

大濠研修施設附属体育館の設計・施工

— 斜交 PC 格子梁による大空間の構造デザイン —

池田 隼人^{*1}・今林 光秀^{*2}・福田 顕議^{*3}

本建物は福岡県福岡市内に建つ研修施設に併設される、地上1階、地下1階の鉄筋コンクリート造、耐震壁付きラーメン構造の体育館である。地下水位が高く、室内空間は吹抜け大空間で荷重が無く、水圧の影響を最小限に抑えるため基礎底面を上げたい。さらに、体育館屋上庭園が隣接する研修施設建物の2階とつながる高さの制約もあり、体育館天井高確保のために屋根梁せいを抑えたい。一般的な構造計画である短辺に主力な梁をかける方式では梁せいを抑えることができないと考え、斜交格子梁として応力を分散させることを考えた。大スパンにもかかわらず、斜交 PC 格子梁のプレストレスによりたわみを抑え、構造体あらわしの内観に美しい構造美を表現することができた。

キーワード：PC 大梁、PC 柱、格子梁、大空間、耐震構造

1. はじめに

本建物は、発注者の創立10周年記念事業として、旧施設を建て替えた施設である（図-1、写真-1）。研修施設に併設される体育館の計画にあたり、周辺住宅への配慮、屋上庭園の開放という課題に対応すべく、体育館の基礎梁、屋根梁を斜交格子梁として大空間の実現を試みた。

本報告では、建築計画のなかから、構造設計のための与条件にかかわる部分を抽出したのち、構造デザインとして建築計画と一体となりながらも独創性、合理性を高める工夫など、構造コンセプトについて説明している。また、PC 構造の採用の優位性を確認し、プレストレスなしの計算と、プレストレス効果を考慮した構造設計について概要を説明した。

最後に、斜め格子のプレストレス導入についての施工計画、施工結果について詳述した。

2. 建物概要

建築名称：西日本シティ銀行ココロ館
 建設地：福岡県福岡市中央区鳥飼
 建物用途：体育館、寄宿舎（寮）
 敷地面積：8 510.06 m²



図 - 1 建物外観（イメージ図）



写真 - 1 体育館 内観写真



^{*1} Hayato IKEDA

(株) 日本設計 構造設計群



^{*2} Mitsuhide IMABAYASHI

(株) 日本設計 構造設計群



^{*3} Akiyoshi FUKUDA

オリエンタル白石 (株)
 福岡支店

建築面積：4 794.76 m²
 延床面積：18 174.46 m²
 階 数：体育館棟 地下1階，地上1階
 構造種別：RC造，一部PC造，耐震壁付きラーメン構造
 基礎形式：直接基礎（置換コンクリート）
 発注者：(株)西日本シティ銀行
 設計監理：(株)日本設計
 施 工：(株)大林組 九州支店
 PC施工：オリエンタル白石 (株)
 全体工期：平成27年3月～平成29年1月
 PC工期：平成27年10月～平成28年8月

3. 建築計画

体育館の屋上には，地域との交流を図ることを目的とした広大なルーフガーデンが計画され，体育館内部は当然ながら無柱空間（35.2 m × 48.4 m）を構築する必要がある（図 - 2，3）。

高さの要求の厳しいバレーボールコート2面が用意できる配置計画が決定した。さらに，地域開放性の向上の観点から屋上を庭園として開放し，1階より容易に屋上庭園と2階レベルまでアクセスできること，できるかぎり高さを抑えたいとの条件が追加となった。屋根面の梁は短辺スパンの中央が高くなるように，球面形状としている。

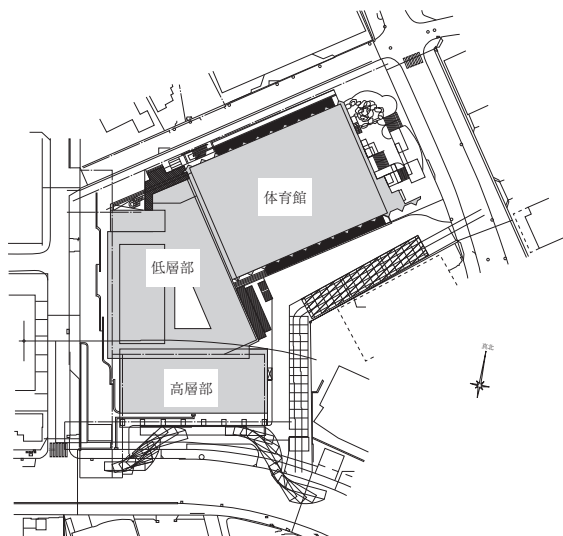


図 - 2 平面図

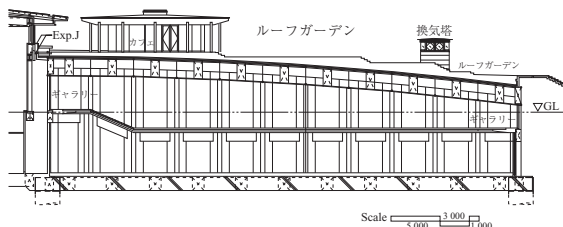


図 - 3 断面図（体育館棟）

4. 構造計画

4.1 構造計画概要

建物は地上12階，地下1階の研修施設棟とそれに併設

される，地上1階（ほぼ吹抜け，一部外周通路），地下1階建ての鉄筋コンクリート造，耐震壁付きラーメン構造の体育館である。研修施設と体育館は，地下は止水上の理由から一体構造となっているが，地上部はエキスパンション・ジョイントにて構造上別棟としている。

4.2 体育館棟構造計画概要

一般的な構造計画として，短辺に主力な梁をかける方式では，梁せいを抑えることができないと考え，格子梁を斜めに掛けて応力を分散させることを考えた。構造模型に示すように，S造では，格子梁としても梁成が大きいくこと，部材数が多くなり複雑に見える（写真 - 2）。RC造の場合，大スパンの変位抑制の観点からプレストレス構造となり，柱梁接合部の納まりから，柱を平面的に45°回転させており，内観立面に表情をもたせた（写真 - 3）。

地盤条件としては，地下水位が高く，室内空間が空洞となって荷重のかからない体育館の特性上，水压を最低限に抑えたいため，できるかぎり基礎底面を上げたい。梁せいをおさえ広大な空間を構築するために，プレストレストコンクリート構造を採用した。

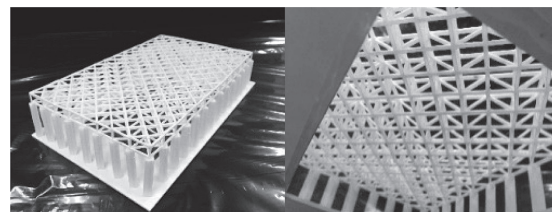


写真 - 2 模型（S造）

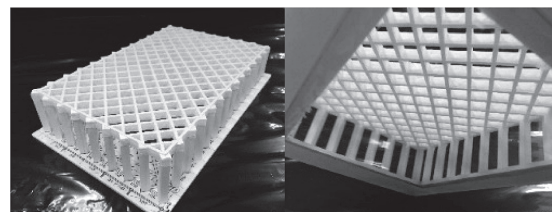


写真 - 3 模型（PC造）

柱を回転させているため，基礎梁も45°回転させた格子梁としており，地盤面からの浮力に抵抗するために，グラウンドアンカーで下方向に緊張しつつ，ピット部分をすべて厚み1.3 mのコンクリートで埋戻している（図 - 4）。

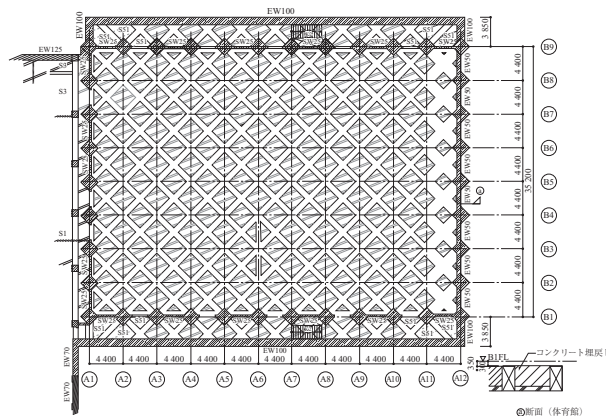


図 - 4 B1階床梁伏図（基礎梁配置）

地震力については、外周に大梁 PC 導入後打設する後打ちコンクリート耐震壁にすべて処理させた（図 - 5）。

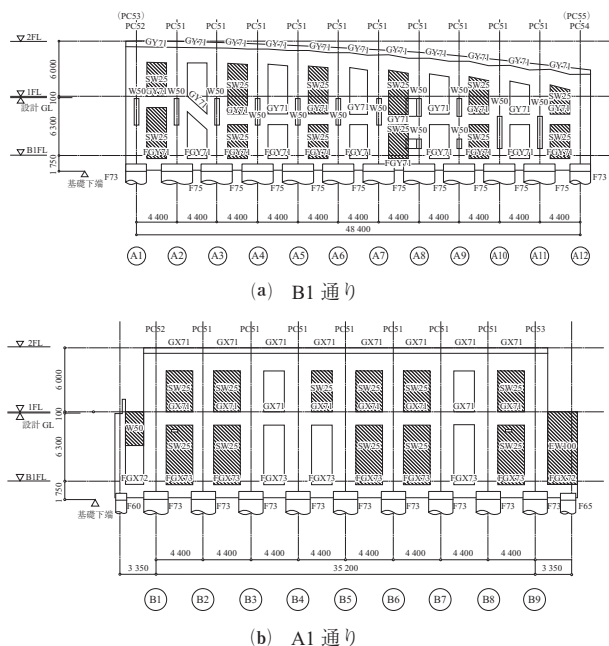


図 - 5 軸組図 (耐震壁配置)

4.3 構造計算のためのモデル化

本構造物は、最大スパン約 50 m の斜交格子梁および柱からなるラーメン構造であるので、躯体の応力はこれらの構造特性を十分考慮し、立体ラーメン構造として求めた。立体フレームモデルにより長期荷重や土圧荷重等を入力し、応力解析した。

応力を算定するための解析は、任意形立体骨組み構造を対象とした立体解析プログラム（UC-Win/Frames (3D) : (株) フォーラムエイト）により行った。図 - 6 に解析モデルを示す。

モデル化の概要を以下に示す。

【使用要素・支持条件】

- 骨組み（大梁および柱、壁）をビーム要素としてモデル化する。
- 斜交大梁はスラブの有効幅を考慮し、T 形梁とする。
- 壁はプレストレス導入後の施工であり、また、躯体荷重と比較して仕上げおよび積載荷重は 3 割程度であり、設計応力に対する影響は小さいため考慮しない。
- 基礎は上部構造と分離して設計するものとし、支点拘束条件は、柱脚固定にて応力解析を行う。

【荷重条件】

- スラブと梁の自重を T 形梁の要素線荷重とし、等分布荷重として鉛直下向きに载荷する。
- 積載荷重は鉛直下向きに等価な節点集中荷重として载荷する。
- 土圧は別途計算された荷重を、分布荷重にて柱要素に入力する。

【特殊荷重】

- プレストレスは別途計算された荷重（つきあげ力、端部

軸力、曲げモーメント）を、要素荷重にて入力する（5.2 参照）。

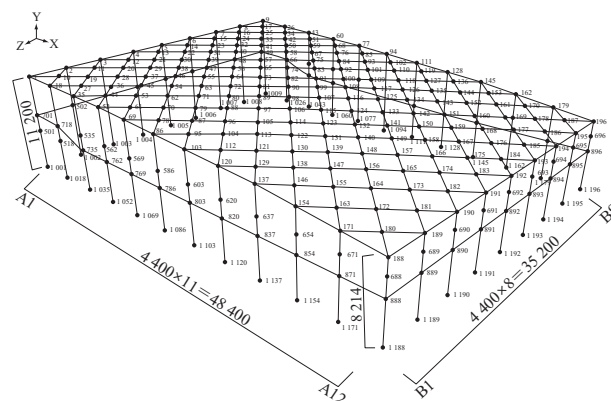


図 - 6 解析モデル

4.4 応力計算結果

下記に示すように、各荷重ケースによる曲げモーメントを算出した。

- 1) G : 固定荷重（躯体自重）D.L による応力
- 2) P : 仕上げ + 積載荷重 L.L による応力
- 3) X' : プレストレスによる応力（柱 PC 鋼棒、PC 梁）導入時で次節に示す。
- 4) 土 : 土圧荷重による応力

躯体荷重による応力（D.L），仕上げおよび積載荷重による応力（仕上げ + L.L），土圧による応力（土）を、それぞれ図 - 7 ~ 9 に示す。

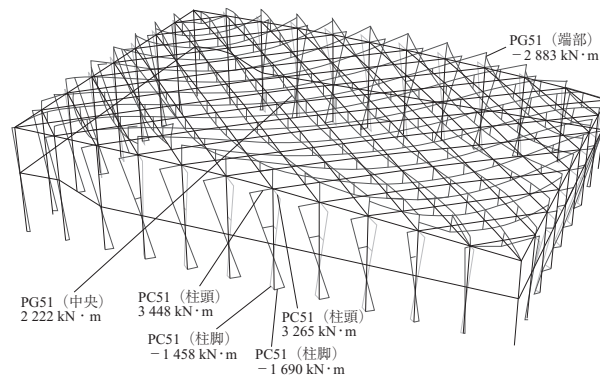


図 - 7 応力図 (D.L)

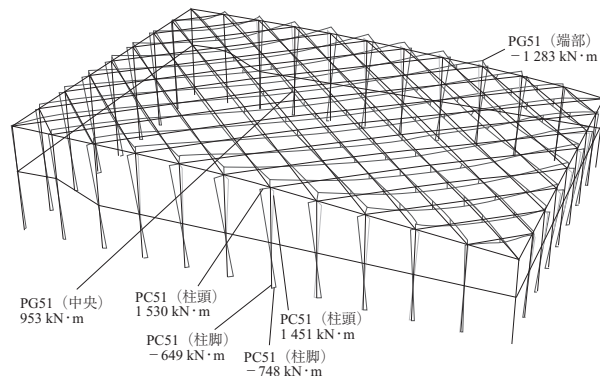


図 - 8 応力図 (仕上げ + L.L)

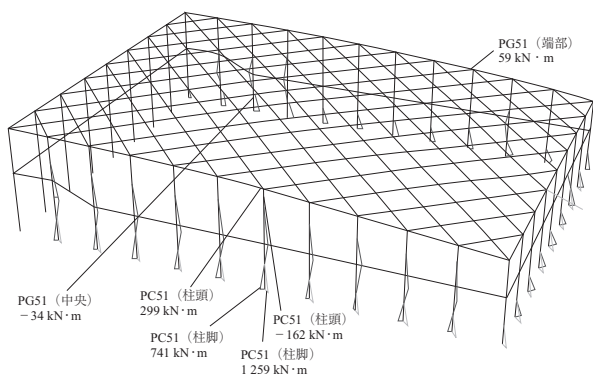


図 - 9 応力図 (土圧)

5. PC 部材の設計

5.1 PC 部材の概要

体育館の屋根は、短辺 35.2 m、長辺 48.4 m、高低差最大 3.0 m（大梁 1 本で 2.0 m）のゆるやかな曲面状の格子梁を、平面的に 45°回転させ、上下左右対称に配置している。最大スパン約 50 m の大梁の応力および変形を抑制するために、PC 鋼材を配置しプレストレスを導入した。緊張は両引きとし、主な PC 大梁はパーシャルプレストレストコンクリート（PPC）部材、柱および耐震壁周辺の PC 導入のない短スパン大梁は PRC（Ⅲ種 PC）として設計した。PC 梁および PC 柱の KEYPLAN を図 - 10 に、部材の諸元を表 - 1、断面を図 - 11、14 に示す。

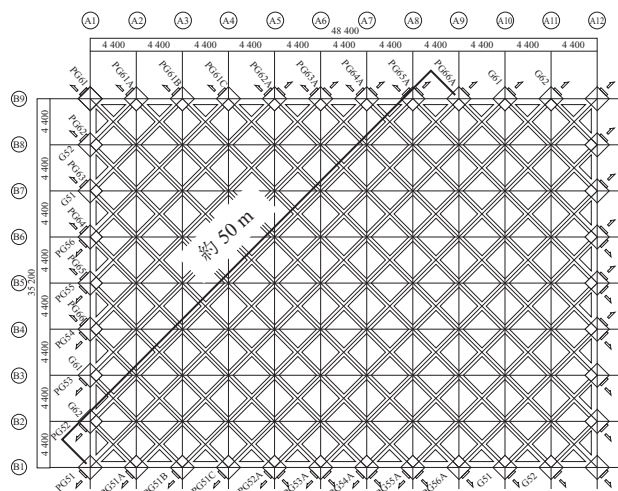


図 - 10 KEYPLAN

平面的に柱を 45 度振り、斜めに交差する格子梁であるため、複雑な納まりを立体的に検討し、大型の定着具を二方向に配置した。図 - 12 および図 - 13 に PC 定着具の納り図を示す。

プレストレス量は、1 シースあたり約 1 800 kN で、6 本を 3 ステップに分け、順々に緊張を行う。柱にも PC 鋼棒 1 本当たり約 1 100 kN で 8 ～ 9 本の緊張力を導入した。

表 - 1 PC 部材諸元

	F_c (N/mm ²)	部材断面 (mm)	PC 鋼材	作業緊張力 (kN)
梁	48	600 × 1 800	6c-10-φ 15.2	1 780
柱	48	1 600 × 1 600	8c-φ 40 (C 種) 他	1 080

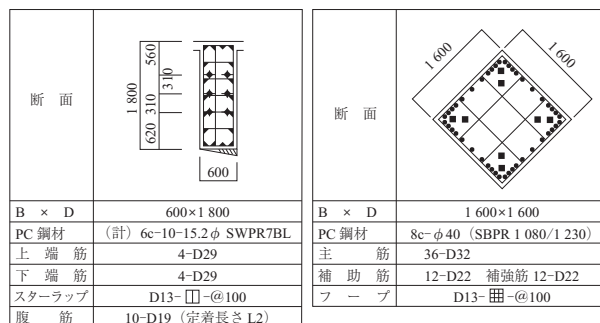


図 - 11 PC 部材断面

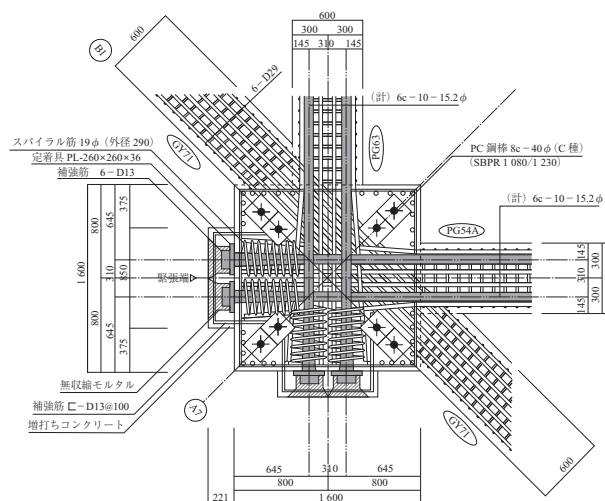


図 - 12 PC 定着具納まり図 (平面)

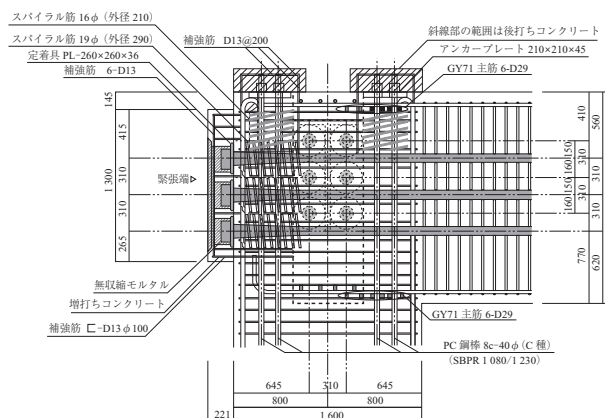


図 - 13 PC 定着具納まり図 (断面)

5.2 プレストレスの応力解析

表 - 2 組合せ応力

	設計応力の種類	状態	組合せ
①	PC 導入時応力	常時	G + X'
②	長期応力	常時	G + P + 0.85 X' + 土
③	終局強度設計用 応力	常時	1.7 (G+P) + 土
④		常時	1.2 G + 2.0 P + 土

PC 荷重図 (PG51)

図 - 15 プレストレス追加荷重 (PG51)

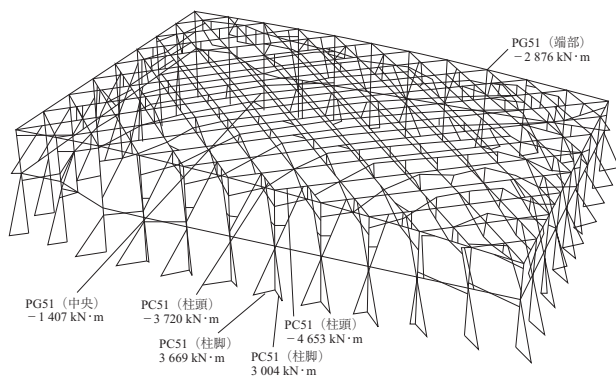


図 - 16 応力図 (プレストレス)

5.3 断面検討およびたわみの検討

プレストレス導入時応力および長期応力における PC 部材のコンクリート縁応力度を計算し、コンクリートの許容応力度を超えないことを確かめた。また、部材の終局曲げ耐力 μ_u が、終局時曲げモーメント以上であることを確かめ、安全であることを確認した。

$$\sigma_{\pm} = -\frac{N_L}{A} + \frac{M_L}{Z}, \quad \sigma_{\mp} = -\frac{N_L}{A} - \frac{M_L}{Z} \quad (\text{縁応力度})$$

$$\sigma_t = \{-\sqrt{\sigma_g^2 + 4\tau^2} + \sigma_g\}/2 \quad (\text{斜引張応力度})$$

$$f_c = 16 \text{ N/mm}^2, f_t = -0.97 \text{ N/mm}^2 \text{ (長期許容応力度)}$$

固定荷重＋積載荷重の中央最大たわみは-31.8 mm, 大梁プレストレス導入により+17.3 mm, 柱プレストレスおよび土圧応力を考慮して, 設計時弾性たわみは-17.1 mm (1/2 900) となり, 大スパンにも関わらず小さく抑えられている (図 - 17)。

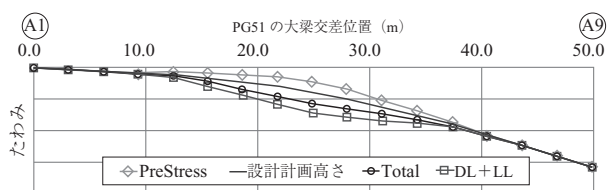


図 - 17 たわみ曲線図 (PG51)

6. 施工概要

6.1 施工計画

図 - 18 に施工フローチャートを示す。柱 PC 鋼棒と大梁 PC 鋼線を配線し、柱・梁コンクリート打設後導入時強度以上かつ材齢 28 日以上を確認後、柱 PC 鋼棒の緊張が完了してから、梁の緊張の順である。

まず、PC 鋼棒を所定の位置に確実にセットするため、頑丈な PC 鋼棒アンカー架台（写真 - 4）を柱脚に設置し、柱頭にはテンプレートを使用した（写真 - 5）。

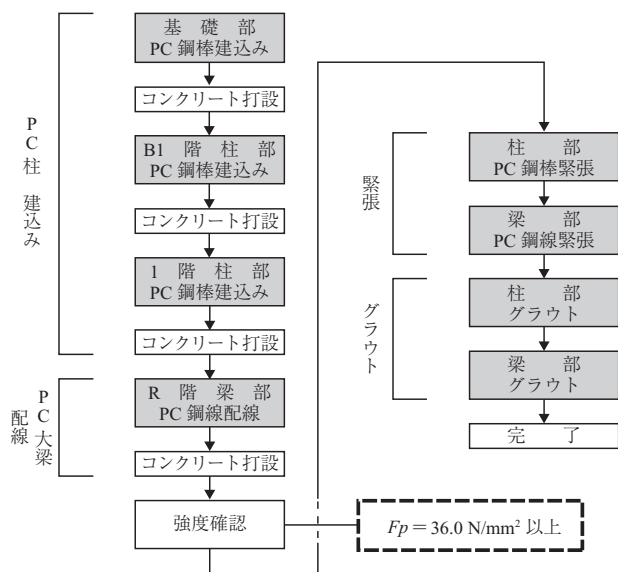


図 - 18 PC 工程フローチャート

柱の使用 PC 鋼棒の量は、 $\phi 40$ (SBPR1 080/1 280) $\times$ 38 柱（合計 308 ケーブル、37.9 トン）である。また、梁の配筋および配線がしやすいように、片側の梁側面の型枠を立て込まず、側面から作業を行った（写真 - 6, 7）。梁の使用 PC 鋼線の量は、PC 鋼より線 10 - 15.2 $\phi \times 28$ 梁（168 ケーブル、73.8 トン）である。緊張ジャッキの重量が 400 kg あり、クレーンでつり上げ設置した（写真 - 8）。

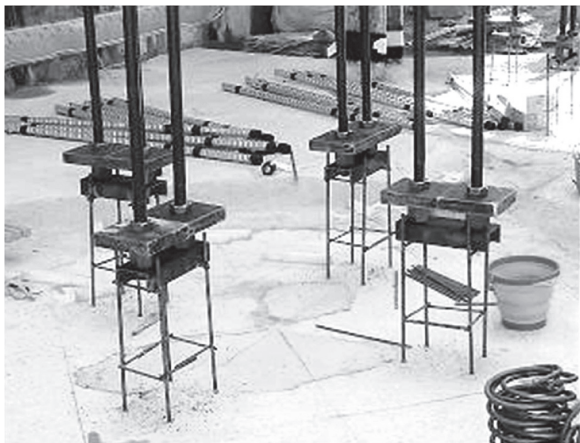


写真 - 4 PC 鋼棒設置架台（柱脚）

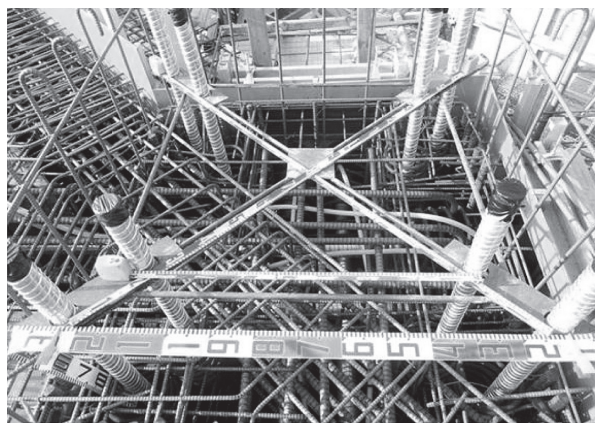


写真 - 5 PC 鋼棒設置テンプレート（柱頭）



写真 - 6 PC 梁型枠状況



写真 - 7 シース施工状況

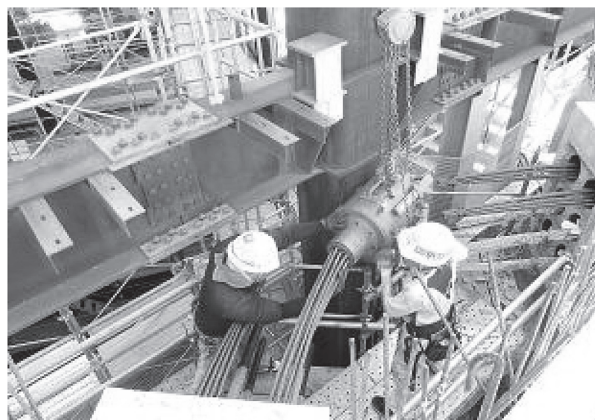


写真 - 8 緊張ジャッキ設置状況

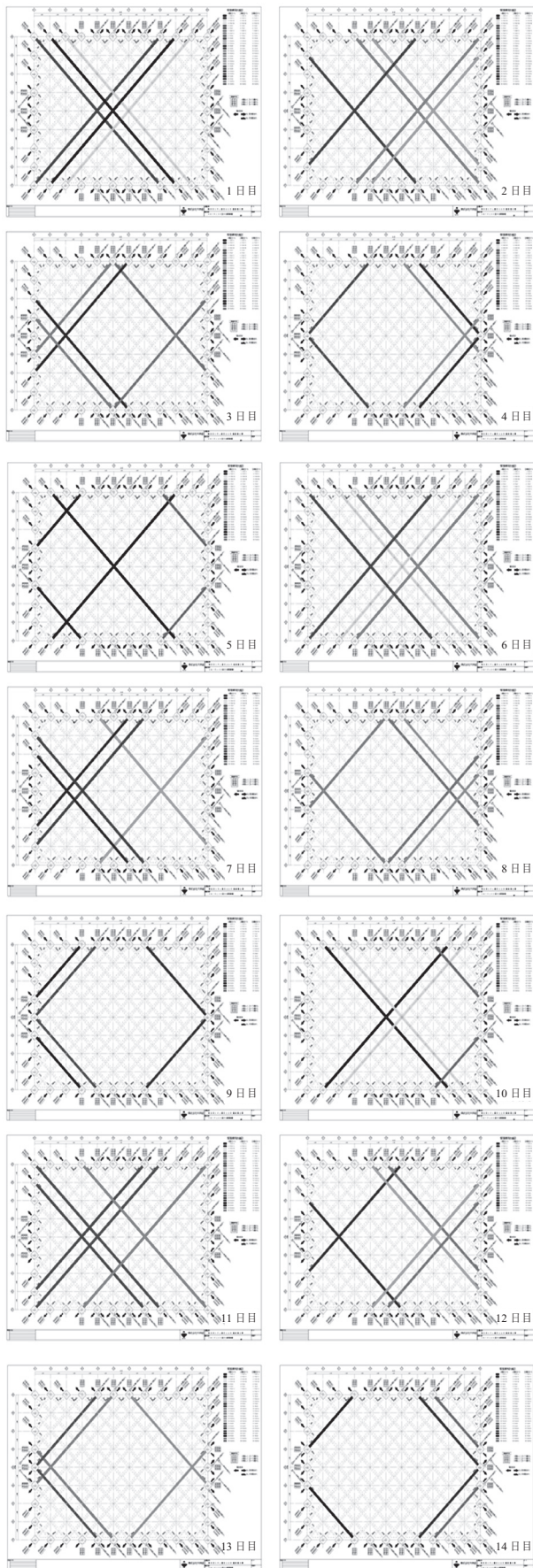


図 - 19 緊張順序施工計画 (梁 PC 鋼線)

6.2 緊張順序の検討

PC 梁のプレストレスの弾性変形は建物全体に影響を及ぼす。確認申請上の構造計算では、プレストレス導入時の検討は、すべての PC 鋼材を緊張完了した状態について行っており、PC 鋼材 1 本ごとの緊張あるいは PC 梁ごとの緊張状態についての詳細施工時解析は提出していない。

本建物は大梁が交差しており、個々の緊張計画は、他の梁のプレストレスによる変形の影響を考慮して、緊張順序を決定した。1 本の梁のみが軸変形して、隣接する梁との間のスラブにひび割れが発生するような状態は避けなければならない。一般的に、短いスパンの梁を緊張する時よりも、長い梁を緊張する時の方が他の梁への影響が大きい。今回の検討でも同様な結果となったため、長い梁から順に、対称に緊張する計画とした。1 つの梁には 1 段あたり 2 本の PC 鋼材が 3 段配置されている。1 段ずつ全体の梁を緊張したあとに、次の段の PC 鋼線を緊張し、まんべんなくプレストレスを導入させた。図 - 19 に緊張順序を示す。PC 大梁の緊張は約 2 週間で完了した。

6.3 床スラブ開口の検討

地下に埋まる計画であること、熱だまりの問題もあり、排気設備のための床開口が必要でありその影響も検討している。全体設計は有効幅を考慮した T 形梁のビーム要素としてモデル化を行って構造解析をしているため、スラブの開口による有効幅の影響および開口周辺の曲げ応力を検討した。なお、大梁断面弱軸方向の曲げを保持させるため、設計段階から腹筋は D19 を用いており、さらに柱に L2 定着長を確保している。床開口による影響検討を行った結果、弱軸方向曲げモーメントはひび割れ耐力以内であったが、安全率の余裕を確保するため、開口周辺の大梁の腹筋本数を増やすなど、弱軸方向の曲げに対して補強を行っている。

6.4 床スラブ打継目地の応力

梁断面が大きく床面積も広いので、コンクリート打設量の調整のため、工区分けが計画された。FEM 解析により、コンクリート打設工区間の床スラブ打継部のせん断力を算出した。その結果、全梁緊張完了した時点が最大となった。図 - 20 に全梁緊張時のせん断応力度コンター図を示す。打継部のせん断応力度を確認した。せん断応力度の値がやや大き目であったため、打継部のスラブ補強筋をシングル配筋ではなく、ダブル配筋とした。

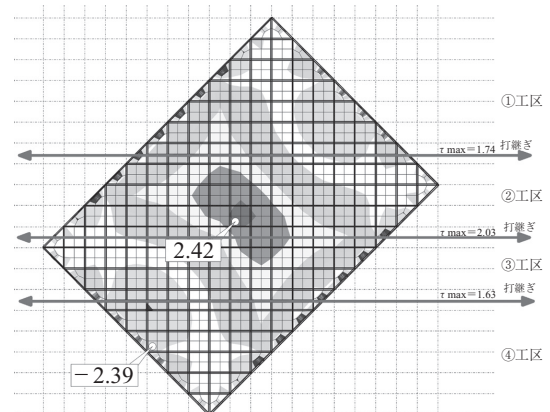


図 - 20 せん断応力度コンター図

6.5 PC 大梁のたわみの実測値

施工中、および施工後の実際のたわみを測定し、解析による計算値との整合性を検証した。解析において最大を示す位置の床スラブを、レベルにて計測した。計測時期は、①コンクリート打設後（支保工存置）②プレストレス導入後（支保工存置）③プレストレス導入後（支保工解体後）④仕上げ+積載後である。つまり①～③および①～④の値が実際のたわみとなる。③は、荷重としては躯体重量と施工荷重が作用している状態であり、緊張力としては、導入時から4週以上経っている状態である。表-3に計算値及び計測から得られたたわみを示す。

支保工解体後の実測値によるたわみは最大13mm（スパンが約50mであり、変形角では約1/3800）であり、計算値のプレストレス導入時と設計時の弾性変形の間の値をとっている。コンクリートのクリープや乾燥収縮によるプレストレスの減退、コンクリートの剛性の減少を考慮すると、実測値は計算値の範囲内にあって妥当と考えられる。

また、施工後の仕上、積載荷重後のたわみは31mm（スパンが約50mで変形角は約1/1600）であり、計算値の設計時の弾性変形と長期たわみの間の値をとっている。実測値は計算値の範囲内にあって妥当と考えられる。

表-3 PC 大梁のたわみ

	計算値	③実測値	計算値	④実測値	計算値
	プレストレス 導入時	支保工 解体後	設計時 弾性変形	仕上 積載後	長期 たわみ
変位	-4.9 mm	-13 mm	-17.1 mm	-31 mm	-88.1 mm
鉛直荷重	D.L	D.L + 施工荷 重	D.L + 仕上げ + L.L	D.L + 仕上げ + L.L	D.L + 仕上げ + L.L
有効率 η	1.0	-	0.85	-	0.85
変形増大率	1.0	-	1.0	-	5.1

6.6 暑中グラウト

JASS5では、日平均気温の日別平滑平年値が25℃を超える期間を暑中と定義している。暑中時期には、グラウトの硬化が早く閉塞が発生しやすいため、充填不良を起こさないよう配慮と対策が必要とされる。当現場のグラウト施工時期は8月で、毎日気温30℃を超えており、暑中グラウトの条件下であるため、グラウトの練上り温度が35℃を超えないような対策を施す必要があった。そこで、以下2点の対策をとり温度管理を行った。

- ①練り場全体にテントを張って日陰を作り、グラウト材および注入機材に直射日光が当たらないようにする。
- ②氷と投げ込みクーラーを使用し、練混ぜ水の温度を下げる（写真-9）。

投げ込みクーラーは、前日からタンクに投入しておき、水温は16℃ほどにまで下がった。グラウトの練上り温度も35℃以下に抑えることができた。



写真-9 グラウト練場施工状況

7. おわりに

建築計画上の要求事項である地下水圧と天井高さ制限に対し、PC格子梁により、梁せいの低減と意匠性、新規性、空間の広さを感じられる、程よい重厚感のあるダイナミックな空間を創出することができた（写真-10）。

施工に関しては、支保工解体前のプレストレスによる応力制御の段階において、適正な緊張順序の設定や、工区分けしたスラブ打継部の検討など、施工段階に合せた綿密な計画の策定と実施が行われた。

施工後のたわみ実測においても、屋上の緑化荷重などの重量仕上に対して、躯体完了時からの増加量が予測の想定内での変形レベルであることが確認でき、適正かつ緻密な施工が行われたことを証明できた。

おわりに、建築主である西日本シティ銀行関係者を始め、PC造の設計・施工にあたり、ご尽力いただいた関係各位に感謝する次第である。



写真-10 体育館内観写真

【2017年5月11日受付】