

西松式開閉式ドーム「トレンディ・ドーム」の開発

Development of TRENDY DOME

| | |
|---------------------|-----------------|
| 後藤 徳広* | 鈴木 剛** |
| Norihiro Goto | Tsuyoshi Suzuki |
| 石田 忠*** | 近藤 操可**** |
| Tadashi Ishida | Moriyoshi Kondo |
| 笠松 照親***** | 大嶋 英一***** |
| Teruchika Kasamatsu | Eiichi Oshima |

要 約

西松式開閉式ドーム（トレンディ・ドーム）の試設計を実施した。建設地を全国に想定し、多雪区域を含めた地域に対応できる多目的施設として、開閉式ドームを計画している。

建築計画、設備計画、構造解析、駆動装置を含め、幅広く検討を加え、さらに、風荷重については、設計用風荷重の妥当性を確認するため、1/250の模型による風洞実験を行って検証した。

ドームの規模については、種々の観点より検討を加えた結果、将来的に最も需要が見込まれる収容人員が約1万人程度の中規模ドームとした。また、開閉屋根はスパン約110mの鉄骨造で、自動制御により水平移動を行う。

この試設計により、中規模トレンディ・ドームの設計法が確立された。

目 次

- §1. はじめに
- §2. トレンディ・ドームの概要
- §3. 構造設計方針
- §4. 構造検討結果
- §5. まとめ

開発着手時は、福岡のツインドームを始めとして種々のプロジェクトが計画されていた（Table 1 参照）。

当社のトレンディ・ドームは中規模の開閉式ドームを対象に、NTCを基本として技術開発を行うことになった。平成2年6月より、具体的にモデルプランを決め、試設計を進め、平成3年8月に設計手法を確立した。

§1. はじめに

開閉式ドームの開発は、平成元年12月、メルボルンナショナルテニスセンター（以下NTCと称する）の実績を有するモンセル社との技術提供により開始した。

*建築設計部構造課副課長
 **建築設計部設計課
 ***建築設計部構造課長
 ****機材部機械課副課長
 *****技術研究所原子力課長
 *****設備部副部長

§2. トレンディ・ドームの概要

2-1 適用範囲

ドームのスパンは110m程度で最大積雪量1.5mまでの多雪区域にも適用でき、収容人員は1万人程度の多目的に使用される施設とする。

2-2 試設計建物概要

(1) 建物概要

用 途：スポーツを主体とした多目的ドーム
 建築面積：15,180m²
 延床面積：39,794m²

Table 1 開閉式ドームプロジェクト一覧

| 名称 | 所在地 | サイズ及び性能 | 所有者 | 使用目的 |
|-------------------|------------------|-----------------------------------------|------|---------------|
| 有明コロシアム | 江東区 | 競技場の屋根カバー | 東京都 | スポーツ コンサート |
| 福岡ツインドーム | 福岡市 | スポーツドーム ファンタジードーム 共に35000人 直径200m | ダイエー | 多目的 |
| 埼玉コロシアム | 浦和市 | 競技場35000人 | 埼玉県 | 多目的 |
| ホワイトドーム | 札幌市 | 競技場35000人 | 未定 | 多目的 |
| 大阪サウスポート スタジアム | 大阪 新埋立地 南港 | 60000人 直径200m | 大阪市 | 多目的 |
| 西武ドーム | 所沢市 | 未定 | 西武球団 | 野球場 |
| 大阪ドーム | 大阪市 | 未定 | 近鉄球団 | 野球場 |
| 名古屋スタジアム | 名古屋市西区 | 45000人 直径240m | ノリタケ | 野球場 |
| 川崎ドーム | 川崎市 | 未定 | 川崎市 | 野球場 |
| 横浜ドーム | 横浜市 | 未定 | 大洋球団 | 野球場 |
| 神戸ドーム | 神戸市 | 30000人 直径200m | 神戸市 | 多目的 |

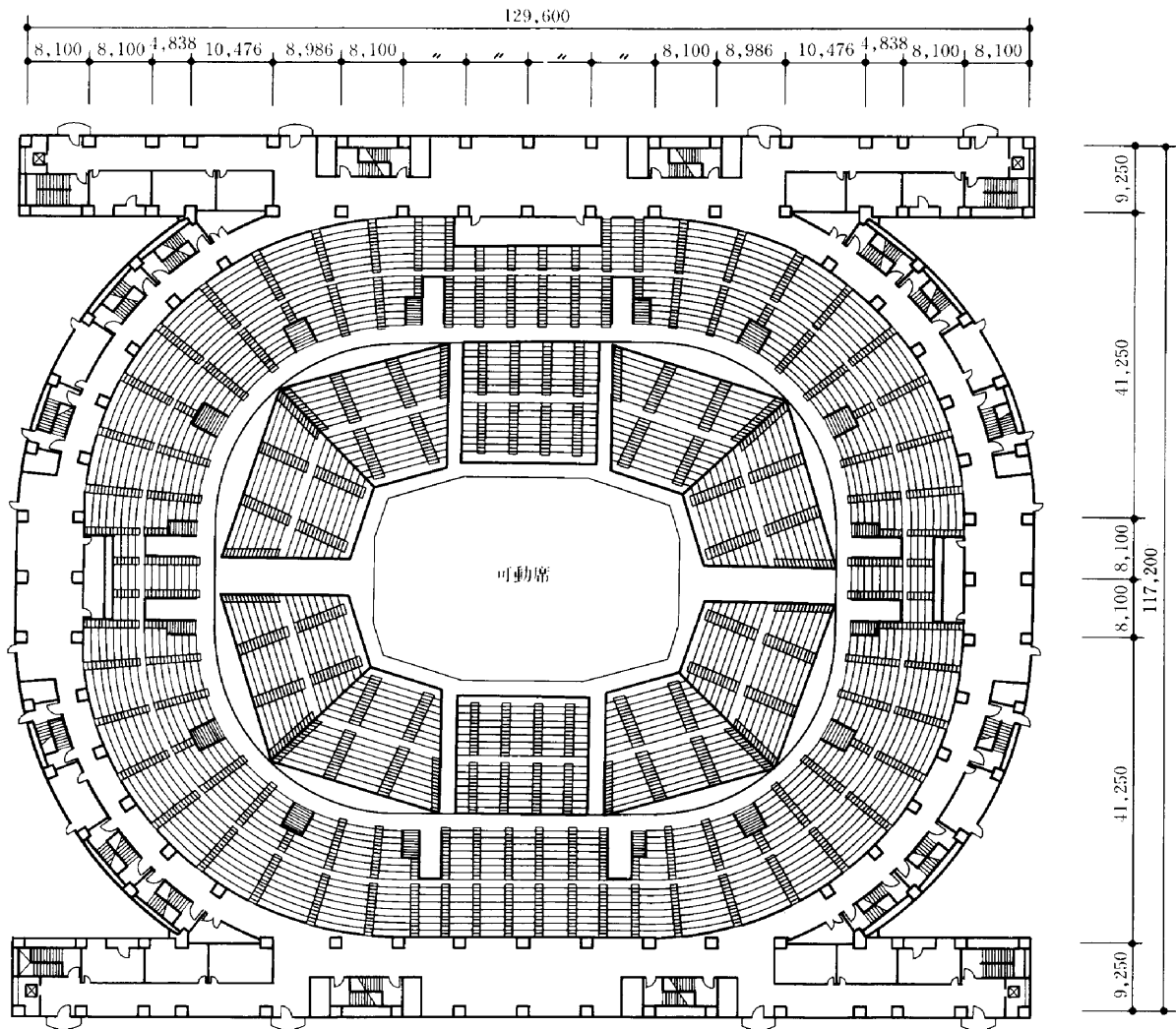


Fig.1 3階平面図

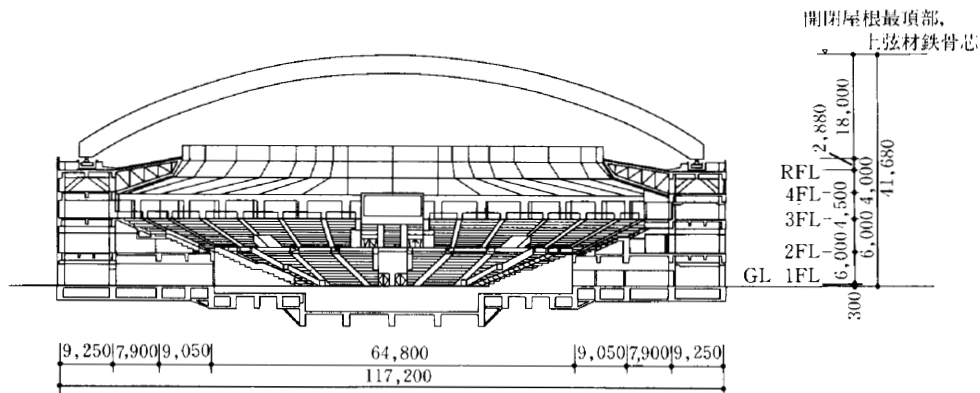


Fig.2 断面図

高 さ：最高高さ 42.0m，軒高 24.0m
 階 数：地下1階，地上4階
 構 造：軀 体 SRC造
 固定屋根 S造
 開閉屋根 S造

外部仕上げは下記仕様とする。

屋 根：ステンレス防水(SUS316 $t=0.4$ mm)
 防水下地(木毛セメント板 $t=25$ mm)

外 壁：コンクリート打放しの上アルミパネル

(2) 建築計画概要

フィールドを中心に、可動席、固定席から構成されるアリーナ部分、その周囲にホール、廊下、事務室等の付属施設を設けた。

可動席は床に座席が収納される形式で、客席パターンを変化させることにより、多様なイベントに対応可能とした (Fig. 3 参照)。

客席周囲の廊下は、内部階段で上下に結ばれ、避難階は1階とした。3階の客席と廊下は防煙区画とし、一般階の廊下と階段室、付属施設、客席は甲種防火区画とした。

収容人員は、固定席に5,800人、可動席に4,600人の計10,400人を見込んでいる。

(3) 構造計画概要

トレンディ・ドームは、開閉屋根構造部、開閉装置、下部構造部の3部分より構成されている。

①開閉屋根構造部

開閉屋根構造部は、金属屋根が水平に移動するアーチ状の鉄骨屋根で、108m×31mの大屋根2枚で構成される。

架構形式はアーチ状の平行弦トラス架構とし、その両端は移動台車に緊結される。

②開閉装置

開閉装置は、駆動、従動装置と支持装置から構成され、開閉屋根構造部の移動と下部構造への荷重の伝達を行う。この装置は、アーチ状の開閉屋根1枚に、片

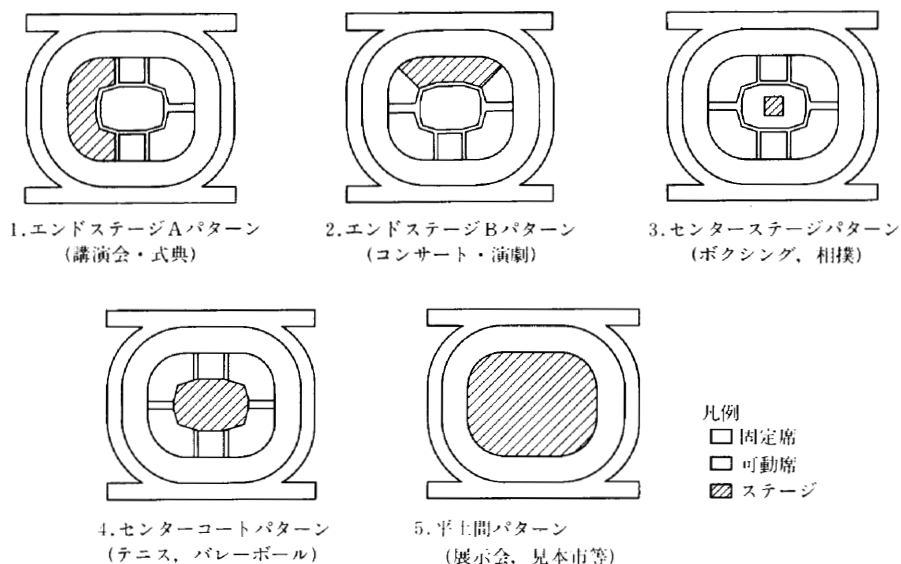


Fig.3 利用形態パターン

側に駆動装置3台、従動装置4台の計7台、両側で合計14台の開閉装置で構成されており、レール上を水平移動する (Fig. 4 参照)。

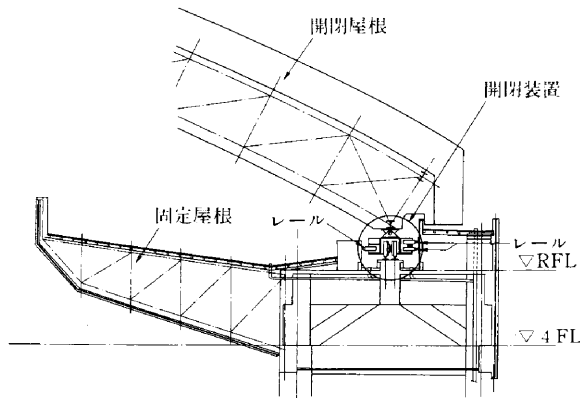


Fig.4 開閉装置

③下部構造

開閉屋根構造部および開閉装置の荷重を安全に支持する構造として、じん性に富む鉄骨鉄筋コンクリート造とした。開閉屋根の走行するフレームは直下階に K

型のブレースを配し、大梁に過大な応力が生じないように配慮した。

平面上四隅の基礎は、開閉屋根のスラストによる引抜き力に抵抗させるため、永久アースアンカーを使用することとした。

(4) 設備計画概要

設備計画概要を Table 2 に示す。

§ 3 . 構造設計方針

3-1 開閉システム

(1) 開閉モード

全閉状態、全開状態を基本モードとする (Fig. 5 参照)。

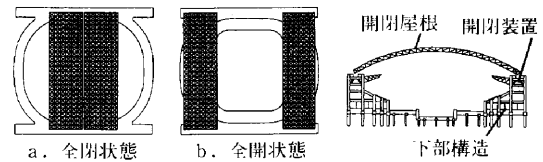


Fig.5 開閉モード

Table 2 設備計画概要

| 諸設備名 | 内 容 | |
|---------|-----------|---------------------------------------------------|
| 給排水衛生設備 | 給 水 設 備 | 受水槽, 加圧給水装置 |
| | 給 湯 設 備 | 中央給湯方式: シャワー室等 個別給湯方式: 厨房, 店舗等 |
| | 排 水 設 備 | 汚水, 雑排水分流方式にて下水本管に放流 |
| | ガ ス 設 備 | 個別給湯, 厨房 |
| 空気調和設備 | 熱源機器設備 | 二重効用冷温水発生器(水冷) 空冷ヒートポンプエアコン |
| | 空 調 設 備 | アリーナ: エアハンドリングユニット +ダクトによる吹出し方式 |
| | 換 気 設 備 | 第一種換気: アリーナ, 機械室, 居室, 厨房等 第三種換気: 売店, 便所, クローク等 |
| | 自動制御設備 | 中央監視設備, 機械廻り制御設備 |
| 電気設備 | 高圧引込設備 | 常用, 予備 2 回線引込み |
| | 受変電設備 | 変電室 2 ヶ所設置 (室内キュービクルタイプ, 変圧器: モールド形) |
| | 自家発電設備 | 防災および保安電源用ディーゼル高圧発電機 |
| | 電 灯 設 備 | アリーナ: メタルハライドランプ投光器主体 |
| | 弱 電 設 備 | 構内監視 I T V 設備, 音響設備 |
| 防災設備 | 排 煙 設 備 | アリーナ: 蓄煙方式, その他: 機械排煙方式 |
| | 消 火 設 備 | アリーナ: スプリンクラー, 屋内消火栓等 電気室等: 不燃性ガス消火 |
| | 警 報 設 備 | 自動火災報知設備, 非常放送設備 |
| | 避 雷 針 設 備 | 棟上導体を設置し, 屋根面を保護する。開閉装置を通じて電氣的に接続する。 |

(2) 屋根の開閉条件

- ①常時は全閉状態とし、全開で使用した後も必ず全閉状態に戻す。
- ②降雨、降雪時および台風時は全閉状態とする。
- ③平均風速15m/sを超える場合は、全閉状態とし、開閉は行わない。

3-2 開閉システムの安全対策

(1) 逸走防止対策

開閉屋根の逸走を防止するため、全閉、全開等の所定の位置で、開閉装置に取り付けられたロックピン、レールクランプ等の係留装置により開閉屋根を固定する。

(2) 突風対策

平均風速15m/s以下を風速計で確認し開閉を行う。移動中に上記突風が生じた場合には、ブレーキを作動させ緊急停止し、さらにレールクランプにて固定させる。

(3) 地震対策

走行中に、レール面に設置した地震計にて、設定値を超える地震を感知した場合、緊急停止させる。係留はブレーキおよびレールクランプで行う。

(4) 台風対策

台風が予想される場合、全閉とし係留装置で対処する。

(5) 走行時の蛇行防止

片側7台、計14台の開閉装置によるドームの開閉作業中に両側の開閉装置の移動差が5cmを超えた場合には、緊急停止させて微調整を行う。

3-3 設計条件

- (1) 開閉屋根の全閉、全開状態に対し、鉛直荷重、雪荷重、風荷重、地震荷重、温度荷重を組合せ、安全性を確認する。
- (2) 開閉開始時および停止時の慣性力は、衝撃力として考慮し、長期扱いとする。
- (3) 開閉中の蛇行は強制変位として考慮し、長期扱いとする。
- (4) 多雪地域の場合は偏積雪荷重を考慮し、長期にて安全性を確認する。
- (5) 断面決定後にレベル1、レベル2の地震荷重により、上部構造、下部構造を含めた地震応答解析を行い、安全性を確認する。
- (6) 各荷重と開閉の組合せは Table 3 による。

Table 3 各荷重の組合せと開閉状態

| 荷重の組合せ | | 開閉状態 | | | |
|--------|-----------------|------|----|-----|----------------------------------|
| | | 全閉 | 全開 | 移動中 | 備考 |
| 長期 | $G \pm T$ | | ○ | | $S_1, \frac{1}{2} S_1$ (片側半分) |
| | $G \pm T + S_1$ | ○ | | | |
| | $G \pm T + C$ | | | ○ | |
| 短期(静的) | $G + K$ | ○ | ○ | | x, y, z地震 " " |
| | $G + S_2 + K$ | ○ | | | |
| | $G + C + 0.5K$ | | | ○ | |
| | $G + W_1$ | ○ | | | |
| | $G + C + W_2$ | | ○ | ○ | |
| 短期(動的) | $G + K_1$ | ○ | ○ | | |
| | $G + S_2 + K_1$ | ○ | | | |
| | $G + K_2$ | ○ | ○ | | |
| | $G + S_2 + K_2$ | ○ | | | |

G : 固定荷重+積載荷重+吊り荷重
 T : 温度荷重
 S₁ : 多雪地域長期雪荷重(70%)
 S₂ : 多雪地域短期組合せ用雪荷重(35%)
 C : 開閉屋根の開閉に伴う荷重
 K : A_i分布による地震力
 K₁ : レベル1による地震力
 K₂ : レベル2による地震力
 W₁ : 台風時の風荷重
 W₂ : 突風時の風荷重

§ 4. 構造検討結果

4-1 一次設計(静的設計)

開閉屋根と下部構造は別々に解析し、下部構造へは開閉屋根の反力を外力として入力した。

(1) 開閉屋根構造部

解析プログラムは ADINA を使用し、弦材は剛接合、その他はピン接合で立体解析を行った。

各部材は、多雪地域も想定しているため、長期積雪

時(偏積雪)が主要な決定要因になった(すべて全開状態、Table 4 参照)。

Z方向のたわみはスパンの1/1000以下で、地震時(Z方向地震時)は1/750となる。

(2) 下部構造部

解析プログラムは STAN II を使用し、開閉屋根の反力を外力とし、1/2モデルの立体解析を行った(Fig. 6 参照)。

Table 5 に示す荷重の組合せで不利な応力により断面を決定した。

Table 4 各部材決定要因

| 部材 | 荷重ケース | | 地震 | | |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------|----|---|--------------|
| | $G + T + \frac{1}{2} S_1$ (片側半分) | $G + T + S_1$ | x | y | z |
| メイントラス 上、下弦材 斜材、束材 小梁 上、下弦材 斜材、束材 水平ブレース 上面 下面 | ○ ○ ○ ○ | 下弦材の一部 | | | 上弦材 端部の束材 |
| | | ○ | | ○ | |

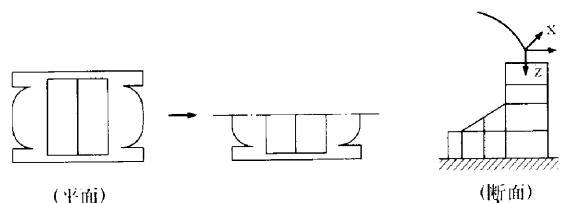


Fig.6 下部構造解析モデル

Table 5 荷重ケース

| 荷重組合せ | | 開閉状況 | |
|-------|----------------------------|------|----|
| | | 全閉 | 全開 |
| 長期 | 1. $G + T$ | | ○ |
| | 2. $G + T + S_1$ | ○ | |
| 短期 | 3. $G + K_x$ (X方向地震) | | ○ |
| | 4. $G + S_2 + K_x$ (X方向地震) | ○ | |
| | 5. $G + K_y$ (Y方向地震) | | ○ |
| | 6. $G + S_2 + K_y$ (Y方向地震) | ○ | |

注) 下部構造に対して影響の小さい下記の組合せは検討省略
 Z地震時、暴風時、移動中の突風、地震

4-2 動的応答解析

(1) レベル1 (25cm/s)

① 解析方針

下部構造を含めた建屋全体をモデル化して立体振動解析を行った(Fig. 7 参照)。開閉屋根の構造は、一次設計と同じ立体モデルをそのまま利用し、下部構造部

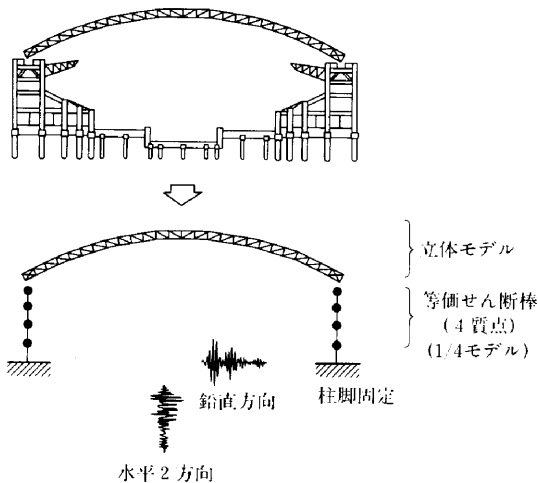


Fig.7 モデル図

は屋根両端下の等価せん断棒に置換して、それぞれの剛性を全体の1/4で与えたモデルとした。解析は弾性範囲とした。

②解析条件

解析条件は Table 6 に示す通りである。

③解析結果

振動モデルの一次固有周期は0.926秒で、下部構造については、スパン直交方向で0.333秒、スパン方向で0.319秒になった (Table 7, Fig. 8 参照)。

開閉屋根構造部の最大応答加速度は頂部において、スパン直交方向では1,300cm/s² (EL CENTRO)、スパン方向では500cm/s² (TAFT)であった。

Table 6 レベル1の解析条件

| | |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 解析法 | 直接積分法Newmark β 法($\beta=0.25$) |
| 時間刻み | 0.02秒 |
| 減衰 | 剛性比例型 ($h=0.03$) |
| 解析プログラム | ADINA |
| 入力地震波 | EL CENTRO 1940 TAFT 1952 HACHINOHE 1968 水平2方向、鉛直方向の3方向同時入力とする。25cm/sで規準化し、鉛直方向は1/2とする。 |
| 耐震判定 | 開閉屋根 短期許容応力度以下 下部構造 $2/3F_c$ 以下 |

Table 7 固有周期 (秒)

| 次数 | 上部構造 | 下部構造 | |
|----|-------|---------|-------|
| | | スパン直交方向 | スパン方向 |
| 1 | 0.926 | 0.333 | 0.319 |
| 2 | 0.547 | 0.117 | 0.107 |
| 3 | 0.482 | 0.082 | 0.080 |
| 4 | 0.348 | 0.051 | 0.049 |

最大応答変位は、スパン直交方向に6.3cm (EL CENTRO)、スパン方向では1/2頂部において4.5cm (HACHINOHE)、上下方向は頂部において18.0cm (TAFT)であった (Table 8 参照)。

部材最大応答応力については、上、下弦材とも短期

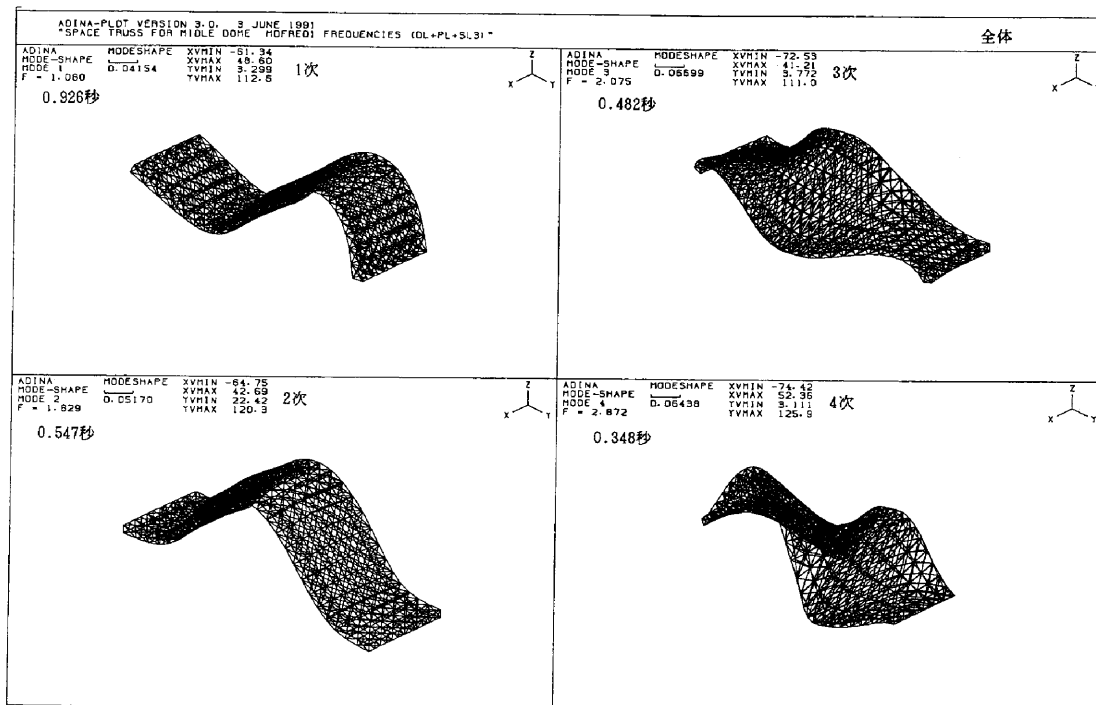


Fig.8 開閉屋根モード図

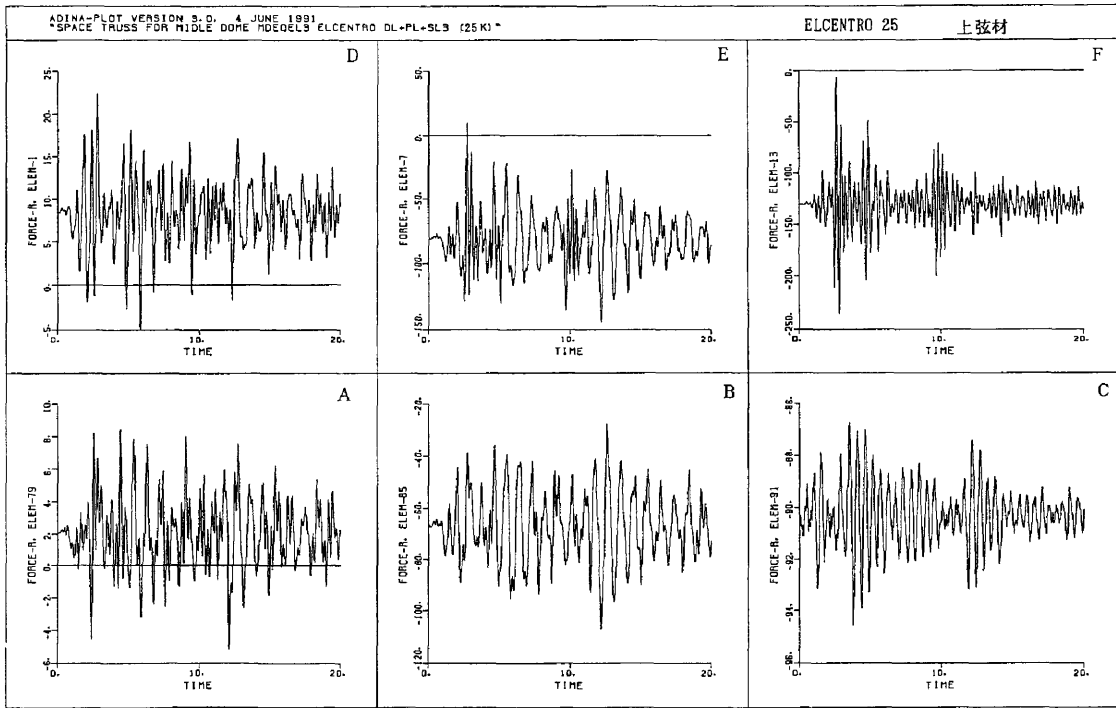
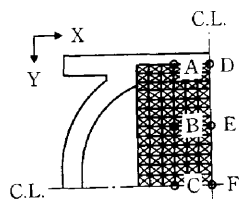


Fig.9 部材応力(時刻歴)

許容応力度の約84%, 斜材では約55%であった (Table 9, Fig.9 参照).

下部構造の最大応答せん断力は, Table 10 に示すように, 一次設計の1.5倍となった. 一次設計にフィードバックして判定を満足させている.

Table 8 最大応答加速度・変位



最大応答加速度 (cm/s²)

| 波 | 方向 | A | B | C | D | E | F |
|-----------|----|-----|-----|-------|-----|-------|-------|
| ELCENTRO | X | 650 | 900 | 1,300 | 620 | 900 | 1,300 |
| | Y | 280 | 260 | 320 | 280 | 290 | 320 |
| | 上下 | — | 370 | 130 | — | 1,200 | 2,700 |
| TAFIT | X | 520 | 700 | 1,000 | 520 | 650 | 900 |
| | Y | 480 | 500 | 510 | 500 | 450 | 500 |
| | 上下 | — | 650 | 290 | — | 1,250 | 2,700 |
| HACHINOME | X | 400 | 470 | 530 | 400 | 440 | 520 |
| | Y | 300 | 350 | 350 | 230 | 340 | 360 |
| | 上下 | — | 530 | 190 | — | 850 | 1,850 |

(2) レベル 2 (50cm/s)

①解析方針

振動モデル, 解析条件, 入力地震波ともレベル 1 と同じとした. ただし下部構造については非線形とし, 静的弾塑性解析を行い, Tri-Linear 型のスケルトンカーブにモデル化した. 入力地震動の入力レベルは50 cm/sで規準化した.

②耐震判定

開閉屋根構造部 座屈耐力以下
下部構造部 F_c 以下 (終局耐力以下)

③解析結果

開閉屋根の各部材応力は, すべて座屈耐力以下に納まっている.

最大応答変位 (cm)

| 波 | 方向 | A | B | C | D | E | F |
|-----------|----|-----|------|-----|-----|------|------|
| ELCENTRO | X | 1.3 | 4.0 | 6.0 | 1.3 | 4.2 | 6.3 |
| | Y | 1.3 | 2.5 | 1.7 | 1.7 | 2.8 | 1.7 |
| | 上下 | — | 8.5 | 8.6 | — | 9.5 | 17.0 |
| TAFIT | X | 1.4 | 3.8 | 5.8 | 1.3 | 3.9 | 5.9 |
| | Y | 1.8 | 3.4 | 2.4 | 2.0 | 3.8 | 2.3 |
| | 上下 | — | 10.5 | 9.8 | — | 13.0 | 18.0 |
| HACHINOME | X | 1.2 | 1.9 | 2.7 | 1.2 | 2.0 | 3.0 |
| | Y | 2.2 | 4.5 | 3.4 | 2.1 | 4.5 | 3.3 |
| | 上下 | — | 11.5 | 9.3 | — | 11.5 | 15.0 |

Table 9 部材最大応答応力

| 部材 | 位置 | 最大応答部材応力 (注) | | | 短期許容圧縮応力 | 座屈耐力 |
|-----|----|--------------|--------|-----------|----------|-------|
| | | EL. CENTRO | TAFT | HACHINOHE | | |
| 上弦材 | A | - 5.0 | - 9.0 | - 10.0 | 221.4 | 292.5 |
| | B | -105.0 | -135.0 | -140.0 | " | " |
| | C | - 94.5 | -108.0 | -102.0 | " | " |
| | D | 22.5 | 35.0 | 20.0 | 296.5 | 369.0 |
| | E | -145.0 | -210.0 | -170.0 | " | " |
| | F | -230.0 | -250.0 | -220.0 | " | " |
| 下弦材 | A | -175.0 | -185.0 | -185.0 | 469.5 | 564.9 |
| | B | -140.0 | -175.0 | -180.0 | 389.7 | 472.0 |
| | C | - 69.0 | - 84.0 | - 77.0 | " | " |
| | D | -520.0 | -500.0 | -375.0 | 616.5 | 729.0 |
| | E | -295.0 | -300.0 | -300.0 | 469.5 | 564.9 |
| | F | -180.0 | -170.0 | -160.0 | " | " |
| 斜材 | A | - 11.5 | - 14.5 | - 14.5 | 63.7 | 86.4 |
| | B | 22.0 | 27.0 | 18.0 | " | " |
| | C | - 17.0 | - 28.0 | - 25.0 | " | " |
| | D | - 28.0 | - 30.0 | - 23.0 | " | " |
| | E | 35.0 | - 19.0 | 22.0 | " | " |
| | F | - 18.0 | - 32.0 | - 28.0 | " | " |

(注) 長期応力含む

Table 10 下部構造応答せん断力

スパン直交方向 (tf)

| 階 | 最大応答せん断力 | 1次設計 | 比率 |
|---|----------|-------|------|
| 4 | 3,106 | 2,101 | 1.35 |
| 3 | 4,642 | 3,115 | 1.49 |
| 2 | 6,132 | 4,171 | 1.47 |
| 1 | 7,102 | 5,050 | 1.41 |

スパン方向 (tf)

| 階 | 最大応答せん断力 | 1次設計 | 比率 |
|---|----------|-------|------|
| 4 | 4,263 | 3,575 | 1.19 |
| 3 | 5,847 | 4,389 | 1.33 |
| 2 | 7,250 | 5,445 | 1.33 |
| 1 | 8,756 | 6,324 | 1.38 |

4-3 風洞実験による風荷重の検証

検証は風荷重に対し、縮尺1/250の模型を作製して風洞実験を行い、開閉屋根の設計荷重の妥当性を検討した (Table 11 参照)。

Table 11 風洞実験装置概要

| 形式 | エッフェル型吹出式境界層風洞 |
|-------|-------------------|
| 全長 | 19.1m |
| 計測筒断面 | 幅1.8m×高さ1.2m~1.5m |
| 計測筒長さ | 11.6m |
| 縮流比 | 1 : 3.87 |
| 風速範囲 | 0 m/s~25m/s 連続可変 |

(1) 浮上りについて

実験より、浮上り係数 (風力係数) C_f は、

全開状態 -0.47

半開状態 -0.30

全閉状態 -0.41

となった。また、自重による抵抗力が837.5tf [8.21×10⁶N] であるのに対し、浮上り力は、全開、半開で99.5tf [0.98×10⁶N]、全閉で416.5tf [4.08×10⁶N] であり、自重で十分抵抗できる結果が得られた。しかし、局部的には2.1を超える風力係数を示しているため、外装材の設計に留意する必要があることを確認した。

(2) 転倒について

設計上の風力係数は均等に作用するため、屋根に転倒モーメントは生じないが、実際は風力係数にバラツキが生じ、転倒モーメントが生ずることが予測されるため、転倒モーメントについても検討した。

自重による抵抗モーメントおよび実験による転倒モーメントは、

- ・自重による抵抗モーメント

$$M_{Rx} = 4,770 \text{tm} [46.78 \text{MNm}]$$

$$M_{Ry} = 31,750 \text{tm} [311.36 \text{MNm}]$$

- ・実験による転倒モーメント

全開 $M_{mx} = 1,303 \text{tm} [12.78 \times \text{MNm}]$,

$$M_{my} = 2,026 \text{tm} [19.87 \times \text{MNm}]$$

半開 $M_{mx} = 885 \text{tm} [8.68 \times \text{MNm}]$,

$$M_{my} = 1,584 \text{tm} [15.53 \times \text{MNm}]$$

全閉 $M_{mx} = 1,880 \text{tm} [18.44 \times \text{MNm}]$,

$$M_{my} = 2,808 \text{tm} [27.54 \times \text{MNm}]$$

であり、転倒モーメントは、いずれも自重による抵抗モーメントより小さく、転倒は生じないことを確認した。

§ 5. まとめ

需要が多く見込まれる中規模の開閉式ドームにターゲットをしぼり、試設計を含んで開発を行ってきた。実際の設計に当たっては、立地条件、使用条件等が変化の上、さらに種々の法的規制等から関係官庁等との十分な打合せが必要となる。

最後に、この開発に当たってご指導頂いた諸先生、並びに関係各位に深く感謝致します。