡添加率が2.5(%)付近でTRD工法協会の定める規準を満足しない強度を発現する場合がある。しかし、気泡添加率2.0(%)以下では一軸圧縮強度はグラフからほぼ線形に増加するため、規準を満足すると考えられる。

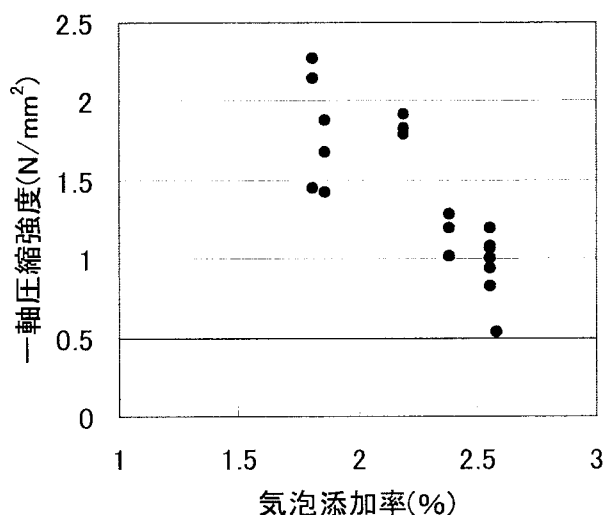


図 5.5 気泡添加率と一軸圧縮強度の関係

5.3.5 単位セメント量による強度特性の変化

図5.6に1(m³)当たりのセメント投入量と一軸圧縮強度の関係を示す。このとき、気泡安定液の気泡添加率は2.0(%)、水セメント比は1.0である。また、TRD

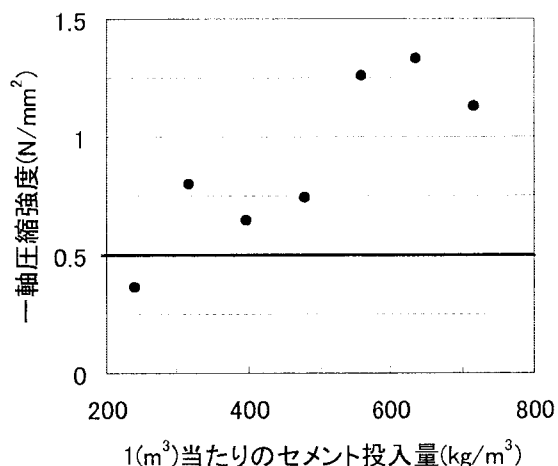


図 5.6 セメント投入量と一軸圧縮強度の関係

工法協会の定める規準を赤線で示した。

単位セメント量が低下すると、気泡ソイルセメントの一軸圧縮強度もほぼ線形に低下する。また、単位セメント量 250(kg/m³)以下のとき規準を満足しない。よって、水セメント比 1.0 の場合、1(m³)当たりのセメント投入量は 300(kg/m³)以上必要である。

5.4 透水特性

5.4.1 概要

TRD 地中壁の室内試験における目標透水係数は、1.0~0.1(×10⁻⁶cm/sec)と設定されている。気泡ソイルセメントの透水係数はこれまで計測されていないため、室内試験を行うことで透水係数を測定した。

5.4.2 実験方法

実験方法を以下に示す。図 5.7 に実験の概要図を示す。

(i) 5.3.2 で示された気泡ソイルセメント供試体の作成方法と同様の手順で供試体を作成する。

(ii) 三軸圧縮試験機に(i)で作成された供試体をセットする。

(iii) 側圧 p' (kN/m²)をかける。

(iv) コンプレッサーによる空気圧を水供給ビュレットを介して変換して、所定の水圧 p(kN/m²)を供試体

上端に作用させる。このとき、硬化供試体の側面からの水の移動をなくすために、p' > p とする。

(v) 供試体下端からの浸透水量を測定することによって、透水係数を測定する。

透水係数は、ダルシーの法則から以下の式によって求めることができる。

$$k = \frac{q \cdot H}{A \cdot p} \cdot \frac{\gamma_w}{p} \quad (\text{cm/sec}) \quad \cdots (5.3)$$

ここで、k：透水係数(cm/sec)， q：浸透水量(cm³/s)， H：供試体高さ(cm)， A：供試体断面積(cm²)， γ_w ：水の単位体積重量(kN/m³)

5.4.3 気泡ソイルセメントの透水係数

表 5.2 に実験条件を示した。図 5.8 に経過時間と透水量の関係を示した。

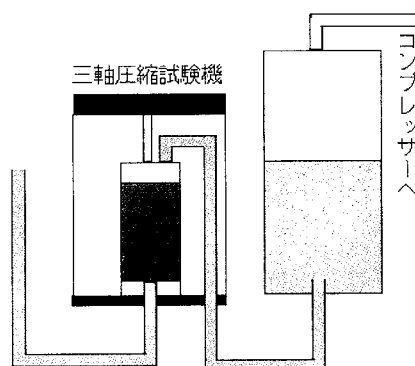


図 5.7 透水試験装置

表 5.2 実験条件

気泡添加率(%)	水セメント比	砂セメント比
2.0	2.22	1.0

気泡添加率の増加とともに気泡ソイルセメントの空隙が大きくなるため、気泡添加率の

上限値 2.0(%)のときの透水係数が TRD 工法協会の定める規準を満足すれば, 気泡ソイルセメントは不透水であると考えられる. 図 5.8 に経過時間と透水量の関係を示す. 初めは高い透水量を示すものの, 次第に一定の透水量を示す. よって, このときの透水量は最大約 $3.0 \times 10^{-4} (\text{cm}^3/\text{s})$ である. このときの式(5.3)で求めた透水係数は $1.4 \times 10^{-6} (\text{cm}/\text{s})$ である. このとき, TRD 工法協会の定める規準をわずかに上回る. これは, 供試体とゴムスリーブの間を水が通過したためと考えられる.

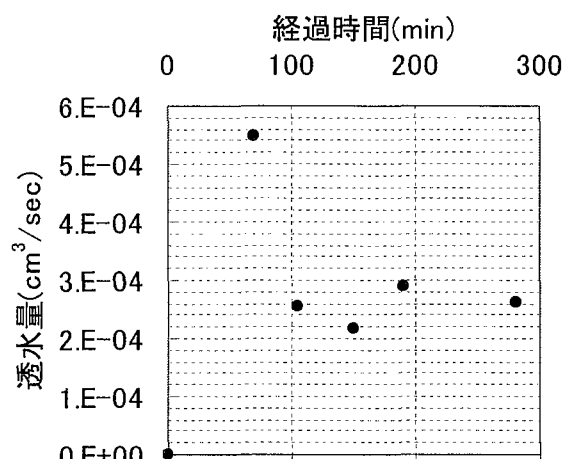


図 5.8 経過時間と透水量の関係

次に, 供試体側面を水性ペンキで被覆し同様の透水試験を行った. 図 5.9 にペンキで被覆した供試体の写真を示す. 気泡ソイルセメントの作成条件は, 表 5.2 で示された条件と同様であり, 気泡添加率 2.0~1.0(%)と変化させて測定を行った. これらの供試体を用いた場合には, いずれの気泡添加率の場合にも 24 時間経過後の透水量は 0 であった. したがって, 気泡ソイルセメントは事実上不透水と認められる.



図 5.9 被覆供試体

第 6 章 気泡安定液の現場管理手法

6.1 概要

6.2 混合土の条件

6.3 気泡安定液の配合計画



単位体積重量計測状況

6.1 概要

安定液は掘削時に掘削度を流動化させるために注入する水、細粒土、及び混和剤の懸濁液である。よって、安定液は掘削機械のカッタービットを地中に挿入した状態で長時間休止する場合のことも考えて保水性に優れ、長時間良好なコンシステンシーを保持することが必要である。

この章では、5章までに示された気泡安定液の状態を規定する諸条件をもとに、現場配合条件を決定する。

6.2 混合土の条件

表 6.1 に代表的な土の土質区分を、図 6.1 に TRD 工法によって混合された土の一般的な粒度分布を示す。図 6.1 に示された粒度分布は加水と攪拌で流動化可能な土の限界粒度組成であり、粒度調整剤添加の要否を判断する目安となる。一般の自然堆積地盤は粘土層から砂礫層で構成され、各地層の粒度組成は偏っていても全層を混合・攪拌した混合土の粒度は図 6.1 に示されるような広い分布の粒度分布を示すことが多い。これは、TRD 工法の技術資料では TRD 線と呼ばれている。粒度調整には水、粘土等を混合土に添加して溝壁の崩壊防止、懸垂力と持続力のある、流動性を兼ね備えた掘削流体にする必要がある。

表 6.2 に気泡安定液利用にあたって必要な地盤調査項目を示す。気泡安定液の場合、土砂の処理が容易であるため、ベントナイト安定液に比べて調査項目が少ないという利点がある。

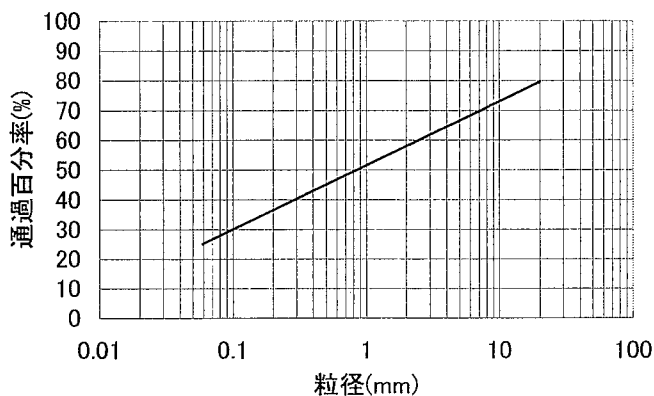


図 6.1 粒度分布 (TRD 線)

表 6.1 混合土の土質区分

	土質特性	混合スラリーの性質
粘土	高粘性~低粘性 (粘土~シルト)	含水比を高めれば流動化するが、土塊ができやすい。また、ビットに付着して掘削抵抗が増える。
一般土 (中間土)	広い粒土分布	加水と攪拌で流動化するが、静置すると固液分離して流動性を失う。
砂	細砂~粗砂	加水と攪拌で瞬時流動するが、整地すると直ちに子液分離する、砂が沈降するなどして流動性を失う。
礫質土	砂礫	加水と攪拌では流動しづらい。
	玉石・巨礫	加水と攪拌では流動しない。

表 6.2 気泡安定液に必要な地盤調査項目

用途	検討事項	土層	土性値					地下水	
		土 N 粒 層 値 度 構 組 成 成	土 粘 内 一 土 間 圧 変 透 の 着 部 軸 粒 隙 密 形 水 単 力 摩 圧 子 比 係 係 係 位 擦 縮 比 数 数 数 重 角 強 重 量 度	水 被 水 流 位 圧 質 速 水 流 頭 向					
施工	掘削効率	○ ○ ◎			○				
	溝壁安定	◎ ○ ○	◎ ◎ ◎				○ ○	◎ ○	
	安定液配合	○ ○							
	土砂分離	—			—			—	

○：役立つと考えられる資料 ◎：計画に必要な資料

6.3 気泡安定液の配合計画

TRD 工法によって混合された図 6.1 に示されるような一般的な土の粒度分布を有する土を対象として気泡安定液の配合を決定する。図 6.1 から、細粒分含有率は約 30(%) である。式(3.2)、式(3.5)を用いて最小含水比と分離含水比を計算した。その結果をもとに、図 6.2 に気泡安定液の適用範囲を示す。灰色の領域が気泡安定液の安定性を保つことができる領域である。

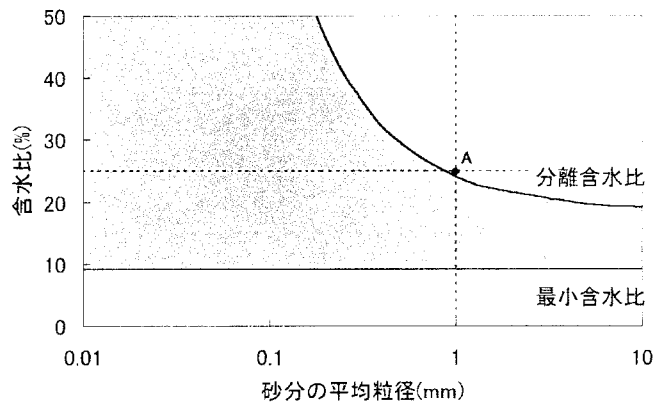


図 6.2 気泡安定液の適用範囲

砂分の平均粒径 1(mm)、含水比 25(%)とすると、図 6.2 上に図示すると点 A なので分離することなく気泡安定液の安定性を確保できる。

(1) 含水比の境界値

式(3.2)から図 6.1 に示されるような土砂に対する最小含水比を算出すると約 9(%)である。また、式(3.5)から平均粒径 0.8mm に対応する最大含水比を算出すると約 32(%)である。

(2) 比重の境界値

4章から、気泡膜の形成できる最小の気泡添加率は1.0(%)である。また、置換用、掘削用ベントナイト安定液の比重の下限値の平均値が1.05であることから、気泡安定液の単位体積重量の下限値は $10.2(\text{kN/m}^3)$ である。

以上の結果をもとに、図6.3に気泡安定液の適用範囲を示す。ここで、式(3.6)に示された含水比とTF値の関係と、式(4.2)に示された単位体積重量と気泡添加率の関係をもとに等値線を描いた。

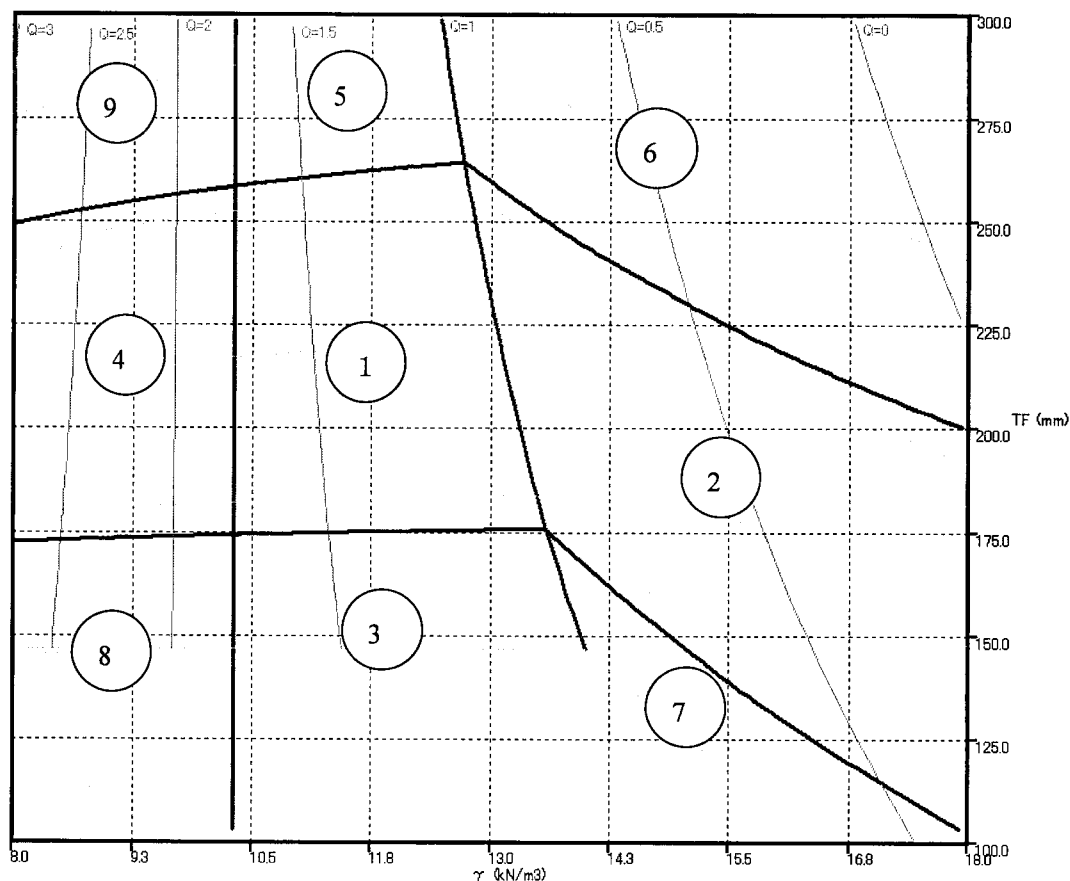


図 6.3 気泡安定液の適用範囲

領域①が気泡安定液の適用範囲である。しかし、外的要因によって領域②~⑨で表される不適切範囲に気泡安定液の状態が遷移する可能性がある。表6.3に②~⑨で観測される現象とその結果を示す。また、不適切範囲に気泡安定液の状態が移行したときの対処法を示す。

(a) 領域②方向に動いた場合

気泡安定液の単位体積重量の増加が起こり、気泡を再添加する必要がある。しかし、急激に領域①方向に移動する場合、気泡の消泡速度が速いと考えられるため、気泡倍率、起泡剤の希釈倍率の調査が必要である。

(b) 領域③方向に動いた場合

気泡安定液の含水量が不足しているため、加水をおこなう必要がある。この場合、気泡が消泡するため、単位体積重量が上昇することが考えられる。従って、気泡の再添加も必

要となる。

(c)領域④方向に動いた場合

気泡安定液の気泡量が多いため、消泡剤を用いて消泡する必要がある。この場合、全面崩壊する可能性があるため、早急の対策が必要である。原因は気泡の添加ミスの他に掘削機の攪拌によって気泡が設定の起泡倍率よりも起泡されている可能性がある。

(d)領域⑤方向に動いた場合

気泡安定液の含水量が多いか、地盤の細粒分が想定量より少ないため、含水量を減らす必要がある。気泡安定液の場合、地盤への浸透水量は小さいが、初期に含有している水量が少ないため、含水量は時間とともに低下する。もし流入水(雨水, 工事用水)がある場合、その流入を遮断する必要がある。

領域⑥～⑨にたいしては現象と同様に②～⑤が同時に起こるため、これらの対策を同時におこなうことが必要である。

表 6.3 ②～⑨での現象と結果

領域番号	現象	結果
②	気泡と土粒子が分離し、土粒子の沈み込みが起こる。	不均一となり崩壊の可能性がある。 コンクリートとの置換ができない。
③	気泡安定液が溝壁に作用させる圧力が不足する。	全面崩壊などの可能性がある。
④	土粒子の気泡吸着が起こる。	気泡が消泡するため管理が難しい。 気泡が消泡するため流動性を失う。
⑤	地盤への浸透水量が増加する。	部分崩壊の可能性がある。
⑥	②と③が同時に起こる。	
⑦	③と④が同時に起こる。	
⑧	④と⑤が同時に起こる。	
⑨	⑤と②が同時に起こる。	

第7章 気泡安定液を利用した試験施工

7.1 概要

7.2 試験施工位置

7.3 掘削計画

7.4 プラント

7.5 配合計画

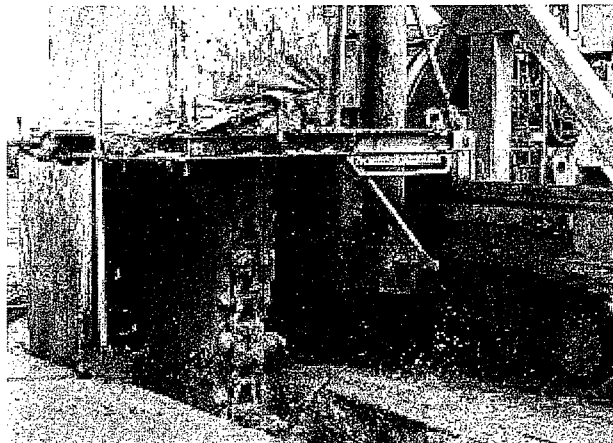
7.6 計測結果

7.7 掘削状況

7.8 排土量

7.9 気泡ソイルセメントの強度

7.10 まとめ



TRD マシンによる掘削状況

7.1 概要

6章までに得られた室内実験の成果をもとに、気泡安定液は気泡量と含水比によって管理することが可能であることが確認された。そこで、(有)マグマと太陽基礎工業(株)の協力を得て、試験施工を行った。従来のベントナイトによる掘削液に替えて、気泡安定液の現場での実証試験を行い、気泡安定液の掘削性、施工性、排泥量等を評価、確認した。現場は岐阜県、東海環状道路建設に伴う掘削で遮水壁を造成するものである。

7.2 試験施工位置

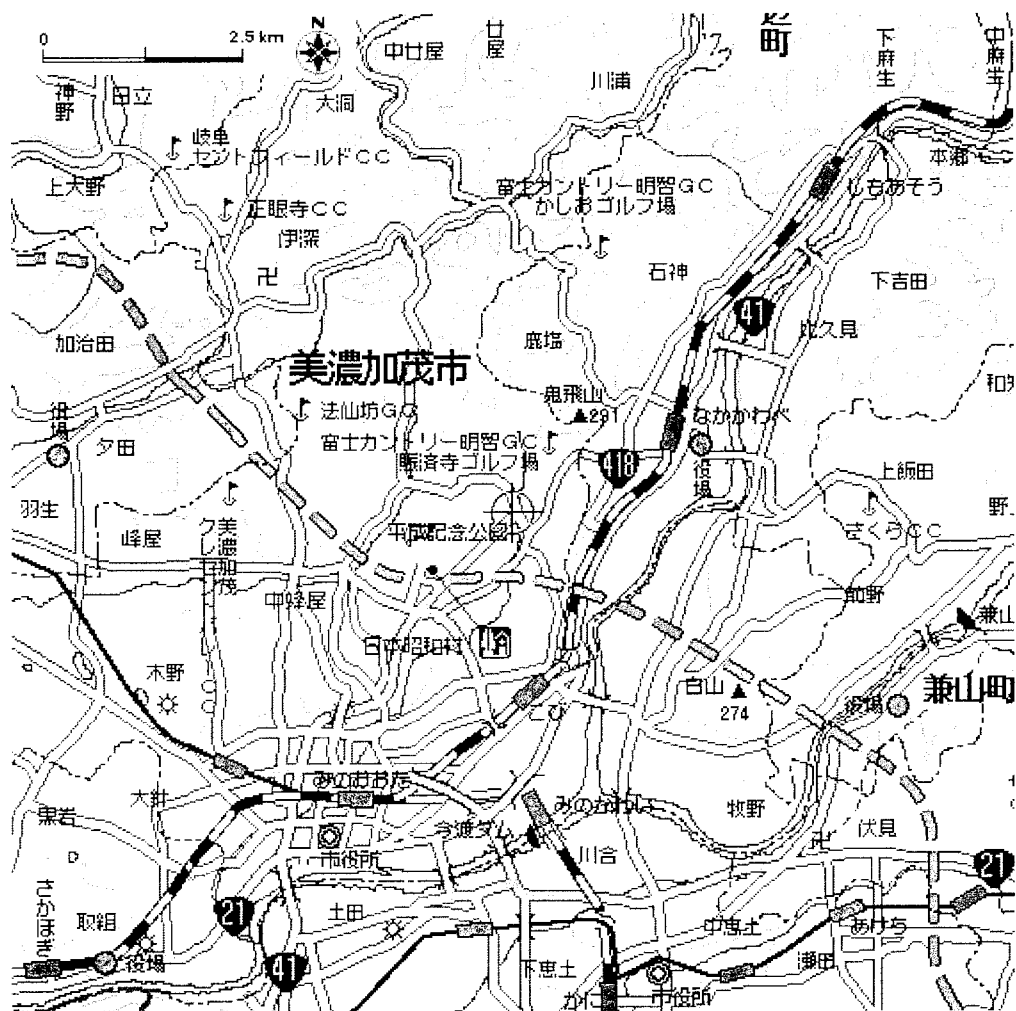


図 7.1 試験施工位置

図 7.1 に試験施工位置周辺図を示す。

7.3 掘削計画

表 7.1, 図 7.2 に掘削計画を示す. 施工管理のための計測は, 掘削進捗 1(m) ごとに単位体積重量, TF 値を測定した.

表 7.1 掘削計画

掘削延長	5(m)
掘削深度	9(m)
掘削幅	0.55(m)
土質	玉石混じりシルト

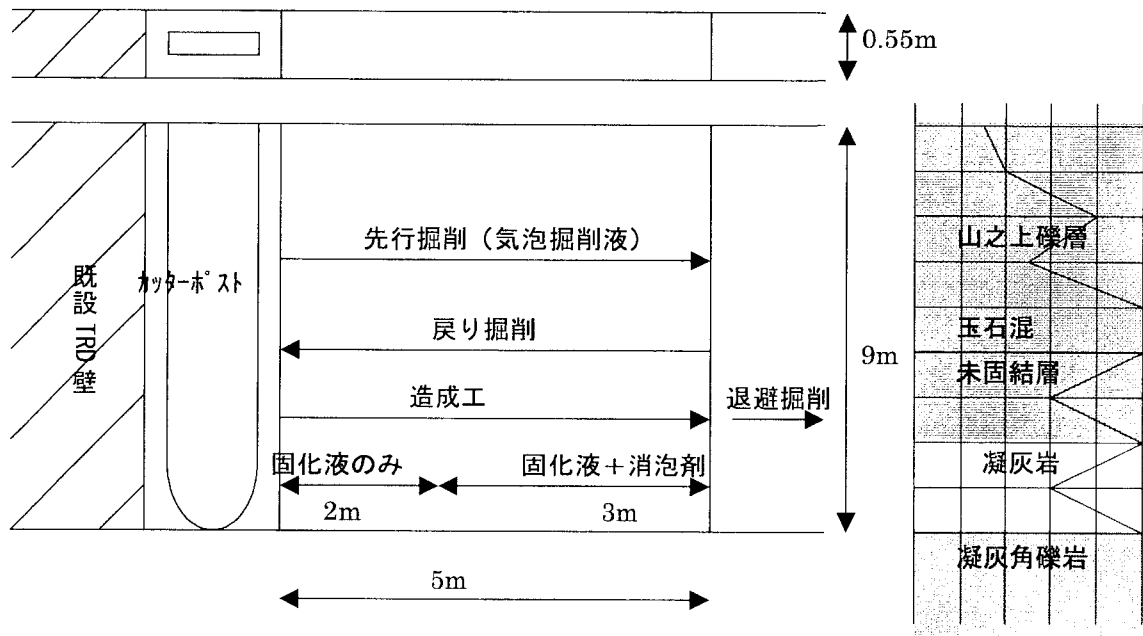


図 7.2 掘削計画

7.4 プラント

図 7.2 にプラントの概要を示す. 気泡安定液による掘削のプラント設備は, 気泡シールドなどで利用されている設備と同様のものを用いた. 図

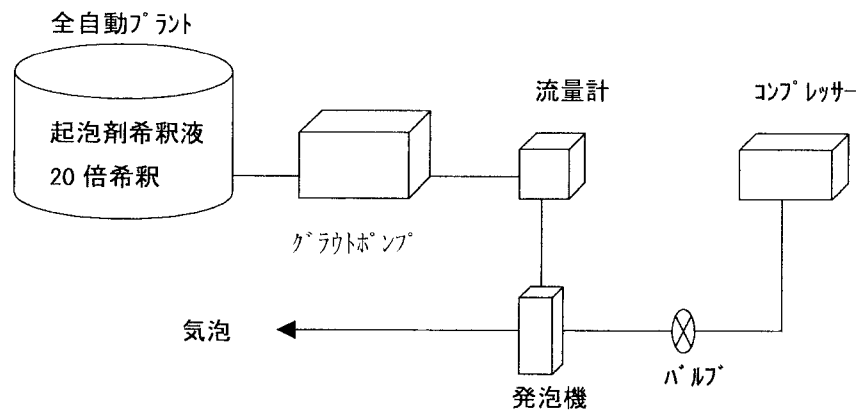


図 7.2 プラント概要

7.3 にプラント全体の写真を，図 7.4 に発泡機の写真を示した。発泡機にコンプレッサーを接続して起泡材を送り込むことによって，気泡をプレフォーミングした。気泡添加率は 20 倍に希釈された起泡剤の流量を計測し，グラウトポンプで注入量を管理した。

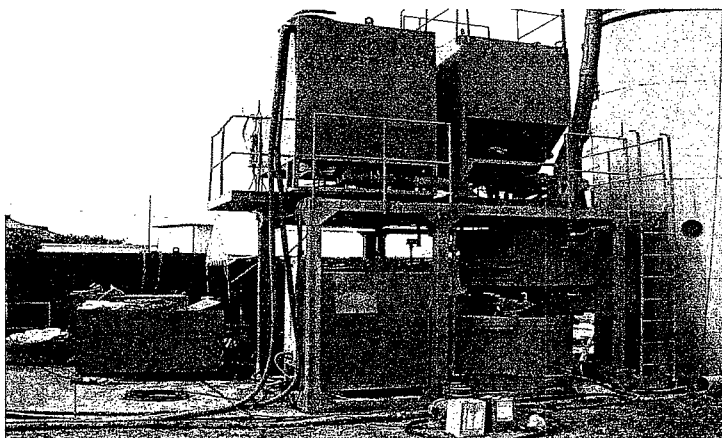


図 7.3 気泡プラント

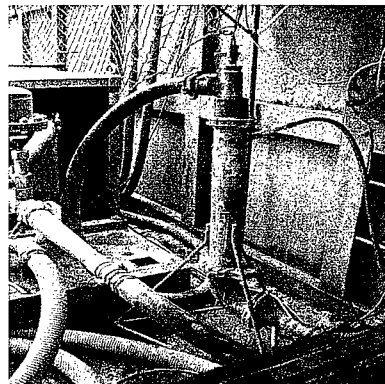


図 7.4 発泡機

7.5 配合計画

図 6.3 に示されている気泡安定液の管理図に基づいて，配合計画を作成した。掘削地盤の含水比は 20～25(%)であったので，気泡添加率 1.0(%)，単位体積重量 11.8～12.8(kN/m³)，TF 値 200±20(mm)を目標に管理した。

7.5.1 起泡材の配合計画

起泡材はパリック FA100 を用いた。配合指標通り，希釈倍率 20 倍，起泡倍率 25 倍で発泡機を用いてプレフォーミングした。表 7.2 に掘削土 1(m³)当たりの気泡剤の配合計画を示した。掘削速度は 1(cm/min)とする。表 7.3 に 1(cm)当たりの配合計画を示す。

表 7.2 掘削土 1(m³)当たりの起泡材の配合

配合材料	使用量	備考
パリック FA-100	0.85(kg)	
水	16.15(kg)	
空気	681(ℓ)	
加水	255(kg)	目標 TF=220

表 7.3 掘削進度 1(cm)当たりの配合計画

掘削液 配合	使用量	備考
起泡剤希釈液	0.841(kg)	20 倍希釈
加水	12.62(kg)	含水比・TF 調整
空気	34(ℓ)	

7.5.2 消泡材と固化液の配合

気泡により増加した安定液量に相当する部分が、余剰の排土となる。排土を処理する場合、体積が大きいほど不経済である。そこで、消泡剤を固化材に添加して、気泡量を減少することにより一軸圧縮強度を増加させるとともに排泥量を減少させることを試みた。

表 7.4 に消泡剤の仕様を示した。予備試験によると、起泡材に対して原液比 1 対 1 で配合したところ、 $TF \geq 240(\text{mm})$ であった。

表 7.5 に掘削土 $1(\text{m}^3)$ 当たりの消泡材入り固化液の配合計画を示す。なお、予備試験での気泡ソイルセメントの一軸圧縮強度は $1.4(\text{N}/\text{mm}^2)$ であった。

表 7.4 消泡材の仕様

品名	TSA732
主成分	シリコーンオイル コンパウンド
外観	乳白色エマルジョン
比重	1.01
pH	6.2

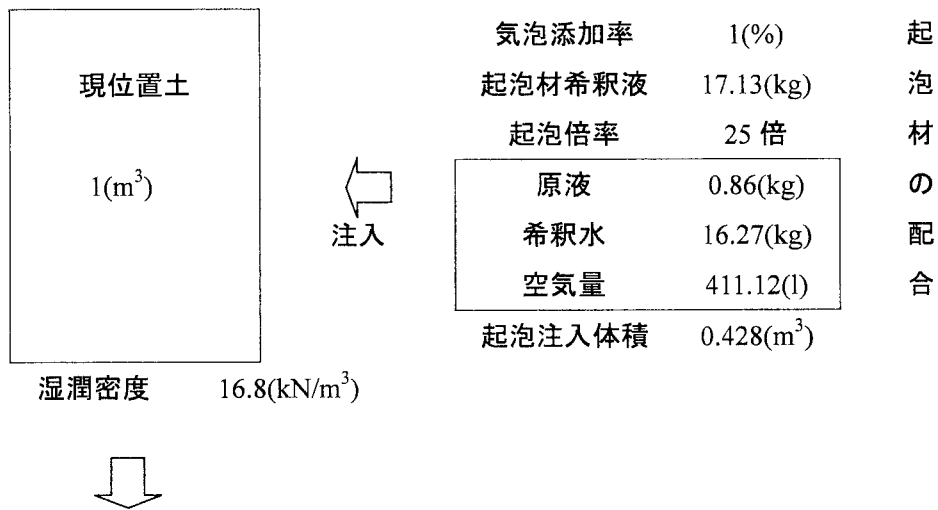
表 7.5 $1(\text{m}^3)$ 当たりの消泡材入り固化液の配合

消泡固化液配合	使用量	備考
高炉セメント B 種	300(kg)	
水	240(kg)	W/C=80%
消泡剤	0.6(kg)	消泡剤 TSA-732

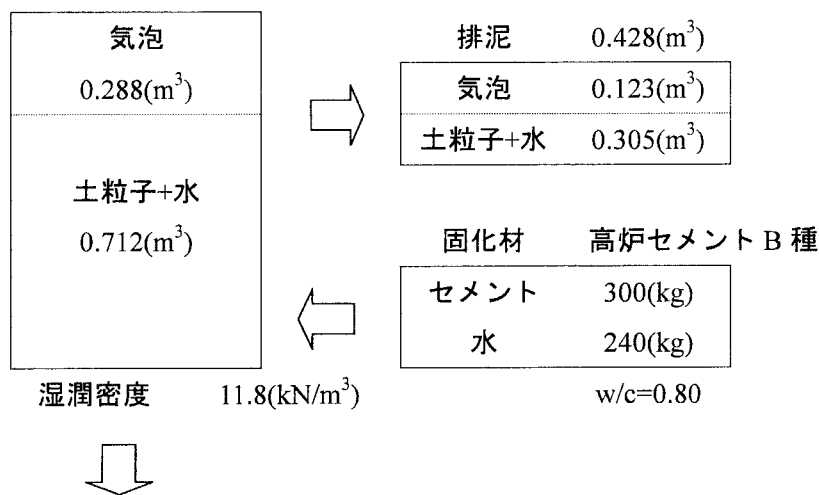
7.5.3 気泡安定液を用いた掘削計画のフローチャート

以下に気泡安定液の配合による掘削から造成までをフローチャートで示す。

① 先行掘削



② 戻り掘削～造成



③ 造成後

掘削進度 0~2(m)

固化液のみ

気泡	0.065(m ³)
土粒子+水 +セメント	0.785(m ³)

湿潤密度 12.8(kN/m³)



排土	0.339(m ³)
気泡	0.073(m ³)
土粒子+水 +セメント	0.095(m ³)

2~3(m)

固化液+消泡材

気泡	0.065(m ³)
土粒子+水 +セメント	0.935(m ³)

湿潤密度 15.2(kN/m³)



排土	0.102(m ³)
空気量	0.007(m ³)
土粒子+水 +セメント	0.095(m ³)

7.6 計測結果

表 7.6 に 1(m) ごとの単位体積重量と TF 値の変化を示す。また、図 7.5 に気泡安定液管理図上での単位体積重量と TF 値の経時変化を示す。

表 7.6 1(m)ごとの単位体積重量と TF 値

掘削進度(m)		1	2	3	4	5
単位体積重量(kN/m ³)	先行掘削	10.0 / 230	11.0 / 225	12.2 / 180	12.6 / 195	1.28 / 210
	戻り掘削	13.7 /205		13.7 /210		
	造成	13.7 / 205 消泡剤無添加		14.7 / 230 消泡剤添加		
TF 値(mm)						

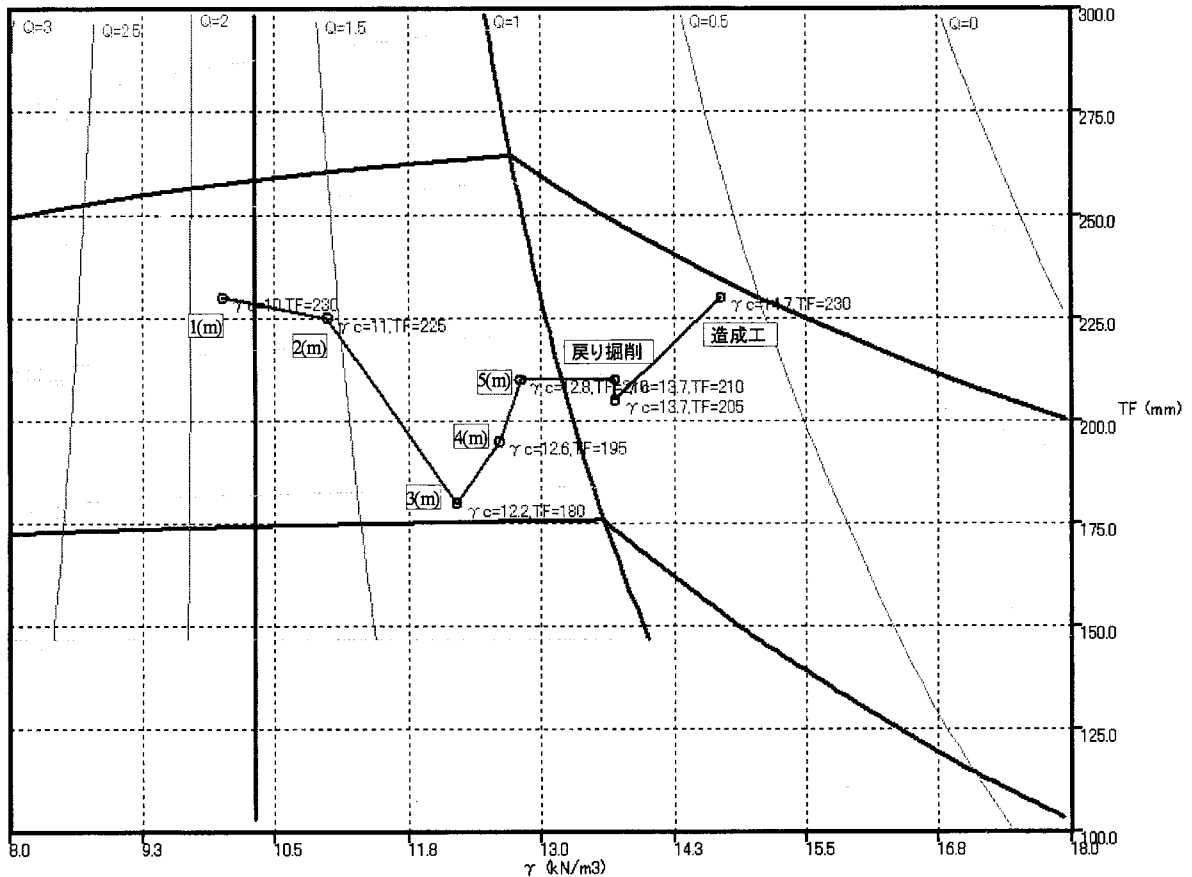


図 7.5 管理図上での単位体積重量と TF 値の経時変化

図 7.5 に示す管理状況を，掘削進度ごとに評価すると以下ようになる。

(a) 1(m)

掘削開始直後は，ベントナイト安定液で造成した既設 TRD 壁のベントナイト安定液が気泡安定液と混じりあったことに加えて，プラントにおいて気泡の送り量がコントロール不足となり，過剰に気泡が送られたため単位体積重量が減少した。よって，プラントからの空気の送り量を停止した。

(b) 2(m)

対策の結果，気泡安定液の管理図上の溝壁を安定に保つことができる領域に移動した。よって，計画通りの気泡の送り量に戻した。

(c) 3(m)

気泡安定液から現地盤へ透水した影響からか，TF 値が減少した。よって，含水比が 15(%) 程度上昇するように加水した。

(d) 4(m)

加水した影響で TF 値が上昇した。溝壁を安定に保つことができる領域内であるため，計画通りの配合で掘削した。

(e) 5(m)

加水の影響で TF 値が上昇した。配合計画通りの単位体積重量と TF 値を示し、先行掘削が終了した。

(f) 戻り掘削

気泡の消泡によって単位体積重量が減少した。すぐ造成へ移行したため、溝壁は安定していた。このとき、溝壁の天端が 30(cm)程度低下した。これは、プラントから送られる気泡の気泡倍率が計画よりも高くなってしまったことが原因であると考えられる。

(g) 造成工

固化材のみで造成した場合は単位体積重量、TF 値の変化はほぼなかったが、消泡材を添加しながら造成したときは気泡が消泡したため単位体積重量、TF 値ともに上昇した。

7.7 掘削状況

図 7.6 に単位体積重量測定状況を、図 7.7 に TF 値測定状況を示す。また、図 7.8 に先行掘削状況を、図 7.9 に芯材の挿入状況を示す。



図 7.6 単位体積重量測定状況

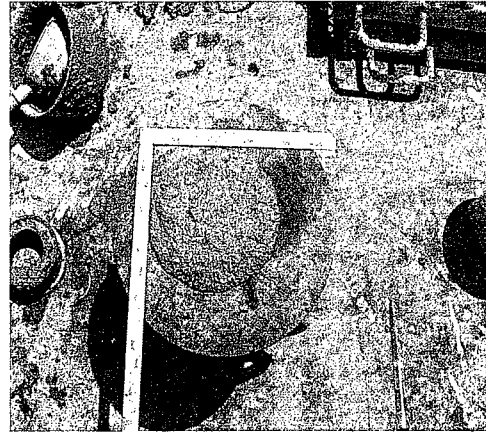


図 7.7 TF 値測定状況

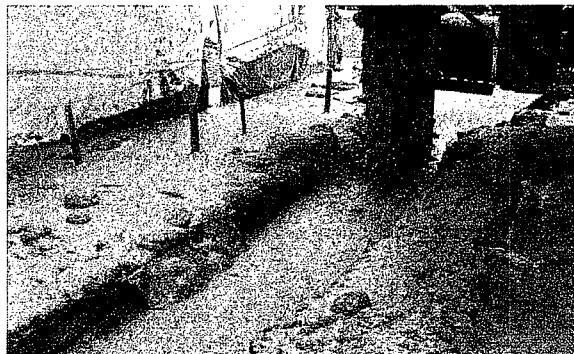


図 7.8 先行掘削状況

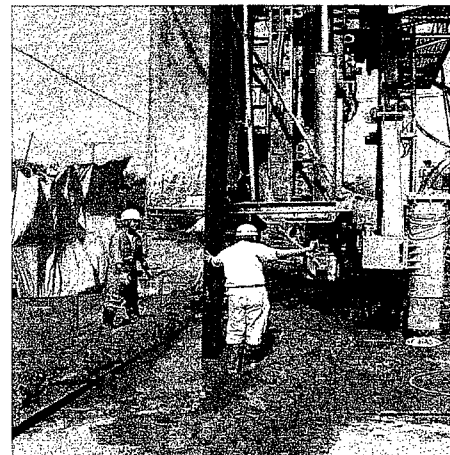


図 7.9 芯材の挿入状況

ベントナイト安定液での掘削と比較して、気泡安定液の掘削の場合、掘削機械のカッタービットへの粘性土の付着が少なかった。また、造成後 2 時間経過後も芯材の挿入は容易だった。

7.8 排土量

表 7.7 に 1(m³)当たりの排土量を示す。

表 7.7 1(m³)当たりの排土量

	先行掘削	戻り掘削	造成工	合計
ベントナイト安定液 (m ³)	0.505	0	0.485 (w/c=150)	0.990
気泡安定液 (m ³)	0.444	0	0.0606 (w/c=80)	0.505

ベントナイト安定液の場合は、芯材の挿入性を考慮して TF 値を上昇させるために w/c を高くする必要がある。気泡安定液の場合、気泡のベアリング効果によって流動性が保持されるため、w/c が低くても芯材が挿入可能な TF 値を示す。この結果、ベントナイト安定液での掘削排土量はほぼ掘削体積と同量の排土が出るのに対して、気泡安定液での掘削排土量は掘削体積のほぼ半分である。したがって、建設残土の処分費用はベントナイト安定液を用いた掘削に対して、気泡安定液を用いた掘削はほぼ半分である。

7.9 気泡ソイルセメントの強度

表 7.8 に気泡ソイルセメントの目標強度を示した。また、図 7.9 に室内試験による一軸圧縮強度測定結果を示す。表 7.9 から目標強度を十分満たすことがわかる。

表 7.8 目標強度

	養生日数	一軸圧縮強度
現場	28(日)	0.981(N/mm ²)
室内試験	28(日)	0.491(N/mm ²)

表 7.9 室内試験での一軸圧縮強度結果

	養生日数	寸法	重量	密度	強度
固化材	7(日)	50×97(mm)	245(g)	1.29(kg/cm ³)	0.967(N/mm ²)
固化材+消泡材	7(日)	50×99(mm)	245(g)	1.38(kg/cm ³)	1.51(N/mm ²)

7.10 まとめ

・今回の試験施工では、発泡装置の空気の送り量が少量であったため、制御不足となったので過剰に気泡を送ったため、配合計画の起泡量以上に発泡した。またプラント内で起泡剤の希釈液が一部発泡した。したがって、気泡掘削液の注入装置は現場施工の管理を容易にするために、発泡倍率等も管理できる専用の装置の開発製作が必要である。

・予備試験で、消泡材が添加しても気泡安定液の気泡の消泡にばらつきが生じた。シリコン系消泡材を用いる、または、他のメーカーの消泡材を用いるなどの対策が今後必要である。

・気泡安定液で掘削することによって、カッタービットに付着する土塊が減少した。掘削性は非常に良好であった。

・ベントナイト安定液による掘削に比べて気泡安定液による掘削の方が排土量を 50(%) 低減できるので、環境面、コスト面で有利である。

・気泡ソイルセメントの目標強度は養生日数 7 日で目標強度を満たしたことから、気泡ソイルセメントの有用性が示された。

第8章 結論

本研究では、気泡材を利用した新たな地盤掘削用安定液の研究開発を行った。得られた成果は、下記のように要約することができる。

- ・ 消泡率の最も低いパリック FA100 を起泡材として採用した。
- ・ 砂礫分の場合、最小含水比は表面乾燥状態含水比である。
- ・ 単位体積重量比の測定結果から、気泡安定液内で土粒子の沈み込みが起こる単位体積重量比は約 1.02 である。
- ・ 安定液として求められる機能は以下に示すとおりである。
 - a) 溝壁の安定(崩壊防止)
 - b) 良質なコンクリートの打ち込み
 - c) 掘削土砂の運搬分離
- ・ ベントナイト安定液と同様の透水量を満足する気泡安定液の気泡添加率は約 1(%)である。
- ・ 気泡安定液の単位体積重量の下限值は約 $10(\text{kN}/\text{m}^3)$ である。このとき、気泡添加率の上限值は約 2.0(%)となる。
- ・ 気泡添加率 1.5(%)以下の場合、気泡を添加する、または水セメント比を低下させるなどの方法で対策を講じる必要がある。
- ・ 単位セメント量が低下すると、気泡ソイルセメントの一軸圧縮強度もほぼ線形に低下する。また、単位セメント量 $250(\text{kg}/\text{m}^3)$ のとき規準を満足しない。よって、水セメント比 1.0 の場合、 $1(\text{m}^3)$ 当たりのセメント投入量は $300(\text{kg}/\text{m}^3)$ 必要である。
- ・ 気泡ソイルセメントは事実上不透水と認められる。
- ・ 試験施工の結果、気泡安定液で掘削することによって、カッタービットに付着する土塊が減少した。掘削性は非常に良好であった。
- ・ ベントナイト安定液による掘削に比べて気泡安定液による掘削の方が排土量を 50(%) に低減できるので、環境面、コスト面で有利である。
- ・ 気泡ソイルセメントの目標強度は養生日数 7 日で目標強度を満たしたことから、気泡ソイルセメントの有用性が示された。

参考文献

- 1)平岡成明，地中連続壁の安定液，山海堂
- 2)TRD 工法協会，TRD 工法(技術資料，標準積算試料)
- 3)社団法人 地盤工学会，土質試験の方法と解説
- 4)大沼正吉，地中連続壁工法 設計・施工ハンドブック，技報堂出版
- 5)小林一輔，最新コンクリート工学 第4版，森北出版
- 6) 嘉門雅史，浅川美利，土木学会編 新体系土木工学 16 土の力学(1)－土の分類・物理化学的性質，技報堂出版
- 7) R.N.ヤング，B.P ワーケンチン，新編 土質工学の基礎 土の性質と挙動，鹿島出版会

Cost reduction of diaphragm wall excavation using air foam

Yoshimasa Kondo

Magma Ltd., Tokyo, Japan

Takashi Nakayama

Railway Technical Research Institute, Tokyo, Japan

Hisanaga Naoe & Hirokazu Akagi

Waseda University, Tokyo, Japan

ABSTRACT: A novel stabilizing liquid using air foam rather than bentonite clay slurry, i.e. air foam suspension, is employed in order to stabilize the trench wall surface during a diaphragm wall excavation. Air foam suspension is used to reduce the construction costs of working on an underground diaphragm wall. Air foam suspension is created by mixing the excavated soil with air foam made from a surface-active chemical agent. The performance of air foam suspension depends on its density and consistency, that is, its table flow value (TF). By comparing the trench stabilization capacity of air foam suspension with that of bentonite clay slurry in model tests, the appropriate performance of air foam suspension was confirmed. The cost evaluation of using an air foam suspension for a diaphragm wall excavation is presented.

1 INTRODUCTION

Currently, bentonite clay slurry is employed to stabilize the trench wall surface during an underground diaphragm wall excavation. However, the cost of bentonite clay is high and the construction costs of working on an underground diaphragm wall are also high due to the disposal cost of high water content bentonite clay slurry as an industrial waste.

The aim of the present study was to develop a novel liquid for use in stabilizing the trench wall surface during a diaphragm wall excavation using air foam. This liquid was developed to be employed in the Trench Cutting Re-Mixing Deep Wall (TRD) method, which is one of the most frequently used diaphragm wall construction methods in urban area. Air foam suspension is produced from a surface active chemical agent by mixing the excavated soil with air foam in the mixing plant, from which it is then conveyed to the trench wall excavation.

2 AIR FOAM SUSPENSION

The basic material used for the air foam suspension is a foaming agent known as a surface-active agent. The surface-active agent is diluted with water at a ratio of 1:20 (agent: water) by weight. The diluted surface-active agent liquid is then stirred with air to produce air

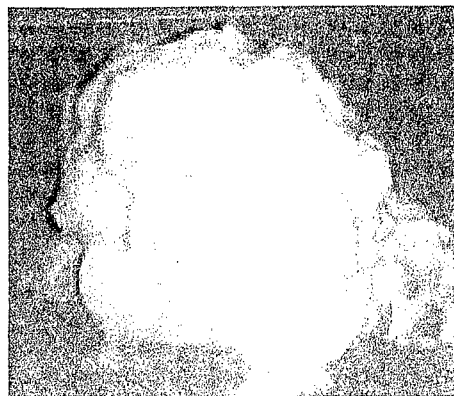


Figure 1. Air foam.

foam (Fig. 1) of twenty-five times the original volume. Air foam suspension (Fig. 2) is created by mixing the air foam with soil at a predetermined mixture ratio. Figure 3 shows the production procedure for air foam suspension.

3 MANAGEMENT CHART FOR BENTONITE CLAY SLURRY

When bentonite clay slurry is used to stabilize the trench wall surface, the specific gravity and the funnel viscosity of the slurry are employed to control

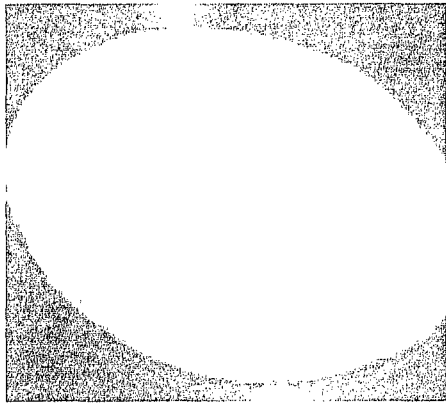


Figure 2. Air foam suspension.

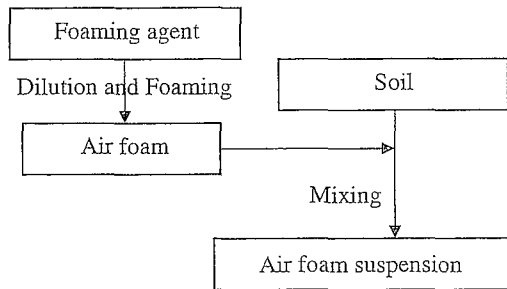


Figure 3. Production of air foam suspension.

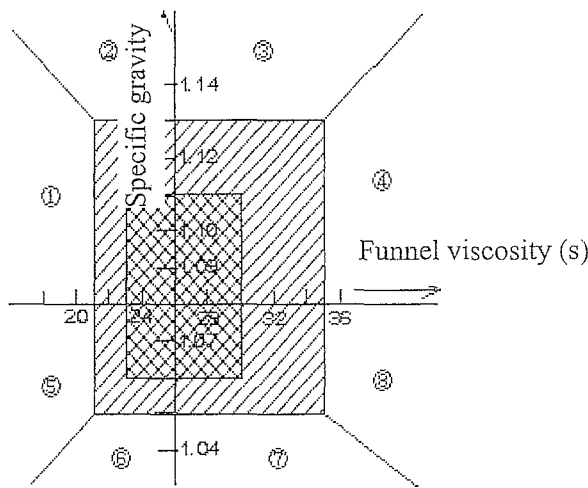


Figure 4. Management chart for bentonite clay slurry.

the stabilization capacity, as shown in Fig. 4. In the lightly shaded area, the stabilization capacity is well established by the bentonite clay slurry, while the cross-shaded area indicates the region in which the trench wall is best stabilized by the slurry. In the regions outside the shaded areas with numbers, the bentonite clay slurry demonstrates poor performance.

Table 1.1 summarizes the slurry state and its performance (numbers correspond to those shown in

Table 1.1. Summary of bentonite clay slurry state and performance.

No	State	Performance
1	A lot of silt fractions exist in spite of low viscosity.	The mud film becomes thick and the amount of flow is large.
2	The separation of sand and clay takes place, and silt and sand mix.	There is an increase in precipitation slime.
3	Muddy water gels and silt and sand mix.	The replaceability of concrete and clay slurry is deficient.
4	There is an increase in specific gravity and viscosity.	Pump efficiency decreases. Poor reinforced concrete.
5	Viscosity is too low.	The mud film is thin and decay may occur. Large amount of drainage flow. Weak mud film.
6,7	Bentonite volume is insufficient.	
8	Excessive carboxymethylated cellulose (CMC) which gels depending on the state of the cement.	pH is high. Poor reinforced concrete.

Table 1.2. Countermeasures to improve the performance of bentonite clay slurry.

No	Countermeasures
1	After the dispersing agent is added, replace it with CMC or bentonite.
2,3	Dispersing agent is added by circulation.
4	Dilution with water.
5	Addition of bentonite and CMC.
6,7	Addition of bentonite.
8	Neutralization of pH value.

Fig. 4); Table 1.2 indicates the countermeasures used to improve the performance of bentonite clay slurry. The performance of the bentonite clay slurry is easily judged from this Fig. 4, based on the measurement results of the specific gravity and the funnel viscosity.

4 MANAGEMENT CHART FOR AIR FOAM SUSPENSION

Systematic experimental investigations were conducted to obtain an appropriate management chart for the air foam suspension (Akagi *et al.* 2002):

- (1) The unit weight of the air foam suspension was adopted, corresponding to specific gravity as a management indicator for the bentonite clay

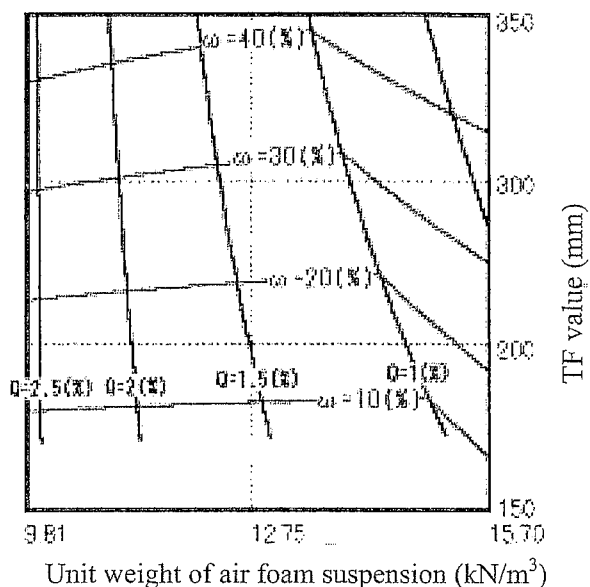


Figure 5. Relationships between unit weight and TF values of air foam suspension depending on Q and w .

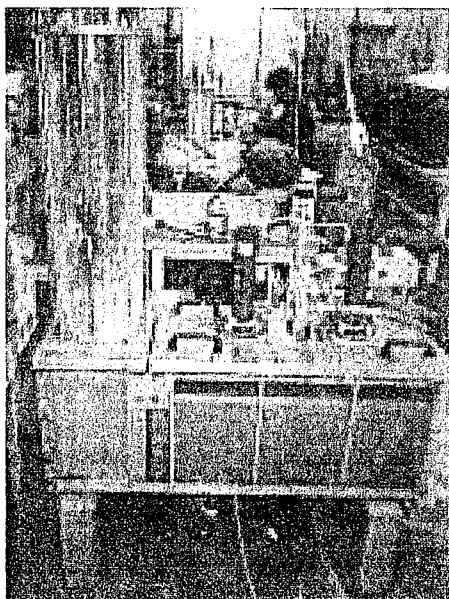


Figure 6. Model test apparatus.

slurry. The unit weight of the air foam suspension was obtained by placing the air foam suspension into a 1(l) measuring cylinder and weighing it. The table flow (TF) value of the air foam suspension was adopted for the factor, corresponding to funnel viscosity in bentonite clay slurry. The TF value was obtained by moulding the air foam suspension into a trapezoidal shape and rotating the steering wheel of the flow table. The maximum diameter of the air foam suspension on the table was measured after the rotation and was equal to TF value.

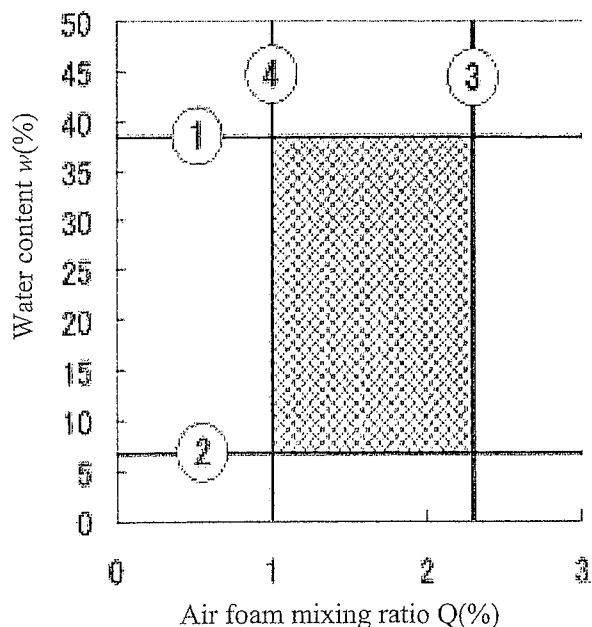


Figure 7. Range of water content and air foam mixing ratio for possible trench wall stabilization by air foam suspension.

Table 2. Poor performance of air foam suspension.

No.	Performance
1	The separation of soil particles from the trench wall.
2	Air foam suspension adsorbs the soil particles.
3	The pressure that acts on the trench wall is insufficient.
4	The amount of seepage water from air foam suspension increases rapidly.

The magnitude of TF value represents the viscosity of the air foam suspension. When the TF value is small, the Funnel viscosity of the suspension is high.

- (2) The air foam mixing ratio Q and the water content of the air foam suspension w are key parameters, which control the air foam suspension performance. Many experiments were conducted to measure the unit volume weight and TF value of the air foam suspension; the experimental results are shown in Fig. 5. The relationships in this figure indicate the equivalent curves for Q and w .
- (3) In order to obtain the trench wall stabilization capacity of the air foam suspension, a series of model tests were carried out employing the model test apparatus shown in Fig. 6, using Toyoura sand ($D_{50} = 0.1$ mm). The experiments showed that the stabilization of the sand trench wall using air foam suspension was achieved within the range of water content $6.7(\%) < w < 38.4(\%)$ and air foam mixing ratio $1(\%) < Q < 2.3(\%)$.

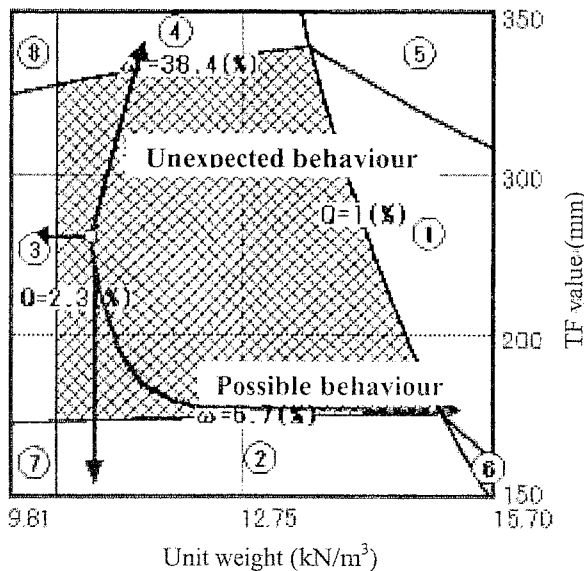


Figure 8. Management chart for air foam suspension.

The cross-shaded area in Fig. 7 shows the possible trench wall stabilization by air foam suspension. Fig. 7 shows the stabilization effects for air foam suspension, which correspond to those given for bentonite clay slurry in Fig. 4. Table 2 summarizes the poor performance of air foam suspension within the regions indicated by numbers in the figure. Using both Figs. 5 and 7, a management chart for air foam suspension is obtained as shown in Fig. 8.

The cross-shaded area in Fig. 8 indicates the region, in which the air foam suspension supports the sand trench wall successfully for 1 or 2 days by the end of concrete installation within the trench. In this figure, both the possible and the unexpected variations of the air foam suspension state during trench wall excavation are shown by the arrows. Possible behaviour indicates the settling of soil particles or the loss of air foam during the trench wall excavation. Unexpected behaviour is due to an increase in water content with a sudden rainfall. It is important to control the air foam suspension performance by the observation of its unit weight and TF value. Table 3.1 summarizes the poor performance of air foam suspension and its effects within in the regions indicated by numbers in Fig. 8; the countermeasures which may be used to improve the performance of the air foam suspension are presented in Table 3.2.

5 DISCUSSION OF COST REDUCTION OF WALL EXCAVATION USING AIR FOAM SUSPENSION

In this chapter, a comparison of the cost necessary for the creation of a stabilizing liquid for wall excavation

Table 3.1. Poor performance of air foam suspension and its effects.

No.	Performance	Effects
1	Separation of soil particles from the air foam suspension.	Possibility of trench wall collapse; difficult to replace with concrete.
2	Earth pressure acting on the trench wall is insufficient.	Possibility of trench wall failure.
3	The air foam suspension adsorbs the soil particles.	Loss of the consistency of the air foam suspension. Management becomes difficult.
4	The amount of seepage water from the air foam suspension increases.	Possibility of partial trench wall failure.
5	Combined performance of 1 and 2.	
6	Combined performance of 2 and 3.	
7	Combined performance of 3 and 4.	
8	Combined performance of 4 and 1.	

Table 3.2. Countermeasures for air foam suspension.

No.	Causes	Countermeasure
1	The amount of the air foam is insufficient.	Addition of the amount of the air foam.
2	The water content is insufficient.	Addition of the water content.
3	The amount of the air foam is excessive.	Reduction of the air foam.
4	The water content is excessive.	Reduction of the water content.

and the disposal of the excavated soil for trench excavation methods using bentonite clay slurry and air foam suspension is presented.

5.1 Cost of stabilizing liquid

The production conditions for the two types of stabilizing liquids are summarized in Table 4, while Table 5 shows their respective costs. The calculation procedure for the amount of air foam suspension is shown in Fig. 9. In the case of air foam suspension, the amount

Table 4. Production of stabilizing liquid.

Stabilizing liquid	Bentonite clay slurry	Air foam suspension
Dilution	5% bentonite concentration	20 times dilution
Air foam magnification	–	25 times
Mixing ratio (%)	50	100

Table 5. Cost of stabilizing liquid for 1(m³) excavation.

Stabilizing liquid	Bentonite clay	Air foam
Amount (t)	0.0238	0.00008
Unit price (US\$/t)	260	13,700
Cost (US\$)	6	1

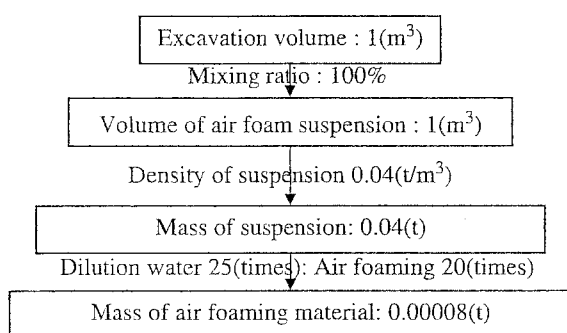


Figure 9. Calculation procedure for the amount of air foam suspension.

of surface-active agent is remarkably smaller than that necessary in the case of the bentonite clay slurry. Although the unit price of the surface-active agent is quite expensive, the resultant cost of air foam suspension is approximately one-sixth that of bentonite clay slurry.

5.2 Disposal cost of excavated soil with stabilizing liquid

Figure 10 shows the stages in the process of disposal of the excavated soil under the bentonite clay slurry method, which requires the disposal of the entire volume of the excavated soil. However, air foam within the stabilizing liquid is easily removed by drying followed by the addition of an anti-foaming agent, as shown in Fig. 11. If the full volume of the added air foam disappears completely by the addition of an anti-foaming agent, the excavated soil can be reused for other applications without any additional treatment.

If the diaphragm wall excavation using bentonite clay slurry is carried out in sandy ground, the bentonite

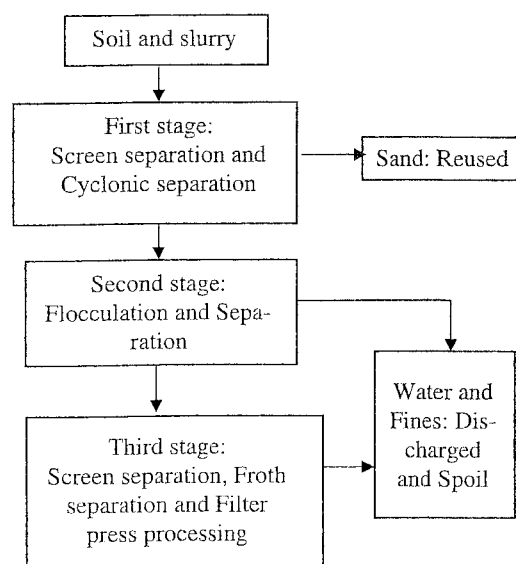


Figure 10. Disposal process of soil with bentonite clay slurry.

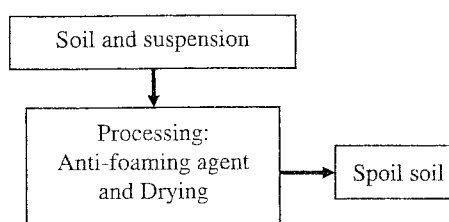


Figure 11. Disposal process of excavated soil and air foam suspension.

clay slurry is mixed by volume at approximately 50% of the excavated soil volume, as shown in Table 4. The total volume of the excavated soil with clay slurry is 1.5(m³), though in fact, approximately 10% of the bentonite clay slurry volume is lost due to seepage through the mud film along the trench wall. The resultant volume of the soil with clay slurry is thus 1.45(m³).

In the case of excavation with air foam suspension, the air foam suspension is mixed with the same volume of excavated soil, as indicated in Table 4. The total volume of the excavated soil with air foam suspension is 2(m³); however in this case, approximately 20% of the air foam volume disappears during the mixing process. Consequently, the volume of the excavated soil with air foam suspension is 1.8(m³).

It is possible to reduce the volume of the air foam suspension by using an anti-foaming chemical agent. Experimental investigation was conducted using a mixture of Toyoura sand and the air foam suspension with a silicon polymer-type anti-foaming agent.

Figure 12 shows the relationship between the anti-foaming agent ratio, i.e. the mass of anti-foaming agent versus the foaming agent mass, and the waste soil volume with air foam suspension. If the anti-foaming

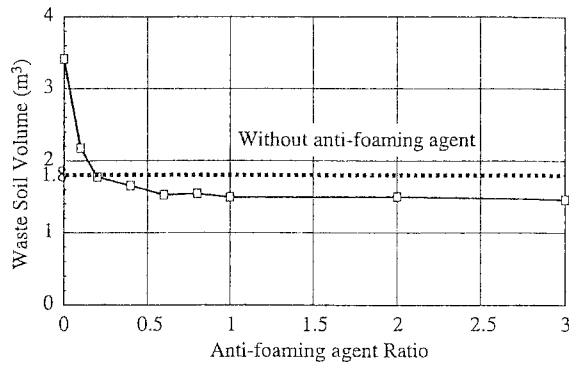


Figure 12. Relationship between anti-foaming agent ratio and waste soil volume.

agent ratio is less than 0.5, the waste soil volume becomes greater than its initial volume due to the additional formation of air foam with mixing. However, the amount of the waste soil volume is approximately $1.5(\text{m}^3)$ with an anti-foaming agent ratio of greater than 0.5, which is almost the same waste soil volume obtained in the case of bentonite clay slurry. Although the cost of an anti-foaming agent is almost the same as the foaming agent, the amount of anti-foaming agent is much smaller than the bentonite clay slurry, as shown in Table 5.

Therefore, the disposal cost of the waste soil with air foam suspension is approximately equal to that with bentonite clay slurry, since the resultant volume of waste soil with stabilizing liquid is almost identical in both cases.

The cost of diaphragm wall excavation using air foam suspension is thus equivalent to approximately 70% of that using bentonite clay slurry stabilization. It was consistent with the actual results obtained in a field test case of successful usage of the management chart, which produced a 30% reduction in the waste soil volume using the air foam suspension method.

6 CONCLUSIONS

In this paper, the development of a novel liquid, an air foam suspension, for stabilizing the trench wall surface during a diaphragm wall excavation was investigated. A management chart for the new air foam stabilizing liquid was presented, which was created through a series of experimental investigations. Finally, the costs necessary under the bentonite clay slurry method and the air foam suspension method for the creation of the stabilizing liquid for diaphragm wall excavation and for the disposal of the excavated soil are compared. The conclusions are summarized as follows:

- (1) Quality management of air foam suspension can be conducted successfully using the unit weight and the TF value of the stabilizing liquid with air foam.
- (2) Diaphragm wall excavation using air foam suspension can provide a reduction in cost of approximately 30% from the cost of stabilization and soil disposal with bentonite clay slurry.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are indebted to the The Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan and Waseda University for their financial assistances through the Grant-in-Aid for Scientific Research (C), (2), No. 16560437 and Waseda University Grant for Special Research Projects, No.2003A-556.

REFERENCES

- Akagi, H., T. Nakayama and Y. Kondo: Trench wall stabilization mechanism of air foam suspension, 37th JGS national conference, No. 765, pp. 1523–1524, Osaka, Japan, July, 2002 (in Japanese).