

静岡県草薙総合運動場体育館の設計・施工

— 免震と PC による木造大空間の実現 —

桐野 康則*¹・岡村 仁*²・梅原 智洋*³・杉本 将基*⁴・佐藤 孝浩*⁵

本建物の特徴は、楕円状に配置した 360 mm × 600 mm の杉集成材柱 256 本で鉄骨トラス構造の切妻屋根を支えるという構造にある。静岡県産の杉集成材柱で包まれた空間を実現するために柱頭免震方式による屋根免震構造を採用し、免震層となる RC 造水平リングには屋根のスラストによるフープテンションに抵抗するための現場打ちポストテンション工法によるプレストレスを導入した。RC 造水平リングに関する種々の設計検討や、BIM を用いた施工検討、ポストテンション導入後の実測結果等について報告する

キーワード：木造、免震、スラスト、フープテンション

1. はじめに

静岡県草薙総合運動場は県内唯一の総合運動場であり、野球場、陸上競技場等、9つの施設を有する。静岡県はスポーツが盛んで体育館の稼働率は 100%，土日はほぼ県大会競技で使用されている。旧体育館は山下設計の設計により 1966 年竣工以来長年愛されてきたが、老朽化のために建て替えられることとなり 2011 年プロポーザルコンペが行われた。

静岡県天竜川流域の天竜杉は、吉野杉、尾鷲檜とならんで日本三大人工美林といわれ、良質の杉の産地である。コンペの提案項目に「県産木材の活用」があり、木材を如何に使うかということが一つのテーマだった。当選案となった内藤建築設計事務所の案は、観客に近い壁面（下屋根と呼んでいる）に杉集成材の柱を細かいピッチで楕円状に配置し、その上に鉄骨トラス構造の切妻屋根（上屋根）を架けるといふ、今までであるように見たことのない構造方式だった。

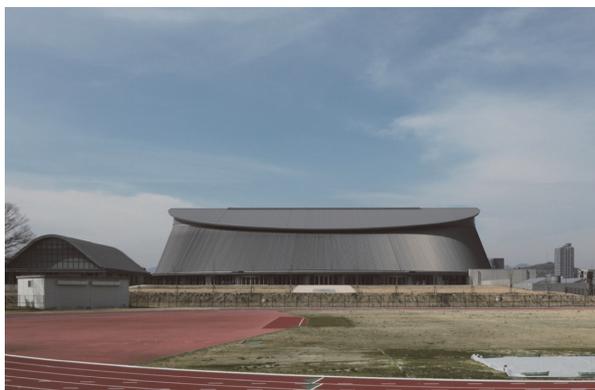


写真 - 1 建物外観写真¹⁾

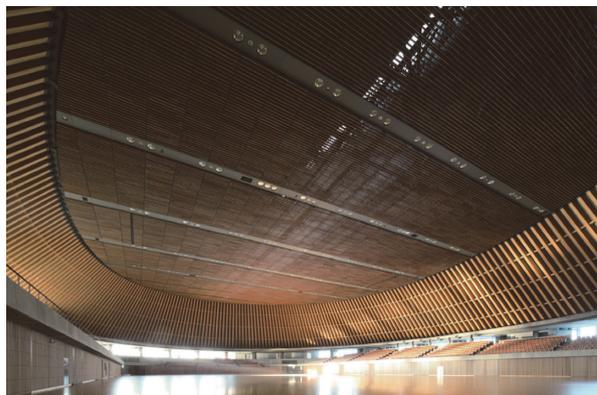


写真 - 2 建物内観写真¹⁾



*¹ Yasunori KIRINO

(株) KAP



*² Satoshi OKAMURA

(株) KAP



*³ Tomohiro UMEHARA

(株) KAP



*⁴ Masaki SUGIMOTO

(株) KAP 元所員



*⁵ Takahiro SATOH

桜設計集団

2. 建築概要

工事中も旧体育館を使用するために総合運動場に隣接する静岡学園跡地を敷地とし、道路の切り回しを行って総合運動場の敷地に組み入れた。建物の外部に運動場と連続するゆるやかなスロープの広場を設け、運動場側から2階の観客席に直接アクセスできるようにしている。

所用室は地下1階に機械室、1階はメインフロア・サブフロア・器具庫・更衣室・運営室・事務室等、主要諸室をすべて配置し、2階は観客席、トイレ、通路のみとしている。1階を競技者空間、2階を観覧空間と位置づけ、競技・運営者と観客の動線を明快に分離している。

2階は外周通路から外部へ接続する出入口を各所に設け、避難安全性に配慮している。

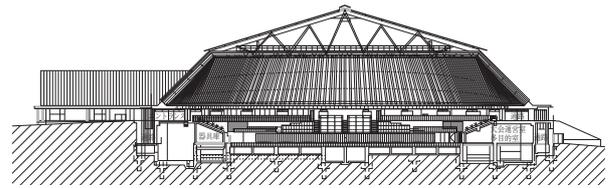


図 - 3 短辺断面図¹⁾

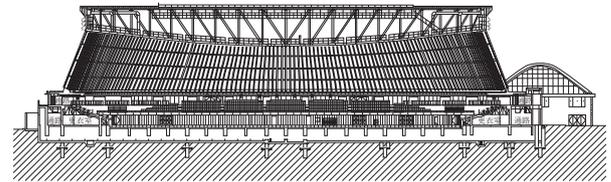


図 - 4 長辺断面図¹⁾

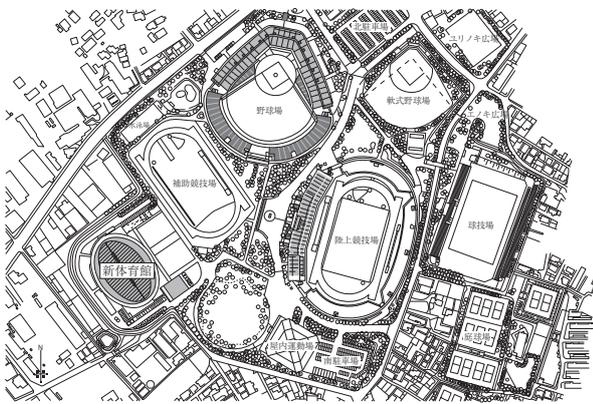


図 - 1 総合運動場内施設配置図

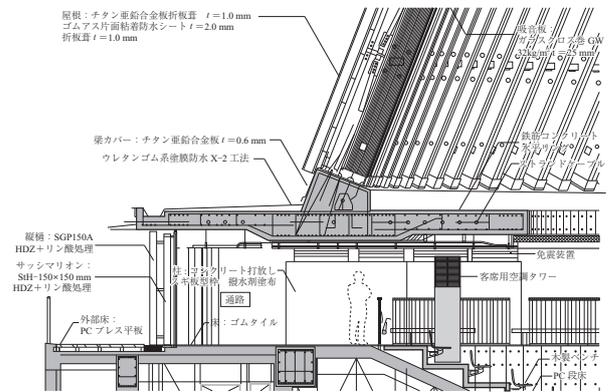


図 - 5 RC水平リング断面詳細図¹⁾

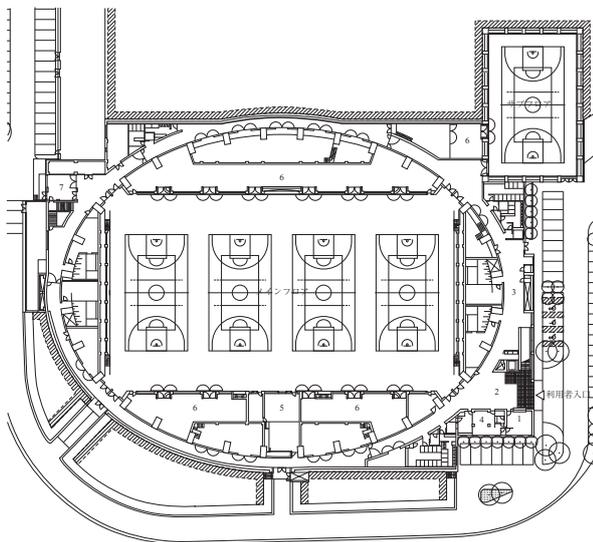


図 - 2 1階平面図¹⁾

所在地 静岡県静岡市駿河区聖一色 226 番 3 号外 51 筆
 用途 観覧場
 建築主 静岡県
 設計管理 内藤廣建築設計事務所
 構造設計 KAP + 桜設計集団

構造設計指導 東京大学生産技術研究所 腰原幹雄
 施工 鹿島・木内・鈴与特定建設工事共同企業体
 PC 工事 黒沢建設
 建築面積 9 701 m²
 延面積 13 509 m²
 階数 地上 2 階, 地下 1 階
 最高高さ GL + 28 m
 工事期間 2013 年 1 月 ~ 2015 年 2 月

3. 構造計画

3.1 ジオメトリー

下屋根の形態は、木材をできるだけシンプルに使うという考えに基づき、同じ長さ、同じ断面の集成材を 256 本、ほぼ等間隔に配置している。その上に切妻屋根の上屋根を架けているのが最大の特徴である。長辺側の中央になるほど切妻屋根の軒先が下がるので集成材は鉛直状態から大きく傾く。上屋根の屋根勾配は 3 寸 (3/10) であり、下屋根の集成材の傾きは短辺側のもっとも鉛直に近い位置で 68.9 度、長辺側のもっとも傾いている位置で 45.2 度である。上屋根の切妻形状と下屋根の曲面形状はべつ物なので、取り合い部で一致せず隙間が生じるが、そこは適切に連結している。

ジオメトリーを決定しているパラメータは、① 下屋根下端の平面形状、② 下屋根上端（上屋根）の平面形状、そして下屋根斜材の長さ（中心線の長さ）16 m、である。

① は長辺 103 438 mm、短辺 76 163 mm の楕円形だが、実際の施工を考えて楕円形状を 4 種類の円弧で近似している。これらの円弧を整数分割したときの間隔がほぼ 1 100 mm となるようにしている。

② は長辺 91 900 mm、短辺 53 600 mm の楕円形だが、円弧近似すると①の円弧とずれが生じ必ずしも単純にはならないので、楕円形状のままとしている。

下屋根斜材の中心線は、その鉛直投影が①の円弧の法線となるような向きとしている。

3.2 上 屋 根

上屋根は切妻屋根形状を活かし、シンプルな平面鉄骨トラスを架けている。トラスの間隔は、集成材 6 本分（外周楕円上の長さが約 5.4 m となるような間隔）である。しかし一方のトラスだとスパンの違いによって集成材に掛かる荷重が大きく異なるので、集成材に掛かる荷重をできるだけ均等にするようにキールトラスを設け、中央部の荷重を両端部に分配するようにしている（図 - 6）。トラスの高さは最大で 9.5 m になる。

水平力に対して上屋根は剛床の役割を果たす。そのため上屋根の上面と下面にはアングル断面の水平ブレースを配置して剛性を確保している。

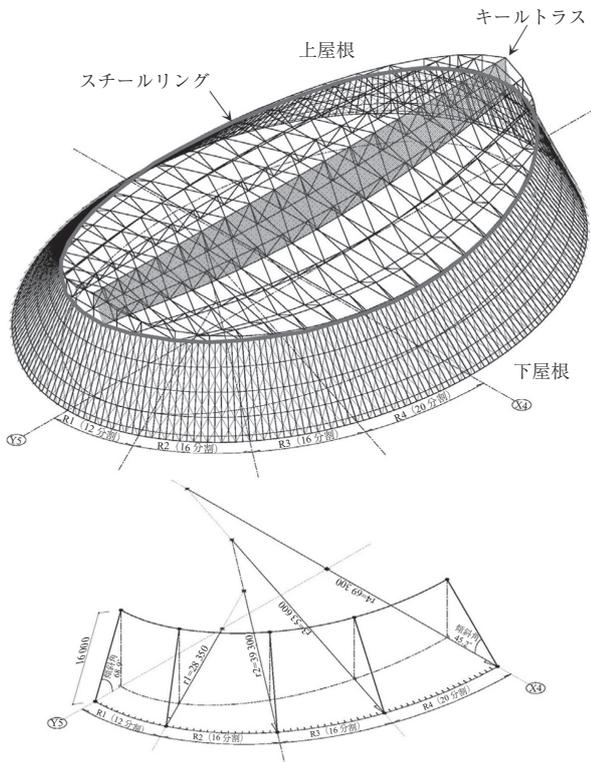


図 - 6 屋根構造芯のジオメトリー

3.3 スチールリング

上屋根と下屋根の境界部は、トラスの荷重を集成材に均等に伝達するために重要な部材であり、スチールリングと



写真 - 3 キールトラスの内部



写真 - 4 スチールリング建方

呼んでいる。スチールリングの断面形状は、3次元曲線上に配置されるということと、後述する下屋根ブレースの軸力による偏心曲げをねじり曲げとして伝達する必要性から 500φ の鋼管としている。

3.4 下 屋 根

下屋根は 256 本の集成材が屋根の鉛直荷重を支え、集成材の背中にラグスクリューでベースプレートを固定し、それに連結して網目状に配置したアングル断面の鉄骨ブレースが水平力を負担している。また鉄骨ブレースを水平方向に拘束するため、角形鋼管二丁合せの水平繋ぎ材を配置している。集成材同士の間にはコマ材と呼ぶ木製の横つなぎ



写真 - 5 下屋根ブレース

材を設け、木斜材の座屈止めとしている。

3.5 防耐火計画

一定時間性能を維持するだけで良ければ燃え代分断面を大きくする燃え代設計で対処できるが、耐火要件があると木材に着火しないようにするか、あるいは着火した炎が自然鎮火しなければならない。

本建物では図 - 7 に示す屋根に降った雨や雪を受ける為の RC 水平リングを室内側に延長して、観客席で火事が発生しても炎の到達高さとなる 5.5 m までは炎をブロックして集成材に着火しないようにしている。



写真 - 6 防炎装置としての RC 水平リング

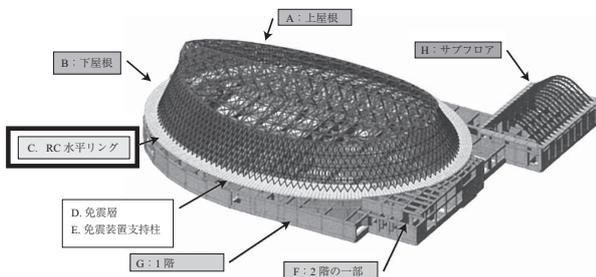


図 - 7 構造の要となる RC 水平リング

3.6 免震構造

東海地震に備えて静岡県では地震地域係数を 1.2 としているので、用途係数 1.25 と合すると通常の 1.5 倍の地震力に抵抗することが求められた。

屋根の集成材に無理をさせないために免震構造を採用している。厳しいコストとエキスパンションの取り易さを考慮して RC 水平リングレベルで中間階柱頭免震とした。免震装置は RC 柱 32 本の上に錫プラグ入り積層ゴム 1 基と天然ゴム系積層ゴム 1 基の 2 基ずつ、合計 64 基を配置している。錫プラグは鉛プラグに比べて降伏応力度が約 2 倍と高く、免震装置の設置位置が限られている場合に有利である。

3.7 RC 水平リング

前述のように RC 水平リングは庇、防火装置としての機能に加えて、免震層の基壇として十分な剛性と強度が要求される。さらに集成材が内側に傾いているため屋根の自重



写真 - 7 柱頭の免震装置

によって RC 水平リングを外に押し開こうとする力（スラスト）が常時発生する。

これらの要求性能を満足するために、幅 9 m、厚み 400 ~ 650 mm の現場打ち RC とし、12 × 12.7 φ ストランドケーブル 4 ~ 6 セットを水平に配置してプレストレスを導入することにより、常時スラストに抵抗するとともにコンクリートのひび割れを抑制した。

4. 解析

4.1 振動解析

通常の建物と異なり屋根の複雑な振動性状が予想されたため、図 - 8 に示す部材レベルの全体解析モデルを用いて振動解析を行った。集成材の背中に鉄骨を固定するために用いたラグスクリーンのせん断バネや、軸力を均等に配分するために集成材の上下端に設けた土台のバネ、引きボルトのバネ等を細かくモデル化している。

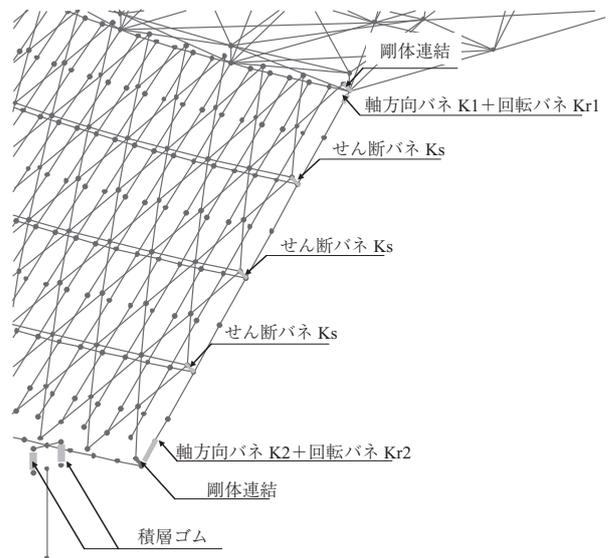


図 - 8 解析モデル

風荷重に対して錫プラグ入り積層ゴムのクリープを考慮した残留変形を 50 mm 以下とするために、地震で決まるよりも多くの免震装置を配置した。図 - 9 は各地震波に対する層せん断力係数であるが、下屋根の最大応答値が

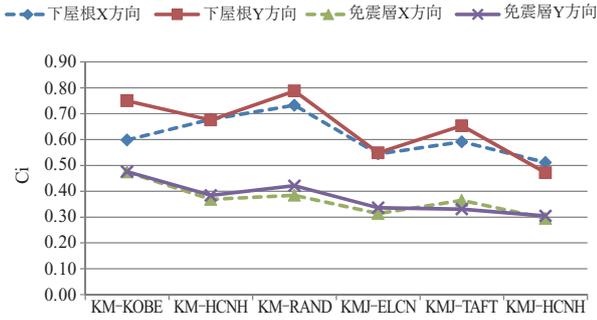


図 - 9 免震層と下屋根の層せん断力係数

0.8程度と一般的な免震建物に比べて免震効果が小さい。それでも非免震の弾性応答に比べると応答が1/5程度である。

4.2 RC水平リングの応力解析

屋根の自重によるスラストでRC水平リングの長辺には外側を引張、内側を圧縮とするモーメント、短辺にはその反対向きのモーメントが作用し、RC水平リングの全体に1000～2000kNのフープテンションが作用する。図-10はRC水平リングを線材置換した解析モデルを上からみたときのモーメント図である。

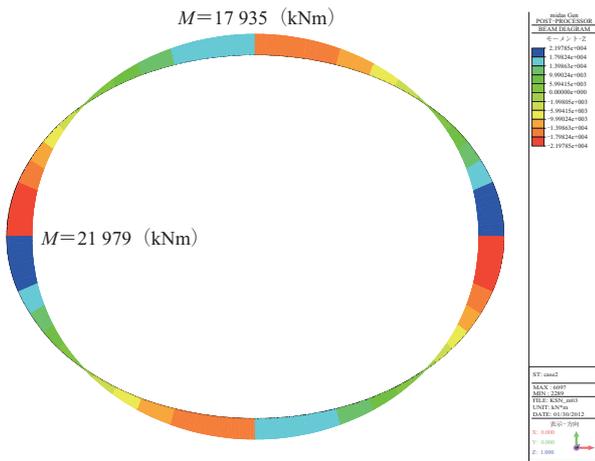


図 - 10 スラストによる水平曲げ

これらスラストによる応力に対して常時でフルプレストレス状態となるようにした。全体で8箇所の緊張端用ブロックを設け、ケーブル長は28～48mとしている。常時荷重による鉛直方向の曲げや地震力による応力等、上記のスラストによる応力以外はすべてRCとして負担している。

またRC水平リングの横座屈に対する安定性を検討するために座屈解析を行い、設計荷重に対して100倍以上の安全率があり、屋根の全体座屈に対しても10倍程度安全率が高いことを確認した。

4.3 RC水平リングの長期変形解析

RC水平リングは、ポストテンションのプレストレス荷重、ジャッキダウン時の屋根の自重によるスラスト、コンクリートのクリープ・乾燥収縮等、さまざまな荷重を受けるので、それらの荷重による長期的な変形が過大にならな

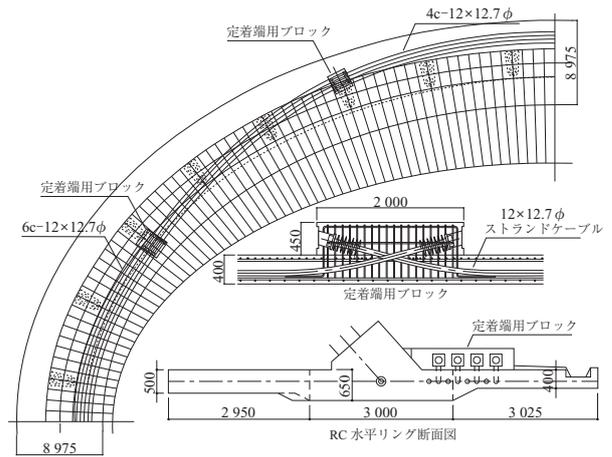
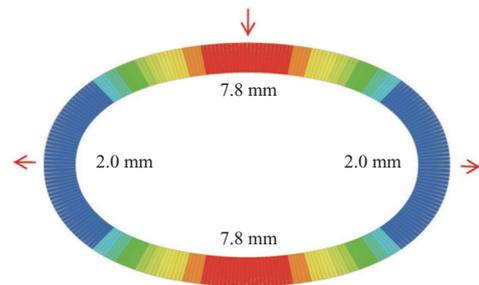
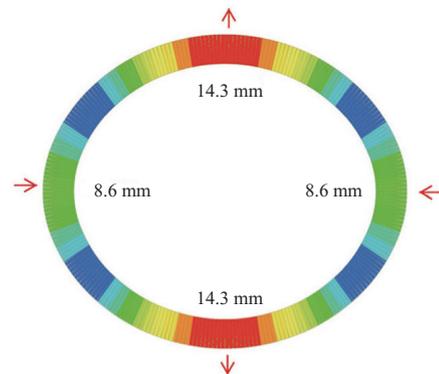


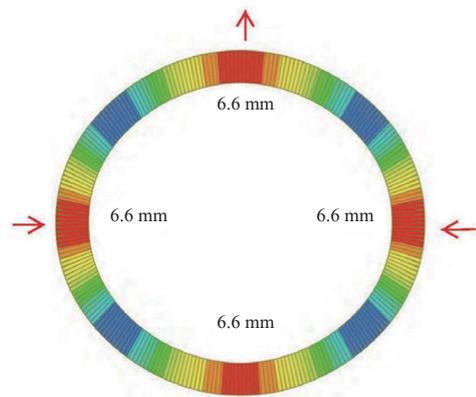
図 - 11 ケーブル配置と詳細図



(a) プレストレスによる変形



(b) 屋根自重による変形



(c) (a)の変形+(b)の変形

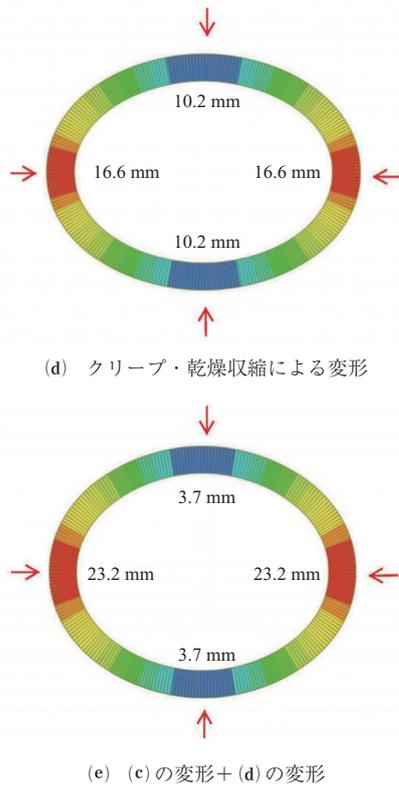


図 - 12 RC 水平リングの長期変形

いことを解析により確認した。図 - 12 にそれらの結果を示す。

解析モデルは図 - 7 に示す全体解析モデルを用いている。ポストテンション緊張時とジャッキダウン時には下屋根のブレース取付けが完了していないので解析モデルの方が実際よりも堅めの設定になる。また一方で、錫プラグ入り積層ゴム支承が荷重を受けると最初は錫プラグの剛性で変形が小さいが数時間で錫プラグがクリープして変形が大きくなる。クリープによる変形増大を考慮して、ここでは錫プラグの剛性を考慮せず積層ゴムだけの剛性とした。

プレストレスによる変形は、ストランドケーブルの中心軸からの偏心を考慮して緊張力を与えた(図 - 12(a))。図 - 12(b)は、屋根自重から受けるスラストによる変形である。図 - 12(c)は(a)と(b)の合成であり、ジャッキダウン時の変形を想定している。

プレストレスによるクリープは以下のように設定した。ストランドケーブルの緊張はコンクリート打設4週後とする。日本建築学会「プレストレスコンクリート設計施工規準・同解説」を参考に、打設4週後のクリープ係数 $\phi_4 = 1.2$ 、またクリープ係数最終値 $\phi_n = 3.0$ より、プレストレスによるクリープ係数は $\phi_n - 4 = 3.0 - 1.2 = 1.8$ 。したがってストランドケーブル緊張時変形の1.8倍をプレストレスによるクリープ変形とした。

屋根自重のスラストによるクリープは以下のように設定した。コンクリート打設8週後にスラストが作用するとする。プレストレスの場合と同様に、打設8週後のクリープ係数 $\phi_8 = 1.7$ 、クリープ係数最終値 $\phi_n = 3.0$ より、屋根

自重のスラストによるクリープ係数は $\phi_n - 8 = 3.0 - 1.7 = 1.3$ 。したがって屋根自重のスラストによる変形の1.3倍をスラストによるクリープ変形とした。

乾燥収縮による変形は以下のように設定した。免震装置の変形に着目したときのRC水平リングの乾燥収縮量は、RC水平リングの乾燥収縮の絶対量から2階スラブの乾燥収縮量を差し引いた量で表される。2階スラブ打設からRC水平リング打設まで12週とする。Whitneyの法則により、12週間の乾燥収縮歪みを求めればよい。打設12週後のクリープ係数 $\phi_{12} = 2.0$ 、クリープ係数最終値 $\phi_n = 3.0$ 、乾燥収縮歪み最終値 $S_n = 3.75 \times 10^{-4}$ より、12週間の乾燥収縮歪みは $S_{12} = S_n(\phi_{12}/\phi_n) = 2.5 \times 10^{-4}$ 、したがって 2.5×10^{-4} を乾燥収縮歪みとし、乾燥収縮による変形を求めた。

以上の合計を図 - 12(d)に示す。図 - 12(e)は(c)と(d)の合成であり、RC水平リングの長期変形を示す。後述するように予測値と実測値はおおむね一致していた。

5. 施 工

ここでは施工についての概略を説明したのち、とくにPC工事について具体的に報告する。免震装置受け柱以降の工程は概略以下のとおりである。

- ① 仮設架台に免震装置を設置したのち、柱配筋し、柱コンクリートを打設。免震装置のアンカープレートとコンクリートの間にグラウトを充填。
- ② 免震装置の上にRC水平リングの型枠を施工し、鉄筋とケーブルシース管を設置。コンクリートを打設し、RC水平リングを形成する。
- ③ 仮設バント上にスチールリングを組み立てる。スチールリングが今後の定規になる。
- ④ 地組した鉄骨トラスをスチールリングに取り付ける。2分割して揚重するトラスは仮設内部バントで支持する。全面にパイプトラスの作業用足場を設ける。
- ⑤ 地組で集成材の上下端に鉄骨ブラケットを取り付け、揚重してスチールリングとRC水平リングに固定する。集成材の背中に取り付け鉄骨ブレースはジャッキダウンが終わるまで荷重がかからないように仮ボルトにしておく。
- ⑥ RC水平リングのケーブルを緊張し、シース管にグラウトを充填する。
- ⑦ 下屋根脚部とRC水平リングの間にコンクリートを打



写真 - 8 木材の建方

設し、両者を一体化する。

- ⑧ 仮設ペントをジャッキダウンし、仮設ペントで受けていた上屋根の荷重を下屋根に移行する。

5.1 PC 工事の施工計画

PC 工事の専門業者は黒沢建設、定着工法は KTB 工法である。ストランドケーブルは、12 × 12.7φ4 ~ 6 セットを使用している。RC 水平リングの設計基準強度は Fc36 とし、緊張作業は設計基準強度以上のコンクリート強度を確認してから行うものとした。

ストランドケーブルは図 - 11 のように平面的に位置が変化している。下屋根の脚部はアンカー鉄筋が密集し、しかもその角度が少しずつ変化しているため、その部分を通過するときに鉄筋と干渉しないようにケーブルシースを通すのは至難の業である。ここでは BIM で鉄筋とシースをモデル化し、干渉状況を確認しながら検討を行った。

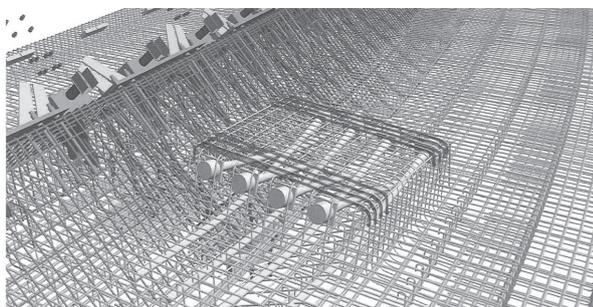


図 - 13 BIM を用いた検討

スラブ下端を配筋したのちにケーブルシース管を配管し、その後スラブ上端筋、下屋根脚部のアンカー筋を配筋した。緊張端ブロックの補強はとくに重要なので入念に配筋を行った。



写真 - 9 緊張端ブロックのケーブルシースと鉄筋

RC 水平リングのコンクリートの打設は 4 工区に分け、なるべく差が出ないように連日打設した。緊張端ブロックは打ち分けせずに、スラブ部分と一体打設とした。

図 - 14 に緊張順序を示す。図の長方形は定着端のブロックを表し、番号は緊張の順番を表す。2 台のジャッキを使って両引きし、アンバランスにならないようにさらに 2 台のジャッキを使って対称の位置で同時に緊張を行った。



写真 - 10 緊張作業

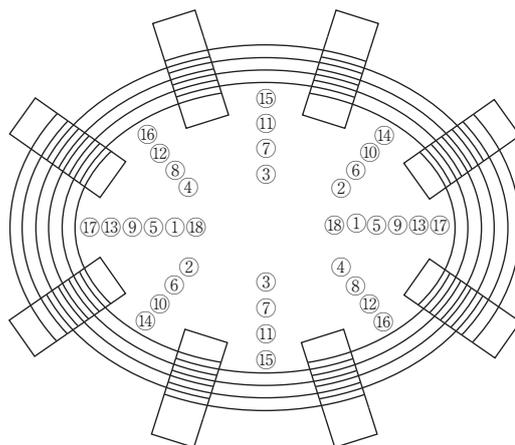


図 - 14 緊張順序

1 セットずつ順次、反時計回りに緊張作業を進めた。

降伏荷重の 85 % である 1 591 kN を導入荷重とした。ケーブルの伸びは 193 ~ 320 mm、摩擦係数は 0.25 ~ 0.4 であり、許容値以内であった。

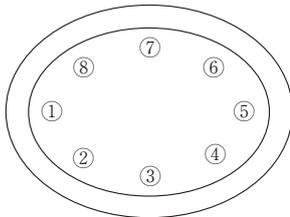
5.2 RC 水平リングの変形の実測

緊張後の RC 水平リングの変形を約半年間実測した結果

表 - 1 RC 水平リングの変形実測

		測定位置								
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	
測定 No.	1	X	1	9	8	6	5	0	1	2
		Y	-1	1	8	6	-3	4	-8	-7
2	X	-8	7	5	2	5	-5	-1	-4	
	Y	0	0	9	8	-2	3	-10	6	
3	X	-9	5	7	7	7	-5	5	-4	
	Y	0	-5	8	7	-6	5	-11	11	
4	X	2	5	2	0	-5	-4	4	3	
	Y	-9	6	-7	0	2	6	2	7	
5	X	1	6	3	0	-1	-9	-2	-4	
	Y	7	-8	-7	1	3	6	0	0	
6	X	9	11	6	0	-3	-9	-1	1	
	Y	4	-4	-2	3	-4	11	5	-4	
7	X	9	7	1	-5	-11	-10	-2	4	
	Y	-3	3	-3	3	2	7	4	-1	
8	X	17	13	3	-6	-12	-12	2	8	
	Y	7	3	-2	2	3	7	7	0	

測定 No.	経過日数
1	緊張直後
2	緊張後 10 日
3	緊張後 23 日
4	緊張後 30 日 (仮設ベントジャッキダウン)
5	緊張後 48 日
6	緊張後 3 ヶ月
7	緊張後 4 ヶ月
8	緊張後 6 ヶ月



測定位置のケーブルプラン

を表 - 1 に示す。測定位置①～⑧はケーブルプランに示した位置である。測定 No. は緊張後の経過日数で 1～8 に分けてある。各測定 No. について絶対座標系での X 方向変形を上段に、Y 方向変形を下段に示している。

直径約 100 m の構造体なので、測定誤差もあり、温度によってもミリ単位で日々変化する。それくらいの変動幅をもつものとするれば 4.3 で示した予測値とほぼ一致している。

6. おわりに

新しい構造形態により大規模な木造建築が実現した。その背景には木材をできるだけシンプルに使うという思想がある。集成材の外側の下屋根ブレースで水平力を負担し、免震構造で屋根の水平力を低減している。この構造の要は RC 水平リングであり、プレストレストコンクリートの技術が大きな役割を果たしている。スラストによる変形と逆向きの変形を与え、長期的な変形を数センチに抑えることができた。この建築が旧体育館と同じように長く多くの人に愛されて使われることを願っている。



写真 - 11 竣工時外観

写真・図提供 1) 内藤廣建築設計事務所

【2015 年 6 月 8 日受付】



刊行物案内

PC 構造物高耐久化ガイドライン

2015 年 4 月

定 価 4,800 円 / 送料 300 円

会員特価 4,000 円 / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会