PCaPC 圧着工法による「組立箱構造」の建築物の設計

DESIGN OF THE BUILDING USING CONSTRUCTION METHOD OF ASSEMBLED PRECAST MEMBERS BY PRESTRESSING

大和田精一 — *1 陶器浩一 — *2
嘉村武浩 — *3Seiichi OWADA — *1 Hirokazu TOHKI — *2
Takehiro KAMURA — *3キーワード：
組立箱構造, PCaPC 圧着工法, 有限要素解析, 実大実験, 歪・たわみ計測Keywords:
Erected box structure, Construction method of assembled precast members by prestressing, Finite element modeling, Mockup test, Measurements of strain and deflection

This paper presents the structural design of a museum constructed with "box assembling structure" for which the PCaPC compression joint method is adopted. All walls, roofs and floors are of precast concrete slabs; the exhibition spaces were made by erecting boxes with PC members which are firmly connected by compression joint method. Then by supporting these boxes by three independent columns, a "floating exhibition rooms" were realized. Those boxes with its frame style are adopting a number of details that no other example can offer.

This paper first introduces the design details followed by the problems raised during design stage, then reports the facts confirmed through our mockup tests and the field measurements.

1. はじめに

PCaPC圧着工法を用いた「組立箱構造」の建物の構造設計について報告する。

用途は美術館で、建物の展示室空間を構成する壁・屋根・床すべてをプレキャストコンクリート（以下PCa）板とし、現場PC圧着により「箱」を形成し、これを3本の独立柱で支えることにより、「浮いた展示室」を実現させている。

PCa壁は発泡断熱材を内蔵した2重殻構造とし、二重壁とすることにより断熱性能に優れた展示室を、また、外側は全部で80万枚の細かなタイルを打ち込んだ多種の曲面を連続させることにより美術館建築にふさわしい特徴あるやわらかい外観形状を創り出している。

この建物は、大断面の圧着工法によりそれ自身が構造体である「箱」を組み立てたものであり、その架構形式と共に、特殊な多くのディテールを採っている。施工前に実大実験を行って課題を解決し、実施時には現場計測を行って設計の検証を行いながら施工をすすめた。

本報では、その設計内容を紹介した後、設計時の課題となった事項について、実大実験・現場計測を通じて解決した内容について報告する。

2. 構造計画概要

自然環境豊かな地に建ち、周辺の環境との調和を特に求められたこの建物の設計に当たっては、それ自体が減圧感を与えることなく、自然の中にとけこませることを設計コンセプトとした。

1階をオープンなエントランス空間とし、2階に各部屋ごとに展示室を分棟配置し、それらを渡り廊下でつなぐことにより、周囲の自然を建物で分断しないようにしている。

写真1. 建物外観

図1. 建物配置

2. 1 架構計画

建物の2階に分棟配置した展示室のうち、正面の展示室の規模は、平面の大きさが21.8m×18m、高さ7mである。展示室は機能上四周を壁に囲まれた整形な形をしている「閉じた箱」である。この「閉じた箱」を3本の独立した柱で支える計画とした。

*1 ㈱日建設計大阪本社 構造設計室長・工修
(〒541-0043 大阪市中央区高麗橋4-6-2)

*2 ㈱日建設計大阪本社 構造設計主管・工修

*3 ㈱日建設計大阪本社 構造設計室 修士(工学)

*1 General Manager, Structural Engineering Dept., Nikken Sekkei Ltd., M. Eng.

*2 Senior Engineer, Structural Engineering Dept., Nikken Sekkei Ltd., M. Eng.

*3 Structural Engineering Dept., Nikken Sekkei Ltd., M. Eng.

建物正面は、中央に柱が1本だけであるが、偏荷重に対しては、箱全体がねじれ抵抗し、後ろの2本の柱で踏ん張ることになる。この立体効果により、3本の独立柱で支えた「閉じた箱」を安定した構造としている。

図2. 「閉じた箱」

2階展示室平面図

2. 2 PCaPC圧着工法

この「箱」を構成する要素、つまり、床・壁・屋根すべてを工場製作のプレキャストコンクリート板とし、現場にて組み立てるPC圧着工法を採用した。部材は幅1.8mをモジュールとした。

この工法を採用した理由はPC構造の一般的な特徴である、工期の短縮・現場作業の省力化・熱帯木材型枠使用の抑制・躯体の高品質化もあるが、それ以上の大きな理由となったのは次の2点である。

・美術館の特徴ある形状の精度確保と美しい曲面打ち込みタイル壁の実現

・美術館の最大の課題であるコンクリートから発生するアルカリガスの早期低減化

図3. PCa組立概要図

2. 3 二重殻構造

展示室内の環境は、外気によって変動することのない「恒温恒湿」が求められる。このため、壁版を断熱材をサンドイッチした二重構

図4. 二重殻構造

造板とし、いわゆる「蔵」のような環境となることを目指した。タイルが打ち込まれた丸みを持つ外壁と厚さ350mmの主構造である内壁の間に450～600mmの断熱材（発泡スチロール）を内包したPCa板とした。また、床を二重構造とし、その間の空間を空調のチャンバーとして計画した。

二重壁・二重床とすることにより高断熱性と大きな熱容量を確保し、非常に負荷が小さく温度変動の小さい展示環境を実現した。

3. 構造設計概要

建物の特徴づける外周の壁板はディープビームとして、荷重を独立柱に伝える。壁梁としての断面諸元を表1に示す。

「箱」の設計にあたっては、PCa部材はフルプレストレスとなるようにした。

PCa壁ブロックはH型断面の二重壁とし、内側の壁（350mm）を構造要素として横方向に緊張して圧着している（図3）。

外壁同士は接続せず、仕上げ材および面外方向の剛性を高めるのに寄与している。

「箱」を支える独立柱は現場築造のSRC造である。箱の脚部に当たる2階外周梁は現場打ちのSRC造として鉄骨で独立柱と接続される。PCaによる壁・床をSRC梁と圧着接合して「箱」を形成している。（図5）

図5. 断面詳細図

・設計用地震力の設定 : 設計用地震力を1質点系弾性地震応答解析を行うことにより設定した。建物の固有周期はX方向で0.34秒、Y方向で0.35秒である。各地震波はEl Centro NS、Taft EW、Hachinohe NS、JMAkobe NSの4波（最大速度：50cm/sec）とする。最大応答せん断力係数が1.38（El Centro）であったため設計用せん断力係数を1.40とした。

・耐震設計クライテリア : 設計用地震力として水平方向加速度1.4Gが作用した場合、上下動による鉛直方向加速度1Gが作用した場合およびこれらを組み合わせた場合、また、上下方向逆対称ねじれ荷重を作用させた場合（西側+1G、東側-1G）に対して生じる応力度が、①独立柱：短期許容応力度以下（弾性設計）、②各PCa部材：フルプレストレス、③PC合成床の現場打ちスラブ部：ひび割れ応力度以下となるように計画した。

上記応答解析による応答加速度は最大で1350galとなった。収容物（絵画）は基本的には壁面に固定されていれば揺れに関しては問題ないので、内装および什器の設計をこの加速度に基づいて行っている。

・解析手法 : 全体架構を線材置換した立体架構モデルによる静的解析および「箱」部分を立体モデル化した有限要素法解析（NASTRANによる）を行い、長期荷重・偏心荷重・地震荷重（水平・上下・逆対称上下）に対する安全性を検証している。また、本解析では「箱」のPCa部材はこれらの荷重時にフルプレストレスとなることを確認している。

図7に立体的有限要素法解析結果（南・北壁面の応力）を示す。なお、プレストレス応力の算出にあたっては各ケーブルの設計導入緊張力の最小値を外力として用いている。

有限要素法による解析結果によると、コーナー部（北西・北東端部）の長期荷重時の鉛直方向変位は3.9mmとなっている。

・ディテール設計

P C a壁板の交点となるコーナブロックは直交する2方向の緊張端が交差する。2方向から反力を受けるため複雑な応力を生じるが断面を大きくして緊張時に生じる応力が許容引張応力度以下になるようにした。有限要素解析の結果を図6に示す。

図6. コーナブロック応力図

長期荷重時

東西方向地震荷重時

壁版P C鋼線よこ緊張時（プレストレス応力）

図7. 有限要素解析結果

表1. 壁板応力一覧表

*水平荷重時力と上下動時力の組み合わせに平方根としている

4. 構築手順

4. 1 架設

敷地南側の樹木を保護するために揚重は北側からのみとし、500トン油圧クレーンにて架設した。組立順序は、以下の手順を採った。

1. 独立柱とそれに連続した外周鉄骨を組み立て、床板を敷き並べる。
2. 外周SRC梁とPC合成床のトップコンクリートを打設、緊張する。(床の完成)
3. 幅1.8mモジュールの壁板を床上に並べ壁を外周SRC梁にたてに圧着、その後壁間に目地コンクリートを打設し、壁板相互をよこに圧着する。(壁面の完成)
4. 屋根板を架設・トップコンクリート打設・緊張し、壁に圧着する。(箱の完成)
5. 最後に渡り廊下板を架設・圧着する。

図8. 組立手順図

4. 2 緊張・グラウト

プレストレスト力は、先述したように設定したいかなる荷重時にも「箱」の各PCa部材はフルプレストとなるように計画した。

・たて緊張・

PCa壁板と床梁の圧着は、壁板内に縦方向に450mmピッチで配したPC鋼棒(32φ)の緊張により行った。緊張力導入時における偏心を最小限にするため、部材の中心に配置したPC鋼棒から端部のPC鋼棒の順で、1回目は最終緊張力の30%で一つの壁板の4本を緊張し、2回目に最終緊張力を同じ順序で導入した。

・よこ緊張・

PCa壁板相互の横緊張は壁内に450mmピッチに配したPC鋼線により圧着し緊張力は2100tであるが、応力の集中する独立柱の周辺は中空部をなくし、断面・緊張力を大きくしている。

壁ブロックに均等に荷重を作用させるため、部材の中央部から上下交互に、緊張を行った。

片引きで緊張を行うところは上から1本おきに緊張端・固定端を左右交互にして導入力を左右均等になるようにした。

実大実験時、および実施工時にPC a壁板・目地コンクリートに歪みゲージを入れて導入力が断面に均等に作用していることを確認しながら慎重に施工を進めていった。

・スラブトップコンクリート緊張・

PC a壁板・床板・屋根板の他、現場打ちである床・屋根のトップコンクリート面内も、格子状に緊張力を導入しているが(PC鋼より線21.8φ、@900)。これは、偏荷重時に「箱」がねじれることによって生じる面内せん断力に対処するためのものである。

・グラウト・

グラウト材は、低ブリージングタイプのグラウト材を、特に充填性に注意の必要な水平PC鋼材にはノンブリージングタイプのグラウト材を用い、施工試験にて圧入速度と充填性を確認して施工に臨んだ。グラウトは注入口の他に、必ず両側に排出口を設けて空気だまりがないようにした。

本施工時には、流量計を用いてグラウト全数の注入量を管理して慎重に施工を進めた。

図9. 緊張手順図

写真2. グラウト充填性確認試験

写真3. 実大実験状況

5. 実大実験

PC圧着工法自体は、特殊技術ではないが、建物全体をブロック圧着工法で構成した今回のような計画は類をみない。そこで、建物の施工に着手する前に実大実験を行って、接合ディテールおよび組立手順の施工性を確認した。

図10. 試験体概要図

実験によって確認した主な事項を以下に示す。

- ・複雑な形状をした二重構造のPC a壁板の製作法
- ・重量が大きくタイル打ち込みで施工精度の要求される壁板の建方方法、
- ・例を見ない大きな断面の圧着となる壁板と床、壁板どうしの接合ディテール
- ・設計で想定した緊張力が各部に導入されてるか。
- ・グラウトの充填性を確保する方法

5. 1 部材製作

建物の特徴づける幅1.8m、高さ7.4m、重量約20トンのPC a壁板は、1ピースで2700枚ものタイルを打ち込む、中央に断熱材の発泡スチロールを打ち込んだH型形状の2重壁である。その仕上がり・寸法精度には特に神経を使った。タイル打ち込み部材における高周波バイブレーターの使用は、タイルのずれ、破損が懸念されることから棒状バイブレーターのみを使用とし、施工性の良い高流動コンクリートを用いた。この高流動コンクリートは普通セメントとフライアッシュを用い、高性能AE減水剤と増粘剤粉末を添加したスランプフロー値65cmのものとした。これを専用バケツにて打設した(2.7m3×3回)。さらに鋼製型枠に10φのエアー抜き穴を設けて、充填性の確保に努めた。鉄筋加工は先組とし、タイルを敷き並べた型枠上に先組みした約2tの鉄筋をセットするが、底盤に敷き並べたタイル上のスペーサーだけで受けるとタイルの破損や剥離のおそれがあるので鋼製型枠と一体となったフレームで先組鉄筋を吊り下げることにより重量を支えるようにした。

また、打ち込みの発泡スチロールがコンクリート打設による浮力で移動しないよう、側面の鋼製型枠からのセパレーターと上部からの金物により固定した。

AE減水材を用いるコンクリートに蒸気養生を行うと熱膨張により組織弛緩を生じる懸念もあるので(*2)、蒸気は用いるものの、最高温度は35℃とし、夏場の雰囲気温度にて養生することとした。

写真4. 壁板製作状況

セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤		混和材
		海砂	砕石	SP8N	ビタリー	7717アッシュ
430	165	820	909	6.5	0.5	70
水セメント比	33.0%	36-65-20N				
細骨材率	51.3%					

表2. 高流動コンクリート配合

5. 2 建方工事の施工性・精度管理方法

PCa壁板は高さ7m、重さ20tを超える大型ピースであり、また、タイル打ち込みでそれ自体が外壁となる構造体であるため、厳しい建て方精度が必要である。試験部材を用いた建方実験を行い、各部材の4隅を3次元測定システムMONMOSにより測定し、建入れ精度管理方法の確認を行った。

架設は壁板脚部両側に取り付けたレベル調整用ボルトと転倒防止・建入れ調整の目的で設置した仮設バットレスから押し引きボルトにより微調整を行った。実際の目線に近い下側を基準にして架設することにより、外観上問題のない精度で施工することが可能であることを確認した。圧着面に確実に緊張力が導入されるように、レベル調整用ボルトは壁ブロック下端の水平目地強度発現後に切断した。

写真4. 壁板建方試験状況

5. 3 水平目地の施工性・充填性

壁ブロック下端とSRC梁との水平目地は、幅1800mm、奥行き500mmの扁平な空間であり、目地材の確実な充填が可能な施工法を確立するため、注入材料（無収縮モルタル、PCグラウト）、注入方法（閉鎖型、開放型）および目地厚をパラメーターとして、透明なアクリル板を用いた試験体を製作して、注入試験を実施した。

材料については、PCグラウトの方が流動性があり、施工性が良かったが、強度発現が早く、かつ強度値が安定している無収縮モルタルを採用することとし、確実な注入作業を行うため、注入速度を管理することとした。目地厚については、大きすぎると空気を押し出しきれずに内部に残留し空隙を生じる傾向があり、小さいと流動性が悪くなる傾向が見られた。最適な目地厚として30mmと設定した。注入方法については、開放型が充填性に優れており、注入状況の確認がおこなえるため、開放型とすることとした。

写真5. 水平目地充填確認試験

図11. 水平目地詳細

5. 4 縦目地コンクリートの施工性・充填性

壁ブロック縦目地は高さ6000mm、奥行き350mm、幅220mmの細長い空間である。この空間には水平シース、鉄筋が混在して配置されることから、材料分離を生じず密実なコンクリートを打設するため高流動コンクリート（ $F_c 360 \text{ kg/cm}^2$ ）を用い、目地の高さ3m程度まではトレミー管（90φ）を挿入して打設した後、トレミー管を引き抜き電動ホッパーで上部から残りの部分を打設する方法を採用した。施工に先立ち、実大の試験体を作成して充填性を確認したが、材料分離を生じない密実なコンクリートが打設されていることを確認した。

6. 歪・たわみ計測

この建物は壁・床・屋根などのPCa構造部材を緊張材で圧着することによって成立する構造であるので、緊張管理が特に重要である。先に述べた実大実験において緊張力の導入によって各部材に生じているひずみを調べ、緊張手順の確認、緊張力の管理や変位の計測と建て方のシミュレーションを行った。その後、約9ヶ月間にわたって長期計測を行っている。

また、実施工時に、工事の施工各段階で各部材のひずみとたわみを計測し、設計値の検証をおこなった。

ここでは、壁ブロックを圧着する壁板よこ緊張を中心に述べる。

6. 1 実測歪みと設計値との比較（緊張時）

実施工時に建物中央の独立柱位置で計測したの圧着部ひずみ（壁板に埋設したひずみ計の値）を図15に示す。この位置では、ひずみ計を圧着部の両側の壁板それぞれの上部、中央、下部、計6点にとりつけ、計測している。緊張時のひずみの計算値との比較を図16に示す。

比較の際に用いたヤング係数は、緊張時に測定したテストピース試験結果の値を用いた。

実測値は、計算値に対し94%～132%と概ねよい対応を示している。実測値で歪み分布が中央部でやや大きくなっているのは平面保持を仮定できるまで歪みが分散していないためと考えられる。

図13. 鋼棒張力（長期）

図14. 鋼棒張力（緊張時）

図7に示す有限要素解析では、緊張端付近では緊張部の歪み分布であるが中央部ではほぼ平面保持を仮定できる歪み分布をしている。

大断面部材の緊張に際しては、断面内の応力の広がりやを考慮することが大変重要であることがわかる。

6. 2 支保工解体時の歪み・たわみ

支保工解体時のコーナー部のたわみは東西両端とも約2mmであり、解析値(3.9mm)の半分程度であった。

壁板の歪みにも変化が見られたが上部で20 μ 引っ張り側へ移行したのみで計算値(62 μ)を下回った。

元々たわみ量が小さいので支保工設置中に躯体に荷重が作用していたと考えられる。

6. 3 緊張力減退

実大実験で計測した横緊張による壁板横方向の歪み計測結果を図19に示す。最終計測時(PC緊張時より9ヶ月)の歪みのクリープ係数は0.4~0.7(PC規準による計算値:1.4)であった。

また、たて緊張において、32 ϕ PC鋼棒のうち1本の固定側については、緊張力の減退を長期間にわたって確認する目的でロードセルを残した。図13、14に緊張力の推移を示す。最終計測時(PC緊張時より9ヶ月)の歪みのクリープ係数は1.24(PC規準による計算値:1.4)であった。

6. 4 セットロス

壁板横緊張時に計測したPC鋼線(VSL工法全449本)のセットロスは2mm~8mmで平均値は4.7mm(設計値:6.0mm)であった(図20)。

また、たて緊張時の鋼棒の荷重を見ると(図13、14)、定着前の59.5tonに対して、緊張直後において56.2ton(94.5%)までの減少があったことがわかる。

これをセットによる戻り量とすると0.3mmの戻りが生じたことになる。鋼棒であっても支圧板の変形、鋼棒ねじ部のガタ等により僅かな戻りが生ずると思われるが短い鋼棒では緊張力のロス設計上無視できない値となる。この建物の実施工時には上記ロスを見込んで導入力を増し、定着完了時の必要導入力を確保するようにした。

6. 5 まとめ

長期計測を通じて、緊張による応力・歪みは設計時点での想定値を満足するものとなったことを確認した。この他、大断面部材では断面内の応力の広がりやを考慮する必要があること、鋼棒でもセットによる戻りを考慮する必要があること等、設計上の注意点を確認した。

7. 終わりに

この建物は、PC大断面部材の圧着工法によりそれ自身が構造体である「箱」を組み立てるものである。架構の考え方、ディテールは例を見ないものがあり、設計時の課題も多くあった。設計・施工に当たっては、解析・実大実験・現場計測を通じて、課題を解決しながら進めていった。

実現にあたり、施工に際しての課題は技術プロジェクトチームを結成して、実験・施工に臨んでいる。監督員としてプロジェクト全体にわたり御助言・御理解をたまわった愛媛県の皆様、共に知恵を出し合い、御協力を頂いた大成・野間共同企業体、大成建設(株)技術開発本部、及び(株)ピー・エスの皆様に深く感謝の意を表します。

図15. 独立柱位置圧着部ひずみ計測結果

図16. 緊張時ひずみ分布

図18. コーナー部変位(支保工解体時)

図19. 実大実験ひずみ計測結果

図20. セットロス値集計結果

ます。

- (参考文献) (*1) プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説 (日本建築学会)
(*2) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS10 (日本建築学会)
(*3) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 (日本建築学会)

[1999年4月20日原稿受理 1999年7月27日採用決定]