

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04360

研究課題名(和文) 回転慣性質量を用いた超高層免震建物の高減衰化に関する研究

研究課題名(英文) Study on high damping of High-rise Seismic Isolation Building by dynamic mass damper system

研究代表者

秦 一平 (HATA, Ippei)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：50548039

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、複数の共振周期を持つ超高層免震建物の居住性と耐震性向上を可能とするダンパーシステムを提案している。居住性と耐震性を向上させるためには、既存の技術では性能およびコストなどの問題から実現が不可能であった。しかし、本研究で提案する新システムでは実用化できる可能性がある。その新技術は、回転慣性質量と粘弾性ダンパーを直列に組み合わせたM-CK型システムである。提案されたシステムの実用化を目指し、設計方法の確立、応答解析、振動実験を通じてその可能性を検証した。その結果、居住性と耐震性と耐風性に優れた超高層免震建物を実現できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

南海トラフ地震が懸念されている現在、その長周期・長時間地震動による都市部の超高層建物の安全性が懸念されている。超高層建物の耐震性は高いが居住性についてはあまり考慮されていない。また、避難時にエレベータ等の移動手段の停止も懸念されるため、より安全で安心な建物を実現しなければならない。そのために、本研究の成果は、安全で安心な建物の具現化が期待できるダンパーシステムであり、そのシステムを実用化できる段階となっている。

研究成果の概要(英文)：This study proposes a damper system that enables the improvement of habitability and seismic performance in high-rise base-isolated buildings with multiple resonance periods. Existing technologies have been unable to achieve this due to performance and cost issues. However, the new system proposed in this study shows potential for practical application. This innovative technology is an M-CK system that combines rotational inertia mass and viscoelastic dampers in series.

Aiming for the practical application of the proposed system, its feasibility was verified through the establishment of a design method, response analysis, and vibration experiments. As a result, it shows that the system could realize high-rise base-isolated buildings with excellent habitability, seismic performance, and wind resistance.

研究分野：免震構造, 制振構造

キーワード：回転慣性質量 免震構造 複数モード制御 リアルタイム・オンライン応答試験 粘弾性ダンパー 超高層建物 地震応答 風応答

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、長周期・長時間地震動が観測された。この地震により、構造物が長時間にわたり揺れ続けたことが様々な調査報告書及びメディア等によって報告されている。加えて、今後発生が予測されている南海トラフ地震では、東北地方太平洋沖地震を上回る長周期・長時間地震動が懸念される。

また、直下地震が発生した場合、図1に示すように建物の振動モードの2,3次モードの周期帯が大きな影響を受けることが想定される。現状の実建物の減衰性能を1次モードの粘性減衰定数で評価すれば、制振構造5%、免震構造では20%程度であるが、高次モードへの減衰付与は小さいのが現状である。

以上のことから、超高層建築物は様々な振動モードに対し、適切な減衰性能を付与することが効果的な対策となる。このとき、繰り返し変形による影響が考慮されることが望ましい。そして、これらを技術として実用化・発展させていくためにも、より少ないダンパー数で高減衰化することが非常に重要となる。

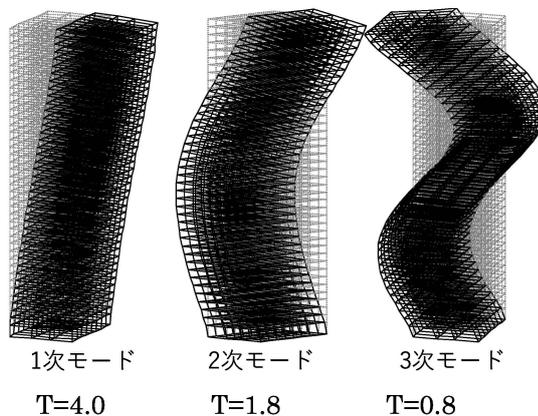


図1 超高層モデルの振動モード

2. 研究の目的

超高層建築物の高減衰化を実現するための技術として、回転慣性質量（以降、D.M.と称する）を用いたシステムの研究がある。

このD.M.を用いた図2(a)に示すような振動システム（以降、MC-K型と示す）が開発されており、オイルダンパーのような粘性系ダンパーの付与減衰に対し、少ないダンパー数で大きな減衰性能を付与できる。しかし、このMC-K型のシステムでは、制御対象の振動モードには大きな減衰を付与できるが、制御対象外の振動モードでの減衰性能はほとんど付与できないことが課題であった。

そこで本研究では、高次モードへの減衰を付与できる図2(b)に示すM-CK型システムを提案している。図3のような応答倍率比較結果が得られ、従来のMC-K型に対し高次モードに減衰を付与できることが実証された。

そこで、M-CK型システムを回転慣性質量と粘弾性ダンパーを直列に組み合わせたシステムとし、超高層免震建物に適用した場合の居住性と耐震性及び耐風性に優れた超高層免震建物を構築することを目的としている。

これを超高層免震建物の免震層に適用することで、免震層の固有周期を確保しつつ、超高層の免震設計でネックとなる風応答を抑える効果が期待できる。

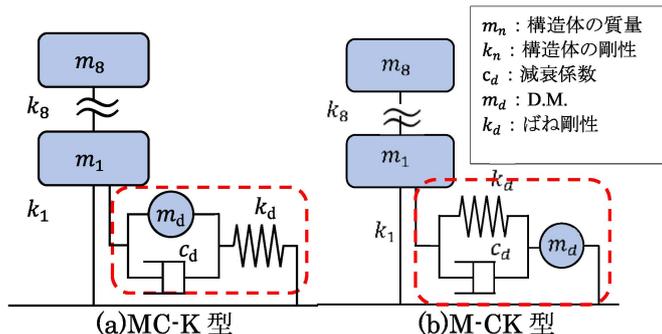


図2 MC-K型とM-CK型システム 振動モデル図

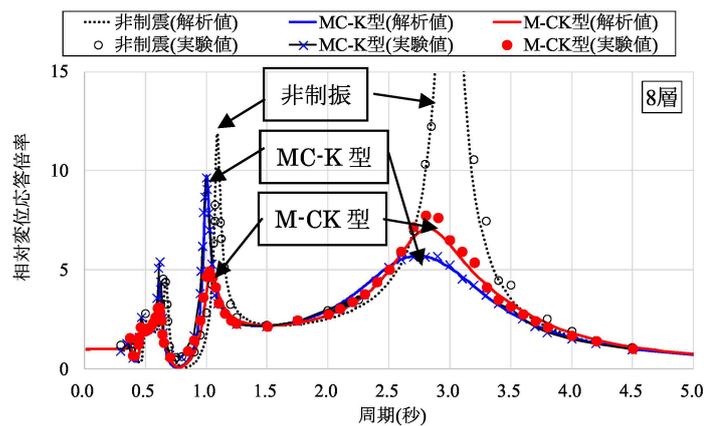


図3 MC-K型とM-CK型の応答倍率比較結果

3. 研究の方法

M-CK型システムを用いた超高層免震建物を実現するためには、「地震応答」と「風応答」の耐震性及び耐風性を検証する必要がある。「地震応答」では、高次振動モードへの高減衰化の適用範囲の検証と長時間の繰返し性能。「風応答」では、暴風時における超高層免震モデル耐風性能の検証。以上の検証が必要となることから、以下の計画により検証する。

(1) 超高層免震建物を模擬した8層試験体の振動実験  
「地震応答」に着目し、MC-K型システムを免震層に配置した場合の高次モードへの減衰効果を検証する。検証方法は、図4に示すように、上部周期3秒の振動モデルに免震層を設置し、振動台による振動実験を行う。検証内容としては、上部構造の1次固有周期に対し、免震層の等価周期を変更しながら、高次モードへの減衰付与を検証する。

(2) MC-K型実大ダンパーの性能試験

M-CK型システムの実用化をするために、回転慣性質量ダンパーと比較的コストの安い粘弾性ダンパーを直列に配置したM-CK型システムを製作した。図5に示す加力方法によりシステムの性能を把握する。

(3) 風荷重時刻歴波形の作成

CFD解析ソフトにより対象とする超高層免震建物に入力される風荷重時刻歴波形を作成する。

(4) M-CK型実大ダンパーのリアルタイム・オンライン応答試験

(2)で提案したM-CK型システムおよび加力装置を用いて、リアルタイム・オンライン応答試験を行う。M-CK型システムの「地震応答」、「風応答」に及ぼす影響について検証し、解析モデルに反映させ本システムの有用性を示す。

リアルタイム・オンライン応答試験は、数学的に履歴則のモデル化が困難である複雑な部材の要素（本研究では減衰力特性）を部材試験により取得し、数値解析を行う演算用コンピュータにオンラインでフィードバックする操作を地震波継続時間だけ繰り返し行い、部材試験と数値解析を混合して同時並行で進めるものである。

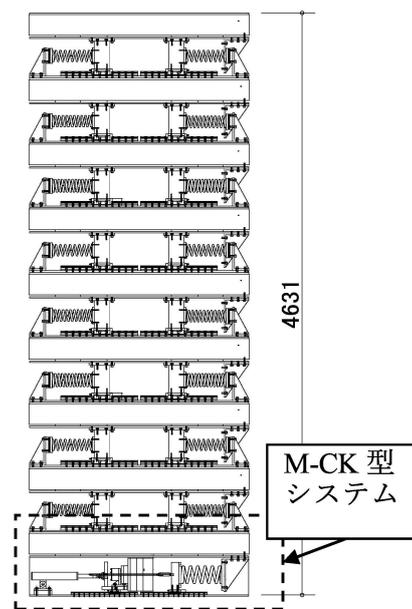


図4 超高層免震モデル試験体

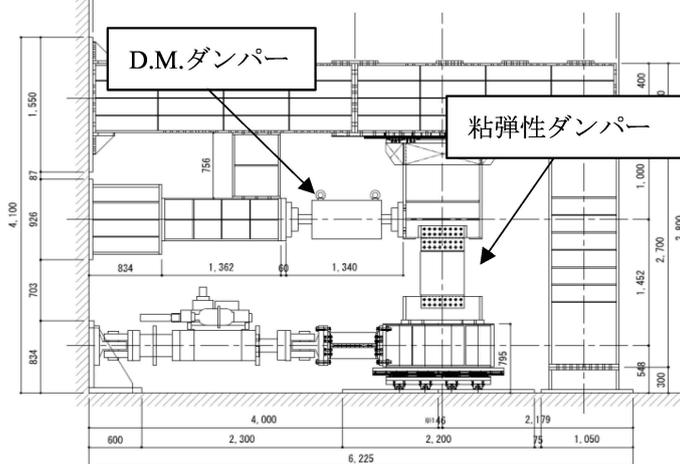


図5 M-CK型システム加力装置概要図

#### 4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) 超高層免震建物を模擬した9層試験体の振動実験

本検討では、正弦波加振実験によって得られた9層目の相対変位応答倍率と解析値の比較を図6に示す。実験の加振周期は6.0(s)~0.3(s)の範囲で実施し、各層に設置する変位計によって計測された層間変位から算

表1. M-CK型システムの最適設計式

最適同調式	最適減衰式
$T_{\infty} = \sqrt{\left(\frac{T_{0,1} \times T_{0,DM}}{T_0}\right)^2 + (2hT_0)^2}$	$h_{opt} = 0.5 \sqrt{\frac{\gamma_m(\gamma_m + 1)}{2} + 2h^2(\gamma_m + 2)}$

表2. M-CK型ダンパーの性能諸元

D.M.ダンパー	$m_d(\text{ton})$	1,800	等価周期 $T_d = 2\pi \sqrt{\frac{m_d}{k_d}} = 2.6\text{s}$
	$c_{md}(\text{kN} \cdot \text{s/m})$	1,500	
粘弾性ダンパー	$k_d(\text{kN/m})$	10,700	
	$c_{kd}(\text{kN} \cdot \text{s/m})$	2,600	

出される9層目の相対変位と振動台の入力変位から相対変位応答倍率決定する。そして、解析結果と比較を行うことで、表1の設計式の有効性を検証する。

実験値のマーカと解析値が良い対応をしており、設計式の有効性が確認できる。また、図7に示す減衰付与傾向から、M-CK型を導入した試験体の高次モードへの減衰付与傾向が非制振時と比較して大きくなっていることが確認できる。

### (2) M-CK型実大ダンパーの性能試験

本検討では、M-CK型ダンパーの正弦波加振試験結果の一例を示し、M-CK型ダンパーの特性を確認する。ここで、表2に性能諸元を示す。D.M.ダンパーは、ダンパー速度が50mm/sの時の特性値、粘弾性ダンパーは加振周期3.0sの特性値を用いた。正弦波加振試験の入力波形は、計12サイクルとし、前後テーパ部を設け、定常部は10サイクルとする。本検討では、加振周期は3.0s、振幅22mmと設定している。

図8に入力波形及び荷重変形履歴を示し、解析値と試験値の整合性が確認される。試験値では、繰り返し加振によって、粘弾性ダンパーの等価剛性が低下しているが、履歴形状が安定している。

また、繰り返し依存性は使用した粘弾性ダンパーの依存性になるため、使用するダンパーに依存することを確認した。

### (3) 風荷重時刻歴波形の作成

風荷重には上部構造20層に対して作成したレベル2風荷重を使用する。風荷重は継続時間600秒とする。風荷重の作成概要を図9に示す。

### (4) M-CK型実大ダンパーのリアルタイム・オンライン応答試験

入力地震動については建築センター模擬波のBCJ-L2、風荷重には、(3)で作成した上部構造20層に対して作成したレベル2風荷重を使用する。風荷重は継続時間600秒とする。相似則の関係より、各外乱の入力倍率は表3に示す。

表3 入力倍率

入力波	モデル	倍率
BCJ-L2	周期比 1.00	0.18
	周期比 1.50	0.15
L2 風荷重	周期比 1.00	0.06
	周期比 1.50	0.07

各試験結果を図10から図12に示す。ここで、M-CK型システムの解析結果については、表2に示す実大ダンパーの各諸元は試験結果にフィッティングした推定値を用いている。

いずれの試験結果においても、リアルタイム・オンライン応答試験結果(凡例: RTOLT)

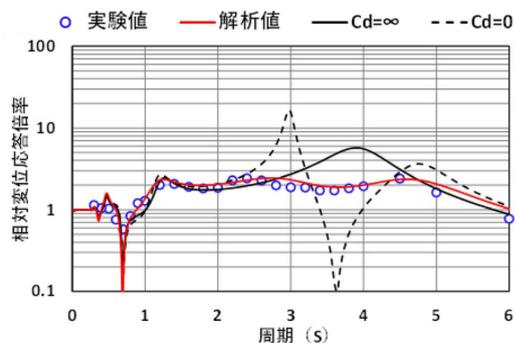


図6 共振曲線および実験結果

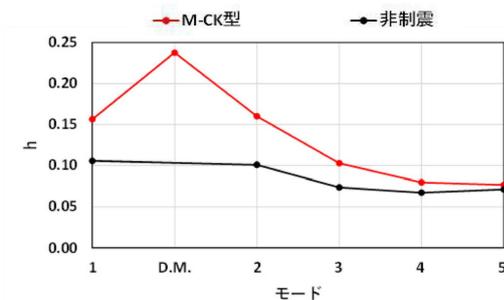


図7 高次モードへの粘性減衰付与傾向

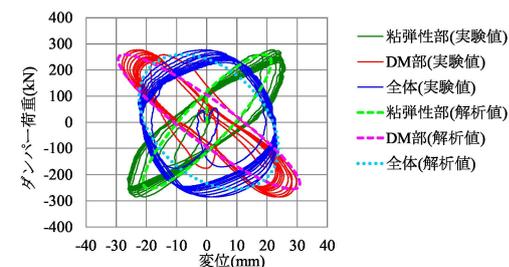


図8 入力波形とダンパーの荷重変形履歴

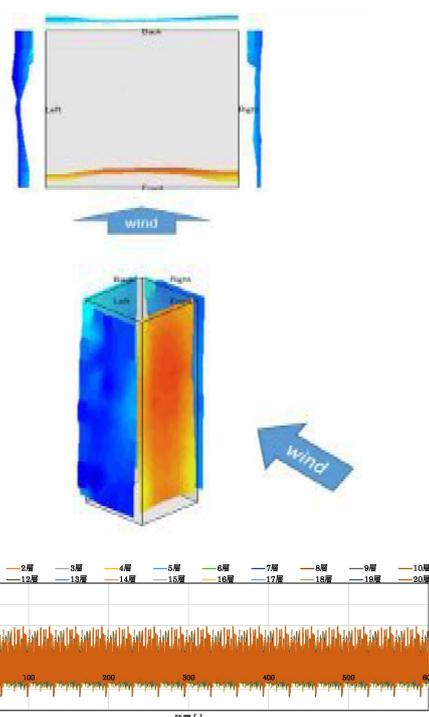


図9 風荷重作成概要図

と解析結果が良い対応を示していることが確認できる。また、風応答では、M-CK型システムのMC部の変形が支配的となり、CK部の変形(ひずみ量)が小さくせん断剛性が増大することから、地震応答と風応答で実大ダンパー諸元に差異が生じたと考えられる。最後に高次モードの応答を制御しているため、上部構造の応答変位は低減した。応答加速度的大きな増幅は見られなかったが、低減させる方法を今後の課題としたい。

以上の本研究による研究成果から、M-CK型システムを超高層免震建物に適用した場合、目的である居住性と耐性を可能とするダンパーシステムが構築できた。今後は設計方法の構築と免震層の変形に追従できる部材を選定する必要がある。

<引用文献>

- ① 石丸辰治, 秦一平, 三上淳治, 公塚正行: 付加剛比によるD.M.同調システムの簡易設計法, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第654号, pp. 1455-1464, 2010
- ② 秦一平, 郭鈞桓, 宮島洋平他: 粘性減衰とばね剛性の並列型D.M.同調システム(M-CK型)の応答性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第85巻, 第777号, pp. 1375-1385, 2020
- ③ 秦一平 他: MC-CK型同調システムに関する基礎的研究(その1~その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 731-734, 2021.7
- ④ 秦一平 他: MC-CK型同調システムに関する基礎的研究(その3~その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 501-506, 2022.7
- ⑤ 秦一平 他: MC-CK型同調システムに関する基礎的研究(その6~その7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 287-290, 2023.7

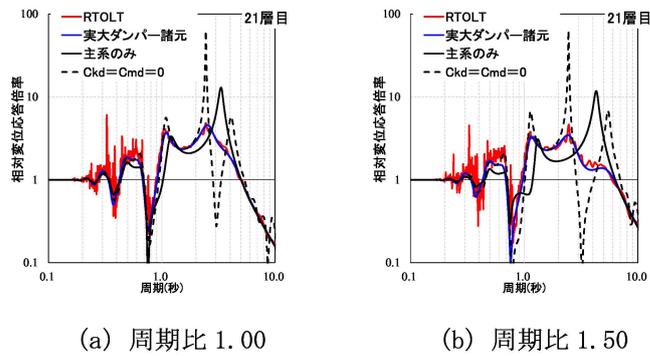


図10 共振曲線

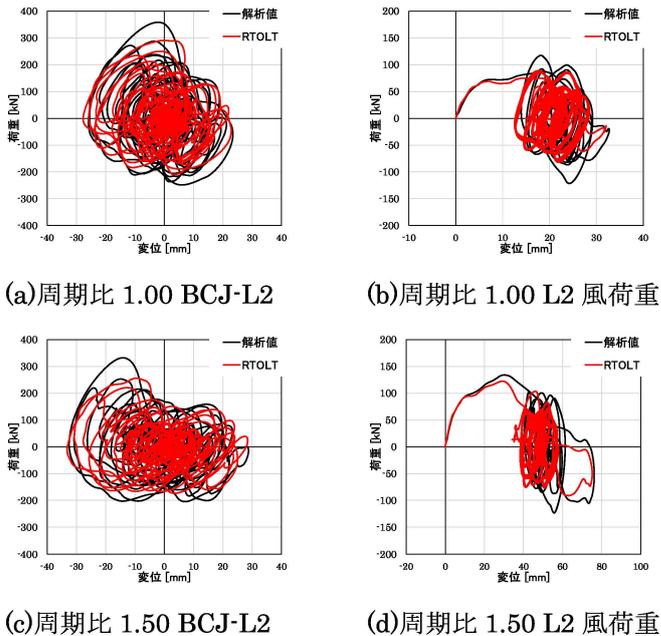


図11 履歴特性

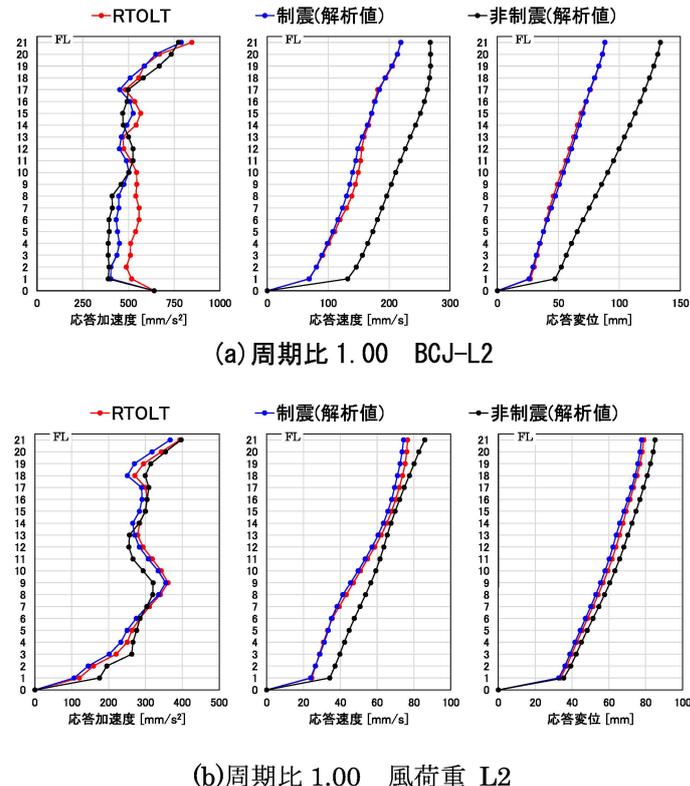


図12 リアルタイム・オンライン応答試験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 郭 鈞桓, 秦 一平, 栗林 愛季, 阿久戸 信宏, 宮島 洋平	4. 巻 88巻
2. 論文標題 MC-K型およびM-CK型D. M. 同調システムによる複合制振（震）の応答性能に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 223-234
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.88.223	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 本西 凌太, 秦 一平, 阿久戸 信宏, 郭 鈞桓
2. 発表標題 主系の減衰を考慮した各 D. M. 同調システムの最適設計式に関する研究 その3. 主系の減衰を考慮したM-CK型システムの振動実験
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 郭 鈞桓, 秦 一平, 阿久戸 信宏, 市川 達也
2. 発表標題 MC-CK型同調システムに関する基礎的研究 その1. MC-CK型同調システムの最適設計式
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市川 達也, 秦 一平, 阿久戸 信宏, 郭 鈞桓
2. 発表標題 MC-CK型同調システムに関する基礎的研究 その2. 主系の減衰を考慮したMC-CK型同調システムの最適設計
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平野 賢司, 加藤 亨二, 郭 鈞桓, 秦 一平, 阿久戸 信宏, 宮島 洋平
2. 発表標題 MC-CK型同調システムに関する基礎的研究 その3. MC-CK型実大ダンパーの試験体概要
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤 亨二, 平野 賢司, 郭 鈞桓, 秦 一平, 阿久戸 信宏, 宮島 洋平
2. 発表標題 MC-CK型同調システムに関する基礎的研究 その4. MC-CK型実大ダンパーの性能確認試験
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 郭 鈞桓, 秦 一平, 阿久戸 信宏, 平野 賢司, 加藤 亨二, 宮島 洋平
2. 発表標題 MC-CK型同調システムに関する基礎的研究 その5. MC-CK型実大ダンパーのリアルタイムオンライン応答試験
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤 亨二, 秦 一平, 阿久戸 信宏, 郭 鈞桓, 平野 賢司, 宮島 洋平, 本西 凌太
2. 発表標題 MC-CK型同調システムに関する基礎的研究 その6. 多質点系モデルを対象としたMC-CK型ダンパーのリアルタイムオンライン応答試験計画
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阿久戸 信宏, 秦 一平, 郭 鈞桓, 平野 賢司, 加藤 亨二, 宮島 洋平, 本西 凌太
2. 発表標題 MC-CK型同調システムに関する基礎的研究 その7. 多質点系モデルを対象としたMC-CK型ダンパーのリアルタイムオンライン応答試験
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023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
---------	---------