

報告日 2010年(平成22年) 8月31日  
報告者 東京工業大学 理工学研究科 機械制御システム 助教  
留 滄海

## 1. 研究概要

(和文)

### (1)課題名(日本語)

水圧用高速電磁弁を用いた PWM 制御方式免震制御手法の構築

### (2)研究者氏名

留 滄海 東京工業大学 理工学研究科 機械制御システム 助教

### (3)研究概要(日本文)

地震時の2次災害から人命を守るためには耐震だけではなく免震を行うことが効果的である。直下地震のように垂直揺れによる破壊が甚大な地震の場合、従来の免震装置は水平揺れを対象としているため十分な垂直揺れ免震を行うことができなかった。

本研究は、大都市直下型地震のための垂直揺れ免震装置として、平常時の荷重支持機能と地震時の垂直揺れ免震機能を兼ね備える新しい垂直揺れ免震システムを提案した。このシステムは水圧用高速電磁弁を用いて免震制御を行う。基礎的な実験結果により、水圧用高速電磁弁の PWM 制御による免震が有効であることがわかった。

### (4)キーワード

水圧, 高速電磁弁, PWM 制御, 免震

(英文)

### (1) Research title

Study on PWM Control of High Speed Solenoid Valve in the Water Hydraulic Vertical Seismic Isolation System

### (2) Name of researcher with title of position

Canghai Liu, Assistant Professor, Tokyo Institute of Technology

### (3) Summary

Conventional seismic isolation system can effectively isolate the horizontal earthquake ground shaking, but it cannot isolate the vertical earthquake energy anyway. In this study, a water hydraulic seismic isolation system is proposed to absorb the vertical ground shaking and therefore improve protection human lives and house's integrity against large earthquake. By using the high speed solenoid valve and the new bellows cylinder, isolation and rocking can be realized. Experimental results showed that the PWM control of the high speed solenoid valve is effective in the water hydraulic

seismic isolation system in absorbing the vertical shaking energy.

#### (4)Key Words

Water hydraulic, high speed solenoid valve, PWM control, isolation

## 2 . 本研究の意義・特色

地震時の2次災害から人命を守るためには耐震だけではなく免震を行うことが効果的である。直下地震のように垂直揺れによる破壊が甚大な地震の場合、従来の免震装置は水平揺れを対象としているため十分な免震を行うことができなかった。一方、垂直揺れ免震装置を構成するためには、常に建物を安定に支えることが必要なため、建物の荷重支持及びロッキング (rocking) 抑止という本質的な技術課題が壁になっていた。

本研究は、大都市直下型地震のための垂直揺れ免震装置として、水圧駆動の高出力の特徴と水の体積弾性係数が非常に高い特徴を利用し、ばねと漏れのない水圧高速電磁弁およびペローズ水圧シリンダを組み合わせることにより、平常時のロッキング抑止ができる安定な荷重支持機能と地震時の垂直揺れ免震機能を兼ね備える新しい垂直揺れ免震システムを提案した。基礎的な結果により、水圧用高速電磁弁の PWM 制御による免震が有効であることがわかった。

## 3 . 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

「耐震構造」の建物は建物全体で地震エネルギーを受けるため、倒壊をしないまでも揺れによる室内設備や家具の転倒、間仕切壁の破損など生活機能を失うダメージを受けることがあり、最悪の場合には室内での死傷者が出ることもある。地震時の2次災害から高齢者や子供を守るためには耐震だけでなく免震を行うことが効果的である。免震装置は水平免震装置の開発が行われているが、直下地震の場合には水平揺れよりも垂直揺れによる破壊ははるかに大きい。したがって、垂直揺れ免震装置の開発が必要となる。しかし、一戸建ての垂直揺れ免震装置は免震に加え、平常時は建物を安定に支持することが不可欠なため、建物の荷重支持能力及びロッキング (rocking) 抑止の点において技術課題がある。

そこで、本研究では直下地震の垂直揺れを対象とし、加圧した水道水を駆動媒体として、建物の荷重支持及びロッキング抑止機能を有する建物を安定に支持できる新しい水圧駆動垂直揺れ免震装置を提案した。また、免震制御には水圧高速電磁弁の PWM 制御を用いた。

提案する免震装置の概念図を Fig. 1 に示す。免震装置は建物の土台と基礎の間に配置される。本研究はばねと水圧シリンダからなる垂直揺れ免震装置を検討する。一個の免震装置は中心に配置される水圧シリンダと周りに配置される3個のばねから構成される。垂直揺れ免震装置を実現するには、1) 平常時の建物の荷重支持、2) 平常時のロッキング抑止、3) 地震時の免震を満たさなければならない。以下では三つの条件について順次に述べる。

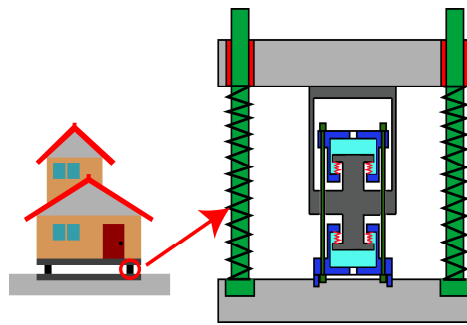


Fig.1 Schematic diagram of seismic isolation device

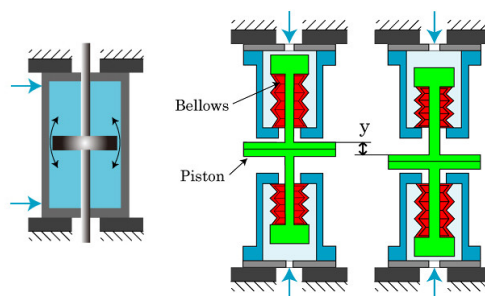
(1) 平常時の建物の荷重支持

シリンダを用いて荷重を支えることが考えられ、建物荷重は数百 kN にのぼるため、面積が大きいシリンダを選ばなければならない。その結果、免震制御に必要な負荷流量が大きくなり、大形の制御弁が必要になる。これは免震システムの実用性を考えた場合には障害になる。そこで、本研究では建物の荷重をばねにより支えることとする。

(2) 平常時のロッキング抑止

垂直揺れ免震装置はロッキング抑止が必要である。特にばねだけによる荷重支持ではロッキングは必ず生じる。これを解決するため、本研究は水の体積弾性係数が非常に高いことに注目し、漏れのない水圧シリンダを密閉加圧することによりロッキング抑止を図ることを考える。漏れのない水圧シリンダを密閉加圧しておけば、水の体積弾性係数が非常に高いことから、水圧シリンダは非常に硬いばねと見なすことができ、この特性を利用すれば、平常時のロッキングを抑止することが可能である。

ロッキング抑止を実現するため、漏れのない水圧シリンダと漏れのない制御弁が必要である。Fig.2 に示すように、市販の水圧シリンダは負荷を受けると漏れが生じる。その漏れ流量を補うため、常に弁で制御する必要があり、これがエネルギーロスとなる。これに対し、本研究ではベローズの漏れない特性を利用し、水圧シリンダにベローズを内蔵することにより、市販水圧シリンダにおいて問題になっている漏れを完全に防ぐことができる。漏れがなければロッキングを抑止するには弁の制御が不要になり、平常時にはパワー不要になる。



(a) Traditional cylinder (b) Proposed cylinder

Fig. 2 Comparison of cylinders

市販の水圧比例弁やサーボ弁は高価で内部漏れもある。一方、我々がすでに開発した水圧 2 段式高速電磁弁は安価で内部漏れがない。そこで、本研究では漏れのない新しい水圧シリンダ、水圧高速電磁弁を用いて垂直揺れ免震のための水圧駆動システムを構築する。

### (3) 地震時の免震

本研究で提案した漏れのない水圧シリンダを用いることによって、平常時のロッキング抑止が可能になるだけでなく、地震時には水圧高速電磁弁を制御することにより、ロッキング抑止を瞬時に解除でき、しかも、同じ水圧シリンダを用いて免震機能を実現できる。提案する免震装置は日常生活への影響はなく、平常時はパワー不要で省エネルギーである。また、水道水を用いるため、環境適応型システムとなる。

実験装置の写真を Fig.3 に示す。実験装置は上下の二つの部分からなる。上の部分は水圧駆動免震装置で、下の部分は地震振動を発生する油圧駆動加振装置である。免震装置は 4 本のばね (4210N/m) を用いて 42kg の負荷質量を支える。水圧ペローズシリンダの仕様を表 1 に示す。免震装置、加振装置の変位と加速度はセンサを用いて計測する。

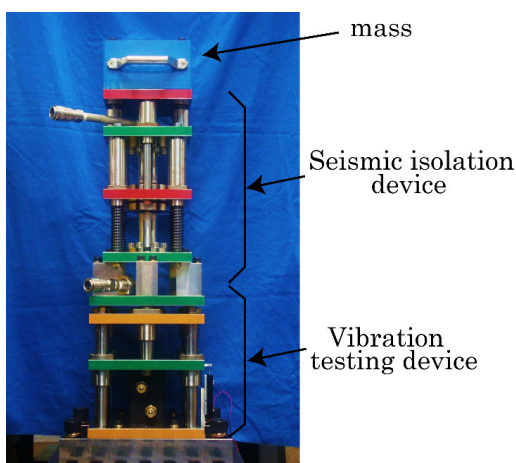
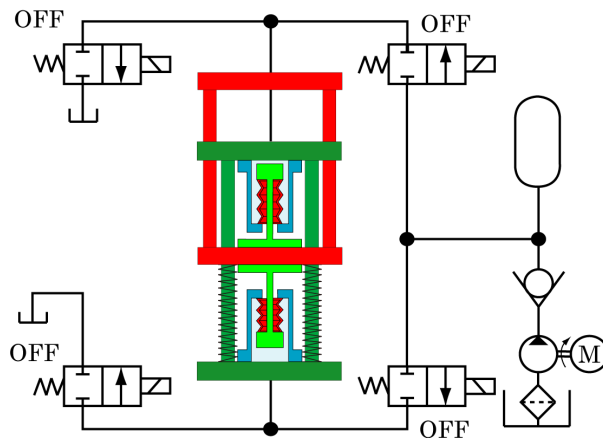


Fig. 3 Picture of experimental setup

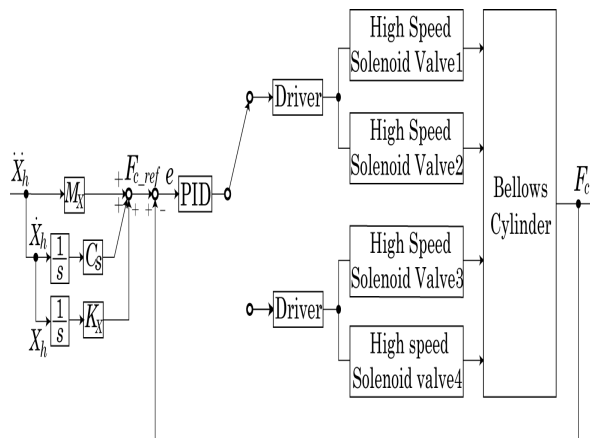
Table 1: Specifications of bellows cylinder

Max. Pressure [MPa]	Area [m <sup>2</sup> ]	Stroke [m]	Spring Constant [N/m]
7	$5.7 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-2}$	4210

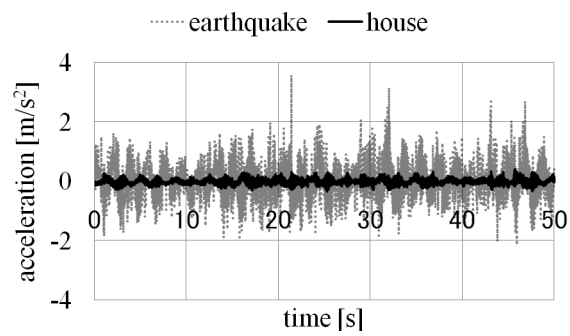
免震を実現するため、4 つの高速電磁弁を用いてペローズシリンダを制御する。水圧回路図を Fig.4 に示す。高速電磁弁は搬送波 50Hz の PWM 信号により制御を行う。制御のプロック線図を Fig. 5 に示す。ペローズシリンダの各部屋の圧力を圧力センサにより測定し、上下の部屋の圧力差とペローズシリンダの受圧面積から、ペローズシリンダの出力を計算する。その値と免震に必要な力の目標値を比較し、それに対応する PWM 信号の Duty 比を設定して水圧用高速電磁弁に与えることで、免震に必要な力を PID 制御により制御する。



**Fig. 4 Water hydraulic control system**



**Fig. 5 Block diagram of seismic isolation control system**



**Fig. 6 Acceleration response**

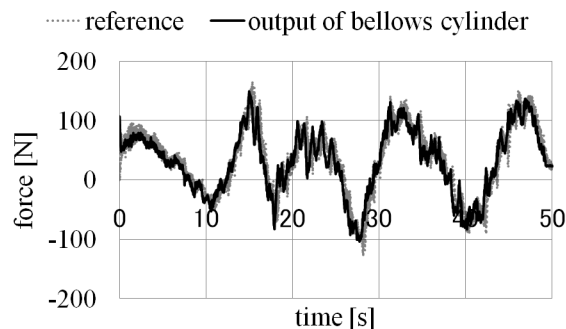


Fig. 7 force response

加振装置の指令入力には1968年八戸の地震波（up-down）を用いる。ベローズシリンダのストロークは12mmであるため、地震波入力を1/4にスケールダウンした。実験結果をFig.6、7に示す。Fig.6により、免震装置の負荷質量の加速度応答はかなり低減され、免震装置は有効であることがわかった。Fig.7により、ベローズシリンダの出力は指令にほぼ追従していることがわかった。また、1978年宮城県沖地震、1952年タフト地震、1940年エルセントロ地震の地震波（up-down）を加振装置の指令入力として加振し、免震装置は有効であることを確認した。これらの実験結果は紙面の都合で割愛した。

本研究は大都市直下型地震のための一戸建て垂直揺れ免震装置として、水圧駆動の高出力の特徴と水の体積弾性係数が非常に高い特徴を利用した能動型水圧駆動免震装置を提案した。基礎的な実験により、水圧用高速電磁弁のPWM制御による免震が有効であることがわかった。また、1個の水圧シリンダによって能動的な免震とロッキング抑止が可能なことがわかった。

#### 4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

留 滄海 東京工業大学機械制御システム専攻 助教  
北川 能 東京工業大学機械制御システム専攻 教授

#### 5. 研究実施時期

2007年（平成19年）4月から2009年（平成21年）3月まで

#### 6. 本研究に関連して発表した主な論文等

- (1) 留 滄海, 北川 能, 直下地震の垂直揺れが吸収可能な一戸建ての水圧駆動免震装置の提案, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2007, 104 (2007)
- (2) Canghai LIU, Ato KITAGAWA, Proposal of Active Water Hydraulic Seismic Isolation System, Proceedings of 2nd TIT-BIT Joint Workshop on Mechanical Engineering, 134-138 (2007)
- (3) 留 滄海, 佐藤彰洋, 北川 能, 一戸建ての垂直揺れ水圧駆動免振装置の提案, 日

本地震工学会大会 2007 梗概集, 118 - 119 (2007)

(4) Akihiro SATO, Canghai LIU, Ato KITAGAWA, PROPOSAL OF ACTIVE SEISMIC ISOLATION SYSTEM, The AOTULE Student Workshop jointly with The 5th KAIST-Tokyo Tech Mechanical Engineering Workshop, 65-66 (2007)

(5) 留 滄海, 佐藤彰洋, 北川 能, 直下地震のための住宅用水圧駆動垂直揺れ免震装置, フルードパワーシステムワークショップ講演論文集, 25-26 (2008)

(6) 関口英樹, 北川 能, 留 滄海, 佐藤彰洋, 川島正人, 戸建てのための水圧駆動垂直揺れ免震システムに関する研究, 平成21年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 68-70 (2009)

(7) Ato Kitagawa, Canghai Liu, Study on Water Hydraulic Vertical Seismic Isolation System, The 3rd BIT-TIT Joint Workshop on Mechanical Engineering, 182-188 (2009)

## 7. 内外における関連研究の状況

地震の水平揺れを免震できる技術が実用化されているが、建物を対象とした垂直揺れを免震できる装置の研究・開発はまだ少ない。株式会社構造計画研究所は世界初の3次元免震住宅を2010年11月に竣工させると発表した。径約85cmの大きな空気圧シリンダによる受動的な免震と油圧シリンダによるロッキング抑止が採用されるため、受動的な免震であるために性能的に不十分であることと不慮の事故の際の油漏れによる住宅地汚染の恐れがあることが問題として残っている。

## 8. 今後の発展に対する希望

建物の耐震は法律で義務化されているが、耐震だけでは不十分である。地震で倒壊した建物の再利用は不可能なため、財産喪失となる。また、病院など防災拠点の機能停止も大きな問題点である。免震技術の高度化ができれば、耐震の基準が下げられることにより、耐震のコストが大幅に削減できる。安心・安全な住宅造りには耐震と免震の技術の融合が必要と考える。今後は耐震・免震技術のさらなる進歩を期待したい。