

多方向転動型同調質量ダンパーを用いての 自然風下での CCTV 柱の制振対策に関する長期現地試験

Long-term Site Test for Vibration Control by Natural Wind of CCTV Pillars Using Multi-Direction Tuned Rolling Mass Damper

井田剛史*・丸岡 晃**・平野廣和***・尾松大道****・富岡 昇*****

Tsuyoshi IDA, Akira MARUOKA, Hirokazu HIRANO, Hiromichi OMATSU and Noboru TOMIOKA

*正会員 (株)十川ゴム 研究開発部 (〒599-8244 大阪府堺市中区上之 516 番地)

**正会員 八戸工業高等専門学校 准教授 環境建設工学科(〒039-1192 青森県八戸市田面木字上野平 16-1)

***正会員 中央大学 教授 総合政策学部 (〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)

****正会員 中井商工(株) 東京営業所 (〒272-0014 千葉県市川市田尻 2-5-11)

***** 協和コンサルタンツ(株) 東北支社 (〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町 6-12)

This paper describes the validity confirmation of design for vibration control of Multi-direction Tuned Rolling Mass Damper (MTRMD) system by the vibration measurement of CCTV pillars where MTRMD was given on long-term site test by natural winds. MTRMD system is the combination of the rotating ball and the hemisphere container which was made of the synthetic rubber. So far the simulation and experimental model tests have been done to estimate the abilities and the performance of MTRMD, the damping effect and the durability was confirmed by the vibration measurement for CCTV pillars on long-term site test by natural winds. In addition, valuable data of the strong wind of "Haru Ichiban" was able to be obtained, it reports on this.

Key Words : vibration control, multi-direction tuned rolling mass damper, natural wind test

1. はじめに

既存の道路監視用 CCTV(Closed Circuit Television)柱、標識柱、信号柱等の柱状構造物は、様々な動的外乱により常に振動現象が生じている。要因としては、地震応答、車両通過による振動応答、風応答などが考えられる。これらの振動応答は構造物の安全性や使用性を損なうものとなり、2007 年 9 月には埼玉県で信号柱倒壊による死亡事故も発生し、同年だけでも全国で 60 件余の道路上の柱状構造物倒壊事故が報告されている¹⁾ことから、この緊急対策が希求されている。

構造物の振動問題の対策手法として、まず、支柱部材のサイズアップ(径間および板厚のアップ)が挙げられるが、その分重厚な構造となりコスト増加が課題となっている。次の対策として制振装置の適用があり、長柱構造物用の制振装置としては、衝突による衝撃で制振効果を得る衝撃ダンパー(ID:Impact Damper)²⁾や同調質量ダン

パー(TMD:Tuned Mass Damper)³⁾、同調液体ダンパー(TLD:Tuned Liquid Damper)⁴⁾、転動型質量ダンパー(TRMD:Tuned Rolling Mass Damper)⁵⁾などの各種制振装置の適用事例が報告されている。それぞれ衝突音、耐久性、価格、制振方向の限定等々の一長一短を有している。

一方、著者らの研究グループは、これらの制振装置の問題を解決するために、多方向に制振効果を発揮し、かつ低コスト化が可能な多方向転動型同調質量ダンパー(MTRMD: Multi-direction Tuned Rolling Mass Damper)⁶⁾を開発し、この効果を確認するために長柱モデルを用いて減衰性能評価を行ってきた。MTRMD の特徴は、水平方向において高加速度が生じる様な初期段階においては衝撃ダンパー(以下、ID)としての特性を、一定加速度以下では同調質量ダンパー(以下、TMD)としての特性をそれぞれ有する複合的機能を持つダンパーである。このダンパーの実構造物へ適用は、2004 年 10 月の都市部高架橋上に設置された監視カメラ用 CCTV 柱が最初である。ここでの CCTV 柱は、交通振動などの影響を受けて柱が

振動し、カメラの視認性が阻害されるといった問題が生じていた。この CCTV 柱に MTRMD を設置し、CCTV 柱を制振させること目的として、性能確認のための現地計測を行った⁷⁾。この結果、鮮明な画像を得ることにより監視機能を確保し、かつ柱の寿命を延ばすことが可能となった。さらに、設置以来5年余りにわたり、メンテナンスフリーで作動していることが確認されている。

この MTRMD の導入により、CCTV 柱の振動を制御することが可能となったので、従来の柱状構造物のサイズを小さくすることも可能となる。さらに、従来から用いられてきた振動に強く耐久性重視の高価な監視カメラでなく、視認性能の低下を抑えた安価な Web 対応監視カメラを利用することでコスト低減が図れる。前者は1台あたり300万円以上するのに対し、後者は10万円前後で入手が可能である。このように汎用化による量産効果で安価となった Web カメラであっても高性能化が計られており、従来の監視カメラと同等の性能が得られ、よってカメラ設備に関する費用の大幅な低コスト化も可能な状況にある。また、データインフラの容量が飛躍的にアップしているため、通信コストを大幅に下げることが可能である。これにより、CCTV 設備の設置コストの大幅な削減が可能となる。

ところで本研究で取り上げる柱状構造物は、一般に中空パイプ構造であり、質量が軽く減衰が小さいために交通振動や風応答による振動の影響を大きく受ける。これらの特徴は、振動継続時間が長く、風の場合、季節風時で1~2日、台風時では数時間と長時間に渡り振動が続くことである。

このような背景から、本論では支柱部材が薄く細い鋼管柱（以下、実験柱とする）2本にそれぞれ市販の Web カメラを設置し、かつ1本の柱には MTRMD を設置して、長期間にわたり自然風下での振動計測を行うものである。実験柱設置場所は、冬季の強風が期待でき、かつ寒冷地での機能確保が確認できる青森県八戸市の八戸工業高等専門学校の屋上（5階建て校舎、地上約20m）とする。ここで、振動応答ならびに照査に必要な振動特性を算出し、さらにカメラより得られた映像も比較し、薄く細い支柱部材の実験柱における MTRMD の制振効果を確認するものである。この計測により2009年2月14日に「春一番」の風速20m/sを越える強風下でのデータの取得ができ、強風に対する十分な制振効果を確認することができたので、本論ではこれに関しても詳細に報告する。

2. 多方向転動型同調質量ダンパー

2.1 多方向転動型同調ダンパー（MTRMD）の特徴

本論で提案する MTRMD は、写真-1ならびに図-1、2に示す様に、転動する球とそれを受ける高減衰ゴムで構



写真-1 MTRMD 本体

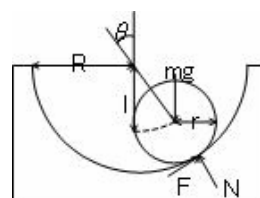


図-1 MTRMD 数値解析モデル

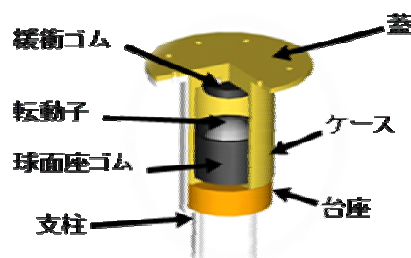


図-2 MTRMD 設置鳥瞰図

成された半円球の容器の組み合わせである。大振幅時には ID としての機能を、小振幅時には TMD の両者の機能を有する。この装置は、著者らの今までの研究^{9) 7)}により、以下のような特徴を有していることが判っている。

- ① 長柱の卓越する振動を効率よく抑制する。
- ② 多方向における振動に対応できる。
- ③ 比較的小振幅の振動も抑えられる。
- ④ 機械駆動部分が無いので、給油等が不要でメンテナンスフリーである。
- ⑤ 簡単な構造であり小型であるので、既存の長柱に対して比較的容易に設置可能である。
- ⑥ 低コストで製作できる。
- ⑦ 金属同士の接触が無いので、制振作動時の騒音がほとんどない。
- ⑧ 高減衰ゴムを球面座に用いることで、TRMD ダンパーの適用可能な振動数範囲を拡大し、かつ転動子の転動を素早く止めて構造物の揺れ戻し現象を抑制する。

2.2 固有振動数の算出

MTRMD は、一定加速度以下では TMD としての特性を有している。ここで、起振力が一方向から作用する場合には、転動子と座が球面であることから、2次元の運動方程式で検討する。このことから固有振動数は、図-1

に示す転動子の半径 r と、それを受ける球面座の半径 R から構成される自由運動方程式から求めることができる。ここで、 m は球の質量、 l は有効半径、 θ は球重心の振れ角、 F は外殻から受ける摩擦力、 N は垂直抗力、 g は重力加速度である。球は滑ることなく回転し運動すると考えると、図-1 の系より、外殻から受ける摩擦力 F 方向の釣り合い式は式(1)で表すことができる。

$$ml\ddot{\theta} = F - mg \sin \theta \quad (1)$$

また、この時の球の回転運動の式は式(2)になる。

$$-Fr = \frac{1}{2}mr^2 \times \frac{l}{r}\ddot{\theta} \quad (2)$$

式(1),(2)を整理すると式(3)の自由運動方程式を導くことができる。

$$\ddot{\theta} + \frac{2}{3} \frac{g}{l} \sin \theta = 0 \quad (3)$$

θ が微小で $\sin \theta \approx \theta$ とすれば、固有振動数 f は式(4)で与えられる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{g}{l}} \quad (4)$$

3. 制振効果確認実験

3.1 実験の概要

都市高架橋における長期観測は、直径 139.8mm、板厚 6.6mm の鋼管柱に MTRMD を取り付けて行ってきた。これに対して本研究では、断面剛性が低く揺れやすい表-1 に示す直径 114.3mm、板厚 3.5mm の実験柱を採用した。なお、支柱の断面積は都市高架橋における CCTV 柱の約 43%となっている。この柱を自然条件下に設置して、まず応答変位に加え、照査に必要と考えられる固有値や減衰率に代表される振動特性を算定した。そして Web カメラの映像から視認性向上を検証するため、MTRMD 有無の 2 本の柱を用意し、それぞれの柱頭頂部に Web カメラを取り付けた。これらから径が細く、かつ板厚の薄い支柱部材においても、MTRMD の制振効果の有することを確認する。

表-1 に示す諸元の実験柱を 2 本用い、両方の柱頭頂部に 3 軸加速度計と柱頭頂部の振動を映像により把握するために写真-2 に示す市販の Web カメラ(キャノン製、VB-C50iR)とこれを保護するハウジング(A-ODW7IF)を設置する。そして片方(写真-3 左側)のみに MTRMD を支柱頭頂部内に設置する。実験柱設置場所については、冬季の強風が期待でき、かつ寒冷地での機能確保が確認できる青森県八戸市の八戸工業高等専門学校の屋上(地上約 20m)に設置した。柱の設置状況と実験状況を写真

表-1 実験柱諸元

	寸法(mm)		
	直径	長さ	板厚
支柱材	114.3	5,000	3.5
上台座	150		4.5
	縦		板厚
下台座	300	300	16
	密度(N/mm ²)	弾性係数(N/mm ²)	ポアソン比
支柱・台座	7.80E-09	2.1E+04	0.3



写真-2 ネットワークカメラ(左)とハウジング(右)



写真-3 実験柱の設置状況と実験状況
(青森県八戸市 八戸工業高等専門学校屋上)

-3 に示す。

実験柱を設置後、引綱法による自由振動実験を行い、得られた加速度データより、固有振動数と減衰定数を求め、事前に構造解析より求めた MTRMD 内の転動子の大きさの最終決定を行う。その後、実環境下での長期計測を行い、Web カメラから取得した映像より振動時の様子を捕らえ、同時刻における映像から MTRMD の有無による制振効果を視認によって比較検討している。

3.2 制振装置のチューニング方法

TMD 系の制振装置は、振動数の調整を誤ると加振装置の働きをしてしまうことがある。そのため、MTRMD の振動数の調整には、十分な注意が必要となる。本研究での MTRMD は、MTRMD 内の転動子の径の違いにより制振効果に大きな差異が生じることがわかっている⁹⁾

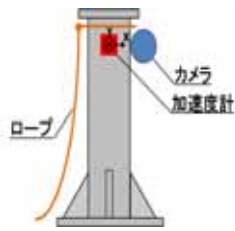


図-2 実験柱の概要

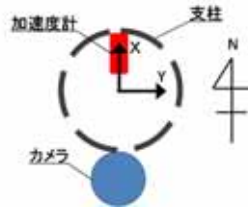


図-3 実験柱断面図

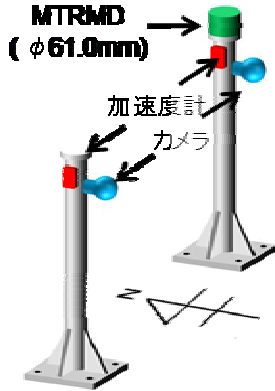


図-4 自然風下の長期計測時の機器配置

よって MTRMD を設置する際には、転動子の径を慎重に検討しなければならない。

そこで、式(4)を球面座内径 R と転動子直径 ϕ の関係を導入して式 (5) に変形する。ここで式(5)の f は、MTRMD 固有振動数となる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4g}{3} \cdot \frac{1}{(2R - \phi)}} \quad (5)$$

$$f_a = \left\{ \frac{1}{1 + \rho} \right\} f_b \quad (6)$$

f_a : 制振材の最適固有振動数

f_b : 長柱の固有振動数

ρ : $\frac{\text{おもりの等価質量}}{\text{長柱の質量}}$

一方、TMD 系の制振装置には質量比（ここでは、MTRMD の質量／実験柱の質量）の調整も重要な要素である。著者らの従来の研究⁶⁾から式(6)に示す場合が最適とされている。これより式(6)の f_a は、長柱（鋼管柱）の固有振動数 f_b から算出される制振材（MTRMD）の最適固有振動数である。 ρ は質量比である。 f と f_a が一致するとき、MTRMD の制振効果を最も得られることが出来るので、式(5)、(6)を計算することで最適転動子径 ϕ を求めることになる。

3.3 最適値の決定

実験柱の固有振動数等の振動特性を事前に把握し、MTRMD 内の転動子の径を決定するために、有限要素法

表-2 引綱法による自由振動実験結果

実験ケース	転動子直径 (mm)	固有振動数 (計測値 Hz)	減衰率 (%)
1-1	なし	2.96	0.5
1-2	なし	2.95	0.55

実験ケース	転動子直径 (mm)	固有振動数 (計測値 Hz)	減衰率 (%)		質量比 (%)
			インパクトダンパー効果	TMDダンパー効果	
2-1	50.8 (銅)	2.94	1.7 (0~3.2秒)	3.60	0.97
2-2	50.8 (銅)	2.95	1.4 (0~5.2秒)	2.77	
2-3	55.6 (銅)	2.94	1.5 (0~3.8秒)	3.75	
2-4	55.6 (銅)	2.86	1.3 (0~5.6秒)	2.23	1.27
2-5	55.6 (銅)	2.91	1.4 (0~5.3秒)	3.90	
2-6	57.2 (銅)	2.91	2.1 (0~2.8秒)	4.20	1.39
2-7	57.2 (銅)	2.94	1.7 (0~4.2秒)	2.90	
2-8	60.0 (銅)	2.89	2.0 (0~3.5秒)	2.40	1.60
2-9	60.0 (銅)	2.95	1.1 (0~6.7秒)	1.90	
2-10	61.0 (鉛)	2.88	3.1 (0~1.9秒)	3.90	2.44
2-11	61.0 (鉛)	2.88	3.3 (0~2.6秒)	4.20	
2-12	61.0 (鉛)	2.88	3.5 (0~1.9秒)	4.50	
2-13	69.4 (銅)	2.99	2.9 (0~3.8秒)	0.36	2.52

注：()内の時間は、インパクトダンパーとしての効果が生じた時間を示す。
(銅)は、高炭素クロム鋼を表す。

による汎用構造解析ソフト（COSMOS/M）を使用して実験柱の固有値解析を行なった。解析モデルは表-1に示す諸元を用いて3次元 BEAM 要素で作成する。ここで、支柱基部を全自由度拘束とし、節点数、要素数ともに約 500 程度である。さらに頭頂部には MTRMD とカメラ、ハウジングの質量を考慮して 5kg を付加させる。

固有値解析の結果、固有振動数は 2.95Hz となった。なお、1 次モードは頭頂部が振れる形状となった。このことから、式(5)、(6)を用いて最適な転動子の径を決定する。

ここで MTRMD に用いる球面座は、内径 $\phi 101\text{mm}$ を用いた。これは、球面座が合成ゴム製であることから、新規仕様の場合は、通常金型から製作をする必要がある。しかし、限られた範囲での実験を行っていることから、他の MTRMD で使われている球面座を流用することで、コストの低減をはかった。このため、本実験では球面座の内径を決定の上、転動子の直径と質量を変えることにより最適な転動子を得ることとした。これより最適な転動子の径を算出すると、 $\phi 61\text{mm}$ となり、質量比は 2.0 ~ 3.0% 程度が最適となった。このため、比重が鋼鉄製の約 1.5 倍である鉛製の転動子 ($\phi 61\text{mm}$) を用意した。ここでの質量比は 2.44% である。なお、鉛製の転動子は特注品であり、本実験のために製作をした鍛造製品である。

一方、本実験では現地での調整を考慮して、数種類の転動子を用意した。汎用品として入手が容易なベアリング用の鋼鉄製（炭素クロム鋼）球として $\phi 50.8\text{mm}$ 、 $\phi 55.6\text{mm}$ 、 $\phi 57.2\text{mm}$ 、 $\phi 60.0\text{mm}$ 、 $\phi 69.4\text{mm}$ の径の転動子を選択した。質量比はそれぞれ 0.95%、1.27%、1.39%、1.60%、2.52% である。

3.4 引綱法による自由振動実験

八戸工業高等専門学校高専屋上にて写真-3 に示す実験柱を用いて、引綱法による自由振動実験を行った。実験柱の概要を図-2 に示す。ここでは、柱頭頂部に 3 軸加

速度計を設置し、計測データ数は 12,000、サンプリング周波数 100Hz の 2 分間連続計測を行った。また、**図-3** に実験柱の断面図を示し、監視カメラと加速度計の位置関係ならびに方位、座標系を示す。

3.5 自然風下での長期計測

自由振動実験終了後の 2008 年 8 月 5 日より、実験設備を用いて 24 時間連続の計測を開始し、2010 年 3 月末までの予定で計測中である。計測機器の配置を**図-4** に示す。ここでの計測項目は、2 本の実験柱の頂部の加速度 3 成分ならびに Web カメラで撮影された画像である。加速度データは実験柱の横にある校舎換気室にデータロガーを設置し、メモリーカードに加速度データを収録し、数週間毎に取り替える方法とした。カメラ映像データは、Web カメラ配線を学内 LAN に直接接続することにより、学内の実験室のパーソナルコンピュータへ画像を直接送って収録する方法と採用した。

風向・風速に関しては、計測地点の近郊である八戸市のアメダス観測ポイントを利用した。

4 引き綱法による自由振動実験

表-2 に引き綱法による自由振動実験の結果を MTRMD の有無で示す。実験ケース 1-1~1-2 が MTRMD なしの場合、実験ケース 2-1~2-13 は各種の直径の転動子を搭載した場合の MTRMD 有りの場合である。

転動子なしの場合の固有振動は、2.95Hz~2.96Hz であり、固有振動数は、固有値解析結果とほぼ一致している。この時の実験ケース 1-2 の計測された加速度より求めた変位の減衰波形を**図-5** に示す。減衰波形からシンプレックス法による最適解を求めることで減衰率を同定すると、0.5%~0.55%であることがわかる。

次に転動子を搭載し、自由振動実験を行った。ところで、本制振装置は大振幅時には ID としての効果を、振幅が小さくなると TMD としての複合的機能を持つ制振装置としての効果を有している。**図-6** の実験ケース 2-11 の MTRMD 設置時の減衰波形に見られるように、減衰波形の形が異なる点が生じており、これは振動開始後約 2.6 秒後に生じている。ここでの図中の①の部分である 0 秒~2.6 秒の間を ID としての効果、2.6 秒以降である②の部分 TMD の効果であると仮定し、それぞれに分けて減衰波形から減衰率の同定を行う。この結果減衰率は、①の ID の区間では 3.2%、②の TMD 区間では 4.2%となった。この手法を使い、**表-2** に示すように MTRMD 有りの場合は ID 効果と TMD 効果に分けて減衰率をそれぞれ示すものとする。

本結果より、鋼製転動子の場合、ID の効果は約 1.5%~2.0%程度の減衰を得ており、TMD の効果は、1.9%~

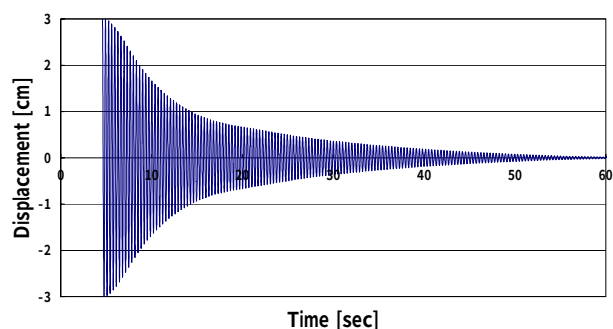


図-5 制振装置なし時の柱の変位減衰波形
(実験ケース 1-2)

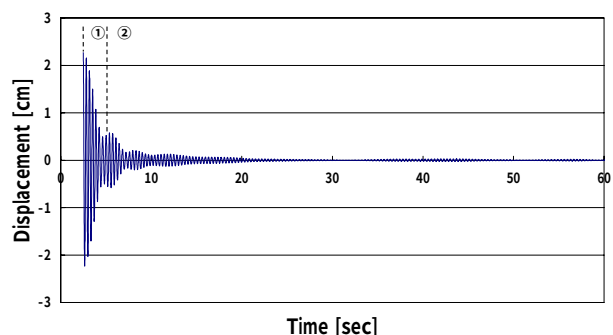


図-6 制振装置付きの時の柱の変位減衰波形
(実験ケース 2-11)

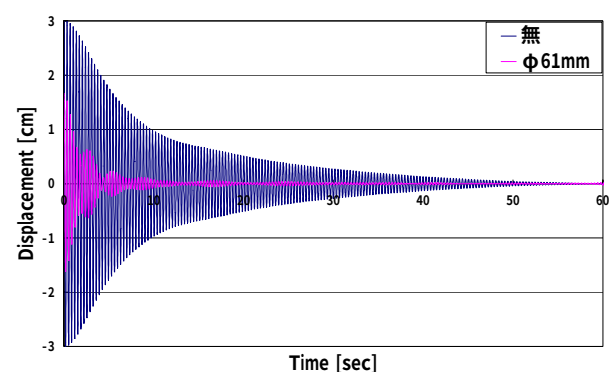


図-7 制振装置有無の変位減衰波形の比較
(実験ケース 1-2 と 2-11)

4.2%の減衰を得ている。さらに最適である転動子φ61mmである実験ケース 2-10~11 では、ID 効果で 3.1%~3.5%、TMD 効果で 3.9%~4.5%の安定した減衰を得ている。φ60mm の鋼鉄製転動子を有する実験ケース 2-8~2-9 と比較すると両ダンパーの効果ともに 2 倍程度の減衰の向上が得られている。これは鉛製転動子の質量が、鋼鉄製と比べて約 1.5 倍あることから、MTRMD と実験柱の質量比の効果を示しているものと考えられる。

これに対して、実験ケース 2-13 のφ69.4mm の鋼鉄製転動子は、直径が大きいため質量が増加しているため ID の効果としての減衰率は向上しているが、TMD の効果は劣っており、TMD としての調整が不十分な例と言える。これは、質量が増した半面、鋼鉄製球の直径が大きくなったため、MTRMD 振動数と最適振動数が乖離したことによるものと考えられる。

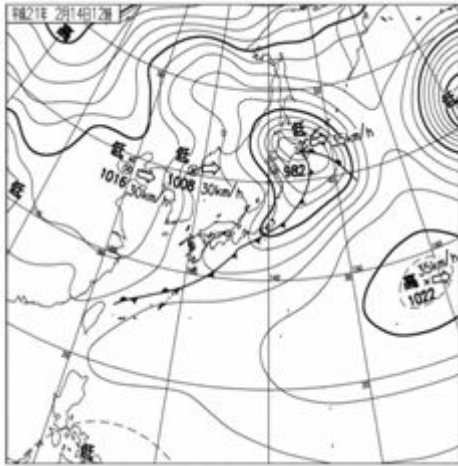


図-8 2009年2月14日12時の天気図
(気象庁 HP より引用)

なお、 $\phi 69.4\text{mm}$ は、ID 効果の領域では鋼鉄製転動子中最も大きな減衰率を得ている。一方、ケース 2-9 と 2-10 を比較すると、同一径でも質量が増加することにより ID の効果が向上している。このことから、ID の効果は転動子の径よりも質量への依存性が高いものと考えられる。

図-7 には実験ケース 1-2 と 2-11 の制振装置有無の加速度減衰波形の比較をそれぞれ参考に示す。図-7 より、MTRMD による大幅な加速度減衰効果を確認することができる。

以上のことから、制振装置のチューニングの検討過程で最適とされた $\phi 61\text{mm}$ の鉛製転動子が、ID 効果と TMD 効果の双方の効果領域において最適であると判断できる。本制振装置を柱に装着することにより、制振装置なしの場合と比較して減衰率は、ID としての効果領域で約 7 倍程度、TMD としての効果領域で約 8 倍程度向上していることがわかる。特に、TMD としての効果領域で大きな減衰率の向上が得られているので、これにより自然風などの影響により生じる小振幅時に効果が期待できることが裏付けられたので、自然風下での長期計測実験には、 $\phi 61\text{mm}$ の鉛製転動子を用いることとする。

5. 自然風下での長期計測結果

冬季の強風が期待でき、かつ寒冷地での機能確保が確認することができる青森県八戸市の八戸工業高等専門学校の屋上（5 階建て校舎、地上約 20m）において、24 時間連続の計測を 2008 年 8 月 5 日より、2010 年 3 月末までの予定で開始した。この間、2009 年 2 月 14 日の「春一番」の強風を初めとして自然風下における長期計測で、いくつかの貴重なデータを得ることができたので、ここに報告する。

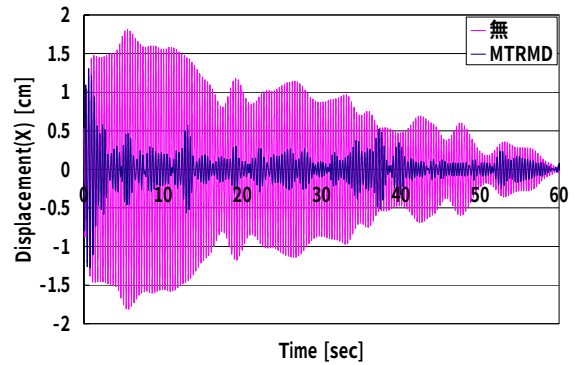


図-9 2009年2月14日のX(南北)方向変位の比較

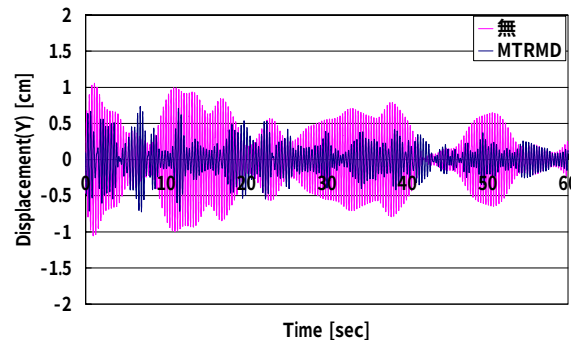


図-10 2009年2月14日のY(東西)方向変位の比較

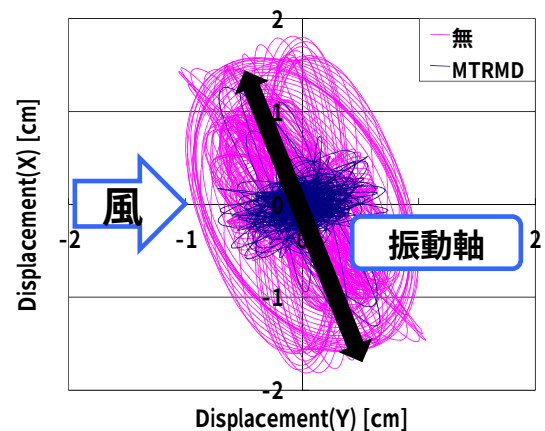


図-11 2009年2月14日の変位リサージュ
(不安定な励振振動（ギャロッピング振動）と推定される）

(1) 2009年2月14日の「春一番」の強風概要

2009年2月14日に日本海を発達した低気圧が通過し、全国的に「春一番」の嵐が吹き荒れた。当日の12時の天気図を図-8に示す。これより同日12時には低気圧が北海道の東方沖で982hPaまで猛烈に発達し、台風並の勢力となった。東北、北海道では強風による空港の長時間にわたる閉鎖、鉄道の運行停止など数々の交通障害等が発生させるに至っている。

また、この日の八戸市はまず南東の風が吹き、寒冷前線が本州通過後に東北地方の特徴である山越えのおろし



(a) MTRMD なしの柱のカメラで撮影した画像



(b) MTRMD ありの柱のカメラで撮影した画像

写真-4 同時刻における MTRMD 有無での画像の差
(2009 年 2 月 14 日 13 時 10 分 31 秒における比較)

風(西風)が強まり暴風が吹き荒れた。八戸市のアメダスポイントにおけるこの日の最大瞬間風速は 32.2m/sec を観測した。

(2) 強風下での計測結果

八戸市のアメダスポイントにおいては、13 時 10 分に西風を主とした瞬間風速は 28.5m/sec、この間の 10 分間の平均風速は 21.6m/sec、気温 8°C を記録した。この時間帯の計測データを以下に報告する。

図-9 と図-10 に、13 時 10 分から 11 分にかけて得られた加速度データより算出した頭頂部の応答変位波形を示す。南北方向(X 方向)と東西方向(Y 方向)に分け、両実験柱の波形を重ねて示すことにより、MTRMD 有無による違いを比較できるようにした。

図-11 には、各方向成分を基に変位のリサージュ図を示す。無制振の方は風軸に対し垂直に大きく励振しており、MTRMD 設置の方は制振効果を得られている。RMS 値に関しては、MTRMD なしの実験柱は 0.73cm、MTRMD ありの方は 0.28cm と振幅で約 60% の低減効果を得ている。ここで、振幅の大きい南北方向に大きな制振効果が生じているが、これは不安定な励振振動(ギャロッピング振動)により、実験柱には風向方向と垂直方向へ大きな揺れが生じ、この揺れに対して MTRMD を設置していることで制振していることを示している。これに対して風向方向(Y 方向)に関しては、制振の効果が低いことがわかる。これは強風によるガスト応答(風の息継ぎ)による振動であり、励振振動よりも振動周期が長くなっ

表-3 長期計測データ

	RMS[cm]		低減率 [%]	最大瞬間風速 [m/sec]	平均風速 [m/sec]	風向
	MTRMD	無				
1月9日	0.05	0.06	11.84	11.9	7.3	南東
2月3日	0.11	0.17	34.22	7.8	5.1	南西
2月14日	0.28	0.73	61.64	28.5	21.6	西

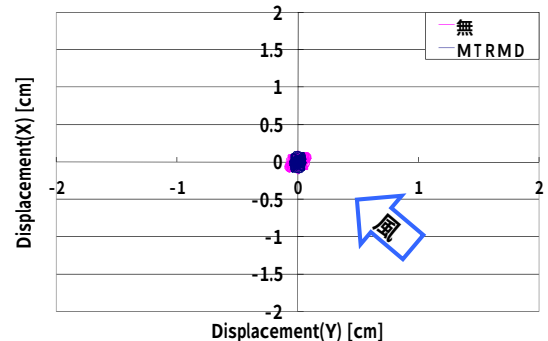


図-12 2009 年 1 月 9 日の変位のリサージュ
(アメダスポイントでの平均風速 7.3m/sec)

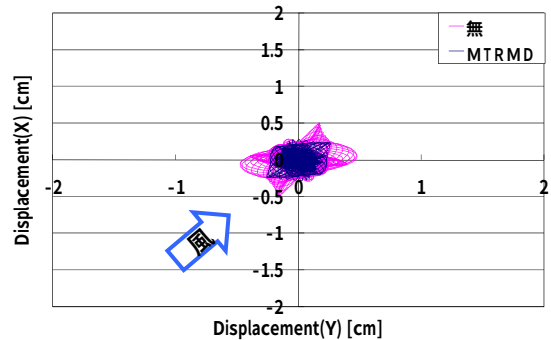


図-13 2009 年 2 月 3 日の変位のリサージュ
(アメダスポイントでの平均風速 5.1m/sec)

ていることから、MTRMD の制振効果が十分に得られなかったと考えられる。MTRMD は、多方向に効果を発揮するが、本計測で得られたように複数の振動現象を同時に受ける場合は、振動数が実験柱の固有振動数に近い方に制振効果を示すようにチューニングされているので、風向直角方向で振幅の大きい振動軸に大きな制振効果を示すことが確認された。

また、この 13 時 10 分 31 秒において録画された MTRMD なしとありの場合のカメラ画像を比較のために写真-4 に示す。(a)の MTRMD なしの場合は、画像がぶれてしまい、鮮明な画像を確認することができない。これに対して(b)の MTRMD ありの場合は、鮮明な画像を得ることができている。これからも MTRMD の制振効果を確認することができる。

(3) その他の強風下での計測データ

2 月 14 日の計測データの他、1 月 9 日、2 月 3 日にも強風を観測することができたので、表-3 に MTRMD 有無の場合の振幅の RMS 値と最大瞬間風速、10 分間の平均風速をそれぞれ示す。また、図-12,13 にそれぞれのリ

サーージュ図を示す。

1月9日と2月3日を比較すると、前者の平均風速は7.3m/sec、後者は5.1m/secであるが、実験柱の振幅RMSの低減率は、後者の風速が低いにも関わらず34.2%と前者の3倍余りを示している。したがって、風速よりも風によって生じた柱の応答振幅(RMS)によってMTRMDの制振効果が依存する可能性が高いことを示している。

ところで、頭頂部の応答変位を低減することが出来れば、支柱基部における発生応力を大幅に抑えられることが著者らの既往の研究^{7),8)}でわかっているため、応力集中部における疲労破壊の防止に関しても十分な効果が期待できる。

6. おわりに

本論では、支柱部材がφ114.3mm、板厚3.5mmと、従来の都市高架橋でのCCTV柱標準仕様設計(直径139.8mm、板厚6.6mm)よりも大幅に細く、薄い構造となっている実験柱2本にそれぞれ市販のウェブカメラを設置し、かつ1本の柱に著者らが提案している制振装置であるMTRMDを設置して、長期間に渡り自然風下での振動計測を行ってきた。その結果、以下の結論を得ることができた。

- ① 無制振時では約0.5～0.55%の減衰定数であったのに対し、φ61mmの鉛製転動子を有するMTRMDを用いることで、IDの効果領域では約7倍、TMDの効果領域では約8倍の減衰を付加することができた。
- ② 春一番の強風観測データから、無制振の実験柱は風向きの垂直方向にギャロッピング的な発散振動の大きな揺れが生じているのに対し、MTRMDはそれを効果的に抑えていることがわかった。また、振幅のRMS値は、約60%余りの低減効果を得ることができた。
- ③ 振幅のRMS値が大きいほど、低減率も大きくなっていることから、大きく卓越した振動ほどMTRMDは効果的に制振することがわかった。これにより安定したカメラ映像を取得できることを確認した。
- ④ 実験柱の断面積が、従来の都市高架橋で採用されているCCTV柱(標準仕様)の約43%となっており、CCTV柱のコスト低減をはかる可能性が認められる。

今後の本観測は、新たに風速計を実験柱近傍に設置し、風との同時計測により詳細な検討を行い、かつ24時間体制で2010年3月末まで継続していく予定である。さらにこの実績を踏まえた上で、CCTV設備の設置コスト削減のための具体的な提案を行っていく予定である。

謝 辞

現地計測を行うに際しては、中央大学理工学部都市環境学科の学生諸君ならびに八戸工業高等専門学校環境建設工学科の学生諸君のから協力を得た。また、テック大洋工業(株)からCCTV実験柱の設計等の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。最後に、本研究の一部は(財)東北建設協会「建設事業に関する技術開発支援制度」(研究代表者：丸岡 晃)及び中央大学理工学研究共同研究助成の給付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) NHK 首都圏ネットワーク「老朽化で信号機の倒壊が相次ぐ」、NHK 首都圏映像部、2007.9.28
- 2) 山田勝彦、飯田毅、和泉夕祐、多田仁志：照明柱の風による振動とチェーンダンパの制振効果、土木学会第43回年次学術講演会、I-307, pp.666-667, 1988.
- 3) 脇村宣郁、南條正洋、松本茂、畑中章秀、安藤高士、松田良平：制振装置による標識柱の振動対策、橋梁と基礎、Vol.39 No.4, 2005.
- 4) 街灯の揺れを抑える制振装置、日経メディカル、No.516, 1997.
- 5) 尾畑守夫、森尻涉、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 Vol.766/ I-68, pp.339-330, 2004.
- 6) 井田剛史、三木孝則、高橋多佳子、連重俊、平野廣和、佐藤尚次：多方向転動型同調質量ダンパーによる長柱構造物の制振対策、土木学会構造工学論文集, Vol.51A, pp.437-446, 2005.
- 7) 井田剛史、平野廣和、尾松大道、連重俊、富岡昇：多方向転動型同調質量ダンパーを用いた都市高架橋上 ITV 柱の制振対策と耐久性確認現地試験、土木学会応用力学論文集, Vol.10, pp.1071-1080, 2007.
- 8) 連重俊、平野廣和、青木徹彦、井田剛史、袁涌、松井謙典：紫外線硬化型樹脂による補強対策を施した長柱の疲労実験、土木学会論文集 No.784/VI-66, pp.99-107, 2005.

(2009. 4. 9 受付)