

礫地盤におけるシールド掘進技術の開発と適用事例

— 塑性流動状態管理手法の確立による施工効率の大幅な改善 —

Development and Application of a Shield Tunneling Technology in Gravel Layer

- Greatly Improving Construction Efficiency by Establishing a Plastic Flow Management Method -

山本祐司* 坂田泰章* 上原 尚*

要 旨

礫地盤対応のシールド工事においては、「カッタートルク・推力上昇による掘進速度低下や掘進不能」、「カッタービットやカッターヘッドの摩耗」、「地盤沈下」といった問題が数多く報告されている。今回、礫地盤のシールド工事における上記問題点を解決するために、台北地下鉄空港線 CU02A 工事、および台北地下鉄環状線 CF640 工事におけるシールドの設計（計 10 台）、および施工（計 8.3km）を通して礫地盤対応のシールド掘進技術を開発し適用した。その結果、巨礫を含む礫地盤対応シールドにおいて、泥土の塑性流動状態を適切な水準で維持することによりカッタートルク、およびカッタービット摩耗量を砂シルト層対応シールドの水準にまで引き下げること的成功し、本技術の有効性を確認した。本技術は、礫地盤対応の土圧式シールドにおいて汎用的に応用可能であり、本技術を応用し適用することで、今後の礫地盤シールド工事の生産性を大幅に改善できるものと考え、本技術の適用事例とその効果をここに報告する。

キーワード：礫地盤シールド、塑性流動状態管理、カッタートルク低減、カッタービット摩耗低減、地盤変状抑制

1. まえがき

土圧式シールド工法は、開発後 40 年を経過し、現在まで多くの周辺技術が開発され目覚ましい発展を遂げてきた。その一方で、礫地盤におけるシールド工事においては掘進不能や地盤沈下といった問題が数多く報告されている。

土圧式シールド工法は、塑性流動化した泥土により切羽安定を図ると同時に、塑性流動化した泥土を連続的に排出するという基本原理から成り立っている。このため切削土砂に塑性流動性を持たせることが工法成立の前提である¹⁾。

泥土の塑性流動状態を適切な水準に管理できずに「塑性流動性の悪化」、「面板、チャンバー、スクリュウコンベヤー（以下、「S/C」と略す）における閉塞や噴発」が発生すると、以下のような問題が発生する。

- i. カッタートルクが増大するため、掘進速度を低下させなくてはならず、最終的には掘進不能に陥る
- ii. 切削土砂の滞留によりカッタービットやカッターヘッドの摩耗が著しく進行

iii. 土圧管理が困難になり、陥没等の地盤変状が発生
以上のように、泥土の塑性流動状態は礫地盤において発生する諸問題を解決するために最も重要な管理指標である。しかし、泥土の塑性流動状態は、スランプ試験による計測、目視や手触りによる性状確認、カッタートルク、推力、スクリュートルクなど、複数の指標から管理技術者が経験や主観によって管理している¹⁾。このため、泥土の塑性流動状態を、施工条件に応じて適切な水準に管理するための具体的な管理指標や管理基準の作成が課題とされている¹⁾。特に礫地盤では、砂/シルト/粘土地盤に比べると適切な泥土の塑性流動状態を維持することが難しい。

以上のような現状を踏まえ、台北地下鉄空港線 CU02A 工事（以下、「CU02A 工事」と略す）、および台北地下鉄環状線 CF640 工事（以下、「CF640 工事」と略す）において、礫地盤対応シールド掘進技術を開発した。本報では、これらの技術の実施工への適用事例と、技術の効果について報告する。

*西日本支社土木第4部台北地下鉄環状線 CF640 工事所

2. 礫地盤対応シールドにおける開発技術と適用事例

CU02A 工事、および CF640 工事の諸元を表-1に、礫の堆積状況、および地質調査で確認した巨礫を写真-1に示す。

表-1 CU02A 工事、および CF640 工事の諸元

		CU02A 工事	CF640 工事
セグメント内径		5.6m	5.6m
シールド外径		6.24m	6.24m
シールド台数		8 台	2 台
シールド掘進距離		7,194m	1,058m
うち礫地盤の割合		65%	56%
礫層の地質特性	礫率	65~92%	44~59%
	細粒分率	1~3%	7~8%
	最大礫径	φ1,000mm	φ1,000mm



写真-1

礫の堆積状況、および地質調査で確認した巨礫

また、CU02A 工事、および CF640 工事を通して開発し、実施工に適用した開発技術は図-1に示す①~④である。

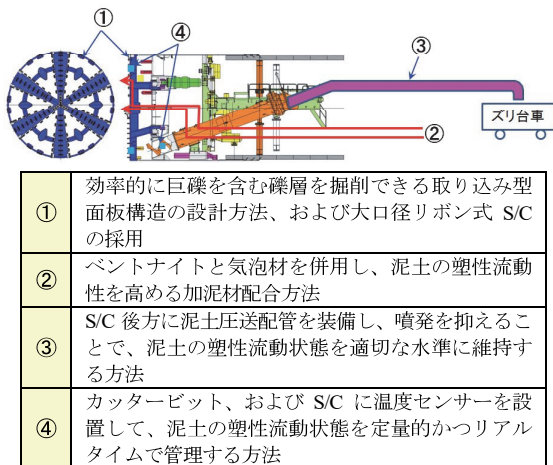


図-1 礫地盤対応シールド掘進技術

2.1 泥土の塑性流動状態を適切な水準で維持する技術

巨礫を含む礫地盤においては、礫破碎を目的としてローラーカッターを多数装備し、かつカッターヘッド通過礫径を制限するために開口率の低い面板型のカッターヘッドを採用していた。しかし、この方式では礫破碎により掘進効率が低く、カッタービット、およびカッターヘッドの摩耗が著しく進行する。

そこで、CU02A 工事においては掘進効率の向上を図

るため、シールド面板構造として先行ビット配置のスポーク型面板を採用し、開口率を高め、最大φ600mmの巨礫を割岩せずにチャンバー内に取り込める構造とした。また、これに伴いφ600mmの巨礫を排出できる外径850mmの大口徑リボン式S/Cを選定した(図-1の①参照)。

しかし、CU02A 工事の施工初期段階において、止水性能が低いリボン式 S/C が原因で土圧保持が困難となり、基準値を超える地盤変状が発生した。このため、土圧を安定保持するために、加泥注入率を絞って泥土の塑性流動性を低下させた結果、カッタートルクが上昇し掘進速度が大幅に低下する問題や、カッタービットの摩耗が異常に進行する問題が発生した。

そこで、泥土の塑性流動性と切羽土圧安定性を両立させるために、S/C 後方に外径600mm、長さ30mの鋼管(以下、「泥土圧送配管」と略す)を設置し、泥土を配管により圧送することで、泥土と配管の摩擦抵抗を増加させ、排土機構の止水性能を強化した(図-1の③参照)。ここで、切羽土圧に対抗するプラグゾーンを形成するために必要な配管の長さLは、圧送負荷計算式 $P = kL + WH$ を用いて次式(1)で表すことができる。

$$L = (P - WH) / k \tag{1}$$

ここで、P: 管理土圧(MPa)

W: 泥土の単位重量(kN/m³)

H: 圧送高さ(m)

k: 管内圧力損失(MPa/m)

この結果、泥土圧送配管の設置により、加泥注入率を上げ、泥土の塑性流動性を高い水準に維持した状態でも土圧保持が可能になった。図-2は、配管の設置前と、設置後の掘進状況を「カッター回転エネルギー」により比較している。

なお、「カッター回転エネルギー」とは、1mの掘進に必要なカッター回転エネルギーのことで、具体的には「カッター回転エネルギー」=「所要カッター電力」×「1m 当たり掘進時間」で表わす。カッター回転エネルギーは、カッタートルクと掘進速度を包括したエネルギー量であり、掘進効率をよりの確に表現できる。

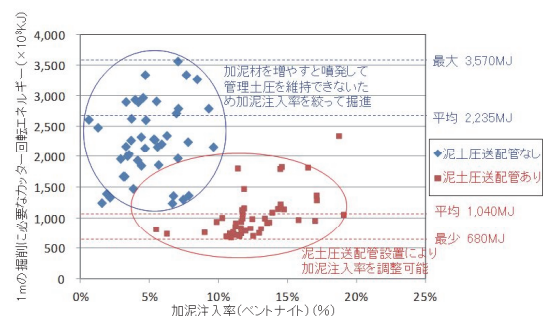


図-2 加泥注入率とカッター回転エネルギーの相関

図-2に示したように、泥土圧送配管の設置前は、噴発を抑えるためにベントナイト加泥注入率を5%程度まで絞り、泥土の塑性流動性を低下させていた。一方、配管の設置後は、注入率を12%程度まで上げ、泥土の塑性流動性を高めることが可能になった。その結果、カッタートルクの低減と掘進速度の向上が実現し、配管の設置前に平均 $2,235 \times 10^3 \text{KJ}$ だったカッター回転エネルギーを1/2以下の $1,040 \times 10^3 \text{KJ}$ にまで低下させることが可能になった。

2.2 排土温度計測による泥土の塑性流動状態管理

泥土圧送配管を設置した後も、泥土の塑性流動状態の悪化に伴いカッタートルクが上昇し、掘進速度が低下する現象が発生した。このため、泥土の塑性流動状態をリアルタイムで定量的に把握し、適切な塑性流動状態を維持する方法を確立することが課題となった。

そこで、塑性流動状態が悪化した際の排土温度が、正常掘進時の排土温度よりも上昇していたことから、排土温度を指標として泥土の塑性流動状態を定量的に把握することが可能であると考えた。

図-3に示すように、掘進速度が設計掘進速度30mm/分以上の正常掘進区間においては、地山温度が23°Cの条件下で、排土温度は約8割の区間で32°C未満に抑えられており、34°C以上に上昇することは殆どなかった。

しかし、図-4に示すように、カッタートルクが上昇し、掘進速度が20mm/分以下に低下した掘進不良区間においては、排土温度は約9割の区間で32°C以上に上昇し、約7割の区間で34°C以上に上昇していた。

また、カッタートルクが上昇し掘進速度が20mm/分以下に低下し、排土温度が34°C以上になった掘進不良区間においては、図-5に示すように、泥土の塑性流動状態悪化に直結する以下4つの事象のいずれかが発生していた。

- i. 裏込注入材のチャンバーへの廻り込み (43%)
- ii. エア注入量不足による気泡材の発砲不良 (34%)
- iii. S/C 回転不足による礫の排出不良 (14%)
- iv. 加泥注入率の不足 (9%)

次に、排土温度とカッタービット摩耗の因果関係を明らかにするために、図-6に示すように、カッター累積回転数を、排土温度32°Cを基準として排土温度別に集計し、このデータを用いて回帰分析を行なう。

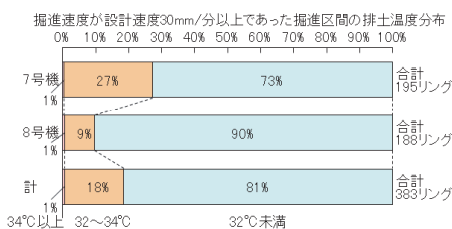


図-3 掘進速度正常時の排土温度分布

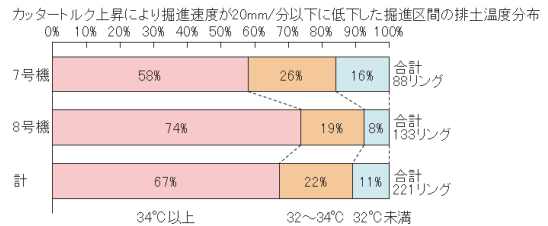


図-4 掘進速度低下時の排土温度分布

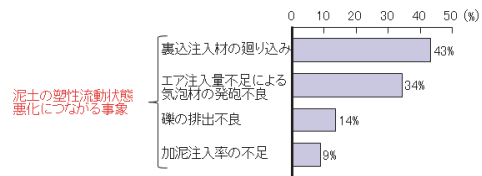


図-5 排土温度が34°C以上になった掘進不良の原因

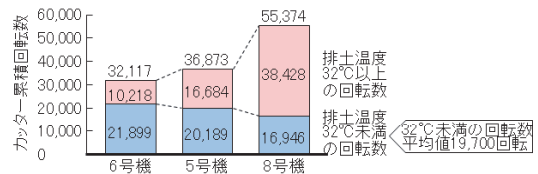


図-6 カッター累積回転数 (排土温度別)

図-7に、カッター累積回転数とカッタービット摩耗量との相関関係を示す。回帰分析より、カッター累積回転数(x)とカッタービット摩耗量(y)の関係は次式(2)の回帰式で表すことができる (回帰分析の決定係数0.99)。

$$y = 0.0005(x - 20,250) \quad (2)$$

回帰分析より、カッター累積回転数とカッタービット摩耗量には高い相関関係があることが確認できる。しかし、図-7に示すように、回帰式(2)のx切片が20,250回転となることから、累積回転数のうち約20,000回転分はカッタービット摩耗に殆ど関与していないことが推定できる。

また、図-6に示したように、掘進が順調であった排土温度32°C未満のカッター累積回転数の平均値は19,700回転であり、上記の20,000回転とはほぼ同数であることから、排土温度32°C未満の掘進においてはカッタービット摩耗が殆ど発生しなかったと推定できる。

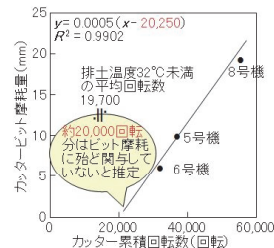


図-7 カッター累積回転数とカッタービット摩耗量の相関

図-8に、排土温度 32℃以上のカッター累積回転数とカッタービット摩耗量との相関関係を示す。回帰分析より、排土温度 32℃以上のカッター累積回転数(x)とカッタービット摩耗量(y)の関係は次式(3)の回帰式で表すことができる(回帰分析の決定係数 0.99)。

$$y = 0.0005x + 1.675 \quad (3)$$

回帰式(3)のy切片が 1.7mm となることから、排土温度が 32℃未満の掘進時には約 2mm しか摩耗しておらず、カッタービット摩耗の殆どが排土温度 32℃以上の掘進時に発生していたと推定できる。

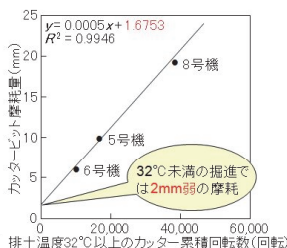


図-8 排土温度 32℃以上のカッター累積回転数とカッタービット摩耗量の相関

以上の解析結果をもとに、カッタービット摩耗量とカッター累積回転数(時系列ではなく排土温度順に並び変えた)の関係を図-9に示す。この図に示すように、排土温度 32℃を境界にしてビット摩耗係数が大きく変化していたと推定できる。つまり、泥土の塑性流動状態が悪化すると、カッタービットの摩耗が促進され、排土温度が 32℃以上に上昇し、逆に泥土の塑性流動状態が良好であればカッタービットの摩耗が大幅に抑制され、排土温度は 32℃未満になっていたと考えられる。このことは、排土温度を計測することで泥土の塑性流動状態を定量的に把握でき、適切な管理基準値を設定できる可能性を示している。

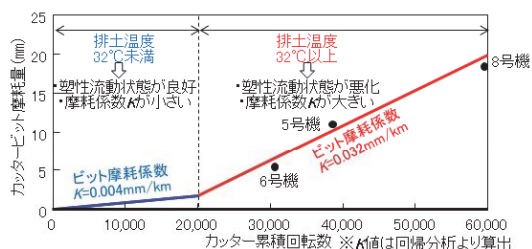


図-9 ビット摩耗係数と排土温度の関係

2.3 塑性流動状態の管理基準の設定

排土温度を指標とする塑性流動状態の管理基準値について分析を行う。正常掘進時において排土温度が上昇する主な原因は、土とカッターヘッドの摩擦熱である。しかし、泥土の塑性流動状態が悪化した際には、切削土砂の取り込み不良により、以下の熱量が土砂に追加供給され、排土温度が上昇すると考えられる(図-10、表-2参照)。

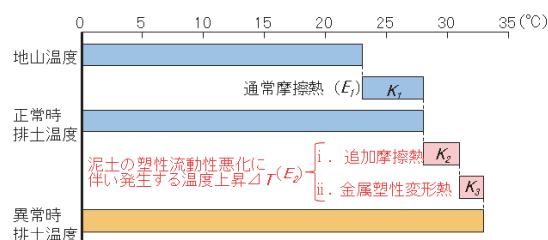


図-10 排土温度上昇要因概念図

表-2 掘進状態による排土温度上昇要因

項目		正常掘進時	異常掘進時
チャンバー土圧	P_0	管理土圧	管理土圧
面板前面土圧	P_f	$P_0 = P_f$	$P_0 < P_f$
P_0 と P_f の差	$P_f - P_0$	0	>0
掘進時摩擦熱	K_1	K_1	K_1
追加摩擦熱	K_2	0	>0
金属塑性変形熱	K_3	小	大

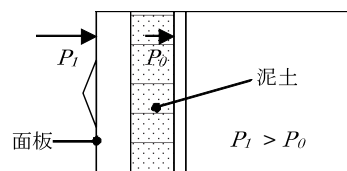


図-11 塑性流動状態悪化時の面板土圧とチャンバー土圧

- i. 面板前面土砂が圧縮され、面板前面土圧 P_f がチャンバー土圧 P_0 より高くなるため増加する摩擦熱
 - ii. 面板前面に滞留した切削土砂によりカッタービットや面板が摩耗するため発生する金属塑性変形熱
- i については、泥土の塑性流動状態が適切に保持されている状態であれば、チャンバー土圧 P_0 =面板前面土圧 P_f の関係にあると考えられるが、泥土の塑性流動状態が悪化すると、面板前面土砂の滞留・圧縮を引き起こし、図-11 に示したように、チャンバー土圧 P_0 <面板前面土圧 P_f の状況が発生する。面板前面土圧がチャンバー土圧より 0.1MPa 以上高くなる事例¹⁾も報告されており、この影響は大きいと考えられる。

ii については、図-12 に示すように、金属摩耗発生時には、摩擦熱の他に金属塑性変形熱と呼ばれる熱が発生することが知られている。また金属摩耗の際に発生するエネルギーの 2/3 が金属のせん断変形に伴う金属塑性変形熱、1/3 が摩擦熱であり、金属塑性変形熱は摩擦熱より大きいとされている²⁾。しかし、切削工学は高速回転の切削現象を扱っており、シールドのような低速回転の切削時に発生する熱量について定量的に評価するためには、実験により発生する熱の割合を把握する必要がある。

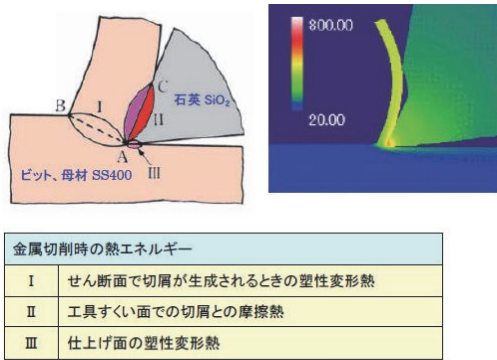


図-12 金属切削時の熱エネルギー
「新版精密工作便覧（精密工学会編集）」より抜粋

カッター面板回転時に発生する摩擦熱による泥土の上昇温度 K_I は熱容量と比熱の式より次式(4)で算出できる。

$$K_I = E_I / (C\gamma V) \quad (4)$$

$$E_I = (1 - \alpha) \int_0^R \{ \mu P (2\pi r)^2 dr \} = \frac{4}{3} (1 - \alpha) \mu \pi^2 R^3 P$$

$$V = \pi R^2 (v/n)$$

ここで、 E_I : カッターが 1 回転する間に発生する摩擦熱(J)

V : カッターが 1 回転する間に取り込まれる土量(m³)

C : 土の比熱(J/kg・K)

γ : 土の密度(kg/m³)

α : 面板開口率

R : カッター半径(m)

μ : 鋼と土の摩擦係数

P : チャンバー土圧(MPa)

v : 掘進速度(m/分)

n : カッター回転数(rpm)

CU02A 工事において通常の摩擦熱による排土温度の上昇 K_I は式(4)より 5K となり、地山温度の実測値が 23℃であることから、この摩擦熱により排土温度は理論上 28℃になる（管理土圧 $P=0.15\text{MPa}$ 、掘進速度 $v=0.025\text{m/分}$ ）。しかし、実際には前述したように、泥土の塑性流動状態が悪化した際に排土温度は 32℃以上に上昇している。このことから、泥土の塑性流動状態が悪化した際には通常の摩擦熱以外のエネルギーが発生し、排土温度を上昇させていたと考えられる。排土の温度を 28℃から 32℃に ΔT ($32\text{℃}-28\text{℃}=4\text{K}$) 上昇させるために必要なエネルギー E_2 は、次式(5)で表すことができる。

$$E_2 = C\gamma V \Delta T \quad (5)$$

この熱エネルギー E_2 が、泥土の塑性流動状態悪化により追加的に土砂に供給される熱量であると考えられる。

式(4)、および式(5)より $E_I=12.0 \times 10^3\text{KJ}$ 、 $E_2=14.6 \times 10^3\text{KJ}$ となり、塑性流動状態が悪化した際に土砂に供給された熱エネルギー(E_I+E_2)は通常の摩擦熱(E_I)の約 2 倍であったことが分かる。

以上のことから、泥土の塑性流動状態の悪化により、カッタートルクが上昇し、カッタービットの摩耗が促進されている際に土砂に供給されている熱量(E_I+E_2)が、通常の摩擦熱(E_I)の 2 倍以上であると仮定すれば、塑性流動状態の悪化を示す基準温度 T_2 は次式(6)で表わすことができる。

$$T_2 = T_0 + \beta E_I / (C\gamma V) \quad (6)$$

β 値=2 (CU02A 工事の実績値)

ここで、 T_0 :地山温度 (℃)

式(6)によると、次節で報告する CF640 工事における基準温度 T_2 は 31.8℃となる（管理土圧 $P=0.09\text{MPa}$ 、設計掘進速度 $v=0.030\text{m/分}$ 、地山温度実測値 $T_0=27.8\text{℃}$ ）。この基準温度は泥土の塑性流動状態が悪化した際に観測された温度とほぼ同じであり、基準値の設定がこのケースにおいては適切であったことが示された。

以上の分析から、排土温度は塑性流動状態の適切な基準を表すことができ、塑性流動状態を評価する指標となり得ることが判明した。ただし、式(6)で今回採用した β 値に関しては、今後掘進データを蓄積することで精度を高めていく必要がある。

2.4 泥土の塑性流動状態管理の適用事例

CF640 工事では、泥土の塑性流動状態が悪化した際に発生する熱量を検知するために、S/C に温度計を設置して排土温度を計測するとともに、図-13 に示すようにカッタービットに温度センサーを設置し、リアルタイムでビット温度を計測できるシステムを導入した。

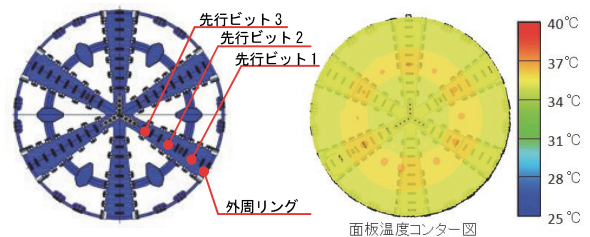


図-13 面板温度監視システム

図-14 は、1 号機の初期掘進データである。縦軸のカッタービット温度は、図-13 に示す先行ビット 1 の温度を表している。

特に 20~30 リングの掘進では泥土の塑性流動状態が非常に良好で、平均掘進速度は 46mm/分、平均カッタートルクは装備トルクの 47% (α 値 10.6 kN/m²)、カッター回転エネルギーは非常に低い水準であり、排土

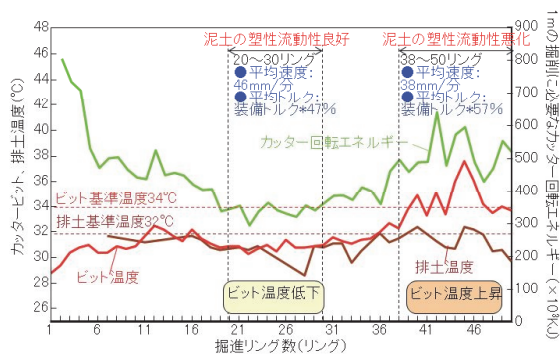


図-14 CF640 工事 1号機初期掘進データ

温度、ビット温度も低い水準で推移していた。しかし、38～50 リングの掘進にかけて、泥土の塑性流動状態が悪化した結果、平均掘進速度が 38mm/分に低下、平均カッタートルクも装備トルクの 57% (α 値 12.8 kN/m²) に上昇、カッター回転エネルギーが上昇し、排土温度、およびビット温度がそれぞれ 32℃、34℃以上に上昇した。また、この際に観測された排土温度 32℃という値は、前節で提示した計算式から算出される理論上の基準温度とおよそ合致していることが確認できた。

さらに、表-3に示すように、排土温度やビット温度は、カッタートルクや掘進速度よりもカッター回転エネルギーとの相関が高いことが分かった。また、同じく表-3に示すように、排土温度やビット温度とカッター回転エネルギーには相関があり、この相関は排土温度よりビット温度の方が高いことも分かった。以上のことから、カッタートルクや掘進速度よりも掘進状態を精度よく評価できるカッター回転エネルギーの変動傾向をビット温度計測により、正確に把握できることが確認できた。

表-3 各種係数の相関係数

相関係数 (左は1号機、 右は2号機)	カッター トルク	カッター 回転数	掘進速度	カッター 回転エネ ルギー
排土温度 (手動計測)	0.06/0.36	0.15/0.40	0.39/0.37	0.30/0.64
ビット温度 (自動計測)	0.59/0.40	0.56/0.67	0.58/0.61	0.79/0.87

また、図-15に示すように、適切な加泥注入率により泥土の塑性流動状態を適切な水準で保持すれば、カッター回転エネルギーを低い水準で抑えることができ、適切なベントナイト加泥注入率は 11%程度であることが分かった (ベントナイト 5%溶液を使用)。

以上のことから、2号機の初期掘進では、ベントナイト加泥注入率を 11%程度で管理した。さらに、図-16に示すように、排土温度が 32℃、ビット温度が 34℃以上になった際には、掘進停止中に攪拌棒から気泡材を注入しながらカッターを回転し、チャンバー内の泥土を攪拌する操作を速やかに実施し、泥土の塑性流動状態を改

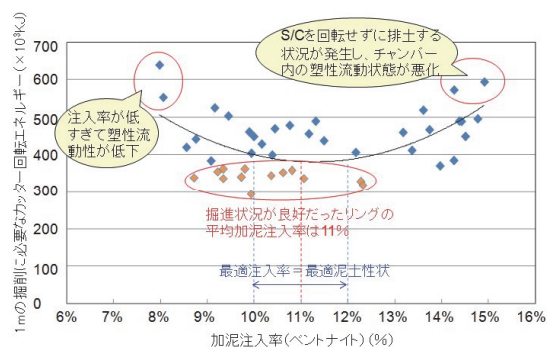


図-15 加泥注入率とカッター回転エネルギーの相関

善する操作を速やかに実施し、泥土の塑性流動状態を改善するという管理基準を設定した。

この管理基準を2号機の初期掘進に適用し、実際に運用した結果を図-17に示す。11 リング目の掘進中に泥土の塑性流動状態が悪化した結果、排土温度が 32℃、ビット温度が 34℃以上に上昇した。このため、管理基準に従い、掘進停止中に気泡材をチャンパー攪拌棒から注入し、チャンパー内泥土を攪拌する操作を継続的に実施した。この結果、泥土の塑性流動状態が適切な水準に戻り、カッター回転エネルギーが大幅に低下し、その後初期掘進が完了するまで排土温度、ビット温度がそれぞれ 32℃、34℃以上に上昇することはなかった。

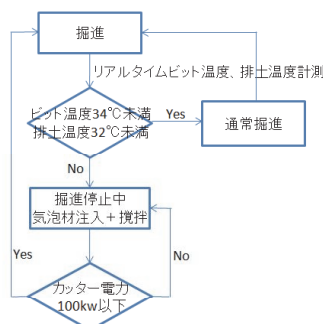


図-16 塑性流動状態リアルタイム管理システムの概要

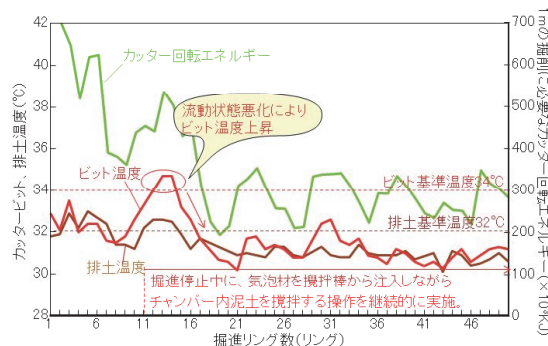


図-17 CF640 工事 2号機 初期掘進データ

このように、排土温度やビット温度をリアルタイムで監視することで、従来の管理手法では把握できなかった

泥土の塑性流動状態の変化をリアルタイムで検知することができるようになった。このため、僅かな塑性流動状態の悪化に対しても、加泥注入率の調整や注入位置の変更等の迅速な対応が可能となり、泥土の塑性流動状態を施工条件に対し最も適切な水準で維持することが可能になった。

また、ビット温度計測により切羽面板の温度変化をコンター図により可視化するシステムを開発し装備した。

図-18は、1号機において泥土の塑性流動状態が悪化した45リング掘進時の面板温度コンター図と、2号機において泥土の塑性流動状態が良好であった45リング掘進時の面板温度コンター図を比較したものである。

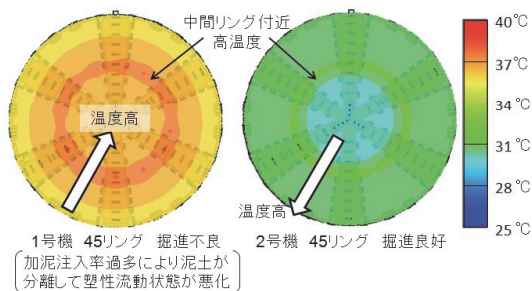


図-18 面板温度コンター図

図-18の2号機のように、泥土の塑性流動状態が良好であれば面板温度は低く、外周にいくほど温度が上昇していることが分かる。一方、図-18の1号機のように、泥土の塑性流動状態が悪化した際には面板温度が上昇し、泥土の塑性流動状態が悪化している内側ほど温度が上昇していることが分かる。また、左右両図より中間リング付近の塑性流動状態が悪化していることも確認できる。

以上のように、ビット温度は設置付近の泥土の塑性流動状態に敏感に反応するため、本技術により切羽細部にわたる塑性流動化状況を可視化することができる。このため、本技術は大断面シールドのようにチャンバーの場所により塑性流動状態にバラつきが出やすいシールド工事において、泥土の塑性流動状態を管理する際に有効である。今後、カッター面板温度センサーと加泥注入システムを連動させて自動制御化すれば、切羽全体の流動性を常に良好に維持でき、大幅な掘進効率の向上に繋がると考えている。

3. 開発した礫地盤対応シールド掘進技術の効果確認

図-1に示した①～④の礫地盤対応シールド掘進技術を適用したCF640工事の2号機の初期掘進データを図-19に示す。特に2号機の掘進においては、排土温度、およびビット温度を指標とした泥土の塑性流動状態監視を強化し、設定した管理基準値により、泥土の塑性流動

状態を適切な水準に維持する管理を強化した。この結果、泥土の塑性流動状態を適切な水準に維持することが可能になり、設計掘進速度30mm/分に対して実績の平均掘進速度は46mm/分、装備カッタートルク5,470kN・m(α値22.5kN/m²)に対して実績トルクは1/2以下の2,511kN・m(α値10.3kN/m²)と砂シルト層並みに低いカッタートルクで施工することができた。

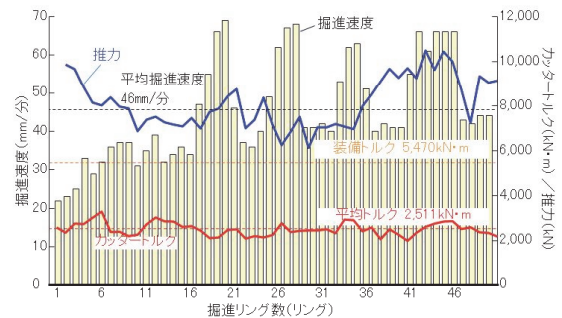


図-19 CF640工事2号機 初期掘進データ

また、表-4、写真-2に215m掘進地点における2号機のカッタービット点検結果、および点検状況を示す。図-20に示す通り、面板最外周に設置したカッタービットの実績平均摩耗量は、設計摩耗量15.8mmに対して1.7mmと、約10%に抑えることができた。実績から計算されるビット摩耗係数は $K=0.015\text{mm/km}$ となり、砂シルト層におけるビット摩耗係数と同水準にまで、カッタービット摩耗を低減できた。また、泥土圧送配管をS/C後方に設置することで、泥土の塑性流動状態を適切な水準に維持し、S/Cからの噴發現象を防ぎ切羽土圧を安定維持することができた。この結果、礫地盤掘削区間における路線上層別沈下計の沈下量は、特記仕様書規定値11mmに対して、最大で3.5mmとなり、礫地盤掘削において懸念される地盤変状を抑制できた。

表-4 カッタービット点検結果

No	摩耗量	No	摩耗量
1	2mm	7	1mm
2	2mm	8	0.5mm
3	2mm	9	1mm
4	1mm	10	1mm
5	2mm	11	1mm
6	1mm	12	1mm
平均摩耗量		1.7mm	

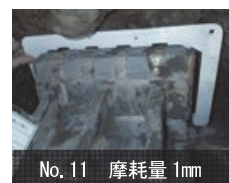


写真-2 ビット点検状況

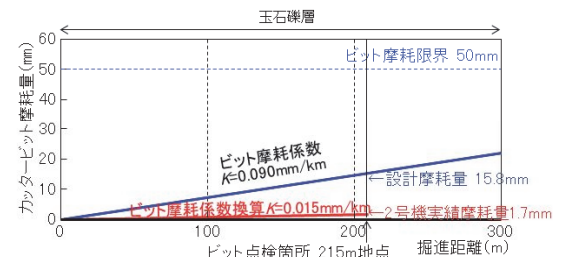


図-20 CF640工事2号機カッタービット摩耗測定結果

開発した礫地盤対応シールド掘進技術を、実施工に適用した結果、分かったことを以下に示す。

- i. 排土温度やビット温度を指標として泥土の塑性流動状態を定量的に把握することが可能
- ii. 泥土の塑性流動状態の管理基準値を設定することが可能
- iii. 排土温度やビット温度による塑性流動状態管理手法を導入することにより、適切な塑性流動状態を維持することが可能であり、適切な塑性流動状態を維持すれば、礫地盤であってもカッタートルクやカッタービット摩耗量を砂シルト地盤の水準に抑えることが可能
- iv. 適切な塑性流動性を維持することで、切羽土圧を安定維持することができ、地盤変状を抑制することが可能

4. あとがき

今回開発した技術を実施工に適用した結果、掘進効率の大幅な改善を実現し、開発技術の有効性を確認することができた。

本技術は、礫率が高い上に巨礫を含む礫地盤という過酷な地質条件において確立した技術である。しかし、泥土の塑性流動状態がカッタートルク、カッタービット摩耗、地盤変状に大きな影響を与えるという点は、どのような礫地盤においても重要な点であり、今回報告した技術は、礫地盤のシールド工事に広く応用可能であり、礫地盤対応シールド工事の生産性改善に大きく寄与できるものと考えている。今後、開発技術の適用事例を増やすことで掘進データを蓄積し、種々のシールド径、土質条件においても技術を適用できるよう、さらなる技術の向上と管理基準の精度向上を図って行きたいと考えている。

最後に、本技術を開発し適用する過程において多くの方々のご支援を頂いた。また、本報告の作成に当たっては多くの方々から有益な示唆を頂いた。この場を借りて心より謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 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」、鹿島出版会、p.2、p.23、pp.37-38、pp.69-71、p.86、2009
- 2) E.G.Thomsen、J.T.Lapsley、R.C.Grassi、日本機械学会誌、「金属切削間工作物によって吸収される変形仕事」、Vol.75、No.4、pp.591-603、1953