

道路橋脚に近接したシールド反転用立坑の設計

全日本コンサルタント株式会社 技術部

田邊 隆
木村 泰三
津田 直幸
山本 悟

論文要旨

平成 21 年 3 月 20 日に開通した阪神西九条駅と近鉄大阪難波駅を結ぶ阪神なんば線新線部のシールドトンネルと近鉄難波線引上げ線の既設トンネルを接続する立坑は、構造形式や施工法に制約を受けた用地内でシールド機が反転できる空間を確保し、近接する阪高橋脚を防護するため C J G による地盤改良と鋼製連壁を単独壁形式で本体利用する構造とした。さらに F E M 解析の結果、阪高橋脚の変位制限から定まる連壁の最大変位に対応するために躯体築造の施工法に逆巻き工法とプレロード工の導入を併用した。また、工事期間中には近接構造物に対して計測管理も実施した。そこで、この立坑の設計並びに工事期間中の計測管理について述べる。

キーワード：シールド立坑、鋼製連壁、単独壁本体利用、逆巻き工法、プレロード工、C J G 工、計測管理

まえがき

阪神電気鉄道株式会社（以下、阪神という）の阪神なんば線のうち新線部は、阪神西九条駅と近畿日本鉄道株式会社（以下、近鉄という）の難波線大阪難波駅間を結ぶ新設路線で建設路線延長 3.4 km であり、この間に九条駅、ドーム前駅、桜川駅の 3 駅が新設された。

阪神なんば線新線部の構造物は、図 - 1 に示すように、阪神西九条駅（高架駅）から J R 大阪環状線を跨ぎ、安治川を渡るまでの区間は阪神西九条駅とほぼ同じ高さの高架橋である。安治川から九条駅（地下駅）の区間は高架橋、U 型擁壁、開削トンネルと地下へ移行し、中央大通りと交差して九条駅に至る。九条駅からドーム前駅、桜川駅をシールドトンネルで通過し、千日前通り（市道難波境川線）直下に位置する近鉄難波線引上げ線（以下、引上げ線という）の西方に接続され、近鉄大阪難波駅に至る。

新設されるシールドトンネルは既設構造物である引上

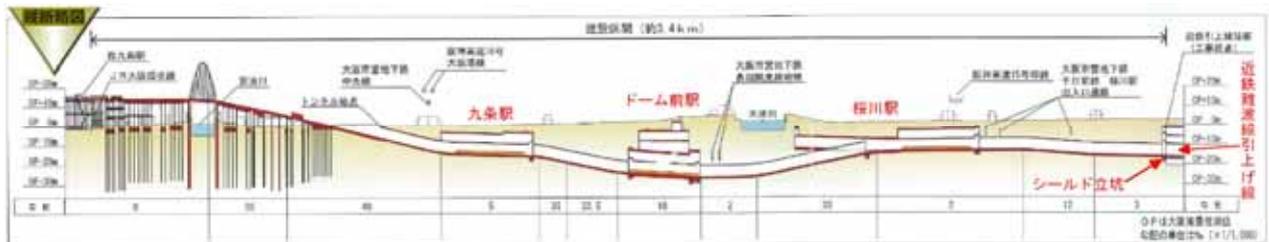
げ線に直接接続することはできない。このため、2 つの構造物を接続するとともに、シールド機の到達・発進を兼ねた反転用立坑を引上げ線に接続する形式で築造した。

そこで、本報告ではシールド機反転用立坑（以下、立坑という）の設計および近接構造物の工事期間中の挙動を監視するための計測管理について述べるものである。ここに、立坑のイメージを含めた現地状況を写真 - 1 に示す。

1. 近鉄難波線引上げ線の概要

近鉄難波線は昭和 40 年から昭和 45 年に建設され、接続する引上げ線は昭和 48 年から昭和 51 年に近鉄奈良線の輸送量増大化に対処するために延伸された。

引上げ線は、千日前通りの直下に位置する 2 層 1 径間の R C ボックスカルパート構造である。ここに、構造図を図 - 2 に示す。



注) 縦断略図は、阪神電気鉄道株式会社のホームページより引用し、加筆した。

図 - 1 阪神なんば線新線部の縦断略図



写真 - 1 現地状況図 (イメージ含む)

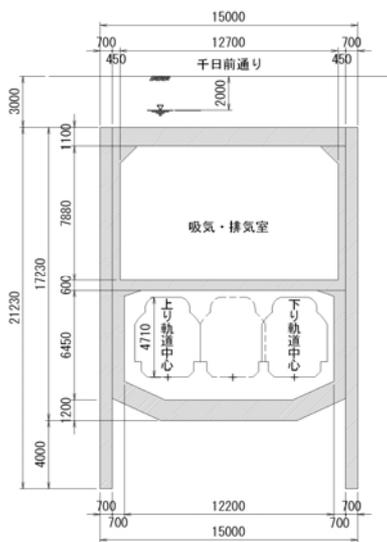


図 - 2 引上げ線の構造図

2. シールド反転用立坑の設計

(1) 立坑の構造形式

立坑は、引上げ線構造物に隣接して築造するため、引上げ線と同形式の矩形構造を採用した。

シールド機の反転に必要な立坑(軌道階)の内寸寸法は、シールド機の径 6950mm、開口径 7200mm より内空幅は 15.100m、内空高さは 8.650m とし、シールド機の長さ 8.2m

より内空長さは 12.000m と決定した。

この立坑はシールドトンネルの吸気・排気の換気機能が必要とするため、その設備を軌道階上部の中層階と上層階に配置した。これより、立坑を 3 層のボックスカルバート構造とした。

3 層ボックスカルバートは、シールド機の到達、反転、発進より最小の内寸寸法で決定しているためシールド機の通過時は 1 径間とし、シールド機の通過後に中柱を築造する 2 径間とした。ここに、立坑の平面図・縦断面図を図 - 3、横断面図を図 - 4 に示す。

(2) 近接構造物への影響軽減対策

立坑は図 - 3、図 - 4 に示すように、阪神高速道路(以下、阪高という)の堺 P-49 橋脚(以下、阪高橋脚という)と民間マンションに近接している。変位制限の厳しい阪高橋脚側には別途検討より C J G (コラムジェットグラウト) による地盤改良を行うものとした。

立坑の設計において、近接する構造物への影響を軽減する対策とその効果は表 - 1 の通りである。

(3) 鋼製連壁の本体利用

立坑は阪高橋脚と民間マンションに近接している。このため、地下連続壁の壁厚はできる限り薄くする必要があった。壁厚は鋼製連壁で 800mm、RC 連壁で 1200mm を必要とした。そこで、壁厚の薄い鋼製連壁を採用した。次に、近接する構造物との離隔を確保する必要があった。そこで、地下連続壁を本体利用することとした。

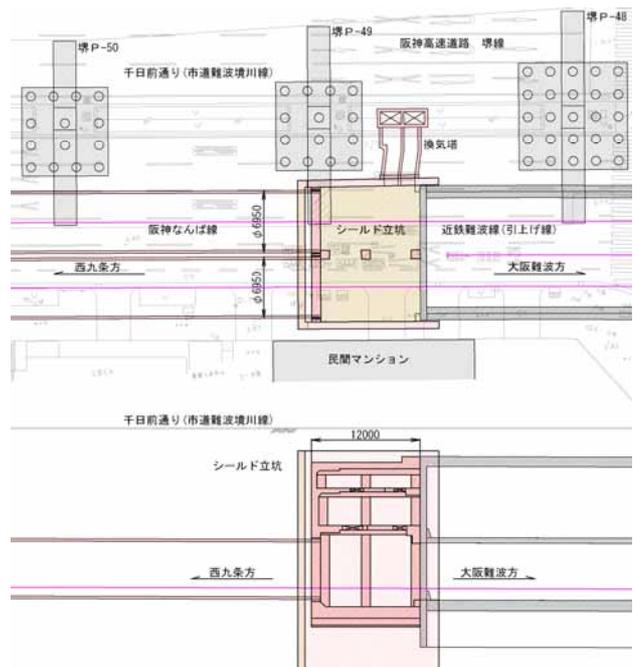


図 - 3 立坑の平面図・縦断面図

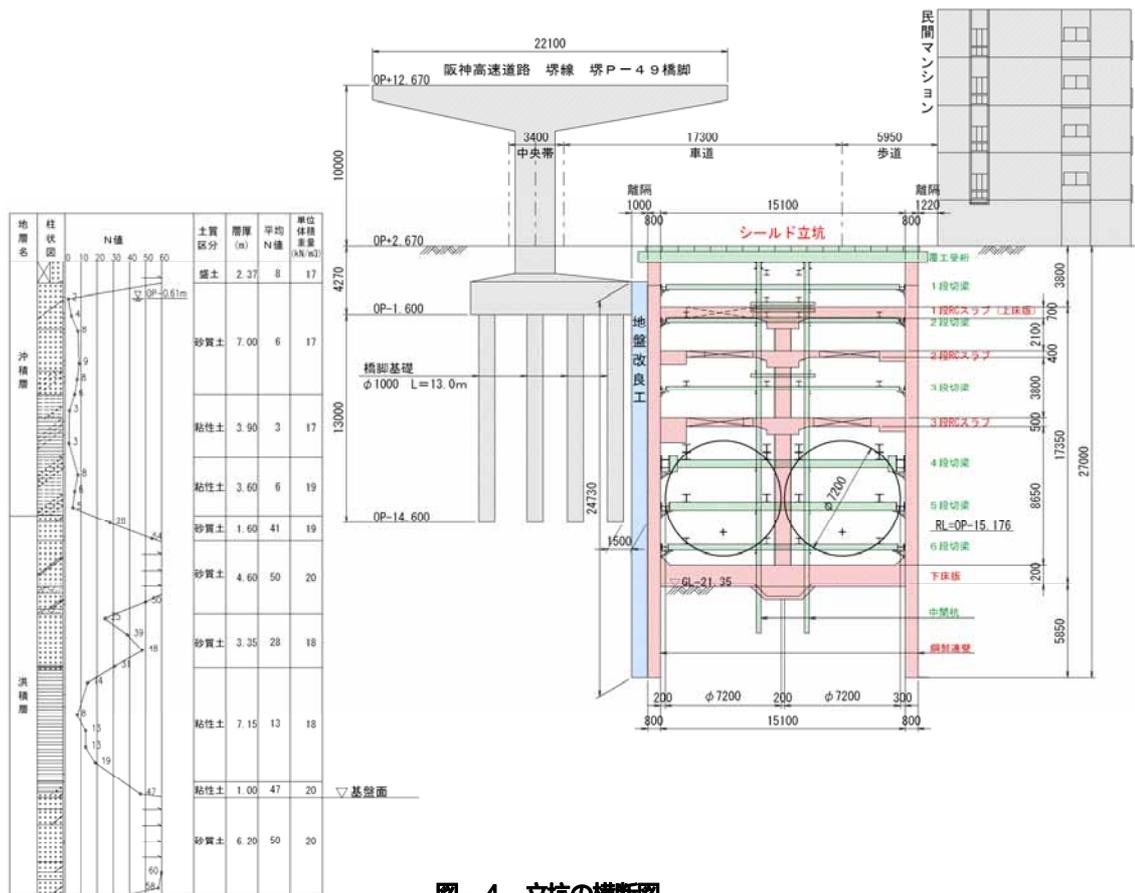


図 - 4 立坑の横断面

表 - 1 影響軽減対策と効果

影響軽減対策	期待できる効果
① 鋼製地下連続壁の採用	<ul style="list-style-type: none"> 柱列式土留工やRC地下連続壁等の他の土留工法に比べて、剛性および耐荷力が高い構造物であり、掘削時の連壁の変形を抑制できる。 従来の地下連続壁の壁厚より薄くでき、近接する橋脚との離隔を最大限に確保できる。
② 逆巻き工法の採用	<ul style="list-style-type: none"> 上留壁の変形を抑制できる。支保工に本設躯体のスラブを利用するので剛性が高く、安全性も高い。
③ 切梁プレロード工の採用	<ul style="list-style-type: none"> 切梁にプレロードを与えることにより、掘削時における土留壁の変形を抑制できる。
④ 情報化施工による対策	<ul style="list-style-type: none"> 施工中における仮設構造物(土留壁、支保工等)および既設橋脚の挙動監視により、影響軽減を図る。

表 - 2 本体利用する地下連続壁の構造形式と特徴

構造形式	特徴
① 重ね壁形式	<ul style="list-style-type: none"> 地下連続壁と本体内壁を部分的に分離した構造、すなわちせん断力は伝達せず、曲げモーメントと軸力は、各々の部材剛性に比例して負担する構造である。
② 一体壁形式	<ul style="list-style-type: none"> 地下連続壁と本体内壁を完全に一枚の壁とする構造である。これより、壁厚は重ね壁形式より薄くできる。
③ 単独壁形式	<ul style="list-style-type: none"> 地下連続壁に本体内壁を設けず(化粧壁は設置する)、地下連続壁単独とする構造である。このため、壁厚が最も薄くできる。

地下連続壁を本体利用する場合の構造形式とその特徴は、表 - 2の通りである。

これより、地下連続壁には壁厚を最小としながらも高い剛性を得ることを目的として、鋼製連壁を単独壁形式とした。

(4) 躯体築造に逆巻き工法、切梁にプレロード工導入の適用

鋼製連壁の土留壁としての応力・変位解析は、近接構造物への影響度が把握でき、かつ20m以上の掘削深度における挙動を比較的正確に反映できる弾塑性解析とした。

立坑の施工法は地下連続壁に鋼製連壁を使用して本体利用する開削工法とした。躯体築造には、順巻き工法と逆巻き工法があるため、両工法での鋼製連壁の最大変位量を比較検討した。結果、鋼製連壁の最大変位量は、順巻き工法で51.0mm、逆巻き工法で43.8mmであった。近接する構造物への影響を最小限とするため、躯体築造は逆巻き工法とした。ここに、立坑の主な施工ステップを図 - 5に示す。

逆巻き工法における解析結果は、次の通りである。

切梁にプレロード工を導入しない場合、鋼製連壁の最大変位量は43.8mmであり、許容変位量40mmを超過し

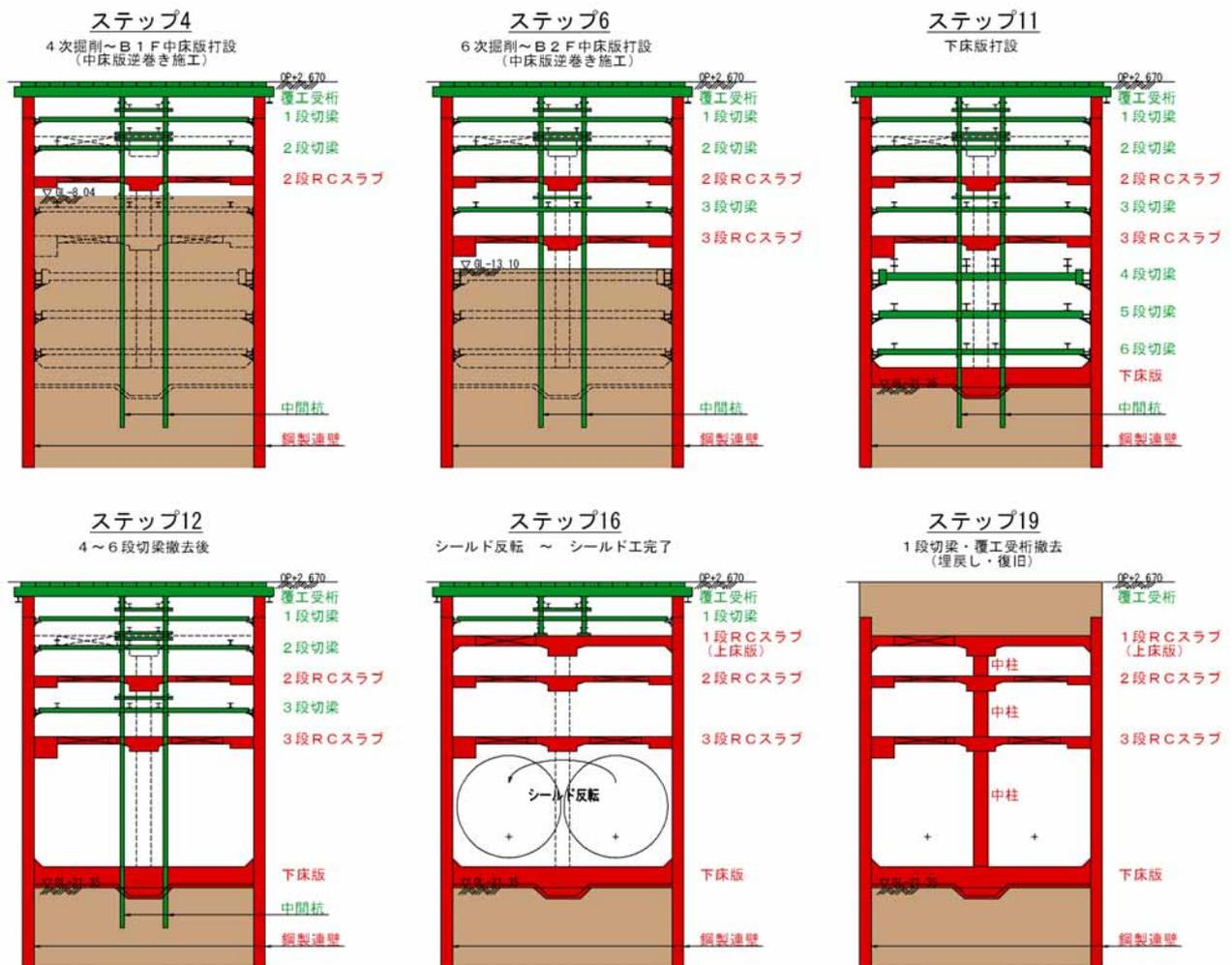


図 - 5 立坑の主な施工ステップ図

た。このため、プレロード工を導入した。

なお、鋼製連壁の許容変位量 40mm は、阪高橋脚を近接施工における第一次管理値以下に収めるため、鋼製連壁の最大変位量より決定した。

プレロード工の導入は、プレロード工を導入しない場合の各切梁に作用する最大反力に対し、その 25%、30%、35%のプレロードを比較検討した。結果、プレロード 30%導入時で鋼製連壁の最大変位量は 39.4mm であり、許容変位量 40mm 以下を満足した。よって、プレロードは最大反力の 30%導入とした。ここに、この最大変位量が発生する施工ステップは図 - 5 に示すステップ 12 の 4～6 段切梁撤去時であり、その変位図を図 - 6 に示す。

なお、プレロード導入量算出時に許容変位量に対して最大変位量に余裕をもたせなかった理由は次の通りである。

切梁にプレロードを導入した際に、スラブに引張り応力を生じさせない。

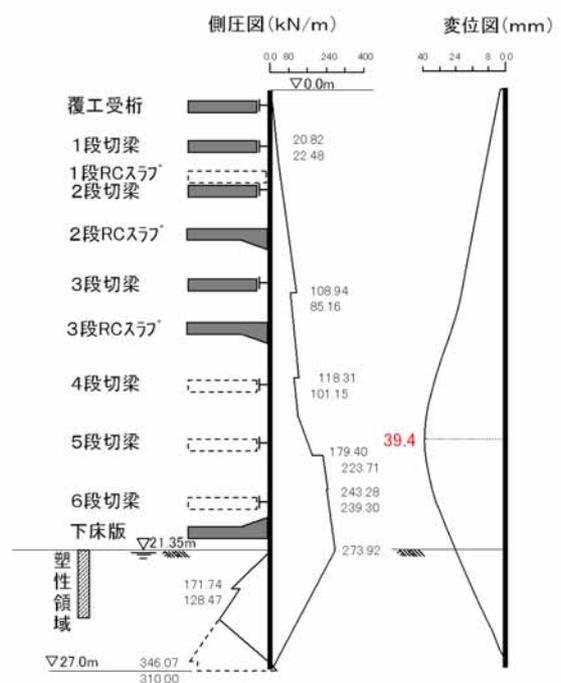


図 - 6 プレロード 30% 導入時の最大変位量

鋼製連壁の水平変位を自動計測し、ステップ毎にプレロード量と鋼製連壁の水平変位をリアルタイムに把握し、計算結果との照合・分析ができること判断した。

3. 近接構造物の影響検討

阪高橋脚に立坑が近接しているため、立坑掘削時の鋼製連壁の変位に起因する橋脚変位への影響を検討した。

(1) 検討方法

橋脚に及ぼす影響は、主に立坑掘削に伴う周辺地盤の変状によってもたらされ、影響度を評価するには掘削に伴う周辺地盤の挙動をいかに精度よく捉えるかが重要となる。掘削に伴う周辺地盤の変位による影響解析には、多層地盤や構造物形状等の複雑な条件を比較的容易に、かつ実際に近い状態で表現できる有限要素法（以下、FEMという）を適用した。

具体的には、立坑掘削に伴う地盤および橋脚の変位挙動は、FEM解析（二次元弾性モデル）に、別途弾塑性解析により算出された鋼製連壁の最大変位を強制変位として与えて予測することとした。近接する橋脚の安全性の評価は、阪高の定める近接施工における管理値との比較により行った。

立坑が阪高橋脚に対して近接施工となるため、離隔1000mmを確保した。この間に存在する地盤に対しては、CJGによる遮断壁工法による地盤改良を施すことを前提とした。CJGは、種々ある遮断壁工法の中でも改良強度が大きいことより選定した。

(2) 検討結果

FEM解析による阪高橋脚の変形挙動は、プレロード導入なしで、水平変位は基礎上側で立坑側に3.68mmと予測された。この値は阪高が定める第一次管理値（以下、許容値という）を超過する結果であった。また、鉛直変位は梁天端で0.93mmの隆起、傾斜角は橋脚中央梁天端で立坑側に0.29分と予測された。しかし、いずれの値も許容値内であった。

プレロード30%導入時では、鉛直変位は梁天端で0.60mmの隆起、水平変位は基礎上面で立坑側に2.76mm、傾斜角は橋脚中央梁天端で立坑側に0.11分と予測された。いずれの値も許容値内を満足する結果であった。

これより、プレロード30%導入による効果が確認できた。ここに、FEM解析のモデル図と結果図を図-7、切梁にプレロード導入の有無によるFEM解析の結果を表-3に示す。

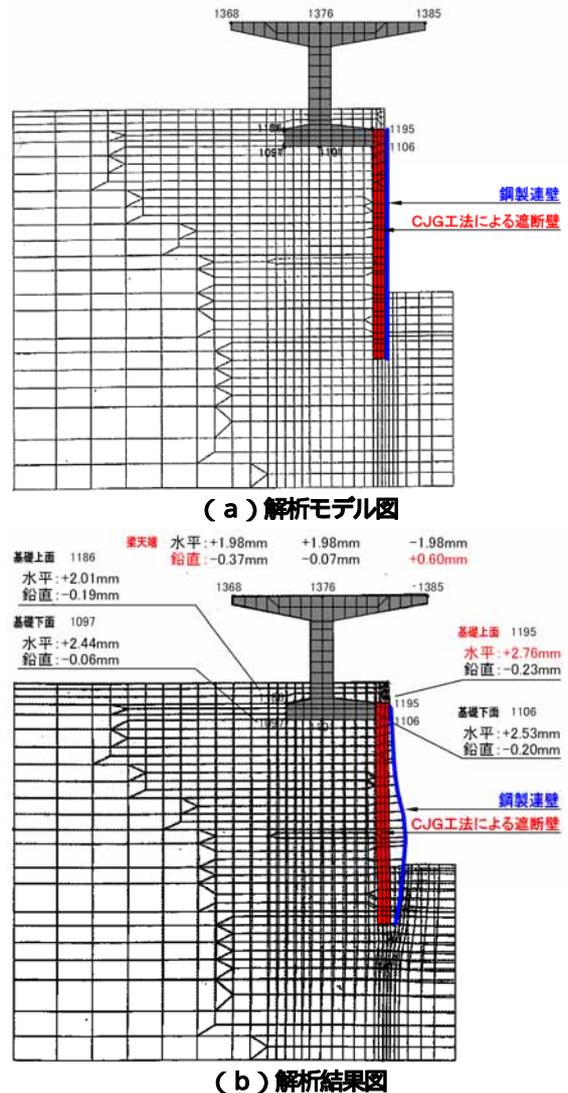


図-7 FEM解析のモデル図と結果図

表-3 阪高橋脚のFEM解析結果

躯体築造工法		逆巻き工法	
プレロード工		なし	
		3.0%	
鉛直変位	着目位置	梁天端(右)	梁天端(右)
	測点番号	1385	1385
	解析値(mm)	+0.93	+0.60
	許容値(mm)	±3.0	
判定		OK	OK
水平変位	着目位置	基礎上側(右)	基礎上側(右)
	測点番号	1195	1195
	解析値(mm)	+3.68	+2.76
	許容値(mm)	±3.0	
判定		NG	OK
傾斜角	着目位置	橋脚中央	橋脚中央
	測点番号	1101~1376	1101~1376
	解析値(分)	+0.29	+0.11
	許容値(分)	±3.0	
判定		OK	OK

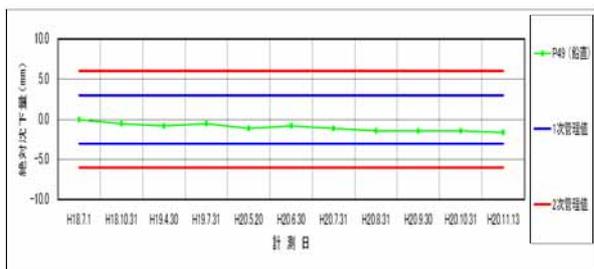
注) 許容値は、阪神高速道路株式会社が定める第一次管理値である。
鉛直変位は、+隆起、-沈下を示す。
水平変位は、+立坑側、-立坑反対側を示す。
傾斜角は、+立坑側回り、-立坑反対側回りを示す。

4. 計測管理

立坑に近接する阪高橋脚の工事期間中にその挙動を監視する目的で自動計測管理を行った。

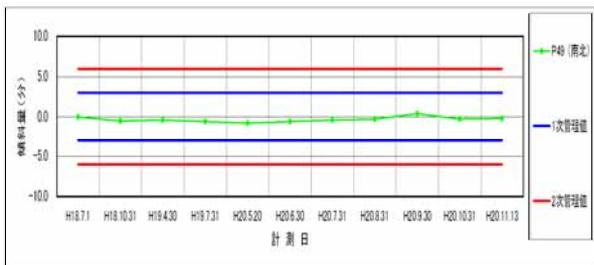
計測項目は、FEM解析に基づき、鉛直変位と傾斜角とした。計測点は橋脚梁天端の中央部である。計測期間は事前と事後の計測5ヶ月を含め、立坑築造が完了するまでの34ヶ月であった。

自動計測による計測結果を図-8、自動計測の最大値とFEM解析値の比較を表-4に示す。なお、計測最大値の水平変位は、傾斜角より算出した。



注) 一次管理値：3 mm、二次管理値：6 mm

(a) 鉛直変位



注) 一次管理値：3分、二次管理値：6分

(b) 傾斜角

図-8 自動計測結果

表-4 計測最大値とFEM解析値の比較

(着目点：橋脚中央梁天端)

	鉛直変位(mm)	水平変位(mm)	傾斜角(分)
計測最大値	-0.80	+0.50	+0.70
FEM解析値	-0.07	+1.98	+0.11
許容値	±3.0	±3.0	±3.0

注) 許容値は、阪神高速道路株式会社が定める第一次管理値である。

鉛直変位は、+隆起、-沈下を示す。

水平変位は、+立坑側、-立坑反対側を示す。

傾斜角は、+立坑側回り、-立坑反対側回りを示す。

これより、工事期間中における水平変位の最大値は立坑側に0.50mmでFEM解析値、許容値より小さい値が計測された。鉛直変位の最大値は0.80mmの沈下、傾斜角の最大値は立坑側に0.70分でいずれもFEM解析値を上回る

が、許容値より小さい値が計測された。

自動計測では、FEM解析の結果と比較して、変形挙動の傾向はほぼ一致している。計測値にばらつきはあったが、微小であり、阪高橋脚の許容値内であった。以上より、近接施工における影響は最小限であったと判断した。

あとがき

シールド反転用立坑の築造工事は、平成16年8月より工事着手、平成21年3月に完成、3月20日に阪神なんば線が開通した。シールド反転用立坑の築造工事を進めていく段階で、近接構造物である阪神高速道路堺P-49橋脚および民間マンションへの影響が懸念された。

そこで、シールド反転用立坑の設計では

鋼製連壁を単独壁形式で本体側壁に利用し、躯体築造に逆巻き工法、切梁にプレロード工の導入を採用した。近接する構造物への影響を最小限とするため、CJG工法による地盤改良を採用した。

工事の進捗状況に応じて、近接する構造物の挙動を自動計測により監視した。

等の工法を実施することで近接構造物に影響を与えることなく、工事を無事完了させることができた。

謝辞

本報告の作成にあたり、ご指導、ご助言およびご協力いただきました阪神電気鉄道株式会社、西大阪高速鉄道株式会社、近畿日本鉄道株式会社ならびに関係各位に深く感謝の意を示す次第です。

参考文献

- 1) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説-開削トンネル-、平成13年3月。
- 2) 西大阪高速鉄道株式会社：西大阪延伸線・鉄道施設設計仕様書<鉄道土木>、平成14年6月。
- 3) 西大阪高速鉄道株式会社：土木施設実施基準、平成14年6月。
- 4) 近畿日本鉄道株式会社：設計仕様書(土木関係)解説、平成13年5月。
- 5) 近畿日本鉄道株式会社：技術基準(鉄道土木施設)解説、平成14年7月。
- 6) 近畿日本鉄道株式会社：第4回技術講話会講演概要集、No.1 西大阪延伸線建設事業に伴う難波立坑築造工事について、平成19年3月。