

気泡シールド工法におけるチャンバー内混合土の消泡および分離特性について

安井利彰¹, 大山哲也², 平田光彦², 高野颯平², 赤木寛一³

1 前田建設工業(株)・土木技術部

2 早稲田大学大学院・創造理工学研究科

3 早稲田大学・理工学術院

概 要

気泡シールド工法を用いたトンネル工事（以下、気泡シールド工事と呼ぶ）¹⁾において、切羽安定を維持しながら安全に掘削を進めるためには、チャンバー内の気泡混合土が施工中に適切な塑性流動性を維持する必要がある。塑性流動性の維持には、消泡と分離を発生させないことが重要である。消泡および分離に影響を与える要因として、気泡混合土の水分量、高圧力下での施工環境および微生物による影響等が考えられる。特に、水分量に関しては掘削地山、気泡および水（地山に含まれている水および加水）の混合比率を適切に管理することが重要である。

筆者らは、気泡混合土の消泡特性および分離特性について実験的に調査し、気泡シールド工事におけるチャンバー内の気泡混合土の塑性流動性を維持する含水比範囲を定義するとともに、現場でのチャンバー内気泡混合土の施工管理手順を考案した。

キーワード：気泡シールド工事，塑性流動性，消泡，分離，含水比

1. はじめに

気泡シールド工事は、泥土圧シールド工法に分類される。カッタービットで掘削した地山をチャンバー内に取り込み、添加した気泡と攪拌混合する。これにより、塑性流動性を有する気泡混合土を形成し切羽の安定に寄与する。排土後、気泡混合土に消泡剤を添加することで、残土体積が減少することから、環境負荷低減という観点で近年適用が増えている¹⁾。

このチャンバー内の気泡混合土は、塑性流動性を有するため、シールドマシンのジャッキ圧力がチャンバー内を介して切羽に均等に伝達する。気泡シールド工事は、これにより切羽の安定を保ちながら掘進する工法である。また、気泡混合土内の気泡が、地山内に侵入することで不飽和領域が形成される。その不飽和領域が難透水層となり、地山からの水圧に耐えて、遮水性を保持することができる。

掘削中に上記の機能を満足するためには、チャンバー内の気泡混合土が均一な懸濁状態を維持することが重要となる。ただ、気泡混合土において消泡や分離が発生すると、塑性流動性や遮水性の低下につながる。その結果、チャンバー内圧力が地山に均等に作用せず、掘進中の切羽安定性が損なわれる。例えば、土砂の過剰な取り込みなどを誘発し、原地盤に悪影響を及ぼす恐れがある。消泡と分離の要因としては、掘削地山、気泡および水（掘削地山に含まれている水分および加水）の混合比率、高圧力下での掘削環境、圧力変動および微生物の影響などが考えられる。

一方、近藤²⁾らはソイルセメント地中連続壁の安定液に気泡を添加した気泡安定液について実験的に調査し、施工における品質管理図を考案している。その中で、気泡混合土が消泡、分離しない含水比の管理範囲が示されている。また、筆者らはこの技術を現場に適用した事例に関する報告を既に行っている³⁾。

これらの研究では、地中連続壁の溝壁安定を支配する気泡安定液の密度と施工時の安定液の流動性に関するテーブルフロー値に着目して、実験的な調査が行われている。しかしながら、消泡現象に関する実験に基づく土質力学的検討が不足しており、分離現象についてもそのメカニズムと気泡添加率の及ぼす影響が適切に評価されていない危惧が存在していた。

前述のように切羽安定を維持しながら気泡シールド掘削を進めるために、チャンバー内気泡混合土の塑性流動性を最適に管理する必要がある。本研究では、気泡シールド工法における切羽安定と地中連続壁工法における溝壁安定、気泡混合土の流動性保持の類似性に着目して、シールド機チャンバー内の気泡混合土の消泡特性および分離特性について実験的に検討し、施工時に適用可能な品質管理手法を検討したものである。

2. 気泡の機能とその消泡メカニズム

気泡混合土の消泡特性を実験的に検討する前に、気泡自体の機能と消泡メカニズムについて確認する。

2.1 気泡と泡沫

水の中で微小な気泡が多数分散しているように、気体が液体中あるいは固体中に包まれた状態を気泡 (Bubble) という。これは、「気体気泡」と呼ぶことができる。一方、各種界面活性物質の気・液界面への吸着によって発生し、多数集まって薄膜を隔てて密接に存在するものを泡沫 (Foams) と呼ぶ。これは、「界面気泡」と呼ぶことができる。気泡と泡沫の区別は形態的であるが、前者はただ1つの界面を有するのに対し、後者は2つ界面を有する⁴⁾。

一般的に、水は液体の中で表面張力が大きく、表面積を最小にしようとする。そのため、水を泡立てて起泡泡させても泡は保持されず、すぐに消える。起泡泡は液体の表面積を大きくしようとする作用であるが、これを解消しようとする力がはたらくためである。そのため、界面活性剤を添加し、水の表面張力を低下させることで起泡泡および泡の保持性能を向上させる。

以下、気泡シールド工事で使用されている界面活性剤を起泡泡した「界面気泡」をこれまでの気泡シールド工法の通例に従い「気泡」と呼ぶ。

2.2 気泡の膜について

界面活性剤は、親水基と疎水基で構成されている。そのため、図-1 に示すように、気泡の膜には水が介在し (液膜)、電気二重層を形成している。この液膜は、重力や圧力差に伴う排水等の影響で不安定になり、いずれ破泡するが、液体の粘性増加等で泡の保持性を向上させるなどで液膜を保持している。このことから、水分が少ないと液膜を形成すること、また、保持することが難しくなることは容易に想像できる。また、圧力変化が繰り返されることで、気泡径が変化すると液膜の厚さも変化する。

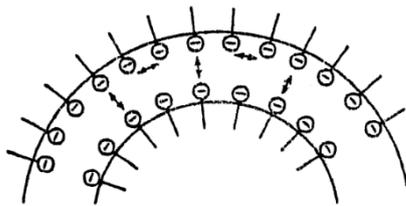


図-1 液膜の電気二重層 (図中矢印：電気的反発力)⁴⁾

気泡シールド工事の気泡混合土は、全体積の15~50%が気泡であり、機能を十分に発揮するためには消泡が生じないことが求められる。気泡は界面活性剤を起泡泡させることにより発生するため、消泡が生じる原因としては地中の微生物による分解や気泡の水分が土粒子に奪われること等が考えられる。しかしながら、気泡混合土がその機能を果たす期間は最長でも数日間であるため、長時間を要する地中の微生物による分解は考慮する必要はない。よって、気泡シールド工事における消泡の主な原因は、地山の土の含水比が小さい場合に気泡の水分が土粒子に吸着すること、高圧力環境および圧力変動と推定することができる。

3. 気泡安定液での消泡特性の定義

既往の研究として、近藤らによる地中連続壁施工の気泡安定液の消泡特性に関する研究概要を以下に示す²⁾。

この研究では、気泡中の水分が土粒子に吸着されることで、液膜の形成が困難になり、消泡に至ると仮説を立てている。そこで、土粒子が水を吸着する限界の含水比に着目し、土と気泡を混合攪拌した際に消泡が生じない最小の含水比を、最小含水比 w_{min} と定義している。気泡安定液の最小含水比 w_{min} では、安定液に含まれる掘削土の性状の違いが影響を及ぼすと考え、粗粒分 (0.075 mm 以上) と細粒分の影響を分けて導出を行っている。粗粒分の影響については、コンクリート骨材配合時に用いられる骨材の表面の含水比に着目して評価を行っている。コンクリート工学では骨材の含水状態 (水分を斜線で表示) を以下の図-2 のように4段階に分けており、気泡安定液において土粒子が気泡を吸着し消泡現象を起こすのは、表面乾燥状態 (黄色背景) を下回るときと仮定している。これより、粗粒分の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) と定義している。さらに、細粒分を含まない6種類の珪砂を用いて表面乾燥状態を測定した結果が表-1 である。これらの平均値を粗粒分の表面乾燥含水比と設定している。

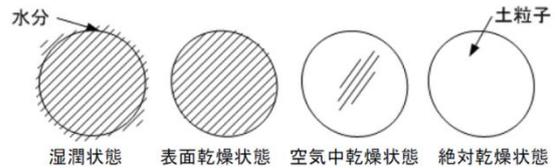


図-2 骨材の含水状態

表-1 表面乾燥含水比

| 試料土 | 表面乾燥含水比 % |
|------|-----------|
| 豊浦砂 | 8.52 |
| 珪砂6号 | 7.65 |
| 珪砂5号 | 8.66 |
| 珪砂4号 | 6.15 |
| 珪砂3号 | 5.58 |
| 珪砂2号 | 5.30 |
| 平均 | 6.97 |

一方、細粒分に関して同様の考え方を適用する際、細粒分の表面乾燥含水比の測定は困難である。よって、粘性土の含水比低下に伴う体積収縮状態の変化に着目している。

粘性土は含水比の低下によって、正規収縮、残留収縮、そして無収縮という段階を経て体積収縮する。無収縮時には土粒子骨格は変化せず、間隙中の液体のみが減少する。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、粘性土が気泡中の水分を吸着し消泡させると考え、細粒分の最小含水比として収縮限界に相当する含水比が採用されている。表-2 に一般的な土の収縮限界含水比を示す⁵⁾。

表-2 一般的な土の収縮限界含水比 %

| 砂 | シルト | 粘土 | コロイド | 雲母 | 泥炭 | カオリン |
|---|------|------|------|-------|------|------|
| — | 19.0 | 11.0 | 6.0 | 160.0 | 44.0 | 36.0 |

上述した粗粒分と細粒分の影響を考慮して、気泡安定液の最小含水比 w_{min} を設定している。すなわち、粗粒分と細粒分の影響について、細粒分含有率 P によって加重平均した値を気泡安定液の最小含水比 w_{min} としている。

$$w_{min} = \text{表面乾燥含水比} \times \frac{100 - P}{100} + \text{収縮限界含水比} \times \frac{P}{100} \quad (1)$$

ここに、 w_{min} : 最小含水比 %, P : 細粒分含有率 %

表-1 から粗粒分の平均表面乾燥含水比 6.97 %, 表-2 から細粒分の収縮限界含水比の代表値として粘土の 11.0 % を式(1)に代入し、最小含水比 w_{min} を以下のように定義している。

$$w_{min} = 6.97 \times \frac{100 - P}{100} + 11.0 \times \frac{P}{100} = 6.97 + 0.0403P \quad (2)$$

4. 気泡混合土の含水比が消泡現象に与える影響

筆者らは、気泡安定液における検討結果を参考にしながら、気泡シールド工事においてチャンパー内気泡混合土の消泡が生じない含水比を新たに細粒分消泡含水比 w_{minF} と定義し、実験的に検討を行った。粗粒分については、近藤らの研究結果を踏襲することとし、今回の消泡含水比の実験対象は細粒分とした。

4.1 気泡混合土の消泡による湿潤密度の変化

気泡シールド工事における掘削対象土が硬質粘性土の場合、硬質粘性土の自然含水比は一般にその液性限界値より小さい。この時チャンパー内に掘削により取り込まれた硬質粘性土は、3. で述べたように気泡の水分を奪って消泡現象が発生し気泡混合土の流動性が低下する⁹⁾。

実験では、気泡混合土が消泡すると、気泡混合土の実測湿潤密度が理論湿潤密度よりも大きくなることに着目した。容量を測定したモールドに気泡混合土を詰めて質量を計測し、実測湿潤密度を算出する。ここに、理論湿潤密度とは式(3)に示すように、消泡していない場合の気泡混合土の配合から決定される湿潤密度である。

$$\text{理論湿潤密度} = \frac{(\text{試料土湿潤質量} + \text{配合時気泡質量}^{*1})}{\text{容器体積}} \quad (3)$$

※1 : 消泡および過発泡していない配合上の気泡質量

そこで、実験では気泡混合土の混合時の含水比を変化させ、その時の湿潤密度を計測することとした。含水比が小さく実測湿潤密度が理論湿潤密度より大きい場合は消泡が発生しているため、両者が一致する含水比が、消泡が発生する含水比の上限值と考えられる。すなわち、それ以下の含水比では必ず消泡するので、気泡混合土中の含水比 w を横軸、湿潤密度 ρ_t を縦軸にとった図に、理論湿潤密度と

実測湿潤密度をプロットし、その交点の値を細粒分消泡含水比 w_{minF} として求めることができる。

試料土はカオリン、木節粘土、液性限界 w_L が大きいケースとしてカオリンとベントナイト (Na 型) を質量比 3:1 で混合させた試料土 (以下、Ka-Be と記す) の計 3 種類に加え、東京都内の原地盤から採取した北多摩層粘性土 (以下、Ki-c と記す) を使用した。各粘性土の液性限界 w_L 、塑性限界 w_P および塑性指数 I_P は表-3 に示す通りである。

表-3 各試料の液性限界・塑性限界・塑性指数

| 試料名 | 試料土 | 液性限界 w_L % | 塑性限界 w_P % | 塑性指数 I_P |
|-----|-------|-----------------|-----------------|---------------|
| A | カオリン | 70.53 | 39.25 | 31.28 |
| B | 木節粘土 | 42.23 | 15.81 | 26.43 |
| C | Ka-Be | 164.13 | 42.51 | 121.62 |
| D | Ki-c | 54.27 | 35.50 | 18.77 |

図-3 に消泡含水比の実験フローを示す。まず対象試料土の予備混練、初期含水比の測定を行う。含水比調整を実施した後に、気泡を所定の体積比率で試料土に添加し、モルタルミキサーで 1 分間攪拌することで気泡混合土を作成する。作成後、湿潤密度の測定を行い、理論湿潤密度 (式 3) と実測湿潤密度を図上にプロットする。なお、湿潤密度は 100 cc の容器に気泡混合土を充填し、質量を測定して算出する。

具体的には、4 種類の試料土についてそれぞれの液性限界 w_L を目安に含水比を調整し、気泡はアニオン系の特殊界面活性剤の原液を水道水で 20 倍希釈したものを 25 倍発泡させたものを用いた。各ケースの気泡添加率は気泡シールド工事における実績値を考慮して体積比で $Q_v = 20$ % とした。ここで、気泡添加率 Q_v (体積比) は掘削地山体積、実験では試料土体積に対する体積比である。今回の実験では、試料土の含水比を変化させているため、試料土の体積 (土粒子密度から算出) と水の体積の合計に対する体積比としている。後述の実験結果の整理では、気泡添加率 Q_M (質量比) も併記している。これは、試料土乾燥質量に対する質量比である。また、各ケースの気泡混合土について、流動性を調べるために JIS R 5201 フロー試験⁷⁾ (以下、TF 試験) を行った。

図-4~図-7 に消泡含水比実験結果を示す。なお、今回の離散的な実験結果を最も精度よく近似できた手法が対数近似であったため、図中に含水比 $w=x$ の対数で近似した結果を実測湿潤密度は実線で、理論湿潤密度を破線で示した。これにより、各ケースともに、含水比に対応する実測湿潤密度と理論湿潤密度の変化を表す曲線の交点を確認することができる。それらの交点で細粒分の消泡含水比 w_{minF} (実験値) を求めた。交点よりも小さい含水比では、気泡混合土中に消泡が生じており、実測理論密度は、理論湿潤密度よりも大きくなっている。一方、交点よりも含水比が大きい領域で実測湿潤密度が理論湿潤密度を下回っ

ていることが確認できる。これは、試料配合後の攪拌によって、気泡が過発泡したことによるものと考えられる。図中には気泡混合土のTF値と完全に消泡した場合の理論密度も併記している。また、消泡時の湿潤密度の実測値は1.3~1.4 g/cm³であり、テーブルフロー値は140~160 mmであった。

表-4に実験結果を整理した。実測湿潤密度と理論湿潤密度との交点の含水比を w_{crSF} とした。なお、表-4中の気泡添加率 Q_M (質量比)は各試料土で幅を持った記載としている。これは、各ケースで含水比を変化させた試料土に対し、気泡添加率 Q_V (体積比)を20%に設定しているためである。表-4より、交点含水比 w_{crSF} は液性限界 w_L よりも大きいことが分かる。本検討は、チャンバー内で気泡混合土が塑性流動性を維持できる施工管理手法を提案することが目的であるため、塑性流動性と含水比の関係に着目して、細粒分の最小含水比を決定することとした。

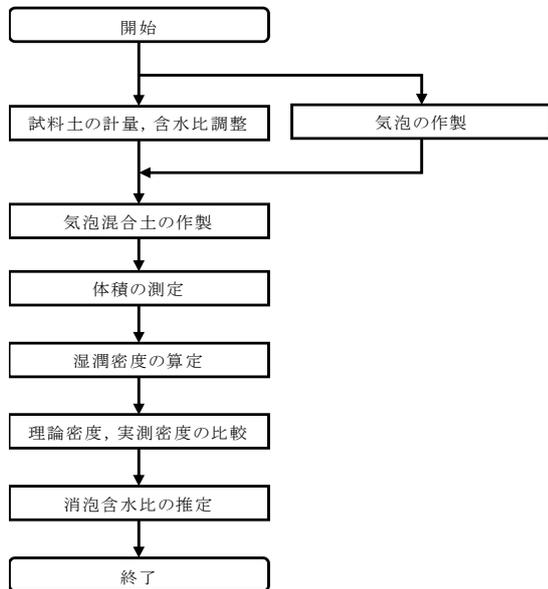


図-3 消泡含水比実験フロー

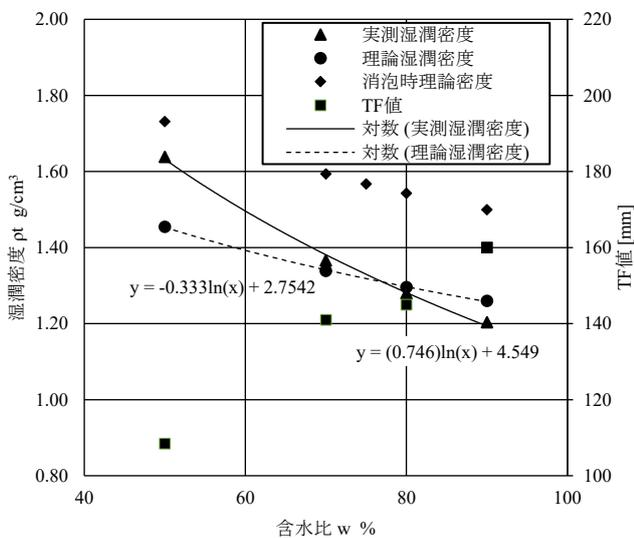


図-4 消泡含水比実験結果 (試料 A : カオリン)

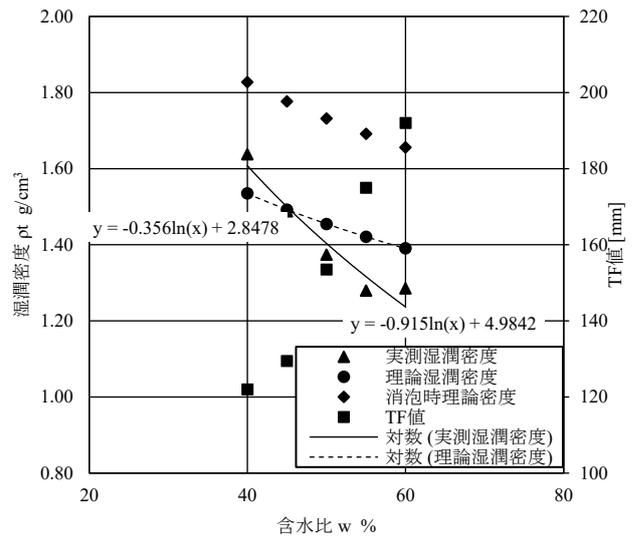


図-5 消泡含水比実験結果 (試料 B : 木節粘土)

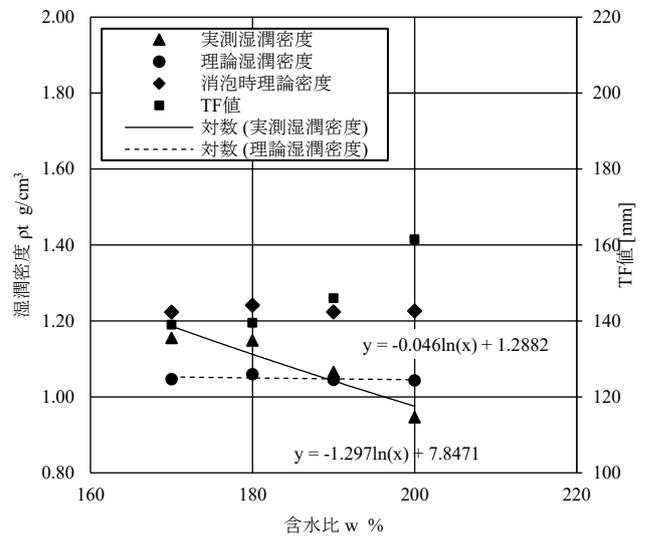


図-6 消泡含水比実験結果 (試料 C : Ka-Be)

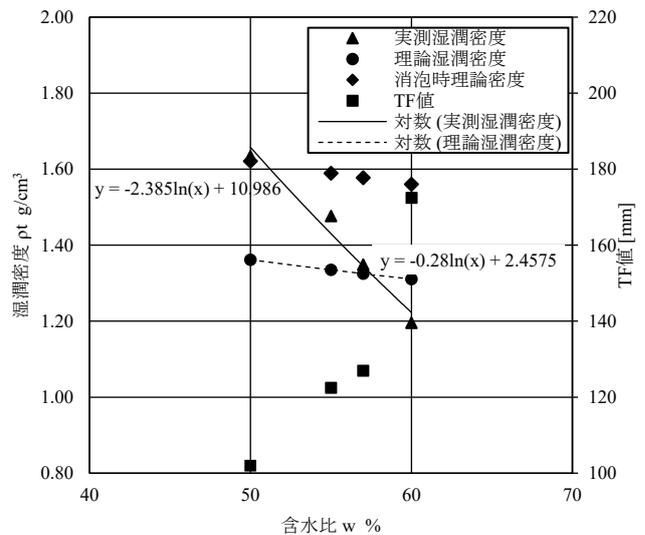


図-7 消泡含水比実験結果 (試料 D : Ki-c)

表-4 細粒分の交点含水比 w_{cnsF} (実験値) と各物性値の比較

| 試料 | 気泡添加率 (体積比/ 質量比) | 液性 限界 | 塑性 限界 | 塑性 指数 | 交点 含水比 (実験値) |
|----|------------------------|----------|----------|----------|--------------------|
| | Q_v %/ Q_M % | w_L % | w_P % | I_P | w_{cnsF} % |
| A | 20/ 0.7~0.9 | 70.53 | 39.25 | 31.28 | 77.05 |
| B | 20/ 0.6~0.7 | 42.23 | 15.81 | 26.43 | 45.69 |
| C | 20/ 1.6~1.9 | 164.13 | 42.51 | 121.62 | 190.27 |
| D | 20/ 0.5~0.6 | 54.27 | 35.50 | 18.77 | 57.49 |

4.2 気泡混合土の消泡に伴う流動性の変化

気泡シールド工事において、切羽掘削土に対する気泡添加は塑性流動性保持の効果が期待されている。しかし、添加した気泡が消泡した場合には、期待される塑性流動性を維持できないことが予想される。そこで本節では、前述の消泡含水比実験で使用した各種粘性土を用い、消泡と塑性流動性との関係を検討した。

図-8 に、消泡含水比実験結果をもとに気泡混合土の含水比 w と TF 値の関係を整理した。各ケースの含水比 w と TF 値との間には正の相関がみられる。気泡混合土の含水比 w と TF 値の関係を一次式で近似した結果も併記している。

一方、東京外環トンネル施工等検討委員会資料では、室内試験時の TF 値目安を 105~160 mm としている⁸⁾。気泡シールドなどの泥土加圧式シールドでは、チャンパー内混合土の流動性を考える場合に切羽安定に加えてスクリーコンベアなどによる安定的な排土のために過剰な流動を避ける必要があるため、上記の TF 値の下限値 105 mm 程度を目標とするのが適切と考えられる。

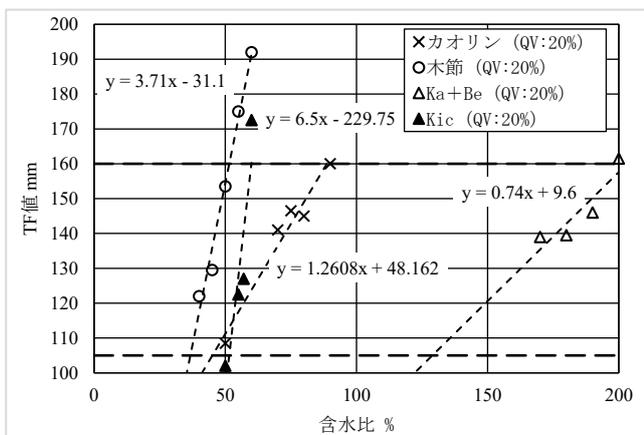


図-8 含水比と TF 値との関係

図-8 の含水比と TF 値の関係をもとに推定した各試料の TF=105 mm での含水比 w_c を表-5 に示す。また、 w_c はいずれも w_L 以下なので、その場合のコンシステンシー指数

I_c も併記する。なお、コンシステンシー指数 I_c は式(4)で与えられる。

表-5 実験値の近似式と TF=105 mm での含水比 w_c とコンシステンシー指数 I_c

| 試料 | 近似式 | TF 値=105 mm での含水比 w_c % | 左記含水比での コンシステンシー 指数 I_c |
|----|--------------|------------------------------|---------------------------------|
| A | TF=1.26w+48 | 45.24 | 0.81 |
| B | TF=3.71w-31 | 36.66 | 0.21 |
| C | TF=0.74w+10 | 128.38 | 0.29 |
| D | TF=6.50w-230 | 51.54 | 0.15 |

$$I_c = \frac{(w_L - w_n)}{I_P} \quad (4)$$

表-5 からわかるように、試料 A のカオリンを除いて、 I_c は 0.2 前後の値となっている。試料 A のカオリンの I_c が 0.81 となっている要因としては、カオリンの主要粘土鉱物の活性度の影響を考慮することができる。表-6 に、各種の粘土鉱物の活性度を示す。

表-6 粘土鉱物の活性度⁹⁾

| 鉱物名 | 活性度 |
|----------|---------|
| カオリナイト | 0.4~0.5 |
| ハロイサイト | 0.1~0.5 |
| イライト | 0.5~1.0 |
| モンモリロナイト | 7.0~8.0 |

カオリンの主要な粘土鉱物と考えられるカオリナイトは活性度が比較的小さいため、水分を保持する能力が低いと考えられる。そのため、カオリンは気泡から水分を奪う能力が小さいので、消泡による TF 値の変化も小さいため TF=105 mm を満足するコンシステンシー指数が他の試料に比べ大きくなると考えられる。

したがって、粘土鉱物の活性度が 0.4~0.5 のカオリン粘土を除けば、コンシステンシー指数 I_c が 0.2 程度の含水比であれば、気泡混合土は TF=105 mm を満足できると考えられる。

この結果に基づいて、コンシステンシー指数 $I_c=0.2$ を満足する含水比を細粒分の最小含水比 w_{minF} と定義することとした。

4.3 気泡混合土の消泡含水比の決定

気泡混合土の消泡含水比 w_{min} は、文献²⁾を参考に、粗粒分・細粒分の影響を分けて導出を行う。それぞれの消泡含水比 w_{minC} 、 w_{minF} を細粒分含有率 P で加重平均し、式(5)のように消泡含水比 w_{min} を計算することができる。

$$w_{min} = w_{minC} \times \frac{100 - P}{100} + w_{minF} \times \frac{P}{100} \quad (5)$$

細粒分の消泡含水比 w_{minF} は、4.2 で述べた通り、式(6)で定める。

$$w_{\min F} = w_L - 0.2 \cdot I_p \quad (6)$$

粗粒分の消泡含水比 $w_{\min C}$ は、表面乾燥状態に相当する含水比（表面乾燥含水比）とし、一般的な粗粒分として豊浦標準砂と珪砂の表面乾燥含水比を用いる。表-1 より、実測値の平均をとり、式(7)で定める。

$$w_{\min C} = 6.97 \% \quad (7)$$

したがって、気泡混合土の消泡含水比 w_{\min} は式(8)のように表すことができる。

$$w_{\min} = 6.97 \times \frac{100 - P}{100} + (w_L - 0.2 \cdot I_p) \times \frac{P}{100} \quad (8)$$

5. 気泡混合土の含水比が分離現象に与える影響

チャンバー内の気泡混合土が、均一な懸濁状態から分離沈降すると、切羽面の遮水性が失われるとともにチャンバー内圧力が地山に均等に作用せず、掘進中の切羽安定性が損なわれる。その結果、チャンバー内への地下水の流入や土砂の過剰な取り込みなどを誘発し、原地盤に悪影響を及ぼす恐れがある。本章では、気泡混合土の分離特性を把握するとともに、分離沈降せず許容できる最大の含水比²⁾（分離含水比 w_{\max} とする）について、分離沈降に伴う粒度特性の変化に着目して実験的に調査した。

5.1 気泡混合土の分離特性の把握

気泡混合土の分離特性を把握するため、分離特性確認実験を行った。実験は近藤らの研究²⁾を参考にした。分離現象は粗粒土において特に課題になることから、試料土は東京都内の最大粒径 20 mm の東久留米砂層の粒度分布を混合再現した模擬サンプル（以下、模擬 His）を用いた。試料土の粒度分布を図-9 に示す。実験ケースは表-7 に示すように含水比 w および気泡添加率 $Q_M\%$ （質量比）/ $Q_V\%$ （体積比）を 12 種類の組み合わせケースに設定した。各実験ケースにおける含水比 w は、試料土が飽和条件において取りうる含水比の幅に対応する最大密度・最小密度試験の結果を基に、相対密度 $D_r=0, 60, 100\%$ 時に飽和状態となる含水比 w を設定した。また、起泡剤は消泡含水比実験と同一の界面活性剤を使用し、水道水で 20 倍希釈、25 倍発泡の条件で統一した。

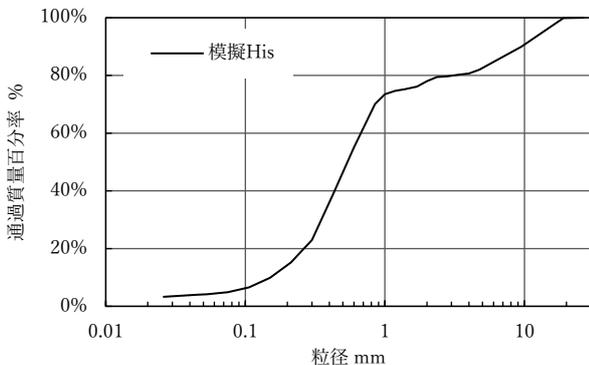


図-9 模擬 His の粒径加積曲線

表-7 実験ケース番号一覧

| $Q_M\%/Q_V\%$ | 0.1/ | 0.2/ | 0.4/ | 0.8/ |
|----------------------|------|------|-------|-------|
| $W\%$ | 3~4 | 6~8 | 12~16 | 24~32 |
| 13.9 ($D_r:100\%$) | ① | ④ | ⑦ | ⑩ |
| 16.7 ($D_r:60\%$) | ② | ⑤ | ⑧ | ⑪ |
| 20.9 ($D_r:0\%$) | ③ | ⑥ | ⑨ | ⑫ |

実験には、図-10 に示すようなプラスチックモールド（内径 90 mm、高さ 100 mm）2 個を上下に組み合わせた容器を使用した。容器に気泡混合土を満たし、1 時間静置する。1 時間経過後に上部モールドと下部モールドを注意深く分割し、それぞれに満たされている気泡混合土の質量計測後、湿潤密度を算出した。気泡混合土の上下モールド湿潤密度比を式(9)のように定義し、分離沈降の進行度合いを示す指標とした。

$$\text{湿潤密度比} = \frac{\text{容器下部の気泡混合土の湿潤密度}}{\text{容器上部の気泡混合土の湿潤密度}} \quad (9)$$

すなわち、湿潤密度比が大きいほど分離が進行していることになる。なお、静置して 1 時間経過以降は密度比がほぼ一定に落ち着くことを事前に確認したので、静置時間を 1 時間とした。

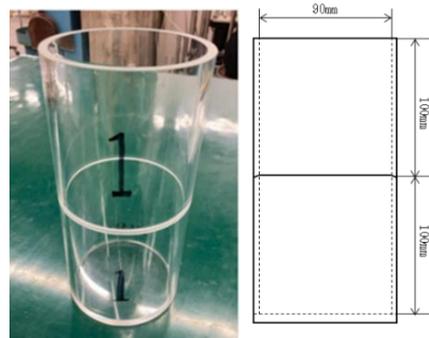


図-10 上下分割モールド(左：容器写真，右：容器断面図)

実験結果を図-11 に示す。含水比 w と湿潤密度比の関係プロットした。全ケースで含水比 w の増加とともに湿潤密度比も増加する。また、同一含水比 w では気泡添加率が大きいほど湿潤密度比も大きい。

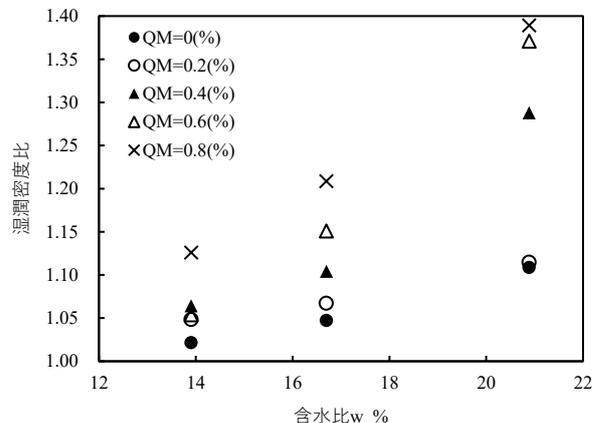


図-11 分離特性確認実験結果（模擬 His）

5.2 気泡混合土の分離の定義について

気泡混合土において、分離特性確認実験を実施した。湿潤密度比から判断して、分離現象が発生していることは分かる。本節では、粗粒分の分離含水比を決定するにあたって、気泡混合土の分離の定義について検討した。

5.1の実験結果より、含水比 w と湿潤密度比には相関関係があることが分かった。そこで、分離と判断する湿潤密度比を決定するために、分離現象が生じた際の試料土の粒度特性の変化に着目した。

前述の実験後の二つ割れモールドの上下それぞれに含まれる試料を用いて粒度試験を行った。手順は以下の通りである。

- 1) 各ケースの試料土を用いて分離特性確認実験 (5.1) を行う。
- 2) 1) の後に上下それぞれのモールドに含まれる試料を用いて、粒度試験 (JISA 1204 及び JGS 0131 に準拠) を行う。

表-8, 9 に全ケースの粒度試験結果を示す。また、代表ケースの粒度試験結果として、気泡添加率 (質量比) $Q_M = 0.1\%$ および 0.8% のケース (表-7 実験ケース①③⑩⑫) を図-12~図-15 に示す。

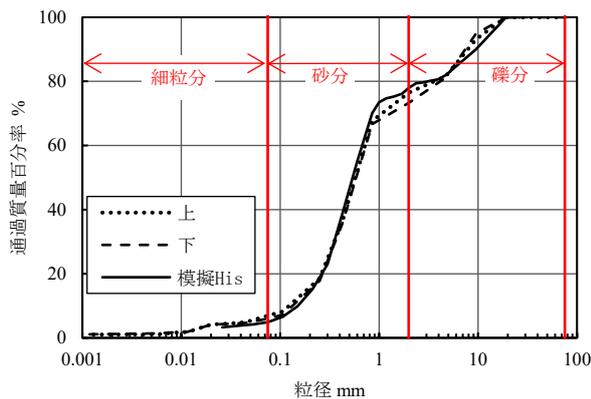


図-12 粒径加積曲線① ($w=13.9\%$, $Q_M=0.1\%$, 湿潤密度比1.032)

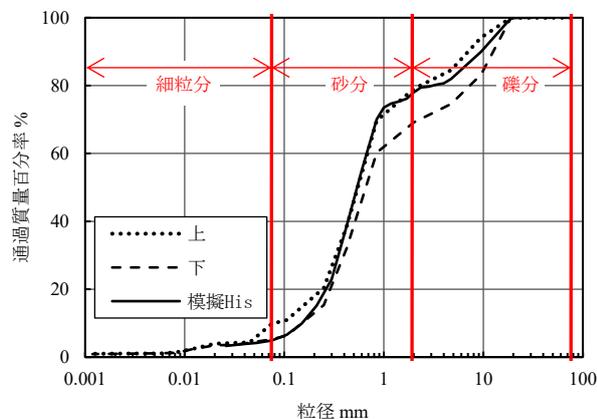


図-13 粒径加積曲線③ ($w=20.9\%$, $Q_M=0.1\%$, 湿潤密度比1.130)

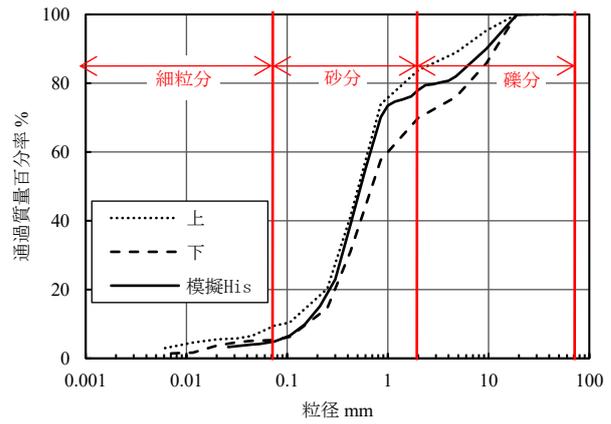


図-14 粒径加積曲線⑩ ($w=13.9\%$, $Q_M=0.8\%$, 湿潤密度比1.136)

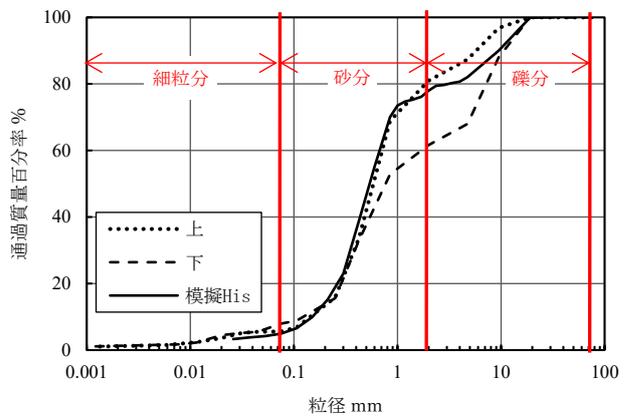


図-15 粒径加積曲線⑫ ($w=20.9\%$, $Q_M=0.8\%$, 湿潤密度比1.239)

粒度試験結果の比較より以下のことがわかる。

- (1) 気泡混合土の含水比 w や気泡添加率が大きいほど、分離が進行しやすく (上下の湿潤密度比が大きい)、上下の試料の粒径加積曲線の差異も大きくなる傾向にある。
- (2) 粒径加積曲線の差異は、細粒分、砂分よりも礫分で顕著である。ただ、湿潤密度比が大きい場合は、砂分の差異も大きい。このことから、分離の進行度合いに因らず、上下モールド内で細粒分はある程度一様に分布しており、礫分(場合によっては砂分も)の沈降と、間隙水及び残存気泡の(相対的な)上昇が、気泡混合土の分離を進行させていると予想できる。
- (3) 上記 (1), (2) と実験時の定性的な観察から、分離現象プロセスの概念図は図-16の状態と推測できる。すなわち、細粒分が水と懸濁状態にあって一様に存在する中で、粗砂分や礫分が沈降し、さらに、細粒分も粗砂分や礫分より遅い速度で沈降するため、間隙水や気泡が相対的に上部に移動する。

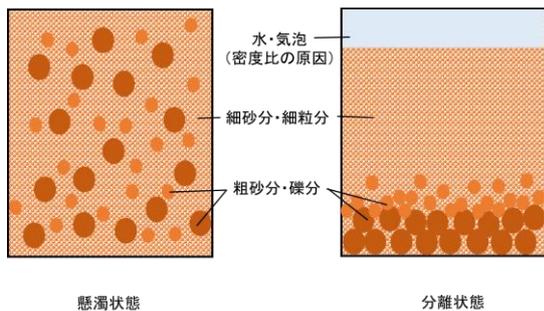


図-16 分離現象プロセスの概念図

粒径加積曲線の形状変化を統計的に取り扱うために、粒度分布を対数正規分布で近似する方法が提案されている。土屋・山元¹⁰⁾は、粒度分布が対数正規分布で表される場合、その確率密度関数 $f(D)$ は式(10)で表現できることを示している。

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0 D} \exp\left\{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ln D - \lambda}{\sigma_0}\right)^2\right\} \quad (10)$$

ここに、 D は土粒子の粒径、 $\ln D$ は D の自然対数、 λ は $\ln D$ の平均値、 σ_0 は $\ln D$ の標準偏差である。なお、 λ 及び σ_0 は、それぞれ以下の式(11)、(12)で定義される。

$$\lambda = \ln D_{50} \quad (11)$$

$$\sigma_0 = \ln \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} \quad (12)$$

D_{50} は中央粒径（幾何平均粒径）、 $\sqrt{D_{84}/D_{16}}$ は対数幾何標準偏差であり、 D_{84} 及び D_{16} はより正確にはそれぞれ84.1%粒径及び15.9%粒径で与えられる。上述の式に基づき、分離実験で得られた粒度試験結果を対数正規分布で近似して表示することを試みた。

分離の進行により粒径の大きな粒子から下方に移動し

ていくと考えれば、下部モールドに含まれる試料の粒径のばらつきが大きくなることが予想される。式(12)で表されるように、標準偏差 σ_0 は試料土粒径のばらつきの指標である。湿潤密度比と下側モールドの標準偏差 σ_0 との関係を図-17に示す。湿潤密度比=1.05付近までは標準偏差 σ_0 は増加傾向にあるが、それ以降は大きく変化しないことがわかる。図-12～図-15からも、湿潤密度比が1.05より小さい場合(図-12)は、上下モールドの粒度分布の差はほとんど見られないが、1.05より大きい場合は(図-13～15)、上部と下部の粒度分布の差が大きくなっている。

近藤らの研究²⁾では、粒度分布が異なる複数の試料を用いて気泡混合土の分離実験を実施した結果、すべての試料において重量比=1.02を境に急激に重量比が大きくなることを確認した。すなわち、粒度分布が異なっても分離が進行し始める重量比は同じ値に帰着することを示している。今回の検討では、模擬Hisにて分離実験を実施し、分離が進行し始める密度比を1.05と設定した。近藤らの研究結果を参考にすると、密度比=1.05を分離の判断とすることは異なる粒度の試料にも適用できると考える。なお、今回は対数正規分布の標準偏差の傾向から分離と判断する密度比を1.05と設定しているので、近藤らの研究で示されている重量比=1.02とは絶対値は異なる。ただ、粒度分布が異なっても分離が進行し始める密度比は同じ値に帰着するという点では共通の見解である(同じ容積の上下モールドで実験を実施しているので、重量比と密度比は同義としている)。

そこで、以降の分離含水比の導出では湿潤密度比=1.05を気泡混合土の分離現象の判断基準として検討を進める。

表-8 各実験ケースの特性値 (1/2)

| 実験 ケース | ① | | ② | | ③ | | ④ | | ⑤ | | ⑥ | | 模擬 His |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 上 | 下 | 上 | 下 | 上 | 下 | 上 | 下 | 上 | 下 | 上 | 下 | |
| D_{84} | 6.05 | 5.76 | 2.13 | 6.66 | 4.52 | 7.90 | 4.20 | 6.08 | 2.13 | 6.60 | 2.81 | 7.84 | 5.94 |
| D_{50} | 0.61 | 0.62 | 0.58 | 0.64 | 0.58 | 0.70 | 0.56 | 0.60 | 0.56 | 0.61 | 0.59 | 0.63 | 0.55 |
| D_{16} | 0.21 | 0.22 | 0.20 | 0.20 | 0.21 | 0.24 | 0.21 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.25 | 0.24 | 0.22 |
| λ | -0.49 | -0.48 | -0.55 | -0.45 | -0.54 | -0.36 | -0.58 | -0.52 | -0.58 | -0.49 | -0.53 | -0.47 | -0.61 |
| σ_0 | 1.67 | 1.62 | 1.17 | 1.75 | 1.54 | 1.75 | 1.50 | 1.70 | 1.17 | 1.74 | 1.21 | 1.74 | 1.65 |
| 湿潤密度比 | 1.032 | | 1.049 | | 1.130 | | 1.041 | | 1.075 | | 1.128 | | - |

表-9 各実験ケースの特性値 (2/2)

| 実験 ケース | ⑦ | | ⑧ | | ⑨ | | ⑩ | | ⑪ | | ⑫ | | 模擬 His |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 上 | 下 | 上 | 下 | 上 | 下 | 上 | 下 | 上 | 下 | 上 | 下 | |
| D_{84} | 3.42 | 7.55 | 4.41 | 8.14 | 3.42 | 7.55 | 3.19 | 8.33 | 3.19 | 7.23 | 3.31 | 9.23 | 5.94 |
| D_{50} | 0.59 | 0.65 | 0.60 | 0.67 | 0.59 | 0.65 | 0.56 | 0.73 | 0.56 | 0.67 | 0.62 | 0.76 | 0.55 |
| D_{16} | 0.21 | 0.24 | 0.23 | 0.25 | 0.10 | 0.24 | 0.21 | 0.27 | 0.21 | 0.24 | 0.25 | 0.28 | 0.22 |
| λ | -0.53 | -0.43 | -0.51 | -0.40 | -0.53 | -0.43 | -0.59 | -0.32 | -0.59 | -0.40 | -0.47 | -0.24 | -0.61 |
| σ_0 | 1.39 | 1.73 | 1.47 | 1.75 | 1.78 | 1.72 | 1.36 | 1.72 | 1.36 | 1.70 | 1.29 | 1.74 | 1.65 |
| 湿潤密度比 | 1.043 | | 1.111 | | 1.204 | | 1.136 | | 1.149 | | 1.239 | | - |

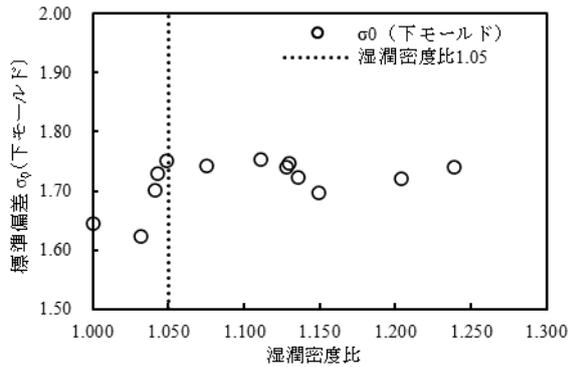


図-17 湿潤密度比と標準偏差 σ_0 との関係

5.3 分離含水比の導出

5.1での検討結果を踏まえ、気泡混合土の分離含水比推定について検討する。気泡混合土の粒度特性が、分離現象に影響を及ぼすと考えられるので、表-10に示す試料を用いて分離特性確認実験を実施した。なお、表中の模擬土質a, bは気泡シールド工法技術資料¹⁾の図-18(p.10)中に示されている土質a, bを模擬したケースである(参照図-18)。その派生ケース模擬土質a', b'は、土質a, bの均等係数 U_c を変化させたケースである。各試料土の粒径加積曲線を図-19に、各ケースの気泡添加率 Q_M (質量比)/ Q_V (体積比)、比表面積 S を表-10に示す。各試料の比表面積 S cm^2/g は、粗粒分の50%粒径 D_{C50} を用いて以下の式(13)で求めた。

$$S = \frac{50\% \text{粒径表面積}}{50\% \text{粒径質量}} = \frac{\pi D_{C50}^2}{\rho_s \frac{\pi}{6} D_{C50}^3} = \frac{6}{\rho_s D_{C50}} \quad (13)$$

5.2で定義した通り、湿潤密度比1.05となる含水比を粗粒分の分離含水比とする。図-20, 21に代表ケースとして、模擬土質a, a', b, b'と珪砂6号の実験結果を示す。各ケースについて、含水比 w ~湿潤密度比関係を二次式で近似曲線した結果も併記する。5.2で検討した通り湿潤密度比=1.05を分離現象の基準とし、湿潤密度比=1.05と上記近似曲線との交点を粗粒分の分離含水比 w_{maxC} と設定した。また、設定した粗粒分の分離含水比 w_{maxC} を目的変数に、気泡添加率(質量比) $Q_M\%$ 、粗粒分の比表面積 S m^2/kg を説明変数として、重回帰分析を実施した。重回帰分析の結果、粗粒分の分離含水比 w_{maxC} を式(14)のように定義する。回帰式の決定係数は、 $R^2=0.709$ である。気泡添加率が大きくなると、分離含水比 w_{maxC} が小さくなる傾向がある点は、図-11の実験結果と整合する。

$$w_{\text{maxC}} = -6.81Q_M + 0.96S + 18.44 \quad (14)$$

表-11に各ケースの分離含水比実験値と回帰式(14)で推定した値を示す。また、図-22に実験値と推定値との比較結果を示す。

表-10 分離特性確認実験ケース

| 実験ケース | 土質試料 | 気泡添加率 (質量比/体積比) Q_M/Q_V % | 比表面積 S m^2/kg |
|-------|---------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 模擬土質 a | 0.23~0.27/10 | 4.818 |
| 2 | 模擬土質 b | 0.21~0.24/10 | 1.798 |
| 3 | 模擬土質 a' | 0.21~0.25/10 | 5.661 |
| 4 | 模擬土質 b' | 0.22~0.24/10 | 2.014 |
| 5 | 豊浦標準砂 | 0.25/8.5~10.8 | 12.144 |
| 6 | 豊浦標準砂 | 0.50/17.7~20.7 | 12.144 |
| 7 | 豊浦標準砂 | 1.00/38.3~47.1 | 12.144 |
| 8 | 珪砂 6号 | 0.25/9.1~11.7 | 6.891 |
| 9 | 珪砂 6号 | 0.50/18.8~21.1 | 6.891 |
| 10 | 珪砂 6号 | 1.00/40.6~51.7 | 6.891 |
| 11 | 珪砂 5号 | 0.25/9.1~11.7 | 4.445 |
| 12 | 珪砂 5号 | 0.50/21.4~24.6 | 4.445 |
| 13 | 珪砂 5号 | 1.00/42.9~49.2 | 4.445 |

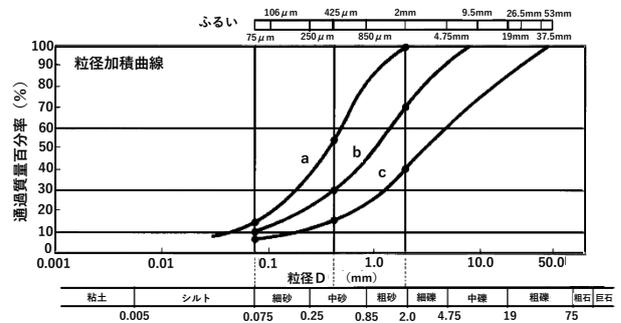


図-18 土質 a, b, c の粒度分布¹⁾

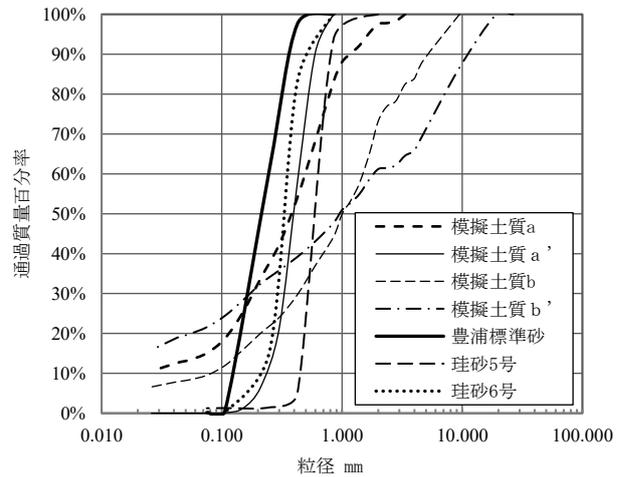


図-19 各試料土の粒度分布

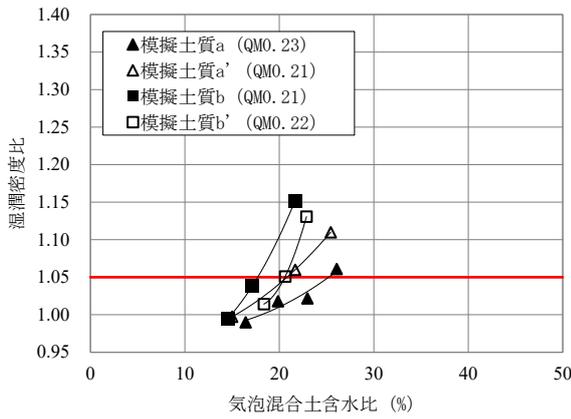


図-20 実験ケース 1~4 結果 (模擬土質 a,a',b,b')

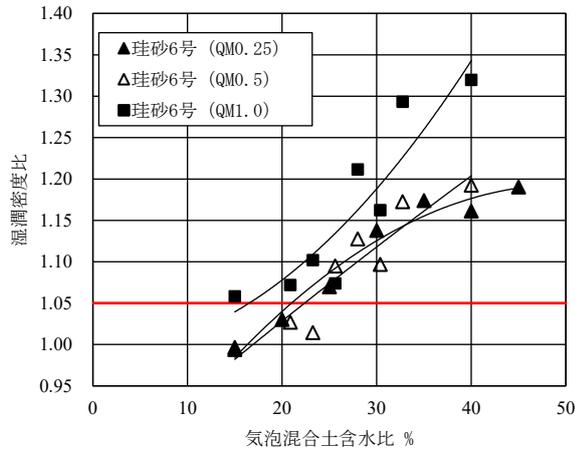


図-21 実験ケース 8~10 結果 (珪砂 6号)

気泡混合土の分離含水比 w_{max} は、文献²⁾を参考に、粗粒分・細粒分の影響を分けて導出を行う。それぞれの分離含水比 w_{maxC} 、 w_{maxF} を細粒分含有率 P で加重平均し、式(15)のように消泡含水比 w_{max} を計算する。

$$w_{max} = w_{maxC} \times \frac{100 - P}{100} + w_{maxF} \times \frac{P}{100} \quad (15)$$

細粒分の分離含水比 w_{maxF} は、近藤らの研究²⁾に準拠し、式(16)で定める。

$$w_{maxF} = w_L \quad (16)$$

一方、粗粒分の分離含水比 w_{maxC} は式(14)に示すように、これまで検討した分離特性確認実験から導出した分離含水比推定式を適用する。

なお、分離実験における湿潤密度比 1.05 を満足する試料の湿潤密度は 1.223~1.779 g/cm³ 程度で、TF 値は 120~200 mm 程度であった。気泡混合土の湿潤密度比が 1.05 を上回って分離現象が発生すると、骨材のブリージングに対応する現象が発生して実験的に流動性を測定するテーブルフロー試験の力学的意味が失われてしまう。この現象がシールド機チャンバー内で発生すると、粗粒の固体土粒子部分はチャンバー下部に沈降堆積する。この場合の粗粒分の沈降堆積速度は、ストークスの法則により粗粒分の粒径と気泡混合土に含まれる細粒分量に主に支配されるチャンバ

一内懸濁液の粘性係数によって決まることになる。

今回の検討に使用した試料土は最大粒径 20mm 以下であったため、最大粒径 20mm 以上の土質については更なる検討が必要である。今回提案しているチャンバー内気泡混合土の品質管理手法の適用限界が最大粒径 20mm となるかは明確に断言できない。しかし、少なくとも最大粒径が大きくなるにつれて土粒子の沈降は助長されるため、細粒分添加によって分離含水比を大きくするアプローチだけでは、気泡混合土の分離抑制に限界がある。例えば、チャンバー内で粗粒材が沈降しても土粒子間の摩擦を軽減し、チャンバー内の塑性流動性を確保することで、切羽土圧を一定に保つことができる方法などが考えられる。

表-11 粗粒分の分離含水比 w_{maxC} 推定結果

| 実験 ケース | 土質試料 | 分離含水比 | |
|-----------|---------|---------------------|---------------------|
| | | w_{maxC} % 実験値 | w_{maxC} % 推定値 |
| 1 | 模擬土質 a | 21.69 | 21.37 |
| 2 | 模擬土質 b | 17.43 | 18.65 |
| 3 | 模擬土質 a' | 19.85 | 22.29 |
| 4 | 模擬土質 b' | 21.00 | 18.78 |
| 5 | 豊浦標準砂 | 27.06 | 28.46 |
| 6 | 豊浦標準砂 | 28.74 | 26.75 |
| 7 | 豊浦標準砂 | 21.64 | 23.35 |
| 8 | 珪砂 6号 | 23.61 | 23.39 |
| 9 | 珪砂 6号 | 24.85 | 21.68 |
| 10 | 珪砂 6号 | 20.45 | 18.28 |
| 11 | 珪砂 5号 | 22.89 | 21.03 |
| 12 | 珪砂 5号 | 14.89 | 19.33 |
| 13 | 珪砂 5号 | 15.16 | 15.92 |

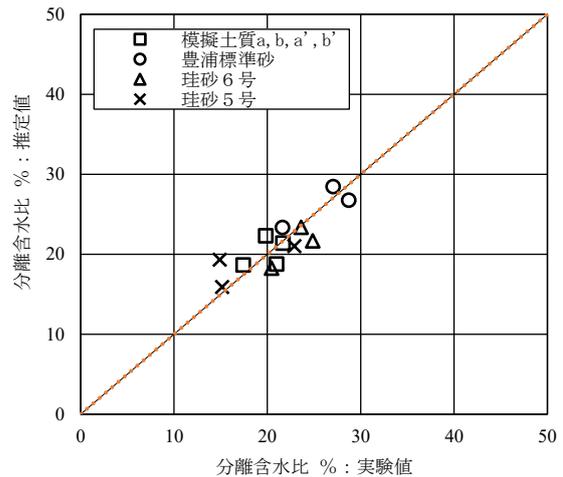


図-22 粗粒分分離含水比 w_{maxC} 実験値と推定値との比較

6. 気泡シールド施工時におけるチャンバー内混合土の品質管理手法について

気泡混合土の塑性流動性を維持するために、含水比 w に着目し、消泡および分離を発生させない含水比の導出を行

った。以上の結果をもとに、気泡シールド施工時のチャンパー内混合土の消泡含水比 w_{min} と分離含水比 w_{max} に関する現場における品質管理手法に関して検討した。

6.1 品質管理手順に関する検討

シールド工事の掘削中に土質条件は変化する。そこで、事前に気泡混合土の配合試験を実施し、その結果を施工管理に活かすことが必要となる。以下にその手順を示す。

- 1) シールド工事の予定路線上の掘削断面図から、消泡や分離が懸念される土質をピックアップする。例えば、消泡は細粒分が多い土質や自然含水比 w_n が低い土質が対象となる。一方、分離は粗粒分が多い土質が対象となる。大断面シールドでは、断面内で土質条件が変化する場合があるが、その場合は断面内での占有比率で土質条件を設定するとともに自然含水比を土質試験結果をもとに推定する。
- 2) 気泡シールド工法技術資料¹⁾より、対象土質の粒度分布から、気泡添加率を決定する。なお、技術資料の気泡添加率は体積比 Q_v であるため、質量比 Q_m に換算する。
- 3) ピックアップした各土質について、式(8)から消泡含水比 w_{min} 、式(15)から分離含水比 w_{max} を算出する。算出した消泡含水比 w_{min} および分離含水比 w_{max} と自然含水比の推定値 w_n を比較する。
- 4) 自然含水比の推定値 w_n が消泡含水比 w_{min} よりも低

い場合、気泡混合土含水比 w_{mix} が消泡含水比 w_{min} よりも高くなるように、切羽への薬剤添加設備等を利用してチャンパー内の掘削土に加水する。

- 5) 地下水位以下で飽和度が高い地盤では、細粒分が少ない粒度であっても自然含水比の推定値 w_n が分離含水比 w_{max} より大きくなる可能性がある。このような場合は、細粒分(例えば、ベントナイトや現場発生土の細粒分)を切羽への薬剤添加設備等を利用してチャンパー内の掘削土に添加する。この際、細粒分添加にともない変化する土質特性(細粒分含有率 P 、細粒土の液性限界 w_L)を踏まえて、式(15)による分離含水比 w_{max} 算出を繰り返し、気泡混合土含水比 w_{mix} が分離含水比 w_{max} よりも低くなるように細粒分添加量を決定する。

上記の1)~3)の対応については、実現場のボーリング試験などからサンプル試料を採取して事前に室内配合試験を実施し、適正な加水量や細粒分添加量を決定する必要がある。図-23に事前配合試験のフロー図を示す。その際、塑性流動性(TF値)も確認する。なお、施工時は切羽土圧やチャンパー内気泡混合土の性状を常に注視し、事前配合試験の妥当性を確認するとともに、塑性流動性の低下が発生した場合は速やかに施策の変更を検討する。

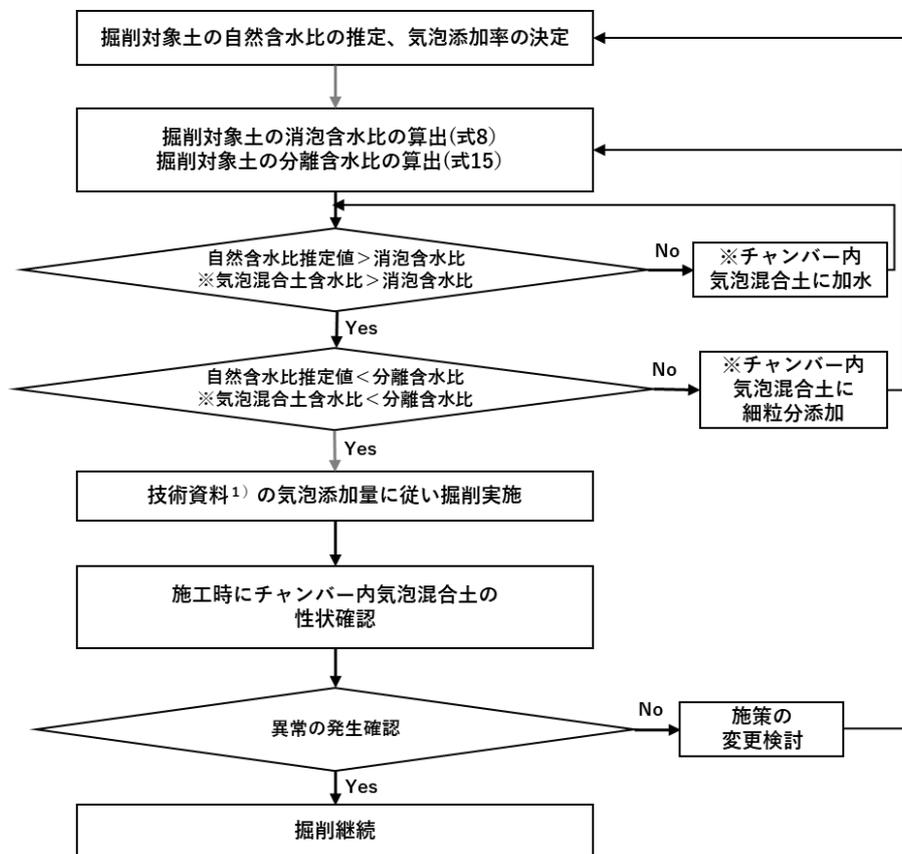


図-23 事前配合試験のフロー図

6.2 モデルケースによる品質管理手法の試行

6.1 で提案した品質管理手法について、モデルケースを設定して試行する。図-24 に示すシールド掘削断面について検討する。

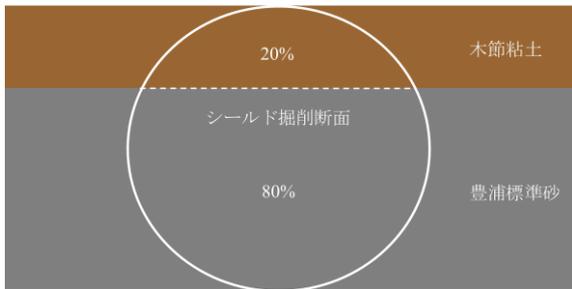


図-24 モデルケースのシールド掘削断面

図-24 に示すシールド掘削断面において、木節粘土が 20.00 %、豊浦標準砂が 80.00 %の土層構成とする。気泡添加率 Q_M (質量比) を 0.5 % と設定し、図-12 の手順に従って検討を進める。最初に掘削対象土の自然含水比 w_n を推定する。土層構成から加重平均し、自然含水比 w_n の推定値は 31.00 % となる。

表-12 推定自然含水比 w_n の算出

| 掘削対象土 | 土層構成 % | 単体での自然含水比 w_n % | 自然含水比 w_n の推定値 % |
|-------|--------|-------------------|--------------------|
| 木節粘土 | 20.00 | 35.00 | 31.00 |
| 豊浦標準砂 | 80.00 | 30.00 | |

次に、式(8)、式(15)を用いて、掘削対象土の消泡含水比 w_{min} 、分離含水比 w_{max} を算出する。細粒分含有率 P は、表-12 より 20.00 % である。式(8)、表-1 および表-3 の物性値から、消泡含水比 w_{min} は 12.98 % となる。一方、式(15)、表-3 および表-10 の物性値より、分離含水比 w_{max} は 29.82 % となる。

表-13 に示すように自然含水比 w_n の推定値は消泡含水比 w_{min} より大きい、分離含水比 w_{max} よりも大きくなり、チャンパー内気泡混合土の分離により、塑性流動性の確保が懸念される。

表-13 自然含水比 w_n の推定値と消泡含水比 w_{min} 、分離含水比 w_{max} との比較

| 項目 | 含水比 % |
|------------------|-------|
| 自然含水比 w_n の推定値 | 31.00 |
| 消泡含水比 w_{min} | 12.98 |
| 分離含水比 w_{max} | 29.82 |

そこで、図-23 のフローに従い気泡混合土に細粒分を添加する。添加する細粒分は表-3 の Ka-Be とし、表-14 に示す土層構成になるように添加した。Ka-Be の含水比は 180.00 % とする。

表-14 Ka-Be 添加後の土層構成

| 対象土 | 土層構成 (%) |
|-------|----------|
| 木節粘土 | 16.66 |
| 豊浦標準砂 | 66.68 |
| Ka-Be | 16.66 |

表-3、表-12 および表-14 から、Ka-Be 添加後における対象土の物性値を加重平均により算出し、表-15 に示す。

表-15 Ka-Be 添加後の対象土物性値

| 自然含水比 w_n の推定値 % | 液性限界 w_L % | 塑性限界 w_P % | 塑性指数 I_P |
|--------------------|--------------|--------------|------------|
| 55.83 | 103.23 | 29.16 | 74.07 |

表-14 より細粒分含有率 P は 33.32 % である。式(8)、表-1 および表-15 の物性値から、消泡含水比 w_{min} は、34.12 % となる。一方、式(15)、表-10 および表-15 の物性値より、分離含水比 w_{max} は 61.10 % となる。表-16 に示すように、自然含水比 w_n の推定値は消泡含水比 w_{min} より大きく、分離含水比 w_{max} より小さくなり、含水比の管理範囲内に収まった。これにより、気泡混合土の消泡、分離が生じることなく塑性流動性を確保できる。

表-16 細粒分添加後の自然含水比 w_n の推定値と消泡含水比 w_{min} 、分離含水比 w_{max} との比較

| 項目 | 含水比 % |
|------------------|-------|
| 自然含水比 w_n の推定値 | 55.83 |
| 消泡含水比 w_{min} | 34.12 |
| 分離含水比 w_{max} | 61.10 |

今回、モデルケースとして、自然含水比 w_n の推定値が分離含水比 w_{max} を上回るケースを試行した。試行では、1 回の調整で自然含水比 w_n の推定値が含水比の管理範囲内に収まったが、実際の現場では細粒分を少しずつ添加しながら図-23 の手順を繰り返し、自然含水比 w_n の推定値が含水比の管理範囲内に収まるように調整する。

7. 結論

気泡シールド工事において、安全に掘削を進めるためには、切羽安定の確保が必須である。そのためには、切羽面の安定した状態を保持し、シールドマシンからの圧力を正常に切羽に伝える必要がある。その際、チャンパー内気泡混合土が適正な品質、具体的には塑性流動性を維持できないと、シールドマシンからの力を切羽に正常に伝えることができず、遮水性を失うとともに切羽安定性が損なわれる。この塑性流動性は、チャンパー内気泡混合土のテーブルフロー試験やスランプ試験などで管理されるが、一定の塑性流動性を満足できない原因として、気泡の消泡と気泡混合土の分離現象が考えられる。

今回、気泡シールド工事における切羽安定と地中連続壁

工法における溝壁安定、気泡混合土の流動性保持の類似性に着目して、消泡と分離について気泡混合土の含水比 w_{mix} が影響することに着目して実験的に検討を行った。得られた成果は以下のように、要約することができる。

(1) 消泡含水比 w_{min}

- ・消泡含水比試験を実施し、TF 値と含水比との間に線形相関関係があることを導いた。
- ・上記の TF 値と含水比の関係から、細粒分の活性度が 0.4～0.5 である場合を除いてチャンパー内気泡混合土が塑性流動性 (TF=105 mm) を満足するコンシステンシー指数 I_c を 0.2 と定義し、細粒分の最小含水比 w_{minF} を導出した。
- ・粗粒分の最小含水比 w_{minC} は、既往の研究を参考に表面乾燥含水比と定義した。

【管理式】

$$w_{min} = w_{minC} \times \frac{100 - P}{100} + w_{minF} \times \frac{P}{100}$$

$$w_{minC} = 6.97$$

$$w_{minF} = w_L - 0.2 \cdot I_p$$

(2) 分離含水比 w_{max}

- ・粗粒分の分離含水比 w_{maxC} は、分離特性確認実験を実施し、上下分割モールド内の気泡混合土の湿潤密度比が 1.05 となる含水比とした。

$$\text{湿潤密度比} = \frac{\text{容器下部の気泡混合土の湿潤密度}}{\text{容器上部の気泡混合土の湿潤密度}}$$

- ・粗粒分の分離含水比 w_{maxC} を気泡添加率 (質量比) $Q_M\%$ と粗粒分の比表面積 $S \text{ m}^2/\text{kg}$ を説明変数として定義した。
- ・気泡添加率 (質量比) $Q_M\%$ が大きくなるほど、また粗粒分の比表面積 $S \text{ m}^2/\text{kg}$ が小さくなるほど粗粒分の分離含水比 w_{maxC} は小さくなり、分離・沈降が進行しやすくなる。
- ・細粒分の分離含水比 w_{maxF} は、既往の研究を参考に液性限界 w_L と定義した。
- ・細粒分の添加により、分離・沈降の進行が抑制される。

【管理式】

$$w_{max} = w_{maxC} \times \frac{100 - P}{100} + w_{maxF} \times \frac{P}{100}$$

$$w_{maxC} = -6.81Q_M + 0.96S + 18.44$$

$$w_{maxF} = w_L$$

(3) 現場での気泡混合土の品質管理

- ・気泡シールド工事における掘削対象地山の自然含水比

w_n に着目し、気泡混合土の塑性流動性を確保するための施工管理手法について提案し、モデルケースの検討例を示した (図-23 参照)。

- ・自然含水比 w_n の推定値が消泡含水比 w_{min} よりも小さい場合は、チャンパー内に加水することにより気泡混合土の含水比 w_{mix} が消泡含水比 w_{min} を超えるように管理して塑性流動性を確保する。
- ・自然含水比 w_n の推定値が、分離含水比 w_{max} よりも大きい場合は、チャンパー内に細粒分を添加することで気泡混合土の含水比 w_{mix} が分離含水比 w_{max} を下回るように管理して、気泡混合土の分離沈降を抑制し、塑性流動性を確保する。

なお、本研究における気泡混合土の分離現象に関する実験では、東京都内の東久留米層などの最大粒径 20 mm 程度の粗粒土を対象としていることに留意する必要がある。最大粒径が 20 mm を上回る粗礫粒子が卓越するような地盤では、粗礫粒子の気泡を含む懸濁液中でのたとえばストークスの法則による沈降現象などを考慮した理論的、実験的な検討が必要である。

謝辞

実験で用いた試料の一部については、東京都内の現場で採取されたサンプルの提供をいただいた。記して、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) シールド工法技術協会：気泡シールド工法 技術資料, 2011.
- 2) 近藤義正, 赤木寛一, 仲山貴司：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, 土木学会論文集 C Vol. 64, No. 3, pp.505-518, 2008.
- 3) 安井利彰, 川島要一, 赤木寛一, 近藤義正, 土屋正雄：気泡掘削工法を適用した柱列式ソイルセメント壁の発生汚泥量低減効果, 第10回地盤改良シンポジウム, 2012.
- 4) 小山内州一：泡の化学, オレオサイエンス 第1巻第8号, pp. 863-870, 2001.
- 5) 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, 1998.
- 6) 徳永光一：PF 土壌水分系による土の物理的・力学的性質に関する二、三の研究, 農業土木研究, Vol. 25, No. 1, pp. 18-24, 1957.
- 7) JIS R 5201：2015 セメントの物理試験方法.
- 8) たとえば, 東京外環トンネル施工等検討委員会：中央 JCT ランプシールド工事の安全・安心確保の取組みについて, 第21回委員会資料, 2020.
- 9) 石原研而：土質力学, 丸善出版.
- 10) 土屋義人, 山元淳史：粒度分布を考慮した砂質土における非定常浸透流の基礎方程式とその抵抗則, 京都大学防災研究所年報, No. 36, B-2, 1993.

(2024.8.26 受付)

Defoaming and separation characteristics of excavated soil with foaming additives for the foam shield driving construction

Toshiaki YASUI¹, Tetsuya OYAMA², Mitsuhiro HIRATA², Souhei TAKANO² and Hirokazu AKAGI³

1 Maeda Corp.

2 Waseda University, Graduate School of Creative Science and Engineering

3 Waseda University, Faculty of Science and Engineering

Abstract

In the foam shield driving method, it is essential to maintain the plastic flow of the foam mixed soil in the chamber during tunnelling to keep the stable excavation, while maintaining the stability of the cutting face. To maintain plastic flow, it is important to prevent the defoaming and separation phenomena of the excavated soil with foaming additives. Factors that affect defoaming and separation include the water content of the foam mixed soil, the construction environment under high ground water pressure, and the influence of microorganisms. It is important to properly investigate the mixing ratio of the excavated soil ground, foam, and water (water contained in the excavated ground and added water) from the soil water content.

The defoaming and separation characteristics of the soil with foaming additives were experimentally investigated and the range of water content to maintain the plastic flow of the soil-foam mixture was indicated. Conclusively the foam shield driving management procedure for the soil-foam mixed in the shield machine chamber was demonstrated.

Key words: foam shield driving method, plastic flow, defoaming, separation, water content