

長岡造形大学第4アトリエ棟 —プレグラウトPC鋼材による浮遊する曲面屋根の実現—

株式会社日本設計 中村 伸・河野 建介



写真-1 周辺ランドスケープと既存の校舎群を機能的・景観的に滑らかに連続させる第4アトリエ棟

長岡造形大学は、1994年に開学したデザイン教育に特化した大学である。日本設計は開学時のキャンパス計画から新棟の設計、長期修繕計画に至るまで、30年にわたり携わり続けてきた。今回紹介する「第4アトリエ棟」は、周辺のランドスケープと既存の校舎群をつなぐ「滑らかな変位」としての大屋根が特徴である（写真-1）。この大屋根は、屋根全体にプレストレスを導入する構造的工夫によって、低ライズでありながらも、内外の連続性を確保し、開放的な空間を実現している。

1. はじめに

長岡造形大学は、1994年に開学したデザイン教育に特化した大学である。日本設計は開学時の計画から新棟計画、長期修繕に至るまで、「キャンパスのすべてがデザインの教材」という理念のもと、30年にわたり携わり続けている（写真-2、-3）。今回紹介する第4アトリエ棟は、2023年の学科再編成で誕生した、デジタル時代の新たな教育を目指す「デザイン学科」の拠点である。私たちは、「創造の杜」をコンセプトに、既存キャンパスの自然資産を生かし、テクノロジーと自然が融合した新たな学びの場を目指した。本建物には、「視覚デザインとプロダクトデザインの融合」を促進する、創造的な空間づくりが求められた。高機能が求められるスタジオ群をコンクリートボックスに収め、その間にオープンなホールや研究室を配置した。さらに、これら全体を大屋根で覆うことで、分野を超えた一体感を生み、学生間の交流を活性化することを目指した。周辺のランドスケープから既存の校舎群につなげる役目を果たす第4アトリエ棟の大屋根は、滑らかに変位する屋根形状とすることで、豊かな自然環境と学生活動を結ぶ結節点を象徴する建築となっている。



写真-2 30年にわたるキャンパス計画



写真-3 キャンパスのすべてがデザインの教材

2. 建築概要

建築主 : 公立大学法人長岡造形大学
 建設地 : 新潟県長岡市
 主用途 : 大学
 建築面積 : 1,234.59m²
 延床面積 : 1,590.59m²
 階数 : 2階
 建物高さ : 11.262m
 構造種別 : 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、一部鉄骨造
 架構形式 : 耐震壁付ラーメン構造
 基礎形式 : 杭基礎
 設計・監理 : (株)日本設計
 施工 : 鹿島建設(株)、(株)吉原組特定共同企業体
 PC工事 : オリエンタル白石(株)
 工期 : 2023年6月～2024年9月



図-1 開学時のキャンパス全体のランドスケープ計画



写真-4 マウンドとひとつながりになって浮かぶ大屋根

3. 建築計画概要

第4アトリエ棟の基本骨格（コンクリートボックスと大屋根）とプリミティブな建築形態は、周辺のランドスケープや、内部のプログラムの構成、環境条件などを総合的に解決する形として導き出されている。

(1) ランドスケープとの呼応

キャンパスは自然式風景庭園の様式を下敷きに、敷地を越え信濃川（東側）へと連なるランドスケープが計画されている（図-1）。今回の計画では、信濃川の桜づつみに連なる豊かな杜と既存校舎群の結節点となる位置を計画地とした。その場所に存在していた築山の記憶を継承する芝生のマウンドを計画し、既存園路と調和しながらマウンドとひとつながりになって浮かぶ曲面の大屋根（写真-4）により、キャンパスの東側に広がる杜から西側の既存校舎群へ、ランドスケープから建築へ滑らかに変位するフォルムとした（写真-5）。

(2) 相反する機能空間の両立

「ハイスペックな創作環境のためのクローズな空間」と「研究・教育・創作が混然一体となったオープンで流動的な空間」という相反する機能の共存が求められた。スタジオ機能を持った室をコンクリートボックスの中に配置し、それらを大屋根の下に配置することで、隙間に大小様々なスケールの空間ができ、他領域の活動を垣間見ることが出来る空間や、建物全体で緩やかな一体感を与える空間を実現した（図-2、写真-6）。

(3) 長岡の気候風土に順応した低環境負荷建築の実現

長岡は夏は暑く、冬は寒く積雪も多い厳しい環境条件である。初期段階からデジタルテクノロジーをフル活用し、この場所の環境条件を細かく分析し、外皮面積が小さく、夏は有害な日射を遮蔽し、中間期には心地良い風を取り入れられる建物形状を追求した。



図-2 第4アトリエ棟の基本構成



写真-5 第3アトリエ棟からの連続性



写真-6 内外との連続性を与える空間

4. 構造計画概要

本建物の平面形状は約37m×34m、建物高さは約11mである。滑らかに変位する大屋根を支える架構は、以下の要素によって構成されている(図-3)。

- ① 機能的に必要なコンクリートボックス
- ② 地震力に対してつり合いを良くするために必要なコンクリートボックスおよび独立壁
- ③ 内外の連続性を持たせる鋼管柱

また、機能的に必要なコンクリートボックスの北面の上部にはスリットを設け、大屋根に浮遊感を与えている。コンクリートボックスの壁厚は350mmとし、柱梁型を壁内におさめることで耐震壁付きラーメン構造とした。また、屋根面スラブ端部に発生する曲げモーメントに対応するために必要な壁厚として設定している。屋根面のスラブ厚は400mmとした。大屋根の底部分が4m程度の片持ちであるため、クリープ変形を考慮し、使用上支障のない範囲に変形を抑えるとともに、PC鋼材の配置が断面的に放物線形状となるよう、スラブ厚を決定している(図-4)。コンクリートの設計基準強度は $F_c=30\text{ N/mm}^2$ としている。屋根および床については、長期の縁応力度が曲げ引張強度以下となることを目標とした。

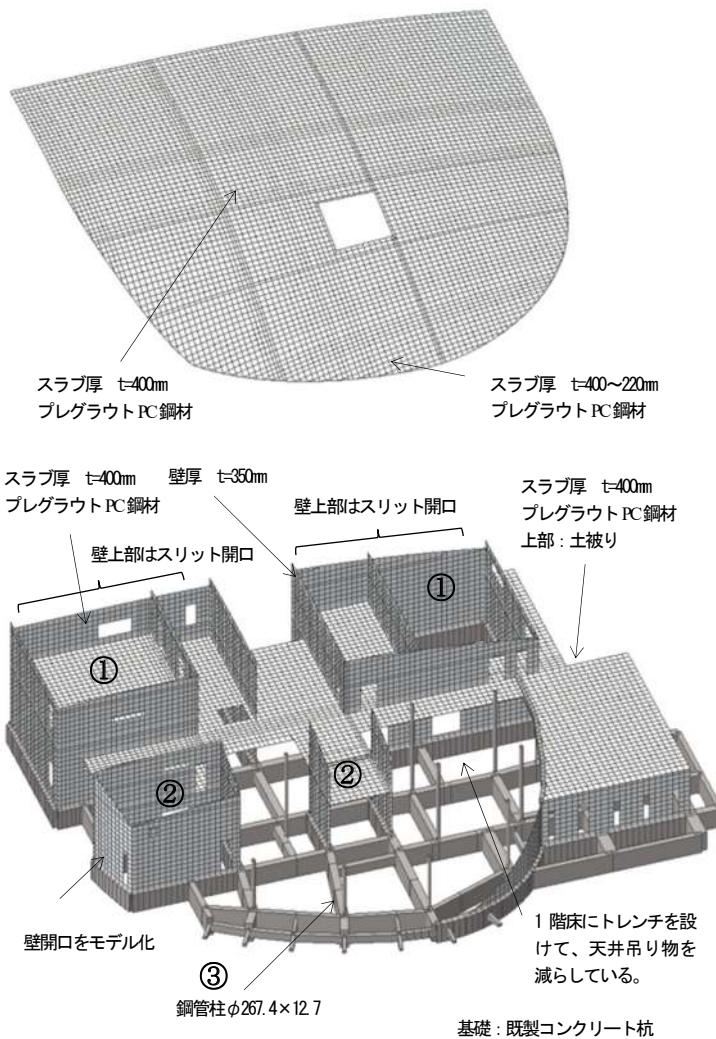


図-3 構造架構図

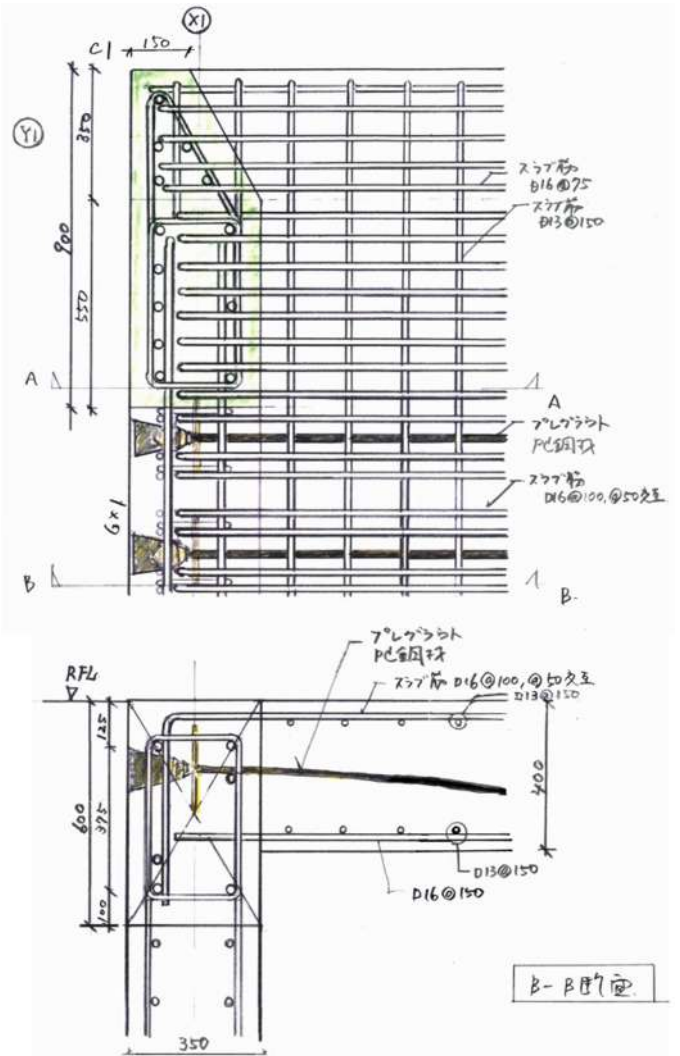


図-4 部材断面決定のスケッチ(上:平面、下:断面)

地震時($D_s=0.55$ 時の崩壊メカニズムを想定)においては、壁のせん断応力度が概ね $F_c/10$ 以下を目標として壁量を決定した。鉄筋径については柱・梁・壁いずれも最大径をD19とし、施工性に配慮した。また、鋼管柱は $\phi 267.4 \times 12.7$ の電縫鋼管を採用している。

耐震要素はすべての壁で構成されている。日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(以下、RC規準)」に基づき、両側柱付き壁(耐震壁)、柱無し壁(壁板)を耐震要素として扱い、崩壊メカニズム時に生じる応力に対して、RC規準に定められた短期許容応力度以下となるよう、適切な配筋を行っている。耐震要素は壁すべてとする設計方針のもと、デザイン上および機能的に必要なすべての壁開口を設計段階で詳細に検討している。その一例を図-5に示す。

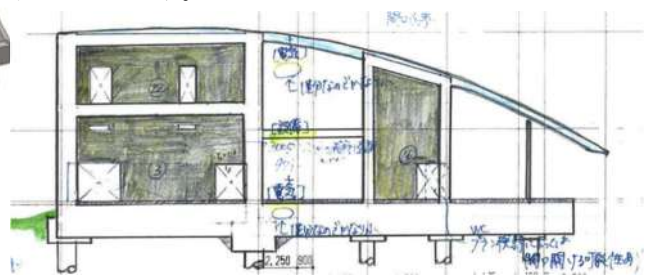


図-5 壁開口検討時のスケッチ

5. プレストレスの構造計画

5.1 プレストレスの配線計画

R 階の屋根スラブは大きなアール形状を持つ自由曲面のスラブを壁柱・鉄骨柱で支えるフラットスラブ構造であり、屋根スラブは鉄骨柱より建物外側に向かって、4m 程度の片持ちスラブとなっている。屋根スラブおよび2階のパン 9m を超えるスラブは、スラブの縁応力度やひび割れ、たわみを制御するためプレグラウト PC 鋼材を用いる PRC 構造とした（以下、プレグラウト PC スラブ）。プレストレス範囲図および断面図を図-6~9 に示す。

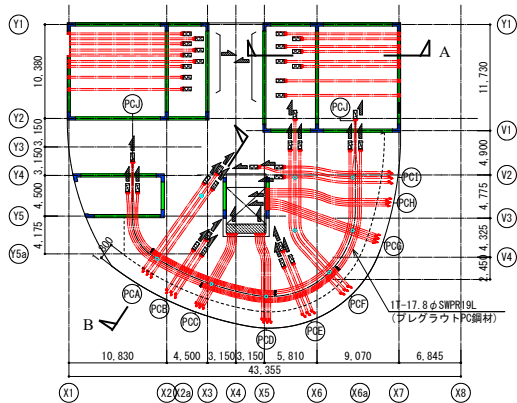


図-6 R階プレストレス範囲図

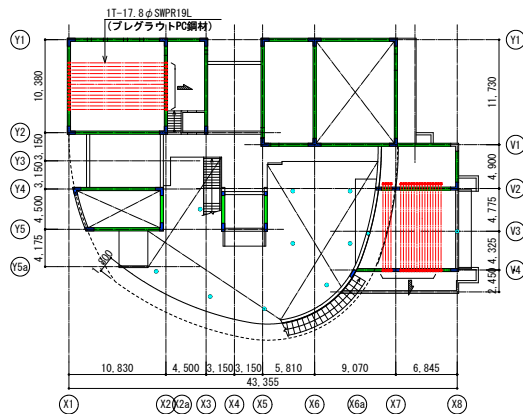


図-7 2階プレストレス範囲図

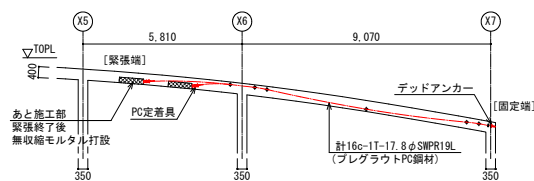


図-8 A断面プレストレス配線図

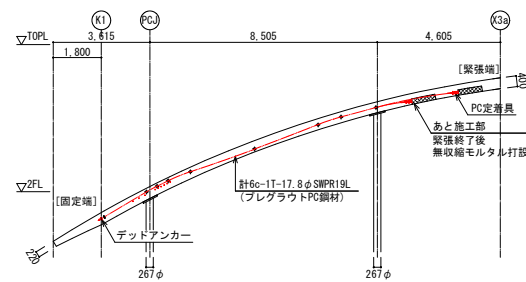


図-9 B断面プレストレス配線図

PCの配線は、2階のフラットスラブおよび屋根面のX1-X7、Y1-Y2間は放物線形状として、スラブ中央で突き上げ効果を期待する配置計画とした(図-8)。屋根面スラブは3次曲面形状となっているが、形状が低ライズ形状となっているため、配線計画としては、片持ち梁としての応力状態を想定した(図-9)。屋根面を線材として考えた場合、片持ち梁の元端はガラス面近くの鋼管柱が、控えの柱は中庭の壁が担う架構形状となる。そのため、平面的なプレストレスの配置も屋根先端に向かって放射状に配置する計画とした。平面的に円弧上に配置した配線は、PCB、PCE、PCH通りにはガラス面近くに柱が無い場合、断面的に放物線形状を描くことで突き上げ効果に期待した配線計画としている。なお、屋根面の緊張端は防水に配慮し、スラブ下端を箱抜きし、緊張後に無収縮モルタルで埋める計画とした。

5.2 プレストレスの外力置換

屋根形状は曲面であることから軸力による効果が大きく、片持ちスラブの先端から吊り上げるような力が作用するため、PC鋼材の偏心配置による向心力とともに、軸力による効果を見込む必要がある。プレストレスによる不静定応力は、FEM解析にプレストレスによる効果を外力置換として入力し、解析を行った。図-10、11に外力置換モデル、表-1にPC外力一覧を示す。

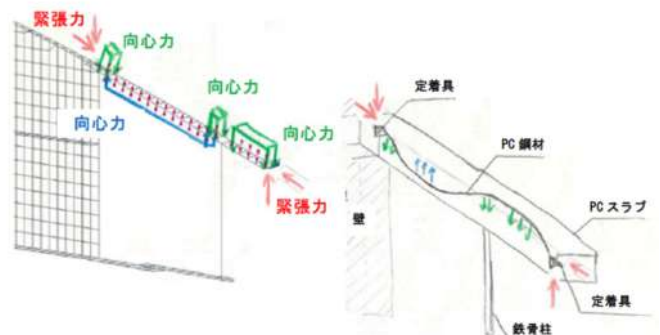


図-10 片持ちスラブの外力置換モデル

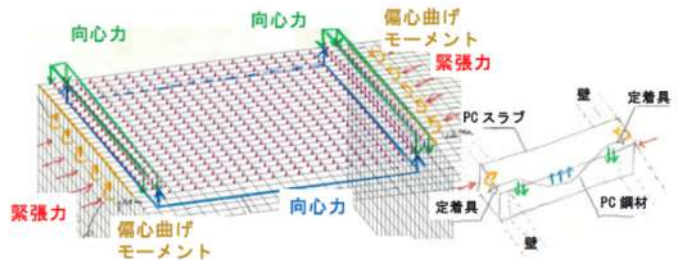


図-11 3辺固定スラブの外力置換モデル

表-1 PC外力一覧

入力荷重一覧	
①	緊張端および固定端の定着具にかかる緊張力
②	部材鉛直方向の向心力
③	部材水平方向の向心力
④	部材端部に生じる部材の図心とPC鋼材位置の偏心による偏心モーメントを節点力として入力
⑤	部材図心の変化による偏心モーメントをせん断力に置換
⑥	反力調整荷重

5.3 プレストレスによる応力制御

この大屋根は、低ライズ形状となっているため、プレストレスを導入することで応力制御を行っている。部材断面が決まる荷重条件は、多雪地域（積雪量 250cm）であることから、長期の荷重条件となる DL+LL+0.7SL にプレストレスによる効果（以下、PS）を考慮した DL+LL+0.7SL+PS である。この荷重条件に対して、プレグラウト PC スラブのクライテリアは、曲げ引張強度以下（ $F_b = -5 \times (0.49 + F_c/100)$ 、 $F_c = 30 \text{N/mm}^2$ ）を目標とした。なお、プレストレスにプレグラウト PC 鋼材を使用しているため、スラブの配筋はプレストレスによる効果を考慮しない応力に対して、RC 部材として許容応力度設計を満たすものとしている。

スラブ配筋については、必要鉄筋量が最も多い箇所であることから、スラブ主筋の継手に配慮し、鉄筋間隔は 75mm または、150mm とした。プレストレスによる効果を図-12 に示す。底を支持する鋼管柱周辺で 10% 程度、北側のロングスパンのスラブ中央部で 40% 程度の応力を制御している。

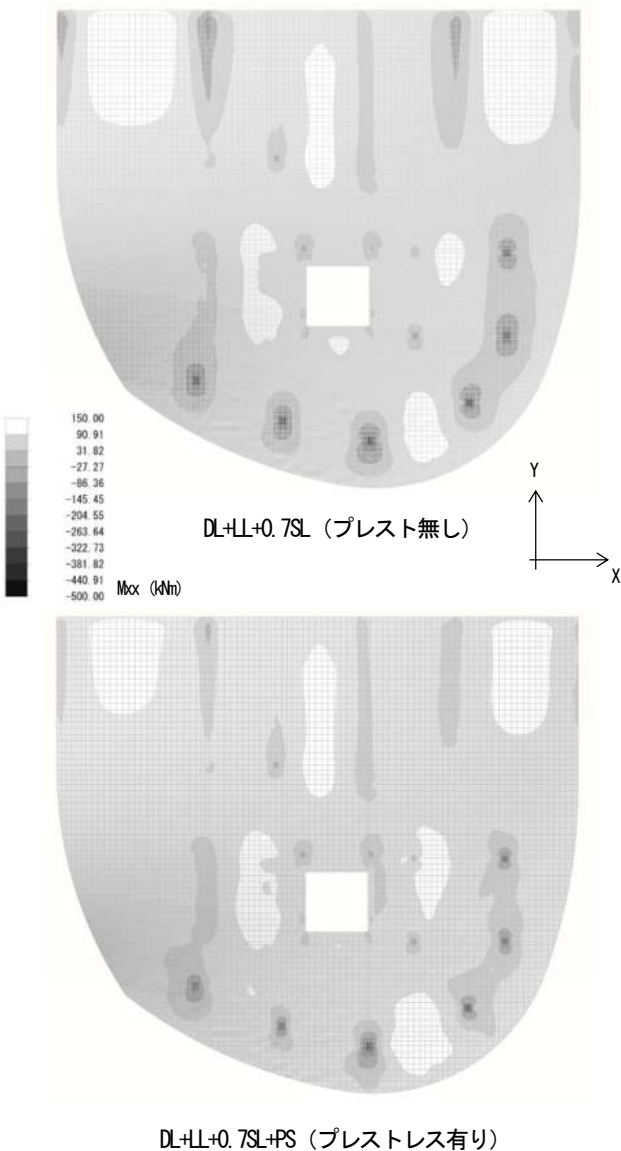


図 - 12 プレストレスの有無による曲げモーメントの比較

5.4 プレストレスによる変形制御

大屋根の下に広がるオープンスペースは、周囲の豊かな杜の環境を最大限に取り込むことを意図し、内外が連続するような外装計画にする必要があった。構造計画においては、カーテンウォールを支持する下地材を最小限とするため、プレストレスによる変形制御を取り入れた設計としている。積雪荷重を考慮した荷重条件（DL+LL+SL）における底（片持ち）先端のたわみは、11mm、3辺固定スラブの中央たわみは、9mm となっている（図-13）。プレストレスの導入により、それぞれ、底先端で 2mm、スラブ中央で 3mm の変形制御を行っている（図-14）。施工精度の調整は床下面に隠れる下枠で行い（図-15）、クリープに対しては上枠で行うディテールとした。

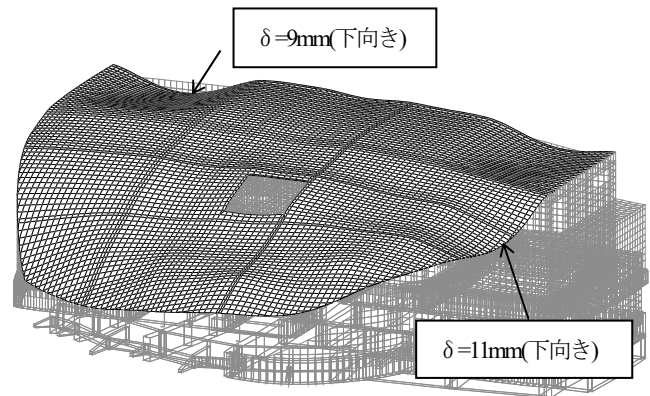


図 - 13 DL+LL+SL 時 変形図 (倍率:200 倍)

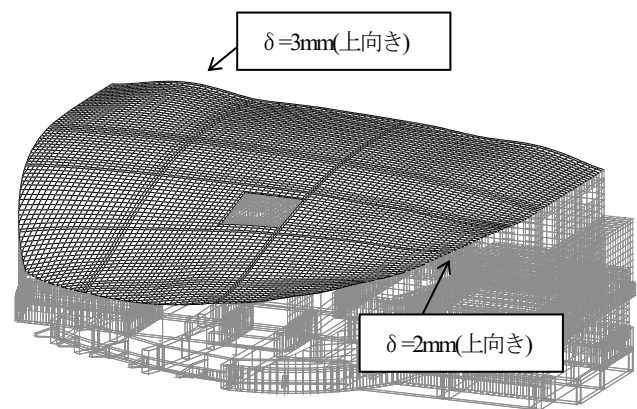


図 - 14 プレストレス導入時 変形図 (倍率:200 倍)

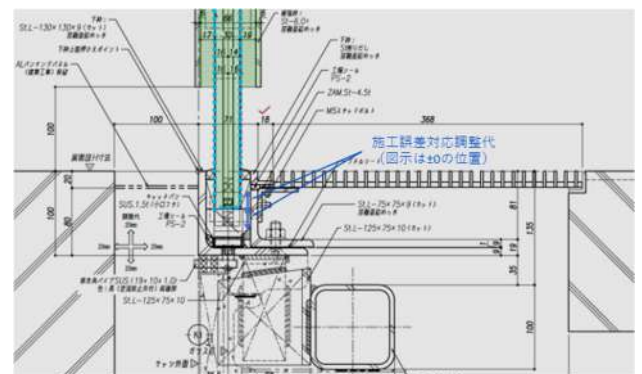


図 - 15 南側ファサード面のディテール

6. プレストレスの施工計画

6.1 施工図の作成

自由曲面に配線するプレグラウトPC鋼材は、施工者提案による楡型枠の採用で精度を確保していく計画とした。楡型枠の施工手順は以下とした。

- ①支保工足場上の大引に楡板受根太を250mm間隔に並べる。
- ②楡板受根太上に楡板を500mm間隔で設置。
- ③楡板上に根太栈木を250mm間隔で取付。
- ④根太栈木に普通ベニヤ板を敷設。

型枠は製作工場でユニット化して製作することで、現場ではユニット化された型枠を所定の位置に配置した。楡型枠を採用している底先端の型枠組立構成を写真-7に、楡型枠の採用により、精度よくプレグラウトPC鋼材を配線している状況を写真-8に示す。



写真 - 7 型枠の組立構成



写真 - 8 プレグラウトPC鋼材の配線状況

6.2 プレグラウトPC鋼材の支持方法

本建物は底版面が曲面であるため、曲げやねじれに追従できるスペーサーを特注で製作した。スペーサーの上部はねじれにも追従可能とするため、厚さ3mmのフラットバーを溶接した。また傾斜が大きく、プレグラウトPC鋼材が滑り落ちることを防止するため、所定の位置にアングルを配置することで、PC鋼材の配置間隔を保持し移動を防止した(写真-9)。

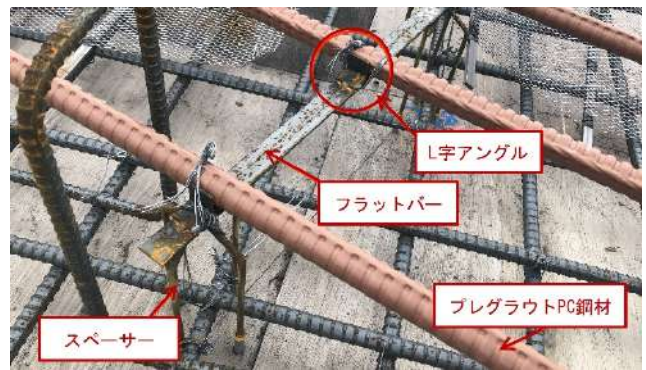


写真 - 9 プレグラウトPC鋼材の支持状況

6.3 デッドアンカーの支持方法

設計時から反曲点位置と固定端の高さを固定した直線と結ぶと、正確な支圧板の角度が出るよう配慮した配線としていた。デッドアンカーの前後をスペーサーで固定し、コの字アングルとL字アングルで挟み、デッドアンカーがプレグラウトPC鋼材に対して直角となるように治具を取り付けて、精度良く支圧板を設置した(写真-10)。

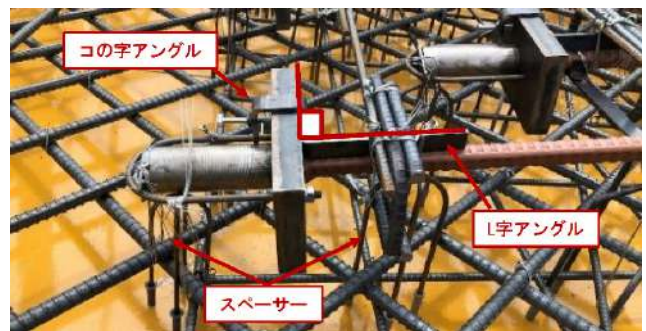


写真 - 10 デッドアンカーの支持状況

6.4 コンクリート打設

急勾配の屋根コンクリート打設となるため、コンクリートの流れ止めは1,000mm間隔で設置した。コンクリート打設の順序については、打設関係者と協議の結果、水上より打設を行った。スランプ12cmとワーカビリティとしては扱いにくいコンクリートの打設であり、スラブ筋間隔が150mmと比較的狭く補強筋も多いなど、コンクリートの充填性には注意を払いながら丁寧にバイブレーターを掛け、施工管理を徹底し、密実なコンクリートを打設した。左官も傾斜のある屋根上で作業姿勢が満足に取れない中、丁寧に左官押さえを実施したことで、品質と精度を確保することできた(写真-11)。



写真 - 11 コンクリート打設状況

6.5 緊張管理

PC 鋼材の伸び量は、材料特性や配線形状など下記に示す要素が大きく影響するが、曲面スラブにおいてこれらの要素を正確に計算し緊張管理を行うことは困難である。それを解決するため下記に示す各要素について検証を行った。

(1) プレグラウト PC 鋼材の材料特性

プレグラウト PC 鋼材は評定を取得している熱硬化型の超高温タイプを選定した。本材料は2階のフラットなスラブにも使用しており、その部位の緊張結果による伸び量は計算値とほぼ一致していることから、材料特性によるばらつきが少ないことを確認した。

(2) PC 鋼材の長さ

PC 鋼材の全長は、各通りの中心の断面図に加え、最も外側のケーブルを作画し平均して、その間の鋼材長を求め方法で算出した。現場でケーブル配線後の余長を考慮した計算値と比べても、誤差なく一致していることを確認した。

(3) PC 配線の角度変化

PC 配線の角度変化は、水平方向の角度変化を考慮する必要性を検証するため、角度変化の全くない直線の配線形状と、水平方向の角度変化のみ考慮した配線形状で緊張力を比較した(表-2)。緊張力のロスは最大で20%程度の差、伸び量では10%程度の差があり、水平方向の角度変化は無視できないことが分かった。

表-2 曲面屋根スラブの緊張力の比較

通り	緊張端	固定端	PC鋼材全長(m)	緊張力			伸び量
				各角度変化の有無(kN)			
				①無し	②水平方向のみ考慮	②/①比率	
PCC	Y5	PCC	9.0	207	197	95%	96%
PCD	Y5	PCC	9.9	208	189	91%	93%
PCF	Y2	PCC	21.1	186	173	93%	97%
PCG	X5	PCC	13.0	202	195	97%	96%
PCH	X5	PCC	13.7	199	185	93%	96%
PCI	X5	PCC	12.0	194	185	95%	97%
PCJ	Y2	PCA	38.6	191	157	82%	91%
	Y2	PCC	33.2	185	151	82%	93%
	Y4	PCD	25.3	193	162	84%	92%
	Y4	PCF	33.7	198	155	78%	89%

※PCA, PCB, PCE通りは平面上の配線は直線のため省略する。

曲面スラブ内の配線を正確に緊張計算することは困難であるため、まずはY3-PCA軸間を通るPCJ通りの配線形状を取り出し、角度変化による緊張力の影響について検証を行った(図-16)。水平・鉛直方向および、3次元でのPC鋼材の配線移動は、水平・鉛直方向の角度変化を足し合わせ計算した緊張力と比較すると約1.02倍の緊張力であり、大きく差がないことが分かった。

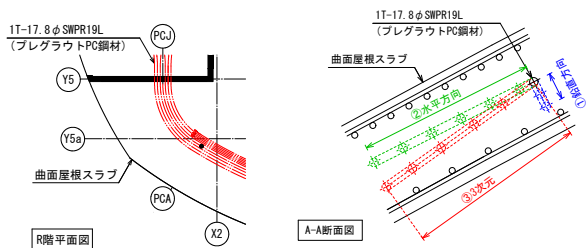


図-16 PC鋼材の角度変化

検証結果では水平方向の角度変化考慮の有無で計算伸び量の差が非常に大きい上に、30m程度の長スパンであるため、材料特性や施工精度によるばらつきも大きくなると考えられる。よって事前にPC配線の角度変化を調査して、緊張する必要があると考えられたが、片引きであり試験緊張は不可能であるため、代表箇所(PCJ通り4箇所)で試し引きを行い、想定した角度変化と大きな差がないか確認を行うこととした(図-17)。

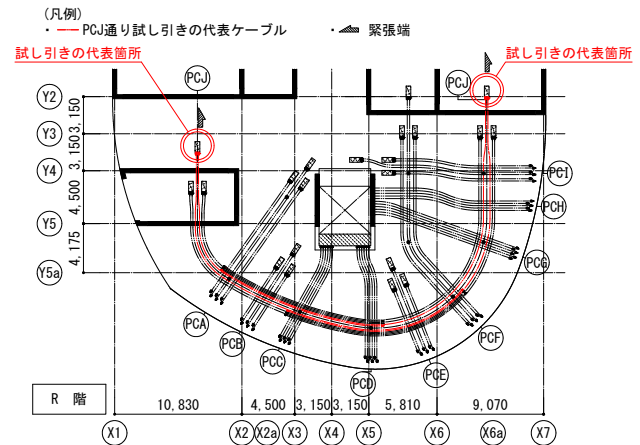


図-17 試し引きの代表箇所

試し引きの緊張管理は、角度変化が最も大きく伸び量が小さいと想定される、鉛直方向と水平方向の角度変化を足し合わせた緊張計算の伸び量以上であることを確認することで、試し引きの適否を判断することとした。4ケーブル中3ケーブルで計算伸び量が試し引きの伸び量以上であり、概ね予測通りの結果であった。

以上の結果より、水平方向の角度変化が緊張力の損失に大きく寄与していることが分かった。これよりPCJ通りは、鉛直と水平方向の角度変化を足し合わせた緊張計算の伸び量で管理を行うことにした。同様に他の通りも水平方向の角度変化の寄与について検証を行った上で、すべてケーブルの緊張管理は、目標管理値の0~5%以内に収まることが確認できた。

7. おわりに

写真-12~19に、施工中から竣工時までの写真を示す。東側の木々が林立するランドスケープから西側の建築群へと連続する大屋根は、低ライズ形状でありながらも、プレストレスの活用により、周辺環境と調和した架構として実現することができた。設計・施工の両面で難易度の高い計画であり、その実現には多くの関係者の尽力があった。

施工を担っていただいた鹿島建設、吉原組の皆さま、PC工事を担当していただいたオリエンタル白石の皆さま、そして30年にわたり長岡造形大学のキャンパス計画に携わらせていただいている長岡造形大学の皆さまに、この場を借りて深く感謝申し上げます。



写真 - 12 森の木々と連続する鉄骨柱



写真 - 13 楕型枠の組立状況



写真 - 14 配筋およびPC鋼材配線状況



写真 - 15 配筋およびPC鋼材配線状況



写真 - 16 屋根急勾配部の打設状況



写真 - 17 屋根スラブ打設後の内部足場の状況



写真 - 18 浮かぶ大屋根 (南東より)



写真 - 19 南東の森へつながるパノラマビュー