

低土被り・併設シールドの河川横断における設計と施工

The Design and the Construction of Twin River Crossing Shield Tunnels with Low Overburden Condition

神谷 拓生*
Takuo Kamiya

大江 郁夫**
Ikuo Oe

要 約

本工事は、現在の京阪天満橋駅から中之島駅（新設）に至る中之島線のうち、なにわ橋駅～天満橋駅間に約 600 m の鉄道トンネルを 2 機の泥土圧シールド（シールド外径 $\phi=6.95$ m）で併設施工したものである。土佐堀川下の沖積～洪積の砂礫層を 0.66～1.0 D 程度（D：セグメント外径=6.80 m）の低土被り、かつ併設で斜めに河川横断した前例のない工事である。

このため、切羽圧の安定性、裏込め材の河川への逸走または噴発について懸念が生じたことから、地質を詳細に把握し、FEM 解析による地盤の安定性を確認した上で、地盤の塑性化防止を目的とした薬液注入工を行い、シールド掘進を行うこととした。実施工では、薬液注入工の試験施工を行い、シールド掘進では、切羽圧、掘削土量、裏込め注入量について十分な管理を行い、無事に掘進を行うことができた。本稿では土佐堀川横断部において設計した薬液注入工による河川横断部防護工およびその施工について工事報告を行う。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 河川横断における課題とその対策
- § 4. 施工結果
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

本工事は、京阪天満橋駅から中之島駅（新設）に至る全長約 2.9 km の地下鉄道建設工事のうち、なにわ橋駅～天満橋駅間 約 600 m を 2 機の泥土圧シールドにより鉄道単線併設トンネルを構築する工事である。

到達部（天満橋駅）が半地下構造であることから、到達付近では本トンネルの土被りは浅く、横過する土佐堀川で大阪府の横過基準に規定されている 1.5 D かつ 5.0 m 以上の土被りを確保できない計画であった。そこで、事前協議および薬液注入工による対策工を提案し、河川管理者の承認を得て、泥土圧シールド工法にて 1.0 D 以下の低土被りで河川下を併設施工した。

§ 2. 工事概要

2-1 工事内容

工事内容を以下に示す。

工 事 名：中之島新線建設工事のうち土木工事
（第 6 工区）

発 注 者：中之島高速鉄道株式会社

工 事 場 所：大阪市北区中之島 1 丁目～中央区北浜東

工 期：平成 15 年 4 月 1 日～平成 21 年 3 月 25 日

シールド： $\phi 6.95$ m 泥土圧式シールド×2 機

平面線形：最小曲率半径 R=250 m

縦断線形：-10～+40‰

施工延長：西行き線 L=535.9 m

東行き線 L=607.0 m

土 か ぶり：4.4 m～24.2 m

セグメント：外径 $\phi_o=6,800$ mm, 内径 $\phi_i=6,300$ mm

DC セグメント（標準型） 767 リング

DC セグメント（中荷重型） 59 リング

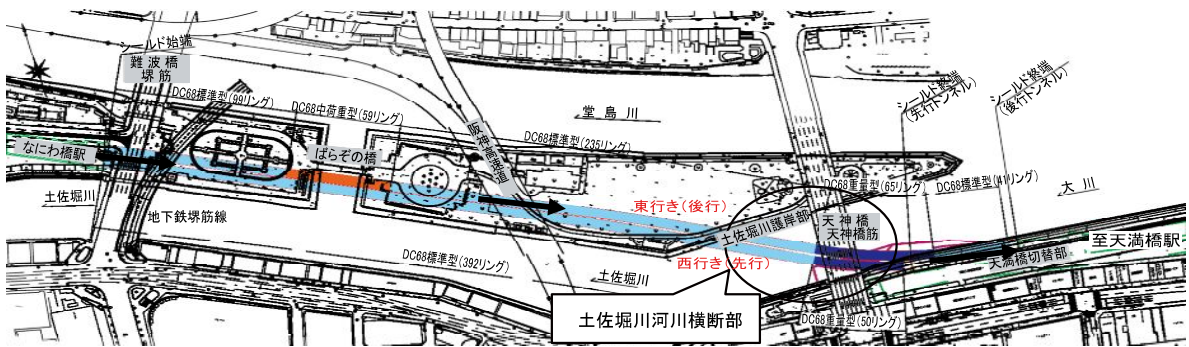
DC セグメント（重量型） 115 リング

2-2 地質概要

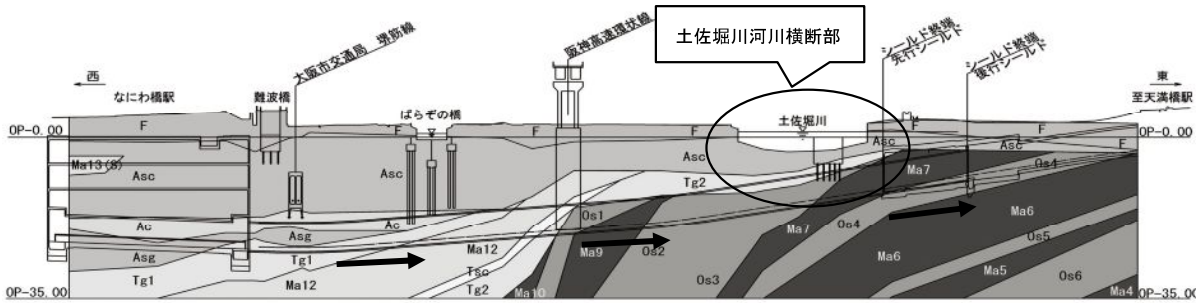
トンネル施工位置は、大阪市の中央を南北に連なる上町台地の西側に位置し、上町台地を形成した上町断層と派生断層である桜川撓曲に隣接しているため、複雑な地

* 関西（支）中之島（出）

** 土木設計部設計課



図一 全体平面図



図二 地質縦断面図

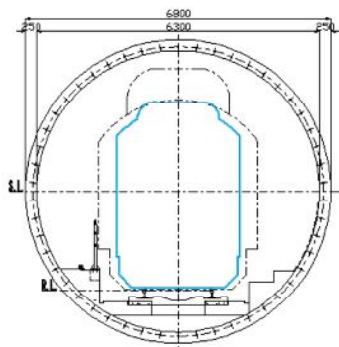
層分布となっている。図一に平面図を示す。図二に追加の調査結果を踏まえた地質縦断面図を示す。

土佐堀川河川横断部では、シールド上部に、比較的緩い礫層である Asc 層と Tg2 層が出現する。

2-3 トンネル標準断面とセグメント¹⁾

トンネル標準断面図を図一3に示す。本工事では、上町断層を対象とした耐震設計の結果、コルゲートタイプ DCセグメント ($\phi_0=6,800$ mm) を全線に採用した。

「2-1 工事内容」に示すように種別は3タイプあるが、河川横断部では土被りが少ないこと、到達部直前の隣接工区内でトンネル上部にある河川護岸を大規模掘削して上載荷重が除荷される計画であることから、浮力対策として重量型セグメントを使用した。この重量型セグメントの1リングあたりの総重量は18.227 t/Rと標準型セグメントの13.045 t/Rより1リングあたり5t余り重いものである。



図一3 トンネル標準断面図

§ 3. 河川横断における課題とその対策

3-1 河川横断における課題

本工事の河川横断は土被りが河川管理者である大阪府の河川横過基準(5m かつ 1.5 D 以上の土被りを確保すること)を満たすことができなかったため、工事入札前から中之島新線土佐堀川横過技術検討委員会(委員長:足立京都大学名誉教授)を設立して検討が行われた。その結果、密閉型である泥土圧シールド工法にすること、重量セグメントによる浮力対策を講じることなどにより河川横断は認められたが、シールドの施工について十分な検討を行うことが留意点として残った。

そこで、工事入手後、土質調査が不足していた土佐堀川河川内において4本の追加土質調査を実施し、正確な土質縦断面図(図二)を作成した上で、課題を整理した。

① 地中障害物

当該地盤では、径の大きい礫、古い橋の残置杭、旧護岸のガラなどが地中障害物として予想され、シールド掘進時にはスクリーコンベヤや土砂圧送ポンプに悪影響が生じる可能性があることから、シールドに工夫が必要と考えた。

② 切羽管理

土被りが浅いことから、土圧管理の上限値と下限値の幅が小さく厳密な管理が必要となる。このため、土圧の計測、土量管理、地山崩壊の把握など、きめ細かな管理が出来るよう、シールドに工夫が必要と考えた。

③ 裏込め注入工

0.66~1.0 D 程度の低土被りであるため、裏込め材が河

床に逸走ないしは噴発する懸念がある。また、併設トンネルに作用する浮力により、トンネル周辺地盤に上向きの力が作用するため、裏込め注入工による影響と相まって地盤が不安定化する懸念がある。このため、十分な検討が必要と考えた。

3-2 シールドの工夫¹⁾ (課題①~②への対策)

本工事の工法は泥土圧シールド工法で、シールド外径は $\phi_0=6.95\text{ m}$ であった。河川横断に対する特殊装備を以下に列挙する。

(1) スクリューコンベア・バルクヘッドゲート

土質調査の結果、河川横断部での掘削対象土質でもあるTg2層にて $\phi\ 300\text{ mm}$ 程度の礫を確認したため、先端をリボンスクリューとした。また、スクリュー上面にハッチを設け、礫を除去できる構造とした。さらに、ハッチ開放時にチャンバ内の土砂が機内に流出することを防止するために、バルクヘッドゲートを設置した。実施工では約 250 mm の礫、ガラ、船舶のスクリューを確認したが、スクリューコンベアが閉塞することはなかった。

(2) 土圧計・チャンバ内可視化システム

チャンバ内の塑性流動化をより正確に確認するために、バルクヘッドに上中下段の左右に計6個の土圧計を装備した。その内、3個は交換型としたが実施工では交換することはなかった。また、掘進中に得られる土圧計の値を、可視化するために、チャンバ内可視化システムを開発した(図-4)。

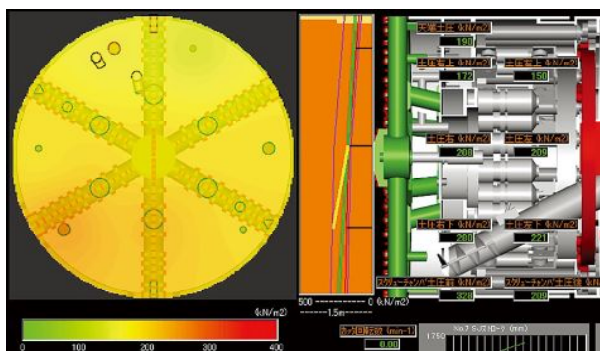


図-4 チャンバ内可視化システムモニター

(3) CV1バルブ

停止中の切羽土圧の低下を防止するためにCV1バルブを設置して、実施工においても常時使用した。

(4) 地山探査装置

油圧ジャッキ貫入式の地山崩壊探査装置を設置した。実施工では、地山の崩壊等は確認されなかった。

3-3 事前解析と補助工法の採用 (課題③への対策)

(1) 解析方針

裏込め注入圧および浮力が地盤に及ぼす影響の程度を予測する目的で河川横断部のFEM解析を行った。解析方針を以下に示す。

- ① FEM解析にて裏込め注入圧および浮力が作用した場合の地盤の要素安全率を算出することにより、地盤の安定性を評価することを目的とした。
- ② シールドトンネル周囲は砂質土層が主体であることから、シールド掘進に伴う周辺地盤の塑性の評価は有効応力で行うのが適切と考えた。このため、解析は砂質土層を有効応力、粘性土層を全応力として取扱う見掛け上の有効応力解析を基本とした。
- ③ シールド施工に伴う裏込め注入圧による地盤の挙動は、3次元的效果によるものである。本解析では、この3次元的效果を再現するため、トンネル縦断方向の軸対称FEM解析とトンネル横断方向の2次元平面ひずみFEM解析を組合わせた解析とした。
- ④ 裏込め注入圧は、「水圧+0.1MPa」とする。トンネル位置地盤は滞水砂質土層であり、解析上、水圧は入力していないため、有効裏込め注入圧としては0.1MPaを考慮した。

(2) 解析ステップ

a) 解析フロー

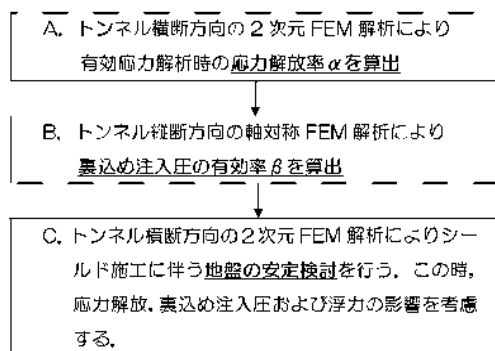


図-5 解析フロー図

b) 応力解放率 α の算出

原設計では、二次元FEM解析において、全応力解析での応力解放率を10%としている。

そこで、本検討では見掛け上の有効応力解析を行うことから、全応力解析で10%相当の変位となる有効応力解析時の応力解放率 α を求めた結果、 $\alpha=38\%$ を得た。

なお、見掛け上の有効応力解析は、砂質土は土水分離、粘性土は土水一体として、図-6のように粘性土層の上下面に地下水圧を作用させた。

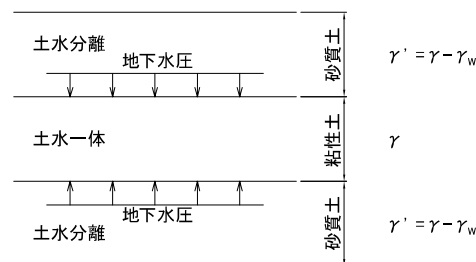


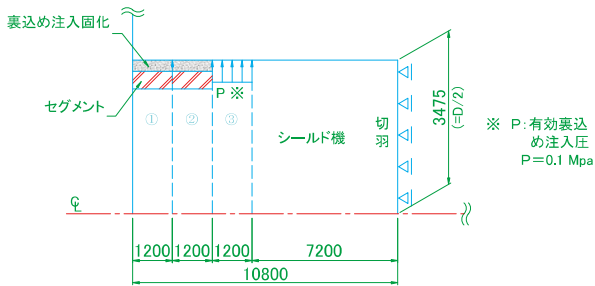
図-6 見かけの有効応力解析概略説明図

c) 裏込め注入圧の有効率 β の算出

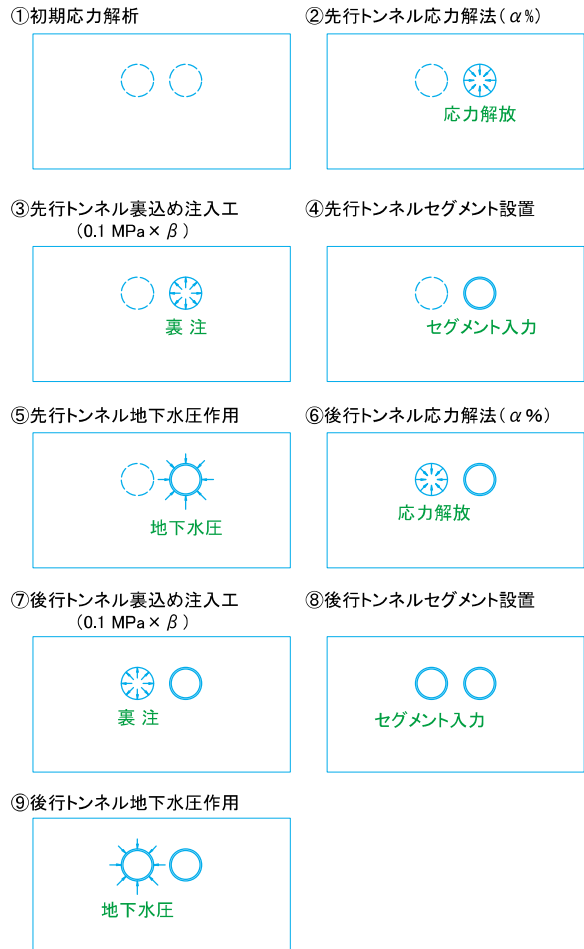
トンネル軸芯を回転軸とした軸対称モデルとした。

モデルの左から右へシールドが進行する状態をモデル化し、掘進を模擬してシールド長+1リング分の地盤要素を除去し、セグメントを設置し、セグメント1リング幅 (=1.2 m) 分に注入圧を载荷させた。このとき、シールド位置の地盤要素も削除するが、応力解放は行わないこととした。また、切羽部の支承条件は鉛直ローラーとした。なお、本検討では、裏込め注入圧载荷時の地盤変位量に着目することから、初期応力解析は行わないこととした。そして、1リング掘進、セグメント設置、裏込め注入圧を载荷することを、地盤変位が収束するまで繰り返し行い、変位量 $\delta 1$ を設定した。

さらに、二次元 FEM 解析にて、裏込め注入圧 0.1 MPa を作用させた場合の河床位置最大鉛直変位量 $\delta 2$ を算出した。 $\delta 1$ と $\delta 2$ の比を裏込め注入圧の有効率 β とした。解析の結果、 $\beta = 37\%$ を得た。



図一七 裏込め注入圧の有効率 β の解析モデル図



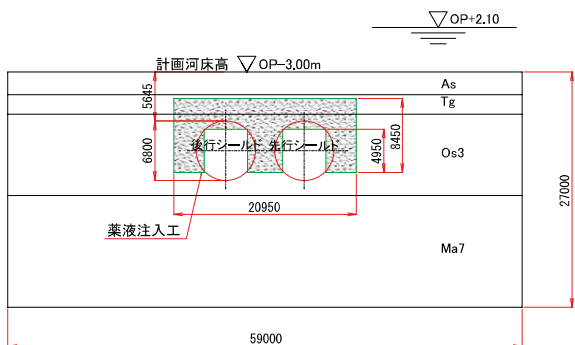
図一九 解析ステップ図

c) 二次元 FEM 解析

図一九に解析ステップを示す。

(2) 解析結果

a) 解析モデル



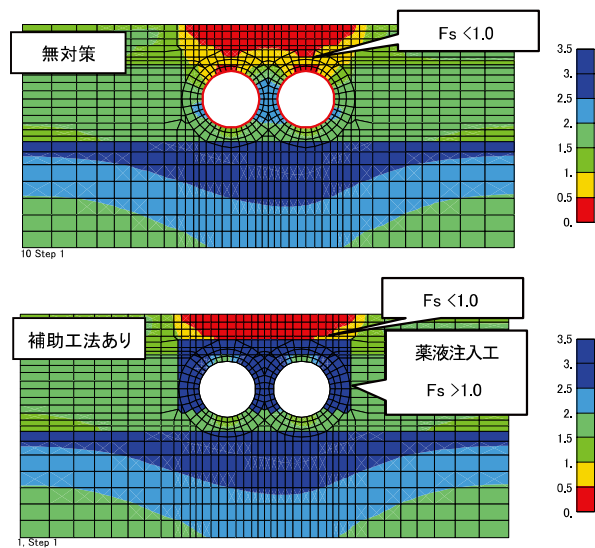
土層	γ kN/m ³	γ' kN/m ³	C kN/m ²	ϕ deg	E_{50} kN/m ²	ν
Ag	18	8	0	33	17 500	0.30
Tg	19	9	0	32	16 500	0.30
Os	19	9	0	40	28 500	0.30
Ma7	17	—	86.9	0	18 200	0.45

※：薬液注入後の変形係数は、原地山の 1.5 倍とする。また、粘着力を $C = 80 \text{ kN/m}^2$ とする。

図一八 解析モデル図

b) 要素安全率

図一十に示す解析結果のうち、モール・クーロンの破壊基準で算定した Step ⑨の要素安全率を示す。



図一十 要素安全率の結果 (Step ⑨)

無対策のモデルでは、要素安全率が1.0を下回る領域がトンネルから上方に広がり、河床につながる事が判明した。一方、補助工法として薬液注入工を考慮したモデルの場合には、シールド周囲の要素安全率が1.0を下回る領域でカバーできた。これらのことから、薬液注入工の効果により裏込め材の逸走の懸念がなく地盤の安定性を確保できることを確認できた。

§4. 施工結果

4-1 補助工法（薬液注入工）

4-1-1 試験注入工

前述の検討の結果、決定した河川防護工（二重管複相式ストレーナー工法）の効果を確認するために、陸上部にて試験施工を行い、以下の項目を計測した。

- ① 標準貫入試験（N 値）
- ② 坑内水平載荷試験（E：変形係数）

結果を図-11、表-1 に示す。各物性が薬液注入工によって改良されていることを確認できた。

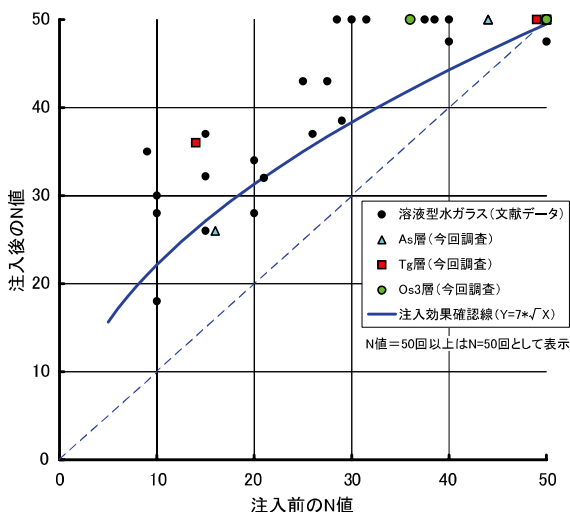


図-11 砂質土の N 値の変化

4-1-2 本施工

本施工は平成 17 年 12 月～平成 19 年 5 月までの期間に、河川防護工 460 万ℓ、既設護岸防護工 80 万ℓ、計 540 万ℓの注入を行った。総注入量の約 80%が河川内での施工であり、スパット台船・フロート台船を使用した（写真-1、図-12）。また、河川内への薬液の流出を確認するため、河川内は二重管にて施工し、日常管理として 1 回/日の頻度でシールド直上部の河床の砂を採取して、その pH および目視で裏込め材の付着等の確認を行った。また、レベル測量で、河床の隆起確認を行った。結果として、河床への薬液のリーク・隆起は発生せず、無事に施工を終えた。

表-1 解析で用いた変形係数と実測値の比較

土 層	FEM 解析改良部 kN/m ²	改良部試験値 kN/m ²	試験値/解析値
Tg 層	24 750	41 315	1.67
Os3 層	42 750	51 684	1.21
As 層	26 250	31 422	1.20

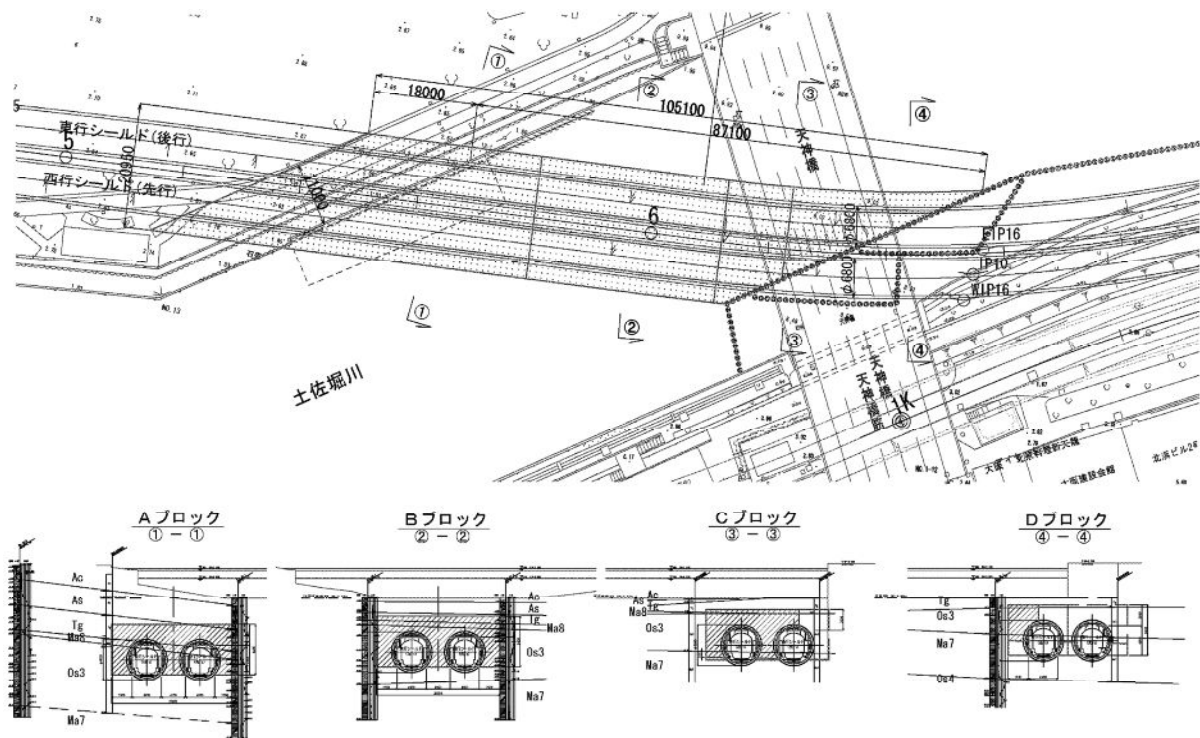


写真-1 河川防護工全景

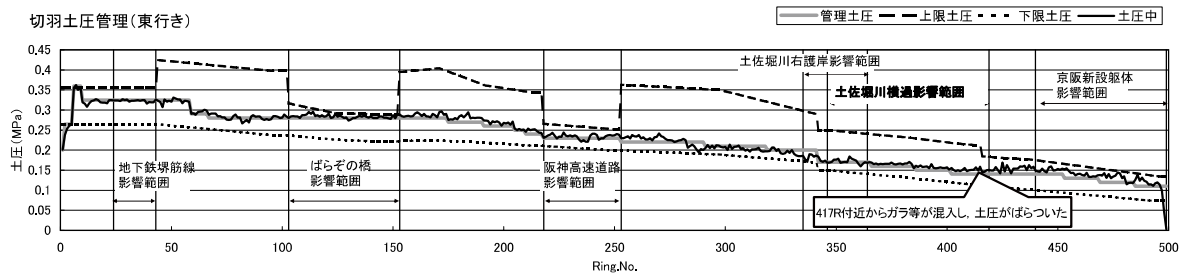
4-2 シールド掘進管理結果

河川防護工の施工を終え、平成 19 年 3 月からシールドの掘進を始めた。河川横断部のシールドの掘進に関しては以下の結果が得られた。図-13～14 に先行トンネルの管理グラフを示す。

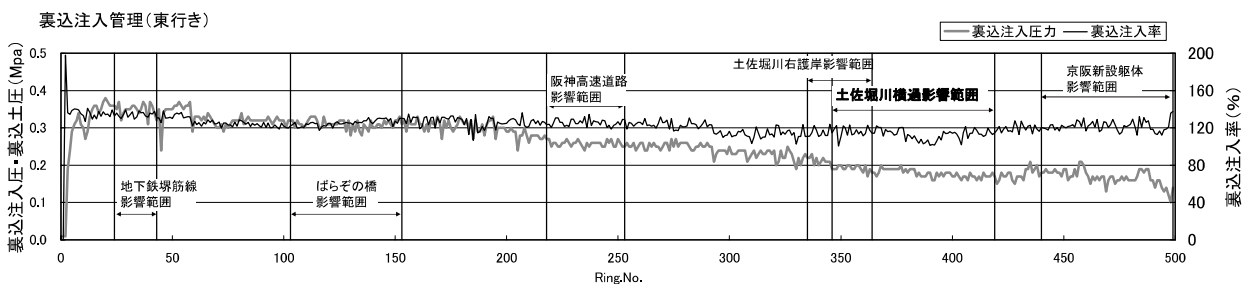
- ① 切羽管理土圧（図-13）：河川横断部における管理土圧は、上限値を「水圧+0.1 MPa（100 kN/m²）」、下限値を「村山の式による土圧+水圧+0.02 MPa（20 kN/m²）」として計画をした。ただし、河川横断部掘進区間への進入に際しては、河川内への加泥材の噴出の恐れは少ないと考えられたが、大きな圧力がかかることを避けるため、下限値+0.03 MPa（30 kN/m²）程度を切羽管理土圧値とした。その結果、概ね設定通りの切羽圧で管理できた。ただし、417 リングから旧護岸のコンクリートガラが混入し、若干ではあるが切羽圧力にばらつきがでた。毎リング掘削終了後にスクリーコンベヤ直後にある P₀ ポンプホッパの清掃を行い、影響を最小限とした。
- ② 裏込注入工（図-14）：裏込注入材は、エア系材料とした。河川横断部の圧力上限設定値として「水圧+0.1 MPa」とし、掘進管理データをもとに見直しを行うこととした。河川横断部では、補助工法があったため注入率は 100～120%程度と小さめであった。
- ③ 掘削土量：流量計とγ線密度計で計測した結果、同一土質に対しては過去 10 リング平均の±5%以内で施工できた。
- ④ その他：土佐堀川右岸・左岸護岸の変位計測を行ったが、変状は小さく、施工を終えた。



図一12 河川防護工全体図



図一13 切羽土圧の管理実績 (先行トンネル)



図一14 裏込め注入工の管理実績 (先行トンネル)

§ 5. おわりに

本工事は、低土被りでの河川横断、複雑に変化する土層におけるシールド掘進、各種重要構造物との近接施工など厳しい施工条件下での工事であった。しかし、本稿で述べたように、各種検討・掘進管理を実施したことにより、河川横断部の河床などに対しての影響を抑え、無事に到達することができた。

最後に、本工事を施工するにあたり貴重な指導助言をいただいた各位に深く感謝の意を表するとともに、本稿が同種工事の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 長瀧元紀, 泉谷 透, 平手 知, 神谷拓生: 複雑に変化する土層におけるシールド掘進管理, トンネルと地下, 451号, Vol. 39, No. 3, pp. 31-37, 2008.