

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04774

研究課題名（和文）TMDとケーブルを用いた空間構造の耐震性能向上のための統合型応答制御

研究課題名（英文）Integrated Response Control Method using TMD and Cable to Improve the Seismic Performance of Spatial Structures

研究代表者

吉中 進（YOSHINAKA, SUSUMU）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70401271

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）：TMDとケーブルを併用した統合型応答制御のために、TMDを用いた山形体育館縮小模型の振動台実験、ケーブルの非抗圧性に着目した耐震補強に関する研究、を実施した。（1）TMDを山形体育館に設置した地震時の制振効果を確認した。制振効果はTMD装置の振動性状の影響を強く受けることを確認した。（2）アーチモデルと円筒ラチスシェルモデルに対するケーブル配置法を提案し、地震動に対する応答制御効果を解析的に確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空間構造は一般的なビル等の重層骨組構造と比較して振動性状が複雑であるとともに、制御デバイスが建築の美しさを損なわないような配慮が必要である。本研究では出来るだけ簡易なシステムを提案し、地震時の応答制御効果を実験および解析的に確認するとともに今後取り組むべき課題を抽出した。特にTMDを大型の3次元空間構造に適用して振動台実験で制振効果を確認した例はなく、インパクトが大きい。よって本研究の成果は学術的意義と社会的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to propose the integrated response control method using TMD and cable to improve the seismic performance of spatial structures, we conducted a shaking table test using a scaled-down gable roof model applying TMDs and studied on the seismic reinforcement method focusing on the non-compressive characteristics of cable. (1) We verified the vibration control performance of TMD for a gable roof under seismic loadings. It was founded that the control performance was strongly influenced by the vibration characteristics of TMD device. (2) We proposed the cable arrangement method for an arch model and a cylindrical latticed shell and verified analytically the control effect under seismic loadings.

研究分野：建築構造学

キーワード：建築構造 制振 耐震補強 TMD ケーブル 山形体育館 振動台実験

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。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の大震災における空間構造の被害において、構造体の損傷のみでなく、屋根と下部の不連続性に起因する支承部被害や吊り天井の落下などの特徴的な被害が生じている。吊り天井の落下対策としては、ブレースを増加することによる耐震性能の向上が図られているが、天井単体の挙動に着目するだけでは限界が存在する。そこで本研究では、空間構造に適用しやすい TMD とケーブルを活用し、天井の吊り元である屋根の応答を制御することで、構造体とともに天井の耐震安全性の向上も可能になるのではないかと着想した。

(2) 研究代表者は、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 を提案し、解析及び小型模型による振動台実験により制振効果を確認している。

(3) 研究代表者は、ブレースの代わりにケーブルを用いた斜行ケーブル吊り天井を提案し、優れた耐震性能を有することを解析的に確認している。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、TMD とケーブルを併用することで、吊り天井と支承部を含む空間構造全体の耐震性能を向上させるための統合型応答制御法を実験的手法と解析的手法を用いて構築することである。

(2) TMD を選択した理由は、支点が 1 点のため空間構造のように構造形式が多様で形状が複雑な構造物、さらに既存の構造物へも適用しやすいと考えられるためである。一方、TMD を空間構造に適用する研究は解析的研究が主であり、3次元の大型模型を用いた実験例は無い。

(3) ケーブルを選択した理由は、大スパンの空間構造の屋根と下部を一体化させるためには必然的に部材が長くなり、一般のブレース材では座屈を回避するのが困難である。一方、ケーブル材は非抗圧性のために座屈を考慮する必要が無い。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究は、①TMD を用いた山形体育館縮小模型の振動台実験、②ケーブルの非抗圧性に着目した耐震補強、③TMD とケーブルを併用した統合型応答制御、で構成される。

(2) 上記①に関して、2014年に防災科学技術研究所の E-ディフェンスで震動実験を実施した実大体育館の 1/4 縮小模型を試験体として用いる。試験体の梁間スパン 5m、桁行方向 2m、柱高さ 1.75m、屋根勾配 10 : 3 である。加振方向は梁間方向とする。TMD の個数は 2 個である。TMD のパラメータの設計には、MTMD と同様にパラメータ変動に対するロバスト性に優れた二重動吸振器(DDVAs)を用いる。2 個の TMD 模型を製作し、山形体育館縮小模型に設置して振動台実験を実施する。

(3) ②に関して、ケーブルの非抗圧性を考慮した解析的手法により行う。空間構造のように複雑な形状の応答を制御するためには、ケーブルをどのように配置するかが課題となる。本研究では、数種類の配置法を提案し、地震応答解析により制振効果を比較・検証する。

(4) ③に関して、①と②の研究で得られた結果から、2 つの手法の特性を分析し、TMD とケーブルを併用する手法を提案し、効果を検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) TMD を用いた山形体育館縮小模型の振動台実験

2 個の TMD はパラメータ変動に対するロバスト性に優れた二重動吸振器(DDVAs)の手法を用いて同調比と減衰比を設定した。製作した装置は、固有振動数に対するロバスト性をより高めるため、最適同調比に比較して 2 個の同調比の幅を広く取っている。ダンパーは汎用のもので最適減衰値に近い値が得られるエアードンパーを用いた。使用したダンパーは最適減衰値より低い値であった。自由振動実験の結果、減衰値には振幅依存性があることが確認された。

#### ①TMD 単体の振動台実験

実験パラメータは、(a)TMD の設置角度、(b)加振波の種類、(c)加振波の振幅、とした。設置角度は 0 度、15 度、40 度の 3 種類、加振波はスイープ加振と振動数一定の調和加振の 2 種類、振動台の振幅は±0.75mm と±1.5mm の 2 種類とした。早稲田大学で実施した実験の状況を図 1 に示す。水平方向に設置したときの周波数応答倍率を図 2 に示す。



図 1 TMD 単体の振動台実験の様子

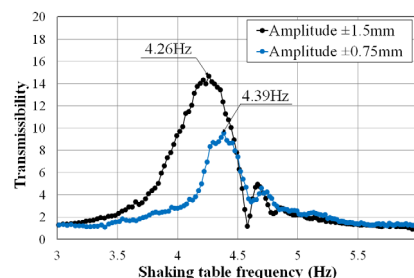


図 2 周波数応答倍率 (角度 0 度)

【1 研究目的、研究方法など (つづき)】

振動台実験の結果、TMD 単体の振動性状はダンパーの振幅依存性とガイド部の摩擦の影響を強く受けることが分かった。

②山形体育館縮小模型の振動台実験

振動台は、東北大学保有の建築実験所大型振動台を用いた。実験においては、実大の体育館と動的挙動が等しくなるように相似則を用いた。実験パラメータは、(a)加振波の種類、(b)2 個の TMD の設置位置と錘の振動方向、(c)柱脚損傷の有無、とした。実験状況を図 3 に示す。計測項目は、試験体各部の加速度、柱頭の変位その他、TMD の錘の相対変位とした。図 4 に JSCA 波 (JMA Kobe 位相) を加振したときの柱頭の変位を TMD 無しの場合と比較する。表 1 に加振波による柱頭の最大応答変位と RMS 値を示す。括弧内は TMD 無しとの比を示す。El Centro 波以外では良好な制振効果を確認することができた。El Centro 波で効果が低いのは製作した TMD 装置のダンパーの振幅依存性によるものである。

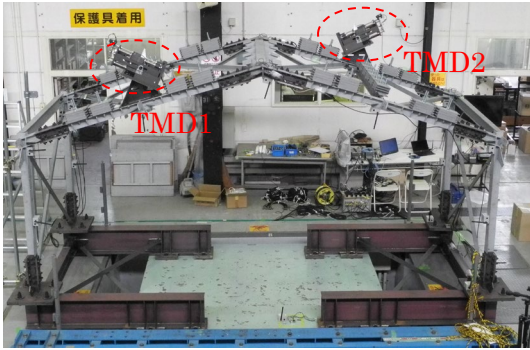


図 3 山形体育館縮小模型振動台実験

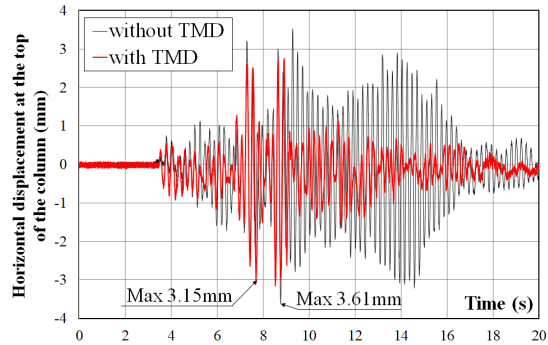


図 4 時刻歴応答曲線の比較

表 1 柱頭最大応答変位と RMS 値 (単位: mm)

地震波	最大変位		RMS 値	
	Without TMD	With TMD	Without TMD	With TMD
El Centro	4.08	4.69 (1.15)	1.07	0.91 (0.85)
JMA Kobe	3.91	3.16 (0.81)	1.58	0.57 (0.36)
JSCA	3.61	3.15 (0.87)	1.11	0.62 (0.56)

実験結果を以下に要約する。

(a) JMA Kobe 波と JSCA 波の加振時において、特に時刻歴全体の RMS 値に関して、TMD の良好な制振効果が確認された。一方、El Centro 波の加振時には最大応答が TMD 無しの場合よりも大きくなった。

(b) 2 個の TMD の設置パターンによる制振効果の差は小さい。

(c) 山形体育館縮小模型の振動性状は、

TMD 装置に組み込まれたダンパーの減衰に関する振幅依存性の影響を強く受けている。

(d) 柱脚の損傷が 2 箇所の場合は応答制御効果が確認できたが、全ての柱が損傷した場合は固有振動数の低下により、逆に応答が大きくなった。

③成果の位置づけと今後の展望

本例のような大型の空間構造モデルを用いて TMD の制振効果を確認した振動台実験は、研究代表者が知る限り世界で初めての試みである。現在、IASS 国際会議のジャーナルと建築学会の大会梗概に投稿しており、建築学会の技術報告集を投稿予定である。本成果を様々な機会外部に発信し、実際の空間構造への適用を目標としていきたい。実験データの整理を早期に完了させ、本研究で得られた課題を解決するための設計手法と装置の設計に繋げていきたいと考えている。

(2) ケーブルの非抗圧性に着目した耐震補強

①非抗圧要素を用いたアーチモデルの耐震補強

解析モデルは図 5 に示すスパン 50m、ライズ 6.67m のアーチモデルである。加振方向は水平方向とした。線形固有値解析の結果、アーチ全体の地震応答に与える影響は、空間構造特有の逆対称 1 波の 1 次モードが最も大きいことが分かった。1 次モードの形状を参考に図 6 に示す 2 つのケーブル配置を提案した。ケーブルに初期張力は導入しない。Nonlinear model a は、ケーブルに生じる応力の位相が同じであり、左右に加振したとき固有振動数が異なるモデルである。Nonlinear model b は、ケーブルに生じる応力の位相が逆であり、左右に加振したとき固有振動数が同じでモード形状が異なるモデルである。

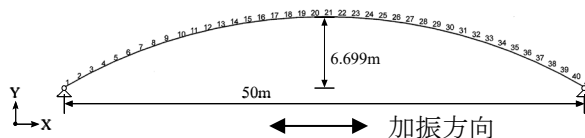


図 5 解析モデル

【1 研究目的、研究方法など (つづき)】

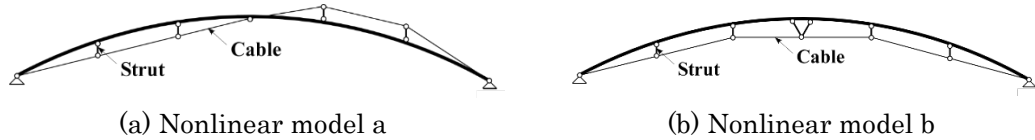


図6 ケーブル配置法

図7に El Centro 波を加振したときの1次モード腹の鉛直方向の応答変位を比較する。参考のため、部材が圧縮力にも抵抗すると仮定した場合のモデルの結果(Linear model b)も示す。減衰は剛性比例型減衰を設定した。図に示すように特に Nonlinear model a では、Linear model b よりも高い応答制御効果を示す。この理由は、ケーブルを用いた場合は材料非線形性のために高い周波数の振動成分が増える一方で、剛性比例型減衰を設定することで高い周波数の応答が良く抑えられるためである。本研究では、2次元アーチモデルの他、図8に示す3次元の円筒ラチスシェルにも本手法を拡張し、地震応答を効果的に低減可能なことを確認している。

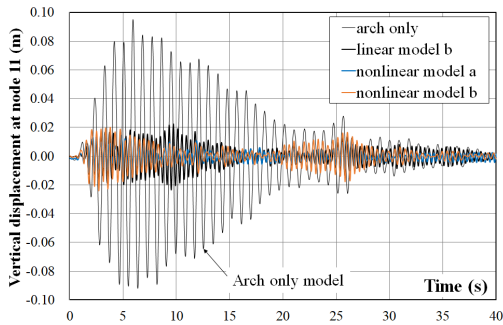


図7 時刻歴応答曲線の比較

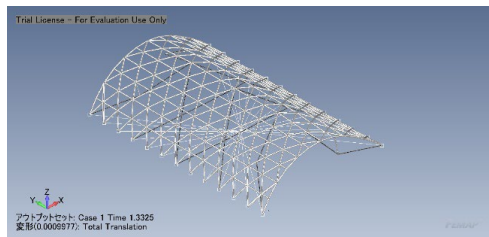


図8 円筒ラチスシェルモデル



図9 小型フレームモデル

②非抗圧要素を用いた減衰性状確認のための自由振動実験

①で述べたように剛性比例型減衰を用いた場合は高次の周波数における減衰値が高いため、非線形振動の場合は応答が低く抑えられる傾向がある。一方でケーブルに圧縮力が生じ、弛緩を繰り返す際の減衰性状は未解明の点が多い。そこで図9に示す3層3スパン(60cm×60cm)の小型のフレームモデルを製作し、ナイロン製の糸とばねを用いて、自由振動実験を実施した。その結果、設定した剛性比例型減衰に近い減衰性状であることを確認した。今後は振動台実験を行って、非抗圧要素を用いた場合の減衰特性を詳しく検証していく予定である。

③成果の位置づけと今後の展望

本研究の特徴は、ケーブルに初期張力を導入せず、非線形振動の特性を活用し、簡易で効果的なシステムを提案していることにある。一方、ケーブルが弛緩を繰り返す場合の減衰特性については、さらなる検討が必要である。

(3) TMD とケーブルを併用した統合型応答制御

(1)の結果より、TMD による制振効果は装置自体の振動特性に強く依存することが分かった。(2)の結果より、ケーブル材を用いた耐震補強はケーブル材を適切に配置することで効果を上げることが可能であるが、振動性状は減衰に強く依存することが分かった。よって、TMD の適用によって減衰を上げながらケーブル材を適切に用いることで、両者の弱点を補って、コストの低い、ロバスト性に優れた手法を提案することが出来ると思われる。

本研究期間内で提案手法の効果を確かめられなかったが、今後研究を継続していく。

以上の研究成果を総括する。

本研究期間において、(1)の研究課題において、振動台の故障トラブルなどが影響し、(3)の課題で具体的な成果をあげることが出来なかった。しかし、(1)で得られたインパクトは大きく、当初想定した以上の有益な成果を上げることが出来た。

今後は得られた研究成果を活用して、空間構造に適用しやすい制振手法である TMD と、同じく空間構造に適用しやすい耐震補強法であるケーブルを併用した統合型応答制御を新たに提案して研究に取り組んでいきたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 吉中進, 谷口与史也	4. 巻 67B
2. 論文標題 SEISMIC REINFORCEMENT OF AN ARCH MODEL USING NON-COMPRESSION ELEMENTS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集B編	6. 最初と最後の頁 151-159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 松下健太郎, 吉中進, 谷口与史也	4. 巻 67B
2. 論文標題 EFFECT OF ADDITIONAL HANGER RODS ON SEISMIC RESPONSES FOR CEILING SUSPENDED BY DIAGONAL CABLES	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集B編	6. 最初と最後の頁 219-224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 工藤潤哉, 吉中進, 谷口与史也	4. 巻 60
2. 論文標題 非抗圧性のケーブルで補強された非線形構造システムの最適ケーブル配置	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会近畿支部研究報告集	6. 最初と最後の頁 277-280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 工藤潤哉, 吉中進, 谷口与史也	4. 巻 68B
2. 論文標題 非抗圧性のケーブルで補強されたラーメン骨組の振動性状 ケーブルの最適配置と減衰評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集B編	6. 最初と最後の頁 135-142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 吉中進
2. 発表標題 空間構造におけるセンサー・アクチュエータ技術の適用
3. 学会等名 第63回植物生理学会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉中進
2. 発表標題 上部構造のパッシブ制振
3. 学会等名 日本建築学会構造委員会・シェル空間構造運営委員会セミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉中進，谷口与史也
2. 発表標題 非抗圧性要素を用いた空間構造の耐震補強 その1 アーチ構造への適用
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会梗概論文(シェル・空間構造関連部門)オンライン発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 工藤潤哉，吉中進，谷口与史也
2. 発表標題 非抗圧性要素を用いた空間構造の耐震補強 その2 重層骨組構造における最適ケーブル配置
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会梗概論文(シェル・空間構造関連部門)オンライン発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Susumu YOSHINAKA, Ken'ichi KAWAGUCHI, Minoru MATSUI, Zihua Chen and Xiaodun Wang
2. 発表標題 Vibration control of large-span arch structure, Eye of the yellow sea, by Houde damper system using mass of double floor
3. 学会等名 IASS 2022 Symposium affiliated with APCS 2022 conference (国際学会)
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
研究分担者	山川 誠  (YAMAKAWA MAKOTO)  (50378816)	東京理科大学・工学部建築学科・教授   (32660)	
研究分担者	藤原 淳  (FUJIWARA JUN)  (80817049)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・主幹研究員   (82102)	

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
---------	---------