

2025 年 1 月 9 日

建築・都市システム学 専攻		学籍番号	第 183526 号	指導教員	齊藤 大樹 中澤 祥二 松井 智哉
氏名	真島 僚				

論文内容の要旨 (博士)

博士学位論文名	非線形粘性ダンパーを有する滑車機構付き制振システムの開発
---------	------------------------------

(要旨 1,200 字程度)

建物主架構を対象とした制振構造や免震構造に関する研究や実用化は活発に行われており、建物の耐震性は飛躍的に向上した。その一方、近年では吊り天井や自動倉庫ラックなど非構造物の地震被害が顕著となっており、天井部材や積荷の落下による死傷が危惧されるだけでなく震災復興の長期化など甚大な影響を社会に及ぼす。しかしながら、非構造物を対象とした使用可能な制振システムの種類は限られている。また、建物主架構よりもスパン幅や層高さなどの寸法が多様な非構造物の耐震性を向上するためには、設置自由性が高い制振システムの開発とその簡易的な設計方法の確立が必要である。そこで、本研究では非構造物を対象に滑車装置を用いて単層から多層まで幅広く適用可能な動滑車多層制振システムを開発することを目的としている。

第2章では、複数層に渡って連続的に動滑車を配置することで各層の累積増幅変位を一つのダンパーに伝達する動滑車多層制振システムを提案した。また、滑車ごとに発生する摩擦力およびワイヤの軸変形を考慮した提案システムの構成式を構築した。

第3章では、動滑車により増幅されたワイヤの大ストロークに追従するため、回転方向に減衰力を発揮する非線形粘性ダンパーを用いた回転式ダンパーを開発した。次に、実大部分吊り天井に提案システムを適用した動滑車単層制振システムに関する振動台実験を実施した。本実験は一方向加振実験と二方向加振実験の二段階で構成されている。一方向加振実験では非制振や耐震天井および動滑車制振システムを適用した場合の計6ケースを対象とし、提案システムの地震動応答低減効果を確認する。また、二方向加振実験では、動滑車制振システムに鉛直方向の地震動が作用する場合の応答低減効果および天井面の回転挙動について検証した。さらに、吊り天井の再現解析を実施し、実験結果と解析結果との比較から解析モデルおよびダンパーの力学モデルの妥当性を検証した。

第4章では、まず4層小型試験体を対象にワイヤ張設レイアウトやワイヤ往復回数を変えた29試験体のパラメトリック振動台実験を実施し、ダンパーへの累積増幅変位伝達効果や動滑車多層制振システムの地震動応答低減効果を把握した。続いて、天然系積層ゴムを用いた6層せん断試験体を用いた三次元大型振動台実験を実施し、提案システムによるエネルギー吸収効率や異なるワイヤ張設方レイアウトにおける地震動応答低減効果を詳細に分析した。さらに、6層せん断試験体の再現解析を行い、振動台実験結果と再現解析結果の比較から動滑車多層制振システムの構成式と解析モデルの妥当性を検証した。

第5章では、耐力スペクトル法を基本とした動滑車多層制振システムの設計法を提案した。耐力スペクトル法による応答予測値と一質点系の時刻歴応答解析結果の比較から地震動の非定常性を考慮したダンパー粘性係数に関する補正式および最大せん断力の算定式を提案し、応答予測精度の向上を図った。また、12層自動倉庫ラックを対象に動滑車多層制振システムの試設計を実施し、時刻歴応答解析との比較から提案設計法は精度よく目標設計変位および層せん断力と一致することを実証した。

第6章では、本論文の結果を総括し、本論文で得られた知見と今後の課題を示した。

Date of Submission (month day, year) : January 9, 2025

Department of Architecture and Civil Engineering	Student ID Number D183526	Supervisors Taiki SAITO Shoji NAKAZAWA Tomoya MATSUI
Applicant's name Ryo MAJIMA		

Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Development of vibration control system using pulley mechanisms equipped with nonlinear viscous dampers
-----------------	---

Approx. 800 words

The research and practical implementation of vibration control and base isolation systems targeting the primary structure of buildings have significantly improved their seismic performance. However, in recent years, seismic damage to non-structural components such as suspended ceilings and automated warehouse racks has garnered increasing attention. This damage has not only caused casualties due to falling ceilings but has also led to severe societal impacts. To enhance the seismic performance of non-structural components, which often feature more diverse dimensions such as span widths and story heights compared to primary structures, it is essential to develop highly adaptable vibration control systems and establish simplified design methods for their application. Therefore, this study aimed to develop a multi-story vibration control system using pulley mechanisms that could be widely applied to non-structural components, ranging from single-story to multi-story configurations.

Chapter 2, "pulley damper multi-layer system (PDMS)" was proposed, where pulleys were continuously arranged across multiple stories to deliver the cumulative amplified displacement of each story to a single damper. Additionally, governing equations for the proposed system were formulated, taking into account the frictional forces generated by each pulley and the axial deformation of the wire.

Chapter 3 focused on developing a rotational damper that utilized a nonlinear viscous damper capable of exerting damping force in the rotational direction to accommodate the large wire stroke amplified by the pulley mechanisms. Subsequently, shaking table tests were conducted incorporating the proposed pulley mechanism into a full-scale suspended ceiling. This experiment was carried out in two stages: a one-directional excitation test and a two-directional excitation test. In the one-directional test, six cases were examined, including scenarios with and without the wire and damper, to verify the seismic response reduction effects. The two-directional test further investigated torsional behavior of the ceiling panel. Furthermore, reproduction analyses of the suspended ceiling were conducted, and the accuracy of the analytical models and damper mechanical models were verified by comparing the experimental and analytical results.

Chapter 4, a parametric shaking table experiment was conducted on a four-story small-scale test specimen, where 29 different configurations were tested to clarify the effectiveness of the proposed system in transmitting cumulative amplified displacement to the damper and reducing seismic response. Additionally, a large-scale three-dimensional shaking table test was conducted using a six-story shear specimen equipped with natural laminated rubber bearings. This test analyzed the energy absorption efficiency of the proposed system and examined the seismic response reduction effects under different wire layout configurations. Furthermore, a numerical simulation of the six-story shear specimen was performed, and comparisons between the experimental and simulation results validated the governing equations and analytical model of the multi-story pulley-based vibration control system.

Chapter 5 proposed a design method for the PDMS based on the capacity spectrum method. By comparing the response predictions obtained using the capacity spectrum method with time-history response analysis results for a single-degree-of-freedom system, correction formulas for the damper viscosity coefficient considering the non-stationary nature of seismic motion were derived, along with a formula for estimating the maximum shear force, thereby improving response prediction accuracy. Furthermore, a trial design was conducted for a twelve-story automated warehouse racking system using the PDMS, and a comparison with time-history response analysis results demonstrated that the proposed design method accurately predicted the target design displacement and story shear force.

Chapter 6 summarized the findings of this study and outlines future challenges.