

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

陣野 員久¹・石原 悟志²・新名 勉³・出射 知佳⁴・譽田 孝宏⁵

¹正会員 大阪府 富田林土木事務所 松原建設事業所 道路第一グループ
(〒580-0016 大阪府松原市上田3-1-25)
E-mail:JinnoK@mbox.pref.osaka.lg.jp

²正会員 大阪府 富田林土木事務所 松原建設事業所 道路第一グループ
(〒580-0016 大阪府松原市上田3-1-25)
E-mail:IshiharaSa@mbox.pref.osaka.lg.jp

³正会員 阪神高速道路株式会社 技術部 技術推進室
(〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)
E-mail:tsutomu-niina@hanshin-exp.co.jp

⁴正会員 株式会社 地域地盤環境研究所 地盤解析部
(〒540-0008 大阪市中央区大手前2-1-2 國民會館・住友生命ビル4F)
E-mail:idei@geor.co.jp

⁵正会員 株式会社 地域地盤環境研究所 地盤解析部
(〒540-0008 大阪市中央区大手前2-1-2 國民會館・住友生命ビル4F)
E-mail:konda@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、超近接および長距離の併設、曲線および縦断線形変化区间を含むトンネルである。大和川線特有の施工条件に対応するため、「大和川線シールドトンネル設計マニュアル」を制定し、詳細設計を実施した。現在、本設計マニュアルを検証するため、シールド掘進に伴う併設トンネル覆工に関する各種計測値を収集し、その挙動を検討している。

本稿では、トンネル径の異なる4連併設シールド区间において、後行シールドの掘進条件の違いによつて先行トンネル覆工への併設影響が変化することを計測結果にもとづいて確認し、設計値と比較、検討した。その結果、各施工段階において先行トンネル覆工の内空変位形状に異なる傾向が見られ、設計値と計測値に差異が生じたので、その原因について考察した。

Key Words : shield tunnel, large cross section, monitoring, design, construction load

1. はじめに

現在、大阪南部地域では、大阪府、堺市、阪神高速道路(株)による共同事業として、大阪都市再生環状道路の一部を形成する地域高規格道路「阪神高速道路大和川線」(以下、大和川線)を整備している(図-1参照)。

大和川線は、阪神高速4号湾岸線と14号松原線を結ぶ延長約9.7[km]の路線であり、この内、大阪府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 $D=12300[\text{mm}]$ 、最小離隔約1.1[m] ($\approx 0.09 \times D$) の大断面かつ超近接、長距離の併設施工となる。



図-1 大和川線の平面位置図

本工事は、既往事例の少ないシールド工事である。よって、本シールド掘進にあたっては、トンネル周辺地盤の特性を十分に把握した上で、シールド掘進に伴う周辺地盤の挙動や先行トンネルおよび近接構造物の挙動を的確に確認し、シールド掘進データと連動させて両者の関連性を検討することにより、近接構造物や併設トンネル相互への影響を極力回避する必要がある。

大和川線シールド工事特有の施工条件に対応するため、「大和川線シールドトンネル設計マニュアル」¹⁾(以下、設計マニュアル)を制定し、詳細設計を実施した²⁾。本稿では、トンネル径の異なる4連併設シールド工事において、後行シールドの掘進条件の違いによって先行トンネ

ル覆工への併設影響が変化することを計測結果にもとづいて確認し、設計値と比較、検討したので報告する。

2. 本工事の特徴

(1) 工事概要

設計マニュアルの妥当性を検証することを目的に、超近接したシールド施工に伴って併設トンネルに与える影響を現在検討している。本検討のため、計測断面を5つ設定しているが(図-2参照)，この内、本稿で示す計測断面3は、本線東行および西行トンネルのさらに両側にお

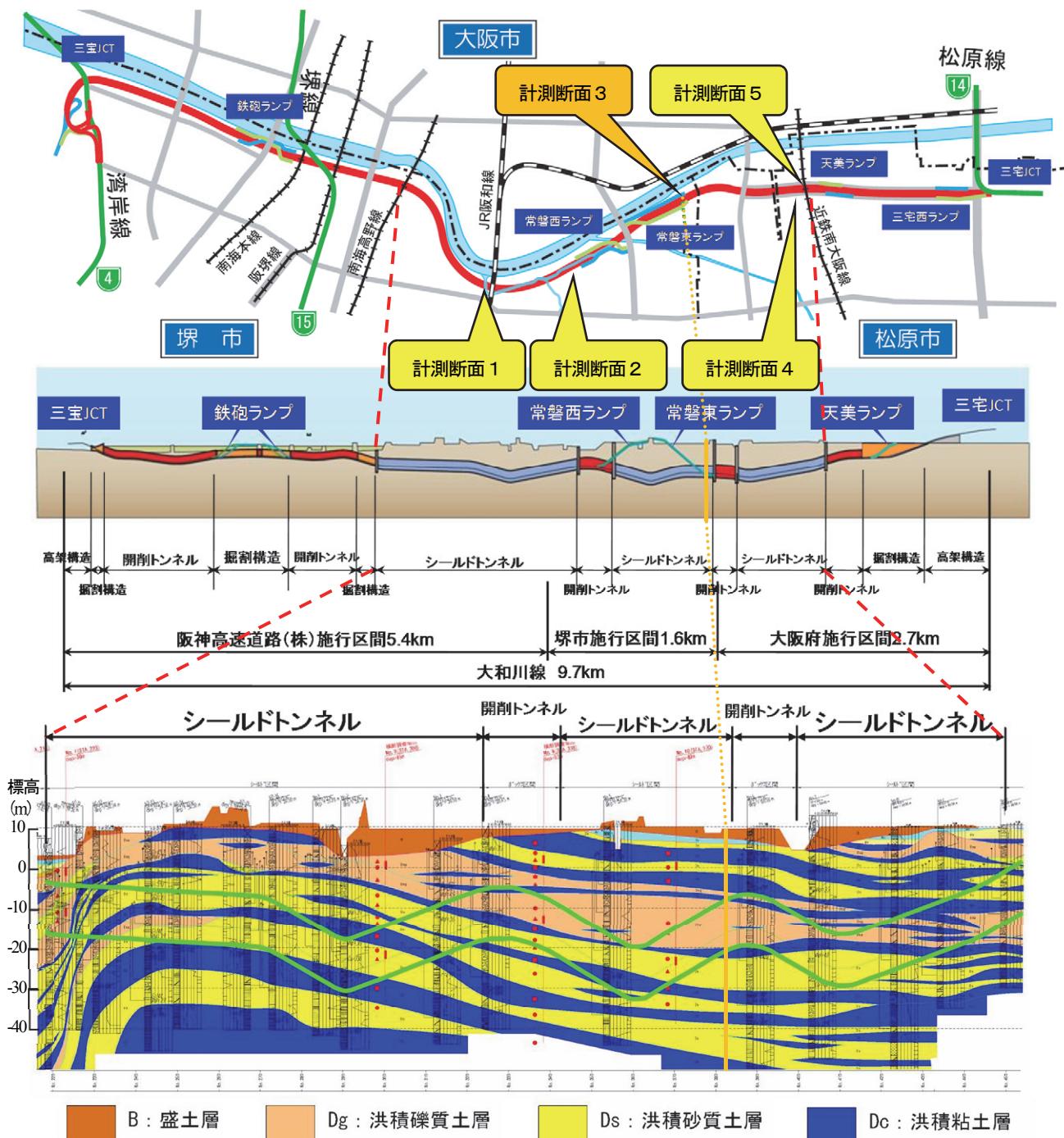


図-2 大和川線の平面位置図(拡大図), トンネル構造, 事業区分およびシールドトンネル区間の土質縦断図³⁾に加筆

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連併設トンネル区間に位置しており、発進立坑から西側へ約36[m]の初期掘進区間に位置している。

本計測断面の平面図および断面図を図-3に示す。本事では、最も北側(大和川寄り)に位置するONランプトンネルを最初に構築し、No.4立坑でシールドを転回した後にOFFランプトンネルを2番目に構築した。ここでは、3番目に構築した本線西行シールド(以下、後行シールド)掘進に伴う隣接したOFFランプトンネル(以下、先行トンネル)への併設影響(離隔約23[m])について述べる。なお、先行トンネル覆工はRCセグメントであり、後行シールドは、気泡材を用いた泥土圧式シールド工法を採用した。

本事は、大断面シールドが超近接で併設掘進することから、先行トンネル覆工への併設影響に一定の配慮が必要である。大断面、超近接シールド掘進に伴う併設影響は、設計上、別途配慮しているが¹⁾、ここではその影響度に着目している。

(2) 地盤概要

シールド掘進対象区域の地盤は、地表部から洪積層が出現する比較的良好く締まった地盤であり、沖積層はほとんど分布していない(図-2参照)。計測断面3におけるシールド掘削対象地盤は、N値=10程度の硬質な洪積粘性土地盤と、N値60以上の良く締まった洪積砂礫土地盤が、それぞれ薄く互層になっている。

(3) 各種計測概要

本計測断面の断面図を図-3に、シールド施工概要およびシールド掘進条件を表-1に示す。

土被り厚は、先行トンネルで約28.2[m]、後行トンネルで約26.5[m]である。両トンネル中央深度はほぼ同じであるが、セグメント外径が前者で8.8[m]、後者で12.3[m]であることから、トンネル径の違いにより前者のほうでトンネル天端深度が少し深い。

本計測断面における計測項目は、トンネル覆工作用圧、発生応力およびトンネル内空変位であり、それぞれを自動計測した。なお、トンネル内空変位計測は、トンネル覆工内面に設置したユニバーサル変位計⁴⁾を用いて、8角形の各計測点における相対変位量を測定した。あわせて、スプリングライン右側(南側)の計測点における絶対変位量をトータルステーションで自動計測し、各計測点の変位を絶対座標で捉えた。初期値は、後行シールド切羽通過1D前(D:後行シールド掘削外径)程度で、シールド掘進による影響が無視できる時点に設定した。以降の計測結果は、後行シールド通過時による影響のみの変動分(以下、併設影響)について整理した。

3. 計測結果

(1) 後行シールド掘進状況

後行シールド掘進時のマシンデータのうち、ジャッキストローク、切羽圧、裏込め注入圧およびテール土圧を図-4(上図)に示す。なお、裏込め注入圧とは、裏込め注入ポンプからのポンプ圧であり、テール土圧とは、同時に裏込め注入口横に設置した圧力計によって計測した吐出圧である。

後行シールド掘削リング15 Ringまでは、総推力が大きく、発進立坑内に設置した反力枠に作用する軸力も大きかったため、切羽上部に設置した圧力計の深度における切羽圧は「静止土圧+水圧程度」(約0.35[MPa])を目標値として施工した(以下、「施工パターン1」)。一方、16 Ring以降のシールド掘削では、後行トンネル覆工と周辺地盤の摩擦の効果から、反力枠に作用する軸力が低下傾向に転じたため、管理切羽圧を約0.40[MPa]に高めた(以下、「施工パターン2」)。また、23 Ring以降については、雨水ポンプ棟への影響範囲にシールドが達して沈下傾向を示したことから、さらに切羽圧を約0.45 [MPa]まで増加させて掘進した(以下、「施工パターン3」)。

(2) 先行トンネル覆工作用圧

後行シールド掘進時における先行トンネル覆工作用圧の経時変化図を図-4(下図)に示す。

後行シールド通過に伴い、作用圧は後行シールド側で変動したが、最も近接しているスプリングライン付近のP-3において、変動量は最大となった。つまり、切羽通過前後では、0.10~0.15[MPa]の作用圧増加であったが、テール通過直前において最大0.27[MPa]まで作用圧が増加した。前者は、後行シールド切羽圧による影響が前方から後方へ、後者はテール通過時の裏込め注入圧による影響が後行シールドの後方から前方へ伝播した結果であると考えられる。

後行シールドのテール通過後には、先行トンネル覆工作用圧が減少に転じた。その後、トンネル周辺地盤の地下水位回復に伴う作用圧の増加が見受けられる。

(3) 先行トンネル覆工発生断面力

後行シールド掘進時における先行トンネル覆工に発生する曲げモーメントの経時変化図を図-5に、軸力に関する経時変化図を図-6に示す。

後行シールド通過に伴い、発生断面力は、後行シールド側で変動したが、最も近接したスプリングライン付近と上下斜部において、その変動量は最大であった。つまり、曲げモーメントは、切羽通過前後において、スプリングライン付近では後行シールド側から押されて正曲げ(内側引張、外側圧縮)に、上下斜部ではそれに連動して

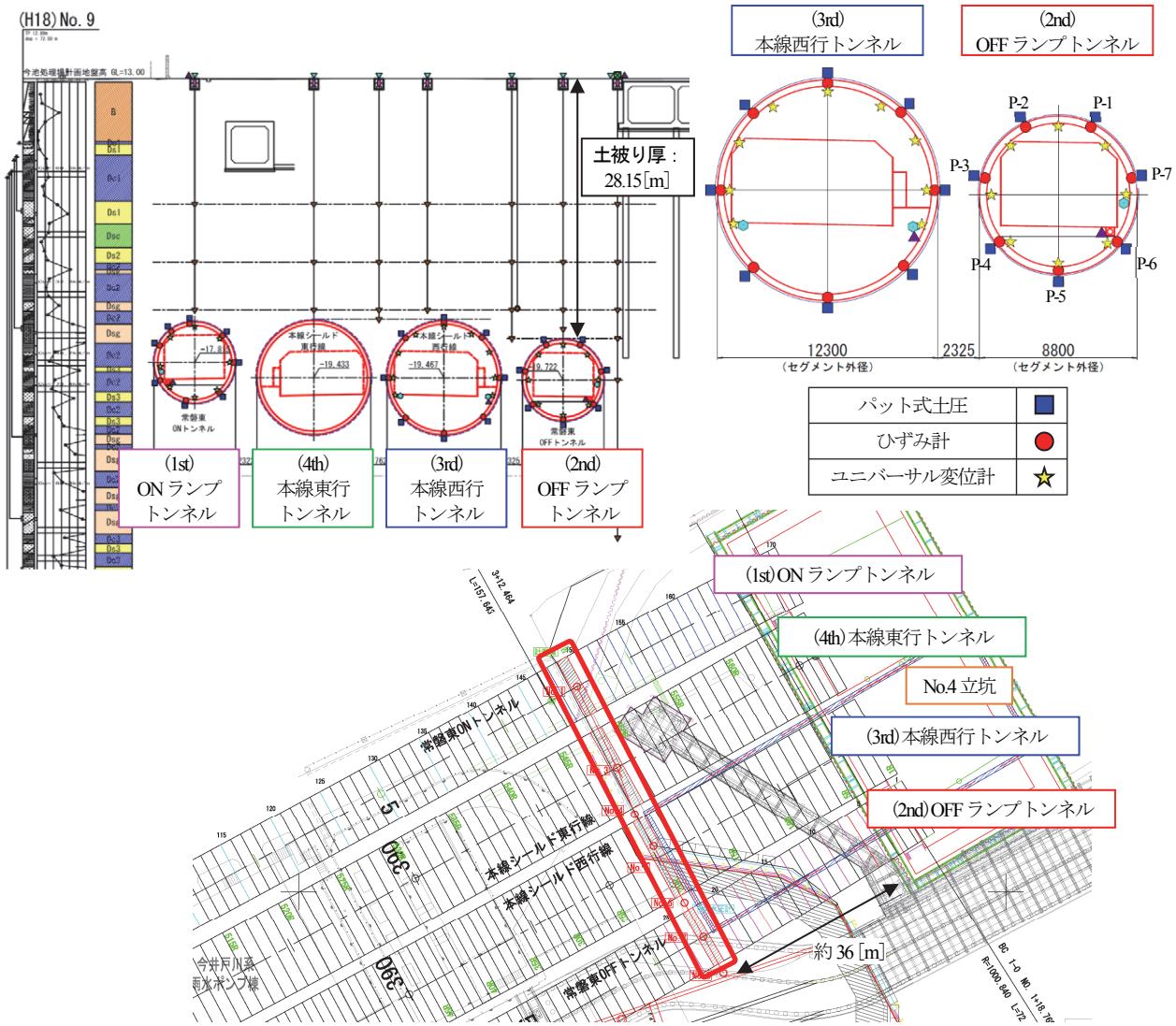


図-3 計測断面3の平面位置図および計測機器設置断面図(No.4立坑側を見て)

表-1 計測断面3におけるシールド施工概要およびシールド掘進条件

		先行シールド(OFFランプ)	後行シールド(本線西行)
施工概要	工法	泥土圧式シールド工法	泥土圧式シールド工法(気泡シールド)
	シールドマシン	外径 $\phi 8980[\text{mm}]$, 機長 $L 10155[\text{mm}]$	外径 $\phi 12540[\text{mm}]$, 機長 $L 12250[\text{mm}]$
	セグメント	RCセグメント (外径 $\phi 8800[\text{mm}]$, 内径 $\phi 8000[\text{mm}]$, 幅 $B 1600[\text{mm}]$)	締合方式合成セグメント (外径 $\phi 12300[\text{mm}]$, 内径 $\phi 11580[\text{mm}]$, 幅 $B 1800[\text{mm}]$)
地盤条件	土被り厚	28.15[m]	26.45[m]
	地下水位	TP+4.0[m]	TP+1.8[m]
	掘進地盤	砂, 砂礫と粘土の互層	
線形条件	平面線形	切羽に向かって右側(北側)カーブ($R=1000\text{m}$)	切羽に向かって右側(北側)カーブ($R=3505\text{m}$)
	縦断線形	上向き($I/R=1300[\text{m}]$)	やや上向き(0.3%)
その他の施工条件	ジャッキパターン	切羽に向かって斜め上部のジャッキを数本使用	切羽に向かって斜め上部のジャッキを数本使用
	コピーカッター	使用 (切羽に向かって-30° ~+120° 範囲に 50[mm] (角度は天端 0°))	使用 (切羽に向かって-45° ~+135° 範囲に 10[mm] (角度は天端 0°))
	切羽圧	設定条件 静止側圧相当(上部: 0.36[MPa], 中央: 0.41[MPa])	静止側圧相当(上部: 0.40[MPa], 中央: 0.50[MPa])
	実施工時の状況	掘進時静止側圧よりやや大きい圧力 上部: 0.30~0.43[MPa], 中央: 0.31~0.50[MPa] 停止時静止側圧相当 上部: 0.20~0.43[MPa], 中央: 0.31~0.50[MPa]	掘進時静止側圧相当 上部: 0.23~0.40[MPa], 中央: 0.34~0.50[MPa] 停止時静止側圧相当 上部: 0.18~0.32[MPa], 中央: 0.29~0.42[MPa]
	裏込め注入圧	設定条件 全土被り圧相当(0.45[MPa]), 裏込め注入率: 約 130%	全土被り圧相当(0.52[MPa]), 裏込め注入率: 約 125%
	実施工時の状況	全土被り圧相当 テール土圧: 0.15~0.64[MPa], 裏込め注入圧: 0.21~0.64[MPa]	全土被り圧より大きい圧力 テール土圧: 0.13~0.43[MPa], 裏込め注入圧: 0.37~0.68[MPa]

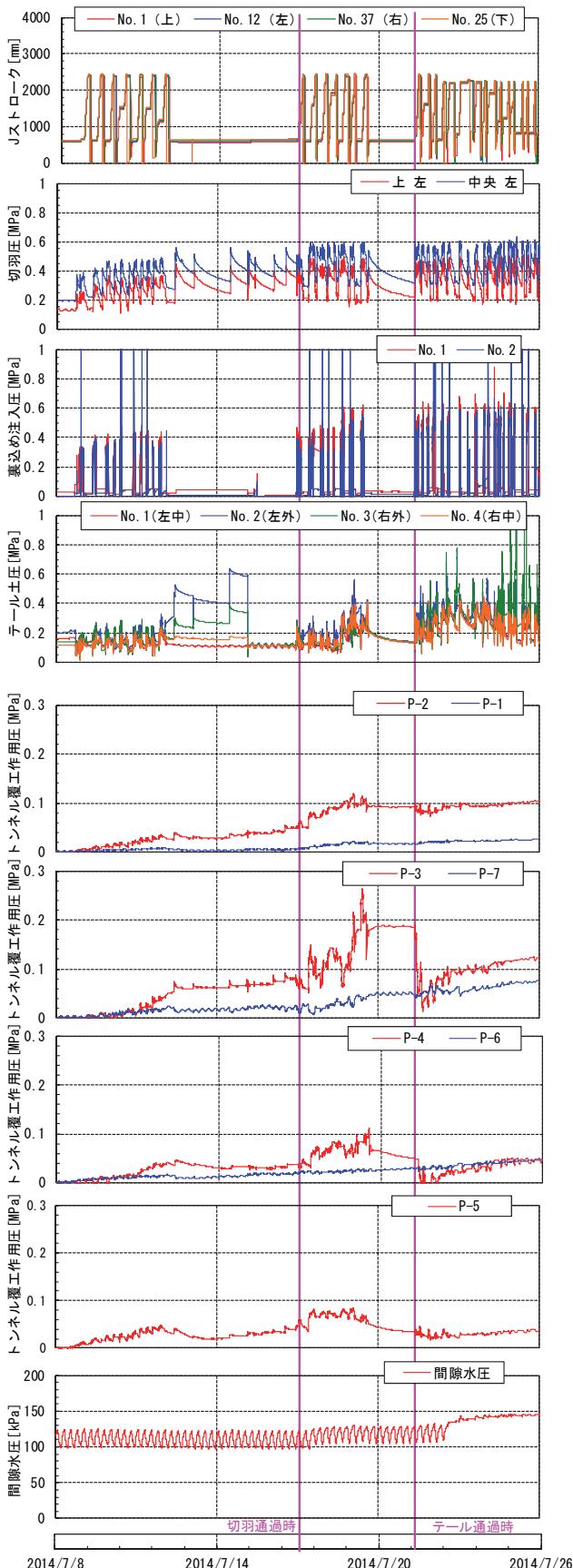


図-4 後行シールド通過時の先行トンネル覆工作用圧(併設変動分)経時変化図

負曲げ(内側圧縮、外側引張)となった。しかし、テール通過前後にはその傾向が反転し、スプリングライン付近で負曲げ、上斜部で正曲げ、下斜部で負曲げが残留する結果になった。一方、軸力は、切羽通過前後(とくに通過後)からスプリングライン付近および上下斜部で圧縮力が卓越した後、テール通過前後から引張側に転じた。

(4) 先行トンネル覆工挙動の分布図

後行シールド通過時における先行トンネル覆工作用圧、発生断面力およびトンネル内空変位量に関する分布図を図-7に示す。ここでは、後行シールドが、先行トンネルに対して紙面左側を掘進している場合を示している。トンネル覆工作用圧および発生断面力については、3.(2)(3)にて説明した傾向が分布図からも確認できる。

トンネル内空変位分布は、切羽通過時において後行シールド側から押される挙動を示し、トンネル覆工作用圧の最大時には、水平方向に0.9[mm]程度の圧縮を示す縦長変形の形状となった。その後、トンネル内空変位の分布は、後行シールド側およびその反対側に伸張する傾向に転じ、テール通過1D後には、水平方向に1.5[mm]程度伸長する横長変形の形状になった。このように、一連のトンネル内空変位の挙動は、上述したトンネル覆工作用圧および発生断面力の挙動と整合する結果となった。

4. 計測値と設計計算値の比較

計測断面3で得られた計測結果にもとづき、先行トンネル覆工への併設影響に着目して、設計計算値との比較および検討をおこなった。

大和川線シールドトンネルは、これまで実績のない大断面、超近接の併設トンネルであることから、設計では、安全を十分に確保しつつも、経済的に併設影響を考慮することが求められた。そこで、シールド掘進対象地盤の状況を加味し、シールド掘進時の施工過程を考慮した2次元線形弾性FEM解析により、併設影響を評価した。

シールド施工過程を考慮した掘削相当応力の概念およびFEM解析ステップを図-8に示す。先行トンネル覆工の併設増分断面力は、シールド施工過程を考慮した2次元FEM解析により増分地中応力(図-8右図(ステップ7)－(ステップ4))を抽出し、それを2リングのはり一ばねモデルに作用させて算定した。詳細については、文献3)を参照されたい。

(1) 2次元線形弾性FEM解析

先行トンネルの併設影響を算出するために用いた2次元線形弾性FEM解析の設定条件を表-2に、土質パラメータを表-3に、有限要素メッシュを図-9に示す。今回の設

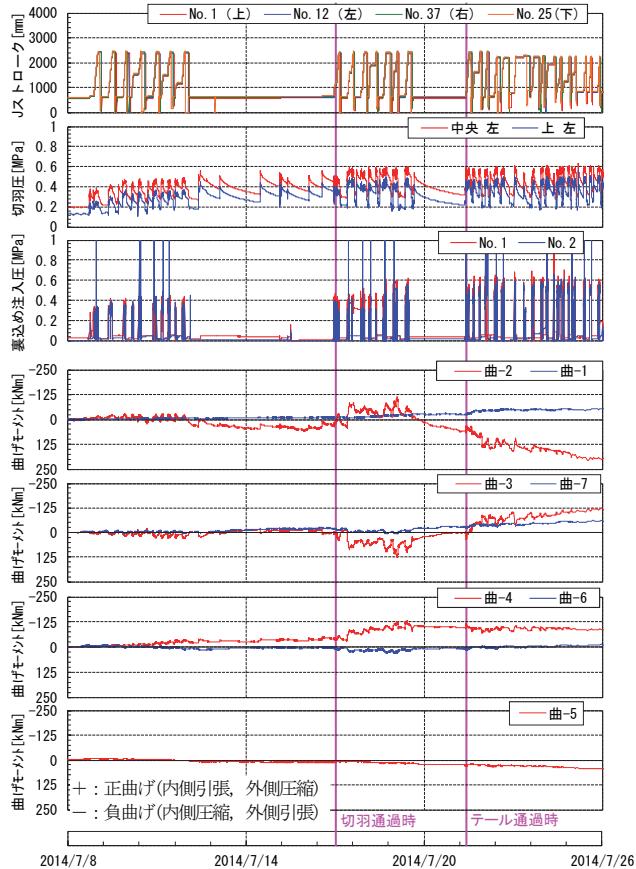


図-5 後行シールド通過時の先行トンネル覆工に発生する曲げモーメント(併設影響分)の経時変化図

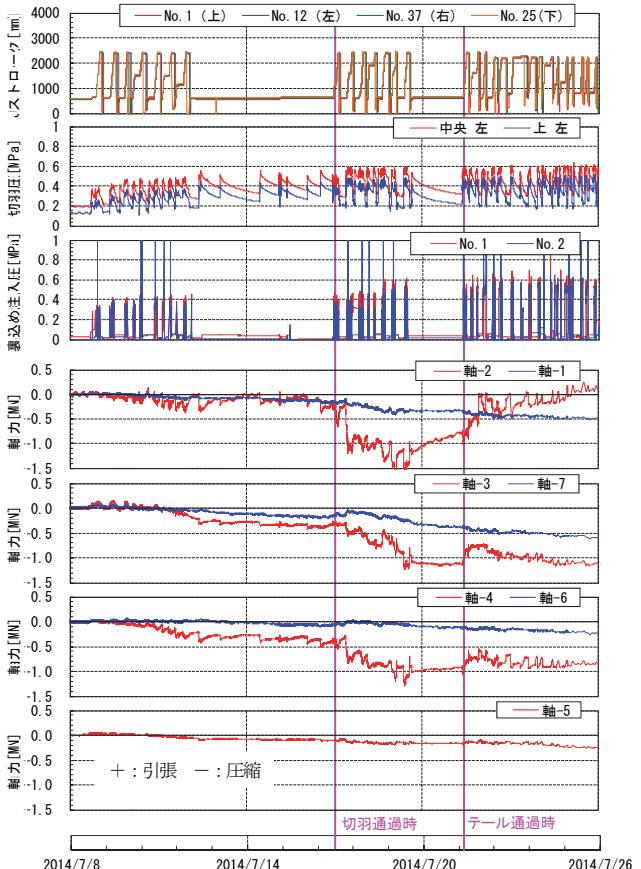


図-6 後行シールド通過時の先行トンネル覆工に発生する軸力(併設影響分)の経時変化図

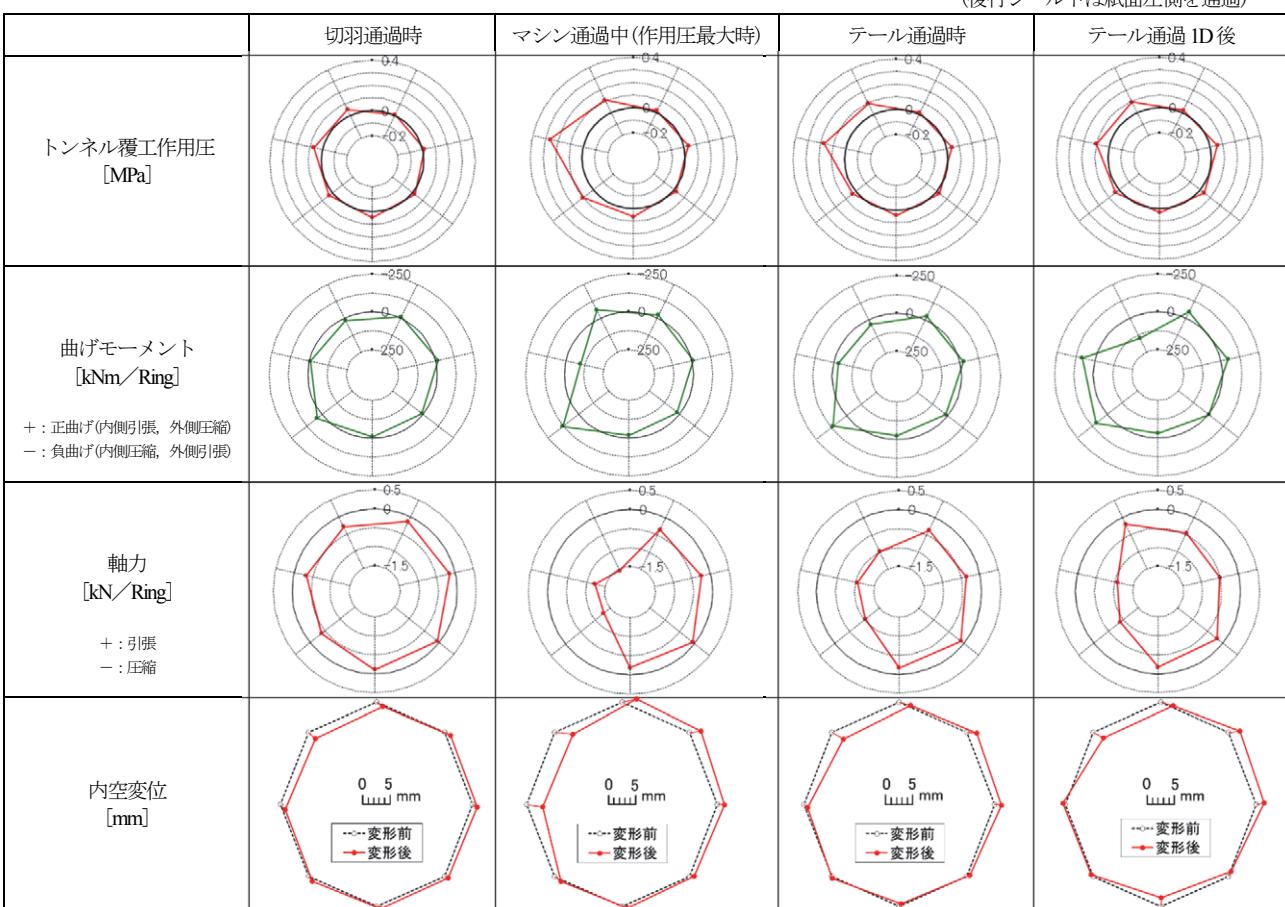


図-7 後行シールド掘進に伴う先行トンネル覆工作用圧、発生応力、発生断面力および内空変位(併設影響分)の分布変化

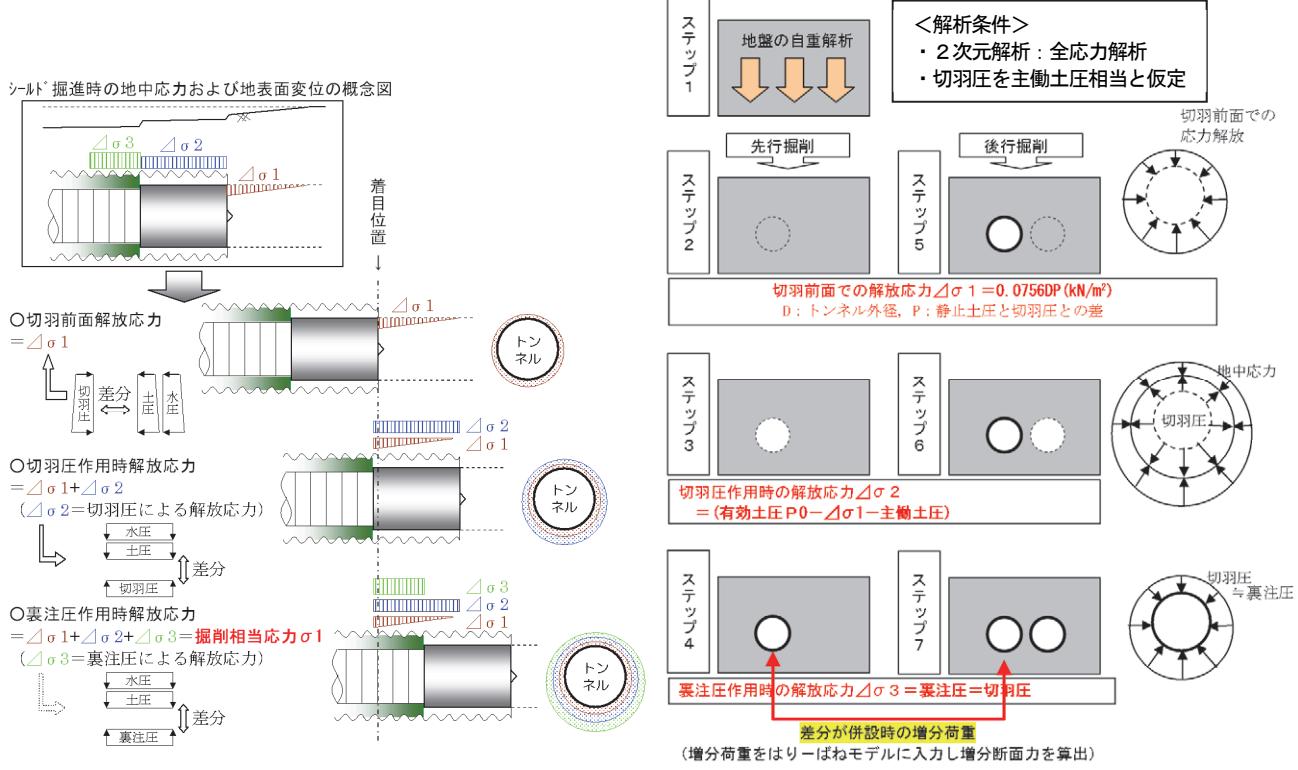


図-8 シールド掘進時の施工過程を考慮した掘削相当応力の概念およびFEM解析ステップ¹⁾

表-2 FEM解析における各種設定条件

項目	解析における設定値(有効応力)				備考
トンネル周辺地盤の応力	先行トンネル(OFFランプ) : 035 後行トンネル(本線西行) : 032				トンネル上部土層の単位体積重量(地下水位以下は水中単位体積重量)と層厚より計算する。
	有効側圧 自重解析により計算				各土層のボアソン比による。
施工条件	切羽圧 [MPa]	先行トンネル (OFFランプ)	上部 静止側圧 : 0.36 水压 : 0.19	中央 静止側圧 : 0.41 水压 : 0.23	切羽圧 = 静止側圧(静止土圧 + 水圧) 解析における設定値は静止土圧
		後行トンネル (本線西行)	上部 静止側圧 : 0.40 水压 : 0.15	中央 静止側圧 : 0.50 水压 : 0.21	
		裏込め注入圧	= 切羽圧		

表-3 土質パラメータ一覧表

土層	N値	単位体積重量 $\gamma(kN/m^3)$	変形係数 $E(MN/m^2)$	ボアソン比 v
B	6	20.0	16.8	0.37
Dc1	8	19.1	32.4	0.40
Ds1	22	18.0	85.6	0.31
Dc1	8	19.1	32.4	0.40
Ds1	22	18.0	85.6	0.31
Dsc	10	19.4	54	0.40
Ds2	27	19.0	120.4	0.30
Dc2	19	19.4	90.4	0.40
Dsg	60	20.0	197.6	0.30
Dc2	19	19.4	90.4	0.40
Dsg	60	20.0	197.6	0.30
Dc2	19	19.4	90.4	0.40
Dsg	60	20.0	197.6	0.30
Dc2	19	19.4	90.4	0.40
Ds3	60	19.0	250.8	0.30
Dc2	19	19.4	90.4	0.40
Ds3	60	19.0	250.8	0.30
Dc2	19	19.4	90.4	0.40
Ds3	60	19.0	250.8	0.30
Dc2	19	19.4	90.4	0.40
Dsg	60	20.0	197.6	0.30
Dc2	19	19.4	90.4	0.40
Ds2	27	19.3	172	0.40
Dc3	60	19.0	250.8	0.30
Dc3	27	19.3	172	0.40
Ds3	60	19.0	250.8	0.30
Dc3	27	19.3	172	0.40
Ds3	60	19.0	250.8	0.30
Dc4	20	17.3	140.8	0.40

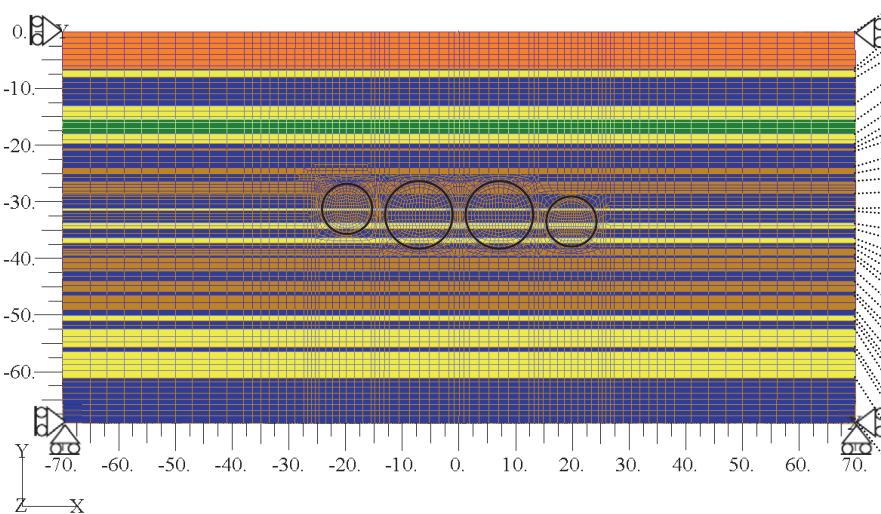


図-9 有限要素メッシュ図

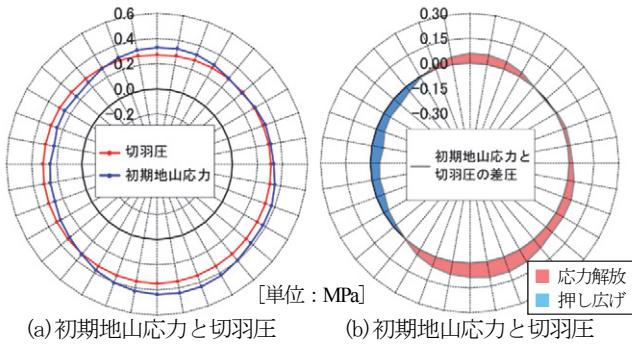


図-10 トンネル掘削に伴う解放応力(図-8右図(ステップ6))

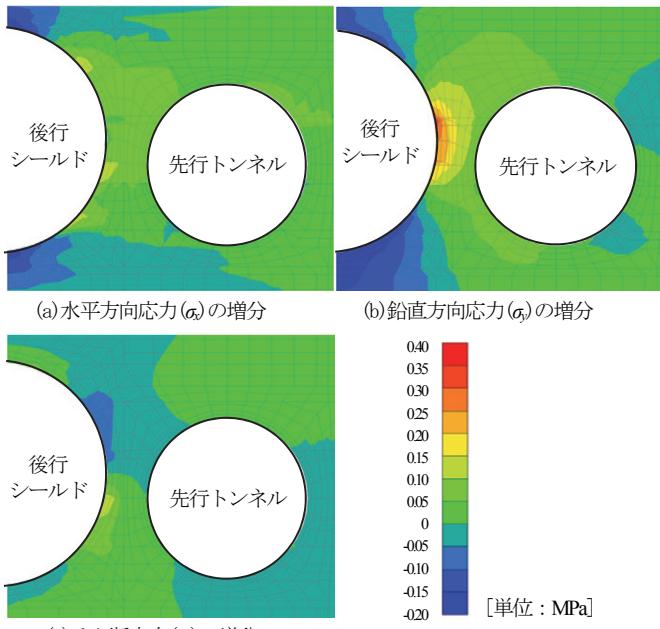


図-11 後行シールド掘進に伴う先行トンネル周辺地盤の応力変動状況(図-8右図(ステップ7)ー(ステップ4))

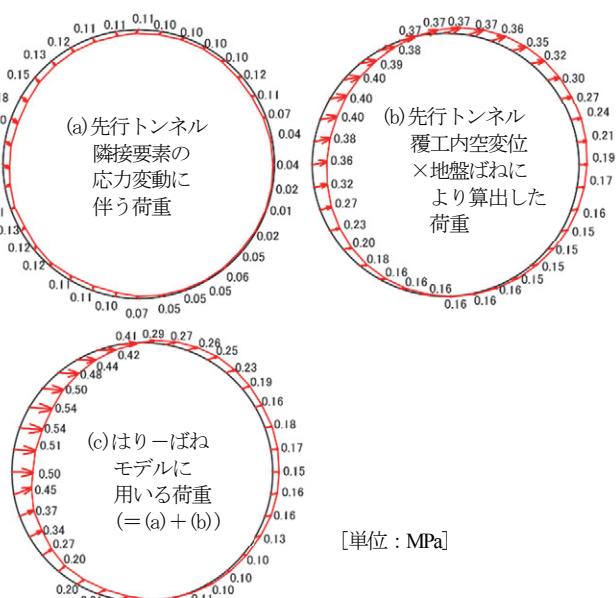


図-12 はりーばねモデルに用いる併設影響を考慮した先行トンネル覆工変動荷重分布

計算では、実施工条件を反映して「切羽圧=静止土圧+水圧」に設定した。水圧については、シールド掘進前後で同様に作用すると仮定し、FEM解析では有効土圧のみを考慮した。裏込め注入圧については、切羽圧と同じと仮定している。

シールド掘削に伴う解放応力を図-10に示す。「切羽圧=静止土圧+水圧」を想定した結果、切羽前面での応力解放がないと仮定した。また、切羽圧作用時の解放応力は、初期地山応力と切羽圧の差圧となる。さらには、「裏込め注入圧=切羽圧」を想定(図-8右図参照)しているため、裏込め注入圧作用時の解放応力がないと仮定した。ただし、トンネル覆工に対しては、裏込め注入圧を半径方向内側にのみ作用させている。

図-10には、図-8右図(ステップ6)における解放応力を示している。初期地山応力と切羽圧の差圧(=解放応力)を算出した結果、トンネル上部と下部で応力解放するが、後行シールド側からは逆に押し出される結果になった。

(2) はりーばねモデル解析に用いる荷重の算出

後行シールド掘進に伴うトンネル周辺地盤の応力変動状況を図-11に示す。ここでは、図-8右図(ステップ7)ー(ステップ4)から抽出した増分地中応力を示した。後行シールドのスプリングライン付近の地盤において鉛直応力の増加が見られるが、それに比べて他の地盤内応力変化は小さい。

図-12は、図-11で得られた併設時増分荷重を、はりーばねモデル計算に与える際の先行トンネル覆工作用荷重の変動分布である。図-12(a)は、先行トンネルに隣接した地盤の応力変動に伴う荷重分布であり、図-12(b)は、図-8右図(ステップ7)ー(ステップ4)から抽出した先行トンネル内空変位に地盤反力係数を乗じた結果である。ここで、トンネル周辺地盤は、砂および砂礫に粘土が介在する互層状態にあることから、N値=30程度の砂地盤に相当する $k=40[\text{MN}/\text{m}^3]$ を仮定した。はりーばねモデルに用いる設計上の先行トンネル覆工作用荷重は、FEM解析によって得られた先行トンネル覆工隣接要素の応力変動に伴う荷重(図-12(a)参照)に、先行トンネル内空変位量にトンネル周辺地盤の地盤反力係数を乗じた荷重(図-12(b)参照)を加算した荷重(図-12(c)参照)を仮定した。

(3) 計測値と設計計算値の比較

計測値と設計計算値の比較を図-13示す。後行シールド掘進に伴う先行トンネル覆工に発生する断面力の計測値は、後行シールド側で軸圧縮力が増加し、負曲げが発生している。設計計算値は、計測値以上に軸圧縮力が卓越し、極端な正曲げとなる逆挙動を示しており、計測値とは異なる結果になった(図-13(a) (b)参照)。

また、後行シールド掘進に伴う先行トンネル内空変位

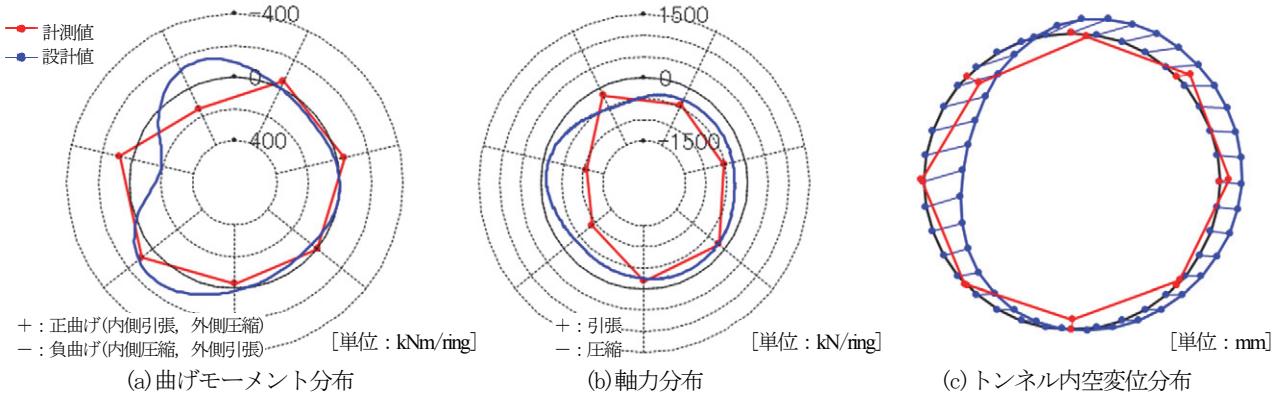


図-13 先行トンネル覆工発生断面力およびトンネル内空変位量(ともに併設変動分)に関する計測値と設計計算値の比較

に関する計測値は、上下方向に圧縮、左右方向に伸張となる傾向を示した。一方、設計計算値は、後行シールド側から押し出される挙動を示し、計測値とは異なる傾向となった(図-13(c)参照)。これは、設計計算時において、先行トンネル側部地盤は応力解放せず、逆に押し出す傾向が顕著であった。この原因として「裏込め注入圧=切羽圧」とする想定が実態とは異なることが考えられる。その結果、はり一ばねモデルに作用させる荷重のうち、先行トンネル内空変位量にトンネル周辺地盤の地盤反力係数を乗じた荷重が支配的になり、設計計算値は縦長変形になったと考えられる。

5. 後行シールド掘進条件の違いによる先行トンネル内空変位分布の差異

(1) 計測値に基づいた比較

3.(1)の各施工パターンにおける先行トンネル内空変位分布の傾向変化を図-14に示す。なお、後行シールドが23 Ringを掘削している箇所は計測断面3であり、ユニバーサル変位計を用いてトンネル内空変位を計測している。また、18 Ringおよび33 Ring掘削時には、先行トンネル覆工内の2点間距離をレーザー距離計で自動計測し、トータルステーションを用いて各計測点における絶対座標を自動測量している。

「施工パターン1」の18 Ring切羽通過時は、切羽通過前のトンネル内空変位はほとんど発生しなかったが、テール通過時に横長変形が進行し、テール通過1D後には7.5[mm]程度の横長変形に達した。一方、「施工パターン2」に移行した23 Ring切羽通過時は、3.(4)に示した挙動を示し、「施工パターン3」で施工した33 Ring切羽通過時には、その挙動が拡大する傾向を示した。つまり、切羽通過時に後行シールド側から押された縦長変形挙動が、テール通過時にも残留している。ただし、テール通過1D後には、後行シールドとは反対側に変形するなど、最終的には2.3[mm]程度の横長変形を示す内空変位分布

となった。

このように、後行シールド掘進時の切羽圧と裏込め注入圧を徐々に増加させることによって、先行トンネル覆工に与える影響も徐々に大きくなつた。とくに、静止土圧よりも大きな切羽圧を作用させた「施工パターン2」以降は、先行トンネルを逆に押し出す挙動が見られた。ただし、テール通過後には、裏込め注入材の固化に伴う載荷圧力の低下や、わずかな体積収縮が原因と思われる状況の変化から、すべての施工パターンで先行トンネル内空変位は、横長変形に転じた。

(2) 設計計算値を含めた分析

ここでは、3.(1)に示す各施工パターンに基づき、切羽圧および裏込め注入圧を変化させた場合の設計計算値と、計測値との比較および分析をおこなう。各施工パターンにおけるFEM解析時の後行シールド掘削に伴う解放応力を図-15に示す。

「施工パターン1」のうち、切羽圧を水圧程度(約0.20[MPa])として設定した12 Ring掘削時(Case 0)における解放応力は、先行トンネル全周で応力解放する状態になった。一方、「施工パターン1」のうち、静止土圧相当の切羽圧(約0.35[MPa])を設定したCase 1では、解放応力が先行トンネル覆工上部で大きく、側部で小さくなる結果になり、切羽圧の上昇による効果が見受けられた。

「施工パターン2」(静止土圧より大きい切羽圧(約0.40[MPa]), Case 2)での解放応力は、とくに後行シールド側で逆に押し出す挙動を示しており、その傾向は、「施工パターン3」(静止土圧より大きい切羽圧(約0.45[MPa]), Case 3)でさらに顕著になった。

各施工パターンにおけるはり一ばねモデル解析結果を図-15に示す。ここでは、先行トンネル覆工の発生断面力および内空変位量に関する分布図で整理しているが、計測値がある場合には併記している。

各施工パターンで解放応力が異なり、その結果、先行トンネル内空変位量にトンネル周辺地盤の地盤反力係数を乗じた荷重が異なることから、各施工段階における設

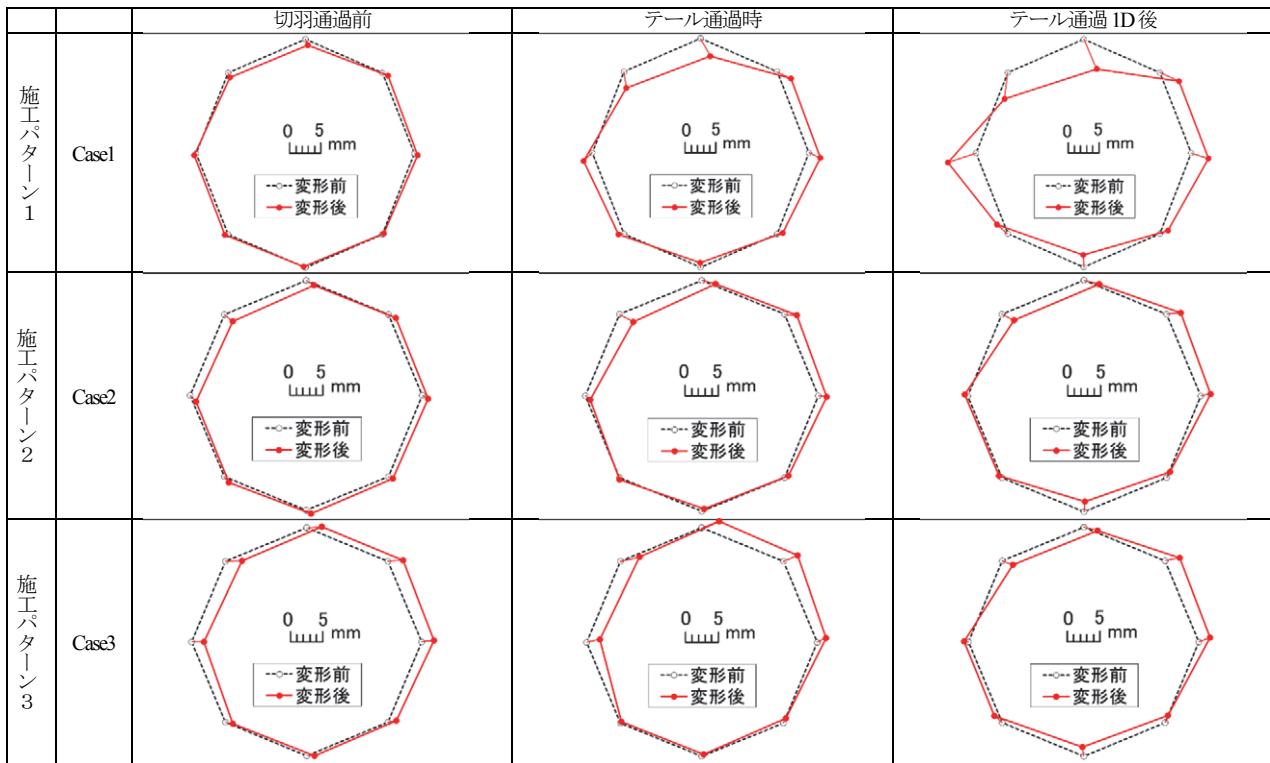


図-14 後行シールド掘進の各施工パターンにおける先行トンネルの内空変位分布の差異(後行シールドは紙面左側を通過)

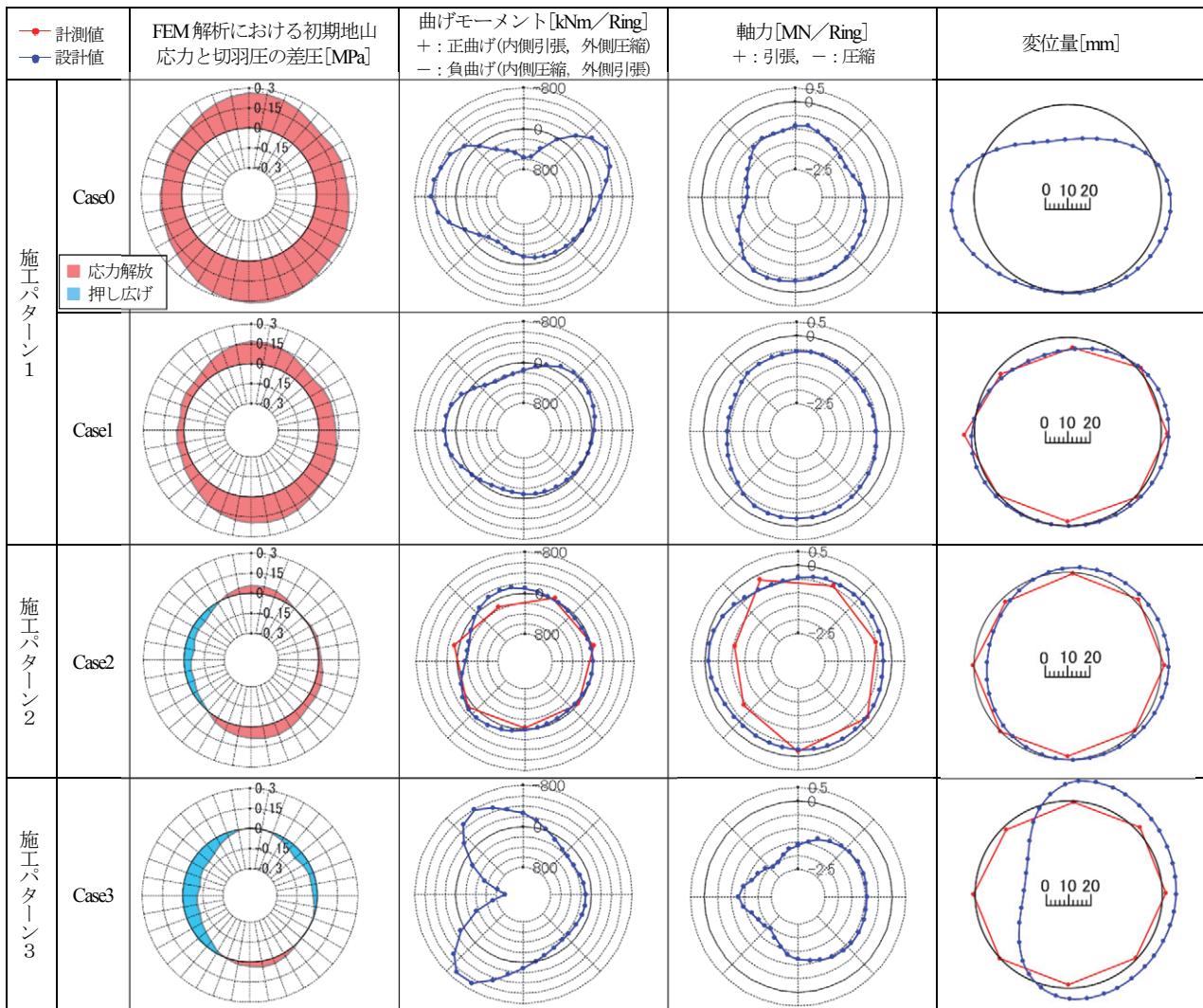


図-15 切羽圧と裏込め注入圧を変化させた場合の先行トンネル覆工断面力、内空変位分布の差異(後行シールドは紙面左側を通過)

計算値の傾向は、各施工パターンで差異が見受けられた。つまり、実質的には水圧程度の切羽圧を設定した「施工パターン1(Case 0)」では、先行トンネル全周にわたって応力解放することから、トンネル覆工は大きく横長変形する結果になり、曲げモーメント分布もトンネル内空変位分布形状に連動した結果になった。また、切羽圧を静止土圧相当まで高めた「施工パターン1(Case 1)」では、解放応力がCase 0ほど大きくならないものの、上部の解放応力が大きいことから、若干上部から押されるトンネル内空変位分布形状になった。計測値は、定量的には少し差異があるものの横長変形に転じ、定性的な挙動は類似する傾向にあった。

一方、解放応力はほとんどなく、逆に先行トンネルを押し出す応力が大きかった「施工パターン2(Case 2)」では、後行シールド側の先行トンネル覆工に正曲げが発生し、縦長変形の傾向を示す内空変位分布になり、明らかに「施工パターン1(Case 0やCase 1)」とは異なる結果になった。計測値は、設計計算値に見られる縦長変形ではなく、他施工パターンと同様、やや横長変形になった。これは、「裏込め注入圧=切羽圧」とする設計の想定と実態が異なり、実際には切羽圧よりも小さい裏込め注入圧がテール通過時に作用したことが原因の1つとして考えられる。このような挙動は、「施工パターン3(Case 3)」でさらに拡大する傾向にあった。

6. おわりに

本稿では、トンネル径の異なる4連併設シールドトンネル工事において、後行シールドの掘進条件の違いによって先行トンネル覆工への併設影響が変化することを計測結果にもとづいて確認し、設計値と比較、検討した。

得られた知見を以下に示す。

- (1) 当該計測断面における先行トンネル覆工の挙動は、後行シールド切羽通過前後においてスプリングライン付近で後行シールド側から押されて正曲げが卓越した後、テール通過前後には傾向が反転して負曲げが卓越し、トンネル内空変形は横長変形に転じる挙動を示した。
- (2) 後行シールドテール通過1D後における計測値と設計計算値を比較した結果、後行シールド掘進に伴って先行トンネル覆工は、後行シールド側で軸圧縮力が増加し、負曲げが発生し、縦長変形の内空変位を示した。一方、設計計算値は、計測値以上に軸圧縮力が卓越し、極端な正曲げとなる逆挙動を示しており、計測値とは異なる結果になった。これは、「裏込め注入圧=切羽圧」の想定が実態と異なっており、はり一ばねモデルに作用させる荷重のうち、先行ト

ンネル内空変位量にトンネル周辺地盤の地盤反力係数を乗じた荷重が支配的になったことが、ひとつの原因として考えられる。

- (3) 後行シールド掘進は、発進立坑の直近で、他区間と比べて切羽圧を低めに設定した「施工パターン1」から、先行トンネルへの影響を抑制するために切羽圧を高めた「施工パターン3」へ掘進管理の設定を変化させた。これに伴い、設計計算値は、前者では先行トンネル全周が応力解放状態になって先行トンネル覆工は横長変形を示すのに対して、後者ではとくに後行シールド側において逆に押し出すことになり、縦長変形を呈した。本傾向は、計測値が示す傾向と異なっていたが、その原因是(2)に示す内容と同じと考えられる。

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）」よりご指導を頂いた。併せて、本区間の施行者である堺市建設局大和川線推進室にご協力頂いた。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(株)：シールドトンネル設計マニュアル, 2011.
- 2) 藤原勝也, 新名勉, 卜部賢一, 隈野員久, 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.
- 3) 崎谷淨, 新名勉, 卜部賢一, 隈野員久, 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, pp.1-10, 2014.
- 4) 橋本正, 水原勝由, 西田義則, 和田幸司, 才田誠, 樋口佳意：連結ユニバーサル変位の開発—基礎実験結果及び設置方法—, 第39回地盤工学研究発表会講演概要集, 841, pp.1679-1680, 2004.

(2016.8.5受付)

BEHAVIOR OF ADJACENT TUNNEL LININIG DUE TO FOLLOWING SHIELD EXCAVATION WITH LARGE-CROSS-SECTION AND HIGH-PROXIMITY

Kazuhisa JINNO, Satoshi ISHIHARA, Tsutomu NIINA,
Tomoyoshi IDEI and Takahiro KONDA

The Yamatogawa Route shield tunnel is the road tunnel including a large diameter, an adjacent and long-distance construction, the curve and vertical section alignment change section. In order to get to know the phenomena of surrounding ground and neighboring tunnel lining due to shield excavation and to review the original design method of double tubes shield tunnel, some monitoring data are observed. In this paper, at the construction site for train-of-four tunnels with different diameter, some influences for the first tunnel lining depended on the second shield excavation are confirmed based on monitoring data, and are compared with design calculation value. In the result, because of the deformation shape of the first tunnel lining is different each second shield excavation stage, some difference between design value and observation are examined.