

機関番号：21401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760437

研究課題名 (和文) 建物複層間に設置するセミアクティブダンパーによる  
地震応答制御に関する研究研究課題名 (英文) SEISMIC RESPONSE CONTROL USING SEMI-ACTIVE DAMPERS  
SETTING AT INTER-STORIES OF A BUILDINGS

研究代表者

菅野 秀人 (KANNO HIDETO)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号：20336449

研究成果の概要 (和文)：本研究は、比較的少ないダンパー量と小さい断面の支持部材を用いてより合理的な地震応答低減手法の提案を目標とした。対象とする曲げせん断振動モデルは5層構造で、各層に1枚の曲げ板と各層の回転変位を拘束する2枚の拘束バネで構成された振動モデルである。また地震応答制御方法として、ダンパーの履歴形状を建物のエネルギー応答に応じて制御するセミアクティブ制御を採用し、その制御係数の設計方法について検討した。

研究成果の概要 (英文)：This study examined seismic response reduction technique using relatively little quantity of dampers and small sectional support members. The fifth stories bending-shear model, which consists of one piece of flat spring showing bending behavior and two pieces of vertical springs holding rotary movement of the top, has been examined. The proposed semi-active seismic response control algorithm of the damper force was examined. The method, which based on potential energy of inter-story, controls the hysteretic shapes of the damper. The design method of this algorithm has been examined in this research.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：構造制御

## 1. 研究開始当初の背景

近年の多くの中高層建物には、強風時等の居住快適性向上、大地震時の安全性向上の観点から制振ダンパーが多く用いられるようになってきた。本研究代表者はこれまで、より合理的な地震応答制御手法としてセミア

クティブ制振に着目し検討を行ってきた。制御手法としては、フェイルセーフの観点、また実構造物の非線形な振動特性に対するロバスト性を考慮し、簡便な制御手法としてダンパーの履歴形状制御を提案してきた。本制御の詳細は後述するが、層間変形とダン

パーに発揮させる制御力の関係において、層間変形が極値に達した時点で層間変形の極値に比例した制御力を決定し、第 2, 4 象限においては制御力を一定とし、第 1, 3 象限においては、架構の復元力増加に伴う応答加速度の上昇を低減させるため制御力の除荷を行うものである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで検討を行ってきた、架構のエネルギー応答に基づくセミアクティブ地震応答制御手法について、制御係数の設定方法などの制御デザイン手法の検討と、制御効果の検討を行うための 5 層曲げせん断型振動モデルの改良を行うことである。

## 3. 研究の方法

### (1) 曲げせん断振動モデル

図 1 に振動モデルの概要を示す。寸法は  $1,518 \times 500 \times 300\text{mm}$  で、各層の高さは約  $300\text{mm}$  である。試験体はスラブプレート、曲げ柱、回転拘束バネで構成されている。曲げ柱および回転拘束バネはリン青銅板を用いており、断面寸法はそれぞれ  $120 \times 5, 30 \times 3\text{mm}$  である。リン青銅板のヤング係数は材料試験結果より  $9.56 \times 10^4 \text{N/mm}^2$  となった。図中には各層質量の実測値もあわせて示す。ここで各層質量とはスラブプレートを中心に上下  $150\text{mm}$  の範囲としている。第 5 層より上層が無いため、第 5 層のみ質量が小さい。

曲げ柱は振動時に曲げ変形が生じる部材で、スラブ両端に剛接してある。回転拘束バネは振動時のスラブプレートの回転を拘束し、モデルの各層にせん断変形を与える部材でスラブ両端にピン接合してある。このモデルは回転拘束バネの取替えにより、試験体の曲げせん断変形特性を調節できる。

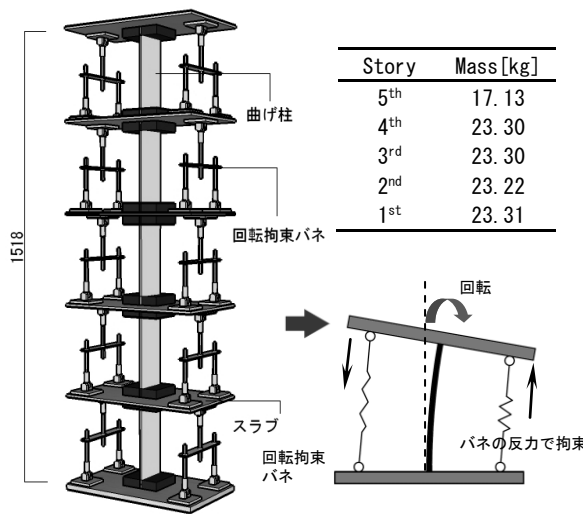


図 1 曲げせん断振動モデル

### (2) セミアクティブ制御則

本研究では、建物の振動エネルギー量に応じて、ダンパーに発揮させる減衰力を制御するセミアクティブ制御に着目し、EFH 制御 (Energy Functional Hysteretic 制御) と定義する。図 2 に EFH 制御の概要を示す。EFH 制御は変位がピークに達し、速度が 0 になった時点の、ポテンシャルエネルギーの平方根に制御係数を乗じて、ダンパーに発揮させる制御力を決定する。また、応答速度と応答変形の符号が逆 (図 2 の第 2, 4 象限) のときには履歴面積を確保するため、目標制御力は応答変形の極値に基づき一定とする。更に最大応答加速度の上昇を抑えるため、応答速度と応答変形の符号が同じ (図 2 の第 1, 3 象限) ときに、今までに経験した最大変形で制御力が 0 となるように応答変形に応じて制御力を低下させる履歴形状制御を合わせて行う。EFH 制御では、地震動応答のような過渡応答において、応答が最大値に近い場合は、第 1, 3 象限において目標制御力が除荷されるが、最大応答を経験した後は応答が小さくなるに従って、その履歴は矩形状に近づき、最大層せん断力を増大させることなくエネルギー吸収能力を高めることが可能である。

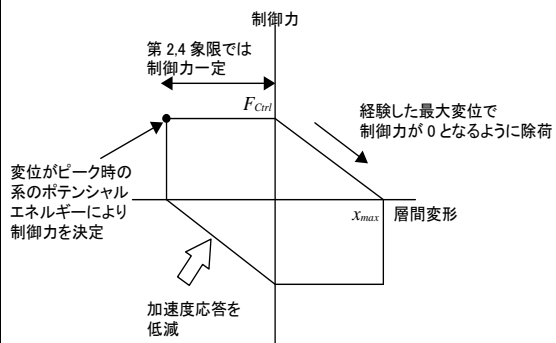


図 2 EFH 制御の概要

## 4. 研究成果

### (1) 曲げせん断モデルの振動特性

振動実験で得られた共振曲線を図 3 に示す。本モデルの 1 次固有振動数は  $1.8\text{Hz}$ 、このときの絶対応答倍率は  $19.36$  であった。図 4 に各次共振点での最大応答変位時の曲げ柱ひずみ分布、各共振点での相対変位応答から得られた振動モード図、各層の層間変位の最大応答分布を示す。なお、曲げひずみは 2 ゲージ法により柱頭柱脚でのみ測定しているが、曲げ柱間ではひずみは直線分布と仮定した。これより 1 次モードでは全体的に曲げ変形が含まれていることがわかる。また、2 次、3 次モードについても明瞭なモード形が得られている。また層間変位のモード形状はひず

み分布と良く対応しており，計測方法や実験データの分析の妥当性が判断できる。共振曲線は 1 次モードで鋭いピークとなっており，減衰が小さいことが確認できる。自由振動測定の結果，本モデルの減衰定数は約 2.5%であった。

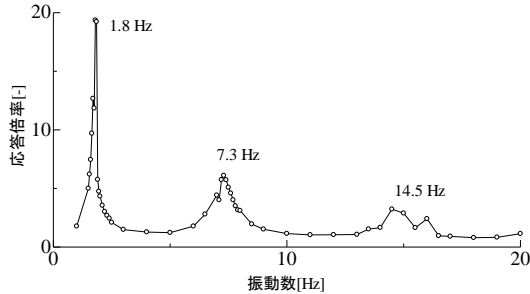
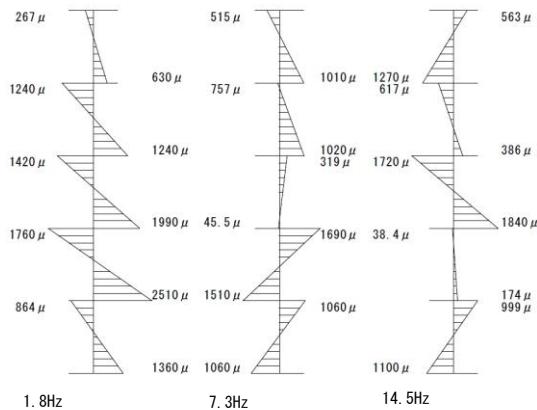


図3 共振曲線



各層曲げ柱ひずみ分布

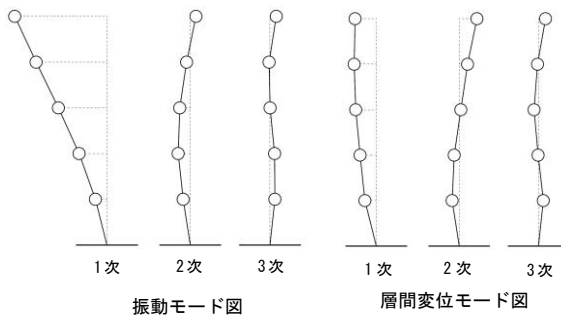


図4 各次モードのモード図，ひずみ分布

本モデルの下層の柱頭回転による当該層の変位  $\theta\delta$ ，上層の水平荷重による変位  $D\delta$  は，次式ようになる。本研究では，まず単位水平荷重時の撓性マトリクスを作成し，その逆行列を剛性マトリクスとした。式中の  $\gamma$  は曲げ剛性とせん断剛性の比を表しており，値が大きくなるほどせん断変形しやすくなる。本検討では準備計算の結果，全ての層で同じ値 ( $\gamma = 82.76$ ) とした。

$$\{\theta\delta\} = \frac{h^3}{EI(\gamma + 2)} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ 1 & 4 & 8 & 12 & 16 \\ 1 & 4 & 9 & 15 & 21 \\ 1 & 4 & 9 & 16 & 24 \end{bmatrix} \{P\} \quad \dots (1)$$

$$\{\theta\delta\} = \frac{h^3}{12EI(\gamma + 2)} \begin{bmatrix} \gamma + 4 & \gamma + 10 & \gamma + 32 & \gamma + 44 & \gamma + 56 \\ 0 & \gamma + 4 & \gamma + 10 & \gamma + 32 & \gamma + 44 \\ 0 & 0 & \gamma + 4 & \gamma + 10 & \gamma + 32 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma + 4 & \gamma + 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma + 4 \end{bmatrix} \{P\} \quad \dots (2)$$

ここで， $\{P\}$  水平力外力ベクトル， $h$  は層高 (231mm)， $E$  は，曲げ柱のヤング率 ( $9.56 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ )， $I$  は曲げ柱の断面 2 次モーメント ( $1250 \text{mm}^4$ )， $k$  は回転拘束バネ剛性 ( $82.76 \text{N/mm}$ )， $L$  は回転拘束バネ間距離 (400mm)， $\gamma$  は回転拘束バネが曲げバネ柱頭の回転を拘束する度合いを表す係数であり， $\gamma = L^2kh / EI$  と定義した。

表 1 には，実験ならびに計算により求められた本モデルの固有振動数を示す。ここで重力式とは Geiger の重力式による算定結果，固有値解析とは，上式の撓性マトリクスから算出した固有振動数を表す。上式から求められる固有値は，振動実験で得られた固有振動数とよく対応しており，本計算モデルがおおむね妥当であることが確認できた。

表 1 振動モデルの固有振動数 (Hz)

振動実験			重力式		固有値解析	
1次	2次	3次	1次	1次	2次	3次
1.80	7.30	14.5	1.18	1.82	9.13	13.94

ただし本実験結果を得るまでには回転拘束バネとスラブを接続する回転ピンの変更を行い，振動時の回転拘束バネのガタを極力抑えるよう改善を行っている。

#### (2) EFH 制御における制御係数決定法の検討

系のエネルギー応答に応じてダンパーに発揮させる減衰力を決定する EFH 制御においては，あらかじめ半サイクル時に系に入力されたエネルギー量に乗じる制御係数の設定が必要がある。本研究では，比較的簡易な手法でその設計方法を提案した。まず多層建物を多質点系にモデル化し，それをさらに一質点系に縮約する。ここで一質点系での応答評価を行い，設定クライテリアを決定する。次に，決定した設計クライテリアと (パッシブ制振等の設計で用いられている) 性能曲線から制振用ダンパーの設計パラメータである損失剛性比  $\eta$ ，支持部材剛性比  $\beta$  を読み取

り、一質点系での最適なダンパー量を選定し、それを多質点系に分配する。一質点系でのダンパー量を選定する方法について、EFH制御を採用した場合、等価線形化法による等価周期  $T_{eq}$ 、等価減衰定数  $h_{eq}$  を求めると、系のエネルギー応答により制御されるダンパーの履歴形状より、次式のように表される。

$$T_{eq} = \frac{1}{\sqrt{1+\beta C(\beta, \eta)}} \quad \dots (3)$$

$$h_{eq} = \frac{-\beta S(\beta, \eta)}{2(1+\beta C(\beta, \eta))} + \frac{h_f}{\sqrt{1+\beta C(\beta, \eta)}} \quad \dots (4)$$

$$C(\beta, \eta) = \begin{cases} \frac{1}{\beta\pi} \left\{ \beta\theta^* - (\beta-\eta)\sin\theta^* - \frac{\pi}{2}\eta \right\} & \beta \geq \eta \\ \frac{1}{\beta\pi} \left\{ (\beta+\eta)\theta^* - (\beta-\eta)\sin\theta^* - \pi\eta \right\} & \beta < \eta \end{cases} \quad \dots (5)$$

$$S(\beta, \eta) = \begin{cases} \frac{1}{\beta\pi} \left\{ \beta\sin^2\theta^* + \frac{2}{\beta}(\beta-\eta)^2 - 2\beta - \eta \right\} & \beta \geq \eta \\ \frac{1}{\beta\pi} \left\{ -(\beta+\eta)\sin^2\theta^* \right\} & \beta < \eta \end{cases} \quad \dots (6)$$

また、非制振時と制振時の応答変位、加速度を比較し、制振効果である変位低減率  $R_d$ 、擬似加速度低減率  $R_{pa}$  を求めると次式のように表される。

$$R_d = \frac{S_d(T_{eq}, h_0)}{S_d(T_f, h_0)} = D_h \frac{T_{eq}}{T_f} \frac{S_{pv}(T_{eq}, h_0)}{S_{pv}(T_f, h_0)} = D_h \frac{T_{eq}}{T_f} \quad \dots (7)$$

$$R_{pa} = \frac{S_{pa}(T_{eq}, h_0)}{S_{pa}(T_f, h_0)} = D_h \frac{T_f}{T_{eq}} \frac{S_{pv}(T_{eq}, h_0)}{S_{pv}(T_f, h_0)} = R_d \left( \frac{T_f}{T_{eq}} \right)^2 \quad \dots (8)$$

$$D_h = \sqrt{\frac{1+\alpha h_0}{1+\alpha h_{eq}}} \quad \dots (9)$$

ここで、 $D_h$  は減衰効果係数であり、 $\alpha$  は地震動によって値が異なり、パッシブ制振に関する既往の研究では、25~75の値が提案されている。ここで、EFH制御を用いた制振構造において、El Centro波、東北大波、神戸波を入力地震動としたときの $\alpha$ が及ぼす影響について検討した。その結果、El Centro波、東北大波では、 $\alpha$ の値に関わらずほぼ安全側の評価となり、値が小さいほどより安全度が増すことがわかった。神戸波に関しては、 $\alpha$ の値に関わらず危険側の評価となり、値が大きいほどより危険度が大きくなった。このことから、 $\alpha$ は小さい値ほど安全度が増すことがわかった。また、応答予測精度に関しては、El Centro波、東北大波では $\alpha=75$ で、神戸波で

は $\alpha=25$ のときに最も精度が高くなった。そのため、神戸波では $\alpha=25$ 、それ以外の入力地震動では原則 $\alpha=75$ を採用した。

本研究により得られたEFH制御の性能曲線を図5に示す。これにより、ダンパー支持部材剛性と層剛性の比 $\beta$ によって目標とする変位応答低減率と加速度応答低減率から、ダンパーの損失剛性の架構層剛性に対する比 $\eta$ を合理的かつ簡便に算出できる。損失剛性比 $\eta$ が求めれば、EFH制御における制御係数を一義的に決定することが可能である。多層建物においては、各層の最大層間変形角が一樣に分布することが合理的な設定であると仮定し、次式のように求めた。

$$K_{bi} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \frac{Q_i}{h_i} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (K_{fi} h_i^2)}{\sum_{i=1}^n (Q_i h_i)} (1+\eta) - \frac{\beta}{\eta} K_{fi} \quad (K_{bi} \geq 0) \quad \dots (10)$$

$$\beta_i = \frac{K_{bi}}{K_{fi}}, \quad \eta_i = \beta_i \frac{\beta}{\eta} \quad \dots (11)$$

これは、a) 最大サイクル時における多質点系と一質点系の等価粘性減衰定数が等しいこと、b)  $A_i$ 分布に基づく静的な層せん断力 $Q_i$ に対し、各層の層間変形角を一樣にする、という2つの条件を満たすことを前提とする。この各層の支持部材剛性比 $\beta_i$ と損失剛性比 $\eta_i$ の配分式を適用することで、一質点系の性能曲線から多質点系モデルのEFH制御を設計することがわかった。

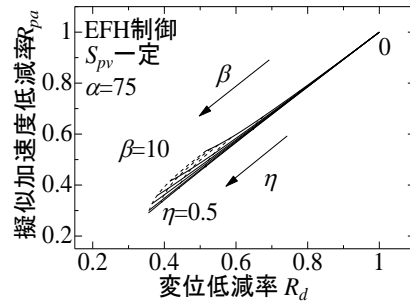


図5 EFH制御の性能曲線（一質点系）

以上の検討により、エネルギー応答に基づく中高層建物を対象としたセミアクティブ制御則の設計方法について、特に制御係数の決定方法など有用な知見を得ることができた。当初目標とした、ダンパーの合理的な設置方法については有意な知見を得ることができなかったが、本検討の範囲においては、取付方法の違いが応答に大きな影響は及ぼさなかった。今後はEFH制御が有効な建物の制約条件など、より詳細な検討が必要となると考えている。

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 3 件)

- 1) Hideto KANNO, Tetsuya NISHIDA and Jun KOBAYASHI : Semi-active Control of MR Dampers Setting at Inter-Stories Level of a Building, The 10th International Conference on Motion and Vibration Control, No.10-203, CD-ROM 1A-14, pp.1-11, 2010.8
- 2) KANNO Hideto , NISHIDA Tetsuya, KOBAYASHI Jun and INOUE Norio : Structural Response Control by Controllable Dampers Setting at Inter-Story of Buildings, 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering & 5th International Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM paper, pp.1105-1110, 2010.3
- 3) 本村薫, 菅野秀人, 西田哲也, 小林淳 : セミアクティブ制振における等価線形化法を用いた制御係数設定法に関する検討, 日本建築学会東北支部研究報告集, No.72, pp.157-160, 2009.6

[学会発表] (計 0 件)

※上記にあげた 3 件の論文について, 1), 2)は振動制御に関する国際会議において, 3)は, 建築学会の研究発表会において口頭発表を行った。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.akita-pu.ac.jp/system/aes/kozo/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅野 秀人 (KANNO HIDETO)

秋田県立大学・システム科学技術学部・  
准教授

研究者番号 : 20336449