

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

西原 知彦¹・新名 勉²・崎谷 淨³・岩住 知一⁴・譽田 孝宏⁵

¹正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 堺建設部（〒590-0075 大阪府堺市堺区南花田口町2-3-20）
E-mail: tomohiko-nishihara@hanshin-exp.co.jp

²正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 堺建設部（〒590-0075 大阪府堺市堺区南花田口町2-3-20）
E-mail: tsutomu-niina@hanshin-exp.co.jp

³正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 堺建設部（〒590-0075 大阪府堺市堺区南花田口町2-3-20）
E-mail: kiyoshi-sakiya@hanshin-exp.co.jp

⁴正会員 鹿島・飛島建設工事共同企業体（〒590-0001 大阪府堺市堺区遠里小野町4-5-3）
E-mail: iwazumi@kajima.com

⁵正会員 株式会社 地域地盤環境研究所 地盤解析部（〒550-0012 大阪府大阪市西区立売堀4-3-2）
E-mail: konda@geor.co.jp

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，別途検討した設計手法の検証を目的として，各種計測データを収集した．本稿では，曲線区間に設定した計測断面で得られた計測結果に基づき，単設シールド掘進に伴う施工時荷重の影響について検討した．その結果，トンネル覆工作用圧や発生応力は，前リングの変形履歴に依存することと，テールシールド圧や裏込め注入圧などの施工時荷重の影響を受けることを確認した．また，曲線施工に伴い，トンネル曲線外側地盤の水平変位分布を計測することにより，その傾向を捉えた．

Key Words : shield tunnel, large diameter, adjacent and curve construction, construction loads, in-site measurement

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る．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 : 12 230[mm]，最小離隔約1.0[m] ($\approx 0.08D$)の大断面かつ超近接施工で構築する．

既往事例の少ないシールドトンネル工事であるため，併設影響を考慮した「大和川線シールドトンネル設計マニュアル」¹⁾²⁾（以後「設計マニュアル」）に基づいて詳細設計を実施した．その上で，本設計思想の妥当性検証を目的に，計測断面を5断面設けてトンネル覆工挙動とトンネル周辺地盤の変形挙動を把握し(図-1参照)，実測値と設計値を比較，検証している．本稿では，曲線区間に設定した計測断面①で得られた計測結果に基づき，併設施工時の影響を検証する上で，基本情報となる単設シールド掘進に伴う施工時荷重の影響について検討した．

2. 計測断面①の概要

大和川周辺の土質縦断面図と計測断面①付近の平面図および土質縦断面図を図-2に示す．大和川線の北側に位置する大和川は，江戸時代中期の1704年(宝永元年)に付け替えられ，堺方面に向けて西流させた人口河川である．このため，地表付近は，盛土等の人為的な改変の影響を受けているが，深部においては旧河川の影響はない．

大和川沿いの地形は，沿岸部の西大阪地域，上町台地地域，東側の東大阪地域の3つに大別できる³⁾．このうち計測断面①付近は，上町台地地域に位置しており，標高はTP+10[m]前後である．表層から洪積層が分布する比較的良く締まった地盤が出現し，沖積層はほとんど分布していない．計測断面①は，最小平面曲率 $R=400$ [m]の曲線施工区間にあり，下り勾配から上り勾配に転じる最深断面でもある．掘進土層は，上半は洪積砂層(Ds7層，N値30～60以上)，下半は洪積粘土層(Dc6層，N値10程

度)である。土被り厚は27[m]程度、地下水位はGL-12[m]程度である。

各計測機器の設置位置図および計測項目を図-3に示す。トンネル覆工計測のうち発生応力の初期値は、セグメント組立直前の船形に置かれた状態で計測した値としたが、

その他の計測項目については、計測リング組立直後を初期値とした。また、トンネル周辺地盤の計測項目は、トンネル上部地盤の鉛直変位と曲線施工外側側部の水平変位である。後者は、曲線施工を考慮して多段式傾斜計を配置した。自動計測頻度は、1～5分ピッチである。

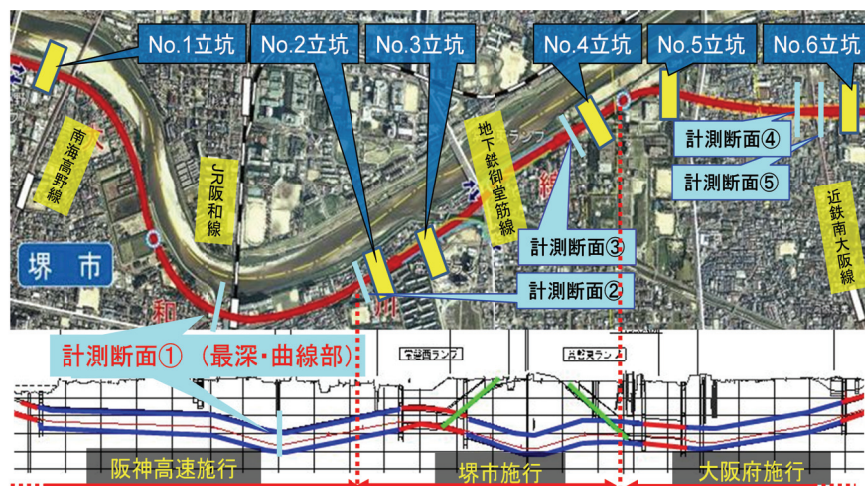


図-1 大和川線シールドトンネル工事における計測断面位置図

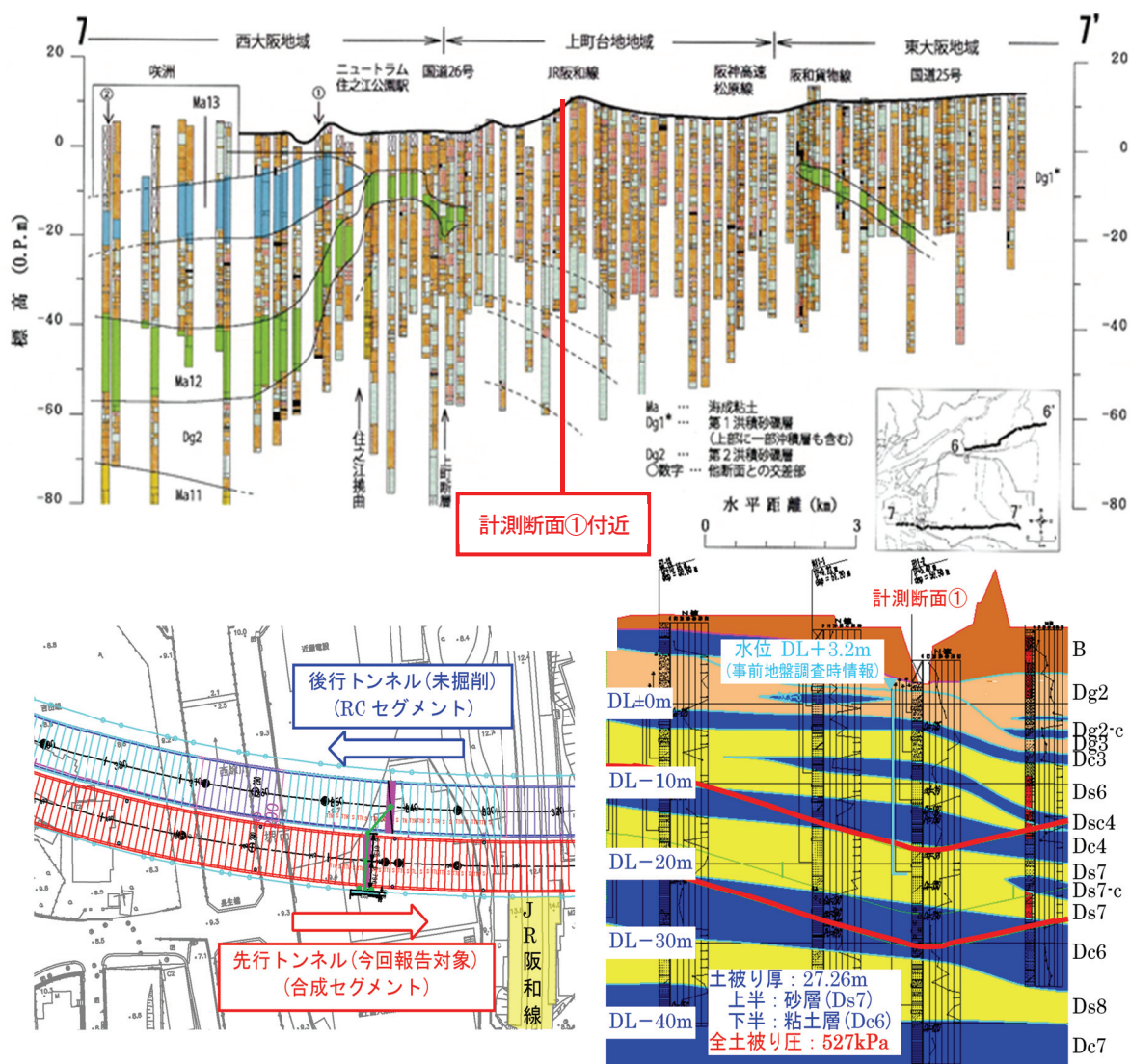
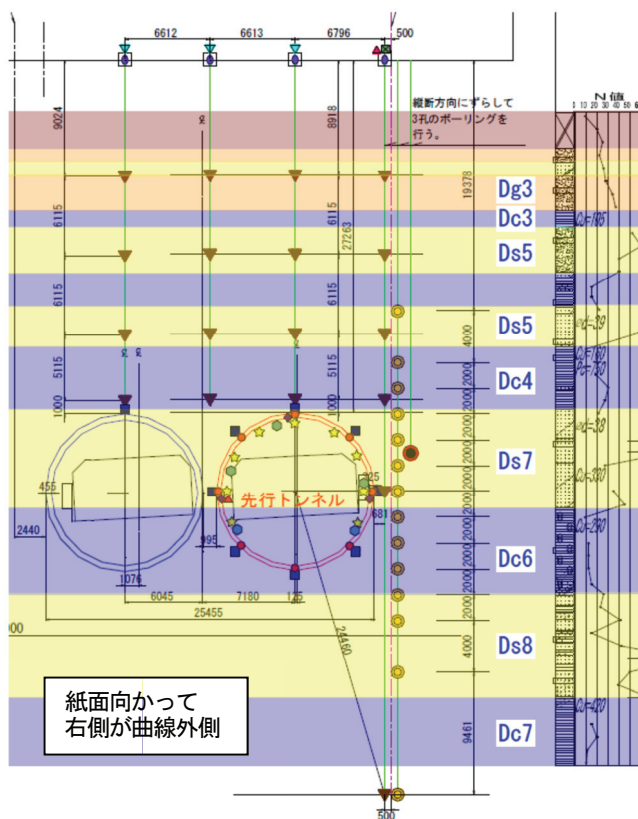
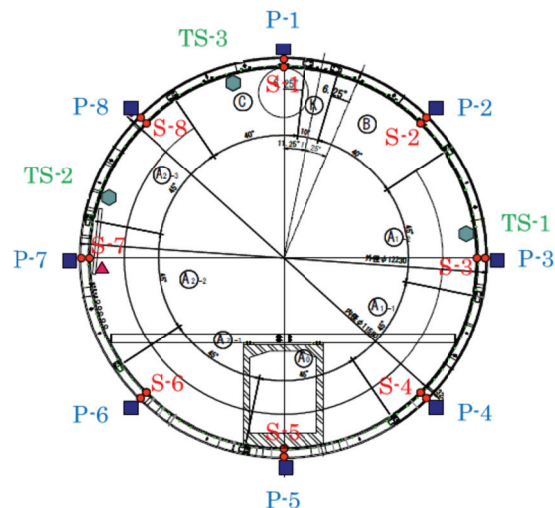


図-2 大和川周辺の土質縦断面図^③および計測断面①付近の平面図と土質縦断面図



(a) 計測機器設置全体図



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 ⁴⁾	■
	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)	☆
		TSプリズム	●
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	■
		水盛式沈下計	▼
		水圧式沈下計	▼
	地盤内水平変位	多段式傾斜計	●
	温度	温度計	▲

(b) トンネル覆工計測拡大図

図-3 計測機器配置図

表-1 計測断面①におけるシールド施工概要および掘進条件

施工概要	工 法	泥土圧式シールド工法
	シールドマシン	シールド外径φ 12 470[mm]，機長L 12 800[mm]
	セグメント	嵌合方式合成セグメント ²⁾ セグメント外径φ 12 230[mm]，内径φ 11 580[mm]，幅B 1 800[mm] 厚さh 325mm(耐火層：形鋼部25mm，コンクリート部60mm) セグメント継手：嵌合構造＋雄ピン－雌板構造 リング継手：嵌合構造＋雄ピン－雌金物構造
地盤条件	土被り厚	27.26[m]（全土被り圧：527[kPa]）
	地下水位	DL＋3.2[m]（トンネル天端部の水圧：246[kPa]）
	掘進地盤	上半：砂層(Ds7)，下半：粘土層(Dc6)
線形条件	平面線形	R＝400[m]
	縦断線形	上向き勾配3[%]区間の開始点付近
その他の 施工条件	コピーカッター	未使用
	ジャッキパターン	全ジャッキ使用(片押し回避) 推進ジャッキ推力を制御し，シールドの姿勢をコントロールするFLEXシステム ⁵⁾ を採用(ジャッキ片押し回避，全ジャッキ推進)

項 目		設定条件	実施工時の状況
切羽圧		上部：430[kPa]，中央：500[kPa]	掘進時：切羽圧はほぼ設定値. 停止時：上部 400[kPa]程度,中央 450[kPa]程度
裏込め注入圧(最大)		左上・右上：460[kPa] 左・右：530[kPa]	右側の裏込め注入圧が設定値を超過する部分があるが，ほぼ設定値程度の最大圧で制御.
裏込め注入量		約130[%]	127～136[%]
中折れ角度[度]	上下	0.15	マシン後半部において設定値よりも中折れ角度が大きくなる(0.3～0.35度).
	左右	-0.77(715R)，-0.76(716R)，-0.74(717R) -0.69(718R)，-0.63(719R)，-0.60(720R)	ほぼ設定値で制御.
ピッチング[%]		18.6(715R)，19.5(716R)，20.4(717R) 21.1(718R)，21.6(719R)，21.7(720R)	マシン通過中は設定値で制御．テール通過後より掘進線形に比べて上向きの状態で掘進.
テールクリアランス		正規組立時：45[mm]	図-9参照

3. シールド掘進概要およびセグメント設計条件

シールド施工概要および掘進条件を表-1に、セグメント構造条件および荷重条件を図-4に示す。本諸条件を踏まえ、「設計マニュアル」に準拠して設計値を算出した。

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FEM解析によって併設時の増分荷重を別途抽出した後、はりばねモデルにそれを作用させて設計値を算出している。詳細については、文献6)を参照されたい。

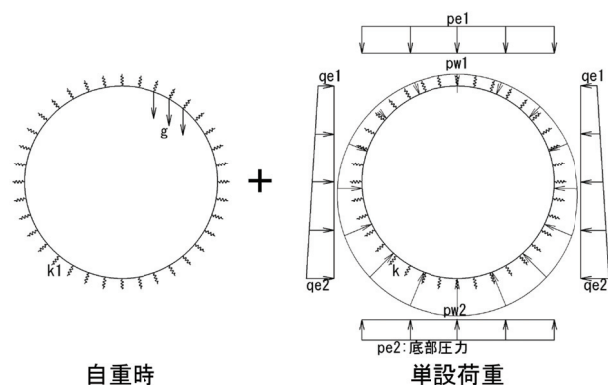
4. トンネル覆工の挙動計測結果

(1) トンネル覆工作用圧

トンネル覆工作用圧に関する経時変化図を図-5に、その分布図を図-6に示す。

テール通過時におけるトンネル天端部作用圧は、テールブラシの通過に伴い、短期的に最大1.2[MPa]を示した。また、テール通過直後の作用圧は、裏込め注入圧相当の約0.5[MPa]の等方的な作用圧分布となった。

テール通過後、トンネル覆工作用圧は全測点で低下し、テール通過10～20日後にはほぼ水压相当圧力まで低下した。ただし、トンネル天端部作用圧の低下量は小さく、水压以上に残留する結果になった。これは、大阪府施工区間に設定した計測断面④、⑤と同様の傾向⁷⁾である。



荷重条件		
特殊荷重	p0(kN/m ²)	17.0
上部鉛直土圧	pe1(kN/m ²)	106.4
下部鉛直土圧	pe2(kN/m ²)	29.9
頂部側方土圧	qe1(kN/m ²)	48.6
底部側方土圧	qe2(kN/m ²)	95.2
頂部水压	pw1(kN/m ²)	205.8
底部水压	pw2(kN/m ²)	324.9
自重	g(kN/m ²)	9.0
地盤反力係数	k1(kN/m ³)	4000
	k2(kN/m ³)	30000
側方土圧係数	λ	0.45

k1: 自重時の地盤反力係数
k2: 外荷重時の地盤反力係数

図-4 トンネル覆工の構造条件および荷重条件

(2) トンネル覆工発生応力

トンネル覆工発生応力に関する経時変化図を図-7に、その分布図を図-8に示す。

セグメント組立時において、トンネル右斜上部で外側引張、内側圧縮の縁応力(正曲げモーメント)が発生している。本挙動は、(3)で示すテールクリアランスから想定したトンネル内空変位分布と一致している。

テールシール通過時は、テールシール圧によりトンネル下半部で圧縮力が増加するとともに、トンネル右斜上部で外側引張、内側圧縮の縁応力傾向が進行している。

テール通過1D(D: シールド掘進径)以降大きな変化は見られず、縁応力分布状況が残留する結果になった。なお、トンネル左斜上部外側の計器データに長期的な変動を確認しているが、調査の結果、計器異常と判断した。

なお、単設シールド掘進時におけるトンネル覆工発生応力の最大値は60[N/mm²]であったが、許容圧縮応力度215[N/mm²]に対して28%程度であったことから、トンネル覆工の安全性は確保できていることを確認した。

(3) トンネル内空変位

掘進完了時およびセグメント組立時のテールクリアランスから推定したトンネル内空変位分布図を図-9に示す。ここでは、計測断面①である718Rを中心に、4リング手前の714Rと6リング後方の724Rを一例として示す。

714Rから718Rでは、トンネル右～右斜下部のテールクリアランスが徐々に大きくなっているのに対して、724Rでは逆に左～左斜下部で大きくなり、傾向が変化した。また、トンネル内空変位は、トンネル左斜上部と右斜下部を結ぶ方向に圧縮する傾向を示した。これは、トンネル覆工自重の影響ではなく、曲線施工に伴う前リングトンネル覆工の変位分布に合わせてセグメントを組み立てたことによる影響と考えられる。この傾向は、(2)で示すトンネル覆工発生応力分布と挙動が一致した。

また、718Rでは、掘進完了時よりも組立時の方で例えば右斜下部でのテールクリアランスが小さくなることから、シールドは左斜上部方向(設定掘進線形方向)に向かい、曲線掘進の影響を受けていると想定できる。

セグメント組立後に設置したTSプリズム位置においてトンネル内空変位を測量した結果を図-10に示す。セグメント組立後からテール通過時にかけて、トンネル覆工全体が短期的に鉛直方向に10～15[mm]程度押し下げられており、若干左斜上部からの押し込み荷重が作用している現象が顕著になった。その後、テール通過後に鉛直方向上向きに若干の回復傾向があったが、その後は長期的な変化が見られず、左斜上部から押された内空変位が10[mm]程度残留する結果になった。

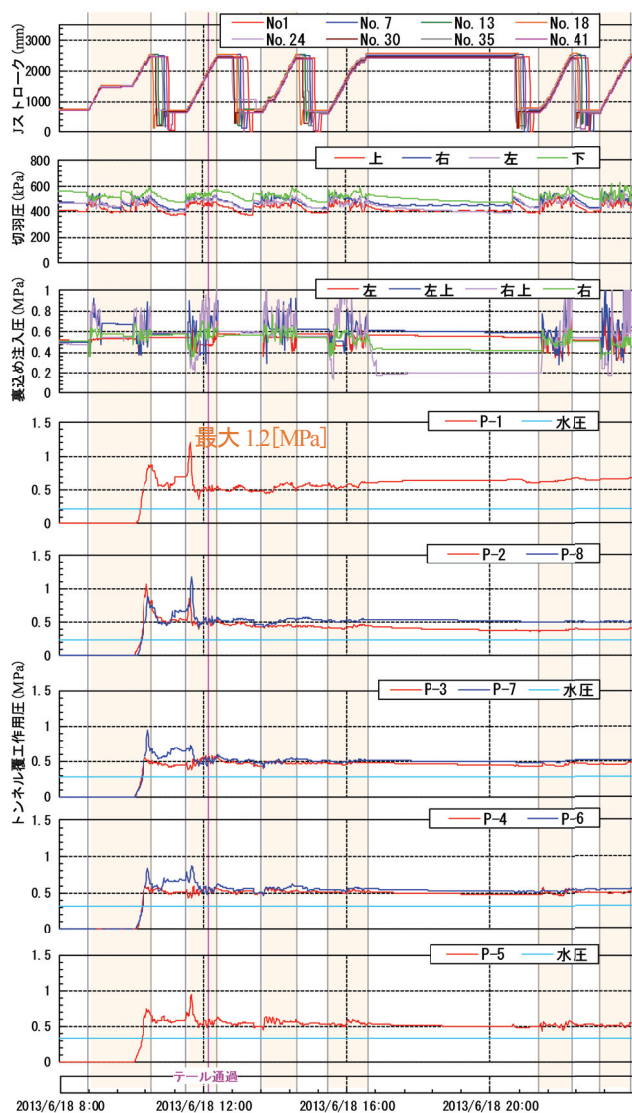


図-5 トンネル覆工作用圧経時変化

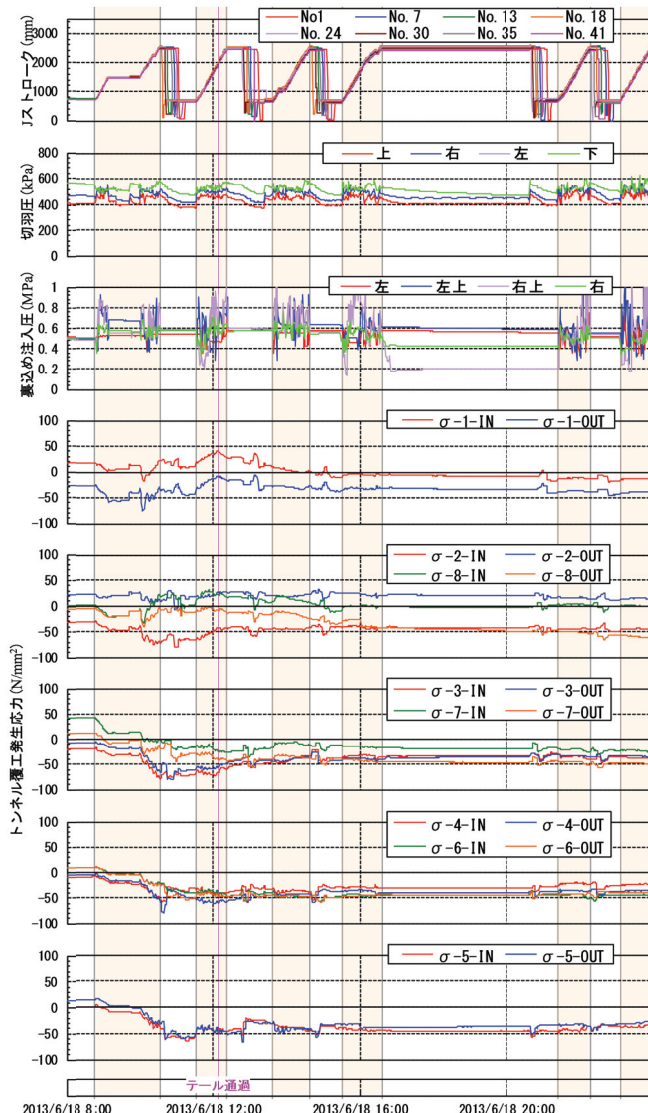


図-7 トンネル覆工発生応力経時変化

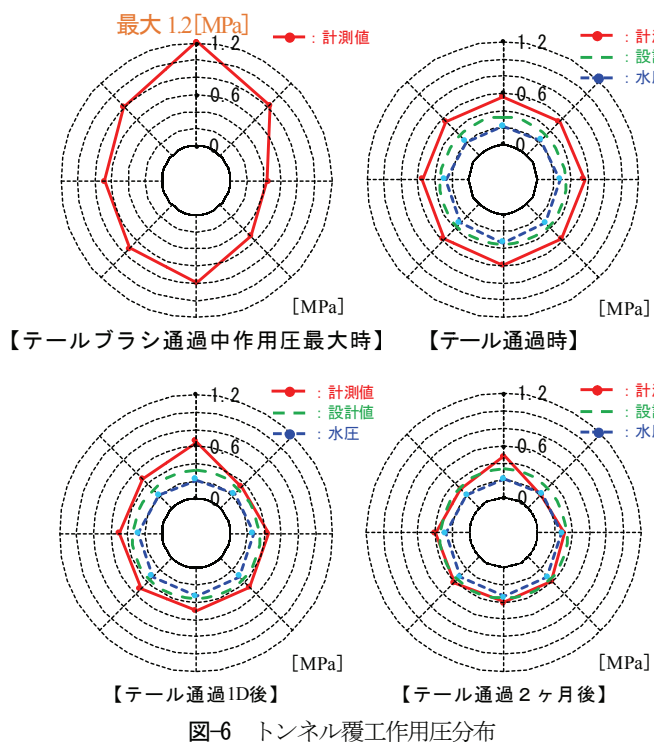


図-6 トンネル覆工作用圧分布

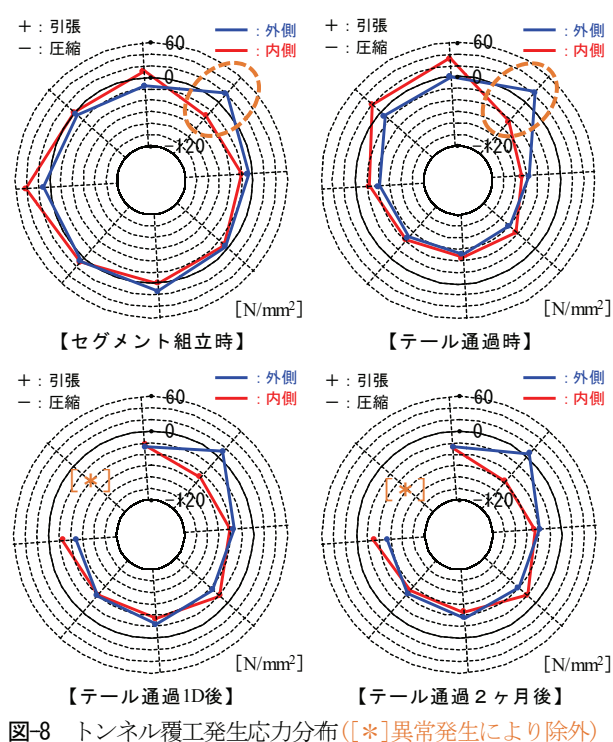


図-8 トンネル覆工発生応力分布 ([*]異常発生により除外)

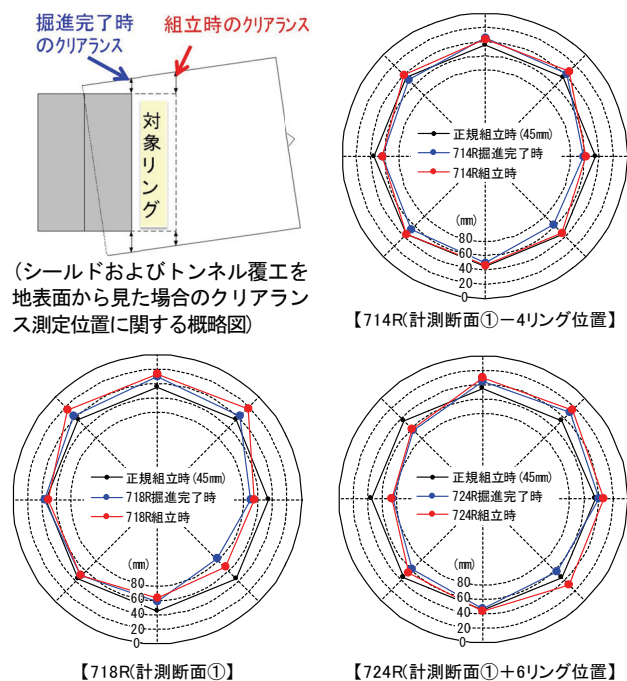


図-9 テールクリアランスから想定したトンネル内空変位分布

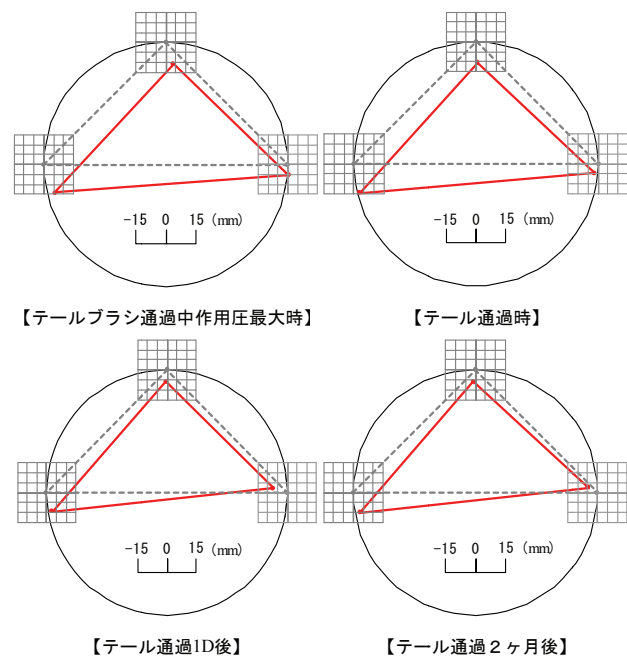


図-10 TSプリズム位置におけるトンネル内空変位測量結果

(4) トンネル覆工の長期挙動

トンネル覆工作用圧の長期挙動を図-11に示す。テール通過後、作用圧は経時的に低下傾向にあり、天端部以外はすべて水圧相当圧力まで低下した。本傾向は約1ヶ月後には収束し、それ以降の変動は見られなかった。

天端部のトンネル覆工作用圧は、他計測点と同様に低下傾向を示したが、水圧相当までは低下せず、有効応力が残留する結果になった。この傾向は、図-6のトンネル覆工作用圧分布のうち、テール通過2ヶ月後の状態からも明らかである。この要因として、浮力によってトンネル天端部が上部地盤に押し付けられ、その反力による影

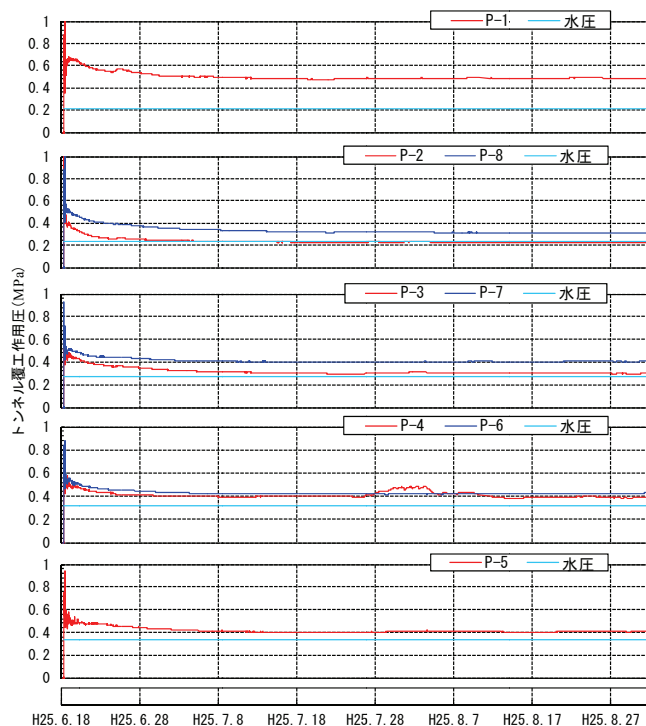


図-11 トンネル覆工作用圧経時変化(長期データ)

響が残留したと考えられる。トンネル内空変位測量結果からも、天端部がテール通過時に内空側へ変位した後、逆に地山側へ押し返される挙動を示していることから(図-10参照)、その可能性が考えられる。

5. トンネル覆工計測結果と設計値の比較

トンネル覆工作用圧と、トンネル覆工発生応力から算出した断面力、およびトンネル内空変位について、各施工段階の計測値と設計値を比較した結果を図-12に示す。

(1) 自重作用時(計測セグメント組立直後)の挙動

テールクリアランスは、トンネル天端部および曲線施工外側(図右側)上部と内側(図左側)上部において小さく、曲線施工外側スプリングライン部とその下部で大きくなった。一方、曲げモーメントの設計値は、トンネル覆工の自重のみを考慮しているため、上部から押し潰されたような分布を示している。なお、各セグメント継手部の影響を反映しているため、左右非対象形を示している。

比較図からもわかるように、このような施工時の影響を設計上は考慮していないことから、曲げモーメント分布では計測値と設計値で傾向が異なることが確認できた。

(2) テール通過時(テールシール圧最大時)の挙動

テールブラシがセグメント表面に接していることから、トンネル覆工作用圧はトンネル天端部において短期的に最大値を、トンネル内空変位は押し潰された挙動を示し、

断面力は自重作用時の分布形状を維持したまま大きくなる傾向を示した。つまり、テール通過時における施工時荷重の影響が大きいことが伺える。

設計値(青色太実線)は、常時荷重に対する断面力を示しており、テール通過時の実挙動とは異なった。

(3) テール通過後(裏込め注入圧作用時)の挙動

トンネル覆工には、裏込め注入圧に相当する均等圧が作用しているのに対して、セグメント覆工軸力は、トンネル下半の圧縮応力が大きくなる歪な軸力分布を示し、設計時の想定軸力とは異なり、テール通過時に発生した断面力が残存する結果となった。

トンネル覆工作用圧の計測値は、等方的な裏込め注入圧分布を示し、分布形状は設計値と同等であったが、絶対量は設計値の1.7倍程度であった。設計上の断面力とトンネル内空変位の分布形状は左右対称を示すが、実際にはテールシールド圧最大時の挙動が残留する状態にあって、定性的に異なる傾向を示した。

(4) テール通過2ヶ月後の挙動

トンネル覆工作用圧は、経時的に減少して設計土圧相当に収束している。一方、軸力は徐々に均一分布形状に近似し、最終的に設計値よりも大きい。比較的良好な対応関係を示した。曲げモーメント分布は、大局的には軸

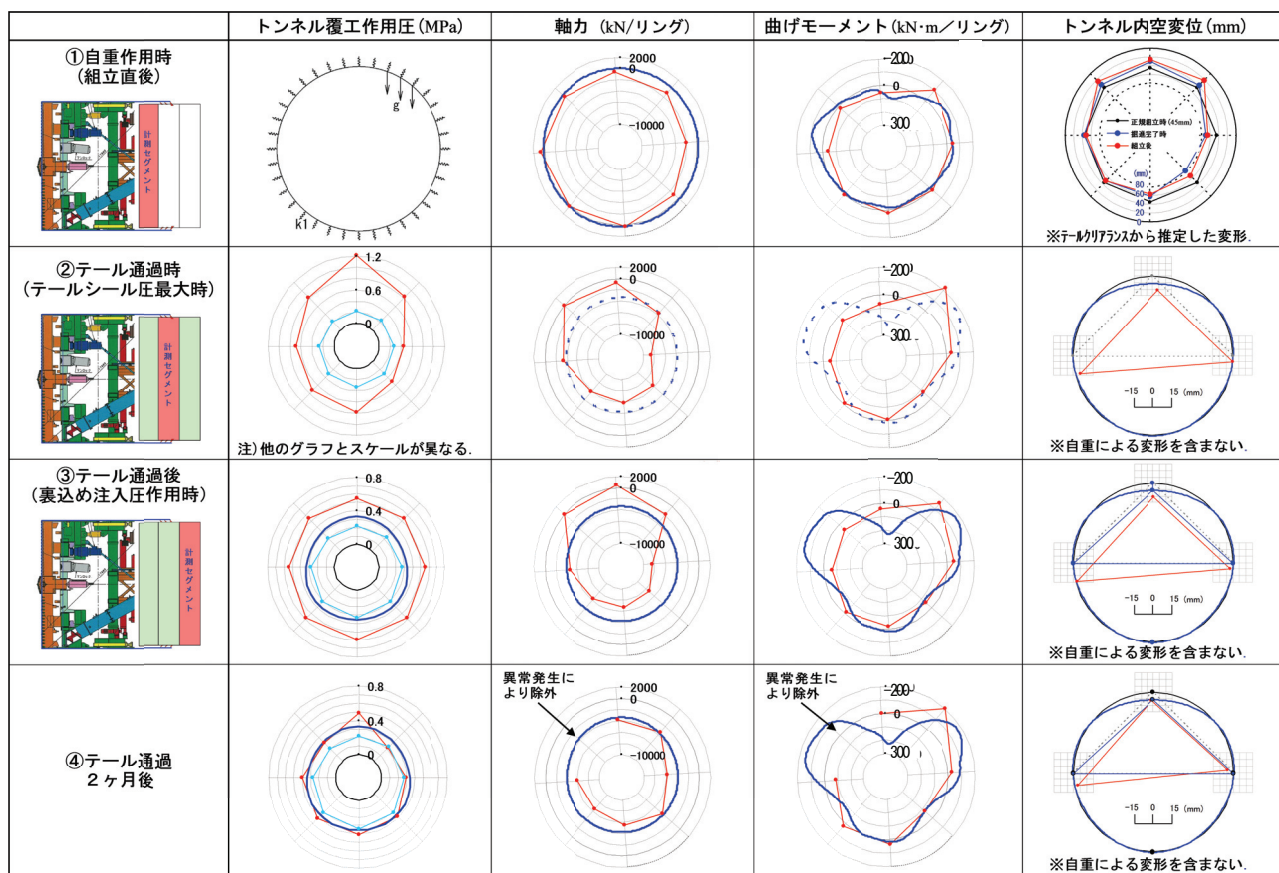
力分布の傾向と類似した結果になった。トンネル内空変位については、上部から押し潰された状態がやや緩和しているものの、トンネル天端部で5[mm]程度残留した。

6. トンネル側部地盤の変形挙動

先行シールド掘進に伴うトンネル周辺地盤の変形分布を図-13に示す。なお、初期値は、トンネル下端から前方に45°線を立ち上げた影響領域の端部の値とした。

シールド掘進に伴いトンネル上部地盤は、先行トンネル直上を中心に下に凸の沈下分布を示した。一方トンネル側方地盤は、切羽到達までスプリングライン以浅で曲線外側に水平変位する傾向を示しているが、シールド中央通過時およびテール通過時において、トンネル斜め上部地盤でトンネル側に0.5[mm]程度引き寄せられている。また、テール通過2リング後には、逆に曲線外側に0.8[mm]程度変位した。このような挙動は、シールド曲線施工に伴う曲線外側に押し出す挙動によるものと考えられる。なお本傾向は、テール通過後も残留している。

このように、トンネル直上地盤は沈下傾向を示すのに対して、トンネル側部地盤は水平方向に押し出す挙動については、通常よく用いられる応力解放率を用いた地盤変形解析結果と異なる傾向になることを確認した。



*) 赤色実線：計測値，青色太実線：設計値，水色実線：トンネル覆工作用水圧

図-12 トンネル覆工作用圧，トンネル覆工発生断面力，トンネル内空変位に関する計測値と設計値の比較

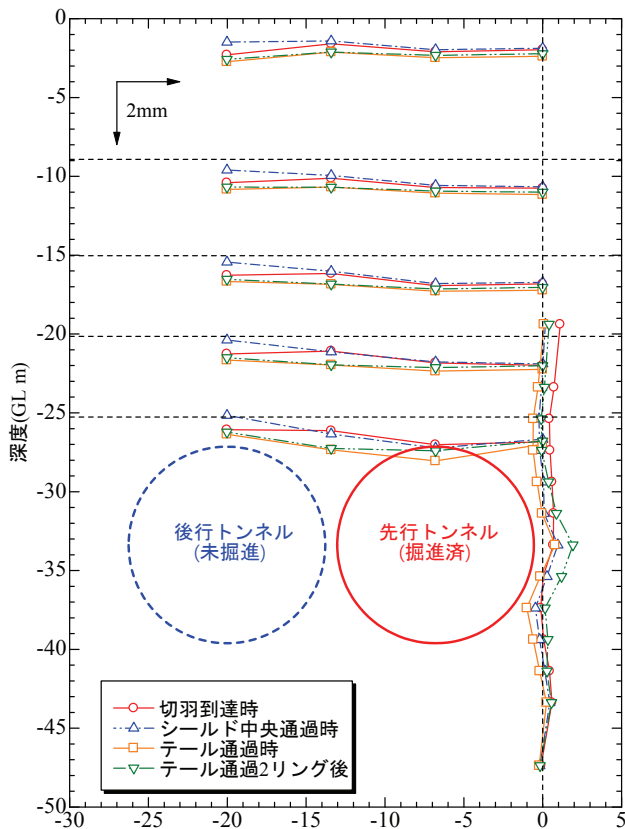


図-13 先行トンネル側部(曲線外側)地盤の水平変位分布図

7. おわりに

本検討で得られた知見を以下に示す。

- ① トンネル覆工作用圧や発生応力は、前リングの変形履歴に依存することが判明した。さらに、テールシールド圧や裏込め注入圧などの施工時荷重の影響を受けることも確認した。
- ② テール通過時における施工時荷重の影響は、設計上考慮していないが、トンネル覆工の発生応力は、最終的に許容応力度の範囲内に収束した。

- ③ シールドの曲線施工に伴い、トンネル直上地盤は沈下傾向を示すのに対して、トンネル側部地盤は水平に押し広げる傾向を示した。これは、トンネル中心方向に収縮する応力解放を用いた地盤変形解析結果とは、傾向が異なる。

今後、単設施工時における施工時荷重の影響も含めて、併設施工時の影響を現場計測結果から分析し、「設計マニュアル」の検証を進める予定である。

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)」よりご指導頂いた。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 阪神高速道路㈱：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) KG-NET・関西圏地盤研究会：新関西地盤－大阪平野から大阪湾へ，口絵 10，2007。
- 4) 橋本正，矢部興一，山根明彦，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) 飛島建設株式会社技術資料，<http://www.tobishima.co.jp/technology/civil/sealed/flex/flex01.html>。
- 6) 崎谷浄，新名勉，ト部賢一，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(投稿中)。
- 7) 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，土木学会第24回トンネル工学報告集(投稿中)。

(2014. 9. 15 受付)

CONSIDERING CONSTRUCTION LOADS DUE TO SHIELD EXCAVATION WITH LARGE SCALE, NEIGHBORING AND CURVE CONDITON

Tomohiko NISHIHARA, Tsutomu NIINA, Kiyoshi SAKIYA
Tomokazu IWAZUMI and Takahiro KONDA

The Yamatogawa Route shield tunnel is the road tunnel including a large diameter, an adjacent construction, the curve and vertical section alignment change section. In order to get to know the phenomena of neighboring tunnel lining due to shield excavation and to review the original design method, some monitoring data are observed. In this paper, the influence of construction loads due to 1st shield excavation is evaluated based on measuring results. As a result, tunnel lining pressure and stress are depended on the modification history of a front ring and construction loads. Moreover, some characteristics of curve construction are interpreted based on the horizontal ground deformations distribution around tunnel.