

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

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2月

1995年兵庫県南部地震や2007年新潟県中越沖地震及び2011年東北地方太平洋沖地震など近年多数の地震が日本の全国で発生した。特に大都市を直撃した都市型災害としては、関東大震災以来である兵庫県南部地震で人的被害は死者6,432名、負傷者43,792名であり、建物の被害は約44万棟程度と大きな被害が出ている。

このようにいつ来るか予測出来ない地震による被害を防ぐための一方法として免震・制振システムという高減衰構造を適用することがあり、ある確定した減衰性能を持っている装置を付加することは構造物全体の減衰性能の不確定性を大幅に減らす働きを持ち、地震応答を低減する点でも大変有効である。これらのシステムの必要性や要求される性能を正確に把握し効果的に利用するためにも構造物が本来有する減衰性能である固有振動数と減衰定数をより精度高く評価した上で高減衰構造を適用することが重要である。これらの減衰性能は構造物の動的特性を支配する重要なパラメータであり、外力に対する構造物の応答性状を確定するために重要な役割を果たす。また、近年木質構造住宅及び軽・重量鉄骨造のような軽量低層構造にも性能設計が求められるようになって来ており、2009年6月より長期優良住宅認定制度の導入という形で適切な維持管理を併用しながら住宅を長期使用することを促す施策が開始されている。

これらの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、最大応答を正確に予測するためには構造形式ごとに復元力特性モデルや減衰機構（減衰定数及び減衰モデル）を適切に設定することが重要である。本論文では、減衰機構を実際の構造物の減衰に寄与するものとし、解析においては構造物の減衰機構を剛性に比例する減衰モデルとして模擬する。時刻歴地震応答解析を行うときに、減衰機構として通常は、内部粘性減衰係数として剛性比例減衰を用いることが多く、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使用するケースが多いが、その時点での瞬間剛性に比例させるべきだとの考え方もある。特に、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軽量低層構造物の木質構造と軽・重量鉄骨造に対しては減衰の設定方法については明確にされていないのが現状である。

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低層鉄骨造を対象とし、時刻歴応答解析による最大応答変形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考え方に基いて、その減衰機構を策定することを目的にする。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す。

第2章では、地震応答解析に基づく耐震設計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、減衰機構の違いが最大応答変形に及ぼす影響について記す。

木質構造と低層鉄骨造の時刻歴地震応答解析を行った結果について検討を行った。時刻歴地震応答解析の解析モデル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のに適した復元力特性モデルである拡張NCLモデルを用いた検討である。また、低層鉄骨造の模擬はTri-linear型復元力特性を用いた。減衰機構としては初期剛性比例と剛性が各計算ステップでの接線剛性に比例する瞬間剛性比例と設定した。入力地震動としては1940年Imperial Vally地震El Centro記録NS成分、1995年兵庫県南部地震JMA神戸記録NS成分、1952年Kern County地震Taft記録EW成分、1968年十勝沖地震八戸地震NS成分、2004年新潟県中越地震川口記録EW成分、2011年東北地方太平洋沖地震仙台記録NS成分の最大速度を0.25、0.5、0.75[m/s]に規準化して用いた。荷重変形関係の比較より減衰機構の違いが最大層間変形に及ぼす影響は大きい。また、応答の荷重変形関係は復元力特性モデルと減衰力の和となるが、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る。これらにより構造物の弾塑性応答を対象とするとき、減衰機構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を明らかにする重要であることを確認した。

第3章では、実験により測定したデータを用いて構造物の減衰係数を推定するのが不可であるため、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減衰係数の推定手法を提案する。

初めに、1質点系せん断型モデルの運動方程式よりエネルギーの釣合いに関する基本式を示す。その基本式より総入力エネルギーと損傷に寄与するエネルギーを定義し、その両エネルギーの関係より減衰消費エネルギーの算出することを示す。また、減衰力が相対速度に比例する仮定との仮定のもとに粘性減衰係数評価の定式化を示す。

次には、木質構造用の減衰係数評価の定式化を示す。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 を推定する木質構造用の関係式 $f_{\mu}(h)$ 、 $f_{\mu}(h, \mu)$ を導いた。この推定式は特定の地震動の影響を受けることを排除するため、0.1~20.0[Hz]の間でスペクトルが一様なホワイトノイズの応答を用いて近似した。これは、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の減衰エネルギーを評価するためである。減衰力が相対速度に比例するとの仮定のもとに提案した手法を用いて木質構造の地震応答解析より減衰エネルギーと減衰係数の推定ができることを確認した。

また、低層鉄骨造用の減衰係数評価の定式化を示す。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 を推定する低層鉄

骨造用の関係式 $f_{L5}(h)$ 、 $f_{L5}(h, \mu)$ を導いた。この推定式は特定の地震動の影響を受けることを排除するため、0.1～20.0[Hz]の間でスペクトルが一様なホワイトノイズの応答を用いて近似した。提案した手法を用いて低層鉄骨造の地震応答解析より減衰エネルギーと減衰係数の推定できることを確認した。

第4章では、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られた応答データを用いて前章で提案した手法より木質構造用と低層鉄骨造用の塑性域での減衰係数の推定を行い、本論文で提案した手法の妥当性について検討した結果を記す。

まず、木質軸組架構は加振方向が1半間(2,730[mm])、高さが1層の立面試験体を用いて1995年の兵庫県南部地震で観測された地震動の最大加速度を10、30、60[%]に規準化した波形による加振を行った。地震動の入力間に低振幅ホワイトノイズの入力により得られた応答加速度データを用いて木質軸組架構の構造特性を評価した。同定した減衰定数を用いて前章で提案した木質構造の減衰係数の同定手法の妥当性を確認した。また、実験と各減衰機構を設定した時刻歴地震応答解析の最大層間変形と荷重の比較より木質構造の実際的な減衰機構は損傷に従い、減衰力が低下する瞬間剛性比例に近いと考えられる。

次には、軽量鉄骨フレームは加振方向が3,660[mm]、高さが1層の立面試験体を用いて1995年の兵庫県南部地震で観測された地震動の最大加速度と2004年の新潟県中越地震で観測された地震動の最大加速度を30、60、100[%]に規準化した波形による加振を行った。各レベルの地震動の入力間に低振幅ホワイトノイズの入力により得られた応答加速度データを用いて軽量鉄骨フレームの構造特性を評価した。同定した減衰定数を用いて3章の低層鉄骨造における減衰係数の提案法の妥当性を確認した。また、実験と各減衰機構を設定した時刻歴地震応答解析の最大層間変形と荷重の比較より低層鉄骨造は損傷に従い履歴減衰の寄与が大きくなっても粘性減衰力は一定で寄与していると考えられ、実際的な減衰機構が初期剛性比例に近いと考えられる。

第5章は、結論である。第2章から第4章での検討から得られた知見を総括する。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 宋 成彬 印

(2013年04月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文	エネルギー応答に基いた木質構造物の減衰機構の評価、日本建築学会構造系論文集 686, 2013年4月, 宋成彬・曾田五月也
○論文	振動台実験による低層軽量構造の減衰性能に関する研究、日本建築学会関東支部研究報告集 I, 2010年2月, 宋成彬・曾田五月也
○論文	強風時における高層高減衰建築物の固有周期と減衰定数の評価、日本建築学会関東支部研究報告集 I, 2008年2月, 宋成彬・曾田五月也
講演	軽量低層構造物, 日本建築学会 建築物の減衰機構とその性能評価に関するシンポジウム, 2013年3月、宋成彬・曾田五月也
講演	Damping Evaluation of damping capacity of full-scale lightweight steel frame with viscous damper by shaking table test, 大韓建築学会大会概要集 構造系, 2011年10月、宋成彬・宮津裕次・曾田五月也
講演	摩擦機構を付加した1層小型鋼製フレームの減衰性能評価, 日本建築学会大会概要集, B-2, 2011年8月, 宋成彬・曾田五月也
講演	軽量低層構造物の減衰評価に関する研究, 第13回日本地震工学シンポジウム 2010, 2010年11月, 曾田五月也・宋成彬
講演	Damping evaluation of a single-story scaled steel frame with frictional damping mechanism, 大韓建築学会大会概要集 構造系, 2010年10月, 宋成彬・曾田五月也
講演	オイルダンパを設置した低層軽量鉄骨フレームの減衰性能評価, 日本建築学会大会概要集, B-2, 2010年8月, 宋成彬・曾田五月也
講演	実測による制振・非制振低層木造住宅の減衰性能評価, 早稲田大学理工総研プロジェクト 早稲田大学理工学研究所創立70周年記念シンポジウム 粘性系ダンパによる建築物の制振設計技術の動向, 2010年6月、宋成彬・曾田五月也
講演	クーロン摩擦をともなう木造建物の減衰機構の検討, 第34回地震工学・応用地学に関するシンポジウム, 2010年3月, 宋成彬・北川誉紀・曾田五月也
ポスター	自然素材活用型住宅の耐震性能に関する実験的研究, 京都大学生存圏研究所 第142・143回生存圏シンポジウム, 2010年3月, 片岡靖夫・小松幸平・森拓郎・北守顕久・鄭基浩・脇田健裕・宋成彬
講演	オイルダンパを設置した木造フレームの減衰性能評価, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference2009, CD-ROM 723-724, 2009年8月, 宋成彬・宮津裕次・曾田五月也

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	低層戸建て住宅の減衰性能評価，早稲田大学理工総研プロジェクト研究 第4回粘性系ダンパーによる既存建築物の制振補強に関するシンポジウム，2009年6月，宋成彬・松永裕樹・曾田五月也
講演	オイルダンパを設置した木造住宅の実測による減衰性能評価，日本建築学会大会概要集，B-2，2008年9月，曾田五月也・宋成彬
講演	実測に基づく高減衰建築物の固有振動数と減衰定数の評価，第32回地震工学・応用地学に関するシンポジウム，2008年3月，曾田五月也・宋成彬
講演	実測に基づく高減衰建築物の減衰性能評価，日本建築学会大会概要集，B-2，pp.723-724，2007年7月，曾田五月也・田村勇樹・宋成彬