

# 木鋼ハイブリッド構造の実用化 におけるフィジビリティスタ ディ

# FEASIBILITY STUDY ON PRACTICAL USE OF TIMBER-STEEL HYBRID STRUCTURE

原田公明 — \* 1 水谷美和 — \* 2  
重松瑞樹 — \* 2 杜 凌子 — \* 2  
林 賢一 — \* 3 倉田高志 — \* 3  
斉藤 瞭 — \* 4 寺澤友貴 — \* 5  
坂田弘安 — \* 6 竹内 徹 — \* 6

Hiroaki HARADA — \* 1 Miwa MIZUTANI — \* 2  
Mizuki SHIGEMATSU — \* 2 Ryoko TO — \* 2  
Kenichi HAYASHI — \* 3 Takashi KURATA — \* 3  
Ryo SAITO — \* 4 Yuki TERAZAWA — \* 5  
Hiroyasu SAKATA — \* 6 Toru TAKEUCHI — \* 6

キーワード：

木鋼ハイブリッド構造, ドッグボーン, コスト, 構造性能

Keywords:

Timber-steel hybrid structure, Dog bone, Cost, Structural performance

In recent years, due to environmental considerations and design requirements, there are increasing opportunities to use timber members for nonresidential buildings. Therefore the authors have proposed a moment frame that uses steel materials for columns, and timber materials for beams, as well as its joining method. In this paper, the static and dynamic analyzes are performed by using the school and hotel column beam structure using timber-steel hybrid structure with dog bone as a model during a large earthquake. And a feasibility cost study was conducted of timber-steel hybrid structure and other structures to verify the practical application.

## 1. はじめに

近年, 木材の環境配慮や意匠性, また国の木質利用促進のための法律の整備や支援により, 低層の非住宅建築物への木質系材料の利用が推し進められている。木材は鋼材やコンクリート等の材料に比べ軽量で比強度も高く, 加工も容易である。構造性能に加え, 製作施工面でも有利な材料である。木材は, 断熱性が高く, 調湿作用があり, 目に与える刺激が小さく, 人の生理面や心理面に良い影響を与える材料であると言われている。また自然素材であるため, CO<sub>2</sub>排出量が少なく環境負荷低減も可能な材料である。しかしながら, 他の構造と比べて, 木質系構造は接合部の剛性や耐力の確保が難しく, 合板や筋交耐力壁などの耐震要素を適宜設けた建築計画とならざるを得ない。一方近年, 木材と鋼材を組み合わせたハイブリッド構造 (以下, 木鋼ハイブリッド構造と呼ぶ) の研究も精力的に行われている<sup>1), 2), 3)</sup>。その一つとして筆者らは集成材と形鋼をラグスクリューによって接合したモーメント抵抗型接合部を提案している<sup>4), 5)</sup>。また木質材料は脆性的な破壊性状を有するため, この木鋼ハイブリッド接合部に先行降伏する鋼材ドッグボーン部を付加した靱性接合部を提案し, 実験的研究を行っている<sup>6), 7)</sup>。梁端のドッグボーン部を早期に曲げ降伏させエネルギー吸収を發揮させる接合形式である (図1, 図2)。この接合部を用いれば, 木質梁の剛接合が実現でき, 合板や筋交耐力壁のない鉄骨造と同様の靱性型設計が可能となる。

本研究では, 本構法を用いて中層ホテルおよび低層小学校のモデル建物を対象に具体的な構造設計を実施し, 木鋼ハイブリッド構造と純S造とした場合の耐震性能の確認を行う。続いて, 上記の構造

形式に加え純木造, 純RC造のモデルを想定し, 構造躯体だけでなく建物全体の総工費を算出しコストフィジビリティスタディの検証を行い, 木鋼ハイブリッド構造の実用化の可能性について分析する。

## 2. 木鋼ハイブリッド構造

図1に木鋼ハイブリッド構造の概念図を示す。柱を鉄骨とし, 端部に鋼材ドッグボーン部を設けた木鋼ハイブリッド梁をラーメン架構とすることで大地震時においても靱性能のある壁やブレースのない自由度の高い構造が可能となる。木鋼ハイブリッド梁の木鋼接合部では, 鋼材と木をラグスクリューと六角ボルトで接合している。

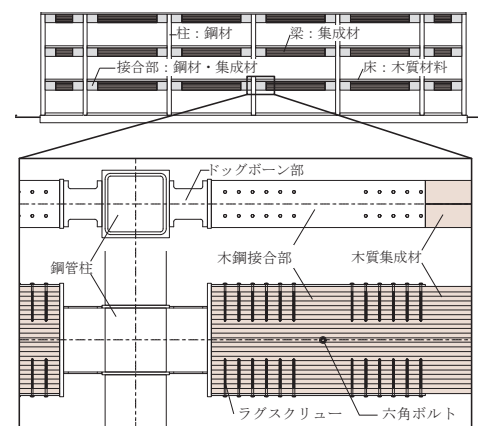


図1 ドッグボーン付き木鋼ハイブリッド接合部の提案

<sup>1</sup> ㈱日建設計 博士 (工学)  
(〒102-8117 東京都千代田区飯田橋2-18-3)  
<sup>2</sup> ㈱日建設計 修士 (工学)  
<sup>3</sup> 日鉄エンジニアリング(株) 修士 (工学)  
<sup>4</sup> 元東京工業大学 大学院生・修士 (工学)  
<sup>5</sup> 東京工業大学建築学系 助教・博士 (工学)  
<sup>6</sup> 東京工業大学建築学系 教授・博士 (工学)

<sup>1</sup> NIKKEN SEKKEI, Dr.Eng.  
<sup>2</sup> NIKKEN SEKKEI, M.Eng.  
<sup>3</sup> Nippon Steel Engineering Co., Ltd., M.Eng.  
<sup>4</sup> Former Grad. Student, Tokyo Institute of Technology, M.Eng.  
<sup>5</sup> Assist. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.  
<sup>6</sup> Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

## 2.1 木鋼ハイブリッド部材の設計方針

木鋼ハイブリッド部材は、大地震時にドックボーン部のみを塑性化させ、木鋼接合部および木部は弾性にとどめる設計方針とする。図2に木鋼ハイブリッド部材の長期・地震時・保有水平耐力時の応力の関係を示す。

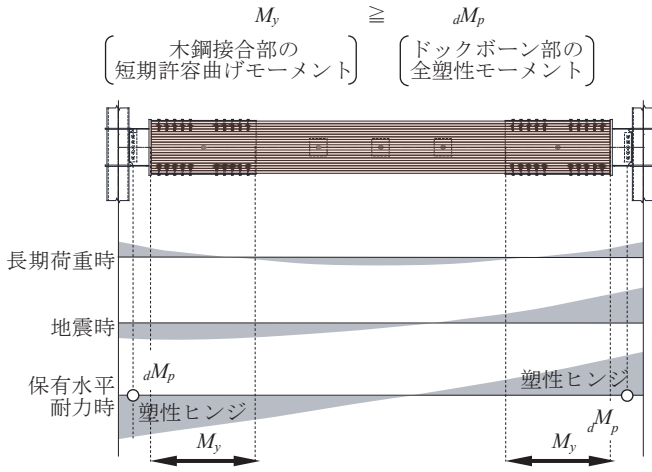


図2 木鋼ハイブリッド部材の設計方針

## 2.2 木鋼接合部の抵抗機構と回転剛性・耐力評価

木鋼接合部は、発生する曲げモーメントとせん断力に対して、主としてラグスクリューの引抜とせん断および集成材のH形鋼フランジに対するめり込みにより抵抗する。接合部長さを集成材せいりの2倍程度にすることで高い接合部効率を実現できる接合方法である。

ここでは木鋼接合部の回転剛性と耐力の評価方法を概要を示す<sup>6)</sup>。図3に示すように、接合部に曲げモーメントとせん断力が作用したときの抵抗メカニズムを想定し、接合部内で集成材の繊維直交方向および繊維方向に発生する抵抗力の釣合いより中立軸位置  $X_n$ ,  $Y_n$  を求める。ここから、各抵抗力による中立軸回りの曲げモーメントを算出し回転角で除すことで回転剛性を求める。耐力は、抵抗要素のいずれかが降伏する回転角に達した時点の曲げモーメントとする。

### 繊維直交方向の釣合い式

$$\Delta P_{lt,ti} + \Delta P_{te,y,li} + \Delta P_{te,y,lo} + \Delta P_{he,y} = \Delta P_{lt,li} + \Delta P_{te,y,ti} + \Delta P_{tef,y} + \Delta Q \quad (1)$$

### 繊維方向の釣合い式

$$\Delta P_{ls,l} + \Delta P_{tef,x,li} + \Delta P_{tef,x,lo} + \Delta P_{te,x} = \Delta P_{ls,t} + \Delta P_{tef,x,ti} + \Delta P_{he,x} \quad (2)$$

ここで、

- $\Delta P_{lt,(ti,li)}$  : ラグスクリューの引抜による抵抗力
- $\Delta P_{te,y,(ti,li)}$  : 鋼材フランジの集成材へのめり込み抵抗力
- $\Delta P_{te,y,lo}$  : 余長の寄与分におけるめり込みによる抵抗力
- $\Delta P_{he,(x,y)}$  : 六角ボルトのめり込みによる抵抗力
- $\Delta P_{tef,(x,y)}$  : 集成材とエンドプレート面に働く摩擦力
- $\Delta P_{ls,(t,l)}$  : ラグスクリューのせん断による抵抗力
- $\Delta P_{tef,x,(ti,li)}$  : 集成材と鋼材フランジ間に働く摩擦力
- $\Delta P_{tef,x,lo}$  : 余長の寄与分における摩擦力
- $\Delta P_{te,x}$  : エンドプレートの集成材へのめり込み抵抗力

( )内添字の  $t$  は上端を  $l$  は下端を示し、 $x$  は繊維方向を  $y$  は繊維直交方向を示す。

## 木鋼接合部の回転剛性

$$K_w = [\Delta P_{lt,ti} (L - X_n - X_{t,ti}) + \Delta P_{lt,li} (X_n - X_{t,li}) + \Delta P_{ls,t} Y_n + \Delta P_{ls,l} (h - Y_n) + \Delta P_{te,y,ti} (2/3 \cdot X_n) + \Delta P_{te,y,li} \{2/3 \cdot (L - X_n)\} + \Delta P_{te,y,lo} (L - X_n) + \Delta P_{tef,x,ti} Y_n + \Delta P_{tef,x,li} (h - Y_n) + \Delta P_{tef,x,lo} (h - Y_n) + \Delta P_{he,y} (\alpha L - X_n) + \Delta P_{he,x} (h/2 - Y_n) + \Delta P_{te,x} \{2/3 \cdot (h - Y_n)\} + \Delta P_{tef,y} X_n] / \Delta \theta \quad (3)$$

## 木鋼接合部の降伏曲げモーメント

降伏曲げモーメント  $M_y$  はラグスクリューの引抜による降伏、ラグスクリューのせん断による降伏および集成材のめり込み降伏のいずれかで決まるとし、式(4)より求める。

$$M_y = K_w \theta_y \quad (4)$$

$$\theta_y = \min(\theta_{y,lt}, \theta_{y,ls}, \theta_{y,te}) \quad (5)$$

$$\theta_{y,lt} = \min\{\delta_{y,lt}/(L - X_n - X_{t,li}), \delta_{y,lt}/(X_n - X_{t,li})\} \quad (6)$$

$$\theta_{y,ls} = \min\{\delta_{y,ls}/Y_n, \delta_{y,ls}/(h - Y_n)\} \quad (7)$$

$$\theta_{y,te} = \min\{\varepsilon_y h / X_n, \varepsilon_y h / (L - X_n)\} \quad (8)$$

ただし、 $\delta_{y,lt}$  は上端ラグスクリューの引抜による降伏変位、 $\delta_{y,ls}$  は上端ラグスクリューのせん断による降伏変位である。

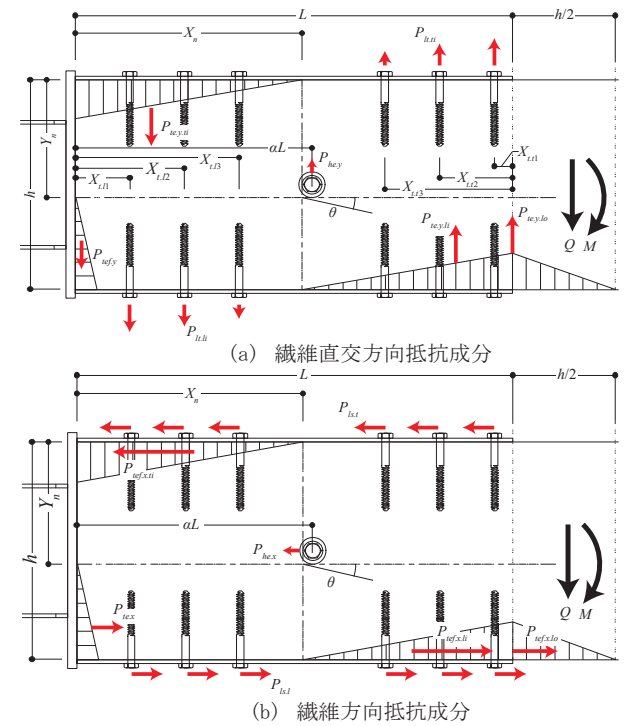


図3 木鋼接合部の抵抗機構

## 3. 耐震性能評価およびコストフィジビリティスタディモデル

木鋼ハイブリッド接合部を用いて図4, 5に示す建物の試設計と比較のため純RC造, 純S造の設計を純ラーメン架構で行う。また, 純木造では, 梁間方向壁付きラーメン架構, 桁行方向純ラーメン架構の設計を行う。木質構造(純木造, 木鋼ハイブリッド構造)は軽量化の目的で床を木造とした(@根太800mmピッチ, 床:木合板  $t=28\text{mm}$ )。RC造, S造はRCスラブとする。基礎は全ての構造共にRC造とし, 耐火条件は耐火建築物とした。中層ホテルおよび低層学校の木鋼ハイブリッド構造架構概念図を図4, 5に, 各構造モデルの構造伏図, 軸組図, 断面表を表1, 2に示す。構造モデル毎に建築基準法告示等に沿って長期短期および二次設計を満足する構造断面を適宜設定する。

### 3.1 中層ホテルモデル (図4)

プランは中廊下形式で1グリッドが7.2m×7.2mのモジュールの一般的な平面計画とする。階数は5階とし、建物高さは18.2mとする。

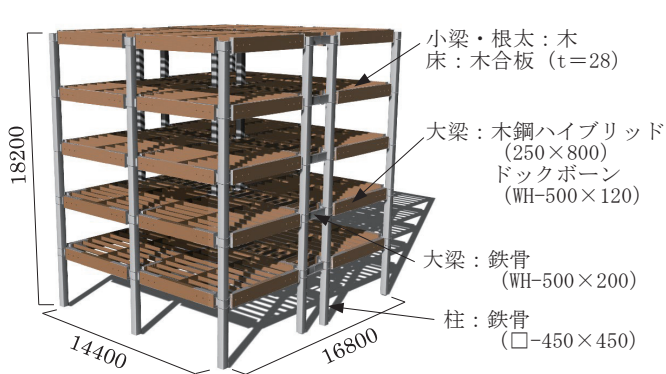


図4 中層ホテルモデル 木鋼ハイブリッド構造架構概念図

### 3.2 低層学校モデル (図5)

プランは片側廊下形式で1グリッドが8.0m×9.4mのモジュールの一般的な平面計画とする。階数は3階とし、建物高さは9.6mとする。

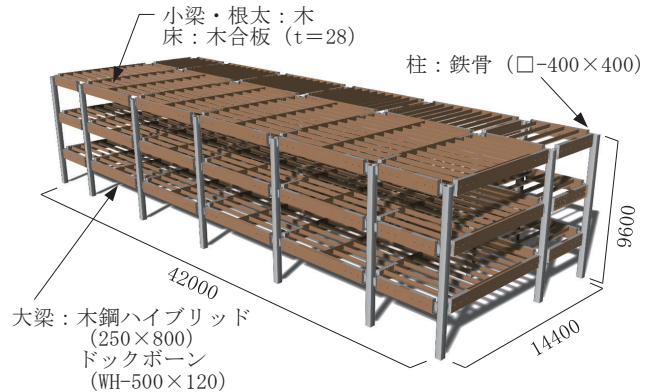


図5 低層学校モデル 木鋼ハイブリッド構造架構概念図

表1 中層ホテルモデル仕様

<純RC造>	<純S造>	<木鋼ハイブリッド構造>	<純木造>
柱 : □-700×700 大梁 : 800×400 小梁 : 350×750 床 : RCスラブ, t=150	柱 : □-500×500 大梁 : H-550×250 小梁 : H-400×200 床 : RCスラブ, t=150	柱 : □-450×450 (S) 大梁 : H-800×300 (S), 800×300 (木) 小梁 : 800×200 (木) 床 : 根太 240×100 (木), 合板 t=28	柱 : □-700×700 (木) 大梁 : 800×300 (木) 壁 : 合板 t=48mm 小梁 : 800×200 (木) 床 : 根太 240×100 (木), 合板 t=28

表2 低層学校モデル仕様

<純RC造>	<純S造>	<木鋼ハイブリッド構造>	<純木造>
柱 : □-600×600 大梁 : 800×400 小梁 : 350×750 床 : RCスラブ, t=150	柱 : □-400×400 大梁 : H-600×200 小梁 : H-450×200, H-250×125 床 : RCスラブ, t=150	柱 : □-400×400 (S) 大梁 : H-800×250 (S), 800×250 (木) 小梁 : 800×200 (木) 床 : 根太 240×100 (木), 合板 t=28	柱 : □-600×600 (木) 大梁 : 800×300 (木) 壁 : 合板 t=48mm, 小梁 : 800×200 (木) 床 : 根太 240×100 (木), 合板 t=28

#### 4. 耐震性能評価

低層学校モデルと中層ホテルモデルについて、木鋼ハイブリッド構造と純S造との耐震性能の比較を行う。はじめに木鋼ハイブリッド梁のモデル化の方法について示し、続いて静的増分解析と動的地震応答解析の結果を示す。建物重量は木鋼ハイブリッド構造が純S造の約6割となっている。設計用地震荷重はAi分布で定める。

##### 4.1 木鋼ハイブリッド部材のモデル化

木鋼ハイブリッド部材は、中央を木断面、ドックボーン部と木鋼接合部を鉄骨H形断面の梁材とし、木鋼接合部に2章で定義した回転剛性  $K_w$  を持つ回転ばねを設けて剛性を評価した。曲げ耐力は、ドックボーン塑性化部H形鋼をマルチスプリングによる弾塑性モデルとして評価した。図6に木鋼ハイブリッド部材のモデル化を示す。

モデル化の妥当性を確認するため、繰り返し载荷実験の結果と比較し、概ね実験結果の履歴を捉えられることを確認している<sup>9)</sup>。繰り返し载荷実験の結果は、木鋼接合部と木部が概ね弾性に留まり、ドックボーン部のみが塑性化して鋼材の安定した履歴を得ている。図7に実験結果の  $M-\theta$  履歴に解析モデルの骨格曲線を重ねて示す。

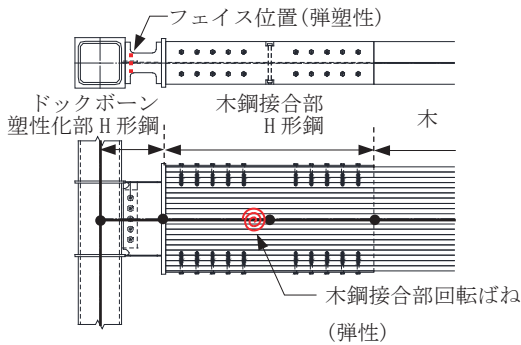


図6 木鋼ハイブリッド部材のモデル化

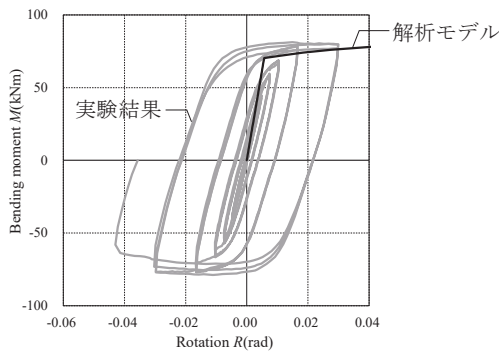
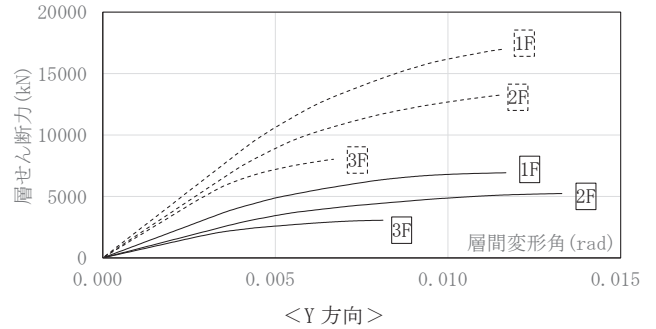
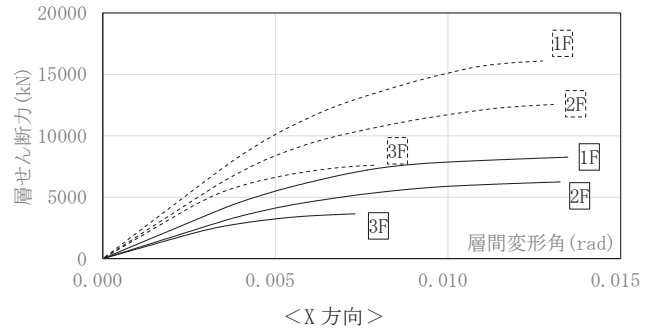


図7 解析モデルの妥当性の検証

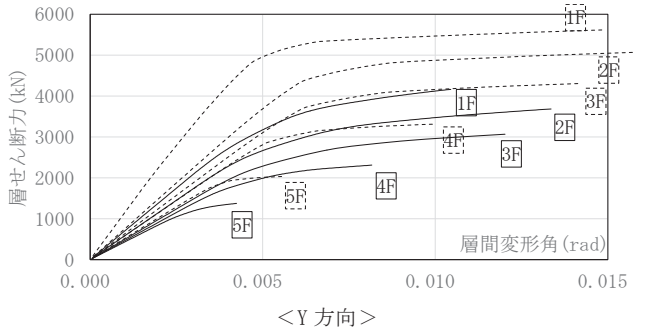
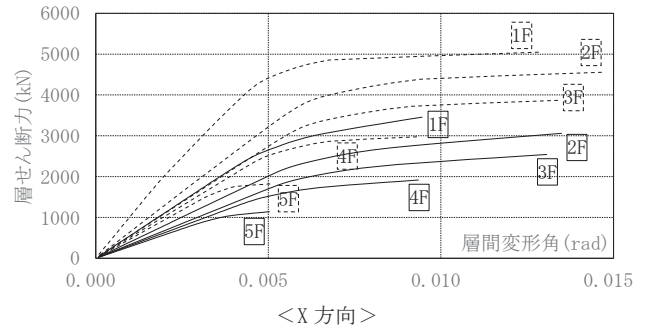
##### 4.2 静的増分解析

低層学校モデルと中層ホテルモデルともに部材レベルでモデル化した弾塑性立体モデルを用いて静的増分解析を行った。解析結果を図8、図9に示す。いずれのモデルとも、木鋼ハイブリッド構造は純S造と同様に安定した復元力特性を示し、保有水平耐力時の層せん断力は木鋼ハイブリッド構造が純S造の約6割程度となり、建物重量比率と同等の値を示した。



凡例 実線:木鋼ハイブリッド構造, 破線:純S造

図8 低層学校モデル 静的増分解析結果



凡例 実線:木鋼ハイブリッド構造, 破線:純S造

図9 中層ホテルモデル 静的増分解析結果

##### 4.3 動的地震応答解析

続いて、人工地震波 BCJ-L1, L2 を入力とした時刻歴応答解析による耐震性能評価を行う。振動解析モデルは、静的増分解析モデルより、各層1質点のポリリニア型弾塑性せん断ばねを配置した擬似立体モデルとし、減衰は初期剛性比例の2%とする。

### 4.3.1 固有周期と固有振動モード

低層学校モデル，中層ホテルモデルにおける木鋼ハイブリッド構造，純S造の固有周期と固有振動モードを図10，図12に示す。低層学校モデルは木鋼ハイブリッド造が鉄骨モデルよりも1割程度長い周期となり，中層ホテルモデルは概ね同等の周期となっている。

### 4.3.2 動的地震応答解析結果

低層学校モデル，中層ホテルモデルにおける木鋼ハイブリッド構造，純S造の時刻歴応答解析結果を図11，図13に示す。

低層学校モデルにおいては，大地震時でも両構造とも最大層間変形角 1/100rad 以下に留まる結果を示した。中層ホテルモデルにおいては，両構造とも最大層間変形角が 1/100rad を若干上回っており，純S造が木鋼ハイブリッド構造よりも大きい変形を示した。

総合しては，低層学校モデル，中層ホテルモデルともに，木鋼ハイブリッド構造は純S造と概ね同等の耐震性能であることが確認できる。

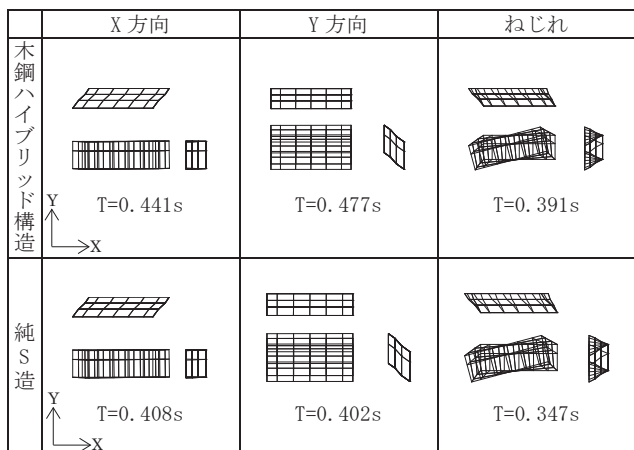


図10 低層学校モデル 固有周期と固有振動モード

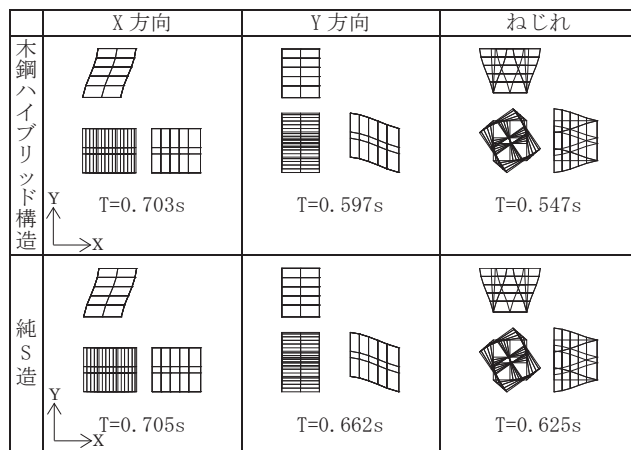


図12 中層ホテルモデル 固有周期と固有振動モード

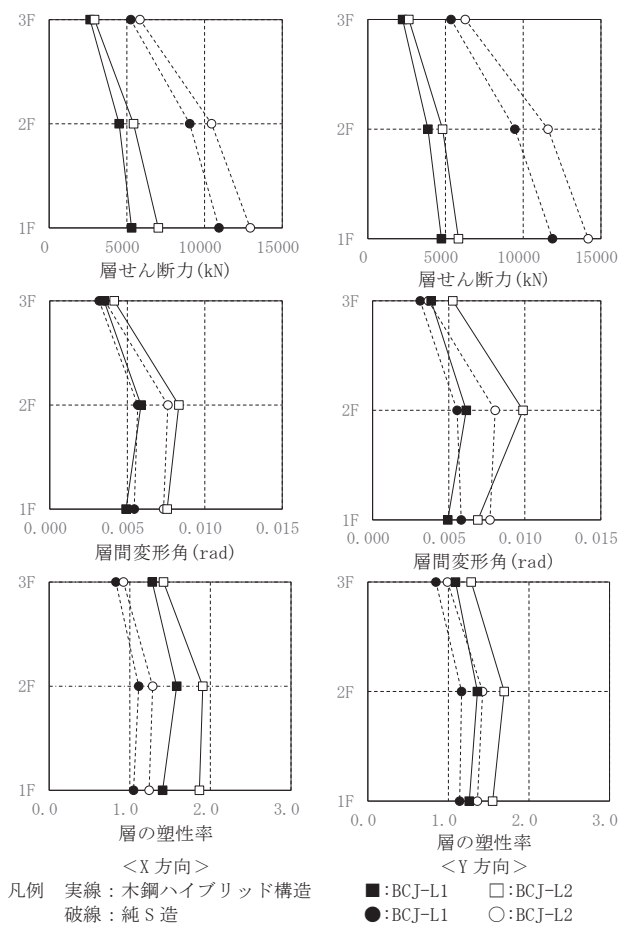


図11 低層学校モデル 時刻歴応答解析結果

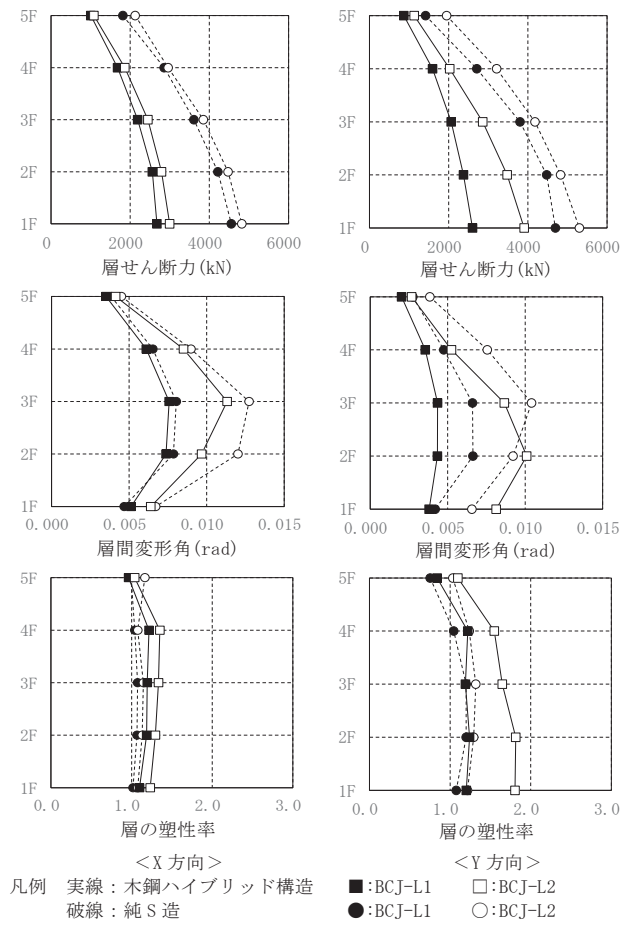


図13 中層ホテルモデル 時刻歴応答解析結果



## 5. コスト比較

### 5.1 前提条件

以下、各種構造におけるコスト比較を行う。いずれの構造も基礎形式は直接基礎とする。用途に応じた積載荷重を設定し、構造躯体は全部材の重量拾いを行い、建物重量を算出する。躯体数量は、コンクリート、鉄筋、型枠、デッキ、鉄骨、木（柱、梁、床全て）各々算出する。木材および鉄骨の耐火材も各々加味している。中層ホテルモデルではビジネスホテルを想定し、低層学校モデルは公共の小学校を想定し、コストを設定した。単価は表3に示す2019年実勢の値を用い、検討モデルと同規模の建物の情報をもとに算定する。コストに加え建屋重量（基礎重量を含む）と地震力の比較も行う。

### 5.2 比較検討結果

低層学校モデル、中層ホテルモデルの4つの構造形式の比較検討結果を表4に示す。

いずれのモデルも、純RC造と純S造は木鋼ハイブリッド構造よりも各々建屋重量で約2倍と約1.5倍、地震力で約3倍と約2倍大きい結果となった。コストは、木鋼ハイブリッド構造は躯体費のみ場合は純RC造、純S造と比較して約4割高くなるが、総工費では薄まって1割以下の差に留まり、また純木造より安くなった。木材単価がRC・S造の材料より高いという実勢を反映した結果を示した。今後木材単価の変動によってはこの値は変わってくる。また、本検討では直接基礎の前提だが、地盤条件により杭基礎の場合は基礎コストが増加し、木鋼ハイブリッド構造とのコスト差が縮まる可能性が大きい。なお、柱を鉄骨とした木鋼ハイブリッド構造は、純木造に比べて筋交い等のないラーメン架構が実現でき、柱のサイズダウンが可能となるため、平面計画の自由度にも有利な構造と言える。

表3 コスト検証に用いた2019年の実勢単価（単位 千円）

前提条件	基礎形式		直接基礎			
	積算方法	全ての構造の部材断面より、躯体数量を算出。2019年の実勢単価				
躯体関連単価	建物の想定		市街地に建つ耐火建築物。ビジネスホテル、公共の小学校			
	コンクリート	型枠	鉄筋	鉄骨	デッキ型枠	
		18/m <sup>3</sup>	7/m <sup>2</sup>	155/ton	300/ton	5/m <sup>2</sup>
木(柱、大梁)	木(根太)	木耐火	躯体その他	土工事		
	400/m <sup>3</sup>	100/m <sup>3</sup>	10/m <sup>2</sup>	50/坪	80/坪	
上記以外単価	外装	内装	設備	昇降機・外構	仮設・経費	
	150/坪	200/坪	400/坪	40/坪	総工費20%	

表4 荷重・コスト比較および総合評価

		低層学校モデル				中層ホテルモデル			
		純RC造	純S造	木鋼ハイブリッド構造	純木造	純RC造	純S造	木鋼ハイブリッド構造	純木造
荷重	建屋重量	2.15	1.55	1.00	1.00	2.35	1.65	1.00	1.00
	地震力	2.80	1.85	1.00	1.00	3.10	2.00	1.00	1.00
コスト	躯体費	0.70	0.70	1.00	1.13	0.67	0.61	1.00	1.20
	総工費	0.93	0.93	1.00	1.03	0.95	0.92	1.00	1.05
評価	フレキシビリティ	△	◎	◎	×	△	◎	◎	×
	工費	○	○	△	△	○	○	△	△
	工期	×	○	◎	◎	×	○	◎	◎
	環境	△	△	◎	○	△	△	◎	○

## 6. まとめ

木鋼ハイブリッド構造の実用化の可能性を探る観点より、低層学校、中層ホテルの建物モデルを対象とし、純RC造、純S造とのコスト面におけるフィジビリティスタディを行った。木質構造は、純木造と木鋼ハイブリッド構造の2種類のモデルとした。木鋼ハイブリッド構造は、純RC造、純S造と比較し、構造躯体のみの場合割高であるが、総工費の場合若干割高になる程度で、木材利用の利点を鑑みれば、総合評価においては同程度である結果が得られた。

耐震性能においては、木鋼ハイブリッド構造の場合は床を木造とし軽量化を図れば、純S造と同等の性能が得られた結果となった。また木鋼ハイブリッド構造は、梁端部の鉄骨で地震エネルギーを吸収できる構造であるため、大地震時の応答性状も純S造とほぼ同程度の性能を有することが確認された。

### 参考文献

- 1) Sakata, H., Jokaku, M., Tomimoto, A. and Nakamura, Y. : Axial Behavior of Glulam Japanese Cedar-Steel Composite Member Adopted Friction Connector, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.73, No.627, pp.811-817, 2008.5 (in Japanese)  
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73巻, 第627号, pp.811-817, 2008.5
- 2) Miyamoto, S., Yamaguchi, N. and Miyazawa, K. : Development of Technology for Hybrid Timber Building Structures : Joints using H-section steel connectors, Journal of Structural Engineering B, Vol.51B, pp.521-530, 2005.3 (in Japanese)  
宮本俊輔, 山口修由, 宮澤健二: 木質複合建築構造技術の開発: H形鋼を用いた接合法, 日本建築学会構造工学論文集 B, 第51B巻, pp.521-530, 2005.3
- 3) 野中卓, 松本芳紀, 福田萬: H形鋼を用いた木造接合部の実験的研究, 日本建築学会北陸支部研究報告書 第46号, pp.57-60, 2003.7
- 4) Harada, H., Nakajima, S., Yamazaki, Y., Matsui, R., Hayashi, K., Sakata, H. and Takeuchi, T. : Rotational Stiffness and Bending Strength of Steel Connections in Timber Lattice Shell, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.83, No.746, pp.577-587, 2018.4 (in Japanese)  
原田公明, 中島舜, 山崎義弘, 松井良太, 林賢一, 坂田弘安, 竹内徹: 木鋼ハイブリッドラチスシェルの接合部回転剛性および曲げ耐力, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.746, pp.577-587, 2018.4
- 5) 原田公明, 富田弥奈美, 林賢一, 水谷美和, 朝日智生, 西本篤史, 山崎義弘, 松井良太, 坂田弘安, 竹内徹: 集成材と形鋼を用いたモーメント抵抗型接合部の力学挙動に関する実験研究 - その1 正負交番繰返し載荷実験 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp.577-578, 2018.9
- 6) Harada, H., Saito, R., Nakajima, S., Yamazaki, Y., Terazawa, Y., Hayashi, K., Sakata, H. and Takeuchi, T. : Cyclic Elasto-plastic Deformation Capacity of Dog Bone Timber-Steel Hybrid Connections, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.85, No.773, pp.945-955, 2020.7 (in Japanese)  
原田公明, 斉藤瞭, 中島舜, 山崎義弘, 寺澤友貴, 林賢一, 坂田弘安, 竹内徹: ドッグボーン付き木鋼ハイブリッド柱梁接合部の弾塑性繰返し変形性能, 日本建築学会構造系論文集, Vol.85, No.773, pp.945-955, 2020.7
- 7) 斉藤瞭, 原田公明, 宮崎崇, 水谷美和, 重松瑞樹, 中島舜, 山崎義弘, 寺澤友貴, 坂田弘安, 竹内徹: ドッグボーン部を有する木鋼ハイブリッド柱梁接合部の繰返し変形性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp.1183-1184, 2019.9
- 8) 日本建築学会: 木質構造設計基準・同解析, 2015.11
- 9) 中谷誠, 小松幸平: ラグスクリーボルトの引抜性能発現機構(第3報): 繊維直交方向引抜理論の構築, 木材学会誌, 第52巻, 第3号, pp.160-167, 2006.5

[2021年5月29日原稿受理 2021年8月5日採用決定]