

# コロンボ外郭環状道路の設計・施工

## — PC 桁 2 000 本の製作と河川横断部の施工 —

田邊 顕\*1・曾田 暢一\*2・大嶋 雄\*3・中 隆司\*4

コロンボ外郭環状道路は、スリランカ初の高速道路である南部高速（コロンボ～ゴール）とコロンボ・カトナヤケ高速道路（コロンボ空港～市街）をコロンボ郊外にて環状に接続する高速道路である。総延長 29.2 km、3 分割されて南側の 2 工区が JICA-国際協力機構により実施された（北側 1 工区は中国の資金にて実施中）。弊社は 3 工区のうち、中央の工区を実施したが、当該工区にはスリランカでは比較的大きいケラニ川や洪水の頻発する湿地帯を横断する橋梁があり、本線 8.9 km のうち実に 4.6 km が橋梁区間であった。本稿は、工期 3 年で詳細設計から開通を達成するために実施した設計上の工夫や施工上の取組みについて報告するものである。

キーワード：BS に準拠した詳細設計、PC-I 桁製作、PC 桁仮置き、移動式仮設桁架設

### 1. はじめに

スリランカの高速道路は、2011 年 11 月に日本政府とアジア開発銀行からの資金援助で、コロンボ郊外と南部の世界遺産都市ゴールを結ぶスリランカ初の南部高速道路 126 km が開通した。また、2013 年 10 月、中国資金により、コロンボ市内と空港を結ぶコロンボ・カトナヤケ高速道路 25 km が開通した。コロンボ外郭環状道路は、これら南部高速道路とコロンボ・カトナヤケ高速道路を繋ぐ 29.2 km の高速道路で、当社は 3 分割された中央の工区、8.9 km を施工した（図 - 1）。

### 2. 工事概要

本工事は、高速道路本線 8.9km、インターチェンジ 2 箇所、インターチェンジ部バイパス 1.9 km の建設工事である。契約時には PC 高架橋 4 橋、鋼高架橋 3 橋だったが、工事着工後、環境上の要求事項（洪水防止）で盛土区間約 2 km が PC 高架橋に変わり、鋼橋もすべて PC 高架橋に変更になった。最終的に橋梁はすべて PC 高架橋となり、高架橋 8 橋、オーバパス橋 5 橋、ランプ橋 8 橋となった。その結果、着工時には 788 本であった PC 桁（標準桁長 35 m）が、上記設計変更後、1 957 本にまで増加した（表 - 1）。

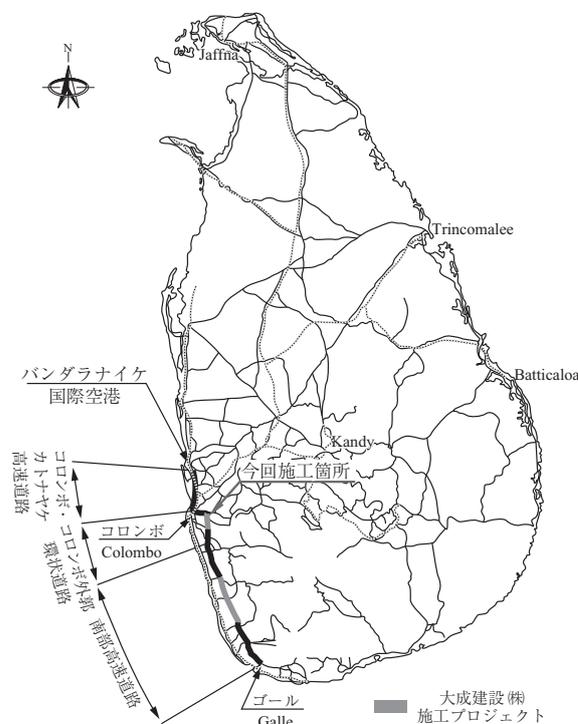


図 - 1 スリランカの高速道路ネットワーク



\*1 Akira TANABE

大成建設(株)  
国際支店



\*2 Masakazu SOTA

大成建設(株)  
国際営業部



\*3 Yu OSHIMA

大成建設(株)  
土木技術部



\*4 Takashi NAKA

大成建設(株)  
東北支店

表 - 1 工事概要

工事名	Outer Circular Highway (OCH) to the city of Colombo Phase 2, Northern section 1	スコープ	詳細設計 (本線橋 (上・下部・基礎)・軟弱地盤改良), 本線・バイパス・交差道路橋の建設, 料金所 (指定下請業者)
発注者	Road Development Authority (RDA)	準拠基準	プロジェクト技術仕様書, BS
コンサルタント	オリエンタルコンサルタンツ	橋梁	本線 8 橋 4.8 km, ランプ橋 8 橋 1.3 km オーバーパス橋 0.2 km
工事場所	Kadwattha ~ Kadwella (コロンボ郊外)	場所打ち杭	φ 1 500 1 700 本
契約工期	2012 年 1 月 9 日 ~ 2015 年 1 月 9 日 (契約時)	PC 桁	1 957 本 (標準桁長 35 m, 桁高 2 m)
資金	JICA (STEP: 本邦技術活用条件)	生コン	G50 5.0 万 m <sup>3</sup> , G40 1.2 万 m <sup>3</sup> , G35 4.9 万 m <sup>3</sup> , G30 15.3 万 m <sup>3</sup> , その他 1.5 万 m <sup>3</sup> , 合計 27.9 万 m <sup>3</sup>

本稿では、詳細設計での工夫、大量の桁製作、クリティカルパスとなったケラニ川を渡河する HB9 橋の施工上の取組みについて報告する。

### 3. 橋梁概要

HB9 橋の橋梁諸元を表 - 2 に、全体一般図および主桁断面図をそれぞれ図 - 2、図 - 3 に示す。また、平成 27 年 7 月時点の HB9 および Access Bridges 橋の全景を写真 - 1 に示す。

表 - 2 橋梁諸元 (HB9)

構造形式	PC2 ~ PC3 径間連続コンボ橋 (4 連)	縦断勾配	↗ +0.46%, ↘ -0.50%
橋梁延長	383 m	横断勾配	-2.50% ~ +2.50%
有効幅員	10.75 m	平面線形	R = 2 000 m

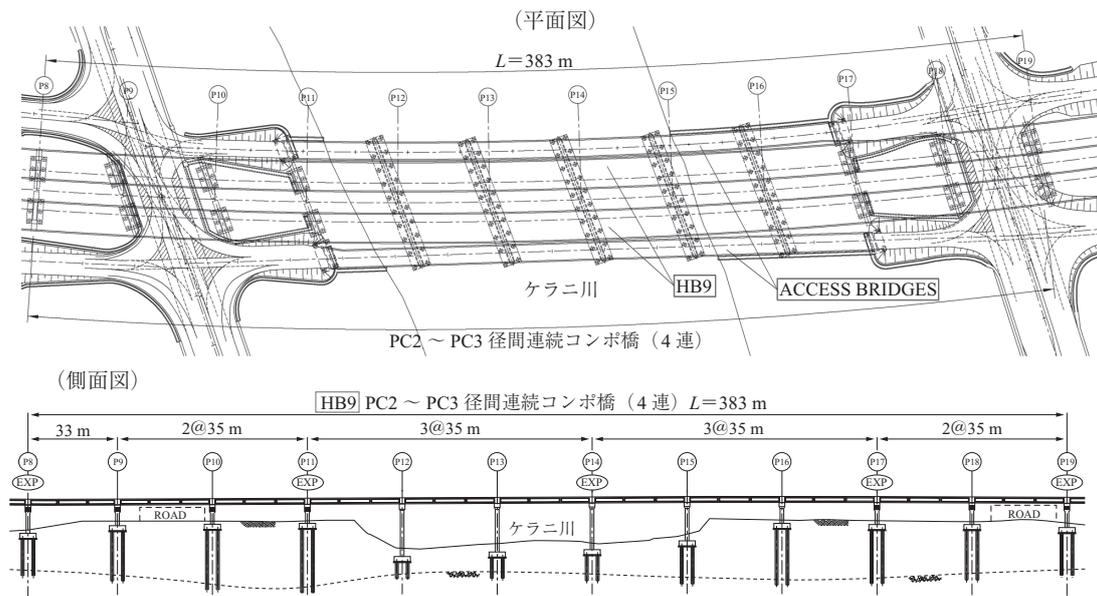


図 - 2 全体一般図

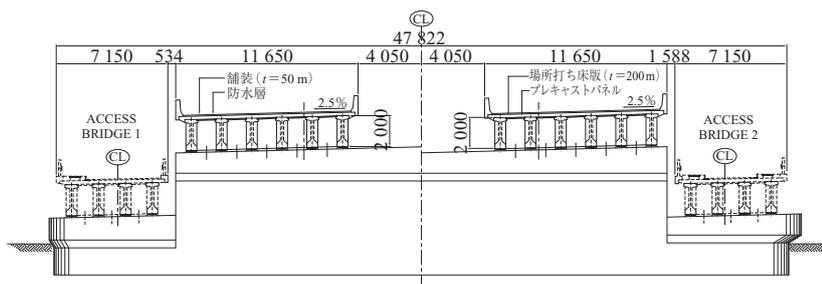


図 - 3 主桁断面図

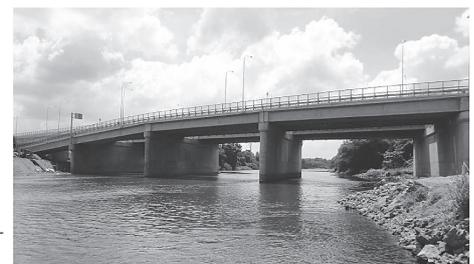


写真 - 1 HB9 および Access Bridges 全景

## 4. 詳細設計

### 4.1 詳細設計の概要

詳細設計に該当する橋梁は、本線 8 橋・ランプ 8 橋の計 16 橋である。コンセプトデザインは終了しており、上部工・下部工・基礎工・付属物の設計が必要となり、構造形式の変更も認められている。なお、軟弱地盤改良工法の選定も詳細設計に該当するが、本稿では割愛する。

準拠基準は BS コードであり、主として BS5400 Part-4 1990 Code of practice for design of concrete bridges を用いた。ほかには、本プロジェクト固有の技術仕様書がある。なお、発注者が作成した Bridge Design Manual (1997) に準拠すると、「地震に対する影響」を設計計算に考慮する必要はない。

詳細設計承認までの手順は、以下のとおりである。

- (1) デザインチームの承認
- (2) デザインチェッカーの承認
- (3) デザインクライテリアの承認
- (4) 土質調査報告書の承認
- (5) 橋梁全体一般図の承認
- (6) 構造解析および設計図面の承認

デザインチームは台湾のコンサルタントが担当し、デザインチェッカーは弊社の土木設計部が担当した。

上部工および下部工の構造解析では Bentley 社の RM Bridge を用い、基礎工の構造解析では Ensoft 社の Gropu 8 を用いた。これらは、事前に承認されたソフトウェアである。

全体系の解析は、PC 桁の製作・運搬・架設～中間横桁および端支点横桁の打設・緊張～床版の打設～中間支点横桁の打設・緊張を行う実際の施工ステップを反映した 3 次元骨組解析モデル (図 - 4) を用いて行い、SERVICE LIMIT STATE では曲げひび割れ幅および縁引張応力度を制限値以下で制御し、ULTIMATE LIMIT STATE では応答値が曲げ耐力およびせん断耐力以内であることを確認している。また、床版の設計は、別途 3 次元 FEM 解析を実施している。

次項以降に、「主桁の設計」に焦点をあて、本プロジェクトにおける詳細設計について報告する。

### 4.2 主桁の設計

#### 4.2.1 設計上の課題

##### (1) 多大な設計数量

詳細設計を行わないオーバーパス 5 橋を除いて、最終的に、本線 8 橋・ランプ 4 橋に対して桁高 2 m の PC 桁を 1 722 本、ランプ 4 橋に対して桁高 1.4 m の PC 桁を 152 本も製作する必要があった。

これは、設計のさじ加減ひとつで、桁の型枠設備および製作サイクルに多大な影響を及ぼすことを意味する。このため、1 橋ごとに設計を完結させるのではなく、最初に全体を見通した「桁のグルーピング」を行うことが、最重要課題となった。

##### (2) 「本」単位で精算する桁の数

製作した桁の支払いは、鉄筋・型枠・コンクリート・PC 鋼材などの数量に対してではなく、本数で精算された。これは、桁の仕様が収支に多大な影響を与えることを意味し、品質を確保しつつ、いかに経済的な桁を設計するかが要求される。「設計の品質が施工者の利益に直接影響する」というデザインビルド特有の課題であった。

##### (3) 道路線形への対応

前述したように、設計変更により、鋼橋および盛土で計画されていた区間が、PC 高架橋に変更となった。一方で、道路線形の変更はなかったため、PC 桁の配置および床版厚により、精緻な線形の変化に対応する必要があった。

これは、本来であれば上部工の構造形式を変更することで対応可能であるが、下記の理由により、PC コンポ橋を選択せざるをえなかった。

- ・地盤条件が悪い湿地帯上が高速道路の建設区間であり、安易に総支保工が選択できなかった。
- ・橋脚の高さが十分でないため、架設工法が限定された。

##### (4) 出来形の確保

コンセプトデザインの段階で、橋面工のアスファルト舗装厚が 50 mm で設計されているため、舗装を 1 層で仕上げる必要があった。

これは、アスファルト舗装により、橋面高さを調整することができないことを意味する。さらに、舗装の品質を確保するために、床版の出来形を設計高さから -20 mm ~ +10 mm に管理する必要がある。このため、不確定要素が高い PC 桁の変形量の管理が課題となった。

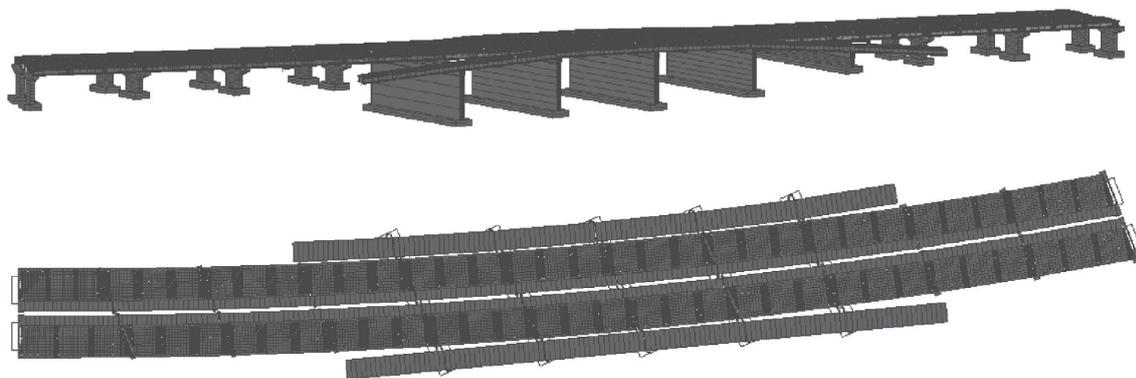


図 - 4 解析モデル図 (HB9 および Access Bridges)

#### 4.2.2 事前検討の実施

本工事の受注確定から工事着工開始までの間に、以下に示す PC 桁の事前検討を実施した。

##### (1) 構造解析の実施

35 m の標準支間長において、PC3 径間連続コンボ橋という構造形式を条件に、幅員構成が上下線分離型と一体型の 2 タイプで、BS コードに準拠した全体系の構造解析および経済設計を実施した。

事前検討から決定した事項を以下に列挙する。

- ・ 桁 1 本あたりのテンドン数を、コンセプトデザインの 4 組から 3 組に変更した。また、耳桁および中桁のテンドン構成を、設計上必要最低限の本数とした。ただし、桁間に設置する PCa 板が床版支保工として機能するよう平滑に設置するため、隣りあう桁の変形量の差を 5 mm 以内に抑えた。

- ・ 横桁横縮めのテンドン数を確定した。

実施設計の段階では、線形への対応・付属物の追加などにより、各橋梁の設計条件は変更となったが、事前検討で決定した事項をいかに維持するかを目標とした。

##### (2) 支間割の変更

設計変更の段階で、十分に検討されていない「桁長」「橋脚の位置」「仮設計画」を中心に、支間割の変更を提案した。変更案では、PC 桁の本数：26 本減、桁の種類（長さ）：49 種類減、下部工の数：5 橋脚減とした。

工費縮減および工程短縮の観点で、客先のエンジニアに事前説明を行い、橋梁全体一般図を確認後、承認された。

#### 4.2.3 主桁のグルーピング

PC 桁の製作サイクルを安定させるため、全橋にわたり、線形を考慮した PC 桁のグルーピングを実施することで、製作する PC 桁の種類を減少させた。

##### (1) グルーピングの方針

PC 桁の製作サイクルを安定させる上で、同じ形状の桁を繰り返し製作することは重要である。しかし、過度に追及すると、「桁の製作・架設精度への要求が厳しくなる」「脚頭部横梁の部材厚が大きくなり、マスコン管理が必要となる」など、追加の負担が発生する。そこで、本プロジェクトでは、横桁形状の変更のみで対応可能な、PC 桁のグルーピングを実施した。

##### (2) 道路線形への対応

線形への対応方法を以下に列挙する。

- ・ 平面線形に対して：床版の張出し長に配慮しながら、PC 桁の平面配置で対応する。
- ・ 縦断勾配の変化に対して：中間支点横桁の側面形状を扇形にすることで対応する。
- ・ 横断勾配の変化に対して：各 PC 桁がねじれの位置にならないように、床版の厚さを変化させることで対応する。

##### (3) グルーピングの結果

桁をグルーピングするには、まず、平面線形から決定される PC 桁間隔・下部工の斜角・支承の縁端距離・桁遊間を考慮して作図を行った。次に、PC 桁の横桁への埋込み長を変化することで配置可能な桁長の最小・最大を算出し、PC 桁の種類が最小になるように桁長を決定する。

最終的には、主桁総数：1957 本に対して、154 種類の PC 桁の製作が必要となった。そこまで種類が減少しなかった理由は、ある程度の施工管理上のリスクを PC 桁の製作ヤードで受持つ方が、合理的であると判断したためである。

#### 4.2.4 BS コードへの対応

BS コードに準拠した設計を実施する上で、留意すべき事項を以下に列挙する。

##### (1) 桁端定着部の検討

詳細設計承認の段階で、コンセプトデザインと同様の桁端定着部の形状が承認されるのに時間を要した。これは、客先のエンジニアが「緊張端の定着長が日本のコードに示される構造細目を満足していない」と判断したためである。

最終的には、BS コードに準拠して設計していることを説明し、試験桁の桁端部に緊張力によるひび割れが発生していないことを確認後、承認された。

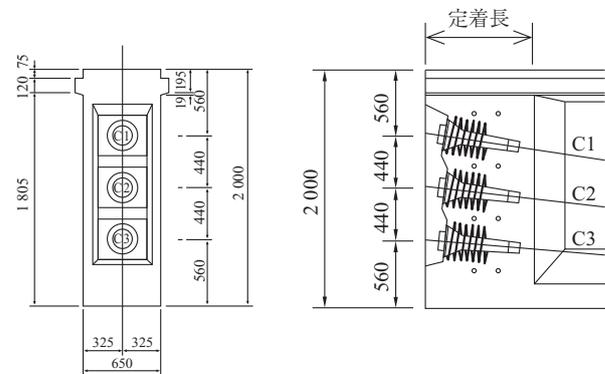


図 - 5 桁端定着部の形状

##### (2) 施工時の検討

前述したように、道路線形に対応するため、特定の区間では、床版厚を標準の 200 mm から最大 400 mm 程度まで変化させる必要がある。

この死荷重増に対して、事前検討で決定した 3 組のテンドン数を維持するためには、有効プレストレスを改善する必要がある。このため、面外変形などの施工管理上のリスクとなり得るが、1 組目のテンドン緊張後、一定の期間を置いて残りの 2 組を緊張することで、クリープ・乾燥収縮によるプレストレスのロスを減少させた。

ただし、BS5400 Part-4 1990 6.3.2.4 (b) に示されるとおり、PC 桁の運搬・架設時に許容する引張応力度が  $1 \text{ N/mm}^2$  と比較的小さいため、テンドン構成を決定する際に注意が必要となった。

##### (3) PC 桁と場所打ち床版接合部の検討

BS5400 Part-4 1990 では、道路橋示方書・同解説 平成 14 年度版 コンクリート橋編 11 章 合成げた橋に明記される、桁と床版間のずれ止めの検討に関して、言及していない。

施工ステップを反映することで、PC 桁と床版の温度差や乾燥収縮によりその結合面にせん断応力度が発生するのは明らかである。このため、準拠基準は BS コードではあるが、詳細設計の段階で、接合部の検討を追加した。



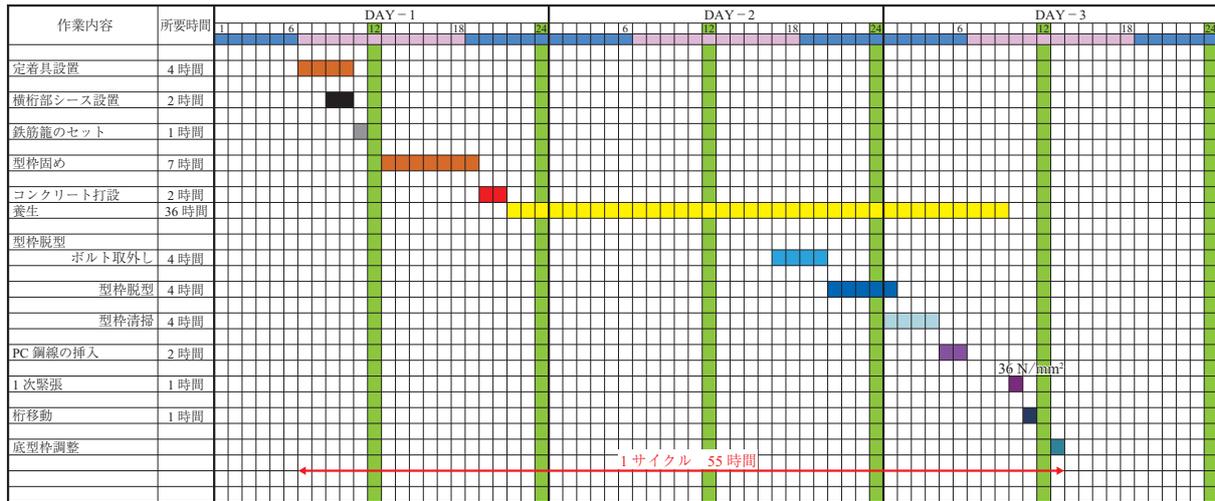


図 - 7 サイクルタイム

(1) 荷役設備 (門型クレーン)

荷役設備は、桁長、製作サイクル、桁保管、製作ベッドの数、コストなどの諸条件を元に、2台の門型クレーン(100T、10T)を各ヤードに配置した。大型門型クレーン(100T吊り)はPC桁の横移動、仮置き、トレーラーへの積込みに使用し、小型門型クレーンは鉄筋籠の型枠への吊込みに使用した。PC桁の積込みで時間を要してサイクルタ



写真 - 2 100T吊り門型クレーンによるPC桁移動状況(奥が10Tクレーン)



写真 - 3 PC桁鋼製型枠

イムに影響を与えないよう、吊り荷揚げ速度、荷吊り時の移動速度をそれぞれ1m/minおよび20m/minに設定した。

(2) 型枠設備

側型枠の転用も検討したが、サイクルタイムに影響を及ぼすため、底型枠とともに固定し、外側に開閉できる構造を採用した(写真-3)。

(3) 組織・生産体制

南ヤード・北ヤードとも、現地労務者を主体とした現地地下請け会社(2社)と労務請負契約した。なお、現地地下請け会社にはこのような大規模なPC桁製作の経験が無いため、製作が軌道に乗るまで第三国(フィリピン・タイ)の熟練工(各ヤード15名程度)の配置を義務付け、現地労務者へ技術指導を行った。結果、PC桁製作開始後3ヵ月目には目標のサイクルを達成でき、スムーズな立上げに成功した。

また管理側の組織としては日本人スーパーバイザー1名と、第三人エンジニア5名およびスリランカ人エンジニア4名のチームでこれら現地地下請け会社の管理および客先のエンジニア対応を行った。

ピーク時には、北ヤードで130人、南ヤードで110人の作業員がPC桁製作に従事したが、ヤード内という限られた場所での繰返し作業のため、大きなトラブルも無くPC桁製作は順調に進捗した。

図-7に生産サイクルタイムを示す。

5.3 PC桁の仮置き

工事概要にて説明したように、工事着工後に大規模な設計変更指示が出て、製作するPC桁の数が約2.5倍になり、増加した1169本に対し、仮置き場を検討する必要が生じた。南ヤードの近傍は全て湿地帯のため、PC桁の仮置きには不適切な土地であった。そこで、土工区間(切土)の本線路上にPC桁を仮置きすることとした。ただし、本線南側は大半が高架橋で土工区間(切土)が限定されており、十分な数の仮置きができなかった。そこで、インターチェンジのランプに向けて高架橋が拡幅される3スパン分を犠牲にし、そこを仮置き場とした。当然のことながら仮置き

期間中は橋脚の施工ができず、クリティカルパス上に無い区間を利用した。

北ヤードの側には土工区間（切土）が数多く存在するため、そこに仮置きした。

先に示したように、PC 桁の架設は 150 トンクレーン 8 台と TEG を使用し、1 日の架設量は最大 20 本であった。

当初、北ヤード、南ヤードともに型枠設備を 12 セット設け、1 日 4 本ずつの製作を考えたが、南ヤード付近は仮置き場が十分取れないこと、洪水時に仮設道路が水没しやすいことなどから型枠設備を 9 セットに減じ、1 日 3 本の製作速度とした。その結果、限られた仮置き場でも連続して桁を製作することができた。

PC 桁の製造本数、架設本数、仮置き本数の実績関係を図 - 8 に、PC 桁の仮置き状況を写真 - 4 に示す。

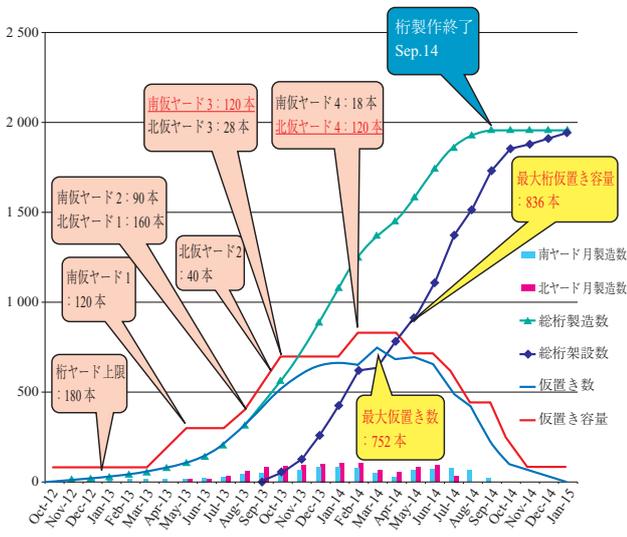


図 - 8 PC 桁の製造本数, 架設本数, 仮置き本数の実績

計算上は、約 750 本の仮置き本数でバランスすることになるが、洪水の影響などを加味して約 1 割増しの余裕をもたせた。



写真 - 4 桁仮置き状況（高架橋区間上）

## 6. HB9 橋（ケラニ川渡河橋）の施工

HB9 橋が渡河するケラニ川は、川幅が 100m 程度であり、スリランカでは比較的大きな河川である。また、当該エリアではしばしばケラニ川の洪水被害が出ており、ケラニ川の水位が上昇すると、流れ込む支流が氾濫し、広い範囲に洪水被害が出ていた。HB9 は河川内に 4 本の橋脚を構築する必要があり、川を半分土砂で締切り工事を行った。この HB9 の構築が本 PJ のクリティカルパスであった。

### 6.1 許認可取得と洪水解析

半川締切による橋脚構築にあたり、河川管理者（灌漑省）から許認可を取得する必要がある。われわれは、ペラデニア大学の水理研究室に洪水解析を依頼し、半川締切の影響評価を実施した。洪水解析は、半川締切をする上下流 1 km の河積断面を必要とするため、河川測量を実施した。ケラニ川に流れ込む支流の情報も加味し、10 年、25 年、50 年、100 年洪水確率の 4 タイプの洪水について解析を実施した（なお、解析は施工ステップを考慮し、もっとも条件の厳しい片側の橋脚が完成し、逆側が半川締切にて施工中の状況を再現している）。半川締切の有無による洪水予想エリアをアウトプットとして提出し、灌漑省でも同様の解析を実施した結果、半川締切の高さとして M.S.L + 4.5 m が許可された。洪水時の河川の水位が M.S.L + 5.0 ~ 6.0 m 程度であることを考慮すれば、洪水時には半川締切を越流する状態が許可されたことになる。図 - 9 に洪水解析の結果の一例を示す（赤丸を付した部分が半川締切の影響による洪水エリア）。



図 - 9 洪水解析の結果（追加洪水エリアの評価）

### 6.2 半川締切の施工

半川締切の造成状況を写真 - 5 に示す。



写真 - 5 半川締切造成状況

洪水解析の項に示したように、洪水時には水没する構造のためしばしば工事が中断した（写真 - 6）。



写真 - 6 半川締切水没状況

### 6.3 場所打ち杭の施工

場所打ち杭は日本の支持杭と同様、支持層である岩盤に1D根入れしなければならない。そのため、比較的強固な岩盤も掘削可能なパワー機による施工を行った（写真 - 7）。岩盤部の掘削に3～6時間程度を要したが、杭1本の施工は約1日の昼夜施工で完了した。



写真 - 7 パワー機による場所打ち杭の施工

### 6.4 移動式架設桁を用いた PC 桁の架設

河川上はクレーンによる PC 桁の架設が困難なため移動式架設桁を用いて PC 桁架設を実施した。



写真 - 8 移動式架設桁による PC 桁架設状況

## 7. おわりに

本工事は、当初の契約工期に約半年の工期延伸が付与され、2015年7月に工事が完了した。3年半という工期は、コンクリートの打設量がのべ30万 $\text{m}^3$ にもおよぶことから非常に厳しいものであったが、多少の余裕をもって完成させることができた。9月17日政権交代後の新内閣の下、当該区間の開通式があり、同日より供用開始されている（写真 - 9）。

最後に、在スリランカ日本大使館および JICA の皆様には多大なご指導・ご協力を賜った。ここに、感謝の意を示して本稿の結びとする。



写真 - 9 開通式の様子

### 参考文献

- 1) 青木俊彦, 堀川裕毅: スリランカにおける高速道路への取組み, 土木施工 vol.54 No.12, pp.45-48, 2013.12
- 2) 田邊顕, 武川良: プレストレスト・コンクリート桁 2000 本の製作, 土木施工 vol.56 No.12, pp.52-55, 2015.12
- 3) 大岡晃, 木之下聡, 石井裕泰: スリランカ・コロンボ外郭環状道路プロジェクトにおける軟弱地盤上の道路盛土工事, 地盤工学会誌 vol.64 No.9, pp.28-31, 2016.9

【2016年9月9日受付】