

# TCMD の制振効果に関する振動実験

高橋 禎昇<sup>\*1</sup>, 小室 貴裕<sup>\*2</sup>, 島崎 洋治<sup>\*3</sup>

## Experimental Verification of Tuned Cradle Mass Damper

by

Sadanori TAKAHASHI<sup>\*1</sup>, Yoshihiro KOMURO<sup>\*2</sup>, and Yoji SIMAZAKI<sup>\*3</sup>

(Received on Sep. 29, 2011 and accepted on Jan. 18, 2012)

### Abstract

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 a constant TCMD swing speed and verify its performance through experiments when the structure is under free and forced vibration. To obtain a constant device speed, simple pendulum dynamics were used to calculate the variable radii of the curved surface. For this study, the damper was installed on 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、構造物の信頼性、精度、品質、寿命などまでも損なう。これらの問題を解決する有効な手段の1つとして制振<sup>1)</sup>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(TMD)とアクティブ型制振(AMD)の2つがある。ここで提案する制振装置はパッシブ型に属するクレイドル(ゆりかご)型制振装置(Tuned Cradle Mass Damper:TCMD)<sup>2,3)</sup>で、比較的長周期構造物の制振に適している。パッシブ型制振装置には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)」<sup>4)</sup>、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)<sup>4,5,6)</sup>」、超高層ビルの屋上に設置される「同調液体ダンパ(Tuned Liquid Damper:TLD)」などがある。文献(2,3)に示されたTCMDは3本の円形レール上を、3個の車輪が付いている錘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(水の比重:1に対する鉄の比重:8)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ので、施工が容易である。ここで提案するTCMDは文献(2,3)の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。

本研究では長周期構造物の制振対象として、1Hz程度の固有周期を持つペンシルビルや歩道橋などの制振を目標に、改良型TCMDが構造物に与える減衰効果を自由振動実験及び強制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

Fig.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1300mmで一方のみせん断型の振動をする。支柱材4本分のバネ定数 $k=11.1$  kg/cmで、TCMDを含めた模型の有効質量は220kgで

\*1 工学研究科土木工学専攻修士課程

\*2 工学研究科土木工学専攻修士課程

\*3 工学部土木工学科教授

ある。ここで、両端固定と仮定した場合の支柱材のバネ定数は、 $k=11.7 \text{ kg/cm}$ 、また有効質量はこのバネ定数と Fig.2 から求めた構造物の固有振動数  $1.12 \text{ Hz}$  より  $233 \text{ kg}$  である。Fig.2 の◆印間 (20 周期) から計算した構造物の減衰定数は  $0.0013$  である。

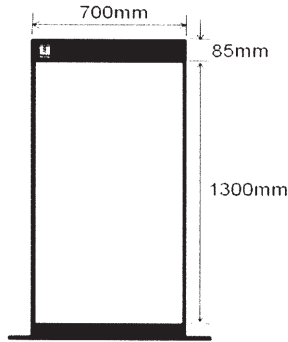


Fig.1 One-story structure

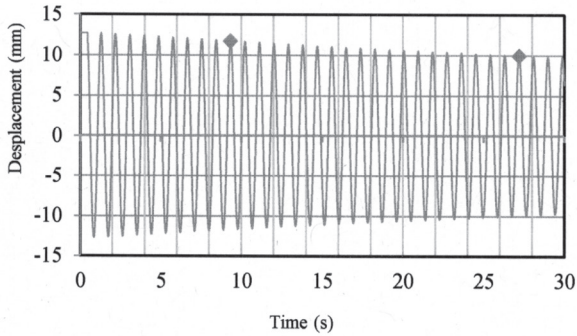


Fig.2 Free vibration of the structure

## 2.2 試作 クレイドル型制振装置

Fig.3 は実験で用いた TCMD の正面図、平面図、および側面図である。装置揺動子の質量は約  $6 \text{ kg}$  である。揺動子には 3 つの車輪を取り付けてあり、3 つの円弧状のレール上を 1 秒間に 1 回程度の速さで揺れる。レールの円弧の最大半径は約  $20 \text{ cm}$  であるが揺動子が一定の速度で揺れるように曲率半径を変化させてある。

レールには非鉄金属である銅版を使用し、揺動子には減衰を得るためのネオジウム磁石が取り付けられている。磁石は+と-方向を交互に配置することにより減衰強度を上げることができ、各種の配列方法が考えられるが<sup>7)</sup>、ここでは揺動子の減衰の程度を定性的に知ることを目的として、一方方向のみで配置した場合の個数により減衰の程度調節をすることとした。

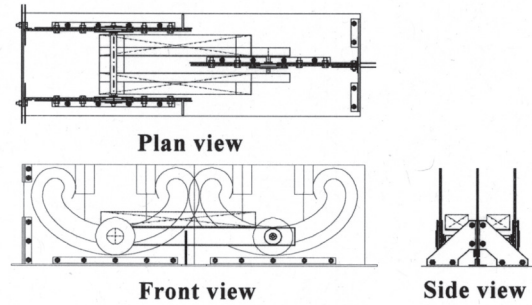


Fig.3 Tuned cradle mass damper

## 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  $14 \text{ kg}$  の荷重で引張り、初期変位を与えて自由振動をさせる。ここでは、TCMD の磁石個数を変化させた時の、TCMD と構造物の変位応答を測定する。変位計測にはレーザー変位センサーを使用し、サンプリング速度を  $5 \text{ msec}$  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の減衰性状を観察する。Fig. 5, 6, 7 は磁石個数を 5, 7, 13 個取り付け自由振動させたときの変位波形である。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。揺動子の変位は計測された変位から構造物の変位を差し引いた値をプロットしてある。Fig.4 の磁石 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。Fig. 5 の磁石 5 個の時の構造物の振動波形を見てみると、5 秒後にビート現象が生じ、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、構造物の自由振動波形と同じようなビート現象も生じていることが分かる。Fig. 7 の磁石 13 個の場合、ビート現象がなくなるが、減衰効果は小さくなっている。

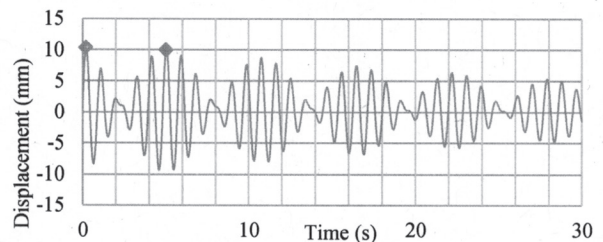
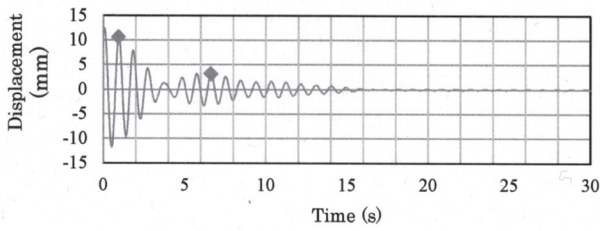
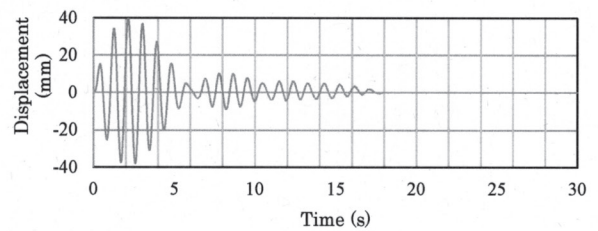


Fig.4 Displacement response (magnet number 0)

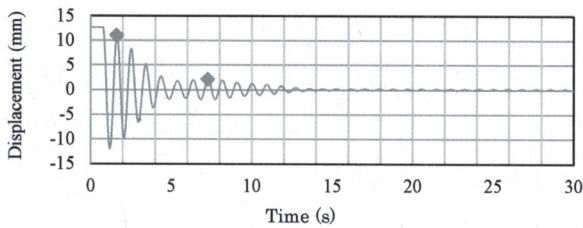


a) Structure

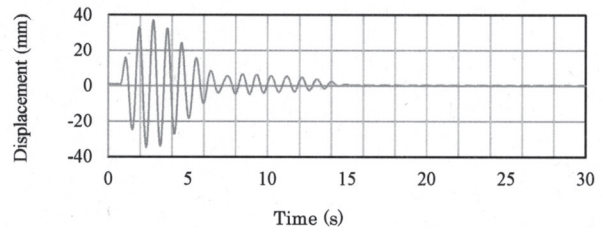


b) TCMD

Fig.5 Displacement response (magnet number 5)

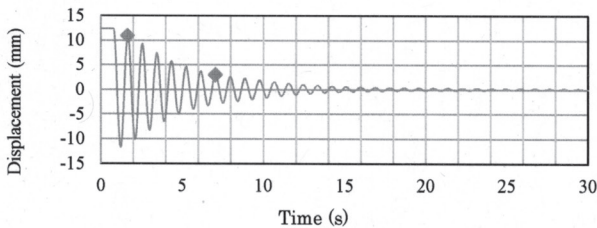


a) Structure

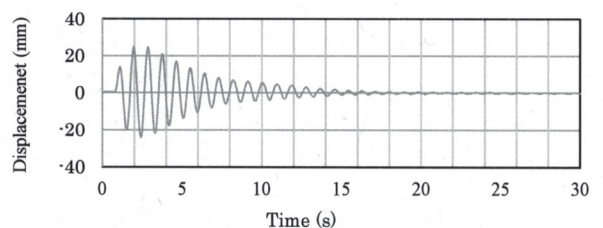


b) TCMD

Fig.6 Displacement response (magnet number 7)



a) Structure



b) TCMD

Fig.7 Displacement response (magnet number 13)

Fig. 8 は磁石個数による構造物の減衰定数値をプロットしたものである。ここで Fig. 8 の横軸は磁石の個数、縦軸は減衰定数(%)である。この図から磁石の個数が 7 から 12 個程度で 4% 余りの構造物減衰が得られていることがわかり、これは TCMD 無搭載の場合の約 40 倍以上の構造物減衰効果を得たことになる。

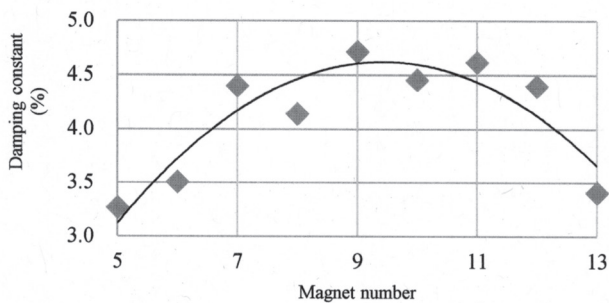


Fig.8 Damping constant of structure versus magnet number

#### 4. 正弦波地動による強制振動実験

##### 4.1 実験方法

構造物の正弦波地動による強制振動実験では、磁石 7 個を使用した TCMD 搭載の構造模型を、約 0.8Hz~1.2Hz の調和振動による強制振動（強制振動数を  $w_f$  とする）をさせる。この時、構造模型の梁部分および TCMD 揺動子の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

Fig. 9 は共振曲線である。横軸は振動数比 ( $w_f/w_s$ : 構造物の固有振動数)、縦軸は変位応答振幅が対数表示になっている。TCMD 無しの場合の共振曲線は理論的に求まる絶対変位をプロットしたものである。TCMD 有の場合、振動数比が 1.00 のとき制振効果が特に大きくなっており、構造物の変位が凹となり<sup>8,9)</sup>、TCMD 無搭載時の振幅の 2% 程度まで小さくなっている。Fig.10 は構造物の絶



## 5. まとめ

対変位に対する TCMD の相対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 3 倍程度に及んでいる。

Fig.11 は、 $w_f/w_s$  が 1.00 の実験により得られた波形である。構造物と TCMD の波形はそれぞれの振動数比で定常的に変位していることがわかる。

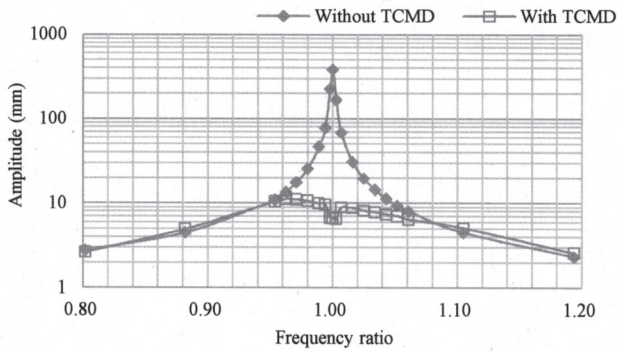


Fig.9 Resonance curve

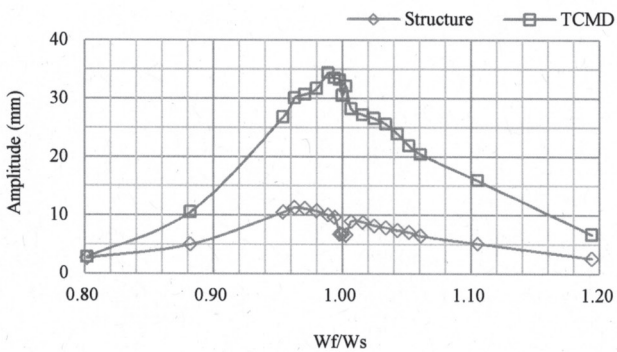
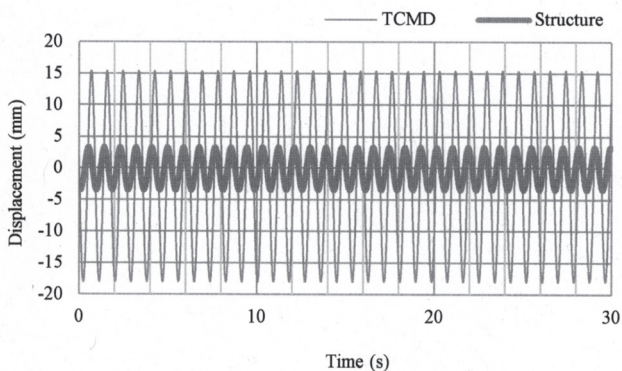


Fig.10 Displacement response of structure and TCMD

Fig.11 Time history of displacement response ( $w_f/w_s=1.00$ )

本研究は、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、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ものである。ここでは、自由及び強制調和振動による制振効果実験から、提案する装置の良好な減衰効果を確認することができた。自由振動実験では、TCMD の磁石による揺動子減衰が構造物制振に大きな影響を与えることを定性的な範囲で整理することができた。本研究では揺動子減衰に磁気ダンパを用いており、適切な磁力を得るための装置改良や磁石の配列などにも考慮が必要なが分かった。

強制振動実験では、適切に調整された TCMD を用いることで、共振時に共振時付近よりもさらに凹の構造制御結果を得ることができることを確認することができた。自由および強制振動実験を通じて、TCMD の最大変位は構造物のその 3 倍程度まで動く可能性があり、TCMD 設計の段階では特に注意が必要であることが示唆された。

本装置は構造物上に分割して設置可能で、既存の建築物などに補強工事を伴わないで施工することが可能である。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。

## 参考文献

- 1) 金田勝徳 他：建築の耐震耐風入門，彰国社，2007.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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 回関東支部技術発表会講演概要集，第 I 部門，pp.146-147，1998
- 5) 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
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Den Hartog, J. P., Mechanical Vibration, McGraw-Hill, New York, 1956.
- 9) Obata, M. and Shimazaki Y., Optimum Parametric Studies on Tuned Rotary-Mass Damper, Journal of Vibration and Control, 14(6): 867-884, 2008.