

切削性に優れる GFRC セグメントを活用した大口径シールドによる地中接合

Underground docking method by large-diameter shield tunneling using GFRC segments with superior cutting properties

渋間 康生*

Yasuo Shibuma

齊藤 一男*

Kazuo Saito

阿部 浩二**

Koji Abe

片岡 藍子*

Aiko Kataoka

要 約

本工事は、首都圏中央連絡自動車道の一部である横浜湘南道路トンネルを築造するシールド工事であり、仕上がり内径φ 12.2m、延長約 5.4km の上下線が併設するトンネルを 2 路線施工する工事である。そのうち上り線 5.4km の施工は、2 機のシールド機を使用して施工を行い、先行トンネルと後行トンネルの接続は、先行トンネルで構築した FFU を用いた GFRC セグメントを、後行のシールド 2 号機で直接切削する方式で地中接合を行った。

本稿は、地中接合の施工における計画時点での懸念事項および、それに対する対策と施工の実績について報告を行うものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 地中接合の概要
- § 3. 切羽添加材の選定
- § 4. GFRC セグメントの大割れ防止
- § 5. 直接切削時のビット管理
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

横浜湘南道路は、首都圏中央連絡自動車道（圏央道）の一部であり、新湘南バイパス藤沢 IC～栄 IC（仮称）に位置している。本工事は横浜湘南道路 7.5km のうち、上下線各 5.4km のトンネル区間を泥土圧シールド工法により築造するものである（表一）。

上り線は、2 機のシールド機で施工を行う計画である。施工順序としては、先行のシールド 1 号機が、路線中間地点に位置する発進基地より路線終点側に向け西側 2.7km の施工を行い、後行のシールド 2 号機が路線始点側より地中接合位置に向け東側 2.7km の施工を行う。

下り線は、上り線を施工したシールド 1 号機を、終点側

の回転立坑で 180°回転させ、下り線 5.4km 全線を同シールド機で施工を行う計画である。

1 号機と 2 号機の接続箇所では、先行のシールド 1 号機が施工した、FFU（写真一）を用いた GFRC セグメント¹⁾^{2) 3)}（以下 GFRC セグメントと呼ぶ、FFU：Fiber Reinforced Foamed Urethane、GFRC：Grass-Fiber Reinforced Concrete）からなる急曲線トンネル部を、後行のシールド 2 号機が直接切削する方式で地中接合を行う。

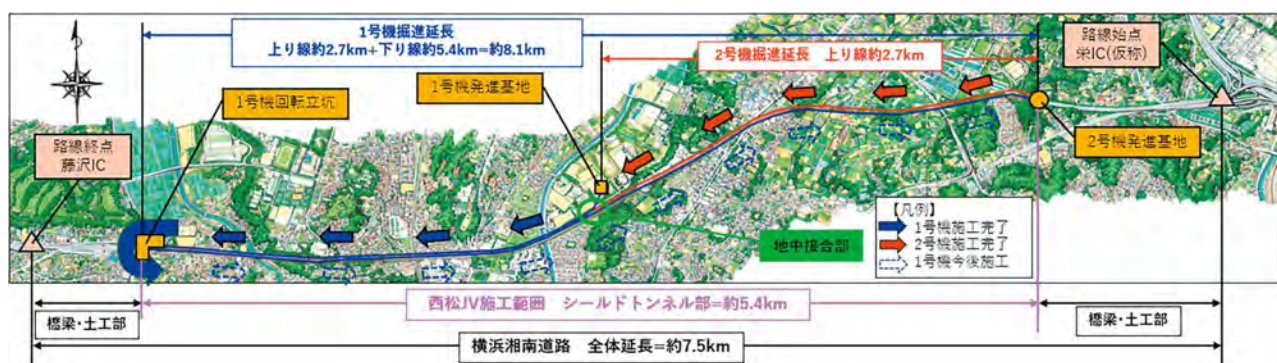
本稿は、地中接合の施工における計画時点での懸念事項および、それに対する対策と施工の実績について報告を行うものである。

表一 工事概要

工事件名	横浜湘南道路トンネル工事 横浜湘南道路トンネル（その 2）工事 横浜湘南道路トンネルその 3 工事 横浜湘南道路トンネルその 4 工事
発注者	国土交通省関東地方整備局
工 期	2015 年 2 月 13 日～2028 年 9 月 30 日
トンネル 諸元	延 長：上下線各約 5.4km 外 径：13.27m（1 号機）/12.92m（2 号機） 内 径：12.20m（1・2 号機） 車線数：上下線各 2 車線
シールド 機諸元	1 号機：泥土圧（気泡）シールド機 掘削外径 13.64m、機長 14.49m 2 号機：泥土圧（気泡）シールド機 掘削外径 13.29m、機長 13.46m

* 関東土木支社 横浜湘南道路工事事務所

** 関東土木支社 横浜湘南道路工事事務所
（現：関東土木支社）



図一1 横浜湘南道路全体図

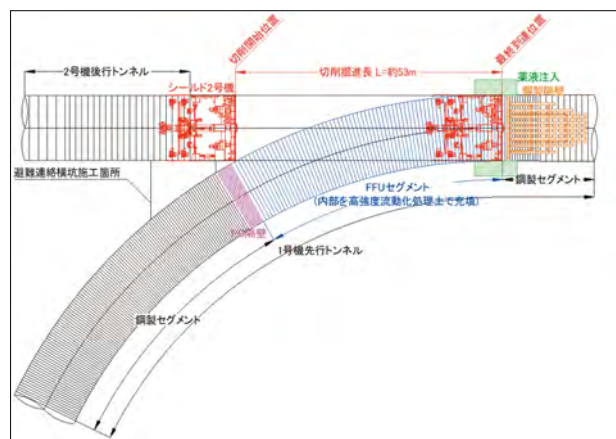
§ 2. 地中接合の概要

2機のシールド機を使用する地中接合は、シールド機同士の正面接合方式や、先行路線に後行シールドが直交方向で接合するT字接合方式が一般的である。しかし、本工事での地中接合（図一2）は、シールド1号機で先行施工したGFRCセグメントからなる急曲線（ $R=99.5\text{m}$ ）トンネルを、後行のシールド2号機で斜め後方から直接切削し接続する、世界的にも前例のない方式となっている。

先行のシールド1号機は大断面シールドで、急曲線部へコンクリート系セグメントを適用するという難条件⁴⁾での施工であった。また、地中接合箇所は、交通量の多い国道1号の直下に位置している。そのため、後行のシールド2号機での直接切削の施工中は、層別沈下計や水盛り式沈下計を使用し、直上の構造物や地盤変状への影響をモニタリングしながら掘進管理を行った。

直接切削での掘進延長は $L \approx 53\text{m}$ であり、急曲線の後方側から切削を行うため、直接切削の進捗に伴い、シールド2号機の掘削断面に占める先行トンネルの割合が徐々に増加する。

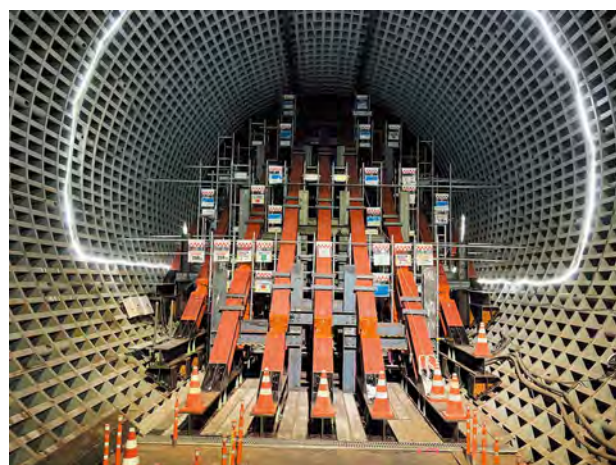
切削対象のGFRCセグメント部は、直接切削時に先行トンネル内部に土砂が流入することを防止するため、両端に隔壁を設け、流動化処理土によるトンネル内部の充填を行った。道路本線となる切羽側の隔壁（写真一2）は、到達後に撤去を行う必要があることと、シールド機の掘進推力に対する反力材としての強度を有する必要があるため、鋼板と鋼材を用いたバックアンカー構造とした。坑口側の隔壁は最終的な本体構造物となるためRC構造とした。



図一2 地中接合部詳細図



写真一1 GFRCセグメントに使用したFFU筋材



写真一2 鋼製隔壁全景

§ 3. 切羽添加材の選定

3-1 課題

GFRC セグメント（セメント添加量 485kg/m³）およびトンネル内部に充填した流動化処理土（セメント添加量 220kg/m³）の掘削にあたり、シールド機のチャンバー内に取り込んだ流動化処理土が再固結し、チャンバー内が閉塞することが懸念された。そのため、再固化防止の対策として適正な切羽添加材の濃度・注入率の計画が必要であった。今回の計画を行う上で、特に留意すべき施工条件は下記の 2 点であった。

- (1) 掘進の進捗に伴い、掘削断面積に占める流動化処理土の割合が変化すること（図-3、図-4）。
- (2) 掘進途中で到達精度を確保することを目的として行う閉合測量時に、1ヶ月の長期停止を行うこと。

3-2 対策

流動化処理土の再固化防止を目的とした添加材としては、シールド 1 号機の発進到達施工時や他工事での使用実績を考慮し、セメント用の安定剤である TAC-Re を選定した。また、事前に試験練りを行い、経時変化に伴う再固化の進行を観察することで最適な濃度と注入率の計画を行った。

試験練りには絶乾状態のボーリング試料と、流動化処理土のテストピースを用いた。ボーリング試料は実際の地山と同等になるよう加水し、含水比調整を行い、流動化処理土のテストピースは、シールド機での切削を想定し最大粒径 2mm 以下となるよう破碎した。上記 2 つの試料を任意の体積比で混合した試料を準備し、それぞれに任意の濃度の TAC-Re 溶液を徐々に加え、掘削に適した塑性流動性が得られるまで混練りを行った。その後、混練りした試料を密封容器に封入し、時間経過による再固化の進行を確認した。

試験練り結果（表-2）から以下のことがわかった。

- (1) 閉合測量に伴う 1ヶ月の長期停止時には流動化処理土の割合は概ね 30% であり、再固化防止は可能であると考えられる。
- (2) 流動化処理土割合 75% 以下の場合は、3 日後における再固化防止は可能である。
- (3) 流動化処理土割合が 100% となる状況では 1 日程しか再固化を防止することができない。

3-3 結果

対策の結果、GFRC セグメントの直接切削の施工中、シールド機のチャンバー内における流動化処理土の再固化を発生させることなく到達することができた。実際の施工における濃度および注入率は、事前の試験練り結果による計画注入率 20% を基本として、排土の性状や、排土のコーン指数、掘進時の切羽土圧の変動、シールド機のカッター起動時における瞬時初動トルク等の、施工

中のデータを総合的に判断し設定した。結果が図-5 の注入実績である。

事前の試験練りからの計画注入率は 20% であったが、流動化処理土の割合が多くなる掘進後半では、注入率 20% では十分な塑性流動性が得られず 30% 程度の注入が必要となった。

濃度については試験練りの結果と比較し、全体的に低めの設定で掘進した。これは、塑性流動性確保のための注入率が予定より大きくなったことから材料費コスト削減を目的に、濃度を低めに設定したためである。

また、試験練りの結果から流動化処理土の割合が 75% 以上となる掘進では、週末 2 日間の停止時に再固化を防止できないということが明らかであった。シールド機のカッター回転時の初動トルクの傾向からも同様の事象が想定されたため、1561R（流動化処理土割合 80%）の施工時から、休日も含め 3 時間おきにチャンバーへの添加材の追加注入と、カッターを回転させることで流動化処理土の割合が高い掘進終盤での再固化を防止した。

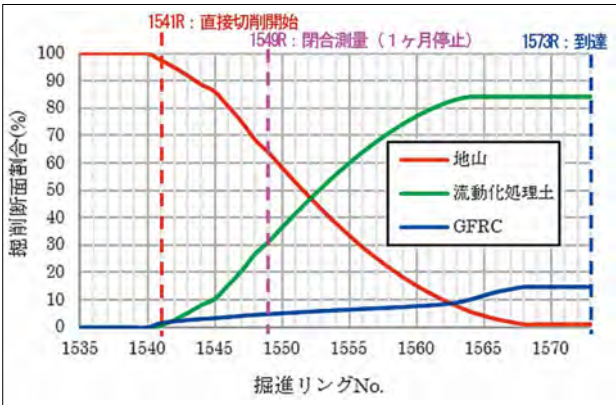
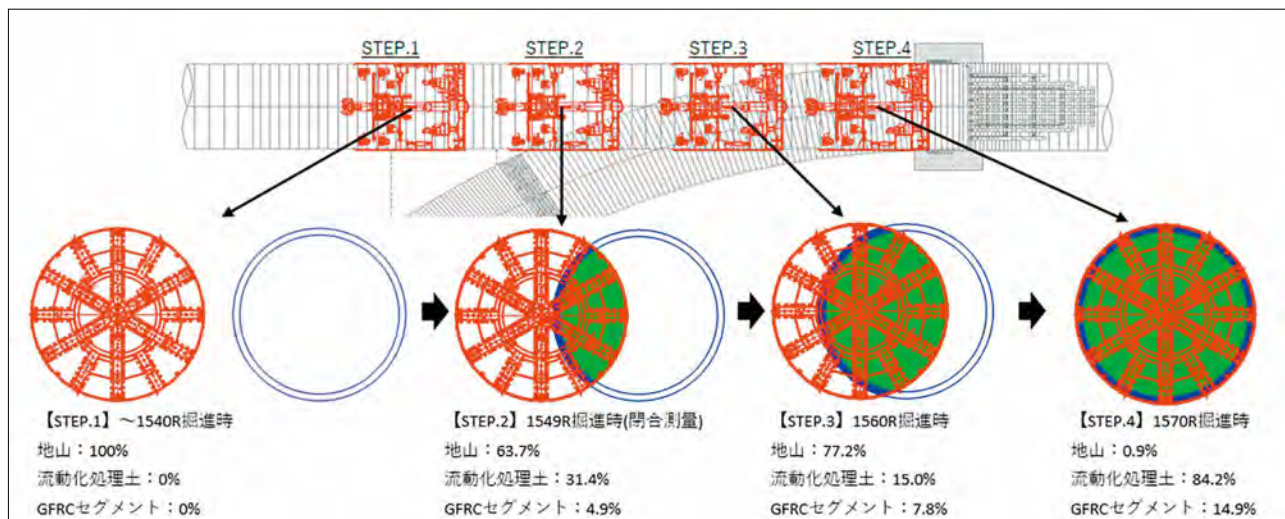


図-3 掘削断面に占める割合

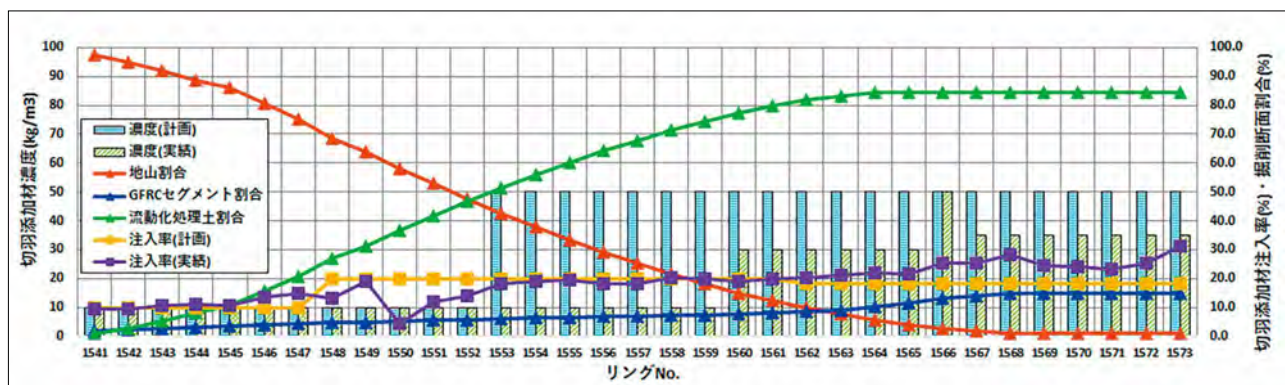
表-2 試験練り結果一覧

試料割合(%)		TAC-Re		再固化傾向				
流動化処理土	地山	注入率 (%)	濃度 (kg/m ³)	1日後	2日後	3日後	1ヶ月後	
25	75	20.0	10	○	○	○	○	
			30	○	○	○	○	
			50	○	○	○	○	
50	50	20.0	10	○	△	△~×	×	
			30	○	○	○~△	×	
			50	○	○	○	△	
75	25	20.0	10	△	△	△~×	×	
			30	○	○	○~△	×	
			50	○	○	○	×	
100	0	18.0	30	△	△~×	×	×	
			50	○	○~△	△	×	

【凡例】	
○：掘削に適した塑性流動性	△：再固化傾向が見られる
×：再固化し掘進不能リスクが高い	赤枠：試験練り結果からの採用値



図一4 直接切削の段階に応じた断面変化図



図一5 切羽添加材の注入実績

§ 4. GFRC セグメントの大割れ防止

4-1 課題

切削時に GFRC セグメントの大割れが発生することで、チャンバー下部へ切削片が堆積し、取込み不良を起こすことや、大割れ片でスクリーコンベア閉塞が発生することが懸念された。こうした事象を防止するため、直接切削の計画にあたり、GFRC セグメントの大割れ防止対策が必要であった。

4-2 対策

対策としては、後行のシールド2号機の掘進管理と、切削する GFRC セグメントの固定という二つの視点から対策を行った。

(1) シールド2号機の掘進管理

シールド2号機の掘進時の対策としては、微速掘進による切り込み量の低減を実施した。シールド2号機の GFRC セグメントを切削する目的として設置した先行ビット配置から、先行ビットの最小パス数3パスでの切り込み量が2.0mm以下となるように、掘進速度を通常掘進時の約10分の1とした。シールド機に装備したシールドジャッキ用の油圧ユニットを、微速用油圧ユニット(吐

出油量制御タイプ)に切り替えることで掘進速度2~3mm/minの微速での掘進を行った(表一3)。

(2) GFRC セグメントの固定

GFRC セグメント側での対策としては、セグメントを地山に対し堅固に固定することで、直接切削時のセグメントの振動防止を図った。セグメントの外周に注入する裏込め材は、一般的には一軸圧縮強度が1.5N/mm²の配合を使用するが、GFRC セグメント箇所については一軸圧縮強度2.0N/mm²の高強度配合を採用した。また、GFRC セグメントの内部に充填する流動化処理土についても同様に一軸圧縮強度2.0N/mm²の高強度配合を採用した。

表一3 通常/微速モード比較表

掘進モード	掘進速度 (mm/min)	カッター回転数 (rpm)	ビット パス数	切込量 (mm)
通常モード	20~30	0.8	3~4	6.25~12.5
微速モード	2~3	0.5	3~4	1.0~2.0

4-3 結果

直接切削の施工中に排出された掘削土から回収した、GFRC セグメントの切削片を写真-3 に示す。懸念されていたセグメントの大割れ等は発生することなく掘削することができた。回収された GFRC セグメント切削片は、最大長さ 40cm 程度の FFU 筋材の切削片のみであった。コンクリート片については全く確認されなかったことから、微速掘進及び GFRC セグメントの固定により GFRC セグメントを細かく削ることができたと考えられる。

直接切削施工時のカッタートルク、有効推力、ジャッキスピード、ビット温度の推移を図-8 に示す。カッタートルクは上限値 16,000kN として管理を行った。

直接切削を開始した 1541R から 1548R まではカッタートルク、ジャッキスピード、有効推力ともに安定しているが、1549R の施工時から有効推力の大きな上昇が確認できる。これはシールド機カッターのフィッシュテール部が GFRC セグメントの切削を開始したことによるものと推定される（図-6）。有効推力とカッタートルクが上昇傾向となったため、ジャッキスピードを 3.0mm/min 程度まで下げて掘進した。1562R~1563R の掘進時にも有効推力の大きな上昇が確認できるが、これはシールド 2 号機が GFRC セグメント全断面の切削を開始した影響と考えられる（図-7）。

また、1567R 以降の施工ではジャッキスピードの大きな低下が見られる。これは全断面切削時に週末 2 日間の停止を挟んだことにより、チャンバー内の再固化の進行によるカッタートルクの上昇が発生したため、掘進速度を低下させ対応した結果によるものである。



写真-3 GFRC セグメント切削片 (FFU 筋材)

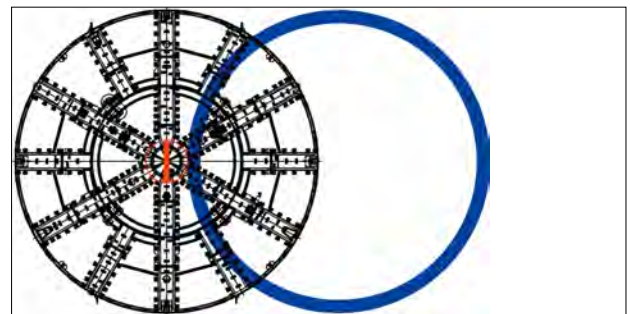


図-6 1549R: フィッシュテールによる切削開始

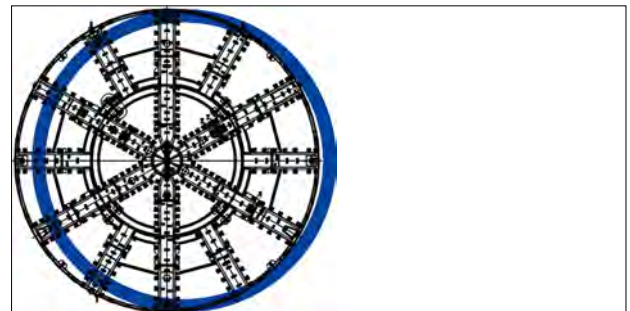


図-7 1563R: GFRC セグメント全周切削開始

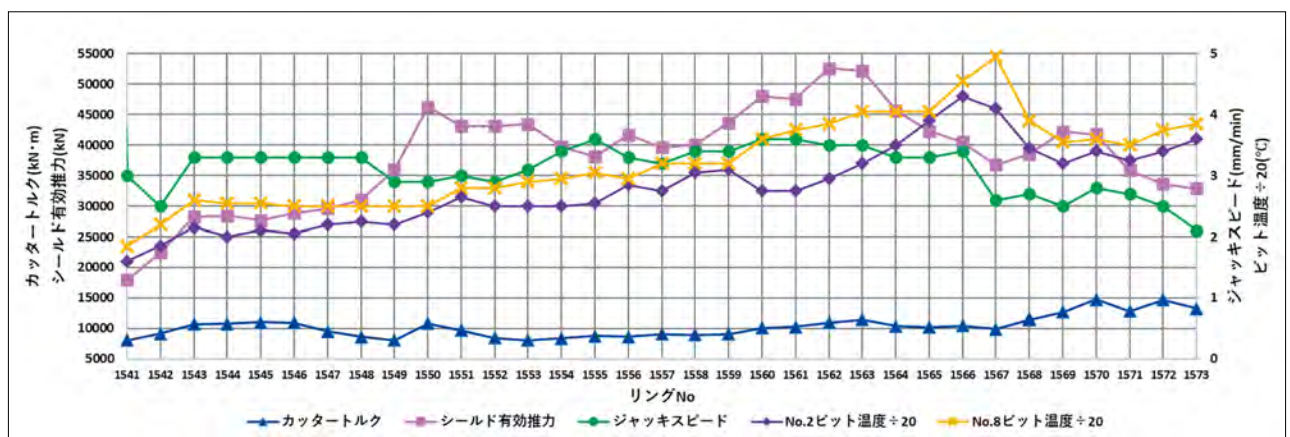


図-8 直接切削時掘進データ

§ 5. 直接切削時のビット管理

5-1 課題

本工事で実施する GFRC セグメントの直接切削掘進は、一般的なシールド工事の発進到達時の仮壁切削などと比較し、距離（約 53m）および施工期間（切削開始～到達まで停止期間を含め約 2 ヶ月）の両面で長期間となる施工である。シールド機のカッタービットの配置や管理の面から以下 2 点が課題であった。

(1) 長距離掘進後の直接切削

シールド 2 号機は約 2.7km の掘進後に地中接合箇所での GFRC セグメントの直接切削を行う。そのため、既にある程度の摩耗が想定されるカッタービットで、GFRC セグメントを長期間切削する際に、摩耗の進行によるカッタービットの脱落や変形が課題であった。

(2) 直接切削開始時の線形逸脱の防止

GFRC セグメントの直接切削は、2 号機切羽から見て右側から片あたりする形で開始する。摩耗により角が丸くなった最外周ビットでは、切削開始の切り込み時にシールド機が GFRC セグメントにより左側へ弾かれることが想定され、シールド機の線形管理も課題であった。

5-2 対策

切削時のカッタービットの脱落や損傷防止措置として、油圧式摩耗検知ビットによる摩耗確認と、温度センサー付きビットによるビットの温度管理を実施した（図-9）。また、切削開始時の切り込み用にレスキュービット（写真-4）を装備した。

(1) 摩耗検知ビット

シールド 2 号機には、摩耗量が摩耗限界値の 50mm となった場合に感知できる油圧式摩耗検知ビットを 2 カ所所装備した。多段式ではないため、段階的な摩耗量の計測はできない構造である。通常の掘進時には 1 回 / 週の頻度で摩耗検知確認を行っていたが、直接切削時には 1 回 / リングに確認頻度を上げて管理を行った。

(2) 温度センサー付きビット

温度センサー付きビットについても 2 カ所所装備していた。類似の他工事の実績なども考慮し、直接切削時には温度検知ビットの管理上限値を 100℃ と定め、切削時のビットの熱変形や脱落損傷を防止する計画とした。

(3) レスキュービットによる切削開始

GFRC セグメントの直接開始時の線形逸脱に対しては、レスキュービットを装備した。スポーク内に格納していた 4 基のレスキュービット（油圧ジャッキで伸縮可能な最外周ビット）を、切削開始直前に伸ばし、カッタースポークに固定することで、健全な外周ビットでの切削開始を可能にした。

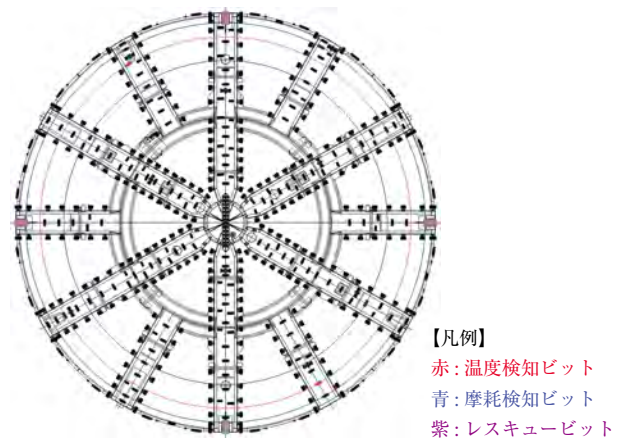


図-9 特殊ビット配置図

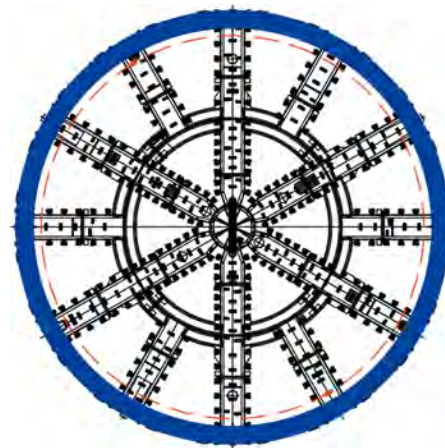


図-10 GFRC セグメント全周切削（1568R 以降）



写真-4
レスキュービット



写真-5
到達後のフィッシュテール

5-3 結果

到達後のカッタービットは、先行ビット・ティースビットともに軽微な欠けは部分的に発生していたが、大きな脱落や異常摩耗は確認されなかった。このことから、摩耗検知ビットおよび温度検知ビットを使用したビット保護措置については適正であったと推察される。図-8に示されているように、カッタービットの温度は切削開始から進捗に伴い、徐々に右肩上がりの傾向を示している。これは、直接切削が進むにつれ温度検知ビットが GFRC セグメントを切削する摺動距離が増加しているためである。また、1567R をピークに 1568R 以降の施工でビット温度が低下している。これは温度検知ビットが最外周に配置されていないため、1568R 以降では温度検知ビットが GFRC セグメントの直接切削を完了し、トンネル内部に充填した流動化処理土のみを切削しているためである(図-10)。

GFRC セグメントの切削開始時のシールド機の挙動は、当初懸念されていたように左側に弾かれることもなく、切削開始後も安定した姿勢制御が可能であった。また、1541R の切削開始時に有効推力の急激な上昇も見られなかったことから、所定のオーバーカット量を確保できていたと推察する。以上の結果から、長距離掘進後の GFRC セグメントの直接切削において、レスキュービットを装備したことは有効であったと考える。

§6. まとめ

(1) 切羽添加材の選定(再固化防止対策)

今回の施工で最も懸念されたチャンバー内での再固化については、事前の試験練り結果をベースとした注入計画に加え、施工時の瞬時トルクを確認することで再固化の予兆を確実に把握し、事前の対策を施すことで再固化による排土不良を防止し到達させることができた。

(2) GFRC セグメントの大割れ防止

事前の計画に沿って掘進を行うことで、大割れを防止し到達を迎えることができた。チャンバー内に排土されなかった大割れ片が残っていることも想定されたが、到達後に鋼製隔壁を解体する際にも、チャンバー内の確認を行った結果、大割れ片は全く確認されなかった。このことから、今回の施工での掘進速度・切込量の設定は適切だったと考えられる。

(3) 今後の改善点

今回の施工を終え、以下の点が今後の改善点として挙げられる。

①フィッシュテールビットの構造

到達後のフィッシュテールビットについては、他の先行ビットとは異なり、全チップが全摩耗や脱落している(写真-5)ことが確認された。ビット台座まで摩耗している箇所もあることから、発進時の仮壁切削や 2.7km の掘進中の摩耗であることも否定することはできないが、

フィッシュテールビットの形状等を工夫することで、脱落摩耗を防止することもできたのではないかと考えられる。チップを張り刃方式ではなく差し刃方式にすることや、フィッシュテールを錐型にすること、フィッシュテールを Y 字型にすることなどが有効であると考えられる。

②ビットの配置

温度センサービットと摩耗検知ビットの配置も改善の余地があるとする。今回の施工でセグメント切削の摺動距離が一番大きくなるのは、GFRC セグメントの中心とシールド 2 号機の中心が一致する掘進最終盤であった。今回のビット配置では、最終盤にセグメント切削を行うビットパスに温度検知ビットが配置されていなかったため、直接切削を行っているビットの温度を直接検知できない状況であった。同様の施工をまた行くとすれば、最外周部に温度検知ビットを配置することが望ましい。また、前述のフィッシュテールの件も考慮し、パス数が少なく掘進による負荷が大きくなりやすいフィッシュテール部に、摩耗検知ビットや温度検知ビットを取り付けることで、ビット負荷をより正確に把握することが可能になると考える。

本稿では横浜湘南道路トンネル工事のうち、急曲線部におけるシールド機での GFRC セグメントの直接切削による地中接合の実績について報告した。大断面シールドにおいて、急曲線トンネルを後方から直接切削する方式での地中接合は、世界的にも前例のない工事であったが、大きなトラブルなく無事に到達まで施工を完了することができた。

今後のシールド工事では、大深度化・輻輳化が進み、到達箇所・接続箇所に従来のように立坑を設置することが困難なケースが増えることが予見される。本工事での実績を活用することで、直接接合方式での施工を行う現場の安全かつ確実な施工に繋がれば幸いである。

参考文献

- 1) 大江・久住・坪井ほか：アラミド繊維を混入した FFU 切削セグメントの性能確認試験-その 1, 土木学会第 71 回年次学術講演会 VI-833, 2016 年
- 2) 大江・久住・坪井ほか：アラミド繊維を混入した FFU 切削セグメントの性能確認試験-その 2, 土木学会第 71 回年次学術講演会 VI-845, 2016 年
- 3) 大江・久住・坪井ほか：アラミド繊維を混入した FFU 切削セグメントの性能確認試験-その 3, 土木学会第 73 回年次学術講演会 VI-174, 2018 年
- 4) 鷲見・坪井・村上・三戸：切削セグメントの施工および計測結果, 西松建設技報 Vol.43, 2020 年