

ドバイメトロプロジェクトにおける 高架橋と歩道橋の建設

大西一宏・大場誠道

ドバイメトロは、全長 75 km（高架橋部 61 km）におよぶ世界最長、かつ中東地区初となる全自動無人化運転による都市交通システムである。その工期は、計画設計から営業運転開始までの約 56 ヶ月であり、限られた期間で完了するためには、急速施工の採用が必須であった。そこで、高架橋の架設にはプレキャスト技術を全面的に採用し、また、地上駅に付随している歩道橋の架設にはドーリー車によるフルスパン一括架設を採用した。本報では、ドバイメトロ高架橋と歩道橋の建設について紹介する。

キーワード：プレキャスト型枠工法、スパンバイスパン架設、バランストカンチレバー架設、フルスパン一括架設

1. はじめに

近年著しい経済発展を遂げたアラブ首長国連邦のドバイ（図—1）では流入人口の急増に伴い、都市内の至るところで交通渋滞が恒常的に発生していた。この状態を改善するために、新たな都市内交通の手段としてドバイメトロプロジェクトがドバイ政府によって計画された。まず初めに建設に着手されたのが、Red Line と Green Line の 2 路線であった。その発注内容は、車両、信号制御、送電等の鉄道システムと、運営に必要な諸施設の建設工事を含んだ超大型鉄道プロジェクトとなった。建設工事では、限られた期間の中で大規模工事を完了させるために急速施工の技術を随所に盛り込む必要があった。



図—1 ドバイ位置図

2. プロジェクトの概要

ドバイメトロプロジェクトは、ドバイ政府機関の Road & Transport Authority (RTA) によって発注され、契約形態は設計施工一括のフルターンキーである。その契約内容は、軌道、車両、信号制御、地上駅、地下駅、駅舎連絡通路、操車場、トンネルや橋りょう、受電施設、駐車場、等の鉄道運行に必要な全施設を含む。本プロジェクトのコントラクターは日本企業を主体にしたコンソーシアム形式の企業体であり、軌道・車両・信号などの運行システムを担当する Rail グループと駅舎建築の設備を含む建設一式を担当する Civil グループに分かれる。

契約範囲である Red Line と Green Line の 2 路線の施工延長距離は Red Line が 52 km、Green Line が 23 km、併せて約 75 km になる。

最高時速 90 km/h の無人運転による列車（写真—1）は 5 両編成で、Gold Car（一等車）と Silver Car（二等車）に分かれ、さらに、女性子供専用車も用意されている。列車の運行は操車場に設置されている運行管理センターから中央制御されている。軌道は 1435 mm の標準軌で、スラブ軌道を採用し、集電方式は第三軌条方式である。線路線形は、最小平面曲線半径 250m、最大勾配 40% のスペックであり、都市内の厳しい線形にも対応できるものになっている。

駅舎内設備は全て空調が完備されている。これは、プラットホームも例外ではなく、プラットホームにフルハイトのスクリーンドア（ホームドア）を設置する



写真-1 運行中のドバイメトロ

ことで軌道部と完全に分離し、プラットフォームでの空調を可能にしている。このため、気温 40 度を超える厳しい夏の期間でも乗客の快適性が確保されている。

3. 高架橋の概要¹⁾

高架橋の橋桁は、PC 下路桁であり、一般部では複線軌道になっている。下路桁のウェブ上端部分は列車の床面とほぼ同じ位置であり、緊急時には乗客が容易にウェブ上端に移り、避難通路として利用することができるように配慮されている（図-2）。

既設埋設管の移設、道路の切回し、他の道路プロジェクトとの干渉を最小限にするために、本工事ではフーチング不要のモノパイル構造を採用した。杭の直径は 2.2m ~ 2.8m の大断面であり、直径 1.75 ~ 2.4 m の円柱橋脚に直接連結している（図-3）。杭はアースドリル工法による摩擦杭として設計した。支持層は地表面から 4 ~ 42 m 下の砂岩あるいはシルト岩層であり、杭長は 9 ~ 54 m となった。

メトロ全体の設計を通じて、優れた意匠が求められていた。高架橋の設計では、曲面を多用し、陰影を意識的に付けることで、全体にスマートな印象を与える

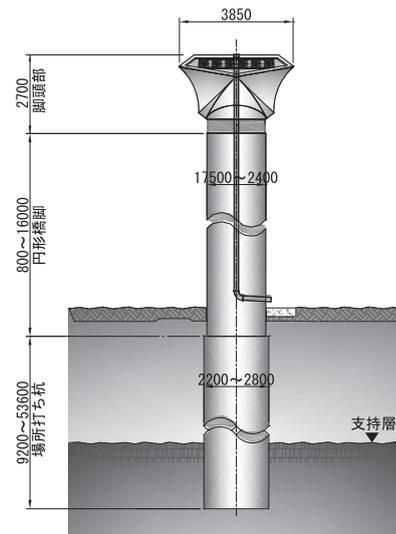
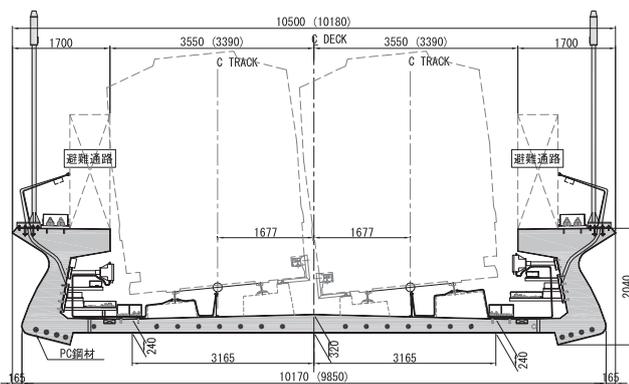


図-3 モノパイル構造

ことを目指した。例えば、橋桁の設計では、ウェブ外側を湾曲の形状とし、T 形橋脚の張出しばり（以下、ピアキャップと記す）の下面には複雑な 3 次元曲面を採用することで、スレンダーな外観を実現した。また、コンクリート表面は所定の耐久性を確保するために表面保護工法が施されているが、そのコーティングの配色の検討も行った。さらに、高架橋全体を同系色でモノトーンにするのではなく、ピアキャップの側面部や、支承部にアクセント的に濃い色のパネルを設置することで、高架橋の輪郭が鮮明になるように工夫している（写真-2, 3）。

基本的に橋桁は単純桁であり、標準的なスパンは 32 m とした。ただし、本線は都市内に建設されるため、道路や運河との交差部が多く、標準よりも長いスパンや、連続桁形式が必要となる箇所も点在した。長スパンの連続桁とする場合には、橋桁の構造や桁高を変えることが通常行われる方法であるが、本プロジェクトでは、スパンの違いや異なるタイプの橋が互いに隣接しても外観の連続性を保つように工夫している。



注) 上記は曲線区間の寸法を示す。括弧内の寸法は直線区間を示す。

図-2 橋桁 断面図

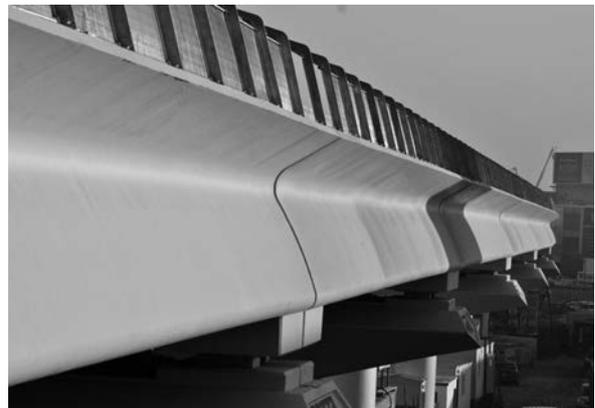


写真-2 橋桁 側面部



写真—3 ピアキャップ



写真—5 PCa型枠 吊込み状況

特に、長大支間のバランストカンチレバー架設による3径間連続橋では、橋桁断面に高い剛性が必要であり、その他の構造形式で用いられている下路桁形式では対応できないため、下路桁と箱桁を組み合わせた世界的にも珍しい橋桁断面とすることで、構造と意匠を両立させた。

4. ピアキャップの施工¹⁾

ピアキャップの施工には、プレキャストコンクリート型枠（以下、PCa型枠と略す）を用いた工法を採用した。この工法の採用により、①ピアキャップの3次元曲面への対応、②現場支保工の省略、③急速施工の実現、が可能となった。

PCa型枠は、新たに造成したプレキャストヤードで製作した（写真—4）。鉄筋はプレファブ化をすすめ、PCa型枠の製作サイクルを縮めている。さらに、PCa型枠の運搬前には、PCa型枠内部に場所打ちコンクリート部の鉄筋を予め挿入しておき、架設現場での作業を最小限にしている。PCa型枠は重さ56tであり、現場までトレーラーによって運搬し、クレーン

により橋脚上に設置する（写真—5）。

橋脚上のPCa型枠の設置精度が最終系の出来形を左右するため、位置決めにあたっては、特製の鋼製治具（写真—6）を橋脚上端とPCa型枠に取り付け、油圧ジャッキを用いて型枠の位置を微調整できるようにした。PCa型枠の位置が確定したのち、内部コンクリートを2回に分けて打設した。1回目の打設により橋脚と固定を確実にし、2回目でPCa内部を充填した。



写真—6 特製治具によるPCa型枠の調整状況



写真—4 PCa型枠製作状況

ピアキャップはPC構造であり、橋桁のスパン等に応じて5-19T15.7から7-22T15.7が配置されている。このプレストレス量は、完成時の荷重で決められていることから、施工にあたっては、橋桁の架設状況に応じて3段階に分割して徐々にプレストレスを導入することで、施工中の小さい反力でもオーバープレストレスになることを回避した。

5. スパンバイスパン架設による 橋桁の製作と架設²⁾

橋桁の施工では、1スパン分を2～4mの長さのセグメントに分割し、架設現場にて一体化するプレキャストセグメント工法を採用した。プレキャストセグメントを製作するための製作ヤードと、セグメントを保管しておくためのストックヤードを本プロジェクトの南端に設営した。製作ヤード内の設備の配置にあたっては、セグメント製作の効率を最優先した。

プレキャストセグメントの製作は次のような手順で行った。まず初めに、鉄筋組立て架台にて鉄筋籠を組み立て、組み上げた鉄筋籠はタワークレーンにより型枠へ移動し、コンクリートを打設する。コンクリートの養生には、皮膜養生剤を用いた。打設したコンクリートの強度がセグメントを移動するための所定の圧縮強度に達したことを確認したのち、セグメントをストックヤードに移動し、最低でもコンクリートが架設に必要な強度に達するまで仮置きしておく。ストックヤードは、計1750個のセグメントを仮置きできる広さを有している(写真一七)。



写真一七 プレキャストヤード全景

セグメントの製作には、ロングライン方式とショートライン方式の2種類を採用した。本プロジェクトの高架橋では直線橋の支間セグメントが大部分を占めるが、速いサイクルで製造できるロングライン方式をこれら大多数のセグメントに採用した。他方、直線橋のピアセグメントと曲線橋のセグメントには、平面線形に合わせた形状を製作できるショートライン方式を採用した。

製作ヤードには、本プロジェクト専用コンクリートを供給するために2基のコンクリートプラントも設置した。製作サイクル全体を速めるためには、所定の初期強度を早期に得ることがポイントであった。同時

に、ペルシャ湾沿岸特有の高温多湿の厳しい環境下において、設計耐用期間100年を満足する耐久性の高いコンクリートも求められた。そのため、日本ではほとんど採用されることのない水セメント比の低い高炉スラグ微粉末とマイクロシリカを混入したセメントを採用したが、配合にあたっては、ワーカビリティを確保し、締固め易さと初期強度発現を確実にするように混和剤を選定していく必要があった。

セグメントをストックヤードで仮置きした後、一般道を利用して架設地点までセグメントを運搬した。架設地点直下までのアクセスがない場合には、セグメントトランスポーターを利用して、既に架設された橋桁上からセグメントを運ぶこともあった。

スパンバイスパン方式によるプレキャストセグメントの架設には、延長105m、重量4200kN、最大吊荷重7350kNの架設桁(写真一八)を用いた。架設桁の形式はオーバーヘッド方式とし、この形式を採用することで、架設桁は架設地点直下からでも、既に架設された橋梁上のセグメントトランスポーターからのどちらでも、セグメントを架設することが可能になっている。



写真一八 架設桁によるスパンバイスパン架設

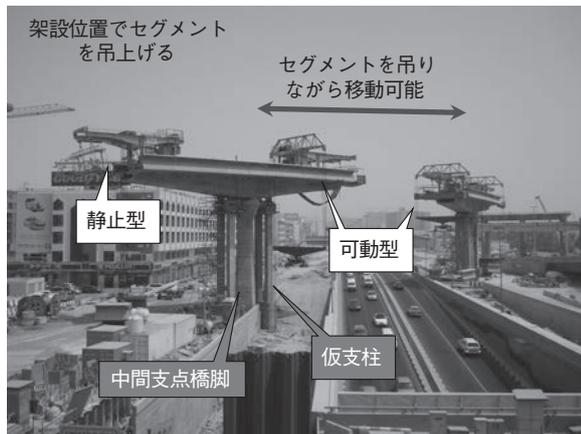
架設桁で全セグメントを吊っているあいだ、各セグメントの接合面にエポキシ製接着剤を塗布し、順次仮設PC鋼棒を緊張することで、接着剤をジョイント部に均等に分布させ、ジョイント部の水密性を確保している。全ジョイントを接着した後、本設のPC鋼材を桁端間から挿入し、緊張することで、セグメントを一体化する。全58kmのプレキャストセグメント工法による上部工に対して架設桁を9基導入し、延べ28ヶ月で架設を完了していた。

6. バラリストカンチレバーによる橋桁の架設³⁾

高速道路や河川を跨ぐ16箇所では、スパン44m

+ 72 m + 44 m の3径間連続橋を配置した。施工法はプレキャストセグメント工法によるバランストカンチレバー架設で、架設機械としてはエレクションノーズを用いる場合とクレーンを用いる場合の2種類を使い分けた。橋梁が既存道路上を横断し、クレーンの設置位置が限定される9橋には、エレクションノーズを使用し、残り7橋にはクレーンを使用した。以下には、エレクションノーズを使った場合について紹介する。

張出架設にあたっては、まず、中間支点橋脚のフーチング上に仮支柱（写真—9）を設置する。次に、ピアセグメントと第1セグメントをクレーンにて中間支点橋脚と仮支柱にそれぞれ架設する。仮支柱上には油圧ジャッキがあり、同ジャッキの操作により線形の初期調整を行う。線形調整後、フーチングと第1セグメント間に配置された仮固定用のPC鋼材を緊張し、柱頭部を仮固定する。

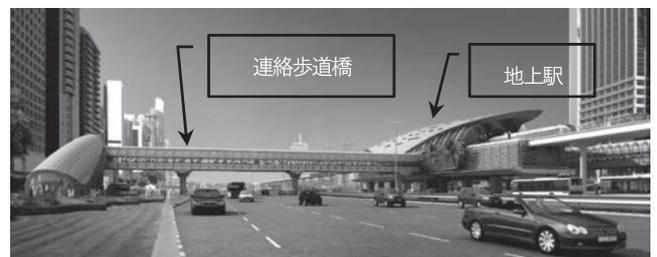


写真—9 エレクションノーズによる張出架設

柱頭部の仮固定後、エレクションノーズを設置する。本工事では可動型と静止型の2種類のエレクションノーズを使用した（写真—9）。静止型エレクションノーズは、自走により張出し先端に移動し、架設位置直下に搬入されたセグメントを吊上げる機能を有する。一方、可動型は、架設された橋の下の任意の位置でセグメントを吊上げ、セグメントを懸架した状態で自走により張出し先端に移動し、セグメントを架設する機能を有する。したがって写真—9に示すように、既存道路を横断するためセグメントの吊上げ地点が限定される中央径間側には可動型を使用し、セグメントの吊上げ地点が限定されない側径間側には静止型を使用した。エレクションノーズの設置後、第2セグメントから第9セグメントまでを順次張出しながら架設した。

7. 自走式運搬台車によるフルスパン一括架設

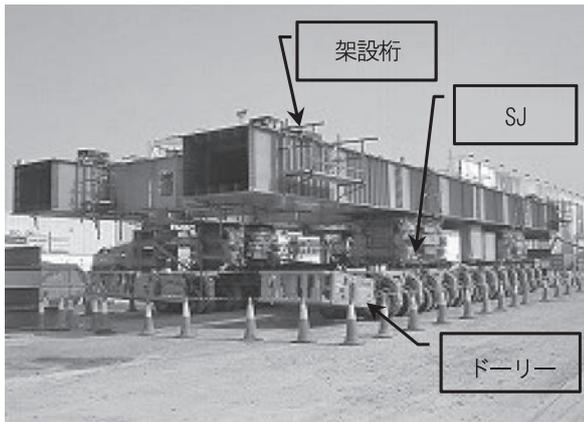
地上駅へのアクセスとして空調が完備されている連絡歩道橋は、主要幹線道路上を跨ぐ場合が多くなるが（図—4）、架設位置に防護工を施し鉄骨を現地で組み立てる従来工法では、当該工事では交通規制、施工箇所数および工期の面から現実的な施工法ではなかった。また、大型移動式クレーン（300 - 500tクラス2台）で相吊り架設する方法も考えられたが、大型クレーン2台の搬入から架設完了まで4時間以内という制約された条件下では工程管理上のリスクがあり、また、吊り込み時の桁の取り回しの困難さや、設置精度の問題もあった。



図—4 地上駅と連絡歩道橋

そこで、本プロジェクトでは、超重量物輸送用自走式運搬台車（以下、ドーリーと称す）によるフルスパン一括架設工法を採用した。施工にあたっては、作業ヤードで鉄骨組から建築外装取り付けまであらかじめ施工してから架設することで、架設後は設備工事および建築内装仕上げの作業のみとなり、本工法は工期短縮のみならず安全面、交通規制の面からも大きな利点があった。

ドーリー上のSJで直接歩道橋を支持すると、SJ上の仮受け位置と支承位置の片持ち部分が長くなり、たわみによる外装材の変形が許容を超えるという問題がでてきた。さらに、歩道橋ごとに橋長が異なるため、仮受け位置が毎回変わると、構造検討も毎回行わなければならないという煩雑さもあった。そのため、本工事ではSJ上に架設桁を設置し、架設桁上の仮受け位置を調整可能にすることで上記問題点に対処することとした（写真—10）。使用したドーリーの積載能力は、960t（12軸×2台並列連結）および720t（9軸×2台並列連結）であり、各ドーリーにはSJを2基搭載し、計4台（合計能力960t）のSJで歩道橋を扛上した。4台のSJはコンピュータ制御によりストロークを管理（最大ストローク3m）し、各SJ間で作業中最大5mmのレベル差が生じた場合自動停止するよう安全対策を講じた。



写真一10 ドーリー全景 (SJ, 架設桁搭載)



写真一11 歩道橋の運搬・架設状況



写真一12 架設が完了した歩道橋群

写真一11に歩道橋の運搬架設状況を、写真一12に架設完了状況を示す。

8. おわりに

2005年8月より始まったデザインビルドのドバイメトロプロジェクトは、2009年9月にRed Lineが、2011年9月にGreen Lineがそれぞれ開業した。その道程は決して平坦ではなく、幾多の壁にぶつかりながらも、ひとつひとつ乗り越え、問題を解決しながらプロジェクトを前に進めることができたのは、ひとえに関係者全員の弛まぬ努力があったからこそと感じている。また、軌道、鉄道運行システムも含んだコンソーシアムという形態、経験の少ない中東湾岸諸国における公共建設工事のシステムに戸惑いながらも、工期通りにプロジェクトを完遂することができたことは、ドバイはじめ中東湾岸諸国に日本企業の確かな技術力と高い信頼性を強く印象づけることができたのではないかと自負している。

ドバイメトロRed LineとGreen Lineが、今後、より長くドバイの人々の交通手段として利用され、さらに、今後増加が期待されている我が国のパッケージ型インフラ輸出の一例として先駆けとなれば望外の幸せである。

最後になりましたが、本プロジェクトに関わった関係者に深謝の意を表します。

JCMA

【参考文献】

- 1) 平岡ほか：デザイン・ビルドによる海外鉄道建設プロジェクトードバイメトロー、橋梁と基礎、Vol.43, No.10, 2009.5
- 2) 大西ほか：プレキャストセグメントによる下路桁形式鉄道高架橋ードバイメトロプロジェクトー、ナショナルレポート日本のプレストレストコンクリート構造物、第3回fibコンGRESS、2010.5
- 3) 齋藤ほか：ドバイ・メトロプロジェクト3径間連続桁橋のセグメント製作と架設、プレストレストコンクリート技術協会 第17回シンポジウム論文集、2008.11

【筆者紹介】

大西 一宏 (おおにし かずひろ)
鹿島建設(株)
海外支店 土木部
工事管理部長



大場 誠道 (おおば なりみち)
(株)大林組
生産技術本部 橋梁技術部
副部長

