

シールド安定掘進のための気泡技術および可視化技術の開発

Development of Foaming Technology and Visualization Technology for Shield Tunneling in Stable Condition

川野 健一 永谷 英基 佐藤 一成 劉 偉晨

要 約

気泡シールド工事において、トラブルなく安定掘進を行うためには、掘削土の塑性流動性および切羽での止水性を確保することが重要である。塑性流動性および止水性を確保するためには、気泡シールド工事で使用する気泡の高性能化が課題である。塑性流動性の向上のためには気泡が土粒子間に吸着することでベアリング効果を発揮する必要があることから、気泡径をできる限り小さくする必要がある。さらに、気泡は自然消泡するので、気泡膜を強くし、消泡にいたるまでの時間を長くすることが肝要である。また、切羽での止水性を向上させるには地山側に気泡による難透水膜を形成する必要がある。気泡が地山中に目詰まりすることが条件となる。そのためには、高発泡倍率の気泡を使用することが重要であることを見出した。また、気泡技術に加えて、センシング技術の高度化による掘進情報の可視化も並行して進めた。安定掘進を進める上で、切羽前方の土層構成の把握、ならびにチャンバー内掘削土の塑性流動性の把握は必要不可欠であり、新しく開発したセンシング技術によってこれらを把握し、定量評価することに成功した。

目 次

- I. はじめに
- II. 気泡技術
- III. センシング技術
- IV. おわりに

I. はじめに

近年、シールドトンネル工事は大深度化・大断面化の傾向にあり、年々施工条件が厳しくなっている。また、低土被りでの発進、高水圧、軟弱地盤、長距離掘進、近接施工など、施工条件も多様化している。さらに、施工時における地表面変状、振動、騒音、安全管理など、周辺環境や住民、施工従事者への配慮が必要不可欠な状況となっている。

このような状況の中、近年では泥土圧シールド工法の一種である気泡シールド工法¹⁾が採用されることが増加している。気泡シールド工法は、加泥材に気泡を使用する比較的新しい工法であり、シールドマシンのチャンバー内で適切に加圧された気泡混合掘削土を介して切羽からの土水圧に対抗し、切羽の安定化を図る工法である。切羽あるいはチャンバー内に気泡 (Photo 1) を注入しながら掘進し、気泡シールド工法に

おいて最も重要となる掘削土の塑性流動性²⁾と切羽での止水性を確保できることが特長である。また、気泡によってチャンバー内での掘削土の付着を防止でき、切羽安定を保持しながらも円滑な掘進を可能にする。さらに、掘削土に含まれた気泡は、チャンバー内から排土された後、時間経過に伴って自然消泡することから、掘削土が本来の地山に近い性状・強度に復元し、残土としての処分が可能となる。

しかしながら、十分な地盤調査を行っても注意すべき地盤の特性や分布に不確実な点が残ることから、不確実性に起因するリスクを認識することが重要である。例えば、礫地盤のように比較的粒径が大きく、細粒分が少なく間隙が大きい地盤では、気泡の逸失が問題となる。



Photo 1 気泡
(Foaming Agent for EPB TBM)

キーワード: 気泡, プラトー境界, 塑性流動性, 止水性, 発泡倍率, 気泡残存率, 気泡粘度

Keywords: foam, plateau border, plastic flowability, watertightness, foam expansion rate, foam remaining rate, foam viscosity

本報では、当社が新たに開発した新型起泡剤（発泡前の原液）を用いた気泡を対象に、気泡の基本特性および性能評価技術、ならびに安定掘進を実現するための模型実験による気泡性能およびセンシング技術による掘進情報の可視化を検証したので報告する。

II. 気泡技術

気泡シールド工法で使用する気泡は、起泡剤の界面活性作用によって物理的に発泡させる。起泡剤の主成分は、界面活性剤系、タンパク質系、樹脂石けん系に大別される。気泡シールド工法では、容易に発泡して安定化しやすく無臭である界面活性剤系起泡剤が通常使用される。

Fig.1 に示すとおり、気泡シールド工法における気泡は、界面活性剤が溶けた気泡膜が空気を包んでいる状態である。安定した気泡が存在するためには、膜の薄化に抵抗するための膜弾性と排水速度が重要となる³⁾。膜弾性が小さい場合、膜が伸びて薄化することで膜内に存在する界面活性剤同士の距離が長くなり、界面活性剤の表面濃度低下につながって表面張力を下げる力が弱くなる。また、重力によって膜を維持する液体が下方に移動することから、膜を形成する液体が少なくなって薄化が進行する。そのため、起泡剤の濃度や粘度を高くして、膜弾性を大きくして排水速度を低下すれば、気泡を安定させることができる。

また、小さい気泡の内圧は大きい気泡の内圧よりも高く、大きい気泡に吸収されやすい。そのため、気泡を安定させるためには、均一な気泡径を持つきめ細かい気泡に発泡することが重要になる。この時、Fig.2 に示すとおり、気泡膜にはプラトー境界⁴⁾と呼ばれる接合部が生じるが、プラトー境界

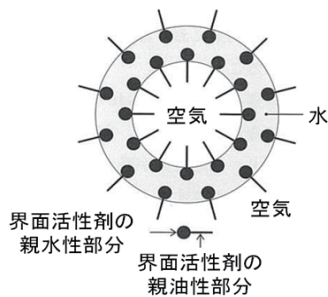


Fig.1 気泡モデル
(The Model of Foam)

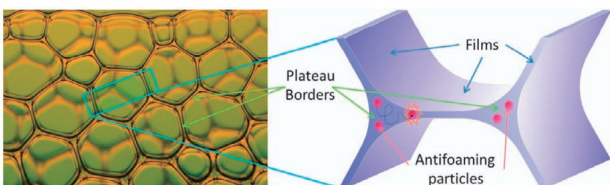


Fig.2 プラトー境界
(Plateau Border)

出典：Yazhgur et al. (2015), Figure 1

液体部の圧力が平面膜部の圧力よりも毛管圧だけ小さくなる。そのため、平面膜部の液体はプラトー境界に向かって排液し、平面部が薄化することに伴って気泡膜が壊れて消失する。

II章では、新たに開発した起泡剤を用いて作った気泡の基本特性、ならびに気泡数・気泡径・気泡品質の定量的評価方法について示す。

1. 起泡剤の基本性質

気泡シールド工事では、気泡の基本特性の評価が施工上のリスク管理に直結する。そこで、下記に示す要素試験を実施した。

(1) 粘性係数

起泡剤の品質が変化していないか確認するために、Brookfield社のB型粘度計 (Photo 2) を用いて起泡剤および高発泡倍率の気泡の粘性係数を計測した。粘度は溶液温度の影響が大きいことから、室温 20℃の実験室において温度を20℃に管理した溶液を使用して計測を行った。

(2) 計測結果

Fig.3 に気泡の粘性係数を計測した結果を示す。起泡剤はニュートン流体に近く、溶液状態であればB型粘度計 (回転速度 50 rpm) での計測結果も 23 mPa・s と一定であり、ほとんど粘度がない。一方で、気泡を対象にした場合は粘度が高くなり、非ニュートン流体に近い性状を示す。そこで、回転速度 5 rpm と 50 rpm における TI (Thixotropic Index) 値を求めると 1 以上であり、高せん断条件下において粘度が減少する特性が明らかとなった。



Photo 2 B型粘度計
(Viscometer)

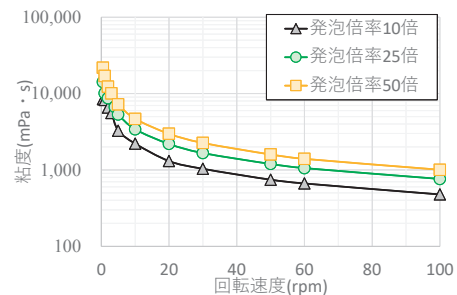


Fig.3 回転速度別の気泡粘度
(Foam Viscosity by Rotational Speed)

2. 気泡径観察試験

(1) 計測システム

実施工における気泡は、乱流が生じる発泡筒の中に起泡剤を通すことで発泡させる。この時、できる限り気泡径を小さくすることが塑性流動性および切羽での止水性の確保のためには重要であるが、気泡数や気泡径は目視で確認できないことが問題である。そこで、気泡数や気泡径を評価できるシステムを構築した。Photo 3 に示すとおり、圧力チャンバー内に気泡を注入した後、デジタルカメラのマクロ撮影で撮影した写真をノートPCで画像解析し、気泡数および気泡径を計測した。

(2) 気泡径観察結果

気泡観察システムで確認した気泡を Photo 4 に、気泡径の観察結果を Fig.4 に示す。Photo 4 に示すとおり、発泡倍率が大きくなればなるほど、気泡径が小さくなっていることが明

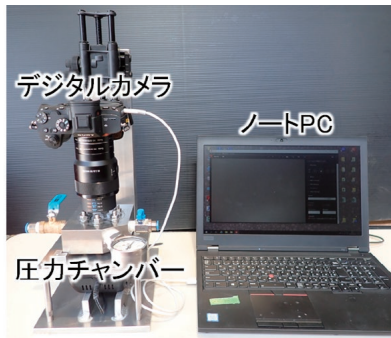
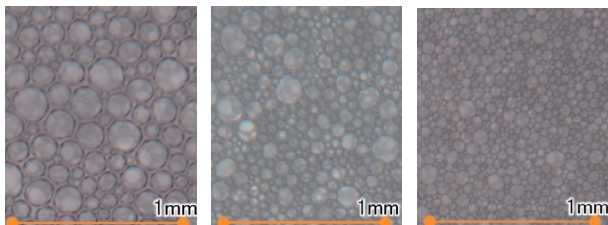


Photo 3 デジタルカメラを用いた気泡観察システム



(a)10倍発泡 (b)25倍発泡 (c)50倍発泡

Photo 4 発泡倍率別の気泡径の違い

(Difference in Foam Diameter by Foam Expansion Ratio)

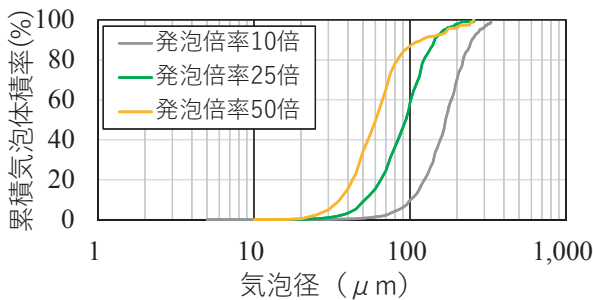


Fig.4 気泡観察結果
(Foam Observation Results)

確である。また、Fig.4 の結果からも、発泡倍率が大きくなればなるほど気泡径が小さな気泡が多くなっていることが明確である。以上のように、高発泡倍率の気泡であれば、気泡径が 100 μm 未満のファインバブルが大部分を占めることを定量的に評価することができた。

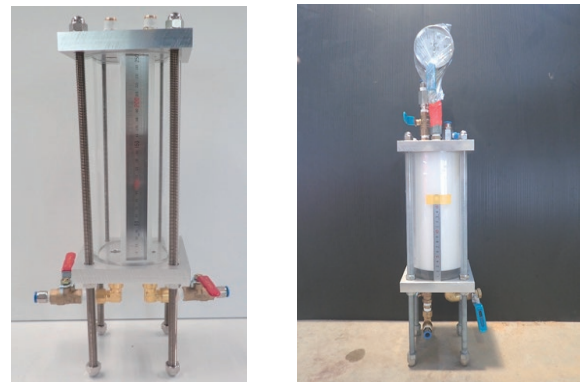
3. 気泡残存率試験

(1) 計測システム

気泡の経時的な残存率を定量的に評価するために、Photo 5 に示す耐圧アクリル容器を使った気泡残存率試験装置を考案した。気泡残存率試験は、Photo 5 (a)に示す耐圧アクリル容器に所定の発泡倍率で発泡した気泡を注入し、経時的な消泡の状況を計測する試験であり、この経時的な気泡の残存割合を気泡残存率としている。

(2) 気泡残存率試験結果

発泡から 24 時間後の気泡残存率試験の結果を Fig.5 に示す。試験結果から、起泡剤の濃度が濃くなるほど、気泡残存率が大きくなっている。また、濃度が 5% で気泡残存率が最大値を示す傾向も明らかである。さらに、発泡倍率が高くなるほど気泡残存率も大きくなっていることが分かる。一方で、発



(a) 気泡注入前 (b) 気泡注入後

Photo 5 気泡残存率試験

(Foam Remaining Rate Test)

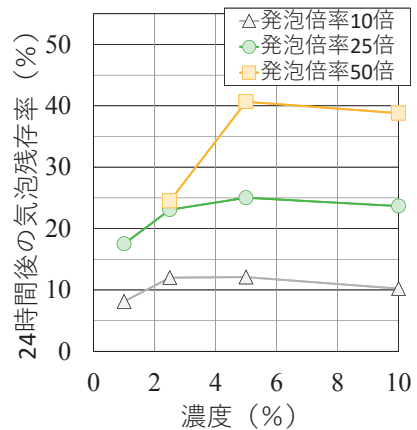


Fig.5 気泡残存率試験結果
(Results of Foam Remaining Rate Tests)

泡倍率が高くなれば気泡膜が薄くなり、土と混ざった時に破泡が進行しやすいことが予想されることから、地山条件、コスト、施工性を考慮して濃度や発泡倍率を決定することが重要である。

Ⅲ. センシング技術

気泡シールド工事における施工条件は複雑化しており、施工中に切羽前方やシールドチャンバー内の土砂性状をセンシング技術によって可視化することができれば、地盤条件に起因する施工リスクの低減に直結し、切羽の不安定化^{5),6)}といった施工トラブルを事前に回避しながら安定的にシールド掘進を進められる。そこで、センシング技術による切羽前方およびチャンパー内の可視化を確立するために、切羽前方地山やチャンパー内掘削土砂のシールド掘進時における地

盤挙動を模擬できる切羽可視化実験装置 (Fig.6, Photo 6) を製作した。

切羽可視化実験装置の仕様を Table 1 に示すが、切羽可視化実験装置の先端には土槽 (500×500×500 mm) を取り付けられ (Fig.6(a)), 様々な計測装置を取り付けられる面板を備えている (Fig.6(b))。面板回転数は直近 20 年の泥土圧シールド工事における回転数 (Fig.7) を再現可能である。土槽前面はアクリル板としており、実験状況を確認できる構造とした。また、近年のシールド工事の大口径・大深度化に対応した実験を実施できるように、実験装置の土槽内は最大で 500 kPa (深度 50 m 相当) 程度の土水圧を付与できる仕様⁷⁾としている。なお、Photo 6(a)に切羽可視化実験装置の外観を

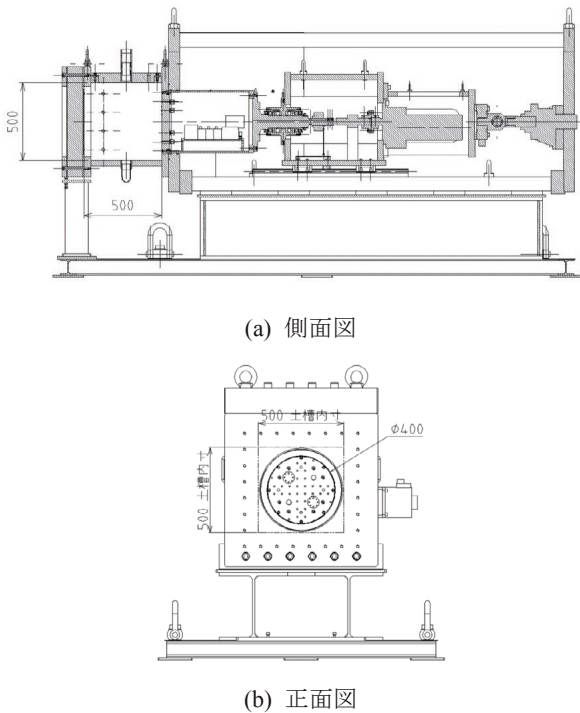
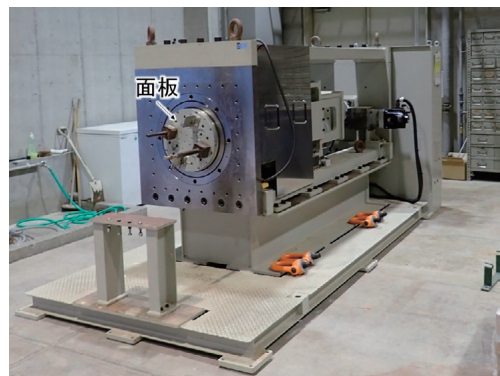


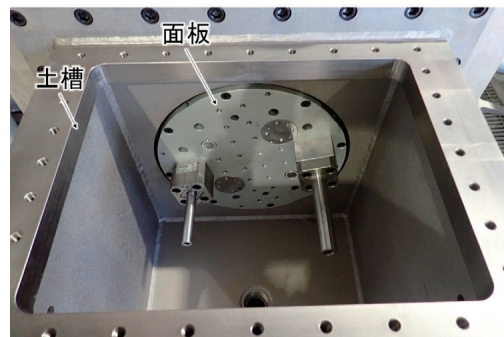
Fig.6 切羽可視化実験装置 (Shield Face Visualization Apparatus)

Table 1 切羽可視化実験装置の仕様 (Specification of Shield Face Visualization Apparatus)

主要諸元	
土槽寸法	500×500×500 mm
面板直径	φ 395 mm
最大トルク	530 N・m
最大回転数	12.5 rpm
最大ストローク	100 mm
最大押込速度	60 mm/分
土槽内最大載荷圧力	500 kPa



(a) 正面から



(b)土槽上部から

Photo 6 切羽可視化実験装置の外観 (Appearance of Shield Face Visualization Apparatus)

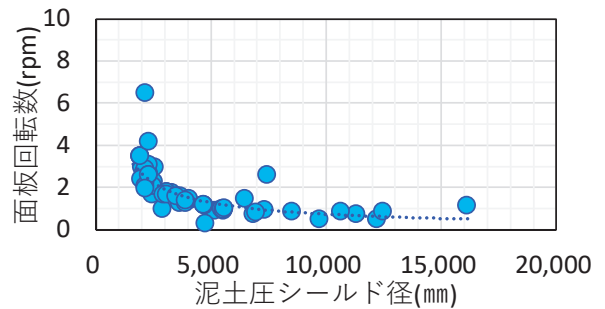


Fig.7 面板回転数と泥土圧シールド径 (Correlation between Face Plate Revolution Speed and Diameter)

示す。Photo 6(b)に示すとおり、実験時は面板の前に土槽を取り付け、土水圧を作用させる場合は土槽に蓋をしてから使用する。

1. 切羽前方可視化

シールド工事では切羽前方の土層構成を掘進中に把握できれば、掘進速度の変更や加泥材の配合を微調整できることから、リアルタイムに土層構成を把握し可視化できれば施工管理に活用できる。切羽前方を可視化するためには、センシング技術⁸⁾によって切羽前方地山の強度を定量的に評価する必要がある。そこで、Photo 7(a)に示すビットひずみセンサを製作した。ビットひずみセンサはシールドマシンに実装されているビットを模擬したセンサである。センサ内部の根本にひずみゲージを貼り付けており、面板に取り付けたビットひずみセンサが土砂の中を回転する際の作用力を計測できる構造にしている。作用力を増幅するためにはセンサ根元に作用する曲げモーメントを大きくする必要があることから、ビットひずみセンサを長くした。さらに、曲げモーメントの増減を精度良く感知するために、センサ根元の径を小さくした。

実験時は Photo 7(b)に示すように、実験装置の面板にビットひずみセンサを取り付け、所定の回転速度で面板を回転させる。その際、ビットひずみセンサ内に貼り付けたひずみゲージの計測値をビットひずみセンサに作用する抵抗力に換算することで、掘削している地山強度の定量的な評価を試みた。



(a) センサの外観



(b) 実験状況

Photo 7 ビットひずみセンサ
(Cutter Bit Strain Sensor)

(1) 実験条件

Photo 7(b)に示すように、一軸圧縮強さが異なる模擬地山を切羽可視化実験装置の土槽内に設置した。ビットひずみセンサを取り付けた面板を回転させることで、模擬地山をひずみゲージを内蔵したビットで模擬地山を掘削した。実際の現場条件を参考に、一軸圧縮強さが 4 水準 (1.2, 1.6, 3.6, 5.8 MPa) の強度を持つ流動化処理土を製作し、地山を模擬した。また、設定した 4 水準の強度において、模擬地山への切込深さ (掘進速度 (mm/min) ÷ 回転速度 (1/min)) をそれぞれ設定した。強度が 1.2, 1.6 MPa の場合、切込深さは 4 水準 (0.4, 0.9, 1.8, 3.6 mm) に設定した。強度が 3.6, 5.8 MPa の場合、切羽可視化実験装置に作用する負荷が増大することから、切込深さを少し変更し、0.36, 0.45, 0.55, 0.64 mm の 4 水準に設定した。この実験条件において、面板を 2 回転させた時のひずみ値を計測した。実験ケースを Table 2 に示す。

(2) 実験結果

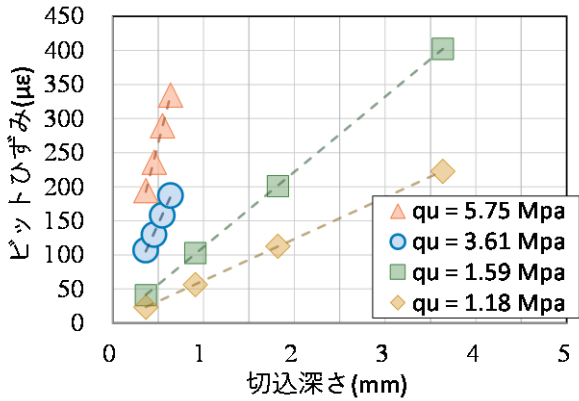
Table 2 の No.1~4 における掘削時のビットひずみの平均値と切込深さの関係を Fig.8 に示す。ビットひずみはビットひずみセンサ内のひずみゲージによる計測値である。実験結果 (Fig.8(a)) から、掘削時のビットひずみの平均値と切込深さの関係は、どの実験ケースにおいても線形関係にあることが分かった。すなわち、切込深さが深くなれば曲げモーメントが線形的に増大する。

また、Fig.8(b)に示すとおり、模擬地山の一軸圧縮強さが大きくなるに伴って、ビットひずみの計測ひずみ値を切込深さで正規化した値も線形的に大きくなることが分かった。通常、掘進速度が速くなれば切込深さが深くなってビットひずみに作用する曲げモーメントは増大する。今回の実験において、掘進速度で計測ひずみを正規化しても線形関係を確認できたことから、掘進速度に対しても線形関係があり、正規化ビットひずみ値で施工管理が可能であることが分かった。

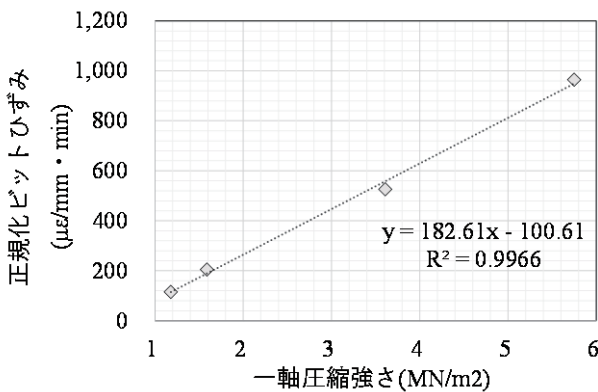
以上のことから、切込深さが明確であれば、ビットひずみによる計測値を監視することで、掘削地山の一軸圧縮強さを推定できる。また、掘進速度も明確であることから、ビットひずみ値を掘進速度と切込深さで正規化することで、掘進速度の影響を考慮した施工管理が可能となり、正規化ビットひずみ値から切羽前方地山の土層区分を判定することが可能であると考えられる。

Table 2 実験ケース
(Experimental Case)

No.	一軸圧縮強さ (MPa)	切込深さ (mm)
1	1.2	0.4, 0.9, 1.8, 3.6
2	1.6	0.4, 0.9, 1.8, 3.6
3	3.6	0.36, 0.45, 0.55, 0.64
4	5.8	0.36, 0.45, 0.55, 0.64



(a) 切込深さ



(b) 模擬地山強度（一軸圧縮強さ）

Fig.8 ビットひずみ値との相関関係

(Correlation with Strain from Cutter Bit Strain Sensor)

2. チャンバー内可視化

シールド工事では、シールドマシンチャンバー内の掘削土の塑性流動性を把握し、切羽圧の適切な管理、切羽での止水性の確保、スクリーコンベアでの噴発や閉塞を防止し、安定掘進のための施工管理に寄与することが大切である。チャンバー内を可視化するためには、センシング技術⁸⁾によってチャンバー内掘削土の塑性流動性を定量的に評価することが重要である。そこで、今までのシールド工事現場での使用実績を基に、Photo 8(a)に示す攪拌翼センサを製作した。攪拌翼センサは面板に取り付けており、所定の回転速度で面板を回転させた際の攪拌翼センサで計測した計測値から、チャンバー内掘削土の塑性流動性の定量的な評価を試みた。

(1) 実験条件

Photo 8(b)に示すように、今回の実験では実際の現場から採取した泥岩掘削土を使用した。実際の掘削条件に合わせるために、含水比が 43~48 %になるように加水調整し、含水比の違いによる塑性流動性の違いを攪拌翼センサの計測ひずみ値から評価した。実験時は掘削土を土槽内に充填し、面板に取り付けた攪拌翼センサを 0.55 rpm で回転させることで、泥岩掘削土を攪拌した。その後、実際の気泡シールド工

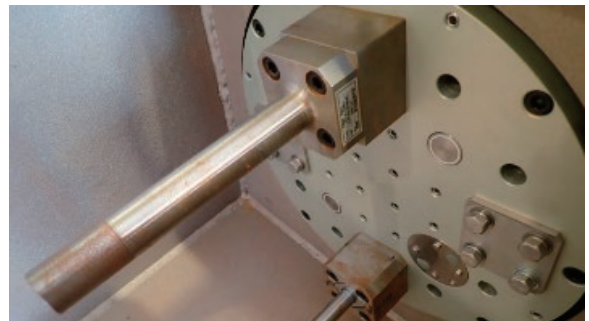
事と同様に、濃度を 0.5 %に調整した起泡剤の希釈溶液を発泡装置で 10 倍に発泡させて、5 L/min の混合速度で混合率 30 % (掘削土に対する外割り体積) となるまで気泡を土槽内に注入し、混合した。

実験中は面板に取り付けた土圧計および水圧計の計測値を監視することで、土槽内の土水圧が 500 kPa になるように操作した。さらに、攪拌翼センサと掘削土の塑性流動性の相関関係を評価する必要があるため、モルタルフロー試験 (JIS R 5201)、スランプ試験 (JIS A 1101)、ベーンせん断試験 (JGS1411 を準用) も併せて実施した。

(2) 実験結果

気泡の混合前後において、攪拌翼センサで計測したひずみ値の例を Fig.9 に示す。気泡を混合する前は攪拌翼センサのひずみ値は約 100 μεであったが、気泡の混合によって約 40 μεまで減少した。すなわち、気泡の混合によって掘削土粒子間に気泡が吸着し、ベアリング効果を発揮することで塑性流動性の改善につながったと推察できる。

また、実験前後に掘削土砂に対して実施した室内試験の結果と攪拌翼センサで計測したひずみ値の関係を Fig.10 に示す。実施した室内試験の内、モルタルフロー試験およびスランプ試験による試験結果を使って比較した。実験結果から、攪拌翼センサで計測したひずみ値と室内試験結果の間には、



(a) センサ外観



(b) 実験状況

Photo 8 攪拌翼センサ
(Stirring Blade Sensor)

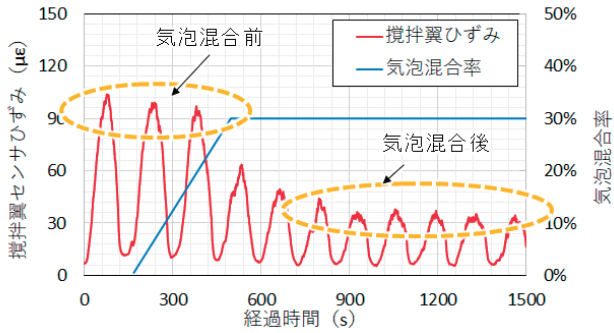
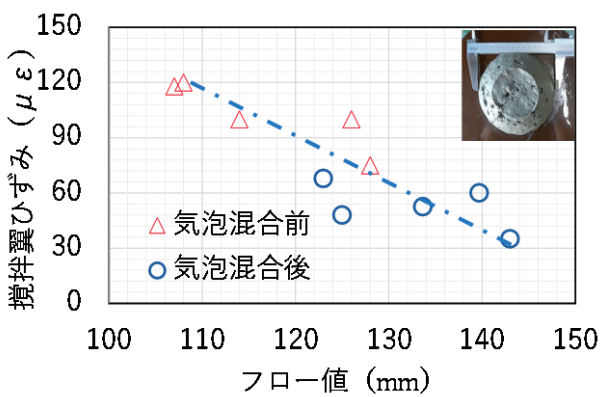
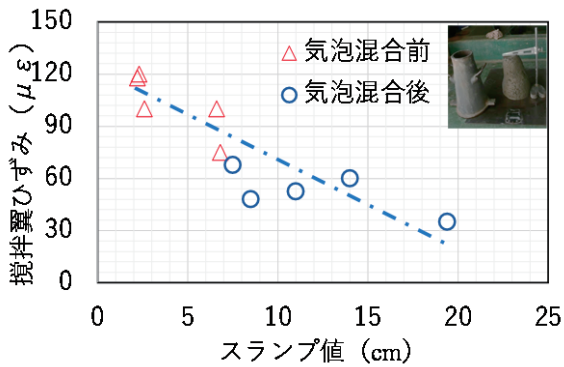


Fig.9 攪拌翼センサによる時系列での計測結果
(Time-series Data from Stirring Blade Sensor)



(a)フロー値



(b)スランプ値

Fig.10 攪拌翼センサと室内試験結果の相関関係
(Correlation between Stirring Blade Sensor and Laboratory Tests)

気泡混合前後のそれぞれの条件において概ね線形関係があることが分かった。気泡のベアリング効果による塑性流動性の向上は明らかであり、攪拌翼ひずみ値から室内試験で評価した塑性流動性を評価できることが分かった。

以上のことから、室内試験結果に基づいて、攪拌翼センサで計測したひずみ値でチャンパー内掘削土の塑性流動性の定量的な評価が可能である。すなわち、チャンパー内の可視化をつうじて、現場で掘削土の塑性流動性の管理が可能であると考えられる。

IV. おわりに

気泡シールド工法における安定掘進を実現するためには気泡の基本特性を把握し、掘削土の塑性流動性および切羽での止水性を確保することが重要である。新しい起泡剤は高発泡状態を可能とし、長時間において気泡を安定的に保持できる。

また、施工中において切羽前方の可視化およびチャンパー内掘削土の塑性流動性の可視化が非常に重要であるが、ビットひずみセンサおよび攪拌翼センサを用いることで、可視化の実現に目途が立った。すなわち、切羽前方地山の土層構成評価や、チャンパー内での掘削土の付着、奮発・閉塞傾向の事前予測、気泡分離・逸失の早期検知が可能となり、気泡の配合修正を早期に実施できることから、安定掘進に貢献できる。

今後も大断面における気泡シールド工事が続くことから、安定掘進の実現による生産性向上、ならびに安全・安心なシールド工法を実現するためには、気泡技術およびセンシング技術による可視化を施工管理に活用する方法が喫緊の課題である。

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) 足立紀尚, 小山幸則, 加島豊, 須賀武, 高田正治, 木村宏; 土圧式シールド工法 その理論と応用, 2010.
- 3) 箕哲男; パフォーマンス・ケミカルの機能シリーズ, 三洋化成工業株式会社研究本部編, 2009.
- 4) Yazhgur, P., Langevin, D., Caps, H., Klein, V., Rio, E. and Salonen, A.; How antifoams act: a microgravity study, npj Microgravity, 2015.
- 5) 久保田光太郎, 川野健一, 永谷英基, 中島悠介; シールド掘進におけるジャーミング発生メカニズムの解明と検知・対策技術の開発, 鹿島技術研究所年報, 2020, pp.29-36.
- 6) Kawano, K., Nagatani, H. and Kubota, K.; Jamming Mechanism on Shield Tunnel Boring Machine, Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds 4th International Conference, 2019.11, pp.64-72.
- 7) 川野健一, 永谷英基; シールド切羽における塑性流動センシング技術の開発, 土木学会第 76 回年次学術講演会概要集, 2021, VI-394.
- 8) Kawano, K., Weichen, L. and Nagatani, H.; Experimental Research on Visualisation Technology ahead Cutter Head and inside Chamber of EPB TBM Shield Tunnelling using New Sensing Technology, Asian Conference on Physical Modelling in Geotechnics (Asiafuge-2021), 2021.11, pp.56-62.

Development of Foaming Technology and Visualization Technology for Shield Tunneling in Stable Condition

Kenichi Kawano, Hideki Nagatani, Issei Sato and Liu Weichen

To achieve stable tunnel boring machine (TBM) excavation without trouble, it is important to ensure the plastic flowability and water sealing properties of excavated soil. To ensure these properties, the performance of foam used in shield construction must be improved. To improve the plastic flowability, the diameter of the foam must be made as small as possible because the foam needs to be adsorbed between soil particles to exert a bearing effect. In addition, since the foam disappears naturally, it is essential to strengthen the foam film and lengthen the time until the disappearance process is completed. Moreover, to improve the water sealing performance, it is necessary to form an impermeable layer with the foam on the ground side, and the foam must bind with soil particles to create a water-proof seal in the ground. For this purpose, we found that it is crucial to use foam with a high foaming ratio. Adding to the foaming technology, we also advanced the visualization technology based on sensing technology used for shield tunneling. For promoting stable TBM excavation, it is essential to understand the composition of the soil layer expanding in front of the cutter face of a TBM and the plastic flowability of the excavated soil in the chamber of the TBM, and we succeeded in understanding and quantitatively evaluating them using newly developed sensing technology.