

スラスト解放を伴う体育館大屋根の施工

Construction of Large Gymnasium Roof with Unloading Thrusting Force

井上 宣良^{*1} 小森 和也^{*1} 池本 孝一朗^{*1}
Noriyoshi Inoue Kazuya Komori Koichiro Ikemoto
小牧 新司^{*2} 嶋田 洋成^{*2}
Shinji Komaki Hironari Shimada

要旨

彦根市新市民体育センター建設工事におけるメインアリーナの施工においては、アリーナ内部から見えがかる鉄骨架構を美しく軽快に見せるため、様々な意匠的・構造的な工夫を行った。特筆すべきは、ジャッキダウン時に下部鉄骨に入力される水平力(スラスト)を解放するために、屋根鉄骨柱脚部をすべり支承とするスライド工法を取り入れたことである。

本報告では、まず屋根鉄骨の構造概要を述べ、施工時解析による施工検討およびBIMモデリングによる鉄骨天井デザインと設備機器位置の検証、地組～建方～ジャッキダウンに至る実際の施工計画および結果について述べる。

キーワード：屋根架構 ジャッキダウン スラスト解放 施工時解析 BIM

1. はじめに

彦根市新市民体育センターは、メインアリーナ・サブアリーナ・弓道場をはじめとするスポーツ機能と、まちなか交流拠点機能、防災拠点機能を兼ね備える滋賀県彦根市の複合市民交流施設である。

メインアリーナについては滋賀県の伝統産業である織物から着想を得たテキスタイルデザインを取り入れたアーチシステムとなっている。周辺環境に配慮し高さを抑えた2方向アーチ形状となっており、織物の縦糸と横糸を意識している。H形鋼を弱軸使いとしてフランジラインを強調させたデザインで、短辺・長辺の勝ち負けを強調した偏心接合となっている。

体育センターは、メインアリーナを中心とした「スポーツ棟」と「まちなか交流棟」から構成されている。本報告では、メインアリーナの大屋根鉄骨工事に関する事前の施工検討および実施結果を中心に紹介する。

表1 工事概要

工事名称 :	(仮称)彦根市新市民体育センター建設工事
所在地 :	滋賀県彦根市小泉町
工期 :	2020年4月1日～2022年6月22日
建築主 :	滋賀県彦根市
設計・監理 :	株式会社石本建築事務所
施工 :	株式会社鴻池組
用途 :	複合施設(体育館、弓道場、集会場)
敷地面積 :	32,533m ²
建築面積 :	9,980m ²
延床面積 :	13,850m ²
構造 :	RC造+S造 地上3階



写真1 メインアリーナ施工状況



図1 メインアリーナ内観イメージ

*1 大阪本店 建築部 *2 日鉄エンジニアリング(株)

2. 大屋根の構造概要

大屋根は長辺約 66m、短辺約 54m の矩形平面をしており、2 方向に曲率を有する屋根形状となっている。構造形式は二方向トラス構造であり、V 字形状の B. BOX の柱により下部構造と接合されている。トラスは上弦材 1 本 + 下弦材 2 本の三角形形状のトラスである。トラス幅 1.8m、デプス 1.8m~0.6m であり、中央部から端部に向かってデプスが小さくなる形状をしている。下弦材、上弦材は H 形鋼、斜材は鋼管により構成している（図 2、図 3）。

本屋根の特徴を以下に示す。

- ① 下弦材 H-200x200 が弱軸使い。短辺方向の弦材は曲げ加工を有している。織物をイメージし、短辺方向と長辺方向で高さ方向に約 125mm レベル差をつけて接合している（図 4）。
- ② 下弦材から V 字 B. BOX 柱の連続性を強調するために、B. BOX 柱の側面 PL が下端 PL 面から約 50mm 程度持ち出し、下弦 H 形鋼のフランジが柱脚まで連続しているように見せている（図 5）。
- ③ 屋根のジャッキダウン時には V 字柱の柱脚部をスライドさせ、下部構造にかかる水平力を低減させていく。

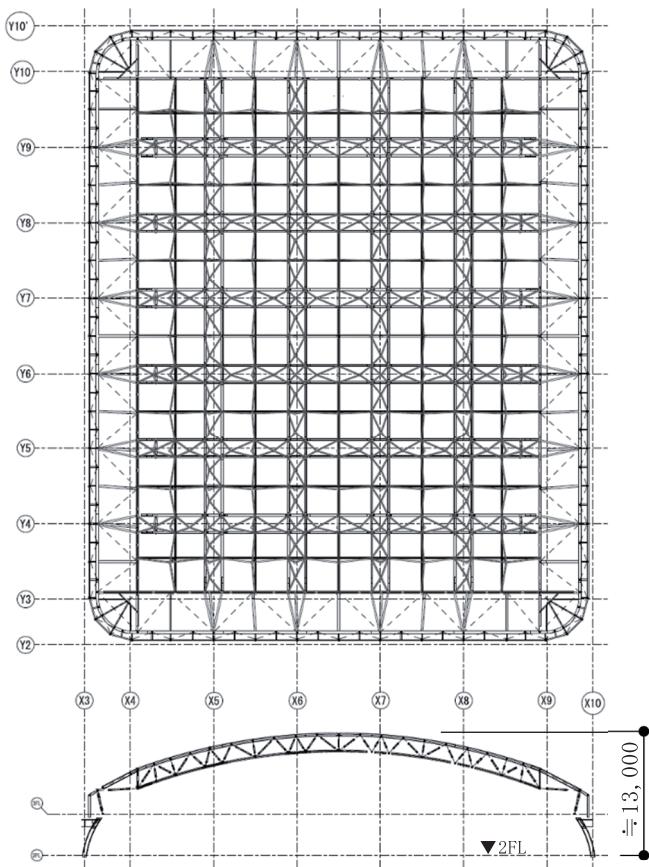


図 2 屋根伏図(上)および Y6 軸面図(下)

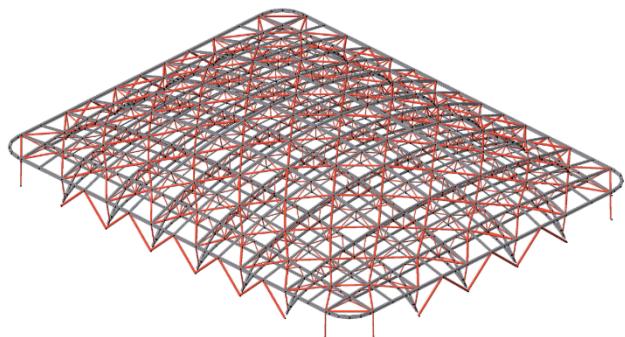


図 3 鉄骨 3D モデル

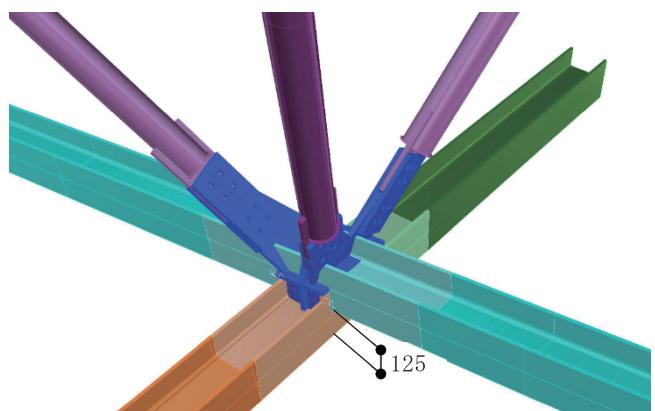


図 4 下弦材接合部

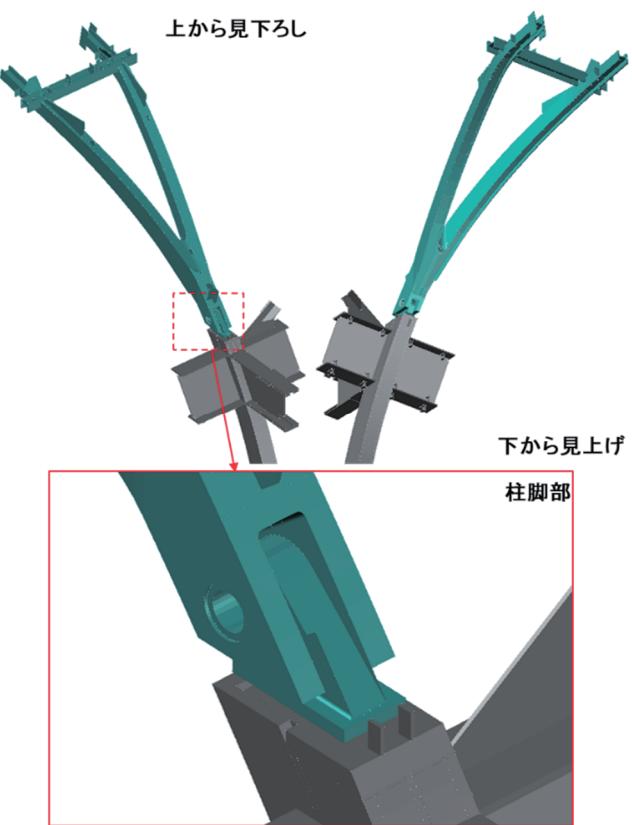


図 5 V 字柱

3. 施工時解析

本屋根構造では、鉄骨自重分のスラストを開放するため、屋根のジャッキダウン時には柱脚部をスライドさせる計画となっている。ジャッキダウンに伴い、屋根は鉛直下向きに下がり、柱脚部は外側にスライドする。屋根は下がった後に設計時の形状となるように施工キャンバー（むくり）を設け、柱脚部はスライド後に屋根のV字柱と下部構造の柱面をそろえるために、あらかじめ内側に建方しておく必要がある。そのため、ジャッキダウンに伴う変位量を正確に把握する目的で施工ステップ解析による確認を行った。本解析結果より、ジャッキダウン手順に応じたベント反力やジャッキダウン量を確認し、キャンバー計画やジャッキダウン計画、仮設計画を行った（図6）。

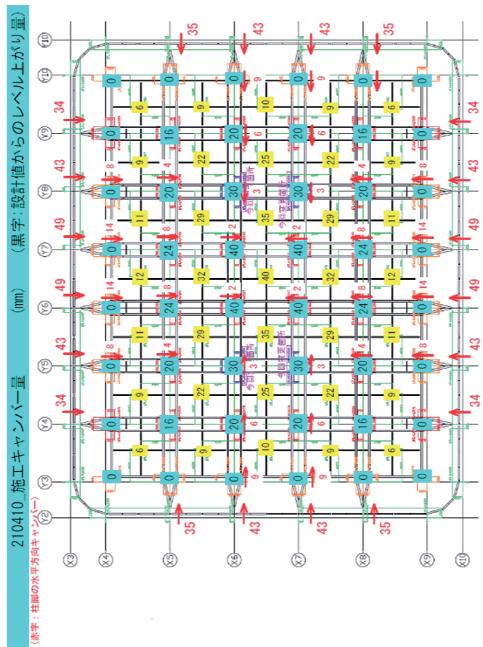


図6 施工時解析に基づき設定した施工キャンバー量

4. BIM を活用した事前検討

4.1 総合図による検証

体育館大屋根にはメインフレーム鉄骨以外の取付製品も多数多く配置されており、諸条件をクリアした位置決定を行う必要がある。屋根形状が不規則な球体形状であり、単純な平面・立面・断面図だけでは空間や干渉の把握が困難であるため、大屋根部分の総合図としてBIMを用いた検証を行うこととした。

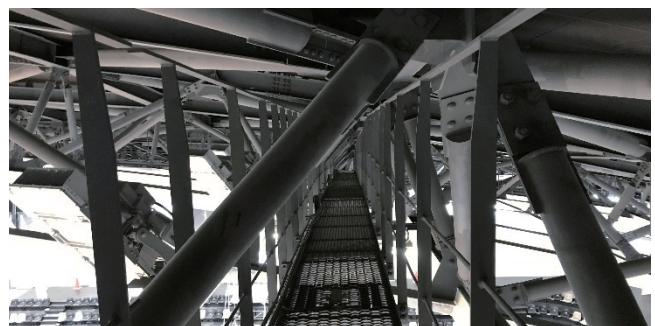
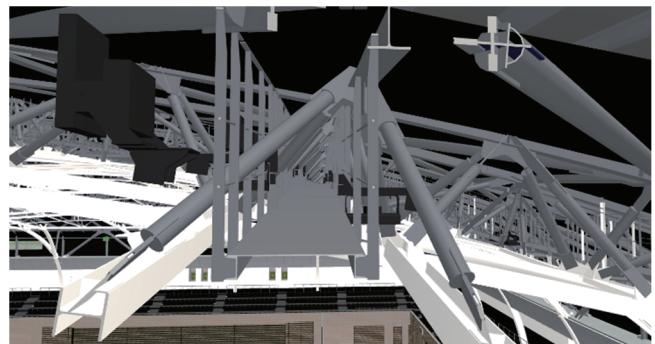
主な取付製品は、以下の通り。

- ① メンテナンス用キャットウォーク
- ② バトン・防球ネット吊込用のワインチおよび制御盤
- ③ 照明器具・スピーカー

各施工業者から製品のBIMデータを受領し、鴻池組の生産支援チームにて鉄骨BIMデータとの統合作業（総合図作成）を行った。写真2にBIMによる検証と施工後の実物を比較して示す。

総合図での検証内容は、以下の通りであった。

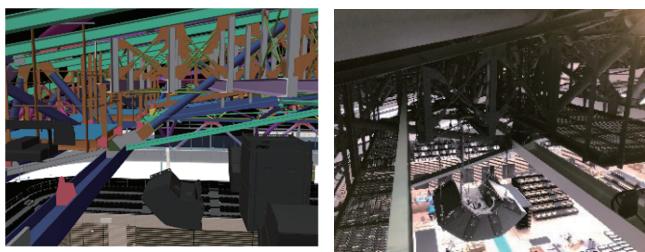
- ① キャットウォークは人の通行が可能か（特に斜材の鋼管と交差する狭小な場所）、また、各製品（器具）のメンテナンスが可能か。
- ② ウインチは下弦材よりも上部に取り付けて目立たないようにし、吊元から垂直に干渉物がないこと。また、制御盤は上弦材と下弦材の間の位置とし、架台の部材が下弦材の上部となるようにする。
- ③ 照明器具は下弦材の上部とし、照明器具の取付・メンテ作業時にキャットウォークから手が届くこと。また、スピーカーは重量が大きいことから、吊元架台が必要であり、その架台部材を通す位置や支持母材をどれにするか。



① キャットウォーク（上:BIM、下:実物）



② キャットウォーク入口（左:BIM、右:実物）



③ スピーカー（左:BIM、右:実物）

写真2 BIMと実物の比較

4.2 屋根鉄骨分科会による検討

鉄骨の部材形状と前述製品の位置決定のため、「屋根鉄骨分科会」を設置し、当社、設計・監理、協力業者が参加し、延べ9ヶ月（1~2回/月）にわたって議論を交わした上で鉄骨製作工程に入った（写真3）。

メインアリーナの鉄骨については、塗り分け位置や色彩も検討対象とした。臨場感を出したBIMによる検討により、当初案から白色と黒色の使い方を反転させた実施案となつた（図7）。



写真3 屋根鉄骨分科会開催状況



図7 鉄骨の色彩（左:当初案、右:実施案）

4.3 3Dプリンターおよび3D動画の活用

BIMデータを活用して3Dプリンターで模型を作成し、柱・梁の部材形状確認を行った（写真4）。なお、BIMデータは施工計画においても活用し、施工手順説明用の3D動画を作成した（図8）。

BIMの活用により施工を担当する職員や作業員が鉄骨部材の形状イメージをつかめ、理解度が大幅に向上した。その結果、完成形状を予測した仮設計画、搬入計画を無駄なく行うことができ、出来栄えに関しても関係者全員が完成のイメージを理解していることから、特に力を入れた白色の下弦材の精度確保や塗装のライン出しについては予想を上回る出来栄えとなった。この結果からも、完成時の内観を事前に確認しながら正確な検証が行える、というBIM最大の利点を実際の工事に反映できたと実感している。



写真4 3Dプリンターで作成した模型

(左:柱脚部分、右:梁部分)

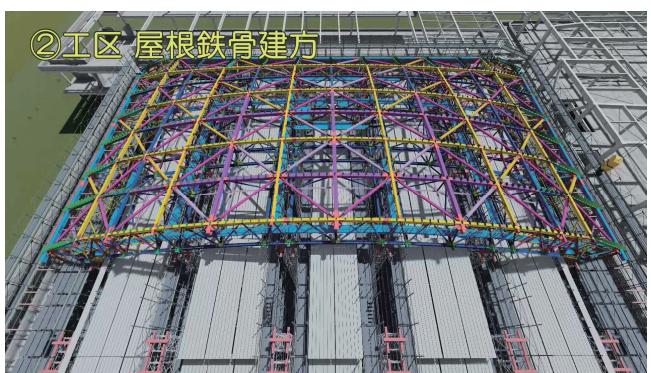
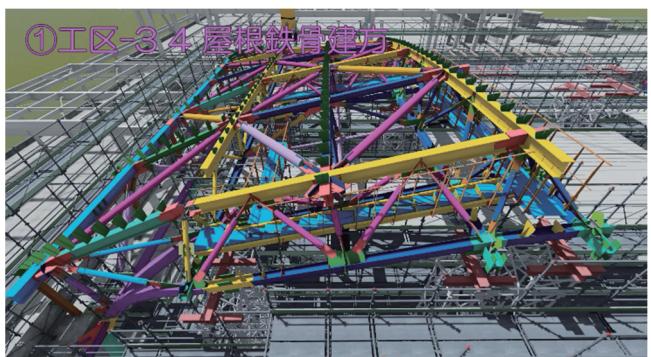


図8 施工手順説明用動画カット

5. 大屋根鉄骨の施工

5.1 鉄骨工程

屋根鉄骨工事の工程を図 9 に示す。支保工足場組立からジャッキダウンまで、延べ 6 ヶ月の工期であった。支保工足場はメインアリーナの天井内装工事に兼用したため、2022 年 2 月に解体した。

工種	2021年					
	6月	7月	8月	9月	10月	11月
支保工足場	組立			※内装完了後解体		
地組		■	■			
建方		■	■	■	■	
本締		■	■	■	■	
溶接			■	■	■	
グラインダー仕上			■	■	■	
ジャッキダウン						■

図 9 屋根鉄骨工事工程表

5.2 仮設計画

仮設計画図を図 10 に示す。建方エリア後方に地組ヤードを設けた。建方揚重機に 200t クローラークレーンを使用し、地組揚重機に 25t ラフタークレーンを使用した。メインアリーナの奥から外側（図面下部）に向かって建て逃げとし、建方揚重機を建物外へ移動した。その後クレーン出口の軸体を構築し、屋根鉄骨を受ける下部の鉄骨建方を行い、残り（図 12 の 4 工区部分）の屋根鉄骨建方を行った。

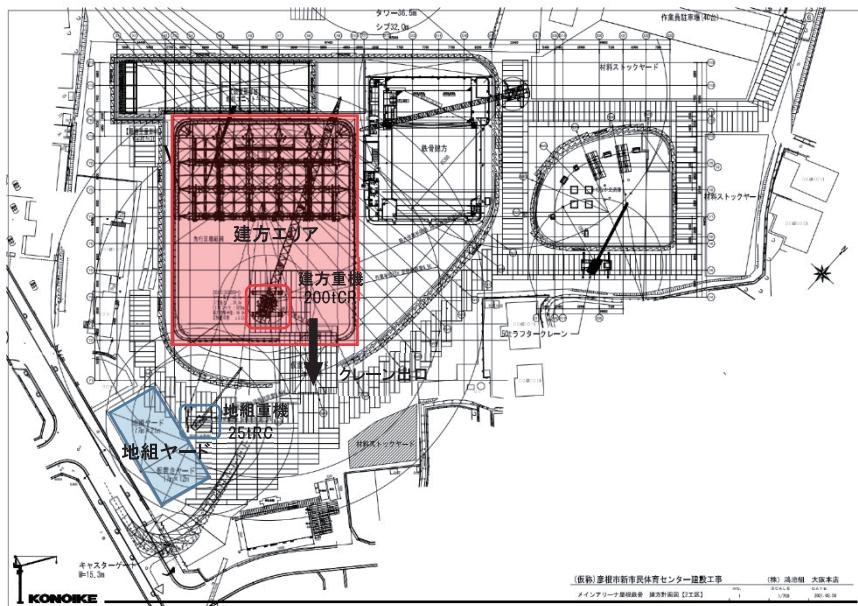


図 10 仮設計画図

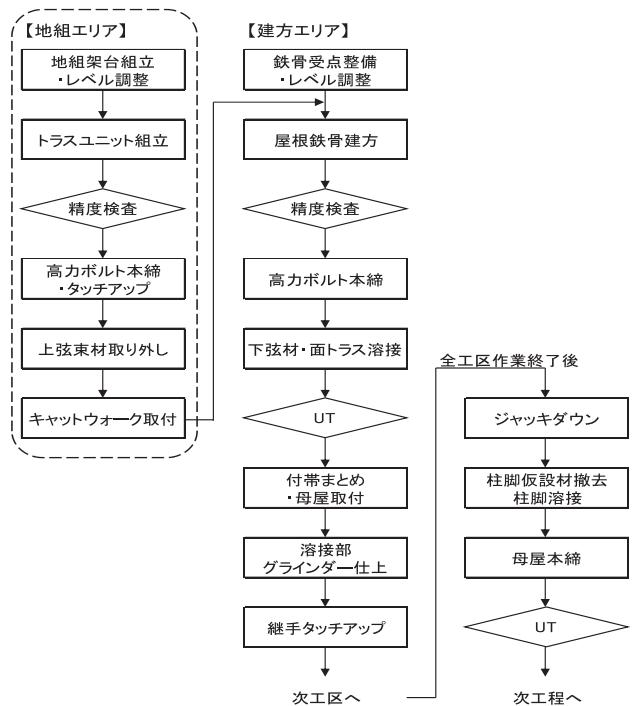
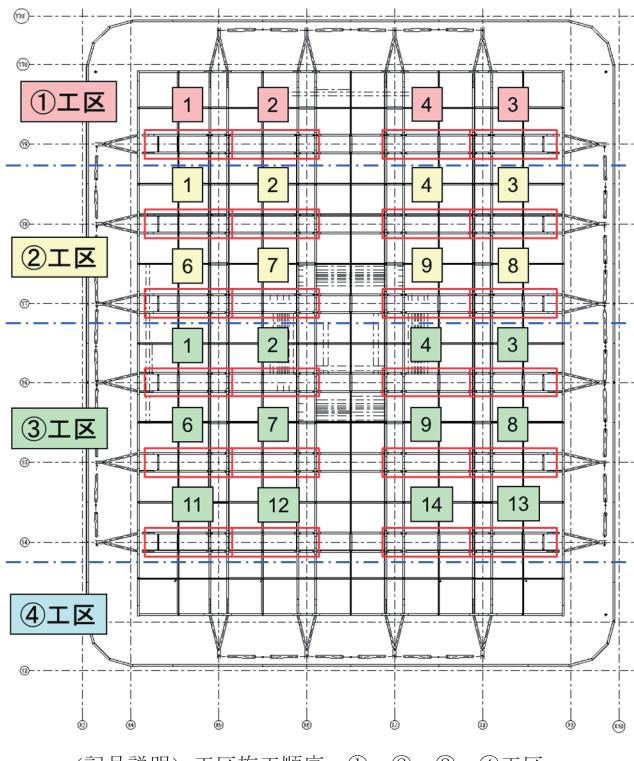


図 11 大屋根鉄骨施工フロー

5.3 立体トラスの地組

施工性と建入精度を確保するため、立体トラスの一部を地組する計画とした（写真 5）。地組したトラスは図 12 の赤枠部分である。アリーナ内部から見上げた際に直線性が際立つ短辺方向トラスを中心に地組を行った。なお、中央部は調整代を確保するため、単材で取り付けた。長辺方向のトラスにおいても短辺方向トラスの直線性確保に支障がないよう、単材で取り付ける計画とした。

地組架台を図 13 に示す。1 本の上弦材と 2 本の下弦材それぞれを 2 点支持できるように 200H 山留材で構成し、支持点にはレベル調整用のキリンジャッキがついている。損傷防止と調整の容易性を目的に、上弦材受けには傾斜受台、下弦材受けには固定用プレートを設けている。地組トラス架構の仕口を精度管理対象とし、建方後の最終的なトラスの直線性担保のため建方管理許容値 $\pm 10\text{mm}$ より厳しい地組管理許容値 $\pm 5\text{mm}$ 以内で管理した。トラス内部にキャットウォークを通すため、主構造の地組完了後に上弦材受けを取り外してキャットウォークを入れ込める仕様とした（図 14）。



〈記号説明〉 工区施工順序 : ①→②→③→④工区
工区内建方順序 : 1→2→…→14 (数字順)

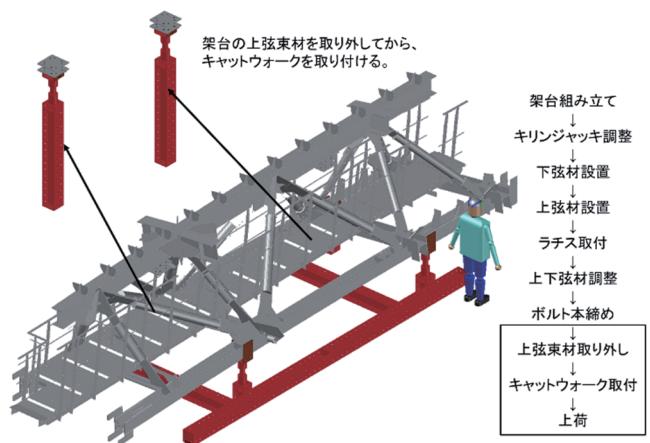


図 14 地組計画図(キャットウォーク)

5.4 立体トラスの建方

立体トラスの揚重においては、底面が広い部材形状を考慮し、下弦材を 4 点吊りする計画とした(写真 6)。揚重した立体トラスを支保工の上に据え、3 次元測量機によって精度計測を行った。3 次元測量機の設置場所は、鉄骨や足場で視野が妨げられない高所にする必要があるが、周辺に適する場所がなかったため、本締めが完了した固定度が高い鉄骨の上に足場を立て、測量機を設置した。3 次元測量機での測量に加え、下弦材についてはスチールテープと水糸を用いてスパンと折れの管理を行い、下弦材のフランジラインが全長に渡って直線になる(接合部で折れない・目違いとならない)ように複数の計測方法と目視で注意深く管理を行った。支保工のジャッキダウンによって屋根が沈むことが施工時解析により予測されたため、最大 40mm の施工キャンバー(設計高さ+40 mm)を設けて建方を行った。



写真 5 地組状況

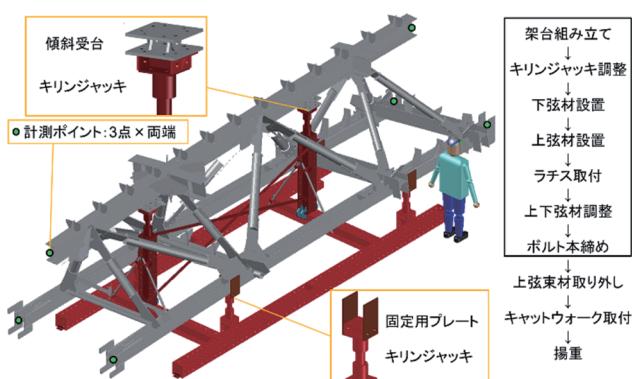


図 13 地組計画図(主部材)



写真 6 建方状況

5.5 ジャッキダウン計画

ジャッキダウン時に各支保工に作用する支持反力を施工時解析により予測し、反力にあわせた 3 種類のベント構成を行った(表 2、写真 7)。

表2 ベント構成

支持反力	5t未満	5t以上 15t未満	15t以上
ベント構成材	スリーエス		四角支柱4本組
ダウン機構	ジャッキベース	油圧ジャッキ +解体ジャッキ	油圧ジャッキ +ライナープレート
備考	人力でダウン可能と判断		ダウン量がジャッキストロークより大きいためライナープレート併用



写真7 反力にあわせたベント構成

反力 15t 以上の箇所には四角支柱 4 本組で強固に組んだベントを構成し、予想最大ダウン量 109mm 分の下がり代を確保するため、ライナープレートと油圧ジャッキからなる機構とした。屋根鉄骨全体を偏りなく均等にダウンさせるために、4 班同時進行で屋根外側から中央に向けて順にダウンする計画とした。

5.6 スラスト解放計画

屋根鉄骨アーチから生じる水平力をできるだけ下部鉄骨に伝えないよう、屋根鉄骨柱脚部を簡易的なすべり支承とし、ジャッキダウン時に下部鉄骨のトッププレート上をスライドすることでスラストを解放する計画とした(図 15)。すべり支承部はジャッキダウン前の屋根鉄骨施工期間中に地震等により倒壊しないよう、エレクションピースにより固定する計画とした(写真 8)。このエレクションピースはスライドが予測より大きかった場合のすべり支承部脱落防止のためのエンドストッパーを兼ねる。スライドの妨げとなる摩擦力をできるだけ排除するため、すべり面にモリブデングリースを塗布し潤滑させた。すべり支承部である鋳鋼には開先を設けており、スライド後に部分溶け込み溶接を行うことで下部鉄骨と屋根鉄骨を定着させた。

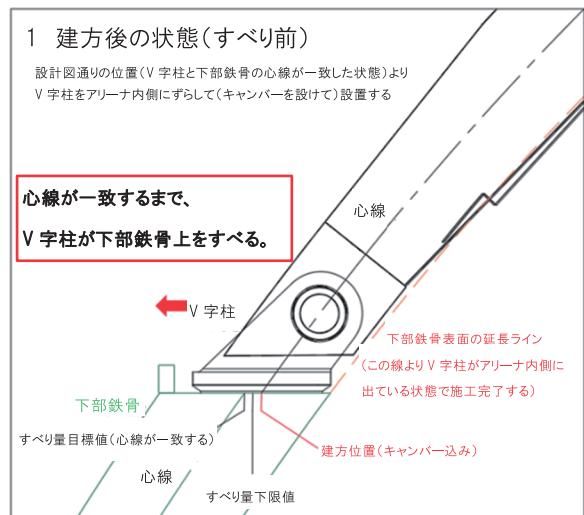


図15 スラスト解放計画



写真8 エレクションピースによる柱脚部仮固定

5.7 ジャッキダウン・スラスト解放工事の結果

ジャッキダウンによる屋根鉄骨各部下がり量の施工時解析と実測との比較を表3に、屋根鉄骨柱脚部すべり量の施工時解析と実測の比較を表4に示す。屋根鉄骨の下がり量は施工時解析の51~68%に留まった。この原因としては、施工時解析ではボルト接合部を完全ピンとみなし、主部材に付帯するピースの補剛効果も考慮していなかったため、実際より剛性が低めになったと考えられる。これはジャッキダウン後の天井高さ確保が求められる体育館アリーナにおいて安全側となり、施工時解析より下がり量がやや少なかった実施工は適正であったと言える。また、表2の通り屋根全体は概ね偏りなく均等にダウンした。

屋根鉄骨柱脚部は、強制的に力をかけることなくジャッキダウンに伴い自然にスライドした。屋根鉄骨のすべり量は施工時解析の43~72%であり、下がり量に準じたすべり量といえる。すべり量に関しても、概ね偏りなく均等となつた。

表3 屋根各部ダウン量と施工時解析との比

	解析	実測	比		解析	実測	比
X4Y9	47mm	25mm	53%	X4Y4	47mm	26mm	55%
X5Y8	79mm	41mm	52%	X5Y5	79mm	46mm	58%
X6Y7	109mm	64mm	59%	X6Y6	109mm	64mm	59%
X7Y7	109mm	65mm	60%	X7Y6	109mm	66mm	61%
X8Y8	79mm	44mm	56%	X8Y5	79mm	49mm	62%
X9Y9	47mm	24mm	51%	X9Y4	47mm	32mm	68%

表4 柱脚各部のすべり量と施工時解析との比

	解析	実測	比		解析	実測	比
X4Y9	34mm	17mm	50%	X9Y4	34mm	23mm	68%
X4Y8	43mm	23mm	53%	X9Y5	43mm	31mm	72%
X4Y7	49mm	26mm	53%	X9Y6	49mm	30mm	61%
X4Y6	49mm	26mm	53%	X9Y7	49mm	25mm	51%
X4Y5	43mm	23mm	53%	X9Y8	43mm	24mm	56%
X4Y4	34mm	17mm	50%	X9Y9	34mm	18mm	53%
X5Y3	35mm	22mm	63%	X5Y10	35mm	19mm	54%
X6Y3	43mm	24mm	56%	X6Y10	43mm	22mm	51%
X7Y3	43mm	23mm	53%	X7Y10	43mm	23mm	53%
X8Y3	35mm	19mm	54%	X8Y10	35mm	15mm	43%

6. まとめ

本工事はジャッキダウンを行いながら柱脚部をすべらせるという難易度の高いものであったが、施工時解析による屋根架構全体の挙動の把握や綿密な施工計画により、適正な施工を行うことができた。また、BIMを採用し複雑な形状を把握しながら本設・仮設ともに、総合的な判断を実施できたことで、結果として美観に優れたテキスタイルアーチ屋根を実現することができた。



写真9 完成外観



写真10 完成外観

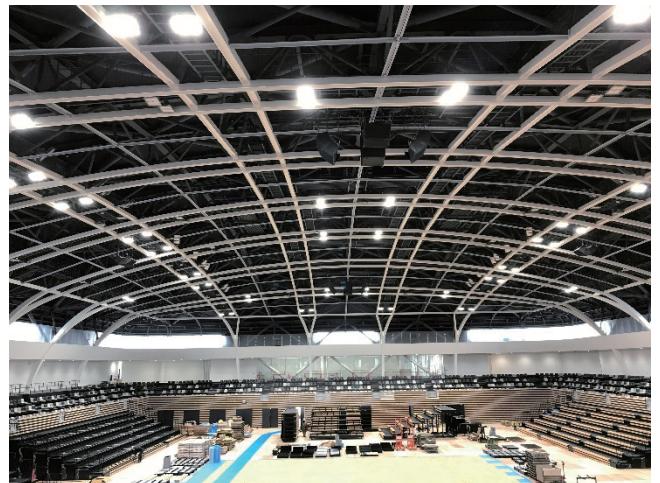


写真11 メインアリーナ完成内観