

大断面，超近接併設シールドトンネル 設計手法の提案

崎谷 淨¹・新名 勉²・卜部 賢一³・陣野 員久⁴・長屋 淳一⁵

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: kiyoshi-sakiya@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 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丁目1-25）
E-mail: UrabeK@mbox.pref.osaka.lg.jp

⁴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丁目1-25）
E-mail: JinnoK@mbox.pref.osaka.lg.jp

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: nagaya@geor.co.jp

大和川線シールドトンネルは，日本でも例を見ない大断面，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トンネルである．特に，セグメント外径 $\phi 12\ 230\text{mm}$ または $\phi 12\ 300\text{mm}$ に対して併設トンネル間の離隔が約1mであることが，特筆すべき点である．そこで，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，詳細設計をおこなった．本稿では，設計マニュアルで提案した設計手法を説明するとともに，当該シールドトンネル工事で得た各種計測データに基づいて一部検証をおこなったので，その結果について述べる．

Key Words : shield tunnel, large diameter, adjacent construction, design method, numerical analysis

1. はじめに

大阪南部地域では，現在，大阪府，堺市，阪神高速道路(株)の三者の共同事業として，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）の整備を進めている(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，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た．このうちシールドトンネルは，大断面で東西線間の併設離隔距離が1[m]程度(トンネル外径比で約0.08D)の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．シールド掘進地盤は，硬質で自立性の高い地盤であるため，完成時のトンネル覆工作用圧は小さく，構造計算上必要となるセグメント厚さは小さくなる．しかし，地盤が良好な場合においても，トンネルの併設離隔距離が小さい場合には，後行トンネル掘進に伴う影響が大きくなることが知られており，十分な注意が必要である．

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⁾を制定し，詳細設計を実施した．本稿では，設計マニュアルで提案した設計手法を説明するとともに，工事で得た各種計測データに基づいた設計検証の事例について報告する．



図-1 大和川線位置図

表-1 大和川線の計画概要

名称	大阪府道高速大和川線	
位置	堺市堺区築港八幡町～松原市三宅中	
合併施行区間	堺市北区常磐町～松原市三宅中	
道路の延長	9.7[km]	
道路の区分	本線	第2種第1級(道路構造令)
	ランプ	A規格(道路構造令)
車線数	本線	4車線
	ランプ	1車線
設計速度	本線	80[km/h]・60[km/h]
	ランプ	40[km/h]
道路構造	地下構造, 掘割構造, 高架構造	

2. 大和川線の概要

(1) 路線概要

大和川線の計画概要を表-1に、トンネル構造および事業区分を図-2に示す。

シールドトンネル区間は、当初、全て開削工法で計画していたが、近年のシールド技術の発展に伴い、地表面の重要交差施設の状況、経済性や工期等を考慮してシールド工法へ変更している（一部、ランプ分合流部は開削工法）。そのため、当初計画していた開削トンネル幅にシールドトンネル構造を収めた結果、東西線間の併設離隔距離が1m程度と小さくなった。

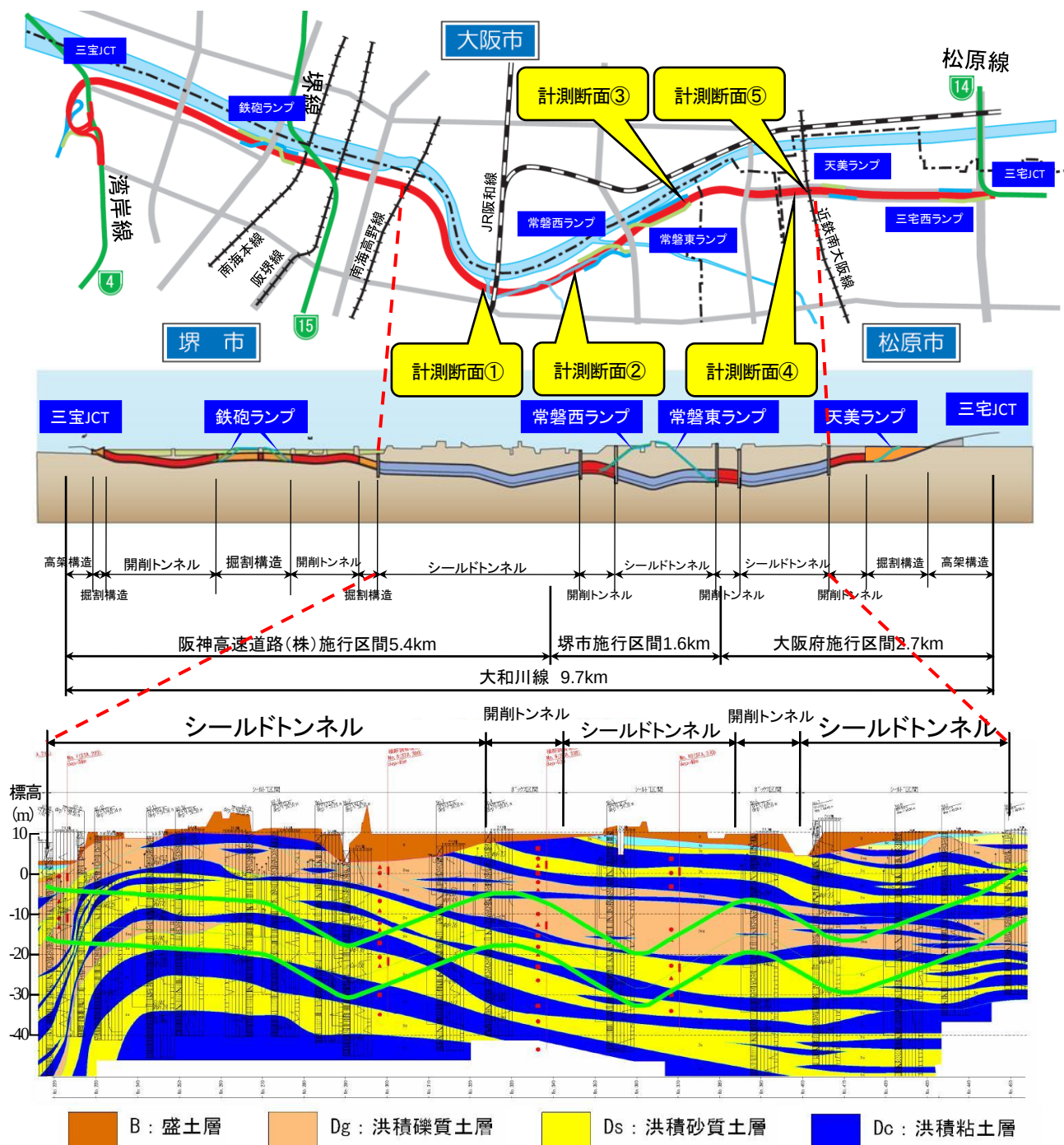


図-2 大和川線トンネル構造、事業区分、およびシールドトンネル区間の土質縦断面図

(2) 地質概要

大和川線シールドトンネル区間の地質縦断図を図-2に示す。シールド区間は、洪積層を主体とする地盤であり、シールド区間西端では、上町断層による撓曲が見られる。

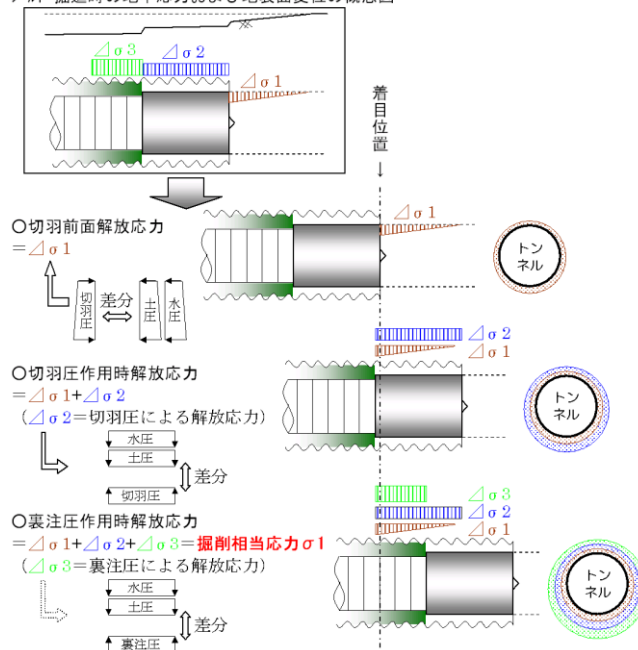
大和川線シールドトンネルの通過地盤は、自立性の高い大阪層群であり、良く締まった砂質土および礫質土と硬質粘性土の互層状の地盤となっている。粘性土については、土と水とを一体として取り扱う考え方(土水一体)もあるが、当該地盤は砂質土が主体であることと、粘性土層も自立性が高いことから、設計時には土と水とを分離して(土水分離)取り扱った。

3. 設計時における併設影響の考慮方法

シールド掘進時の地山には、①切羽前面での応力解放、②シールド機通過時の応力解放、③裏込め注入時(テールボイド発生時)の応力解放、の大きく分けて3段階の応力解放が生じる。大和川線シールドの設計では、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、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、シールド掘進時の実際の地山状況を加味し、シールド掘進時の施工過程を考慮した2次元FEM解析により、併設影響を評価することにした。

トンネル覆工の常時設計フローを図-3に示す。トンネル覆工の設計では併設影響を考慮しており、断面力は、セグメントおよびリング継手部の併設影響が評価可能な千鳥組の添接効果を反映したはりばねモデルを用いて算定した。

シールド掘進時の地中応力および地表面変位の概念図



(1) 後行シールド掘進に伴う先行トンネルの併設影響

a) 設計思想

土被り厚がトンネル外径よりも大きいシールドトンネルの場合、トンネル上部地盤を周辺地盤が支持する地盤内のアーチング効果を期待して、設計上、全土被り圧よりも小さい緩み土圧を設計上採用する場合がある。しかし、併設トンネルの場合、このトンネル上部地盤を支持している周辺地盤を後行シールドが掘進するため、アーチング現象が崩れて地盤内で応力が再配分し、先行トンネル覆工に緩み土圧以上の圧力が作用する場合がある。

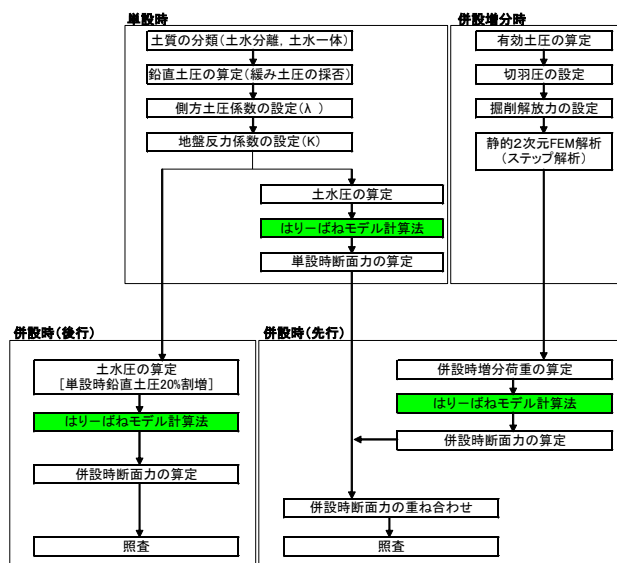


図-3 常時設計検討フロー²⁾

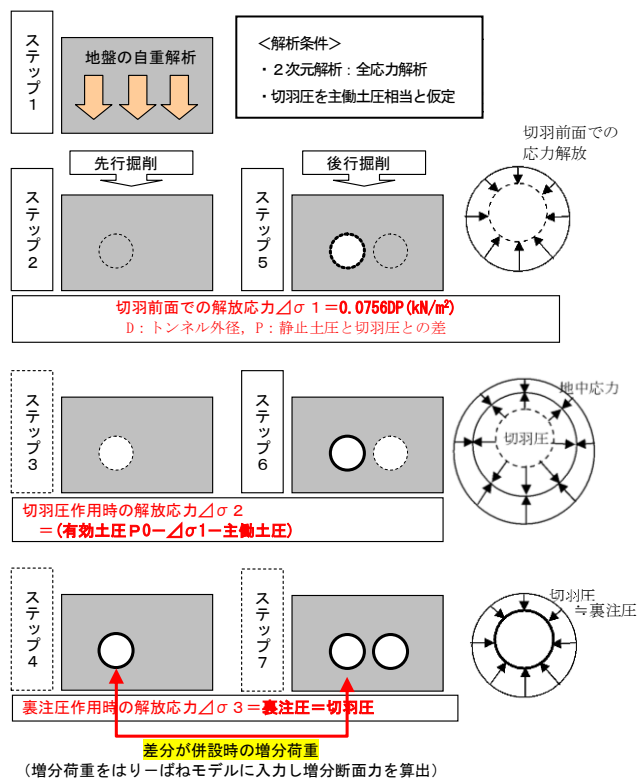


図-4 シールド掘進時の施工過程を考慮した掘削相当応力の概念およびFEM解析ステップ¹⁾

また、後行トンネル覆工にも緩み土圧が作用すると考えられるが、上部地盤を支持する周辺地盤の状況が単設トンネルの場合とは異なり、先行シールド掘進に伴う地盤変位や地山の乱れによる強度低下により、側方土圧や地盤反力が変動することが想定される。

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解析ステップを図-4に示す。後行シールド掘進に伴う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-4右図(ステップ7)ー(ステップ4))を抽出し、それを甲乙2リングのはりばねモデルに作用させて算定した(図-5参照)。よって、併設影響による鉛直土圧の増加量は、FEM解析時において増分荷重として包括されるため、単設鉛直土圧は割増さない。以下に、図-4に示す各施工ステップにおける解放応力の考え方を詳述する。

b) 切羽前面解放応力

切羽前面解放応力 $\Delta\sigma_1$ は、シールド掘進における切羽前面での解放応力であり、地山側からの土水圧と、それに対抗するシールド側からの切羽圧の差圧を考慮した。ただし、 $\Delta\sigma_1$ は、切羽前面の影響域幅によって変化するため、単純に算定することが難しい。ここでは、図-6に示す3次元FEM解析を用いて、「トンネル掘削外径 D 」、「切羽位置での地山応力と切羽圧の差圧 P 」、「シールド掘削地盤のポアソン比 ν 」を変数とするパラメトリックスタディーを実施した。なお、図-6に示す各パラメータは、大和川線シールドを想定して設定した。

各解析パラメータを3ケース設定してパラメトリックスタディーを実施した結果を図-7に示す。ポアソン比 ν については、切羽前方3[m]程度まで若干の変化は見ら

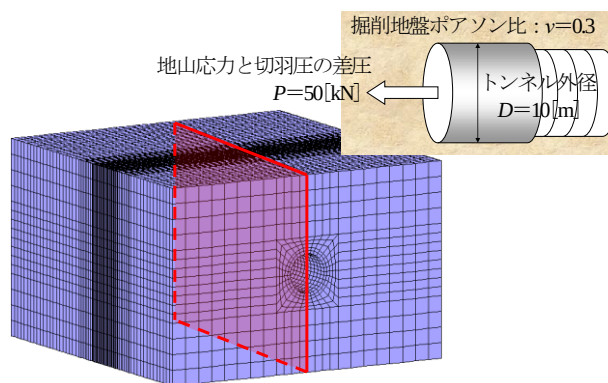


図-6 3次元FEM解析モデルと解析パラメータの概念図¹⁾

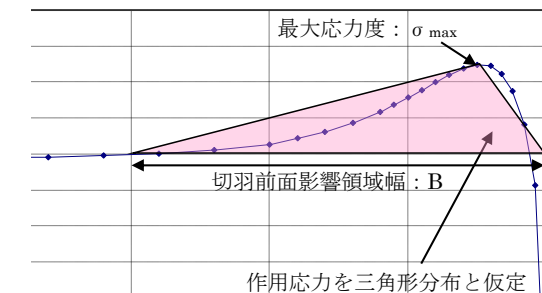
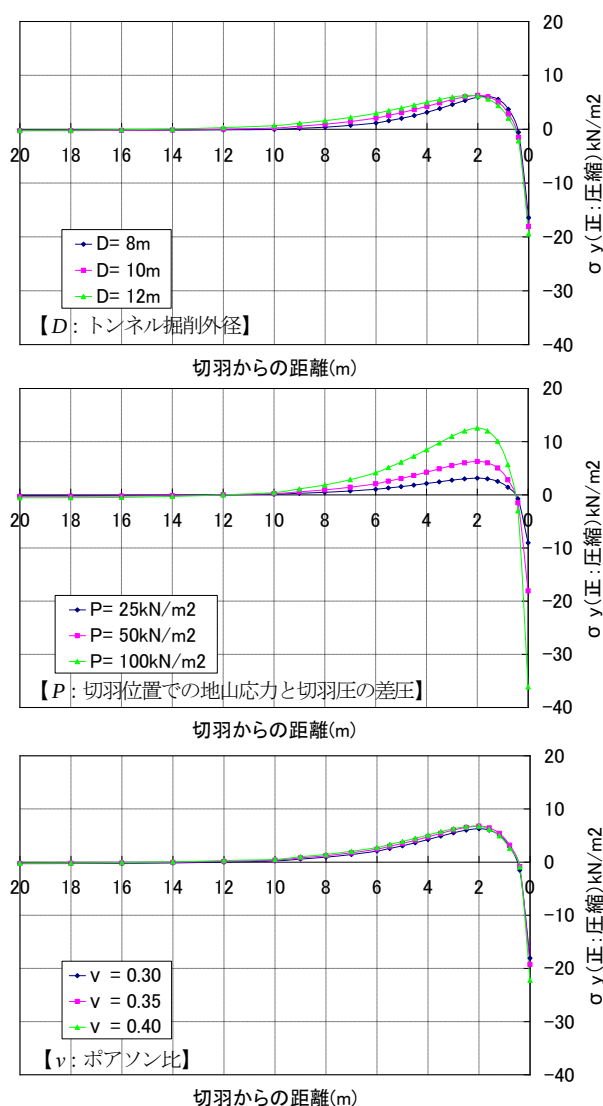


図-7 3次元FEM解析によるパラメトリックスタディーの結果¹⁾

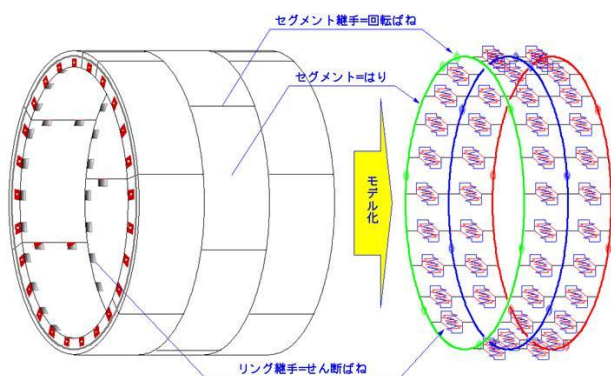


図-5 はりばねモデルの概要¹⁾

表-2 3次元FEM解析結果一覧表¹⁾

パラメータ	解析ケース			解析結果			式(1)による算定値 (カッコ内) : 作用応力に対する 増加率
	D	P	ν	切羽前方 影響域幅 B [m]	最大応力度 σ_{max} [kN/m²]	作用応力 $\Delta\sigma$ [kN/m²]	
地山応力 と切羽圧 の差圧 P	10	25	0.3	12.00	3.14	18.83	20 (6.16%)
		50		12.00	6.28	37.66	40 (6.16%)
		100		12.00	12.55	75.31	80 (6.24%)
トンネル 掘削外径 D	8	50	0.3	9.75	6.08	29.75	32 (7.96%)
	10			12.00	6.28	37.66	40 (6.16%)
	12			14.58	6.21	45.73	48 (6.03%)

れるものの、切羽前方12[m]以降の応力増分はほとんどないことが判明した。よって、ここでは、ポアソン比の影響は無視できると判断した。

トンネル掘削外径 D と地山応力と切羽圧の差圧 P に関するパラメトリックスタディーをおこなった。表-2に切羽前面影響域幅 B と最大応力度 σ_{max} と作用応力 $\Delta\sigma$ の係数に着目して整理した結果を示す。 $\Delta\sigma$ については、図-7の桃色メッシュに示すような三角形分布に近似して算出し、本結果を網羅する算定式として式(1)を提案した。表-2に示す通り、式(1)により3次元FEM解析結果に比べて切羽前面解放応力 $\Delta\sigma_1$ は6%程度増加するものの、安全側の設計になることを確認している。

$$\Delta\sigma_1 = 0.0756 \times D \times P \quad (1)$$

c) 切羽圧作用時解放応力

切羽圧作用時解放応力 $\Delta\sigma_2$ は、切羽到達以降シールド通過中に地山が解放する応力であり、地山側には「有効土圧 P_0 ＋水圧－ $\Delta\sigma_1$ 」が、シールド側には「切羽圧(＝主働土圧＋水圧)」が作用していると考えた。よって、 $\Delta\sigma_2$ は、両者の差圧である式(2)で算出できる。

$$\Delta\sigma_2 = \text{有効土圧 } P_0 - \Delta\sigma_1 - \text{主働土圧} \quad (2)$$

d) 裏込め注入圧作用時解放応力

裏込め注入圧作用時の解放応力 $\Delta\sigma_3$ は、テールシールド通過時において、トンネル覆工全周に裏込め注入圧が作用している状態の解放応力である。地山側には「有効土圧 P_0 ＋水圧－ $\Delta\sigma_1$ － $\Delta\sigma_2$ 」が作用し、トンネル覆工には「裏込め注入圧」が作用すると考える。ここでの裏込め注入圧は、解放応力がより大きくなる安全側の「裏込め注入圧＝切羽圧」を仮定した。この場合、切羽圧作用時の解放応力が作用した後、地山側応力とシールド側応力は釣り合うため、裏込め注入圧作用時における地山の応力解放はないと仮定できる(式(3)参照)。ただし、トンネル覆工には裏込め注入圧が作用しているため、裏込め注入圧相当の応力が解放される。

$$\Delta\sigma_3 = 0 \quad (3)$$

(2) 後行シールド掘進に伴う後行トンネルの併設影響

併設トンネルの場合、地中応力の再配分の観点から、トンネル覆工作用圧は先行トンネルだけでなく後行トンネルにも影響を及ぼすことが考えられる(図-9参照)。ここでは、単設トンネル覆工に作用する緩み土圧相当の解放応力が、後行トンネル覆工に作用した場合の圧力変化を2次元FEM解析より検討した。具体的には、先行シールド掘進時に伴う先行トンネル覆工天端部の鉛直土圧と、後行シールド掘進時における先行および後行トンネル覆工天端部の鉛直土圧の比率より、併設影響を検討した。

併設シールド掘進に伴う影響が大きい断面条件として、

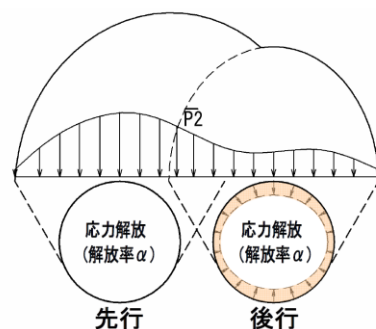


図-9 併設シールド掘進に伴う先行および後行トンネル覆工天端作用土圧の概念図

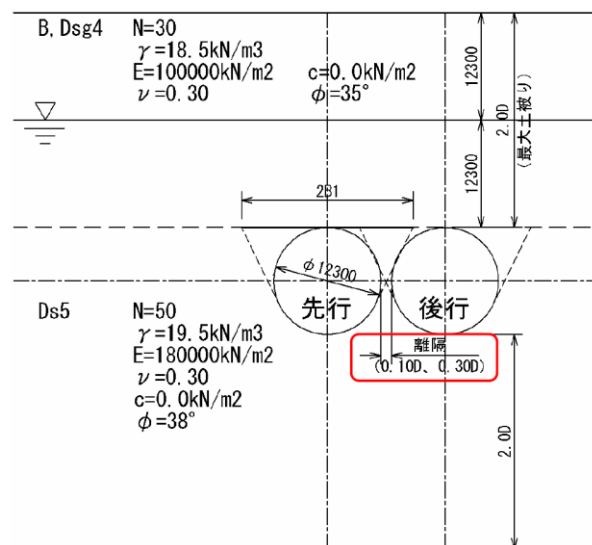


図-10 併設影響検討用の仮想断面

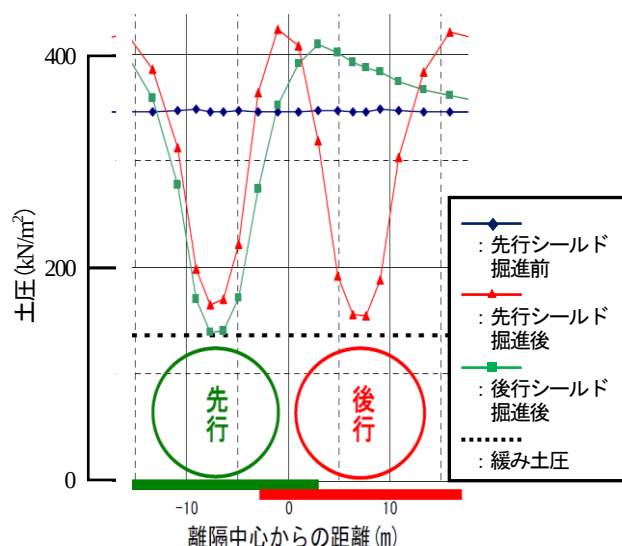


図-11 トンネル天端深度における鉛直土圧分布(併設トンネル離隔0.1Dの場合)

図-10に示す仮想断面を想定した解析条件を用いた。2次元FEM解析は、2通りの離隔を想定して実施したが、離隔が狭いほど併設影響が顕著になることから、より安全側である離隔0.1Dの場合について述べる(図-11参照)。

後行トンネル覆工天端部の鉛直土圧の比率は、(先行

併設／先行単設）＝1.20，（後行併設／先行単設）＝1.12であった．よって，設計時における安全側の設定として，後行トンネル覆工作用圧は，単設時の緩み土圧よりも20%割り増すこととした．

4. 併設影響を考慮したトンネル覆工設計手法の検証例

併設影響の検証のため，大和川線シールド区間全線において5箇所計測断面を設けた(図-2参照)．そのうち，大阪府施工区間の計測断面④で得られた計測結果⁴⁾に基づき，後行シールド掘進に伴う併設影響に着目して，計測結果と設計値の比較および検討をおこなった．

計測断面④の断面図を図-12に示す．計測断面④は，5つの計測断面のうち，ほぼ直線の本掘進区間に設定した計測断面であり，鉄道構造物直下を下越しシールド掘進する直前のトライアル断面でもある．先行シールド掘進時には，鉄道構造物の沈下量を極力抑制するために通常

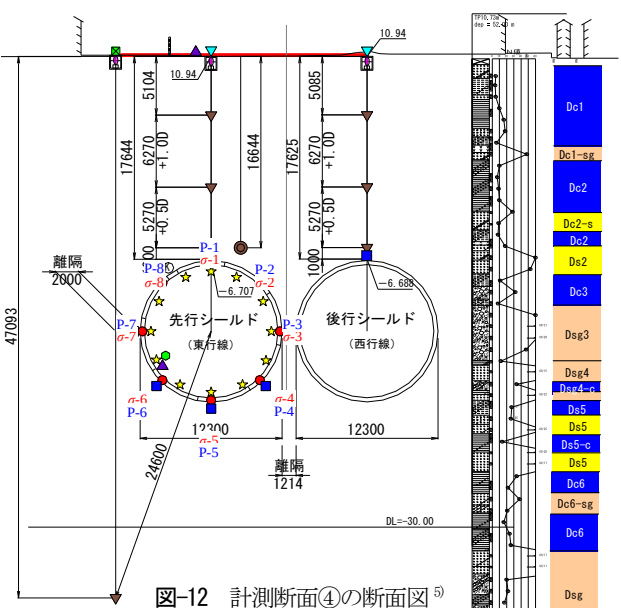


表-3 シールド施工概要と設定シールド掘進条件(計測断面④)

施工概要	工法	泥土圧式シールド工法	
	シールドマシン	外径φ12 540[mm]，機長L 12 355[mm]	
線形条件	セグメント	嵌合方式合成セグメン(外径φ12 300[mm]，内径φ11 580[mm]，幅B 1 800[mm])	
	平面線形	R 1 400[m]～13 000[m]	
その他施工条件	縦断線形	VR 9 500[m] (下り3%～1%)	
	ジャッキパターン	先行シールド	後行シールド
	気泡材	上部5本のジャッキ未使用	
	気泡材	使用	
	外周充填材	使用	未使用
	コピーカーター	使用(上側270°)	未使用
	設定条件	上部：0.23[MPa]，中央：0.31[MPa]	
切羽圧	実施工時の状況	掘進時： 上部 0.20～0.30[MPa] 中央 0.30～0.40[MPa] 静止土圧より大きい 停止時： 上部 0.20～0.26[MPa] 中央 0.30～0.32[MPa]	掘進時： 切羽圧はほぼ設定値 停止時： 上部 0.12～0.18[MPa] 中央 0.20～0.28[MPa]

掘削よりも切羽圧と裏込め注入圧を高めめに設定した．後行シールド掘進時には，鉄道構造物の影響範囲外へ抜けていくことから，通常掘進管理を実施した．

計測断面④におけるシールド施工概要および設定シールド掘進条件を表-3に示す．

表-4 併設時の増分地中応力算出用FEM解析の各種設定条件

項目		解析における設定値	備考
トンネル周辺地盤の応力	有効土被り圧	0.240 [MPa]	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	各土層のポアソン比に依存する．
施工条件	切羽圧	上部：0.109 [MPa] 下部：0.139 [MPa]	切羽圧＝静止側圧＝静止土圧＋水压 解析における設定値は，静止土圧 ＊静止土圧係数＝0.47
	裏込め注入圧	＝切羽圧 ＝静止土圧	

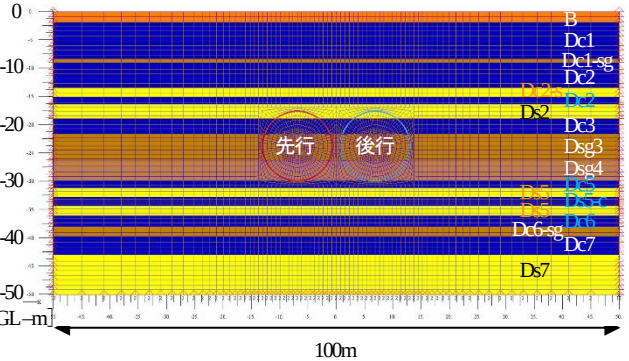


図-13 有限要素メッシュ図

表-5 土質パラメータ

土層	N値	単位体積重量 γ[kN/m ³]	変形係数 E [kN/m ²]	ポアソン比 ν
B	11	18	7.7	0.35
Dc1	8.4	17.5	5.9	0.40
Dc1-sg	48	19	19.0	0.34
Dc2	10.1	18.3	7.1	0.40
Dc2-s	29.7	18	21.0	0.35
Dc2	10.1	18.3	7.1	0.35
Ds2	33.9	18	25.6	0.35
Dc3	26.2	19	18.3	0.40
Dsg3	53.2	20	48.0	0.35
Dsg4	52.5	19	40.6	0.35
Dc5	20	16.9	22.1	0.40
Ds5	56	19	52.1	0.35
Ds5-c	14	16.7	24.1	0.40
Ds5	56	19	52.1	0.35
Dc6	27.4	19.5	35.0	0.40
Dc6-sg	47.8	19	47.4	0.35
Dc7	24	18.5	55.5	0.40
Ds7	49	20	34.3	0.35

(1) 後行シールド掘進に伴う先行トンネルの併設影響に関する設計値と計測値の比較

併設時の増分地中応力算出のためのFEM解析の設定条件を表-4に、有限要素メッシュを図-13に、土質パラメータを表-5に示す。今回の設計計算では、実施工条件を反映して「切羽圧＝静止土圧＋水圧」に設定した。なお、水圧は、シールド掘進前後で同様に作用すると仮定し、有効土圧のみを考慮した。

a) 各解放応力の設定

計測断面④を対象に、後行シールド掘進に伴う先行トンネルの併設影響をFEM解析により算出するため、各施工段階の解放応力(図-4左図参照)を以下に設定した。

今回の設計では、切羽前面解放応力 $\Delta\sigma_1$ を示す式(1)において「切羽圧＝静止土圧＋水圧」を仮定した結果、応力解放はないと設定した。また、切羽圧作用時解放力 $\Delta\sigma_2$ も式(4)のように設定した。

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_2 &= \text{有効土圧} P_0 - \Delta\sigma_1 - \text{主働土圧} \\ &= \text{有効土圧} P_0 - \Delta\sigma_1 (=0) - \text{静止土圧} \\ &= \text{初期地山応力} - \text{切羽圧}\end{aligned}\quad (4)$$

裏込め注入圧作用時解放力 $\Delta\sigma_3$ は、式(3)に基づいて応力解放はないと仮定した。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た。

図-14は、図-4右図(ステップ6)における解放応力を示す。初期地山応力と切羽圧の差圧(＝解放応力)を算出した結果、(ステップ6)での解放応力は、トンネル覆工上部で大きく、側部で小さくなる結果になった。

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-15に示す。ここでは、図-4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。図-15より、特に併設トンネル間地盤において、後行シールド掘進に伴う解放応力は、水平方向応力(σ_x)増分に比べて鉛直方向応力(σ_y)増分の方が大きく、上部からの鉛直応力が卓越していることを確認した。

図-16は、図-15で得られた併設時増分荷重をはりーばねモデル計算法(図-3参照)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-16(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-16(b)は、図-4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覆工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地盤であることから、N値＝30程度の砂地盤で $k=30[\text{MN}/\text{m}^3]$ 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変動荷重は、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-16(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-16(b)参照)を加算した荷重を仮定した。

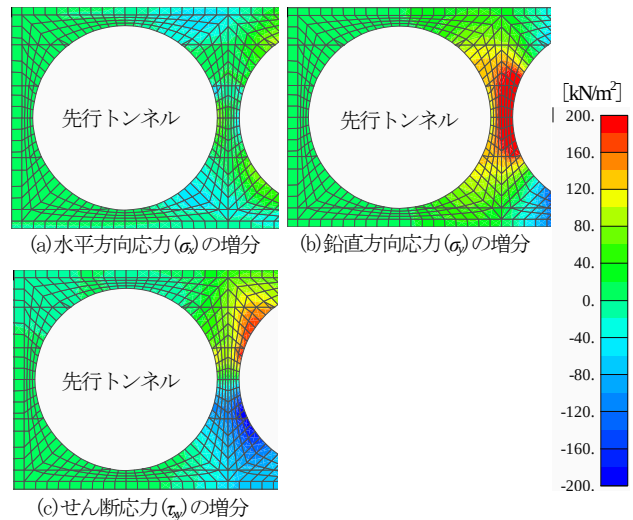
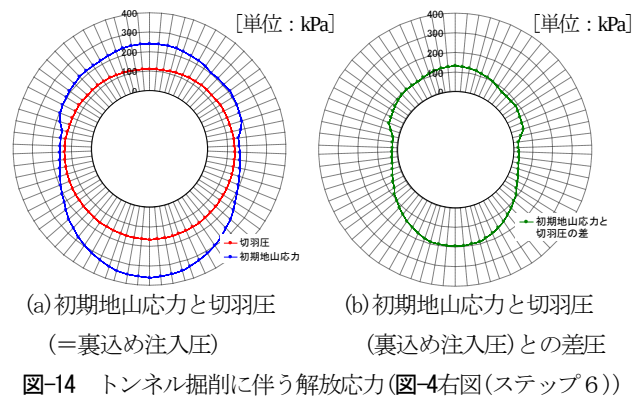


図-15 後行シールド掘進に伴う先行トンネル周辺地盤の応力変動状況(図-4右図(ステップ7)ー(ステップ4))

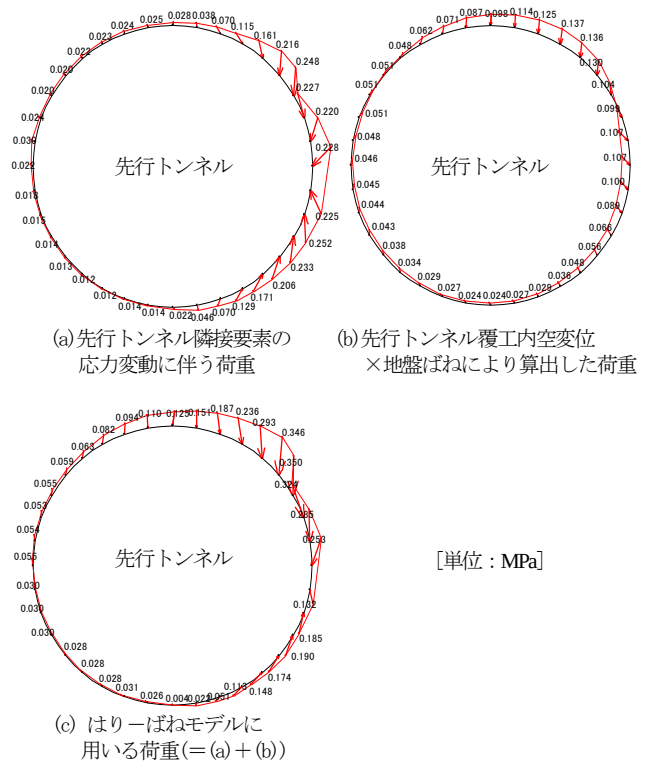


図-16 はりーばねモデルに用いる併設影響を考慮した先行トンネル覆工変動荷重分布

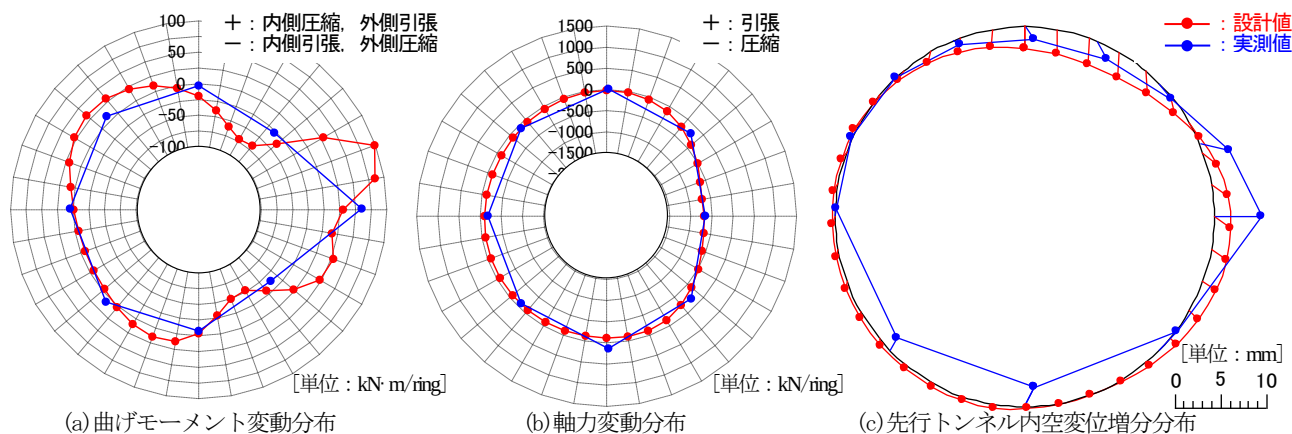


図-17 先行トンネル覆工発生断面力およびトンネル内空変位量(ともに増分量)に関する設計値と計測値の比較

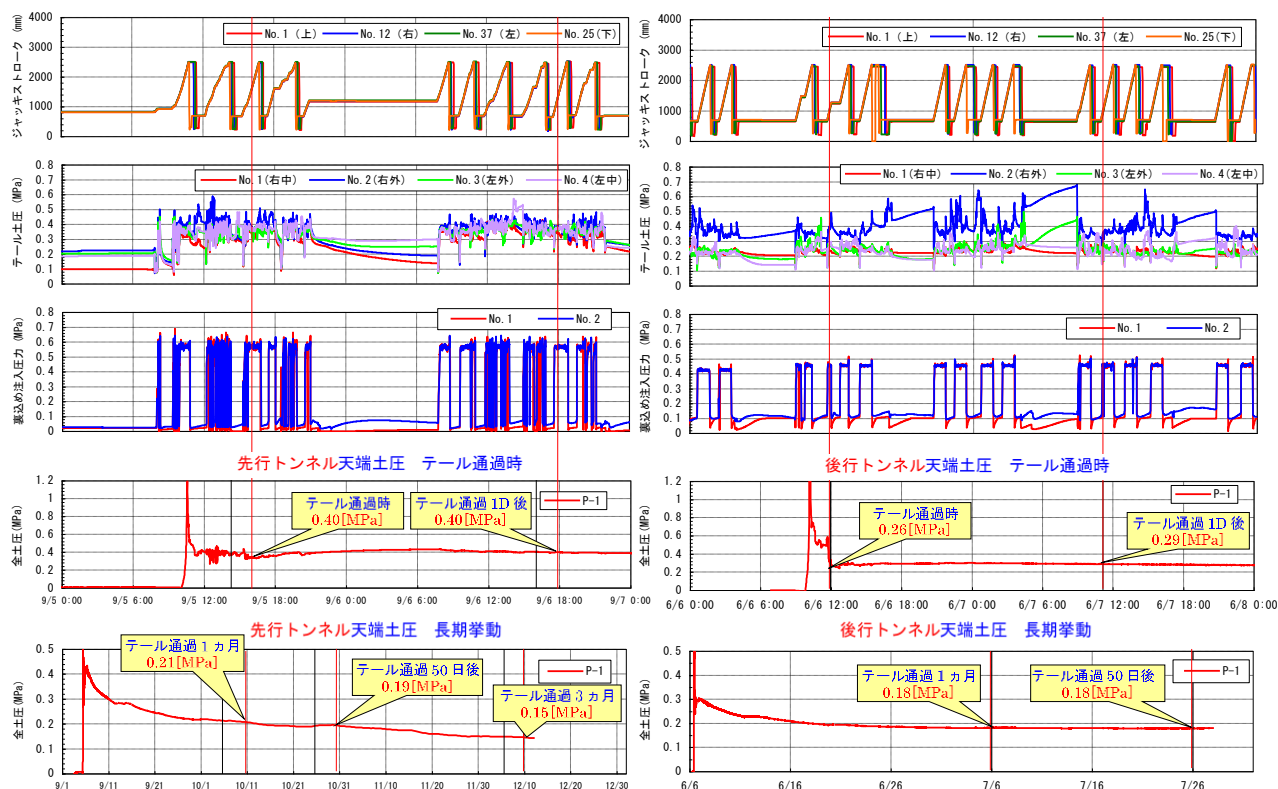


図-18 計測断面④における先行および後行トンネル覆工天端土圧の経時変化

b) 設計値と計測値の比較

設計値と計測値の比較を図-17に示す。後行シールド掘進に伴う先行トンネル覆工断面力の変動は、後行シールド側で軸力が増加し、負曲げ(内側圧縮、外側引張)が発生している。今回のケースでは、設計値は、この傾向を精度よく表現しており、定量的にも併設影響を評価できることを確認した(図-17(a) (b) 参照)。

また、後行シールド掘進に伴う先行トンネル覆工の実際の内空変位は、上下方向に圧縮、後行シールド側に伸張となる傾向を示した。設計値は、この傾向を定量的には表現できているものの、定量的には計測値に比べて小さく評価する結果になった(図-17(c) 参照)。これは、はりばねモデルにおけるセグメント継手部の回転ばねの設定に影響を受けていると考えている。

(2) 後行シールド掘進に伴う後行トンネルの併設影響に関する設計値と計測値の比較

計測断面④における先行および後行トンネルの覆工天端土圧の経時変化を図-18に示す。テール通過直後の天端土圧は、先行トンネル側で0.40[MPa]、後行トンネル側で0.28[MPa]であり、先行トンネルの方が大きかった。これは、計測断面④において、先行シールド通過時の方が裏込め注入圧が大きく、その差異によって併設影響が発現したと考えられる。

長期的な天端土圧の変動は、先行トンネル天端土圧がテール通過3ヶ月後に0.15[MPa]を示すなど、圧力低下が継続している。一方、後行トンネル天端土圧は、テール通過後50日後で0.18[MPa]まで低下しているものの、テール通過20日後以降は圧力低下が見られなかった。先行

トンネル覆工圧の長期的な低下の要因としては、裏込め注入圧の影響が徐々に緩和していることと、裏込め注入材の硬化に伴う体積収縮の影響が考えられる。また、トンネル覆工天端土圧の長期変動は、後行トンネルの天端土圧が先行側より20%程度大きくなったことを確認した。

(3) 計測結果およびFEM解析結果から推察する併設影響メカニズム

FEM解析から得られた後行シールド掘進に伴う併設トンネル周辺地盤の主応力増分ベクトル図を図-19に示す。後行シールド掘削に伴い、後行シールド天端および下端部付近の地盤は、応力解放によって鉛直方向に引張応力が増加している(図-14(b)参照)。一方、先行トンネル覆工は、上下斜部(後行シールド側)の周辺地盤において、後行シールド掘進に伴う応力解放に連動して、鉛直方向に圧縮応力が増加している。

後行シールドに隣接した側部地盤では、後行シールド掘進に伴う応力解放により、鉛直方向の圧縮応力が卓越している。一方、先行トンネルの側部地盤では、先行トンネル覆工の影響により主応力が回転し、先行トンネル半径方向への圧縮力が増加している。

併設シールド掘進に伴う影響は、併設トンネル周辺地盤において局所的な変動を示しており、図-9に示す併設トンネル上部地盤からの鉛直土圧変化とは異なる傾向にあった。併設影響を考慮する上で重要な内容であることから、今後の設計検証において詳細に分析を進めたい。

以上の結果を踏まえ、併設影響のメカニズムに関する概念図を図-20に示す。シールド掘進に伴う解放応力は、地山応力とシールドから地山への付加応力(切羽圧と裏込め注入圧)との差圧である。よって、異方性を有する地山応力と付加応力の差圧を考えると、トンネル側部の水平方向応力よりもトンネル上部の鉛直方向応力の方が大きくなる(図-20①参照)。また、後行シールド掘進時には、応力解放分の鉛直応力が、併設トンネル間の地盤および先行トンネル覆工に作用することになる(図-20②参照)。その結果、先行トンネル内空変形は、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削による応力解放から、後行トンネル側へ押し出す挙動を示す(図-20③参照)。一方、後行トンネル通過時の併設トンネル間地盤の応力状態は、1) 後行トンネルの応力解放による鉛直方向の圧縮力、2) 鉛直方向の圧縮により水平方向へ広がる力、3) 先行トンネル側部が後行トンネル側へ押し出すことによる地盤反力が相互に作用し、図-19はこれらの力が釣り合った状態を示している。図-19より先行トンネルの側部地盤の水平応力成分は、圧縮応力が作用した状態であり、先行トンネル側部の覆工土圧が増加することとなる。これは、後行トンネル通過時における先行トンネル覆工作用土圧の計測結果とも一致する。

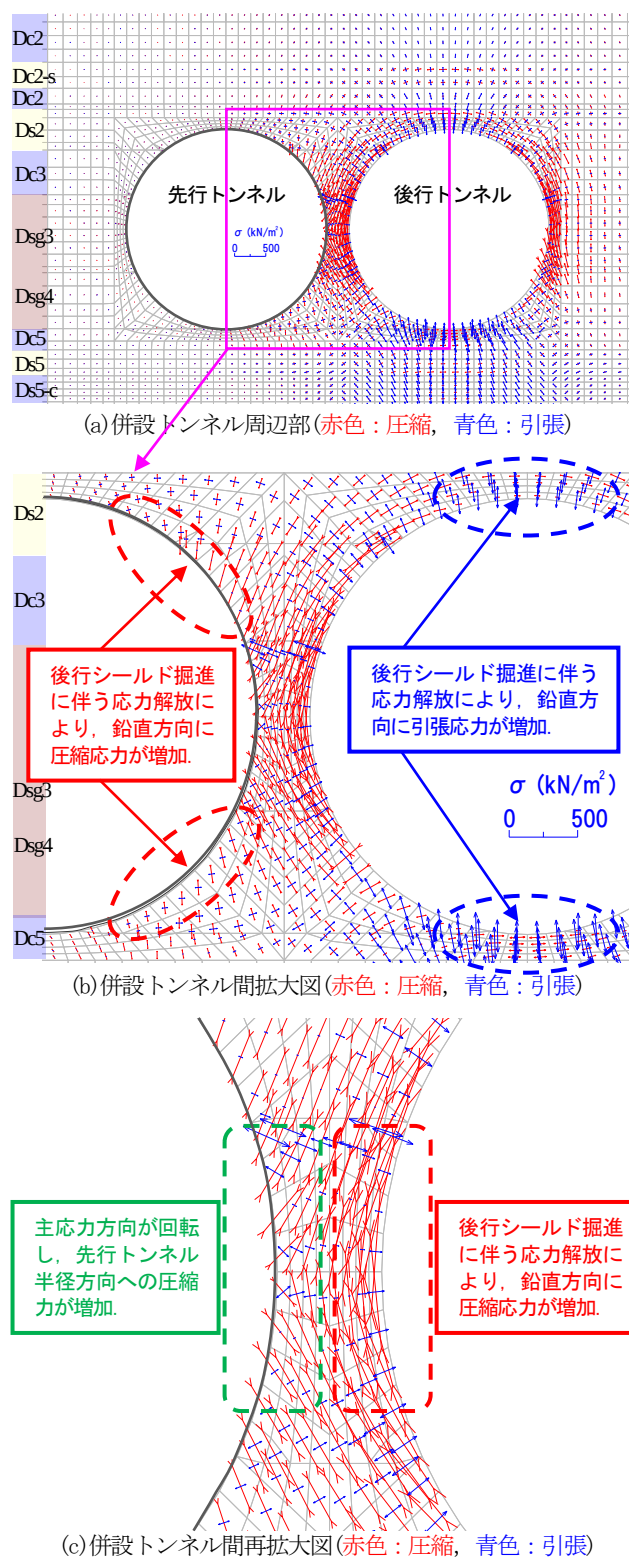


図-19 後行シールド掘進に伴う併設トンネル周辺地盤の主応力増分ベクトル図

5. おわりに

大断面、超近接の併設トンネルである大和川線シールドトンネルにおいて、併設影響を考慮した設計手法を下記の通り提案した。

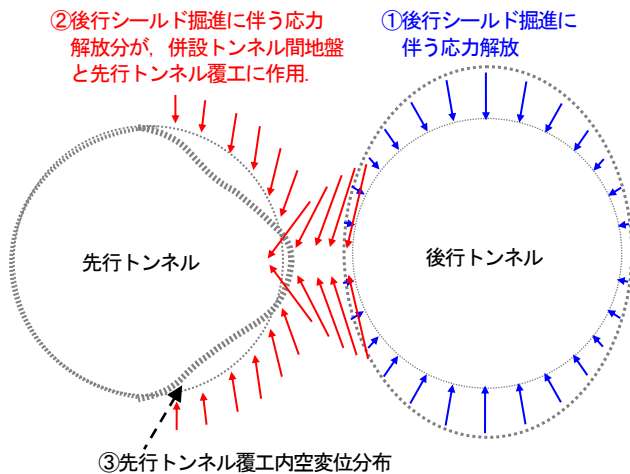


図-20 併設影響のメカニズム概念図

- ① 先行トンネルは、シールド施工過程を考慮した付加荷重を2次元FEM解析を用いて評価することにより、併設影響を考慮する。ここでの付加荷重とは、切羽前面解放応力、切羽圧作用時解放応力、裏込め注入圧作用時解放応力である。併設増分断面力は、2次元FEM解析によって得られた増分地中応力をはりばねモデルに入力して算出する。
- ② 後行トンネルは、先行シールド掘進によって緩んだ地山を超近接して併設シールド掘進して構築することから、後行トンネル覆工には、単設時に想定した緩み土圧以上の応力が作用すると考えられる。ここでは、この影響を考慮するため、後行シールド掘進に伴う後行トンネル覆工の併設影響は、単設時の緩み土圧よりも20%割増す。

本稿では、計測結果に基づいて、設計手法を検証した結果の一部を報告した。現状での知見を以下に示す。

- ① 先行トンネル覆工の増分断面力について計測値と設計値を比較した結果、定性的、定量的に良い対応関係にあった。一方、内空変位増分量は、設計値は計

測値に比べて小さく評価した。これは、はりばねモデルにおけるセグメント継手部の回転ばねの設定に影響を受けていると考えられる。

- ② 先行トンネル覆工の天端土圧は、テール通過後、長期間低下する傾向にあった。後行トンネル覆工の天端土圧は、先行トンネルのような長期的な低下は見られなかった。前者は、裏込め注入圧が徐々に緩和していることと、裏込め注入材の硬化に伴う体積収縮が原因として考えられる。今回計測事例では、後行トンネル天端土圧は、先行トンネル側よりも20%程度大きくなり、設計時の想定と合致した。

ここでは、計測断面④のみの比較および検討であったが、この他にも計測断面として4断面を設定しており、現在同種の検討を進めている。今後の検討結果も含めて、「設計マニュアル」の詳細検証を進める予定である。

謝辞：本設計手法は、「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）」において審議をいただき、「シールドトンネル設計マニュアル」として制定した。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，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.
- 3) 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.
- 4) 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(投稿中)。

(2014. 9. 15 受付)

APPROACH FOR DESIGN METHOD OF DOBBLE TUBES SHIELD TUNNEL WITH LARGE SCALE AND NEIGHBORING

Kiyoshi SAKIYA, Tsutomu NIINA, Kenichi URABE
Kazuhisa JINNO and Junichi NAGAYA

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 dobbles tubes shield tunnel, some monitoring data are observed. In this paper, this original design approach proposed by design manual is explained in detail, and is tried to examine partially based on some monitoring data in the Yamatogawa Route shield tunnel construction.