

真岡発電所見学者施設建設工事の設計・施工

— PC 技術を用いた大スパン屋根と曲面壁を有する壁式 RC 構造 —

西牧 誠*¹・鳥 章典*²・宮村 忠寿*³・小池 正大*⁴

本建物は株式会社神戸製鋼所真岡発電所内に計画された見学者用の展示施設の計画である。施設の中心となる展示室において、曲面形状の外壁を有する無柱空間が求められた。この課題に対し、屋根スラブにプレストレスを導入した壁式鉄筋コンクリート造を採用することにより大スパン架構を実現し、美しい曲面に包まれた広々とした内部展示空間を実現することができた。

キーワード：プレストレストコンクリート，アンボンド PC，曲面外壁，形態生成

1. はじめに

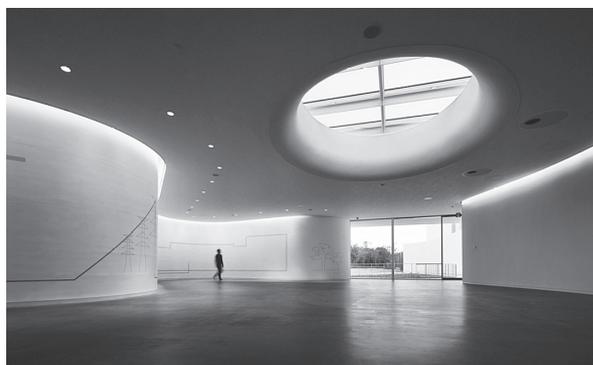
本計画は神戸製鋼所の全額出資子会社のコベルコパワー真岡が建設した日本初の内陸型ガス火力発電所のプロジェクトの一環として、火力発電所の顔となる見学者施設および見学者ルートを整備する計画である。見学者施設は地域の小学生の社会科見学として活用され、電気と社会のつながり、火力発電所と地域とのつながりを紹介することをテーマとした施設である（写真 - 1）。

見学者施設は、発電所本体の見学におけるイントロダクションと振返りの場として使用される。ここでは、拡張現実技術（AR）を用いて、内部壁面にタブレット端末をかざすことで画面に映像が流れ、火力発電所の理解を深める展示手法を採用している。

見学者施設に相応しい特徴的な建築形状と展示空間として必要な空間に対し、構造計画の課題は曲面形状の外壁と最大 12 m 程度のスパンをもつ屋根面を成立させることにあった。そこで、壁式鉄筋コンクリート造を採用し、建築計画でもっとも重要である曲面外壁を構築させるとともに、屋根面にプレストレストコンクリートを採用することで、合理的に大スパン架構を成立させ、展示施設としてフレキシビリティに優れた大空間を実現した（写真 - 2）。



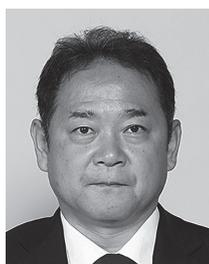
*写真 - 1 建物外観（鳥瞰写真）



*写真 - 2 建物内観

*¹ Makoto NISHIMAKI

(株) 竹中工務店 東京本店
設計部 構造部門

*² Akinori KARASU

(株) 竹中工務店 東京本店
設計部 構造部門

*³ Tadatashi MIYAMURA

(株) 竹中工務店
北関東支店 作業所

*⁴ Shoudai KOIKE

(株) ピーエス三菱
東京建築支店 建築設計部

2. 建築概要

建物名称：コベルコパワー真岡 見学者施設
 建設地：栃木県真岡市鬼怒ヶ丘1丁目12-1
 規模：地上1階
 建物用途：展示室
 建築面積：586.46 m²
 延床面積：544.80 m²
 建物高さ：5.10 m
 軒高さ：4.83 m
 構造形式：耐震構造
 構造種別：壁式鉄筋コンクリート造
 架構形式：壁式構造
 基礎形式：直接基礎
 （深層混合処理工法による地盤改良）
 設計施工：株式会社 竹中工務店
 PC施工：株式会社 ピーエス三菱
 工期：2019年4月～2019年12月

3. 建築計画

3.1 設計主旨

本計画は、「環境とのつながりを喚起する発電所見学の導入空間」をコンセプトとし、発電所と自然との境界部をどのようにつなぐかを重要視した計画となっている。

発電所との境界である高さ5mの防音壁と前面道路の間に、真岡の特徴的な環境である雑木林の丘とヒバリが飛来する庭を整備している。ここにもう1枚の曲面壁を挿入し、周辺環境と発電所の境界を自然につなぐような柔らかい曲面を計画することで、周辺環境と発電所が緩やかにつながる中間領域が生まれることを目指している（写真-3）。

大きくうねる2枚の壁が近づいたり離れたりすることで、内部と外部が緩やかにつながる空間を形成し、子供達が地球とエネルギーの未来を考えるのにふさわしい展示空間を創り出している（写真-4）。

3.2 平面計画

平面形状を決めるうえで、①外構の植栽配置、②ARに必要な展示壁長さ、③気候・光・日射・通風等の環境要素、④構造合理性をもつ形状、の4つの要素が重要となった。それらを考慮しつつ、たわみや躯体数を最小化するようにシミュレーションを行い、約400ケースの解から複数の最適な曲面形状を選択し、最終的な形状決定を行っている。

屋根面に設けた楕円の調光トップライトは、展示進行に伴う光環境をコントロールする役割を担っている。

3.3 外構計画

外構計画では、「真岡の環境を体験できる場所をつくる」ことをテーマに、真岡の景色の要素を取り込み、真岡に自生する樹種やヒバリなどの鳥類が利用しやすい植物を選定した。さらに池を計画することで真岡の自然環境の再現を目指した（写真-5）。

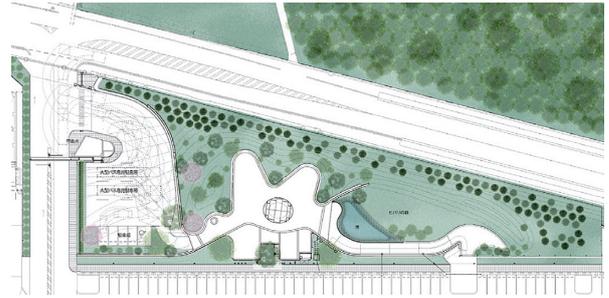


図-1 配置図（計画時）



*写真-3 上部鳥瞰



*写真-4 展示室



*写真-5 建物外観（ヒバリの庭から見る）

4. 構造計画

4.1 設計方針

本建物の特徴である美しい曲面外壁を実現しつつ、展示空間として必要となる無柱空間を確保することが構造計画上の課題であった。

無柱空間の実現に向けては、屋根架構を鉄骨造化することも検討したが、屋根取合い部の防水性や曲面外壁との納まり、鋼材の発注工程が長期化する情勢であったことから、屋根全体をプレストレスト鉄筋コンクリート造（以下、PRC造）とすることで計画した。さらに、曲面形状の鉄筋コンクリート造の設計や施工性を考慮して、最適な構造形式として、壁式鉄筋コンクリート造を採用した。

屋根面を鉄筋コンクリートで計画する際に、クリープを含むスラブたわみ量をいかに抑えるかが課題となったが、トップライトを軽量化に活かしたうえで、施工性や納まりを考慮し、スラブ内にアンボンドPC鋼材を用いたPRC造を採用することでたわみの抑制を図った。

4.2 基礎構造計画

計画地は栃木県中南部の平野部にあり、鬼怒川、姿川、田川、五行川などの河川沿いに形成される低地と河岸段丘で構成される地域で、ローム層が広く分布している特徴があり、さらに鹿沼土といわれる軽石層を有する。軽石層は比較的大きな支持力を有しているが、荷重が大きくなると急激な強度低下を起し、圧密沈下を起す可能性がある。

そのため基礎形式は、鹿沼層の下部のGL - 6.8 m 付近に分布しているローム層を支持地盤とする深層混合処理工法による地盤改良とした（図 - 2）。なお、根切り底を浅くし、残土を減らすためにマットスラブ（一部布基礎）を採用した。

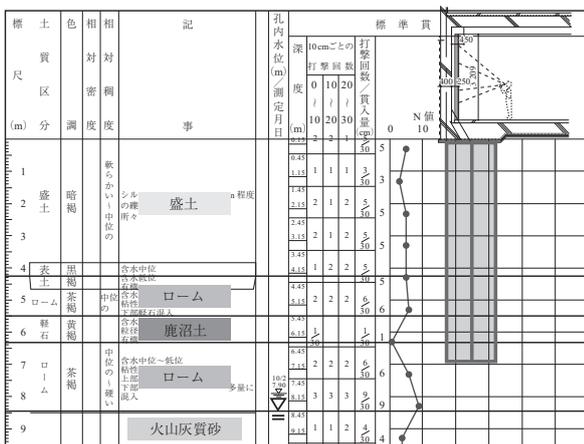


図 - 2 基礎計画図

4.3 上部構造計画

架構形式は、X、Y方向共壁式鉄筋コンクリート造とし、向い合う壁間距離はX方向で最大約21m、Y方向最大約12mとなっている。曲面外壁の壁厚は375mmを基準とし、応力が集中する入隅部については500mmとしている（図 - 3）。

曲面壁は曲面型枠の製作を考慮し、曲率を3パターンに標準化することで施工性・製作性が高まるよう考慮した。

また、壁配筋の種類もできる限りそろえることで、施工性に配慮した（写真 - 6）。

屋根面スラブは375mmを基本とし、一部600mm、500mmとして、長期たわみを抑えつつ、スラブ端部での応力がひび割れモーメント以下となるように計画した。なお、屋根の防水はウレタンゴム複合系塗膜防水を採用し、軽量化を図っている。

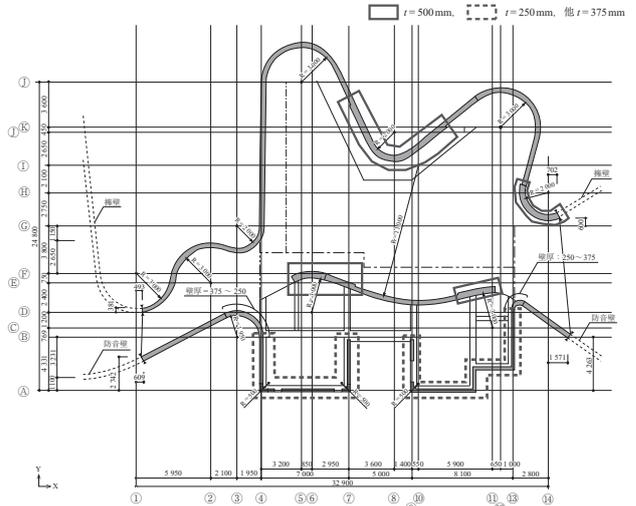


図 - 3 1階床伏図

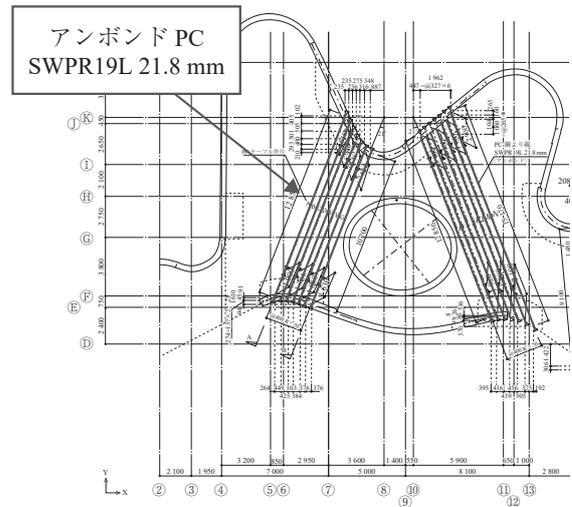


図 - 4 屋根伏図

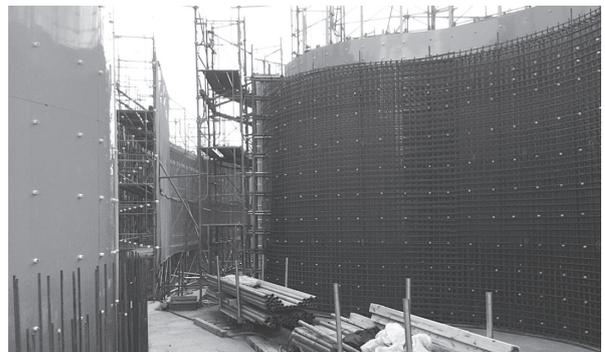


写真 - 6 曲面外壁の施工状況

屋根スラブ中央部には、建築計画上採光が必要となり、トップライトを設ける計画とした。トップライトを設けることでスラブ重量を減らしつつ、パラペット立上り部の剛性を評価することで、長期応力低減を図った。トップライトの位置および形状は建築担当と協議し、中央付近に楕円形状で計画を行った。

屋根スラブのPC鋼材の配置はトップライトとの位置を考慮し、八の字型に計画した(図-4)。ここで、外壁が曲面形状であることから、外壁側からの緊張作業が困難となるため、スラブ中央部でプレストレスの緊張を行う片引き方式の同時緊張を採用し、外壁側にあと施工箇所が生じない計画とした。

4.4 躯体形状の最適化検討

本計画の初期設計段階では、外構の植栽配置、展示室の壁長さ、設備の空調効率といった条件を盛り込み、建物を構成する躯体の総重量と屋根スラブのたわみを目的関数とした躯体形状の最適化を行った。

図-5に示す各種ツールを用いて、400ケースの解を導き、その中で躯体重量×最大たわみの値が小さくなる曲面外壁の形状を5つのケースに絞り込んだ(図-6)。その後、個別に解析を行い、たわみと端部応力を最小化するような躯体形状を計画した。さらに、屋根面に楕円形状のトップライトを設けることで、自重の低減を図り、トップライト周囲にパラペットを設けることでたわみ抑制に効果が見られ、最終的な形状決定に至った。

modeFRONTIER / FlowDesigner



図-5 最適化ツール

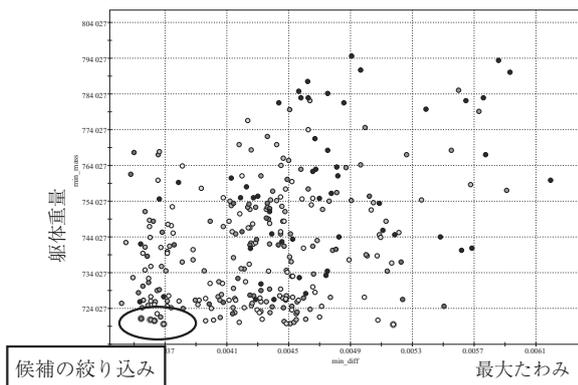


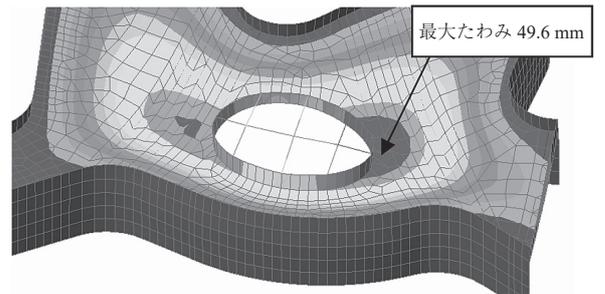
図-6 最適解の抽出

4.5 屋根面のアンボンドPCの設計

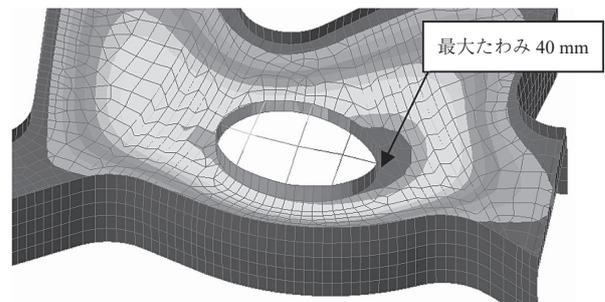
屋根スラブに対し、ポストテンション方式にてプレストレスを導入し、PRCⅢとして設計した。PC鋼より線SWPR19Lの21.8mmを用いて、片側7本ずつを均等間隔で配置し、スラブ中央部のたわみを抑制する計画とし、吊上げ力を算出し、midas iGenにてその効果を確認した。

FEM解析による応力解析の結果を図-7、図-8に示す。プレストレスの導入により、弾性たわみ量は約20%低減、長期曲げモーメントは約26%低減し、設計クライテリアを満足することを確認した。

今回、壁式鉄筋コンクリート造であるため、プレストレスの定着部が壁とスラブの取合い部に設置されることから、施工上鉄筋や定着金物が密集することが想定されたが、壁・スラブともに入隅部にて厚さを500mm(一部スラブ厚さ600mm)としたことで、端部の断面性能を向上させるだけでなく、施工性向上にも寄与する結果となった。

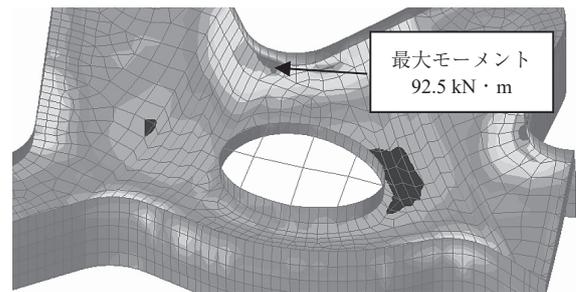


(i) プレストレス非考慮

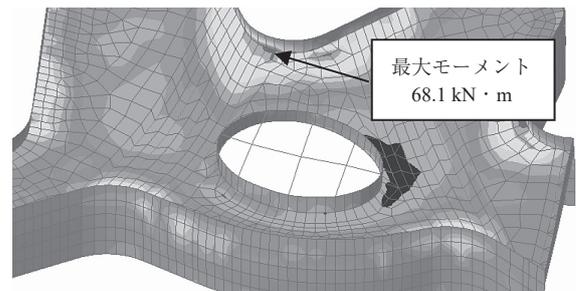


(ii) プレストレス考慮

図-7 プレストレス導入有無の長期たわみ量 (変形増大係数16とした場合)



(i) プレストレス非考慮



(ii) プレストレス考慮

図-8 プレストレス導入有無による長期曲げモーメント

5. 施工概要

5.1 PC 鋼より線配線工事

屋根スラブは、ポストテンション方式のアンボンドPC鋼より線 21.8 mm (SWPR19L) を 16 本配置した PRC 造とした。屋根の中央には、トップライト用のスラブ開口が設けられており、開口の周辺でのたわみを抑制するため、PC 鋼材をその開口の両側へ配置した計画としている (図 - 9)。また、比較的スパンが長くスラブ下にガラスサッシが取りつく箇所 (ケーブル符号 O, P の直下) についても、たわみ防止のために PC 鋼より線を配置した。

緊張端の定着体は、通常の支圧板型やキャストタイプを用いて外端部に緊張端を設ける方法ではなく、後埋め部からの水の侵入を防ぐため、スラブ内に緊張端と切り欠きを設けてスラブ上部から緊張することが可能な H 型アンカーを採用した (図 - 10)。緊張後、切欠き部にコンクリートを充填したのち、屋上防水と緊張端部の防水を兼ねて塗膜防水を施工することで、建物内部への水の侵入を防止した。

H 型アンカーは、円筒コンクリート構造物など円周方向に配置される PC 鋼より線に用いられる定着具であり、定着具はあらかじめ埋設されるため、切欠きを小さく抑えられる特徴をもっている。当該アンカーは土木学会による技

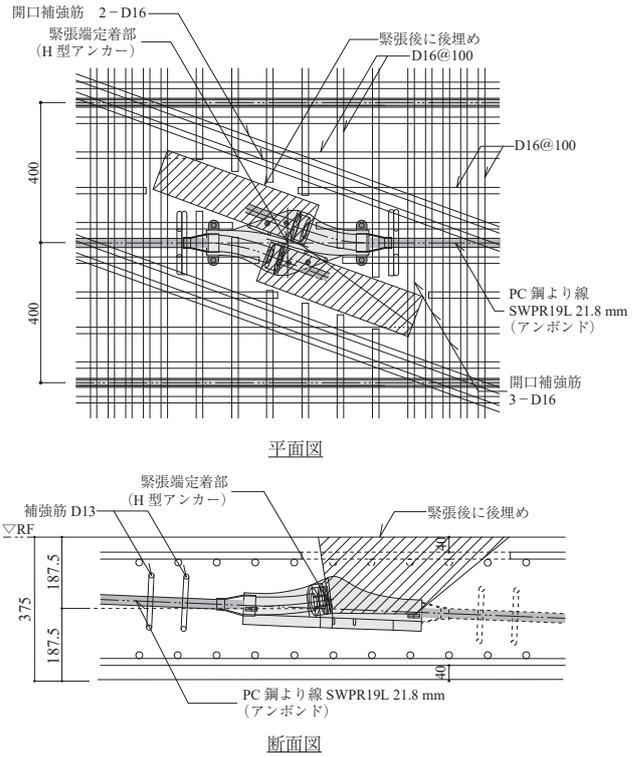
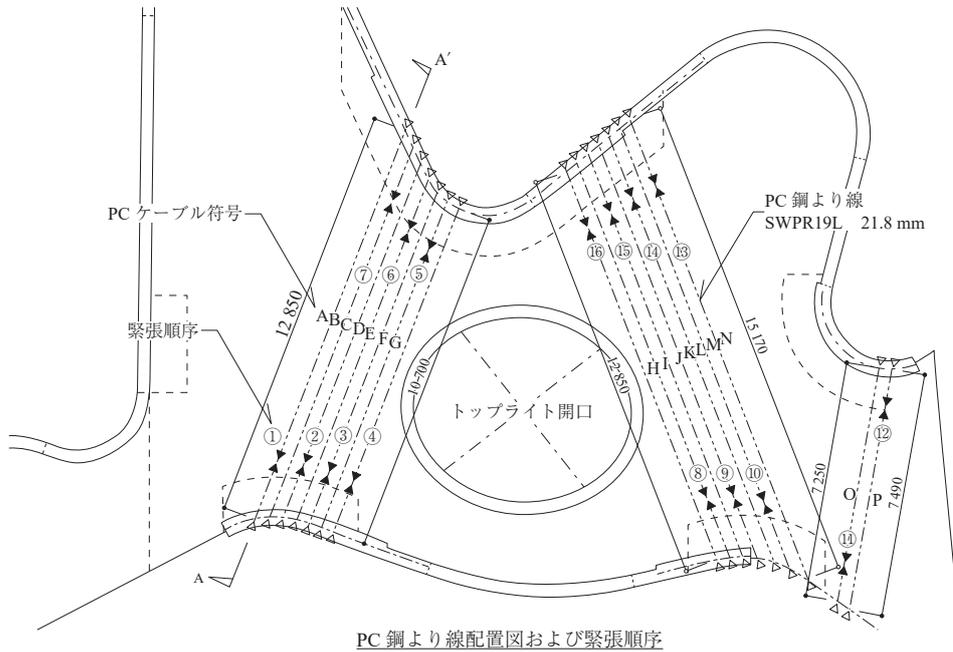
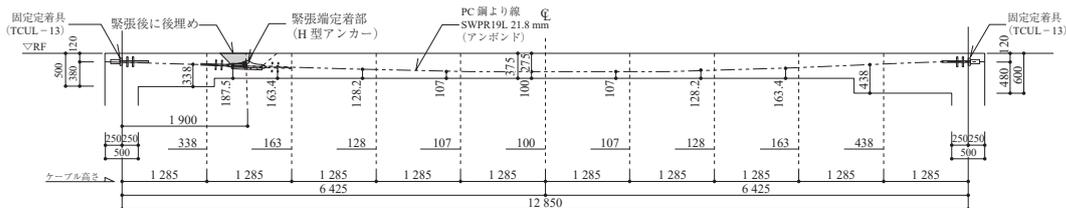


図 - 10 緊張端部詳細図



PC 鋼より線配置図および緊張順序



A-A' 断面配線図

特記なき限り▶◀は緊張端、△は固定端を示す。○数字は緊張順序を示す

図 - 9 PC 鋼より線配線図および緊張順序

術評価証を取得しているが、今回は建築物で使用するため、PC 規準¹⁾ 13 条を元に、定められた試験方法に従い実験を行うことで定着具の安全性の確認を行った。試験方法はプレレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種 PC）構造設計・施工指針・同解説²⁾ に従った実験を行い、その結果、定着具としての性能と安全性を確認した³⁾。

写真 - 7 ~ 10 にスラブの配筋およびアンボンド PC 鋼より線の配線状況を示す。施工順序は、① スラブ筋下端配筋 → ② H 型アンカー（定着体）の設置 → ③ アンボンド PC 鋼より線の配線および定着体への挿入 → ④ スラブ筋上端配筋 → ⑤ コンクリート打設 → ⑥ 切欠き用鋼製型枠の脱型 → ⑦ 導入時のコンクリート強度発現後に緊張 → ⑧ 余長の切断 → ⑨ 切欠き部の後埋め → ⑩ 緊張端部の防水を兼ねた屋上防水とした。図 - 11 に施工順序のフローチャートを示す。

PC 鋼より線および H 型アンカーの設置について、H 型アンカー内へ PC 鋼より線を挿入する際、定着体内部がカーブした形状であるため、PC 鋼より線の剛性により H 型アンカーが回転することが想定された。そのため H 型アンカーを所定の位置へ設置し、スラブ下端鉄筋と結束固定をした後に、H 型アンカーへ PC 鋼より線を挿入する順序とすることにより、挿入時の回転を抑え施工精度の向上を図られた。

また屋根スラブは、躯体で水勾配を設けていることや外壁が曲面形状のためスパンがすべて異なること、さらに放物線の途中に H 型アンカーを設置する必要があった。そのため、スラブ勾配を考慮し 1 ケーブルごとに配線図を作成した上で、レベル調整用に全ねじボルト（写真 - 10）

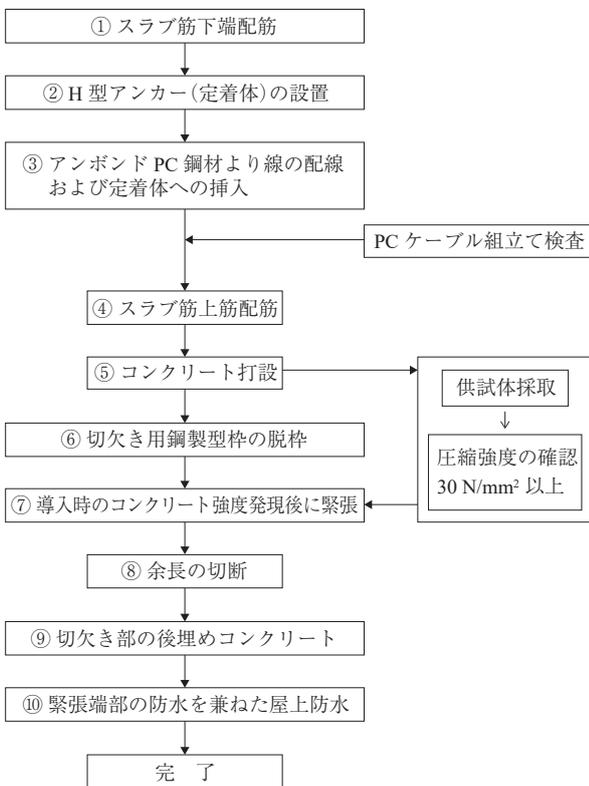


図 - 11 施工順序のフローチャート

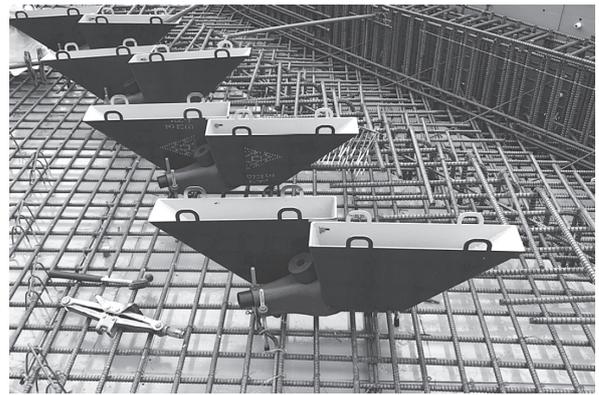


写真 - 7 スラブ下端筋および H 型アンカーの設置

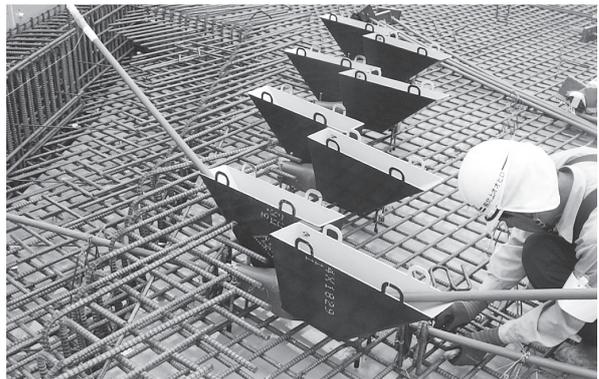


写真 - 8 H 型アンカーへの PC 鋼より線の挿入



写真 - 9 アンボンド PC 鋼より線および H 型アンカー設置状況

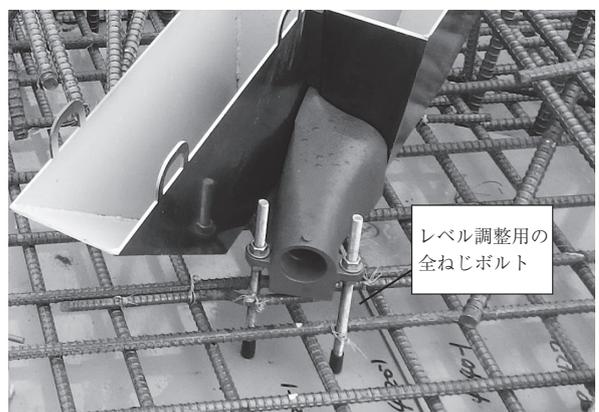


写真 - 10 H 型アンカーのレベル調整用全ねじボルト

を用いて H 型アンカーのレベルを調節することで、高い精度で施工を行うことができた。

5.2 緊張工事

屋根スラブのアンボンド PC 鋼より線の緊張工事は、コンクリート打設が完了し、導入時のコンクリート強度 $\sigma_{cp} \geq 30 \text{ N/mm}^2$ が発現したのちに行った。

本工事におけるアンボンド PC 鋼より線は、H 型アンカーを使用しているため、PC 鋼より線を 2 分割することとなる。スラブ筋と定着体の納まりの関係からスラブ厚さの中央に H 型アンカーを設置する必要があるため、配線形状によって長いケーブルと短いケーブルとに分けて計画を行った。

短いケーブルでは、導入応力の管理¹⁾に定められている PC 鋼より線の伸びを計算値の $\pm 5\%$ 以内に管理するこ

とが困難であったため、緊張力のみで管理を行った。なお、緊張力はプラス側の管理を行った。

PC 鋼材の機械的性質、緊張時の諸係数、導入プレストレス力、および緊張ジャッキの仕様を表 - 1 ~ 4 に示す。また、理論伸び量・導入緊張力・圧力計示度の計算値を表 - 5 に示す。

緊張力のロス、H 型アンカー内での摩擦によるロス (5%)、カーブチェアの摩擦によるロス (5%)、ジャッキ内でのロス (2%) を合計した 12% として実際の緊張力を決定した。通常よりも摩擦によるロスが大きいため、PC 規準¹⁾ 54 条に基づき、摩擦によるプレストレス力の減少を除去する目的で一時的に過緊張を行うこととし、導入時の許容引張荷重を $0.9 P_y$ (445.5 kN) とすることで、設計用緊張力を確保した。また、セット量の管理は戻り量管理の方法とし定着体ごとに定まる標準数値のセット量とジャッキ内ケーブルの伸び量の和である 8 mm を管理値とした。

PC 鋼より線の緊張は、図 - 9 に示す緊張順序で行った。前述したように長短のケーブルが存在するため、短いケーブル側でのセット量による緊張力の減少に配慮し、緊張端となる H 型アンカーの配置は隣り合うケーブルと対称とし交互の位置関係となるよう、バランスよく配置し緊張力を導入した。また、緊張順序は軸変形差による躯体のひび割れを防止するために、一本置きに緊張を行い、応力の集

表 - 1 PC 鋼材の機械的性質 kN (t)

定着体記号	H 型アンカー
鋼材構成	1-21.8 mm (SWPR19L)
引張荷重	573 (58.4)
降伏点荷重	495 (50.5)
導入時 許容引張荷重	443.5 (45.23)

表 - 2 緊張時の諸係数

定着体記号	H 型アンカー
鋼材構成	1-21.8 mm (SWPR19L)
断面積	312.9 (mm ²)
弾性係数	195 000 (N/mm ²)
角度変化による 摩擦係数	0.06 (1/rad)
m 当たりの 摩擦係数	0.002 (1/m)

表 - 3 導入プレストレス kN (t)

定着体記号	H 型アンカー
鋼材構成	1-21.8 mm (SWPR19L)
定着方式	くさび式 (CCL アンボンド工法)
導入プレストレス力	396.0 (40.4)

表 - 4 緊張ジャッキの仕様

定着体記号	H 型アンカー
鋼材構成	1-21.8 mm (SWPR19L)
使用ジャッキ	KM - 50
受圧面積	72.45 (cm ²)
ジャッキ内ロス	12 (%)
ジャッキ内摩擦係数	1.12
実際の緊張力 kN (t)	443.5 (45.23)
圧力計示度 MPa (kg/cm ²)	61.2 (624.2)

表 - 5 理論伸び量・導入緊張力・圧力計示度 計算値

番号	階	ケーブル No.	μ 値	導入緊張力 (kN)	圧力計示度 (MPa)	伸び量 (mm)	$\pm 5\%$ の 許容範囲	
No.1	R	A-短	0.06	396	61.2	20.5	19.5	~ 21.5
No.2	R	A-長	0.06	396	61.2	78.3	74.4	~ 82.2
No.3	R	B-短	0.06	396	61.2	20	19.0	~ 21.0
No.4	R	B-長	0.06	396	61.2	75	71.3	~ 78.8
No.5	R	C-短	0.06	396	61.2	19.5	18.5	~ 20.5
No.6	R	C-長	0.06	396	61.2	72.1	68.5	~ 75.7
No.7	R	D-短	0.06	396	61.2	19.1	18.1	~ 20.1
No.8	R	D-長	0.06	396	61.2	69.5	66.0	~ 73.0
No.9	R	E-短	0.06	396	61.2	18.9	18.0	~ 19.8
No.10	R	E-長	0.06	396	61.2	67.7	64.3	~ 71.1
No.11	R	F-短	0.06	396	61.2	18.7	17.8	~ 19.6
No.12	R	F-長	0.06	396	61.2	66.9	63.6	~ 70.2
No.13	R	G-短	0.06	396	61.2	18.7	17.8	~ 19.6
No.14	R	G-長	0.06	396	61.2	66.4	63.1	~ 69.7
No.15	R	H-短	0.06	396	61.2	20.5	19.5	~ 21.5
No.16	R	H-長	0.06	396	61.2	78.3	74.4	~ 82.2
No.17	R	I-短	0.06	396	61.2	20.6	19.6	~ 21.6
No.18	R	I-長	0.06	396	61.2	79.4	75.4	~ 83.4
No.19	R	J-短	0.06	396	61.2	20.8	19.8	~ 21.8
No.20	R	J-長	0.06	396	61.2	80.8	76.8	~ 84.8
No.21	R	K-短	0.06	396	61.2	21.1	20.0	~ 22.2
No.22	R	K-長	0.06	396	61.2	82.5	78.4	~ 86.6
No.23	R	L-短	0.06	396	61.2	21.4	20.3	~ 22.5
No.24	R	L-長	0.06	396	61.2	84.7	80.5	~ 88.9
No.25	R	M-短	0.06	396	61.2	21.7	20.6	~ 22.8
No.26	R	M-長	0.06	396	61.2	87.5	83.1	~ 91.9
No.27	R	N-短	0.06	396	61.2	22.4	21.3	~ 23.5
No.28	R	N-長	0.06	396	61.2	91.2	86.6	~ 95.8
No.29	R	O-短	0.06	396	61.2	15.9	15.1	~ 16.7
No.30	R	O-長	0.06	396	61.2	47.3	44.9	~ 49.7
No.31	R	P-短	0.06	396	61.2	16.1	15.3	~ 16.9
No.32	R	P-長	0.06	396	61.2	48.7	46.3	~ 51.1

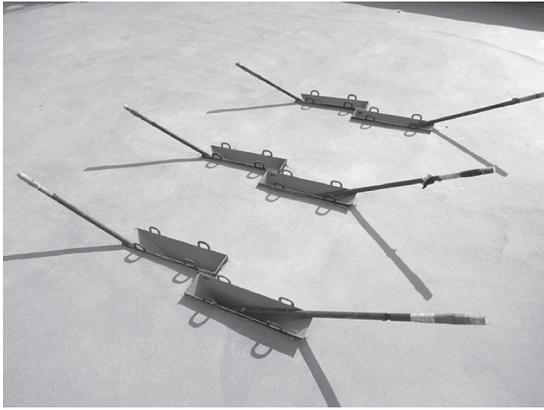


写真 - 11 コンクリート打設後状況



写真 - 12 鋼製型枠の脱型状況

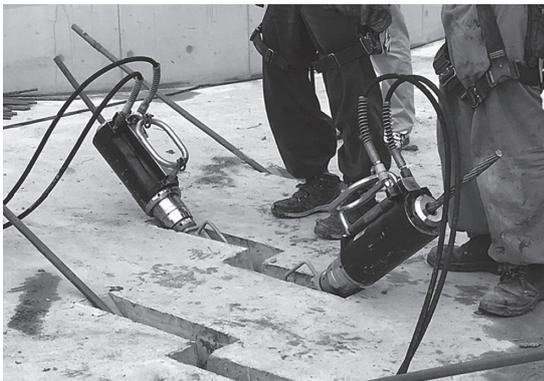


写真 - 13 緊張作業の状況

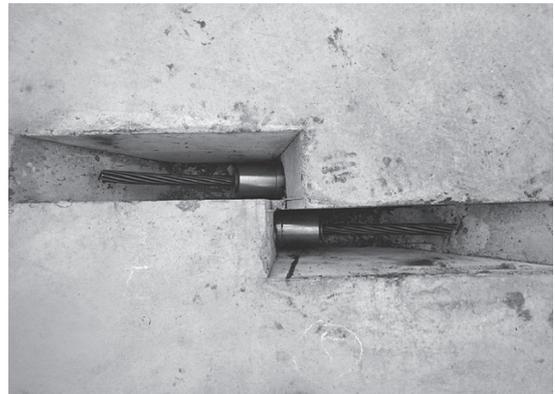


写真 - 14 緊張後の余長切断状況

中を緩和することでひび割れの発生は見られなかった。

緊張作業の状況を写真 - 11 ~ 14 に示す。緊張準備作業として、切欠き用鋼製型枠の脱枠を行い（写真 - 12）、定着グリップの取付けを行う。その後に、1つのH型アンカーに対して2台の緊張ジャッキ（KM-50）を設置し（写真 - 13）、長短のPC鋼より線の緊張力に過度な差が生じないように配慮し2台同時に緊張力を加えた。また、圧力計はキャリブレーションを行ったものを使用し最小目盛り1mmのスケールにより伸びの測定を行った。緊張後は、余長の切断を行った後に（写真 - 14）、切欠き部をコンクリートで充填した。

6. おわりに

今回、発電所の顔となる見学者施設として特徴的な外観形状と広々とした展示空間をもつ建物の設計に対し、屋根面にプレストレストコンクリートを採用することで、合理

的に大スパン架構を成立させ、フレキシビリティに優れた大空間を実現することができた。

最後に、本プロジェクト関係者の皆様に、心より感謝の意を表します。

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、1998
- 2) プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種PC）構造設計・施工指針・同解説、2003、pp.286-289
- 3) 武市ほか：円筒コンクリート構造物用PC鋼材定着具の開発、第28回PCシンポジウム、pp.691-694、2019.11

（*の写真：撮影 株式会社フォワードストローク）

【2020年5月15日受付】