

マルチストランド工法を用いた長大スパンのボイドスラブの施工

—早稲田中学校・高等学校 興風館建替工事—

東京建築支店	建築工事部	大根田直之
建築本部	構造設計部	橋本航太郎
建築本部	構造設計部	今村雅泰

概要: 一般的に、プレストレスによるボイドスラブには、シングルストランド工法が用いられ、スパンも 12~15m 程度が最大となっている。本建物においては 40.5m 桁行方向スパン×22.5m 張間方向スパンを実現するために、床厚さ 800mm として、ジョイストスラブのように小梁状に敷き並べたボイドスラブとすると共に、プレストレスの導入に際しては、マルチストランド工法が採用された。また、重層に連なるスラブの施工に対しては、3 層受けによる検討が為され、施工工程の短縮にも寄与している。

Key Words: PC ボイドスラブ, 長大スパン, マルチストランド工法

1. はじめに

本建物の体育館（興風館）は築後 38 年が経過しており、生徒の安全確保、教育環境の更なる向上を図る観点から、将来を見据えて建替を行うこととされ、創立 125 周年記念事業として位置づけられた。3,000m² を超える新たな運動スペースの創出のため、屋上に新設の運動スペースを設けるほか、集会に利用するホールをスポーツ施設にも兼用できるよう設計されている。そのため、プール、図書館、食堂、集会ホール兼運動スペース、柔剣道場、アリーナおよび屋上運動スペースが積層に積み重ねられた体育館とされた（図-1）。

なお、それらの施設には大空間が必要であり、40.5m×22.5m の無柱空間を構築する必要があったため、張間方向スパン（22.5m）にはプレストレストコンクリート造（以下、PC 造）が採用された。また、比較的階高を抑えることが可能な PC ボイドスラブを採用することが一般的であるが、通常シングルストランド工法によるアンボンド PC ボイドスラブでは、12~15m スパンが最大である。そのため、本建物では床厚さ 800mm としたジョイストスラブ状に小梁を敷き並べた一方のボイドスラブとし、マルチストランド工法（PC 鋼より線：12S12.7mm）を用いることで、前述の大空間が実現されている。

また、2 階（2 層吹き抜け）、4 階および 5 階による重層に連なる PC ボイドスラブの施工に対しては、当初は全層支保工受けにて計画されていたが、施工工程の短縮を鑑みて、施工時の検討を行ない 3 層受けによる施工を実施した。



大根田直之



橋本航太郎



今村雅泰



図-1 建物断面概要 (引用：早稲田中学校・高等学校 HP)

2. 建築概要

建築主：学校法人早稲田高等学校
 所在地：東京都新宿区馬場下町 62
 設計・監理：株式会社佐藤総合計画
 施工者：株式会社安藤・間
 PC 施工：株式会社ピーエス三菱
 構造：RC 造, SRC 造, S 造
 用途：教室・図書館 (3 号館),
 体育館 (興風館)
 建築面積：2,237.38m² (3 号館, 興風館)
 延べ面積：11,497.75m² (3 号館, 興風館)
 階数：地上 6 階, 地下 1 階
 最高高さ：32.65m



写真-1 建物外観 (引用：早稲田中学校・高等学校 HP)

3. 構造計画概要

張間スパン 22.5m の PC ボイドスラブは、桁行スパンのモジュール 4,500mm を 8 分割した @562.5 による小梁状の PC ユニットとして設計された。全スラブ厚 800mm に対し、1 ユニットの部材幅は 250mm であり、ボイド部の上下に 120mm 厚の薄スラブが配置されることで、中央断面では I 形の PC ユニットとなっている (図-2)。PC 鋼材は 1 ユニット当たり 1c-12S12.7mm が配置され、断面 250mm×800mm 内には、梁形のように上下主筋およびせん断補強筋が配置された。端部ではせん断力伝達のため、ボイド部がなく全スラブ厚 800mm の矩形となっている。

符号位置	PS80		
	Y1端	中央	Y6端
2. 4. 5 階			
PC 鋼材	⊕ 1c-12-12.7mm (SWPR7BL)		
上端筋	2-D19<6-D29>	2-D19	2-D19<5-D25>
下端筋	2-D19<6-D29>	2-D19	2-D19<5-D25>
S T P	2-D13@100	2-D13@100	2-D13@100

※ < >内は柱部に定着する配筋を示す。
 ※ 柱部以外の配筋は中央の配筋と同等とする。

図-2 PC ボイドスラブ断面リスト

PC ボイドスラブ 40.5m×22.5m には、50～66本の 12S12.7mm の PC 鋼材が配置されており、配線形状はスラブ中央部に生じる曲げ応力をキャンセルするように曲げ上げ配線が為されている。定着部に関しては Y1 通りが建物の外部に面しており、写真-1 から分かるように意匠的に施された鋸状の斜め壁が配置されているため、建物内部の Y6 通り側に緊張端を設けることにより、緊張端の後埋めモルタル部などが外部に露出しないように配慮されている。なお、緊張端が建物内部に設けられることで隣接するスラブと緊張用機器が干渉することがあり、一般的にはスラブを後施工する機会が多いが、本建物の場合には隣接するスラブ下で緊張を行なう納まりとなっており、緊張後の後工事を極力少なくするように配慮されている。また、定着具が配置される Y1 通り、Y6 通りには桁行スパン 4,500mm ごとに柱が配置されているが、本建物の柱が SRC 造であり鉄骨と定着体の納まりが厳しいことや、柱の後方に大梁が取り付くことで、緊張空間を確保しなければならないため、柱内に定着具を設けることを避けた。そのため、定着側端部では柱を避けるように水平方向に PC 鋼材を曲げて桁方向の梁に定着具を収める配線形状とされた (図-3、図-4、写真-2、写真-3)。

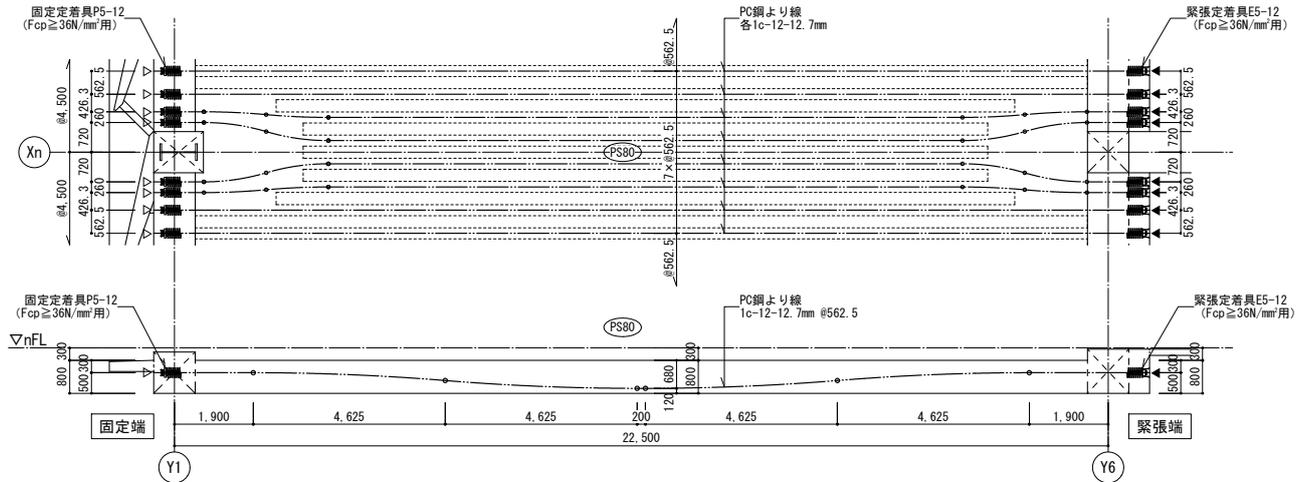


図-3 PC ボイドスラブ配線形状

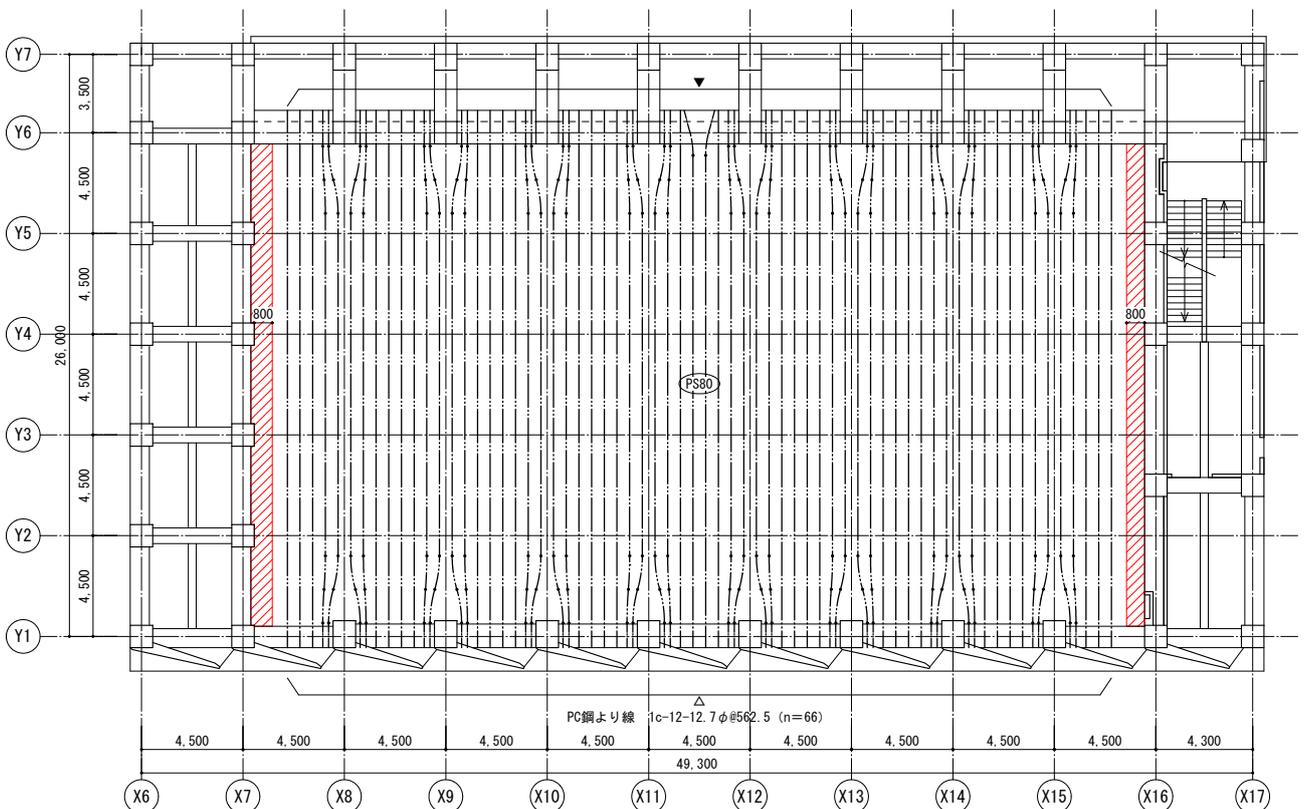


図-4 PC ボイドスラブ KEYPLAN

一般的にスラブはX方向、Y方向ともに梁に囲まれているため、概ね端部に生じる跳ね上がりモーメントは辺長にわたり一定であるが、当該スラブに関してはX方向に前述の柱が配置されていること、また、一方のボイドスラブであることから、柱端部においてスラブ上端の曲げモーメントが過大になる。そのため、当該部分には柱内へ定着する太径の鉄筋が配置されており、前述の曲げモーメントに対して配慮されている。

また、プレストレスの導入に際して、比較的導入プレストレス力が大きいことから、X7およびX16通りの構面による拘束が生じる可能性がある。そのため、プレストレス導入時にはPCボイドスラブとX7およびX16構面とは縁を切るように後施工範囲800mmが設けられており、PCボイドスラブに適切なプレストレス力が導入されるよう配慮されている（図-4ハッチング範囲）。

その他、本建物の1階の床梁には18mスパンにおいて6台のPC梁が採用されており、断面500~700mm×1,000mmにPC鋼材4c-12S12.7mmが配置されており、1階の図書館による荷重を支持している。



写真-2 配線施工状況



写真-3 PCボイドスラブ全景

4. 施工

4.1 配線作業

本建物における配線作業の手順は、コンクリート工事においてボイド下端面までの120mm厚を打設・硬化後に角型ボイドを設置し、その後にスラブ天端面まで打設したことを除いては、ボイド間に梁形（幅250mm×せい800mm）の配筋が組まれるため、一般的な場所打ちPC梁と同様の計画とした。

ケーブル通線はクレーンを用いて行なった。張間スパン22.5mに直交する梁のバックスパン側からケーブルを通すと、通線作業時に近傍のスラブ型枠とケーブルが接触して型枠を傷める懸念があったため、PCボイドスラブ固定端側の梁形上端筋を鉄筋ジャッキにて一時的に拡張したスペースから1本ずつ吊り下ろして行なった（写真-4）。PCボイドスラブ構築の手順は以下の通りである。

- (1) スラブ型枠の設置
- (2) スラブ型枠にケーブルホルダー位置の墨出し
- (3) スラブ外周梁の配筋
- (4) スラブ下端、梁形（上端筋を除く）の配筋
- (5) 緊張定着具の設置、シースの配管
- (6) PCケーブルの通線、固定定着具の設置
- (7) 梁形上端、キャップタイの配筋
- (8) ボイド下端面までのコンクリート打設
- (9) ボイドの設置
- (10) スラブ上端の配筋
- (11) スラブ天端面までのコンクリート打設

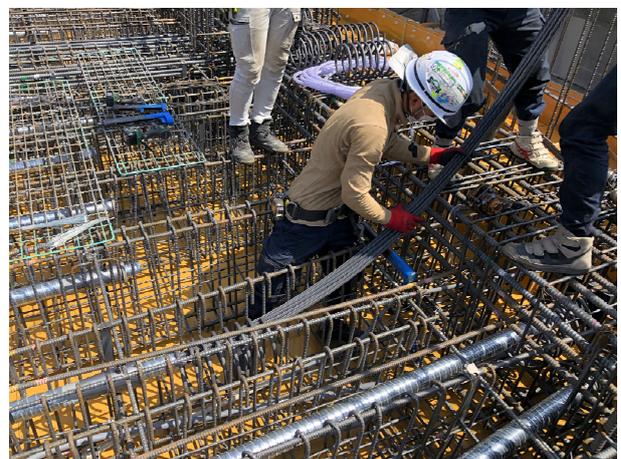


写真-4 ケーブル通線状況

4.2 ケーブルホルダー

本建物におけるケーブルホルダーの配置箇所数は、2、4、5 階全体で 3,600 箇所余りに上る。梁形がボイドで区切られているため、1 組のケーブルホルダーで複数のケーブルを保持することは不可能だった。2 階の施工では、一般的なフラットバータイプ（写真-5）をメインに用いたが、施工効率の悪さと箇所数の多さに相当の労力を費やした。

そこで、設置作業の効率化とケーブル保持の確実性を両立すべく 4 階では、D13 の大小 2 本をト形に溶接加工したものを製作した。ケーブルホルダーの配置に際しては 2 個 1 組を上下の梁主筋に結束し、かつ H 形になるよう互いを結束する方式をとった（写真-6）。本方式により 2 階施工時に比べて幾分施工性が改善されたが、2 個 1 組でなく 1 個だけでもケーブル保持に必要な強度があることを確認したため、配置箇所数をさらに減らす方法を思案した。

最終的に 5 階では、ト形による単独での回転が懸念されたため、ト形頂部に短い鉄筋の溶接加工を行ない、梁上端鉄筋と結束することによってケーブルホルダーの回転を防止し、最終形として製作した（図-5、写真-7）。本形状により機能性を損なうことなく、1 箇所当たり 1 本の設置で済むようにし、ケーブルホルダーの折れや回転、位置ずれといった不具合が生じることなく、作業時間の短縮を実現することができた。

固定定着具の設置においては、本建物での設置位置は直交梁内であったことから、一般的な仕口内設置の固定方法でなく、ケーブルホルダーと同様にト形加工品を用いる計画としたことで効果を発揮した。

よって、本建物のように梁幅が小さく、保持するケーブル数が少ない場合のケーブルホルダーや、固定定着具の梁内設置用の控えとして有効な方法と考える。



写真-5 ケーブルホルダー（フラットバー）

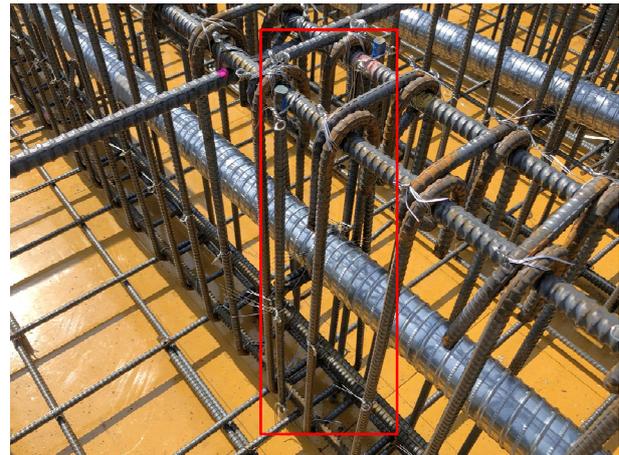


写真-6 ケーブルホルダー（H形）

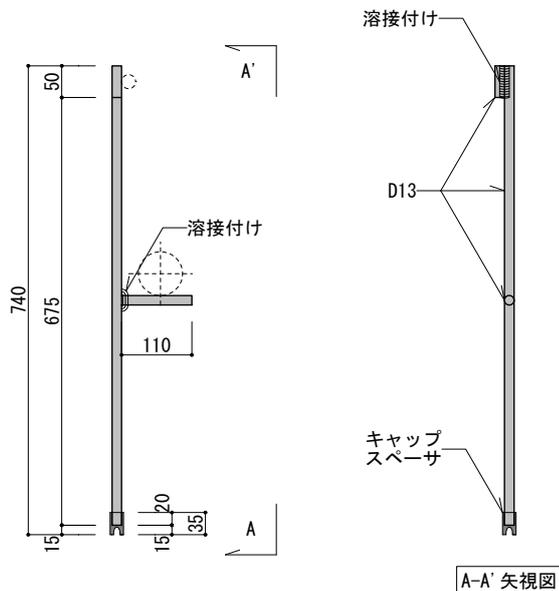


図-5 ケーブルホルダー（ト形）

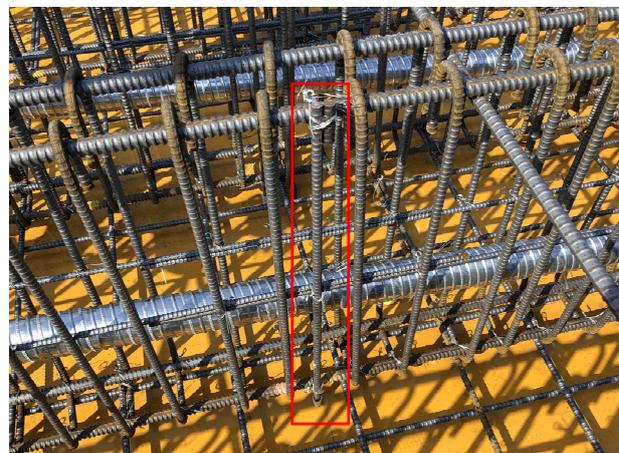


写真-7 ケーブルホルダー（ト形）

4.3 緊張順序の決定

緊張順序を決定するにあたり、プレストレス導入による軸縮み変形を確認した。桁方向の柱一柱間 (@4,500) 部分をひとつの梁と仮定して検討を行なった。判定基準は、面内せん断変形角が、面内せん断変形によるひび割れを生じる可能性のあるひずみ ($\gamma=1/3,500$) 以下とした。検討の結果、一度に緊張可能なケーブル本数は桁方向の柱一柱間あたり 4 本までと算出されたが、安全側の配慮として 1 本減じた 3 本としたことで、せん断ひずみ γ は 1/5,000 以下に収まっている。

また、局所集中的にプレストレスを導入することのないように、緊張するケーブルは少なくとも 1 本置きとなるよう緊張順序を決定した。なお、桁方向の柱一柱間あたり 8 本のケーブルが配置されているため、1フロアの緊張作業は、緊張機器を 1 往復半移動させながら行なった (図-6)。

本緊張順序により、プレストレス導入による面内せん断変形によるひび割れは、いずれの階層においても生じなかった。

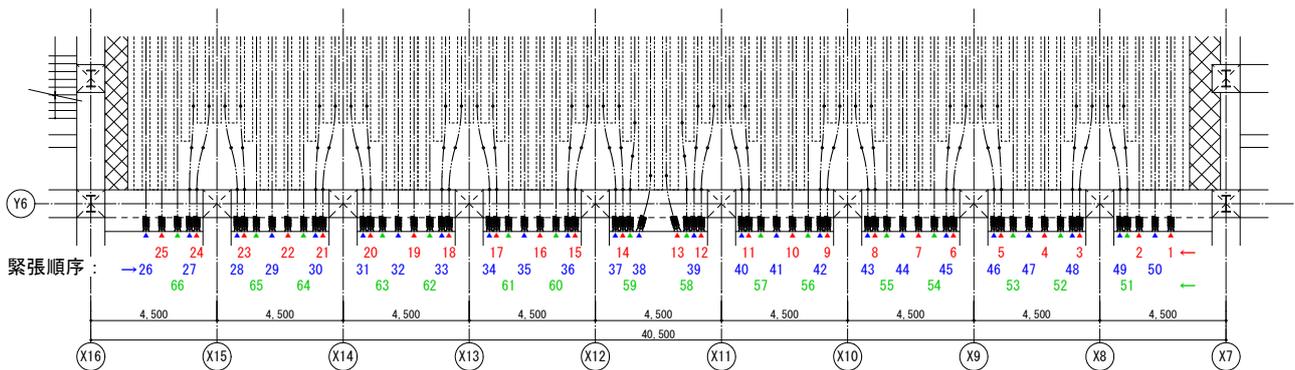


図-6 緊張順序

4.4 スラブ下部での緊張

本建物の PC ボイドスラブは、緊張端位置が建物内部である Y6 通り側の直交梁側面にあたるため、隣接するスラブの下部にて緊張作業を行なった。緊張に際しての懸念事項として、スラブ下端面からケーブル芯までが 420mm と狭く、緊張ジャッキの設置方法を計画する必要があった。

通常スラブ下部での緊張は、スラブ部分に後打ち箇所を設け、緊張ジャッキを吊り下げて施工するか、ハンドリフターを使用し緊張ジャッキを迫り上げて行なう。しかしながら、本施工ではスラブを後打ちする設計でなく、かつ緊張作業本数が多く、緊張順序による緊張機器の移動も多いことから、工程を加味して一般的に効率の良い、緊張ジャッキを吊り下げて施工する方法で計画した。

吊り下げ用チェーンブロックの揚程, 吊り元位置と吊り下げ用資材, ジャッキ設置用移動ローラーの選定, ジャッキ引き込み時および取り外し時の方法など, 設置用設備から作業手順を一連に計画することで, 工程内にて安全に作業を行なった (図-7, 写真-8)。

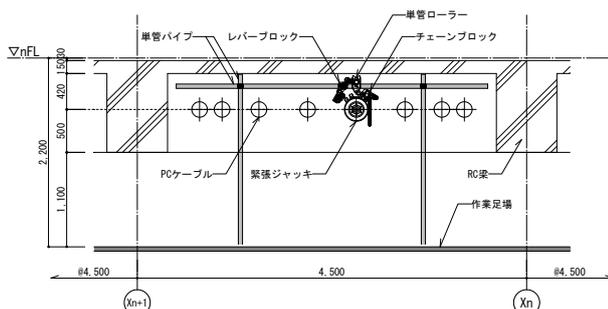


図-7 緊張ジャッキ設置方法 (緊張端正面より)

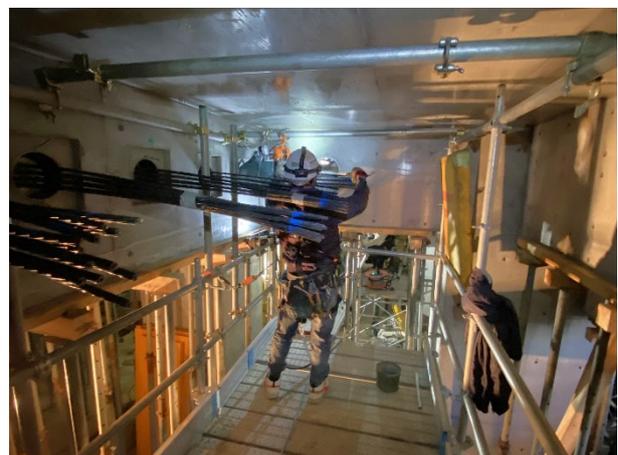


写真-8 スラブ下部での緊張状況

4.5 緊張管理方法

本 PC ボイドスラブは、緊張端における緊張空間を確保するため、スパン端部付近で柱を避けるように水平方向に曲げられた配線形状となっている(写真-9)。柱近傍のケーブルは、鉛直方向のライズに加えて前述のような平面的な曲がりがあることにより、累積角度変化 $\Sigma \alpha$ が大きくなることが緊張計算から判明した。

PC 規準¹⁾や JASS5²⁾において、 $\Sigma \alpha$ が大きい配線形状の緊張管理は、PC 建協発刊の「プレストレストコンクリート工事における緊張管理の手引き(建築編)³⁾」に記載の「7%管理」が提案されており、当該部分は7%管理に則り緊張管理を行なう計画とした。

導き出された緊張圧力と伸び管理値を元に緊張作業を実施し、当該部分 88 本のケーブル全てに所定のプレストレス導入を行なった。



写真-9 柱近傍で曲げられた配線形状

5. 3層受けに対する施工時検討

B1 階に設けられるプールの仕上げ工事を早期に実施するため、当該階の支保工解体を4階の PC ボイドスラブへのプレストレス導入後、5階の PC ボイドスラブのコンクリート打設前に行なう必要があった。

施工時検討による応力の算出を(株)安藤・間の技術部にて汎用プログラム Midas iGen (マイダス IT ジャパン)により行ない、モデルは X 方向 2 スパン (@4,500×2=9,000mm)、Y 方向 22,500mm にて1階柱から5階床までとし、支保工の配置計画を元に、その剛性を評価して検討された。

判定基準としては、2階および4階の PC ボイドスラブ(3階は吹き抜け)において、施工時応力および変形量が、原設計による設計時応力および変形量以下であること、また、1階の PC 梁および支保工を受ける RC スラブに対しては、施工時の縁応力度以下および中期(長期と短期の間)許容応力度以下であることとし、確認を行なった。一部、PC ボイドスラブにおいて設計時応力を超える箇所については、施工時の縁応力度以下であることを検討し、施工時荷重に対する安全性を確認した。

以上の検討により、2階および4階の PC ボイドスラブのプレストレスを導入することで、5階床のコンクリート打設前に B1 階の支保工を解体することは問題ないと判断され、施工時工程の短縮が図られた。施工時の支保工設置状況を写真-10, 11 に示す。



写真-10 B1階支保工



写真-11 2階支保工全景

6. まとめ

本建物では、40.5m×22.5m の無柱空間を構築するために PC 造によるボイドスラブが採用された。PC ボイドスラブにはマルチストランド工法を用いることで、一般的なアンボンド PC ボイドスラブに用いられるシングルストランド工法よりも大きなスパンを飛ばすことを可能とし、階高を抑えつつ前述の大空間が実現されている。

配線工事においては、周辺のスラブ型枠を傷めないように配慮した通線方法の計画を行なったほか、小さい梁幅かつ保持するケーブル数が少ない場合に特化したケーブルホルダーを製作することで作業効率化を図った。

緊張工事においては、緊張箇所が一部分に偏ることのないような緊張順序の検討によりスラブ面内せん断変形に起因するひび割れ発生を防止し、ケーブル配線形状に適した緊張管理方法を選定することで、構造上必要な品質の確保に努めた。

重層に連なる PC 造部分の支保工計画においては、当初は全層支保工受けにて計画されていたが、3 層受けによる応力および変形量の検討を行なうことで品質安全性を確認し、早期に支保工解体を実施して工程の短縮を図った。

以上より、PC 工事期間全体を通して安全かつ合理的に施工を進めることができた。

最後に、本建物の PC 工事にあたり、ご指導を頂きました佐藤総合計画様および安藤・間様ほか、ご協力いただいた関係者各位にこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，2022.3
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2022.11
- 3) プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレストレストコンクリート工事における緊張管理の手引き（建築編），2019.12