

大スパンの屋根架構におけるハイブリッド構造の施工報告 Glulam Timber-Steel Composite Structure applied to Long-Spanned Roof

富田 修*

Osamu Tomita

福岡 敏行*

Toshiyuki Fukuma

山本 仁*

Hitoshi Yamamoto

要 約

本工事は、房総半島のほぼ中央部に位置する長生郡長南町の町立長南中学校における体育館棟の建て替え工事である。この計画は、ぬくもりの伝わる軽快な空間を実現することを設計主旨として、千葉県産杉材を用いて小屋組架構を構成することで設計が進められた。

木材を用いて空間構造を構成する場合、大断面集成材を用いたアーチ架構が採用される場合が多いが、この場合、部材単体のボリュームが大きく、意匠的にも単調になるために、かえって軽快感を損なうことになる。また、コスト的に割高となる場合も多い。

そこで本工事では、主として応力を負担する鋼板に座屈拘束を行う集成材を組み合わせた「木・鋼ハイブリッド部材」を張弦梁と組み合わせる架構工法を採用した。これにより、集成木材の断面を大幅に小さくすることが可能となり軽快で暖かみのある空間を構成することができた(写真-1)。

本報では、木・鋼ハイブリッド構造を用いた張弦梁架構の製作・施工について報告する。

目 次

- § 1. 木・鋼ハイブリッド部材を用いた張弦梁架構
- § 2. 部材の製作と品質管理
- § 3. 現場施工
- § 4. おわりに

§ 1. 木・鋼ハイブリッド部材を用いた張弦梁架構

1-1 概要

今回の計画では、屋根の架構形式に木・鋼ハイブリッド部材を使用した張弦梁構造を採用した(図-1、2)。屋根の張弦梁架構詳細を、図-3～図-7に示し、部材の基本構成と張弦梁構造の特徴を下記にまとめる。

木・鋼ハイブリッド部材は主として応力を負担する鋼板を集成材で両サイドから挟み込み、シアリング・連結ボルトを用いて一体化したハイブリッド部材である。これにより外観は木材でありながら、集成材単体に比べて小断面化が可能となる。

張弦梁構造は、曲げ剛性を持つ部材とテンション材が束材を介して結合された構造形式であり、低ライズの屋根形態が実現可能となり、下部構造の水平反力も低減される。張弦梁構造とハイブリッド部材を組み合わせることにより、より一層の小断面化が図られている。

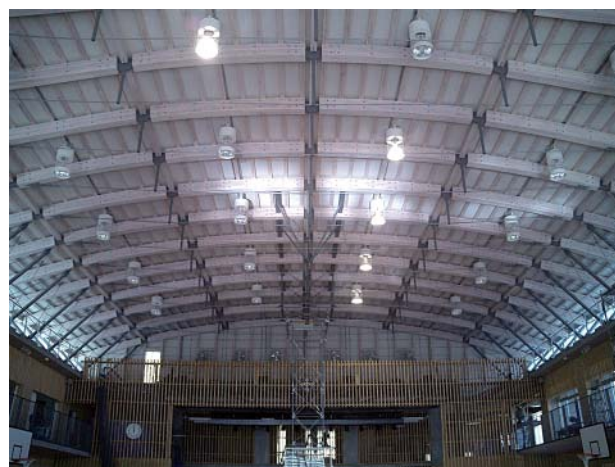


写真-1 内部屋根架構完成写真

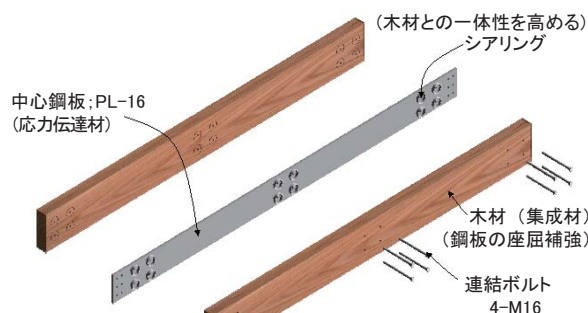


図-1 ハイブリッド部材基本構成

*東関東(支)長南中学校(出)

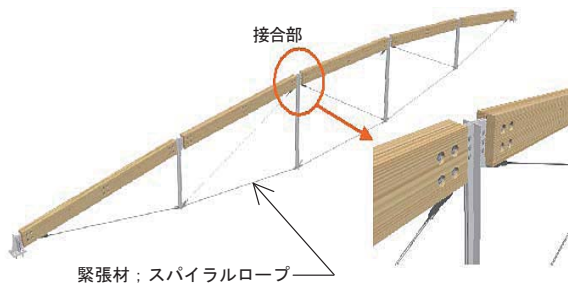


図-2 ハイブリッド張弦梁構造イメージ

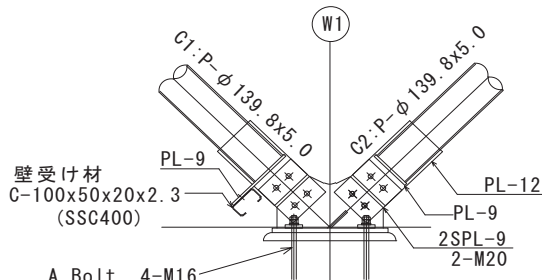


図-3 両端の柱脚部詳細図

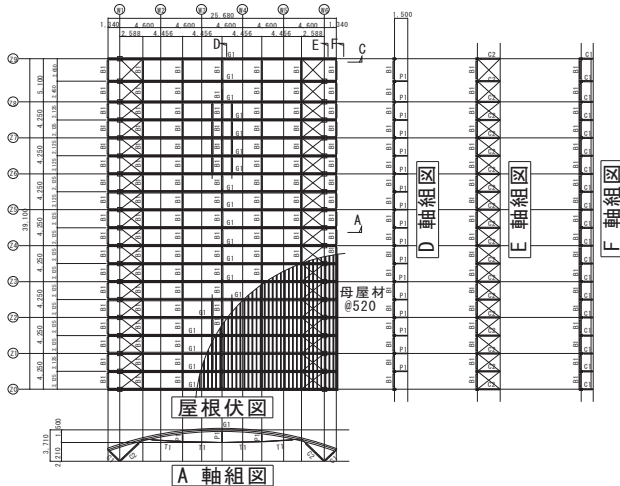


図-4 屋根伏図・軸組図

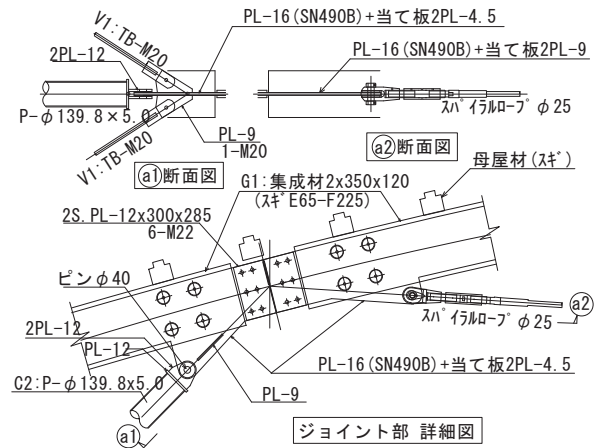


図-6 主フレームのジョイント部詳細図

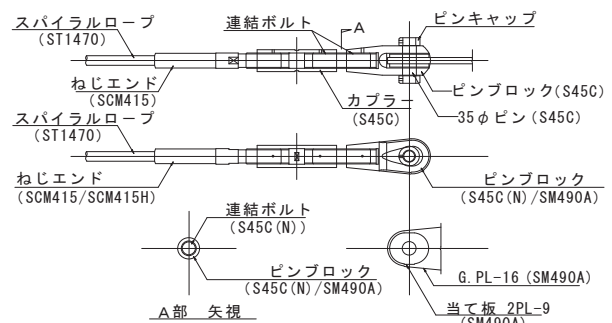
スパイラルロープ φ25用ピンジョイント (T1) 詳細図
大臣認定品

図-7 テンション材端部の詳細図

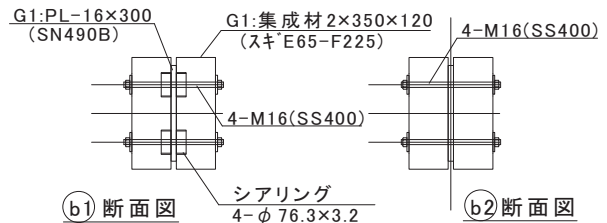


図-8 ハイブリッド部材の断面構成

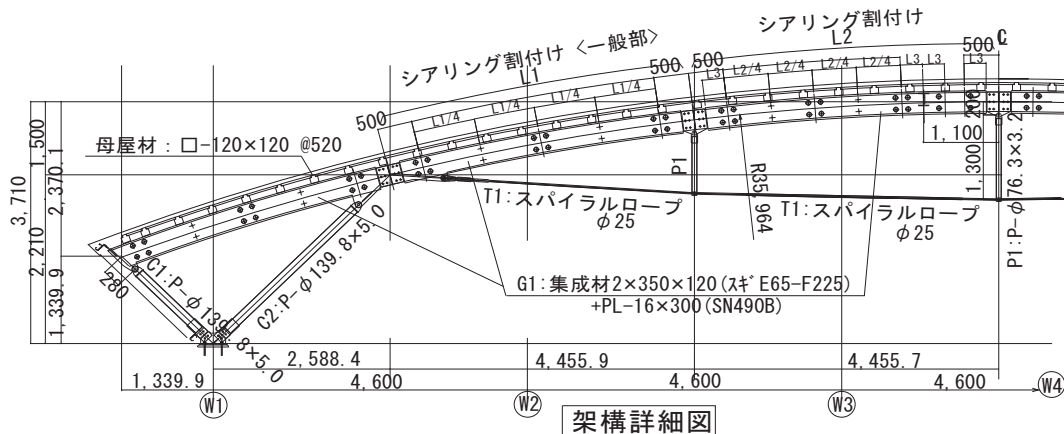


図-5 主フレームの断面詳細図

1-2 ハイブリッド部材の特徴

ハイブリッド部材の特徴を以下に示す。

(1) 環境に優しい

木材（集成材）は国産杉材を基本としている。

(2) 斬新な構造

鋼材の強さと木材の軽快性を組み合わせた新しい構造システムであり、応力は主として中心鋼板が負担し、木材は座屈補剛の役割を果たす。

(3) 安定した構造的な性能

部材応力のほとんどを鋼材が負担するため、木材特有のクリープ変形や接合部剛性の不足といった心配が無い。

(4) 部材断面の小型化

引張は鉄骨で、圧縮・曲げは複合的に負担する。

また、接合部は鉄骨部材同士の接合になるため、木造のように接合部で断面サイズが決まることはない。

(5) 優れた意匠性

鋼材の大部分は木材で隠れてしまうため、木材独特の暖かみのある空間が得られる。

(6) 施工性

取り合いは鉄骨同士であり、鉄骨造と同様の施工性を有する。

(7) テンション構造との融合

テンション材と組み合わせることで、合理的な張弦梁架構が可能となる。

1-3 ハイブリッド部材の構成

ハイブリッド部材は、図-8に示す通り、中心鋼板（PL-16×300：SN490B）にシアリング（P-76.3 φ×3.2）を両面から溶接し、さらに両側から集成材の座彫りした部分にはめ込み、通しボルト（M16：亜鉛メッキ品）にて締付することで一体化している。

1-4 大断面集成材との比較

本物件の屋根は、ハイブリッド部材を用いた張弦梁架構を採用しているが、大断面集成材の大梁として計画した場合、スパン 23 m の矩形断面の単純梁とすると□-900×300（スギ E65-F225）となる（図-9 参照）。

この場合、大梁集成材のボリューム比（ハイブリッド材：集成材）は 1.0：3.2 程度、概算コスト比は 1.0：1.2 程度（モックアップ製作費用および材料試験費は含まず）となる。

1-5 施工時解析

張弦梁架構の建方に先立ち、建方手順を反映した施工時解析を行った（図-10 参照）。

検討した荷重ケースおよび解析結果を表-1に示す。

① 主フレーム建方（ジャッキダウン後）時

② 母屋建方後

③ 屋根（ステンレス鋼板、厚 0.4）積載後

解析の結果、屋根積載後にスパン中央で、最大 17 mm

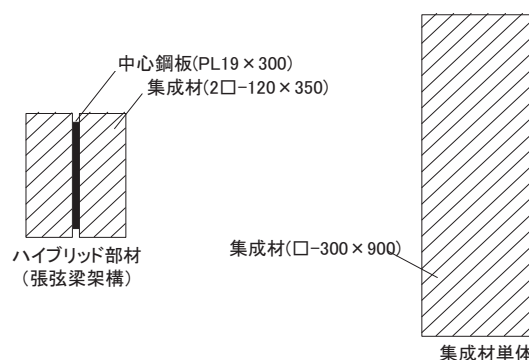


図-9 断面比較

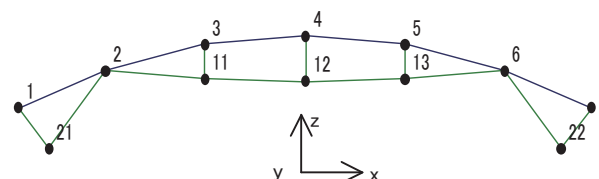


図-10 解析モデル図

表-1 解析結果

① 主フレーム建方時の変位				
荷重ケース	節点	Dx (mm)	Dy (mm)	Dz (mm)
構造体	1	-0.50	0.00	-0.51
	2	-0.86	0.00	0.64
	3	-0.08	0.00	-4.19
	4	0.00	0.00	-7.38
② 母屋建方後の変位				
荷重ケース	節点	Dx (mm)	Dy (mm)	Dz (mm)
+ 母屋	1	-0.76	0.00	-0.76
	2	-1.30	0.00	0.96
	3	-0.11	0.00	-6.29
	4	0.00	0.00	-11.07
③ 屋根（ステンレス鋼板、厚 0.4）積載後の変位				
荷重ケース	節点	Dx (mm)	Dy (mm)	Dz (mm)
+ 屋根	1	-1.16	0.00	-1.17
	2	-1.99	0.00	1.47
	3	-0.18	0.00	-9.65
	4	0.00	0.00	-16.98

程度の鉛直変位が確認された。数値解析に対して、実構造物の変形は小さくなることが多いことから、最大の鉛直変位を解析結果の7割程度の12 mmと予測した。

§2. 部材の製作と品質管理

ハイブリッド部材の製作は、鉄骨専門の加工工場〔株〕矢嶋・長野工場〕にて鉄骨製作・加工された中心鋼材を、集成材専門加工工場〔藤寿産業(株)〕に搬入し、そこで木・鋼一体加工されハイブリッド化が行われた。

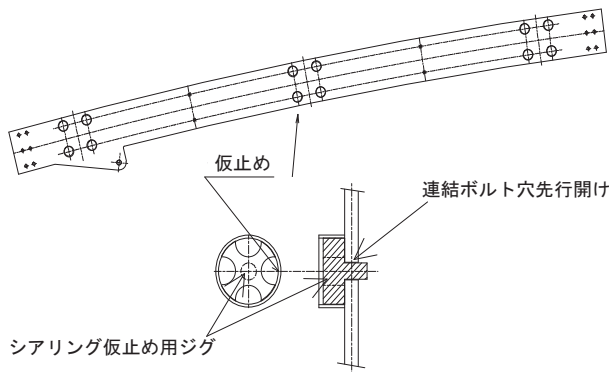


図-11 中心鋼材加工図

2-1 鉄骨の品質と加工

(1) 鋼材の品質

主フレーム構成鋼材を以下に示す。

- ・上弦材の中心鋼材：PL-16×300 (SN490B)
- ・上弦材端部の柱材：P-139.8φ×5.0 (STK400)
- ・上弦材とテンション材を繋ぐ束材：
P-76.3φ×3.2 (STK400)
- ・ブレース：TB-M20 (SS400)
- ・テンション材：スパイラルロープ 25φ (ST1470)

(2) 中心鋼材の加工

ハイブリッド部材の中心鋼材 1 本につき両面に 24 個 (一部 32 個) のシアリングが溶接され、これにより集成材と連結しているため、鋼板と集成材に高い加工精度が要求される。このため曲面となっている中心鋼材の高い寸法精度を確保するため、レーザー切断機を用いて鋼板の切断および孔開けを行い、特別に専用ジグを製作しシアリングの仮溶接を行った (図-11)。また、溶接の入熱による変形が考えられたため、シアリングの溶接前後の形状測定を行い、熱影響による変形が管理基準値 (e≦4 mm) 以下であることも確認した。

2-2 構造用集成材の品質と加工

構造用集成材の加工工程と品質管理を図-13 に示す。

(1) 構造用集成材の品質

構造用集成材の品質を以下に示す (平成 15 年農林水産省告示第 235 号「構造用集成材の日本農林規格」以下「JAS」という)。

- ① 樹種：千葉県産杉 (KD 材 ※1 参照)
- ② 等級：異等級構成/対称構成 (杉 E65-F225) (表-2, 図-12 を参照)
- ③ 材面の品質：2 種 (プレーナー仕上げ)
- ④ ラミナーの縦継ぎ：フィンガージョイントとし、そのフィンガーの長さは 18 mm 以上とする。
- ⑤ 使用環境：使用環境 1 とする (※2 参照)。
レゾルシノール系樹脂接着剤を使用する (表-6)。
- ⑥ 含水率：ラミナーの含水率は 12% 以下とする。
- ⑦ 木材保護塗料：加工した構造用集成材には、木材保護塗料 (表-5) を工場 1 回塗りとする。

杉			
E65-F225		断面 120×350 の場合	
最外層	L 80	h/16 以上	最外層: 21.88 mm 以上
外 層	L 70	h/16 以上	外 層: 21.88 mm 以上
中間層	L 60	h/8 未満	中間層: 43.76 mm 未満
内 層	L 50	h/4 以下	内 層: 175.0 mm 以下
中間層	L 60	h/8 未満	
外 層	L 70	h/16 以上	
最外層	L 80	h/16 以上	

(異等級構成/対称構成)

図-12 ラミナーの等級構成

表-2 機械区分によるラミナーの等級

事 項	基 準
強度性能	1. 等級区分機によって測定された曲げヤング係数が表-3 の左欄に掲げる機械区分による等級に応じ、それぞれ同表の右欄に掲げる数値以上であること。 2. MSR ひき板 (対称異等級構成集成材の最外層ひき板および外層用ひき板) にあつては、上記 1 に加えて次の①および②の要件を満たすこと。 ① 曲げ C 試験の結果、試験片の曲げ強さの平均値が表-4 の平均値の欄に掲げる数値以上であること。 ② 曲げ C 試験の結果、試験片の 95% 以上の曲げ強さが、表-4 の下限値の欄に掲げる数値以上であること。
腐れ	無いこと。
割れ	目立たない程度の微少な割れであること
変色	目立たない程度であること。
逆目	目立たない程度であること。
材の両端部の品質 (MSR ひき板に限る)	等級区分機による測定のできない両端部においては、節、穴等の強度を低減させる欠点の相当径比が、等級区分機による測定を行った中央部分にある欠点の相当径比より大きくないこと。
その他の欠点	極めて軽微であること。

注) 相当径比とは、欠点を木口面に投影した時の面積のその木口面に対する割合をいう。

- ※1 KD 材：人工乾燥材
- ※2 使用環境 1：構造用集成材の含水率が長期間断続的にまたは断続的に 19% を越える環境、直接外気にさらされる環境、太陽熱等により長期間断続的に高温になる環境、構造物の火災時でも高温の接着性能を要求される環境その他の構造物の耐力部材として、接着剤の耐水性、耐候性または耐熱性について高度な性能が要求される使用環境をいう (日本合板検査会「構造用集成材の日本農林規格平成 15 年改正」農林水産省告示第 235 号)。

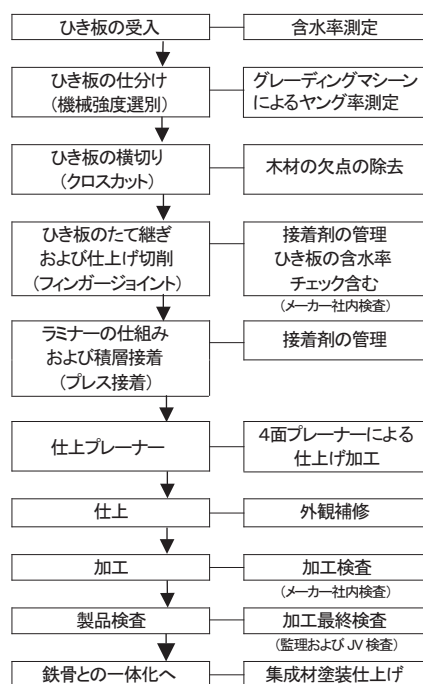


図-13 構造用集成材の製造工程

表-3 曲げヤング係数の適合基準

機械区分による等級	曲げヤング係数 ($\times 10^3 \text{ N/mm}^2$)
L 80	8.0
L 70	7.0
L 60	6.0
L 50	5.0

表-4 曲げ強さの適合基準

ひき板の機械区分 による等級	曲げ強さ (MPa または N/mm^2)	
	平均値	下限値
L80	36.0	27.0
L70	33.0	25.0

表-5 木材保護塗料の仕様

品名	メーカー	塗布量の目安
カルデット	リボス社	約 $15 \text{ m}^2/\text{l}$

表-6 接着剤の仕様

メーカー 品名	用途	品番	種類	混合比
(株)オーシカ・ ディアノール	フィンガー用 接着剤	D-40	主剤	100
		D用硬化剤	硬化剤	15
	積層用 接着剤	D-300	主剤	100
		30 M	硬化	40

(2) 構造用集成材の品質管理のポイント

構造用集成材の品質管理のポイントを以下に示す。

- ・異等級対称構成集成材 (杉 E65-F255) のひき板受け入れ時の含水率の測定の実施

- ・ひき板仕分け時の曲げヤング係数・含水率 (12%以下) の確認
- ・雨がかり防止のための全面シート養生

(3) 構造用集成材の加工

集成材の座彫り加工の精度を確保することを目的として、鉄骨加工工場にて鋼製テンプレートを作成し、座彫り加工を行う際の基準とした。座彫りの孔径は、シアリング径+1mmとした。座彫り後は、孔位置の測定を行い許容誤差 ($\pm 2 \text{ mm}$) 以内であることを確認した。

2-3 ハイブリッド部材の加工

鋼板と集成材の一体化の作業においては集成材に割れ・かけが生じないように注意を払った。また、綴りボルトによりハイブリッド材を一体化しているため、工場出荷時にボルトのゆるみがないことを確認した。

2-4 スパイラルロープ加工

スパイラルロープの加工方法を以下に示す。

- (1) 材料は JIS G 3506 SWRH62-82・JIS G 3502 SWRS 62-82 の線材またはこれらと同等以上の線材を使用する。
- (2) 素線は(1)に示す線材に冷間加工を施した後、溶融亜鉛めっきを行う。最外層素線に接続部はなく、伸線加工前の溶接による接続部も含んではならない。
- (3) ロープは全長を通じて径、より長さなどが均一になるようにより合わせる。
- (4) ロープのよりによる構造伸びを除去するために、260 kN (破断荷重の約 51%) のプレストレッチング荷重を 30 分以上保持し、これを 2 回繰り返すものとする。
- (5) 測長は全長を測定する。使用するスチールテープは JIS 1 級品とし、100 N (10.2 kg) の張力を与え、長さ 100 m の物を使用する。
- (6) スパイラルロープは、実際にかかる張力 29.4 kN により 7 mm 伸びるため、工場にて 29.4 kN のプレテンションを行い、7 mm 短く切断し、現場には巻いた状態で搬入する。

切断・端末加工 (シングルロック加工) 工程を以下に示す (テンション材の構成と性能は表-7, 8 参照)。

- ① 必要長さにグラインダーカッターで切断する。
- ② 端末金具は SCM415 もしくは SCM415H とし、防食処理は溶融亜鉛めっきとする。
- ③ 所定の金具に挿入して、その外周部をプレスし、ロープと金具を締結した後、全長を測定する。圧縮加工誤差は片端につき $\pm 10 \text{ mm}$ とする。

§3. 現場施工

3-1 内部支保工足場

建方に先立ち行った施工時解析により得られたジャッ

表一七 テンション材の構成

部品名	種別	規格
ピンブロック	丸鋼	JIS G 4051 S45 C
ピン・カプラー		
連結ボルト		
スパイラルロープ 端末金具	線材	JIS G 4105 SCM415
スパイラルロープ		JIS G 3506 SWRH62-82 JIS G 3502 SWRS62-82 またはこれらと同等以上の材料

表一八 テンション材の性能

品目	材質	降伏点	引張強さ	伸び
ピンブロック カプラー 連結ボルト	S45CN	$\geq 345 \text{ N/mm}^2$	$\geq 570 \text{ N/mm}^2$	$\geq 20\%$
ピン	S45CH	$\geq 490 \text{ N/mm}^2$	$\geq 690 \text{ N/mm}^2$	$\geq 17\%$
スパイラル ロープ	ST1470	$\geq 1080 \text{ N/mm}^2$	$\geq 1470 \text{ N/mm}^2$	$\geq 3\%$

キダウン点の反力と屋根架構の変形挙動を解析し、ジャッキダウン時に支点となる内部支保工足場と接合部を計画した(図一14)。また、屋根架構の重量が軽いため、通常の大掛かりなジャッキアップの必要はない。なお内部足場は、仕上げ用の足場を組立てた後、全面水平塞ぎし隙間をなくしたものである。

3-2 地 組

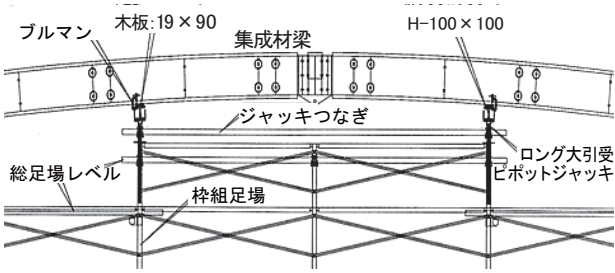
敷き鉄板上に地組ヤードを設置し、地組および塗装することにより、作業性が悪い棚足場上部での作業を少なくした。これにより、地組と残りの躯体工事施工が同時進行できるとともに、建方期間が短縮された。

地組の架台は、通常 H 型鋼を使用するが、今回は重量が軽いため、枠組足場を使用して架台を組み立てた。この地組ヤードは引き続き、内部の木仕上材および外部ルーバーのアスロック材の塗装ヤードとしても利用できた。

3-3 建 方

建方については一般的な鉄骨建方と基本的には同じである。建方作業は、建方用重機に 50t ラフタークレーン、建方合番用に 25t ラフタークレーンを使用して実施した。建方中のレベル・建入・位置は通常の鉄骨精度管理基準値を採用した。

ハイブリッド部材は、鉄骨部材に傷つきやすい仕上材が一体になっているため、建方中の損傷を排除することが一番のポイントとなる。そこで、吊ワイヤーの代わりにナイロンスリングを使用し、部材に接触する吊受材にも養生をし、さらに部材を支点に下ろす際に通常よりもゆっくりと慎重にすることで、既設部材との接触の可能性を低減した。特に集成材部分の損傷には留意し、その結果、この部分の損傷を 0 にすることができた。



図一14 支保工足場スパン方向計画図

3-4 スパイラルロープの設置とジャッキダウン

全ての架設が完了した後、接合部のレベルを調整し、本締めを行い、スパイラルロープをセットする。その後、スパイラルロープに 29.4 N の張力を与え、端部の通から順次ジャッキダウンする。

今回は、張弦梁架構のため、全ての支点を同時にジャッキダウンするのではなく、通り毎にジャッキダウンしていくことができた。

施工手順を守ることにより、ジャッキダウン後、屋根材を載せた変形量が 12 mm となり、設計時の解析結果から求められた予測値とほぼ同一の実績結果が得られた。

§ 4. おわりに

本工事で採用した木・鋼ハイブリッド工法は、主に鉄骨鋼板の座屈を防止するために、鋼板を集成材で両側から挟み込む構造形式であり、部材応力のほとんどは鋼板が負担している。このため主要接合部は HTB を使用した通常の鉄骨造と同じ納まりとなり、構造用集成材同士を接合させるためのドリフトピンは不要となる。また、引張力は全て鉄骨で負担する工法であることから木材特有のクリープ変形についても検討不要となる。この工法を採用することにより、過去の施工事例のように大断面の構造用集成材を使用する場合と異なり、モックアップや製作、試験等を行って部材寸法を検討する必要も無くなるというメリットがあった。

また、木・鋼ハイブリッド工法は、各部材の接合部が鉄骨表しであり、集成材と中心鋼材の連結ボルト頭も露出していることから、意匠的にも完全な構造用集成材による架構工法とは異なるが、テンション材を組み合わせることで部材断面をより小さくすることが可能となっている。さらに、材料が非常に軽量なことから製作作業能率も良く、施工においてもジャッキアップや支保工等の仮設設備が簡易になり、組立作業も容易になる等、製作・施工面においてもメリットがあった。

このように本工事を通じて、今回採用した木・鋼ハイブリッド構造は、通常の体育館程度のスパンを有する架構には非常に有効な工法であると実感した。

最後に、本工事において数多くの御指導、御協力を頂いた関係各位に厚く御礼を申し上げます。