

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特性の簡易評価法

正会員○ 藤原悠祐* 同 金 亨國*
同 辻 聖晃* 同 吉富信太*
同 竹脇 出*

2. 構造—2. 振動

制振, 微振動, 3段ユニット, 高硬度ゴム, 簡易応答評価法

1. 序

本研究の目的は, 交通振動等による振幅 0.1mm 程度の微小振動から地震時の大変形まで安定した減衰効果を発揮する戸建住宅用制振システムを提案し, 本制振システムを設置した際の応答を簡易的に評価することができる簡易応答評価法を構築することである。また, 実物大供試体に対する自由振動実験を実施し, 提案する制振システムの減衰性能を検証する。

2. 制振システムの概要

本研究で提案する制振システムは, 図1に示すように, ダンパーユニットと呼ぶ機構にエネルギー吸収要素である粘弾性ダンパーを組み込み, この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建築骨組に設置することで構成される。この制振システムを, 本研究では3段ユニット間柱型粘弾性ダンパーシステムと呼ぶ。本システムを採用することにより, 剛性の高い上下フレームがエネルギー吸収要素を組み込んだダンパーユニットの回転を拘束するため, 村田らが提案するポストテンション型制振機構^{1),2)}では必須であったブレース材へのポストテンションの導入が不要となる。ダンパーユニットの変形時の概要を図2に示す。

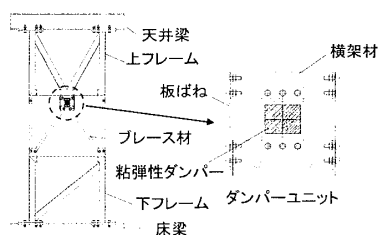


図1 3段ユニット間柱型粘弾性ダンパーシステム

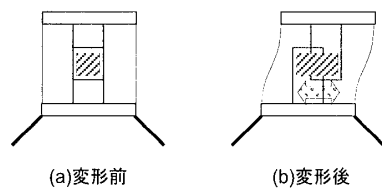
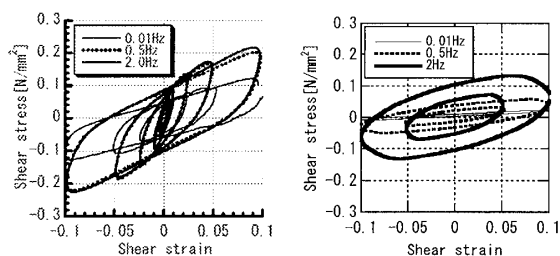


図2 ダンパーユニットの変形

本研究では, 粘弾性ダンパーとして, 高硬度ゴムあるいは速度依存型ゴムを2枚の鋼板に加硫接着したものを用いる。高硬度ゴムは, 歪が小さいときに高い等価剛性と等価減衰を示す著しい歪依存性の減衰性能を有する材料である³⁾。一方, 速度依存型ゴムは, 抵抗力が主として歪速度に依存し, 減衰性能の歪依存性は高硬度ゴムに比べると小さい。両ゴムの履歴ループの一例を図3に示す。



(a)高硬度ゴム

(b)速度依存型ゴム

図3 高硬度ゴムと速度依存型ゴムの履歴ループ

3. 実大制振システムを用いた自由振動実験

3.1 自由振動実験の目的

実物大供試体に対する自由振動実験により, 以下の項目を明らかにする。

1. 提案する制振システムの有効性の実証。
2. 自由振動実験結果との比較により, シミュレーションに用いた解析モデルの妥当性を検証する。
3. 本研究で扱う高硬度ゴムダンパー等が有する減衰性能の歪依存性³⁾の自由振動実験による実証。

3.2 供試体の概要

供試体および載荷装置の概要を図4に示す。制振システムは, 天井梁と床梁のそれぞれに, 上下フレーム脚部のベースプレートを高力ボルト接合することにより設置される。上下フレームを構成する溝型鋼は, 溶接による剛接合としてある。ブレース材は, 平板2枚を一組として構成されており, これを下フレームに溶接されたガセットプレートとダンパーユニットに高力

Pillar-type viscoelastic damper system composed of three layers and simplified earthquake response evaluation method for houses with the proposed damper system

FUJIWARA Yusuke, KIM Hyeong Gook, YOSHITOMI Shinta, TSUJI Masaaki, and TAKEWAKI Izuru

ボルトでボルト接合される。

3.3 荷重方法

荷重は、所定の振幅に達するまで吊り柱に荷重をかける人力加振により行う。表1に荷重ケースを示す。

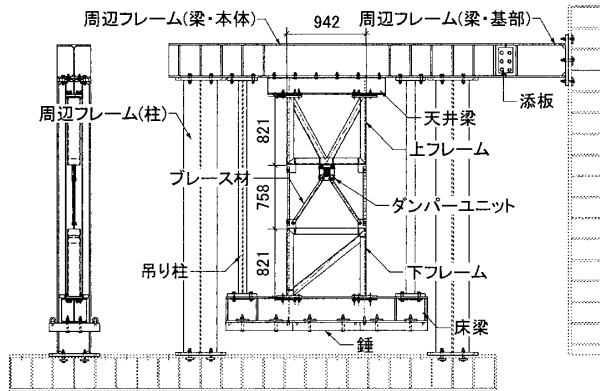


図4 実験供試体

表1 荷重ケース

| モデル ※1 | ケース番号-使用ダンパー量(mm ²) (ゴム厚 3.2mm) | | | | | | |
|-----------|---|----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------|
| | ①- 36 | ②- 72 | ③- 100 | ④- 196 | ⑤- 400 | ⑥- 1000 | ⑦- 6000※2 |
| A | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| B | - | - | ○ | ○ | ○ | - | ○ |
| C | - | - | ○ | ○ | ○ | - | ○ |

※1 各モデルの詳細は以下の通りである。

モデルA…荷重フレーム+制振システム(高硬度ゴム)

モデルB…荷重フレーム+制振システム(速度依存型ゴム1)

モデルC…荷重フレーム+制振システム(速度依存型ゴム2)

※2 粘弾性ダンパーを6000mm²組み込んだケースについては、この実験に用いる錘の質量では自由振動の様子を観察することが困難であるため、オイルジャッキによる準静的荷重実験のみを実施した。

4 実験結果

4.1 高硬度ゴムダンパー量による比較

ダンパーユニットに組み込む高硬度ゴムダンパーの面積を変えて自由振動させた場合の応答波形の比較を図5に示す。図5より、ダンパー量が増えるにしたがい減衰が増大していることがわかる。このことにより、本制振システムがエネルギー吸収効果を発揮していることを示した。

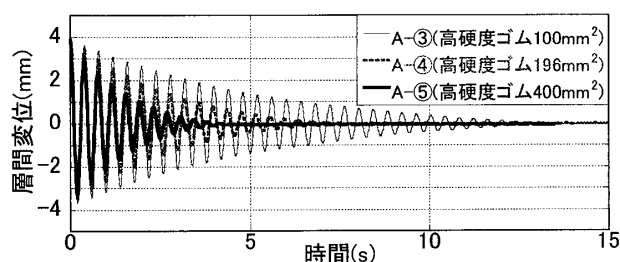


図5 高硬度ゴムダンパー量による比較

4.2 粘弾性ダンパーの種類による比較

粘弾性ダンパーの種類による減衰性能の違いを示すため、図6と図7に、制振システムに3種類の粘弾性ダンパー(高硬度ゴム, 速度依存型ゴム1, 速度依存型ゴム2)をそれぞれ400mm²ずつ組み込んだ場合の供試体の自由振動波形の比較を示す。図6より、今回の自由振動実験における変形レベル(粘弾性ダンパーのせん断歪で200%以下)と振動数レベル(3Hz以下)では、同じダンパー量を組み込んだ場合において高硬度ゴムの減衰性能が最も高いことがわかる。

また、図7より、速度依存型ゴム1あるいは速度依存型ゴム2を組み込んだ場合には応答が小さくなってからもしばらく供試体が振動しているのに対して、高硬度ゴムを組み込んだ場合には、速やかに供試体の振動が停止していることがわかる。これは、微小変形領域において極めて高い減衰性能を発揮する高硬度ゴムの歪依存性によるものである。

次に、図6に結果を示した各供試体が有する減衰定数を変形レベル毎にみよ。図8に、各変形レベルの平均振幅に対する減衰定数(対数減衰率より評価したもの)の変化を示す。なお、図8には、粘弾性ダンパーを組みこまない場合の供試体の減衰定数も併せて示してある。図8からも、微小変形領域において、高硬度ゴムを組み込んだ供試体が他の供試体に比べて極めて大きな減衰定数を有することがわかる。

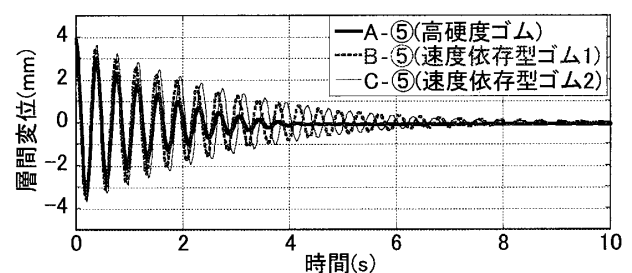


図6 粘弾性ダンパーの種類による比較

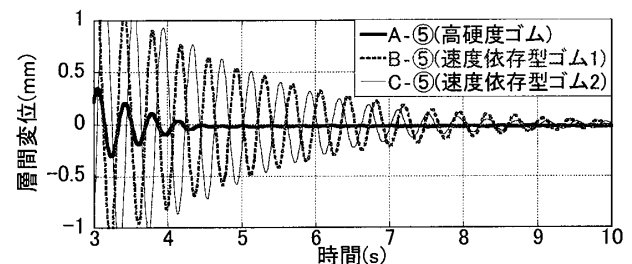


図7 自由振動波形(図6の一部を拡大)

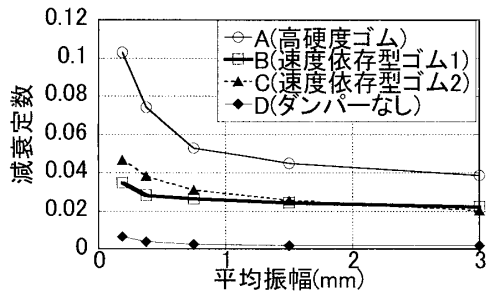


図8 各変形レベルにおける供試体の減衰定数

5. シミュレーションと実験結果の比較

非線形時刻歴応答解析によるシミュレーションと実験結果の自由振動波形の比較を行う。なお、シミュレーションに用いた汎用構造解析ソフト(SNAP)は、粘弾性ダンパー要素として本論文で扱う高硬度ゴムを内蔵し

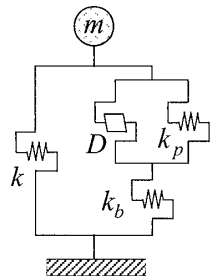


図9 シミュレーション解析モデル

用いた解析モデルは図9に示すような1質点系のせん断型モデルであり、 D ：高硬度ゴムダンパー、 k_p ：板ばねの水平剛性、 k_b ：ダンパー周辺部材(上下フレーム、ブレース材及び取付接合部)の水平剛性、 m ：供試体を1質点系に置き換えたときの質量、 k ：吊り柱の水平剛性を表す。なお、シミュレーションにおいては、ダンパー無しの場合の供試体の固有周期のみ実験結果に適合するように調整した。

図10に、ケースA-⑤について比較を行った結果を示す。図10より、高硬度ゴムを制振システムに組み込んだ場合においては、シミュレーションと実験結果が極めて良好な精度で一致することを確認した。

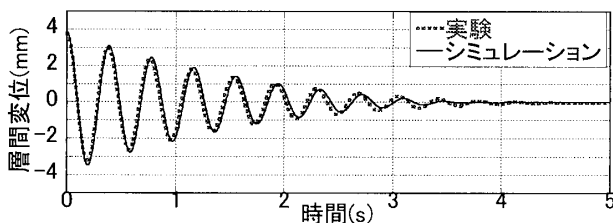


図10 シミュレーションと実験結果の比較

6. 簡易応答評価法

本研究で提案する制振システムを戸建鉄骨住宅へ設置した場合の建物の応答を時刻歴応答解析によらず簡易的に評価することができる簡易応答評価法を構築する。さらに、数値例題を示し、設計用地震動に対する

簡易応答評価法による結果とシミュレーションの比較を行うことにより、簡易応答評価法の妥当性と有効性を示す。

6.1 想定する戸建鉄骨住宅のモデル化

建物モデルは、重量鉄骨造3層住宅を想定してモデル化を行った。以下にモデル化の手順を示す。(1)3質点系のせん断型モデルとした。(2)1次固有振動数(3Hz)及び各層質量も実際の重量鉄骨造3層住宅を参考にして決定した。(3)1次固有モードは逆三角形と仮定し、各層剛性を決定した。(4)構造減衰は2%とした。

6.2 簡易応答評価法の構築

簡易応答評価法では、本制振システムを等価なKelvin-Voigtモデルに置き換えた簡易モデルを用いる。簡易モデルの各層等価剛性 K_{eq} 及び各層等価減衰係数 C_{eq} は、以下に示すとおりである。

$$K_{eq} = \frac{k_b \{ (k_d + k_p)(k_b + k_d + k_p) + (\omega c_d)^2 \}}{(k_b + k_d + k_p)^2 + (\omega c_d)^2} \quad (1)$$

$$C_{eq} = \frac{k_b^2 c_d}{(k_b + k_d + k_p)^2 + (\omega c_d)^2} \quad (2)$$

ここで、 k_d および c_d はそれぞれ、高硬度ゴムダンパーの等価剛性及び等価減衰係数を表し、 ω はMaxwellモデルと等価Kelvin-Voigtモデルの等価性を定義するための固有円振動数である。

簡易モデルを用いて簡易応答評価法の構築を行う。以下にその手順を示す。

- ① 建物モデルの非減衰時の1次固有円振動数 ω_0 、1次固有モード \mathbf{u} 及び1次の刺激係数 β を算出する。簡易応答評価法では1次モードのみを考慮し、高次モードの影響は無視することとする。
- ② 建物モデルの頂部最大変位が y となるときの各層間変位 δ_i を、①で算出した1次固有モード \mathbf{u} を用いて求める。ここで、 y は粘弾性ダンパーのせん断歪で100%に相当する変位を与えることとする。
- ③ 建物モデルの各層に設置した制振システムに、②で求めた各層間変位 δ_i が生じたときの簡易モデルの各層等価剛性 K_{eq} 及び各層等価減衰係数 C_{eq} を式(1)、(2)より算出する。このとき $\omega = \omega_0$ とする。
- ④ 制振システムを設置した建物モデル全体の減衰定数 h を、③で算出した簡易モデルの K_{eq} 及び C_{eq} を用いて求め、1次減衰定数 h を次式で評価する。

このとき、制振システムを設置した建物モデルの1次固有円振動数および1次固有モードは、近似として①で算出した非減衰時の1次固有円振動数 ω_0 、1次固有モード \mathbf{u} を用いることとする。

$$h = \frac{1}{2\omega_0} \frac{\{\mathbf{u}\}^T [\mathbf{C}]^* \{\mathbf{u}\}}{\{\mathbf{u}\}^T [\mathbf{M}] \{\mathbf{u}\}} \quad (3)$$

$$[\mathbf{C}]^* = [\mathbf{C}_{eq}] + \frac{2h_0}{\omega_0} [\mathbf{K} + \mathbf{K}_{eq}] \quad (4)$$

ここで、 h_0 ：建物モデルが有する構造減衰、 \mathbf{C}_{eq} ：各層に設置された制振システムの等価減衰行列、 \mathbf{K}_{eq} ：各層に設置された制振システムの等価剛性行列、 \mathbf{K} ：建物モデルの剛性行列である。

- ⑤ 応答スペクトル法を用いて建物モデルの頂部最大変位 y^* を求める。
- ⑥ ⑤で求めた建物モデルの頂部最大変位 y^* を②の y に代入して以下②～⑥の手順を y の値が収束するまで行う。
- ⑦ 収束した y の値を建物の頂部最大変位として、各層に生じる層間変位を求める。

6.3 簡易応答評価法を用いた数値例題

本節では数値例題を示し、設計用地震動に対する簡易応答評価法による結果と汎用構造解析ソフト(高硬度ゴムの復元力モデル内蔵)を用いた非線形時刻歴応答解析によるシミュレーションの比較を行う。応答を評価するのは6.1節でモデル化を行った重量鉄骨造3層住宅を想定したモデルとする。また、制振システム1ユニットあたりには高硬度ゴスを6000mm²(ゴム厚3mm)組み込むこととする。簡易応答評価法に用いる応答スペクトルには、Newmark-Hallの応答スペクトル(高層建築物設計用のレベル1)を採用し、シミュレーションにおいてはこの応答スペクトル(減衰定数2%)に適合する模擬地震動群を入力する。

数値例題として、建物モデルの各層に一方方向あたり制振システムを0ユニット、1ユニット、2ユニット、4ユニットずつ設置した場合に、建物モデルに生じる各層間変位の最大応答値を求める。図11に、簡易応答評価法とシミュレーションの数値例題の結果を示す。なお、シミュレーションの結果は、入力地震動群をそれぞれ入力して得られた応答値の平均値を示してある。

図11より、簡易応答評価法とシミュレーションの数値例題の結果は、概ね良好な精度で一致することを確認した。これにより、簡易応答評価法の妥当性と有効性を示した。

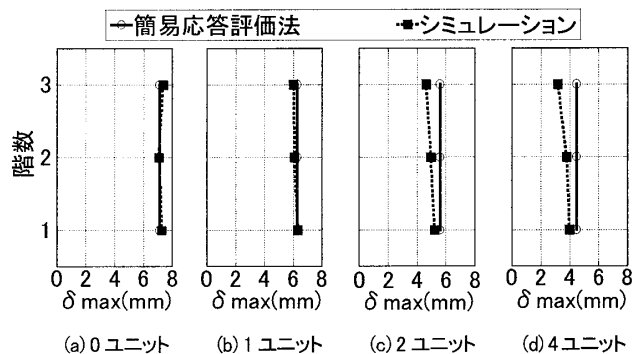


図11 簡易応答評価法を用いた数値例題

7. 結論

1. 交通振動等による振幅0.1mm程度の微小振動から地震時の大変形まで安定した減衰効果を発揮する戸建住宅用制振システムを提案した。
2. 本論文で提案する制振システムの実大自由振動実験を行い、以下の項目を明らかにした。
 - 提案する制振システムの有効性を実証した。
 - 自由振動実験結果との比較により、シミュレーションに用いた解析モデルの妥当性を示した。
 - 本論文で扱う高硬度ゴムダンパーが有する減衰性能の歪依存性を自由振動実験により実証した。
3. 本制振システムの簡易モデルを構築し、本制振システムを有する建物の応答を時刻歴応答解析によらず簡易的に評価することができる簡易応答評価法を提案した。設計用地震動に対する簡易応答評価法による結果とシミュレーションの比較を行うことにより、簡易応答評価法の妥当性と有効性を示した。

謝辞 本研究の一部は、平成21年度科学研究費補助金による。また、自由振動実験においては住友ゴム工業(株)より高硬度ゴム及び速度依存型ゴムの材料特性に関して有益な意見を頂戴した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 辻聖見他：戸建て住宅の微小振動制御のためのポストテンション型制振機構，鋼構造年次論文報告集（第17回鋼構造シンポジウム），pp.127-132，2009.11.
- 2) 辻聖見他：戸建て住宅の微小振動制御のためのポストテンション型制振機構 簡略化モデルによる実効率の解析，構造工学論文集 Vol.56B，pp.171-178，2010.4.
- 3) 谷翼他：高硬度ゴム粘弾性体の極微小変形から大変形までのひずみ・振動数依存性のモデル化：構造系論文集 No.629，pp.1079-1086，2008.7.