

非同調質量ダンパーを用いた制震改修に関する基礎研究

Study on Seismic Retrofit using Untuned Mass Damper

○山下直城³, 秦一平¹, 阿久戸信宏¹, 郭鈞桓²

*Naoki Yamashita³, Ippei Hata¹, Nobuhiro Akuto¹, Chunhuan Kuo²

Abstract: This paper proposes a response control study using a Untuned Mass Damper (UTMD) that does not expect a tuning effect for buildings with high aspect ratio in urban areas. Use of Untuned Mass Dampers can improve the design concerns of conventional Tuned Mass Dampers. Calculate the optimum damping in the Untuned Mass Damper and show the effectiveness by the complex eigenvalue analysis and the time history analysis.

1. はじめに

都市部などの狭小地に立つ建物において、土地を有効利用するために高アスペクト比となる傾向がある。この様な建物を制震補強する際、同調質量ダンパー (Tuned Mass Damper 以下「TMD」) を採用することが多い。TMD とは対象建物の固有周期に対し、同調した固有周期をもつ付加質量を建物最上部に付加し応答を低減する制震装置である。TMD を用いることで、建物状況に応じて効果的に省スペース、低コストで制震改修することが可能である。しかし、経年劣化等の影響によって TMD の周期調整作業が必要となるため、維持管理の観点でやや懸念事項が残る。

そこで本研究では、周期調整等の煩雑な作業を解消するため、TMD のばね部を振り子の原理を適用させた比較的周期の長い支承材を想定し、付加質量に依存しないシステムを提案する。この同調効果を期待しない非同調質量ダンパー (Untuned Mass Damper, 以下「UTMD」) システムを高アスペクト比の既存建築物に適用した時の制震効果について把握することを目的とする。

2. 最適減衰の算出

Fig.1 に示す 1 質点系モデルを対象に TMD の最適同調式および最適減衰式、UTMD の最適減衰式を導出する。ここでは Fig.2 の共振曲線を例に、同調関係と減衰関係について示す。

TMD の最適設計式^[1]は Den Hartog らによって定点理論が提案されており、(1) 式から (8) 式を用いることによって建物に応じた最適な制震設計を行うことが可能である。なお、Fig.2 (a-1) に示すように減衰係数の異なる共振曲線がすべて通過する定点を TMD 剛性を調整することにより定点高さを揃え、Fig.2 (a-2) に示すように定点高さが最大となる減衰係数 (最適減衰定数 h_{opt}) を導出することにより実現可能である。

本研究で対象とする UTMD については、TMD のばね部を振り子の原理を適用させた比較的周期の長い支承材を想定し同調効果を期待しないことから、(4) 式で算出される短周期の強制振動数比 λ を選択し、(7) 式および (8) 式において選択した λ の振幅倍率が最大となる定点を通る h を利用し、UTMD の最適減衰を算出することができる。

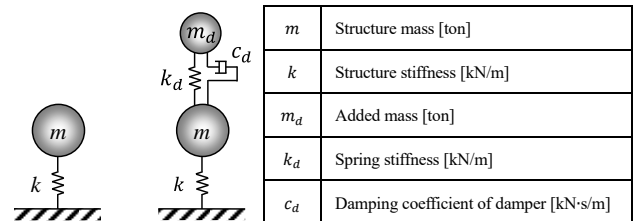


Fig.1 Model overview

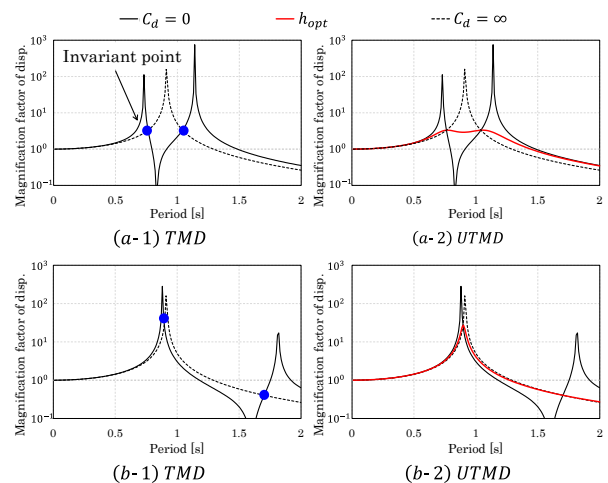


Fig.2 Resonance curve illustration

$$\frac{x_1}{x_{st}} \Big|_{\zeta=0} = \frac{y^2 - \lambda^2}{(1 - \lambda^2)(y^2 - \lambda^2) - \mu y^2 \lambda^2} \quad (1) \quad \frac{x_1}{x_{st}} \Big|_{\zeta \rightarrow \infty} = \frac{1}{1 - (1 + \mu)\lambda^2} \quad (2)$$

$$\frac{y^2 - \lambda^2}{(1 - \lambda^2)(y^2 - \lambda^2) - \mu y^2 \lambda^2} = \frac{1}{1 - (1 + \mu)\lambda^2} \quad (3)$$

$$\lambda^4 - \left(\frac{2 + 2y^2 + 2\mu y^2}{2 + \mu} \right) \lambda^2 + \left(\frac{2}{2 + \mu} \right) y^2 = 0 \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \mu} \quad (4) \quad \left(\frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2} \right) = \frac{1}{1 + \mu} \mp \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{\frac{\mu}{2 + \mu}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \left(\frac{x_1}{x_{st}} \right)}{\partial \lambda^2} = \frac{\partial}{\partial \lambda^2} \left[\frac{(y^2 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}{[(1 - \lambda^2)(y^2 - \lambda^2) - \mu y^2 \lambda^2]^2 + [1 - (1 + \mu)\lambda^2]^2 (2\zeta\lambda)^2} \right] \quad (6)$$

$$h^2 = \frac{(y^2 - \lambda^2)[2 + y^2 + \mu y^2 - (3 + \mu)\lambda^2]}{4(1 + \mu)\lambda^2} \quad (7) \quad c_d = 2m_d \sqrt{\frac{k}{m}} h \quad (8)$$

μ : Mass ratio ($\mu = m/M$) [-] Ω_n : Natural frequency of structure ($\Omega_n = \sqrt{K/M}$)
 h : Damping ratio of TMD ($h = c/(2m\Omega)$) λ : Forced frequency ratio ($\lambda = \omega/\Omega_n$)
 γ : Natural frequency ratio ($\gamma = \omega_n/\Omega_n$) X_1/X_{st} : Dynamical magnification [-]

1 : 日大理工・教員・建築 2 : 日大理工・任期制職員・建築 3 : 日大理工・学部・建築

3. 固有値解析結果

前章で示した TMD および UTMD の最適設計式を用いた設計例を示す。対象建物は、都市部などの狭小地に立つ建物を想定した 9 質点系せん断モデル（以下、「非制震」）を用いる。Table1 に非制震モデル概要と固有値解析を示す。内部粘性減衰定数は 1 次モードに初期剛性比例型で 1[%]付与する。この非制震モデルに TMD と UTMD の最適設計式を適用させた 10 層モデルを作成する。なお、多質点系モデルを対象に各最適設計式を用いる場合には制御対象を 1 次モードとし、非制震モデルの 1 次モードの有効質量と有効剛性を用いる。TMD および UTMD に付加する質量は 1 次有効質量に対して 10[%]および 20[%]として、UTMD 周期は 2.0[s]、4.0[s]、6.0[s]とする。各諸元を Table2 に示す。

Fig.3 および Table3 に複素固有値解析による各モードの刺激関数と周期及び粘性減衰定数を示す。以降の結果は参考として質量比 10[%]の結果を示す。UTMD においては、同調効果を期待していないことから、TMD 部および主架構が各モードにおいて独立して振動する性状が確認でき、1 次モードについては過減衰となっていることが分かる。また、Fig.4 に TMD 周期は 6.0[s]の共振曲線を示す。複素固有値解析からも確認できたように 1 次モードは過減衰状態であり、過度な応答倍率は確認されない。また、2 次モードにおいて、 $c_d = 0$ と $c_d = \infty$ の交点（定点）を通る最適な減衰係数の設定ができていることが確認できる。

4. 時刻歴応答解析結果

3 章に示した非制震モデルおよび TMD, UTMD を付加した制震モデルを対象に時刻歴応答解析を実施し比較検討を行う。入力地震動は日本建築センター模擬波 (BCJ-L2) と兵庫県南部地震 (JMAKOBEN-S) の 2 波を用いる。

Fig.5 から Fig.6 に各応答結果を示す。Fig.4 には解析結果より TMD 直下の 9 層目の層変位 D_{max} 、層加速度 ABS_{max} および非制震モデルの $D_{max,0}$ 、 $ABS_{max,0}$ を抽出して、応答低減効果を ($D_{max}/D_{max,0}$ 、 $ABS_{max}/ABS_{max,0}$) を求めてまとめた結果を示す。

UTMD は TMD と比較して応答低減効果には多少劣るものの、非制震と比較して応答を約 20[%]から 50[%]程度低減することが確認できる。

5. まとめ

本報では、UTMD の応答性能について検討した。今後、振動台実験によって本検討結果を実証予定である。

Table1 Model specifications & Eigenvalue results

FL	Mass [ton]	Initial Stiffness [kN/m]	Mode	T_0 [s]	h [-]
9	116.7	61497.0	1st	1.209	0.010
8	90.1	66694.0	2nd	0.447	0.027
7	94.7	79564.0	3rd	0.272	0.044
6	95.1	93178.0	4th	0.196	0.061
5	96.8	106963.0	5th	0.155	0.077
4	90.7	112726.0	6th	0.133	0.091
3	91.0	119800.0	7th	0.117	0.103
2	91.6	132364.0	8th	0.103	0.117
1	107.2	69604.0	9th	0.091	0.132

Table2 TMD parameter

	μ	m_d [ton]	c_d [kNs/m]	k_d [kN/m]
T_{TMD}	0.1	74.800	130.492	1669.421
$T_{TMD} = 2.0$			252.433	738.246
$T_{TMD} = 4.0$			345.536	184.562
$T_{TMD} = 6.0$			363.981	82.027
T_{TMD}	0.2	149.600	323.926	2805.556
$T_{TMD} = 2.0$			517.334	1476.493
$T_{TMD} = 4.0$			675.695	369.123
$T_{TMD} = 6.0$			709.994	164.055

Table3 Eigenvalue analysis result

Mode	T_{TMD}		$T_{TMD} = 2.0$		$T_{TMD} = 4.0$		$T_{TMD} = 6.0$	
	T_0 [s]	h [-]	T_0 [s]	h [-]	T_0 [s]	h [-]	T_0 [s]	h [-]
1st	1.53	0.08	1.96	0.49	3.79	1.53	5.65	2.45
2nd	1.06	0.11	1.23	0.08	1.26	0.06	1.26	0.06
3rd	0.44	0.04	0.45	0.05	0.45	0.05	0.45	0.06

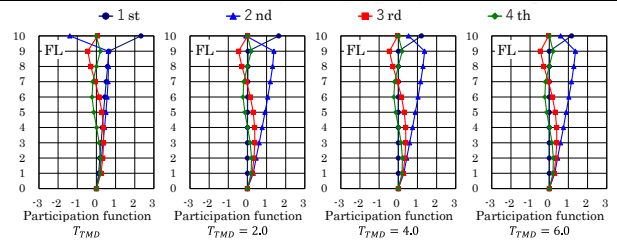


Fig.3 Participation function figure

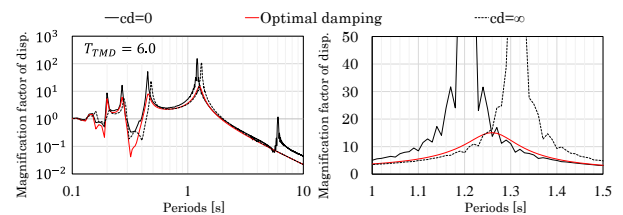


Fig.4 Resonance curve ($\mu=0.10$, $T_{TMD} = 6.0$)

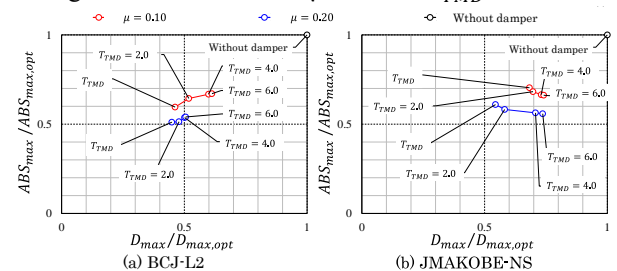


Fig.5 Response reduction figure

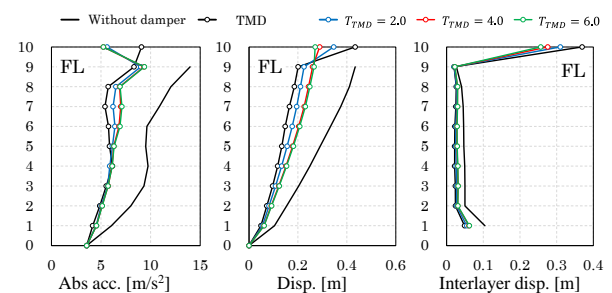


Fig.6 Response result ($\mu=0.10$, BCJ-L2)

参考文献

[1]青戸一登,丸山晃市:振動工学 解析から設計まで,森北出版株式会社,2002