

氏名(本籍地)	高岩裕也(東京都)			
学位の種類	博士(工学)			
報告・学位記番号	甲第443号(甲工第112号)			
学位記授与の日付	平成30年9月25日			
学位記授与の要件	本学学位規程第3条第1項該当			
学位論文題目	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			
論文審査委員	主査	教授	博士(工学)	松野浩一
	副査	教授	工学博士	秋山哲一
	副査	教授	工学博士	石田哲朗
	副査	教授	博士(工学)	野澤千絵
	副査	神奈川大学教授 工学博士		内田青蔵

【論文審査】

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断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、工学的知見の蓄積がなされてきた。しかしながら、経年変化を考慮した評価は今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われる可能性があるため、精度の高い構造性能評価を行うことが求められている。

このような社会背景の中、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・活用や軽微な変更を市区町村の判断で行うことができるようになった。そこでは、従来の文化庁指針が対象としていた国宝・指定文化財等建造物ではなく、登録文化財建造物などの耐震診断の需要拡大が見込まれる。登録文化財建造物の多くは住宅規模のもので、軸組の部材が細く、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

ある。文化庁指針は、社寺のような軸組の部材が太い主耐力要素で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、住宅規模の構造性能を適切に評価しきれていないという問題が未解決である。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。

上記研究背景の下、本論文は、経年変化を考慮した伝統木造建築物の構造性能評価法の提案を行うことを目的として、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・解析的研究を実施して、研究対象建築物の変形依存性、固有振動数の振幅依存性と経年依存性についてそれぞれ定量的に明らかにしながら構造性能評価式を提案している。本論文は6章で構成され、各章の関連性は図1に示すように整理される。また、研究業績との関係を以下に紹介する研究業績番号を付記することで示した。

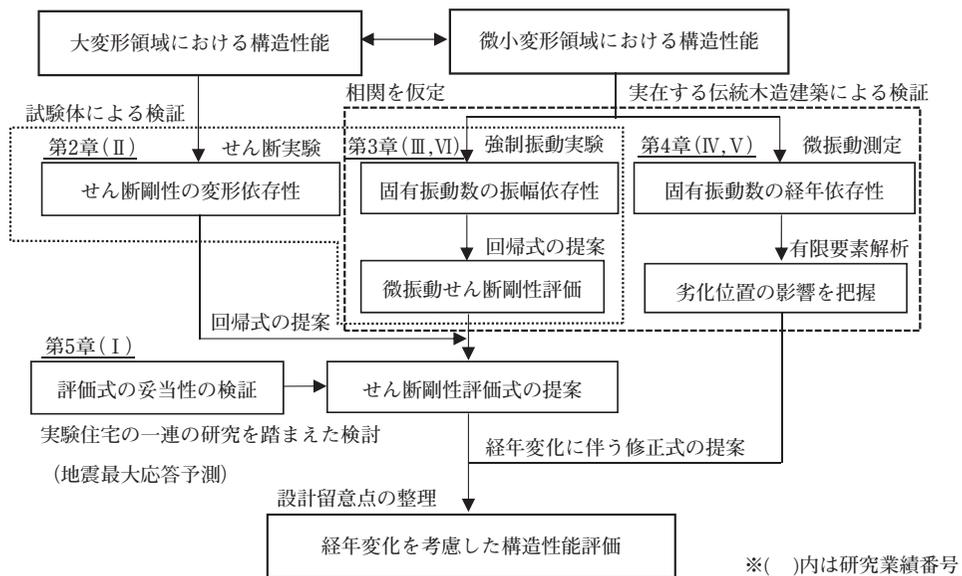


図1 論文構成

ここで、本論文テーマに沿った研究業績は以下の通りである。

原著論文（査読付き学術論文）3編

- I. 高岩裕也，松野浩一：土塗り壁を有する伝統木造建築物における地震最大応答変位の簡易評価手法の提案，日本建築学会技術報告集，第24巻，第58号，pp.1011-1016，2018.10（掲載決定）
- II. 高岩裕也，松野浩一：土塗り壁を有する伝統木造建築物の大変形領域におけるせん断剛性評価に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第82巻，第738号，

pp.1245-1253, 2017.8

- III. 高岩裕也, 富所俊平, 香取慶一, 松野浩一: 近代中規模木造建築物の振動特性と水平剛性の相関性に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.61B, pp.229-236, 2015.3

国際会議 (査読付き Proceedings) 3編

- IV. Yuya Takaiwa, Koichi Matsuno: INFLUENCE OF AGING ON SEISMIC PERFORMANCE OF "KURA-ZUKURI BUILDING", World Conference on Timber Engineering, August 20-23, 2018.8 (採用決定)
- V. Yuya Takaiwa, Natsumi Takayanagi, Syumpei Tomidokoro, Koichi Matsuno: AN AGING-RELATED STRUCTURAL PERFORMANCE VARIATION OF "KAWAGOE KURA-ZUKURI BUILDING", World Conference on Timber engineering, Contribution838, p.154, August 22-25, Vienna, Austria, 2016.8
- VI. Natsumi Takayanagi, Yuya Takaiwa, Syumpei Tomidokoro, Koichi Matsuno: THE SEISMIC REINFORCEMENT OF TRADITIONAL WOODEN BUILDING BY "THE WOODEN BUILT-UP SEISMIC WALL WITH RABBIT JOINT", World Conference on Timber Engineering, Contribution847, p.185, August 22-25, Vienna, Austria, 2016.8

以下に各章の内容と結論を概説する。

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。

ここでは、従来関連が無いとされて来た伝統木造建築物における微小変形領域の等価剛性と大変形領域の剛性の相関性を明らかにするために、伝統木造建築物の力学的挙動に対して (1) 微小変形領域から小変形領域までの初期挙動, (2) 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に着目して、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つ設定している。

建築物の構造性能を評価するためには変形状, 応力性状, 振動性状を評価する必要があり, その3つの性状共に関わるファクターとして曲げ・せん断・軸系の剛性評価を挙げながら, 研究対象の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ことを指摘している。そして, 本論文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剛性ではなく, せん断変形角 $1/600\text{rad}$ 時におけるせん断剛性を基準値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の評価

を目指すことを述べている。また、研究手法として既往研究データの活用、実在する対象建築物から定量的に振動データを収集して統計的手法により経年変化を考慮することなど研究手法の特色を示している。

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闡明するにあたって、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、既往研究で行われた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結果から、主耐力要素である土塗り壁の主耐力要素のせん断特性について評価を行った。ここでは、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の結果についても着目して検討を行い、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。そして、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、再築に関わらずせん断剛性を評価できることを可能とした。この成果は、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。

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ことで、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を明らかにした。そこで、相関係数 β を算出した結果、 $\beta = 0.4\sim 0.6$ で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無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課題が存在する。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実験的研究を実施した。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 $\beta = 0.38$ となることを示した。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、非破壊試験から得られた微小

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できる可能性を明らかにした。

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・解析的研究を実施した。目的達成のために伝統木造建築物の多様な構法・様式等を分類し、それらを対象に総合的な研究を行うべきであるが、ここでは経年変化に関する研究手法の構築を兼ねて、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。)を研究対象としている。そこで、既に2002年7月に常時微振動測定が実施された実在する蔵造建築物を対象とした構造モニタリングが2014年12月に実施された結果を再考し2回の測定から、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。この結果から非減衰自由振動理論により、等価剛性 K_m を算出して、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柱の腐朽を確認した。そこで、建築物全体に対する軸組による剛性の寄与率から、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。その結果、せん断剛性 $K_{1/600}$ において、梁間、桁行各方向において約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て、現在、設計実務で慣例となっている劣化を想定して耐力に一律0.7を乗じるなどの構造性能評価との違いを解析的に示した。

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章で構築した研究成果を踏まえて、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から、大変形時のせん断剛性 $K_{1/50\sim 1/20}$ 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。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 K_m に相関係数 β を乗じることで、大変形時のせん断剛性 $K_{1/50\sim 1/20}$ を推定した。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提案した。その評価精度の検証は、実験

住宅における強震計により計測した応答波形を用いて行った。

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1/99~1/75rad程度である事を確認した。常時微振動測定結果を用いて応答スペクトル法から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1/68~1/63radとなり、2階床レベルにおける変位では層間変形角1/75radに対して1cm以下の誤差となることを解析的に算出し、強震計観測結果を概ね再現していることを示した。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。

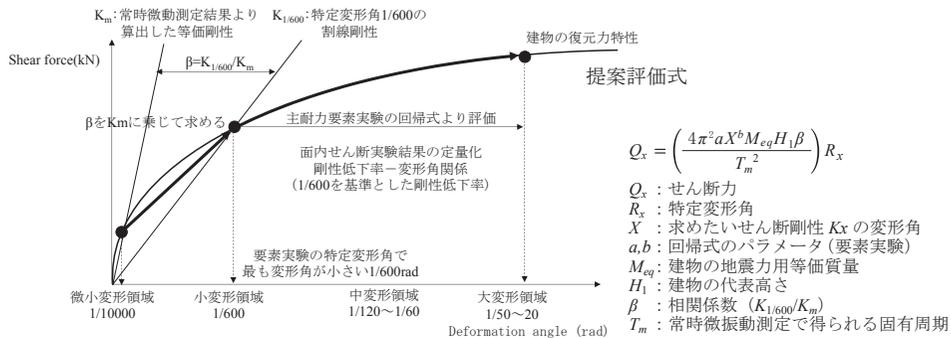


図2 セン断剛性評価手法の提案

第6章 結論では、経年変化を考慮した伝統木造建築物のせん断剛性評価式の提案を目的とした一連の実験的・解析的研究によって解明した工学的知見を示し、本論文の結論を示した。本論文で明らかにした事柄は、以下の通りである。

- (1) 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) 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1/600rad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) 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) 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せん断

剛性評価式を提案し、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、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することで、上述した(1)～(3)の工学的知見を得た。そして、それら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せん断剛性評価式の提案およびその妥当性の検証(4)を行った。そして、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性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。

提案した評価式を用いて、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を簡便に、かつ高精度に行う事が可能となる。また、提案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・定量化することで多種の耐力要素にも活用できることを示した。

【審査結果】

これまで、我が国では文化財指定建造物を含む伝統木造建築物の保存活動が進められて来た。さらに昨今では、文化的価値を広く世界に発信しつつ地域文化の継承と地域活性化に向けて、これら建築物を観光資源として公開活用することが社会的要請となっている。しかし、対象となる伝統木造建築物は築年数が60年以上の建築物が大半でその耐震性が問題となっており、それらの活用に向けて耐震補強による地震発生時の安全確保が社会的義務となっている。現在、建築実務においては文化庁が策定した「重要文化財（建造物）耐震基礎診断実施要領」に準拠した耐震診断、耐震補強設計が実施されているが、同実施要領は経年変化に伴う材料劣化、部材や架構レベルの構造性能劣化などが考慮されておらず、学術的研究分野においても経年変化を考慮した評価法はいまだ整理されていないのが現状である。

本学位請求論文では、伝統木造建築物の微小変形から大地震時に発生する大変形領域までの変形性状に着目して弾塑性理論、振動理論から伝統木造建築物の経年変化に伴うせん断剛性評価式に基づく構造性能評価法の提案を目的としている。論文では、過去に実施された既往研究の実験データや実測データなども再評価しながら、伝統木造建築物の載荷実験および自由振動実験から構造性能の変形依存性を、研究対象建築物の常時微振動測定から固有振動数の振幅依存性と経年依存性を定量的に示している。そして、これらの研究成果を工学的に関連付けて経年変化を考慮した伝統木造建築物の微小変形領域から大変形領域に適用できる簡便で高精度のせん断剛性評価式に基づく構造性能評価法が提案されている。

これら一連の研究成果は、査読付き学術論文として日本建築学会構造系論文集に1報、日本建築学会技術報告集に1報、日本建築学会構造工学論文集に1報、計3報が筆頭著者で公表（内1報は、2018年10月公開）されている。加えて、国際会議 World Conference on Timber Engineering Contribution (WCTE) 2016に2報、WCTE 2018に1報、計3報（内2報筆頭著者、査読付き Proceedings）が国際的に公表されている。

また、本論文にあっては、経年変化と広い変形領域を考慮した評価式の提案に独創性が、既往研究データを用いて提案式の妥当性を検証したことで汎用性と適用性が、提案式の簡便、高精度であることに有用性がそれぞれ認められ、学位請求論文としての十分な内容を備えている。よって本論文は、博士（工学）の学位請求論文として十分な価値を有していると本審査委員会一同が判定した。また、理工学研究科（建築・都市デザイン専攻）の博士学位審査基準と照らし合わせても十分な研究内容であると認められる。従って、高岩裕也氏の博士学位請求論文は、本学博士学位を授与するに相応しいものと判断する。