

# バイチャイ橋建設工事

## — 世界遺産に架ける世界最長の1面吊りPC斜張橋 —

中村 智樹 \*1・土田 一輝 \*2・大野 浩 \*3・永元 直樹 \*4

### 1. はじめに

バイチャイ橋は、ベトナム北東部に位置する国道18号線に建設される6径間連続PPC斜張橋である。国道18号線はハノイ国際空港から中国との国境の町モンカイまで延びる総延長約319kmの基幹路線であるが、その中間地点にあるハロン湾の海峡部に遮られ、横断にはフェリーが使用されてきた。バイチャイ橋建設工事はこの海峡部を架橋により横断するわが国のODAによるプロジェクトである。また、ハロン湾は世界遺産に登録されているベトナム有数の景勝地であるため、バイチャイ橋では景観上の配慮がなされ新たなランドマークとしての役割が期待されている。

バイチャイ橋の橋長は903mで、1面吊りPC斜張橋としては世界最長の中央支間長435mを有する。航路限界は幅200m、高さ50mで、同じく円借款によって整備された湾内のカイラン港（ベトナム北部唯一の深海港）を使用する大型船舶の航行が可能である（写真-1）。

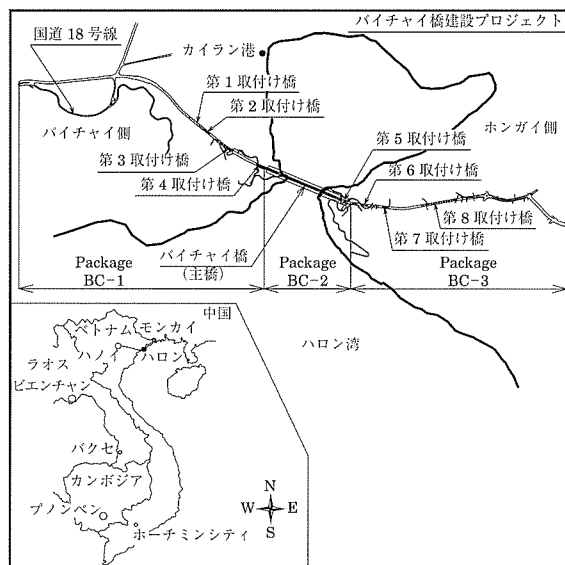


図-1 位置図



写真-1 バイチャイ橋（主橋全景）

バイチャイ橋建設工事は、主橋、第1～第8取付け橋、取付け道路、およびアクセス道路などからなり、起点側から Package BC-1（3 205 m）、BC-2（1 072 m）、BC-3（2 487 m）の3工区で構成されている。なかでも特別円借款を受けた Package BC-2 は、主橋、第5取付け橋（橋長99 m）、取付け道路（70 m）が工事範囲となっている（図-1）。

本稿では、Package BC-2 における主橋の上部工事について報告する。

### 2. 工事概要

工事名：The Bai Chai Bridge Construction Project  
(Package BC-2)

発注者：ベトナム運輸省 第18プロジェクト管理局  
設計・監理者：日本構造橋梁研究所・パシフィックコンサルタンツインターナショナル・TEDI・Hyder-CDC 共同企業体

施工者：清水建設・三井住友建設共同企業体

工期：2003年8月1日～2006年11月30日

橋名：バイチャイ橋（以下、主橋のみ）

構造形式：6径間連続PPC斜張橋

橋長：903 m

支間割り：35.0 + 86.0 + 129.5 + 435.0 + 129.5 + 86.0 m

全幅員：25.3 m

基礎：深礎杭基礎（A1橋台、P1、P5、P6A橋脚）  
ニューマチックケーソン基礎（P2、P3、P4橋脚）

主桁：鋼管ブレース付1室箱形断面PC構造

主塔：独立1本柱PC構造

斜材：準ハープ形1面吊り

橋梁一般図、主要工事数量表を、それぞれ図-2、表-1

\*1 Tomoki NAKAMURA：清水建設(株) 海外土木支店 ベトナム土木営業所 工事長

\*2 Kazuteru TSUCHIDA：清水建設(株) 土木技術本部 社会基盤統括部 設計主任

\*3 Hiroshi OHNO：清水建設(株) 土木技術本部 社会基盤統括部 副部長

\*4 Naoki NAGAMOTO：三井住友建設(株) 土木管理本部 PC設計部 課長

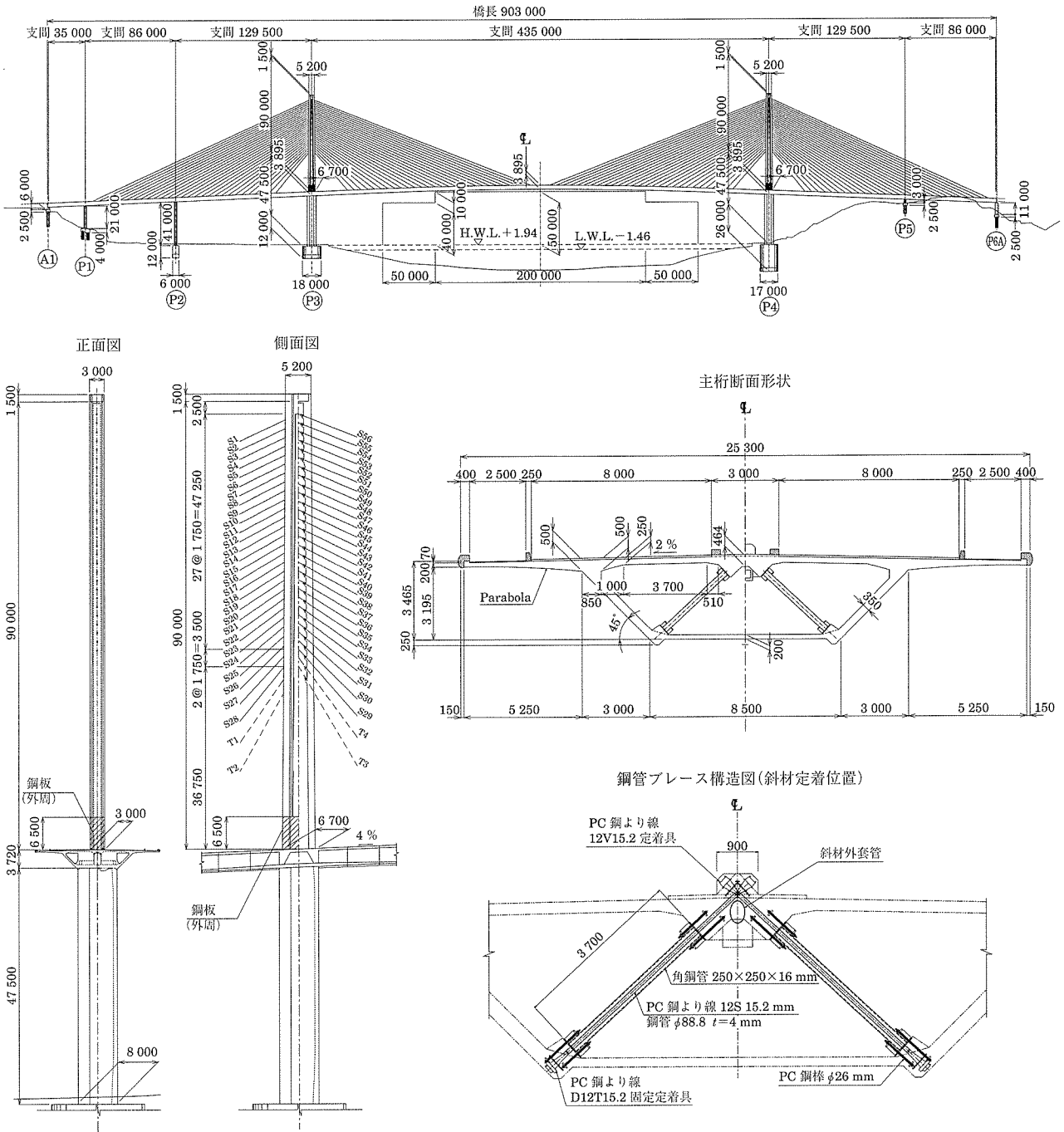


図 - 2 橋梁一般図

表 - 1 主要工事数量表

項目	仕様	単位	数量	項目	仕様	単位	数量		
コンクリート	主桁	45 N/mm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	13 102	PC鋼材	主桁連続ケーブル	SWPR7BL 12S12.7	kg	51 296
	主塔	55 N/mm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	1 810		主桁主鋼棒	SBPR930/1180 φ 32 mm	kg	168 853
	地覆	24 N/mm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	753		主桁横締め	SWPR19L 1S21.8	kg	111 672
	橋脚	35 N/mm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	579		鋼管ブレース内PC鋼より線	SWPR7BL 12S15.2	kg	19 510
	ケーソン	24 N/mm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	9 000		鋼管ブレースアンカーPC鋼棒	SBPR930/1180 φ 26 mm	kg	14 802
鉄筋	上部工	SD 390, SD 490	ton	2 604.5	主塔鉛直締めPC鋼より線	SWPR7BL 12S12.7	kg	51 293	
	下部工	SD 390	ton	1 401.5	主塔水平締めPC鋼より線	SWPR7BL 12S12.7, 8S12.7	kg	13 814	
主桁鋼管ブレース	STK 490 φ 267.4 mm t = 9.3 mm	ton	151.2	斜材	PC鋼より線 (亜鉛メッキ)	15.7mm (NF A35-035)	ton	1 017	
	STKR 490 250 × 250 mm t = 16 mm	ton	172.1		深礎杭	杭径 φ 2.5 mm, φ 3.5 mm	m	157.5	

表 - 2 コンクリート配合表

用途	$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤
					W (水道水)	C (PCB 40)	S (川砂)	G (砕石)		
								5-10mm	10-20mm	
主塔	55	20	30	41	144	500	721	324	757	6.50 (SP8S)
主桁	45	19	32	43	145	475	763	316	738	6.65 (SP8S)
主橋脚	35	13.5	37	43	144	400	795	329	769	4.00 (SP8S)
下部工	24	12	48	45	164	350	827	316	737	3.85 (R561)
地覆	21	12.5	44	44	150	350	825	328	766	4.20 (R561)
ケーソン中埋め	18	18	58	48	170	300	895	303	707	3.60 (SP8S)

に示す。

### 3. コンクリートの配合

コンクリートプラントは、両岸に1基ずつ設置し、それぞれ1バッチ容量1m<sup>3</sup>の2軸強制練りミキサ、50トンセメントサイロ2基、冷却水製造装置、全自動材料計量設備を装備した。公称練混ぜ能力としては60m<sup>3</sup>/時間を有していたが、運搬能力等の関係から実施工での最大出荷量は40m<sup>3</sup>/時間弱であった。

本工事で用いたコンクリートの配合を表-2に示す。セメントは、ベトナムではJIS適合の普通ポルトランドセメントや早強ポルトランドセメントはほとんどなく、石灰石微粉末などを混合したベトナム規格適合セメント（置換率約10%、PCB 40）を使用した。上部工用コンクリートでは、とくに暑中での高いスランブ保持性能を与えるため、混和剤に高性能減水剤（SP8S）を用いた。ベトナムでは耐凍害性は問題にならないことから空気量は重要視されず、AE剤や高性能AE減水剤は一般的でない。配合は、主桁の場合、主鋼棒と上床版横締め緊張作業に必要な圧縮強度（26N/mm<sup>2</sup>）が、打込み後36時間以内に得られるよう決定した。

ベトナム北部では気温が年間で大きく変化する。2003年から2006年までの間、現場でのコンクリート打込み時の気温は8～37℃を記録した。打込み時のコンクリート温度を32℃以下とするために、暑中には水と冷却水製造装置を併用し、練混ぜ水を4℃まで冷却して使用した。冷却水は、貯蔵骨材、毛布で包んだセメントサイロ、トラックアジテータにも散水して用いた。また、現場ではコンクリート配管を毛布で包み、常温水を散布してコンクリート温度の上昇を抑えた。

### 4. 上部工の施工概要

上部工は、図-3に示すように、主塔、斜材の施工と並行して移動作業車による主桁の場所打ち張出し施工を行った。主桁の張出しブロック数は、中央径間側32ブロック、側径間側31ブロックであり、斜材の架設を含む1ブロックを標準8日サイクルで施工し、第1ブロック施工後約1年で張出し施工を完了した。側径間は支柱式支保工を用いて施工し、張出し施工の終了後、側径間閉合部、中央閉合部の施工を経て、斜材の張力調整を行った。

仮設備の標準的な配置を図-4に示す。

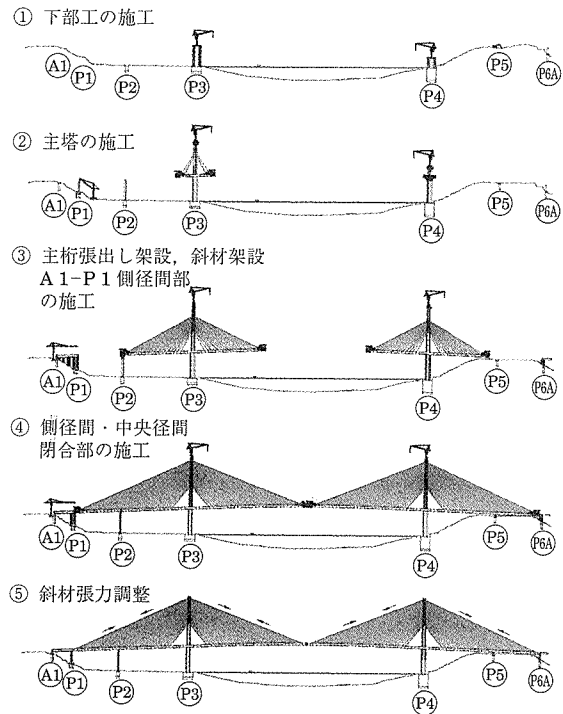


図 - 3 上部工施工順序図

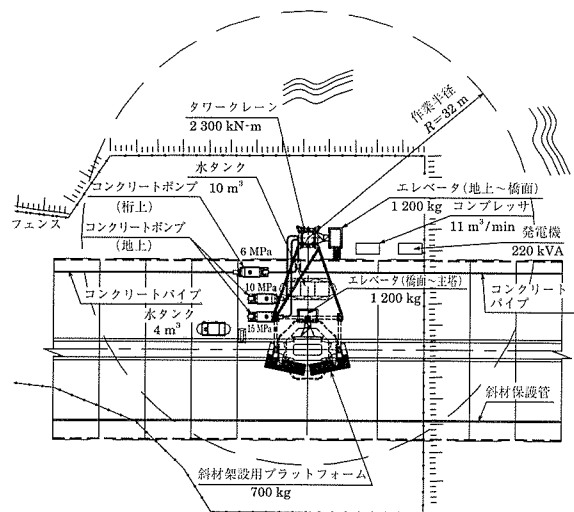


図 - 4 上部工仮設備配置図 (P3 橋脚)

## 5. 主桁の施工

### (1) 標準ブロック

主桁の標準ブロック長は 6.5 m で、箱桁内には鋼管ブレースを配置して断面の軽量化を図っている（写真 - 2）。斜材定着部の鋼管ブレースには、一般部の丸鋼管（ $\phi$  267.4 × 9.3 mm）よりも剛性の高い角鋼管（ $\square$  250 × 16 mm）を使用し、内部に PC 鋼材（12S15.2）を配置して斜材からの引張力に抵抗している。

移動作業車（容量 8 500 kN・m）は、設計条件から総重量が 1 300 kN に制限されている。メインジャッキは 2 200 kN が 2 台で、屋根部には、鋼管ブレース、斜材外套管、緊張用ジャッキの吊上げ用として 20 kN のウインチを 2 基装備した。

新ブロックのコンクリート打込み時に、底型枠を支持している旧ブロック下床版が変形し、橋軸直角方向に引張応力が発生することが施工時応力度の照査結果から判明し、その対策として、コンクリート打込み前に下床版を上床版から 2 本の PC 鋼棒で仮支持し、緊張力 100 kN を与えることで、引張応力の発生を抑えた。

コンクリートは、コンクリートポンプを地上と柱頭部橋



写真 - 2 鋼管ブレース



写真 - 3 主桁コンクリート打込み

面に配置して、張出しブロックの片側ずつ打ち込んだ（写真 - 3）。ブロック間の鉛直打継目処理は、妻型枠に遅延剤を塗布して脱型後に処理した。

主桁に配置される PC 鋼材はすべて内ケーブル方式であり、上床版に張出し架設用の PC 鋼棒  $\phi$  32 mm、下床版・ウェブに連続ケーブル 12S12.7 が使用されている（図 - 5）。また、上床版横締めには PC 鋼より線 1S21.8 mm が配置され、設計荷重時に発生する引張応力度をコンクリートの引張強度以下に抑えている。

標準ブロック施工のサイクル工程を図 - 6 に示す。

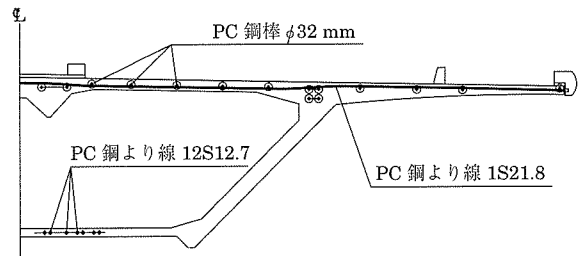


図 - 5 主桁 PC 鋼材配置 (中央径間側第 25 ブロック)

作業	日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
移動作業車(1)	コンクリート工	■	第(n-1)ブロック						第nブロック	■	
	緊張工			■							8日サイクル
	移動作業車の移動			■							
	型枠工				■						
	鉄筋、PC工					■					
	鋼管ブレース、外套管取付け						■				
	斜材架設							■			第(n-1)ブロック
橋面測量											80%緊張
移動作業車(2)	コンクリート工	■	第(n-1)ブロック							第nブロック	■
	緊張工			■							8日サイクル
	移動作業車の移動			■							
	型枠工				■						
	鉄筋、PC工					■					
	鋼管ブレース、外套管取付け						■				
	斜材架設							■			第(n-1)ブロック
											80%緊張
											100%緊張

図 - 6 主桁施工サイクル工程

### (2) P2, P5 橋脚通過時

P2, P5 橋脚頭部は、移動作業車が通過時に接触しないよう、軸方向鉄筋に機械式継手を用いてコンクリートを桁下 3 m で打止めた（写真 - 4）。脚頭部は移動作業車が通過した後に施工し、橋脚上の主桁第 19 ブロックでは、すべりゴム支承、負反力制限装置、コンクリートストッパー、横桁をあと施工した。

あと打ちとなる主桁内の横桁（厚さ 2.5 m）は、マスコンクリートであり高強度コンクリート（ $f_{ck} = 45 \text{ N/mm}^2$ ）を使用していることから自己収縮によるひび割れ発生の可能性が無視できないため、上床版との間に最小 30 mm 程度の隙間を残しておき、後日、無収縮モルタルを打込んだ。

### (3) P1 閉合部（側径間）

A1 - P1 側径間は、当初設計では張出し施工完了後に一括施工するものであった。しかし工期短縮のため、張出し施工と並行して A1 - P1 側径間を支保工で施工（写真 - 5）し、

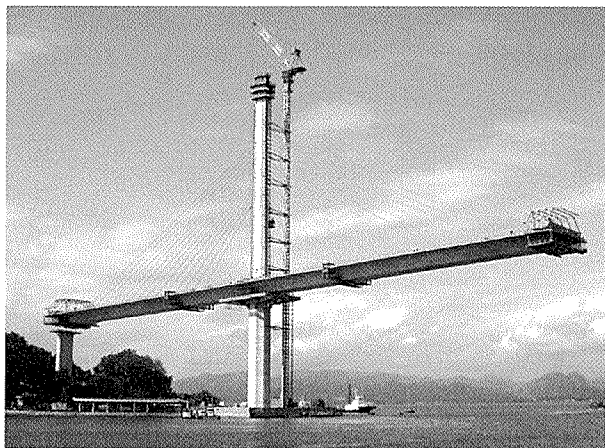


写真 - 4 P2 橋脚通過時

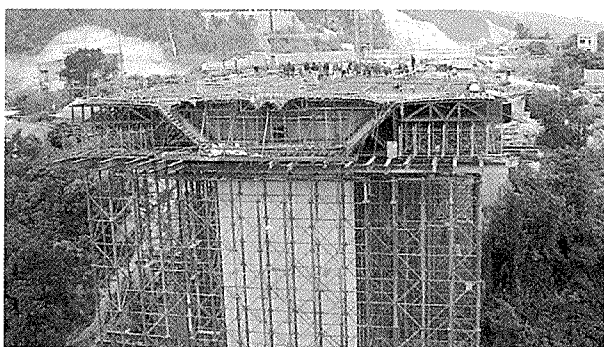


写真 - 5 A1 - P1 側径間の施工

張出し完了後に長さ 2.15 m の閉合部で連結する施工手順となるよう設計変更した。そのため、A1 - P1 側径間は連結まで単純桁としてすべりゴム支承上に支持されるので、P1 橋脚に鉛直に埋込んだ 4 本の H 形鋼で仮固定した。

長さ 2.15 m の閉合部は、PC 鋼棒 2 本と 2 000 kN ジャッキ 2 台で移動作業車の上部前方横梁を側径間に固定して、張出し側の高さを調整した (写真 - 6)。また、移動作業車の外枠を支柱式支保工で受けてコンクリート荷重による張出し側のたわみを拘束した。橋軸方向の力は、主に温度変化により最大 2 300 kN 発生することから、ウェブ同士を 8 本の H 形鋼で仮固定した。

閉合部のコンクリートは、以下の条件を満足する時間帯



写真 - 6 P1 閉合部

に打込むこととした。

- ① 気温降下による既設張出し部の縮みが安定して、養生中のコンクリートに引張応力が発生しない。
- ② 既設張出し部が気温上昇に伴って伸びてきたとき、発生圧縮応力を上回るコンクリートの圧縮強度が発現している。

検討の結果、深夜 3 時頃コンクリート打込みを完了し、翌午後 4 時頃から上床版主鋼棒 (570 kN × 2 本) と下床版連続ケーブル (1 000 kN × 2 本) を緊張し、発生しうる引張応力に抵抗することとした。

#### (4) 中央閉合部

長さ 3.2 m の中央閉合部は、P4 橋脚側の移動作業車を用いて施工した。高さの微調整は、PC 鋼棒 2 本と 2 000 kN ジャッキ 2 台で移動作業車の上部前方横梁を P3 橋脚側に緊結して行った (写真 - 7)。P1 側径間閉合時と同様に橋軸方向に約 3 200 kN の軸力が発生することから、ウェブ同士の仮固定実施後、コンクリート打込みを行い、下床版連続ケーブル (1 500 kN × 4 本) の緊張を行った。所定の養生を行った後、残りの連続ケーブルを緊張し、仮固定用 H 形鋼を撤去した。

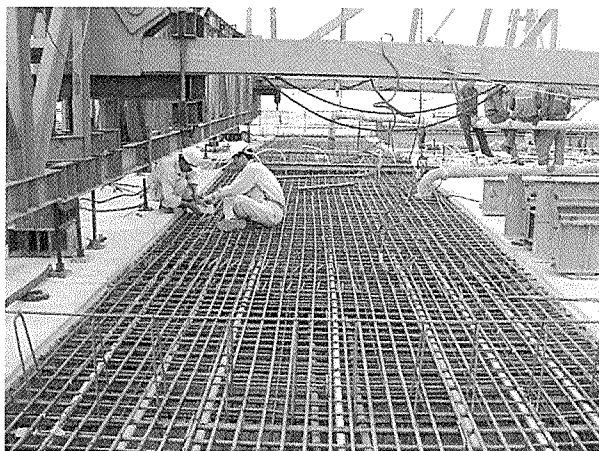


写真 - 7 中央閉合部

## 6. 主塔の施工

中空変断面を有する主塔は、高さ 91.5 m を、24 ロット (高さ 2.1 ~ 4.2 m) および頂部高欄 (高さ 1.5 m) に分割し、油圧ジャッキにより昇降するクライミング型枠を用いて施工した。コンクリートは、タワークレーンに沿わせた配管で橋面まで圧送してバケット (容量 2.5 m<sup>3</sup>) に受け、タワークレーンで主塔頂部まで吊上げて打込んだ。これは、長い鉛直配管での閉塞リスク低減と、タワークレーンでの運搬時間短縮の両方を考慮したことによる。

ハロン湾は台風襲来地域であることから、設計風速は橋面高さにはほぼ等しい地上 50 m で 50 m/秒 (10 分間平均風速) であり、主塔の耐風安定性に関して、設計風速時の風荷重に対して安全率 1.3 以上の終局耐力を有すること、45 m/秒の風速までひび割れを生じさせないことが要求された。

このため、主塔のひび割れ発生を抑えるため、主塔下部

には鉛直方向 PC 鋼材 (12S12.7) を 80 本配置した (図 - 7)。また、風による主塔の振動を抑制するため、主塔内に高さ 80 mm の FRP 製容器に水を封入した分散型液体ダンパーを、1 基あたり 344 個設置した (写真 - 8)。このダンパーを PC 斜張橋の主塔に恒久的に設置するのは、世界で初めてとなる。ダンパー設置前後の振動実験では、主塔の 1 次モードでの対数減衰率は 0.03 から 0.07 まで増加し、動的応答が 58 % 低減することを確認した。

主塔の斜材定着部コンクリートには、斜材緊張力による引張応力が発生するため、水平方向に PC 鋼材を配置して過大な応力の発生を抑えた (図 - 8)。水平方向 PC 鋼材は、斜材の容量に応じて斜材 1 段あたり 8S12.7 4 本 ~ 12S12.7 8 本が配置された (図 - 9)。

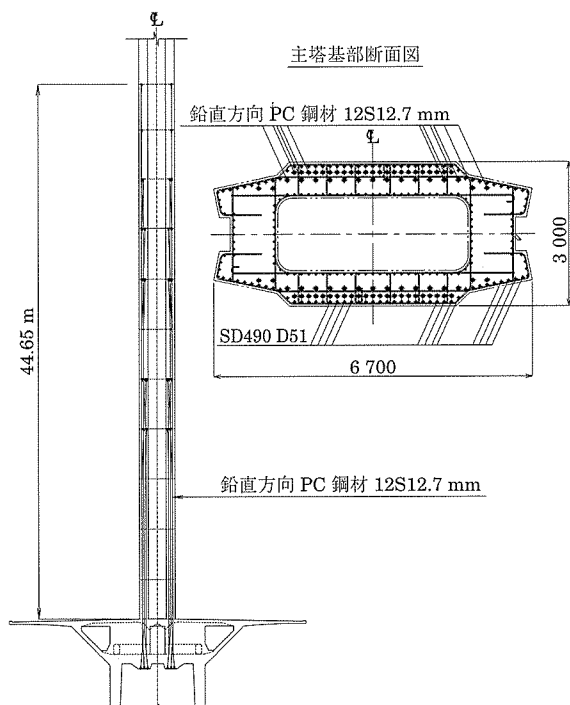


図 - 7 主塔鉛直締め PC 鋼材配置

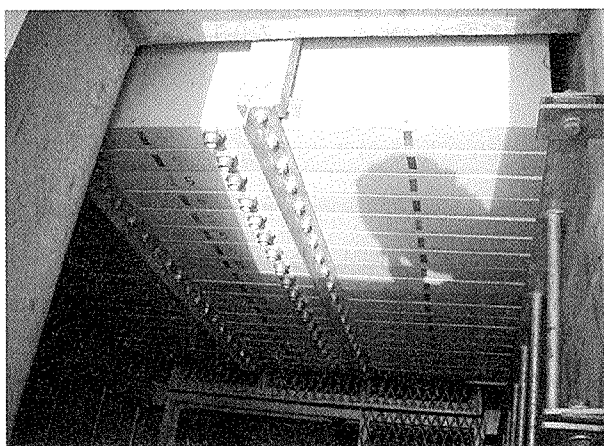


写真 - 8 液体ダンパー (主塔最上段、18 段重ね)

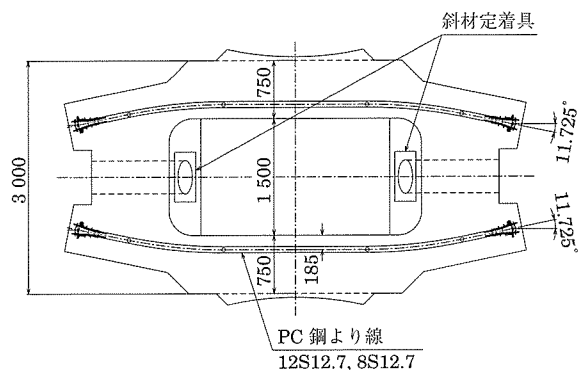


図 - 8 主塔水平締め PC 鋼材配置 (1)

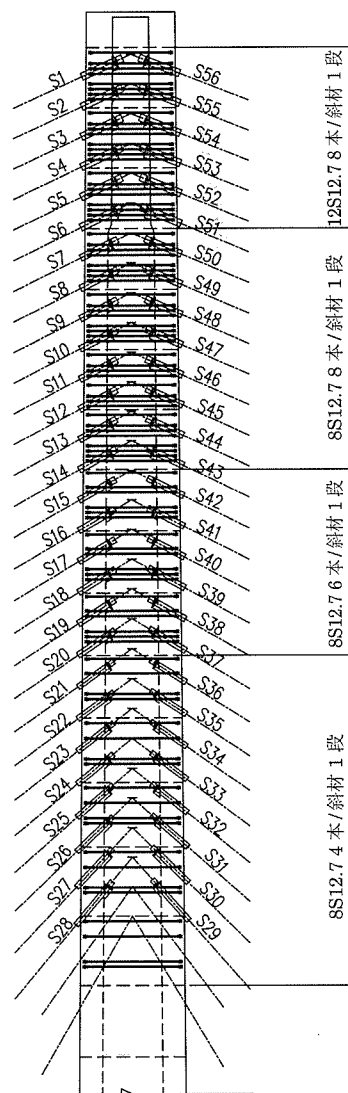


図 - 9 主塔水平締め PC 鋼材配置 (2)

## 7. 斜材の施工

1 面 28 段ある斜材は、35 ~ 71 本のストランド  $\phi$  15.7 mm が保護管 (HDPE, 外径 150 ~ 200 mm, 厚さ 6 ~ 6.2 mm) に収納されている。本工事での採用が世界初となるこの保護管 (コンパクトダクト) は、新たなストランド挿



入方法の開発により、従来品の 80 % の外径を実現し、表面には二重らせんリブ（高さ 1.6 mm、間隔 600 mm）がつけられている。このリブには、風の受圧面積を減少させるのと同時に、風と雨の相互作用によるレインバイブレーションを低減させる効果がある。一方、ストランドはコンパクトストランドと呼ばれ、亜鉛めっき、ワックス、HDPE 被覆の三重防蝕構造になっており、斜材にはセメントグラウトを注入しない。HDPE 被覆は従来品よりも薄い 1.2 mm 厚であり、内径の小さいコンパクトダクトへの挿入を容易にしている。定着具には固定側と調整側の 2 種類があり、主桁内の調整側定着具はリングナットによる張力調整が可能である（図 - 10）。定着部はキャッピング後、ワックスを注入した。

斜材の架設では、保護管と第 1 ストランドを先行して架設した後（写真 - 9）、第 2 ストランド以降を 2 本ずつ下から挿入し、シングルストランドジャッキにより 1 本ずつ緊張を行った（写真 - 10）。全ストランドの張力が同じになるように、第 1 ストランドにはロードセルを設置し、各ストランドを第 1 ストランドの張力と一致するまで緊張する管理方法を採用した。線形管理のため、斜材は緊張力の 80 %



写真 - 9 保護管、第 1 ストランドの架設



写真 - 10 シングルストランドジャッキによる緊張作業

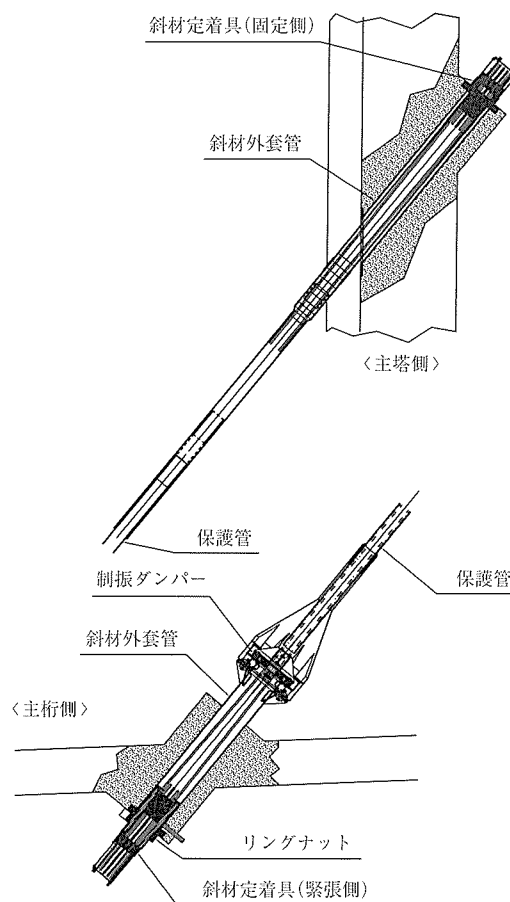


図 - 10 斜材定着具

を導入した後、翌朝に主桁のレベル測量を行って線形を確認し緊張力の 100 % まで導入した。

主桁中央閉合の後、張力調整を 32 本の斜材（S1, S16 ~ S28, S56）で行った。これは設計上考慮された供用時の斜材および主桁の応力度を制限値内にするためのものであり、線形補正のための張力調整は不要であった。

斜材制振装置には、斜材下段から順に、高減衰ゴムダンパーを 8 段、内部油圧ダンパーを 10 段、内部ラジアルダンパーを 10 段、全斜材の主桁側斜材外套管上端部に設置した。中でも内部ラジアルダンパーは、80 mm 以上の振幅に対応できるオイルダンパーであり、世界で 2 番目の使用となった（写真 - 11）。アクチュエータ（50 kN）を用いた斜

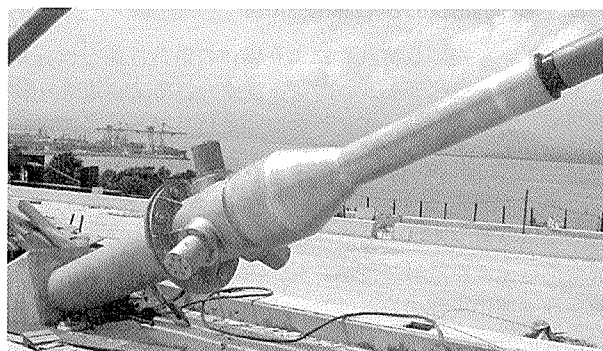


写真 - 11 内部ラジアルダンパー

材振動試験（写真 - 12）では、1次～3次モードでの対数減衰率は0.005程度から斜材長に応じて0.03～0.04以上に改善されることを確認した。



写真 - 12 斜材振動実験

## 8. 橋面工

地覆の施工では、上床版下面にアンカーで固定した腕木上に型枠を配置する一般的な施工法のほかに、移動式型枠（1基あたりの長さ10m）を併用して工期短縮を図った。移動式型枠を写真 - 13 に示す。



写真 - 13 地覆用移動式型枠

## 9. 載荷試験および照明試験

橋面工完了後、載荷試験により橋体の構造性能を検証した。載荷荷重はベトナムの高速道路橋の載荷試験基準<sup>3)</sup>に基づき、設計活荷重によって各照査部位に発生する設計断面力の80～90%に相当する断面力を与えるように決定した。最大で重量25tのダンプトラックを48台橋面上に載荷した（写真 - 14）。主塔の頂部および主桁の各支間中央部変位は光波距離計で計測され、主塔基部、主桁の支点部および支間中央部のコンクリートひずみが計測された。さらに載荷前後の斜材張力を加速度計により測定した。また、ダンプトラックを走行させ、橋体の振動測定も実施した。

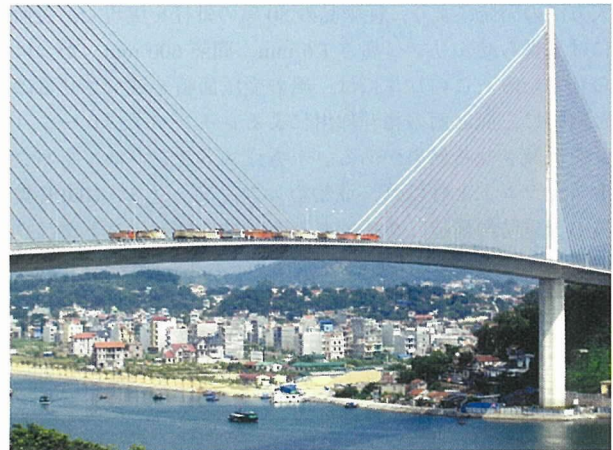


写真 - 14 載荷試験状況

この載荷試験の結果、橋体の変形量および斜材張力増加量は計算値のおおむね80～90%を示し、所定の性能を有することが確認された。また、振動測定の結果、主桁鉛直曲げ振動1次モードでの固有振動数は設計値0.301 Hzに対して0.312 Hzであることを確認した。

バイチャイ橋では、ランドマークとしての役割を高めることを目的に、橋梁全体で220基の灯具を設置してライトアップが施される。設計時にコンピュータシミュレーションによって検討された照明効果を確認するため、ライトアップテストを実施して、灯具の照射角度・方向の調整および照明演出プログラムの検討を行った（写真 - 15）。



写真 - 15 ライトアップテスト

## 10. おわりに

2006年4月30日、バイチャイ橋では日越両国の政府代表者をはじめとする約250名の関係者が出席して連結式が行われ、2006年12月2日に全区間開通した。

日本の資金と技術が、ベトナム・中国両国の経済成長と世界遺産の地における新しいランドマーク創出に貢献している。

最後に、本橋の確認実験にあたってご指導いただきました東京大学 藤野教授、岡山大学 阪田教授ならびに九州工業



大学 久保教授に厚く御礼申し上げます。

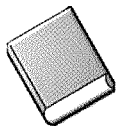
参考文献

1) 小宮 正久：バイチャイ橋の設計，橋梁と基礎，vol.40，No.08，  
pp.189-195，2006.8

2) 柳川春夫，吉田喜義，中村智樹，土田一輝，永元直樹：バイチャイ橋の施工，橋梁と基礎，vol.40，No.10，pp.15-24，2006.10

3) Standard for load testing of bridge on highway 22 TCVN243-98

【2006年11月2日受付】



刊行物案内

## プレストレストコンクリート技士試験 講習会資料

平成18年度 PC 技士試験講習会

資料のほか，過去3年間の試験問題，正解および解説が掲載されています。

(平成18年6月)

頒布価格：3500円(送料を含む)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会