

# シールド工事に用いた高発泡性起泡剤の開発

木村 志 照      三浦 俊 彦  
武田 厚      千野 裕 之  
(本社土木本部)

## Development of High Performance Foam Agent for Shield Tunnel

Yukinobu Kimura      Toshihiko Miura  
Atsushi Takeda      Hiroyuki Chino

### Abstract

It is a recent trend in Japan that more shield excavations in long distances and/or with large cross sections adopts foam injections due to complexities in their geologies. Therefore, there is the need for higher performance foam agents. “Leo-foam OL-10<sup>®</sup>” can generate dense foams with a low concentration. Foam generated has high viscosity and high resilience against dissipation. The fluidity of excavated materials is improved and lasts three times as long as a regular foam agent dose. Application of “Leo-foam OL-10” to real tunnel projects has proved that it can be successfully used for a shield excavation with less foam injection. From the result, it can be concluded that “Leo-foam OL-10” can reduce usage, and it can be used for a wide range of geological conditions.

### 概 要

近年、掘削土質が複雑に変化する長距離・大断面トンネルにおいて、気泡シールド工法の採用が増加しており、これまで以上に掘削作業の効率化に向けた起泡剤の高性能化や、材料使用量低減が求められている。今回開発したレオフォームOL-10<sup>®</sup>は、従来起泡剤に比べ、低濃度でも高発泡性能を有し、緻密な気泡を作製することができる。また、作製される気泡が従来剤に比べ、耐消泡性に優れているため、泡粘性も高い。このため、使用濃度を従来起泡剤の1/3程度としても、掘進に大きく影響する気泡混合土の塑性流動性は、同等以上の性能を有する。今回開発したレオフォームOL-10を実現場に適用した。掘削対象土質に応じて、気泡添加率や発泡倍率を調整することで、従来起泡剤よりも少ない使用量でも遜色なくスムーズに掘進可能であること、また、従来剤と同様に、増粘材や加泥材と併用もでき、幅広い土質に適用可能であることが実証された。

## 1. はじめに

気泡シールド工法は、泥土圧シールド工法のひとつであり、添加材として気泡を使用する。シェービングクリーム状の気泡を注入することで、掘削土の流動性と止水性を向上させ、かつ、チャンパー内の掘削土の付着を防止できるため、切羽の安定を保持しつつ、スムーズな掘進が可能となる。砂礫層から粘性土層までの広い範囲の地質に適用可能であり、地質変化への適応性が高い。現在、一般的に起泡剤として、スルホン酸塩系陰イオン界面活性剤(主にアルファオレフィンスルホン酸ナトリウム、以下AOSとする)を主成分とした特殊起泡剤が使用され、通常は1.5%~3.0%濃度程度に希釈して使用されている。また、排出された気泡混合土は、時間とともに消泡し、自然に消泡しにくい場合でも、特殊消泡材を散布することで消泡し、ほぼ元の土砂の性状へ戻るため、後処理が容易であり、泥土圧シールドで用いられる他の掘削用添加剤に比べて材料使用量が少ない工法である<sup>1)</sup>。

近年では、長距離・大断面トンネルにおいて、気泡シールド工法の採用が増加している。そのため、これまで以上

に材料搬入頻度の低減等による掘進作業の効率化が求められており、起泡剤の高性能化による材料使用量低減が必要とされている<sup>2)</sup>。

そこで筆者らは、気泡シールド工法において、従来使用している起泡剤よりも、低濃度で高発泡・高粘性の気泡を安定的に生成できる起泡剤「レオフォームOL-10<sup>®</sup>」の開発を行った。

## 2. 新起泡剤の開発

起泡剤は、その主成分である界面活性剤分子が気体と液体の界面に吸着し、膜を形成し表面張力を低下させることで、泡を安定させる。起泡剤濃度が低くなると、吸着する界面活性剤分子の密度が小さくなり、起泡力の低下、泡膜強度の低下により消泡しやすくなる。一般的には、陰イオン界面活性剤に助剤を添加することで、Fig. 1 に示すように、助剤が界面活性剤分子間に入り込み、泡膜密度及び泡膜厚の増加に寄与し、起泡力の向上や泡膜安定性強化につながる事が知られている<sup>3)</sup>。そのため、主剤である陰イオン界面活性剤に複数の助剤を組み合わせ、より低濃度で高

性能を有する配合を検討した。

## 2.1 新起泡剤の選定

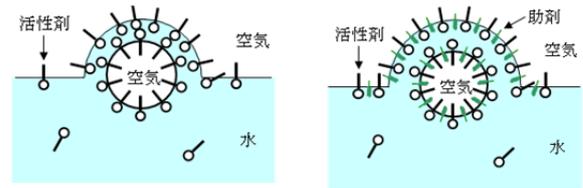
シールド工事用の起泡剤は、発泡性、気泡混合土の塑性流動性、カッタービットやチャンパー内への付着防止等様々な機能が要求される。Table 1 にシールド工事用起泡剤として必要な性能の評価項目を示す<sup>4)</sup>。配合選定においては、上記の中でも、シールド掘進時に最も重要となる気泡混合土の塑性流動性(以下、流動性)を指標として試験を実施し、最適な配合を決定した。

Table 2 に、検討した材料配合の一覧を示す。なお、従来剤は、市販されている製品によって濃度等が異なっており、比較する剤としての代表性に欠け、適切ではないと考えた。そこで、この試験における従来剤は、主剤であるAOSのみを含有し、その濃度を30%とした水溶液を作製し使用した。なお、AOS濃度は市販品の中でも最大と考えられる濃度として設定した。候補剤として、No.1~5の5配合とした。No.1~3までは、陰イオン界面活性剤を従来剤と同じAOSとし、No.1は助剤Aを、No.2は助剤Bを、No.3は助剤Aと助剤Cの両方を、Table 2 に示す割合で配合した。No.4は、陰イオン界面活性剤として、硫酸塩系DとEを、助剤として助剤AとCを用いた。No.5は、陰イオン界面活性剤として、硫酸塩系Eを、助剤として助剤AとCを用い、Table 2 に示す割合で配合した。

## 2.2 気泡混合土の流動性試験

**2.2.1 試験方法** 通常、硬質粘土は、吸水することで気泡を消泡させやすく、流動性を保持しにくい。このため、実現場から硬質粘土を採取し、9.5mm以下の粒径に粉砕し、含水比を50%に調整した後、試料土として使用した。試料土に、ハンドポンプを用いて気泡を添加混合し、気泡混合土を作製した。気泡添加条件は、発泡倍率約8倍、添加率50v/v%とした。この気泡混合土の流動性を、混合直後、15分、30分放置後に、ミニスランプチューン(上端内径50±0.5mm、下端内径100±0.5mm、高さ150±0.5mm)を用いてミニスランプ値を測定し評価した。また、添加した気泡の状態を目視にて観察し、発泡性として合わせて評価した。

**2.2.2 試験結果** 試験結果をTable 3 に示す。なお、流動性の判定基準は、気泡混合土のミニスランプ値が、15分後で3.0cm以上、30分後で1.0cm以上とした。従来剤は、よく使用される希釈濃度範囲である3.0~1.5%では、十分な流動性を有していた。No.1は、1.25%濃度程度までは流動性を保持していたが、それ以下では流動性を保持できない。No.2は、1.67%濃度でも流動性を保持できていない。このことから、助剤Aの方が、助剤Bよりも気泡性能向上に寄与することがわかった。さらに、No.3では、1.18%濃度まで流動性を保持できていることから、助剤Aと助剤Cを併用することで、より気泡性能が向上することがわかった。No.4は、0.5%濃度でも十分な流動性を保持しており、主剤である陰イオン界面活性剤をAOSから硫酸塩系陰イ



助剤添加なし 助剤添加あり

Fig.1 助剤の効果  
Effect of Auxiliary Agent

Table 1 起泡剤と気泡混合土の必要性能  
Required Property of Foaming Agent and Mixed Soil

| 性能    | 評価方法  | 評価                        | 施工への寄与  |                            |
|-------|-------|---------------------------|---|----------------------------|
| 起泡剤   | 発泡性   | ・目視*<br>・気泡径*<br>・動的表面張力* | ・細かい発泡をすること<br>・表面張力が低いこと                                   | 気泡の均質な混合                   |
|       | 消泡性   | ・目視<br>・排液速度*             | ・徐々に消泡する(排液速度が遅い)こと   | 塑性流動性の維持                   |
|       | 泡粘性   | ・粘度測定*                    | ・粘性が高いこと  | 排土をまとめる(土圧の維持, 噴発防止)       |
| 気泡混合土 | 塑性流動性 | ・スランプ試験*<br>・ベーンせん断       | ・スランプ5~15cm(ミニスランプ2.5~7.5cm)<br>・ベーンせん断1~3kN/m <sup>3</sup> | 掘進の安定(土圧の維持, 切羽安定, 機械負荷低減) |
|       | 低付着性  | ・手触り等                     | ・付着性がないこと   | 付着による掘進効率の低下防止             |

※今回実施した項目

Table 2 検討した材料配合一覧  
List of Studying Material Blended

| 試料 No. | 配合(%) |        |      |      |      |     |
|--------|-------|--------|------|------|------|-----|
|        | 主剤    |        |      | 助剤   |      |     |
|        | AOS   | 硫酸塩系 D | E    | A    | B    | C   |
| 従来剤    | 30.0  | -      | -    | -    | -    | -   |
| No.1   | 27.0  | -      | -    | 27.0 | -    | -   |
| No.2   | 27.0  | -      | -    | -    | 27.0 | -   |
| No.3   | 26.2  | -      | -    | 26.2 | -    | 2.6 |
| No.4   | -     | 19.1   | 8.2  | 27.3 | -    | 5.5 |
| No.5   | -     | -      | 26.0 | 22.5 | -    | 6.0 |

オン界面活性剤とすることで、2倍以上薄く希釈しても同等以上の気泡混合土の流動性を有していた。ただし、No.4は、主剤がAOSである配合よりも、発泡時の気泡(泡径)が不均質かつやや水っぽい性状であった。シールド工事用の起泡剤は、掘削時に均質に混合される必要があるため、発泡時に細かな気泡を生成できることが求められており、そ

の点でやや課題がある。No.5は、主剤を硫酸塩系Eのみにすることで、発泡性が良好となり、かつ0.42%濃度とNo.4より低濃度でも流動性を保持していた。

以上の結果から、No.5が、最適な配合であると判断できる。従来剤であるAOSの1.5%とNo.5の0.5%の比較から、No.5は1/3以下の低濃度で気泡混合土の流動性を確保できると期待された。そこで、No.5を「レオフォームOL-10」と命名し、気泡単体での詳細な性能評価や、実現場における適用性を以下のように評価した。

### 3. レオフォームOL-10の気泡性能評価

選定したレオフォームOL-10の気泡生成の発泡性能と、生成した気泡の性能を、従来剤(AOS 30%水溶液)と比較した。

#### 3.1 発泡性能

発泡性能として、発泡直後の気泡径の計測及び最大泡圧法にて動的表面張力の測定(装置は動的表面張力計SITAt60を使用。)を行った。なお、施工時には、均質に気泡が混合される必要があるため、より緻密な泡を生成することが求められる。

**3.1.1 気泡径の計測** Fig.2 に気泡のデジタル顕微鏡写真, Fig.3 に気泡径の分布を示す。AOSは1.0%濃度で8倍発泡(一般的に現場使用時の発泡倍率), レオフォームOL-10は、1.0%, 0.4%及び0.2%濃度で10倍発泡(現場使用時の発泡倍率として想定している)の条件で気泡を生成した。また、計測は同一視野範囲において実施した。同濃度(1%)において、従来剤は、大きな径の気泡が混在し、不均質であるのに対して、レオフォームOL-10は、小さな径に分布が集中し、かつ気泡の数が多く、微細で均質かつ密な気泡を生成できることがわかった。また、0.4%及び0.2%と濃度を低くすると、気泡の密度が、やや劣るものの同様に微細な気泡を生成できることが分かった。

**3.1.2 動的表面張力の計測** Fig.4 に最大泡発泡法による動的表面張力の測定結果を示す。最大泡発泡法は、気体を吐出し、気泡を作製する時の気体の最大吐出圧を測定し、表面張力に換算する方法であり、動的表面張力は、発泡性能に係る界面活性剤の気泡表面への吸着速度を表面張力の時間変化として捉える指標である。横軸に起泡剤濃度、縦軸に動的表面張力を表しており、動的表面張力が小さい程、発泡性(起泡性)が良好である事を示している。なお、気泡の吐出時間は、100msecとした。この結果、動的表面張力が、従来剤1%で43.1mN/m、従来剤1.5%で42.3mN/mとなり、レオフォームOL-10 0.5%で42.5mN/mとなった。

従来剤1.5%とレオフォームOL-10 0.5%の動的表面張力が、同程度であることから、レオフォームOL-10は、従来剤の1/3の濃度で同程度の発泡性(起泡性)を有していることがわかった。なお、起泡剤使用量を従来剤よりも少なくすることができるため、環境影響も小さくなる。

Table 3 発泡性および流動性試験結果  
Result of Expandable Foam and Fluidity Test

| 試料   | 添加濃度 (%) | 発泡性 | ミニスランプ試験 |          |          | 評価 |
|------|----------|-----|----------|----------|----------|----|
|      |          |     | 0分 (cm)  | 15分 (cm) | 30分 (cm) |    |
| 従来剤  | 3.00     | ○   | 9.4      | 8.6      | 4.7      | ○  |
|      | 1.50     | ○   | 6.2      | 3.9      | 1.6      | ○  |
| No.1 | 2.00     | ○   | 9.8      | 7.8      | 3.5      | ○  |
|      | 1.25     | ○   | 9.1      | 3.1      | 1.2      | ○  |
|      | 1.11     | ○   | 9.2      | 2.6      | 1.1      | ×  |
| No.2 | 2.00     | ○   | 10.1     | 8.0      | 2.0      | ○  |
|      | 1.82     | ○   | 8.0      | 4.2      | 1.6      | ○  |
|      | 1.67     | ○   | 8.4      | 2.9      | 0.6      | ×  |
| No.3 | 2.00     | ○   | 9.2      | 7.1      | 3.0      | ○  |
|      | 1.18     | ○   | 8.6      | 3.8      | 1.4      | ○  |
|      | 1.11     | ○   | 6.7      | 2.4      | 1.3      | ×  |
| No.4 | 1.00     | △   | 7.6      | 5.6      | 4.1      | ○  |
|      | 0.74     | △   | 6.8      | 4.9      | 2.5      | ○  |
|      | 0.50     | △   | 6.8      | 3.6      | 2.0      | ○  |
| No.5 | 1.00     | ○   | 9.6      | 7.9      | 4.8      | ○  |
|      | 0.50     | ○   | 7.9      | 3.6      | 2.1      | ○  |
|      | 0.42     | ○   | 8.2      | 3.6      | 1.1      | ○  |

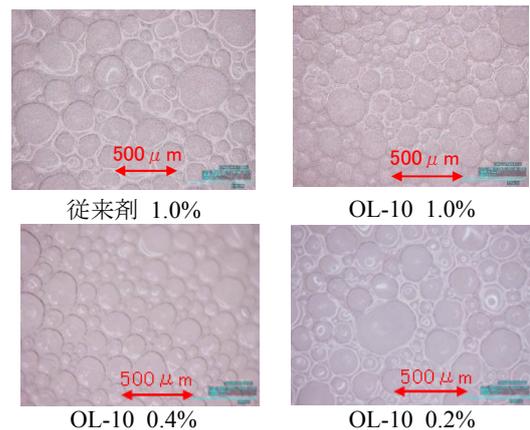


Fig. 2 気泡径の観察  
Observation of Foam Diameter

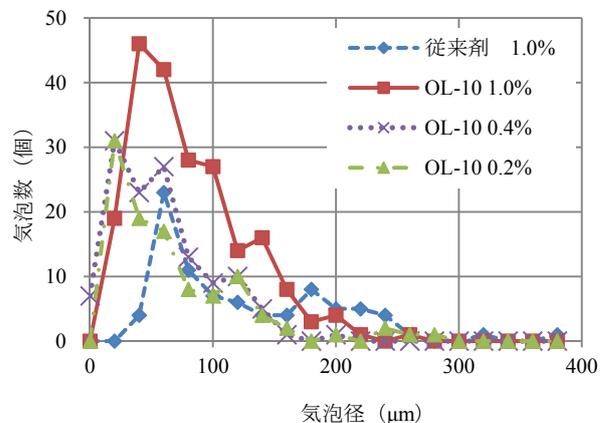


Fig. 3 気泡径分布  
Distribution of Foam Diameter

### 3.2 気泡性能

気泡性能として、消泡性と泡粘性の計測を行った。施工時には、気泡混合土が排出されるまでは一定の流動性を維持していることが必要とされ、消泡が進むにつれて流動性は低下するため、耐消泡性能が求められる。また、泡粘性が高いほど、気泡混合土のまとまりが強くなり、掘進時の土圧等の維持がしやすいため、泡粘性も求められる。

**3.2.1 消泡性の計測** 時間の経過とともに消泡し、元の液体に戻る。ここでは、500mlメスシリンダーに気泡を充填し、10分・20分・30分・60分後に消泡により、気泡から溶液に戻った量(排液量)を計測した。また、充填した気泡体積中に含まれる液量は、気泡発泡倍率により異なり、排液量で一概に比較することができない。そのため、充填した気泡の液量(気泡体積÷発泡倍率)に対する排液量の割合(排液率)として、耐消泡性の評価指標とした。Fig.5 に、排液率の経時変化を示す。従来剤の排液率は、10分で約80%、20分で約90%、60分経過後にはほぼ100%となり、全て消泡する結果となった。一方、レオフォームOL-10は、1.0%、0.4%ともに60分経過後でも排液率が約80%と消泡が遅く、より強靱な気泡であると言える。

**3.2.2 泡粘性の計測** 泡粘性は、泡の強度の指標のひとつとして評価し、高性能回転式粘度計(レオメータ)を用いて計測した。Fig.6 に泡粘性の結果を示す。レオフォームOL-10の泡粘性は、従来剤の性能を大きく上回っている。これは、従来剤は、気泡生成直後から消泡が進行し、気泡量が減少することに伴い、泡粘性も低下するのに対し、レオフォームOL-10は、多くが消泡せず気泡量が多いことが要因のひとつとして考えられる。いずれの理由としても、レオフォームOL-10は、0.4%と低い濃度においても高い泡粘性を示した。

## 4. レオフォームOL-10の現場適用

レオフォームOL-10を3現場にて適用した。Table 4 に適用事例の概要を示す。

### 4.1 事例A

事例Aは、シールド外径φ12,540mm、砂混じり粘性土を主体とした地山を対象とし、施工延長の内、一部区間において適用した。掘削土は、ベルトコンベアにて坑外へ搬出された。レオフォームOL-10の使用条件は、現場で使用していた起泡剤(以下、現場起泡剤)と同条件(1%濃度)で置き換え、添加条件は、地質条件やリング毎の排土の性状を観察しながら、最適条件を確保できるように適宜調整しながら掘進した。Fig. 7 に、レオフォームOL-10と現場起泡剤の切り替え前後の掘進結果を示す。掘削地山に合わせ、徐々に気泡注入率を減らしていき、レオフォームOL-10使用リング区間の後半において、スクリュ回転圧力が上昇したものの、全体として、現場起泡剤との切り替え前後で、掘進に大きな影響はなく、発泡倍率7~19倍、気泡注入率16~60%の範囲で順調な掘進状態を維持することができ

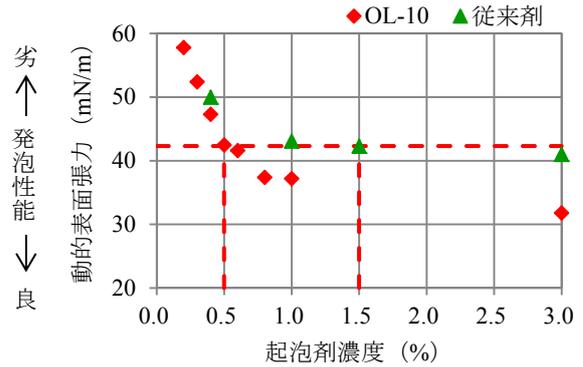


Fig. 4 動的表面張力計測結果(100msec)  
Result of Dynamic Surface Tension Measurement (100msec)

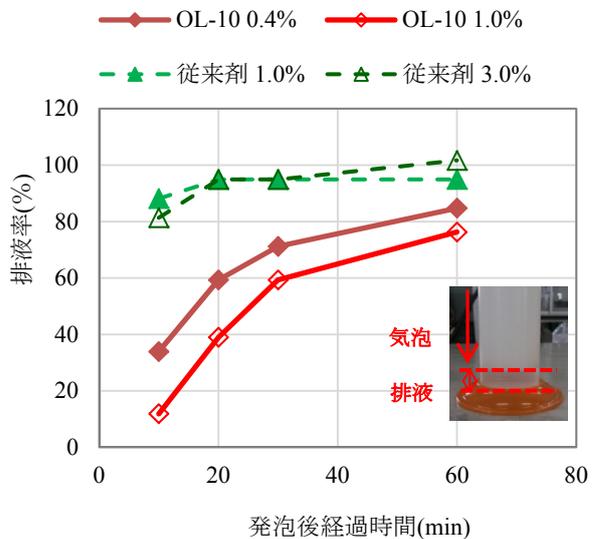


Fig. 5 消泡性計測結果  
Result of Antifoam Performance Measurement

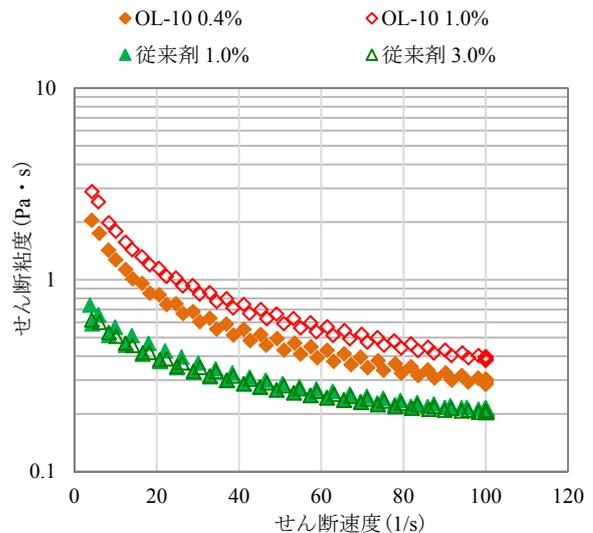


Fig. 6 泡粘性測定結果  
Result of Foam Viscous Measurement

Table 4 適用事例の概要  
Overview of Case Study

|          | 事例A  | 事例B  | 事例C  |        |
|----------|--|--|--|--------|
| シールド径・延長 | φ 12,540mm, L 630m   | φ 2,330mm, L 1,249m  | φ 2,130mm, L 1,383m  |        |
| 土質       | 砂混じり粘性土  | 玉石混じりの砂礫土  | 砂質土(細粒分10%以下)  |        |
| 土被り      | 26~28m程度   | 18~22m程度   | 9~18m程度  |        |
| 排土方法     | ベルトコンベア<br> | ベルトコンベア<br>→ 掘削土砂運搬車<br> | ノントックホース<br>→ 掘削土砂運搬車<br> |        |
| 適用区間     | 一部区間適用   | 一部区間適用   | 全線適用   |        |
| 気泡       | 濃度   | 1.0%   | 1.0% → 0.6%  | 0.5%   |
|          | 発泡倍率   | 7~19倍  | 6~11倍  | 5~20倍  |
|          | 注入率  | 16~60%   | 5%程度   | 30~60% |
| その他      | —  | 鉱物系加泥材との併用   | 増粘剤・鉱物系加泥材併用   |        |

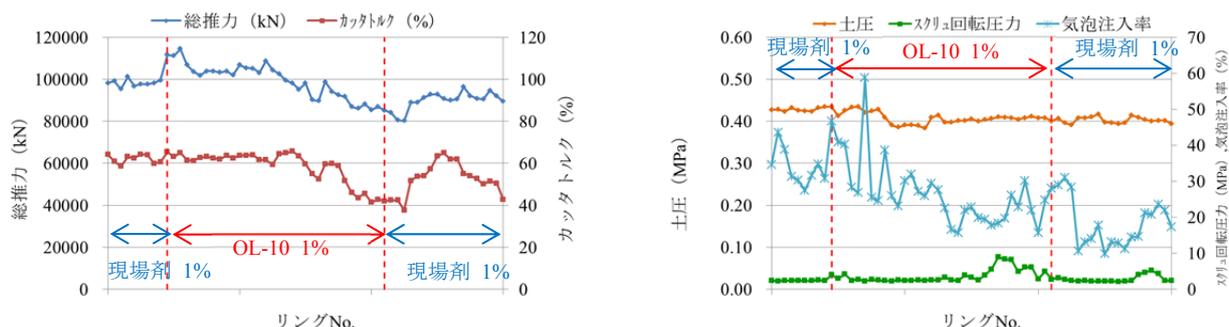


Fig. 7 事例Aの掘進データ  
Tunneling Data of Case A

この結果より、レオフォームOL-10の粘性土への適用性が十分にあると実証された。

#### 4.2 事例B

事例Bは、シールド外径φ 2,330mm、玉石混じりの砂礫土を対象としていたため、細粒分を補う目的で、鉱物系加泥材を併用して掘進していた。施工延長の内、一部区間においてレオフォームOL-10を適用した。掘削土は、ベルトコンベアを介して掘削土砂運搬車によって排出された。当該現場で通常使用している起泡剤は、従来起泡剤の3倍濃縮品であり、これを1%濃度で使用している。レオフォームOL-10は、当初1%濃度で使用し、途中から0.6%濃度によって使用した。添加条件は、排土性状を確認しながら最適になるように適宜調整した。Fig. 8 に、従来剤とレオフォームOL-10(1%→0.6%濃度)の掘進結果を示す。OL-10の1%濃度での使用リングの後半区間において、従来剤よりも気泡注入率は少ないものの、スクリュ回転圧力が低くなった。これは、従来剤よりもレオフォームOL-10の気泡が強靱であることから、掘削土の流動性が高く、スクリュにかかる

負荷が小さくなったものと考えられる。0.6%濃度では現場使用起泡剤と同程度の掘進となった。レオフォームOL-10(1%→0.6%濃度)の掘進結果、発泡倍率6~11倍、注入率5%程度の範囲で、全体として順調な掘進状態を維持することができた。この結果より、レオフォームOL-10は、従来剤よりも低濃度でも同様に掘進でき、加泥材との併用により砂礫土へ適用できることが実証された。

#### 4.3 事例C

事例Cは、シールド外径φ 2,130mm、細粒分10%以下の砂質土の地山を対象とし、掘削土が一次スクリュコンベアからノントックホースを介して掘削土砂運搬車に排出される条件であったことから、細粒分を補いかつ排土のまとまりを強くするため、鉱物系加泥材と増粘剤を併用した。事例CではOL-10を全線で適用し、起泡剤濃度は0.5%とし、気泡注入率は、地質条件や排土性状を観察しながら、最適性状を確保できるように適宜調整した。Fig. 9 に、一部区間の掘進結果を示す。掘進時のカット圧力がやや変動し、スクリュ回転圧力は、一部高くなっているものの概ね安定

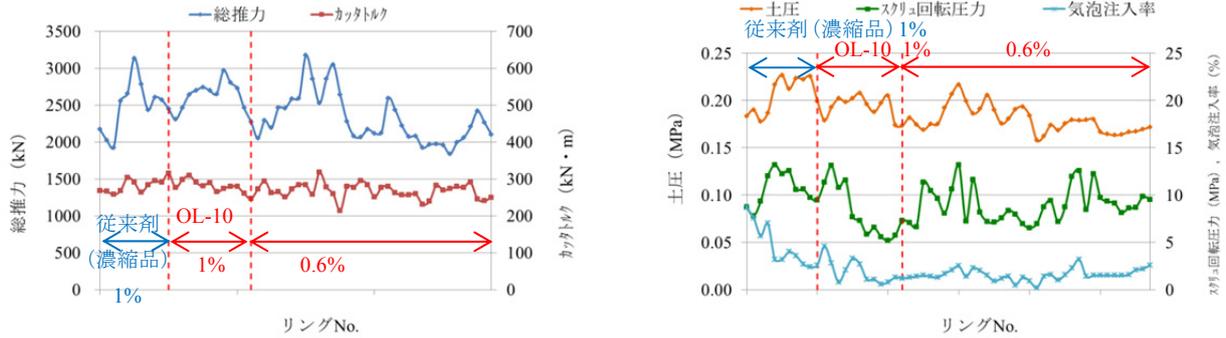


Fig. 8 事例Bの掘進データ  
Tunneling Data of Case B

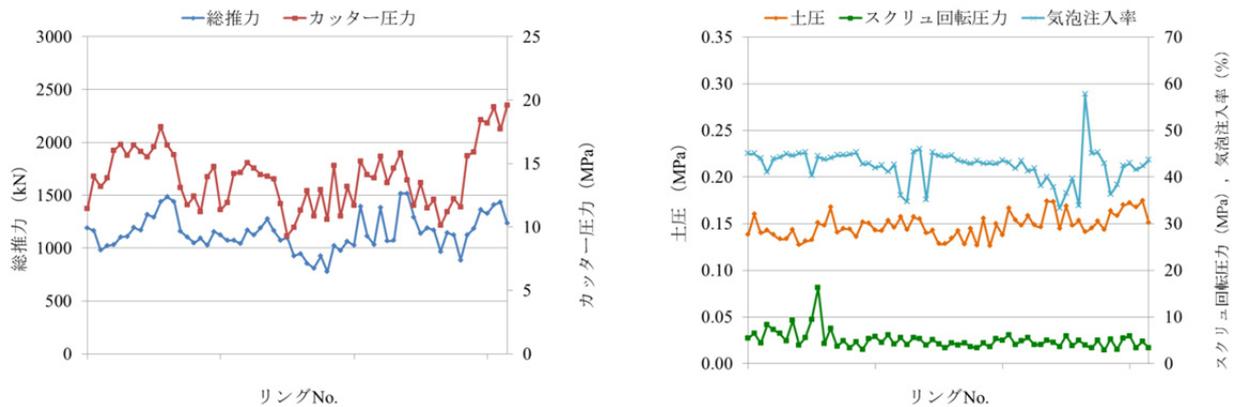


Fig. 9 事例Cの掘進データ  
Tunneling Data of Case C

している。また、総推力と土圧に大きな変動はなかったことから、排出された掘削土の性状は、良好な状態を保っていたものと推察される。全体として発泡倍率5~20倍、気泡注入率30~60%の範囲で順調な掘進状態を保持することができた。この結果より、今回対象となった、細粒分が少ない砂質土において、レオフォームOL-10は、従来剤と同様に増粘剤と併用可能であることが実証された。

## 5. まとめ

気泡シールド工法において、従来使用している起泡剤よりも、低濃度で高発泡・高粘性の気泡を安定的に生成できる起泡剤を開発し、硫酸塩系陰イオン界面活性剤に、助剤A及びCを組み合わせた新たな気泡シールド工用起泡剤「レオフォームOL-10」を開発した。以下にその特長を示す。

- 1) 従来起泡剤よりも高発泡、高粘性を有する強靱な気泡を作製することができるため、従来剤の1/3以下の濃度でも同等以上の気泡を生成することができる。また、使用量が少なくなるため、環境への影響も小さくなる。
- 2) 従来起泡剤と同様に、砂礫土質・砂質土質・粘性土質と幅広い地質に適応できることが実証された。
- 3) 本剤は、従来剤よりも低濃度で使用できることから、

材料使用量の低減ができる。これにより、材料搬入量を減少し、施工の効率化に寄与できる。

## 謝辞

共同で起泡剤の開発を進めるにあたり、界面活性剤の材料の選定、データの測定等、多大な協力をいただいたライオン・スペシャリティ・ケミカルズ株式会社の関係各位に深謝致します。

## 参考文献

- 1) シールド工法技術協会：気泡シールド工法—技術資料一，pp.1-23，2011.8
- 2) 武田厚他：高発泡性能を有するシールドトンネル工用起泡剤の開発，土木学会第70回年次講演会，VI-261，2015.9
- 3) 石井淑夫 他，泡のエンジニアリング，pp.487-498，2005.3
- 4) 三浦俊彦 他，環境に配慮したシールドトンネル工用起泡剤の開発，大林組技術研究所報，No.75，p.2，2011.12