



構がもつ復元力特性は、鉄骨系、木質系によらずスリップ型が大半である。このようなスリップ型の復元力特性をもつ構造の制振設計の一貫した手法は提案されていない。

(2) 復元力が歪に依存し、バイリニア型の復元力を示す非線形粘弾性ダンパーと、その時刻歴解析モデルが提案されているが、適用範囲や精度について明らかでない。さらには、粘弾性体の動的特性を高精度に再現できるモデルがあっても、一般の解析プログラムには組み込まれていない。ある程度の精度をもった、近似的な時刻歴解析手法も必要であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、戸建住宅を体現する構造として、スリップ型の復元力特性をもつモデルを対象とする。そのモデルに対して粘弾性ダンパーを適用する場合を対象とし、等価線形化と線形応答スペクトル低減化に基づいた地震応答評価法を提案し、合理的な制振設計手法とすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

### 3. 1 非線形粘弾性ダンパーを適用した引張ブレース架構の動的強制加振実験、振動台実験、および数値解析による実験の再現

まず、一般的な鉄鋼系住宅で用いられる引張ブレース架構を対象に行なった制振構造の実験について検討した。適用したダンパーは、振幅依存性のある、非線形粘弾性ダンパーである。引張ブレース架構はブレースが降伏するとスリップ型の履歴を描く。そこで引張ブレースを粘弾性ダンパーブレースに置換して、なおかつ、ダンパーを適用した制振架構の等価剛性（最大変形とその時の層せん断力から得られる割線剛性）が等しくなるように、制振架構を設計し、その有効性を実証した。この実験では、制振架構がスリップ型の履歴を描かないように設計を行っており、言わば本研究の第一段階となる。

動的強制加振実験では、制振架構にアクチュエータによって強制的に動的な層間変形を与えている。研究代表者の過去の実績によって、非線形粘弾性ダンパーの動的特性は高精度に再現可能であるので、これに実験から得られた架構と、その接合部の特性を組み合わせ、これを簡易な1質点系へと変換することを検討した。

さらに振動台での地震応答実験の結果を、前述の簡易な一質点系モデルを用いることで再現可能であるかを検討した。

### 3. 2 スリップ型特性をもつ構造に粘性系ダンパーを用いる場合の最大応答予測法の提案

次に、スリップ型履歴を示す一質点系を用い、そこに粘性ダンパーを適用した制振構造の最大応答（変位・層せん断力）予測法について提案をした。このモデルでは粘性ダンパーを対象にしており、ダンパーは剛性をもたない。ただし、ダンパーが剛性をもつ場合は、それが組み込まれる主架構に対して、その剛性を考慮（つまり付加する）すればよい定式化であり、粘弾性ダンパーの場合にも適用が可能である。

対象制振構造の定常応答時の履歴を、架構の塑性率や粘性力による減衰定数をパラメータにして、その等価剛性、等価減衰定数を得て、線形応答スペクトルを利用して最大変位、最大層せん断力を予測する。

ただし、架構の復元力特性がスリップ型であるということは、地震応答中にその等価剛性は基本的に変化しており、それを考慮するため、等価周期の変動範囲で、応答スペクトルを平均化する処理を行なう。

本応答評価法の精度は、エネルギー一定則や変位一定則との比較を行なった。

### 3. 3 振幅依存性をもつ非線形粘弾性ダンパーの等価線形化と制振構造設計法への応用

3. 1および3. 2にて、スリップ型の復元力特性をもつ架構に対して、粘弾性ダンパーによる効果を組み込んだ応答評価法（設計法）が提示できるので、ここでは、非線形粘弾性ダンパーを線形の粘弾性ダンパーに置換して、設計を行うことの適用性について検討を行なった。本研究での制振構造は、基本的に住宅を想定しているが、高い適用性を示すことを目的に、高次モードの影響がある4, 10, 20層の主架構モデルを対象とした。

非線形粘弾性ダンパーを適用する際、予測する最大応答での等価剛性、等価粘性を用いてダンパーを線形粘弾性に置換した。

## 4. 研究成果

### 4. 1 非線形粘弾性ダンパーを適用した引張ブレース架構の動的強制加振実験、振動台実験、および数値解析による実験の再現

引張ブレースをもつ軽量鉄骨耐震架構の復元力特性上の弱点について示し、粘弾性ダンパーを用いた制振架構への変更を行った。それにあたっては、ダンパー固定の状態での荷重変形関係を用いて制振架構を水平バネ系に置換する手法を利用し、制振性能向上のために支持部材剛性を高めることが肝要であることを示した。

粘弾性体にイソブチレン・スチレン系材料を用い、目標性能に対する粘弾性体の厚さ、せん断面積の決定法について述べた。この粘弾性ダンパー制振架構と引張ブレース架構に動的な層間変形を与える実験を行い、制振

架構が想定通りの最大せん断力を示し、なおかつエネルギー吸収や変形追従性に優れることを示した。

さらに粘弾性ダンパー制振架構、引張ブレース架構を組み合わせ3種の1層試験体を製作し、振動台実験を行い、地震応答性状について考察した。ここでも、制振架構は引張ブレース架構より優れた応答性状を示した。加速度入力を大、小、大とした場合にも、安定した性能であった。

制振架構が弾性範囲にある場合の固有振動数、減衰定数の計算方法を示し、ホワイトノイズ入力時の実験結果とよく一致することを示した。

振動台実験試験体を水平バネ一質点系に置換し、時刻歴応答解析を行い、実験の再現精度について示した。制振架構試験体の精度は引張ブレース架構よりも優れ、モデル化は妥当と考えられる。架構の塑性化を抑えることが解析の精度向上の一因であり、これがひいては制振設計の精度を高める可能性があることを述べた。

#### 4. 2 スリップ型特性をもつ構造に粘性系ダンパーを用いる場合の最大応答予測法の提案

スリップ型特性をもつ弾塑性架構と粘性系ダンパーからなる構造を一質点系として捉え、等価線形化と線形応答スペクトル低減化に基づく地震応答予測法を提案した。また、その精度を検証し、応答制御設計への適用も示した。

スリップ型弾塑性要素と粘性要素の一質点並列系について、応答のランダム性やスリップ型の複雑な履歴特性を考慮し、系の等価周期・減衰定数を、各要素の諸元値の関数として定式化した。弾塑性要素については、初期剛性、二次剛性比、降伏変形、降伏力、塑性率、スリップ耐力比（弾性時とスリップ時の履歴の交点での力と降伏力の比）が、粘性要素については粘性係数が、それぞれの要素の諸元となる。なお、粘性に替わり粘弾性の要素を考慮する場合、その剛性を弾塑性要素の方に加味して本理論を適用できる。

上記の固有周期や減衰定数と線形応答スペクトルを用い、時刻歴解析によらないシステム最大応答予測法を提案した。各要素諸元値と地震波を広範に変えながら、系の時刻歴応答解析を行い、本手法や多手法の予測値と比べた結果、本手法が最も高い予測精度をもつことがわかった。

本予測法と、設計用の簡略な線形地震応答スペクトルを用い、最大応答予測曲線を描くことができる。これにより疑似加速度、疑似速度、変位応答スペクトル一定領域での応答が可視化できるため、スリップ要素と粘性要素の諸元値の効果が包括的に理解でき、応答

制御設計に有効な手段が構築できた。

スリップ型の弾塑性要素が、いわゆる一般的なバイリニア型の弾塑性要素よりエネルギー吸収量が少ないため変位が増すという傾向を定量化できた。対比して、本来はバイリニア型弾塑性系を対象としたエネルギー一定則をスリップ型にも用いた現行の設計指針は、二次剛性比だけでなくスリップ耐力比を考慮しないため本来の応答傾向を捉えておらず、ばらつきが大きい上にかなり安全側となることがわかった。

ちなみに提案した最大応答予測線図によれば、たとえば住宅などの短周期構造に対して適用される疑似加速度スペクトル一定領域では、低い降伏力で最大変位は増えやすい。これは最大応答評価式中に、最大変位/弾性変位が等価周期の2乗に比例して増加する項があり、等価減衰の増加による変位減少に比べてその影響が大きいためである。ちなみに疑似速度一定、変位一定領域の場合の順に、塑性化による変位増加傾向が無くなることもわかった。

#### 4. 3 振幅依存性をもつ非線形粘弾性ダンパーの等価線形化と制振構造設計法への応用

一質点系制振構造モデルを作成して、その剛性や粘性、入力地震動をパラメトリックに変化させた解析を行い、粘弾性体の振動数・振幅依存性を精密に再現できるダンパー解析モデルを適用した厳密モデルと、その最大応答時の履歴に基づいてダンパーの等価剛性・等価粘性を決定した近似モデルとで、両者の最大変位、最大加速度がほぼ一致することを確認した。

一質点制振構造モデルは、粘弾性体の最大応答せん断歪を10%rad~300%radとした場合、その振幅依存性によって等価剛性と等価減衰定数が最大で2倍の変化を示す場合がある。これは、大きな地震入力を想定して設計された制振構造が、相対的に小さい地震入力の際に応答低減性能を向上することを端的に示しており、実際に多質点モデルを用いても同様の傾向が見られることを示した。

振幅依存性を示す非線形粘弾性ダンパー制振構造を等価線形化するのに、最大応答時のダンパー履歴に基づいて直接、粘弾性ダンパーを線形ダンパー（Kelvin要素）に変換する手法を採用し、それを笠井らが提案した線形粘弾性ダンパー制振構造の設計手法へ適用した。計12種の多質点系制振構造を設計し、4種の模擬地震波を用いて検証を行った。これより、合理的なダンパー量決定手法としての精度は、充分と考えられる結果が得られた。

なお、提案手法による一連の設計過程は、表計算ソフトによって作業が可能のため、制

振構造の初期設計が簡易に済み、さらに制振構造の等価周期や等価減衰定数が与えられるので、設計者にとっては、その挙動を理解するのに有用と考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

①大木洋司、笠井和彦：振幅依存性をもつイソブチレン・スチレン系粘弾性ダンパーの等価線形化と制振構造設計法への応用，日本建築学会構造系論文集，653号，pp.1209-1216，2010年7月，査読有

②笠井和彦，西原耕作，蒲武川，大木洋司，坂田弘安，松田和浩：スリップ型特性をもつ構造に粘性系ダンパーを用いる場合の最大応答予測法，日本建築学会構造系論文集，646号，pp.2227-2236，2009年12月，査読有

③大木洋司，笠井和彦，横山重和，和田章，緑川光正：引張ブレースをもつ軽量鉄骨架構への粘弾性ダンパー適用に関する研究，日本建築学会構造系論文集，645号，pp.2011-2020，2009年11月，査読有

④Matsuda, K., Sakata, H., Kasai, K., and Ooki, Y.: Frame Analysis of Passively Controlled Wooden Frame Using Hysteresis Model Based on Experiment of Joint, Proc. of 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp.275-280, Tokyo, Japan, March 3-4, 2009, 査読無

⑤西原耕作，笠井和彦，大木洋司：スリップ型復元力特性を持つ主架構と粘弾性要素からなる制振構造の設計法(その1 等価線形化手法に基づく地震応答評価法)，日本建築学会大会学術講演梗概集，B2，pp.495-496，2008年9月，査読無

⑥鈴木琢也，中村尚弘，笠井和彦，大木洋司：温度・振動数・歪振幅に依存する粘弾性ダンパーの時刻歴応答解析に関する一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.547-548，2008年9月，査読無

⑦松田和浩，坂田弘安，笠井和彦，大木洋司：財産保持に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その22 繰返し水平力を受ける在来軸組木造住宅の挙動に対する内外装材の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，C1，pp.427-428，2008年9月，査読無

[学会発表] (計 7 件)

①松田頼征，笠井和彦，坂田弘安，大木洋司，山崎義弘：財産保持に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その28 方杖型制振壁の動的載荷実験，日本建築学会大会学術講演，2010年9月11日，富山大学

②坂田弘安，松田和浩，笠井和彦，大木洋司：財産保持に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その23 制振壁・面材壁のフレームモデル，日本建築学会大会学術講演，2009年8月28日，東北学院大学

③松田和浩，坂田弘安，笠井和彦，大木洋司：財産保持に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その24 制振化による応答変位低減効果，日本建築学会大会学術講演，2009年8月28日，東北学院大学

④関川久範，笠井和彦，坂田弘安，大木洋司，山崎義弘：財産保持に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その25 一軸偏心した1層木質制振架構の振動台実験概要，日本建築学会大会学術講演，2009年8月28日，東北学院大学

⑤山崎義弘，笠井和彦，坂田弘安，大木洋司：財産保持に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その26 一軸偏心した1層木質制振架構の振動台実験結果，日本建築学会大会学術講演，2009年8月28日，東北学院大学

⑥大木洋司，笠井和彦：イソブチレン・スチレン系粘弾性ダンパーを用いた制振構造の等価線形化手法に基づく設計法について：日本建築学会大会学術講演，2008年9月18日，広島大学

⑦大木洋司：応答制御の概論，第7回新「シェル・空間構造」セミナー，2008年6月27日，発明会館ホール

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称：制振部材の設計方法

発明者：笠井和彦，大木洋司，坂田弘安

権利者：東京工業大学

種類：特許

番号：特許第4139900号

取得年月日：2008年6月20日

国内外の別：国内

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

大木 洋司 (OOKI YOJI)

東京工業大学・総合理工学研究科・特任助教

研究者番号：20323842