

初期掘進開始直後における小土被り条件での 鉄道横断シールド工事での取り組みについて

上野 敏光¹・春元 崇志²

¹(株)大林組 大阪本店 要玄寺川シールド工事事務所 (〒540-8586 神戸市東灘区本山中町1-5-44)

²神戸市 建設局 道路部工務課 (〒650-8570 神戸市中央区加納町6-5-1) .

本工事ではシールドが発進して約25m地点よりJR主要幹線の軌道下を横断施工した。この区間では初期掘進中の設備状態での施工であり、土被りも1.8Dと小さいことから、適正管理値の把握を目的として事前に1箇所計測管理を行った。ここでの変位量が軌道管理値を超える結果となったことから、JR軌道敷までの残りの区間において計測点を追加設置して再度簡易トライアル計測を行い、小土被り条件での各種管理項目の設定値の見直しとそれらの妥当性の検証を行った。これらの設定管理値にて軌道下の横断施工を行うことにより、営業線軌道へ影響を与えることなく僅か4日半で施工を無事に完了することができた。

キーワード 泥土圧シールド、鉄道横断、初期掘進、小土被り、トライアル計測

1. はじめに

要玄寺川放水路築造工事は、神戸市が市街地での水害対策として推進している治水事業で、急峻な六甲山系の麓に位置する東灘区の高橋川水系要玄寺川へのゲリラ豪雨による河川の氾濫災害防止を目的としている。早期の河川整備実現のため、国・県・政令市の三者が事業主体となった補助金事業であり、発注者は神戸市である。

本論文は、シールド工事のうち、発進直後かつ小土被りと最も厳しい条件であった JR 神戸線の横断における軌道への影響低減の取り組みとその結果について報告する。

2. 工事概要

(1)全体工事概要

本工事は、シールドトンネル（マシン外径φ2.46m）による349mの円形放水路と開削トンネルによる99mの矩形放水路（内空2.5m×2.5m）及び放水路上部の沈砂池躯体を築造するものである。本工事の全体概要を図-1の平面縦断図に示す。当該シールド工事の特徴として、掘削延長は短い、厳しい平面・縦断線形を有していることとJR神戸線・阪急電鉄及び主要幹線道路の山手幹線の3つの重要構造物の横断施工があった。

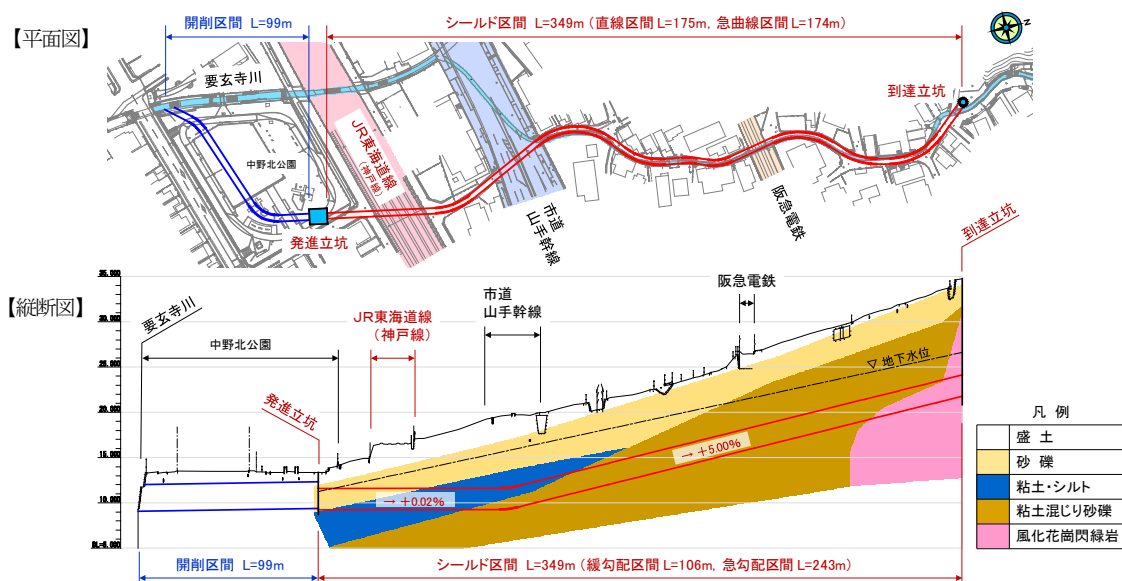


図-1 全体工事概要図

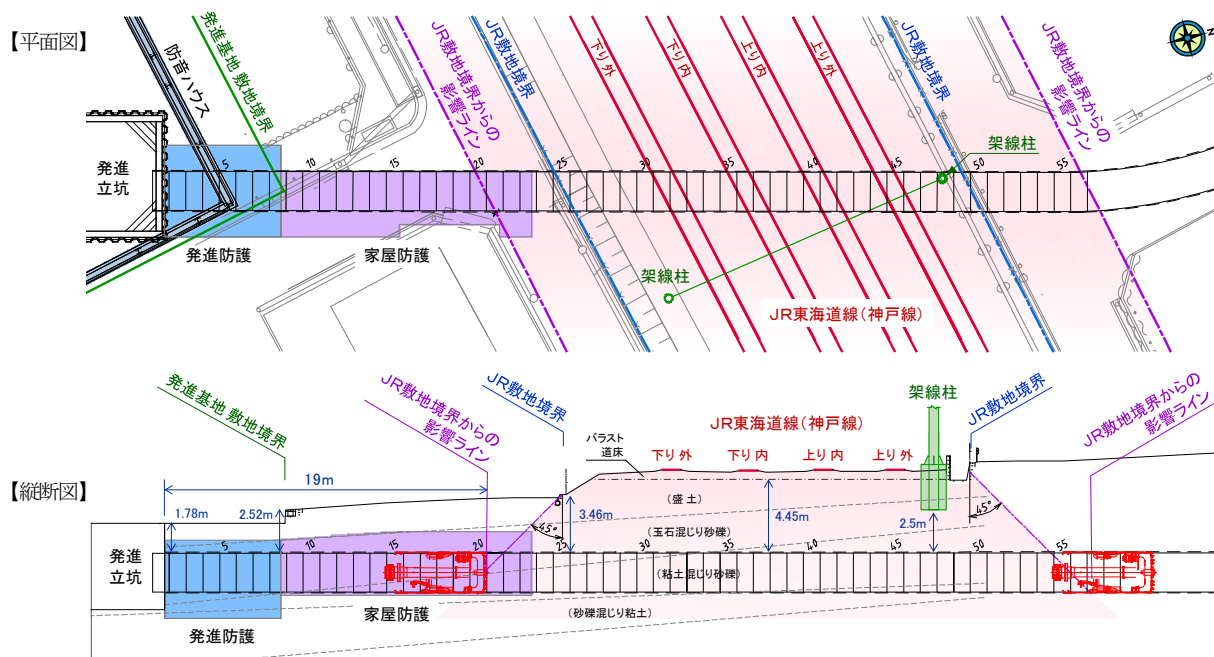


図-2 JR神戸線横断面部 概要図（平面・縦断面図）

(2) JR神戸線横断面部の概要

3箇所の重要構造物横断の中でもJR神戸線横断は特に厳しい条件であった。図-2にその概要を示す。JR影響範囲までの掘進距離は、発進後わずか19mしかなく、その後の約40mの掘削がJR横断影響区間であった。また、JR敷地内の終端部には信号機を共架した架線柱（鉛直離隔2.5m）があり、この真下を通過しなければならなかった。軌道数は4軌間（上り線×2、下り線×2）で、旅客営業・貨物線営業を合わせ多くの列車が運行する線路であった。また、この区間の軌道構造はバラスト道床であった。JR横断部の土被りは、バラスト道床厚を控除した有効土被りで4.45m（1.8D）であり、その手前の発進立坑からJR敷地境界まではさらに被りが小さく、1.78m（0.7D）～3.46m（1.4D）であった。土質構成は表-1のとおりで砂礫系の地盤であった。

表-1 JR横断部の土質構成

土 層	土 質 概 要
盛 土	含水は中位、N=8、暗黄～暗灰色
玉石混じり砂礫	沖積礫質土層に該当、含水が中～高位、N=12～48、暗緑灰～暗灰色
粘土混じり砂礫	含水は低～中位、N=16～17、黒灰～暗灰～暗青灰色
砂礫混じり粘土	含水は中位、N=28、黒灰

3. JR横断施工における技術的課題

(1) 土質・立地条件による課題

上述したような小土被り条件であるだけでなく、この初期掘進中の非常に短い区間において、軌道に影響を与えない掘進管理方法（管理項目および管理値）を確立する必要があった。しかし、発進からJR敷地までの区間については、発進坑口部にシールド機長+1mの発進防護、その後の15m区間には隣接家屋防護を目的とした地盤改良（薬液注入）を施工しており、JR敷地境界部に達するまでは、ほぼ改良地盤内の掘進となっていた。それ故、ここでの管理結果をJR軌道下での掘進に直接反映することに懸念が残っていた。また、砂礫層掘進に対して、シールド通過前から通過後に至る各段階において地盤変位を抑制する対策を検討・実施する必要があった。その他、土被り部の土質が盛土層・玉石混じり砂礫層であることから、添加材の逸走・地表面への噴出を防止することも重要であった。

(2) JR営業線の制約及び協議上の課題

JR営業線については、旅客運送に関わる安全性の確保から軌道変位量に関し、一次管理値（要注意判定）が±2mm以内、二次管理値（作業停止判定）が±4mm以内と厳しい管理基準値が設定されていた。

更に施工時間帯に関しても、通常の条件と異なっていた。一般的に鉄道横断施工の作業時間としては、運行時間外（線路閉鎖中）を選択するケースが多いが、発注者とJRの事前協議において、本線路における夜間閉鎖時間は1日2.5時間程度と短く、約40mの影響区間に対して線路閉鎖中のみの施工では長期間の横断施工となるため、期間短縮による影響リスク低減の観点から「昼夜間施工」が採用され、短期間で影響範囲を通過することが入札時の技術提案でも課題として求められていた。

表-2 課題解決のための対策

目 的		実施項目	実施内容
地表面変位 抑 制	切 羽	トライアル計測の実施	J R 横断前に、実地盤における地中および地表面の変位を計測し、掘進管理項目・管理値の設定・補正に反映する。
	通過中	余掘り充填材の採用	掘進中、シールド外周の余掘り部に充填材を注入し、シールド通過中の地山のゆるみを防止する。
	通過後	裏込め注入孔位置の変更	セグメントの裏込め注入孔を通常より坑口側へ150mmずらし、掘進開始と同時に速やかに注入できるようにする。
		高強度裏込め材の採用	1時間強度が通常の約10倍となる裏込め配合とし、セグメント外周の早期安定を図る。
施工時間短縮		ロータリーポンプの採用	ポンプ圧送により掘削土砂を連続的に排土することで、掘進サイクルの向上を図る。

4. 技術的課題解決のための取り組み

(1) 地盤変位抑制及び時間短縮のための解決策

JR軌道横断における2つの大きな課題（地盤変位の抑制及び横断施工時間の短縮）を解決するため取った対策を表-2に示す。

(2) 各種管理値の設定

上述の沈下抑制項目と最も密接な関係にある管理項目（切羽圧、余掘り充填材量、裏込め注入圧と注入量）の設定値とその設定根拠を表-3に示す。これらの採用に当っては、トンネル標準施工方書や近隣類似条件での施工実績を引用した。

表-3 各管理値と設定根拠

管理項目	設定値	設 定 根 拠
切羽圧	60 kPa	有効静止土圧(土水分離) + 地下水圧 + 予備圧 (20 kPa)
余掘り充填材	120 L/リンク	理論上のオーバーカット相当量
裏込め注入圧	140 kPa	有効静止土圧(土水分離) + 地下水圧 + 100 kPa
裏込め注入量	530 L/リンク	テールボイド量×100%以上 (高橋川施工実績)

(3) トライアル計測による施工管理方法の検証

上述の各種管理値を目標にして初期掘進を開始した。まず、自動トライアル計測によって掘進中の地盤変位を

計測し、各管理項目の設定管理値や使用材料、施工方法の妥当性を検証した。図-3にトライアル計測の詳細を示す。なお、自動計測ポイントは1箇所のみであるが、後から追加設置した簡易計測ポイントも併記した。

シールド通過前後における地盤変位の計測結果を図-4に示す。切羽（シールド先端）が計測位置を通過する2.5m（2.5リング分）手前の時点から沈下傾向が見られはじめ、通過前0.5mの時点でJR軌道の二次管理基準値（±4mm）を大きく超える8mm以上の沈下が計測された。その後もシールド通過に伴い沈下は進行し、シールドテールが通過して裏込め注入を行うまで、最大約20mmの沈下が発生した。そこで、掘進を一時中断して各施工管理値の見直し、および使用材料・施工方法の変更について検討することとした。

a) 切羽圧の管理

沈下は切羽通過前から発生しており、特に通過直前で

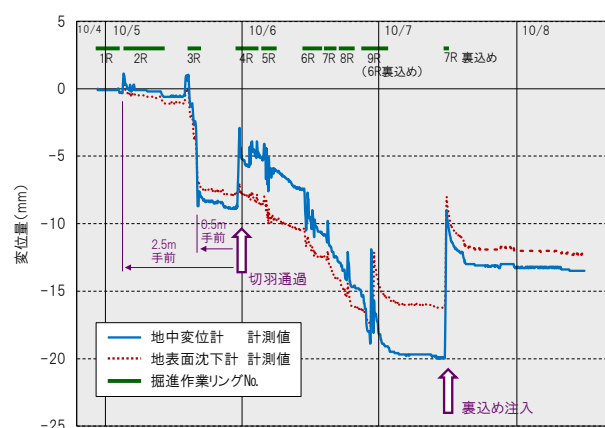


図-4 自動トライアル計測結果（地盤変位量）

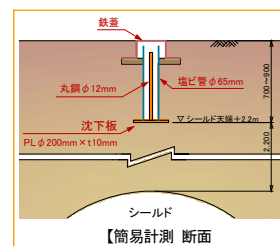
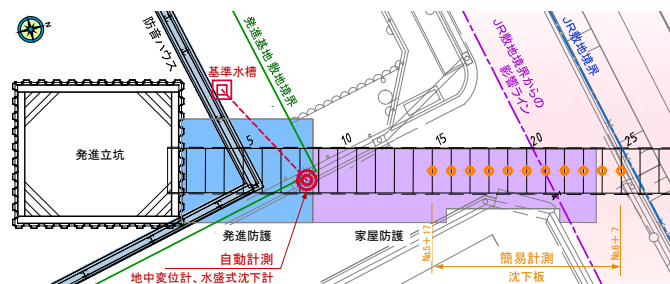
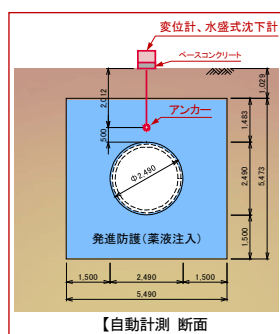


図-3 トライアル計測

その沈下量が大きくなっている。そこで、まず管理切羽圧の設定値を見直すこととした。土被りがID前後と小さいことを勘案し、近年の泥土圧・小土被り施工の実績として近年の泥土圧・小土被り施工の実績（大林組：URUP工法）での管理手法を参考に、考慮する土圧を「有効静止土圧」から「全土被り圧」に変更した。また、上限値と下限値を設定し、この範囲内で切羽圧を制御・管理することとした（表-4）。

表-4 切羽管理圧の改善

項 目	当初計画	変 更
切 羽 圧 設定管理値	60 kPa	(上限) 120 kPa (下限) 100 kPa
設定根拠	有効静止土圧 + 地下水压 + 予備圧	(上限) 下限値 + 20 kPa (下限) 全土被り圧 + 地下水压 + 予備圧

b) 加泥材の管理

上記a)にて管理切羽圧が大きくなることに伴い、粘性の小さい従来のベントナイト系加泥材では、加泥材が地盤中を逸走し地上へ噴出することが懸念された。そこで、従来の配合に対して高分子系材料を添加し、粘性抵抗を付与することで地盤中の逸走・地上への噴出を防止することとした（表-5）。

表-5 加泥材の改善

項 目	当初計画	変 更
配 合 (1m ³ 当り)	A 液	助材V 70 kg 水 973 kg
	B 液	—
性 状	変化時間	—
	粘 性	100cp

c) 余掘り充填材の管理

シールド通過時においても沈下が進行していることから、余掘り充填材の性状（粘性、ゲルタイム）について改善を検討した。試験練りにより複数の材料・配合を比較検討し、当初の材料よりもゲルタイムが短く粘性が大きい「クレーショック」を採用することとした（表-6）。

表-6 余掘り充填材の改善

項 目	当初計画	比較案 ①	比較案 ②	変 更 (クレーショック)
配 合 (1m ³ 当り)	A 液	助材V 100 kg 水 860 kg	助材V 91 kg 水 873 kg	クニゲルFS 200 kg 水 823 kg
	B 液	SP-70 100 ℓ	消石灰 27 kg シャロー 1.1 kg 水 91 kg	SP-70 100 ℓ
性 状	ゲルタイム	60秒	8 秒	34 秒
	粘 性	1,000cp	15,000 cp	40,000 cp

表-7 裏込め注入圧・注入量の改善

項 目	当初計画	変 更
裏込め 注入圧	管理値	140 kPa
	根 拠	有効静止土圧 + 地下水压 + 100 kPa
裏込め 注入量	管理値	530 L/リング
	根 拠	設計テールボイド量 × 100%

d) 裏込め注入の管理

前記a)の管理切羽圧増加に伴い、裏込め注入圧の管理値を「全土被り圧+地下水压+100 kPa」に変更した。また、注入量については、近隣で同種の地盤を掘進した「高橋川放水路築造工事（第5工区）」の実績をもとに「設計テールボイド量×100% 以上」と設定していたが、砂礫地盤で一般的な「設計テールボイド量×130% 以上」に変更し、地表面変位および地上への裏込め材噴出の有無を監視しながら管理することとした（表-7）。

e) 排土方法の変更

当初採用したロータリーポンプでは掘進中に排出される礫により閉塞が頻発したため、切羽圧を安定的に保持できず、復旧作業にも時間を要した。そこで、JR横断を含む初期掘進区間については、従来どおりの「ベルトコンベア+ブリー鋼車」方式に変更し、スクリュウゲートから立坑下までベルトコンベアを連結して接続排土する方法を採用し、確実かつ安定した排土による切羽安定および施工サイクルの確保を図った。

(4) 追加簡易トライアル計測による再検証

見直した管理方法・設定管理値に基づき掘進を再開し、追加設置した簡易トライアル計測区間(図-3参照)において地盤変位を計測して、各設定管理値の妥当性を再度検証した。変位計測は人為レベル測量により行い、シールド中心線上に設置した沈下板の高さを掘進中5分間隔で計測した。なお、沈下板の設置深さは、既設舗装・路盤の厚さとともにJR敷地内の終端部に存在する架線柱との離隔を勘案し、通過するシールド天端から鉛直離隔で約2.2mの位置に設置した。

表-8 管理値の改善経過

項 目		当初計画	自動トライアル計測 による検証	簡易トライアル計測 による再検証
管理切羽圧		60 kPa	100～120 kPa	同 左
加泥材	注入量	500 L/リング [*] (10%)	同 左	500～750 L/リング [*] (10～15%)
余掘り充填材	注入量	120 L/リング [*]	同 左	60 L/リング [*]
裏込め 注 入	注入圧	140 kPa	180 kPa	150 kPa
	注入量	530 L/リング [*] (100%)	690 L/リング [*] (130%)	600 L/リング [*] (115%)

この簡易計測区間の掘進中、余掘り充填材については、注入に伴いシールドの姿勢制御に影響を及ぼす傾向が見られたため、途中から注入量を当初計画の50%に変更した。裏込め注入については、見直した注入圧・注入量での管理では注入後地盤が隆起する傾向が見られたため、地盤変位量を確認しながら段階的に設定値を補正し、最終的に注入圧を「150 kPa (全土被り圧+地下水圧+70 kPa)」、注入量を「設計テールボイド量×115%」とした。また、簡易計測区間の終盤では発進防護・家屋防護区間を抜け未改良地盤を掘進したが、それまでの改良地盤に比べ掘削土の塑性流動性の低下が確認されたため、加泥材の注入量を増やすことにより塑性流動性の向上・切羽の安定を図った (表-8)。

その結果、最終的に地表面変位を±2mm以内に抑制することができた。

5. JR軌道横断施工

(1) 軌道管理方法

上記成果をもとに発注者・JRと三者協議を行い、管理項目・管理値について承諾を得るとともに、横断施工時の軌道管理方法を決定した。協議ではJR側からの協力も得ることができ、横断施工時は営業線の運行管理に支障のない範囲で列車運行速度を低減する徐行措置が取られた。例えば、新快速電車は通常の120 km/hから80 km/hへ減速運転を行うことで、列車通過時の衝撃荷重を大幅に低減できた。軌道計測は、トータルステーションによる三次元測定システム (マンモス測量) にて、レール側面に貼り付けたターゲットを常時計測することとした (図-5)。この計測結果が一次管理値 (±2mm) を超えた時点で、保線業者が軌道内に入って糸張り検測し、必要に応じてバラスト突固め等の保線作業を行う計画とした。

(2) 施工結果

JR 横断時の掘進進捗および軌道変位量の結果を表-9 に示す。進捗は概ね 4～5 リング/方を確保でき、シールドテールが影響範囲を通過するまで延べ5日間で横断を完了した。シールド通過前および通過中における軌道の変位はほとんど発生しておらず、加泥材や余掘り充填材、

裏込め材の地表面への噴出等も見られなかった。通過後、一部において一次管理値を超える結果 (-2.8mm) となっているが、保線業者による 10m 弦による糸張り検測を実施した結果、実際の軌道変位量は 1mm 未満であり、保線作業は行われなかった。また、横断施工後の事後計測 (JR 委託工事として別業者が実施) においても、営業線軌道および架線柱の変位はほとんど観測されなかった。

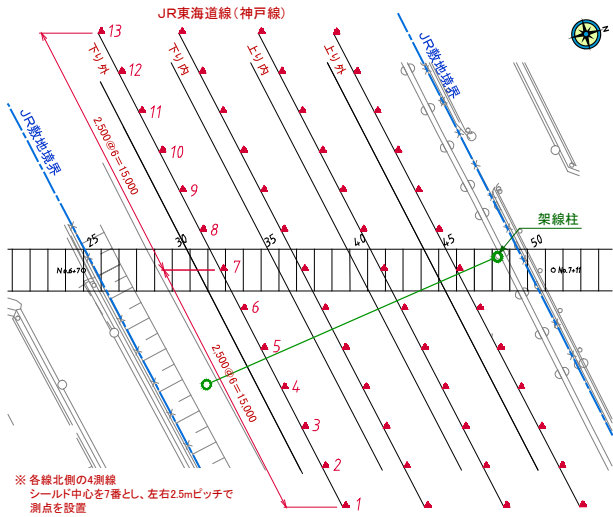


図-5 JR軌道計測位置

表-9 JR横断施工結果 (進捗および軌道変位)

施 工 日		12/5 (月)		12/6 (火)		12/7 (水)		12/8 (木)		12/9 (金)	
		昼	夜	昼	夜	昼	夜	昼	夜	昼	夜
施工リング数		5 R	4 R	4 R	4 R	5 R	4 R	4 R	4 R	2 R	3 R
シールド先端位置		敷地境界	下り外線	下り内線	上り内線	上り外線	架線柱				
シールドテール位置				下り外線	下り内線	上り内線	上り外線	架線柱			影響境界
軌道 変位 計測 結果 (mm)	下り外線	-	0	-1	-2	-2.7	-2.5	-2.6	-2.8	-2.5	-2
	下り内線	-	-	0	-1	-1.7	-1.5	-1.4	-1.8	-1.4	-0.8
	上り内線	-	-	-	0	-1.3	-1.2	-1.5	-1.3	-1.5	-0.9
	上り外線	-	-	-	-	-0.5	-0.8	-1.4	-1.9	-1.8	-1
	架線柱	-	-	-	-	-	-0.5	-1.4	-1.1	-1.2	-0.9

6. まとめ

シールド初期掘進中かつ小土被りという厳しい条件下でのJR横断施工であったが、トライアル計測によって実際の施工条件に適合した管理項目・管理値の見直しを行うことで、営業線軌道へ影響を与えることなく施工を完了することができた。