

# 切削セグメントの施工および計測結果 Construction and measurement results of the concrete segments to enable cutting by shield machine

鷺見 悟*	坪井 広美*
Satoru Sumi	Hiromi Tsuboi
村上 初央**	三戸 憲二***
Hajime Murakami	Kenji Mito

## 要 約

横浜湘南道路は首都圏3環状道路の一番外側に位置しており、高速横浜環状南線IC・JCT（仮称）と新湘南バイパス藤沢ICとを結ぶ7.5kmの高規格幹線道路である。

横浜湘南道路トンネル工事は、2機のシールドマシン（以下、シールド）を用いてそのトンネル部分を築造する工事である。シールド1号機は道路敷地外に設置された立坑から発進し、曲線半径R99.5mで道路敷地内の道路線形に擦り付けてトンネルを築造する。シールド2号機はシールド1号機が通過した曲線区間のセグメントを直接切削し、地中接合することで1本の道路トンネルを築造する計画となっている。

本文は、シールド1号機で行った切削セグメントの施工および計測結果について報告するものである。

## §1. はじめに

横浜湘南道路は、首都圏3環状道路、首都圏中央連絡自動車道（圏央道）の一番外側に位置しており、高速横浜環状南線IC・JCT（仮称）と新湘南バイパス藤沢ICとを結ぶ7.5kmの高規格幹線道路である。図-1に横浜湘南道路位置図を示す。横浜湘南道路を始めとした圏央道が開通すると、横浜本牧JCTから東名高速道路の海老名JCTまで8分、全線開通後は中央自動車道八王子JCTまでは64分短縮される。さらには渋滞緩和、災害時の輸送ルートの確保にも期待されている。

本工事は、そのトンネル部分を2機のシールドを用いて築造する工事である。シールド1号機は道路敷地外に設置された立坑から発進し、曲線半径R99.5mで道路敷地内の道路線形に擦り付けてトンネルを築造する。シールド2号機はシールド1号機が通過した曲線区間のセグメントを直接切削し、地中接合することで1本の道路トンネルを築造する計画となっている。図-2に直接切削イメージ図を示す。



図-1 横浜湘南道路位置図

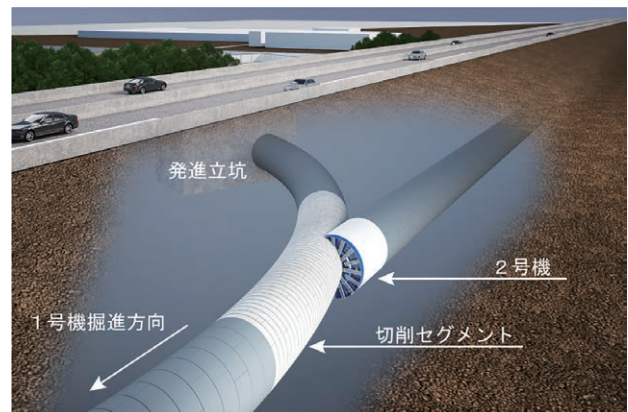


図-2 直接切削イメージ図

\* 関東土木（支）横浜湘南道路（工）

\*\* 土木設計部設計二課

\*\*\* 技術研究所

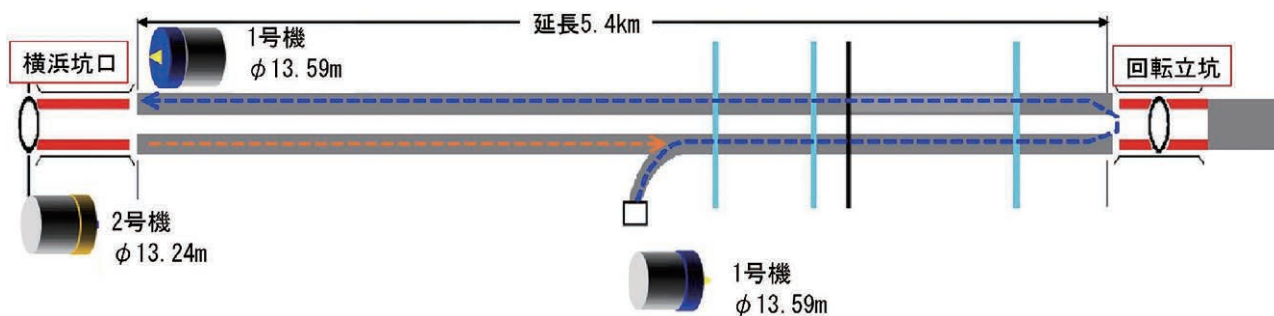


図-3 路線平面図

§2. 工事概要

路線平面図を図-3に示す。シールド1号機は外径φ13.59 m、シールド2号機は外径φ13.24 mである。シールド1号機は発進立坑より発進後、曲線半径99.5 mの曲線施工を行った後、回転立坑に向けて、上り線約2.7 kmを掘進する。回転立坑に到達後、Uターンし、横浜坑口に向けて、下り線約5.4 kmを掘進する。シールド2号機は横浜坑口から回転立坑に向けて掘進後、シールド1号機が通過した曲線区間のセグメントを直接切削し、地中接合することで上り線・下り線の道路トンネルを築造する計画となっている。

§3. 切削セグメント（構造上の工夫）

本工事中は、シールド1号機が施工した曲線区間のセグメントをシールド2号機で切削する必要があるため、切削可能なコンクリート系セグメントの適用が求められた。そこで、今回は切削性に優れたFFU切削セグメントを開発し<sup>1-3)</sup>適用した。構造上の工夫を以下に列挙する。

筋材には切削性確保のため、FFU（硬質ウレタン樹脂をガラス繊維で強化したもの）を使用した。FFUは立坑坑口部での仮壁直接切削工法としての使用実績は多いが、コンクリート系セグメントへの使用は前例がなく、初めての試みである。写真-1にFFU筋材を示す。

コンクリート骨材には多孔質であり、切削しやすい軽量骨材コンクリートを使用した。また、コンクリートにはアラミド繊維（長さ35 mm、直径0.5 mm）を0.5 vol%混入し、曲げ強度の向上～施工時荷重によるひび割れ発生を抑制を図った。

リング継手には部分ほぞ構造を採用した。切削性確保のためリング間の接続には、ボルトや金物類を一切使用せず、リング継手は部分ほぞに加えてガラス繊維強化樹脂製のダウエルバーを使用した。また、リング継手面にはジャッキ推力の緩衝材として、発砲ポリエチレン板を設置した。写真-2にリング継手構造の外観を示す。

セグメント継手は突き合わせ継手とし、セグメント組立用として切削可能なガラス繊維強化樹脂製の斜めボルト、目違い防止のために樹脂製ガイダンスロッドを使用した。図-4にセグメント継手構造の断面図を示す。



写真-1 FFU筋材



写真-2 リング継手構造の外観  
(部分ほぞ+ガラス繊維強化樹脂製ダウエルバー)

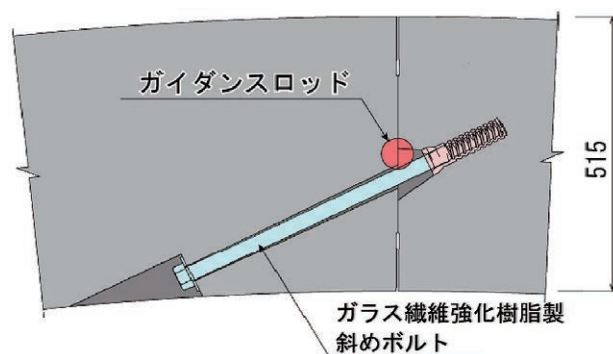


図-4 セグメント継手構造の断面図

§4. 技術的課題

本工事における技術的課題として、大断面シールド・急曲線部へのコンクリート系セグメントの適用が挙げら

れる。

現在までのφ10.0 m以上の大断面シールドトンネルの施工実績では、急曲線部へのコンクリート系セグメントの適用は、外径φ12.14 m、曲線半径R180 mが最小である（曲線半径／外径=180/12.14=14.8）。これは大口径・急曲線施工では施工時荷重の影響が大きいこと、急曲線部ではセグメント幅が狭いため目開き～目違い～施工時荷重の影響でひび割れ～漏水が生じやすいことから、コンクリート系セグメントの適用が難しいためである。本工事の施工条件（外径φ13.59 m、曲線半径R99.5 m）は、このコンクリート系セグメント適用の最小半径の実績を大きく下回り（曲線半径／外径=99.5/13.59=7.3<14.8）、しかも将来施工のために切削可能な部材を用いなければならないという難条件であったため、シールドの施工時荷重の影響に対して、十分な対策を講じる必要があった。

シールド急曲線施工イメージを図-5に示す。シールド急曲線施工では、カーブ内側よりも外側に大きな推力を作用させ、トンネル軸方向に曲げモーメントを作用させる。このとき、カーブ内側と外側のジャッキ推力差（偏心量）が大きいほど曲げモーメントが大きくなり、カーブ内側に引張力が発生し、目開き等の原因となる。目開きが発生すると、線形の確保が困難となり、セグメントにひび割れ～漏水等が発生する。また、切削セグメントのリング継手は切削することを考慮した樹脂製ダウエルバーであるため、引張力に対する抵抗が金属製のボルト継手に比べて小さい。

§5. 施工時荷重低減対策

大断面シールド・急曲線施工時荷重の低減対策として、以下の施工方法を採用した。

- ① FLEX制御<sup>4)</sup>（力点制御ジャッキ）を装備し、セグメントへの偏荷重を抑制した。従来方式ではジャッキ1本毎の推力を調整できないため、急曲線施工時にはカーブ内側のジャッキ作動本数を減らす、いわゆる片押し状態で掘進を行っていたが、FLEX制御を装備することで、ジャッキ推力の偏心量を調整することが可能となり、セグメントに過度な偏荷重を作用させずに掘進を行った。
- ② 3次元余掘り管理システム、3次元テールクリアランス管理システムを採用し、適切な余掘り～テールクリアランスを逐次管理しながら掘進することで、テールでの競りを防止し、セグメントに過度な施工時荷重を作用させずに掘進を行った。図-6、7に3次元余掘り管理システム、3次元テールクリアランス管理システムを示す。
- ③ 自動測量システム（Robotec）を採用し、シールド内に設置したプリズムターゲットを、自動追尾可能なトータルステーションにより自動測量し、線形管理を行っ

た。

- ④ 掘進時にはジャッキ偏荷重の作用によりセグメント内側（曲線内側）に万一、引張力が発生する場合に備えて、引張力に抵抗する目開き防止用のプレートを切削

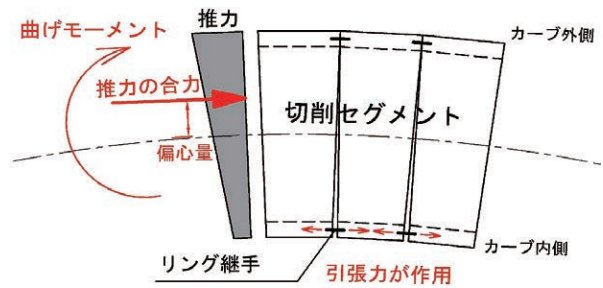


図-5 シールド急曲線施工イメージ

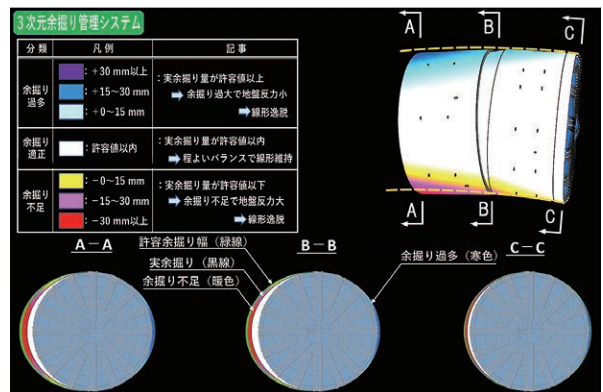


図-6 3次元余掘り管理システム

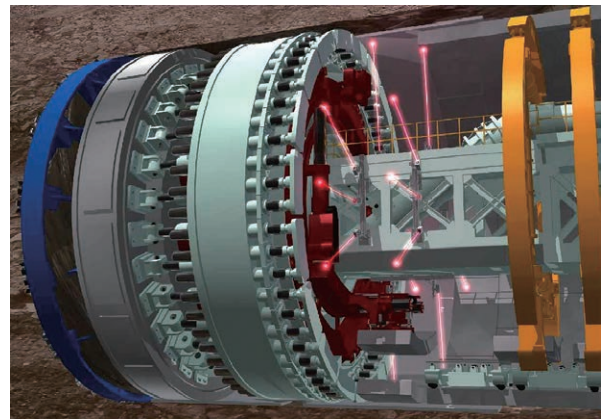


図-7 3次元テールクリアランス管理システム

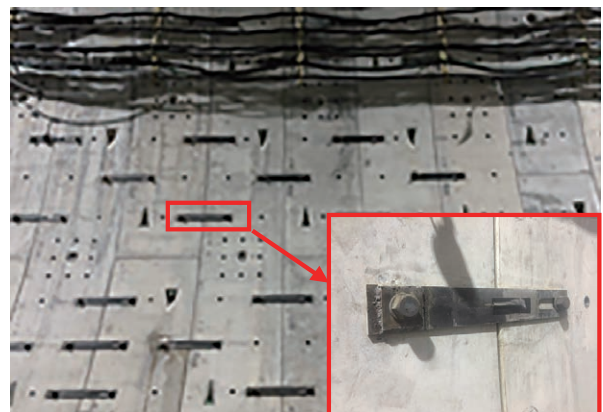


写真-3 目開き防止プレート

セグメント左右部に設置した。目開き量管理値は、止水シールの止水性を考慮して±3 mmと設定した。写真-3に目開き防止用プレートを示す。

⑤急曲線施工では、曲線内側よりも外側に大きなジャッキ推力を作用させる。このジャッキ推力の偏心量（内外のジャッキ荷重差）が大きいほど、曲線内側に大きな引張力が作用し、セグメントにひび割れや目開きが発生するリスクが高くなる。このため、急曲線施工時に切削セグメントに目開きやひび割れが発生しない様に、設計上の限界偏心量を事前に算定し、ジャッキ推力の偏心量管理を徹底して掘進管理を行った。

§6. 切削セグメント施工結果

限界偏心量の80%を管理値として掘進管理を行った結果を図-8に示す。中央制御室で偏心量のリアルタイム表示、FLEX制御によるジャッキ推力の偏心量調整を行うことで、切削セグメントに目開き、有害なひび割れ～漏水を発生させることなく掘進を終えることができた。

また、切削セグメント区間での左右蛇行量を図-9に示す。設計左右蛇行量の80%を管理値として定め、掘進管理を行った。前例のない急曲線でのコンクリート系セグメントを使用した施工であったが、中央制御室での線形管理システム、自動測量システムを用いたシールド線形のリアルタイム表示～施工管理を行うことで、管理値内で施工を完了することができた。

§7. 切削セグメント測定結果

前章で述べた様に、急曲線部での切削セグメントの施工は良好であった。ここでは切削セグメント区間(71 R)のうち、切削1-2 R間で実施した曲線内側引張力のトン

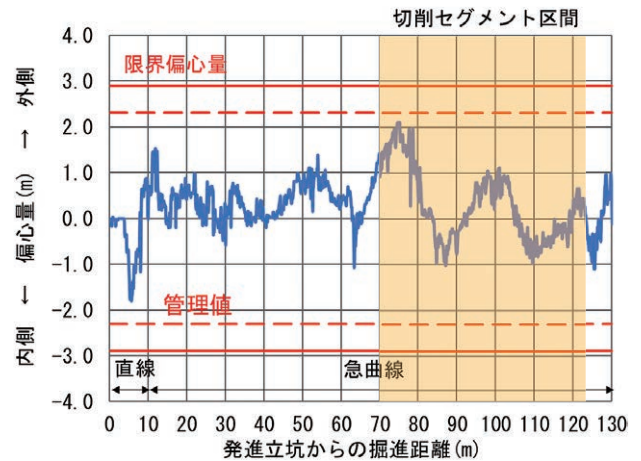


図-8 偏心量管理結果

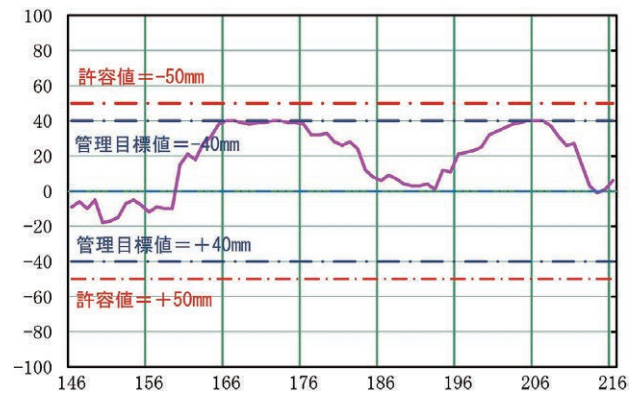


図-9 切削セグメント左右蛇行量

ネル軸方向ひずみ、目開き量の計測結果について報告する。シールド発進直後の急曲線区間は立坑から52.5 mまでが鋼製セグメント (B500 mm×105 R) 区間、52.5 mから105.75 mまでがRCおよび切削セグメント (B750 mm×71 R) 区間である。図-10に切削セグメント計測位置図、表-1に計測項目を示す。

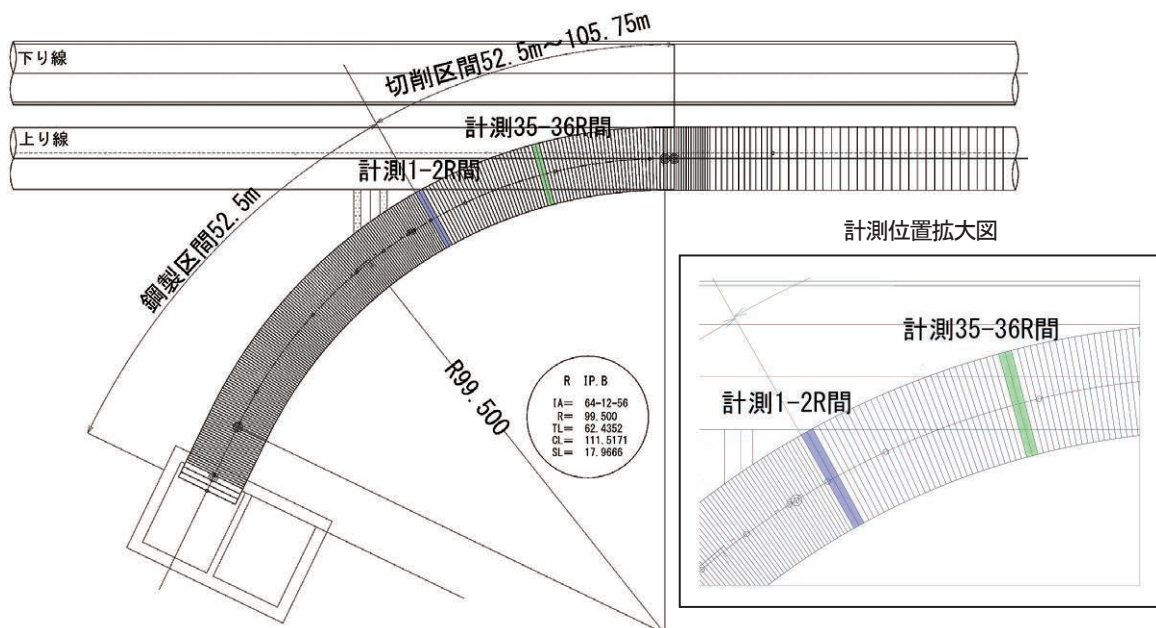
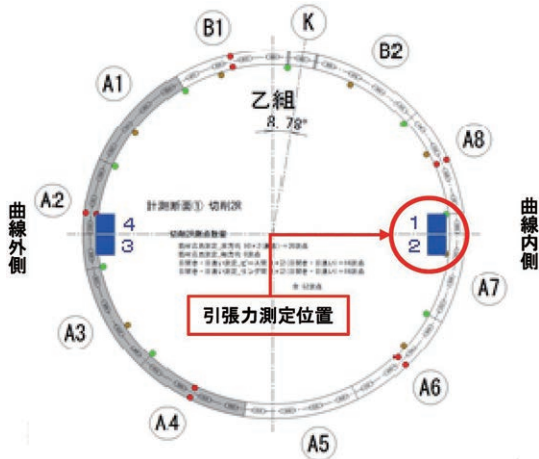


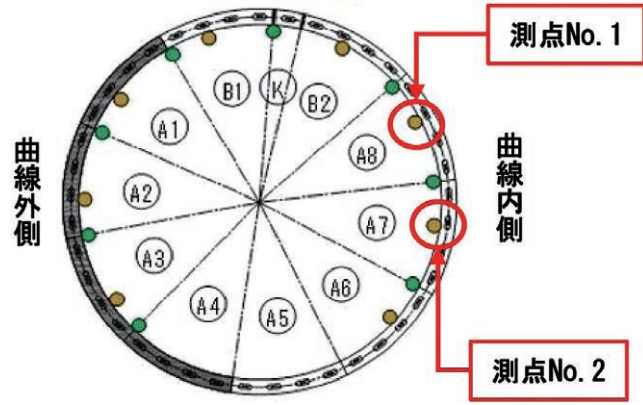
図-10 切削セグメント計測位置

表一 計測項目

計測項目		目的
曲線内側引張力 (目開き防止プレート)	リング間	急曲線施工時のジャッキ推力偏心量による曲線内側への引張力測定
セグメント目開き	リング間 ピース間	継手変位挙動

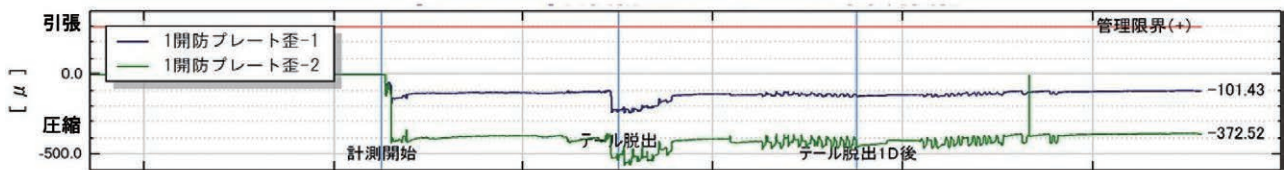


図一 11 リング間引張力計測位置図

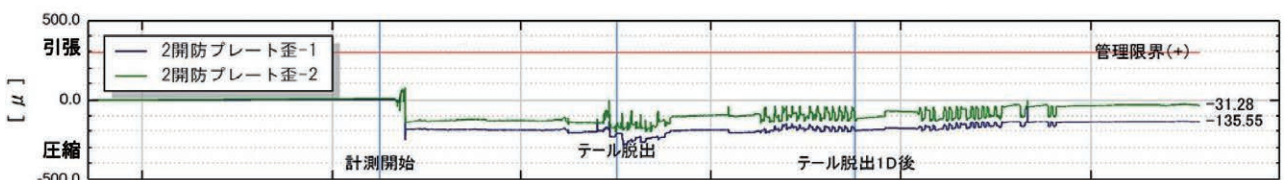


図一 13 リング間目開き・目違い測定位置図

切削1-2R間目開き防止プレート計測結果



切削2-3R間目開き防止プレート計測結果



図一 12 リング間引張力測定結果

① リング間引張力測定結果

リング間引張力測定位置図を図一11、測定結果を図一12に示す。測定位置は曲線内側、スプリングライン付近で行った。測定方法はリング間に設置された目開き防止プレート上にひずみ計を設置し、計測を行った。

計測の結果、計測開始直後から圧縮力が作用し、テール脱出 1.0 D 後しばらくは、継続して作用しているが、その変化は小さく、最終的には収束する結果となった。

この変化傾向からジャッキ推力の偏心量を、FLEX 制御によって適切に管理できていたため、カーブ内側に懸念されていた引張力を発生させることなく、安全性を確保しながら、シールド方向制御を行えたことが分かる。

② リング間目開き・目違い測定結果

図一13にリング間目開き・目違い測定位置図、図一14に測定結果を示す。

切削セグメント 1-2 R のリング間でも引張力測定と同

様に、曲線内側でリング間目開き・目違いの測定を行った。計測位置は、スプリングライン付近の2箇所とした。

計測の結果、目開き量は計測開始からテール脱出 1.0 D 後以降も大きな変化はなく、最大変位で -0.75 mm とほぼ発生していないことが分かった。

目違いの変化は、測点 No.1 において、計測開始直後から開く (+) 方向へ働き、テール脱出 1.0 D 後には閉じる (-) 方向へ変化し、その後は収束する結果となった。

これは、シールドのテールブラシの拘束圧がなくなって、一度目開きした後、裏込め注入を適切に行ったことで閉じたものと考えられる。最終的には、最大変位 -1.47 mm と許容値内での挙動であった。

引張力計測で引張力の発生が確認されなかったこと、目開き・目違い計測でも許容値内での挙動であったこと、セグメントに有害なひび割れ～漏水等が発生しなかったこと、所定の施工精度を確保できたことから、施工時荷

切削セグメント1-2R リング間目開き・目違い

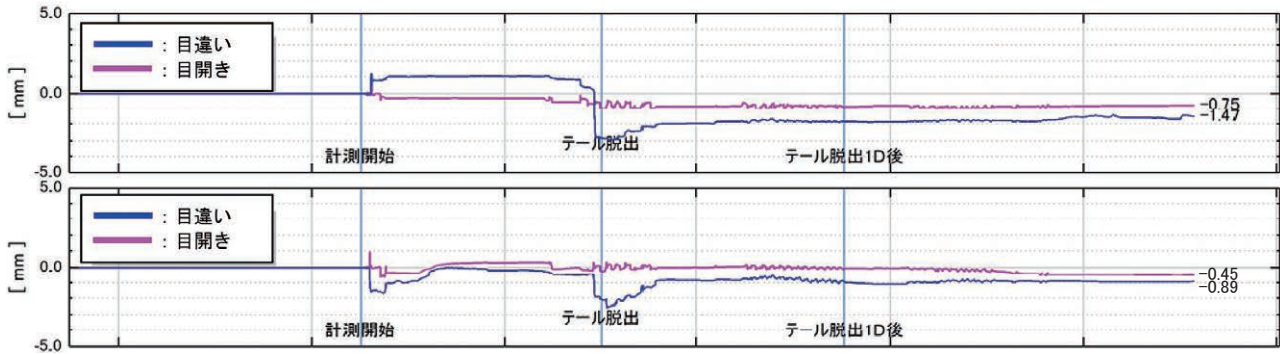


図-14 リング間目開き・目違い計測結果

重低減対策の効果が十分に発揮され、良好な施工ができたものと考えられる。写真-4に切削セグメント組立状況、写真-5に切削セグメント坑内状況を示す。

§8. おわりに

今回の切削セグメントの施工は、従来にない急曲線部へのコンクリート系セグメントの適用、切削可能な部材の適用という難条件であったが、さまざまな構造上の工夫、施工設備および施工管理の工夫、ジャッキ推力偏心量の徹底した管理により、良好な施工結果を得ることができた。本工事の施工実績が、今後の同様の計画に役立てば幸甚である。

謝辞. 切削セグメントを開発、施工するにあたっては、立命館大学総合科学技術研究機構上席研究員・小山幸則先生にご指導を頂戴した。成果をまとめるにあたり、深く感謝申し上げる次第である。

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
- 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
- 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



写真-4 切削セグメント組立状況



写真-5 切削セグメント坑内状況

- 学会第73回年次学術講演会 VI-174, 2018
- 4) 東洋工業株式会社, 有限会社イング; 自動方向制御システム「FLEX」