

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

軽量低層構造物の減衰性能評価に関する研究

Damping Properties Evaluation of Lightweight Low-rise Structure

申請者

宋	成彬
Sungbin	SONG

建築学専攻 建築構造設計研究

2013年 6月

1995年兵庫県南部地震以後、2011年東北地方太平洋沖地震に至るまで、現行の建築基準法が最低限として定めるレベルを大幅に上回る地震力をひき起こす地震動が日本各地で発生している。特に、兵庫県南部地震では44万棟に達する建築物の構造被害とともに、約6,400名の死者、約44,000名の負傷者が生じるといふ甚大な被害が出た。その後進められている研究によれば、このような過酷な地震動が再度発生する危険性も高いとされており、それらに対する建築物の備えを高める事が喫緊の課題となっている。

このような状況の中で、先進的な制振構造システムを低層の建築物で採用する試みが加速されている。多くの一般低層建築物に固有の減衰性能の特定が難しいのに対して、ある確実な減衰性能を付加することで構造全体を高減衰化して、地震応答を安定して低減することが目的である。しかしながら、制振構造システムの地震時挙動を正確に予測するためには、主体構造そのものの固有振動特性と減衰性能とをより精度高く評価して、その上で付加する減衰装置の性能を決めることが重要である。特に減衰性能は動的な外乱の作用に対する構造物の応答に重要な影響を与える事を考慮する必要がある。

制振、非制振を問わず、構造物の耐震性能を直接的に評価するには、種々の地震動に対する時刻歴応答解析を行うことが有効であるが、最大応答を精確に予測するためには構造形式ごとに復元力特性や減衰機構を適切にモデル化することが重要である。時刻歴地震応答解析を行うときに、減衰モデルとして通常は、内部粘性減衰系として剛性に比例する減衰係数を設定して、1次固有振動に対して構造種別に応じた減衰定数となるように比例定数を定めることが多い。また、塑性域での応答を評価する時の減衰としても上記に準じて弾性剛性から定めた減衰係数を準用するケースが多いが、応答の任意の時点での瞬間剛性に比例させるべきとの考えもある。特に、従来は地震応答解析に基づく耐震設計をすることのほとんど無かった低層の木質構造や軽量鉄骨造に対しては地震応答解析に適した減衰モデルの設定方法について早急に適切な対応を整理する必要がある。

上記のような背景を踏まえ、本論文において著者は、軽量低層構造物である木質構造と軽量鉄骨造の減衰性能評価を研究対象としている。時刻歴地震応答解析による最大応答の予測精度を向上させるための基礎的な研究として、塑性域を含む大変形振動時のエネルギー応答の理論に基づいてそれら構造の減衰機構を推定し、応答計算のための減衰モデルを構築することを目的としている。本論は5章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論で、本研究の背景、既往の研究の概要、研究の目的、および本論文の構成を記している。

第2章では、従来は地震応答解析に基づく耐震設計を行ったことがほとん

ど無かった木質構造と低層鉄骨造において、時刻歴地震応答解析による耐震性能評価を行う際に減衰モデルの設定の違いが最大応答変形に及ぼす影響を検討している。

木質構造の時刻歴地震応答解析には、構造用合板等を貼り付けた耐力パネルの荷重変形関係を模擬することに適した復元力特性である拡張 NCL モデルを用いている。また、低層鉄骨造の復元力特性モデルには標準的な Tri-linear 型復元力特性を用いている。比較検討した減衰モデルは、初期剛性比例と瞬間剛性比例の 2 種類であり、瞬間剛性は各計算ステップでの接線剛性としている。2 種の地震応答解析により得られた荷重変形関係の比較より、極めて強い地震動の作用時には減衰モデルの違いが最大層間変形に基づく安全性評価に大きな影響を及ぼすことを確認している。瞬間剛性比例と仮定したモデルでは塑性化後の剛性低下により減衰力が小さくなり、エネルギー吸収性能も低下する事で変形が大きくなると理解できる。このように、構造物の弾塑性応答を対象とするとき、減衰モデルの違いが最大応答変形の予測に及ぼす影響が大きく、軽量低層構造物の減衰機構の解明とそのモデル化について詳細に検討することが極めて重要であることを明らかにしている。

第 3 章では、構造物のエネルギー応答に着目して、木質構造と低層鉄骨造の地震応答解析を行うための減衰モデルの構築手法を提案している。

初めに、1 質点系せん断型モデルの力の釣り合いによる運動方程式をエネルギーの釣り合いに関する基本式へと変換して、外乱による総入力エネルギーと構造の損傷に寄与するエネルギーをそれぞれ定義し、その両エネルギーの関係より減衰による消費エネルギーの算出を定式化している。さらに、この消費エネルギーを、減衰力が相対速度に比例する粘性減衰系による消費エネルギーと等置する事で粘性減衰係数を算出する手法を数値シミュレーションに基づいて定式化している。

木質構造用の粘性減衰係数評価の定式化については、まず地震動により入力される総入力エネルギー E_I より構造体の損傷に寄与するエネルギー E_D を推定する関係式 $f_w(h)$ 、 $f_w(h, \mu)$ を導入している。ここに、 h は減衰定数、 μ は塑性率である。これらの式は、総入力エネルギーから損傷に寄与するエネルギーを控除した残りとして減衰エネルギーを評価するものであり、減衰力が層間変形速度に比例するとの仮定のもとに減衰エネルギーと粘性減衰係数の推定ができることを確認している。さらに、低層鉄骨造についても同様に総入力エネルギー E_I より構造体の損傷に寄与するエネルギー E_D を推定するための関係式 $f_{Ls}(h)$ 、 $f_{Ls}(h, \mu)$ を導き、提案した手法より減衰エネルギーを算出し、さらに粘性減衰係数を推定できることを確認している。

第 4 章には、軽量低層構造物である木質軸組架構と軽量鉄骨架構の実大振動台実験より得た応答データを用いて、前章で導入した手法を用いて木質軸

組架構と軽量鉄骨架構の塑性変形領域を含む応答時の粘性減衰係数の推定を行い、本論文で提案する手法の妥当性について検討した結果を記している。

木質軸組架構の実大振動台実験は、加振方向長さが 2730[mm]、高さが 2735[mm]で合板耐力壁を有する 1 層立体試験体を用いて 1995 年兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測された地震動の NS 成分の最大加速度を 10、30、60[%]に規準化した波形による加振を行っている。地震動入力に低振幅のホワイトノイズ入力を行い、得られた応答加速度データを用いて同架構の構造特性の推移を評価している。同定した減衰定数は前章で提案した同定手法によるものとの整合性が良く、提案手法が妥当であることを示している。また、実験と時刻歴地震応答解析とによる荷重変形関係の比較より、木質構造の実際的な減衰モデルは瞬間剛性比例型に近いことを確認している。

軽量鉄骨架構の実大振動台実験については、加振方向長さが 3660[mm]、高さが 2620[mm]のブレース壁付き 1 層立体試験体を用いている。木構造の加振に用いたものと同じ地震動および 2004 年中越地震時に川口で観測された地震動の EW 成分を 30、60、100[%]に規準化した波形による加振を行った結果を記している。各レベルの地震動の入力間に低振幅のホワイトノイズを入力して得られた応答加速度データを用いて軽量鉄骨架構の構造特性の推移を評価し、低層鉄骨造においても提案する粘性減衰係数の推定手法の妥当性を確認している。低層鉄骨造では、損傷の進捗が進行して履歴減衰の寄与する割合が高くなっても粘性減衰力は一定で生じている傾向が認められることより、その実際的な減衰モデルが初期剛性比例型に近いとしている。

第 5 章は、結論であり、以上の検討から得られた知見を総括している。

以上を要するに、本研究では、時刻歴地震応答解析において軽量低層構造物の最大層間変形の予測精度を向上させるため、エネルギー応答に基づいて軽量低層構造物である木質構造と低層鉄骨造の減衰性能の評価手法を新たに提案したものであり、実大振動台実験の応答データを用いて提案した手法の適用性を確認している。本研究の成果は、今後の低層の木質構造および鉄骨造の減衰機構の策定とその解析用モデルの構築に対して極めて有用であり、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。

2013 年 4 月

審査員（主査）	早稲田大学教授	工学博士（早大）	曾田五月也
	早稲田大学教授	Ph.D.（コロンビア大学）	西谷 章
		工学博士（早大）	
	早稲田大学教授	工学博士（早大）	山田 眞
	早稲田大学教授	博士（工学）（早大）	前田 寿朗