

3 段ユニット間柱型履歴ダンパーシステムの開発とその減衰性能の評価

正会員 ○金亨國^{*1} 同 吉富信太^{*2} 同 辻聖晃^{*2} 同 竹脇出^{*2}

2. 構造—2. 振動

履歴ダンパー, 剛性比, 自由振動実験, デュアルシステム, ハイブリッドシステム

1. 序

本論文の目的は微小振動から大変形まで安定した減衰効果を発揮する 3 段ユニット間柱型履歴ダンパー制振システムを提案し, 実大制振システムを用いた自由振動実験により本制振システムの有する減衰性能とシミュレーション結果の妥当性を検証することである. さらに広い振幅範囲で制振性能を発揮できる剛性 (および降伏変位) の異なる 2 種類の履歴ダンパーを組み込むデュアルシステムと, 異種の 2 つのダンパーを組み込むハイブリッドシステムを提案する.

2. 制振システムの概要及び履歴ダンパー材の設計

2.1 制振システムの概要

本論文で提案する制振システムは 3 段間柱型履歴ダンパーシステムを採用している. これは図 1 に示すように, 板バネ, 履歴ダンパー, 横架材などで構成されたダンパーユニットをブレース材及び上下フレームを介して主体骨組に設置することで構成される. 従来のポストテンション型制振システムに比べて, 部材断面を小さくすることが可能となる.

2.2 目標性能実現のための履歴ダンパーの降伏変位と初期剛性の算定

履歴ダンパーの目標性能は等価減衰定数とし, それを実現するための降伏変位と初期剛性は, 等価線形化

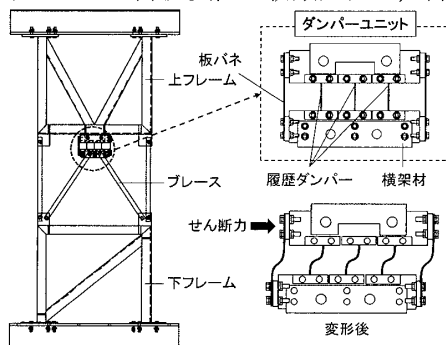


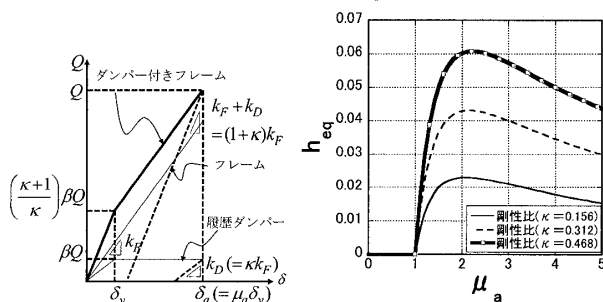
図 1 3 段ユニット間柱型履歴ダンパーシステム

法より逆算する. フレームの剛性を k_F , ダンパーシステムの初期剛性を k_D とし, その比 k_D/k_F を剛性比 κ とする. また, フレームは弾性, ダンパーは完全弾塑性材料とする. ダンパーの降伏変位を δ_y , 自由振動における等価減衰定数評価対象時の振幅を δ_a とし, その比 δ_y/δ_a を塑性率 μ_a とする. 振幅 δ_a でのフレーム+ダンパーの負担せん断力 $Q=Q_F+Q_D$ とダンパーの負担せん断力 $Q_D=k_D\delta_y$ の比 Q_D/Q を負担せん断力比 β とする. 剛性比 κ , 塑性率 μ_a , 負担せん断力比 β の定義を式(1)に, これらの関係による等価減衰定数 h_{eq} を式 2 に示す. (2) 式を κ について解き, (3) 式を得る.

$$\kappa = \frac{k_D}{k_F}, \mu_a = \frac{\delta_a}{\delta_y}, \beta = \frac{Q_D}{Q} = \frac{\kappa}{\mu_a + \kappa} \quad (1)$$

$$h_{eq} = \frac{2\beta}{\pi} \left[1 - \frac{\beta}{(1-\beta)\kappa} \right] = \frac{2\kappa}{\pi(\mu_a + \kappa)} \left[1 - \frac{1}{\mu_a} \right] \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{\pi h_{eq} \mu_a^2}{2(\mu_a - 1) - \pi h_{eq} \mu_a} = \frac{\mu_a}{\frac{2(\mu_a - 1)}{\pi h_{eq} \mu_a} - 1} \quad (3)$$

図 2 ダンパー付き 図 3 降伏変位 $\delta_y=1\text{mm}$ と建物の復元力特性 した場合の δ_a-h_{eq} 関係

高硬度ゴムダンパーを用いた自由振動実験¹⁾では, 実験供試体の減衰自由振動を観察できる最大のダンパー量として, 振幅が 2~4mm での自由振動時の等価減衰定数が 4% 程度となるようなダンパーを用いた. 比較のため, 振幅 $\delta_a=3\text{mm}$ での等価減

Development of pillar-type hysteretic damper system composed of three layers and evaluation of its damping performance

KIM Hyeong Gook, YOSHITOMI Shinta, TSUJI Masaaki, TAKEWAKI Izurui

衰定数が4%となるような履歴ダンパー特性を標準ケースとする．標準ケースの降伏変位 δ_y を1mm，基準振幅の塑性率 μ_e を3とするときの剛性比は，(3)式より $\kappa = 0.312$ となる．標準ケースからの拡張ケースとして剛性比をそれぞれ0.156，0.468とした2ケースを考える．

3. 幾何非線形性を考慮した履歴ダンパー要素の復元力特性のモデル化

履歴ダンパーの減衰性能を観察するための振幅2～4mmの変形は，履歴ダンパーの両端にせん断力だけではなく $P-\Delta$ 効果による付加せん断力も生じさせる．尚，ダンパーに生じる軸力が大きくなる場合には軸力-曲げモーメント相関降伏条件も考慮する必要がある．図4(b)により幾何非線形性を考慮した解析モデルがダンパー要素のせん断実験結果によく対応していることが分かる．4～12mmで生じたせん断力の差は，N-M相関降伏条件で降伏後に生じるモーメントの低下の予測精度に原因があると考えられる．履歴ダンパーの復元力特性を完全弾塑性と仮定すると解析上の簡便性は得られるが，実験結果と比べて水平変形に対する等価剛性が大きくなり，自由振動波形では振幅や周期などにおいて差が出るのが予想できる．これは実験とシミュレーションの結果から観察することとする．

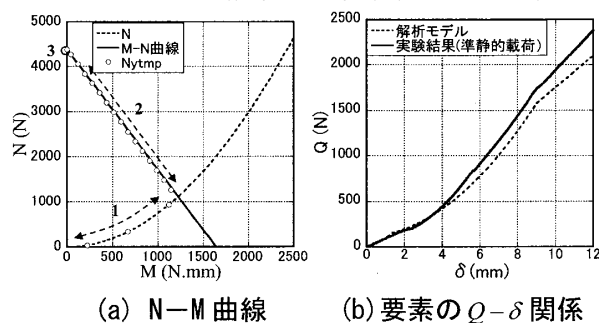


図4 幾何非線形性を考慮したダンパー要素の $Q-\delta$ 関係のモデル化

4. 実大制振システムを用いた自由振動実験

4.1 自由振動実験の目的

提案する制振システムの減衰性能を調べるため，実大自由振動実験を行う．自由振動実験を行う理由・目的は以下の通りである．

1. 提案するシステムが有効に機能することの検証
2. 強制加振実験に比べてシステムの単純化が可能
3. 組み込む履歴ダンパーの剛性（剛性比）や供試

体のサイズを適切に選択することにより，ダンパー周辺部材の剛性などの基本性能の評価が可能

4.2 供試体及び実験の概要

供試体の概要を図5(a)に示す．図に示すように反力壁に高力ボルトで固定した梁と2体のH型鋼柱で構成される平面フレームから吊り柱を介して，床梁及び錘を吊りあげる形でダンパーユニットを含む3段型のフレームを設置する．シミュレーションに用いた解析モデルは図5(b)に示すような1質点系のせん断型モデルである．

ここで， m ：供試体を1質点系に置き換えたときの質量， k_D ：履歴ダンパーの水平剛性， k_F ：吊り柱の水平剛性， k_S ：板バネの水平剛性， k_B ：ダンパー周辺部材の水平剛性である．

計測は8箇所とする．3段ユニットの上フレーム下部に対するダンパーユニットの下部の相対水平変位を履歴ダンパーに生じる正味の变形量とする．供試体に生じるせん断力は床梁の絶対加速度に1質点置換質量を乗じた慣性力により評価する．

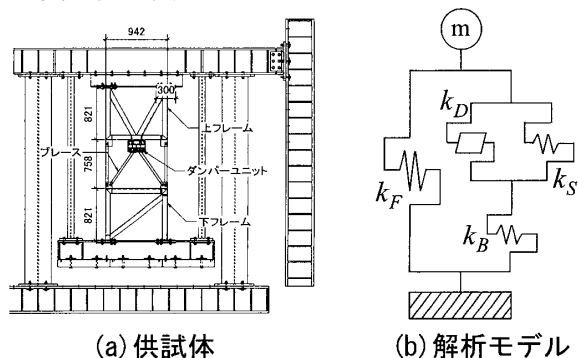


図5 実験供試体と解析モデルの概要

5. 実験結果とシミュレーションの比較

5.1 自由振動波形による減衰定数の算定

図6は剛性比 κ をパラメータとしたシミュレーションと実験の自由振動波形の比較を示す．制振システムの減衰性能は振幅比を用いた対数減衰率により評価する．図6(b)は標準ケースの波形を表し，振幅2～4mmでの等価減衰定数は0.037である．これより標準ケースが目標とする減衰性能を発揮できることを確認できる．また，剛性比が大きくなると減衰性能も大きくなるのが分かる．しかし塑性率1以下の領域ではフレームが有する構造減衰によって減衰する．その減衰性能は低く，履歴ダンパーは微小振動には対応できないことを表している．

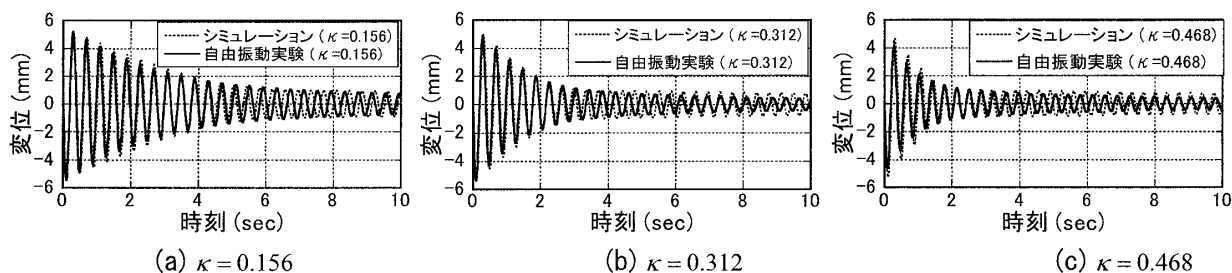


図6 自由振動波形の比較（実験とシミュレーション）

シミュレーションと実験の自由振動波形の比較により、シミュレーションより実験の周期が少しずつ長くなっていることがわかる。これはシミュレーションでは完全弾塑性を仮定しており実験よりも剛性を大きく見積もっていることに起因すると考えられる。

5. 2 履歴ダンパーの負担せん断力

図7は準静的載荷時、剛性比 $\kappa = 0.312$ の場合においてダンパーに生じた変位とせん断力の関係を示す。履歴ダンパーの負担せん断力 Q_D は、準静的載荷時においてダンパー付きフレームの層せん断力ー層間変位関係から吊り柱と板バネが負担するせん断力を差し引いて求める。また、図に三角形の記号付きで表されている曲線はダンパーの要素実験から得られた変位とせん断力の関係であり、標準ケースダンパーを組み込んだ制振システムにおけるダンパーの負担せん断力曲線と対応していることが分かる。

5. 3 自由振動時の供試体の復元力特性

図8に自由振動実験による供試体の復元力ループとシミュレーションの復元力ループの比較を示す。各ケースにおいて、振幅 2mm 以下におけるループはシミュレーションとよく対応するが、それ以上の振幅においては層間変形に対して非線形的な層せん断力の増加が観察される。

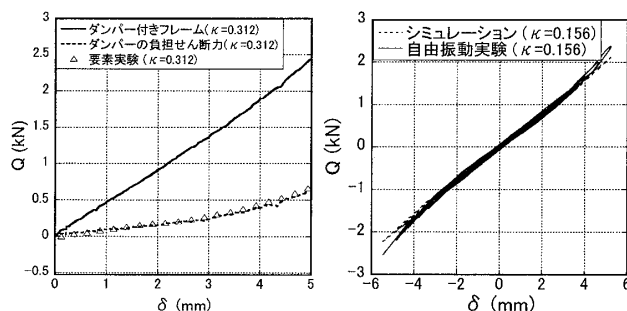


図7 準静的載荷時のダンパーの負担せん断力

等価減衰定数 h_{eq} は、図3のように最大ポテンシャルエネルギーに対する復元力ループの1サイクルの面積から求められるが、ここでは対数減衰率により評価する。図9の実線は、各ケースにおける自由振動時の振幅ごとの等価減衰定数を示す。15%程度低い実際の初期剛性と幾何非線形性などにより最大等価減衰定数値は予想より小さいが、図3の予想値と近い結果が得られている。

6. 降伏変位の異なる2種類の履歴ダンパーを組み込むデュアルシステム

図9、10は高硬度ゴムダンパーと履歴ダンパーの自由振動実験から得られた結果を表す。履歴ダンパーを見ると、振幅 $2\sim 4\text{mm}$ での減衰は目標通り高硬度ゴムダンパーに対応するが、振幅 1mm を下回る領域ではその減衰性能が低下することがわかる。履歴ダンパーの降伏変位を 1mm より小さくすれば、より小さい振幅でも減衰性能を発揮できると思われる。この履歴ダンパーの特徴を用いれば大振幅だけでなく微小振幅でも減衰性能を発揮できると考えられる。

図11は初期剛性が同じで降伏変位をそれぞれ 0.5mm 、 3mm とした2種類の履歴ダンパーを組み合わせたデュアルシステムの自由振動波形である。 $3\sim 12\text{mm}$ の振幅では二つのダンパーにより、 $0.5\text{mm}\sim$

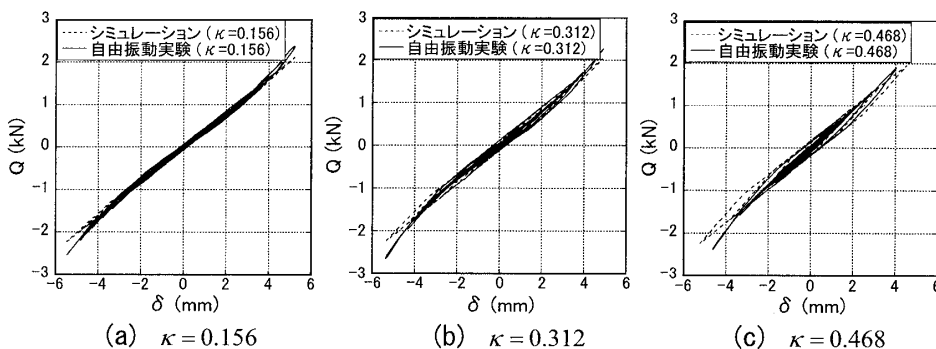


図8 動的載荷時の供試体の $Q-\delta$ 関係比較

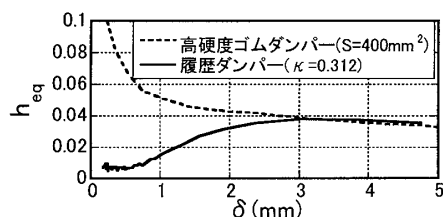


図9 各振幅ごとの等価減衰定数

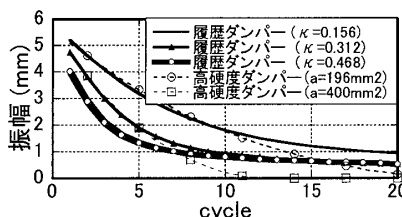


図10 サイクルごとの振幅変化

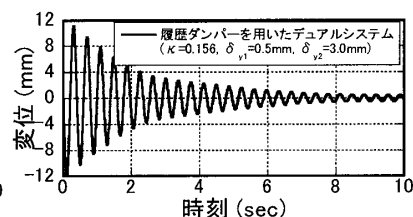


図11 デュアルシステムの自由振動波形

3mm の振幅では降伏変位 0.5mm のダンパーにより振幅が減衰されていることが確認できる。しかし、広い振幅範囲で減衰効果を有するこのデュアルシステムでも極小さな振幅には対応できないという短所がある。

7. 材料の特性の異なる 2 種類のダンパーを組み込むハイブリッドシステム

ここでは広い振幅範囲で有効に減衰性能を発揮する、1 個のダンパーユニットに履歴ダンパーと高硬度ゴムダンパーを組み合わせたハイブリッドシステムを提案する。シミュレーションによりその効果を明らかにする。

このシステムの特徴は、微小変形に対して高減衰性能を有する高硬度ゴムと、地震時のような大変形に有効な履歴ダンパーを組み合わせることにより、両者の長所を併せ持つ制振ダンパーの構築が可能となることである。図 12 には材料特性の異なる 2 つのダンパー要素の設計方法を示す。ここでは履歴ダンパーの降伏変位を 6mm として、履歴ダンパーの塑性率が 1 になるところでの高硬度ゴムの等価減衰定数が履歴ダンパーの有する最大等価減衰定数の 1/2, 1/5 になる場合を想定している。

図 13 より、ハイブリッドシステムは 0~12mm のすべての振幅に対して減衰性能を発揮していることがわかる。結果だけを見ると、高硬度ゴムの面積が大きく減衰効果が高いと考えられるが、大変形に対する減衰効果は履歴ダンパーだけでも十分であるといえる。これより、ハイブリッドシステムの構成要素の経済的な設計のためには、目標変形における 2 つのダンパー要素の最適等価減衰比を算定する必要がある。

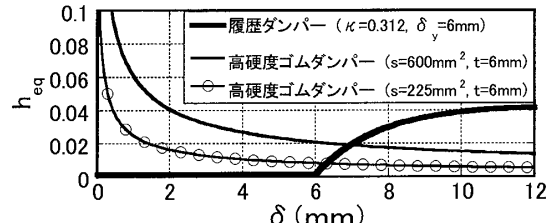


図 12 ダンパーの等価減衰定数によるハイブリッドシステムのダンパー要素の設計

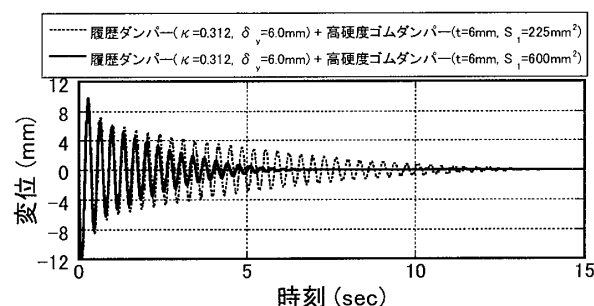


図 13 ハイブリッドシステムの自由振動波形の比較

8. 結論

1. 履歴ダンパーを用いた 3 段ユニット間柱型制振システムを提案し、自由振動実験によりシステムの有する減衰性能を確認した。
2. 履歴ダンパーの有する幾何非線形性が減衰性能に与える影響をシミュレーションと実験から確認した。
3. 広い振幅領域で減衰性能を発揮できる鋼材と高硬度ゴムを組み合わせたハイブリッドシステムを提案し、シミュレーションによりシステムの減衰効果を確認した。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号 21560588, 研究代表者: 辻聖晃)による。

参考文献

1. 藤原悠祐, 3 段ユニット間柱型粘弾性ダンパーシステムの開発と制振性能の簡易評価法, 京都大学修士論文, 2011. 2.

*1 京都大学大学院生

*2 京都大学

Kyoto University, Graduate student
Kyoto University