

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

氏 名 小川敬多

論文題目 木質構造の接合に関する
力学挙動解析

論文審査担当者

主査	名古屋大学教授	佐々木康寿
委員	名古屋大学教授	土川 覚
委員	名古屋大学教授	山本 浩之
委員	名古屋大学准教授	山崎真理子
委員	名古屋大学助教	安藤 幸世

論文審査の結果の要旨

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ている。また、木材の建築・土木構造への利用を考えたとき、資材製造・施工時のエネルギー消費が少ないことや炭素貯蔵効果により地球温暖化の抑制に貢献すると考えられていることなどから、昨今では木質構造物の普及拡大が望まれている。しかしながら、構造物には様々な外力が作用するため、利用者の力学的安全性を確保し、これらの力学性能を把握することが不可欠である。木質構造物、特に我が国の住宅や寺社仏閣で多く見られる軸組構法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重要となる。

本研究は、木質構造におけるいくつかの接合方式をとりあげ、これらが外力に対して示す力学挙動について実験的および理論的な考察を試みたものである。木造軸組構法で見られる接合部の代表例として、1) はり材-柱材接合部、2) はり材-はり材接合部、3) 軸材料-面材料接合部の3つに大別し、これらの力学挙動に関する実験的・理論的解析を行なった。実大の接合部試験体を作製して力学試験を実施することで力学挙動を調べたほか、耐力発現メカニズムに関する力学モデルを新たに考案することで接合部に外力が作用した時の力学挙動推定式を誘導した。加えて、接合部の形状や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する状態を想定している。すなわち、はり材-柱材接合部およびはり材-はり材接合部ではモーメントが作用するにより回転変形する状態を、軸材料-面材料接合部では接合面でせん断力の作用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ている。論文は7つの章で構成されている。第1章では本研究の背景と目的について詳述している。第2章では木質構造の接合に関する内外の既往の研究例を概説し、本研究で解決すべき問題点を整理している。続く第3章~第6章が本論文の中核となる部分であり、上に述べた接合部に関する実験的な性能把握とともに力学モデルの提案と理論解析を行っている。第7章では本研究で得られた知見を整理、総括している。以下に、本論文の中核となる各種接合の力学挙動解析について要約する。

1) はり材-柱材接合部の力学挙動解析

はり材-柱材接合部の代表的なものとして、ほぞ接合部にモーメントが作用する場合の力学挙動を解析した。ほぞ接合部は、柱材の先端に設けられたほぞが、はり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、木材のめり込みと摩擦によって耐力を発現する。ほぞ接合はこれまでも多くの研究例があるが、本研究では、加工精度や経年等によりほぞ接合部に生じる隙間を考慮に入れたことが特徴の一つとなっている。すなわち、構造物中に存在するほぞ接合部では嵌合の甘さ（ほぞとほぞ

穴の幅方向に存在する隙間)が問題になることがよくある。これを踏まえて、嵌合の甘さを考慮した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。幾何学モデルから接触部での木材のめり込み変形量を求め、これにめり込み応力-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。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。ほぞ接合部の実大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。その結果、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。その結果、隙間が増大する(嵌合が甘くなる)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に示すことが可能となった。

2) はり材-はり材接合部の力学挙動解析

はり材-はり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。渡りあご接合は、直交する二本のはり材の切欠き同士が嵌め合わさることで水平構面を構成するもので、我が国の伝統的木造文化に特徴的な接合方式である。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。この接合部の力学性能については、比較的多くの実験的研究例があるが、仕口形状の複雑さのため理論解析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モデルで表現した。このモデル化された変形の様子を基に、フックの法則により耐力を計算した。さらに、大変形時の塑性化に伴う耐力低減をモデルに導入することで、接合部の弾塑性域にわたる力学挙動の推定式を誘導した。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。その結果、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。一方、渡りあごの切欠き形状や寸法は、古くから伝承されてきたもので地域や大工によって大きく異なり、切欠き形状が力学的機能に及ぼす影響については不明な点が多い。そこで、上記の誘導した推定式中の寸法値(入力値)を変化させることで、それに伴うモーメント抵抗性能の変化を数値解析的に調べた。その結果、上ばりのはり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、例えば上ばりのはり幅を 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 51.3%増大することがわかった。このように力学性能向上に効果的な切欠き寸法およ

び形状を定量的に示すことにより渡りあご接合の設計を可能とした。

3) 軸材料-面材料接合部の力学挙動解析

木造軸組構法では 1980 年代以降、合板等の面材料が多用されるようになった。例えば面材張り耐力壁はその代表例で、柱・はり材の軸材料で構成される軸組を面材料で覆うことにより木質構造の力学性能を確保している。この軸材料-面材料の接合には釘による接合が一般的であった。これに対し、本研究では工業用両面テープによる接合方法の可能性を検証した。これは、自動車工業等で実用化されている方法を木質構造に応用しようとするものである。JAS に準拠して軸材料-面材料接合部試験体（二面せん断）を作製し、せん断性能を静的・動的試験により評価した。この際、両面テープ接合試験体の他に木ダボを併用したものと、釘着接合によるものとの性能を比較した。静的試験の結果によれば、両面テープ接合では釘着接合よりも変形性能で劣り、脆性的な挙動が示されたが、初期剛性や最大荷重ではより高い性能を示した。動的試験では、両面テープと木ダボを併用接合した場合の S-N（応力レベル-疲労寿命）関係は、釘着接合のものとはほぼ同一線上に位置するなど、両者は同等の疲労特性を持つことが示唆された。また、長寿命となる条件下では破壊時の変位が増大し、応力レベルが変わると変形性能が変化することが示された。これをエネルギー論的考察により任意の応力レベルにおける変形性能を推定する方法を提案した。これらの結果を受けて両面テープ接合を面材張り耐力壁に応用した。従来の釘着接合に代わり、両面テープを用いて構造用合板と軸組（柱・はり材）を接合した耐力壁を試作した。また、力学的補強（靱性を稼ぐ）目的で木ダボも併用した。耐力壁の面内せん断（水平加力）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、剛性では大幅な向上が示された。壁倍率（水平加力に対する強度指標）も釘着耐力壁と同等の結果が得られたことから、耐力壁への粘着テープ使用の可能性が示された。さらに、テープ接合を小領域の接合箇所の連続体とみなし、接合部の小試験体によるせん断荷重-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、力学的平衡条件より耐力壁の荷重-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（設計）することが可能となった。

以上のように、本研究の成果は新規性、独自性等の生物材料工学分野における高度の学術的価値を有し、学術研究に大きく貢献するものである。また、木材科学、木造建築などの木材利用学関連の研究領域に対しても価値ある知見を提供するものである。よって、本審査委員会は本論文が博士(農学)の学位を授与するに十分価値あるものと認定した。

試験の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 第	号	氏名	小川 敬多
試験担当者	主査 佐々木康寿 土川 覚、山本 浩之、山崎真理子、安藤 幸世			
(試験の結果の要旨)				
平成29年 2月 8日学位審査委員会において、主論文の内容を中心としてこれに関連する科目の学識および研究能力について試問し審査した結果、合格と判定した。				