木材の曲げ性能を鋼板の補剛に活用した制振部材の開発と実建物への適用

DEVELOPMENT OF ENERGY DISSIPATION DEVICES USING BENDING PERFORMANCE OF WOOD FOR STIFFENING OF STEEL PLATE AND APPLICATION TO BUILDING

江坂佳賢 — * 1 大山翔也 — * 2
稲山正弘 — * 3 青木謙治 — * 4

Yoshisato ESAKA — * 1 Tatsuya OHYAMA — * 2
Masahiro INAYAMA — * 3 Kenji AOKI — * 4

キーワード：
木質構造, 集成材, 制振部材, 鋼板, 座屈補剛

Keywords:
Wooden structure, Glued laminated timber, Energy dissipation devices, Steel plate, Buckling restrained

The focus of this paper is on earthquake-resistant energy dissipation devices that do not support vertical loads, as well as the performance of a steel plate stiffened with wood. The authors describe an experimental study on a metallic yielding damper with wooden stiffeners, with intended application of such technologies to, for example, multi-story buildings. Energy dissipation devices stiffened with wood, excellent in design, and can improve seismic performance of buildings.

1. 背景

持続可能な循環型社会の構築を見据え、生物資源である木材の有効利用が求められている。建築物の構造部材への木材利用を考えた場合、建物規模や立地に加え、その適用対象を鉛直荷重支持部材とするか否かで、耐火規定への適合の要否および要求性能が異なる。近年では、中大規模建築物の構造部材への木材利用を具現化するため、床・柱・梁等に対する耐火措置を講じた木材を利用した工法・製品が開発されつつあるが、これらの場合、製造者が限定される等の制約があり、部材寸法上の適用条件も存在する。ここでは、耐火処置等の規定がかからない鉛直荷重を支持しない耐震部材(制振部材)に焦点を当てるとともに、木材の有する軽量かつ加工性・供給性・環境負荷の観点に優れた特性に着目し、その曲げ性能およびめり込み性能を活用した鋼材の補剛工法を考案した。本稿ではその具体的な事例の1つとして、重層型建物に利用される耐震部材(制振部材)への木材利用を目指した、鋼板と木材によるハイブリッド型の制振間柱の実験的研究に基づく開発および実建物への適用について詳述する。

2. 開発意図

一般に、中高層の重層型建物に利用される鋼製の制振間柱は、低降伏点鋼のウェブのせん断降伏により、履歴型のエネルギー吸収を担う制振部材である。安定した吸収エネルギーの確保のためには、ウェブの板座屈を防止した上でせん断降伏させることが重要であり、一般的には鋼製の補剛リブを設けてウェブの板座屈を防いでいる。

本計画では、低降伏点鋼のウェブの板座屈を、木材で補剛することを意図した。木材には直接層せん断力等の外力を負担させない機構を設けた上で、簡易な製作によって構成することを目指し、その曲げ

およびめり込み性能によって、ウェブを補剛する手法を考案した。使用木材には、集成材・製材・CLT等、様々な木質材料が考えられる。

本部材は制振部材であり、鉛直荷重支持部材には該当しないため、耐火処置等が不要となり、製造者等を限定することなく、幅広い運用が期待される。また既往の鋼材系制振間柱に必要となる、ウェブへの補剛リブの溶接が不要となり、溶接量および施工手間の低減が可能となる。さらに意匠性に優れた制振部材であり、見え掛かり部での積極的な利用も可能となる。このことから新築に限らず、一般的に溶接施工が困難であるとともに、耐震部材(制振部材)の設置箇所が限定される、既存建物の耐震改修などにも拡張できる可能性が高い。

3. 既往の研究等

鋼材と木材のハイブリッド部材の開発的研究は、鉛直荷重支持部材(柱・梁等)を対象に、異種材料同士の効率的な接合手法と荷重分配を探索したものが多数報告されている。一方、耐震部材(制振部材)に関しては、伊藤らによる木パネルで面外補剛された鋼板耐震壁の開発^{3)~5)}、および渋谷らによる木材で座屈補剛された座屈拘束ブレースの補剛性能に関する研究^{6)~7)}が確認され、前者は面材(壁)、後者は軸材(ブレース)を対象としている。本研究としては前者の一部が参考となるが、補剛材である木材の材種・被補剛材である鋼材の材種および形状・両者の接合方法・適用対象建物の規模等に差異がある。

本稿では、中高層の重層型建物への適用を想定した上で、鋼材と木材とを簡便な方法により接合し、意匠性にも優れた制振部材の開発を、解析的検討によりダンパーの試設計を行った後、実大モデルによる実験的検討に基づき、構造安全性の確認を実施した。この一連の検討内容とともに、実建物への適用により得られた成果を報告する。

^{*1} ㈱日建設計エンジニアリング部門構造設計グループ
構造設計主管・修士(工学)
(〒102-8117 東京都千代田区飯田橋2-18-3)

^{*2} ㈱日建設計エンジニアリング部門構造設計グループ 修士(工学)

^{*3} 東京大学大学院農学生命科学研究科 教授・博士(工学)

^{*4} 東京大学大学院農学生命科学研究科 准教授・博士(農学)

^{*1} Associate, Structural Design Division, Engineering Dept., Nikken Sekkei, M. Eng.

^{*2} Structural Design Division, Engineering Dept., Nikken Sekkei, M. Eng.

^{*3} Prof, Grad. School of Agri. and Life Sci., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

^{*4} Assoc. Prof., Grad. School of Agri. and Life Sci., Univ. of Tokyo, Dr. Agr.

4. 解析的検討

本章では、木材の曲げ性能を鋼板の補剛に活用するという着想に基づき、解析的検討を行い、その実現性を検証するとともに、ダンパーの試設計を行った。

4.1 検討対象

検討対象は図1に示すとおり、BH-900×350×6×22の溶接組立てH形鋼部材とし、H形鋼部材のみの無補剛モデルとH形鋼部材のウェブ両面に木部材を宛がうことでウェブの板座屈補剛を意図した木補剛モデルを比較検討する。鋼材はフランジにはSM490A、ウェブにはLY225を用いるものとし、補剛木材の形状は厚さ139mm×幅792mm×長さ3000mmとし、厚さ139mm×幅300mm×長さ792mmのスギ集成材(E65F225)の単位木片を幅方向に積層接着して形成することを想定する。ウェブ両面に設けた木材は通しボルトにて相互に緊結し、鉄骨部材のせん断変形が木材に伝達されることがないように、通しボルトが貫通する鉄骨側のボルト孔は縦方向のルーズ孔とする。これにより、鉄骨部材がせん断変形した際には木材はロッキングし、木材がせん断変形することを回避し、鉄骨部材のせん断変形に追従可能となる。当該部材は制振間柱として使用し、せん断力を負担した際には柱の上下端に逆対称モーメントが作用する状態を想定する。

4.2 解析モデル

図2に解析モデルの概要図を示す。鋼材は4節点シェル要素を用いてモデル化する。応力度-ひずみ関係は図3に示すとおり、トリリニア型でモデル化し、降伏条件にはMisesの降伏条件を用いる。鋼材の材料特性を表1に示す。

木材はソリッド要素を用い、弾性でモデル化する。本工法では図1に示すように集成材の単位木片を積層接着して板状の補剛木材を形成することを想定し、その力学的性状から積層接着の接着性能には期待しない設計とした。よって本解析においては間柱長さ方向の木材の剛性は無視し、間柱幅方向の曲げ剛性のみ有するモデルで解析を行う。解析モデルにおける木材の材料特性を表2に示す。

H形鋼ウェブ両面の木材を相互に緊結するボルトは図2に示すとおり、ボルト軸部の弾性剛性を有するばね要素としてモデル化し、補剛木材の表面に座金形状の剛体を設けることで座金のモデル化を行う。また鉄骨部材がせん断変形した際に補剛木材はロッキングにより変形追従する機構のため、最上部中央および最下部中央のボルトを除き、ボルトと鉄骨の関係は自由とする。

境界条件は、柱下端はX,Y,Z方向並進とX,Y,Z軸まわりの回転をすべて拘束とする。柱上端はX,Z軸方向の並進とX軸まわりの回転

表1 鋼材の材料特性

	フランジ(SM490A)	ウェブ(LY225)
降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	325	205
ヤング係数 E(N/mm ²)	205,000	205,000
ポアソン比 ν	0.3(弾性), 0.5(塑性)	0.3(弾性), 0.5(塑性)
2次勾配(N/mm ²)	4,100(E/50)	3,417(E/60)
引張強さ σ_t (N/mm ²)	490	300
3次勾配(N/mm ²)	205(E/1000)	205(E/1000)

表2 木材の材料特性

集成材(E65F225)	L方向	R方向	T方向
ヤング係数 E(N/mm ²)	6,500(E_L)	260($1/25 \cdot E_L$)	1.0 (剛性非考慮)
せん断弾性係数 G(N/mm ²)	$G_{LR}=433$ ($1/15 \cdot E_L$)	$G_{RT}=1.0$ (剛性非考慮)	$G_{LT}=433$ ($1/15 \cdot E_L$)

a-1) 無補剛部材 a-2) 木補剛部材

b) ボルト接合詳細

図1 検討部材概要図

図2 解析モデル図

図3 解析モデルにおける鋼材の応力度-ひずみ関係

は自由であり、Y 方向並進と Y, Z 軸まわりの回転を拘束する。補剛木材と鉄骨間は接触問題として扱うが、摩擦は無視するものとする。

4.3 解析方法

解析ソフトに ABAQUS を用い、以下に示す解析を行う。

(1) 座屈固有値解析

弾塑性有限要素解析において初期不整を導入するために H 形鋼部材を対象に座屈固有値解析を行い、H 形鋼部材の座屈モードを求める。

(2) 弾塑性有限要素解析

無補剛モデル、木補剛モデル共にウェブ面外方向(Y 方向)の初期不正の最大値を柱長さの 1/1000(3.4mm)とし、上記の H 形鋼部材のみのモデルの座屈固有値解析で得られた 1 次の座屈モード形状で初期不整を付与したうえで、柱上端にウェブ面内方向(X 方向)の強制変位を与えて増分解析を行う。増分解析は柱の部材角が 1/50 に達した時点で終了する。

4.4 解析結果

(1) 座屈固有値解析

H 形鋼部材のみのモデルで座屈固有値解析を行って得られた 1~3 次モードの弾性座屈荷重と座屈モードを図 4 に示す。

(2) 弾塑性有限要素解析

弾塑性解析で得られたウェブの平均せん断応力度-部材角関係を図 5 に示す。なお、ウェブの平均せん断応力度は以下より算出した。

$$\tau = Q / \{t_w \times (H - 2t_f)\}$$

ここで、 τ : ウェブの平均せん断応力度 (N/mm²)

Q : 柱のせん断力 (N)

H : 柱せい (mm)

t_w : ウェブ厚 (mm)

t_f : フランジ厚 (mm)

図 5 にウェブの材料降伏せん断応力度を併せて示す。無補剛モデルでは材料降伏せん断応力度に達する以前にウェブの座屈発生によってウェブの負担せん断応力度が低下するのに対し、木補剛モデルでは材料降伏せん断応力度付近まで弾性の挙動を示し、その後も負担せん断応力度が低下することなく、安定した復元力特性を示し、木材による補剛効果が確認できる。

図 6 に無補剛モデルおよび木補剛モデルの部材角 1/50 時点の H 形鋼の変形図を示す。無補剛モデルではウェブの面外変形が 60mm と大きくウェブが面外に座屈している一方、木補剛モデルではウェブの面外変位は最大でも 2.3mm 程度に留まっており、木の補剛効果によりウェブの面外変形が進展していないことが確認される。

図 7 に無補剛モデルおよび木補剛モデルの部材角 1/50 時点の H 形鋼の Mises 応力図を示す。無補剛モデルでは座屈モードの山谷で局部的に応力度が過大となっているのに対し、木補剛モデルでは一様に分布しており、繰り返し载荷等においても早期にウェブが座屈することなく、安定した履歴特性を示すことが想定される。

図 8 に補剛木材の繊維方向の応力度を示す。ボルト孔周りで局部に大きな応力が発生しているが、版中央の応力を確認すると応力度の最大値はウェブ接触面側、外面側(ウェブ接触面反対)共に 3 N/mm² 以下に収まっており、短期許容曲げ応力度 15.0N/mm² と比較しても十分弾性範囲に収まっていると判断できる。

図 9 には補剛木材のウェブ接触面のウェブ面直交方向の応力度を示す。応力度の最大値は 1 N/mm² 以下であり、めり込みに対する短期

許容応力度 4.0N/mm² 以下に収まっていることが確認される。

図 10 に解析で得られた各ボルトの軸力図を示す。ボルトの最大軸力は 5.6kN 程度である。ボルト M16 の短期許容引張力は 36.9kN であることからボルトはウェブの座屈を補剛するのに十分安全側の設計になっていることが確認される。

木材の座金(PL-9×40φ)に対するめり込みは、ボルト孔(18φ)欠損を考慮した断面積から算定した座金部分の支圧が 5.59N/mm² となり、スギのめり込みに対する基準強度である 6.0N/mm² 以下に収まっていることを確認した。また、既往研究²⁾による支圧面の応力分布から、支圧面中央の孔欠損部分が支圧算定上の影響を殆ど有しないと

図 4 座屈固有値解析結果

図 5 ウェブの平均せん断応力度—部材角関係

図 6 H 形鋼の変形図 (mm)

図 7 H 形鋼の Mises 応力図 (N/mm²)

図8 補剛木材の繊維方向応力度 (N/mm²)

図9 補剛木材のウェブ面
直交方向応力度 (N/mm²)
(ウェブ接触面側)

図10 ボルト軸力図 (N)

考え、孔欠損を考慮しない断面積で支圧を算定すると 4.46N/mm² となり、既往研究²⁾に基づくめり込み降伏耐力である 4.49N/mm² 以下であることを合わせて確認した。なお、本検証を踏まえ、後述する実大実験では座金を PL-9×50φ (孔径 16φ) に、ボルトを M12 に変更し、めり込み部分の安全率を一層確保させた。

5. 実験的検討

4章では、解析的検討によってダンパーの試設計を行い、前述した解析条件下において木材による補剛効果を確認した。一方で、材料・幾何学的非線形性、異種材料間の接触、繰返し効果による物性変化等に対しては、解析的検討のみでは不十分であると考え、実大の実験的検討に基づき、構造安全性を確認し、最終的な検証を行った。

5.1 試験体概要

試験体は実大試験体とし、鉄骨部材は BH-900×350×6×22 の溶接組立て H 形鋼とする。使用材料はフランジが SM490A、ウェブが LY225 とし、補剛木材はスギ集成材 (E65F225) の単位木片を二次接着 (パネルボンド KU 使用) して成形したものとする。試験体図を図 11 に示す。

5.2 実験概要

実験は部材に逆対称曲げモーメントを発生させる形で加力を行う。荷重は図 12 に示すとおり、実建物への適用を想定した地震応答解析結果に基づき、層間変形角による制御として、層間変形角 $\pm 1/200$ サイクルを 3 回、 $\pm 1/100$ サイクルを 3 回、 $\pm 1/50$ サイクルを 3 回繰り返した後、大変形後の試験体挙動確認のため再度 $\pm 1/100$ サイクルを 3 回繰り返し、その後に最終サイクルの荷重として試験体の耐力劣化が認められるか、または油圧ジャッキのストローク限

界まで正方向 (油圧ジャッキの引き方向) の単調荷重を実施する。

5.3 実験結果

実験により得られたウェブの平均せん断応力度と層間変形角の関係を図 13 に示す。最終的には油圧ジャッキのストローク限界である層間変形角 $+1/22.2$ ($+0.045\text{rad}$) までの荷重を行ったが、耐力の低下は認められず、荷重－層間変形角関係は安定した紡錘形を示した。最大荷重荷重は最大変形時に記録した 909kN (せん断応力度 168.4N/mm²) であった。

本部材が地震により変形した際の仕上げ材の挙動を確認するため、片面に仕上げ化粧板を貼り付けて試験を行った。試験時の試験体挙動については、 $-1/200$ サイクル 1 回目の最大変形時に仕上げ材の鉄骨フランジへの接触と、荷重中には木材のきしみに起因すると思われる異音の発生が数回認められたが、仕上げ材および補剛木材に亀裂やはく離等の発生は認められなかった。なお、仕上げ材については層間変形角 $\pm 1/50$ の正負交番 3 サイクル終了後に取り外しを行った。

試験終了後に補剛木材を取り外し、目視観察を行った。その結果、

図11 試験体図

写真1 試験体セットアップ状況

図12 荷重プログラム

鉄骨ウェブの座屈は確認されず、木材による補剛効果が認められた(写真 4)。また、補剛木材の鉄骨接触面にも損傷は認められなかった(写真 5)。補剛木材の通しボルト用座金の接触面には、一部にめり込みが確認されたものの大きな変形や損傷には至っていない(写真 6)。

解析で確認された高次モードの座屈形状(図 6:b)が、実験では目視の範囲で確認できなかった理由は、解析時における木材の諸元に設計値を用いている等、安全側の評価としていることが推察される。

最終的に使用範囲を超える層間変形角 1/22.2 まで試験体の加力を行ったが、この段階では、補剛木材のロッキング変形が鉄骨ウェブのルーズ孔で追従できる範囲を超えたため、補剛木材固定用の M12 通しボルトについては鉄骨ウェブルーズ孔との接触で発生する支圧による曲げ変形が確認された(写真 7)。また、鉄骨ウェブルーズ孔部分および補剛木材のキリ孔部分にもボルト接触に伴う変形が生じたが、ボルト自体に緩みや亀裂などは認められなかった。最後に、参考として変位を 0 点に戻した後、補剛木材を撤去し、無補剛の状態では層間変形角 $\pm 1/50$ 、1 サイクルの加力を行った。ウェブの平均せん断応力度と層間変形角の関係を図 14 に示す。また、+1/50 サイクル時の試験体状況を写真 3 に示す。ウェブ全面にせん断座屈が生じ、ウェブの材料降伏に至る前に耐力劣化を起こしていることが確認された。

本工法は、鉄骨ウェブのせん断降伏耐力が維持できる領域まで、座屈モード形状を高次側へ移行させ、座屈による耐力劣化を防ぐことが重要だと考えられ、この効果は、解析・実験の両面から考察できる。

6. 実建物への適用

6.1 建物概要

適用建物は福岡市に計画された地上 11 階建ての鉄骨造の事務所ビルであり、2 階から 10 階までを基準階とする重層型の構造である。敷地の 2 面を前面道路に接する角地に立地するため、執務空間の採光・使用性の観点から 16.5m スパンの無柱空間を有する片コア形式として設計した。また本建物では地震時の建物の損傷を抑制するために制振構造を採用しており、骨組架構内に制振部材を付加することで耐震性能の向上を図った。建物イメージを図 15 に、建物諸元および平面・断面の概要を図 16・17 に、架構パースを図 18 に示す。

既往の制振部材を用いたこれまでの構造設計においては、制振部材はコア内の隠蔽部に配置することが一般的であり、外観上・使用上の問題から見え掛かり部への配置事例は少ない。コア形式が片コア型の場合、また本事例のような建築面積がコンパクトなペンシルビルの場合、コア内に制振部材が集中配置されることにより、偏心を生じて建物がねじれ振動すること、制振部材を設置できる箇所が限られること等が課題となる。そこで本計画では、今回開発した木補剛制振間柱の優れた意匠性を活用し、桁行方向において、コア内の座屈拘束ブレースと、外装面架構の見え掛かり部に設けた木補剛制振間柱とにより、バランスの良い架構を構成し、その解決を図った(図 17)。なお、木補剛制振間柱の仕様は、前述した解析・実験と同様とした。

6.2 制振効果の解析的検証

木補剛制振間柱による制振効果の検証のため、座屈拘束ブレースのみの場合と、木補剛制振間柱を追加設置した場合のモデルにおける時刻歴応答解析による比較検討を行った。入力地震動には告示模擬地震動(解放工学的基盤)とし、3 種類の位相特性(八戸 EW・東北大学 NS・JMA 神戸 NS)の地震動を用いた。図 19 に各層の最大層間

図 13 木補剛時のウェブの平均せん断応力度-層間変形角関係

図 14 無補剛時のウェブの平均せん断応力度-層間変形角関係

写真 2 試験体変形状況

写真 3 無補剛試験の変形状況

写真 4 試験体変形状況(鋼板部分)

写真 5 試験後の木補剛材状況(鋼板接触面側)

写真 6 座金接触面状況

写真 7 通しボルトの状況

図 15 建物イメージ図

変形角を示す。座屈拘束ブレースのみの最大層間変形角 $1/125$ (8.0×10^{-3} rad) [3 階] に対して、木補剛制振間柱を追加設置した場合の最大層間変形角は $1/154$ (6.5×10^{-3} rad) [2 階] となっており、極めて稀に発生する地震動レベルの最大層間変形において約 20% の低減効果が得られ、有効性が確認できた。なお梁間方向については、コア内の座屈拘束ブレース 2 基により適切な制振部材配置が可能となり、木補剛制振間柱は未使用のため、応答解析結果等は割愛する。

6.3 事例における適用状況

写真 8 に木補剛制振間柱の施工状況を示す。当該部材は、補剛木材を設置する前の H 形鋼間柱の状態では搬入し、一般の鉄骨部材と同様に通常通りの鉄骨建方を行った。その後、工事現場にて補剛木材を取り付けた。補剛木材には幅 300mm の集成材を最小構成要素となる単位木片として利用し、積層・組立てを行ったため、重機や特別な機材等を用いることなく、人力で容易に設置することができた。写真 9・10 に内外観の様子を示す。外装面の本柱は現しとし、 280×900 の鉄骨箱型断面柱に木仕上げを施して木補剛制振間柱と外観を統一させ、交互に配置することで端正な内部空間を実現させた。

7. まとめ

一連の検討により、木材の軽量性・加工性・供給性・環境負荷の観点に優れる特性と、その曲げ性能およびめり込み性能を利用した本工法による薄板鋼板の補剛効果を確認できた。そして、この成果を実建物に適用し、耐震性能の向上と意匠性に優れた内部空間の実現の両立を果たした。鋼材の補剛に求められる剛性・耐力は、一般にその基準強度に依存する。本稿では、対象鋼材を低降伏点鋼とした制振部材を想定し、比較的低い補剛剛性・補剛耐力を木材にて賄うことを意図した。また、補剛木材には、その力学的性状と材料製作性・入手性を加味し、単位木片の二次接着により成形する手法を採用し、その効果を確認することができた。なお、この一連の検討は、実建物への適用を見据えた個体検討となっており、実験結果を踏まえた解析手法の構築および、木材による鋼板の座屈補剛の一般化評価方法の構築には至っておらず、これらについては今後の課題としたい。

謝辞

本プロジェクトに関わられた皆様、実大実験等に協力を頂いた JFE スチール(株)、JFE テクノリサーチ(株)の皆様に謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：木質構造設計標準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-，2006
- 2) 稲山正弘：木材のめり込み理論とその応用，東京大学 学位論文，1991
- 3) 伊藤他：木質パネルで面外補剛されたスリット入り鋼板の耐震性能，日本建築学会構造系論文集，第 75 巻，第 657 号，pp. 2065-2071，2010. 11
- 4) 谷口・伊藤他：スリット入り鋼板耐震壁の補剛性能検証実験と補剛設計式の導出 その 1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，22433～22434，2012
- 5) 伊藤・中居他：木パネル補剛スリット入り鋼板の補剛特性および間柱型耐震壁としての性能 その 1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，22570～22571，2014
- 6) 渋谷他：座屈拘束ブレースの補剛性能に関する研究 その 1 木材で座屈補剛した場合，日本建築学会大会学術講演梗概集，22437，2004
- 7) 小林・渋谷他：座屈拘束ブレースの補剛性能に関する研究 その 2～3，日本建築学会大会学術講演梗概集，22508～22509，2005

建物諸元	
・建設地：福岡県福岡市	
・建物用途：事務所	
・階数：地上 11 階，地下 2 階	
・構造：地上 S 造，地下 RC 造	
・建築面積(概数)：590m ²	
・延べ面積(概数)：6,800m ²	

図 16 建物諸元

a) 基準階平面図

b) 断面図

図 17 建物概要

図 18 架構パース

図 19 時刻歴応答解析結果

写真 8 補剛木材 取付状況

写真 9 内観写真

写真 10 外観写真

[2019 年 10 月 1 日原稿受理 2020 年 3 月 23 日採用決定]