

シールドチャンバー内の気泡混合土における消泡含水比の決定

早稲田大学 学生会員 ○平田 光彦
 早稲田大学 フェロー会員 赤木 寛一
 早稲田大学 非会員 高野 颯平
 早稲田大学 非会員 加藤 麻衣

1. 概要

気泡シールド工法は、土圧式シールド工法の添加剤として気泡を使用したものである。近年では、大深度地下を利用した大規模プロジェクトにも用いられている。気泡を掘削用安定液に適用している場合は、気泡を吐出しながら地山の掘削を行うことで、チャンバー内に気泡混合土を造成する。これにより、環境負荷(廃棄物)が少ない、施工品質が高い、施工および施工管理が容易といった特徴がある。

気泡シールド工法の施工において、注入した気泡が切羽から地盤内に漏れ、地表面に漏気している例がみられる。これは、チャンバー内の気泡混合土に含まれる気泡が破泡し、その空気が地表まで漏出していくためと考えられる。気泡は界面活性剤を水で希釈した溶液を起泡させて作成する。そのため消泡が生じる原因は、気泡中の水分が土粒子に吸水されること等と考えられる。

地盤掘削用安定液として土と気泡を混合、攪拌した際に消泡が生じない最小の含水比は、最小含水比 w_{min} と定義されている¹⁾。粗粒分と細粒分の影響を分けて考慮しそれぞれ最小含水比を求め、細粒分含有率 P で加重平均し安定液の最小含水比 w_{min} としている。

$$w_{min} = w_{minC} \times \frac{100 - P}{100} + w_{minF} \times \frac{P}{100} \quad (1.1)$$

ここで、 w_{minC} :粗粒分の最小含水比[%]、 w_{minF} :細粒分の最小含水比[%]、 P :細粒分含有率[%]。粗粒分の最小含水比 w_{minC} は、骨材の表面乾燥状態に相当する含水比(表面乾燥含水比)とし、5種の珪砂の平均値をとって

$$w_{minC} = 6.97[\%] \quad (1.2)$$

としている。

本研究では、チャンバー内気泡混合土の消泡が生じない含水比を消泡含水比と定義し、以下 w_{min} と表記する。今回新たに消泡含水比試験を実施し、細粒分の消泡含水比 w_{minF} に影響を及ぼすパラメータを調査した。その結果について報告する。

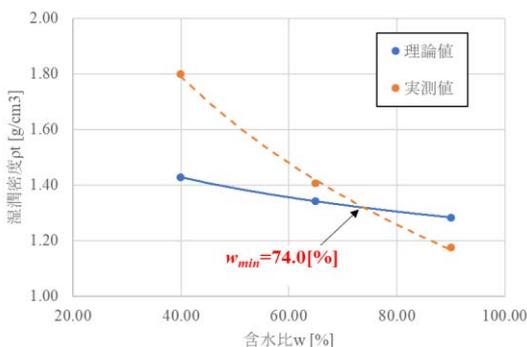


図-2.1 消泡含水比試験結果の一例

2. 実験内容

はじめに試料土を含水比調整し、濃度 5%に希釈した起泡剤を起泡倍率 25 倍で起泡した気泡を添加した。起泡剤には界面活性剤バリック FA-100 を使用した。この際、気泡添加率は試料土に対して体積比 20%とした。これは、気泡添加による流動性向上の効果が気泡添加率 20%で十分発揮されるためである。次に気泡混合土の湿潤密度を測定し、配合から決まる理論湿潤密度と比較し、消泡含水比 w_{minF} の推定を行った。

消泡含水比試験結果の一例を図-2.1 に示す。グラフ上の青色の実線が理論湿潤密度、橙色の破線が実測湿潤密度であるが、この交点の含水比を消泡含水比 w_{minF} とする。この交点より低含水比側では実測値が理論値を上回っている。すなわち消泡により実測湿潤密度が大きくなっている。一方で高含水比側では、気泡の体積が所定より大きくなってしまい再発泡現象が起こっており、実測値が理論値を下回る結果となる²⁾。したがってこの2つのグラフの交点は、消泡が発生しない含水比であり、かつ気泡が規定倍率で混合される含水比となる。

本実験で使用した試料土はカオリン、木節粘土、Na 型ベントナイト、および現場より採取した砂質細粒土、以上 4 種類の粘性土である。試験を実施した試料土の基本物性を表-2.1 に示す。Ka-Be 混合土(D)は、カオリン(Ka)とNa型ベントナイト(Be)を質量比 3:1 で混合したものである。

表-2.1 各試料土の基本物性

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:砂質細粒土	54.27	35.50	18.77
D:Ka-Be 混合土	164.13	42.51	121.62

3. 実験結果と考察

実験結果を図- 3.1～図- 3.4 に、テーブルフロー(以下、TF)試験後の試料土の状況を図- 3.5 に示す。これらの実験結果より、本実験における細粒分の消泡含水比 w_{minF} は以下の表- 3.1 の実験値に示す値となった。なお、この値は、湿潤密度の理論値と実測値の近似曲線(各図中の青色と橙色の点線)の交点として算出した値である。各試料土の消泡含水比は、液性限界よりわずかに大きく、その差は塑性指数に依存している。これは、気泡の持続には土粒子の保水性が重要であり、その保水性は塑性指数により評価できるためと考えられる。

キーワード：気泡混合土 消泡含水比 液性限界 塑性指数

連絡先：〒168-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学赤木研究室 TEL：03-5286-3405

表-3.1 各試料の消泡含水比

試料土	実験値[%]	計算値[%]
A:カオリン	77.05	76.90
B:木節粘土	45.69	45.67
C:砂質細粒土	57.49	57.64
D:Ka-Be 混合土	190.27	190.29

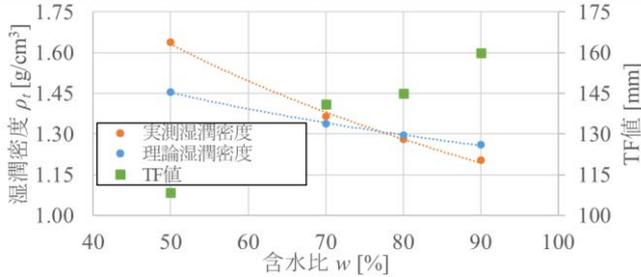


図-3.1 含水比と湿潤密度および TF 値の関係 (A:カオリン)

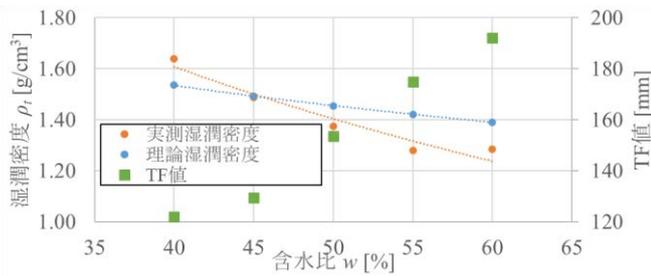


図-3.2 含水比と湿潤密度および TF 値の関係 (B:木節粘土)

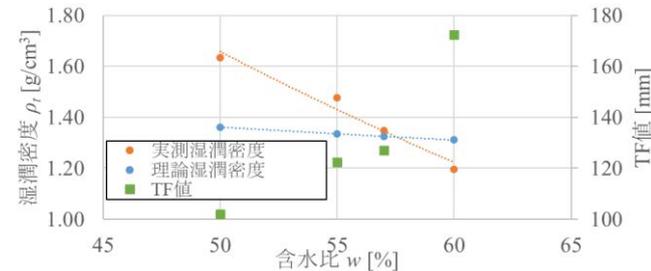


図-3.3 含水比と湿潤密度および TF 値の関係 (C:砂質細粒土)

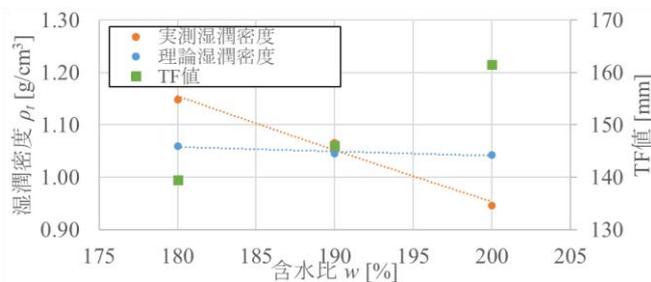


図-3.4 含水比と湿潤密度および TF 値の関係 (D: Ka-Be 混合土)



図-3.5 TF 試験後の試料土【左:カオリン(w=80%), 右:木節粘土(w=50%)】

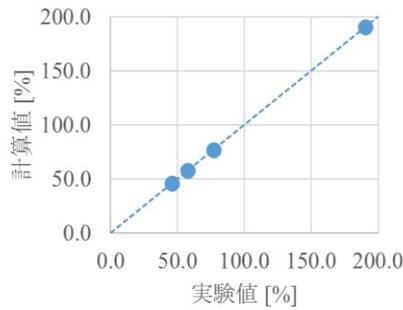


図-3.6 消泡含水比の実験値と計算値の関係

また図-3.5からも確認できるように、消泡含水比付近の含水比の試料土は TF 値 140~150mm 程度という良好な流動性を示している。これは、チャンバー内気泡混合土を消泡含水比に

維持することで、円滑な施工が可能であることを意味する。

それぞれの試料土について、表-3.1 の消泡含水比の実験値を液性限界 w_L 、塑性指数 I_P を説明変数とし重回帰分析を行った。その結果を式(3.1)に示す。

$$w_{minC} = 1.08w_L + 0.136I_P - 3.55 \quad (3.1)$$

この式で得られた計算値を、表- 3.1 の計算値に示す。また実測値と計算値の関係を図- 3.6 に示す。これにより、式(3.1)で細粒分の消泡含水比を推定することは可能と判断できる。

式(1.1)に式(1.2), (3.1)をそれぞれ代入して、気泡混合土の消泡含水比 w_{min} は式(3.2)のように表せる。

$$w_{min} = 6.97 \times \frac{100 - P}{100} + (1.08w_L + 0.136I_P - 3.55) \times \frac{P}{100}$$

$$= (1.08w_L + 0.136 I_P - 10.52) \times \frac{P}{100} + 6.97 \quad (3.2)$$

4. まとめ

本研究では、4種類の細粒土の消泡含水比 w_{minC} を試験により調査し、それを用いて気泡混合土の消泡含水比 w_{min} の算出式(3.2)を導出した。得られた成果を以下に列記する。

- 1) 気泡混合土の消泡含水比 w_{min} は、細粒分含有率 P および細粒分の液性限界 w_L 、塑性指数 I_P を用いた式で求めることが可能である。
- 2) 消泡含水比 w_{min} に含水比調整された試料土は良好な流動性を示し、気泡シールド工法の円滑な施工を可能にすると考えられる。

今後は、今回の一連の結果および、別途検討している気泡混合土の分離特性や流動性について検討を行った結果を利用して、気泡シールド工法による施工時における気泡混合土管理図の作成を目標とする。

5. 参考文献

- 1) 近藤義正, 仲山貴司, 赤木寛一: 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 Vol.64 No.3, pp505-518, 2008, 7
- 2) 平田光彦, 赤木寛一, 大山哲也: 配合試験時の攪拌羽根の形状が気泡混合土の性状に及ぼす影響, 第16回地盤工学会関東支部発表会, 2019, 10