

大容量テンドンを用いたコンクリート球形シェルのPC工事 —— 大阪市中央体育館メインアリーナ ——

阿波野 昌幸*1・田淵 博昭*2・濱田 一豊*3・戸潤 隆*4・古林 桂太*5

1. はじめに

本工事報告で紹介する建物は、1997年の大阪国体「なみはや国体」、そして将来のオリンピック誘致に向けての中核施設として計画された市立体育館であり、大阪市の中心部から西へ約5 km、大阪市を東西に横切る「中央大通り」と「みなと通り」の合流点の八幡屋公園内に位置し、西側に天保山ハーバービレッジや海遊館などのレジャー施設、南側に南港コスモスクエア地区、北側に舞洲スポーツアイランド地区と近年のウォーターフロント計画地区に隣接している。本体育館のメインアリーナは直径110 m、高さ30 m、最大収容人員は1万人であり、その他にサブアリーナ（直径52 m）、柔剣道場等の施

設が設けられている。そのすべての施設が公園地下に設けられたため、メインアリーナ屋根の総重量は約70 000 tf（約5~6 tf/m²）となる。その大荷重を支持するためアリーナ屋根の外周に20 000 tfの緊張力を導入するプレストレストコンクリートのテンションリングを配したコンクリート球形シェル構造が採用された。ここではそのテンションリングに用いられた大容量テンドン（規格降伏荷重949 tf/テンドン）の配置設計、緊張管理、グラウト管理を含むPC工事を中心に報告する。

2. 建物概要

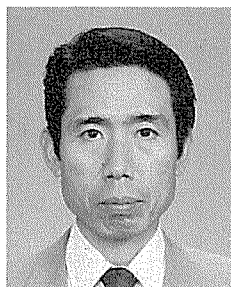
写真-1に建設時の状況、図-1に平面概要、図-2に構造断面を示す。



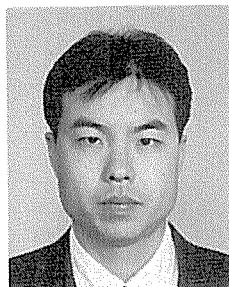
写真-1 建設状況



*1 Masayuki AWANO
(株)日建設計
大阪本社構造部
構造設計主管



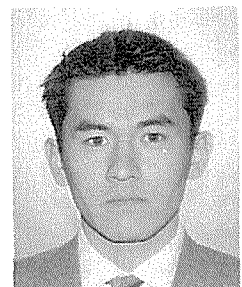
*2 Hiroaki TABUCHI
大阪中央体育館 J.V.
工務長



*3 Kazutoyo HAMADA
大阪中央体育館 J.V.
工務主任



*4 Takashi TOMA
(株)ピー・エス
大阪支店建築部
次長



*5 Keita FURUBAYASHI
(株)ピー・エス
大阪支店建築部

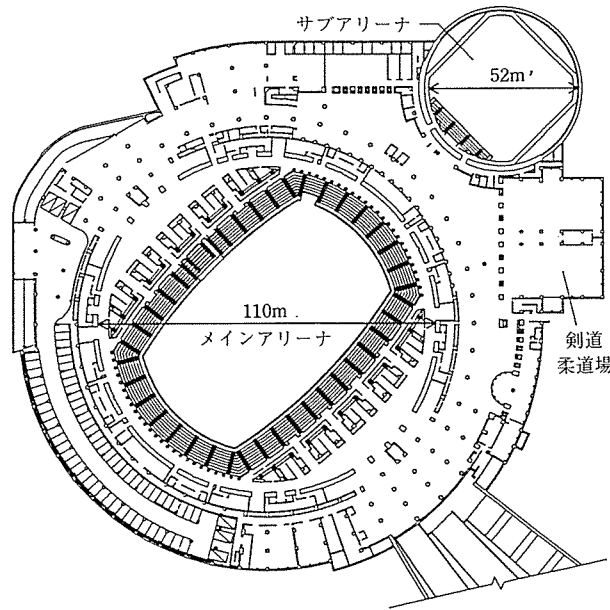


図-1 平面概要図

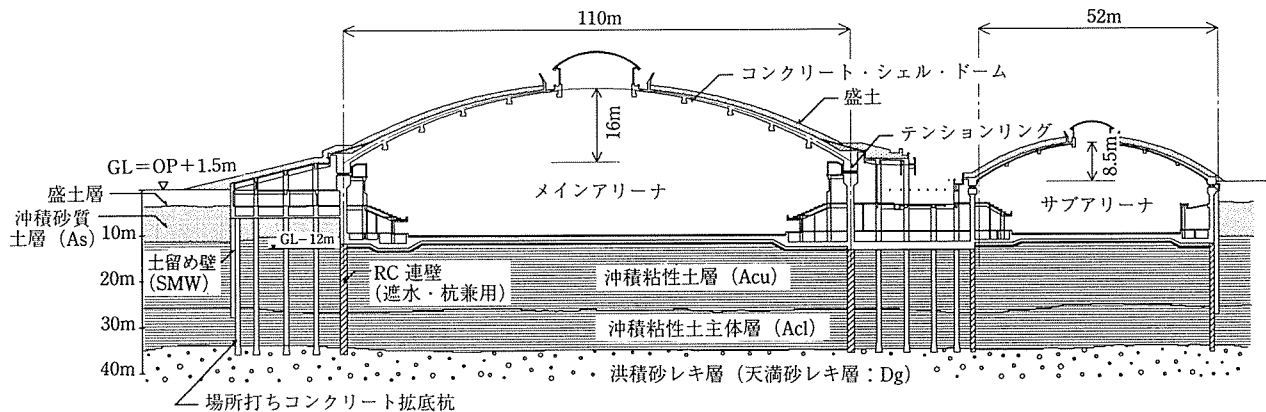


図-2 構造断面図

2.1 建築概要

建物名称：大阪中央体育館

所在地：大阪市港区田中3丁目八幡屋公園内

建築面積：442 m²

延床面積：38 425 m²

階数：地下3階

高さ：(基準階高さを SGL=OP+1.6 m としたとき)

- ・軒高 SGL+26.6 m (地盤面+4.0 m)
- ・最高部高 SGL+30.0 m (地盤面+7.4 m)
- ・基礎深さ SGL-11.5 m
- ・B 3 FL SGL- 9.5 m (アリーナ床レベル)

構造種別：

- ・基礎 RC 連続地中壁，場所打ちコンクリート杭
- ・架構〈アリーナ屋根〉
プレストレストコンクリート球形シェル構造
(プレキャストコンクリート併用)

〈上記以外〉

鉄筋コンクリート造および

一部プレストレストコンクリート造

発注者：大阪市教育委員会事務局

設計監理：大阪市都市整備局営繕部・(株)日建設計

施工：大林・西松・浅沼共同企業体(建築)

メインアリーナ PC 施工：(株)ピー・エス

2.2 メインアリーナ屋根構造の概要

球形シェルに鉛直荷重が加わると放射方向(半径方向)に圧縮力が流れ、シェルの裾野部および最外周のテンションリング(円周方向)を膨らませるような引張力が生じる。この引張力に対し、テンションリングおよびシェル裾野部に合計 30 本の大容量テンドンを配置し引張力に抵抗させた。

球形シェル部分は図-3 に示すように、円周方向に配したプレキャスト PC 梁(スパン約 8~12 m)、頂部のコンプレッションリングに用いたプレキャスト RC 梁お

よび梁間に敷き並べたプレキャスト PC 床版と現場打ち
 トッピングコンクリート ($t=400\sim 1\ 100\text{ mm}$) による
 合成構造とした。なお、コンクリート強度は、現場打ち
 部分を $F_c=360\text{ kgf/cm}^2$ 、プレキャスト部材を $F_c=500\text{ kgf/cm}^2$
 kgf/cm^2 とした。図-4 に PC 梁、図-5 に DT 版の断

面の一例を示す。

3. 建物の耐震設計

メインアリーナ屋根の球形シェルは、地震に対して充
 分安全であることを確認している。設計用の地震荷重と

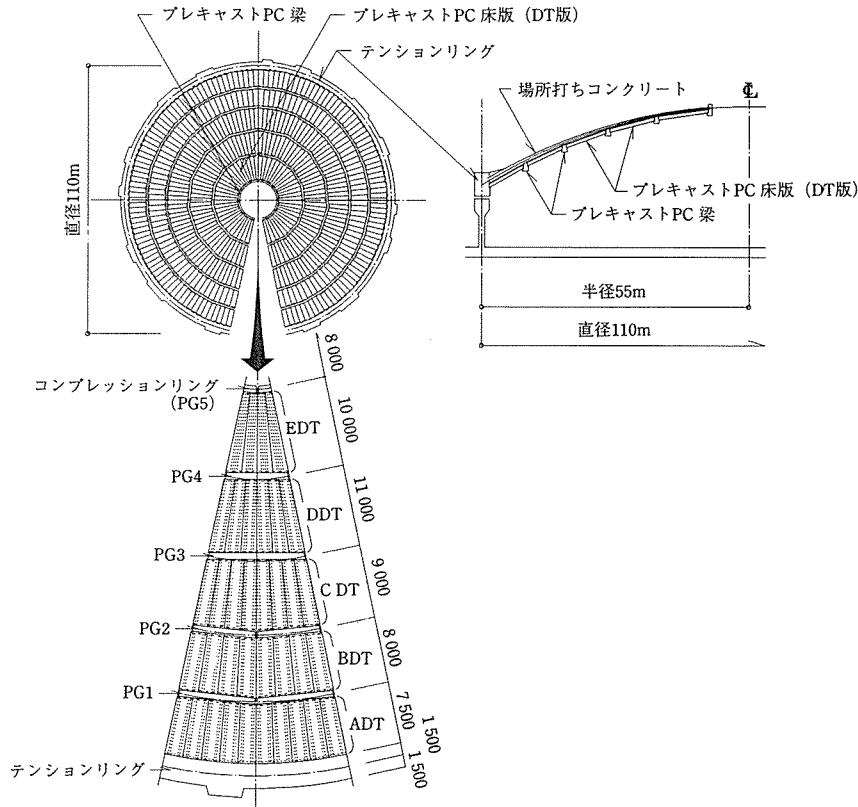
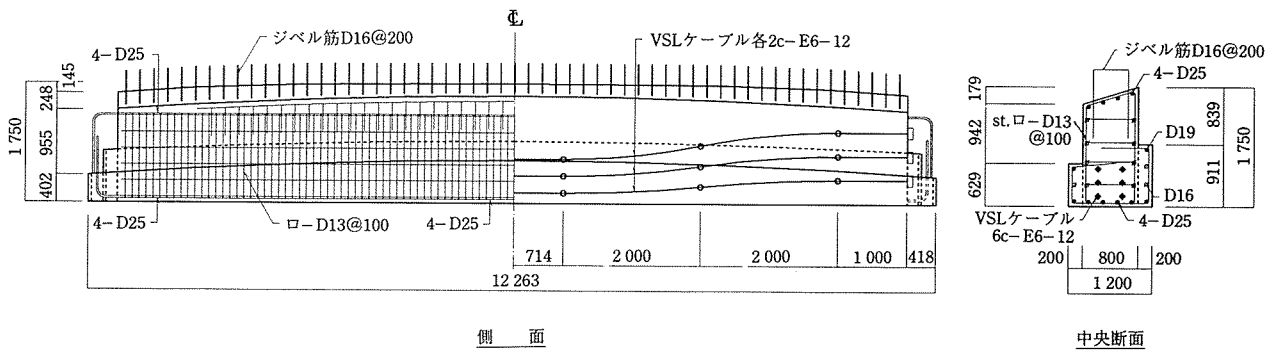


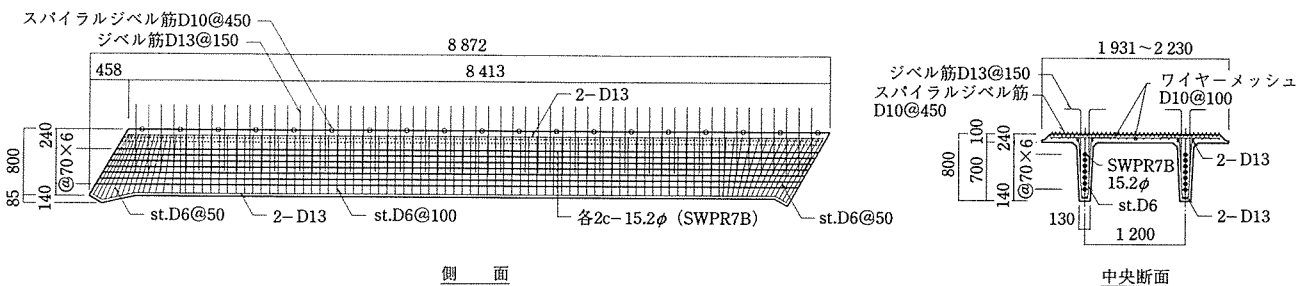
図-3 球形シェル概要図



側面

中央断面

図-4 プレキャスト PC 梁断面図



側面

中央断面

図-5 プレキャスト PC 床版 (DT 版) 断面図

して水平震度 0.3 の水平力に対し、シェル
のコンクリートの圧縮応力が長期許容圧縮
応力度 ($F_c/3$) 以下に納まり、引張応力が
生じないように設計した。また、大地震荷
重として設計用地震荷重の 1.5 倍の水平力
〔 $G+P+1.5K$ 〕 に対して圧縮応力が短期
許容圧縮応力度 ($2F_c/3$) 以下に納まり、
引張応力がひび割れ発生応力度 ($F_c/10$) を
超えないことを確認している。また、上下
動の地震荷重の検討として、長期荷重の
1.7 倍の荷重 [$1.7(G+P)$] に対してコン
クリートの圧縮応力が短期許容圧縮応力度
以下に、引張応力がひび割れ発生応力度以
下となるように設計した。さらに、球形シェルに対し時刻歴応答解析を行い、各部の応力度検討を行っている。応答解析は、水平 1 方向入力、上下 1 方向入力および水平 2 方向・上下 1 方向同時入力の 3 ケースについて行った。なお、採用地震波は、EL CENTRO NS, EW, UD 波、TAFT NS, EW, UD 波および OSAKA 206 EW 波を採用し、地震動の大きさはレベル 2 地震動を 40 cm/sec とした。応答解析結果より、レベル 2 地震動でもシェルのコンクリートの圧縮応力は短期許容圧縮応力度以下に、引張応力はひび割れ発生応力度以下に納まる結果となった。

次に上記で述べたシェルに生じる地震動を下部の躯体に伝える機構を説明する。アリーナ屋根の球形シェルは、テンションリングの下端において、半径方向に変形可能な積層ゴムの支承により支持されている (図-6 参

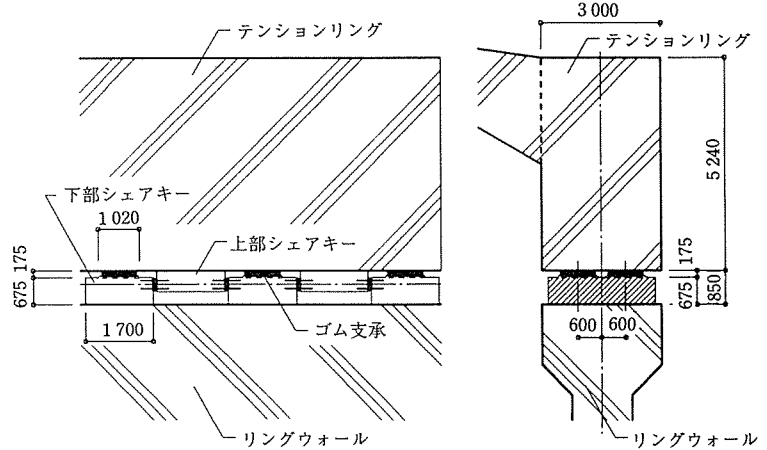


図-6 支承部詳細図

照)。このゴム支承は、球形シェルの鉛直荷重および上下動の地震荷重をテンションリング下の円筒形の耐震壁 (リングウォール) に伝達する一方、プレストレス力を導入した場合や、鉛直荷重の変動による半径方向の水平変形、さらに長期間のクリープ変形を拘束しないための半径方向ローラー機構の役割を持たせている。また、球形シェルの円周方向の変形は、テンションリングおよび下部リングウォールと一体としたコンクリート造のシェアキーにより拘束し、地震時に生じる球形シェルの水平力はそのシェアキーを介して下部リングウォールに伝達させる構造とした。

4. 球形シェルの施工手順

テンダンの緊張は施工段階の荷重に応じて 3 段階に分けて行った。球形シェルの施工手順を図-7 に示す。

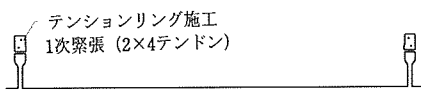

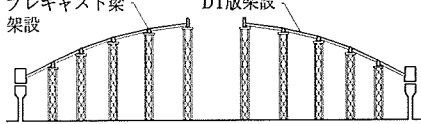
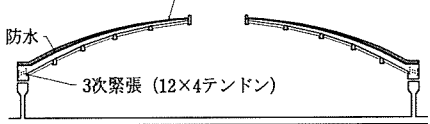
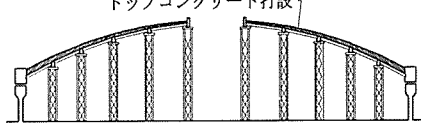
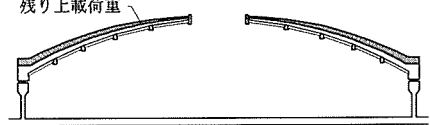
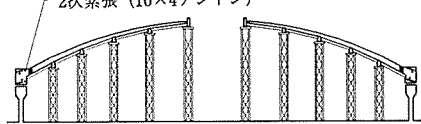
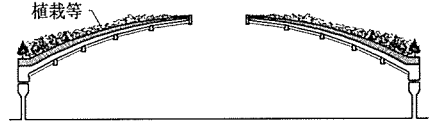
| | | | |
|--|--|---|---|
| <p>① ゴム支承の設置 テンションリング施工 所定強度発現後 1次緊張</p> | <p>テンションリング施工 1次緊張 (2×4テンドン)</p>  | <p>⑤ 支保工の ジャッキダウン 支保工の撤去</p> |  |
| <p>② 支保工の組立 プレキャスト梁架設 DT版架設</p> | <p>プレキャスト梁架設 DT版架設</p>  | <p>⑥ 防水工事 上載荷重の50%施工 3次緊張</p> | <p>上載荷重の50%施工 防水 3次緊張 (12×4テンドン)</p>  |
| <p>③ シェル部分の配筋 トップコンクリート 打設</p> | <p>トップコンクリート打設</p>  | <p>⑦ 残り上載荷重</p> | <p>残り上載荷重</p>  |
| <p>④ シェル部の 所定強度発現後 2次緊張</p> | <p>2次緊張 (16×4テンドン)</p>  | <p>⑧ 植栽・造園工事</p> | <p>植栽等</p>  |

図-7 球形シェルの施工手順

5. PC 工事の施工

緊張工法は VSL 工法で、テンドン種別は E 6-42 タイプが用いられた。その諸元および定着体概要を図-8 に示す。また、緊張方法は、シェルに均等に荷重を作用させるため、1 周 4 本のテンドンに対して両端両引きの同時緊張とした。

5.1 テンドンの配置設計

テンドンはテンションリング部に 24 本、シェル部分に 6 本で合計 30 本配置され、1 テンドンの緊張力は 807 tf (0.85 P_y) とした。これから摩擦ロス等を考慮すると導入力は合計約 20 000 tf となり、これを鉛直荷重による引張力に抵抗させた。球面シェルの外周は約 350 m あるため、30 本の PC テンendon は平面的に均等に 4 分割し、引出しの直線部を入れて、1 テンドンの長さは約 110 m とした。テンドンの平面配置の一例を図-9 に示す。また、テンドンの断面配置およびその引出し方法を図-10 に示す。テンションリング部 (A~D 列) については、1 テンendon が 4 分の 1 周した後、接線方向へ直線的にテンションリング側面のバットレスに引き出す方法とした。また、シェル裾野部のテンendon (E・F 列) については曲線にてシェル上部のバットレスへ曲げ上げて引き出す方法とした。

5.2 シースの配置工事

シースは、内径 145 ϕ 、外径 157 ϕ 、定尺 8 m を用い、コンクリート打設時の浮上りを防止するため、鉄筋受け兼用の架台に U 字ボルトにより固定した (写真-2 参照)。また、シースのジョイント部は、コンクリート

| | |
|----------------|-------------------------------|
| テンドン構成 | 42-15.2 ϕ (VSL E6-42) |
| 記号 | SWPR7B |
| 断面積 | 58.254 (cm ²) |
| 引張荷重 (P_u) | 1 117.2 (t) |
| 降伏荷重 (P_y) | 949.2 (t) |
| 導入時緊張力 | 806.8 (t) |
| シース | 亜鉛メッキ |
| 内径/外径 | 145/157 (mm) |

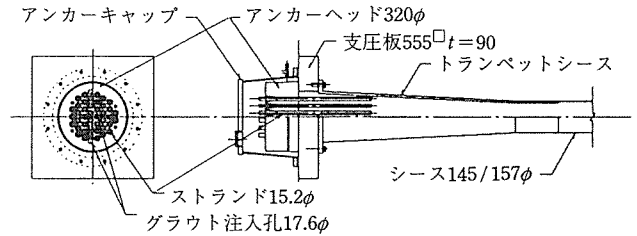


図-8 テンendon 諸元および概要図

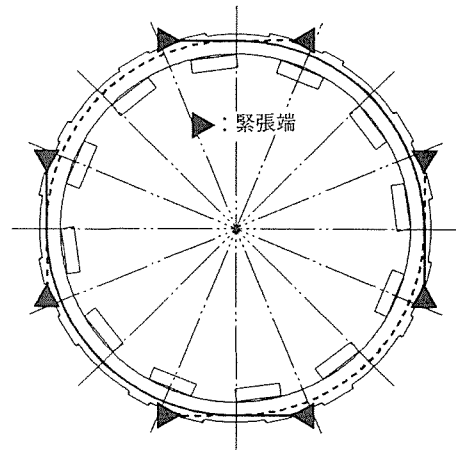


図-9 テンendon 配置概要図

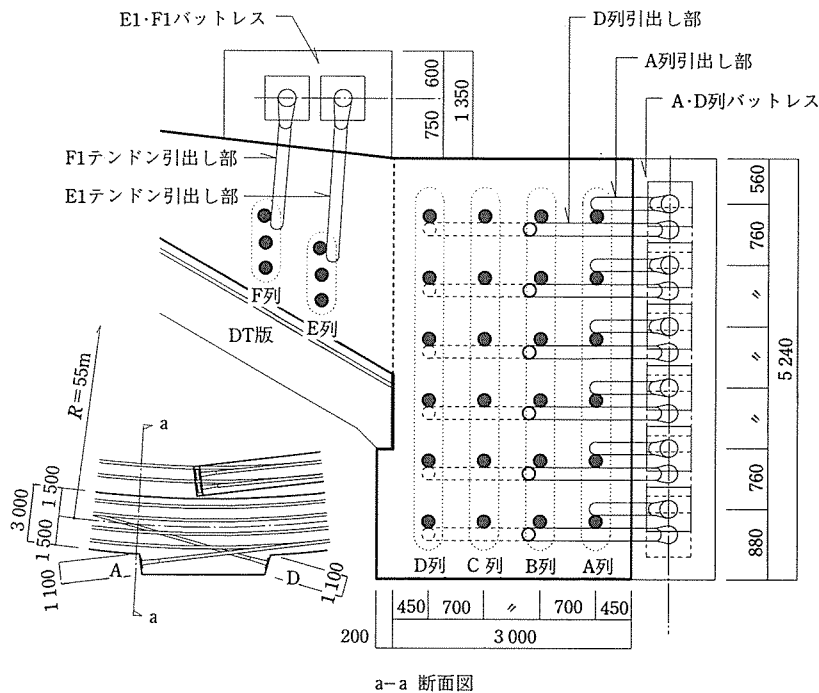


図-10 断面配置図

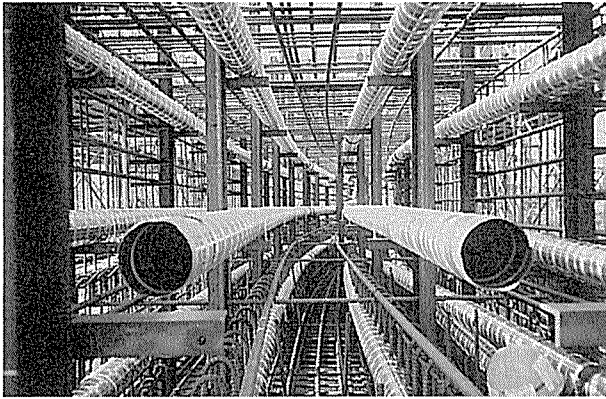


写真-2 シース・鉄筋受け架台

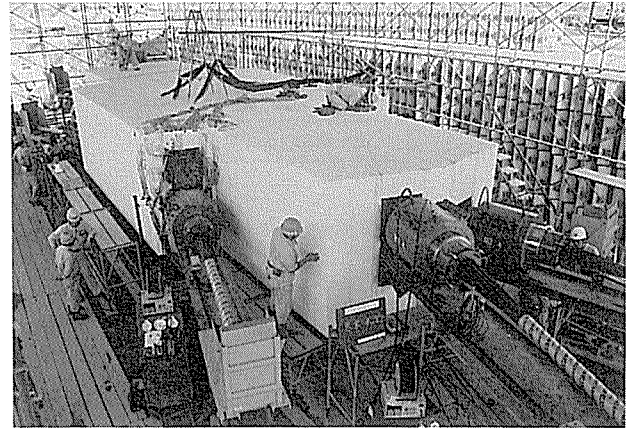


写真-4 定着部実大実験

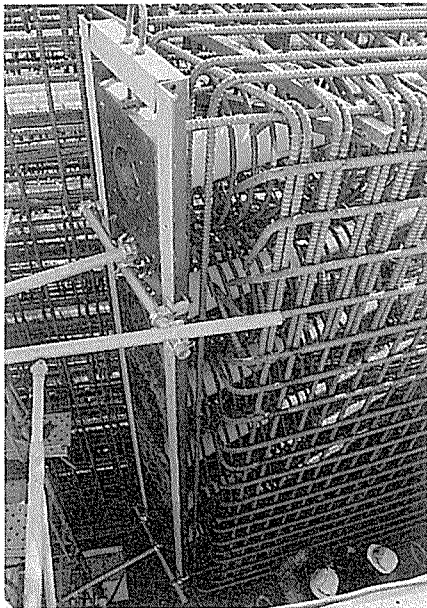


写真-3 支 圧 板

打設時のペースト分の流入を防ぐため、ジョイントシースにプチルテープとエスロンテープの2重巻きとした。支圧板は、縦6段分をアングルにて固定し、所定位置へ取り付けられた(写真-3参照)。なお、鉄筋とシースとが複雑に配置されるテンションリングの施工に先立ち、長さ約10mにて実物大のテンションリング組立実験を行い、作業性の確認を含めて細かな作業手順の検証を行った。

5.3 テンドンの挿入工事

1 テンドンの長さが約110mで、約5tfの重量があること、大型重機使用上の制約、またメインアリーナ外周部躯体施工との輻輳等の理由から、テンドンの挿入は1度にすべてのストランドを挿入するプルスルー方式では困難であり、ストランド1本ごとに挿入するプッシュスルー方式を採用した。

5.4 緊張作業

(1) テンションリング定着部実大実験

定着部の安全性の確保、補強方法(配筋方法)の把握

のため、実物大のバットレス部の供試体を製作し、実際に使用するジャッキを用いて緊張を行った。実験の状況を写真-4に示す。実験の結果、各補強筋の有効性、定着部周辺の応力状態が把握でき、大容量のPC定着部の安全性が確認された。

(2) 緊張作業

緊張作業は、8台の1100tf級ジャッキを使用して行った。シェルに対し均等に荷重を作用させるためには、緊張作業の進行状態を各ジャッキ間で同調させる必要があった。そこで、各オペレーター間のポンプ操作の歩調を合わせるため、計測管理室を基点とし、各ジャッキ間に有線による同時通話可能な通信システムを採用した。また、テンドンの伸び量(700mm)とジャッキストローク量(300mm)との関係より、緊張作業中2回のジャッキの盛替え作業が必要であったが、このシステムにより細かな作業指示の伝達、確認が可能となり作業を円滑に行うことができた。

(3) 緊張管理要領

今回の緊張においては、テンションリングの必要断面導入力20000tfを確保するため、全テンドンの伝達荷重を把握し摩擦係数を算出する必要があった。設計値において $\mu=0.25$ (1/rad)、 $\lambda=0.001$ (1/m)と λ 値を低く設定したため、摩擦係数の算出については、両変数である μ 、 λ の内 λ 値を0.001と固定して μ 値の算出を行った。この μ 値が0.25を上回った場合はテンションリング各断面位置での導入力を計算し、最終的に断面導入力20000tfを超えることを確認することとした。このため、テンドンの両端にセットされた2台のジャッキをそれぞれ加圧側、受圧側と設定し緊張を行った。図-11に緊張管理フローを示す。加圧側ジャッキを100tfきざみで加圧したときの受圧側ジャッキへの伝達荷重は、計測管理室のパソコンにリアルタイムにデータ収集され、各4本のテンドンの摩擦係数が計算表示された。また、荷重データはあらかじめキャリブレーションを行った加

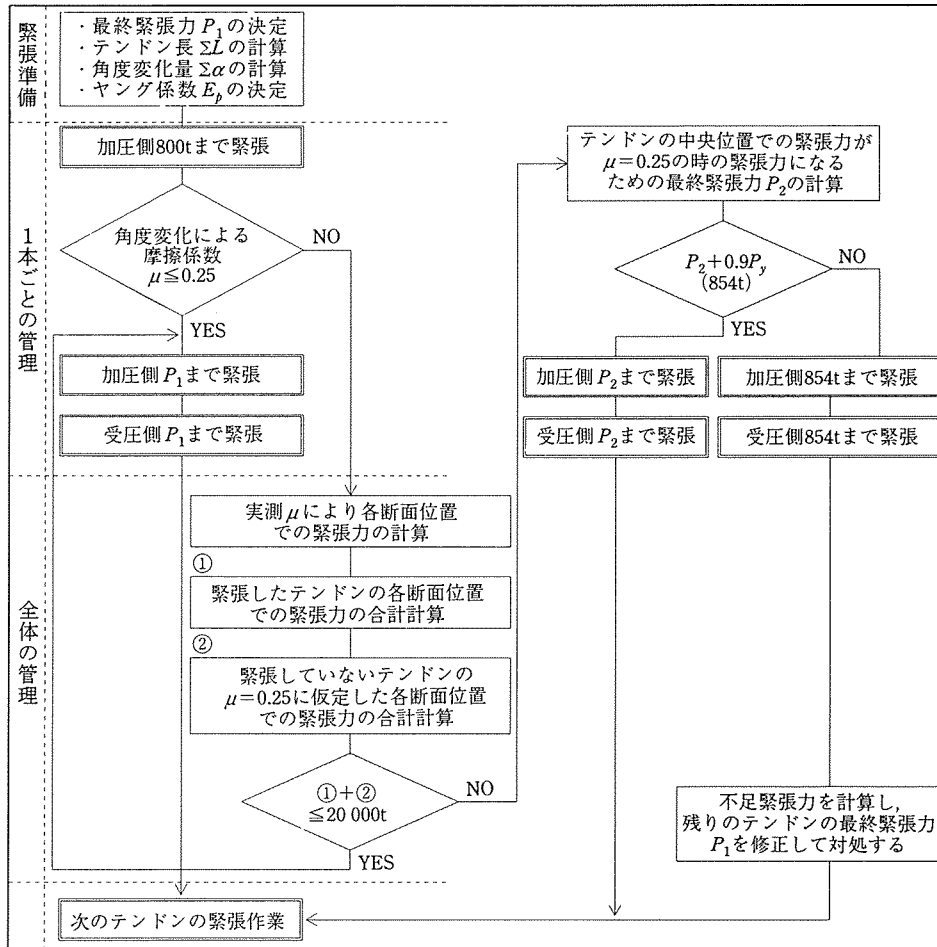


図-11 緊張管理フロー

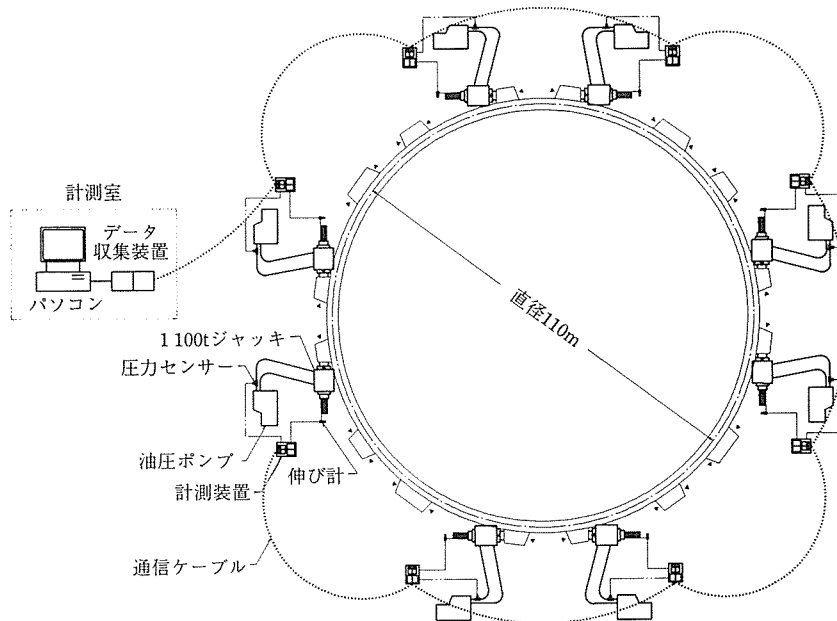


図-12 計測システム概要図

圧センサーにより測定し、デジタル値にて表示した。計測システムの概要図を図-12に、モニター画面を図-13に示す。また、テンションリング内に設置した鉄筋計の計測データにより算出される軸力の増加分、および変位

計により計測されるテンションリングの変形量を解析値と比較し、確実に緊張力が導入されていることを確認した。なお、テンドンの伸び量についても、ストランド端部に設置した伸び計によりリアルタイムに計測し、荷重

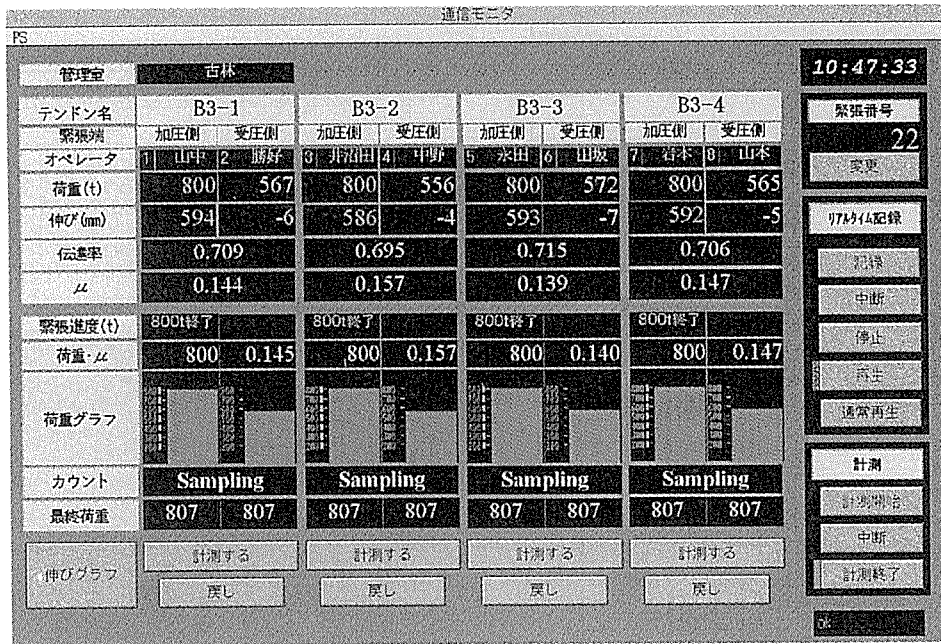


図-13 計測モニター

に対する実測伸び量の確認と、設計伸び量に対して $\pm 5\%$ 以内であることを目標に管理を行った。

(4) 緊張管理結果

図-14に μ 値の計測結果および断面導入力の一例を示す。 μ 値はおおむね0.25以下となっているが、テンションリング部分(A~D列)とシェル裾野部(E・F列)のテンドンとを比較すると、シェル裾野部の方が大きい値となり0.25を超えるものも見られた。その理由としては、テンションリング部のテendonは接線方向に直線的

に引き出しているのに対し、シェル裾野部のテendonでは、シェル上部へ小さい曲げ上げ半径により引き出しているためと推測される。しかし、テンションリング部の24本のテendonの μ 値が小さく必要断面導入力の20000tfは問題なく確保することができるため、テendonの過緊張は行わなかった。また、実際のテンションリングの軸力については、図-15よりテendon1周を緊張すること確実に緊張力が導入されていることがわかり、変形についても図-16に示すように解析どおりに動いている

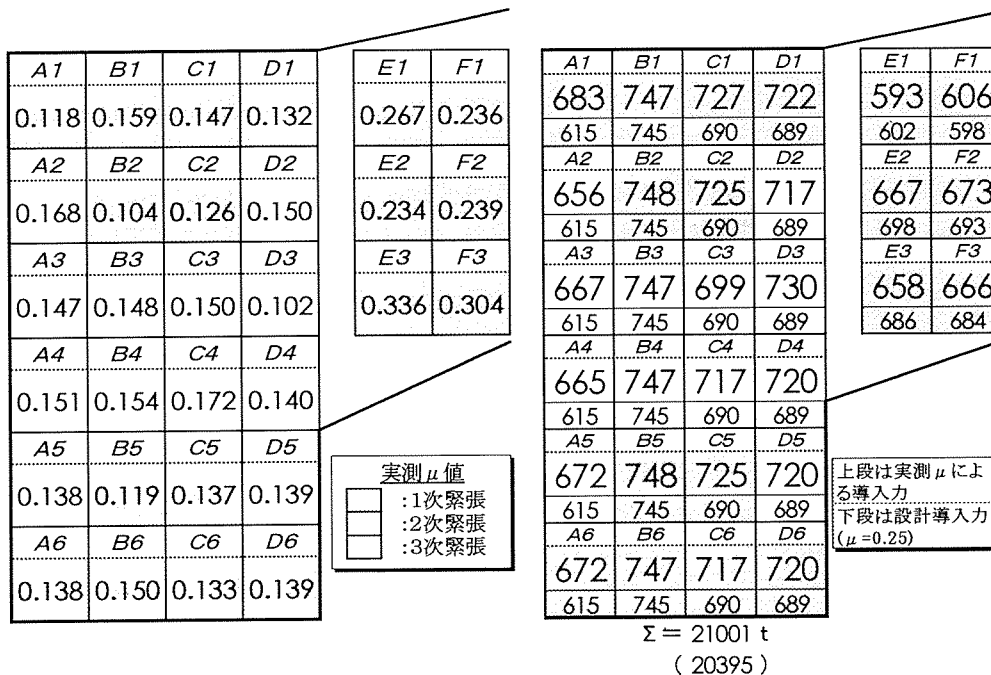


図-14 μ 値計測結果および断面導入力

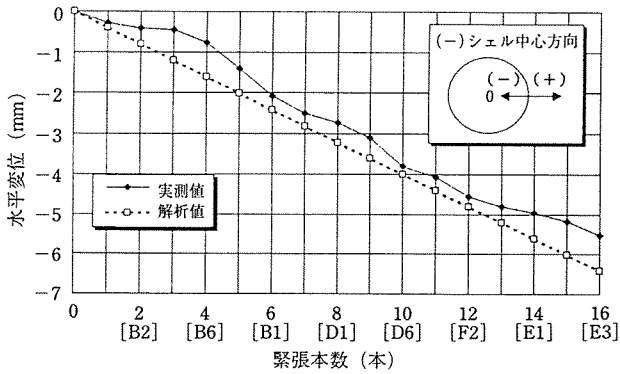


図-15 テンションリング水平変位 (2次緊張時)

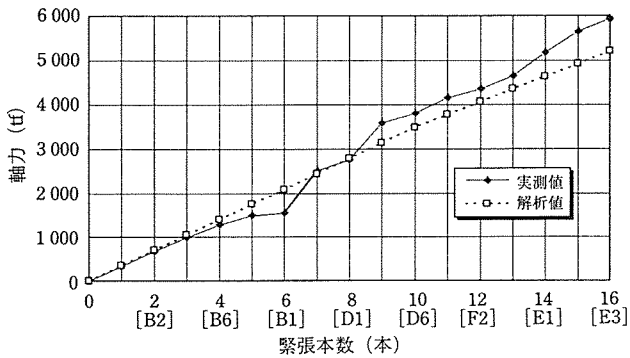


図-16 テンションリング軸力変化 (2次緊張時)

ことがわかる。なお、テンドンの伸び量は、設計値 $\pm 5\%$ におさまる結果となった。

5.5 グラウト工事

(1) 配合試験および注入実験

グラウト配合は、構造物の種類、シースの配置形状、シース径、長さおよび気温などの施工環境に応じて決定されなければならない。グラウトの品質としては、水セメント比、圧縮強度、流動性、ブリージング率、膨張率、などがあり、関連規定を満たす必要がある。特に流動性については注入作業が完全に行えるかどうかを決める重要な要素である。そこで、本工事のグラウトは、大口径 (内径 147φ)、約 110 m の長さのシースにより注入量が約 1.5 m³ となること、注入時期が冬期から夏期にわたることなどから、品質および施工性の良好なグラウトの選定のため、冬期・夏期の各配合試験、実物大の試験体による注入実験を行った。

配合試験は、現場での注入時における施工性を考慮し、良好なコンシステンシーを 120 分以上保持したうえで所要の品質を確保できる配合を選定することを目的とした。その結果、グラウトの水セメント比を冬期 40%、夏期 42% と決定し、双方とも高性能 AE 減水剤を 1.4% 使用するものとした。膨張剤は適度な膨張が得られるよう夏期用と冬期用の 2 種類を使用した。表-1 に採用した配合を示す。

表-1 グラウト配合表

| 1 バッチ当たり | | | | | | |
|----------|-----|------|------|------------------|-----------------|-----|
| | W/C | セメント | 水 | 減水剤 | 膨張剤 | |
| | (%) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | 膨張率 |
| 夏 | 42 | 80 | 33.6 | 1.12 [C×1.4%] | 0.8 [C×1.0%] | 小 |
| 冬 | 40 | 80 | 32.0 | 1.12 [C×1.4%] | 0.8 [C×1.0%] | 大 |

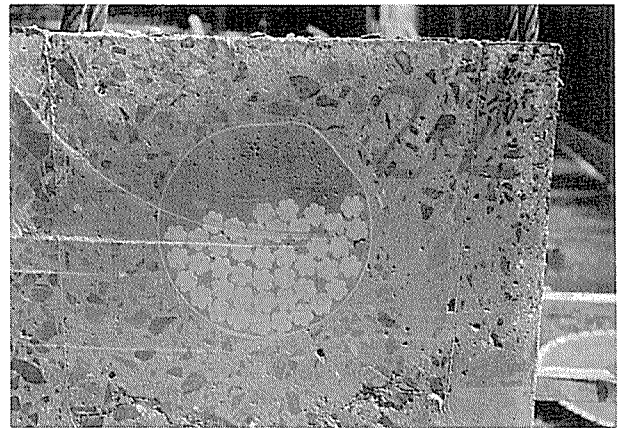


写真-5 グラウト充填状態

注入実験では、①配合試験により選定された配合による実験の施工性の確認、②施工時間 (タイムスタディ) の把握、③注入必要量の把握、④実際の充填状態の確認、⑤中間部エア抜きの位置の選定を目的とし約 110 m の長さで実際のシースを配置し、ストランド (E6-42) を挿入して行った。なお、試験体はエア抜きの間隔の異なる 2 タイプとした。

結果として、施工性については特に問題はなく、本試験をもとにきめ細かな作業手順を確立し実施工に反映した。また、養生期間をおき試験体の切断を行い、実際にシース内のグラウト充填状況を確認した。写真-5 に示すように十分な充填状況が確認され、中間部エア抜きの間隔を 20~30 m と決定した。なお、今回の施工に際し、通常トランペットシース部に設けるグラウト注入口、排出口を前記の図-8 に示すアンカーヘッドにかぶせたキャップに設け、アンカーヘッドに設けた 2 つの孔 (17.6φ) よりシース内にグラウトを注入する方法を採用したが、充填状態は非常に良好であった。

(2) 注入工事

グラウト量が大容量であることから現場内にミニプラントおよびアジテーター (0.5 m³) を設置し、グラウト供給量の確保をはかった。品質管理上、練混ぜ直後、注入開始直前、さらに排出口から排出されたグラウト材についてコンシステンシー試験を行い品質の確保につとめた。また、シースが大口径であるため、グラウト充填後、約 15 分間シース内のエアがエア抜部へ上昇

するのを待って、再注入によりエアの排出を行い、必要圧力まで加圧し注入完了とした。

結果として大容量のグラウト注入にもかかわらず、注入実験により作業手順を確立したため、順調に作業が進み、また、エア抜き状況およびアンカーキャップ取外し後のアンカーヘッド部の充填状況より、シース内におけるグラウト充填状況が良好なことが推測された。

6. おわりに

本建物は緑地の少ない大都市圏において、緑につつまれた公園とその公園地下に建設された大規模なスポーツ施設を融合させた画期的な大空間構造物である。そして、数多くの高度な建設技術の結集により建設され、本

報告はその中のPC施工技術を中心に報告したものである。今後計画される大規模なPC構造物を設計・施工する際に少しでも役立つことを願う。

本建物の基本設計終了後、実施設計を進めるにあたり、大容量のプレストレストコンクリートおよびハーフプレキャストPC部材の設計・施工の問題点など、数多くの点について熱心な御指導、御助言を頂いた大阪大学工学部建築工学科鈴木計夫教授に対し深く感謝の意を表します。また、施工ならびに実験、解析等に対し、多くの御協力、御尽力を頂いた大林組技術研究所を始め関係各位に対し厚く御礼申し上げます。

【1996年3月18日受付】