多方向転動型同調質量ダンパーを用いた独立柱状構造物の制振対策

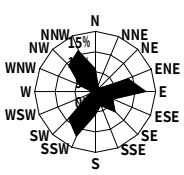
○首都高速道路(株)*　正会員　嶋澤隆介　中央大学　正会員　平野廣和
中央大学　正会員　佐藤尚次

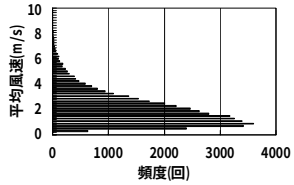
1. はじめに

既存の道路監視用 CCTV 柱に代表される独立柱状構造物の多くは、自然風、交通、地震等、様々な動的外乱により振動現象が生じる。この振動応答は構造物の安全性や使用性を脅かすものとなり、その対策が様々検討されている。筆者ら[1]もこれまでに高架橋上に設置されている CCTV 柱を対象とし、交通による振動応答対策の検討を行った。そして、付加振動系制振機構として多方向転動型同調質量ダンパー（以下、MTRMD（Multi-direction Tuned Rolling Mass Damper））を用いることが有用であることを提案している。一方、柱状構造物の多くは中空のパイプ構造となっており、質量が軽く、構造減衰が小さいため、風応答による振動の影響も大きいと考えられる。そこで本報では、異なる外乱成分である自然風下における制振効果、風速別応答に対する振幅低減効果、MTRMD 多方向有効性の 3 点の検証項目に着目し、長期間の屋外計測実験を行い、自然風による振動応答対策を検討する。

2. 実験概要

実験は、中央大学理工学部校舎 13 階屋上（地上約 40M）で行う。風速計を屋上地面より高さ 4m の位置に設置する。計測はサンプリング周期 1 秒、測定インターバルを 10 分とし、10 分間の平均風向、風速、最大瞬間風速等を常時計測する。観測場所での 1 年間平均風向・風速頻度を**図-1** に示す。また、日最大瞬間風速と日最大風速の比により算出されるガストファクターGF は 2~4 となり、乱れが強く、ガスト応答が生じることが考えられる。それらを考慮し、**表-1** に示す諸元の試験柱を 2 本製作し、MTRMD 有り、無しの同時振動計測実験を行う。試験柱における計測には 3 軸加速度計、防水ひずみゲージを**図-2** に示すように設置する。ひずみゲージは**図-3** に示すように支柱円周上 4 箇所に添付し、添付高さを下台座溶接部上端から 30mm の位置とする。また、試験柱座標と方位の関係も**図-3** に示す。計測はサンプリング周波数 100Hz とし、10 分間（データ数 60000）の連続計測を 10 分毎に行う。なお、実験は固有値解析、自由振動実験により MTRMD 諸元決定、減衰効果確認等を行い、そして自然風下における長期計測を行う 3 段階の構成とする。





風向　　風速

図-1　平均風向・風速頻度分布

表-1 試験柱の諸元

	寸法(mm)		単位質量	長さ	質量
	直径	肉厚	(kg/m)	(m)	(kg)
支柱材	60.5	3.2	4.52	4.00	18.08
	直径		(kg/mm)	厚さ(mm)	(kg)
中台座	140.5		0.12	6.00	0.73
	縦	横	(kg/mm)	厚さ(mm)	(kg)
上台座	120	120	0.11	6.00	0.68
下台座	150	150	0.18	9.00	1.59

	質量密度(N/mm^3)	縦弾性(N/mm^2)	ポアソン比
支柱材･台座	7.80E-09	205900	0.3

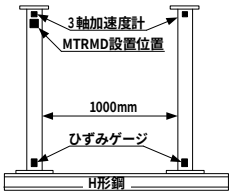


図-2 試験柱の概要

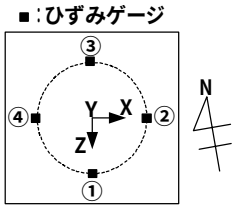


図-3 支柱断面

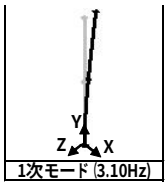


図-4　固有値解析

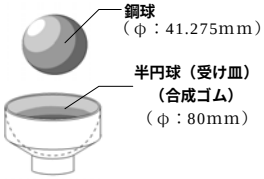


図-5　MTRMD

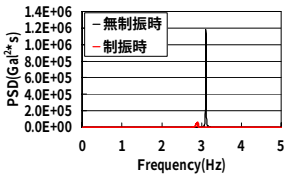


図-6 PSD(自由振動)

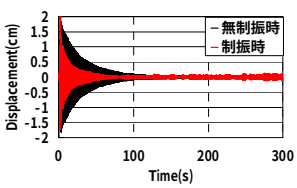


図-7 変位波形（自由振動）

3. 計測結果及び解析結果

3.1 固有値解析

汎用構造解析ソフト COSMOS/M を使用し、有限要素法により試験柱の固有振動数を求める。試験柱のモデル化には**表-1** の諸元を基に、線形四辺形薄肉シェル要素を用いる。なお、メッシュサイズは 10mm 四方分割とし、節点数は 11047、要素数は 10960 である。また、境界条件は支柱基部底面ボルト接合位置となる 4 節点を全自由度拘束とする。解析結果である固有振動数とその振動モード形状を**図-4** に示す。この図より、試験柱固有振動数が 3.10Hz であることがわかる。この振動数を対象振動数とし、MTRMD の諸元を決定する。実験に用いた MTRMD

キーワード：独立柱状構造物、自然風、振動応答、制振装置　*研究当時：中央大学大学院所属
連絡先　：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27　tel.03-3817-1816　fax.03-3817-1803

を**図-5** に示す。なお、実験に使用した MTRMD は全て既製品の組み合わせにより製作した。

3.2　自由振動実験

試験柱固有振動数の確認、設計した MTRMD の適応度(減衰効果)を検証するため、引張法による自由振動実験を行う。**図-6** に PSD 比較、**図-7** に応答変位波形比較結果を示す。**図-6** から試験柱固有振動数 3.1Hz とわかる。また、MTRMD 設置時の卓越振動が 2.92Hz であり、固有振動数との差異が 0.1Hz であることがわかる。しかし、対数表示により観察したところ、3.11Hz を谷とした二つ山の卓越が確認された。さらに、最大 PSD 値を 1/20 に低減していることから、MTRMD の特徴的機能である TMD 効果が発現していることが考えられる。一方、**図-7** より、無制振時における減衰定数が 0.16%であることに対して、制振時での減衰定数が 0.86%と約 5 倍増加していることが確認できる。これにより、長期計測の際、MTRMD により減衰効果が向上することが期待される。

3.3　長期屋外計測

無制振時、制振時における制振効果の検討のため、本報では一例として平均風向東、平均風速 5m/s、最大瞬間風速 12.2m/s を計測した時間帯でのデータを用いる。**図-8** に支柱頭頂部応答加速度元波形比較を示す。この図より MTRMD が振動初期段階から作用し、約 50%以上の加速度低減効果がわかる。また、**図-9** に示す PSD 波形比較では最大 PSD 値を 1/5 に低減することが確認された。**図-9** から卓越振動数が無制振時で 3.12Hz、制振時では 2.95Hz とわかることから自然風下での卓越振動成分は対象支柱固有振動数成分が支配的であることが考えられ、そのことからも、MTRMD による高い制振効果の発現が確認されたと考えられる。**図-10** に応答変位リサージュ比較を示す。この図から、計測時間帯で多方向に発生した振動による最大振幅値を、MTRMD の制振効果により抑えていることがわかる。このことから、MTRMD の多方向に対して有効である可能性を有すると考えられる。**図-11** に支柱基部における発生応力範囲頻度分布比較を示す。この図から制振時が低応力範囲に抑えられていることがわかる。

MTRMD の特徴的機能である TMD 効果に求められる要素として、共振時において最大振幅を低減することが挙げられる。このことからも、MTRMD 応答変位依存性は重要な検討項目である。一方、自然風下において、最大応答変位値が発現する時間帯が最大瞬間風速発生時と同時間であることが確認された。そこで最大応答変位値と最大瞬間風速の関係に着目し、統計的処理を行うことで、MTRMD の応答変位依存性を検討する。なお、用いるデータは全風向(全方位)を対象とし、最大瞬間風速 10m/s 以上を計測した時間帯データとする。また、MTRMD による時間帯低減効果を検討するため応答変位リサージュから二乗平均値を算出する。**図-12** に最大瞬間風速値と最大応答変位値、二乗平均値の関係を示す。なお、各図において無制振時、制振時を示し比較を行うため、各プロット点を基に線形近似曲線(数

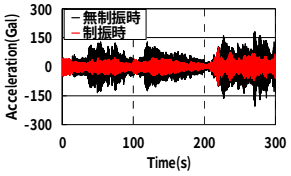


図-8 加速度元波形

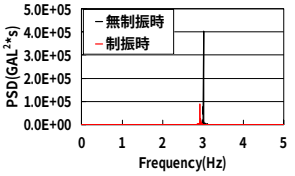


図-9 PSD

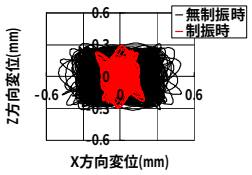


図-10 変位リサージュ

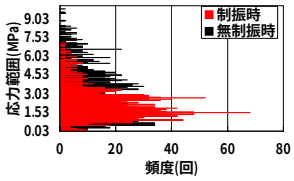
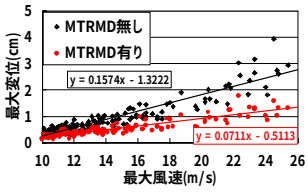
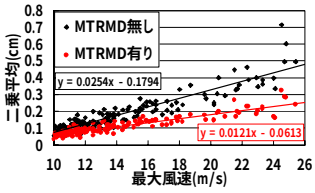


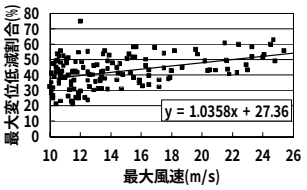
図-11 応力範囲頻度分布

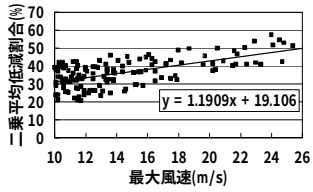




(最大応答変位)　　(二乗平均)

図-12　最大瞬間風速時応答





(最大応答変位)　　(二乗平均)

図-13　最大瞬間風速時低減率

式)を同図に示す。この図から最大応答変位、二乗平均の最大瞬間風速に対する傾きが数式からも広がることがわかる。そこで、これらの値を基に低減率を算出し、それぞれ**図-13** に示す。これらの両図から、最大瞬間風速が増加するに従い、MTRMD による低減率も増加することがわかる。このことから、MTRMD 応答変位依存性が現れたものだと考えられる。また、MTRMD による低減効果として最大応答変位での低減率が 20%から最大で 70%を超える値が示され、二乗平均での低減率は 20%以上、最大で 60%程度まで増加することが確認された。このことからも MTRMD の高い制振効果が考えられる。また、全方位からの自然風を対象にした結果から MTRMD による振幅低減効果がみられたことからも、MTRMD の多方向有効性が考えられる。

4．おわりに

屋外計測を行うにより MTRMD が風向に依存せず支柱頭頂部における卓越振動成分を制振することが判断された。また、風速増加に従い、制振効果が増加することが確認された。これらから支柱頭頂部における振幅が低減され、それに伴い必然的に支柱基部での発生応力も抑え、支柱の疲労耐久性、使用性も向上すると期待される。

<参考文献>

1)　井田剛史他：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、応用力学論文集、2007