



# 磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる 応答制御に関する研究

富澤, 徹弥

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2014-03-25

(Date of Publication)

2015-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6082号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006082>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



# 博士論文

(論文題目)

磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる  
応答制御に関する研究

平成 26 年 1 月

神戸大学大学院工学研究科

富澤 徹 弥

# 目次

1. 序論	... 1
1.1 研究の背景	... 1
1.2 既往の研究	... 3
1.3 本研究の目的	... 5
1.4 本論文の構成	... 6
1.5 本研究に関する発表論文等	... 8
2. 磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの開発と性能試験	... 11
2.1 磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの構造	... 11
2.2 性能試験	... 18
2.2.1 荷重制限（トルクリーフ）機構確認試験	... 18
2.2.2 剛性確認試験	... 20
2.2.3 低速試験	... 22
2.2.4 正弦波加振試験	... 22
2.2.5 耐久性能試験	... 27
2.3 振動解析モデルによるシミュレーション	... 30
2.4 第2章まとめ	... 35
2.5 付録図表	... 36
3. リアルタイムハイブリッド実験による検証	... 53
3.1 リアルタイムハイブリッド実験	... 53
3.1.1 実験概要	... 53
3.1.2 セミアクティブ振動制御装置概要	... 54
3.1.3 対象モデル	... 55
3.1.4 入力地震動	... 56
3.2 リアルタイムハイブリッド実験による応答結果	... 58
3.2.1 パッシブ制御時の応答結果	... 58
3.2.2 セミアクティブ制御則	... 62
3.2.3 セミアクティブ制御時の応答結果	... 67
3.3 第3章まとめ	... 70

4. 多様な地震動に対する応答制御効果	... 71
4.1 はじめに	... 71
4.2 周波数領域における検討	... 72
4.2.1 パッシブ制御による場合	... 73
4.2.2 セミアクティブ制御による場合	... 76
4.3 時刻歴応答における検討	... 79
4.3.1 対象モデル	... 79
4.3.2 入力地震動	... 80
4.3.3 パッシブ制御による場合	... 84
4.3.4 セミアクティブ制御による場合	... 88
4.4 セミアクティブ制御効果の評価	... 90
4.4.1 一定電流印加時の等価減衰定数の評価	... 91
4.4.2 減衰定数が等しい場合のセミアクティブ制御効果	... 92
4.5 第4章まとめ	... 94
5. 結論	... 97
Appendix	... 99
参考文献	... 105



# 第 1 章 序論

- 1.1 研究の背景
- 1.2 既往の研究
- 1.3 本研究の目的
- 1.4 本論文の構成
- 1.5 本研究に関する発表論文等

## 1. 序論

### 1.1 研究の背景

近年の地震学の進歩は著しく、1995年兵庫県南部地震以降、全国の活断層調査、堆積平野の地表から地下の基盤までの地下構造調査、全国の数千ヶ所にわたって強震計を設置した強震動観測などが実施され、震源特性や伝播特性、増幅特性の解明が進んでいる。1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震などの調査研究から、内陸（型）地震の断層近傍の地震動には継続時間は短いものの、周期1~2秒の大きな振幅のパルス波が含まれることが明らかになった。また、2003年十勝沖地震を契機に注目された長周期地震動も膨大な観測記録の収集や深い地下構造の解明などを背景に調査研究が進み、東京、名古屋、大阪の大都市圏では東海、東南海、南海地震などの海溝型巨大地震の発生により、それぞれの地域に固有の長周期の揺れが長時間続く長周期長時間地震動が予測されるようになった。特に、南海トラフの地震による長周期長時間地震動については様々な機関で検討がなされており、予測される地震動が公開されている。主なものとしては、愛知県設計入力地震動協議会などで作成された名古屋市三の丸の地震動<sup>1)</sup>や、大阪平野を対象として作成された釜江波、関口波、鶴来波<sup>2)</sup>などがある。また、国土交通省基準整備事業においては長周期地震動に対する超高層建築物や免震建築物の影響に対する研究を行い、その成果を基に2010年12月に国土交通省から「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案」<sup>3)</sup>が公表され、その中で区域ごとの地震動も示されている。

しかしながら、2011年東北地方太平洋沖地震では、マグニチュード8を超える断層破壊が3つ続けて起きるマグニチュード9の巨大地震が発生したことを契機に、東海、東南海、南海地震の3連動地震の断層モデルの見直しなど、想定すべき地震動の考え方が変化し、東海、東南海、南海地震の3連動地震<sup>4)</sup>など、これまで対象としてこなかった連動地震も含めて、発生の可能性のある最大級の地震に対する対策が求められるようになってきている。さらに、2012年には内閣府から見直された断層モデルが公表されており、断層の大きさを最大限と考え、位置も陸地に最も近づいた場合を想定した4連動地震動（日向灘域、南海域、東海域、駿河湾域）<sup>5)</sup>も作成されている。プレート境界の巨大地震の他にも、建設地近傍や直下で起こるマグニチュード7クラスの地震も建築物に与える影響は大きく、活断層による地震としては、大阪の上町断層や東京の立川断層などによる地震の発生が懸念されている。また、関東平野では首都圏の直下で起こるプレート境界地震も懸念されている。このような地震は規模がさほど大きくないものでも、建設地に近いために非常に大きな地震動となり、建築物に与える影響も大きい。大阪では2006年に大阪府自然災害総合防災対策検討委員会より大阪府市予測波<sup>6)</sup>が公表されており、それに基づき、一般社団法人日本建築構造技術者協会（以下、「JSCA」という）関西支部を中心とする「大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動及び設計法に関する研究会」（以下、「大震研」という）により、その地震動に対する設計法に関する検討<sup>7)</sup>も行われている。また、首都圏直下地震に

対しては文部科学省において関東地方各所の予測波が公表されている。

一方で、一般的な免震建築物における応答変位のクライテリアは設計で想定するレベルの地震動に対し、40～50cm程度とする場合が多く、擁壁とのクリアランスとして、さらに20～30%程度の余裕をとり、60cm程度に設定される場合が多い。しかしながら、前述のような従来の設計で想定されていた振幅レベルや継続時間を大きく上回る地震動に対しては、免震建築物の安全性や機能が脅かされる可能性がある。内陸型地震の断層近傍で発生するパルス性地震動によっては、免震層の過大な応答変位により、擁壁への衝突による建築物躯体やExp.Jの部分的損傷、過大变位による免震部材の破断や圧壊、座屈による支持能力の損失なども懸念される。また、長周期長時間地震動によっては、大振幅の揺れが長時間継続することで、床応答加速度が増大し、室内の機器の移動や転倒により、建築物の機能が維持できない可能性がある。このような免震層の過大変形を抑制するために、パッシブ型のダンパー量をいたずらに増加させた場合には、床応答加速度が上昇して免震建築物の長所が損なわれてしまうことも考えられる。以上のような背景から、免震層の過大な応答変位を低減しながらも床応答加速度の上昇を抑制することを目的として、免震建築物にセミアクティブ制御の考え方を導入したセミアクティブ免震に関する研究<sup>8), 9), 10)</sup>が行われている。セミアクティブ制御は、外部からの供給エネルギーが少なく、制御を実装するハードウェア装置自体はパッシブ方式でありながら、アクティブ方式の概念により、減衰や剛性などの建築物の部分的な構造特性を変化させることが可能となり、パッシブ制御だけでは実現できない制御効果が期待できる。反面、セミアクティブであるため、制御のための電源とコンピュータが必要であり、電源確保の観点から大地震時における可動性を考えると、現状では広い普及に難しい側面もあるが、無停電電源装置(UPS: Uninterruptible Power Supply)等の利用により、それを補うことはできる。また、アクティブ・セミアクティブ制御により、地震動に対する望ましい応答制御方法を模索するには重要であり、それを応用することで、より効果的なパッシブ型ダンパーの開発にも役立つものと位置づけることとする。

本研究においては、前述のような建築基準法の水準を大きく超える多様な地震動に対して、セミアクティブ制御により床応答加速度を抑制しながら、免震層の過大な応答変位を低減する制御方法を提案する。このとき、近年我が国で精力的に研究が進められている慣性質量機構による入力低減効果<sup>11)</sup>および変位抑制効果<sup>12), 13)</sup>を基に、その効果をセミアクティブ制御で適切にコントロールする方法について論ずる。

## 1.2 既往の研究

1995年の兵庫県南部地震以降、それまでの耐震構造に対し、制震構造や免震構造など、地震による建築物の挙動をコントロールしようとする性能設計の考えが急速に普及してきている。特に、高度情報化社会の昨今においては、大地震時における建築物の倒壊防止による人命保護のみならず、そこに付与された多様な機能を維持することが社会的要求として高まりつつある。このような社会的要求に対する研究開発分野のひとつとして、建築物のアクティブ・セミアクティブ振動制御がある。アクティブ・セミアクティブ振動制御は、これまで機械工学や航空宇宙工学などの分野で研究開発がなされ、多くの実績が上がっている。建築分野においては、1989年にアクティブマスダンパーが実際の建築物に初めて適用された後、1995年までの6年半程度の間、20棟の建築物にアクティブマスダンパーが設置され<sup>14)</sup>、その後も建築・土木構造物についてのアクティブ制御に関する研究発表や適用が数多くなされている<sup>15)</sup>。装置駆動に必要な外部からの供給エネルギー量が極めて少ないセミアクティブ制御についても、兵庫県南部地震を契機に研究開発が加速してきている。なかでも、免震構造にセミアクティブ制御の考え方を導入したセミアクティブ免震は、大地震時に免震効果を保ちながら免震層の層間変位を小さくするだけでなく、中小地震時にも振動低減を図ることを意図しており、その成果が報告されている<sup>8), 9), 10)</sup>。

これらのセミアクティブ制御を実現する代表的な振動制御装置としては、可変オリフィスによるオイルダンパー、磁気粘性流体（以下、「MR流体」という）や電気粘性流体などの機能性流体を用いたダンパー、可変摩擦ダンパーなどがある。本研究において用いているMR流体は、磁場の作用によって見かけの粘度が上昇する流体で、最初にRabinowによってクラッチに適用され<sup>16)</sup>、その後もエンジンマウントやMRダンパーのほか、シートサスペンション、ショックアブソーバー、医療器具、トレーニングマシンへの適用が進んでいる。MRダンパーを用いた既往の研究では、主に免震建築物を対象として、最適レギュレーター理論による最適制御<sup>17), 18)</sup>やEF制御<sup>19)</sup>などの制御則を用いたセミアクティブ制御によりMRダンパーの荷重変位関係において、第2、第4象限で積極的にエネルギー吸収を行い、主架構に見かけの負剛性を与えることで絶対加速度の低減を図る制御方法<sup>20)</sup>などを始め、様々な制御方法が提案されている<sup>21), 22), 23)</sup>。また、免震建築物のみならず、一般建築物の制震システムとして提案された制御（a clipped-optimal control<sup>24)</sup>）や斜張橋の風や交通振動に対する制御<sup>25), 26)</sup>にも適用されている。

一方、近年我が国では精力的に研究が進められている慣性質量に関して、振動制御に質量項を利用するという考え方は機械振動制御分野において早くから取り入れられており、動吸振器（Tuned Mass Damper, 以下「TMD」と略す）の最適設計法として、Den Hartogの定点理論<sup>27)</sup>が広く知られている。建築分野において、TMDは塔状構造物や高層構造物の風揺れ制御を目的として使用されることが多いが、付加質量に比べて制御対象とする構造物の質量は大きく、大きな振動制御効果を得るためには非常に大きな付加質量が要求され、主振動系である制御対象構造物の荷重負担をいたずらに増加させることとなる。また、制

第一章

第二章

第三章

第四章

第五章

御できる振動は基本的に 1 つの振動モードであり、非定常性の強い振動には効果が期待しにくいなどの短所を有しており、地震動に対して実用に供するには困難があった。このような背景に対して、近年では大地震時においても大きな振動制御効果を得るために、振り子と梃子を利用した機構<sup>28)</sup>やボールねじにより軸方向運動を高速な回転運動に増幅変換する機構<sup>29), 30)</sup>が提案されており、小さな実質量を何らかの形で増幅させようという試みがなされてきている。特に、「減衰こま」と呼ばれる粘性減衰装置はボールねじ機構を実現し、固定された外筒との間に充填された粘性体のせん断抵抗で抵抗力を得るものであり、これまでに建築構造物を対象とした振動制御装置として実用化されてきている。回転方向である内筒の接線方向変位は軸方向変位の 5~40 倍程度に増幅され、内筒の質量が高速回転することにより生じる回転慣性質量は、実質量に変位増幅率の二乗を乗じた値に増幅されるため、内筒の実質量の千倍以上になっている。さらに、「減衰こま」に円筒形の回転付加おもりを付け、外筒を回転させるようにした「粘性マスダンパー<sup>13)</sup>」においては、回転付加おもりの質量効果を実質量の数千倍にも増幅させることが可能となっている。このような技術開発の発展に伴い、振動方程式の質量項、減衰項、剛性項を互いに連動させる調整法に関して、近年、精力的な研究が進められてきている。これらの研究は大別して、モード制御の概念を利用する「モード制御型」と、TMD の概念を利用する「同調型」の 2 つの考え方がある。「モード制御型」において、古橋・石丸ら<sup>31), 32)</sup>はすべての高次モードの応答を消失させる「完全モード制御法」を提案しており、大きな慣性質量が振動現象によって生成されるところから、これを「ダイナミック・マス (D.M. : Dynamic Mass)」と呼称している<sup>11)</sup>。また、「同調型」においては、井上・五十子ら<sup>33)-40)</sup>が定点理論<sup>27)</sup>を基本に、回転慣性要素と柔支持部材で支持することにより同調付加振動系を構成し、これにより回転慣性要素との並列機構である粘性減衰要素に効率良くエネルギーを吸収させる制振システムとして、「同調粘性マスダンパー (TVMD : Tuned Viscous Mass Damper)」を提案している<sup>13)</sup>。磯田・半澤らは同じく「同調型」として、回転慣性要素を TMD として梁の上下振動低減に利用する<sup>41)</sup>ほか、「モード制御型」と「同調型」両者について、伝達関数による応答倍率<sup>42)</sup>や地震入力エネルギー<sup>43)</sup>の観点からそれらの特性を整理し、慣性質量ダンパーを組み込んだ低層集中制震への適用も展開している<sup>44)</sup>。

### 1.3 本研究の目的

本研究では、建築構造物の地震動に対する振動応答を制御することを目的として筆者が開発した、回転慣性による質量効果と MR 流体による可変減衰効果の 2 つを狙いとするハイブリッド型の振動制御装置、MR 流体を用いた回転慣性質量ダンパー<sup>45), 46)</sup> (以下、「MR 回転慣性ダンパー」という) について、種々の性能試験を実施し、その解析的検証を加えることで、振動制御装置としての基本特性の整理を行う。また、MR 回転慣性ダンパーを用いたリアルタイムハイブリッド実験を通じて、既往の研究の理論的成果を、数値解析と実験を通して比較検証を行い、断層近傍地震動を含む標準的な入力地震動に対して、セミアクティブ制御による効果について検証を行う。さらに、セミアクティブ振動制御装置としての MR 回転慣性ダンパーの各種構造物への適用可能性や地震動に対する制御効果を解析的に検証し、前述のような建築基準法の水準を大きく超える多様な地震動に対して、セミアクティブ制御により床応答加速度を抑制しながら、免震層の応答変位を低減する制御方法を提案することを目的としている。

## 1.4 本論文の構成

本論は全5章から構成されている。

第1章「序論」では、本研究に至る背景として、近年の地震学の進歩や2011年東北地方太平洋沖地震を契機とした想定すべき地震動の考え方の変化により、断層近傍地震動や長周期長時間地震動など、従来の建築基準法の水準を超える地震動に対する免震建築物の安全性や機能性について言及している。既往の研究においては、セミアクティブ制御および慣性質量に関する研究を概観し、本研究の目的を、慣性質量による質量効果を取り入れたセミアクティブ制御により床応答加速度を抑制しながら、免震層の応答変位を低減する制御方法を提案することとして明確に位置づけている。

第2章「磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの開発と性能試験」においては、最大出力100kNの試作機を製作し、アクチュエータの変位入力による加振試験等により、その基本特性について整理し、理論式および解析手法の妥当性の検証を行っている。荷重制限（トルクリーフ）機構による過負荷防止や質量効果が発揮できる臨界振動数、各印加電流値におけるMR流体の降伏応力、耐久性能などの基本特性を確認している。次に、正弦波入力加振試験においては、MR流体自身のせん断流れに対する抵抗力および磁場作用時のMR流体の降伏応力によるエネルギー吸収効果により可変減衰力を用いたセミアクティブ制御装置としての有効性を示している。また、性能試験の結果からMR回転慣性ダンパーの振動解析モデルを構築し、正弦波および地震動を用いたランダム波試験結果との比較により、その妥当性を検証している。

第3章の「リアルタイムハイブリッド実験による検証」では、MR回転慣性ダンパーを用いたリアルタイムハイブリッド実験を通じて、制御対象とする構造体の固有周期 $T$ 、構造体質量に対する慣性質量の比（質量比 $\mu$ ）、断層近傍地震動を含む標準的な入力地震動による応答性状を比較している。パッシブ制御である電流無印加時の最大床応答加速度、最大応答変位の比較から、地震動により異なるものの、質量比が大きくなるほど、最大床応答加速度は大きく、最大応答変位は小さくなる傾向を示すことを明らかにしている。また、伝達関数から、質量比が大きくなると、どの入力地震動においても共振点付近の応答は小さくなるものの、短周期領域で絶対加速度が増幅することを示している。また、地震動の入力速度波形と構造体の最大応答変位との関係から、構造体の最大応答変位が大きいほど、地震動の最大速度入力発生時からの時間差も大きくなり、最大速度入力発生時からの時間差は地震動の性質による影響が支配的であることを明らかにしている。これらのことから、地震動の入力速度波形に着目したセミアクティブ制御則を提案している。電流無印加時のパッシブ制御時、1Aの一定電流印加時のパッシブ制御時、提案したセミアクティブ制御時それぞれにおける最大応答値の比較から、セミアクティブ制御時は全ての場合について概ね10~40%程度最大応答変位が低減されることを確認し、特に、JMAKobe波について、質量比を大きくすることで、短周期領域での床応答加速度の増幅を抑えながら、同時に応答変位を低減することが可能であり、さらにセミアクティブ制御時は、パッシブ制御に比べ

て、床応答加速度をあまり上昇させずに応答変位を低減する効果が期待できることを示している。

第4章「多様な地震動に対する応答制御効果」においては、固有周期4秒の免震構造物モデルを対象として、周波数領域における伝達関数および地震動に対する時刻歴応答の観点から検討を行い、慣性質量効果を取り入れたスカイフック方式によるセミアクティブ制御方法を提案し、その効果について論じている。周波数領域における伝達関数から、適切な質量比を取ることにより、減衰比を大きく取るよりも加速度伝達率および変位伝達率とともに小さくできる領域があることを示している。しかしながら、質量比と減衰比を調整することには一長一短があり、それらのトレードオフ関係をパッシブ制御のみでは解消できないことを示している。それらの課題に対し、スカイフック方式を採用することで、セミアクティブ制御により高周波数領域における伝達率を上昇させずに、共振周波数近傍での伝達率を小さくすることができることを周波数領域における検討より示している。また、時刻歴応答における検討から、適切な質量比および減衰比を取ることにより、特に周期1~2秒程度に大きな振幅を持つようなパルス性地震動に対しては床応答加速度を効果的に減少させることができることを明らかにしている。さらに、パッシブ制御時において、最大床応答加速度が最も小さくなる質量比および減衰比の組み合わせの場合について、各入力地震動に対するセミアクティブ制御効果を確認し、本論で用いた地震動では、最大床応答加速度を平均6%程度、最大応答変位を平均28%程度低減することができることを示している。また、建築基準法の水準と同程度の地震動に対して設計されたモデルとして、質量比および減衰比を一定とした場合のセミアクティブ制御効果についても検証し、最大床応答加速度は平均16%程度、最大応答変位は平均38%程度低減されることを示している。これらの結果より、本論で提案した慣性質量効果を取り入れたスカイフック方式によるセミアクティブ制御法は、床応答加速度を抑制しながら、同時に免震層の応答変位を低減するのに有効な制御方法であると結論付けている。

第5章「結論」では、これまでの結果より、筆者が開発したMR回転慣性質量ダンパーを用いて、断層近傍地震動を含む標準的な入力地震動ならびに建築基準法の水準を大きく超える多様な地震動に対して、セミアクティブ制御により、床応答加速度を抑制しながら、免震層の応答変位を効果的に低減できることを示している。



## 1.5 本研究に関する発表論文等

### 査読論文：

- 1) 富澤徹弥, 高橋治, 藤谷秀雄, 柴田和彦, 佐藤友祐：磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの性能試験とその解析的検証, 日本建築学会構造系論文集, 第 693 号, pp.1859-1867, 2013.11
- 2) 富澤徹弥, 藤谷秀雄, 伊藤麻衣, 青山優也, 柴田和彦, 佐藤友祐：磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる応答制御ーリアルタイムハイブリッド実験による検証ー, 日本建築学会構造系論文集 (掲載未定)
- 3) 富澤徹弥, 伊藤麻衣, 青山優也：リアルタイムハイブリッド実験による磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの応答制御, 神戸大学大学院工学研究科紀要 (掲載未定)
- 4) 富澤徹弥：磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーによるパルス性地震動に対するセミアクティブ制御, 神戸大学大学院工学研究科紀要 (掲載決定済み)
- 5) 富澤徹弥, 藤谷秀雄, 柴田和彦, 佐藤友祐：多様な地震動に対する磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの応答制御に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 (掲載未定)

### 国際会議：

- 1) H. Fujitani, Y. Mukai, T. Tomizawa, K. Hirata, Y. Mazuka, H. Fujii : Response reduction of base-isolation system against near-fault pulse and long-period ground motions, 15th World Conference of Earthquake Engineering, 2012.9
- 2) Hiroshi Sodeyama, Kazuhiko Shibata, Yusuke Sato, Tetsuya Tomizawa, Hideo Fujitani : A STUDY ON CONTROLLABLE ASEISMIC DEVICE WITH INERTIA MASS AND MR FLUID, Proceeding of ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP2013), 2013.7

### 口頭発表：

- 1) 富澤徹弥, 高橋治, 五十幡直文, 柴田和彦：回転慣性質量を用いた建築用慣性ダンパーの開発 その1 性能試験および解析モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.463-464, 2010.9
- 2) 富澤徹弥, 高橋治, 五十幡直文, 柴田和彦：回転慣性質量を用いた建築用慣性ダンパーの開発 その2 トルクリリース機構および微振動試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.715-716, 2011.8
- 3) 富澤徹弥, 藤谷秀雄, 向井洋一, 平田恵子, 柴田和彦, 佐藤友祐：MR 流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる応答制御 その1 免震構造への適用とその有効性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海) B, pp.501-502, 2012.9
- 4) 平田恵子, 藤谷秀雄, 向井洋一, 富澤徹弥, 柴田和彦, 佐藤友祐：MR 流体を用いた回転

慣性質量ダンパーによる応答制御 その2 セミアクティブ制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) B, pp.503-504, 2012.9

- 5) 平田恵子, 藤谷秀雄, 向井洋一, 富澤徹弥, 柴田和彦, 佐藤友祐: 多様な地震動に対するMR流体を用いた慣性質量ダンパーの効果, 日本建築学会近畿支部平成25年度(2013年度)近畿支部研究発表会, 2013.6
- 6) 佐藤友祐, 柴田和彦, 高橋治, 富澤徹弥, 藤谷秀雄: MR流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる応答制御 その3 耐久性能試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) B, pp.407-408, 2013.8
- 7) 富澤徹弥, 藤谷秀雄, 柴田和彦, 佐藤友祐: MR流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる応答制御 その4 瞬間入力速度による制御方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) B, pp.409-410, 2013.8

公開特許:

- 1) 特開2012-184816 公報: 減衰装置、及び構造物の制振装置

第  
一  
章

第  
二  
章

第  
三  
章

第  
四  
章

第  
五  
章

A  
p  
p  
e  
n  
d  
i  
x

## 第 2 章 磁気粘性流体を用いた回転慣性質量

### ダンパーの開発と性能試験

- 2.1 磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの構造
- 2.2 性能試験
- 2.3 振動解析モデルによるシミュレーション
- 2.4 第 2 章まとめ
- 2.5 付録図表

## 2. 磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの開発と性能試験

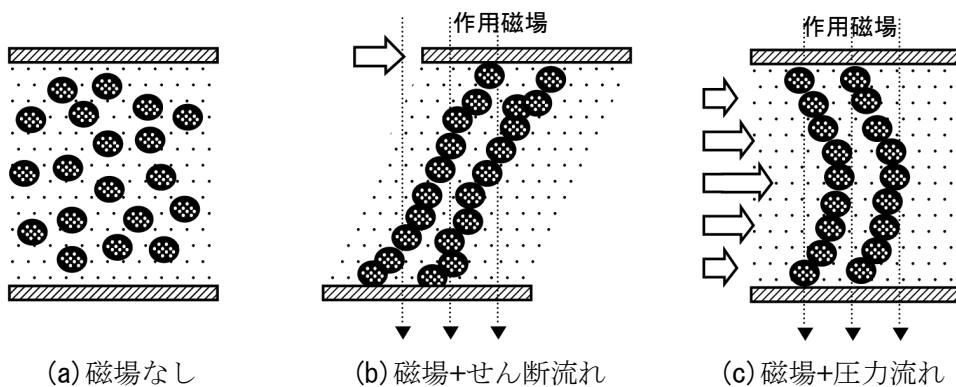
### 2. 1 磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの構造

本章では、建築構造物の地震動に対する振動応答を制御することを目的として、筆者が開発した振動制御装置、MR 回転慣性ダンパーについて、種々の性能試験を実施し、その解析的検証を加えることで、振動制御装置としての基本特性の整理を行う。MR 回転慣性ダンパーは、原子力施設やプラント工場などの配管設備の振動対策として用いられている、回転慣性質量を利用した振動制御装置に対して、建築構造物に適用可能となるような改良を加え、さらにセミアクティブ制御が可能な MR 流体を用いることにより、回転慣性による質量効果と MR 流体による可変減衰効果の 2 つを狙いとしたハイブリッド型の振動制御装置である。

MR 回転慣性ダンパーは、既往の研究の「減衰こま」における外筒との間に充填された粘性体として、磁場の作用によって見かけの粘度が上昇する MR 流体を用いたものである。MR 流体は磁性粒子を液体中に分散させたもので、図 2.1(a)~(c)に示すように、この磁性粒子は磁場を受けると分極して液体中に鎖状の粒子が組織化（クラスターを形成）するため、せん断流れや圧力流れに対する抵抗が生じて粘度が上昇する。抵抗の大きさは与える磁場の大きさにより異なり、ある範囲まではより強い磁場を発生させるほど見かけの粘度は上昇する。逆に磁場を与えることをやめればクラスターも崩れ、磁性粒子が分散した状態に戻り、抵抗も元に戻るようになる。そのため、図 2.1(d)に示すように、磁場が作用していないときはせん断速度とせん断応力は概ね比例関係となり、ニュートン流体の特性を示し、磁場が作用した場合には降伏応力度 $\tau_0$ をもつビンガム流体の特性をもつ。MR 流体におけるこの特性を利用して、シリンダとピストンからなるダンパーの作動流体に MR 流体を封入した振動制御装置として、MR ダンパー<sup>47)</sup>がある。MR ダンパーは、装置の内部に電磁石を設置し、電磁石に印加する電流を変化させることにより MR 流体が受ける磁場を変動させ、ダンパーの出力をコントロールすることができるセミアクティブの振動制御装置である。

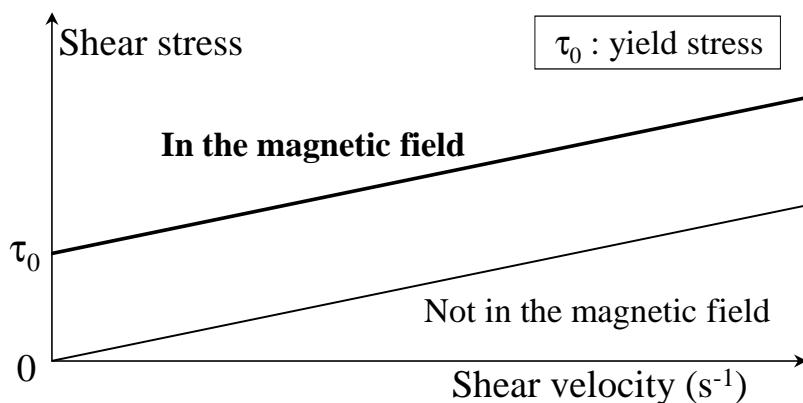
第一章

第二章



第三章

第四章



(d) せん断速度とせん断応力度の関係

第五章

図 2.1 MR 流体の抵抗機構

表 2.1 MR 回転慣性ダンパー各部の主要な寸法

項目	記号	単位	数値
ボールねじのリード長	L	mm	12
フライホイール円盤半径	r	mm	100
フライホイール幅 (=ΣW <sub>m</sub> +ΣW <sub>n</sub> ) (磁場部, 非磁場部の合計幅)	W	mm	120
MR流体の充填隙間	H	mm	2
磁場部の合計幅	ΣW <sub>m</sub>	mm	40
非磁場部の合計幅	ΣW <sub>n</sub>	mm	80

Appendix

図 2.2 に MR 回転慣性ダンパーの構造概略図を示す。また、主要な寸法値を表 2.1 に示す。MR 回転慣性ダンパーの出力発生部は、主にボールねじとボールナット、フライホイール（付加質量）および MR 流体と磁場発生機構（電磁石）で構成されている。ボールねじとボールナットにより直線運動が回転運動に変換され、ボールねじの先に取り付けられたフライホイールが回転することにより回転慣性力が発生し、回転慣性力により増幅された質量効果が、ボールねじを介して直線運動として伝達され、軸方向加速度に比例した慣性力が出力される。ボールねじのリード長（ねじ山のピッチ）を  $L$ 、フライホイールの円盤半径を  $r$  とすると、微小時間  $dt$  の間に、ボールねじに軸方向変位  $dx$  が入力されたとき、回転慣性力によりボールねじに働く軸方向力（反力） $F_I$  は、次式で表される<sup>46)</sup>。

$$F_I = \frac{2\pi^2 r^2}{L^2} \cdot m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{2\pi^2 r^2}{L^2} \cdot m \cdot \ddot{x} \quad (2.1)$$

フライホイールの実質量  $m$  (=20kg) に対して、式(2.1)より増幅機構による等価質量は 27.4ton となり、1370 倍の慣性力を得ることができる。一方、フライホイールが回転することで、フライホイールとケース間の相対変位からせん断速度が生じる。これにより、慣性力と同時にフライホイールの周囲に充填された MR 流体自身のせん断流れに対する抵抗による減衰力を得ることができる。図 2.3 に示すように、MR 流体を封入しているケースには磁場発生機構が取付けられており、MR 流体に作用する磁場の強さを変えることによって MR 流体の降伏応力による抵抗力を任意に設定し、MR 流体自身のせん断流れに対する抵抗力に加算される減衰力を調整できる仕組みとなっている。使用する MR 流体<sup>36)</sup>の基本特性値を表 2.2 に示す。使用する MR 流体の磁性粒子は直径約 10 $\mu$ m 以下の鉄の粒子であり、液体には化学合成油系の油を用いている。一般に、MR 流体は高価であり、磁性粒子と油の比重の違いから磁性粒子の沈降が生じるため、実用性に課題がある場合もある。沈降については、油中に磁性粒子が分散した状態をできるだけ長期間保つために、分散剤や界面活性剤を付加する場合や磁性粒子表面に特殊な加工を施している場合もある。筆者はこれらの実用性への課題に対して、①ボールねじ機構の高速回転運動による MR 流体の攪拌作用、②高速度のせん断流れを利用した効率的な粘性抵抗による MR 流体使用量の減少、によりその解決を図っている。なお、使用する MR 流体の攪拌に必要なエネルギーをボールねじの軸方向速度に換算すると、およそ 0.14mm/s<sup>46)</sup>であり、微振動程度の入力でも MR 流体を十分に攪拌することができる。また、最大出力が同程度である一般的なピストン型の MR ダンパーと比較すると、MR 流体の使用量は、ピストンおよびシリンダ内の圧力設定や磁場発生機構部の設計によるところはあるものの、約 10~20%程度と大幅に少なくすることができる。

先の回転慣性力の導出と同様にして、微小時間  $dt$  の間に、ボールねじに軸方向変位  $dx$  が入力された場合、フライホイールの回転速度  $v$  は、角速度  $\omega$  を用いて次式のように表される。

$$v = r\omega = r \cdot \frac{2\pi}{L} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{2\pi r}{L} \cdot \dot{x} \quad (2.2)$$

また、フライホイールの周囲に充填された MR 流体の粘度を  $\mu$ 、磁場作用時の降伏応力を  $\tau_0$ 、

MR 流体の充填隙間を  $H$  とすると, MR 流体に生じるせん断応力  $\tau$  は次式で表すことができる.

$$\tau = \text{sign}(\dot{x}) \cdot \tau_0 + \mu \frac{v}{H} = \text{sign}(\dot{x}) \cdot \tau_0 + \mu \cdot \frac{2\pi r}{LH} \cdot \dot{x} \quad (2.3)$$

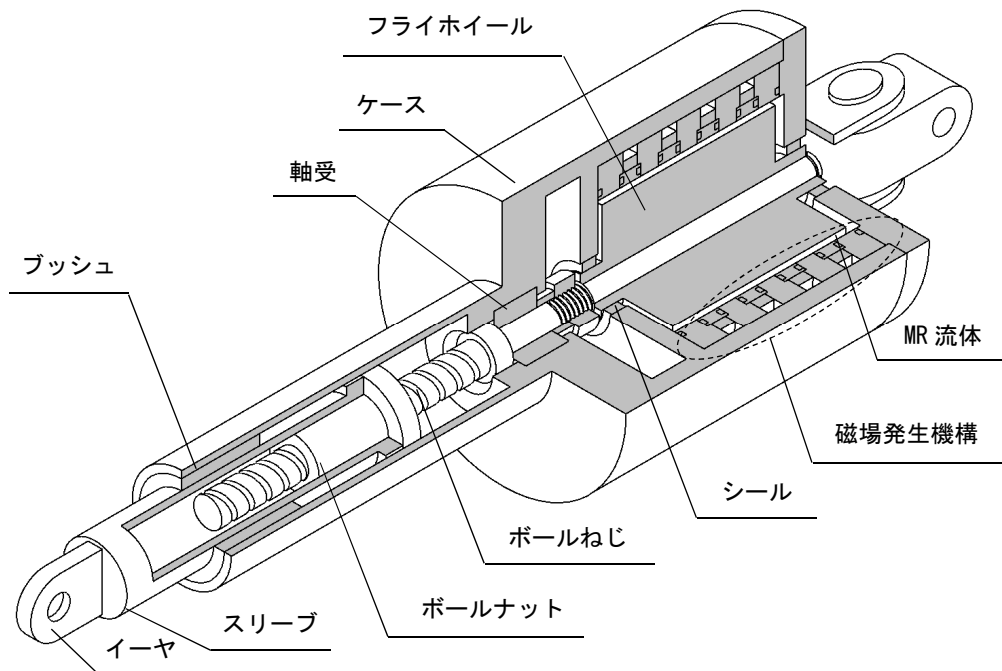
式(2.3)による MR 流体のせん断抵抗力は, フライホイールの回転によりトルク  $T$  に変換され, ボールねじを介して軸方向力 (反力)  $F_V$  として作用する. フライホイールの幅を  $W$ , 磁場発生部の合計幅を  $\Sigma W_m$  とすると, MR 流体の可変減衰力によりボールねじに働く軸方向力 (反力)  $F_V$  は次式で表される.

$$\begin{aligned} F_V &= \frac{2\pi}{L} \cdot T = \frac{2\pi}{L} \cdot r \cdot \tau \cdot 2\pi r \cdot W \\ &= \frac{4\pi^2 r^2}{L} \cdot \left( \text{sign}(\dot{x}) \cdot \tau_0 \cdot \Sigma W_m + \mu \cdot \frac{2\pi r}{LH} \cdot W \cdot \dot{x} \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

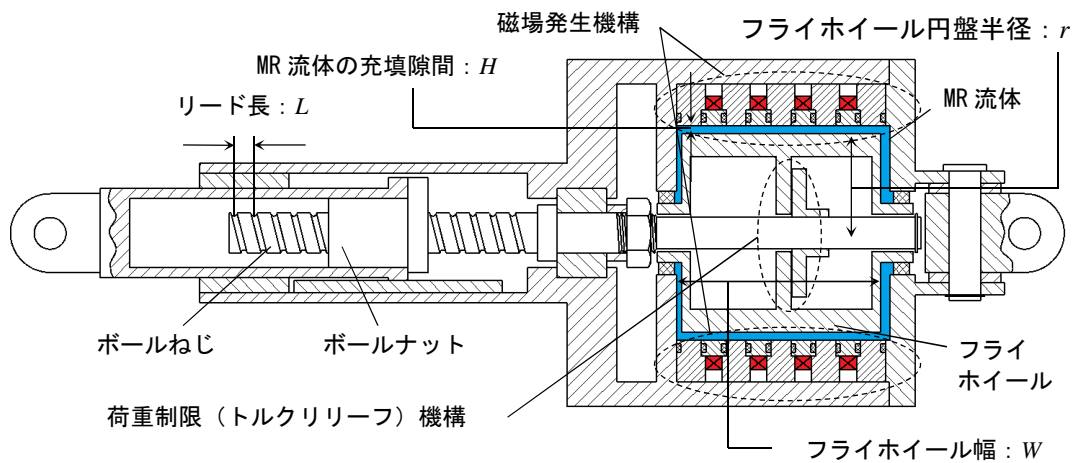
MR 回転慣性ダンパーによる出力は, 式(2.1)に示す回転慣性質量による慣性力  $F_I$  と, 式(2.4)に示す MR 流体のせん断抵抗力による減衰力  $F_V$  の和で表される. 式(2.4)の第1項は MR 流体による可変減衰力を示し, 無印加時と電流印加時では最大 27kN の可変幅を有している.

表 2.2 MR 流体の主要特性

項目	記号	単位	印加電流	数値
基本粘度	$\mu$	Pa・S	—	0.74
	$\tau_0$	kPa	0.25A	4.0
降伏応力	$\tau_0$	kPa	0.50A	10.0
	$\tau_0$	kPa	0.75A	20.5



(a) 斜視図



(b) 断面図

図 2.2 MR 回転慣性ダンパーの構造概略図



第一章

第二章

第三章

第四章

第五章

Appendix

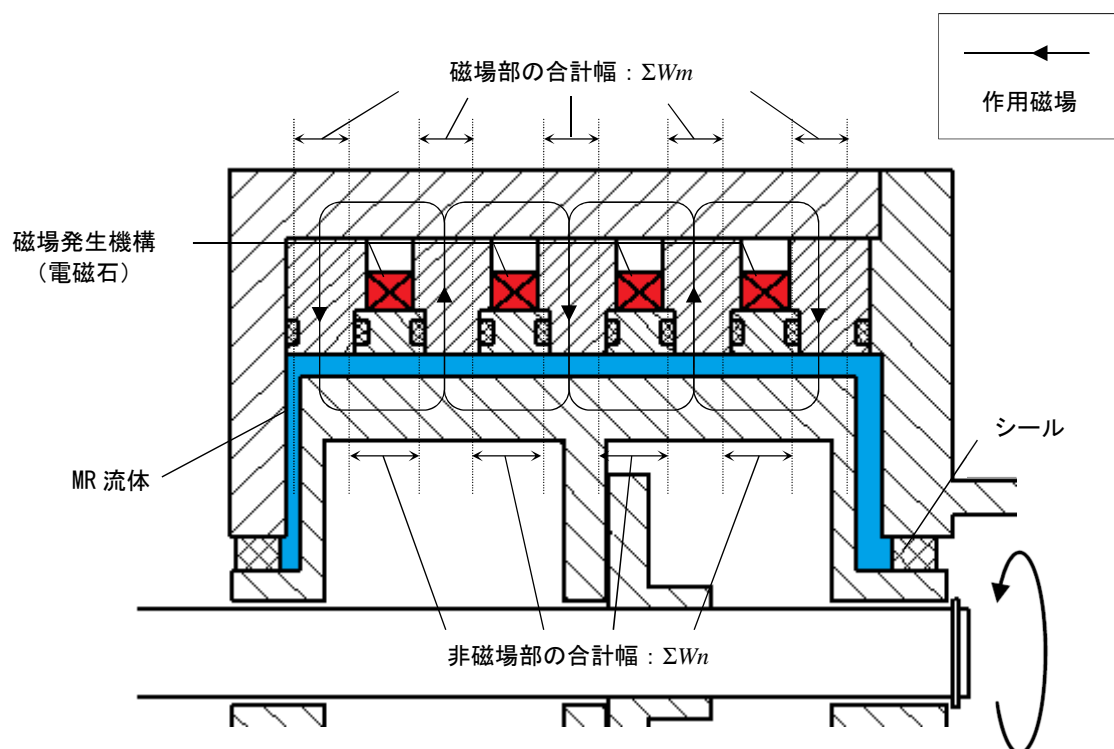
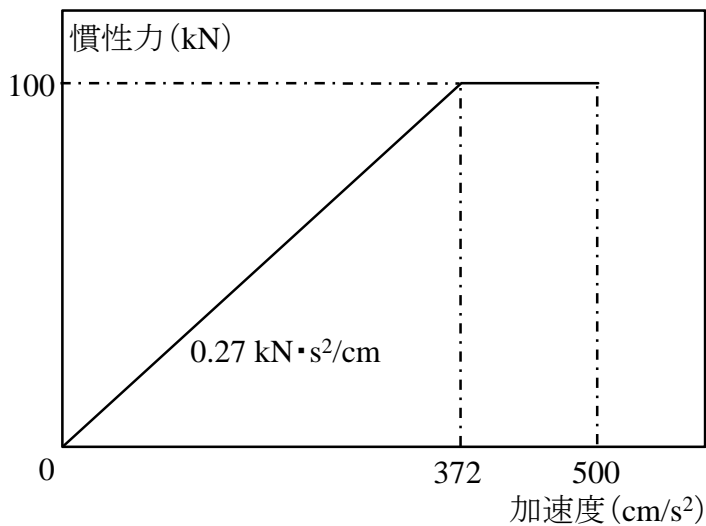


図 2.3 磁場発生機構部概略図

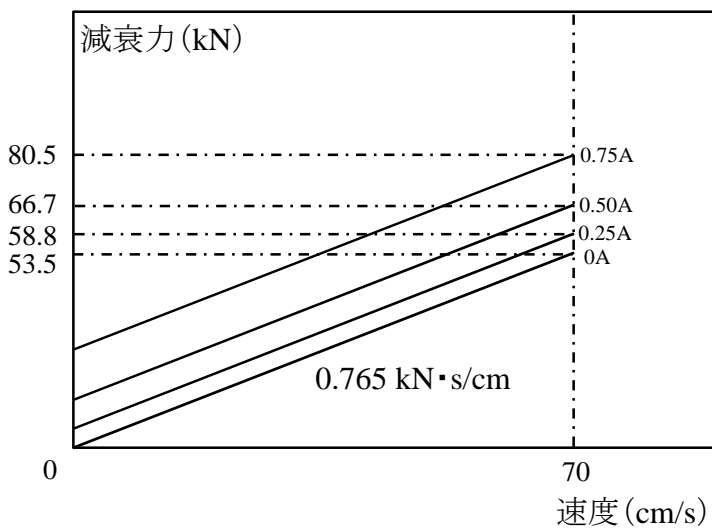
図 2.4 に、式(2.1)から算出される慣性力-加速度関係、式(2.4)から算出される減衰力-速度関係をそれぞれ示す。また、MR 回転慣性ダンパーの主な仕様特性を表 2.3 に示す。なお、MR 回転慣性ダンパーには想定を超える入力となされた場合のダンパーへの過負荷を防止するために、回転部に荷重制限（トルクリーフ）機構が取り付けられており、軸部と回転部との接触部分には摩擦材を使用し、その摩擦力が一定値を超えると軸が滑り、出力が頭打ちになる構造となっている。

表 2.3 MR 回転慣性ダンパーの主な仕様特性

項目	単位	数値
許容最大出力荷重	kN	100
許容最大加速度	cm/s <sup>2</sup>	500
許容最大速度	cm/s	70
許容ストローク	mm	250(±125)
慣性質量	ton	27.4
減衰係数	kN・s/cm	0.765
MR流体による可変減衰力	kN	5.3(0.25A)
	kN	13.2(0.50A)
	kN	27.0(0.75A)



(a) 慣性力－加速度関係



(b) 減衰力－速度関係

図 2.4 MR 回転慣性ダンパーの特性

## 2.2 性能試験

MR 回転慣性ダンパーの基本特性を確認するため、最大 100kN 出力の試作機を製作し、性能試験を実施した。実施した性能試験は、①荷重制限（トルクリーフ）機構確認試験、②高振動数領域における剛性確認試験、③電流印加時および無印加時の MR 流体のせん断抵抗力を確認する低速試験、④正弦波および地震動を用いたランダム波加振試験、⑤耐久性能試験の 5 種類である。なお、MR 流体による影響を確認するため、④に関しては MR 流体封入の前後でそれぞれ同様の試験を行った。

### 2.2.1 荷重制限（トルクリーフ）機構確認試験

荷重制限（トルクリーフ）機構確認試験の状況を写真 2.1 に示す。試験は MR 流体封入前に行い、モータで軸を回転させて荷重制限（トルクリーフ）機構と軸の滑りによって生じる軸トルクを計測した。図 2.5 はモータの回転数および回転時間を示している。試験結果の評価には、60rpm の定格回転数に達した 2 秒後から、定格回転数を落とし始める 2 秒前までのそれぞれ 3 秒間（7～10 秒区間および 30～33 秒区間）の平均値を滑りトルク値とした。図 2.6 の試験結果に示すように、モータの回転により発生するトルク値はモータを回転し続けても頭打ちの値となっており、荷重制限（トルクリーフ）機構が機能していることが確認できる。計 3 回の試験で得られた滑りトルク値はそれぞれ 173.2Nm, 172.5Nm, 179.4Nm となり、設計上の滑りトルク値 191Nm に比べ、やや小さい値となった。回転慣性力によるトルク  $T$  と、ボールねじに働く軸方向力  $F_l$  との関係<sup>46)</sup>から、試験結果より MR 回転慣性ダンパーはおよそ 90.3～93.9kN の出力に達した場合に荷重制限（トルクリーフ）機構が働き、発生荷重を許容値内に留めることができると考えられる。

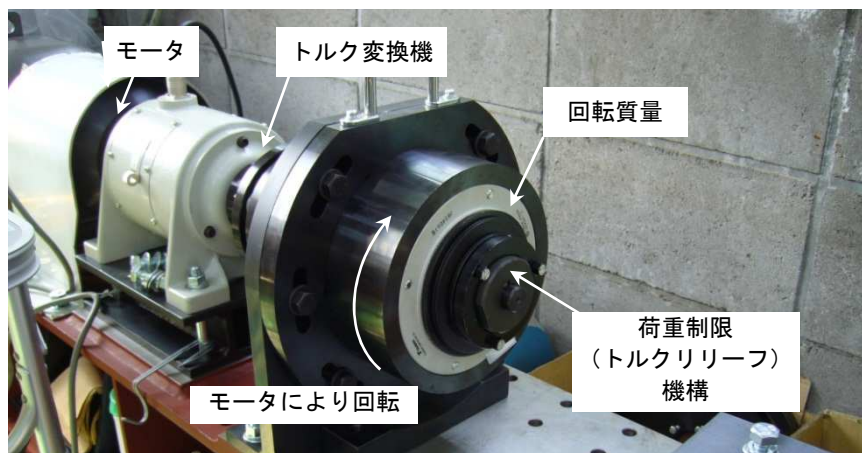


写真 2.1 荷重制限（トルクリリーフ）機構確認試験

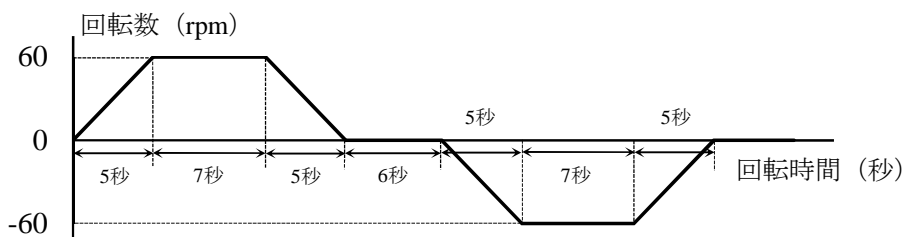


図 2.5 モーターの回転数と回転時間

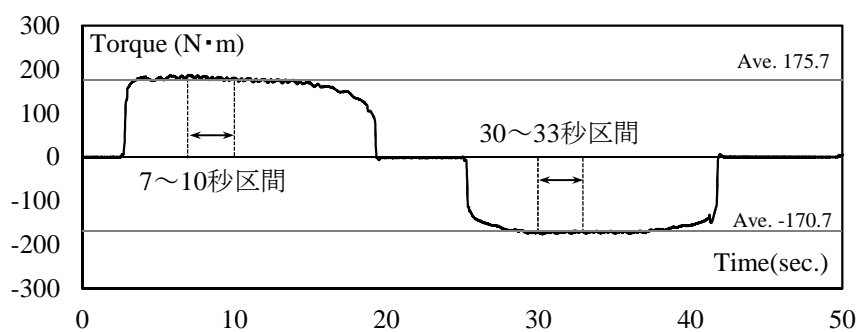


図 2.6 荷重制限（トルクリリーフ）機構確認試験結果

## 2.2.2 剛性確認試験

加速度に比例した慣性力は、正弦波加振においては変位と 180 度の位相差を生じるため、一般に負のばね特性を示すことが知られている<sup>49)</sup>。MR 回転慣性ダンパーのボールねじ部分による増幅機構は、剛性をもつボールねじの先に回転慣性による付加質量が接続されていると考えることができ、ある一定以上の高振動数領域においては、理論上、正のばね特性を示す<sup>46)</sup>。この特性を利用し、20Hz および 30Hz の高振動数領域において、アクチュエータの変位入力による加振試験を行い、装置の剛性を算出した。加振試験の状況を写真 2.2 に示す。計測項目は、試験機アクチュエータ変位と発生する荷重の 2 項目とした。図 2.7 に、剛性確認試験結果の荷重変位関係を示す。図より、荷重変位関係は右上がりの正のばね特性を示しており、その傾き  $k$  は 20Hz 加振時で 62.1kN/mm、30Hz 加振時で 61.4kN/mm となっており、概ね同程度である。これを装置の剛性と考え、試験を行った MR 回転慣性ダンパーの質量効果が発揮できる臨界振動数<sup>46)</sup>は 7.5~7.6Hz 程度であり、それ以上の高振動数領域では正のばね特性を示すものと考えられる。

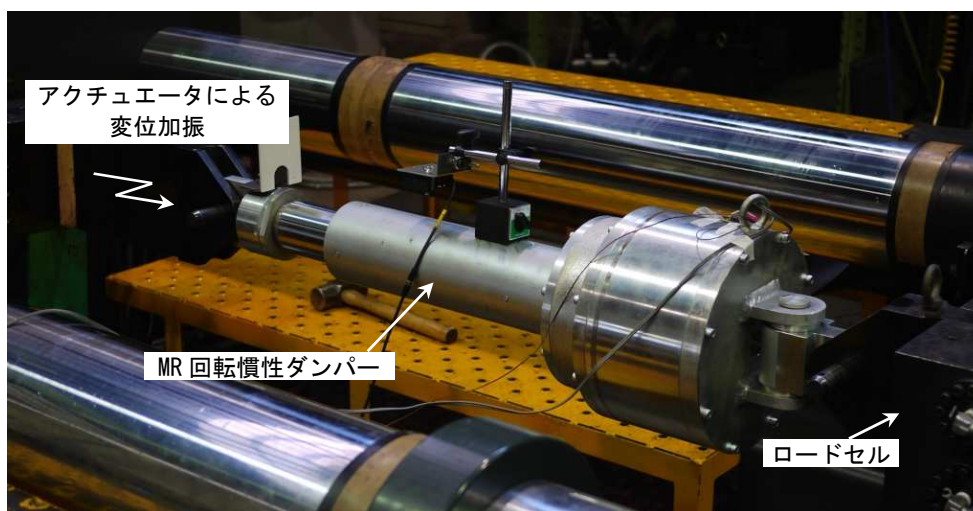


写真 2.2 加振試験の状況

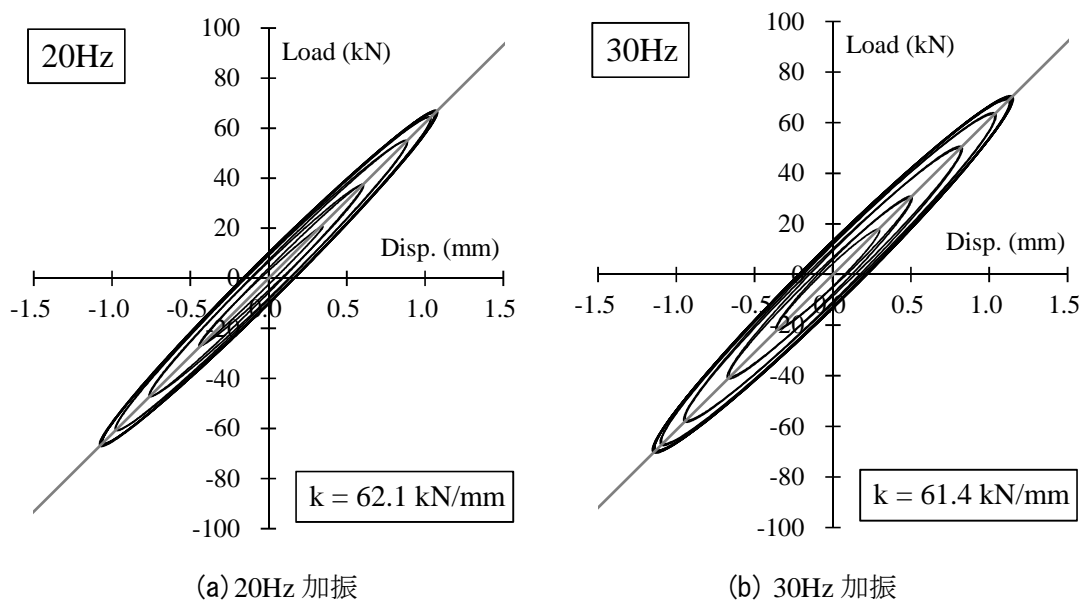


図 2.7 剛性確認試験における荷重変位関係

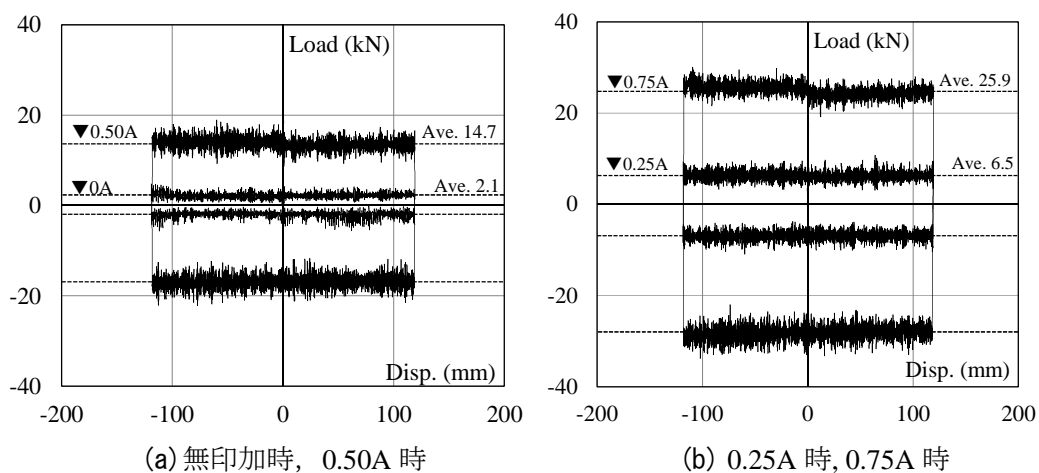


図 2.8 低速試験における荷重変位関係

### 2.2.3 低速試験

低速試験では、定速 4.0mm/s にて振幅±120mm の三角波加振試験を行い、一定速度下における MR 流体のせん断抵抗力を算出した。計測ダイアグラムは写真 2.2 と同様とし、印加電流は、0A, 0.25A, 0.50A, 0.75A の 4 パターンとした。図 2.8 に低速試験における荷重変位関係を示す。図より、各電流値において荷重は概ね一定値を示している。無印加時では、約 2kN 程度の荷重が生じているが、これは摺動部の摩擦の影響と考えられる。摩擦の大きさは最大出力荷重の 2%程度と小さな値であるため、設計上はほぼ無視して良い範囲と考えられる。印加電流 0.25A, 0.50A, 0.75A 時では、発生荷重はそれぞれ 6.5kN, 14.7kN, 25.9kN となっており、速度 4mm/s 時の粘性減衰 0.3kN を差し引くと、表 2.3 に示す各印加電流値における MR 流体の降伏応力 $\tau_0$ を式(2.4)に代入した理論値と概ね一致する。

### 2.2.4 正弦波加振試験

本項では、加振振幅および加振周期をパラメータとした正弦波加振試験により、MR 回転慣性ダンパーの基本特性を考察する。本試験では MR 流体の有無による影響を確認するため、MR 流体の封入の前後でそれぞれ同様の試験を行った。表 2.4 に正弦波加振試験において実施する試験条件を示す。表に示すように、正弦波加振試験は周期 0.2~5.0 秒、振幅レベル 1~120mm の範囲で計 48 ケースを実施した。図 2.9~2.11 に代表的な荷重変位関係を示す。なお、図 2.9 は MR 流体の封入前の場合、図 2.10 は MR 流体封入後で電流無印加時の場合、図 2.11 は MR 流体封入後にさらに 0.75A の一定電流を印加した場合である。加振周期は 0.5 秒, 1.0 秒, 1.5 秒, 4.0 秒とし、加振振幅は全て±20mm の結果を示しており、表 2.4 中の太線で囲ったケースについて比較している。全体的な傾向として、前述の剛性確認試験における荷重変位関係とは異なり、臨界振動数以下の低振動数領域においては見かけ上の負のばね特性が確認できる。また、加振周期が長くなるほど、その傾きは緩やかになっている。振幅 A, 角振動数 $\omega$ の正弦波の入力を考えると、任意時刻  $t$  における入力変位  $x$  は次式のように表すことができる。

$$x = A \sin \omega t \quad (2.5)$$

式(2.5)を式(2.1)および式(2.4)に代入すると、正弦波入力による MR 回転慣性ダンパーの出力荷重  $F$  は以下のようになる。

$$F = -\frac{2\pi^2 r^2}{L^2} \cdot m \cdot A \omega^2 \sin \omega t + \frac{4\pi^2 r^2}{L} \left( \text{sign}(\dot{x}) \cdot \tau_0 \cdot \Sigma W_m + \mu \cdot \frac{2\pi r}{LH} \cdot W \cdot A \omega \cos \omega t \right) \quad (2.6)$$

式(2.6)を式(2.5)で除し、変位最大時を仮定すると次式を得る。

$$\frac{F}{x} = -\frac{2\pi^2 r^2}{L^2} \cdot m \cdot \omega^2 + \frac{4\pi^2 r^2}{L} \cdot \frac{\text{sign}(\dot{x}) \cdot \tau_0 \cdot \Sigma W_m}{A} \quad (2.7)$$

式(2.7)より、正弦波加振における負のばねは、振動数および振幅依存性を有していることが

確認できる。図 2.9～2.11 の図中には、式(2.7)より求まる傾きを灰色の一点鎖線で併せて示しており、概ね良い対応を示していることが確認できる。図 2.11(d)に関しては傾きがやや逆転しているように見えるが、これは慣性力に比べて磁場印加時の MR 流体による減衰力が大きいためと考えられ、周期の長い建築構造物の応答制御に対して MR 回転慣性ダンパーの加速度低減効果を得るためにはストロークを大きくし、可変減衰力よりも大きい慣性力を得る必要があることを示唆している。

また、図 2.9 および図 2.10 において、MR 流体封入の前後で比較すると履歴面積の増加が見て取れ、MR 流体のせん断抵抗によるエネルギー吸収が確認できる。さらに、図 2.11 より電流印加時には大幅な履歴面積の増加によるエネルギー吸収をしており、MR 回転慣性ダンパーを用い、この可変減衰力を利用したセミアクティブ制御により効果的な振動制御が期待できると言える。これらの回転慣性質量と可変減衰それぞれ単独での効果に加え、回転慣性質量により負のばね特性を与えながら可変減衰のセミアクティブ制御を行うことによる、その相乗効果として、建築構造物の過度な応答変位を抑制するために大きな減衰を付加しても、床応答加速度の上昇を小さくできるような応答制御の実現が期待できる。

表 2.4 正弦波加振試験条件

周期 (sec.)	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	3.0	4.0	5.0	
振動数 (Hz)	5.00	3.00	2.00	1.00	0.67	0.33	0.25	0.20	
角振動数 (rad/s)	31.42	18.87	12.57	6.28	4.19	2.09	1.57	1.26	
振幅 (±mm)	1	3.1	1.9	1.3	0.6	0.4	0.2	0.2	0.1
		98.7	35.6	15.8	3.9	1.8	0.4	0.2	0.2
	5	15.7	9.4	6.3	3.1	2.1	1.0	0.8	0.6
		493.5	178.0	79.0	19.7	8.8	2.2	1.2	0.8
	10	—	18.9	12.6	6.3	4.2	2.1	1.6	1.3
		—	356.0	157.9	39.5	17.5	4.4	2.5	1.6
	20	—	—	25.1	12.6	8.4	4.2	3.1	2.5
		—	—	315.8	79.0	35.1	8.8	4.9	3.2
	50	—	—	—	31.4	20.9	10.5	7.9	6.3
		—	—	—	197.4	87.7	21.9	12.3	7.9
	80	—	—	—	50.3	33.5	16.8	12.6	10.1
		—	—	—	315.8	140.4	35.1	19.7	12.6
100	—	—	—	62.8	41.9	20.9	15.7	12.6	
	—	—	—	394.8	175.5	43.9	24.7	15.8	
120	—	—	—	—	50.3	25.1	18.8	15.1	
	—	—	—	—	210.6	52.6	29.6	18.9	

※ 上表中、各加振ケースにおいて、上段の灰色セルは最大速度 (cm/s)、  
 下段の白色セルは最大加速度 (cm/s<sup>2</sup>) の値をそれぞれ示している



第一章

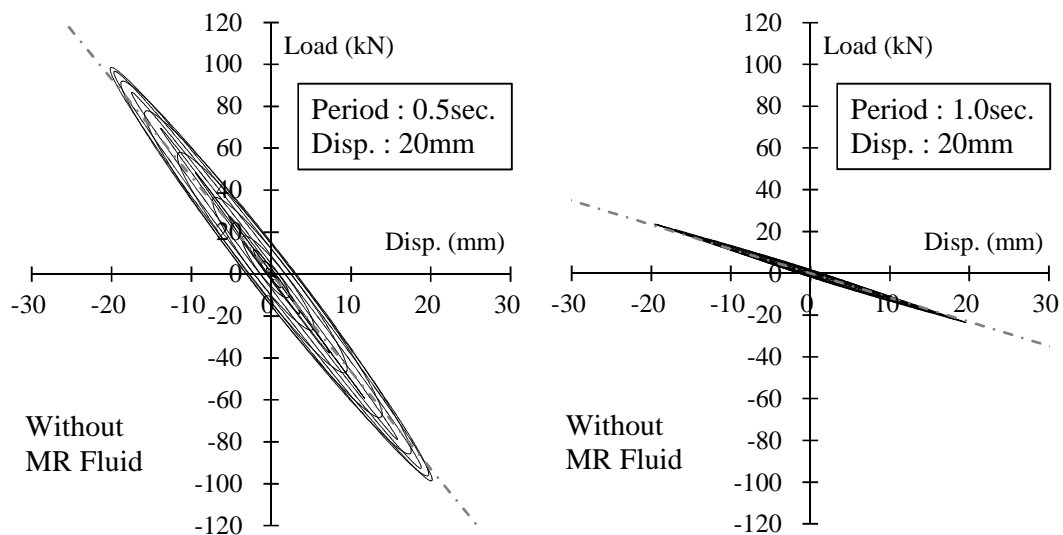
第二章

第三章

第四章

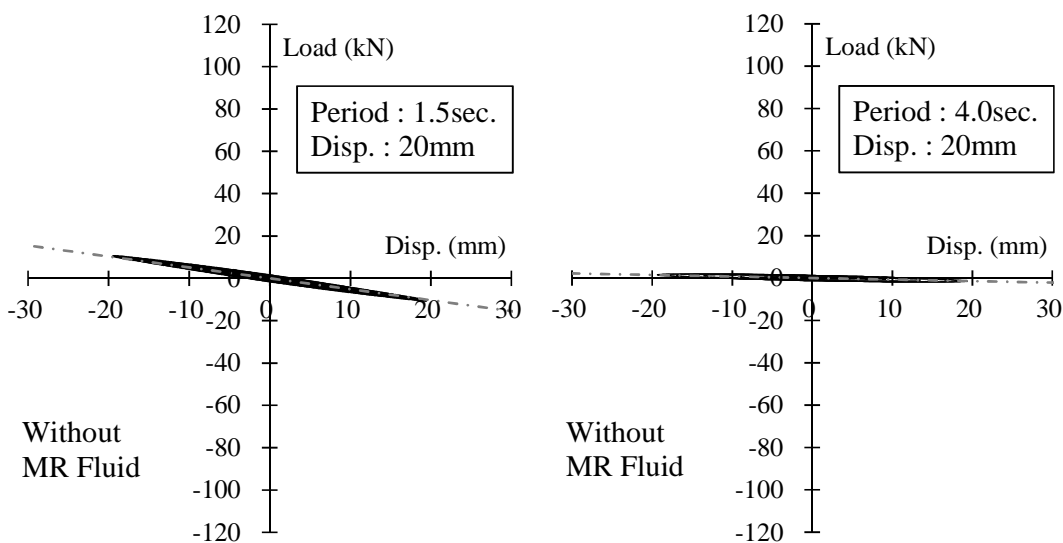
第五章

Appendix



(a) 周期 0.5 秒, 振幅 ±20mm

(b) 周期 1.0 秒, 振幅 ±20mm



(c) 周期 1.5 秒, 振幅 ±20mm

(d) 周期 4.0 秒, 振幅 ±20mm

図 2.9 正弦波加振試験における荷重変位関係 (MR 流体封入前)

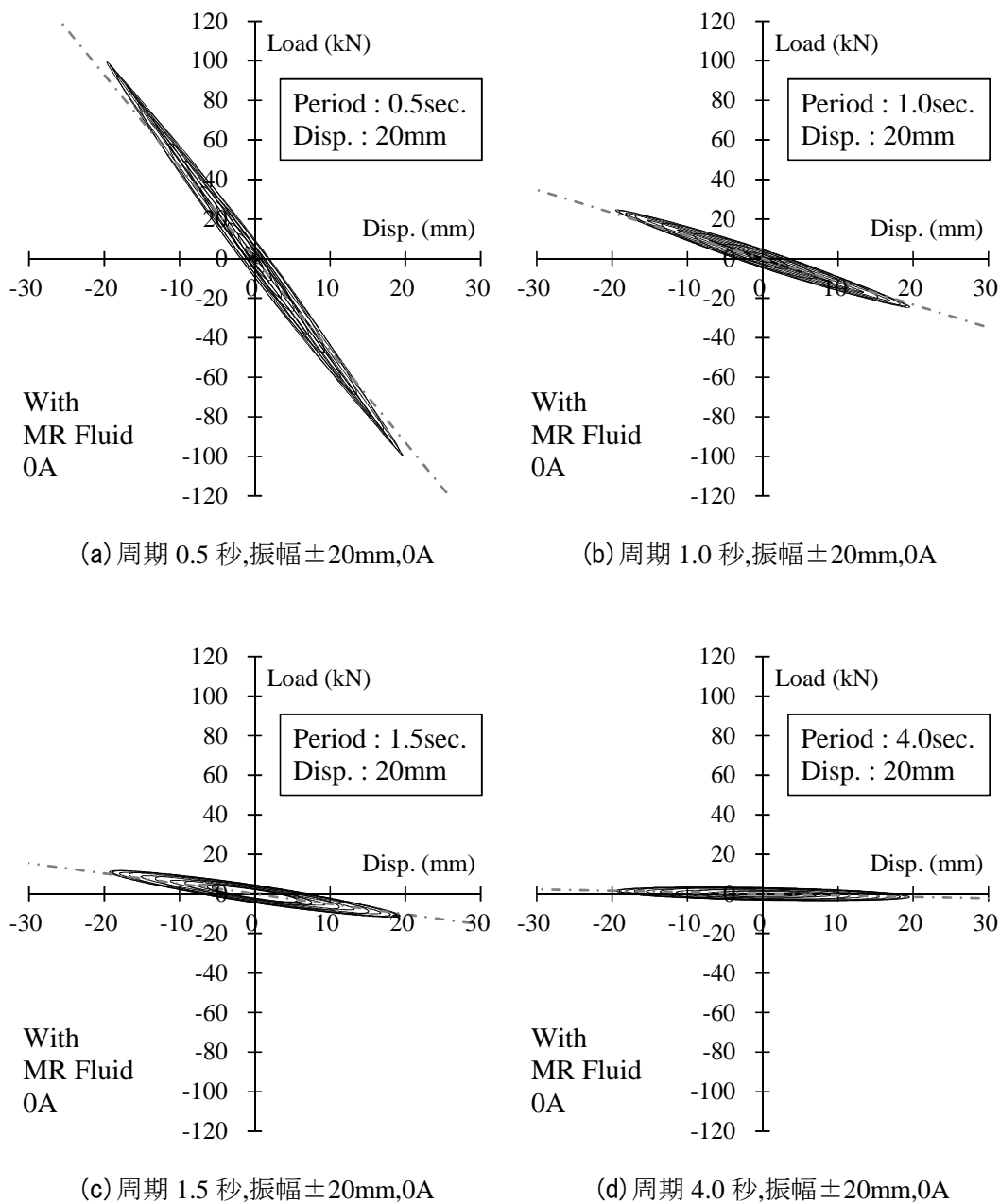


図 2.10 正弦波加振試験における荷重変位関係 (MR 流体封入後, 無印加時)

第一章

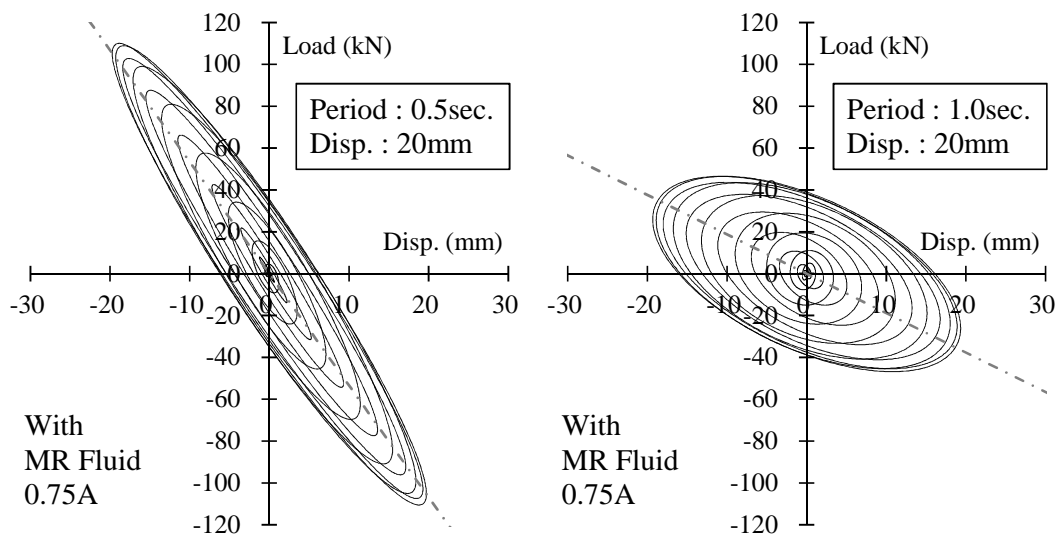
第二章

第三章

第四章

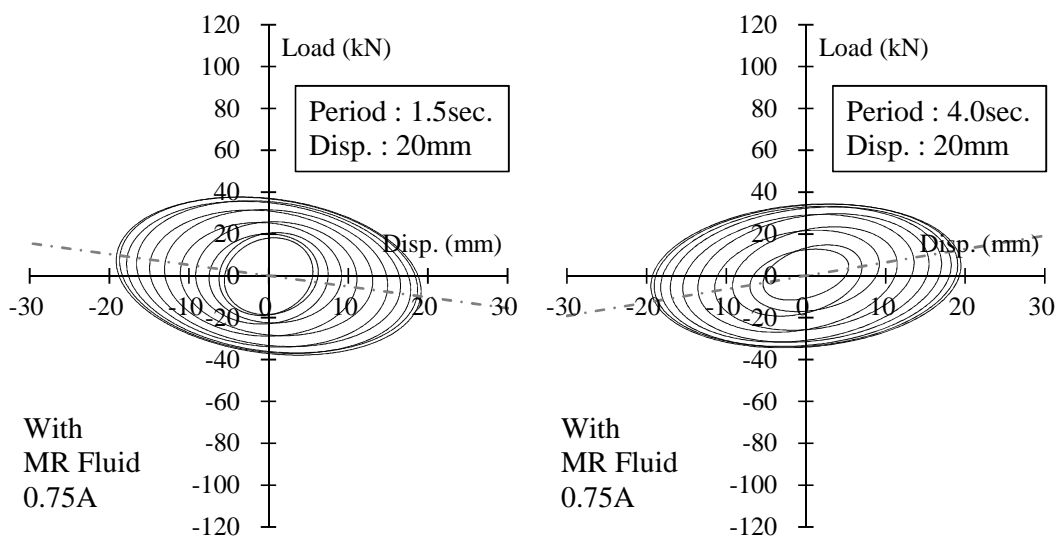
第五章

Appendix



(a) 周期 0.5 秒, 振幅 ±20mm, 0.75A

(b) 周期 1.0 秒, 振幅 ±20mm, 0.75A



(c) 周期 1.5 秒, 振幅 ±20mm, 0.75A

(d) 周期 4.0 秒, 振幅 ±20mm, 0.75A

図 2.11 正弦波加振試験における荷重変位関係 (MR 流体封入後, 0.75A 印加時)

### 2.2.5 耐久性能試験

耐久性能試験は、前項の正弦波加振試験と同様に、アクチュエータの変位入力により正弦波加振を行った。耐久性能試験における加振は周期 4 秒、振幅  $\pm 20\text{mm}$  の正弦波加振とし、加振時間は連続 30 時間とした。なお、本試験による MR 回転慣性ダンパーの総摺動距離は約 2160m であり、電流は無印加とした。

加振開始前、加振開始から 8 時間経過後、22 時間経過後、30 時間経過後それぞれにおいて、加振中に荷重と変位を計測した。それぞれの場合の荷重変位関係を比較して図 2.12 に示す。図中には回転慣性質量による負のばね特性を赤色の鎖線で併せて示しており、概ね良い対応をしていることが確認できる。耐久性能試験の前後では荷重変位関係において、概略の形状にあまり大きな変化は見られないが、8 時間経過後と耐久性能試験前を比較すると、僅かではあるが履歴面積が小さくなっていることが確認できる。この要因のひとつとしては、MR 回転慣性ダンパーにより発生する減衰力から変換される熱によって、MR 流体自身が熱せられ、MR 流体の実際の粘度が低下したことが考えられる。

MR 回転慣性ダンパー表面部には、熱電対を設置し、耐久性試験中における MR 回転慣性ダンパー表面部の表面温度を計測した。加振経過時間に対する MR 回転慣性ダンパー表面部の温度変化を図 2.13 に示す。図より、耐久性試験前の  $12.1^{\circ}\text{C}$  から加振開始後 500 分 (8 時間 20 分) 程度までは表面温度は徐々に上昇する傾向にある。500 分 (8 時間 20 分) 経過後以降については、 $22^{\circ}\text{C}$  前後のほぼ一定温度を推移しており、MR 回転慣性ダンパーの発熱と放熱とが均衡して一定温度に達したと推測される。本研究に用いている MR 流体は温度依存性を有しており<sup>48)</sup>、温度変化に伴い基本粘度が変化する性質がある。本試験に用いた MR 流体の温度依存性を図 2.14 に示す。式(2.3)より、MR 流体に生じるせん断応力  $\tau$  と基本粘度  $\mu$  は一対一に対応するので、図 2.14 より求まる MR 流体の温度変化によるせん断応力  $\tau$  から、 $22^{\circ}\text{C}$  の場合の基本粘度は  $12^{\circ}\text{C}$  の場合に比べ、およそ 20% 程度低下するものと考えられる。

第一章

第二章

第三章

第四章

第五章

Appendix

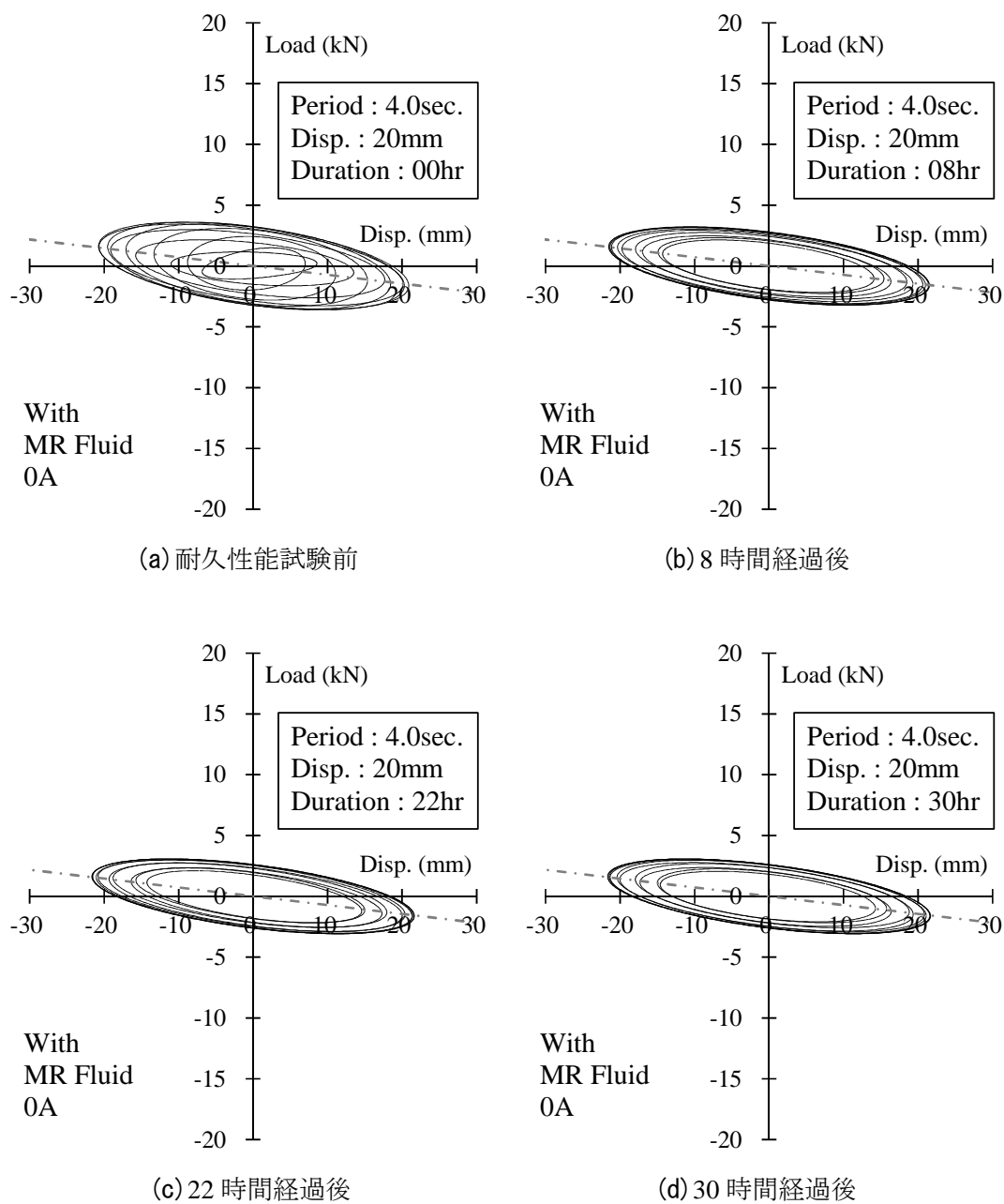


図 2.12 耐久性能試験における荷重変位関係 (MR 流体封入後, 無印加時)

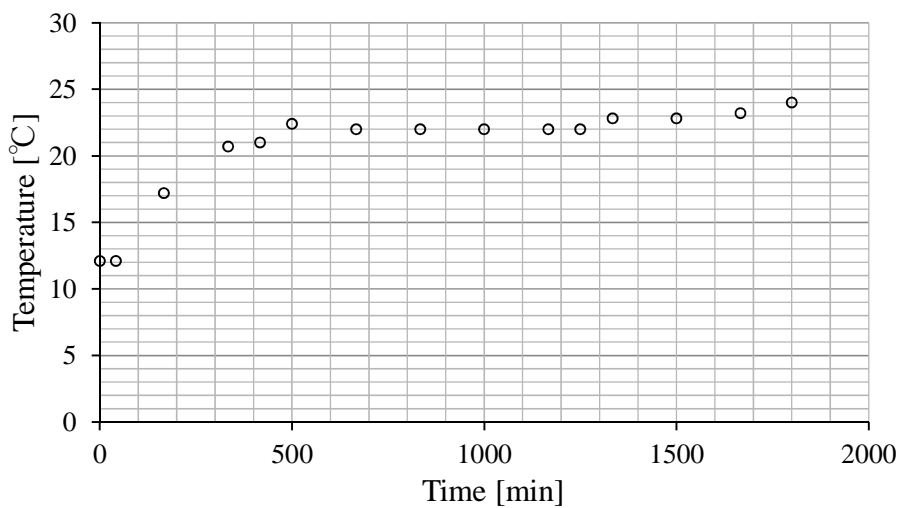


図 2.13 耐久性能試験時の MR 回転慣性ダンパー表面部の温度変化

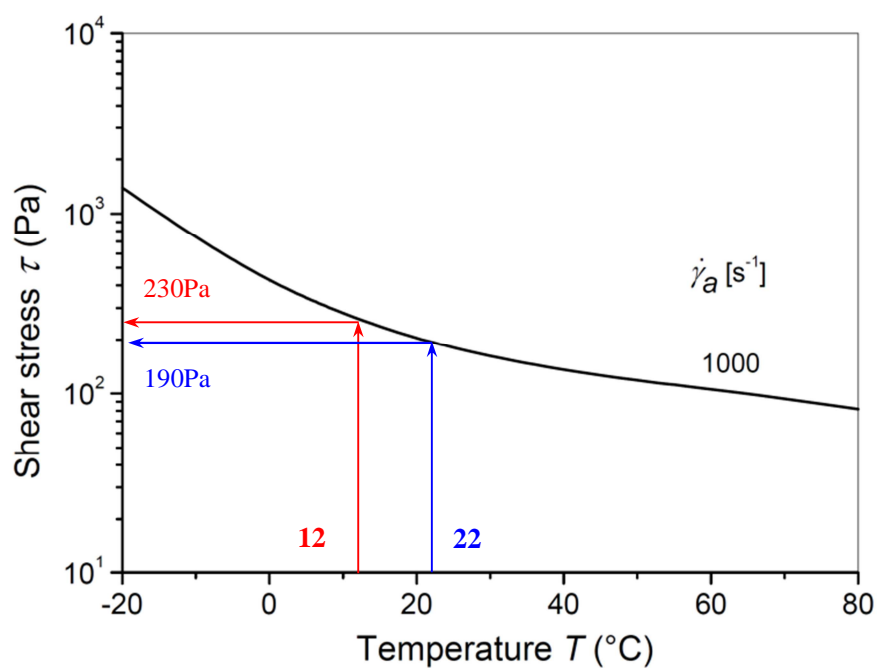


図 2.14 本研究に用いた MR 流体の温度依存性<sup>48)</sup>

### 2.3 振動解析モデルによるシミュレーション

理論式から展開される慣性力-加速度関係, 減衰力-速度関係を基に, MR 回転慣性ダンパーの振動解析モデルを構築し, 正弦波および地震動を用いたランダム波加振試験の結果と比較することで, その解析手法の妥当性を確認する. MR 回転慣性ダンパーの振動解析モデルを図 2.15 に示す. 本解析モデルは既往の文献<sup>13)</sup>を基に, 回転慣性による慣性要素  $m_d$  と粘性体のせん断抵抗による粘性減衰要素  $c_d$  を並列機構としてモデル化し, それらとばね要素  $k_d$  を直列に接続している. また, MR 流体による可変減衰要素は, MR ダンパーの振動解析モデルとして採用されているビンガムプラスチックモデル<sup>50), 51)</sup>により, クーロン摩擦要素  $f_{MR}$  としてモデル化を行う. 図 2.15 において, 節点 OP, PQ 間の変位量をそれぞれ  $x_1, x_2$  とおくと, 次式が成り立つ.

$$x = x_1 + x_2 \quad (2.8)$$

$$k_d x_1 = m_d \ddot{x}_2 + c_d \dot{x}_2 + f_{MR} \cdot \text{sign}(\dot{x}_2) \quad (2.9)$$

式(2.8)および式(2.9)より, 任意の変位入力に対し, MR 回転慣性ダンパーの出力を得ることができる. 各要素に与える復元力特性のモデルを図 2.16 に示す. 慣性力, 粘性減衰力, クーロン摩擦力については, 図 2.4 および表 2.3 に示す理論値を用いることとし, ばね剛性については図 2.7 の試験結果の平均値として,  $k_d = 61.8 \text{ kN/mm}$  を採用する.

代表的な荷重変位関係として, 加振周期 1.0 秒, 加振振幅  $\pm 100 \text{ mm}$  における試験結果と解析結果, 式(2.6)に示す理論式による解の比較を, 図 2.17~2.19 に示す. 前述の正弦波加振試験の結果と同様に, 図中には式(2.7)より求まる傾きを灰色の一点鎖線で併せて示し, 図 2.17 は MR 流体の封入前の場合, 図 2.18 は MR 流体封入後で電流無印加時の場合, 図 2.19 は MR 流体封入後にさらに 0.75A の一定電流を印加した場合である. 図 2.17 より, 慣性力だけの結果では試験結果, 解析結果, 理論解は概ね一致していることが確認できる. また, 図 2.19 を見ると, 理論式による解は変位の絶対値が最大を記録する付近で, 荷重変位関係における曲線がやや崩れている. これは速度の正負切り替わりにより, MR 流体による可変減衰力に不連続な点を生じているためと考えられる (式(2.6)右辺第 2 項). これに対し, 本解析においては  $\Delta t = 0.001$  秒として十分に小さい時間刻みを与えた数値積分により, その部分を補間しているため, 変位最大値付近においても試験結果と同様に滑らかな曲線を再現することができ, 十分な精度を有する解析モデルと言える. しかしながら, 図 2.18 を見ると, 試験結果による履歴面積は解析結果および理論解に比べ, やや小さくなっている. この傾向は図 2.19 にも同様に見て取れ, 実際の MR 流体のせん断抵抗による粘性減衰は理論値に比べて小さいと考えられる. この要因のひとつとしては, MR 回転慣性ダンパーにより発生する減衰力から変換される熱によって, MR 流体自身が熱せられ, MR 流体の実際の粘度が表 2.2 に示した基本粘度  $\mu$  よりも低下したことが考えられる.

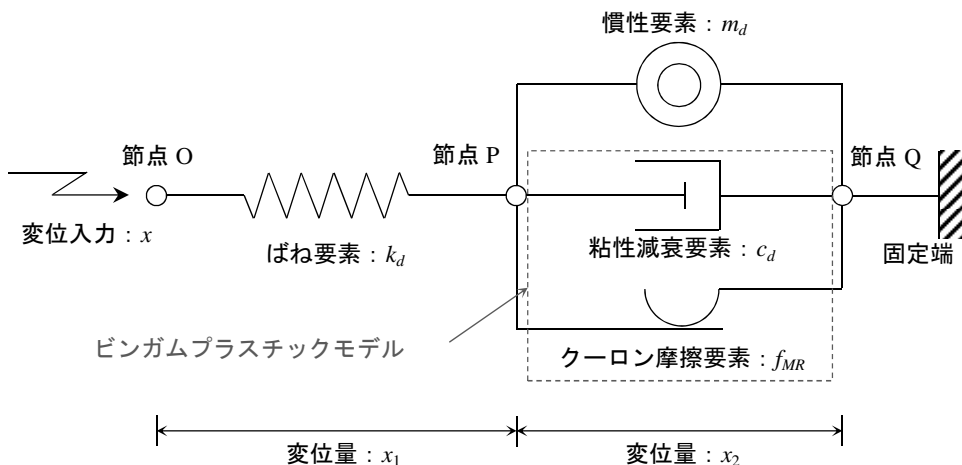


図 2.15 MR 回転慣性ダンパーの振動解析モデル

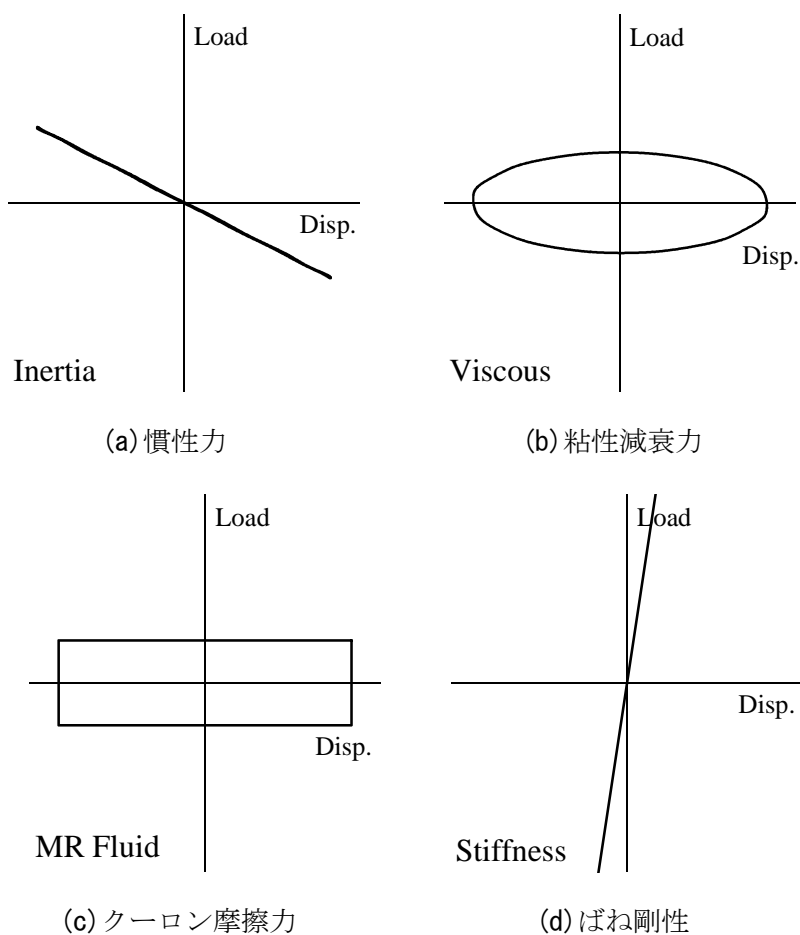


図 2.16 各要素の復元力特性のモデル



第一章

第二章

第三章

第四章

第五章

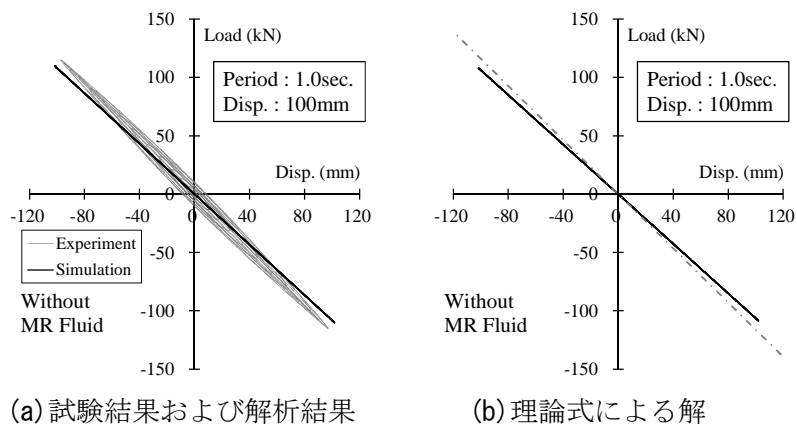


図 2.17 試験,解析,理論解の結果比較 (MR 流体封入前)

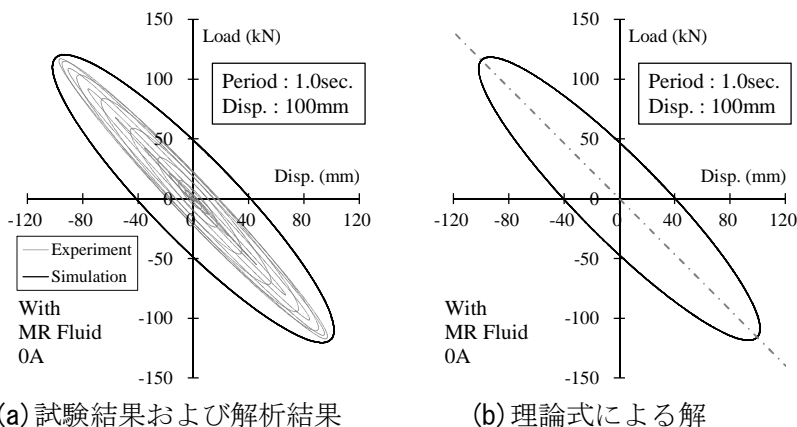


図 2.18 試験,解析,理論解の結果比較 (MR 流体封入後無印加時)

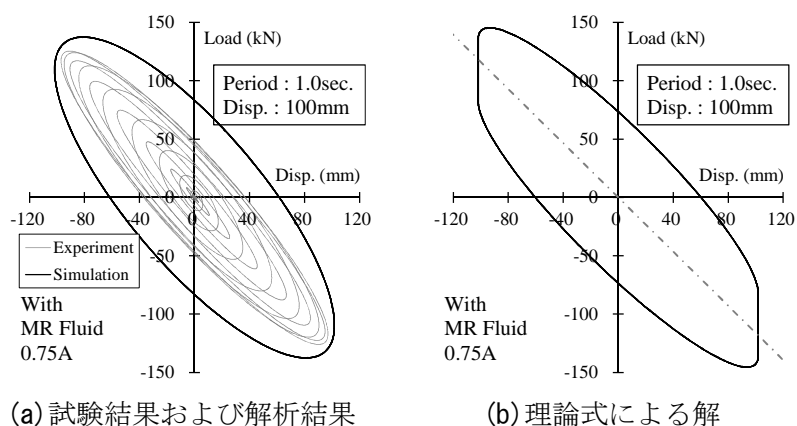


図 2.19 試験,解析,理論解の結果比較 (MR 流体封入後 0.75A 印加時)

A  
p  
p  
e  
n  
d  
i  
x

前述の耐久性能試験の結果では、MR 流体の温度が約 10℃上がると、基本粘度は 20%程度低下することが確認された。耐久性能試験時の熱電対は MR 回転慣性ダンパーの表面に設置されていたため、実際の MR 流体の温度上昇はそれより大きいものと考えられる。そこで、MR 流体の基本粘度 $\mu$ が温度依存性により 50%になった場合を仮定して、再度解析を行った結果を図2.20に示す。図より、試験結果と解析結果は概ね良い対応を示している。MR 流体の基本粘度の温度依存性の定量化については今後の課題であるが、MR 回転慣性ダンパーの理論解および解析手法については、正弦波加振試験の結果と概ね良い対応を示しており、その妥当性が確認できる。

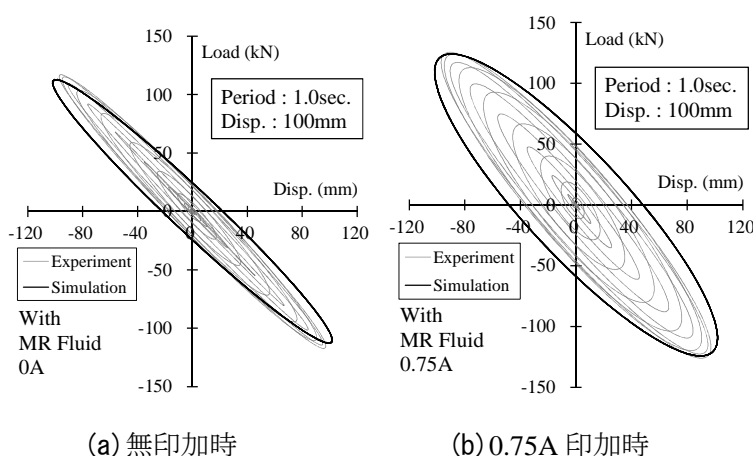


図 2.20 MR 流体の基本粘度 $\mu$ を 50%とした場合における試験結果と解析結果の比較

次に、地震動を用いたランダム波入力時における試験結果と解析結果の比較を行う。地震動を用いたランダム波の入力は、実際の観測記録地震波の加速度記録を 2 回積分した変位波形を、アクチュエータから入力している。入力地震波は試験機の限界から、JMA Kobe 1995 NS 波の 0.46 倍に基準化した地震波を 160 秒間、Hachinohe 1968 NS 波の原波を 80 秒間、それぞれ入力した。図 2.21 に、試験結果と解析結果の時刻歴波形を併せて示す。MR 流体の粘度は表 2.2 に示した基本粘度 ( $\mu=0.74\text{Pa}\cdot\text{S}$ ) の場合を青線、基本粘度を 50% ( $\mu=0.37\text{Pa}\cdot\text{S}$ ) とした場合を赤線とし、いずれも電流無印加時における結果を示している。図 2.21 の縦軸は MR 回転慣性ダンパーの出力荷重を示しており、横軸の継続時間において、JMA Kobe 1995 NS 波入力では 35~40 秒区間、Hachinohe 1968 NS 波入力では 20~30 秒区間の比較的输出が大きくなる区間を示している。なお、高振動数領域における正のばね特性による影響を取り除くため、得られた波形には臨界振動数 7.5Hz 以下の低振動数領域に対して、ローパスフィルタ処理を施している。図より、解析結果の方がやや高振動数波形があるものの、試験結果と解析結果の振動数および最大値は概ね一致しており、地震動を用いたランダム波試験における MR 回転慣性ダンパーの変位追従性および振動解析モデルの妥当性が確認できる。また、MR 流体の基本粘度を 50% ( $\mu=0.37\text{Pa}\cdot\text{S}$ ) とした場合、MR 回転慣性ダン

第一章

パーの最大出力荷重は基本粘度 ( $\mu=0.74\text{Pa}\cdot\text{S}$ ) の場合と比較して大きくなるが、その比は JMA Kobe 1995 NS 波入力の場合で 9%、Hachinohe 1968 NS 波入力の場合で 4%程度であり、地震動を用いたランダム波試験における基本粘度 $\mu$ の影響は小さいと言える。よって、地震動を用いたランダム波に対する検討では、MR 流体の基本粘度 $\mu$ は一定として扱っても応答制御効果に大きな影響はないものと判断する。

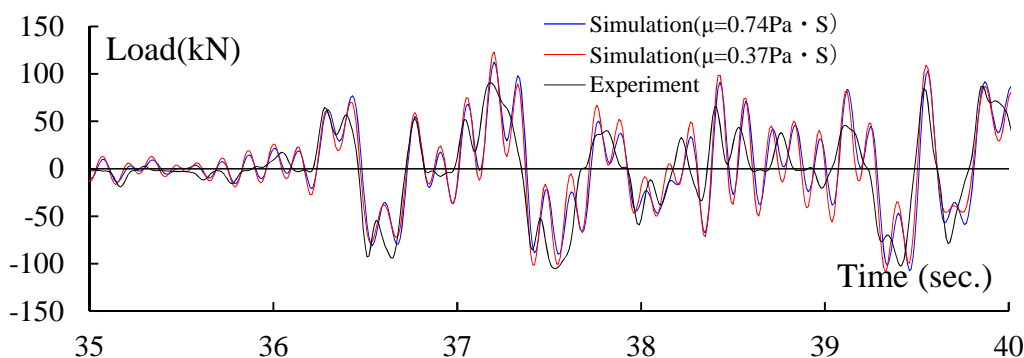
第二章

なお、MR 流体の基本粘度 $\mu$ は前述の式(2.4)の第 2 項において、ボールねじの軸方向速度  $\dot{x}$  に乗ずる係数として表されているが、以降の検討では、基本粘度 $\mu$ を含む  $\dot{x}$  に乗ずる係数全体を粘性減衰係数  $cd$  と定義し、第 3 章においては正弦波加振の結果から  $cd$  の値を相加平均により近似し、第 4 章においては  $cd$  自体を解析パラメータとして扱っているため、本論における考察や結論は基本粘度 $\mu$ の値には依存しない。

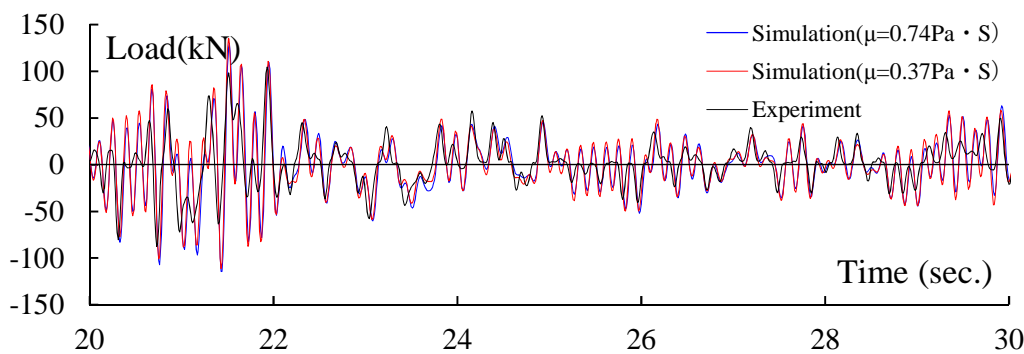
第三章

第四章

第五章



(a) JMA Kobe 1995 NS 波入力時の応答 (35~40 秒区間)



(b) Hachinohe 1968 NS 波入力時の応答 (20~30 秒区間)

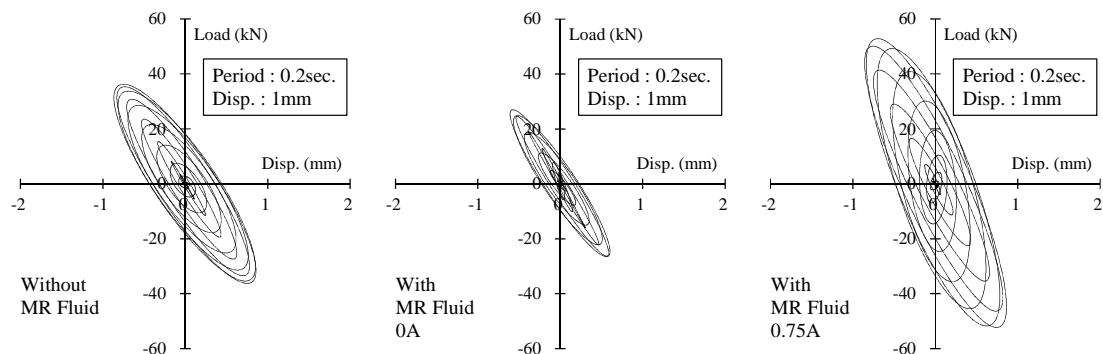
図 2.21 地震動を用いたランダム波入力時における試験結果と解析結果の比較

## 2.4 第2章まとめ

筆者が開発した振動制御装置，MR 回転慣性ダンパーについて，最大出力 100kN の試作機を作製し，アクチュエータの変位入力による加振試験等により，その基本特性について整理し，理論式および解析手法の妥当性の検証を行った．本章により得られた知見は以下の通りである．

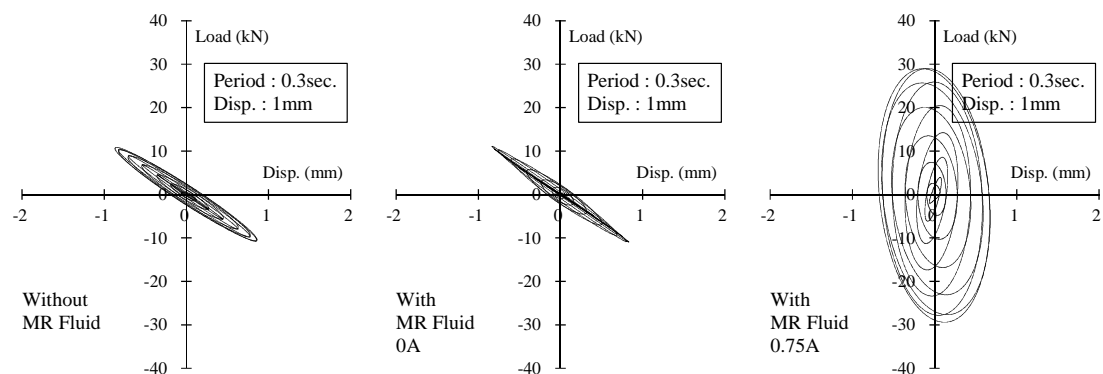
- ① 回転慣性による質量効果と MR 流体による可変減衰効果を狙いとした MR 回転慣性ダンパーについて，理論式の展開によりその基本特性を示した．
- ② 荷重制限（トルクリーフ）機構確認試験により，一定のトルク値を超えると軸が滑り，MR 回転慣性ダンパーの過負荷防止機構が働くことを確認した．
- ③ 剛性確認試験により，高振動数領域における正のばね特性を確認し，試作機において質量効果が発揮できる臨界振動数を 7.5～7.6Hz 程度と推定した．
- ④ 低速試験により，各印加電流値における MR 流体の降伏応力 $\tau_0$ が理論値と概ね一致することを確認した．
- ⑤ 正弦波入力加振試験より，臨界振動数以下の低振動数領域において，慣性質量による負のばね特性を確認した．また，MR 流体のせん断流れに対する抵抗力および磁場作用時の降伏応力によるエネルギー吸収効果を確認し，可変減衰力を用いたセミアクティブ制御装置としての有効性を示した．
- ⑥ 耐久性能試験より，30 時間の連続加振後も特性に大きな変化は見られないが，MR 流体の温度依存性により MR 流体の基本粘度が低下し，正弦波加振における MR 回転慣性ダンパーの履歴面積が減少することが確認された．
- ⑦ MR 回転慣性ダンパーの振動解析モデルによるシミュレーション解析を実施し，正弦波試験結果との比較により，その妥当性を示した．MR 流体の基本粘度 $\mu$ の温度依存性についての定量化は今後の課題であるが，理論解および解析結果は正弦波加振試験の結果と概ね良い対応を示した．
- ⑧ 地震動を用いたランダム波入力により，MR 回転慣性ダンパーの変位追従性および地震動を用いたランダム波に対する振動解析モデルの妥当性を示した．また，MR 回転慣性ダンパーの最大出力荷重は，MR 流体の基本粘度を 50% ( $\mu=0.37\text{Pa}\cdot\text{S}$ ) とした場合と基本粘度 ( $\mu=0.74\text{Pa}\cdot\text{S}$ ) の場合とでは MR 流体の基本粘度を 50% ( $\mu=0.37\text{Pa}\cdot\text{S}$ ) とした場合の方が大きくなるが，その比は JMA Kobe 1995 NS 波入力の場合で 9%，Hachinohe 1968 NS 波入力の場合で 4%程度であり，地震動を用いたランダム波試験における基本粘度 $\mu$ の影響は小さい．

2.5 付録図表



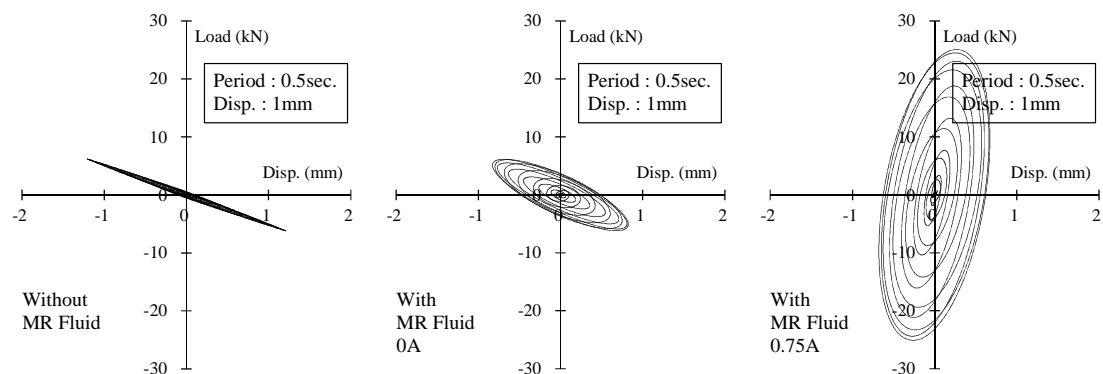
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.22 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 0.2 秒，振幅 ±1mm)



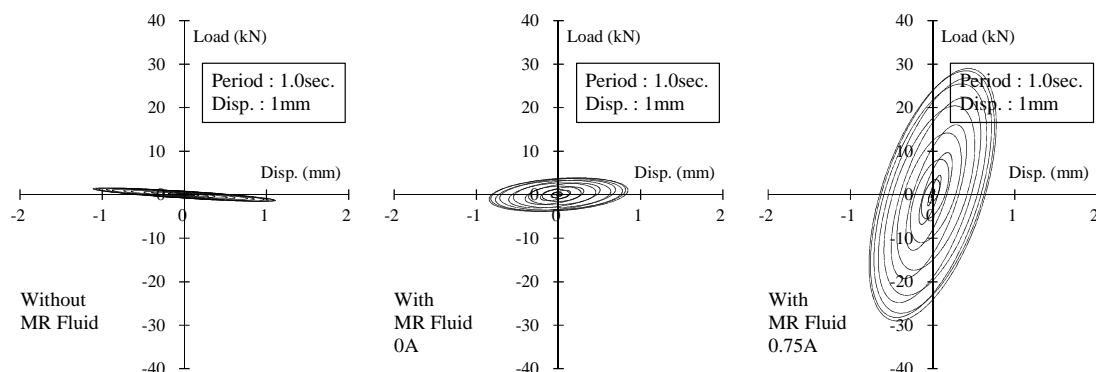
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.23 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 0.3 秒，振幅 ±1mm)



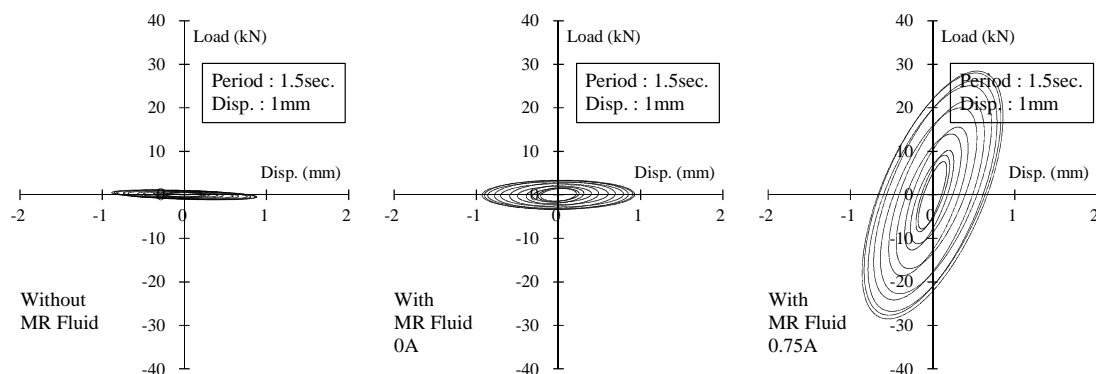
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.24 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 0.5 秒，振幅 ±1mm)



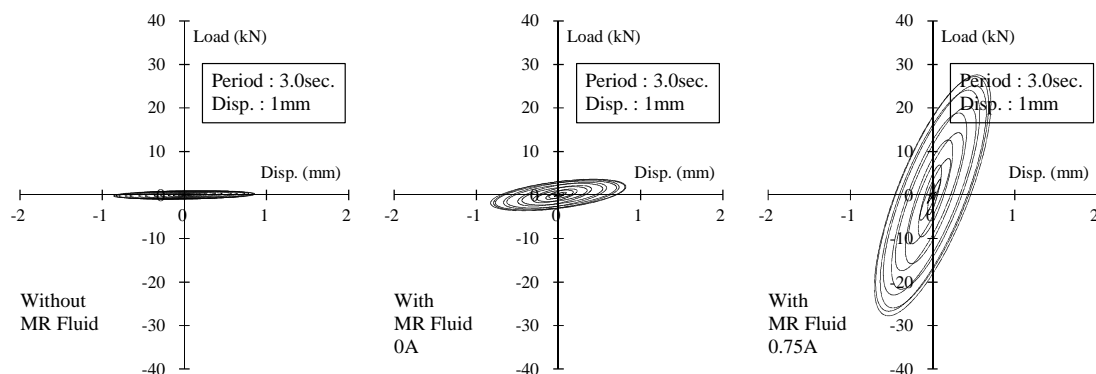
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.25 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.0 秒，振幅 ±1mm)



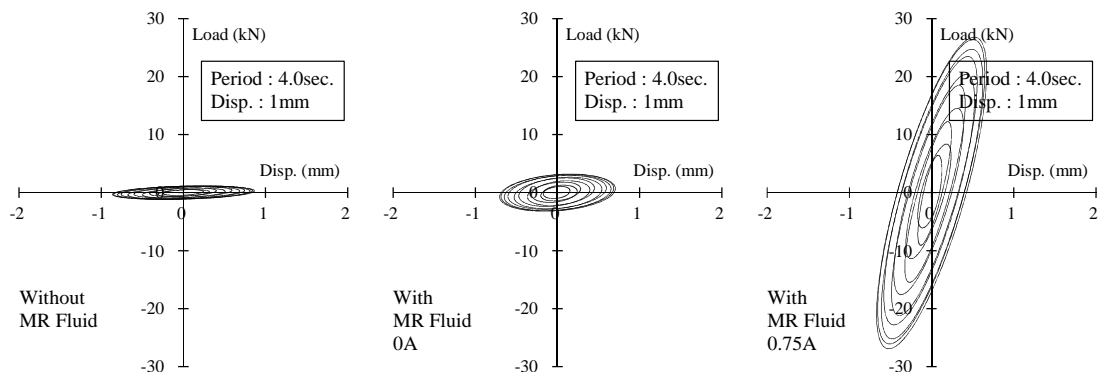
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.26 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.5 秒，振幅 ±1mm)



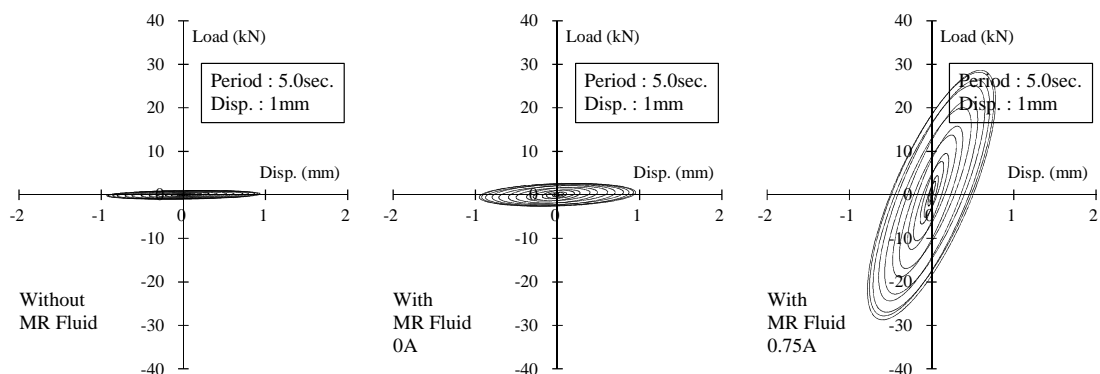
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.27 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 3.0 秒，振幅 ±1mm)



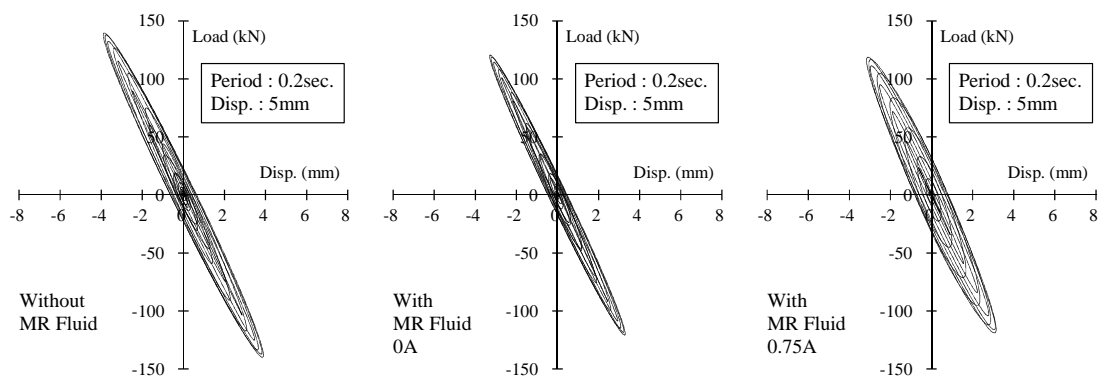
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.28 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 4.0 秒，振幅 ±1mm)



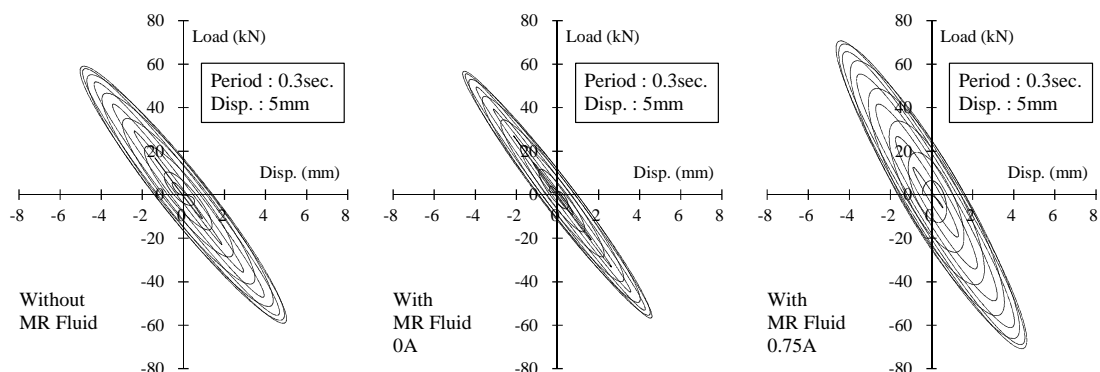
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.29 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 5.0 秒，振幅 ±1mm)



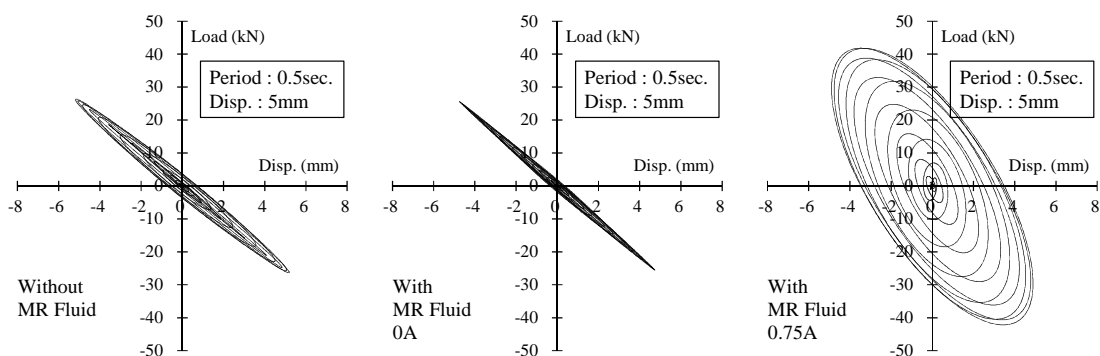
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.30 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 0.2 秒，振幅 ±5mm)



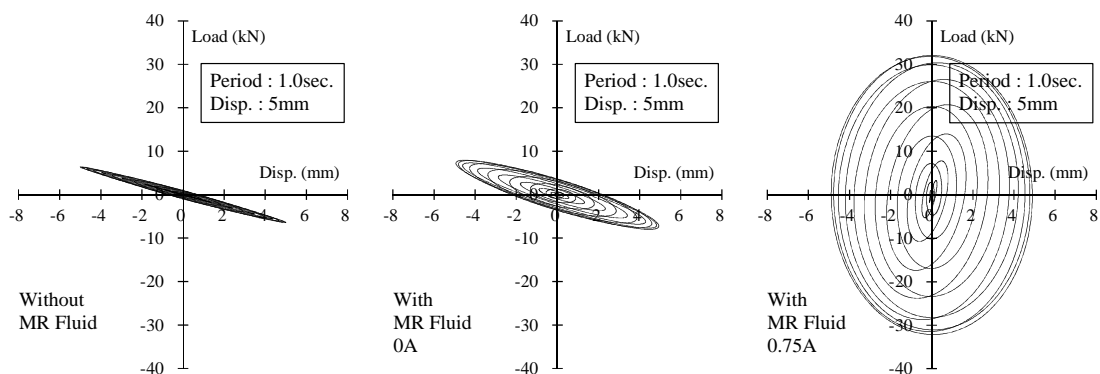
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.31 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 0.3 秒，振幅 ±5mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

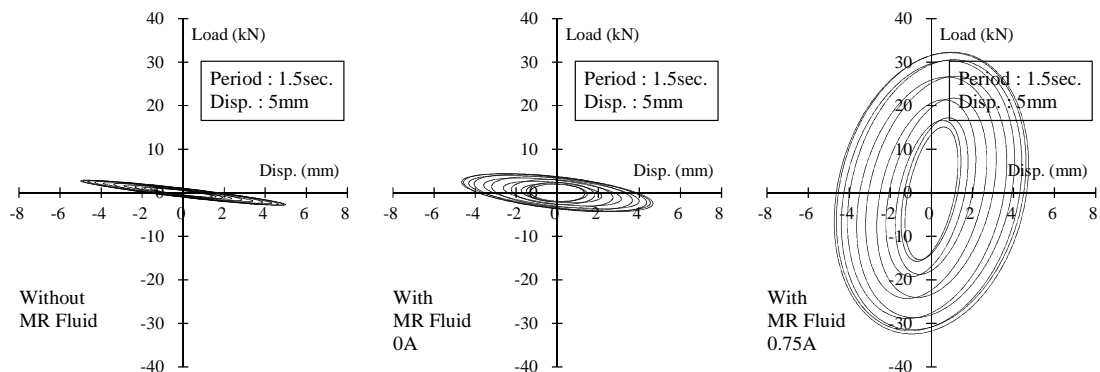
図 2.32 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 0.5 秒，振幅 ±5mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

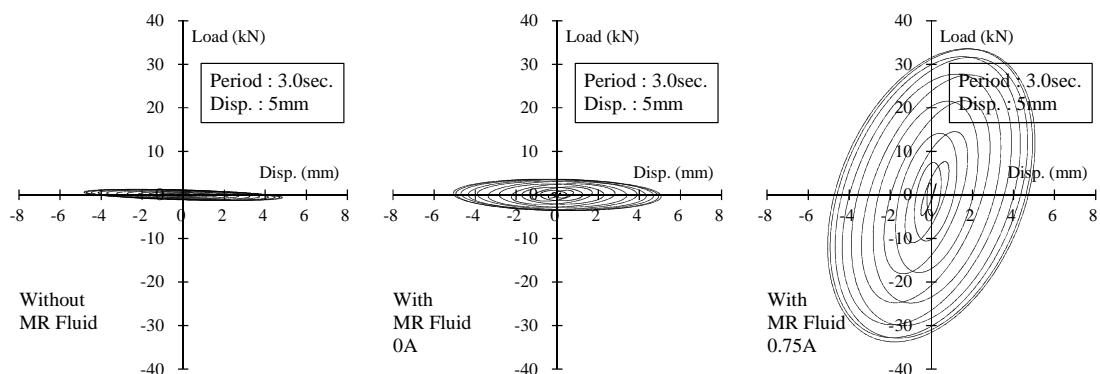
図 2.33 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.0 秒，振幅 ±5mm)





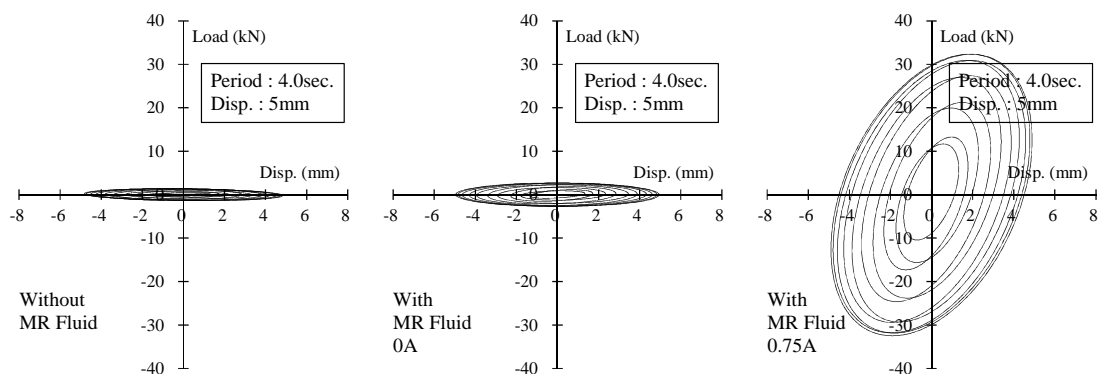
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.34 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.5 秒，振幅 ±5mm)



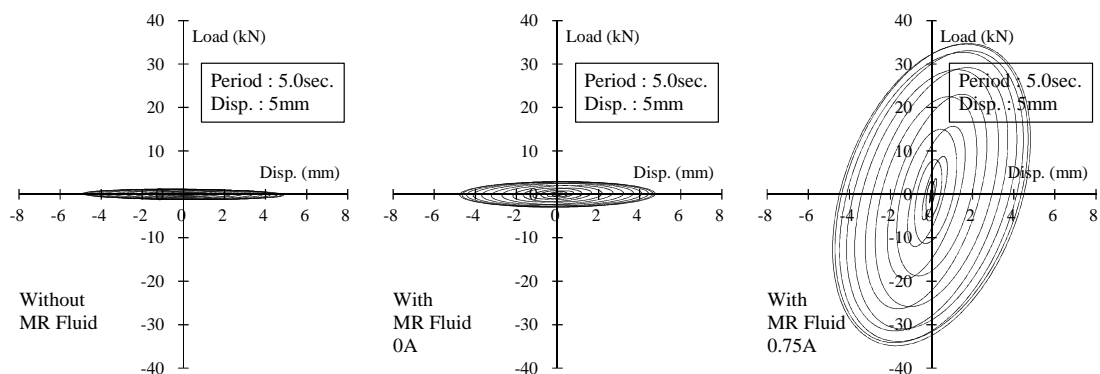
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.35 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 3.0 秒，振幅 ±5mm)



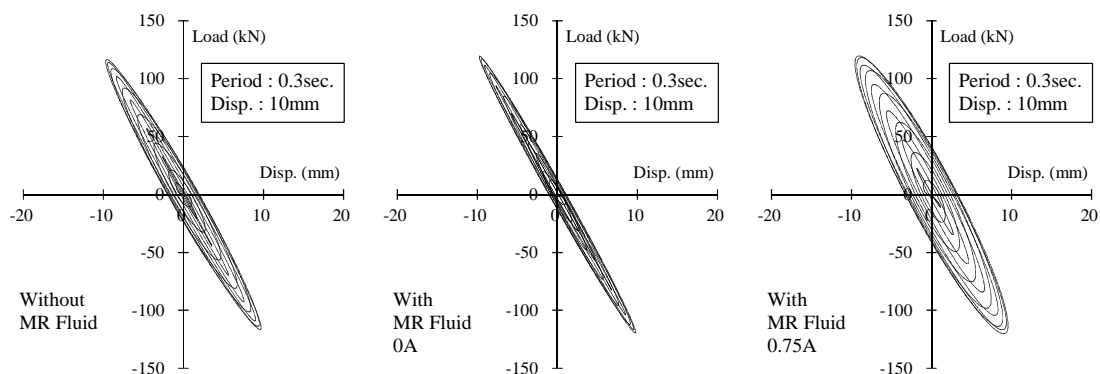
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.36 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 4.0 秒，振幅 ±5mm)



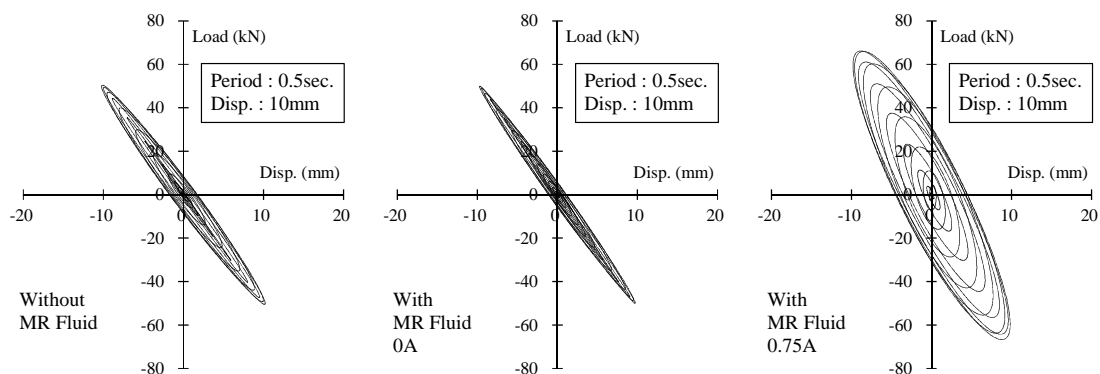
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.37 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 5.0 秒，振幅 ±5mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.38 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 0.3 秒，振幅 ±10mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.39 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 0.5 秒，振幅 ±10mm)

第一章

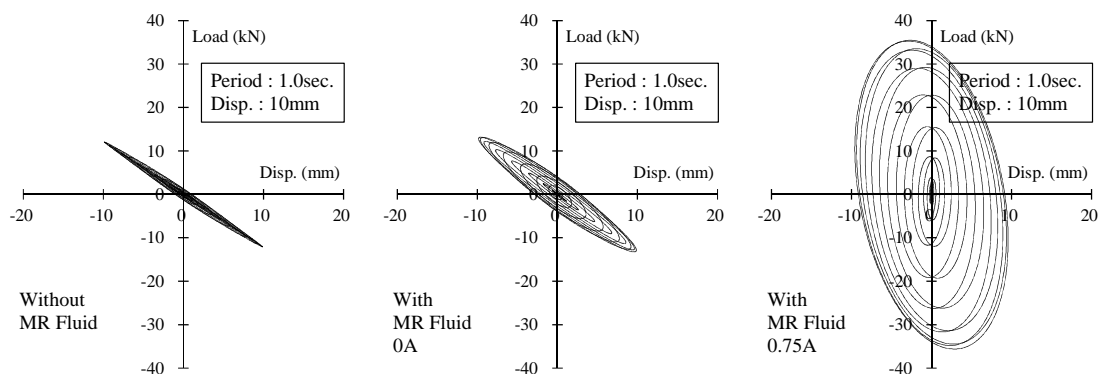
第二章

第三章

第四章

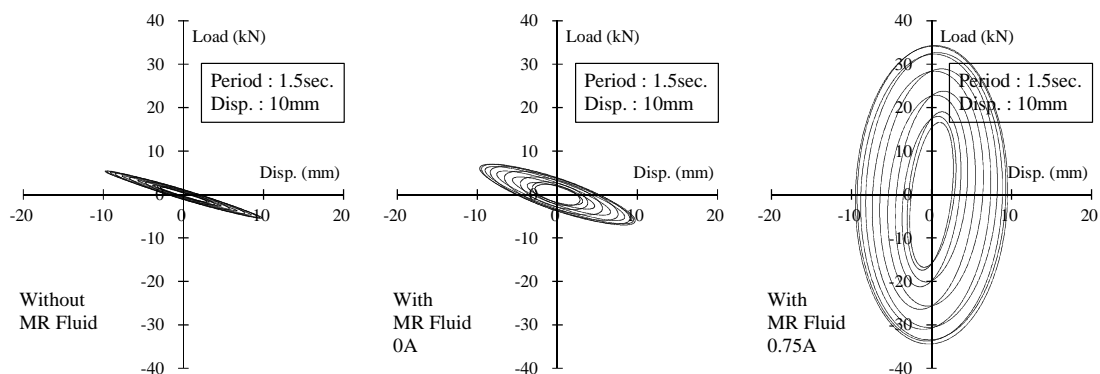
第五章

Appendix



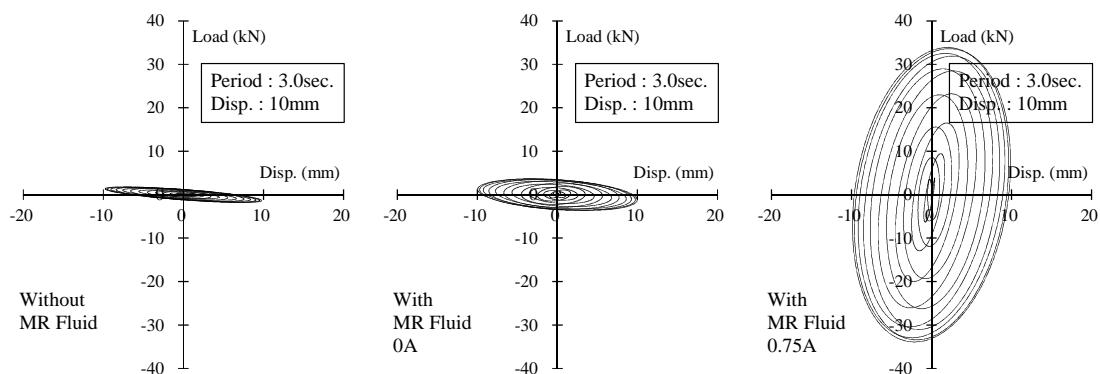
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.40 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.0 秒，振幅 ±10mm)



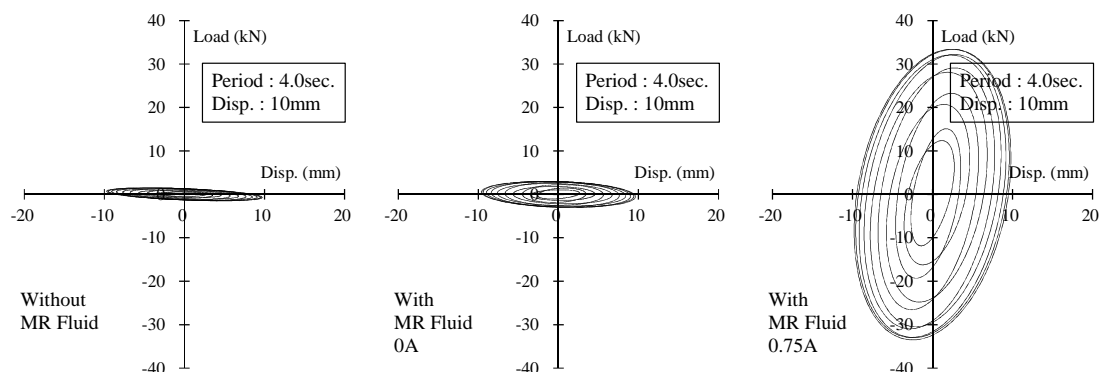
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.41 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.5 秒，振幅 ±10mm)



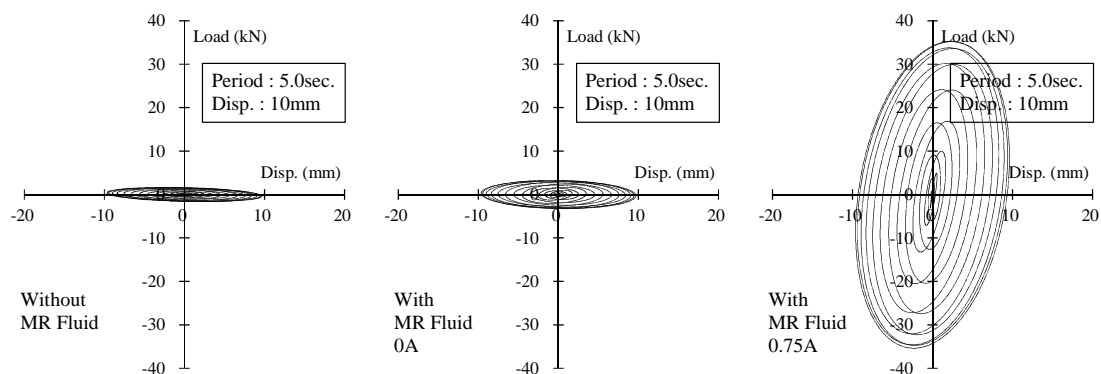
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.42 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 3.0 秒，振幅 ±10mm)



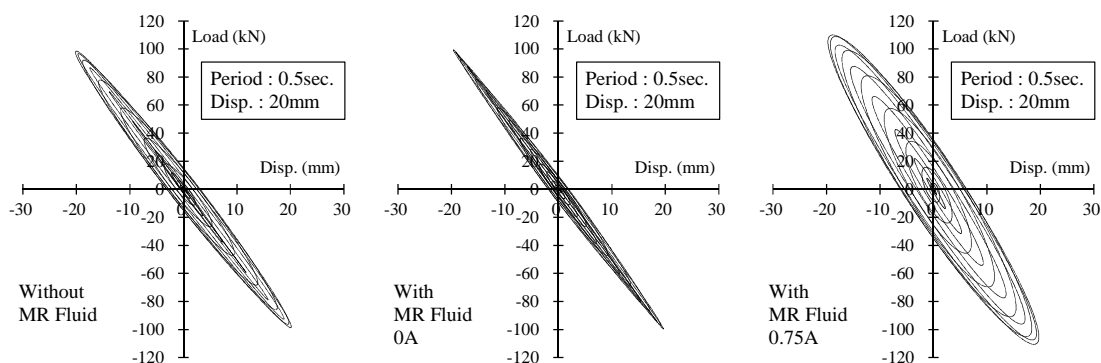
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.43 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 4.0 秒，振幅 ±10mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.44 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 5.0 秒，振幅 ±10mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.45 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 0.5 秒，振幅 ±20mm)

第一章

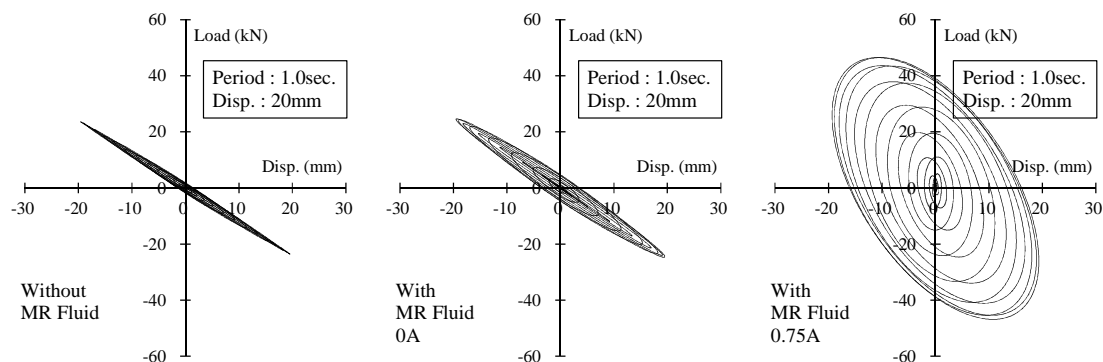
第二章

第三章

第四章

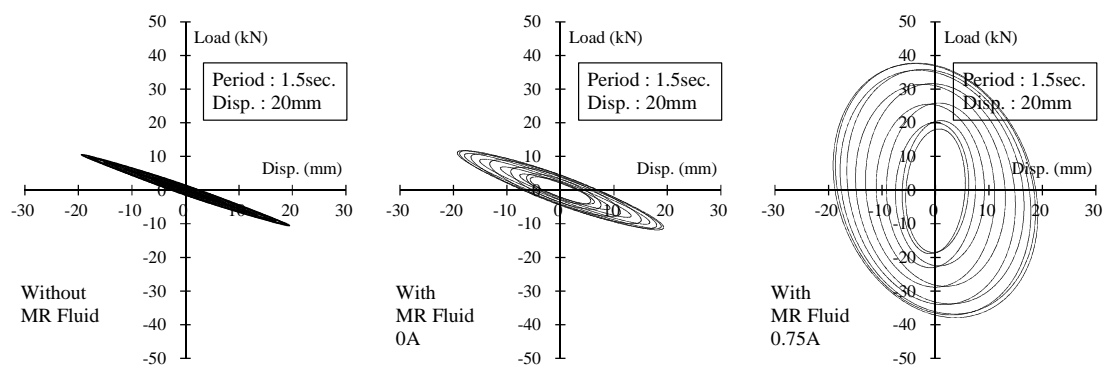
第五章

Appendix



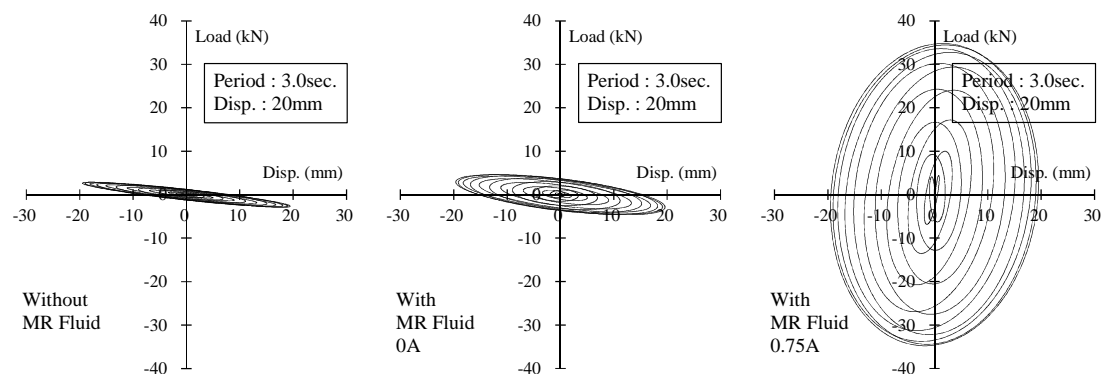
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.46 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.0 秒，振幅 ±20mm)



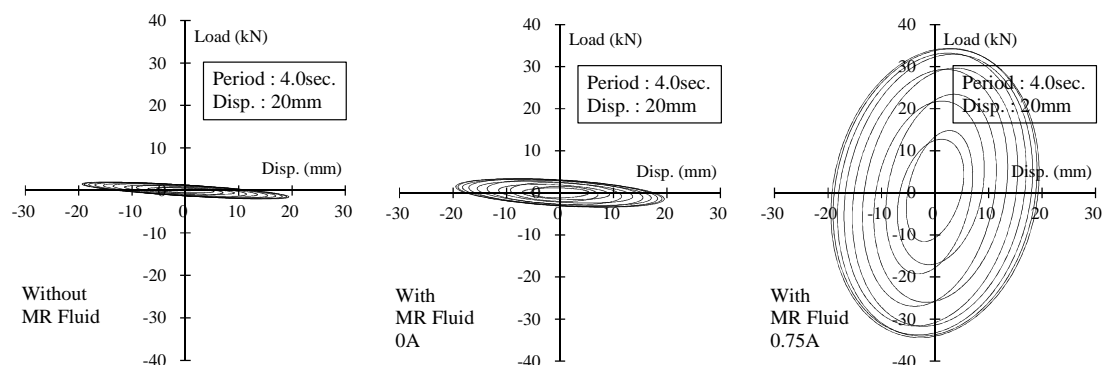
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.47 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.5 秒，振幅 ±20mm)



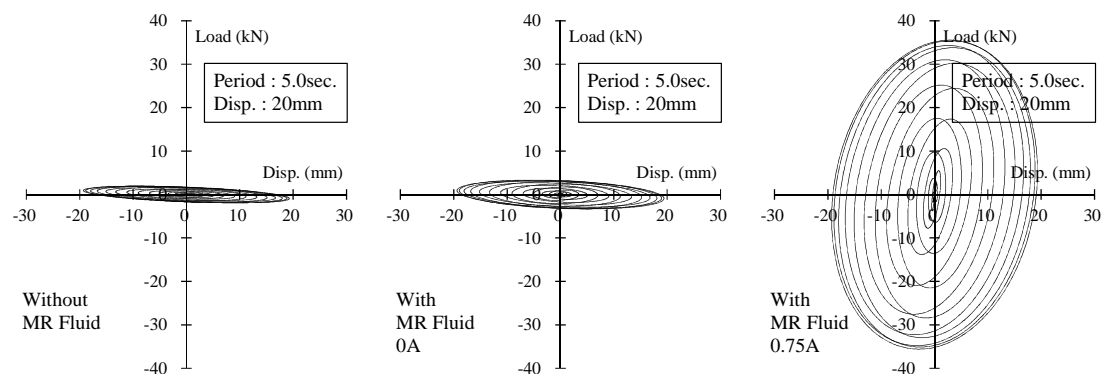
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.48 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 3.0 秒，振幅 ±20mm)



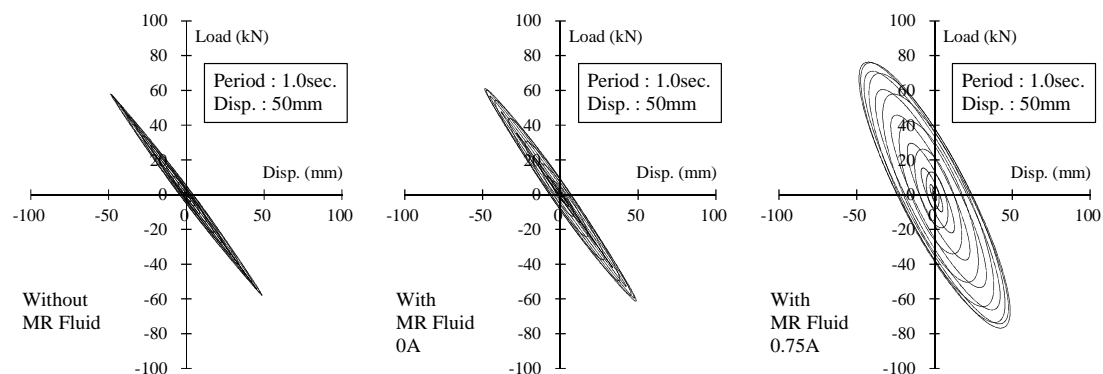
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.49 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 4.0 秒，振幅 ±20mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.50 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 5.0 秒，振幅 ±20mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.51 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.0 秒，振幅 ±50mm)

第一章

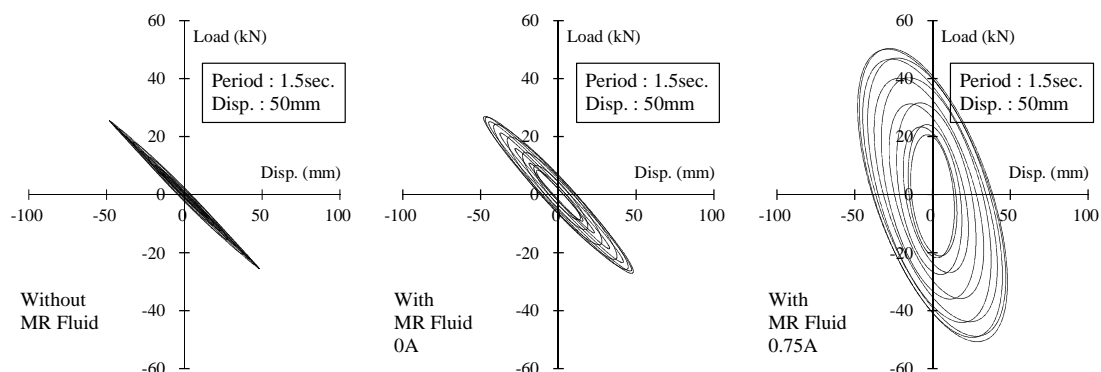
第二章

第三章

第四章

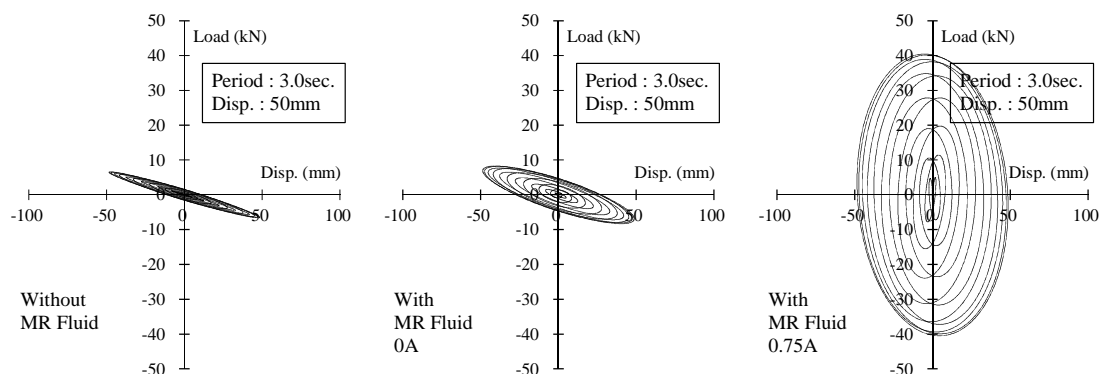
第五章

Appendix



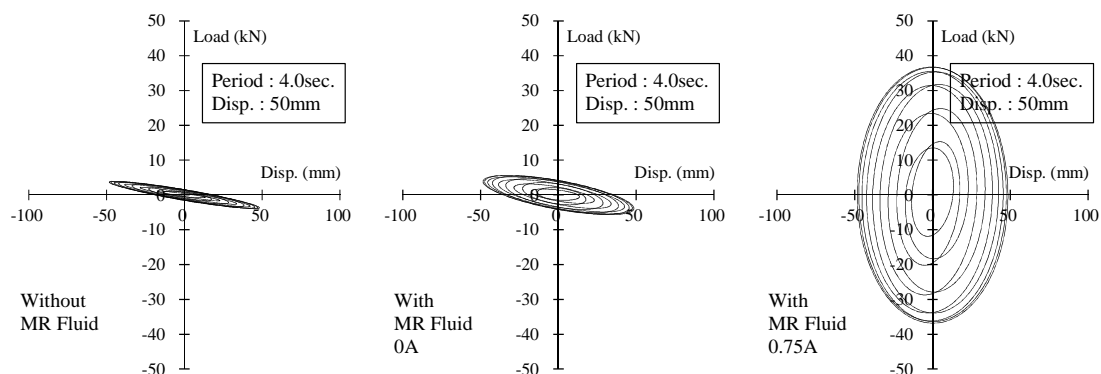
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.52 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.5 秒，振幅 ±50mm)



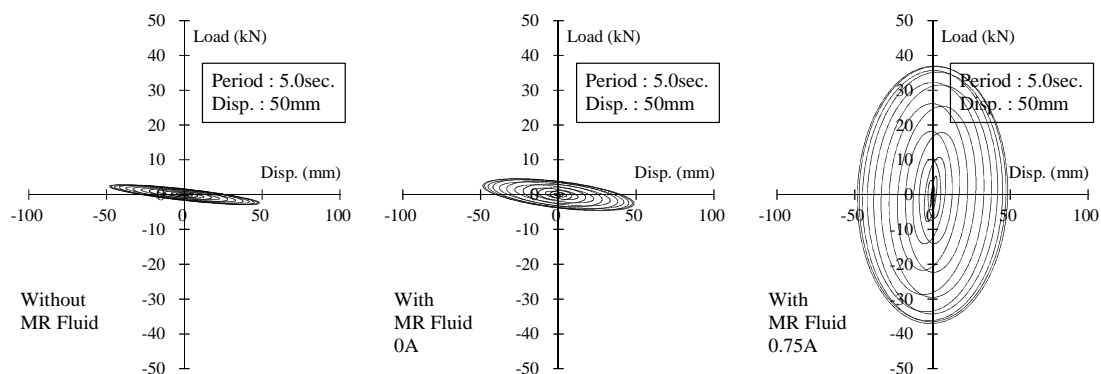
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.53 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 3.0 秒，振幅 ±50mm)



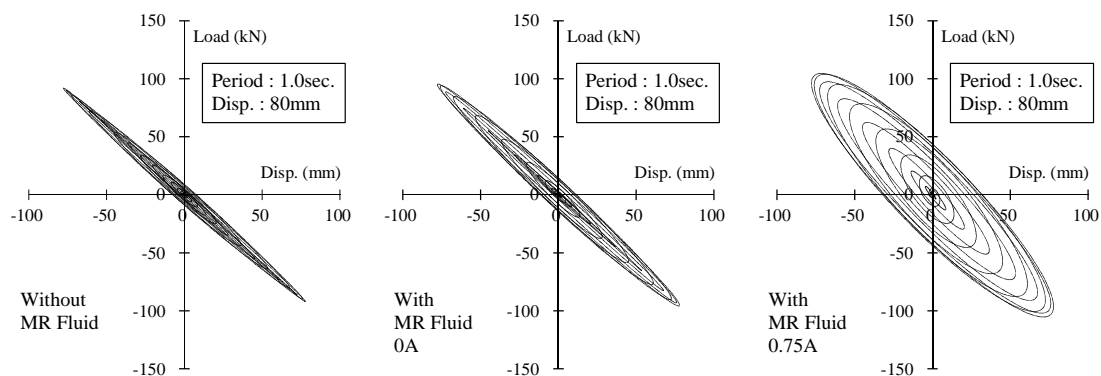
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.54 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 4.0 秒，振幅 ±50mm)



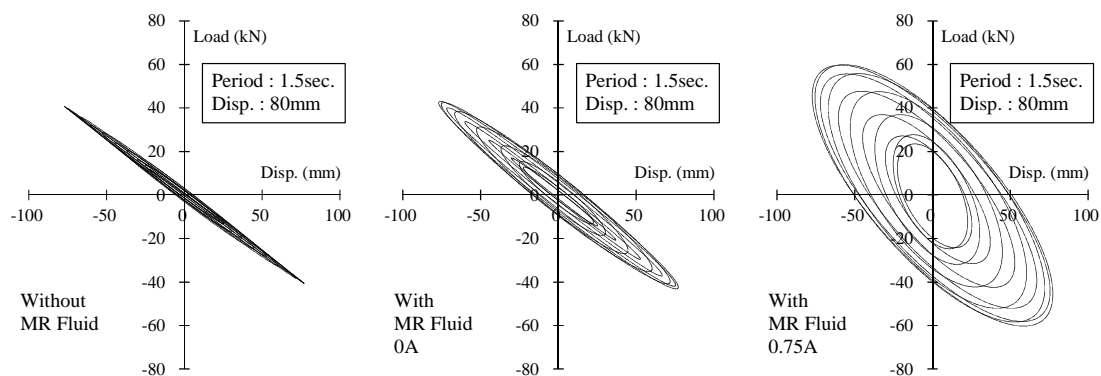
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.55 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 5.0 秒，振幅 ±50mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.56 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.0 秒，振幅 ±80mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.57 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.5 秒，振幅 ±80mm)



第一章

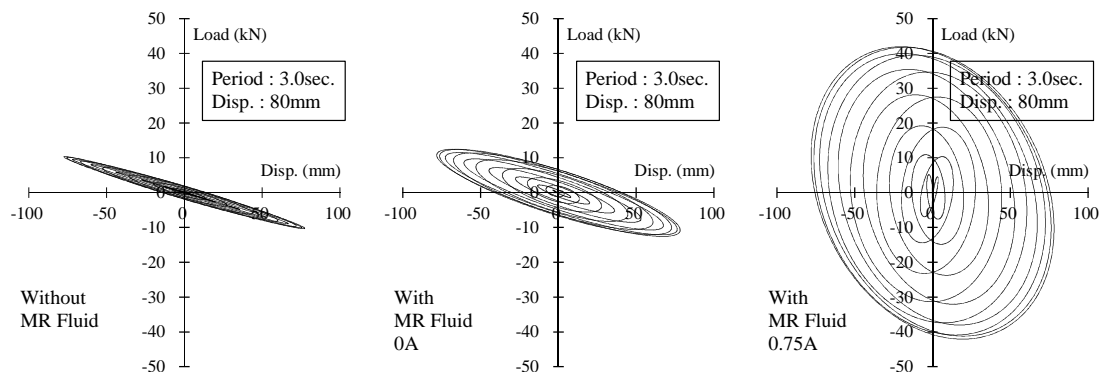
第二章

第三章

第四章

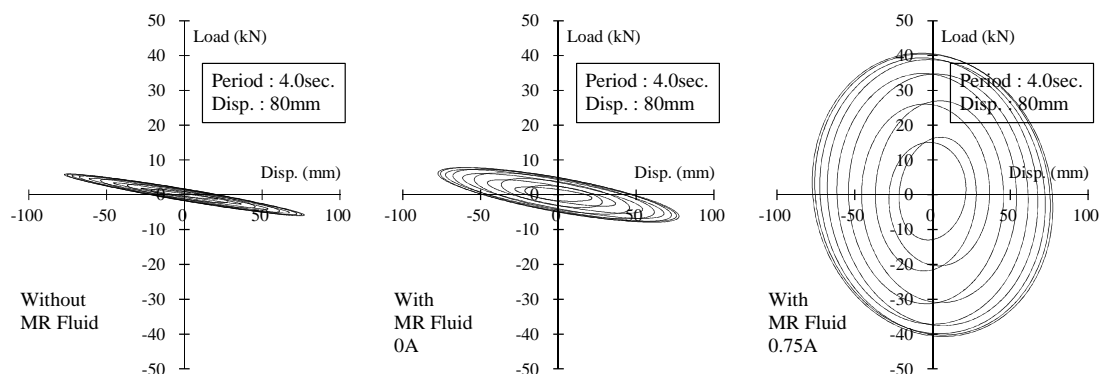
第五章

Appendix



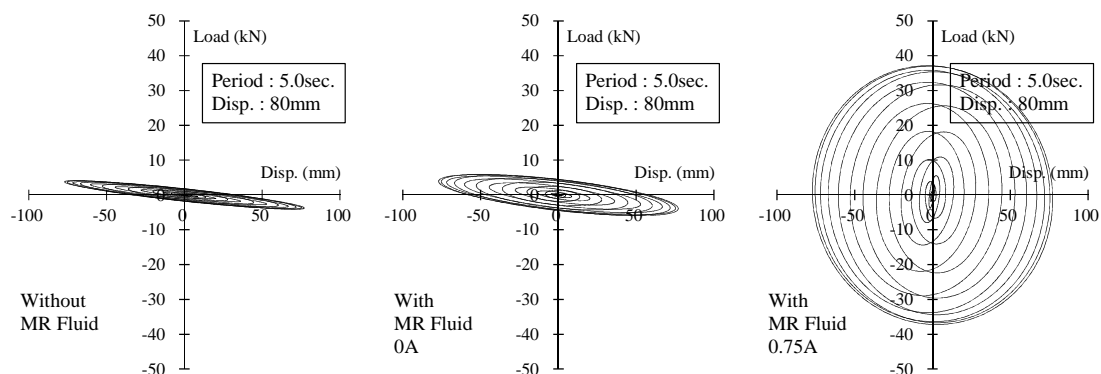
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.58 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 3.0 秒，振幅 ±80mm)



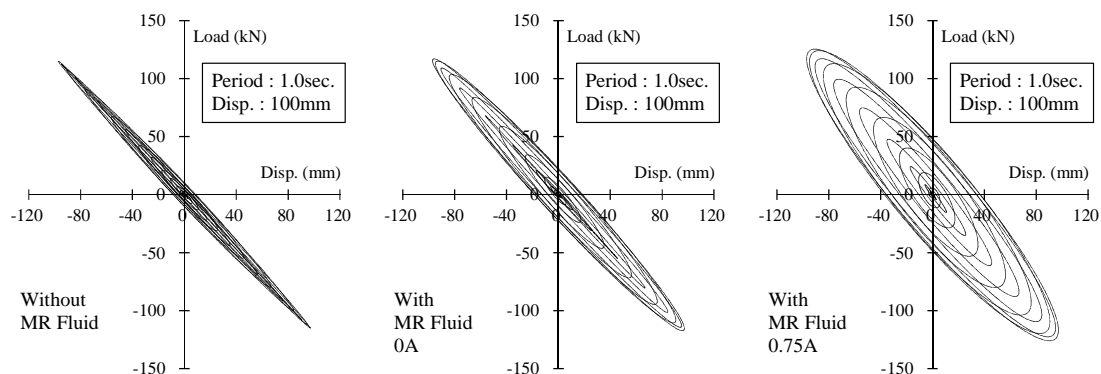
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.59 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 4.0 秒，振幅 ±80mm)



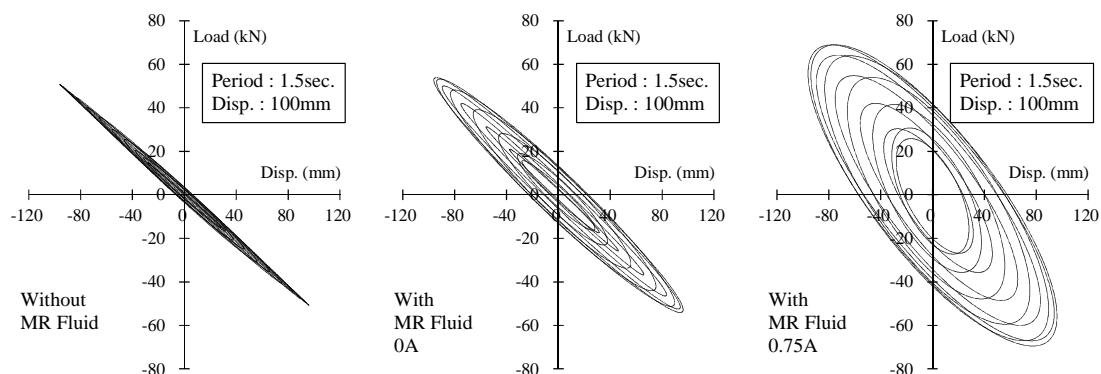
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.60 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 5.0 秒，振幅 ±80mm)



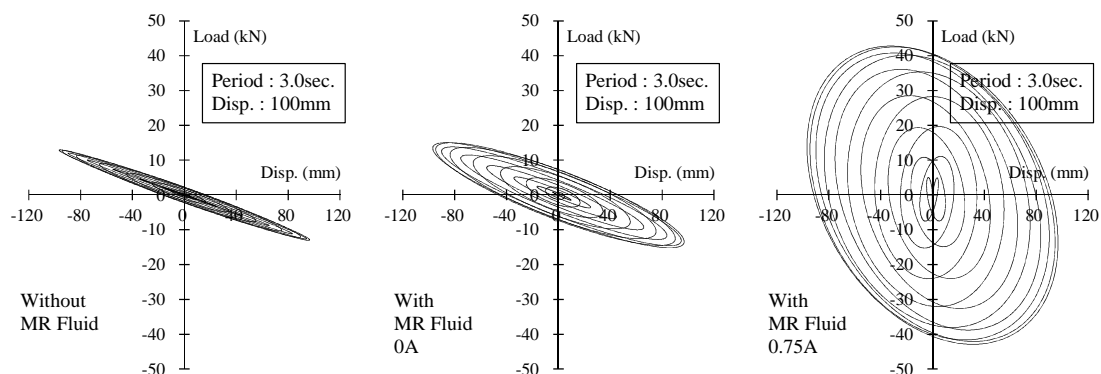
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.61 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.0 秒，振幅 ±100mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.62 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.5 秒，振幅 ±100mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.63 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 3.0 秒，振幅 ±100mm)

第一章

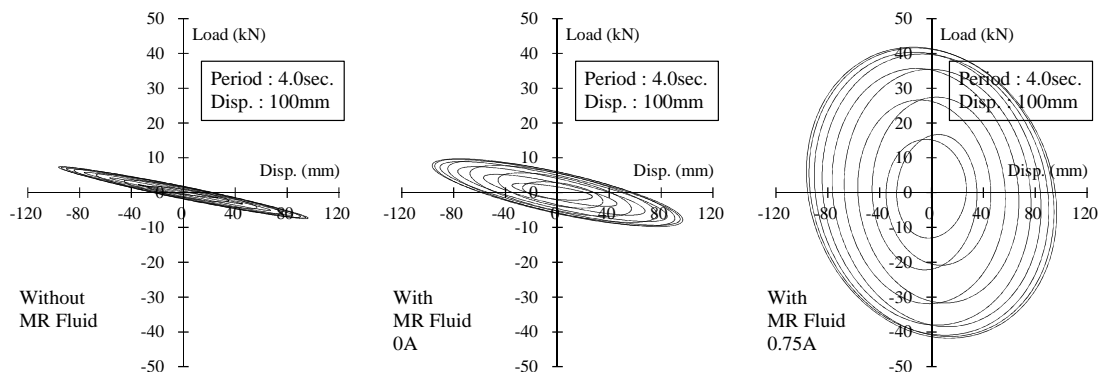
第二章

第三章

第四章

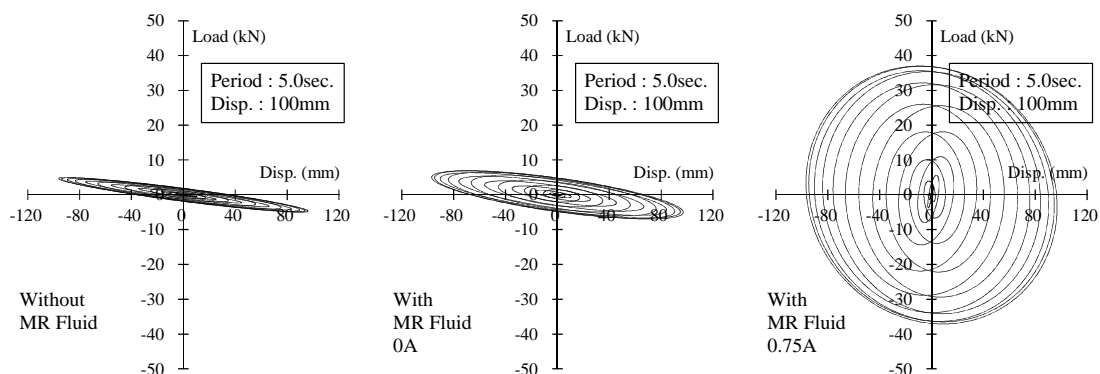
第五章

Appendix



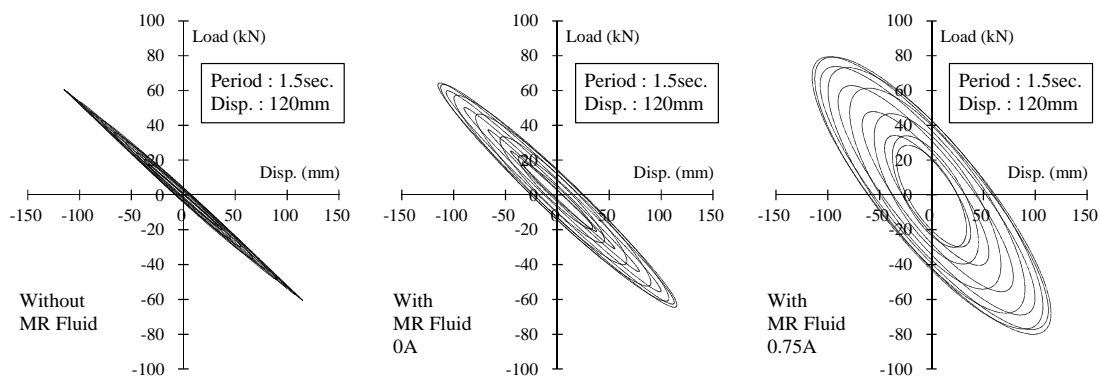
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.64 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 4.0 秒，振幅 ±100mm)



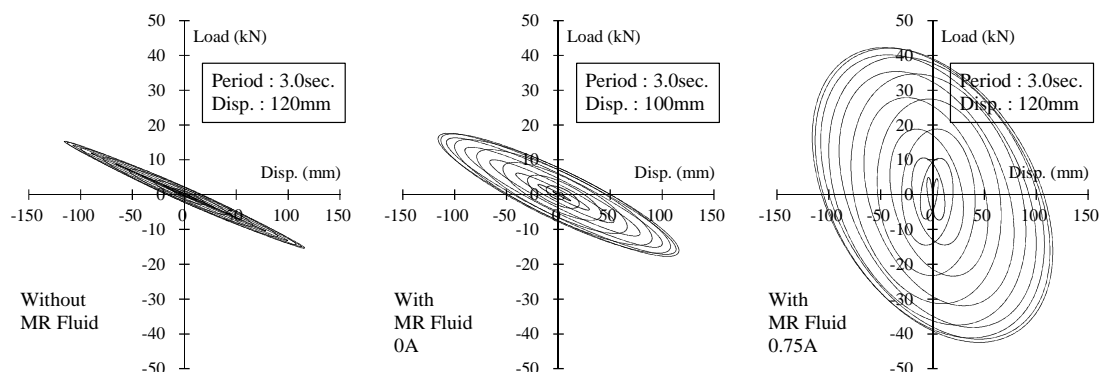
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.65 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 5.0 秒，振幅 ±100mm)



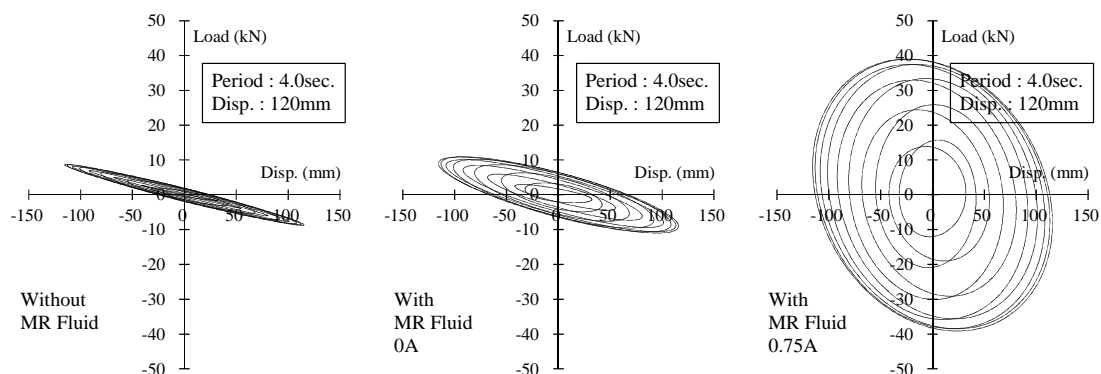
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.66 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 1.5 秒，振幅 ±120mm)



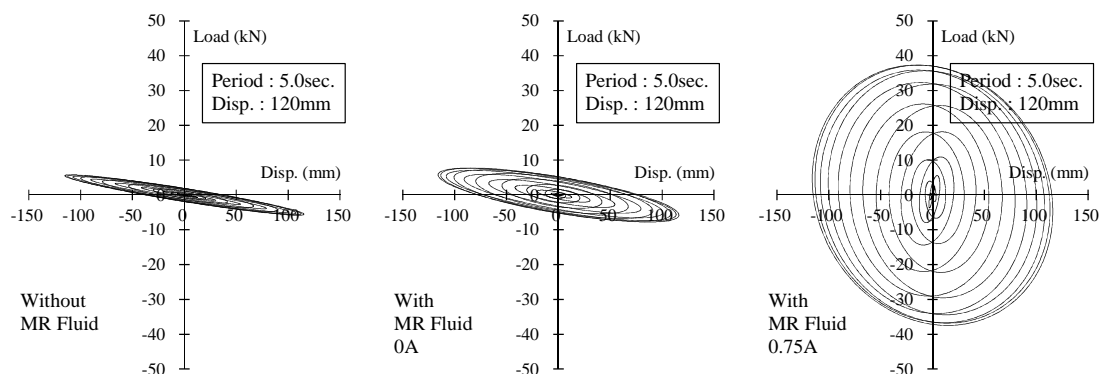
(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.67 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 3.0 秒，振幅 ±120mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.68 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 4.0 秒，振幅 ±120mm)



(a) MR 流体封入前 (b) MR 流体封入後，無印加時 (c) MR 流体封入後，0.75A 印加時

図 2.69 正弦波加振試験における荷重変位関係 (周期 5.0 秒，振幅 ±120mm)

## 第3章 リアルタイムハイブリッド実験による

検証

- 3.1 リアルタイムハイブリッド実験
- 3.2 リアルタイムハイブリッド実験による応答結果
- 3.3 第3章まとめ

### 3. リアルタイムハイブリッド実験による検証

#### 3.1 リアルタイムハイブリッド実験

本章のリアルタイムハイブリッド実験では、パラメトリックスタディを実施するモデル化可能な構造物の部分は応答計算により解析し、不確定要素が比較的多く含まれているセミアクティブ振動制御装置について実時間での加振を行う。応答解析と実際の試験体（本実験では、セミアクティブ振動制御装置を指す。）との複合実験であり、実際のセミアクティブ振動制御装置の力学特性や時間遅れを考慮することができる。本実験においては、セミアクティブ振動制御装置として、MR 回転慣性ダンパー<sup>45), 46)</sup>を用いた。

##### 3.1.1 実験概要

MR 回転慣性ダンパーを用いたリアルタイムハイブリッド実験の概要を図 3.1 に示す。まず、コンピュータ内で構造物モデルに地震動を入力した際の解析モデル全体の応答値を数値積分により求め、得られた構造物モデルの応答変位を加振装置のスライドテーブルに実現させる。同時に、制御演算により所定の制御則に基づき、実際の MR 回転慣性ダンパーに印加すべき電流値を求め、直流電源装置から MR 回転慣性ダンパーに電流を印加する。その際の MR 回転慣性ダンパーの出力荷重をロードセルにより計測し、コンピュータ内にその値を取り込み、MR 回転慣性ダンパーの実際の出力荷重を用いて応答解析をコンピュータ内で実施する。続いて、次のステップにおける構造物モデルの応答変位、MR 回転慣性ダンパーの印加電流値を求め、前者を試験機のスライドテーブルに出力し、後者を直流電源装置に出力して MR 回転慣性ダンパーに電流を印加する。これらの操作を繰り返すことで、MR 回転慣性ダンパーが設置された、ある構造物モデルに地震動が作用した際の時刻歴応答が得られることになる。なお、サンプリング周波数は 100Hz としている。

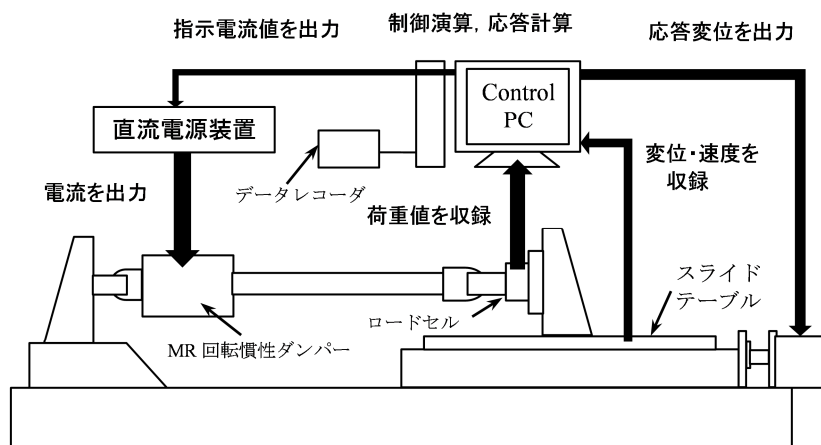


図 3.1 リアルタイムハイブリッド実験概要

### 3.1.2 セミアクティブ振動制御装置概要

本実験に用いた MR 回転慣性ダンパー設計時における主な仕様特性を表 3.1 に示す. リアルタイムハイブリッド実験に先立ち, 正弦波加振による単体性能試験を行い, 本実験の試験体である MR 回転慣性ダンパーについて, 次式によりモデル化を行った. 図 3.2 に, 正弦波加振試験結果と式(3.1)による近似式の比較を示す. 試験結果と式(3.1)は概ね良い対応を示すことが確認できる. なお, 式(3.1)の第 2 項の係数 (以下, 「 $cd$ 」とおく) は相加平均, 印加電流値の項は最小二乗法により近似している. 式(3.1)より, モデル化上の慣性質量  $md$  は 241kg, 1A 電流印加時の可変減衰力  $f_{MR}$  は 1.07kN 程度となる.

$$F = 0.241\ddot{x} + 0.877\dot{x}^{0.442} + \text{sign}(\dot{x}) \cdot (0.458I^2 + 0.487I + 0.129) \quad (3.1)$$

$F$  : MR 回転慣性ダンパーの出力荷重 (kN)

$\ddot{x}$  : 相対加速度 ( $\text{m/s}^2$ ),  $\dot{x}$  : 相対速度 ( $\text{m/s}$ ),  $I$  : 印加電流値 (A)

表 3.1 MR 回転慣性ダンパーの設計時の主な仕様特性

項目	単位	数値
許容最大出力荷重	kN	2.45
許容最大加速度	$\text{cm/s}^2$	980
許容最大速度	cm/s	100
許容ストローク	mm	600 ( $\pm 300$ )
慣性質量	ton	0.25
MR流体による可変減衰力	kN	1.34 (1.0A)
	kN	0.61 (0.5A)

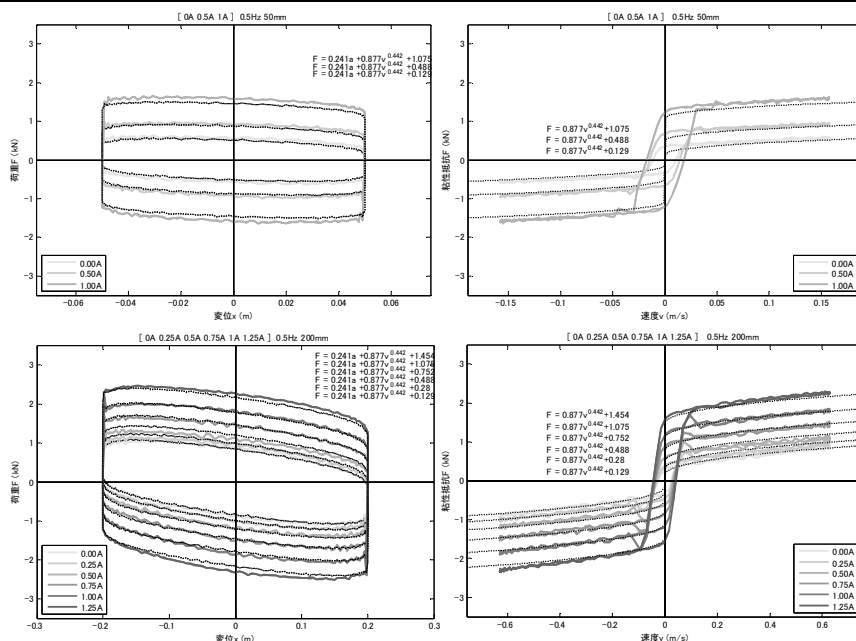
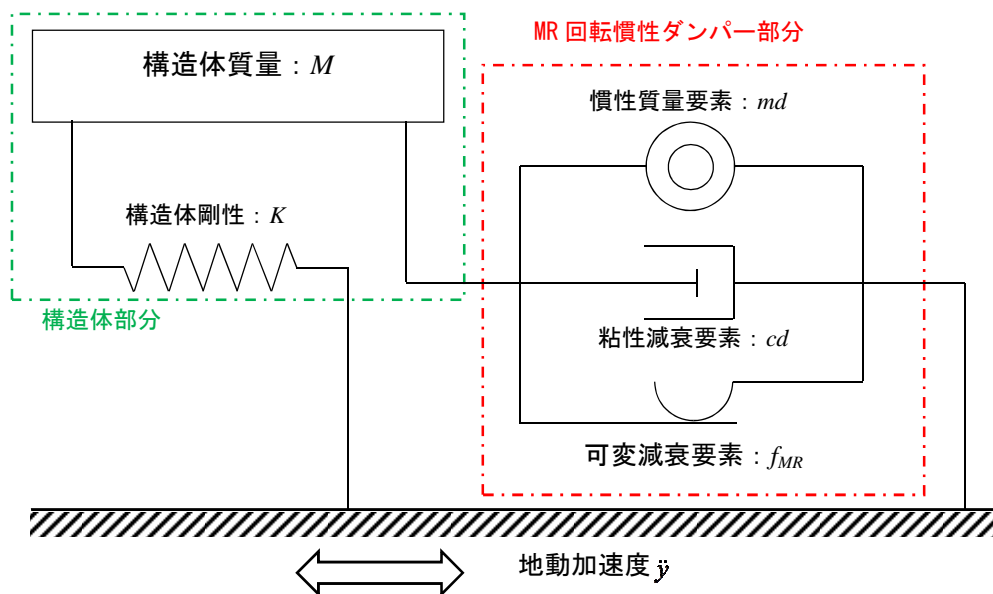


図 3.2 正弦波加振試験結果と近似式の比較

### 3.1.3 対象モデル

本実験で対象とするモデルを図 3.3 に示す。対象モデルは免震構造物を想定し、1 質点系非減衰振動モデルに MR 回転慣性ダンパーを付加する。実験パラメータは構造体質量  $M$  に対する慣性質量  $m_d$  ( $=241$  kg) の比  $\mu$  を 0.10, 0.30 の 2 通り、構造体の固有周期  $T$  を 3 秒, 5 秒の 2 通りとする。対象モデルの一覧を表 3.2 に示す。それぞれの対象モデルについて、パッシブ制御時およびセミアクティブ制御時の実験を行っている。対象モデルの呼称は以下のように設定する。

例： $\mu 30 T3$  (質量比 0.30, 固有周期 3 秒の場合)  
 $T3$  : 固有周期 3 秒,  $T5$  : 固有周期 5 秒  
 $\mu 10$  : 質量比 0.10,  $\mu 30$  : 質量比 0.30



$$\text{質量比} : \mu = \frac{m_d}{M}, \quad \text{固有周期} : T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}}, \quad \text{減衰比}^* : \zeta = \frac{c_d}{2\sqrt{MK}}$$

図 3.3 対象モデル図

表 3.2 対象モデル一覧

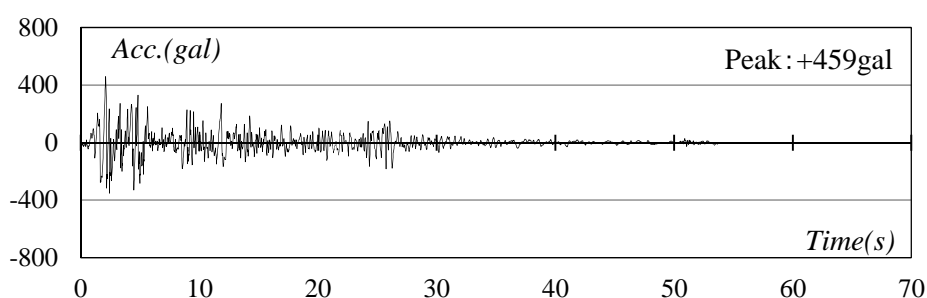
対象モデル	実験パラメータ		構造体諸元		減衰比* $\zeta$
	質量比 $\mu$	固有周期 $T$ (s)	質量 $M$ (kg)	剛性 $K$ (N/m)	
$\mu 10 T3$	0.10	3.0	2411.7	10578.9	0.09
$\mu 10 T5$	0.10	5.0	2411.7	3808.4	0.14
$\mu 30 T3$	0.30	3.0	803.9	3526.3	0.26
$\mu 30 T5$	0.30	5.0	803.9	1269.5	0.43

\*式(3.1)より MR 回転慣性ダンパーの減衰力は相対速度のべき乗に比例するモデルに設定しているため、減衰比  $\zeta$  は参考値と算出している。

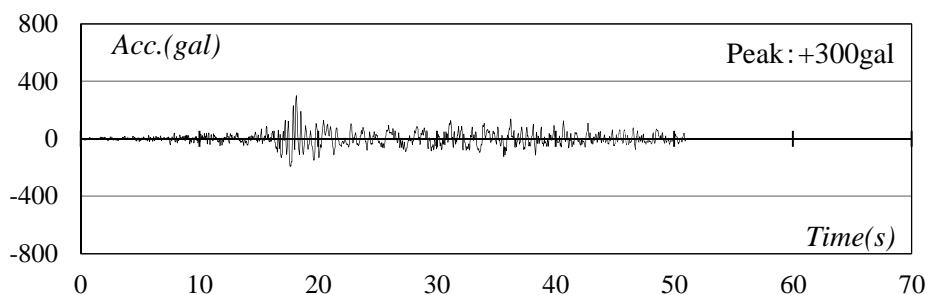


### 3.1.4 入力地震動

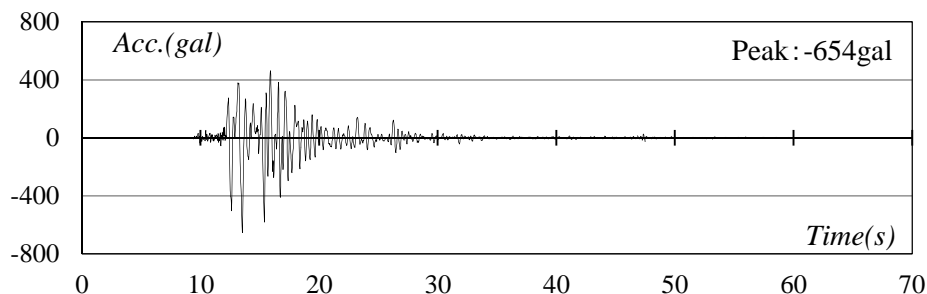
入力地震動には代表的な観測記録として、El Centro 1940 NS, Hachinohe 1968 NS, JMA Kobe 1995 NS (以下, それぞれ「ElCentro」, 「Hachinohe」, 「JMAKobe」と略す) を用いる. 入力地震動の倍率は試験機およびMR回転慣性ダンパーの許容値限界から, ElCentro および Hachinohe については最大速度振幅を 45cm/s に基準化した波形, JMAKobe については原波を 0.8 倍した波形としている. 図 3.4 に ElCentro (45cm/s 基準化), Hachinohe (45cm/s 基準化), JMAKobe (原波 0.8 倍) の加速度時刻歴波形を示す. また, それぞれの加速度, 速度, 変位のフーリエスペクトルを図 3.5 に示す. なお, スペクトル解析の際, ウィンドウ幅を 0.2Hz とした Parzen ウィンドウによる平滑化処理を行っている.



(a) ElCentro (45cm/s 基準化)

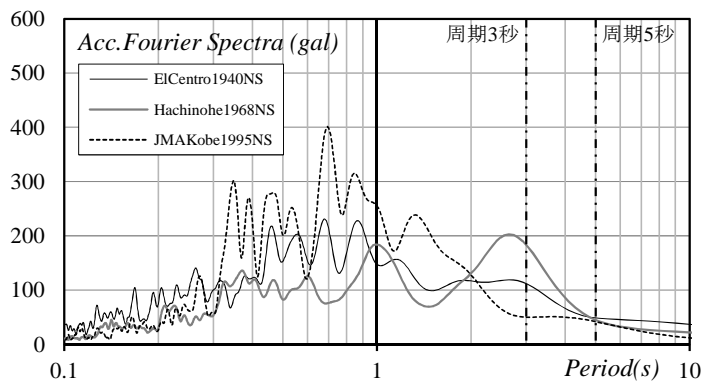


(b) Hachinohe (45cm/s 基準化)

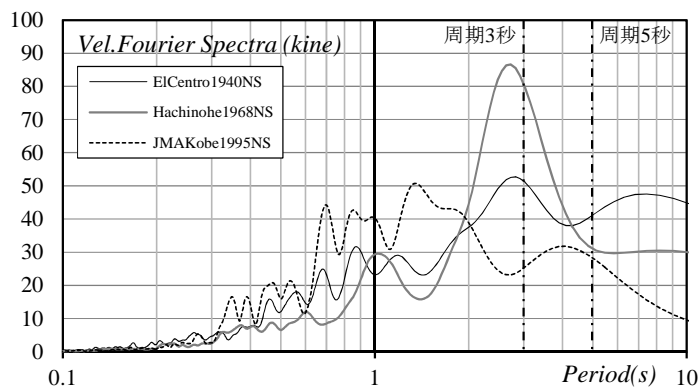


(c) JMAKobe (原波 0.8 倍)

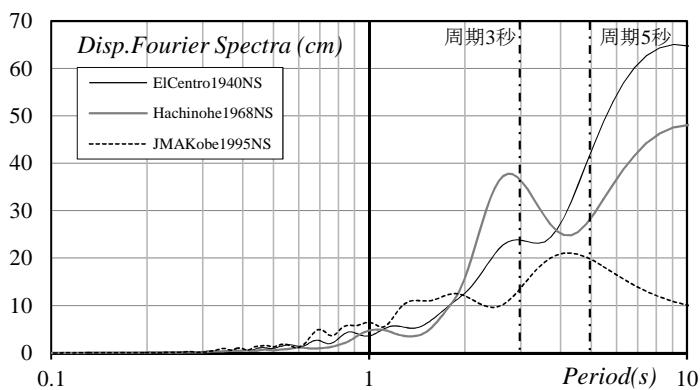
図 3.4 入力地震動の加速度時刻歴波形



(a) 加速度スペクトル



(b) 速度スペクトル



(c) 変位スペクトル

図 3.5 入力地震動のフーリエスペクトル

### 3.2 リアルタイムハイブリッド実験による応答結果

#### 3.2.1 パッシブ制御時の応答結果

図 3.6, 図 3.7 にパッシブ制御である電流無印加時の最大床応答加速度, 最大応答変位の絶対値をそれぞれ示す. 図 3.6(a) より, 質量比  $\mu$  が大きくなると, 概ね最大床応答加速度は大きくなる傾向にある. ただし, JMAKobe については質量比  $\mu$  が大きくなると最大床応答加速度は小さくなる. また, 図 3.6(b) を見ると, 固有周期  $T$  の違いによる目立った傾向はなく, 特に質量比 0.30 の場合は, それぞれの地震動において, 固有周期によらず, ほぼ同程度の値となる. 次に最大応答変位について着目すると, 図 3.7(a) より質量比  $\mu$  が大きくなると, どの地震動においても最大応答変位は小さくなる傾向となる. 特に固有周期 3 秒の場合の方が質量比  $\mu$  による最大応答変位の低減率は大きい. また, 構造体の固有周期  $T$  が長くなると, 質量比 0.10 の場合は最大応答変位が小さくなり, 質量比 0.30 の場合は最大応答変位が大きくなる傾向にある. 地震動により異なるものの, 質量比  $\mu$  が大きくなると概ね最大床応答加速度は大きく, 最大応答変位は小さくなると言える.

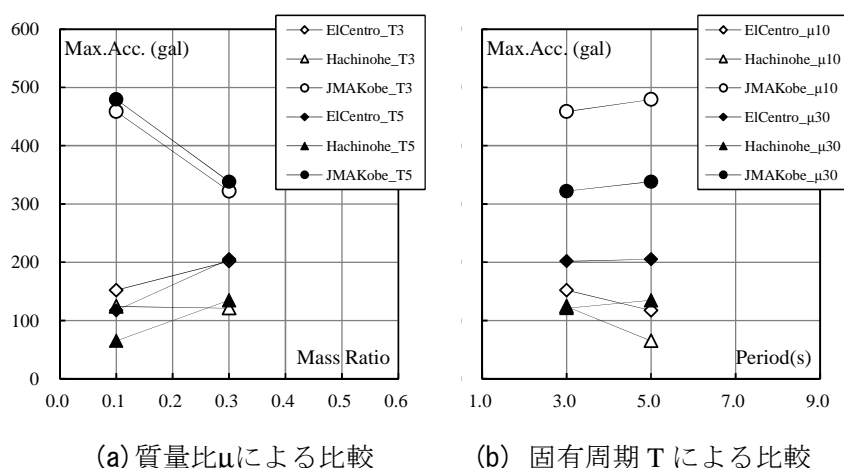


図 3.6 最大床応答加速度の絶対値 (電流無印加時)

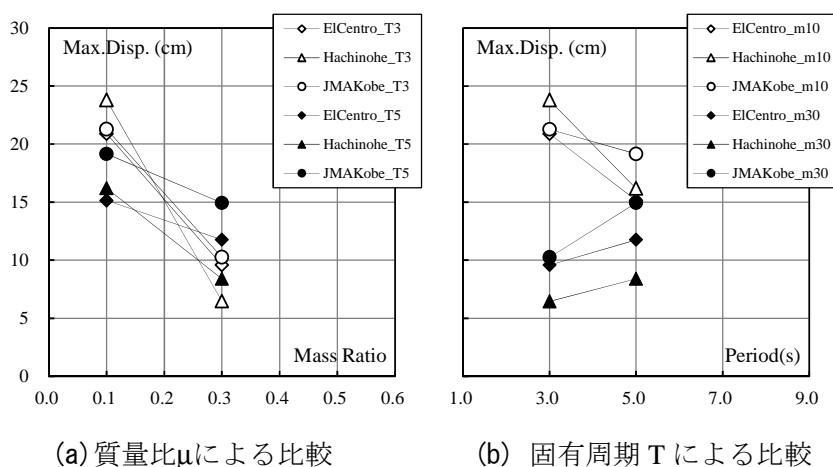


図 3.7 最大応答変位の絶対値 (電流無印加時)

次に、これらの傾向を周波数領域の観点から考察する。図 3.8 は、リアルタイムハイブリッド実験により得られた時刻歴応答波形のフーリエスペクトルと、図 3.5 に示す入力地震動のフーリエスペクトルとの比から求めた伝達関数である。代表的な例として、ElCentro 入力時の固有周期 3 秒の場合における質量比 $\mu$ による比較を示している。なお、実験により得られた時刻歴応答のスペクトルには入力地震動と同様の平滑化処理を行っている。図 3.8(a)より、構造体の固有周期 3 秒付近では、質量比 0.30 では質量比 0.10 と比較してピーク値が 50% 程度低減されている。しかしながら、概ね周期 2 秒以下の範囲では加速度伝達率が全般に渡り、2 倍以上になっている。一方、図 3.8(b)では、ほぼ全領域に渡り、変位が低減されていることが確認でき、特に構造体の固有周期 3 秒付近における変位低減率は顕著である。

質量比 $\mu$ が大きくなると共振点付近の応答は小さくなるものの、短周期領域で加速度が増幅する現象はどの入力地震動においても顕著に見られていた。これは既往の研究においても、理論的に導出された周波数応答や数値解析による検証で明らかにされており、その改善方法としては、慣性質量をばね要素と直列にして免震層剛性と並列に配置する方法<sup>52)</sup>や摩擦スライダー<sup>12)</sup>などを併用する方法などが提案されている。

図 3.9 はそれぞれの固有周期および入力地震動の場合において、質量比 0.10 に対する質量比 0.30 の伝達関数の比を示したものである。加速度、変位ともに、伝達率が 1 より小さい領域が質量比を大きくすることにより応答低減を図れる周期帯、伝達率が 1 より大きい領域が質量比を大きくすることにより応答が増幅する周期帯である。これらの伝達率は周波数領域におけるスペクトル解析より導出される慣性質量の周波数応答における特徴であることから、構造体の固有周期による影響はほとんどなく、図中の実線と破線は同様の傾向を示している。地震動について比較すると、概ねどの地震動においても同様の傾向を示しているが、左列の加速度伝達関数を見ると、周期 2 秒から 6 秒付近の加速度が低減される領域および周期 2 秒以下の加速度が増幅する領域がある。質量比 $\mu$ の変化によるこれらの効果が最も顕著に表れているのは Hachinohe であり、加速度伝達率において最も効果が小さい、つまり慣性質量による悪影響が小さいと考えられるのは JMAKobe である。一方、右列の変位伝達関数を見ると、どの地震動においても周期 0.4 秒から 8 秒程度の範囲で変位低減効果が期待できる。これより、JMAKobe においては慣性質量により質量比 $\mu$ を大きくしても、短周期領域での床応答加速度の増幅を抑えながら、同時に応答変位を低減することが期待できると考えられる。

第一章

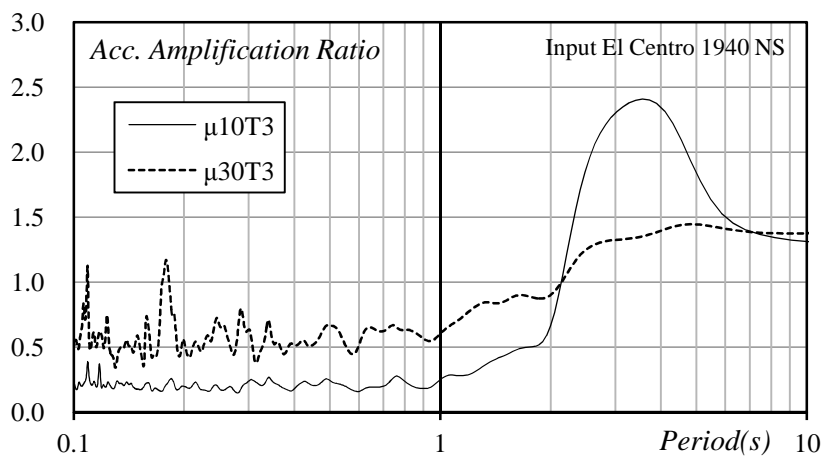
第二章

第三章

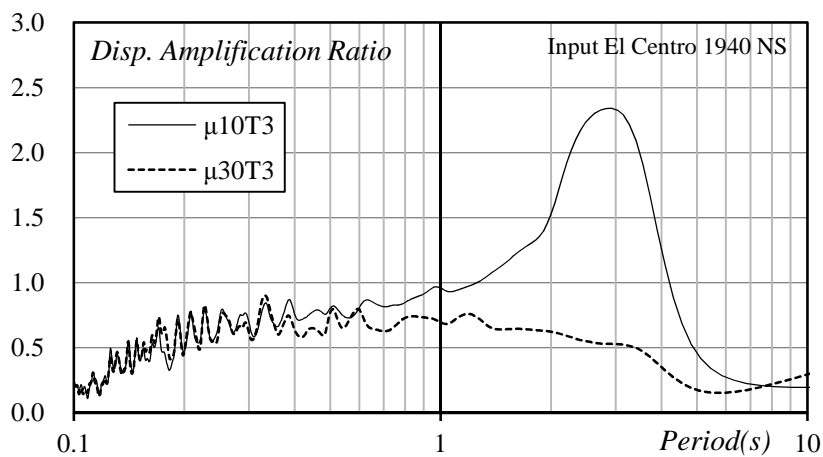
第四章

第五章

Appendix

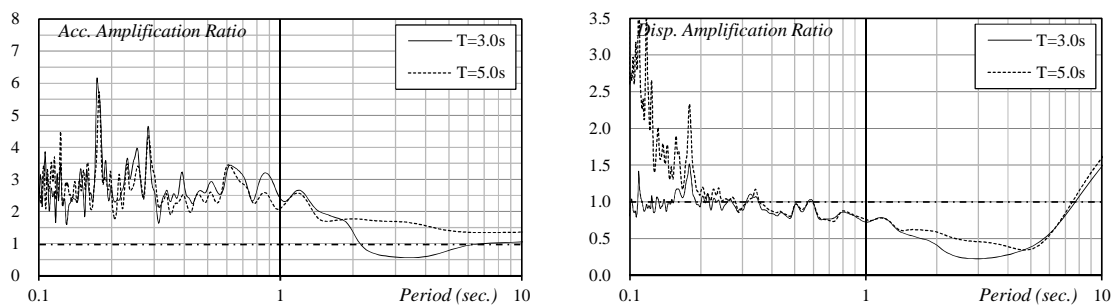


(a) 加速度伝達関数

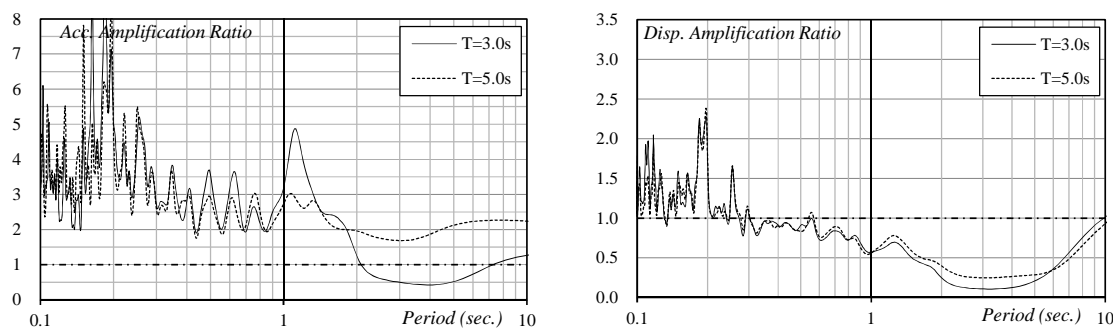


(b) 変位伝達関数

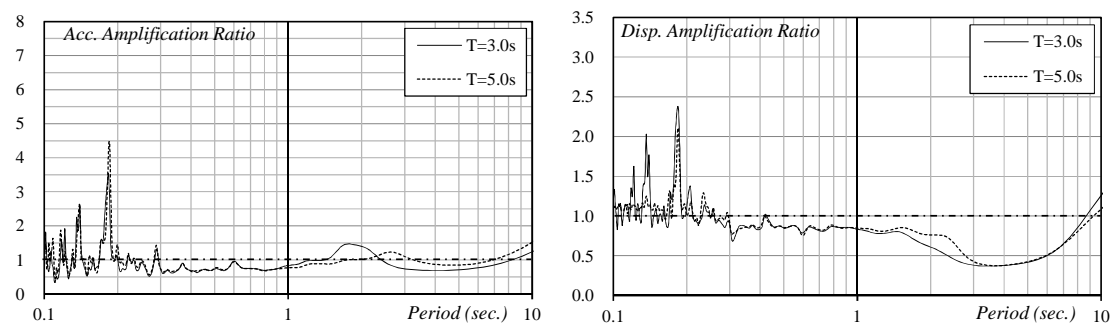
図 3.8 ElCentro 入力時の周期伝達関数



(a) ElCentro



(b) Hachinohe



(c) JMAKobe

図 3.9 質量比 0.10 に対する質量比 0.30 の伝達関数比  
(左列：加速度伝達関数，右列：変位伝達関数)

### 3.2.2 セミアクティブ制御則

本項では、前項において、慣性質量の効果により床応答加速度の増幅を抑えながら応答変位を小さくすることが期待できると考えられる JMAKobe について、セミアクティブ制御により床応答加速度および応答変位をさらに低減する方法を提案する。

#### (1) 地震動の最大入力速度発生時と構造物の最大応答変位発生時の関係

JMAKobe に代表されるパルス性地震動は、短い時間に大きな振幅の変位を生ずるという特徴を持つため、最大応答を考えると、対象となる構造物の過渡応答による影響は少なく、短時間の大振幅変位入力、つまり大きな速度が入力されることで最大応答に至る場合が多い。図 3.10、図 3.11 に本実験で用いた ElCentro および JMAKobe の時刻歴速度波形、ElCentro および JMAKobe 入力時の  $\mu 10T3$  の時刻歴応答変位波形を示す。図中には解析結果を赤線で併せて示しており、両者の対応から解析により実験結果を概ね再現できていることが確認できる。図 3.10、図 3.11 を見ると、地震動の入力速度と構造体の応答変位には密接な関係があり、入力地震動の速度が最大となった数秒後に構造体に最大応答変位が生じていると考えることができる。

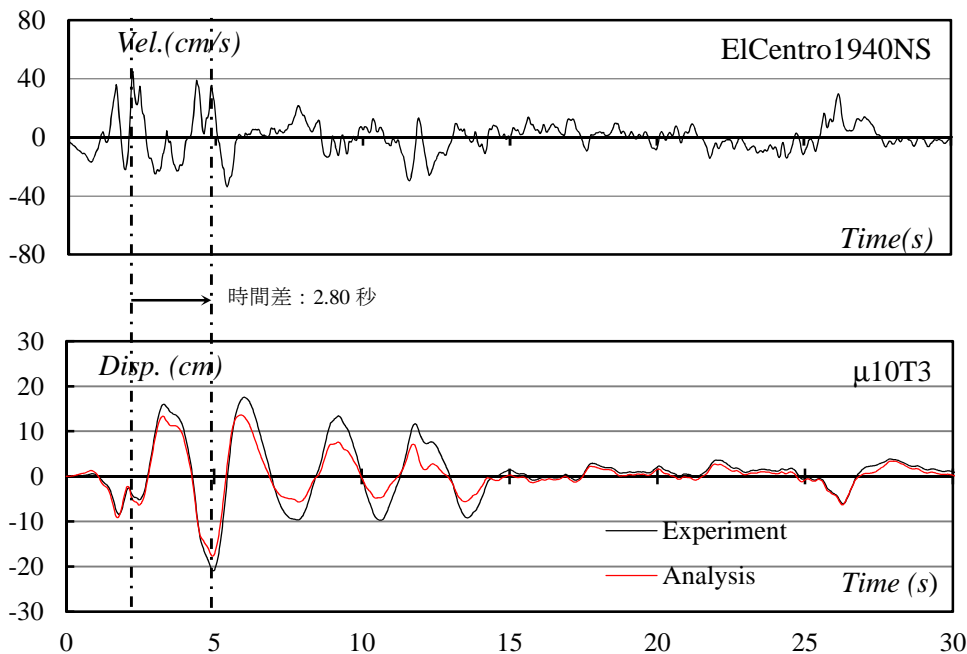


図 3.10 ElCentro の時刻歴入力速度と $\mu 10T3$  の時刻歴応答変位

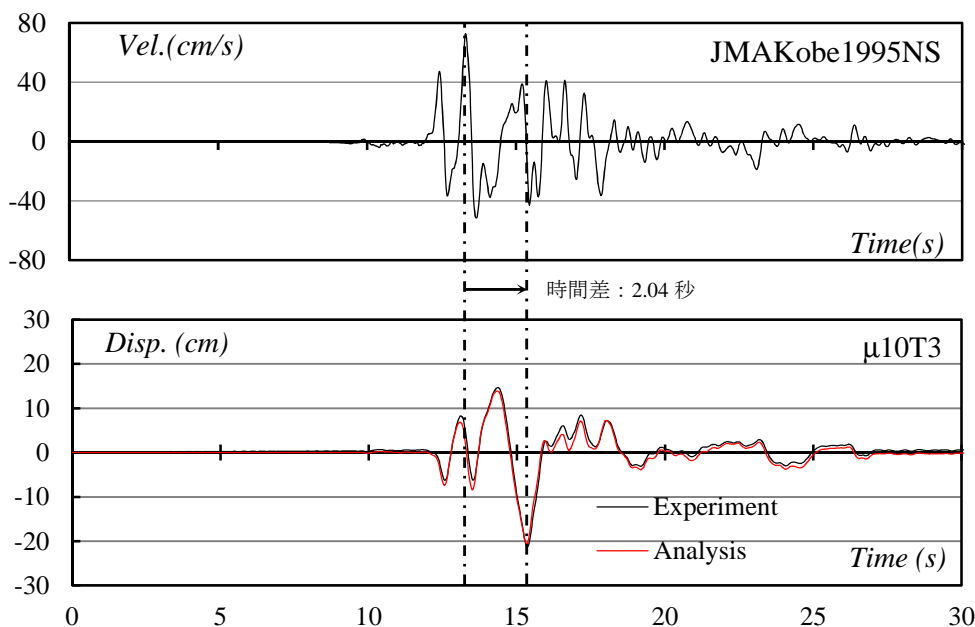


図 3.11 JMAKobe の時刻歴入力速度と $\mu 10T3$  の時刻歴応答変位



図 3.12 は、パッシブ制御である電流無印加時の場合について、地震動の入力速度が最大となる時刻から構造体が最大応答変位を記録するまでに要する時間（以下、「最大速度入力時からの時間差」という）を横軸に取り、構造体の最大応答変位を縦軸に取り、両者の関係を質量比 $\mu$ および地震動ごとにプロットしたものである。図 3.12 より、構造体の最大応答変位が大きいほど、最大速度入力時からの時間差も大きくなる傾向が見て取れる。質量比 $\mu$ に着目すると、質量比 0.10 では最大速度入力時からの時間差のばらつきは大きいですが、質量比 0.30 ではそのばらつきは少なく、地震動ごとに概ね一定値となっている。また、地震動別に比較すると、最大速度入力時からの時間差は、ElCentro の場合では 2.0~3.5 秒程度の範囲、Hachinohe の場合では 0.3 秒程度、JMAKobe では 1.0~2.0 秒程度の範囲となっており、地震動の性質による影響が支配的であると考えられる。

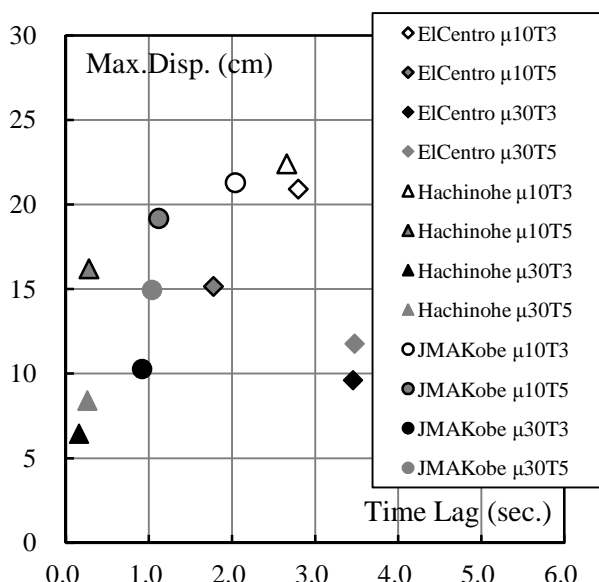


図 3.12 最大速度入力時からの時間差

(2) セミアクティブ制御則の提案

一般に、地震動には様々な周波数成分が含まれているが、免震構造物の最大応答は固有 1 次モードによる影響が大きいいため、入力地震動に免震構造物の固有周期に一致する成分が大きな振幅で含まれている場合、免震構造物の固有の応答が励起され、最大応答変位を生じると考えることができる。この傾向を基に、図 3.13 に示すような制御方法を提案する。図 3.3 の対象モデルが図 3.13 に示すように、時刻歴波形上の D 地点において  $V_{present}$  の入力動を受けているとする。この  $V_{present}$  と  $\Delta t$  秒前の入力速度  $V_{past}$  を比較して、現在の入力速度が  $\Delta t$  秒前の入力速度より大きければ制御力を ON にし、小さければ制御力を OFF にする。このとき、 $\Delta t$  には制御力発生の時間遅れや構造物の固有周期 T（あるいはその 1/4 や 1/2）を取るなど、いくつかの定義が考えられる。

ここで、図 3.14 に示すように、免震構造物の固有周期  $T$  に一致する成分を持ち、その振幅が時間とともに次第に増幅し、最大値を記録した後に次第に減衰する漸増漸減正弦波が入力された場合を考える。この正弦波が図 3.3 の対象モデルそれぞれに入力された場合について、電流無印加時のパッシブ制御時、図 3.13 の  $\Delta t$  をそれぞれ 0.2 秒、 $T/4$  秒、 $T/2$  秒、 $T$  秒とした場合のセミアクティブ制御時の最大応答値の一覧を表 3.3 に示す。ここで、 $\Delta t$  の設定方法として、0.2 秒は制御力発生が遅れ時間を想定しており、 $T$  は免震構造物の固有周期を表し、 $T=3$  秒の場合は  $T/4=0.75$  秒、 $T/2=1.5$  秒、 $T=5$  秒の場合は  $T/4=1.25$  秒、 $T/2=2.5$  秒となる。

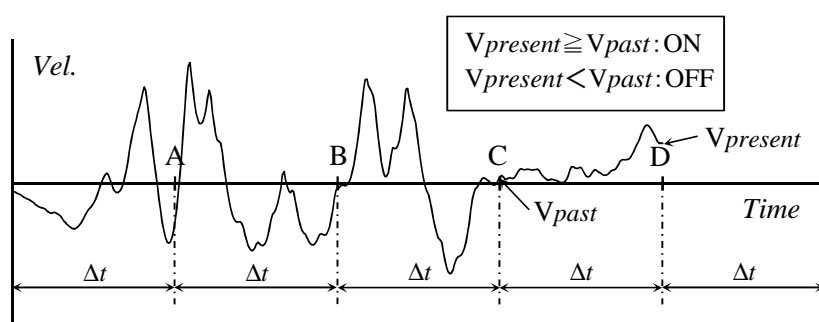


図 3.13 提案するセミアクティブ制御則

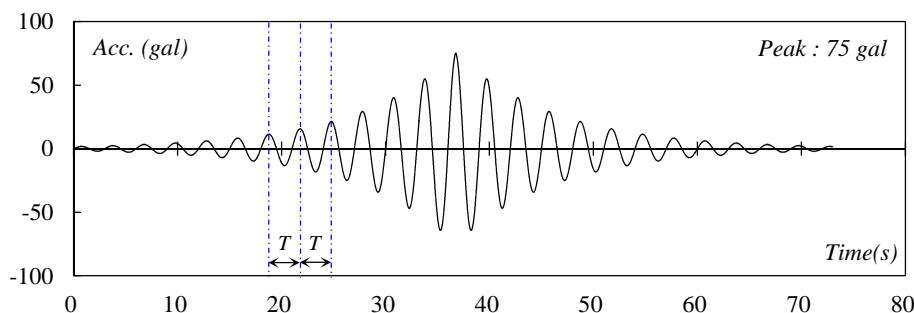


図 3.14 免震構造物の固有周期  $T$  に一致する振幅を持つ正弦波 ( $\mu 10T3$ )

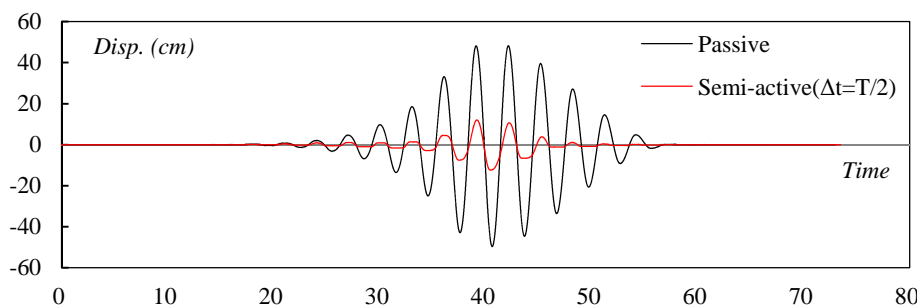


図 3.15 漸増漸減正弦波入力時の  $\mu 10T3$  の時刻歴応答変位

表 3.3 漸増漸減正弦波入力時の最大応答値一覧

(a) 最大床応答加速度

対象モデル	最大床応答加速度 (gal)					入力加速度最大値 (gal)
	Passive	Semi-active				
		0.2s	T/4	T/2	T	
$\mu 10T3$	215	159	169	101	<b>93</b>	75
$\mu 10T5$	91	84	90	66	<b>64</b>	51
$\mu 30T3$	230	250	251	199	<b>190</b>	188
$\mu 30T5$	<b>134</b>	199	206	175	170	135

(b) 最大応答変位

対象モデル	最大応答変位 (cm)					入力加速度最大値 (gal)
	Passive	Semi-active				
		0.2s	T/4	T/2	T	
$\mu 10T3$	50	26	29	<b>12</b>	20	75
$\mu 10T5$	50	20	25	<b>9</b>	17	51
$\mu 30T3$	50	25	27	<b>11</b>	20	188
$\mu 30T5$	50	19	27	<b>12</b>	19	135

\*太字は各対象モデルにおける最小値を示す。

図 3.15 には電流無印加時のパッシブ制御時および $\Delta t$ を T/2 (=1.5) 秒とした場合のセミアクティブ制御時の場合における $\mu 10T3$ の時刻歴応答変位を示す。図 3.15 より、電流無印加時のパッシブ制御時の場合と比較して、セミアクティブ制御により効果的に応答変位の抑制が行われていることが確認できる。また、表 3.3 より、 $\Delta t$ の設定値による最大応答値を比較すると、最大床応答加速度は $\mu 10T3$ を除き、 $\Delta t$ を構造体の固有周期と同じにした場合 ( $\Delta t = T$ ) が最も小さくなるが、 $\Delta t = T/2$ とした場合も概ね同程度に小さくなることを確認できる。

次に、最大応答変位に着目すると、 $\Delta t = T/2$ とした場合が最も小さくなるため、ここでは $\Delta t$ を構造体の固有周期 T の 1/2 と設定し、MR 回転慣性ダンパーをセミアクティブ制御した場合の制御効果について次項で比較を行う。

### 3.2.3 セミアクティブ制御時の応答結果

表 3.4 に、パッシブ制御時（電流無印加時，1A の一定電流印加時）およびセミアクティブ制御時における最大応答値の一覧を示す．また，図 3.16 に電流無印加時のパッシブ制御時，1A の一定電流印加時のパッシブ制御時，セミアクティブ制御時（以下，それぞれ「0A」，「1A」，「SA」という）それぞれにおける最大応答値の比を示す．

図 3.16(a)は，電流無印加時に対する 1A 一定電流印加時の比 (1A/0A) を示している．1A，つまり 0A にクーロン摩擦力による減衰が付加された場合，質量比 0.30 の JMAKobe 入力時（図中●印，●印）を除き，最大応答変位は大きく低減されている．特に，Hachinohe 入力時（図中▲印，▲印）の最大応答変位は 0A に比べて 70～80%程度低減され，クーロン摩擦減衰による変位低減効果が最も顕著に表れている．しかしながら，最大床応答加速度は 2.1～2.6 倍程度に増幅し，免震構造物の長所である加速度低減効果が損なわれてしまい，適正値を超えた過度な減衰が付加されていると考えられる．

図 3.16(b)は，電流無印加時に対するセミアクティブ制御時の比 (SA/0A) を示している．図より，全ての場について概ね 10～40%程度最大応答変位が低減されている．最大床応答加速度は最大で 1.6 倍程度の増幅となっており，Hachinohe 入力時（図中▲印，▲印）では前述の図 3.16(a)に比べて，最大応答変位は大きくなるものの，最大床応答加速度の上昇は抑えられている．また，質量比 0.10 の JMAKobe 入力時（図中○印，●印）は最大床応答加速度を上昇させずに最大応答変位が低減されている．図 3.16(b)を見ると，図 3.16(a)に比べて全体的なプロットのばらつきが小さく，前項において提案した制御則は全ての場について一様な効果を発揮していると言える．

図 3.16(c)は，1A 一定電流印加時に対するセミアクティブ制御時の比 (SA/1A) を示しており，減衰量を同じにした場合のパッシブ制御とセミアクティブ制御の効果を比較したものと考えることができる．図より Hachinohe 入力時（図中三角印全般）については 1A のパッシブ制御の方が最大応答変位は小さくなるが，質量比 0.30 の JMAKobe（図中●印，●印）はセミアクティブ制御の方が最大応答変位は小さくなる．

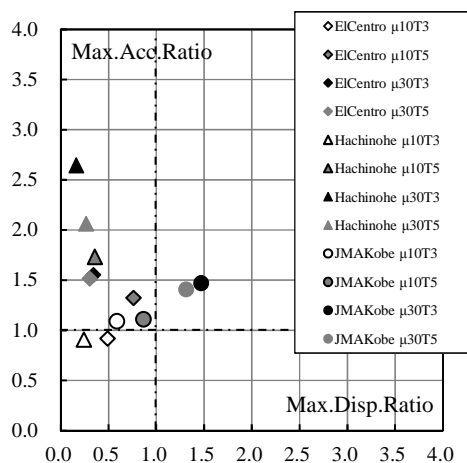
表 3.4 最大応答値一覧

(a) 最大床応答加速度

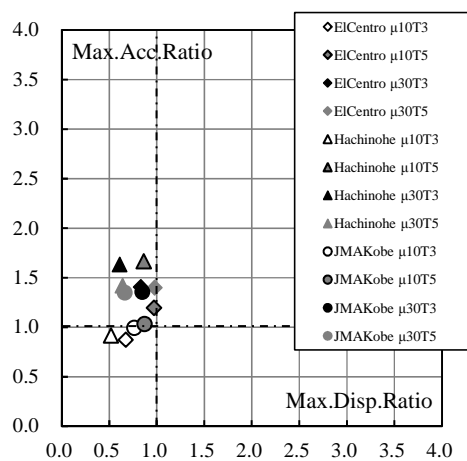
対象モデル	最大床応答加速度 (gal)								
	ElCentro入力時			Hachinohe入力時			JMAkobe入力時		
	0A	1A	SA	0A	1A	SA	0A	1A	SA
$\mu$ 10T3	152	139	132	124	112	113	459	498	455
$\mu$ 10T5	117	155	140	65	112	108	479	531	494
$\mu$ 30T3	202	312	283	121	320	197	322	473	436
$\mu$ 30T5	205	310	286	135	277	190	338	476	456

(b) 最大応答変位

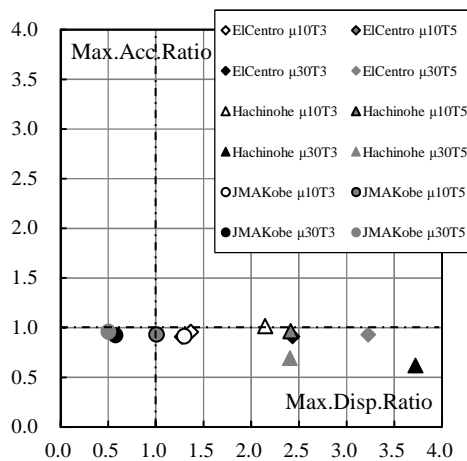
対象モデル	最大応答変位 (cm)								
	ElCentro入力時			Hachinohe入力時			JMAkobe入力時		
	0A	1A	SA	0A	1A	SA	0A	1A	SA
$\mu$ 10T3	20.9	10.3	14.1	23.8	5.8	12.4	21.3	12.5	16.3
$\mu$ 10T5	15.1	11.5	14.7	16.2	5.8	14.0	19.2	16.6	16.7
$\mu$ 30T3	9.6	3.3	8.0	6.5	1.1	3.9	10.3	15.1	8.7
$\mu$ 30T5	11.8	3.6	11.5	8.4	2.2	5.4	14.9	19.6	9.9



(a) 電流無印加時に対する1A一定電流印加時の比 (1A/0A)



(b) 電流無印加時に対するセミアクティブ制御時の比 (SA/0A)



(c) 1A一定電流印加時に対するセミアクティブ制御時の比 (SA/1A)

図 3.16 電流無印加時, 1A の一定電流印加時, セミアクティブ制御時  
 それぞれにおける最大応答値の比

### 3.3 第3章まとめ

MR 回転慣性ダンパー<sup>45), 46)</sup>を用いたリアルタイムハイブリッド実験を通じて、制御対象とする構造体の固有周期  $T$ 、構造体質量に対する慣性質量の比（質量比 $\mu$ ）、断層近傍地震動を含む標準的な入力地震動による応答性状を比較した。また、慣性質量に関する既往の研究の解析研究成果を実験により補足し、確認を行った。得られた知見から、セミアクティブ制御則を提案し、セミアクティブ振動制御装置としての MR 回転慣性ダンパーの同様の入力地震動に対する制御効果を検証した。本章により得られた知見は以下の通りである。

- ① パッシブ制御である電流無印加時の最大床応答加速度、最大応答変位の比較から、地震動により異なるものの、質量比 $\mu$ が大きくなるほど、最大床応答加速度は大きく、最大応答変位は小さくなる傾向を示すことを確認した。また、固有周期  $T$  の違いによる目立った傾向は確認されなかった。
- ② リアルタイムハイブリッド実験により得られた時刻歴応答波形の周期伝達関数から、質量比 $\mu$ が大きくなると、共振点付近の応答は小さくなるものの、短周期領域で加速度が増幅することを確認した。また、この現象はどの入力地震動においても顕著に見られた。
- ③ 加速度伝達関数において、②の傾向が最も顕著に表れていたのは Hachinohe であり、JMAKobe が最も影響は小さかった。変位伝達関数においては、どの地震動においても広範囲の周期帯で変位低減効果が確認された。これらのことから、JMAKobe については質量比 $\mu$ を大きくすることで、短周期領域での床応答加速度の増幅を抑えながら、同時に応答変位を低減することができるものと考えられる。
- ④ 地震動の入力速度と構造体の応答変位との関係から、構造体の最大応答変位が大きいほど最大速度入力時からの時間差も大きくなり、最大速度入力時からの時間差は地震動の性質による影響が支配的であることを確認した。これらのことから、地震動の入力速度に着目したセミアクティブ制御則を提案した。
- ⑤ 電流無印加時のパッシブ制御時、1A の一定電流印加時のパッシブ制御時、セミアクティブ制御時それぞれにおける最大応答値の比較から、セミアクティブ制御時は全ての場合について概ね 10~40%程度最大応答変位が低減され、最大床応答加速度は最大でも 1.6 倍程度の増幅となっており、1A に比べて適度な減衰による応答低減効果を確認した。
- ⑥ セミアクティブ制御による効果が最も大きいのは JMAKobe の場合であり、パッシブ制御に比べて、床応答加速度をあまり上昇させずに応答変位を低減する効果が期待できることを確認した。

## 第 4 章 多様な地震動に対する応答制御効果

- 4.1 はじめに
- 4.2 周波数領域における検討
- 4.3 時刻歴応答における検討
- 4.4 セミアクティブ制御効果の評価
- 4.5 第 4 章まとめ



## 4. 多様な地震動に対する応答制御効果

### 4.1 はじめに

本章においては、建築基準法の水準を大きく超える多様な地震動に対して、セミアクティブ制御により床応答加速度を抑制しながら、免震層の過大な応答変位を低減する制御方法を提案する。このとき、近年我が国で精力的に研究が進められている慣性質量機構による入力低減効果<sup>11)</sup>および変位抑制効果<sup>12), 13)</sup>を基に、その効果をセミアクティブ制御で適切にコントロールする方法について論ずる。想定するセミアクティブ振動制御装置は MR 回転慣性ダンパーとする。

第一章

#### 4.2 周波数領域における検討

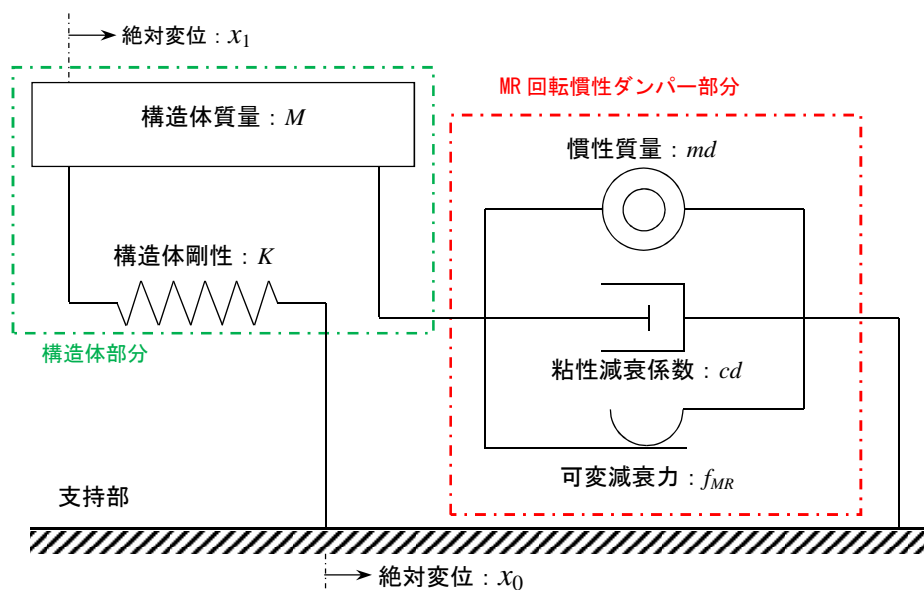
本節では、図 4.1 に示すような 1 質点系非減衰振動モデルに MR 回転慣性ダンパーを付加した場合の振動特性を伝達関数の形で整理し、その応答制御効果を考察する。なお、対象モデルは免震構造物を想定し、構造体の固有振動数は 0.25Hz（固有周期 4 秒）に設定している。構造体の絶対変位を  $x_1$ 、支持部の絶対変位を  $x_0$  とすると、図 4.1 の対象モデルにおいて、支持部が加振される場合の振動方程式は式(4.1)で表される。なお、振動方程式は絶対座標系とし、入力（加振）に対する出力（応答）の伝達関数は、構造体に対する質量比  $\mu$  や減衰比  $\zeta$ 、固有円振動数比  $\lambda$  により無次元化することで一般性を持たせている。また、MR 流体による可変減衰力は構造体質量  $M$  と慣性質量  $m_d$  との和の 5% としている。これは免震建築物の上部構造重量に対する免震層降伏せん断力の比  $\alpha_s$ <sup>53)</sup> を意図しており、一般的な免震建築物では  $\alpha_s=3\%$  程度とすることが多い<sup>53)</sup> が、本論では建築基準法の水準を大きく超える地震動を想定しているため、 $\alpha_s=5\%$  として一般的な値より大きく設定した。

第二章

第三章

$$M\ddot{x}_1 + K(x_1 - x_0) + m_d(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_0) + c_d(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + f_{MR} \cdot \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) = 0 \quad (4.1)$$

第四章



第五章

$$\begin{aligned} \text{構造体の固有円振動数} : \omega_n &= \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad \text{固有円振動数比} : \lambda = \frac{\omega}{\omega_n} \\ \text{質量比} : \mu &= \frac{m_d}{M}, \quad \text{減衰比} : \zeta = \frac{c_d}{2\sqrt{MK}}, \quad \text{重力加速度} : g \\ \text{MR 流体による可変減衰力} : f_{MR} &= (M + m_d) \cdot 0.05 \cdot g \end{aligned}$$

図 4.1 対象モデル図

A  
P  
P  
e  
n  
d  
i  
x

#### 4.2.1 パッシブ制御による場合

パッシブ制御による場合、式(4.1)の第5項、MR流体による可変減衰力 $f_{MR}$ は0となり、式(4.1)は下式のように表される。

$$M\ddot{x}_1 + K(x_1 - x_0) + m_d(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_0) + c_d(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) = 0 \quad (4.2)$$

構造体の絶対変位 $x_1$ 、支持部の絶対変位 $x_0$ の初期値を0とおいて、式(4.2)をラプラス変換すると、複素数 $s$ を用いて次式のように表される。なお、 $X_1, X_0$ は構造体および支持部の変位の複素振幅を表す。

$$Ms^2X_1 + K(X_1 - X_0) + m_d s^2(X_1 - X_0) + c_d s(X_1 - X_0) = 0 \quad (4.3)$$

式(4.3)から、入力(加振)に対する出力(応答)の伝達関数 $X_1/X_0$ を求め、 $s=j\omega$ ( $j$ は虚数単位、 $\omega$ は円振動数)とおくと、次式を得る。

$$\frac{X_1}{X_0} = \frac{-m_d\omega^2 + j\omega c_d + K}{-(M + m_d)\omega^2 + j\omega c_d + K} \quad (4.4)$$

質量比 $\mu$ や減衰比 $\zeta$ 、固有円振動数比 $\lambda$ により無次元化し、式(4.5)を得る。

$$\frac{X_1}{X_0} = \frac{1 - \mu\lambda^2 + 2\lambda\zeta \cdot j}{1 - (1 + \mu)\lambda^2 + 2\lambda\zeta \cdot j} \quad (4.5)$$

これより、支持部および構造体の絶対加速度をラプラス変換する過程で分母分子をそれぞれ円振動数 $\omega^2$ で除すと、加速度伝達関数は $|X_1/X_0|$ 、変位伝達関数 $|(X_1 - X_0)/X_0|$ として、それぞれ以下のように表される。

$$\left| \frac{X_1}{X_0} \right| = \sqrt{\frac{(1 - \mu\lambda^2)^2 + (2\lambda\zeta)^2}{\{1 - (1 + \mu)\lambda^2\}^2 + (2\lambda\zeta)^2}} \quad (4.6)$$

$$\left| \frac{X_1 - X_0}{X_0} \right| = \sqrt{\frac{(\lambda^2)^2}{\{1 - (1 + \mu)\lambda^2\}^2 + (2\lambda\zeta)^2}} \quad (4.7)$$

式(4.6)および式(4.7)より、質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ を変化させた場合の加速度伝達率と変位伝達率を図4.2に示す。図中の黒線は質量比を $\mu=0$ で一定として減衰比 $\zeta$ を0.10, 0.30, 0.50と変化させた場合、図中の赤線は減衰比 $\zeta=0.10$ で一定として質量比を0.05, 0.10と変化させた場合である。図4.2(a)より、質量比 $\mu$ が一定の場合、共振周波数 $\lambda=1$ 近傍では減衰比 $\zeta$ が大きいほど、加速度伝達率は小さくなる。これは図4.2(b)の変位伝達率においても同様である。しかしながら、高周波数領域 $\lambda=\sqrt{2}$ 程度以上の範囲においては、減衰比 $\zeta$ が大きいほど、加速度伝達率は大きくなる。一方、減衰比 $\zeta$ を一定として質量比 $\mu$ を変化させた場合、共振周波数 $\lambda=1$ より高周波数領域での変位伝達率はやや小さくなる。特に、 $\lambda=\sqrt{2}$ 程度以上の高周波数領域においては、加速度伝達率に大きな変化が見られる。図4.2(a)の加速度伝達率において、例えば $\mu=0.00, \zeta=0.50$ の場合と、 $\mu=0.05, \zeta=0.10$ の場合を比較すると、 $\lambda=\sqrt{2}$ 以上の領域

第一章

において、 $\lambda=20$  程度の範囲までは $\mu=0.00$ ,  $\zeta=0.50$  よりも $\mu=0.05$ ,  $\zeta=0.10$  の場合の方が加速度伝達率を小さくすることができる。逆に、 $\lambda=20$  を超えると $\mu=0.05$ ,  $\zeta=0.10$  の場合の方が加速度伝達率は大きくなってしまいが、適切な質量比 $\mu$ を取ることにより、減衰比 $\zeta$ を大きく取るよりも加速度伝達率を効果的に小さくできる周波数領域が存在する。本論の対象モデルの固有周期4秒のため、0.2秒~2.8秒 ( $\lambda=\sqrt{2} \sim 20$ ) 程度の周期帯がこの範囲に該当する。

第二章

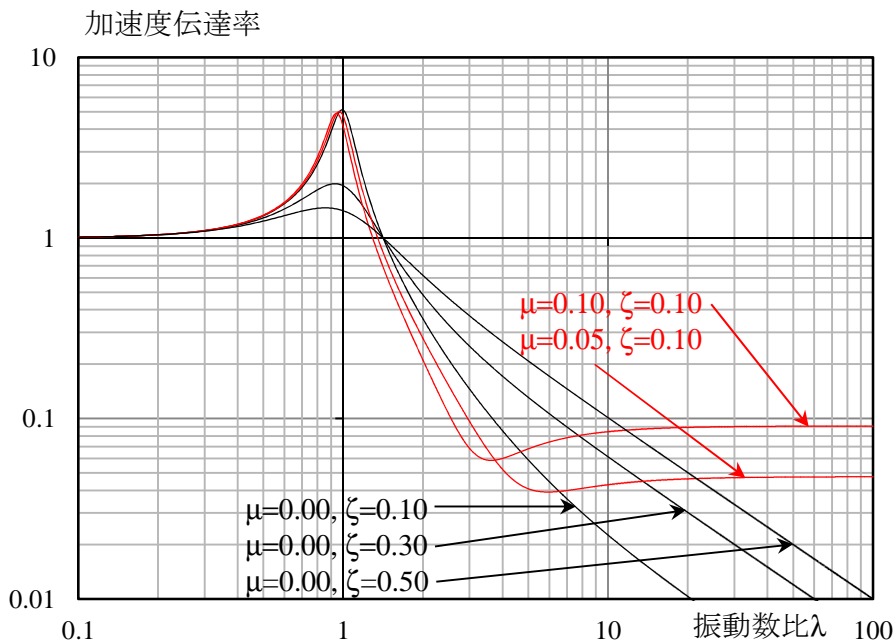
しかしながら、共振周波数 $\lambda=1$  近傍においては、質量比 $\mu$ の変化のみでは加速度伝達率に大きな変化は見られず、加速度伝達率を低減させるには、減衰比 $\zeta$ を大きく取る必要がある。

第三章

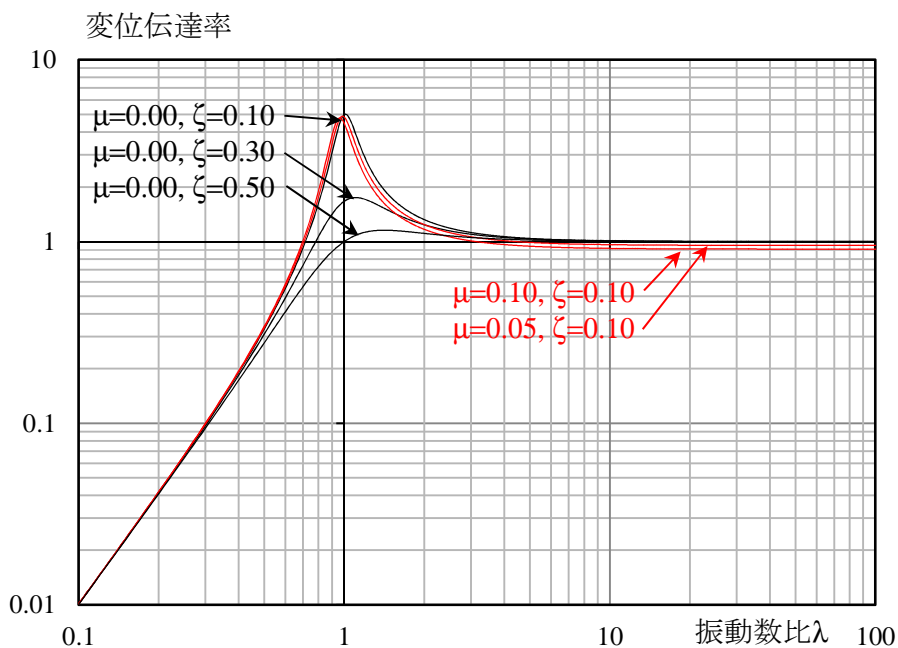
しかし、減衰比 $\zeta$ を大きく取ると先述のように、 $\lambda=\sqrt{2}$  程度以上の範囲で加速度伝達率は大きくなる。また、減衰比 $\zeta$ を揃えた場合の質量比 $\mu$ による効果を、例えば $\mu=0.00$ ,  $\zeta=0.10$  と、 $\mu=0.05$ ,  $\zeta=0.10$  の場合とを加速度伝達率の観点から考察すると、 $\lambda > \sqrt{2}$  で加速度伝達率が相対的に小さくなる周波数領域は上限が $\lambda=7$  程度までと狭くなる。このように、加速度伝達率および変位伝達率において、質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ を調整することにはそれぞれ一長一短があり、パッシブ制御による場合はこれらのトレードオフ関係を、想定する外乱の周波数特性を考慮し、適切に調整する必要がある。

第四章

第五章



(a) 加速度伝達関数



(b) 変位伝達関数

図 4.2 パッシブ制御による場合の伝達関数

#### 4.2.2 セミアクティブ制御による場合

本項では、前項におけるパッシブ制御時の質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ のトレードオフ関係を踏まえ、セミアクティブ制御によりこれを解決する方法を提案する。地震動に対する応答制御にあたって、主に加速度伝達率の観点から、質量比 $\mu$ または減衰比 $\zeta$ の調整を先に行った場合、それぞれのトレードオフ関係は、以下のように整理できる。

- ① 質量比 $\mu$ を優先して調整する場合、適切な質量比 $\mu$ を取ることで、加速度伝達率および変位伝達率が共に小さくなる特定の周波数領域が存在する。減衰比 $\zeta$ が小さい方がこの範囲は広い。しかし、減衰比 $\zeta$ が小さい場合は減衰比 $\zeta$ が大きい場合に比べて、共振周波数 $\lambda=1$ 近傍で伝達率が大きくなる。
- ② 減衰比 $\zeta$ を優先して調整する場合、減衰比 $\zeta$ を大きく取ると、共振周波数 $\lambda=1$ 近傍での加速度伝達率および変位伝達率が共に小さくなる。しかし、高周波数領域 $\lambda=\sqrt{2}$ 以上の範囲で、加速度伝達率が大きくなる。

セミアクティブ制御による上記の解決方法を考える。①の解決方法としては、適切な質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ の組み合わせを取り、セミアクティブ制御により、共振周波数 $\lambda=1$ 近傍での伝達率を小さくすれば良い。②の解決方法としては、適切な減衰比 $\zeta$ を取り、セミアクティブ制御により、 $\lambda=\sqrt{2}$ 以上の高周波数領域での加速度伝達率を小さくすれば良い。②については、既往の研究<sup>18), 19), 20)</sup>において、セミアクティブ制御でみかけの負剛性を与えることによる絶対加速度の低減効果が報告されている。本論では、慣性質量による質量効果を取り入れることを前提として、①の解決方法に関するセミアクティブ制御について、以降に論ずることとする。

セミアクティブ制御方式の基本的な考え方として、アクティブ方式の観点で制御系の検討を進め、その具現化においてパッシブ要素を採用することでハードウェア装置の簡素化を維持し、効果をアクティブ方式に近づけるといふ狙いがある。そのため、周波数領域における制御系の検討はアクティブ方式として議論を進める。制御系の検討において、前述①の共振周波数 $\lambda=1$ 近傍で伝達率を小さくし、かつ高周波数領域における伝達率を上昇させない方法として、スカイフック方式を採用する。スカイフック方式は、図4.3に示すように、絶対静止点に構造体質量 $M$ をダッシュポット、あるいは、ばねにより連結し、ダッシュポットの減衰係数またはばね定数を大きく（極論すると無限大に）することにより、支持部の外乱の大小に関わらず、構造体質量 $M$ を常に絶対静止することを意図したものであり、前者はスカイフックダンパー、後者はスカイフックスプリングと呼ばれている<sup>54)</sup>。アクティブ制御によるスカイフック方式の場合、式(4.1)の第5項、MR流体による可変減衰力の項を、状態フィードバックゲイン $g_1, g_2$ を用いた次式の制御力項に置き換えるものとする。

$$f_{MR} \cdot \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) = f_{\text{skyhook}} = g_1 \dot{x}_1 + g_2 x_1 \quad (4.8)$$

式(4.1)の制御力項を式(4.8)に置き換えた式について、前節と同様にして加速度伝達関数 $|X_1/X_0|$ 、変位伝達関数 $|(X_1 - X_0)/X_0|$ を求める。

$$\left| \frac{X_1}{X_0} \right| = \sqrt{\frac{(1 - \mu\lambda)^2 + (2\lambda\zeta)^2}{\{1 + N_a - (1 + \mu)\lambda^2\}^2 + \{2\lambda(\zeta + \zeta_a)\}^2}} \quad (4.9)$$

$$\left| \frac{X_1 - X_0}{X_0} \right| = \sqrt{\frac{(\lambda^2 - N_a)^2 + (-2\lambda\zeta_a)^2}{\{1 + N_a - (1 + \mu)\lambda^2\}^2 + \{2\lambda(\zeta + \zeta_a)\}^2}} \quad (4.10)$$

$$\text{ここで, } \zeta_a = \frac{g_1}{2\sqrt{MK}}, N_a = \frac{g_2}{K} \quad (4.11)$$

式(4.9)および式(4.10)による加速度伝達率と変位伝達率を図 4.4 に示す。図中の赤線は質量比を $\mu=0.05$ 、減衰比を $\zeta=0.10$  の場合のパッシブ方式の場合、図中の青線は同じ質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ で、式(4.11)で表されるアクティブ減衰比 $\zeta_a$ 、アクティブ剛性比  $N_a$  によりスカイフック方式を採用した場合である。また、黒線は $\mu=0$  で、減衰のみを $\zeta=0.30$  で付加した場合、緑線は $\mu=0$ 、 $\zeta=0.30$  でスカイフック方式を採用した場合を示している。図 4.4 より、スカイフック方式では共振周波数 $\lambda=1$  近傍の伝達率は減衰のみを $\zeta=0.30$  で付加した場合と同程度以下になっており、質量比 $\mu$ が同じ場合には高周波数領域における伝達率も上昇しないことが確認できる。また、スカイフックダンパーにスカイフックスプリングを加えた場合には、主に共振周波数以下の低周波数領域において、加速度伝達率はより小さくなり、 $\lambda=0.3\sim 1.0$  程度の範囲（本論の対象モデルでは固有周期 4 秒～13 秒）までは変位伝達率も小さくなる。 $\lambda < 0.3$  の範囲（本論の対象モデルでは固有周期 13 秒以上）においては、変位伝達率が大きくなるが、本論で対象としている地震動の周波数域からは大きく外れている。これらの結果から、スカイフック方式は①の解決方法として期待できる。

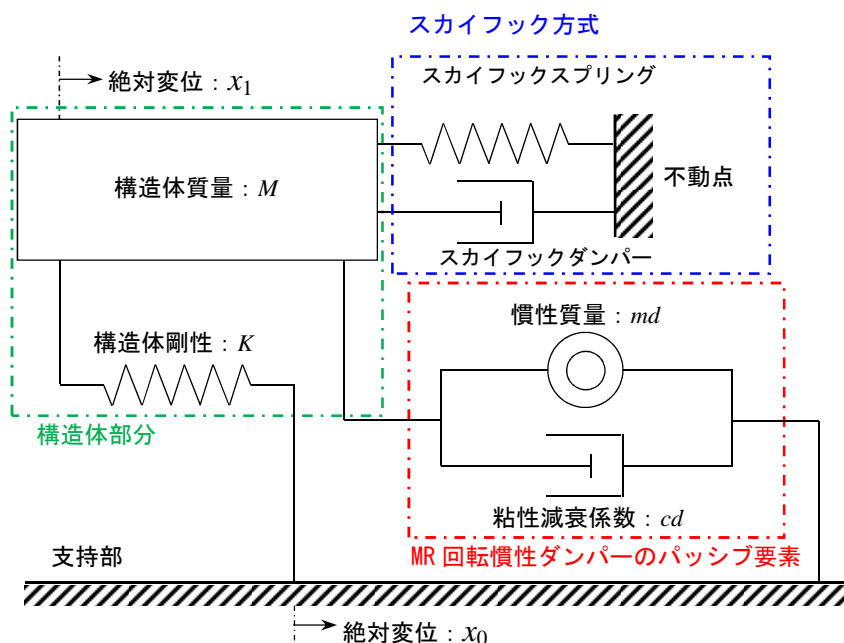


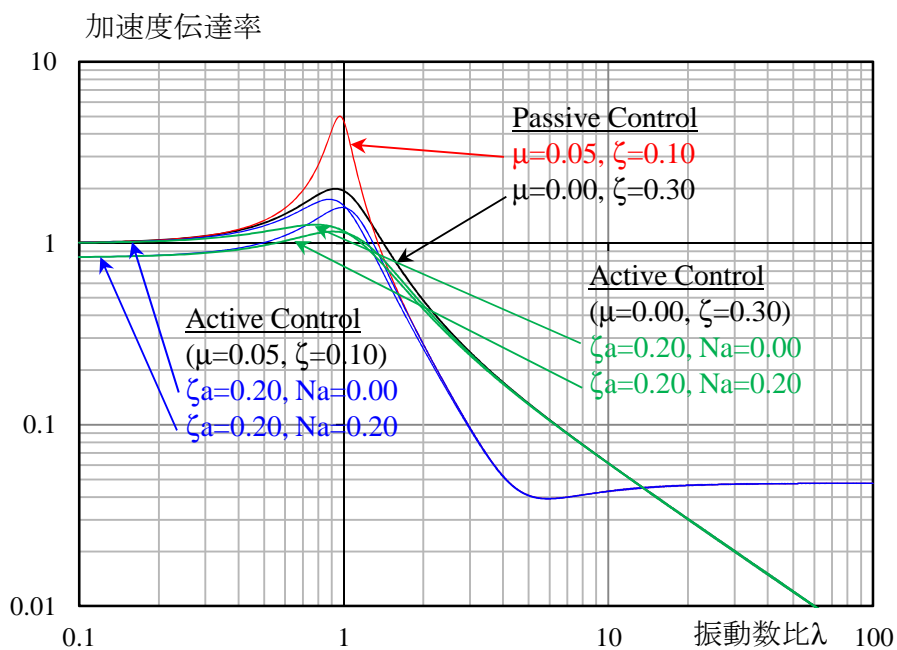
図 4.3 スカイフック方式の原理

第一章

第二章

第三章

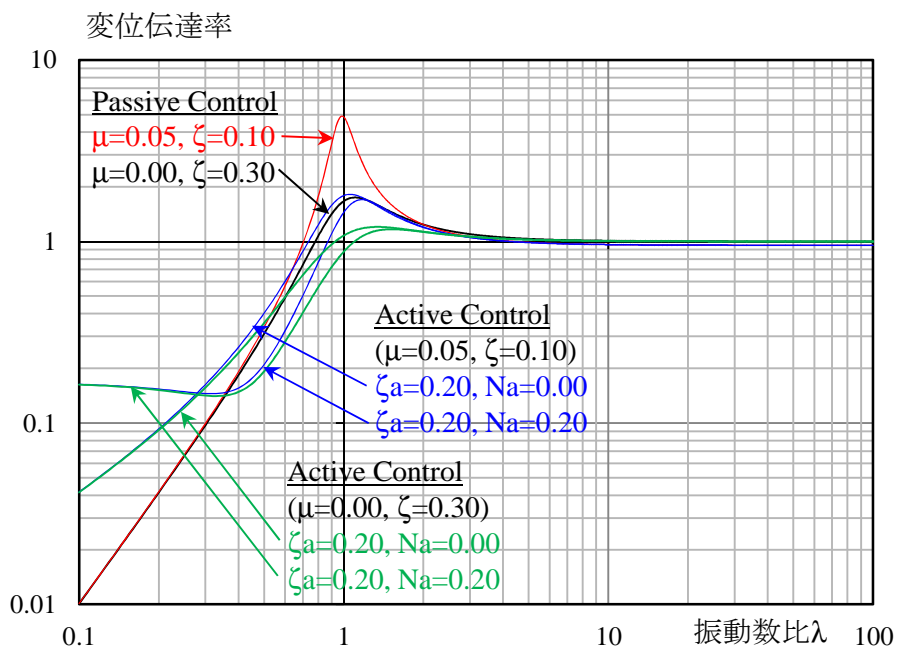
第四章



(a) 加速度伝達関数

第五章

A  
P  
P  
e  
n  
d  
i  
x



(b) 変位伝達関数

図 4.4 スカيفック方式による場合の伝達関数



### 4.3 時刻歴応答における検討

本節では、前節までの周波数領域における一連の検討に、時刻歴応答の観点から考察を加える。式(4.8)では、制御力は構造体の絶対速度および絶対変位をフィードバックしているが、実際のMR回転慣性ダンパーの可変減衰力の作用方向は構造体と支持部との相対速度の向きに依存している。そのため、前述のスカイフック方式を具現化するにあたっては、絶対速度および絶対変位と、相対速度との位相差を考慮する必要がある。図4.5に、構造体の絶対速度と構造体-支持部間の相対速度の時刻歴波形の例によるスカイフック方式の切替え則を示す。図4.5に示すように、構造体の絶対速度 $\dot{x}_1$ と構造体-支持部間の相対速度 $(\dot{x}_1 - \dot{x}_0)$ とは、時刻歴のある領域で位相特性が等しくなる場合と、そうでない場合の二つの状態が存在する。よって、セミアクティブ制御において、スカイフック方式を実現させるために、次式のように $\dot{x}_1$ と $(\dot{x}_1 - \dot{x}_0)$ が同符号の場合のみ、制御力としてMR回転慣性ダンパーの可変減衰力を作用させる。

$$\dot{x}_1 \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_0) > 0 \quad (4.12)$$

また、 $\dot{x}_1$ と $(\dot{x}_1 - \dot{x}_0)$ が異符号となる場合には、セミアクティブ方式では意図する方向と逆方向に制御力が働いてしまうため、次善の策としてMR回転慣性ダンパーの可変減衰力を0とする。以降では、パッシブおよびセミアクティブ制御時の地震動に対する応答制御効果を時刻歴応答解析にて検討する。

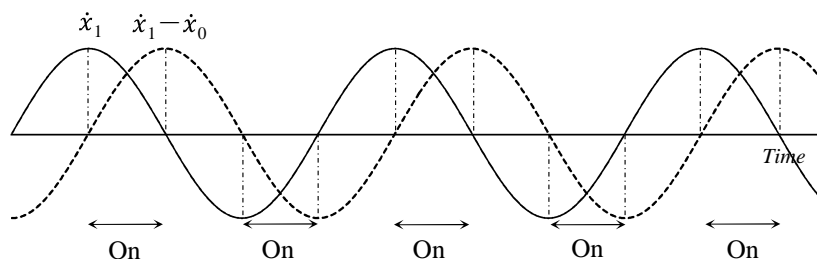


図4.5 スカイフック方式による切替え則

#### 4.3.1 対象モデル

時刻歴応答解析における対象モデルは図4.1と同様とし、質量比 $\mu$ を0.00, 0.02, 0.05, 0.10, 0.30, 0.50の6通り、減衰比 $\zeta$ を0.00, 0.10, 0.30, 0.50の4通りに変化させた場合について比較検討を行う。なお、対象モデルの呼称は以下のように設定する。

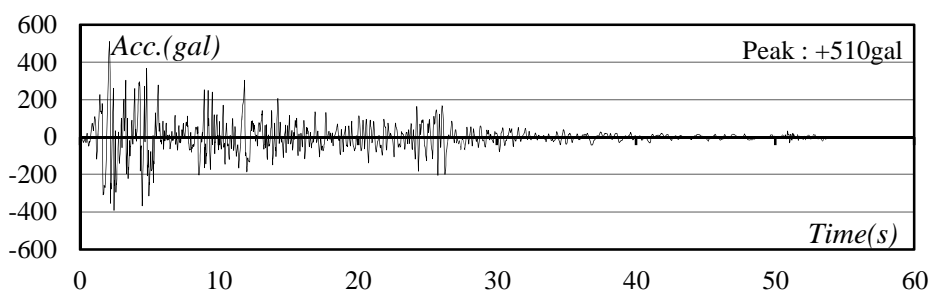
例： $\mu 05 \zeta 10$  (質量比 0.05, 減衰比 0.10 の場合)  
 $\zeta 00, \zeta 10, \zeta 30, \zeta 50$  : 減衰比 0.00, 0.10, 0.30, 0.50  
 $\mu 00, \mu 02, \mu 05, \mu 10, \mu 30, \mu 50$  : 質量比 0.00, 0.02, 0.05, 0.10, 0.30, 0.50

### 4.3.2 入力地震動

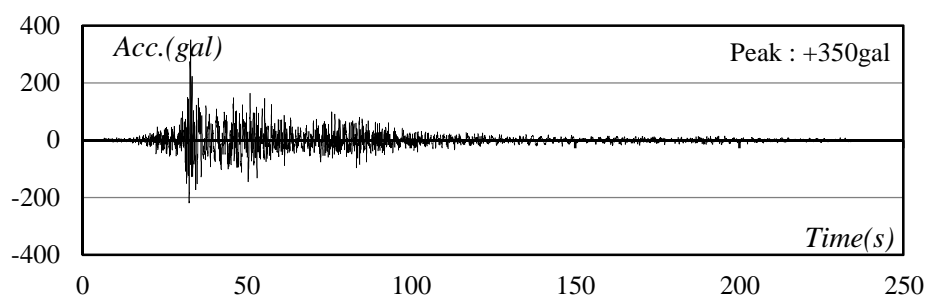
入力地震動には代表的な観測記録として、El Centro 1940 NS, Hachinohe 1968 NS<sup>55)</sup>, JMA Kobe 1995 NS, JR Takatori 1995 NS (以下、それぞれ「ElCentro」, 「Hachinohe」, 「JMAKobe」, 「JRTakatori」と略す)を用いる。また、建築基準法の水準を大きく超える地震動として、SPW3125\_T3V125N1<sup>7)</sup>, UMTA4\_B1EW1<sup>7)</sup>, Future Nankai<sup>2)</sup>, AIC003<sup>5)</sup> (以下、それぞれ「SPW」, 「UMT」, 「Nankai」, 「AIC」と略す)を用いる。各地震動の加速度時刻歴波形を図4.6に示す。また、それぞれの加速度フーリエスペクトルを図4.7に示す。なお、スペクトル解析の際、AICについてはウィンドウ幅0.1Hz、それ以外の地震動についてはウィンドウ幅0.2HzのParzenウィンドウによる平滑化処理を行っている。また、各地震動の継続時間および最大加速度、最大速度、最大変位を表4.1に示す。備考欄には、長周期およびパルス性など、各地震動の大まかな特徴も併せて示している。

表4.1 入力地震動一覧

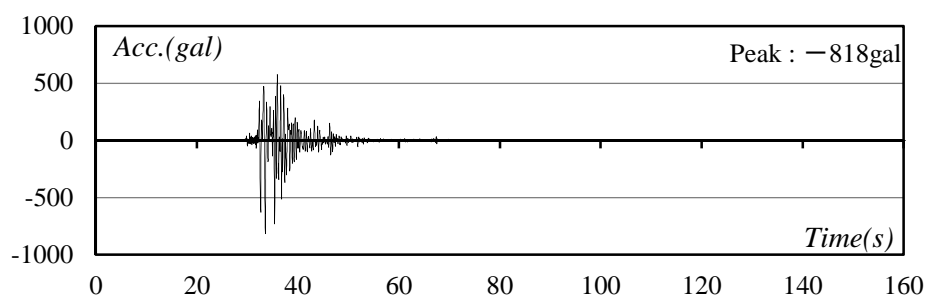
入力地震動	継続時間 (秒)	最大値			備考	
		加速度 (gal)	速度 (kine)	変位 (cm)		
ElCentro	53	510	50	17	観測地震動	—
Hachinohe <sup>55)</sup>	234	350	50	17	観測地震動	長周期地震動
JMAKobe	160	818	91	20	観測地震動	パルス性地震動
JRTakatori	150	606	122	41	観測地震動	パルス性地震動
SPW <sup>7)</sup>	40	131	88	70	人工地震動	パルス性地震動
UMT <sup>7)</sup>	40	812	101	58	人工地震動	パルス性地震動
Nankai <sup>2)</sup>	270	121	120	142	人工地震動	長周期地震動
AIC <sup>5)</sup>	655	545	68	44	人工地震動	長周期地震動



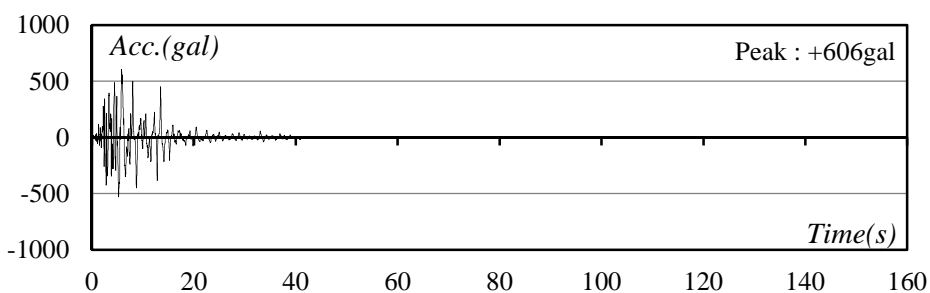
(a) El Centro 1940 NS (観測波 50kine 基準化)



(b) Hachinohe 1968 NS<sup>55)</sup> (観測波 50kine 基準化)



(c) JMA Kobe 1995 NS (観測波原波)



(d) JR Takatori 1995 NS (観測波原波)

図 4.6 入力地震動の加速度時刻歴波形

第一章

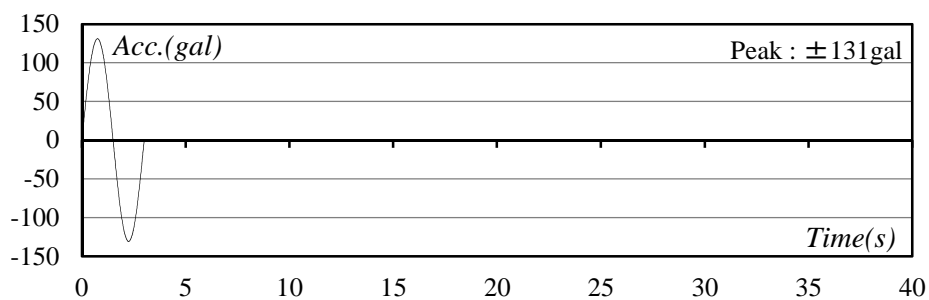
第二章

第三章

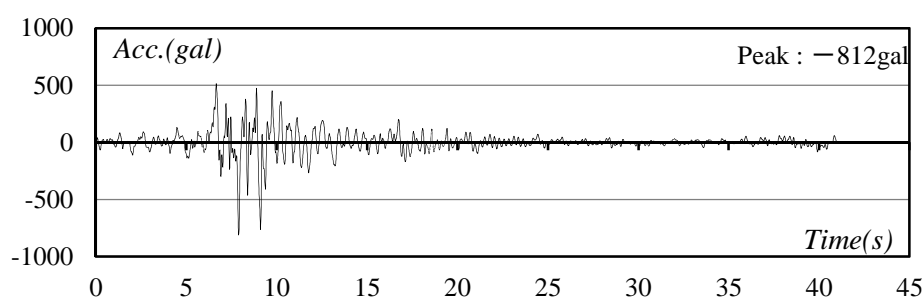
第四章

第五章

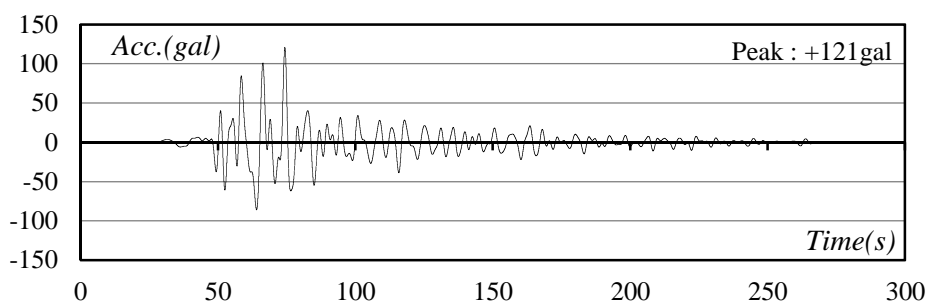
A  
P  
P  
e  
n  
d  
i  
x



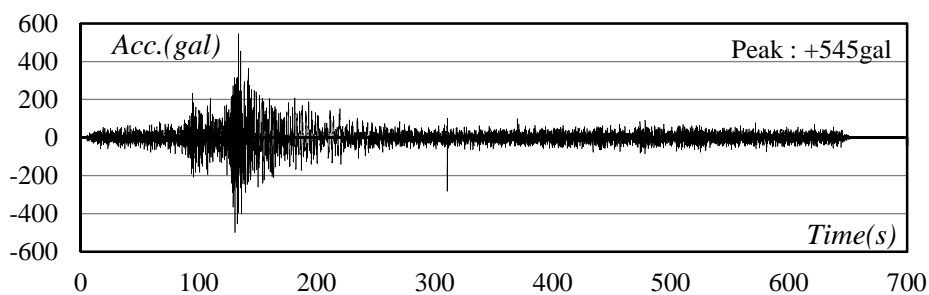
(e) SPW3125\_T3V125N1<sup>7)</sup>



(f) UMTA4\_B1EW1<sup>7)</sup>

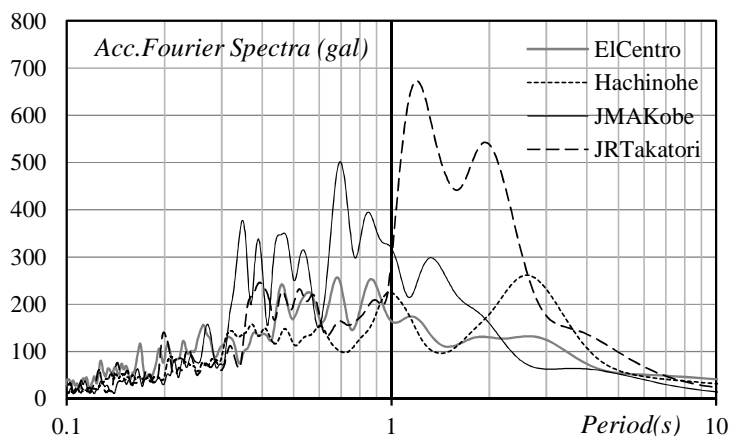


(g) Future Nankai<sup>2)</sup>

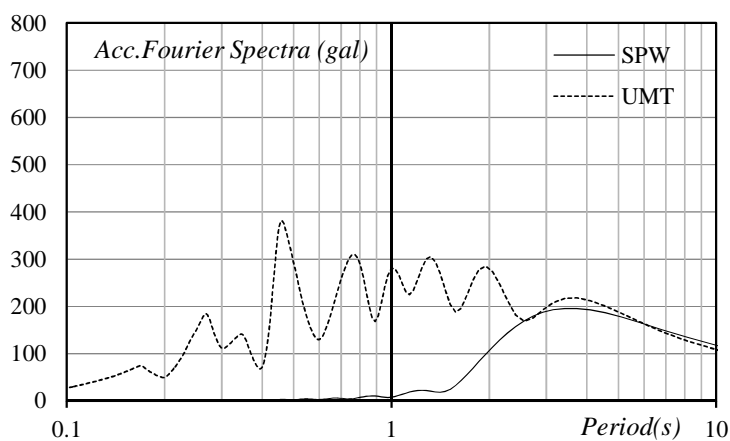


(h) AIC003<sup>5)</sup>

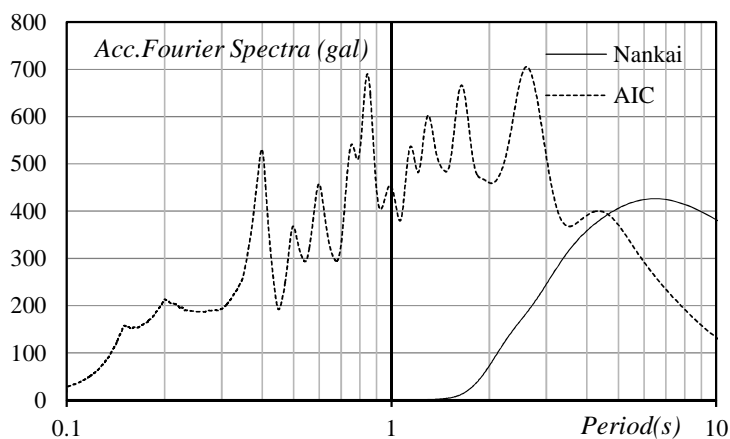
図 4.6 入力地震動の加速度時刻歴波形



(a) 観測地震動



(b) 人工地震動 (パルス性地震動)



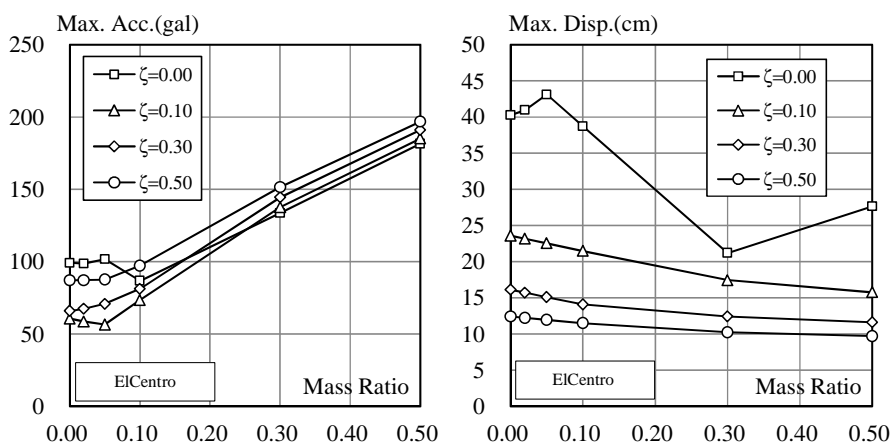
(c) 人工地震動 (長周期地震動)

図 4.7 入力地震動の加速度フーリエスペクトル

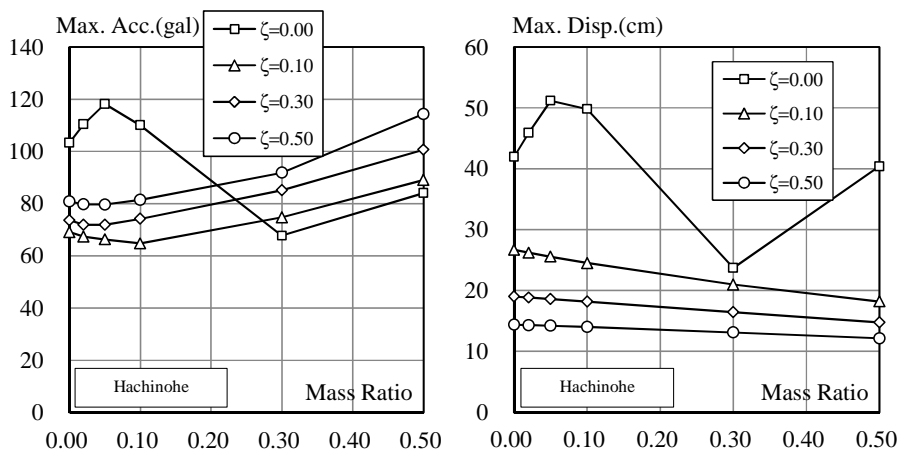
### 4.3.3 パッシブ制御による場合

各入力地震動におけるパッシブ制御時の最大床応答加速度および最大応答変位を図 4.8 に示す。図 4.8 は横軸に質量比 $\mu$ 、縦軸に最大床応答加速度または最大応答変位を取り、それぞれの減衰比 $\zeta$ ごとにプロットしたものである。図より、 $\mu 00\zeta 00$ を除き、質量比 $\mu=0.10$ 程度より大きい範囲では、全体として、質量比 $\mu$ が大きくなると、最大応答変位は小さく最大床応答加速度は大きくなる傾向が見てとれる。前述のように大きな質量比 $\mu$ を付加することで、高周波数領域の加速度伝達率が大きくなってしまいうためと考えられる。SPW および Nankai については、質量比 $\mu$ の増大とともに、最大応答変位のみならず、最大床応答加速度も減少する傾向にあるが、これは図 4.7(b), (c)から分かるように、SPW と Nankai が 1 秒以下程度の短周期帯成分を含まないためである。

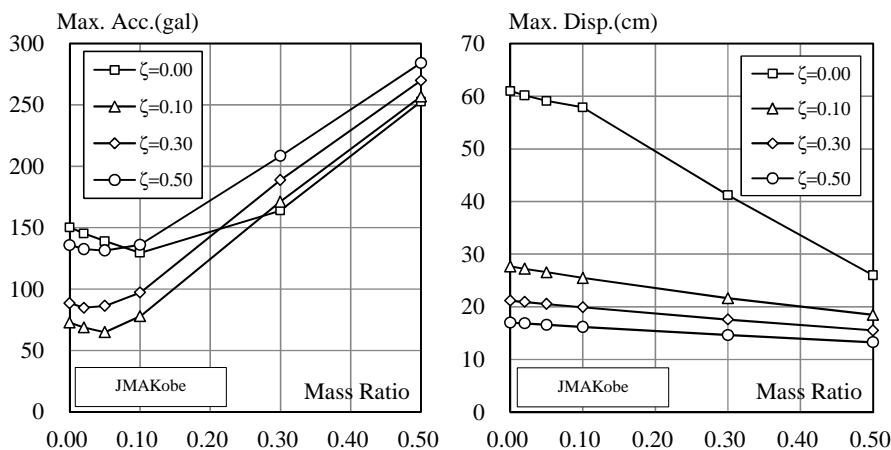
次に、最大床応答加速度に着目すると、質量比 $\mu$ の増大とともに最大床応答加速度が増大する傾向があるものの、SPW, Nankai 以外の地震動では、質量比 $\mu 0.02$ から 0.10 の範囲で極小値を取り、下に凸の特性を示していることが確認できる。これは前述のように、質量比 $\mu$ による特定の周波数領域での加速度低減効果であり、例えば、4.2.1 項で示した $\mu 00\zeta 50$ と $\mu 05\zeta 10$ との比較において、固有周期 0.2~2.8 秒程度の周期帯では減衰比 $\zeta$ の小さい $\mu 05\zeta 10$ の方が加速度低減効果は大きいことは既に述べた。時刻歴応答においては、特に JMAKobe および JRTakatori の場合に、 $\mu 00\zeta 50$ に比べ $\mu 05\zeta 10$ の方が 50%以上も最大床応答加速度が低減していることが確認できる。このように、質量比 $\mu=0.05$  および減衰比 $\zeta=0.10$  を取ることに より、特に周期 1~2 秒程度に大きな振幅を持つようなパルス性地震動に対しては床応答加速度を効果的に減少させることができると考えられる。しかしながら、JMAKobe や JRTakatori での最大応答変位に着目すると、 $\mu 00\zeta 50$ に比べ $\mu 05\zeta 10$ の方が最大応答変位は最大 56%増大しており、床応答加速度をより低減するという観点において、免震効果をより高めているという見方もできるが、本論における検討の範囲においては最大床応答加速度と最大応答変位の両方を同時には抑制できず、パッシブ制御のみでは限界があることが分かる。



(a) ElCentro 入力時の最大床応答加速度, 最大応答変位



(b) Hachinohe 入力時の最大床応答加速度, 最大応答変位



(c) JMAKobe 入力時の最大床応答加速度, 最大応答変位

図 4.8 各入力地震動におけるパッシブ制御時の最大床応答加速度および最大応答変位

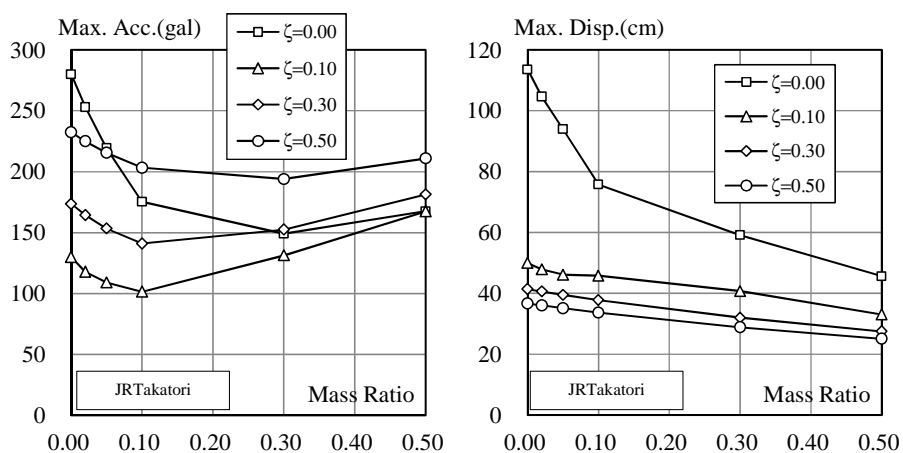
第一章

第二章

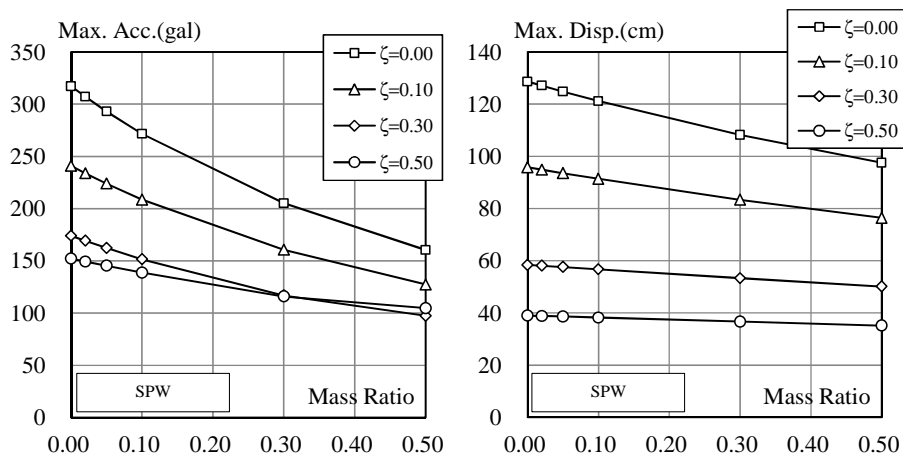
第三章

第四章

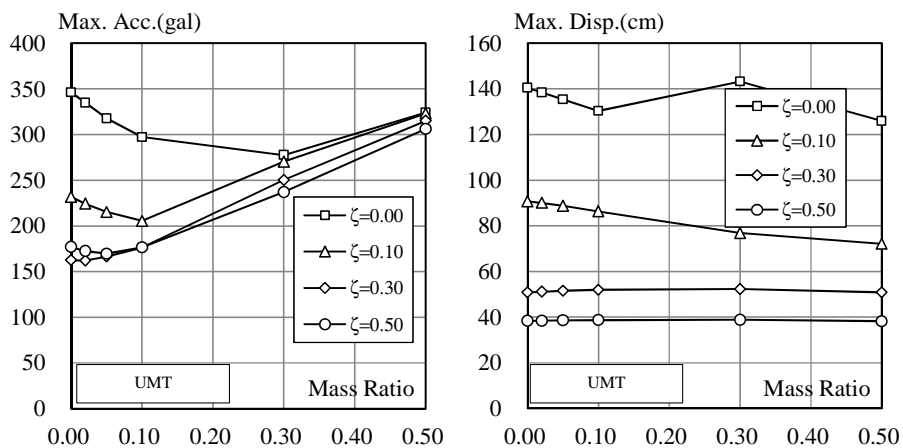
第五章



(d) JRTakatori 入力時の最大床応答加速度, 最大応答変位



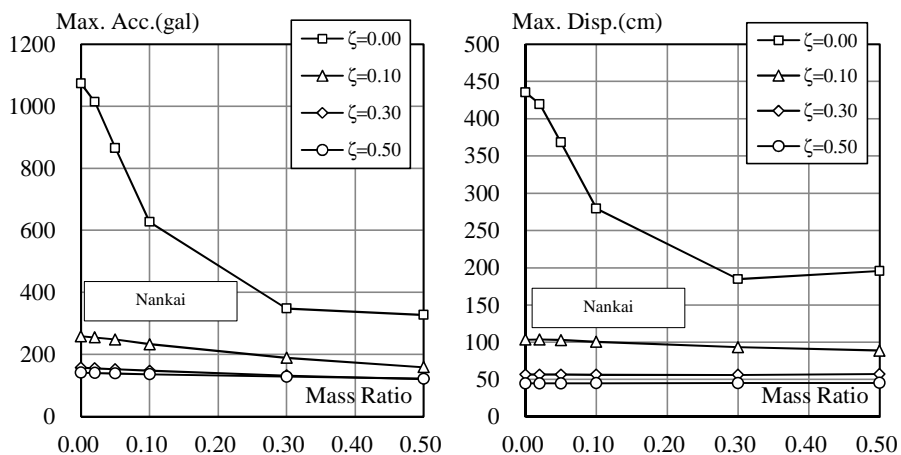
(e) SPW 入力時の最大床応答加速度, 最大応答変位



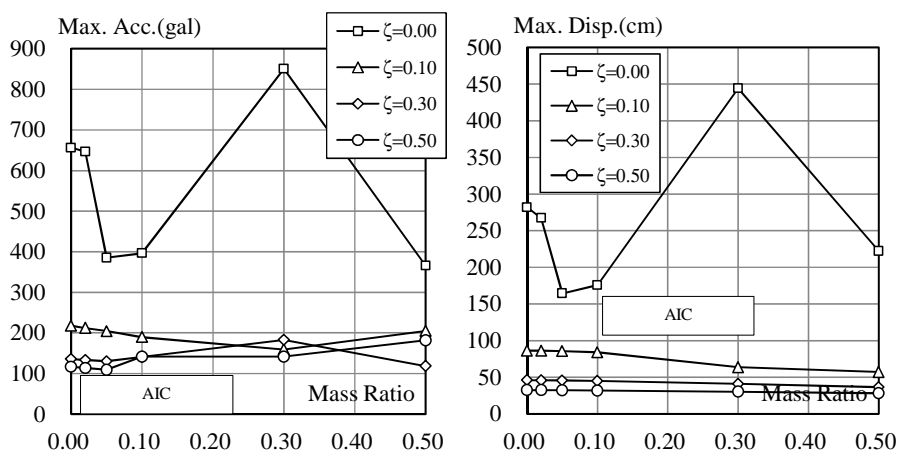
(f) UMT 入力時の最大床応答加速度, 最大応答変位

図 4.8 各入力地震動におけるパッシブ制御時の最大床応答加速度および最大応答変位





(g) Nankai 入力時の最大床応答加速度, 最大応答変位



(h) AIC 入力時の最大床応答加速度, 最大応答変位

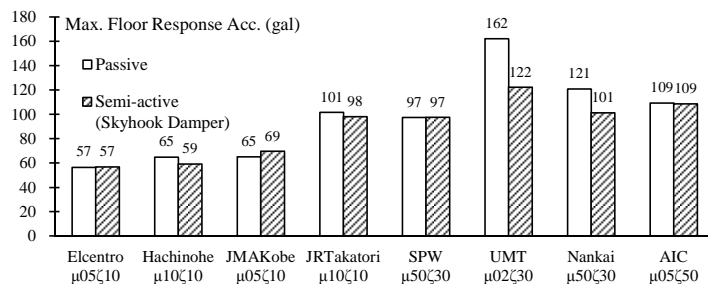
図 4.8 各入力地震動におけるパッシブ制御時の最大床応答加速度および最大応答変位

#### 4.3.4 セミアクティブ制御による場合

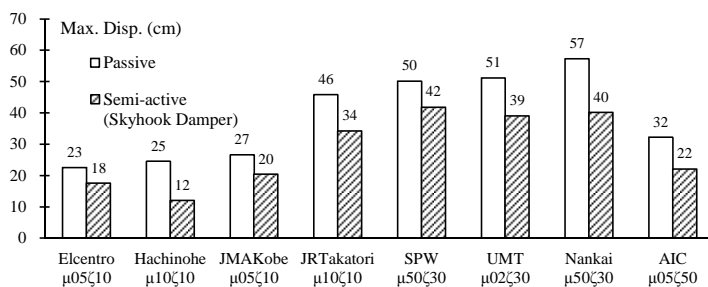
次に、セミアクティブ制御による場合について考察する。図 4.8 に示したパッシブ制御時において、最大床応答加速度が最も小さくなる質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ の組み合わせの場合について、各入力地震動に対するセミアクティブ制御効果を確認する。図 4.9 は、パッシブ制御時およびセミアクティブ制御時の ElCentro の $\mu 0.5\zeta 10$ 、Hachinohe の $\mu 10\zeta 10$ 、JMAKobe の $\mu 0.5\zeta 10$ 、JRTakatori の $\mu 10\zeta 10$ 、SPW の $\mu 50\zeta 30$ 、UMT の $\mu 0.2\zeta 30$ 、AIC の $\mu 0.5\zeta 50$  それぞれの場合における最大床応答加速度および最大応答変位を示している。なお、本項におけるセミアクティブ制御は 4.2.2 項において提案したスカイフック方式のうち、アクティブ剛性比  $N_a$  を 0 としたスカイフックダンパー単独による制御を用いている。また、図 4.1 に示すように、MR 流体による可変減衰力は構造体質量  $M$  と慣性質量  $m_d$  との和の 5% としている。

図 4.9 より、どの地震動においても、セミアクティブ制御時はパッシブ制御時に比べて、最大床応答加速度を同程度もしくは小さく抑制しながら、応答変位も低減できていることが確認できる。図 4.9 において検討に用いた地震動では、最大床応答加速度は平均 6% 程度、最大応答変位は平均 28% 程度低減されており、本論で提案する慣性質量効果を取り入れたスカイフック方式によるセミアクティブ制御法は、床応答加速度を抑制しながら、同時に免震層の応答変位を低減するのに有効な制御方法であると言える。

図 4.9 では、図 4.8 に示すパッシブ制御時において、最大床応答加速度が最も小さくなる質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ の組み合わせを選び、入力地震動ごとに異なるモデルとしていた。しかしながら、パッシブ制御の場合、実際の構造物に対する質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ は、設計時にある一定の値に固定され、制御によりオンラインで調整することは難しくなる。ここでは、建築基準法の水準と同程度の地震動に対して設計されたモデルを想定し、質量比を $\mu=0.05$ 、減衰比を $\zeta=0.10$ と一定とした場合 ( $\mu 0.5\zeta 10$ ) のセミアクティブ制御効果について考察を加える。図 4.10 は $\mu 0.5\zeta 10$  の各入力地震動に対するセミアクティブ制御効果を示している。構造物モデル以外の部分は図 4.9 と同様であり、ElCentro、JMAKobe では図 4.9 と図 4.10 とで最大応答値が等しくなっている。図 4.10 より、 $\mu 0.5\zeta 10$  におけるパッシブ制御の場合、建築基準法の水準を大きく超える地震動である SPW、UMT、Nankai、AIC に対して、免震層の最大応答変位はいずれも 80cm を超える結果となる。一般的な免震建築物における擁壁とのクリアランスが 60cm 程度とすると、擁壁への衝突が懸念される過大な変位であると言える。それに対し、本論で提案する慣性質量効果を取り入れたスカイフック方式によるセミアクティブ制御法では、SPW、UMT、Nankai、AIC に対して、最大床応答加速度は 200gal 以下、免震層の最大応答変位は 60cm 以下におさまっている。建築基準法の水準と同程度と考えられる ElCentro、Hachinohe、JMAKobe、JRTakatori に対しては、パッシブ制御時に比べて最大床応答加速度の低減は小さく、一部では数%上昇しているものもあるが、その値は最大でも 112gal であり、免震建築物の機能性は維持できる程度である。また、最大応答変位は全ての地震動に対して低減している。図 4.10 において検討に用いた地震動では、最大床応答加速度は平均 16% 程度、最大応答変位は平均 38% 程度低減されている。

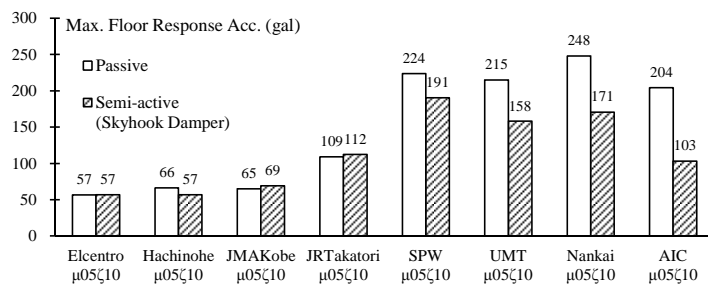


(a) 最大床応答加速度

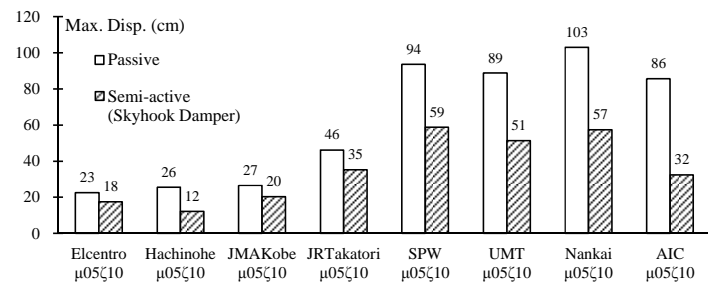


(b) 最大応答変位

図 4.9 パッシブ制御時とセミアクティブ制御時の最大値の比較



(a) 最大床応答加速度



(b) 最大応答変位

図 4.10 パッシブ制御時とセミアクティブ制御時の最大値の比較  
 (質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ が一定の場合)

#### 4.4 セミアクティブ制御効果の評価

MR 回転慣性ダンパーに一定電流を印加した場合、MR 流体による可変減衰力  $f_{MR}$  は常に一定の値となり、摩擦力と同様の復元力特性を示す<sup>46)</sup>。本節では、MR 流体による可変減衰力  $f_{MR}$  を常に一定と仮定した場合の等価減衰定数を簡易に求め、等価減衰を考慮した場合のパッシブ制御時とセミアクティブ制御時の最大応答値とを比較し、その制御効果について、さらに考察を加える。

#### 4.4.1 一定電流印加時の等価減衰定数の評価

MR 流体による可変減衰力  $f_{MR}$  は、これまでと同様に構造体質量  $M$  と慣性質量  $m_d$  との和の 5% とし、図 4.5 のような制御則による切替えは行わず、常に一定の値を取ると仮定する。 $\mu 00\zeta 00$  の場合、構造体剛性  $K$  と  $f_{MR}$  を併せた復元力特性は図 4.11 のように表すことができる。この際の 1 サイクルにおける消費エネルギー  $\Delta W$  は式(4.12)のように表される<sup>56)</sup>。また、等価減衰定数  $h_e$  は、振動数を  $p$  とおくと、式(4.13)のように表される<sup>56)</sup>。

$$\Delta W = 4f_{MR} \cdot \delta \quad (4.12)$$

$$h_e = \frac{4f_{MR}}{\pi p \delta} \cdot \frac{1}{2\sqrt{MK}} \quad (4.13)$$

これより、等価減衰定数  $h_e$  は振幅  $\delta$  と振動数  $p$  の関数となる。図 4.1 の対象モデルにおいて、振動数  $p$  を固有振動数 (=0.25Hz) とし、 $\mu 00\zeta 00$  に  $f_{MR}$  を一定として付加した場合の最大応答変位を求め、それらを式(4.13)に代入すると、それぞれの地震動入力時における等価減衰定数を簡易に求めることができる。 $\mu 00\zeta 00$  の場合の各地震動入力時における最大応答変位と、式(4.13)から求められる等価減衰定数  $h_e$  を表 4.2 に示す。45cm 変位時の場合では概ね 18% 程度の減衰定数となる。

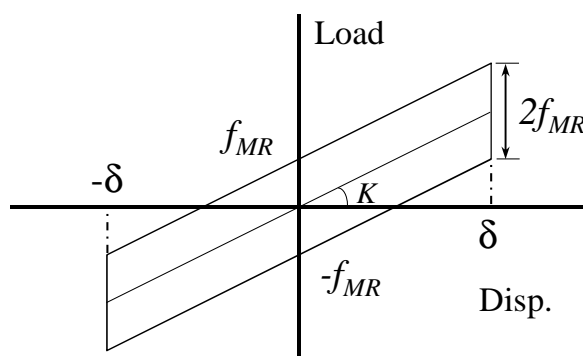


図 4.11 等価減衰定数の算出

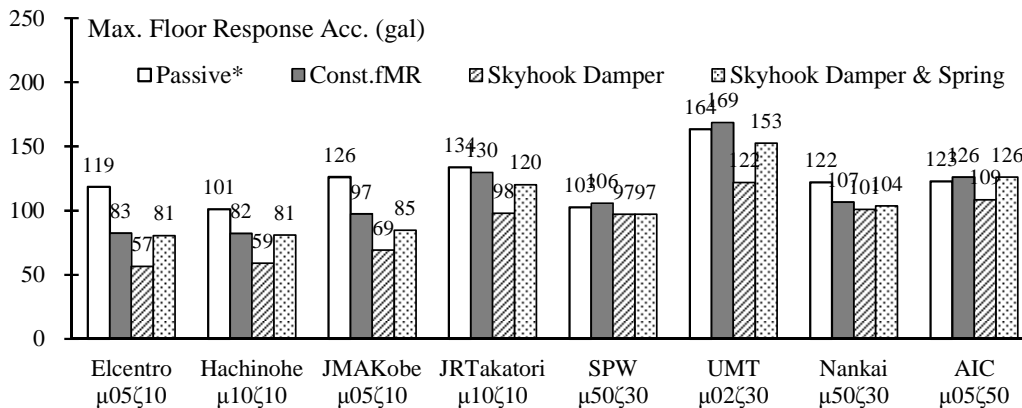
表 4.2 各入力地震動における等価減衰定数

入力地震動	$\mu 00\zeta 00$ 最大応答変位 (cm)	等価減衰定数 $h_e$	入力地震動	$\mu 00\zeta 00$ 最大応答変位 (cm)	等価減衰定数 $h_e$
EiCentro	11.7	0.695	SPW <sup>7)</sup>	59.9	0.135
Hachinohe <sup>55)</sup>	9.4	0.865	UMT <sup>7)</sup>	59.3	0.137
JMAKobe	21.6	0.376	Nankai <sup>2)</sup>	43.4	0.187
JRTakatori	45.4	0.179	AIC <sup>5)</sup>	30.7	0.265

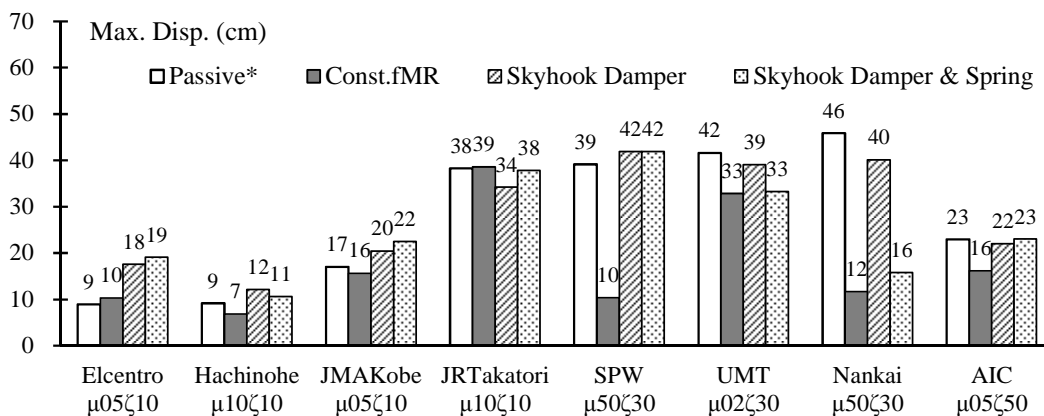
#### 4.4.2 減衰定数が等価な場合のセミアクティブ制御効果

本節では、①前項で求めた等価減衰定数を加算したパッシブ制御の場合、②MR 流体による可変減衰力  $f_{MR}$  を常に一定として摩擦力と同様の復元力特性を与えた場合、③本論で提案するスカイフック方式によるセミアクティブ制御とした場合、それぞれについて最大応答値を比較し、その制御効果について評価する。なお、①の等価減衰定数を加算したパッシブ制御とは、例えば ElCentro の  $\mu 05\zeta 10$  の場合を例にとると、表 4.2 における等価減衰定数は 69.5% であるので、減衰比として 69.5% を  $\mu 05\zeta 10$  に加算し、減衰比  $\zeta$  を 79.5% として考えた場合を示している。よって、①～③は MR 流体による可変減衰力  $f_{MR}$  の値はいずれも等しいとして、①は等価減衰定数として与えた場合、②は一定の摩擦力として常に与えた場合、③は図 4.5 に示す切替え則により②の復元力を切替えた場合の比較を意味している。

図 4.12 に①～③の場合の最大床応答加速度および最大応答変位を示す。なお、③のセミアクティブ制御は、スカイフックダンパー単独の場合と、さらにスカイフックスプリングを併用した場合の 2 通りとした。図より、スカイフックダンパーによるセミアクティブ制御時では全ての場合について床応答加速度が最も小さくなっている。また、①と②を比較すると、②の方が①に比べ応答低減効果は大きく、特に長周期地震動に対する応答変位の低減効果が大きい。②と③の比較では、②の方が応答変位を低減できる反面、床応答加速度が上昇してしまう。最後に、①と③の比較では、応答変位が小さい地震動においては③の方が応答変位は増大してしまうが、一定以上の変位応答となる場合には①よりも③の方が変位の低減効果は大きく、減衰比を等しくした場合においても①のパッシブ制御に比べてセミアクティブ制御は床応答加速度を抑制しながら、免震層の応答変位を低減するのに有効であると言える。これらのことから、①のパッシブ制御時に比べて、②では変位低減効果が期待でき、③では床応答加速度の低減効果が期待でき、MR 回転慣性ダンパーによる応答制御効果が確認できる。



(a) 最大床応答加速度



(b) 最大応答変位

\*図中の Passive の対象モデルには表 4.2 に示す等価減衰定数が加算されている

図 4.12 減衰定数が等しい場合のセミアクティブ制御効果

#### 4.5 第4章まとめ

MR 回転慣性ダンパー<sup>45), 46)</sup>による応答制御に関して、固有周期 4 秒の免震構造物モデルを対象として、周波数領域における伝達関数および地震動に対する時刻歴応答の観点から検討を行い、慣性質量効果を取り入れたスカイフック方式によるセミアクティブ制御方法を提案し、その効果について論じた。本章により得られた知見は以下の通りである。

- ① 周波数領域における伝達関数から、適切な質量比 $\mu$ を取ることによって加速度伝達率および変位伝達率をともに小さくできる領域がある。
- ② 質量比 $\mu$ と減衰比 $\zeta$ を調整することには一長一短がある。質量比 $\mu$ を優先して調整する場合には①の領域で伝達率が小さくなるものの、共振周波数近傍での伝達率が大きくなる。一方、減衰比 $\zeta$ を優先して調整する場合には周波数近傍での伝達率は小さくなるものの、高周波数領域において加速度伝達率が大きくなる。パッシブ制御による場合はこれらのトレードオフ関係を、想定する外乱の周波数特性を考慮して、質量比 $\mu$ と減衰比 $\zeta$ を適切に調整する必要がある。
- ③ ②のトレードオフ関係について、質量比 $\mu$ を優先して調整することを前提とした場合、スカイフック方式を採用することで、高周波数領域における伝達率を上昇させずに、共振周波数近傍での伝達率を小さくすることができる。セミアクティブ制御により、パッシブ制御では実現できない効果が期待できる。
- ④ 時刻歴応答における検討から、入力地震動によらず全体的な傾向として、質量比 $\mu=0.10$ 程度より大きい範囲では、質量比 $\mu$ が大きくなると最大応答変位は小さくなるものの、最大床応答加速度は大きくなる傾向が確認できた。
- ⑤ 最大床応答加速度に着目すると、質量比 $\mu$ が大きくなるに従い、最大床応答加速度は大きくなる傾向にあるものの、質量比 $\mu=0.02$  から $\mu=0.10$  の範囲で極小値を取る下に凸の特性を示す。これは上記①による効果と考えられ、適切な質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ を取ることにより、特に周期 1~2 秒程度に大きな振幅を持つようなパルス性地震動に対しては床応答加速度を効果的に減少させることができると考えられる。
- ⑥ パッシブ制御時において、最大床応答加速度が最も小さくなる質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ の組み合わせの場合について、各入力地震動に対するセミアクティブ制御効果を確認し、本論で用いた地震動では、最大床応答加速度は平均 6%程度、最大応答変位は平均 28%程度低減されることを示した。また、建築基準法の水準と同程度の地震動に対して設計されたモデルを想定し、質量比 $\mu=0.05$ 、減衰比 $\zeta=0.10$  で一定とした場合のセミアクティブ制御効果についても考察を加え、最大床応答加速度は平均 16%程度、最大応答変位は平均 38%程度低減されることを示した。これらの結果から、本論で提案した慣性質量効果を取り入れたスカイフック方式によるセミアクティブ制御法は、床応答加速度を抑制しながら、同時に免震層の応答変位を低減するのに有効な制御方法である。
- ⑦ 一定電流印加時を想定して、その際の等価減衰定数を入力地震動ごとに求め、減衰比



が等価な場合のパッシブ制御時およびセミアクティブ制御時の最大応答値について比較した。減衰を等しくした場合においてもパッシブ制御に比べてセミアクティブ制御は床応答加速度を抑制しながら、免震層の応答変位を低減するのに有効であることを確認した。

第一章

第二章

第三章

**第四章**

第五章

A  
p  
p  
e  
n  
d  
i  
x

## 第 5 章 結論

## 5. 結論

本研究は、建築構造物の地震動に対する振動応答を制御することを目的として筆者が開発した、回転慣性による質量効果と MR 流体による可変減衰効果の 2 つを狙いとするハイブリッド型の振動制御装置、MR 回転慣性ダンパーによる応答制御に関する研究であり、セミアクティブ制御により、断層近傍地震動を含む標準的な入力地震動ならびに建築基準法の水準を大きく超える多様な地震動に対して、床応答加速度を抑制しながら、免震層の応答変位を低減する制御方法を提案することを目的としている。本論においては、セミアクティブ振動制御装置としての MR 回転慣性ダンパーの各種性能試験により振動解析モデルを構築し、リアルタイムハイブリッド実験により、数値解析と実験を通して比較検証を行うことで、既往の研究の理論的成果および解析モデルの妥当性を示した。また、それらの結果から、周波数特性に対する検討を実施し、スカイフック方式によるセミアクティブ制御則を提案した。提案した制御則に対し、時刻歴応答解析により、多様な地震動に対する MR 回転慣性ダンパーの応答制御効果について論じた。本論より、得られた知見を以下に示す。

第 2 章の「磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの開発と性能試験」においては、最大出力 100kN の試作機を製作し、アクチュエータの変位入力による加振試験等により、その基本特性について整理し、理論式および解析手法の妥当性の検証を行った。荷重制限（トルクリリーフ）機構確認試験では、一定のトルク値を超えると軸が滑り、MR 回転慣性ダンパーの過負荷防止機構が正常に働いていることを確認し、剛性確認試験では、高振動数領域における正のばね特性を確認し、質量効果が発揮できる臨界振動数を求めた。低速試験では、各印加電流値における MR 流体の降伏応力 $\tau_0$ が理論値と概ね一致することを示した。正弦波入力加振試験においては、MR 流体自身のせん断流れに対する抵抗力および磁場作用時の MR 流体の降伏応力によるエネルギー吸収効果を確認し、可変減衰力を用いたセミアクティブ制御装置としての有効性を示した。以上の結果から、MR 回転慣性ダンパーの振動解析モデルを構築し、正弦波試験結果や地震動を用いたランダム波試験結果との比較により、その妥当性を示した。

第 3 章の「リアルタイムハイブリッド実験による検証」では、MR 回転慣性ダンパーを用いたリアルタイムハイブリッド実験を通じて、制御対象とする構造体の固有周期  $T$ 、構造体質量に対する慣性質量の比（質量比 $\mu$ ）に対して、断層近傍地震動を含む標準的な入力地震動による応答性状を比較した。パッシブ制御である電流無印加時の最大床応答加速度、最大応答変位の比較から、地震動により異なるものの、質量比 $\mu$ が大きくなるほど、最大床応答加速度は大きく、最大応答変位は小さくなる傾向を示すことを明らかにした。また、伝達関数から、質量比 $\mu$ が大きくなると、どの入力地震動においても共振点付近の応答は小さくなるものの、短周期領域で絶対加速度が増幅することを示した。地震動の入力速度波形と構造体の最大応答変位との関係から、構造体の最大応答変位が大きいほど、地震動の最

大速度入力発生時からの時間差も大きくなり、最大速度入力発生時からの時間差は地震動の性質による影響が支配的であることを明らかにした。これらのことから、地震動の入力速度波形に着目したセミアクティブ制御則を提案した。電流無印加時のパッシブ制御時、1Aの一定電流印加時のパッシブ制御時、提案したセミアクティブ制御時それぞれにおける最大応答値の比較から、セミアクティブ制御時は全ての場合について概ね10~40%程度最大応答変位が低減されることを確認した。特に、JMAKobe波について、質量比 $\mu$ を大きくすることで、短周期領域での床応答加速度の増幅を抑えながら、同時に応答変位を低減することができ、さらにセミアクティブ制御時においては、質量比 $\mu$ によるパッシブ制御のみでは一般に実現の難しい、床応答加速度をあまり上昇させずに応答変位を低減する効果が期待できることを示した。

第4章「多様な地震動に対する応答制御効果」においては、固有周期4秒の免震構造物モデルを対象として、周波数領域における伝達関数および地震動に対する時刻歴応答の観点から検討を行い、慣性質量効果を取り入れたスカイフック方式によるセミアクティブ制御方法を提案し、その効果について論じた。周波数領域における伝達関数から、適切な質量比 $\mu$ を取ることにより、減衰比 $\zeta$ を大きく取るよりも加速度伝達率および変位伝達率とともに小さくできる領域があることを示したが、質量比 $\mu$ と減衰比 $\zeta$ を調整することには一長一短があり、それらのトレードオフ関係をパッシブ制御のみでは解消できないことを示した。それらの課題に対し、スカイフック方式を採用することで、高周波数領域における伝達率を上昇させずに、共振周波数近傍での伝達率を小さくすることができることを周波数領域における検討より示した。時刻歴応答における検討から、適切な質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ を取ることにより、特に周期1~2秒程度に大きな振幅を持つようなパルス性地震動に対しては床応答加速度を効果的に減少させることができることを明らかにした。パッシブ制御時において、最大床応答加速度が最も小さくなる質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ の組み合わせの場合について、各入力地震動に対するセミアクティブ制御効果を確認し、本論で用いた地震動では、最大床応答加速度を平均6%程度、最大応答変位を平均28%程度低減することができることを確認した。また、建築基準法の水準と同程度の地震動に対して設計されたモデルとして、質量比 $\mu$ および減衰比 $\zeta$ を一定とした場合のセミアクティブ制御効果についても考察を加え、最大床応答加速度は平均16%程度、最大応答変位は平均38%程度低減されることを示した。これらの結果より、本論で提案した慣性質量効果を取り入れたスカイフック方式によるセミアクティブ制御法は、床応答加速度を抑制しながら、同時に免震層の応答変位を低減するのに有効な制御方法であると結論付けている。

以上より、筆者が開発したMR回転慣性ダンパーを用いて、セミアクティブ制御により、断層近傍地震動を含む標準的な入力地震動ならびに建築基準法の水準を大きく超える多様な地震動に対して、床応答加速度を抑制しながら、免震層の応答変位を低減できることを示した。

## Appendix

## Appendix

本論では、筆者が開発した回転慣性による質量効果と MR 流体による可変減衰効果の 2 つを狙いとするハイブリッド型の振動制御装置, MR 回転慣性ダンパーによるセミアクティブ制御効果について考察した.

ここでは、建築基準法の水準と同程度の地震動に対して設計された実際の免震建築物を例にとり、MR 回転慣性ダンパーによる応答制御効果について、さらなる考察を加える.

### 1. 建物概要

本建物は、鉄筋コンクリート造 4 階建ての免震建築物である。建物概要を以下に示す。

建物名称 :	某集合住宅		
用途 :	共同住宅		
建築面積 :	295 m <sup>2</sup>	延床面積 :	934 m <sup>2</sup>
階数 :	地上 4 階		
最高高さ :	13.1 m	基準階高さ :	3.05 m
構造種別 :	鉄筋コンクリート造, 免震構造		
構造形式 :	長辺方向 : 純ラーメン構造 短辺方向 : 耐力壁付ラーメン構造		
免震システム :	アイソレーター : 天然ゴム系積層ゴム (8 基) ダンパー : 500kN 型オイルダンパー (2 基)		

第一章

第二章

第三章

第四章

第五章

A  
p  
p  
e  
n  
d  
i  
x

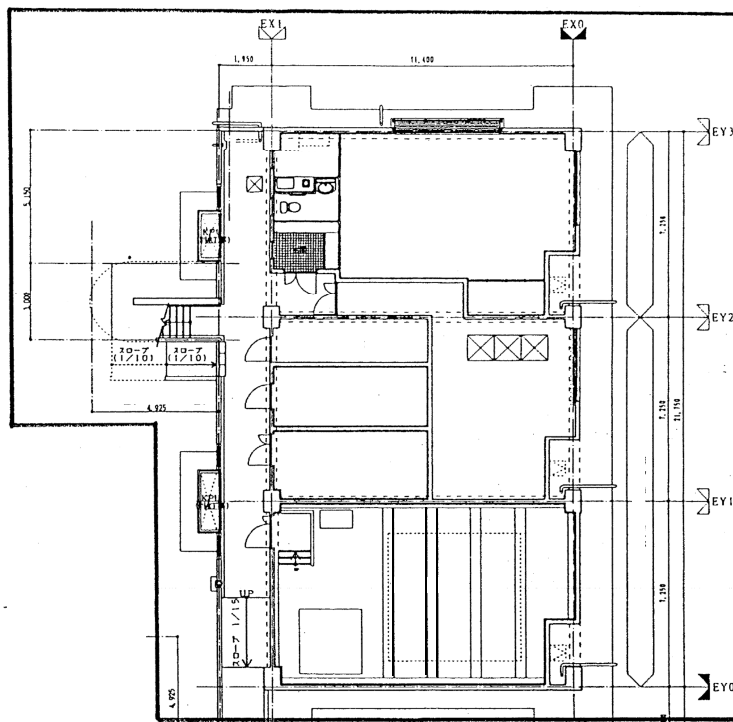


図1 平面図

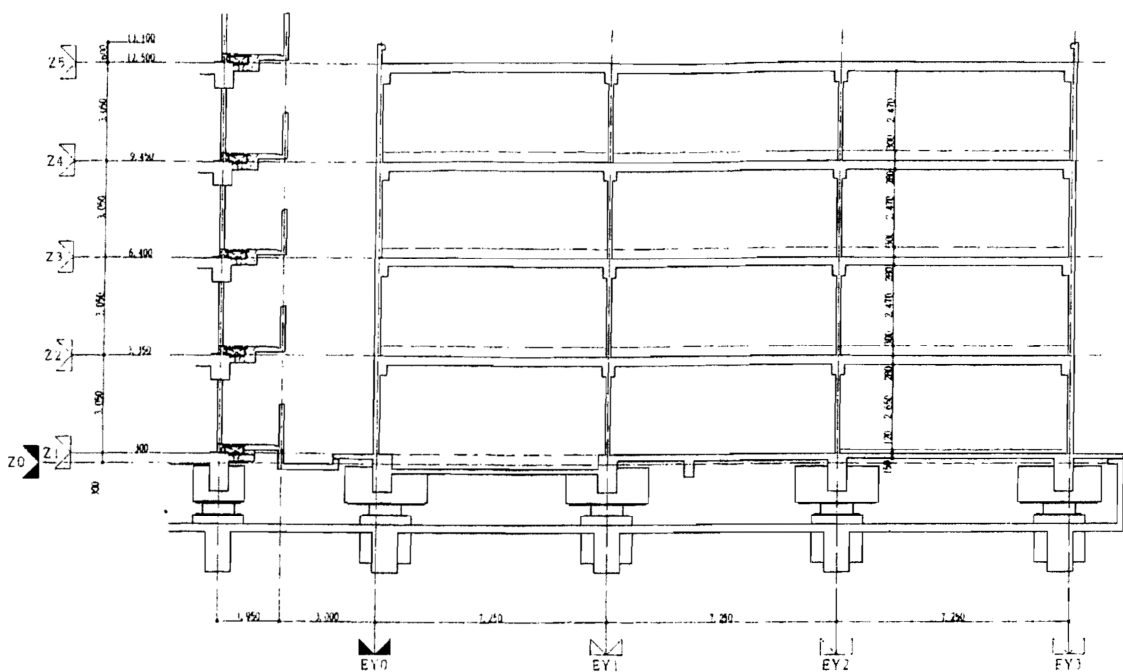


図2 断面図

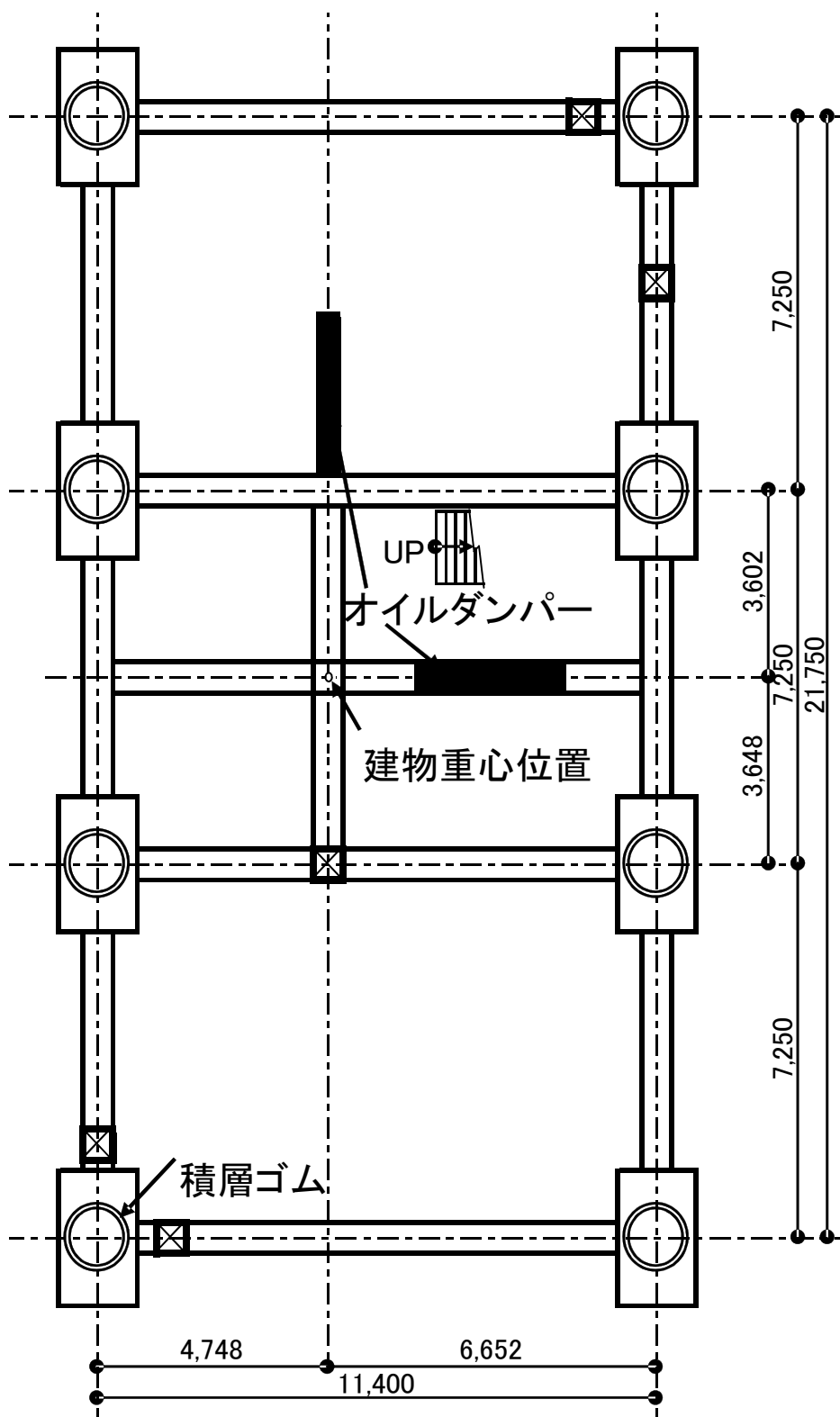


図3 免震層配置図



## 2. 入力地震動

入力地震動は、4.3.2 項で示した入力地震動と同一とする。各地震動の継続時間および最大加速度、最大速度、最大変位を表 1 に示す。詳細は 4.3.2 項を参照されたい。

表 1 入力地震動一覧

入力地震動	継続時間 (秒)	最大値			備考	
		加速度 (gal)	速度 (kine)	変位 (cm)		
EiCentro	53	510	50	17	観測地震動	—
Hachinohe <sup>55)</sup>	234	350	50	17	観測地震動	長周期地震動
JMAKobe	160	818	91	20	観測地震動	パルス性地震動
JRTakatori	150	606	122	41	観測地震動	パルス性地震動
SPW <sup>7)</sup>	40	131	88	70	人工地震動	パルス性地震動
UMT <sup>7)</sup>	40	812	101	58	人工地震動	パルス性地震動
Nankai <sup>2)</sup>	270	121	120	142	人工地震動	長周期地震動
AIC <sup>5)</sup>	655	545	68	44	人工地震動	長周期地震動

## 3. 解析モデル

本考察においては、免震建築物の床応答加速度および免震層の応答変位に着目するため、上部構造は 1 質点によりモデル化する。免震層における積層ゴムの復元力は線形とし、オイルダンパーは図 4 に示すバイリニア型ダッシュポットによりモデル化した。

上部構造重量： 19871kN  
 免震層剛性： 8640kN/m  
 固有周期： 3.04 秒

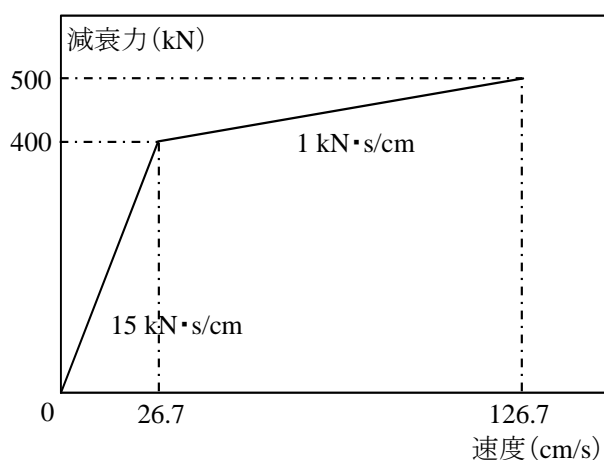


図 4 オイルダンパーの復元力特性

#### 4. 解析ケース

解析ケースは表 2 に示す 4 ケースとした。ケース 1 (以下,「原設計モデル」という) は,天然ゴム系積層ゴム 8 基と 500kN 型オイルダンパー 1 基とした。ケース 2~4 は,建築基準法の水準を超える地震動への対策として,ケース 2 はケース 1 にさらに 500kN 型オイルダンパー 2 基を付加したもの,ケース 3 はケース 1 に MR 回転慣性ダンパー 2 基をパッシブで付加したもの,ケース 4 はケース 3 の MR 回転慣性ダンパーをスカイフックダンパーによるセミアクティブ制御したものである。なお,MR 回転慣性ダンパー 1 基あたりの諸元は,4.3.4 項と同様に,質量比 $\mu=0.05$ ,減衰比 $\zeta=0.10$ ,MR 流体による可変減衰力 $f_{MR}=400\text{kN}$ として,MR 回転慣性ダンパーの荷重制限機構を想定して,1 基あたりの最大減衰力は 500kN で頭打ちとして,オイルダンパーの最大減衰力と等しくなるようにした。

- ケース 1 : 天然ゴム系積層ゴム + 500kN 型オイルダンパー (原設計モデル)
- ケース 2 : 原設計モデル + 500kN 型オイルダンパー 2 基
- ケース 3 : 原設計モデル + 500kN 型 MR 回転慣性ダンパー 2 基 (パッシブ)
- ケース 4 : 原設計モデル + 500kN 型 MR 回転慣性ダンパー 2 基 (セミアクティブ)

表 2 解析ケース諸元

ケース名	略称	積層ゴム	オイルダンパー	MR 回転慣性ダンパー	制御
ケース 1	原設計	8 基	1 基	—	パッシブ
ケース 2	オイル	8 基	3 基	—	パッシブ
ケース 3	MR 慣性 (パッシブ)	8 基	1 基	2 基	パッシブ
ケース 4	MR 慣性 (セミアク)	8 基	1 基	2 基	セミアクティブ

第一章

第二章

第三章

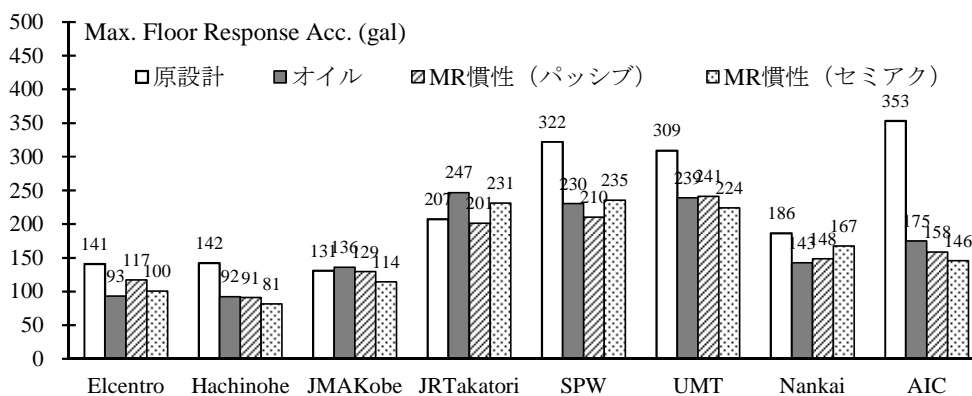
第四章

第五章

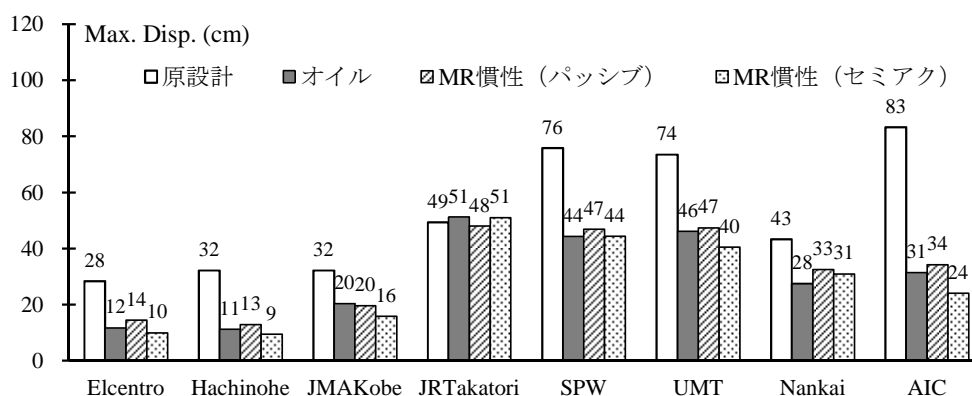
Appendix

## 5. 応答解析結果

図5に、各ケースの最大床応答加速度および最大応答変位を示す。建築基準法の水準と同程度の地震動に対して設計された実際の免震建築物では、SPW、UMT、AICに対して70～80cm程度の非常に大きな応答変位を生じる。本建物においては、擁壁への衝突が起こる変位量である。これに対して、ダンパー量を増やしたケース2～4の場合では、最大応答変位は概ね50cm以下になっており、クリアランス(60cm)の範囲内におさまっている。このことから、建築基準法の水準を超える地震動に対しては3倍程度のダンパー量が必要になることが確認できる。オイルダンパーのリリース荷重を免震層の降伏せん断力として考えると、免震建築物の上部重量に対する比 $\alpha s^{53}$ はケース1で2%、ケース2～4で6%程度となる。図5より、オイルダンパー単独ではNankaiに対して最も応答が低減されている。パッシブ制御によるMR回転慣性ダンパーではJRTakatoriに対して最も応答低減効果が大きい。その他の地震動に関しては、すべてセミアクティブ制御の場合が最も応答低減が図れている。これより、本論で提案した慣性質量効果を取り入れたスカイフック方式によるセミアクティブ制御法は、実際の免震建築物に対しても、床応答加速度を抑制しながら、免震層の応答変位を低減するのに有効であると言える。



(a) 最大床応答加速度



(b) 最大応答変位

図5 各ケースにおける最大値の比較

## 参考文献

## 参考文献

- 1) 国土交通省中部地方整備局ほかコンソーシアム：名古屋三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成（概要版），2004
- 2) 日本建築学会：各種波形予測手法に基づいた海溝型巨大地震の予測強震動波形収集資料，日本建築学会，2007.12
- 3) 国土交通省：超高層建築物等における長周期地震動への対策試案，<http://www.mlit.go.jp/common/000132046.pdf>, 2010.12
- 4) 大崎総合研究所：平成 23 年建築基準整備促進事業 42.超高層建物等への長周期地震動の影響に関する検討，<http://www.mlit.go.jp/common/000208404.pdf>, 2012.4
- 5) 大崎総合研究所：平成 24 年建築基準整備促進事業 42.超高層建物等への長周期地震動の影響に関する検討，<http://www.mlit.go.jp/common/000995439.pdf>, 2013.4
- 6) 大阪府：大阪府自然災害総合防災対策検討（地震被害想定）報告書，2007.3
- 7) 多賀謙蔵，亀井功，角彰，近藤一雄，林康裕，宮本裕司，井上一朗：上町断層帯地震に対する設計用地震動ならびに設計法に関する研究 その 1～その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.127-130, 2011.8
- 8) 吉田和夫，藤尾忠洋：双線形最適制御理論とセミアクティブ免震制御への応用，日本機械学会論文集, pp.96-102, 2001.4
- 9) 藤井秀樹，樋渡健，藤谷秀雄：MR ダンパーによる免震構造物のセミアクティブ制御実験－最適レギュレータ理論における重み係数の効果，日本建築学会構造系論文集，第 618 号，pp.73-79, 2007.8
- 10) 長島一郎，篠崎洋三，欄木龍大：可変減衰オイルダンパーを用いた免震構造物のスライディングモード制御，日本建築学会構造系論文集，第 649 号，pp.511-519, 2010.3
- 11) 石丸辰治：対震設計の方法 ダイナミックデザインへの誘い，建築技術，2008.7
- 12) 齊藤正人：強震動による免震システムの過大応答変位を抑制するための新機構の提案と解析的評価，土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.258-272, 2008.4
- 13) 井上範夫，五十子幸樹：建築物の変位制御設計－地震に対する免震・長周期建物の設計法，丸善出版，2012.12
- 14) 日本建築学会：アクティブ・セミアクティブ振動制御技術の現状，2006.5
- 15) 日本建築学会：建築構造物のアクティブ制御のこれまでの歩みと将来－構造性能の向上にむけて－文献抄録集と適用事例集，日本建築学会シンポジウム配布資料，2002.11
- 16) J. Rabinow：The Magnetic Fluid Clutch, AIEE Transaction 67, pp.1308-1315, 1948
- 17) 樋渡健，塩崎洋一，藤谷秀雄，曾田五月也：最適レギュレータ理論を用いた MR ダンパーによるセミアクティブ免震，日本建築学会構造系論文集，第 567 号，pp.47-54, 2003.5
- 18) 佐上瑤子，堀則男，井上範夫：磁気粘性流体ダンパーを用いた免震建物の応答制御手法の検討及び提案，日本建築学会構造系論文集，第 627 号，pp.709-716, 2008.5

19) 塩崎洋一, 樋渡健, 藤谷秀雄, 曾田五月也 : MR ダンパーを用いた免震構造物の簡易なセミアクティブ制御に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 570 号, pp.37-43, 2003.8

20) 岩田範夫 : MR ダンパー用簡易セミアクティブ制御手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 559 号, pp.71-78, 2002.9

21) H. Yoshioka, J. C. Ramallo, and B. F. Spencer Jr. : "Smart" Base Isolation Strategies Employing Magnetorheological Dampers, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 128(5), pp.540-551, 2002.5

22) J. C. Ramallo, E. A. Johnson, and B. F. Spencer Jr. : "Smart" Base Isolation Systems, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 128(10), pp.1088-1099, 2002.10

23) BARIS ERKUS and ERIK A. JOHNSON : INVESTIGATION OF DISSIPATIVITY FOR SEMIACTIVE CONTROL OF THE BASE ISOLATED BENCHMARK BUILDING WITH MR DAMPERS, Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (ERMR 2006), pp.512-518, 2006.6

24) S. J. Dyke, B. F. Spencer, Jr., M.K. Sain and J. D. Carlson : Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction, Smart Materials and Structures, Vol.5, pp.565-575, 1996.8

25) Y. F. DUAN, Y.Q. NI, and J. M. KO : CABLE VIBRATION CONTROL USING MAGNETO-RHEOLOGICAL (MR) DAMPERS, Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (ERMR 2004), pp.829-835, 2004.8

26) H.B. CHENG, J. W. TU, W.L. QU, Q. J. ZHANG and N. M. WERELEY : MAGNETORHEOLOGICAL FLUIDS AND DAMPERS FOR VIBRATION CONTROL OF THE TIANXINGZHOU BRIDGE, Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (ERMR 2010), pp.235-241, 2010.8

27) Den Hartog, J.P. : Mechanical Vibration, 4th edition, McGraw-Hill, New York, 1956

28) 山本鎮男, 永井雄一, 河田叡治 : 振子としてこの作用を応用した球形タンクの免震装置, 圧力技術, Vol.13, No.5, pp.235-243, 1975

29) 新垣忠志, 黒田英二, 有馬文昭, 井上豊, 馬場研介 : ボールネジを用いた制震装置の開発 (その 1 制震チューブ・制震ディスクの性能試験), 日本建築学会技術報告集, 第 8 号, pp.239-244, 1999.6

30) 新垣忠志, 黒田英二, 有馬文昭, 井上豊, 馬場研介 : ボールネジを用いた制震装置の開発 (その 2 制震チューブの減衰性能とその評価法), 日本建築学会技術報告集, 第 9 号, pp.265-270, 1999.12

31) 古橋剛, 石丸辰治 : 慣性接続要素によるモード分離, 日本建築学会構造系論文集, 第 576 号, pp.55-62, 2004.2

32) 古橋剛, 石丸辰治 : 慣性接続要素による多質点振動系の応答制御, 日本建築学会構造系論文集, 第 601 号, pp.83-90, 2006.3

- 33) 斉藤賢二, 杉村義文, 栗田哲, 井上範夫: 慣性質量要素を利用した粘性ダンパーによる構造骨組の応答制御 その7~その8, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.727-730, 2006.9
- 34) 斉藤賢二, 栗田哲, 井上範夫: 慣性接続要素を利用した線形粘性ダンパーによる一質点構造の最適応答制御と Kelvin モデル化手法に関する考察, 構造工学論文集, Vol.53B, pp.53-66, 2007.3
- 35) 斉藤賢二, 中南滋樹, 木田英範, 井上範夫: 慣性接続要素を利用した線形粘性ダンパーと支持部材を直列結合した一層最適設計システムの振動実験 その1~その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.829-834, 2007.8
- 36) 斉藤賢二, 井上範夫: 慣性接続要素を利用した粘性ダンパーをもつ制振構造の最適応答制御に関する一考察—最適設計システムにおける線形粘性要素の等価非線形粘性要素への置換法, 日本建築学会技術報告集, Vol.13, No.26, pp.457-462, 2007.12
- 37) 斉藤賢二, 中南滋樹, 木田英範, 井上範夫: 慣性接続要素と最適化された柔バネ要素と粘性要素を有する一層応答制御システムの振動実験, 構造工学論文集, Vol.54B, No.26, pp.623-634, 2008.3
- 38) 斉藤賢二, 杉村義文, 井上範夫: 慣性接続要素を利用した粘性ダンパーによる制振構造の応答制御に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.54B, No.26, pp.635-648, 2008.3
- 39) 木田英範, 中南滋樹, 井上範夫, 斉藤賢二: 慣性接続要素を利用した多段調整バネ付き粘性マスダンパーシステムによる構造物の応答制御 その1~その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.627-630, 2008.9
- 40) 油川健樹, 木田英範, 堀則男, 井上範夫: 増幅機構付き減衰装置の基本特性と地震応答シミュレーション解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.639-640, 2008.9
- 41) 半澤徹也, 磯田和彦: 回転慣性質量を利用した TMD による上下動制振に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 640 号, pp.1047-1054, 2009.6
- 42) 磯田和彦, 半澤徹也, 田村和夫: 回転慣性質量ダンパーを組合せた応答低減機構による 1 質点系振動モデルの応答特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 642 号, pp.1469-1476, 2009.8
- 43) 磯田和彦, 半澤徹也, 田村和夫: 慣性質量ダンパーを組み込んだ構造物への地震入力エネルギーに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 650 号, pp.751-759, 2010.4
- 44) 磯田和彦, 半澤徹也, 田村和夫: 慣性質量ダンパーを組み込んだ低層集中制震に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 686 号, pp.713-722, 2013.4
- 45) 特開 2012-184816 公報: 減衰装置、及び構造物の制振装置
- 46) 富澤徹弥, 高橋治, 藤谷秀雄, 柴田和彦, 佐藤友祐: 磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの性能試験とその解析的検証, 日本建築学会構造系論文集, 第 693 号, pp.1859-1867, 2013.11
- 47) 岩田範生, 袖山博: 20kN 級ダブルバイパス式 MR ダンパーを用いた動的加振による簡易履歴制御実験, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, 0271, 2006.11

第一章

- 48) MR 2434, a magnetorheological fluid from BASF  
49) 富澤徹弥, 高橋治, 五十幡直文, 柴田和彦: 回転慣性質量を用いた建築用慣性ダンパーの開発 その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.463-464, 2010.9  
50) 日本建築学会: 建築構造物の振動制御入門, 日本建築学会, 2010.12

第二章

- 51) B. F. Spencer Jr., S. J. Dyke, M. K. Sain and J. D. Carlson: Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.123, No.3, pp.230-238, 1996.3  
52) 齊藤正人: 回転慣性免震装置によるクリアランスを抑制した免震システムの評価, 日本土木学会年次学術講演会概要集, pp.1-348, 2007.9

第三章

- 53) 日本建築学会: 免震構造設計指針 第4版, 日本建築学会, 2013.10  
54) 田中信雄: 振動制御, 養賢堂, 2008.9  
55) 翠川三郎, 三浦弘之: 1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録の再数値化, 日本地震工学会論文集, 第10巻, 第2号, pp.12-21, 2010.5  
56) 柴田明德: 最新 耐震構造解析 第2版, 森北出版, 2003.5

第四章

第五章

A  
P  
P  
E  
N  
D  
I  
X



謝辭

## 謝辞

本論文は、筆者が株式会社 構造計画研究所において、三和テッキ株式会社の方々の多大なる御協力を得て実施致しました、磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの実用化のための研究開発の成果をとりまとめたものです。

本研究を進めるにあたり、研究の計画や筋道、論文の執筆に至るまでの多岐にわたり、終始丁寧かつ簡潔明瞭な御指導御教示を賜り、数多くの議論の末、本論文を完成へと導いていただきました神戸大学 教授 藤谷秀雄先生には心より尊敬、感謝の意を表します。5th World Conference on Structural Control and Monitoring の懇親会にて初めてお話をさせていただきました後、本論文に係る内容を議論する中で、それまで全く面識のなかった私に大学院博士課程への入学を勧めていただき、このような機会を与えてくださった先生には本当に感謝の言葉しかありません。ありがとうございます。

また、本論文の副査でもあり、本研究の研究過程において、参考論文や関連書籍などを御紹介いただき、本論文の内容全般にわたり、有益な御助言をいただきました神戸大学 向井洋一准教授に心より御礼申し上げます。ならびに、本論文の審査を担当いただいた、神戸大学の田中剛教授、多賀謙藏教授には、本論文に関する貴重な御意見を賜りました。厚く御礼申し上げます。そして、私の学生時代の恩師である東京工業大学 准教授 五十嵐規矩夫先生にも、本論文の副査として厳正なる審査をしていただきました。心より感謝、御礼申し上げます。

会社に在籍しながら、藤谷先生との出会いをはじめ、研究の機会と環境を与えて頂きました、株式会社 構造計画研究所の高橋治技師長に深く感謝致します。部の所属が変わっても、引き続きの研究を許可して下さった構造設計部の川端淳部長、そして、最も身近で応援いただいた関根渉室長には数々の御配慮をいただきました。また、服部正太代表取締役社長、阿部誠允代表取締役副社長、西尾啓一執行役員をはじめ、社内のみならず数々の御支援を賜りました。特に、多忙な業務の傍ら御協力をいただいた、内野清士氏、齋藤光広氏、Mateo Alay Albert 氏、篠原昌寿氏、平本知樹氏、柳済晟氏、蔦宗咲枝氏ならびに部内の多くのメンバーに、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

実験の実施および分析、解析等では、三和テッキ株式会社の袖山博氏、柴田和彦氏、佐藤友祐氏、立岡善典氏を中心とする方々に、様々な形で御協力をいただきました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

また、東亜建設工業の樋渡健氏には、大学院博士課程進学にあたり、研究室の OB として、研究内容をはじめ、社会人博士としての心構えなど様々な面からアドバイスをいただきました。心より感謝申し上げます。大学院の学生には若く、フレッシュな活力をたくさんいただきました。特に、本研究に多大なる御協力をいただいた伊藤麻衣助教、平田恵子氏、青山優也氏には厚く御礼申し上げます。

最後に、郷土の家族をはじめ、私が業務および研究に専念できる環境をつくり、そして、支え応援してくれた妻 久美子と愛する子どもたちに心より感謝致します。

本研究を進めるにあたり、僅かながらでも関わりのあった方々、陰ながら見守り御支援くださった方々に心より感謝の意を表します。

2014年1月  
富澤 徹弥

神戸大学博士論文「磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる応答制御に関する研究」全 108 頁

提出日 2014 年 1 月 23 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ **Kernel** にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 富澤 徹 弥

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。