

営業線鉄道函体のアンダーピニングによる開削トンネル本体工の建設

(神戸山手線(南伸部)大道交差部工区)

阪神高速道路(株) 建設事業本部神戸建設部神戸山手線建設事務所 玉田 和也
阪神高速道路(株) 建設事業本部神戸建設部神戸山手線建設事務所 宮本 義広
阪神高速道路(株) 建設事業本部神戸建設部神戸山手線建設事務所 後 昌樹

要 旨

神戸山手線南伸部の大道工区交差部は、重交通道路の地下空間において阪神高速道路の開削トンネルが神戸高速鉄道の営業線を鋭角に下越する形で近接・立体交差する工区である。本工区は営業線地下鉄函体を仮受けしながらの工事であり、その規模は仮受け延長 120m、仮受け総重量 20 万 kN、仮受け期間 6 年間となり、国内最大級のアンダーピニングでの開削トンネル工事であった。また、本道路函体は将来にわたり鉄道函体の支持構造としても機能するため、異方向の多段配筋が必要となり、通常のボックスカルバートでは類を見ない過密配筋となった。このような特殊条件のもと安全性を考慮しながら無事に道路函体完成に至った。本稿は、鉄道函体仮受から道路函体構築完了に至るまでの施工に関する問題点とその対応について述べる。

キーワード: アンダーピニング、開削トンネル、過密配筋、高流動コンクリート

はじめに

神戸山手線南伸部の大道工区交差部は、重交通道路の地下空間において阪神高速道路の開削トンネルが神戸高速鉄道の営業線を鋭角に下越する形で近接・立体交差する工区である。本工区は道路の縦断線形上、最も深い場所に位置し、掘削深さは最深部で 31m となる。また営業線地下鉄函体を仮受けしながらの工事であり、その規模は仮受け延長 120m、仮受け総重量 20 万 kN、仮受け期間 6 年間となり、国内最大級のアンダーピニングでの開削トンネル工事となった。仮受けする地下鉄函体の施工期間中の変位管理値は、函体の応力と列車の走行性から決まり、鉄道軸方向に対して鉛



図-1 位置図

直方向の相対変位で限界値が 10m間で 2.2mm と非常に小さな値に制限された。従来の施工管理技術でこの厳しい管理値を満足できる方法は無く、技術開発で克服しなければならない大きな課題を抱えた工事であった。また、本工区の道路函体は、

営業中鉄道函体のアンダーピニング下で構築後、鉄道函体の支持構造としても機能するため、異方向の多段配筋が必要となり、通常のボックスカルバートでは類を見ない過密配筋となる。本稿はこのような特殊条件のもと、鉄道函体仮受から道路函体構築に至るまでの施工に関する問題点とその対応について述べる。

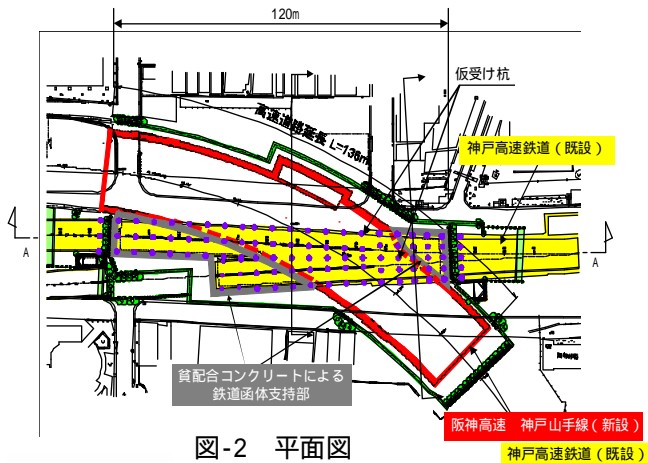


図-2 平面図

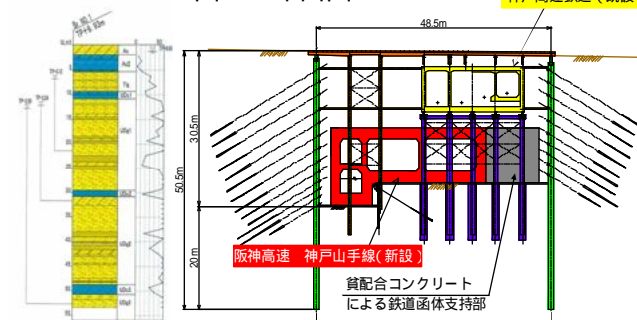


図-3 断面図 (-)

1. 仮設工

1-1 鉄道函体直下での仮受杭の施工

通常の仮受け工事では、仮受け杭にH鋼を採用していることが多い。今回工事では、函体の総重量が20万kN(杭1本あたりの軸力に換算すると2000kN)と重く、しかも施工期間中の地震時水平力を仮受け工で負担する必要があった。H鋼では応力的に不可能で900mmの鋼管杭を採用した。仮受け杭の施工は、鉄道函体直下の高さ3m、幅2.5mの狭隘な導坑内から施工する必要があった。

その施工ステップは下記の通りである(図-4)。

函体直下の地盤を薬液注入で強化する。

函体直下にメッセル工法で導坑を掘削する。

導坑内に大口径ボーリング機を入れ鋼管杭を施工する。

導坑は全数で22列ある。最初に奇数列の導坑掘削と杭施工を行い、仮受け完了後、偶数列の導坑掘削を行う手順とし、函体に与える影響を極力小さくした。

仮受け杭の施工は改造した大口径ボーリングマシンにより行った。導坑内から施工できるように、機械を抜本的に改造し、高さ2.9mで施工可能な機械を開発した。また、鋼管の継ぎ手には、溶接継ぎ手と機械式継ぎ手の併用により施工サイクルを短縮し、支持力低下の原因となるスライムの沈降を沈降時間を短くすることで防止した。施工が完了した仮受け杭は、全本数、鉄道函体で反力を取り設計荷重の110%荷重を載荷するプレロードを行って、支持力を確認するとともに、施工時の沈下を減少させた。

以上、狭隘な作業環境の導坑内からの施工であったが、全96本の鋼管杭で、設計値以上の支持力を確保することに成功した。

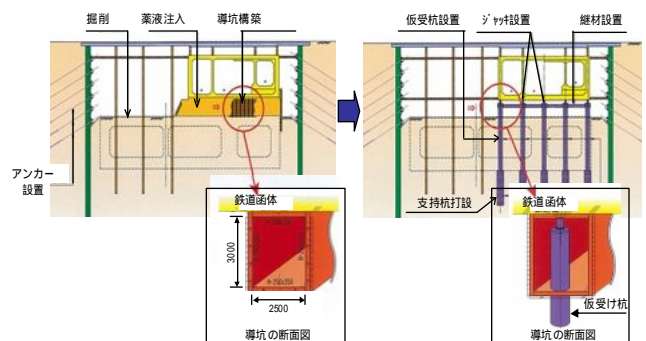


図-4 函体下施工手順図

改造前

改造後

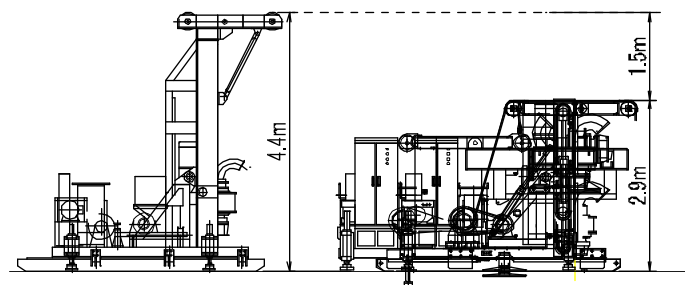


図-5 大口径ボーリングマシンの改造

1-2 仮受け杭の管理「仮受け工自動制御システム」

施工中、仮受け工に生じる沈下や隆起の要因の

代表的なものを以下に示すが、仮受け工は常時変動していた。

- ・掘削に伴う地盤のリバウンド（実測変位で 37mm 隆起を測定した）
- ・構造物の自重による地盤の弾性沈下（実測変位で 10mm 沈下を測定した）
- ・温度変化に伴う杭の伸縮（実測変位で 2～3mm の日変動を測定した）

仮受け期間中の鉄道函体の変位の管理値は、鉄道函体の応力と列車の走行性から決められ、鉄道軸方向に対して鉛直方向の相対変位で限界値が 10m 間で 2.2mm と制限された。この条件は厳しく、1 日の温度変化で鋼管杭の伸縮により管理値をオーバーしかねない値であった。従来技術でのジャッキ制御は、オペレータの手動操作によりジャッキ圧・ジャッキストロークを調整していた。しかし、この方法では一度に多くのジャッキを調整することは困難で、本工事のように管理値が厳しい工事への適用には課題があった。

そのため、以下に示すような『仮受け工自動制御システム』を新規に開発した。

鉄道函体の絶対変位量、ジャッキ荷重を 24 時間秒単位で連続計測する。

計測データとジャッキの伸縮はコンピュータで集中管理する。

測定変位が管理値に近づく傾向が現れた場合には、複数のジャッキを作動させ、鉄道函体の相対変位が小さくなるよう自動的に制御を行う。

変位制御の例を、図-6 に示す。この図で、ある杭（赤い杭）の変位が管理値に近づいたと仮定する。その場合、まず 1 次制御範囲のジャッキを伸縮させ制御する。1 次制御範囲のジャッキで制御しきれない場合には、2 次、3 次とジャッキを伸縮させる範囲を拡大させ変位量の修正を行う。このような制御を、仮受け杭に設置された 120 台のジャッキ全数を連動させて制御するシステムを構築した。

この杭が管理値に接近した場合、周囲のジャッキを伸縮させ変位を制御する
(1次 2次 3次の順で対応するジャッキを増加させる)

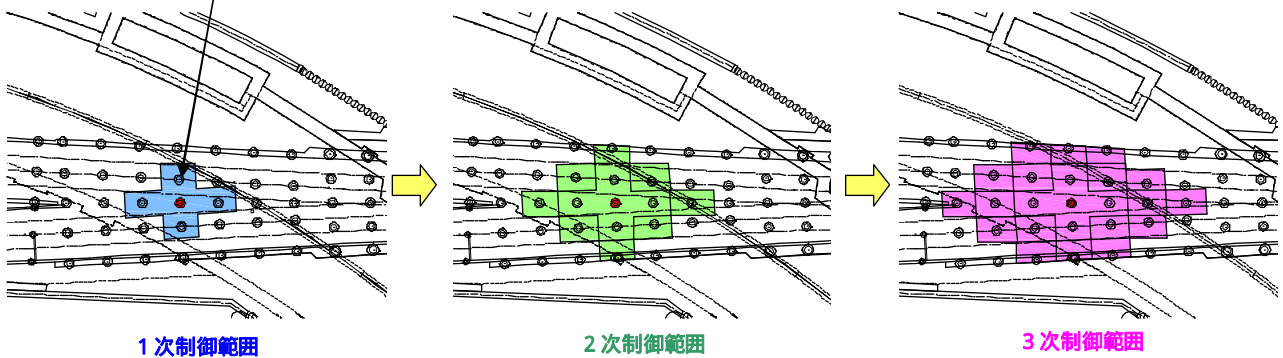


図-6 変位制御の模式図

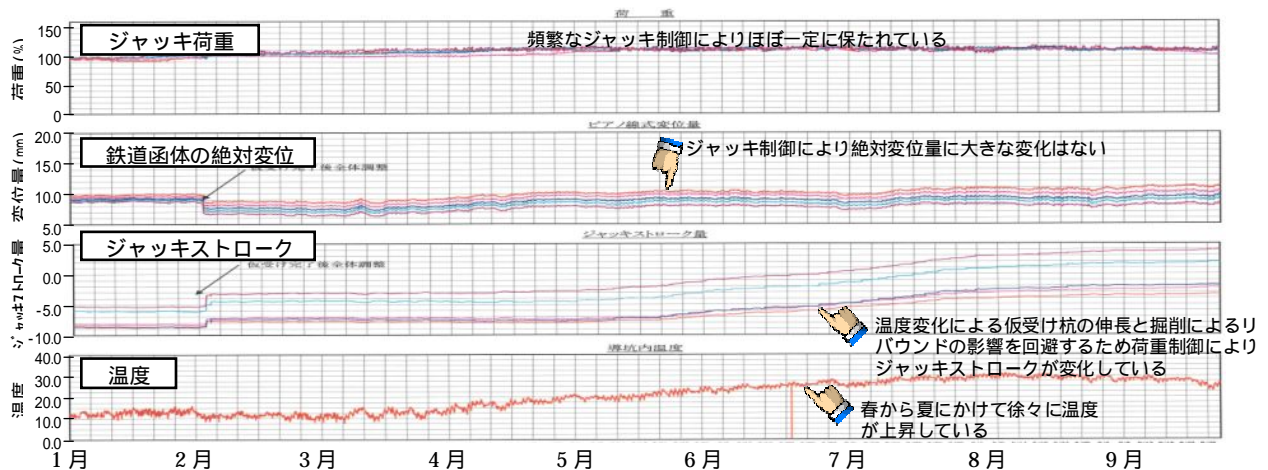


図-7 施工中の鉄道函体の変位制御状況経時変化図

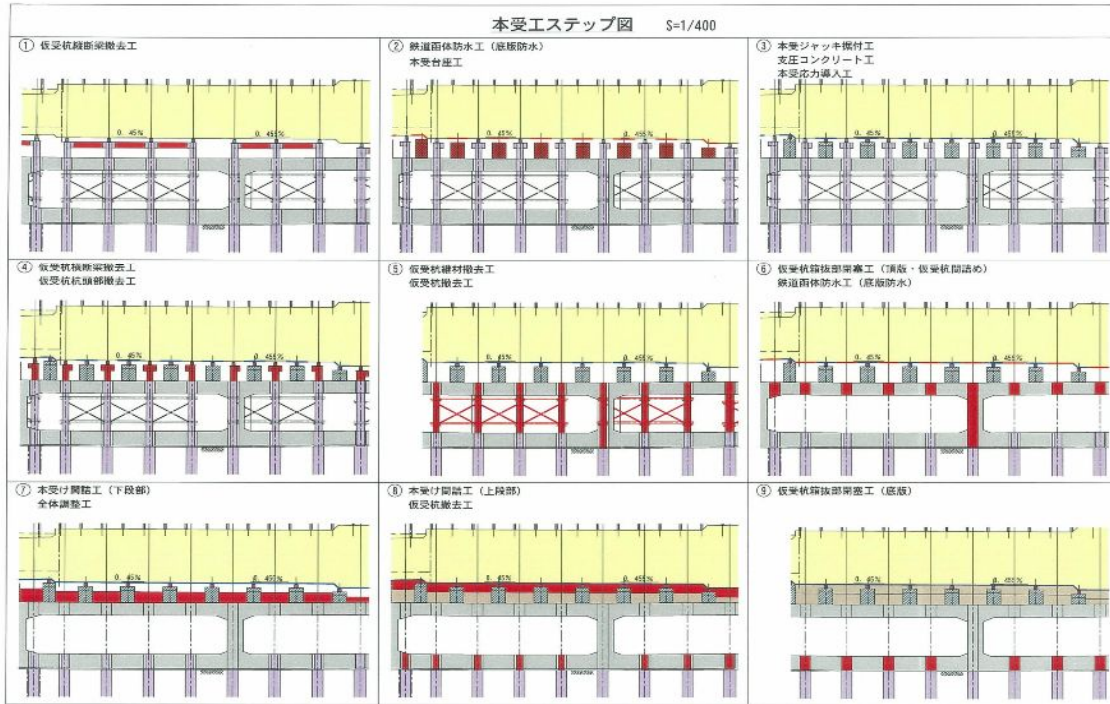


図-10 本受工施工ステップ概要図

これにより、2,4ブロック受替え後に撤去したジャッキは52台となり、そのすべてを1,3ブロックの受替えのために転用することにより有効利用をはかった。

本受応力導入においては、これまで仮受杭にて支持していた応力を道路函体上の本受架台に移行するため図-9に示すように、全本受荷重を20%ずつ計5ステップに分割しながら施工を行った。

施工はすべて最終列車通過後から始発列車点検前までの軌電停止作業となった。また鉄道函体への影響については鉄道函体内に設置した水盛式沈下計のデータを随時計測しながら、荷重の移行によって鉄道函体に想定外の変形が生じていないか実地観測を行った。その結果、ジャッキ制御による影響はほとんどなく、荷重の移し替えを完了した。

(2) 縦断梁撤去時の仮受構造の安全性の検討

鉄道函体の本受替えを行うためには、道路函体直上に鉄道函体軸方向と直角方向に本受用の台座を構築する必要がある。しかし、仮受杭頭部には縦横断方向に繋ぐ梁が設置されており、これと干渉することとなる。よって本受け工に際し、仮受杭の杭頭部に設置されている縦断梁を撤去するこ

とに対する安全性の検討を行った。

安全性の検討については、仮受構造を3次元の立体フレーム解析を用いた(図-11)。その結果、縦断梁の撤去前後において杭頭部での変形量に大きな差異がないこと、仮受杭の支持力に影響がないこと、また各仮受部材が応力度的に問題がないことを確認できたため、先行して縦断梁を撤去し台座を構築することとした(写真-1)。さらに施工後の安全性について検証するために、縦断梁の撤去前後において列車走行に伴う振動計測を行い、その差異の確認を行った(図-12)。その結果、解析結果で得られた値と比較すると、実測値は非常に小さく、また縦断梁撤去前後の比較に関してもほとんど差異がないことを確認した。

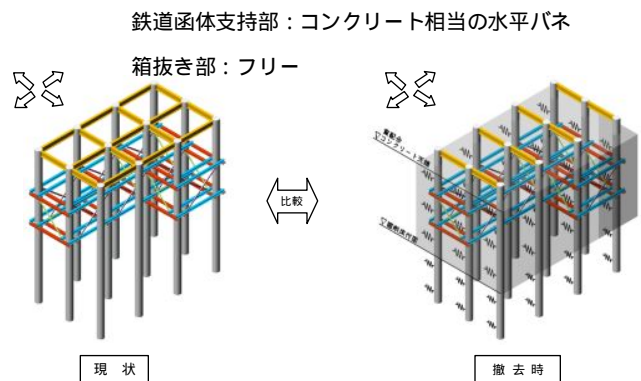


図-11 仮受工立体図

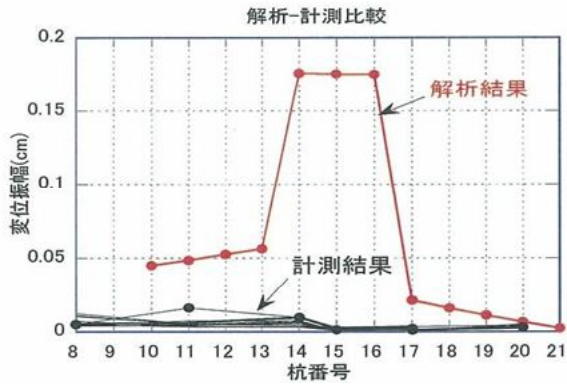


図-12 振動解析結果と実測値との比較



写真-1 縦断梁撤去後台座構築状況

2. 道路函体工

2-1 仮受杭との干渉

道路函体を構築する際、平面的に 53 本の仮受杭が干渉する。これらの杭は躯体構築中も鉄道函体を仮受け支持するものであるため、このうち 44 ヶ所については道路函体の底版及び頂版に箱抜き型枠を設置し、躯体構築の影響を排除した(写真-2)。また道路函体側壁に干渉し、線形上、回避不可能な 9 本の杭についてはスタッドジベルを打設し、側壁に巻き込みながら打設することにより一体化を図った(写真-3)。



写真-2 底版部仮受箱抜き状況



写真-3 側壁に抱き込まれる仮受杭の処理

2-2 仮受杭継材との干渉

鉄道函体の仮受け構造と道路函体が平面的に交差するため、仮受け構造の水平継材及び斜材が側壁配筋の障害となり、ボックスカルバート構造が成立しない。よって道路函体の構築に際し、頂版及び側壁に干渉する水平継材(下図赤及び青で表示)や斜材(紫及び緑で表示)を撤去した場合の仮受け構造の安定性について 3次元フレーム+シェルモデル解析にて行った(図-13)。その結果、撤去前後の影響を比較し、影響が極めて軽微であり対策は不要であることが確認できたため撤去に着手した。さらにその検証として、継材撤去前後において列車走行時に発生する微振動計測を行い、その影響がほとんどないことも確認した。

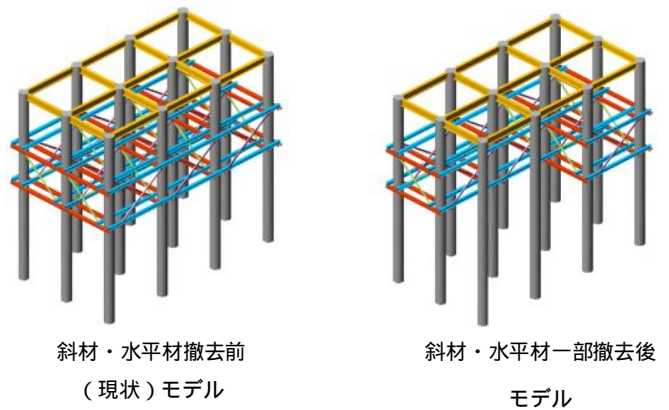


図-13 仮受け杭継材撤去図

2-3 輻輳鉄筋に対する諸問題

新設道路函体の主筋と仮受け杭が干渉し道路函体の鉄筋は連続して配筋できない状況であった。よって、完成時の主筋とは別に仮受け杭と平行に補強鉄筋を配置する必要が生じた(図-14)。そのため、本構造物は道路函体の構造鉄筋として最

も多いところで主筋4段と補強鉄筋4段が重なる最大8段の配筋となる。またこれらの配筋が約30°の角度をもって立体的に交差するため、鉄筋間の離隔も非常に小さくなっている。このため全ブロックの平均鉄筋量は150kg/m³であるが、鉄道函体と平面的に干渉するエリアについては鉄道補強鉄筋が配筋されるため、350kg/m³以上の鉄筋量となっている。

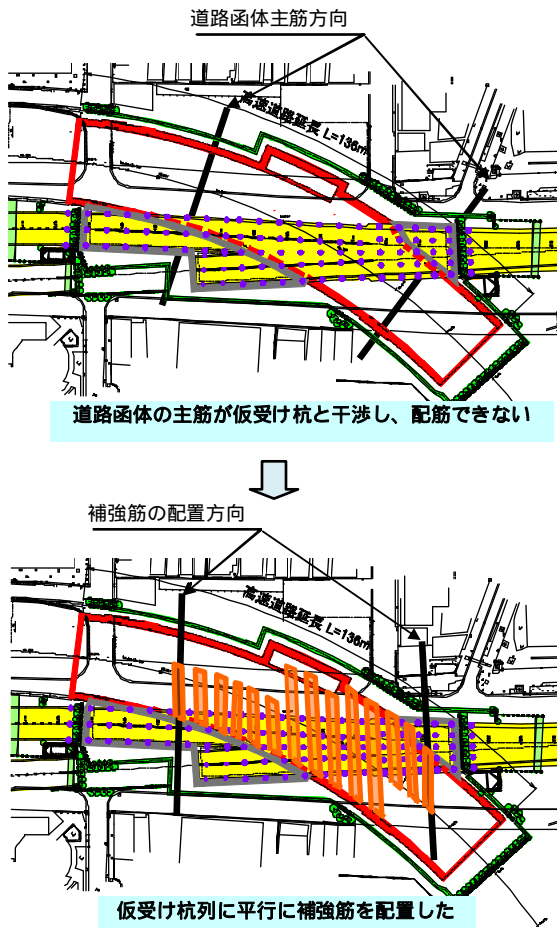


図-14 補強鉄筋配置図

(1) コンクリートの充填性

配筋が輻輳し、しかもすべての鉄筋が剛結され、打設時にフレキシブルホースを投入する打設口が確保出来ない状況においても、所要の品質を確保できる材料の選定が不可欠であり、検討の結果、マスコン対策のための低発熱コンクリート(30-18-20L)と高流動コンクリートを併用する形での施工となった。

1) 要求性能の決定(自己充填性ランクの決定)

土木学会「コンクリート標準示方書[施工

編]」では、自己充填性ランクを構造物の構造条件に応じて3つのランクに分類している。一般的に自己充填性能が上がるにつれて、必要になる単位粉体量及び高性能 AE 減水剤の使用量が多くなるため、コンクリート単価は増加する。したがって、経済的な配合設計を行うためには、構造物に応じた適切な自己充填性ランクの選定が重要になる。そこで、実物大供試体による自己充填性の照査を行い、最終的に本構造物に適用する高流動コンクリートの充填性をランク2とした(写真-4)。また、この充填性確認実験の結果、上部1.5mをスランブ18cmのコンクリートを使用し、コンクリート吐き出し口から高さ1.5mを超える部分については高流動コンクリートを使用することにした(写真-5)。



写真-4 実物大供試体によるコンクリート充填性確認試験



写真-5 コンクリートの切断面確認状況

2) 施工概要

高流動コンクリートを適用した箇所は鉄道函体下の鉄道補強筋が輻輳する3~10ブロックの底版と頂版である。表-1に配合設計における目標品質を示す。また、表-2にコンクリート配合及び使用材料を示す。セメントは、他の部位と同様に低熱ポルトランドセメントを使用し、化学的に不活性である石灰石微粉末を使用して単位粉体量を580kg/m³とした。また、フレッシュ時の品質変動を抑制する効果を有する増粘剤を使用して品質安定性を高めた。

製造は2社のプラントを使用して行った。両プラントとも、コンクリートの練混ぜは、水平二軸強制練りミキサ（容量3.0m³）を用いて行い、1バッチ2.25m³練りとした。また、練混ぜ時間は、両プラントとも全材料投入後180秒とした。

コンクリートの打設は、東・北ヤードに油圧ピストン式のポンプ車を各1台配置して、2系統にて行った。また、各系統とも最大圧送距離は水平換算で約250mであり、吐出口からの流動距離が6m以内になるように6つのT字管とシャッターバルブを操作して打設した。圧送による自己充填性の低下もなく、良好に打設を行うことが出来た。

表-1 目標品質（ランク2）

試験項目	目標値	試験規格
圧縮強度	30N/mm ²	JIS A 1108
スラップ厚	650 ± 50mm	JIS A 1150
空気量	4.5 ± 1.5%	JIS A 1128
ホック充填高さ	300mm以上 (障害R2)	JSCE-F 511

表-2 配合及び使用材料（プラント：タイコ）

W/C	Air	s/a	単位量(kg/m ³)					VIS	SP
			W	C	LP	S	G		
(%)	(%)	(%)	W	C	LP	S	G	(W×%)	(P×%)
50.0	4.5	47.1	165	330	250	722	822	0.165	10.44

使用材料	記号	摘要
セメント	C	低熱ポルトランドセメント 比重3.24
石灰石微粉末	LP	比重2.71
細骨材	S	唐津産海砂:男鹿島産砕砂=7:3 比重2.57
粗骨材	G	男鹿島産砕石 比重2.61
増粘剤	VIS	バイオポリサッカライド
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系

(2) スターラップの施工性

頂版及び底版の配筋が多いところで主鉄筋が4段となり、鉄筋間隔がそれぞれの芯で100mmであることから、スターラップを鉄筋に掛けるための自由度が極めて制限されることになる。よって使用箇所に応じたスターラップ形状の選定を行う必要があった。選定に際しては前述の実物大供試体を用いた充填性確認試験時に、鉄筋を組立てる際、設計仕様のスターラップが施工可能か否かについて実験を行った。その結果、鉄道補強鉄筋と交差する箇所については一般的なスターラップでは対応出来ないことがわかった。よって、そのエリアについてはプレート定着型せん断補強筋を用いた(表-3)(写真-6)。

表-3 スターラップの施工性比較検討結果

場所毎に配筋状況が異なるため、物理的に設置可能かを判定した。

フック形状	半円形	プレート定着型 せん断補強筋	鋭角	直角
模式図				
性能	阪公の標準仕様。曲げ半径： $r=2.5\phi$ 、フック長：8 ϕ	半円形フックと同程度の耐力を有する。	半円形フックほどではないが、主筋拘束効果はある程度期待できる。	かぶり剥落時の耐震性能が懸念される。
上筋	阪公標準のみ	○	○	○
	斜め補強筋部(シングル)	○	○	○
下筋	阪公標準のみ	○/箱抜き近傍は×	○/箱抜き近傍は×	○/ハンチ筋付近は×
	斜め補強筋部(シングル)	×	○	○
かぶり部への侵入	標準	半円形より小	半円形と同等	斜め筋と干渉して傾くと、かぶり部に侵入する。
	備考	1本物に対応可		



写真-6 プレート定着型せん断補強筋

おわりに

本工事は、神戸山手線全路線の中で最も技術的難易度が高い、神戸高速鉄道函体との交差部工区であった。本工事を通じて開発した技術は、仮受け工事の安全性・合理性を飛躍的に向上させたもので、その意義は大きいと考える。

また、開発した様々な施工技術は、有効性・安全性を確認した完成度の高い技術となっており、今後、増加する都市部の様々な立体交差工事等で活用可能な技術である。社会の発展に大きく寄与できる技術開発成果であると考えます。

謝辞：本稿の事業は平成 10 年度以降、神戸高速鉄道(株)への委託工事等を経た後、阪神高速工事となり現在に至っている。

最後に紙面を借りて、神戸高速鉄道(株)・工事関係者をはじめとする関係各位のご指導・ご協力に対し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 田中泰雄, 井上真次: 大規模な仮受け工の設計と施工 (その 1) - 既設鉄道函体に設置した計測データの評価 - , 土木学会第 57 回年次学術講演会, 2002.
- 2) 田中泰雄, 井上真次: 大規模な仮受け工の設計と施工 (その 2) - 鉄道函体縦断方向の鋼性評価 - , 土木学会第 57 回年次学術講演会, 2002.
- 3) 渡部幹広, 井上真次: 大規模な仮受け工における導坑施工方法の改善, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 2003.
- 4) 富樫昇, 櫻井春輔: 地下鉄営業線の大規模アンダーピニング工の動的挙動に対する検討、土木学会鉄道力学シンポジウム, 2006.
- 5) 田島新一, 井上真次: 大規模なアンダーピニングの設計と施工 (その 2) - 3 次元シェル解析による仮受け設計及び計測結果との比較 - , 地盤工学会第 38 回研究発表会, 2003.
- 6) 富樫昇, 井上真次: 大規模なアンダーピニングの設計と施工 (その 6) - 仮受けされた鉄道函体の列車走行時の振動解析 (その 2) - , 地盤工学会第 41 回研究発表会, 2006.
- 7) 神戸市道高速道路 2 号線 (南伸部) と神戸高速鉄道東西線との立体交差部における基本協定 第 4 回変更, 2005.6.
- 8) 神戸高速鉄道(株): 神戸市道高速道路 2 号線の神戸高速鉄道東西線との立体交差部施工法検討及び詳細設計業務報告書, 1999

CONSTRUCTION OF CUT AND COVER TUNNEL BENEATH

THE UNDERPINNING OF SUBWAY TUNNEL

Yoshihiro MIYAMOTO, Masaki USHIRO and Kazuya TAMADA

The Ohmichi tunnel section of the Hanshin Expressway Kobe Yamate Route (south extension) is where the route crosses under an underground tunnel of the Kobe Kousoku Railway beneath a heavy traffic road on the ground surface. It was a very large scale project in which the cut and cover tunnel was constructed beneath the underpinning of the subway tunnel, and extraordinarily dense reinforcement was required for the expressway tunnel which was supposed to be a permanent support of the subway tunnel once completed. This report describes the challenges encountered and measures taken during the project from the underpinning of the subway tunnel to the completion of the expressway tunnel.

宮本 義広



阪神高速道路株式会社
建設事業本部神戸建設部
神戸山手線建設事務所
Yoshihiro Miyamoto

後 昌樹



阪神高速道路株式会社
建設事業本部神戸建設部
神戸山手線建設事務所
Masaki Ushiro

玉田 和也



阪神高速道路株式会社
建設事業本部神戸建設部
神戸山手線建設事務所
Kazuya Tamada