

鉄道営業線高架橋の連続アンダーピニング工事における安全性確保対策

鹿島建設(株) 正会員 ○伊藤弘之 田中 誠 山本信也
東京急行電鉄(株) 山道芳徳

1. はじめに

鉄道営業線として供用中の RC ラーメン高架橋の直下に新線を増設するため、半地下のラーメン構造物または地中ボックス構造物を新設し既設梁スラブ 8 連（延長約 280m）を受け替えるアンダーピニング工事を施工している¹⁾。一般に、アンダーピニングには既設構造の安全性や営業線の走行安全性の確保に様々な対策を必要とするが、本工事では、地盤・構造物・軌道構造の特性を考慮したリスク低減策を講じることで工程短縮を図りつつ安全性を確保する施工方法・手順を採用し、一部区間の受替えを無事に完了した。本稿では、アンダーピニング区間の計画と施工における安全性確保対策を報告する。

2. アンダーピニング工事の概要

相鉄・東急直通線（以下、新線）は、相鉄・JR 直通線羽沢駅から新横浜駅、新綱島駅を経由し、東急東横線・目黒線日吉駅までを連絡する延長約 10km の計画路線（図-1）である。新線の大部分が地下式で、地上駅である日吉駅付近で 37‰の最急勾配で地上に接続する計画である。地上に接続する区間では、用地上の制約から営業中の東横線（以下、既設線）および 1 層 RC ラーメン高架橋（以下、既設高架橋）を延長約 600m にわたって改築またはアンダーピニングし、

既存の鉄道用地内で既設高架橋の直下に新線を敷設する。

改築・アンダーピニングの構造形式は新線構造物の深度および既設線の線路線形に応じて 4 タイプに分けられる（図-2）。区間 A（延長約 192m）では、既設高架橋を段階的に 1 層 3 柱式 RC ラーメン高架橋に改築し、新設地中梁と一体化したスラブ上に新線を敷設する。区間 B（延長約 130m）では、既設高架橋直下に 2 柱式 RC ラーメン構造の受替え構造物を新設し、既設上層梁スラブをアンダーピニングする。新線は新設地中梁と一体化した半地下の U 形擁壁内に敷設する。区間 C（延長約 154m）では、仮設の架構により一時的に既設上層梁スラブを仮受けした後、地中に新設する新線ボックスカルバートと既設柱とを一体化してアンダーピニングする。区間 D（延長約 120m）では、既設高架橋直下に RC 地中連続壁と逆巻き工法でボックスカルバートを新設し、既設地中梁をアンダーピニングする。

次章からは、既設高架橋の受替えを一部完了した、区間 B（基礎杭ラーメン式アンダーピニング区間）と区間 C（ボックス式アンダーピニング区間）における安全性確保対策の実績を報告する。



図-1 路線概要図

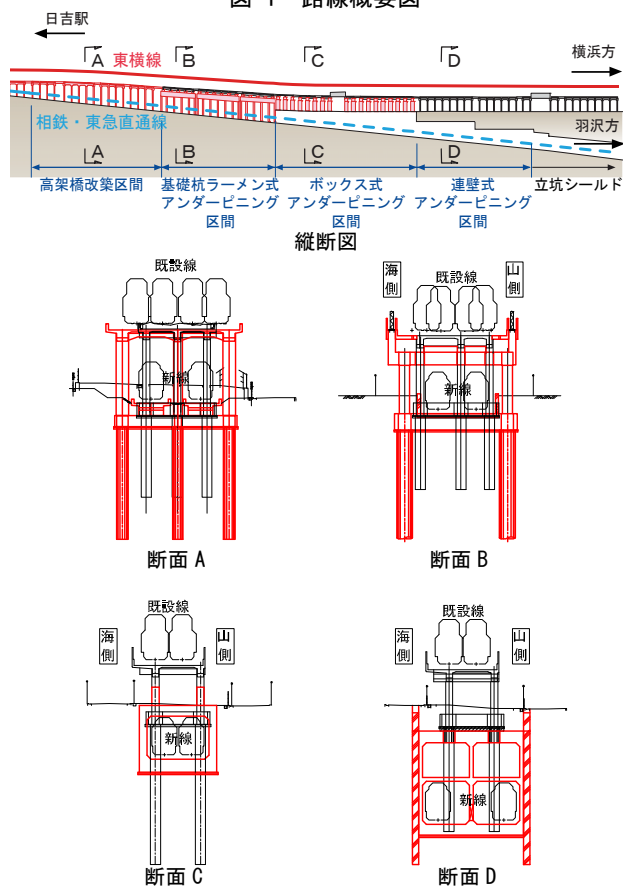


図-2 構造形式一般図

キーワード 近接施工、場所打ち杭、孔壁防護、受替え、仮受け、プレロード

連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設(株) 土木設計本部 TEL03-6229-6661

3. 基礎杭ラーメン式アンダーピニング区間の安全性確保対策

(1) 設計計画

本区間は、1層3柱式RCラーメン高架橋の上層梁スラブ3連（R3、R4、R5）を、延長約130mにわたり、新設する2柱式ラーメン構造物によりアンダーピニングを行うものである。また、既設線の線路線形の変更に伴い、既設橋面の拡幅も併せて実施する。

新設構造物の基礎杭は既設線と新線の4線分の荷重を支持するため、 $\phi 1,800 \sim 2,000$ の比較的大口径となる。既存の鉄道用地内に収めるため、新設構造物の基礎杭・柱通りは既設高架橋の径間中央に配置し、既設柱通りには既設柱・横梁を受け替える受け梁を配置する。受け梁に巻き込まれた既設柱は水平方向のずれ止めとして機能し、鉛直荷重は既設高架橋横梁と受け梁の間に打設する間詰めコンクリートにより支持する（図-3）。

この区間の特徴として、①既設線の線路線形の関係から構造物が平面的に徐々に拡幅する形状になる、②新設ラーメン構造の径間中央に既設構造を支持する受け梁が配置される、③支持地盤が傾斜している、④既設高架橋の近接・直下で新設構造物を施工する点が挙げられる。

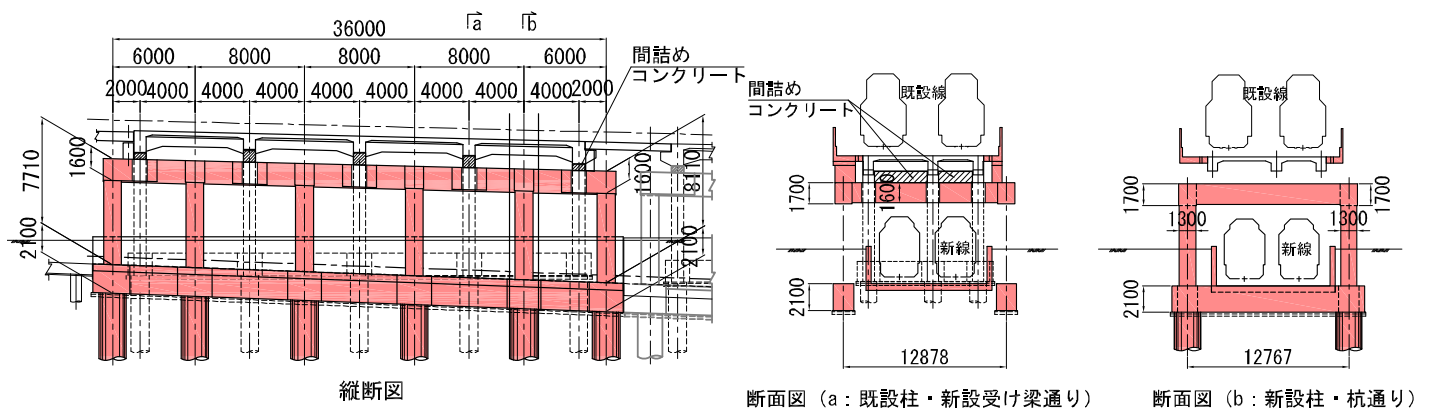


図-3 基礎杭ラーメン式アンダーピニング区間一般図（R3）

(2) 施工計画

基礎杭は狭あいな施工条件を踏まえてTBH工法による場所打ち杭を選定した。TBH杭施工時の課題として、近接する既設高架橋基礎杭の支持力低下および孔壁崩壊の懸念が挙げられた（図-4）。

掘削から躯体構築の施工手順は既設高架橋直下を含む掘削全体を受け替え前に完了させ、ジャッキ仮受けを用いずに直接受け替える手順を採用した²⁾（図-5）。この手順では工程短縮を図れる一方で、施工時の課題として掘削時の既設高架橋の耐震性および受替えが既設構造・既設線に及ぼす影響が挙げられた。

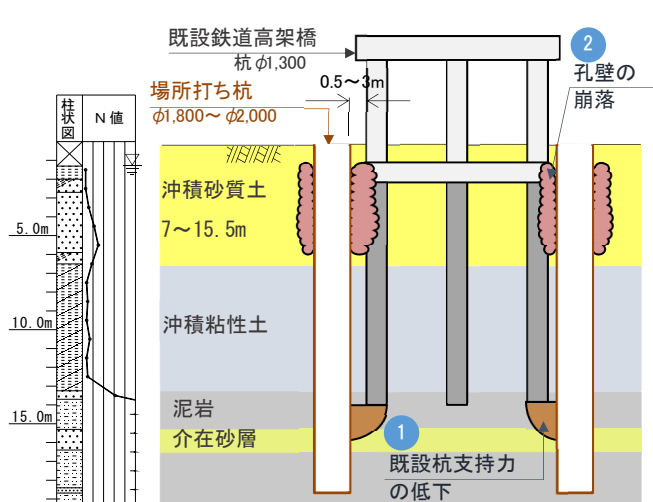


図-4 場所打ち杭工事模式図

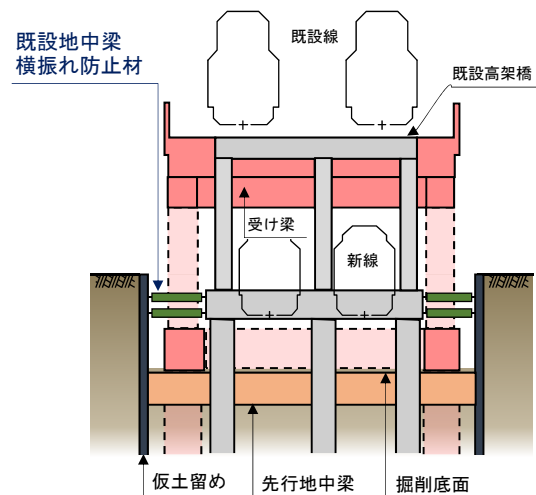


図-5 掘削工事模式図

(3) 基礎杭施工時の既設基礎杭支持層の防護

既設高架橋の基礎杭の支持層は泥岩であるが、既設杭先端の直下に薄層の砂層が介在する箇所がある。このような既設杭に近接して削孔する箇所（最近接箇所において離隔 480mm）においては基礎杭施工時の応力解放による既設杭先端部の支持力低下が懸念された。そこで、別報³⁾に示すように支持層性状と離隔に応じて対策要否を選定し、必要な箇所には基礎杭施工箇所にあらかじめ鋼管を既設杭下端付近まで設置して既設杭支持層のすべりを防護することとした。鋼管は場所打ち杭設計径を確保できる内径φ2,058、肉厚 16mm を採用し、既設杭先端より杭径程度（約 2.0m）まで設置する計画とした（表-1）。

鋼管の施工は高架下で施工可能な低空頭対応（必要空頭 5.1m）の機械を採用した（写真-1）。オールケーシング工法と同様の中掘圧入であるが、機械の引抜き力が小さいため鋼管は残置することとした。なお、圧入時に滑材を使用するため、圧入後に裏込め材で注入・置換するものの、構造物の設計においては安全側の設定として周面摩擦抵抗を無視した場合の成立を確認した。

鋼管の芯ずれは自主管理値 50mm 以内、鉛直性は 1/400 程度で、場所打ち杭削孔も孔曲りを生じることとはなかった。また、懸念された削孔時の高架橋沈下も確認されなかった。

表-1 場所打ち杭および鋼管圧入工の設計仕様

本数	場所打ち杭（TBH 工法）			鋼管圧入	
	杭径(mm)	杭長(m)	杭頭 (GL- m)	外径 (mm)	深さ* (GL- m)
4	φ 2,000	17.0	3.8~5.2	φ 2,090	9.5~12.5 (平均 11.0)
2	φ 1,800	13.5	5.2~6.9	φ 2,090	12.5
1	φ 2,000	21.5	6.7~8.1	φ 2,090	21.5

* 圧入深さは既設杭先端から 2.0m



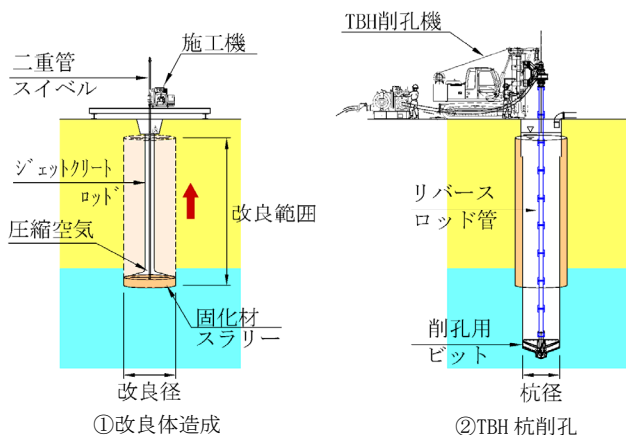
L=1000~1500 の鋼管を円周溶接継手で接合し、順次中掘圧入する

写真-1 低空頭機械による防護鋼管の施工

(4) 基礎杭施工時の孔壁防護

工事箇所に地表から厚く分布する沖積砂質土層は「細砂」や「シルト質細砂」で、N 値は 3~14、細粒分含有率は 20%程度、地下水位は GL-0.5~-1.5m である。このような土質での場所打ち杭施工では孔壁崩壊リスクが高いことから防護工を検討した。本工事では低空頭下で施工可能な物理的防護の方法として、従来工法より工程短縮が図れる、強度を抑制した高圧噴射攪拌工法による孔壁防護を採用した。

本工法は、場所打ち杭と同心円状の改良体（φ2,800、一軸圧縮強さ $q_u=500\sim1,000\text{kN/m}^2$ ）を造成後、改良体内を削孔し場所打ち杭を造成するものである（図-6）。改良径および改良強度の設定方法、現場試験施工の内容は別報⁴⁾に示すが、現場試験施工を行い設定した改良径ならびに強度を満足する地盤改良体が造成できることを確認した。場所打ち杭および高圧噴射攪拌工法の設計仕様を表-2 に示す。



計画深度まで削孔後、固化を噴射しながら所定の引き上げ速度および回転速度により、

安定液を循環させながらリバーシブルビットにより改良体内部を貫通し、計画深度まで削孔

図-6 高圧噴射攪拌工法による孔壁防護模式図

表-2 場所打ち杭および高圧噴射攪拌工法の設計仕様

本数	場所打ち杭（TBH 工法）			地盤改良	
	杭径 (mm)	杭長 (m)	杭天端高 (GL- m)	改良径 (mm)	改良下端高* (GL- m)
8	φ 2,000	17.0	3.8~5.2	φ 2,800	6.7~16.2 (平均 12.2)
12	φ 1,800	13.5	5.2~6.7	φ 2,800	6.6~12.4 (平均 8.6)
11	φ 2,000	21.5	6.7~8.0	φ 2,800	6.8~7.7 (平均 7.3)

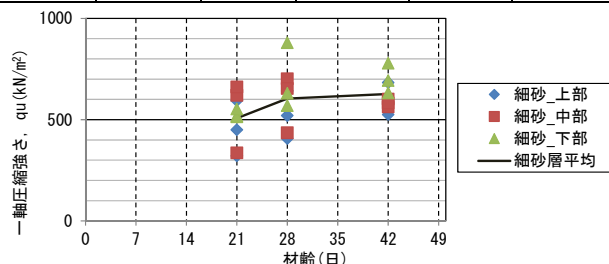


図-7 孔壁防護改良体から採取したコア供試体強度

改良造成中の近接高架橋柱の変位は $\pm 1\text{mm}$ 以下と微小であった。地盤改良体から採取したコア供試体の強度は各深度とも目標強度（材齢42日 $500\sim 1,000\text{kN/m}^2$ ）を満足した（図-7）。

場所打ち杭削孔では、改良体範囲の削孔速度は約 20min/m で泥岩の削孔速度よりも早く工程通り順調に施工を進めることができた。超音波孔壁測定より懸念された孔壁崩壊が生じていないことを確認した。また、孔曲りもなく鉛直性 $1/200$ 以下の精度で設計径を掘削できていることを確認した。

強度を抑制した高圧噴射攪拌による孔壁防護を併用した場所打ち杭の施工はすべて完了し、良好な結果が得られた。杭施工後に掘り出して確認した地盤改良体を写真-2 に示す。

(5) 掘削時の既設高架橋の耐震性確保

既設高架橋の周辺・直下を掘削する際に既設地中梁および基礎杭が露出するが、地盤改良（先行地中梁）による掘削底面付近の拘束と、仮土留めと既設地中梁を結ぶ横振れ防止材の設置によって、工事期間中も建設時設計と同等の耐震性（設計震度 $K_h=0.25$ で短期許容応力度以内）を確保することとした（図-5、写真-3）。

また、施工の影響による既設構造物および軌道の変状を確認するため、計測を実施した。柱通りごとに柱間の相対鉛直変位（隆起・沈下）を確認するためのデジタルレベル（写真-4）、単版桁部においては構造物間の相対水平変位の有無を確認するためのベクトル変位計を設置し常時計測を行った。

床付け完了後、新設躯体を構築し、新設受け梁と既設横梁の間に間詰めコンクリートを打設した。また、新設スラブと既設スラブを接合し橋面を拡幅した。



写真-2 場所打ち杭施工後に確認した地盤改良体
（掘り出す前は円環状に認められた）

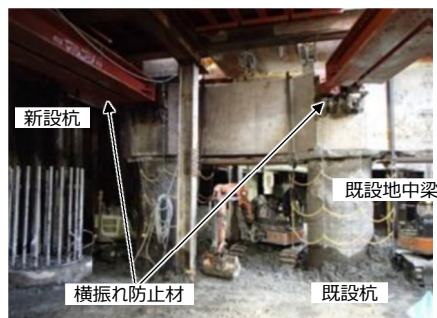


写真-3 床付け完了時の横振れ防止材

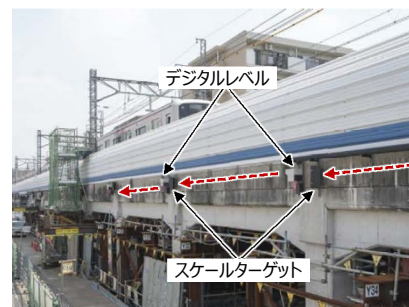


写真-4 高架橋変位計測器

(6) 受替え時の既設構造・既設線に及ぼす影響の低減

本区間の受替え工は、受替えに伴う変形が小さいマシブな本設構造物で受け替えること、軌道がバラスト軌道であり微小な変位であれば軌道整備による対応が可能であることから、仮受ジャッキによるプレロードは用いず、既設柱の切断をもって新設構造物に荷重を受け替える計画とした。

既設梁スラブを受け替える受け梁は新設ラーメンの径間中央（既設柱通り）に配置されることから、既設柱切断（受替え）に伴って新設縦梁のたわみ、ねじりと受け梁のたわみが生じ、既設梁スラブには支点沈下による付加応力が生じる。この応力付加後の既設梁スラブの構造安全性を別報²⁾の構造計算によって確認した。

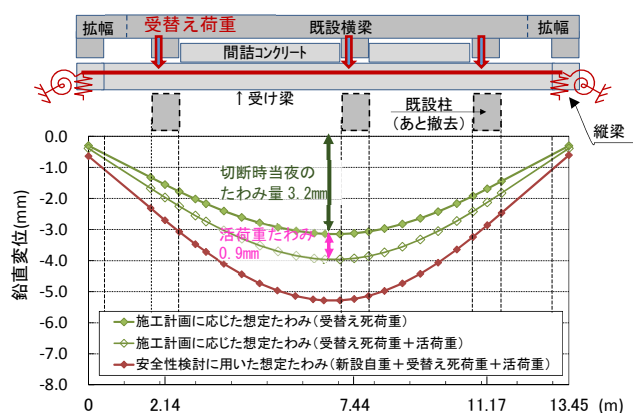


図-8 既設柱切断時の新設受け梁の変位量の想定

また、新設受け梁・縦梁の型枠支保工は間詰コンクリート打設前に解放することで、新設構造物の自重たわみを受替えに先行して生じさせて、既設柱切断時（受替え時）の受け梁のたわみを構造安全性検討に用いた値から低減する計画とした（たわみ最大値 5.3mm→4.1mm）。

受替えに伴う軌道への影響については、「高低」（10m 弦正矢法）で管理することとした。受替えに伴う“受け梁”の想定たわみ（最大 $3.2+0.9=4.1\text{mm}$ 、**図-8**）を基に、切断する既設柱通り線上の軌道が 5mm 沈下すると仮定して「高低」を算定し、柱を 1 列 3 本ずつラーメン端部の列から順番に切断する手順であれば、「高低」は最大 2.6mm で 1 次管理値 3.5mm を下回ることを確認した。

既設柱の切断は、想定以上の変状が生じた場合に軌道整備による復旧ができるよう線路閉鎖間合で行うこととした。ワイヤーソーを使用して線路閉鎖間合 140 分で 1 列 3 本ずつ切断した（**写真-5**）。切断の前後においてレールレベルの水準測量および 10m 弦正矢での軌道変位を確認したが有意な変位は生じなかった。柱切断後に実測した受け梁たわみは列車走行前後で 2～3mm 程度で予測値を下回った。

既設柱撤去後の全景を**写真-6**に示す。



写真-5 ワイヤーソーによる既設柱切断

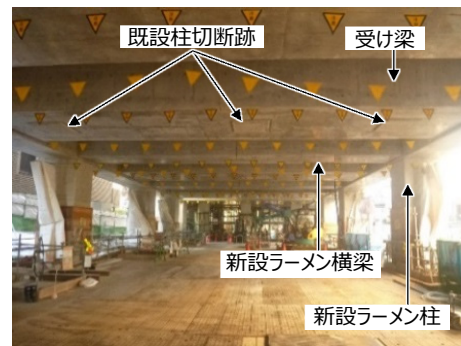


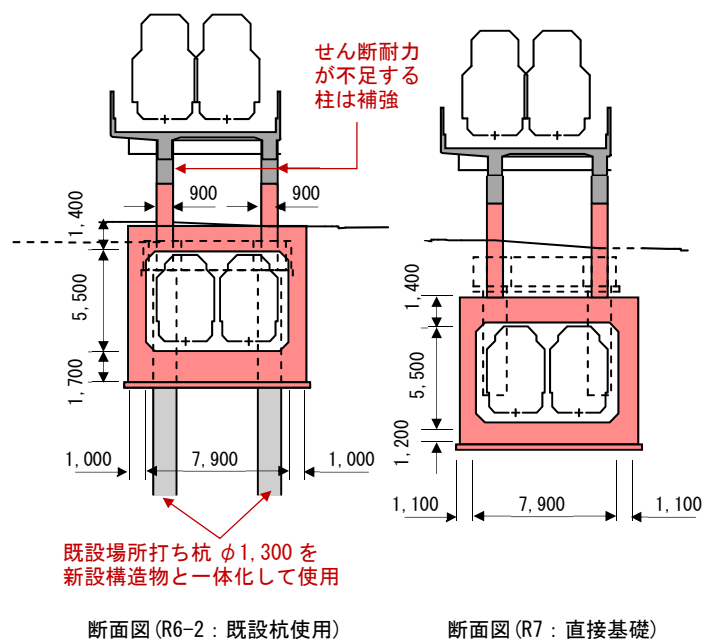
写真-6 既設柱撤去後の全景

4. ボックス式アンダーピニング区間の安全性確保対策

(1) 設計計画

本区間は、1 層 2 柱式 RC ラーメン高架橋の上層梁スラブ 5 連（R6-1～R7）を、延長約 150m にわたり、新設するボックスカルバートによりアンダーピニングを行うものである。

既設柱の中間より下部を撤去した後、新設するボックスカルバートと既設柱切断箇所とを柱構造で接合して一体化する。ボックスカルバート上床板の高さの関係から一部区間の柱は現行よりも柱長が短く（せん断スパン比が小さく）なるが、せん断耐力が不足する柱は既存のせん断補強工法（分割帯鉄筋の巻立てとモルタル吹付け）によりせん断補強を行う計画である。また、ボックスカルバートの支持構造は、下床版が支持層に着底する区間は直接基礎構造とし、下床版が沖積層に位置し支持層に着底しない区間は既設杭を下床版と一体化させて用いる杭基礎構造としている（**図-9**）。



断面図 (R6-2：既設杭使用)

断面図 (R7：直接基礎)

図-9 ボックス式アンダーピニング区間構造一般図

(2) 施工計画（仮受け計画）

新設構造物が既設杭先端より深い位置にある区間では、既設構造物を供用しながら構築するには逆巻き構築か仮受けが必要となる。本工事では工程短縮を図るため、仮受け架構を設けて既設高架橋梁スラブを仮受けした後、既設柱下部より撤去しながら掘削し、順巻きで新設構造物を構築し受け替える手順を採用した。

仮受けの手順は、支持層までP I P工法により仮受け杭（H鋼モルタル杭）を打設し、形鋼からなる仮受け架構へ油圧ジャッキで受け替える計画である。仮受け架構の構造を図-10、図-11 に示す。仮受け架構設置後の全景を写真-7 に示す。仮受け区間の特徴として、①仮受け区間が長く区間内に単版桁および鋼下路桁が含まれる、②仮受けする構造物の重心が線路直角方向に偏心している、③仮受けする構造物が比較的軽く設計荷重に占める活荷重の割合が高い、④既設線が弾性まくら木直結軌道であり変位が生じた場合に軌道整備による対応が困難であるといった点が挙げられる。

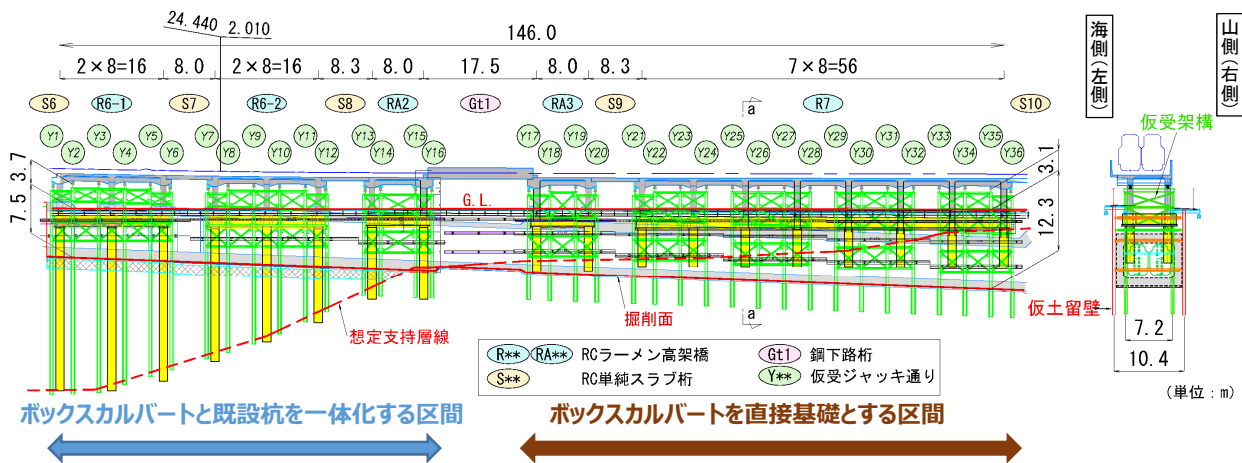


図-10 仮受け区間概要図

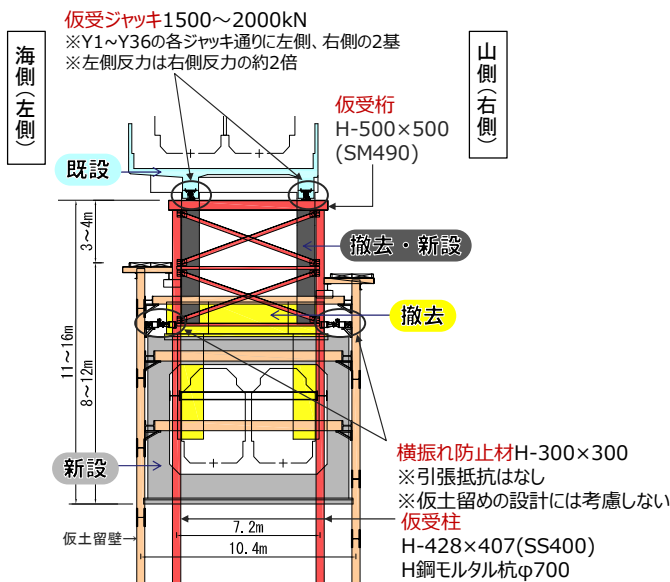


図-11 仮受け架構一般図

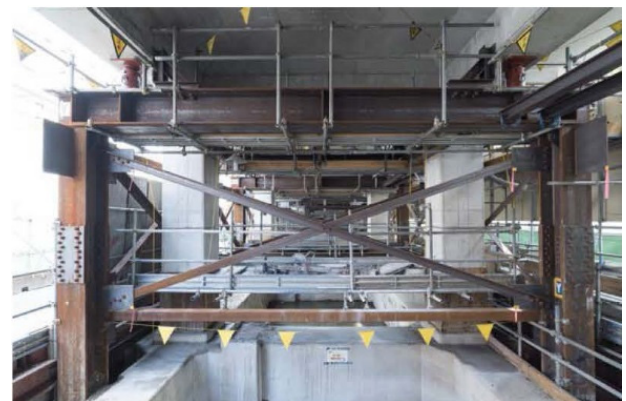


写真-7 仮受け架構全景

仮受け支点は変位を生じやすい単版桁や鋼下路桁を避けて既設ラーメン縦梁とし、応力が大きく変わらないよう既設柱位置に近い位置に配置した。仮受け杭（仮受け柱）の位置は、既設地中梁との干渉が小さく新設構造物壁体を避けた配置とした。仮受け柱は床付け面から約 11～16m となるため、横振れ防止材を設けて地震時の水平変位を抑制する構造とした。仮受けジャッキは既設構造物の死荷重と活荷重から選定し、ラーメン高架橋区間は 1,500kN ジャッキ、荷重が大きい鋼下路橋前後は 2,000kN ジャッキとした。特徴②のとおり、既設高架橋構築時の施工手順に起因して構造物重心が偏心しており、架構設計上は異なる反力を考慮したが、仮受けジャッキは受替え時の制御に差異が生じないように左右同型とした。

(3) 仮受け時の既設構造・既設線に及ぼす影響の低減

a) プレロード工計画

仮受け架構への受替えに先行して、まず試験的に設計荷重（既設高架橋の死荷重と活荷重を基に設定；本件では死荷重の140%に相当）まで載荷除荷する‘先行プレロード’を線路方向2列（×左右2基=計4基）ずつ行った後、受替え時の衝撃緩和のため死荷重まで導入する‘本プレロード’を全数同時に行う。

先行プレロードでは仮受柱の支持力確認、初期沈下の促進とともに躯体変状の有無を確認する。プレロード荷重（設計荷重）の対死荷重比は特徴③のとおり140%と一般より大きいことから、構造・軌道への影響の小さい導入計画、軌道保守の体制の確保、計測管理が課題に挙げられた。

b) 先行プレロードによる影響検討

先行プレロードとして既設高架橋の死荷重以上の荷重を逆方向に載荷するため応力増加の影響を検討した。また、載荷に伴う高架橋変位が除荷後も残留するリスクがあるため、軌道面変位は載荷時の状態でも列車走行に支障しない範囲内に制限することとした。

既設高架橋応力は線形骨組みモデルによる許容応力度法により検証し、許容応力度（基準値の1.3倍割増し）を超過しないことを確認した。また、一部ラーメンについては杭に引抜き力が発生するが、引抜き抵抗力以下であることを確認した。

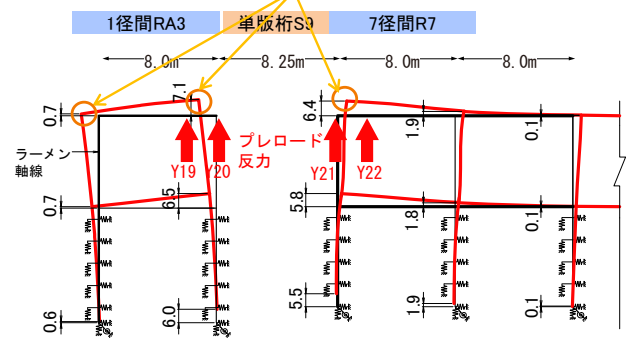
軌道面の変位については、特徴④のとおり軌道に変状が生じた場合に軌道整備による対応が困難なことから、整備基準値をベースに着手前現状の軌道変位も考慮して高低3mm（10m弦正矢法）を上限に検討した。検討結果の例を図-12に示す。杭長が短く引き抜き抵抗の小さいラーメンでは高架橋全体が引抜き方向に回転変位が生じる結果を得た。単版桁片側のみに載荷した場合4.2mmの高低が生じるのに対して、単版桁前後を同時載荷した場合は2.2mmの高低に抑えられる。このような検討を基に高低3mm以下に抑える載荷順序を決定した。

c) 先行プレロードの導入計画

設計荷重まで20%ずつ段階的に載荷し、各載荷段階において、15分間で3/100mm以下の変形または60分間で著しい変化がないことを確認して次段階に進めることとした。死荷重の60%までは構造・軌道への影響は小さいことを構造計算で確認したうえで線路閉鎖前に行うこととし工程短縮を図った。60%を超える処女載荷段階は線路閉鎖後に行うこととし、線路閉鎖解除までに除荷と変状時の整備を行う時間工程で計画した（図-13）。

設計荷重(死荷重×140%)載荷時の変位

載荷箇所ケース	絶対変位(mm)	10m弦高低(mm)
i) Y19,Y20の2列載荷	0.7, 7.1, 0.0	4.2
ii) Y19~Y22の4列載荷	0.7, 7.1, 6.4	2.2



a) 変位検討時は設計せん断バネでモデル化
b) 躯体応力検討時は安全側に杭頭固定でモデル化

線路方向骨組モデル
(赤線：変形図、数値：絶対変位[mm])

図-12 先行プレロード時の変位量 (RA3~R7)

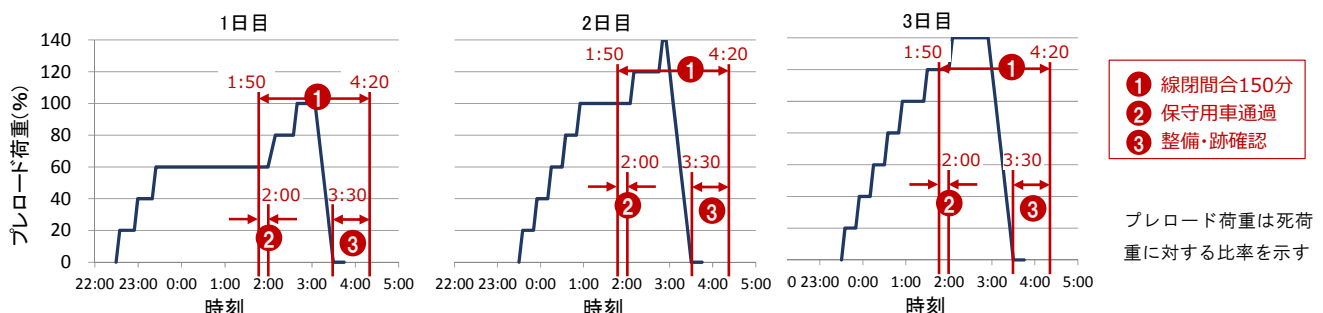


図-13 先行プレロード時の時間ステップ

d) 先行プレロード時の計測計画

各段階における構造物および軌道の変形量の確認のため、構造物のデジタルレベルでの常時計測（前出の写真-4）、ワイヤレス沈下センサ（写真-8, 9）によるレールおよび仮受け架構の沈下・隆起の計測，作業前後のレベルによる測量を併用することとした。また，施工に先立って既設高架橋のクラックを調査・記録し，各段階においてクラックの進展や新たなクラックの有無を確認することとした。



写真-8 軌道計測(全景)



写真-9 軌道計測(センサ受信機)

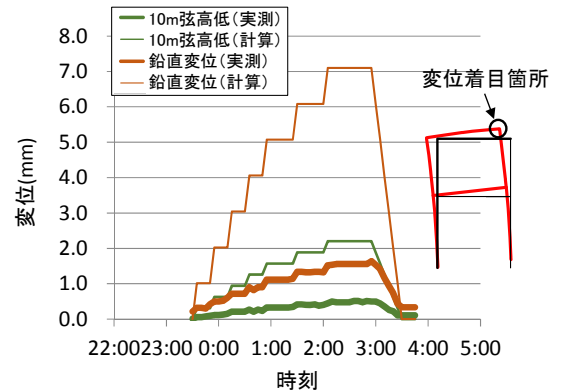


図-14 先行プレロード時の変位量の計算値と実測値の差異

e) 先行プレロード施工結果

先行プレロード中の変位は計算と同様の傾向で生じたが，値は計算の約 20%であった（図-14）．この差異は主に既設杭の実際の引抜き抵抗が，計算に用いたモデル（設計せん断ばね）よりも大きいことによると推察される．なお，除荷後は復位し残留変位は認められなかった．また，構造物のクラックの進展等も認められなかった．

仮受ジャッキ 72 基全ての先行プレロードを終えて，設計荷重である死荷重の 140%まで載荷することができた．

f) 今後の施工

現在，本プレロードおよび既設柱の切断を全数行って，仮受けジャッキへの受替えが完了している．今後は掘削および構築の進捗に伴ってリバウンドや沈下が予想されるが，継続して計測管理体制の確立を図り，事前に検討した各段階の予測変位との対比とジャッキストローク管理を行いつつ施工を進める．

5. おわりに

本稿では鉄道営業線として供用中の RC ラーメン高架橋を長区間にわたってアンダーピニングするための計画と安全性確保対策について述べた．営業線の受替えは狭あいな条件下での繊細な施工が求められるが，設計・施工段階において慎重な検討を重ねることで施工生産性向上との両立を図れた対策も含まれており，今後の同種工事の参考となることを期待する．

[参考文献]

- 1)山道ほか：鉄道営業線高架橋アンダーピニング工事の設計・施工，橋梁と基礎，vol.51，No.3，pp.31～36，2017.
- 2)伊藤ほか：鉄道ラーメン高架橋の連続アンダーピニング工事の計画と施工実績，第 72 回年次学術講演会，VI-118，pp.235～236，2017.
- 3)伊藤ほか：場所打ち杭施工時の近接杭支持層防護・孔壁防護の施工実績～鋼管圧入工法(ケコム工法)と高圧噴射攪拌工法(ジェットクリート工法)の適用，第 70 回年次学術講演会，VI-016，pp.31～32，2015.
- 4)伊藤ほか：強度抑制した高圧噴射攪拌による場所打ち杭孔壁防護—ジェットクリート工法—，基礎工，Vol.45，No.6，pp.74～77，2017.
- 5)伊藤ほか：連続した鉄道高架橋アンダーピニング工事の計画と施工実績～仮受工計画概要と先行プレロード工の実績，第 71 回年次学術講演会，VI-092，pp.183～184，2016.