

氏 名	こよう HU RONG
学位(専攻分野)	博 士 (学 術)
学 位 記 番 号	博 甲 第 1 0 9 1 号
学位授与の日付	令和 5 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 建築学専攻
学 位 論 文 題 目	中国伝統木造建物の挙動予測のためのファイバー要素を用いた解析モデルの開発
審 査 委 員	(主査)准教授 村本 真 教授 金尾 伊織 教授 満田 衛資

## 論文内容の要旨

本論文は、中国伝統木造建築の保存と修復のために必要な梁要素による構造解析モデルの構築手法を検討したものである。中国伝統木造建築の力学特性は十分に解明されていない状況にあり、伝統木造建築物の保存・修復設計のための規準の整備が求められている。このような状況から信頼性が高く計算効率が良い数値解析法の開発が求められている。本論文では、蟻落とし（燕尾榫）接合部の履歴特性と柱の傾斜復元力挙動を追跡するためのモデル化手法を提案している。これらを用いて、平面架構の挙動を予測し、繰り返し変形時の柱の残留応力と柱脚の劣化が架構全体の挙動に与える影響を検討し、提案した解析モデルの応用を示している。

論文は第 1 章から第 5 章で構成されている。

第 1 章では、研究の背景と中国伝統木造建物の概要が記されている。

第 2 章では、柱-横架材接合部に蟻落とし（燕尾榫）接合部を有する軸組の応力伝達機構をファイバー要素の構成則でモデル化する手法が検討されている。中国伝統木造における燕尾榫接合部を対象に接合部の蟻部分と蟻穴間のめり込み挙動を考慮して単調載荷と繰り返し載荷時の解析モデルが提案されている。他研究者らによる単調載荷と繰り返し載荷実験の解析を通して、接合部のモーメント-変形角曲線が追跡され、解析モデルの妥当性が示されている。ただし、この解析モデルの適用範囲は  $0.1 \text{ rad}$  までとされた。また、この解析モデル上の構成則の組合せを変化させることで、初期剛性は接合部の上下面のめり込みで決定され、上下面が降伏した後、側面のめり込みが作用してモーメント-変形角関係が推移することが明らかとなっている。

第 3 章では、柱の傾斜復元力挙動を追跡するための解析モデルの構築方法が述べられている。柱脚または柱頭の平面梁-柱有限要素のファイバー要素にそれぞれのめり込み特性を表現する構成則モデルが与えられている。この構成則モデルは、柱脚または柱頭が接触する素材によって異なる特性を持たせる必要があることが短柱の実験を通して明らかとなっている。柱に作用する鉛直荷重の大きさが異なる場合や柱寸法が異なる場合のいずれにおいても提案した構成則モデルが有効であることが実験の解析を通して確認されている。これらの解析結果によって柱脚と礎石間のめり込みによる初期変形は柱傾斜復元力に重要な役割を果たしていることが明らかとなっている。

る。

第4章では、第2章と第3章で得た知見をもとに、木材の異方性と各構造要素の変形特性を考慮した上で中国伝統構法による平面架構の建物全体のモデル化手法と各構造要素のモデル化手法について検討されている。実大平面架構の静的載荷実験の変形挙動を概ね追跡できたことから解析モデルの妥当性が確認されている。また、提案した残留変形を考慮した解析モデルを用いて架構全体の挙動が検討され、提案した解析モデルによって残留変形を有する場合の木造架構の静的挙動についても評価できることが述べられている。さらに、残留変形を考慮する解析モデルは、柱脚に腐朽が生じた場合についても応用できることが示されている。本章で提案した解析モデルは中国伝統木造建築の静的な挙動について、今後のさらなる議論に活用できる基礎モデルとなっている。

第5章では、本論文で得た結果をまとめている。

## 論文審査の結果の要旨

申請論文は、中国伝統木造建築の保存と修復のためにその構造性能を予測するため、平面梁-柱有限要素法のファイバーモデルで構造解析モデルを構築する手法について述べたものである。提案されたモデルはファイバー要素に接合部の応力伝達と柱の局所的なめりこみ特性を考慮した構成則に特徴がある。

接合部のモデル化では、蟻落とし接合部に生じる応力伝達やめり込みを個別に構成則としてモデル化し、それらを並列したファイバー要素で考慮することで、接合部挙動を追跡できる。申請論文に示された蟻落とし接合部以外への適用も期待される。柱の傾斜復元力挙動のモデル化では、柱脚が地面に対してめり込む状況を詳細に観察した結果、素材の剛性が発現する前に初期の剛性変化があることに着目している。この剛性変化は、柱脚が礎石や鋼材と接する場合にそれぞれ異なることが木材の短柱圧縮実験の結果を整理することで確認されている。申請論文の提案までは柱の傾斜復元力挙動の予測に、柱脚または柱頭にその履歴特性を表現するばね要素を与えて解析する必要があった。梁-柱有限要素のファイバーモデルに局所的なめり込み特性を与えることにより、特別な工夫を要せず柱の傾斜復元力挙動の追跡に成功している。そして、これらのモデル化手法を平面骨組の全体解析に適用し、静的な倒壊挙動を追跡している。実大平面架構の静的載荷実験の解析を通して、建物の挙動を概ね追跡できたことから、部分要素実験で構築した解析モデルが全体解析モデルに適用可能であることが示されている。

さらに、申請論文では、中国伝統木造建築の保存と修復に必要な建物性能を予測するため、新たに木部材の繰り返し変形による残留変形を考慮したモデルが提案されている。建物の繰り返し載荷の影響をファイバー要素の断面モデルの修正によって可能としている。この応用例として、柱脚の腐朽を表現するモデルが提案されており、柱の腐朽が建物全体の構造性能に与える影響を効果的に把握する手法が示されている。提案されたこれらの解析モデルは中国伝統木造建築の静的な挙動を議論するための基礎モデルとなり極めて有意義であり高く評価できる。

本論文は、審査を経た以下の 2 編の論文にその内容が発表されている。

[1] 胡 蓉, 村本 真, 井上祥子, 李 軍: 梁-柱有限要素法のファイバーモデルを並列化して接合部の履歴特性を考慮した解析法-蟻落とし接合部の繰り返し挙動の解析-, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 67B, pp. 403-412, 2021.3

[2] 胡 蓉, 村本 真: ファイバーモデルで柱脚の応力状態を考慮した柱の傾斜復元力挙動の解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 87 巻, 第 802 号, pp. 1201-1212, 2022.12

また、本論文は、以下の投稿中の論文の内容を含んでいる。

[3] Rong Hu, Makoto Muramoto and Jun Li: A fiber beam-column modeling method for damage evaluation of traditional Chinese timber building, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 16p.(投稿中)