

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	TMDを有する超高層建物の定点理論を用いた耐風設計
Title(English)	Wind resistant design for high-rise building with TMD based on fixed points theory
著者(和文)	小野寺大空, 佐藤大樹, 沖村将大, 田中英之, 曾根孝行, 渡井一樹, 今野大輔
Authors(English)	ONODERA Sora, SATO Daiki, OKIMURA Masahiro, TANAKA Hideyuki, SONE Takayuki, WATAI Kazuki, KONNO Daisuke
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 453-456
Citation(English)	, , , pp. 453-456
発行日 / Pub. date	2024, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

TMD を有する超高層建物の定点理論を用いた耐風設計

構造－振動

超高層建物 TMD 定点理論
風応答 多質点系モデル

準会員○	小野寺大空 ^{*1}	正会員	佐藤大樹 ^{*2}
正会員	沖村将大 ^{*3}	〃	田中英之 ^{*4}
〃	曾根孝行 ^{*4}	〃	渡井一樹 ^{*4}
〃	今野大輔 ^{*4}		

1. はじめに

近年の台風の激甚化や施工技術の発展に伴う建物のさらなる高層化によって、建物に作用する風力は増大していくことが予想される。そのため、耐風設計の重要性が増している。超高層建物の場合、建物頂部に TMD を設置して風応答を低減させることが多い。TMD の設計には定点理論¹⁾²⁾が用いられることが多い³⁾。しかし、定点理論は 1 質点で表現できる建物（主系）に対して調和振動を入力した際の応答倍率の理論値に基づくものであり、実際の超高層建物のように多質点、かつ風力のようなランダム波形に対しても適用できるか、十分に検討されていない。

そこで本報では、TMD を有する超高層建物に定点理論を用いた耐風設計手法を提案する。具体的には、まず調和振動入力時の加速度応答倍率の確認を行う。続いて、定点理論と 1 質点建物モデルおよび 10 質点モデルにおける時刻歴応答解析の結果を比較し、定点理論による検討の妥当性を検証する。その後、加速度応答倍率と時刻歴応答解析の関連性を耐風設計に応用し、居住性能評価指針との比較を行う。

2. 主系の減衰による影響

本報では、アスペクト比 $H/B=5.0$ 、辺長比 $D/B=1.0$ 、高さ $H=200\text{ m}$ の超高層建物を対象とする。建物の 1 次固有周期 ${}_1T_f=3.0\text{ s}$ 、建物密度 $\rho_f=250\text{ kg/m}^3$ とし、質量 m_i は高さ方向に一様であると想定した。本章では、1 次モードを対象とした 1 質点モデル（図 1）を用いる。その際 1 次モードは直線と仮定する。図中の ${}_1m$ 、 ${}_1k$ および ${}_1c$ はそれぞれ、1 次モード質量、剛性、減衰係数である。

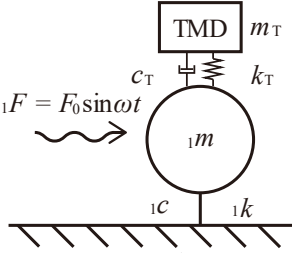


図 1 1 質点モデル

1 次モード固有円振動数および減衰定数はそれぞれ次式で表される。

$${}_1\omega = \sqrt{{}_1m/{}_1k}, \quad {}_1\xi_f = {}_1c/(2\,{}_1m\,{}_1\omega) \tag{1}, (2)$$

本建物には、屋上階に TMD を設置している。TMD の固有周期 T_T 、質量 m_T 、剛性 k_T 、減衰係数 c_T はそれぞれ次式で表される。ここで、 ${}_1m$ は 1 次モード質量を、 ξ_T は減衰定数を表す。本報では、 ${}_1m$ は 1 次モード形を直線および等分布質量と仮定した場合の理論値である総質量の 1/3 を用いた。また、 β_T を周期比、 β_m を質量比と呼ぶ。

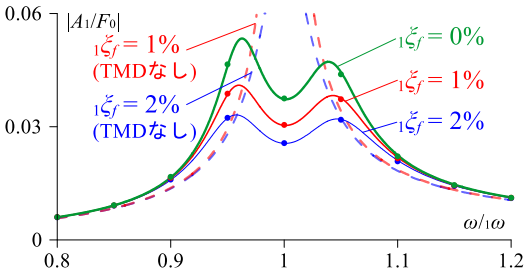
$$T_T = {}_1T_f \beta_T, \quad m_T = {}_1m \beta_m \tag{3}, (4)$$

$$k_T = \omega_T m_T, \quad c_T = 2m_T \omega_T \xi_T \tag{5}, (6)$$

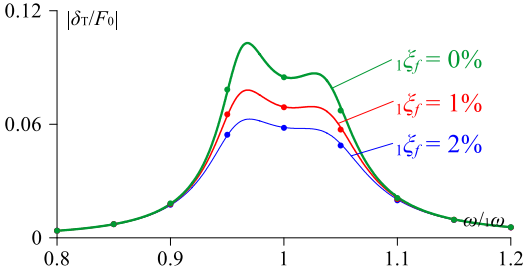
図 1 の 1 層目に作用する外力は、(7)式で与えられるものとする。

$${}_1F = F_0 \sin \omega t \tag{7}$$

定常時における主系の加速度の振幅を A_1 、TMD の相対変位の振幅を δ_T とすると、 F_0 に対する比は式(A1)および (A2)（付録参照）で得られる。



(a) 主系の加速度



(b) TMD の相対変位

図 2 ${}_1\xi_f$ による応答倍率の変化
($\xi_T = 5\%$, $\beta_T = 1.0$, $\beta_m = 0.01$)

図 2(a), (b)に、主系の減衰定数 ${}_1\zeta_f$ を変化させた時の加速度応答倍率および TMD の相対変位応答倍率を示す。このとき、 $\zeta_T = 5\%$ 、 $\beta_T = 1.0$ 、 $\beta_m = 0.01$ とする。図中の実線は理論式(A1), (A2)を、プロットは時刻歴応答解析の結果を表している。このことから、応答倍率の理論式と時刻歴応答解析の結果が一致していることが分かる。図 2(a)には参考として、TMD なしでの加速度応答倍率を図中破線で示す (式(A3))。図 2(a)より TMD を設置することで ${}_1\omega$ における加速度が低下することが分かる。また、TMD ありに着目すると、主系の減衰定数 ${}_1\zeta_f$ が大きいほど応答倍率は低減している。また、グラフの形状および極大、極小の位置($\omega/{}_1\omega$)は主系の減衰の影響をあまり受けないことがわかる。図 2(b)より、TMD の相対変位についても、時刻歴応答解析の結果(プロット)と理論曲線が一致していることが確認できる。また、曲線のピーク的位置($\omega/{}_1\omega$)は、加速度のピーク的位置(図 2(a))と同じであることが分かる。

3. 1 質点モデルにおける解析と定点理論の比較

主系が非減衰の場合における TMD の最適な β_T 、 ζ_T は定点理論^{1),2)}より、以下の式で得られる。

$$\beta_T = 1 + \beta_m, \quad \zeta_T = \sqrt{\frac{3\beta_m}{8(1 + \beta_m)}} \quad (8), (9)$$

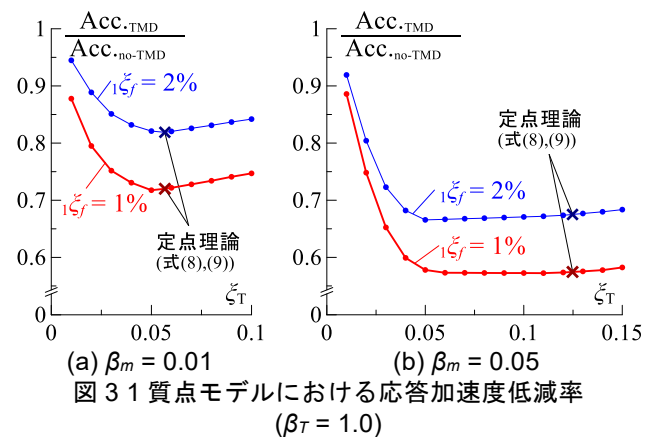
1 質点モデル (図 1) を用いて風外力による時刻歴応答解析を行う。建物に作用する風外力は風洞実験結果³⁾を用いた。風速は再現期間 1 年に相当するレベルとし、基本風速は $U_1 = 20 \text{ m/s}$ である。検討用風外力は、1 次モーダル風力を用い、1 組につき 10 質点分の風力波形を 0.05 s 刻み 14000 ステップとし、風洞実験結果から応答の評価時間部分が重ならないように 650 s × 5 組取り出した。解析時の過渡応答の影響を避けるため、各風力波形の前に 50 s にエンベロープを設け、後ろの 600 s (10 分間) で各応答を評価し、検討用風向は 0° のみとした。なお、本報では風直交方向のみを対象とする。

図 3(a), (b)に $\beta_m = 0.01$ および 0.05 における、 ζ_T を変化させた場合の時刻歴応答解析の結果を示す。TMD を設置しない場合の最大加速度を $\text{Acc.}_{\text{no-TMD}}$ 、TMD を設置した場合のそれを Acc._{TMD} とする。また、定点理論における最適な減衰定数での解析結果を図中 (×) に併記する。

図 3(a) $\beta_m = 0.01$ より、 ${}_1\zeta_f = 1\%$ の場合 $\zeta_T = 5\%$ 付近で、また、 ${}_1\zeta_f = 2\%$ のとき $\zeta_T = 6\%$ 付近で最大加速度は最小となり、加速度が最小となる ζ_T は、概ね等しい値となった。一方、定点理論における最適な減衰定数 (式(9)) は $\zeta_T = 5.67\%$ であり、概ね等しい値である。図 3(a), (b)より 1 質点モデルにおける時刻歴応答解析による実際の最適な減衰定数と定点理論における最適な減衰定数を比較すると、概ね近い結果が得られたことが分かる。また、最大加速度

Acc._{TMD} でも比較すると、 0.01 cm/s^2 ほどしか変わらないため、定点理論で検討することは妥当であるといえる。

図 3(b) $\beta_m = 0.05$ より、 ${}_1\zeta_f = 1\%$ では $\zeta_T = 11\%$ で、 ${}_1\zeta_f = 2\%$ のとき $\zeta_T = 5\%$ で応答は最小となった。しかし、定点理論における、最適な減衰定数は $\zeta_T = 12.47\%$ と、 $\beta_m = 0.01$ の場合 (図 3(a)) とは異なり、解析結果と定点理論より得られる最適な ζ_T は違いが確認された。これは、図 3(b)からわかるように、 $\beta_m = 0.05$ の場合は ζ_T が 0.05 から 0.15 の範囲では ζ_T による応答低減効果の変化は小さいことが原因と考えられる。そのため β_m が大きい場合は定点理論による最適な ζ_T は過大となる場合があることに注意が必要である。



4. 10 質点モデルにおける解析と定点理論の比較

本章では、10 質点モデルを用いて時刻歴応答解析を行う。構造減衰は剛性比例型とし、 ${}_1T_f$ に対して 1 次減衰定数 ${}_1\zeta_f = 0.01$ を用いる。 i 層のフレーム剛性 k_i は、建物の 1 次固有モードが直線となるように決定した。なお、フレームは弾性状態を保つものとする。

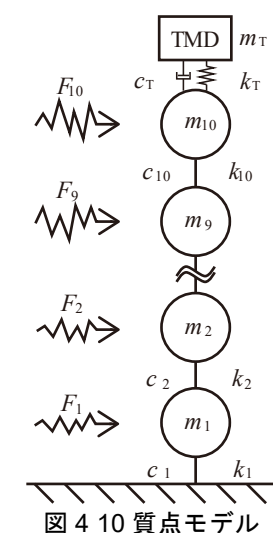


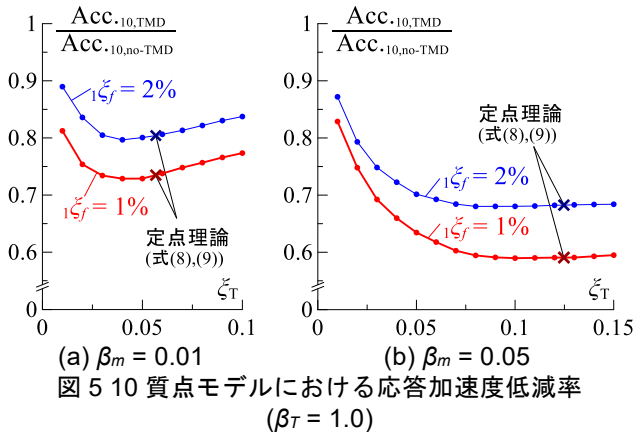
図 4 10 質点モデル

建物に作用する風外力は風洞実験結果⁴⁾を用いた。

図 5(a), (b)に $\beta_T = 1.0$ 、 β_m をそれぞれ 0.01 および 0.05 で、 ζ_T を変化させた場合の時刻歴応答解析の結果を示す。TMD を設置しない場合の風直交方向の最大加速度を $\text{Acc.}_{10,\text{no-TMD}}$ 、TMD を設置した場合のそれを $\text{Acc.}_{10,\text{TMD}}$ とする。定点理論における最適な減衰定数での時刻歴応答解析の結果も図中 (×) に示す。

図 5(a) $\beta_m = 0.01$ より、 ${}_1\zeta_f = 1\%$ では $\zeta_T = 4\%$ で、 ${}_1\zeta_f = 2\%$ のとき $\zeta_T = 4\%$ で最大加速度は最小となった。定点理論における最適な減衰定数は $\zeta_T = 5.67\%$ で、1 質点での検討 (3 章) と同様に、時刻歴応答解析と概ね等しい ζ_T となった。

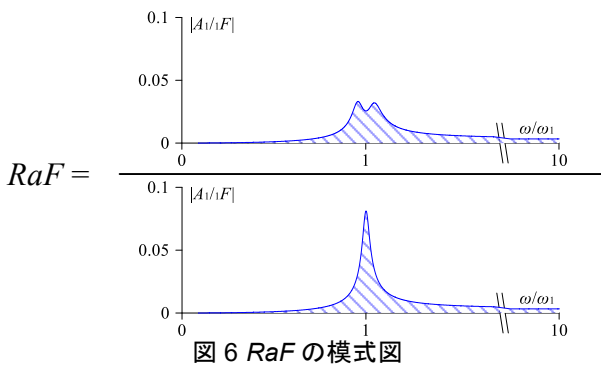
図 5(b) $\beta_m = 0.05$ より, ${}_1\zeta_f = 1\%$ では $\zeta_T = 10\%$ で加速度は最小となり, ${}_1\zeta_f = 2\%$ のとき $\zeta_T = 8\%$ で最小となった。一方, 定点理論における最適な減衰定数は $\zeta_T = 12.47\%$ で, 3 章の 1 質点系での検討と同様に, β_m が大きい場合, 定点理論に基づく最適な ζ_T は, 時刻歴応答解析に比べて過大となることがわかった。



5. 調和振動入力時の応答倍率と時刻歴応答解析の比較

本章では, 1 質点モデルにおける調和振動入力時の加速度応答倍率 (2 章) と 10 質点モデルにおける時刻歴応答解析の結果 (4 章) の関連性を検討する。

10 質点モデルにおける時刻歴応答解析において, $\text{Acc}_{10,\text{no-TMD}}$ に対する $\text{Acc}_{10,\text{TMD}}$ の比を RaR とする。また, 調和振動入力時において, TMD を設置しない時の加速度応答倍率 (図 2(a)) の, 1 次モード固有円振動数 ω の $1/10$ から 10 倍の範囲のグラフの面積に対する TMD 設置時のその比を RaF とする。また, 図 6 に RaF の模式図を示す。



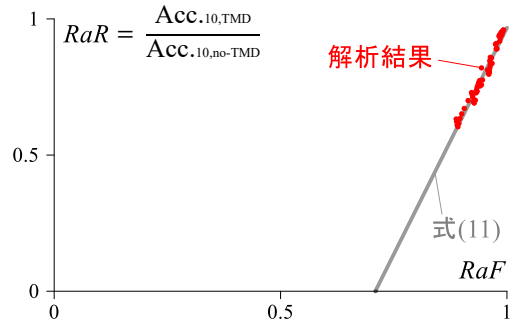
続いて, RaR と RaF の関連性を検討する。TMD の設定が決まれば RaR , RaF も 1 つに決まる。TMD の設定を $1\% \leq \zeta_T \leq 10\%$, $0.7 \leq \beta_T \leq 1.3$, $0.01 \leq \beta_m \leq 0.1$ の範囲で変化させた, 合計 29 ケースの結果を図 7 に示す。図 7 から, RaR と RaF には正の相関があることが分かる。

最小二乗法により近似曲線を求めると, 近似曲線の式

は式(11)のようになる。

$$RaR = 3.33 RaF - 2.36 \quad (10)$$

このとき, 決定係数は 0.96 であった。



6. TMD の設計手法

本章では, 5 章で提案した式(10)を用いて, 目標の応答加速度となる TMD の設計手法について述べる。

6.1 TMD の設計手法

以下に TMD の設計手法を示す。

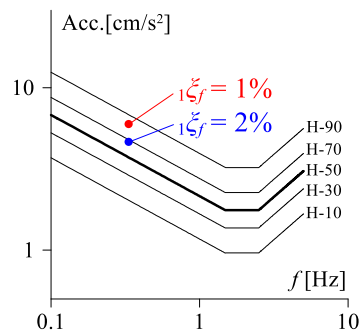
- ① TMD なしでの加速度 $\text{Acc}_{\text{no-TMD}}$ を求める。
- ② 任意の β_m を設定し, 図 2(a)を用いて RaF を算出する。
- ③式(12)より, Acc_{pre} を算出する。

$$\text{Acc}_{\text{pre}} = (3.33 RaF - 2.36) \times \text{Acc}_{10,\text{no-TMD}} \quad (11)$$

- ②, ③を繰り返すことで, β_m と応答加速度の関係が得られる。

6.2 TMD を設置しない場合の応答加速度

時刻歴応答解析で使用する建物モデルおよび風力は, 4 章と同じである。居住性は再現期間 1 年の風力における最大加速度で評価する。図 8 に性能評価曲線⁹⁾を示す。H-10, H-30, H-50, H-70, H-90 はそれぞれ知覚確率 10%, 30%, 50%, 70%, 90%を意味する。TMD を設置しない場合の風直交方向の最大加速度は, 時刻歴応答解析より ${}_1\zeta_f = 1\%$ のとき 5.98 cm/s^2 , ${}_1\zeta_f = 2\%$ のとき 4.64 cm/s^2 であった。この結果を性能評価曲線 (図 8) にプロットする。本報では, H-50 を目標として TMD を設定するものとする。この時 ${}_1\zeta_f = 1\%$ では, $RaR = 0.63$, ${}_1\zeta_f = 2\%$ では $RaR = 0.81$ であることが図 8 より分かる。



6.3 検証

図9に式(12)より得られる応答加速度の予測曲線(実線)を示す。図9の曲線より、 ${}_1\xi_f = 1\%$ のときは $\beta_m = 0.04$ 程度、 ${}_1\xi_f = 2\%$ のときは $\beta_m = 0.02$ 程度必要であることが分かる。

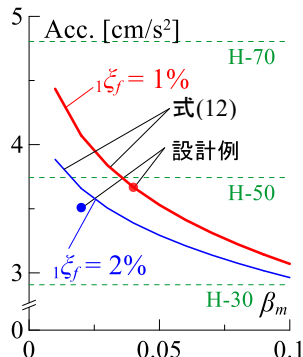


図9 加速度応答倍率による時刻歴応答解析の予測および居住性能評価指針との比較

表1に ${}_1\xi_f = 1\%$ 、 $\beta_m = 0.04$ のとき、 ${}_1\xi_f = 2\%$ 、 $\beta_m = 0.02$ のときのTMDの設定を示す。なお、 ξ_T 、 β_T は式(8)、(9)の定点理論における最適値を用いるものとする。

表1 TMDの設定

	β_m	β_T	ξ_T
${}_1\xi_f = 1\%$	0.04	1.035	11.20%
${}_1\xi_f = 2\%$	0.02	1.017	7.99%

図9に表1でのTMDの設定に置ける時刻歴応答解析での結果をプロットで示す。図9より、 ${}_1\xi_f = 1\%$ 、 2% の両方で予測曲線と時刻歴応答解析の結果は概ね一致し、H-50を下回っていることが分かる。このことから、加速度応答倍率による予測により、時刻歴応答解析を行うことなく、最大加速度が目標となる知覚確率を満たすために必要な β_m の値を概算できると言える。

付録 主系の加速度応答倍率およびTMDの相対変位の応答倍率の式

調和振動入力時における主系の加速度応答倍率およびTMDの相対変位の応答倍率はそれぞれ次式で得られる。

$$\left| \frac{A_1}{F_0} \right| = \frac{\omega^4 \{ (-m_T \omega^2 + k_T)^2 + \omega^2 c_T^2 \}}{\sqrt{\omega^2 \{ {}_1c(m_T \omega^2 - k_T) + c_T({}_1m \omega^2 + m_T \omega^2 - {}_1k) \}^2 + \{ (-{}_1m \omega^2 + {}_1k)(-m_T \omega^2 + k_T) - m_T k_T \omega^2 \}^2}} \quad (\text{A1})$$

$$\left| \frac{\delta_T}{F_0} \right| = \frac{m_T^2 \omega^4}{\sqrt{\omega^2 \{ {}_1c(m_T \omega^2 - k_T) + c_T({}_1m \omega^2 + m_T \omega^2 - {}_1k) \}^2 + \{ (-{}_1m \omega^2 + {}_1k)(-m_T \omega^2 + k_T) - m_T k_T \omega^2 \}^2}} \quad (\text{A2})$$

TMDがない場合の主系の加速度応答倍率は式(A3)より得られる。

$$\left| \frac{A_1}{F_0} \right| = \frac{\omega^4}{\sqrt{({}_1\omega^2 - \omega^2)^2 m^2 + ({}_1c \omega)^2}} \quad (\text{A3})$$

7. おわりに

本報では、調和振動入力時の加速度応答倍率の確認を行い、定点理論と1質点建物モデルおよび10質点建物モデルにおける時刻歴応答解析の結果を比較し、定点理論による検討の妥当性を検証した。その後、加速度応答倍率と時刻歴応答解析の関連性を耐風設計に応用した。

まず、調和振動入力時の加速度倍率は主系の減衰定数が大きいかほど低減し、グラフの形状および極値の位置は概ね等しかった。続いて、定点理論により多質点、ランダム振動におけるTMDの最適値を求めることは建物とTMDの質量比 β_m が小さい場合は妥当であるが、 β_m が大きい場合はTMDの減衰が過大となることに注意が必要である。さらに調和振動入力時の加速度倍率による予測により、時刻歴応答解析を行うことなく、最大加速度が目標値を満たすために必要な β_m を概算することができた。

謝辞

本報告は、株式会社竹中工務店、東京工業大学佐藤研究室との共同研究での成果の一部です。ここに記して感謝の意を示します。

参考文献

- 1) Erich Hahnkamm: Die Dämpfung von Fundamentalschwingungen bei veränderlicher Erregerfrequenz, Ingenieur-Archiv 4 (2), 192-201, 1933
- 2) J. E. Brock : A Note on the Damped Vibration Absorber, Trans. ASME, J. Appl. Mech. 13 A-284, 1946
- 3) 日本建築学会: 建築構造物の振動制御入門, 2010.12
- 4) 平塚紘基, 佐藤大樹, 田中英之: 履歴型ダンパーを有する超高層制振建物の弾塑性風応答予測, 日本建築学会関東支部研究報告集, 第27巻, 第66号, pp.662-667, 2021.6
- 5) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第635号, pp.75-82, 2009.1
- 6) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説, 2004

*1 学生会員 東京工業大学 学生

Undergraduate Student, Tokyo Institute of Technology*1

*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 准教授・博士(工学)

Associate Professor, IIR, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng*2

*3 学生会員 東京工業大学 大学院生

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology*3

*4 株式会社竹中工務店 技術研究所

Researcher, Development Institute, Takenaka Corporation.*4