

特殊なデザインに対応した PCa・PC 部材の施工

- 『国立劇場おきなわ』PC 工事 -

九州支店	建築事業部	池田龍基
九州支店	建築事業部	川本浩一
九州支店	建築事業部	毛利 浩
九州支店	建築事業部	岩田 勲

概要: 『国立劇場おきなわ』は、国の重要無形文化財「組踊」を中心とする沖縄伝統芸能の公開、伝承者養成、調査研究等を行い、その保存振興を図るとともに、沖縄の地理的・歴史的な特性を活かし、伝統文化を通じたアジア・太平洋地域の交流の拠点となることを目的として計画された。国内では新国立劇場(東京)に次いで6番目の国立劇場となる。本建築物にPCa・PCが多数採用された背景には、沖縄の那覇新港に隣接した区域という厳しい環境条件から特に高い耐久性をもつ構造体の要求と、劇場という用途の性格上、大空間の屋根(ロビー・客席・舞台)を支える構造体の必要性とがあった。また斜交格子が連続する意匠の外壁(写真-1)の施工法は、PCa・PCのメリットを活かした必然的な選択であったといえる。本稿では本工事の最大の特徴であるPCa外壁板の施工を中心に報告する。

Key Words: 国立劇場, 耐久性, 大空間, PCa 外壁板

1. 工事概要

(1) 建築工事

工 事 名: 国立組踊劇場(仮称)建築工事
 所 在 地: 沖縄県浦添市勢理客 4-14-1
 発 注 者: 内閣府沖縄総合事務局開発建設部
 設計監理: (株)高松建築設計事務所
 建築施工: 大成・戸田・仲本工業特定建設工事共同企業体
 PC 施 工: (株)ピーエス三菱 九州支店 PC 建築事業部
 建築面積: 7 136.85m²
 延床面積: 14 591.84m²
 階 数: 地下1階 地上3階建
 軒 高: GL+23.7m(1FL+22.2m)
 最高高さ: GL+24.3m(1FL+22.8m)
 構 造: 鉄筋コンクリート造, 一部プレストレストコンクリート造
 メインホール客席数: 626 席
 研修ホール客席数: 251 席



写真-1 建物外観



池田龍基



川本浩一



毛利 浩



岩田 勲

(2) PC 工事

本建築物の主体構造は RC 造であるが、大劇場・共通ロビーの屋根を支持する梁(スパン 22.8m)、底部分を支える片持ち梁等は PCa・PC 造が採用され、外周部の外壁・軒先関係は全て PCa 部材で構成される。そのほか内外部の耐震壁、スラブには合成構造のハーフ PCa 版を使用している。梁・耐震壁・床版等の構造部材および底関係の非構造部材は、沖縄県内の PCa 工場で、PCa 外壁板は現場敷地内の製作ヤードで製作した。図-1 に躯体区分図、表-1 に使用材料、表-2 に部材数量表、表-3 に工程表を示す。

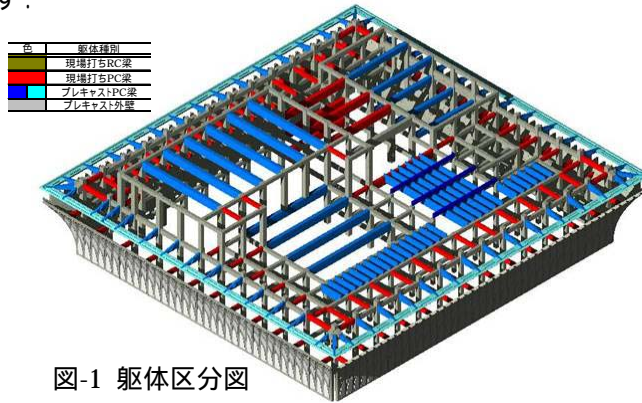


図-1 躯体区分図

表-1 使用材料

コンクリート設計基準強度	
現場打ち躯体	30 N/mm ²
PCa 梁	50 N/mm ²
PCa 外壁板, エントランス柱	40 N/mm ²
穴あき PC 版	40 N/mm ²
耐震壁ハーフ PCa 版, 化粧部材, 3F 合成床版	30 N/mm ²
PC 鋼材	
PC 鋼より線	SWPR7BL SWPR19
PC 鋼棒	SBPR930/1080
鉄筋	
D29 ~ D32	SD390
D19 ~ D25	SD390
D16 以下	SD295A

表-2 部材数量表

使用力所		総重量 (t)	面積 (m ²)	製作数 (P)	1次 PC (t)	2次 PC (t)	製作場所
耐震壁ハーフ PCa 版		696.4	3224.1	530	-	-	工場
PCa 外壁版		3105.0	-	166	14.6	14.3	現場ヤード
エントランス柱		16.2	-	4	-	-	工場
梁部材	3F	-	-	-	4.2	-	現場打ち
	R F	1437.0	-	170	7.9	22.9	工場
	PH F	358.2	-	16	3.0	6.7	工場
床部材	3F 合成床版	145.8	-	58	-	-	工場
	穴あき PC 版 t120	427.1	2135.5	459	-	-	工場
	穴あき PC 版 t150	74.2	311.6	120	-	-	工場
化粧部材	PK(底版)	473.6	-	174	-	-	工場
	PL(頂部)版)	163.7	-	150	-	-	工場

表-3 工程表

年度	平成12年		平成13年										平成14年							平成15年														
	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	
建築工事	仮設工事	準備工		磁気探																														
	既設解体撤去工事			既設基礎・杭																														
	杭工事					PHC既設杭(中掘工法)																												
	躯体工事							土工事		地下躯体				基礎工事		地上躯体																音響測定		
PC工事	架設工程	PCa外壁板																			外部仕上工事										後施工部架設			
		PCa梁																					内部仕上工事(舞台廻り仕上工事含む)											
		PCF壁版																																
	製作工程	PCa外壁板																																
		PCa梁																																
		PCF壁版																																

2. 施工

(1) PCa 外壁板

a) 概要

外壁面は東西南北の4面からなり、それぞれの面は幅1.9m、高さ12mの湾曲したPCa部材約40基により構成される(図-2)。四隅にはエキスパンションジョイントが設けられ、4つの面が独立した構造となる。各々の部材は脱型後に1次緊張を行い、建方後2次緊張により全ての部材が一体化され安定した壁面となる(図-3)。壁脚部は鉛直方向および水平方向2方向にアンカーバーによりピン支持され、上部は異形PC鋼棒(エポキシ樹脂塗装)により水平面外方向を支持し、面内方向にはローラー支点として建物本体と縁を切る構造となっている(図-4)。部材は一見全て同じに見えるが、部材の方向・形状、PC配線の種類、さらに菱形の開口は建物内部の用途により、開口・壁・ガラスのパターンに分類されており、それらの組合せにより部材の種類は全166P中53の種類が存在する。

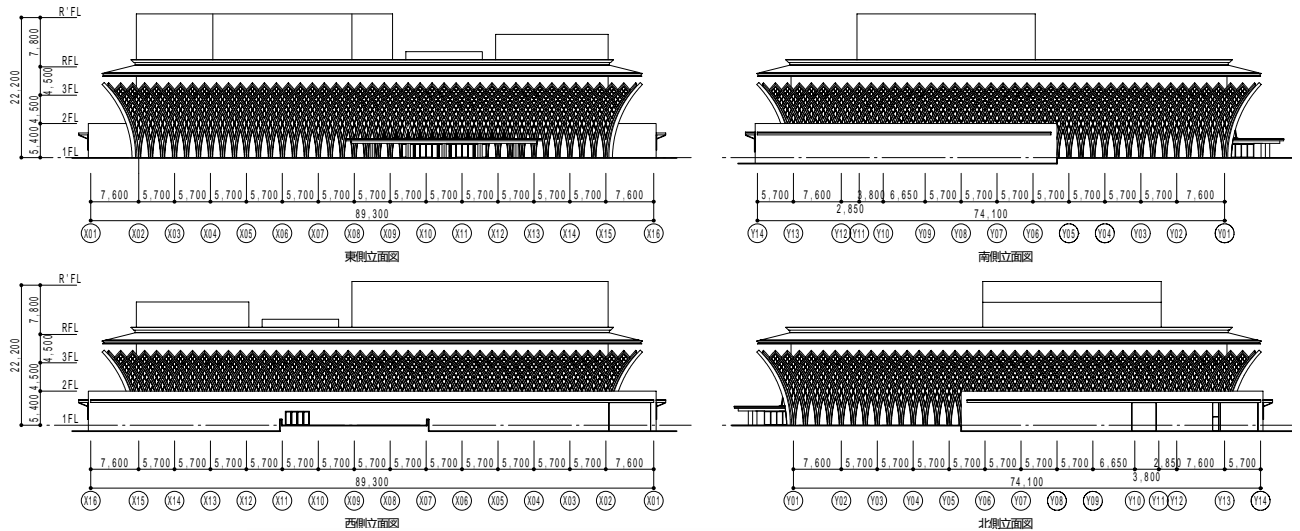


図-2 立面図

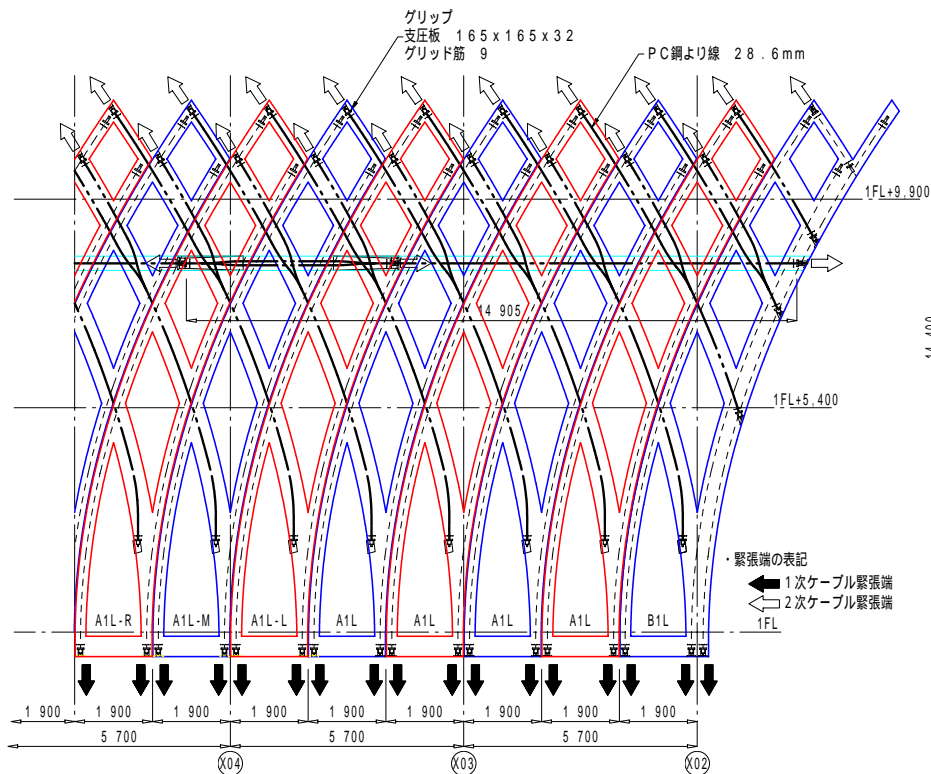


図-3 PC配線図

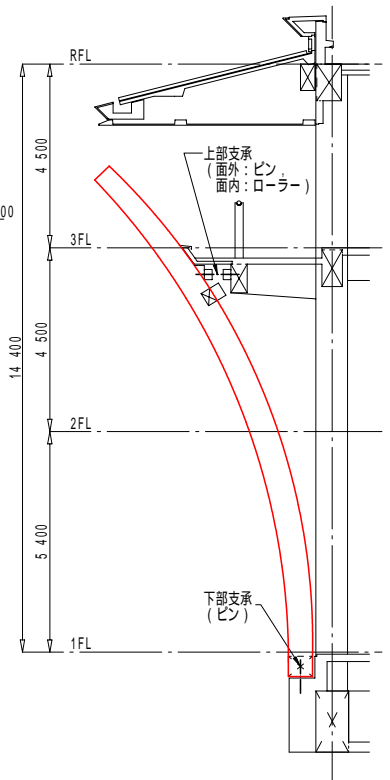


図-4 PCa 外壁板側面図

b) 施工上の課題

PCa外壁板はねじりを伴った3次元曲面で構成されており、形状の把握が困難であり、製作・建方共に非常に難易度が高いことが予想された。さらに部材相互の目地幅(20mm)、2次PCケーブル通線等を考慮すると、柱・梁などの一般的な部材より高い精度が必要であった。工事着手前に本施工における下記の課題を提議し計画を行った。

部材形状の把握・施工図の表現方法

意匠部材として鑑賞に耐えうる外観を実現するための型枠の構造・脱型方法

製作終了まで高い精度を維持するための型枠の管理方法

建築マスター工程にのせるため、毎日3部材打設可能な能力をもつ製作ヤードの計画

部材の重心を的確にとらえるための吊治具の検討

建方時に不安定な形状の部材を自立させる仮設金物の検討

2次緊張による圧着接合部の無収縮モルタル施工方法

斜角をもつ圧着面のプレストレス力によるすべりの対策

c) モックアップ

前項の課題については、下記のモックアップを段階的に行い、解決の方法を検討した。

3D-CADによる形状作成(図-5) 部材形状イメージの把握、部材重量・重心位置の情報取得

1/50スケールモデルの製作(写真-2) 型枠業者等の関係業者との打合せ

部分モックアップの製作(写真-3) 設計監理と化粧目地、開口面積等の意匠的なディテールを検討

実物大モックアップの製作(写真-4) 施工計画の妥当性・安全性の検証

モックアップの最終段階として、本施工の4ヶ月前に鋼製型枠1基を準備し、実物大の試験部材で製作・建方のシミュレーションを行い、施工計画の妥当性・安全性を検証した。



図-5
3D-CAD



写真-2 1/50
スケールモデル



写真-3
部分モックアップ



写真-4
実物大モックアップ

複雑な形状を実現するためには、型枠の構造が最大の課題となった。通常ベッド(底枠)面に凹凸のある部材を型枠から取出すためには、脱型方向に対して適切な抜き勾配が必要となる。この部材はベッド面自体が円弧状に湾曲しており、通常の方法では脱型が不可能なため、菱形の開口枠と鋼製の化粧目地棒は、コンクリート打設時には固定され、脱型時にはフリーとなる構造とした。モックアップ時に困難を極めた部材脱型については、抜き勾配の変更や開口枠の熱膨張を抑制するためのクーリング設備設置を検討した(図-6)。そのほか本施工までの間に再度問題点の洗い出しを行い、必要な正・改良を加えた。

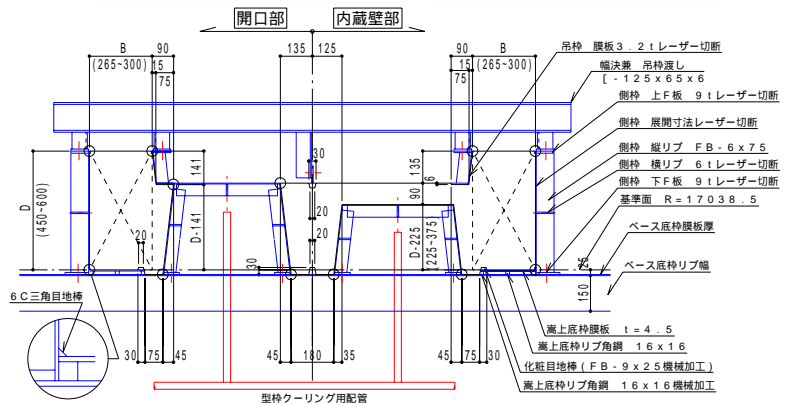


図-6 鋼製型枠断面図

d) 製作ヤード計画

敷地内の将来前庭や駐車場となる約 9,000m² のスペースを利用して製作ヤードを計画した。計画にあたっての諸条件は以下の通りであった。

コンクリート設計基準強度 40N/mm², 脱型時強度 27N/mm², 1次 PC 導入時強度 27N/mm²

上記の強度を発現すべく, 促進(蒸気)養生の実施

製作部材数 166P

型枠は, L・R 部材に各 3 枠の計 6 枠

部材製作は, 1 サイクル 2 日(3 部材)とし, 計 55 サイクル

打設後 17 時間経過後に脱型し, 脱枠・緊張架台へ移動

打設後 19 時間経過後に 1 次プレストレスを導入

全 166P をストック可能なストックヤードの計画

製作設備は, 鋼製型枠, 鉄筋先組架台, 緊張架台, 蒸気養生システム, 型枠クーリング設備, スtockヤードで, 部材揚重に 150t クローラークレーン 1 台, 型枠・材料の揚重に 25t ラフタークレーン 2 台, 部材運搬に 25t 高床トレーラー 2 台を使用した(写真-5・図-7)。鋼製型枠は勝手違い(L 型・R 型)を 3 枠ずつ計 6 枠用意し, 15.0m × 23.0m の円弧状の製作ベッド上で組立てた。図-8 に製作ベッド配置図, 写真-6 に鋼製型枠を示す。



写真-5 製作ヤード全景

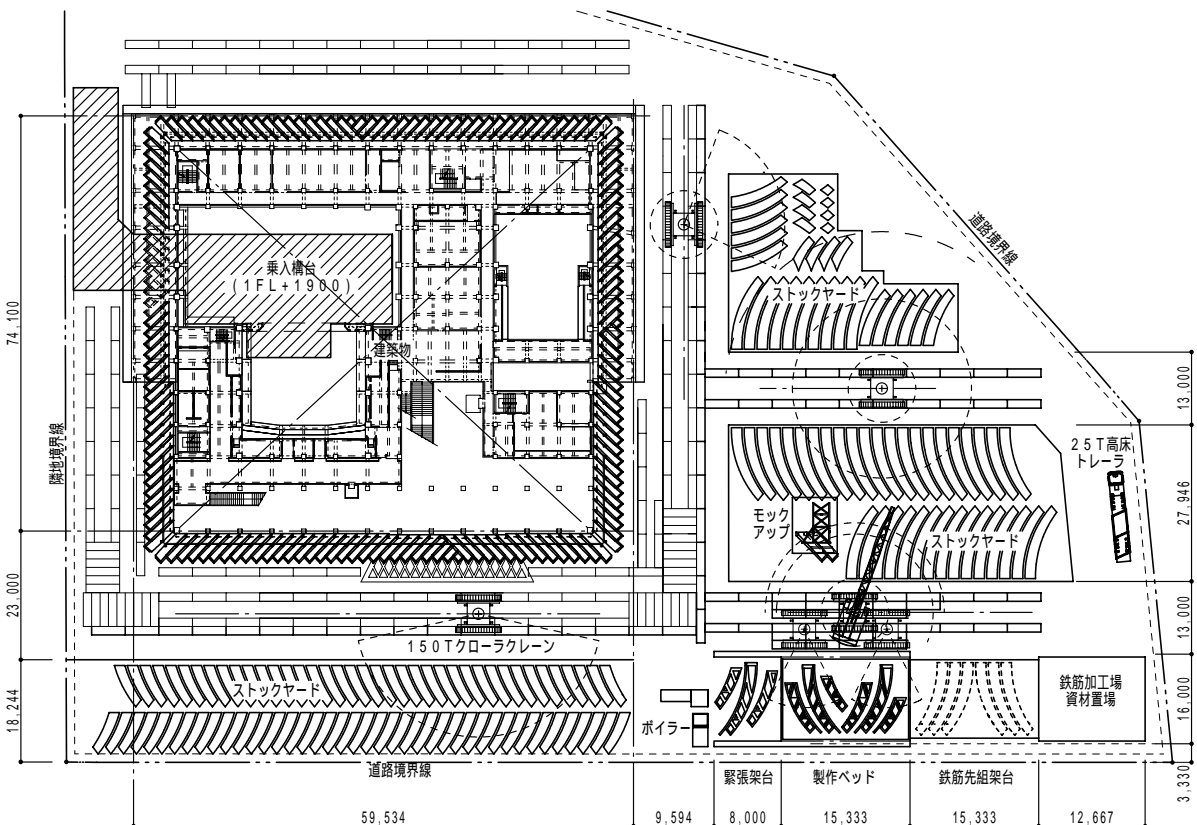


図-7 製作ヤード計画図

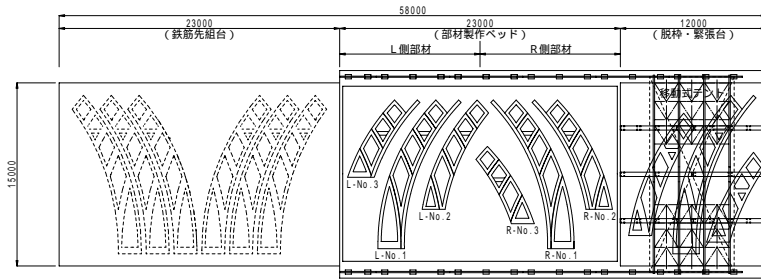


図-8 製作ベッド配置図



写真-6 鋼製型枠

e) 製作

製作は、L・R セグメント用各々3 枠を使用し、1 サイクル 2 日で行った。製作ベッド上の作業と並行し、1 次・2 次シースを仮配置した先組鉄筋の組立を行い、ベッド上の清掃が完了すると共に先組鉄筋を移動、鉄筋位置および PC 鋼材位置の補正、1 次 PC 鋼材の入線・定着体取付け、側枠浮き枠のセット、打設前清掃、配筋検査を経て、コンクリート打設を行った。表-4 に製作タイムサイクルを示す。

表-4 製作タイムサイクル

手順	タイムサイクル		1日目				2日目				3日目				
	作業内容	作業時間	累計時間	8	10	12	14	8	10	12	14	8	10	12	14
1	ベッド清掃、墨だし	1.0H	1.0H												
2	開口枠組立、金物取付	2.0H	3.0H												
3	鉄筋、PC配置、金物取付	2.0H	4.0H												
4	止め枠組立、金物取付	2.5H	6.5H												
5	PC定着体取付、ケーブル挿入	1.0H	6.5H												
6	浮き枠組立、打設前清掃	2.0H	8.5H												
7	配筋、型枠検査	-	-												
8	コンクリート打設	3.0H	11.5H												
9	打設面仕上げ	4.0H	13.5H												
10	蒸気養生(自動制御)	12.0H	-												
11	止め枠解体	1.5H	15.0H												
12	製品取出し、脱枠台へ移動	2.0H	17.0H												
13	開口枠解体、補修、1次緊張	2.0H	19.0H												
14	製品種込み、仮置き場へ移動	3.0H	22.0H												

■ L型枠×3枠
■ R型枠×3枠

PC 鋼材位置・打ち込み金物位置・止め枠等の位置は、あらかじめ製作ベッドに XY 方向にけがかれた 200mm 間隔の座標からの寸法管理を行い製作図との整合を計った。また部材製作の都度、組立てる型枠の部品数は 6 枠で計 500 点にもものぼり、作業員の混乱を避けるため、部材製作図に型枠の部品番号を明示する等の配慮をした。写真-7 に打設前の状況を示す。

コンクリートはポンプ車を用い、棒状バイブレーターによる内部振動にて入念な締固めを行った。表-5 にコンクリート配合および試験結果を示す。セグメントには脱枠時および建方時の強度を確保するために、1 次 PC 鋼材(PC 鋼より線 28.6)が配置されている。設計基準強度 40N/mm² に対し、打設 17 時間後には 1 次プレストレス導入時強度 27N/mm² を発現させるべく、通常と同強度のコンクリートより富配合とし蒸気養生を行った。なおコンクリート配合は数度の実機試験練りにより決定した。蒸気養生はコンクリート養生管理システムを使用し、温度センサーを介した自動制御による管理を行った。



写真-7 打設前状況

脱枠時のセグメント表面温度は 45 ~ 50 にのぼり、鋼製型枠を使用しているために特にユニットパターン枠(五面がコンクリートに密着)は熱膨張により脱枠が困難な状況であったが、散水クーリングにより改善した。

部材製作は全 166 部材を約 4 ヶ月の工期を経て完了した。写真-8 に型枠クーリング配管設備、写真-9 にセグメント脱型状況、写真-10 にストック状況、写真-11 に場内運搬状況を示す。

表-5 コンクリート配合および試験結果

コンクリート配合: 40-20-20

プラント: (株)沖繩生コンクリート那覇工場

製作場所: PCヤード

配合表(kg/m ³)	W/C = 34%				細骨材率 = 41.2%				備考														
	セメント量	顔料	水	細骨材	粗骨材	混和剤																	
465	-	-	158	456	250	1031	-	4.185	-	混和剤 高性能AE減水 剤 ターレックス- パ-100PHX													
圧縮強度試験結果 (N/mm ²)						外気温	21.0																
材齢17h (蒸気/標準)		材齢7日 (蒸気/標準)		材齢28日 (蒸気/標準)		CON温度	28.0																
平成14年11月5日		平成14年11月11日		平成14年12月2日		スラブ (cm)	13.5																
1	29.2	-	1	45.8	-	1	57.3	-	塩化物(kg/m ³)	0.052													
2	31.1	-	2	46.6	-	2	63.4	-	空気量(%)	3.6													
3	29.6	-	3	44.3	-	3	61.6	-	蒸気温度	60.0													
平均	30.0	-	平均	45.6	-	平均	60.8	-	昇温時間(h)	2.0													
										継続時間(h)	6.0												
平成14年11月5日																							
工程	採取 前置 昇温 蒸気継続 (蒸気温度:60) 降 温 圧縮試験																						
時刻	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12



写真-8 型枠クーリング配管設備



写真-9 脱型状況



写真-10 スtock状況



写真-11 場内運搬状況

各セグメントは外方向に転倒しようとするため、面外方向に最大 6.7t の水平力が発生し、これを支持しなければならぬ。また、建方時にはまだ壁面が一体化されておらず、各セグメントを単体で自立させるには、面内方向にも最大 2.3t の水平反力が必要となる。2 次 PC 鋼材の緊張が完了して壁面が一体化するまで、反力を負担するために各支点位置に仮設金物を配置し位置固定・微調整を行った。写真-12 に地切状況、写真-13 に建方状況、写真-14 に仮設金物、写真-15 に本設支承金物を示す。



写真-12 地切状況



写真-13 建方状況



写真-14 仮設金物



写真-15 本設支承金物

g) 目地処理および 2 次緊張

各セグメントは目地巾 20mm で配置され、目地に無収縮モルタル充填後、2 次 PC 鋼材 (28.6) を通線・緊張することにより、不安定な形状のセグメント単体がすべて圧着され、安定した外壁面が構築される (図-11)。2 次緊張による圧着部の目地数は約 700 箇所へのぼったが、無収縮モルタル充填用の目地型枠、および目地部のシーシ孔形成用にゴムチューブを用いることにより、作業の効率化を図った (図-12・写真-16・写真-17)。全 166 ピースを 25 の施工ブロックに分割し、1 つの施工ブロックの 2 次緊張が完了して外壁面が一体化された後、次の施工ブロックへ移行する施工順序とした。2 次 PC 鋼材は圧着目地に対して斜角をもつため、プレストレス力によるすべりが生じないよう、目地部にコッターを配置し緊張順序にも留意した (図-13・写真-18)。

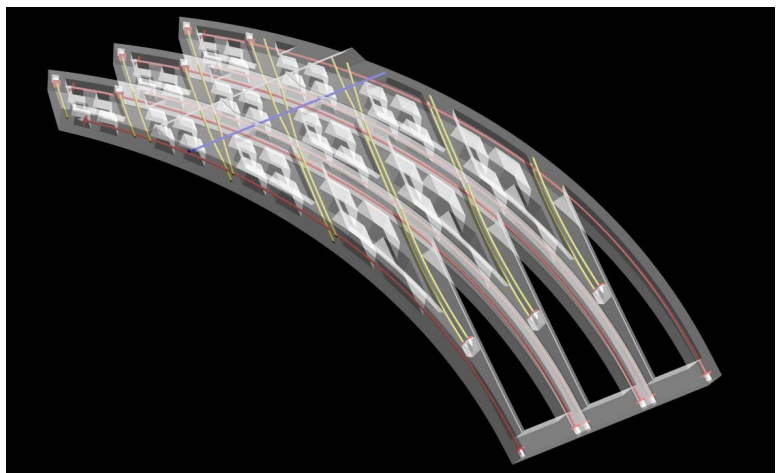


図-11 セグメント圧着概念図

完了して外壁面が一体化された後、次の施工ブロックへ移行する施工順序とした。2 次 PC 鋼材は圧着目地に対して斜角をもつため、プレストレス力によるすべりが生じないよう、目地部にコッターを配置し緊張順序にも留意した (図-13・写真-18)。

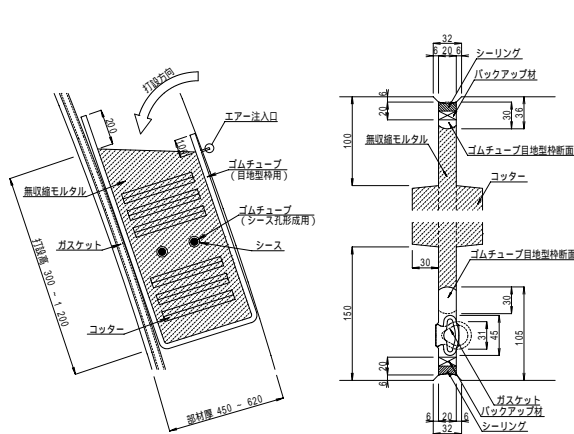


図-12 圧着目地詳細図



写真-16 ゴムチューブ目地型枠

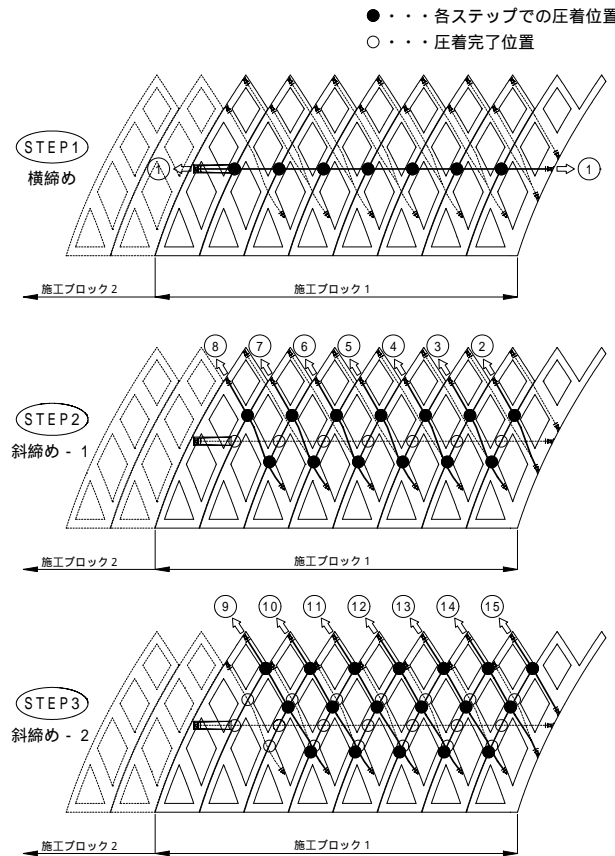


図-13 2次PC緊張順序



写真-17 目地型枠施工状況



写真-18 2次緊張状況

(1) PCa 大梁

a) 製作

メインホールの客席及び舞台上部を支えるPCa 梁はスパン 22.8m, 重量 50t を越えるため, 運搬等の問題から工場で一本の部材を 3 つのセグメントに分割して製作した(写真-14). 打設方法は接合面の精度を考慮しマッチキャストとした(写真-19).

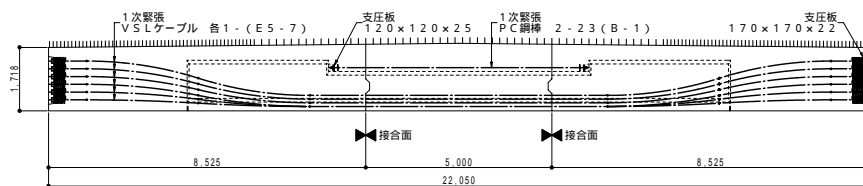


図-14 PC 配線図



写真-19 PCa 大梁製作状況

b) 接合・架設

現場搬入したセグメントは以下の作業手順で施工した。

- セグメント搬入・仮置き(写真-20)
- 転倒防止用レバーブロック取付け
- 接合用 1 次 PC ケーブル挿入(PC 鋼より線 6C-7S12.7・PC 鋼棒 2C-23B1)
- 接合面にエポキシ樹脂接着材を塗布
- クレーンにて接合面が密着するまでセグメントを移動
- 1 次 PC ケーブル緊張作業(総緊張力約 5800KN)(写真-21)
- 緊張端部処理
- 現場打ち柱頭部へ部材架設(写真-22)



写真-20 仮置き状況



写真-21 1次緊張状況



写真-22 PCa 大梁架設状況

部材の揚重には 360t 油圧クレーンを使用した(図-15) . 舞台上部の 6 梁(18 セグメント)の接合・架設に要した日数(クレーンの移動・セット, 乗入構台の覆工板盛換え等を含む)はわずか 5 日であり, 短期間で大空間の骨組みが完成した。

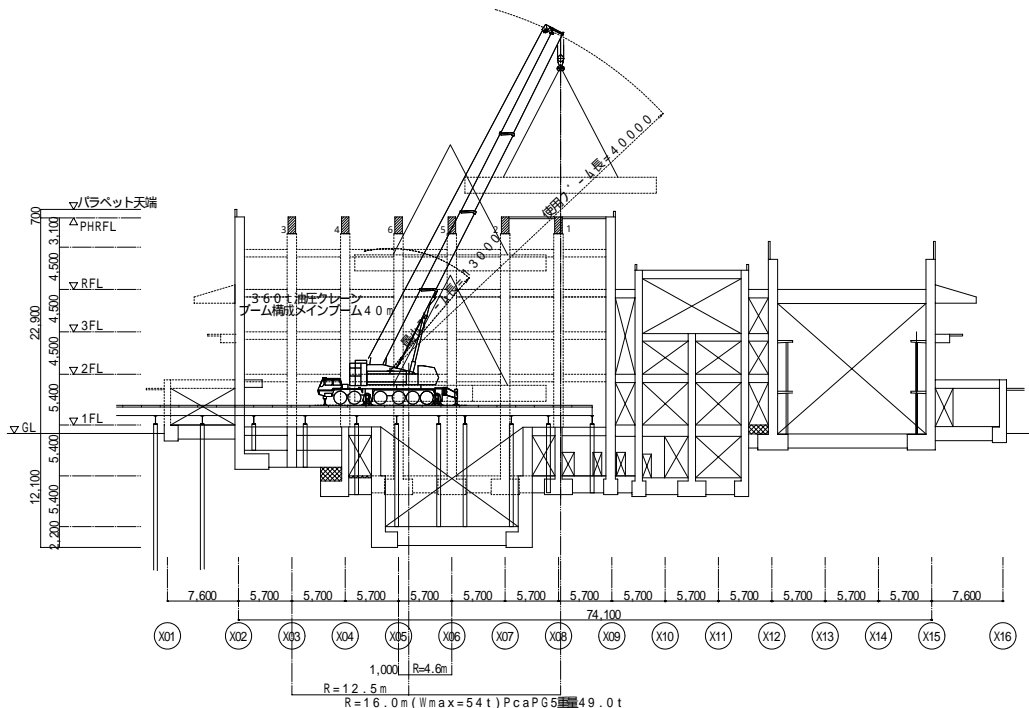


図-15 PCa 大梁架設計画図

(3) R 階軒先関係 PCa 部材

a) PCa 片持ち梁

設計では場所打ち PC 梁であったが、支保工の省力化および工期短縮等のメリットにより PCa・PC 化した。片持ち梁を PCa・PC 化した場合は、部材を支保工で受け目地無収縮充填後、PC 鋼材で圧着接合するのが通常の施工方法である。本計画においては、3 階テラスのスラブの出が少なく、支保工を設置するスペースが確保できない等の理由から、無支保工架設の計画とした(図-16・写真-23)。鋼製ブラケットで PCa 片持ち梁(張出し長 5.8m、重量 5.4t)の自重を受け、転倒モーメントは、部材の上端に埋め込まれた圧着接合用の PC 鋼棒と、部材下端に設置したボルトと支圧プレートの反力により処理した(写真-24)。

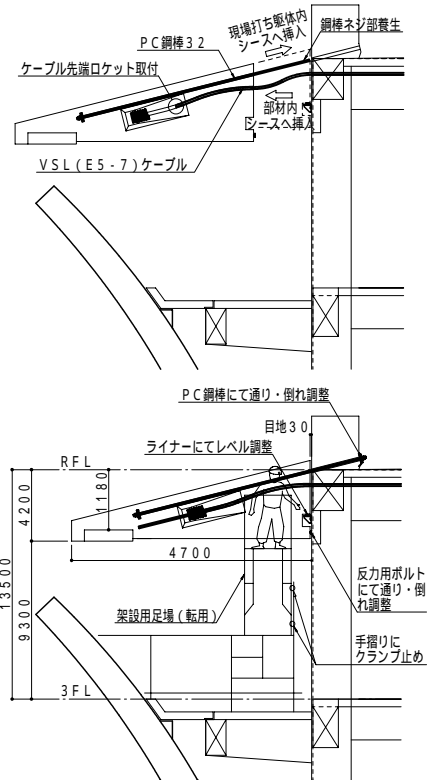


写真-23 PCa 片持ち梁架設状況



写真-24 PCa 片持ち梁接合部

図-16 PCa 片持ち梁施工手順図

b) PCa 雨樋梁・庇版・パラペット版

PCa 雨樋梁は前述の PCa 片持ち梁と 20mm の目地を介し、PC 鋼棒 23 4 本で圧着されている。庇版は現場内に一旦仮置きし地上で瓦貼りを行い架設した。PCa 雨樋梁およびパラペット版は工場にて御影石を先行打込みとした。写真-25 に PC 雨樋梁、写真-26 に庇版架設状況、写真-27 にパラペット版架設状況を示す。



写真-25 PCa 雨樋梁



写真-26 庇版架設状況



写真-27 パラペット版架設状況

3. まとめ

本工事では PCa・PC が構造部材のみならず、建築物の外観を支配する特殊な意匠部材に採用されたことで、今後の多様化する建築工事におけるデザインにも、PCa・PC 採用の新たな可能性が開けた。

また、特殊部材の施工においては、モックアップによるシミュレーションがいかに重要か再認識できた。

謝辞

本計画は非常に難易度の高いものであったが、関係各位の貴重な助言や協力もあり、PCa・PC のメリットを最大限に活かした施工ができたことと確信している。誌面をお借りして心より感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 高松建築設計事務所: architectural design 国立劇場おきなわ, 建築技術, No648, pp.60-81, 2004.1
- 2) 井上誠・小栗新・池田龍基・毛利浩: 国立組踊劇場の設計・施工, プレストレストコンクリート, Vol.45, No4, pp.34-42, 2003