ダイナミック・マス同調システムを用いた新しいTMDシステムの開発

日本大学　山下　直城

１. はじめに

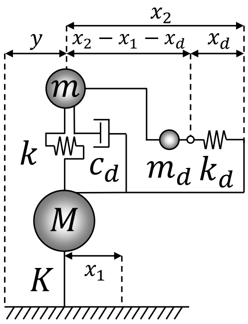
同調質量ダンパー（Tuned Mass Damper，以下「TMD」）は対象建物の１次固有周期に対して同調した付加質量を建物最上部に付加し，最適な付加剛性と付加減衰を調整することによって応答を低減する制振装置である．TMD を用いることで，省スペース，かつ，低コストで制振することが可能である．TMD は，多くの建築物に採用され，2011 年の東日本大震災以降，超高層建物などの振動制御に対し，同調質量ダンパーを適用した事例がある．しかし，ほとんどの建物の固有周期は設計値通りとなるとは限らず，設計時で最適設計を行っても，竣工時は，再調整作業が必要となる．その場合，最適調整をするために，竣工前に建物の固有周期を計測しながら調整作業を行う必要があり，付加質量や付加剛性の部材を変更しながら施工するという課題が挙げられる．

以上の研究背景より本研究では，簡易にTMD の周期調整を可能とする回転慣性質量（ダイナミック・マス，以下「D.M.」）に着目し，TMD の懸念点を改良する新しい TMD システムの開発を目的とする．以降，提案するシステムを「D.M.同調型 TMD システム」と呼称する．D.M.同調型 TMD システムは，TMD を構成する層（付加質量と付加剛性で構成される層．以下「付加層」）の周期を制御対象系に対し長周期化し，その層間に D.M.同調システムを用いるシステムである．付加層を変更することなく，D.M.同調システム部で調整可能なシステムとなっている．本論文では，D.M.同調型 TMD システムの概要と最適設計式を示す．次に，対象建物を仮定したモデルに、最適設計式の適用方法とその制振効果を示す。また、提案システムと最適設計式の検証を目的に試験体を作成し振動実験を行った結果を示す．

２. D.M. 同調型 TMD システムの概要および最適設計式の導出

本章では，D.M.同調型 TMD システムの 1 質点系せん断モデルを対象とした定点理論に基づく最適同調式および最適減衰式を提案する．図１に１質点系せん断モデルの頂部に提案する D.M.同調型 TMD システムを付加したときのモデル図を示す． Euler-Lagrange の方程式を用いて解析モデルの振動方程式は(1)式のように誘導できる．ここで，(1)式において定常振動$x_2 = X_2 e^{i\omega t}$，$x_1 = X_1 e^{i\omega t}$，$x_d = X_d e^{i\omega t}$，$\ddot{y} = -\omega^2 Y e^{i(\omega t+\phi)}$とおくと，振動方程式は (2) 式のようになる．相対変位応答倍率 ($|X_1/Y|$) における$c_d = 0$又は$c_d = \infty$の交点の方程式を質量比μ および D.M.比γ の関係式として (3) 式の 3 次方程式で求められるため，その式の解より交点が３つ存在する。ここで，短周期側の２つの交点を定点 P，Q，定点 P，Q の周期をT_P，T_Q と定義する．(3) 式を用い定点 P，Q の応答倍率が等しくなる条件である最適同調式は (4) 式，最適減衰式は (5) 式で表せる．T_P，T_Q は (6) 式，(7) で近似可能である．(6) 式，(7) 式を (4) 式，(5) 式に代入し整理すると μ，$T_{0,1}$，$T_{0,D.M.}$の関係式として，最適同調式は (8) 式，最適減衰式は (9) 式で表せる．主系と D.M.同調型 TMD システムが連成して生じた新たな振動モードを D.M.モードと呼称する．

ここで，固有周期 T_∞は減衰係数 $c_d = \infty$の状態とすれば，$T_\infty = 2\pi\sqrt{(M+\mathrm{m})/K}$ となる．非制振時の固有周期 T_0は T_0=$2\pi\sqrt{M/K}$ であるため，上記のT_∞との関係を整理すると，質量比$\mu = m/M$ は (10) 式のような周期の関係式となる．提案した最適設計式は，(3) 式，(8) 式，(9) 式，(10) 式を用いれば多質点系へ拡張が可能となる．



M	主系質量
K	主系剛性
m	付加質量
k	付加剛性
c_d	付加減衰
m_d	D.M.
k_d	システム剛性

図１　D.M. 同調型 TMD システムを用いた１質点系モデル

$$\mathrm{T} = \frac{1}{2}m(\dot{x}_2+\dot{y})^2 + \frac{1}{2}M(\dot{x}_1+\dot{y})^2 + \frac{1}{2}m_d(\dot{x}_2-\dot{x}_1-\dot{x}_d)^2,\ \mathrm{F} = \frac{1}{2}c_d(\dot{x}_2-\dot{x}_1)^2$$

$$\mathrm{V} = \frac{1}{2}k(x_2-x_1)^2 + \frac{1}{2}K{x_1}^2 + \frac{1}{2}k_d{x_d}^2,\ \text{ここで，}\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) + \frac{\partial F}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$\begin{cases} x_2\text{について：} & (m+m_d)\ddot{x}_2 - m_d\ddot{x}_1 - m_d\ddot{x}_d + c_d\dot{x}_2 - c_d\dot{x}_1 + kx_2 - kx_1 = -m\ddot{y} \\ x_1\text{について：} & -m_d\ddot{x}_2 + (M+m_d)\ddot{x}_1 + m_d\ddot{x}_d - c_d\dot{x}_2 + c_d\dot{x}_1 - kx_2 + (k+K)x_1 = -M\ddot{y} \\ x_d\text{について：} & -m_d\ddot{x}_2 + m_d\ddot{x}_1 + m_d\ddot{x}_d + k_dx_d = 0 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} m+m_d & -m_d & -m_d \\ -m_d & M+m_d & m_d \\ -m_d & m_d & m_d \end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{x}_2\\ \ddot{x}_1\\ \ddot{x}_d\end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_d & -C_d & 0 \\ -C_d & C_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{x}_2\\ \dot{x}_1\\ \dot{x}_d\end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k & 0 \\ -k & k+K & 0 \\ 0 & 0 & k_d \end{bmatrix}\begin{Bmatrix}x_2\\ x_1\\ x_d\end{Bmatrix} = -[\bar{M}]\begin{Bmatrix}1\\1\\0\end{Bmatrix}\ddot{y} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix}\ddot{x}_2\\ \ddot{x}_1\\ \ddot{x}_d\end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{c_d}{m} & -\frac{c_d}{m} & 0 \\ -\frac{c_d}{m} & \frac{c_d}{M} & 0 \\ \left(\frac{c_d}{m}+\frac{c_d}{M}\right) & \left(-\frac{c_d}{m}-\frac{c_d}{M}\right) & 0 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{x}_2\\ \dot{x}_1\\ \dot{x}_d\end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k}{m} & -\frac{k}{m} & \frac{k_d}{m} \\ -\frac{k}{M} & \frac{k+K}{M} & -\frac{k_d}{M} \\ \left(\frac{k}{m}+\frac{k}{M}\right) & \left(-\frac{k}{m}-\frac{k+K}{M}\right) & \left(\frac{k_d}{m}+\frac{k_d}{M}+\frac{k_d}{m_d}\right) \end{bmatrix}\begin{Bmatrix}x_2\\ x_1\\ x_d\end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix}1\\1\\0\end{Bmatrix}\ddot{y}$$

$$-\omega^2\begin{Bmatrix}X_2\\ X_1\\ X_d\end{Bmatrix} + i\omega\begin{bmatrix} \frac{c_d}{m} & -\frac{c_d}{m} & 0 \\ -\frac{c_d}{m} & \frac{c_d}{M} & 0 \\ \left(\frac{c_d}{m}+\frac{c_d}{M}\right) & \left(-\frac{c_d}{m}-\frac{c_d}{M}\right) & 0 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix}X_2\\ X_1\\ X_d\end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k}{m} & -\frac{k}{m} & \frac{k_d}{m} \\ -\frac{k}{M} & \frac{k+K}{M} & -\frac{k_d}{M} \\ \left(\frac{k}{m}+\frac{k}{M}\right) & \left(-\frac{k}{m}-\frac{k+K}{M}\right) & \left(\frac{k_d}{m}+\frac{k_d}{M}+\frac{k_d}{m_d}\right) \end{bmatrix}\begin{Bmatrix}X_2\\ X_1\\ X_d\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}\omega^2\\ \omega^2\\ 0\end{Bmatrix}Ye^{i\phi} \quad (2)$$

$$2(1+\mu)\,\Omega^3 + \left((-2-\mu){\omega_1}^2 - 2(1+\mu)^2{\omega_2}^2 - 2(1+\mu)(1+\gamma+\mu\gamma){\omega_d}^2\right)\Omega^2$$
$$+\left(2(1+\mu){\omega_1}^2{\omega_2}^2 + \left(2+\mu+2\gamma(1+\mu)\right){\omega_1}^2{\omega_d}^2 + 2(1+\mu)^2{\omega_2}^2{\omega_d}^2\right)\Omega \quad (3)$$
$$-2(1+\mu){\omega_2}^2{\omega_d}^2{\omega_1}^2 = 0 \qquad \Omega = \omega^2 = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$$

$$T_\infty = \sqrt{\frac{1}{2}({T_P}^2 + {T_Q}^2)} \quad (4) \qquad h_{opt} = \frac{{T_P}^2 - {T_Q}^2}{2({T_P}^2 + {T_Q}^2)} \quad (5)$$

$$T_P = \frac{\sqrt{T_{0,D.M.}T_\infty}}{1+\mu^2} \quad (6) \qquad T_Q = \sqrt{T_{0,1}T_\infty}(1+\mu^2) \quad (7)$$

$$T_\infty = \frac{\left(T_{0,1}(1+\mu^2)^4 + T_{0,D.M.}\right)}{2\,(1+\mu^2)^2} \quad (8) \qquad h_{opt} = \frac{T_{0,1}(1+\mu^2)^4 - T_{0,D.M.}}{2(T_{0,1}(1+\mu^2)^4 + T_{0,D.M.})} \quad (9)$$

$$\mu = \frac{m}{M} = \left(\frac{T_\infty}{T_0}\right)^2 - 1 \quad (10)$$

μ ： 質量比 ($\mu = m/M$) [-]	ω_2 ：固有振動数 ($\omega_2 = \sqrt{k/m}$) [-]	ω_d ：固有振動数 ($\omega_d = \sqrt{k_d/m_d}$) [-]
γ ： D.M.比 ($\gamma = m_d/m$) [-]	T_0： 非制振時の固有周期	T_∞：$c_d = \infty$時の周期
ω_1 ：固有振動数 ($\omega_1 = \sqrt{k/M}$) [-]	$T_{0,1}$： $c_d = 0$時の主系１次モード	$T_{0,D.M.}$： $c_d = 0$時の D.M. モード

提案式の有効性を確認するため，1質点系せん断モデルを対象とした設計例を以下に示す．対象建物の主系質量 $M=100$[ton]，固有周期は1.0(s)とした．D.M.同調型TMDシステムの設計方法は複素固有値解析結果に基づき行う．

① 質量比 μ の設定

質量比 μ を設定し，付加質量 m を算出する．本検討では，$\mu=0.03$とする．

② 付加層周期の設定

付加層周期を設定し，付加剛性 k を算出する．本検討では，付加層周期を3.0[s]と設定とする．

③ D.M.比 γ の設定

γを設定し，付加質量 m_d を算出する．本検討では，$\gamma=10$と設定とする．

④ システム剛性 k_d の決定

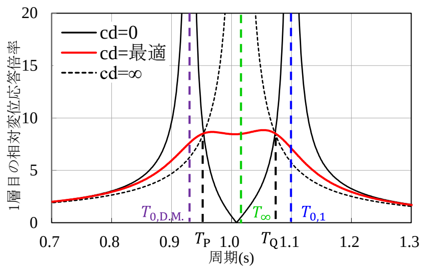
複素固有値解析により $c_d=0$ の状態で，(7) 式を満足するシステム剛性 k_d を決定する．

⑤ 付加減衰 c_d の決定

複素固有値解析により，目標減衰定数h_{opt}が主系1次モードと D.M.モードの粘性減衰定数の平均値となる付加減衰 c_d を決定する．

以上の設計フローに従って決定した諸元を用いた共振曲線を図2に示す．定点の高さが揃い，かつ，定点で最大応答倍率となる減衰係数が付与できていることが確認できる．

1質点系モデルに対し，D.M.同調型TMDシステムの質量比および D.M.比を変更し最適設計した際の付与粘性減衰定数の傾向を図3に示す．なお，従来のTMDシステムの目標減衰定数は，既往の設計式[1]を用いて設計し複素固有値解析により得られた1次モードと2次モードの付与粘性減衰定数の平均値とした．付与粘性減衰定数は，D.M.同調型TMDシステムのD.M.比が $\gamma=3.0$ の場合，従来のTMDシステムと近似した傾向となり，$\gamma=10$ 以上とする場合，付与粘性減衰定数が頭打ちとなる傾向となることが確認できる．



M	100(ton)
K	3947.8 (kN/m)
m	3.0(ton)
k	13.2(kN/m)
c_d	4.6(kN·s/m)
m_d	30(ton)
k_d	92.0(kN/m)

図2 最適設計式を用いた共振曲線

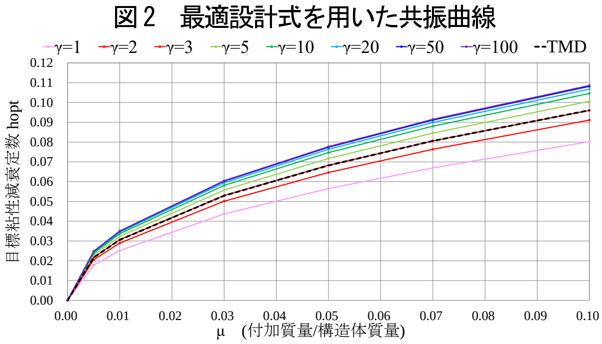


図3 D.M.同調型TMDシステムの減衰付与傾向

3．D.M.同調型TMDシステムの設計例

本章では，多質点系せん断モデルを対象に D.M.同調型TMDシステムを用いた設計例を示す．対象建物は，9質点系せん断モデル（以下,「非制振モデル」）を用いる．表3に非制振モデル諸元および固有値解析結果を示す．内部粘性減衰定数は1次モードに初期剛性比例型で1.0[%]付与する．

非制振モデルに付与するD.M.同調型TMDシステムの諸元を表1に示す．付加層は，質量比 $\mu=0.03$，付加層周期3.0[s]とし，D.M.比 γ は3から50の4ケースを検討した．各種システムの諸元を表2，内部減衰を含まない複素固有値解析結果を表3に示す．また，制振モデルにおけるD.M.同調型TMDシステム直下9層目共振曲線を図4に示す．どの γ においても2つの定点の高さが揃い，かつ，定点で最大応答倍率となる減衰係数が付与できていることが確認できる．また，図4よりγ=5 以上ではD.M.部の大きさが違っても制振効果があまりかわることはないため，ロバスト性が高いことがわかる．

表1 非制振モデル諸元および固有値解析結果

層	質量 (ton)	剛性 (kN/m)	モード	周期 (s)	h (-)	有効質量 (ton)	有効剛性 (kN/m)
9	116.75	61,497	1次	1.21	0.010	748.00	20,200
8	90.10	66,694	2次	0.45	0.027	87.40	17,300
7	94.67	79,564	3次	0.27	0.044	25.50	13,600
6	95.10	93,178	4次	0.20	0.062	7.70	7,890
5	96.79	106,963	5次	0.16	0.078	2.75	4,510
4	90.67	112,726	6次	0.13	0.091	1.10	2,470
3	90.96	119,800	7次	0.12	0.103	0.54	1,560
2	91.65	132,364	8次	0.10	0.117	0.37	1,360
1	107.15	69,604	9次	0.09	0.132	0.15	715

表2 D.M.同調型TMDシステム諸元

μ	γ	m(ton)	k(kN/m)	c_d(kN·s/m)	m_d(ton)	k_d(kN/m)
0.03	3.0	22.4	98.433	39.354	67.3	362.888
0.03	5.0	22.4	98.433	37.947	112.2	397.183
0.03	10.0	22.4	98.433	36.879	224.4	427.466
0.03	50.0	22.4	98.433	36.014	1,122.0	455.218

表3 複素固有値解析結果

モード	γ=3		γ=5		γ=10		γ=50	
	T(s)	h	T(s)	h	T(s)	h	T(s)	h
付加層	6.40	0.168	7.92	0.129	10.83	0.091	23.54	0.040
1次	1.34	0.068	1.34	0.071	1.34	0.074	1.34	0.076
D.M.	1.15	0.077	1.15	0.080	1.14	0.082	1.14	0.084
2次	0.45	0.004	0.45	0.004	0.45	0.004	0.45	0.004
3次	0.27	0.002	0.27	0.001	0.27	0.001	0.27	0.001
4次	0.20	0.001	0.20	0.001	0.20	0.001	0.20	0.001

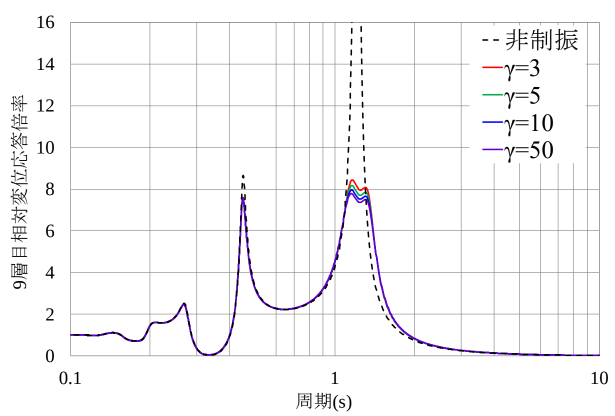


図4 9層目相対変位応答倍率

最後に，時刻歴応答解析結果を図５に示す．入力地震動は日本建築センター模擬波（BCJ-L2）の原波とした．時刻歴応答解析により D.M.比が変化しても応答結果に差異が生じないことから，建物との同調調整作業において D.M.を増減し調整した場合においても，対象建物と最適同調とすることで応答低減効果を得ることを確認した．

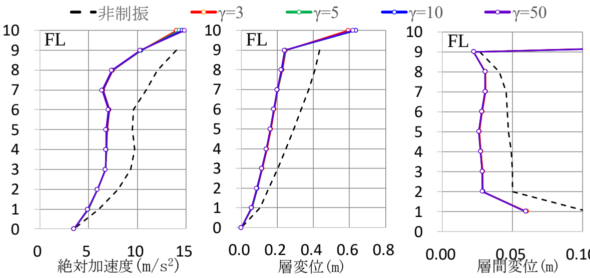


図５　時刻歴応答解析結果

4. D.M.同調型 TMD システムの振動実験

本章では，８層せん断モデルに対し D.M.同調型 TMD システムを適用した際の応答低減効果を確認する．また，提案した最適設計式の妥当性を検証する．

4.1 歯車式回転慣性質量装置の概要

D.M.同調型 TMD システム試験体の D.M.要素である歯車式回転慣性質量装置とは，軸方向運動を歯車を介して回転方向運動に増幅変換し，振動論的に生じた見かけの質量である回転慣性質量（D.M.）[2]が生じる装置である．歯車の組み合わせや，錘の直径により回転慣性質量を自由に調整でき，本試験体では，回転部に質量５kg を設置し，回転による増幅倍率が約 230 倍であるため，２台分の D.M.質量効果として，md=2.3ton となっている．歯車式回転慣性質量装置の構成図を図６に示す．

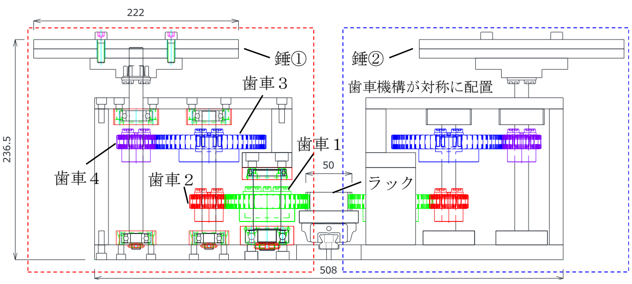


図６ 回転慣性質量装置構成図

4.2 D.M.同調型 TMD システム単層試験

D.M.同調型 TMD システムの挙動および性能確認のため，電磁式振動台を用いて正弦波加振試験を行った．層間に設置した変位計により計測された層間変位と，振動台入力変位との比率である相対変位応答倍率を算出する．試験体は，せん断粘性ダンパーの有無による２ケースを実施した．

せん断粘性ダンパーとは，高粘度の粘性体の粘性せん断抵抗力を利用した減衰装置である．平面図および立面図を図７に示す．減衰性能確認試験における減衰力特性図を図８に示す．図中の黒の点線が理論値，赤線が実験値を示す．加振周期 1.0(s)，５サイクルの正弦波とし，シリコンオイルの動粘性係数は５万(CS)，温度は 20 度一定とした．速度が小さな場合では理論値と同程度であるものの，速度が増加すると理論値と差異が生じた．本試験では，粘度の高いオイルを使用したため，オイルが板の隙間に流入せず，オイル高さが一定でなくなったことが原因であると考えられる．

正弦波加振試験結果を図９に示す．図中のプロットが試験値，実線が解析値であり，青色がせん断粘性ダンパーを付与しない場合の試験値に対し内部減衰を考慮した場合の解析値，赤色がせん断粘性ダンパーを付与した場合の解析値を示す．周期 1.0 秒付近の共振域においては，解析値と試験値が良い対応を示していることから，想定した装置の特性を発揮していることを確認した．

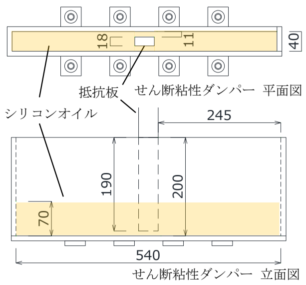


図７　平面図および立面図

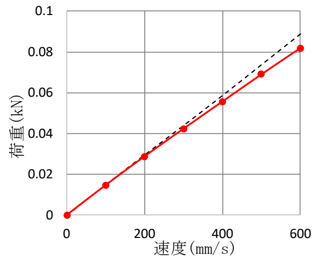


図８　減衰力特性図

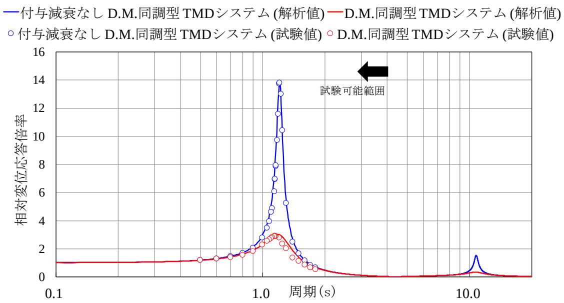


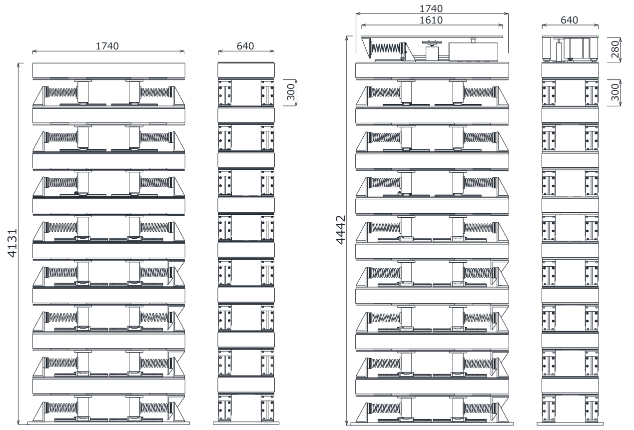
図９　D.M.同調型 TMD システム単層試験結果

4.3 ８層せん断試験体モデルの概要

試験体は１層目から８層目を主構造体（非制振モデル）として，最上層に D.M.同調型 TMD システムを付与した付加層を設置した振動試験モデルである．各層の剛性はコイルばねを用いて，変形をせん断方向に強制する LM ガイドによって構成されている．試験体立面図を図 10，非制振モデルのモデル諸元および固有値解析結果を表４に示す．

表４　非制振モデル諸元および固有値解析結果

層	質量	剛性	モード	周期	有効質量	有効剛性
	(ton)	(kN/m)		(s)	(ton)	(kN/m)
8	0.96	524.26	1次	1.14	6.62	200.00
7	0.95	681.48	2次	0.42	0.75	170.00
6	0.95	719.08	3次	0.26	0.20	122.00
5	0.97	894.26	4次	0.19	0.06	66.60
4	0.92	926.14	5次	0.15	0.03	46.60
3	0.91	994.51	6次	0.13	0.01	20.10
2	0.96	1057.39	7次	0.11	0.01	16.50
1	1.07	647.97	8次	0.10	0.00	6.76



(a) 非制振モデル　　　(b) 制振モデル

図 10　試験体立面図

D.M.同調型 TMD システムは，付加層周期 3.0(s)，D.M.比 $\gamma = 10$，質量比 $\mu = 0.035$ とし，付与減衰はせん断粘性ダンパー，D.M.は歯車式回転慣性質量装置を用いて再現した．D.M.同調型 TMD システムのモデル諸元を表 5，平面および断面図を図 11 に示す．

表 5　D. M. 同調型 TMD システム諸元

	m(ton)	k(kN/m)	c_d(kN·s/m)	m_d(ton)	k_d(kN/m)
理論値	0.23	1.010	0.41	2.3	4.93
実験諸元	0.23	1.010	0.40	2.3	4.8

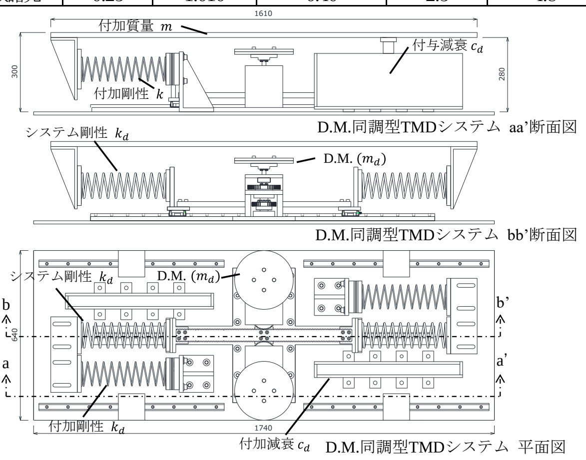


図 11　D. M. 同調型 TMD システム平面図および断面図

4.4 ８層せん断試験体の振動実験

８層せん断試験体における，正弦波加振試験結果を図 12 に示す．青色が非制振モデル，赤色が制振モデルを示し，プロットが試験値，実線が解析値を示す．解析値と試験値において良い対応を示している事から，最適設計式の有効性が確認できる．

続いて，地震波加振試験の結果を図 13 に示す．使用する地震波は日本建築センター模擬波（BCJ-L2），兵庫県南部地震波（JMAKOBE-NS）を使用する．なお試験体のクライテリアの都合上，倍率は 17%，13%としている．青線が非制振モデル，赤線が制振モデル結果であり，応答加速度，応答速度，応答変位，層間変位結果を示す．非制振モデルと比較し制振モデルは各応答値において大きな応答低減効果が見られる事から，最上部に付与された D.M.同調型 TMD システムが適切に作動している事を証明すると共に，提案するシステムの有効性を示した．

D.M.同調型 TMD システムは，付加層の層間に設置された D.M.同調システム部（m_d，k_d）が制御対象の建物固有周期と同調することで最適同調を満足することが可能である．D.M.部は回転慣性質量効果を有するため，小さい錘の変更のみで対象建物との同調作業が可能となる．

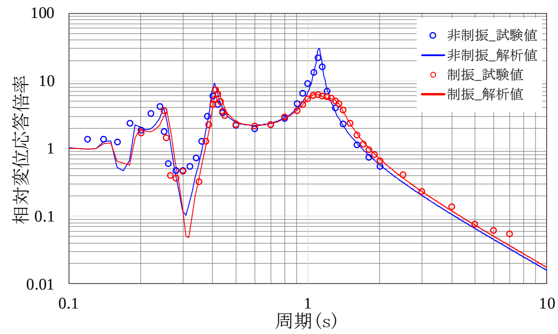


図 12　８層せん断試験体　共振曲線

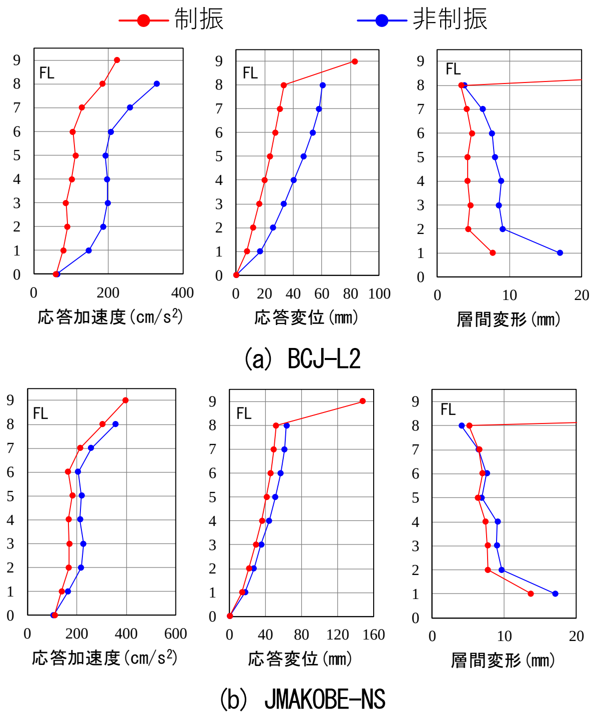


図 13　８層せん断試験体　地震波加振試験結果

5. まとめ

D.M.同調型 TMD システムの概要を示すと共に，最適設計式を提案し，解析により D.M.同調型 TMD システムを実規模建物への試設計を行い確認した後，応答特性を試験体を用いた振動実験により，装置の挙動および応答低減効果を確認した．提案するシステムは，TMD システムの懸念点を改善した新しい制振システムとして期待できる．

参考文献

(1)背戸一登　丸山晃市：振動工学　解析から設計まで，森北出版株式会社

(2)石丸辰治：対震設計の方法　ダイナミックデザインの誘い，株式会社建築技術