

高水圧・急曲線・急勾配シールドトンネルの施工

A shield tunneling work of the high water pressure, a hairpin bend, a steep slope

小松原修義¹・土居 正司²・紺谷 郁夫³・柴崎 貞典⁴・栗山 修⁵

Nobuyoshi Komatsubara and Syouji Doi and Ikuo Kontani and Sadanori Shibasaki
and Osamu Kuriyama

¹東京都下水道局 北部建設事務所工事第一課長 (〒124-0001 東京都葛飾区小菅一丁目2番1号)

²東京都下水道局 北部建設事務所工事第一課 工事第二係長 (〒124-0001 東京都葛飾区小菅一丁目2番1号)

³株奥村組 東京支社 土木第1工事部 業平ポンプ所工事所 所長 (〒130-0001 東京都墨田区吾妻橋3-12)

⁴株奥村組 東京支社 機械部 工務課長 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

⁵株奥村組 東京支社 機械部 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

As for the excavation of a hairpin bend $R=20\text{m}$, security and posture control of thrust anti-power are important. In addition we had to plan stability of face earth pressure to prevent spout and confinement of the earth and sand in high water pressure and steep slope section.

For curve execution, we planned displacement and prevention of meandering by using expansion and reduction segment and a segment with bag as means to overcome problem. For earth pressure in steep slope section and a change of the water pressure, we tried stabilization of face earth pressure by an injection method of addition materials and the control method that use earth pressure meter to be attached to a pump of earth and sand transportation.

Key Words: a hairpin bend, a steep slope, spout and prevention of confinement

1. はじめに

(1) 工事の目的、特徴

東京都では江東内部河川整備計画にもとづき、雨水の放流先を北十間川から隅田川に変更し、業平橋ポンプ所を再構築することで内部河川の水質保全を図る事業を計画している。

本工事はこれらの雨水を直接、隅田川へ放流する放流渠を泥土圧シールド工法で築造するものである。

工事およびシールドマシンの特徴を以下に記す。

- ①高水圧：最大土被り 40m、掘削深度 45m、最大水圧 0.45MPa
- ②急曲線：交角 90° ・ $R=20\text{m}$ ・ $CL=32\text{m}$ 2ヶ所
- ③急勾配：水平距離 $L=170\text{m}$ 、土被り $DP=40\text{m}\sim 6\text{m}$ 、勾配 $i=199.3\%$
- ④シールドマシンの対応
 - ・高水圧 4.0kg/cm^2 以上に対応するため、テールパッキンを3段装備
 - ・急曲線 $R=20\text{m}$ 対応のため、左右 11.1° の中折れ機構を装備
 - ・急曲線 $R=20\text{m}$ 対応のため、スクリュウコンベア首振り機構を装備

- ・急勾配 $R=60\text{m}$ 対応のため、上下 4.0° の中折れ機構を装備
- ・砂礫対応ラインクラッシャーを装備
- ・掘削土砂圧送用ポンプを装備
- ・坑口 NOMST 壁対応 NOMST 先行ビット装備
- ・メタン対応機内防爆仕様とした

(2) 工事概要

本工事の概要を以下に記す。

- ・泥土圧シールド（一次覆工）工法
 - シールド外径： $\phi 5,800\text{mm}$
 - 仕上内径： $\phi 5,000\text{mm}$
 - 管渠延長：471m
- ・セグメント
 - 直線部：ハニカムセグメント
(幅： $1,000\text{mm}$) = 299Ring
 - 縦曲線勾配変化部：CPセグメント
(幅： 500mm) = 48Ring
 - 急曲線部：スチールセグメント
(幅： $1,000\text{mm}, 500\text{mm}, 300\text{mm}$) = 356Ring
- ・残土搬出 14,760 m^3

- ・発進坑口 NOMST 壁
噴射攪拌杭工 (SJM) 6 本
- ・到達坑口 噴射攪拌杭工 (SJM) 14 本
2 重管ストレーナー複相式 1 式
- ・計測工 東武鉄道、源森橋、北十間川護岸
(傾斜計、沈下計)

(3) 平面・縦断線形

平面・縦断線形を図-1 および図-2 に示す。

発進直後に $R_1=60\text{m}$ の曲線部施工を行い、次に源森橋直下を通過する前後で R_2 および $R_3=20\text{m}$ の急曲線部を 2 箇所施工する (土被=40m)。縦断曲線 $R_4=60\text{m}$ の施工を経て +199.3‰ の急勾配区間に入り、170m 掘進後に縦断曲線 $R_5=60\text{m}$ で +5‰ の勾配に戻して (土被り 6m) 放流吐口に到達する (図-2 参照)。

特に源森橋の直下は $1\text{D}=6110\text{mm}$ の離隔で基礎杭を通過し、左曲線 $R_3=20\text{m}$ を通過後に東武線と近接・並行して施工しなければならなかった。各企業

者 (東京都建設局、東武鉄道) の許容値を超えれば、工事中止になるため、施工管理のうえで源森橋と東武線橋脚の沈下計測が重要であった。

(4) 土質概要

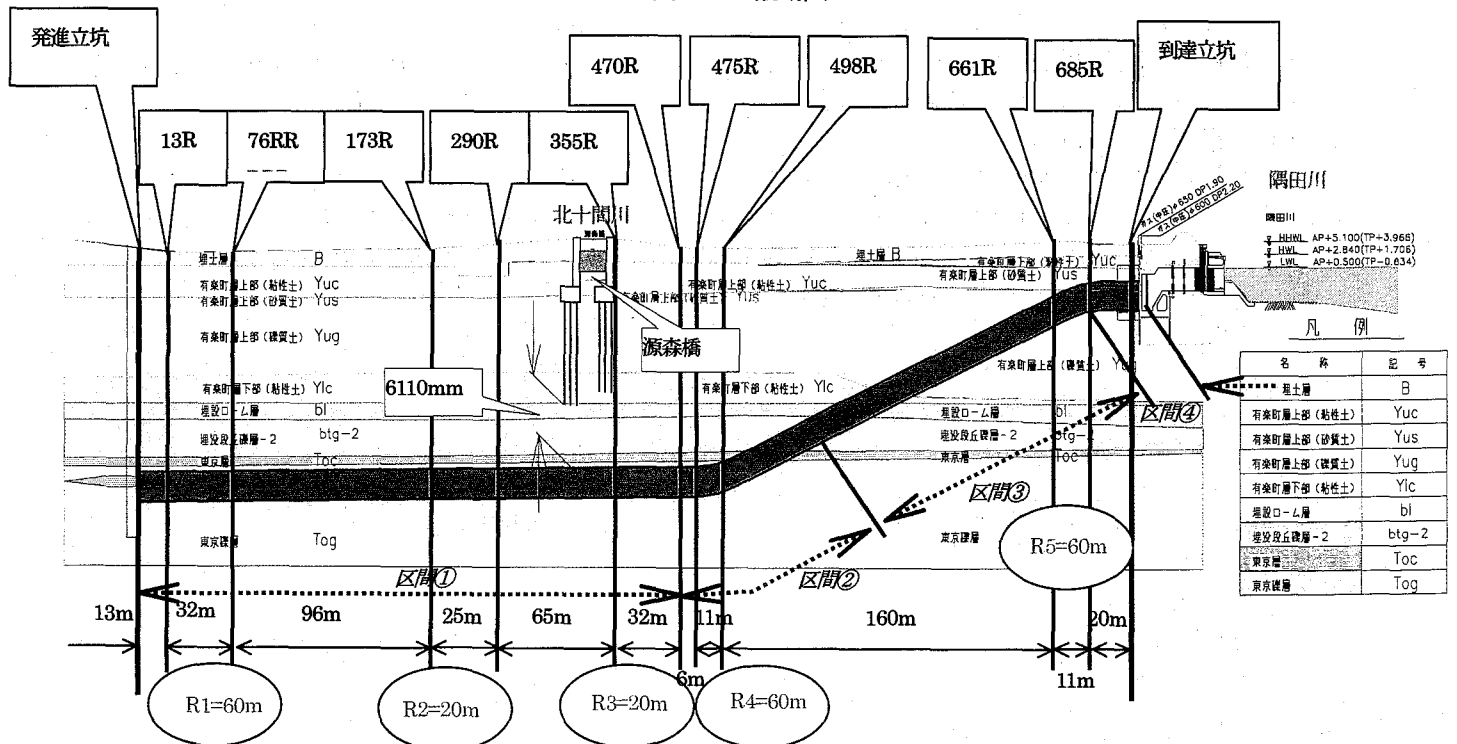
図-2 縦断図に示すとおり、発進部から急勾配部手前までの土被り 40m の大深度区間は洪積の締った砂礫 (Tog) が主体で、部分的にレンズ状の洪積硬質粘土 (Toc) を含んでいる (区間①)

急勾配区間に入ってから層厚が約 2m の洪積硬質粘土 (Toc) が現れ、洪積硬質粘土が主体になった時には、切羽上部に沖積砂礫 (btg)、下部に洪積砂礫 (Tog) の土質構成となり、掘進とともに切羽の土質性状が複雑になる (区間②)。その後はローム (Lm) と沖積粘性 (Ylc) を挟んで、沖積砂礫 (btg)・礫質土 (Yug) の 2 種類の沖積砂礫層となり、特に沖積粘性土 (Ylc) と礫質土 (Yug) の層境付近に崩落性の高い箇所が存在した (区間③)。

図-1 平面図



図-2 縦断図



到達前の水平区間に入ると、沖積砂質土（Yus）・粘性土（Yuc）・礫質土（Yug）の互層になるが、大部分が地盤改良区間であることから比較的地盤が安定していた（区間④）。

なお、初期掘進開始当初、地下水に塩分（≒3000ppm）の存在が判明した。当初計画では、添加材に高分子（アニオン系）を予定し使用していたが、添加効果が得られなかったため、ベントナイト+珪酸の鉱物系に変更した。

2. 急勾配トンネルの複雑な地盤への対応

（1）問題点の整理

本工事は、当初から以下の課題をクリアする必要があった。

ほぼ全線に亘り砂礫層であった（図-2参照）。

掘削土砂は、圧送ポンプによって排出したが、立坑深さが45m・配管高さが55mもある（高水圧）ため、配管内の閉塞を回避することが重要であった。同時に切羽の安定を図る必要もあり、加泥材の配合・注入量（率）・注入ヶ所をどうするかが当初からの課題となっていた。また、図-1・図-2を見てわかるように、平面・縦断的に圧送ルートと土質および切羽土圧が変化し（急勾配）、土砂の「噴発」と「閉塞」防止が懸念事項であった。

また、急曲線R=20mが2ヶ所存在し（図-1参照）、カーブ通過の際、シールドマシンのテールと標準スチールセグメントが、干渉することが判明した。

したがって、推進反力の確保という観点から、マシン背後のセグメントの変位・蛇行が懸念されていた。

た。

（2）「噴発」と「閉塞」防止対策

a) 添加材注入方法による対策

土砂の圧送をスムーズにするためには、土砂が分離しないように加泥注入量を増やしていけばよい。しかし、加泥注入量を増加すると、高水圧であるため、スクリュウコンベアのフライトと土砂の摩擦力が低下し、「プラグ効果」が損なわれ、排出ゲートで「噴発」し易く、切羽土圧が不安定になるという矛盾が生じた。

勿論、加泥注入量が低下すればスクリュウコンベア以下の配管ルートで「閉塞」し易くなる。

本工事では、加泥注入を「切羽の安定」と「圧送に最適な土砂状態に保持」といった、2元的な管理方法を採用することによって、切羽安定に最適な加泥注入率の模索とサンプリングによる目視・触感・スランプ計測で得られた結果から、圧送に適した土砂性状とするための補足注入率を毎リング決定した。具体的には、当該工事の砂礫では、通常の施工と比較して若干高目の結果であるが、30～40%の注入率で切羽土圧が安定し、スクリュウコンベア部分で「噴発」、「閉塞」がなくなることが判った。

一方、土砂の圧送については、50%以下になると擬似閉塞が起り、継続すると配管内、特に立坑直下部で閉塞した。したがって、上記問題を解決する方法として、図-3に示すように「切羽」と「土砂圧送ライン」それぞれの系統で注入することによって切羽土圧の安定と「噴発」、「閉塞」対策とした。

図-3 添加材（加泥）注入概要模式図

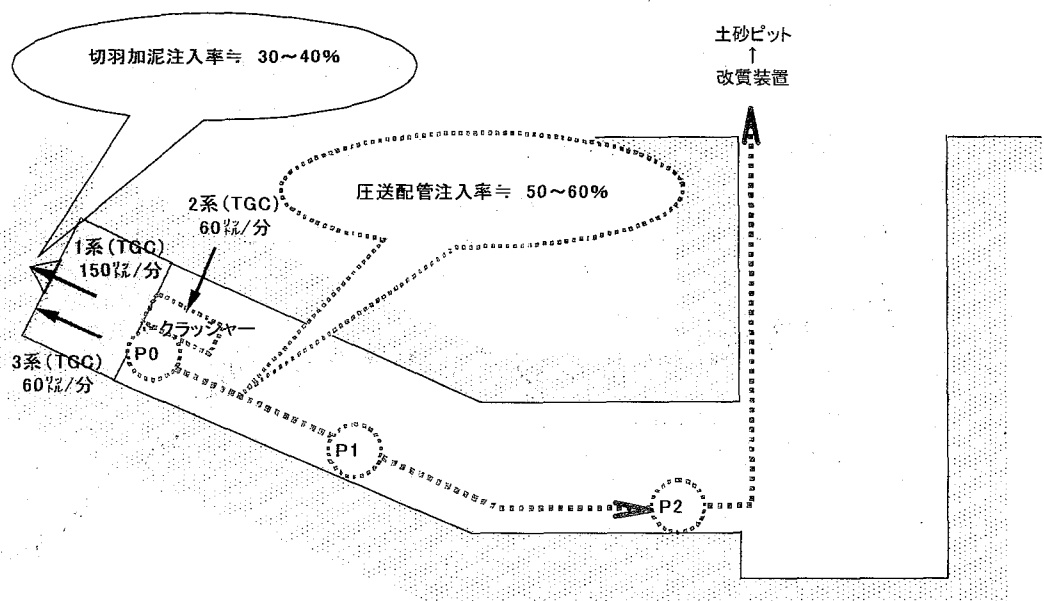
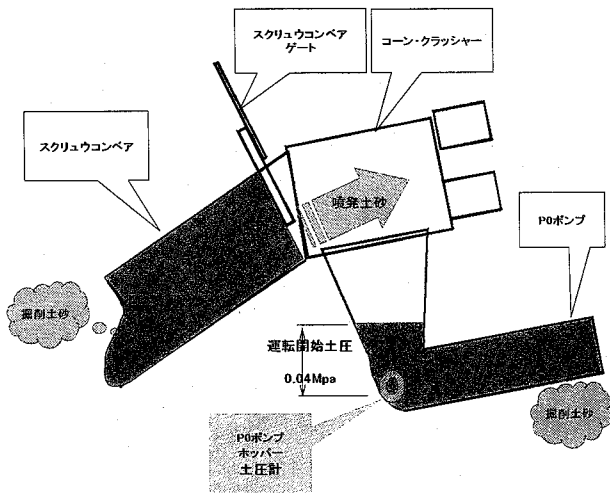


図-4 圧送ポンプ<P0>ホッパー土圧制御モデル図

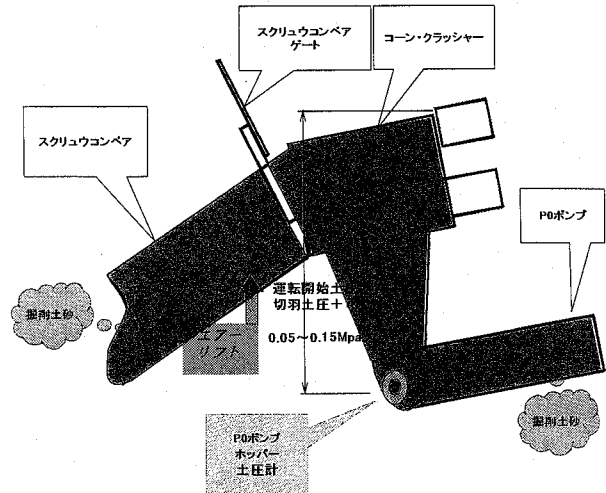
① 当初 $H=0.04\text{Mpa}$

SC ゲート開放 → 「噴発」



② 変更 $H=\text{切羽土圧} + \alpha$ $0.05\sim 0.15\text{Mpa}$

SC ゲート開放 → 噴発なし



急勾配区間では、切羽土圧がリング毎に変化するため、圧送ポンプのホッパー部分の土圧計に着目し、噴発土砂のブレーキング効果を狙って調圧装置として活用した。図-4に概要を示す。

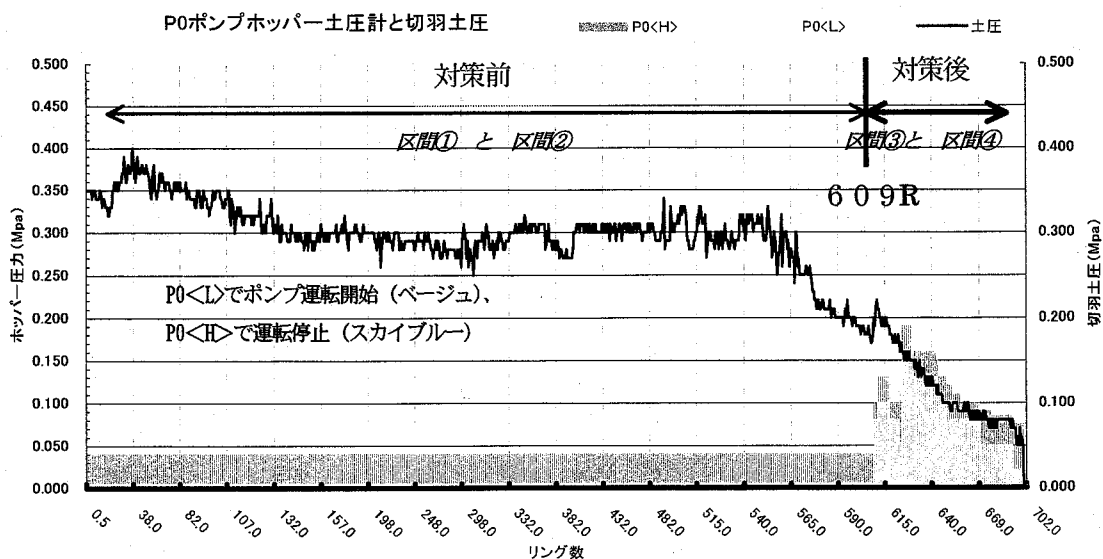
今回、圧送ポンプ<P0>ホッパー土圧の制御範囲調整による「噴発防止」対策は、「切羽土圧+ α 」で一定の成果があったものの、土質が急激に変化する場合や土水圧の変化によって頻繁に制御値を調整する必要があった。特に、土被りが浅くなり、土質変化が激しくなるにつれて顕著になった。

また、スクリーコンベア回転数、ゲート開度などリング掘進途中での大幅な調整が必要で、マシン操作も重要なファクターであり、掘進途中・完了時点のサンプリングによる目視・触感評価と注入率や

マシン操作へのフィードバックが不可欠・重要な作業となった。以上の作業を確実に実施することで、土砂圧送も安定したと考えている。

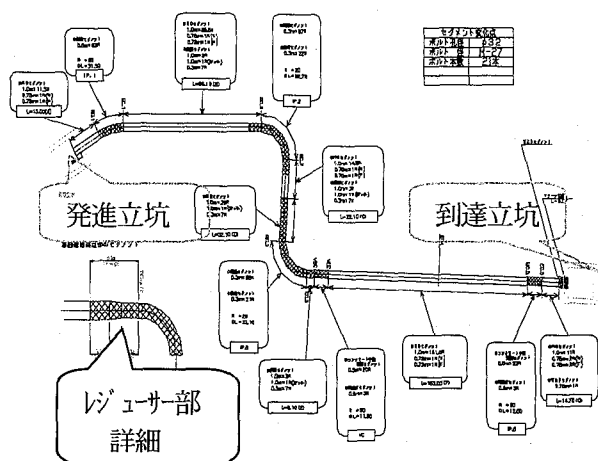
特に、急勾配に入った当初は土質の急激な変化に戸惑い、「噴発」を意識しすぎて、添加材注入量が適量より低下させると、スクリーコンベア部分で頻繁に「閉塞」させてしてしまうことが多かったものの、コンプレッサーを常設し、ゲート部2B 注入孔よりのエアリフトを併用することで「閉塞」を回避することが可能になり、土砂性状の適範囲が広がり、後半は比較的安定した切羽土圧になった(表-1 参照)。

表-1 P0 ポンプホッパー土圧計による制御グラフ



(3) 平面・縦断 急曲線対応

図-5 セグメント割付図



セグメントの割付を図-5に示す。直線部は二次覆工省略型のハニカムセグメント、平面曲線部はスチールセグメント、縦断曲線部はCPセグメント (Concrete Packed Steel Segment : 工場で鋼殻内にコンクリートを中詰したセグメント) である。

本工事では、平面・縦断線形が短区間で変化することから、16種類のセグメントを使用した。ハニカム (RC) セグメントが4種類 (外径φ5650 標準1000、坑口接続、切羽接続、テーパ△28)、スチールセグメントが一般部4種類 (外径φ5650 標準1000、標準500、テーパ△66、テーパ△20)、縮径部セグメントが3種類 (外径φ5580 標準300、袋付300、テーパ△106)、CPセグメントが3種類 (外径φ5650 標準500、袋付500、テーパ△66)、縮径部の開始時と終了時に使用するレジャー・セグメント、および到達部の可撓セグメントである。

図-6 レジャーセグメントのテール通過状況

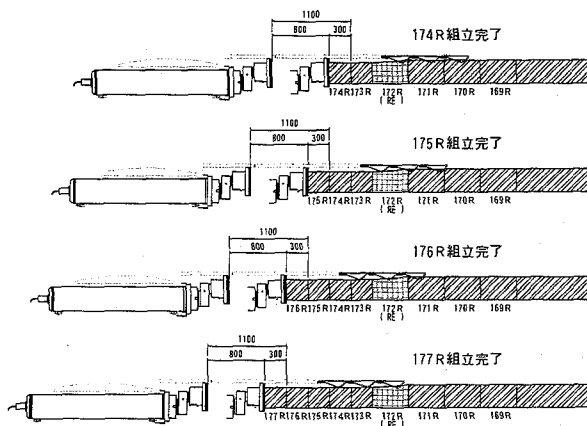
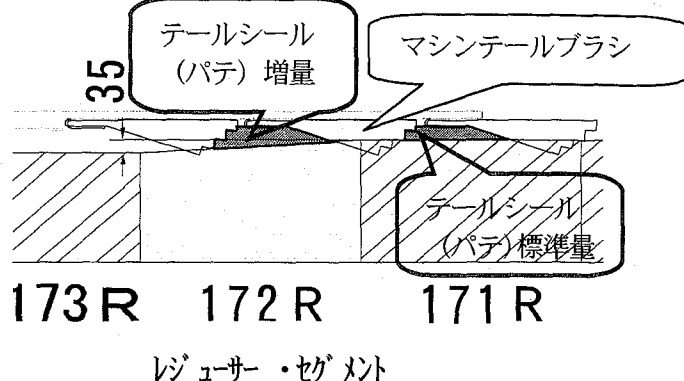


図-7 レジャーセグメントのテール部詳細

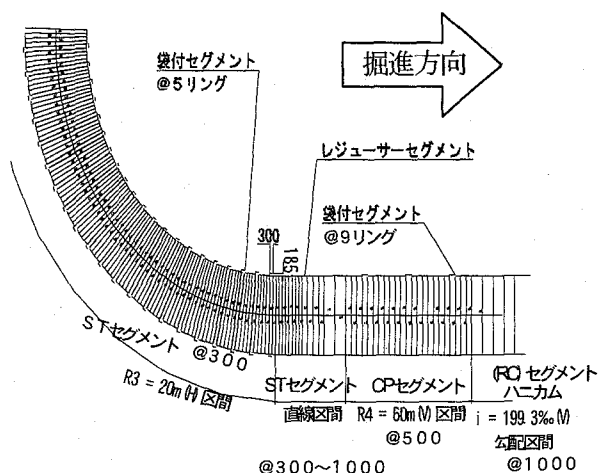


レジャー・セグメント (幅 $W=500\text{mm}$ 、レジャー・セグメント外径 $5,580\sim 5,650\text{mm}$) は、シールド機のテールとセグメントの競りを防ぐため、標準セグメント (外径 $5,650\text{mm}$) に対して外径を 70mm ($35\text{mm}\times 2$) ラッパ状に縮小・拡大し使用した。また、セグメント縮径時には、テールシール内の止水グリスが不足することから、止水グリス充填用ポンプを増設し、テールシール内への止水グリス注入が掘進サイクルに対して遅れないように対応した。(図-6および図-7参照)。

$R=20\text{m}$ の急曲線区間 (スチールセグメント外径 5580mm 、セグメント幅 300mm) および $R=60\text{m}$ の縦断急曲線区間 (CPセグメント外径 5650mm 、セグメント幅 500mm) において袋付セグメントを使用した。 $R=20\text{m}$ 部は5Ringに1箇所、 $R=60\text{m}$ 部では9Ringに1箇所、セグメント背面に設置したドーナツ状の袋に裏込材を充填し膨張させることで、テールボイドを無くし、即時に反力を持たせて急曲線部の施工を行った。掘進中および掘進後、セグメントの変位・蛇行等は見られず、施工精度に問題なかったことから、袋付セグメントの有効性が確認できたと考えている。

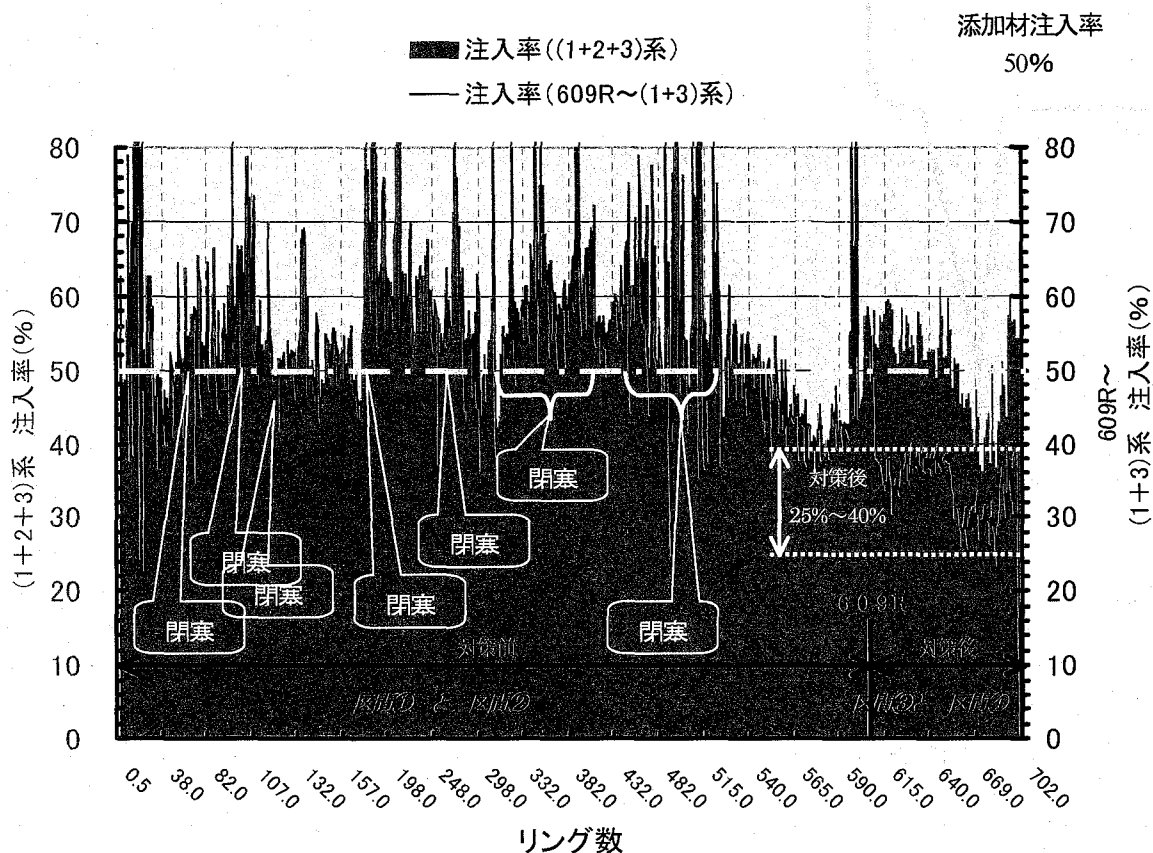
袋付セグメントの使用状況を図-8に示す。

図-8 袋付セグメント使用状況



3. 課題の克服と検証

表-2 切羽と圧送管内添加材注入率比較



(1) 「噴発」と「閉塞」の解消

発進から急勾配までの高水圧下の施工では（区間①と区間②）、スクリーコンベア排土口の噴発による土圧制御の困難さ、滞水砂礫層への加泥材の配合・調整の困難さ、切羽での攪拌不足によるスクリーコンベアの度重なる「噴発」と「閉塞」が問題となった。また、急勾配区間では、急激な土質の変化と切羽土圧の不安定さから、添加材注入量の適合しないケースが頻発し、切羽での掘削土砂混練不足による圧送管内「閉塞」が発生した。

結果的に、スムーズな土砂圧送に必要な加泥注入率は、概ね50～60%、切羽土圧の安定については25～40%という結果になった（表-2参照）。ただし、「噴発防止」については、土質・土水圧、スクリーコンベア特性など、不確定な要素と予測しがたい側面があったため、掘削土砂のサンプリングと目視・感触による判断が重要であったと確信している。

また、スクリーコンベアの閉塞解除方法としては、前述した、閉塞ヶ所に圧縮空気を送り込み、閉塞した圧密土砂をエアーで排出させる方法が最も効果的であった。スクリーコンベアを正転させながら瞬間的に圧縮空気（7kg/cm²）を送り込むことで、

切羽土圧の上昇も抑制できたことから、今後、同様な場面への応用と適用が期待できると考えている。

圧送ポンプ＜P0＞ホッパー土圧の制御範囲調整による切羽土圧の安定化は、「噴発」に対しての効果が絶大であった。今後は、切羽前面の土水圧を予測し、自動調整・修正可能なシステム化を図ることで、応用範囲が広がるものと考えている。

(2) 急曲線部での成果

シールドマシンに装備した中折れ機構など、性能として特に問題は発生しなかった。

また、レジャーサー・セグメントの通過時については、前述したとおり、テールシールポンプの増設（3.0ℓ/分 → 3.0ℓ/分+5.5ℓ/分）を行ったことで、マシンテールからの地下水浸入はなかった。掘進サイクルも低下することなく通過することが出来た。

袋付セグメントの効果については、数値的に評価することが困難であるため、掘進時の背面側セグメントの蛇行や変位の計測と通過後出来上がったトンネルの精度から評価した。結果的に、直線部分と同等以上の仕上がりであったことから、アンカー効果

は、期待していいものとする。

写真-1 シールドマシン

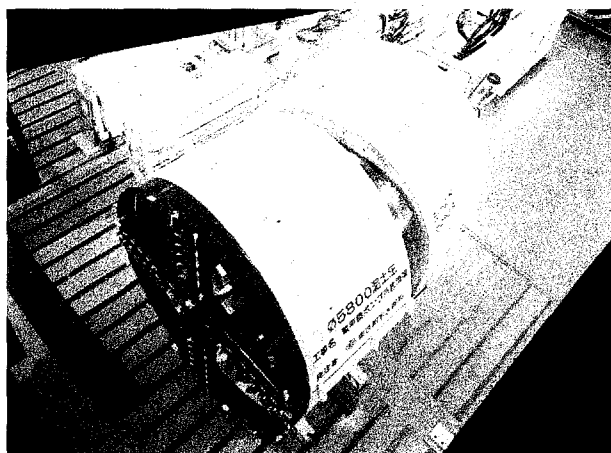


写真-2 坑内 (R3→R4)

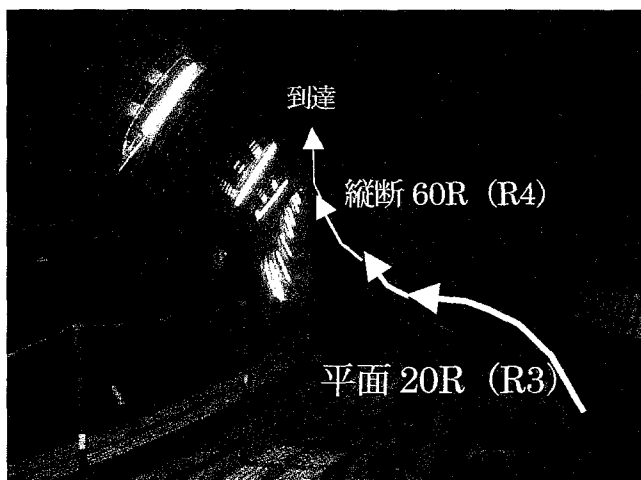


写真-1 は、シールドマシンの工場仮組立時の平面中折れ使用時のものである (4.0°)。

写真-2 は、20R (R3) から60R (R4) 到達側を見たものである。

4. おわりに

本文では紹介できなかったが、当該工事では以下の課題にも対応した。

源森橋からの急勾配区間 (区間②～区間③) では、東武線と近接して並行に掘進することから、取込土砂量と沈下計測の監視が重要になった。

取込土砂量の管理については、以下の計測値を偏差処理 (過去20リング分、2σを上・下限) した上で、リアルタイムでオペレータ室の監視モニターに表示し、取込み土砂量を調整して掘進した。

①P0 ポンピングストローク変換土砂量

②P1 ポンピングストローク変換土砂量

③P2 ポンピングストローク変換土砂量

④電磁流量計

⑤ドップラー流量計

⑥土砂ピット実測土砂量

取込土砂量の管理では、閉塞等のトラブルを除くと、当初計画した誤差5%以内を満足できなかったが、それぞれの流量計測で10%以内の管理ができた。

また、沈下計測では重要構造物に対する沈下量は10mm以下になり、特に源森橋通過に伴う沈下は数ミリ以内に収まった。

高水圧・急曲線・急勾配に加え、可燃性ガス、既設構造物 (源森橋直下通過) および在来営業鉄道 (東武線) との近接施工等、数多くの厳しい施工条件下であったが、平成18年5月に無事到達することができた。