

国際科学技術博覧会 国連平和館の設計と施工

渡 辺 邦 夫*
深 谷 朝 男*

1. はじめに

昨年夏のある会議の席上、プレストレストコンクリートの現況についての話題があり、現在のわが国のプレストレストコンクリート(PC)構造は、土木と建築にしいて分ければ、土木の分野で97%、建築ではわずか3%しか利用されていないという話を聞き、私達の日常活動の実感からかなりかけ離れた小さな値で、その実態にびっくりしたものであった。比較あるいは分類のバロメーターにはいろいろな見方があり、一概には言えないと思うが、それでも大雑把な認識としては建築構造物に対してPC技術はあまりに少ない利用のされ方である。

その建築のわずかな利用領域にもかかわらず、PRC構造、SPC構造、アンボンド工法など様々な構法、工法の開発が進んでいるのも事実であり、定着端の認定制度などを含めて官学民が合わせてPC技術の向上に多大な日常的な努力を払っているのも事実である。こういった努力の割にはPC技術は一般に普及しておらず、むしろ特殊な建築物にのみ利用されているというのが現状ではないかと思える。

本来PC構造はプレキャストコンクリートを対象に発展してきた技術である。それが昭和40年代の高度成長期のボーリング場ブームなどを一つのきっかけとして、割りあい大スパンの建物を従来のRC構造の延長線上で可能とするため、現場打ちコンクリートにもPC技術が応用されるようになってきた。その結果、現在では現場打ちPC構造がこの技術の中心をなしているかの誤解を受けているとも思える。しかしPC構造が高強度、高品質のコンクリートを対象としてはじめて成り立つという構造原理を考えると、現場打ちコンクリートにこの技術を応用していくには相当の無理がある。また、施工性の面でもRC構造の延長線上の把握のしかたでは、施工プロセスが繁雑(シースの配線、ストレス導入に要するコンクリート強度発現までの養生、型枠・支保工の長期間

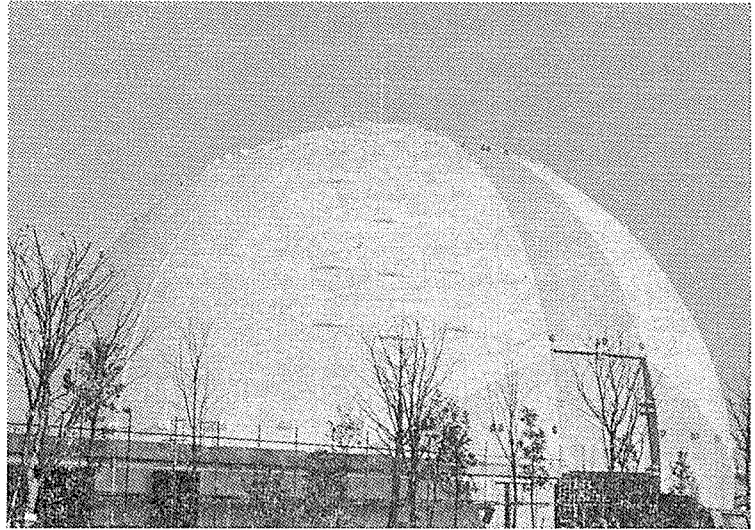


写真-1 完 成

の存置など)となり、工法上のメリットを十分に発揮できない。やはり、PC構造は工場製作(プレキャスト)された高強度、高品質のコンクリートと高張力鋼とのうまい協働関係を成立させ、乾燥収縮、クリープなどコンクリートのもつ欠点を根本的にカバーしつつ、現場での施工プロセスを簡潔にした工法として構造物を近代工業生産システムにのせることのできる最良の技術として育てていくことが本流だと思う。その発展の方向性を見失わないで諸々の技術を開発し実用化してゆくことが、建築分野におけるPC技術の普及に不可欠である。

ここに紹介する計画は概略そういったPC構造に対しての私達の考え方を背景にして進められてきたものである。

国連平和館の設計は、博覧会会場の様々な施設建設の進行状況からいうと殆んど最後の施設となってしまったものである。基本設計が昭和58年11月頃から59年2月、引き続いて実施設計を59年5月に完了したプロジェクトで、この頃には会場内の政府館、外国館をはじめ民間パビリオンのあらかたの建物がその構造体の輪郭が出来上がっていたが、このプロジェクトだけが数十の案について検討をし、様々な可能性を追究する段階であった。設計作業と並行して現地を再三見に行く機会があり、上棟間近のパビリオンの大多数、具体的には本誌に

* (株) 構造設計集団 <SDG>

◇報 告◇

も紹介されているソ連館以外はすべて鉄骨造の構造で様々な形態をつくり出しているのを眺めていた。何か会期6か月を前提とする仮設性を前面に打ち出したパビリオン群に埋め尽くされたという印象を強く受けたものである。

主催者である博覧会協会が建設のテーマの一つとして掲げた「仮設性の追求」ということばはどうか解釈してよいか迷うところであるが（実際には予算を切りつめると

いうことらしい）、短期間に素早く建設し会期後は簡単にスクラップ化できること——を仮設性を実現したこととしても、それが微々たる投資ならそれでも良いのだろうが、この会場全体では巨大な建設投資が行われることになっている。この巨大投資が6か月を対象にし、その後はスクラップであってよいのか。そういう素朴な疑問は現地の状況からも感じるものであった。

私達の設計チームは万博という事業特性と、大多数の

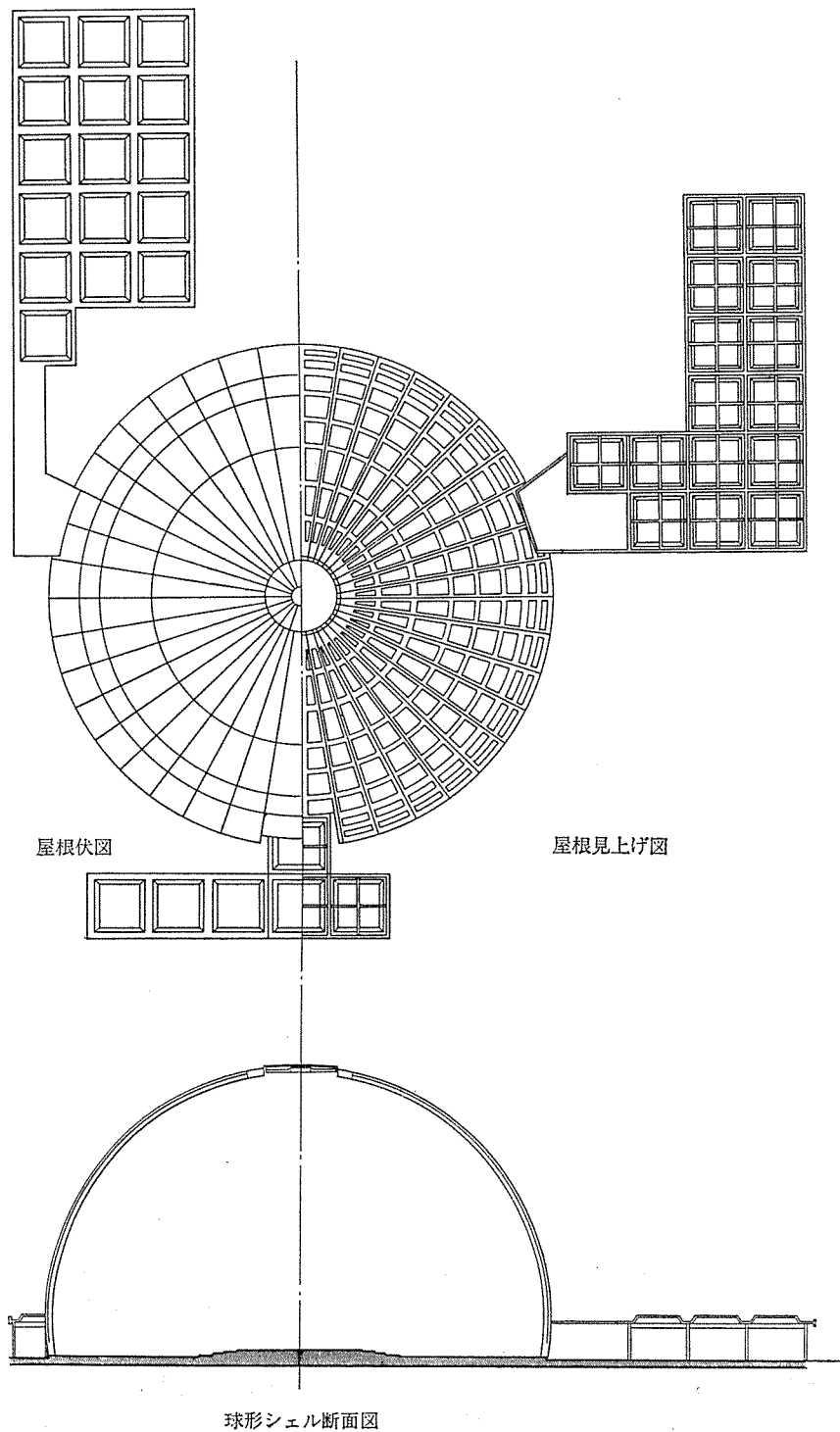


図-1 一般図

パビリオンが採用した鉄骨の氾濫の中でむしろ後に述べる理由もあって、コンクリート系技術の展開を考えることとした。そして基本方針は次の2点に絞った。

- ① 仮設性の追究。単に会期終了後に解体し易い構造ということだけでなく、再利用（あと利用）が可能な構造、工法の採用。
- ② 施設の仮設性の表現。建築表現は完成途上の施工プロセスの表現に重点を置く。内部展示スペースは完成度を高めるとしても建物の外部表現は構造と工法とをそのまま表現してゆき、会期後の次の展開イメージを優先する。建築としては未完成の状況を積極的に表現する。

ということであった。

2. 計画概要

このパビリオンは展示スペースとそのバックヤードともいえる付属施設とから構成され、展示スペースの構造体としてプレキャストプレストレストコンクリート構造の球形シェルを採用した。

周知のように大空間を構築するための様々な架構方式の中でも、球形シェルは原理的に極めて安定性の高い架構方式といえる。鉛直荷重（自重、積載、積雪）に対しても水平荷重（地震力、風圧力、温度変化）に対してもいずれの角度の入力にも均質な性質をもち、原則的には軸力で基礎に力を伝達する構造方式である。球形シェルはその緯度に添って頂部付近は圧縮リング、赤道付近は引張リングとなり、自己完結性の高いものである。開口のない完全な球形シェルを考えるとこのような明解で秩序正しい応力分布が想定できるのであるが、この建物の

ように出入口のための開口が要求されると、その周辺は応力の分布が乱れ、特殊な処置が必要となる。自己完結性の高い構造方式ほど、一たんその秩序が乱されるとその対応によっては全体のシステムにまで影響してしまうことをよく経験することがある。計画当初から最も気を使う問題である。

古来、この構造形態はを多くの建築物、工作物に利用されてきており、その事例は無数にある。そこに使用する構造素材も多様であり、石造、木造、コンクリート造、アルミ、鉄などの金属造、その表皮としてのテント、あ

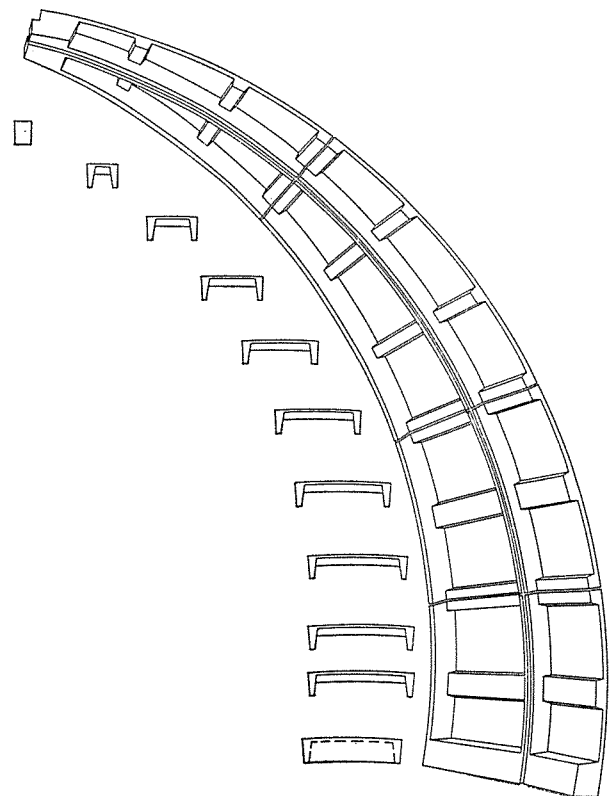


図-2 球形シェル・ユニット断面図



写真-2 根伐後の基礎の配筋

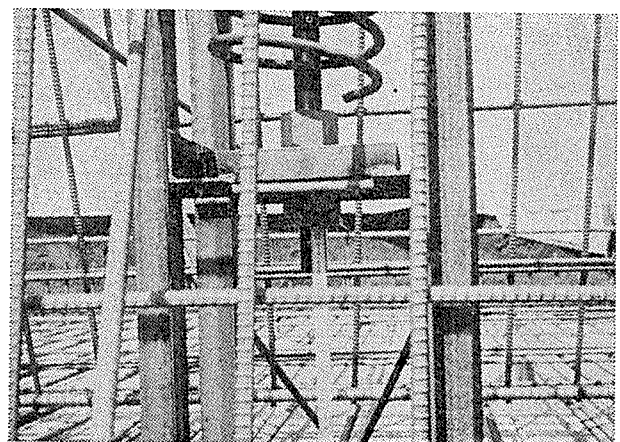


写真-3 基礎へのPC鋼棒の埋込み
埋込み端の詳細

◇報 告◇

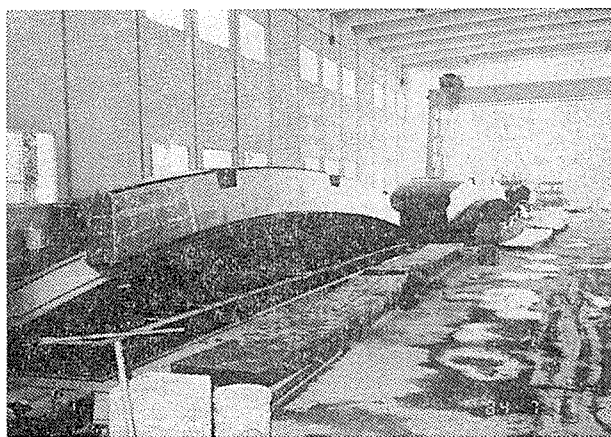
るいはレンガ、土によるもの、氷によるものなど各時代各地域の生活状況の中から自由に選択してきたともいえる。現代では大規模な球形シェルの主流は金属の部材を組み合わせて構成（フーラー・ドームに代表されるような）する手法であり、そのディテールにも各種の工夫がなされている。今回の博覧会でもそういった構造の施設は数例ある。

このような様々な素材上の可能性の中で、本計画では次の諸点を計画目標に据えて案を検討した。

- ① 積極的に「あと利用」を考えると、構造体そのものの高い耐久性を維持すること。
- ② 水密性、遮音性、断熱性、更に耐火性に富んだシェルを構成すること。展示スペースを考慮すると、これらの建築性能が構造体ですべて獲得できることが望ましい。いわゆる内装、外装を必要としない構造方式であること。
- ③ シェルを構成する骨組とその表皮との性能を一致させ、全体として力学的特性を十分に発揮する構成とすること。
- ④ 空間の重厚さを表現すること。単純な意味での軽



写真—4 基礎コンクリート打設完了
PC 鋼棒が埋め込まれている。
鋼棒の頭部は養生キャップ。



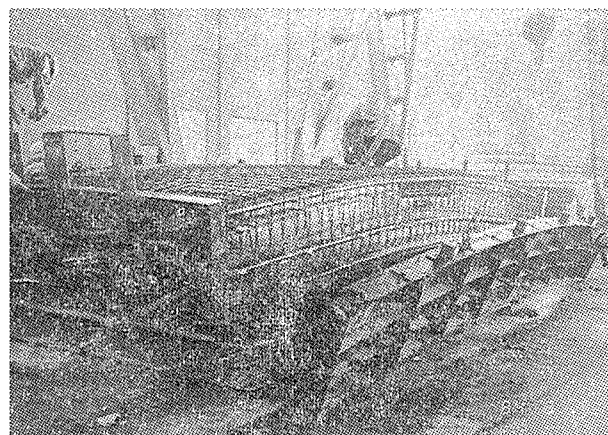
写真—5 PC 製作工場にセットされた鋼製型枠（4基）

量化は目的としない。
などであり、この設定した目標に適合する最終案としてコンクリート系球形シェルを採用することにしたのである。

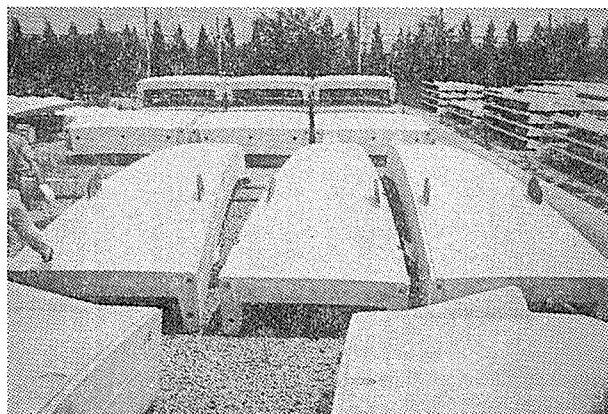
付属棟についてもこの設計主旨は生かされている。平家建ての軽微な構造でよいため、4.8m グリッドの鉄骨造（柱、梁のジョイントは建方と解体、更に再組立てを考えすべてピン接合とし、八型ブレースを入れた）に屋根は PC パネルを敷き並べ、外壁にはスチールのハニカムパネルを使用した。

＜建築概要＞

- ① 名称：外国展示館・C1 号館
- ② 所在地：国際科学技術博覧会会場内Cブロック
- ③ 敷地面積：14 200 m²
- ④ 建築面積：2 231 m²
- ⑤ 延床面積：2 015 m²
- ⑥ 建築設計：(株) 計画連合
- ⑦ 構造設計：(株) 構造設計集団 <SDG>
- ⑧ 設計監理：計画連合、構造設計集団 <SDG>
- ⑨ 施工：間、安藤、株木、山本建設 JV。



写真—6 型枠に鉄筋、シースをセット
埋込み金物も同時にセットする。



写真—7 PC 工場内のストックヤードに
仮置きされた PC 部材

⑩ PC シェル施工：黒沢建設（株）

3. 構造設計概要

この球形シェルは直径 41 m の球体から、全球体の 18/40 に相当する底部を切り取り、これを円形の基礎上に設置した形状で、シェルの頂上高さは $20.5 \times (1 + \sin 9^\circ) = 23.707 \text{ m}$ である。球体は多面体に置きなおすのではなく真球でつくることとした。

シェルの頂部は頂上からの緯度 9° の範囲（半径 3.206 m）が開口となっており、この部分には放射状の鉄骨屋根を架ける。PC 部材の分割上そうせざるを得ない。その他の部分は緯線に沿って 40 分割（経度にして 9° 分割）、経線に沿って 4 分割（緯線方向角度にして $9^\circ \times 2 = 18^\circ$ が 2 つと $9^\circ \times 3 = 27^\circ$ が 2 つの分割）した PC 部材の集合体である。なお、内部への出入口として経度にして 180° 、基部からの緯度にして 27° に相当する開口部が 3 か所（開口中心間の経線方向角度にして 108° 、 108° および 144° ）設けている。このようにこの球形シェルは 9° モジュールによってすべての秩序が構成されている。

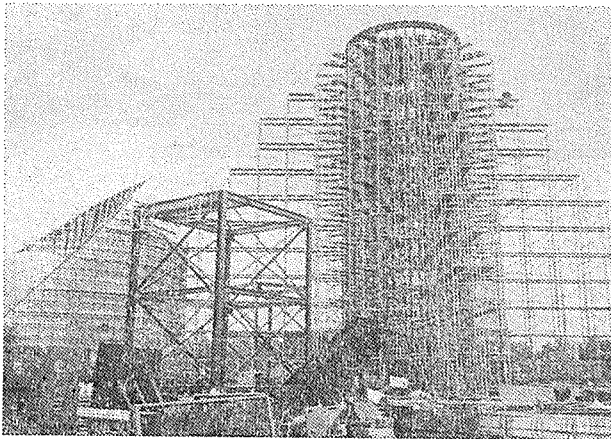


写真-8 現場の中央に組み立てられた中央支保工、および開口部の架台

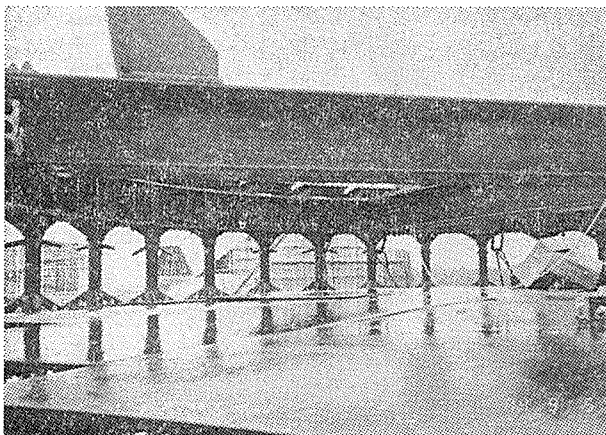


写真-9 中央支保工の頂部に設けられた円形 H 鋼ここに PC 部材が載せられる。

工場製品化するうえでモジュールの選択に重要な作業の一つであるが、この規模の PC シェルでは「 9° 」以外のモジュールはあり得ないとの確信を持つまでスタディを繰り返した。

したがって工場製作される PC 部材は、緯線方向に 4 分割、経線方向に 40 分割した形状となる。標準部材の寸法は、最小幅、最大幅および長さが最下段用でそれぞれ 3.16 m、3.2 m、6.42 m で、最上段用でそれぞれ 0.48 m、1.87 m および 9.84 m である。これは各セグメントの重量をほぼそろえるためでもある。部材の周辺にはリブ（たてリブ丈 70 cm）が設けられており、このリブには PC 鋼材挿入用のシース孔が設けられている。たてリブには含まれた部分には横リブ（丈 35 cm）がモジュールに従って配置されている。これらリブ以外の部分は厚さ 8 cm のコンクリート板である。これらの部材

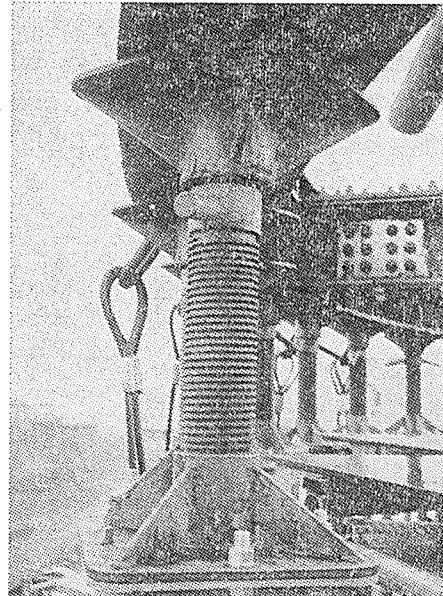


写真-10 円形 H 鋼のレベル調整用および構台解体用ジャッキ 40 台が設置された。

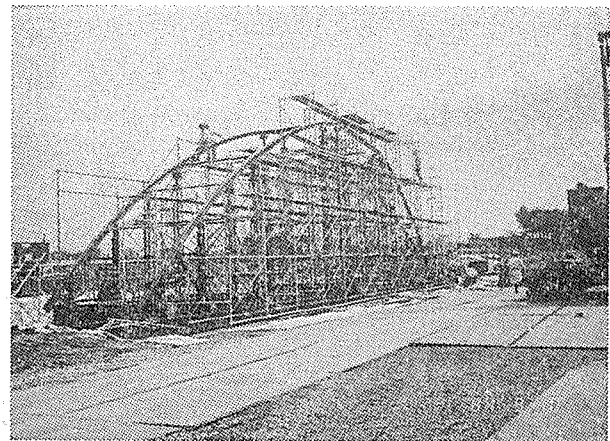


写真-11 現場の脇での地組み用構台の組立て（3 基）

◇報 告◇

は現場搬入されるまでは RC の状態で製作，運搬される。ここに使用するコンクリート設計強度は $F_c=400$ kg/cm² の高強度普通コンクリートである。

PC 部材から構成されるシェルは，緯線，経線両方向にプレストレスを導入することにより，連続体としてのリブ付きシェルとなる。この曲面構造は有限要素法によって解析されるが，要素分割は緯線，経線両方向とも 9° モジュールで配置されたリブの交点を節点とし，節点間の部材を直線状の線材に置換した。シェル脚部の境界条件は，ピン支持と仮定して当初解析を進めたが，実施の施工条件を考えるとこの部分は半固定と考えられるので，境界条件を完全固定とした場合の解析も行い，いずれの境界条件も満足するように裾部の安全性の検討を行った。なお，テンションリングとなる基礎の変形によるシェル部への影響も重要な検討事項であった。

PC 部材はすべてフルプレストレスングの状態に置かれるように断面を検討したが，完成後の曲面構造としての部材応力以外に部材の脱型，ストック，運搬，アーチ部材としての組立て後の水平吊り上げ，架設時の応力および変形など施工のプロセスに対応して各段階におい

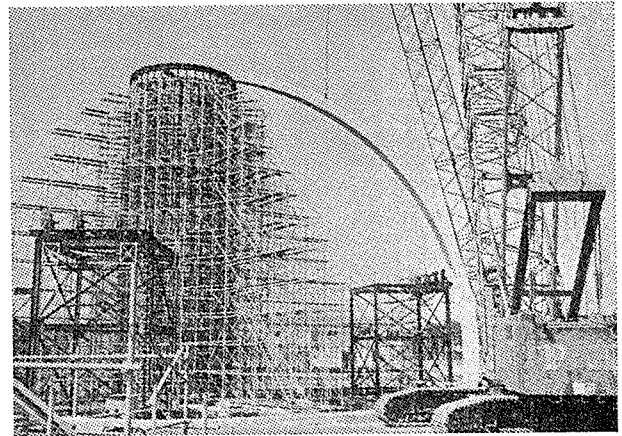


写真-14 最初のアーチ部材の架設

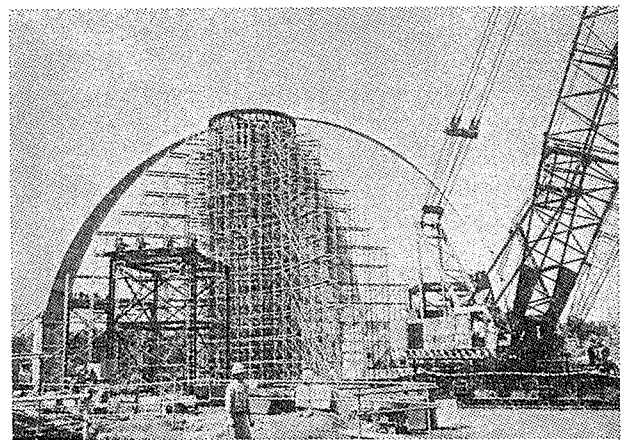


写真-15 アーチ部材の架設
対角上に1対として架設してゆく。

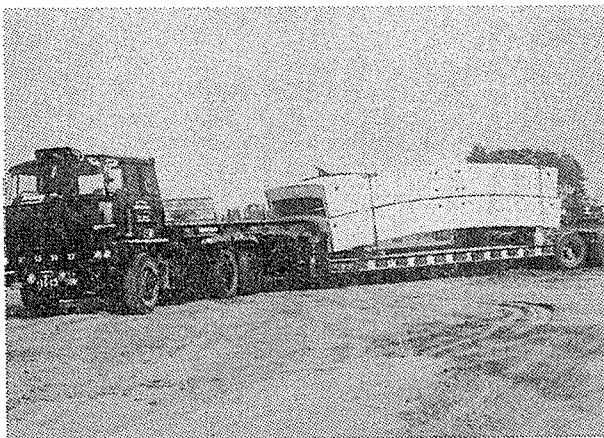


写真-12 PC 部材の現場搬入
低床式トレーラーを使用。

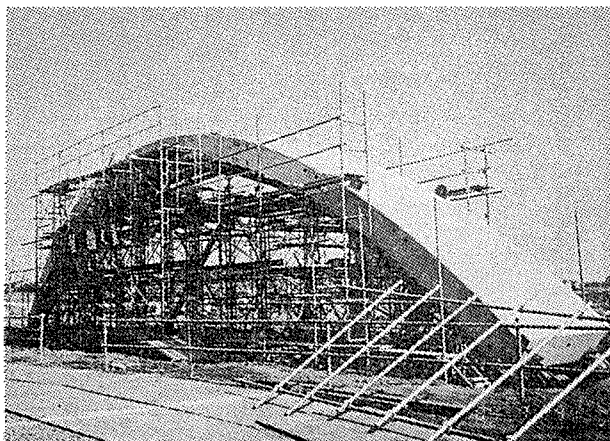


写真-13 PC 部材 (4 セグメント) の地組み

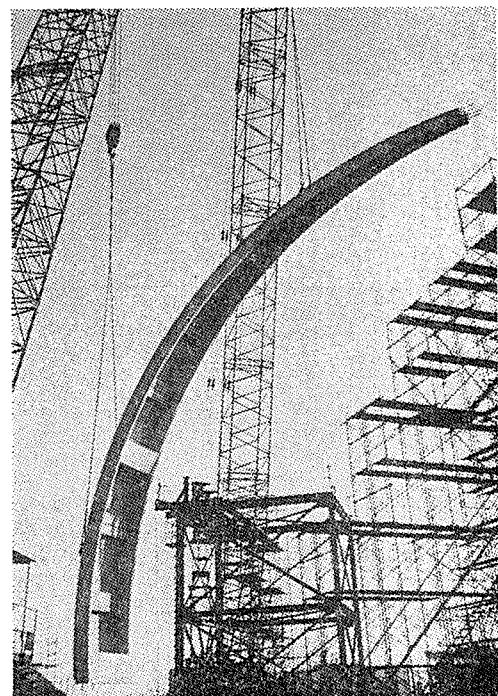


写真-16 アーチ部材の吊込み
2基のクレーンによる相吊り
によって行われる。

て、部材断面が施工時許容応力度を満足するように設計している。特にアーチ部材の曲げ応力は、完成後よりも施工時の方が大きくなり、この段階でのトラブルを避けるよう注意を要する。

また、シェルの全体座屈に対する検討は等分布荷重を受けるリップ付き球形シェルの座屈理論式を用いて行った(座屈問題に関しては東大生産技術研究所の半谷助教授に御指導いただいた)。すなわち PC パネルの曲げ剛性および面内剛性に対する置換厚さを算定し、これより得られた座屈荷重が平均的固定荷重の4倍以上あることを確かめている。リップ付き球形シェルの座屈については大変平易で実用性の高い理論式ともいえるのでここに結論だけを記しておく。等分布荷重を受ける球形シェルの座屈荷重は次式で表わすことができる。

$$q_{cr} = kE \left(\frac{t}{a} \right)^2$$

ここで、 t : シェル厚、 a : 曲率半径である。また、

$$k = 0.228 \times \frac{\alpha^{1.5}}{(1-\nu^2)^{0.7}}$$

で、 $\alpha = t_b/t_m$, t_b : 曲げ剛性に対する置換厚さ、 t_m : 面

内剛性に対する置換厚さとする、前式の t は $t = t_m$ としして用いる (IASS, VOLUME 84/85 ANALYSIS, DESIGN AND REALIZATION OF SPACE FRAMES より)。

経線方向に分割された4つの部材を地組みするときのポストテンションは7本よりストランド 12.7φ を5ケーブル束ねて VSL 工法で両端に定着する。これがたてリップに各々2か所、一部材で合計4か所緊張することになる。一般の部材ではシースを円弧状にコンクリート断面と並行して配置してあるが、開口脇の部材では応力が大きくなるのでシースの位置を変えてある。水平リング、すなわち緯線方向も7本よりストランドのケーブルを建方完了後に通線し VSL で定着するが、定着位置を球体の外側に引き出してこれも外観を形成するうえでの主要なデザイン要素とした。また、開口直上部の大きな応力に対しては幅の広い水平リップとし、一般の型枠を最後に改造して部材を製作することとした。

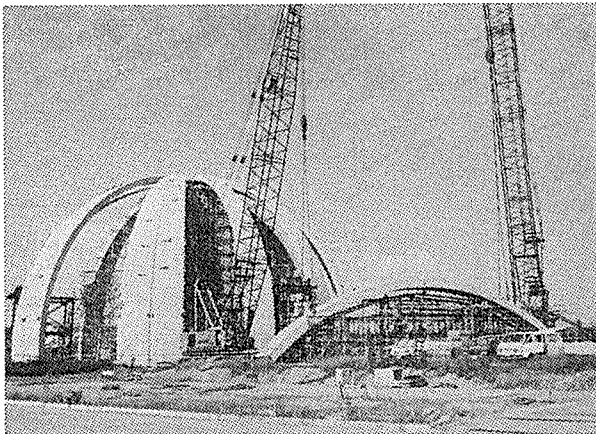


写真-17 アーチ部材の建方と地組みは並行して行われる

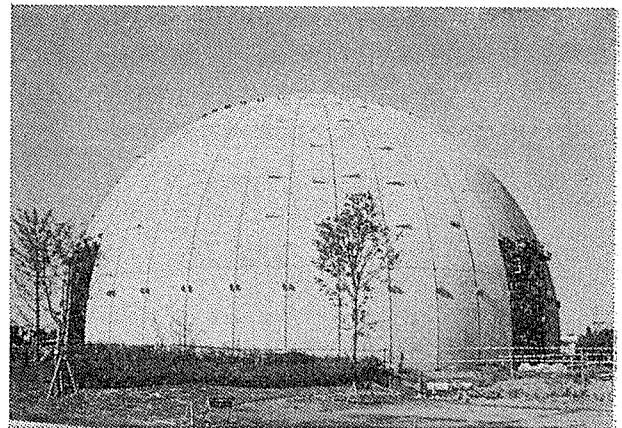


写真-19 建方完了

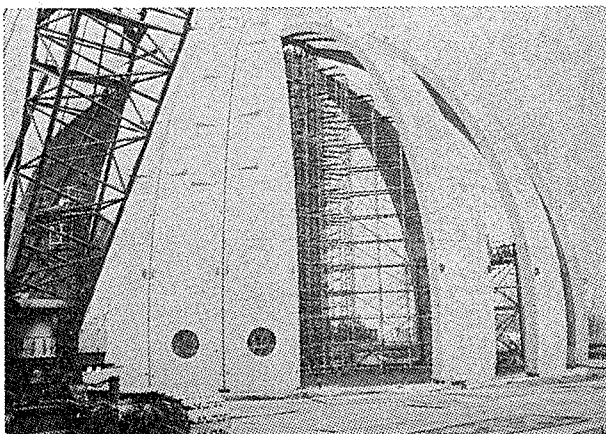


写真-18 壁面の丸い開口は空調用スリーブ

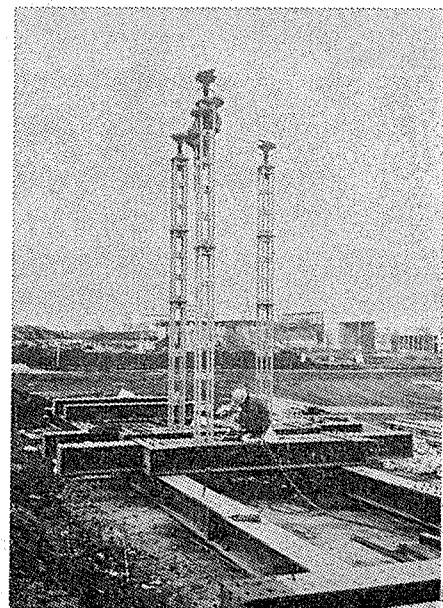


写真-20 地組み構台の解体

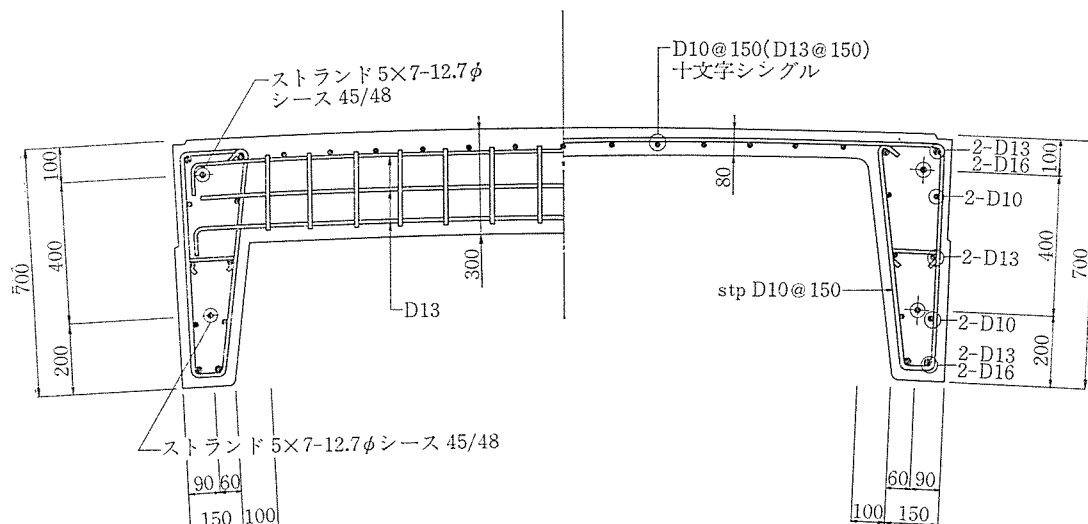


図-3 アーチ部材断面

4. 施 工

PC 部材製作用鋼製型枠は工場に4台用意され各々が40回転することとなる。この型枠は真球をつくり出すために二方向曲面のものであり、その製作も精度的にむずかしいものであったが、コンクリート打設後の外側の

鍍面仕上げも曲面とするため部材製作についても細心の注意が必要であった。コンクリートは良質な骨材を使用したこともあり、設計強度 $F_c=400 \text{ kg/cm}^2$ に対して実際には $520\sim 550 \text{ kg/cm}^2$ の高強度を得ることができた。

ばらばらのPC部材はそのまま現場に搬入され、円周

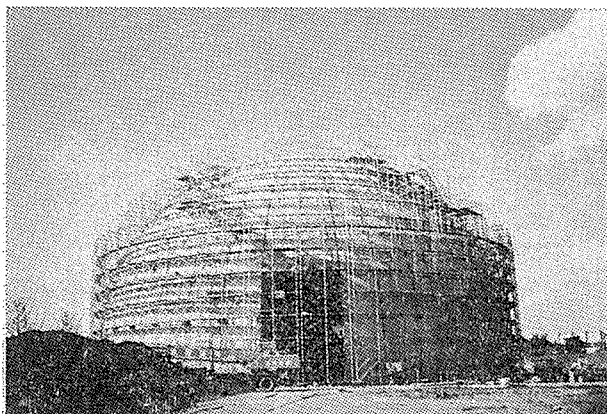


写真-21 目地詰めおよび水平リングの横緊張のために外足場をかける

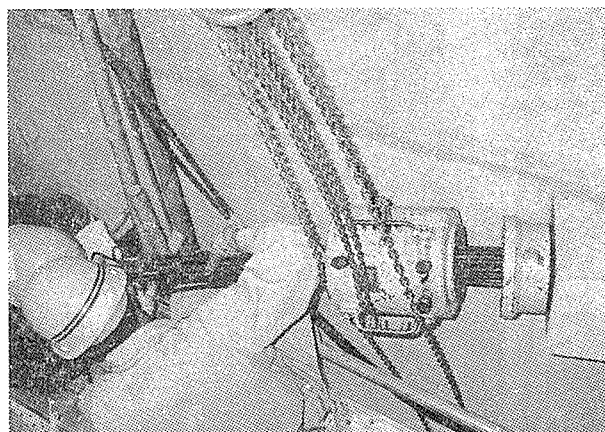


写真-23 水平リングの緊張作業

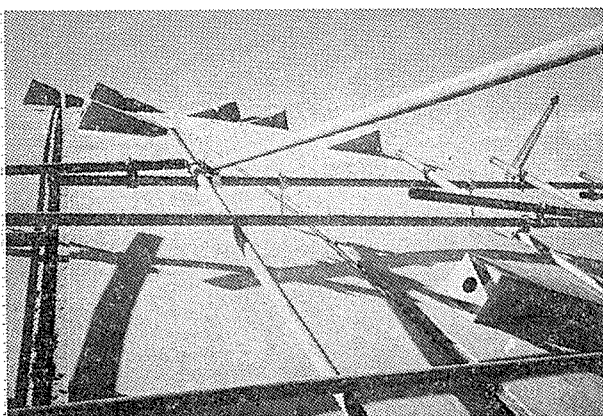


写真-22 水平リングの緊張端の突出部がみえる

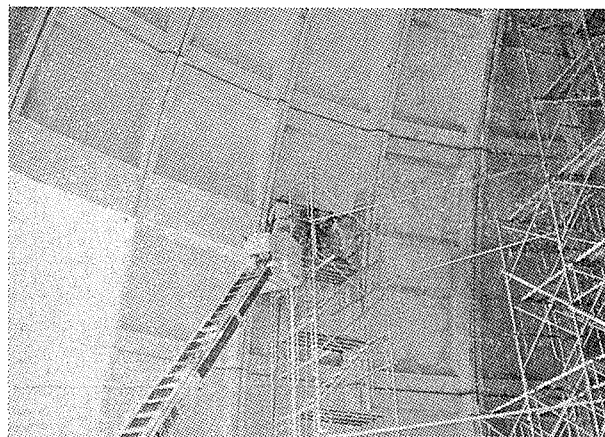


写真-24 全緊張作業の完了
このあと中央支保工を解体

方向に 40 分割された 1/4 円状のアーチ部材（開口部 3 ピース、一般部 4 ピース）に地組みされ、7 本よりストランド 12.7φ を 5 ケーブルに束ねて 4 つのシース孔に挿入し、経線方向にプレストレスを導入する。この地組みのための構台はアーチ部材の曲率に加工した H 鋼を四角支柱で支持する方法をとり（構台の高さも 6 m 以上必要であった）全部で 3 基用意された。地組みのポストテンション導入時に部材は縮むので構台と部材の間は軸方向にすべるようにしておく。

円形の基礎の中心部には仮設支保工を組み上げておき地上で地組みされたアーチ部材は、下部を基礎に、頂部をこの中央支保工に架設する。中央支保工の頂部には円形に加工された H 形鋼がセットされジャッキ（40 台）によりレベルを調整できるようにしておく。支保工にひずみが発生しないようアーチ部材は常に対角上の 2 部材を 1 対として架設する。全部材の架設終了後、アーチ部材間の目地モルタル（膨脹性モルタル）が充填されその強度発現後、下部から頂部に向けてリング方向のプレストレスが導入されシェルとして一体化される。リング方向 PC 鋼材は 5~7-12.7φ ストランドケーブルを用い 9 セ

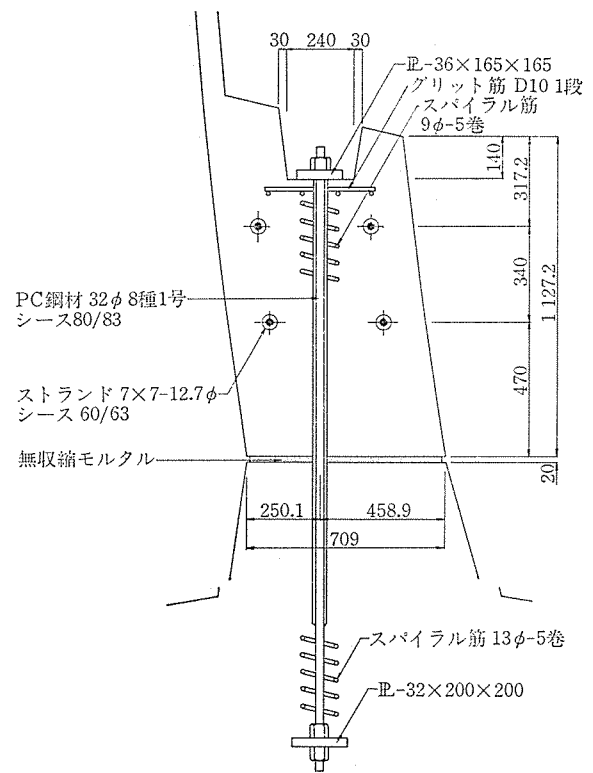


図-4 脚部詳細図

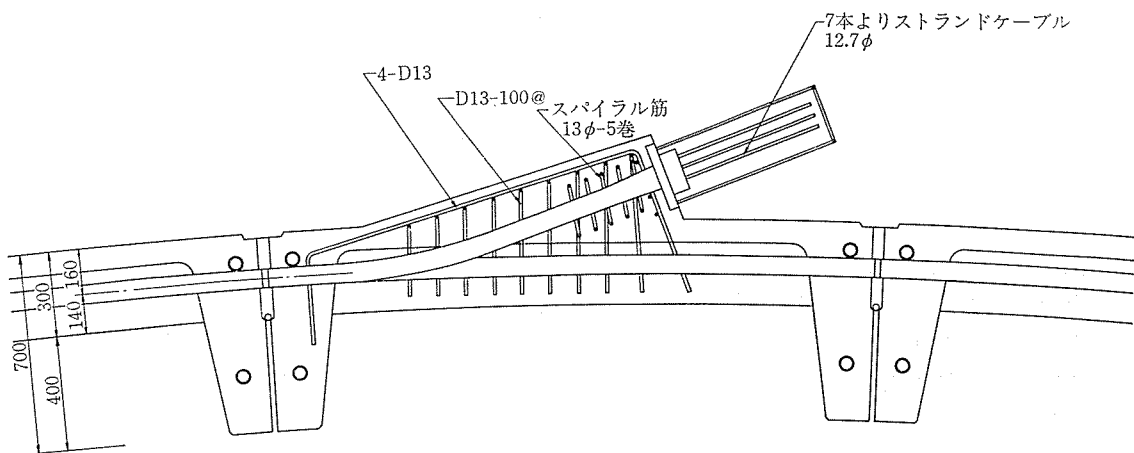


図-5 水平リング横締め緊張端詳細

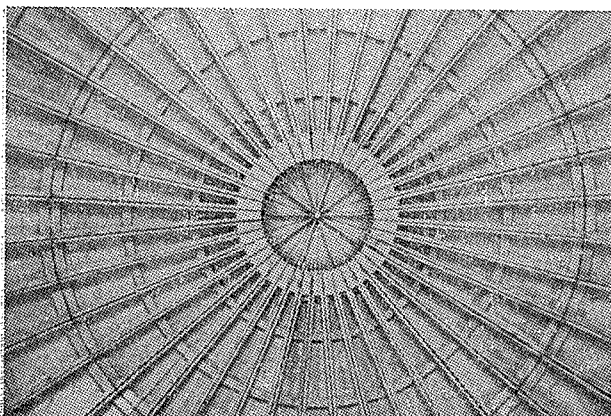


写真-25 中央支保工解体後のシェル内見上げ
中央は鉄骨屋根

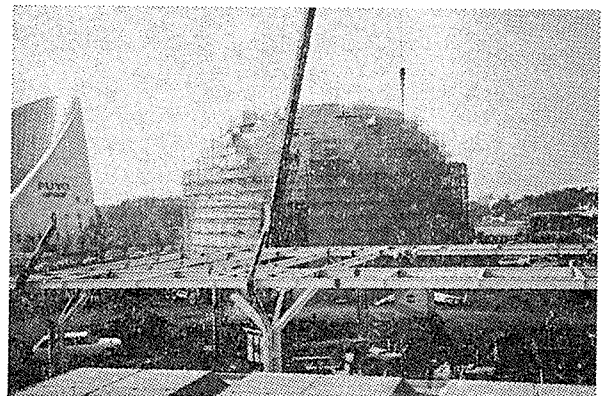


写真-26 外部足場の解体

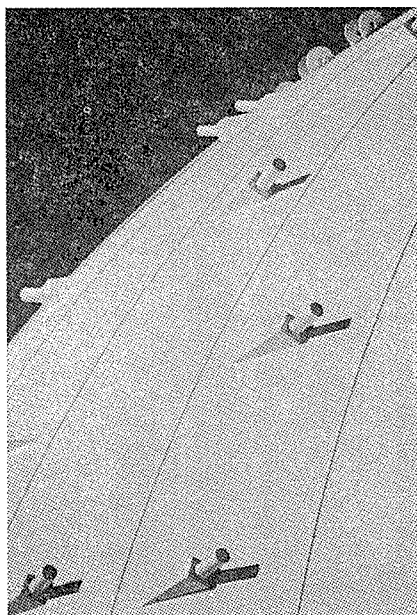


写真-27 水平リング緊張定着端の表現

グメント毎にこの球体の外部に向けて曲げ上げて定着する。これらの定着端にも VSL 工法を採用した。

アーチ部材脚部は厚さ方向 70 cm の接触面の敷きモルタル（セメントペーストでレベルは調整する）によって支持されており、基礎に埋め込まれた PC 鋼棒（B種1号, 1セグメント当り 3-32φ）により、セグメント脚部と基礎とが圧着接合される。部材の建方時には仮緊張（フルプレストレスの 30% 程度）し、リング方向の横締めがすべて完了し施工上の変形がなくなった最後の段階でこの部分の本緊張を行った。

仮設の中央支保工は、会期終了後のこのシェルの解体時にも必要となる。建設の手順と全く逆の順序で解体は行われることになる。この PC シェルを移設して再利用するときにも同じ中央支保工が必要となるため、この部分の設計は当初の組立て、その後の解体、更に再組立てという三段階において十分な施工性を発揮するようなされている。

横締めの定着端の保護（外部に突出するため）は、太径のスパイラルシースを点溶接し、ウレタン系防錆、止水剤を圧入した。

6. おわりに

この世界最大の PC 球形シェルの建設に当たり、多く

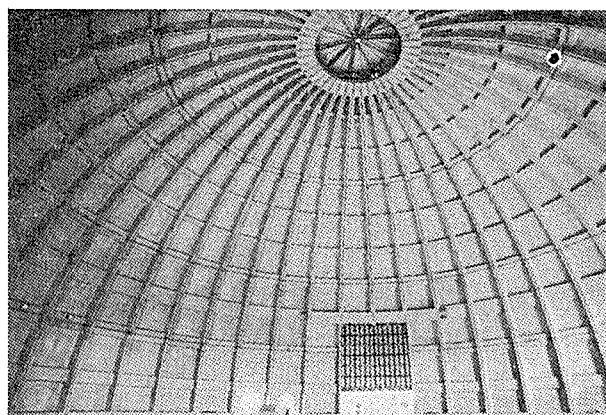


写真-28 完成後の内部

の方々を支援を頂いた。施設の計画者である計画連合の阿井和男氏が私達と同一の目的意識を持っていたことが、この施設実現の前提であったことは言うまでもなく、(財)日本建築センターの評定委員であった岡本、橋本、斉藤各先生の積極的な指導もこのプロジェクトの成功に大きく寄与したものである。また、万博協会計画建設部の藤井氏（計画当時）、PC シェルの実際の施工を引き受けてくれた黒沢建設の黒沢社長など多くの方々の協力なしには、このプロジェクトの実現には至らなかったであろう。

一方で、何故こんな面倒な設計をするのだという反対勢力もあり、限られた建設予算と工期との中での必然性を疑問視する方々も相当な人数にのぼった。単に 6 か月間の博覧会なのだからという考え方に立つか、国連平和館なのだからという考え方に立つかによって造り方も造られた結果も変わってしまうわけであるが、たまたま私達はマクロ的な観点で様々な問題に挑戦することを提案したのである。その立場をどう選択するかはこの建設に参加した方々の一人一人の自由ではあるとしても、やはり一つの信念を中心にもものは造らざるを得ないということを確認したプロジェクトでもあった。

この施設は特殊な例だとしても工事を通じて痛感したのは、最初に記した PC 構造の建築への普及はまだまだ長い道程が必要なのだという事であった。それでもこの無限に可能性を秘める技術の発展のために身を粉にしようとする多くの方々の存在は、私達のこれからの設計活動に大いなる励みになった。

【昭和 59 年 12 月 27 日受付】