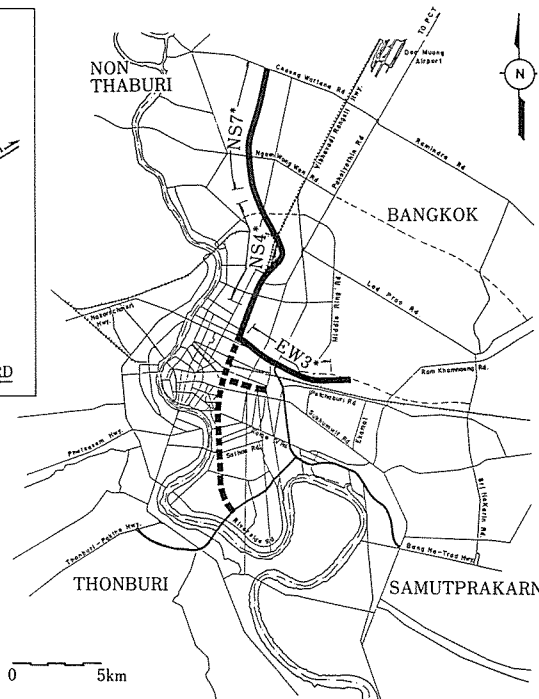
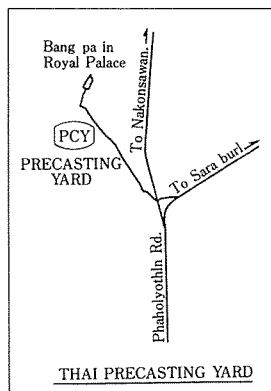


バンコク第二高速道路の計画および設計 ——外ケーブル方式によるプレキャストブロック工法——

白石 暢明*1・竹林 稔雄*2・谷沢 次康*3

1. まえがき

本高速道路プロジェクトは、民間会社であるバンコク高速道路株式会社 (BECL) が、設計・施工・ファイナンス・運営を行い (このうち設計・施工監理は(株)熊谷組 (プロジェクトマネージャー) による)、30年間の事業期間の後、タイ国高速道路・鉄道公社 (ETA) に施設を引き渡すという、いわゆる BOT (Build, Operate & Transfer) 方式によるものである。高速道路はほぼ全線高架式であり、片側3車線の本線上下線約32km (盛土部約1km含む) および1,2車線のインターチェンジ17か所からなる (図-1参照)。工事は2期に分けられ、そのうち第一期工事区 (約19km) は既に着工され、日増しに悪化していくバンコク市内の交通渋滞と競争するがごとく、完成を急いでいる (写真-1, 2, 3, 4)。本文は、この高速道路の第一期工事区の大部分を占めるプレキャストブロック工法による高架橋に関し、計画・設計の概要を報告するものである。



- 第2高速道路1期工事 (19km)
- - - 第2高速道路2期工事 (12km)
- 第1高速道路 (供用中)
- * プレキャストブロック工法区間

図-1 路線概要

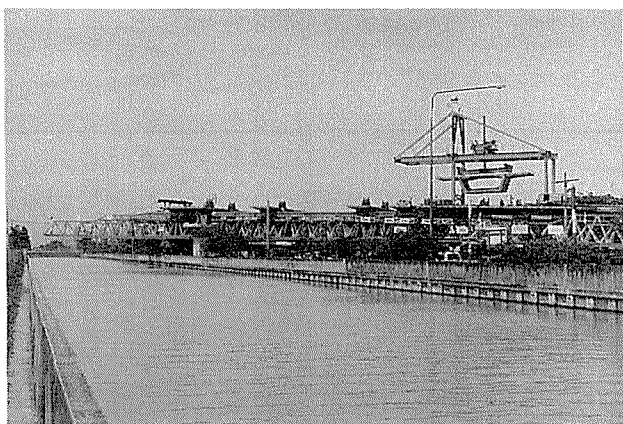


写真-1 UNDERSLUNG TRUSS による架設

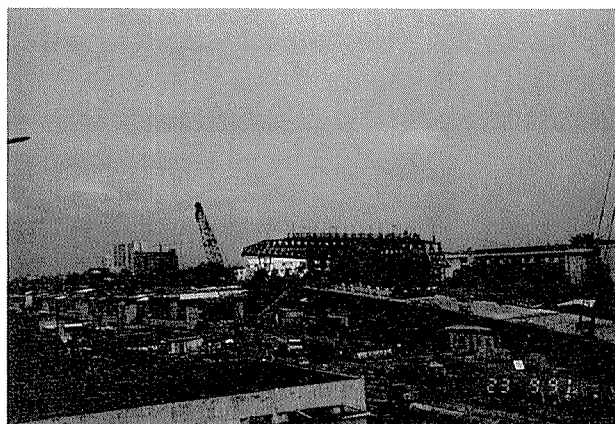


写真-2 OVERHUNG TRUSS による架設

*1 Nobuaki SHIRAISHI : (株)熊谷組 タイ統括営業所/バンコク第二高速道路工事所所長
 *2 Toshio TAKEBAYASHI : (株)熊谷組 タイ統括営業所/バンコク第二高速道路工事所設計主任
 *3 Tsugiyasu YAZAWA : (株)熊谷組 タイ統括営業所/バンコク第二高速道路工事所設計係

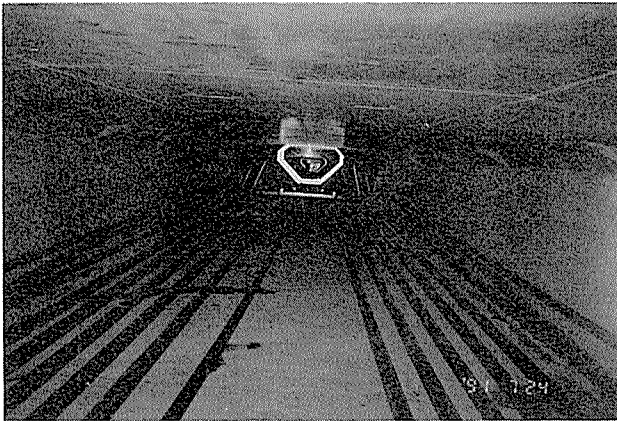


写真-3 箱桁橋内部

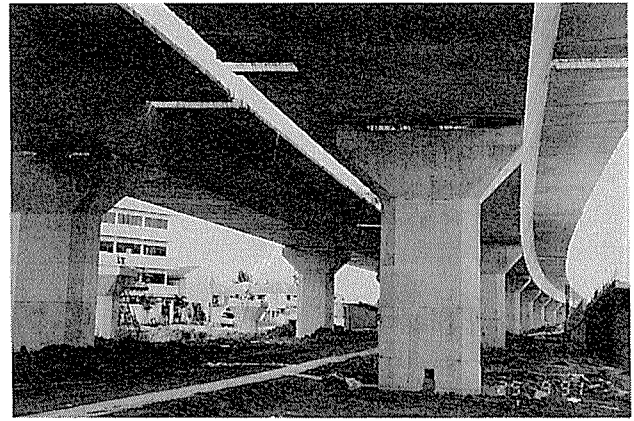


写真-4 箱桁橋外観

(ループ $R_{min}=50m$)

2. 工事概要

2.1 高速道路工事概要

- 1) 工事名称：バンコク第二高速道路建設工事
- 2) 元発注者：タイ国高速道路・鉄道公社 (ETA)
- 3) 発注者：バンコク高速道路株式会社 (BECL)
- 4) 工事設計・施工監理者：(株)熊谷組
- 5) 工事場所：タイ国バンコク市
- 6) 工事数量：表-1 参照

表-1 概略工事数量

工事区	第一期	第二期(設計中)
本線延長	19 km	12 km
インターチェンジ	11 か所	6 か所
予定建設工期	1990.3-1993.2	1992.8-1995.7
コンクリート	82 万 m ³	46 万 m ³
鉄筋	9.6 万 ton	6.7 万 ton
ストランド	1.4 万 ton	0.7 万 ton
場所打ち杭	22 万 m	14 万 m
打込み杭	18 万 m	12 万 m
プレキャストブロック	14 473 個	設計中
プレキャストブロックスパン	1 131 スパン	設計中

2.2 高架橋概要(第一期工事区)

- 1) 構造形式：最大4径間連結単純PC箱桁橋(プレキャストブロック)
最大6径間連結単純PC合成桁橋(プレキャストU桁)
最大10径間連続RC床版橋(一部PC)
- 2) 高架橋延長：約19 km(プレキャストブロック工法17 km)
- 3) 有効幅員：13 m(3車線), 9.5 m(2車線), 6 m(1車線)
- 4) 径間長：24.85 m~48.65 m
- 5) 平面斜線：本線 $R_{min}=280 m$
出入路 $R_{min}=90 m$

- 6) 勾配：縦断勾配最大6%
横断勾配最大10%

3. 高架橋の計画および設計の概要

3.1 計画・設計フロー

高架橋の計画・設計フローを図-2に示す。

(1) Phase 1 (入札用計画・設計)

BECLが関わる以前に、JICAの調査に基づきETA自身の手で進められていた原計画では、プレキャストI桁によるPC合成桁が基本構造であった。これに対し、景観性および施工時の地上部との相互影響を考慮して、プレキャストブロック工法によるPC箱桁橋が標準工法代替案として採用された。上下部工の詳細設計にあたっては、スパン・バイ・スパン工法¹⁾を指定架設工法とし、それに伴う仮設荷重をできるだけ明確にすることにより、将来の架設工事計画からそのフィードバックによる設計変更の減少をはかった。ブロック製作作業を集中管理するためのキャストヤードの計画およびブロック各構造の可能な限りの標準化もこの時点で行われた。

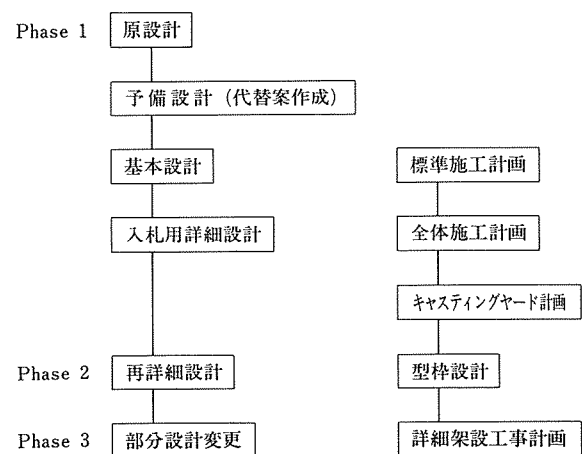


図-2 高架橋の計画・設計フロー

◇設計報告◇

(2) Phase 2 (ブロック製作計画からのフィードバック)

詳細設計の完了に引き続き、ブロック製作作業(主に型枠設計)の改善の観点から入札用詳細設計の細部の見直しが行われた。本作業は架設工事の入札と並行して行い、架設工事に影響を与える設計変更については、入札中・後の修正情報として業者に与えられた。

(3) Phase 3 (架設工事計画からのフィードバック)

入札の結果、プレキャストブロック架設工事3工区に対し、2業者が選定された。2業者からはそれぞれの工区の状態を反映した架設工法が提案され、それに伴う若干の設計変更が行われた。

3.2 設計条件

(1) 設計基準

「AASHTO 1983 SPEC.」²⁾を基本設計基準とし、さらにこれだけではカバーできないプレキャストブロック工法に特有な部分については、補助規準として「AASHTO 1989 GUIDE SPEC. FOR SEGMENTAL CONCRETE BRIDGE」³⁾を用いた。

(2) 地域特性を考慮した修正

上記の設計規準を準用するにあたり、バンコクの地域特性を考慮した修正を行った。そのうち主なものを以下

に示す。

- (a) 沈下:隣接橋脚間で最大 50 mm の不等沈下
- (b) 活荷重: 1.3・HS 20-44
- (c) 風荷重: $V=30.5 \text{ m/sec}$ ($H=10 \text{ m}$)
- (d) 温度変化: 10~40°C
- (e) 地震荷重: 震度係数=0.06
- (f) 耐久性: 「はげしい腐食性環境」下にあるものとする

4. 下部構造

高速道路沿線の地質は、バンコク市全域がチャオプラヤ川河口の広大な扇状地内に位置しているため、沿線長に比べて極めて均質な性状を示している。入札詳細設計では、橋脚用基礎として、場所打ち杭(径 1.0 m/1.2 m)および打込み杭(PC, 径 0.6 m)の両設計を並記し、最終決定は施工業者の提案に任せる方法をとった。この結果、沼地内を除いてすべての橋脚は場所打ち杭基礎となった。各杭長は、荷重および地層の変化に応じて、25~50 m (場所打ち杭), 25~35 m (打込み杭)となっている(図-3 参照)。

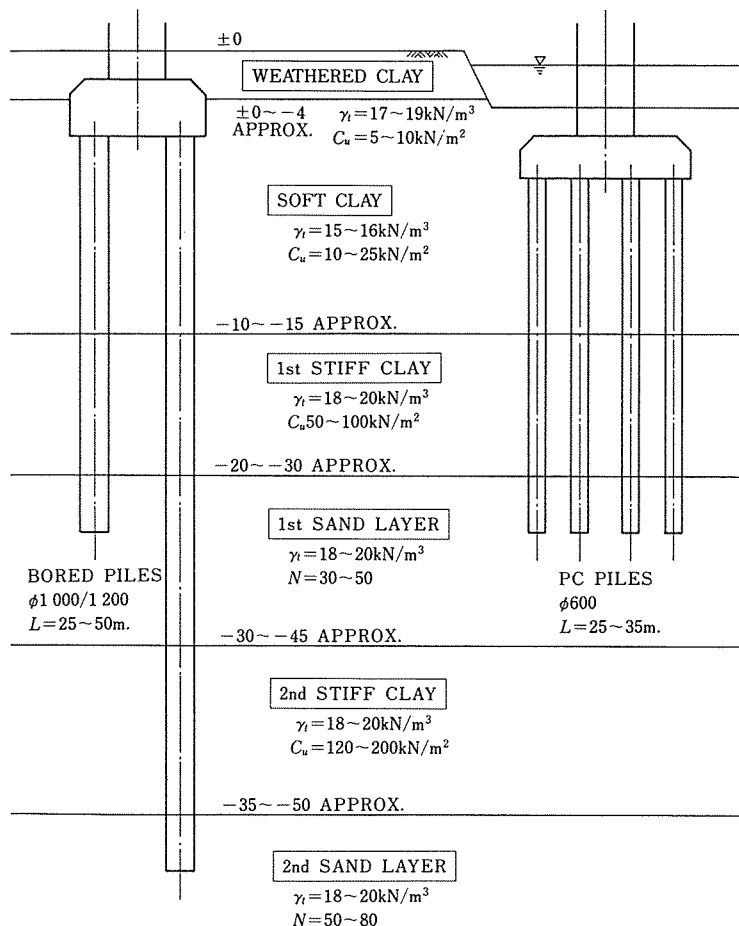


図-3 橋脚用基礎

5. 上部構造

5.1 主桁構造

主桁は、基本2タイプ(D 2, D 3)のブロックからなる単純PC箱桁橋である。径間長(24.85 m~48.65 m)および道路幅(6 m~25 m)の変化に対しては、ブロックを適宜組み合わせることで対処している(図-4, 5, 6: 表-2, 3)。

表-2 プレキャストブロック諸元

プレキャストブロックの種類		長さ(m)	幅(m)	高さ(m)	重量(t)
D 2	中間ブロック (INTERMEDIATE SEGMENT)	3.3	6.7	2.4	40
	偏向ブロック1 (DEVIATOR SEGMENT d 1)	3.5	12.2		
D 3	偏向ブロック2 (DEVIATOR SEGMENT d 2)	2.2 (橋脚ブロック)	10.0	15.6	50
	橋脚ブロック (DIAPHRAGM SEGMENT)		15.6		

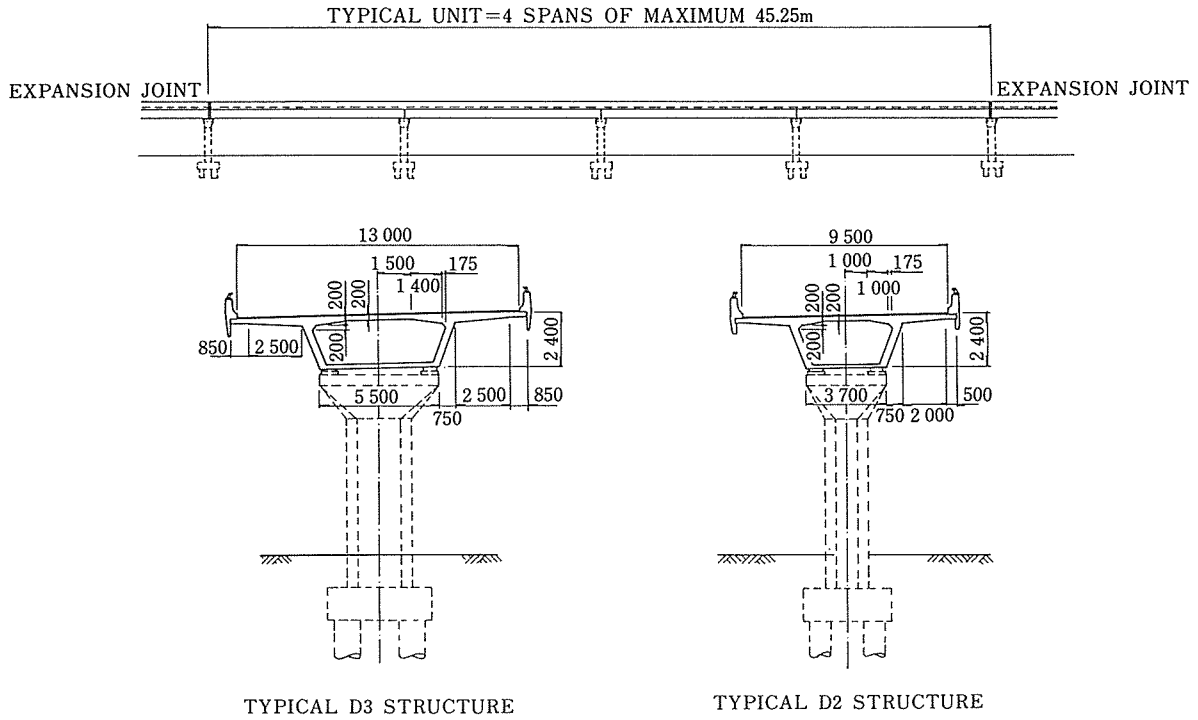


図-4 高架橋一般図(プレキャストブロック工法)

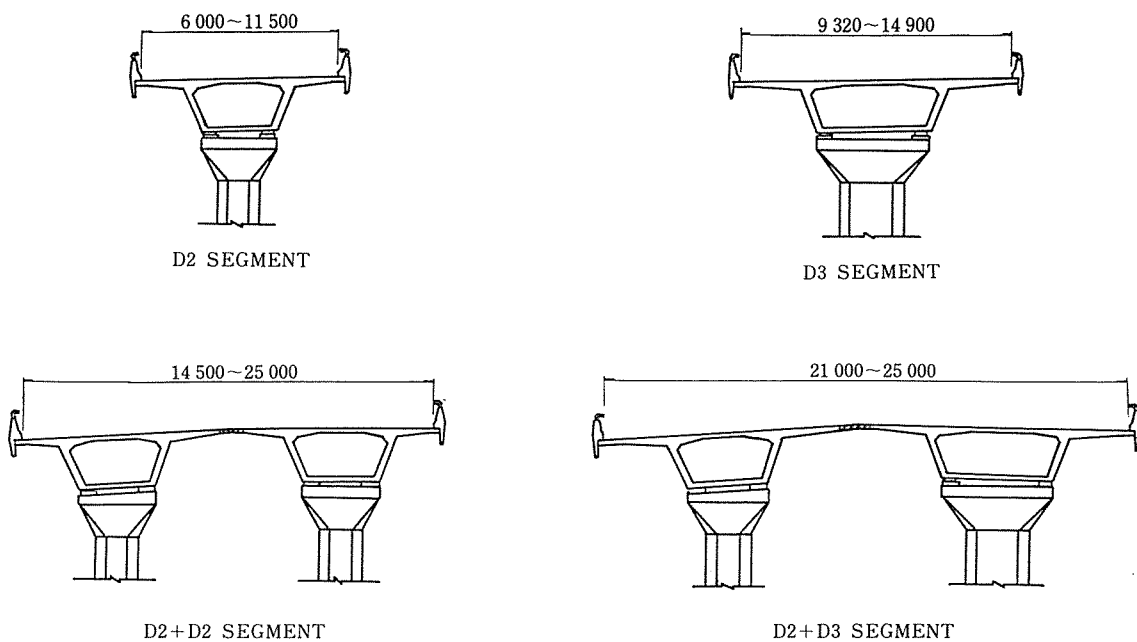


図-5 主桁の構成

◇設計報告◇

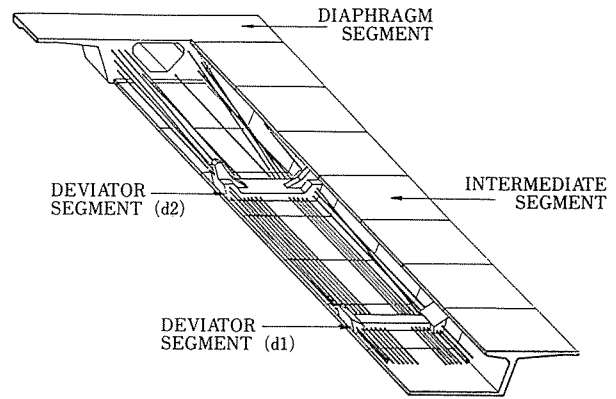
表-3 主桁タイプと構成

径間長 (m)	ブロック構成 ^{*1)}	スパンタイプ数 ^{*2)}			
		D 2 ^{*3)}		D 3 ^{*3)}	
		SINGLE	TWIN	SINGLE	TWIN
24.85	4/0/2/2	2	0	0	0
28.25	4/1/2/2	2	1	1	0
31.65	5/1/2/2	3	3	1	1
35.05	6/1/2/2	2	3	3	1
38.45	7/1/2/2	2	3	2	1
41.85	8/1/2/2	1	3	2	1
45.25	9/1/2/2	2	3	3	1
48.65	10/1/2/2	0	0	1	0
計		14	16	13	5

- *1) 中間ブロック数/偏向ブロック1数/偏向ブロック2数/橋脚ブロック数
- *2) サブタイプ (R<5.00 m の場合) の数は含まず
- *3) 図-5 参照

支持方式は以下の理由により、単純桁とした。

- 1) 隣接橋脚間に最大 50 mm の不等沈下を考慮すると、(特に短径間で) 単純桁が有利になる。
- 2) 各ブロック重量の平準化(連続桁では、橋脚ブロックの重量が突出する)
- 3) 現場打ちコンクリートによる閉台継目が不必要
- 4) ショートライン・マッチキャストによる施工誤差が1径間のみで抑えられ、累積しない。



TENDON SIZE : 5K15~19K15

図-6 ケーブル配置例

架設工法にスパン・バイ・スパン工法を採用したことで、全主ケーブルを外ケーブル方式にすることが可能となった(図-6, 7)。ケーブル配置にあたっては、ケーブル定着部の分散、ケーブル定着位置の標準化(必要プレストレス量の調整はストランド本数のみで行う)、予備ケーブル用設置スペース(約10%の追加プレストレス量を考慮)に配慮した。使用ケーブルは、5~19本の15.2mmストランド(低リラクセーション, GRADE 270)である。

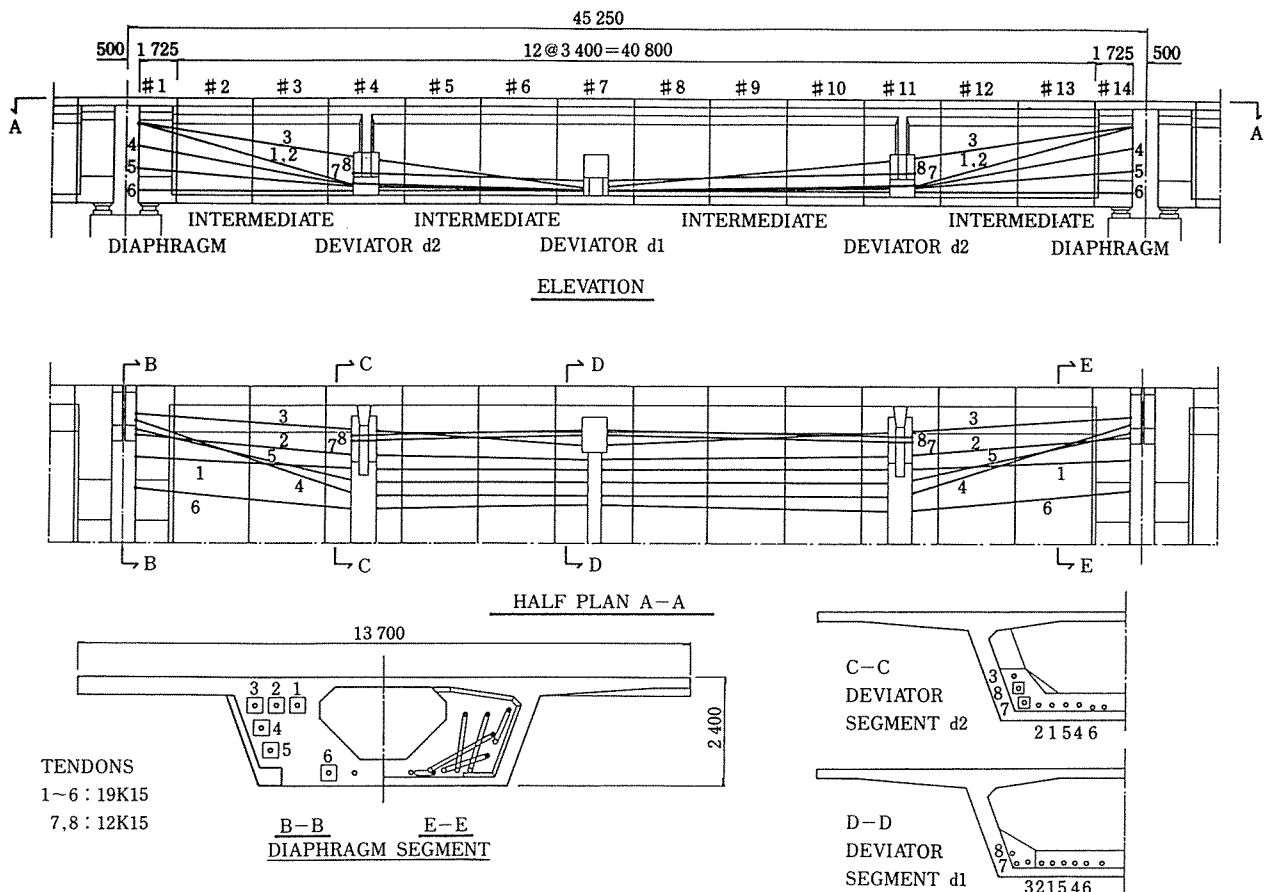


図-7 ブロックおよびケーブル配置例 (D 3 ; l=45.25 m)

表-4 HDPE ダクト

ストランド本数/ケーブル (15.2 mm)	HDPE ダクト内径 (mm)
5~7	66
8~12	79
13~19	97

ケーブルの腐食防止対策は、各ケーブルを両端定着部間で連続性を保たれた HDPE (High Density Polyethylene) ダクト中に納め、緊張後空隙にセメントグラウトを充填することで行っている(表-4, 図-8)。また、将来ケーブル交換の必要性が生じた場合を考慮し、デビエーターは2重シース構造としている。

5.2 プレキャストブロックの構造

表-2 に示すブロック諸元の決定にあたっては、原設計で与えられた桁下空間の確保、既存道路上の運搬性、架設時の操作性、キャストヤードでの作業性(型枠数、サイクルタイム他)等の要因が考慮された。鉄筋量は一般部で約 110 kg/m³ とスレンダーな構造の割には少なめに抑えられている。中間ブロックの標準配筋図(D3)を図-9 に示す。

ブロック各部分の主たる特徴は次のとおりである。

(1) ブロック継目部(図-10)

ブロック継目部はすべて Dry Joint (接合面にエポキシ樹脂系接着剤の塗布を行わない; 外ケーブルの場合にのみ可能) および Multiple Shear Keys (単一の大型接合キーに比べ、良好なせん断力伝達効果が得られる) の概念に基づき、作用せん断力に対しウェブ接合面でのせん断摩擦効果のみで抵抗するように設計されている。継目部はエポキシの引張強度を期待できないことから、単純桁の特性も考慮のうえ、曲げ応力に対し次のような制約条件を設けた。

- ・架設直後: 全断面圧縮 (上床版上縁で 0 N/mm² 以上)
- ・設計荷重作用時: 全断面圧縮 (全断面 1.4 N/mm² 以上)

Dry Joint は防水性に劣るため、凍結融解作用を受けたり、凍結防止剤(塩)の散布が行われる寒冷地には不向きである。熱帯性気候のバンコクでは、その点での防水性は不要であるが、浸透水の外観および耐久性への潜在的悪影響を考慮し、アスファルト舗装(50 mm)の効果には期待せず、別途、上床版への防水を施した。防

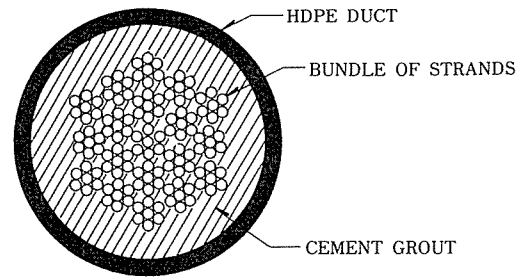


図-8 外ケーブル断面図

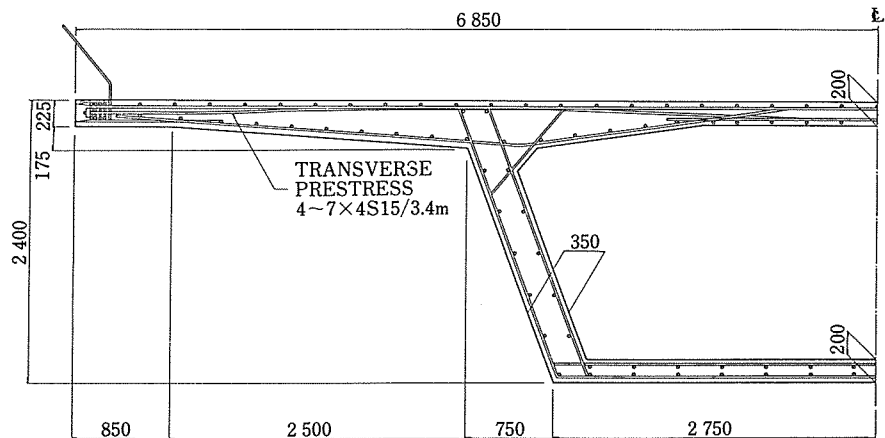
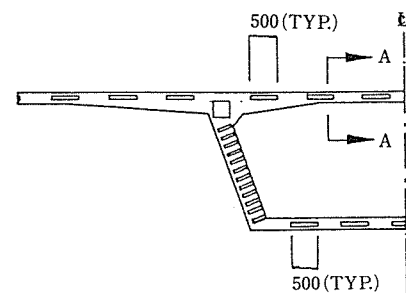
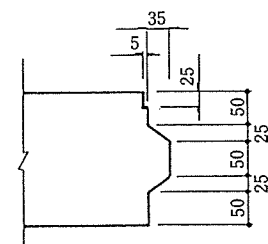


図-9 標準配筋図(D3中間ブロック)



SHEAR KEY (D3 SEGMENT)



SECTION A-A

終局荷重作用時のブロック継目部の検討方法
 $(V_s - V_p) \leq \phi \cdot p \cdot (A_{w1} \cdot u_{w1} + A_{w2} \cdot u_{w2})$

ここに、

A_{w1} : ウェブ面積(せん断キー部分)

A_{w2} : ウェブ面積(せん断キー以外の部分)

p : 継目部平均支圧応力度

u_{w1} : せん断摩擦係数(せん断キー部分)

u_{w2} : 摩擦係数(せん断キー以外の部分)

V_s : 継目部に作用するせん断力

V_p : 継目部におけるプレストレスの鉛直成分

ϕ : 強度低減係数(=0.65)

図-10 ブロック継目部

◇設計報告◇

水は、各ブロックの接合面上縁に予め全幅にわたる切込み（幅5 mm、深さ 25 mm）を設け、ブロック架設・接合後にこれにシーリングすることで行っている。

(2) ディビエーター

偏向ブロック中のディビエーターは、通称 DIABOLO と呼ばれる一葉双曲線状型枠を用い、コンクリートに滑らかな形状変化を与えている（図-11）。曲面形状は、プロジェクト中で出会うすべての道路線形変化に伴うケーブル角度の変化を包絡するように設計されているため、同一型枠が同一位置で常時使え、偏向ブロック・橋脚ブロック製作作業の標準化、型枠設置ミスの低減に寄与している。

主ケーブルの最小曲げ半径は 3.6 m まで下げたため、ディビエーター周囲のコンクリートには密に補強筋を配置している。

(3) ケーブル定着部

ケーブル定着部の概念図を図-12 に示す。定着部と DIABOLO 間に接続用パイプを入れることにより、各工区ごとに異なる定着工法が使用されることによるブロック製作への影響を緩和している。

定着部の集中する橋脚ブロック中には、縦締め PC 鋼棒を入れることにより、各プリズム間の接続ならびにひびわれ抑制をはかっている（図-13）。ケーブル本数の多いスパンでは、橋脚ブロックへの定着具の過度の集中を防ぐため、偏向ブロック 2 にも分散して行っている。

(4) 上床版

上床版は、ポストテンション方式により横締めを行っており、片持ち部については道路幅の変化を吸収できる

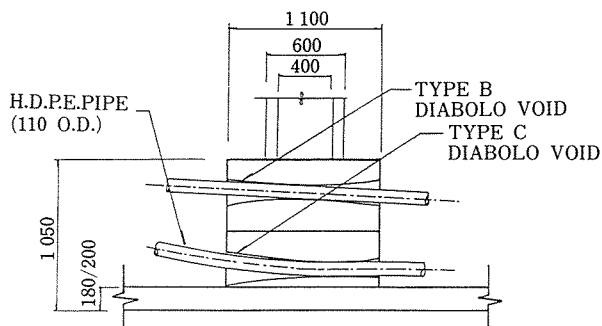


図-11 ディビエーター（偏向ブロック2）

よう若干長目になっている。

横締めケーブルへのプレストレス導入手順は次のように行われ、標準キャストサイクル1日を達成するための型枠の早期転用をはかっている（ここに、設計コンクリート強度は 40 N/mm²）。

- i) 仮緊張——プレキャストブロックのコンクリート打設後、強度 15 N/mm² で片持ち部の自重と釣りあうだけのプレストレスを導入し、その後に脱型。
- ii) 本緊張——ブロックを仮置き場に移し、本緊張を行う（コンクリートの必要最小強度は 25 N/mm²）。

6. 橋脚支承部および伸縮継手部の構造

支承構造は、水平力の各橋脚への分散を考慮し、ゴム支承を採用した。ゴム支承の構造は、各スパンタイプに応じて次のように変化している。

- ・設計最大反力：2 000～4 500 kN
- ・設計水平力：30～50 kN（橋軸方向）、70～90 kN（橋軸直角方向）
- ・設計移動量：10±10～55±20 mm
- ・せん断バネ定数：1.0～2.0 kN/mm
- ・全 厚：73～193 mm
- ・補強鋼板（3 mm）層数：5～11 層

ゴム支承背面には、地震時における橋軸直角方向の水平力に対処するためコンクリートブロックによる移動制

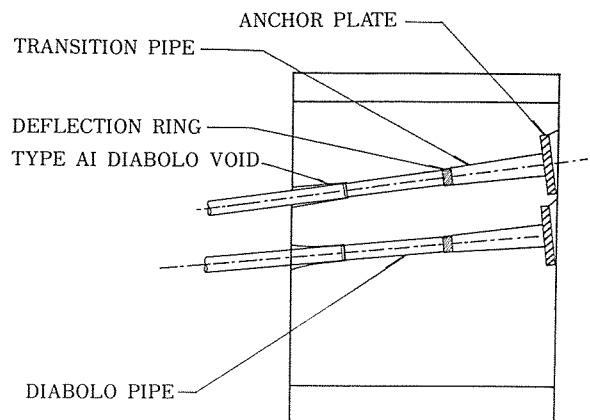
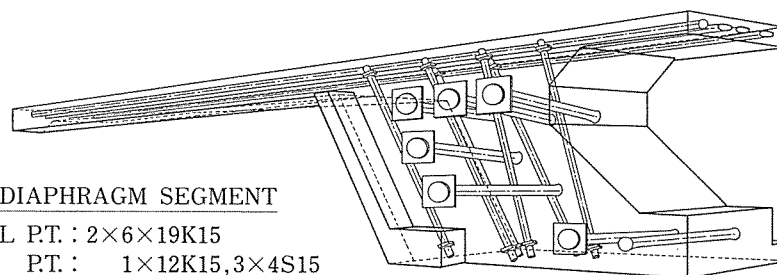


図-12 ケーブル定着部概念図



PRESTRESS IN D3 DIAPHRAGM SEGMENT

- (1) LONGITUDINAL P.T. : 2×6×19K15
- (2) TRANSVERSE P.T. : 1×12K15, 3×4S15
- (3) VERTICAL P.T. : 2×6×φ32 STRESS BAR

図-13 橋脚ブロック中のプレストレス

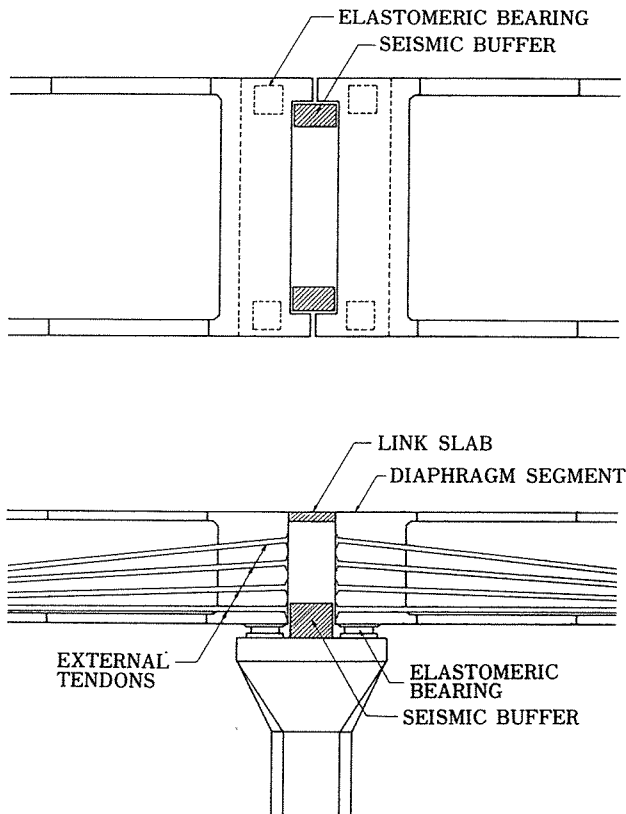


図-14 橋脚支承部の構造

限装置を設けている（図-14）。橋脚上で向き合った橋脚ブロック端面間に1 mの距離をとることにより、将来の予備ケーブル設置作業空間を確保した。

伸縮継手は単純桁の供用上の弱点となりやすいため、3~4径間の桁を現場打ちコンクリートの連結床板にてつなげ、継手個数を減少させている。継手にはフィンガージョイントを採用した。

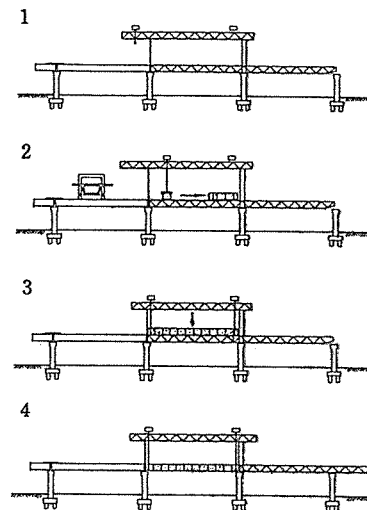
7. 施工計画

架設作業は、3工区（第一期工事区）で行われるのに対し、プレキャストブロック約14 500個の製作・供給は単一のキャストヤードにて行う体制をとったため、膨大な量の情報をいかに管理するかが、全体施工計画等の眼目となった。

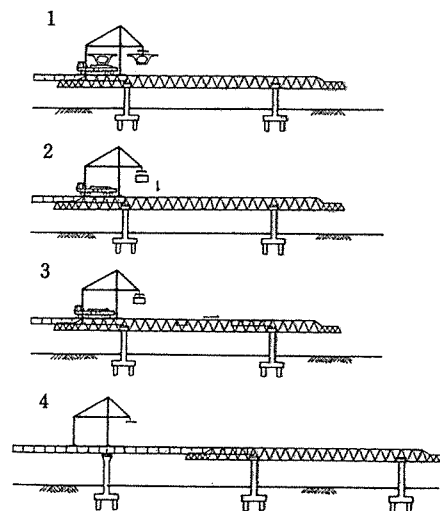
7.1 架設工法

スパン・バイ・スパン架設工法に必要となる箱抜き、補強鉄筋等の情報は、各スパンおよび各ブロックごとにキャストヤードに早朝に伝えられ、施工図に組み入れられる施工管理システムの構築を行った。

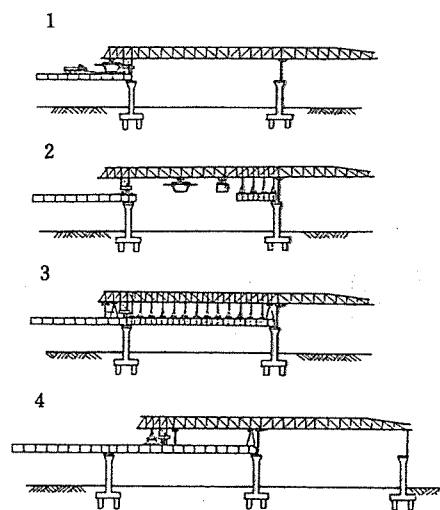
実際の採用工法は、道路線形の変化が単純・緩やかな部分では、UNDERSLUNG TRUSSによる架設、線形が複雑・急な部分では、OVERHUNG TRUSSによる架設工法である（図-15）。



入札時指定工法



採用工法 (UNDERSLUNG TRUSS)



採用工法 (OVERHUNG TRUSS)

図-15 プレキャストブロック架設工法

◇設計報告◇

7.2 許容誤差の設定

本高架橋形式は、5.1で述べた利点がある一方、ブロック間に現場打ち継目を持たないため、架設作業中の誤差修正がほとんど不可能であるという欠点も合わせ持っている。また、ブロック製作は、ショートライン・マッチキャスト工法で行ううえに、下部工施工と同時進行を基本としている。このため、諸々の要因の累積効果としての重大な施工ミス——スパン（ブロック組立後）が所定の位置に収まらない——の発生が危惧された（表-5）。

表-5 プレキャストブロック工法に関わる施工ミスの発生要因

事象	誤差	要因
ブロック組立後スパンが所定の位置に収まらない	ブロック寸法 橋脚位置・寸法	設計・計算 施工図 製作 橋脚施工 架設 道路線形 全体配置 標準詳細 計算アルゴリズム 入力作業 図面作製 測量（製作前後） 測量（構築前後） 測量（架設前後） 型枠精度 製作後変形

キャストヤード、下部工施工現場および架設現場間の緊密な情報のフィードバックが、架設精度の点からも望ましいのであるが、平均ブロック製作速度：30個/日、平均下部工施工速度：3橋脚/日、さらに架設現場が複数に分かれていることから、逆に、情報量の多さ、ならびにそれらの到達時間の差が混乱を招くおそれもあった。そこで下記に示す方針により管理を行った。

- 1) 下部工施工・ブロック製作の間では、それぞれの作業に許容誤差を定め、各々の成果物がその範囲内に収まっている限りは、不必要に頻繁なフィードバックは行わない。
- 2) ブロック製作後寸法に基づき、キャストヤードにて架設時管理座標データを修正、架設現場に渡す。

各部の許容誤差は、表-6に示すとおりであり、これらは誤差の同時発生による累積効果および縦断勾配・横

表-6 許容施工誤差

橋脚	項目	許容誤差
橋脚	平面位置	±15 mm
	組立後の1スパン長さ	±25 mm
ブロック製作	各ブロック中心線	±20 mm
	橋脚ブロック位置（平面）	±5 mm
ブロック架設	橋脚ブロック位置（鉛直）	±5 mm
	各ブロック中心線	±20 mm
ベアリング設置	橋軸方向	±6 mm
	橋軸直角方向	±3 mm
	ベアリング中心間隔	±3 mm

断勾配に起因する芯ずれ効果の吸収が可能である。

7.3 施工図

各々のブロックは、（道路線形）×（構造詳細）の組合せで考えれば、一つとして同じものはなく、製作作業を機械的に行うためには、極論を言えば、各ブロックがそれぞれ独自の施工図を持つことが必要である。本プロジェクトでは膨大な数のブロックを取り扱い、その各ブロックに施工図一式を出すことは現実的ではないので、以下の方法をとった。

- 1) 施工図（A1サイズ）は、各スパンタイプ（D2-基本30タイプ、D3-基本18タイプ；平面線形がR<500mの場合あるいは、上床版片持ち部長さが大きく変化する場合などは、サブタイプをつくる）中の全ブロックタイプに対し発行する。
- 2) 各スパンに対し、キャスト時のキーとなる情報を載せたスパンレイアウト図（A1サイズ）を発行する。

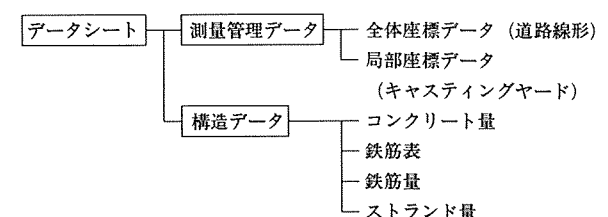
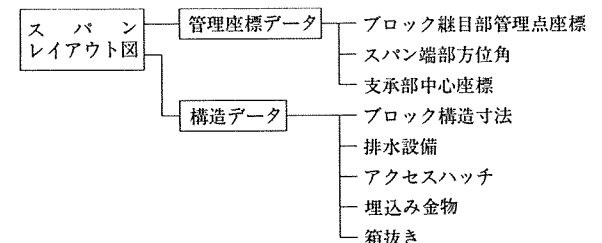
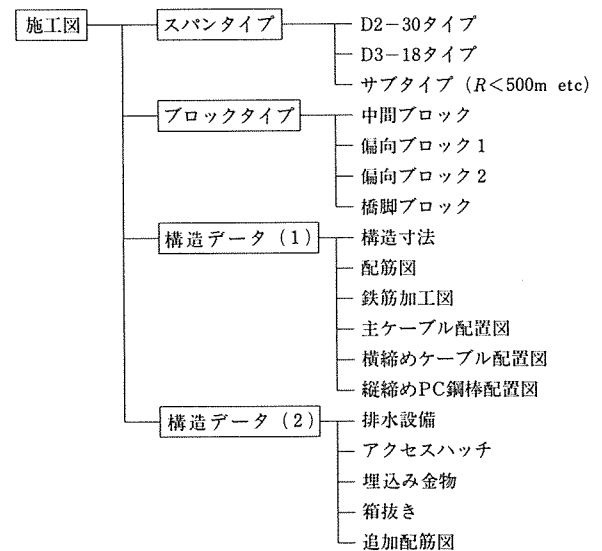


図-16 施工図およびデータシートの情報構成

3) 各ブロックに対し、補足情報をデータシート(A4サイズ)での形で発行する。

施工図およびデータシート上の情報構成を図-16に示す。

8. あとがき

外ケーブル方式によるプレキャストブロック工法は、技術的には目新しいものではないが、本報告はその使用規模が世界でも他に類を見ない規模であり、大規模使用にあたってなされた幾つかの工夫が今後の類似工事の参考になれば幸いである。工事開始に先立ち、実物大テストスパン(D2ブロック、スパン長45m)の架設および載荷試験を行ったが、現在、結果を整理中であるので、その詳細については施工状況の報告とともに別稿に譲りたい。

最後に、本高速道路の計画・設計は、ETA および BECL 以下、(株)熊谷組(工事設計・施工管理)、Free-

man fox Intercon (主設計者)、Jean Muller International (プレキャストブロック工法部分の補助設計・計画)、Louis Berger International(設計照査)ほか、多国籍にわたる企業・個人の協力により行われていることを記し、謝意に代えたい。

参 考 文 献

- 1) Podolny, W. Jr., Muller, J. M. : Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges, John Willey & Sons, 1982
- 2) AASHTO : Standard Specifications for Highway Bridges 13th editon, 1983
- 3) AASHTO : Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges, 1989
- 4) 森元ほか : 特集 : 外ケーブル構造, プレストレストコンクリート, Vol. 32, No. 5, Sept. 1990

【1991年12月5日受付】

◀刊行物案内▶

最新 PC 橋 架 設 工 法

体 裁 : B5判 147頁

頒布価格 : 3 000 円 (送料 : 350 円)

内 容 : PC 橋架設工法総論 <桁橋> 張出し工法概論/ディビダーク工法/FCC—PC 鋼より線を用いた片持ち張出し工法/P & Z 工法/架設桁を用いた場所打ち張出し工法/フリー・ワイズ・ワーゲン工法/逆片持ち架設工法/幅員が大きく変化する PC 橋の片持ち梁架設工法/プレキャストブロックキャンチレバー工法/押出し工法概論/TL 押出し工法/SSY 式押出し工法/RS 工法/移動支保工架設工法概論/ゲリューストワーゲン工法/OKK 式大型移動支保工/FPS 式移動支保工/ストラバーク方式可動支保工/プレキャスト桁架設工法概論/固定支保工式架設工法概論 <アーチ橋> アーチ橋架設工法概論/ピロン・メラン張出し工法/トラス張出し工法/トラス・メラン併用工法/ロアリング式架設工法/CLCA 工法(剛性アーチ巻立て工法) <斜張橋> 斜張橋架設工法概論/SLT 工法/ジャンピングステージ工法(主塔施工用移動足場工法)/スウェーフト工法/埋込み桁を用いたキャンチレバー架設工法/主塔用クライミングフォーム工法/FRP 斜材外套管の架設工法/斜張ケーブルの被覆工法/複数集合斜材の架設・緊張工法/ π フレーム工法 <吊床版橋> 吊床版橋架設工法概論/吊床版懸垂架設工法/吊床版架設工法/吊床版橋のスライド式架設工法/吊床版橋の架設工法 <その他の橋梁> バイプレ工法/プレビーム工法/PC トラスの架設工法/PC 方杖ラーメン橋片持ち架設工法