

論文内容の要旨

氏名	景山 誠 <small>かげ やま まこと</small>
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工第188号
学位授与の日付	平成23年3月22日
学位授与の要件	学位規程第4条第1項該当
学位論文題目	木質ラーメンの構造性能評価法に関する研究
論文審査委員(主査)	教授 村上 雅英
(副主査)	特任教授 窪田 敏行
(副主査)	教授 田中 茂樹

木質ラーメンは、木製の柱、梁、半剛接の接合部で構成され、その直下に大きな開口を設けることができるので、狭小間口などの木造住宅には特に有効で需要が高い耐震要素である。しかし、木質ラーメン用いた木造建物の設計法が体系化されていないため、設計や建築確認の段階で構造安全性の確認の方法が問題となる場合がある。その理由として、木質ラーメンのせん断耐力は、負担する鉛直荷重に左右されるため耐力壁のように画一的に評価できないことや、曲げやせん断等の複合応力を受ける木質ラーメン接合部の構造性能の評価法、鉛直荷重を負担する木質ラーメンの挙動やせん断耐力の評価法、耐力壁と併用した層全体のせん断耐力の評価法が確立されていないことなどが挙げられる。このことから、複合応力を受ける木質ラーメン接合部の構造性能を適切に評価し、鉛直荷重の影響も含めた木質ラーメンの構造性能評価法、層全体のせん断耐力の評価法を構築することが重要といえる。また、木質ラーメンに関連する既往の研究の大半は、特定の仕様の接合部を対象とした実験報告の域を出ないものである。特定の仕様を対象としても、そこから他の仕様にも共通する知見を得ることが、木質ラーメンの評価法の確立につながると考える。

よって本論文では、特定の仕様の木質ラーメンを対象として

- ・複合応力を受ける木質ラーメン接合部の構造性能評価(第2章)
- ・木質ラーメンの水平せん断挙動の解明(第3章)
- ・数値解析による木質ラーメンの構造性能評価(第4章、第5章)
- ・木質ラーメンと耐力壁を併用した層全体のせん断耐力評価(第6章)

に着目し、これらの問題を解明するとともに、特定の仕様以外の木質ラーメンにも適用できる評価法を検討、提案することを目的とする。

第1章では、木質ラーメンの特徴を示し、接合部仕様や指針、既往の研究内容を分類、整理し、木質ラーメンを取り巻く現状と問題点と、これを基に本論文の目的を述べた。

第2章では、金物工法に用いる金物で構成される在来金物型ドリフトピン接合部について、曲げとせん断が同時に作用する場合の抵抗機構は、曲げによる引張側金物と圧縮される木部で曲げを、圧縮側金物でせん断を負担すると仮定した。この仮説の安全性を検証するとともに、柱頭および柱脚接合部が曲げ-せん断の複合応力を受ける構造性能を調べた。また、曲げとせん断の複合応力に対する検定式の妥当性を検討した。

これらを検討するため、接合部を抽出した試験体を用いて、せん断スパンを変数とした曲げ-せん断実験、純曲げ・純せん断実験といった一連の要素実験を実施した。複合応力の影響を調べるため、純曲げ実験でのモーメント M_0 、純せん断実験でのせん断耐力 Q_0 に対する複合応力時の作用モーメント M 、作用せん断力 Q の比 $M/M_0-Q/Q_0$ 関係を調べた。まず、柱頭接合部は柱芯と梁芯の交点である構造芯、柱脚接合部は柱木口を危険断面位置に仮定すると、この位置から加力点間距離つまりせん断スパンが短くなり作用せん断力が大きくなるほど負担できる曲げモーメントが上昇するという、工学的常識では理解しがたい結果になった。そこで、柱頭接合部は梁木口、柱脚接合部はドリフトピンの剛芯位置を危険断面位置に設定した結果、せん断スパンが短くなるほど負担できる曲げモーメントが低下するか一定で推移した。曲げモーメントが低下する場合は検定式に近くなった。この結果より、危険断面位置は部材に作用するせん断力が接合部内で金物或いは他方の部材へ伝達される位置に設定すべきとの知見が得られた。また、柱頭接合部では柱梁の構造芯から梁木口間、柱脚接合部では柱木口からドリフトピンの剛芯間の剛性は、接合部の回転剛性と比べて非常に高い。従って数値解析では危険断面位置に半剛接パネを配置するために剛域を設定することが、この接合部のモデル化として妥当と判断した。この知見を基に、LSB柱脚接合部を対象と

して危険断面位置を再評価して複合応力の検討を行い、危険断面位置の設定位置が重要であることを確認した。また、抵抗機構の仮説の安全性を一連の要素実験で検証するとともに、柱脚接合部に引張軸力が作用した構造性能を実験的に調べるために引張軸力を変数とした曲げ-せん断実験を実施し、引張軸力が20kN以下であれば構造性能に影響を与えないことを確認した。

第3章では、木質ラーメンの水平せん断挙動を調べるため、スパンと鉛直荷重の有無を変数とした水平加力実験の結果と考察を述べた。木質ラーメンのせん断耐力は一般的な方法である、荷重-変形角曲線の完全弾塑性評価から得られる特性値を基に算出される4指標の最小値とした。スパンは1820mmと3640mmの2通りとし、せん断耐力はスパンの短い方が若干高かった。鉛直荷重の有無で比べると、終局耐力 P_u 、最大荷重 P_{max} 、降伏耐力 P_y は鉛直荷重ありの方が低くなった。これに対し、初期剛性 K 、特定変形角時耐力 $P_{1/120}$ は、柱頭接合部の接合金物を固定するボルトの締付トルクの影響を受けて鉛直荷重の有無によって傾向が異なることを確認した。また、鉛直荷重を負担する木質ラーメンのせん断耐力は、柱頭接合部の早期の降伏と $P-\Delta$ 効果の影響を受けることが見出された。

木質ラーメンにおいて、スパンの短い場合や鉛直荷重を負担する際に付加される梁端部への作用せん断力や柱脚への作用軸力が木質ラーメンの構造性能に与える影響を、水平加力実験から推測した各接合部のモーメント-回転角関係と要素実験とを比較することで検討した。その結果、検討した範囲において、これらの力が接合部の挙動に与える影響は小さいことが確認できた。よって数値解析に用いる接合部の骨格曲線は、これらの影響を考慮せずに設定してよいことが見出された。

第4章では、木質ラーメンの構造性能を数値解析で評価することの妥当性を検証するため、解析モデルや各接合部の骨格曲線の設定方法を示し、解析結果と実験結果と比較した。解析モデルは柱材と梁材を等価な線材に置換し、柱頭と柱脚接合部は、剛域を考慮して危険断面位置に半剛接合部を配置した。各接合部の半剛接合部は、それぞれの要素実験から得られたモーメント-回転角関係を基に、複数の折れ点を持つ骨格曲線にモデル化した。数値解析は、強制変位増分による1方向非線形の弾塑性解析で、せん断変形や $P-\Delta$ 効果を考慮した平面フレーム解析とした。木質ラーメンの構造性能は、弾塑性解析から得られた荷重-変形角曲線を完全弾塑性評価して求めた。数値解析から得られた荷重-変形角曲線や完全弾塑性評価で得られた特性値等について、実験結果との整合性を確認した。さらに、危険断面位置を適切に評価せず、柱頭接合部は柱芯と梁芯の交点、柱脚接合部は柱木口に半剛接合部を設けた数値解析を行った。その結果、剛域を設けて適切な危険断面位置で評価した数値解析の方が、概ね実験結果に近くなることを確認した。以上のことから、剛域を考慮した解析モデルによりスパンや鉛直荷重を変数として数値解析を行った結果は、実務設計レベルで用いても支障のない範囲で実験結果を概ね評価できたといえ、本論文の目的の1つである数値解析で木質ラーメンの構造性能を評価することの妥当性が、検討した範囲で確認できた。

第5章では、第4章までで得られた知見に基づいて、特定の仕様以外で想定される木質ラーメンを対象に、その構造性能を接合部の靱性や危険断面位置およびせん断スパンを変数として数値解析により検討した。

接合部の靱性を変数として鉛直荷重の有無による木質ラーメンの終局耐力の違いに着目すると、脆性的な接合部で構成される木質ラーメンのせん断耐力は特に、鉛直荷重の影響で終局耐力が大幅に下がることが確認できた。また、柱頭接合部の危険断面位置が柱梁の構造芯とならない柱頭接合部で構成される木質ラーメンを想定して、剛

域を設けて危険断面位置で評価した剛域モデルによる場合と、本来の危険断面位置とは異なる構造芯で評価した構造芯モデルによる場合を比較した。その結果、本来の危険断面位置が構造芯から離れるような接合部を構造芯モデルで評価した場合、木質ラーメンのスパンに対して厳しい条件となる短いせん断スパンの骨格曲線で算定すると危険側になる可能性が見出された。よって、木質ラーメンの構造性能を数値解析で評価するには、適切なモデル化に基づいた接合部の骨格曲線を用いるとともに、鉛直荷重を負担する場合は $P-\Delta$ 効果や接合部の早期降伏が影響を与えることを考慮すべきである。

第6章では、実務設計で一般に用いられる、耐力壁と木質ラーメンを併用した小規模木造建物の層のせん断耐力を、各耐震要素のせん断耐力の単純加算で求めることの安全性について検討した。そこで、各耐震要素のせん断耐力の単純加算で求めた場合（A法）と、各耐震要素の荷重-変形角曲線の累加で得られた層全体の荷重-変形角曲線から求めた場合（B法）の違いを検討した。耐力壁は筋かい耐力壁と面材耐力壁、木質ラーメンは鉛直荷重なしとありの2通りを対象とした。B法は、損傷限界変形角を①：1/150rad.としたB1法、②：層に含まれる耐震要素のうち最小の損傷限界変形角としたB2法の2通りとした。本論文で対象とした耐震要素と組合せの範囲において、損傷限界変形角を1/150rad.とした場合、一部を除いてA法はB法より概ね安全に評価できた。一方、全ての耐震要素の損傷を許容しない場合、A法は最大で89%過大評価となることが分かった。ただし、本論文の検討範囲は非常に限定されているため、対象とする耐力壁や木質ラーメンの仕様や組合せを広げて検討することが今後の課題である。

第7章では本論文の結論を述べており、在来金物型ドリフトピン接合部で構成される木質ラーメンを対象として、複合応力を受ける接合部の評価方法、鉛直荷重を負担する木質ラーメンの挙動、数値解析による構造性能評価法の妥当性が見出された。木質ラーメン接合部の構造性能を評価する際は、危険断面位置を適切に設定すべきことが見出され、そのモデル化の方法を提案できた。このことは他の仕様の接合部でも共通した知見であり、この知見が得られたことは本論文の成果の1つといえる。また、木質ラーメンの水平加力実験と数値解析から、鉛直荷重を負担する場合は $P-\Delta$ 効果や接合部の早期降伏などの影響を考慮すべきことが明らかになった。さらに、木質ラーメンと耐力壁を併用した層全体のせん断耐力は、耐力壁の損傷を許容する場合において、実務設計で一般に用いられる各耐震要素のせん断耐力の単純加算で評価できることを検討した範囲内で確認した。

論文審査結果の要旨

木製の柱、梁と半剛接の接合部で構成される木質ラーメンは、その直下に開口を確保でき狭小開口などの木造住宅では特に有効な耐震要素である。しかし、木質ラーメンを用いた木造建物の設計法が体系化されていないため、設計や建築確認の実務で構造安全性を確認する方法が問題となる場合がある。その理由として、木質ラーメンのせん断耐力は鉛直荷重に左右され耐力壁のように画一的に評価できないことや、曲げ・せん断等の複合応力を受ける接合部の評価法、鉛直荷重を負担する木質ラーメンの挙動やせん断耐力の評価法、耐力壁と木質ラーメンを併用した層全体のせん断耐力の評価法が確立されていないことが挙げられる。よって本論文では、これらの問題を解明し、特定の仕様以外の木質ラーメンにも適用できる評価法を検討、提案することを目的として次の項目に着目した。

- ・複合応力を受ける木質ラーメン接合部の構造性能評価
- ・木質ラーメンの水平せん断挙動の解明
- ・数値解析による木質ラーメンの構造性能評価
- ・木質ラーメンと耐力壁を併用した層全体のせん断耐力評価

(1) 複合応力を受ける木質ラーメン接合部の構造性能評価

金物工法に用いる金物で構成される在来金物型ドリフトピン接合部を対象として、柱頭や柱脚接合部が曲げ・せん断の複合応力を受ける構造性能を調べ、曲げとせん断の複合応力に対する検定式を検討した。また、曲げとせん断が同時に作用する抵抗機構の仮説の安全性を検証した。これらを検討するため、各接合部を抽出した試験体による、せん断スパンを変数とした曲げ・せん断実験、純曲げ・純せん断実験といった一連の要素実験を実施した。その結果、接合部の構造性能は、部材に作用するせん断力が接合部内で金物或いは他方の部材へ伝達される危険断面位置で評価すべきことが明らかになった。そして、数値解析では、危険断面位置に半剛接パネを配置するため剛域を設定することが、接合部のモデル化として妥当との知見が得られた。そして、この妥当性をL S B柱脚接合部を対象にして実験的に検証した。また、仮定した接合部の抵抗機構の安全性を要素実験で検証するとともに、柱脚接合部を対象として引張軸力が構造性能に影響を与えない範囲を、引張軸力を変数にした曲げ・せん断実験で確認した。

(2) 木質ラーメンの水平せん断挙動の解明

木質ラーメンの水平せん断挙動を調べるため、スパンと鉛直荷重の有無を変数とした水平加力実験を実施したところ、スパンの短い方がせん断耐力は若干高かった。また、鉛直荷重の有無で比べると、終局耐力 P_u 、最大荷重 P_{max} 、降伏耐力 P_y は鉛直荷重ありの方が低くなったのに対し、初期剛性 K 、特定変形角時耐力 $P_{1/120}$ は、柱頭接合部の接合金物を固定するボルトの締付トルクの大きさによって鉛直荷重の有無で傾向が異なることを確認した。さらに、鉛直荷重を負担する木質ラーメンのせん断耐力は、柱頭接合部の早期の降伏とP- Δ 効果の影響を受けることを見出した。スパンの短い場合や鉛直荷重を負担する際に付加される梁端部への作用せん断力や柱脚への作用軸力が木質ラーメンの構造性能に与える影響について検討した結果、付加力が接合部の挙動に与える影響は小さいことが確認できたため、数値解析に用いる接合部の骨格曲線にはこれらの影響を考慮しないで見出された。

(3) 数値解析による木質ラーメンの構造性能評価

木質ラーメンの構造性能を数値解析で評価することの妥当性を検証するため、解析モデルや各接合部の骨格曲線の設定方法を示すとともに、この解析結果と実験結果を比較した。解析モデルは柱材と梁材を等価な線材に置換し、各接合部には剛域を考慮して危険断面位置に半剛接パネを配置した。半剛接パネは、要素実験で得られたモー

メントー回転角関係を基に、複数の折れ点を持つ骨格曲線にモデル化した。解析方法は強制変位増分による1方向の弾塑性解析とし、せん断変形やP- Δ 効果を考慮した平面フレーム解析とした。数値解析から得られた荷重-変形角曲線や特性値等について、実験結果との整合性を確認できた。また、この解析方法の妥当性を検証するため、危険断面位置を適切に評価せずに柱頭は柱芯と梁芯の交点、柱脚は柱木口に半剛接パネを設けた解析モデルによる解析結果と実験結果を比較した。その結果、剛域を設定した解析結果の方が実験結果に近くなることを確認でき、実務設計レベルで用いても支障のない範囲で評価できたことから、数値解析による木質ラーメンの構造性能評価の妥当性が、検証した範囲で検証できた。

一方で、特定の接合部の仕様以外で想定される木質ラーメンを対象に、その構造性能を①：接合部の靱性、②：接合部の危険断面位置とせん断スパンを変数にして数値解析で検討した。その結果、①については、脆性的な接合部で構成される木質ラーメンの終局耐力は特に鉛直荷重で大幅に下がることが確認できた。②については、接合部の危険断面位置が柱梁の構造芯とならない柱頭接合部で構成される木質ラーメンを想定し、剛域を設けて危険断面位置で評価した場合と、本来の危険断面位置とは異なる構造芯で評価した場合を比較した。その結果、本来の危険断面位置が構造芯から離れるような仕様の接合部ほど、木質ラーメンのスパンに対して短いせん断スパンの骨格曲線で算定すると危険側になる可能性が見出された。よって、木質ラーメンの構造性能を数値解析で評価するには、適切なモデル化に基づいた接合部の骨格曲線を用いるとともに、鉛直荷重を負担する場合はP- Δ 効果や接合部の早期降伏が影響を与えることを考慮すべきとの知見が得られた。

(4) 木質ラーメンと耐力壁を併用した層全体のせん断耐力評価

耐力壁と木質ラーメンを併用した小規模木造建物の層のせん断耐力を、実務設計で一般に用いられる各耐震要素のせん断耐力の単純加算で求めることの安全性を調べるため、各耐震要素のせん断耐力の単純加算で求めた場合(A法)と、各耐震要素の荷重-変形角曲線の累加で得られた層全体の荷重-変形角曲線から求めた場合(B法)の違いを検討した。耐力壁は筋かい耐力壁と面材耐力壁、木質ラーメンは鉛直荷重なしとありの2通りとした。B法は、損傷限界変形角を①：1/150rad.としたB1法、②：層に含まれる耐震要素のうち最小の損傷限界変形角としたB2法の2通りとした。本論文で対象とした耐震要素と組合せの範囲は非常に限定されたものであるが、損傷限界変形角を1/150rad.としたB1法の場合、一部を除いてA法はB法より概ね安全に評価できた。一方、全ての耐震要素の損傷を許容しないB2法の場合、A法は最大で89%過大評価となることが確認できた。

本論文の結論として、在来金物型ドリフトピン接合部で構成される木質ラーメンを対象とした複合応力を受ける接合部の評価法、鉛直荷重を負担する木質ラーメンの水平せん断挙動、数値解析による構造性能評価法の妥当性が示された。さらに、接合部の靱性、危険断面位置やせん断スパンを変数とした木質ラーメンの構造性能を解析的に調べるとともに、木質ラーメンと耐力壁を併用した層全体でのせん断耐力の評価方法の安全性を検討した。

よって、審査員は、各審査試験、予備試験ならびに博士学位論文公聴会(平成23年1月26日)を行って慎重に審議した結果、本論文は、木質ラーメンの研究で未解明であった問題に対して、特定の仕様に対して実験と解析の両面から取り組み問題解決しており、本論文の内容は博士(工学)の学位を授与するに相当するものと認めた。