

大和川線シールドトンネルにおける 併設影響を考慮した設計手法の検証

阪神高速道路(株)建設・更新事業本部堺建設部設計課 南口 優貴
阪神高速道路(株)建設・更新事業本部大阪建設部設計課 新名 勉
阪神高速道路(株)建設・更新事業本部堺建設部設計課 藤原 勝也

要 旨

大和川線シールドトンネルは、大断面かつ超近接の併設で長距離を掘進した既往事例の少ないトンネルであり、約 0.09D (D:トンネル外径) の併設離隔で R=400m の曲線区間を施工した。大和川線では、「シールドトンネル設計マニュアル」を制定し、超近接による先行および後行トンネル相互の併設影響を考慮した独自の手法により覆工設計を実施した。

一連の施工を終え、設定した計測断面において得られた計測値から覆工挙動の分析を行い、併設影響の考察を行うとともに、設計値と比較し、設計手法の検証を行った。その結果、大和川線トンネルのような地盤構成、併設程度、シールド掘進管理条件下において、設計手法の妥当性を確認した。

キーワード: 大断面、シールドトンネル、超近接・長距離併設、併設影響、覆工挙動

はじめに

阪神高速大和川線は延長 9.7 km の路線のうち、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 (内、約 2.0 km を阪神高速道路(株)が施工) 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離隔がトンネル外径比 0.09D (D:トンネル外径) 程度の超近接施工により長距離を掘進する、既往事例の少ないシールドトンネルである。(図-1)

従来、併設シールドトンネルの設計では応力解放率を用いた 2次元 FEM 解析を用いることが多い。しかし、本工事のように併設離隔距離の小さい大断面シールドトンネルにおいては参照しうる類似条件下の実績がなく、応力解放率の設定が困難で

あった。このような特有の施工条件に対応するため併設影響の検討を行い¹⁾、「シールドトンネル設計マニュアル」²⁾(以下「設計マニュアル」)を制定した。具体的には、先行トンネルについては、後行シールド掘進過程ごとの地山解放応力に着目した 2次元 FEM 逐次解析により評価した。また、後行トンネルについては鉛直土圧を 20%割増し、覆工設計を行った。

一連の施工を終え、大和川線シールドトンネルにおいてあらかじめ設定した計測断面において、得られたデータから併設影響による覆工挙動の分析を行った。本稿では、これらの分析・検証に関し、阪神高速道路(株)施工区間の結果について報告する。



図-1 大和川線の概要

1. 覆工設計手法

1-1 先行トンネルでの覆工設計手法

併設トンネルの覆工設計では応力解放率を用いた2次元FEM解析を用いることが一般的である。しかし、シールド掘進時の実際の地山は(1)切羽前面での応力解放、(2)シールド通過(切羽圧作用)時の応力解放、(3)裏込め注入圧作用時の大きく分けて3段階の応力解放が生じる。従来手法では、これらの掘進過程の応力解放を過去の事例などから1つの応力解放率で表現するが、大和川線のような既往事例の少ない超近接シールドトンネルではその設定が困難であった。そこで、シールド掘進時の実際の地山状況を加味し、施工過程を考慮した2次元FEM解析により、併設影響を考慮した。FEM解析のステップを図-2に示す。後行シールド掘進に伴う、先行トンネル覆工への併設増分断面力は、ステップ7とステップ4の差分として抽出し、梁-ばねモデルに作用させた。

なお、設計マニュアルでは安全側に評価し、切羽圧=主働土圧と設定した。また、覆工に作用する裏込め注入圧を切羽圧相当と仮定しているため、裏込め注入時の応力解放は発生しない。施工ではトンネル周辺地盤を緩ませないことを前提として掘進を行ったことから、本報告では、切羽圧=静止土圧、裏込め注入圧=全土被り圧相当として検討を行う。

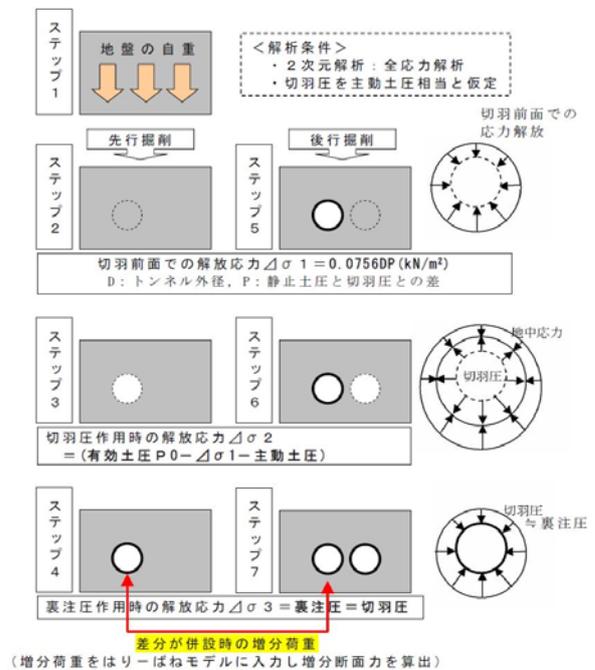


図-2 2次元FEM解析のステップ

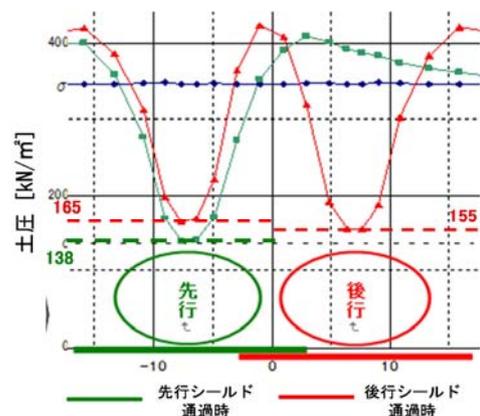


図-3 2次元FEM解析による鉛直土圧

1-2 後行トンネルの覆工設計

併設トンネルの場合、地山の狭い範囲を複数回掘進するため、トンネル上部の地盤は後行シールド通過により、応力が再配分され、単設トンネルの場合と異なることが考えられる。そこで、トンネル天端に作用する鉛直土圧に着目し、2次元FEM解析により、先行時に対する、併設時の先行・後行トンネルに作用する作用圧の比率を導出した。その結果、比率は併設時先行/単設時=165/138≒1.20、併設時後行/単設時=155/138≒1.12となったことから、安全側を考慮し鉛直土圧を単設時の20%割増することとした。(図-3)

2. 計測断面、計測項目の概要

図-4に設定した計測断面、計測項目の概要及び施工条件を示す。計測断面①は、土被り厚が大きく、R=400mの曲線区間に位置する。計測断面②は、土被り厚が比較的小さく、直線に近い区間に位置する断面である。施工時の条件として、切羽圧は静止側圧相当、裏込め注入圧は全土被り圧相当と設定し、ほぼ設定値通りに掘進を行った。

また、先行トンネル1断面につき8か所で、覆工作用圧と発生応力、内空変位を計測した。

3. 併設影響を考慮した先行トンネルの設計検証

3-1 先行トンネルにおける安全度の確認

(1) 覆工発生応力と許容応力度の比較

図-5に単設時及び併設時における覆工発生応力と許容応力度の比較を示す。ここでは8測点のうち、最大応力が発生した箇所について示している。単設、併設のいずれの場合においても、最大応力は長期許容応力度以内に十分収まっており、覆工の安全性が確認できた。

(2) 併設増分応力の計測値と設計値の比較

次に、後行シールド掘進時における覆工発生応力の増分について、計測値と設計値の比較を図-6に示す。ここでは、設計値として、設計マニュアルで設定されている、「切羽圧=主働土圧+水圧」(図-6の青色棒グラフ)とした場合、ならびに実際の施工条件を反映した、「切羽圧=静止土圧+水圧」とした場合(図-6の緑色棒グラフ)の2

断面図	計測断面①		計測断面②	
	後行シールド	先行シールド	後行シールド	先行シールド
セグメント種類	RCセグメント	嵌合方式合成セグメント	RCセグメント	RCセグメント
セグメント外径[m]	12.23		12.23	
土被り厚[m]	27.26		16.12	16.03
平面線形[m]	R=400		R=3000	
地下水位	DL+3.2		DL+4.0	
掘進地盤	上半:砂層 下半:粘土層		上:裸層 中:粘土層 下:砂層	
施工条件	全ジャッキ使用		全ジャッキ使用	
	未使用		未使用	
	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]	
	掘進時	上部:0.48~0.57[MPa] 中央:0.42~0.59[MPa]	掘進時	上部:0.48~0.57[MPa] 中央:0.42~0.59[MPa]
停止時	上部:0.40~0.50[MPa] 中央:0.42~0.53[MPa]	停止時	上部:0.40~0.50[MPa] 中央:0.42~0.53[MPa]	
裏込め注入圧	全土被り圧相当 (左上・右上:0.46[MPa] 左・右:0.53[MPa]) 裏込め注入率:約130%		全土被り圧相当 (左上・右上:0.32[MPa] 左・右:0.35[MPa]) 裏込め注入率:約130%	
ポンプ吐出圧	ポンプ吐出圧 : 0.21~0.97[MPa]		ポンプ吐出圧 : 0.21~0.51[MPa]	ポンプ吐出圧 : 0.25~1.22[MPa]
テール土圧	テール土圧 : 0.24~0.60[MPa]		テール土圧 : 0.11~0.47[MPa]	テール土圧 : 0.10~0.43[MPa]

図-4 計測断面、計測項目の概要及び施工条件

つの併設増分応力を算出した。その結果、計測値はいずれも設計値以内に収まり、安全側に評価している。また、主働土圧を用いた場合、解放応力が大きくなるため増分応力を過大に評価する傾向となった。静止土圧を用いた場合でも乖離が発生しているが、その要因としては、解析で設定した地盤構成や静止土圧係数がと実際と異なっていた点や、先行トンネルに偏荷重や変形が発生しないように施工を行った点などが考えられる。

3-2 単設時におけるトンネル覆工挙動

単設時における、セグメント組立からテールシール通過までの計測値と設計値の比較を図-7に示す。なお、計測断面①において、機器の不具合により計測値に一部欠損が生じている。また、テールシール通過中の設計値は、参考として通過1D後のものを示す。覆工自重作用時は計測値と設計値が概ね類似しているが、それ以降では、両者に乖離が生じている。この原因として、設計では真円を前提とし、覆工自重と土水圧を考慮しているが、施工では前リングの形状に拘束されて組まれる点、裏込め注入やテールシールによる施工時荷重が作用する点から、計測値と設計値に乖離が生じたと考えられる。なお、詳細な考察は文献³⁾、⁴⁾を参照されたい。実際の覆工挙動は前リング

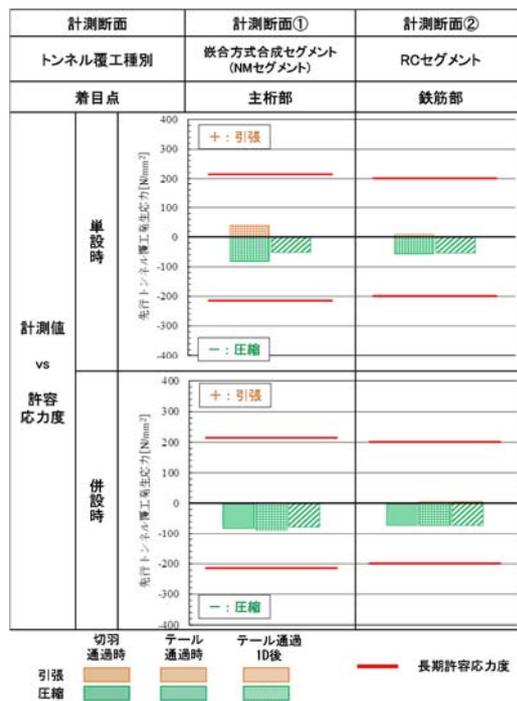


図-5 覆工発生応力と許容応力度の比較

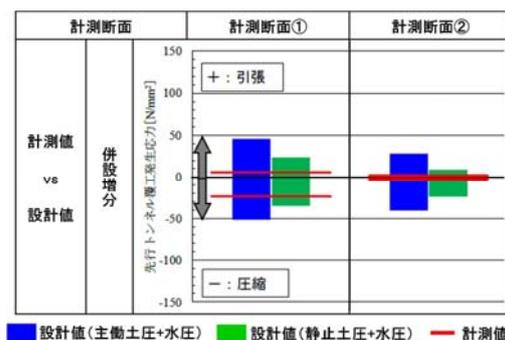


図-6 覆工発生応力の計測値と設計値の比較

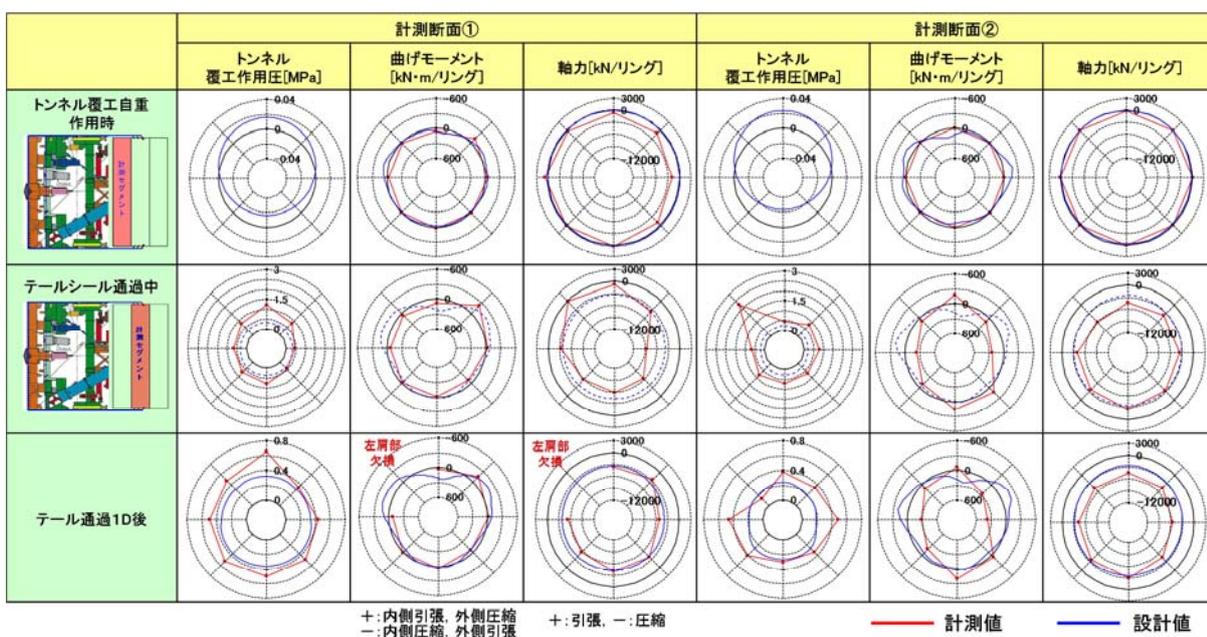


図-7 単設時における計測値と設計値の比較

の組立精度に依存するため、可能な限り真円なトンネルを構築するように、施工管理を行うことが重要である。

3-3 後行シールド通過時の先行トンネル覆工挙動

続いて、後行シールド通過時の先行シールドにおける計測結果を基に、覆工の挙動分析を行う。

図-8 に両断面における、後行シールド通過中（切羽通過時～裏込め注入圧作用時までの最大値）、テール通過 1D 後の計測結果（後行シールド通過前を初期値とした併設増分）を示す。

(1) 計測断面①での挙動

軸力に着目すると、後行シールド通過時には後行トンネル側で圧縮力が発生し、テール通過後も残留している。一方、曲げモーメントと内空変位に関しては、後行シールド通過中に正曲げ（内側引張、外側圧縮）が発生し、内側へと変位しているが、テール通過後は負曲げ（内側圧縮、外側引張）が生じ、外側への変位に転じている。

(2) 計測断面②での挙動

軸力に関しては計測断面①と同様、後行トンネル側で圧縮力が残留している。曲げモーメントと内空変位に着目すると、後行シールド通過時は計測断面①のような正曲げ、内側への変位は生じていない。テール通過後は負曲げ方向にモーメントがわずかに転じ、変位も外側へと向いている。

(3) 覆工挙動に関する考察

両断面とも、後行シールド通過時には後行側からの押しつけ力が作用し、通過後も軸力が残留す

る結果となった。また曲げモーメントは負曲げ方向、変位は外側へと転じる傾向にあった。このような挙動を示す要因として、後行シールド掘進に伴うトンネル周辺地盤の応力解放の影響を受けていると考えられる。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では、自立性が高く土のアーチング効果に信頼がおけると考えて、緩み土圧を採用することが多い。しかし、併設トンネルの場合は、後行シールド通過時に地盤内で応力が再配分し、アーチング現象が崩れるため、先行トンネル覆工には緩み土圧以上の圧力が作用すると思われる。

本計測結果から想定される覆工挙動を図-9 に示す。後行シールド通過時には、後行側からの押しつけ力により、正曲げが発生し、内側へ変形する。この時、トンネル上下部では地中応力と切羽・裏込め注入圧との差分の応力解放が起こる。

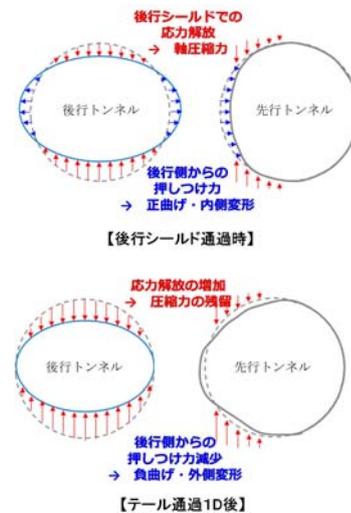


図-9 想定される先行トンネル覆工挙動

	軸力[kN] (+: 引張 - : 圧縮)		曲げモーメント[kN・m] (+: 内側引張, 外側圧縮 - : 内側圧縮, 外側引張)		内空変位[mm]	
	後行シールド通過中	テール通過1D後	後行シールド通過中	テール通過1D後	後行シールド通過中	テール通過1D後
計測断面①						
計測断面②						

図-8 後行シールド掘進時における先行トンネル計測結果

テール通過後には後行シールド側からの押し付け力が減少、また、負曲げに転じ、外側へ変形する挙動となると考えられる。さらに、後行シールドでの上下の地中応力が解放するため、先行トンネルにおいて軸圧縮力が残留するものと考えられる。加えて、両断面の結果を比較すると、後行シールド通過時において、計測断面①では、正曲げ、内側への変位が発生している。一方で、計測断面②では、計測断面①ほど曲げモーメントや変位が顕著に見られない。このような傾向になった原因として、両断面は直線・曲線施工や土被り厚の違いがあるが、計測断面①は深度が深いため、土水圧が大きく作用している。それに伴い、切羽圧や裏込め注入圧等の施工時荷重の影響を受けやすくなり、計測断面①では後行側において正曲げや内側への変位が見られたと考えられる。

3-4 併設時の先行トンネル計測値と設計値の比較

先行トンネルでの覆工設計手法の妥当性を検証するために、計測値と設計値を比較する。図-10に後行シールド通過時とテール通過1D後における軸力、曲げモーメント、内空変位の計測値と設計値の比較を示す。計測断面②では両者が定性的に類似している。一方で、計測断面①では、内空変位について、計測値ではトンネル内側から外側へ変位しているが、設計値は全体が下方に剛体変位し、両者が大きく乖離している。

この要因として、併設増分荷重を算定する2次元FEM解析のモデル図-11に示すように、計測断面①では、トンネル下半の剛性が小さいことがあげられる。このため、設計ではトンネル全体が下方へ変位する結果となった。実際の施工断面の地盤構成が解析で想定したものと必ずしも一致しない点や、施工では縦断方向継手により拘束されているため、解析で見られたような単リングでの剛体変位は生じないと考えられる点から計測値と設計値に乖離が生じたと考えられる。また、設計では図-12に示すように、併設増分として2次元FEM解析から得られたセグメント隣接要素の応力増分による荷重と変位量は、地盤ばねを介してはりばねモデルに作用させている。設計上の変位量と荷重は大きくなるが、変位を受ける側の地盤反力も小さく、剛体変位はするが、断面力が大きくなるような変形は生じていない。

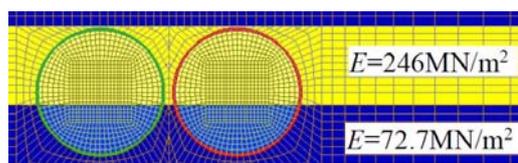


図-11 計測断面①における剛性の違い

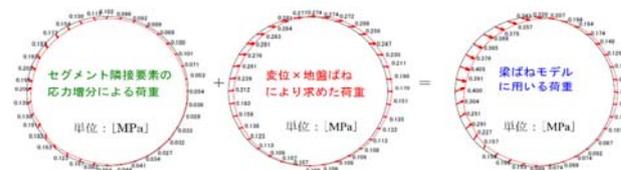


図-12 はりばねモデルで用いた荷重分布

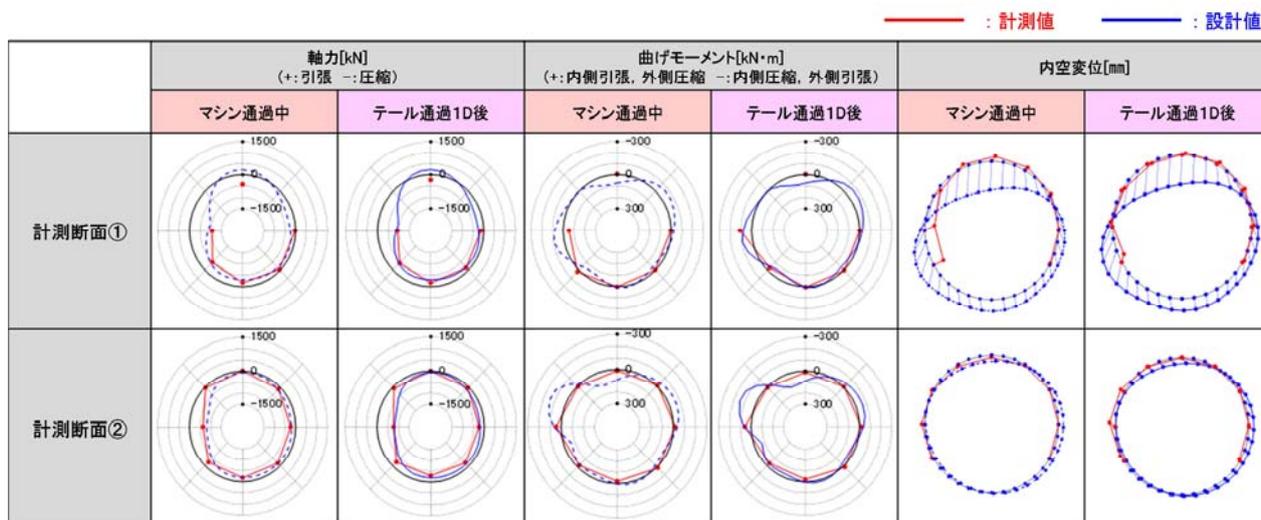


図-10 後行シールド掘進時における先行トンネル計測値と設計値の比較

4. 併設影響による後行トンネルの設計土圧の検証

後行トンネルは設計上、併設影響として鉛直土圧を20%割増することとしたが、その妥当性を検証するため、シールド通過1D後も計測を続けた。図-13に後行トンネル覆工天端における計測値の経時変化と単設時鉛直土圧を20%割増した設計値を示す。後行トンネル覆工の天端作用圧（図-13の赤線）は、後行シールド通過直後は大きい値になっているが、最終的には単設鉛直土圧の20%割増（図-13の茶色点線）以下に収束している。これは本シールドトンネルが掘削時に周辺地盤を大きく緩ませずに掘進したことによることも考えられ、設計時の段階で後行トンネル覆工作用圧の割増を考慮しておくことは妥当であると考えられる。また、温度（図-13の黄色線）との関連性について確認すると、計測断面①では温度の下降に伴い、作用圧は減少し、計測断面②では温度上昇により、作用圧が上昇している。これはトンネル坑内の温度変化により、覆工が膨張・収縮することで周辺地盤からの反力が増減するためだと考えられる。このように、温度と覆工作用圧の間に相関が見られる可能性がある。

5. まとめ

本稿では、大和川線シールドトンネルにおいて設定した2断面における計測結果から、トンネル覆工挙動を分析し、設計手法を検証した。以下に大和川線のような掘進地盤、施工管理下での施工を行った場合として、得られた知見を示す。

- ・シールドトンネル設計マニュアルに基づく設計を行うことで、覆工に生じている断面力は十分に許容応力度に収まり、覆工の安全性が確認できた。
- ・併設時における増分応力について、計測値は設計値に十分収まり、安全側に評価することができた。

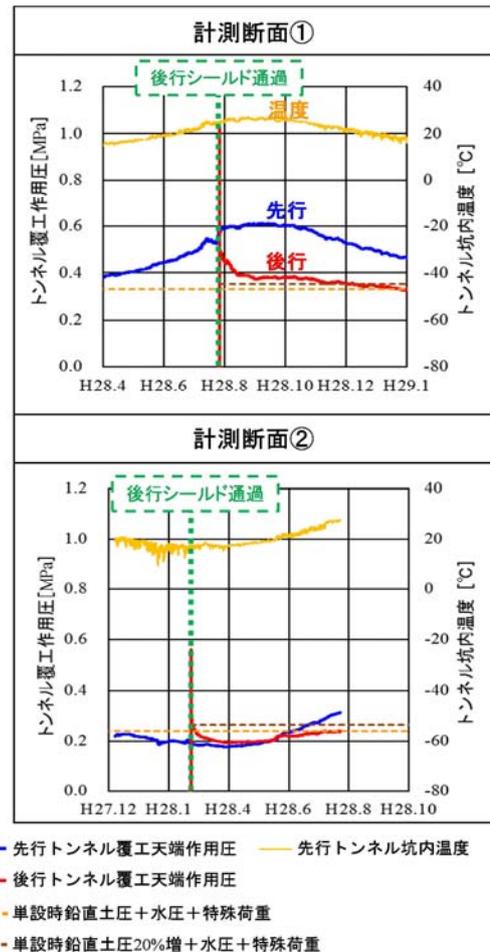


図-13 後行シールド通過における計測結果

- ・単設時における覆工計測結果と設計値に乖離が生じた。この原因としては、設計では真円を前提とし、覆工自重と土水圧を考慮しているが、実際は前リングの組立精度の影響を受け、さらに施工時荷重（切羽圧、裏込め注入圧、テールブラシ圧等）の影響も受けているためだと考えられる。

- ・併設時における先行トンネル覆工は後行シールド通過時に、後行側での解放応力と押しつけ力により、軸圧縮力が増加し、曲げモーメントは正曲げ方向、トンネル内側へ変形する傾向が見られた。その後、解放応力の増加、並びに押しつけ力の減少により、軸圧縮力は残留し、曲げモーメントは負曲げ、変形は外側へと転じる傾向が確認された。

- ・先行トンネルの覆工計測結果と設計値について、1断面において両者が定性的に類似していたが、もう1断面では、設計時にトンネル全体が下方へ

の変位を示した。この原因としては、併設増分を算定する2次元FEM解析の地盤剛性の影響を受けたものと考えられる。

・先行トンネルにおける併設影響を考慮した設計手法について、大和川線のような地盤構成、併設程度、シールド掘進管理条件下においてはその妥当性が確認された。

・後行トンネルにおいて、今回の事例では単設鉛直土圧の20%割増以内に収まったが、設計時に単設鉛直土圧の割増を行うことは妥当である。

大和川線シールドトンネルの設計・施工において得られた知見が今後の同種・類似工事の参考となれば幸いである。

謝辞：本稿の検討に当たり、「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）」ならびに「同シールドトンネル幹事会（幹事長：建山和由 立命館大学教授）」によりご指導頂いた。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 崎谷浄, 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, トンネル工学報告集, 第24巻, II-8, 2014.12
- 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) 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, トンネル工学報告集, 第24巻, II-8, 2014.12
- 4) 平野正大, 新名勉, 岡本信也: 大和川線シールドトンネル(阪高施工区間)における単設時の検証, 阪神高速道路第48回技術研究発表会論文集, 2016

VERIFICATION OF THE DESIGN METHOD CONSIDERING THE INFLUENCE OF PARALLEL SHIELD TUNNELS ON THE YAMATOGAWA ROUTE

Yuki MINAMIGUCHI, Tsutomu NIINA and Katsuya FUJIWARA

Long-distance parallel shield tunnels with a large-cross section were constructed with a very small clearance on the Yamatogawa Route. The clearance between the tunnels was nearly equal to $0.1D$ (D : external diameter of the tunnels), and each tunnel had both a straight section and a curved section. A shield tunnel design manual was established for the Yamatogawa Route shield tunnels, and the lining was designed with mutual influence between the first and second tunnels taken into account. In this paper, the behavior of lining was analyzed based on the measurement data acquired at the specified cross sections to investigate the influence of the parallel tunnels, and the design method was verified by comparing the measured values and calculated design values.

南口 優貴



阪神高速道路株式会社
建設・更新事業本部
堺建設部 設計課
Yuki Minamiguchi

新名 勉



阪神高速道路株式会社
建設・更新事業本部
大阪建設部 設計課
Tsutomu Niina

藤原 勝也



阪神高速道路株式会社
建設・更新事業本部
堺建設部 設計課
Katsuya Fujiwara