

分散型 MTMD による大スパン建築構造の
振動制御に関する研究

2007年 3月

吉 中 進

論文の内容の要旨

論文題目 分散型 MTMD による大スパン建築構造の振動制御に関する研究

氏 名 吉 中 進

本研究で対象とする大スパン建築構造，特に曲率を持った大屋根構造は軸力などの面内力によって抵抗する形態抵抗構造であり，荷重伝達性能に優れるため，曲げを主な荷重伝達法とする梁構造と比較して自重が軽く，地震時の安全性が高いというのが旧来の認識であった。しかし，近年に発生した大震災における調査の結果，構造体の軽微な損傷や天井材・吊り物の落下被害など，仮に構造体の大きな被害が見られない場合においても，重要な機能である避難場所としての使用が出来ないケースが多いことが分かった。さらに橋梁や大スパン床スラブなど，その他の大スパン構造においても，交通振動や歩行者振動などの環境振動に対する振動被害が生じていることが分かった。これらの構造物は，サステイナブル建築などの社会的な要求や，建築用途のコンプレックス化などにより，今後ますます増加するものと思われる。

そこで本論文では，建築土木構造物の制振に実績のある TMD(Tuned Mass Damper)を用いた新しい制振設計法を提案する。制振装置として TMD を選択した理由は，TMD が特に大スパン軽量構造物の制振に対する実績に優れていること，TMD は設置にあたり支点が必要でないため設計の自由度が高く，形状が複雑で意匠性に対する要求の高い大屋根構造への適用性に優れていると思われるためである。さらに既存構造物の制振補強に対する施工性にも優れていると思われる。

大スパン建築構造の中で，特に大屋根構造は，重層式骨組構造と比較して幾つかの大きく異なる振動性状を示す。本研究ではこれらのうち，特に以下の2点に着目して新しい設計法を提案する。

- ・かなり高次のモードを含む複数の振動モードが卓越し易いこと
- ・複数の振動モードの固有振動数が近接していること

本論文で提案する設計法は，図1に示すように，小型の MTMD(Multiple TMD)を空間に分散配置することにより，固有振動数の近接した複数の振動モードを制御するものであり，本論文では分散型 MTMD と呼んでいる。分散配置した MTMD は小型であるため，図1の右側に示すように，骨組の中空部に埋め込むなど意匠性を考慮した適用方法も考えられる。

MTMD の基本的な原理は，単一の振動モード制御を目的として，東京大学大学院社会基盤学専攻の藤野教授らにより提案されたものであり，一般的な TMD 設計法である通常 TMD が図2に示すように，構造物の制御モードの固有振動数に同調させた1個の TMD を設置す

るのに対して、制御モードの固有振動数の近傍に固有振動数を意図的にずらした複数の MTMD をある特定のバンド幅を持たせて設置するものである。

本論文では MTMD の持つ重要な特性の一つである同調比に対するロバスト性、言い換えると構造物の固有振動数変動に対するロバスト性に着目し、固有振動数が近接した複数の振動モードをまとめて制御することにより、従来の設計法に比較して制振効率に優れ、さらに MTMD を分散配置させることにより、構造物全体をバランス良く制御することが可能な設計法を提案する。

具体的には、本論文で固有振動数の近接した複数の振動モード制御を目的とした MTMD 空間配置と設計パラメータの設定法を新たに提案する。

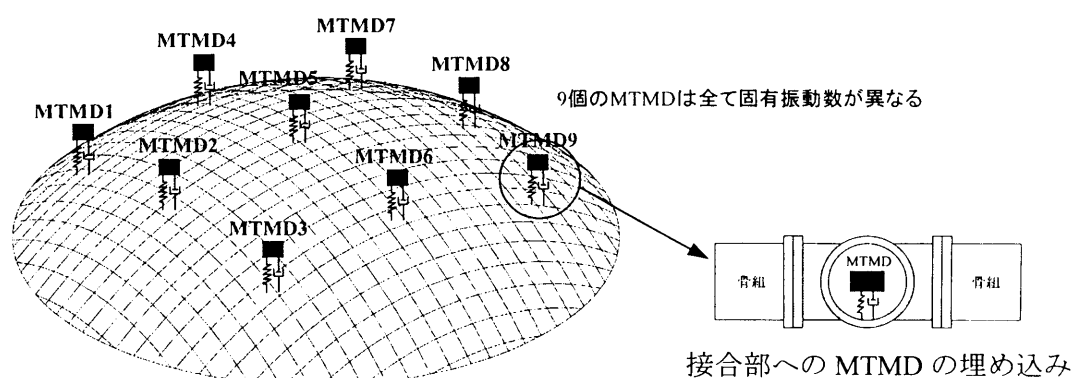


図1 分散型 MTMD (9 個の MTMD を用いる場合)



図2 通常 TMD と MTMD

本論文は、以下で述べる 10 章で構成される。

第 1 章では、大スパン建築構造の制振設計法の開発に関する研究概要を述べ、研究対象である大スパン建築構造を大きく (1) 大屋根構造、(2) その他大スパン建築構造に分類した。

第 2 章では、研究の背景として、(1) 大スパン建築構造の振動被害、(2) 大スパン建築構造の振動性状、(3) 制振技術の実施例と既往の研究を述べ、大スパン建築構造に適した新たな制振設計法を開発する必要性と、制振設計法を開発するにあたって留意すべき点を明らかにした。

上述した背景を基にして、以下の研究目的を設定した。

固有振動数の近接した複数の振動モードが励起し易い特徴を持つ大スパン建築構造の振動性状に適した新しい TMD の制振設計の手法を提案し、その効果を解析的及び実験的に確かめること。

第 3 章では、既往の TMD 設計法をまとめた。本論文では、既往の単一振動モード制御用の MTMD 法を応用していることから、設計パラメーターの設定方法について詳述した。さらに、複数振動モード制御に応用するとき重要となる、最適バンド幅の設定と同調比に関するロバスト性に関する考え方をまとめた。

また、実際の大スパン建築構造を想定した 40m スパンのアーチモデルの単一振動モード制御に、集中配置した MTMD を適用して解析的検討を行い、MTMD 法の大スパン建築構造に対する適用性を確認した。

第 4 章では、前述した本論文で提案している分散型 MTMD について、MTMD 空間配置と設計パラメーターの設定に関する基本的な考え方を述べた。

第 5 章では、固有振動数の近接した大スパン建築構造の複数振動モード制御に対する分散型 MTMD の適用性を確認するために、形状が簡易でアスペクト比の異なる 2 つの矩形平板を対象に、解析的検討を実施した。ここでの設計パラメーターの設定は、既往の単一振動モード制御における手法を準用した形とした。

解析の結果、(1) 空間領域で構造物全体の振幅のバラツキが小さく、(2) 周波数領域で MTMD 設定バンド幅の内側における応答のバラツキが少ないという、分散型 MTMD の特徴的な性状が確認された。

さらに、同一の合計質量を持つ通常 TMD と比較して、制振効果に優れ、大スパン建築構造の複数振動モード制御に対する分散型 MTMD の適用性が確かめられた。

また、分散型 MTMD おける複数の振動モード制御のための等価質量の算定法として、平均等価質量を提案した。

第 6 章では、9 質点系の基本モデルを対象に、不規則励振として基本的な白色雑音を入力し、分散型 MTMD 設計法における MTMD 空間配置と設計パラメーター設定に関する解析的検討を行った。

検討の結果、提案した MTMD 空間配置法の有効性が確認された。

さらに、複数振動モード制御のための設計パラメーターの設定法を理論的に確立し、振動数領域から分散型 MTMD の適用範囲の目安を設定した。

本章での検討結果から、分散型 MTMD の基本的な設計法を確立した。

第7章では、代表的な大スパン建築構造である単層円筒ラチスシェルとドーム状スペースフレーム構造を対象に、実際の構造物を想定し、地震外力に対する分散型 MTMD の制振効果を確認した。

単層円筒ラチスシェルのように制御モードの固有振動数が分散している場合、ドーム状スペースフレーム構造のように制御モードの有効質量比が大きく異なる場合における制振設計の考え方も同時に示した。

本章では、特に構造物全体における制振効果の確認に重点を置き、分散型 MTMD が構造物全体をバランス良く制御することに優れていることが確かめられた。

また観測地震波に対し、全体構造質量に対する MTMD の合計質量比が 2~3%程度で、最大応答の低減効果、加力時間全体に亘る制振効果ともに、優れた制振効果が得られることが分かった。

第8章では、分散型 MTMD を大スパン建築構造へ適用した場合の効果と、複数振動モード制御のための基礎データを得ることを目的として、小規模のアーチモデルと簡易な TMD 及び MTMD 模型を製作し、振動台実験により分散型 MTMD の制振効果を確認した。

その結果、調和外力に対して分散型 MTMD は広い外力周波数で安定した高い制振効果が得られること、不規則励振に対する分散型 MTMD の高い制振効果が確認された。

また MTMD 法を複数の振動モード制御に応用するとき重要な性質である固有振動数変動に対するロバスト性が高く、且つ理論上のロバスト余裕を超えても急に制振効果が低下することが無いことが確かめられた。

第9章では、前章までの検討結果を総合して、分散型 MTMD のパラメーター決定法をまとめた。特に、“制御モードの選択とグループ分け”、“MTMD の設計”において注意すべき点をまとめた。

第10章では、本論文の結論を以下のようにまとめた。

1. 固有振動数の近接した複数の振動モードが励起し易い特徴を持つ大スパン建築構造の振動性状に適した、新しい TMD の制振設計法として、分散型 MTMD を提案した。
2. 分散型 MTMD の大スパン建築構造における制振効果を解析的及び実験的に確認した。
3. 分散型 MTMD の（1）MTMD 空間配置と（2）設計パラメーターの設定に関して、実際の大スパン建築構造の設計に際して基本となる設計法をまとめ、その根拠を理論的に明確に示した。

Summary of Thesis

VIBRATION CONTROL OF LARGE-SPAN ARCHITECTURAL STRUCTURES USING SPATIALLY DISTRIBUTED MTMDs

Susumu Yoshinaka

Because large-span architectural structures, especially curved large-span roof structures, have superior load transmitting performance, it has been generally recognized that they are lighter and therefore safer in even strong earthquakes than general beam structures. However, results of investigations following recent strong earthquake disasters have shown that people often could not use these structures for emergency shelters because of slight damage to the structures themselves as well as dropping of ceilings and suspended objects. It has also been observed that environmental vibration damage occurs in other types of large-span architectural structures such as large-span floors. These structures will become increasingly widespread in the future because of social demand for sustainable architectures and complexity of architectural usage.

I therefore propose a new vibration control design method applying TMD (Tuned Mass Damper) to many architectural and civil structures. I select TMD for vibration control devices because they have been widely applied to large-span light-weight structures and are considered to be superior in application to complex-shaped large-span roof structures because they can be installed with only one support point. They are also considered to be superior for retrofitting of existing structures.

Large-span architectural structures, especially large-span roof structures, have different vibration properties than general building structures. In this study, I focused on the following two properties:

- Various vibration modes involving rather high-order vibration modes
- Closely spaced natural frequencies of those vibration modes

In the design method proposed in this paper, shown in Figure 1, we control various vibration modes with closely spaced natural frequencies by small spatially distributed MTMDs (Multiple TMDs). Because the spatially distributed MTMDs are small, it is considered possible to apply them inside structural members or joints.

The basic MTMD theory for controlling one vibration mode was proposed by Professor Fujino of the University of Tokyo. Conventional single TMDs consist of one mass tuned to a natural frequency of the controlling mode. The MTMD method, on the other hand, consists of a number of small MTMDs with different natural frequencies distributed over the optimal bandwidth around the natural frequency of the controlling mode.

This paper focuses on the structure's robustness against change of its natural frequency, which is

an important property of the MTMD method. Then, to achieve more effective control than the single TMD method, I aimed to control various vibration modes together. Moreover, by applying MTMDs in a spatially dispersed arrangement, I expected to control the overall structure in a well-balanced manner.

In summary, this paper proposes a new design method with a spatially dispersed arrangement of MTMDs and a set-up procedure for design parameters to effectively control various vibration modes for large-span architectural structures.

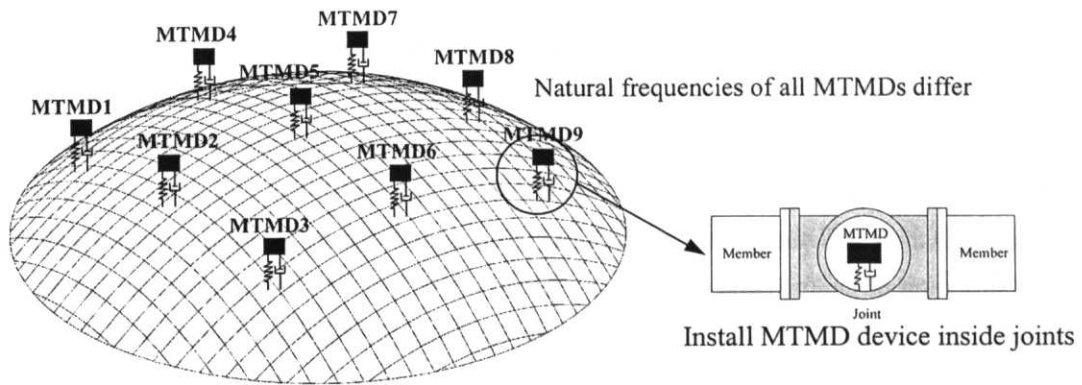


Figure1. Spatially Distributed MTMD method

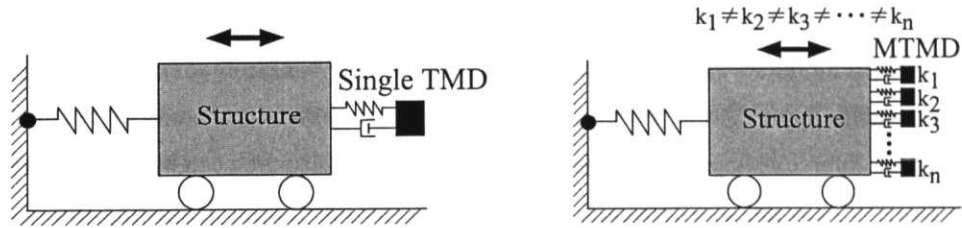


Figure 2. Single TMD and MTMD method

This thesis consists of the following ten chapters.

Chapter 1: “Introduction” .

This chapter first outlines the thesis. Large-span architectural structures, which are target structures in this study, are divided into (1) large-span roof structures and (2) other types of large-span architectural structures.

Chapter 2: “Background and purpose of this study” .

As a background to this study, this chapter describes (1) existing examples of vibration damage, (2) vibration properties of large-span structures, (3) examples of actual structures utilizing vibration control devices and existing studies . I thus show that it is necessary to develop a new vibration control method for large-span structures.

The purpose of this paper is summarized below.

I propose a new vibration control method using TMD, which is considered to be compatible with vibration properties of large-span architectural structures that have various vibration modes with closely spaced natural frequencies. I then verify the effect of the proposed method by numerical analyses and tests.

Chapter 3: “ Summary of existing TMD design method to control one mode” .

This chapter summarizes the existing TMD design method for controlling one vibration mode. I apply the MTMD method proposed for controlling one mode to control plural modes, so I describe the design method in detail. I summarize the theory of the procedure for setting up the optimal bandwidth and its robustness against the tuning ratio.

To verify the applicability of the MTMD method to actual large-span structures, analytical investigations are carried out using a 40m-span arch model to control one mode by a concentrated arrangement of MTMDs.

Chapter 4: “Proposal of spatially distributed MTMD method” .

This chapter describes the basic theory of the spatial arrangement of MTMDs and the procedure for setting up design parameters of the proposed spatially distributed MTMDs method.

Chapter 5: “Verification of applicability of spatially distributed MTMD method to large-span structures” .

This chapter describes analytical investigations carried out to verify the applicability of the spatially distributed MTMD in controlling plural modes of large-span structures with closely spaced natural frequencies. Two rectangular plate models with different aspect ratios were used. In the analyses, the procedure for setting up the design parameters was based on the existing MTMD method proposed for controlling one mode.

The following characteristic properties of the spatially distributed MTMD were obtained, and they are compared with those obtained from the generally used single TMD method:

- (1) In the spatial domain, the amplitudes of the overall structures are even.
- (2) In the frequency domain, the responses inside the MTMD bandwidth are even.

The effect of vibration control of the spatially distributed MTMD was superior to that achieved by the single TMD of the same total weight. This verified the applicability of the spatially distributed MTMD method to large-span structures.

Moreover, to calculate the equivalent mass of the spatially distributed MTMD, an average equivalent mass method is newly proposed.

Chapter 6: “Parameter design method for spatially distributed MTMDs under random excitation” .

Analytical investigations were carried out using a basic nine-mass system under white noise excitation with a spatial arrangement of MTMDs, and a procedure for setting up design parameters was used.

The obtained results verify the effect of the proposed arrangement of MTMDs described in chapter 4.

Moreover, the parameter design method for controlling plural modes was theoretically established and the standard for the applicable limit of the spatially distributed MTMD method was established in the frequency domain.

From the analytical results of this chapter, the basic method for designing the spatially distributed MTMDs was established.

Chapter 7: “Analytical investigations on vibration control effect of spatially distributed MTMD method to large span structures” .

This chapter describes analytical investigations carried out to verify the vibration control effect of the spatially distributed MTMD under earthquake forces. I used both a single-layer lattice shell and a dome-shaped spatial structure, which are considered to be typical large-span roof structures.

In addition, the design method for spatially distributed MTMDs is shown for a structural model with widely spaced natural frequencies and for a structural model with rather different effective mass ratios of controlling modes.

The analytical results verify that spatially distributed MTMDs with total mass ratios of only about two percent can effectively control both the overall structural responses and the maximum responses.

Chapter 8: “Shaking table tests using an arch model” .

This chapter describes shaking table tests with a small-scale arch model carried out to examine the fundamental and real behavior of the spatially distributed MTMD method.

Firstly, tests using harmonic excitation were executed to confirm the frequency response characteristics of the spatially distributed MTMD, and the test results are compared with analytical results.

Then, I confirmed the control performance of the spatially distributed MTMD under random excitation.

Finally, I confirmed the robustness of the spatially distributed MTMD against a structure's frequency changes, which is important in real applications of the proposed method in controlling several vibration modes at the same time.

Chapter 9: “Summary of parameter design method for spatially distributed MTMDs” .

This chapter summarizes the basic parameter design method for spatially distributed MTMDs based on the results described in the previous chapters.

In particular, I carefully summarized the selection of the controlling modes, the division into several controlling groups and the detailed design method for spatially distributed MTMD.

Chapter 10: “Conclusions” .

This chapter summarizes the conclusions of this paper as follows:

- (1) I have proposed a spatially distributed MTMD method as a new vibration control method using TMD, which is considered to be compatible with the vibration properties of large-span structures with closely spaced natural frequencies.
- (2) I verified the vibration control effect of the spatially distributed MTMD method applied to large-span structures by numerical analyses and tests.
- (3) I established a basic design method for the spatial arrangement of MTMDs and the procedure for setting up design parameters in order to apply the proposed method to real large-span structures, and described its theory.

分散型 MTMD による大スパン建築構造の振動制御に関する研究

目 次

第1章 序論	1
1. 1 研究概要	1
1. 2 本論文の構成	5
第2章 研究の背景と目的	8
2. 1 TMD による振動制御の状況	8
2. 2 大スパン建築構造の振動被害	11
2. 2. 1 大屋根構造の地震被害	11
2. 2. 2 橋梁の環境振動被害	17
2. 2. 3 大スパン床スラブの環境振動被害	18
2. 3 大スパン建築構造の振動性状	20
2. 3. 1 大屋根構造の振動性状のまとめ	20
2. 3. 2 大屋根構造の固有周期分布	21
2. 3. 3 大スパン骨組構造の基本振動性状	23
2. 4 制振技術の実施例と既往の研究	29
2. 4. 1 実施例	29
2. 4. 2 既往の研究	33
2. 5 研究目的	41
第3章 単一振動モード制御のための既往の TMD 設計法のまとめ	43
3. 1 TMD 基礎理論	43
3. 2 通常 TMD 設計法	46
3. 2. 1 2自由度系の非減衰強制振動	46
3. 2. 2 副振動系に減衰がある場合の2自由度系の強制振動	47
3. 2. 3 通常 TMD 設計上の注意点	49
3. 3 MTMD 設計法	50
3. 3. 1 設計パラメーター	50
3. 3. 2 最適バンド幅	51
3. 3. 3 同調比に関するロバスト性	53
3. 3. 4 MTMD 減衰比の設定	54

3. 3. 5	多自由度系における MTMD 設定バンド幅と周波数応答	55
3. 4	MTMD 法の大スパン建築構造への適用	56
3. 4. 1	解析モデル	56
3. 4. 2	アーチ単体の振動性状	57
3. 4. 3	通常 TMD, MTMD, 多重 TMD の設計	58
3. 4. 4	解析結果	59
3. 4. 5	本節のまとめ	61
3. 5	本章のまとめ	62
第 4 章	複数振動モード制御のための分散型 MTMD の提案	63
4. 1	提案の概要	63
4. 2	MTMD 空間配置	66
4. 3	設計パラメーター	68
4. 4	本章のまとめ	69
第 5 章	分散型 MTMD の大スパン建築構造への適用性の確認	70
5. 1	正方形平板	70
5. 1. 1	解析モデル	70
5. 1. 2	平板の振動モードと制振モードの選択	71
5. 1. 3	通常 TMD と分散型 MTMD の設計	73
5. 1. 4	周波数応答解析	75
5. 1. 5	MTMD 空間配置と設計パラメーターの直接的決定法の提案	78
5. 2	長方形平板	81
5. 2. 1	通常 TMD と分散型 MTMD の設計	81
5. 2. 2	周波数応答解析	84
5. 3	質量比の算定に関する考察	89
5. 3. 1	等価質量の算定法	89
5. 3. 2	MTMD における等価質量の算定と平均等価質量の提案	89
5. 3. 3	周波数応答曲線の比較	91
5. 4	本章のまとめ	93
第 6 章	不規則励振に対する分散型 MTMD のパラメーター設定法	94
6. 1	不規則振動理論	95
6. 1. 1	不規則振動理論のまとめ	95
6. 1. 2	定常不規則励振に対する線形系の応答	99
6. 1. 3	定常不規則励振に対する多自由度系の応答	103

6. 2	解析モデルと解析条件の設定	107
6. 2. 1	解析モデル	107
6. 2. 2	線形固有値解析	107
6. 2. 3	荷重条件の設定	109
6. 2. 4	制振効果の定量的評価法	110
6. 3	MTMD 空間配置	111
6. 3. 1	通常 TMD と分散型 MTMD の設計	111
6. 3. 2	MTMD 最適空間配置探索法の提案	113
6. 3. 3	解析結果	114
6. 3. 4	本節のまとめ	117
6. 4	MTMD バンド幅の設定法	118
6. 4. 1	設定バンド幅と周波数応答, MTMD モード振幅形状の関係	118
6. 4. 2	複数振動モード制御時におけるバンド幅設定法のまとめ	123
6. 5	適用範囲の目安	124
6. 6	本章のまとめ	127
第 7 章	大スパン建築構造における分散型 MTMD の制振効果に関する解析的検討	128
7. 1	単層円筒ラチスシェル	128
7. 1. 1	解析モデル	128
7. 1. 2	線形固有値解析	130
7. 1. 3	通常 TMD と分散型 MTMD の設計	132
7. 1. 4	周波数応答解析	135
7. 1. 5	観測地震波を用いた時刻歴応答解析	138
7. 1. 6	加速度応答スペクトルと制振モードの対応	145
7. 1. 7	本節のまとめ	147
7. 2	ドーム状スペースフレーム構造	148
7. 2. 1	解析モデル	148
7. 2. 2	線形固有値解析	150
7. 2. 3	通常 TMD を用いたときの周波数応答	156
7. 2. 4	4 個の MTMD を用いたときの周波数応答	159
7. 2. 5	新たな MTMD 空間配置の提案と制振効果の確認	162
7. 2. 6	本節のまとめ	173
7. 3	本章のまとめ	174
第 8 章	アーチモデルを用いた振動台実験	175
8. 1	アーチモデルと実験機器	175

8. 2	アーチ単体の振動性状	177
8. 3	通常 TMD と分散型 MTMD の設計	179
8. 4	通常 TMD と分散型 MTMD の周波数応答特性	182
8. 4. 1	通常 TMD の実験結果	182
8. 4. 2	分散型 MTMD の実験結果	183
8. 5	帯域白色雑音入力に対する制振効果	188
8. 5. 1	狭い帯域を持つ白色雑音	188
8. 5. 2	広い帯域を持つ白色雑音	190
8. 6	固有振動数変動に対する MTMD のロバスト性の確認	191
8. 7	本章のまとめ	193
第 9 章 分散型 MTMD パラメーター決定法のまとめ		194
第 10 章 結論		196
参考文献		201
発表論文		209
Appendix		
1.	大スパン鉄骨造渡り廊下の床振動制御	211
2.	ロック式 TMD の提案	222
謝辞		226

第 1 章 序論

第1章 序論

最初に、研究の概要と本論文の構成を述べる。

1. 1 研究概要

本研究の目的は、一般のビル等の重層式骨組構造とは異なり、固有振動数の近接した複数の振動モードが励起し易い特徴を持つ、大スパン建築構造の振動性状に適した新しいTMDの制振設計の手法を提案し、その効果を解析的及び実験的に確かめることである。

本研究は新しい設計法の提案であり、制振装置はこれまで建築土木構造物の制振に実績のある受動型(パッシブ型)の制振装置であるTMD(Tuned Mass Damper)¹⁻¹⁾を用いている。

TMDは建築構造物を対象とした場合、建物重量に対して1~2%程度の質量で、地震力や風荷重に対して大きな制振効果を得ることができ、且つ支点が不要であるため設置の自由度が高く、より構造物への適用性が高いという利点がある。しかし、従来一般的に用いられてきた通常のTMD設計法は、設計パラメーターの最適値からの変動に非常に敏感であるという欠点があった。

一方、阿部・藤野により提案されたMTMD(Multiple TMD)法¹⁻²⁾は、共振点における制振効果が高いのみならず、設計パラメーターに対するロバスト性に優れるという特徴を持つ。本論文ではこのうち、同調比に対するロバスト性に着目して、既往のMTMD法を応用し、制振効率に優れた新しい大スパン建築構造用の制振設計法を提案する。

本研究で対象とする大スパン建築構造に関して、大きく以下の2つに分類できる。

- (1) 大屋根構造
- (2) その他の大スパン建築構造

(1) は、ドームやスタジアムの屋根を代表的な建築物とし、一般的に空間構造と呼ばれているものである。本構造システムは、部材が3次元的に複雑に構成されており、形状も複雑なものが多く、一般的な骨組構造とは大きく異なる振動性状を持つものが多い。振動被害の原因となる入力には主に地震力が多い。地震被害に関して、重層式骨組構造に比較すると、構造本体そのものの被害はそれほど多くはないものの、阪神淡路大震災や宮城県沖の地震において、天井材の落下被害が大きな話題となった。

(2) は、近年増加している大スパン床スラブや、その他の橋梁状構造物である。振動被害の原因となる入力は、機械装置の振動や歩行者振動、交通機関による振動など多種多様であり、一般に環境振動¹⁻³⁾と呼ばれるものに関する被害が多い。ちなみに環境振動とは文献¹⁻³⁾によると、「地盤、建物など、ある広がりをもって我々を取り巻く境界の日

常的な振動状態をいうものとする。」と定義されている。

本論文では、これらのうち、特に（１）に関する研究結果を述べる。近年施工される大屋根構造は、トラス構造のような離散系構造が大部分を占めることから、本論文では離散系構造に対する設計法を示す。連続体構造に対する理論的解法については、今後の研究課題である。

大屋根構造の制振技術に関する現状の詳細は２．３節で述べるが、ビル等の多層式骨組構造に比較すると、成熟の域には達していない。そのため今後の研究開発の進展が期待される分野である。

大スパン建築構造は、サスティナブル建築など社会的な要求や建築用途のコンプレックス化、軽量で耐久性に優れた新しい建築材料などの建築技術の発達により、今後さらに増加するものと思われる。さらに社会の発展により、今までにない新たな振動源が出現することも十分に考えられる。社会的な動きとしても、今後、構造物の安全性のみならず、居住性能など建築物にさらに高い性能が要求されることは避けられない。

そのため、大スパン建築構造に関する制振手法の開発は、今後ますます重要性が高まるものと考えられる。

本論文で提案する新しい大スパン建築構造の制振設計の手法である“分散型 MTMD”は、これらの問題に対する対策の一手法になるものである。

本研究の特徴を以下にまとめる。

１．空間的な広がりを持つ構造物を対象とする。

そのため、特定の点ではなく、構造物全体の応答をバランス良く制御する必要があり、MTMD の空間配置を考慮している。

２．阿部・藤野により提案された MTMD 法¹⁻²⁾ を応用している。

阿部・藤野による既往の研究と本研究の比較を図 1.1 に示す。

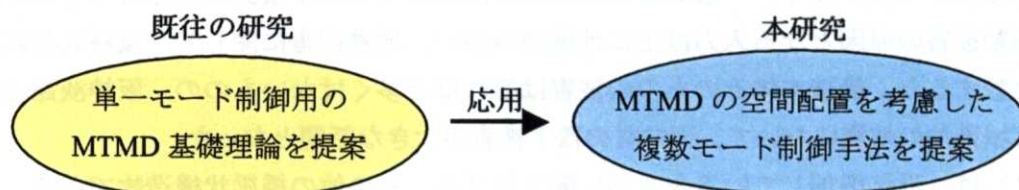


図 1.1 既往の研究との比較

３．離散系構造物を対象とし、一般的な構造解析プログラムを用いた設計法を提案する。

本論文で新たに提案する分散型 MTMD の設計法とその効果を、図 1.2 にまとめる。

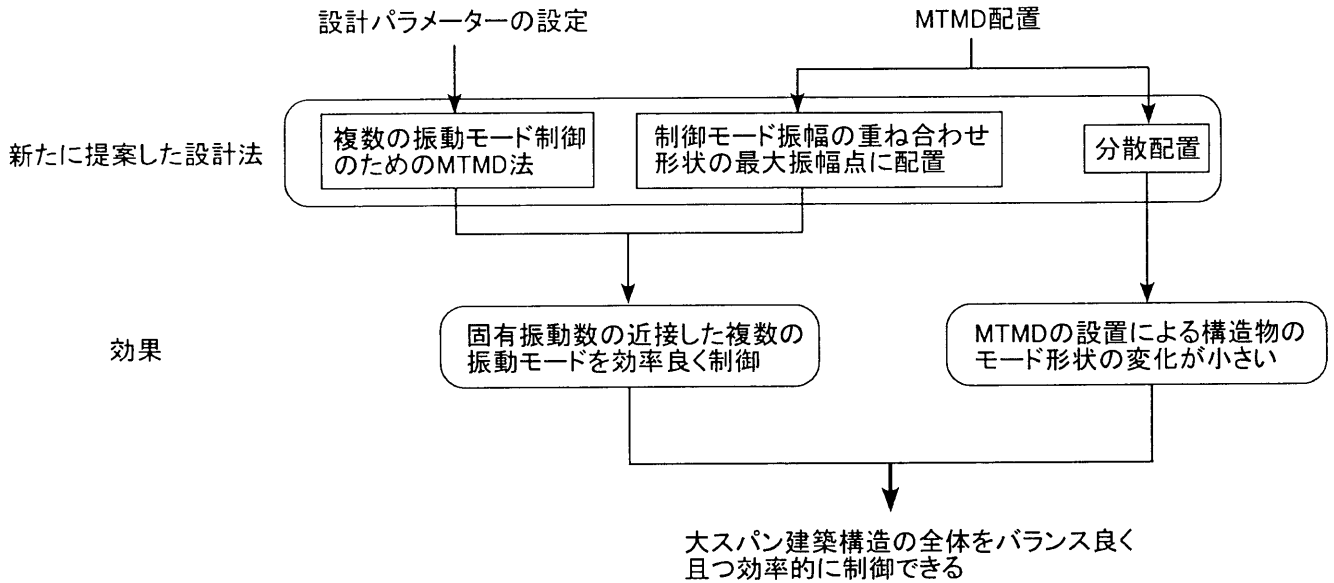


図 1.2 分散型 MTMD の設計法と効果のまとめ

本論文で、地震動を受けたときの分散型 MTMD の制振効果を把握し、比較検討するために、(1.1-1) 式で示す「全節点応答変位の二乗平均値和」を用いている。

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{T} \int_0^T X_i^2(t) dt \quad (1.1-1)$$

ここで、 X_i は節点 i における応答変位、 N は全節点数、 T は加力時間である。

本量を用いた理由を以下に述べる。

前述したように、本論文では、空間的な広がりを持つ大スパン建築構造を制御対象としているため、ある特定の節点ではなく、構造物全体の応答をバランス良く制御することを目標としている。そのため、制振効果の確認には、特定の節点の応答ではなく、全節点の応答変位の和を用いた。ここで、応答変位を用いた理由は、大スパン建築構造は許容応力度設計（弾性設計）が基本であり、全節点における応答変位を小さく抑えることは、構造物全体に生じる応力も小さく抑える効果が高いと考えられる。よって、制振効果を評価する尺度として適切であると考えられる。

また、TMD、MTMD の設置は構造物のモード特性に影響を及ぼす結果、第 7 章の解析例題で示すように、構造物単体の場合と比較して、地震外力を受けた場合の時刻歴応答波形の形状が大きく変化し、特定の時刻における応答変位のみでは制振効果の評価が難しい。そのため、応答変位を加力時間で積分することとした。

なお、制振効果を比較検討するために、論文中では本量以外に、以下の指標も用いた。

- (1) 周波数応答解析により得られた制御モード固有振動数における応答変位の空間分布
時刻歴応答解析により得られた応答変位二乗平均値の空間分布
→主に、空間領域における制振効果のバランスを確認するために用いた。
- (2) 時刻歴応答解析により得られた制御モードの腹など代表的な節点における最大応答変位及び全節点最大応答変位の二乗和
→主に、地震動を受けたときの最大応答変位の低減効果を確認するために用いた。
- (3) モードの腹など代表的な節点における周波数応答曲線
→主に、代表的な節点における周波数領域での定常時における制振効果を確認するために用いた。

1. 2 本論文の構成

本論文の構成を以下に述べる。

最初に、第2章で研究背景を整理して研究目的を述べ、第3章で既往の TMD 及び MTMD 設計法について概観する。

それらを受け、第4章で大スパン建築構造用の制振設計法として新たに分散型 MTMD 法を提案する。第5章では提案手法の大スパン建築構造への適用性を数値解析により確認する。

第6章では本研究で対象とする複数振動モード制御のための MTMD 空間配置と設計パラメーターの設定に関して検討し、提案手法の適用範囲の目安を述べる。

第7章では大屋根構造における提案手法の地震力に対する制振効果を数値解析により確認し、第8章で簡単なアーチモデルを用いた振動台実験の結果を述べる。

第8章で用いるアーチモデルは、前章までで検討対象とした3次元的な広がりを持つモデルとは異なるが、本章ではあくまで MTMD 基礎理論の実験的確認を目的とした。

最後に、第9章で分散型 MTMD の設計法をまとめ、第10章で本論文の結論を述べる。

各章毎の内容を以下に述べる。

第2章 研究の背景と目的

大スパン建築構造の制振手法を開発するにあたって、まず現状の振動被害を調査した。調査手法は、地震時の現地被害調査と文献調査によった。

次に、大スパン建築構造の振動性状をまとめた。手法は既往の研究文献の調査と代表的な大屋根構造である 200m スパンの骨組構造の線形固有値解析手法を用いた。

次に、大スパン建築構造における制振技術の実施例と既往の研究をまとめた。

これらの背景を受け、本論文で述べる研究目的をまとめた。

第3章 単一振動モード制御のための TMD 設計法のまとめ

ここでは、既往の TMD 設計法をまとめた。既往の手法は全て、単一の振動モード制御を想定して提案されたものである。まず、一般的な TMD 設計法である Den Hartog による固定点法を用いた通常 TMD における設計パラメーター設定法をまとめ、本論文で提案する分散型 MTMD の基礎となる MTMD のパラメーター設定法を既往の研究文献に基づきまとめた。

第4章 複数振動モード制御のための分散型 MTMD の提案

前章でまとめた単一モード制御のための MTMD 設計法を応用し、第2章でまとめた大スパン建築構造の振動の特徴である固有振動数の近接した複数の振動モードを効率良く制御

するための手法として、新たに分散型 MTMD を提案した。

具体的には、MTMD の空間配置法と設計パラメーターの設定法を新たに提案した。

第 5 章 分散型 MTMD の大スパン建築構造への適用性の確認

前章で提案した複数振動モード制御のための分散型 MTMD の大スパン建築構造への適用性を確認するために、アスペクト比の異なる 2 つの矩形板を検討用モデルとして選択し、分散型 MTMD の制振効果を解析的に確認した。ここでのパラメーター設定は既往の MTMD 法に準じた形とした。さらに質量比の設定において、等価質量を用いた場合と全体構造質量を用いた場合を比較し、平均等価質量を新たに提案した。

第 6 章 不規則励振に対する分散型 MTMD のパラメーター設定法

第 4 章で提案した MTMD 空間配置が有効なものであることを確認し、複数振動モード制御のための MTMD 設計パラメーターの設定法を確立するために、9 質点系の基本モデルを対象モデルとして選択し、最も簡単な不規則励振である白色雑音を入力として、解析的検討を実施した。

さらに本手法の適用にあたっては、制御モードの固有振動数が近接していることが条件となるため、振動数領域から本手法の適用範囲の目安を設定した。

第 7 章 大スパン建築構造における分散型 MTMD の制振効果に関する解析的検討

前章で確立した分散型 MTMD のパラメーター設定法が、実際の大スパン建築構造で有効であることを確認するために、代表的な大屋根構造である単層円筒ラチスシェルとドーム状スペースフレーム構造を対象モデルとして提案手法を適用し、地震力に対する制振効果を確認した。

第 8 章 アーチモデルを用いた振動台実験

提案した分散型 MTMD が大スパン建築構造で有効であることを確認するために、簡単なアーチモデルを用いた振動台実験を実施して制振効果を実験的に確認した。ここでは、複数モード制御に応用するための基盤となる基礎データを得ることを目的として、単一モード制御に対する分散型 MTMD の制振効果を実験的に検証した。さらに構造物の固有振動数変動に対するロバスト性を確認した。

第 9 章 分散型 MTMD パラメーター決定法のまとめ

前章までの研究結果を総合して、第 4 章で提案した分散型 MTMD のパラメーター決定法をまとめた。

第10章 結論

本論文の結論をまとめた。

Appendix1. 大スパン鉄骨造渡り廊下の床振動制御

本論文は、1.1節で述べたように大屋根構造を主な検討対象としているが、その他の大スパン建築構造における分散型 MTMD を用いた複数振動モード制御の例を述べる。

Appendix2. ロック式 TMD の提案

TMD 及び MTMD を適用したときに、周波数応答特性で生じる課題に対する一つの対策法を提案する。

なお、本論文での数値解析は、第6章以外は全て、汎用の構造解析ソフトである MSC. Nastran for Windows^{1-4) ~1-6)}を使用した。論文中にあるモデル図やモード図は基本的に Nastran の出力図を用いた。

また、本論文で実施した数値解析における各種の設定は、基本的に文献1-7)に従った。

第 2 章 研究の背景と目的

第2章 研究の背景と目的

本研究の背景を述べるために、まず2.1節で本研究で使用する制振装置であるTMD(Tuned Mass Damper)を用いた振動制御の状況をまとめる。2.2節では大スパン建築構造の振動被害の現状を報告し、2.3節で大スパン建築構造の振動性状の特徴を述べる。次に、大スパン建築構造における制振技術の実施例と既往の研究例を述べる。

それらの背景を受け、2.5節で本研究の目的を述べる。

2.1 TMDによる振動制御の状況

現在、機械構造物や建築土木構造物の制御に用いられているTMDの起源は、1928年にDen Hartogらが米国機械学会誌に発表した動吸振器に遡ることができ、その後、様々な機械構造物に発生する振動の制御に用いられてきた。

土木分野では、吊橋や斜張橋の主塔の風による振動（特に建設時）の制振対策に多くの実績がある。1990年代に建設された花畔大橋主塔の制振に用いられたTMDに関しては、文献2-1)に詳しい。

表2.1.1に、過去20年間に国内でTMDを用いて建設された吊橋主塔の例をまとめる²⁻²⁾。

表 2.1.1 TMD が適用された吊橋主塔の例

年代	主塔名	塔高	周波数 (Hz)
1980 年	秩父橋	40m	
1985 年	名港西大橋	122m	
	荒津大橋	60m	
	櫃石島橋	139m	0.75
	岩黒島橋	148m	
1990 年	花畔大橋	45m	
	東神戸大橋	147m	0.256
	サンブリッジ		
	横浜ベイブリッジ	172m	
1995 年	弓削大橋		0.584
	奥多摩大橋（橋桁）		0.595
	鶴見航路橋	180m	0.76

注) 空欄は不明

建築分野では、1986年に高さ124.5mの千葉ポートタワー²⁻³⁾の最上部に、常時風に対する展望ゾーンの居住性向上と、地震時・強風時における建物の応答制御を目的としてTMD

が設置されて以降、同様の目的で香川ゴールドタワーなどの展望塔に設置された。スレンダーな超高層ビルにおける風揺れに対する居住性向上を目的として設置された例も多い。

表 2.1.2 に TMD を用いて国内で建設された建築構造物の例をまとめる²⁻⁴⁾。

表 2.1.2 TMD が適用された建築構造物の例

建物名称	地上階数 (階)	高さ (m)	竣工年
MHS 本社ビル	8	26.8	1988
東山スカイタワー	7	134.0	1989
福岡タワー	5	148.1	1989
ハウステンボス ドム・トールン	5	85.55	1992
P&G 日本支社テクニカルセンター	31	131.4	1993
秋田ポートタワー	5	109.7	1994
幸福ビル別館	9		
博多シーホーク	36		
久保田家石材商店恵比寿ビル	9		
丸の内駅前再開発ビル	24		
仙台 AER	33		
江戸川区総合区民ホール展望タワー	11		
福島 5 丁目計画共同ビル	24		
芦屋競艇場展望タワー棟	5		
梅田 DT タワー	27		

注) 空欄は不明

海外では、中華民国（台湾）にある高さ 508m の超高層ビルの台北国際金融センターにおいて、台風などで発生する横揺れも吸収できるように振り子型の TMD が設置されている。その他、カナダの CN タワー（535m）、ボストンにある 60 階のジョンハンコックビル、シドニーのセンターポイントタワー（305m）で同様に、強風により引き起こされる振動の制御に TMD が用いられている²⁻⁵⁾。

その他、機器配管系に発生する流体関連振動の制御や、最近では 2. 3 節で後述する大スパン床スラブにおける環境振動の制御に用いられるケースが増加している。

TMD と同様に質量効果機構を用いたものとして TLD(Tuned Liquid Damper)がある。これは液体の揺動（スロッシング）を利用し、液体を質量とし、重力を復元力としたものである。表 2.1.3 に TLD を用いて国内で建設された建築構造物の例をまとめる²⁻⁴⁾。

表 2.1.3 TLD が適用された建築構造物の例

建物名称	地上階数 (階)	高さ (m)	竣工年
横浜マリンタワー		101.3	1987
ゴールドタワー	5	136.0	1988
新横浜プリンスホテル	43	145.2	1992
法華クラブ池之端店	26	95.20	1993
新東京国際空港管制塔	15	87.30	1993
東京国際空港管制塔	14	77.10	1993
H.R.O.ホテル	28		
東京ドームホテル	43		2000
TYG 第 11 ビル			

注) 空欄は不明

表中にある新横浜プリンスホテルでは、TLD が合計 30 基設置され、強風時の揺れが 40～50%低減する効果が確認されている。東京ドームホテルでは、並進用として 160 槽が、捩れ用として 40 槽が設置されている²⁻⁴⁾。

2. 2 大スパン建築構造の振動被害

大スパン建築構造の振動被害について、第1章で述べた分類に従って、大屋根構造の地震被害と、その他の大スパン構造（橋梁と大スパン床スラブ）の環境振動被害に分けて述べる。

2. 2. 1 大屋根構造の地震被害

最初に、近年日本で生じた大規模地震のうち、筆者が実際に現地調査を実施した兵庫県南部地震と芸予地震、宮城県沖の地震における被害例を述べる。

（1）兵庫県南部地震

兵庫県南部地震は1995年1月17日（火）の午前5時46分に淡路島北部を震源としたマグニチュード7.2の地震であり、淡路島及び神戸市を中心とする広い地域に甚大な被害（死者6,300人）をもたらした。筆者は1995年1月24日と25日の二日間にわたり東京大学生産技術研究所川口教授と共に体育館やホール等の大屋根構造物を中心に被害調査を行った²⁻⁶⁾。

他のビル等の多層式骨組構造が大きな被害を受けたのと比較すると、大屋根構造は全体的に被害は少なかったものの、まったくの無被害であったわけではない。大屋根構造においては、多層式骨組構造とは異なる特徴的な被害が多く見られた。ここではその特徴的な被害をまとめる^{2-7), 2-8)}。

① 支承部の被害が多い（写真2.2.1～写真2.2.2 参照）

支承部の被害として、アンカーボルトの破断、アンカー周辺のコンクリートのクラックや剥離が確認された。またシステムトラスにおいて支承部の周辺でトラス部材の破断や座屈が生じたものもある。これらの原因として鉄筋コンクリートの下部構造に鉄骨造屋根が載るといった振動性状の異なる構造が接合したためと思われるもの、屋根の支持部の階層が異なるため支持部に相対変位が生じたことによるとと思われるものなどがある。また大きな被害としてはPC梁の屋根構造全体が落下した被害がある。これは置き屋根形式となる屋根で相対的に弱い支承部の損傷により生じた被害であると思われる。

② 吊り物の落下被害が多い（写真2.2.3～写真2.2.4 参照）

屋根そのものではなく、屋根から吊り下げられた天井材、キャットウォーク、照明器具、スピーカーのような二次部材の落下、脱落、破損の被害である。写真2.2.3に示したスピーカークラスターの落下事例では、クラスター昇降のためのウィンチ部分の歯車が地震時の上下動によって破損し、ケーブル巻取りドラムの空転によってクラスター全体が落下、ケ

ケーブルの破断に至ったことが報告されている²⁻⁸⁾。2. 3節で後述するように、大屋根構造に特徴的な振動性状として、水平入力によっても上下方向の応答が生じ、面外方向の振動が発生し易いことがある。吊り物の落下被害においても、このような大屋根構造の振動性状が大きく影響しているものと考えられる。

特に②の吊り物の落下被害について、兵庫県南部地震の発生以前は、大屋根構造の耐震設計において、それほど重要視されてこなかった問題かもしれないが、災害救助拠点として機能を果たせなかった建物が多かったため、あらためてその重要性が指摘される機会となった。

屋根構造自体の被害としては、屋根面ブレースの曲げ変形及び破断、ガセットプレート²⁻⁷⁾の曲げ変形、トラス部材の曲げ変形、破断などがあった²⁻⁷⁾ (写真 2.2.5～写真 2.2.6 参照)。

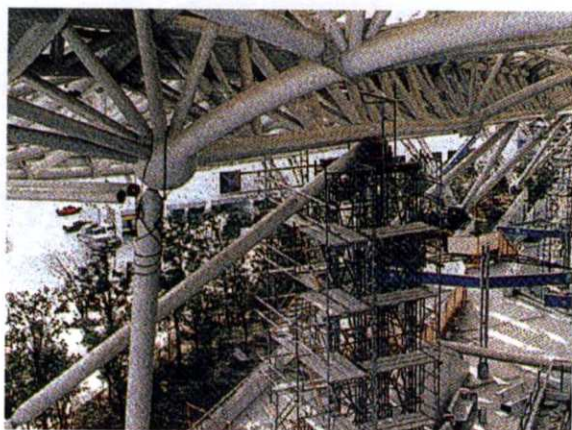


写真 2.2.1 支持部材の脱落



写真 2.2.2 PC 梁屋根の落下



写真 2.2.3 スピーカーの落下

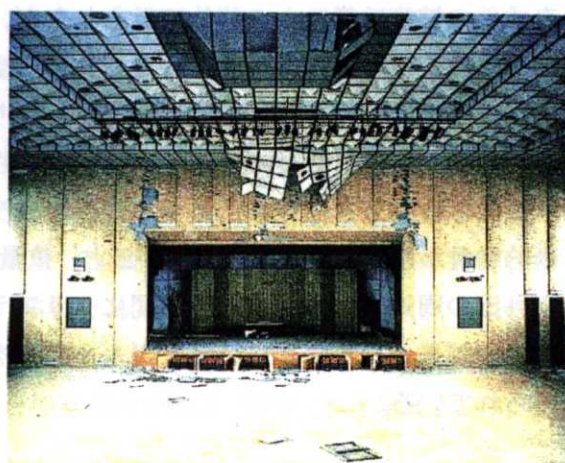


写真 2.2.4 天井材の落下

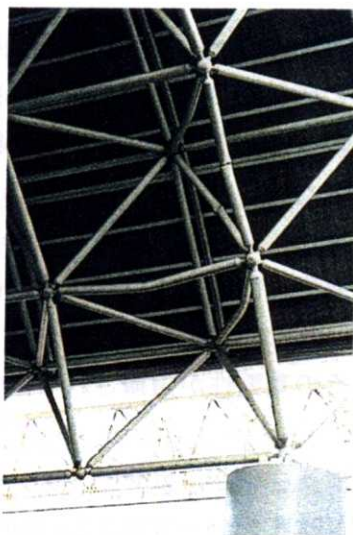


写真 2.2.5 システムトラス部材の被害²⁻⁷⁾



写真 2.2.6 水平ブレースの破断²⁻⁷⁾

(2) 芸予地震

芸予地震は 2001 年 3 月 24 日（土）に広島県沖の安芸灘を震源として、中国、四国、九州北部地方で発生した地震であり、マグニチュードが 6.4 で震源の深さは約 51km である。筆者は 2001 年 4 月 3 日～5 日の 3 日間にわたり、鹿島建設（株）の小堀研究室を中心とした 6 名のメンバーと共に建物被害調査を実施した。全体として阪神淡路大震災に比較すると、構造躯体に大きな被害は少なく、被害は軽微であった。被害は松山市の方が広島地区（東広島市・呉市・三原市・広島市）に比べてやや大きかった。大きな構造躯体の被害としては今治市のピロティーマンションの崩壊や一部の学校建築における柱のせん断ひび割れがあった。

大屋根構造における構造躯体の被害は、体育館の妻壁ブレースの座屈（写真 2.2.9）の他、支承部の被害は幾つかの建物で見られたが、一般に大きな被害は少ない。一方、体育館における外装材の損傷（写真 2.2.7～2.2.8）や天井材の落下は多く観察され、一部の体育館では天井材の落下により、学生が怪我をしたり、内装材の落下により避難場所としての使用が出来ない建物もあった。

これらの被害を受けて、はじめて、国土交通省から都道府県建築行政担当部長宛てに技術的助言が配信された。それによると、重量の大きい（面内剛性の高い）天井材について、天井面の周辺部と周囲の壁との間にクリアランスを確保することが必要であること、吊りボルトが長くなる場合には吊りボルト相互を補剛材で連結することが必要であることが述べられている。



写真 2.2.7 外壁の損傷を受けた体育館



写真 2.2.8 外壁の損傷詳細

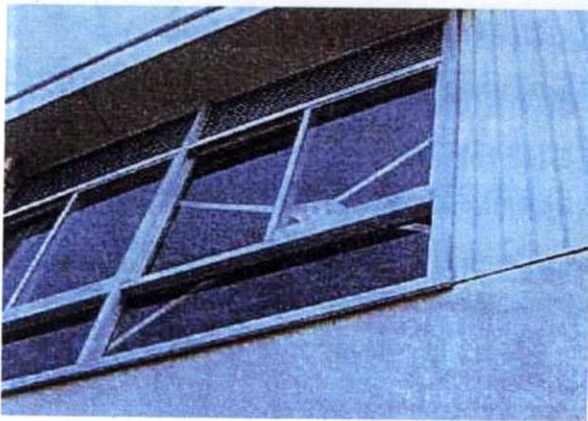


写真 2.2.9 妻壁ブレースの座屈



写真 2.2.10 体育館開口部ひび割れ

(3) 宮城県沖の地震

宮城県沖の地震は、2005 年 8 月 16 日 (火) に宮城県沖を震源として発生した地震であり、マグニチュードが 7.2 で震源の深さは約 42km である。宮城県川崎町で最大震度 6 弱を記録し、仙台市や石巻市、福島県相馬市などで震度 5 強を観測したものの、全体的な建物被害は軽微であった。

筆者は、2006 年 8 月 18 日 (木) に東京大学生産技術研究所川口教授や東京工業大学元結助教授らと共に、日本建築学会から派遣され、被害の大きかった仙台市泉区にある複合スポーツ施設スポパーク松森の被害調査を行った²⁻⁹⁾ (写真 2.2.11, 写真 2.2.12)。本建物は平成 17 年 7 月に利用が開始されたばかりの新しい建物であるが、1 階にある温水プール天井材が中央部を除いてほぼ全面にわたって落下し、31 人の重軽傷者を出す大きな被害を受けた²⁻¹⁰⁾。同年 9 月 8 日 (木) には足場の上からの詳細な調査を実施した (写真 2.2.13, 図 2.2.1)。

落下した天井は、一般的な工法である「鋼製下地在来工法」、「捨て張り工法」^{2-11), 2-12)}

と呼ばれるものである。天井は野縁から落下しており、損傷したクリップが床面に多数散乱していた。クリップの損傷や変形というボードが落下した直接の原因は確認できるものの、なぜこのような大面積に及ぶ天井面が一気に落下したかについては今後の研究課題である。

東北大学の源栄教授は、常時微動測定の結果水平方向に比較して上下方向の揺れが大きいことから、天井材落下原因の一つとして、面外方向の振動が生じやすいという大屋根構造の振動性状があることを指摘している²⁻¹³⁾。



写真 2.2.11 ウォータースライダーから見下げ



写真 2.2.12 サークルデッキから見上げ

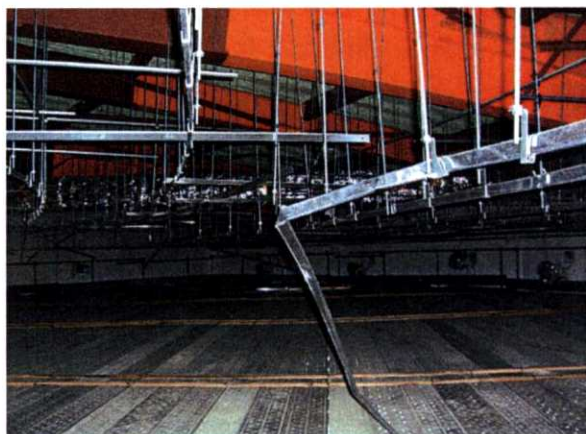


写真 2.2.13 野縁受けの変形状況

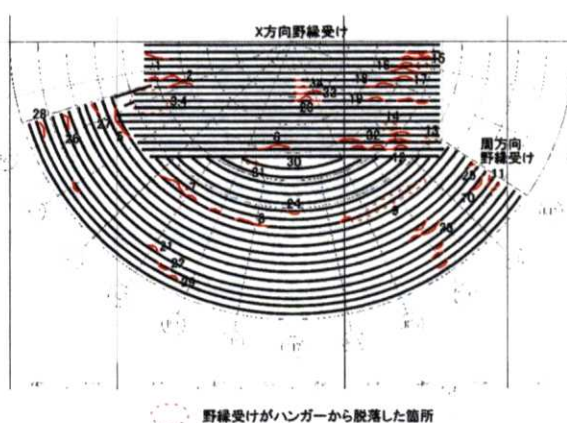


図 2.2.1 野縁受けの変形分布

このように最近日本で起きた3つの大震災における大屋根構造の被害としては、屋根から吊り下げられた天井材、照明器具、スピーカーの落下、脱落、破損の被害が多いことが特徴である^{2-14), 2-15)}。さらに、支承部の被害が多いことが挙げられるが、これらは屋根構造そのものではなく、屋根との接続部位や接続する建築材の被害であり、構造躯体が

大きな被害を受ける他の建築骨組とは性質が異なり、一見すると被害は軽微であるような印象を受ける。

しかし、地域の学校体育館をはじめとした大屋根構造の多くは地震時における応急避難場所としての機能を求められており、吊り物の落下により要求されている機能を果たせなかった建物が多かったことは問題である²⁻¹⁶⁾。さらに軽微な構造躯体の被害でも、地震災害時における心理的な問題で避難場所として使用できなかった例も多い。

また屋根自体の落下など、依然として大きな被害を受ける大屋根構造が存在していることは問題である。

今回取り上げた、兵庫県南部地震と芸予地震、宮城県沖の地震以外の新潟県中越地震、福岡県西方沖地震においても被害の特徴は同様なものである²⁻¹⁷⁾。新潟県中越地震においては、積雪荷重に対する配慮から、構造骨組自体は全体的に強度、剛性ともに高くなる傾向があり、屋根構造そのものの被害は少ない反面、吊り天井や照明器具などの懸垂型の日構造材や設備に深刻な被害が見られたという報告がある²⁻¹⁸⁾。

大屋根構造における強風時の被害としては、2004年9月に発生した台風18号に伴う強風により、山口情報芸術センターにおける屋根ふき材の剥離・脱落の被害、きららドームのガラストップライトの破損被害、出雲ドームにおける膜の破損被害が報告されている²⁻¹⁹⁾。

大屋根構造における環境振動の問題としては、大屋根を持つアリーナ施設で、強風による屋根面の振動により透過光や反射光が振動し、競技中の選手の視覚障害を引き起こす場合があるとの報告^{2-20), 2-21)}がある。

2. 2. 2 橋梁の環境振動被害

建築構造ではないが、大スパン構造の一つである歩道橋の横揺れの例として、2000 年 5 月に開通したロンドンにあるミレニアムブリッジは、横揺れのためにわずか3日で閉鎖された^{2-22), 2-23)}。大きな横揺れが引き起こされる原因は、橋が右側に揺れると歩行者はバランスを取ろうと逆に左側に反射的に重心を移動させ、それに大人数の相乗効果も加わって、決定的な横揺れ現象を引き起こしたためとされる。補修のために橋の下部に2種類のダンパーが取り付けられた。一つは水平運動を減衰させる粘性ダンパー、もう一つはTMDであり、これらを合計91個設置することで橋の外観を変えることなく横揺れが解決され、2002年2月に再び開通した(写真2.2.14, 写真2.2.15参照, 撮影は東京大学生産技術研究所の川口教授による)。



写真 2.2.14 ミレニアムブリッジ全景



写真 2.2.15 橋の下部に取り付けられた TMD

国内でも埼玉の戸田競艇場に向かう戸田橋において歩行者振動が問題となった。

2. 2. 3 大スパン床スラブの環境振動被害

前述した橋梁以外の構造物でも最近では環境振動が問題となることが多く、床スラブなどにおいて、道路交通や鉄道軌道による振動、建築設備機器による振動、人の動作による振動、精密機器が嫌う微振動などが問題とされることが多い^{2-24) ~2-27)}。

これらは最近の床スラブの大スパン化により問題が大きくなる面が否定できない。スパンが大きくなると、等価的に重量と剛性が不足して揺れやすいうえに、歩行加振振動数の定倍成分との共振が発生しやすいと言われている。最近施工された事務所（スパン 26m×13m）と工場（スパン 16m×16m）における大スパン床スラブの施工中の写真を、写真 2.2.16 と写真 2.2.17 に示す。

大スパン床スラブの振動対策としては TMD が用いられることが多い。御堂筋に面した地上 14 階建ての某事務所ビルは、スパンが 18m の大スパン床スラブであり、歩行時の床の上下振動が懸念されたため、7 個の TMD が設置された。

その他、図 2.2.2 にバスが走行・発着制動する 3 階床に対し、その走行・制動による振動を低減されるために TMD が適用された複合ビルの例を示す²⁻²⁴⁾。

図 2.2.3 には、地下 1 階、地上 6 階の鉄骨造の事務所ビル床において歩行者振動が問題となった事例を示す²⁻²⁷⁾。この場合も、振動を低減させるために、スラブ面と OA フロア間の 100mm の隙間に 30 台の TMD が設置された。



写真 2.2.16 事務所の大スパン床スラブ例



写真 2.2.17 工場の大スパン床スラブ例

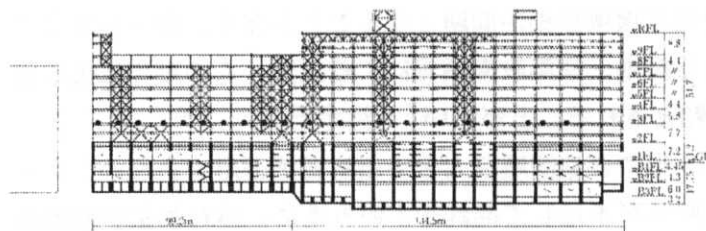


図2 長辺方向 軸組図
Fig.2 Framing elevation (in the longitudinal direction)

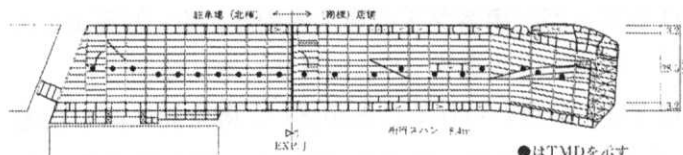
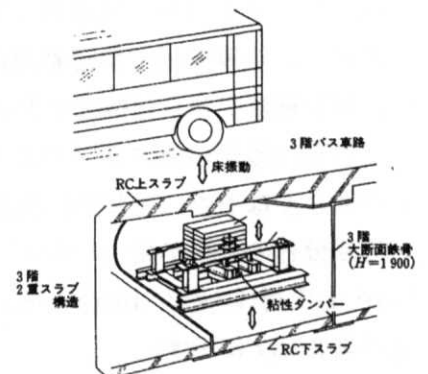


図3 3階 床伏図
Fig.3 3F-level floor framing plan



TMD (チューンド・マス・ダンパー) 床制振装置
図5 TMD概要図
Fig.5 Outline of Tuned Mass Damper as Illustrated

図 2.2.2 バスの走行振動対策として TMD が設置された複合ビルの例²⁻²⁴⁾

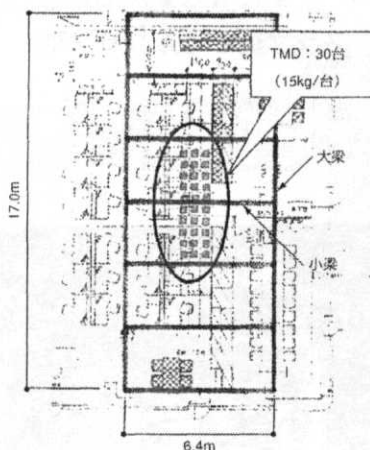
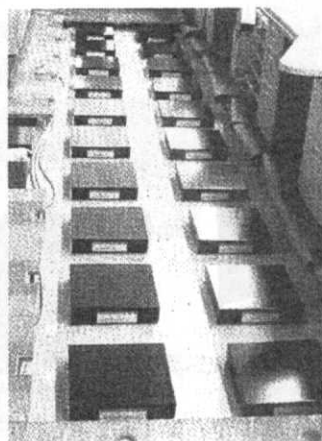


図1 TMD設置レイアウト図



②設置設置状況

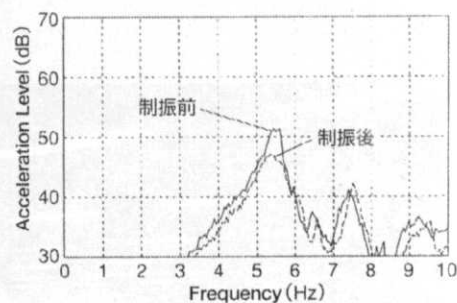


図6 1名踵加振時の振動加速度

図 2.2.3 事務所床の走行者振動対策として TMD が設置された例²⁻²⁷⁾

以上、本節では大スパン建築構造の振動被害について、大屋根構造の地震被害とその他の大スパン構造の環境振動被害に分けて述べた。

両者ともに、一般のビル等建築物に比較して、これまであまり問題とされてこなかった、または新たに問題が多く発生している被害であり、本研究で提案した設計法を適用可能な例がこれからさらに増加していくものと思われる。

2. 3 大スパン建築構造の振動性状

本節では主として、大スパン建築構造の中でも重層形式のオフィスビル等の骨組構造と比較して特徴的な振動性状を示す大屋根構造における振動性状の概要を文献(2-8), (2-28)を参考として整理する。2. 3. 3では、代表的な大屋根構造モデルとして200m スパンの単層格子骨組構造を選択し、数値解析により、2. 3. 1で述べる大屋根構造の振動性状を確認する。

2. 3. 1 大屋根構造の振動性状のまとめ

ライズを持つ大屋根構造の振動性状で最も特徴的なことは、

- (1) 面外方向の振動が発生し易く、地震動などの水平入力によっても、上下方向の応答が生じ易いこと
 - (2) かなり高次のモードを含む複数の振動モードが卓越し易いこと
- である。

一般に、図2.3.1に示すように、水平入力に対しては複数の逆対称のモードが卓越し、鉛直入力に対しては複数の対称モードが卓越する。

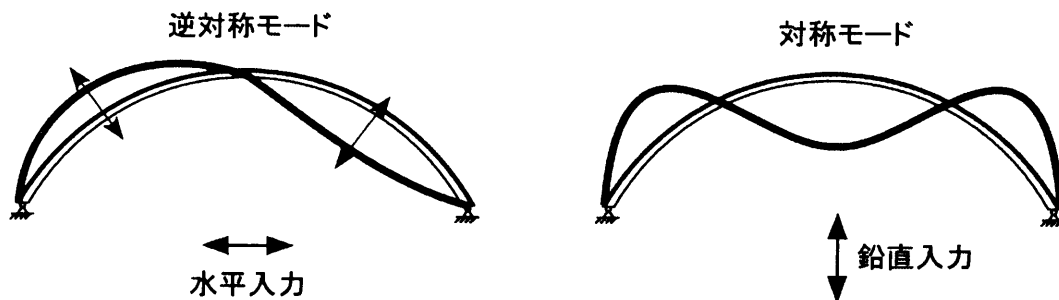


図 2.3.1 入力方向による振動モード

また(2)に関連して、

- (3) 異なる振動モード同士の固有周期が近接していることが挙げられる。

さらに、既往の研究⁽²⁻⁸⁾より、大屋根構造の振動モードと固有周期は、特に屋根の形状と支持条件に大きく依存することが分かっており、個々の構造物により大きく異なる性状を示すことが多い。

振動モードの形状も複雑であることが多い。

大屋根構造の制振設計を考える場合は、これらの性質を十分に考慮に入れる必要がある。

2. 3. 2 大屋根構造の固有周期分布

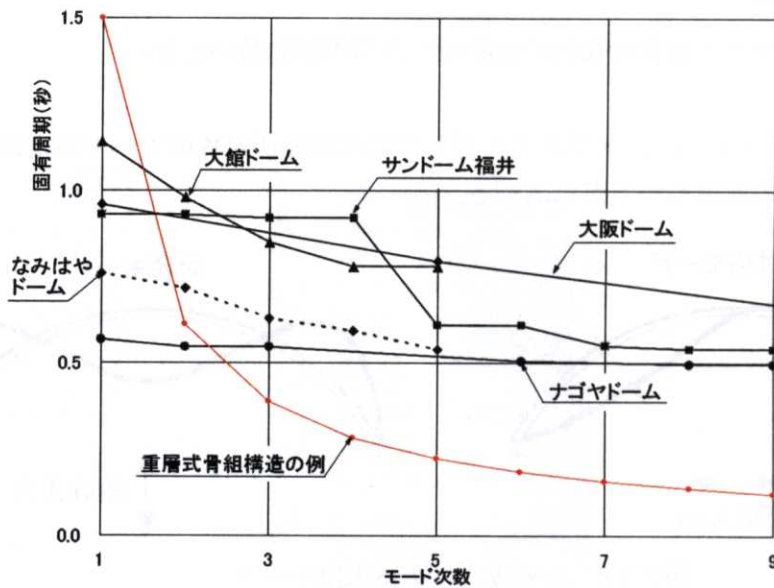
次に、2. 3. 1で述べた(3)の固有周期の分布について、文献2-28)を参考として、既往の大屋根構造の設計例を構造形式毎に整理する(図2.3.2～図2.3.5参照)。

ここで、図中に比較のために示した重層式骨組構造(層数16)の例は、既往文献²⁻²⁹⁾による逆三角形の1次モードをもち質量が均等なせん断質点系の高次固有円振動数と1次固有円振動数間の以下の関係式を用いて計算した。ここで1次の固有周期は1.5秒とした。

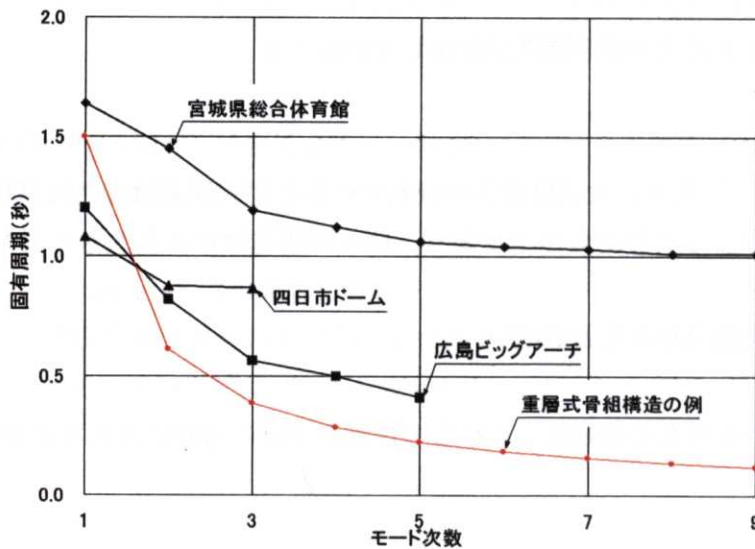
$$\omega_i^2 = [1 + 2 + \dots + (2s-1)]\omega_1^2 = \left(\sum_{t=1}^{2s-1} t\right) \cdot \omega_1^2 = (2s-1)s \cdot \omega_1^2 \quad (2.3-1)$$

ここで、 s はモード次数を、 ω_1 は1次の固有円振動数を、 ω_i は*i*次の固有円振動数を表している。

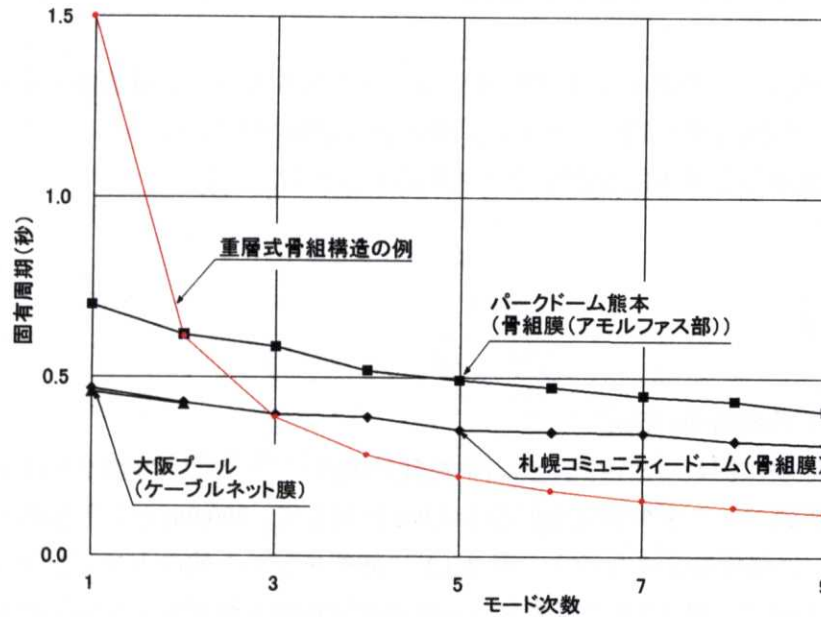
(1) ドーム状スペースフレーム構造(図2.3.2)



(2) アーチ状スペースフレーム構造(図2.3.3)

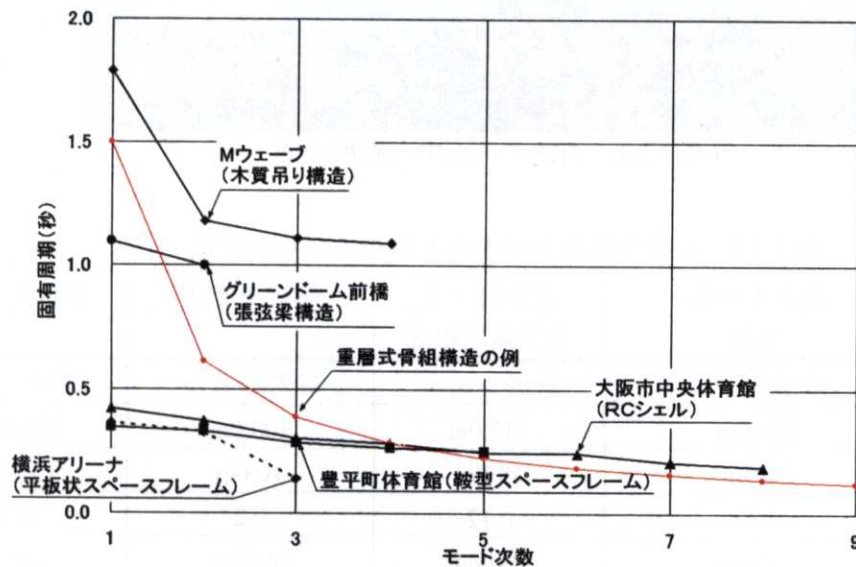


(3) 膜構造 (図 2.3.4)



代表的な空気膜構造である低ライズケーブル補強空気膜構造の東京ドーム屋根の上下方向固有周期は、内圧 30mmAq 時で 4.15 秒，内圧 60mmAq 時で 1.80 秒である。

(4) その他の構造形式 (図 2.3.5)



以上の図から、全般的に大屋根構造においては、重層式骨組構造と比較して固有周期が近接し、固有周期が 1.0～0.5 秒程度の間に密集していることが分かる。

また、アーチ状スペースフレーム構造においては、他の大屋根構造の形式と比較すると、各モードの固有周期の間隔が若干広がっていることが分かる。

2. 3. 3 大スパン骨組構造の基本振動性状

近年施工例が増えてきた代表的な大屋根構造の一つである大スパン単層格子骨組構造を例にとり、基本的な振動性状を調べるために、線形固有値解析を行った。

以下の3種類の情報から基本的な振動性状を確認することとする。

- ①固有周期
- ②刺激係数
- ③振動モード形状

(1) 解析モデルと骨組断面の決定

筆者が接合部の実験に関わった西武ドーム中央膜屋根部^{2-30), 2-31)}(写真2.3.1)を参考形状とし、スパンを西武ドーム中央膜屋根部の145.0mに対して、200.0mとして解析モデルを設定した。図2.3.6に解析モデルを示す。表2.3.1に解析モデルと他の大スパン単層骨組構造との形状の比較を示す。表2.3.2に西武ドーム中央膜屋根部と解析モデルの構造詳細部の比較を示す。



写真 2.3.1 西武ドーム中央膜屋根部

表 2.3.1 既存の単層骨組構造と解析モデルの比較

	西武ドーム 全体	西武ドーム 中央膜屋根部	解析モデル	名古屋ドーム
全体形状	球形シェル	球形シェル	球形シェル	球形シェル
スパン	220.0m	145.0m	200.0m	183.6.0m
ライズ	51.0m	18.0m	40.0m	33.0m
ライズスパン比	0.23	0.12	0.2	0.18
曲率半径	160.0m	160.0m	145.0m	144.3m
全体重量	$9,900.0 \times 10^4 \text{ N}$	$1,900.0 \times 10^4 \text{ N}$	$3,731.0 \times 10^4 \text{ N}$	$10,094.0 \times 10^4 \text{ N}$
単位面積重量	$260.6 \times 10 \text{ N/m}^2$	$115.1 \times 10 \text{ N/m}^2$	$118.8 \times 10 \text{ N/m}^2$	$381.5 \times 10 \text{ N/m}^2$
構造形式 架構システム	周辺部：鉄骨立体骨組 中央部：単層格子骨組	単層骨組 2方向格子	単層骨組 2方向格子	単層骨組 3方向格子
屋根材料	周辺部：ステンレス板 中央部：A種膜材	A種膜材	A種膜材	ステンレス板

表 2.3.2 西武ドーム中央膜屋根部と解析モデルの比較

	西武ドーム中央膜屋根部	解析モデル
構造形式	単層格子骨組構造	単層格子骨組構造
屋根材料	膜材	膜材
構造材料	鋼材	鋼材
格子間隔	7.5m (球の緯線・経線)	7.5m (球の緯線)
支承部	7.2 度間隔 合計 50 個	7.5 度間隔 合計 48 個
骨組接合部	高力ボルト接合 曲げ剛性を 75%に低減させて解析	剛接合を仮定
境界条件	放射方向ピン支持 円周方向自由	ピン支持

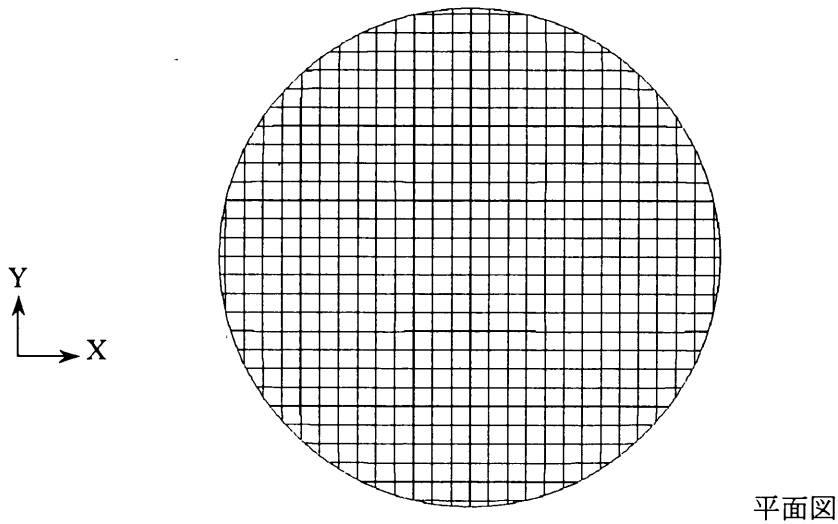
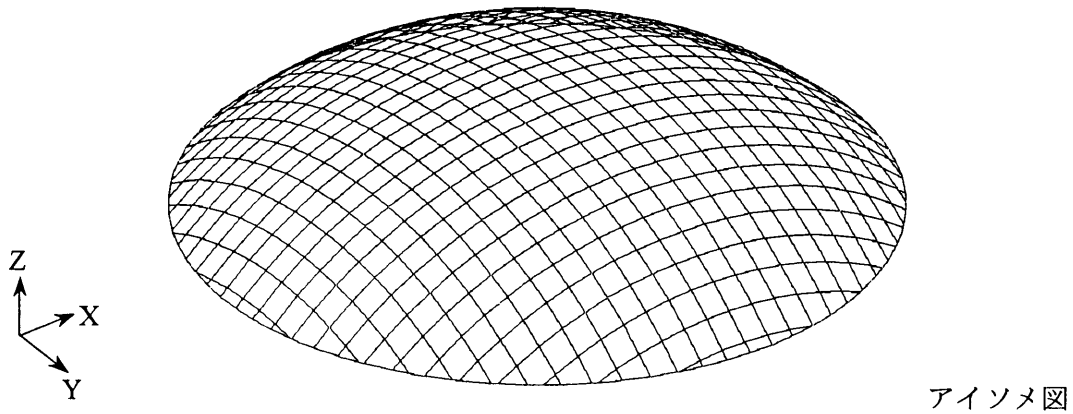


図 2.3.6 解析モデル

骨組の断面を決定するにあたって、テンションリング断面を西武ドームと同一とし、鋼管骨組断面をパラメーターとした幾何学的非線形性を考慮した座屈解析を行い、自重に対する座屈安全率が約3倍になるように各部材の断面を決定した。最終的に決定された断面を表 2.3.3 に示す。表に示す断面において自重に対する安全率は 3.13 倍であった。

表 2.3.3 骨組断面

	西武ドーム 中央膜屋根部	解析モデル
一般骨組	$\phi 558.8 \times 14\text{mm}$	$\phi 609.6 \times 16\text{mm}$
テンションリング	$\phi 914.4 \times 36\text{mm}$	$\phi 914.4 \times 36\text{mm}$

(2) 解析条件

固有値問題の解析手法として相似変換法の 1 種であるランチョス (Lanczos) 法²⁻³²⁾を用いた。質量は集中質量を用い、境界条件は周辺のテンションリングでピン支持とした。

(3) 解析結果

①固有周期について

図 2.3.7 にモード次数と固有周期の関係を示す。既往の研究結果より、自由度の多い大スパン構造はかなりの高次モードまで振動が励起することが言われているため 600 次までを対象モードとした。比較のため、図には逆三角形均等質量せん断質点系の高次振動数と 1 次振動数の関係である(2.3-1)式を用い、1 次の固有周期をピン支持解析モデルの解析結果に揃えて 5.18(sec)としたときの結果も示す。図中の○印の意味については、後述する。

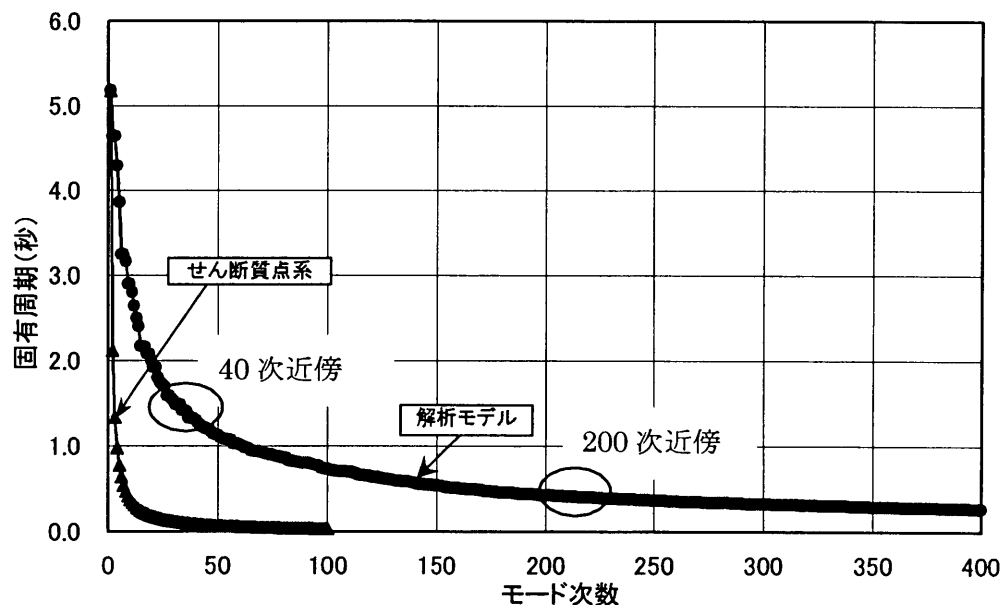


図 2.3.7 モード番号と固有周期の関係

図に示すように多層式骨組構造のせん断質点系と比較した場合の解析モデルの特徴は、

- ・ 高次モードも比較的固有周期が長い
- ・ 多数の近接固有値が存在する
- ・ 重複固有値を持つ場合が存在する

ことである。

表 2.3.4 に 10 次モードまでの固有周期を示す。

表 2.3.4 固有周期解析結果

モード次数	固有周期 (単位：秒)
1	5.184
2	4.641
3	4.641
4	4.290
5	3.863
6	3.247
7	3.247
8	3.167
9	2.904
10	2.904

注) 灰色の箇所は重複している固有周期を示す。

②刺激係数の分布について

図 2.3.8 と図 2.3.9 に、600 次までのモードにおける水平方向（図 2.3.6 の X 方向）と鉛直方向（Z 方向）の刺激係数とモード次数の関係を示す。

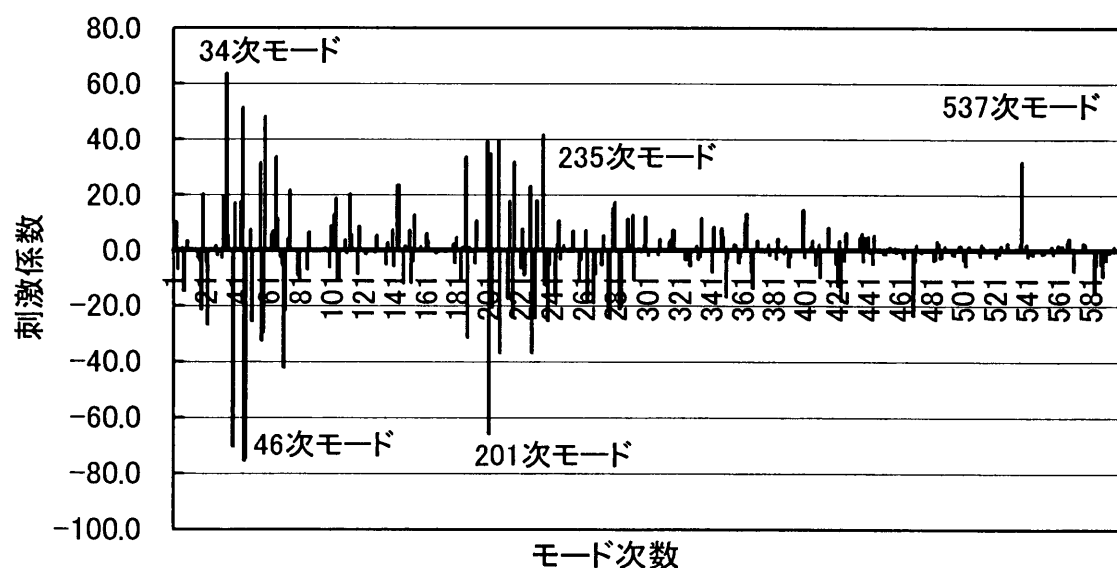


図 2.3.8 水平方向（X 方向）刺激係数の分布

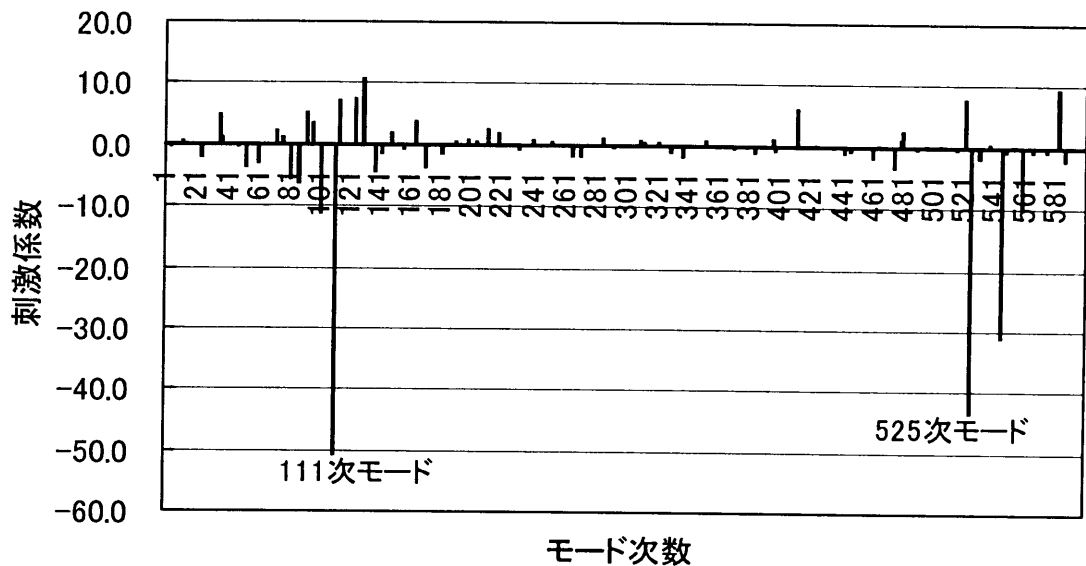


図 2.3.9 鉛直方向 (Z 方向) 刺激係数の分布

上図に示すように、水平方向刺激係数に関して、40 次近傍のモードと 200 次近傍のモードに刺激係数が卓越する領域がある。図 2.3.10 に低次で刺激係数が比較的大きい 19 次のモード形状を示す。2. 3. 1 で述べた逆対称モード形状となっている。

鉛直方向刺激係数に関して、111 次モードで刺激係数が極めて大きい。111 次のモード形状は図 2.3.11 に示すように、解析モデルの中央節点が鉛直方向に大きく沈み込むかたちで変位する特徴的な形状をしている。対称モード形状となっている。

図 2.3.7 中に○印で示したのは、水平方向刺激係数の大きい 40 次近傍のモードと 200 次近傍のモードの固有周期であり、卓越する振動モードにおける固有周期が近接していることが分かる。

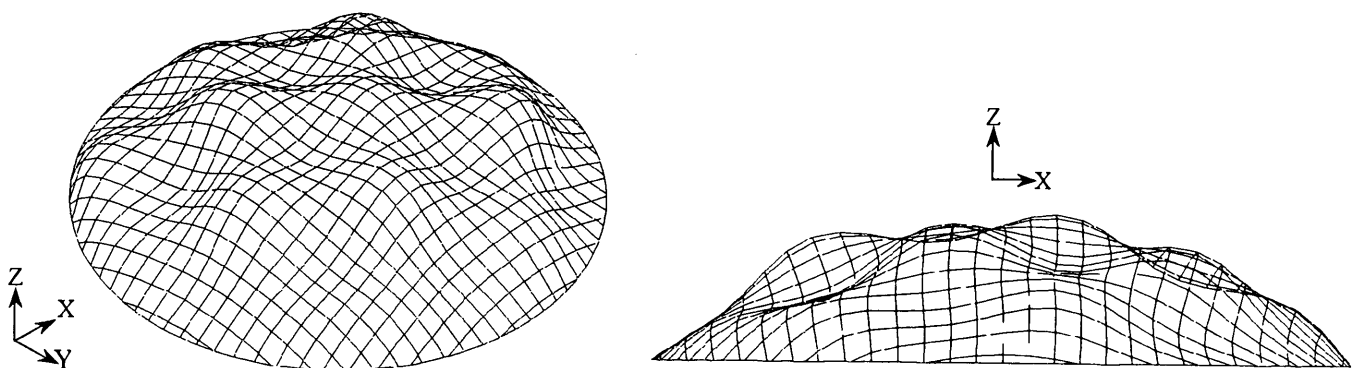


図 2.3.10 19 次モード形状

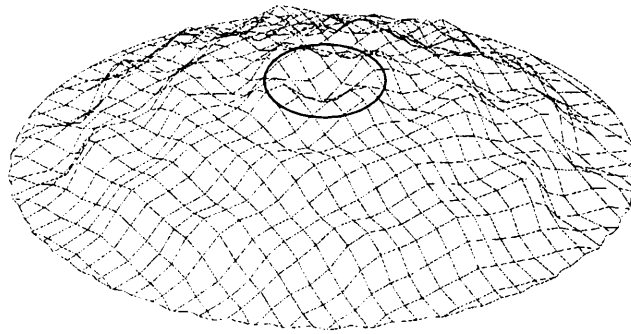


図 2.3.11 111 次モード形状

本解析例として取り上げた単層格子骨組構造の振動モードは、格子がせん断方向に振れるモードが多く複雑な形状をしているが、この解析例からも 2. 3. 1 で述べた、

- (1) 面外方向の振動が発生し易く、地震動などの水平方向入力によっても、上下方向の応答が生じ易いこと
- (2) 非常に高次のモードを含む複数の振動モードが容易に卓越し易いこと
- (3) 異なる振動モード同士の固有周期が近接していること

という大屋根構造の特徴的な振動性状が確認された。

より一般的な単層ドームの構造形式であるラチスドームの振動性状に関しては、7. 2 節でさらに確認する。

2. 4 制振技術の実施例と既往の研究

本節では、大スパン建築構造における制振技術の実施例と、本研究に関わる既往の研究をまとめる。

2. 4. 1 実施例

ここでは、大スパン建築構造における制振技術の実施例を、大屋根構造とその他の大スパン建築構造に分けて述べる。

(1) 大屋根構造

スパン 222m の日本初の開閉式ドームである「福岡ドーム」は、地震時における 3 段の屋根パネルの接触を防止するために屋根頂部にオイルダンパーが設置されている²⁻²⁸⁾。

2001 年 7 月にオープンした開閉式屋根を有する「豊田スタジアム」においては、地震時における応答低減のために、開閉式屋根の端部にオイルダンパーが設置された。ダンパーの設置により、応答値が 60～80% 程度に低減されたことが報告されている²⁻³³⁾。

地場産木材であるスギ丸太とスギ集成材、鉄骨を用いた木質ハイブリッド構造の「愛媛県武道館」では、屋根面ブレースの一部に粘弾性ブレースを用いている²⁻³⁴⁾。

「静岡サッカースタジアム・エコパ」にでは、スタンド前方に設けられた耐風ロッドの定着部に、竹内ら²⁻³⁵⁾により新たに開発されたバネ付き粘弾性体によるテンション構造用付加減衰機構が設けられ、地震時・強風時における屋根架構の応答低減が図られた²⁻³⁶⁾。

2005 年に完成した「しもきた克雪ドーム」では、地震時における応答せん断力を低減するために、合計 16 本の極低降伏点鋼を用いた座屈拘束ブレースがデッキ下に設置されている(図 2.4.1 参照)。制震ブレースを採用したことにより、地震による屋根面の応答加速度は、20～30% 低減されたことが報告されている。なお、設計時には TMD の採用も検討したが、高次までのモードに対応できないという理由で採用が見送られている²⁻³⁷⁾。

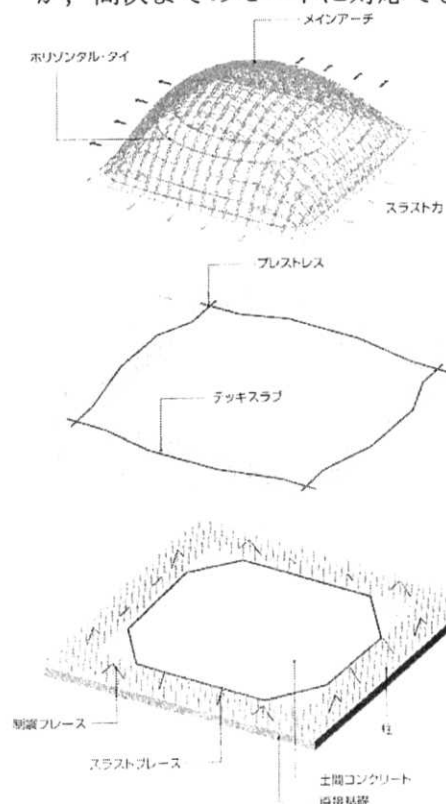


図10 大成式座屈拘束ブレース

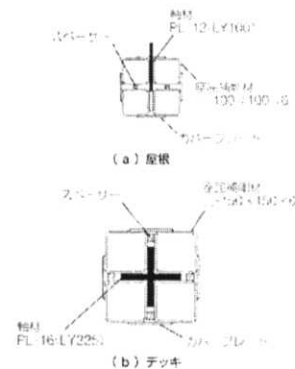


図11 制震ブレース断面

図 2.4.1 しもきた克雪ドーム構造ダイアグラムと制震ブレース²⁻³⁷⁾

強風時における吊り屋根の制振を目的としたものに、「国立代々木競技場第1体育館」がある²⁻²⁸⁾。制振装置として、オイルダンパーが12個設置されている。

同じく強風時における制振を目的としたものとして、1998年に長野市で開催された冬季オリンピックのスピードスケート会場として鹿島建設(株)が施工した「長野オリンピック記念アリーナ」(写真2.4.1)がある²⁻³⁸⁾。本物件は大断面集成材と鋼板から構成される複合部材を吊り材として用いたスパン80mの大型吊り屋根構造であり、強風時の振動が問題となった。そこで屋根の四隅にオイルダンパーの設置を検討し、三次元の風応答解析を実施したところダンパーの設置により最大応答鉛直変位が約30%低減し、全体的に揺れが小さくなることが分かった。またダンパーの設置によりねじれの変形も減少することが分かり、実施物件に採用された。

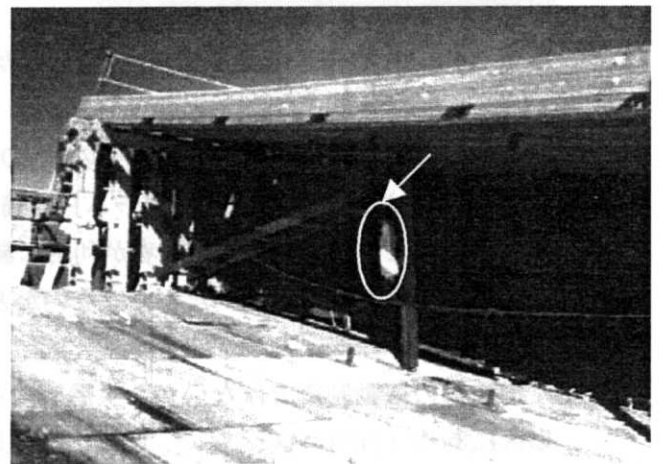
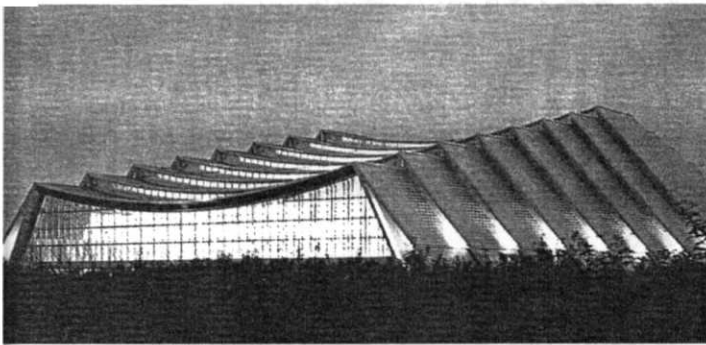


写真 2.4.1 長野オリンピック記念アリーナ外観とダンパー設置状況

制振ではなく、免震機構が採用された例として、2001年3月に竣工した「山口きらら元気ドーム」がある²⁻³⁶⁾、²⁻³⁹⁾。本ドームの屋根架構は、38基の鉛プラグ入り積層ゴム支承で支えられ(写真2.4.2参照)、免震ドームとすることで以下に示す効果を上げている。

- ①温度変化による変形を吸収し、屋根架構及び下部構造に生じる温度応力を低減する。
- ②免震効果により水平と上下方向の地震時応力を低減する。
- ③下部構造の柱の長さの違いによる短柱の応力集中及びそれに伴う剛性偏心を防止する。

同じく免震機構が採用された例として、張弦梁構造の屋根を持つ「京都アクアリーナ」がある²⁻³⁶⁾。免震装置は屋根構造と支持構造の境界部に挿入されている。屋根部分を免震構造とすることにより、下部構造への地震時水平力を低減されるとともに、屋根架構の各部への地震時応答量を低減することが出来た。

さらに、新設ではないが免震支承を大屋根構造に用いた例として、阪神淡路大震災時にトラス接合部が大きな被害を受けた「阪神競馬場の震災復旧工事」において一部の支承に免震装置を採用した²⁻⁷⁾(写真2.4.3参照)。支承の種類は滑り支承に加えて積層ゴムを設置し、復元力を持たせた。

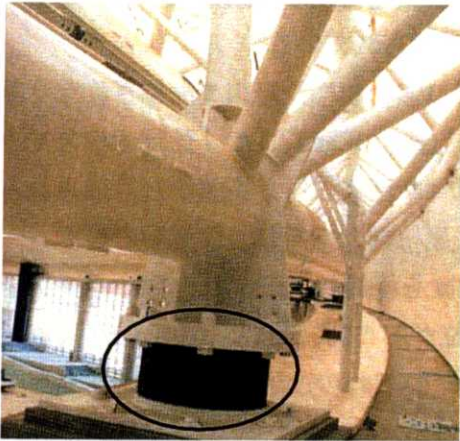


写真 2.4.2 山口ドーム免震支承²⁻³⁹⁾

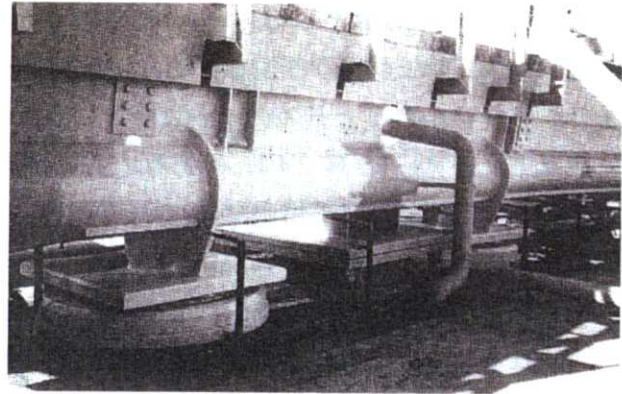


写真 2.4.3 免震支承を用いた震災復旧工事²⁻⁷⁾

今のところ、大屋根構造の制振への TMD の適用例は、国内外を問わず無いようである。

その理由は、「しもきた克雪ドーム」の箇所で述べたように、複数の振動モードを効率的に制御することが可能で、設計者が利用し易い形で整理された TMD 設計手法が、現在までのところ提案されていないためではないかと思われる。

構造物の振動制御ではないが、大屋根構造に制振技術が用いられた例として、東京都江東区にある「有明コロシアム」で、降雨による騒音を防止するために、板厚 0.5mm 前後の制振鋼板が約 440tf 用いられている²⁻⁴⁰⁾。また、前述した「福岡ドーム」において、開閉屋根を全閉時において気密性や水密性を保持しながら、パネル間では必要なクリアランスを確保させるために、アクティブシールを用いている²⁻⁴⁰⁾。

(2) その他の大スパン建築構造

TMD を大スパン建築構造へ適用した例としては、2. 2. 2 及び 2. 2. 3 で述べた事例のほかに、例えば以下のものがある。これらは主に、居住性の向上などを目的とした環境振動に対する制振の事例である。

屋上が運動場で 6 階が講堂である鉄骨造 7 階建て校舎において、屋上の大スパン床スラブ (20.5×18.75m) の振動応答を低減するために TMD が設置された例がある。さらに鉄骨造の階段で上部がピン支承、下部が磁気浮上となっているため、歩行時の揺れを低減するために TMD が設置された²⁻⁴¹⁾。

トラス構造の大スパン片持梁で支えられた鉄骨造の観覧スタンドで、居住性能を向上させるために TMD を設置し、非制振の場合と比較して、居住性ランクを 1 ランク向上させることができたとの報告がある²⁻⁴²⁾。

36m スパンの鉄骨造のアーチ形式骨組を用いた渡り廊下で歩行者振動を低減させるため

に TMD を設置し、応答が大幅に低減できたとの報告がある²⁻⁴³⁾。これについては、本論文中の Appendix1.でも詳しく紹介している。

スタンディングホール、パーキングエリア、オフィスからなる複合施設の湊町リバープレイスの上層部は 45 度にオーバーハングされた逆正八角錘形の骨組となっている。オーバーハング部にあるオフィスの居住性能を向上させるために TMD が設置された²⁻²⁴⁾。

その他、大阪梅田スカイビルの渡り廊下にも TMD が設置されたとの報告がある。

2. 4. 2 既往の研究

TMD を含む大屋根構造の応答制御に関する既往の研究全般については、新宮らによる文献(2-44)、(2-45) に詳しい。

ここでは、(1) 大屋根構造の振動性状全般に対して特に本論文の内容と関係の深い研究、(2) TMD を用いた大屋根構造の制振に関する研究と、(3) 本研究の特徴である複数の TMD を用いた制振に関する既往の研究をまとめる。

(1) 大屋根構造の振動性状全般に関する研究

山田らは文献(2-46) において、1 次固有振動数がほぼ同じ値になるように調整されたスパン、分割数、部材断面の異なる単層ラチスドームを対象として、形状変数がドームの地震応答性状に及ぼす影響に関する解析的検討を実施した。その結果、単層ラチスドームは高次モードの応答まで励起され易く、分割数が増すあるいはネットワークが密になると、より高次の振動モードまで励起され易くなることが分かった。また単層ラチスドームは高次励起系と見なすことができ、高次励起系の共振応答性状は固有振動数分布特性により説明できることを述べている。

単層ラチスドームにおける刺激係数と固有周期の分布に関して、村田らによる(2-47) 上下地震動を受けるドームの動的応答特性を分析した研究がある。その結果、検討用モデルである 200m スパン剛接合単層ラチスドームにおいて、放射方向ローラー支持の場合に上下方向の刺激係数の大きいモードは 48 次と 58 次の面外変位卓越型モードであり、ピン支持の場合に上下方向の刺激係数の大きいモードは 126 次（面外変位 1 波）と 283 次（面内変位 1 波）と、非常に高次にある振動モードの刺激係数が大きいことが分かった。

大屋根構造で卓越する振動モードに関して、竹内ら(2-48) は、60m スパンの中規模単層ラチスドームを対象モデルとして選択し、デプス／スパン比をパラメーターに検討した結果、デプス／スパン比が 1/50 程度では卓越するモードが逆対称 1 波、逆対称 2 波、逆対称 2.5 波、面内変形の 4 モードにほぼ限定されるという結論を述べている。

ビル等の重層式骨組構造における減衰については文献(2-49) に詳しいが、大屋根構造の減衰については、データ数が非常に少ない。立道は文献(2-36) で、既往の大屋根構造における計測データを基に分析を行っている。その結果、大屋根構造の減衰定数が振幅に依存すること、スパンが大きく周期が長くなるほど減衰定数が大きくなること、さらに屋根仕上げの付加により減衰定数は増加する傾向にあることを示し、大屋根構造の減衰の要因としては、接合ボルトや各種部材間の摩擦減衰が大きな割合を占めていることを明らかにしている。

立道は文献 2-50) で、東京都の屋内体育施設「光が丘ドーム」、富山県の「総合運動公園」屋内グラウンド、「福井県立恐竜博物館恐竜ホール」、「北九州メディアドーム」の振動計測結果を示している。その中で、「総合運動公園」屋内グラウンドと「福井県立恐竜博物館恐竜ホール」では、屋根仕上げ前後における減衰定数を比較している。

文献 2-51) には、スパン 134m の鉄骨立体トラスドーム「名古屋国際展示場」における振動計測結果が示されている。自由振動実験の結果得られた減衰定数は約 4.3%と推定されている。

近年の大屋根構造の振動計測結果については、渡邊ら²⁻⁵²⁾による岡山ドームの常時微動計測により減衰定数を推定した研究や、新宮ら²⁻⁵³⁾によるスパン 71m, ライズ 14.2m を持つ鉄骨円錐形シェルの千葉県総合運動場体育館の計測結果がある。両者ともに減衰定数は 2.0%程度である。

大屋根構造の減衰については、今後さらに計測データ数を増やしていく必要があると思われる。

(2) TMD を用いた大屋根構造の制振に関する研究

大屋根構造への TMD の適用に関する研究で最も早いものは、加藤ら²⁻⁵⁴⁾による両端固定されたフィレンディールアーチに TMD を適用し、風の吹き上げによる変動荷重を想定し、時刻歴応答解析により TMD の制振効果を確認したものがある。

山田ら²⁻⁵⁵⁾は、大屋根構造が水平方向の入力を受けたときに上下方向の応答が大きくなることに着目して TMD を上下方向に設置し、図 2.4.2 に示す簡単なモデルを用いて、TMD の制振効果を理論的に検討した。その結果、TMD システムを効果的に働かせるためには、構造物の固有周期と TMD の固有周期の比が重要であることが明らかになった。

薛ら²⁻⁵⁶⁾は、図 2.4.3 に示すような縦方向に動作する TMD を製作し、1000mm スパンを持つプラスチック製アーチを用いて、自由振動実験と阪神淡路大震災における地震波を用いた振動台実験により、周波数領域と時間領域で TMD の制振効果を確認した。TMD の動作方向による制振効果の違いは、求心方向と鉛直方向で大きくは異ならないが、求心方向の場合の方がより効果的であることを明らかにしている。

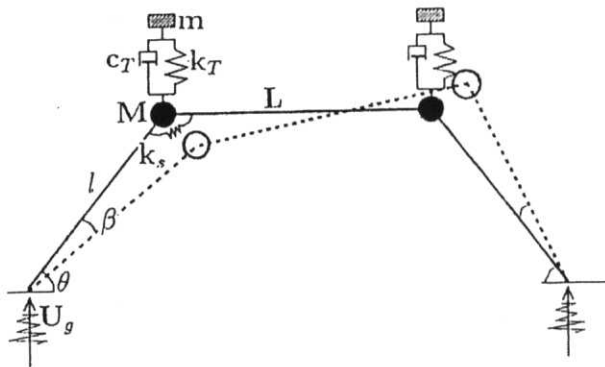


Fig. 1 解析用モデル

図 2.4.2 簡易モデル ²⁻⁵⁵⁾

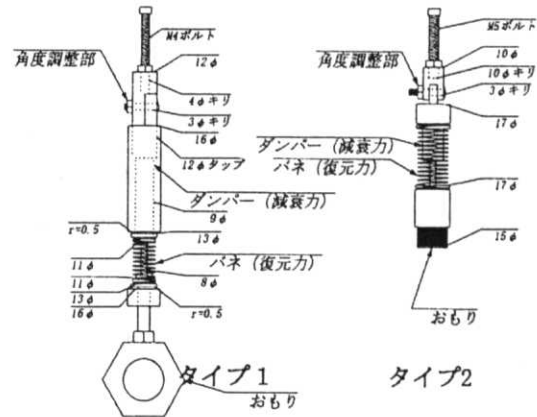


図 2. 1 TMD 全体図

図 2.4.3 縦方向 TMD ²⁻⁵⁶⁾

立道 ²⁻⁵⁰⁾ は、写真 2.4.4 に示す厚さ 0.15cm のステンレス板で製作した 91.2cm スパンのアーチ模型を用いて、振動台実験により TMD の制振効果を確認している。TMD はピアノ線によるバネと、鉛の錘を用いて作成され、バネ先端の錘は試験体に対して自由方向に揺れるように設定されている。さらに図 2.4.4 に示すスパン 84m、ライズ 23m の円筒シェルモデルに TMD を適用し、周波数応答解析と時刻歴応答解析により、TMD の制振効果を確認している。解析結果から、TMD は入力地震動の特性によっては、地震開始直後の主要動の制振効果を期待することは難しいと述べている。

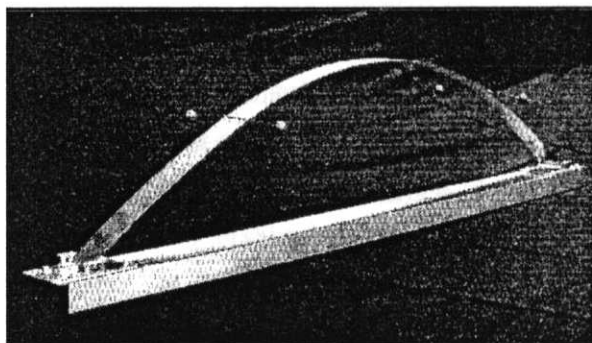


写真 2.4.4 アーチ模型 ²⁻⁵⁰⁾

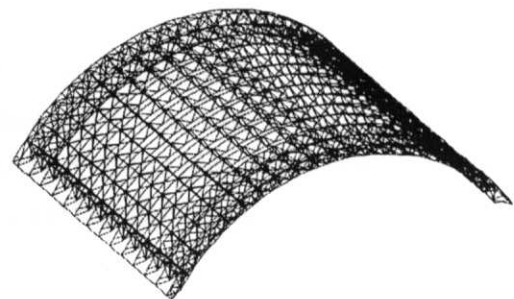


図 2.4.4 円筒シェルモデル ²⁻⁵⁰⁾

山田らは ^{2-57) ~2-59)}、円形平面からなり、低次から高次のモードまで非常に近接した固有振動数を持つスパン 90m、ライズ 15m の単層ラチスドームを対象として、TMD の配置、動作方向、ドームの 1 次固有振動数に対する TMD の固有振動数の比をパラメーターとして、制振効果を解析的に検討した。TMD の設置タイプは、図 2.4.5 に示す分散型と集中型の 2 種類である。設置タイプについて、TMD の固有振動数を水平入力時におけるドームの頂点付近の卓越振動数に合わせたとき、両者の違いによる制振効果の差はほとんど見られなかつ

た。また、動作方向では、求心方向と鉛直方向の違いによる効果の差はほとんど見られなかった。TMD の設定で、TMD の固有振動数は上下入力時の卓越振動数に合わせるよりも、水平入力時の卓越振動数に合わせて設定する方が効果的なことが明らかとなった。

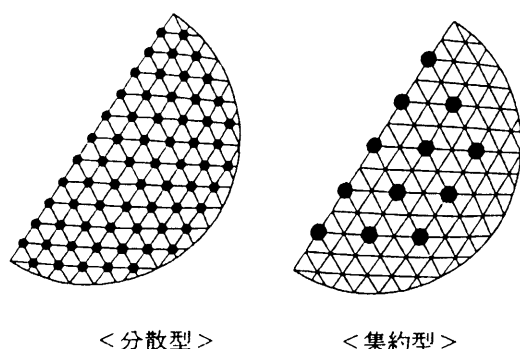


図 3 TMD の設置タイプ

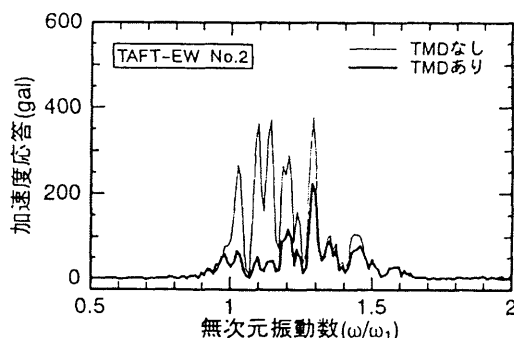


図 10a 頂点付近のフーリエスペクトル ($R_w = 1.10$)

図 2.4.5 単層ラチスドームにおける TMD の設置タイプとフーリエスペクトル ²⁻⁵⁷⁾

以上で報告された研究例は、幾つかの限られた大屋根構造モデルにおける TMD の制振効果を明らかにしたものであるが、ビル等の重層式骨組構造への設計手法をほぼそのままの形で用いたものであり、2.3 節で述べたような大屋根構造に特徴的な振動性状を特に考慮して提案されたものではない。

既往の研究のうち、特に文献 2-57) ~2-59) は、固有振動数が近接する複数の振動モードを持つ 3 次元的な大屋根構造を対象としたものであり、本論文で述べる研究内容に最も近いものであるが、TMD 配置の理由が明確でなく、理論的な根拠が述べられていない。TMD の固有振動数に関してもパラメトリックスタディーを実行したものであり、同調比や減衰定数のパラメーター設定法を明確に提示するには至っていない。

上記のそれ以外の研究 ^{2-50), 2-55), 2-56)} においても、単一の振動モードを制御対象としているにも関わらず、複数個の TMD を用いているが、その理由は特に述べられていない。

そのため、実際の大屋根構造を対象として、効果的な TMD の制振設計をするためには、それらの振動性状を考慮した設計法を新たに提案し、設計手法を確立するために様々な検討を進めていく必要があると思われる。

本論文中では特に触れていないが、筆者は、研究の初期段階で、200m スパンのアーチモデルを対象にして、時刻歴応答解析により調和地盤外力に対する TMD の制振効果を確認している ²⁻⁶⁰⁾。また TMD の動作方向に対する検討を行った結果、上述した既往の研究例と同様に、放射方向に設定した場合に最も制振効果が高いが、鉛直方向に設定した場合との差は小さいことが分かった。

以上の理由から、本論文中でも TMD の動作方向は、設置位置における曲面の法線方向に

設定している。

大屋根構造ではないが、72.8mの高さを有する鉄骨トラス形状の通信用鉄塔における制震補強に関する研究として、加藤らによる研究²⁻⁶¹⁾がある。TMDの重量は鉄塔の総重量の約6%であり、時刻歴応答解析の結果、相対変位と部材軸力ともに大きな低減効果を有することが報告されている。

(3) 複数のTMDを用いた制振に関する研究

ここでは、大スパン建築構造に限定せずに、本研究の特徴である複数のTMDを用いた制振に関する既往の研究内容を説明する。

TMDを複数個並列に複合した研究で最も早いのは、背戸らによる二重TMDの研究であると思われる。背戸らは文献²⁻⁶²⁾で二重TMDの最適調整条件式を導いた。さらに、通常のTMDの欠点である、主振動系の固有振動数の変動による制振効果の低下が二重TMDの使用により小さくできることを示した。また減衰係数の変動に対しても、二重TMDを用いることにより、制振効果に与える影響を小さくできることを示した。

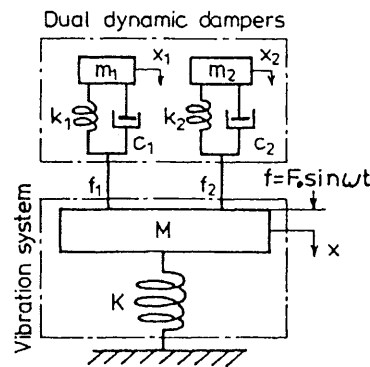


図 1 2 個の複合動的吸振器を持つ振動系の力学モデル

図 2.4.6 二重 TMD モデル²⁻⁶²⁾

背戸らは、文献²⁻⁶³⁾で有限要素法、モード解析法と TMD による多自由度系の制振法を融合した構造物の制振設計法を提案し、平板モデルを対象として二重 TMD の制振効果を解析的に確認した。文献²⁻⁶⁴⁾では磁気ダンパを用いて二重 TMD の模型を製作し、平板モデルに対してインパルスハンマを用いて実験的に制振効果を確認した。背戸らは、二重 TMD を防振ハンドルや配管系など様々な構造物²⁻⁶⁵⁾、²⁻⁶⁶⁾に適用している。

背戸はさらに、二重 TMD を四重 TMD や六重 TMD に拡張し、TMD の設置による変位振幅曲線の各ピークのバラツキを抑え、共振ピークを抑えるための評価関数を用いて、多重

TMD の最適設計式を導いた²⁻⁶⁷⁾。六重 TMD の最適設計式の詳細は 3. 4. 3 で述べる。これら多重 TMD は、主振動系の固有振動数の変動や減衰係数の変動に対するロバスト性に優れていることを述べている。

背戸は文献²⁻⁶⁷⁾で、多自由度系における複数の振動モード制振のための TMD の設置場所を示しているが、本論文の研究内容である「複数の TMD を用いた場合における主振動系の固有振動数の変動に対するロバスト性を活かして、複数のモードをまとめて制御する」という考え方ではなく、あくまで一つ一つのモードを個別に制御するという考え方に立ち、制振モードに最も効果的で、他のモードに干渉な場所を配置位置としている。

背戸らはさらに文献²⁻⁶⁸⁾で、複数の振動モード制振時に、複数の TMD（ここでは多重 TMD ではなく、通常の TMD を用いている）を設置することにより、最適調整条件が崩れることを考慮して、感度解析法を用いた調整法を提案している。

Igusa ら^{2-69), 2-70)}は、複数の TMD の固有振動数を、構造物の制振モードの固有振動数の周りに分布させる手法の DTMD(Distributed Tuned Mass Dampers)を提案し、通常の TMD と比較して、広帯域入力に対する応答を低減させるのに効果的であることを述べている。論文中では、白色雑音入力に対する構造物の 2 乗平均応答を最小にすることを目標として設計パラメータの設計式が示されている。

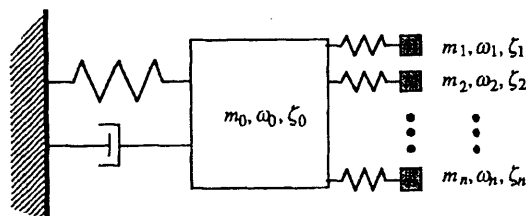


Figure 1. System configuration

図 2.4.7 DTMD モデル²⁻⁶⁹⁾

藤野ら²⁻⁷¹⁾は、複数の TMD の固有振動数を、制振モードの固有振動数の周りにあるバンド幅を持たせて分布させた MTMD(Multiple Tuned Mass Dampers)のバンド幅と減衰定数をパラメータとして、調和外力に対して数多くの数値シミュレーションを行い、周波数応答特性を調べた。その結果、MTMD のバンド幅と減衰定数には最適値が存在することと、MTMD のパラメータ変動に対するロバスト性を示している。MTMD の個数が制振効果に与える影響については、個数を増やすことにより効果を高めることができるが、ある程度以上の数（本論文では 11 個）になると効果は変わらないことを述べている。さらに MTLTD(Multiple Tuned Liquid Dampers)に対しても数値シミュレーションを行い²⁻⁷¹⁾、TLD は振幅が大きくなるに従い減衰が大きくなるので、MTLD の優位性は小振幅に限定されるという新たな知見を述べている。

阿部・藤野²⁻⁷²⁾は、前述した研究結果²⁻⁷¹⁾を基に発展させ、MTMDの制振効果はMTMDの減衰が低いときに特に有効であることに着目して、まず減衰を無視した状態で、MTMDの基本的特性をモード特性の摂動解に基づいて検討した。論文中では、MTMD—構造物系の全てのモードに全てのMTMDが強く連成する状態を基準に最適バンド幅を求め、同調比に関するロバスト性の定量的な指標も求めている。一般的なTMDの設計における摂動解の適用については文献²⁻⁷³⁾に詳しい。文献²⁻⁷⁴⁾、²⁻⁷⁵⁾では、個々のMTMDの減衰を考慮した状態で摂動法を展開し、自由振動（モード減衰）、自励振動、調和応答におけるMTMDの性能評価式を示した。

藤野・L. M. SunはMTLDを用いて振動台実験と、TLD—構造物の相互作用に関する実験を行い、同調比に多少の誤差が生じた場合においても制振効果の劣化が生じないことを示した²⁻⁷⁶⁾。

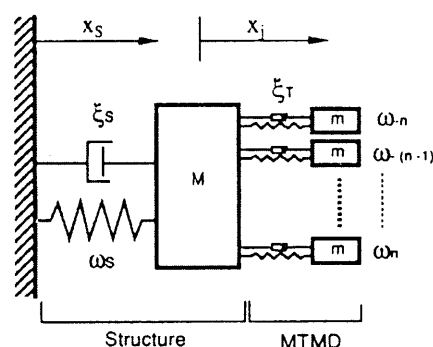


Fig.1 MTMD-structure system

図 2.4.8 MTMD モデル²⁻⁷²⁾

阿部・藤野による研究²⁻⁷²⁾、²⁻⁷⁴⁾、²⁻⁷⁵⁾は、MTMDバンド幅が制振効果に与える影響に着目している点が特徴である。さらにMTMDの設計式を導く根拠が明確である。さらに個々のMTMDの減衰定数と質量は同じであるため、MTMDの個数と合計質量を決定すれば、提示された設計式に従い、個々のMTMDの設計パラメーターが容易に決定できる利点がある。

複数個のTMDを用いたその他の研究としては、Ahsan Kareemら²⁻⁷⁷⁾が、風荷重と地震荷重の不規則励振下におけるMTMDの性能を、MTMDの個数、減衰定数、MTMD質量分布、固有振動数間隔を対象としたパラメトリックスタディーにより検証している。その結果、MTMDの制振効果は質量分布と周波数間隔に関わらずほぼ同等であること。また、MTMDバンド幅がロバスト性と制振効果に及ぼす最も重要なパラメーターであること、最適バンド幅の近傍においてはMTMDの減衰の大きさが制振効果に与える影響は小さいことなど、調和外力の場合と定性的な性質は一致していることを示している。

MTMDの最適配置に関する研究として、Genda Chenら²⁻⁷⁸⁾は、6層の多層式骨組構造

を対象に、地震外力を受けたときの最適配置に関するシミュレーション手法を開発した。ここでいう Multiple の定義は、複数の制御モードに対して、複数の床面に TMD が分散して設置されるという意味であり、各制御モードにおいては複数の床面に設置された複数の TMD の固有振動数は全て同じであるため、阿部らが提案した Multiple とは意味が異なっている。論文中で、最適化の指標は全床面における加速度低減効果を用いている。観測地震波を用いた時刻歴応答解析の結果、MTMD は単一の TMD に比較して最大加速度の低減効果に優れ、従来の単一 TMD の問題点であった衝撃的な地震荷重を受けたときにおける最初の応答ピーク低減効果にも優れることを示した。

複数の TMD を大スパン構造の振動制御に適用した例として、Jong-Dar Yau ら²⁻⁷⁹⁾は、高速鉄道が通過する連続橋における 1 次と 2 次の 2 個の振動モードを制御するために 3 個の TMD を分散的に設置した。ただし、ここでのパラメーター設定は通常 TMD の設計法である。解析の結果、TMD システムは通過する列車の荷重により引き起こされる連続橋の主要な共振ピークを効果的に抑えることができることが明らかとなった。

大スパン構造におけるアクチュエータと周辺装置の最適配置の問題については、Eric Ponslet ら²⁻⁸⁰⁾が、組み合わせ最適化問題に対する手法を調査し、遺伝的アルゴリズムを用いた手法を提案しているが、内容は手法の提案に留まっている。その他の大スパン構造における制振装置の配置に関しては、Thomas P. Murphy ら²⁻⁸¹⁾が、メインスパン 655m の吊り橋を対象として鋼材履歴ダンパーを用い、ダンパーを吊り橋全体の重要箇所分散的に設置することで、地震時に構成部材に働く最大応力を低減させることができると述べている。

一般的に用いられている通常 TMD の設計上の注意点として、3.2.3 でも述べる同調比に対するロバスト性の欠如があるが、1998 年に強風時における居住性の向上を目的として設置された TMD で、2002 年までの観測記録を基に、同調状態の経年変化と制振性能の検証を行った中村らによる研究²⁻⁸²⁾がある。

上述の研究のうち、本論文における複数の TMD のパラメーター設定法は、阿部・藤野による MTMD の研究結果^{2-72), 2-74), 2-75)}を基盤としている。

しかし、阿部・藤野を含めて、背戸、Igusa らの研究は全て単一の振動モードに対する設計法を示したものであり、本論文で対象とする複数の振動モードの制振のためには、新たに設計法を提案する必要がある。

2. 5 研究目的

2. 1 節～2. 4 節で述べたことを背景とし、本研究の目的を以下で述べる。

大スパン建築構造、特に曲率を持った大屋根構造は軸力などの面内力によって抵抗する形態抵抗構造であり、荷重伝達性能に優れるため、曲げを主な荷重伝達法とする梁構造と比較して自重が軽く、地震時の安全性が高いというのが旧来の認識であった。

しかし、「2. 2. 1 大屋根構造の地震被害」で述べたように、最近発生した大震災の調査報告によると、決して無視することのできない様々な被害が生じていることが分かった。特に天井材や吊り物の落下被害が多いことは、近年注目されている大屋根構造の問題点の一つである。これらの構造物は地震時における避難場所として設定されることが多いが、構造体の軽微な損傷や天井材・吊り物の落下被害など、仮に構造体の大きな被害が見られない場合においても、避難場所としての使用が出来ないケースが多いことは問題である。

また地震被害以外にも、大屋根を持つアリーナ施設で、強風による屋根面の振動により透過光や反射光が振動し、競技中の選手の視覚障害を引き起こす場合があるなど、新たな被害事例も報告されている。

さらに、「2. 2. 2 橋梁の環境振動被害、及び2. 2. 3 大スパン床スラブの環境振動被害」で述べたように、その他の大スパン建築構造においても、近年増加する傾向にある大スパン床スラブを中心に、交通振動や歩行者振動などの環境振動に対する振動被害が生じていることが分かった。これらの被害に対する対策としては、TMD(Tuned Mass Damper)が用いられることが多い。大スパン床スラブは、サスティナブル建築などの社会的な要求や、建築用途のコンプレックス化などにより、今後ますます増加するものと思われる。さらに社会の発展により、今までに無い新たな振動源が発生する可能性もある。

以上より、大屋根構造や大スパン床スラブなど大スパン建築構造に対する制振技術を開発することの必要性及び重要性が明らかとなった。

一方、「2. 4 制振技術の実施例と既往の研究」で述べたように、大スパン建築構造のうちで特に大屋根構造に対する制振技術に関しては、ビル等の多層式骨組構造と比較すると、実施例と既往の研究報告ともに例が少なく、今後の発展が期待される分野である。

そこで、大スパン建築構造に対する新しい制振設計の手法を開発することを目指した。制振装置は、これまで建築土木構造物の制振に実績のある TMD を用いることとする。制振装置として TMD を選択した理由は、TMD が特に大スパン軽量構造物の制振に対する実績に優れていること、TMD は設置にあたり支点が必要でないため設計の自由度が高く、形状

が複雑で意匠性に対する要求の高い大屋根構造への適用性に優れていると思われるためである。さらに既存構造物の制振補強に対する施工性にも優れていると思われる。

一方、TMD の大スパン建築構造への適用に関して、大スパン床スラブや歩道橋などへの適用例は多いものの、大屋根構造での実施例は今のところまだ無い。2. 4. 1 でも述べたが、ある事例では設計時に TMD の採用も検討されながら、高次のモードに対応できる設計法がないという理由で採用されなかったのは残念なことである。

2. 4. 2 で述べたように、TMD の大屋根構造への適用に関する既往の研究について、幾つかの報告があるが、従来の重層式骨組構造に対する設計手法をほぼそのままの形式で準用したものであり、大スパン建築構造が持つ特徴的な振動性状を考慮して新たに提案されたものではなく、あくまで TMD の制振効果を示すにとどまっている。複数の TMD 配置やパラメーター設定法に関しても、理論的な根拠が明確でない。

また、固有振動数にあるバンド幅を持たせて設定した複数の TMD の設計法についても、これまでに幾つかの研究報告があるが、これらの研究は全て多層式の骨組構造などを想定し、単一の振動モードに対する制振設計法を示したものであり、本論文で対象とする大スパン建築構造の制振のためには、新たに設計法を提案する必要がある。

大スパン建築構造の中で、特に大屋根構造は「2. 3 大スパン建築構造の振動性状」で述べたように、重層式骨組構造と比較して、幾つかの大きく異なる振動性状を持つ。本研究ではこれらのうち、2. 3. 2 と 2. 3. 3 でも確認した、以下の 2 点に特に着目し、TMD を用いた新しい制振設計手法を提案する。

- ・かなり高次のモードを含む複数の振動モードが卓越し易いこと
- ・複数の振動モードの固有振動数が近接していること

以上まで述べた背景を受けて、本研究の目的を以下のように設定している。

固有振動数の近接した複数の振動モードが励起し易い特徴を持つ大スパン建築構造の振動性状に適した新しい TMD の制振設計の手法を提案し、その効果を解析的及び実験的に確かめること。

本論文では特徴的な振動性状を持つ大屋根構造への適用を想定した研究を中心に報告するが、もちろん固有振動数の近接した複数の振動モードを制御目標とする大スパン床スラブや、その他の建築構造への適用も可能である。大スパン鉄骨造渡り廊下の床振動制御に適用した例について Appendix1. で述べる。

第 3 章 単一振動モード制御のための 既往の TMD 設計法のまとめ

第3章 単一振動モード制御のための既往の TMD 設計法のまとめ

本章では、従来一般的に用いられている Den Hartog による最適設計式を用いた通常 TMD の設計法と、既往文献 3-1) により提案された MTMD の設計法をまとめる。両者ともに、制振設計に対する基本的な考え方は、外力に対して大きく励起する特定の振動モードを制御するものである。そのため、複数振動モードを制御する場合においても一つ一つのモードを個別に制御する方法であり、本論文で提案する複数の振動モードをまとめて制御する考え方と異なっている。しかし、次章で提案する分散型 MTMD においても、単一振動モード制御時における MTMD パラメーター設定法を応用したものであり、基盤となるものであるため、本章で詳しく述べる。

3. 1 TMD 基礎理論

本節は主に、文献 3-2) で述べられた内容を要約したものである。

(1) TMD による振動制御の考え方

線形構造物の応答は、モード解析法によって各固有振動モードの重ね合わせで表される。そのため構造物の振動制御を行う場合、構造物の応答に大きく寄与している特定の振動モードの応答制御を考えればよい。

n 次モードに対する周波数応答関数は、以下の式で表される。

$$|H_n(i\omega)| = \frac{D_n}{M_n \omega_n^2} = \frac{D_n}{K_n} \quad (3.1-1)$$

ここで、

H_n : 周波数応答関数

M_n : モード質量

K_n : モード剛性

D_n : 動的応答倍率

構造物の振動制御において、(3.1-1)式の分母であるモード質量あるいはモード剛性を大きくする考え方もあるが、これらは構造物の静的設計に影響を及ぼすこととなるため一般的ではない。それに対して(3.1-1)式の分子の動的応答倍率を小さくすることにより、構造物の振動制御を行う考え方がある。図 3.1.1 に動的応答倍率と減衰の関係の模式図を示す。このようにモード減衰比を大きくすることにより、構造物の共振時における振動応答を低減することが出来る。この関係を利用したものが減衰付加による振動制御である。

外部エネルギーを用いないパッシブ型の減衰制御としては、オイルダンパーを構造物に直接取り付けする方法が一般的であるが、このときダンパーを支持する支点が必要となり、ダンパーの取り付け位置に制限が生じる。

一方、同じくダンパーで減衰を付加する（振動エネルギーを散逸する）ものに動的減衰器がある。図 3.1.2 に動的減衰器を建物の屋上に設置した模式図を示す。動的減衰器は図に示すように、質量、バネ、ダンパーからなり、支点が不要であるため、設置位置の自由度が高く、より構造物への適用性が大きいという利点がある。

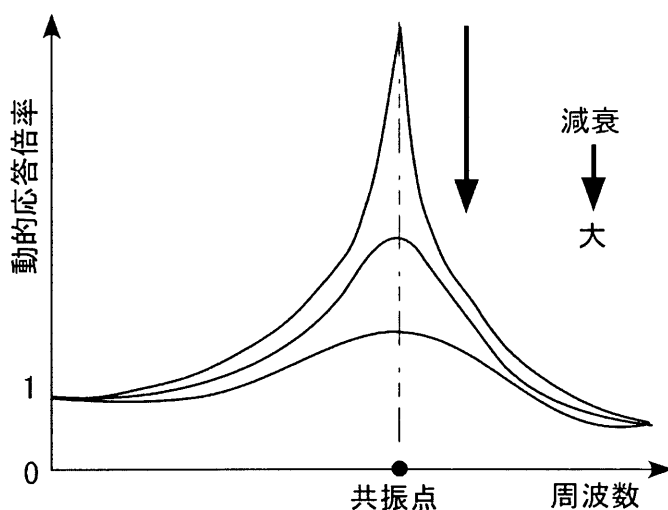


図 3.1.1 減衰の増大による動的応答倍率の低減

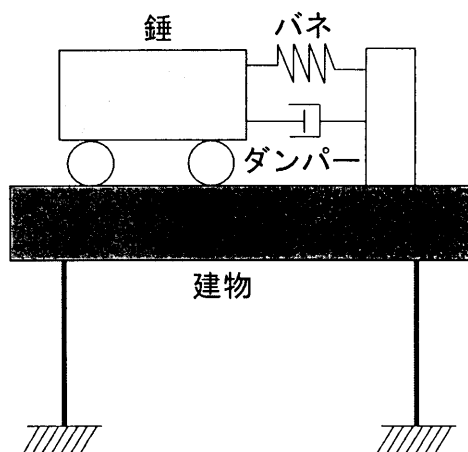


図 3.1.2 動的減衰器模式図

ダンパーでの散逸エネルギーを大きくするためには、動的減衰器にある質量（錘）の構造物に対する相対速度が大きいことが重要となる。そこで動的減衰器の固有振動数を構造物の固有振動数に同調させることが行われ、一般的に TMD(Tuned Mass Damper)と呼ばれる。

TMD は付加質量であるため、構造全体の重量への影響を考慮して、通常は制振対象の質

量に対して 1～2%に抑えているが、通常はその程度で十分な制振効果が得られている。

以上述べた TMD の原理をまとめると、「建造物の振動エネルギーを TMD の質量（錘）の運動エネルギーとして吸収し、TMD にあるダンパーでエネルギーを消散させる付加減衰効果を用いたものである」となる。

（2）TMD の設計パラメーター

TMD が錘，バネ，ダンパーで構成されることから，TMD の設計において無次元化された以下に示す 3 つのパラメーターが用いられる。

①質量比： μ

$$\mu = \frac{M_2}{M_1} \quad (3.1-2)$$

建造物の等価質量 M_1 に対する TMD の質量 M_2 の比である。多自由度系における等価質量の算定については、5. 3 節で詳しく述べる。

建築建造物に使用されている TMD の質量比は、通常 1～2%程度である³⁻³⁾。

②同調比： γ

$$\gamma = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (3.1-3)$$

建造物の制御モードの固有円振動数 ω_1 に対する TMD の固有円振動数 ω_2 の比である。

③TMD 減衰比： ξ_T

$$\xi_T = \frac{C_T}{2M_2\omega_2} \quad (3.1-4)$$

TMD の臨界減衰係数 $2M_2\omega_2$ に対する TMD の減衰係数 C_T の比である。

TMD の設計においては、これら 3 つのパラメーターをいかに設定するかが重要となる。

3. 2 通常 TMD 設計法

本論文では、従来一般的に用いられている TMD 設計法を通常 TMD 設計法と呼び、次節以降で述べる MTMD 法と区別している。本論文での以降で、通常 TMD とは、①制御モードの腹に 1 個の TMD を設置し、②設計パラメーターは Den Hartog による固定点法³⁻⁴⁾などのパラメーター最適設計法に従う方法を指すものとする。

本節で述べる内容は、設計パラメーターの設定に関して、文献 3-2) と文献 3-5) の内容をまとめたものである。通常 TMD の模式図を図 3.2.1 に示す。主振動系（構造物）に、錘、バネ、ダンパーで構成された 1 個の TMD が設置されている。

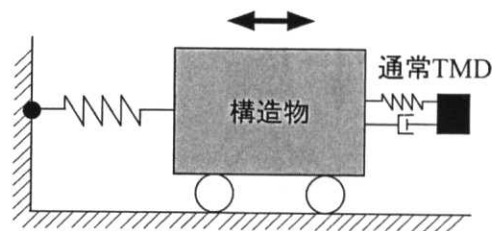


図 3.2.1 通常 TMD 模式図

3. 2. 1 2 自由度系の非減衰強制振動

まず、TMD を設置した系を 2 自由度振動系と考え、図 3.2.2 に示すように主振動系に副振動系が接続された減衰の無い 2 自由度系において、主振動系が $P \cos(pt)$ の調和励振を受ける場合の応答性状を調べる。

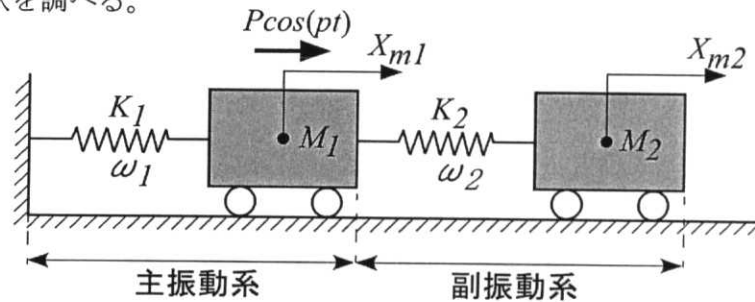


図 3.2.2 2 自由度系非減衰強制振動

図 3.2.3 に主振動系の静的変位で基準化したときの主振動系と副振動系の動的応答倍率と外力周波数の関係を示す。図に示した 2 本の曲線のうち、太線が主振動系の応答倍率を、細線が副振動系の応答倍率を示す。

図中の記号の説明を以下に示す。

P : 外力円振動数

ω_I, ω_{II} : 2 自由度系連成固有円振動数

ω_2 : 副振動系の固有円振動数

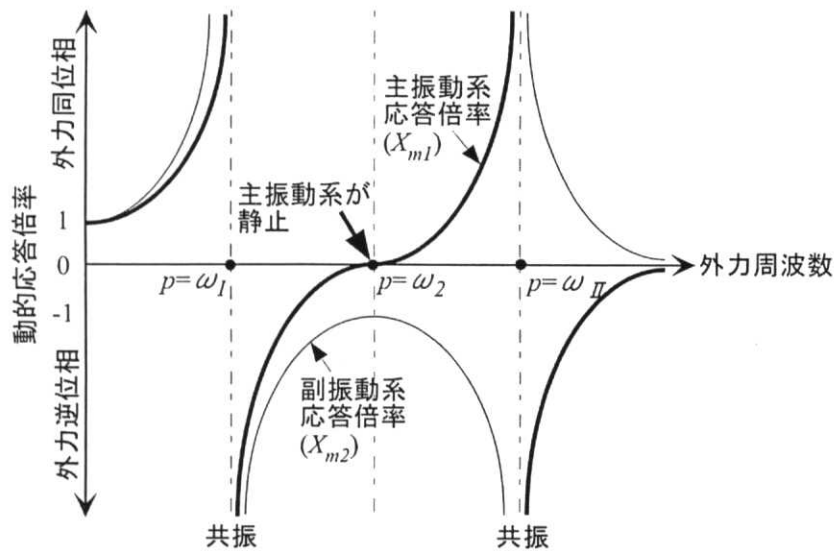


図 3.2.3 主振動系と副振動系の動的応答倍率

ここで注目すべきことは、外力振動数が副振動系の固有円振動数に等しい ($p = \omega_2$) と
き主振動系が完全に静止することである。このとき、副振動系は p/k_2 の振幅で外力と反対
方向に振動する。

また、2 自由度系の連成固有振動数のうち小さい方の円振動数 ω_I の近傍では主振動系と
副振動系が同位相で振動するが、大きい方の円振動数 ω_{II} の近傍では逆位相で振動する。

このように副振動系の固有円振動数をターゲットとする外力周波数に一致させた場合は、
主振動系を完全に静止させることが出来るが、外力が連成固有円振動数に等しいとき 2 つ
の共振点が生じる。そのため、一つの対象周波数以外でも制御効果があるようにするため
には動吸振器に減衰を与える必要がある。そこで、副振動系に減衰が存在する場合の振動
性状を次に述べる。

3. 2. 2 副振動系に減衰がある場合の 2 自由度系の強制振動

次に、図 3.2.4 に示すように副振動系 (TMD) に減衰が存在し、主振動系が $P \cos(pt)$ の
調和励振を受ける場合を考える。実際の TMD はこの形式となる。

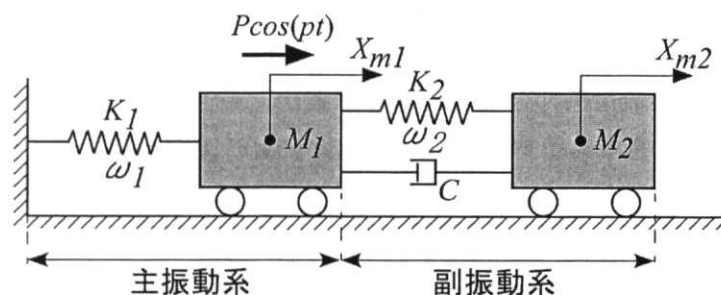


図 3.2.4 副振動系に減衰が存在する場合

分かりやすくするため，主振動系の絶対変位を u_s ，主振動系の変位に対する副振動系の相対変位を u_T ，主振動系に作用する外力を p_s とする。

$$\begin{aligned} u_s &= X_{m1} \\ u_T &= X_{m2} - X_{m1} \\ p_s &= P \cos(pt) \end{aligned} \quad (3.2-1)$$

このとき，2自由度数の運動方程式は以下になる。

$$\begin{bmatrix} M_1 + M_2 & M_2 \\ M_2 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 M_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_s \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.2-2)$$

(3.2-2)式を用いて，副振動系の質量比と同調比を一定値に選び，副振動系の減衰比 ξ_T をパラメーターとして，主振動系の周波数応答曲線を求めると図 3.2.5 のように示される。

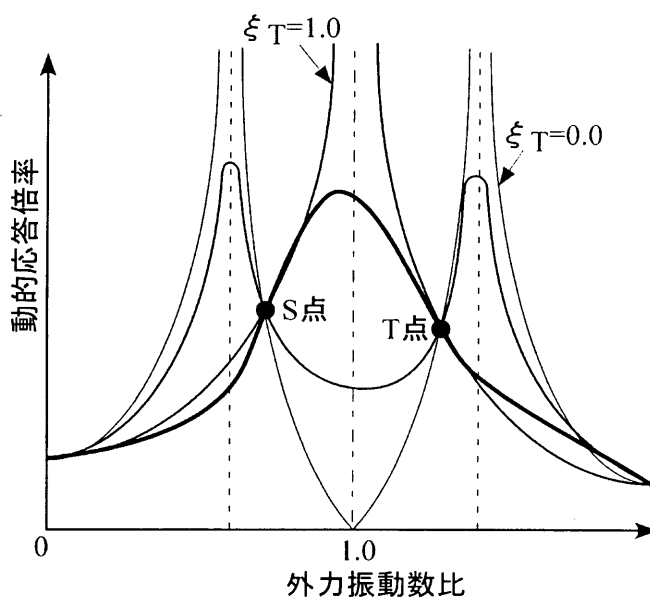


図 3.2.5 副振動系の減衰比をパラメーターとした主振動系の周波数応答曲線

特徴的なことは，副振動系の減衰比によらず応答曲線が必ず通る点が2点（図のS点とT点）あることであり，固定点と呼ばれる。そこでTMDの最大制振効果として，周波数応答曲線のピークをどの振動数に対しても小さくすること，すなわち周波数応答曲線をできるだけ低い位置で平滑にすることが考えられる。具体的には，固定点S，Tの高さが等しく，且つ極大になるときを最適条件として，最適減衰比と最適同調比が求められる。このようにして減衰比と同調比を求める方法をDen Hartogによる固定点法³⁻⁴⁾といい，TMD設計の基本となるものである。

これらの最適減衰比と最適同調比は，外力振動の種類に応じて異なり，調和外力振動と調和地盤振動においては，質量比 μ をパラメーターとして以下の式により求められる。

①調和外力振動

$$(\xi_T)_{OPT} = \sqrt{\frac{3}{8} \frac{\mu}{1+\mu/2}} \quad (3.2-3)$$

$$\gamma_{OPT} = \frac{1}{\sqrt{1+\mu}} \quad (3.2-4)$$

②調和地盤振動

$$(\xi_T)_{OPT} = \sqrt{\frac{3}{8} \frac{\mu}{1+\mu}} \quad (3.2-5)$$

$$\gamma_{OPT} = \frac{1}{1+\mu} \quad (3.2-6)$$

3. 2. 3 通常 TMD 設計上の注意点

図 3.2.6 は調和外力励振を受けた場合における TMD の同調比と減衰比に対する有効減衰を等値線として示したものである（図は参考文献 3-2）より取り上げた）。ここで TMD の質量比 μ は 0.5% とし，構造物の対数減衰率は 0.01 としている。また，TMD の減衰と有効減衰はともに対数減衰率として示している。図より明らかなように，制振効果である有効減衰率 δ_{eff} の値は，TMD の同調比 γ と減衰比 δ_T の両パラメーターの変動に非常に敏感である。例えば構造物の固有振動数の推定に誤差があり，同調比が最適値から 5% ずれた場合には制振効果は約 50% 落ちる。

このように設計パラメーターである同調比および減衰比に対する通常 TMD の制振効果の敏感性，つまりロバスト性の欠如は実構造物への適用において大きな問題となる。

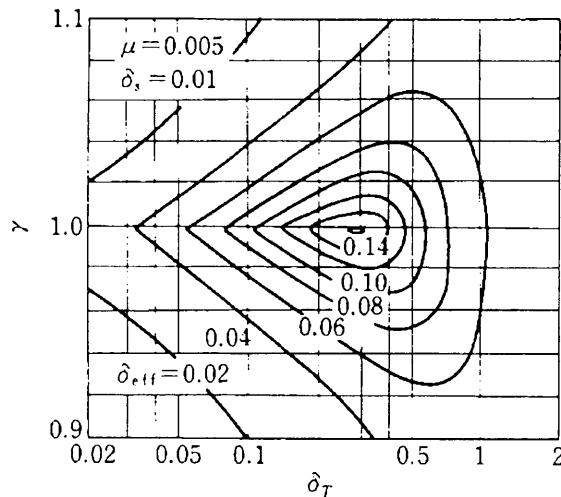


図 3.2.6 通常 TMD のロバスト性の欠如³⁻²⁾

3. 3 MTMD 設計法

MTMD 法は，阿部・藤野により提案され^{3-1), 3-6) ~3-8)}，図 3.3.1 に示すように，複数個の小型の TMD を設置する方法である。複数個の TMD の固有周期を意図的にずらし，ある特定のバンド幅を持たせることにより，①共振点における制振効果が高く，②同調比や減衰比に対するロバスト性に優れるという特徴を持つ。特に②は前節の 3. 2. 3 でも述べた通常 TMD の欠点である設計パラメーターに対する敏感性を減少させるものであり，非常に重要な特性である。

一般的に TMD は取り付けスペースの制約から，TMD の応答をある程度に抑えるため，減衰を最適減衰よりも大きく設定することが多い。そのために減衰比に対するロバスト性は大きなメリットとなる。しかし本論文では，減衰比ではなく，同調比に対するロバスト性に着目し，新しい制振設計法を提案する。そのため，本論文の次章以降では，ロバスト性とは，構造物の固有振動数の変動に対する制振効果の安定性を指すものとする。

また本論文中では，複数個ある MTMD のうち，最大固有振動数から最小固有振動数までの振動数幅を MTMD 設定バンド幅と呼ぶことにする。

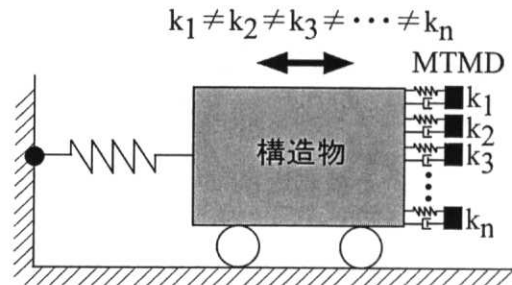


図 3.3.1 MTMD 模式図

3. 3. 1 設計パラメーター

ここでは，文献 3-1) で述べられた設計パラメーターの設定法を要約する。ここで構造物は 1 自由度系である。

MTMD の個数は N 個($=2n+1$)とする。 n は MTMD の番号である。全ての MTMD が構造物と強く連成するために各 MTMD の質量は全て等しく，固有円振動数間隔も全て等しい。図 3.3.2 に MTMD の固有円振動数の振動数軸上での分布を示す。

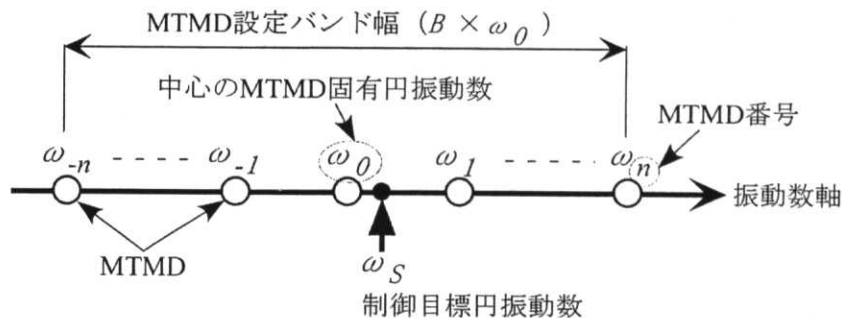


図 3.3.2 MTMD の固有円振動数の分布

中心の MTMD の固有円振動数を ω_0 , それ以外の MTMD の固有円振動数を ω_j とし, 両者の関係を(3.3-1)式で表す。 ω_0 と構造物の固有円振動数 ω_s の関係を(3.3-2)式で表す。式中のパラメーター β は MTMD の固有円振動数間隔を, β_0 は ω_0 と ω_s の間隔を表している。

$$\omega_j = \omega_0(1 + j\beta) \quad (j = -n \sim n) \quad (3.3-1)$$

$$\omega_0 = \omega_s(1 + \beta_0) \quad (3.3-2)$$

MTMD の固有円振動数のバンド幅 B を(3.3-3)式で表す。

$$B = (\omega_n - \omega_{-n}) / \omega_0 \quad (3.3-3)$$

このとき, パラメーター β とバンド幅 B の関係は, (3.3-4)式で表される。

$$\beta = B / (N - 1) = B / (2n) \quad (3.3-4)$$

主振動系の等価質量に対する MTMD の合計質量比を μ_{total} とすると,

$$\omega_0 = \omega_s / \sqrt{1 + \mu_{total}} \quad (3.3-5)$$

3. 3. 2 最適バンド幅

既往文献 3-1) によると, 以下に示す最適バンド幅 B_c が提案されている。

$$B_c = \frac{1}{4} \sqrt{8\mu_{total}T} \quad (3.3-6)$$

$$\text{ただし, } T = \gamma + \log(N) \quad (\gamma = 0.57721 : \text{オイラー定数}) \quad (3.3-7)$$

この最適バンド幅は, 幅広い外力振動数に対して平均した制振性能を持つ MTMD の特性が卓越するのは, 構造物-MTMD 系の全てのモードで各 MTMD の動きに大きな差が無いモード形状になっていることから, 「各モードにおける MTMD の最大モード振幅が等しい」ことを基準として定めたものである。

図 3.3.3 は文献 3-1) に掲載された μ_{total} が 0.01 で 11 個の MTMD を用いた場合のモード形状を示している。縦軸が構造物の変位を 1 として正規化したモード振幅を表し, 横軸は最左端に構造物(S), 次いで左から MTMD が振動数の低い順 ($-n \sim n$) に並んでいる。

3 個のグラフのうち中央にある $B=0.122$ のときが(3.3-6)式で計算した最適バンド幅 B_c に

近い場合、左側にある $B=0.80$ のときがバンド幅が非常に広い場合、右側にある $B=0.05$ のときがバンド幅が非常に狭い場合である。対応する周波数応答曲線を図 3.3.4（MTMD は実線で記されている）に示す。図中 STMD は通常 TMD を示している。

両図から分かるように、バンド幅が非常に広い場合は、中心にある 2 つのモードにおける MTMD の動きが小さく、制御目標振動数近傍での制振性能が低い。一方、バンド幅が非常に狭い場合は、最外郭の 2 つのモードにおける MTMD の動きが小さく、制御目標振動数から離れたときの制振性能が低下する。バンド幅が最適バンド幅 B_c に近いときは、中心部のモードと最外郭のモードともに、他のモードと同じように MTMD の振幅が大きくなっており、幅広い外力振動数に対して平均的な制振性能を持つという MTMD の特性が卓越している。

図 3.3.4 に示した通常 TMD（STMD）との周波数応答の比較において、バンド幅が非常に広い場合は MTMD と質量比 $\mu=0.01/11$ の周波数応答曲線が非常に近く、MTMD としての性能が失われ、中心の一つの MTMD のみが働くようになっていくことが分かる。一方、バンド幅が非常に狭い場合には逆に、質量比 $\mu=0.01$ の STMD の周波数応答曲線に非常に近くなっており、このことから両者ともに MTMD の特性が失われていることが分かる。

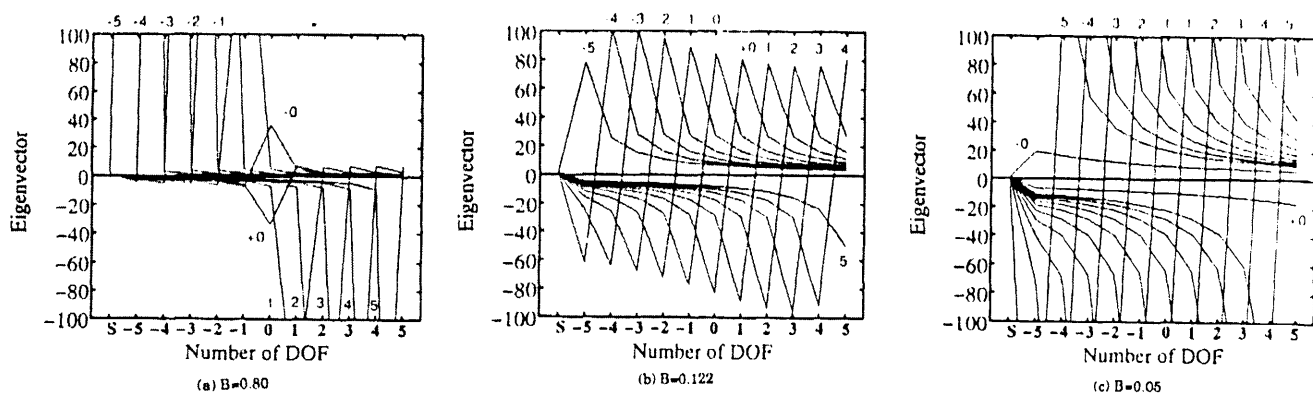


図 3.3.3 MTMD—構造物系のモード形状³⁻¹⁾

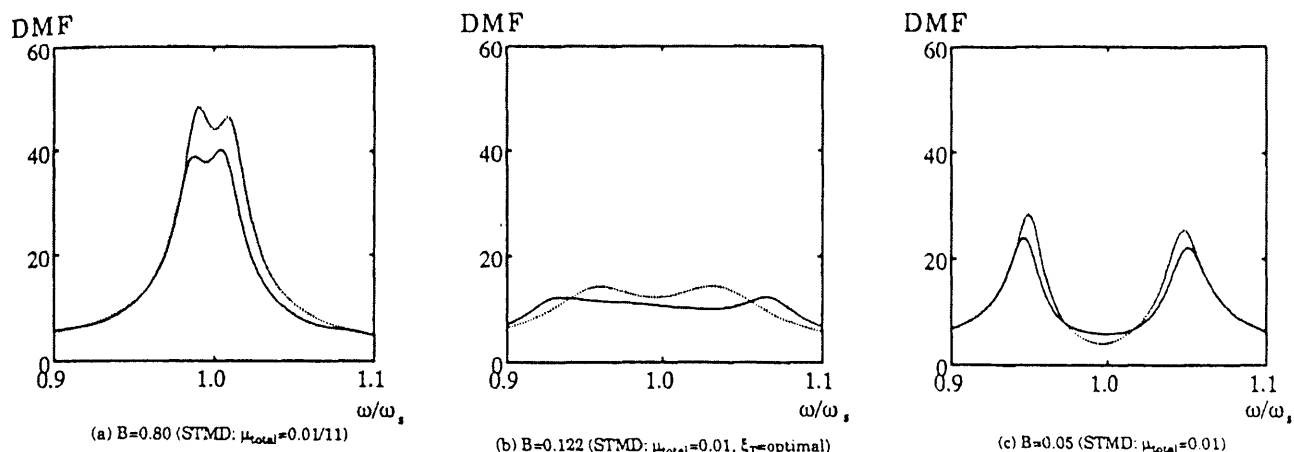


図 3.3.4 周波数応答曲線（実線：MTMD，点線：STMD）³⁻¹⁾

3. 3. 3 同調比に関するロバスト性

ここでは最適バンド幅 B_c に基づいた同調比に関するロバスト性の基準を導く。

MTMD 設定バンド幅 B が最適バンド幅 B_c よりも大きいとき、ロバスト余裕は以下の式で与えられる³⁻¹⁾。

$$B_r = B - B_c \quad (3.3-8)$$

$\mu_{total}=0.01$ で MTMD が 21 個の場合について、ロバスト性を調べると図 3.3.5 のようになる。

図は横軸に中心の MTMD の振動数の構造物の振動数からのずれの度合い β_0 を示す。縦軸

に構造物に MTMD によって付加された等価付加減衰 ξ_{eq} を示す。 ξ_{eq} がほぼ一定になって

いる区間がロバスト性を表していると考えると、式(3.3-8)の B_r は全体の傾向を良く表して

いることが分かる。図(d)に通常 TMD(STMD)の場合が示されているが、この場合はロバス

ト性が低いことが確認できる。図(a)のようにロバスト余裕が小さく、設定バンド幅 B が最

適バンド幅 B_c に近い場合は、ロバスト性は低いが、等価付加減衰が大きく制振性能が高い。

このように、ロバスト性を主目的として設計するときは、ロバスト性を確保するために最適バンド幅より、想定される誤差の分バンド幅を広く取る必要があることが分かる。

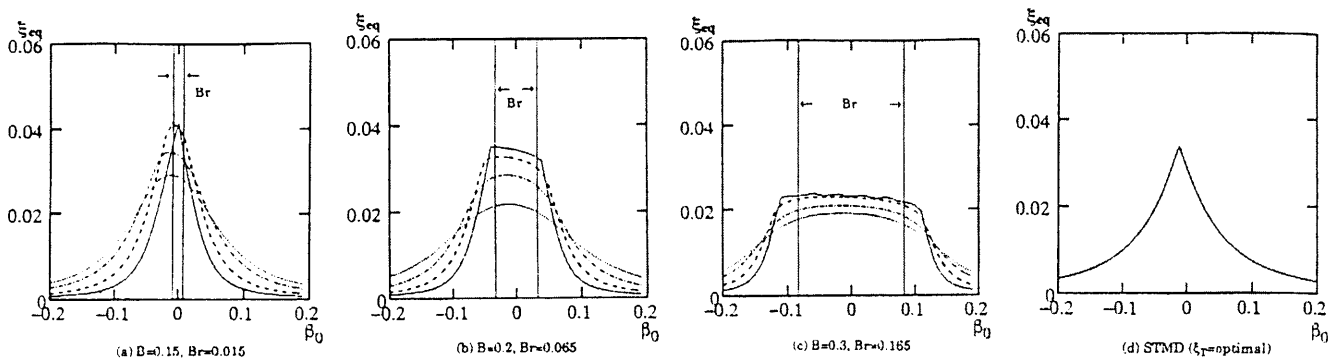


図 3.3.5 B_r による MTMD の等価付加減衰の変化³⁻¹⁾

3. 3. 4 MTMD 減衰比の設定

阿部・藤野は、文献 3-7) で MTMD の制振効果の指標として、構造物の周波数応答のピーク値を用い、1 自由度系応答のアナロジーから得られる等価付加減衰 ξ_{eq} を用いている。MTMD の減衰比の目安として、等価付加減衰と MTMD の減衰比の関係を表す曲線で極大値となる以下の値を設定している。

$$\xi_T = \sqrt{3}\beta / \pi = 0.5513\beta \quad (3.3-9)$$

一方、Igusa は文献 3-9) で、無限個の MTMD を設置した場合における、白色雑音入力に対する構造物の 2 乗平均応答について検討し、減衰比の目安として以下の値を与えている。

$$\xi_T > 0.6\beta \quad (3.3-10)$$

(3.3-9)式と(3.3-10)式で若干の違いはあるが、文献 3-6) では通常の TMD と比較して MTMD の減衰比に対するロバスト性は極めて高いことが確認されている。

以上より、本研究では(3.3-9)式を用いて MTMD の減衰比を設定した。

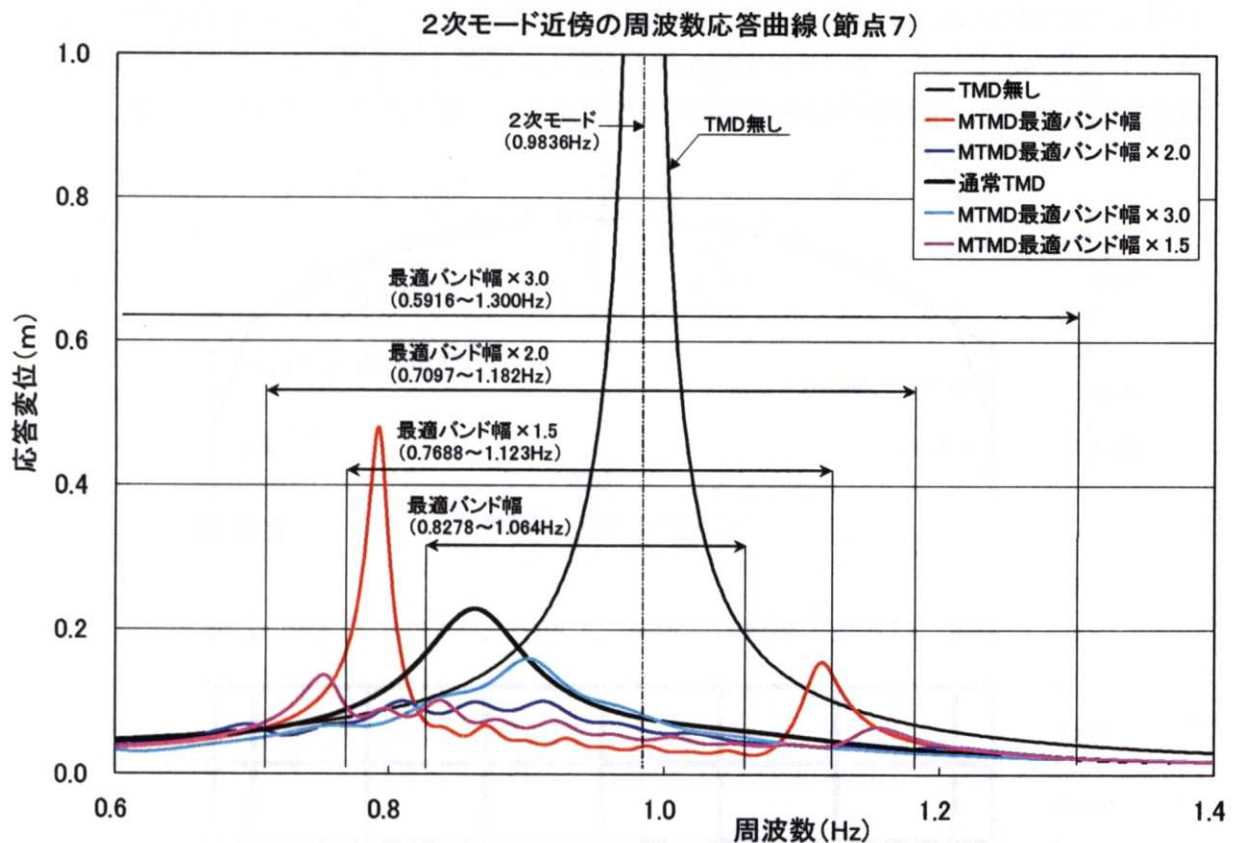
以上に述べた MTMD のパラメーター設定法を要約すると、(3.3-4)式からバンド幅 B を決定するとパラメーター β が定まり、(3.3-1)式と(3.3-9)式より個々の MTMD の固有円振動数と減衰比が決定されることになる。

3. 3. 5 多自由度系における MTMD 設定バンド幅と周波数応答

文献 3-1) 及び文献 3-6) から MTMD 設定バンド幅が周波数応答に与える影響が大きいことが分かっている。そこでここでは多自由度系のモデルとして 6. 2 節の図 6.2.1 に示す 9 質点系構造物を選択し、最適バンド幅を基準として、多自由度系構造物における設定バンド幅と周波数応答の関係を調べる。制御モードは図 6.2.2 に示す 2 次モードとし、地盤面変位は両端が同一方向に単位の大さの加速度を持つものとした。MTMD と、比較のために用いる通常 TMD の合計質量比は全体構造質量の 5.0% で同じとし、最適バンド幅を 1.0 倍、1.5 倍、2.0 倍、3.0 倍に拡大したときの 2 次モードの腹 (図 6.2.1 の節点 7) の周波数応答曲線を図 3.3.6 に示す。最適バンド幅を 3.0 倍まで拡大すると設定バンド幅内にピークが出現し、設定バンド幅の内側で安定した制振効果が得られる MTMD の特質がなくなる。

一方、MTMD 設定バンド幅内における制振効果は最適バンド幅に設定したときに最も高いが、図 3.3.4(b) に示した 1 自由度系の場合と同様に、バンド幅の外側に応答のピークが出現するため、広い周波数領域に亘って平均的な応答を得たい場合は、最適バンド幅を 1.5 倍程度に拡大した方が良いことが分かる。

以上の結果から、本研究で地震力など広い周波数成分を含む外力を対象として単一の振動モードを制御する場合は、最適バンド幅を 1.5 倍に拡大した値を用いた。



3. 4 MTMD 法の大スパン建築構造への適用

本節では MTMD 法の大スパン建築構造への適用性を調べるために、40m スパンのアーチ構造を選択して MTMD を適用し、周波数応答解析により制振効果を調べた。ここで MTMD は次章以降で述べる分散配置ではなく、集中配置とし、通常 TMD と同じ位置に設置した。

また本節では MTMD 法ではないが、2. 4. 2 でも述べた固有振動数の異なる複数の TMD を用いる設計法の一つである多重 TMD 法³⁻¹⁰⁾との比較も行った。多重 TMD も設計パラメーターに対するロバスト性など、MTMD 法と同様な性状を持つことが分かっている。

3. 4. 1 解析モデル

30～40m スパンの中規模体育館の構造形式として標準的に用いられる図 3.4.1 の立面図に示す 2 次元アーチ構造を解析モデルとした。図中に示すように、アーチ部のスパンは 40.0m、ライズ 7.0m、曲率半径は約 32m である。アーチの部材断面は H-488×300×11×18 とし、両端の柱とブレースの断面はそれぞれ H-800×300×14×18, H-200×200×8×12 である。材料は鋼材を仮定し、質量密度は $7.86(\text{t/m}^3)$ で与えた。また伏図に示すように解析対象とするアーチは隣り合うアーチと小梁で接合されていると仮定し、小梁の質量をアーチとの接合部に集中質量として与えた。小梁の断面は H-300×150×6.5×9 とし、アーチとの接合部は節点 3,4,7,10,13,16,19,22,23 である。屋根材料は膜材と仮定し、取り付け金物を含めた質量を $15.0(\text{kg/m}^2)$ として、アーチの支配面積を考慮して計算した質量をアーチ部材の非構造質量として与えた。境界条件は柱の脚部を完全固定とし、接合部は全て剛接合とした。

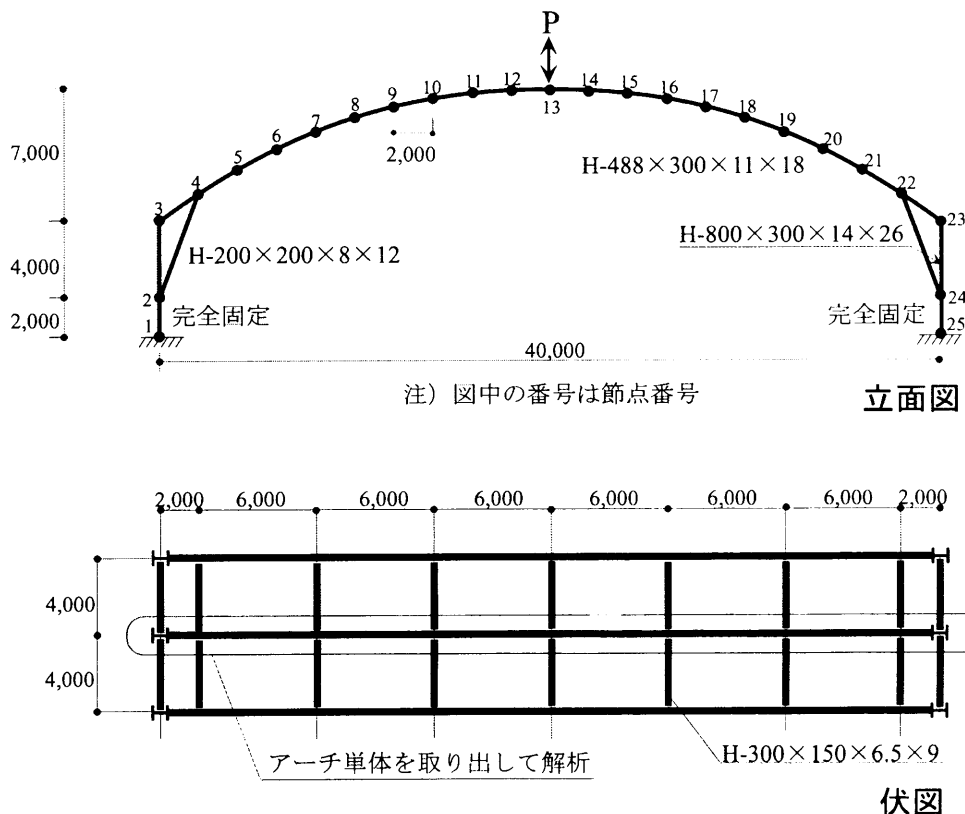


図 3.4.1 アーチモデル

3. 4. 2 アーチ単体の振動性状

最初に TMD 無しのアーチ単体で線形固有値解析を行った。線形固有値解析の結果得られた 2 次モード形状を図 3.4.2 に、それ以外の 1 ～ 7 次までのモード形状の概略図を図 3.4.3 に示す。固有振動数を表 3.4.1 に示す。

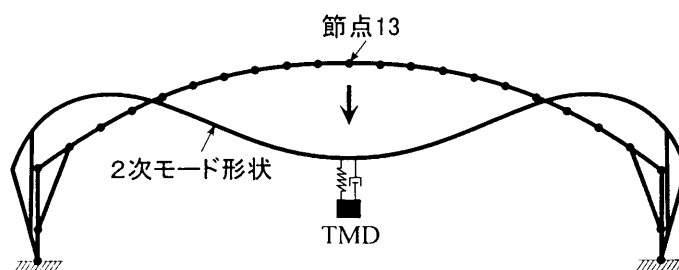


図 3.4.2 2 次モード形状

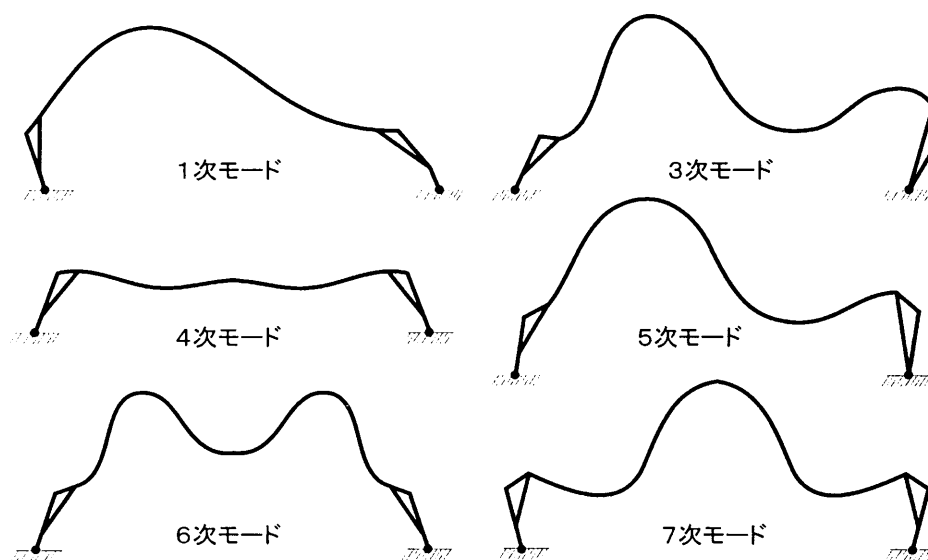


図 3.4.3 1 ～ 7 次のモード形状の概略図

表 3.4.1 アーチの固有振動数

モード次数	固有振動数(Hz)
1	1.05
2	1.28
3	2.50
4	2.71
5	2.90
6	3.18
7	3.39

次に、アーチ単体で周波数応答解析を行った。外力 P の振幅は 9.8kN とし、アーチ中央（節点 13）に鉛直方向に与えた。アーチの減衰比は各次モードに対し 2.0% とした。図 3.4.4 に 10 次モードまでを対象としたアーチ中央の周波数応答解析の結果を示す。ここでアーチ中央に着目した理由は、中央部に照明やスピーカーなど吊り物が置かれる例が多いため、これらの耐震・耐風安全性の向上をここでの TMD による制御目的と想定したためである。同図から分かるようにアーチ中央部においては 2 次と 7 次のモードが励起するが、特に 2 次モードにおける応答が卓越するため、ここでは TMD による制振目標を 2 次モード（固有振動数 1.28Hz）とした。

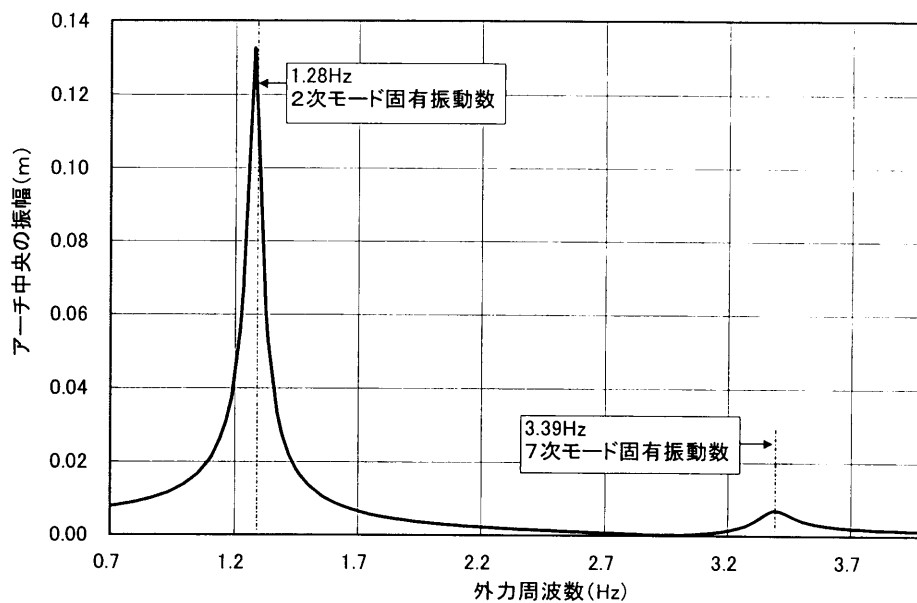


図 3.4.4 アーチ中央の周波数応答曲線

3. 4. 3 通常 TMD, MTMD, 多重 TMD の設計

TMD は全て 2 次モード腹の節点 13 に集中配置した（図 3.4.2 参照）。参考のため、TMD 合計の質量比は全てのケースで 10.0% で共通とし、多重 TMD と MTMD の個数は多重 TMD に関する文献 3-10) で最適条件式が示されている最大の個数である 6 個とした。

MTMD の設計パラメーターは、3. 3 節で述べた最適バンド幅の計算式(3.3-6)と(3.3-9)式を用いて求めた。多重 TMD の設計パラメーターは、TMD が 6 個のときの最適同調比と最適減衰比を求める以下の式³⁻¹⁰⁾を用いて決定した。

$$\gamma_{opt1} = 0.1867(\mu' + 0.0328)^{-0.4735}$$

$$\gamma_{opt2} = 0.2127(\mu' + 0.0486)^{-0.5001}$$

$$\gamma_{opt3} = 0.2307(\mu' + 0.0897)^{-0.6031}$$

$$\gamma_{opt4} = 0.9683(\mu' + 0.9871)^{-3.5739}$$

$$\begin{aligned}\gamma_{opt5} &= 1.0837e^{-2.2288\mu'} - 0.0556e^{-99.420\mu'} \\ \gamma_{opt6} &= 1.1895e^{-0.8450\mu'} - 0.1389e^{-73.535\mu'}\end{aligned}\quad (3.4-1)$$

$$\begin{aligned}\xi_{opt1} &= (5.7835 \times 10^{-4} \mu')^{0.1957} - 0.0518 \\ \xi_{opt2} &= (1.3074 \times 10^{-3} \mu')^{0.2098} - 0.0485 \\ \xi_{opt3} &= (1.1732 \times 10^{-2} \mu')^{0.2884} - 0.0262 \\ \xi_{opt4} &= (2.8652 \times 10^{-2} \mu')^{0.3182} - 0.0256 \\ \xi_{opt5} &= (1.9782 \times 10^{-1} \mu')^{0.4719} - 0.0018 \\ \xi_{opt6} &= (5.1454 \times 10^{-1} \mu')^{0.5677} - 0.0038\end{aligned}\quad (3.4-2)$$

ここで、 μ' は TMD 1 個の質量比である。

これらの式は、TMD 設置による共振曲線の各ピーク値のバラツキを小さくするための評価関数と、共振ピークを抑えるための評価関数を用いて決定された値から求めた曲線の近似式である。

表 3.4.2 に MTMD と多重（六重）TMD の同調比と減衰比を示す。

単一の通常 TMD の同調比と減衰比は 3. 2 節で述べた Den Hartog による最適条件式 (3.2-3), (3.2-4)式を用いて、同調比を 0.909, 減衰比を 0.185 と決定した。

表 3.4.2 MTMD と多重 TMD の設計パラメーター

	MTMD		多重 TMD	
	同調比	減衰比	同調比	減衰比
TMD1	0.870	0.0287	0.775	0.0526
TMD2	0.922	0.0287	0.833	0.0567
TMD3	0.974	0.0287	0.891	0.0590
TMD4	1.03	0.0287	0.955	0.0622
TMD5	1.08	0.0287	1.03	0.0657
TMD6	1.13	0.0287	1.13	0.0634

3. 4. 4 解析結果

2 次モード固有振動数の近傍におけるアーチ中央部の鉛直変位に関する周波数応答を図 3.4.5 に示す。MTMD と多重 TMD の設定バンド幅に近い約 1.0～1.6Hz の周波数領域では、MTMD と多重 TMD は通常 TMD に比較して制振効果が高いが、その両側では高いピークが生じて逆に応答が大きくなり、効果が低下する。このように MTMD と多重 TMD の効果を論じる場合には、設定バンド幅との関係に注意する必要がある。MTMD と多重 TMD を比較すると、多重 TMD の方が TMD のバンド幅（複数個の TMD のうち、最高次の固有振動数から最低次の固有振動数までの間隔）が広く、広い外力周波数で安定した制振効果を示

し、応答ピークも低い。

次に、MTMD 設定バンド幅の両外側にあるピークを下げ、2次モード固有振動数近傍において広い外力周波数に亘りバランスの取れた平均的な制振効果を得るため、MTMD のバンド幅を2倍と3倍に拡大した場合の周波数応答曲線を図 3.4.6 に示す。6 個の MTMD の周波数間隔は全て同じとした。この場合も 3. 3. 5 で述べた検討結果と同様に、MTMD の設定バンド幅を広げることにより、2次モード固有振動数付近の効果は若干低下するが、広い周波数領域に亘って平均的な制振効果を得ることが出来た。

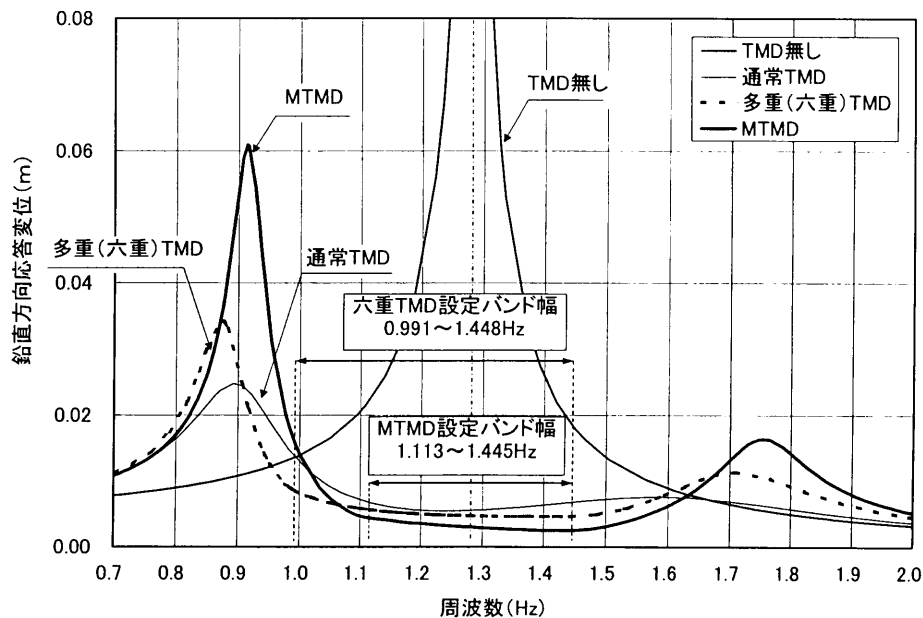


図 3.4.5 アーチ中央節点の鉛直方向応答変位に関する周波数応答の比較

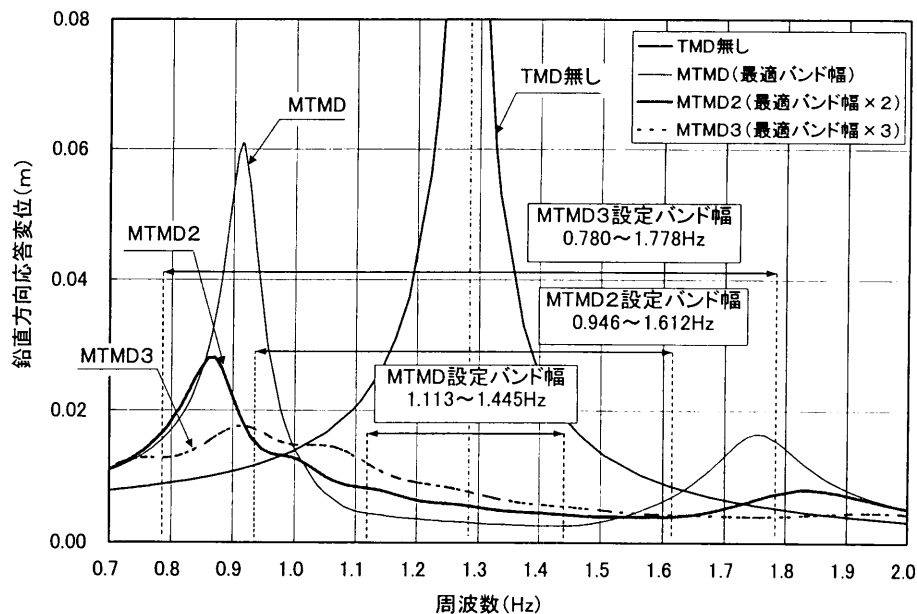


図 3.4.6 MTMD 設定バンド幅による周波数応答の変化

3. 4. 5 本節のまとめ

以上までに述べた解析結果をまとめる。

- (1) 制御対象モードの固有振動数近傍では、MTMD または多重 TMD の効果は大きく、大スパン建築構造における MTMD 法の制振効果が確認された。
- (2) 通常 TMD と比較して、MTMD と多重 TMD は設定バンド幅の両外側のピークが大きくなる傾向がある。
- (3) MTMD の設定バンド幅を拡大することにより、広い周波数領域に亘ってピークの小さいバランスの良い平均的な制振効果を得ることが可能となる。MTMD と多重 TMD の周波数応答の違いは、主として設定バンド幅の違いによるものであると思われる。

以上より、MTMD 法の大スパン建築構造への適用性と、大スパン建築構造に適用した場合の基本的な周波数応答特性を確認した。

3. 5 本章のまとめ

本章では，単一モード制御のための TMD 設計法として，Den Hartog による最適設計式を用いた通常 TMD 設計法，阿部・藤野により提案された MTMD 法を既往の文献をもとにしてまとめた。

次章で提案する複数モード制御のための分散型 MTMD においても，本章でまとめた単一モード制御のための MTMD 設計法を基盤としたものである。

また MTMD 法の振動性状に関して，既往の研究は 1 自由度系構造物を対象としたものであることから，3. 3. 5 で基本的な多自由度系モデルに MTMD 法を適用した場合の振動性状を確認し，3. 4 節では実構造物を想定した大スパン建築構造モデルに対する MTMD 法の制振効果と適用性を周波数応答解析により確認した。

解析結果からも確認されたように，MTMD 法においては，特に MTMD 設定バンド幅が構造物の周波数応答に及ぼす影響が大きい。そのため，複数振動モード制御の場合におけるバンド幅の設定に関して，6. 4 節で詳しく検討する。

第 4 章 複数振動モード制御のための 分散型 MTMD の提案

第4章 複数振動モード制御のための分散型 MTMD の提案

本章では、大スパン建築構造における固有振動数の近接した複数の振動モードを効率良く制御するための方法として、MTMD 法を応用した分散型 MTMD を提案する。

4. 1 提案の概要

第2章で述べたように、大スパン建築構造、特に大屋根構造は固有振動数の近接した複数の振動モードが励起する特徴がある。本提案の骨子は、これら複数の振動モードを制御するときに、通常の TMD 設計法が個々の振動モードを個別に制御する方法であるのに対して、3. 3 節で述べた MTMD 法の同調比に関するロバスト性、言い換えると構造物の固有振動数変動に対するロバスト性を活かして、複数の振動モードをまとめて制御することにより、制振効果の高い手法を提案しようとするものである。

まず提案の背景となる、複数の振動モード制御を目的としたときにおける通常 TMD と MTMD 法を設計パラメータの設定という観点から比較する。

通常 TMD の設計の考え方は、3. 2 節で述べ、図 4.1.1 に示すように、TMD を構造物に対する付加系と考えて設計パラメータを最適調整するものであり、制振効果はパラメータの変動に敏感である。そのため固有振動数の近接した複数の振動モードを制御する場合、TMD の設置が他の振動モードの固有振動数と形状に影響を及ぼす結果、最適調整がずれ、3. 2. 3 で述べたように制振効果が大きく低下する可能性がある。

一方、MTMD 法の制振効果は3. 3 節で述べたように、同じ質量を持つ複数個の MTMD の慣性力及びバネの弾性力を基本とし、減衰は周波数応答を平滑化する副次的な役割を果たしている。ここで設計パラメータは、図 4.1.1 に示す MTMD と構造物を含めた全体系モデルにおいて、MTMD が構造物と強く連成する状態を基準に設定される。そのため、複数振動モードを制御する場合も単一振動モード制御の場合と同じ考え方でパラメータを設定することが可能であると考えられる。

以上より、設計パラメータの設定という観点からも、複数の振動モードの制御に MTMD 法を用いることが有効であると考えられる。

次に、大スパン建築構造に特有の振動モードの空間的広がりという観点から考える。2. 2 節で述べたように、大スパン建築構造、特に大屋根構造の振動モードはビル等の多層式骨組構造と比較して形状が複雑である。さらに本研究では複数の振動モードの制御を対象としているため、複数の振動モードで制振効率を上げることを考えると、特定の節点に複

数個の MTMD を集中して設置することは制振効率が良くないと考えられる。さらに大スパン建築構造は自由度が高いモデルが多いため、特定の点ではなく、構造物の全体をバランス良く制振したい。

そこで図 4.1.2 に示すように、固有振動数の異なる複数個の MTMD を個々の構造物における制御モードの形状に対応して、空間に分散配置する分散型 MTMD を提案する。

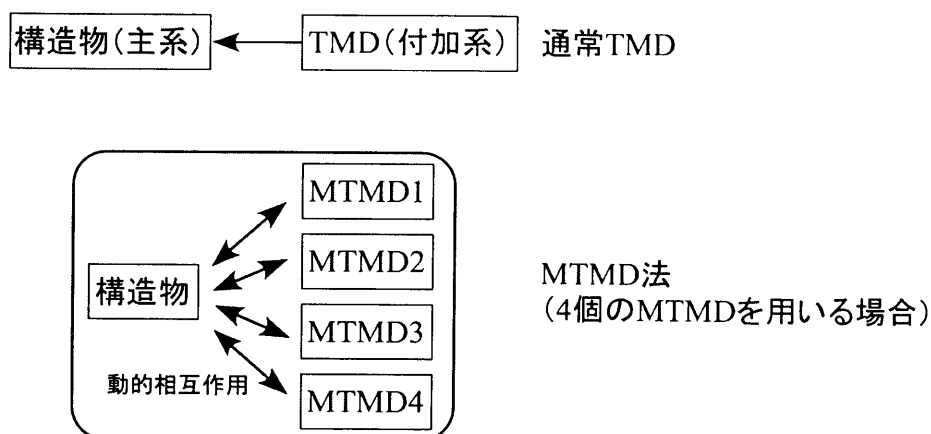


図 4.1.1 通常 TMD と MTMD 法のパラメーター設定に関する比較

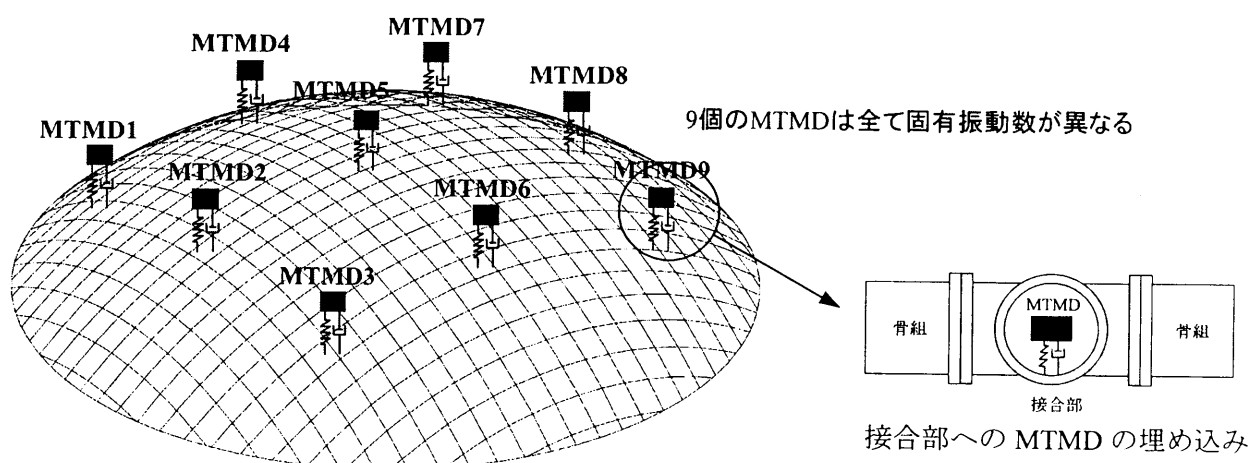


図 4.1.2 分散型 MTMD (9 個の MTMD を用いる場合)

分散型 MTMD は 1 個の大型の TMD ではなく、小型の複数個の MTMD を用いるので、図 4.1.2 の右側の図に示すように意匠性を考慮して、骨組鋼管の中空部に埋め込むなどの適用方法も考えられる。

ちなみに、2. 3. 3 でも述べたが、筆者が接合部の実験に関わった西武ドームの中央

膜屋根部⁴⁻¹⁾は、図 4.1.2 に示したものと同一構造形式を持つスパン約 145m の単層格子骨組構造であり（写真 4.1.1 参照）、全体の構造重量は約 2000tf である。MTMD の合計質量を全体構造質量の 2.0% とし、約 300 箇所ある接合部のうちの 1 割にあたる 30 節点に MTMD を埋め込むと仮定すると、接合部 1 箇所あたりの MTMD 質量は約 1.3t である。そのとき、錘を鋼材で製作すると仮定すると、約 0.17m^3 の大きさが必要となる。接合部の長さが 1.2m であるため、錘の長さを 1.2m で製作すると仮定すると、錘の断面の大きさは約 $38\text{cm} \times 38\text{cm}$ となる。

西武ドーム接合部の内径が約 51cm であり、MTMD が振動するために必要なスペースを考えると、若干余裕が少ないが、MTMD を設置する接合部を他の箇所よりも多少大きめに製作するなどの工夫をすれば、実際の構造物に対して実現性のある方法と思われる。

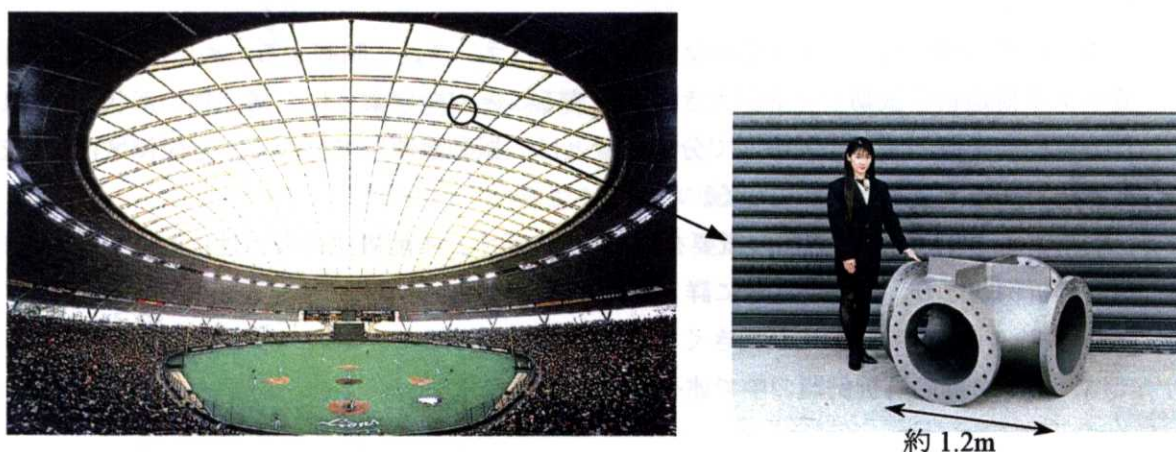


写真 4.1.1 西武ドーム単層格子骨組構造と鋳鋼接合部

本研究で制振対象とする大スパン建築構造は他の構造物に比較して、特に意匠性を要求される建築物が多いため、複層骨組構造の場合も梁の裏側に設置するなど、制振装置を設置することにより建築全体の意匠への影響が少ないように配慮することは重要であると思われる。

次節以降で、MTMD の配置とパラメーター設定に対する基本的な考え方をまとめる。

4. 2 MTMD 空間配置

一般的な TMD 設計法である通常 TMD は、3. 2 節で述べたように、単一の振動モード制御時においてモードの腹に 1 個の TMD を設置するが、複数の振動モード制御時においても各制御モードの腹に 1 個ずつの TMD を設置し、設計パラメーターも各振動モードで個別に設定する（図 4.2.1 参照）。

一方、MTMD 法の設計パラメーターは前節で述べたように、MTMD-構造物系モデルで同じ質量を持つ全ての MTMD が構造物と強く連成する、すなわち MTMD の応答が大きくなる状態を基準として設定するため、複数の振動モードをまとめて制御するときの空間配置も、MTMD と構造物が複数の振動モードで強く連成することを目標として設計する必要がある。そこで複数の制御モードの振幅を重ね合わせた形状における最大振幅点に設置することとする。

さらに構造物の特定の 1 点ではなく、全体をバランス良く制御するために、MTMD の設置により構造物の振動モードが大きく変化することのないように、構造物の形状を考慮した分散型の配置とする。本論文で分散配置とは、振動数領域ではなく、空間領域における配置法であることを強調しておく。

提案する MTMD の配置法の概要を図 4.2.2 に示す。本配置法の妥当性については、第 5 章の解析例題と 6. 3 節でさらに詳しく調べる。

制御モードの有効質量比が大きく異なる場合におけるモードのスケーリングの例については、7. 2 節の解析例題の中で述べる。

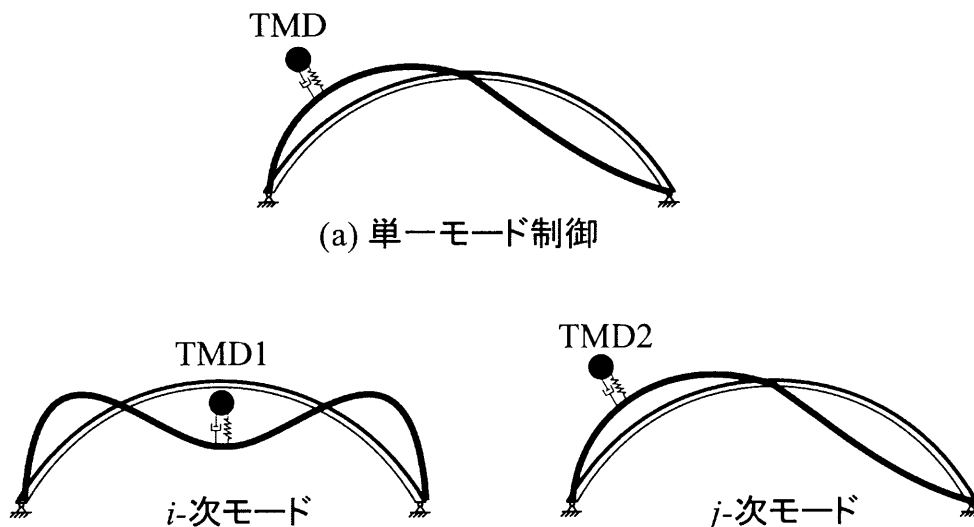


図 4.2.1 通常 TMD の配置

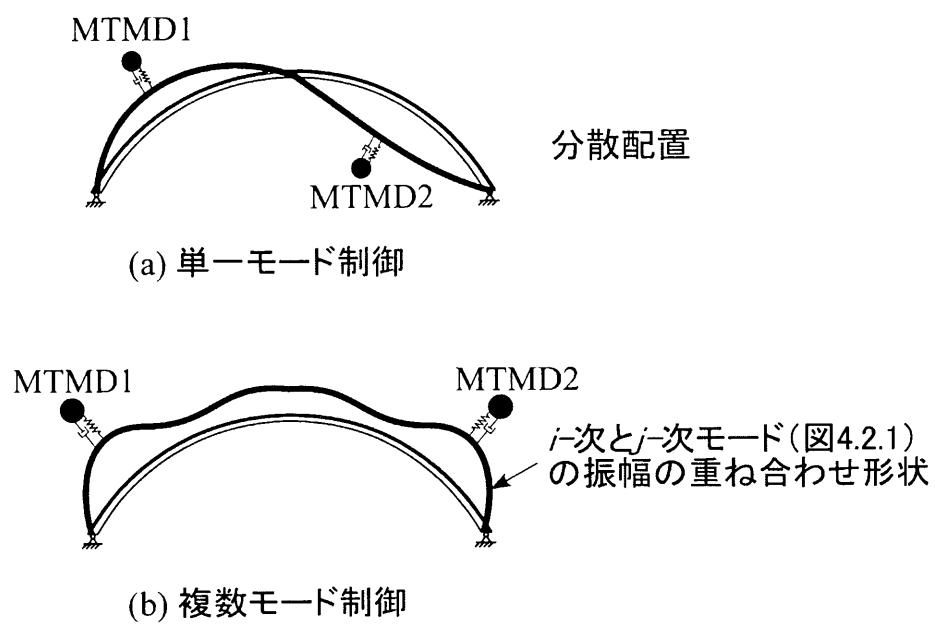


図 4.2.2 分散型 MTMD の配置

4. 3 設計パラメーター

3. 3節で述べたように、MTMD法の制振効果はMTMD設定バンド幅と関係が深い。そこで既往の研究⁴⁻²⁾では、3. 3節でも述べたように、1自由度系制御のためのMTMD設定バンド幅として、図4.3.1に示すように、幅広い外力振動数に対して平均した制振性能を持つMTMDの特性が卓越する状態となる最適バンド幅 B_c が定義されている。この最適バンド幅は、「各モードにおけるMTMDの最大モード振幅が等しい」ことを基準として定められたものである。

3. 3節で述べたように、個々のMTMDの同調比及び減衰比は、MTMD設定バンド幅が決定すれば定まる。

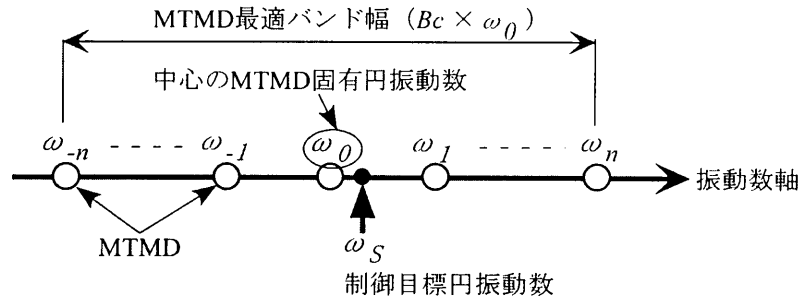


図 4.3.1 単一振動モード制御時における最適バンド幅

複数振動モード制御の場合（ここでは、 i 次と j 次を制御対象モードとする）は、図4.3.2に示すように、制御目標振動数が複数個となるため、新たなMTMDバンド幅設定法を提案する必要がある。そこで6. 4節では、既往の研究⁴⁻²⁾で提案された単一モード制御のための最適バンド幅を応用した複数モード制御のためのバンド幅設定法を新たに提案する。

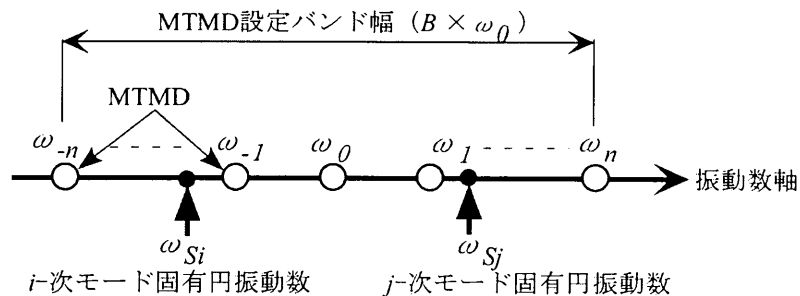


図 4.3.2 複数振動モード制御時における MTMD バンド幅設定

一方、制御モードの固有振動数間隔が非常に広い場合は、必然的にMTMD設定バンド幅が非常に広くなり、3. 3節で述べたように、中心の一つのMTMDのみが働き、MTMDとしての特性が失われる。そこで6. 5節では、提案手法の適用範囲の目安をMTMD設定バンド幅と各制御モードにおける最適バンド幅との関係から考察する。

その前段階として、次章では、単一振動モード制御時の周波数応答における MTMD の設定バンド幅と応答低減効果幅の関係に着目して、MTMD の制御目標振動数を制御対象である複数の振動モードの固有振動数の中央に設定し、制御モードの固有振動数が MTMD のバンド幅内に収まるように MTMD 設定バンド幅を調整し、複数の振動モード制御時における設定バンド幅の大きさと周波数応答の関係を確認する。

4. 4 本章のまとめ

本章では、大スパン建築構造を対象とした固有振動数の近接した複数の振動モードの制振設計法として分散型 MTMD を新たに提案した。

提案した手法の妥当性については、次章以降で述べる解析的検討や振動台実験によって検証していく。

なお、次章以降で、提案した分散型 MTMD と既往の設計法である通常 TMD の制振効果の比較においては、同じ合計質量を持つという条件の下で行うこととする。

第5章 分散型 MTMD の大スパン 建築構造への適用性の確認

第5章 分散型 MTMD の大スパン建築構造への適用性の確認

前章で提案した手法の効果を確認するために、平面的な広がりを持ち、形状が簡易なアスペクト比の異なる2つの矩形平板を検討対象モデルとして選択し、解析的検討を行った。

本章では、周波数応答における MTMD の設定バンド幅と応答低減効果幅の関係に着目して、MTMD の制御目標振動数を制御対象である複数振動モードの固有振動数の中央に設定し、制御モードの固有振動数が MTMD のバンド幅内に収まるように MTMD 設定バンド幅を調整した。また、提案した MTMD による手法と通常 TMD の効果を比較する際に TMD と MTMD の合計質量は同じとした。

TMD の質量比の設定に用いる主振動系の質量は多自由度系の場合は等価質量⁵⁻¹⁾を一般的に用いるが、複数のモードをまとめて制御する場合には、モード毎に異なる等価質量をどう決定すれば良いかという課題があるため、5.1節と5.2節で用いる主振動系の質量は全て構造全体の質量（以下、全体構造質量と述べる）を用いることにする。等価質量を用いた場合と全体構造質量を用いた場合の違いについては、5.3節で検討する。

5.1 正方形平板

5.1.1 解析モデル

平面の大きさが8.0m×8.0mで厚さが20.0cmの鉄筋コンクリートスラブを解析モデルとした。コンクリートの材質はFC240を仮定し、質量密度は2.40(t/m³)で与えた。全体構造質量は30.7(t)である。境界条件は周辺単純支持とした。

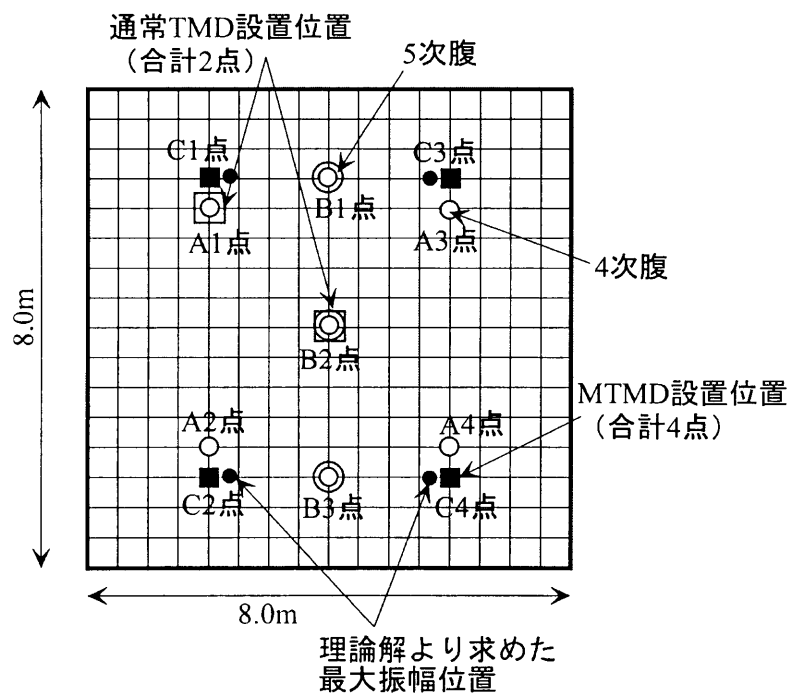


図 5.1.1 平板モデル

5. 1. 2 平板の振動モードと制振モードの選択

平板単体の振動特性を把握するために線形固有値解析を行った。解析の結果得られた6次モードまでの固有振動数を表 5.1.1 に、モード形状を図 5.1.2 に示す。表中に単純支持された矩形板の固有振動数の理論解も示す。理論解は文献⁵⁻²⁾を参考に以下の(5.1-1), (5.1-2)式により求めた。2次と3次及び5次と6次モードは固有振動数が等しい縮退モードである。

$$p_{mn} = q_{mn}^2 h \sqrt{\frac{E}{3(1-\nu^2)\rho}} \quad (5.1-1)$$

$$q_{mn} = \pi \sqrt{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)} \quad (5.1-2)$$

ここで、 p_{mn} ：固有振動数、 q_{mn} ：波動伝播定数、 a, b ：矩形板の辺長、

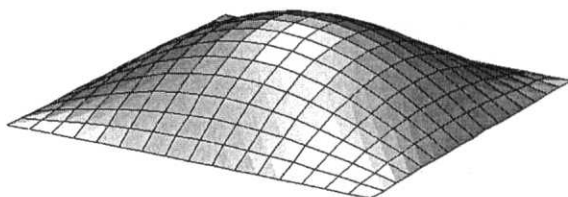
m ：辺 b に平行な節線数、 n ：辺 a に平行な節線数、 $2h$ ：板の厚さ、 ν ：ポアソン比、

ρ ：板の単位体積当りの質量、 E ：ヤング係数

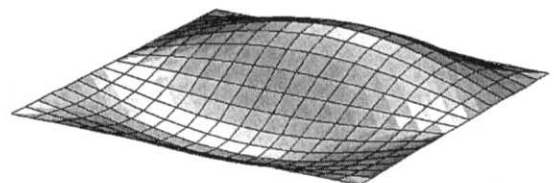
である。

表 5.1.1 6次モードまでの固有振動数 (単位：Hz)

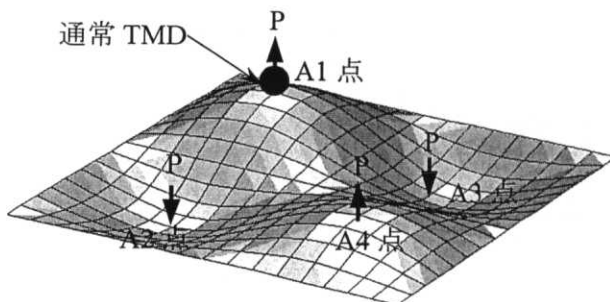
モード次数	数値解析	理論解
1	2.77	2.81
2, 3	6.91	7.03
4	10.9	11.3
5, 6	13.8	14.1



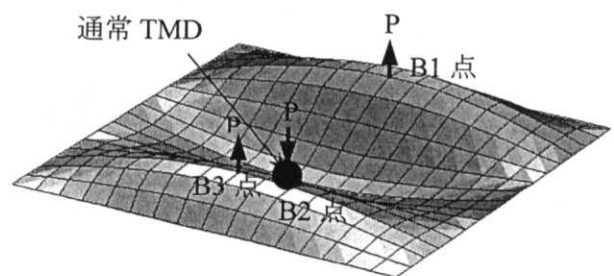
1次モード



2次モード



4次モード



5次モード

図5.1.2 振動モード

制振モードの選択に関して、複数個の TMD を分散配置させる分散型 MTMD と、モードの腹に 1 個の TMD を設置する通常 TMD の制振効果の違いをより明確にするため、本節では腹の数が多く、ある程度高次のモードとして 4 次と 5 次モードを制振対象モードとした。

なお、最近の大型で加振力の大きい高速プレスや自動織機などで 10(Hz)程度の振動数を持つものが増えているという報告⁵⁻³⁾があり、このような機器による環境振動を現実の例として想定することも可能である。

5. 1. 3 通常 TMD と分散型 MTMD の設計

ここでは5. 1. 2で述べた線形固有値解析の結果に基づく、通常TMDとMTMDの設計について述べる。通常TMDとMTMDを用いた分散型MTMDの制振効果を比較するために、TMDの合計質量1.2(t)（全体構造質量に対する質量比3.91%）を共通とした。

（1）通常 TMD

通常TMDは4次と5次モードの腹に1個ずつ設置した。設置位置は図5.1.1及び図5.1.2に示すA1点とB2点である。設計パラメーターは文献⁵⁻⁴⁾に示された調和外力下での最適条件式である(5.1-3), (5.1-4)式を用いて決定した。設計パラメーターを表5.1.2に示す。2個のTMDの同調比及び減衰比は4次と5次モードの固有振動数それぞれに対して個別に設定した。

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (5.1-3)$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (5.1-4)$$

ここで、 γ_{opt} は最適同調比、 ξ_{opt} は最適減衰比であり、 μ は TMD の質量比である。

表5.1.2 通常TMDの設計パラメーター

パラメーター	値
TMD 1 個の質量	0.600(t) (質量比 : 1.95%)
同調比	0.980
減衰定数	0.0857

（2）分散型 MTMD

分散型MTMDの設置位置は固有値解析で得られた4次と5次モードの振幅の重ね合わせが最大となる点とした。ここで、それぞれのモードは各次の最大振幅で正規化した。図5.1.3に重ね合わせの図を示す。設置位置は図5.1.1及び図5.1.3に示すC1点～C4点の合計4箇所とした。C1点～C4点における4次と5次と重ね合わせモードの振幅の比を表5.1.3に示す。設計パラメーターの決定は、3. 2. 2で述べた計算式に従った。4個のMTMDの同調比の決定には、制御目標振動数が4次と5次モードの固有振動数の中央(12.3(Hz))であるとし、4次と5次モードの固有振動数がMTMDのバンド幅内に収まるようにバンド幅を調整した。調整後のバンド幅は10.2～13.9(Hz)であり、最適バンド幅の2.0倍である。4個のMTMDの設計パラメーターを表5.1.4に示す。表中の同調比は、12.32(Hz)に対する比を表す。4個の

MTMDの周波数軸上における分布を図5.1.4に示す。4個のMTMDは図5.1.3に示すように、MTMD1をC1点に設置し、MTMD2をC2点、MTMD3とMTMD4をC3点とC4点に設置した。

なお、平板のように単純な形状においては固有値解析を実施せずに理論解から直接MTMDの配置や設計パラメーターを決定することが出来ると思われるため、5.1.5で詳細を述べる。

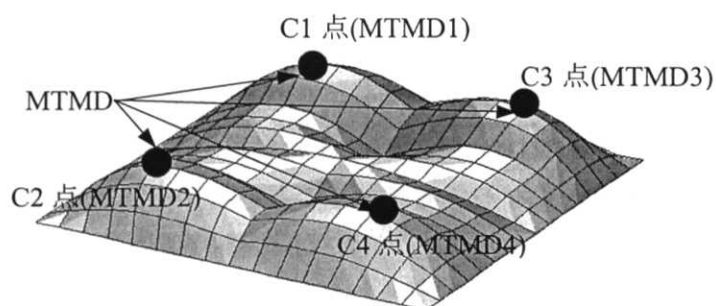


図5.1.3 4次と5次モードの重ね合わせ形状

表 5.1.3 MTMD 設置位置における各モードの振幅比

4 次モード	5 次モード	重ね合わせ形状
0.927	0.650	1.58

表5.1.4 MTMDの設計パラメーター

パラメーター		値
MTMD 1 個の質量		0.3(t) (質量比 : 0.977%)
同調比	MTMD1	0.830
	MTMD2	0.930
	MTMD3	1.03
	MTMD4	1.13
減衰定数		0.0565

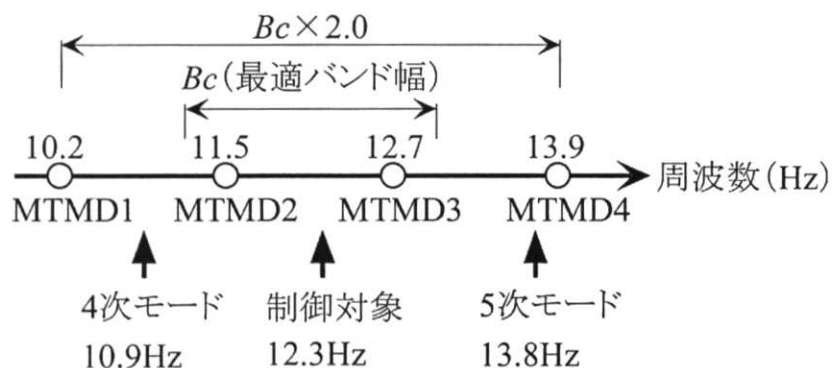


図5.1.4 周波数軸上でのMTMDの分布

5. 1. 4 周波数応答解析

通常TMDと分散型MTMDの制振効果を比較するために周波数応答解析を行った。加力点は図5.1.2に示すように4次と5次モードの全ての腹の位置とし、板に対して鉛直方向に $P=9.8\text{kN}$ の荷重を与えた。図に示すような加力方法を本節中の以降では、それぞれ4次モード加力または5次モード加力と呼ぶ。平板の減衰定数は各次モードに対し、3.0%とした。図5.1.5に4次モードの腹に加力したときの4次モード固有振動数近傍における通常TMDの設置位置A1点（図5.1.2参照）の鉛直方向の周波数応答曲線を示す。図5.1.6に5次モードの腹に加力したときの通常TMDの設置位置B2点（図5.1.2参照）での周波数応答曲線を示す。

両図から、①MTMDはMTMDのバンド幅内では効果が高くロバスト性も高いが、②バンド幅の外側では応答が大きくなる傾向があることが分かる。図5.1.6の5次モード加力で15.0(Hz)の近傍でピークが見られるが、これは平板単体ではなく、MTMDの質量とバネを設置して線形固有値解析を行ったときに得られた10次モード（固有振動数15.2Hz）が励起されたものである。

以下で述べる通常TMDと分散型MTMDの制振効果の比較において、平板の4次と5次モードの固有振動数を選択した理由は、通常TMDの最適設計振動数であり、両者の効果を比較し易いと考えたためである。MTMDは制御対象振動数を一つ選ぶというよりも、あるバンド幅で応答を抑えるという手法であり、通常TMDのような厳密な最適設計手法ではない。

通常TMDを設置した点以外での制振効果を比較するために、4次モード加力時における4次モード固有振動数10.9(Hz)でのA1～A4点における応答の比較を図5.1.7に示す。通常TMDはTMDを設置したA1点での振幅は良く抑えられているが、それ以外の点での振幅のバラツキが大きいことが分かる。

一方、分散型MTMDの方は全体的に良く振幅が抑えられており、分散型の効果が良く現れている。このためTMDの設置位置だけでなく、板全体の振動を制御したい場合には分散型配置の効果は極めて大きいと思われる。ここで通常TMDを設置したA1点においてもMTMDの方が効果が高いのは、通常TMDで5次モードを制御するために設置したB点4次の節にあり、質量比2.0%分の効果しか無いのに対して、MTMDの方は質量比4.0%分が両方のモードに対して効果があるためであると思われる。

4次モード固有振動数での通常TMDと分散型MTMDの鉛直方向周波数応答の平面分布を図5.1.8に示す。ここで、応答の大きさを表すスケールは共通にしている。分散型MTMDの板全体における制振効果の高さが確認できる。

5次モード加力時の5次モード固有振動数13.8(Hz)におけるB1～B3点の応答変位の比較を図5.1.9に示す。この場合も通常TMDはTMDを設置したB2点での振幅は良く抑えられているが、MTMDに比較して振幅のバラツキが大きい。

板全体のエネルギーとして制振効果を比較するために、4次と5次の固有振動数における全節点の鉛直方向応答変位を2乗した値の総和の比較を図5.1.10に示す。4次と5次モードともに分散型MTMDの効果が高いことが分かる。

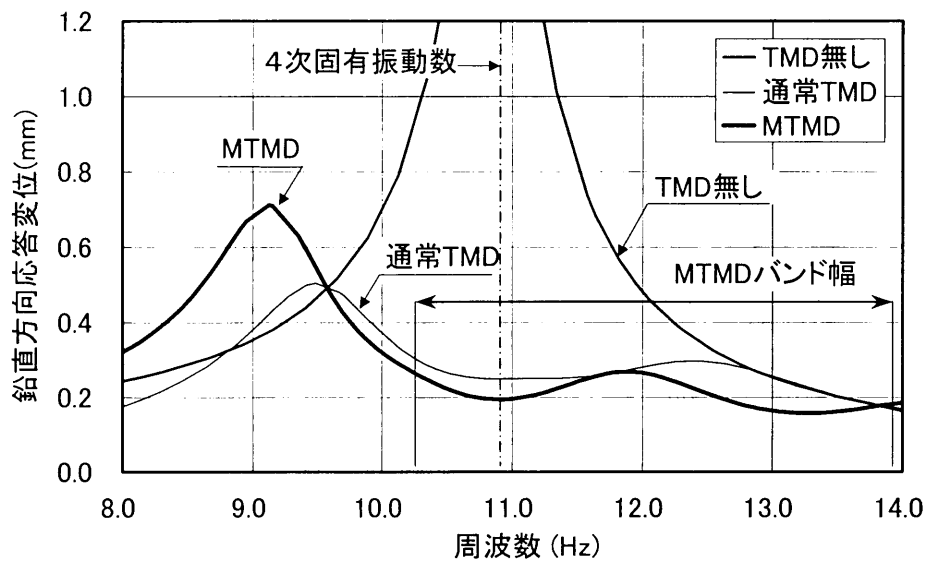


図5.1.5 A1点における周波数応答曲線（4次モード加力）

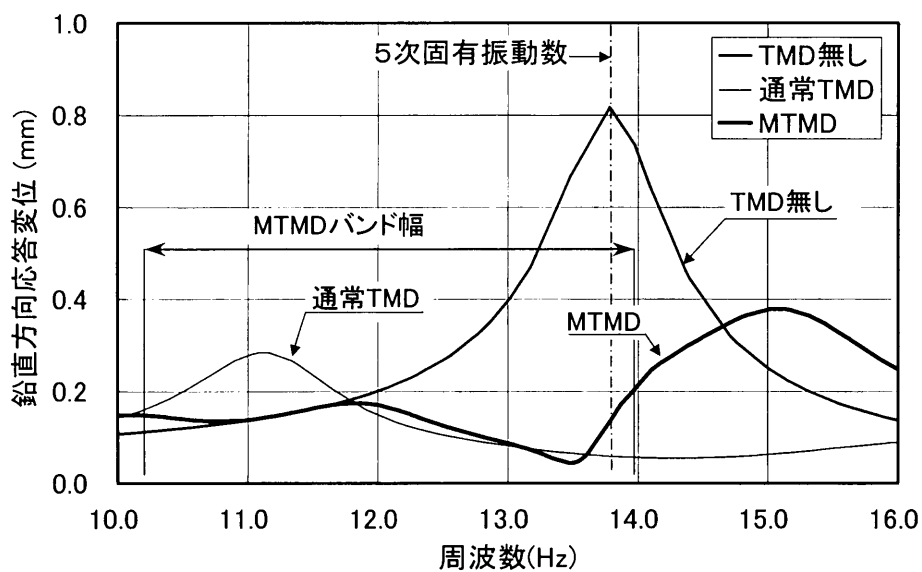


図5.1.6 B2点における周波数応答曲線（5次モード加力）

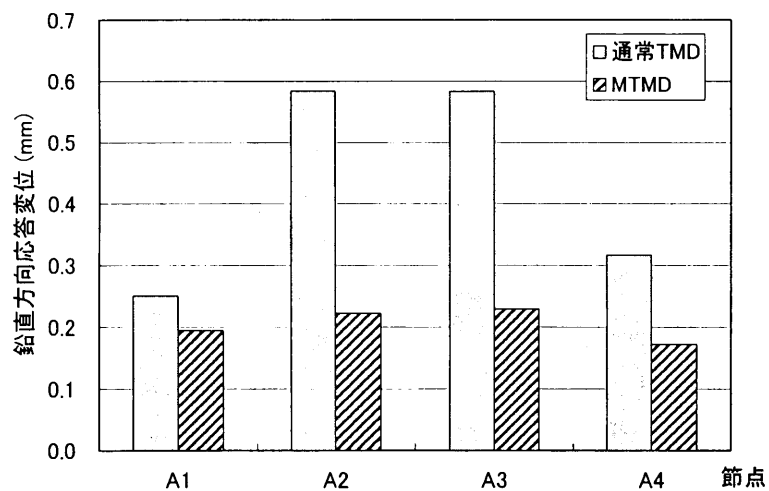
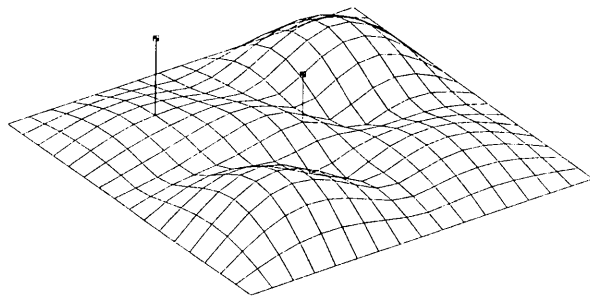
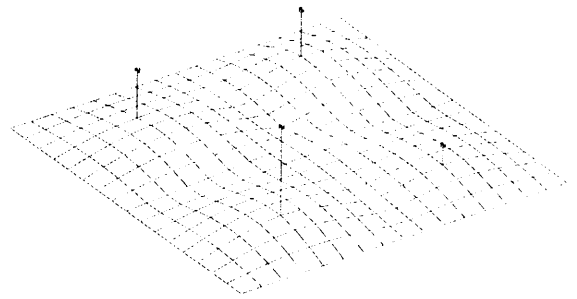


図5.1.7 4次モード腹における応答変位の比較（4次モード固有振動数）



(a)通常 TMD



(b)分散型 MTMD

図5.1.8 鉛直方向応答変位の平面分布（4次モード固有振動数）

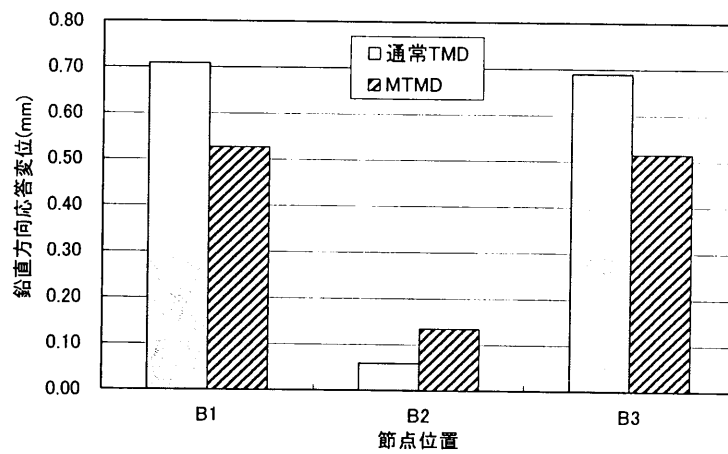


図5.1.9 5次モード腹における応答変位の比較（5次モード固有振動数）

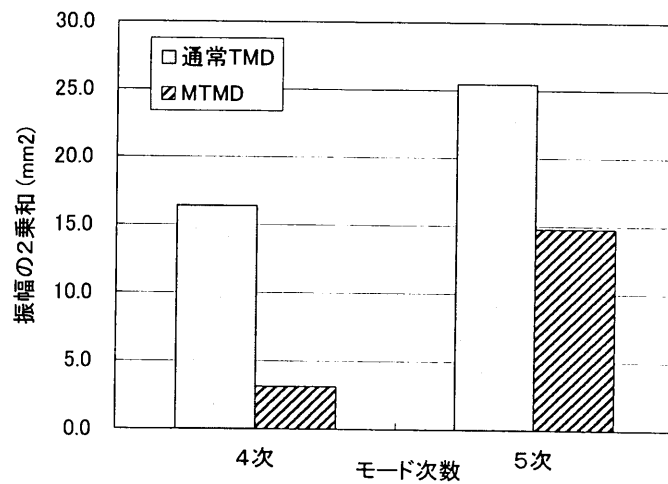


図5.1.10 全節点応答変位の2乗和の比較（4次，5次モード固有振動数）

5. 1. 5 MTMD 空間配置と設計パラメーターの直接的決定法の提案

ここでは MTMD 空間配置及び設計パラメーターを決定するための一手法として、前述した解析例のように有限要素法（FEM）による固有値解析を行わずに、理論解に基づいて直接的に決定する方法を提案する。

矩形板の固有振動モードは以下の式で表される⁵⁻²⁾。

$$B_{mn} = \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (5.1-5)$$

ここで、 a, b は矩形板の辺長、 m は辺 b に平行な節線数、 n は辺 a に平行な節線数である。本モデルの場合は $a=b=8.0\text{m}$ であり、 $m=2, n=2$ のときが 4 次モード、 $m=3, n=1$ と $m=1, n=3$ のときが 5 次と 6 次モードに相当する。

4 次と 5 次モードの振幅の絶対値の重ね合わせは式(5.1-6)で表される。ここで w_1 と w_2 は制振モードの重み付けである。

$$z = w_1 |B_{2,2}| + w_2 |B_{3,1}| \quad (5.1-6)$$

最大振幅点では、以下の(5.1-7)式を同時に満足する。

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 0, \frac{\partial z}{\partial y} = 0 \quad (5.1-7)$$

$w_1=1.0, w_2=1.0$ のとき、最大振幅点を求めると以下の 4 点となる。

$$(x, y) = (0.195a, 0.299b), (0.195a, 0.701b), (0.805a, 0.299b), (0.805a, 0.701b) \quad (5.1-8)$$

本モデルの最大振幅点位置は図 5.1-1 に示すように、数値解析により得られた C1～C4 点にほぼ一致し、ここで提案した手法の妥当性が確認された。同調比に関しても理論解を基に設定することになるが、理論解と実際の構造物の固有振動数は若干異なることが予想されるため、実設計においてはバンド幅にある程度の余裕がある設計にすべきであると思われる。

4 次と 5 次以外の低次の振動モードについて、 $w_1=1.0, w_2=1.0$ のときに振幅の絶対値を重ね合わせた図を表 5.1.5 と表 5.1.6 に示す。表中の第 1 列の振動モードと、第 1 行第 2 列～第 4 列までのモードを重ね合わせたものが求めるモードの振幅の重ね合わせである。

表 5.1.5 平板の固有振動モードの振幅の絶対値の重ね合わせ

$$B_{mn} = \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

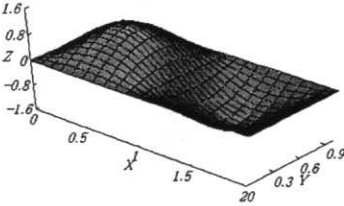
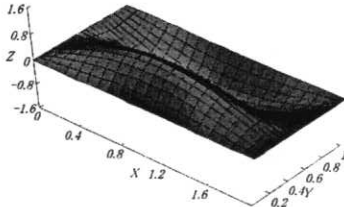
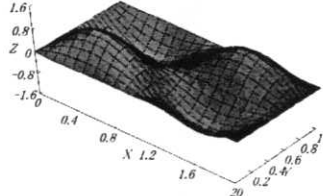
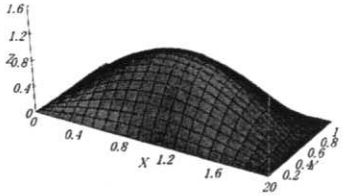
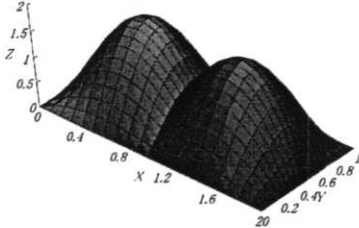
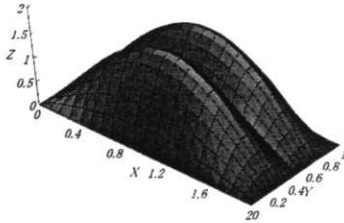
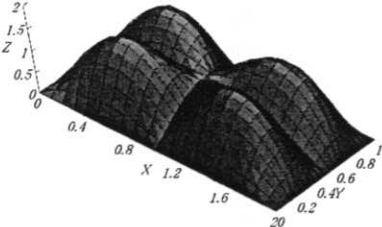
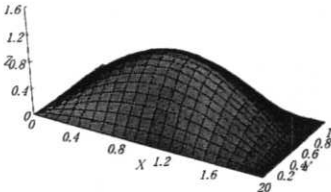
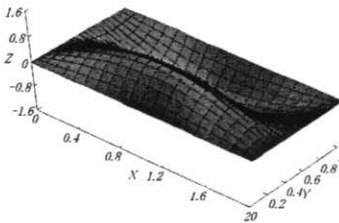
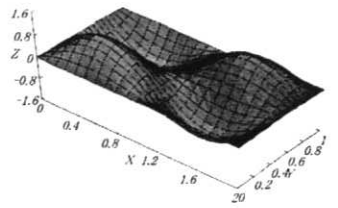
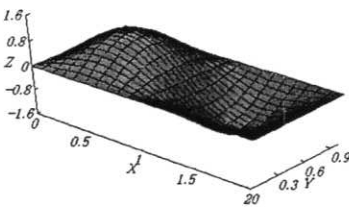
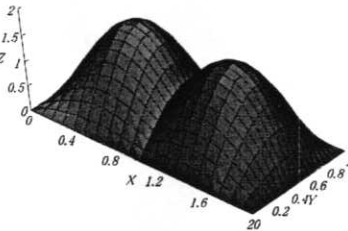
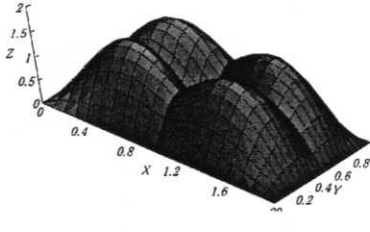
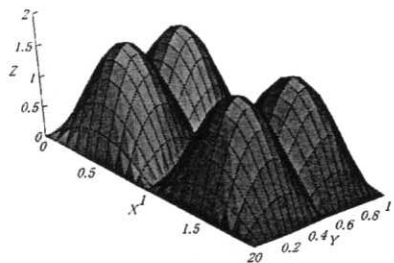
	<p>m=2,n=1</p> $B_{2,1} = \sin \frac{2\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}$ 	<p>m=1,n=2</p> $B_{1,2} = \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{2\pi y}{b}$ 	<p>m=2,n=2</p> $B_{2,2} = \sin \frac{2\pi x}{a} \sin \frac{2\pi y}{b}$ 
<p>m=1,n=1</p> $B_{1,1} = \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}$ 	<p>$z = B_{1,1} + B_{2,1}$</p>  <p>最大振幅 : z=1.760 最大振幅点位置 : x=0.298a, 0.702a y=0.500b</p>	<p>$z = B_{1,1} + B_{1,2}$</p>  <p>最大振幅 : z=1.760 最大振幅点位置 : x=0.500a y=0.298b, 0.702b</p>	<p>$z = B_{1,1} + B_{2,2}$</p>  <p>最大振幅 : z=1.562 最大振幅点位置 : x=0.290a, 0.710a y=0.290b, 0.710b</p>

表 5.1.6 平板の固有振動モードの振幅の絶対値の重ね合わせ

$$B_{mn} = \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

	<p>m=1,n=1</p> $B_{1,1} = \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}$ 	<p>m=1,n=2</p> $B_{1,2} = \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{2\pi y}{b}$ 	<p>m=2,n=2</p> $B_{2,2} = \sin \frac{2\pi x}{a} \sin \frac{2\pi y}{b}$ 
<p>m=2,n=1</p> $B_{2,1} = \sin \frac{2\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}$ 	<p>$z = B_{2,1} + B_{1,1}$</p>  <p>最大振幅：z=1.760 最大振幅点位置： x=0.298a,0.702a y=0.500b</p>	<p>$z = B_{2,1} + B_{1,2}$</p>  <p>最大振幅：z=1.760 最大振幅点位置： x=0.304a,0.696a y=0.304b,0.696b</p>	<p>$z = B_{2,1} + B_{2,2}$</p>  <p>最大振幅：z=1.562 最大振幅点位置： x=0.250a,0.750a y=0.298b,0.702b</p>

5. 2 長方形平板

本節では、前節のモデルからアスペクト比のみを変更した $8.0\text{m} \times 2.0\text{m}$ の長方形平板を解析モデルとして選択した。境界条件や、各モードの腹に板に対して鉛直方向に 9.8kN の加力を行う荷重条件など、その他の解析条件は正方形板の場合と全て同じである。本節では、特に MTMD の合計質量が同じ条件の下で複数の MTMD の質量分布をパラメーターとした解析的検討を行った。

5. 2. 1 通常 TMD と分散型 MTMD の設計

通常 TMD と分散型 MTMD で TMD 合計質量は 0.308t (質量比 : 4.01%) で共通とした。

(1) 制振モード

前節と同様に線形固有値解析を行い、今回はより低次のモードである図 5.2.1 に示す 2 次と 3 次のモードを制振モードとして選択した。表 5.2.1 に 3 次モードまでの数値解析結果と (5.1-1), (5.1-2) 式を用いた理論解による固有振動数を示す。

以降の本節中で、図 5.2.1 に示す加力方法をそれぞれ 2 次モード加力または 3 次モード加力と呼ぶ。

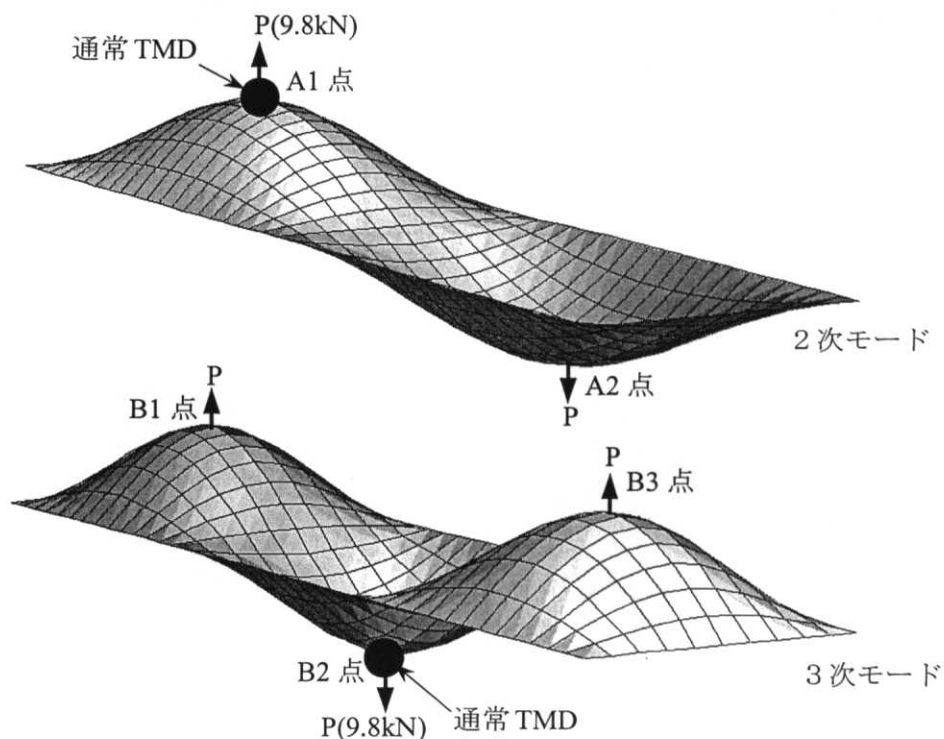


図 5.2.1 2 次モードと 3 次モード形状

表 5.2.1 3 次モードまでの固有振動数 (単位 : Hz)

モード次数	数値解析	理論解
1	23.5	23.9
2	27.1	28.1
3	33.4	35.2

(2) 通常 TMD

通常 TMD の設置位置は図 5.2.1 に示すように、2 次と 3 次モードの腹の A1 点と B2 点に 1 個ずつ合計 2 個設置した。設計パラメーターは前節と同様に、(5.1-3)と(5.1-4)式に従った。計算の結果得られた設計パラメーターを表 5.2.2 に示す。2 個の TMD の同調比及び減衰比は 2 次と 3 次モードの固有振動数に対してそれぞれ個別に設定した。

表 5.2.2 通常 TMD の設計パラメーター

パラメーター	値
TMD 1 個の質量	0.154(t) (質量比 : 2.00%)
同調比	0.980
減衰定数	0.0857

(3) 分散型 MTMD

MTMD の設置位置は、図 5.2.2 に示す 2 次と 3 次モードの重ね合わせ形状の極大点 C1～C4 の合計 4 箇所に設置した。極大点の位置は数値解析より得られた位置とほぼ同じである。MTMD の制御目標振動数は 2 次と 3 次モードの固有振動数の中間 (30.2Hz) とした。本例では MTMD バンド幅内に 2 次と 3 次の固有振動数が収まるように最適バンド幅を 1.7 倍に拡大し、調整後の MTMD バンド幅を 25.8～33.5(Hz)とした。表 5.2.3 に MTMD の設計パラメーターを示す。図 5.2.3 に 4 個の MTMD の周波数軸上での分布を示す。4 個の MTMD は MTMD1 を図 5.2.2 の C1 点、MTMD2 を C2 点、MTMD3 と MTMD4 を C3 点と C4 点に設置した。

今回のモデルにおけるモードの重ね合わせ形状は極大点における振幅の大きさが異なるため、MTMD の質量分布を変更した解析も実施した。解析ケースは全部で 4 ケースとし、ケース 1 は MTMD の質量が全て同じ、ケース 2 は質量分布を MTMD 設置点の重ね合わせ振幅の大きさに比例させ、ケース 3 は振幅の大きさの 2 乗に比例させ、ケース 4 はさらに分布の差が大きくなるように 0.03(t)移動させた。全ケースで MTMD の合計質量は同じとし、4 個の MTMD の固有振動数及び減衰定数は同じとした。表 5.2.4 に各ケースにおける MTMD の質量を示す。

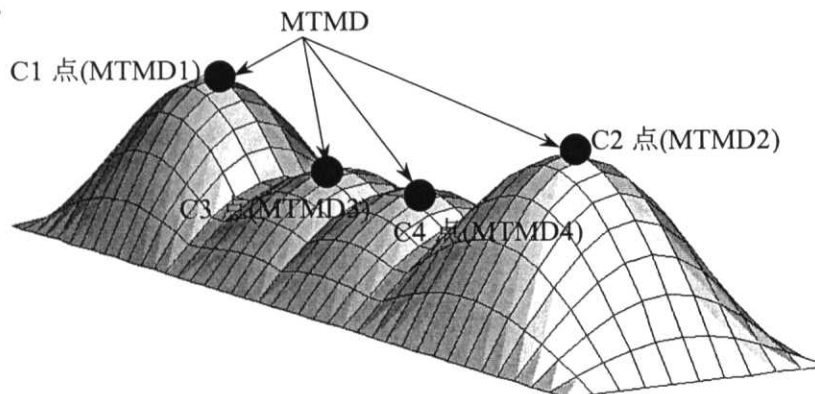


図 5.2.2 2 次と 3 次モードの重ね合わせ形状

表5.2.3 MTMDの設計パラメーター

パラメーター		値
MTMD 1 個の質量		0.0770(t) (質量比 : 1.00%)
同調比	MTMD1	0.853
	MTMD2	0.938
	MTMD3	1.02
	MTMD4	1.11
減衰定数		0.0480

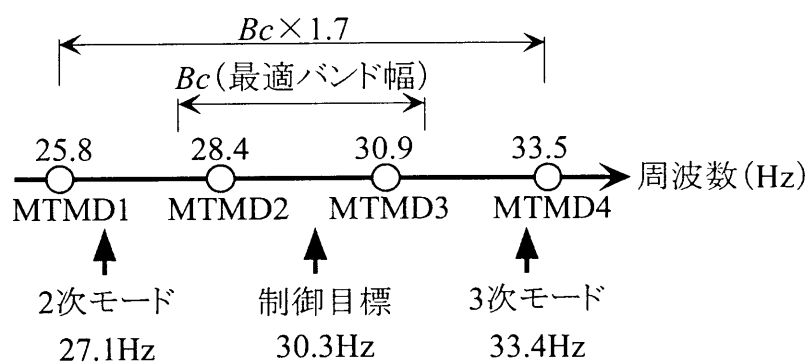


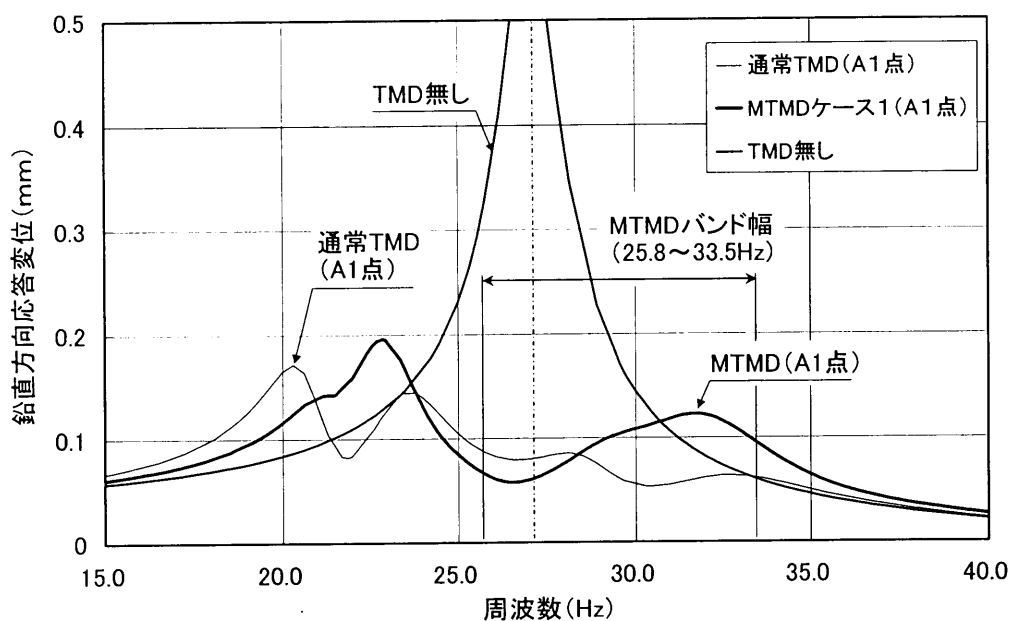
図 5.2.3 周波数上での MTMD の分布

表 5.2.4 各解析ケースにおける MTMD 質量分布 (単位 : t)

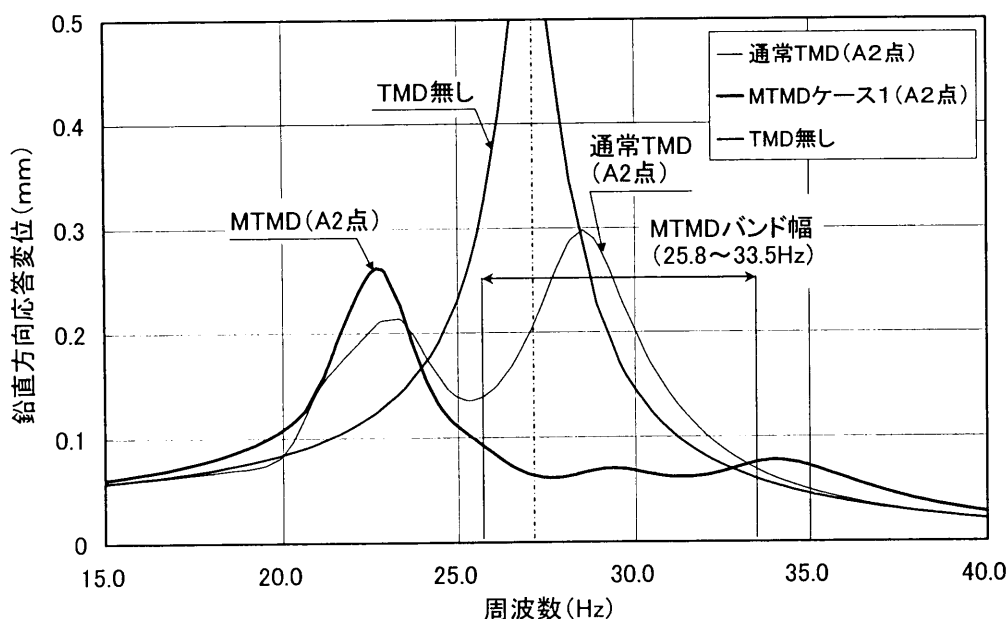
	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
MTMD1	0.0770	0.0940	0.109	0.139
MTMD2	0.0770	0.0600	0.045	0.015
MTMD3	0.0770	0.0600	0.045	0.015
MTMD4	0.0770	0.0940	0.109	0.139

5. 2. 2 周波数応答解析

まず MTMD ケース 1 と通常 TMD の周波数応答解析結果の比較を行う。図 5.2.4 に 2 次モード加力時の 2 次モード腹 (図 5.2.1 の A1 点及び A2 点) の鉛直方向変位に関する周波数応答曲線を示す。図 5.2.5 に 3 次モード加力時の腹 (図 5.2.1 の B1 点及び B3 点) の応答曲線を示す。2 次, 3 次ともに 28.5(Hz) 付近で A2 点と B3 点の応答が大きい。これは図 5.2.6 に示す通常 TMD を設置した状態の 3 次モード (固有振動数 28.5Hz) が励起されたためである。MTMD はバンド幅内において凹凸の少ないバランスの取れた応答になっている。



(a)A1 点



(b)A2 点

図 5.2.4 A1 点と A2 点での周波数応答曲線の比較 (2 次モード加力)

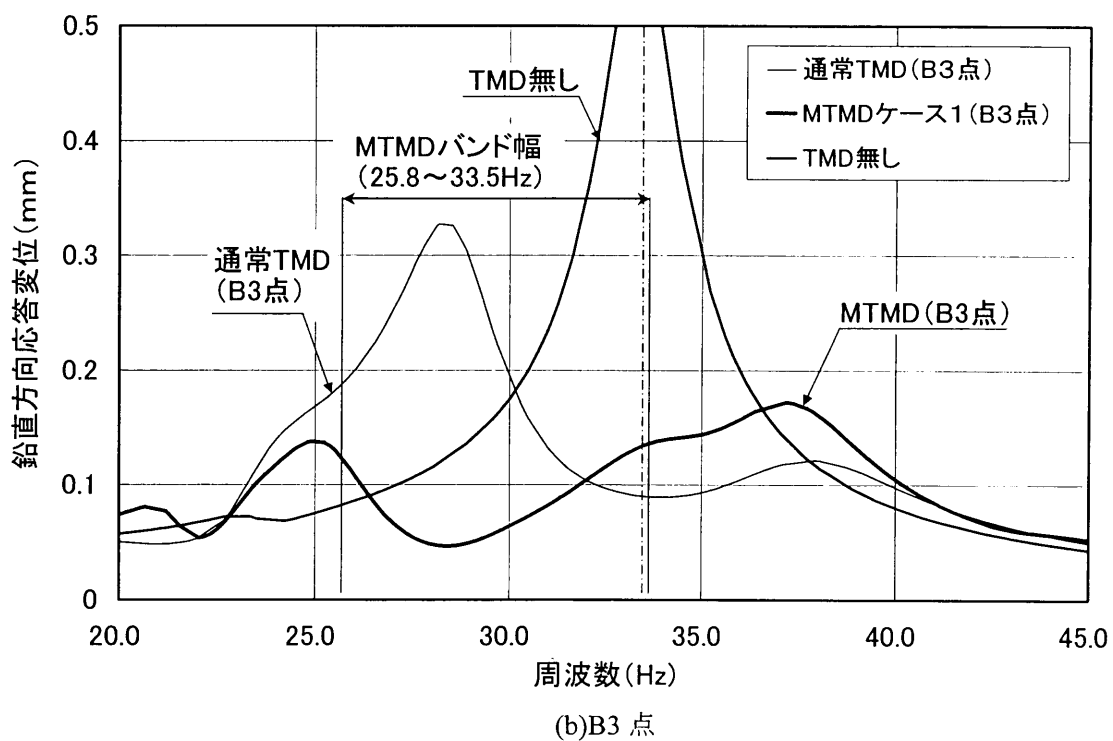
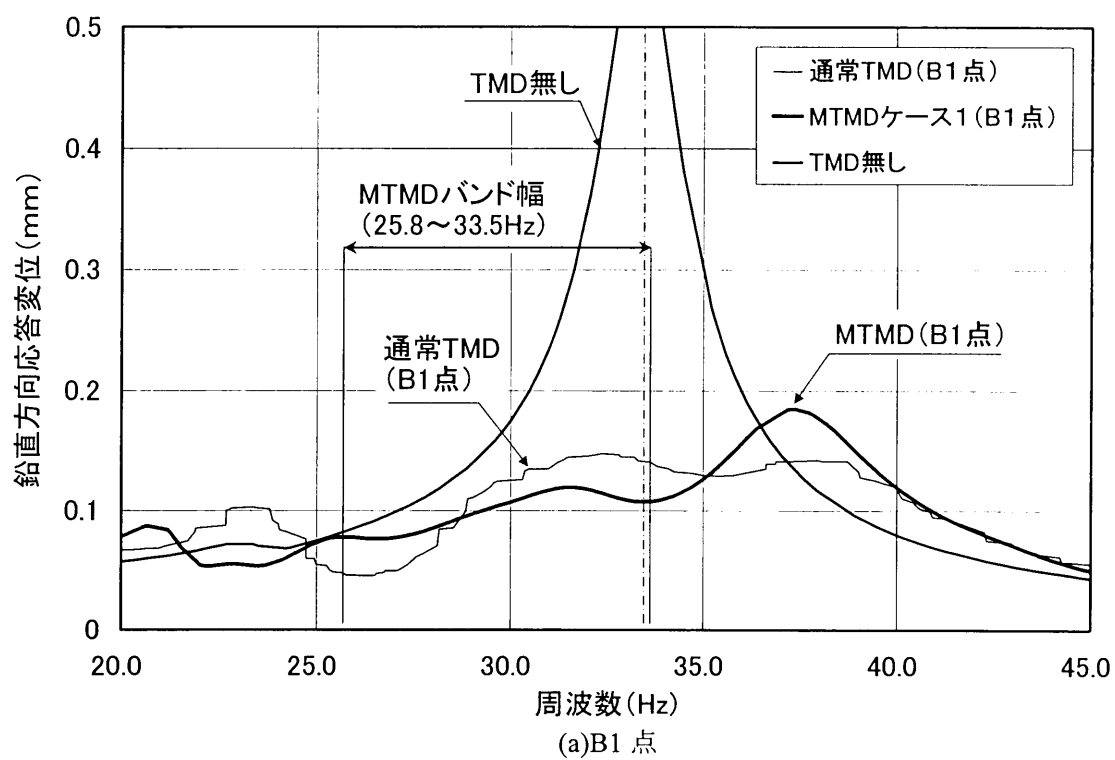


図 5.2.5 B1 点と B3 点での周波数応答曲線の比較（3 次モード加力）

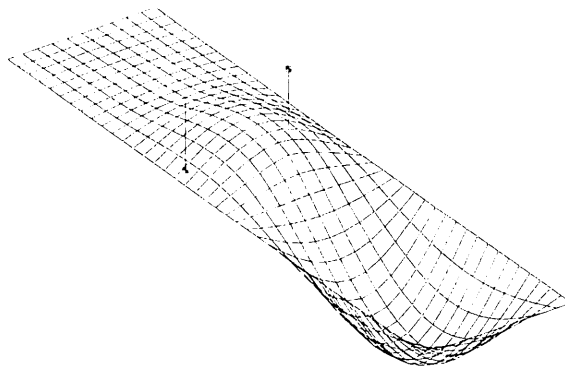
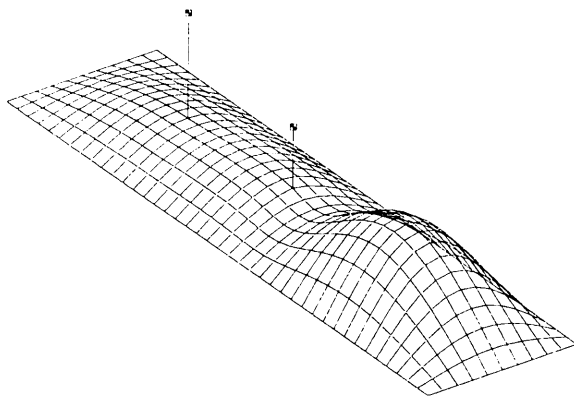
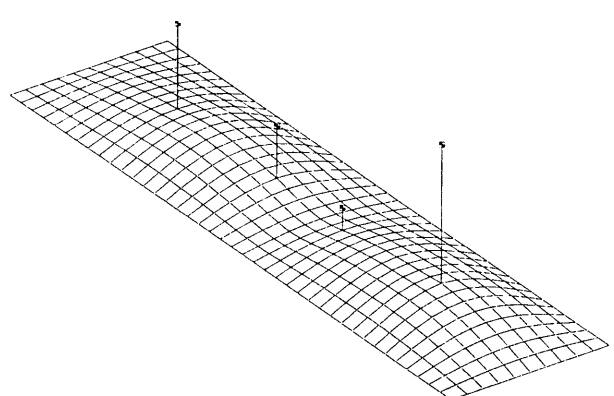


図 5.2.6 通常 TMD 設置後の 3 次モード(28.5Hz)

図 5.2.7 と図 5.2.8 に 2 次と 3 次の固有振動数における鉛直方向応答変位の平面分布を示す。図に示すように分散型 MTMD は 2 次と 3 次両方のモードで通常 TMD より振幅のバラツキが小さい。

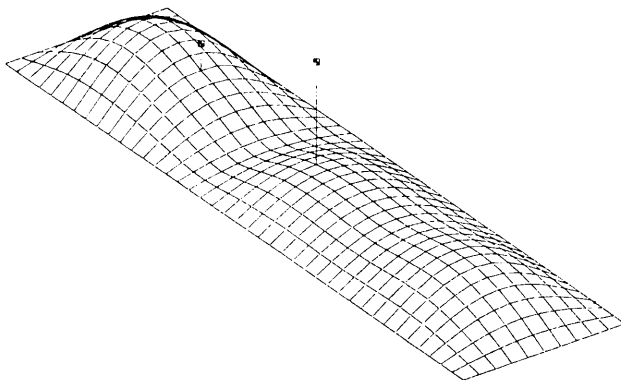


(a)通常 TMD

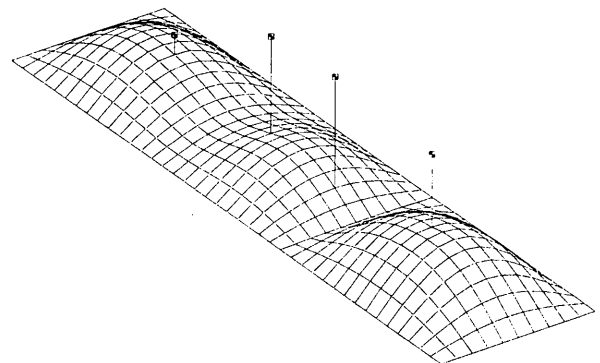


(b)MTMD

図 5.2.7 鉛直方向応答変位の平面分布（2 次モード固有振動数：27.1Hz）



(a)通常 TMD



(b)MTMD

図 5.2.8 鉛直方向応答変位の平面分布（3 次モード固有振動数：33.4Hz）

図 5.2.9 に 2 次と 3 次の固有振動数における全節点の鉛直方向応答の 2 乗和の比較を示す。MTMD ケース 1 以外の結果も示す。ケース 3 以外は 2 次モードにおける効果は大きいですが、3 次モードは通常 TMD の方が効果が高い。MTMD ケース 3 では 2 次と 3 次の両方に対して効果が高いことが分かる。このため MTMD の質量分布を調整することにより、目標性能に応じた制振設計ができる可能性がある。

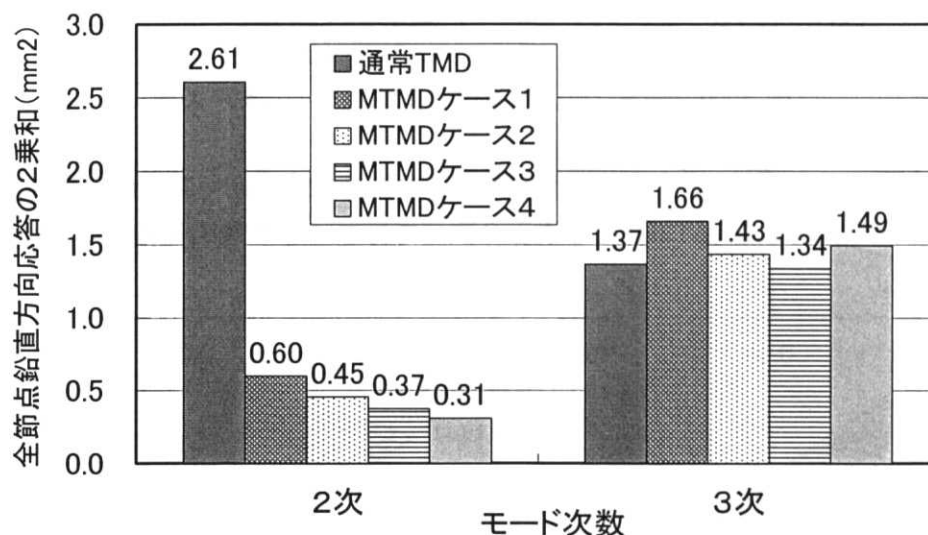


図 5.2.9 全節点の鉛直方向応答の 2 乗和

図 5.2.10 に示す 1 次モードには節が存在しないため、2 次と 3 次の制振用に配置した MTMD はバンド幅の調整のみで 1 次モードの制御も可能であると考えられる。そこで MTMD の配置を変えずにバンド幅のみを変更して周波数応答解析を行った。制御振動数は 1 次と 3 次の固有振動数の中間 (28.4Hz) とし、最適バンド幅の 2.7 倍とした。調整後の MTMD のバンド幅は 22.1~33.6(Hz)である。質量分布は 2 次と 3 次ともに通常 TMD より効果が高かった MTMD ケース 3 を採用した。図 5.2.11 に MTMD の周波数軸上の分布を示す。1 次モード腹 (図 5.2.10 の D 点) に加力したときの 1 次モード腹の鉛直方向変位に関する周波数応答曲線を図 5.2.12 に示す。1 次の腹は 2 次の節にあたるため今回の加力方法では 2 次モードは励起されないが、1 次と 3 次の両方のモードに対して制御効果があることが分かる。参考のため図中に通常 TMD の応答曲線も示す。20.6(Hz)付近の応答が大きい。

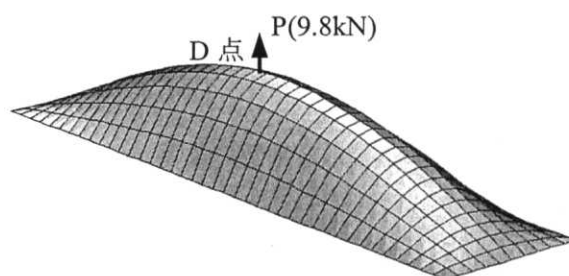


図 5.2.10 1 次モード形状

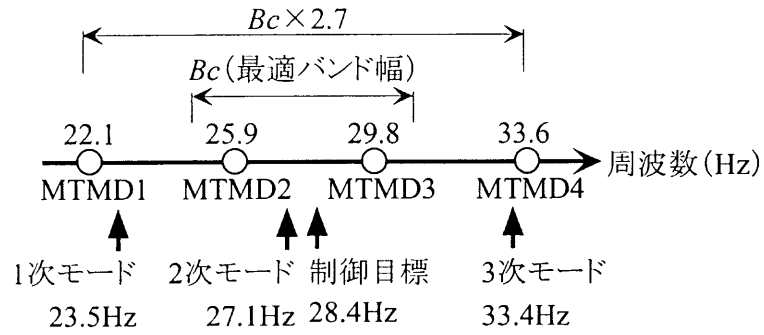


図 5.2.11 周波数軸上での MTMD の分布

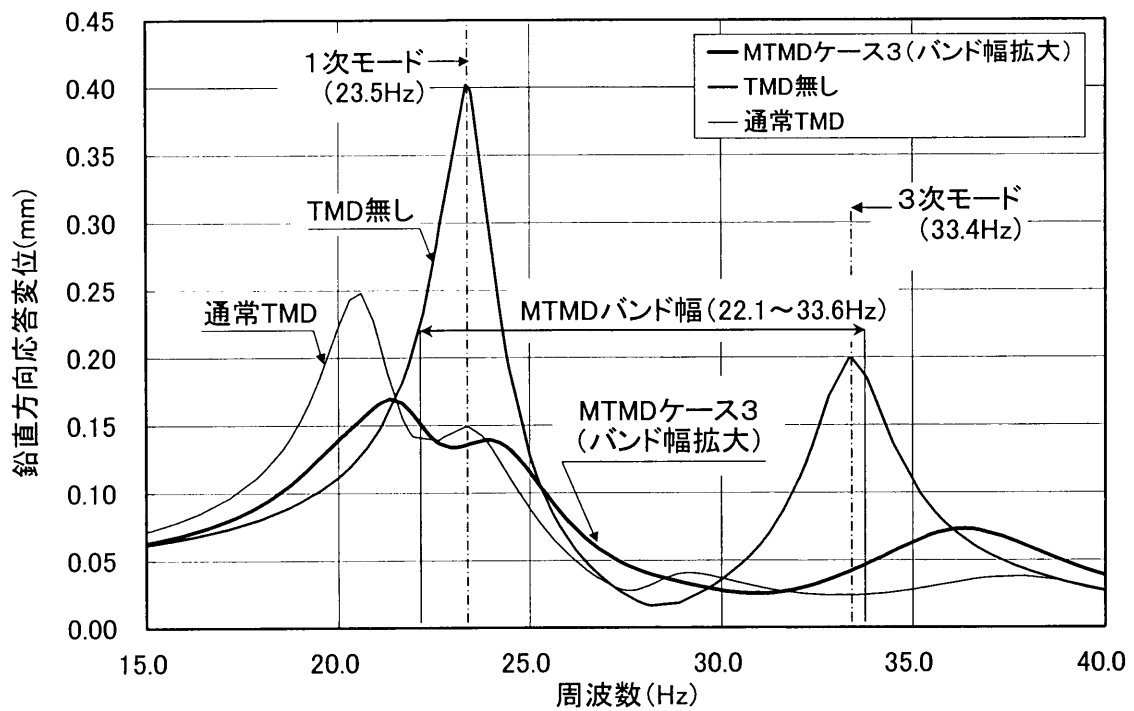


図 5.2.12 D 点における周波数応答曲線（1 次モード加力）

5. 3 質量比の算定に関する考察

これまでも述べたが，多自由度系の TMD の設計時に必要となる質量比の算定には等価質量を用いるのがより一般的である。そこで本章では MTMD の場合に，主振動系の質量として全体構造質量を用いた場合と等価質量を用いた場合の比較を行う。

5. 3. 1 等価質量の算定法

既往の文献 5-1)，5-5) に基づき等価質量の計算方法を以下にまとめる。

N 自由度系において，制御対象とする i 次モードの固有ベクトルが以下の(5.3-1)式で表されるとする。

$$\{x_i\}^T = \{x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_j \quad \cdots \quad x_N\} \quad (5.3-1)$$

各質点の速度は $\rho x_1(\text{m/sec}), \rho x_2, \dots, \rho x_N$ で表される。 ρ が全節点で共通なのは同じ固有振動数で振動するためである。質点の質量を m とすると，この系全体の運動エネルギーは以下の式で表される。

$$T_{all} = \frac{1}{2} (m_1 \rho^2 x_1^2 + m_2 \rho^2 x_2^2 + \cdots + m_N \rho^2 x_N^2) \quad (5.3-2)$$

モード解析法では N 自由度系を連成の無い N 個の 1 自由度系の集まりと考えるので同様に 1 自由度系で表すことを考える。質点 j に着目し， j 点で 1 自由度系に置換するには N 自由度系における j 点と全く同じ運動をしていると考えて，運動エネルギーを(5.3-3)式で表す。

$$T_j = \frac{1}{2} M_{i,j} (\rho x_j)^2 \quad (5.3-3)$$

$M_{i,j}$ を i 次モードの j 点 (TMD 設置位置) における等価質量と定義する。 $T_j = T_{all}$ とおけば等価質量は以下の式で求めることが出来る。

$$M_{i,j} = \begin{bmatrix} x_1/x_j \\ x_2/x_j \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ x_N/x_j \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & 0 \\ & & \ddots & & \\ & & & m_j & \\ 0 & & & & \ddots \\ & & & & & m_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1/x_j \\ x_2/x_j \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ x_N/x_j \end{bmatrix} \quad (5.3-4)$$

5. 3. 2 MTMD における等価質量の算定と平均等価質量の提案

全体構造質量と等価質量を用いた場合の比較を 5. 1 節と同じモデルを用いて行う。両者の違いは，通常 TMD の質量比 μ 及び MTMD の合計質量比 μ_{total} の評価が変わることによるものである。通常 TMD の場合に(5.1-1),(5.1-2)式を用いて各質量で求めた同調比と減衰比

を表 5.3.1 に示す。等価質量を用いた場合は質量比が大きくなるため、同調比が小さくなり、減衰比は逆に大きくなる。

表 5.3.1 通常 TMD における同調比と減衰比の比較

質量の種類	モード	質量比	最適同調比	最適減衰比
全体構造質量	4, 5 次	0.0195	0.981	0.0848
等価質量	4 次	0.0779	0.927	0.165
	5 次	0.107	0.904	0.190

では、提案した手法のように複数のモードを同時に制御する場合はモード毎に異なる等価質量をどう設定すればよいのであろうか。図 5.1.3 の重ね合わせ形状から(5.3-4)式を用いて計算しても実際にはこのようなモードは存在しないため、物理的には意味がない。そこで複数のモードを平均的に制御するという提案した手法の原点に立ち返り、以下の(5.3-5)式のような簡易な設定法を提案する（以下、平均等価質量と述べる）。式中 M の添え字はモードの次数を示す。

$$M_{ave} = (\alpha_4 M_4 + \alpha_5 M_5) / (\alpha_4 + \alpha_5) \quad (5.3-5)$$

ここで α_4 及び α_5 は重み付けであり、以下の解析では $\alpha_4 = \alpha_5 = 1.0$ とした。

MTMD の場合に、合計質量比 μ_{total} の評価法の違いが MTMD パラメーター設定に与える影響は(3.3-2)式に示す中心の MTMD の固有振動数 ω_0 と、(3.3-6)式の最適バンド幅 B_c である。表 5.3.2 に各質量で計算した値を示す。制御目標振動数 ω_s は 5.1 節と同じく 12.3(Hz) とした。表に示すように 4 次と 5 次又は平均等価質量を用いた場合の違いは少ないが、全体構造質量を用いた場合は質量比が小さくなるため、中心の MTMD の固有振動数は大きく、最適バンド幅は狭くなる。

最適バンド幅を基にした MTMD バンド幅の調整方針は 5.1 節と同様に 4 次と 5 次の固有振動数がともに含まれるようにした。以上の方針から、等価質量を用いた場合は最適バンド幅の 1.5 倍に、全体構造質量を用いた場合は最適バンド幅の 2.0 倍に調整した。最終的に決定された 4 個の MTMD の同調比と減衰定数を表 5.3.3 に示す。最大の同調比 (MTMD4) は主振動系の質量に関わらずほぼ同じであるが、最小の同調比 (MTMD1) は全体構造質量の場合は等価質量の場合より大きい。減衰定数は全体構造質量の方が小さい。表 5.3.3 に示すように今回のモデルは 3 種の等価質量の違いは少ないが、等価質量の考え方を導入することにより、MTMD 設置位置の振幅に対する各モードの寄与率によって MTMD の質量分布を決定できる可能性もある。

表 5.3.2 中心の MTMD の固有振動数 ω_0 及び最適バンド幅 B_c の比較

質量の種類		主振動系質量 (t)	質量比	ω_0 (rad/sec)	B_c
全体構造質量		30.7	0.00977	76.0 (12.1Hz)	0.152
等価質量	4 次	8.98	0.0334	72.7 (11.6Hz)	0.281
	5 次	13.4	0.0224	74.2 (11.8Hz)	0.230
	平均	11.2	0.0268	73.6 (11.7Hz)	0.251

表 5.3.3 各 MTMD の同調比と減衰比の比較

パラメーター	MTMD	全体構造質量	等価質量		
			4 次	5 次	平均
同調比	MTMD1	0.832	0.741	0.793	0.771
	MTMD2	0.931	0.873	0.903	0.891
	MTMD3	1.03	1.01	1.01	1.01
	MTMD4	1.13	1.14	1.12	1.13
減衰定数	共通	0.0558	0.0774	0.0634	0.0693

5. 3. 3 周波数応答曲線の比較

MTMD の空間配置は変化させないためモード形状はほぼ同じと考えられるため、ここでは 1 節点の周波数応答曲線で比較する。比較する点は 5. 1 節と同じ通常 TMD を設置した 4 次と 5 次モードの腹の位置とした (図 5.1.2 の A1 点及び B2 点)。検討の結果、MTMD の場合は 5 次モード加力時に質量設定が制振効果に及ぼす影響は小さいことが分かった。これは 5 次モード側の MTMD4 の同調比がほぼ同じであるためと考えられる。そのため以下では 4 次モード加力の場合に関して比較する。図 5.3.1 に A1 点の鉛直方向変位に関する周波数応答曲線を示す。参考のため等価質量で設定した通常 TMD の応答も示す。図 5.1.5 に示す全体構造質量で設定した通常 TMD の場合に比較して、応答が凹凸の大きい山谷型から凹凸の小さい台形型に変化している。

MTMD で等価質量を用いた場合は全体構造質量を用いた場合に比較して MTMD のバンド幅が広くなり (図には平均等価質量のバンド幅のみ示す)、バンド幅内で振幅の凹凸が小さく、バンド幅の外側 (周波数の低い側) で応答が低くなる傾向があるが、通常 TMD ほど応答曲線の形状自体に大きな変化は見られない。MTMD の制振効果は MTMD のバンド幅との関係で考えるべきであるため、制振効果をバンド幅内における応答曲線の下方の振幅 2 乗面積 A で比較する。MTMD の最小固有振動数を ω_l 、最大固有振動数を ω_m 、対象節点における振幅を $X(\omega)$ とすると、以下の(5.3-6)式で示される。

$$A = \int_{\omega_l}^{\omega_m} X(\omega)^2 d\omega \quad (5.3-6)$$

バンド幅は 3 種類の等価質量で大きな差がないため、ここでは簡単のために平均等価質量と全体構造質量の場合の 2 種類を用いる。図 5.3.2 に平均等価質量で設定した広いバンド幅 (9.50~13.9Hz) と全体構造質量で設定した狭いバンド幅 (10.3~13.9Hz) での比較を示す。

図には等価質量で設定した通常 TMD の場合も示す。MTMD の場合に、広いバンド幅では全体構造質量で設定した場合と等価質量の場合は同程度であり、狭いバンド幅では全体構造質量の場合の効果が若干高いが、いずれの場合も通常 TMD より効果が高い。

以上より、提案した手法は全体構造質量と等価質量の場合で応答曲線の形状とバンド幅内の振幅 2 乗面積において大きな違いは見られなかった。これは制御目標振動数をポイント的に定める通常 TMD と異なり、MTMD はあるバンド幅で制御する考え方であり、提案した手法の場合は制御モードに応じてバンド幅を設計者が調整するため、最終的に決定される設計パラメーターに大きな違いが生じないためであると思われる。平均等価質量は、応答曲線と振幅 2 乗面積ともに 4 次と 5 次の等価質量の平均程度であり、複数のモードを制御する場合の等価質量の設定法として有用であると考えられる。

よって、本論文中的次章以下では、分散型 MTMD における複数振動モード制御のための等価質量の算定には平均等価質量を用いた。

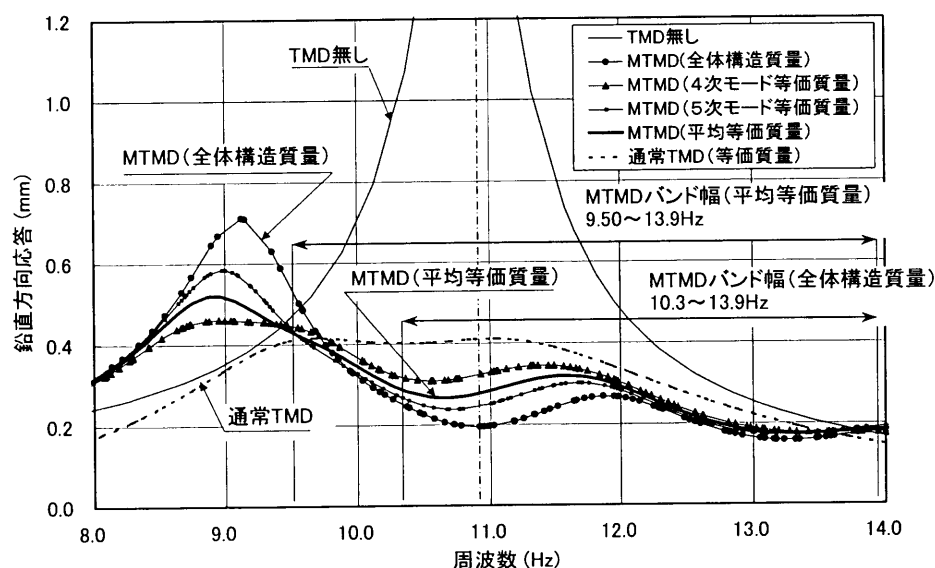


図 5.3.1 A1 点における周波数応答の比較（4 次モード加力）

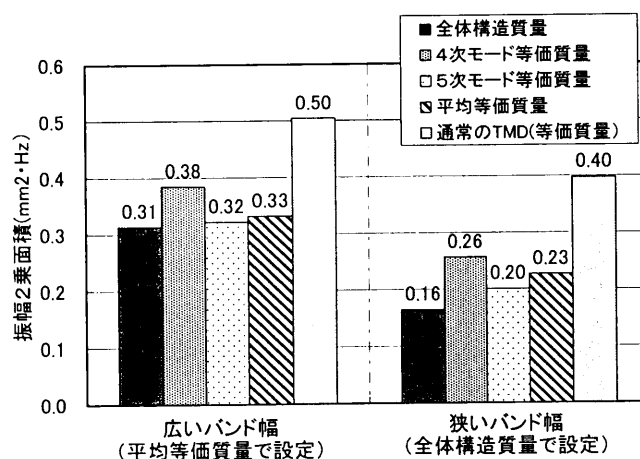


図 5.3.2 A1 点における振幅 2 乗面積の比較（4 次モード加力）

5. 4 本章のまとめ

本章では，前章で提案した分散型 MTMD の制振効果を確認するために，正方形平板と長方形平板の 2 つのモデルを対象として，周波数応答解析を行った。長方形平板における振動モードの振幅の重ね合わせ形状は，極大点における振幅の大きさが異なるため，MTMD の質量分布を変更した解析的検討も実施した。

5. 1 節と 5. 2 節における検討結果から，提案した手法の特徴をまとめると表 5.4.1 のようになる。空間領域で振幅のバラツキが小さいのは，MTMD を分散型に配置することにより，MTMD 設置前後でモード形状の変化が小さく，通常 TMD に比較して MTMD 設置後のモード形状が滑らかであることによるものである。

さらに制振効果の高さは，複数のモード形状の重ね合わせから MTMD の配置を決定したため，他のモード形状と無関係に TMD 配置を決定する通常 TMD の手法に比較して，TMD の合計質量が同じという条件下での TMD の効率が高くなっているためである。

表 5.4.1 分散型 MTMD の特徴

領 域	適用手法	特 徴
空 間	分散型 TMD	構造物全体での振幅のバラツキが小さい
周波数	MTMD	MTMD バンド幅内で応答の凹凸が少ない

本章での検討結果から，大スパン建築構造における複数振動モード制御のための分散型 MTMD の特徴と適用性を確認した。

また，5. 3 節では，等価質量が制振効果に及ぼす影響を確かめるために，正方形平板モデルを対象に周波数応答解析を行った。その結果，提案した手法は通常 TMD と比較して主振動系の質量設定が制振効果に及ぼす影響は小さいこと，及び MTMD の等価質量の設定法として提案した平均等価質量の有用性を確認した。

本論文中的次章以降では，本章で提案した平均等価質量を用いている。