

併設するシールドトンネル施工時の光ファイバ計測による影響評価

鹿島建設（株） 正会員 ○辻良祐 有賀大峰
 鹿島建設（株） 正会員 永谷英基 小坂琢郎
 鹿島建設（株） 正会員 望戸健雄 石井直樹

1. 概要

横浜環状南線公田笠間トンネル工事では、泥土圧シールド工法が採用されており、先行トンネルを構築後、回転立坑でシールドマシンを回転させ、後行トンネルを構築する併設トンネルである。両トンネルのセグメント間の最小離隔は1 m しかないため（図-1）、後行トンネルの施工（先行・後行ともにマシン外径 15.28 m）によって、切羽圧や裏込め注入圧が作用し先行トンネルのセグメントにクラックや目開き、目違いなどの不具合を生じさせる可能性があった（図-2）。そこで、後行トンネルの初期掘進を併設施工トライアル区間と位置付け、光ファイバを先行トンネルのセグメント（合成セグメント）表面に設置し、後行トンネル掘進時に発生するひずみの監視を行った。また、併設施工影響を再現するために、2 次元および3 次元解析を実施したのでその結果を報告する。

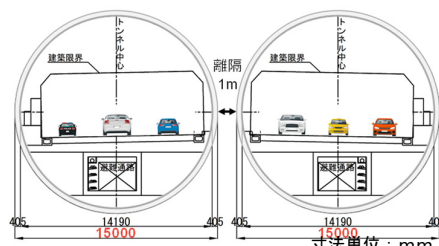


図-1 標準横断面図

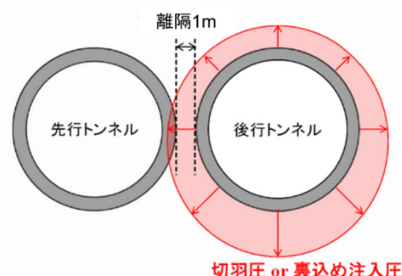


図-2 影響イメージ

2. 計測計画

回転立坑から 170 m までの初期掘進区間において、表-1 に示す計測を実施した。計測計器設置位置の概要を図-3 に示す。セグメント（幅 2 m）の変位は、プリズム（1 箇所／2～3 R）を先行トンネルのスプリングライン（SL）付近に配置し、トータルステーションで自動計測した。セグメントのひずみは、コンクリート表面に設置した光ファイバで計測した。

表-1 初期掘進時の先行トンネル計測項目

計測項目	計測計器	数量	備考
セグメントの変位	トータルステーション	4 2 か所	・先行トンネルの復路側スプリングライン（SL）付近 ・坑口から30mまでは2Rに1か所 ・坑口から30～170mまでは3Rに1か所
セグメントのひずみ（円周方向）	光ファイバ	2 測線	・先行トンネル945Rと933R ・避難通路BOXを除く全周
	ひずみゲージ	3 カ所	・先行トンネルの945Rと933Rの0時，3時，9時の位置
セグメントのひずみ（軸方向）	光ファイバ	4 測線	・ひずみ計測用：先行トンネルの坑口から170mまで、後行トンネル側に3測線設置（設置高さはSL+20mm，SL+40mm） ・温度計測用：ひずみ計測用光ファイバに並行して1測線設置（設置高さはSL+60mm）
	ひずみゲージ	3 カ所	・先行トンネルの952R，912R，872Rに設置

光ファイバはひずみ計測用と温度計測用の2種類を使用し、軸方向にはSL付近に4 測線、円周方向には先行トンネルの945 R（回転立坑から約 20 m の位置）と 933 R（回転立坑から約 44 m の位置）に2 測線ずつ避難通路 BOX を除くセグメント内側全周（円周長 50 m）に設置した。また、光ファイバの計測結果を比較するために、軸方向は952 R，912 R，872 R において、円周方向は945 R と 933 R の 0 時，3 時，9 時の位置にひずみゲージを設置した。

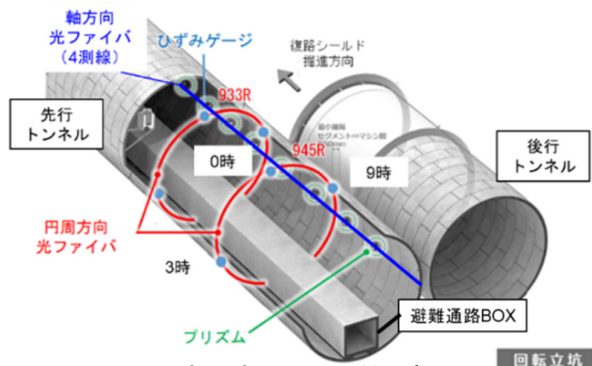


図-3 計測計器の設置位置概要図

キーワード 分布型光ファイバ，泥土圧シールド，ひずみ計測，併設トンネル

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設（株）技術研究所 TEL 042-485-1111

3. セグメントへの光ファイバの設置方法と計測概要

(1) 光ファイバ設置方法

光ファイバを設置するため、セグメントの表面をケレンし、アセトンで清掃した後に、光ファイバをセグメントに瞬間接着剤で仮固定しながら配線した。配線完了後に2液性のエポキシ系接着剤で完全に固定した(図-4)。リング継手間は10mmほどの隙間があり、



図-4 光ファイバ設置状況

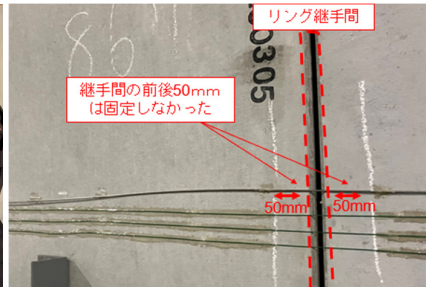


図-5 リング継手間の状況

セグメントが何らかの影響で変形した場合、光ファイバが断線する恐れがあったため、隙間の前後50mmの部分は接着剤による固定をせず(図-5)、これらの位置は欠損区間として扱った。

(2) 光ファイバによる計測概要

光ファイバの計測はレイリー方式¹⁾を用いて行い、計測仕様は空間分解能5.0cm、測点間隔5.0cmとして分布計測を実施し、計測は15分に1回行った。計測結果はリアルタイムに中央制御室の掘進オペレータと共有できる環境を構築した。

4. 計測結果

計測結果の一例を表-2

に示す。マシンが先行トンネルの945Rに近づくにつれ、円周方向945Rの光ファイバの一部で圧縮ひずみが100μεほど増加(表-2の表中青線枠)した。この

とき、トータルステーションによる測量によると、セグメントがトンネル内空側に1.5mmはらみ出したため、即座に当該位置のセグメントを視認し、セグメントにクラック等の不具合が発生していないことを確認した。また、光ファイバで計測された圧縮ひずみは設計の破壊ひずみよりも小さい値であったため、経過観察をしながら掘進を再開し、有害なクラックをセグメントに発生させなかった。はらみ出しの原因は後行トンネル掘進時の切羽圧が影響したと考えられる。

また、光ファイバで計測された圧縮ひずみは設計の破壊ひずみよりも小さい値であったため、経過観察をしながら掘進を再開し、有害なクラックをセグメントに発生させなかった。はらみ出しの原因は後行トンネル掘進時の切羽圧が影響したと考えられる。

また、光ファイバで計測された圧縮ひずみは設計の破壊ひずみよりも小さい値であったため、経過観察をしながら掘進を再開し、有害なクラックをセグメントに発生させなかった。はらみ出しの原因は後行トンネル掘進時の切羽圧が影響したと考えられる。

また、光ファイバで計測された圧縮ひずみは設計の破壊ひずみよりも小さい値であったため、経過観察をしながら掘進を再開し、有害なクラックをセグメントに発生させなかった。はらみ出しの原因は後行トンネル掘進時の切羽圧が影響したと考えられる。

また、光ファイバで計測された圧縮ひずみは設計の破壊ひずみよりも小さい値であったため、経過観察をしながら掘進を再開し、有害なクラックをセグメントに発生させなかった。はらみ出しの原因は後行トンネル掘進時の切羽圧が影響したと考えられる。

また、光ファイバで計測された圧縮ひずみは設計の破壊ひずみよりも小さい値であったため、経過観察をしながら掘進を再開し、有害なクラックをセグメントに発生させなかった。はらみ出しの原因は後行トンネル掘進時の切羽圧が影響したと考えられる。

また、光ファイバで計測された圧縮ひずみは設計の破壊ひずみよりも小さい値であったため、経過観察をしながら掘進を再開し、有害なクラックをセグメントに発生させなかった。はらみ出しの原因は後行トンネル掘進時の切羽圧が影響したと考えられる。

また、光ファイバで計測された圧縮ひずみは設計の破壊ひずみよりも小さい値であったため、経過観察をしながら掘進を再開し、有害なクラックをセグメントに発生させなかった。はらみ出しの原因は後行トンネル掘進時の切羽圧が影響したと考えられる。

また、光ファイバで計測された圧縮ひずみは設計の破壊ひずみよりも小さい値であったため、経過観察をしながら掘進を再開し、有害なクラックをセグメントに発生させなかった。はらみ出しの原因は後行トンネル掘進時の切羽圧が影響したと考えられる。

また、光ファイバで計測された圧縮ひずみは設計の破壊ひずみよりも小さい値であったため、経過観察をしながら掘進を再開し、有害なクラックをセグメントに発生させなかった。はらみ出しの原因は後行トンネル掘進時の切羽圧が影響したと考えられる。

また、光ファイバで計測された圧縮ひずみは設計の破壊ひずみよりも小さい値であったため、経過観察をしながら掘進を再開し、有害なクラックをセグメントに発生させなかった。はらみ出しの原因は後行トンネル掘進時の切羽圧が影響したと考えられる。

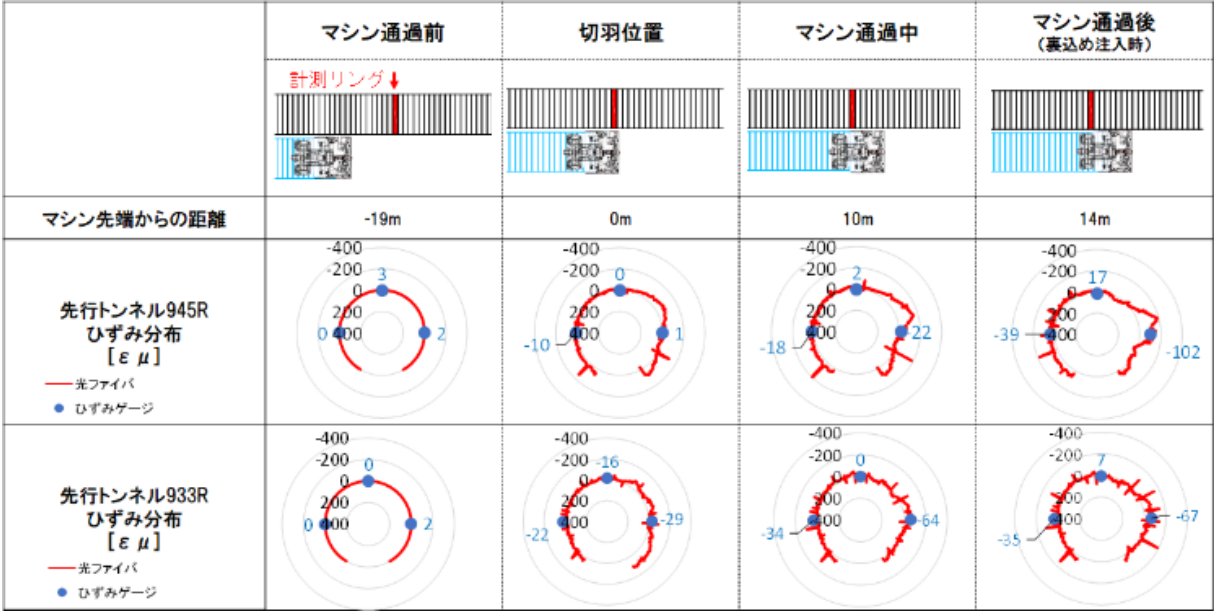
また、光ファイバで計測された圧縮ひずみは設計の破壊ひずみよりも小さい値であったため、経過観察をしながら掘進を再開し、有害なクラックをセグメントに発生させなかった。はらみ出しの原因は後行トンネル掘進時の切羽圧が影響したと考えられる。

表-2 計測結果(円周方向945R)

	マシン位置：先行トンネル947R (945Rの2R前)	マシン位置：先行トンネル945R
マシンと945Rの関係		
自動測量による945Rの変位		
945Rのひずみ分布		

また、945 R と 933 R における、マシン（切羽）との位置関係から「マシン通過前」「切羽位置」「マシン通過中」「マシン通過後（裏込め注入時）」のそれぞれの施工状況におけるセグメント変位量とひずみを詳細に整理した（表－3）。光ファイバとひずみゲージの計測値はよく合致しており、光ファイバ計測値をみると、切羽位置においてすでに併設施工影響に伴う圧縮ひずみ（ひずみ値はマイナスが圧縮ひずみ）が発生していることが確認できる。また、切羽通過以降は、併設施工影響による圧縮ひずみは増大しており、残留している。

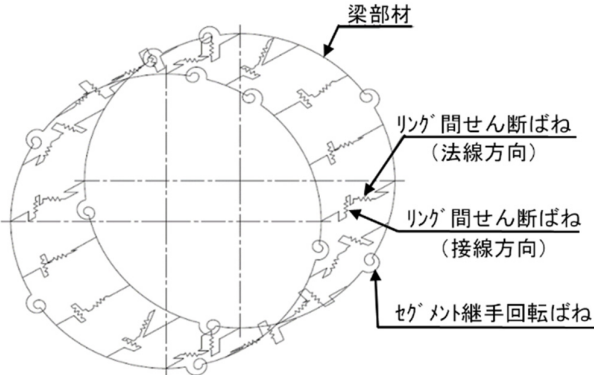
表－3 先行トンネル 945R および 933R のセグメント変位およびひずみ分布(施工状況別)



5. 2次元解析モデルを用いた再現解析

(1) 解析条件

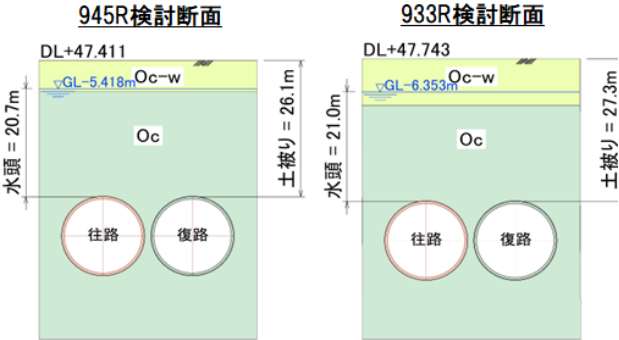
再現解析に用いる梁ばね解析モデルは2リングモデルとした(図－6)。セグメントの構造条件と単設トンネル時の設計の考え方を表－4、再現解析を行った 945 R と 933 R の検討断面を図－7に示す。単設トンネル時は土水圧荷重によるセグメント継手部の軸圧縮力が卓越し全断面圧縮状態となっており、併設施工時においても全断面圧縮状態となることからセグメント継手の回転ばねは剛結設定とした。また、1-2 リング間のリング間せん断ばねは本工事の単設時トンネル設計と同様に線形ばねを設定した。



図－6 2リング梁ばね解析モデル概念図

表－4 セグメント構造条件、設計の考え方

セグメント形式	嵌合方式合成セグメント
セグメント外径	Do = 15,000mm
セグメント内径	Di = 14,190mm
セグメント図心半径	Rc = 7,298mm
セグメント幅	B = 2,000mm
セグメント厚	h = 345+60mm (内面に耐火層60mm)
セグメント分割数	10+K
土と水の考え方	土水分離
鉛直土圧の考え方	緩み土圧 (鉛直土圧の下限値は1Do)
側方土圧係数	λ = 0.35
地盤反力係数 (地盤ばね)	$k = 207\text{MN/m}^3$ $k = k_0 \cdot (Bv/0.3)^{-3/4} (\text{kN/m}^3)$ $k_0 = E0/0.3$ Bv:トンネル外径Do E0:地盤の変形係数(kN/m ²)



図－7 再現解析の検討断面

後行シールドによる併設影響を再現するに当たって、先行トンネルに作用させる増分荷重および地盤ばねを次のように設定した(図-8)。増分荷重は光ファイバ計測の圧縮ひずみが再現できる荷重として全土被り相当の有効土被り圧を最大値とする三角形分布荷重をトンネル幅にわたり鉛直方向に作用させ、水平方向増分荷重は有効土被り圧に側方土圧係数 $\lambda(=0.35)$ を乗じることとした。地盤ばねは、先行・後行トンネル間の地山が後行トンネル側テールボイド発生により変形し、その地山の変形に追従する形でセグメントが変形するものと想定されるため、その挙動を再現できるようにテンションばね(引張側有効)とし、全周を一律低減してセグメント変位を再現した。なお、先行トンネル中心の変位をゼロと仮定し、計測変位量＝セグメント変形量として再現解析を行った。

(2) 計測結果との比較

地盤ばねを低減してセグメント変位量を合致させた時の解析のひずみ分布と計測結果の比較を表-5に示す。解析結果は、実測したひずみ値とひずみ分布を概ね再現することができており、2次元梁ばねモデルを構築することができた。

6. 3次元解析モデルを用いた再現解析

(1) 解析条件

回転立坑から42R(84m)分の先行トンネルをモデル化した。解析プログラムは施工ステップごとの応力・変位の累積が求められるFEANX(マイダスアイティ)を用いた。シールドトンネルは、セグメント本体をシェル要素、セグメント継手は回転ばね(剛結合)およびせん断ばね、リング継手は引張ばねおよびせん断ばねでモデル化した。地盤の緩みに伴う増分荷重は2次元モデルで構築した基本モデルを元に、マシン通過前の地山緩み範囲(切羽前方の45°影響線範囲)からマシン通過後まで荷重を漸増させて載荷した(図-9)。

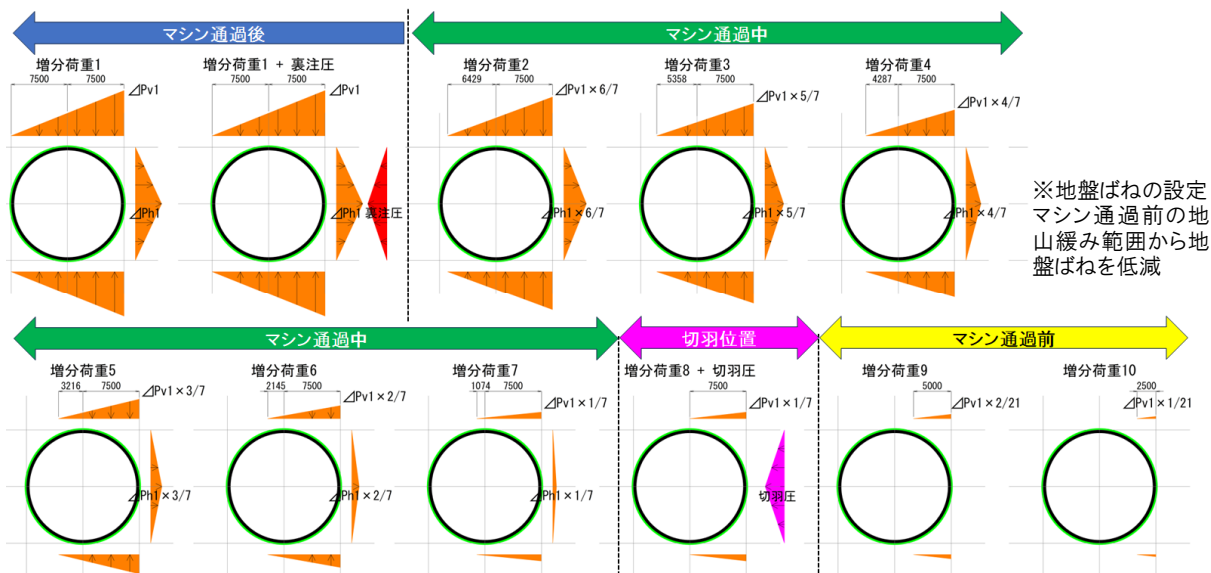


図-9 先行トンネル荷重図

全土被り分の有効土圧 ΔP_v1

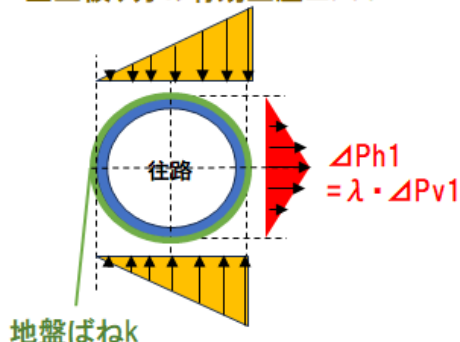
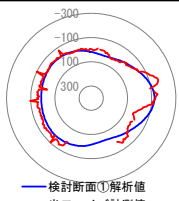
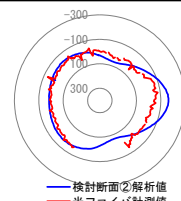


図-8 荷重と地盤ばねの設定

表-5 解析のひずみ分布と計測結果の比較

検討断面	945R	933R
増分荷重	$\Delta P_v1=358.2(\text{kN/m}^2)$ $\Delta Ph1=125.4(\text{kN/m}^2)$	$\Delta P_v1=377.5(\text{kN/m}^2)$ $\Delta Ph1=132.1(\text{kN/m}^2)$
地盤ばね値k	$k=70(\text{MN/m}^3)$	$k=44(\text{MN/m}^3)$
セグメント変位量(計測値＝解析値)	4.0 mm	6.7 mm
ひずみ分布 $\epsilon[\mu]$		

また、先行トンネルが後行シールドから受けるシールドからの影響を模擬するため、解析 1 ステップごとに切羽圧や裏込め注入圧の作用位置を 1 R (2m) ずつ前進させた。裏込め注入圧はシールド機後端位置、切羽圧はカッター部位置の先行トンネル 1 R の範囲に載荷した (図-10)。

(2) 計測結果との比較

945 R と 933 R に着目し、後行シールドの切羽からの距離でセグメント変位の変化を整理した結果を図-11 に示す。後行シールドの切羽が近接するに伴って先行トンネルセグメントがトンネル内側に変位し、切羽通過後はセグメントがシールド余掘りの影響等によりトンネル外側に変位し、さらに裏込め注入の圧力の影響によりシールド内側に変位した後、テールボイドの影響で最終的にシールド外側に引っ張られるように変位する挙動が計測されており、図-11 に示すように実計測された変位挙動を解析モデルでは精度よくトレースすることができた。また、解析による先行トンネルの変形図の一例を図-12 に示す。当初、切羽圧によるトンネル内側への変位が全く発生しない解析結果であったが、図-9 に示すようにマシン通過前からマシン通過中までの増分荷重を漸増させることで切羽圧によるトンネル内側への変位を再現できるようになった。これはトータルでの増分荷重が実際よりも大きすぎることが影響していたものと推察され、3 次元解析ではマシン通過中までの荷重は 2 次元モデルで設定した荷重よりも小さく設定する必要があることが分かった。

解析モデル範囲の中央に位置する 933 R の切羽圧載荷時、通過中、裏込め注入圧載荷時におけるトンネル周方向のひずみ分布図を図-13 に示す。解析値と計測値のひずみレベルとひずみ分布が概ね一致することが確認できた。また、トンネル軸方向のひずみを切羽離れ距離で整理したグラフ

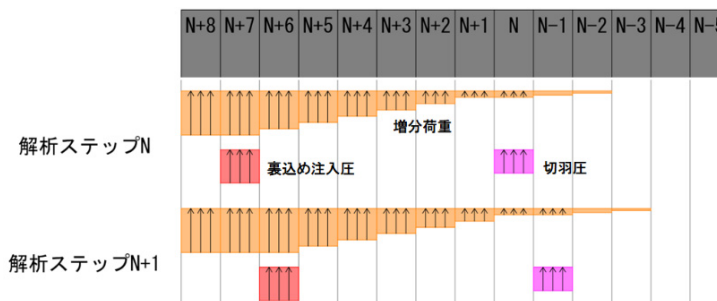


図-10 施工時荷重の載荷方法

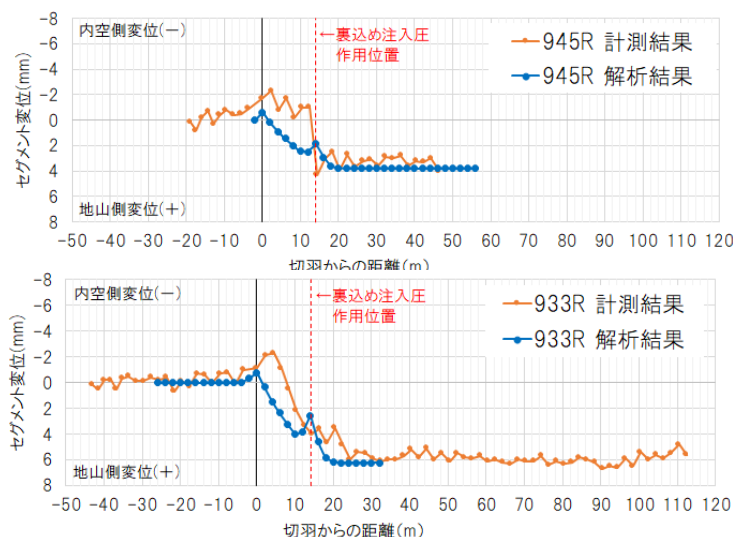


図-11 先行トンネルのセグメント変位(上:945R, 下:933R)

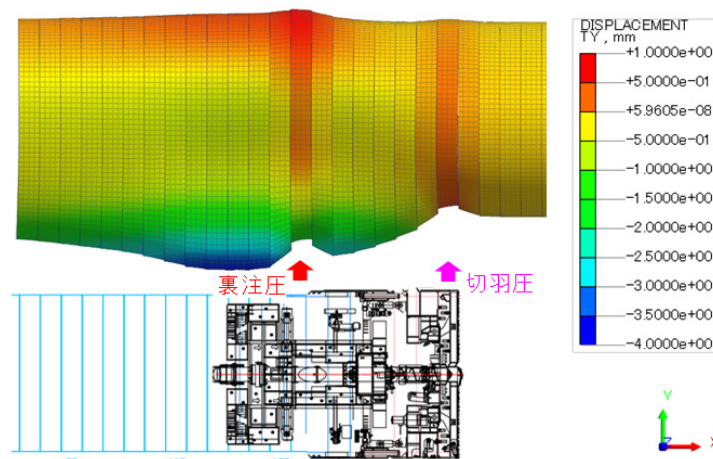


図-12 先行トンネル変形図(933R 切羽圧作用時)

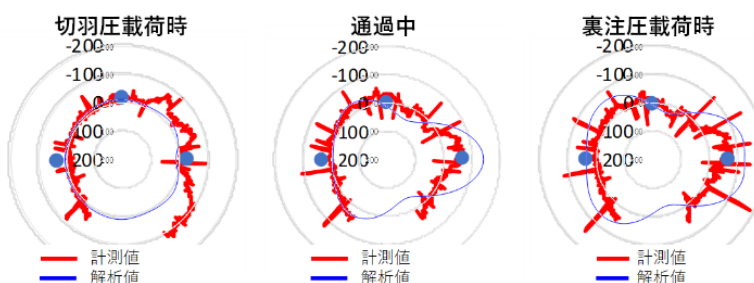


図-13 セグメントのひずみ分布(933 R)

を図-14 に示す。切羽圧による影響や通過時の影響、裏込め注入圧による影響を受けてセグメントの軸方向のひずみが大きく変動する様子が確認されており、3次元モデルにより概ねこの挙動を再現することができたと考えている。ただし、ひずみの絶対値を一致させることはできなかったため、今後も継続してモデル改良に取り組んで行く。

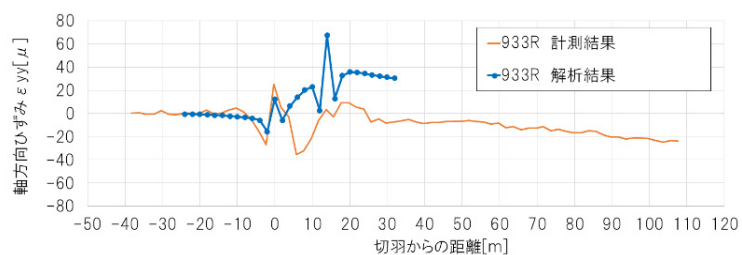


図-14 先行トンネルセグメントひずみ(軸方向)

7. おわりに

光ファイバを用いた併設トンネル施工時の影響評価について、分布的かつ連続的なデータで評価することができた。また、再現解析を実施し、併設施工の影響を2次元梁ばねモデルや3次元逐次シェルばねモデルにより再現できた。

今回の結果から光ファイバセンシングはシールドセグメントの状態を把握する有力な計測手法の一つとして、シールドトンネルの近接施工時の影響検討に活用できることがわかった。また、光ファイバは長期耐久性にも優れていることから、供用後の長期的な維持管理時にも適している。今後、普及展開を進めて行く。

参考文献

- 1) 反町敏宏：光ファイバを用いたコンクリートの温度ひび割れの検知，土木学会第 76 回年次学術講演会講演概要集，CS9-42，2021.