

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

# 主論文の要旨

論文題目 木質構造の接合に関する力学挙動解析

氏名 小川 敬多

## 論文内容の要旨

### 1. 緒言

木材は環境優位性に優れた資源の一つと考えられている。木材は再生可能な資源であることから、資源循環型社会の構築に貢献すると考えられる。また、木材の構造利用を考えたとき、施工時の省エネルギー性や、木材の炭素貯蔵効果の面から、地球温暖化問題の解消に貢献しうると考えられる。これらを理由に、木質構造物の普及拡大が昨今では望まれている。しかしながら、構造物である以上、様々な外力から利用者を守る必要があり、したがって、力学性能の把握が不可欠である。木質構造物（特に、我が国で多く見られる軸組構法の構造物）の力学性能は、部材と部材を繋ぐ接合部の力学性能が支配的となるため、接合部の力学性能を把握することが求められる。

木造軸組構法で見られる接合部は主に、1) 梁材-柱材接合部、2) 梁材-梁材接合部、3) 軸材料-面材料接合部の3つに大別できる。本研究では、これらの接合部を対象に力学挙動解析を行なった。接合部試験体を用いて力学試験を実施することにより力学挙動を調べたほか、耐力発現メカニズムの考察により接合部に外力が作用した時の力学挙動推定式を導いた。加えて、誘導した推定式を用いることで、接合部の詳細寸法などの諸条件が力学挙動に及ぼす影響を数値解析的に調べた。なお、本研究では地震や台風などによって構造物に水平方向の外力が作用している状態、すなわち、梁材-柱材接合部、および柱材-柱材接合部ではモーメントが作用することにより回転変形する状態、軸材料-面材料接合部では接合面でせん断力が作用することによりスリップ変位が生じる状態を想定して力学挙動解析を行なった。

### 2. 梁材-柱材接合部の力学挙動解析

梁材-柱材接合部の代表的なものとして、ほぞ接合部を対象に、モーメント作用時の力学挙動を解析した。ほぞ接合部とは、柱材の先端に設けられたほぞが、梁材に設けられたほぞ穴に差し込まれることで構成されるT字型の接合部であり、ほぞ接合部

が回転変形する際には、ほぞがほぞ穴の壁面と接触し、めり込みと摩擦によって耐力を発現する。ほぞ接合部はこれまでも多く研究されており、おおよそ想定される負荷条件下での力学挙動解析が試みられてきた。しかしながら、研究で得られるデータと異なり、実際に構造物中に存在するほぞ接合部は、嵌合の甘さ（ここでは、ほぞ幅方向の嵌合、すなわち、ほぞの幅がほぞ穴の幅より小さいために隙間が存在している状態を指す）が問題になることがしばしば見られる。これを踏まえて、嵌合の甘さを考慮してほぞ接合部の力学挙動を解析した。

はじめに、ほぞ接合部が回転変形した様子を幾何学的にモデル化した。ここでは、ほぞの幅をほぞ穴の幅よりもわずかに小さくしており、これによる隙間が嵌合度を表している。幾何学モデルから接触部でのめり込み変形量を求め、これに木材めり込み時の応力-ひずみ関係を適用させることでめり込み抵抗力を求めた。また、クーロン則から摩擦抵抗力を求めた。その後、モーメント・鉛直力・水平力の釣合条件からほぞ接合部のモーメント-変形角関係の推定式を導いた。実大スケールのほぞ接合部試験体を用いて力学試験を行なうことで、モーメント-変形角関係の試験結果と推定結果を比較した。両者は良く一致したことから、上記モデルの妥当性が示された。

また、推定式中の嵌合度（ほぞとほぞ穴の幅方向に存在する隙間）の入力値を変化させることで、嵌合度と力学挙動の関係を数値解析的に調べた。これにより、隙間が増大する（嵌合がより甘くなる）につれて回転剛性等の特性値が大きく低下することがわかり、例えば、ほぞの幅がほぞ穴の幅よりも 1.0 mm 小さい場合は、隙間が無い場合と比較して回転剛性が約 22% 低下することが明らかになった。このように、嵌合度と力学挙動の関係を定量的な指標により示すことができた。

### 3. 梁材-梁材接合部の力学挙動解析

梁材-梁材を繋ぐ接合部として、渡りあご接合部を対象に、モーメント作用時の力学挙動を解析した。渡りあご接合部とは、直交する二本の梁材の切欠き同士が嵌め合わさることで構成されるものであり、この接合部がモーメントにより回転変形するときには、切欠き部で部材が接触し、めり込み合うことにより耐力を発現する。渡りあご接合部の力学性能は実験により多く検証されてきたものの、仕口形状の複雑さのため、理論解析的な研究は十分ではなかった。

本研究では、既往のめり込み理論を応用することで、渡りあご接合部にモーメントが作用した時の接触部でのめり込み変形の様子を三次元的にモデル化した。また、ここでモデル化された変形の様子を基に、フックの法則を用いて耐力を計算した。さらに、大変形時では塑性化に伴う耐力低減をモデルに組み入れることで、接合部の弾塑性域にわたる力学挙動の推定式を導いた。実大スケールの渡りあご接合部試験体を用いた力学試験を実施し、モーメント-変形角関係の試験結果と推定結果を比較した。両者は概ね一致したことから、推定式の妥当性が示された。

渡りあご接合部の切欠き形状や寸法は、地域や大工らによって大きく異なる。そこで、切欠き中の、どこの寸法が、どの程度、力学挙動に寄与しているかを把握することは大きな関心事である。推定式中の寸法値（入力値）を変化させることで、それに

伴うモーメント性能の変化を数値解析的に調べた。その結果、上梁の梁幅を大きくした場合と、切欠きを深くした場合は、モーメント抵抗性能がより急激に増大し、例えば上梁の梁幅を 50%大きくするとモーメント抵抗性能は 47.2%、切欠き深さを 50%大きくするとモーメント抵抗性能は 51.3%増大した。このように、これらの寸法の増大が力学性能向上に効果的であることが、定量的な指標とともに示された。

#### 4. 軸材料一面材料接合部の力学挙動解析

昨今の木造軸組構法では、面材料が多く用いられている。例えば面材張り耐力壁はその代表的なものであり、柱材や梁材などの軸材料で構成されるフレームに面材料を覆うように張り合わせることで、フレームの力学性能を確保している。この軸材料一面材料の接合には、これまでは釘着をはじめとした金物接合が一般的である。

本研究では、金具による接合の代替として、工業用両面テープによる接合方法を検証した。これは、自動車工業等で用いられてきた方法を木質構造に適用したものである。JAS に準拠して小型スケールの軸材料一面材料接合部試験体（二面せん断の試験体）を用意し、せん断性能を静的試験と疲労試験により評価した。工業用両面テープ接合の試験体や、木ダボを併用接合した試験体の性能を調べ、釘着接合による試験体の性能と比較した。静的試験の結果（せん断荷重－スリップ変位関係）によれば、工業用両面テープ接合時は釘着接合時よりも変形性能が劣り、脆性的な挙動が得られたものの、初期剛性や最大荷重はより高い値を示した。疲労試験の結果によれば、両面テープと木ダボを併用接合した試験体の S-N プロット（ストレスレベルと疲労寿命の関係）は、釘着接合のものと同線に位置しており、同等の疲労特性を持つことが示唆された。また、疲労寿命が長くなる条件下では、疲労破壊時の変位がわずかに増大し、すなわち、ストレスレベルなどの条件が変わると変形性能が変化することが示された。ここでは、エネルギー論的な考察を加えることで、任意のストレスレベルにおいて変形性能を推定する方法を提案した。

この工業用両面テープによる接合を面材張り耐力壁に応用した。従来の釘着接合を代替するように、面材内周に両面テープを貼付して軸組フレーム（柱材・梁材）と接合した。また、力学的補強を目的に、木ダボも併用した。耐力壁の面内せん断試験によれば、両面テープと木ダボの併用接合による耐力壁は脆性的な破壊が見られたが、釘着接合の耐力壁と比較して、最大荷重は同等以上となり、剛性では大幅な向上が見られた。また、壁倍率を算出した結果でも釘着の耐力壁と同等の値が得られたことから、この耐力壁の構造利用の可能性が示された。

さらに、この耐力壁の力学挙動推定を試みた。合板内周のテープ接合箇所を、小領域のテープ接合部の連続体とみなし、小型スケール接合部試験体のせん断荷重－スリップ変位関係を用いて、耐力壁が変形した時に各々の領域で発現されるせん断耐力を求めた。続いて、モーメントの釣合条件より耐力壁のせん断変形角を計算することで、荷重－変形角関係を推定した。推定結果と試験結果は概ね良い一致を示したことから、両面テープを用いた面材張り耐力壁の力学挙動は、両面テープ接合のせん断挙動に基づいて表現できることが示された。