新 TCMD の模型構造物に対する自由及び強制振動実験

Free and Forced Vibration Experiments of New Tuned Cradle Mass Damper

島崎 洋治*, 高橋 禎昇**, 小室 貴裕**
Yoji Simazaki, Sadanori Takahashi, Yoshihiro Komuro

*工博, 東海大学教授, 工学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目四丁目 1 番 1 号)

*東海大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目四丁目 1 番 1 号)

The tuned cradle mass damper (TCMD) relies on the motion of a swing mass on a curved surface to dissipate structural vibration energy. The objectives of this study are to obtain constant swing speed of the TCMD for a large amplitude of the swing and to verify its performance through experiments when the structure is under free and forced vibration. In order to obtain a constant speed of the device, the variable radius of the curved surface were calculated by using simple pendulum dynamics. For this study, the damper was installed in a one-story simple rigid frame model with a frequency of approximately 1 Hz.

Keywords: tuned mass damper, free vibration, forced harmonic vibration.

1. まえがき

構造物の振動発生原因には地震や風, 道路や鉄道を走行する車両, 建築や土木工事の建設機械によるものなどがあげられる. これらの振動によって引き起こされた振動の周期が構造物の固有周期と一致した場合に共振現象が起こり, 構造物が大きく揺れる. この大きな揺れは, 居住空間の安全性や快適性など, 日常生活に支障をきたすのみならず, 構造物そのものに損傷を与える. これらの問題を解決する有効な手段の 1 つとして制振が挙げられる. 制振手法には多くの種類があり, 分類の仕方も多様であるが, 大きく分けてパッシブ型制振とアクティブ型制振の 2 つがある¹⁾. 各種形態を持つパッシブ型制振装置²⁾のうちの 1 つに, 比較的短周期で微小な振幅の制振に適している「同調質量ダンパ (Tuned Mass Damper : TMD)」として道路照明柱などの道路構造物に設置される「転動型制振装置 (Tuned Rotary Mass Damper : TRMD)^{3, 4, 5)}, 中高層ビル制振を目的としたクレイドル (ゆりかご) 型制振装置 (Tuned Cradle Mass Damper : TCMD)^{6, 7)}, 高層ビルの屋上に設置される「同調液体ダンパ (Tuned Liquid Damper : TLD)⁸⁾」などがある. 文献 (6, 7) に示された TCMD は 3 本の円形レール上を, 錘付きの 3 個の車輪が移動する形式である. これは, 「TMD」のようなバネやダッシュポットを必要としない単純な機構を持ち, 保守が容易な上に, 「TLD」と比較しても設置面積が 15%程度 (水の密度 : $1\text{g}/\text{cm}^3$ に対する鉄の密度 : $8\text{g}/\text{cm}^3$) と省スペースで設置できる特徴がある. さらに, 多分割して設置することも可能な

で, 施工が容易である. ここで提案する TCMD は 3 本の円形レールに曲率変化を持たせ, 錘が一定の振動数で揺れるように工夫してある. この円弧状レールは, 揺れが大きくなるに従って曲率半径が小さくなる特徴を持ち, この曲率半径は振り子の方程式を厳密に解くことにより決定することが出来る. このことで, 円弧の幅が狭まり, クレイドル (TCMD のレールを含む部分) の型がシンプルになる利点もある.

建築物は高さが高くなるほどゆっくりと揺れる. 10~20 階建ての中高層集合住宅や事務所ビルの一次固有周期は 0.8~1.8 秒だが, 軒高 100 m を超える超高層建物になると数秒ほどの長周期になるなど, 揺れの速さは 10 階建てと比べると格段に遅くなる⁹⁾. 東海, 東南海, 南海地震が起きると, 関東, 濃尾, 大阪などの平野部ではゆっくりとした揺れが何分間も続くと言われている. 震源からの揺れが地盤を伝わり, 都市に林立する高層ビルの固有周期と同調すると, 設計値を超える応力がこれらに加わり, 最悪の場合には構造物が倒壊する危険もある. 1985 年のメキシコ地震では, 震源から離れたメキシコシティで, 周期が 2 秒程度の地震と共振した高層ビルが数十棟も倒壊した^{10, 11)}.

本研究では 1 秒程度の固有周期を持つ吊形式の歩道橋やビルなどの制振を目標に, 新 TCMD が構造物に与える減衰効果を自由振動実験及び強制調和振動実験により確認する.

2. 実験模型

2.1 ラーメン構造模型

図-1 にラーメン構造模型を示す. このラーメン構造模型は支柱材が PL-60×8 の鋼材 (SS400) を 4 本使用しており, 長さは 1300 mm で一方向のみにせん断型の振動をする. 図-2 は構造模型の頂部横方向に静荷重を与えた時の水平変位をプロットしたものである. この結果, 支柱材 4 本分のバネ定数は $k = 11.1 \text{ N/mm}$ となる. また図-3 は構造物に TCMD を搭載し, 揺動子を固定して測定した時の自由振動波形である. この図の◆印間 (20 周期) から求めた構造物の減衰定数は 0.13% である. このバネ定数と自由振動波形から求めた固有振動数 1.12 Hz より, TCMD を含めた模型の有効質量は 220 kg となる.

図-1 構造模型

図-2 模型構造物の水平バネ

図-3 模型構造物の自由振動

2.2 試作クレイドル型制振装置

図-4 は実験で用いた新 TCMD の概略図である. 中央板は 500×280×5 mm, 側面 2 枚の板は 710×280×5 mm の銅製で, 揺動子の質量は 6 kg である. この揺動子には 3 つの車輪を取り付けてあり, 中央と 2 枚の側面板を削って作成した 3 つの円弧状のレール上を 1.19 Hz の一定速度で揺動する. この振動数はレールの最下点から 90mm, 40mm および微小振幅で自由振動する 3 波形から求めた実測値で, それぞれの振動数は等しい値であった. レール円弧の最大半径は約 200 mm で, 車輪の直径は 72 mm である. また, 磁気ダンパ¹²⁾を使用するために揺動子にはネオジュウム磁石を取り付けてある. 銅板に沿って揺動するこの磁石の個数により TCMD の装置減衰を調節することができる.

図-4 新 TCMD の概念図

図-5 は TCMD の自由振動実験から求めた磁石数に対する本装置が持つ減衰定数 (ここではこれを h_2 とする) をプロットしものである. 図から明らかなように, h_2 は磁石数に対して直線的に変化していることがわかる.

図-5 磁石数に対する TCMD の減衰定数

2.3 円弧レール上 TCMD の自由振動方程式

TCMD の揺動子は回転する 3 つの車輪と円弧上を単純移動する錘からなっている．図-6 は一つの車輪部分について考えた自由物体図である．

図-6 TCMD の自由物体図

今、揺動子の車輪が滑ることなく回転し運動すると考えると、図より u 方向、 v 方向および回転運動の式は次のように表すことができる．

$$u \text{ 方向の釣合: } F - Mg \sin \theta = M \ell \ddot{\theta} \quad (1)$$

ここで、周期 T に対する摩擦力 F_d の影響は小さいので、簡単のために省略してある．

$$v \text{ 方向の釣合: } -Mg \cos \theta + N = M \ell \dot{\theta}^2 \quad (2)$$

$$\text{回転方向: } -Fr = I\beta = I \frac{\ell}{r} \ddot{\theta} \quad \text{より}$$

$$F = -I \frac{\ell}{r^2} \ddot{\theta} \quad (3)$$

ここで、 M は車輪と錘を含めた重量、 I は車輪の慣性モーメントで、車輪がシリンダー状で半径が r 、質量が m の場合に $I = mr^2 / 2$ となる．また g は重力加速度、 ℓ は車輪の重心の運動半径、 F はレールから受ける摩擦力、 N は垂直抗力、 $\beta = \ell \ddot{\theta} / r$ は車輪の回転角速度である．

式(3)を式(1)に代入して、整理すると摩擦力を考慮しない自由運動方程式が次のように求めることができる．

$$\ddot{\theta} + \frac{M}{(M + \frac{I}{r^2})} \frac{g}{\ell} \sin \theta = 0 \quad (4)$$

式(4)から求まる TCMD の運動周期 T は次式となる．

$$T = 4 \sqrt{\frac{(M + \frac{I}{r^2}) \ell}{Mg}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - \sin^2(\theta_m/2) \cdot \sin^2 \phi}} \quad (5)$$

ここで、 θ_m はゆれ幅である． θ_m が小さい場合、 $\sin \theta \simeq \theta$ と置きかえられ、式(5)の右辺積分項が $\pi/2$ となる．この場合、車輪回転のない場合や無視できるときには、 $I = 0$ となり T は微小振動をする長さ ℓ の振り子と同じで、次式のようになる．

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad (6)$$

また、錘がなくシリンダー状の車輪のみが回転する場合、 $I = mr^2 / 2$ となり、 T は次式のようになる．

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{3\ell}{2g}} \quad (7)$$

ここで周期 T が一定で、大振幅で運動すると考えると θ_m の変化に伴うレール半径 ℓ を式 (5) によって求めることができる、この変化する ℓ を使った一定振動数で揺動する TCMD が本研究の装置である．また構造物の振動に同調する TCMD の振動数（設計振動数）は、微小振動時の式 (4) より次式で求めることができる．

$$f_{TCMD} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{(M + \frac{I}{r^2}) \ell} g} \quad (8)$$

今、本研究で用いた TCMD の車輪 1 つ分を考えると、TCMD の全質量を $M = 2\text{Kg}$ 、回転する車輪の半径を $r = 36\text{ mm}$ 、質量を $m = 0.34\text{Kg}$ 、 $\ell = 164\text{ mm}$ とすると、装置の固有振動数は 1.18 Hz となり、実測値とほぼ等しい値となる。

図-7 は最下点①の半径を 200mm としたときのレールの形状を $\theta = \pm 70^\circ$ の範囲で示した図である。レール①-②が新 TCMD のもので、破線で示した①-③が半径 200 mm の円弧である。①-②の半径は周期 T を一定としたときの式 (5) 中の ℓ を使って描いた曲線である。

図-7 新 TCMD レール寸法と円弧レール

3. 自由振動実験

3.1 実験方法

構造物の自由振動実験では、構造模型の梁部分を水平方向に 140 N で引張り、初期変位を与えて自由振動をさせる。この初期変位により生ずる、両端固定とした柱の静的最大応力は 75 N/mm^2 である。ここでは、TCMD の磁石個数を 5 個から 13 個まで変化させた時の、TCMD と構造物の変位応答を測定する。変位計測にはレーザ変位センサーを使用し、サンプリング速度を 5msec とし、30 秒間計測する。

3.2 実験結果

TCMD は磁石個数で装置の減衰強度を調節する。自由振動実験では、この磁石個数による構造物に対する TCMD の制振効果変化を確認する。図-8 は磁石 0 個で構造物を自由振動させた時の構造物変位応答波形である。この図から明らかなように、TCMD の持つ減衰が小さいため（レールと車輪との摩擦のみ）に応答波形にビート現象が起きていることが分かる。この時の◆印間（5 周期）

の減衰定数は 0.80% になっており、TCMD が無い場合の 0.13% よりは大きいものの、制振効果ありとは言いがたい。図-9 から図-13 は磁石個数を 5 個から 13 個 ($h2 = 4.37\% \sim 15.89\%$) まで変化させて構造物を自由振動させたときの代表的な 5 種類の応答変位波形である。図中 a) は構造模型の変位応答波形を表し、b) は TCMD の揺動子の変位応答波形を表している。ここで、揺動子の変位は構造物との相対変位である。磁石 0 個の時と比べると、明らかに減衰効果が得られていることが観察できる。

図-9 の磁石 5 個 ($h2=4.37\%$) の時の構造物の振動波形を見てみると、5 秒後に小さなビートが生じ、再び振動を始めるが 15 秒後には揺れが止まっている。この時の TCMD の揺動子の波形を見てみると約 6 秒後まで振動し構造物の振動を抑制するように運動していることがわかる。また、小さなビートも生じていることが分かる。この時の揺動子の振幅は $\pm 40\text{mm}$ ほどになっており、構造物のその 4 倍近くである。

図-10 および 11 の $h2$ はそれぞれ 7.25% および 10.13% である。定点法による TMD の最適設計法^{2,13)}によれば、本研究の TCMD/構造物の質量比 $= 6/220 = 2.73\%$ より $h2$ の最適値は約 10% である。図-10 と図-11 を比較してみると構造物減衰はほぼ同じような形状であるが、TCMD の最大振幅は $h2 = 10.13\%$ のほうが 20% あまり小さくなっているのがわかる。

図-12 と図-13 は $h2$ がそれぞれ 13.01% および 14.45% のときの振動波形である。ビートはなくなっているが、TCMD の減衰力が強いので、構造物は他の場合に比べ、ゆっくりと減衰している。これらの場合には、TCMD の最大振幅が図-11 と比較してさらに数パーセント小さくなっている。

表-1 は TCMD の磁石個数を 5 から 13 個まで変化させた時の構造物の振動波形から算出した減衰定数値 ($h1$) を示した表である。表中の◆1 と◆2 は、それぞれ図中にある最初のマーカと最後のマーカを意味し、この間は 6 周期である。減衰定数値はこれらのマーカ◆1 と◆2 の高さで周期数から計算してある。また図-14 はこれらの値をプロットしたものである。ここで図-14 の横軸は磁石の個数、縦軸は構造物の減衰定数 $h1$ (%) である。この図から磁石の個数が 7 から 12 個で 4% 程度の構造物減衰が得られていることがわかり、これは TCMD 非搭載の場合の 30 倍の構造物減衰効果を得たことになる。また磁石 9 個 ($h2 = 10.13\%$) 付近で、構造物減衰 $h1 = 4.71\%$ と最大を示しており、TCMD の最適 $h2$ があることを示唆している。

図-15 は構造物の最大変位応答値を TCMD の最

大変位応答値で除した倍率を示したものである。TCMD は構造物の振動制御するために、この 2～3 倍の変位で運動をしていることがわかる。また $h2$ が大きくなるにつれて TCMD の振幅が小さくなっていることも観察できる。

図－8 構造物の変位応答（磁石 0 個）

4. 強制調和振動実験

4.1 実験方法

構造物の強制振動実験では、TCMD 無搭載の構造模型および磁石 7 個 ($h2 = 7.25\%$) を使用した TCMD 搭載の構造模型を、それぞれ振動数比 $w_f/w_s = 0.8 \sim 1.2$ （強制調和振動数を w_f 、構造物の固有振動数を w_s とする）の調和振動による強制振動をさせる。この実験では供試体を振動台上に固定し

変位による強制調和振動を与える。この時、構造模型の梁部分および TCMD 揺動子の端部 2 か所に設置したレーザ変位センサをあてて応答を計測する。強制振動により、変位応答振幅が定常的になったところで、30 秒間測定する。

4.2 構造物の強制振動実験結果

図－16 は構造物の共振曲線である。横軸は振動数比、縦軸は変位応答振幅の最大値が対数表示になっている。TCMD の揺動子を固定した場合の共振曲線は、実測値がきわめて小さな強制振動振幅で得られたものであるため実験の信憑性に問題があると考え、理論的に求まる絶対変位をプロットしたものである。この図から振動数比が 1.0 のとき制振効果が特に大きくなっており、ここで構造物の変位が最少となり、TCMD 無搭載時（揺動子固定時）の振幅の 1/57 程度に減少している。またこの共振点左右の応答が小山状に大きくなっていることが観察される。図－17 は構造物の変位に対する TCMD の全振幅変位を示した図である。共振時 ($w_f/w_s = 1.00$) 付近では構造物の変位に対して TCMD の変位は最大で 5 倍程度に及んでいる。

図－18～図－20 はそれぞれ、 w_f/w_s が 0.882, 1.00 および 1.105 の場合の実験により得られた、構造物と TCMD の揺動子の変位応答波形である。揺動子の影響により構造物が定常的に制振されている様子が観察できる。

a) 構造物

b) TCMD

図－9 変位応答 $h2 = 4.37\%$ （磁石 5 個）

a) 構造物

b) TCMD

図－10 変位応答 $h2 = 7.25\%$ （磁石 7 個）

a) 構造物

b) TCMD

図-11 変位応答 $h_2 = 10.13\%$ (磁石 9 個)

a) 構造物

b) TCMD

図-12 変位応答 $h_2 = 13.01\%$ (磁石 11 個)

a) 構造物

b) TCMD

図-13 変位応答 $h_2 = 14.45\%$ (磁石 12 個)

表-1 磁石の個数と構造物の減衰定数(h_1)

磁石個数 (h_2)	◆1 の高さ (mm)	◆2 の高 (mm)	h_1
5 (4.37%)	10.952	3.192	0.0327
6 (5.81%)	11.464	3.056	0.0351
7 (7.25%)	11.234	2.138	0.0440
8 (8.69%)	11.560	2.428	0.0414
9 (10.13%)	10.828	1.832	0.0471
10 (11.57%)	10.940	2.040	0.0445
11 (13.01%)	10.332	1.812	0.0462
12 (14.45%)	10.352	1.972	0.0440
13 (15.89%)	11.188	3.092	0.0341

図-14 TCMD の磁石個数と構造物の減衰定数

図-15 変位倍率 (TCMD/構造物)

図-16 共振曲線

図-17 強制振動時の構造物と TCMD の変位

図-18 振動数比 0.882

図-19 振動数比 1.000

図-20 振動数比 1.105

5. まとめ

本研究では、実用化に向けた 1Hz 程度で揺れる構造物のための改良型 TCMD を提案した。この改良は従来、揺動子が円弧のレール上を移動するために、非線形性（大きく揺れるにしたがって、揺れが遅くなる）を有していることを改良したもので、円弧の曲率半径を変化させることで、一定揺れ速度での運動を可能にした。また従来の装置より円弧の幅を狭くすることで、形状がコンパクトとなった。

ここではまず、この TCMD を設計するために必要な揺動子の自由振動方程式を導出し、揺動子の回転する車輪と回転しないおもりを含む時の TCMD 振動数を求める式を提案した。次に、自由及び強制調和

振動による制振効果実験から、提案する装置の構造物に与える減衰効果を定性的な範囲で確認することができた。

自由振動実験では、構造物の柱に生じる応力が降伏点応力の1/3程度の範囲で行った。ここではTCMDの揺動子減衰が構造物制振に影響を与えることを示した。

強制調和振動実験では、共振点振動数比(1.0)の左右で構造物応答に二つの山ができることを確認することができた。このことを数値解析などで詳しく調べることで、最適設計の足掛かりとなる可能性が考えられる¹³⁾。また共振時には、TCMDを搭載することにより、最大で1/57まで変位応答を減少できる結果を得ることができた。

自由および強制調和振動を通じて、TCMDの最大変位は構造物のその3~5倍程度まで揺動する可能性があり、TCMD設計の段階では特に注意が必要であることが示された。

本研究は限られた条件下での実験的研究である。制振装置の設計で重要となる主なパラメータは、①TCMD揺動子と構造物の質量比 μ 、②揺動子の持つ減衰定数 h_2 および③TCMDと構造物の固有振動数比 γ などである。2自由度系振動理論^{2,13)}では、最適TCMD振動数 f_{opt} と振動数比 γ_{opt} はそれぞれ、 $f_{opt} = 1/(1+\mu)$ および $\gamma_{opt} = \sqrt{3\mu/8(1+\mu)}$ などである。これらはTMDの形態や、制振対象となる構造物特性などにも影響されるはずである。

今後、実際の構造物への供用を目標にTCMD-構造物の連成運動方程式を作成し、数値計算により装置の最適化に関する研究を進めてゆく予定である。

謝辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構の地域ニーズ即応型課題「ペンシルビルに適用する制振装置の施策と評価(平成21年度採択課題)」として支援を受けた研究である。この課題の参画機関として、地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター(都産技研)の福田良司氏、株式会社コスモテックスの森尻渉氏の協力をいただいた。また強制振動実験を行うにあたり、昭島市にある多摩テクノプラザ(都産技研)の起振機を使用させていただいた。これらの協力に対し深く謝意を表する。

参考文献

- 1) Housner G.W., et al, 'Structural control: past, present, and future' American Society of Civil

Engineers, J. Eng. Mech., Vol 123, No 9, Special Issue, 1997; 897-971.

- 2) Soong, T.T. and Dargush G.F., Passive Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley & Sons, 1977.
- 3) 近藤隆行, 島崎洋治: 転動型制振装置に関する基礎的研究, 土木学会第25回関東支部技術研究発表会講演概要集, 第I部門, pp.146-147, 1998.
- 4) 尾畑守夫, 森尻渉, 島崎洋治: 転動型制振装置の自由振動における制振効果, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.381-391, 2001.
- 5) 尾畑守夫, 森尻渉, 島崎洋治: 転動型制振装置の照明柱に対する制振効果, 土木学会論文集 No.766/I-68, 339-350, 2004.
- 6) 武井啓充, 島崎洋治: クレイドル型制振装置における実験と解析, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, 第I部門, pp.1189-1190, 2008.
- 7) 武井啓充, 島崎洋治: Vibration Control Effects of Tuned Cradle Damped Mass Damper, Journal of applied Mechanics Vol.13, pp.587-594, 2010.
- 8) Fujino, Y., Sun, L.M., Pacheco, B.M. and Chaiseri, P.: Tuned Liquid Damper (TLD) for Suppressing Horizontal Motion of Structure, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.118, No.10, Oct, 1992.
- 9) 日本建築学会: 長周期地震動と建築物の耐震性, 丸善株式会社, 2007.
- 10) 南忠夫: メキシコ市の建築物の振動特性, 1985メキシコ地震災害調査報告, 日本建築学会, 113-124, 1987.
- 11) 正木和明: 1985年9月19日メキシコ地震に関する研究I, 愛知工業大学研究報告, 第24号B, 119-130, 1989.
- 12) 長屋幸助, 関口肇: 反転磁極の組合せによる高減衰磁気ダンパの開発とその解析, 日本機械学会論文集C編, 57-544, pp.3800-3805, 1991.
- 13) Den Hartog, J. P., Mechanical Vibration, McGraw-Hill, New York, 1956.
- 14) Obata, M. and Shimazaki Y., Optimum Parametric Studies on Tuned Rotary-Mass Damper, Journal of Vibration and Control, 14(6): 867-884, 2008.

(2012年3月8日 受付)