

# 地下鉄営業線直上における開削トンネル工事に関する報告

## The Report of The Construction Cut & Cover Tunnel Just above The Railway Tunnel Under Operation

鳥取 一雄\*

Kazuo Tottori

中桐 秀雄\*\*

Hideo Nakagiri

### 要 約

地下鉄営業線トンネル（ボックスカルバート）直上を開削工法により掘削・構築するトンネル工事において、掘削に伴う地盤のリバウンドによる地下鉄営業線トンネルへの影響が懸念された。当該工事においては、予測変位値を基にした各施工ステップにおける施工管理値を設定した後、計測変位値を基にして、適宜、対策工を見直す観測施工を実施した。さらに、土留め壁欠損部に実施した地盤改良工施工時に地下鉄営業線トンネルへ与える影響を極力小さくするため、厳重な施工管理を行った。本書は、当該工事における観測施工および施工管理手法について報告するものである。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 施工上の課題および事前対策工
- § 4. 実施工におけるリバウンド対策
- § 5. おわりに

### § 1. はじめに

本工事は、阪神高速道路神戸山手線のうち、延長154.3 mのボックスカルバート（以後、新設躯体と称す）を開削工法により築造するものである。工事箇所には神戸市営地下鉄トンネル（以後、既設営業線躯体と称す）が床付けレベルより約70 cm直下に交差しており、掘削に伴う既設営業線躯体への影響が懸念された。

対策工として、施工基盤面の盤下げ、土留め壁締切り内部の地下水位低下、欠損防護工（地盤改良工）の施工順序の見直し、部分掘削・構築の実施および上載荷重の部分載荷等を行い、施工に伴う既設営業線躯体への影響を低減させた。また、既設営業線躯体内には計測機器を設置し、変状計測を行いながら施工を進めている。

### § 2. 工事概要

#### 2-1 工事概要

工事内容を以下に示す。

工 事 名：新湊川第2工区（その3）開削トンネル工事

発 注 者：阪神高速道路株式会社

工事場所：神戸市長田区神楽町付近

工 期：平成17年10月1日～平成22年4月30日

施工延長：154.3 m

工事内容：

- ・路面覆工：3,433.3 m<sup>2</sup>
- ・開削土工：37,388 m<sup>3</sup>
- ・函体工：10,420.2 m<sup>3</sup>
- ・薬液注入工：112本（331.8 m<sup>3</sup>）
- ・連続地中壁工（柱列式 ECW）：8,105.7 壁 m<sup>2</sup>
- ・地下水位低下工：リリーフウェル 2 本
- ・計測工：1 式 他

#### 2-2 地形・地質概要

当該工事箇所の東側には、新設躯体と平行して新湊川が流れており、護岸および橋台が近接している。

地質としては、沖積粘性土 Ac が介在しているが、GL-21 m 付近までは洪積砂礫 Dg（N 値 30～50）が主体であり、GL-21 m 以深に連続した洪積粘性土 Dc1（層厚 2.0 m）が存在している。地下水位は GL-4.1 m 程度であり、掘削に伴う盤ぶくれ対策として、土留め壁先端を Dc1 に根入れさせている。

#### 2-3 計測概要

既設営業線躯体内部に水盛式沈下計、傾斜計、及び温度計を設置し、最寄りの新長田駅に設置したパソコンを通して、現場事務所のパソコンでリアルタイムに既設営業線の変状を計測している（図-1～3、表-1）。

\* 関西（支）新湊川（出）

\*\* 土木設計部設計課

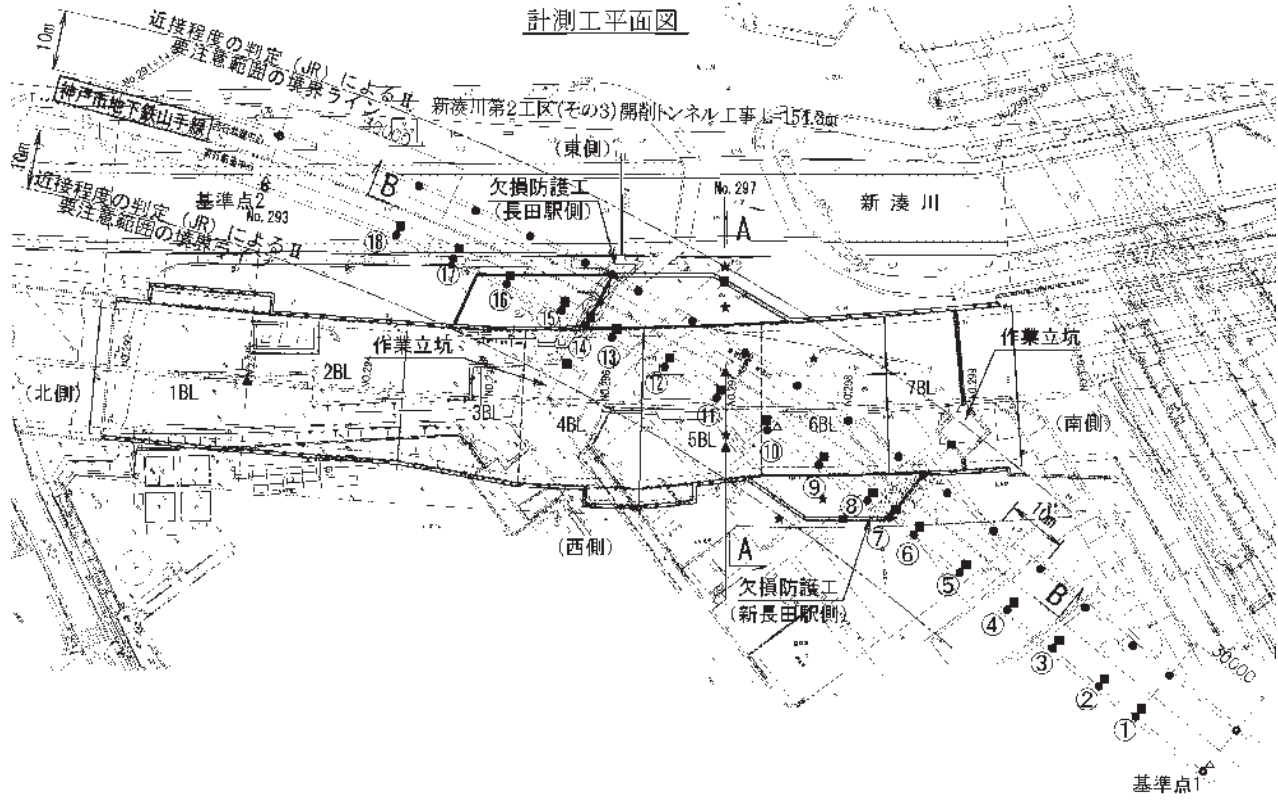


図-1 平面図

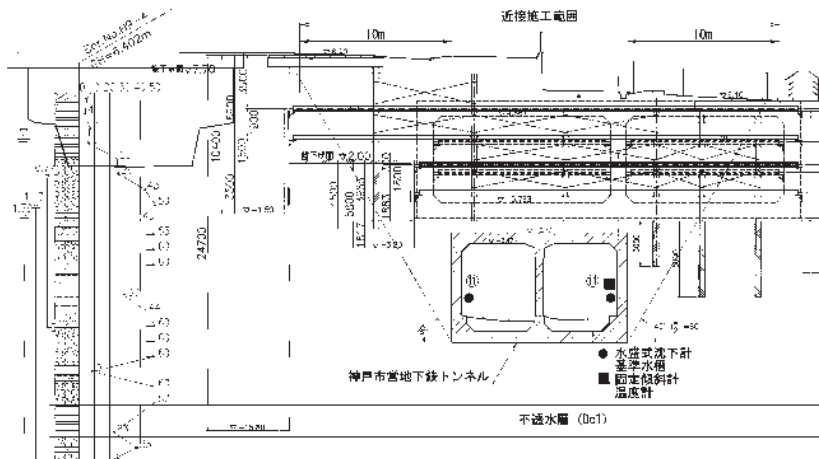


図-2 A-A断面図 (近接施工範囲)

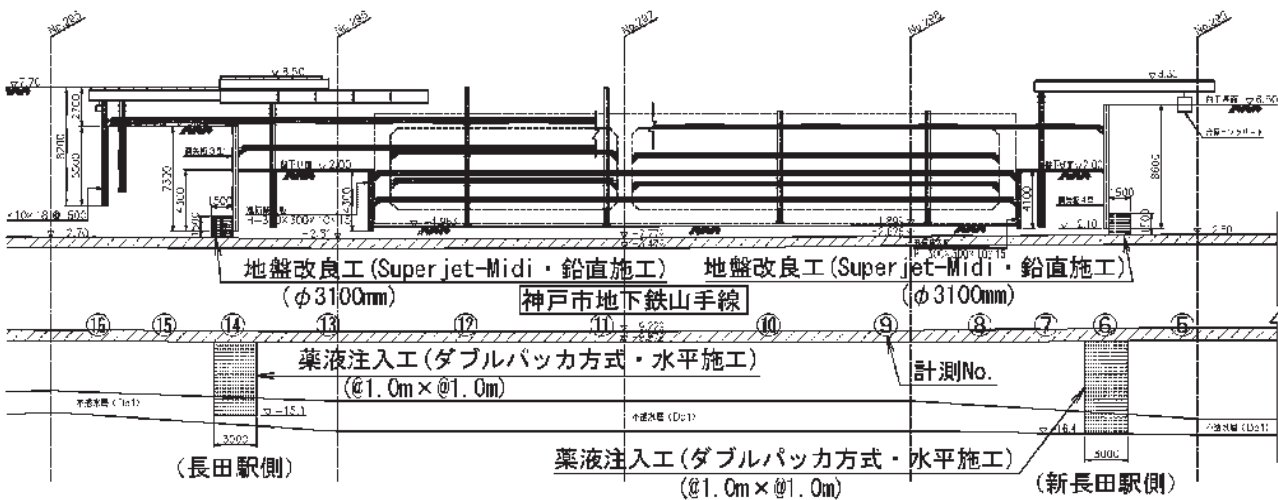


図-3 B-B縦断面図

表-1 計測機器一覧表

対象	計測項目	計測器	記号	計測器配置	個数
土留打設 (No.293)	掘削地盤	変位計	▲	1ヶ所3深度	3
	鉛直変位				
土留打設 (No.297)	壁体水平変位	多段式傾斜計	■	深度方向に2mピッチ	8
	掘削地盤鉛直変位	変位計	▲		4
	掘削地盤被圧水位	水圧計	★		3
	周辺地盤被圧水位	水圧計	★		1
土留打設 (No.298付近)	壁体水平変位	多段式傾斜計	■	深度方向に2mピッチ	7
	掘削地盤被圧水位	水圧計	★		3
	周辺地盤被圧水位	水圧計	★		1
対象	計測項目	計測器	記号	計測器配置	個数
北側立坑	壁体水平変位	挿入式傾斜計	■	1ヶ所	1
	南側立坑	壁体水平変位	挿入式傾斜計	■	1ヶ所
地下鉄構造物	沈下	水盛式沈下計	●	上下線10mピッチに配置	36(18×2)
	基準点	基準水槽	◎	施工影響範囲外に設置	4(2+2)
	傾斜	固定傾斜計	■	10mピッチに配置	18
	温度	温度計	△	基準点および中央	3

§3. 施工上の課題および事前対策工

3-1 施工順序

(1) 施工区分

① 一般部と近接施工部

新設躯体は7ブロックに分割されており、新設躯体直下に既設営業線躯体が存在しているため、一般部(1~



写真-1 ECW工法施工全景写真



写真-2 ECW工法先端部写真

3 BL)と近接施工部(4~7 BL)に区分して施工協議等を行っている。近接施工部は、既設営業線躯体下端からの主働崩壊角線で囲まれた範囲(=既設営業線躯体側壁から10mの範囲)としている(図-1)。なお、近接施工協議の関係より一般部を先行施工し、近接施工部の施工に着手したのは一般部の施工開始より6ヶ月後であった。

② 施工順序

施工箇所中央付近には神戸市道が交差しており、その交通を確保しながらの施工となるため、迂回路を切り回しながら、土留め壁工(ECW工法、他)、中間杭工、地盤改良工の施工を行う必要があった。工程、重機の配置等を考慮して、北側ヤードに路面覆工を設置した後、迂回路を北側に切替えて、南側ヤードの土留め壁工、中間杭工、地盤改良工の施工を行った。なお、掘削・土留め支保工に関しては、土留め壁の欠損防護工が完了した時点で施工を行った。

(2) 欠損防護工の施工順序

欠損防護工は2箇所(長田駅側、新長田駅側)存在しており、長田駅側から施工を行った。施工順序として、既設営業線躯体上部および側部は、地上から鉛直施工により地盤改良を行い、既設営業線躯体下部は、近接に作業立坑を設けて、作業立坑内から水平施工により地盤改良を行った。

3-2 課題

施工協議において、下記事項を考慮した各施工ステップにおける施工管理値を設定する必要があった。

- (1) 既設営業線躯体の継手構造を『剛結合』と評価
- (2) 欠損防護工(地盤改良工)が既設営業線躯体へ与える影響

3-3 事前対策工

(1) 各施工ステップにおける施工管理値

各施工ステップにおける既設営業線躯体の許容変位量をFEM逐次解析より算出した。施工協議の結果、長期許容変位量を3次管理値、同値の80%を2次管理値、50%を1次管理値に設定し、既設営業線躯体RC構造の降伏時から算出される許容変位量の80%を限界管理値に設定した。

各施工ステップにおける施工管理は2次管理値以内で行い、2次管理値を超えた場合は関連工事の一旦中止、対応策の実施を行う。3次管理値を超えた場合は関連工事の中止、抜本的対応策の実施を行う。限界管理値を超えた場合は、電車運行停止を行うこととなった。

(2) 欠損防護工(地盤改良工)の影響評価

① 既往工事の実績調査

阪神高速道路(株)における同様の工事実績調査を行った。類似工事の報告書によると、事前検討として、取り壊し予定のある営業線ではない躯体に試験注入を実施し、注入圧と躯体変状の相関関係を把握した後、FEM逐次解析

を行い施工管理値を設定していた。

② 当該工事における地盤改良工施工時の施工管理値

当該工事では、試験注入を実施することが可能な躯体が存在しないため、注入圧と躯体変状の相関関係を把握することができなかった。

そこで、2箇所存在する欠損防護工のうち、最初に施工する長田駅側に関しては、既設営業線躯体の縦断方向の長期許容曲げ耐力より曲率 ( $\phi = My/E \cdot I$ ) を推定し許容相対変位量 ( $\delta a = 2.4 \text{ mm}/10 \text{ m}$ ) を算出して、施工管理値を設定した。

後日施工する新長田駅側に関しては、長田駅側での施工実績（注入圧と躯体変状の関係等）を考慮して、FEM 逐次解析を行い、各施工ステップにおける施工管理値を設定することとした。

(3) 事前対策工

既設営業線躯体の変状（リバウンド）対策は、原設計思想と同様に①施工基面の盤下げ、②土留め壁締切り内部の地下水位低下を基本思想とした。図-4 に長田駅側の施工実績をフィードバックした FEM 逐次解析の結果、表-2 に当該工事における新長田側施工時からの各施工ステップにおける施工管理値を示す。

表-2 施工管理値 (単位: mm)

施工ステップ	1次管理値	2次管理値	3次管理値
1次掘削	2.9	4.6	5.7
2次掘削	3.2	5.0	6.3
3次掘削	3.7	5.9	7.4
4次掘削	3.6	5.8	7.2
掘削完了時	3.1	4.9	6.1

§ 4. 実施工におけるリバウンド対策

4-1 欠損防護工施工時

(1) 長田駅側

① 施工順序・時期

図-5 に示すように、既設営業線躯体上部を高圧噴射

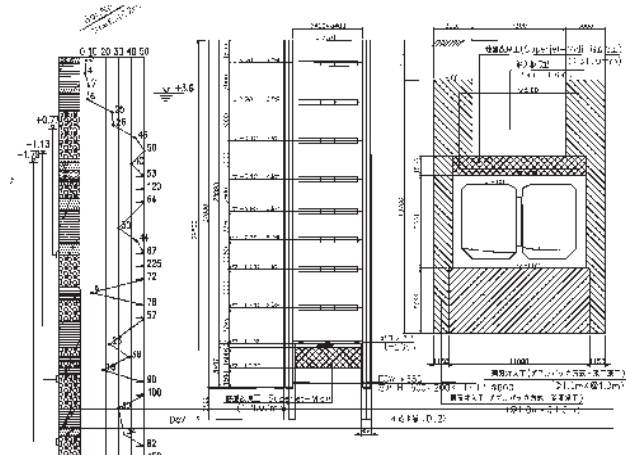


図-5 欠損防護工断面と作業立坑

攪拌工法（SJM 工法）で施工し、側部を薬液注入工法（二重管ダブルパッカー方式）で地上から鉛直方向に施工した。その後、下部を薬液注入工法（二重管ダブルパッカー方式）で作業立坑から水平方向に施工した。

施工は、施工箇所が既設営業線躯体周りとなるため、き電停止後の夜間施工で行った。

② 計測管理・立会い

既設営業線躯体の変状をリアルタイムで確認するため、現場注入プラント内にパソコンを配置し、変状を確認しながら注意深く施工を行った。施工時は、各関係機関およびJV 担当者が、既設営業線躯体内部に立ち入り、躯体内部への薬液の流入や内部構造の異常の有無を確認した。

③ 既設営業線躯体の変状

a. 上部地盤改良（SJM 工法）施工時

止水目的から、上部地盤改良は、既設営業線躯体頂版に接した未改良部分のない改良体を造成する必要がある。通常の水平方向のノズルでは、噴射孔からノズル先端までの間に未改良層が形成され、止水目的を成さない可能性がある。そのため、斜めの噴射ノズル（図-6）を使用して、頂版に接した改良体を造成する施工計画と

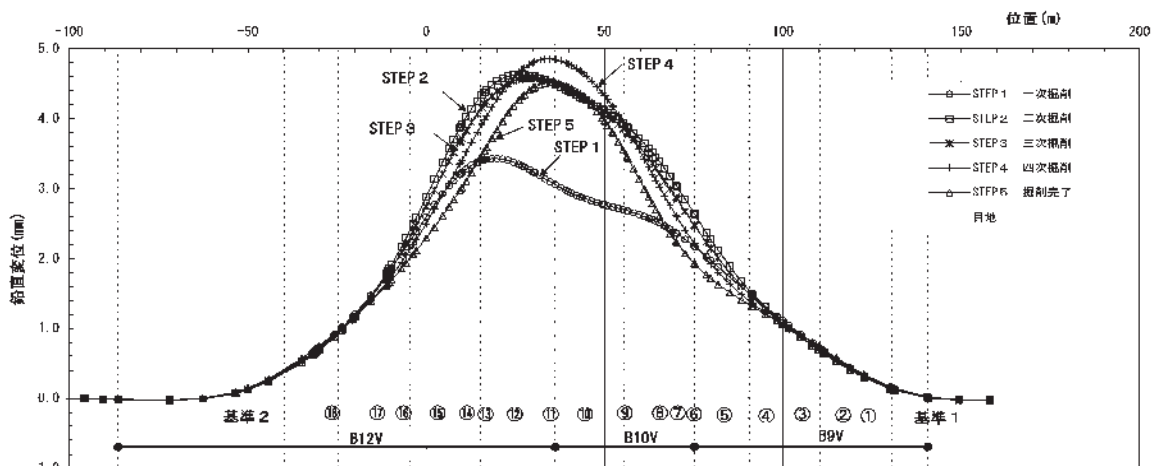
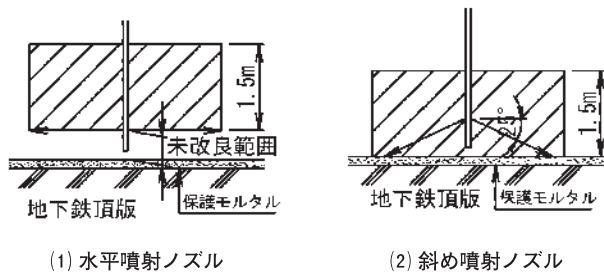


図-4 FEM 逐次解析結果（長田駅側の薬注施工実績をフィードバック）



図一六 斜め噴射ノズル

した。また、図面上において頂版防水層に保護コンクリートがあることを確認していたが、防水層を損傷しないように留意して施工管理を行った。

なお、改良体造成時には計測値に異常はなく、躯体内部への削孔水、セメントスラリーの流入はなかった。

#### b. 側部地盤改良（薬液注入工法）施工時

注入範囲下端から既設営業線躯体の底版下端付近まで、吐出量を毎分8リットルで施工したところ、既設営業線躯体が1.2mm隆起した。底版下端以深の側部施工に関しては注入圧を低減させるため、吐出量を毎分6リットルに下げた施工を行い、2セットで行っている注入作業が底版下端以深に集中しないように、施工順序を調整した。施工管理においては定量管理を原則としたが、注入圧については、1次注入では1.5MPa、2次注入では0.7MPaを上限として、注入圧力管理を併用し、注入圧の高い状態が続いた場合、同時施工のセット数を一旦減らし、注入圧および計測値を監視しながら施工した。その結果、既設営業線躯体の隆起量は1.2mmで収まった。

#### c. 下部地盤改良（薬液注入工法）施工時

側部における薬注施工実績を踏まえ、下部も吐出量を毎分6リットルで施工を行った（2セット）。注入順序としては、既設営業線躯体に近い孔から順番に横方向へ施工した。

1次注入が7割程度完了した時点で、既設営業線躯体の隆起量が一時的に3.1mmとなったため、施工を一時中断し、注入仕様等の見直しを行った。以下に記述する対策工を実施した結果、地盤改良工の施工が完了した時点における既設営業線躯体の隆起量は最終的に2.4mmで収まった。

#### 【対策工】

##### 1) 使用材料の変更

既設営業線躯体の変位を抑えるため、残りの1次注入材料を標準のCBから溶液型に変更した。本来、ダブルパッカー工法における1次材（CB）の目的は、弱部の粗詰めによる確実な止水性と強度確保にある。しかし、下部地盤改良の範囲は、新設躯体の掘削床付け以深であり、大きな強度特性を必要としない。したがって、全量2次材（溶液型）であっても問題ないと判断した。

##### 2) 注入率の見直し

薬液注入工の実施工前に、地下鉄影響範囲外で、注入率設定のための試験注入を実施しており、現場透水試験

より、注入率28%（当初36%）においても透水係数 $k=1.0 \times 10^{-5}$  cm/sec以上を確保できることを確認していた。そこで、全量2次材のうち1次施工として注入率28%の注入量を注入し、全孔の注入が終了した時点で、既設営業線躯体の変位量が管理値以内であれば、2次施工として、残りの注入率8%の注入量を注入することとした。

##### (2) 新長田駅側

#### ① 欠損防護工の施工順序の変更

長田駅側では側部注入施工時においても、既設営業線躯体の隆起が見られた。この原因として、既設営業線躯体下部の砂礫地盤の空隙に薬液が浸透し、既設営業線躯体に上向きの力が作用したためと判断した。そこで、既設営業線躯体下部への薬液の浸透を低減し、既設営業線躯体に作用する上向きの力を抑制するため、上部の高圧噴射攪拌工法の施工の後、下部の水平注入を先行して施工し、下部の空隙を充填した後、側部注入を実施することとした。

#### ② 下部注入仕様・注入順序の見直し

下部の薬液注入においては、長田駅側の施工実績を踏まえて、注入開始当初から吐出量を毎分6リットル、2セットとし、1次、2次注入材料とも溶液型で注入を実施し、注入率も1次施工で28%、2次施工で8%と設定した（表一3）。

表一3 薬液注入仕様変更

	吐出量	セット数	注入材料	
			1次	2次
当初	8リットル/分	4	CB	溶液型
変更	6リットル/分	2	溶液型	溶液型

また、注入順序についても見直した。長田駅側では既設営業線躯体に近い孔から横へ順次注入を行ったが、新長田駅側では縦に1列ずつ完了していくように注入順序を変更した。さらに、地下水の流動が北側から南側へ向いていることから、注入順序も北側から南側へ設定した。

#### ③ 側部注入仕様

側部の薬液注入においては、注入開始当初から既設営業線躯体底版下端以深では吐出量を毎分6リットルで注入を行った。なお、側部に関しては、新設躯体の掘削範囲であり、強度を必要とするため、当初計画と同様に1次注入材をCB、2次注入材を溶液型で施工した。

#### ④ 既設営業線躯体の変状

地盤改良工の施工が完了した時点における既設営業線躯体の隆起量は予測値3.4mmに対し、実測値3.8mmであり、2次管理値4.6mm以内で施工することができた。

### 4-2 掘削時

#### (1) 掘削時の変状

地盤改良工施工完了後、本格的に本線掘削を開始した。

リバウンド対策として採用している地下水位低下工法は、各掘削段階毎に土留め壁締切り内の地下水位を低下させる方法であり、掘削完了時には既設営業線躯体の底板下端付近まで地下水位を低下させる計画であった。

実施工においては、掘削が進むにつれて既設営業線躯体の隆起量が予測値よりも大きくなり、2次掘削完了時において既設営業線躯体の隆起量は4.8mm程度となり、2次管理値に近づいたため、各計測点における計測値を吟味しながらリバウンド対策工を実施する必要があった。

施工協議の結果、当初は2次管理値で施工管理を行っていたが、下記に記述する対策工を実施することで、掘削完了時は3次管理値(6.1mm)で施工管理を行う承諾を得ることができた。

(2) 対策工の実施

① 地下水位低下工法の早期実施

1次掘削途中から、地下水位低下量を計画水位よりも早期に低下させ、既設営業線躯体に作用する揚圧力を低減することで、既設営業線躯体の隆起を抑制した(表一4)。

表一4 地下水位低下工法の実施

施工ステップ	計画水位 (m)	実際の水位 (m)
1次掘削	TP+3.6	TP+0~-3.0
2次掘削	TP+2.5	TP-3.0~-4.0
3次掘削	TP-1.5	TP-4.0~-8.0
4次掘削	TP-6.0	TP-8.0~-8.2
掘削完了時	TP-9.6	TP-8.2

② 掘削箇所への上載荷重の部分載荷(写真一3)

既設営業線躯体直上の近接施工部付近においては、掘削に伴う除荷荷重によるリバウンドを抑制するため、掘削箇所に大型土嚢(324t:20kN/m<sup>2</sup>)および鉄板(168t:20kN/m<sup>2</sup>)を載荷した。なお、既設営業線躯体へ上載荷重を載荷させる場合は、偏土圧による既設営業線躯体横断方向の構造検討を行い、その安全性を検証した。

③ 部分掘削・構築の実施

既設営業線躯体直上の近接施工部付近は、7BL→6BL→5BLと順次掘削する計画であったが、既設営業線躯体への影響を考慮して施工順序を変更した。既設営業線躯体直上である6BLの掘削を2次掘削で一時中断し、隣接している7BLと5BLを先行して床付けした(隆起量は5.8mm)。その後、7BLと5BLの底板を構築した結果、既設営業線躯体の隆起量は4.9mmとなり、底板構築に伴い1mm程度の沈下が見られた。

④ 掘削完了時における隆起量

6BLの掘削を一時中断したことにより、掘削重機および残土置場の重機を一旦搬出し、6BL掘削再開時に再度

搬入した。また、6BL掘削再開時には工程短縮のため、隣接している7BLと5BLは函体側壁部の構築を行っており、6BL掘削残土搬出の通路を路面覆工上に確保する必要があり、鉄筋工、型枠工の作業ヤードが一時的に制限されることとなった。

しかし、施工効率が低下した状態となったが、部分掘削・構築を実施したことで、6BLの掘削が完了した時点での既設営業線躯体の隆起量は5.5mmとなり、3次管理値以内で施工管理を行うことが可能となった(表一5)。

表一5 施工管理値と計測値 (単位:mm)

施工ステップ	施工管理値		計測値
	2次	3次	
1次掘削	4.6	5.7	3.9
2次掘削	5.0	6.3	4.8
3次掘削	5.9	7.4	5.8
4次掘削	5.8	7.2	5.8
掘削完了時	4.9	6.1	5.5



写真一3 大型土嚢載荷状況写真

§5. おわりに

本工事は地下鉄営業線に近接した開削トンネル工事であり、地盤のリバウンドにより既設営業線躯体そのものに大きな影響を与える懸念があった。しかし、計測管理・施工管理を十分行った結果、無事掘削を完了することができた。現在、函体工の施工中であるため、今後も安全に工事が竣工できるよう引き続き計測管理・施工管理を十分に行う所存である。

謝辞：本工事の施工にあたりご指導いただいた阪神高速道路株式会社をはじめ、関係各位の皆様、とりわけ本社土木設計部の皆様には厚く御礼申し上げますとともに、工事完了まで引き続きのご指導をお願いする次第である。