

氏名（本籍）	<small>ながせ ただし</small> 長瀬 正（大阪府）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	工博乙第2号
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当者
学位授与の年月日	平成26年3月25日
学位論文題目	伝統的木造建築物の耐震設計法に関する研究
論文審査委員	（主査）教授 上 谷 宏 二 教授 頭 井 洋 教授 辻 野 良 二

論文内容の要旨

本研究は、伝統的木造建築物を対象とした論理的な設計法を構築することを目的とする。論理的とは、検定作業ではなく、耐震性能として予め設定された変形制限を満足する設計解を直接与える方法が解析的に展開されていることであり、設計者が操作するパラメータが設計結果をどの程度左右するかを定量的定性的に直接調べることができることを意味する。すなわちデータ図表を提供するのではなく、応答諸量の関係について解析的表現を用いることで、設計者の望む方向への解の導出を可能ならしめるものである。建物階数は実用的な 2 階または平屋とし、応答量の表現として等価線形化手法に基づく限界耐力計算を解析的に展開している。

本研究の具体的な成果は、第 2 章から第 9 章にまとめている。設計で扱う耐力要素や耐震設計法としての限界耐力計算を具体的かつ解析的に検討し、これを用いて一貫した設計法を提示し、具体的な設計例を示している。

第 2 章では、大径の柱が多用される古代の寺社建築の耐力要素として特徴的な柱の傾斜復元力について論じている。まず柱の傾斜復元力曲線は柱端部の変形が支配的であることを FEM 解析から検証し、既往実験の差異も柱端面の条件によって説明できることを示している。次いで矩形断面および円形断面について傾斜復元力の、アスペクト比に関する近似を含まない厳正な定式化を行なって、特性を支配するパラメータは、柱アスペクト比と端面の変形に関わるバネ定数であることが示されている。柱ロッキングによる位置エネルギーの効果を陽に表すために、エネルギーの釣合い式から力の釣合い式を求め、力の釣合いから直接に計算した結果と比較している。また大変形時に負勾配の復元力を有する非線形弾性系である傾斜復元力モデルの地震応答解析を行って、転倒現象を速度ポテンシャル理論から検討し、傾斜復元力モデルの転倒限界は、中立状態において系が有する絶対速度の大きさに関係付けて精度良く評価できることを示している。非線形弾性挙動を示す傾斜復元力は常に中立位置に復元するセルフセンタリング特性を本来有しているため、負勾配域にいたる応答でも中立位置では常に一定のポテンシャルを保持しているので、他の劣化型の履歴復元力よりある意味で有利であると言える。傾斜復元力に関連させて、伝統木造建築の非破壊試験として採用されている常時微動について、唐招提寺金堂における実測と解析結果をまとめている。とくに修理事業の進捗に併せて、解体前と屋根瓦撤去後の 2 回の計測を行い、傾斜復元力のような建物重量に比例する剛性要素が存在すること、屋根重量は建物減衰を増大させる働きをもつことを確認している。

第3章では、組物のモデル化と鉛直力および水平力に対する挙動について考察している。まず斗組を有する簡単な骨組モデルの固有値解析から、主要なモードが柱ロッキングであり、斗組の変形や柱との連成度合いが小さいことから、地震応答解析において斗組部分が建物応答に与える影響は小さいことが示されている。次に唐招提寺金堂の保存修理に関連して実施した実大斗組モデルの静的載荷実験結果をまとめ、荷重変形関係は第2章の傾斜復元力モデルを用いて説明出来ることを示している。すなわち、実験で見られた荷重変形関係の降伏性状は、斗尻材料の塑性化ではなく幾何学的なPA効果として理解される。同じ模型を用いて、10年間に亘ってめり込みクリープ実験を行ない、めり込み変形のクリープ予測式を作成した。めり込み変形に関するクリープについて既往の実験は無く、予測式の提案も本研究が最初である。この予測式を唐招提寺金堂の保存修理に適用して、とくに古材と新材が混在する古建築の改修においてクリープを考慮した将来の屋根軒先垂下変形を評価して、修理事業に役立てている。

第4章では、既往の実験データに基づいて土塗り壁の復元力を作成している。壁耐力に与える壁形状のアスペクト比の影響を考慮した耐力式を提案している。垂壁などの小壁そのものの復元力モデル化についても既往の実験データを統一的に扱うため、アスペクト比をパラメータとする耐力式を構築し、その耐力式を用いて、小壁と柱が組み合わされた種々の架構の復元力の計算法が示されている。さらに腰壁と垂壁とそれらで拘束された柱で構成される耐力要素についても復元力の作成方法をまとめている。特に全面壁および小壁の復元力特性を、対象とする範囲での精度を有するバイリニアで近似すれば、垂壁付き柱や垂壁腰壁付き柱の耐力式が陽な形で導かれることを示している。

第5章では、既往の実験データから柱ほぞの復元力および柱梁仕口の復元力データをまとめている。構モーメントの概念を用いることにより、曲げ抵抗要素を有する層の耐力が統一的に計算できることを示している。1, 2階の変形によって曲げが強制される通し柱の折損の検定式を作成し、実務設計者のための設計法をまとめている。

第6章では、伝統的構法による木造架構の耐震性能に関する特徴の一つである床の変形と偏心の関係を論じている。まず、4号建物の壁量計算で規定されている、四分割法の壁率比と偏心率の対応について検討している。木造建築物の軸組みの設置の基準を定める告示によれば壁率比が0.5以上であれば、偏心率が0.3以上となるような大きな偏心を防ぐとされていることの確認として行われた既往の膨大な数値計算結果が簡単なモデルの解析解で説明できることが示されている。伝統木造における板張りの床を剛床として扱うことはできないし、計算の都合から剛床となるような補強を施すことも決して望ましいことではない。床の変形の影響は必要に応じた精度で床構面を模擬した立体モデルあるいは疑似立体

モデル等による静的・動的解析によって検討されているが、個々のケーススタディでは一般的な定性的定量的結果を示すことは難しい。そこで、解析的に扱える簡単なモデルを設定することで、床剛性が偏心補正における変形増大に与える影響を検討している。床剛性は既往実験データに基づいて確認している。伝統的木構造の床構面剛性が、鉛直構面の剛性や地震荷重偏心に伴う地震力配分が変形増大率に与える影響を検討するため、3 構面モデルを設定して、床構面と鉛直構面の剛性比をパラメータとする解析解が導出される。既往の実験データに基づいて確認された伝統構法による床剛性比は 0.5 から 1.0 程度であり、偏心率が 0.3 以下であれば、床構面を考慮した端部構面変形の増大率はせいぜい 1.2 倍程度であることが示されている。

第 7 章では、伝統木造建造物の耐震性は変形性能によって規定されることから、先ず、現行の設計における変形制限の意味合いについて論じている。次いで、設計の論理化に資するために、限界耐力計算を解析的な形で定式化することにより、1 階と 2 階の変形が同一の指定値をとる限界せん断力係数比を導出し、2 階が先行降伏する設計の可否と従来のマニュアル化された計算法の改良を論じる。柱脚の変位を拘束しない石場建ては伝統的構法の一つとして継承され、多くの実験的解析的研究が展開されている。しかし、限界耐力計算の枠組みの中に柱脚の滑りを取り入れることは、限界耐力計算における等価 1 質点系への縮約と相いれないこと、滑り現象が有する種々の不確定要因などの理由からこれまで困難とされてきた。本論文ではエネルギー一定則や変位一定則の観点から滑り現象を分析し、その知見に基づいて、柱脚の滑り現象を現行の限界耐力計算における基礎地盤連成効果の周期調整係数や減衰と類似の方法で扱うことにより、滑りを考慮した限界耐力計算の定式化を提案している。また、提案手法を用いた予測結果が既往の震動台実験結果と良好に対応することから提案した手法の妥当性を確認している。

第 8 章では、著者がこれまでに手掛けてきた伝統木造建物の制振、免震設計の事例を紹介している。見えがかりが重視される伝統的木造建築では、制振ダンパーの設置箇所が制約され、床下設置や小壁内蔵となることが多い。制振補強として、寺院本堂床下に回転摩擦ダンパーを用いて補強を行っており、その設計手法についてまとめている。また、伝統的構法による社寺建築を想定した一連の振動台実験で大引き下に粘性体ダンパーを設置したモデル解析と実験結果についても検討している。3 つの免震事例では、木造建築物の特性から積層ゴム支承の採用は難しいことから、球面滑り支承、ボールベアリング、直動転がり支承などを用いている。設計上配慮すべき風荷重や耐久性についても論じている。

第 9 章では、第 7 章で展開された近似応答解析の定式化を用いて、二階建て木造を対象とした設計法を提案している。極稀地震時の各階最大変形が指定値をとるための各階の耐

力レベルを算出する。建物がこの耐力を具備するように、第 2,4,5 章で提案した耐力評価式を用いて各階に必要な耐力要素を割り当てる設計法である。従来の設計法が仮定断面の設定と検定作業を試行錯誤で繰り返す必要があったのに対し、本設計法は指定変形を実現するための耐力要素の設定を繰り返しの応答計算なしで行うことができる。震動台実験モデルに対する設計例を示し、直接的な耐力割り当てが可能であることを確かめている。また滑りを考慮した限界耐力計算を適用して求めた応答諸量は震動台実験結果と良好に対応することも確認している。

以上によって、指定された変形制限を満たす設計解を繰り返し手続きなしに得ることができる論理的な設計法が構築され、その有用性が実験結果との対比によって確認されたと結論している。

論文審査結果の要旨

設計行為とは制約条件を満足する複数の解の中から一つの解を選択決定することである。建築構造設計では、設計者の経験や類似例に基づいて設計モデルを設定し、これらの性能を解析によって確認するという試行錯誤過程を繰り返しながら改良を加えていく方法がとられてきた。設計という作業が解析と検定に置き換えられており本来の設計行為ではない。伝統的構法を用いた木造建築物の挙動では、構成材料や接合部の変形性能が支配的である。接合部で生じるめり込み・滑り・離間は各種耐震要素の力学特性に強い材料・幾何学非線形性を生ぜしめ、このことが多数蓄積されてきた実験結果を精度良く説明できる明快な数理モデルの提案を困難にしていた。また、最近のコンピュータ計算能力の飛躍的な向上によって、膨大な計算モデルの解析も可能であるが、実験やコンピュータ解析における各種パラメータの意味やバラツキの影響を解明出来ない限り、これらの膨大な実験解析データを実際の設計行為に直接役立てることは出来ない。そのためには、挙動を説明できる数理モデルや定式化の整備が必須である。実験や数値解析は対象構造物を特定して初めて実行が可能となるのに対し、設計とは所要の性能を有する対象構造物を見出すための行為である。そのために、各種耐震要素の挙動を明快かつ包括的に説明できる数理モデルの提案が強く求められていた。

学位申請者の研究は、伝統的木造建築物の耐震設計法の論理化を試みるもので、各種耐震要素の耐力式の定式化から始めて、耐震性能として指定された条件を満足する設計解を直接に導き出す設計方法を提示している。等価線形化手法に基づく限界耐力計算を解析的に展開することで応答諸量の関係を簡潔に記述し、その成果に基づいて試行錯誤の繰り返しの過程を必要としない直線的な流れの設計法を構築している。

本研究の具体的な成果は第2章から第9章にまとめられ、その内容は大きく3つに分けられる。第2章から第6章および第8章は設計で扱う耐力要素を、第7章は耐震設計法としての限界耐力計算を具体的かつ解析的に検討し、第9章で設計法を提案し、設計例を示している。

まず、耐力要素として、傾斜復元力、組物、土壁、仕口、床構面、制振部材を取り上げてその力学特性の解析的表現、耐力式の定式化を行っている。負勾配を有する非線形弾性系である柱の傾斜復元力モデルについては、転倒現象を速度ポテンシャル理論から検討し、転倒限界は中立状態における構造体の絶対速度の大きさと関係付けて説明できることを示している。とくに傾斜復元力は常に中立位置に復元するセルフセンタリング特性を本来有していることから、今後の耐震設計において有効活用できる可能性を示唆している。組物については、傾斜復元力特性と同様の扱いが可能なることを実験的に実証し、めり込み挙動に関する長期クリープ実験結果などの設計資料もまとめている。土壁や柱梁仕口部の耐力

について既往の実験データを統一的に説明できる耐力式を提案している。床構面については、簡単なモデルを用いて床剛性の大きさが偏心による変形増大に与える影響を解析的に検討している。計算上の都合から木造床版に過大な剛性を施すことは、伝統工法の面から見て決して望ましいことではない。本研究では、床版に過大な剛性を与えなくても健全な耐震性能が実現できることを理論的に示しており、伝統構法を生かした設計法の確立に大いに寄与するものである。

次いで、2階建て建物に限定されているが、限界耐力計算の解析的表現を用いて、1階と2階の変形と耐力との関係を明らかにしている。これまでの限界耐力計算法では2階先行降伏を精度よく扱えないことを例示して、収斂計算に基づく改良計算法を提案している。またこれまでの計算法でも、2階先行降伏モデルに対しては、計算の変位ステップを1階ではなく2階を基準とすることで改良されることを示した。柱脚の変位を拘束しない石場建ては伝統的構法の一つとして継承され、多くの実験的解析的研究が展開されている。しかし、限界耐力計算の枠組みの中に柱脚の滑り取り入れることは、限界耐力計算における等価1質点系への縮約と相いれないこと、滑り現象が有する種々の不確定要因などの理由からこれまで困難とされてきた。本論文ではエネルギー一定則や変位一定則の観点から滑り現象を分析し、その知見に基づいて、柱脚の滑り現象を現行の限界耐力計算における基礎地盤連成効果の周期調整係数や減衰と類似の方法で扱うことにより、滑りを考慮した限界耐力計算の定式化を提案し、震動台実験結果との比較によって妥当性を確認している。以上の限界耐力計算法の改良や滑りを考慮した定式化はこれまでにない取り組みであり、伝統構法による木造建築物の耐震設計法の枠を拡大するものである。

最後に、以上の耐力要素や限界耐力計算の解析的表現式を用いて、論理的な設計法を構築している。設計者の希望する極稀地震時の各階変形から必要耐力が算出され、耐力要素を割り当てることで試行錯誤を行わずに設計解が一意的に提供される。提案された設計法を既存の震動台実験モデルに適用し、試設計結果のモデルの応答諸量が震動台実験結果と良好に対応することによって提案設計法の有効性を実証している。

検定行為ではない本来の意味での耐震設計法の構築を目指した本研究は、設計で検討すべき多くの問題を含むため研究内容は多岐に亘ってまとめられている。耐力要素にはまだ追加すべき要素があり、また等価1質点系モデルの応答値はバラツキを含む最大値ではなく、平均値と見るべきなので、耐震安全性の確認には更なる研究が求められる。

以上で述べたように、本研究は解析的なアプローチによって、これまでにない新しい設計のスタイルを提案するものであり、学術的にも実用的にも博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。