

## 主塔に設置された TMD を考慮した女神大橋の動的応答解析と減衰効果の評価

東京工業大学 学生会員 有馬義人 長崎大学工学部 フェロー 高橋和雄  
長崎大学工学部 正会員 中村聖三

## 1. まえがき

女神大橋は完成系の主塔頂部では、風洞実験において風速 33m/s 付近で渦励振振動の発生が懸念されたため、その防止策として主塔頂部に制振装置(TMD)が設置されている<sup>1)</sup>。平成 17 年 11 月女神大橋が完成状態となったことから、主塔頂部で人力加振実験が実施された。これにより主塔の振動特性の実測と TMD の制振効果の確認が行われた<sup>2)</sup>。この結果、有限要素法による斜張橋のモデル化の妥当性および TMD による減衰の増加を確認した。引き続き、本研究では、斜張橋全体系、TMD 及び人力加振力をモデル化し、動的応答解析を行うことにより TMD の制振効果を調べる。また、実験値と解析値を比較することにより、モデル化の妥当性を検証する。

## 2. 実験の概要

**2.1 制振装置(TMD)** 完成系の女神大橋主塔には 2P および 3P 主塔の N 塔頂部、S 塔頂部付近に各 1 基、計 4 基設置されている。主塔の上段水平梁上部の振動である面内 2 次の渦励振振動の制振に TMD が用いられている。

**2.2 加振実験の概要** 人力加振実験は TMD 非作動時と作動時の 2 ケースで、それぞれ 3 回ずつ行われた。減衰の大きさを比較することで TMD の制振効果が確認された。3P 主塔頂部で橋軸直角方向加速度を計測した。加振人員は 30 人で、オシレータに表示される波形に合わせて上半身を橋軸直角方向に繰り返し移動(頭部変位 25 cm 程度)させ加振を行った。オシレータはあらかじめ完成系モデルで行われた FEM 解析による主塔の固有振動数である 0.923Hz に合わせた。TMD の非作動時、作動時ともに同じ条件で加振を行った。加振は主塔の応答が一定になるまで行い、加振停止前から計測を開始し、加振停止後の主塔の自由減衰波形を計測した。

図-1 女神大橋の FEM モデル

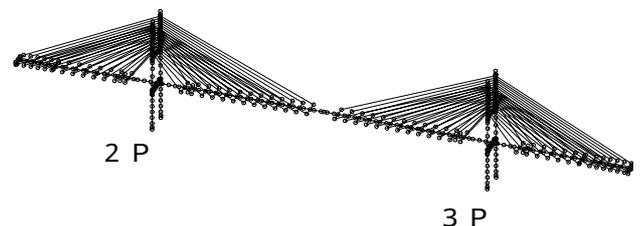


図-1 女神大橋の FEM モデル

表-1 卓越振動モード

次数	固有振動数 (Hz)	有効質量 (橋軸直角方向)	モード特性
14	0.917	4660	2P・3P主塔 面外
15	0.920	119.5	3P主塔 面外

## 3. 解析

**3.1 解析条件** 女神大橋全橋の FEM モデルを図-1 に示す。動的応答解析を行う解析ソフトには TDAP を用いた。解析方法は時刻歴応答解析法による直接積分とした。直接積分には、Newmark $\beta$  法( $\beta=0.25$ )を用いる。

減衰は、固有振動解析より得られた橋軸直角方向への有効質量が大きく主塔が卓越した 2 つのモードを Rayleigh 減衰として与えた。主塔の卓越モードを表-1 に示す。振動モードの減衰定数は実験から得られた減衰定数 0.003 を与えた<sup>2)</sup>。

**3.2 TMD のモデル化** TMD は図-2 のようにモデル化した。主塔の TMD 設置地点に節点重量 3tf (TMD 固定部装置重量) をもつ節点を新たに作り、その節点より橋軸直角方向に TMD の重錘質量を持った節点をさらに設ける。2 つの節点は TMD のバネ係数  $k$ ・減衰係数  $c$  を持つバネ・粘性要素で結ばれている。TMD

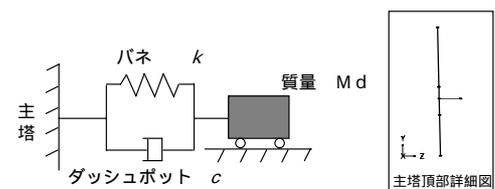


図-2 TMD のモデル化

表-2 TMD の諸元

$M_d$ (tf $\cdot$ s <sup>2</sup> /m)	$k$ (kN/m)	$c$ (kN $\cdot$ s/m)
0.306	95.933	11.875

キーワード：長大斜張橋、制振装置、動的応答解析、減衰

連絡先：〒852-8521 長崎市文教町 1-14 長崎大学工学部社会開発工学科 Tel095-819-2610 Fax095-819-2627

の節点は橋軸直角方向のみの自由度をもつものとする。

表 2 に TMD の諸元を示す。この場合の TMD の減衰定数は 0.35，固有振動数は 0.9Hz となる。

**3.3 人力加振のモデル化** 人力加振のモデル化は，体重移動による人間の重心の変化が及ぼす主塔への慣性力とする。一定周期による加振は正弦波 ( $y = a \sin \omega t$ ) で表せるため，加振力は次式で表せることができる。

$$m\ddot{y} = -ma\omega^2 \sin \omega t \quad (1)$$

ここに， $m$ ：質量， $a$ ：重心変位の振幅， $\omega (= 2\pi f)$ ：固有円振動数， $f$ ：加振振動数

平均身長における重心変位の比率と，加振実験の撮影映像を確認し，重心変位  $a$  は 16 cm を用いることとした。また，この正弦波は周期 1.08(s) で 30 周期後に，頂部を加振させ停止した。加振に参加した 30 人分の体重は 11.76kN なので，加振力は 9.7 kN となる。

**3.4 解析結果とモデル化の評価**

固有振動解析の結果より得られた固有振動数の値を表-3 に示す。3P 主塔の制振対象モードの固有振動数は

0.920Hz となり，実験のデータ解析による値とほぼ一致した。TMD 固定部の重量増加に伴い，制振モードは当初の固有振動数 0.923Hz から 0.920Hz となり，固有振動数はわずかに減少した。

次に，TMD 作動時および非作動時での人力加振による 3P 主塔頂部の加速度応答の解析結果および計測結果と TMD 作動時の TMD 重錘質点の変位の解析結果および計測結果を図-3 に示す。図-3 から加速度応答値を比較すると，解析波形および計測波形ともに最大応答は約 40gal を示しており，両者はほぼ一致した(表-3 参照)。TMD 作動時の解析波形は TMD 非作動時よりも加速度応答値が小さく，また速く減衰していることから TMD の制振効果を確認した。TMD 非作動時には，解析波形および計測波形ともに減衰振動から減衰定数を求める。TMD 作動時には測定波形および解析波形で TMD の質点変位の衰退の大きい区間を減衰解析範囲として，減衰定数を求める。TMD 非作動時および TMD 作動時での両者の値を比較した結果を表-3 にまとめる。TMD 非作動時では減衰定数はほぼ一致するが，TMD 作動時では減衰定数は解析値が大きい値となった。これは，TMD の粘性係数  $c$  が大きいものと考えられる。そのため，今後は粘性係数  $c$  を再検討し，TMD の再モデルを行い妥当性を明らかにしていく。

**4.まとめ**

本研究により得られたことを以下にまとめる。

実験値と解析値との比較した結果，斜張橋のモデル化および人力加振力のモデル化の妥当性を確認することができた。TMD をモデル化した主塔の応答解析から TMD の効果を検証できたが，解析値の減衰効果が大きくなる結果が得られた。

参考文献 1) 中瀬和敏，有吉正敏，北原雄一，甲斐富岳，今金真一，上田浩之，針谷清久：女神大橋上部工の施工，橋梁と基礎，Vol.39，pp.5-14，2005.12

2) 日吉直久，呉慶雄，高橋和雄，北原雄一，中村聖三：女神大橋主塔の振動実験による振動特性の把握と固有振動数の解析値との比較，土木学会第 61 回年次学術講演会概要集 第 部門，pp.931-932，2006

表-3 実験値と解析値の比較

	実験値	解析値
固有振動数(Hz)	0.927	0.920
最大加速度応答値(gal)	42	43
減衰定数(TMD 非作動時)	0.004	0.003
減衰定数(TMD 作動時)	0.008	0.015

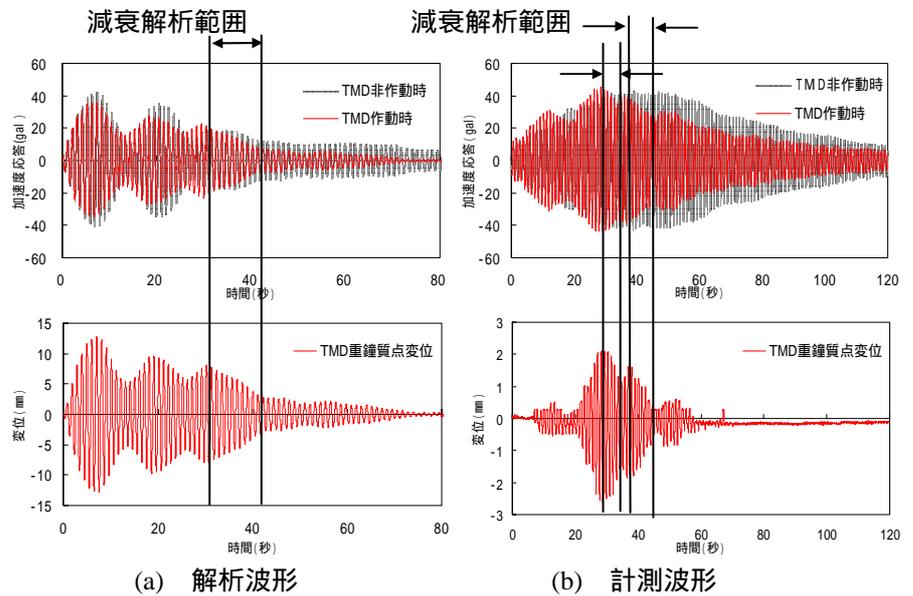


図-3 解析波形と計測波形の比較