

ハイブリッド構造による競技場大屋根の施工と施工時解析

Construction and Constructional Analysis for Large Roof by Hybrid Space Structure

小野 弘毅*1	上原 健一*1	永井 茂*1
Hiroki Ono	Kenichi Uehara	Shigeru Nagai
古城 豊光*2	柿田 芳久*2	新蔵 良太*2
Toyomitsu Furuki	Yoshihisa Kakita	Ryota Shinkura

要旨

維新百年記念公園陸上競技場新築工事の屋根架構を施工するにあたり、設計者、有識者や施工者を交え、①屋根大梁およびマストの建方の方法、②施工フローの確定、③FEM解析を用いた施工時解析、④ケーブル長の算定、⑤建方精度の基準、⑥その他の鉄骨建方が完了するまでの問題を抽出し検討等を行った。本報告では、施工計画時の検討内容、実際の施工方法および施工時解析と屋根架構の計測結果の比較について述べる。

キーワード：屋根架構 ハイブリッド構造 施工フロー FEM解析 施工時解析

1. はじめに

維新百年記念公園陸上競技場は、昭和38年第18回国体のために山口県山口市内に建設され、競技場を含め、サッカー・ラグビー場、テニスコート、球技場などのスポーツ施設が集合した総合公園内に位置する。平成23年に第66回「やまぐち国体」を開催するにあたり、老朽化した既存のスタジアムの建替え工事が計画され、平成20年より工事が行われた。なかでもメインスタンドは特色のある屋根架構に覆われる計画となっている(図1、写真1)。

本報告では、屋根架構についての施工計画、施工方法および施工時解析の報告を行う。

2. 建築概要

工事名称：維新百年記念公園陸上競技場新築工事
所在地：山口県山口市吉敷地内
工期：平成20年10月～平成22年12月
建築主：山口県
設計・監理：株式会社佐藤総合計画
施工(建築)：鴻池組・井森工業・山口建設特定建設工事共同企業体
用途：都市公園施設(陸上競技場)
建築面積：13,533.10 m²
延床面積：20,584.77 m²
構造：スタンド部 鉄筋コンクリート造
屋根架構部 鉄骨造



図1 スタジアム完成パース



写真1 スタジアム外観

*1 広島支店 建築部 *2 東京本店 建築設計部

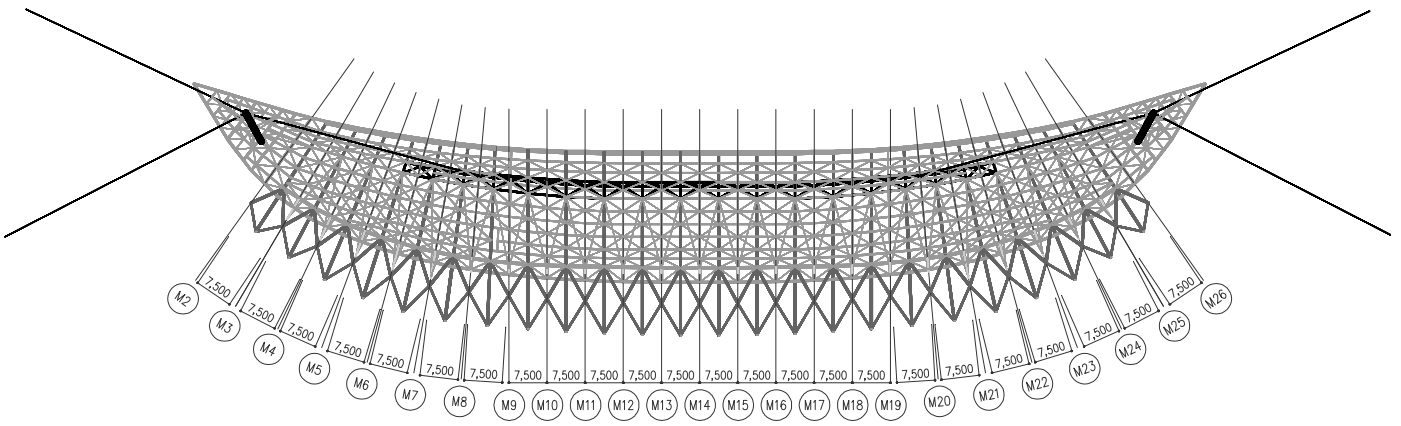


図2 屋根伏図

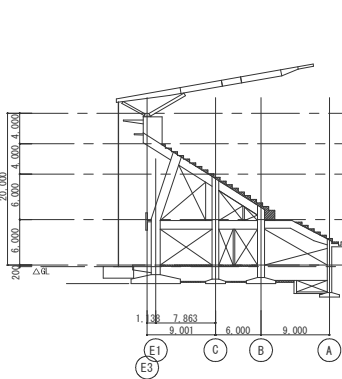


図3 M2 通り軸組図

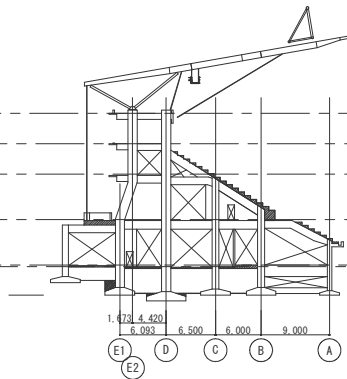


図4 M9 通り軸組図

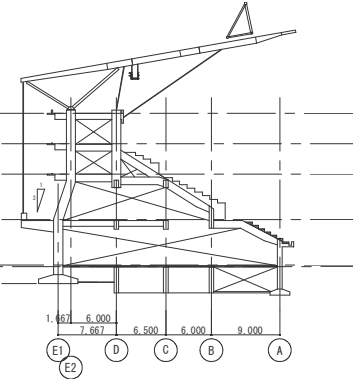


図5 M14 通り軸組図

3. 構造概要

メインスタンドは地上4階、RC造の耐震壁付きラーメン架構である。円周方向のスパンは7.5m、M14 通りを軸に左右対称で、スタンドの最高高さは GL+20.6m (軒高)である (図2、3、4、5)。屋根架構はスタンド上部に設置されているため、屋根架構からの反力を受けるスタンドは、多くの間仕切り壁を耐震壁とすることで、大きな耐震強度を有している。客席椅子を設置するための段床はプレキャストコンクリート、段床を支える傾斜梁と M14 通りの柱を無くしたメインエントランス部の 15m ロングスパンの梁 (M13～M15) にはプレストレストコンクリートが採用されている。

屋根架構は大別して、①屋根大梁、②V 支柱、③バックステイ、④キールトラス、⑤マストケーブル、⑥マスト、⑦耐風ロッドの7種類で構成されている (図6)。

屋根架構は、設計コンセプトでもある「浮遊感あふれる大屋根」を実現すべく、二つの構造方式を合わせたハイブリット構造が採用されている。1 つ目の構造方式は、屋根大梁をV支柱を起点にバックステイが引っ張ることによる天秤式の「片持ち梁方式」、2 つ目はマストとマストケーブルによりキールトラスを吊り上げる「吊り上げ方式」である。

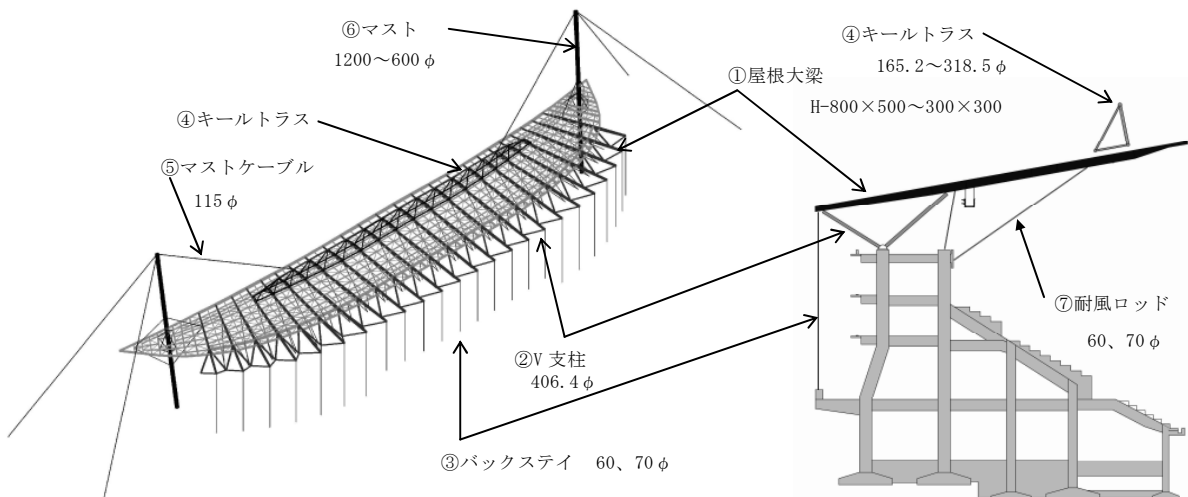


図6 屋根架構構成図

4. 屋根架構施工計画

4.1 鉄骨建方委員会

屋根架構を施工するにあたり、設計者、有識者および施工者により鉄骨建方委員会(表1)を立上げ、建方の方法・精度管理値や建方時の屋根架構の挙動、部材の応力状態などを検討した。

表1 鉄骨建方委員会メンバー (敬称略)

山口県土木建築部	末永
(株)佐藤総合計画	渡邊、岩淵、長嶋
日本大学	斎藤
(株)構造設計プラス・ワン	金田、早稲倉
(株)鴻池組	中山、小野、秋枝、古城、柿田、新蔵
新日鉄エンジニアリング(株)	平林、鍛冶、田畑、菊池、関口
神鋼鋼線工業(株)	田川、別府、榊、松本、浜崎

4.2 施工方法の選定

屋根架構を施工するために、建方の合理化や張力管理方法から考えた4つの建方方法を比較し検討を行った(図7)。A案はベントによりすべてを支えるため、もっとも施工が容易な方法である。B案はマストケーブルとバックステイの初期張力を併用して使用することで、下部構造の負担を軽減する方法であり、屋根大梁先端の変形やマストケーブル・バックステイの張力の管理が最も容易な方法である。C案は重量のあるキールトラスのみをベントで受け、屋根架構はマストケーブルとバックステイの張力で自立させる方法である。D案は屋根架構をバックステイとマストケーブルの張力で自立させながら施工する方法で、ベントが必要ないため下部構造に負担がなく、仕上げ工事に影響がない。A案はマストへの初期張力の導入がないため、構造計算上の応力状態と異なること、バックステイの張力管理が困難であること、下部構造のスタンドに負担が増大すること、ベントの部材が超大になることから不採用になった。C・D案は屋根大梁の剛性が低いことから大梁先端の変形が大きく、バックステイの張力調整だけでは大梁の精度管理が困難になる。以上のことを考慮し、総合的な見地からB案を採用した。

図	A	B	C	D
	ベントのみ	ベント+初期張力	キールのみ+ベント	ノーベント
施工性	◎	○	△	△
下部構造の負担	×	△	○	◎
精度管理	○	◎	△	△
構造計算上の応力状態	×	◎	◎	◎

図7 施工方法の比較

マストの施工方法は、マストがフィールド側に6.6度、傾斜しているため、①ベントで支え傾斜させながら建方する方法、②鉛直に建方をしてから、マストケーブルの張力により傾斜させる方法、③ベントを使用せずにマストの中間タイロッドに水平力を負担させる方法の3案が挙げられた。①案は両端の屋根を支えるための支保工があるため、ベント設置が困難であること、②案はマストを傾斜させるまで屋根架構に取り付けられない部材が発生することとマスト頂部の精度管理が困難になることから、③案を採用した。

4.3 施工フロー

建方時の施工フローを作成し(図8)、手順を確認した。

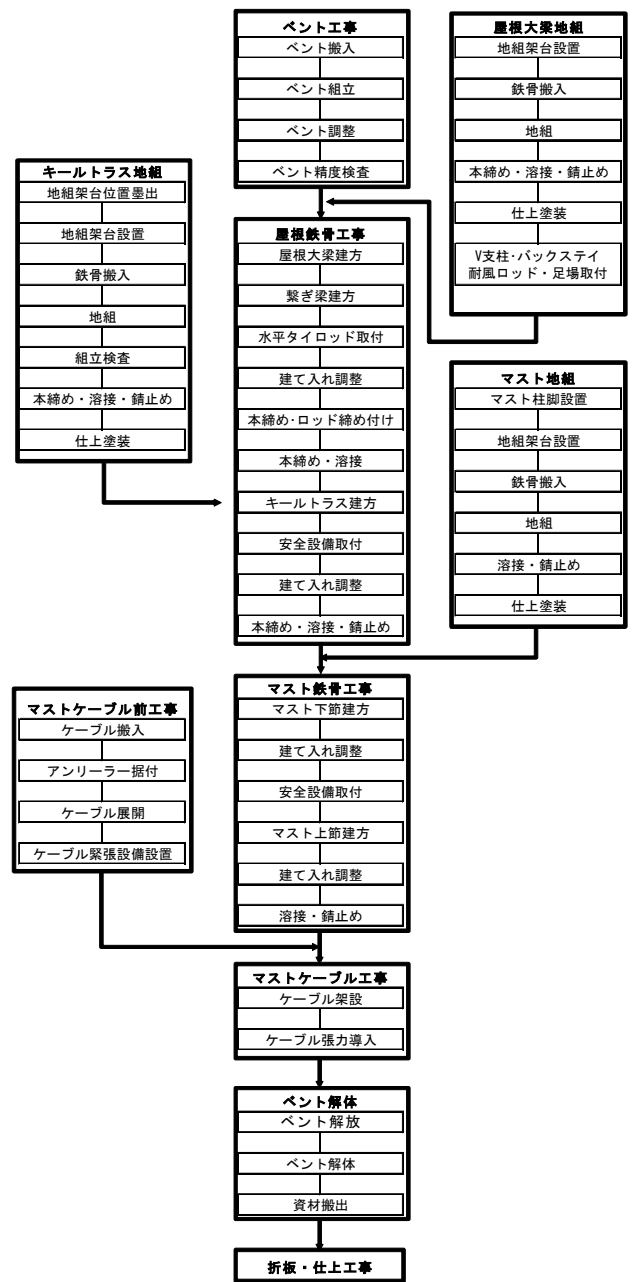


図8 施工フロー

4.4 施工時解析

建方時の屋根の挙動や部材の応力状態を把握するために施工時解析を行った。

通常の応力解析では、建物完成時の形状をモデル化し(図10)、解析を行い応力状態や変位などの安全性を確認する。一方で施工時解析は、各工程段階をモデル化し、作業の手順に合わせて、モデルを変化させていく解析方法であり、施工途中の応力の状態や作業手順による応力の変化を確認できる。また、同時にケーブルの垂れ下がり量であるサグを考慮した幾何学的非線形解析を同時に行うことで、実際の施工状態に近似したモデル化も行った。

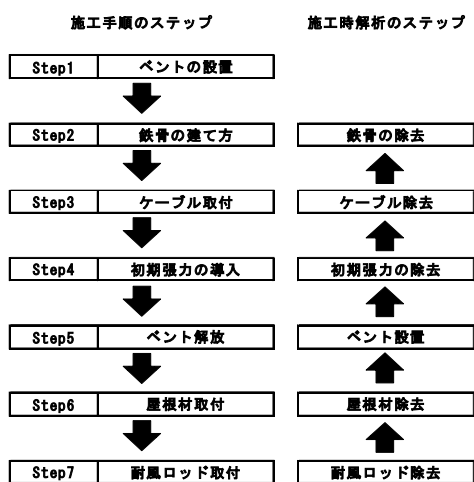


図9 施工ステップ

施工時解析は、図8の施工フローを簡略した施工手順のステップに対して、完成したモデルから施工手順を遡る逆施工解析法を採用し(図9)、解析を行った(図11、12、13)。また、各Stepで下記の項目の値を抽出した。

- ①屋根大梁先端の変位
- ②バックステイの軸力
- ③マスト頂部の変位
- ④マストケーブルの軸力
- ⑤ベントにかかる軸力

①～④の値は、実施工時の建方の精度管理値の指標となる。これらの管理値を施工時において逐次追跡することで、適正な建方が行われていることになる。

マストケーブルの製作寸法を決定するには、サグを考慮する必要がある。これは通常の線形解析では解くことは困難であるため、幾何学的非線形解析にて検討した。従って、最終的なマストケーブルの長さは、マスト頂点と接地点の距離、初期弾性伸び、マストケーブルのサグを考慮し決定した。

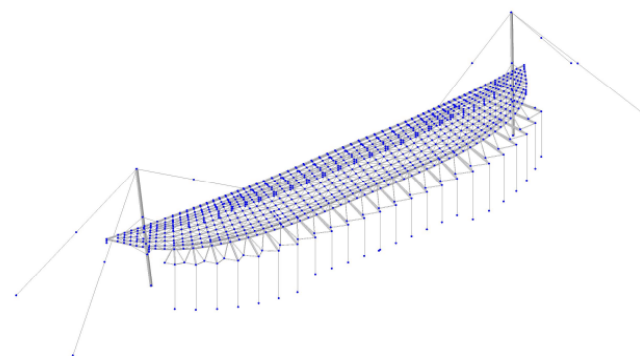


図10 FEM 解析モデル

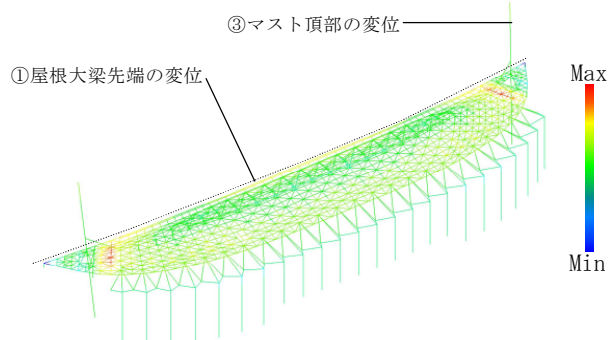


図11 Step3 変位解析結果

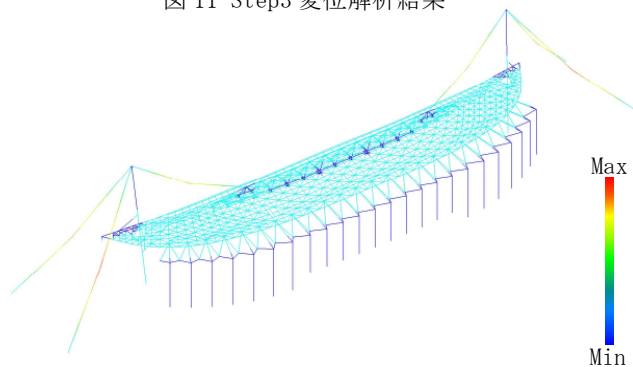


図12 Step5 変位解析結果

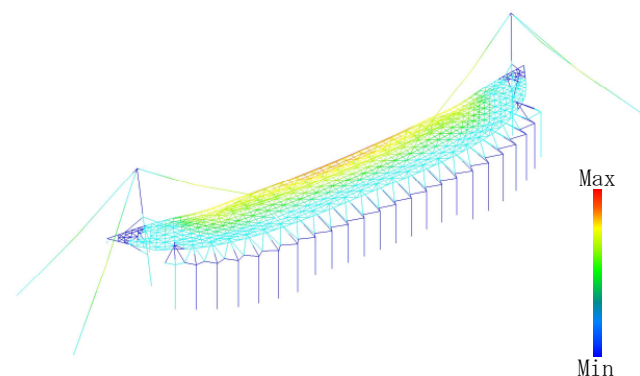


図13 Step7 変位解析結果

4.5 建方精度管理

施工精度の管理は、屋根大梁の変位やケーブルの軸力で行われることが多いが、今回の管理は、ケーブルの軸力を優先に行うことを鉄骨建方委員会で決定した。軸力の許容値は設計クライテリアに対し、管理許容値は±10%、限界許容値は±15%とした。

5. 屋根架構の施工

5.1 屋根大梁

最大 37mある屋根大梁は3分割して現場に搬入した。高所での作業を極力減らすため、地組ヤードで組み上げ(写真2)、塗装を行った後に、V 支柱、バックステイ、耐風ロッドおよび足場などの仮設資材を取り付け(写真3)、400t クローラークレーンと補助機として 100t クローラークレーン2台を用いて設置した(写真4、図14)。また、製作誤差と施工誤差が加わるため、円周方向に誤差が集中すると許容値を超えることが考えられ、誤差を調整するスパンを2ヵ所設ける計画としたが、建て入れの調整を建方時とボルト本締め直前に行ったため、調整を必要としない精度で施工することかできた。



写真2 屋根大梁地組1



写真3 屋根大梁地組2

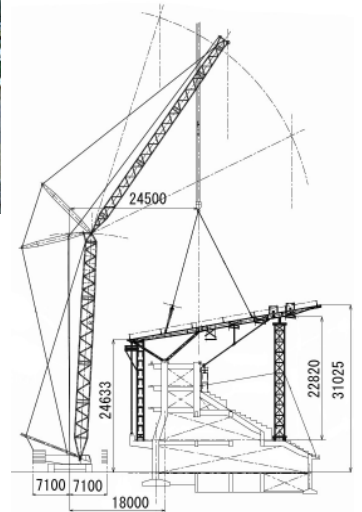


図14 建方計画図

5.2 キールトラス

高さが最大 4mになるキールトラス(ワーレントラス)は上弦材、下弦材、ラチス材に分けて現場に搬入した。地組ヤードでは工場と同様の製作架台を用意し(写真5)、接合部数が最小限になるようにクレーンの能力からトラス全体を7ブロックに分けて組み上げた。各ブロックの接合部は吊り足場を設け、屋根架構上で溶接を行った(写真6)。



写真4 屋根大梁設置



写真5 キールトラス地組

5.3 マスト

全長 56.2mのマストは6本に分けて搬入し、下節を4本(38m)、上節を2本(18m)で組み上げて設置する計画とした。地組ヤードでの鋼管溶接が困難になることが予想されたため、地組ヤードにターニングローラーを設置し、適切な作業環境で現場溶接をすることにより品質を確保した(写真7)。上節と下節の接合は、下節をローラークレーンにより設置した後、下節の上部の溶接用の足場を取り付け、上節を吊り込み、エレクションピースにより接合して、溶接作業を行った(写真8)。



写真6 キールトラス設置



写真7 マスト溶接



写真8 マスト建方

5.4 マストケーブル

マストケーブルの取り付けは、ケーブルの先端にPC鋼棒とオイルジャッキを仕込み、接合部を引き込む計画とした(写真9)。クレーン2台により最初にマスト側の接合部から取り付け、クレーンでもう一方の接合部の近くまで運び、PC鋼棒を取り付け、オイルジャッキで引き込むことにより、ケーブルを引き寄せ、接合部を取り付けた。PC鋼棒とオイルジャッキは最終的には取り外した。また、マスト頂部は、当初ケーブル取り付けのための足場を計画していたが、使用する頻度が低いことと作業性を考慮して現場に60mクラスの高所作業車を搬入して作業を行った(写真10)。



写真9 マストケーブル接合部



写真10 マストケーブル設置

5.5 ジャッキダウン

ベントを解放するための計画として、ベント頂部の屋根大梁を受けている部分に油圧ジャッキを設置し、ジャッキをダウンすることで、ベントが負担している軸力を解放させ、屋根架構を自立させる方法とした。ジャッキダウンは、屋根架構を対称にして3エリアごと、各屋根大梁の施工時解析結果の変位に対して20%ずつ5段階に分けて行った。なお、屋根大梁の変位値は、前節で行った施工時解析により、Step4とStep5の大梁変位から設定した。

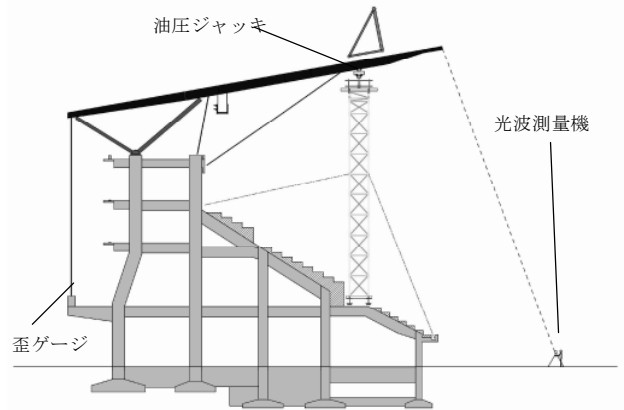


図15 計測計画図

6. 屋根架構の計測

6.1 計測計画

ジャッキダウン時には、屋根の挙動を確認するために、ジャッキを1段階ダウンするたびに、施工時解析で抽出した①～④を計測した。

屋根大梁の先端およびマスト頂部の変位の計測は、図15に示すように3次元光波を使用し、座標を計測した。計測点には地組の段階で反射板を取り付ける計画とした。マストケーブルとバックステイには歪ゲージを取り付け、軸力を計測した。

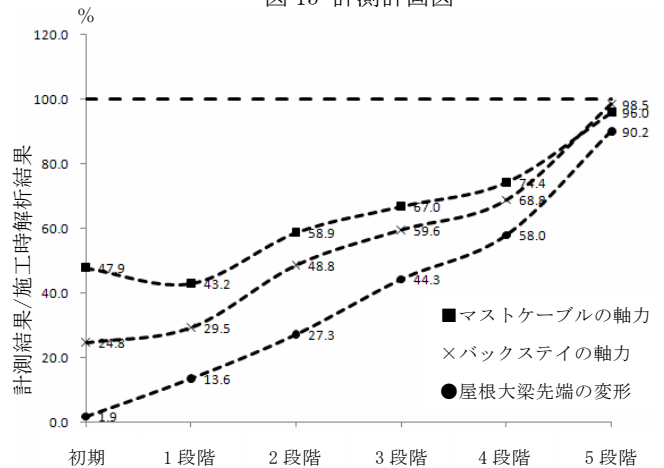


図16 施工時解析結果と計測結果比較図

6.2 施工時解析結果と計測結果の比較

施工時解析の結果に対する計測結果を図16に示す。ジャッキダウンの段階を増すたびにマストケーブルとバックステイの軸力、屋根大梁先端の変位は、施工時解析結果に近似していくことが確認できた。ジャッキダウン完了時のマストケーブルとバックステイの軸力値は、許容管理値内に納まり、屋根大梁先端の変位値も想定内の結果であった。

ただし、ジャッキダウンの一段階目でマストケーブルの軸力は、初期張力を下回る結果となった。これは気温の上昇によりケーブルが膨張したことなどの影響が考えられる。同様にタイロッドも膨張しているが、マストケーブルの全長と断面の方が大きいため、タイロッドの影響は少ない。気温の昇降によりケーブル、タイロッドの軸力および屋根大梁の変位は変動するが、変動の値は微少であるため、構造部材に問題はないものと判断した。

また、屋根折板の取り付け完了時にも屋根大梁の先端変形を計測した。計測結果と施工時解析結果の差は微少であった。

これらにより屋根架構は、構造計算と同等の応力状態であると推察され、適正に施工できていることが確認できた。

7. まとめ

本工事の屋根架構の施工計画にあたり、鉄骨建方委員会を設け事前検討することで、設計者と施工者で共通の理解ができ、問題点の早期解決を行うことができた。また施工時解析を使用することで、施工中の屋根架構の応力状態や挙動の変化を把握し、精度管理基準や計測基準を設定することができた。さらに計測結果との比較を行うことで適正な施工が行われていたことが確認できた。

謝辞

今回、維新百年記念陸上競技場新築工事を施工するにあたって、山口県 末永剛士主任技師、佐藤総合計画 渡邊朋宏上席主任、岩淵佳隆主任、長嶋明大氏、日本大学 齋藤公男名誉教授、構造設計プラス・ワン 金田勝徳代表、早稲倉章吾氏、新日鉄エンジニアリング 平林竜次マネジャー、田畑英樹マネジャー、ほか関係各位の皆様にご協力を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡邊朋宏ほか：鉄構技術：維新百年記念陸上競技場-計画と施工-、p.28-42、2010.11