

振動台加振手法研究用の 非弾性挙動実現模型の製作

○清水 信行¹・小川 信行²・佐藤 栄児³・野波 健蔵⁴

¹工博 いわき明星大学教授 理工学部機械工学科 (〒970-8551 福島県いわき市中央台飯野 5-5-1)

²工博 科学技術庁防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県筑波市天王台 3-1)

³工修 科学技術庁防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県筑波市天王台 3-1)

⁴工博 千葉大学教授 工学部電子機械工学科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

Aiming the completion in 2005, the full-scale 3-D earthquake testing facility is now under construction. The most notable point in this facility is that this facility aims at fracturing tests of models different from the existing shaking tables which aim at elastic tests. Therefore, the method of operation and control for the full-scale 3-D earthquake testing facility must be newly developed. In order to establish new effective operation and control methods, we will conduct tests by using the small shaking table with a small model having non-elastic bilinear characteristics. In order to realize the repeated use of the model, a MR-damper was employed. This paper reports the objective of the study and the developed experimental model.

Key Words: Full Scale 3-D Earthquake Testing Facility, Fracturing Test, Operation and Control Method, Repeated Use, MR-Damper

1. 緒言

日本は地震国である。記憶に新しいものでは1995年1月に阪神淡路震災をもたらした兵庫県南部地震であろう。その反省から現在、科学技術庁防災科学技術研究所では3次元大型震動実験施設の建設計画が進行中である。既存の振動実験施設と大きく違う点は、試験体の破壊実験を可能とする事を目的としているところにあり、これまで行うことのできなかつた構造物の動的破壊特性を知ることが出来るということからこの施設に寄せられる期待は大きい。

しかしこれを実現するためには技術的に多くの課題が残されている。その一つに試験体の破壊(非弾性化)に伴う振動台の加振制御問題がある。試験体が弾性領域にとどまる場合の振動台の加振制御方法は、試加振法と呼ばれる方式の技術が確立しているが、試験体が非弾性領域に入った場合の振動台の加振制御方法についてはいまだその技術は確立されていないのが現状である。そこで今後新たな加振制御方式を確立するために、試験体の非弾性化に伴う振動台への影響を調査することを目的とし、繰り返し利用可能な非弾性挙動実現模型の製作をパッシブ制御技術を利用して行った。本論文はその報告であり次のような構成である。2章では振動台加振制御手法研究の構想と研究動向をあわせて示し、3章で実構造物の破壊実験例から模型製作において必要とされる条件と再現すべき破壊様式の設定をおこなう。また4章でこれらを実現するために提案された各種

試験体としての構造物破壊特性の調査
破壊挙動が振動台に与えるの影響の調査及び検討

加振制御手法の提案と構成

各加振手法をシミュレーションにより確認
各加振手法を振動台実験により確認

図1 加振制御手法の研究の構想

方式について述べ、それに基づいて製作した模型を5章で紹介する。最後に模型完成時の性能確認試験についてを6章で報告する。

2. 振動台加振の制御手法研究の構想と動向

(1) 研究の構想

試験体としての構造物破壊を前提とした振動台の設計、建設はこれまで前例がない。従って図1に示すように試験体の破壊挙動が振動台に与える影響の

調査を行い、その結果から加振制御手法を提案し、コンピュータによるシミュレーションと振動台へのコントローラの実装による確認という手順で研究を実施していく。そのためには、破壊挙動が振動台に与える影響の調査から、加振制御手法の検討までが一環して行える振動台と破壊挙動を実現する模型により構成されるシステムが必要となる。

図2はそのシステム構成案である。振動台は科学技術庁防災科学技術研究所所有の小型振動台を用いる。この振動台は小型ながら、建設中である実大3次元震動破壊施設と同じ油圧機構であり、水平及び上下に加振可能な2次元振動台である。従って加振制御手法の基礎検討には十分耐えられる施設であると考えられる。現在実験開発のため制御装置のデジタル化と加振装置の改修を行っている。なお、この小型振動台でのねらいは各種提案されるであろう加振制御手法に対する評価基準を作成することを目指しており、常に同じ状態で実験を行うことが求められる。このため繰り返し利用可能であり破壊特性に再現性のある模型の製作が必要となり今回の模型製作計画が発足した。

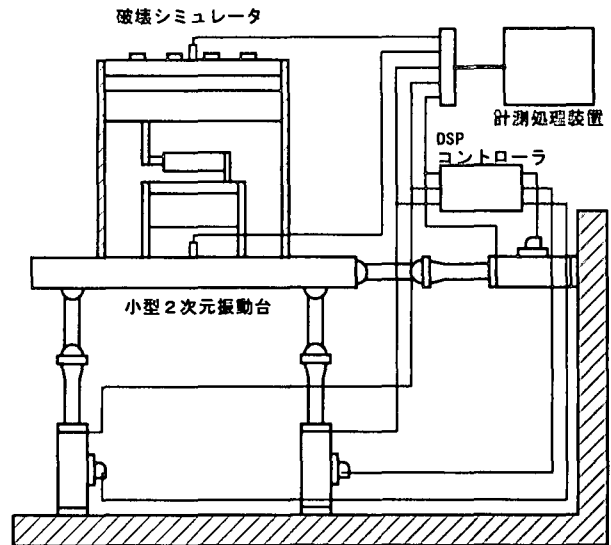


図2 システム構成

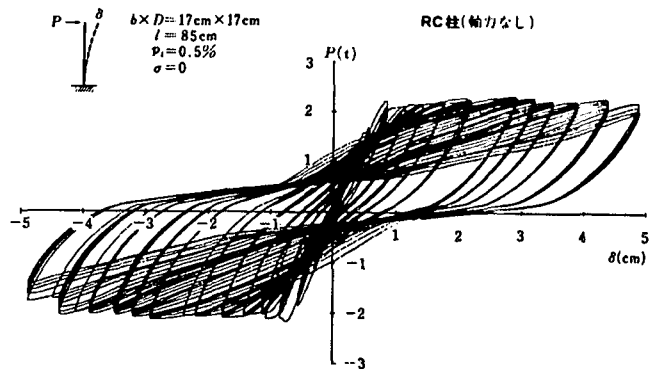


図3 実構造物における破壊実験例

(2) 研究動向

実大3次元大型震動破壊施設の建設計画を契機に、高度化された振動台技術にさらに試験体の破壊を目指す新しい技術の要求を受けて、加振制御手法を含めた振動台の研究が再び活発化してきた。日本機械学会機械力学・計測制御部門主催の Dynamics and Design Conference (D&D '99)では振動台関連技術の研究発表が数多く発表され、加振制御技術としては既存の加振制御手法の高度化¹⁾や試験体の特性変化についての問題をロバスト制御手法²⁾や適応型制御手法³⁾、および物理的な反力補償方法⁴⁾などの新しい手法で解決するための提案が種々成された。

従ってこれら提案された手法や今後提案されてくる手法についての検討をおこなっていくためにも適切な模型の製作が重要と考えられる。

3. 構造物の破壊例と振動実験用モデルの選定

(1) 構造物の破壊例と振動実験

図3はRC柱の繰り返し荷重による破壊実験の荷重-変位曲線の代表例である⁵⁾。

今回建設される大型震動台においては実験供試体を震動により破壊する事が主目的である。従ってこの震動台において実験される試験体はこのような破壊特性を示す事が予想される。こうした荷重と変位の関係を再現するような模型を製作し、振動台上に設置し模型と振動台との相互作用を検証する事は新しい加振制御手法を確立する上で極めて有効であると言えよう。その実現方法としては比較的破壊に至りやすい材料及び構造を選択し、実験ごとに模型を

破壊していく方法があるが、破壊特性を同一に保つことが難しくなり、実験の統一性が失われるばかりか、費用的にも好ましくない。従って次の2点

- ・破壊特性に再現性があること
- ・繰り返しの使用が可能であること

を満たす経済的な模型の製作を試みる。今回はこの模型の製作を中心に述べ、次報以降でこの模型を用いた実験について述べる。

(2) 破壊特性のモデルとその選定

地震応答解析では破壊特性の特徴を単純化したモデルを設定し解析を行うことが一般的であり、様々な破壊様式に対するモデルが提案されている。そこでこのような破壊様式の実現可能な、先に挙げた2条件を満たす模型を製作する事が、実験の信頼性と高効率化を損なわない最良の手段といえる。製作する模型に付与すべき破壊特性のモデルは前節の実構造物における破壊特性のように、ある力以上で剛性が低下する様な部材の降伏現象を模している事と、剛性の低下後に履歴を描く事が重要である。

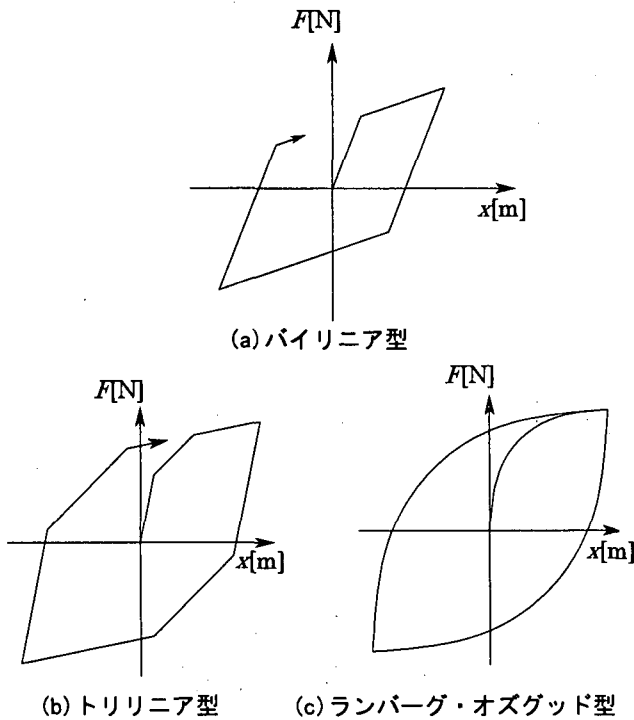


図4 破壊特性の代表的なモデル

図4は破壊特性の代表的なモデルであり、今回はその中で最も基本的な図4 (a)で示されるバイリニア型をモデルに付与する特性として選定した。

4. 再利用可能な非弾性挙動を実現する為の方式

(1) 各方式の比較

先に述べたが、破壊特性を模す上で重要なポイントは剛性が変化することと履歴を描く事である。この点をふまえ、非弾性挙動を実現する為の考案された幾つかの方式について述べる。

a) ばね長調整式模型

図5にばね長調整式模型の概略図を示す。この方式は質量部とそれを支える丸棒ばね、シリンダ部、および電磁弁から構成されておりシリンダピストンと丸棒ばねが連結されている。これにより丸棒ばね部の長さを調整し剛性を変化させる仕組みとなっている。ただし油圧源やサーボ制御機構が必要となる。なお、バイリニア型のような非線形特性を再現する為には模型質量部の速度、変位情報が必要となる。

b) 板ばね・ブレーキ式剛性切り替え模型

この方式は図6に示されるように質量部と2種類の板ばねから成る2つの建屋、及び建屋を連結するスライドバー、ブレーキ機構とそれを作動させる電磁弁から構成される。スライドバーはブレーキを利かせている状態で固定される、これにより2つの建屋は連結され模型の剛性は図中の板ばね1と板ばね2の合計となる。また、ブレーキが解除されることにより建屋同士の連結が解かれ板ばね1のみの

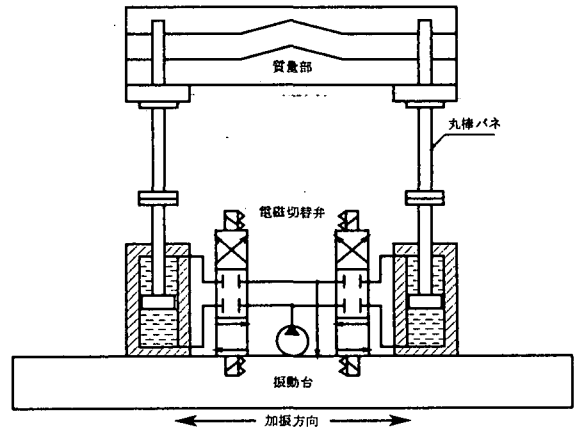


図5 ばね長調整式模型

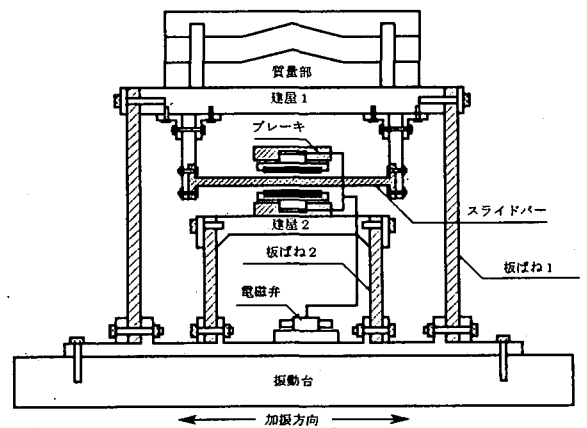


図6 板ばね・ブレーキ式剛性切り替え模型

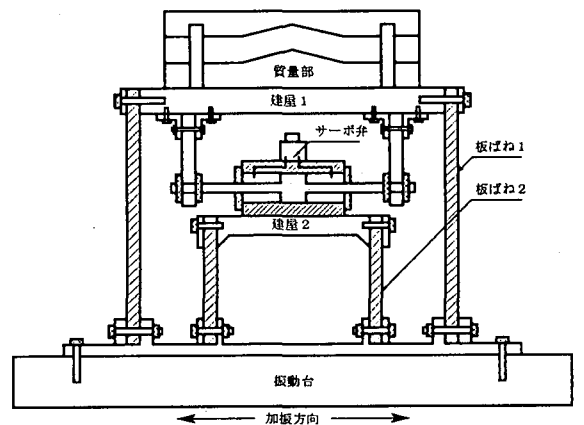


図7 板ばね・油圧シリンダ式剛性切り替え模型

剛性となる。従ってブレーキ ON で初期剛性を、OFF で2次剛性を実現することができる。従って模型質量部の速度、変位情報からブレーキングのタイミングを制御する事によりバイリニア型の非線形特性を再現する事ができる。ただしこの方式にも小型で十分ではあるが油圧源を必要とする事と、ブレーキ機構により発生するショックが予想される。

c) 板ばね・油圧シリンダ式剛性切り替え模型

この方式は、基本的には b)と同じでありブレーキ部を図7に示されるように油圧シリンダシステムに置き換えたものである。これにより剛性を円滑に

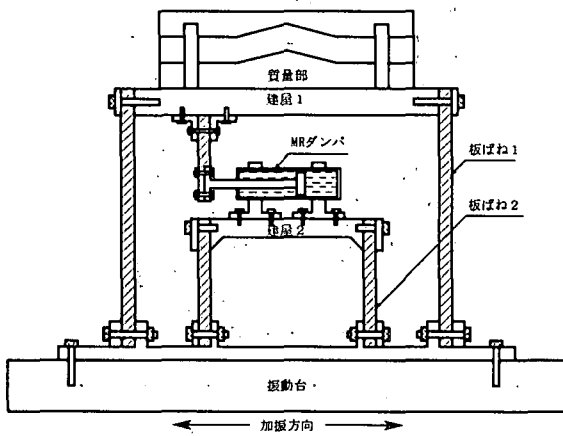


図8 板ばね・MRダンパ式剛性切り替え模型

切り替えることができるのが長所である。また、油圧シリンダシステムを積極的に使う事により、様々な破壊様式を再現する事が可能である。ただし油圧源と油圧システムの制御を必要とする。

d) 板ばね・MRダンパ式剛性切り替え模型

質量部と2つの建屋から構成されることは前述の方式と同様であるが、図8のように剛性の切り替えにMRダンパを使用する。一般にMRダンパは印可電圧により、内部流体である磁性流体の粘性を変化させる可変減衰力機構であるが、与える印可電圧により抵抗力を非常に大きくとれる事から建屋同士の連結及び解除の機構に用いることができる。MRダンパの特性によりバイリニア型の非線形特性を再現するためにアクティブな制御は必ずしも必要とせず、降伏応力を設定するための電源のみの方式が採用できる。

(2) 選定

模型を製作するにあたり先に挙げたような方式が提案された。今後行って行く事が実験及び理論の開発であることを考慮し、非線型挙動を実現するための方式を選定するにあたり次に示される6項目を選定基準として設けた。

- [1] 破壊特性に再現性があること
- [2] 繰り返しの使用が可能であること
- [3] 非弾性挙動が制御可能であること
- [4] 簡単な構造であること
- [5] 拡張性があること
- [6] 新しい技術である事

[1]及び[2]に関しては冒頭で述べたように模型製作の絶対条件である。[3]については今後行う実験において模型の特性をある程度変更可能とする事により、実験の幅を持たせるようにしたい為である。ただしこれは[4]につながる事であるが非弾性挙動を制御可能とする為に、あまり複雑な制御を付与することは解析を困難にする恐れがあるため好ましくない。又、実験の進行を円滑に進める為にも模型構造

表1 選択項目

方式	選択基準項目						備考
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
(a) ばね長調整式	○	○	△	×	×	×	油圧源 油圧サーボ制御
(b) ブレーキ切り替え式	○	○	○	△	×	×	油圧源 電磁弁制御
(c) 油圧シリンダ切り替え式	○	○	○	×	○	×	油圧源 油圧サーボ制御
(d) MRダンパ切り替え式	○	○	○	△	○	○	DC電源

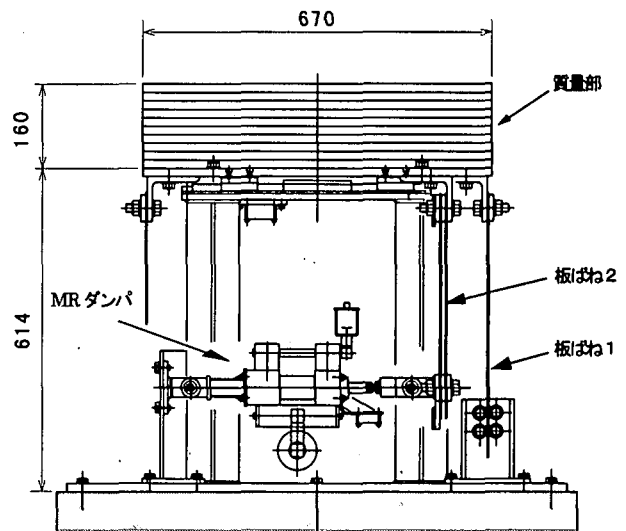


図9 製作した模型の全体図

の複雑化による故障はできる限り避けたい。[5]に関しては今回搭載する小型振動台についてのみ利用可能な方式ではなく、今後予定されている中型以上の振動台に搭載する模型に対しても利用可能な方式であること、[6]については技術的好奇心と今後の発展性を大切にする事からの要因である。

従ってこれらの選定基準を踏まえて表1により各方式を比較すると、構造は多少複雑ではあるが、総合的にMRダンパを用いた模型が一番有用であると考えられる。とくに他の方式と比較してバイリニア型の復元力特性を再現することにおいてアクティブな制御を必要としないことは極めて有用であり、本模型製作に関して最も適していると判断した。また今後更に高度なアクティブ制御を付与して所望の復元力特性を実現できる可能性を秘めている。したがってこの方式で模型製作を進める事とした。

5. 製作した模型

(1) 模型の構成

図9に製作した模型の全体図を示す。製作された模型は質量部とそれを支える柱、リニアガイド、板

表2 模型基本仕様

固有振動数	f	3 [Hz]
可動部変位振幅	Xmax	±50 [mm]
剛性切替変位	Xc	±(5~20) [mm]
試験体おもり合計	M	300 [kg]
総質量	Ma	500 [kg]
剛性低下率	γ	0.5
初期剛性	K1+K2	106.6 [N/mm]
2次剛性	K1	53.3 [N/mm]

表3 MR ダンパの仕様

発生荷重	150~800 [N]	
ストローク	±35 [mm]	
作動流体	LORD 社製 MR 流体 : MRF-132LD 内容量 : 1 [L]	
磁場発生部	電磁石	SUYBO(電磁軟鉄) 相当材
	鉄心 コイル	PEW-1(ポリエステル銅線) 巻数 : 3800
最大荷重 発生時	電流/電圧	0.48[A] / 30 [V]
	磁束密度	0.76 [T]

ばね、MR ダンパから構成されている。また表2は模型の基本仕様である

(2) MR ダンパ

a) 仕様

表3にMR ダンパの仕様を示す。

b) 構造と作動原理

MR ダンパの構造を図10に示す。MR ダンパは構造物が振動することによりピストンがシリンダ内を移動し、圧力差を生じる。この時シリンダ内に充填されている作動流体が高圧側からオリフィスを通り低圧側に流れ込む。MR ダンパはオリフィス部に電磁石を配しており、発生する磁界の強弱によりMR 流体の見かけの粘度を変化させることが出来る。すなわち磁界が強いほどMR 流体の見かけの粘度が高くなり、ダンパとして大きな抵抗力を発生する。なお、今回模型に使用したMR ダンパの特徴として、電磁石の発熱による作動流体の温度上昇を極力避けるために、電磁石をシリンダ・ピストンから分離し別置き型としている。また作動流体の分離及び沈殿を押さえるため、減衰力を発生させるオリフィス部をシリンダ下部に設置した両側ピストンロッド・バイパス流路構造、とすることで連続使用によるMR ダンパの特性変化を極力抑える為の工夫がなされている。

c) 性能

b)で述べたようにMR ダンパはオリフィス部に発生させる磁界により抵抗力を変化させる仕組みとなっており、磁界の強さは電磁石に印加する電流(電圧)により調整される。図11はMR ダンパの印加電流

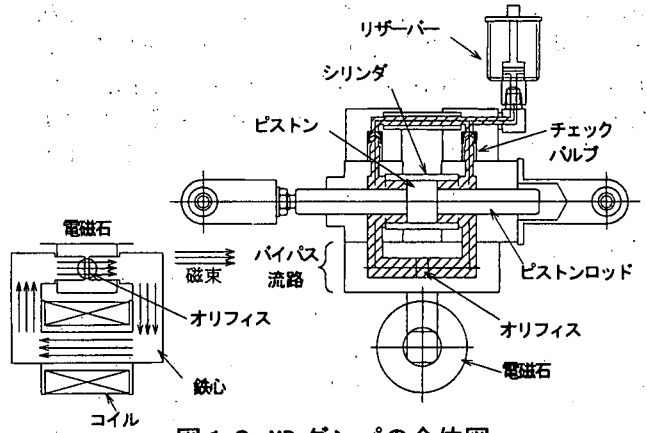


図10 MR ダンパの全体図

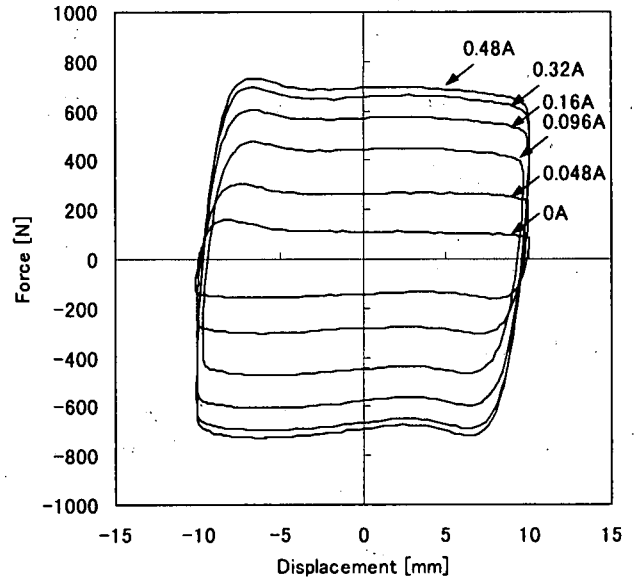


図11 印加電流による変位と抵抗力の関係

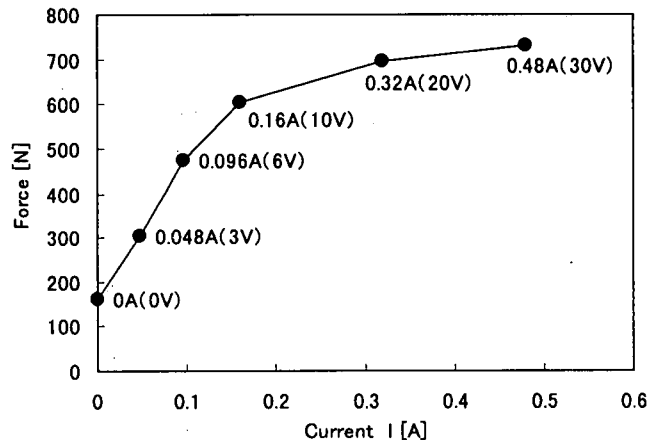


図12 印加電流と抵抗力の関係

ごとの変位と抵抗力の関係である。この図からMR ダンパの減衰特性は摩擦減衰に酷似していることが分かる。また、この図のように印加する電流により、ある力以上ではMR ダンパは滑りを生じ見かけ上は降伏したようになる。この滑りを生じ始める力は電磁石に印加する電流により決定し、印加電流とその抵抗力の関係は図12のようになる。このことから

電流を印加しない状態においても抵抗力は0とはならず、減衰特性も保持されていることが分かる。図12において約0.16[A]までは印加電流と抵抗力の関係はほぼ比例関係となっているといえる。したがってその間の電流を選択することにより非常に簡単にMRダンパの抵抗力を選ぶことができる。

(3) 作動方式

実際にMRダンパにより剛性が切り替わる仕組みについて述べる。例としてMRダンパに0.16[A]印加したと仮定すると、図11または12により得られる抵抗力は約610[N]程度であることがわかる。従って0.16[A]印加時においてMRダンパに変位を生じさせるためには約610[N]以上の力が必要となる。ここで表2よりMRダンパが固定されている状態、即ち2種類の板ばねが連結されている場合のばね定数は初期剛性となるので106.6[N/mm]である。従って質量部が約5.7[mm]以下の変位量であればMRダンパは変位せず板ばね同士の連結は解除されないが、質量部の変位量が増加していくとMRダンパがすべりを生じ、実質K2のばね剛性が働かなくなる。これにより剛性の低下が実現可能となる。

6. 作動確認試験

製作された模型について作動及び性能の確認のため、図13に示すように模型を設置し、準静的な復元力の測定を行った。試験結果を図14に示す。なお、試験条件は以下の通りである。

- ・入力変位 20,30,40[mm]の3ケース
- ・印加電流 0.48[A]

7. 考察

図14より各ケースとも履歴を描いていることが確認できる。また点線で示されているばね剛性はMRダンパ搭載、および非搭載時の変位 ± 20 [mm]におけるばね定数の平均値である。MRダンパ搭載時におけるばね定数の平均値は88.0[N/mm]となり、剛性の低下が成されていることが確認できる。なお非搭載時における平均値は48.5[N/mm]となり、模型仕様の53.3[N/mm]より若干小さい値となった。また変位を大きくするに従い、復元力に振動的な部分が発生している。これらの理由は板ばねガイドローラのがた、MRダンパの加工精度によるものと考えられ、これらを調整または改良する事により解消されるものと思われる。

8. 結論

振動台の加振制御手法の開発のための振動実験において必要となる繰り返し利用可能な非弾性挙動実現模型の製作をMRダンパの適用により行った。その結果、改良または調整すべき点があるが当初の

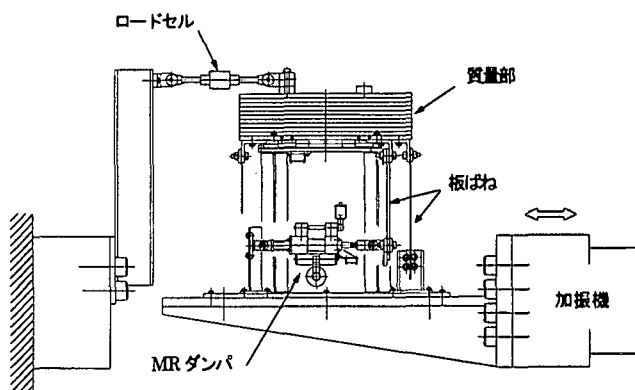


図13 性能確認試験

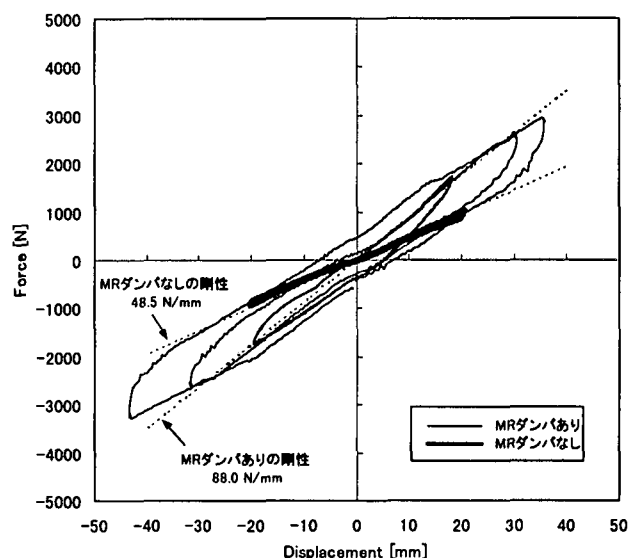


図14 試験計測結果

目的である履歴特性と剛性の低下を実現できることが確認できた。これを今後の振動台での実験においての試験体とすることが可能であると考えられる。

謝辞：本研究は科学技術庁科学技術振興調整費総合研究「構造物の破壊課程解明に基づく生活基盤の地震防災向上に関する研究」の研究費により行われたものである。

本報告書を作成するにあたり三和テッキ(株)技術本部試験研究部 袖山 博氏及びいわき明星大学大学院修士1年 村 達也君に協力を得た。ここに感謝する。

参考文献

- 1) 広江隆治,他: 繰り返し型目標波に対する高調波歪み補償の検討-電気油圧式振動台への適用-, 機械力学・計測制御講演論文集, Vol.B, pp.19-22, 1999.
- 2) 井出和成,他: 電気油圧式地震振動台の波形制御-分散型 H_∞ 制御の適用-, 機械力学・計測制御講演論文集, Vol.B, pp.67-70, 1999.
- 3) 井出和成,他: 電気油圧式地震振動台の波形制御-Adaptive Inverse Controlの適用-, 機械力学・計測制御講演論文集, Vol.B, pp.15-18, 1999.
- 4) 堂蘭美礼,他: 振動台の実時間反力補償, 機械力学・計測制御講演論文集, Vol.B, pp.467-470, 1999.
- 5) 柴田明徳: 最新耐震構造解析, 森北出版, pp.113, 1981.