

2018 年度

東洋大学審査学位論文の要約

経年変化を考慮した伝統木造建築物の構造性能評価法に関する研究

理工学研究科 建築・都市デザイン専攻 博士後期課程

46G0151002 高岩 裕也

論文の要約

近年、我が国における国宝・指定文化財等の伝統木造建築物の内部公開・活用に伴う耐震化による安全性の担保が社会的義務となり、文化庁の策定した「重要文化財（建造物）耐震基礎診断実施要領（以下、文化庁指針と記す.）」に準拠した耐震診断により地震に関する構造性能が評価されるようになった。その文化庁指針は経年変化について考慮しておらず、対象の伝統木造建築物を構成している主耐力要素のせん耐力を積算的に評価しているのが現状である。その際に用いられる主耐力要素のせん断耐力を把握するための実験手法として、面内せん断実験等が用いられており、仕様の差異・材料によるばらつき等について既往研究で多くの実験的研究が行われ、工学的知見が蓄積なされてきた。しかしながら、経年変化を考慮した評価はまだまだ整理されておらず、過度な補強・改修等により、その伝統木造建築物が有する建設当初からの伝統・文化的な価値を損なう可能性があるため、高精度な構造性能評価を行う必要がある。

そんな中、2018年6月に文化財保護法改正案が閣議決定され、今後、登録文化財などの公開・活用や軽微変更を市区町村の判断で行うことができるようになる。そこで、従来の文化庁指針が対象としていた国宝・指定文化財レベルの文化財建造物ではなく、登録文化財などの耐震診断の需要拡大が見込まれる。ここで、登録文化財の多くは住宅規模のもので、軸組が細く、壁が主耐力要素として構築されている伝統木造建築物であり、文化庁指針は、社寺のような軸組が太く主耐力要素として構築されているものを対象として作成されたものであることから適切に構造性能を評価しきれていないという問題が露呈する。よって、今後需要が見込まれる伝統木造建築物の耐震診断に対して、高精度に、かつ簡便に構造性能評価する方法を構築することが喫緊の課題であるといえる。そのような背景の下、注目を集めているのが非破壊試験の一種である常時微振動測定であり、半解体・部分解体等を行わないで、直接的に、簡便に構造性能を評価することが期待されている。しかしながら、実在する建築物に対する耐震診断への適応においていくつかの課題が残されている。

本研究は、上記の研究背景を鑑み、伝統木造建築物の構造性能に関する3つのテーマに対して実験的・解析的研究を実施する。そして、伝統木造建築物の変形依存性、固有振動数の振幅依存性・経年依存性についてそれぞれ闡明し、経年変化を考慮した伝統木造建築物の構造性能評価法の提案を行うことを目的とする。目的達成のために、本論文は以下のような6章で構成される。

第1章 序論

第2章 伝統木造建築物における構造性能の変形依存性に関する研究

第3章 伝統木造建築物における固有振動数の振幅依存性に関する研究

第4章 伝統木造建築物における固有振動数の経年依存性に関する研究

第5章 経年変化を考慮した伝統木造建築物の構造性能評価に関する研究

第6章 結論

それら各章の研究の関係性を踏まえて図1のように研究計画を立案した。

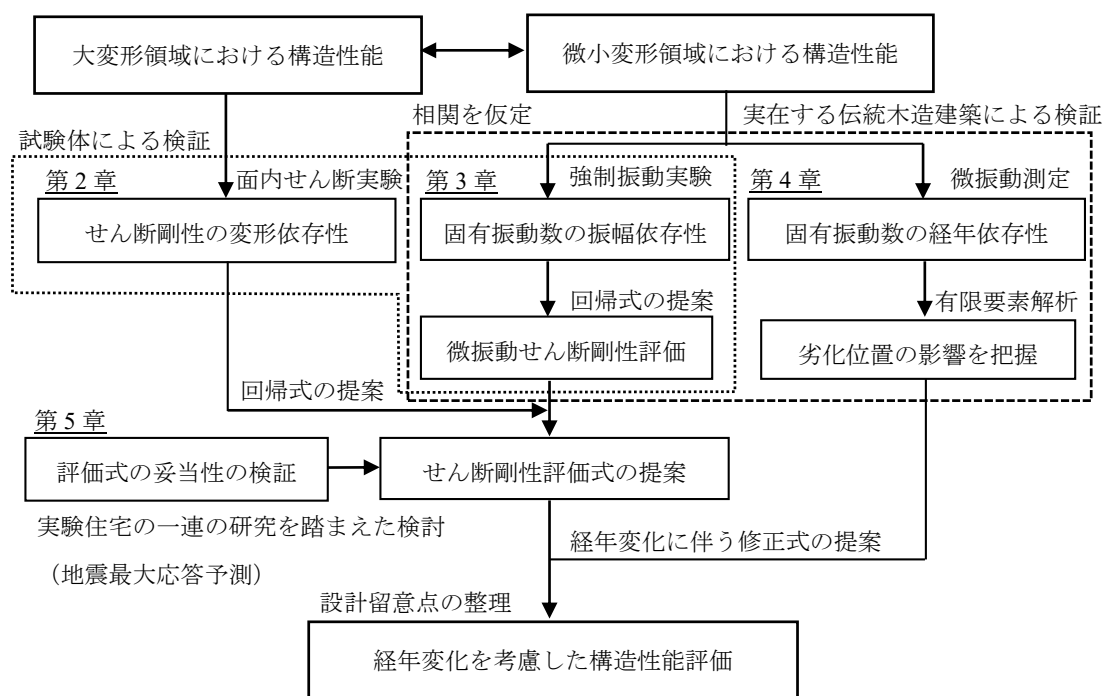


図1 研究フロー

第1章 序論では、伝統木造建築物に関する社会的・歴史的背景を踏まえて、これまで行われてきた既往研究の現段階における到達点および課題について述べ、本研究の目的を示した。

ここで、特筆すべき事項として、従来関連がないとされていた伝統木造建築物における微小変形領域の等価剛性から大変形領域の剛性の評価を本研究では試みるべく、伝統木造建築物の挙動を大きく2つの挙動に分けて分析を行っており、その挙動を微小変形領域から小変形領域までの初期挙動と、小変形領域から大変形領域までの主耐力要素の損傷挙動として設定している。それら挙動を踏まえて、伝統木造建築物における構造性能の変形依存性、固有振動数の振幅依存性、経年依存性という研究テーマを3つ設定し、本論の各章に割り当てることで論理を構築している点に特色がある。

また、建築物の構造性能を評価するには、変形性状、応力性状、振動性状を評価する必要がある。その3つの性状に関わるファクターに剛性がある。剛性には、曲げ・せん断・軸系が存在するが、伝統木造建築物の多くは低層、かつ土塗り壁で構築されているため、せん断剛性が重要なファクターとなってくる。よって、本研究では伝統木造建築物の構法的・構造的特徴を考慮し、ばらつきの大きい特定変形角時のせん断耐力ではなく、せん断変形角 $1/600\text{rad}$ 時におけるせん断剛性を基準とした剛性低下率に着目して定式化を行い、土塗り壁を有する建築物の大変形領域におけるせん断剛性を評価している。また、解体・部分解体等を想定し、地盤上に構築した実大住宅規模および単位壁要素試験体を新築・再築し、実験・分析を行っている点に

も特色がある。さらに、実在する対象建築物から定量的に振動データを収集し、統計的手法により経年変化を考慮した構造性能を評価することから、それらの研究とは一線を画しているといえる。

第2章 伝統木造建築物における構造性能の変形依存性に関する研究では、本研究の最終目的である経年変化を考慮した伝統木造建築物の構造性能について説明するにあたって、まずは経年変化を考慮せずに伝統木造建築物の構造性能の変形依存性について明らかにすることを目的とした実験的・解析的研究を実施した。はじめに、伝統木造建築物を模した実大住宅試験体を対象とした一連の実験的研究を実施し、主耐力要素である土塗り壁の面内せん断実験を実施することで主耐力要素のせん断特性について把握を行った。ここで、新築試験体に加えて半解体・全解体を想定した再築試験体を構築し、その影響についても整理した。その結果、せん断変形角 $1/120\text{rad}$ 程度までは新築試験体と比較して再築試験体の耐力 $Q_{1/120}$ が $1.1\sim 1.5$ 倍程度高く、初期剛性および最大耐力のばらつきが大きいことを確認した。そこで、せん断変形角 $1/600\text{rad}$ 時の剛性 $K_{1/600}$ を基準として変形角増大に伴う小変形領域の剛性からの変動率を定式化することにより、新築、再築の影響を極めて小さいものとして捉えることを可能とした。これは、耐力のばらつきが多い土塗り壁に対して有効的な評価方法である。以上のことから、第2章では、伝統木造建築物の構造性能の変形依存性について明らかにした。

第3章 伝統木造建築物における固有振動数の振幅依存性に関する研究では、伝統木造建築物における微小変形領域と小変形・大変形領域の構造性能の関係性について明らかにした。はじめに、既往研究のデータを整理すると、常時微振動測定結果から振動論に基づいて算出した等価剛性 K_m と層間変形角 $1/600\text{rad}$ 時の割線剛性 $K_{1/600}$ の比率 $\beta = K_{1/600} / K_m$ (以下、相関係数 β と記す。) には高い相関があることが明らかになった。そこで、相関係数 β を算出した結果、 $\beta = 0.4\sim 0.6$ に推移することを確認した。この結果は、直接的な結びつきはないとされていた常時微振動測定で得られる固有振動数と初期剛性の相関を示している。そこで、第2章で扱った実験住宅の自由振動実験により得られる小・大変形領域および常時微振動測定により得られる微小変形領域の固有振動数を比較した結果、相関係数 $\beta = 0.34$ となることを確認した。ここで、自由振動実験は、対象建築物に初期変位を与えて急激に除荷する方法であるため、実在する建築物では測定が困難であるという問題が露呈する。そのため、比較的簡便に計測が可能である強制振動実験に着目し、架構試験体を対象とした起振機による振動実験を行い、微小変形領域の固有振動数から小変形・大変形領域の固有振動数を推定する手法の構築についても実施した。その結果、微小変形領域の固有振動数から推定した構造性能は、小変形領域において引張実験結果を 89% の精度で追従し、相関係数は $\beta = 0.38$ となった。以上のことから、強制振動実験と常時微振動測定を組み合わせることで、非破壊で微小変形領域の固有振動数から小変形領域の固有振動数を推定する可能性について示した。これら一連の研究によって、伝統木造建築物の固有振動数の振幅依存性について明らかにした。

第4章 伝統木造建築物における固有振動数の経年依存性に関する研究では、伝統木造建築物における固有振動数の経年依存性を把握することを目的に、実在する伝統木造建築物を対象とした一連の調査・測定、それらを踏まえた分析・解析的研究を実施する。目的達成のためには伝統木造建築物の多様な構法・様式等を分類し、それら対象に対して、総合的な研究を行うべきであるが、経年変化に関する研究手法の構築を兼ねて、現段階では端緒として、経年変化により木部の劣化が顕著に確認されている「大壁仕様の土塗り壁を有する伝統木造建築物」（以下、蔵造建築物と記す。）を研究対象とし、実在する蔵造建築物を対象とした2002年7月と2014年12月の2回に渡る常時微振動測定による構造モニタリングを実施した。ここで、本研究で端緒として扱った蔵造建築物の常時微振動測定データは、一部分の期間（2002年～2014年）におけるデータであるため、具体的な劣化に関する数値の取り扱いには注意されたい。測定の結果、梁間・桁行方向ともに経年変化に伴い固有振動数が低下していることを確認した。この結果を用いて非減衰自由振動理論により、等価剛性 K_m を算出すると、12年間で約70%の剛性低下を確認した。ここで、その要因を把握するために、対象とした実在する蔵造建築物および隣接する同時期に建設された蔵造建築物において建物損傷調査を行った結果、蔵造建築物の腰巻付近の外部側腰板における柱の腐朽が確認された。そこで、建築物全体に対する軸組剛性の寄与率の確認を行い、経年変化による柱脚の腐朽が建築物の構造性能に及ぼす影響を検討した。検討の結果、せん断剛性 $K_{1/600}$ において、各方向で約30%が軸組の剛性であることを確認し、蔵造建築物の柱脚劣化が構造性能に与える影響が大きいことを確認した。最後に、それら劣化位置を変数とした地震応答解析を行い、最大応答増大率を算出し、慣例となっている劣化を想定して耐力に一律0.7を乗じるなどの措置ではかえって危険側になることを示した。以上の研究によって伝統木造建築物における固有振動数の経年依存性について明らかにした。

第5章 経年変化を考慮した伝統木造建築物の構造性能評価に関する研究では、第2章、第3章、第4章で構築した研究知見を踏まえて、第2章で実施した静的面内せん断実験により得られた剛性低下率－変形角関係を定式化して、土塗り壁を主耐力要素とする実験住宅の常時微振動測定結果に第3章で得られた相関係数 β を乗じることで、大変形時のせん断剛性を推定する評価法を提案^(図2)した。ここで、常時微振動測定結果には経年変化の影響が含まれていることについては第4章で示している。その結果、載荷試験により評価した値と概ね一致する結果となった。この結果は、対象建築物の層間変形角 $1/600\text{rad}$ 時のせん断剛性が得られれば、対象建築物の常時微振動測定結果と主耐力要素の面内せん断実験結果より、大変形領域におけるせん断剛性を概ね推定することが可能であることを示している。また、実験住宅に関する一連の研究知見を踏まえて、常時微振動測定結果を用いて地震最大応答を推定する手法を、強震計により計測した応答波形を用いた検証により提案した。まず、強震計観測結果から、実験住宅1階中央部梁間方向の最大層間変形角は $1/99\sim 1/75\text{rad}$ 程度である事が確認できた。常時微振動測定・応答スペクトル法を用いて地震最大応答を算出した結果、 β 値が実験値の場合、梁間方向の応答変形角は $1/68\sim 1/63\text{rad}$ となり、2階床レベルにおける変位では層間変形角 $1/75\text{rad}$ に対して 1cm 以下の

誤差であり、強震計観測結果を概ね再現しているといえる。最後に、経年変化を考慮した応答予測を行い、経年変化に伴う地震応答の変化について考察を加えた。

ここで、本研究の到達点を踏まえて、提案した構造性能評価法の適応範囲について述べておく。まず、本研究で提案した評価式は、伝統木造建築物の靱性能に期待しているため、土塗り壁の構面に極度の劣化が無い場合で、急激な荷重低下・脆性的な破壊等が無い変形領域のみ適応できるため、経年変化を想定した要素の面内せん断実験により定量化することで、実状に応じて回帰式を修正する等の措置が必要である。また、提案した評価式は、伝統木造建築物の構法的特徴を踏まえて、構造性能における重要なファクターとなるせん断剛性を評価することによって、伝統木造建築物の構造性能評価が簡便に、かつ高精度に可能となっているため、常時微振動測定結果および主耐力要素の実験結果があれば、寺社仏閣等の大規模伝統木造建築物への適応も理論上は可能である。しかしながら、本研究で検証した対象試験体は住宅規模であることから、寺社仏閣等の大規模伝統木造建築物を対象とした検証を実施することによって構造性能における重要なファクターを特定し、研究データを構築していく必要がある。

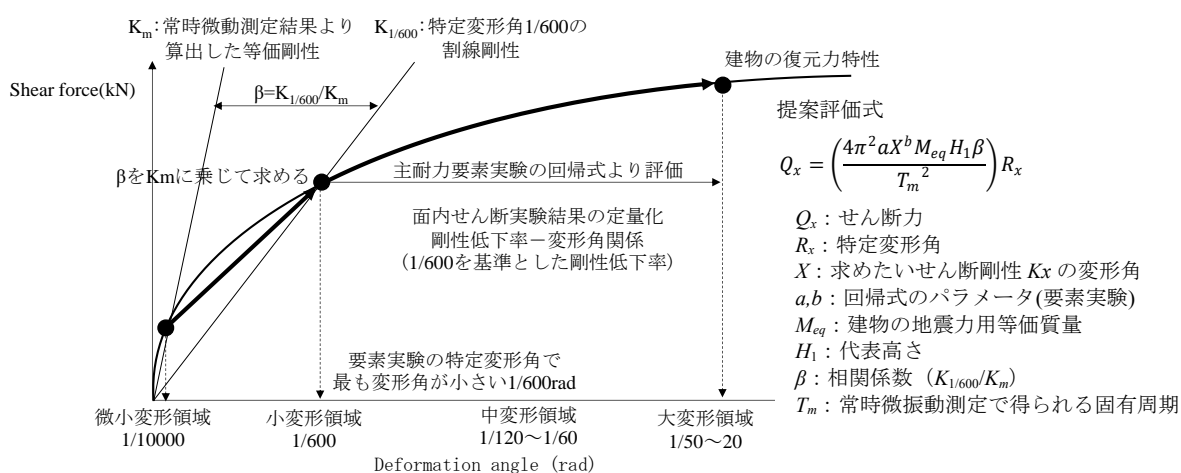


図2 本研究で提案するせん断剛性評価手法

第6章 結論では、経年変化を考慮した伝統木造建築物の構造性能評価法に関する一連の研究成果を総括的に述べ、本研究の結論を示した後に、各章において闡明した知見および提案した構造性能評価法の適応範囲についてそれぞれ示した。

ここで、各章で得られた主要な工学的知見は以下の4点である。

(1) 伝統木造建築物における構造性能の変形依存性

実験住宅および主耐力要素である土塗り壁に関する変形依存性を実験・解析的に把握し、主耐力要素のせん断変形角 1/600rad 時の剛性 $K_{1/600}$ を基準とした変形増大に伴う剛性の変動率を定式化することにより伝統木造建築物の構造性能の変形依存性について明らかにした。

(2) 伝統木造建築物における固有振動数の振幅依存性

常時微振動測定によって得られる固有振動数から振動論に基づいて算出した等価剛性 K_m と層間変形角 $1/600\text{rad}$ 時の割線剛性 $K_{1/600}$ の相関 $\beta = K_{1/600} / K_m$ について振動実験により定量的に明らかにし、伝統木造建築物の固有振動数の振幅依存性について明らかにした。

(3) 伝統木造建築物における固有振動数の経年依存性

実在する木造建築物を対象とした常時微振動測定を用いた構造モニタリングによって等価剛性 K_m の経年依存性を定性的に把握し、調査・数値解析に基づいて耐震性能への影響を定量化することで、伝統木造建築物における固有振動数の経年依存性について明らかにした。

(4) 経年変化を考慮した伝統木造建築物の構造性能評価式

第2章から第4章までの知見を踏まえて、経年変化を考慮した伝統木造建築物の構造性能評価式を提案し、同式に既往実験結果を適応させてその妥当性を明らかにした。

本研究では、上述した(1)~(3)の工学的知見を踏まえた経年変化を考慮した伝統木造建築物の構造性能評価式の提案およびその妥当性の検証(4)を行っている。具体的には、構造性能の評価対象である伝統木造建築物の常時微振動測定によって振動性状、主耐力要素の実験結果の定量化によって変形状を把握することで、構造性能を求める時に必要となるせん断剛性評価式を提案している。提案した評価式は、伝統木造建築物の構法的特徴を踏まえて、構造性能における重要なファクターとなるせん断剛性を評価することによって、伝統木造建築物の構造性能評価が簡便に、かつ高精度に可能となっている。また、式のパラメータである要素実験結果の項について、既往研究の面内せん断実験データを評価・定量化することで活用できるため、研究成果の実務における汎用性についても大いに期待できる。これは、実務設計において本構造性能評価法を用いる場合には、本研究で対象とした土塗り壁以外の耐力要素に対しては、設計者が適切に設計クライテリア（目標値）を設定する必要があるものの、伝統木造建築物の多様な耐力要素仕様に対して適応することが可能な工学的知見である。さらに、従来の伝統木造建築物を対象とした構造性能評価では評価されていなかった経年変化が構造性能に及ぼす影響についても、直接的に評価対象から常時微動測定によって振動性状を求めていることから可能となり、既往研究の課題であった実在する建築物への適応についても達成している。

2018年6月に文化財活用法改正案が閣議決定されたことから、今後は、登録文化財等の木造建築物の利活用に伴い、軸組が細く、壁を主耐力要素とする伝統木造建築物の耐震診断の需要が見込まれる。その際に、本研究で提案した構造性能評価法を用いた耐震診断を実施することで、適切な構造性能の評価を簡便に、かつ高精度に実施することが可能となり、それに伴う適切な耐震化が期待される。このことは、伝統木造建築物が有する建設当初からの歴史意匠・文化的な価値をより多く保存することに繋がり、将来的な伝統木造建築物の価値・技術の継承に繋がることと考える。