

2. 4mの土被りで国道を横断したボックス推進工事

Construction of Box Jacking under the National Road with 2.4m Overburden

須長 重雄*1 川本 英人*1 四倉 悠介*1
 Shigeo Sunaga Hideto Kawamoto Yusuke Yotsukura
 樋口 昌典*2 桶川 宏司*2
 Masanori Higuchi Koji Okegawa

要旨

本工事は、辻堂海岸(砂浜)に設けた発進基地から藤沢市辻堂浄化センター内までの154m区間においてボックス推進工法により放流管を築造するものである。比較的緩い砂地盤を対象として、サイクリングロード、国道134号、および飛砂防備保安林の直下を土被り1.6~4.2mの小土被りでボックスを推進した。本報告では、国内で3例目となる推進延長100m超のボックス推進工法について報告する。

キーワード：ボックス推進 小土被り 長方形断面

1. はじめに

藤沢市南部処理区では、汚水と雨水を同じ管渠で流す合流式下水道（一部分流式）を採用しており、雨天時には処理を不要とする雨水分までもが辻堂浄化センターに流入し、処理量が増大している。

辻堂南部放流管は、合流式下水道改善事業の一環として築造するものであり、一定量を超えて流入した雨天時の下水のうち雨水分を海へ放流して、辻堂浄化センターに流入する下水量の適正化を図ることを目的としている。また、他の施設と一体的に機能することにより、公共用水域の水質保全を図るものである（図1）。



図1 工事位置

2. 工事概要

辻堂南部放流管整備計画は、辻堂浄化センター北東の市道交差点から辻堂海岸までの約480mの区間に、ボックスカルバート構造の放流管を築造するものである（写真1）。放流管は土被りを確保するため、内空幅4.1m、高さ1.5mの扁平型の断面を採用しているが、自然流下の管渠で、最下流の海岸部の高さが決まっているため、比較的小土被りとなっている。

小土被りの場合、経済性から開削方法が採用されることが多いが、本工事箇所は、飛砂防備保安林区域、国道134号の道路区域、海岸保全区域などの複数の区域に跨っているため、各施設管理者との協議等により、安全性および施工性の観点から開削工法は困難となった。

このため、全体整備計画のうち辻堂浄化センターと辻堂海岸を南北に結ぶ154m区間については、密閉型ボックス推進による非開削工法で管路を築造する計画となった。

表1に工事概要、図2に放流管構造図を示す。

表1 工事概要

工事名	辻堂南部放流管築造工事
発注者	藤沢市
施工者	鴻池組・日総ブランテック共同企業体
工期	2018(平成30)年12月3日~2020(令和2)年4月30日
工事場所	神奈川県藤沢市辻堂西海岸三丁目地内
工事内容	放流管路 延長L=153.6m ・管渠工：密閉型ボックス推進（泥土圧式） 掘削外寸； $\Phi 4,750\text{mm} \times \text{H}2,230\text{mm}$ 仕上り外寸； $\Phi 4,100\text{mm} \times \text{H}1,500\text{mm}$ 推進延長；146.16m ・人孔工：2箇所 ・仮設工：一式 ・地盤改良工：一式 ・付帯工：一式

*1 東京本店 土木部

*2 技術本部 土木技術部

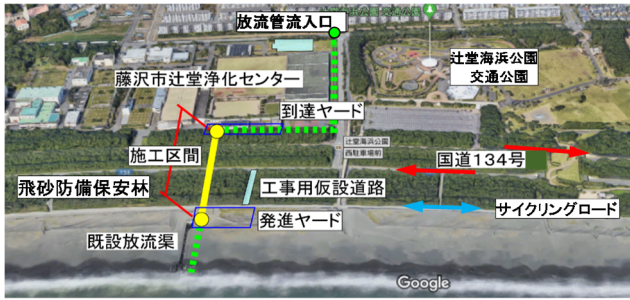


写真1 路線概要

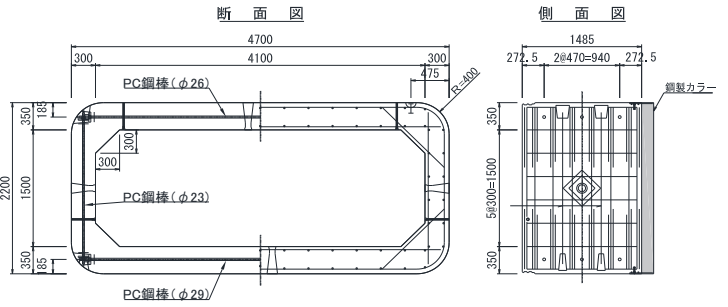


図2 放流管構造図

辻堂浄化センター内では推進工事用の仮設スペースが確保できないことから、辻堂海岸内に鋼矢板を打設し、その内側を盛土することにより 1,400m²の作業ヤードを造成して発進基地とした。なお、作業ヤードへは国道下り線からの工事用仮設道路（有効幅員 4.2m、長さ 54.4m）を設け、両側には高さ 5m の防砂ネットを設置した。図3に推進施工時の発進基地平面図、図4にボックス推進工法のシステムの概要を示す。

3. 長方形断面のボックス推進工法

3.1 施工上の主な課題

図5に推進路線の平面図、図6に縦断面図をそれぞれ示す。

推進路線の土被りは最小 1.56m（保安林の横断部）、最大 4.17m であり、国道 134 号横断部は下り線 3.11m、上り線では 2.38m と、全線にわたって土被りが小さい条件となっている。国道 134 号は交通量が多く（32,000 台/日）、重要な幹線道路となっており、国道横断部においては推進工事に起因した路面変状などのトラブルを絶対に発生させないことが課題であった。

また、推進対象地盤は比較的緩い砂層と考えられたが、地下水位や均等係数、粒度分布など、推進管理を計画する上で詳細な土質情報が不足していた。

さらに、保安林のクロマツの根系の深さが 1.6m 程度と想定されていたため、掘進断面まで樹木の根が存在する可能性があり、推進機に絡むことによる樹木の損傷、カッターの損傷やチャンパー内閉塞による掘進停止などのトラブル発生懸念があった。

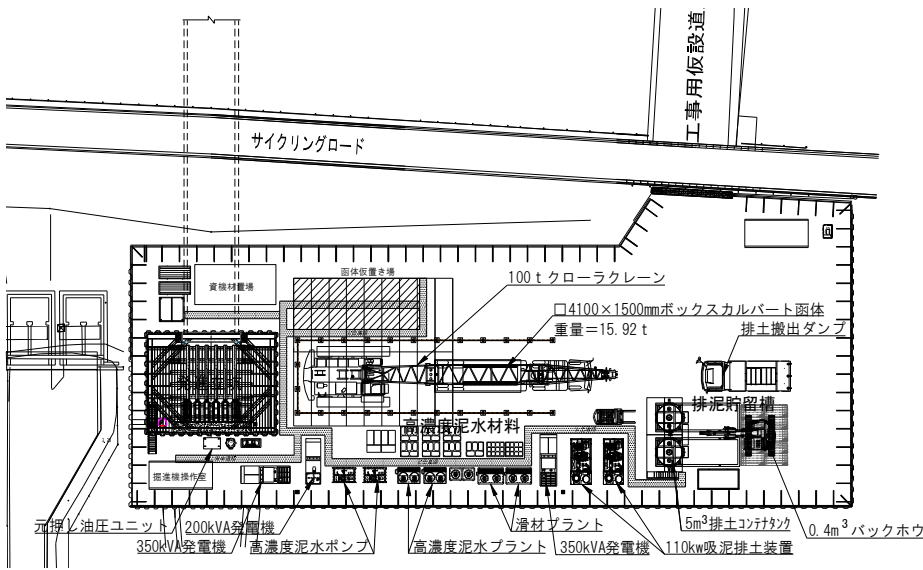


図3 発進基地平面図

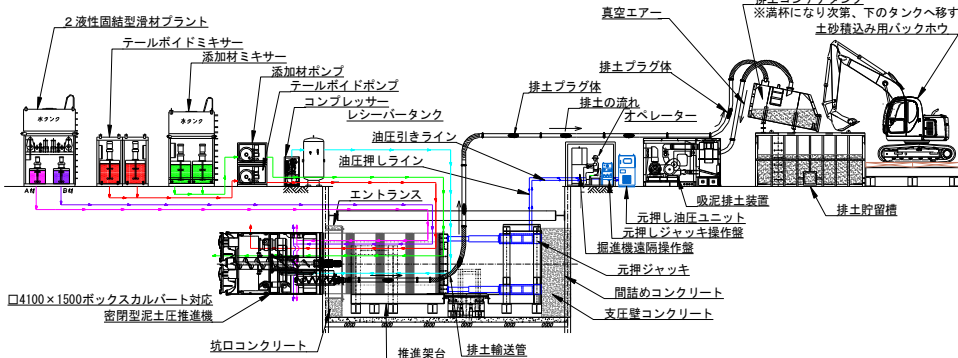


図4 ボックス推進工法システムの概要

3.2 推進区間の地盤調査

保安林内ではボーリング調査が許可されないため、発進・到達立坑の両地点で土質調査を行い、その結果を推進管理へ反映した。推進区間の地盤は、海浜堆積物による細砂層（N 値 12~23）で、均等係数は 5 程度、砂分が 87.1~92.7% と卓越した粒度組成であった。

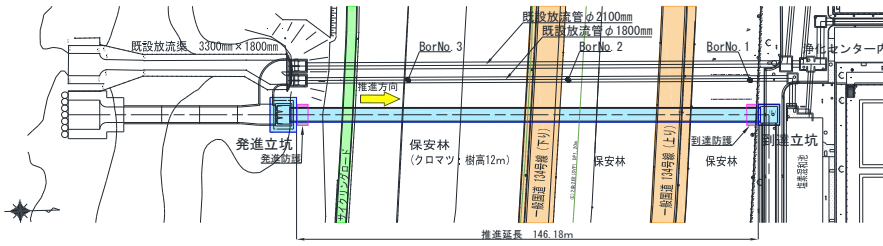


図5 推進路線平面図

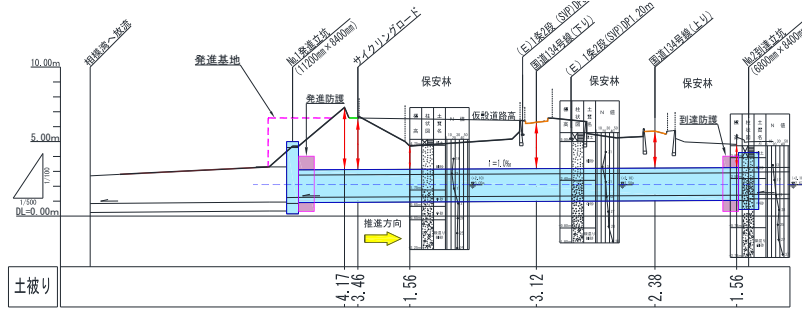


図6 推進路線縦断面図

また、細～中砂分が多く、「細粒分まじり砂」に分類され、透水係数(k)は、 1×10^{-4} cm/sec と「中位」の透水性であった。

3.3 カッターヘッドの改良

ボックス推進工法は泥土圧式を基本としており、掘進機のチャンバー内に泥土を満たして、元押しジャッキの推進力により泥土圧を発生させ、この泥土圧を切羽に作用する土圧および水圧に見合う圧力に保持することにより切羽の安定を図る工法である。また、掘削方法は、カッター部を自転公転式の多軸構造とすることにより隅角部も同時に掘削できる機構となっている。これは、カッター全体が公転で1回転する際に、回転軸から半径が異なるビットを装着した楕円形のカッター3軸が自転し、矩形断面の掘削軌道となるためである(図7)。

しかし、今回の掘削断面は、高さ2.23mに対して横幅がその2倍以上の4.75mとなっており、推進機中央部に幅290mmの未掘削部分が発生する(図8)。

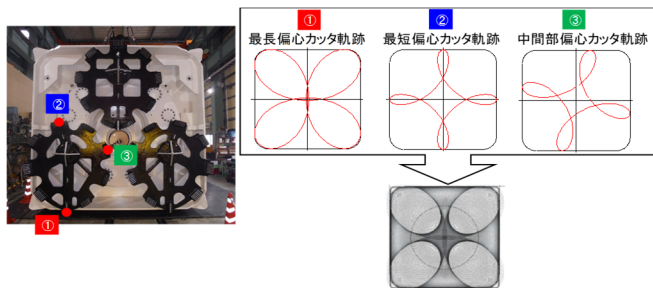


図7 ボックス推進機の自転公転式カッタービットの軌跡

この未掘削部の対処については後述する(4.4.1)。

また、カッターヘッドの根がらみ防止のため、刃先が円錐状の丸型先行ビットを追加配置した(写真2)。

3.4 出来形精度の確保

長方形断面のため、推進機の自沈やローリング(トンネルの前後軸に対して左右に回転または傾斜)の発生によって管渠の出来形精度が低下しやすい。

そこで、推進機の自重による前下がり現象や左右の切削抵抗が異なった場合の推進機のふらつきを防止するため、推進機と函体(ボックスカルバート)を緊結した(写真3)。

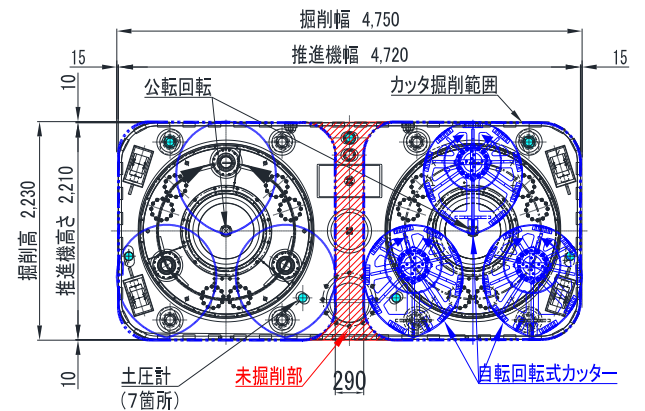


図8 ボックス推進機のカッター正面図



写真2 推進機全景と楕円形カッター

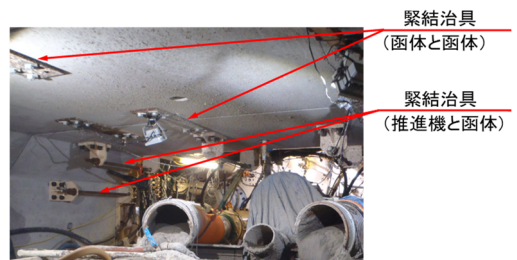


写真3 推進機と函体の緊結状況

また、推進機のローリングは出来形を大きく損なうため、推進機のフード部をローリング修正ジャッキにより左右に回転できる構造とした(図9)。なお、推進機の方

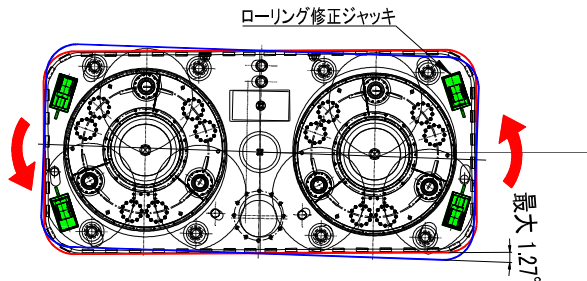


図9 ローリングの修正方法

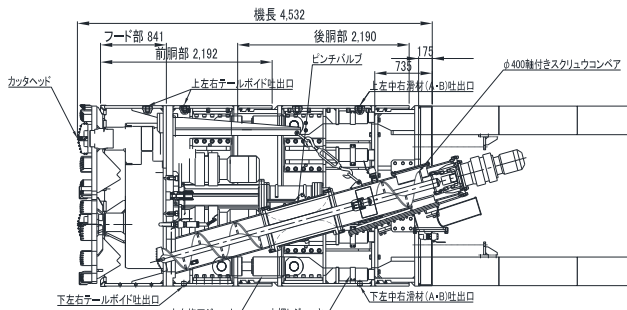


図10 推進機の構造

3.5 切羽の安定と排土管理

排泥装置には、φ400mmの軸付きスクリュウコンベアを装備した。この装置により、スクリュウの回転数を制御して排土量を調節し、切羽土圧を保持できる。さらに、コンベアの中央部にはピンチバルブを装備し、噴発等の異常掘進時にスクリュウ内部を密閉して湧水や土砂の噴発を遮断できる機構とした(図10)。

推進中は中央管理室のオペレーターが、チャンバー内に設置した図11に示す7箇所の土圧計を確認しながら掘進した(写真4)。

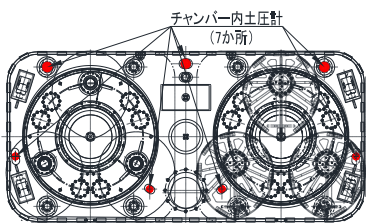


図11 チャンバー内の土圧計位置

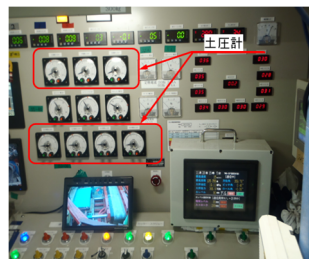


写真4 推進機の運転操作盤

3.6 推力低減対策

ボックス推進では、円形の場合と異なり地盤のアーチ効果が期待できず、地山の変位による締め付けにより周面摩

擦力が大きくなる。休工日明けの作業開始時には、函体外周面の地切りのために平日掘進時の1.5~2.0倍の推力が必要となる場合もある。そのため、推力の検討では周面摩擦力を円形の場合の2倍に設定した。

また、地山崩壊に起因する推進函体の締め付け(土圧の増大)によるテールボイド層の減少や劣化、集中荷重や過大な推力による函体の損傷、さらには推進不能トラブルが懸念された。そこで、テールボイドを長期間保護し周面摩擦力を低減させるため、2液性の固結型滑材(カントールSS)を注入した。滑材吐出口は、推進機後胴部の上下左右に4個設置した。さらに、推進機後胴部には元押し推力の低減と地切り対策のため、中押しジャッキ(8, 144kN=509kN×16本、ストローク200mm)を装備した(図10)。

3.7 地表面沈下対策

小土盛りで横断する国道134号への影響を最小限にするため、国道横断前にトライアル施工区間を設け、地表面沈下量の自動計測を実施し、切羽圧力の管理上下限值、排土量の過不足、加泥材の注入量、滑材注入量などの掘進管理値の妥当性を検証した。

地表面計測は、推進開始に先立ち、発進直後(砂浜内)の15m区間と国道横断手前の35m区間に連通管式沈下計を設置して実施した(図12)。

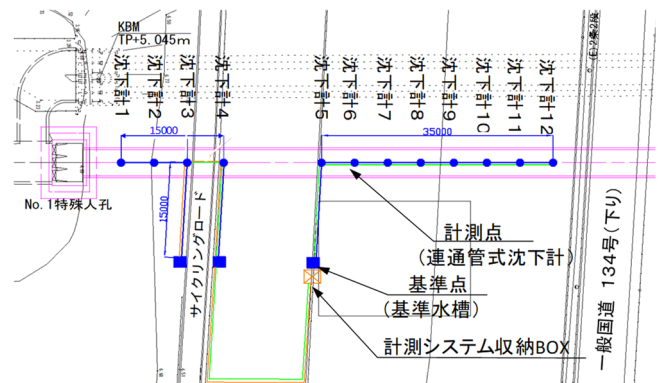


図12 地表面自動沈下計測の計器配置

国道の手前35mのトライアル施工区間を通過する際は切羽圧力を監視し、加泥材注入量や滑材注入量を調節し、適切な値を模索しながら推進管理を行った。

さらに、実施中では、発進直後に発生した次章の「4. 推進機の停止トラブル」も反映し、推進管理値を修正した。

計測結果を図13に示す。すべての測定点において切羽の接近直前に大きく隆起し、通過後は直ちに沈下した。函体通過中は、函体が到達するまで地表面沈下が継続する傾向となった。隆起量の最大は測点7で82.5mm、沈下量の最大は測点4の-45.6mmであった。なお、トライアル区間は砂

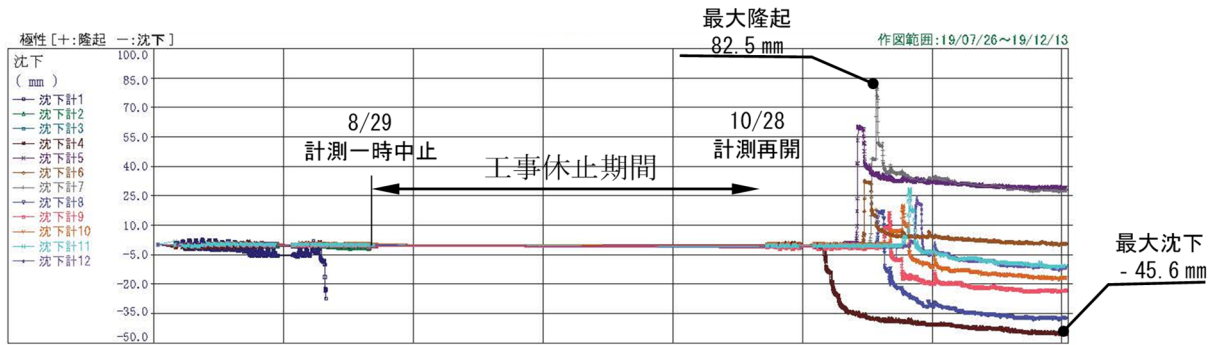


図13 地表面自動沈下計測結果

浜内であったため、地表面沈下による問題はなかった。

国道横断開始直前(沈下計11~12)では、切羽通過直前に20mm程度の隆起が発生したものの、通過後直ちに-20mm程度の沈下の現象が発生した後、函体通過期間は、-5~-10mmの沈下で収まるように推進管理が可能となった。

国道134号横断時は、水準測量により路面沈下計測を1日3回行った。沈下量は下り線で-17mm、上り線で-27mmとなり、管理基準値±30mm以内に収めることができた。

4. 推進機の停止トラブル

推進防護区間の5mは毎分15mmで掘進できたが、カッターヘッドが未改良部に貫入すると同時に排土量が少なくなってカッターのオーバートルクが発生し、カッター回転が停止する事態が発生した。2基の自転公転式カッターのうち、片方の回転が交互に停止していたことから、チャンパー内に障害物を取り込んでいることも想定された。

また、チャンパー内の閉塞によりカッタートルクが増大しているおそれがあったため、チャンパー内の土砂の塑性流動化を目的として、切羽への掘削添加材の追加注入を行った。しかし、土被りが小さく、推進機の上半は砂分が卓越し無水層の地盤のため、掘削添加材が地表面に噴出・逸泥する事態となった。

また、保安林横断中や国道横断中でのトラブルを発生させないことが本工事の重要課題であったため、推進停止地点のサイクリングロード横断手前の砂浜内で、切羽面や障害物を確認し、推進機を点検するための調査立坑を設けることとした。

4.1 調査立坑の築造

調査立坑は、推進機の隔壁前面の点検や修理改造が可能な最小幅(B=2.0m)とした。また、杭打ちが不要な小判型ライナープレート土留め工法を採用し、推進機の切羽前面に設置した(写真5)。

調査立坑を築造後、立坑内よりライナープレートを撤去し、推進機のフード部を押し出した。

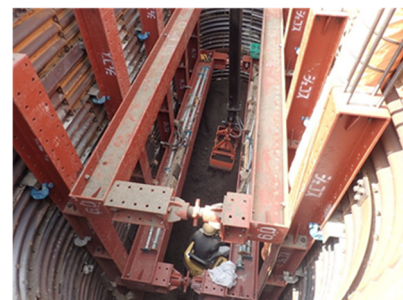


写真5 調査立坑掘削状況

4.2 障害物とチャンパー内の確認

調査立坑の掘削中にも障害物が出現し、最大500mmの岩塊や木片などが多数出現した(写真6、7)。

また、チャンパー内に岩塊や木片が取り込まれ、カッターの回転阻害や切削土砂の塑性流動化の低下の要因となっていたことも確認された。



写真6 チャンパー内の木片(左)とカッターに挟まり落下した岩塊(右)



写真7 チャンパー内で確認された障害物

4.3 掘進停止トラブルの原因

障害物によるカッターの回転不良に加え、中央部の未掘削部において固結化した地山がチャンバー内で確認された。これは、切羽崩壊や掘削土砂の取り込み過多を防止するため、切羽圧力に対してチャンバー内圧力を20kPa程度加圧して掘進したことで、未掘削部の土砂が圧縮され固結したものと考えられた。また、チャンバー中央部の最下部に配置した排土口は、最も地山が固結しやすい部分に設けられていることも、地山の固結化の一つの要因であると考えられた。

このため、チャンバー内土砂の攪拌不足対策と効率的な排土、切削土砂の塑性流動化を図る必要があった。

4.4 推進機の改造

推進機の改造概要図を図14に示す。改造した箇所は、以下の通りである。

- ① センター固定カッターの増設（未掘削部の解消）
- ② $\phi 300$ mm排土バルブの2箇所増設（切削土砂の取り込み促進）
- ③ 掘削添加材の吐出口の延伸（カッター背面に吐出させ、チャンバー内の混練り効果を向上）
- ④ テールボイド注入ラインの加工（注入材の周辺地盤への逸泥を防止して切羽面に吐出）

4.4.1 センター固定カッターの増設

中央部の幅290mmの未掘削部に対して、自転カッターから300mm後方に固定カッター（V字型柱）を設置することとした。この固定カッターにより未掘削土砂をカッティングし、両サイドに土砂を移動させて自転公転式カッターにより攪拌混合させる。これにより、未掘削部分は発生しなくなる（写真8）。

4.4.2 $\phi 300$ mm排土バルブの増設

自転公転式カッター中央部の点検スペースに $\phi 300$ mmの排土バルブを設置した。これは、土砂の流動化能力が最も高い自転公転式カッター中央部に排土口を設けることにより、下部の排土に加え両サイドからも土砂を取り込み易くするためである。さらに、ほぐし効果の向上のため、排土口の上部に $\phi 50$ mmの掘削添加材吐出口を装備し、チャンバー内の土砂の流動性向上を図った。なお、推進機の排土は主にスクリュウコンベアで行うが、カッター負荷の上昇や前面抵抗力の上昇などが確認された場合は、両サイドの排土バルブから補助的に排土することとした（写真9、10）。

4.4.3 掘削添加材のチャンバー内吐出口の延伸

チャンバー内の圧力保持により圧縮された土砂に対しては、添加材注入だけではミキシング効果が期待できないため、チャンバー内の左右下部に設置した吐出口を300mm延伸させ、カッター攪拌翼の背面に吐出できるようにした（写

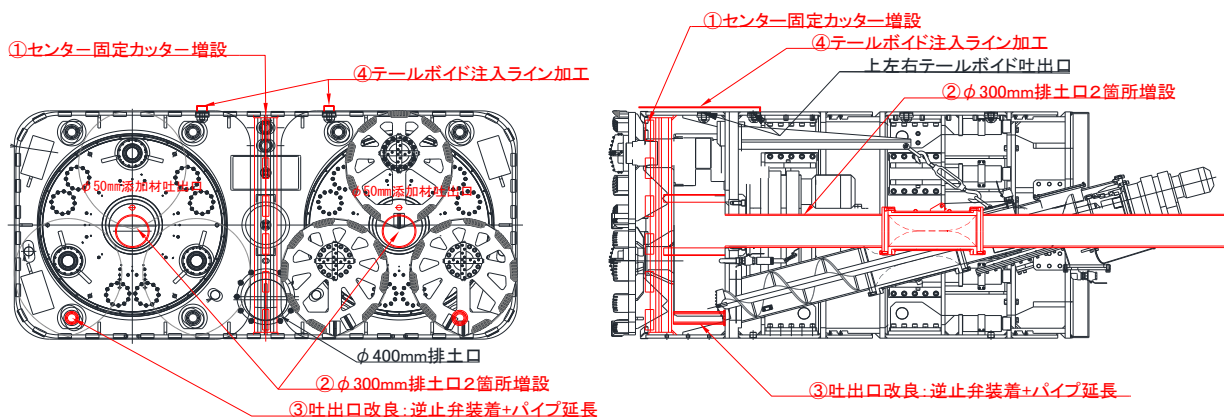


図14 推進機の改造概要図



写真8 センター固定カッター

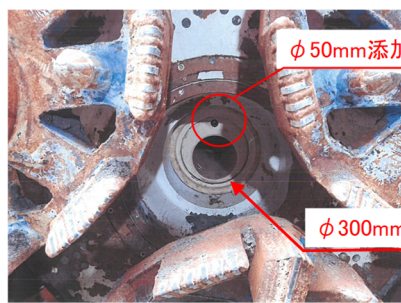


写真9 $\phi 300$ mm排土口と $\phi 50$ mm添加材吐出口

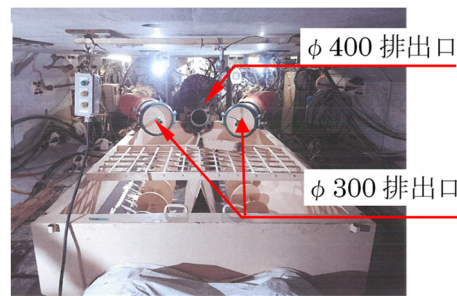


写真10 機内側の排出口

真 11)。掘削添加材を自転公転式カッターが回転する範囲のより近い位置から注入することによって、切削土砂の塑性流動性の改善を図った。



写真 11 吐出口の延伸

4.4.4 テールボイド注入ラインの加工

当初計画では、テールボイド充填も兼用した注入方式を採用していたが、砂分が卓越し、地下水も無い地盤であるため、注入された掘削添加材は周辺地盤に逸散し、切羽にはほとんど回っていないことが確認された(図 15)。

そのため、切羽先端から1m程度後方にある上部2箇所の特ールボイド注入ラインを確実に切羽面に誘導できるように、推進機鋼殻外周面に「掘削添加材誘導プレート」を設置した(写真 12)。

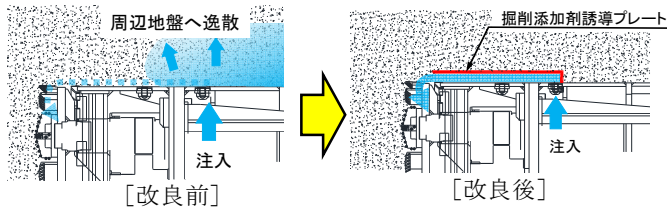


図 15 注入方式の改良



写真 12 掘削添加材誘導プレート

5. 推進管理

5.1 線形

これまで述べた対策を講じた結果、縦断線形、平面線形

とも規格値±50mmに収めることができた(図 16、17)。

推進機は総重量79.7tと重く、推進機の前でのめり現象が懸念されたため、管路勾配に対して後胴部を上向き0.4~0.6度、前胴部を上向き0.2~0.4度で推進機の姿勢制御を行った。

また、推進施工中は、ローリング修正ジャッキによる推進機の姿勢制御を行った。左右にそれぞれ最大0.2度のローリングが発生したが、函体の横断高低差は15mm程度に収まり、良好な線形管理ができた。

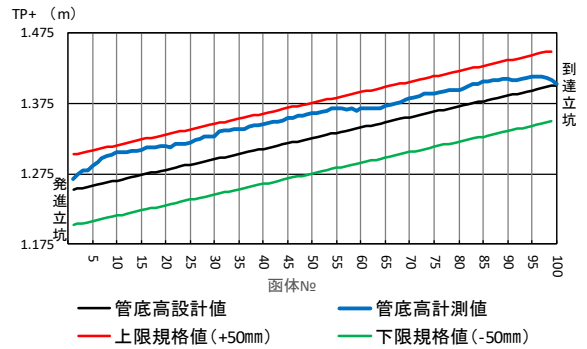


図 16 函体管底高の計測結果

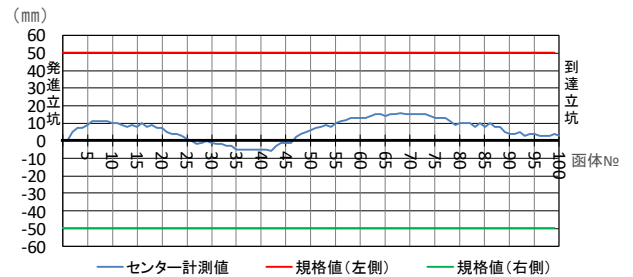


図 17 函体センターの計測結果

5.2 総推力

最大総推力は、計画推力の80%程度であった。推進開始直後の推力の上昇は、掘進停止トラブルによるテールボイドの損傷や調査立坑築造による周辺地盤の乱れによるものと考えられ、その地点以降は推力の大幅な上昇はなかった(図 18)。

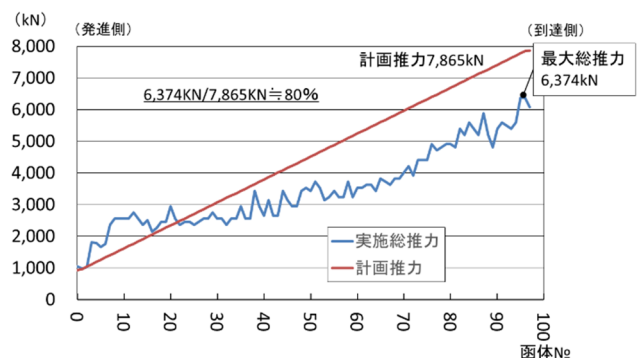


図 18 実施総推力と計画推力

推力を低減するためには、十分な滑材を函体外周面に注入充填し、テールボイド層を保持することが重要である。本工事では、計画滑材注入量 181L/m に対して、233L/m の注入を行い、周面摩擦力の上昇を抑制し、推力の低減を図ることができた。

5.3 切羽圧力と排土量

切羽圧力は、上限値 0.04MPa～下限値 0.02MPa で管理した。

推進時の掘削添加材の注入量と排土量を図 19 に示す。

注入量は掘削対象土量の 55% (5.826m³/m) で計画したが、ほぼ 2 倍の平均 93.6% (9.92m³/m) となった。一方、排土量は、計画排土量 16.419m³/m に対して平均 92% (15.105m³/m) となり、取り込み過多となった推進箇所は発生しなかった。

掘削対象土量が 10.593m³/m であることから、掘削添加材の戻り量は 4.5m³/m 程度と推察され、実際に切羽に添加した加泥材のうち 5.4m³/m 程度 (≒注入量 9.92 - 戻り量 4.5) は、周辺地盤に逸泥・浸透したものと推察される。なお、推進中に地表面に掘削添加材が噴出する事象は確認されなかった。

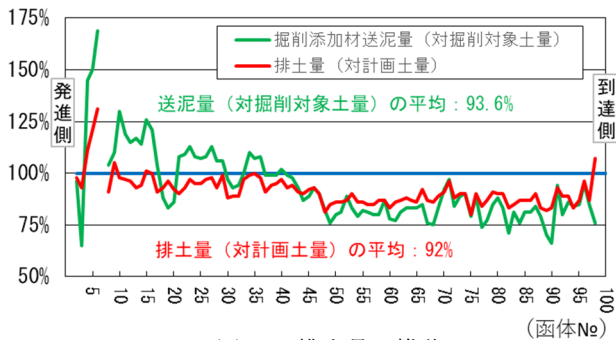


図 19 排土量の推移

6. まとめ

本工事は、海辺近くの砂浜で、砂分が卓越し、均等係数 5 程度の悪条件の地盤の中を推進しなければならず、さらに、推進機は高さ 2.23m に対して横幅が 4.72m という長方形断面で、かつ、小土被りのため地盤変状を発生させやすいという難しい工事であった。数多くの対策を行ったことで、国道横断部においては、地表面の沈下量を管理基準値内に収めることができ、推進工事に起因した路面変状トラブルを発生させることなく工事を終えることができた。また、当初予定の 3 函 (4.5m) / 日を確保し、工期を遵守できたことは大きな成果であった。

今までに事例のない、横方向に 2 連を組み合わせた長方形断面のボックス推進は、同断面積の円形より上下間を狭くすることが可能なため、小土被り対応のみならず、地下構造物が輻輳した狭い箇所での施工や、横型・縦型を組み合わせた大断面のパイプルーフへの適用など大きな可能性を秘めている工法である。本報告が同種の工事の参考になれば幸いである。

最後に、迅速に対応していただいた藤沢市、推進工事を担った (株) アルファシビルエンジニアリング、その他の関係者の方々に感謝の意を表す。



写真 13 ボックス推進完了 (到達立坑側)