

# 全体曲げ変形挙動に着目した超高層建築物のセミアクティブ地震応答制御

## Semi-active Seismic Response Control for High-rise buildings based on Overall Flexural Deformation

秋田県立大学 准教授 菅野秀人

### (研究計画ないし研究手法の概略)

#### 1. 研究目的

超高層建築物のような塔状比の大きな構造物の地震時挙動は、建物各層間に生じる変形だけではなく、柱部材の軸方向の伸縮に起因する全体曲げ変形が無視できない場合がある。この全体曲げ変形が卓越する架構において、建物各層間にダンパーを設置した場合、制振効果が十分に発揮できないことが想定される。本研究は、高層建築構造物を対象に、全体曲げ変形に着目したセミアクティブ地震応答制御を実現することを目的とする。ダンパーを鉛直方向に設置して、建物全体に減衰力を与える曲げ変形制御型制振構造に着目し、ダンパーには、磁気粘性流体（MR）ダンパーを採用した。これは、ダンパー内の励磁コイルに電流を印加することでダンパー力を制御できるデバイスである。1質点系の曲げせん断型振動モデルを対象に、鉛直方向に小型MRダンパーを設置し、ダンパー力をリアルタイムで制御する。制御には、応答変位の局所ピーク値に比例させてダンパー力を決定する手法を採用した。さらに、過度なダンパー力による応答加速度の増大を防ぐため、応答に応じてダンパー力の「ON」と「OFF」とを切り替える制御を組み合わせた手法についても検討した。

#### 2. 研究計画

本研究では、高層建築物の地震時全体曲げ挙動を模擬するモデルとして、図1のような曲げせん断振動モデルを考える。片持ち柱を基本とした1質点系のモデルで、柱頭回転に起因する曲げ変形を鉛直方向のバネにより拘束し、曲げせん断型の振動性状を模擬する。ここでは、メインとなる片持ち柱を曲げ柱、鉛直方向のバネを回転拘束バネと呼ぶこととする。図中の $m$ は頂部マス質量、 $I_m$ は回転慣性モーメント、 $EI$ は曲げ柱の曲げ剛性、 $k_r$ は回転拘束バネの剛性を表す。MRダンパーは、回転拘束バネと同じ鉛直方向に設置する。MRダンパーは図のような摩擦力 $F_c$ とダッシュポット $C_d$ を並列結合したビンガムモデルで表される。

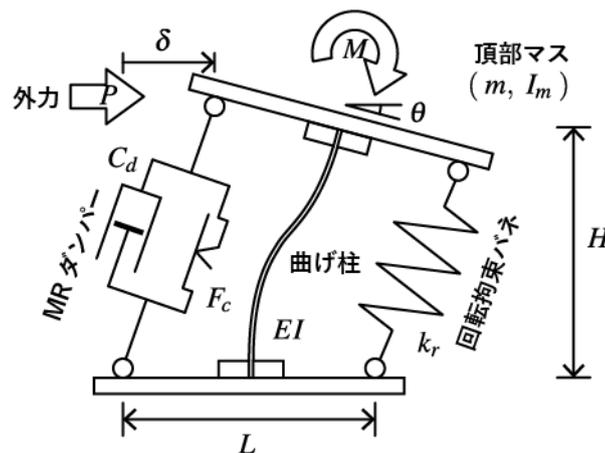


図1 本研究で検討する1質点系曲げせん断振動モデル

本研究では、地震時における主架構（曲げせん断模型）の応答に基づいてダンパー力を決定するセミアクティブ制御則を検討する。ダンパー力は、鉛直方向に設置したMRダンパーへの励磁により制御する。制御の目的は、ダンパー力による全体曲げ変形の適度な拘束による水平方向の応答変位および応答加速度の低減である。この場合、鉛直方向のダンパー力を過度に大きくすると系の全体曲げ変形が拘束されて系全体の固有周期が短周期化し、加速度応答が増大することが懸念される。そこで系の曲げ変形に起因する鉛直変位成分の大きさにダンパー力を比例させる制御を2種類試みた。一つはJ.A.Inaudi (1994) が提案した“Modulated Homogeneous Friction”を参考にしたMHF制御である。これは図2（上段）のように応答変位履歴において、直前のピーク変位の大きさに比例してダンパー力を決定するもので、このときの比例係数 $\eta k$ は剛性の次元を有する。このときダンパーの履歴ループ形状は図のようなピーク変位の大きさに比例した矩形状となる。

もう一つは、MHF制御によりMRダンパーに励磁する電流量の大きさを決定し、さらに非励磁と任意の一定電流印可とを切り替える制御を組み合わせた制御である。励磁のOn/Offの切り替えは、MRダンパーの応答速度と応答変位の符号が同じときは非励磁（Off）とし、異符号のときは一定の励磁電流を印可（On）とした。すなわち図2（下段）に示すようにMRダンパーの荷重-変位関係において、第2象限と第4象限では一定の電流値で減衰力を発揮させ、第1象限と第3象限では非励磁としてMRダンパーの減衰力を抑えるものである。本研究ではこれをMHF-On/Off制御と呼ぶ。この制御により振動系全体の固有周期の短周期化を抑え、加速度応答の増大を抑えることを図る。

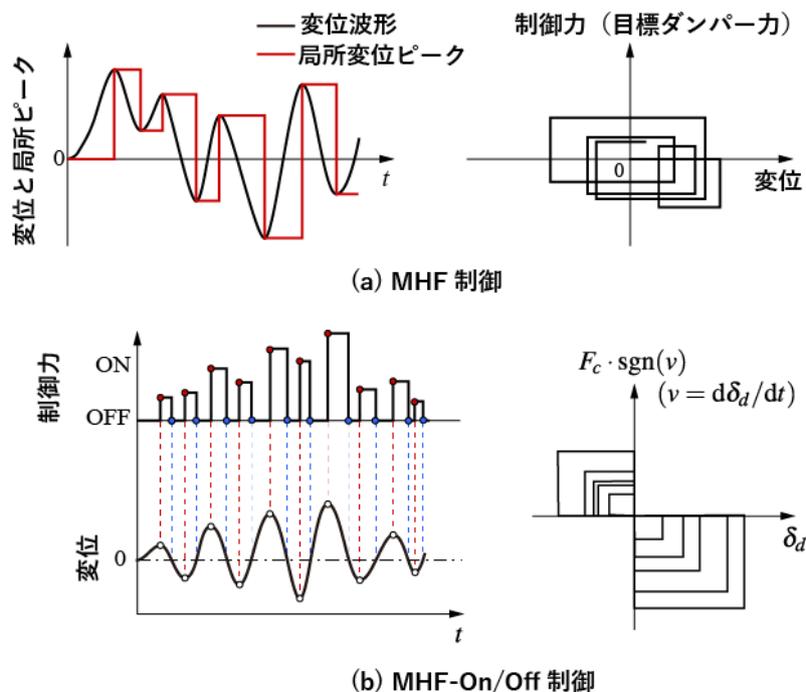


図2 MRダンパーの制御則の概要

### 3. 実験方法

曲げせん断型振動系の地震時応答低減を図る2つの制御則の有用性を検証するため、リアルタイム・ハイブリッド・シミュレーション（RTHS）実験を実施した。これは、実試験と数値解析を同期させて構造体全体の動的挙動を実時間でシミュレートするもので、近年の自動車や航空産業の開発

分野ではHILとして普及しているもので、建築・土木分野でもその応用が拡がりつつある実験手法である。本研究ではMRダンパー単体の動的加力実験と曲げせん断型振動モデル本体の数値解析とを同期させたRTHS実験を実施した。図3に実験装置の外観とRTHS実験システムのダイアグラムを示す。曲げせん断型振動モデルの状態空間モデルに対し、数値積分（Runge-Kutta法、時間刻み0.0005s固定）の各計算ステップにおいて、算出したダンパー変位を、動的アクチュエータへの指令変位として出力し、そのときのダンパー荷重をロードセルで計測して、その値を状態空間方程式の外力項としてフィードバックした。実験には、秋田県立大学が所有するストローク±100mm、加力容量10kNの動的アクチュエータ（島津製作所製JF10kN-100）と、DSPコントローラとしてdSPACE社のMicroLabBox（1302T）を使用した。

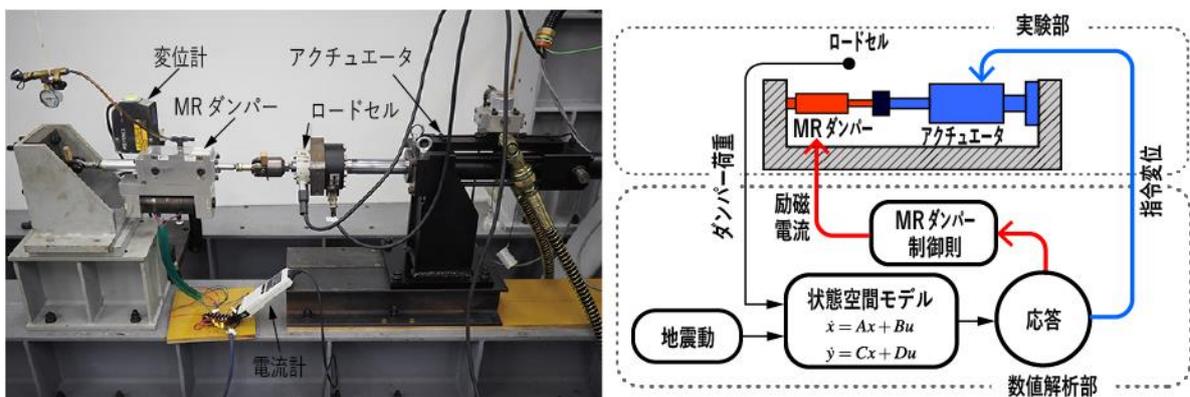


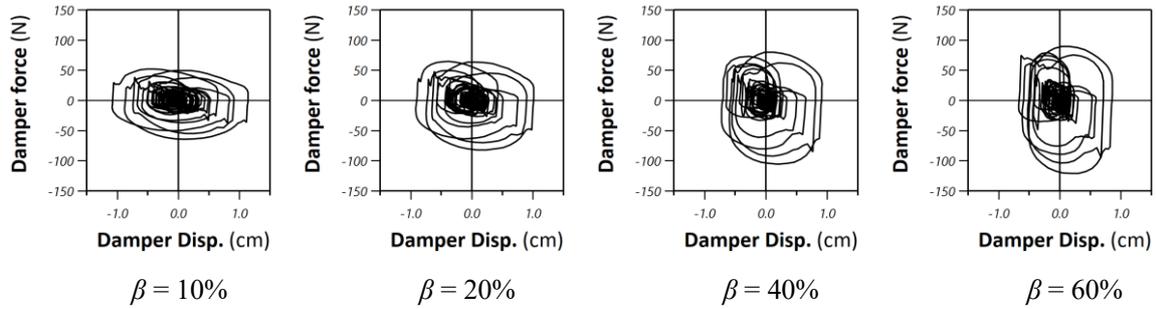
図3 実験装置外観（左）とRTHS実験システムのダイアグラム（右）

### （実験調査によって得られた新しい知見）

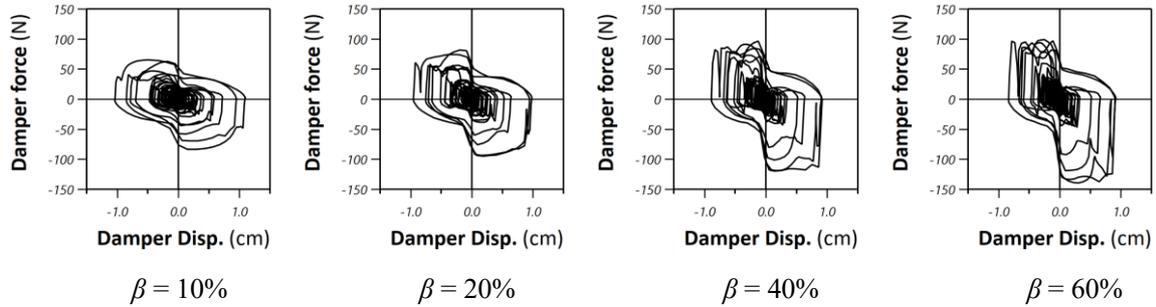
#### 4. 実験結果

実験結果の一例を図4、5に示す。入力地震波はEl Centro (1940) 観測波の水平主軸(N023W)成分1方向とし、入力倍率は原レベル1.4倍とした。また本モデルの固有周期（0.6秒）と入力地震波の周期特性を鑑みて地震波の時間軸を1/2に圧縮した。また、2つの制御則において、ダンパー力を決定するための制御係数は、想定される履歴ループの面積と等価となる複素減衰数 $\beta$ に換算して、 $\beta=0.1\sim 0.6$ の範囲で検討した。

図4のダンパー力-ダンパー変位関係を見ると、前述の図2で示した履歴ループ形状とほぼ同等の性状が得られており、MRダンパー力を意図通りに制御できていることが確認できる。すなわち、応答変位が小さい場合は小さなダンパー力、応答変位が大きくなるとダンパー力もそれに比例して大きくなっている。なお、図2の履歴形状と異なり、実験結果の履歴ループは摩擦的な矩形状に加えて楕円形状を含んだものとなっている。これは、MRダンパーの特性のひとつである粘性減衰による影響である。図5は、曲げせん断型モデル全体の水平方向の慣性力と頂部変位の関係である。どちらの制御においても、 $\beta$ （すなわちダンパー力）が大きくなると、履歴ループ形状は丸みを帯びた楕円形状に近づくが、正負の最大応答変位発生時の履歴ループ尖端部分の形状について、2つの制御を比較すると、MHF-On/Off制御では、 $\beta$ が大きくなるにしたがって尖端部が丸みを帯びる傾向を示すが、MHF制御ではこのような傾向は見られない。これは、MHF-On/Off制御では、変位と速度が同符号（すなわち図の第1,3象限）の場合にダンパー力をOffとすることで、慣性力の増大を抑えている効果が表れているものと推察される。

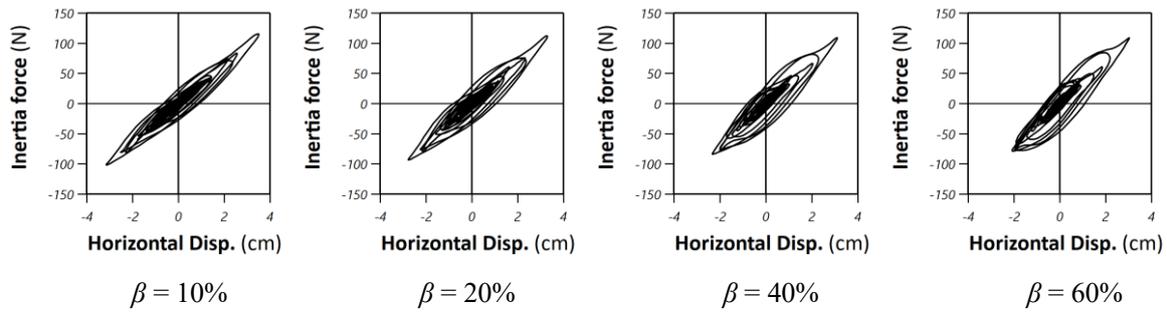


(a) MHF制御

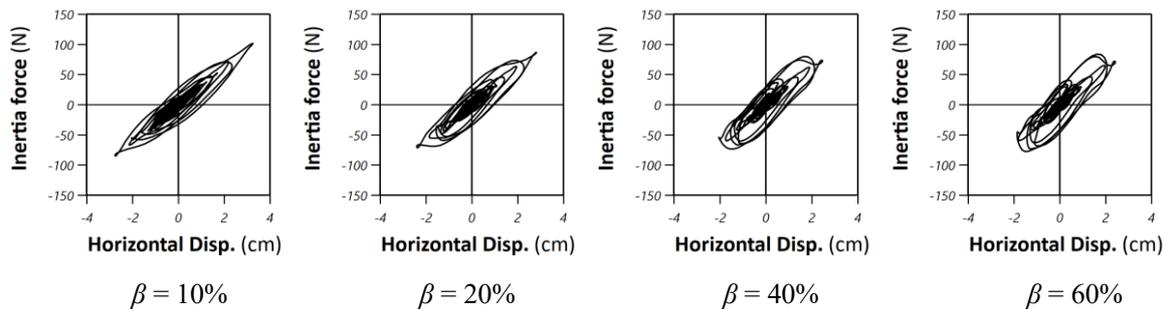


(b) MHF-On/Off 制御

図4 ダンパーカーダンパー変位関係 (上段 MHF制御, 下段 MHF-On/Off制御)



(a) MHF制御



(b) MHF-On/Off 制御

図5 慣性力ー水平変位関係 (上段 MHF制御, 下段 MHF-On/Off制御)

図6には、ダンパー変位、水平変位、水平加速度の最大値の比較を示す。なお図中の $\beta=0$ は非制御を表す。最大ダンパー変位 (図上段) を見ると、MHF制御では $\beta$ が増大すると、ダンパー変位は単調減少するが、MHF-On/Off制御では、 $\beta=0.3$ より増大してもダンパー変位の減少は底打ちとなる傾向を示している。また、最大応答変位 (図下段左) を見ると、 $\beta$ の増大に伴って両制御とも最大変位

は減少するが、 $\beta=0.3$ 以上となるとその傾向は底打ちしていることがわかる。またMHF制御では、 $\beta=0.3$ で非制御時と比べて15%程度の応答低減がされているのに対し、MHF-On/Off制御では30%程度と高い応答低減効果を示している。また最大応答加速度（図下段右）では、MHF制御は非制御時に対して10%程度の応答低減であるのに対し、MHF-On/Off制御は $\beta=0.3$ で最大35%の応答低減となっており、高い応答抑制が図れている。ただしMHF-On/Off制御では、 $\beta$ が0.3を超えると $\beta$ の増大に伴って、最大応答加速度が増加に転じていることがわかる。

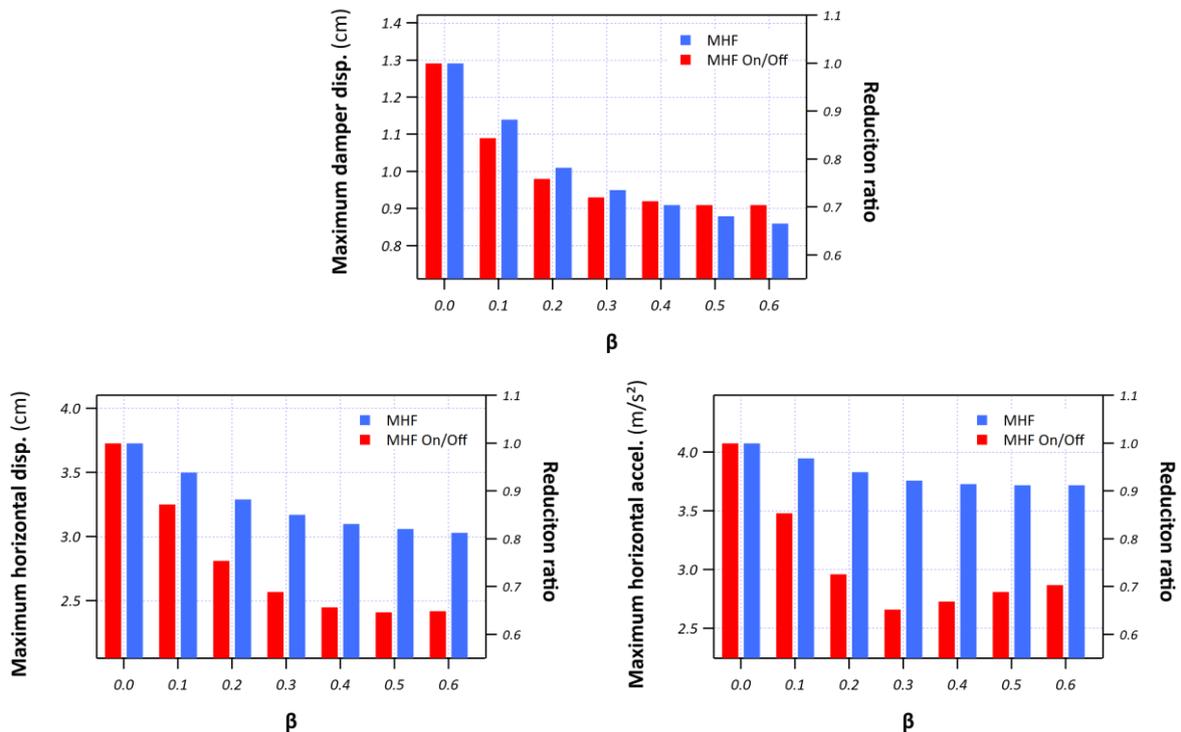


図5 最大応答値の比較（上段 ダンパー変位，下段 左 水平変位，右 水平加速度）

## 5. まとめ

高層建築物の地震時全体曲げ挙動を模擬する曲げせん断型振動モデルを用いて、応答変位に比例させてダンパー力を決定する2つの制御則について検討した。このうちMHF-On/Off制御は、加速度、変位ともにMHF制御と比較しても高い地震応答低減効果を確認することができた。これは、MHF制御においては、ダンパー力が大きくなると、架構の全体曲げ変形を拘束することになり、ダンパー変位が発生せずに減衰性能が発揮しにくい欠点があることを示唆するものである。ダンパー変位を適度に発生させる（すなわち、全曲げ変形を拘束しすぎない）MHF-On/Off制御は、MHF制御の欠点を補える制御であることがわかった。

### （発表論文）

- 1) 菅野秀人：全体曲げ変形挙動に着目した曲げせん断型振動モデルの地震応答制御に関する実験的研究，第15回日本地震工学シンポジウム，pp.3455-3464，2018.12