

Fig. 3 全体配置図

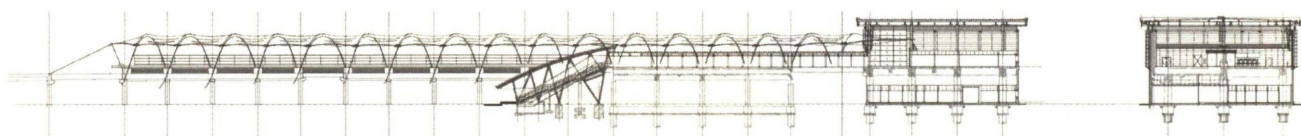


Fig. 4 立面図

3. ホーム膜屋根の特徴

ホームの膜屋根は楕円スパイラル状にねじり加工された鋼管スパイラルフレームと構造用ケーブルワイヤにより初期張力を導入された四フック化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布 (PTFE) で構成されている。

スパイラルフレームは鋼管 (BCP325) $\phi 406.4 \times 25$ を捻り曲げ加工された 16 本のスパイラルフレームと駅舎側にある 1 本の楕円フレームを脚部根巻き固定としている。これらのフレームは単線である鉄道軌道が駅ホームで複線となる位置関係から 9 種類の加工形状に大別できたが、曲率や鋼管溶接位置の関係等により、ほぼすべてのフレームが異なる加工形状を求められる。

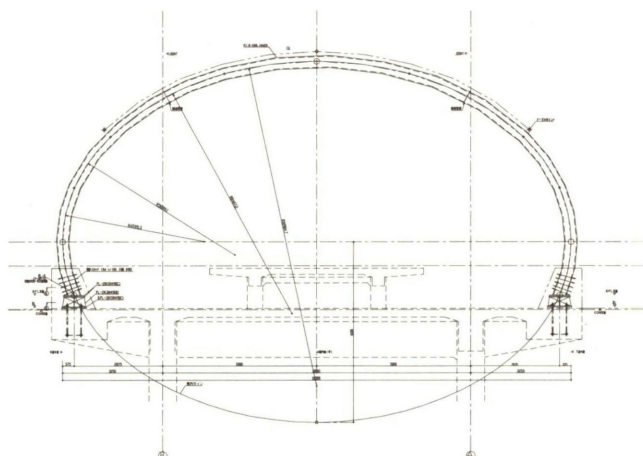


Fig. 5 スパイラルフレーム形状図

このスパイラルフレームに膜体である四フック化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布を張る形式である。

膜体の支持取り付けには構造用ワイヤケーブルを用いており、膜体には初期張力が導入される。

膜屋根は全体構造のサスペンション応力を中央・両端部に張った 3 本の構造ワイヤケーブルを介してホームの先端・基端部に支持緊張固定させている。この架構形式により合理的・経済的な構造性能が追求されている。初期張力の導入により外力 (風荷重・雪荷重) に対する構造安定性の向上が図られている。初期張力が導入される膜体は膜に孔を開けずに定着用具により掴み込まれており、膜体自体に強度低下部を設けない取り付け形式が採用されている。膜体には一般的に張力導入膜構造で採用されている初期張力より、50%程高い張力である 3 kN/m が設定されている。

ホーム膜屋根は鉄道高架上に建設される事から、駅舎ホーム部分鉄道高架に設けられた 3 箇所の桁架構端部を跨ぐ形式になる。桁架構端部は地震などの水平方向外力が作用したときに高架桁の変形を緩衝する機構であるが、膜屋根には一部に変形が集中する事となりこの変形にも追従可能な架構形式となっている。

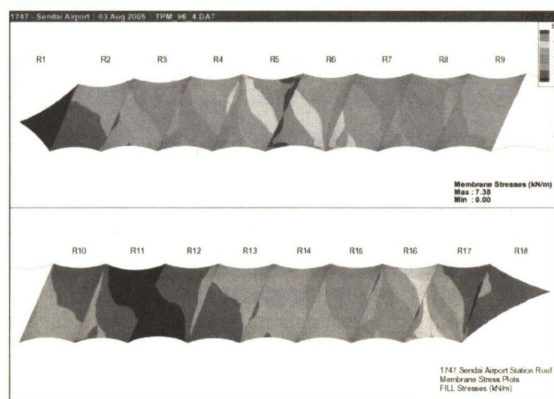


Fig. 6 強制変形時の膜架構解析結果

4. スパイラルフレーム鉄骨工事

4.1 要求性能と工事部分の状況

本工事の施工にあたって鉄骨部材の寸法精度及び施工精度が重要である。構造用ワイヤケーブルをスパイラルフレームに取り付け初期張力を導入するため、位置が張力や形状に与える影響が大きい。しかし単純な形状に見えるスパイラルフレームは3次元のねじり加工である。しかし本工事の様な太径大規模の鋼管を3次元的にねじる事は加工機器の問題から困難であった。そこで3D-CADを駆使し要求される形状に近似した加工形状を解析した。解析の結果、2次元曲げ加工された曲率の異なる7種類の鋼管をねじりながら溶接接合することで実現出来る結果を得た。

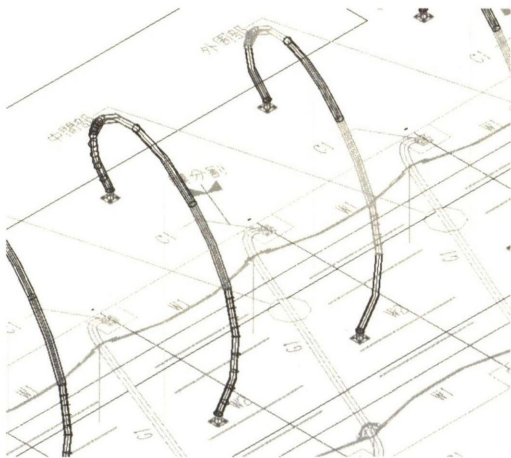


Fig. 7 3D-CADによる架構図

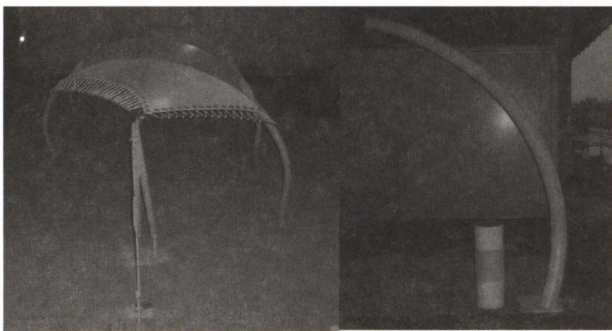


Photo. 1 1/10、1/3モデルによる検証

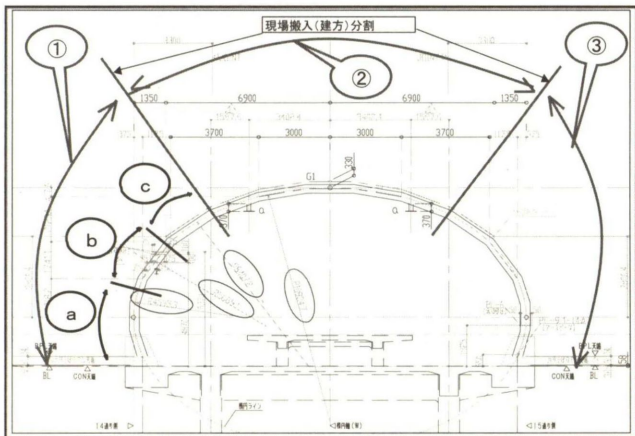


Fig. 8 スパイラル形状加工図

鉄道施設であることから電車電力線支持具等がスパイラルフレームに取り付けられる。また膜体も電車車両との位置関係が重要であり、相互の干渉が如何なる事象でも生じてはならない。積雪時、強風時、地震時におけるこれらの挙動を解析し、必要寸法の確保が求められた。それらの与条件を3D-CADに反映し検証と製作図面の作成を実施した。

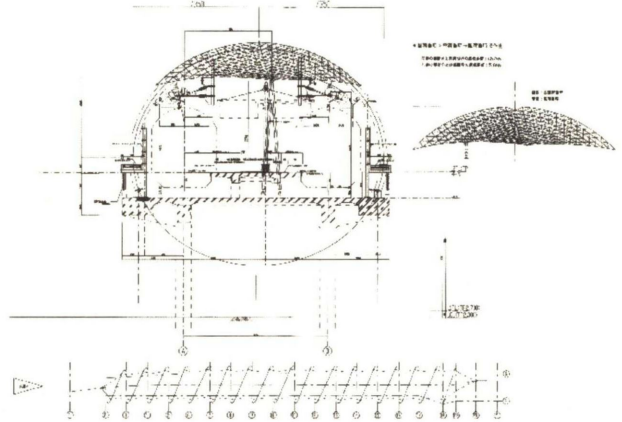


Fig. 9 3D-CADによる各部材の位置検討図

膜屋根との関係から、スパイラルフレームの水平位置精度は±10mmが要求された。鉛直方向については積雪時および強風時のスパイラルフレームと膜体の変形状態で決められる。鉄道電車線と電車走行軌跡には影響しないことを確認した。

ホーム部の膜屋根は別途発注され完成している鉄道高架での工事である。そのためスパイラルフレームのアンカーボルトや脚部根巻きコンクリートの主筋は既に施工されており、本工事が引き継ぐ形態で施工する事になっていた。しかし、既に別途施工されたアンカーボルト等に想定された以上の精度が求められ、本工事での調整が必要であった。脚部は根巻きコンクリート形式であり、スパイラルフレーム脚部の応力を根巻きコンクリートを介して下部高架に伝達する形式であり、鋼管脚部に0節を設けて誤差の修正を行い、精度の回復を行った。

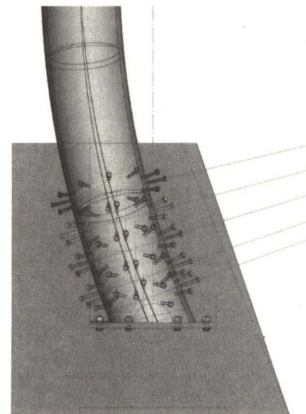


Fig. 10 脚部根巻き検討図

4.2 製作

スパイラルフレームは曲率の違う鋼管をねじりながら接合することによって楕円スパイラルに近似した形状としている。主材である鋼管は2次元曲げ加工し切断すると、円形に微妙な歪みを生じる。また鋼管自体にもJISで許容された製品誤差を有しているため、部材の接合には事前の測定と矯正により一連となるスパイラル形状が得られるよう部材の組み合わせを確認しながら製作を実施した。製作工場は精度を要求されるため、建設地との地域関係に関わらず、鋼管の曲げ加工・製作に精通した製作工場を選定した。製品精度基準はJASS6および各指針に準拠したが、特殊な形状の製作であることからスパイラル形状の管理方法は独自に設定した。

4.2.1 鋼管の曲げ加工

鋼管には製品許容誤差内で真円ではないが曲げ加工を施す事によって微妙な“つぶれ”や“開き”等の歪みが大きくなる。曲げ加工した曲率の異なる鋼管をつなぎ合わせることで楕円スパイラル形状にすることを目標としているが、曲げ加工による変形は目違い等鋼管の繋ぎ合わせ溶接に大きな影響が生じる。そこで曲げ加工は高周波誘導加熱による曲げ加工（高周波曲げ）とした。

高周波曲げ加工は、対象部材に近接した誘導コイルを高周波電圧を掛けることにより生じる電磁誘導作用により、対象部材を急速にかつほ均一に加熱することが可能であり部材の熱歪みが小さい加工方法である。この特性を利用して加熱しながらゆっくりと曲げる事により鋼管の熱および加工変形を最小限に抑止した。

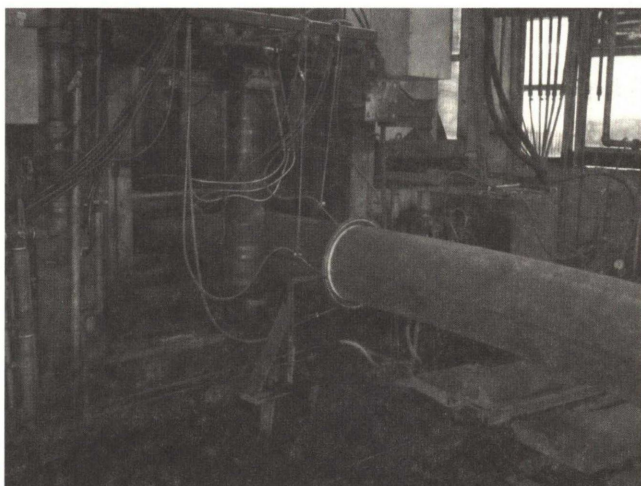


Photo. 2 鋼管の高周波曲げ加工

4.2.2 部材製作

スパイラルフレームはFig. 8に示した様に曲率の異なる曲げ鋼管を繋ぎ合わせて製作される。存在する歪みは溶接作業に影響を生じるため各部材を計測し、溶接部の鋼管歪みが最小となる様に組み合わせた。更に溶接歪みが生じるため部材形状の確認を綿密に行い、計画された形状を目標とした。

接合は定盤上に3D-CADで作成した水平面投影図を設置し管理ポイントの水平位置と高さを溶接毎に管理し製作部材の精度を確保した。

また、スパイラルフレームには膜屋根の受け治具が取り付けられる。このジグはプレートを切り出した板加工品であるが、曲率のある鋼管上に取り付けられるため位置の設定および管理が極めて困難である。そこで、鋼管の繋ぎ合わせでも行った3D-CADにより座標管理を行い、その結果を水平面投影図とレベル管理に置換し受け治具を取り付けた。

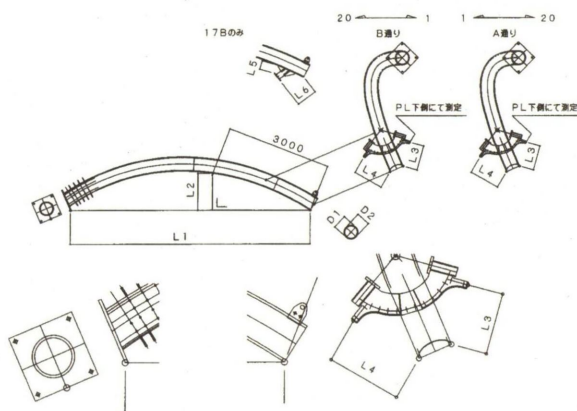


Fig. 11 製作管理用水平面投影図



Photo. 3 鋼管の溶接作業



Photo. 4 膜受けジグの取り付け



Photo. 5 スパイラルフレームの仮組み確認

4.3 建方工事

スパイラルフレームは3分割の状態で見場に搬入された。T.P. +33.0m に設けられた絶対高さ制限の関係から、揚重機作業が制限されており地組により大型揚重機で吊り上げる工法は採用することが出来ない。従って、現場で組み立て溶接する方法で作業を行った。現場での組み立てはフレームがスパイラル状の形状であることから、常に斜め方向に傾斜する力が作用しており脚部には転倒応力が生じている。建て方支持方法としては0節台座に設けたアンカーボルトで支持させる方法を採用したが、建て方位置の修正に微細な制御が必要なことからフレームを支持できる仮ベントの設置も行った。尚、下部スパイラルフレームの位置決め制御が容易になるよう0節台座には中央に突起P Lを取り付けた。

建て方位置の計測は、製作時同様にホーム上にスパイラルフレーム管理計測の水平投影位置を基準として、精度管理を計るとともに、3次元座標計測器を用いてダブルチェックを行った。

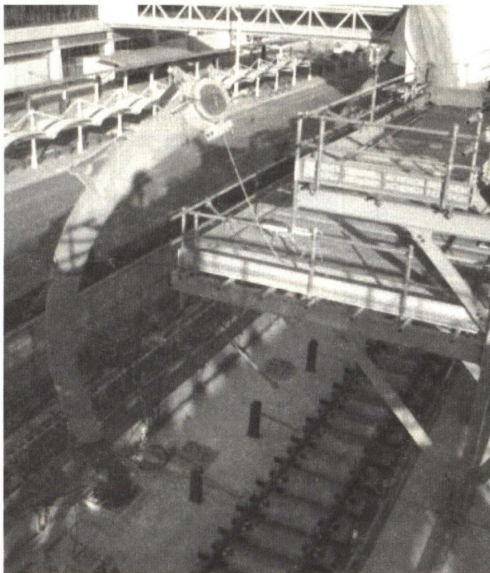


Photo. 6 スパイラルフレーム下部建て方状況

スパイラルフレームの建て方時には別途発注されているホーム部分の鉄道軌道の工事も同時に開始を要求された。同時作業は困難であったが、軌道部分作業空間の確保と現場溶接・膜工事仮設として、移動式足場(MOFS)を採用した。

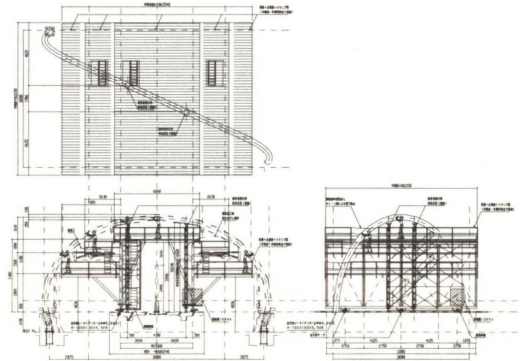


Fig. 12 移動式足場(MOFS)計画図

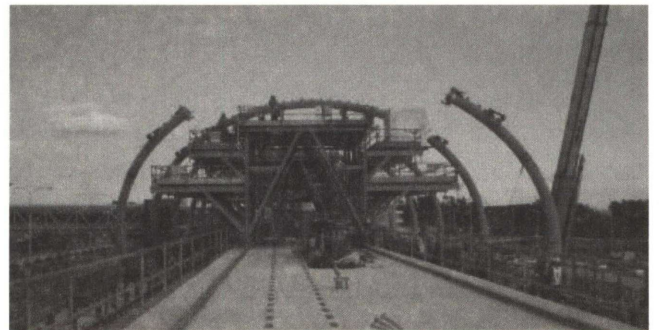


Photo. 7 スパイラルフレーム下部建て方



Photo. 8 スパイラルフレーム上部吊り込み



Photo. 9 スパイラルフレームの組み立て状況

4.4 現場溶接

スパイラルフレームは3分割で輸送し現場溶接により組み立てられる。鋼管の溶接作業は高度な技術を要求される。本工事では技量付加試験を実施し溶接作業者の選定を行った。

現場溶接部はスパイラルフレームの流麗な形状を具現化するために機械加工（グラインダ仕上げ）を求められた。しかし鋼管の溶接には歪みによる変形が避けられないため強固な固定治具が求められる。これらの固定治具は鋼管に直接溶接され取り付けられるが、本工事では機械加工部分が増えること、鋼材への過度な入熱を避けるためにボルト締め付けによる治具を製作し使用した。

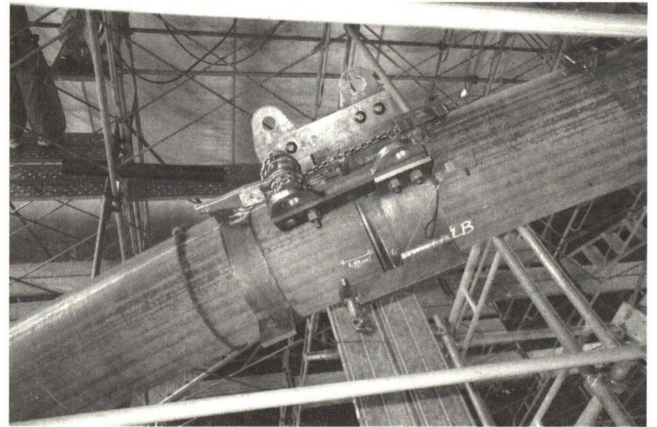


Photo. 10 現場溶接部固定治具

5. 膜屋根工事

5.2 膜屋根形式の概要

膜屋根は膜厚 1mm の四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布と構造用ケーブルワイヤ、スパイラルフレームで構成される。この構造形式は膜体に初期張力を導入することで合理的かつ経済的に外力への構造安定性を確保する形式である。膜体は強度低下部分となる孔開け加工せず、膜体をアルミニウム成形部材で挟み込み構造用ケーブルワイヤに取り付ける。このワイヤに張力を導入することにより膜体への張力導入が可能となる。

膜屋根は施工解析した結果に基づいて膜体の加工形状や構造用ケーブルワイヤ長さが設定されている。3系統の構造用ケーブルワイヤをスパイラルフレームに取り付け、フレームの位置及びワイヤ長さの再確認を実施し、膜体を展張する。膜体展張は4スパン分1パネルを基本として展張機で敷設する。展張機は膜体を鋼管に巻き付け低速で敷設を行う施工機械である。

尚、展張作業時には風速 5m/s 以下の条件が求められており、施工途中で膜内に吹き込みが生じないように風上側より展張作業を行った。吹き上げ防止措置として親網で順次押さえ込んだ。膜屋根工事手順を Fig. 13 に示す。

膜屋根工事手順

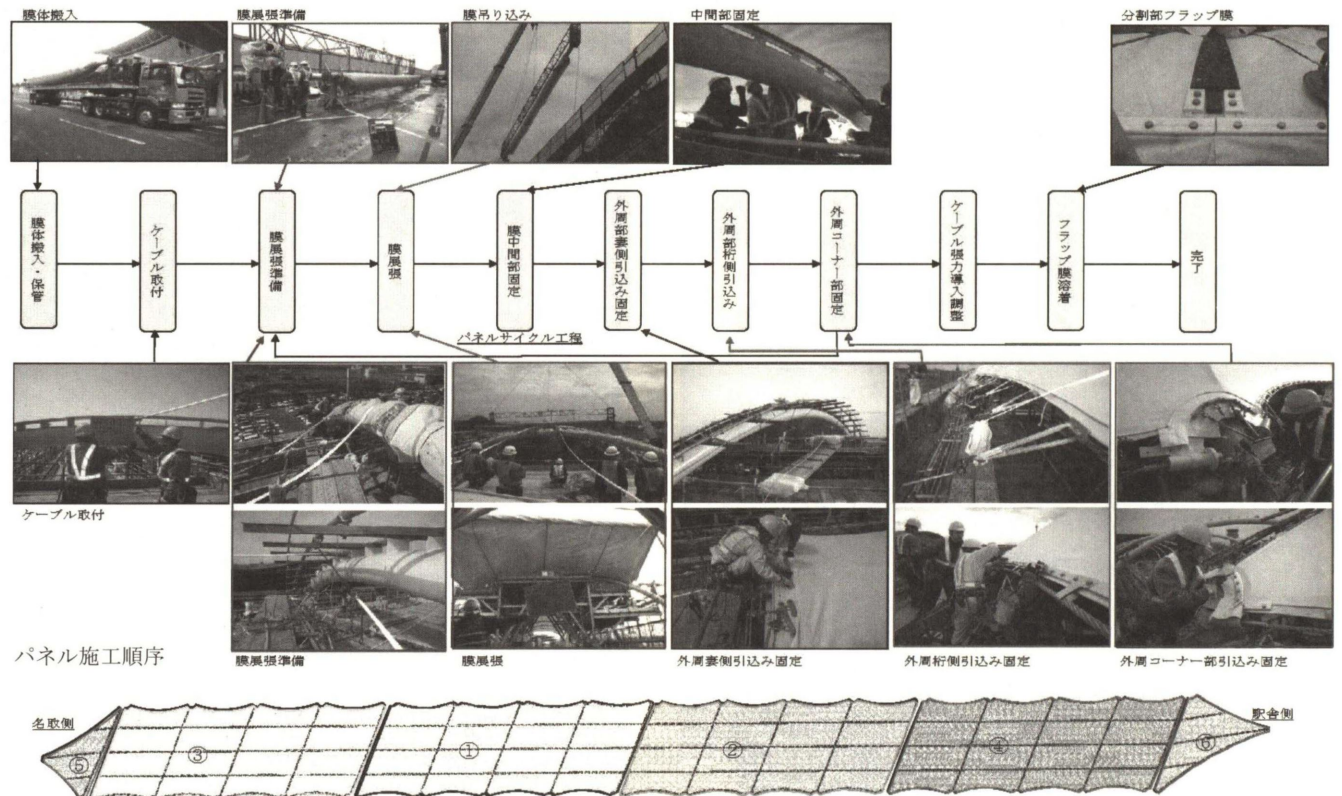


Fig. 13 膜屋根工事手順図

5.2 膜体の加工と導入張力の管理

膜体に初期張力を導入する膜屋根形式である。初期張力として高張力を導入することにより高い構造安定性と流麗な形状維持が可能となる。また、再緊張を極力回避し維持管理の簡素化も実現できる。膜体にはタテ糸・ヨコ糸両方向とも3 kN/mの初期張力を導入する。

膜体や構造用ケーブルワイヤの加工及び導入張力の設定に、設計指示に基づいた施工解析と試験により決定された。

解析と膜体の2軸試験結果からタテ糸方向約1.0%、ヨコ糸方向約3.5%の縮小率となり、膜体の加工に際して形態に応じた適正な加工縮小率を設定した。

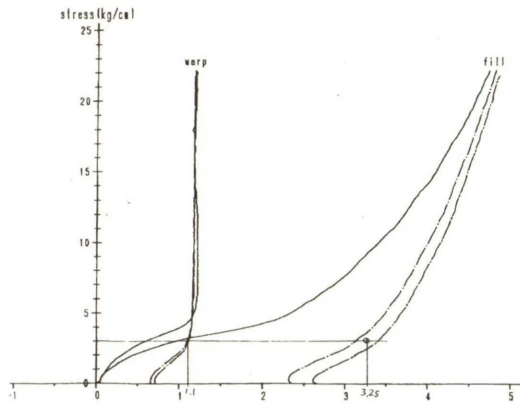


Fig. 14 膜体の2軸試験結果

Table. 1 試験膜体の縮小率一覧 (抜粋)

膜材Lot. No	タテ糸方向縮小率(%)	ヨコ糸方向縮小率(%)
139292-2	0.80	2.7
139295	0.90	3.7
139296	1.05	3.3
139297	0.90	3.7
139298	1.05	3.3

展張された膜体を所定の位置に定着するための引込み作業は応力が部分に集中しないように均等にかつ時間を掛けて行う。膜体を引き過ぎ、結果として局部応力の集中あるいは膜破損を招かぬため、引込み張力測定を実施する。各鋼管スパイラルフレームの建て入れを確認しながら、油圧ジャッキで張力を導入する。

張力導入引込みを数回のステップに分けることにより、膜体に異常なしわ等が発生しない事を確認しながら、両サイド交互に設計値まで引き込む。

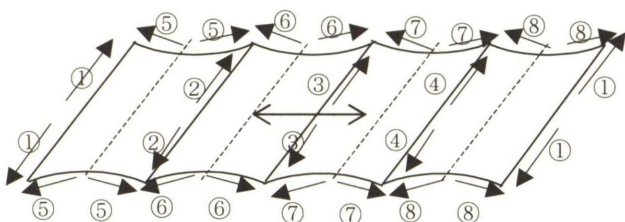


Fig. 15 1パネルの引込み手順図



Photo. 11 張力導入作業

膜体はある程度の硬度を有しており、入力された張力が膜全体に伝達するには時間を要する。従って、手順に則して作業を行い、順次ステップを経過させながら張力を導入する。

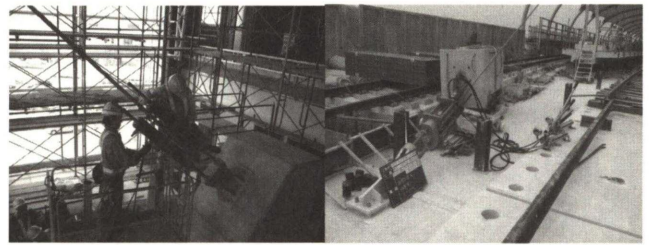


Photo. 12 膜屋根起端終端張力導入作業

Table. 2 導入管理張力一覧

部位	名取側	本屋側
管理種別	張力管理(KN)	張力管理(KN)
設計値	119.6	287.2
測定値	120	290

6. まとめ

本工事の実施に当たり一見単純な形状に思われるスパイラルフレームや張力の導入された膜屋根は主材料である鋼管が楕円3次元形状であることや膜体の形状変形から困難な状況が想定されたが、施工解析や各種物性試験の実施、3D-CADや数値計測・管理により実現することが可能となった。この様な高度な施工精度管理で流麗な屋根が具現化された。

本報告では膜屋根を具現化するため目標と過程を記載した。高度な計測機器や機械の使用、施工方法策定と管理の徹底が必要であることは勿論であるが、“ものづくり”に対する真摯な姿勢が必要不可欠であることも改めて感じた次第である。

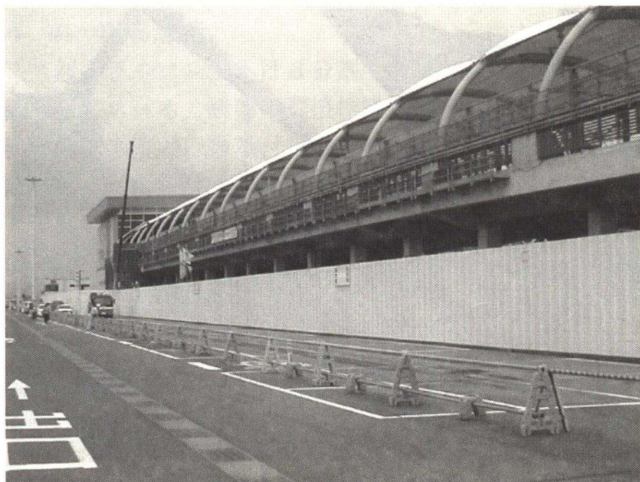


Photo. 13 空港駐車場側外観



Photo. 14 ホーム内部



Photo. 15 仙台空港と仙台空港駅（航空写真）

謝辞

ねじりの入ったスパイラルフレーム及び膜屋根をどの様に具現化するか着手時は手探りの状態であった。難度の高い形状の屋根であるに加え、事前施工されたアンカーボルトのズレや軌道工事との重複が避けられない事態が生じ大変苦勞した。しかし、一番の成功要因は、発注者である鉄道運輸機構の担当者、支店及び現場のスタッフを始め、関係していただいた協力業者の方々の物造りに対する熱い情熱だったように思う。この情熱こそが、幾多の難問を乗り越え、この難しい形状の具現化を達成したと言っても過言ではない。

このプロジェクトに関与していただいた多くの方々に改めてここに感謝申し上げる次第である。

The Report on Construction of Sendai Airport Station

Masaki OHNO, Masafumi KATO, Shingo FUJIYAMA and Kazuyuki WATANABE

Abstract

Sendai Airport Station is constructed on the elevated railway in Sendai airport. The roof over the platform is of membrane structure by the processed steel pipe like an oval spiral and the glass fibre cloth. It was necessary to solve a lot of restrictions to achieve it though it was seen as easily built. The main management point to achieve it is following:-

- ・Production accuracy and positioning of spiral frame.
- ・Processing shape and initial-tension.

Because a lot of conditions were solved, beautiful roof shape was achieved.

Keywords: spiral-frame, membrane structure, initial-tension, railway facilities
