

令和元年5月17日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06583

研究課題名(和文)空間構造の地震応答制御のための複数TMDを用いた設計法の高度化

研究課題名(英文)Advanced Design Method of Multiple Tuned Mass Dampers for Vibration Control of Spatial structures

研究代表者

吉中 進(YOSHINAKA, SUSUMU)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70401271

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：設計パラメータの異なる複数個のTMDを用いたときの性状の変化に着目し、空間構造の耐震性能の向上を目的としたTMD設計法の構築を実施した。(1)複数個のTMDを用いることで初期変位付与型TMDの初期変位解放条件の変更が可能となることを確かめた。非制御モードの励起に着目し、空間構造のTMD配置法を開発した。(2)停止規則に順序統計量を用いた最適設計法を提案し、その効果を確認した。(3)斜行ケーブル型吊り天井のケーブル配置法を開発し、特に既設の吊り天井の耐震補強に有効であることを確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年に発生した2011年東日本大震災や2016年熊本地震では、空間構造の主構造体や吊り天井の落下事故が多発し、多くの人命が損なわれた。地震時に避難場所として使用されることが多い空間構造の耐震安全性を考える場合は、主構造体の安全性はもちろんのこと、吊り天井など2次部材の安全性を考慮する必要がある。本研究で構築した応答制御法を用いることで、主構造体に加えて2次部材の安全性の向上が可能となる。さらに社会的要請が高い施工性に優れたケーブルを用いた既設の吊り天井補強法が、耐震性能が非常に高いことを確認できたことは、社会的意義が大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we formulated a design method of TMD to improve the seismic performance of spatial structures, focusing on the variation of vibration properties by using multiple TMDs with different design parameters. (1) By using multiple TMDs, it was founded that any initial structural conditions to release TMDs became possible. And we developed a spatial arrangement method of TMDs focusing on the excitation of non-control modes. (2) We proposed a stochastic optimization to design of distributed multiple tuned mass dampers in a single layer lattice dome and confirmed its performance. (3) We developed a cable arrangement method of proposed ceilings suspended by diagonal cables. And it was confirmed that this method was highly effective to the seismic reinforcement of existing suspended ceilings.

研究分野：工学(建築構造)

キーワード：建築構造 振動制御 TMD 空間構造 最適設計 ロバスト性 吊り天井 ケーブル

1. 研究開始当初の背景

(1) TMDは、構造物の1点の絶対応答量に対して制御力を作用させる方法であるため、空間的な設置自由度が高く、構造形式が多様で複雑な空間構造への適用性が高いと考えられる。一方、TMDを空間構造に適用させる場合の課題として、①TMDは単一のモードに対する制振方法であり、複数のモードが励起される構造物への適用が困難であること、②TMDは本来周期外乱に対する制振方法であるため、衝撃的な波形を示す大地震時の最大応答を低減させることが困難であること、が指摘されている。

(2) 研究代表者は、上記①の課題に対して、特定のバンド幅を有する固有振動数の異なる小型のMTMD (Multiple TMD) を空間に分散配置させる分散型MTMD法を提案し、通常のTMDと比較して構造物全体で優れた制振効果を有することを確認している。

(3) 研究代表者は、上記②の課題に対して、TMDにあらかじめ初期変位を与え、過渡応答初期の制振効果を向上させる初期変位付与型TMDを提案し、インパルス外力下における基本的な制振効果を確認している。本手法はTMDの初期変位の向きと大きさを適切に設定することにより、モード減衰比が大きいモード単独で振動させることが可能となる原理に基づいている。自由振動理論解を用いて、主振動系の初期条件とTMD初期変位の関係を示す本手法の基盤となる初期解放条件式を導いている。

2. 研究の目的

1. で述べた研究背景に基づき、空間構造の地震応答制御のための複数TMDを用いた設計法の高度化を行う。本研究の特徴は、一般に単体で使用されるTMDを設計パラメータの異なる小型の複数個のTMDに分割し、振動特性を変化させることにある。このことにより、パッシブ型のMTMDに対してさらなる制振性能の向上を図ること、初期変位付与型TMDの初期変位解放条件が変更可能となると考えられる。TMDは他の制振手法と比較して、空間的な設置自由度が高く、既設の構造物に対しても施工しやすく、コスト的にも比較的安いことから、複数化することで性能の向上が可能となれば、適用範囲の拡大につなげることが出来る。制御目標は、主構造材の安全性の向上とともに、社会的な要請が大きい吊り天井の安全性の向上も含める。吊り天井に関しては、研究代表者が提案した斜行ケーブル吊り天井の開発を進める。

以上のように、複数のTMDを用いた地震応答制御の設計法を構築するとともに、耐震性の高い吊り天井を開発することで、空間構造全体の耐震性能を向上させることを研究目的とする。

3. 研究の方法

(1) 初期変位解放条件式に基づく空間構造用初期変位付与型TMDの構築

①理論的検討

初期変位解放条件式に基づいて検討した。TMD単体の場合は、初期変位解放条件式を完全に満足することはできない。そこで、TMDが2個と3個の場合を例に取り、初期条件が異なる場合において、同調比の設定が主振動系の応答とTMDの初期変位に与える影響を確認した。

②アーチモデルを用いた解析的検討

複数個の初期変位付与型TMDを空間構造に適用する場合、空間配置が課題となる。最初に3自由度系モデルを用いて、インパルス外力下におけるTMD配置の影響を確認し、初期変位付与型TMDを空間構造へ適用する場合の設計指針を示した。次に、50mスパンのアーチモデルを用いてTMD空間配置による応答性状を確認し、空間配置の評価式を提案した。

(2) ロバストTMD最適設計法の開発

単層ラスタドームに複数小型TMDを空間・周波数領域の両方で分散配置する構造システムの検討を行った。停止規則に順序統計量を利用した構造最適化法により、事前に割り当てられた精度を確率的に満たすことが保証されることを示した。均等配置した場合のTMD設計と本提案法による設計解を数値解析例により比較して振動制御性能を確認した。

(3) 斜行ケーブル型吊り天井の開発

斜行ケーブル型吊り天井は、自重下ではケーブルに引張力が作用し、安定した挙動を示すが、ケーブルが張力を消失した場合には不安定な挙動が発生する。最初にケーブルの張力消失が吊り天井の応答に与える影響を解析的に確認した。次に、ケーブルの空間配置に関して、グランドストラクチャ法を準用した手法を開発し、小型モデルを用いた自由振動試験により、提案した手法が有効であることを確認した。最後に多様な形状の屋根と天井へも適用可能なプログラムを開発し、地震応答解析により有効性を検証した。

4. 研究成果

(1) 初期変位解放条件式に基づく空間構造用初期変位付与型TMDの構築

①理論的検討

研究代表者は、自由振動応答の理論解に基づき、主振動系/TMDで構成される2自由度系において、モード減衰比の大きいモード(2次モード)単独で振動する、すなわち1次モードの応答が除去される系の初期条件として、(1)式で表される初期変位解放条件式を導いている。ここで、 κ_1 は1次の固有ベクトルである。

$$\kappa_1 \mathbf{a} \hat{\mathbf{u}}(0) = 0 \quad (1)$$

(1)式に示すように、1次モードと力学的に独立で、エネルギー的に無関係な初期条件を与えた場合に、1次モードの応答が0となる。一般粘性減衰における固有ベクトルは複素数となるため、(1)式で得られるTMD初期変位も複素数となる。一方、2個以上のTMDを用いることで実数の初期変位を得ることが出来る。また、1個のTMDを用いた場合は初期変位解放条件式から初期速度極大の時刻で解放した場合のみ有効な効果を得ることが出来るが、2個以上のTMDを用いる場合には図1に示すように初期変位が極大の時刻で解放した場合も大きな効果を得ることが出来る。図1で確認できるように、2個のTMDの同調比の設定により制振効果と初期変位の大きさが異なることから最適同調比を提案した。さらに、3個以上のTMDを用いることで、必要な初期変位の大きさを小さくすることも可能である。

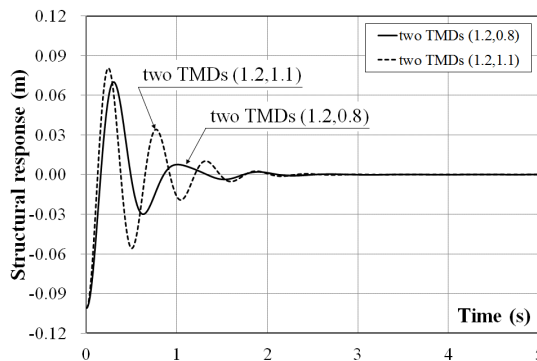


図1 初期変位極大の時刻で解放した場合のインパルス応答

②アーチモデルを用いた解析的検討

初期変位付与型TMDを自由度の大きい空間構造に適用する場合には空間配置が課題となる。最初に3自由度系モデルを用いて、TMDの配置パターンが制振効果に及ぼす影響を確認し、空間構造に適用する際の指針とした。その結果、以下に述べる結論が得られた。a)モードの節以外の箇所であれば対象モードの応答を制御可能である。b)TMDの初期変位に起因するばね力により制御モード以外のモード(非制御モード)が励起されるため、TMDを配置する場合は非制御モードの応答を考慮する必要がある。c)TMDが3個の場合は初期変位によるばね力の和が0となるように設定することで非制御モードの励起を抑えることが出来る。

次に図2に示す50mスパンのアーチモデルを用い、インパルス外力下において、空間配置による制振効果の違いを検証した。TMDの設置位置は対称性を考慮して節点2~節点10とした。初期変位は初期変位解放条件式より求めたため、図3の1次モード腹の応答曲線に示すように制御モードは完全に制御されており良好な制振効果を示す。設置位置による応答の違いは非制御モードの2次モードの励起による。非制御モードの励起に関して、自由振動理論解から(2)式に示す評価式を提案した。図4に図3に示すインパルス応答から得られた2~5秒の応答変位の2乗平均応答と(2)式の評価式について、最も応答が小さい節点7に設置した場合で基準化した値を比較する。多少のばらつきは存在するが、全体的な傾向は良く一致している。

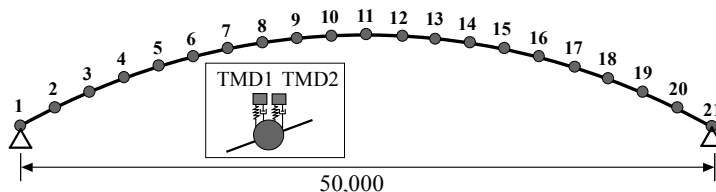


図2 アーチモデル

$$\sum_{n=1}^N \sqrt{(\text{Re}(\kappa_n \mathbf{a} \hat{\mathbf{u}}(0)))^2 + (\text{Im}(\kappa_n \mathbf{a} \hat{\mathbf{u}}(0)))^2} \quad (n \text{ は非制御モード}) \quad (2)$$

一方、本手法の実用化を考えた場合、初期変位の大きさ、解放時刻の点で非常に高い精度が要求されることから同調スイッチ等を用いることも考えられるが、周辺装置が大規模になるとアクティブ制振との差別化が難しくなる。そのため今後は新しく提案しているパッシブ型の逆対称モード制御法(ASC法)など、より実用化しやすい手法の開発を同時に行う予定である。

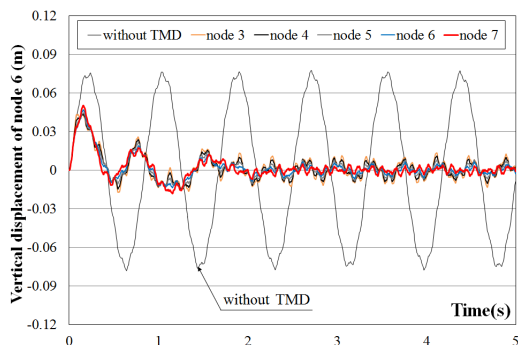


図3 空間配置によるインパルス応答の比較

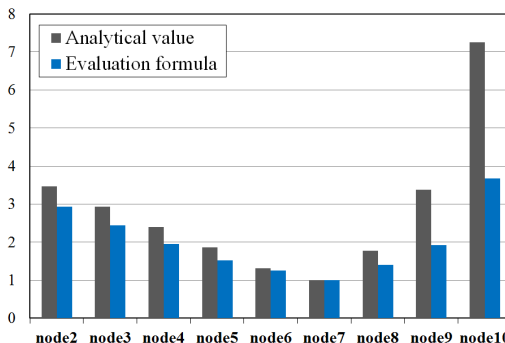


図4 解析結果と評価式(2)の比較

(2) ロバストTMD最適設計法の開発

停止規則に順序統計量を利用した最適設計法を提案し、単層ラチスドームへの小型 TMD の最適設計問題に適用した。数値解析例により、均等配置の TMD に比較して振動制御性能が 2 倍程度向上することを確認した。ただし、設計解は入力の方角性に大きく影響を受け、また主構造物の構造特性の変動にも敏感であるので、よりロバスト性を向上させられる設計法を調べる必要がある。その他、床を TMD の質量として用いた場合の最適配置についても検討した。

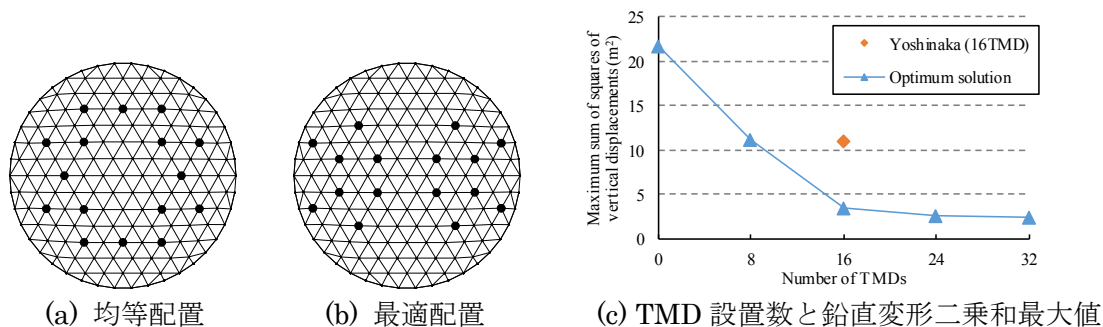


図 5 TMD最適設計解

(3) 斜行ケーブル型吊り天井の開発

ケーブルが張力を消失した場合における応答性状を確認するために、図 6 に示すモデルを用いて地震応答解析を実行した。図 7 に JMA KOBE 1995 NS 波を水平加振したときの天井板の水平方向応答を通常の吊りボルトモデルと比較する。斜行ケーブルモデルで 9 秒付近に応答変位が急激に増加するのはケーブルの張力消失の影響である。このようにケーブルに張力消失が生じた場合は一時的に変位が増加するが、変位が大きい状態が長時間にわたって持続することは無いことが分かる。またケーブルの応答軸力の変動も限定的である。

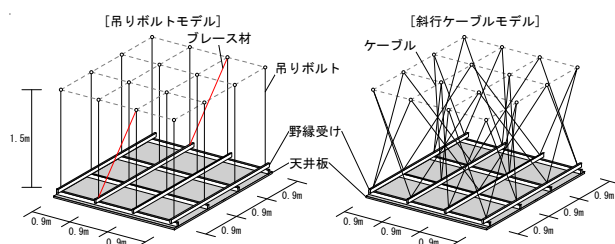
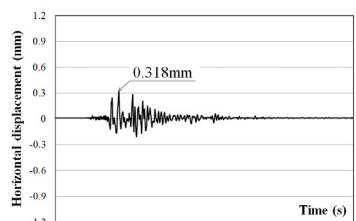


図 6 吊り天井解析モデル

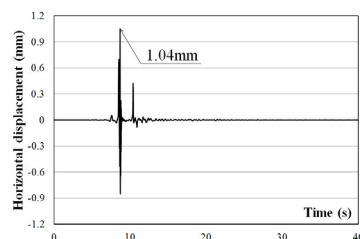
ケーブル空間配置の決定法としてグランドストラクチャ法を準用した方法を提案し、地震応答解析を実行した結果、先述のモデルと比較して応答変位の大きさが非常に小さく、且つ張力消失も生じないことが確かめられた。これは提案した配置法が張力の大きいケーブルのグループを採用したためである。図 8 に得られたケーブル配置モデルの性状を実験的に検証するために用いた小型模型を示す。ケーブル配置に関しては、多様な屋根と天井に適用可能なプログラムを開発した。地震応答解析の結果、特に既設の在来工法天井の補強に有効であることが確かめられた。既存の天井の耐震補強は社会的な要請が高いことから、今後は実用化に向けて、特に屋根面の応答が斜行ケーブル吊り天井に与える影響について検討する。

以上の (1) ~ (3) まで述べた研究成果により、TMD を複数個用いる場合の基本的な設計法の構築、耐震性の高い斜行ケーブル型吊り天井の性状の確認という当初の研究目的は概ね達成することができたと考えられる。

今後は、本研究で得られた成果に基づき、より実用化しやすい方法をメーカーとともに共同で検討を進める予定である。



(a)吊りボルトモデル



(b)斜行ケーブルモデル

図 7 天井面の水平変位の比較



図 8 小型模型

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 吉中進、小鶴桂太、谷口与史也：初期変位付与型 TMD の同調比の設定、日本建築学会構造系論文集、第 738 号、pp.1177-1187、2017 年 8 月、査読有り。
DOI : <https://doi.org/10.3130/aijs.82.1177>
- ② 吉中進、谷口与史也、山川誠：初期変位付与型 TMD を設置したアーチモデルの打撃試験、日本建築学会構造系論文集、第 722 号、pp.735-745、2016 年 4 月、査読有り。
DOI : <https://doi.org/10.3130/aijs.81.735>

〔学会発表〕(計28件)

- ① 中澤祥二、吉中進：地震応答特性と耐震設計の新しい展開、2018 年度日本建築学会大会(東北)構造部門(シェル・空間構造)PD 資料、「空間骨組構造の地震被害と耐震設計の新しい展開」、pp.31-40、2018 年 9 月 4 日、東北大学(宮城県仙台市)。
- ② 吉中進、谷口与史也：逆対称モード形状に着目したアーチ構造の振動制御、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅱ、pp.889-890、2018 年 9 月、東北大学(宮城県仙台市)。
- ③ 小鶴桂太、吉中進、谷口与史也：初期変位付与型 TMD の空間配置に関する評価式の提案、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅱ、pp.891-892、2018 年 9 月、東北大学(宮城県仙台市)。
- ④ 山川誠、吉中進：単層ラチスドームにおける分散型 TMD 設計への順序統計量に基づく確率的最適化法の適用、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅱ、pp.893-894、2018 年 9 月、東北大学(宮城県仙台市)。
- ⑤ 山川誠：単層ラチスドームにおける分散型 TMD 設計への順序統計量に基づく確率的最適化法の適用、日本機械学会 第 13 回最適化シンポジウム 2018 講演論文集、pp.81-82、2018.10.15-16、京都リサーチパーク(京都府京都市)。
- ⑥ Makoto Yamakawa and Susumu Yoshinaka : Simultaneous optimum design of multiple tuned mass dampers in spatial and frequency domain with closely spaced natural frequencies、The Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization、A060028、Dalian、China、May 21-24、2018、Dalian University of Technology(大連市(中華人民共和国))。
- ⑦ 多田光汰、吉中進、大庭直、谷口与史也：構造体に取り付けた斜行ケーブル吊り天井の地震応答性状、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 58 号・構造系、pp.269-272、2018 年 6 月 24 日、大阪工業技術専門学校(大阪府大阪市)。
- ⑧ 吉中進、谷口与史也：逆対称モード形状に着目したアーチ構造の振動制御の提案、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 58 号・構造系、pp.297-300、2018 年 6 月 24 日、大阪工業技術専門学校(大阪府大阪市)。
- ⑨ 楠本倅子、吉中進、谷口与史也：ストローク長さに着目した衝撃ダンパ組み込み型 TMD の制振効果に関する一考察、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 58 号・構造系、pp.301-304、2018 年 6 月 24 日、大阪工業技術専門学校(大阪府大阪市)。
- ⑩ 津留崎聖斗、吉富信太：多層構造物における地震時応答低減のための TMD 床の最適配置法、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 58 号・構造系、pp.65-68、2018 年 6 月 24 日、大阪工業技術専門学校(大阪府大阪市)。
- ⑪ Susumu YOSHINAKA and Yoshiya TANIGUCHI : Impact test of an arch model using TMDs with initial displacement、Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017、"interfaces: architecture.engineering.science"、25-28 September、2017、Hamburg、Germany、Session #27、ID 9205、pp.1-10、2017.9、Hafen City University、(シュツットガルト(ドイツ連邦共和国))。
- ⑫ 小鶴桂太、吉中進、谷口与史也：多自由度系における初期変位付与型 TMD の設計法に関する一考察、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅱ、pp.865-866、2017 年 9 月、広島工業大学(広島県広島市)。
- ⑬ 吉中進、大庭直、谷口与史也：斜行ケーブル型吊り天井の水平荷重に対する応答性状 その 1 ケーブル配置法の提案、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅱ、pp.949-950、2017 年 9 月、広島工業大学(広島県広島市)。
- ⑭ 多田光汰、吉中進、大庭直、谷口与史也：斜行ケーブル型吊り天井の水平荷重に対する応答性状 その 2 自由振動試験と構造体との連成の影響、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅱ、pp.951-952、2017 年 9 月、広島工業大学(広島県広島市)。
- ⑮ 津留崎聖斗、吉富信太：多層構造物における TMD 床の最適配置法を用いた TMD 床の課題の検討、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅱ、pp.655-656、2017 年 9 月、広島工業大学(広島県広島市)。
- ⑯ 大庭直、吉中進、谷口与史也：斜行ケーブル吊り天井の地震応答に及ぼすケーブル配置の効果、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 57 号・構造系、pp.417-420、2017 年 6 月 24 日、大阪工業技術専門学校(大阪府大阪市)。
- ⑰ 小鶴桂太、吉中進、谷口与史也：初期変位付与型 TMD の空間配置に関する一考察、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 57 号・構造系、pp.605-608、2017 年 6 月 24 日、大阪工業技術専門学校。

- ⑮ 津留崎聖斗、吉富信太：多層構造物における地震時応答低減のための TMD 床の最適配置法の提案、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 57 号・構造系、pp.225-228、2017 年 6 月 24 日、大阪工業技術専門学校（大阪府大阪市）。
- ⑯ Susumu YOSHINAKA、Riki YOSHIDA and Yoshiya TANIGUCHI：Formulation of release conditions for TMDs with initial displacement and its application to an arch model、Proceedings of the IASS Annual Symposium 2016、“Spatial Structures in the 21st Century”、26–30 September、2016、Tokyo、Japan、CS1F-1、ID 1024、pp.1-10、2016.9、東京大学（東京都文京区）。
- ⑰ 小鶴桂太、吉中進、谷口与史也：自由振動における初期変位付与型 TMD の制振効果に関する研究 その 1 複数の初期変位付与型 TMD の個数と同調比がインパルス応答へ与える影響、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅱ、pp.197-198、2016 年 8 月、福岡大学（福岡県福岡市）。
- ⑱ 吉中進、谷口与史也：自由振動における初期変位付与型 TMD の制振効果に関する研究 その 2 TMD power flow による制振効果の評価と解の存在条件に関する考察、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅱ、pp.199-200、2016 年 8 月、福岡大学（福岡県福岡市）。
- ⑳ 津留崎 聖斗、吉富 信太：多層構造物における地震時応答低減のための TMD 床の最適配置法の提案、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅰ、pp.201-202、2016 年 8 月、福岡大学（福岡県福岡市）。
- ㉑ 小嶋 健太郎、吉富 信太：基礎免震と連結制振のハイブリッドシステムに対する連結ダンパーの最適配置法の研究、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅱ、pp.299-300、2016 年 8 月、福岡大学（福岡県福岡市）。
- ㉒ 菅生和政、山川誠：単層ラチスドームの振動制御における TMD の空間的配置の検討、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅰ、pp.387-388、2016 年 8 月、福岡大学（福岡県福岡市）。
- ㉓ 山川誠、大崎純：凸集合内の不確定変動に対し順序統計量を用いた建築構造の最悪地震時応答解析、第 39 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、報告 H44、pp.217-220、2016.12、日本建築学会会議室（東京都港区）。
- ㉔ 大庭直、吉中進、谷口与史也：斜交ケーブルを用いた吊り天井の振動性状に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 56 号・構造系、pp.113-116、2016 年 6 月 26 日、大阪工業技術専門学校（大阪府大阪市）。
- ㉕ 小鶴桂太、吉中進、谷口与史也：複数の初期変位付与型 TMD の個数と同調比がインパルス応答へ与える影響、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 56 号・構造系、pp.229-232、2016 年 6 月 26 日、大阪工業技術専門学校（大阪府大阪市）。
- ㉖ 津留崎聖斗、吉富信太：多層構造物における地震時応答低減のための TMD 床の最適配置法の提案、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 56 号・構造系、pp.225-228、2016 年 6 月 26 日、大阪工業技術専門学校（大阪府大阪市）。

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

大阪市立大学工学部研究者総覧

https://research-soran17.osaka-cu.ac.jp/html/100001198_ja.html

6. 研究組織

(1) 研究分担者

- ① 研究分担者氏名：吉富 信太
ローマ字氏名：(YOSHITOMI、shinta)
所属研究機関名：立命館大学
部局名：理工学部
職名：教授
研究者番号（8 桁）：30432363
- ② 研究分担者氏名：山川 誠
ローマ字氏名：(YAMAKAWA、makoto)
所属研究機関名：東京理科大学
部局名：工学部
職名：教授
研究者番号（8 桁）：50378816

(2) 研究協力者

無し

※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、研究者個人に帰属されます。