球技場吊り屋根鉄骨の製作・建方施工管理に関する報告

REPORT ON THE FABRICATION & CONSTRUCTION OF THE SUSPENDED STEEL-FRAME ROOF OF A SOCCER STADIUM

福井 治 —*1 河野久米彦 —*2
柴田育秀 —*3

Osamu FUKUI —*1 Kumehiko KOHNO —*2
Ikuhide SHIBATA —*3

キーワード：
スタジアム, 吊り屋根, 鉄骨製作, 鉄骨建方

Keywords:
Stadium, Suspended roof, Fabrication, Erection

This paper reports the fabrication and construction of the fixed roof of Toyota stadium. The fixed roof looks like a crescent moon and covers the main & back stands. It's composed of keel truss, sub-truss, combined beam and horizontal brace. This paper describes the control process of the fabrication, referring to drawing, casted steel, optimum method of welding, combination of various joint plates.

Also this paper describes the erection process of the roof on site.

1. はじめに

本報告書は矢作緑地施設整備工事（豊田スタジアム建設工事）における吊り屋根鉄骨の製作・建方施工管理に関する報告である。

屋根形状は球技場の円形客席スタンドの上部に、兜を伏せたような三日月状の屋根である。固定屋根はメインスタンド、バックスタンド上部に独立して設置され、スタジアム四隅に設けられたマストからケーブルにて吊る構造である。また、東西の固定屋根を跨ぐ形で下部のフィールドを覆うように開閉式可動屋根が設置される。

固定屋根は三日月の弦の位置に長さ220mに及ぶキールトラスがあり、それに直交する形で最長60m、片側11台のサブトラスを接合し、サブトラス間に繋ぎ梁及び水平ブレースを配置して、屋根構面を構築している。（図1参照）

サブトラスのキールトラス他端側にはルーフサポートが設けられ、下部スタンド鉄骨に剛接され、屋根鉄骨の水平力を下部構造に伝達している。また、ルーフサポートとサブトラスはピン接合になっており、固定屋根の温度変形他に追従するための可撓性を確保している。

キールトラスは5,000×6,250の断面を有する三角形の鋼管トラスで構成されている。建方時を考慮し、全体を9分割し、長さ25～38m、重量84～125tの地組ユニットとしている。

サブトラスは弓型の形状で、屋根面と取合う直線部をH形鋼、曲線部を鋼管で構成した成5,500mmの平面トラスである。約14m間隔で、屋根面を境に上反り下反りのトラスが交互に配置されている。

マストは最大板厚70mm、60kg級高張力鋼板（北側2本）、53kg級高張力鋼板（南側2本）を最大φ3500mmの円筒形に曲げ加工し

て溶接接合した長さ約90mの円柱である。単品重量約450t/本の独立柱で、柱脚部には球座を有している。

ケーブルは素線φ7mmの160kg級ピアノ線を張力に応じて、283～499本束ねたものを使用している。工場製作時に所定長さに加工され、端部金物と一体化されたものを現場にて展開、架設、緊張している。CB1～4はキールトラス側上吊り、CB5、6はバックステア側の上吊りケーブルで、CB11、12は地震時、強風時にキールトラスの変形を抑えるタイダウンケーブルである。

工事量として総重量約8,650t（ケーブル共）屋根面積約20,000㎡に及ぶ大規模な吊り屋根鉄骨工事である。

図1 固定屋根外観及び架構概念図

2. 製作管理

2-1 ケーブル定着に対する鑄鋼品形状決定と製作手順

今回鑄鋼品を使用した主な部位は下記の通りである。

- ・マストの柱脚部及び柱頭部
- ・キールトラスのケーブル取合部
- ・ルーフサポートのケーブル取合部

*1 大成建設㈱名古屋支店建築部 課長
(〒450-6047 名古屋市中村区名駅1-1-4 JR セントラルタワーズ)

*2 大成建設㈱名古屋支店建築部 工事長

*3 オーヴァラップアンドパートナーズジャパンリミテッド

*1 Manager, Building Construction Department, Nagoya Branch, Taisei Corporation

*2 General Manager, Building Construction Department, Nagoya Branch, Taisei Corporation

*3 Ove Arup & Partners Japan Limited

・サブトラスの外周端ピン接合部

総重量で約 800ton 単品最大重量で約 50ton の鋳鋼品であった。
鋳鋼品の製作手順は、概ね下記のフローに従って行った。

ケーブル端部の定着方法は、意匠性、納り、緊張方法等より、マスト頂部はボルトナット定着（図2参照）、多端側は支圧版定着（図3参照）としている。また、キールトラスの吊上げケーブルとタイダウンケーブルの定着点は、鋳鋼による一体部品である。

図2 マスト頂部鋳鋼品3D造形図、製品外観、定着金具類外観

図3 ルーフサポートのケーブル定着鋳鋼品の模型と製品外観

鋳鋼品に集合する部材の加工性及び溶接性能（曲面取合いのため曲線加工が必要になったり、鋳鋼本体がマスのため取合い溶接部が急冷されやすく溶接性能が低下し易い。）を確保するため、通常スタップという取合いのための枝出しを一体成形する。したがって、このような鋳鋼品の造形には3次元CADによる座標管理、ディテール検討が不可欠となる。

製品検査として、製品寸法精度と冶金の性質の確認を実施した。冶金の確認として、厚肉部分のUT、出隅部、入隅部のMTと同時に鋳込みピースによる材料試験を行った。

材料試験は引張試験、0℃シャルピー衝撃試験を行った。屋外露出構造物のため冬の低温特性が問われており、0℃で最低 50 J が条件であったが、良好な結果を得ることが出来た。

2-2 60kg 級高張力鋼及び鋳鋼の溶接計画と検証

マストの北側2本に60kg級高張力鋼（SA440B）板厚70mmを採用している。3m幅の鋼板を半円加工して突合せ溶接する仕様のため、溶接線には軸線に沿った直線溶接と軸線に直交した円周溶接の2種類がある。

溶接施工性試験に先立ち、SAW（サブマージーク）溶接の予備試験を実施した。造船の分野では板継ぎ溶接に両面からのSAW溶接を採用するのは一般的なことであり、今回の物件への適用の可否について予備検討した。しかし、余盛形状やビード外観が意匠的にやや強調されすぎること、円周溶接での始末端の重なり部の品質や溶接部の低温時における冶金的特性に疑義があり、採用を見合わせた。

結局、溶接施工性試験に基づき、工場溶接はCO₂自動溶接によるX型開先溶接、現場溶接はCO₂半自動溶接によるK型開先溶接を採用した。溶接施工性試験は冷間曲げ加工圧延鋼板相互、鋳鋼と圧延鋼板相互に対し行い、試験項目は、外観試験、UT試験、化学成分分析、引張試験、シャルピー衝撃試験（0℃、-10℃*BM、DEPO、BOND、HAZ*LCZ方向）、ビッカース硬さ試験、マクロ試験とした。

圧延鋼材相互のシャルピー衝撃試験結果は、パス間温度を230℃以下としたが、溶着金属部分（DEPO）で極小値を示し、0℃で≒120 J程度であった。なお、パス間温度の設定は、SA440Bについての新日鉄社内技術レポートに基づいて決定した。

鋳鋼と圧延鋼材溶接部のシャルピー衝撃試験結果は、予熱80℃、後熱600℃*1h、パス間温度230℃以下としたが、BOND、HAZで極小値を示し、0℃で50～60 Jであった。これは圧延鋼材の母材のシャルピー値が200～250 Jあるのに比べ、試験に用いた鋳鋼の脆性がかかなり低いためと考えられる。硬さ試験結果は、X型開先でビッカース硬度260以下、K型開先で280以下、レ型開先で300以下程度であった。

試験結果を受け、マスト柱脚部の鋳鋼取合い溶接の開先形状をレ型からK型開先に変えた。また、製作管理のUT検査判定値をマスト中央1/3部分（地震時に曲げモーメントが極大となる部分）と端部テーパ部分1/3とで適用基準を変え、板厚方向の表層1/4部分と中央1/2部分でUT検査判定値を変えて適用することにした。

2-3 工場製作での3次元展開と工作図及び仮組立管理

キールトラス、サブトラスについては、工場での仮組立、現地での地組を想定して、工作図を組立状況に応じて座標変換する必要があった。つまり、三角形断面のトラスを正立したまま組立るのは、トラスが湾曲していることや、三角形の頂点が最下部になるなど組立用定盤及び地組架台が大掛かりになり、精度も出し難いことが考えられた。そこで、三角形断面を横倒しして、ラチスを含む斜辺を定盤に平行になるように座標変換して、組立用工作図とした。ケーブル定着用鋳鋼品の組付け位置及び角度も定盤上の座標、鋳鋼品定着面の定盤となす角度を決定して、適正な地組架台計画を行った。

2-4 高力ボルト摩擦面の組合せ検証

今回の固定屋根鉄骨は、厚膜型無機ジンクリッチ塗料の部材と亜

鉛メッキ部材の混用で計画された。そこで、上記部材の組合せにおけるボルト接合部のすべり係数試験を実施し、接合部設計に反映した。つまり、ジंक+ジंक、ジंक+亜鉛メッキには0.45+F10T（黒皮ボルト）、亜鉛メッキ+亜鉛メッキには0.40+F8T（亜鉛メッキボルト）のすべり係数及び高力ボルトの組合せを試験により検証した。また、同時に過大孔の検証と厚板によるリラクゼーションの検証を行い、孔径2mmUP及び4mmUP、t12+t22+t12mmとt22+t40+t22mmの試験も実施した。試験結果は下表の通りであるが、各試験水準において、良好な結果を得ることができた。

表1 高力ボルトすべり係数試験結果一覧表

ボルト径	中板厚	孔径	表面処理	係数
M22	22	φ24	ジंक塗装同士	0.564
M22	22	φ26	ジंक塗装同士	0.552
M22	22	φ24	メッキ薬品処理同士	0.455
M22	22	φ26	メッキ薬品処理同士	0.432
M22	22	φ24	側板：ジंक塗装 中板：メッキ薬品処理	0.587
M22	22	φ26	側板：ジंक塗装 中板：メッキ薬品処理	0.534
M22	40	φ24	側板：ジंक塗装 中板：メッキ薬品処理	0.562
M22	40	φ26	側板：ジंक塗装 中板：メッキ薬品処理	0.586

なお、黒皮ボルトの防錆処理は素地調整が施しにくく、ナット出隅での膜厚確保が難しいため、2種ケレンの上、厚膜型エポキシ樹脂プライマーを2度塗りする仕様とした。

2-5 スケジュール管理

表2 製作管理項目のスケジュール管理状況

鉄骨製作関連計画工程表		-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1
項目	月	H11年													H12年	
		12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
地組開始																
建方開始																
製作業者決定																
建方業者決定																
ベント計画																
基礎																
キール分割																
ジオマトリライン																
キールライン																
サブ・ルーフ																
その他																
鋼製品製作																
ケーブル解析																
ケーブル解析																
模型承認																
CAD造形																
木型検査																
製品検査																
建方仮設取合																
ケーブル																
工作図																
製作																
工場選定承認																
工作図																
仮組検査																
溶接性試験																
ボルト試験																
溶接工試験																
塗装仕様決定																

——— : 最早品または全体のENDを示す
 : 最遅品の継続作業を示す

大規模特殊構造物の計画は、建方開始1年以上前から決定すべき重要管理項目があるため、その時期を明確にして管理した。

3. 建方施工管理

3-1 ベント計画

ベント計画は下記の原則を基本方針とした。（図4参照）

- ① サブトラスを分割しない（スタンド段床を駄目にしない）
- ② サイドスタンドとの干渉範囲を小さくする。
- ③ キールトラス上架時の架構の安定を図る。
- ④ ベントをキールトラス上架前でも自立させる。（最高60m）

図4 ベント配置計画図（固定屋根片側を示す。）

3-2 地組計画と地組状況

フィールド部分で地組を行い、キールトラス用定盤に4~5定盤、サブトラス用定盤に3~4定盤、マスト用定盤に2定盤を設置した。ルーフサポート用定盤はバックスタンド側の建物外周に3定盤程度用意し、メインスタンド側は後施工躯体部分に3定盤程度設置した。

地組工程は組立溶接から中塗り塗装までとしたため、定盤には精度を要求する地組定盤と塗装架台の2種類を設置した。塗装用架台は柱を四隅に立て、ワイヤ+飛散養生シート張とし、塗料飛散防止に努めた。

定盤の配置は、資材搬入動線、重機作業動線と定期的に調整を行った。建屋外の外構部分で地組し、横持ち運搬する計画ならば動線調整は不要となるが、地組用の設備が別途必要となり、工事費の増加を伴うため、今回の工事では採用しなかった。（図5参照）

図5 建屋内でのキールトラス地組状況

図6 製作工場でのキールトラス仮組立状況

現地での地組は、図6に示すように、工場での仮組状況を再現する形で実施した。

3-3 建方順序と精度管理

建方順序は、北側 1/3→南側 1/3→中央 1/3 の手順とし、中央部分を最後とした。これは、ベントの低い所から建て始めて架構の安定を図り、建て仕舞を中央の比較的直交している部材で取り合わせるにより納め易くするためであった。

最終の中央ブロックの寸法精度（地組精度を含む）は±10mm 程度であり、精度良く施工できた。（図7参照）

図7 固定屋根建方完了状況

キールトラス及びサブトラスの地組時に、仕口位置を定盤上の罫書き位置と照合し、個々の建方部材の精度を1~3mmの精度で確保した。（図8参照）

図8 地組時の精度管理状況

上架時には、キールトラスの地組ユニットの仕口端部に3次元測量器（マンモス：ソキア製）のターゲットを取付けて上架した。（図9参照）この際、予め工作図の3次元CADより、建方時のキールトラスの仕口位置を3次元座標で算出しておき、その座標値に実物のターゲット位置を合わせるようにして建方精度の管理を実施した。

図9 3次元測量器のターゲット設置状況

4. まとめ

湾曲したキールトラスを有する総重量8,650 tに及ぶ吊り屋根鉄骨の製作・建方施工管理について述べてきたが、以下に施工管理上留意すべき事項を要約する。

- ① ケーブル定着に伴う鋳鋼品の製作は、形状決定の手順が複雑であり、早期に定着方法を決定し、手順を追って造形検証を進める必要がある。また、意匠性の高い部品のため、意匠設計者の造形確認を必要とし、鉄骨製作工程の遅延要素となりやすい。
- ② 60kg 級高張力鋼及び鋳鋼の溶接計画は、使用条件を考慮した溶接施工性試験にて検証し決定した。今回はCO2 自動または半自動溶接法によるX型、K型開先継手とすることで良好な溶接施

工を行うことができた。

- ③ 製作工場にて現場施工と同条件で仮組立を実施し、現場施工での再現性を確保した。また、工作図情報は3次元CADにて座標変換を行い、予め組立専用の活用しやすい情報として整備した。
- ④ 重防食塗装と亜鉛メッキの混用構造のため、高力ボルト摩擦面の組合せが3種類となった。すべり係数試験を実施し、厚膜型無機ジンクリッチ塗装同士及びジンクリッチ塗装と亜鉛メッキ薬品処理面の組合せでは、すべり係数0.45を確保できた。
- ⑤ 建方開始1年以上前から製作に反映すべき管理項目があるため、製作時の管理項目の抽出と、決定時期の確認を行い、工程遅延にならないようにする必要がある。
- ⑥ ベント計画は早い時期に方針決定する必要がある。製作、揚重、現場施工全ての基本となる。
- ⑦ 地組ヤードを何処に設定するかで、工事計画が大幅に変動する。地組ヤードを建屋内に設定すると、工程計画が地組架台数と地組能力によって決定される。また、工程調整は地組ヤードの振り回しの影響を受けるため、資材搬入動線や重機走行動線の調整が複雑になる。

5. 謝辞

今回工事の施工計画、実施工に当たっては、新日本製鐵株式会社建築事業部、横河工事株式会社、宮地建設工業株式会社の協力により良好な結果を得ることができた。ここに謹んで謝辞を述べたい。

[2001年4月9日原稿受理 2001年7月27日採用決定]