

## ベトナムの斜張橋、フーミー橋の施工エンジニアリング – Construction Engineering of Phu My Cable-Stayed Bridge, Vietnam –

著：George Moir, Colin Edmonds, Peter Walser and Martin Romberg

訳：山崎 啓治, 坂本 尚基\*

フーミー橋は、ホーチミン市の第7区 (District 7) および第2区 (District 2) の間を流れるサイゴン川 (Saigon river) を跨ぎ、現在建設中の新環状道路の一部となる。この環状道路は南部メコンデルタ地域と中部および北部ベトナムを結ぶ重要な交通網となる。フーミー橋建設工事は、380 mの中央径間を有する橋長705 mの長大斜張橋、そして延長約758 m (7区側) および638 m (2区側) の両サイドのアプローチ橋の設計・施工からなる。主橋の幅員は27 mで、幅250 m、桁下空間45 mの河川航路限界を確保し、主桁 (deck) を支持する主塔 (pylon) はH型柱で塔高は約140 mである。本橋は2社からなるジョイントベンチャーが施工し、2009年9月に完成した。

本文は、事前に実施された張出し架設を追った逐次解析 (stage-by-stage analysis) による施工エンジニアリング、架設中の斜材張力調整および橋面出来形管理の現場での業務について紹介する。

キーワード：斜張橋, 施工エンジニアリング, 主塔施工, 主桁架設

### 1. はじめに

フーミー橋は、ベトナム、ホーチミン市にこのほど竣工した斜張橋であり、第7区および第2区の間を流れる

サイゴン川を跨ぎ、現在建設中の新環状道路の一部となる (図 - 1)。この環状道路は、南部メコンデルタ地域と中部および北部ベトナムを結ぶ重要な交通網となる。

市中心部からわずか下流に位置する主要港は、今後10

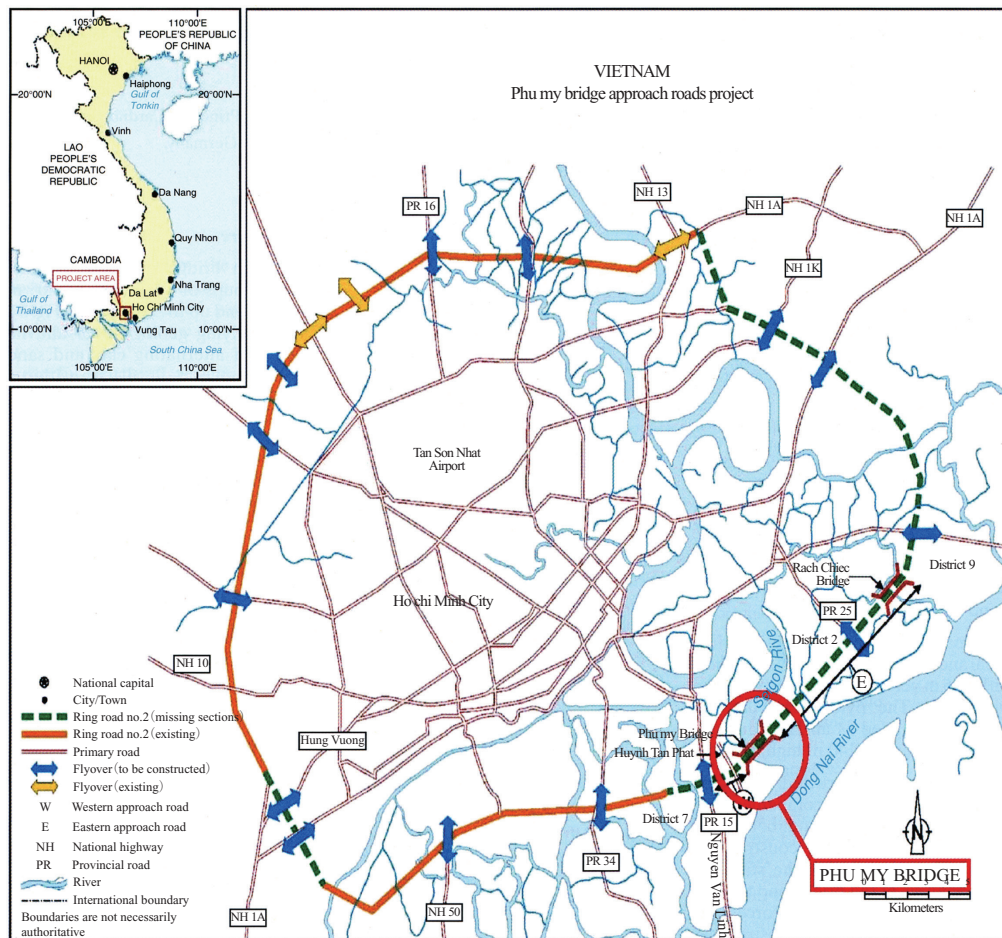


図 - 1 新環状道路の重要区間となるフーミー橋

年の間にさらに下流側に移転し、相当な重量物積載交通量を生み出すと予想されている。さらに、メコンデルタ地域にある工場群から大量の工業製品がホーチミン市を通過して輸送され、現在、これらはホーチミン市の中央部に位置し、もっとも南部に架かるサイゴン橋にてサイゴン川を渡る。交通機能確保のためにも市中心部の交通渋滞緩和が必須であり、サイゴン川南東側第2区とその他地域を結び、サイゴン川を渡るフーミー橋を含めた内環状道路の形成が待たれている。

フーミー橋建設工事は、EPC 契約 [訳者注\*1] で行われ、380 m の中央径間を有する橋長 705 m の長大斜張橋、そして延長 758 m (7 区側) および 638 m (2 区側) のサイゴン川両サイドのアプローチ高架橋を含む総延長 2 101 m の高架橋の設計・施工からなる。

本設構造物の設計は、主橋部とアプローチ橋部の 2 パッケージに分割された。またべつの設計パッケージとして、主橋の設計に関し、仮設構造物の設計および施工エンジニアリング (construction engineering) [訳者注\*2] があつた。本文は、施工エンジニアリングのいくつかの特徴的な事項、とくに施工前に行われる検討および施工中に行われる施工検討エンジニア (construction engineer) [訳者注\*2] の業務について紹介する。

## 2. 主橋の概要

主橋は 3 径間の斜張橋で、中央径間が 380 m、側径間がそれぞれ 162.5 m (図 - 2) であり、パイルキャップ位置からの総主塔高は 134.5 m、橋面からは 93 m である。主橋中心にて幅 250 m、満潮時桁下空間 45 m の河川航路限界 (navigational clearance) を確保している。

### 2.1 橋梁基礎

主塔を支持する主橋脚は、杭径 2.05 m を有し、深さ 80 m に達する 1 グループあたり 14 本の杭が 2 グループからなる多柱式基礎である (図 - 3)。地盤は粘土層と砂



図 - 3 主橋脚の杭配置とプレキャスト型枠

層からなる互層の沖積堆積層で、杭先端は密実な砂層中に支持されている。

パイルキャップは、14 本の杭を有するマスコンクリートの鉄筋コンクリートパイルキャップ 2 区画からなり、これらは 2 室中空構造で一体化されている。

パイルキャップの施工は、版状のプレキャスト埋設コンクリート型枠を用い、鋼管ケーシングと固定することで、水に浸からないドライな作業エリアのもとで行い、パイルキャップの側面型枠はプレキャスト製の幅木パネルで、水面下まで伸ばした。

### 2.2 主塔

コンクリート製の主塔は、H 型形状で外形寸法が 5.50 × 7 m から 3 × 5 m に変化する箱型断面で、斜材定着部は主塔上部の断面内に、交差せず一鉛直面に配置される。主塔および主橋脚は 2 本の横梁で結ばれ、そのうち下部横梁 (lower cross-beam) はプレキャスト製作したものをリフトアップし、最終位置に固定した (図 - 4)。

### 2.3 タイダウン橋脚

タイダウン橋脚 (tie-down piers) は、両側径間端部に

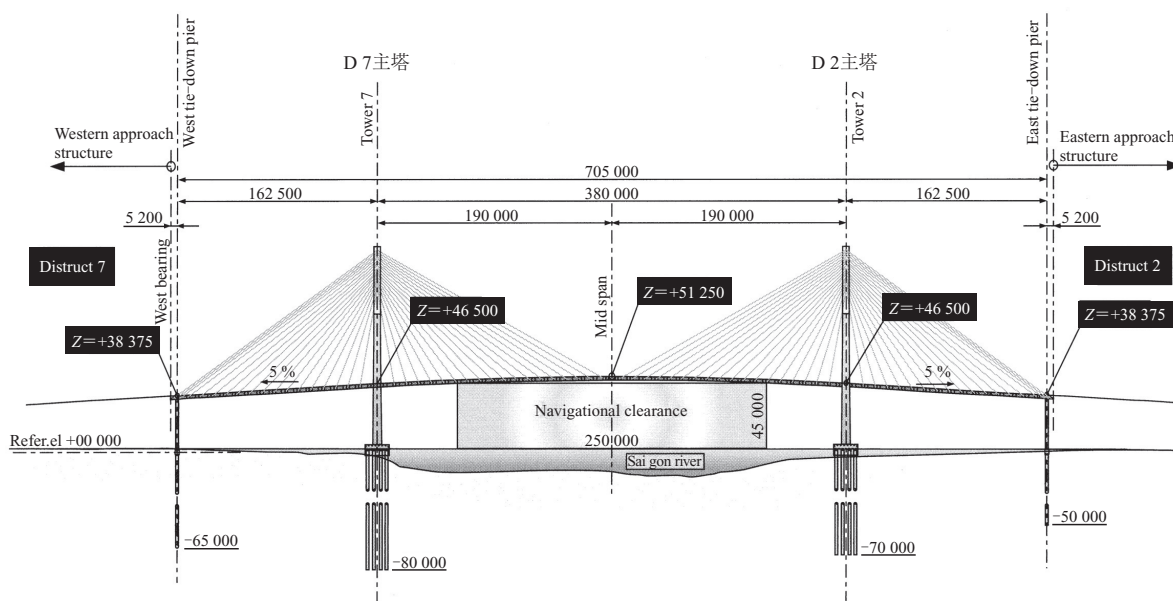


図 - 2 全体一般図 (主橋部)



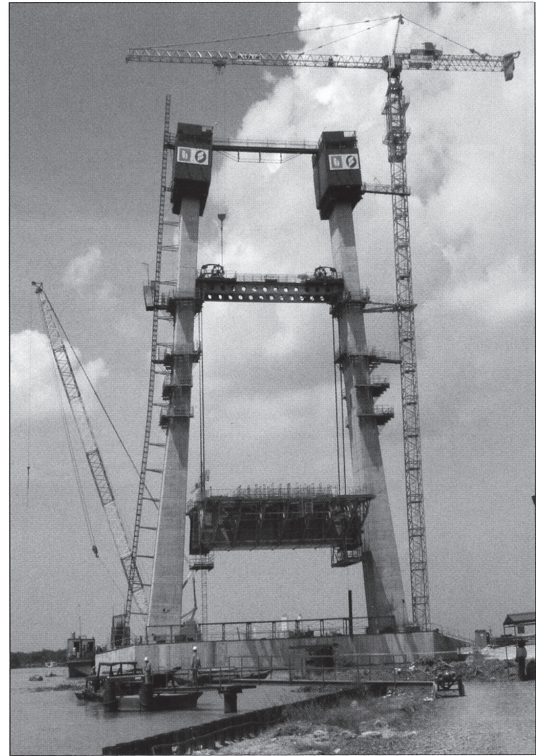
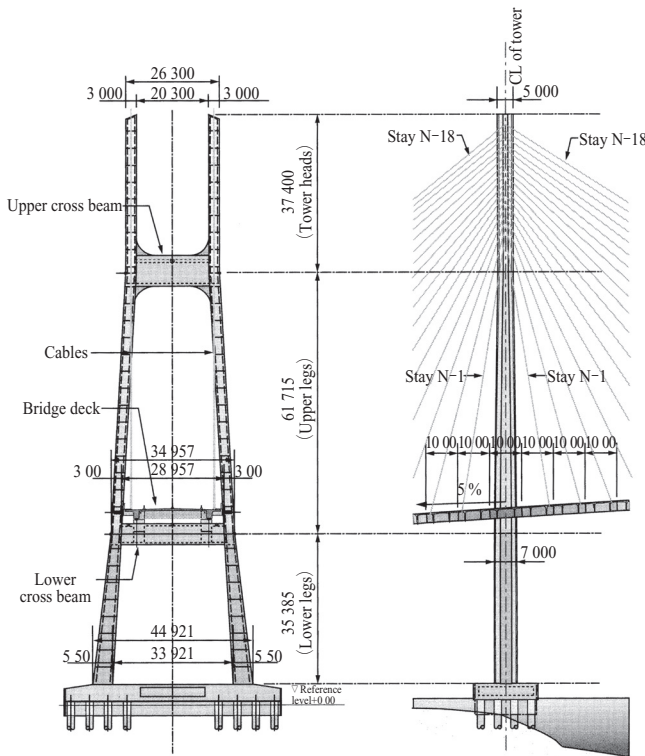


図 - 4 主塔一般図と下部横梁の吊上げ

位置し、PC 鋼材にて鉛直締めされた二本の矩形コンクリート柱で大口径場所打ち杭に支持されている。側径間の外側 3 段の斜材はタイダウン橋脚位置で固定される。そこでの上部工床版は充実断面であり、橋軸方向および橋軸直角方向ともにプレストレスが導入されている。

#### 2.4 橋梁上部工

主橋の幅員は 27 m で、乗用車およびトラックのための 2 車線、二輪車のための車線、そして歩行者のための歩道と上下線それぞれの方向へ 3 つの異なる交通車線を収容している (図 - 5)。

斜材の配置は 2 面吊りで、橋梁上部工は 5 m 間隔で横方向に配置されるプレレストコンクリート横桁 (cross girder) で結ばれた橋軸方向 2 本のエッジガーダータイプの主桁となる。斜材は 10 m 間隔で配置されるプレキャスト製定着部にて、橋軸方向のエッジビームに固

定される。

### 3. 施工方法

#### 3.1 主塔の施工

主塔は、断面を囲うようなジャンプフォームを用い、後述する手順にしたがい 4 m リフトにて施工した。主塔に関する制御すべき荷重は、風荷重および主塔の脚が傾斜しているという形状に起因する断面力である (図 - 6)。施工手順を以下に示す。

- ① 高さ 56 m まで主塔脚 (tower leg) を構築し、仮設の下部ストラット兼リフティング・ビームをパイルキャップ位置から 48m の高さに設置する。下部ストラットは、主塔脚に生じる断面力および変形を制御するだけでなく、下部横梁の吊上げに用いられる。
- ② パイルキャップ上で下部横梁を製作し、柱頭部施工

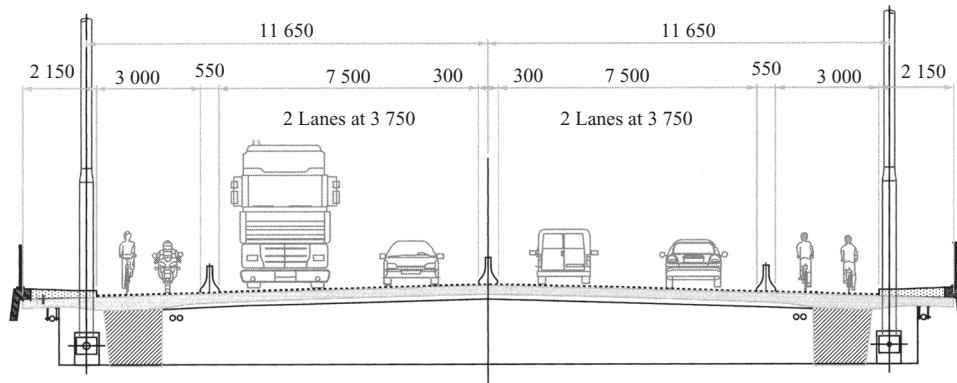


図 - 5 主桁断面図



図 - 6 主塔の施工

のための支保工を取り付ける。

- ③ 仮設下部ストラットを用い、下部横梁および柱頭部施工用支保工を一括で吊り上げる。これは重量 1 200 t、揚程 30 m 規模のものである。下部横梁を正規の位置に設置し、場所打ち調整目地のコンクリートを打設し、下部横梁を主塔脚に一体化させる。
- ④ 下部横梁が主塔脚と一体化した後、柱頭部コンクリートを施工する。長さ 30 m を 3 分割で施工する。主塔の施工と並行して、主桁の施工を可能なかぎり早く着手する。
- ⑤ 主塔の施工を続け、仮設の中間ストラットをパイルキャップから高さ 70 m の位置に設置し、下部ストラットを撤去する。中間ストラットは、主塔に生じる断面力を制御する細い梁で、上部横梁 (upper cross-beam) 施工中の落下物安全ブラットフォームを支持するのにも用いられる。
- ⑥ 仮設の上部ストラットを設置する。上部ストラットは、主塔柱のブレース、さらに上部横梁の型枠支保工の役目を担う。上部横梁の施工後、中間ストラットおよび上部ストラットを撤去し、主塔脚が完成する。
- ⑦ 一段目の斜材を架設・緊張し、主桁柱頭部区間に固定する。柱頭部施工用型枠を取り外し、吊り下げた後、主桁施工のための移動作業車を吊り上げ、設置する。主桁が主塔橋脚の支承上を自由に回転でき、この段階では、主桁上げ越し形状は斜材張力というよりは斜材長によって制御される。斜材張力は斜材導入力の 75 % までを緊張しておき、斜材長の最終調整量決定前に、測量を行う。

### 3.2 主桁の施工

主橋の全体施工手順を以下に示す (図 - 7)。

#### (1) D7 主塔からの張出し架設

次節 3.3 に後述する 1 ブロックあたりの主桁施工サイクルにしたがい、主桁は川側張出しブロックから張出し架設を開始し、ブロックごとに施工する。アンバランスモーメント低減および急速施工のため、川側張出しと陸側張出し両サイドの施工手順が一部重複する。すなわち、陸側張出しブロックのコンクリート打設前に、川側張出しの移動作業車を次ブロックへ前進させる。

#### (2) バフエッティング・ケーブルの設置

両張出しとも第 7 ブロックまで施工した後、パイルキャップと主桁を結ぶバフエッティング・ケーブル (buffeting cables) を両側に設置し、陸側ケーブルのみ緊張する。高度 10 m で風速 20 m/s 以上という強風時以外、川側ケーブルはゆるんだ状態にあり、橋面位置での主塔曲げモーメントを制限している。

#### (3) 仮設タイダウン・ケーブルの設置

第 11 ブロックまで施工した後、陸側に仮設基礎と主桁を結ぶ仮設タイダウン・ケーブル (tie-down cables) を設置し、陸側バフエッティング・ケーブルを解放し、川側ケーブルに張力が作用した状態とする。これが主塔全体の曲げモーメントを制限している。

#### (4) D7 側径間の閉合

第 15 ブロックまで施工した後、長さ 1.5 m の側径間閉合ブロックを施工する。閉合前に測量し、仮設タイダウン・ケーブルを解放することによって、主桁の橋面高さ調整を行う。打設コンクリートへの温度の影響を制限するため、閉合ブロックのコンクリート打設を夕方に行う。

#### (5) 移動作業車を転用し、D2 主塔からの張出し架設

側径間閉合後、川側張出しの残り 3 ブロックを施工し、移動作業車を D2 主塔へ転用し、同様に施工する。

#### (6) 中央径間閉合

移動作業車を用い、長さ 10 m の中央径間閉合ブロックを施工する。閉合コンクリート打設前に詳細測量および斜材張力調整を行う。中央閉合後、橋面工荷重が載荷され、必要な場合、さらなる斜材張力調整を行う。

### 3.3 主桁施工サイクル

主桁は主塔から張出し架設され、移動作業車を用い、ブロック長 10 m でコンクリート打設する (図 - 8)。標準架設サイクルは以下のとおり [訳者注\*3]。

- ① 新ブロックのコンクリートを打設し、打設の翌朝に出来形測量 (as-built survey) を実施する。
- ② ローリングビーム (rolling beam) を前進させ、移動作業車の前方側にある横桁と緊張・固定する (必要コンクリート強度は 30 MPa)。
- ③ プレキャスト製定着部に固定していた PC 鋼棒の緊張力を解放・撤去し、斜材を再緊張する (必要コンクリート強度は 30 MPa)。
- ④ 縦ストラット (longitudinal strut) を撤去し、移動作業車を降下させ、移動作業車の後方側にある横桁と緊張・固定する (必要コンクリート強度は 35 MPa)。
- ⑤ 移動作業車を次ブロックの半分の位置まで前進させ



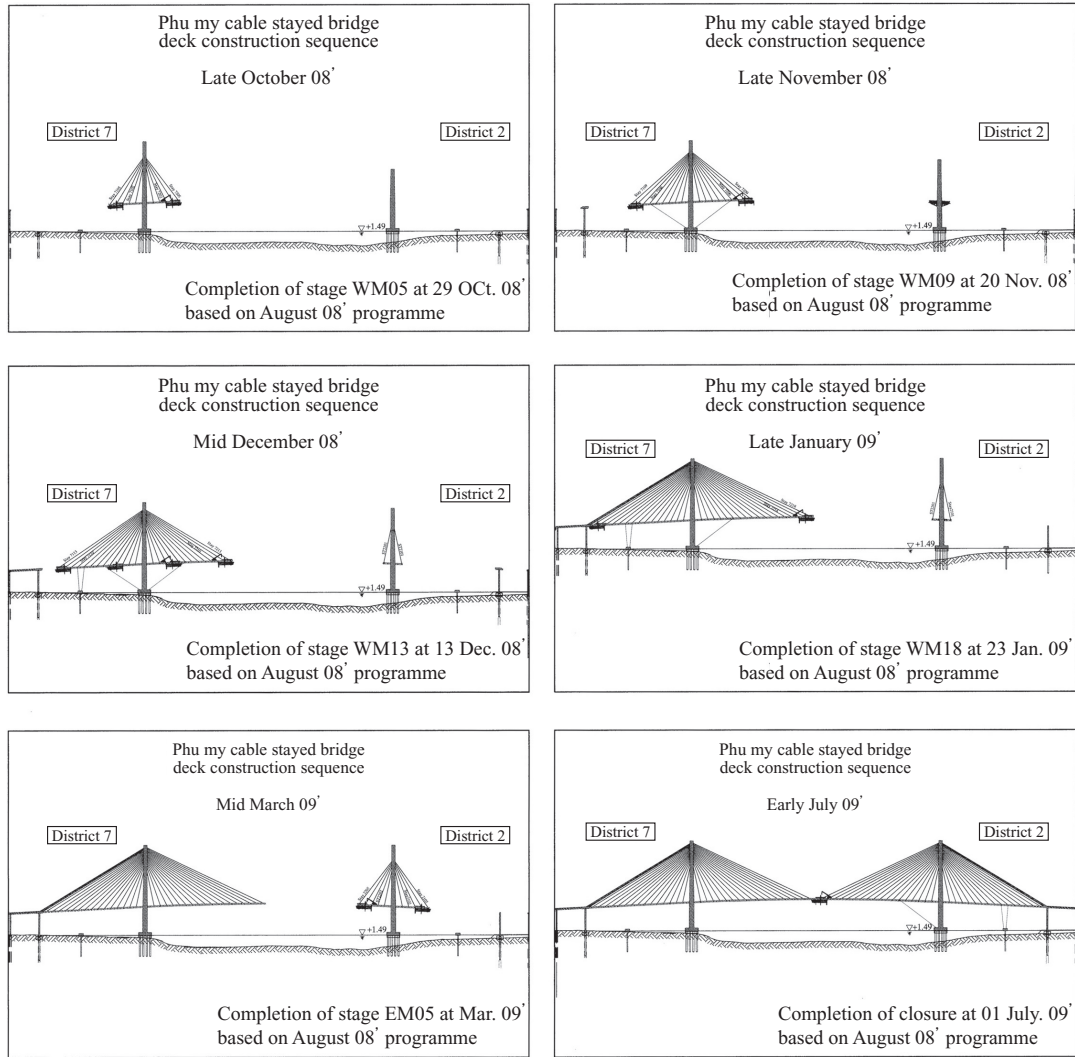


図 - 7 全体施工手順 (主橋部)

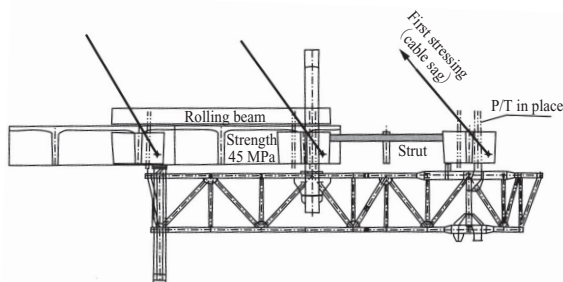
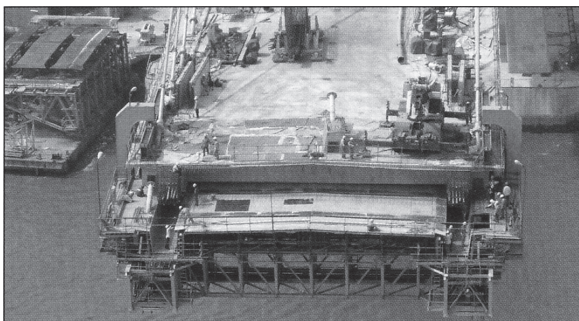


図 - 8 移動作業車

- る。
- ⑥ 移動作業車前進移動中にプレキャスト製定着部を設置する。
- ⑦ 移動作業車前進移動完了後、上昇させ、位置測量し、必要な場合、上げ越し補正を行う。
- ⑧ プレキャスト横桁およびエッジビームの鉄筋籠を設置する (必要コンクリート強度は 40 MPa)。
- ⑨ 床版の鉄筋配置を開始する。斜材架設前に鉄筋重量 25 t まで配置可能である。
- ⑩ 旧ブロックおよびプレキャスト製定着部間に縦ストラットを設置する。
- ⑪ 斜材の架設および緊張を行う。斜材はプレキャスト製定着部に固定され、この定着部は PC 鋼棒によって移動作業車と相互接続されている。縦ストラットを通じて、斜材張力の水平方向成分のみ旧ブロックに伝達される。この初期斜材導入力の鉛直方向成分は、約 100 t 本に一定に保たれ、コンクリート打設中、移動作業車を保持する (必要コンクリート強度は 45 MPa)。
- ⑫ 床版鉄筋配置を終え、打設前測量を行い、新ブロッ

クのコンクリートを打設する。

張出し架設初期の習熟期間を経たあとでは、主桁施工サイクルは通常5日で、側径間側は先行する中央径間側に2日遅れで進んだ。

#### 4. 施工検討エンジニアの業務

##### 4.1 施工検討エンジニアの業務－設計フェーズ

コントラクターは設計コンサルタントを雇用し、施工エンジニアリングおよび主要な仮設構造物の設計を実施した。現場施工開始前に、施工検討エンジニアおよびコントラクターは以下の事項を確認、合意した。

- ① 主要な仮設構造物・資機材の重量および要求事項
- ② 時間依存の影響を正確に決定するのに重要な、実際の施工を考慮した詳細な施工工程
- ③ 斜材架設時期
- ④ 仮設タイダウン・ケーブルの設置時期、再緊張時期および回数
- ⑤ 主橋脚およびタイダウン橋脚の柱頭部における型枠・支保工の撤去時期
- ⑥ 詳細な主桁施工サイクル手順と側径間および中央径間閉合手順

続いて、施工検討エンジニアが、時間依存の影響（クリープおよび収縮）を考慮のうえ、施工手順をモデル化し、張出し架設の工程を追った逐次解析を行う。

この解析は、橋梁施工完了後の斜材張力が本設設計の設計者による計算値と一致するように、各斜材架設段階で導入する斜材張力を効率よく提供するのが特徴的である。これらは、最終斜材張力および主塔断面力などの制約条件を付した一連の連立方程式を解くことにより得られる。入力変数は、斜材緊張力や閉合前に行われる調整緊張力などである。

一度、斜材張力を計算した後、主桁上げ越し量（camber curves）および支点反力の計算を行うが、この解析の目的は、以下を明らかにするためである。

- ① 全架設ステップの全部材の断面力およびたわみ量
- ② バフェッティング・ケーブルおよび仮設タイダウン・ケーブルの張力
- ③ 端橋脚に設置する仮設支保工への作用力

また、解析ソフトは、温度条件や施工中の作業荷重の変動に起因する調整量も計算する。

架設時解析（erection analysis）は、本設の設計結果に基づき、もっとも確からしいパラメータ、寸法および重量を考慮に入れ行いが、とくに以下について注意を払っている。

- ① 実際のコンクリート単位重量および鉄筋量を考慮した死荷重
- ② 断面諸値
- ③ プレストレス力
- ④ コンクリートのクリープおよび乾燥収縮量

この解析の目的は、最終の設計上の仮定と一致させるために、橋梁の上げ越し出来形（線形座標）および本設の設計で発生する断面力をできるだけ正確に算定するこ

とである。さらに、いかなる架設ステップにおいても、橋梁の全部材が構造上の能力を超えていないことを確認するため、架設時応力計算（erection stress analysis）を行う。

それまでの斜張橋建設およびベトナムでの実績を踏まえ、以上からコントラクターは本橋を短工期かつ経済的に施工する見通しがついた。

##### 4.2 施工検討エンジニアの業務－施工フェーズ

施工中、施工検討エンジニアは、以下の責任を担う。

- ① 測量結果のモニター
- ② 正規上げ越し量確保のための移動作業車の上げ越し補正
- ③ 橋面上の作業荷重、温度および斜材張力の影響による斜材再緊張力の補正
- ④ コントラクターへの変更可能な施工手順に関する助言

主桁ブロックのコンクリート打設の翌朝、以下の情報が得られる。

- ① 張出し先端4ブロックおよび主塔の測量結果
- ② 加えて、鉄筋・PC鋼材の保管状況および移動クレーンなどの橋面上の主要な荷重条件図（図-9）
- ③ 実斜材張力確認のため、新ブロックで行われるリフト・オフ試験（lift-off test）結果

測量結果を当該架設ステップの主桁および主塔の予測座標位置と比較し、橋面上の実荷重条件、斜材張力および温度の影響に対して補正を行う。解析から、施工検討エンジニアは、斜材張力調整のための斜材長および次ブロック施工のための移動作業車位置を決定する。サイクル工程を遅延させないために、現場施工チームにとって、これらの情報が2～3時間のうちに必要であった。移動作業車の型枠セットによる上げ越し補正は、局所的な橋面出来形に影響を及ぼす一方で、斜材張力の補正は、橋梁全体の上げ越し出来形に、より大きく影響を及ぼす。施工中絶えず、測量結果が解析値どおりか検証し、いくつかの変数については、以下のような感度解析を実施した。

- ① 移動作業車重量の変動

設計では移動作業車重量を210tと仮定していたが、設置後、実重量が235tであると判明し、再解析を実施した。

- ② 主桁の剛性

主桁たわみ量は、コンクリートの実ヤング係数およ



図-9 主桁の張出し架設



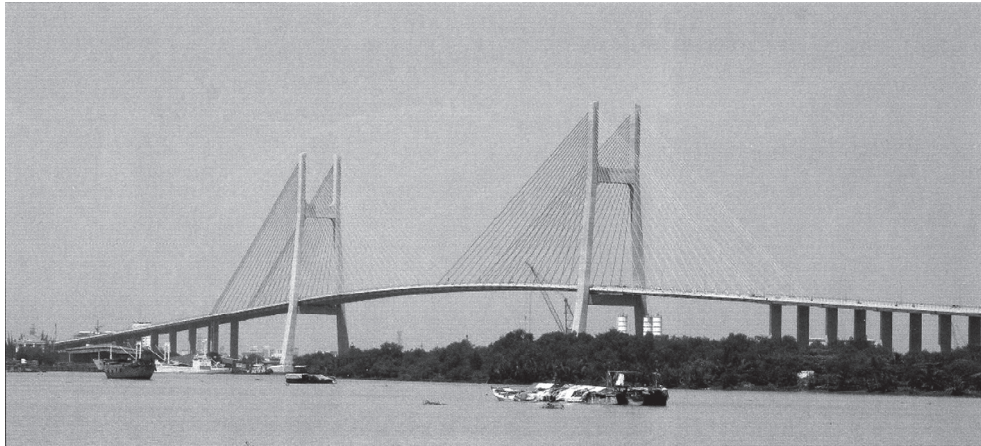


図 - 10 フーミー橋全景

び主桁断面の有効幅に依存する。

③ 斜材の剛性

試験成績表により斜材の実断面積および実ヤング係数が得られる。

④ 主桁の重量

設計では主桁の重量は仮定した鉄筋量をもとにしており、実際のコンクリート単位重量および鉄筋量を考慮した重量と比較した。

⑤ 移動作業車の剛性

別途、移動作業車は全部材を3次元モデル化し、部材剛性を計算し、移動作業車としての剛性を算定した。計算される剛性は、実剛性と比較し、実載荷条件下にある現場計測値から分析した。

主桁の施工中、主桁のたわみ量は計算による予測値より大きかった。いくつかの可能性が考えられるが、移動作業車重量および主桁自重の増加が大きいと考えられる。たわみの原因となる斜材張力もわずかに増加した。

5. おわりに

本文では、斜張橋の急速施工に適用されたさまざまな特徴を紹介した。

本プロジェクトは、施工方法に合致し、最適化した多くの計画および設計が必要であった。このためコントラクターと施工検討エンジニア間での多くの協働作業が必

要であり、結果、施工中、あまり問題も起こらず、短い習熟期間のうちに主桁施工5日サイクルを達成することができた。施工検討エンジニアの業務が、施工前および施工中とも本プロジェクトの重要な位置を占めることとなった。

契約工期は34カ月で、当初、2009年末の供用開始予定であったが、30カ月で完成し、本橋は2009年9月に供用開始した(図-10)。

原 典

George Moir, Colin Edmonds, Peter Walser and Martin Romberg : Construction Engineering of Phu My Cable-Stayed Bridge, Vietnam, Structural Engineering International, Vol.20, No.3, pp.331 ~ 337, 2010, Aug.

This article was first published in English in Structural Engineering International, SEI, Vol.20, Nr.3, 2010, pp.331-337, IABSE, Zurich, Switzerland, www.iabse.org

【訳者注】

訳者注\*1: EPCとは“Engineering, Procurement and Construction”の略で、EPC契約とは検討・設計、調達および建設一式を請負う契約形態。

訳者注\*2: 海外の橋梁建設工事では、コントラクターが設計コンサルタントを雇用し、仮設構造物の設計および施工時計算を含む施工時検討(原文では、“Construction Engineering”)を担当させるのが一般的であり、本文では「施工エンジニアリング」と訳した。また、これを実施する立場のコンサルタントの技術者(原文では、“Construction Engineer”)を「施工検討エンジニア」と訳した。

訳者注\*3: IABSEのホームページ上のE-Learning Projectにて、本橋の移動作業車による主桁施工サイクルがアニメーションで紹介されている。

[http://www.elearning-iabse.org/Anime\\_10/index.htm](http://www.elearning-iabse.org/Anime_10/index.htm)

【\* : 山崎啓治 (鹿島建設(株) 土木設計本部)  
坂本尚基 (リテックエンジニアリング(株) 設計本部)】

【2012年6月4日受付】

Phu My 橋の設計データ

企業者	Phu My Bridge Corporation
コントラクター	Bilfinger Berger Baulderstone Hornibrook (BBBH Consortium)
設計者	Arcadis (本設構造物の設計 / 主橋部) Cardno/Golders (本設構造物の設計 / アプローチ橋部) Cardno/Leonharct, Andra und Partners (仮設構造物の設計および施工エンジニアリング)
施工監理	Maunsell (AECOM) Vietnam
鋼材	17 000 t
コンクリート	100 000 m <sup>3</sup>
PC 鋼材 および斜材	2 000 t
工事費	US \$ 1.05 億
供用開始日	2009年9月2日