

# 大断面・超近接シールドトンネル覆工の 長期挙動の評価

中元 佑一<sup>1</sup>・藤原 勝也<sup>2</sup>・陣野 員久<sup>3</sup>・石原 悟志<sup>4</sup>  
長屋 淳一<sup>5</sup>・譽田 孝宏<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 阪神高速道路株式会社 建設・更新事業本部（〒590-0075 大阪府堺市堺区南花田口町2-3-20）  
E-mail:yuichi-nakamoto@hanshin-exp.co.jp

<sup>2</sup>正会員 阪神高速道路株式会社 建設・更新事業本部（〒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

<sup>3</sup>正会員 大阪府 東部流域下水道事務所 萱島工区（〒572-0045 大阪府寝屋川市東神田町37-1）  
E-mail:JinnoK@mbox.pref.osaka.lg.jp

<sup>4</sup>正会員 大阪府 富田林土木事務所 松原建設事業所（〒580-0016 大阪府松原市上田3-1-25）  
E-mail:IshiharaSa@mbox.pref.osaka.lg.jp

<sup>5</sup>正会員 株式会社地域地盤環境研究所（〒540-0008 大阪府大阪市中央区大手前2-1-2）  
E-mail:nagaya@geor.co.jp

<sup>6</sup>正会員 株式会社地域地盤環境研究所 地盤解析部（〒540-0008 大阪府大阪市中央区大手前2-1-2）  
E-mail:konda@geor.co.jp

併設シールド掘進に伴ってトンネル周辺地盤内の応力は再配分されることから，先行トンネルだけでなく後行トンネルにも併設影響がおよぶ場合が考えられる．この併設影響は，大断面であるほど，また近接度が高いほど大きいと考えられ，その収束が長期間におよぶ可能性がある．よって，大和川線シールドトンネル設計マニュアルでは，事前の解析的検討を踏まえ，後行トンネル覆工作用圧（天端部）は単設時より20[%]割増することを規定している．今回，設計マニュアル検証用の計測断面にて得られた各種データに基づいて，シールドトンネル設計土圧の妥当性を検証した．その結果，設計土圧の考え方はおおよそ適切であったことを確認するとともに，最長で5年にわたるトンネル覆工作用圧の長期計測の結果，作用圧はほぼ収束していることと，併設トンネル覆工発生応力は長期許容応力度内に収まっていることを確認した．

**Key Words** : Shield tunnel, High proximity and large cross-section, Influence on proximity tunnel, Long-term behavior

## 1. はじめに

大阪府道高速大和川線は，4号湾岸線と14号松原線を接続する全長約9.7[km]の路線であり，その内，約3.9[km]（延長の約4割，図-1参照）でシールドトンネル構造を採用している．本トンネルは，既往事例の少ない大断面，超近接および長距離の併設，曲線および縦断線形変化区間を含む．

併設トンネル間の離隔が狭い場合，地盤内応力は再配分されることを想定すると，先行トンネル覆工作用圧や発生応力は，後行シールドの掘進条件に依存すると考えられる<sup>1)</sup>．また，先行トンネルのみならず後行トンネル自体にも併設影響がおよぶと考えられ，大断面であるほど，また近接度が高いほど，併設影響度の収束が長期にわたると考えられる．さ

らには，併設トンネルの場合，先行トンネルの隣接地盤中を後行シールド掘進することから，単設時に比べて掘進地盤の緩み範囲が拡大し，後行トンネル覆工に作用する緩み土圧は，単設トンネルの場合とは異なることが考えられる．

今回，既往事例の少ない大和川線シールドトンネルの特徴を踏まえ，図-1に示す計測断面において，最長で5年にわたってトンネル覆工作用圧および発生応力の収束状況を確認するとともに，後行トンネル設計土圧の妥当性を検証した．

## 2. 併設シールドトンネル設計の概要

大和川線シールドトンネルは，大和川線固有の技

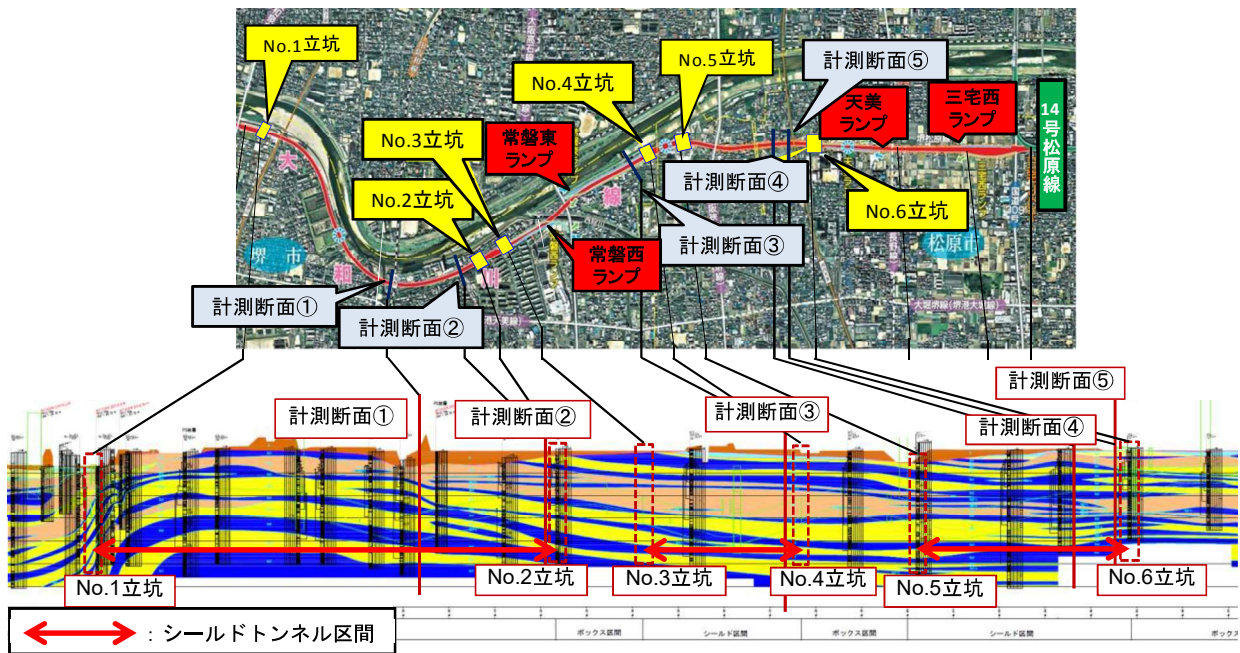


図-1 大和川線シールドトンネルの平面図および縦断面図

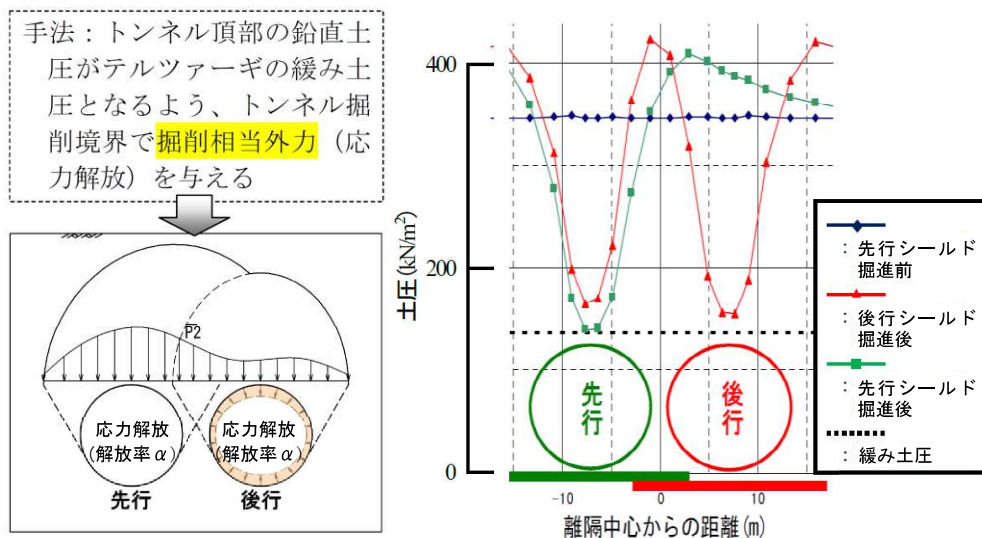


図-2 後行トンネルの設計における併設時の緩み土圧の考え方<sup>3)</sup>

術的課題(大断面, 超近接, 長距離掘進等)に対し, 設計上の併設影響評価を規定した「シールドトンネル設計マニュアル<sup>2)</sup> (以下, 本マニュアル)」に準拠して設計した。

### (1) 先行トンネル<sup>3)</sup>

土被り厚がトンネル外径よりも大きく, 対象地盤の強度定数が評価できる場合, トンネル上部地盤を周辺地盤が支持する土のアーチング効果を期待して, 全土被り圧よりも小さい緩み土圧を設計上採用しても良いとしている。この隣接地盤中を後行シールド掘進するため, 地盤内で応力の再配分が生じ, 先行トンネル覆工に作用する緩み土圧は増加すると考える。この影響は, 施工過程を考慮した2次元FEM解析により地盤内応力増分で評価し, これをはりばねモデルに入力することによって, 先行トンネル覆工に発生する断面力を算出する。

### (2) 後行トンネル<sup>3)</sup>

後行トンネル覆工にも緩み土圧が作用するが, 先行シールド掘進時の影響を受けると考えられる。ここでは, 単設トンネル覆工に作用する緩み土圧に相当する解放応力が, 後行トンネル覆工に作用した際の圧力変化について, 2次元線形弾性FEM解析より検討した。単設時(先行シールド掘進時)におけるトンネル頂部の鉛直土圧と, 併設時(後行シールド掘進後)における先行および後行トンネル頂部の鉛直土圧の比率を求めた結果, 併設時先行T/単設時先行T=1.20, 併設時後行T/単設時先行T=1.12となった(T:各トンネル, 図-2参照)。よって本マニュアルでは, より危険な場合を想定した併設影響として, 後行トンネル設計鉛直土圧を単設時の20[%]割増で設定することとした。

### 3. 計測概要

#### (1) 計測断面

表-1に対象とする各計測断面の概要を、図-3に計測機器配置図を示す。計測断面①②④⑤は、2つの大断面トンネルが併設した状態にあるが、計測断面③は、ランプトンネルを含む4つのトンネルが横並びになった4連併設トンネルである。ランプ部を

ONからOFFの順で掘進した後、本線部を西行から東行の順でシールド掘進した。

#### (2) 地質状況

図-1に示すように、シールド掘削対象地盤は、硬質な洪積層を主体とする地盤であり、良く締まった砂質土や礫質土(N値40~60以上)と硬質粘性土(N値=7~27,  $c=200$  [kN/m<sup>2</sup>]程度)の互層状態にある。

表-1 各計測断面の概要

	計測断面①	計測断面②	計測断面③		計測断面④	計測断面⑤	
先行トンネル名	本線西行トンネル		ONランプトンネル*2)	本線西行トンネル*2)	OFFランプトンネル*1)	本線東行トンネル	
セグメント種類	嵌合方式 合成セグメント (NMセグメント)	RCセグメント	合成セグメント (CPセグメント)	嵌合方式 合成セグメント (NMセグメント)	RCセグメント	嵌合方式合成セグメント (NMセグメント)	
セグメント厚[mm]	325	455	400	360	400	360	
後行トンネル名	本線東行トンネル		本線東行トンネル	*1)本線西行トンネル(後行シールド)はOFF ランプトンネル(先行トンネル)に対して 「片側併設」 *2)本線東行トンネル(後行シールド)はON ランプトンネルおよび本線西行トンネル(先行 トンネル)に対して「両側併設」		本線西行トンネル	
セグメント種類	RCセグメント		嵌合方式 合成セグメント (NMセグメント)			嵌合方式合成セグメント (NMセグメント)	
セグメント厚[mm]	455		360			360	
土被り圧[m]	27.26	16.12	本線：26.45、ON：26.80、OFF：28.15			17.64	9.15
地下水位[m]	DL+3.2	DL+4.0	TP+4.39			TP+2.5	TP+0.5
主たるシールド掘進土層	上半：洪積砂質土層 下半：洪積粘性土層	上部：洪積礫質土層 中部：洪積粘性土層 下部：洪積砂質土層	洪積砂質土層、洪積砂礫質土層、洪積粘性土層の互層				

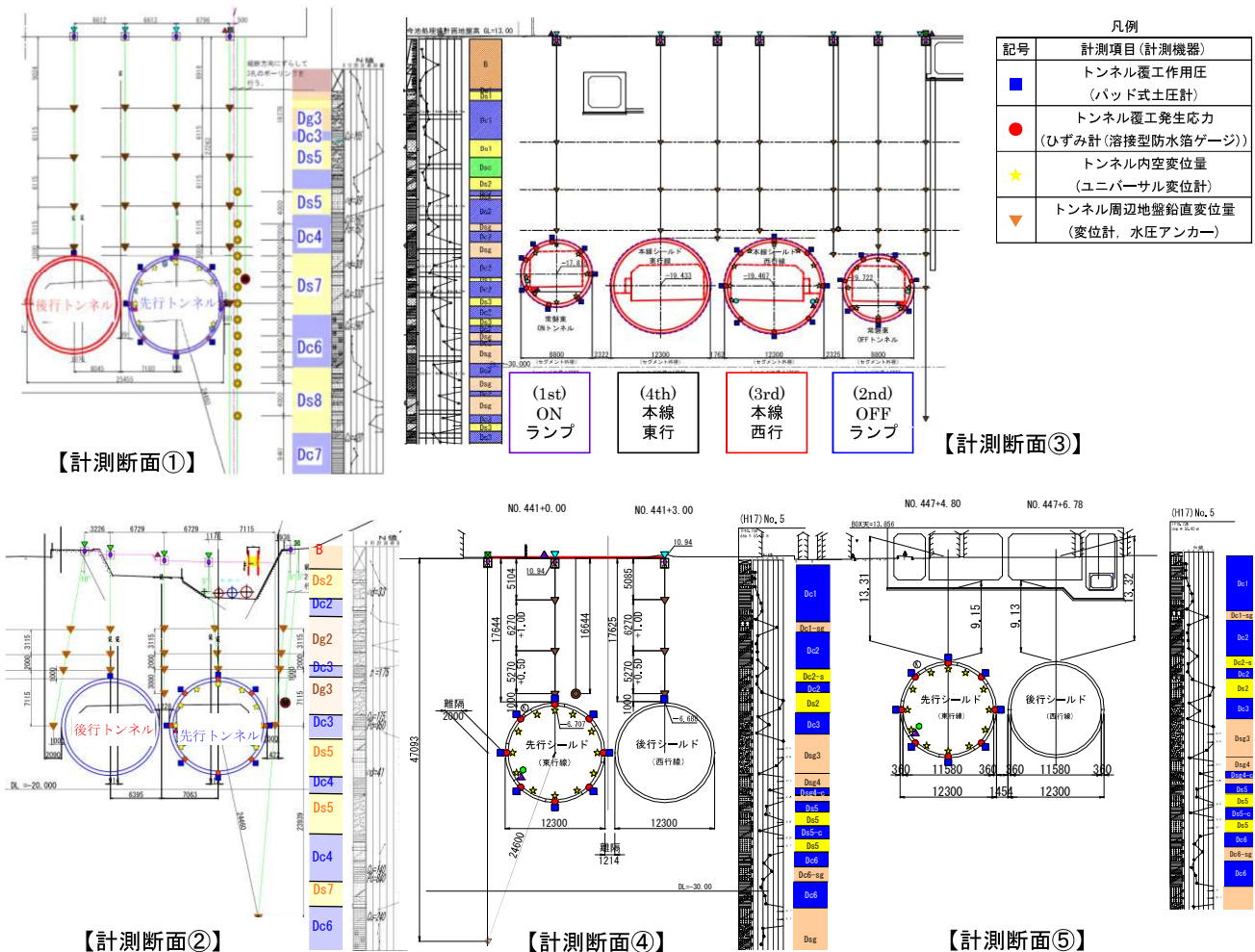


図-3 各計測断面における計測機器配置図

### (3) 計測項目

計測項目は、トンネル覆工作用圧および発生応力であり、前者はパッド式土圧計<sup>4)</sup>を用いて計測し、後者はひずみ計(溶接型防水箱ゲージ)を用いて計測した。後行シールド通過後約1～5ヶ月後までは自動計測し、それ以降は1回/月の頻度で手動計測し、最長5年間にわたって計測を実施した。

## 4. 計測結果<sup>5)</sup>

### (1) トンネル覆工作用圧

各計測断面におけるトンネル覆工作用圧の計測結果を図-4に示す。黄緑色一点鎖線は「単設時鉛直土圧+水圧+特殊荷重(列車荷重, 鉄道構造物荷重等)」を表し、橙色二点鎖線は本マニュアルに準拠して単設時鉛直土圧を20[%]割増した値を示している。なお、計測断面③については、紙面の都合上、片側併設に着目してOFFランプを先行トンネル、本線西行を後行トンネルと見なした場合について表示した。

トンネル覆工作用圧は、テール通過前後においてテールブラシがトンネル覆工に接触することによって瞬間的に増加するものの、テール通過1D後にかけて緩やかに低下して一定値に収束する傾向を示している。その後、トンネル坑内温度と連動して、夏場に作用圧は増加し、冬場に逆転して減少する傾向を示している。計測値が一貫して設計土圧を上回らない断面もあれば、時期によって計測値が設計土圧を超過する断面も見られたが、計測断面③を除けば計測値は長期的に設計土圧程度に落ち着いている傾向にある。

### (2) トンネル覆工発生応力

各計測断面における先行トンネル覆工発生応力を図-5および図-6に示す。なお、紙面の都合上、片側に配置したひずみ計による応力計測結果を中心に示しているが、全体傾向は類似していることを確認している。

前節で述べたように、トンネル覆工作用圧が坑内の温度変化の影響を受けて増減しているのに対して、トンネル覆工発生応力は、ほとんどの断面において変動は少なく、ほぼ一定の値に収束している。

## 5. 計測結果に関する考察

### (1) トンネル覆工作用圧に関する温度影響

トンネル覆工作用圧は、トンネル坑内温度と連動して季節変動する傾向にあった。この原因として、以下の3つの場合が考えられる。

- パッド式土圧計のセンサー自体が温度特性を持つ場合。
- パッド式土圧計の受圧板内に封入されているオイルが温度変化によって体積変化を起し、周辺地

盤および裏込め注入からの反力が増減する場合。  
c) トンネル坑内の温度変化に伴ってトンネル覆工が膨張および収縮することにより、周辺地盤および裏込め注入からの反力が増減する場合。

a) およびb)に関しては、メーカーによる零点温度影響試験(荷重を載荷することにより拘束圧を考慮)より、パッド式土圧計における1[°C]変化時の変動量は $3.2 \times 10^{-2}$ [kPa/°C]であったことから、ほとんど温度変化の影響を受けないことを確認している。

c) について分析するため、本線トンネル覆工(嵌合方式合成セグメント)が、1[°C]温度変化した場合を想定し、トンネル半径方向の変形量について以下に試算をおこなった。

$$\begin{aligned}\Delta R &= \alpha \times R_0 & (1) \\ &\approx 7.26 \times 10^{-2} [\text{mm}]\end{aligned}$$

ここで、 $\Delta R$  : 半径方向の膨張変位量[mm]  
 $\alpha$  : 鋼材の線膨張係数  
( $= 11.8 \times 10^{-6}$ [/°C])  
 $R_0$  : トンネル覆工半径  
( $= 6150$ [mm])

よって、1[°C]の温度変化に対するトンネル覆工作用圧の変動量 $\Delta p$ は、以下のように試算できる。

$$\begin{aligned}\Delta p &= k \times \Delta R & (2) \\ &\approx 2.9 [\text{kPa}/^\circ\text{C}]\end{aligned}$$

ここで、 $k$  : 設計地盤反力係数(設計値)  
( $= 40,000$ [kN/m<sup>3</sup>])

長期計測結果から得られたトンネル覆工作用圧は、夏場に上昇して冬場に低下するといった季節変動を示しており、その温度相関は3～7[kPa/°C]であった。これは、(2)式に示す試算結果と類似していることから、実際に起こり得る現象であると推察できる。よって、トンネル坑内温度の変化に伴い、トンネル覆工が膨張および収縮することにより、周辺地盤や固化した裏込め注入材からの反力が増減することから、トンネル覆工作用圧は季節変動していると考えられる。

いずれの計測断面においても、トンネル坑内温度が同程度であった時期におけるトンネル覆工作用圧は、ほぼ等しい値であった。よって、大和川線シールドトンネルの環境下にあつては、トンネル覆工が負担する外荷重の変化は、周辺環境が大きく変化しない限りほぼ一定であると考えられる。

### (2) トンネル覆工発生応力に関する温度影響

長期計測の結果、トンネル覆工作用圧は夏場に増加し、冬場に低下するといった季節変動を示すのに対して、トンネル覆工発生応力はほとんどの断面で大きな変動はみられなかった。



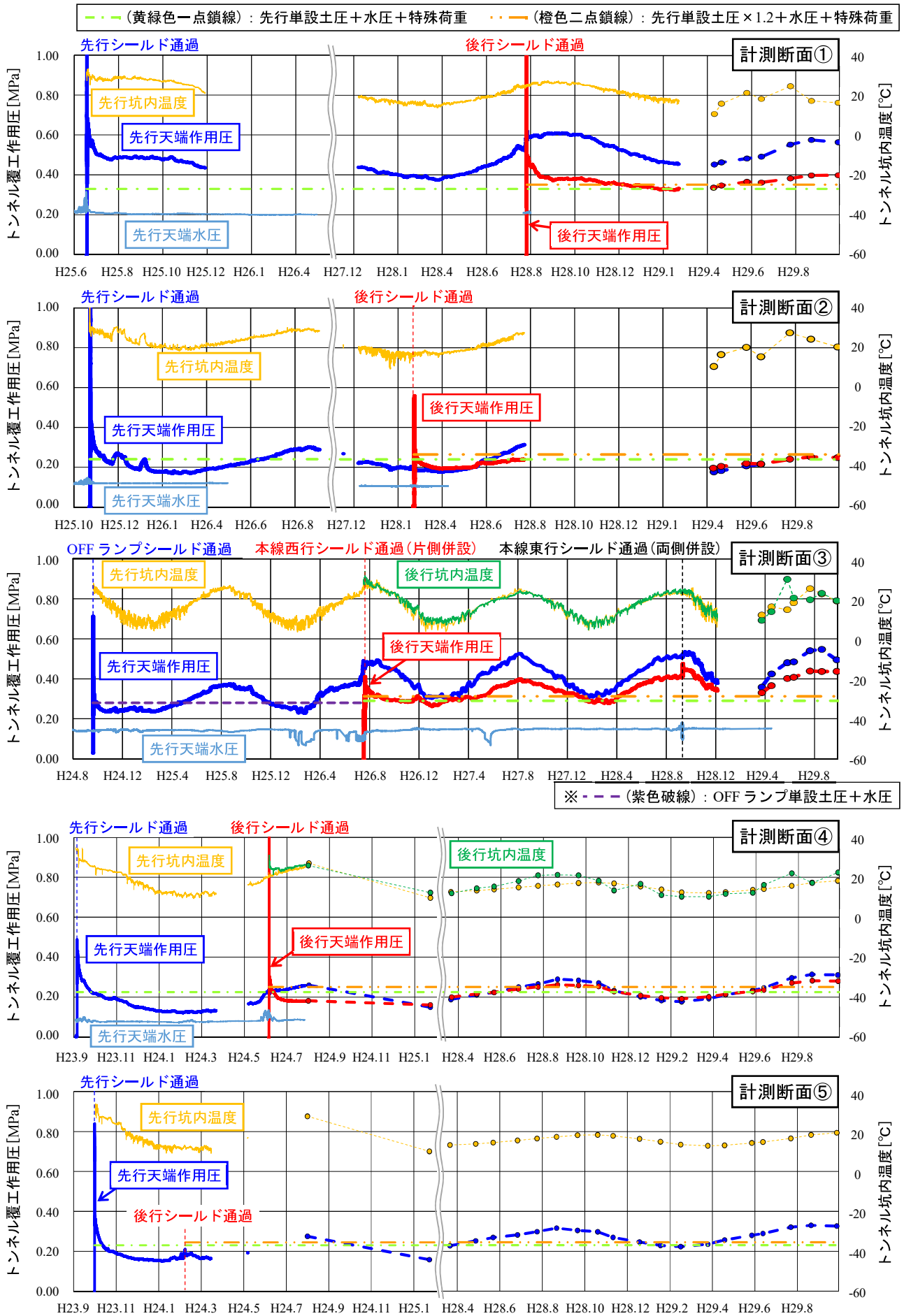
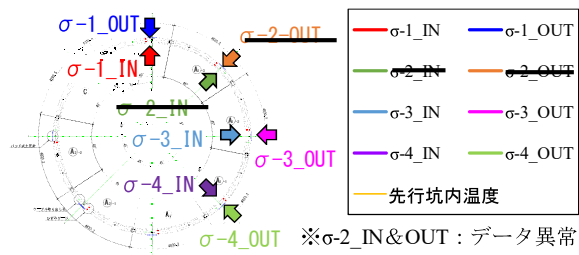
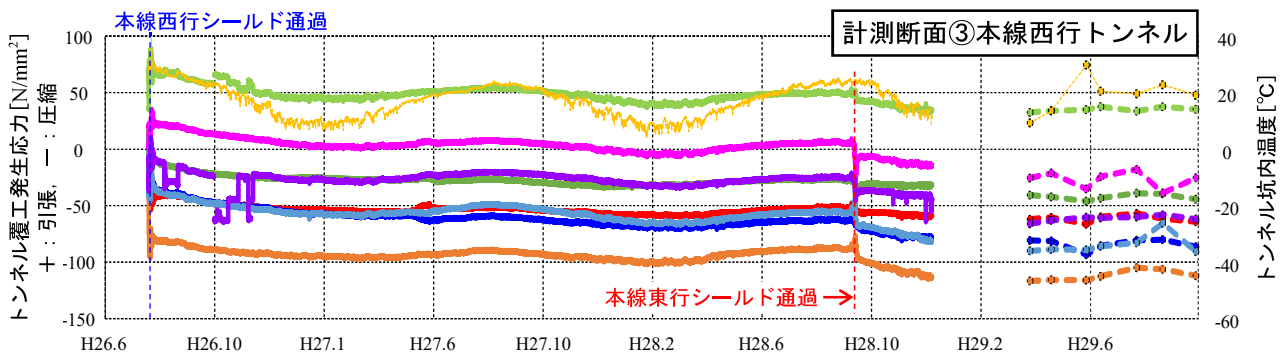
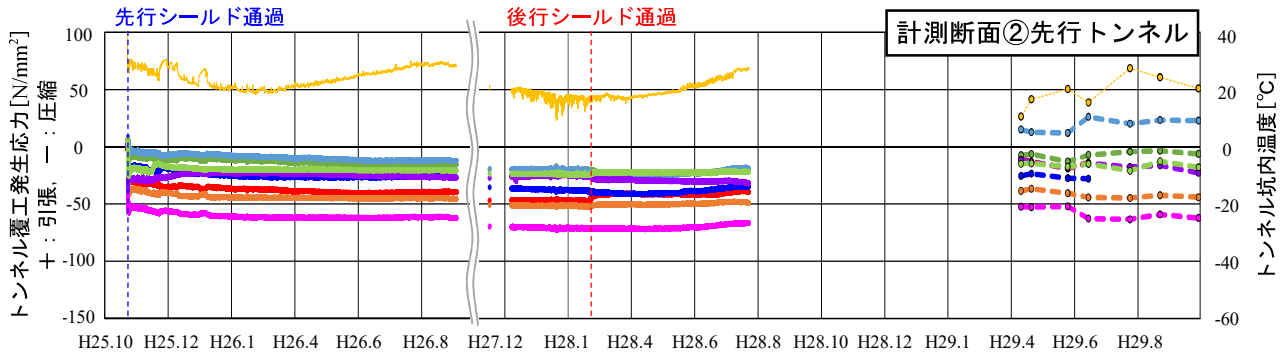
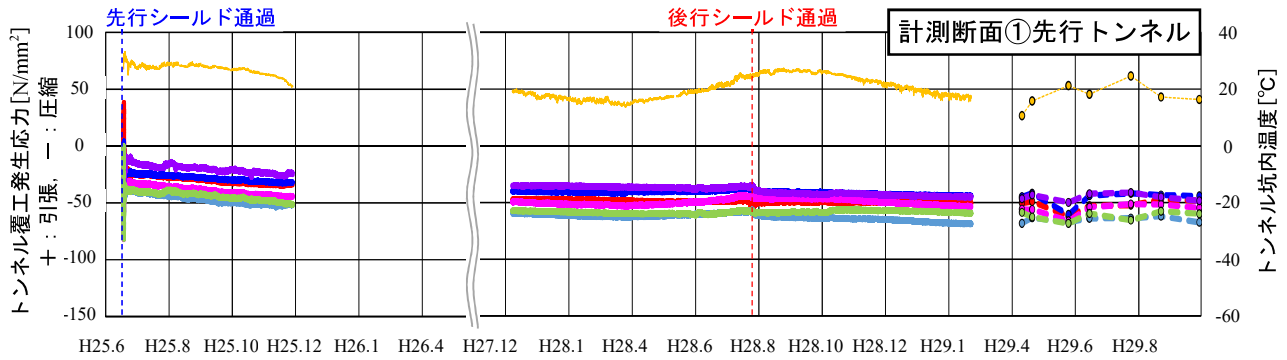
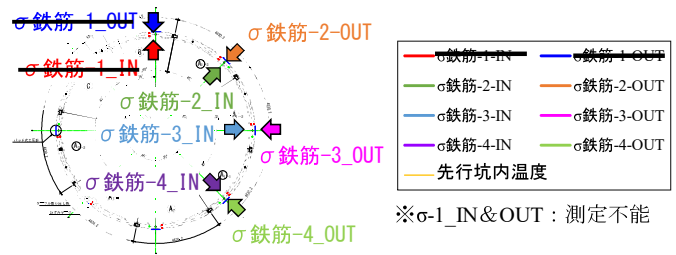


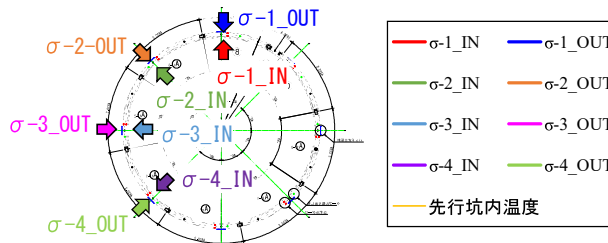
図-4 トンネル覆工作用圧計測結果



【計測断面① 先行トンネル】



【計測断面② 先行トンネル】



【計測断面③ 本線西行トンネル】

図-5 トンネル覆工発生応力計測結果(計測断面①②③)

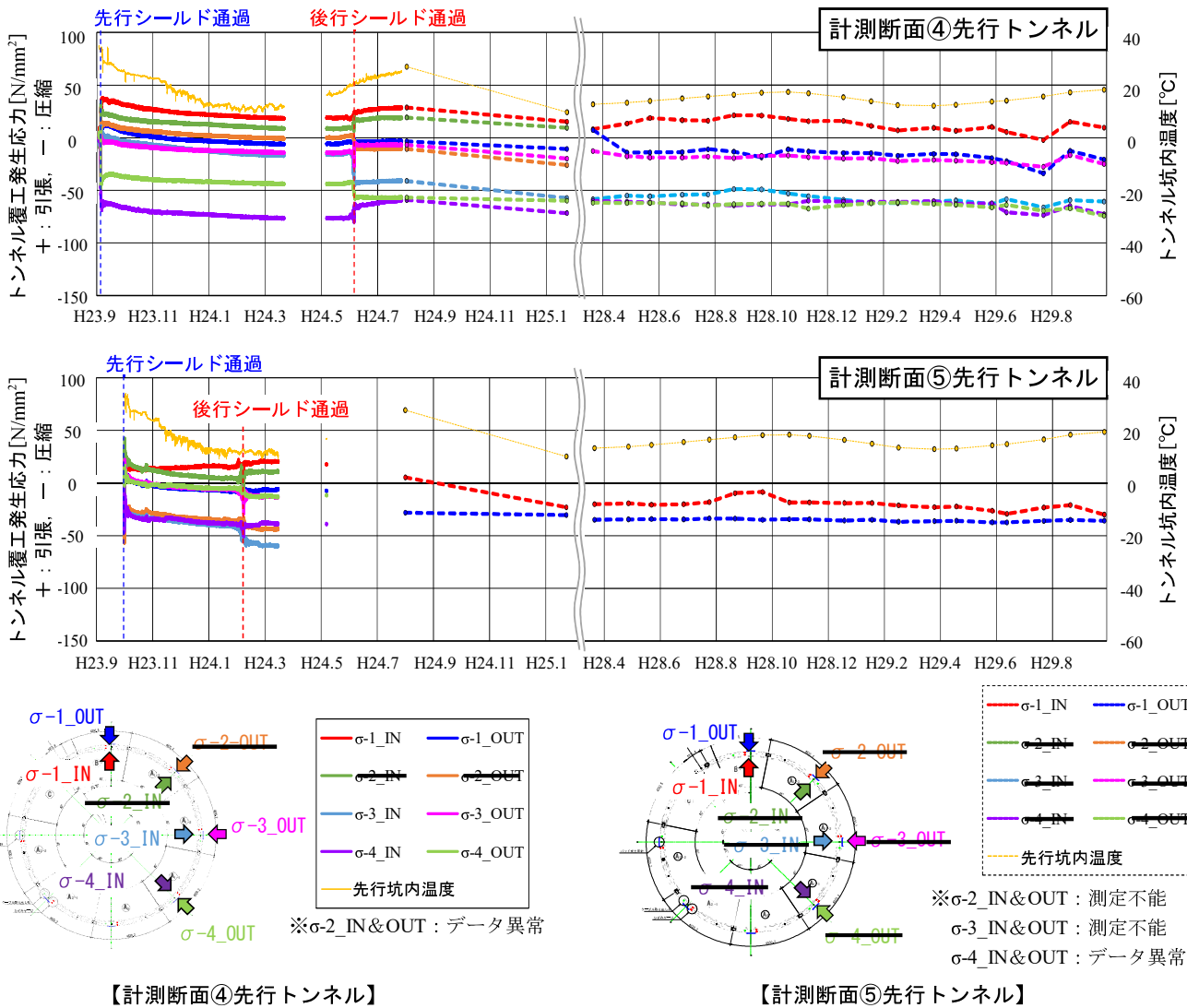


図-6 トンネル覆工発生応力計測結果(計測断面④⑤)

トンネル覆工発生応力の計測に用いている計測機器はひずみ計(溶接型防水箔ゲージ)であるが、これは、自己温度補償型の計測機器であることから、温度変化の影響を受けない。

地盤ばねが接続しているトンネル覆工を仮定した場合、トンネル坑内温度の変化に伴ってトンネルリングが膨張や収縮しようとする、それに応じた地盤反力が発生してトンネル覆工作用圧は増減する。一方、地盤ばねによってある程度拘束されたトンネルリングは、大きく膨張や収縮するまでは至らないため、またその大部分はセグメント継手部に集中すると考えられるので、それに対応したトンネル覆工発生応力や内空変位はほとんど発生しないと考える。なお、計測断面③の本線西行トンネルでは、若干の温度変化影響を受けている。これは、トンネル坑内温度変化によるトンネル覆工の膨張や収縮に対して拘束力が作用していることによるものと考えられる。

## 6. 計測値と設計値の比較

今回のシールド施工では、掘進条件を「切羽圧≒静止土圧+水圧」「最大裏込め注入圧≒全土被り圧」に設定したことから、トンネル周辺地盤を大きく緩ませることなく施工できた。その結果、後行シールド掘進時における後行トンネル覆工作用圧(天端部、計測断面③除く)は、先行(単設時)トンネル覆工作用圧(天端部)の20[%]割増程度にほぼ収束する結果になった。よって、今回のような地盤条件や施工条件を確保できるのであれば、後行トンネル覆工作用圧の割増は、設計上考慮せずとも安全が確保できたとと言える。

ただし、詳細に分析すると、20[%]割増の設計ラインに収束した計測断面もあれば、若干超過したり、計測断面③のように大きく超過する場合もあるなど、一定傾向にはなかった。このように、後行トンネル覆工作用圧は、シールド掘進条件に大きく依存していることから、設計

上の割り切りとして、シールド施工条件などでやむを得ずトンネル周辺地盤を緩ませて掘進した場合を想定して、後行トンネル覆工作用圧を一定率割増する方法は有効と考えられる。その意味では、今回の20[%]割増の処置は、ある程度の妥当性が確保できていると言える。

## 7. おわりに

本稿のまとめを以下に示す。

- 1) トンネル覆工作用圧(天端部)は、長期的には設計値程度に収束しており、周辺環境が大きく変化しない限りほぼ一定であった。
- 2) トンネル覆工作用圧は季節変動を示しているが、これは、トンネル坑内温度の変化に伴ってトンネル覆工が膨張および収縮することにより、周辺地盤や固化した裏込め注入材からの反力が増減することが原因として考えられる。
- 3) 一方、トンネル覆工発生応力は、このようなトンネル覆工の挙動の大部分が、主としてセグメントピース間継手部に集中すると考えられるため、変動は少ないと考えられる。
- 4) 大和川線シールドトンネルの地盤条件や施工条件であれば、本マニュアルで定められたトンネル覆工作用圧を割増す処置は、実際の施工条件による周辺地盤の緩みや、施工時荷重などを考慮すると、設計上の割り切りとして有効と考えられる。

**謝辞：**本稿の検討では、「大和川線トンネル技術委員会(委員長：大西有三 京都大学名誉教授)」によりご指導頂いた。ここに付記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 平野正大, 藤原勝也, 出射知佳, 譽田孝宏, 紀伊吉隆: 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, 土木学会トンネル工学報告集, Vol.27, II-1, 2017.
- 2) 阪神高速道路(株): シールドトンネル設計マニュアル, 2011.
- 3) 崎谷淨, 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, 土木学会トンネル工学報告集, Vol.24, II-8, 2014.
- 4) 橋本正, 矢部興一, 山根昭彦, 伊藤博昭: パッド式シールドセグメント用土圧計の開発, 第28回土質工学研究発表会講演概要集, pp.2055-2058, 1993.
- 5) 中元佑一, 藤原勝也, 陣野員久, 石原悟志, 山内雅基, 長屋淳一: 大和川線シールドトンネル覆工挙動に関する長期計測結果からの考察, 第73回土木学会年次学術講演会, III-567, pp.1133-1134, 2018.

(2018. 8. 10 受付)

## THE EVALUATION OF LONG-TERM BEHAVIOR OF PARALLEL SHIELD TUNNEL LINERS WHICH IS CONSTRUCTED VERY CLOSELY WITH A LARGE CROSS-SECTION

Yuichi NAKAMOTO, Katsuya FUJIWARA, Kazuhisa JINNO, Satoshi ISHIHARA, Junichi NAGAYA and Takahiro KONDA

In the Yamatogawa Route located in the urban area of Kansai, Japan, the parallel shield tunnels are constructed very closely over a long distance with a large cross-section. With regard to the design of the preceding tunnel, the influence of the side shield tunnel excavated nearby the preceding tunnel is considered. According to "Yamatogawa-Route shield tunnel design manual", the pressure on liners of trailing tunnel is designed 120 percent of vertical soil pressure as a influence of parallel excavation.

In this paper, the data which have been measured for two years on five cross sections were reported and the measured values were compared with the designed values. As a result, it was confirmed that the pressure varied slightly and didn't excess the designed value. The sectional force didn't also excess the long-term allowable stress. It seemed that it is effective to increase the pressure on trailing tunnel in some degree.