

## 第VI部門

## シールド工法に適用される気泡混合土の流動性とその影響要因

大阪大学 学生員 ○三池 瑠衣

大林組 正会員 木村 志照・三浦 俊彦・武田 厚

大阪大学 正会員 緒方 奨・乾 徹

## 1. はじめに

気泡シールド工法で使用される気泡混合土の塑性流動性や気泡の挙動は、気泡作成・注入時の圧力、チャンバー内の拘束圧等が影響を与えていると考えられる<sup>1)</sup>。しかし、これらの要因がどの程度寄与しているかなど解明されていない点が多い。近年増加している大断面のトンネル施工においては、断面の上端と下端で0.1 MPa程度の圧力差が生じることから、圧力が塑性流動性に及ぼす影響の把握は重要である。さらに、気泡は単体の時の土と混合されている時で挙動が異なる<sup>2)</sup>という報告もされているが、実際の施工を想定した気泡の作成・注入、土との混合攪拌、気泡混合土の流動性の計測を一貫して高圧下で実施した試験はほとんどない。本研究では、新たに高圧条件下で気泡混合土の流動性を評価可能な試験装置を作成し、流動性とそれに寄与する要因を解明することを目的に実験的検討を行った。

## 2. 試験方法

## 2.1 使用材料

砂質地盤中での掘削を想定し、4, 5, 6, 7, 8号珪砂を乾燥質量比2:1:1:1:2で混合した試料土（土粒子密度2.645 g/cm<sup>3</sup>）を対象に実験を実施した。起泡剤（レオフォームOL-10<sup>®</sup>）を希釈濃度が1%となるよう蒸留水を加水して使用した。気泡の発泡倍率が後述する初期上載圧である100 kPa下での値が8倍となるように気泡を作製した。

## 2.2 試験方法

図-1に示す気泡の注入から流動性の計測までを連続的に高圧下で実施できる試験装置を作成し、気泡の作成・注入圧力と注入力、上載圧が気泡混合土の流動性（一定回転速度時のトルク）に及ぼす影響を評価した。試験ケースを表-1に示す。モールド（内径100 mm、高さ127 mm、図-2）内に試料土を乾燥密度1.77 g/cm<sup>3</sup>、飽和度95%以上で充填し供試体を作製した。載荷板上に設置した排水コックを閉じ非排水状態にし、初期上載圧として100 kPaの圧力を作用させた。発泡装置で所定の圧力で作成した気泡を試験機側面から注入し、所定の注入率FIR<sub>100</sub>（100 kPa下における試料土体積に対する注入力体積の比率）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、それぞれの試験ケースにおいて所定の上載圧下でベーンブレードを回転（回転速度83 Hz）させ、回転トルクを60分間計測した。同時に上部載荷板の変位、間隙水圧の計測も行った。その後、上載圧を再び100 kPaに戻し、同様にベーンブレードの回転トルク、載荷板変位、間隙水圧を10分間計測した。一連の試験は供試体の作成後から試験終了時まですべて非排水状態で実施し、上部載荷板の鉛直方向の変位は所定圧力下で常に許容されている状態であった。

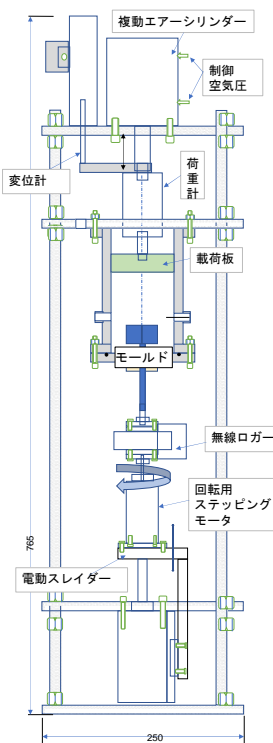


図-1 試験装置

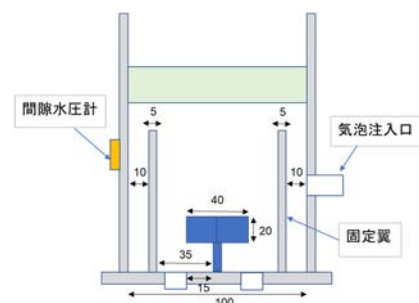


図2 モールド断面図（単位:mm）

表-1 試験ケース

FIR <sub>100</sub>	TF 値* (mm)	注入圧 (kPa)	上載圧 (kPa)
10%	154	300	300, 400, 500
		350	350, 400, 500
		400	400, 500, 550
15%	155	300	500
20%	171	300	500

\*JIS R 5201 によるテーブルフロー値

キーワード 気泡シールド工法 流動性 大深度地下 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

### 3. 試験結果とその考察

図-3 に  $FIR_{100}=10\%$  のケースにおける上載圧と 60 分間の計測トルクの平均値の関係を気泡注入圧毎に示す. 注入圧と上載圧が同じであれば, トルクは  $0.1\text{ N}\cdot\text{m}$  以下の小さい値を示すが, 上載圧が注入圧を上回るとトルクが急激に上昇する結果となった. また, 一定の上載圧 (例えば  $400\text{ kPa}$ ) であれば, 注入圧が低い場合, よりトルクが大きくなった. 各試験ケースの载荷および除荷時のトルク, および上載圧と間隙水圧の差で算出される有効応力の平均値の関係を図-4 に示す. 有効応力は上載圧と気泡の注入圧によって変化するが, トルクと有効応力はほぼ線形に比例する関係にあることがわかった. これは, 間隙圧の上昇に伴い, 土粒子間の摩擦が軽減され, 流動性が向上する挙動を反映しているといえる. また, 除荷時のトルクは载荷履歴によらず低い値であり, 変位も弾性的な挙動を示した. このことから, 加圧に伴う消泡は生じず, 圧力変化に伴う流動性への影響は小さいと判断できる.

上載圧  $500\text{ kPa}$ , 注入圧  $300\text{ kPa}$  の条件下での注入率  $FIR_{100}$  と平均トルク, 有効応力の関係を図-5 示す. いずれのケースにおいても上載圧は注入圧と比較して十分に高いが, 注入率が高くなればトルク, 有効応力ともに増加が小さくなることが確認された.

$FIR_{100}=10\%$  のケースにおける, 吉迫ら<sup>1)</sup>の研究で評価指標として用いられている差圧比 (上載圧と注入圧の差分を上載圧で除した値) と平均トルク, 有効応力の関係を図-6 に示す. 注入圧に依らず, 差圧比とトルクには一意的な関係が確認でき, 差圧比が増加するとトルクも増加した. 各試験ケースにおいて, 上載圧の増加とともに体積減少が確認されたが, 差圧比が大きいケースでは一定の値を超えると体積減少が緩やかになり同時に有効応力が発生し始めることが確認された. Wu ら<sup>2)</sup>の研究でも示されているように, それぞれの気泡には気泡内部から外側に向かってはたらく内部空気圧が存在している. この内部空気圧はヤングラプラス式  $p_A - p_L = 2\gamma/r$  に従う. ここで,  $p_A$ : 気泡の内部空気圧,  $p_L$ : 外部の液圧 (ここでは水圧計で計測された間隙水圧),  $\gamma$ : 界面張力 (通常  $20\sim 25\text{ mN/m}$ ),  $r$ : 気泡径である.  $r$  は通常  $0.01\sim 0.3\text{ mm}$  であるため,  $p_A - p_L$  は数  $\text{kPa}$  程度のオーダーとなり,  $p_L$  に比べて十分に小さいことから  $p_A = p_L$  と近似できる. よって, 上載圧が一定であるとき, 注入圧 (気泡内圧) が小さく, 差圧比が大きい方が有効応力が大きくなり, 流動性が低下したと考えられる.

### 4. おわりに

気泡混合土の加圧下における流動性は注入圧と上載圧から求められる差圧比が大きくなると低下することが示された. 一方で, 注入率が高い場合は差圧比が大きくても流動性は低下しにくい傾向が確認された. 本試験においては圧力変化に伴う顕著な消泡は見られなかったが, 起泡剤の希釈濃度が低く, かつ粘性土を掘削する場合には消泡の可能性が高くなることから, 今後はこれらの点をさらに検討する必要がある.

### 参考文献

- 1) 吉迫和生ら: 気泡シールド工法に用いる気泡の圧力下における性状, 第74回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, No.VI-808, 2019
- 2) Yuanli Wu et al.: Experimental study on the stability of foam-conditioned sand under pressure in the EPBM chamber, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.106, pp.103590, 2020

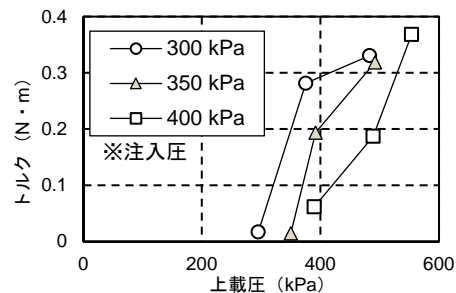


図-3 注入圧毎の上載圧と計測トルクの関係

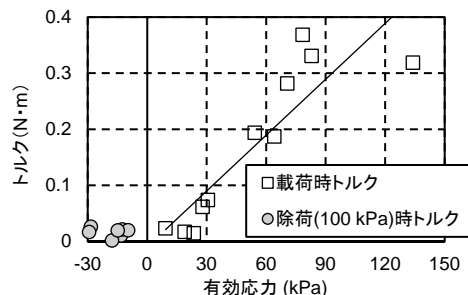


図-4 有効応力と計測トルクの関係

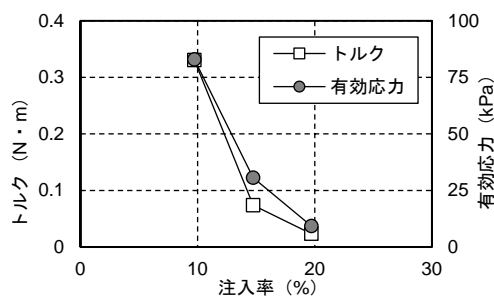


図-5 注入率と計測トルクの関係

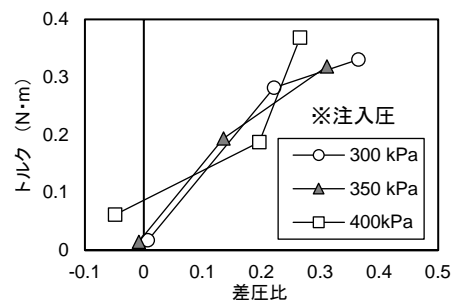


図-6 差圧比と計測トルクの関係