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1・藤原 勝也2・陣野 員久³・石原 悟志4
 橋本 正⁵・長屋 淳一⁶・出射 知佳7

¹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

²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

³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

⁴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

5 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

6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

⁷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 設離隔が外径比0.1×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ュ アル」¹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²(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.

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,



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 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 離隔		0.995m(≒0.08D)	1.228m(≒0.1D)	片側併設: OFFと西行間離隔2.34m 両側併設:東行と西行間離隔1.76m、ONと東行間離隔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	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
状況	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×Dと超近接施工断面である².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)³. 一方,計測断面②④⑤は,比較的土被りの浅い直線断面 である^{4,5}.

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/m²]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⁶⁾

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³

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

		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]	
	実施工時の 状況	掘進時、上部:0.48~0.57[MPa]	掘進時、上部:0.23~0.32[MPa]	
		中央:0.42~0.59[MPa]	中央:0.24~0.41[MPa]	
		→ 静止側圧より若干大きい圧力	→ 静止側圧より若干大きい圧力	
切羽庄				
		停止時、上部:0.38~0.50[MPa]	停止時、上部:0.27~0.29[MPa]	
		中央:0.35~0.52[MPa]	中央:0.32~0.35[MPa]	
		→ ほぼ設定値(静止側圧)相当	→ ほぼ設定値(静止側圧)相当	
	設定条件	全土被圧相当(0.53[MPa])	全土被圧相当(0.35[MPa])	
裏込め 注入圧		裏込め注入率:130%	裏込め注入率:130%	
	実施工時の	ポンプ吐出圧:0.21~0.97[MPa]	ポンプ吐出圧:0.21~0.51[MPa]	
	状況	テール土圧:0.24~0.60[MPa]	テール土圧:0.11~0.47[MPa]	

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



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)⁴ 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70

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

※①~④の順に掘進 2.52mm 3.52mm 3.52mm<					
		本線東行トンネル	本線西行トンネル		
<u> </u>	<u>面線形</u>	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	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 点止時 ト部 0.10、0.20[MP.] 中中、0.00、0.40[MP.]		
		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	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		
声によ	設定条件	全土被圧相当(0.52[MPa])、裏込め注入率:130%	全土被圧相当(0.52[MPa])、裏込め注入率:125%		
表込め 注入圧	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]	ポンプ吐出圧 : 0.37~0.68[MPa] テール土圧 : 0.13~0.43[MPa]		





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ID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 ID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、短期許容応力度内以下に収まった. ONラン プトンネルについては、テール通過1D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1D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.

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.

- すべての計測断面において、後行シールド通過時 1) 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1D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1D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.
- 計測断面①は、シールド掘進深度が最も深く、R= 2) 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

ール通過 自動計測

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



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

- 阪神高速道路(株):シールドトンネル設計マニュア ル, 2011.
- 西原知彦,新名勉,崎谷淨,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=400m), 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=400m 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.