

木・鋼ハイブリッド構造部材の開発と実用化

～自然素材(集成材)と鋼材でできた構造部材～

Development and Realization of the Timber-steel hybrid members
 ～Structural members which are made of natural materials (glulam timber) and steel～

松岡 祐一* Yuichi MATSUOKA
 建築・鋼構造事業部
 鋼構造ソリューション部
 鉄構設計室長

富本 淳 Atsushi TOMIMOTO
 技術開発第一研究所
 構造商品開発室
 マネジャー

永山 浩三 Kozo NAGAYAMA
 建築・鋼構造事業部
 鋼構造ソリューション部
 鉄構設計室 マネジャー

平林 竜次 Ryuji HIRABAYASHI
 建築・鋼構造事業部
 建築プロジェクト部建築鉄構室
 プロジェクトグループ マネジャー

杉山 佳孝 Yoshitaka SUGIYAMA
 建築・鋼構造事業部
 建築プロジェクト部建築鉄構室
 プロジェクトグループ

抄 録

木・鋼ハイブリッド構造部材は、鋼板を集成材ではさみ込み、摩擦コネクタと呼ぶ特殊な接合方法により鋼板と集成材を一体化することにより、鋼材の強さと木材の軽快さを併せ持たせた新しい構造部材である。その開発過程においては、摩擦コネクタ接合部の要素実験を行い、続いて部材の圧縮・曲げ実験で部材性能を確認した。それら実験結果と、鋼構造と木質構造の各種設計規準を参照しながら、実際の設計で用いられる部材の設計式を確立した。木鋼ハイブリッド部材を用いた構造は既に4件の実績があり、1件が施工中である(2012年9月現在)。

Abstract

The timber-steel hybrid member is a new structural member which has both the strength of steel and the lightness of wood. On that member, a steel plate is sandwiched between two glulam timbers, and the steel plate and the glulam timbers are integrated by the special connecting method called friction connector. On the development process, the element tests of the friction connector were conducted, and then, the structural performance of the member was confirmed by compression tests and flexure tests for the member. Referring the results of the tests and the standard for structural design both of steel structure and timber structure, the practical design formula of the hybrid member was established. Four buildings used the timber-steel hybrid member were already constructed, and now, one building is under construction. (as of September 2012)

1 緒言

木材は古代より重要な構造材として、世界の土木建築分野の様々な構造物に使われてきた。中でも森林資源の豊富な日本は、現存する世界最古の木造建築といわれる法隆寺や、木造軸組建築としては世界最大の東大寺大仏殿など、住宅などの小規模建築だけでなく大規模建築物にまで幅広く木材を使う、世界に冠たる木造文化を持つ国であった。しかし、鉄とコンクリートで代表される西洋の近代建築が導入された明治以降は、木造の大規模建築が造られることは少なくなり、世界で最も厳しいといわれる建築基準法の防耐火規定にも阻まれて、戦後しばらくの間、大規模木造建築は散発的に造られるにすぎなかった。

木材は軽くて強いという、構造材としては非常に優れた性能を持っているが、鋼材やコンクリートのような工業化されて安定した品質を持つ材料に比べるとそのバラツキが大きい。精緻な構造計算のもとに設計される現代建築において、計算上の取扱いの難しい材料として、設計者から敬遠されてきたのも、大規模木造建築が衰退した一因であろう。そうした中、エンジニアリングウッドと呼ばれ安定した品質が確保された大断面集成材が普及してきたことや、2000年の建築基準法の改正により防耐火規定が緩和され、大規模建築への木材の適用の道が開けたこと、更にはCO₂排出削減に代表される世界的な環境問題への取り組みなどから、木材を建築構造材として積極的に使おうという気運が高まり、21世紀に入って以降はいくつかの大規模木造建築が建設されている(図1, 2)。

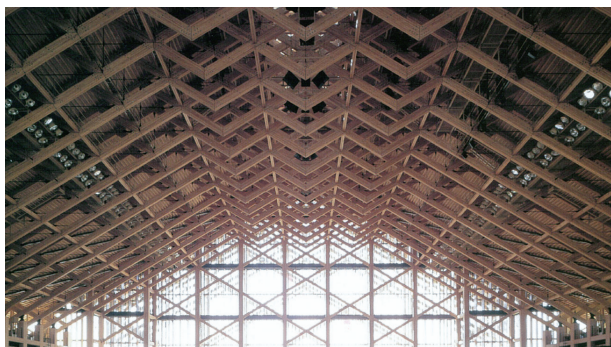


図1 愛媛県武道館(写真)
Fig. 1 Ehime Prefectural Budou-kan (Photo)



図2 木の花ドーム(写真)
Fig. 2 Konohana-dome (Photo)

こうした流れの中で木材を活用した当社独自の構造部材として開発されたのが木・鋼ハイブリッド構造部材である。本稿では、この木・鋼ハイブリッド部材について、その開発の経緯と具体的な設計・製作・施工の方法について述べ、更に実際の建物に適用された事例について紹介する。

2 開発の経緯

2.1 木・鋼ハイブリッド構造部材の特徴と構造用集成材

木・鋼ハイブリッド構造部材(以下ハイブリッド部材と称す)は、鋼板を木材ではさみ込み、長さ方向に所定の間隔でボルト接合し一体化する複合構造形式の構造部材である。図3にハイブリッド部材の組立図を示す。鋼板は木材より小さく、構造材の外観のほとんどが木材なので、木造建築物と変わらぬ質感を得られることや、引張応力に対しては鋼板が抵抗し、圧縮と曲げには複合材として抵抗するため、木材のみで設計した場合に比べて部材断面を小さくできることが特徴である。

空間構造向けハイブリッド部材に用いる木材は、大断面となることが多いので構造用集成材を採用している。構造用集成材とは丸太から切り出された20~40mm程度の厚さのひき板(ラミナと称す)の繊維方向が平行となるよう接着剤で貼り合わせた木質材料であり、JAS規格に準拠し製造される工業製品である。表1に鋼板と異等級対称構成構造用集成材(以下集成材と称す)の比重、圧縮・引張・曲げの

長期許容応力度とそれぞれの比強度についてまとめた。集成材の応力度 - 歪関係を鋼板と比較すると、図4に示す通り強度、ヤング率ともに大幅に低いことは周知の事実であるが、比強度で比較してみると曲げ比強度は集成材の方が高いことが分かる。すなわち、鉛直荷重による曲げモーメントによって部材断面が決まる大梁等に集成材を用いると、鉄骨造に比べて軽い構造体の設計が可能になる。

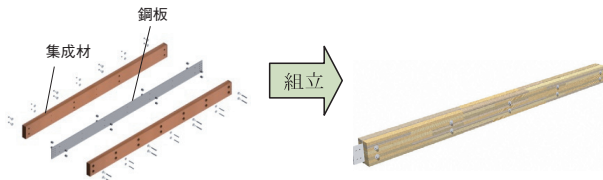


図3 木・鋼ハイブリッド構造部材
Fig. 3 Timber - Steel hybrid structural member

表1 鋼材と集成材の比強度
Table 1 Specific strength of Steel and Timber

材料	種類 (規格)	比重	長期許容応力度 [N/mm ²]			圧縮 比強度	対鋼 材比	引張 比強度	対鋼 材比	曲げ 比強度	対鋼 材比
			圧縮	引張	曲げ						
集成材	ベイマツ (E120F330)	0.50	9.2	8.1	11.8	18	0.93	16	0.82	24	1.19
	スギ (E65F225)	0.35	6.2	5.3	8.1	18	0.89	15	0.76	23	1.17
鋼材	SS400	7.85	156	156	156	20	-	20	-	20	-

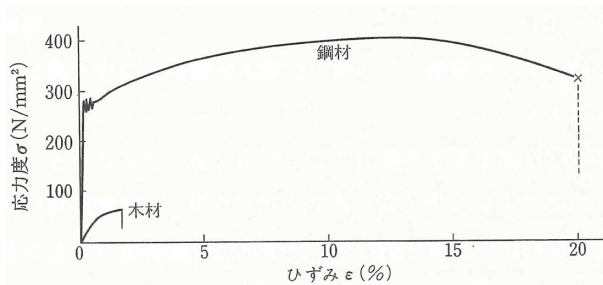


図4 鋼材と木材の応力度 - 歪関係
Fig. 4 Stress-Strain relation of Steel and Timber

2.2 鋼板と集成材の一体化方法

ハイブリッド部材の開発における最大の課題は、いかにして鋼板と集成材を容易にかつ確実に一体化し、その複合効果を高めるかにある。在来の接合方法としては、ボルト接合・ドリフトピン接合・シアリング接合等が標準化されており、開発当初はボルトとシアリングを併用することで一体化を試みた(図5(a)参照)。

しかし、この方法では鋼管を輪切りにしたシアリングの溶接による鋼板の歪みで、集成材のシアリン

グ孔とシアリングの間に無視できない精度誤差が生じ、シアリング孔の径を大きくすることによってクリアランスを確保した誤差吸収機構を設けざるをえない。シアリングと集成材の間の応力は支圧によって伝達されるため、このクリアランスによる接合部剛性の低下は、集成材と鋼板の複合効果を低減させることになる。

その解決手段として、鉄骨構造では一般的な高力ボルト摩擦接合を活用した方法を考案した(図5(b)参照)。この方法では、φ50mmの丸鋼に孔明け加工をしたコネクタを集成材の孔に挿入する。この時、集成材の孔径をコネクタ外径より0.5mm小さくすることでコネクタを集成材に圧入し一体性を高める。コネクタを所定の数だけ圧入した集成材で鋼板をはさみ、コネクタ部を高力ボルトで摩擦接合し、鋼板と集成材を一体化させる。

コネクタは集成材に隙間無く圧入されているため、この部分でガタによる変形が生じることはない。また、コネクタおよび鋼板のボルト孔径は、通常の高力ボルト接合同様にボルト径 + 2mmとしているため、この部分で精度誤差を吸収しながら、摩擦による滑りのない接合が可能となる。このように鋼板と集成材の接合部での変形を小さくし、その一体性を高めることによって、シアリング方式に比べて優れた複合効果を得ることができる。

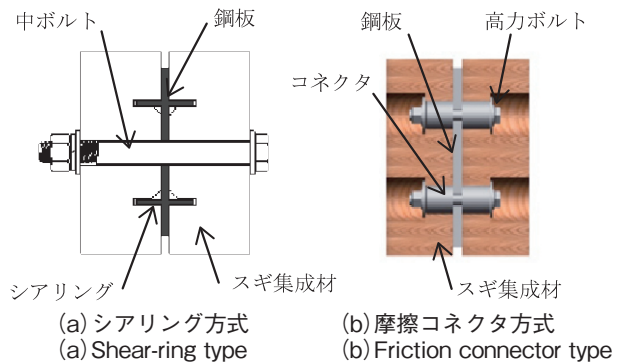


図5 接合部の詳細図
Fig. 5 Connection details

2.3 ハイブリッド部材の構造性能

集成材と鋼板の接合部における構造性能を確認するため、接合部せん断実験(以下、要素実験)を行った。実験パラメータはコネクタの寸法・間隔・数・配列と集成材の厚みであり、最大せん断力と剛性、破壊挙動を確認し、接合部仕様の最適化を図った。

図6に加力状況, 図7に摩擦コネクタ方式のせん断力-変位関係図を示す。二つの鋼板を摩擦コネクタ方式で二つの集成材と接合し, 上側の鋼板を鉛直下向き(図6中下向き矢印)に加力して反力床に支持される下側の鋼板で抵抗する実験である。図7は集成材の厚さ120mm, コネクタを加力直交方向に150mmの間隔で2個配置した試験体3体の結果である。縦軸はロードセルで計測した荷重を1/2倍した摩擦面1面あたりのせん断力を表す。横軸はコネクタ局部的変位を表し, 主として集成材へのめり込みによる変形量を表している。この実験結果より, コネクタ摩擦面の滑りは無く, せん断剛性, 最大耐力ともに安定した履歴特性を示すことが分かった。更に, 木材特有の脆性的な破壊も見られず, 摩擦コネクタ方式はバラツキの小さい安定した性能を有する接合部であることが確認された。

要素実験に引き続き, 摩擦コネクタ方式によるハイブリッド部材の軸圧縮実験を行った。図8に軸圧縮実験における軸圧縮耐力時の変形性状, 図9に荷重-軸変位関係図を示す。図中 K_{w+s} は集成材と鋼板を完全に一体とした場合の理論線で, 試験体は理論線と同程度の軸圧縮剛性を有することが分かる。最大耐力は, 部材弱軸回りの座屈荷重であり, 座屈後の面外変位が大きくなると集成材が曲げ破壊する。

ハイブリッド部材は梁としての活用が多いことから, 等曲げ実験も実施した。図10に実験状況, 図11に実験結果を示す。試験体は鋼板の曲げ降伏(緑応力降伏)荷重(M_{ys}), 鋼板全断面降伏荷重(M_{ps})を超えて, 集成材の端部が割裂して最大耐力を呈した。また, 図11にはシアリング方式の試験体の結果も示しており, 接合方式の違いによる複合効果の差が明らかである。

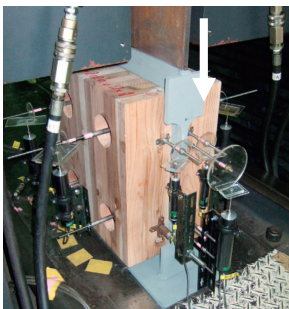


図6 要素実験(写真)
Fig. 6 Element Test (Photo)

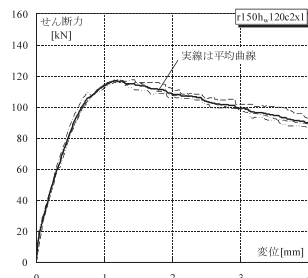


図7 せん断力-変位関係
Fig. 7 Shear - Displacement Relationships

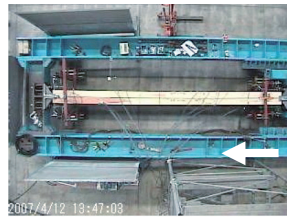


図8 軸圧縮実験(写真)
Fig. 8 Axial Compression Test (Photo)

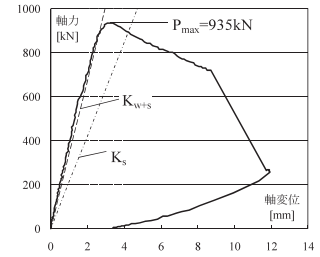


図9 荷重-軸変位関係
Fig. 9 Load - Displacement Relationships

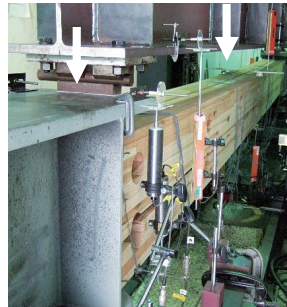


図10 等曲げ実験(写真)
Fig. 10 Flexure Test (Photo)

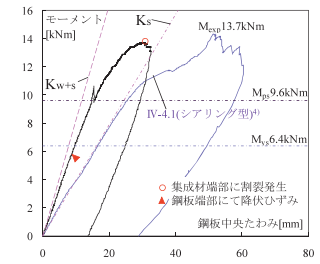


図11 曲げ-たわみ関係
Fig. 11 Moment - Deflection Relationships

3 木・鋼ハイブリッド部材の設計方法

3.1 設計概要

図12に摩擦接合型コネクタを用いたハイブリッド部材の構成を示す。中心鋼板の両側にスギの集成材を配し, 鋼板と集成材をコネクタを介して一体化させている。スギ集成材は鋼板弱軸方向の座屈補剛の役割を担うとともに, 鋼材と木材のヤング係数比を考慮した等価断面積比に応じて軸力を負担する。部材端部は鋼板のみで, 他部材とは高力ボルト摩擦接合により接合される。

ハイブリッド部材の構造特性は, 座屈に関わる軸圧縮性能やコネクタの耐力など, 主に集成材の性能によって規定される構造特性と, 鋼板の曲げ降伏耐力などの鋼材の性能によって規定される構造特性に分けられる。現行の建築基準法による許容応力度設計では, 木材と鋼材で長期荷重と短期荷重に対する安全率の考え方が異なるため, 負担する応力が木材と鋼材のいずれの構造性能によるものかを判断し, 負担応力毎に適切な安全率を考慮した部材の許容耐力を設定する。

木材と鋼材は各々のヤング係数比を考慮した等価断面積比に応じて応力を負担する。実際の設計で用

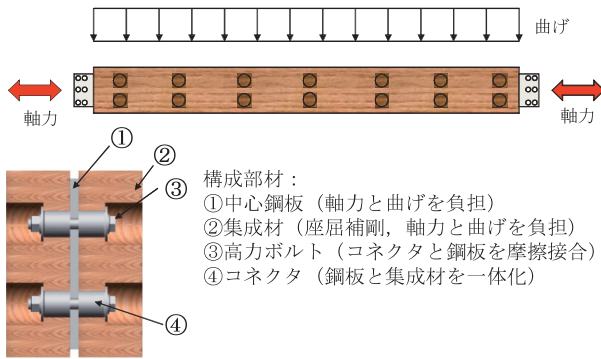


図12 木・鋼ハイブリッド部材の構成
Fig. 12 Constitution of Timber-steel hybrid member

いられる部材では、スギ集成材の負担割合30%~40%に対して、鋼材が60%~70%の負担となる。鋼板からスギ集成材への応力伝達は端部のコネクタによって行われるため、部材耐力の30%~40%を伝達するコネクタが部材端部にあればよいことになる。一方、部材の圧縮耐力は、集成材の弱軸方向の曲げ剛性によって座屈耐力が決まる場合、同断面の集成材と同等となる。即ち、本部材は同サイズの大断面集成材と比べ、部材耐力は同じであるが、接合部での鋼から木への伝達応力が小さく、一般の木質構造に比べ接合部を簡略化することが可能であることを特徴としている。

以下の各項目では、図13により定義した部材断面の座標系を用いる。

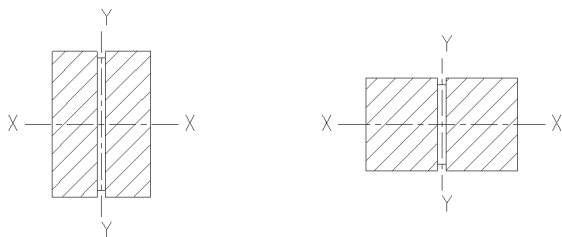


図13 ハイブリッド部材断面の座標系
Fig. 13 Coordinates for hybrid-member section

3.2 引張材の設計

ハイブリッド部材に作用する引張応力は、中心鋼板が全て負担するものとし、「日本建築学会 鋼構造設計規準」(以下、鋼構造規準)に則り引張耐力 T_h を(1)式により求める。

$$T_h = A_{se} \cdot f_{ts} \quad (1)$$

T_h : ハイブリッド部材の引張耐力
 A_{se} : 中心鋼板の有効断面積

f_{ts} : 鋼板の許容引張応力度

3.3 圧縮材の設計

ここではY軸回りの座屈耐力について述べる。

ハイブリッド部材の圧縮耐力はその細長比によって決まり、集成材の曲げ剛性に依存するY軸回りの等価細長比 λ を(2)式により定義する。

$$\lambda = \frac{l_k}{i_{ysw}} \quad (2)$$

ここに、

$$i_{ysw} = \sqrt{\frac{I_{yw}}{A_{sw}}}, \quad A_{sw} = nA_s + A_w$$

l_k : ハイブリッド部材の座屈長さ
 i_{ysw} : ハイブリッド部材Y軸回りの等価断面二次半径
 I_{yw} : 集成材を一体とみなしたときのY軸回りの断面二次モーメント
 A_{sw} : ハイブリッド部材の等価断面積
 $n = \frac{E_s}{E_w}$: 集成材に対する鋼材のヤング係数比
 E_s : 中心鋼板のヤング係数
 E_w : 集成材のヤング係数

「日本建築学会 木質構造設計規準」(以下、木質規準)では、圧縮材の細長比 λ に応じて座屈低減係数 η を(3)式で算出している。

$$\left. \begin{aligned} \lambda \leq 30 & \quad \eta = 1 \\ 30 < \lambda \leq 100 & \quad \eta = 1.3 - 0.01\lambda \\ 100 < \lambda & \quad \eta = \frac{3000}{\lambda^2} \end{aligned} \right\} (3)$$

細長比が100以上の場合の座屈低減係数は、集成材のオイラー座屈から決まっているので、ハイブリッド部材の座屈低減係数もこれに準じて計算する。細長比が100以下の場合には、いわゆる塑性座屈に相当する座屈低減係数となっているが、ハイブリッド部材でこの座屈低減係数を適用すると、後述するコネクタの負担せん断力が過大となるので、部材耐力がコネクタ耐力によって決定するようにするのが良い。即ち、ハイブリッド部材の細長比が100以下の場合でも、 $\eta = 100$ の座屈低減係数で部材耐力を設定し、それを上回るようにコネクタ配置の設計をする。以上より、ハイブリッド部材の圧縮耐力 C_{yh} を(4)式により求める。

$$C_{yh} = A_{sw} \cdot \eta \cdot f_{cw} \quad (4)$$

ここに、

C_{yh} : ハイブリッド部材の Y 軸回りの圧縮耐力

A_{sw} : ハイブリッド部材の等価断面積

η : 材の細長比に応じて決まる座屈低減係数

$$\eta = \begin{cases} 3000/\lambda^2 (\lambda \geq 100) \\ 0.30 (\lambda < 100) \end{cases}$$

f_{cw} : 集成材の許容圧縮応力度

3.4 曲げ材の設計

ここでは X 軸回りの曲げについて考える。木質規準によると、横座屈細長比 C_s が 10 以下であれば、横座屈補正係数 C_b が 1 となり、横座屈は生じない。よって、ハイブリッド部材の C_s が 10 以下となるように設計する。横座屈細長比 C_s は、座屈長さ l_e と材せい h 、材幅の関係から(5)式で求められる。

$$C_s = \sqrt{\frac{l_e h}{b^2}} \quad (5)$$

ここに、

l_e : 有効座屈長さ

h : 材せい

b : 材幅

ハイブリッド部材はヤング係数の異なる材料の複合部材であるから、単純に部材の外径から材せいと材幅を求めるわけにはいかない。そこで、(6)式に従い鋼材と木材のヤング係数比を考慮した等価材せい h' と等価材幅 b' を求め、(5)式に適用する。

$$\begin{cases} \frac{b' h'^3}{12} = n I_{xs} + I_{xw} \\ \frac{h' b'^3}{12} = I_{yw} \end{cases} \quad (6)$$

ここに、

h', b' : ハイブリッド部材の等価材せい及び等価材幅

I_{xs} : 中心鋼板 X 軸回りの断面二次モーメント

I_{xw} : 集成材 X 軸回りの断面二次モーメント

I_{yw} : 集成材を一体とみなしたときの Y 軸回りの断面二次モーメント

また、有効座屈長さ l_e は、木質規準の等分布荷重の有効座屈長さに準じて、振れ止め材間距離 l_0 の 1.9 倍とする。以上より、横座屈細長比 C_s は(7)式を満足すればハイブリッド部材は横座屈を生じることなく、その曲げ耐力は鋼材または集成材の許容曲げ耐力によって規定されることになる。

$$C_s = \sqrt{\frac{1.9 l_0 h'}{b^2}} \leq 10 \quad (7)$$

ハイブリッド部材の曲げモーメントは、部材端部では鋼材のみが負担する。一方、中央部は鋼材と木材の曲げ剛性比で曲げモーメントを負担するが、コネクタがハイブリッド部材全長の両端及び 1/2 点に配置されたときの変形の適合条件から、木材の負担曲げモーメントは剛性比で負担する曲げモーメントの 1.5 倍と考える。これより、ハイブリッド部材の曲げ耐力を、(8)式で求める。すなわち、端部鋼板及び中央部木材から求められる曲げ耐力の小さい方とする。

$$M_{xh} = \min \left\{ \begin{array}{l} Z_{xs} \cdot f_{bs} \\ \frac{1}{1.5} Z_{xw} \cdot f_{bxw} \frac{n \cdot I_{xs} + I_{xw}}{I_{xw}} \end{array} \right. \quad (8)$$

ここに、

M_{xh} : ハイブリッド部材の X 軸回りの許容曲げモーメント

Z_{xs} : 中心鋼板の X 軸回りの断面係数

f_{bs} : 鋼材の X 軸回りの許容曲げ応力度

Z_{xw} : 集成材の X 軸回りの断面係数

f_{bxw} : 集成材の X 軸回りの許容曲げ応力度

3.5 摩擦接合型コネクタの設計

摩擦接合型コネクタの耐力は、木質規準 602.1 の「曲げ降伏型接合具を用いた接合」に準じて(9)式で算出する。式中の値は、集成材の等級を E65-F225 とした場合の繊維方向の値である。この耐力は、2.3 節で示した実験値に対し十分な安全率を有している。

$$p_0 = \min \left\{ \begin{array}{l} {}_j K_0 \cdot p_y \\ {}_j K_0 \cdot {}_j K_f \cdot p_{u0} \end{array} \right. = \begin{cases} 17.8 \text{ kN (長期)} \\ 32.4 \text{ kN (短期)} \end{cases} \quad (9)$$

ここに、

p_0 : コネクタの基準許容せん断耐力

${}_j K_0 = 1/2$: 基準化係数

${}_j p_y$: コネクタの降伏せん断耐力

${}_j K_f = 2/3$: 安全係数

p_{u0} : コネクタの終局せん断耐力

端部コネクタに生じるせん断力はハイブリッド部材に生じる圧縮力と曲げモーメントを等価断面積比及び等価断面二次モーメント比に応じて分配した集

成材負担応力として算出する。

4 製作・施工方法

木・鋼ハイブリッド部材の製作・施工には、鉄骨には見られないいくつかの特徴がある。それを以下に記す。

4.1 製作期間の把握

鉄骨の場合、設計図書に指定された材料を鋼材メーカーに発注し製造するため、製作期間はある程度の調整が可能である。一方で集成材の場合、原木を山から伐採する期間(秋～冬)が決まっており、その伐採された原木を市場から買いとるため、時期によっては必要数量の確保が不可能となる場合がある。当社では、市場価格・材料調達時期・製作期間・納期等を、事前に十分調査したうえで、製作に着手している。

4.2 図面の整合性

ハイブリッド部材の工場製作は、鉄骨を先行して製作した後に集成材工場に搬入し、鉄骨と集成材とを一体化する工程となる。このため、鉄骨における集成材取付け用の孔や下地に不具合が発生した場合、集成材との組立作業に支障を来すこととなる。集成材工場には鉄骨加工設備がないため、場合によっては鉄骨工場に持ち帰ることとなり、その補修に多大の時間とコストを要することとなる。

これに対し当社では、工作図を一元管理することで図面の不整合による不具合の発生を防いでいる。工作図の作成手順は、まず鉄骨の図面を作成し、その図面を使用して、鉄骨と集成材との組立に必要な鉄骨の孔位置及び下地の有無の指示を行う。それをもとに、孔位置及び下地を反映させた鉄骨詳細図を作成する。更にその鉄骨詳細図を利用して、集成材の加工図を作成する。そうすることによって鉄骨詳細図と集成材加工図との不整合の発生を未然に防いでいる。

4.3 意匠材としての取扱い

ハイブリッド部材の集成材は構造材でありながら意匠材でもあるため、製作に着手する前に、納まり

方法や加工形状等の見えがかりの確認を、設計者・発注者に行う必要がある。見えがかりの確認にはモックアップを作成する方法があるが、時間とコストの関係上、現実的ではない。そのため、製作前に通常の現寸検査とは別に3次元CADを用いてモデル(図14)を作成し、細かな納まり形状を確認しながら製作に取りかかるようにしている。

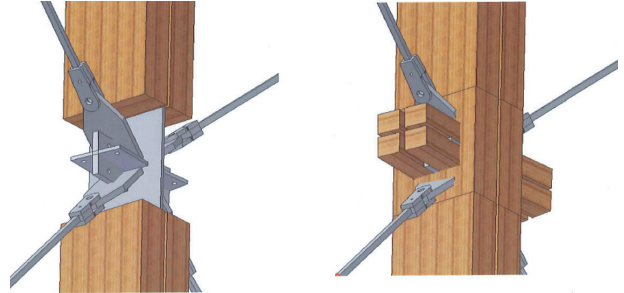


図14 3次元CADモデルによる納まり検討例
Fig. 14 Example of details by 3D CAD modeling

4.4 鉄骨の現場補修

ハイブリッド部材では、鉄骨の取合いにおいて不具合が発生した場合も、集成材に熱を加えてはならないため、組立状態のままでは溶接・溶断等の補修をすることができない。この場合、ハイブリッド部材から集成材を取り外して補修をすることとなるため、現場での補修が困難で、工場に持ち帰っての補修となることが多い。ハイブリッド部材では、特に図面精度を上げて品質管理を十分に行い、不具合が無いようにしている。

4.5 施工上の特徴と留意点

一般的な集成材の施工は、木造の技術がベースとなるウッドタッチが基本で、取合い方法は木と金物のボルト接合となって製作精度が施工精度に直接つながり、従来の鉄骨業者では施工することができなかった。しかし、ハイブリッド部材の建方は、継手方法が鉄骨造と同じであるため、鉄骨と同様の取扱いが可能となった。ただし、仕上げ材と同じ扱いとなるので、キズがつかないように十分な配慮をしている。

施工上の留意点としては、以下の6項目があげられる。

- ①輸送時、ラッシングには必ず角あてをあてて、シートにて雨養生を行う。

- ②荷下し時には、ナイロンスリングを使用して巻くか、端部鉄骨部を利用して揚重し、集成材に傷が付かないよう配慮する(図15)。
- ③仮置き時は必ずバタ角+養生材を使用し、直置きはしない(図15)。雨天時には雨養生としてブルーシートによる養生を行う。
- ④建方時もナイロンスリングを使用し、ワイヤーによる傷・汚れの発生を防ぐ。集成材には吊りピース等の仮設材を付けることができないので、吊り治具等を考慮する。
- ⑤大スパン構造でベント等にて仮受けを行う場合、鉄骨部で受けるようにする(図16)。但し荷重によっては適切な養生を行って木部で受けることもある。
- ⑥集成材表面は保護塗料を塗布しているが、施工中の汚れ(埃・雨だれ・接触等)によるアクが発生するため、施工完了時にクリーニングを行う。



図15 荷下しと仮置(写真)
Fig. 15 Unloading and temporary installation (Photo)



図16 鉄骨仮受(写真)
Fig. 16 Temporary support of steel member (Photo)

5 施工事例

木・鋼ハイブリッド部材が適用された建築は既に4件の実績があり、1件が施工中である(2012年9月現在)。本節ではその内の1件を施工事例として紹介する。

5.1 物件概要

2011年に新潟県において、半径13.25mの円筒型で最高高さが14.8mのアトリウムの構造を施工した。架構図を図17に示す。屋根架構は、曲げ圧縮材となる上弦材をハイブリッド部材(PL-16×300+2□-155×350)とし、引張材となる下弦材にPC鋼棒φ26を配置したテンション構造で大スパン架構を実現している。壁面架構は、柱材にハイブリッド部材(PL-16×400+2□-155×450)を配置し、壁面内

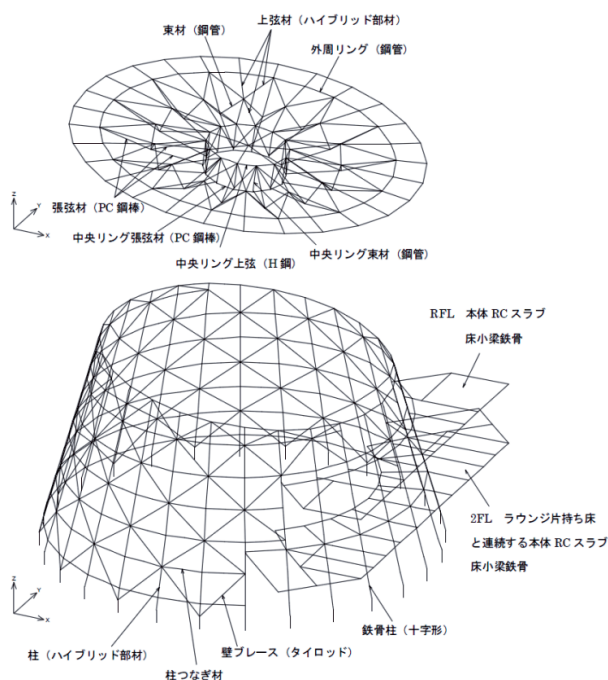


図17 架構図
Fig. 17 Frame drawings

の水平力を負担するブレース材としてタイロッドφ28が用いられている。

5.2 施工の特徴

本件は以下に示すような施工の特徴を持っている。

- a) 木・鋼ハイブリッド構造を取り入れた物件にはテンション構造を併用しているものが多い。本件でも、テンション構造の品質を確保するため、テンション材に歪みゲージを貼って張力測定管理を実施した。
- b) 建方作業においては、集成材を傷つけないようにナイロンスリングを使用する(図18)。但し、鉄骨を使用している分、重量が大きくなるため、大きな部材ではナイロンスリングを使用しても重みで集成材が傷つく恐れがある。このため、重量の大きな部材は鉄骨部分で吊る事とし、本件では、柱材について図19のように治具を用いて建方を実施した。
- c) 本件の特徴として、柱材もハイブリッド部材となっている事があげられる。柱以外の部材は、製作工場でハイブリッド化した部材を現場でボルト接合する施工方法だが、柱材については図20のように継手部分の鋼板どうしを現場溶接した後、集成材を取り付けてハイブリッド化した。



図18 建方状況(写真)
Fig. 18 Erection(Photo)



図19 柱材の吊上げ(写真)
Fig. 19 Hanging of a column(Photo)



a) 鉄骨現場溶接
a) Site welding



b) 集成材取付
b) Installing of glulam timbers

図20 柱部材の現場ハイブリッド化(写真)
Fig. 20 Site hybridization of columns(Photo)

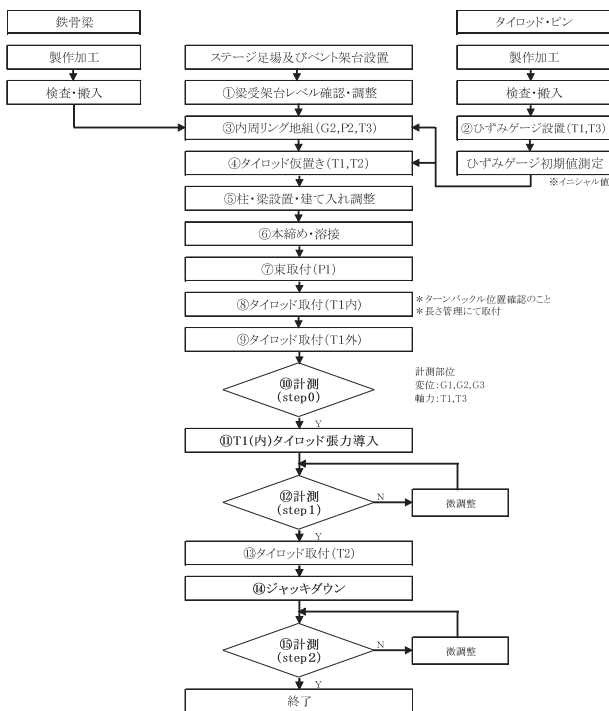


図21 施工フロー
Fig. 21 Construction flow

5.3 施工フロー

本件の施工フローを図21に示す。建方作業は精度確保と揚重回数削減のため、可能な限り地組みをする計画とした。支保工は屋根架構を受けるように設け、まず、内周リングを地組みして支保工に架設し、その後全体を4分割して外周リング→上弦材→

柱の順序で建方を行った。建方・本締めが完了した後、PC鋼棒・タイロッドを取り付けて張力導入を実施し、ジャッキダウンを行った。

5.4 張力導入とジャッキダウン

張力導入時とジャッキダウン時の張力と変位の計測点を図22に示す。張力はPC鋼棒のT1(内)材を締め付ける事で導入し、放射状の14方向に対して対角線上にあるものを同時に締め付け、次にそれと直交方向にあるT1(内)材を締め付けるという手順として、極力均等に張力が導入されるよう配慮した。

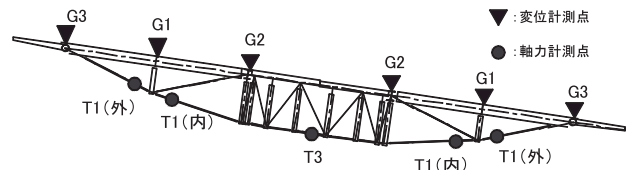


図22 張力及び変位の測定位置
Fig. 22 Measuring positions of tension and displacement

張力と変位の計測値を表2に示す。導入時の張力及びジャッキダウン後の張力はどちらも解析値に近い値となっている。また、変位量は解析値よりも小さくなっているが、これは解析では木の軸剛性を見込んでいないためであり、概ね想定した範囲内の挙動を示している。

本件では、ジャッキダウン完了後、集成材を化粧材として用いて大部分の鉄骨継手部をカバーする作業を行った。こうすることで、木質構造と同等の外観を得ることができ、且つ、鉄骨造を取り入れる事で断面サイズが小さくなるため、開放的で意匠的にも魅力的な空間が提供できた(完成内観、図23参照)。



図23 建屋内観(写真)
Fig. 23 Interior view of the building(Photo)

表2 張力と変位の測定結果
Table2 Result of tension and displacement

・張力測定結果

STEP \ 計測点		T1 (内)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	T1内張力導入(kN)	48	48	47	51	48	49	51	47	50	49	50	—	48	48
	目標値(kN)	44	44	46	46	47	47	48	47	48	47	47	46	46	44
2	ジャッキダウン(kN)	57	57	57	60	58	58	61	57	60	58	60	—	57	57
	目標値(kN)	59	59	61	61	63	62	63	62	63	62	63	61	61	59

STEP \ 計測点		T1 (外)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	T1内張力導入(kN)	48	51	46	53	51	—	54	51	50	50	51	50	50	47
	目標値(kN)	45	45	47	47	48	47	48	47	48	47	48	47	47	45
2	ジャッキダウン(kN)	57	60	58	62	61	—	63	61	60	59	60	60	59	57
	目標値(kN)	62	63	63	64	64	65	65	65	65	65	64	64	63	63

STEP \ 計測点		T3			
		1	2	3	4
1	T1内張力導入(kN)	106	103	103	103
	目標値(kN)	96	95	94	96
2	ジャッキダウン(kN)	127	123	123	123
	目標値(kN)	129	127	127	128

※T1(内)12番とT1(外)6番は機器の不良により測定できなかった

・変位測定結果

(mm)

STEP \ 計測点		G1													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	T1内張力導入	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
	ジャッキダウン	0	0	0	-1	-2	-1	0	-2	-2	-2	0	-1	0	-2
2	解析値	-5	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4

STEP \ 計測点		G2				G3					
		0	1	2	3	1	2	3	4	5	6
1	T1内張力導入	3	5	3	5	-1	-2	0	0	-1	-2
	ジャッキダウン	-1	3	1	1	-1	-2	0	0	-3	-2
2	解析値	-11	-7	-7	-7	-1	0	0	0	0	0

6 結言

地球温暖化対策のためのCO₂排出削減が叫ばれるようになって久しい。この点、現代建築における構造材料の両雄である鉄とコンクリートは、その製造過程で大量のCO₂を排出することで逆風下に立たされていることは否めない。一方の木材は、その樹木としての生長段階で空気中のCO₂を吸収し、炭素を留めたまま構造体として使用できるという、CO₂削減にとっては願ってもない材料である。この木材と、構造材料として類い希なる特長を持つ鋼とを組み合わせた木・鋼ハイブリッド構造部材は、未来へ向けた新しい構造材としてのポテンシャルを十分に秘めているといえよう。木・鋼ハイブリッド構造部材の、これからの更なる普及に期待したい。

参考文献

- 1) 坂田弘安, 上角充広, 富本淳, 中村泰教: 摩擦接合型コネクタを用いたスギ-鋼板ハイブリッド部材の軸方向特性, 日本建築学会構造系論文集, 第627号, pp. 811-817, 2008. 5
- 2) 坂田弘安, 上角充広, 富本淳, 中村泰教: 摩擦接合型コネクタを用いたスギ集成材と鋼板接合部のせん断性能に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第643号, pp. 1659-1664, 2009. 9
- 3) 中野翔太, 坂田弘安, 上角充広, 富本淳, 中村泰教: 摩擦型コネクタを用いたスギ集成材と鋼板によるハイブリッド部材の力学的挙動に関する実験研究 - その6. 部材曲げ特性と曲げ耐力評価 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集(C-1), pp. 297-298, 2008. 9
- 4) 鋼構造設計規準, 日本建築学会, 2005
- 5) 木質構造設計規準・同解説, 日本建築学会, 2006
- 6) 森田明他: 新潟市食育・花育センター, 鉄構技術, 2011. 10