

## 女神大橋の主塔のTMDのモデル化と検証

長崎大学工学部 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 12 月の女神大橋完成時に、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、FEM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明らかにする。

### 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及び3P主塔にN塔頂部、S塔頂部付近に各1台設置されている。

#### 2.2 人力加振

人力加振は3P主塔頂部で実施された。加振人員は20人で塔の加振方法は、オシレータに表示される加振波形に合わせて、主塔の固有振動数(0.93Hz)で上半身を橋軸直角方向に繰り返し移動(約25cm程度)して行った。TMDの非作動時および作動時と同じ条件で加振を行った。

加振は主塔の応答が一定値となるまで行い、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。計測はTMD作動時・非作動時ともに3回ずつ実施された<sup>2)</sup>。

### 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。FEM解析を行う解析ソフトはTDAPを用いた。解析方法は時刻歴解析による直接積分とした。

減衰は、固有振動解析によって得られた主塔の面外方向に卓越した振動モードを2つ取り出してRayleigh減衰として与えた。それぞれの固有振動数における減衰定数は実験から得られた減衰定数の推定値<sup>1)</sup>より与えた。主塔の卓越モードを表-1に示す。

#### 3.2 TMDのモデル化

TMDは図-2のようにTMDモデルとした。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、その点より橋軸直角方向にTMDの重鎮質量を持つ

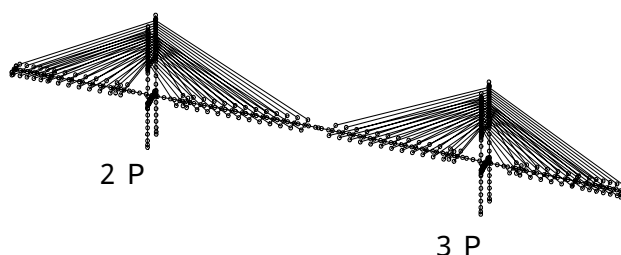


図-1 女神大橋のFEMモデル

表-1 卓越振動モード

|            | 振動数<br>(Hz) | 振動モード |
|------------|-------------|-------|
| 主塔面外<br>1次 | 0.525       |       |
| 主塔面外<br>2次 | 0.916       |       |

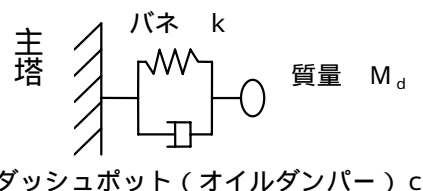


図-2 TMDのモデル化

表-2 TMDの諸元

| $M_d$<br>(tf・s <sup>2</sup> /m) | $k$<br>(kN/m) | $c$<br>(kN・s/m) |
|---------------------------------|---------------|-----------------|
| 0.306                           | 95.933        | 11.875          |

た節点をさらに設ける。2つの節点はTMDの減衰係数 $c$ ・バネ定数 $k$ を持つ粘性・バネ要素で結ばれている。TMD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( $y = \alpha \sin \omega t$ )で表せるため、加振力は次式で表せることができる。

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

ここに、 $m$ ：質量、 $\alpha \sin \omega t$ ：重心変位、 $\omega (= 2\pi f)$ ：固有円振動数、 $f$ ：加振円振動数

加振実験の撮影映像を確認して、重心変位は25cm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20人分の体重は11.76kNなので、加振力は9.6kNとなる。

### 3.4 解析結果とモデル化の評価

人力加振による主塔頂部の加速度応答の解析結果を図-3に示す。図はTMD作動時・非作動時での3P主塔頂部の橋軸直角方向の加速度応答波形である。これより作動時と非作動時を比較すると、作動時では非作動時に比べ加速度の応答値が小さく、また速く減衰している。

人力加振による振動実験では20人加振でTMD作動時・非作動時ともに最大加速度応答は $40\text{gal}^2$ であり、解析での最大加速度応答値はこれに近い値となった。これより、人力加振による加振力は適切にモデル化することができたと考えられる。

また、TMDの効果を評価するために解析で得られた波形データから減衰定数を求める。減衰定数の解析対象範囲を図-3に示してい

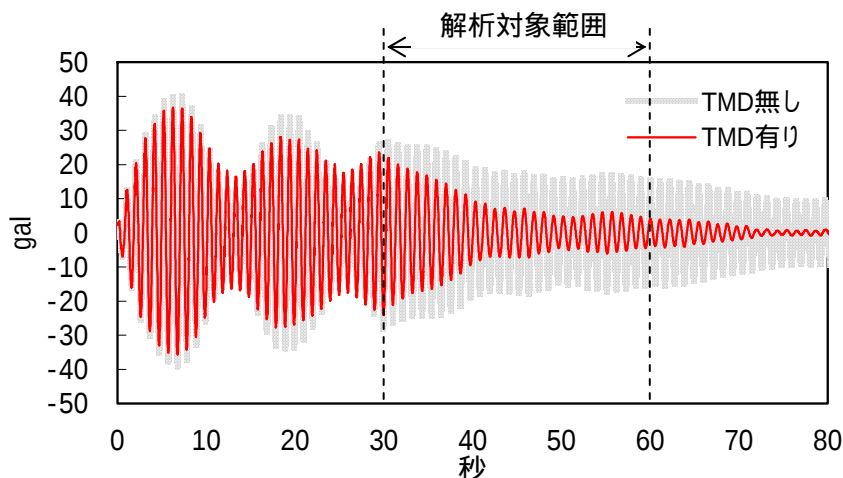


図-3 減衰波形

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 | 0.916 |
| 減衰定数(TMD 非作動時) | 0.003 | 0.003 |
| 減衰定数(TMD 作動時)  | 0.005 | 0.010 |

る。正弦波加振停止後以降となる点線の時刻区間から平均値をとり、これを減衰定数とする。これらの結果を表-3に示す。TMD非作動時での減衰定数 $h = 0.003$ であったが、TMD作動時には減衰定数 $h = 0.01$ となり、TMDによる減衰付加効果が確認された。加振実験ではTMD非作動時の減衰定数が0.003であり等しい値であるが、TMD作動時には実験より得られた値0.05よりも大きい値となった。

### 4. まとめ

今回の解析結果より、TMD作動時の減衰定数が増えたことから、制振装置の減衰効果を解析的に確認することができた。しかし、減衰定数の値が大きかったことからTMDのモデル化や解析方法が妥当であるとするにはまだ不十分である。今後はさらに、モード重ね合わせ法との比較や卓越モードの再確認などを行い妥当性を明らかにしていくものとする。

**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