

バルセロナ空港新管制塔の設計・施工

著：Mauro Eugenio Giuliani

訳：プレストレストコンクリート海外部会 * 高津比呂人

1. はじめに

バルセロナ空港の新管制塔は、空港や都市の象徴となる建物である。その構造体は、特異解をもつ厳密な関数による曲線によって形成され、それが管制塔に意匠的な表現を与えている。このような建物を実現するために必要な構・工法が、設計段階から詳細に検討され、意匠と構造が調和した建物がここに実現した。

2. 意匠

管制塔の建設予定地が、そのデザインに大きな影響を及ぼした。その 80 m 四方の建設予定地は、滑走路と滑走路の間（一つは供用中で、一つは建設中）にあり、新ターミナルの建設予定地と隣り合っていた。

コントロールルーム（図 - 1）の高さは、滑走路の端での飛行円錐の中の視点の角度によって定義されており、65 m であった。また、滑走路と滑走路の間に位置しているため、360° の視野を確保する必要があった。ここでは、管制装置の配置にも適当な八角形のプランを採用することで、360° の視野を確保した。八角形のプランでは、円形等のプランに比べ、光の反射を軽減するという効果があるが、さらに反射光を軽減するために、ガラスを鉛直方向に対して 15° 傾けて設置した。

八角形のプランを採用することにより、シャフト構造（図 - 1）の配列が決定した。シャフトは、直線で形成された網目状のホワイトコンクリート部材からなり、双曲線のフォルムをなしている。網目の頂点では、放射状に

配置された 8 本の鉄骨梁が管制塔の上部構造を支持しており、この梁の上に、コントロールルームが置かれ、さらに同じ梁で下側の階を吊り下げている。

中央の八角形のコア（図 - 1）は双曲線のシャフトの中に挿入されている。中央コアは自立構造で、押し出しアルミ鋼管で作られている。中央コアは、上部と下部の部屋の接続部としての機能を含んでいる。さらに詳細に述べると以下のとおりである。

- ・ 2つのパノラマエレベーターを対辺に備えている。
- ・ 中央に2つの非常階段を備えている。
- ・ 頂上に階段の踊り場からの4つの通路を備えている。

管制塔の足元を取り囲む円形の建物には、必ずしも上部の部屋に置く必要のない設備や機器のスペースがあり、加えてオフィスと店舗を備えている（データ処理室、修理室、バックアップコンピュータ、管制官の休憩所、事務所）。とくに内部リング（図 - 1）の中間階部分は、管制塔へのアクセスを形成しており、さらに地上駐車場の上に展開する外部リング（図 - 1）の2階部分への高架の連絡通路を支持している。エントランスホールからは管制塔の全景を見上げることができる。

下部構造の外径は、ほぼ建設エリアに内接しており、将来建設されるターミナルのデザインと協調性のあるものとなっている。

3. 構造

3.1 コンセプト

双曲線に内接するシャフト構造は、鉄筋コンクリート構

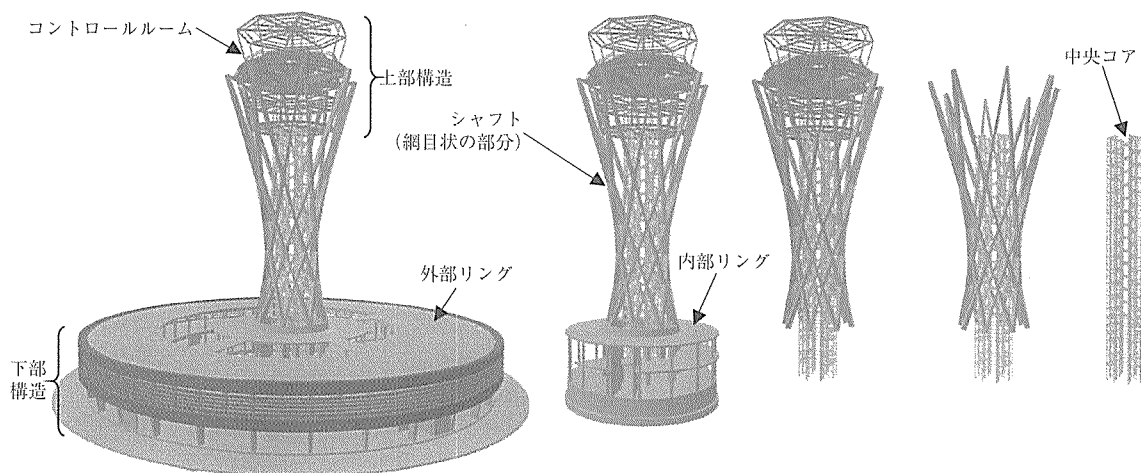


図 - 1 管制塔の各部の計画

造の限界を追求した空間構造の先駆者たちによって開発され、たとえば、E.Torroja のフェダラの給水塔や、Morandi のリボルノの給水塔（設計のみで実現していない）がある。

しかし、この形状の構造は、型枠の複雑さや、多くの優秀な労働者を必要とすることから工事コストが高くなるため、次第に採用されなくなっていた。

新管制塔では、プレキャスト・鋼－コンクリート合成構造・施工解析・構造解析・最新の構造材料といった現代の技術を用いることで、この先駆者らの手法を実現した。また、材料固有の構造性能を最大限に利用できる、効果的かつ経済的な形状を選択することができた。

結果的に、非常にかぎられた材料と経費で、高強度かつ高剛性を発揮し、洗練された印象の管制塔を実現することが可能となった。

設計の最初の段階から、提案された形状で、鉛直力と水平力に抵抗し、施工を実現するということが大きな課題として課せられた。

最初のデザイン案では、双曲線形状表面の定直線に沿って配置された鋼管要素から成るシャフト構造であったが、メンテナンス上の問題（建設地が海のそばであることが一つ）から、AENA（建築主：スペイン空港公団）は最初のデザイン案を切り捨て、プレキャストコンクリートによる解決を見出した。

形状面および構造上堅牢で、正確であると考えた最初のアイデアを発展させた解決方法を、非常に短い時間で検討しなければならないことが問題であった。

もちろん、構造材料の変更によって、設計のコンセプトと施工法の両方に大きな変化が生じたが、最終的にプレキャストコンクリート構造を採用することによって、鋼構造の案よりも、堅牢な構造となった。

構造の基本的なテーマは、設計の最初の段階から考慮していたのだが、シャフトをプレキャストコンクリート要素により組み立てることであった。それを実現するた

めには、信頼性があり、かつ速く低コストで組み立てることを両立し得る、効率的で空間上で正確な位置に設置し得る接合システムが必要であった。

解決策として、施工中、階段やエレベーターおよびシステム配管を取納しているアルミニウム構造の中央のコアとシャフト要素を相互作用させることを考えた。これを実施するために、以下に示すような、新しい技術による材料構成が採用された。

- ・シャフトのプレキャスト部材は、普通強度のホワイトコンクリートによるプレキャストプレストレストコンクリートを使用
- ・接続ノード部分には、鋼板とPC鋼棒を使用
- ・上部構造は鉄骨造で、床版は鋼－コンクリート合成構造
- ・中央コアには押し出しアルミニウム鋼管を使用

3.2 構造計画

構造的には、管制塔と、その足元を取り囲む円形の建物の2つの主要なシステムに特長がある。

双曲面のシャフトが鋼とコンクリートによる管制塔の上部構造を支えている。シャフト内部の階段－エレベーターコアは、アルミニウム構造であり、スマートさと軽快さを兼ね備えており、管制塔の上部構造と下部構造を接続する。

双曲面のシャフトは、下部構造の屋根の高さの位置にある強力なリング梁から立ち上がっており、そのリング梁以下の部分は、現場打ちの柱と床スラブからなり、基礎構造（場所打ち杭）に荷重を伝達している。

管制塔の足元を取り囲む円形のビルは、プレキャストコンクリート造の放射状フレームで、床スラブには、ハーフプレキャスト版を用いている。また、水平剛性を付加するための耐震壁が取り付けられている。

3.3 各部の詳細

3.3.1 下部構造の内部リング

この円形の平面をもつ部材は管制塔のシャフトの基部構造物となる。

基礎から立ち上がる鉄筋コンクリート柱により、管制塔のシャフトが立ち上がるリング梁を支える構造となっている。

中間階の床は現場打ちコンクリートスラブで、外周部の現場打ちの円形柱によって支持されている。中央部でシステム通路を区切っている数枚の耐震壁は、水平剛性を付加するとともに、基礎から上る階段を支えている。

3.3.2 シャフト

双曲面のシャフトは、普通強度のホワイトコンクリートによるプレキャストプレストレストコンクリートで作られている。

上部の節点で、コントロールルームを支持するとともに、アルミニウムの中央コア部分の水平力をコンクリート構造に伝えている。

シャフトは、すべて、意匠上および構造上の二元的な機能を有するプレキャスト部材で作られ、このコンセプトは、後述の下部構造の外部リングにも拡張された。

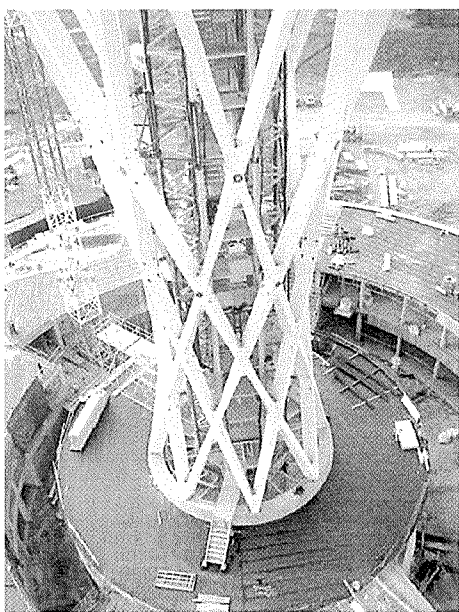


図-2 シャフトと下部構造の内部リング

シャフト下部の八角形の内接円の直径は 12.66 m、上部の八角形の内接円の直径は 23.40 m である。各要素の断面は 0.45 × 0.90 m の長方形で、中央に配置された PC 鋼棒によってプレストレスが導入されている。

断面の主軸はいつも双曲面の中心線の方に合わせているため、要素の端部は相対的に回転（軸に対してねじれ）しており、その外面は必ずしも平面にはなっていない（図-3）。

各プレキャスト部材の中心線は、節点で収束しており、その位置で各部材が貫通していると想定して、平滑面を決定している。したがって、双曲面は2つの連続した節点間の距離の長さにかぎって分割可能であるため、それを前提にした接続システムを考案した。

使用するコンクリートは、立方体圧縮強度 40 MPa の自己充てんコンクリートで、使用材料は、ホワイトセメント、明るい色の骨材、混和材である。

節点部分には、以下の特徴がある（図-4、5）。

水平断面と鉛直断面：すべてのプレキャスト部材には、節点の中央を貫通する鉛直平面に一致する端面と、節点の中心線に直交する平面に一致する端面を有している。

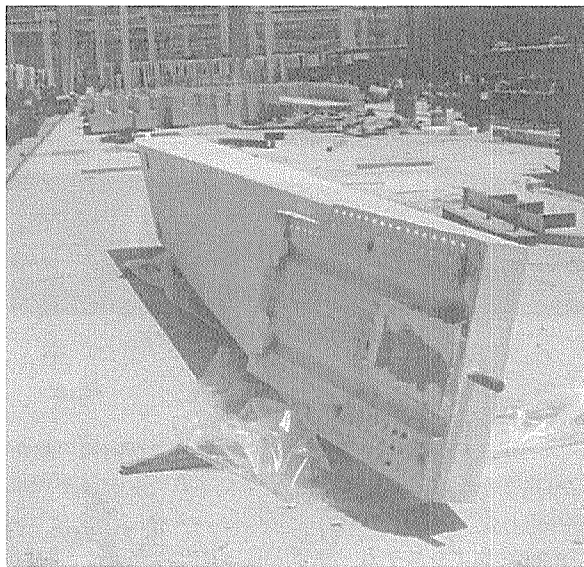


図-3 シャフトのプレキャスト部材

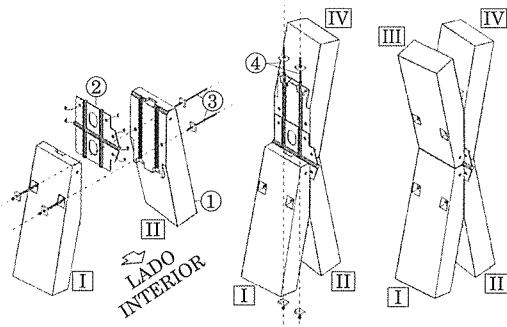


図-4 シャフトの節点の構成



図-5 ノード部分の建方

両方の表面にはプレキャスト部材同士の全面接触を防ぎ、その後の高強度モルタルでのグラウティングを可能にする小突起が設けられている。

内部のステンレス部材は、プレートと数本のパイプでできており、プレキャスト部材間のせん断力の伝達および、緊張用の鋼棒のガイドとして機能する。また、空間内での節点の位置決め（建方の間、この要素は階段コアに仮に取り付けられ、建方の終了まで部材を支持する）やプレキャスト部材の仮固定材となる。

水平および垂直緊張材は PC 鋼棒であり、最上部の節点では直径 32 mm、それ以外では直径 26 mm のものを用いた。

3.3.3 上部構造

構造は、鋼-コンクリート合成構造で、放射状の鉄骨梁と、デッキスラブで構成されている。テクニカルルームの高さ（55.56 m）にある、シャフトの上部の頂点で支持されている変断面で最大せい 1.5 m の鉄骨梁が、上部構造を支持している（図-6）。

シャフトの上部の頂点より下部の床はファサード（正面の外観）を区切る外周部の鉛直材と、内部空間を区切るパーテーションに隠れる内部の鉛直柱によって吊り下げられており、コントロールルームの屋根は、ランタンの角に隠された 8 つの細長い鉄骨の上に載せかけられる。

機械設備の収納室やシミュレーション訓練室、休憩室の高さで、床スラブとシャフトが水平ロッド（鉛直方向の力の流れを変えないように水平ヒンジを設けている）により接続されている。

上部構造の鋼-コンクリート合成フレームは、地組された後に、大型クレーンでシャフトの上部に取り付けられた。

3.3.4 アルミニウム階段コア

コア部分にも、構造と意匠の間の相関関係がある。

このコアは、特別に設計された、押し成形角形アル

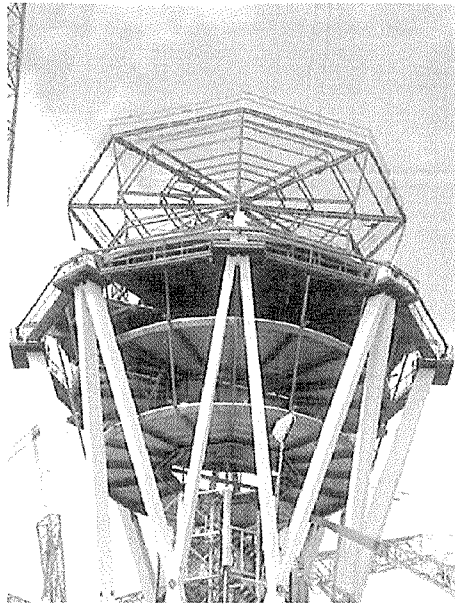


図-6 上部構造

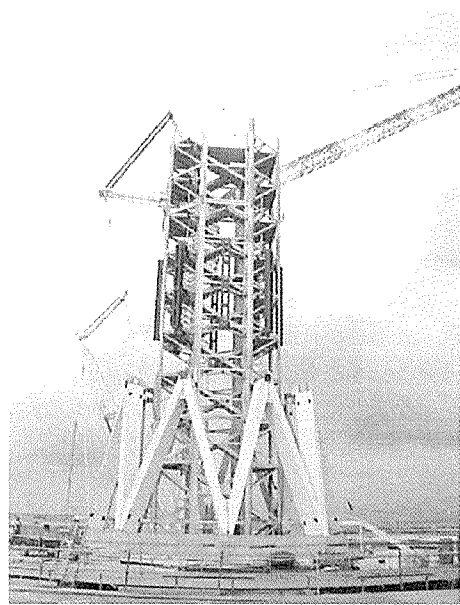


図-7 アルミニウム構造のコア

ミニウム鋼管・接合部・ステンレス製ボルトを使った革新的な構造システムであり、このプロジェクトにおけるもう一つの大きな特徴である。

この材料を選択した背景には、海に近接していても、メンテナンスが必要ないという点があった。鋼管の断面寸法は、ヨーロッパ中の多くの工場で製造可能なものを選定した（最大寸法 300 × 200 mm、プレス能力 30 000 kN）。

この独特な断面を製造するために必要な金型の製造による建設コストの上昇は、建物が軽量化されたことによって、小さく抑えられた。

階段の吹抜けコアは、その自重を支える独立構造で、シャフトの基礎に緊結されている。風や地震によって引き起こされる曲げとせん断力を減少させるために、シャフトのノードとの間に水平接合ロッドを設けた。

施工中、階段コアはシャフトの建方用のガイドとして、またそれを固定するものとして使用された（図-7）。

3.3.5 下部構造の外側リング

構造は放射状のプレキャストフレームと現場打ちの床スラブから構成されている。このフレームの梁は、長方形断面の PC 梁で、内部柱に剛結されている一方、外側の柱には単純支持されている。

床スラブは、剛な水平ダイアフラムで、すべての要素を接続し、地震荷重や風荷重を耐震壁に伝達している。

内周部の柱は現場打ちで、外周部の柱は、彫刻を施したプレキャスト柱である。ファサードは構造的、意匠的ユニットにより構成されている（図-8）。これらはすべてホワイトコンクリートを使ったプレキャスト部材でできており、以下のような特徴を有している。

- ・外部柱の2倍の高さである
- ・1階と2階の境界部と屋根に曲線状の長方形断面の梁がある
- ・2階床と屋根梁の間に2次柱がある

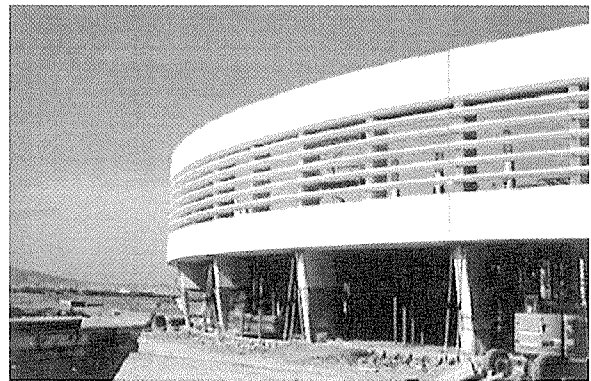


図-8 外部リングのファサード

- ・陰影をつける水平翼を備えている

ファサードの接続システムは、外側および内側の見た目を損なわないようにするため、「隠された」ディテールを採用した。

3.3.6 施工システム

プレキャストプレストレストコンクリートで作られたシャフト構造は、幾何学的に複雑な計画であったため、設計の初期の段階から、施工手順の詳細な検討が必要であった（図-9, 10, 11）。

そこで、アルミニウムの階段コアとコンクリートシャフトの相互作用に基づく以下のシステムを考案した。

- a. コアのセグメントは、つねにシャフト部材のノードよりも高い位置まで取り付ける。
- b. 階段コアの鉛直材に、シャフト部材の接合用プレートを取り付ける。
- c. シャフトのコンクリート部材を設置して接合用プレートにピンで接続し、ピンの定着は階段コアにとる。
- d. 同じ階の8つのノードの建方後に、プレストレスを導入し、隙間にはグラウトを注入する。
- e. 鉛直方向は固定せずに、シャフトの水平位置を固定



図 - 9 プレキャスト部材の建方



図 - 12 新管制塔の全景



図 - 10 上部構造の設置



図 - 11 躯体工事の最終段階

- するために、節点とコア間に最終的な接続部材を取り付ける。
- f. 以上の作業を繰り返し、コアとシャフト部材を取り付けていく。
 - g. 階段コアを最終の高さまで取り付けたら、シャフトも最終レベルまで取り付け、階段コアの頂部とケーブルで仮止める。
 - h. 多角形の仮設梁によって、シャフトの上側の節点間を接続した後に、ケーブルを取り外して、シャフトの中に地組みした上部構造の鉄骨フレームを大型クレーンで取り付ける。
 - i. 管制室をクレーンで取り付け、続いて床コンクリートを打設して、躯体工事は完了。

参考文献

- 1) Mauro Eugenio, Gian Carlo Giuliani: "Aluminium Stairs and Lift Load-Bearing Core of the Barcelona Airport Tower", Structural Engineering International, Vol.16, No.4, pp.360-362, 2006.4

原 典

- Giuliani, M.E.: "One Step Further: Barcelona New Control Tower", proceedings of The 2nd fib Congress, ID2-24, 2006.6

Reproduced by permission from the *fédération internationale du béton (fib)*, www.fib-international.org

* : プレストレストコンクリート海外部会委員
池上浩太郎 (ピーシー橋梁 (株))
上田 高博 (㈱ 銭高組)
白鳥 明 (首都高速道路 (株))
藤岡 篤史 (㈱ピーエス三菱)
山口 統央 (鹿島建設 (株))

【2008年5月9日受付】