

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：32682

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760447

研究課題名(和文) 応答低減効果の向上を目指した空間構造物の制振装置の設計手法および改修手法の提案

研究課題名(英文) Proposals for Design Method for Vibration Control Devices and Method of Seismic Retrofit for Spatial Structures which aim at Improvement of Response Reduction Effects

研究代表者

熊谷 知彦 (Kumagai, Tomohiko)

明治大学・理工学部・講師

研究者番号：70376945

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、地震または台風などの災害時に避難場所、防災拠点としても使用される建築物である空間構造物の地震時における応答を低減させるための制振装置の設計手法の提案を目的としている。まず、空間構造物への適用性の高い制振装置の選択を行い、TMD(Tuned Mass Damper)を選出した。次に、体育館等に使用されることの多い円筒ラチスシェルを対象として、種々の地震動を水平または鉛直方向から受ける場合のTMDによる応答低減効果の分析を数値解析により行った。最終的に、TMDを設置した場合の応答低減率の評価法を提案し、その妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：The spatial structures are also used for evacuation facility and disaster prevention base in a time of disaster such as an earthquake or a typhoon. Therefore, the purposes of this study are to propose the design method for vibration control devices for spatial structures. First, the vibration control devices that have high applicability to the spatial structures are selected. As a result, TMD (Tuned Mass Damper) is elected. Next, the response reduction effects of the cylindrical lattice shell roofs which are often used for the roof of gymnasiums subjected to the horizontal or vertical earthquake motions are examined by numerical analyses. Lastly, the evaluation method for response reduction effects for spatial structures with TMDs is proposed and the validity of this method is verified.

研究分野：建築構造，シェル・空間構造，鋼構造

キーワード：空間構造物 地震応答 制振装置 応答低減効果 耐震改修手法 エネルギー吸収性能 時刻歴応答解析

1. 研究開始当初の背景

イベントスペースや学校体育館を含むスポーツ施設として空間構造物が数多く既設されている。このことは同時に、地震または台風等による災害時の避難場所が数多く存在することを意味する。しかし、近年多発している大地震や台風等の災害時(1995年阪神淡路大震災, 2004年新潟中越地震, 2011年東北地方太平洋沖地震等)において空間構造物も屋根構造部材および下部構造部材の破断, 座屈, または天井材, 照明器具落下等の被害を受け, 使用が不可能と判断されたものも多い。そのため, 災害時にも健全性を保ち, 避難所等として使用可能とするための耐震性の確保は重要な課題のひとつであり, そのための設計手法や改修手法が必要となっている。しかしながら, 現行の設計基準では, ビルなどの重層構造物を対象とした水平荷重のみが規定されており, 空間構造物特有の鉛直方向の振動を考慮した設計用地震荷重は規定されておらず, 具体的な耐震設計手法は無く, 制振設計手法についても各設計者に委ねられているというのが現状である。

2. 研究の目的

研究の目的は, 空間構造物の地震時における応答低減効果の向上を目指した制振装置の設計手法の提案およびその検証である。空間構造物は, 近年多発している大地震や台風等の災害時に避難場所, 防災拠点としても使用される建築物である。しかしながら, 空間構造物においても屋根構造部材および下部構造部材の損傷のみならず, 天井材, 照明等の設備の落下が発生し, その使用が叶わない状況が発生している。そのため, 災害時にも健全性を保ち, 災害時にも使用可能とするための設計および改修手法の提案が求められている。そこで本研究では, 現在まで行ってきた研究を更に発展させ, 下記に示すような手順および方法により, 空間構造物の応答をより低減するための手法を提案する。

(1) 地震時における空間構造物の応答低減を目指し, 制振装置のパラメータ設定および設置位置に関する設計手法の提案を行う。その際, 最適な設置位置についての分析を行う。さらに, 提案した手法を適用して制振装置の設計を行い, 空間構造物に設置した場合の応答低減効果について数値解析により検証する。

(2) 種々の地震動に対する応答低減効果を検証することで, 地震動の周波数特性, 位相特性が応答低減効果に与える影響を定量的に捉える。

(3) 多方向から地震動を受ける制振装置を付加した空間構造物の応答性状の分析を行い, 体系的にまとめる。

(4) 以上の結果をまとめ, 空間構造物の耐震性の向上を目指した制振装置の設計手法および既存の空間構造物の改修手法を提案する。

3. 研究の方法

本研究は, 以下に示す具体的方法に従って遂行され, 目的の達成を目指した。

(1) 制振装置を付加した空間構造物の応答性状の分析

体育館等の屋根構造として多く使用されている屋根型円筒ラチスシェルを対象として, 制振装置を付加した場合の応答低減効果について分析する。ここでは, 空間構造物への適用性が高いと考えられる TMD (Tuned Mass Damper) を制振装置として採用する。TMD の設計パラメータとして, 設置位置, 設置個数, 同調比, 減衰比, 重量等が挙げられるが, これらの最適な設定方法を探る。

(2) 種々の地震動を受ける制振装置を付加した空間構造物の応答低減効果の分析

上記(1)で得られた最適な設定手法で設計された TMD を設置した場合の応答低減効果の検証として, 地震動の周期特性, 位相特性の違いが低減効果に与える影響を分析することで定量的な結論を得る。さらに, 制振装置の設計手法および既存空間構造物の改修手法の提案に向けた制振装置付加による応答低減率の簡易な予測法についても検討し, 提案を行う。

(3) 鉛直方向入力を受ける制振装置を付加した空間構造物の応答低減効果の分析

上記までの研究は, 水平方向地震動に対する TMD の設計および応答低減効果の検討である。しかし, 地震動は 3 方向の成分を有している。そこで, 多方向入力について検討する必要がある。ここでは, 多方向入力に向けた検討として, まず鉛直方向入力に対する TMD の最適な設計方法および応答低減効果の分析を行う。

4. 研究成果

本研究により, 以下のような研究成果が得られた。

(1) 制振装置を付加した空間構造物の応答性状の分析

学校体育館規模の屋根型円筒ラチスシェルを対象として, 数値解析により制振装置による応答低減効果の分析を行った。

図 1-1 に対象とした円筒ラチスシェルを示す。スパンは桁行方向で 48m, 妻面方向で 36m である。屋根部の半開角は 30° である。部材

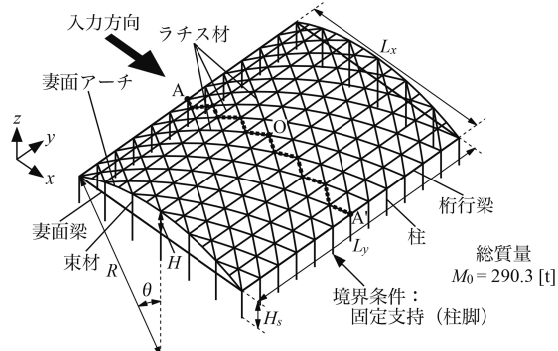


図 1-1 解析モデル (屋根型円筒ラチスシェル)

は全て円形鋼管とする。屋根構造は、固定荷重に対し、部材安全率 = 2.5 とした許容応力度設計 ($\sigma_y=235\text{N/mm}^2$) により設計する。下部構造は、ベースシア係数 $C_0 = 0.3$ のせん断力および固定荷重に対して、弾性範囲であるように設計する。図 1-2 に入力方向である水平 x 方向の卓越固有モードを示す。3 次, 7 次, 1 次の順で卓越し, これら上位 3 モードの有効質量比の合計は 98% である。モードの腹の数は 3 次, 7 次では 4 つ, 1 次では 2 つである。TMD の制御対象モードは以上の 3 モードとする。

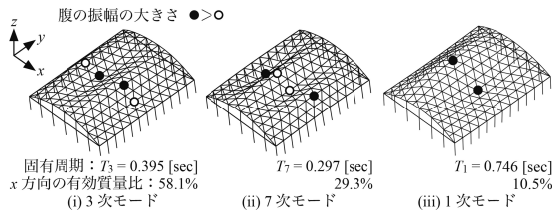


図 1-2 水平 x 方向卓越固有モード

TMD の設計および設置方法については、検討を重ねた結果、以下のように行うことが最適であると判断した。TMD の設置場所は制御対象モードの腹とし、個数はモードの腹の個数に合わせる。TMD の同調比, 減衰比は, TMD を 2 個設置する 2 重 TMD (1 次) では定点理論に基づく最適条件式, 4 個設置する 4 重 TMD (3, 7 次) では主系に n 個の TMD を設置した際の応答曲線における, $(n+1)$ 個の極値のばらつきと極大値を小さくするという考え方に基づいた最適条件式により設定する。TMD の質量は対象構造物の総質量の 2% とする。

上記の TMD を設置した場合の応答低減効果について、まず正弦波入力に対して検討を行う。この検討より、屋根型円筒ラチスシェルへの TMD の適用において、単一のモードを制御対象とする TMD を同時に複数設置することで、広い周期帯において応答を低減できることが得られた。

続いて、人工地震波 BCJ-L1 に対する応答低減効果を検証する。図 1-3 に AOA' 上の最大鉛直応答加速度倍率を示す。図 1-3(iv) より、単一 TMD を同時に設置した S_371s,

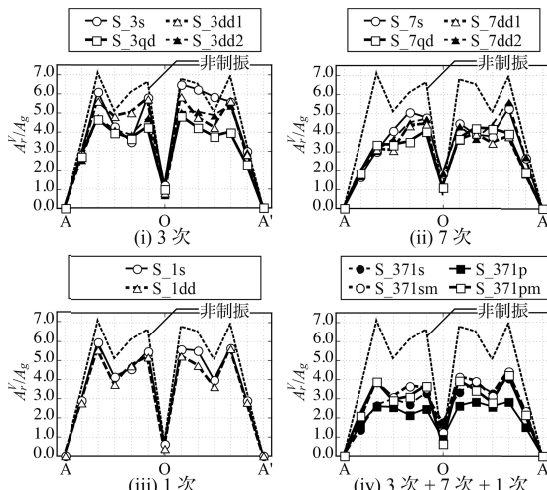


図 1-3 最大鉛直応答加速度倍率分布 (BCJ-L1)

S_371sm と比較し、本研究で最適であると判断した多重 TMD を同時に設置した S_371pm では応答がより均等に低減する。TMD の質量が総質量の 2% である S_371pm は、総質量の 6% である S_371p と比較して応答の最大値は大きいものの、TMD の合計質量が 5.8t (2%) のモデルで最も応答が小さい。

以上より、屋根型円筒ラチスシェルへの TMD の適用において、制御対象モードの腹に多重 TMD を分散して設置することで、地震波入力時の応答を均等に低減可能である。その設置位置は、シェルの稜線を挟んだ配置であることが望ましいことが明らかとなった。

(2) 種々の地震動を受ける制振装置を付加した空間構造物の応答低減効果の分析

上記(1)で得られた結果は、1 種類の地震波についてのみ検証したものである。そこで地震波の周期特性・位相特性が与える影響について分析しておく必要がある。対象とする構造物および TMD の詳細は、(1) と同一である。入力地震動は、以下の 13 波を採用する。人工地震波 BCJ-L1 の 1 波、観測地震波 El Centro NS(1940), Taft EW(1952), Hachinohe NS(1968), JMA Kobe NS(1995), 東北地方太平洋沖地震 Tsukidate NS(2011), Hokota NS(2011) の 6 波および観測地震波の位相特性を採用し、告示第 1461 号に基づき作成した模擬地震波の 6 波を加える。図 2-1 に入力地震波の加速度応答スペクトルを示す。 A_g は入力地震波の最大加速度である。図には、対

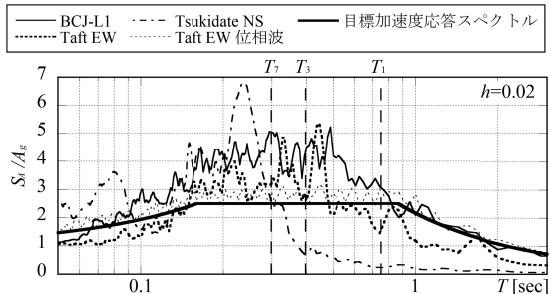


図 2-1 種々の地震動の加速度応答スペクトル

象構造物の固有周期 T_3, T_7, T_1 も示す。

図 2-2 に構造物の総入力エネルギーの低減量と TMD の総入力エネルギーの対応を示す。図中の E_S^{unc} は非制振時の構造物, E_S^c, E_{TMD} はそれぞれ TMD 設置時の構造物のみ, TMD のみの総入力エネルギーである。入力地震波によらず、 $E_S^{unc}-E_S^c$ は E_{TMD} と良い対応を示しており、TMD がエネルギーを吸収することで、シェル構造物への総入力エネルギーが低減していることがわかる。

そこで、TMD のエネルギー吸収率と応答低減率の関係について検討する(図 2-3)。図には TMD のエネルギー吸収率と構造物の応答低減率が対応することを意味する式(2-1)を示す。

$$(A_r^c / A_r^{unc})^2 = (E_S^{unc} - E_{TMD}) / E_S^{unc} \quad (2-1)$$

ここに、 A_r^c, A_r^{unc} はそれぞれ TMD 設置時, 非制振時の全節点の最大鉛直応答加速度の総和である。

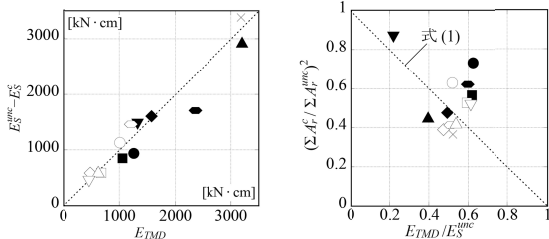
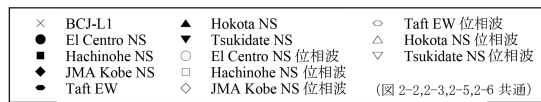


図 2-2 エネルギーの対応 図 2-3 TMD のエネルギー吸収率と応答低減率の関係

入力地震波によらず、エネルギー吸収率と応答低減率の関係は式(2-1)と概ね良い対応を示し、構造物の応答低減率は TMD が吸収するエネルギー量と対応するといえる。

次に、図 2-4 に示す 1 質点系、並列多質点系を用いた応答低減率の評価法を検討する。

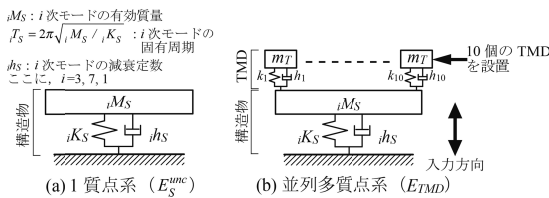


図 2-4 質点系への置換

図 2-5 に質点系を用いて算出した TMD のエネルギー吸収率 E_{TMD}/E_S^{unc} と解析結果との対応を示す。TMD のエネルギー吸収率は、解析結果に比較し大きいものの、概ね対応している。これを踏まえ、式(2-1)より求めた評価法による応答低減率 $(\sum A_i^c / \sum A_i^{unc})^2$ と解析結果の比較を図 2-6 に示す。応答低減率は、一部の観測地震波では解析結果との対応が良くないものの、告示による周期特性を有する地震波では評価できている。

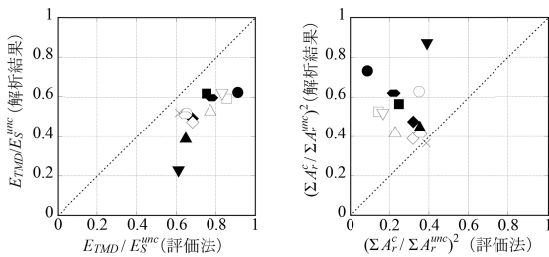


図 2-5 TMD のエネルギー吸収率の対応 図 2-6 応答低減率の対応

以上より、制御対象モードの腹に多重 TMD を分散して設置することで、地震動の周期・位相特性によらず応答は低減すること、並列多質点系を用いて TMD のエネルギー吸収率を算出することで、告示による周期特性を有する地震波については応答低減率を評価可能であることが得られた。

(3) 鉛直方向入力を受ける制振装置を付加した空間構造物の応答低減効果の分析

上記は、水平方向地震動に対する TMD による応答低減効果の分析を行った研究である。ここでは、多方向入力に対する TMD の応答低

減を目指し、まず鉛直方向入力に対する TMD の設計および設置方法、それらを設置した場合の応答低減効果について分析する。

対象とする構造物は、(1)、(2) と同一である。また、TMD の設計、設置方法等に関しても (1) と同様の決定方法で行う。そこで、まず制御対象とするモードについて検討する。ここで、鉛直 z 方向入力に対する卓越固有モードは、相当に高次モードとなり、有効質量比の観点から対象モードを選定すると有意な応答低減効果が得られないことがわかった。そのため、(1) で採用した制御対象モードの決定方法を修正し、TMD において重要となる応答変位への寄与が大きいモードを選び出す方法を採用した。その結果により選出したモードを図 3-1 に示す。制御対象モードは、比較的低次となる 5 次、2 次、13 次である。また、奇数個の TMD に対する最適条件式は現時点では得られていないため、モードの腹が 3 個、5 個となる 2 次、13 次モードに対しては、六重 TMD を適用する。

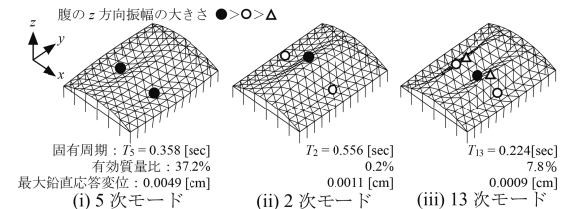


図 3-1 鉛直 z 方向入力に対する制御対象モード

(1) と同様に正弦波に対する応答低減効果を分析する。この分析より、制御対象とするモードの周期付近では、十分に高い応答低減効果が得られること、単一のモードを対象とする TMD を同時に複数設置した場合には、単一のモードのみを制御した際に起こる応答の増大が発生しないが明らかとなった。

次に、地震波に対する応答低減効果を検討する。人工地震波 BCJ-L1 に対する AOA' 上の最大鉛直応答加速度倍率を図 3-2 に示す。図 3-2(i) より、単一のモードを制御した場合、非制振時に比べ応答が大きくなる節点がある。これは、制御対象モードの固有周期より長周期の応答が大きくなるためである。図 7(ii) より、5 次、2 次、13 次を同時に制御した場合には、単一のモードを制御した場合に比べて応答低減効果が高い。

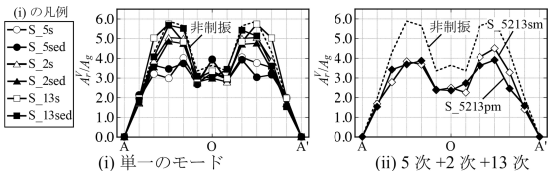


図 3-2 最大鉛直応答加速度倍率分布 (BCJ-L1)

さらに、構造物の固有周期と TMD の付加減衰の変化に対する多重 TMD の応答低減効果におけるロバスト性について検証する。図 3-3 に構造物の固有周期、TMD の付加減衰と非制振時の最大鉛直応答加速度 A_0^V に対する A_i^V の応答比の関係を示す。構造物の固有周期

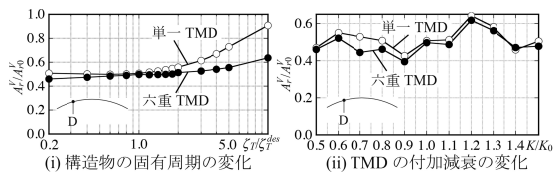


図 3-3 非共振時の最大鉛直応答加速度に対する応答比 (5 次モード制御, D 点, BCJ-L1)

には、設計値に対して 0.5~1.5 倍、TMD の付加減衰には、0.2~10 倍の変化を与える。その結果、単一 TMD に比べ、六重 TMD の応答低減効果におけるロバスト性が高いことが明らかとなった。

(4) 成果によるインパクト、今後の課題

以上の研究成果により、現在まで検討されてこなかった最適条件式に基づいた TMD による多モードの同時制御における応答性状、応答低減率が明らかとなった。また、ここでは検討できなかった多方向入力に対する振動制御についても、水平または鉛直方向入力に対する応答低減効果を分析した結果から、可能性の一端を示すことができた。さらに、現在まで提案されてこなかった TMD による応答低減率の評価方法が提案され、より簡便に TMD の効果を確認することが可能となった。

一方で、ここで行われた分析は全て数値解析による結果であり、実挙動における効果については別途検討する必要がある。また、近年起こることが懸念されている大地震時にどのような効果を示し、またどのような問題が発生するのかについても検討しなければならない。

しかしながら、これらの研究成果により、空間構造物の振動特性を考慮した制振装置の設計が可能となり、改修手法の確立の一助となることが十分に期待できる。また、今後の空間構造物の設計の自由度が広がることが期待され、更には大地震時においても防災拠点として健全に使用することのできる空間構造物の実現が可能となると考えられる。なお、上記に示した実挙動における応答低減効果や過大な地震時における挙動の解明は、次年度以降の課題とする。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

箕輪健一、熊谷知彦、小河利行、モード制御手法を用いた二層円筒ラチスシェルのアクティブ制振、日本建築学会構造系論文集、査読有り、Vol.79, No.701, 2014, pp.951-959

T.Kumagai, T.Takeuchi, T.Ogawa, Seismic Response Behavior of Single Layer Lattice Domes under Horizontal Bi-directional Inputs, Proceedings of IASS 2013, 査読有り, 2013, pp.1-6(CD-ROM)

箕輪健一、熊谷知彦、小河利行、モード制御手法を用いたアーチ構造物のアクティブ制振、日本建築学会構造系論文集、査読有り、Vol.78, No.687, 2013, pp.939-948

熊谷知彦、箕輪健一、桑原諒子、小河利行、圧電フィルムを用いたアーチ構造物のアクティブ制振実験、日本建築学会構造系論文集、査読有り、Vol.78, No.686, 2013, pp.771-779

T.Kumagai, T.Ogawa, A.Mimatsu, A.Tomimoto, Vibration Control of Arch Structures by Plural TMDs, Proceedings of IASS-APCS 2012, 査読有り, 2012, pp.1-8(CD-ROM)

[学会発表](計 4 件)

山岡幸介、複数の TMD を用いた屋根型円筒ラチスシェルの振動制御 その 1 TMD の設計および正弦波加振における応答低減効果、2013 年度 日本建築学会大会 (北海道)、2013 年 8 月 30 日、北海道大学

熊谷知彦、複数の TMD を用いた屋根型円筒ラチスシェルの振動制御 その 2 地震動に対する応答低減効果および TMD のエネルギー吸収性能、2013 年度 日本建築学会大会 (北海道) 2013 年 8 月 30 日、北海道大学

三松あずさ、水平 2 方向地震動を受ける単層ラチスドームの振動実験 その 1 実験および解析概要、自由振動特性、2012 年度 日本建築学会大会 (東海)、2012 年 9 月 13 日、名古屋大学

熊谷知彦、水平 2 方向地震動を受ける単層ラチスドームの振動実験 その 2 地震応答性状、応答加速度評価手法、2012 年度 日本建築学会大会 (東海)、2012 年 9 月 13 日、名古屋大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊谷 知彦 (KUMAGAI TOMOHIKO)

明治大学・理工学部・専任講師

研究者番号：7 0 3 7 6 9 4 5

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し