

# プレキャストセグメント工法における 諸方策と品質の実例

白石暢明<sup>1</sup>・竹林稔雄<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (株)熊谷組 海外本部タイ営業所 (タイ国バンコク市)

<sup>2</sup>正会員 (株)熊谷組 技術本部土木技術部 (〒162 東京都新宿区津久戸町2-1)

バンコク第二高速道路工事は、高架橋の標準構造形式として外ケーブル・ドライジョイントによるプレキャストセグメント桁、さらにその架設工法としてスパンバイスパン工法が採用され、大規模・急速施工に大きく貢献した。本報告では、計画・設計・施工の各段階で取られた単純化、標準化などの方策、管理状況およびその結果として得られた工程・品質などに関し、種々の工事関連データを提示することにより概要を述べる。

*Key Words*: precast segmental bridge, external tendons, dry joint, span-by-span erection, simple beam

## 1. まえがき

1990年2月に着工されたバンコク第二高速道路工事(第一期工事区、全長約20km)は1993年7月に完成、同年9月に開通した(写真-1)。本高速道路は大部分が高架橋であり、その標準構造形式として採用されたプレキャストセグメントPC箱桁橋の使用規模は、単一のプロジェクトにおいては現時点で世界最大となる。

本工事では、規模のメリットを最大限に活かすため、計画・設計・施工の各段階において様々な方策を施した。それらは、プレキャストセグメント、外ケーブル、ドライジョイントなどに代表される構造の単純化・標準化、ショートライン・マッチキャスト工法、スパンバイスパン工法に見られる施工の機械化、あるいはプロジェクトマネージャー組織やキャストヤード設備のような集中化・一貫化といった形で具現化された。

本文では、プレキャストセグメント工法に関する工事データを整理することにより、上述のような種々の方策、管理状況およびその結果として得られた工程、品質、問題などの概要を示す。

## 2. 全体概要<sup>1)-4)</sup>

### (1) 工事概要

主要工事数量および全体工程を表-1, 2に示す。

### (2) 高架橋構造概要

高架橋の一般概要を表-3に示す。また、プレキャスト

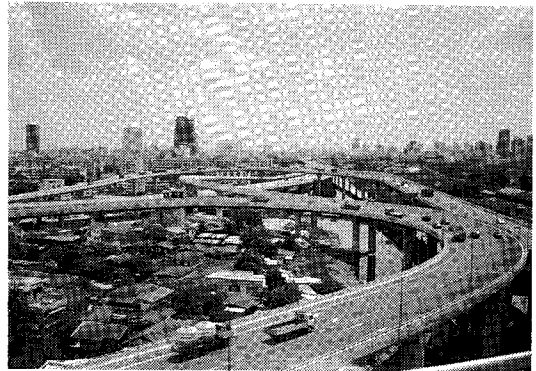


写真-1 バンコク第二高速道路  
(インターチェンジ開通後風景)

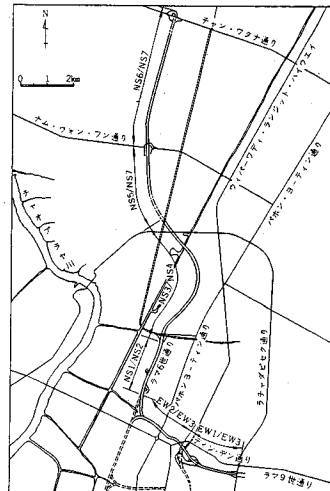


図-1 第一期工事区の工区構成

表-1 主要工事数量 (第1期工事区)

工区*	上部工	EW3	NS2	NS4	NS7	MS6 キャストコンクリート	計
	下部工	EW1, EW2	NS1	NS3	NS5, NS6		
本線延長(km)		5.1	2.2	5.0	7.4	-	19.7
全舗装面積(m <sup>2</sup> )		338 000	177 000	209 000	274 000	-	998 000
高架橋面積(m <sup>2</sup> )		217 000	89 000	151 000	131 000	-	588 000
料金所		4	3	2	3	-	12
コンクリート(m <sup>3</sup> )		165 000	121 000	99 000	109 000	285 000	779 000
鉄筋(t)		23 000	19 000	13 000	15 000	44 000	114 000
スラット(t)		5 000	3 000	3 000	3 000	3 000	17 000
場所打ち杭(m)		69 000	38 000	45 000	46 000	-	198 000
打込み杭(m)		125 000	35 000	39 000	46 000	-	245 000
U桁・I桁径間数		55	139	0	2	-	196
U桁・I桁本数		226	718	0	6	-	950
プレキャストU・I桁数		511	0	293	327	-	1 131
プレキャストU・I桁個数		6 392	0	3 802	4 280	14 474 **	14 474 **

\*: 第1期工事区工区名 (EW1~EW3, NS1~NS7) に関しては図-1を参照のこと。

\*\* : 載荷試験用に製作したU・I桁14個を加えると、製作総数は14488個 (再製作分25個は除く) となる。

表-2 実施工程表 (プレキャストセグメント部分のみ)

工種	工区	1990	1991	1992	1993
キャストコンクリート工	PCY				
セグメント製作工	MS6				
下部工	EW1, 2				
	NS3				
	NS5, 6				
セグメント架設工	EW3				
	NS4				
	NS7				
	NS7				
橋面工	EW1, 2				
	NS3				
	NS5, 6				
設備工	EM				

表-3 高架橋の概要 (第1期工事区)

項目	概要
延長	本線約19km(片側3車線、上下線計6車線)
有効幅員	13m(本線:3車線)、9.5m(出入路:2車線)
径間長	24.85~48.65m
曲線半径	R <sub>min</sub> =280m(本線)、90m(出入路)、50m(U・I)
勾配	縦断最大6%、横断最大10%
構造形式	最大4径間連続単純PC箱桁橋(プレキャストセグメント) 最大6径間連続単純合成桁橋(プレキャストU・I桁) 最大10径間連続RC床版橋(一部PC)

表-4 プレキャストセグメントの諸元

プレキャストセグメントの種類	長さ(m)	幅(m)	高さ(m)	重量(t)	備考
D2 中間セグメント	3.3~	6.7~	2.4	40~	主に2車線用
偏向セグメント(d1)	3.5	12.2		50	
D3 偏向セグメント(d2)	2.2	10.0~	15.6	50~	主に3車線用
橋脚セグメント		15.6		65	

表-5 主桁タイプと構成

径間長(m)	セグメント構成*	主桁タイプ数		ケーブル数**		
		1主桁	2主桁	桁端定着	中間定着	
D2	24.85	4/0/2/2	2	0	8	0
	28.25	4/1/2/2	2	2	8	0
	31.65	5/1/2/2	5	3	8	0
	35.05	6/1/2/2	3	5	8	0
	38.45	7/1/2/2	4	5	10	0
	41.85	8/1/2/2	2	5	10	0
D3	45.25	9/1/2/2	4	4	10	2
	28.25	4/1/2/2	1	0	8	0
	31.65	5/1/2/2	1	1	8	0
	35.05	6/1/2/2	3	1	10	0
	38.45	7/1/2/2	2	1	12	0
	41.85	8/1/2/2	2	1	12	2
	45.25	9/1/2/2	3	1	12	4
	48.65	10/1/2/2	1	0	12	4

\*: 中間セグメント数/偏向セグメント1数/偏向セグメント2数/橋脚セグメント数

\*\* : 5~19K15

トセグメント部分の構造概要を表-4, 5および図-2, 3に示す。

### 3. 単純化・標準化

#### (1) 計画・設計

##### a) プレキャストセグメント工法の採用

本高速道路の高架橋部分の標準構造は、原設計ではプレキャストI桁によるPC合成桁であったが、以下のような条件に基づく再検討を必要とした。

- ① 本工事はBOT (Build, Operate & Transfer) 方式による民活プロジェクトの一環であり、早期資金回収のために完成が急がれた (急速施工の要求)。
- ② プロジェクトの主体である民間事業会社は30年間のメンテナンス義務を有するため、規模の大きさに関わらず品質確保が容易な構造物が要求された (単純化・標準化の要求)。
- ③ 都市内高速道路のため、施工時の地上部との相互影響が少ない工法が要求された。

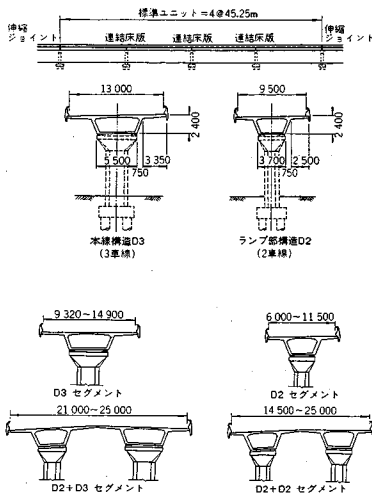


図-2 高架橋一般図  
(プレキャストセグメント工法)

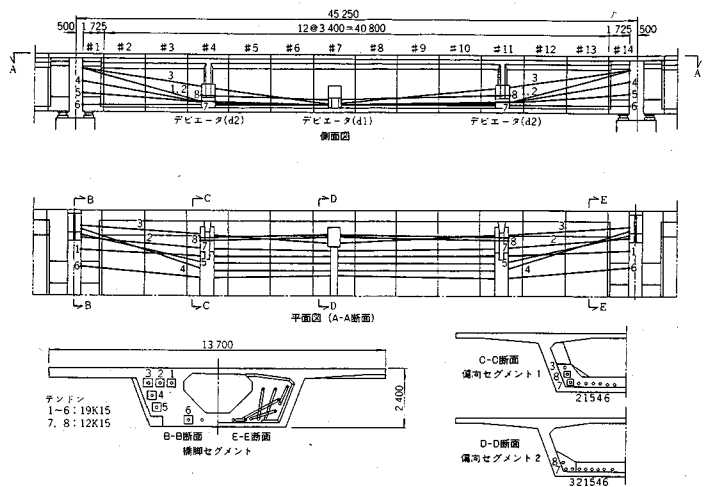


図-3 セグメントおよびケーブルの配置例 (D3)

- ④ 多くの道路、鉄道線路、運河、埋設物などを横断するため、ある程度径間長を長く取ることのできる構造が要求された。
- ⑤ 対象の規模が大きいのであったため、設計・施工を容易にする構造であることが望まれた (単純化・標準化の要求)。
- ⑥ 都市内高速道路のため、景観性が要求された。
- ⑦ ①、⑤および⑥より、構造の連続性が望まれた (標準化の要求)。

以上の条件の総合評価の結果、プレキャストセグメント、外ケーブル、ドライジョイントといった基本構造が、架設工法 (スパンバイスパン工法) も含んだ一つのパッケージとして採用された。

#### b) 構造詳細

主桁は表-4、5に示すように基本2タイプ (D2, D3) のセグメントからなり、径間長および道路幅の変化に対して、これらを適宜組み合わせることで対処できるよう、両タイプのセグメントの高さをそろえた。

外ケーブル、ドライジョイントおよび単純桁などの単純な構造の採用は、施工段階に生じる品質あるいは工程上の不確実性を設計段階である程度排除することに貢献している。すなわち、

- ・外ケーブル：PC鋼材配置、緊張作業およびグラウト作業の信頼性向上
- ・ドライジョイント：エポキシ樹脂の品質管理が不要；天候に左右されない
- ・単純桁：セグメント製作誤差、桁架設誤差を1径間で吸収できる；場所打ちコンクリートによる閉合継目が不要

但し、これらの構造の採用はシステムの冗長性を下

げ、脆性的な破壊形態につながるため、安全率を大きく取ることによって安全性の向上を図った。

セグメント製作作業の便宜を考え、ケーブル定着位置・偏向位置の標準化を行い、桁の幅・長さの変化に伴うプレストレス量の調整はPC鋼より線本数の調整のみで行った。また、各セグメントへの作用せん断力はその架設後の位置によって異なるが、ここでは橋脚セグメントを除く殆どのセグメントのウェブ厚およびウェブ配筋を同一とした。

したがって、各桁を個別に見れば、最適設計とはなっていないが、設計・施工の手間を加えたトータルメリットは得ることができた。

デビエータのケーブル通過部の製作には標準化したディアボロ型枠<sup>2)</sup>を用い、桁長・桁曲線の変化に起因するケーブル角度の変化を吸収することができるようにした。これにより、デビエータ中の埋め込みシースの位置・形状のチェック作業の削除、型枠の開口位置の固定といった直接的効果に加え、型枠の設置ミスの低減という間接的効果も得ることができた。

桁端部の橋脚セグメントは、伸縮継手用・連結床版用の2タイプがあり、前者は架設終了時にそのまま伸縮継手の設置が可能となるよう設計した。一方、後者は、現場打ち連結床版コンクリート用の空きスペース1mを利用して、セグメント製作誤差および桁架設誤差の吸収を可能にした。

各主桁タイプごとの径間数を表-6に示す (ここに、2主桁タイプ1径間は、架設トラスの作業の観点から、2径間と数えている)。出入路およびインターチェンジでの加速・減速用車線 (計38ヶ所) による道路幅変化に対応するため、2主桁タイプが全体の約30%を占める結果

表一六 主桁タイプと径間数

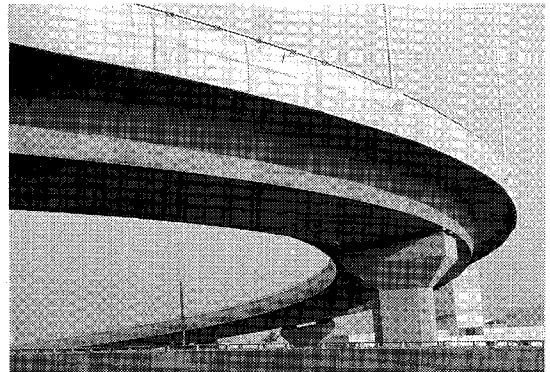
セグメント タイプ (m) 主桁 径間長	D 2			D 3			D 2 + D 3		
	1主桁	2主桁	計	1主桁	2主桁	計	1主桁	2主桁	計
24.85	4	0	4	0	0	0	4	0	4 (0.4%)
28.25	15	5	20	3	0	3	18	5	23 (2.0%)
31.65	22	12	34	11	1	12	33	13	46 (4.1%)
35.05	40	22	62	29	0	29	69	22	91 (8.0%)
38.45	65	113	178	52	9	61	117	122	239 (21.1%)
41.85	93	79	172	113	8	121	206	87	293 (25.9%)
45.25	190	83	273	152	8	160	342	91	433 (38.3%)
48.65	0	0	0	2	0	2	2	0	2 (0.2%)
計	429 (37.9%)	314 (27.8%)	743 (65.7%)	362 (32.0%)	26 (2.3%)	388 (34.3%)	791 (69.9%)	340 (30.1%)	1131 (100%)

となった。これにより1主桁/2主桁遷移部の出現頻度は無視し得ないものとなり、その部分の上下部工の設計を標準化するインセンティブとなった。

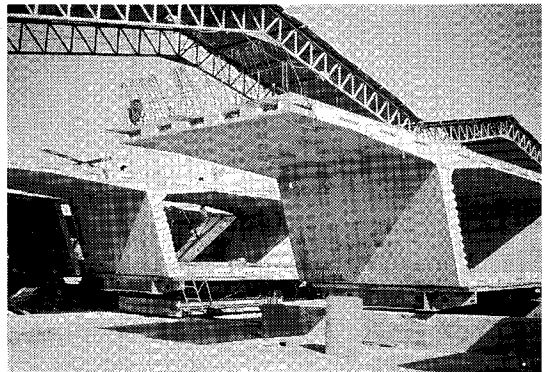
c) 桁配置

各径間長ごとに径間数を整理したものを表一六に示す。都市内高架橋のため、道路、鉄道線路、埋設物等の障害物が多数存在していたが、約40% (1131径間で433径間) が標準径間長である45.25mを有している。

曲線半径が小さい場合、セグメント製作上 (隣接セグメント間の角度が大きいため) 型枠セットの煩わしさあるいは美観上 (架設後のウェブ面の不連続性) の理由から、本工事でのように3.4mと長いセグメントを用いることはまれである。さらに、架設トラスの操作上の理由によりスパンバイスパン工法が用いられることもあまり行われず、本工事で曲線半径が90m程度の箇所が数ヶ所含まれていたが、その前後の区間との施工の連続性を保つためにプレキャストセグメント・スパンバイスパン工法を採用した。実際には、製作・架設・完成後 (写真一2) のいずれにおいても問題は生じなかった。



写真一2 急曲線部 (曲線半径 90m)



写真一3 ショートラインマッチキャスト工法

(2) セグメント製作

数量が多くかつ変化に富んだ道路線形を持つ高架橋に柔軟に対応するためショートライン・マッチキャスト方式を採用した (写真一3)。セグメントの設計自体が既に標準化されていたため、型枠の標準化も容易であり、4タイプに止めることができた (表一七)。用意された型枠数は最終的には計50組となった。

本工事で実際に発行された施工図の構成を表一八に示す。種々の指標と比較した平均図面発行枚数は以下のようなになる。

- ・0.7枚/セグメント
- ・8.6枚/径間

設計のかかなりの部分を標準化していたにもかかわらず、このように大量の図面を必要とした理由は、線形管理がセグメント製作のキーポイントであるとの認識に基づ

表一七 セグメント型枠数

型枠タイプ	D2	D3	計
中間・偏向セグメント用	21	14	35
橋脚セグメント用	9	6	15
計	30	20	50

表一八 施工図発行枚数

図面種別	初期発行枚数	再発行枚数	計	枚/セグメント	枚/径間
桁配置図	1134	481	1615	0.11	1.43
桁種別詳細図	5055	2877	7932	0.54	7.01
標準詳細図	55	135	190	0.01	0.17
補修工用図面	4	8	12	0.001	0.01
計	6248	3501	9749	0.67	8.61

注：載荷試験用桁 (1径間, 14セグメント) に対する施工図含む

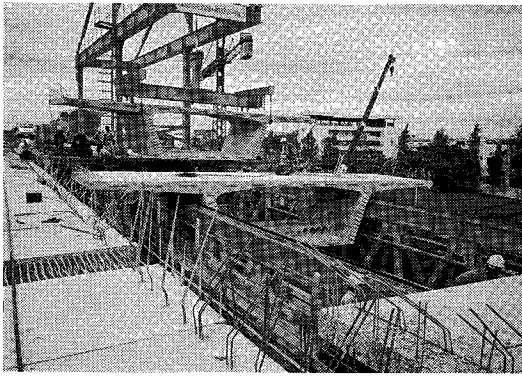


写真-4 スパンバイスパン工法（サポートタイプトラス）

表-9 高架橋路線上の主な障害物

障害物の種類	障害物直上の桁数（径間）
一般道路	45
高速道路	4
架設済みの桁 （インターチェンジ交差部）	10
鉄道	4
沼	159
運河	15
計	237（21.0%*）

\*：径間総数1131に対する割合

き、左右の違いのようなわずかな差異も図面化したこと；製作現場での使用の便を考え、大縮尺の図面としたこと；わずかな設計変更も図面再発行の対象としたが、それが非常に頻繁であったこと、などである。

すなわち、情報のあいまいさに起因するヒューマンエラーを、人的能力に依ってではなく機械的に防止しようとしたことが図面枚数の増加につながったと言うことができ、今後の類似工事では人間工学的な点から再検討の余地がある分野であろう。

### (3) 架設

本工事では、スパンバイスパン工法（写真-4）を単純桁、外ケーブルおよびドライジョイントと組み合わせることで、架設作業のクリティカルな部分から、コンクリート打設やエポキシ樹脂塗布など現場での管理に手間のかかる作業の排除が可能となり、架設作業は、単純な組立作業となった。また、架設直後の橋面がそのまま次径間の桁の架設用アクセスとして使え、地上部の状況に左右されず、同一の段取りで連続して架設作業を進めることができたことも大きなメリットであった。工事区域内の主な地上障害物とその直上に位置する桁の径間数を表-9に示すが、架設工程はこれら障害物の影響をほとんど受けていない。

表-10 キャスティングヤードで使用した主なプラント

種類	数量	能力
パッチングプラント	2	各60m <sup>3</sup> /hr
タイヤ式コンクリートクレーン	5	80t吊り
クレーン	4	10t吊り
ベルトコンベア	6	3m <sup>3</sup> /min
トラクタミキサー	10	6m <sup>3</sup> 積み

表-11 架設トラスの概要

トラスタイプ	長さ (m)	幅 (m)	重量 (t)	基数
サポートタイプトラス	96	2.15×2	320	NS4:2, NS7:2
ハンガタイプトラス	85	8.0	290	EW3:6

## 4. 機械化

### (1) セグメント製作

ヤード内に配置された主なプラントを表-10に示す。定常的に運営を行っている工場と比べると、プラントの配置・使用上のある程度の非効率性は否めず、今後のプロジェクトではより自動化・機械化を進めるための改善対象となる領域であると考えられる。

### (2) 架設

使用した架設トラスの概要を表-11に示す。架設作業開始に先立って、全トラスが架設作業中に被る最大荷重の25%増しの荷重による載荷試験を行い、耐力および変形性状の確認を行った。約1000tの（等分布）荷重載荷は、第一径間のセグメント（600-800t）上にコンクリートブロックを追加載荷することで行った。

支持すべき荷重の大きさ、使用回数の多さ、施工速度の速さ、事故が起きた場合の影響の大きさ、特に、既存の道路上での架設作業があることなどを考慮すると、スパンバイスパン工法で用いられる架設トラスではこのような直接確認は不可欠であろうと考えられる。

## 5. 集中化・一貫化

### (1) 組織

本工事は、企画、設計、入札、施工の各段階を一貫して単一のプロジェクトマネージャー組織が実施・管理・監督を行った（図-4）。これにより、企画・設計段階では施工への事前の配慮、さらに施工段階では設計理念に立ち戻った迅速・柔軟な判断、各工区を見通した視野の広い判断、あるいは全工区レベルでの情報のフィードバックを行うことが可能となった。

プロジェクトマネージャーはまた一部資材の購入計画立案および調達を行った。これにより、鉄筋、PC鋼材他の主要材料の安定供給および品質管理を図っただけでなく、ゴム支承、伸縮継手および防音壁などの製品につい

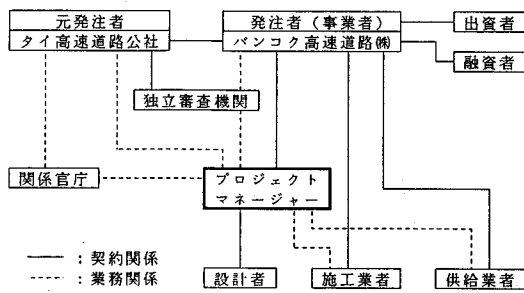


図-4 プロジェクト組織図

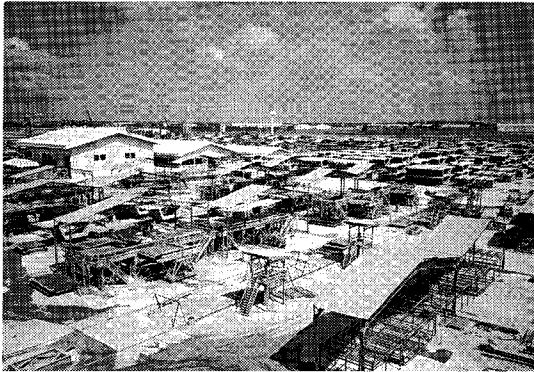


写真-5 キャスティングヤード

ては、高架橋全線にわたってそれぞれ供給元を一元化、外観の統一を図ると共に、供給・設置工程および品質の管理を容易にした。

## (2) セグメント製作

セグメントの製作は1箇所のキャストヤードにて集中的に行い、品質の確保およびプラントの有効利用を図った。キャストヤードの光景を写真-5に示す。バンコク市中心部から北に約60km離れたバンパイン地区に確保されたヤード敷地は、約20万 $m^2$ の広さを持ち、内部は共通ゾーン(事務所、鉄筋加工場、シース加工場他)、製作ゾーン(4ゾーン)および仮置ゾーン(3ゾーン)に分割されている<sup>9)</sup>。

ヤード総面積を他の諸量で除することにより求めた単位ヤード面積は、それぞれ以下ようになる。

- ・約20000 $m^2$ /トラス
- ・約4000 $m^2$ /型枠
- ・約14 $m^2$ /セグメント

ショートライン・マッチキャスト工法の採用にもかかわらず非常に広い面積となっている。その理由として次のようなものが挙げられる。

- ① ヤード内にバッティングプラント、鉄筋加工場、シース加工場、機械修理工場などを完備し、原材料の搬入さえあればセグメント製作が可能な体制を取った。

- ② 架設速度が非常に速く、セグメントの仮置数を多くすることで架設作業に支障の無いようにする必要があったため、仮置場面積が広がった。

- ③ 製作作業とセグメント運搬車両の仮置場への乗入れとの錯綜を防ぐために、ヤード内道路を広く取った。

- ④ 多数の人員(最盛期には2シフト合計約1800人)を抱え、そのための事務所、控え室、食堂他の施設を必要とした。なお、この中には、生コン製造、鉄筋・シース加工からセグメント搬出に至る全作業に必要なエンジニア、測量係、検査係、オペレータ、労務者、事務員他が含まれている。

- ⑤ 面積の拡大に伴い、ヤード内配置およびプラントの動線が二次元的になり、アクセス関係の面積がさらに上乘せされる形となった。

このように本工事では、残念ながら単位面積の点でのスケールメリットを得ることはできなかったと言える。これに比して、通常の工事では規模が余り大きくないため、型枠数が少ない、要求されるセグメント仮置数が少ない(種々の不確実性が低い、かつ架設速度が遅いため: 6.(1)参照)、材料加工機能を抱え込まない、ヤード内配置が一次的であるなどの理由により、単位面積は上記の数字よりかなり減少するものと考えられる。

## (3) 実物大載荷試験<sup>5)-7)</sup>

本工事の規模の大きさは、試験用桁の製作およびそれを用いての実物大載荷試験を行うことに対する十分な理由付けとなった。試験の企画・実施・結果の評価は、プロジェクトマネージャーによる運営下に置かれ、得られた情報は多方面で利用された。

試験は架設開始前および終了後の二度に分けて行われた。施工開始前の試験は非破壊試験であり、スタッフの訓練、プラントの機能確認、施工マニュアルの整備、設計の改善、設計荷重下での挙動確認などが行われた。一方、架設終了後の載荷試験は桁が実際に破壊に至るまで続行する破壊試験であり、実際の耐力のチェックにより架設済みの桁の直接的な安全性確認を行うことができた。

## 6. 急速施工

### (1) セグメント製作

各タイプのセグメントの標準サイクルタイムを表-12に示す。但し、ショートライン・マッチキャスト工法をタイ国で実施するのは初めてであったため、この製作速度を達成するまでに7~8ヶ月の習熟期間を要した。習熟後の製作速度は、平均900個/月(最高1011個/月)に達した(図-5)。

表-12 セグメント製作の標準サイクルタイム

作業項目	第1日												第2日											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
型枠準備・測量																								
鉄筋籠設置																								
型枠セット																								
鉄筋籠仕上げ																								
コンクリート打設																								
出来形測量																								
脱型・切離し																								

注) — : 中間・偏向セグメント(1日#1台%), ---- : 橋脚セグメント(2日#1台%)

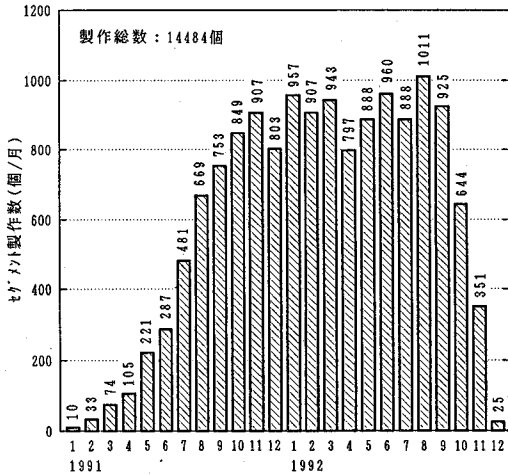


図-5 セグメント製作工程

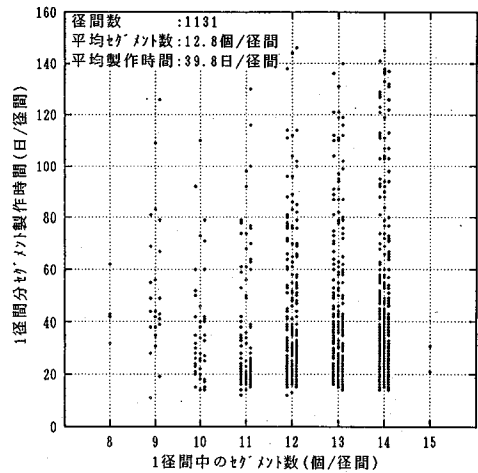


図-6 セグメント製作時間 (1径間分)

図-6は、1径間分のセグメントを全て製作し終わるまでに要した時間を整理したものである。単位時間当たりのセグメントの製作総数自体は標準サイクルタイムから予想されるものとほぼ同じであるにもかかわらず、1径間分のセグメントの製作時間は予想値(10~20日)よりもかなり大きくなる傾向があった。この理由としては、セグメント再製作、型枠の不具合、休日等による影響もあるが、より大きな要因として、その時々局面の必要型枠タイプと実際に空いている型枠の不一致、および複数の架設現場での工程の変更に伴う製作工程の途中変更が挙げられる。通常の工事では架設工程が比較的単純であるため、1径間分のセグメントの製作時間は、平均値、バラツキ共に減少するものと考えられる。

セグメントの製作速度の妥当性は単独で評価されるべきものではなく、架設作業速度との調和を考慮して評価されるべきである。本工事では、前段で述べた問題に加え、1セグメントごと・1径間ごとに製作するというマッチキャスト工法の特徴からくる制約、セグメントコンクリートの必要養生期間に起因する製作と架設間のタイムラグ等の影響により、製作工程は不確定性の高いものとなった。これは架設速度の速さとも相まって、セグメント仮置個数の増大の形で現れる結果となった。図-

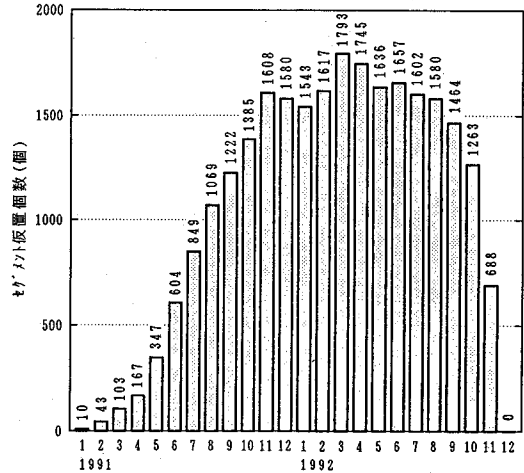


図-7 セグメント仮置個数の推移

7に仮置個数の推移を示す。

## (2) 架設

架設作業の標準サイクルタイムを表-13に示す。実際には、以下に示すような状況が頻繁に発生したため、長期連続して標準サイクルタイム通りに作業が進行することは少なかった。

・サポートタイプ: 1主桁/2主桁遷移部での段取り

表-13 架設作業サイクルタイム

作業項目	第1日												第2日											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
資座準備																								
トラスフック設置																								
トラス移動・設置																								
クレーン移動・設置																								
支承据付け																								
セグメント吊込み																								
セグメント位置調整																								
クレーン・ケーブル設置																								
ケーブル緊張																								
桁ジャッキダウン																								
ケーブルアップ																								

注1) 本表はサポートタイプトラスで2日サイクルの場合。1日サイクルの場合は、夜間休止無し。

注2) ハンガータイプトラスの場合、トラスの移動・架設共に約5割増しの時間を要し、標準サイクルタイムは3日となる。

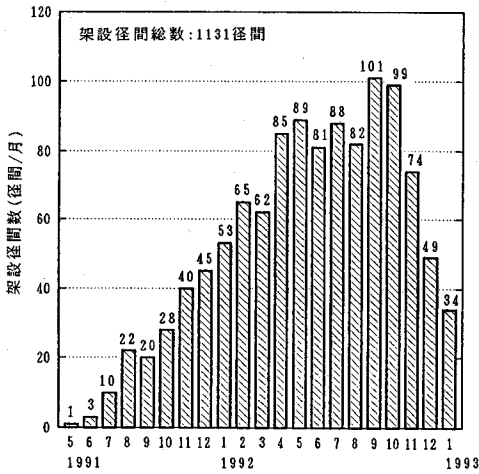


図-8 架設工程

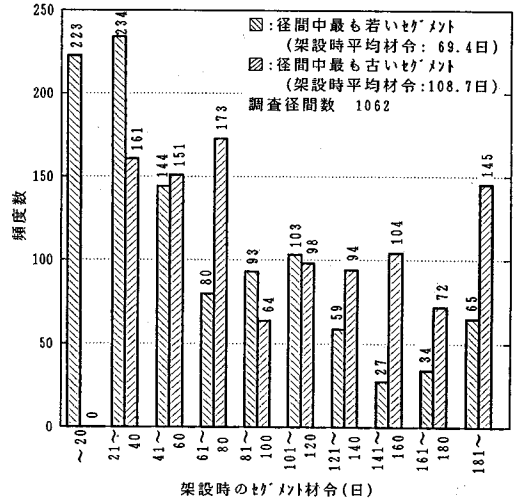


図-9 架設時のセグメント材令

- 替え、発進部でのトラス長調整
- ・ハンガータイプ：トラス長の調整、曲線部での横移動
- ・両タイプ共通：トラスの分解・移動・再組立、セグメント製作待ち

全トラスが稼働していた最盛期には、平均90径間/月(最高101径間/月、平均径間長41m)の架設速度を達成することができた(図-8)。習熟期間はいずれのトラスにおいても、3-4ヶ月程度であった。

架設時のセグメントコンクリートの材令分布を図-9に示す。当初計画では架設時のコンクリート材令は28日としたが、実際にはセグメント製作工程と架設工程の不一致のため、材令が28日未満のセグメントの架設も相当数行なった。

## 7. 品質(問題の発生)

### (1) セグメント製作

各タイプの型枠の平均使用回数は表-14に示す通り

である。マッチキャスト用定置式鋼製型枠の使用可能回数は、一説にはおおよそ1000回と言われているが、所定のセグメント製作精度を確保していくためには、使用期間中の頻繁なメンテナンスが必要である。本工事では最低月1回の型枠の定期検査を行ったが、その結果、表-15に示す通りかなりの頻度で補修が必要となった。なお、これらの型枠は第二期工事区においても引き続き使用するため、使用回数は最終的には表-14中に示されている数字の約2倍程度になる予定である。

セグメントの許容製作誤差を表-16に示す。セグメント単体の製作精度に関してはあまり問題は生じなかったが、各セグメントデータを集計して作成する桁全体の仕上り線形に関しては誤差が大きくなる傾向があり、架設用データ作成の段階で座標の修正を行う必要が約70%の桁で生じた(表-17)。修正は桁全体を最適位置まで3次元的に移動させることで行った。桁全体としての製作誤差の発生は、セグメントの大きさ、平面線形、あるいは発生方向などとは特に相関関係が無いように見受けられ、どのような場合でも等しく線形管理が必要であるこ



表-14 型枠の使用回数

セグメントタイプ	セグメント数	型枠数	平均型枠使用回数
D2 中間・偏向	7954	21	379
橋脚	1488	9	165
D3 中間・偏向	4270	14	305
橋脚	776	6	129
計	14488	50	290

注：再製作されたセグメント(25個)は含まず

表-15 型枠のメンテナンス頻度

作業内容	型枠本体	油圧機器	計	平均回/型枠・月
調整	433	115	548	1.5回/型枠・月
修理	55	563	618	1.7回/型枠・月
交換	156	31	187	0.5回/型枠・月
計	644	709	1353	3.7回/型枠・月

注：本表は型枠46基の1991年11月～1992年6月までの8ヶ月間の記録を集計したもの。

表-17 製作後に線形の修正を要した桁数<sup>1)</sup>

セグメントタイプ	D 2 桁 (製作総数: 743) <sup>2)</sup>				D 3 桁 (製作総数: 388) <sup>3)</sup>				D 2 + D 3 (製作総数: 1131) <sup>4)</sup>			
	橋軸方向	橋軸直角方向	鉛直方向	計 <sup>5)</sup>	橋軸方向	橋軸直角方向	鉛直方向	計 <sup>5)</sup>	橋軸方向	橋軸直角方向	鉛直方向	計 <sup>5)</sup>
R = ∞ (直線)	137	136	125	274	17	35	40	56	154	171	165	330
1000m ≤ R < ∞	34	43	34	81	34	54	61	107	68	97	95	188
R < 1000m	60	96	58	145	49	68	74	122	109	164	132	267
合計	231	275	217	500	100	157	175	285	331	432	392	785 <sup>4)</sup>

注1) キャスティングヤードで製作誤差が発見されたものに限る。

注2) 500/743=67%, 500/785=64%, 743/1131=66% 注3) 285/388=73%, 285/785=36%, 388/1131=34% 注4) 785/1131=69%

注5) 1つの桁で2方向以上に修正を要したものは、合計欄では1つとして数えている。

表-18 品質管理項目

チェック時期	項目
1.鉄筋籠吊込み前	鉄筋籠(治具上), 型枠, プレストレス定着具
2.内型枠セット前	下床版鉄筋, ウェブ鉄筋
3.コンクリート打設前	上床版鉄筋, 横締めケーブル, 埋込み金具, 測量
4.コンクリート打設中	打設作業
5.脱型・切離し前	測量, コンクリート強度, 横締め(仮緊張)
6.次ブロック製作前	マッチキャスト使用の可否, 埋込み金具位置, 損傷度
7.積出し前	横締め(本緊張), ストラット切断, グラウニング, 補修, 外観, コンクリート強度
8.積出し後	積出し作業, 架設現場での補修

表-19 セグメント製作時の損傷箇所(コンクリート部分)

部所名	全体数(面)	損傷数(面)
ウェブ 端面(妻枠側)	15605	6911(44.3%)
ウェブ 端面(マッチキャスト側)	13343	4080(30.6%)
床版 端面(妻枠側)	15605	7733(49.6%)
床版 端面(マッチキャスト側)	13343	5483(41.1%)
ウェブ 側面(内面)	14474	1687(11.7%)
ウェブ 側面(外面)	14474	424(2.9%)
下床版(上面)	14474	4(0.03%)
下床版(下面)	14474	280(1.9%)
上床版(上面)	14474	2(0.01%)
上床版(下面)	14474	14(0.1%)
上床版(側面)	14474	6(0.04%)
デビエーター	3320	620(18.7%)
パイプ(支点隔壁)	2262	468(20.7%)

注：損傷の判定は非常に厳しい基準に基づいており、ごく軽微なものも含まれている。

とを示唆している。

セグメント製作の各過程に品質管理項目を設定し(表-18)、それぞれ所定の方法・基準に従って、検査・確認を行った。検査結果例として、脱型直後に発見されたセグメントの損傷に関するデータをまとめたものを表-19に示す。損傷箇所は端面が他に比べて圧倒的に多く、若材令の多段せん断キーおよびガイドキーが脱型・切離し作業に対し非常に敏感であることがわかる。せん断キーの健全度はドライジョイント方式では特に重要な事項であるが、本工事では、設計時にせん断キーの若干の損傷は許容する余裕のある設計を行っていたため、損傷の発見が与える心理的圧力を軽減する効果があった。なお、表中の損傷の多くは、構造上問題とはならない程度の軽微なものであり、桁の外観に影響を及ぼさない場合は補修を要しないものであった。例えば、構造上問題があり、補修を要すると判断されたジョイントの数は97個であった。表-20にキャスティングヤードでの補修の対象となったその他の不具合のリストを示す。

補修不可能な損傷・形状ミス等の理由で廃棄されたセグメント数は25個(全数の0.17%)であり、これらは再製作の対象となった(表-21参照)。タイで初めての工法である上に、急速施工、セグメントの長距離運搬など、事故・ミスの潜在的要因は多く、計画時においては米国での類似工事の統計値<sup>9)</sup>から、上記の10倍程度の棄却率

表-20 セグメントの不具合（キャストヤードで発見された主なもの）

不具合の内容	発生頻度
寸法誤差	39
左右の向き	1
変形	1
部分的欠損	1
ひび割れ	5
ジョイント、豆板	2
鉄筋のかぶり	3
鉄筋	8
定着具	35
PC鋼材	22
ケーブル通過部	1
埋込み金具	41
仕上げ	3
計	162

表-21 セグメントの廃棄理由

廃棄理由	廃棄個数
寸法誤差	2
ひび割れ	2
ジョイント	3
マッチキスト面損傷	1
グラウトミス	1
コンクリート強度	1
ハットリツグミスによる損傷(製作ヤード)	4
同上 (架設現場)	3
直前の設計変更	1
その他(手続きミスなど)	7
計	25

を予想していたため、得られた結果は満足すべきものであったと言える。

一方、架設作業中に初めて発見された不具合例を表-22に示す。これらは廃棄の対象とはならなかったが、架設作業中又は後の補修を必要とした。ほとんどのものは製作中の検査で見逃されたものであるが、本工事で採用されたチェック体制では捕捉困難なものも幾つか含まれている(例:セグメント仮置き中の変形)。

## (2) 架 設

桁端部の橋軸直角方向および鉛直方向位置は、表-23に示す許容誤差に従い、架設時に厳密に調整された。桁端部の橋軸方向位置および桁中央部レベルに関しては特に許容誤差は設けなかったが、セグメント製作時の誤差管理でカバーし得ない部分、すなわち、セグメントの仮置期間中の変形、架設工程の変更により生じる架設後クリープ変形量の見込み違い、および上越し計算自体の誤差の累積効果により、かなりのバラツキを示した。しかし、支承回りの設計に予め余裕を持たせていたこともあり、構造的にはほとんどのものが問題無く、高欄位置およびアスファルト舗装厚の調整による対策等で十分であった。

全てのダイアフラム(橋脚セグメント)およびデビエータ(偏向セグメント)には、約10%までの追加プレ

表-22 セグメントの不具合 (架設作業中に発見された主なもの)

項 目
寸法誤差
左右の向き
変形
ひび割れ
定着具背面空洞
デビエータ
定着具
埋込み金具

表-23 桁の許容架設誤差

項 目	許容誤差
ジョイントの目違い(上下・左右)	± 5mm
セグメント中心線のずれ	± 20mm
橋脚セグメント中心線のずれ	± 5mm
橋脚セグメント中心線上のバールのずれ	± 5mm
連続するセグメント2個の平面角度のずれ	± 0.001rad
連続するセグメント2個の平面角度のずれ	± 0.003rad

表-24 架設作業中のセグメントの損傷理由

損傷箇所	損傷理由	損傷個数
上スラブ 部分的欠損	クレーン転倒	1
上スラブ ひび割れ	仮支承の不具合	1
上スラブ 剥離	同上	1
上スラブ 部分的欠損	架設済み桁上でのセグメントハットリツグミス	2
上スラブ 部分的欠損	トラスハットリツグミス	2
計		7

ストレスを可能にする予備ケーブル設置用孔を補強と共に設置した(D2セグメント:1個/セット, D3セグメント:2個/セット)。これらの予備孔の主目的は供用開始後のプレストレス損失あるいは荷重増加に対するものであったが、実際には、定着具の取付ミス、セグメント製作後の設計変更、緊張作業の不備などをカバーするために、6セット(全数の0.04%)の予備孔が既に施工中に使用された。この予備ケーブル設置用孔の存在は、発注者、設計者および施工者の全てに安心感を与える保険として、必要な初期投資に比してその果たす役割は大きいものがある。

架設作業に起因するセグメントの損傷事例は7例(セグメント全数の0.05%)である。損傷箇所・原因を表-24に示す。なお、幸いこれらはいずれも再製作の対象とはならず、原位置にて補修された。

## 8. まとめ

本プロジェクトの反省も兼ねて、今後の類似工事の計画に当たって重要と思われる事項を、以上のデータでは表現しづらいものも含めて以下に簡単にまとめる。

(1) 大規模施工、急速施工あるいは省力化施工の妥当性の判断は、評価方法(評価範囲, 評価基準, 統計処理方法, コスト算出方法)次第であるため、できるだけ

トータルメリットの観点から見る事が重要である。

また、これらのメリットを最大にするためには、基本計画の段階でプロジェクト全体を事業として捉える、工事量(工区)設定の最適化を図る、PM(プロジェクトマネージメント)・CM(コンストラクションマネージメント)の導入などの舞台作りが必要であると考えられる。

(2) プレキャストセグメント橋の計画立案時には、全体と各要素および各要素間の関係、具体的には設計・施工の連続性、製作と架設の調和、上部工と下部工の関係などに注意する必要がある。施工規模・速度の増加に伴いこの問題の重要性は増してくる。

(3) 大規模かつ急速に製作・施工する際に得られるプレキャストセグメントの品質は、必ずしも満足なものではない場合がある。したがって、作業中に問題の発生しづらい仕組み作り、および製品の許容度を上げ、製作・架設作業中の棄却率を減らすことのできる仕組み作りを予めしておくことは、工程・コストに関わる不確実性の減少に寄与するものと考えられる。以下に、本プロジェクトでの適用例を示す。

- ・作業中に問題の発生しづらい仕組み作り：単純化、標準化、繰り返し作業、マニュアル化、外ケーブル、ドライジョイント

- ・製品の許容度を上げ、作業中の棄却率を減らすことのできる仕組み作り：予備ケーブル設置用孔、予備のせん断キー、連結単純桁

文献8)には、米国カリフォルニア州におけるプレキャストセグメント橋のデータが広範囲にわたってまとめられており、同形式の橋梁に関心のあるものにとって非常に有益な情報を与えてくれる。幸いバンコク第二高速道路工事は、単一工事で既に十分な量の情報量を有しており、上記文献にならって情報の整理を行えば興味のある

結果が得られるのではないかと考えたことが本文執筆の動機である。実際に発生した問題についてもまとめてあるので、類似工事の計画時の一助になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 白石暢明, 小倉好一, 竹林稔雄: バンコク第2高速道路(第一期工事)の施工, 橋梁と基礎, Vol. 27, No. 5, pp. 8-14, 1993.5.
- 2) 白石暢明, 竹林稔雄, 谷沢次康: 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, プレストレストコンクリート, Vol. 34, No. 4, pp. 42-51, 1992.7.
- 3) Shiraishi, N., Race, D., Short, M. and Kitta, T.: Bangkok Second Stage Expressway-Construction of the Segmental Viaducts, *FIP Symposium '93 Proceedings*, pp. 1221-1228.
- 4) Shiraishi, N. and Fox, P.D.: Bangkok Second Stage Expressway - Viaduct Design Overview, *FIP Symposium '93 Proceedings*, pp. 1123-1130.
- 5) Takebayashi, T., Deeprasertwong, K., Honda, B. T., Umeki, H. and Kumasaka, T.: Full Scale Testing of a Precast Concrete Bridge with External Tendons and Dry joints, *FIP Symposium '93 Proceedings*, pp. 1145-1152.
- 6) Takebayashi, T., Deeprasertwong, K. and Leung, Y. W.: A Full Scale Destructive Test of a Precast Segmental Box Girder Bridge with Dry Joints and External Tendons, *Proc. Instn. Civ. Engrs Structs & Bldgs*, 104, 297-315. Aug., 1994.
- 7) 竹林稔雄, K. Deeprasertwong, Y. W. Leung: ドライジョイント・外ケーブル方式のプレキャストセグメント桁の実物大破壊試験, プレストレストコンクリート, Vol. 36, No. 5, pp. 41-53, 1994.9.
- 8) Moreton, A. J.: Special Report Segmental Bridge Construction in Florida - A Review and Perspective, *PCI Journal*, 1989.6.

(1994.7.1 受付)

## VARIOUS MEASURES TAKEN AND QUALITY ACHIEVED IN PRECAST SEGMENTAL BRIDGE CONSTRUCTION

Nobuaki SHIRAISHI and Toshio TAKEBAYASHI

Precast segmental bridges with external tendons and dry joints were employed together with the span by span erection method as the standard structural form for the viaducts in the Bangkok Second Stage Expressway, which contributed in the realization of a megascale rapid construction. This paper, presenting various data, describes the outline of the measures taken in the project such as simplification, standardization etc. and the construction programs and the quality actually achieved.