

気泡シールド工法における切羽可視化技術の現場適用実績

On-Site Monitoring Results of Visualization Technology Developed for Shield Tunneling Method with Foam

劉 偉 晨 永 谷 英 基 川 野 健 一 佐 藤 一 成

要 約

気泡シールド工事における施工条件は年々複雑化している。そのため、切羽前方地山の土層構成やシールドマシンチャンパー内の土砂性状をセンシング技術で施工中に可視化できれば、地盤条件の急変に起因する施工リスクの低減につながる。すなわち、切羽の不安定から生じる施工トラブルを事前に回避し、安定的にシールド工事を進められる。そこで、シールド掘進時における切羽前方地山の掘削およびチャンパー内掘削土砂の挙動を模擬できる切羽可視化実験装置¹⁾を用いて、ビットひずみセンサによる切羽前方地山の土層構成可視化技術¹⁾ならびに攪拌翼センサによるチャンパー内の掘削土砂性状の可視化技術²⁾を開発した。本報では、開発技術を横浜環状南線公田笠間トンネル工事において実適用したので、その適用実績について報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 工事概要および可視化技術の適用状況
- III. 可視化結果
- IV. おわりに

I. はじめに

近年、軟弱地盤など複雑な条件下でのシールドトンネル工事が増加している。特に、地盤情報が不十分な場合は、シールド掘進時のトラブルが生じて、非常に困難な工事となる。泥土圧シールドでは、切羽付近の圧力バランスの維持および順調な排土を実現するために、チャンパー内掘削土砂を塑性流動性³⁾と呼ばれる状態に調整する必要がある。従来は、シールドチャンパー内に設置した土圧計を利用し、チャンパー内土圧から土砂の塑性流動性を判断することが多いが、掘削土のアーチ効果や含水状態によっては正確に圧力を計測できず、塑性流動性を判断できない場合もある。また、チャンパー内掘削土砂の塑性流動性を維持するために、掘削地盤に合わせた加泥材選定が重要である。切羽前方地山の土層構成が急に変わる場合では、土層構成の迅速な検知と加泥材注入配合の適切な調整が求められている⁴⁾。

上記の状況を踏まえて、既報⁵⁾に示すとおり、シールド掘

進時における切羽前方地山の掘削状況およびチャンパー内掘削土砂の攪拌状況を模擬できる切羽可視化実験装置を用いて、ビットひずみセンサ (Photo 1) による切羽前方地山の土層構成可視化技術¹⁾ならびに攪拌翼センサ (Photo 1) によるチャンパー内の掘削土砂性状の可視化技術²⁾を開発した。いずれの可視化技術もセンサの根元内部に貼り付けたひずみゲージの計測値を、掘削時や攪拌時にビットひずみセンサと攪拌翼センサに作用する抵抗力に換算することで、掘削する地山の強度とチャンパー内土砂の塑性流動性を定量的に評価できる。

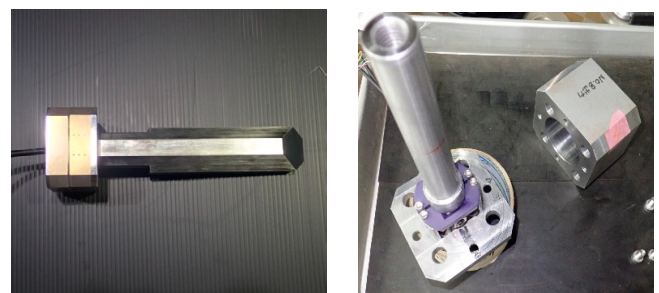


Photo 1 ビットひずみセンサ (左) と攪拌翼センサ (右)
(Bit-strain Sensor(left) and Stirring-blade Sensor(right))

キーワード : 気泡シールド工法, 可視化, センシング技術, 土層検知, 塑性流動性

Keywords : shield tunneling method with foam, visualization, sensing technology, soil layer detection, plastic flow

ビットひずみセンサの実験結果から、模擬地山の一軸圧縮強さが大きくなれば、ビットひずみの計測ひずみ値を切込深さで割った値も線形的に大きくなることが分かった^{6,7)}。また、実験において、計測ひずみを掘進速度で割っ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、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。

攪拌翼センサを用いた場合、気泡を掘削土砂に混合する前後で攪拌翼センサによる計測ひずみ値が大幅に変化した²⁾。すなわち、気泡混合によるベアリング効果を発揮し、塑性流動性が大きく改善されたことをひずみ値で判断できることが分かった。よって、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砂の塑性流動性をリアルタイムでモニタリングすることが可能である。

本報では、当該可視化技術を横浜環状南線公田笠間トンネル工事に適用したので、適用実績について報告する。

II. 工事概要および可視化技術の適用状況

横浜環状南線公田笠間トンネル工事は、直径 15.28 m の大断面泥土圧シールド工事である。Fig.1 に示すとおり、工事対象区間の土層は主に泥岩・砂質泥岩層であるが、泥岩層上部に沖積砂質土層が存在する区間がある。事前のボーリング調査から、600 リング以降は地山の上部に風化泥岩層が存在していることも分かった。

本工事では、気泡シールド工法²⁾が採用されている。気泡を使用することで、掘進中のチャンパー内掘削土砂の塑性流動性を確保することを意図している。シールド掘進を安定的に進めるためには、切羽前方地山の土層変化およびチャンパー内掘削土砂の塑性流動性をリアルタイムにモニタリングしながら、気泡材の注入条件を調整することが肝要である。

また、小土被り（地上）発進であり、Fig.1 に示すとおり初期掘進時は軟弱な沖積粘性土層が掘削対象である。そのため、地表面変状対策として地盤改良（15 リングまで：発進保護として全断面改良，15～80 リング：部分改良）を実施している。地盤改良区間を通過すると、掘削断面の下から徐々に泥岩層

が出現し、初期掘進完了時はシールドマシンの全断面が泥岩層に入る状況であることから、地盤変状が懸念される初期掘進区間においては、掘進中における地表面変状の監視と土層の変化を捉えることも重要である。

上記の状況を踏まえ、掘進中にリアルタイムに切羽前方地山の土層変化を検知するために、ビットひずみセンサをカッ

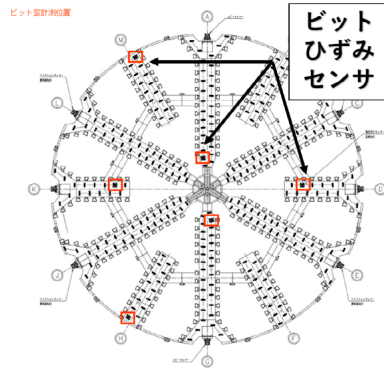


Fig.2 ビットひずみセンサ配置図
(Layout of Bit-strain Sensor)

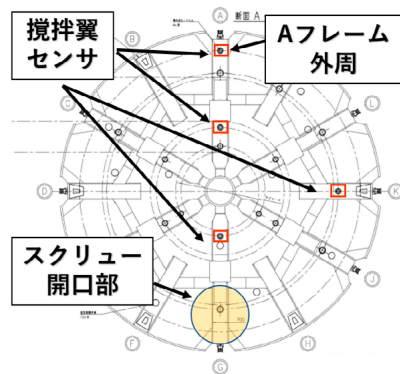


Fig.3 攪拌翼センサ配置図
(Layout of Stirring-blade Sensor)

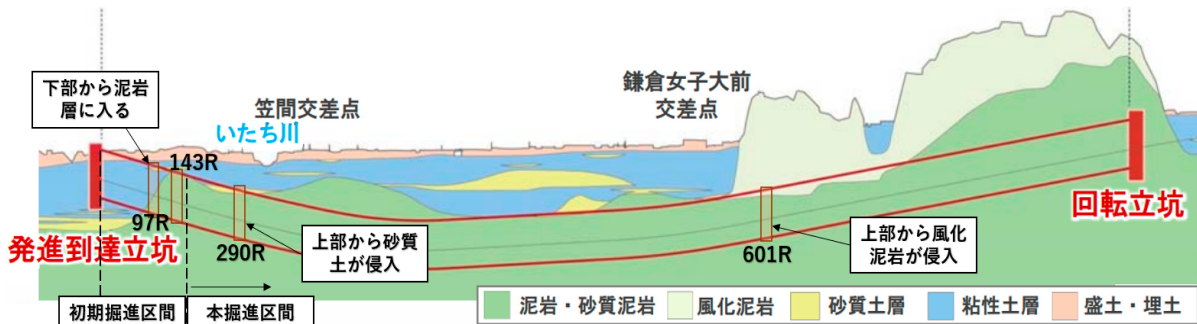


Fig.1 横浜環状南線公田笠間トンネル工事地質縦断面図
(Geological Profile of Yokokan-minami Kuden-kasama Tunnel Project)

タースポーク上のビットに装着し (Fig.2), 地山掘削時の抵抗をビットひずみ値として常時モニタリングした。

また, 直径 15 m 級の巨大なチャンバーの中で掘削土砂の塑性流動性をモニタリングするために, 攪拌翼センサをカタースポークの裏側に 4 箇所設置した (Fig.3)。同図には, シールドチャンバーから排土するスクリーコンベヤの位置も示している。

Ⅲ. 可視化結果

1. ビットひずみセンサによる切羽前方地山の土層検知

(1) 初期掘進区間における可視化結果

初期掘進区間において, ボーリングで地盤改良区間および泥岩層 (0c 層) の試料をサンプリングし, 土質試験で一軸圧縮強さを取得した。Table 1 に示すとおり, 全断面改良区間 (15 リングまで) は, 泥岩層 (0c 層) と同等の一軸圧縮強さであるが, 部分改良区間 (15 リング~80 リング) の一軸圧縮強さは少し低下していることが分かった。その後, 上部のひずみ計測値も徐々に上昇し, マシンの全断面が泥岩層に入った後は, 下部と同等なひずみ値が計測されたことが分かった。

Fig. 4 に初期掘進における最外周 (A フレーム) に取り付けられたビットひずみセンサの計測ひずみ値を掘進速度で割ったビットひずみ値を示す。全断面のビットひずみ/掘進速度

Table 1 初期掘進区間における地盤の一軸圧縮強さ (Unconfined Compression Strength in the Initial Excavation Area)

試験対象	一軸圧縮強さ (kN/m ²)
全断面改良区間	3,503
部分改良区間	2,222
泥岩層	3,510

の平均値に関して, 全断面改良区間は計測ひずみ値が高かったが, 部分改良区間では低下し, 泥岩層への進入に伴って増加が続いた。この結果は, Table 1 に示す改良体および地山ボーリング試料の一軸圧縮強さと良く整合しており, ビットひずみセンサによって一軸圧縮強さが異なる土層の検知が可能であることを示唆している。

Fig. 4 中に赤枠で示す 80~100 リングの区間では, 掘削断面の下から泥岩層が徐々に出現してくるため, 下部における計測ひずみ値が上部よりも先に高くなる傾向が明確であり, 実際の土層構成を正確に検知できることが分かった。また, 現場では土層が横断方向にも傾斜していることが分かった。

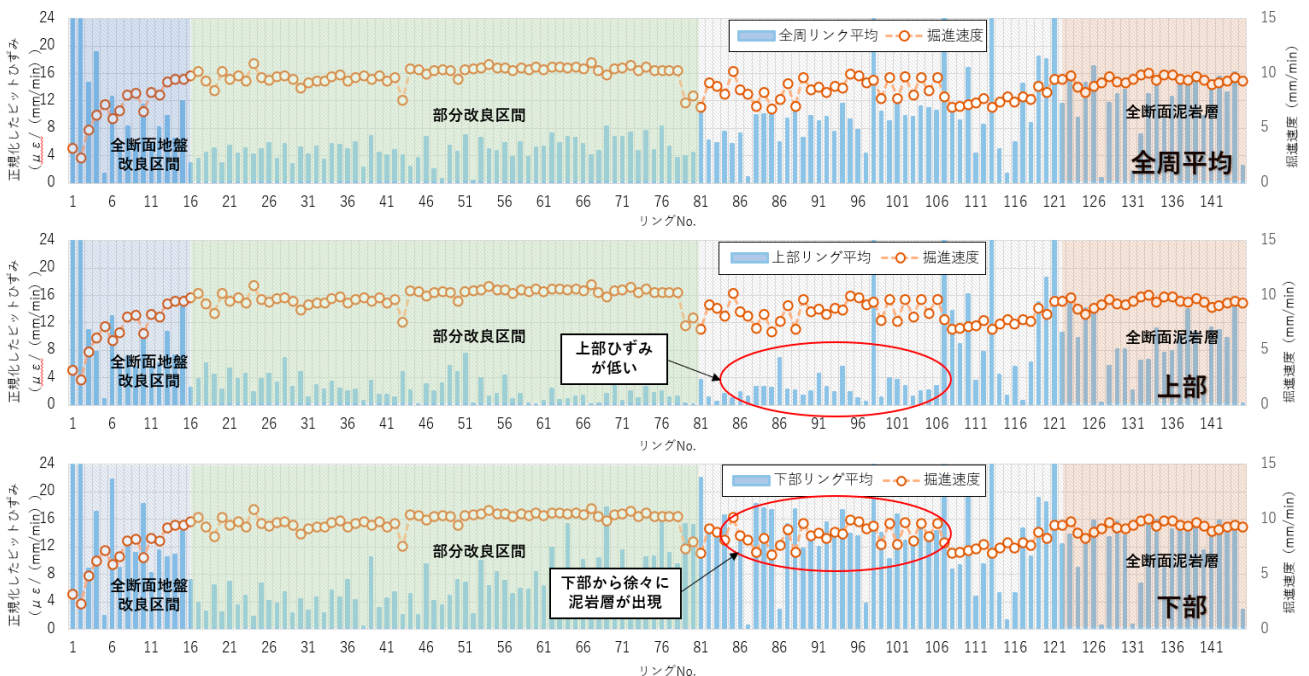


Fig.4 最外周Aフレームに装着したビットひずみセンサの計測ひずみ値 (棒グラフ) および掘進速度 (折れ線)

(上: 全断面平均; 中: 上部断面のみの平均; 下: 下部断面のみの平均)

(Strain Obtained from Bit-strain Sensor at the Most Outer Circumference and Excavation Speed)

(Top: Full cross section average; Middle: Top part average; Bottom: Bottom part average)

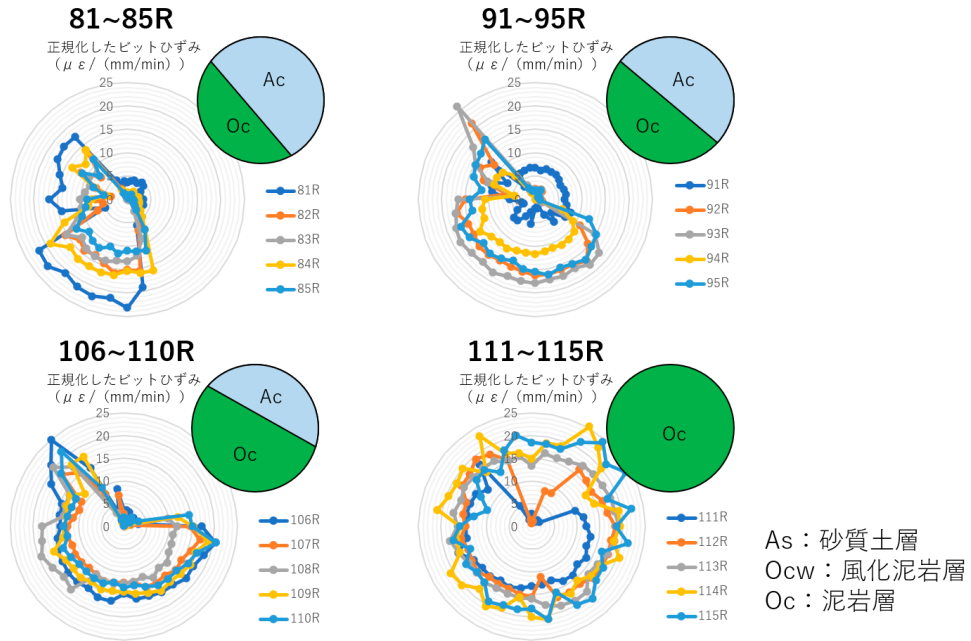


Fig.5 正規化したビットひずみのレーダー図
(リング平均, 初期掘進区間)

(Radar Diagram of Monitoring Result of Bit-Strain Sensor
(Ring average, in initial excavation area))

Fig.5 に部分改良区間を抜けて泥岩層 (Oc 層) に入った時点でのビットひずみ/掘進速度の平均値をレーダー図に示す。マシン側から切羽側を見た時の方向を基準としている。81~85 リングでは、掘削断面の上部は沖積粘性土層 (Ac 層) であり、断面左下から泥岩層 (Oc 層) が出現することから、左下のビットひずみ/掘進速度の値が明確に上昇していた。

さらに 91~110 リングにおいては、ひずみ値が上昇する範囲が広がり、シールドマシンが徐々に泥岩層 (Oc 層) に進入する様子が把握できた。

また、111~115 リングでは、シールドマシンの掘削断面が完全に泥岩層 (Oc 層) に進入したことから、ビットひずみ/掘進速度の値は全周において概ね同等の値となった。

以上の結果から、ビットひずみセンサで切羽前方地山の土層変化をリアルタイムに検出できることが明らかとなった。

(2) 本掘進区間における可視化結果

Fig.1 の地質縦断面図に示すとおり、初期掘進後の本掘進からは全断面が概ね泥岩層となるが、図中で示した場所において、掘削断面の上部から砂質土層 (As 層, 290 リング前後) と風化泥岩層 (Ocw 層, 601 リング前後) が出現することが分かっている。砂質土層 (As 層) と風化泥岩層 (Ocw 層) は掘削対象土層のほとんどを占める泥岩・砂質泥岩層 (Oc 層) と比較して、一軸圧縮強さが著しく低いので、ビットひずみセンサで土層変化の検知ができると想定していた。

Fig.6 に 290 および 601 リングにおける最外周 (A フレーム) ビットひずみセンサの計測結果をレーダー図で示してい

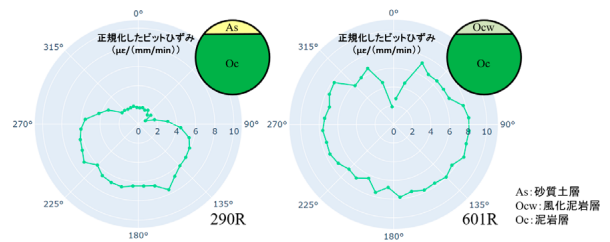


Fig.6 ビット計測ひずみのレーダー図
(リング平均, 本掘進区間)

(Radar Diagram of Monitoring Result of Bit-Strain Sensor)

る。290 リングでは、掘削断面上部における計測ひずみ値が低下しており、想定したとおり砂質土層 (As 層) の出現が検知できた。601 リングでは、掘削断面の上部における計測ひずみ値が V 字型に低下しており、風化泥岩層 (Ocw 層) の出現もビットひずみセンサから検知できた。

以上のように、ビットひずみセンサの計測ひずみ値をモニタリングすることで、シールド掘進時における切羽前方地山の土層の変化をリアルタイムに検知できた。大断面シールド工事では、ビットひずみセンサを使って地盤条件の変化をリアルタイムに検知することで、合理的な切羽土圧管理ならびに適切な気泡材注入を実現することが可能になると考えている。

2. 攪拌翼センサによる塑性流動性監視

(1) 初期掘進区間における計測結果

本工事は小土被り（地上）発進のため、Fig.1 に示した初期掘進（150 リングまで）における地表面変状の監視と制御が重要であり、チャンパー内掘削土砂の塑性流動性を監視しながら掘進した。Fig.7 に、掘削土砂の塑性流動性と高い相関を持つスクリュートルクとスクリュ開口部（Fig.3 参照）近傍で計測した攪拌翼センサのひずみ値の比較結果を示す。図中の赤枠に示したとおり、80 リングまでは攪拌翼センサで計測されたひずみ値はスクリュートルクの上昇傾向と一致し、攪拌翼センサで掘削土砂の塑性流動性の変動傾向を感度良く捉えている。80 リング以降は相関性が落ちているが、地質状況の変化がスクリュートルクにも影響すると考える。

さらに、スクリュコンベヤーからの排土を対象に実施したコーン貫入試験の試験結果と攪拌翼センサで計測したひずみ値の比較結果を Fig.8 に示す。攪拌翼のひずみ値が急激に大きくなるリングにおいては排土を対象にしたコーン指

数も高まる傾向にあり、土砂の塑性流動性が低下することを計測ひずみ値によって判断できる。

（2）本掘進区間における計測結果

室内実験¹⁾および初期掘進時の施工管理データから、初期掘進後の本掘進（151 リング以降）における掘進管理のための攪拌翼センサの計測ひずみ値の閾値を設定した。その際、他工事での適用実績を参考にし、初期掘進で問題なく掘進できた際のひずみ値の最大値（415 $\mu\epsilon$ ）および最小値（25 $\mu\epsilon$ ）を施工管理における上限値および下限値とした。Fig.3 に示す4本の攪拌翼センサで計測したひずみ値をリング別に平均した結果を Fig.9 に示す。Fig.9 によると、全リングにわたって当初設定した閾値内に計測ひずみ値が収まっており、掘進中は塑性流動性に問題がなかったことが分かる。計測ひずみ値は、土圧勾配などの他の掘進管理項目と合わせて総合的な判断材料の一つとして取り扱い、掘進状況に応じて気泡材の

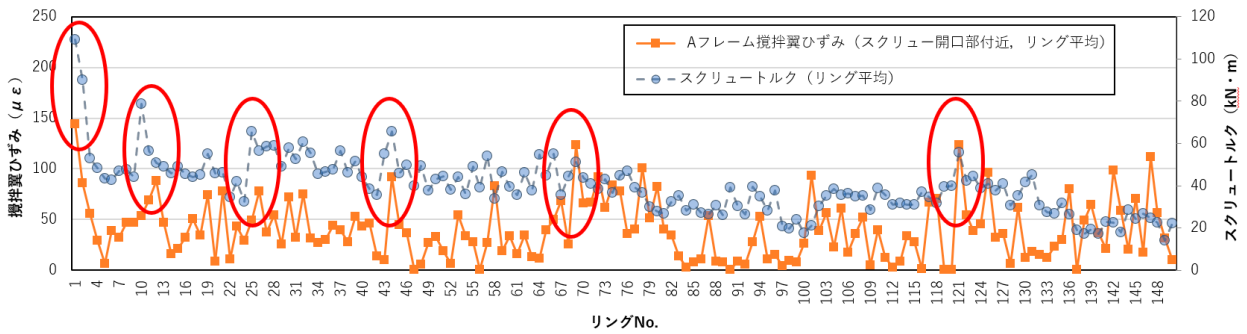


Fig.7 攪拌翼センサとスクリュートルクによる計測結果の比較
(Contrast of Monitoring Results from Stirring-blade Sensor and Screw Conveyor Torque)

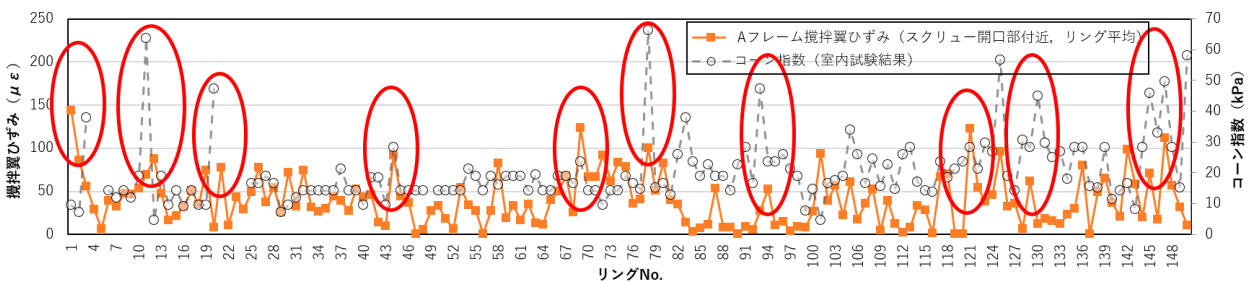


Fig.8 攪拌翼センサとコーン貫入試験の結果比較
(Contrast of Monitoring Results from Stirring-blade Sensor and Cone Test Results)

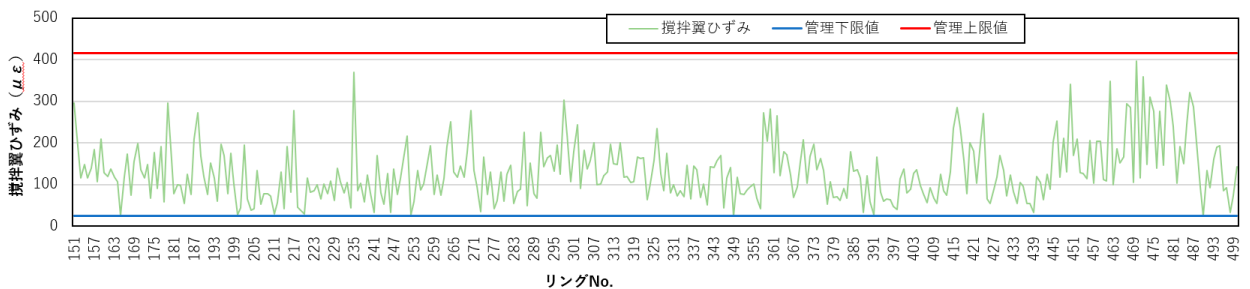


Fig.9 攪拌翼センサによるチャンパー内掘削土砂の塑性流動性監視結果（リング平均，本掘進区間）
(Monitoring Results of Soil Condition Inside Chamber via Stirring-blade Sensor (ring average, in normal excavation area))

注入量を変更するなど、施工管理に有効活用できた。

また、チャンパー内掘削土砂の塑性流動性をリアルタイムに可視化するために、4本の攪拌翼センサの計測結果を線形補間してコンター図に表示した (Fig.10)。コンター図はカットが1回転するごとに更新される仕様としたことで、塑性流動性のリアルタイム可視化が実現でき、チャンパー内のどの位置で塑性流動性が低下しているかを直観的に把握できるようになった。

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、施工中において切羽前方およびチャンパー内掘削土砂性状の可視化が非常に重要であり、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、掘進中にリアルタイムモニタリングを実現できた。特に、大断面シールドの場合、チャンパー内の土砂性状に不可避的なバラツキが生じるが、本技術によって切羽前方地山条件およびチャンパー内掘削土砂の塑性流動性をより高度に監視し、これに応じて切羽の安定性を確保していくことができる。

参考文献

- 1) 高柳哲, 田村賢士, 児玉亮治, 尾関淳, 新川健二, 劉偉晨, 川野健一, 永谷英基; ビットひずみセンサによるシールド切羽前方の可視化技術の開発, 土木学会第77回年次学術講演会概要集, VI-114, 2022.
- 2) 新川健二, 田村賢士, 児玉亮治, 尾関淳, 高柳哲, 劉偉晨, 川野健一, 永谷英基; 攪拌翼センサによるシールドチャンパー内の可視化技術の開発, 土木学会第77回年次学術講演会概要集, VI-115, 2022.
- 3) 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.
- 4) 気泡シールド工法技術協会; 気泡シールド工法, 2020.
- 5) 川野健一, 永谷英基, 佐藤一成, 劉偉晨; 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, 鹿島技術研究所年報, 第70号, 2022, pp.39-46.
- 6) 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.
- 7) Liu, W., Kawano, K., Nagatani, H. and Michael, M.; Experimental research on the development of a new visualization system on EPB TBM and soil conditioning inside the chamber, Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds 5th International Conference, 2022.11, pp.114-119.

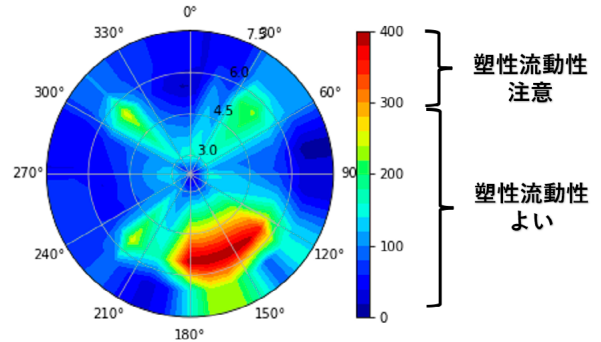


Fig.10 チャンパー内塑性流動性の分布状況
(Contour of Soil Condition Monitoring inside Chamber)

On-Site Monitoring Results of Visualization Technology Developed for Shield Tunneling Method with Foam

Weichen Liu, Hideki Nagatani, Kenichi Kawano and Issei Sato

In earth-pressure-balance (EPB) tunnel-boring-machine (TBM) shield tunneling with a large cross-section diameter, control of the soil conditions inside the chamber, especially in the vertical direction, may become difficult due to possible rapid changes in the soil layers in front of the cutter face. Therefore, to keep excavation stable, it is essential to detect the changes in the soil composition ahead of the cutter face and quickly adjust the soil conditioning approach inside the chamber while monitoring soil conditions in real time. Therefore, to establish a visualization system for TBM, a bit-strain sensor and stirring-blade sensor are developed using a special experimental apparatus that can simulate the movement of a real TBM during excavation. The system has been used in the Yokokan-minami kuden kasama tunnel project, and this paper will introduce monitoring results obtained during excavation.