

インパルス外力を受けた単層円筒ラチスにおける
初期変位付与型 TMD による振動制御に関する研究
Study on Vibration Control using Tuned Mass Damper with Initial Displacement
for Single Layer Lattice Cylindrical Shell under Impulse Load

建築構造学分野 [] 中谷 昌弘

本研究の狙いは通常の TMD では抑えることができなかった衝撃力が与えられた直後の初期の応答を制御することである。そのために、TMD にあらかじめ初期変位を与え、初期の応答から強制的に TMD の振幅を大きくする手法を採用した。

本研究における対象モデルは多自由度系モデルの単層円筒ラチスシェルである。1 自由度系モデルにおける既往の研究結果を参考に適度な初期変位を与えることによって、減衰に関する効果を維持し、初期の応答に対する制振効果を確認することができた。

他の多自由度系モデルにおける研究も今後必要となるが、本研究の位置付けとしてはその第一歩であると考えられる。

1. 序

本研究で採用する振動制御法である TMD (Tuned Mass Damper) はエネルギーの注入を必要としない受動要素で構成されるパッシブ振動制御にあたる。TMD は、1 つの大きな振動系である構造物の振動を、もう 1 つの小さな 1 自由度振動系を付加することによって制御しようとするものである。TMD は支点を必要としないことから自由な設計ができるため空間構造物への適用を進めていきたい。

TMD は比較的小さい制御力によって減衰変化を可能とするため、高い制御効率が期待される。しかし通常の TMD では減衰能力は高いが、衝撃力が作用した直後の初期の応答を抑えることがほとんどできない¹⁾。

そこで TMD に初期変位を与えることによって、強制的に TMD の振幅を大きくし、初期の応答に対する制振効果を高める手法を採用する。

TMD の最適設計パラメーターを用い、通常の TMD を設置した場合と初期変位を与えた TMD を設置した場合を比較し考察する。

2. 解析モデル

解析モデルは中小規模の体育館屋根として一般的な単層円筒ラチスシェルを対象とする。

モデルの大きさは、平面が 50.0m×75.0m の長方形で、高さが 12.5m、ライズスパン比は 0.25 である。モデル全体の合計節点数は 122 である。

境界条件については両妻面をピン支持、両直線端を Y 方向ローラー支持とした。部材間の接合は全て剛接合としている。

材料は全て鋼材を仮定し、部材の断面は鋼管 ϕ - 318.5×9.0 を用いた。

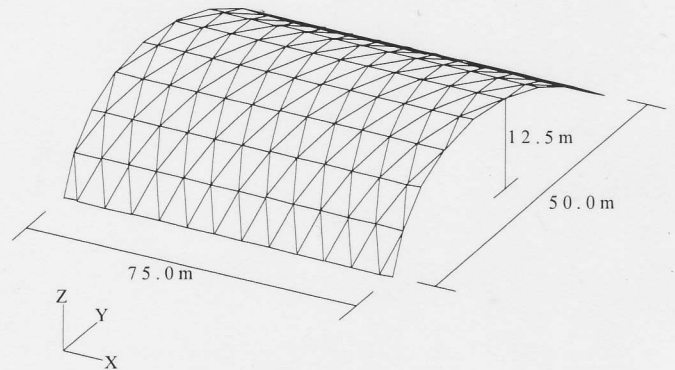


図1 解析モデルのアクソメ図

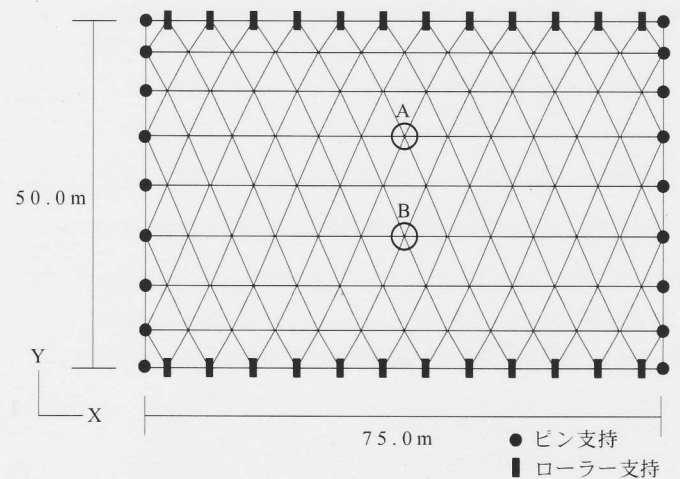


図2 解析モデルの平面図

解析を行う際、一般に全てのモードを考慮するのではなく、動的挙動に支配的な影響を及ぼすモードのみを取り出して計算する場合が多い。これらの卓越モードは、刺激係数や有効質量比によって選定できる。

本研究においては、有効質量比によって卓越モードを評価する。

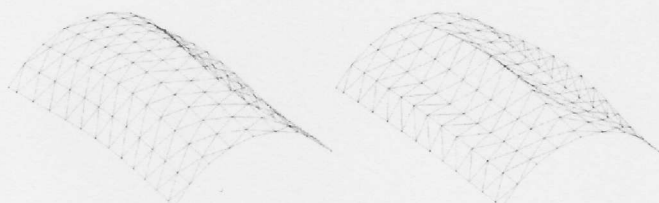
有効質量比は次のように表される³⁾。

$$\bar{M}^{(j)} = \frac{(\sum_{i=1}^n m_i u_i^{(j)})^2}{\sum_{i=1}^n m_i (u_i^{(j)})^2} \quad (1)$$

表1に10次モードまでの比較的有效質量比の大きいモードの固有振動数と有効質量比を示す。

表1 固有振動数と有効質量比

| モード次数 | 固有振動数 (Hz) | 有効質量比 | | |
|-------|---------------|-------|--------|--------|
| | | X | Y | Z |
| 1 | 2.423 | 0 | 0 | 0.0209 |
| 2 | 2.495 | 0 | 0.0525 | 0 |
| 3 | 3.412 | 0 | 0.0171 | 0 |
| 6 | 4.273 | 0 | 0 | 0.4481 |
| 7 | 4.922 | 0 | 0 | 0.0508 |
| 10 | 5.618 | 0 | 0.0029 | 0 |



(a) 6次モード

(b) 7次モード

図3 Z方向の有効質量比の大きい振動モードの形状

6次モードにおいて最大の変位を示した節点(腹の節点)が節点Aと節点B(図2)であったことからTMDの設置位置はこの2点に着目することとする。まずは節点AにのみTMDを設置した場合と、次に節点Aと節点Bの2点に設置した場合とを考え、またその各々に対して調和地盤振動と自由振動の場合の2パターンでのTMDを設計する³⁾。



図4 モデル名

調和地盤振動に対するTMDの最適パラメーターは、

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (2)$$

$$\xi_T = \sqrt{\frac{3}{8} \frac{\mu}{1+\mu}} \quad (3)$$

自由振動に対するTMDの最適パラメーターは、

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (4)$$

$$\xi_T = \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \quad (5)$$

式(2)から(5)より算出されたTMDの設計パラメーターを表2に示す。

表2 TMDの設計パラメーター

| 設置位置 | 質量 (Kg) | バネ定数 (N/m) | 減衰定数 (N-sec/m) |
|------------|------------|---------------|-------------------|
| TMD1 A | 786 | 554994 | 3600 |
| TMD2 A | 786 | 544112 | 5849 |
| 2TMD1 A, B | 393 | 277497 | 1800 |
| 2TMD2 A, B | 393 | 272056 | 2896 |

3. 時刻歴応答解析

インパルス外力が作用した際の制振効果を確認するために時刻歴応答解析を行った。解析手法は直接過度応答解析を用い、積分時間刻みを0.01秒とした。インパルスを0.0秒から0.01秒にZ方向に与え、TMD設置位置の節点AにおけるTMDなしの場合の最大応答速度が1.46m/secになるように大きさを調整し、その結果6.54×10¹⁴Nとした。構造物の減衰はレーリー減衰を用いて、1次と6次のモードで2%となるように設定した。

3.1 最適初期変位付与時の時刻歴応答解析

TMDの最適初期変位の算出には式(6)を用いる⁴⁾。

$$y_0 = -10.6 \times \frac{x_0}{\omega_a} \quad (6)$$

この設計式は吉中の研究によるもので、調和地盤振動最適化パラメーターである。

\dot{x}_0 はTMDを設置した状態でのTMDを設置した点における応答初速度、 ω_a は制御モードである構造物の6次モードの固有振動数とTMDの固有円振動数の平均値である。

本研究における単層円筒ラチスシェルにおいて式(6)を用いて最適初期変位を算出すると、TMD1の場合 $y_0 = -0.466$ m、2TMD1の場合 $y_0 = -0.532$ mであった。

TMD1の場合における節点Aについて図5に、節点Bについて図6に時刻歴応答曲線を示す。節点Aにおいては、最適初期変位を与えることによって、初期の応答や減衰などに有効な制振効果が確認できる。しかし、TMDを設置していない節点Bにおいて逆に応答変位が大きくなっていることも確認できる。

また2TMD1の場合における節点A, Bについて図7に時刻歴応答曲線を示す。最適初期変位を与えることによって、TMD1のときと比較して、また初期変位を与えないときと比較して、さらなる制振効果が確認できる。

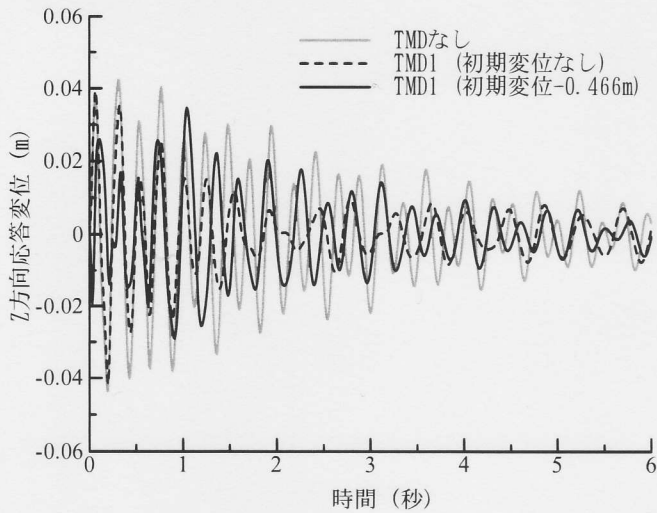


図5 Z方向時刻歴応答曲線
($T_z=0.466\text{m}$, 節点A, TMD1)

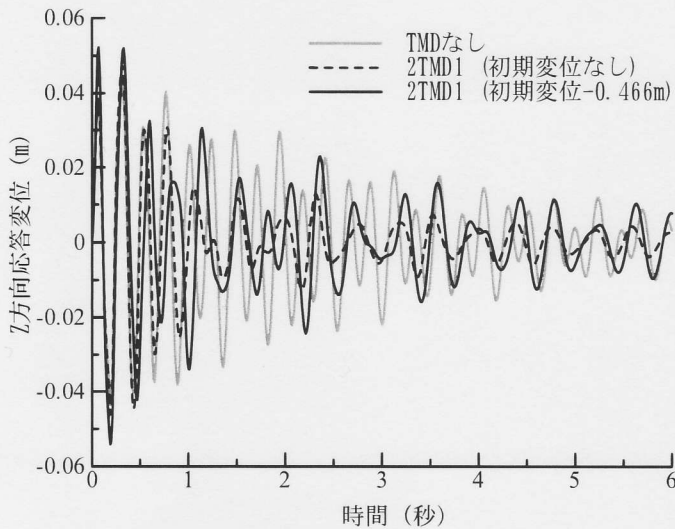


図6 Z方向時刻歴応答曲線
($T_z=0.466\text{m}$, 節点B, TMD1)

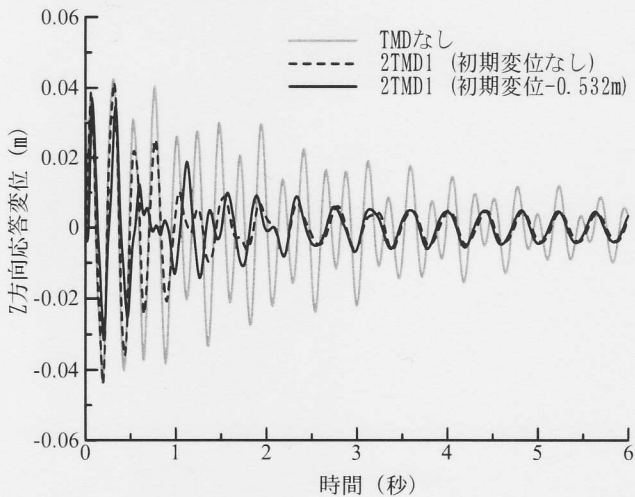


図7 Z方向時刻歴応答曲線
($T_z=0.532\text{m}$, 節点A, B, 2TMD1)

3.2 初期変位の大きさと応答変位の大きさ

図8, 9は、TMD1と2TMD1におけるインパルス外力を受けた直後の1/4周期 ($\omega_s T = \pi/2$)の振幅、または1周期以降 ($\omega_s T = 5\pi/2$ 以降)の最大振幅とTMDの初期変位の大きさの関係を表す。

また一点鎖線は最適初期変位を示している。

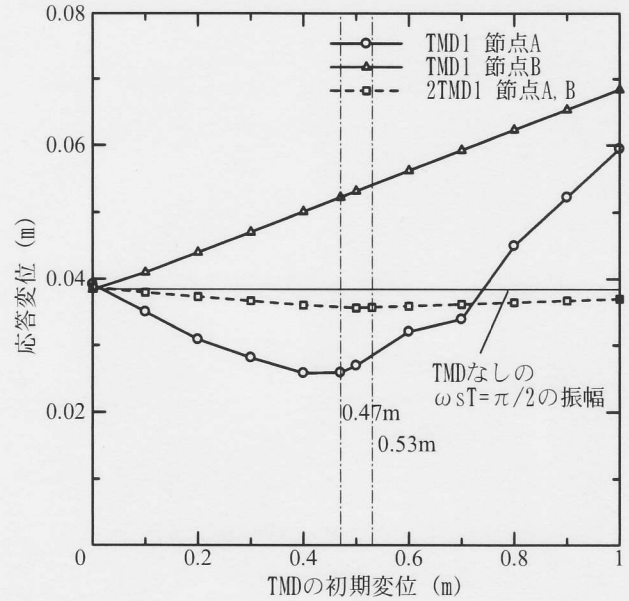


図8 $\omega_s T = \pi/2$ の振幅(初期応答)の比較
(TMD1と2TMD1)

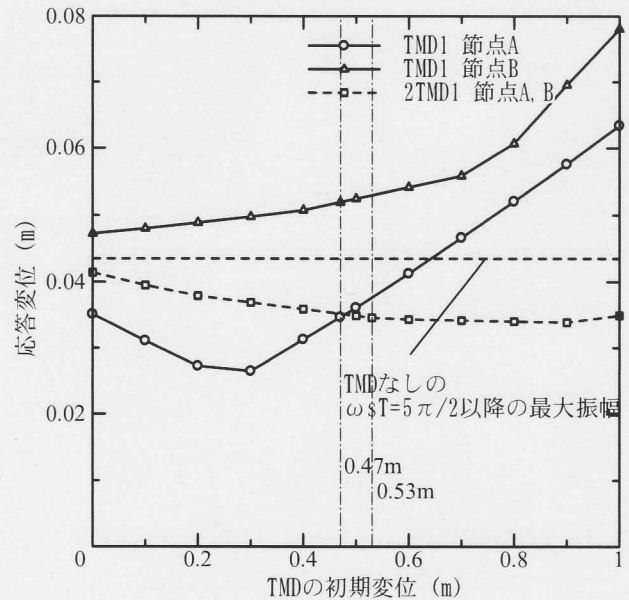


図9 $\omega_s T = 5\pi/2$ 以降の最大振幅の比較
(TMD1と2TMD1)

図8に示すTMD1と2TMD1における初期応答の比較を見ると、最も初期応答を抑えることができているのは最適初期変位を与えたTMD1の場合の節点Aである。しかしTMD1の場合、節点BではTMDなしの場合より大きな応答を示してしまう。

そこでTMDを2つ設置することによって節点Bにおける制振効果が確認される。2TMD1の場合TMD1の場合の節点Aのように突出して応答を制御できている箇所

は見当たらないが、初期変位の変化に対してのロバスト性には優れていたと言える。

また、最適初期変位の値において初期の応答は最小となっていることから最適初期変位の設計式は有効であったと思われる。

図9に示すTMD1と2TMD1における $\omega_s T = 5\pi/2$ 以降の最大振幅の比較を見ると、これも同じくTMD1の場合の節点Aのような大きく応答を制御する箇所は2TMD1の場合には見られないが、節点Bも制御しているという点で2TMD1の制振効果は確認される。

また $\omega_s T = 5\pi/2$ 以降の最大振幅においては最適初期変位の設計式は多少のずれは生じるが、目安として用いることが確認できる。

結果として、TMDを2つ設置することによって節点Aと節点Bの応答をともに抑えることができた。

3.3 二乗応答平均

ここまで初期の応答にあたる $\omega_s T = \pi/2$ の振幅と、1周期以降の $\omega_s T = 5\pi/2$ 以降の最大振幅について分けて考察してきたが、この節においては初期の応答からその後の応答まで一貫しての制振効果を確認したい。

そのため、節点Aと節点Bにおいて時刻歴応答解析の積分刻みに当たる0.01秒ごとの応答を二乗し二乗平均値をもって評価する。

二乗平均を行う応答はTMD1、TMD2、2TMD1、2TMD2の全てにおいておおよそ最適な初期変位となる $T_z = 0.5m$ を与えた時刻歴応答とする。

計算式は式(7)に示す通りで、時刻歴応答曲線において十分に減衰し終える6秒間において平均をとるものとする。

$$\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (7)$$

図10は横軸に初期変位を、縦軸に二乗応答平均をプロットしたものである。

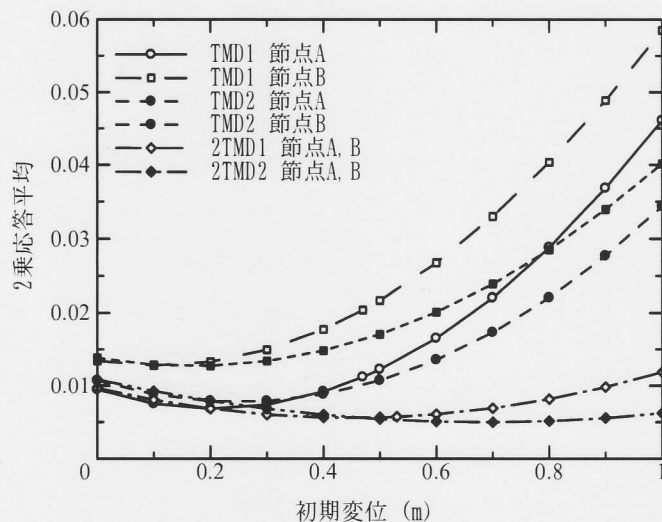


図10 二乗応答平均

初期変位が小さいときは節点AにおいてはTMDが1つのときと2つのときの大きな差は見られない。しかしTMDの初期変位が大きくなるにつれその差は大きくなる。TMDを2つ設置することによって、初期変位が大きくなっても時刻歴応答全体としての制振効果はほとんど下がらない。これは図8、図9から考察したようにTMDの初期変位に対するロバスト性の効果によるものである。

4. 結論

初期の応答が懸念されるTMDであったが、初期変位を与えることによってその応答を抑えることができることを確認できた。しかしそれには初期変位を与える際に最適な初期変位を与える必要がある。初期変位が小さすぎると通常の初期変位なしのTMDとさほど初期の応答に変化はなく、大きすぎると初期の応答が逆に大きくなってしまおうという結果となった。

最適初期変位を算出する設計式については、1自由度系モデルとして置き換えたときの設計式を使用したが、おおよその目安となることも確認できた。

また、本研究における多自由度モデルにおいてはTMDを1つだけ設置するだけでは、その節点での制振効果は得られたが他の節点における制振効果は望ましくなかった。そこでTMDを2つ設置し解析を行ったところ、TMDを設置した箇所の制振効果はもちろんのこと、TMDを設置していない節点における制振効果も確認することができた。

本研究ではTMDの設置数は2つまでであったが、さらに個数を増やすことによってモデル全体としての制振効果は期待されるだろう。しかし、本研究でも見られたがTMDの総質量を同じにして個数を増やすと、TMDを設置した節点における応答の制御できる量は少なくなる。モデル全体の応答を抑えることと、1つの着目する節点の応答を抑えることはトレードオフの関係にあるということである。これに関してもTMDの最適パラメータを算出したときのように、最適化基準を設けることによる最適値があるだろう。

また、本研究においては単層円筒ラチスシェルとして対象モデルを設定したが、他のモデルへの制振効果を確認することも必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 田中信雄著：振動制御，養賢堂出版，2008.9
- 2) 大崎順彦：建築振動理論，彰国社，1996.11.
- 3) 山口宏樹著：構造振動・制御，共立出版株式会社，1996.5.
- 4) 吉中進：初期変位付与型TMDを用いた過渡応答の振動制御—初期変位設計式の提案—

討 議 等

◆討議 [谷池 義人 教授]

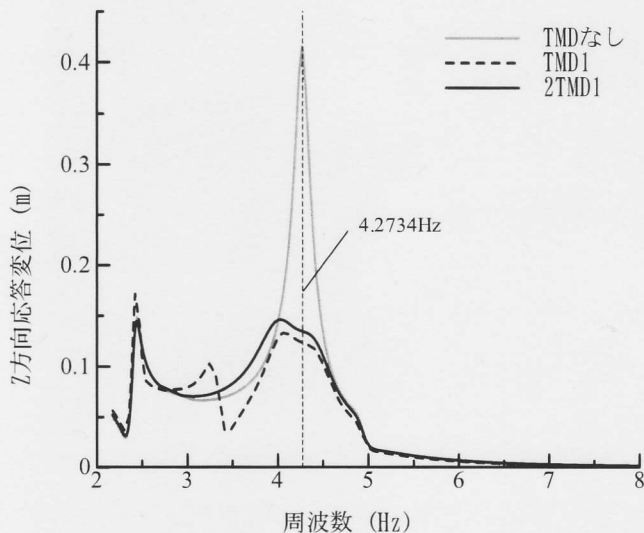
インパルス外力ではなく実際の地震波を与えたとき、TMDは有効に働くのか。

◆回答：空間構造を対象とした既往の研究において通常のTMDやMTMDの制振効果が確認されていますが、初期の応答制御効果は低いことが分かっています。本論文で提案した初期変位付与型TMDは1自由度系モデルで初期の応答も含めて加力時間全体における良好な制振効果が確認されています。空間構造では今後の研究課題となっています。

◆討議 [谷池 義人 教授]

今回6次モードの腹にTMDを設置しているが、他のモードの腹にTMDを設置したら効果はないのか。

◆回答：他の節点に設置したときについては解析を行っていません。しかし、今回6次モードの固有振動数における応答が突出していて、またその固有振動数に対するTMDの効果も確認できている。TMDの設置箇所、パラメーターについては本研究で示したものが最適だったと考えます。



調和地盤振動時の周波数応答曲線 (節点A)

◆討議 [角掛 久雄 助教授]

このTMDは一方向にだけ効果のあるものなのか。

◆回答：今回設置したTMDは外力の方向である鉛直方向の応答変位を抑えることを目的としたため、TMDの作動方向を鉛直方向のみに設定しています。本モデ

ルのように曲率のある構造の場合は節点の法線方向に設定するなど、卓越するモードの形状に応じて設定方向を調整すれば、水平と鉛直の両方向の外力に対して有効な制振効果を発揮できるものと考えられます。

◆討議 [大内 一 教授]

制御の対象として外力はどのようなものを考えているのか。

◆回答：今回はインパルス外力を対象としましたが、それは実際の地震力を与える際の先駆けとなると考えています。

◆討議 [谷池 義人 教授]

TMDを2つ設置する際、初期変位の組み合わせによって効果は変わるのか。

◆回答：研究の発想としては考えていたのですが、本研究では解析を行っていません。

◆討議 [山口 隆司 准教授]

インパルス外力はどのように与えているのか。

◆回答：インパルス外力は構造の基礎に加えました。解析上は構造のすぐ下の新しい節点に大質量を作成し、この節点を剛体要素によってモデルの周囲の節点に接続しました。

◆討議 [大島]

対象モデルとして単層円筒ラチスシェルを選んだ理由は。

◆回答：1自由度系での制振効果は既に確認されています。自由度が大きく、空間的な広がりを持つ構造への提案手法の適用性を確認するために、一般的な中小規模の体育館屋根としてよく用いられる単層円筒ラチスシェルモデルを選択しました。

◆討議 [松村 政秀 講師]

最適設計されたTMDは実際どれくらいの大きさになるのか。また、ばね定数や減衰定数などのパラメーターの設定は現実的に可能なのか。

◆回答：本研究では TMD の質量を対象モデルの等価質量の 2%としています。有効な効果が確認された 2TMD の場合の約 373kg の錘は鋼材を用いるものと仮定すると 36cm 四方のサイズになります。実際は分散配置をすることにより、さらに小型のサイズの TMD を用いる予定です。

また、ばね定数や減衰定数についてはある程度の精度をもって設定可能と考えます。