

海外での日平均 26 個の主桁セグメントの製作 — ドバイ・メトロプロジェクト高架橋上部工工事 —

大場 誠道 *1・山崎 啓治 *2・岩城 孝之 *3・樫田 爽 *4

ドバイメトロは、急速に発展を続けるアラブ首長国連邦ドバイ市街中心部とドバイ国際空港および郊外の経済特別区を結ぶ総延長約 60 km の中東湾岸諸国初の全自動無人化運転鉄道システムである。このうち高架橋上部工は、プレキャストセグメント工法による高架橋建設が計画され、セグメント製作設備 53 設備、架設桁 9 機により建設された。

本文は、プロジェクトのためにドバイ市郊外に設けられた大規模なセグメント製作ヤードにおける主桁プレキャストセグメントの製作について報告するものである。実質 25 カ月間で日平均 25.6 個、日最大 44 個にて 15 895 個のセグメントを製作した。

キーワード : 海外工事, プレキャストセグメント工法, ロングライン方式, ショートライン方式

1. はじめに

ドバイメトロは、急速に発展を続けるアラブ首長国連邦ドバイ市街中心部とドバイ国際空港および郊外の経済特別区を結ぶ中東湾岸諸国初の全自動無人化運転の鉄道システムである。このうち 1 期工事 Red Line は延長 52.0 km を全体工期 49 カ月にて、2 期工事 Green Line は延長 22.7 km を 45 カ月にて詳細設計、土木建築工事および鉄道システムの供給を行う、いわゆる設計施工フルターンキー契約に基づく建設プロジェクトである。

総延長 61.1 km の高架橋上部工（支間数 1 696、セグメント数 15 895）は、基本は架設桁にてスパンバイスパン架設されるプレキャストセグメント工法による単径間橋（以下、Simple-span と記す）で、標準支間を 28 m、32 m および 36 m と設定し、できるかぎりこれらの支間割となるよう橋脚がレイアウトされ、支間数において約 80 % をこれにてカバーしている。交差条件上、それ以上の支間長を必要とする場所においては 44 m までを 2 径間連続橋（PC 連結方式連続合成桁）、それ以上 72 m までをセグメントにより張出し架設される 3 径間連続橋としている。

高架橋上部工工事の特徴は、以下のとおりである。

- ① 設計施工一括（Fast Tracking）
- ② 厳しい施工工期（設計から鉄道開業まで 49 カ月）
- ③ これまでに経験のない大規模な一請負業者への発注（セグメント製作設備 53 設備、架設桁 9 機）

高架橋上部工工事は、2005 年 8 月詳細設計に着手し、12 月に協力業者と下請負契約を結び、詳細施工計画立案、2006 年 1 月セグメント製作ヤード造成開始、詳細設計の進捗とともに架設桁、セグメント製作型枠設備、タワークレーンおよび門形クレーン等の揚重機設備の調達を順次行い、10 月主桁プレキャストセグメント製作を開始、2008 年 12

月すべてのセグメントの製作を完了した。一方、2007 年 1 月架設桁によるスパンバイスパン架設を開始し、1 期工事については 2008 年 8 月架設桁 9 機にてすべてのスパンの架設が完了した。

高架橋上部工工事は、以下のように大別される。

- ① 詳細設計
- ② プレキャストセグメント製作
- ③ プレキャストセグメント架設（スパンバイスパン架設）
- ④ プレキャストセグメント架設（3 径間連続橋張出し架設）
- ⑤ 場所打ち構造施工
- ⑥ コンクリート塗装および付属物設置

本文では、このうち主桁プレキャストセグメントの製作について、とくに主要数量を占める U 型断面を有する Simple-span のセグメント製作について報告する。

2. 工事概要

2.1 全体工事概要

工事名：Dubai Metro Project（Phase - 1・Phase - 2）
ドバイ・メトロプロジェクト（1 期工事・2 期工事）
企業者：アラブ首長国連邦（UAE）
ドバイ市庁道路交通局（RTA）
コンサルタント：Systra / Parsons（仏 / 米）
施工者：Dubai Rapid Link Consortium（DURL）
鉄道システム JV：三菱重工業 / 三菱商事
土建 JV：大林組 / 鹿島建設 / Yapi Merkezi（トルコ）
契約形態：総価契約 / 設計施工フルターンキー契約
資金源：現地政府自己資金
工事場所：アラブ首長国連邦（UAE）ドバイ市
工期：（1 期工事）2005 年 8 月～2009 年 9 月（49 カ

*1 Narimichi OBA：(株)大林組 海外支店

*2 Keiji YAMAZAKI：鹿島建設(株)海外支店（現 鹿島建設(株)土木設計本部 プロジェクト設計部）

*3 Takayuki IWAKI：(株)大林組 海外支店

*4 Akira KASHIDA：鹿島建設(株)海外支店

月)

(2期工事)2006年6月～2010年3月(45カ月)
 契約内容：高架橋、トンネルおよび駅舎などからなる延長74.1kmの新交通システム(LRT)の詳細設計、施設建設、受配電設備、信号・通信設備、駅務設備、車両を含む鉄道システム一式、保守3年間

2.2 全体工事内容

(1) 地上区間

(1期工事)延長46.5km(高架橋/ランプ他)、地上駅舎23駅(他業者によるドバイ空港内2駅含まず)

(2期工事)延長14.6km(高架橋/ランプ他)、地上駅舎12駅

(2) 地下区間

(1期工事)延長5.5km(シールド/開削トンネル)、地下駅4駅

(2期工事)延長8.1km(シールド/開削トンネル)、地下駅6駅

(3) その他

(1期工事)操車場2カ所、立体駐車場2カ所、非常避難階段、電力供給所等

(2期工事)操車場1カ所、立体駐車場1カ所、非常避難階段、電力供給所等

2.3 上部工工事概要

高架橋上部工構造物一覧を表-1に、代表的な上部工構造図を図-1に示す。

3. 上部工の設計

3.1 詳細設計作業

工期開始とともに入札図書および入札時設計検討をもとに詳細設計作業を開始した。実際の設計作業は、入札準備段階から起用した英国の設計コンサルタントほかリード・コンサルタントの下、英国および香港のデザイン・オフィスにて行われた。

3.2 セグメント製作方法の選定

セグメントの製作方法は、ショートライン方式またはロングライン方式に大別されるが、それぞれの特筆事項に十分留意し、本工事では以下の理由によりそれぞれを選定した。

- ① 主要数量を占める Simple - span および 2 - span の直線橋の標準セグメント：ロングライン方式
 - ・直線橋
 - ・桁高が一定
 - ・セグメント長がほぼ一定(4.000m)
 - ・断面寸法の変化が比較的少ない
 - ・セグメント製作時の形状管理が容易
 - ・脱型後、既設セグメントを移動する必要が無く施工管

表-1 高架橋上部工構造物一覧

構造形式			Span 数			
			直線	曲線	計	
セグメント橋	I	Simple-span	1 28 m class	182	80	262
			2 32 m class	556	157	713
			3 36 m class	195	78	273
			4 Transition span	89	—	89
	Total			1 022	315	1 337 (78.8%)
	II	2-span	5 44 m / 44 m	26	36	62
			6 40 m / 40 m (Crossover)	30	—	30
	Total			56	36	92 (5.4%)
	III	3-span	7 44 m / 72 m / 44 m (Standard)	33	36	69
			8 40 m / 72 m / 40 m (Non-Standard)	—	3	3
	Total			33	39	72 (4.2%)
	IV	Station-span	9 Type-1 Station	30	—	30
			10 Type-2 Station	84	—	84
			11 Nakheel Station (Single Track)	9	—	9
			12 Rashidiya Station (Twin Track)	3	—	3
			13 Rashidiya Station (Single Track)	3	—	3
14 Al Qusais-2 Station (Twin Track)			3	—	3	
15 Al Qusais-2 Station (Single Track)			3	—	3	
Total			135	—	135 (8.0%)	
V	Single-track	16 Single Track	17	43	60 (3.5%)	
Total			1 263	433	1 696 (100.0%)	
RC	VI	Cast-in-situ	17 Nakheel RC Special Structure	—	—	1
			18 Rashidiya RC Special Structure	—	—	1
			19 Al Qusais RC Special Structure	—	—	1

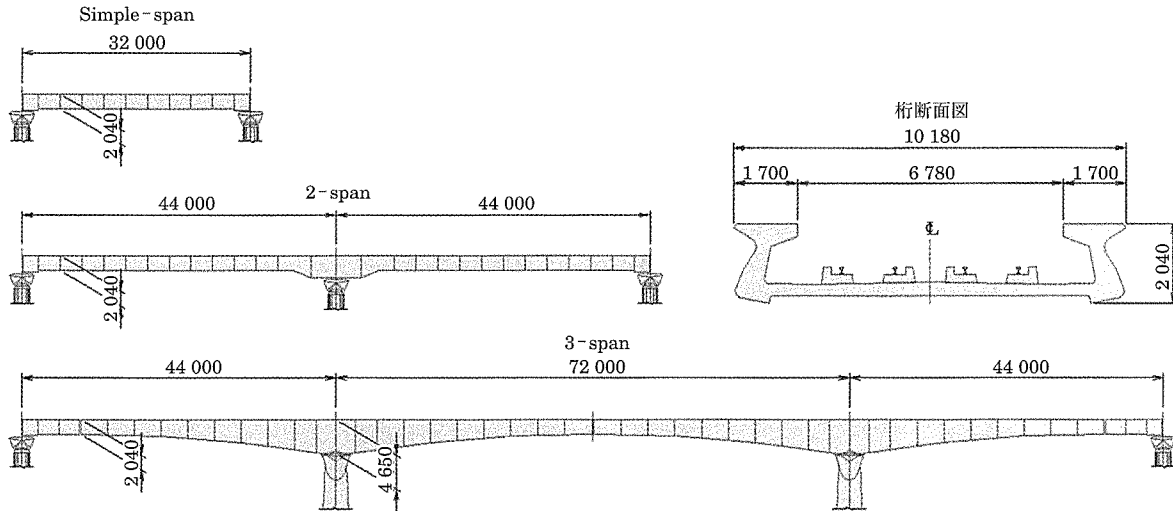


図 - 1 高架橋上部工構造図

表 - 2 セグメント諸元

構造形式	セグメントタイプ	製作方式	セグメント長 (m)	桁高 (m)	重量 (tf)
Simple-span / 2-span	標準 (直線橋)	ロングライン	4.000	2.040	50-60
	標準 (曲線橋)	ショートライン	4.000		53-63
	支点		1.950	2.241	43-45
	中間支点		3.200 / 2.650	2.341	50-63

理が容易

② Simple - span および 2 - span の曲線橋の標準セグメント：ショートライン方式

・種々の曲線半径を有する曲線橋に対応

③ Simple - span および 2 - span の支点セグメント：ショートライン方式

・①, ②で製作する標準セグメントをマッチキャストし製作

上記のようにそれぞれを選定し、いずれもマッチキャスト方式とした。代表セグメントの諸元を表 - 2 に示す。

3.3 詳細設計時の留意事項

主要数量を占める Simple - span の標準セグメントおよび支点セグメントは、セグメント製作設備 1 設備あたり 1 日

1 個製作する生産計画となっている。したがって、とくに断面形状、部材寸法および PC 鋼材配置断面の標準化など、設計上で対処できることは最大限反映させることを念頭に置き詳細設計を行った。後述する協力業者選定後は、型枠設備製作のための設計とも条件をすり合わせ随時詳細設計に反映させた。

公道上をセグメント運搬する場合、日本では道路交通法および車両制限令などの法令から最大重量が 40 tf と定められ、最大セグメント長が決まる場合が多い。ドバイでは最大重量に関して、軸重での制限があるのみであることから運搬業者は多種多様な積載重量のトレーラを有している。このことから最大セグメント長を 4.0 m (許可制限幅) と定め、結果的にセグメント重量は 60 tf (U 型断面 Simple - span) となった。

4. 上部工の施工

4.1 上部工工事工程

上部工工事工程を表 - 3 に示す。

4.2 施工体制

プレキャストセグメント工法による高架橋上部工の施工は、製作ヤードでのセグメント製作および架設桁を用いたスパンバイスパン工法によるセグメント架設が中心となる。総延長 61.1 km に渡る高架橋のセグメント架設、それに供

表 - 3 高架橋上部工工程表

工 種	数量	年		2005				2006				2007				2008				2009		
		月	8	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7			
① 詳細設計	1 式			詳細設計																		
② セグメント製作	16 471 個				製作ヤード設営				製作 (型枠 51 セット)													
③ セグメント架設 (スパンバイスパン)	1 624 支間				架設桁製作				架設 (架設桁 9 機)													
④ セグメント架設 (3 径間)	24 橋								架設 (2 フロント)													
⑤ 場所打ち Special Station	3 駅								場所打ち施工													
⑥ コンクリート塗装・付属物設置	43 km								塗装, ハンドレール等設置													

給する大量のセグメント製作とこれまでに経験のない大規模な工事となることから経験ある PC 専門業者を使った協力業者体制で工事を行った。

5. 主桁セグメントの製作

5.1 セグメント製作ヤード

セグメントは製作場所により、現場製作セグメントまたは工場製作セグメントに大別されるが、本工事では約 16 000 個の主桁セグメントを製作する必要があるため、路線の終点近傍の郊外部に製作ヤード面積 500 000 m²のセグメント製作ヤードを新たに設けた (写真 - 1)。セグメントを製作ヤードから架設現場まで公道上を運搬する必要があり、最長の運搬距離は 50 km である。



写真 - 1 セグメント製作ヤード

セグメント製作ヤードは、鉄筋ストック・組立ヤード、キャストヤード (型枠設備)、仕上げヤードおよびストックヤードで構成される。セグメント製作ヤード配置図を図 - 2 に示す。鉄筋材料荷降ろし・移動および鉄筋籠移動のために 6 機のタワークレーンを配置し、セグメント移動のために門形クレーン (Gantry Crane) を 8 ライン配置した。ストックヤードは 2 段積み考慮で 1 750 個のセグメント仮置きが可能である。

5.2 セグメント製作設備

セグメントの製作方法は、前述したようにそれぞれのセグメントの特徴に合わせロングライン方式またはショートライン方式を適切に選択した。セグメント製作設備およびセグメント数量を表 - 4 に、ロングラインおよびショートラインをそれぞれ写真 - 2、写真 - 3 に示す。

5.3 高強度コンクリートの製造

高強度コンクリートは、JV がコンクリート供給業者にセグメント製作ヤード内の土地を提供し、2 機 (120 m³/hr, 90 m³/hr) のコンクリート・プラントを設置させ製造した。

コンクリート配合を表 - 5 に示す。ドバイでは、高層建築工事において超高強度コンクリートが用いられており高強度コンクリート製造は可能である。しかしながら当地で初めてのプレキャストセグメント工法による橋梁建設であり、初期材齢時に脱型強度 12 N/mm² (12 h)、セグメント吊上げ強度 30 N/mm² (36 h) を必要とするコンクリート製造の経験はない。したがって、特記仕様書での要求事項、ドバイの気象環境、現地で得られる材料、さらに施工条件、スランプ、スランプ保持時間を考慮し、試験練りを行ってコンクリート配合設計を決定した。

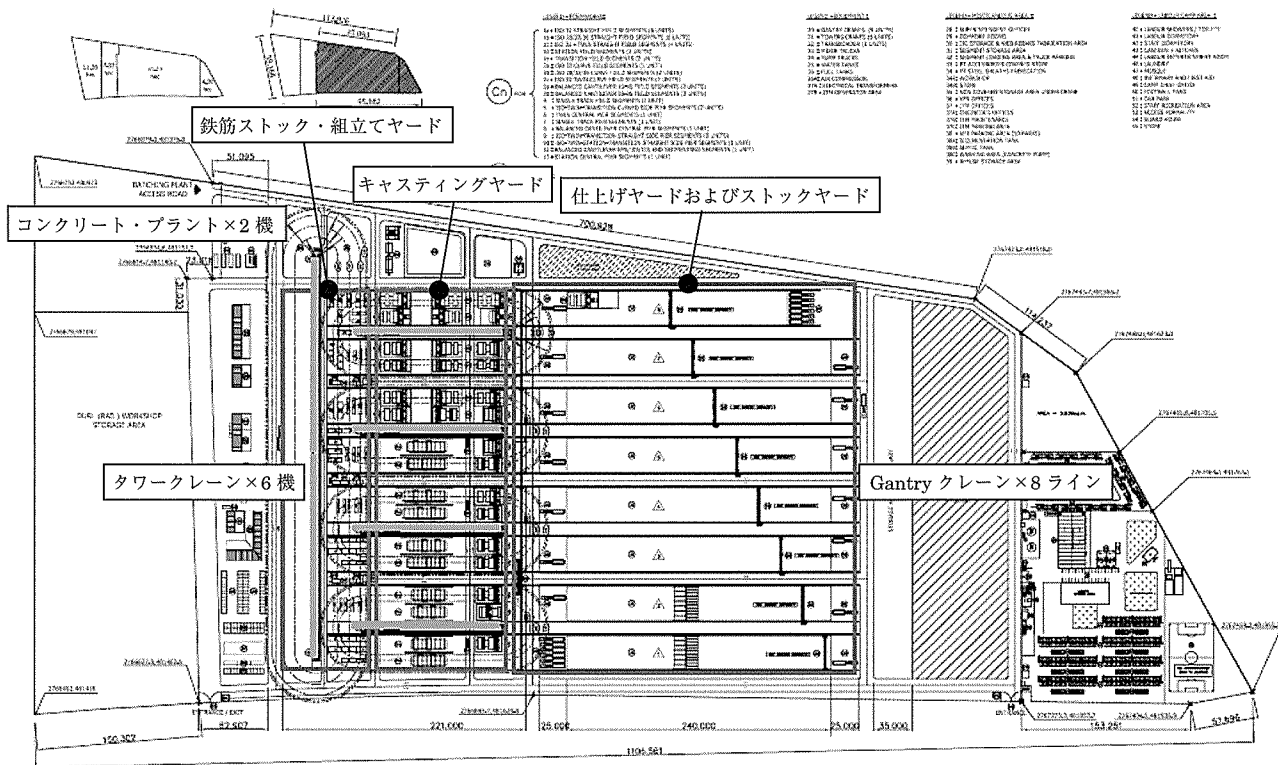


図 - 2 セグメント製作ヤード配置図

表 - 4 セグメント制作設備一覧

構造形式	セグメントタイプ	製作方式	名称	数量	セグメント数	コンクリート強度 (角柱強度)	
Simple	Straight	標準	ロング	C1a, b, C1e	16 2	6 513 616	C50
		支点		C9	5	1 955	
	Curved	標準	ショート	C2a, b, c	7	2 186	C50 C60
		支点		C5	3	719	
	Station Type-1 Type-2	標準	ロング	C1d	2	694	C60
			支点		C9d	1	
中間支点		ショート	C13	2	348		
2-span	Straight	標準	ロング	C1c		474	C60
		支点		C9		56	
		中間支点	ショート	C6	1	112	
	Curved	標準		C2c		324	C70
		支点	ショート	C5		36	
		中間支点		C6		72	
3-span	Staright / Curved	標準柱頭部	ショート	C3a, b	8	864	C60
		桁端部		C8	2	96	
			C12	1	142		
Single	Straight / Curved	標準	ショート	C4a, b	2	452	C50
		支点		C7a / b	1	170	
合計				53	15 895		

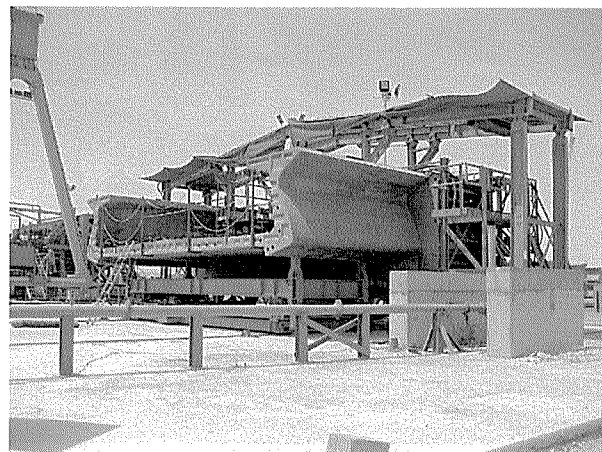


写真 - 3 ショートライン製作設備

より調整されることから、ロングラインで製作される Simple - span および 2 - span の直線橋の標準セグメントは、縦横断線形の有無にかかわらず直線水平に製作すればよく、非常に形状管理が容易である。一方、ショートラインは、平面線形および縦断線形に合わせマッチキャスト・セグメントを回転、さらにバルクヘッドを回転する必要があり、測量台を設け、レベルとトランシットによる形状管理を行った。

5.5 セグメント製作サイクル

(1) 鉄筋地組み

工場にて切断・加工された鉄筋を鉄筋組立架台 (Main Jig) にて鉄筋籠組立てを行う (写真 - 4)。PC シース配置は鉄筋組立架台での鉄筋籠組立て時に行い、支点セグメントの PC 定着体は、鉄筋組立架台で一度その設置位置・角



写真 - 2 ロングライン製作設備

5.4 形状管理 (Geometry Control)

Simple - span および 2 - span は、① 架設・緊張後のたわみ量が小さいことから上越しを考慮する必要がなく、② 縦横断線形による列車軌道高さ変化は、軌道コンクリートに

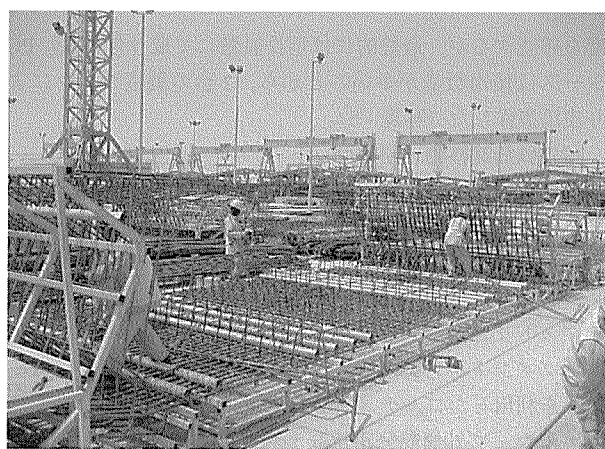


写真 - 4 鉄筋組立架台での鉄筋籠組立て

表 - 5 コンクリート配合表

	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単用量 (kg/m³)					
					水	セメント	マイクロシリカ	細骨材	粗骨材	混和剤 Sikament NN
C50	20	18 ~ 25	36.5	49.5	155	400	25	943	963	12.0
C60	20	19 ~ 23	36.0	48.7	160	415	30	927	976	10.7
C70	20	19 ~ 23	34.7	49.6	163	432	38	939	956	11.8

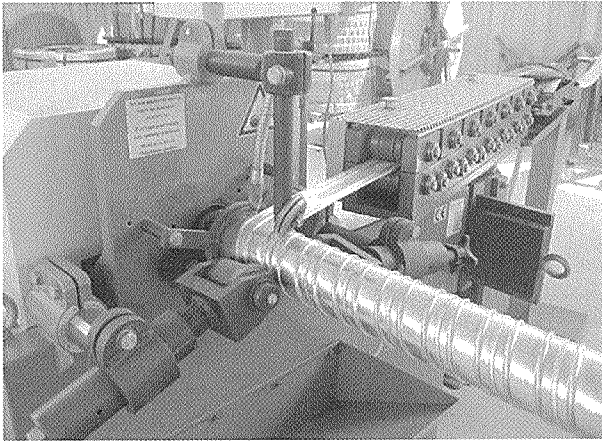


写真-5 PC シースの現場製作

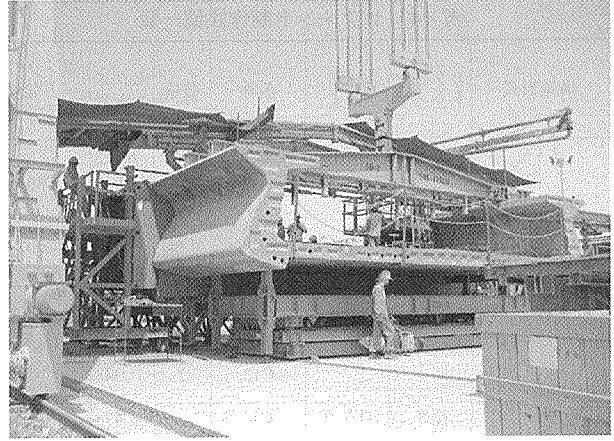


写真-7 セグメントの分離

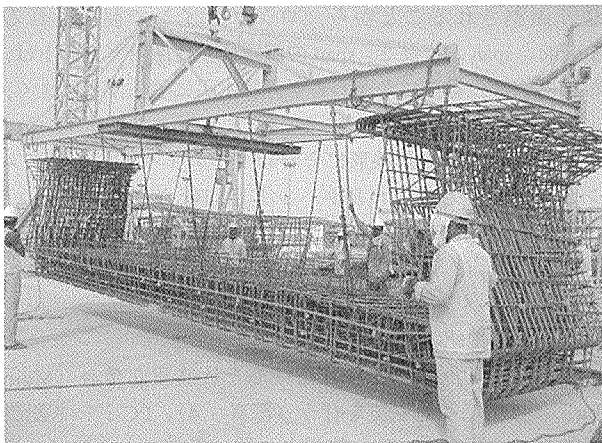


写真-6 鉄筋籠吊込み

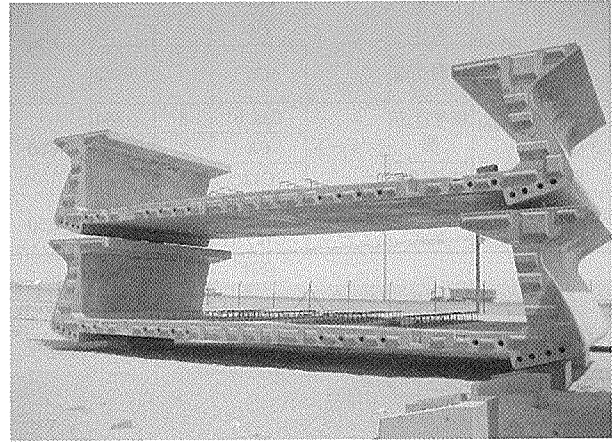


写真-8 2段積みされるセグメント仮置き状況

度を確認するが、最終的には型枠設備にて取り付ける。PCシースは使用数量が多いことから、2台の製造マシンにより現場製作した(写真-5)。

(2) 鉄筋籠移動・型枠セット

鉄筋籠組立て後、鉄筋籠吊ジグを用いてタワークレーンにて型枠設備にセットする(写真-6)。

(3) コンクリート打設

コンクリート打設は、定置式のポンプおよび移動可能なディストリビュータを使用した。

セグメント継目部でのシースの取付けは、空気の注入・排出を利用したゴムチューブを使用した。

主桁ウェブ外側部分が意匠上特徴的な曲線を有しておりコンクリートの締固めには棒状バイブレータと型枠振動機を併用した。

(4) 養生

特記仕様書では、7日間の散水養生が要求されていたが、

- ① セグメント製作がマッチキャスト方式であり散水養生を行うと次に施工されるセグメントまで水の影響が及ぶこと、
- ② 広大なストックヤードで散水養生を行うことは経済的にも品質管理上も懸念が残ることから、皮膜養生剤による養生とした。

時間	1	2	3	4	5	6	7	8	9
準備	■								
外型枠脱型	■								
内型枠脱型	■								
バルクヘッド脱型		■							
マッチキャストセグメント分離・移動		■							
接合面はく離剤塗布			■						
型枠清掃			■						
鉄筋籠移動			■						
バルクヘッドセット				■					
PCシース調整				■					
内型枠セット				■					
インサート類(ウェブ)セット				■					
PCシース・ゴムチューブ設置				■					
外型枠セット				■					
インサート類(スラブ)セット				■					
測量					■				
コンクリート打設前検査						■			
コンクリート打設							■		
表面均し・養生								■	

図-3 ロングライン・サイクル工程

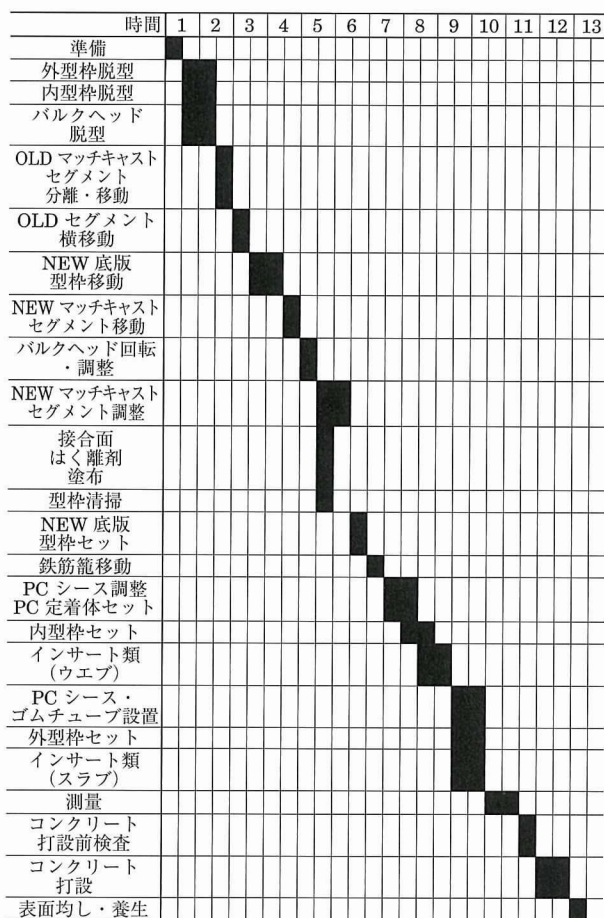


図 - 4 ショートライン (C9) ・サイクル工程

(5) セグメントの脱型・分離

セグメントの分離を容易にするために接合面に、はく離剤を使用し、セグメントの吊上げには門形クレーンを用いた(写真-7)。

(6) サイクル工程実績

ロングラインでの標準セグメントのサイクル工程を図-3に、ショートライン(C9)のサイクル工程を図-4に示す。

5.6 セグメント仕上げ・補修

セグメントは若材齢時の取扱いが多いことから、非常に損傷しやすいものであるが、通常は補修可能であり再製作まで至ることはまれである。本工事でも移動・仮置き中に重大な損傷を受けたセグメントはなかった。損傷例としては、脱型時の損傷、コンクリート表面のジャンカ、あばた、乾燥ひび割れおよびせん断キーの損傷などがあり、とくにマッチキャスト面の補修は、架設時に局部応力集中が発生しないよう注意を払った。

5.7 セグメント仮置き

セグメントの仮置きは、有害な応力が発生しないよう3点支持とし、2段積みとした(写真-8)。支持地盤は砂地盤であり、とくにコンクリートスラブ、H鋼等を設けず、敷き材を用いるのみとした。

5.8 セグメント製作実績

16 000 個あまりのセグメントの製作は、2006 年 10 月最初のセグメントをロングラインにて製作開始し、施工図の準備が整った構造から順次セグメント製作を開始、所要の目標である Simple-span の標準セグメントおよび支点セグメント製作 1 日 1 個製作工程達成、2008 年 12 月に実質 25 カ月間で完了した(図-5)。製作開始当初の施工図の不備等によるものが9個、品質トラブルによるものが2個、計11個が再製作された。

セグメント製作設備 53 設備を用い日平均 25.6 個、日最大 44 個のセグメント製作を達成した。

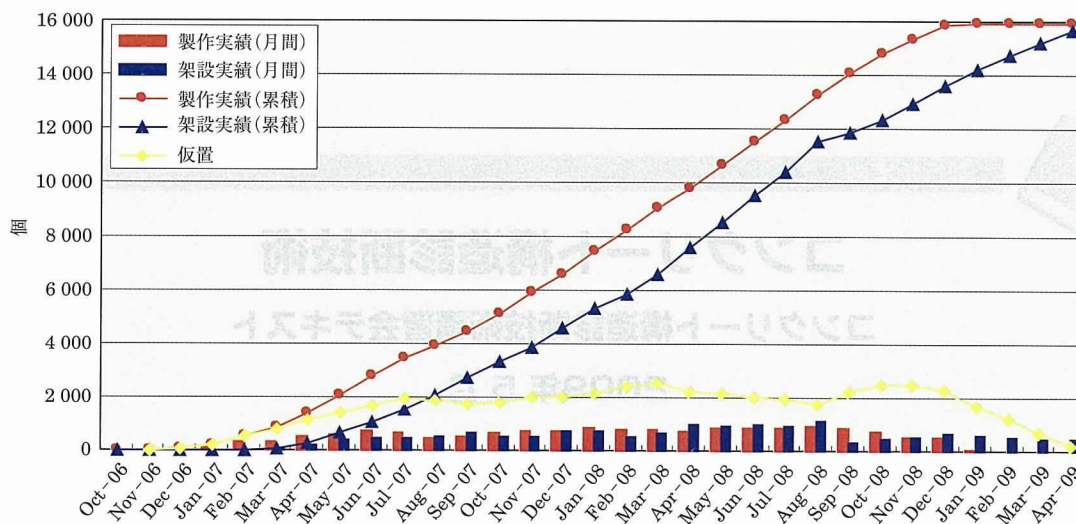


図 - 5 セグメント製作実績

6. おわりに

これまで日本国内で建設されたプレキャストセグメント工法による高架橋は、最大でも施工延長が3 km程度であり²⁾、海外においても San Antonio"Y"Project (アメリカ)、バンコク第二高速道路 (タイ)、Metro Viaduct in Monterrey (メキシコ)、サンチアゴ・プロジェクト (チリ) およびデリー・メトロ (インド) などが知られているが施工延長は20 km未満である。

本工事、ドバイ・メトロプロジェクトはこれらを大きく上回る施工延長をひとつのJVが担当し、また土建工事に与えられた施工期間は実質37カ月とこれまでに経験のない

工事規模・短工期であった。今後、海外では、本プロジェクトのような大規模発注の都市内高架橋建設プロジェクトが増加していくと予想され、本文が同種工事の計画・施工に参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 大場成道, 伊藤隆吉, 齋藤公生, 山崎啓治: ドバイ・メトロプロジェクト高架橋建設におけるプレキャスト部材の広範な利用, プレストレストコンクリート, Vol.50, No.5, pp.6~11, 2008年9月
- 2) (社) プレストレストコンクリート技術協会: PC橋架設工法2002年版, p.56, 2002年8月

【2009年3月13日受付】



刊行物案内

コンクリート構造診断技術

コンクリート構造診断技術講習会テキスト

2009年5月

定価 7,500円/送料 500円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会