

栃木県総合運動公園陸上競技場の設計・施工 — 県産部材でつくる 3 次元形態 PC 架構 —

奥野 親正*¹・山崎 慎介*²・井上 啓*³・藤森 啓祐*⁴

栃木県宇都宮市に建つ屋根架構と観客席スタンドを一体化したスタジアムに対して、スタンド架構は、プレキャスト鉄筋コンクリート（PCaRC）とプレキャストプレストレストコンクリート（PCaPC）を主体としている。PCaRCは1階躯体に用い、在来工法を併用する架構としており、PCaPCは2階以上のスタンド躯体に用い、部位によって工場製作と現場製作を使い分けている。工場製作のPCa部材の大部分は栃木県内工場で製作し、地組した大ブロックを一括建方工法により施工している。

キーワード：PCaRC, PCaPC, 現場製作 PCa, 工場製作 PCa, 圧着, 大ブロック化一括建方工法

1. はじめに

本建築は、栃木県の総合スポーツゾーン整備の主要施設として整備される、陸上競技場（第1種公認）兼天然芝サッカー場（Jリーグ施設基準）で、全席屋根付きのスタジアムである。

本報告は、屋根架構と観客席スタンドを一体化した大規模スタジアム（図 - 1, 2）に栃木県内で工場および現場において製作したプレストレストコンクリート（PC）部材を用いた設計と施工の事例紹介である。



図 - 1 鳥瞰パース

2. 建築概要

建 築 主 : 栃木県
建築名称 : 栃木県総合運動公園陸上競技場
建築場所 : 栃木県宇都宮市西川田 2 丁目
主 用 途 : 観覧場
建築面積 : 20 041.77 m² 延床面積 : 42 168.47 m²
階 数 : 地上 4 階 最高部高さ : 33.730 m
設計・監理 : 久米・AIS・本澤特定建築設計共同体
施工者(建築) : 鹿島・増渕・渡辺・那須土木
・磯部・浜屋 JV
工 期 : 2017 年 4 月～2019 年 11 月



図 - 2 内観パース



*1 *Chikamasa OKUNO*

(株) 久米設計
構造設計部



*² *Shinsuke YAMAZAKI*

(株) 久米設計
構造設計部



*³ Akira INOUE

(株) 久米設計
構造設計部



*4 *Keisuke FUJIMORI*

鹿島建設(株)
関東支店

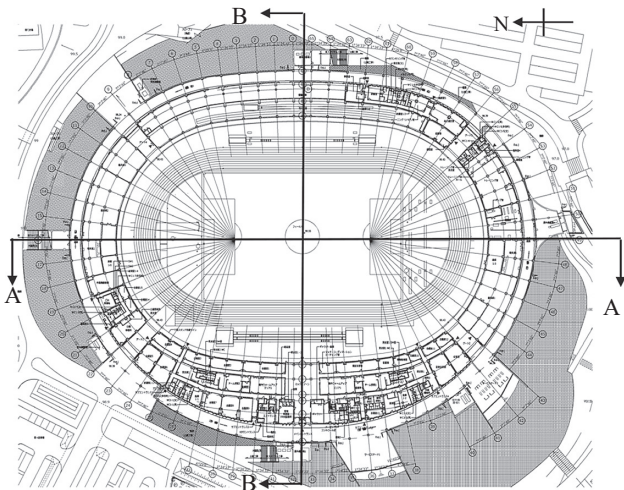


図 - 3 1 階平面図

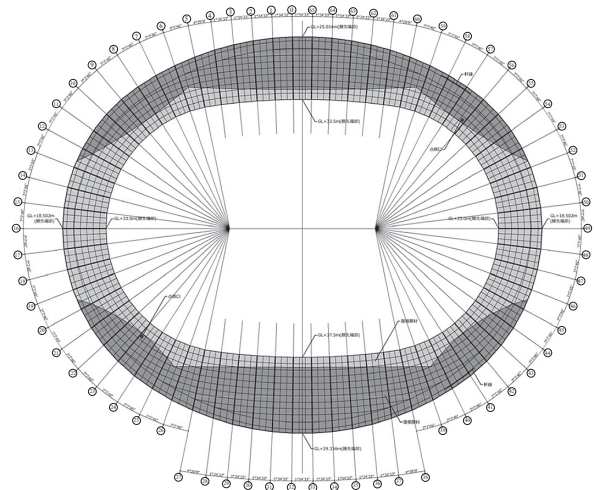


図 - 4 屋根平面図

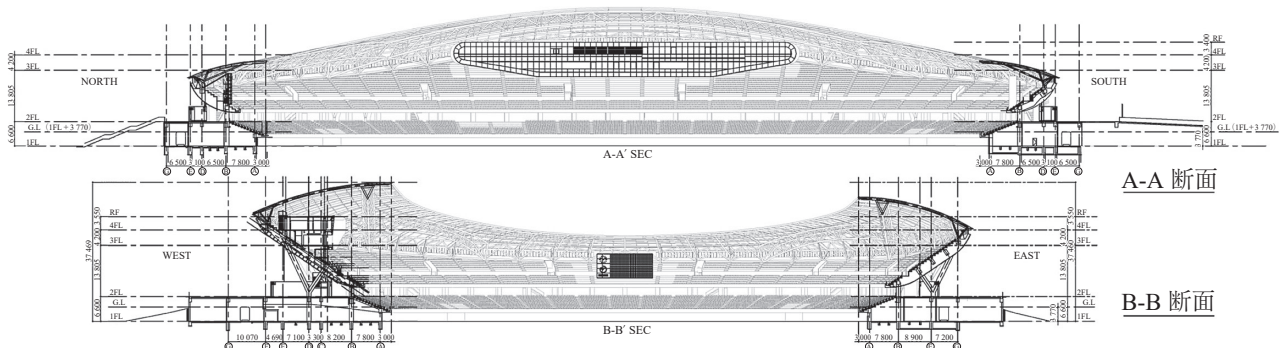


図 - 5 断面図

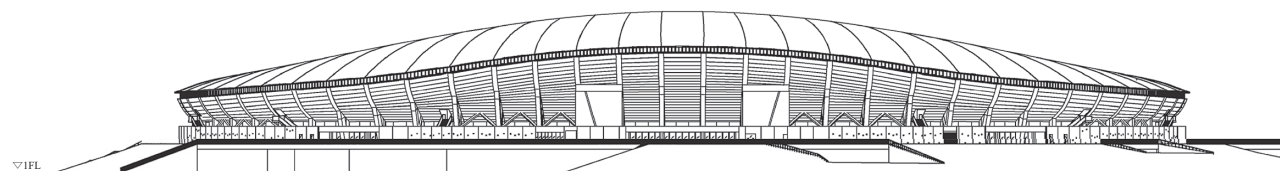


図 - 6 西立面図

3. 建築計画

スタジアム周囲は緑の丘として景観に配慮し、緩やかな曲面の大屋根で覆われた軽快で象徴性のある外観とした。観客席は全席屋根付きの 25 000 席、勾配を最大 35 度に設定し、観客席とフィールドとの距離を近づけることで、一体感を演出し、競技場の躍動感や臨場感を高める計画とした。

平面は競技場という特性から約 210 × 260 m の楕円に近い形状としている（図 - 3）。屋根は、スタンドの平面をほぼそのまま立ち上げた形状として客席全面を A 種膜で覆う計画としている（図 - 4）。スタンドのプレキャスト（PCa）段梁と PCa 床板を現しとしたコンクリートの素地を生かした立面で、建築全体がお椀形となっている（図 - 5, 6）。建物配置については、南北軸の採用により日照時間を最大限得られる計画としフィールドへの通風を考慮した。スタジアムの形態決定にあたっては、天然芝の育成

に必要なフィールドの日射量や通風、観客席からの視認性など、さまざまなシミュレーションによる検討を重ねた。さらに、多様な曲線で構成される 3 次元構造の実現のため、コンピュータによるパラメトリックデザインを行い、意匠・構造・設備が一体となった、より最適解を探った。

4. 構造計画概要

- 基礎 : 直接基礎、および 杭基礎
- 架 構 : 鉄筋コンクリート造、および、
プレストレストコンクリート造
鉄骨造（屋根）
- 耐震壁 : 鉄筋コンクリート造
- ブレース : 制振パネル付き鉄骨造ブレース
- 床 : 鉄筋コンクリート造
プレキャストプレストレストコンクリート造
スラブ（ST 版）

5. 構造設計概要

架構は、観客席を受けるスタンド下部架構と屋根架構が相互に作用する安定した構造を目指した。

構造架構概要の断面図を図 - 8 に示す。屋根は緩やかな曲面をもった形態をアーチ効果として利用した 6 枚の桁の葉を重ねたイメージのトラス構造としている。この桁の葉をかたちどる位置に最大 160 m のアーチトラス（鉄骨トラス）をメイン、バックスタンドに 3 本ずつを交差させて配置した。アーチトラスから延びる屋根先端片持ち H 形鋼梁と、南北スタンドからの片持ちトラス架構をフィールド側の先端周方向鋼管梁で結合してコンプレッションリングとすることで屋根を一体化して変形抵抗性を向上させている。

アーチトラスから放射状に作用するスラスト力は、スタンド上部の外周鉄骨リングトラスを介してお椀形状の PCaPC 造スタンド架構に伝達し、スタンド周方向の現場緊張のリング状の PCa 梁にて力学的に自己完結した形態とした。これらのアーチ効果を利用した屋根とスタンド架構は一体化され、力学的に合理的な構造としている。スタジアムの全景を写真 - 1 に示す。

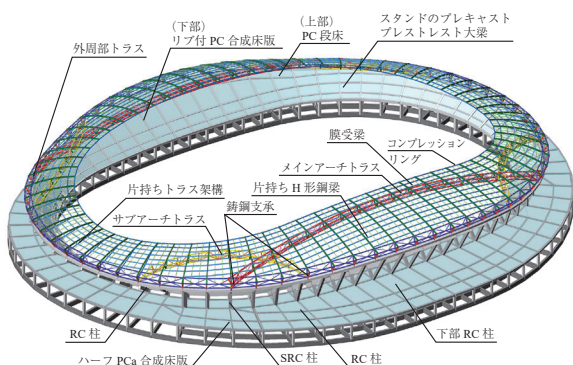


図 - 7 構造架構概要

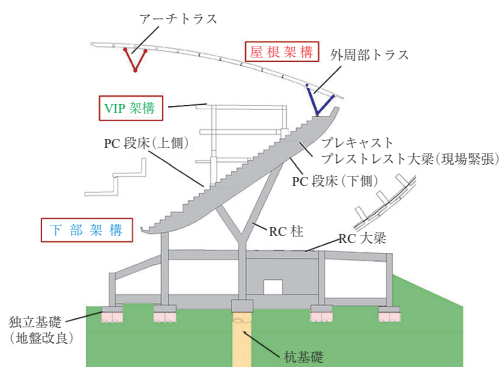


図 - 8 構造架構断面図



写真 - 1 スタジアム全景

5.1 屋根の構造計画

アーチトラスは、トラス成約 3 m の三角形断面としメイン、バックスタンドに 3 本ずつを交差させて配置している。メイン、バックスタンドのメインアーチはそれぞれスパン 161.2 m、140.9 m でライズスパン比 10 : 1.12 とし、スタンド上部の外周リングトラスに接続している。屋根先端までは、アーチトラスからの H 形鋼の片持ち梁として膜屋根を支持している。屋根スパンの比較的小さい南北の部分は、外周トラスからの片持ちトラスによる架構を周方向の梁部材で結合した架構としている。これらの屋根架構を先端のコンプレッションリング（φ 400 mm）で結合している。メインアーチトラス脚部からの大きな鉛直力は鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）造柱により支持している。スタジアム内観を写真 - 2 に示す。



写真 - 2 スタジアム内観

5.2 スタンド下部架構計画

屋根と一体化したスタンド下部架構（以降、下部架構）は、耐震壁の適切配置により構造体の剛性を高めた架構としている。構造種別は、鉄筋コンクリート造（RC 造）とし、耐震壁付きラーメン構造としている（図 - 8）。

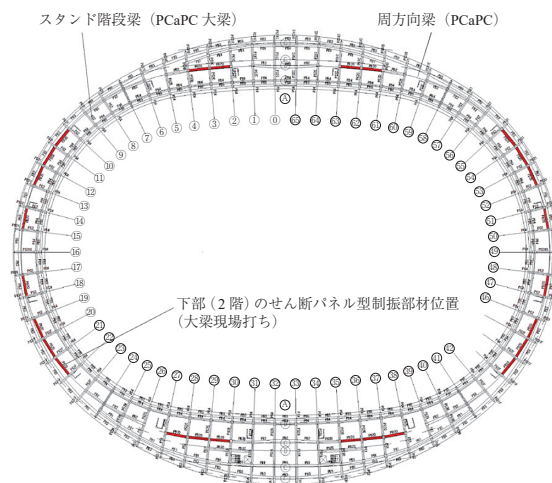
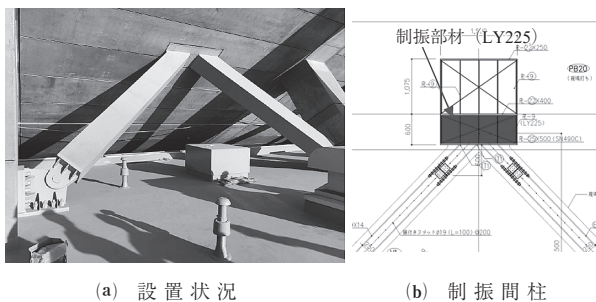


図 - 9 3階梁伏図

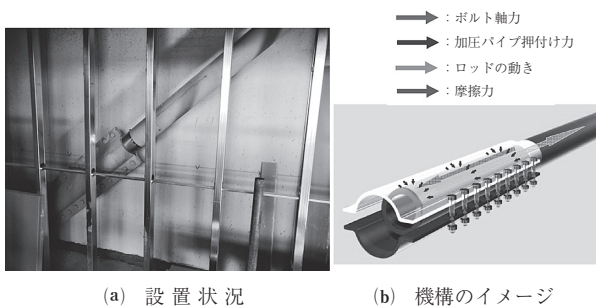
基礎および 1 階の架構は現場打ちコンクリートを主体とし、2 階の内側に配置されたスパンの短い柱は現場製作のプレキャスト鉄筋コンクリート（PCaRC）、RC 壁が取りつく柱や斜めの V 字柱は現場打ちコンクリートとした。3 階のスタンド部分は、放射方向梁（PC 段梁）を工場製作のプレキャスト梁、周方向梁を現場製作のプレキャスト梁とし、現場緊張の圧着接合により一体化した PCaPC 造梁としている。スタンド部分の客席の床となる段床は工場製作の PCaPC 造とし、PC 段梁の下面は工場製作のリブ付き

ハーフ PCa 床版とし、このハーフ PCa 床板と PC 段梁を現場打ちトップコンクリートにより一体化している。2 階周方向には制振部材を配置 (26 か所) して大地震時のエネルギーを吸収し建物の耐震性の向上と屋根架構への水平力の低減を図っている (図 - 9)。この制振部材は、逆 V 字として頂部に鋼板 (LY225) を配置したシアリンク型せん断パネル形式として短期荷重時を超える地震時に対して有効としている (図 - 10)。また、4 階の VIP 部分の架構は、鉄骨造とし、長辺方向を純ラーメン構造、短辺方向をブレース付きラーメン構造としている。長辺方向の両端部分は 22.3 m 跳ね出したトラス架構部には、地震時に対して鋼管摩擦型ブレースダンパー (片側 4 か所、計 8 か所) を設置し、上下振動を抑制している (図 - 11)。なお、鋼管摩擦型ブレースダンパー (付加制振) は、静的解析において考慮しなくとも構造安全上問題がない設計としている。



(a) 設置状況 (b) 制振間柱

図 - 10 セン断パネル型制振部材



(a) 設置状況 (b) 機構のイメージ

図 - 11 鋼管摩擦型ブレースダンパー

6. PCaPC の概要

6.1 PCa 部材

本建築で使用している PCa 部材を表 - 1 に示す。PCa 部材は 2 階床以上のスタンド躯体で使用しているが、柱 (現

表 - 1 PCa 部材一覧

部位	PCa 区分	製作会社
柱	現場製作 (仕口現場打)	—
周方向梁	現場製作 (圧着)	—
段梁	工場製作 (圧着)	川田建設 (那須) オリエンタル白石 (真岡) SMC プレコン (新白河)
一般部床	PCaPC 穴あき合成床版	スパンクリート工業 (宇都宮)
段床	PCaPC L 形床版	富士ピー・エス (真岡)
スタンド通路床	PCaPC リブ付き床版	トヨタ T & S 建設 (大田原)
段床下部面	PCaPC 逆 T 形合成床版	トヨタ T & S 建設 (大田原) 富士ピー・エス (真岡)
コンコース外壁	ハーフ現場 PCa 壁	—

※) 一部の柱、梁、床部材は現場打ちとしている。

場製作 PCa) および一般部床 (PCaPC 穴あき合成床版) は 1 階にも使用している。周方向梁、段梁は 3 階のスタンド架構を構成する部材で放射方向、周方向とも PC 圧着により一体化している。

各部位のコンクリート強度を図 - 12 に示す。とくに応力が集中する 2 階短柱や 3 階の PCa 段梁はもっとも強度の高い Fc60 とし、一般部は Fc36、その他、応力状態に応じて、Fc24~48 を使い分けている。

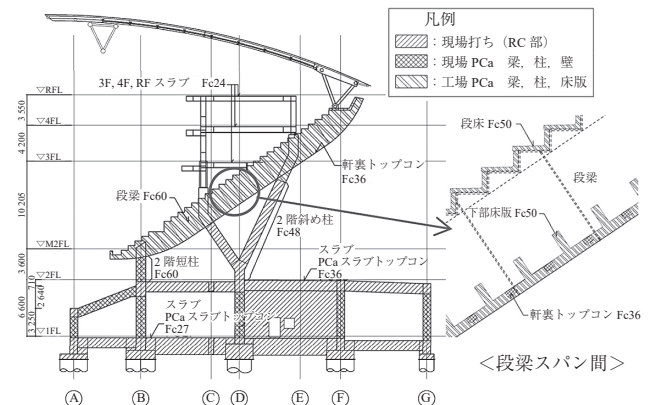


図 - 12 コンクリート強度の区分

6.2 主要 PCaPC 部材概要

(1) スタンド段梁

3 階のスタンド部分の PCa 段梁は、輸送可能な 25 t 以下のブロックに分割した工場製作 PCaPC 梁とした (写真 - 3, 4)。放射軸ごとに全長が異なり、メインスタンド側で最長 (約 33 m) となり、サイドスタンド側で最短 (約 15 m) となる。図 - 13 に最長部となる 32 通りの段梁を示す。各ブロックを現場緊張の圧着接合により一体化した。

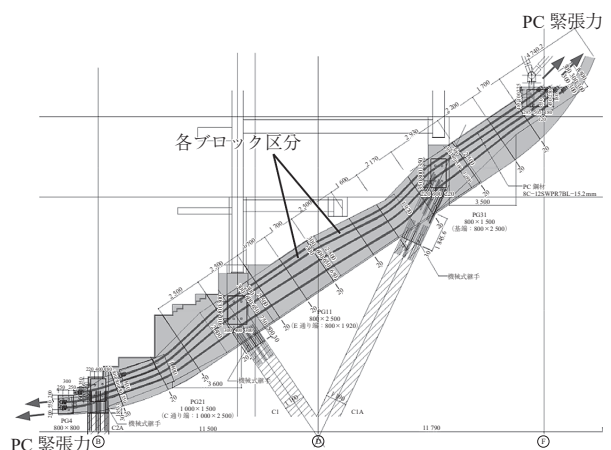


図 - 13 段梁の PC 割付図 (32 通り)

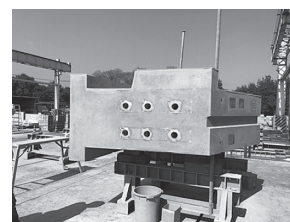


写真 - 3 段梁ブロック

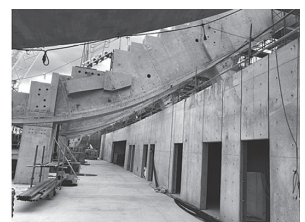


写真 - 4 段梁設置状況

(2) スタンド PC 段床

スタンドの段床は工場製作の PCaPC 造とし、スパン 10 m 以下は L 形床版、スパン 10 m 以上はト形床版とした (図 - 14)。

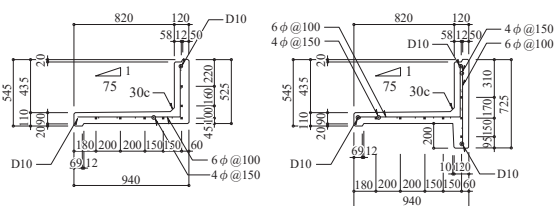


図 - 14 段床詳細図

(3) スタンド下部床版

工場製作逆 T 形リブ付き PCaPC 床版を段梁の下面に設置し、隣接する PCaPC 床版および段梁との接続部を現場打ちコンクリートにより一体化している (図 - 15, 写真 - 5)。この下部床版により段梁面内の剛性を確保している。

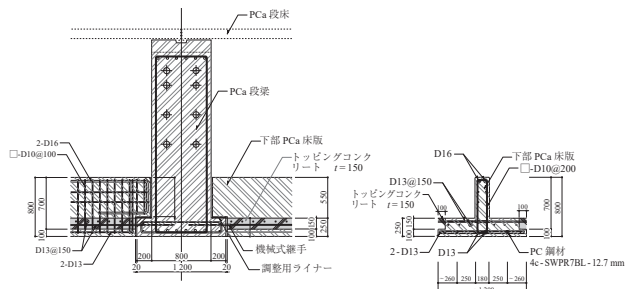


図 - 15 下部床版詳細図

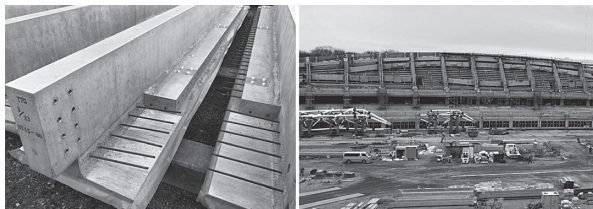


写真 - 5 下部床版 写真 - 6 周方向梁の架設状況

(4) 周方向梁

段梁の直交方向となる周方向に設置する周方向梁は現場のヤードにて製作した現場 PCa とし、現場圧着接合により一体化している。周方向は全周に渡っているものもあり、一度に PC 緊張することは難しいため、3～4 スパンごとに順次 PC 緊張し、全体に軸力導入している。周方向梁の架設状況を写真 - 6 に示す。

サイドスタンドのゲートとなる 16 通りと 49 通りの 2 か所は内部柱のみの 1 本脚架構となっており、段梁頂部で直交する周方向梁の PC 緊張力による懸垂力で段梁を支持している (写真 - 7, 図 - 16)。

(5) メインアーチトラス直下のフレーム

メインスタンド側とバックスタンド側の 2 本のメインアーチトラスで屋根全体重量の約 25 % を負担しており、大きな軸力を支持する部位であるため、直下の柱梁フレームは SRC 造とした。メインアーチトラスによる応力は、鉄骨部材で負担し基礎まで伝達できる架構としている。一方、

アーチのスラスト力は、鉄骨造の脚部から RC 造の周方向梁に健全に伝達される必要があるため、RC 造の脚部 (基礎) を設けている。脚部の局部応力は鉄筋の効果を考慮した 3 次元 FEM 解析により問題ないことを確認している (図 - 17)。



写真 - 7 16 通りの段梁

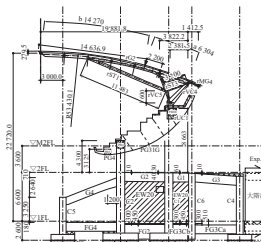


図 - 16 16 通り軸組図

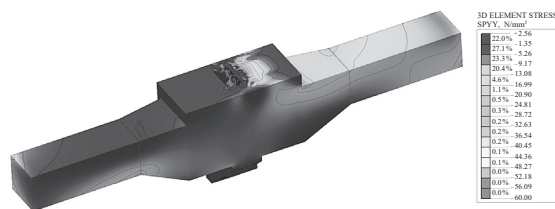


図 - 17 メインアーチトラス脚部の FEM 解析

7. PCa 部材の実大実験

7.1 スタンド段梁の圧着目地部せん断耐力確認試験

スタンド段梁の圧着目地部について、形状、目荒しの違い (図 - 18) によるせん断耐力の違いを確認した。試験結果を表 - 2、試験状況を写真 - 8 に示す。

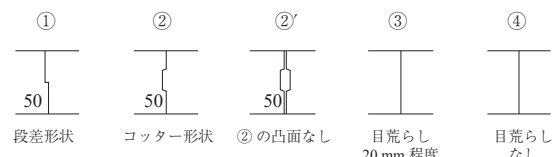


図 - 18 段梁圧着部目地部の仕様

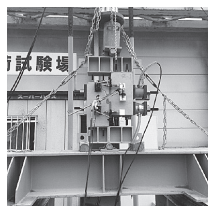
表 - 2 試験結果 (圧着部の摩擦係数)

試験体	①	②	②'	③	④
摩擦係数	2.47	1.72	1.90	2.80	1.76

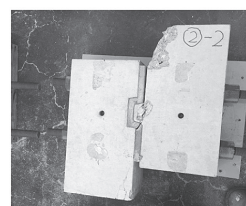
試験結果から下記を確認した。

③ 20 mm 程度の目荒らしありの摩擦係数は、最大の 2.80 であった。部材の製作上もっとも省力化できる④目荒らしなしの摩擦係数は 1.76 であり、設計摩擦係数の 0.5 以上であった。

以上の結果から、圧着目地部の形状は、④目荒らしなしを主体としたが、段梁の片持ち状の基端部と V 字柱の境界部では、大きな力 (せん断力) が作用するため、せん断余裕度向上のために③ 20 mm 程度の目荒らしありとした。



(a) 試験状況

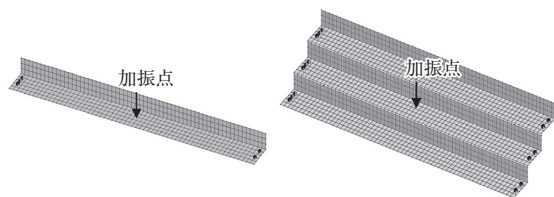


(b) 試験後の試験体

写真 - 8 圧着部のせん断試験状況

7.2 段床の振動試験

スパン 10 m 程度となる L 型 PCa 段床の実例は少ないため、歩行荷重に対する振動試験を実施した。設計時に行った二人歩行を想定した解析では、段床単体での応答加速度は大きく、居住性能評価 V-90 を大幅に超えるが、上下の段床を設置したあとでは版の重量が増加することにより居住性能評価 V-70 程度まで向上することを確認している（図 - 19, 20）。すべての段床が設置された状態で、スパンが最長となる L 形段床を対象に二人歩行による振動試験を実施した結果、居住性能評価 V-50 であった（図 - 21）。解析と実測値は、固有振動数の比較（表 - 3）では、単体モデルでおおむね整合しているのに対し、最終設置状態となる複数枚モデルでの実測値の方が大幅に大きくなっている。解析では 3 枚の段床が連続した状態のモデルであったが、実際には多数の段床が存在するため、実測値の方が解析よりも良い評価となったと考えられる。

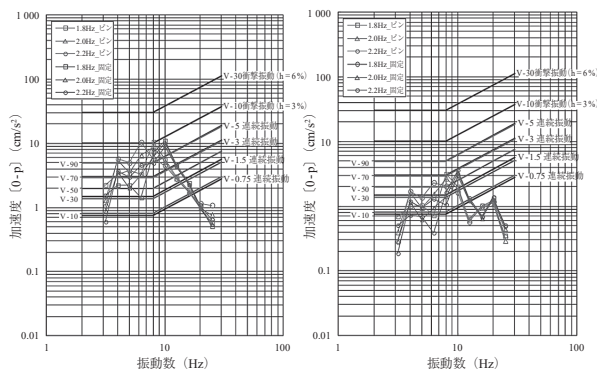


※実際の端部境界条件はピンと固定の中間にあると考えられるため、ピンと固定の 2 ケースで解析を行った。

(a) 単体モデル

(b) 複数枚モデル

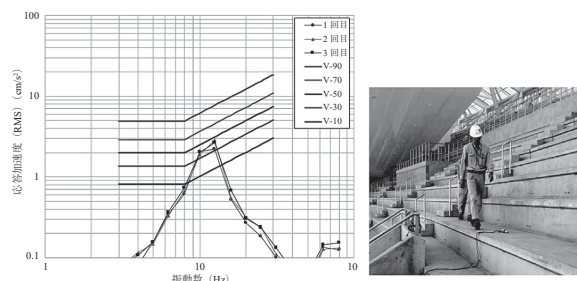
図 - 19 段床の解析モデル



(a) 単体モデル

(b) 複数枚モデル

図 - 20 居住性能評価の解析結果



(a) 居住性能評価の実測値

(b) 試験状況（二人歩行）

図 - 21 居住性能評価の実測結果

表 - 3 段床の固有振動数 (Hz)

	解析		実測値
	ピン	剛接合	
単体	7.95	9.55	8.5
複数枚※	8.6	10.19	19.9

※：実測値は最終設置状態を示す。

8. PCa 段梁の大ブロック化一括建方工法

8.1 上部スタンドの施工手順

上部スタンドの PC 工事は、下記 STEP1～STEP6 の手順で工事を進める（写真 - 9）。

- STEP1 地上で一体化した PCa 段梁を一括揚重建方する。
- STEP2 下部床版を下から角度を変えながら取り付けける。
- STEP3 周方向梁を架設し、通線・緊張する。
- STEP4 下部床版のトッピングコンクリートを打設する。
- STEP5 段梁上に PCa 段床を敷設する。
- STEP6 PCa 段床の通路部に PCa 踏石を設置する。

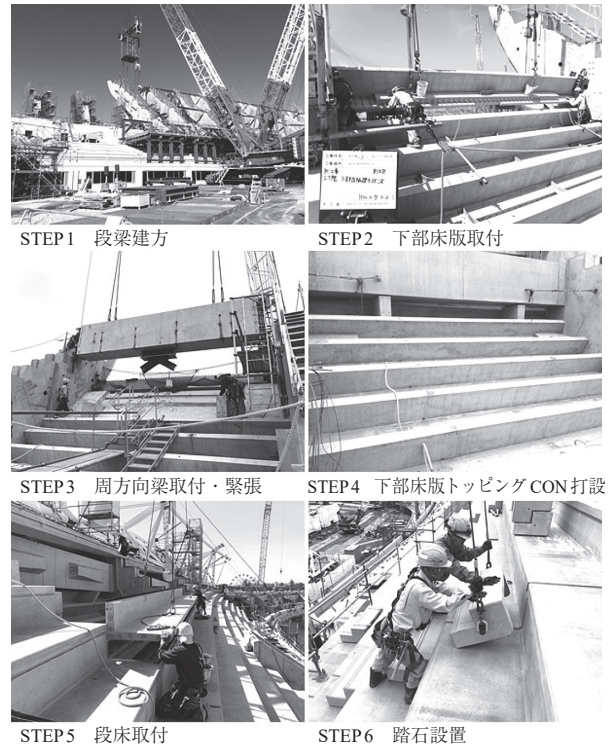


写真 - 9 上部スタンドの施工手順

8.2 段梁建方計画と実施状況

(1) 地組計画

段梁を、高さ 2 m 程度の架台の上に、水平に寝かせた状態で組み立て、PC 鋼より線を配線・緊張して一体化する（図 - 22）。一体化した段梁の重量が約 70 ～ 230 t と大きいことから、可能な限り揚重距離を小さくするため、建方用重機が旋回するだけでスタンドに取り付けできる位置に地組する計画とした（図 - 23）。

比較的小さな段梁は、フィールド内の地組ヤードで組み立て、とくに重量が大きい段梁は、下部スタンドに構台を設置し、その上で地組することにより、さらに揚重距離を小さくする配慮をした（写真 - 10）。

搬入した段梁ブロックは、地組架台に通る墨と割付墨を出しておき、定規アングルなどを使って位置決めを行う。位置が決まった段梁ブロックは、転倒防止ワイヤーを張り、隣接するブロック同士をエレクトロニクスピースで連結して固定する（写真 - 11）。

段梁ブロック間の目地（幅 20 mm）は、止め型枠を取り付け、無収縮モルタルを流し込んで埋める。目地モルタルの強度がプレストレス導入強度（36 N/mm²）に達したのち、PC 鋼線を配線・緊張して段梁の地組が完了する（写真 - 12）。

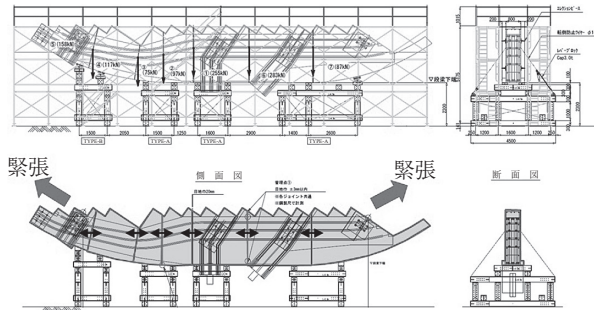


図 - 22 段梁地組のイメージ

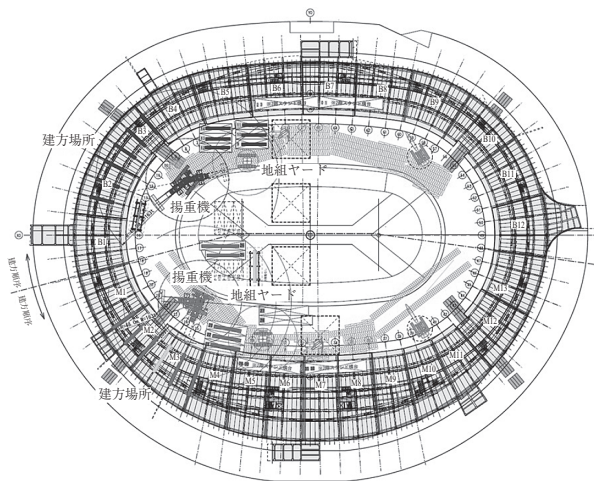
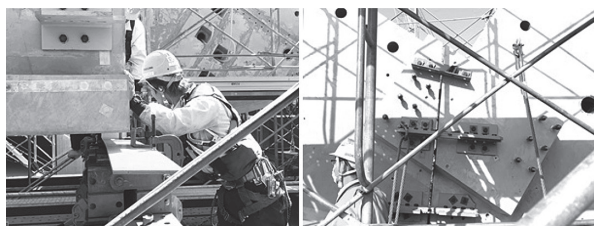


図 - 23 地組ヤード計画



(a) フィールド内 (b) スタンド上構台

写真 - 10 段梁地組状況



(a) 段梁ブロック位置合せ (b) 段梁ブロック固定

写真 - 11 段梁ブロック組立て状況



(a) PC 鋼より線挿入 (b) PC 鋼より線緊張

写真 - 12 PC 鋼より線配線・緊張状況

(2) 揚重計画

地組が完了した段梁を、スタンドに建方するための揚重機は、750 t クローラークレーンを用いる。本体後部に外部ウエイトを増設し、およそ 1 350 t クレーン仕様として、最大重量 230 t 程度の段梁を作業半径 32 m で建方を行う（写真 - 13）。最盛期には、2 台体制で建方を行った。

PCa 部材を揚重する場合、一般的には部材上面や側面にインサートを埋め込み、吊ビースをボルト固定し玉掛ワイヤーを掛けるが、一体化した段梁の重量に耐えうるような大型インサートを設置することが困難であることから、梁を貫通する鋼管を 4 箇所埋め込み、そこへ鋼棒（φ 150 mm、重量 150 kg 程度）を挿入して玉掛治具を取り付ける方法とした（写真 - 14）。

段梁は水平に寝かせた状態で地組するため、地組架台から吊り上げたのち、スタンドに取り付ける状態に合せて角度調整する必要がある。本工事では、段梁の重量が 150 t 以下の場合は電動チェーンブロック（図 - 24）、150 t 超の場合はジャッキングホイス（図 - 25）の 2 種類の調整機構を用いた（写真 - 15）。



写真 - 13 建方揚重機（750 t クローラークレーン）



(a) 吊上げ治具（鋼棒）挿入状況 (b) 段梁揚重状況

写真 - 14 段梁揚重状況

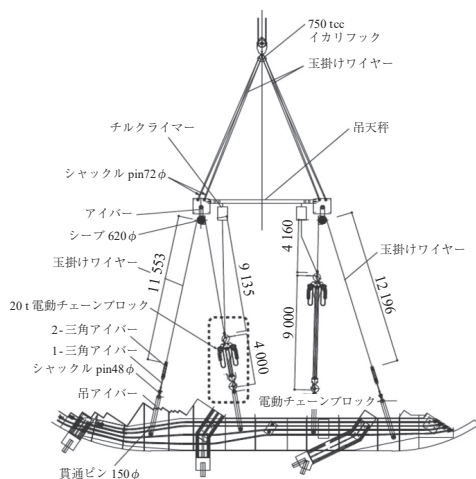


図 - 24 段梁玉掛図 (150 t 以下)

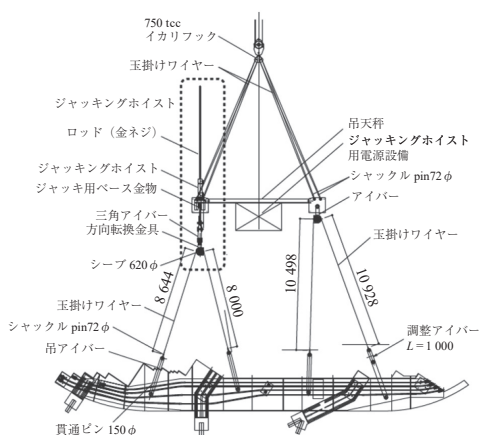


図 - 25 段梁玉掛図 (150 t 超)



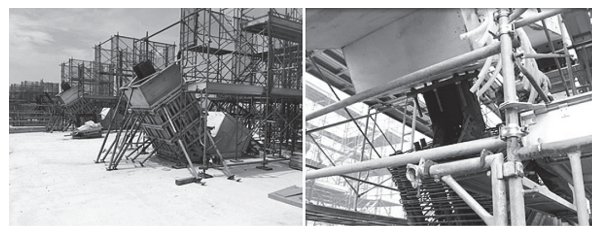
(a) 電動チェーンブロック (b) ジャッキングホイスト

写真 - 15 角度調整治具

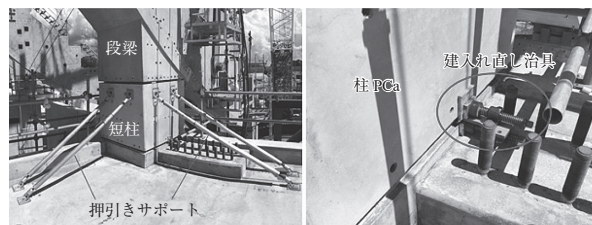
(3) 建方精度管理

段梁と下部構造との接続形式は、「直柱+Y字柱」形式と、「直柱」形式の2種類に大別される。長さ・重量が大きな段梁は「直柱+Y字柱」形式で、小さい段梁は「直柱」形式である。段梁頂部に屋根鉄骨が載るため、段梁頂部の建方精度は屋根鉄骨脚部での誤差吸収範囲内に納める必要がある。そこで、いずれの接続形式も、外周側の柱(Y字柱, 直柱)に精度調整機構(建方精度を調整するための仕組み)を設けた。Y字柱は、建方時は仮設鉄骨ジョイントで接合し、ボルト本締め後に接合部を配筋し、コンクリート打設を行う計画である。現場打ちコンクリートの下部Y字柱に仮設鉄骨を埋め込んでおき、段梁側にはアンカーボルトで仮設鉄骨を取り付けた(写真-16)。段梁側鉄骨の

B-PL部と、鉄骨ジョイント部において、位置調整することで建方精度を確保する仕組みである。

(a) 下部Y字柱の埋込み鉄骨 (b) 段梁側の仮設鉄骨
写真 - 16 Y字柱の仮設鉄骨ジョイント

直柱の精度確保の方法は、下から突き出る鉄筋と、鉄筋を挿入する機械式継手の位置の精度を厳密に管理したうえで、段梁直下の短柱をPCa化し、このPCa柱脚部のグラウトを行わずに建方を行うことで、2本の機械式継手のクリアランスを使って段梁の位置調整を行う仕組みとした。写真-17は、段梁直下に設けた短柱PCaの建て入れ精度調整治具である。



(a) 押引きサポート (b) 建入れ直し治具

写真 - 17 精度調整治具

8.3 段梁建方の結果と考察

大ブロック一括建方方法の採用により、段梁周囲に作業用足場はあるものの、段梁を支える支保工がないため、建方完了直後でも段梁直下は整然としており、作業通路を確保することができた。

安全面では、地上2m程度の架台の上で水平に寝かせた状態で地組を行うことで、梁底が曲面で角度のある段梁の高所での組立てや大量の支保工組立・解体作業がなくなり、目地工事やPCグラウト工事などは不安定な支保工・足場上での危険な作業が大幅に減ったことなどから、8ヵ月間の断梁地組・建方工事は無事故で完了させることができた。

また品質面では、地上で水平に寝かせた状態で地組することで、段梁一体化を精度よく管理できたこと、緊張によるPCaPC部材の縮みも含め、柱との接合部で調整機構を設けたことなどにより、段梁建方精度(段梁頂部に載る屋根鉄骨位置)を、水平変位(放射方向, 円周方向)および鉛直変位とも管理目標値内に抑えることができ、計画どおりの施工ができた。大ブロック一括建方工法を採用したメリットは大きい。

9. おわりに

本建築の設計・製作・施工にあたり、質の高い建築の実現、高い品質と施工精度の実現に尽力くださった皆様に感謝いたします。

【2020年4月30日受付】