

高圧下での気泡混合土の塑性流動性に気泡の発泡倍率が及ぼす影響

大阪大学
大林組 正会員
大阪大学 正会員

宮澤寛太
木村志照・三浦俊彦・武田厚
○乾 徹・緒方奨

1. はじめに

気泡シールド工法は添加材として気泡を注入しながら掘進する工法で、気泡の消泡後に掘削土の塑性流動性が低下することから、掘削土の再利用が比較的容易となる利点もある¹⁾。しかし、気泡の性状や注入量が気泡混合土の塑性流動性に及ぼす影響については現場経験に依存する点が多く、施工環境に近い高圧下で評価された事例も少ない。本研究では実際の施工条件に近い高圧条件下で、気泡注入からベーンブレードの回転抵抗の計測による塑性流動性の評価を行い、特に気泡の発泡倍率が塑性流動性に及ぼす影響を評価した。

2. 試験方法

砂質地盤中での掘削を想定し、4, 5, 6, 7, 8号硅砂を乾燥質量比 2:1:1:1:2 で混合した試料土を対象に実験を実施した。起泡剤（レオフォーム OL-10[®]）を濃度が 1%となるよう蒸留水を加水して希釈した。初期上載圧 p (kPa) 下で気泡の発泡倍率 FER_p が 16 倍となるように気泡を作製し、先行研究²⁾で発泡倍率を 8 倍とした際の結果と比較を行った。

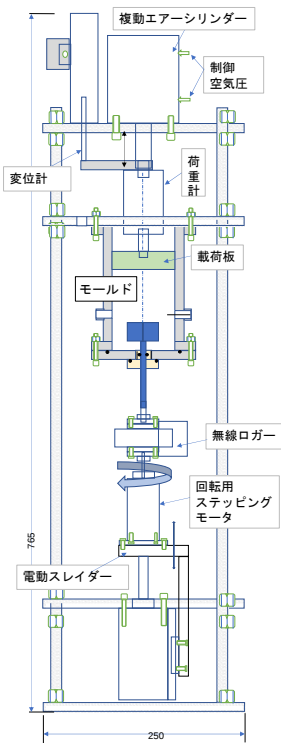


図-1 試験装置²⁾

著者らの先行研究²⁾と同様に図-1 に示す気泡の注入から流動性の計測までを連

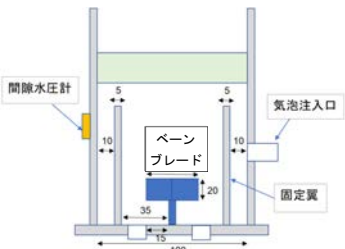


図-2 モールド詳細(単位:mm)²⁾

続的に高圧下で実施できる試験装置を用いて、気泡の注入圧と注入量、上載圧が異なる条件で気泡混合土の流動性（ベーンブレードが一定速度で回転する際の回転抵抗）を評価した。モールド（内径 100 mm, 高さ 127 mm, 図-2）内に湿潤状態の試料土を充填し、載荷板に設置した排水コックを解放して排水条件にし、初期上載圧を作用させ、飽和砂供試体を作製した。その後、排水コックを閉じ、発泡装置にて作成した気泡を試験機側面から所定の注入圧で注入した。注入量が所定の注入率 FIR_p （初期上載圧 p における試料土体積に対する気泡の注入体積の比率, %）に達した時点で、モールド内部のベーンブレード（幅 20 mm, 高さ 20 mm）を回転上下動（回転速度 500 Hz）させて 3～5 分間攪拌を行った。次に、所定の上載圧を作用させ、ベーンブレードを回転（速度 83 Hz）させ、回転抵抗（トルク）を 60 分間計測した。同時に上部載荷板の鉛直変位、間隙水圧の計測も行った。その後、上載圧を再び初期上載圧に戻し、同様に回転抵抗、載荷板変位、間隙水圧を 10 分間計測した。気泡材の注入から試験終了時まですべて非排水条件で実施し、上部載荷板の鉛直方向の変位は所定圧力下で常に許容している。

試験ケースを表-1 に示す。各配合の試料土の大気圧下のテーブルフロー（以下、TF）値も併せて示す。

表-1 試験ケース

初期上載圧 p (kPa)	FIR_p (%)	FER_p (倍)	注入圧 (kPa)	TF 値 (mm)	上載圧 (kPa)
100	10	16	300	161	300, 400, 500
	15		400		400, 500
	20		300	169	500
200	10	8	400	179	500
				168	400, 500

3. 試験結果とその考察

各試験ケースにおける平均有効応力とトルクの計測値の関係を図-3 に示す。なお、図中の凡例は、「発

キーワード 気泡シールド工法 流動性 発泡倍率 高圧下

連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 大阪大学大学院工学研究科 TEL: 06-6879-7623

泡倍率「初期上載圧」を示しており、トルク計測時の上載荷を変化させた場合の平均有効応力とトルクの関係を示している。ここでの平均有効応力は上載圧と間隙水圧の差であり、気泡内の空気圧の影響は考慮できていない。また、「除荷」としているのは、載荷後に初期上載圧に戻した場合の計測結果である。

$FER_p = 8$ 倍の結果²⁾ (プロット■)と比較して、 $FER_p = 16$ 倍の場合は同じ平均有効応力に対するトルクの値が小さくなっている。これより、塑性流動性は発泡倍率の増加によって上昇する傾向が確認された。発泡倍率の増加で相対的に気泡中の気相の占める割合が増加したこと、上載圧より高い注入圧で気泡を注入しているために気泡内圧が高い状態が保たれ、実際に作用する有効応力がより低減されたことが理由として考えられる。一方、初期上載圧の増加は流動性に影響しない傾向が見られるが、2 ケースのみでの結果であることから、さらに検証を行う必要がある。

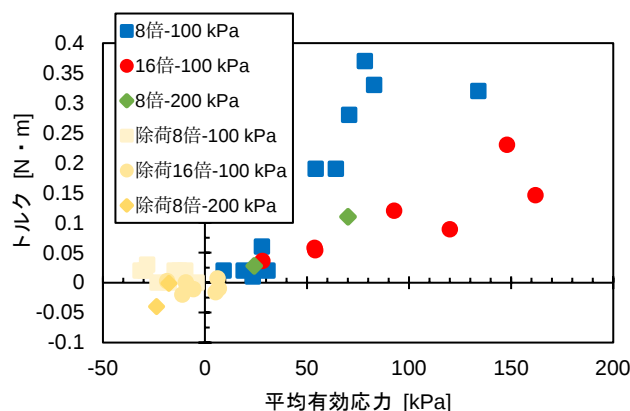


図-3 平均有効応力とトルク

図-4 に、注入率 FIR_p を変化させた場合の平均有効応力とトルクをそれぞれプロットしている。発泡倍率に関わらず注入率の増加が有効応力およびトルクを低下させることが確認された。

図-5 に $FIR_p = 10\%$ の場合の差圧 (= 注入圧 - p) と載荷・除荷時の体積ひずみ (膨張を正) の関係、図-6 に差圧が 200 kPa の場合の FIR_p と体積ひずみの関係をそれぞれ示す。発泡倍率と注入率の増加によって載荷時の圧縮ひずみが増加するだけでなく、除荷後の圧縮ひずみの残留量が増加した。残留圧縮ひずみの発生は気泡の破泡、もしくは気泡の体積収縮によるものと考えられる。しかし、図-3 に示すように除荷時のトルクがおおむね 0 N・m であり、塑性流動性自体は損なわれていないと考えられる。

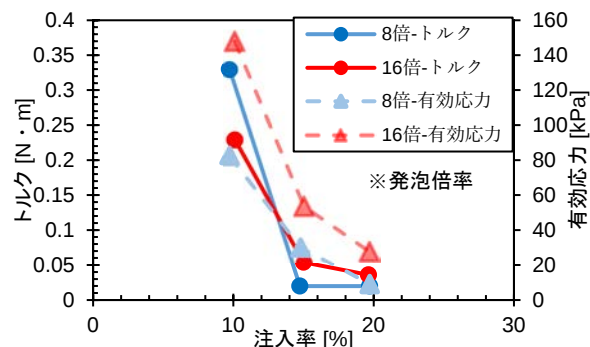


図-4 注入率による有効応力とトルク計測値

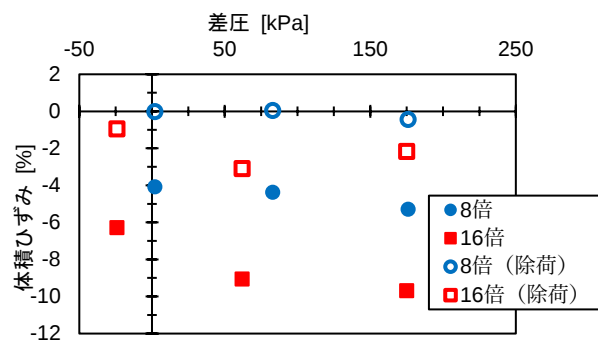


図-5 差圧と体積ひずみの関係 (注入圧 300 kPa, $FIR_p = 10\%$)

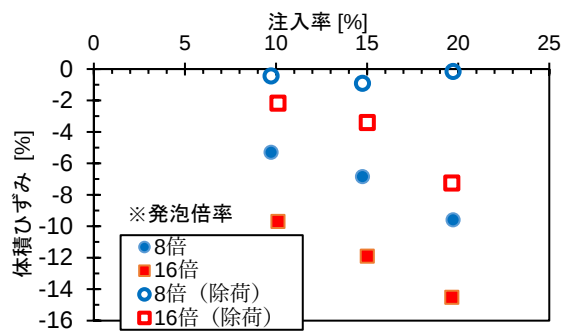


図-6 注入率と体積ひずみの関係 (注入圧 300 kPa, 上載圧 500 kPa)

4. おわりに

気泡の発泡倍率の増加によって気泡混合土の塑性流動性が向上する傾向が確認された。気泡自体の安定性は発泡倍率の増加によって低下すると考えられ、圧力変動に伴う圧縮ひずみやその残留量が大きくなることが確認された。発泡倍率の変化による塑性流動性向上のメカニズムはあくまで推測の域であり、今後も検証を行う必要がある。

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，2020。
- 2) 三池瑠衣ら：シールド工法に適用される気泡混合土の高圧下における流動性とその影響要因，土木学会第 77 回年次学術講演会，VI-99，2022。
- 3) L. Mori et al.: Characterizing the influence of stress on foam conditioned sand for EPB tunneling, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.71, pp.454-465, 2018。