

大断面・超近接・併設シールドトンネルにおける後行シールド掘進時の併設影響に関する検討

平野 正大¹・藤原 勝也²・出射 知佳³・譽田 孝宏⁴・紀伊 吉隆⁵

¹正会員 阪神高速道路(株) 経営企画部 経営管理課 (〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町4-1-3)
E-mail: masahiro-hirano@hanshin-exp.co.jp

²正会員 阪神高速道路(株) 建設・更新事業本部 堺建設部 設計課
(〒590-0075 大阪府堺市堺区南花田口町2-3-20)
E-mail: katsuya-fujiwara@hanshin-exp.co.jp

³正会員 (株) 地域 地盤 環境 研究所 地盤解析部
(〒540-0008 大阪市中央区大手前2-1-2 国民会館・住友生命ビル4F)
E-mail: idei@geor.co.jp

⁴正会員 (株) 地域 地盤 環境 研究所 地盤解析部
(〒540-0008 大阪市中央区大手前2-1-2 国民会館・住友生命ビル4F)
E-mail: konda@geor.co.jp

⁵正会員 鹿島・飛島建設工事共同企業体 大和川線シールドJV工事事務所
(〒590-0001 大阪府堺市堺区遠里小野町4丁5-3)
E-mail: kii@kajima.com

大和川線シールドトンネルは、大断面、超近接の併設、曲線および縦断線形変化区間を含む道路トンネルである。これらの特徴を有する大和川線シールドトンネルにおいて、シールド掘進に伴う周辺地盤や併設トンネルの挙動を的確に把握し、大和川線シールドトンネルで独自に設定した設計手法の検証を目的として計測断面を設定し、トンネル覆工計測を実施した。本稿では、各計測断面で得られた計測結果に基づき、後行シールド掘進に伴う先行トンネルへの併設影響について検討した。その結果、後行シールド通過中および通過後で先行トンネル覆工作用圧や発生断面力へ与える影響が異なっており、後行シールド掘進条件に依存する傾向が強いことが明らかになった。

Key Words : shield tunnel, large cross section, long distance and high proximity shield

1. はじめに

阪神高速大和川線は、阪神高速道路4号湾岸線と同14号松原線を結ぶ延長約9.7[km]の自動車専用道路であり、その大部分にシールドトンネルや開削トンネルの地下構造形式を採用している(図-1参照)。このうち阪神高速道路(株)が施工する大和川線シールドトンネルは、セグメント外径 $D=12.23$ [m](シールド外径:12.47[m])、最小離隔約1.0[m]程度(トンネル外径比で約0.08×D、D:トンネル外径)の大断面かつ超近接施工により長距離掘進する、既往事例の少ないトンネルである。

従来、併設トンネルの覆工設計には、応力解放率を用いた2次元FEM解析を用いることが多い。しかしながら、本工事のように既往事例の少ない離隔距離の小さな大断

面シールドトンネルにおいて、類似地盤での施工を考慮した応力解放率の設定は困難であった。そこで本工事では、シールド掘進過程毎の地山にける応力解放を考慮した独自の手法を大和川線シールドトンネル設計マニュアル¹⁾²⁾にて制定し、詳細設計を行った。本マニュアルにおける併設影響の設計上の規定では、設計対象断面を後行シールドが通過した後、長期経過後の覆工挙動を対象とした。しかしながら、対象断面の直近を後行シールドが通過する際、先行トンネル覆工は、後行シールドの切羽圧、裏込め注入圧等の施工時荷重の影響を受け、設計上考慮している併設影響と異なる影響を受けることが考えられる。そのため、設計上想定している以上の覆工断面力が発生する可能性も否定できない。以上から、大和川線シールドトンネルにて得られたトンネル覆工計測結果



図-1 大和川線路線概要図

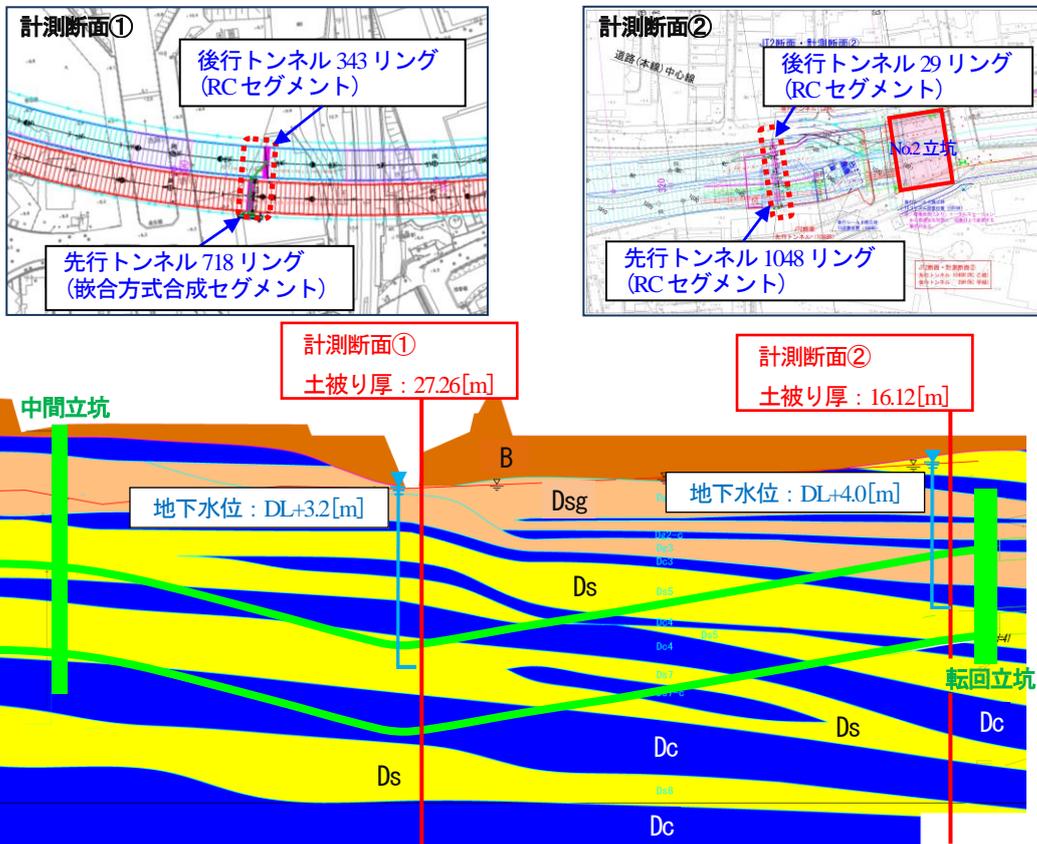


図-2 計測断面①および②の平面図および土質縦断面図

および施工条件を示すマシンデータなどに基づいて、実施工時の挙動を分析し、安全性の確認を行う必要がある。そこで本稿では、阪神高速道路(株)施工区間において設定した2つの計測断面(計測断面①および②)における先行トンネル覆工計測結果と施工条件を反映した再現設計計算結果を基に、後行シールド通過中および通過後の先行トンネル覆工挙動について考察を行ったので、その結果を報告する。

2. 計測断面および計測項目の概要

図-2に、本稿にて対象とした計測断面①および②の平面図および土質縦断面図を示す。両計測断面付近の地質条件は、洪積層を主体とする大阪層群の砂質土、礫質土および粘性土の互層であり、全体的に硬質な地盤である。

(1) 計測断面①の概要

図-3に計測断面①の断面図を示す。計測断面①は、阪

神高速道路（株）施工の大和川線シールドトンネル区間における最深部（土被り厚約27.3[m]，併設離隔約1.0[m]（ $\approx 0.08 \times D$ ））かつ曲線施工区間（ $R \approx 400$ [m]）の本掘進区間に位置しており，先行トンネル覆工のセグメントは嵌合方式合成セグメント（桁高：325[mm]）である．掘進土層は，上半は洪積砂層（Ds7層，N値46以上），下半は洪積粘土層（Dc6層，N値15程度）で，地下水位はGL-7[m]程度である．

(2) 計測断面②の概要

図-4に計測断面②の断面図を示す．計測断面②は転回・発進立坑直近の直線に近い後行掘進時には初期掘進区間となる断面（土被り厚約16.1[m]，併設離隔約1.23[m]（ $\approx 0.1 \times D$ ））であり，先行トンネルのセグメントはRCセグメント（桁高：455[mm]）である．掘進土層は，上半は洪積礫層（Dg3層，N値25程度），SL付近は洪積粘土層（Dc3層，N値15程度），下半は洪積砂層（Ds5層，N値41程度）で，地下水位はGL-4[m]程度である．

3. 計測概要

図-5に計測断面①および②における計測機器の計測位置図および計測項目を示す．計測断面①には，後行シールド掘進時の先行トンネルへ与える影響を確認するため，作用圧を確認する土圧計，発生断面力を確認するためのひずみ計，変位状況を確認するための内空変位計（ユニバーサル変位計）を設置した．加えて，狭い区間を複数回掘削することに伴う上部地盤の緩み範囲を確認するため，鉛直変位計を設置した．また，曲線施工に伴う地中の水平変位を確認するため，多段式傾斜計を配置した．

計測断面②には，計測断面①との比較を行うため，土圧計，ひずみ計，内空変位計および鉛直変位計を設置した．先行トンネル覆工計測の各項目は，計測頻度1～5分

の自動計測により行い，後行シールドの通過に伴う影響が出現する前に初期値を計測し，併設影響分のみを抽出した．

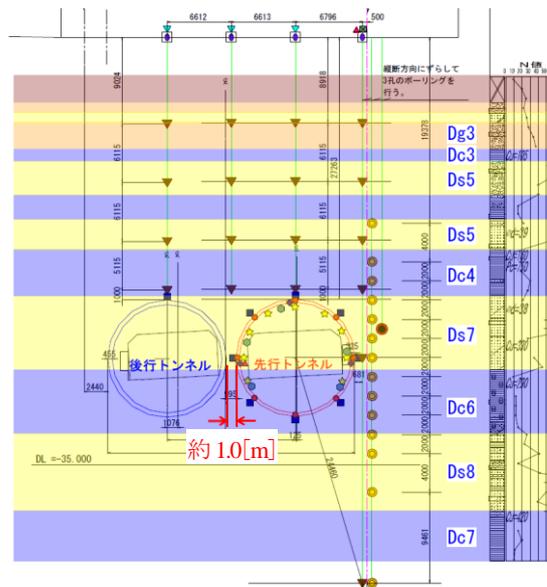


図-3 計測断面①の断面図

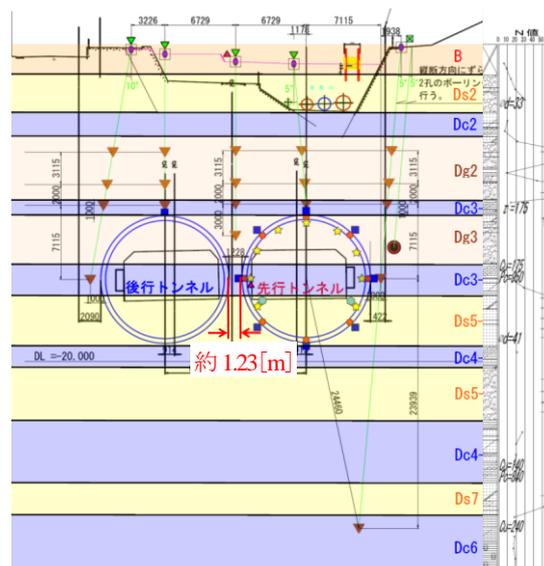


図-4 計測断面②の断面図

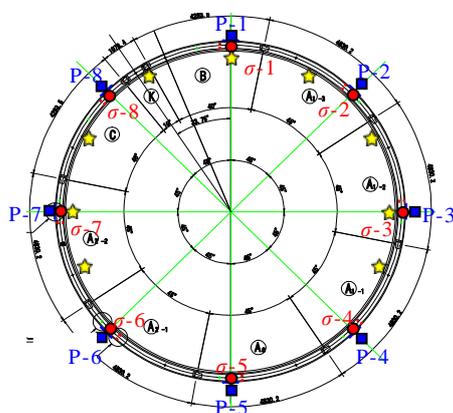


図-5 計測断面①および②の計測機器設置位置図および計測項目

対象	計測項目	計測機器	記号
トンネル覆工	トンネル覆工作用圧	パッド式土圧計	■
	トンネル覆工作用水圧	間隙水圧計	●
	トンネル覆工発生応力	ひずみ計	●
	トンネル内空変位	変位計 内空変位計（ユニバーサル変位計）	☆
周辺地盤	坑内温度	温度計	▲
	地盤内鉛直変位	水圧式アンカー	▼
		伸縮計	●
		基準水槽	■
	地盤内水平変位	水盛式沈下計	▼
		水圧式沈下計	▼
多段式傾斜計		◎	
温度	温度計	▲	

本稿では、後行シールド通過中（先行トンネルへの作用圧が最大となった時点）と、後行シールド通過1D後（後行シールドの影響による計測値の変動が収束した時点）の2時点に着目して分析した。なお、計測断面①は左右両肩部のひずみ計でデータが欠損したため、曲げモーメントのデータが取得できなかった。

表-1に、計測断面①および②におけるシールド施工概要および掘進条件を示す。先行、後行シールド共に、切羽圧は静止側圧相当、裏込め注入圧は全土被り相当と設定しており、ほぼ設定値通りに掘進した。

4. 設計概要

設計計算値は「設計マニュアル」に準拠して算定するが、計測値との比較をするため、切羽圧等は実施工時の設定条件を反映したもので再現設計した。

先行トンネル覆工には、超近接施工する後行シールド掘進による影響が大きく作用することから、施工過程を考慮した2次元FEM解析によって併設時の変動荷重を別途抽出した後、2リングはりばねモデルにその変動量を作用させて算出した³⁾⁴⁾。表-1に2次元FEM解析で使用した荷重条件を施工条件と併せて示す。なお、本設計手法の照査は、後行シールドが通過した後の長期経過後が設計上のクリティカルと考えており、後行トンネル施工中は対象としていない。

5. 先行トンネル覆工挙動計測結果

(1) 計測断面①

図-6に、計測断面①の先行トンネル覆工における作用圧および曲げモーメント併設影響変動分の経時変化図を示す。後行シールドの切羽通過前からテール通過時に計測値の変動が見られたが、作用圧の最大値は後行シールドに最も近いP-7計測点で、約0.22[MPa]であった。図-7に最大作用圧発生時の後行シールドの平面位置図を、図-8に後行シールドのマシンデータを示す。最大作用圧は後行シールド掘進中ではなく、後行トンネル346R組み立て時に発生した。計測断面①は大和川線シールドトンネルトンネルの最深部で、後行シールドは平面曲線（R=約400[m]）の内側に位置しているが、掘進時にはコピーカッターを用いていないため、大きな周辺土圧を受けた状態でセグメント組み立てを行っていたと考えられる。これらのことから、計測断面①における最大作用圧は、セグメント組み立てのためジャッキを抜いたことにより、周辺土圧の影響でシールドの姿勢が微小に変化し、その影響がトンネル間地盤を伝わって先行トンネルに作用したものと考えられる。このような作用圧の変動による影響は、曲げモーメントの経時変化図にも現れており、作用圧最大時に瞬間的に正曲げ（内側引張、外側圧縮）が発生した。

次に、図-9に後行シールド通過中および通過1D後の曲げモーメント分布図を示す。計測値を赤色実線で、設

表-1 シールド掘進概要、施工条件および設計時の荷重条件

施工概要	計測断面①		計測断面②		
	泥土圧シールド工法				
シールドマシン	外径φ 12,470[mm] 機長L12,800[mm]				
セグメント	後行: RCセグメント (外径φ 12,230[mm], 内径φ 11,320[mm], 幅B2,000[mm])	先行: 嵌合方式合成セグメント (外径φ 12,230[mm], 内径φ 11,580[mm], 幅B1,800[mm])	後行: RCセグメント (外径φ 12,230[mm], 内径φ 11,320[mm], 幅B2,000[mm])	後行: RCセグメント (外径φ 12,230[mm], 内径φ 11,320[mm], 幅B2,000[mm])	
地盤条件	土被り厚 27.26[m] 地下水位 DL+3.2[m]		16.12[m] DL+4.0[m]		
掘進地盤	上半: 砂層, 下半: 粘土層		上半: 礫層, 中: 粘土層, 下半: 砂層		
線形条件	平面線形 R=400[m]		R=3,000[m]		
縦断線形	上向き勾配3%区間の開始地点付近		上向き勾配2%→1%への変化点		
その他の施工条件	ジャッキバターン	全ジャッキ使用			
	コピーカッター	未使用			
	切羽圧	設定条件	静止側圧, 上部: 0.43[MPa], 中央: 0.50[MPa]	静止側圧, 上部: 0.29[MPa], 中央: 0.34[MPa]	
		実施工時の状況	掘進時 上部: 0.48~0.57[MPa] 中央: 0.42~0.59[MPa] →静止側圧より若干大きい圧力 停止時 上部: 0.38~0.50MPa 中央: 0.35~0.52[MPa] →ほぼ設定値(静止側圧)相当	掘進時 上部: 0.40~0.50[MPa] 中央: 0.42~0.53[MPa] →静止側圧より若干大きい圧力 停止時 上部: 0.37~0.45[MPa] 中央: 0.40~0.49[MPa] →ほぼ設定値(静止側圧)相当	掘進時 上部: 0.23~0.32[MPa] 中央: 0.24~0.41[MPa] →静止側圧より若干大きい圧力 停止時 上部: 0.27~0.29[MPa] 中央: 0.32~0.35[MPa] →ほぼ設定値(静止側圧)相当
	裏込め注入圧	設定条件 全土被り圧相当(左上・右上: 0.46[MPa], 左・右: 0.53[MPa]), 裏込め注入率: 約130%		全土被り圧相当(左上・右上: 0.32[MPa], 左・右: 0.35[MPa]), 裏込め注入率: 約130%	
	実施工時の状況	ポンプ吐出圧: 0.21~0.97[MPa] テール土圧: 0.24~0.60[MPa]	ポンプ吐出圧: 0.29~0.90[MPa] テール土圧: 0.27~0.56[MPa]	ポンプ吐出圧: 0.21~0.51[MPa] テール土圧: 0.11~0.47[MPa]	ポンプ吐出圧: 0.25~1.22[MPa] テール土圧: 0.10~0.43[MPa]
設計時の設定条件	トンネル周辺地盤の応力	後行トンネル: 0.328[MPa]	先行トンネル: 0.328[MPa]	後行トンネル: 0.198[MPa] 先行トンネル: 0.198[MPa]	
	切羽圧	上部	静止側圧: 0.33[MPa], 水圧: 0.20[MPa]		
		中央	静止側圧: 0.42[MPa], 水圧: 0.27[MPa]		
裏込め注入圧	=切羽圧				

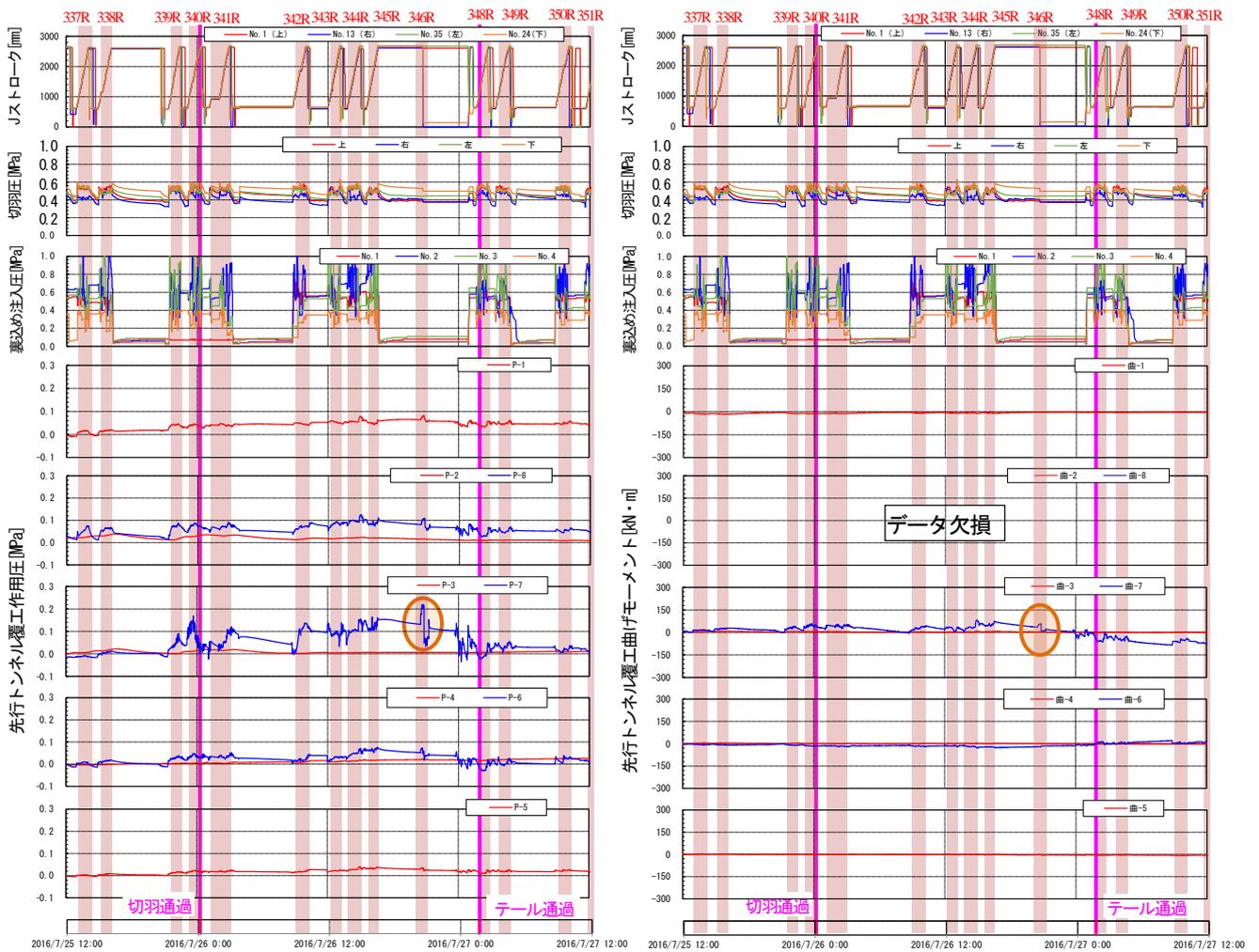


図-6 計測断面①における作用圧および曲げモーメントの継時変化図

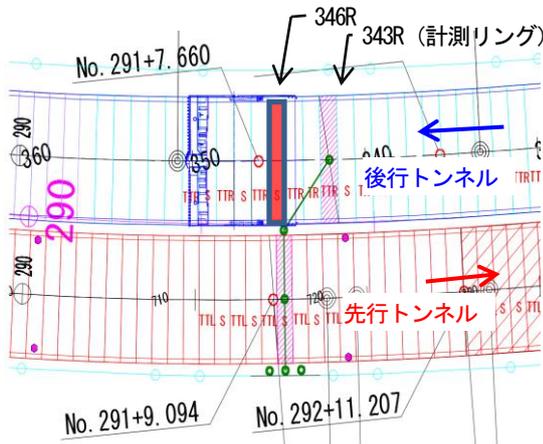


図-7 最大作用圧発生時のシールド平面位置図

計計算値を青色実線で示し、分布図左側に後行シールドを示す。なお、設計計算値は後行シールド通過1D後を対象として算出しているため、最大作用圧発生時の分布図では参考値として青色破線で示す。

後行シールド通過1D後の計測値および設計計算値を比較すると、両方とも後行シールド側で負曲げ（内側圧縮，外側引張）が発生する同様の傾向を示した。一方、

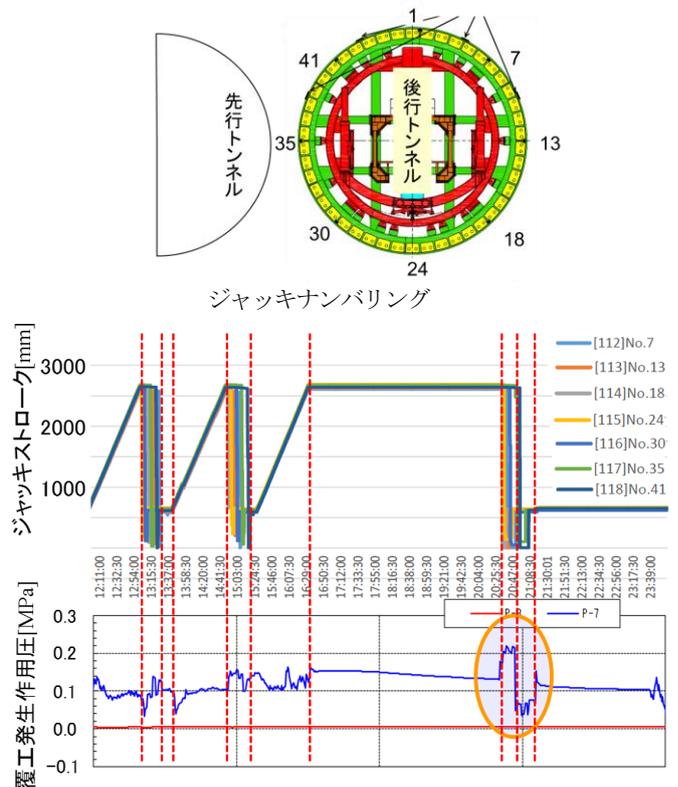


図-8 計測断面①最大作用圧発生時のマシンデータ

後行シールド通過中は後行シールド側で正曲げが発生しており、設計で対象としている後行シールド通過1D後（長期経過後）と異なる傾向が見られた。なお、後行シールド通過時における先行トンネル覆工発生応力の最大値は $67.1\text{ [N/mm}^2\text{]}$ であったが、許容圧縮応力度 $215\text{ [N/mm}^2\text{]}$ に対して31%程度に収まっており先行トンネル覆工の安全性を確保していることを確認した。

(2) 計測断面②

図-10に、計測断面②の先行トンネル覆工における作用圧および曲げモーメント併設影響変動分の経時変化図を示す。後行シールドの切羽通過時前後およびテール通過時前に作用圧の変動が大きいことがわかる。作用圧が最大値となったのはテール通過前のP-7計測点で、約 0.20 [MPa] であった。これは、後行シールドの裏込め注入圧が、トンネル間地盤を伝わって先行トンネルに作用したと考えられる時点であるため、後行シールドの施工時荷重のうち裏込め注入圧の影響が大きいと考えられる。一方で、曲げモーメントの経時変化図に着目すると、作用圧最大時（裏込め注入圧作用時）も、後行シールド側で負曲げの状態であり、計測断面①と異なる傾向が見られた。

次に、図-11に後行シールド通過中および通過1D後の曲げモーメント分布図を示す。マシン通過時（最大作用圧発生時（裏込め注入圧作用時））に後行シールド側へ若干正曲げ方向に変化したが、その後負曲げに転じる挙動を示した。後行シールド通過1D後に後行シールド側で負曲げが生じる傾向は、設計計算結果（青色実線）と一致した。なお、後行シールド通過時における先行トンネル覆工発生応力の最大値は $62.0\text{ [N/mm}^2\text{]}$ であったが、許容圧縮応力度 $200\text{ [N/mm}^2\text{]}$ に対して31%程度に収まっており先行トンネル覆工の安全性を確保していることを確認した。

(3) 先行トンネル覆工挙動に関する考察

図-12に、これまで大和川線シールドトンネルで実施してきたFEM解析結果から推察される併設影響のメカニズムに関する概念図を示す。後行シールド掘進に伴って、先行トンネル覆工には、後行シールド側の上下部からの圧縮荷重と後行シールド掘進による応力解放が作用することになり、その結果、後行トンネル側へ押し出される挙動が発生すると考えられる⁴⁵⁾。後行シールド通過1D後においては、計測断面①および②の両断面で、後行シールド側で負曲げが発生しており、既往の解析結果と同様の傾向が見られた。一方、後行シールド通過中に着目すると、計測断面②は後行シールド通過1D後と同様、後行シールド側に押し出されるような挙動が見られたのに対し、計測断面①はその傾向は小さかった。これ

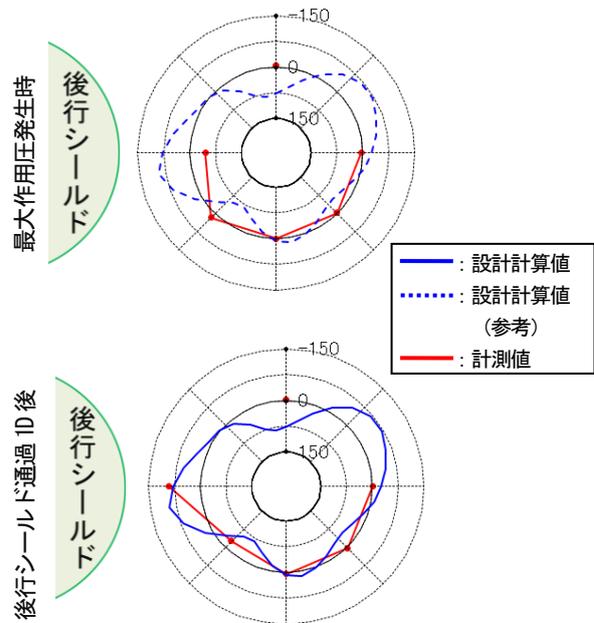


図-9 計測断面①の曲げモーメント分布

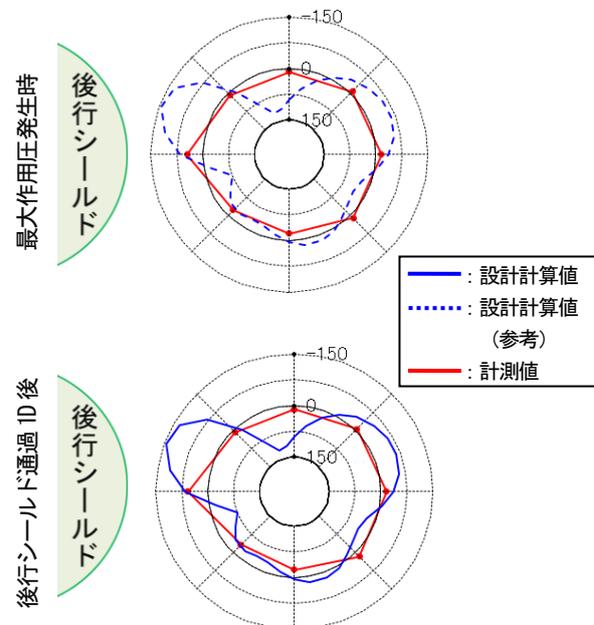


図-11 計測断面②の曲げモーメント分布

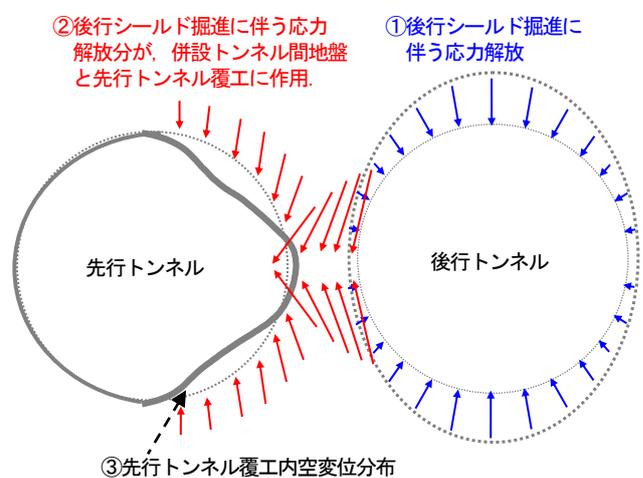


図-12 併設影響のメカニズム概念図

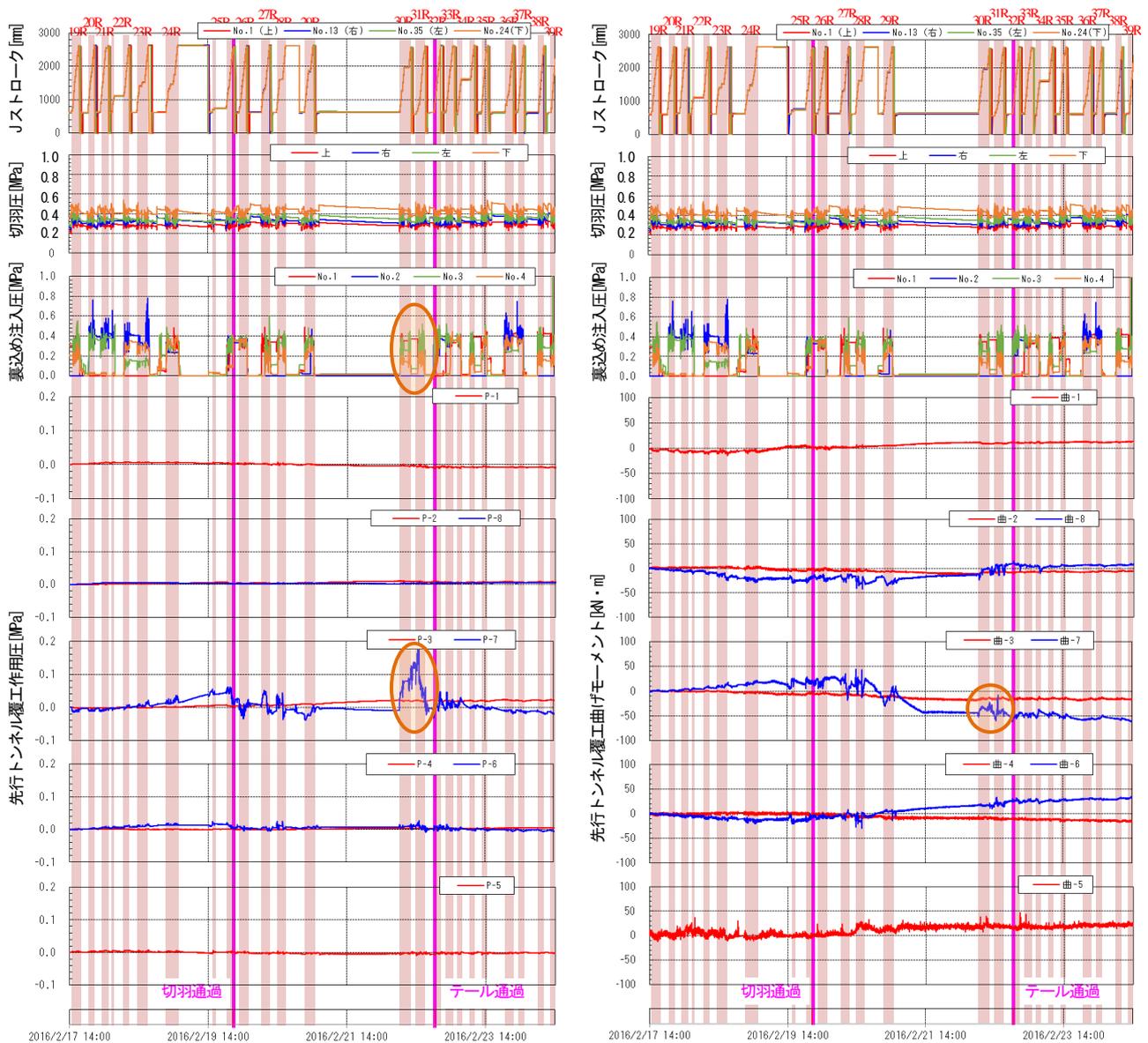


図-10 計測断面②における作用圧および曲げモーメントの継時変化図

は、計測断面①が計測断面②よりも平面曲線半径の小さい区間に位置し、深度も深く、土水圧が大きく作用する特徴を有している。それに伴って、切羽圧や裏込め注入圧等の施工時荷重が比較的大きかったため、後行シールド掘進に伴う応力解放の影響と比べて、施工時荷重の影響が大きかったことが要因として考えられる。

実施工条件を考慮した設計マニュアルに基づいた設計計算値に着目すると、計測断面①、②とも設計上のクリティカルとした後行シールド通過1D後において、その後行シールド側に発生する負曲げを反映できている。しかしながら、施工時や上半部において設計値と計測計算値の乖離が見られた。これは、併設増分を算定する際の2次元FEM解析において、粘性土が影響していることや、2リングはりばねモデルにおける地盤ばねの設定に差があるものと考えており、現在検証を行っている。

6. まとめ

本稿のまとめを以下に示す。

- 1) 併設影響を受ける先行トンネル発生応力度は許容応力度内に収まっており、トンネル覆工の安全性を確認した。
- 2) 先行トンネル覆工計測結果から、超近接条件での併設シールドトンネルにおける先行トンネルは、後行シールド通過中は後行シールドの切羽圧や裏込め注入圧等の施工時荷重の影響を大きく受け、後行シールド通過後は、地山の応力解放の影響により、後行シールド側へ押し出される挙動を示す傾向が見られた。
- 3) トンネル深度や平面線形等の掘進条件の違いにより、後行シールド掘進による先行トンネルへの影響が異なることが判明した。特に、トンネル深度が大きく、

平面線形が曲線である場合、後行シールド施工時のシールド姿勢が先行トンネルへ影響を与えることを確認できた。

参考文献

- 1) 阪神高速道路(株)：シールドトンネル設計マニュアル，2011.
- 2) 志村敦，藤原勝也，辻野博史，岩住知一：超近接長距離併設シールドトンネルの設計，トンネルと地下，Vol.41，No.11，pp.43-50，2010.
- 3) 藤原勝也，新名勉，卜部賢一，陣野員久，玉田 康一，石垣兄太：硬質地盤における大断面，超近接・長距離併設シールドトンネルの覆工設計概要，第 13 回岩の力学国内シンポジウム，pp.677-682，2013.
- 4) 崎谷浄，新名勉，卜部賢一，陣野員久，長屋 淳一：大断面，超近接併設シールドトンネル設計手法の提案，土木学会第 24 回トンネル工学報告集，2014.12.
- 5) 卜部賢一，陣野員久，石垣兄太，長屋淳一，稲垣祐輔：大断面，超近接シールド掘進に伴う併設トンネルへの影響に関する分析，土木学会第24回トンネル工学報告集，2014.12.

(2017.8.11 受付)

A STUDY ON THE INFLUENCE OF SHIELD TUNNEL EXCAVATION WITH A LARGE CROSS SECTION ON HIGH PROXIMITY PARALLEL SHIELD TUNNEL

Masahiro HIRANO, Katsuya FUJIWARA, Tomoyoshi IDEI, Takahiro KONDA and Yoshitaka KII

The Yamatogawa Route comprises parallel shield tunnels which are constructed very closely over a long distance with a large cross section and curves. To confirm the validity of the design method which independently set during the Yamatogawa Route construction, and to grasp the behavior of the ground and the tunnel, we set measurement cross sections, and measured the behavior of them. In this paper, an analysis about the influence of following tunnel excavation on existing one is performed based on the empirical measurements. Consequently, it was confirmed that the behaviors of the original tunnel during and after excavation showed different tendencies, and they depend on the condition of following tunnel excavation.