

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360220

研究課題名(和文) 免震建築物制御用軸力制限機構付き回転慣性マスダンパーの開発

研究課題名(英文) Development of rotary inertial damper having force restriction mechanism for response control of seismically isolated structures

研究代表者

五十子 幸樹 (Ikago, Kohju)

東北大学・災害科学国際研究所・教授

研究者番号：20521983

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：免震建物において上部構造物の総質量に匹敵するみかけ質量の慣性こまを設置し、それに軸力制限機構と支持ばねを介して接続したシステムについて、軸力制限機構部の非線形特性を複素剛性により等価線形化することにより伝達関数の閉形表現を導出した。これにより、ダイナミック・マスの効果による地震力低減効果を保持しながら上部構造物の床応答加速度を低減するダンパー解の閉形表現を定点法により導出した。

更に、提案ダンパーの有用性を確認し、実用化のための資料を得るためにダンパー縮小試験体と実大試験体を用いた実験を実施し、理論の妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：This research work derived a closed form optimal design of a new damper system consisting of rotary inertial damper having a force restriction mechanism and a spring element connecting it to the structure. The optimal damper restriction force and spring stiffness are determined such that the peak of the acceleration amplification factor obtained by linearizing the hysteretic property of the force restriction mechanism is equal to the amplification factor at the fixed point of the resonance curve.

Furthermore, series of experiments using small scale and full scale damper are conducted to validate the effectiveness of the proposed damper.

研究分野：耐震工学

キーワード：ダイナミック・マス 変位制御 免震構造

## 1. 研究開始当初の背景

本研究課題が研究対象とする「慣性こま」はビル地震応答制御装置の一つであり、構造物の層間相対加速度に比例する抵抗力を発揮するダイナミック・マスを実装置として実現したものである。慣性こまに用いられるボールネジ機構は、ボールネジ部の直線運動をボールナットの高速回転運動に変換する機構であり、これにより回転錘の見かけ上の慣性抵抗力が増幅され、これにより見かけの大きな質量を得る。この増幅された見かけ質量の効果を建築物の地震時応答制御に用いる試みは海外の研究者によっても行われていたが、理論・解析が主であり、実用化に至っていたのは我が国の研究グループだけであった。その中でも著者らの共同研究者が開発したマスダンパー[図.1]では、ボールネジを用いた運動の増幅機構に外径 600mm の円筒型回転質量(フライホイール)を取り付けることで、その見かけの質量効果を実質量の数千倍程度に増幅することを可能とされていた。ただし、既往の慣性こまは高層・超高層ビルの制振用に開発されたもので、長大なストロークを要求する免震建物の制御に用いることは出来なかった。

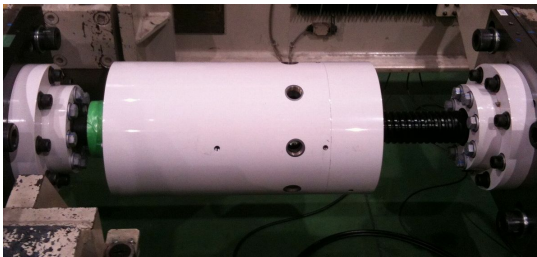


図.1 実用化された制振用慣性こま

また、高層・超高層ビルの制振に慣性こまを用いる場合、その質量と支持ばねで構成される二次的な振動系の周期を主構造物の周期に同調させることで同調質量ダンパー(TMD)として用いることが出来たが、免震構造でそのような使い方をすると支持部材のストロークが実現不可能なほどに大きくなってしまいう問題があったので、高層・超高層ビルの制振とは異なるアプローチの設計方法を見いだす必要があった。

## 2. 研究の目的

慣性こまは、免震構造物に適用する場合においても、実質量の数百倍の質量増幅効果を持ち、建物質量に匹敵するほどの大きな質量を免震層に付与することが可能であり、これにより免震層より上部の構造物に入力する地震力を低減することが可能であるが、床応答加速度が過大になってしまう場合もあった。本研究では、免震制御において大きな可能性を秘めた慣性こまについて、その効果的な活用方法を模索する。まず第一に、上部構造への地震入力低減効果を保持しながら過

大な床応答加速度を低減するために、ダンパー内に軸力制限機構を設けると共に、ダンパーが発生する高周波応答成分を除去する緩衝ばねの効果を明らかにする。

次に、高層・超高層建物制振用に開発されていたダンパーを免震用に改造し、実大試験体を製作し、共同研究者が保有する 3000kN ダイナミックアクチュエータを用いた単体加振実験により所用の性能が得られることを確認する。

## 3. 研究の方法

慣性こまを免震建物に設置した時の上部構造物への地震外力低減効果を保持しながら、上部構造物の過大な床応答加速度を低減する目的で設置されるダンパー軸力制限機構と緩衝ばねについて最適な設定値を定点法により見いだす。

定点法は線形システムにしか適用できないので、非線形要素である軸力制限機構部分を複素バネを用いて等価線形化する。これにより得られた慣性こま付き免震建物の伝達関数についてその定点を見いだす。さらに、伝達関数の最大値が定点における応答倍率に一致する時の制限軸力と緩衝ばねの値を求めることで最適なダンパー設計解を得る。

また、提案ダンパーの実用化へ向けて縮小ダンパー試験体の振動台実験と実大ダンパー試験体の単体加振実験により理論の検証を行う。

## 4. 研究成果

免震建物において上部構造物の総質量に匹敵するみかけ質量の慣性こまを設置し、それに軸力制限機構と支持ばねを介して接続したシステムについて、軸力制限機構部の非線形特性を複素剛性により等価線形化することにより伝達関数の閉形表現を導出した。これにより、ダイナミック・マスの効果による地震力低減効果を保持しながら上部構造物の床応答加速度を低減するダンパー解の閉形表現を定点法により導出した。

更に、提案ダンパーの有用性を確認し、実用化のための資料を得るために実験を実施した。ダンパー縮小試験体を取り付けた縮小免震試験体では軸力制限と緩衝ばねの効果を振動台実験で確認した。縮小試験体では、好ましくないダンパー内部の内筒質量や摩擦の影響が大きく免震制御効果は限定的であったが、解析モデルの妥当性を確認することが出来た。既往の高層・超高層建物制御用に開発・実用化されていた慣性こまを免震建物のストロークに対応できるように改造し、実大の免震用慣性こまを試作した[図.2]。

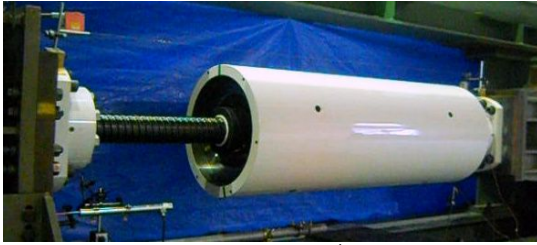


図 . 2 試作実大ダンパー

試作ダンパーに対して共同研究者である(株)免制震デバイスが保有する 3000kN ダイナミック・アクチュエータを用いて単体加振実験を実施し、設計通りのストローク、見かけ質量、軸力制限を発揮することを確認した。

これら解析的、実験的検討によりダンパー軸力制限機構はある程度上部構造物の床応答加速度を低減することにおいて効果があるものの、限界があることも明らかになってきたので、さらなる改善のために軸力制限機構をピンガム流体を用いた流体クラッチ機構とする改善案や、軸力制限機構と緩衝ばねを粘弾性体で置き換える改善案を提案し、解析的にその有効性を示した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

中南滋樹, 木田英範, 五十子幸樹, 井上範夫: 免震建物における粘性マスダンパーの軸力制限と緩衝ばねの効果, 査読あり, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 701 号, pp.1055-1064, 2014 年 7 月

〔学会発表〕(計 19 件)

S. Nakaminami, K. Ikago, H. Kida, N. Inoue: Response Characteristics of a Base-Isolated Structure Incorporated with a Force-Restricted Viscous Mass Damper, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Paper ID 0484, 2012.9.26

K. Ikago, M. Ikenaga, K. Kakemoto, N. Inoue: Optimum Base-Isolation System Control using Force Restricted Viscous Mass Dampers, Proceedings of the 14th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Sardinia, Italy, paper 38, 2013.9.5

K. Kakemoto, M. Ikenaga, K. Ikago, N. Inoue: Seismic Control of Base-isolated Structures incorporated with a Force-restricted Viscous Mass Damper, Proceedings of 13<sup>th</sup> World

Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Sendai, Japan, paper 900533, 2013.9.25

K. Ikago, M. Ikenaga, S. Nakaminami, K. Saito, N. Inoue: Shake Table Tests for a Base-Isolated System Containing a Rotary Inertial Damper, Proceedings of The Twelfth International Conference on Computational Structures Technology, Naples, Italy, paper54, 2014.9.5

掛本啓太, 中南滋樹, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 回転増幅機構と軸力制限機構を有する粘性マスダンパーによる免震構造物の地震時応答制御, 日本建築学会東北支部研究報告集(青森), 第 75 号・構造系, pp.121-124, 2012 年 6 月 16 日

掛本啓太, 中南滋樹, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 軸力制限機構付き粘性マスダンパーの免震構造物への適用性に関する研究—(その 3) 定点法に基づく最適制限軸力パラメータの閉形解導出—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 第 75 号・構造系, pp.487-488, 2012 年 9 月 12 日

中南滋樹, 木田英範, 五十子幸樹, 井上範夫: 軸力制限機構付き粘性マスダンパーの免震構造物への適用性に関する研究—(その 4) 質点系の伝達特性—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 第 75 号・構造系, pp.489-490, 2012 年 9 月 12 日

齊木健司, 中南滋樹, 木田英範, 五十子幸樹, 井上範夫: 軸力制限機構付き粘性マスダンパーの免震構造物への適用性に関する研究—(その 5) RC 造 5 階建物への適用例—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 第 75 号・構造系, pp.491-492, 2012 年 9 月 12 日

井上範夫, 中南滋樹, 木田英範, 五十子幸樹: 軸力制限機構付き粘性マスダンパーの免震構造物への適用性に関する研究—(その 6) 戸建住宅への適用例—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 第 75 号・構造系, pp.493-494, 2012 年 9 月 12 日

掛本啓太, 中南滋樹, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 粘性マスダンパーを有する免震構造物の地震時応答制御における定点法の適用範囲, 日本建築学会東北支部研究報告集(岩手), 第 76 号・構造系, pp.21-22, 2013 年 6 月 22 日

菊地淳哉, 掛本啓太, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 軸力制限機構付き粘性マスダンパーを有する免震構造物の加振実験とその解析的検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道),

pp.411-412, 2013年8月30日  
中南滋樹, 木田秀範, 田中久也, 渡邊義仁, 五十子幸樹, 井上範夫: 軸力制限機構付き粘性マスダンパーの免震構造物への適用性に関する研究—(その7)実大ダンパーの単体加振実験—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.413-414, 2013年8月30日  
菊地淳哉, 掛本啓太, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 粘性マス直列型ダンパーによる免震建物の地震応答制御に関する研究, 日本建築学会東北支部研究報告集(福島), 第77号・構造系, pp.7-10, 2014年6月21日  
池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 軸力制限機構にピンガム流体を用いた粘性マスダンパーの免震構造物への適用性, 日本建築学会東北支部研究報告集(福島), 第77号・構造系, pp.15-18, 2014年6月21日  
護法亜弥, 菊地淳哉, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 粘性マスダンパーの緩衝支持部材が免震構造物において応答に及ぼす影響の実験的検討, 日本建築学会東北支部研究報告集(福島), 第77号・構造系, pp.19-22, 2014年6月21日  
菊地淳哉, 掛本啓太, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 粘性マス直列型ダンパーによる免震建物の地震応答制御に関する研究—(その1)—ダンパー概要とその基本応答性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 構造, pp.499-500, 2014年9月12日  
掛本啓太, 菊地淳哉, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 粘性マス直列型ダンパーによる免震建物の地震応答制御に関する研究—(その2)—システムの最適制御法と実建物への適用例, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 構造, pp.501-502, 2014年9月12日  
護法亜弥, 菊地淳哉, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 粘性マスダンパーの緩衝支持材が免震構造物において応答に及ぼす影響の実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 構造, pp.505-506, 2014年9月12日  
ZHAO Chen, KIKUCHI Junya, IKENAGA Masahiro, IKAGO Kohju, NORIO Inoue: Viscoelastically Supported Viscous Mass Damper Incorporated into a Seismic Isolation System, The 14<sup>th</sup> Japan Earthquake Engineering Symposium (CD-ROM), Chiba, Japan, pp.3832-3841, 2014.12.5

〔図書〕(計 1件)

・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年12月

〔産業財産権〕  
出願状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

五十子 幸樹 (IKAGO KOHJU)  
東北大学・災害科学国際研究所・教授  
研究者番号: 20521983

##### (2) 研究分担者

池永 昌容 (IKENAGA MASAHIRO)  
東北大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 50552402

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: