

# 大断面シールドトンネル覆工挙動に与える 超近接併設影響の検討

伊佐 政晃<sup>1</sup>・藤原 勝也<sup>2</sup>・陣野 員久<sup>3</sup>・石原 悟志<sup>4</sup>  
橋本 正<sup>5</sup>・長屋 淳一<sup>6</sup>・出射 知佳<sup>7</sup>

<sup>1</sup>正会員 阪神高速道路株式会社 技術部 (〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町4-1-3)  
E-mail: masaaki-isa@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 萱嶋工区 (〒572-0045 大阪府寝屋川市東神田町37番1号)  
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 (〒584-0031 大阪府富田林市寿町2丁目6-1)  
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 (〒113-0034 大阪府大阪市中央区大手前2丁目1番2号)  
E-mail: hashimoto@geor.co.jp

<sup>6</sup>正会員 株式会社地域地盤環境研究所 (〒113-0034 大阪府大阪市中央区大手前2丁目1番2号)  
E-mail: nagaya@geor.co.jp

<sup>7</sup>正会員 株式会社地域地盤環境研究 地盤解析部 (〒113-0034 大阪府大阪市中央区大手前2丁目1番2号)  
E-mail: idei@geor.co.jp

大和川線シールドトンネルは、既往事例の少ない大断面，超近接，長距離にわたって併設するトンネルであるため，先行トンネル覆工の設計では，後行シールド掘進に伴う先行トンネル覆工への併設影響を考慮している．また，本トンネルは，土被り厚の異なる直線区間だけでなく曲線区間もあり，また掘削径の異なるシールドトンネルによる片側併設，両側併設など様々な条件下で構築した．ここでは，大和川線シールドトンネル設計マニュアル検証用に設定した計測5断面においてトンネル覆工の挙動を計測し，得られた各種データについて分析した．特に，曲線施工に特有の傾向を確認するため， $R=400$ [m]の曲線施工と直線施工を比較し，片側併設時と両側併設時の併設影響の差異についても比較，検討したので報告する．

**Key Words :** *Parallel shield tunnels, Influence on proximity tunnel, Large cross-section*

## 1. はじめに

阪神高速大和川線は，延長約9.7[km]の大部分にあたる約6.8[km]が地下構造であり，そのうち約3.9[km]でシールドトンネルを採用している．大断面で東西線間の併設距離隔が外径比 $0.1 \times D$  ( $D$ :セグメント外径)程度の超近接施工により長距離掘進する，既往事例の少ない大断面併設トンネルである．本シールドトンネルは，土被り厚の異なる直線区間だけでなく曲線区間もあり，掘削径の異なるシールドトンネルによる片側併設，両側併設など様々な条件において掘進している．ここでは，大和川線シールドトンネル固有の技術的課題に対して，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

アル」<sup>1)</sup>を検証することを目的に，異なる条件下に設定した5箇所の計測断面において，周辺地盤やトンネル挙動を計測した<sup>2)</sup>(図-1参照)．

本稿では，計測5断面の計測結果について整理し，曲線施工に特有の傾向を確認することを目的に， $R=400$ [m]の曲線施工と直線施工を比較した．また，片側併設時と両側併設時の併設影響の差異や，掘削外径の違いによる影響についても検討した．

## 2. 計測5断面と計測項目の概要

各計測断面の断面図および計測機器配置図を図-2 に，

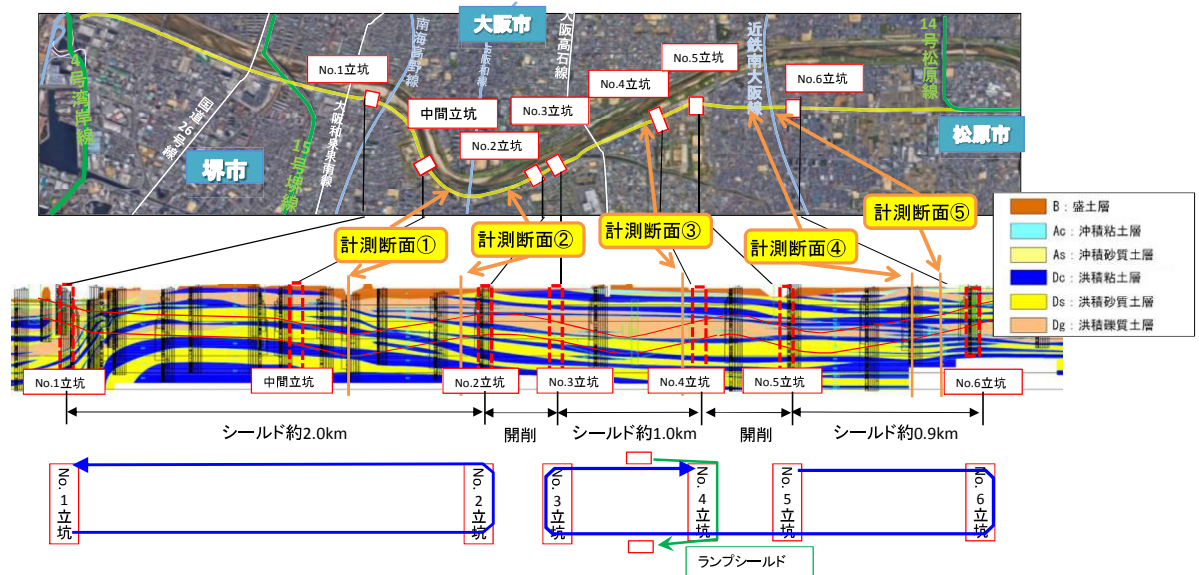


図-1 計測断面位置

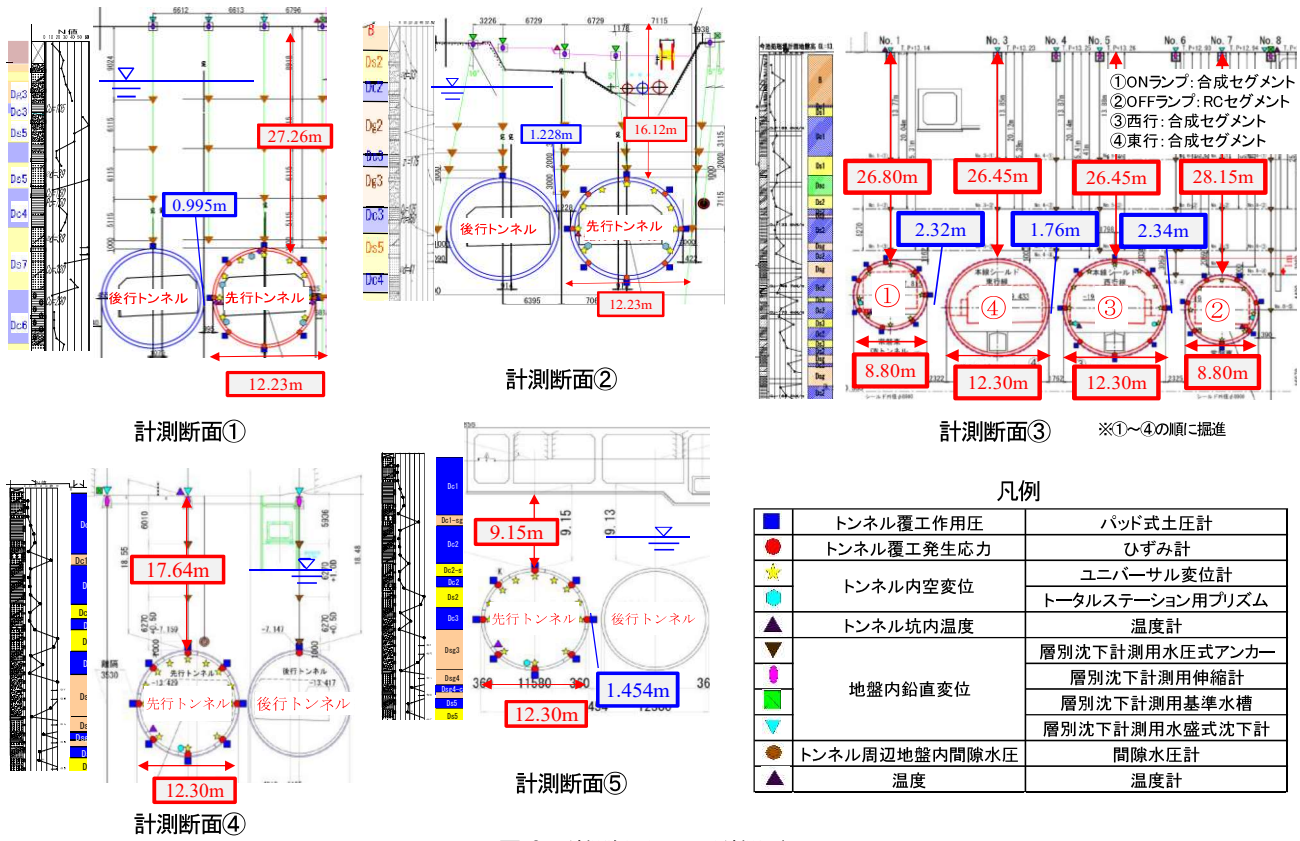


図-2 計測断面および計測項目

表-1 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
セグメント種類	先行:合成セグメント 後行:RCセグメント	先行:RCセグメント 後行:RCセグメント	③西行:合成セグメント ④東行:合成セグメント	①ONランプ:合成セグメント ②OFFランプ:RCセグメント	先行:合成セグメント 後行:合成セグメント	
セグメント外径		12.23m	12.30m	8.80m		12.30m
土被り	27.26m	16.12m	本線:26.45m, ONランプ:26.80m, OFFランプ:28.15m		17.64m	9.15m
併設トンネル間 距離	0.995m(≒0.08D)	1.228m(≒0.1D)	片側併設:OFFと西行間距離2.34m 両側併設:東行と西行間距離1.76m, ONと東行間距離2.32m		1.214m(≒0.1D)	1.454m(≒0.11D)
平面線形	R=400m	R=3,000m	R≒3,500m		R=1,400m-13,000m	R=1,400m
掘進地盤	上半:砂層,下半:粘土層	上:礫層,中:粘土層, 下:砂層	砂・砂礫と粘土の互層		砂・砂礫と粘土の互層	
特徴	最深&曲線&超近接断面	転回立坑到達・再発進直近の 直線断面	4連併設断面		近鉄交差前トライアル用の 直線断面	近鉄交差部の直線断面
掘進 状況	切羽圧 静止側圧よりやや大きめ	静止側圧よりやや大きめ	片側併設時:静止側圧よりやや大きめ 両側併設時:静止側圧相当		静止側圧よりやや大きめ	静止側圧よりやや大きめ
裏込め注入圧	全土被り圧相当	全土被り圧相当	全土被り圧よりやや大きめ		全土被り圧相当	全土被り圧相当

計測5断面の概要を表-1に示す。計測断面①は、 $R=400[m]$ の曲線かつ最も深い掘削深度にあり、併設離隔 $0.08 \times D$ と超近接施工断面である<sup>2)</sup>。また、計測断面③は本線東行および西行トンネルの両側において、地表からのアクセス道路であるランプトンネル(ONランプおよびOFFランプ)が位置する4連併設断面である。その施工順序は、ONランプシールド掘進後に、No.4立坑で転回してOFFランプシールドを施工し、その後、本線西行トンネル、本線東行トンネルの順番に構築する。本線西行トンネルは、OFFランプ横をシールド掘進する(片側併設)のに対して、本線東行トンネルは、ONランプおよび本線西行トンネルの間を掘進する(両側併設)<sup>3)</sup>。一方、計測断面②④⑤は、比較的土被りの浅い直線断面である<sup>4),5)</sup>。

シールド掘削対象地盤は、硬質な洪積粘性土地盤(N値7~27、 $c=200[kN/m^2]$ 程度)と良く締まった洪積砂・砂礫土地盤(N値40~60以上)が互層状に堆積している。

各計測断面の先行トンネルを対象に、1断面あたり8箇所(8角形の頂点位置)を基本として計測機器を配置し、後行シールド併設時における先行トンネル覆工作用圧と発生応力、トンネル内空変位を自動計測した。各計

測データの初期値については、トンネル覆工発生応力はセグメント組立直前を、その他の計測項目については計測リング組立直後に設定した。また、併設シールド掘進時の両トンネルの挙動を検証することを目的に、以下の計測値については、後行シールド通過時における先行トンネル覆工挙動に関する併設変動分のみを表示している。なお、計測断面①については、単設時テール通過後および併設通過前において左右両肩部のひずみ計の値が異常値を示したため、欠損としている。

### 3. 計測値の分析<sup>6)</sup>

後行シールド併設時において先行トンネル覆工に発生する断面力および内空変位の計測値を図-3に示す。

ここでは、各計測断面の特徴を踏まえ、以下の断面について計測結果を分析した。

- ・計測断面①(掘進深度が深く $R=400[m]$ の曲線断面)
- ・計測断面③(掘進深度が深く4連併設断面)
- ・計測断面②④⑤(比較的掘進深度が浅く直線断面)

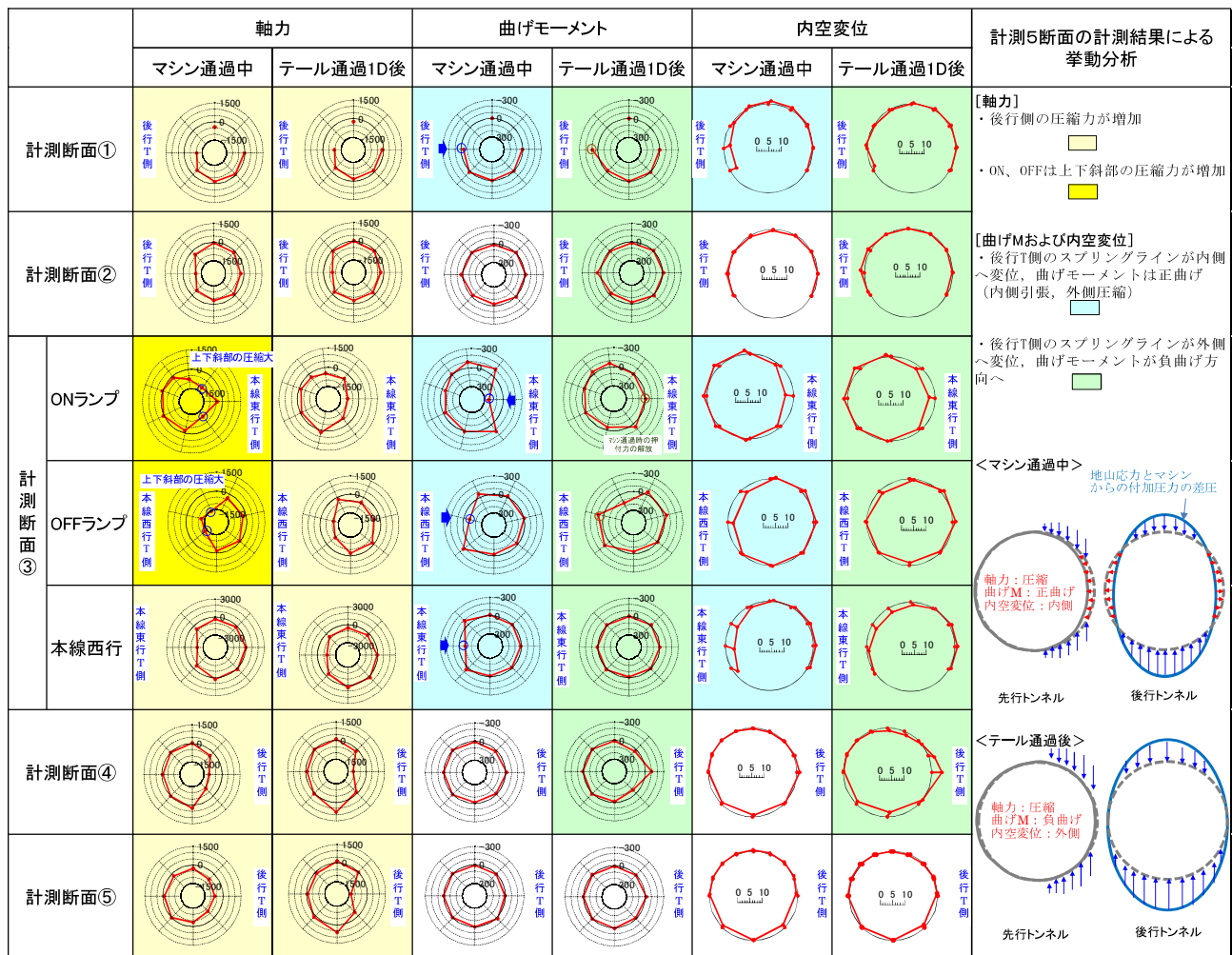


図-3 先行トンネル覆工に発生する軸力、曲げモーメントおよび内空変位の計測結果(併設影響のみを表示)

### (1) 計測断面①

シールド通過中においては、SL(スプリングライン)付近で後行シールド側から押され、先行トンネルの曲げモーメントは正曲げ(内側引張、外側圧縮)に、内空変位は縦長変形になった。しかし、シールド通過後は、施工時荷重の減少に伴い、負曲げ(内側圧縮、外側引張)および横長変形に転じた。また、軸力については、マシン通過時に後行シールド側の圧縮力が増加し、テール通過後も圧縮力が残留する結果となった。

### (2) 計測断面③

#### a) OFFランプ

本線西行シールド通過中、OFFランプトンネル(先行トンネル)は、切羽圧や裏込め注入圧等の施工時荷重の影響を受けて、後行シールド側で正曲げのモーメントが発生し、縦長変形となった。しかし、テール通過後、後行シールド側からの施工時荷重の減少に伴い、負曲げおよび横長変形に転じた。先行トンネル覆工に発生した軸力は、マシン通過中に上下斜方向から増加したが、テール通過後は施工時荷重の減少に伴って減少した。

#### b) ONランプと本線西行トンネル

OFFランプトンネルの挙動と同様、後行シールド通過中において、両先行トンネルの後行シールド(本線東行トンネル)側SL付近において、正曲げおよび縦長変形となった。しかし、テール通過後には、負曲げおよび横長変形方向に転じている。先行トンネル覆工に発生した軸力は、マシン通過中に上下斜方向から増加し、テール通過後は、軸圧縮力の減少が見られた。

### (3) 計測断面②④⑤

シールド通過中は、計測断面①③ほど顕著な曲げモーメントの変動を示さなかったが、シールド通過後は、後行シールド側SL付近で負曲げ、横長変形となる類似傾向を確認した。先行トンネル覆工に発生した軸力は、テ

ール通過後も残留する結果となった。

以上、各計測断面における計測値の分析より、後行シールド通過中は、施工時荷重(切羽圧、裏込め注入圧)により、先行トンネルが後行シールド側から押されて正曲げおよび縦長変形になるのに対して、テール通過後には傾向が逆転し、後行シールド側からの併設影響が弱まり、負曲げおよび横長変形に転じた。また、各計測断面の軸力は、いずれもマシン通過時に後行シールド側が増加し、テール通過後も残留する結果となった。本傾向は、どの計測断面においても定性的に共通して確認できた。

ただ、計測断面①③は、計測断面②④⑤に比べて掘進深度が深く、施工時荷重による影響をより大きく受けていると考えられることから、シールド通過前後の曲げモーメントおよび内空変位の変化が他の計測断面に比べて大きくなる傾向にあった。

## 4. 曲線施工と直線施工の比較<sup>3)</sup>

計測断面①(曲線施工)と計測断面②(直線施工)における後行シールド掘進時の施工条件を表-2に示す。両計測断面とも、切羽圧は静止土圧相当に、最大裏込め注入圧は全土被り圧相当で施工管理した。各施工段階における先行トンネル覆工の内空変位分布および断面力分布を図-4に示す。計測断面①では、切羽通過時に縦長変形を示す一方で、計測断面②ではほとんど変化はなかったが、シールド通過中からは両計測断面とも内空変位分布が徐々に縦長変形から横長変形に反転している。

計測断面①のように、先行トンネル内空変位分布が切羽通過時に縦長変形する傾向は、直線施工である計測断面③⑤でも見られる類似した挙動であることから、曲線施工だけに特化される傾向とは言い難い。このような傾向は、曲げモーメント分布や軸力分布に関しても同様に発生しており、曲線施工だけに特化する傾向は見られな

表-2 計測断面①(曲線施工)と計測断面②(直線施工)における後行シールド掘進条件

		計測断面①(曲線施工)	計測断面②(直線施工)
平面線形		R=400m	R=3,000m
土被り		27.26m	16.12m
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]
切羽圧	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	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:0.38~0.50[MPa] 中央:0.35~0.52[MPa] → ほぼ設定値(静止側圧)相当	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	全土被り相当(0.53[MPa]) 裏込め注入率:130%	全土被り相当(0.35[MPa]) 裏込め注入率: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:0.21~0.51[MPa] テール土圧:0.11~0.47[MPa]

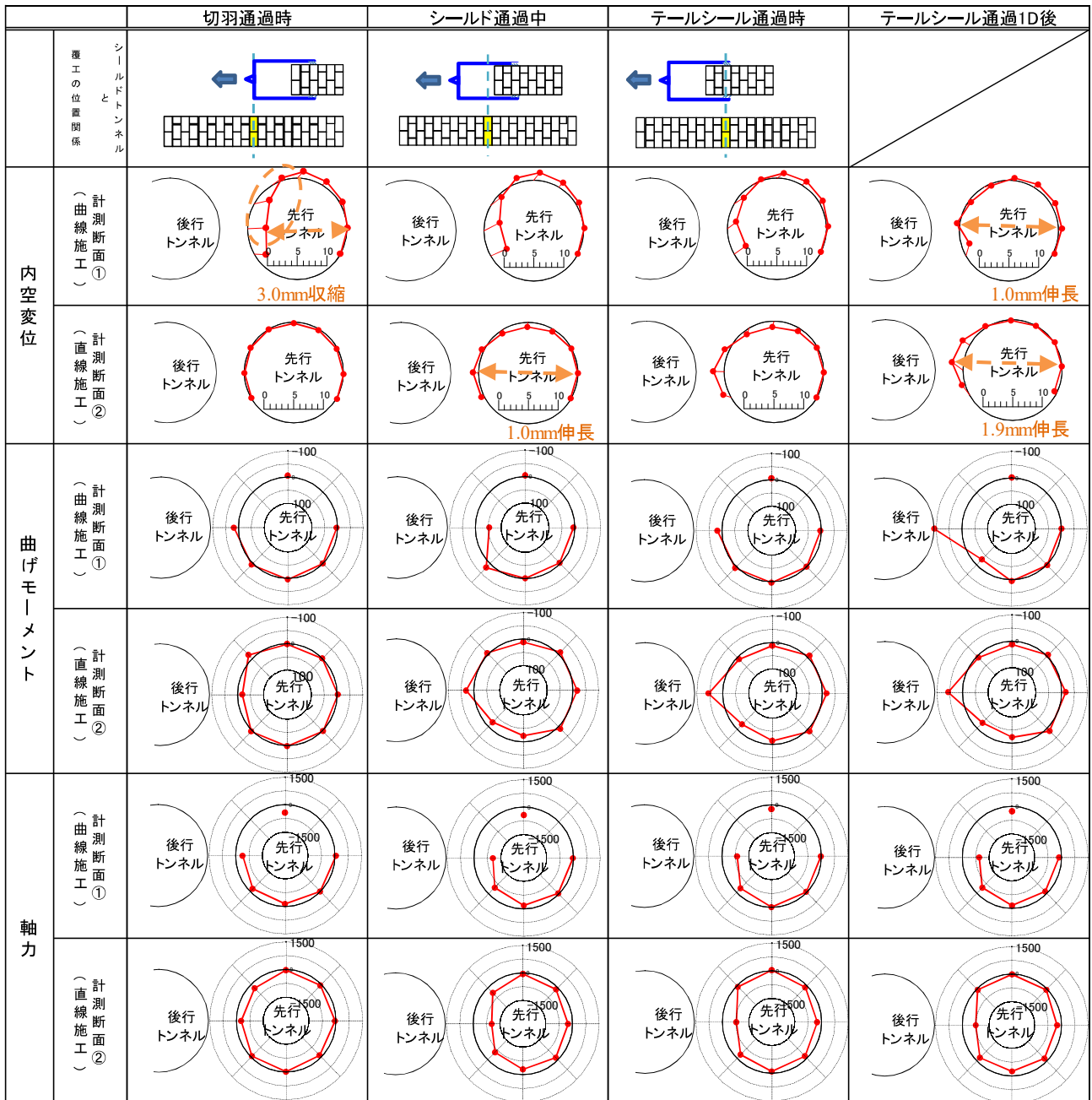


図-4 計測断面①②における先行トンネル覆工の内空変位分布および断面力分布の変化(併設影響のみを表示)

かった。

曲線施工時には、中折れ装置と全シールドジャッキの圧力を制御するFLEXシステム(シールド線形管理対策)<sup>4)</sup>を採用し、切羽面を全押ししながら曲線外側を余掘りして掘進している。よって、 $R=400[m]$ 程度の曲線施工であれば、直線施工と大差なく施工管理できる効果が今回の結果に表れていると考えられる。

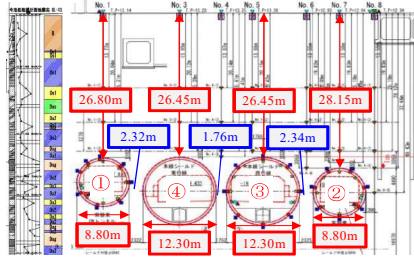
### 5. 片側併設と両側併設の比較<sup>7)</sup>

計測断面③において、片側併設(先行：OFFランプトンネル，後行：本線西行シールド)と両側併設(先行：ON

ランプトンネルおよび本線西行トンネル，後行：本線東行シールド)の後行シールド掘進条件を表-3に示す。片側併設時の本線西行シールドは、発進後間もない計測断面③を通過するため、切羽圧を所定の静止側圧相当まで高めることができず、静止側圧より若干小さい圧力でしか施工することができなかった。一方、両側併設時の本線東行シールドは、切羽圧は静止土圧相当、最大裏込め注入圧は全土被り圧相当で掘進した。片側併設時における先行トンネルの内空変位分布を図-5に、両側併設時における各先行トンネルの内空変位分布を図-6に示す。片側併設時も両側併設時も後行シールド側から先行トンネルは押されて、先行トンネルの内空変位分布は縦長変形になるのに対して、シールド通過後は、後行シールド側

表-3 計測断面③の片側併設と両側併設における後行シールド掘進時の施工条件

		本線東行トンネル	本線西行トンネル
平面線形		R=3,500m	R=3,500m
土被り		26.45m	26.45m
設定条件		静止側圧、上部:0.40[MPa]、中央:0.50[MPa]	静止側圧、上部:0.40[MPa]、中央:0.50[MPa]
切羽圧	実施工時の状況	掘進時 上部:0.28~0.43[MPa]、中央:0.39~0.58[MPa] → 静止側圧より若干大きい圧力 停止時 上部:0.33~0.42[MPa]、中央:0.46~0.54[MPa] → ほぼ設定値(静止側圧)相当	掘進時 上部:0.23~0.40[MPa]、中央:0.34~0.50[MPa] → ほぼ設定値(静止側圧)相当 停止時 上部:0.18~0.32[MPa]、中央:0.29~0.42[MPa] → 静止側圧より若干小さい圧力
	裏込め注入圧	設定条件 全土被圧相当(0.52[MPa])、裏込め注入率:130% 実施工時の状況 ポンプ吐出圧:0.41~0.67[MPa] テール土圧:0.29~0.67[MPa]	設定条件 全土被圧相当(0.52[MPa])、裏込め注入率:125% 実施工時の状況 ポンプ吐出圧:0.37~0.68[MPa] テール土圧:0.13~0.43[MPa]



※①~④の順に掘進  
 ①: ONランプトンネル  
 ②: OFFランプトンネル  
 ③: 本線西行トンネル  
 ④: 本線東行トンネル

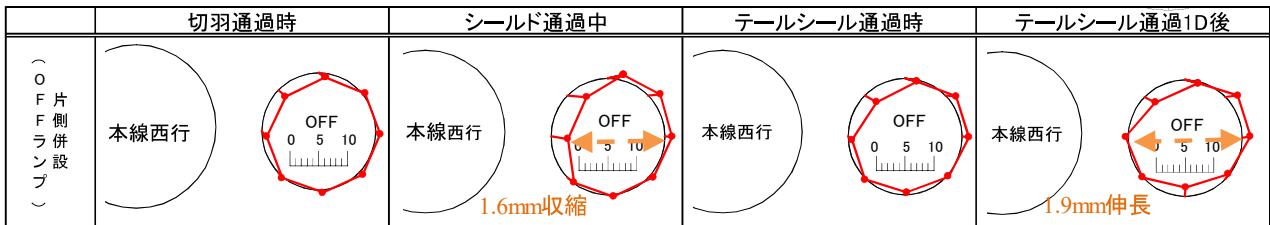


図-5 片側併設時のOFFランプトンネルの内空変位(併設影響のみを表示)

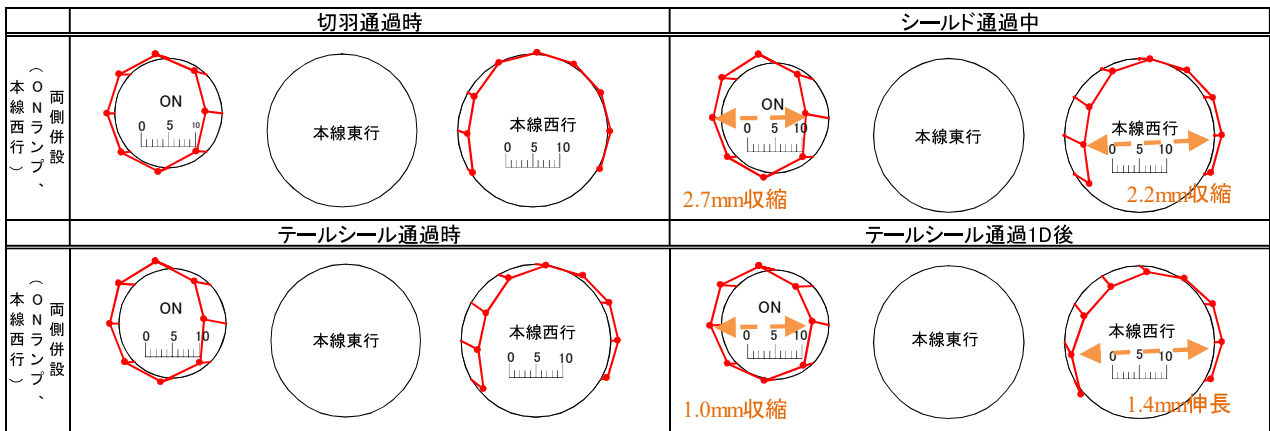


図-6 両側併設時のONランプトンネルと西行トンネルの内空変位(併設影響のみを表示)

からの併設影響が弱まり、横長変形に転じる傾向が確認できた。つまり、片側併設の場合も両側併設の場合も、他の計測断面と同様、シールド通過中は、先行トンネルが後行シールド側から押されて正曲げおよび縦長変形になるのに対して、テール通過後は傾向が逆転し、負曲げおよび横長変形になる傾向を示した。ただし、シールド掘削径が異なるため、本線東行シールド(セグメント外径:12.30[m])の併設施工により、それよりも径の小さいONランプトンネル(セグメント外径:8.80[m])の方で、施工時に比較的大きな断面力が発生する傾向にあった。

## 6. トンネル覆工の安全性

先行トンネル覆工組立時から併設シールド通過後までに発生した先行トンネル覆工発生応力度と許容応力度の関係を図-7に示す。なお、ここに示すトンネル覆工発生応力は、併設時の変動量ではなく、セグメント組立直前の初期値からの累積量を示している。単設時の発生応力は、先行トンネル覆工組立以降の最大値、先行シールドテール通過1D後の値を示し、併設時の発生応力は、後行シールド通過中の最大値、後行シールドテール通過1D後およびそれ以降に実施した自動計測の最終計測値

を表示している。

計測断面③のON、OFFランプトンネルの単設時において、一時的に長期許容応力度を超過する最大値を示したものの、短期許容応力度内に収まった。ONランプトンネルについては、テール通過ID後以降において、トンネル周辺地盤で実施した薬液注入工による影響が一時的に作用したと思われる。OFFランプトンネルについては、先行シールドテール通過前に最大値を示し、長期許容応力度を一時的に超過しているが、先行シールドテール通過ID後は許容値以下の応力度となっている。

併設時については、いずれの計測断面においても、先行トンネル覆工発生応力の最大値が、後行シールド通過前後に発生しており、長期許容応力度内に収束する結果になった。また、後行シールド通過に伴う先行トンネル覆工発生応力度への併設影響については、先行シールド通過時の単設時の挙動に比べて小さい結果となった。

## 7. おわりに

大和川線シールドトンネル工事では、切羽圧は静止土圧相当、最大裏込め注入圧は全土圧相当で施工したことから、トンネル周辺地盤を大きく緩ますことなく、安全

に施工を完了することができた。その結果、先行トンネル覆工の発生応力度は、後行シールド掘進に伴う併設影響を受ける段階以降、すべて許容応力度内に収まる結果であった。

得られた知見を以下に示す。

- 1) すべての計測断面において、後行シールド通過時に先行トンネル覆工は、後行シールド側において曲げモーメントは正曲げ、内空変位は縦長変形する傾向を示した。一方、後行シールド通過ID後には、曲げモーメントは負曲げ、内空変位は横長変形の逆傾向を示した。なお、シールド掘進深度が比較的深い計測断面①③では、シールド通過中の施工時荷重が大きくなるため、後行シールド通過中およびテール通過ID後の断面力や内空変位の変化量は、他計測断面に比べて大きかった。
- 2) 計測断面①は、シールド掘進深度が最も深く、 $R=400[m]$ 曲線の併設施工であることから、曲線施工による影響が懸念されたが、断面力および内空変位ともに直線施工時と大きな差異はなかった。曲線施工時において、FLEXシステムを採用して全ジャッキ推力を管理しながら曲線外側を余掘りして掘進したことから、この程度の曲率であれば直線施工と大差なく施工管理することができると考え

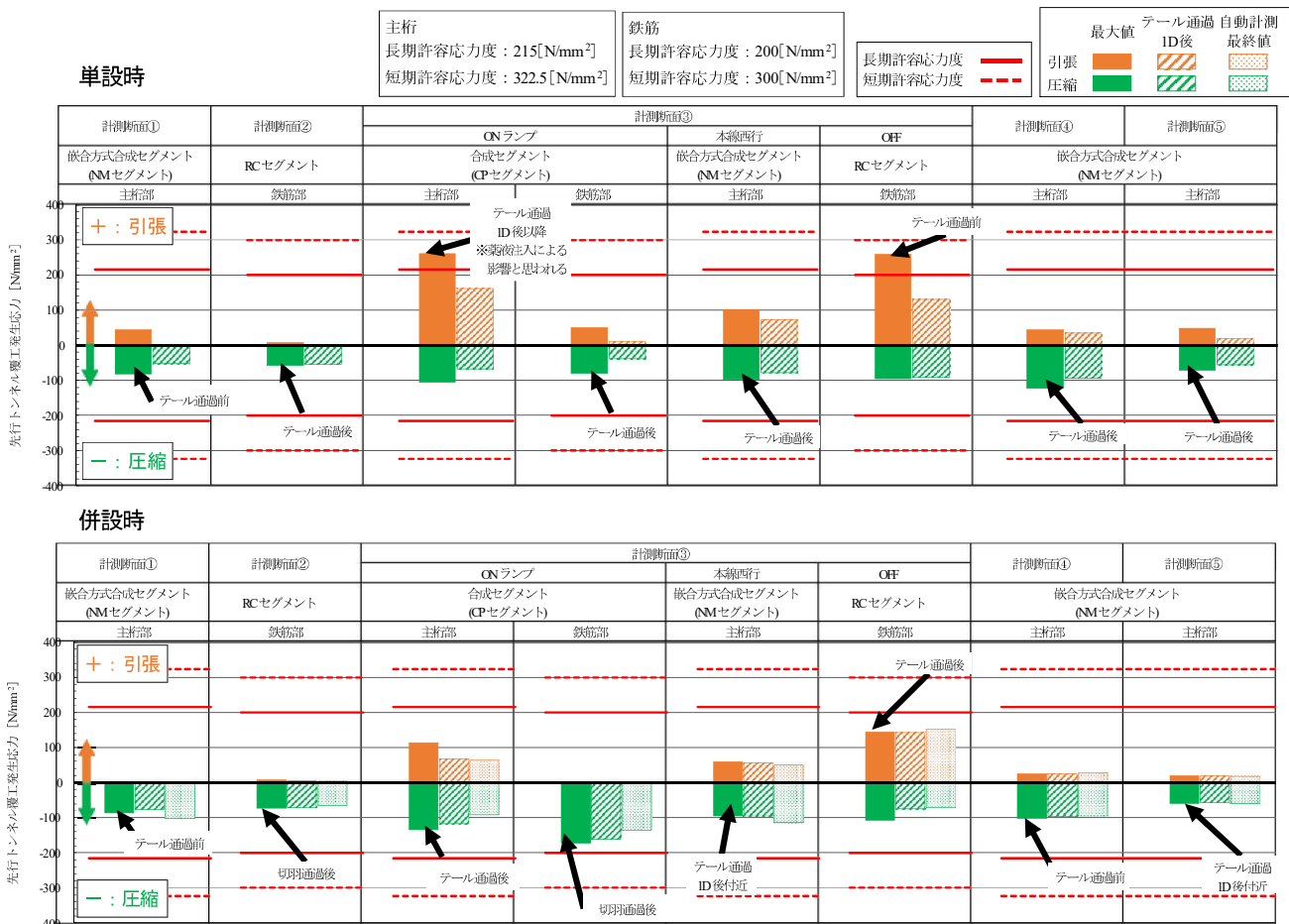


図-7 先行トンネル覆工発生応力と許容応力度の関係

られる。

- 3) 片側併設および両側併設ともに、他の計測断面と同様、シールド通過中は、先行トンネルが後行シールド側から押されて正曲げおよび縦長変形になるのに対して、テール通過後は、傾向が逆転し、負曲げおよび横長変形になった。なお、シールド掘進径の違いから、掘削径の大きい本線シールド掘進に伴うトンネル径の小さいランプトンネルへの併設影響については、比較的大きな断面力が発生する傾向にあった。
- 4) 大和川線トンネル覆工発生応力は、セグメント組立時間から後行シールド通過以降、すべて長期許容応力度内に収束しており、安全性が確保できていることを確認した。なお、単設時の挙動の方が、併設時の挙動に比べて全体挙動に対する割合が大きいことを確認した。

今後、計測値と設計計算値との比較検証を行い、大和川線シールドトンネル設計マニュアルの妥当性についてさらに検証を進めていく予定である。

#### 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) 西原知彦，新名勉，崎谷浄，岩住知一，譽田孝宏：大断面，曲線シールド掘進における施工時荷重の影

響に関する分析，土木学会トンネル工学報告集，Vol.24，II-6，2014。

- 3) 陣野員久，石原悟志，新名勉，出射知佳，譽田孝宏：超近接する後行シールドの掘進条件の違いが先行トンネル覆工挙動に与える併設影響，土木学会トンネル工学報告集，Vol.24，II-8，2016。
- 4) 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。
- 5) ト部賢一，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，土木学会トンネル工学報告集，Vol.24，2014。
- 6) 伊佐政晃，藤原勝也，陣野員久，石原悟志，出射知佳，長屋淳一，紀伊吉隆：大和川線シールドトンネル覆工挙動における超近接併設影響に関する考察，土木学会第73回年次学術講演会概要集，III-566，pp.1131-1132，2018。
- 7) 出射知佳，陣野員久，石原悟志，藤原勝也，伊佐政晃，譽田孝宏，石垣兄太：大断面・超近接シールド掘進に伴う片側併設影響と両側併設影響の比較，土木学会第73回年次学術講演会概要集，pp.1135-1136，2018。

(2018.8.10 受付)

## BEHAVIOR OF PARALLEL SHIELD TUNNELS LINING WITH A LARGE CROSS-SECTION AND HIGH-PROXIMITY

Masaaki ISA, Katsuya FUJIWARA, Kazuhisa JINNO, Satoshi ISHIHARA,  
Tadashi HASHIMOTO, Junichi NAGAYA and Tomoyoshi IDEI

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. These tunnels are excavated under the various conditions such as a straight section with various excavation depth, a curved section ( $R=400\text{m}$ ), and near the shield tunnel with different diameter. And the behaviors of the shield tunnels are measured at five point cross sections with these various conditions.

In this paper, the measurement data on five cross sections were reported. In order to confirm the tendency peculiar to curved construction, comparison between curved construction with  $R=400\text{m}$  and straight construction was carried out. Furthermore, the influences between the effects of high-proximity parallel shield tunnel at one side and the both side were reported.