

# 国内とは一風異なる PC 構造の有効利用とその問題点および解決例 — バンコク産業環状道路 双子の斜張橋 —

スラポン シーサワチャー \*1・河野 弘文 \*2・市橋 俊夫 \*3・増野 久人 \*4

## 1. はじめに

近年、国際工事を通して海外コンサルタントの設計による構造物を施工する機会が急増している。とくに土木の分野においては、海外コンサルタントの日本国内への市場参入がほとんどなかっただけに、優劣は別として、目を見張られる設計に出会うことも珍しくない。

本稿では、バンコク産業環状道路の斜張橋工事を通して経験した、日本とは相当異なる PC 構造物の設計について、施工者の立場から紹介させていただく。

## 2. プロジェクト紹介

本プロジェクトは、慢性的なバンコクの渋滞を解消すべく計画されたリングロードの一部を構成するものであり、ODA の一環として、斜張橋 2 橋を含む高架橋工事費の 60 % が JBIC を通して日本から有償資金援助されている。本プロジェクトに携わった主な事業主体を示す。

施 主：タイ政府運輸省

設 計：Epsilon, Norconsult, Mott MacDonald 共同企業体

工事監理：タイ 4 社 + フランス 1 社 (Jean Muller International) の共同企業体

施工 (第 1, 第 2 工区)：大成, 西松, JFE, SINO - THAI 共同企業体

図 - 1 に示すように、バンコク東部から南部にかけてバンコク国際港と大規模工業地帯がチャオプラヤ川に分断された 3 つの地域に存在する。これらを環状に結ぶことにより、大量のトラックが都心部を回避して行き来することが



図 - 1 バンコク産業環状道路位置図



写真 - 1 斜張橋部全景

\*1 Surapol Srisaovajati : タイ王国 運輸省 地方道路局

\*2 Hirobumi KONO : 大成建設 (株) 国際事業本部 バンコク産業環状道路作業所

\*3 Toshio ICHIHASHI : 大成建設 (株) 国際事業本部 バンコク産業環状道路作業所

\*4 Hisato MASUNO : 大成建設 (株) 国際事業本部 バンコク産業環状道路作業所

## ○ 工事報告 ○

期待されている。

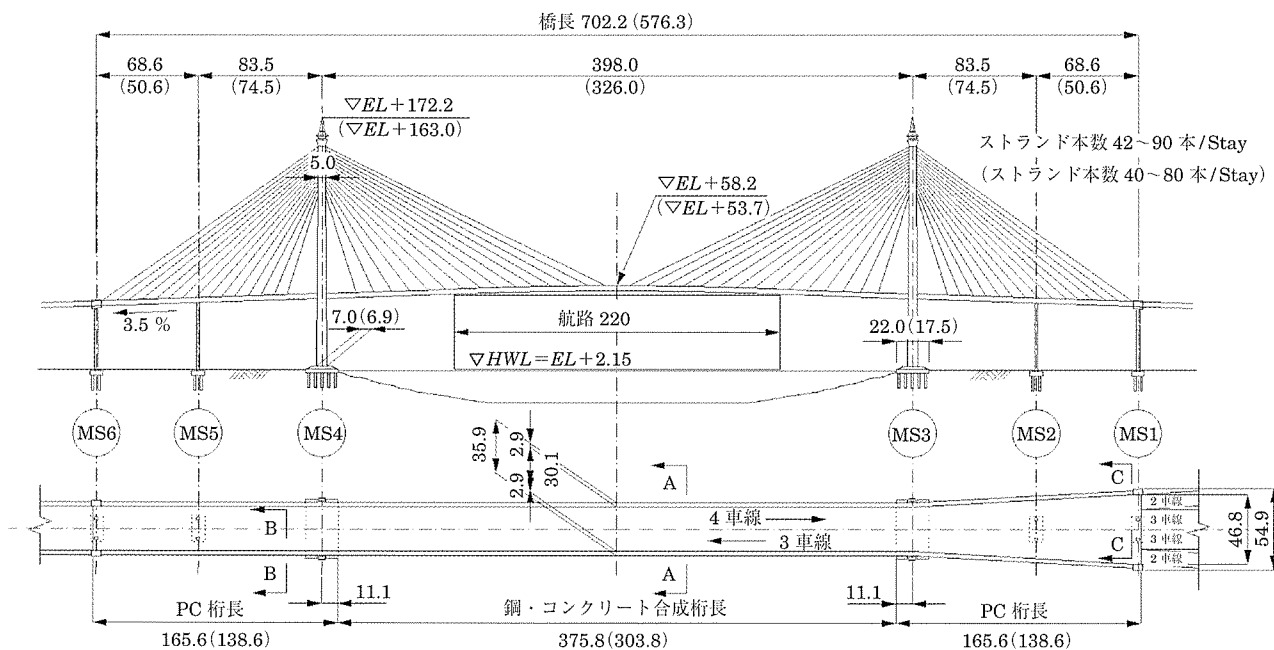
このうち、本プロジェクトは川が大きく湾曲し、くびれた地点に鋼・コンクリート複合斜張橋（以下、斜張橋）2橋を含む南北約5 km、東西約3 kmの高架橋をT字形に構築するものである。工区は第1工区（南工区）、第2工区（北工区）、および第3工区（西工区）に分かれており、それぞれ基礎から上部工まで（正確には伐採から道路標識設置まで）を一括発注している。当JVはこのうち第1および第2工区を請負っている。表-1に、南から北に順を追って概略橋梁寸法を示す。

表-1 第1, 第2工区橋梁概要

| 橋名                    | 橋長<br>(m) | 支間<br>(m) | 総幅員<br>(m) | 工法    |
|-----------------------|-----------|-----------|------------|-------|
| Slip Road A           | 168       | 30 ~ 36   | 11         | 移動支保工 |
| Slip Road B           | 588       | 30 ~ 36   | 11         | 移動支保工 |
| South Approach Bridge | 1 090     | 36 ~ 68   | 31         | 移動支保工 |
| South Main Bridge     | 図-2 参照    |           |            |       |
| Central Interchange   | 319       | 58 ~ 68   | 26         | 固定支保工 |
| North Main Bridge     | 図-2 参照    |           |            |       |
| North Approach Bridge | 661       | 40 ~ 68   | 31         | 移動支保工 |
| North Viaduct         | 694       | 36 ~ 52   | 31         | 移動支保工 |

南橋 構造一般図

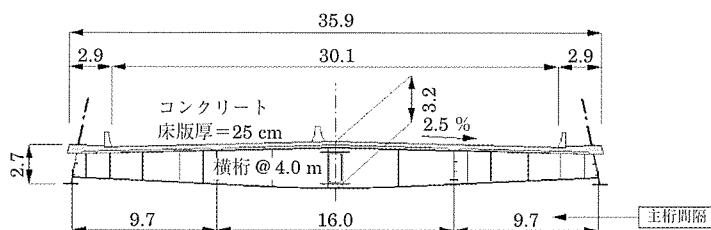
( )は北橋寸法 [単位: m]



中央支間合成桁断面

A-A

桁断面は南北橋同じ



側径間 PC 桁断面

B-B

桁断面は南北橋同じ

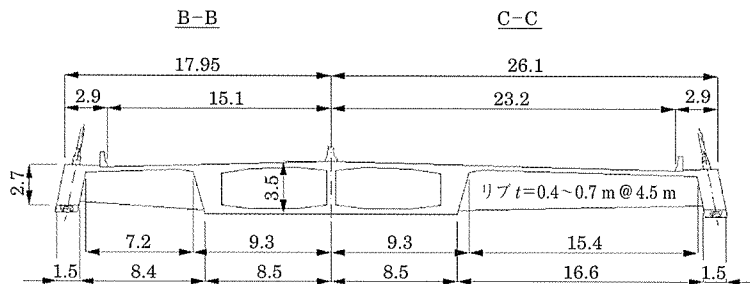


図-2 斜張橋構造一般図

橋脚はすべて RC 構造、斜張橋中央支間以外はすべて PC 箱桁構造であり、移動支保工は大、中、小の 3 種類を用いた。支間 68 m、幅員 31 m 2 室箱桁橋の移動支保工施工は、世界最大級である。

### 3. 斜張橋概要

#### 3.1 構造概要

チャオプラヤ川横断部には、南北それぞれに鋼・コンクリート複合斜張橋を施工した。主要寸法を図 - 2 に示す。主な特徴は以下のとおりである。

- 1) 支持地盤が深く、長さ 72 m の場所打ち杭を必要とする。
- 2) 幅員 36 m の中央径間を、鋼 4 主桁 + RC 床版の合成桁構造で実現している。
- 3) 最大幅員 55 m の側径間を 2 室 PC 箱桁で実現している。
- 4) コンクリート主塔は、フーチング、中間横梁、および斜材定着部で PC 構造である。
- 5) 主塔の曲げ剛性がきわめて小さい。
- 6) 橋脚の橋軸方向曲げ剛性がさらに極端に小さい（断面 2 次モーメント比で主塔の約 5 %）。
- 7) 桁下空間が 50 m 近く、非常に高い。

#### 3.2 施工方法概要

主塔の杭長が 72 m もあることから察せられるように、バンコクはチャオプラヤ川の河口近くに位置しているため支持地盤がきわめて深く、表層 20 m は N 値 0 ~ 2 の超軟弱地盤である。近年の著しい都市化に伴い、60 年で 1.5 m の地盤沈下を起こしたとの調査結果も報告されている。軟弱地盤上に、高い構造物を建設するために物理的困難と制約が多く発生し、さまざまな工夫を必要とした。以下にこれら問題点を含めて簡単に紹介する。

##### (1) 橋脚

場所打ち杭およびフーチング施工後、RC 橋脚を施工した。橋脚は通常の枠組み足場を設置し、大型パネル式鋼製型枠を用いた。

##### (2) 主塔

主塔は基部のみ固定式支保工施工とし、脚部から上はすべてクライミングフォームを使用した。詳細は紙面の都合上割愛するが、脚部は断面変化が激しいこと、内空が非常に狭いこと、および傾斜がきついことから、緻密な計画が要求された。さらに斜材定着部近辺（以下 Stem と称する）は密な PC 構造であり、連続配置される PC アンカーと、コンクリート面から突出するガイドパイプ等の斜材定着部材のために、特殊な足場構造となっている。

主な荷揚げ設備として、主塔横に最大吊り能力 18 ton（作業半径 19 m）、最大作業半径 62 m のタワークレーンを設置した。主塔のコンクリート打設は 3 m<sup>3</sup> バケットとタワークレーンを用いて行った。

地上高さ 182 m のクレーンマストは途中 3 段の壁繋ぎ材で主塔と連結することにより変位を制御した（写真 - 2）。ところが主塔自体がきわめて低剛性であり、主径間張出し架設に伴い主塔頂部で約 1 m の橋軸方向変位を起こすた

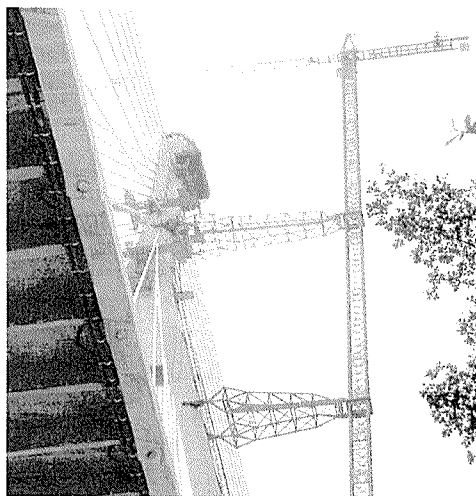


写真 - 2 タワークレーン

め、壁繋ぎ材の設計およびクレーン本体の安定性に入念な検討を必要とした。とくに、主塔の変位に伴いタイおよびマストに蓄積されたエネルギーを、クレーン解体時にスムーズに解放できるように、壁繋ぎ材と主塔の連結部を PC 鋼棒にて緊結した。

##### (3) 側径間

PC 箱桁構造の側径間は、斜材架設に先駆けて施工し、主径間張出し施工時のカウンターウェイトとしての役割を担わせる。断面は中央の 2 室箱桁（幅 18.6 m）、リブ付き張出し床版（片幅 7 m ~ 15 m）、および端部エッジビーム（片幅 1.5 m の充実断面）で構成され、斜張橋の幅員としては例を見ない広さである。ところが本設の橋脚は斜材緊張後に対してのみ設計されているため、極端に断面剛性が小さく、これに作用する架設時の断面力を小さく抑える必要がある。地盤から支持するにも桁下空間が高く、地盤も劣悪なことから堅固な支保工設置には工期、コストの両面で制約があった。さまざまな検討の結果以下の方法を採用した。

まず、固定支保工（写真 - 3）を用いて中央の箱桁部を構築する。支保工基礎は仮設といえども直径 1.2 m、長さ 55

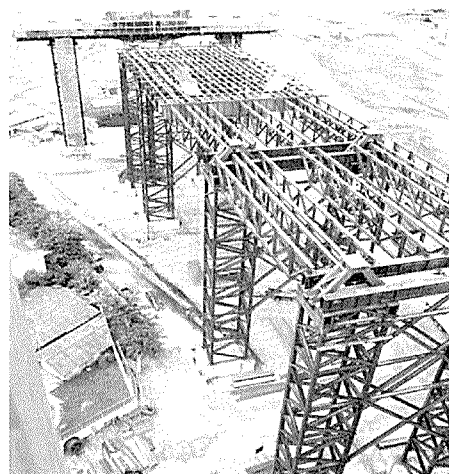


写真 - 3 固定支保工

m の場所打ち杭を各フーチング 2 本ずつ設置し、フーチング上に特注鋼製支柱を建て、天端に反力調整用ジャッキを設置した。各支柱の最大鉛直支持力は 600 ton から 1 700 ton であるが、高さが 40 m 以上あるため、わずかな水平力でも下端に大きな曲げモーメントを発生させる。この曲げモーメントを小さく抑えるための工夫として、各支柱間に架けられたトラス梁から鉛直反力のみ（これに伴う偏心モーメントは止むを得ない）が支柱に伝達されるようにしたり、コンクリート打設のブロック割や打設順序等を入念に検討した。

中央箱桁部施工後、大型横向きトラベラーを用いて、リブ付き張出し床版を 9.2 m ごとに施工した。これは世界的にも例を見ない規模のトラベラーであり、なおかつ PC 箱桁部の応力制限から極限まで部材寸法を絞り込んでいるため、予想しない（通常は引張力しか発生しない）部材が座屈するハブニング等があったものの、局部座屈が先行するように設計したため大事にいたることなく、簡易な補強で工事を継続することができた（写真 - 4）。

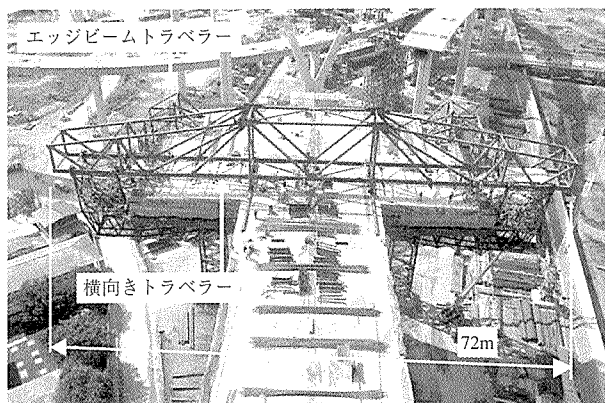


写真 - 4 横向き大型トラベラー

張出し床版を追いかけて、別の横向きトラベラーでエッジビームの施工を行った。このトラベラーは斜材定着用のガイドパイプを正確な角度で設置できるように、十分な剛性を保有している。

#### (4) 主 径 間

主径間は 4 本の鋼製主桁上に厚さ 25 cm または 35 cm の RC スラブを合成した構造であり、4 m ごとにダイヤフラムがあるものの、非常にフレキシブルである。標準セグメントは橋軸方向 12 m、幅 36 m、架設時重量 480 ton であり、工場で製作した鋼部材を、架橋地点から約 10 km の地点に設けたヤードで組立て、そこで床版コンクリートを打設した。これを台船で架橋地点まで運搬し、既設張出し桁先端に移動したガントリークレーンを用いて吊り上げた。

写真 - 5 および図 - 3 に示すように、既設斜材吊り点位置とガントリークレーンによる吊り点位置が橋軸直角方向で異なるために、桁先端で 40 mm の上下方向変位差が生じる。これをジャッキで調整しながらボルト接合した。

標準セグメントのサイクル架設手順は以下のとおり。

吊上げ→ボルト接合→間詰めコン打設→斜材架設緊張→



写真 - 5 中央支間セグメント架

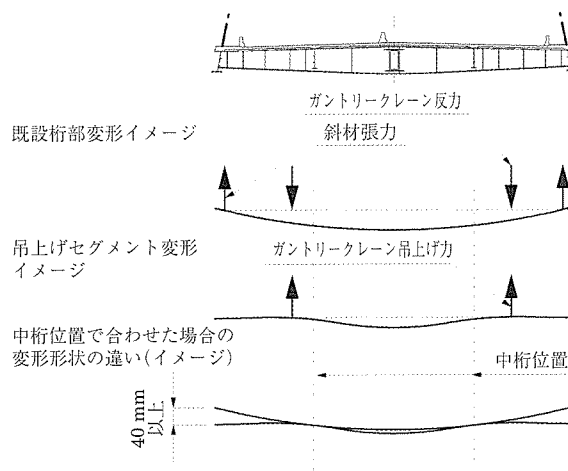


図 - 3 横断面変形イメージ

ガントリークレーン前方へ移動→吊上げ。

各斜材はストランド  $\phi$  15.7 mm 40 本～90 本で構成され、ストランドはおのおの亜鉛メッキ + WAX + PE 被覆されており、ストランドごとの挿入緊張が可能である。

まず橋面上に外套管（HDPE）を所定長さ配置し、ストランドを 1 本挿入する。これをクレーンまたはウィンチを用いて架設し、その後、ストランドを 1 本ずつ挿入しては緊張する。全数挿入緊張後、モノジャッキを用いてさらに 2 周緊張し、各ストランド間の張力のバラツキを  $\pm 2.5\%$  以内に納めた。主桁が柔軟なため、張力よりも桁高が優先で管理を行い、結果的にはわずかな最終張力調整で、張力、主桁レベルともに許容値内に納めることができた。なお、各セグメントの架設サイクル工程は、24 時間態勢で標準 7 日であった。

## 4. PC 構造部位の紹介

### 4.1 PC フーチング

40 000 ton 近い鉛直反力を支持する主塔のフーチングは、40 m  $\times$  22 m  $\times$  5 m の PC 構造で、45 本の場所打ち杭上に設置されている（図 - 4）。国内ではタンク構造物に PC 基礎をしばしば見かけるが、橋梁基礎に採用することはまれではないだろうか。これを仮に RC 構造としていたならば、

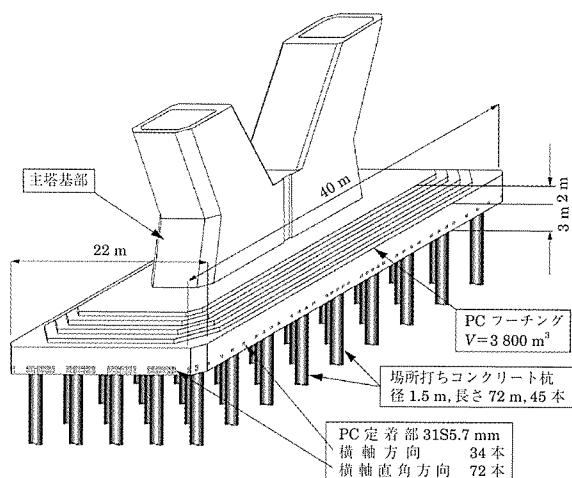


図-4 PC フーチング

厚さ10m以上の巨大なマスコンとなり、平面寸法も杭本数も増加していたはずである。

PC鋼材は31S15.7が長手方向に72本、短手方向に34本下側に偏心して配置されており、フーチング中央部に集中する鉛直下向き反力による曲げモーメントを打ち消すように設計されている。主塔からの鉛直反力は、斜材架設に伴って急激に増加するため、緊張作業は施工進捗に合わせて3段階に分けて行った。

温度応力を除けば、PC構造の利点として配筋量を小さく抑えることが可能となる。Strut & Tie理論によれば、スターラップを排除することも可能となる。実際の設計でも側面および上面の配筋はD25またはD32（ともにSD50）一段のみで、スターラップは存在しない。

この結果、Specと配筋量の関係から、施工上新たなハードルが発生した。

#### 1) Specの要求事項

セメント量360kg/m³以上、28日強度40MPa（cube）で、なおかつ温度応力制御策として、最大観測温度を70℃以下に抑えること。

#### 2) バンコクの環境と実情

日中の外気温は38℃前後に上昇するため、練混ぜ水の温度は平均30℃、骨材は40℃前後、セメントは50℃前後となり、事前試験からの推計では、無対策では硬化時温度は90℃近くまで上昇する。一方、低発熱セメントの大量入手はきわめて困難。

#### 3) 配筋面からの制約

夜間限定の層状打設に分割するには、打継面の一体性確保の観点から、大量の鉛直鉄筋の追加配置と施工者による設計検討およびコンサルタントによる承認作業が必要となる。設計変更への責任を含めてすべて施工者負担である。

これらを解決すべく種々の検討の結果、以下の方法でコンクリートボリューム3,800m³/基を1回打設とした。

- ・凝結材として、フライアッシュを対セメント比1:1で配合する。ただし、凝結材総量は420kg/m³とする。
- ・コンクリート強度はプレストレスの必要導入時期から逆算して、56日強度で40MPaとする。

- ・大量の水を用い、練混ぜ水温度を9℃以下に保ち、骨材にも氷を用いた冷却水を散水する。
- ・セメントおよびフライアッシュを1週間前からストックし、サイロに散水して冷却する。

打設はポンプ車4台プラス故障時に予備4台（実際に4台故障し、結果として8台使用）を配備し、36時間連続で行った。4箇所のプラントをフル稼働し、打設日前後を含め4日間は近隣すべての工事現場での打設作業を中止してもらうことにより、この1回打設が実現した（写真-6）。

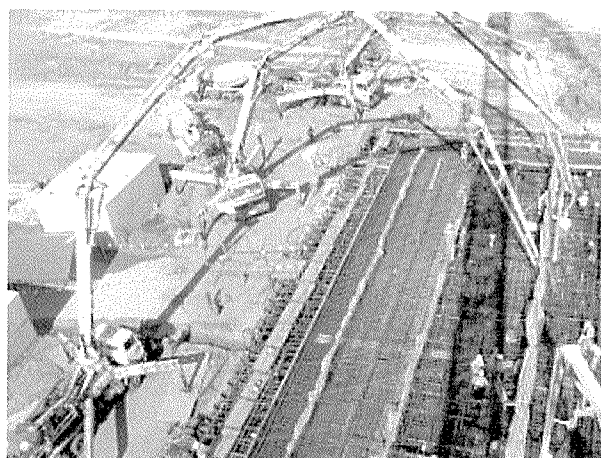


写真-6 主塔基礎3,800m³一回打設

#### 4.2 側径間幅員PC断面

幅員36m～55mを両端の斜材で支持する構造を、2室箱桁断面で実現するには相当の無理があることは容易に想像される。最適設計であったか否かは別として、これを実現することは工事を請け負った施工者の責任である。

広幅員を実現している張出し床版部は片幅員15mにも達し、橋軸方向間隔4.6mごとに設けられたPCリブで支えられている（図-5）。3.2で概略紹介したように、施工は1)箱桁部、2)リブ付き張出し床版部、3)エッジビーム部の順序で行った。

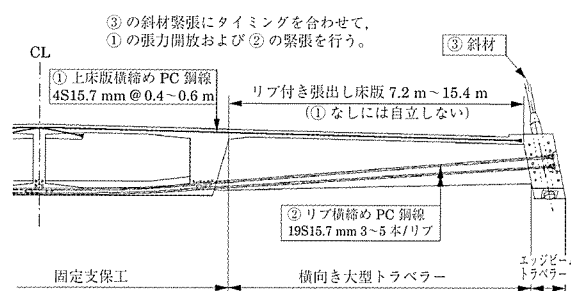


図-5 側径間断面PC配置

あまりにも張出し長が大きく、張出し床版+エッジビームのカンチレバーによる負の曲げモーメントを、自身の断面剛性で支えることができないため、上床版には横締めPC（①）が配置されている。ところが、最終的には両端の斜材で支持されることにより正の曲げモーメントが圧倒的に上



回る（飛行機の主翼の性状が、離陸前と飛行中とで変化するがごときである）。これに対し、リブ下端には別途 PC ストランド（②）が配置されている。①は②を打ち消す方向に作用するため、ある段階で①の緊張力を開放する設計となっている。さらに、②は斜材張力が作用して初めて必要となるため、事前に張力を 100 % 導入することはできない。

これら複雑な性状変化に対し、①の導入と解放、②の導入および斜材緊張のタイミングを検討し、実際の施工においても手順を厳守することにより、低い桁高で大きな曲げモーメントに対抗できる健全な構造物が実現した。経済設計の観点からの良否は別として、PC 構造の極限までの利用を試みた例として興味深い。

#### 4.3 主塔側斜材定着部の PC 構造

本斜張橋は、意匠デザイナーが描いたデッサンを基に、ノルウェーの設計コンサルタントが詳細設計を実施した。北欧では高強度コンクリートの使用が一般化しており、これに伴い部材断面のスリム化が進んでいる。一方、タイの市場ではコンクリート強度 50 MPa (cube) が実質的な供給能力の限界であり、設計上も同強度を前提としている。ところが、以下の理由により、配筋密度が高くなり過ぎ、契約図書に基づいて施工することは實際上不可能であった（写真 - 7）。

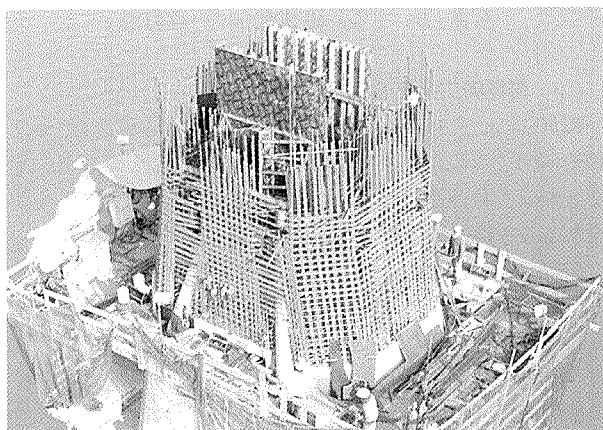


写真 - 7 主塔配筋状況  
（原設計は鉛直鉄筋をこの 4 倍配置）

- 1) 高強度コンクリートに慣れ親しんだ感覚で断面を決めたうえで、強度を 50 MPa に設定し、計算だけで必要配筋量を決めたものと推測される。
- 2) 設計成果物である発注図面では、実際の配筋図を描かずに、数値のみで配筋量を示している。
- 3) 適用規準である British Standard（以下 BS）は配筋面ではきわめて安全サイドの構造細目を採用しており、たとえば鉄筋のラップ長がほとんどの場合 40 D ~ 60 D、しかも 3 段千鳥配置となる。

さらに、斜材定着部（緊張側）が Stem 部中空断面内部に設けられており、これによるコンクリートの引張応力を打ち消すために水平面内にループ状にプレストレスを導入する設計としていた。最大 19 本のストランドをこれだけ小さな曲げ半径で 270 度のループ状に配置・緊張した実績は

なく、緊張時に外側のストランドが内側のストランドの伸びを拘束し、内側のストランドが破断してしまう可能性が高いことが懸念された。

これら、配筋と PC 配置の問題を解決すべく、工事管理担当のコンサルタントと協議の上、図 - 6 に示すように外形寸法を変えることなく設計変更を実施した。主な変更点を列挙する。

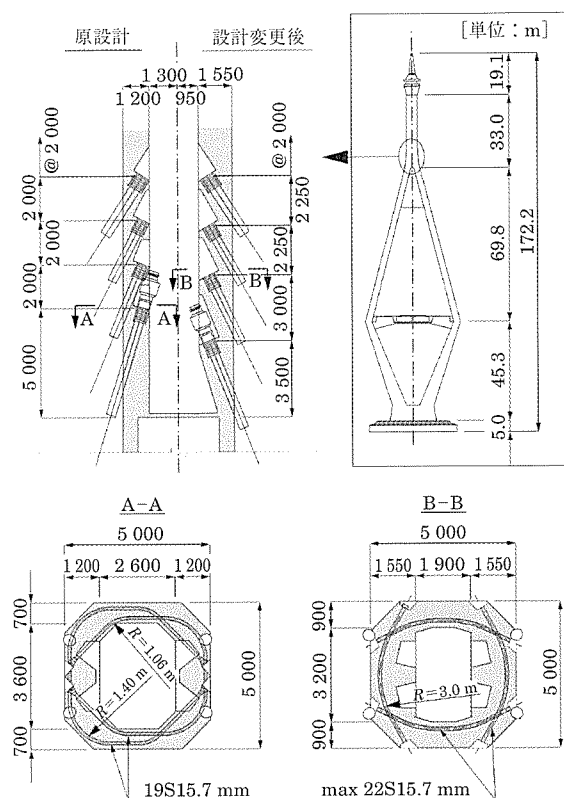


図 - 6 Stem 部設計変更イメージ

- 1) 壁厚を大きくし、下 3 段の斜材定着位置を下方へずらした。
- 2) 施工時および完成後の Stem 部の曲げモーメントを極力抑え、全断面圧縮状態を実現することにより、軸方向鉄筋を原設計の 1/4 に減らした。
- 3) ループ PC 配置を 4 分割し、曲げ半径も  $R = 3.0 \text{ m}$  と大きくした。
- 4) PC ダクトを、通常のシースから鋼管に変更し、パイププレート等によるダクトの損傷を防いだ。
- 5) 短く変更された水平 PC 鋼材の、緊張定着時のセットロスの影響を減らすため、通常の緊張作業後に、シムプレートを挟むための 2 次緊張を実施した。

これらの設計変更により、施工可能な構造に生まれ変わったものの、PC 定着用切り欠きが 4 面すべての外周に上下方向に連続配置され、クライミングフォームのアンカー位置がますます限定されたことやタワークレーンの壁緊ぎをきわめて限定された空間で巨大な反力（偶力 160 ton）に耐えうる構造とすること等、施工上の難問は枚挙にいとまが

ない。

#### 4.4 コンクリートと鋼桁の連結部構造

主塔から 11.1 m 主径間側に入った地点から、鋼・コンクリート合成桁が始まる。PC 箱桁からいきなり 4 主構の合成桁に変化させることはできないため、連結部には長さ 4.4 m の鋼箱桁+コンクリート床版からなる「連結ボックス」と称するセグメントが設置された。連結ボックスのコンクリート桁側端面にはダイヤフラムが設けられ、スタッドジベルが上下左右に 30 cm 間隔で配置されている。

PC 桁と連結ボックスは PC 鋼棒 ( $\phi$  50 mm) で緊結されているものの、幅員 36 m に対して上床版近傍にわずか 46 本配置されているだけである。いずれは斜材からの水平分力が巨大な圧縮力となって作用するものの、日本国内では考えられない簡易な連結構造である。さらに連結ボックスを構成する 4 本のウェブと下フランジ (幅 1100 mm, 厚さ 100 mm) が、PC 桁との接合部で突然消滅する構造であり、架設時を含めてつねに全断面圧縮状態が保持されることを前提としている。

本構造は設計技術の観点からは決して健全とは思えないが、現実には細心の注意を払って施工を進めた結果、架設

時を異常なく持ちこたえたことは事実である。なお、完成系においては、全断面圧縮応力が支配的となるように斜材張力を設定することにより、この構造でも何ら問題はないものと考えられる。

## 5. おわりに

技術先進国のコンサルタントが設計したものを、産業構造や文化のまったくことなる国で施工する。ワーカーを含めると、十数カ国の人間が工事に携わり、工事初期の段階では工期、品質、安全のすべての面で認識が異なる。ところが工事の進捗とともに目指すところが収束してくる。まさしく海外工事の困難と醍醐味がいかにして生まれるかを事例で示したようなプロジェクトであった。

このように多国籍の人間が携わる工事では「責任」範囲の明確化が要求され、「契約」により縛られることは当然である。一例として、本工事では BS で記述された内容は優劣の如何にかかわらず、遵守することが要求された。一方、技術者としてより良い構造を模索する習性を排除することができない (しない) のもまた自然なことである。西洋的な「契約」に縛られた国際市場で勝ち抜く力を養うことは勿論大切であるが、一方、日本人ならではの器用さを武器に、柔軟に、より発注者が満足するものへ提案・変更していく姿勢に磨きをかけることが、日本の建設業の特異性を打ち出す一つの方法になるのではないだろうか。そのためには、柔軟性に富む日本の性能照査型設計規準を大々的に世界に宣伝し、それを契約図書ベースとすることが早道のように思われる。

2006 年 6 月末現在、舗装工事を実施しており、発注者の意向に沿い、2006 年内供用開始に向けてラストスパートをかけているところである。紙面の都合上、主径間の複合構造、各所の施工、仮設構造物等に関する内容は省略させていただいた。別の機会に報告したいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 市橋俊夫：ストラット&タイ手法の概要，プレストレストコンクリート Vol.46, No.5, pp.57～61, 2004.9
- 2) 中島健一：タイ・バンコクの交通渋滞と道路橋工事，土木学会誌，Vol.89, No.8, pp.56, 57, 2004.8

【2006 年 6 月 29 日受付】

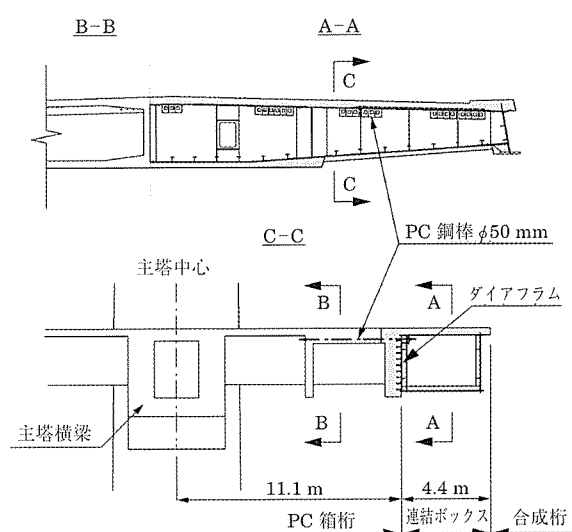


図-7 PC箱桁と合成桁の連結部構造