

2種類のダンパーを用いたハイブリッド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, 高硬度ゴムダンパー, ハイブリッドダンパー, 自由振動実験, 簡易設計法

1. 序

本論文の目的は, 風や交通振動による微振動から地震時の大変形まで有効な減衰効果を発揮する2種類のダンパーを用いた戸建住宅用のハイブリッドダンパーシステムを提案し, その設計及び減衰性能の評価が同時にできる簡易設計法を構築することである。また, 実大制振システムを用いた自由振動及び強制加振実験により本制振システムの有する減衰性能と簡易設計法の有効性を検証する。

2. ハイブリッドダンパーシステムの概要

本論文で提案する制振システムは, 3段ユニット間柱型ハイブリッドダンパーシステムである。図1に示すようにダンパーユニットと呼ばれる機構に履歴ダンパーと高硬度ゴムを組み込み, ダンパーユニットをブレース部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。周辺部材の剛性を十分大きくすることにより変形を中間層に集中させ, 減衰性能の高効率化が可能となる。また, ダンパー要素をユニット化することで目的に応じたダンパーを容易に取り替えることができる。さらに, 履歴ダンパーと高硬度ゴムを一つの制振機構に並列配置し, 両者の減衰性能における長所を併せ持つコンパクトな制振ダンパーの構築が可能となる。

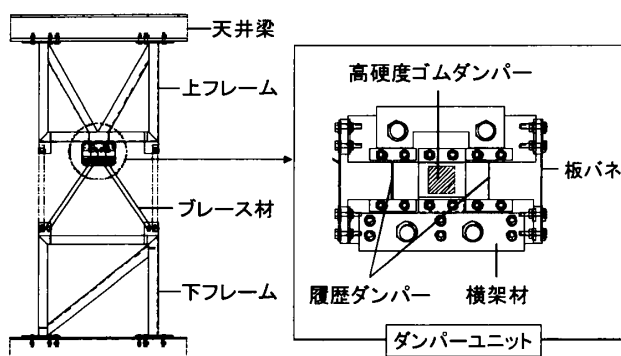


図1 ハイブリッドダンパーシステム

Development of three-layer-type hybrid damper system composed of two different dampers

KIM Hyeong Gook, YOSHITOMI shinta, TSUJI Masaaki and TAKEWAKI Izuru

3. ハイブリッドダンパーの設計と減衰性能の評価

3.1 簡易設計法の概要

本研究ではエネルギー吸収要素として履歴ダンパーと高硬度ゴムダンパーを用いる。通常の鋼材ダンパーは降伏変位より小さい振幅領域で減衰効果を期待できないという短所がある。一方, 高硬度ゴムダンパーは小さな歪領域において大きな等価剛性と等価減衰を有する。両ダンパーのせん断変形に対する等価減衰定数の変化の一例を図2に示す。

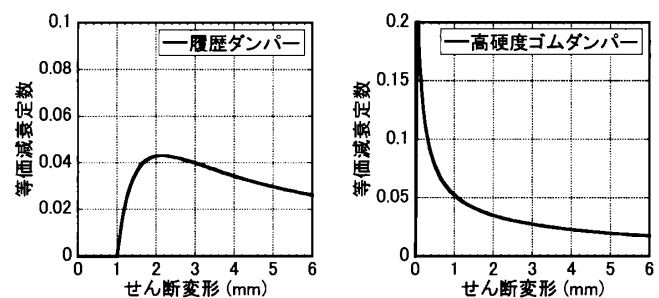


図2 履歴ダンパー及び高硬度ゴムダンパーのせん断変形と等価減衰定数の関係

ここでは, 両ダンパーの有する減衰特性を組み合わせることにより, 幅広い振幅領域で有効な減衰性能を発揮するハイブリッドダンパーの簡易設計法と減衰性能の簡易評価法を提案する。簡易設計法は目標減衰性能を有する履歴ダンパーを設計し, 指定する振幅での高硬度ゴムダンパーと履歴ダンパーの等価減衰定数比を想定することにより必要な高硬度ゴムダンパーの量を定める方法である。

3.2 ダンパーの設計1(履歴ダンパー)

ハイブリッドダンパー設計のステップ1として, 指定する振幅で目標性能を発揮する履歴ダンパーの設計を行う。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を等価線形化法より逆算する。剛性比 κ , 塑性率 μ_0 ,

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}^{hd} を式(2)に示す。式(2)を κ について解くと、式(3)を得る。

$$\kappa = k^{hd} / k^F, \quad \mu_a = \delta_a / \delta_y, \quad \beta = Q_D / Q = \kappa / (\mu_a + \kappa) \quad (1)$$

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

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

ここで、 k^{hd} : 履歴ダンパーの剛性、 k^F : 主体骨組の剛性、 δ_a : 層間変位、 δ_y : 履歴ダンパーの降伏変位、 Q : 骨組とダンパーの負担せん断力、 Q_D : ダンパーの負担せん断力である。本研究では、骨組は弾性、履歴ダンパーは完全弾塑性材料とする。実験供試体の容量制限を考慮し、振幅が2~4mmでの自由振動時の等価減衰定数が4%程度となるような履歴ダンパーを設計する。ダンパーの降伏変位 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、式(3)により $\kappa = 0.312$ となる。式(4)を式(2)に代入することより、設計した履歴ダンパーの最大減衰値 h_{max}^{hd} を求める。式(4)での μ_{opt}^{hd} はダンパーの等価減衰定数を最大化するという意味で、最適塑性率と呼ぶ。

$$\partial h_{eq}^{hd} / \partial \mu_a = 0 \rightarrow \mu_{opt}^{hd} = 1 + \sqrt{1 + \kappa} \quad (4)$$

剛性比が $\kappa = 0.312$ の時の履歴ダンパーの有する最大減衰値は $h_{max}^{hd} = 0.0432$ となる。

3.3 ダンパーの設計2(高硬度ゴムダンパー)

本研究で扱う高硬度ゴムは強いひずみ依存性を有する粘弾性ダンパーである。式(5)から(7)に、せん断変形に対する高硬度ゴムの等価剛性 k_{eq}^{hrd} [N/mm] 及び等価減衰係数 C_{eq}^{hrd} [N·s/mm] を表す。

$$k_{eq}^{hrd} = \frac{S}{d} \left(\frac{0.32 + 0.11\varepsilon^{0.38}}{1 + \varepsilon} \bar{\gamma}_{max}^{-0.62} + \frac{0.32\varepsilon - 0.11\varepsilon^{0.38}}{1 + \varepsilon} \frac{\bar{\gamma}_{max}^{0.38}}{\gamma_{max}^{0.38}} + 0.10\gamma_{max}^{-0.66} \right) \quad (5)$$

$$C_{eq}^{hrd} = \frac{S}{d} \left(\frac{0.64\varepsilon - 0.22\varepsilon^{0.38}}{\pi\omega} \frac{\bar{\gamma}_{max}^{0.38}}{\gamma_{max}^{0.38}} + \frac{0.306}{2\pi^2} \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^{-0.75} \gamma_{max}^{-0.75} \right) \quad (6)$$

$$\text{ただし、} \varepsilon = 0.94 |\gamma_{max}|^{0.73} \left(|\gamma_{max}|^{0.73} + 0.01 \right)^{-1} \quad (7)$$

ここで $\bar{\gamma}_{max}$: 過去に経験した最大せん断ひずみ、 γ_{max} : 現在のループの最大せん断ひずみ、 S : ダンパーの断面積、 d : ダンパー厚さである。比 S/d は形状比と定義する。

ハイブリッドダンパー設計のステップ2は、高硬度ゴムダンパーの量を決めることである。ある振幅で履歴ダンパーの最大減衰定数と高硬度ゴムダンパーの等価減衰定数との倍率 ($\eta(\bar{\delta}) = h_{eq}^{hrd} / h_{eq}^{hd}$) を指定し、そのときの目標とする減衰性能を發揮できるゴムの面積 S を式(8)より算出する。ただし、ゴムの厚み d は建物の最大応答時でもゴムがある程度の減衰性能を發揮するように与える。

$$S = 2 \cdot d \cdot m \cdot \eta \cdot h_{max}^{hd} \cdot f_{C_{eq}^{hrd}}^{-1}(\gamma) \times \left\{ 4 \cdot \eta \cdot h_{max}^{hd} \cdot f_{k_{eq}^{hrd}}(\gamma) \cdot f_{C_{eq}^{hrd}}^{-1}(\gamma) + \sqrt{\eta^2 \cdot (h_{max}^{hd})^2 \cdot f_{k_{eq}^{hrd}}^2(\gamma) \cdot f_{C_{eq}^{hrd}}^{-2}(\gamma) + \omega \cdot m^{-1}} \right\} \quad (8)$$

ここで、 m : 建物を1質点系に置き換えた時の質量、 ω : 建物の固有円振動数である。 $f_{k_{eq}^{hrd}}(\gamma)$ および $f_{C_{eq}^{hrd}}(\gamma)$ はそれぞれ等価剛性と減衰係数を形状比 S/d で割ったものである。本研究では、履歴ダンパーの降伏変位を1mmとして、履歴ダンパーの塑性率が1となる場所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0.25, 0.5, 1.0になる場合を想定した。

3.4 ハイブリッドダンパーの減衰性能の評価

等価線形化法に基づいた簡易設計法は、両ダンパーの減衰定数を重ね合わせることで、ハイブリッドダンパーを設計する際にダンパーの有する減衰性能の評価ができる特徴を有する。表1に設計した履歴ダンパーと高硬度ゴムダンパーの諸元を、図3には1質点系でモデル化された建物(実験供試体)に設計したハイブリッドダンパーを設置したときの層間変位と等価減衰定数の関係を示す。図3より、ハイブリッドダンパーシステムは、与えた振幅範囲(層間変位)で有効な減衰効果を發揮しているといえる。しかし、履歴ダンパーの降伏以前の振幅範囲での減衰は、両ダンパーを一つのシステムに組み込んだことにより全体システムの剛性が高くなり、高硬度ゴムダンパーのみを設置した場合より減衰が小さくなっている。

表1 履歴及び高硬度ゴムダンパーの諸元

N	履歴ダンパー			高硬度ゴムダンパー		
	κ	h_{max}^{hd}	δ_y [mm]	η	S [mm ²]	d [mm]
0						
1	0.312	0.04	1	0.25	64	3.2
2				0.5	144	
3				1.0	289	

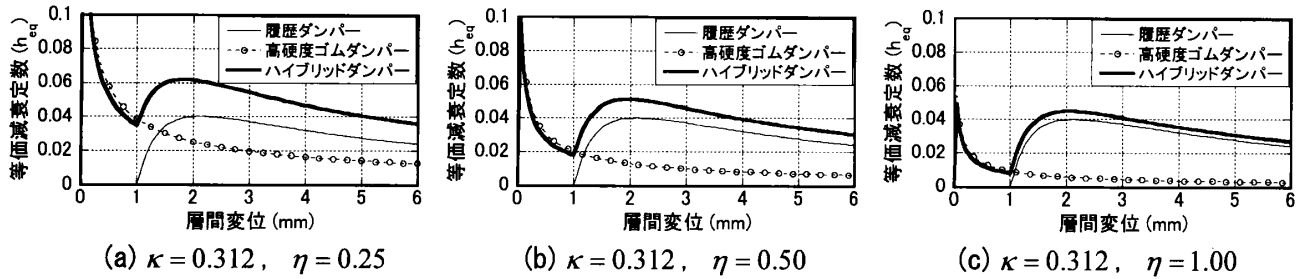


図3 振幅と等価減衰定数の関係(等価線形化法による計算結果)

4. 実大制振システムを用いた検証実験

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検討するため、実大制振システムを用いた自由振動実験を行う。自由振動実験により、提案するシステムの有効性とダンパー周辺部材の剛性などの基本性能を明らかにする。自由振動実験は強制加振実験に比べて実験システムの単純化が可能となる。

4.2 供試体の概要

供試体とその解析モデルの概要を図5(a)に示す。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を設置し、それから吊り柱を介して床梁及び錘を吊りあげた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。吊り柱の断面は、载荷フレームの目標固有周期を0.33[s]とし、想定する载荷振幅(約6mm)では弾性範囲以内に留まることを目標として選定した。また、周辺フレーム部材の断面は、供試体の振動の影響を受けないように十分大きなものとした。制振システムは3段ユニットとしたため、階高やダンパーユニット高さが変化しても、上下フレームはそのままブレース長を変えることで対応できる。幅広い振幅領域での提案制振システムの有効性に関する検証においては、吊り柱の変位が10~20mm程度まで到達するように载荷を行う必要がある。しかし、実際の実験では実験装置の容量制限や载荷フレームの剛性を考慮して、最大層間変位やゴムの厚み、履歴ダンパーの降伏変位などを表1で示したように実際より小さく設計した。実験結果との比較を通じ、シミュレーションと簡易設計法の妥当性が検証できれば、実際の建物に提案制振システムを設置する場合においても、シミュレーションにより制振システムの減衰性能を評価することが可能となる。

4.3 計測計画

計測は図4に示す8箇所とする。データ収集のサンプリング周波数は100Hzとした。d4はダンパーに生じる正味の変形量を表す。a1とa2は床梁の絶対加速度である。自由振動時に供試体に作用する層せん断力は、錘の絶対加速度に供試体を1質点系に置き換えたときの質量 $m=1629.4kg$ を乗じた慣性力により評価する。

4.4 载荷方法

供試体に対する载荷は、オイルジャッキにより行い、吊り柱の変位が約6mmまで到達すると载荷を停止して、ジャッキを外し自由振動させる。強制加振実験は床梁の上に設置した起振機により、供試体を強制振動させる。実験のパラメータとしては高硬度ゴムの量を採用した。

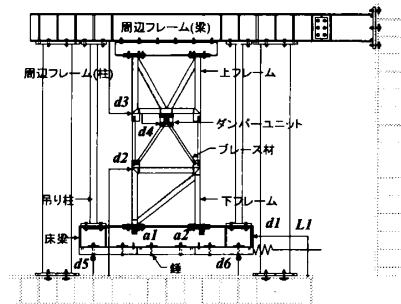


図4 供試体の概要と計測計画

5. 実験結果

5.1 準静的载荷実験

供試体の層間変位 δ_d に対するダンパー(N0.3)の変形量 δ_D を図5に、ダンパーに生じるせん断力 Q_D を図6に示す。図5より、供試体の層間変位の98%以上がダンパーの変形として有効に寄与していることが確認できる。図6より、ハイブリッドダンパーは、微小変形時の剛性が高硬度ゴムにより非線形的に増加し、約2mm以上の変形では履歴ダンパーによる幾何非線形的挙動の影響を受けることを確認した。

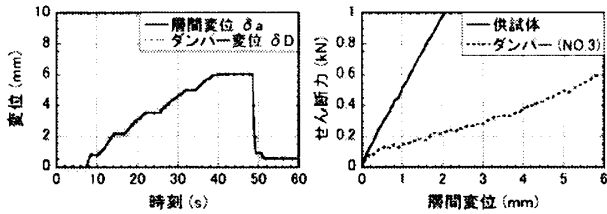


図5 δ_a 及び δ_D 図6 ダンパーのせん断力

5.2 自由振動実験

シミュレーションに用いた解析モデルは図7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^P ：板バネの水平剛性、 k^B ：ダンパー周辺部材の水平剛性

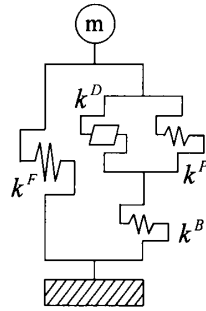


図7 解析モデル

である。ハイブリッドダンパー (NO. 2) を組み込んだ供試体を自由振動させた場合の応答波形を図8に、対数減衰率により求めた振幅-減衰定数関係を図9に示す。図8より、ゴム量が大きくなるにつれ減衰が増加していることが分かる。図9より、ハイブリッドダンパーは幅広い振幅領域で有効な減衰効果を発揮できることを明らかにした。しかし、シミュレーション及び簡易設計法による計算結果と実験結果の比較により、解析結果より実験の周期がわずかに長くなっている。また、大振幅時の減衰が大きいことも観察される。これは解析で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。

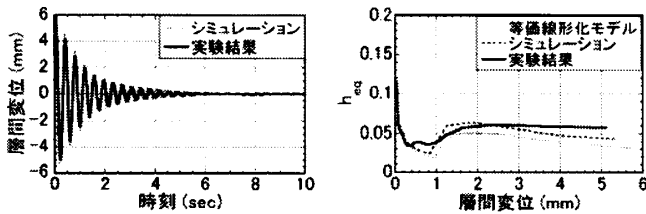


図8 自由振動波形 図9 層間変位-減衰定数関係

5.3 強制加振実験

図10に示すランダム変位波形をレベル1とし、それに係数0.5を乗じたものをレベル0.5の入力波形と呼ぶこととする。大きさが異なる加振を行う場合の

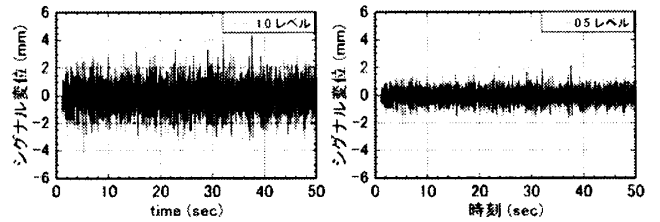


図10 入力したランダム変位波形

供試体の応答を比較する。変位の時刻歴応答を示した図11より、加振入力レベル1及び0.5に対するダンパーのない供試体の最大変位応答はそれぞれ2.2mmと1.1mmであり、それらの最大応答は設置したハイブリッドダンパー (NO. 2) によってそれぞれ53%と46%程度まで低減できることがわかる。しかし、単一ダンパーに比べ、初期剛性が大きくなっており、エネルギー消費率 ($\Delta W/W$) の低下による微小振幅での減衰効果が低減されていることが確認された。

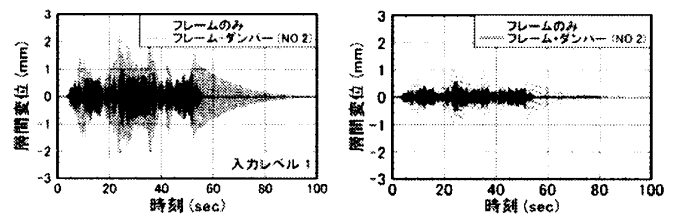


図11 変位の時刻歴応答

6. 結論

1. 2種類のダンパーを用いたハイブリッドダンパーシステムの簡易設計法と減衰性能の簡易評価法を提案した。
2. 実験を通じ、提案したシステムに用いた2種類のダンパーが、それぞれ異なる振幅領域で応答を効果的に減衰させることができることを実証した。
3. 実験と解析結果の比較から、簡易設計法の妥当性と減衰性能の簡易評価法の有効性が確認された。

謝辞

本研究の一部は、科研費 (基盤研究(C), 課題番号21560588, 研究代表者: 辻聖晃) およびGCOEによる。また住友ゴムからのダンパー提供に謝意を表す。

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 博士課程
*2 京都大学

Kyoto University, Graduate student
Kyoto University