

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 段ユニット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。

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

履歴ダンパーを設置した建物の等価減衰定数を指定して、それを実現するための履歴ダンパーの降伏変位と初期剛性を、等価線形化法より逆算する。建物の剛性を 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、建物は弾性、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 、等価減衰定数評価用の振幅を δ_a とし、その比 δ_y/δ_a を塑性率 μ_a とする。振幅 δ_a での建物+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。定義により、等価減衰定数 h_{eq} を κ について解き、(1)式を得る。

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

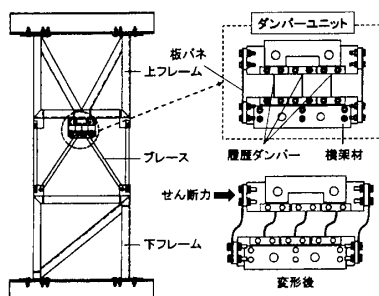
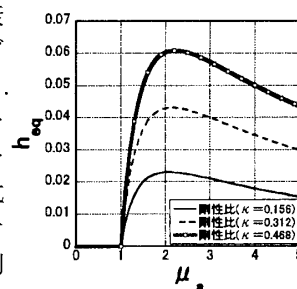


図1 3段ユニット間柱型履歴ダンパーシステム

振幅 $\delta_a = 3\text{mm}$ での等価減衰定数が 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_a 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。また、

図2 降伏変位 $\delta_y = 1\text{mm}$ とした場合の $\mu_a - h_{eq}$ 関係

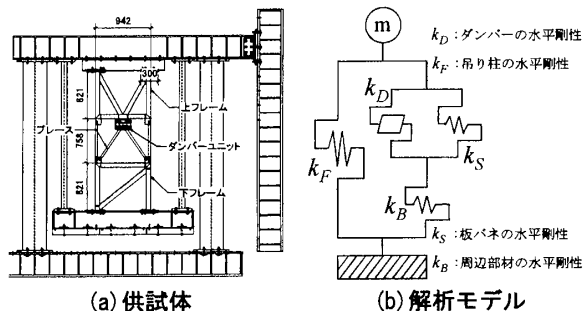
標準ケースとはほぼ同等の減衰定数となる高硬度ゴムダンパー（振幅が 2~4mm での等価減衰定数が 4% 程度）を用いた自由振動実験との比較を行う。

3. 供試体及び実験の概要

実験の供試体は図 3(a) に示すように、周辺フレームから 2 本の柱により吊られた床梁及び垂に対して、ダンパーユニットを含む 3 段ユニット型制振システムを設置する。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。シミュレーションに用いた解析モデルは図 3(b) に示すような 1 質点系のせん断型モデルである。

4. 実験結果とシミュレーションの比較

図 4 に自由振動波形、図 5 にピーク時の振幅の推移、図 6 に図 5 から対数減衰率により求めた振幅レベル毎の減衰定数を示す。図 5, 6 には比較のため、高硬度ゴムを用いた場合の結果¹⁾も示す。図 2 の予想値と図 6 の実線を比べると、標準ケースの振幅 2~4mm における減衰定数は 0.037 であり、目標減衰定数 4% を概ね実現できていることが分かる。初期剛性が設計より 15% 程度低いことと、大変形時における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ものの、概ね類似した結果が得られている。

(a) 供試体 (b) 解析モデル
図3 実験供試体と解析モデルの概要

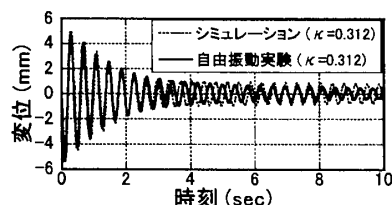


図4 自由振動波形の比較

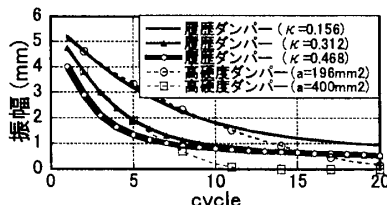


図5 サイクルごとの振幅変化

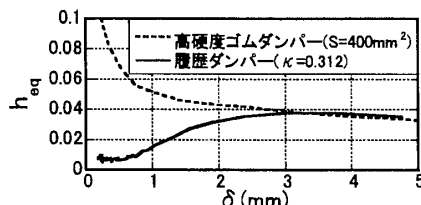


図6 各振幅ごとの等価減衰定数

また、塑性率 1 以下の領域では減衰性能は低く、履歴ダンパーは微小振動に効果が小さいことも確認できた。図 4 より、振幅 1mm 程度以下でシミュレーションより実験の周期が長いことがわかる。これは実験ではダンパーの荷重-変形関係が降伏変位近傍でなだらかな曲線となるのに対し、シミュレーションでは完全弾塑性を仮定しているため、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. 自由振動時の供試体の復元力特性

図 7(a)に準静的載荷時のダンパーの負担せん断力を示す。履歴ダンパーのせん断力は、ダンパー単体の負担せん断力は要素実験とよく対応している。3mm 以上における非線形性はダンパー要素の $P-\Delta$ 効果によるものである。図 7(b)に自由振動実験による実験とシミュレーションの $Q-\delta$ 関係の比較を示す。振幅 3mm 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準静的載荷時と同様に、非線形な層せん断力の増加が観察される。

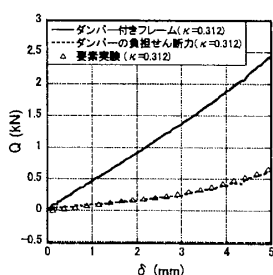
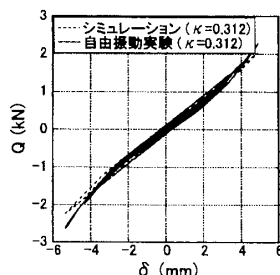


図 7(a) 準静的載荷時のダンパーの負担せん断力

図 7(b) 動的載荷時の供試体の $Q-\delta$ 関係

6. 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 8 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 で付加減衰定数が 0 のときに、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指定倍 (1/2, 1/5) になるようにゴム量を決める。

図 9 にハイブリッドシステムの自由振動の解析結果を示す。図より 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。小振幅においては、高硬度ゴムの面積が大きい方が減衰効果が高いが、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。

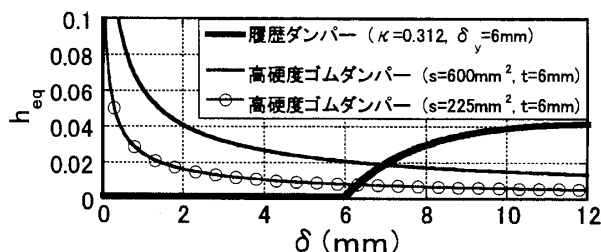


図 8 ダンパーの等価減衰定数によるハイブリッドシステムのダンパー要素の設計

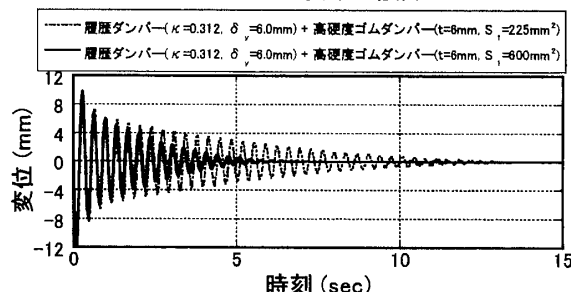


図 9 ハイブリッドシステムの自由振動波形の比較

7. 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。

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.