

# 「T-WOOD® Goo-nyaize」の開発

容易に自由変形可能な単板積層木材を活用した木質架構

厚澤 瑛人<sup>\*1</sup>・相馬 智明<sup>\*1</sup>・森田 尚<sup>\*2</sup>・山崎 信宏<sup>\*3</sup>  
木村 吉邦<sup>\*3</sup>・稲垣 玲<sup>\*3</sup>・シャオ タイユイン<sup>\*3</sup>・足立 幸司<sup>\*4</sup>

Keywords : flexible wood, wooden structure, shear wall, wood screw, glulam

やわらかい木, 木質構造, 面材張り耐力壁, ビス, 集成材

## 1. はじめに

近年, 国内森林資源の有効活用, 二酸化炭素排出量の削減という観点で建築分野における木材利用が注目され, 様々な木質材料が用いられた木造建築が実現している。本研究では「やわらかい木<sup>1)</sup>」(写真-1)に注目した。やわらかい木とは, 図-1 に示すように木質単板をシート状接着剤で積層接着した複合材で, 自在に曲げ・ねじることができる新感覚の木質素材である。

この木質材料は曲げ応力が作用すると容易に変形するため, 躯体を構成する部材としての利用が難しく, スツールやベンチの座面等の用途<sup>2)</sup>に限られていた。そこで, 筆者らはやわらかい木の用途拡大, 木材利用の新たな可能性の拡張を目指し, やわらかい木がつくり出す曲線を活かした木造躯体の構築を可能とする構法「T-WOOD Goo-nyaize」を開発した。本研究では, この構法を活用し, 写真-2 に示すような木造パーゴラ(軒先や庭に設けるつる性植物を絡ませる棚)を設計・試作するとともに, 加力実験および屋外設置による劣化状況の観察を実施した。

## 2. 新構法「T-WOOD Goo-nyaize」

### 2.1 やわらかい木の性質と構造的工夫

図-1 に示すように, やわらかい木は曲げ応力が作用すると, 積層した木質単板間のシート状接着剤が大きくせん断ずれを起こしながら変形するため形状の維持が難しい。そのため, このせん断ずれをボルトなどで拘束することで形状を保つことができることを確認した(写真-3)。



写真-1 やわらかい木

Photo.1 Flexible Wood

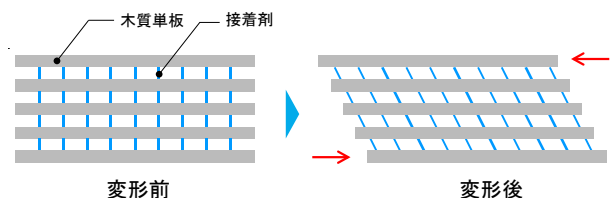


図-1 材料構成と変形機構

Fig.1 Material composition and deformation mechanisms



写真-2 「T-WOOD Goo-nyaize」による木造パーゴラ

Photo.2 Wooden pergola by “T-WOOD Goo-nyaize”

\* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室

\* 2 技術センター 技術企画部

\* 3 設計本部 設計戦略部

\* 4 秋田県立大学

以上から、構造躯体の一部とし、形状を維持させながら利用するためには、材料に曲げ応力が作用しない構成とし、なおかつボルト等によって形状を拘束する必要がある。

そこで、①トラスやアーチ構造の構成部材とするか、在来軸組構法で使われる面材張り耐力壁のように、②面内せん断力の抵抗要素となる面材としての活用方法を検討した。本研究では、接合部の構成が比較的簡単である②の面材張り耐力壁の開発を実施した。

## 2.2 木造パーゴラの設計

やわらかい木を耐力壁・屋根構面に用いた木造パーゴラ(スパン 5,170×高さ 2,770×奥行 3,060mm)を設計・試作した(写真-4(a))。水平力の抵抗要素として一方はカラマツ(異等級構成, E95-F270)の集成材を柱・梁に用いた木質ラーメン構造とし、その直交方向はやわらかい木(スギ単板+シート状接着剤)を面材としてビスで柱や梁に留付けた耐力壁構造とした(写真-4(b))。

写真-4(a)に示すように、柱は2本の集成材(240×60×2,760mm)を LVL の綴り材(120×60×300 mm)で2丁合わせとした。合わせ柱は 720mm ピッチで 5 本配した。梁も柱同様に 2 丁合わせの構成とし、柱梁の接合部は 4 本のドリフトピンによる 3 面せん断によってモーメントに抵抗する機構とした。

やわらかい木は幅 300×最大長さ 1,860×厚さ 9mm の帯状とした。材料の構成は厚さ 1mm のスギ単板を JIS Z1541 に適合した両面接着テープ(厚さ約 0.14mm)で 8 層分接着させたものとした。図-2 に示す通り、ビスで留め付ける際のビス頭におけるパンチング破壊を抑制するため、端部から 150mm の部分には繊維方向を直交させた木質単板の層を 2 層分挿入した。

施工方法として、帯状のやわらかい木を曲げながら、合わせ柱・梁に設けた切欠きに沿わせ表裏に編込むように構築した(図-3)。やわらかい木は製造限界長さである 2m 以下となるように、合わせ柱の位置に継手を設けた。その継手位置ではやわらかい木を曲げずに、フラットな平面のまま



写真-3 やわらかい木の変形拘束

Photo.3 “Flexible wood” variant restraints

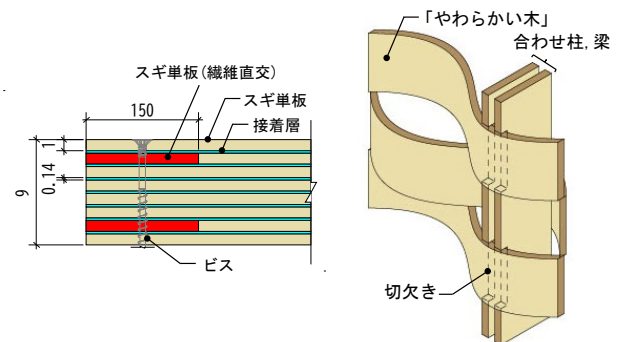


図-2 材料構成

図-3 取付方法

Fig.2 Material composition

Fig.3 Installation Method

柱に沿って左右 2 辺を各 6 本、計 12 本のビスで留付けており、この部分が面材耐力壁として機能する(写真-4(c))。位置決めのため、継手部分以外の箇所では合わせ柱(もしくは梁)の位置において 2 本のビスで固定した。

本断面構成のやわらかい木は、実測値において約 3.5rad/m の曲率まで安定して変形可能であることが別の実験で確認されている。同じ厚さのレゾルシノール接着剤を用いたスギ合板では 0.35~0.45rad/m となっており、約 8~10 倍程度の曲面を形成できる。今回の木質パーゴラにおいては、事前のモックアップによる試験施工の結果から、約 2rad/m の曲率とした。柱ピッチと切欠きの深さはこの曲率に合わせて決定した。



(a) 木質架構  
(a) Wood structure

(b) 面材耐力壁  
(b) Shear wall

(c) 面材部分詳細  
(c) Part of the shear wall

写真-4 やわらかい木による散在面材張り耐力壁  
Photo.4 Sheathed shear wall by “Flexible wood”

### 2.3 抵抗機構

図-4 に水平力  $Q$  に対する抵抗機構を示す。やわらかい木が合わせ柱の表裏に編み込まれるため、面材部が壁の表裏に散在する。これら面材部の抵抗モーメント  $M_i$  の総和  $\Sigma M_i$  が壁全体の抵抗モーメントとなって水平力  $Q$  に抵抗する機構を想定した。壁の高さを  $H$  として、抵抗モーメントの総和  $\Sigma M_i$  と水平力  $Q$  のつり合いの式を式(1)に示す。

$$\Sigma M_i = Q \cdot H \quad (1)$$

やわらかい木による面材一枚あたりの抵抗モーメント  $M_i$  は文献<sup>3)</sup>に記載されている村上らによる面材張り大壁の詳細計算法をもとに算定した。ビスの配置から面材の中立軸を求め、その中立軸からの距離とビスの一面せん断耐力をもとに  $M_i$  を求める。図-5 に示すように、基本的に 12 本のビスで囲われた部分を面材部分として計算を行った。ビスピッチは 50mm とし、柱の厚みの関係上へりあき距離は最小で 15mm とした。また、散在している面材部分の枚数は壁一構面あたり表裏合わせて計 18 枚であった。

ビス 1 本当り耐力の剛性はヨーロッパ型降伏理論<sup>4)</sup>を用いて算定した。その際に用いる材料厚さはやわらかい木を構成するスギ単板の厚み 1mm×7 層分の 7mm とし、後述する屋外利用による表面割れが確認されたため、表層部 1 層分と接着層は構造性能を負担しないものと仮定した。ビスは  $\phi 4.1 \times 51\text{mm}$  (シネジック社コンフィット, ステンレス製) を使用した。

降伏耐力はやわらかい木を留めつけているビスの曲げ降伏で決定すると仮定し、フレームの集成材とやわらかい木のスギ単板の材料強度は文献<sup>4)</sup>の値を参照した。

## 3. 実大実験

### 3.1 実験計画

設計した木造パーゴラに対して実大加力実験を行った。図-6 に加力装置を示す。東西壁面それぞれにおいて、柱脚部の独立基礎ブロックを鉄骨によって固定し、柱頭側面にビスで留め付けた加力用鉄骨梁をセンターホールジャッキ (容量 200kN) によって加力した。加力は一方向のみとし、変形角 1/450, 1/300, 1/200, 1/100 で除荷・載荷を繰り返して加力した。脚部の独立基礎を地面に固定できなかったため、文献<sup>3)</sup>をもとに柱脚固定方

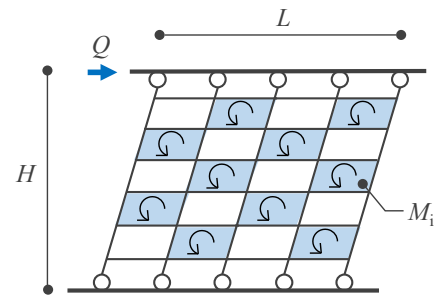


図-4 抵抗機構

Fig.4 Resistance Mechanism

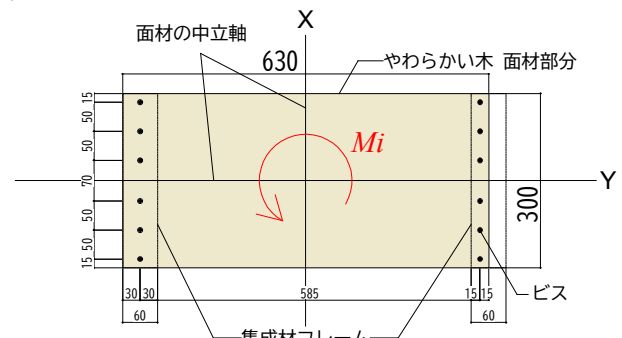


図-5 ビスの配置

Fig.5 Arrangement of screws

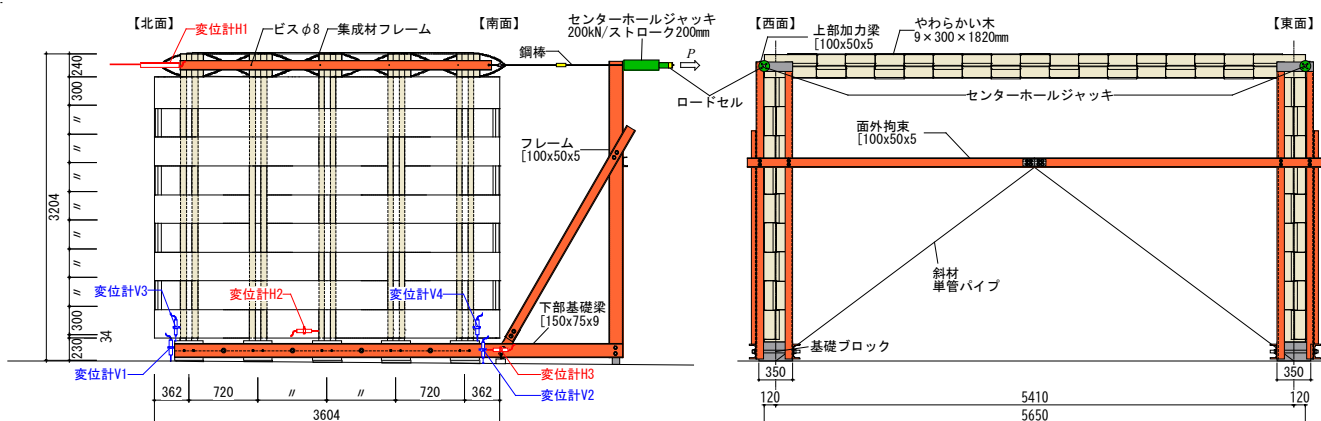


図-6 加力装置図および変位計の配置

Fig.6 Loading method and transducer arrangement



式の耐力試験方法を参考にし、せん断変形角 $\gamma_0$ は、全体変形角 $\gamma$ と壁の浮き上がりによる回転角 $\theta_1$ 、基礎の浮き上がりによる回転角 $\theta_2$ の差として算出した。

### 3.2 実験結果

最大荷重時の主な破壊性状を写真-5に示す。せん断変形にともない、斜め方向の圧縮力による部材の面外座屈が散在する耐力壁部で確認された。また、抵抗要素として想定した面材部分におけるビスの端抜け破壊に加え、集成材柱の切欠き部分におけるやわらかい木縁部のめり込みや、上下のやわらかい木交差部の部材相互の摩擦・めり込みが確認された。これらの摩擦・めり込み抵抗によってやわらかい木部材が貫接合のような挙動を示し、荷重が上昇し続けた。

図-7に東、西面の耐力壁それぞれの荷重－変形角関係を示す。変形角 1/15 を超えても明確な荷重低下はみられず、ジャッキのストローク限界に達したため加力を終了した。東西で比較すると、東面の耐力壁の方が剛性・耐力ともに低い値となった。また、図-8に示すように、加力が進むにつれ東側において基礎の浮き上がりが大きくなっており、荷重制御による加力を実施したものの荷重を完全に均一にできず、東西で荷重や変形に差がみられた。

降伏耐力について、実験値（東西平均）と想定した抵抗機構による計算値を図-7中にそれぞれ黒実線、黒点線で示す。実験値は計算値の約3倍の値であった。この原因として、面材のせん断抵抗要素にビスの一面せん断以外の、やわらかい木部材相互のめり込みや縁部のめり込みが加わったことが挙げられる。面材の中立軸からの距離は、ビスよりもこれらのめり込みの発生位置のほうが大きいため、面材の領域が想定よりも大きくなり、降伏耐力の実験値が計算値を上回った。

表-1に特性値一覧と壁倍率を示す。

表-1 特性値一覧  
Table 1 List of characteristic values

| 特性値                                 |        | 平均   | 東面   | 西面   |
|-------------------------------------|--------|------|------|------|
| 最大耐力 $P_{\max}$                     | kN     | 10.1 | 10   | 10.5 |
| 初期剛性 $K$                            | kN/rad | 376  | 286  | 381  |
| $2/3P_{\max}$                       | kN     | 6.77 | 6.67 | 7.03 |
| 見かけの 1/120 時 $P$                    | kN     | 3.78 | 3.81 | 3.95 |
| 降伏耐力 $P_y$                          | kN     | 4.87 | 5.13 | 5.43 |
| $0.2\sqrt{2}\mu \cdot 1 \times P_u$ | kN     | 4.18 | 3.6  | 4.26 |
| 短期許容せん断耐力 $P_a$                     | kN     | 3.78 | 3.6  | 3.95 |
| 壁倍率                                 | —      | 0.67 | 0.65 | 0.71 |



写真-5 破壊性状一覧（西面）  
Photo.5 Fracture mode (west side)

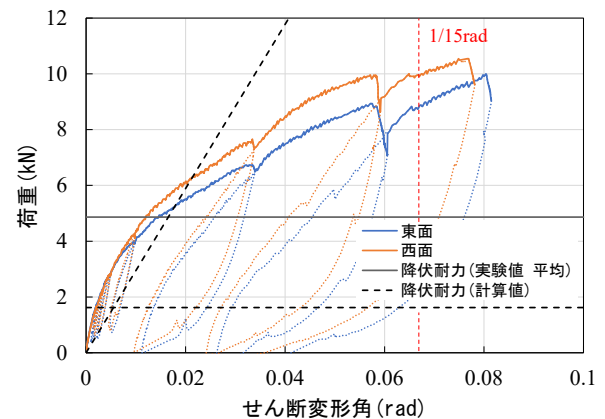


図-7 荷重－変形角関係  
Fig.7 Load-deformation angle relationship

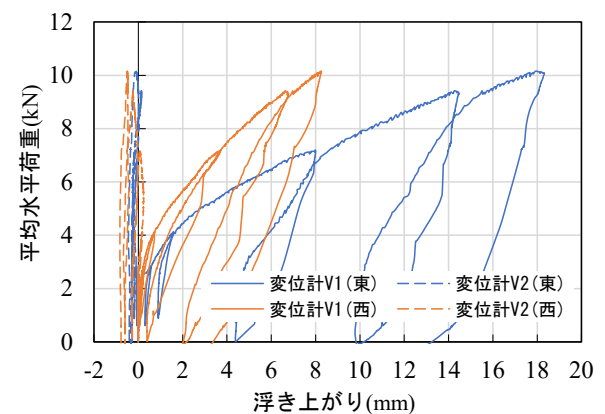


図-8 脚部基礎の浮き上がり  
Fig.8 Uplift of leg foundations

## 4. 屋外利用による実証実験

やわらかい木は、基本的に屋内での利用を想定しているが、劣化促進試験として部材の耐候性を確認できるように、試験的に屋外に木造パーゴラを設置した。

設置期間は 2023 年 11 月～2024 年 2 月である。

今回使用したやわらかい木は、端部を除き、繊維方向、樹種を統一した材料構成とした。その結果、表層第一層のみが温湿度変化や直射日光による変形を繰り返し、第二層目以降は変形追従せず、剥がれや波打ち、部材の膨潤（写真-6）といった課題が確認された。この課題の材料的な解決方法として、①表層に変形の少ない強度の高い材料を使用する、②表層を耐水性・耐候性に優れた材料で被覆するといったやわらかい木全体を保護するような手段が挙げられる。

## 5. まとめ

木材利用の新たな可能性拡張を目的にやわらかい木を活用した木造躯体を提案し、構造性能確認のために加力実験を実施した。その結果を以下に示す。

- 1) 耐力壁の面材とすることで、「やわらかい木」を木造躯体の一部として活用可能とした技術「T-WOOD Goo-nyaize」を開発した。
- 2) 開発した技術を用いて通常の木材では難しい曲線、曲面を活かした木造パーゴラを構築した。
- 3) 加力実験を実施し、平均最大耐力 10.1kN、平均初期剛性 376kN/rad、破壊性状を確認した。
- 4) 屋外利用による実証実験で表層の波打ちや割れ、部材の膨潤が確認された。



(a) 表層の波打ち・割れ (b) 部材の膨潤  
(a) Rippling and cracking of surface (b) Swelling of the component

写真-6 屋外利用によって確認された課題

Photo.6 Identified issues

今後は自由形状の特徴を活かし、木造パーゴラ以外の形態（トラスやアーチの一部）や人体に優しい内装材として活用していきたい。

## 参考文献

- 1) 東京大学：木質材料，特開 2010-36359，2010-02-18
- 2) 株式会社 HUG：”やわらかい木のツール”，[HUG \(hughug.net\)](http://hughug.net)，（参照 2024-7-9）
- 3) (財)日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計，2008.
- 4) 日本建築学会編：木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－（第 4 版），丸善出版，2006.