

板状の PCaPC 部材を用いた張弦構造の設計・施工 — 白金の丘学園 —

原田 公明*1・宇田川 貴章*2・上田 大輔*3・佐藤 高*4

1階を体育館、その上部屋根を運動場とした学校施設において、剛性・耐力が高い板状の PCaPC 部材を用いた張弦構造を屋根梁とした。その設計概要、施工順序を考慮した FEM 解析結果、施工計画および施工時の測定結果について報告する。

キーワード：板状の PCaPC 部材、張弦構造、FEM 解析、施工計画

1. はじめに

1階を体育館、その上部屋根を運動場とした学校施設において、剛性・耐力が高い板状の PCaPC 部材を用いた張弦構造を屋根梁とした。その設計概要、施工順序を考慮した FEM 解析結果、施工計画および施工時の測定結果について述べる。

2. 建築概要

- ・建設地 東京都港区
- ・建築面積 7 519.50 m²
- ・延床面積 17 967.66 m²
- ・階数 地下1階、地上6階、塔屋1階
- ・最高高さ 29.7 m
- ・主体構造 低層棟：鉄筋コンクリート造・一部プレキャ

ストプレストレストコンクリート造
高層棟：鉄筋コンクリート造

3. 建築計画

敷地が北西に下っていく斜面地であることから、道路沿いの北側足元に2層の低層棟をつくり、ここに道路沿いに体育館やホールや会議室など地域に開放する「地域連携ゾーン」を配置し、街と学校をつなぐスペースを生み出した。そして低層部の屋上と斜面の上を連続させて「第二の地盤」を生み出し、ここにグラウンドを配置した。

南側の教室主体の高層棟では、4-3-2の学年区分をベースに1～3階に第1期4学年、5階に第2期3学年、6階に第3期2学年の教室を配置し、成長段階に基づき緩やかな分節を行った（図-1）。

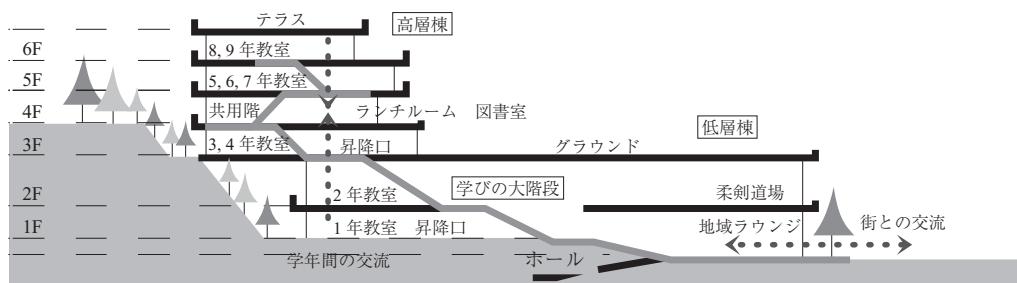


図 - 1 断面構成



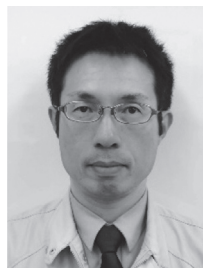
*1 Hiroaki HARADA

(株) 日建設計
構造設計G 技師長



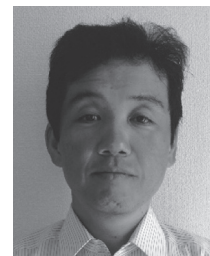
*2 Takaaki UDAGAWA

(株) 日建設計
構造設計G 主管



*3 Daisuke UEDA

大成建設(株)



*4 Takashi SATO

(株) ピーエス三菱

4. 構造計画

4.1 全体計画

本計画の特徴の一つは高低差のある敷地を有効活用するため、体育館の屋根を運動場としたことである（写真 - 1）。そうすることで敷地に余裕をもたせた配置計画となること、運動場という用途、つまり子供たちが日常的に運動を行う屋根・床としての構造体であるため、居住性の点で問題のない性能確保が絶対条件であった。



写真 - 1 北東側からの外観

そのため、張弦材の下弦材をテンション材の線材ではなく、厚みのある帯状のコンクリートの板とし、初期張力、プレストレス力を入れ、版自体を長期荷重時にも圧縮状態とすることで、耐力に加え、剛性にも寄与させた。これにより、振動数も 4 Hz 程度となり歩行振動の共振領域から外れ、必要性能を確保できた（写真 - 3, 5）。

体育館の屋根の構造のほかにもう一つのテーマは、大スパンを有する 2 階建ての低層棟と 12 m の高低差の敷地に 6 階建、4 階建が跨る高層棟の構造のつなぎ方である。用途上は 1, 2 階で一体となる平面計画であるため、止水ラインをなるべく設けたくない。しかし、低層棟は、直接地業べた基礎（一部地盤改良）で壁主体の架構、高層棟は既製コンクリート杭で壁付ラーメン架構である。基礎、架構とも異なる形式のため、EXP.J を設けて別構造とした（写真 - 2, 図 - 2）。



写真 - 2 学びの大階段

耐震設計上は、いずれも 1, 2 次設計とも 1.25 倍の重要度をかけ、耐震グレードを向上させる設計とした。

低層棟は高層棟側から片土圧を受ける地盤形状となっていること、大空間を有する平面であることより、空間相互の境界には十分な RC 耐震壁を配置しルート 1 相当の剛強



写真 - 3 張弦構造



写真 - 4 張弦構造

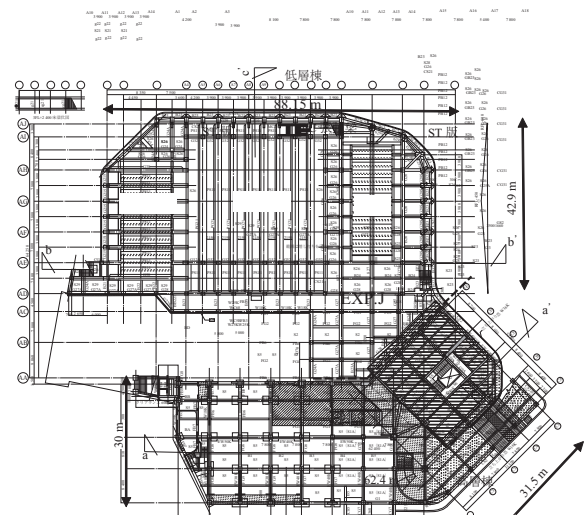


図 - 2 3階床梁伏図

な RC 構造とした（図 - 2, 5）。

片土圧をスムーズに地盤に流すためバットレス形状の斜め壁を設けた（図 - 4）。前述したが体育館の屋根は上下弦材、束材とも PCaPC 材とした。またプール・柔剣道場の屋根も長スパンの用途のため少ない梁せいとし空間を大きくとるため PCaST 床版とし屋根を支えた（図 - 5）。

高層棟は教室を主用途とした平面計画のため RC 造耐震壁付ラーメン架構とした。1, 2 階で低層棟と取り合う「く」の字平面となっているが長辺方向では中央の背骨にあたる通りに、短辺では教室間の境界に RC 耐震壁をバランスよく配置させねじれの生じないバランスの良い架構とした（図 - 2, 3, 4）。

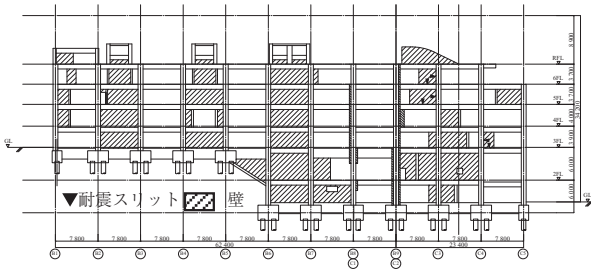


図 - 3 a-a' 軸組図

4.2 板状のPCaPC 部材を用いた張弦構造

PCaPC 部材を用いた張弦構造の最大スパンは 31.8 m であり端部を剛接合とし、連続梁とすることで剛性を高めている (図 - 6)。短スパンとなる AJ 通り側の外端柱には、長期荷重時に引張力が生じることが予想されたため、PC 鋼棒 (2-32φ) によりあらかじめ圧縮力 (導入力 1 196 kN) を導入し、固定度を確保した。AJ 通り部分の基礎スラブ厚さはカウンターウェイトとするため 1 800 mm とした (図 - 4, 7, 8)。

下弦材は、天井材を兼用しており、幅 150cm 厚さ 25 cm の PCaPC 版とし、高さ方向の形状は、放物線を近似した円弧とした。スパン中央において下弦材の下端から上弦材上端までは 2 400 mm とした。下弦材は AE 通り～AF 通り間、AH 通り～AI 通り間で上弦材と一体化させ、軸力を上弦材に伝達させている (写真 - 4, 6)。下弦材は長期荷重時においても引張応力が生じず圧縮材として抵抗するようあらかじめ緊張力を与えることでフルプレストレスの設計とした。上弦材は幅 175 cm、せいはスパン中央で 75 cm、端部で 250 cm としている。張弦構造の間隔は 390 cm とし、上弦材間には、ハーフプレキャスト版を用いた (図 - 6)。

下弦材には一部照明用の開口 (270 φ、端部のみ 600 ×

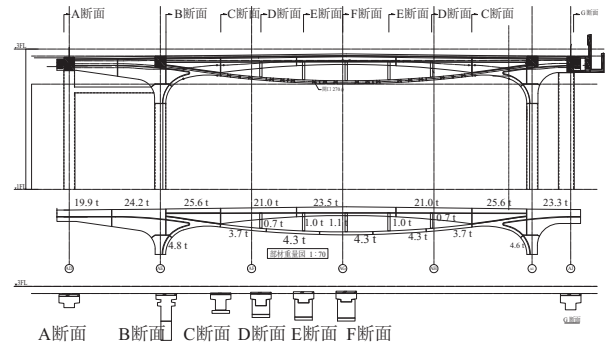


図 - 6 PCaPC 張弦梁形状図

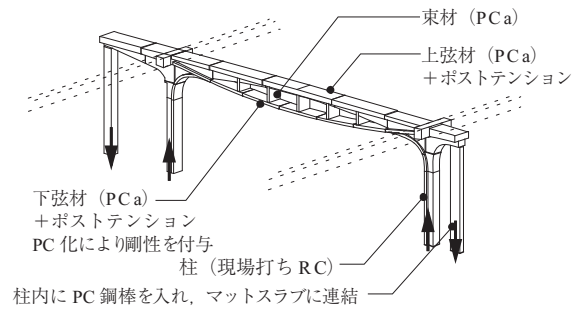


図 - 7 PCaPC 張弦梁概念図

300 × 300 mm) を設けている (写真 - 3)。下弦材と上弦材をつなぐ束材は、幅 150 cm、厚さ 20 cm の PCaPC 版とした。上弦材および下弦材と束材は 4-D22 を用いて一体化した (図 - 9)。

緊張力導入時に二次的な曲げが生じないようにシングル配筋とし継手は機械式継手とした。運搬性を考慮し、上弦材は 8 分割、下弦材は 5 分割とした。

上弦材も下弦材と同様のフルプレストレスの状態となるよう、バランス良く緊張力 (上弦材 4c-7-15.2 φ 導入力

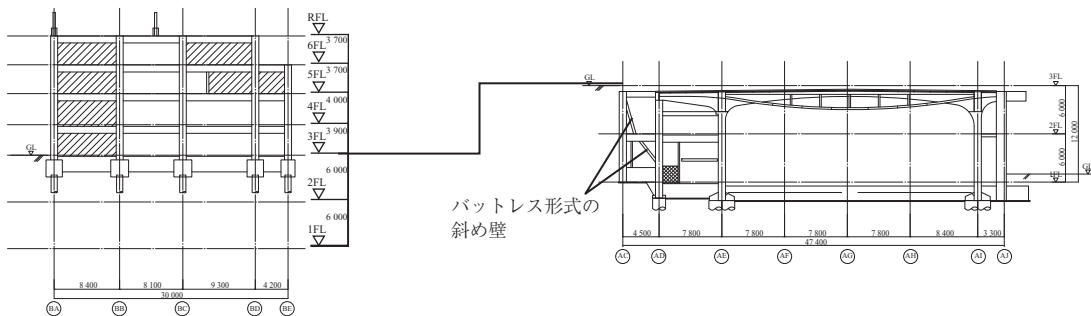


図 - 4 c-c' 軸組図

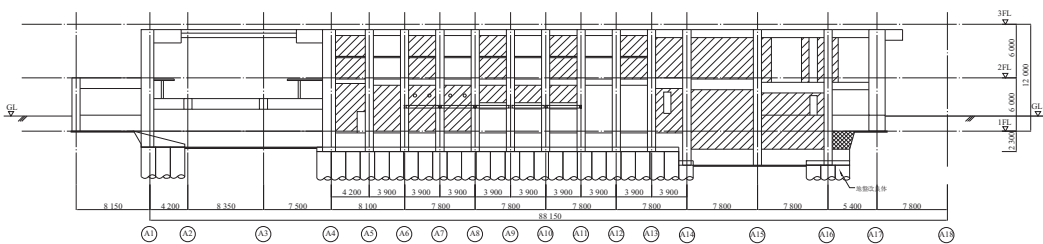


図 - 5 b-b' 軸組図

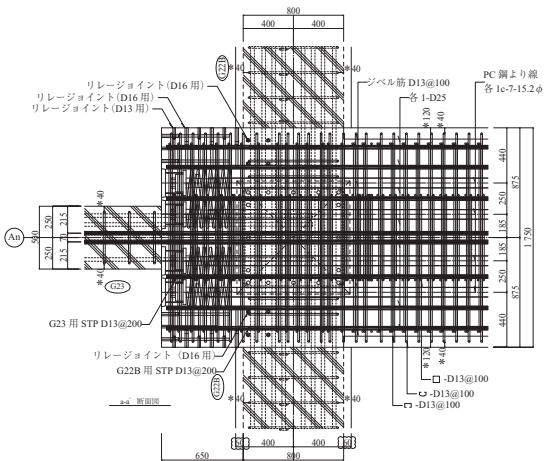


図 - 8 AD 通り詳細図



写真 - 5 張弦構造 (AI 通り)

4 972 kN, 下弦材 6c-7-15.2 φ 導入力 7 458 kN) を設定した。上弦材, 下弦材共部材全体に緊張力が導入されるよう部材断面内で均一なケーブル配置とした。緊張による柱の水平方向の倒れを小さくするため、緊張方法は両引きとした。AE 通りと AI 通りの張弦構造と現場打ち柱の柱頭と

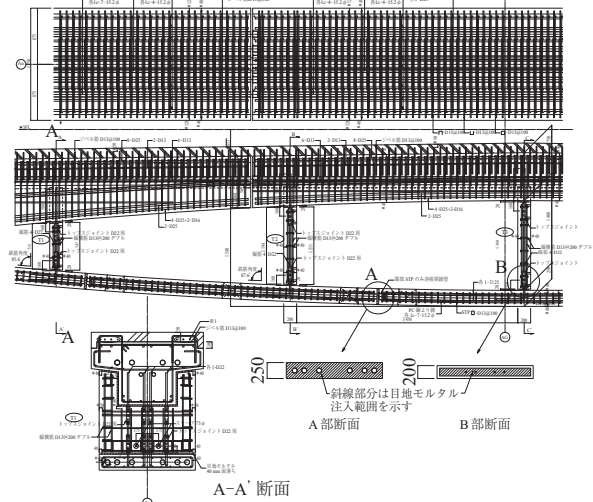


図 - 9 PCaPC 張弦梁束材詳細図

の接合部分は PCa 部材とし施工精度を確保した。柱頭部分の R 形状のリブは張弦構造とは縁を切り、柱頭に過大な曲げが生じないようにした (図 - 10)。

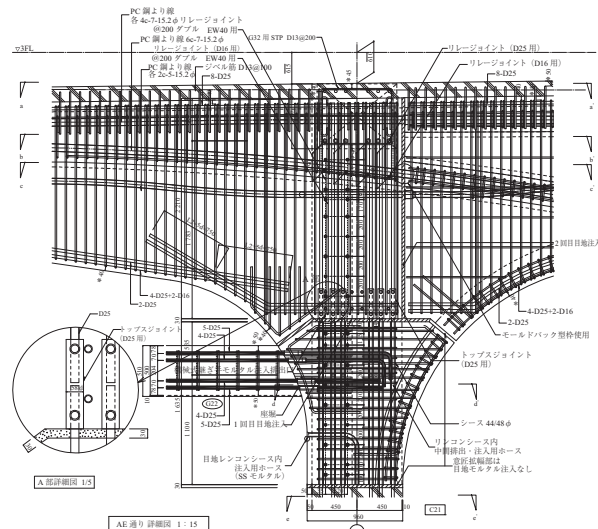


図 - 10 AE 通り詳細図

最初に施工を行う PCaPC 部材を用いた張弦構造では各施工段階で要所のひずみおよびスパン中央部の鉛直変位を測定し、応力状態および変形状態を確認した。PCaPC 部材のコンクリート強度は $F_c 60$ とした。トップコン厚さは 150 mm とし、コンクリートの設計強度は $F_c 27$ とした。PCaPC 部材の現場緊張を拘束する部位 (土圧処理用バットレス等) の施工は、現場緊張後施工を行った。

施工順序は、① PCaPC 部材 + PCa 床版架設 ② AJ 通り柱 PC 鋼棒緊張 ③ 2 次ケーブル (組立用) 緊張 ④ 下弦材・上弦材緊張力導入 ⑤ トップコン打設とした。下弦材・上弦材の緊張力は、大きく 5 段階に分けて少しづつは均一に緊張力を与えた。

4.3 FEM 解析

PCaPC 部材を用いた張弦構造の各施工段階における応



写真 - 6 張弦構造

力・変形状態を確認するためにFEM解析を行った。解析ソフトはMIDASを用いた。PCaPC部材はソリッド要素でモデル化している。施工順序を考慮し、トップコン打設後に作用する仕上げ・積載荷重に対しては、トップコン断面もモデル化した別の解析モデルを用いて解析を行った(図-11)。

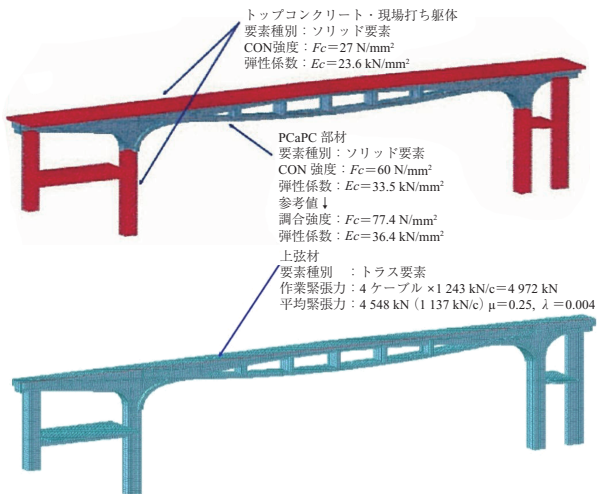


図 - 11 解析モデル図

長期荷重時にPCaPC張弦梁の各部材には、引張応力は生じていないことを確認した(表-1)。

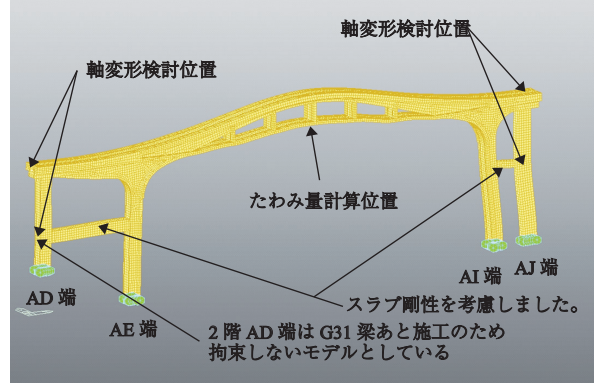
表 - 1 解析結果

部材	位置	DL	PC板	PC鋼	PC2次	PC上	PC下	TP	仕上・	PCを考慮	STEP7	STEP8	STEP8+LL
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	積載	しない応力	①~⑥	①~⑦	①~⑧
トップコン	上縁	-	-	-	-	-	-	-1.84	-1.84	-	-	-	-1.84
	下縁	-2.70	-0.35	0.07	-0.95	-2.49	1.74	-0.92	-1.71	-5.68	-4.68	-5.60	-7.31
上弦材	上縁	1.64	0.22	0.13	-0.99	-3.88	-9.01	0.57	2.42	4.85	-11.89	-11.31	-8.89
	下縁	3.14	0.45	-0.12	-0.42	-3.51	-9.83	1.18	3.98	8.74	-10.29	-9.11	-5.14
下弦材	上縁	2.93	0.42	-0.19	-0.34	-3.32	-9.97	1.10	3.83	8.28	-10.47	-9.37	-5.54
	下縁												

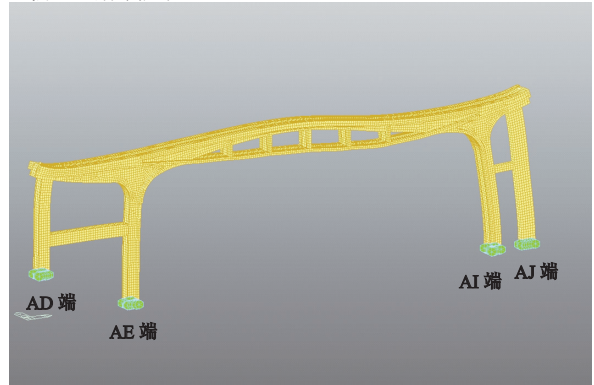
圧縮をマイナスとする (N/mm²)

緊張完了時のスパン中央変位は、約5mm(上向き)、長期荷重作用時には約6mm(下向き)となった(図-12)。各施工段階ごとの変位量の測定値はほぼ解析結果と一致した。鉛直方向の固有周期は、固定荷重+積載荷重時において約4Hzである。

下弦 PC 鋼材緊張時



上弦 PC 鋼材緊張時



仕上・積載荷重時

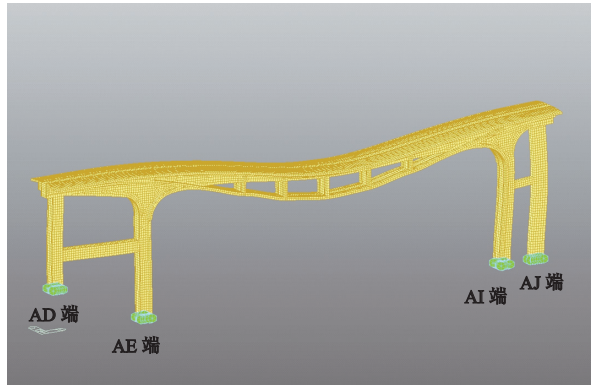


図 - 12 解析結果

5. 施工概要

5.1 PCa 部材の製作

部材の形状および配置を図-13に、部材数量表を表-2に示す。

PCa部材はピー・エス・コンクリート兵庫工場で製作した。部材の形状は上弦材・下弦材・束材・柱それぞれ6・2・3・2種類としている。最大荷重・上下弦材の分岐位置および無収縮モルタル目地の充填性を考慮して分割位置を

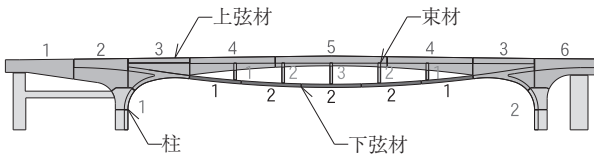


図 - 13 部材配置・形状図

表 - 2 部材数量表

部材名	部材数	部材重量 (t)	総重量 (t)
上弦材 1	8	19.7	157.6
上弦材 2	8	24.0	192.1
上弦材 3	16	25.4	406.4
上弦材 4	16	20.7	331.2
上弦材 5	8	23.1	184.6
上弦材 6	8	23.1	184.8
下弦材 1	16	3.7	59.2
下弦材 2	24	4.3	103.2
東材 1	16	0.7	11.2
東材 2	16	1.0	16.0
東材 3	8	1.1	8.8
柱 1	8	4.8	38.4
柱 2	8	4.6	36.8
合計	160		1 730.4

決定した。写真 - 7, 8 に製作状況を示す。

5.2 PCa 部材の建て方

架設計画図を図 - 14 に示す。敷地条件により A5 通りから A12 通り側へ架設を行ってクレーンを移動する建逃げ架設を行う必要があった。そのため支保工は施工完了後

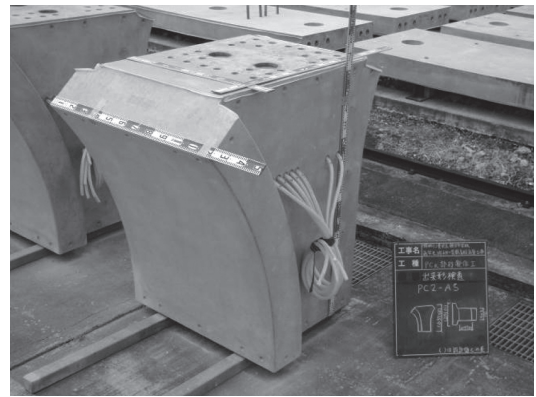


写真 - 7 上弦材 3 配筋 (上) および上弦材 3 部材

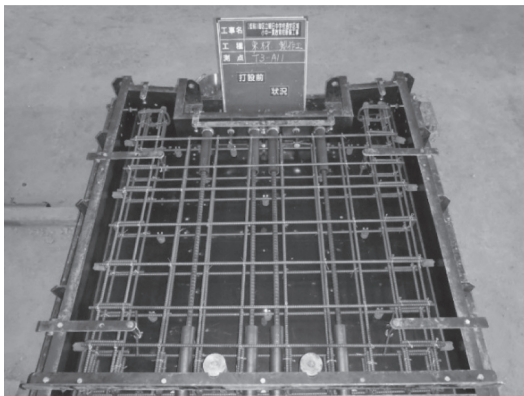


写真 - 8 東材配筋 (上) および下弦材

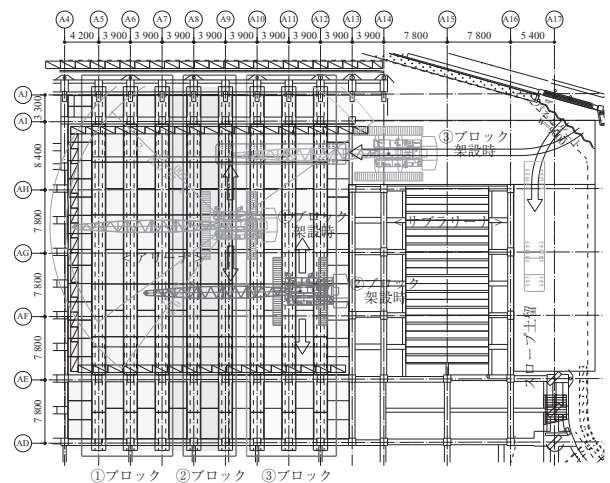


図 - 14 架設計画図

にジャッキを用いて全体を移動するシステムを採用した。工区は8梁を3-2-3梁の3ブロックに分けて、150tクローラークレーンを使用して架設を行った。

写真 - 9 に支保工全景を写真 - 10 に移動システムを示す。

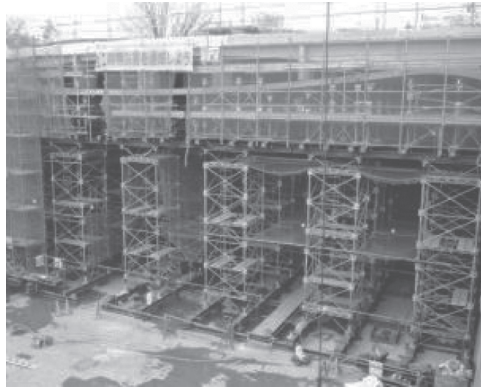


写真 - 9 支保工全景

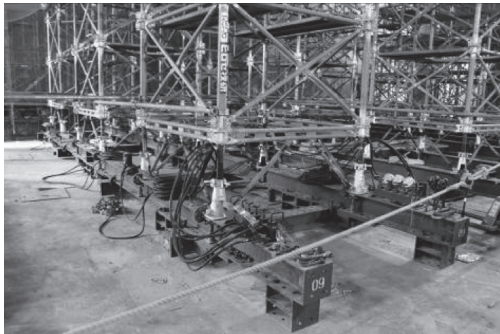


写真 - 10 支保工移動システム

各梁部材の建て方は①柱部材②端部梁部材③下弦材④束材⑤上弦材の順に進めることとした。上弦材は下弦材の上に設置する事になるため下弦材および束材を架設したあとに、上弦材を支えるための横材を設置して架設を行った。重量部材のため支保工は地震時にも倒壊しないよう十分な強度をもたせ、部材設置後に所定高さになるように軸縮みに配慮して支保工の計画をおこなった。とくに上下弦材の支保工は両部材を同時に支える必要があるため、支保工の縮み量については綿密な検討を行った。中央部の支保工の縮み量は10mmを想定したが8mmの縮み量となった。架設が完了した梁の間にRCハーフPC版を取り付けてPCa床組を完成する。図 - 15 に架設手順図および写真 - 11 に架設状況を示す。

5.3 緊張工事

緊張工事は部材のひずみおよび変形を測定し、前述のFEM解析の結果と比較して、適切にプレストレスが導入され張弦梁部材の性能が発揮されているかを確認しながら行った。プレストレス導入にあたって周辺躯体の拘束条件が解析モデルと一致するよう後施工範囲を計画した。上下弦材の緊張作業は、ステップを5段階に分けステップごとに隣接フレームに移って軸変形差を少なくなるよう配慮し

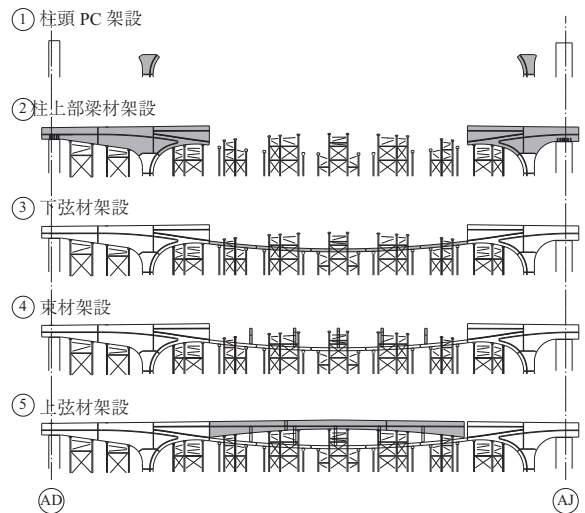


図 - 15 架設手順図

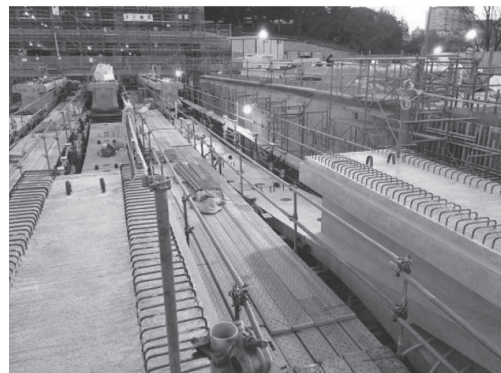


写真 - 11 架設状況

た。後施工範囲計画図を図 - 16 に、緊張作業ステップを表 - 3 に示す。



写真 - 12 架設状況 (左) および緊張状況 (右)

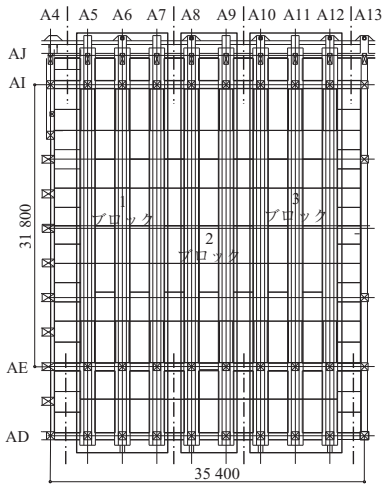
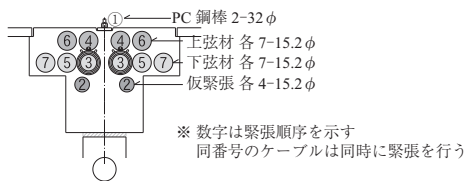


図 - 16 あと施工範囲計画図

表 - 3 緊張ステップ

STEP	作業手順
初期状態	PCa 梁 + PCa オムニア版架設済み
STEP.1	PC 鋼棒①緊張 (598 kN×2)
STEP.2	2次ケーブル②緊張 (710 kN×2)
STEP.3	下弦③緊張 (1 243 kN×2)
STEP.4	上弦④緊張 (1 243 kN×2)
STEP.5	下弦⑤緊張 (1 243 kN×2)
STEP.6	上弦⑥緊張 (1 243 kN×2)
STEP.7	下弦⑦緊張 (1 243 kN×2) → 支保工撤去
STEP.8	トップコン打設 (仕上げ・積載荷重前)
STEP.9	仕上げ・積載 (FL=11.0 kN/m ² ・FL=3.5 kN/m ²)



5.4 ひずみおよび変位の測定

緊張工事の際に測定するひずみの測定位置を図 - 17 に示す。躯体表面のひずみ計測は1ブロック中央のA6 通りにて実施し、計測位置は柱際側面16箇所および中央部の

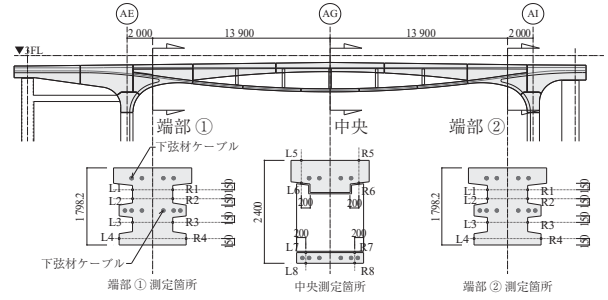


図 - 17 ひずみ測定位置

上下弦材の上下8箇所とした。変位については中央下弦材下端から1FL床までの距離をレーザー距離計測器を用いて測定し全8梁について行った。計測のタイミングは表 - 3の緊張ステップごとに行うが、STEP.3~5およびSTEP.7については50%緊張で計測を行い2段階とした。

上弦材中央(L6およびR6)のひずみ計測結果と中央鉛直変位(以下、ムクリ)測定結果を図 - 18, 19に示す。ひずみ測定値は解析値に近い値となり、左右差も見られなかった。掲載以外の各計測値も解析値に沿った値を示した。ムクリ量は緊張完了後(STEP7-2)で最大値13mmとなり解析値の6mmより大きい値となったが、実測値と同様な傾向を示した。

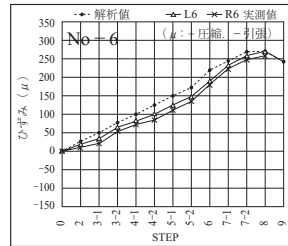


図 - 18 ひずみ計測値

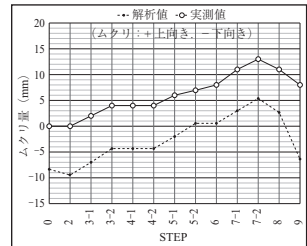


図 - 19 ムクリ計測値

6. おわりに

1階を体育館とし、その上部屋根を運動場とした学校施設において、剛性・耐力の高いPCaPC部材の下弦材をもつ張弦構造で構造と空間をつくった。板状のPCa下弦材にプレストレスを導入することで、性能に加え、美観にも特徴ある構造を実現でき、PC造の良さを改めて認識できた。

最後に本建物の設計・施工を行うにあたり、多大なご指導とご協力をいただいた東京都港区の皆様へ感謝の意を表します。

また本工事の施工にあたっては綿密な工程計画のもとに、高品質、高精度の建物を実現した施工および製作を担当された方々に、心より御礼申し上げます。

写真 - 3, 写真 - 5 撮影 Nacasa & Partners inc.

【2015年5月7日受付】