

河川直下を縦断して掘進する 連続多急曲線シールドの施工

荒東 伸一¹・嶋田 尚正²・火山 太³・土井 拓郎⁴・清水 真人⁵

¹ (株) 安藤・間 九州支店土木部 (〒810-0041 福岡県福岡市中央区大名 1-8-10)

E-mail: arato.shinichi@ad-hzm.co.jp

² (株) 安藤・間 九州支店土木部 (〒810-0041 福岡県福岡市中央区大名 1-8-10)

E-mail: shimada.naomasa@ad-hzm.co.jp

³ 福岡県 那珂県土整備事務所 (〒816-0943 福岡県大野城市白木原 3-5-25 筑紫総合庁舎 3F)

E-mail: hiyama-f3500@pref.fukuoka.lg.jp

⁴ 福岡県 那珂県土整備事務所 (〒816-0943 福岡県大野城市白木原 3-5-25 筑紫総合庁舎 3F)

E-mail: doi-t9909@pref.fukuoka.lg.jp

⁵ 正会員 (株) 安藤・間 建設本部 (〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20)

E-mail: shimizu.masato@ad-hzm.co.jp

筑紫野市街地に甚大な被害をもたらした浸水被害の再発防止を目標とし，平成 27 年度より高尾川床上浸水対策特別緊急事業が着手された．当事業のうち高尾川地下河川築造工事は，高尾川の河川直下に延長約 1.04km，外径 $\phi 6.0\text{m}$ のトンネルを泥土圧シールド工法で構築するものであるが，川幅の狭い河川直下を縦断するため，連続する多数の急曲線施工 ($R=16\text{m}\sim 60\text{m}$ ，27 箇所) や，硬質地盤（風化花崗岩）の掘進といった非常に厳しい難条件下でのシールド工事であった．本報告では，これらの難条件を克服するために実施した対策とその結果について述べる．

Key Words: shield tunneling method, under river, sharp curve, weathered granite, cutter bit wear

1. はじめに

高尾川・鷺田川流域では，近年浸水被害が頻発しているため河川改修が実施されていたが，平成 26 年 8 月の豪雨によって，下流の鷺田川改修後に着手予定であった高尾川流域において床上浸水が発生し，筑紫野市街地に甚大な被害をもたらした．そのため，浸水被害の再発防止を目標とし，平成 27 年度より高尾川床上浸水対策特

別緊急事業が着手された（図-1）．高尾川地下河川築造工事は，当事業のうち地下河川整備を実施するものであり，高尾川の河川直下に延長約 1.04km，外径 $\phi 6.0\text{m}$ のトンネルを泥土圧シールド工法で構築するものである．

本工事は，川幅の狭い河川直下を縦断するため，連続する多数の急曲線施工 ($R=16\text{m}\sim 60\text{m}$ ，27 箇所) や，硬質地盤（風化花崗岩）の掘進といった非常に厳しい難条件下でのシールド工事である．

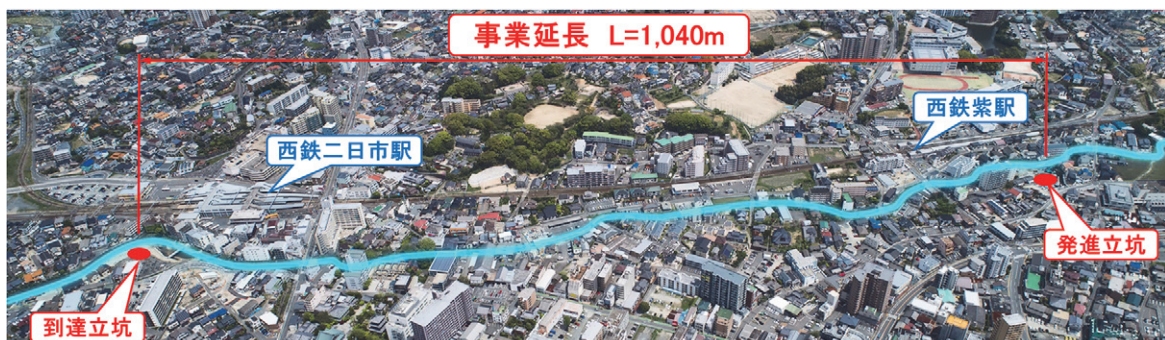


図-1 高尾川床上浸水対策特別緊急事業区間の状況

2. 工事の特徴と課題

(1) 急曲線施工

本事業は、市街地において限られた期間内に事業効果を発現させる必要があるため、従来の用地買収を伴う河道拡幅等ではなく、地下河川によるバイパスで計画が進められた¹⁾。その結果、高尾川地下河川の路線は、両側に家屋が密集し蛇行する狭い河川区域内に収めるよう計画され（図-2）、シールド平面線形は河川直下を縦断する形で最小 $R/D=2.6$ を含む連続する多数の急曲線（ $R=16\text{m}\sim 60\text{m}$ 、27箇所）で構成されている（表-1、図-3）。そのため、シールドの操作性向上およびセグメントの施工時荷重への対策が課題となった。

(2) 硬質地盤（風化花崗岩）の掘進

施工場所は、博多湾に注ぐ河川中流域の扇状地性の地形であり、周辺の丘陵地には基盤岩として中生代白亜紀

の早良花崗岩が分布している。一般に地表部の花崗岩は著しく風化作用を受け、いわゆる“まさ化”が進んで土砂状になっていることが多い。

当該地点の地質調査結果からも、シールド断面は概ね N 値 50～300 を示す DH 級の風化花崗岩が分布し、一部の区間で掘削断面の下半に CL 級相当の風化花崗岩（一軸圧縮強度： 5MN/m^2 以下）が出現する場合があると想定された（図-4）。これにより、当初計画時は硬質な土砂相当の地盤と判断され、強化型先行ビットを主体とした摩耗対策によりビット交換は不要と想定された。また、大きな岩片の取り込みの制限とビット配置スペースを確保するため、面板型のカッタフェースを採用した。

しかし、発進から約60mの掘進後に、著しいカッタールクの増大と掘進速度の低下に陥り、一向に回復する兆しが見られなかった（図-5）。これにより、ビットの早期摩耗および面板、チャンバーの閉塞が懸念され、これらの対策を早急に行うことが課題となった。

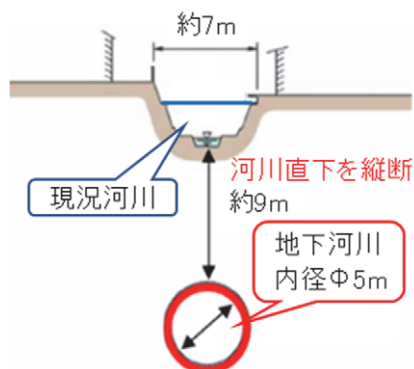


図-2 標準断面図

表-1 急曲線箇所数

曲線半径 $R(\text{m})$	箇所数	R/D
16	2	2.6
18	4	3.0
20	10	3.3
25	1	4.1
30	7	5.0
60	3	10.0
計	27	—

※トンネル外径 $D=6.0\text{m}$ として算出

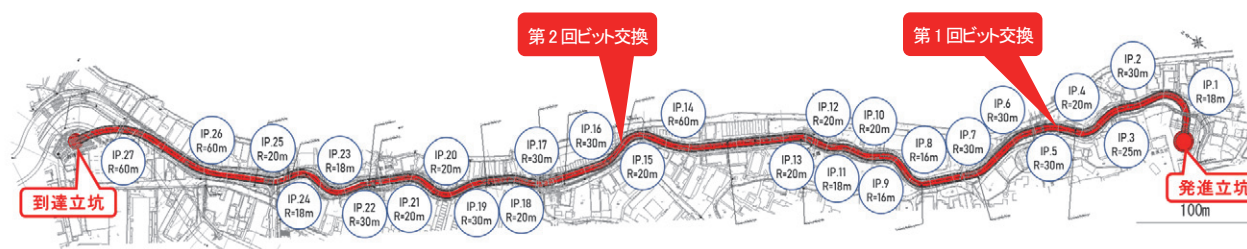


図-3 路線平面図

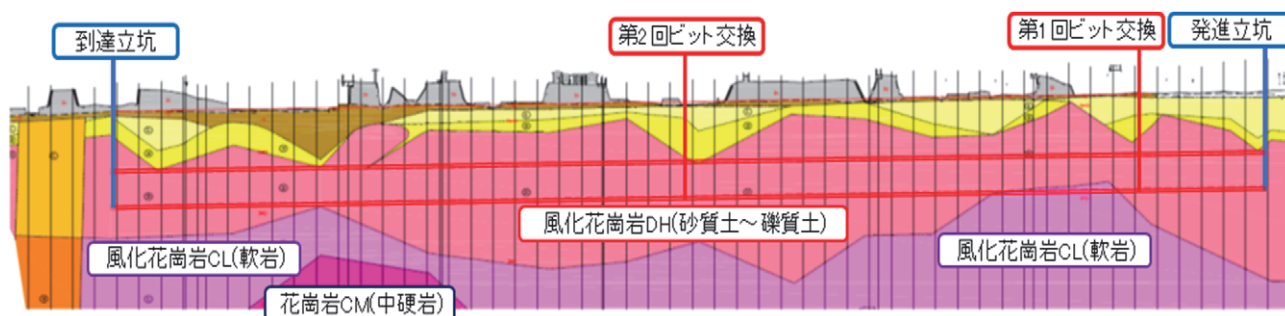


図-4 地質縦断面図

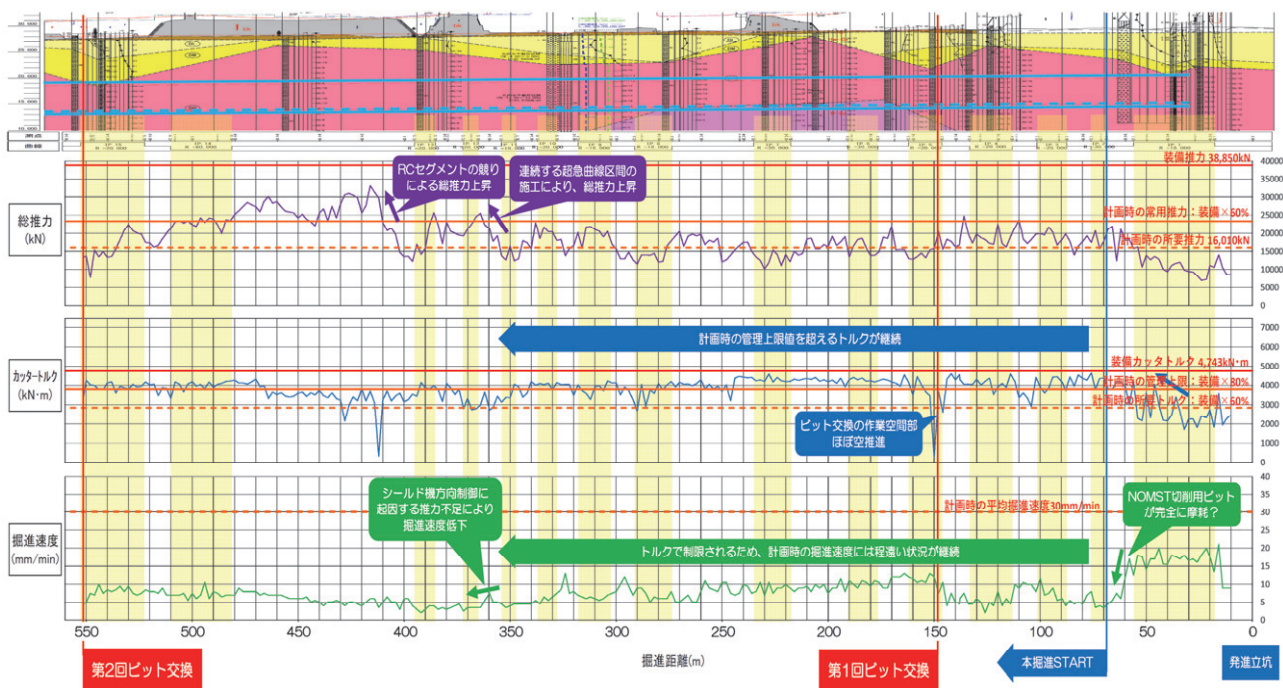


図-5 シールド掘進状況（発進～第2回ビット交換）



写真-1 掘削土に混入して排出された瓦礫

(3) 添加材の検討

当初、細粒分の多い硬質地盤に適した添加材として気泡材を選定し、掘進を開始したが、風化花崗岩の亀裂等を通じた漏気と小陥没が観察され、この対策が課題となった。

この小陥没については、花崗岩の性質である“方状節理”と呼ばれる割れ目、および河川直下を低土被り（最小土被り 9.3m）で掘進することが要因と考えられる。陥没が発生する前に気泡や泥水が激しく噴出する状況から、陥没箇所についてはもともと大きな割れ目が存在しており、気泡や泥水が噴出することで、河床の緩い砂が巻き上げられると共に流される。さらに、地下10mの掘削土に河床堆積物である瓦礫が混入していたことから（写真-1）、大きな割れ目から気泡、泥水が噴出することで、その割れ目を伝って河床堆積物（河床に堆積する瓦礫を含む緩い砂）がシールド機内に吸い出されることで陥没が発生したものと考えられる（図-6）。

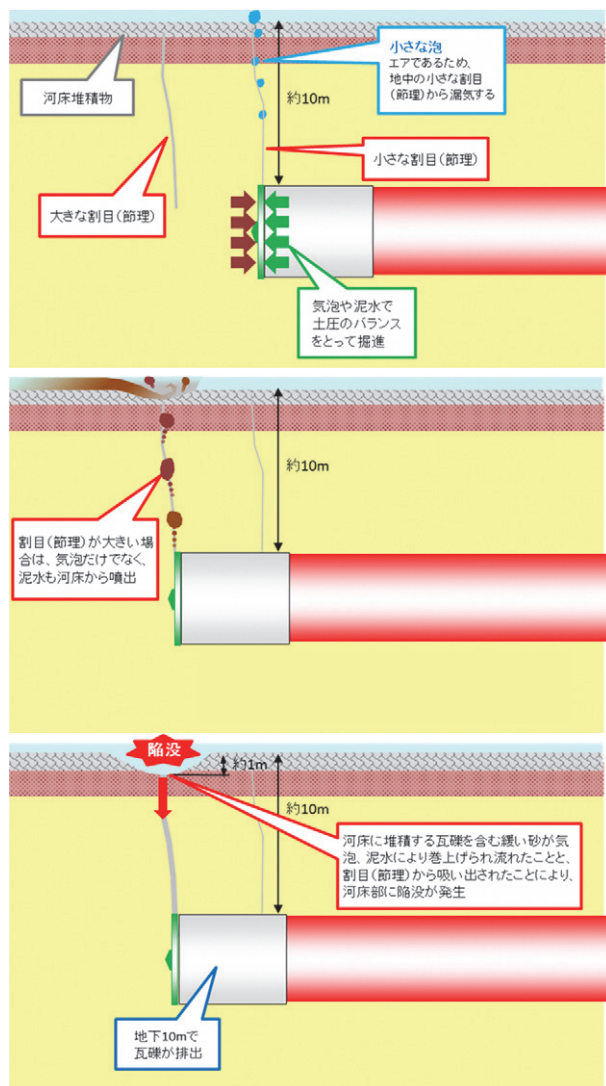


図-6 河床陥没のメカニズム

3. 課題への対策と対応

(1) 急曲線施工の対策

連続する急曲線施工にあたり、シールドの操作性向上およびセグメントの施工時荷重への対策については、以下を実施した。

a) シールド機

本工事では、外径φ6.14mの泥土圧シールドを適用した。主な仕様を表-2に、全体構造を図-7に示す²⁾。

前述した地質条件（硬質な土砂相当）のもと、強化型先行ビットによる切削を主体とし、発進時の NOMST 切削用に特殊先行ビットを配置した。なお、万が一の風化花崗岩のコアストーンの出現や到達時の NOMST 切削に備え、一部に交換式の強化型先行ビットを採用している。

カッタフェースについては、大きな岩片の取り込み制限とビット配置スペースの確保のため、面板型を採用した。

連続する急曲線の施工に対しては、操作性の向上や余堀り量の低減、テールクリアランスの確保のため、セグ

メント幅を最大 1.0m に抑制し、K ピースを半径方向挿入型としてシールド機長をできる限り短縮した。さらにコピーカッタのストローク（300 mm）に余裕を持たせるとともに、硬質地盤で酷使することを考慮して装備数を2台から4台に増強した。

その他、急曲線施工におけるテールシールのトラブル防止のためウレタン充填式のテールブラシを採用し、河川直下での施工を考慮してスクリーゲートを二重化した。

b) FLEX システムの採用

ジャッキパターンを選択による方向制御に替えて、それぞれのジャッキ圧の自動調整で方向制御が可能な FLEX システムを採用した(図-8)。これにより、方向制御をジャッキの ON/OFF で実施する場合と比較し、ジャッキ圧の偏心を小さくすることができるため、セグメントに加わる偏圧も低減できる。また、方向制御をシステムで行うことで、シールド機の操作は切羽安定と裏込注入管理に集中することができるため、掘進トラブルの低減にも繋がる。

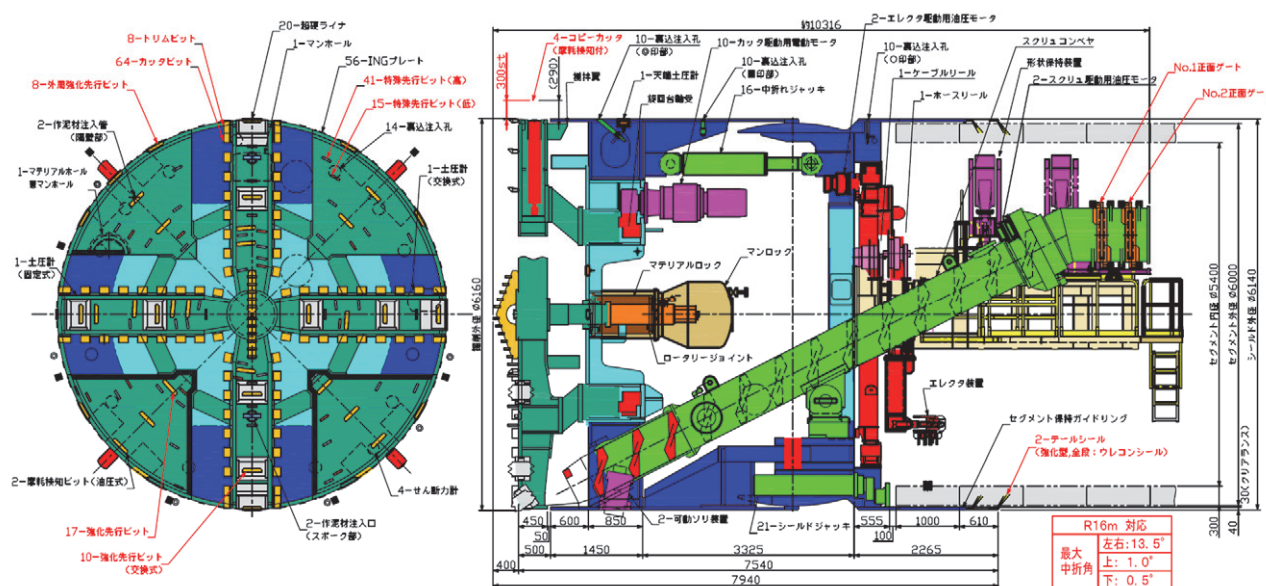


図-7 シールド機の全体構造図

表-2 シールド機的主要仕様

シールド仕様	
伸長速度	50mm/min
総推力	38,850kN
単位面積当りの推力	1,312kN/m ²
シールドジャッキ	1,850kN × 1,150st × 35MPa × 21本
中折れ仕様 (R=16m)	
中折れジャッキ	2,000kN × 900st × 35MPa × 6本
	2,000kN × 1,150st × 35MPa × 10本
最大中折れ角	左右 : 13.5°
	上 : 1.0°
	下 : 0.5°
カッター仕様	
駆動トルク	4,743 (常用) / 7,114 (瞬時最大) kN・m
α 値	20.5 (常用) / 30.7 (瞬時最大)
回転速度	0.91rpm
コピーカッター仕様	
コピーカッタージャッキ	165kN × 300st × 21MPa × 4本



図-8 FLEXシステム操作画面(6ブロック)

c) 裏込め材注入袋付きセグメントの採用

R=30m以下の急曲線部については、3リング毎に裏込め材注入袋付きセグメントを設置する。これにより、地盤反力を早期に確保し、ジャッキ推力によるセグメントへの過大な応力や変位、目開きの防止ができる。

d) セグメントの設計と施工管理

シールド線形は、R/D=2.6 (R=16m) をはじめとした非常に厳しい急曲線が連続しており、施工時には線形の逸脱や蛇行修正の度合い、頻度が通常の急曲線施工より増加すると考えられた。そのため、シールドテールとセグメントの競り、シールドジャッキの片押しや偏心量が增大した状態でのジャッキ推力の作用など、施工時荷重の影響増大が懸念された。

想定される施工時のリスクに対して、実施したセグメントへの急曲線施工時荷重への対策内容を以下①～③に示す3)。

- ①テールシールドからの出水等のトラブル防止や急曲線施工のため、各曲線半径に応じて所要のテールクリアランスを確保し、かつ可能な限り外径を大きくした縮径セグメントを使用した。表-3にセグメントの仕様一覧を示す。
- ②縮径量の違いにより、セグメント桁高中心とジャッ

表-3 セグメントの仕様

セグメント種別	対応する曲線半径	外径 (mm)	縮径量 (mm)	桁高 (mm)	幅 (mm)
RC	直線	6000	0	300	1000
鋼製	R60以上	6000	0	225	500, 1000
鋼製	R30	6000	0	225	300
鋼製	R25	5980	10	215	300
鋼製	R20	5980	10	215	300
鋼製	R18	5970	15	210	300
鋼製	R16	5920	40	185	300

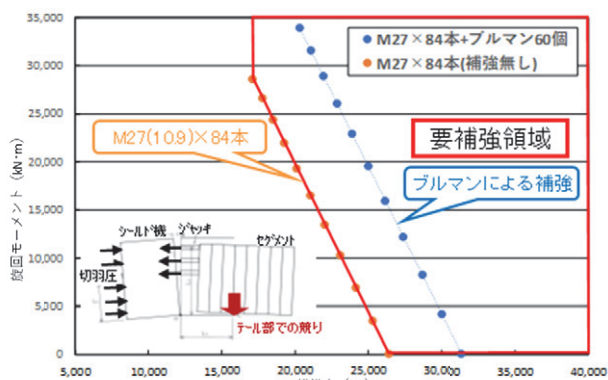


図-10 競り荷重に対する構造安全判定図

キ推力作用位置の偏心量が各セグメントによって異なるため、図-9に示す最大偏心量（テールクリアランスが最小となった時に最大となる偏心量）を考慮し、縦リブの設計・補強を行った。また、施工時荷重を考慮したトンネル軸方向、横断方向の構造解析を実施し、鋼製セグメントのリング継手および主桁を補強した。

図-10, 11に示す急曲線施工時の施工時荷重に対するセグメントの構造安定判定図から、総推力の上限値を設定し施工管理値に反映した。ここで、旋回モーメントとは、ジャッキ合力作用位置の断面方向での偏心に伴う曲げモーメントを表す。図-10では、旋回モーメントと総推力に対して、リング継手の耐力が下回る場合は構造安定性が確保できないと判定され（要補強領域）、ブルマンによるリング継手部の補強を行うものとした。図-11では、旋回モーメントと総推力ごとにトンネル軸方向、横断方向の構造解析を行い、構造的にNGとなる数値を求め（青線）、施工時における旋回モーメントの上限値を定めた（赤線）。

- ③急曲線施工 (R=30m以下) の影響を受けやすい急曲線区間の前後1機長分(L=8.0m)は、トラブル発生時に対応しやすい鋼製セグメントを配置することで、急曲線前後での施工時の影響を緩和した (図-12)。

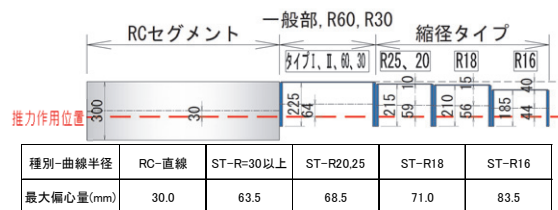


図-9 各セグメントの縮径量および偏心位置関係

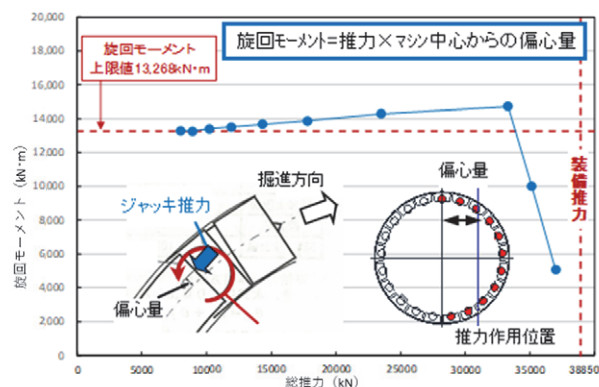


図-11 推力と旋回モーメントに対する構造安定判定図

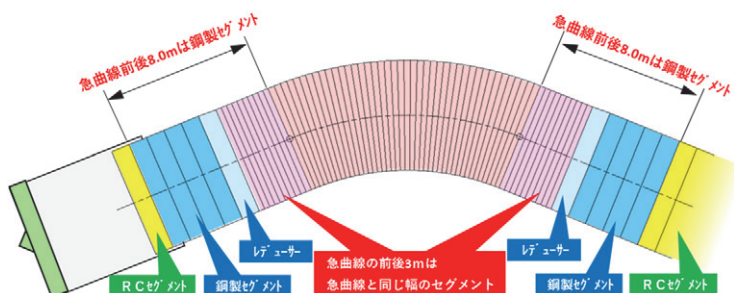


図-12 急曲線部のセグメント割付の例

e) シールド機挙動シミュレーション

連続する多急曲線の複雑なシールド線形を所定の精度で円滑に掘進可能なことを確認するため、シールド機動力学モデルを用いた掘進シミュレーションを事前に実施した⁴⁾。

平面線形、縦断線形、掘進速度の計画値と解析値を図-13に示す。これらの図から、平面線形、縦断線形の解析値と計画値はおおよそ一致することがわかる。また、シールド操作条件は使用するシールド機の装備能力内であったことから、力学的に本S字急曲線部は掘削可能と考えられる。

(2) 硬質地盤（風化花崗岩）の掘進対策

ビットの早期摩耗および面板、チャンバーの閉塞の対策については、以下を実施した。

a) ビットの早期摩耗対策

発進から約60m以降の掘進状況が継続する場合、当初

のビット許容摩耗量 50mm では計 4 回のビット交換が必要となる。一方、ビット交換には補助工法（地盤改良）が必要となるが、地上部の施工ヤード確保等の制約もあるため、ビットの長寿命化を図ることによって交換回数を減らす必要があった。

ビットの長寿命化については、強化型先行ビットの増設と高低差配置により、許容摩耗量 100mm を確保した。カッタビットについても同様に高低差配置とし、許容摩耗量 50mm(当初 25mm)を確保した（図-14、15）。また、これらの改造を含む1回目のビット交換を掘進延長 136m 地点、2 回目のビット交換を掘進延長 542m 地点で実施する計画とした（交換位置は図-3、図-4）。

b) 面板、チャンバーの閉塞対策

1 回目のビット交換時にカッタ中心部に掘削土砂の閉塞が確認されたため、補助面板の一部を切り欠き、面板の開口率を 34%から 38%に拡大した。また、カッタ中心付近への攪拌翼の追加等を実施した（図-15）。

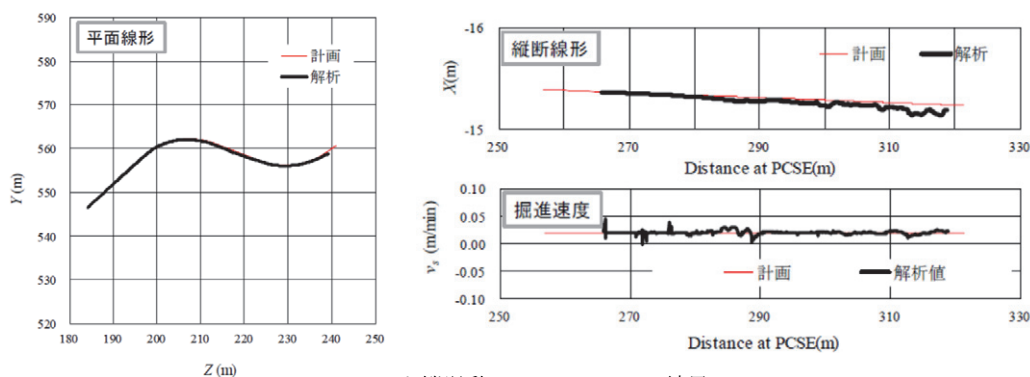


図-13 シールド機挙動シミュレーション結果

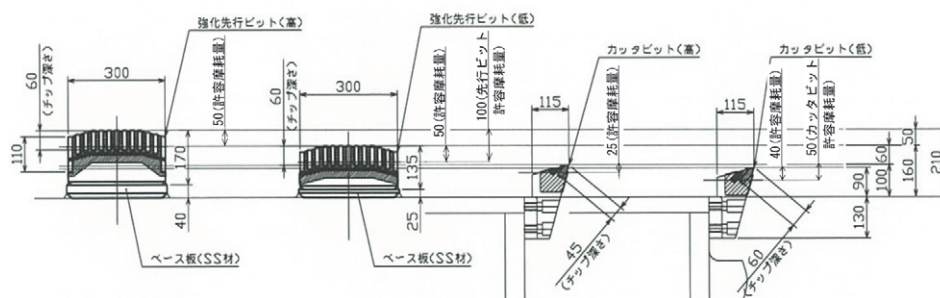


図-14 ビットの高低差配置

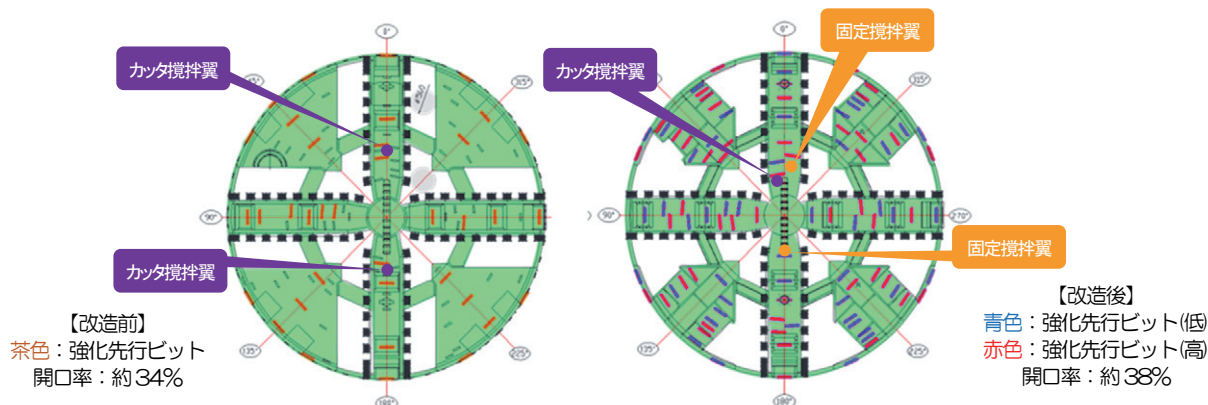


図-15 面板の改造と攪拌翼の追加

(3) 添加材の変更

当初は細粒分を含む硬質地盤に適した添加材として気泡材を選定し掘進を開始したが、風化花崗岩の亀裂等を通じた漏気が観察され、小陥没も発生したことから、1回目のビット交換以降は高分子系（凝集剤、邂逅剤、界面活性剤）とベントナイトを併用した添加材に変更し、掘進状況や排土性状に応じて使用材料の種類と添加量を試行錯誤して掘進を行った。

4. 対策の実施結果

(1) 急曲線施工の結果

急曲線施工に関しては、種々の対策を講じた結果、線形を逸脱することなく、また、鋼製セグメントの破損や変形、漏水なども発生せずシールド掘進を終えることができた（写真-2, 3, 4）。ただし、縮径に伴うテール内への裏込め材の浸入、固結により、RCセグメントの一部損傷やテールシールの交換が必要となったことについて

では、今後の急曲線施工の課題である。また、コピーカッタについては4台に増強を行っていたが、想定以上の摩耗量が確認されたため、2回目のビット交換時にコピーカッタ4台全ての交換も実施している。

(2) 硬質地盤（風化花崗岩）の掘進結果

途中2回のビット交換により、到達までの掘進を終えることができたが、高トルク、低掘進速度の状態が解消されることはなかった。2回目のビット交換時に、切羽にてロックシュミットハンマーによる原位置試験を実施した結果、一軸圧縮強度は 16 MN/m^2 の値を示しており、カッタトルクの増大は想定を超える地盤の強度に起因するところが大きいのと考えられる。また、ビットについては、概ね予測計算通りの摩耗量が観測されており、1回目のビット交換時に高低差配置によるビットの長寿命化を行っていなければ、到達までの掘進が不可能な状況であった。面板改造と攪拌翼の追加、および添加材の変更により、面板やチャンバーの掘削土砂の固着や閉塞は改善された（写真-5）。



写真-2 発進直後の急曲線（IP.1：R=18m,IA=121-29-10）



写真-3 4つの連続急曲線（IP.10～13：R=18m,20m）



写真-4 シールド機到達状況



写真-5 2回目ビット交換時のチャンバー内の状況

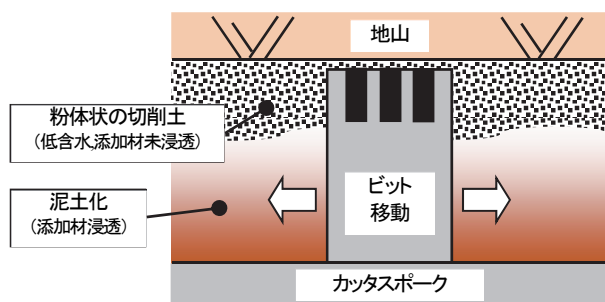


図-16 ビット先端での状況（想定）

(3) 添加材の変更結果

添加材の変更により、河床からの漏気（逸泥）や小陥没の発生は抑制することできた。しかし、添加材について試行錯誤を行ったが、高トルク傾向が解消されることはなかった。

カットトルクの増大は、前述の地盤の強度に起因するものの他に、室内試験の結果、切削土に十分な水分や添加材がない場合、推力により土粒子のかみ合わせでせん断抵抗が発生する可能性がわかった（図-16）⁵⁾。そのため、今回のような含水比の小さい岩盤、硬質土の泥土圧シールドにおいては、特にビット高さが高い場合に、添加材がビット先端まで浸透するよう、注入孔を切羽に近づける等の配慮、工夫が必要であると考えられた。また、今回は試験等を行えなかったが、密閉かつ加圧された空間でのダイレイタンスによる切削土のせん断抵抗の増大も可能性としてあるものと想定される。

5. おわりに

令和2年6月より暫定的に地下河川の運用が開始された。また、同年6月27日には時間雨量45mmの降雨も観測されたが、事業効果の発揮が確認されている。

本工事は、川幅の狭い河川直下を縦断するため、約1kmの延長で27箇所もの連続急曲線を施工する、国内でもこの規模のシールドトンネルでは例がないものであ

った。また、硬質な風化花崗岩の掘進といった非常に厳しい難条件下でのシールド工事であった。

本報告に述べたように、当初の計画にはない、河川直下での2回のビット交換や面板の改造、また、高負荷運転に伴う種々の機械故障やトラブルを克服し無事に掘進を完了することができた。これにより、急曲線施工や硬質地盤（風化花崗岩）の掘進に伴う、新たな課題も明確になったと考える。

今回の報告が、今後の急曲線施工や硬質地盤（風化花崗岩）のシールド施工に際して参考になれば幸いである。

謝辞：本工事の施工にあたっては、発注者主催の技術検討委員会を通じ、早稲田大学創造理工学部社会環境工学科の岩波基教授、高知大学教育研究部自然科学系理工学部部門の横山俊治名誉教授、（公財）鉄道総合技術研究所防災技術研究部地質研究室の川越健室長からご教授賜りました。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田浦康司：高尾川における地下河川の整備について、第17回都市水害に関するシンポジウム,2018.11
- 2) 井上隆浩，清水真人，土井拓郎，荒東伸一，小柳涼平：河川直下を縦断して掘進する連続多急曲線シールドの施工,第75回年次学術講演会,2020.9
- 3) 石堂暁，清水真人，土井拓郎，嶋田尚正，藤野紘治：連続する急曲線施工におけるセグメントの施工時荷重対策,第75回年次学術講演会,2020.9
- 4) 中田善人，岩渕崇宏，杉本光隆，粥川幸司：シールド機動力学モデルによるS字急曲線部におけるシールド挙動シミュレーション,第74回年次学術講演会,2019.9
- 5) 粥川幸司，名倉浩，秦浩司，土井拓郎，荒東伸一：泥土圧シールドによる風化花崗岩の掘進と土質特性,第75回年次学術講演会,2020.9

(2020. 8. 7 受付)

SHIELD TUNNELING WITH WINDING SHARP CURVES UNDER RIVER

Shinichi ARATO, Naomasa SHIMADA, Futoshi HIYAMA, Takuro DOI,
and Masato SHIMIZU

With the goal of preventing recurrence of the enormous flood damage to the urban area of Chikushino, a special emergency project for flood control above floor level on the Takao River was launched in 2015. In this project, the Takao River Underground Diversion Channel Works was to construct a tunnel with a length of 1.04km and an external diameter of $\phi 6.0\text{m}$ directly under the Takao River by EPB shield tunneling method. Due to the tunnel alignment along the narrow river, the shield driving was under extremely severe conditions such as winding sharp curves ($R=16\text{m}-60\text{m}$, 27 locations) and hard ground (weathered granite). In this report, we describe the countermeasures taken to overcome these difficult conditions and the results.