

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15139

研究課題名（和文）Development of a low-damage, high redundancy vibration control structure system considering extreme ground motions

研究課題名（英文）Development of a low-damage, high redundancy vibration control structure system considering extreme ground motions

研究代表者

陳 星辰 (Chen, Xingchen)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・助教

研究者番号：00816564

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では小振幅時はスウィング挙動、大振幅時はロッキング挙動という2段階挙動を呈する心棒制振システムを提案している。繰返し載荷実験によるシステムの実現可能性を確認した。初期隙間やダンパー容量、初期引張材容量等が弾塑性挙動に及ぼす影響を明らかにした。力学モデルによる挙動予測式を提案し、有限要素解析による実験結果を精度よく再現し、システムの評価方法を整備した。提案システムが適用された多層鋼構造骨組の地震応答解析を通じて、主要パラメータが地震応答に及ぼす影響を明確にしたとともに、耐震性能の向上について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では巨大地震に対して高い耐震性能を持つスウィング-ロッキング型心棒架構造制振システムを提案し、載荷実験及び有限要素解析・地震応答解析を通じて幅広いパラメトリックスタディーを行った。新しいコンセプトに基づいており、提案システムの特性を十分検討したことなど学術的意義が高い。本研究で得られた知見は建物の最大変形、床加速度、残留変形など様々な地震応答を制御することに有用になり、社会的な意義も高い研究成果である。

研究成果の概要（英文）：A novel spine frame system with two-stage vibration behavior has been proposed for reducing seismic response of building structures. Firstly, cyclic loading tests were carried out to validate the feasibility of the proposed system, as well as to clarify the effect on hysteresis behavior from the main parameters including the initial gap, damper amount, and pretension force. Secondly, evaluation methods for the lateral force-displacement relation were established based on idealized mechanical models and finite element models. The evaluated results were in good agreement with the test results. Furthermore, response history analysis with various ground motions and seismic intensity were conducted for steel structures adopting the proposed system. The effect of main structural parameters on seismic performance was clarified. The appropriate value of each parameter was investigated for improving the target seismic performance of building structures.

研究分野：建築構造学

キーワード：制振構造 心棒架構造 初期張力材 ダンパー 載荷実験 有限要素解析 地震応答解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、エネルギー吸収部材付き制御型心棒架構を建物に挿入することによって、大地震における建物の特定層への損傷集中を効果的に防止できることが検証されている。ただし、スウィング挙動を呈する心棒架構は負剛性を持つため、主架構が塑性化すると変形が大きくなりやすく、残留変形が生じる可能性がある。

一方で、原点復帰特性があるロッキング挙動を呈する心棒架構では、小振幅時に心棒架構に配置されるダンパーが効きにくいという特性があり、さらに大振幅時に床加速度や心棒架構の内力が増加するなど、設計上の制約が多い。

2. 研究の目的

本研究では、建物の最大層間変形角、最大床加速度、残留変形等地震応答を抑制するため、小振幅時はスウィング挙動、大振幅時はロッキング挙動という2段階挙動を呈する心棒制振システムを提案し(図1に示す)、提案システムの弾塑性挙動と地震応答特性を明らかにすることを目的としている。具体的には下述のとおりである。

(1) 予備動的解析による提案システムの基本的な有効性を確認する。繰返し载荷実験によるシステムの実現可能性を確認し、初期隙間やダンパー容量、初期引張材容量等が弾塑性挙動に及ぼす影響を分析する。

(2) 設計方法を構築するため、力学モデルによる挙動予測式を提案するとともに、有限要素解析による実験結果を再現し、システムの評価方法を整備する。

(3) 提案システムが適用された多層構造骨組の地震応答解析を通じて、主要パラメータが地震応答に及ぼす影響を詳細に分析し、耐震性能の向上を検討する。

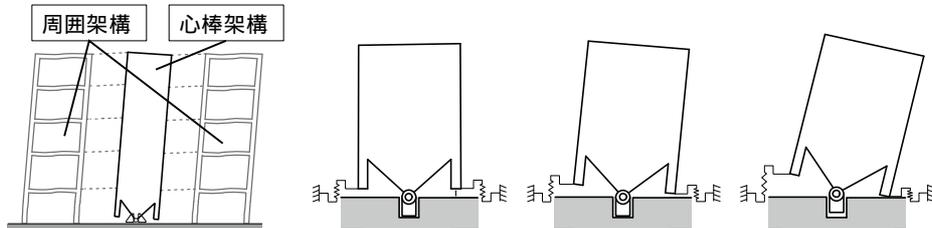


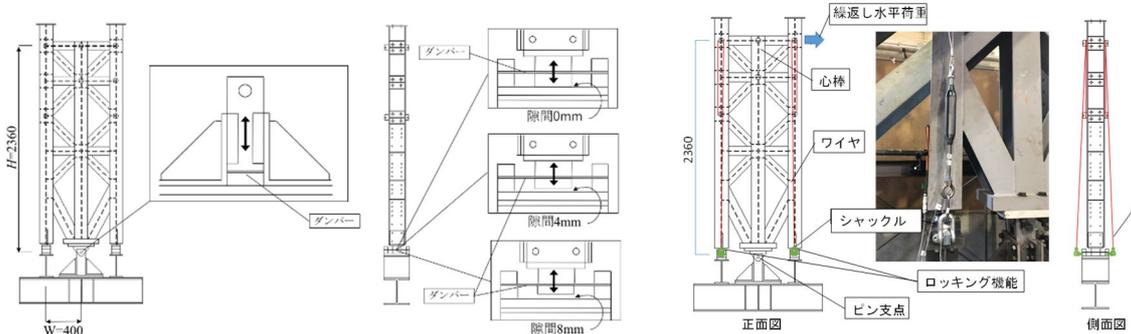
図1 提案システムの概要

3. 研究の方法

(1) 繰返し载荷実験

本研究では、図2に示すように、ダンパーとワイヤを有する縮小3層心棒架構の弾塑性繰返し挙動を確認する。試験体の高さは $H = 2360$ mm、幅は $W = 800$ mm である。心棒架構の水平せん断力は、中央下部のピン支点で伝達する。ピン支点は回転しながら浮き上がることができる。弾塑性ダンパーは心棒架構の両側下部に配置する。図2(a)に示すように、ロッキング挙動を遅らせるため、心棒架構の両側下部から着地面まで隙間(初期状態では0 mm, 4 mm)を設けている。

ワイヤの設置は図2(b)のように行う。ワイヤの材料にはロープ径4.0 mmの7束×19本、破断荷重12 kNのステンレスワイヤロープを用いた。実験に先立ちプレストレッチングを行い、実験中に弛まないように初期張力を導入した。取付け方法によって2種類の長さを用いた。ワイヤの短いケースをWS、長いケースをWLと呼ぶこととする。柱下部に厚さ4.5 mmの鋼板(SS400)を弾塑性ダンパーとして取付けた。ダンパーの塑性化部は2つであり、サイズは55 mm×20 mmと55 mm×40 mmである。それぞれD20、D40と呼ぶこととした。塑性化部の曲げ変形によりエネルギーを吸収する。



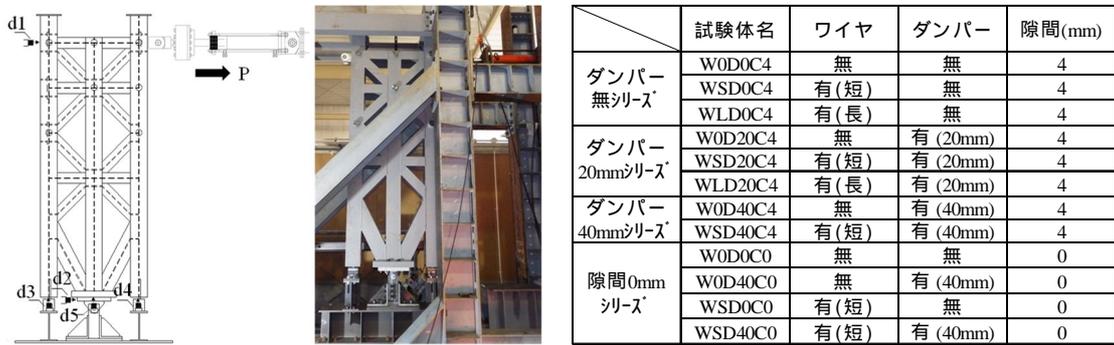
(a) 中央ピン支点と柱脚部隙間

(b) PT ワイヤの設置状況

図2 試験体概要

载荷実験では、図3に示すように繰返し水平荷重 P を作用させ、変位計 $d1$ と $d2$ の差より得られる層間変位 u を考慮した層間変形角 $R (= u/H)$ を制御値として、 $R = \pm 0.005, 0.01, 0.015, 0.02$,

0.025, 0.03 を各 2 サイクル与える。実験パラメータは図 3 に示すようにワイヤ、ダンパー、及び初期隙間である。

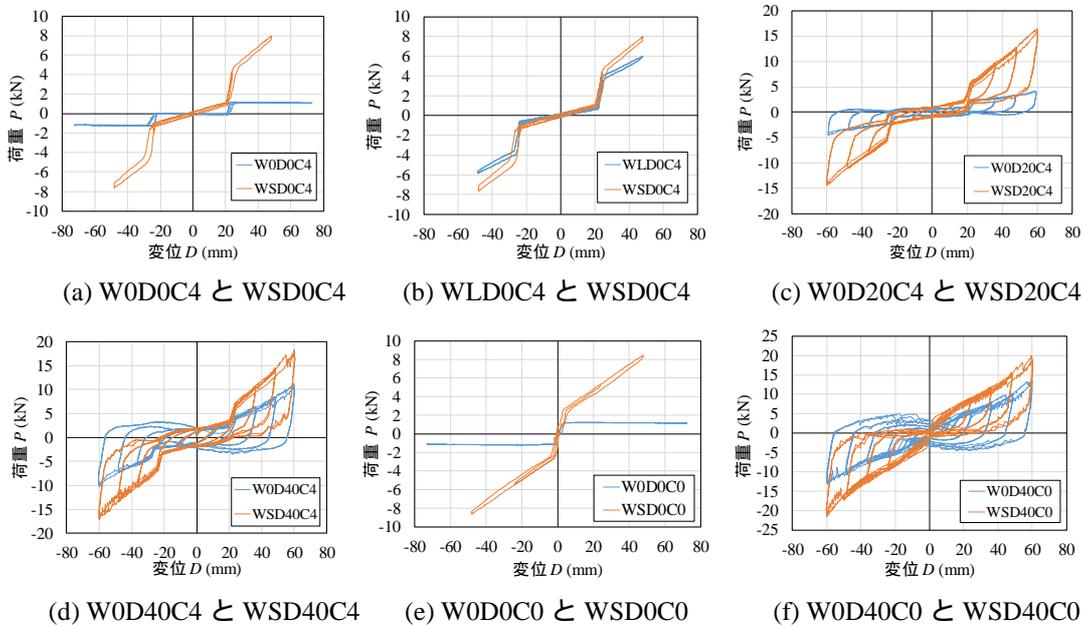


(a) セットアップと荷重・計測方法

(b) 試験体パラメータ

図 3 試験体セットアップとパラメータ

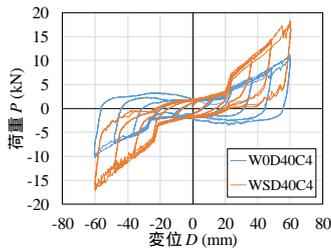
図 4 に代表試験体の荷重～水平変位関係を示す。ロッキング時の水平変位は予測とほぼ一致し、PT(pre-tensioning)ワイヤを加えることで、剛性の上昇及び除荷後の残留変形を抑制し、ワイヤの長さを短くすると剛性が上がることが確認できた。図 4(d)と図 4(c)の比較より、D40 シリーズ試験体は D20 シリーズより大きいエネルギーを吸収することが確認できる。また、W0D40C4 試験体では変位の増加と共に履歴曲線の形状が不安定になっており、これはダンパーが強すぎて鉛直方向の変位が 0mm に戻らなかったことが主な原因と考えられる。D40 試験体の履歴曲線は大い変位で荷重変動が生じているのは、ダンパーを固定しているブロックが滑ったためと考えられる。



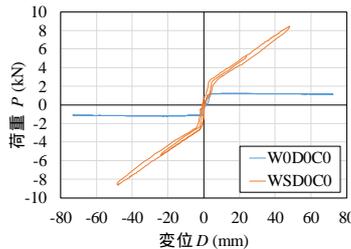
(a) W0D0C4 と WSD0C4

(b) WLD0C4 と WSD0C4

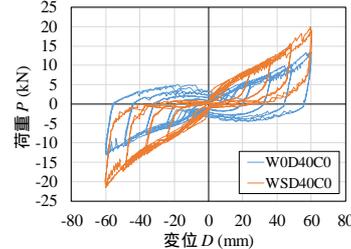
(c) W0D20C4 と WSD20C4



(d) W0D40C4 と WSD40C4



(e) W0D0C0 と WSD0C0



(f) W0D40C0 と WSD40C0

図 4 荷重～水平変位関係の比較

(2) 力学モデルと有限要素解析による挙動評価

設計方法を構築するため、力学モデルによる水平荷重～変位関係の予測式を導出した。図 5(a) に挙動予測に用いる試験体の力学モデルを示す。スウィング-ロッキング型心棒架構ではロッキング前とロッキング後の 2 つの場合に分けられ、自重による P- Δ 効果やダンパーの幾何学非線形の影響等を考慮している。

予測式の精度を検討することや実験結果をより詳細に分析すること等を目的とし、有限要素解析による試験体挙動をシミュレートした。解析モデルは図 5(b)に示している。解析を行うにあたり、最初に架構重さを重心に加える。次に柱下部に隙間を与える。最後にワイヤに所定の張力を付与する。

図 6 に実験結果と予測値と解析値の比較の一例を示している。三者は概ね一致していることが確認できる。ただし、WSD40C4 において、水平変位が大きくなる時に、実験値・解析値と予測値の比較的大きな乖離が生じている。実験時の鋼材ダンパー接合部のすべりが主な原因であると考えられる。大地震で想定されている最大変位の 46mm (層間変形角 0.02rad) に対して、PT ワイヤとダンパーのモデル化は概ね妥当であると言える。

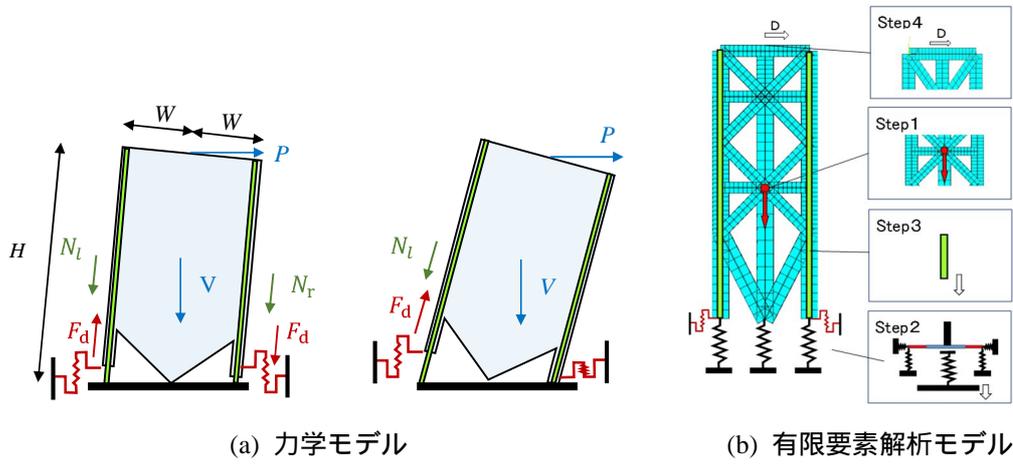


図5 挙動評価用モデル

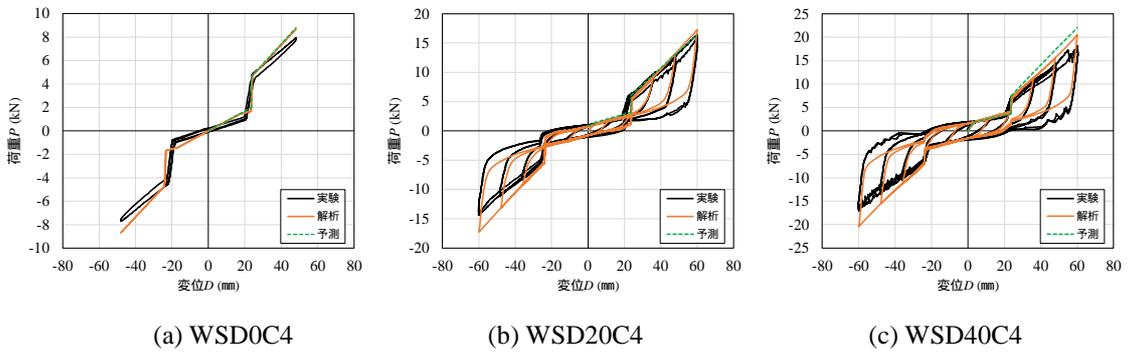


図6 評価結果と実験結果の比較例

(3) 地震応答解析

本研究では、浮き上がりを許容するスウィング-ロッキング型心棒架構を有する5層の鋼構造骨組に初期隙間、PTワイヤ、ダンパーを設け、それらのパラメータによる影響を分析する。初期隙間による心棒架構の挙動の制御、ダンパーによるエネルギー吸収能力の向上、PTワイヤによる原点回帰性の向上を期待し、それらの効果を確認する。また、応答の低減、原点回帰性を総合的に向上させるパラメータの検討を目的とする。

解析モデルを図7に示す。心棒中央下部は水平方向のみを拘束しており、心棒が浮き上がることを許容する。5スパン平面フレームの階高は1階を4.6m、2~5階を4mとし、節点にはそれぞれ23tonの質量を与える。地震動にはEl Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Hachinohe 1968 NS, JMA-Kobe 1995 NS, BCJL2の最大速度を50 cm/s、70 cm/sに基準化して用いており、減衰係数は0.02とする。また、パラメータにはダンパー降伏耐力 N_y 、PTワイヤの初期張力 N_0 、初期隙間 δ_g を用いる。

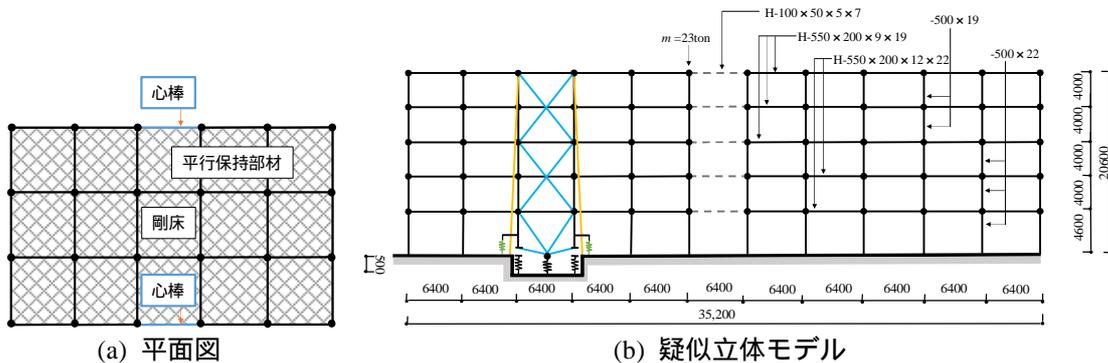


図7 地震応答解析モデル

地震波 JMA-Kobe NS 70 cm/s を与えた場合の最大層間変形角と各パラメータの関係性を例として図8に示す。ダンパー耐力とPTワイヤの初期張力を大きくし、初期隙間量を小さくすることにより層間変形角が抑制されていることが分かる。特にワイヤを設け、ダンパー耐力5500 kN以上とした場合では最大層間変形角は0.01 radを下回り、ワイヤの初期張力、隙間量による変化は小さいことが分かる。一方で、ダンパーの耐力が2750 kN以下の場合、隙間量ごとに最大層間変形角が大きく変動していることが分かる。これは、ロッキングや浮き上がり挙動により最大層間変形角が抑えられているためだと考えられる。

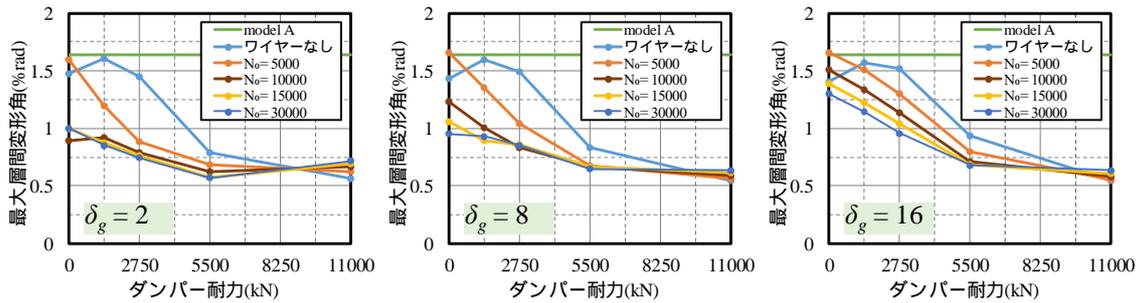


図8 最大層間変形角と主要パラメータの関係例

地震波 El Centro 1940 NS 70 cm/s を与えた場合の最上階の最大加速度と各パラメータの関係为例として図9に示す。ダンパー耐力とPTワイヤの初期張力を大きくし、初期隙間量を小さくすると最大加速度が大きくなることが確認できた。これは、ロッキング挙動、PTワイヤによる復元力の増大、ダンパーによる一次固有周期の減少が主な原因と考えられる。

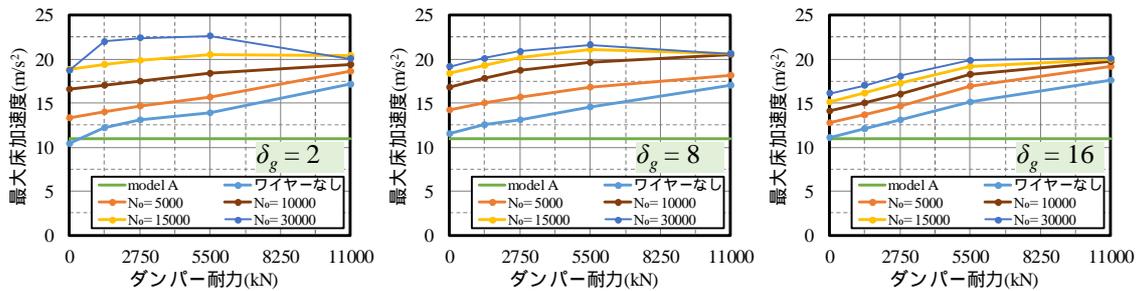


図9 最大床加速度と主要パラメータの関係例

4. 研究成果

本研究で得られた主な研究成果を以下にまとめる。

- (1) スウィング-ロッキング型心棒架構制振システムを提案している。繰返し載荷実験によるシステムの実現可能性を確認した。初期隙間やダンパー容量、初期引張材容量等が弾塑性挙動に及ぼす影響を明らかにした。
- (2) 設計方法を構築するため、力学モデルによる挙動予測式を提案した。また、有限要素解析による実験結果を精度よく再現し、システムの評価方法を整備した。
- (3) 提案システムが適用された多層構造骨組の地震応答解析を通じて、主要パラメータが地震応答に及ぼす影響を明確にしたとともに、耐震性能の向上について検討した。

本研究ではスウィング-ロッキング型心棒架構制振システムに関する十分な知見が得られたと考えている。この成果は建物の耐震性能向上に有用になると考えられる。今後の展望としては、本研究成果の国内外への情報発信を進めるとともに、速度依存型ダンパーの適用、中高層建物に適用すること、ラーメン以外の構造形式との併用等が挙げられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 陳星辰、田川浩
2. 発表標題 大振幅時にロッキング挙動を呈する心棒制振システムを配置した鋼構造骨組の地震応答解析
3. 学会等名 2019年度日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Xingchen Chen, Hiroshi Tagawa
2. 発表標題 Rocking-delayed spine system for improving seismic performance of building structures
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 陳星辰、田川浩
2. 発表標題 大振幅時にロッキング挙動を呈する心棒架構の繰返し載荷実験
3. 学会等名 2020年度日本建築学会（関東）学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永井綾乃、陳星辰、田川浩
2. 発表標題 PTワイヤを適用したロッキング機能を有する心棒架構の繰返し載荷実験
3. 学会等名 2020年度日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大鶴駿介、陳星辰、田川浩
2. 発表標題 繰返し荷重を受けるスウィング-ロッキング型心棒架構の有限要素解析
3. 学会等名 2021年度日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------