

京都大学	博士（工学）	氏名	符 栄吉(FU RONGJI)
論文題目	建物の非接触常時微動計測と柱の非破壊試験による伝統木造建物の耐震診断に関する研究		
（論文内容の要旨） 本論文は、日本の伝統木造建物の耐震性能を効率的かつ高精度に評価するために、レーザードップラー速度計（以下、LDV）を用いた建物の非接触常時微動計測と衝撃弾性波試験による柱の非破壊試験を導入した新たな耐震診断法を提案することを目的としている。提案する耐震診断法は 2 段階で構成されており、屋外から効率的に実施可能である簡略耐震診断法および、簡略耐震診断法において耐震性能が低いと判定された建物に対して各柱の材料特性を考慮可能である詳細耐震診断法からなる。本論文は 7 章で構成されており、以下に章ごとの内容と得られた成果を説明する。 第 1 章は序論であり、研究の背景と既往の研究について述べるとともに、研究の目的と論文の構成を示している。 第 2 章では、1 台の LDV を用いた伝統木造建物の非接触常時微動計測法を提案し、東福寺境内の建物 8 棟に適用してそれらの固有振動数を評価し、接触式加速度センサーを用いた既往の計測結果と比較することで精度検証を行っている。計測の結果、提案法によって、建物の固有振動数に対応するピークを明瞭に捉えることができるフーリエスペクトルが得られることを検証している。LDV を用いて評価した固有振動数が、既往の研究で接触式加速度センサーを用いて評価した固有振動数とほぼ一致していることも確認している。さらに、LDV は、約 30m 離れた位置からでも固有振動数を評価でき、計測機器を設置できない建物、近づくことができない建物にも適用可能である。 第 3 章では、2 台の LDV を用いた伝統木造建物の固有モード形の評価法を提案し、3 棟の茅葺民家と東寺五重塔に適用して固有モード形を評価している。はじめに、1 棟の建物に対して、複数回に分けて計測した LDV の計測記録の分析方法が、固有モード形の評価に及ぼす影響を考察している。この結果を複数台の接触式加速度センサーの同時計測により評価した固有モード形の結果と比較することで、2 台の LDV を用いた最適な固有モード形の評価法を提案している。次に、低層の伝統木造建物に対して本提案法を用いることにより、屋外から水平面内の並進 2 方向および回転が卓越する固有モード形を評価できることを確認している。東寺の五重塔では、提案法により 6 つの固有モード形を抽出している。 第 4 章では、ヒノキとスギの小試験体に対して非破壊試験である衝撃弾性波試験と破壊試験である曲げ試験を行い、衝撃弾性波試験により非破壊で伝統木造建物の柱の曲げヤング係数を推定するために、動的ヤング係数と曲げヤング係数の関係式を両者の実験結果の回帰直線により構築している。その際、産地が異なるスギの小試験体を用いて、各産地の回帰直線に有意な差が生じないことを明らかにし、提案法では産地に関係なく各樹種の回帰直線を用いることが可能であることを確認している。動的ヤング係数と曲げヤング係数の関係式により推定した曲げヤング係数を日本農林規格の機械等級区分に当てはめることで、基準曲げ強度を設定する方法を提案している。さらに、柱の実大試験体に対して衝撃弾性波試験と曲げ試験を実施することで、提案法の有効性を検証している。			

京都大学	博士（工学）	氏名	符 荣吉(FU RONGJI)
第 5 章では、文化財建物 9 棟の計 637 本の柱に対して非破壊試験である衝撃弾性波試験を実施し、第 4 章で構築した方法により柱の曲げヤング係数と基準曲げ強度を評価することで、実存建物の柱の曲げヤング係数と基準曲げ強度の分布を統計的に分析している。その結果、本章で対象としたヒノキとスギの柱では、非破壊試験を行うことで、9 割以上の柱の曲げ強度が既往の耐震診断で一般的に用いられている無等級材の基準曲げ強度より高く設定されることを確認している。既往の耐震診断で用いられることの多いヒノキとスギの無等級材の基準曲げ強度を用いることは、文化財建物に使われる品質の高い柱に対して、基準曲げ強度を過小評価する可能性がある。一方で、本章で対象としたマツとツガの柱の場合には、推定された基準曲げ強度は既往の耐震診断で一般的に用いられている無等級材の基準曲げ強度を下回ることが多いことを確認している。既往の耐震診断では、マツとツガの柱の基準曲げ強度を過大評価する可能性がある。以上は、第 4 章で構築した衝撃弾性波試験を用いた基準曲げ強度の設定法を耐震診断に適用することの重要性を示唆している。 第 6 章では、伝統木造建物の耐震性能を効率的かつ高精度に評価するための 2 段階の耐震診断法を提案している。その一つは、第 2、3 章で構築した伝統木造建物の固有振動数と固有モード形の評価法を用いた、耐震性能が低い伝統木造建物を屋外から効率よく選別するための簡略耐震診断法である。もう一つは、第 4 章で構築した非破壊試験による柱の基準曲げ強度の評価法に基づいた、簡略耐震診断法で選別された建物の詳細耐震診断法である。はじめに、簡略耐震診断法で、LDV を用いた非接触常時微動計測により得られた固有振動数と固有モードを既往の最大応答評価法に適用することで地震時の建物の最大応答変形角を評価するとともに柱折損の可能性を簡略的に評価し、次に、簡略耐震診断法のクライテリアを満足できない建物に対して詳細耐震診断法を適用する提案をしている。その際、各柱の基準曲げ強度を考慮できるように、柱の非破壊試験法を用いて柱の折損評価を行う。提案した 2 つの耐震診断法を実建物に適用し、それらの結果を既往の耐震診断法の結果と比較している。非接触常時微動計測を用いた簡略耐震診断法により評価された建物の 1 階の応答変形角は、概ね既往の耐震診断法の結果と対応しており、簡略耐震診断法の有効性を示している。また、柱の非破壊試験を用いた詳細耐震診断法により、各柱の基準曲げ強度を推定し、柱の折損判定を実施した結果、対象とした建物では、既往の耐震診断法と比べて折損の可能性があると評価された柱が減少し、各柱の材料特性に即した柱の折損評価が可能であることを例証している。 第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、日本の伝統木造建物の耐震性能を効率的かつ高精度に評価するために、レーザードップラー速度計（以下、LDV）を用いた建物の非接触常時微動計測と衝撃弾性波試験による柱の非破壊試験を導入した新たな耐震診断法を構築することを目指としており、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 1 台の LDV を用いた伝統木造建物の非接触常時微動計測法を提案し、それを東福寺境内の 8 棟の建物に適用して、非接触で固有振動数を評価した。また、接触式加速度センサーによる既往の計測結果と比較することで、その精度を検証した。その結果、提案する非接触常時微動計測法により、建物の固有振動数に対応するピークを明瞭に捉えることができるフーリエスペクトルが得られることを確認した。さらに、LDV の計測結果により評価した固有振動数は、既往の研究において接触式加速度センサーにより得られた値とほぼ一致していることを確認した。
2. 2 台の LDV を用いた伝統木造建物の固有モード形の評価法を提案し、複数の接触式加速度センサーによる同時計測の結果と比較することで、固有モード形の評価精度を検証した。本評価法を 3 棟の茅葺民家と五重塔に適用した。
3. 伝統木造建物の柱に用いられる主要な樹種であるスギとヒノキについて、衝撃弾性波試験により非破壊で柱の曲げヤング係数を推定するための動的ヤング係数と曲げヤング係数の関係式を構築した。その際、スギの産地が関係式に及ぼす影響を考察した。また、推定曲げヤング係数に基づく柱の基準曲げ強度の設定法を提案した。さらに、柱の実大試験体を用いて提案法の有効性を確認した。
4. 提案した柱の基準曲げ強度の設定法を用いて、9 棟の計 637 本の文化財建物の柱の基準曲げ強度を統計的に調べ、スギ、ヒノキ、マツ、ツガの柱の曲げヤング係数および基準曲げ強度の分布を把握した。その結果、既往の耐震診断で一般的に用いられている基準曲げ強度は、樹種に依存して過大評価もしくは過小評価する傾向があることを明らかにした。
5. LDV を用いた伝統木造建物の非接触常時微動計測法と柱の非破壊試験法を導入し、効率よく耐震性能が低い伝統木造建物を選別する簡略耐震診断法と、選別された建物の詳細な耐震診断ができる詳細耐震診断法の 2 段階の耐震診断法を提案した。提案した耐震診断法を実建物に適用し、提案した耐震診断法の有効性を検証した。

以上により、本論文は、伝統木造建物の耐震性能評価に資する重要な知見を与えており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 7 年 2 月 18 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。