

日立造船 W. ペンヌン ○東大 学 小林正典
東大 正 藤野陽三 東大 正 伊藤 学

1. はじめに

塔、橋桁などのギャロッピング振動は、最も低次の、すなわち一次振動数のモードで生じ、高次の振動数は高いので問題とはならないのが普通である。しかしながら、何らかの原因、たとえばTMDを一次振動数に同調させるなどで一次振動の構造減衰を上げた時、一次モードの限界風速が高まり2次あるいは3次モードのギャロッピングの限界風速を上回る場合が生じてくる。一次モードに対する限界風速を越えるような風速では一体どのような現象が起きるのであろうか。

2. TMDを付けた斜張橋タワーの風洞実験結果¹⁾

横浜ベイブリッジタワーの三次元模型(1/100)を用いて、タワーの面内ギャロッピングに対するTMDの制振効果を確かめる実験を一樣流を用いて行った。図1はタワー模型を示す。Sc数はTMDなしでは一次面内モードで約10 ($\delta=0.013$)。図2に塔頂面内変位(無次元振幅)と風速の関係を示す。TMDにより限界風速が高風速側にシフトしていることがわかる。図中の点線は、TMDにより塔に付加された見かけ上の構造減衰(実験値)を考慮して、TMDのない場合のV-A曲線をシフトした、いわば半経験的予測曲線である。case 1はTMDによる付加減衰が小さく($Sc=14$)、予測値が高風速側にずれている。case 2は付加減衰が大きい場合($Sc=24$)で、逆に予測値が実験値より低風速側にずれている。この断面は断面比が1:1.7程度なので準定常理論による予測値そのものが余り意味をもたないが、case 1とcase 2で実験値と予測値の関係が逆転していることに留意したい。

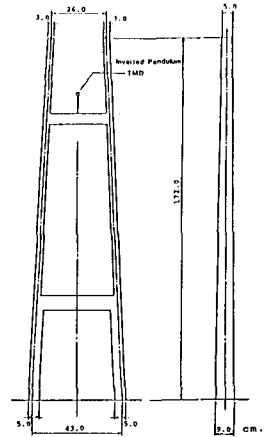


図1 タワー模型

TMDを付加しないとき、あるいはcase 1の場合のギャロッピングは一次モードによるsimpleな応答であったが、case 2の場合にはやや特徴のある応答を示した。このケースにおける応答のパワースペクトルを図3に示す。 V_f (換算風速)=48では一次モードのみの小振幅応答(図3 a)であるが、 $V_f=67$ では2次モードが混じってくる(図3 b)。さらに高風速の $V_f=80$ では1次モードが主のととき、2次、3次モードが

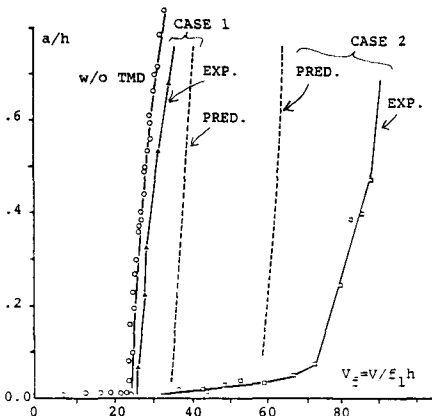


図2 V-A曲線

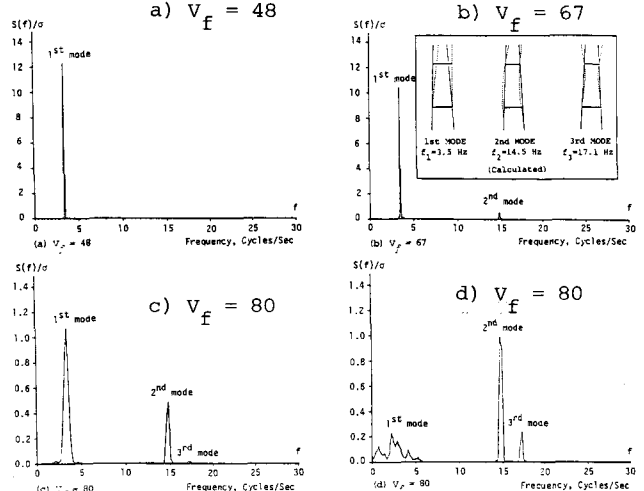


図3 塔頂面内変位応答のパワースペクトル

主のときが繰り返すという非定常な様相を呈した（図3 c, d）。測定の関係で3次モードはかなり過小評価されており、実際には2次モードの寄与よりも大きいことがビデオより確認されている。図には示していないが、さらに高風速になると、ほぼ一次モードのみによる大振幅ギャロッピングであった。

図2に示すように、case 2のV-A曲線は、TMDなしの場合あるいはcase 1とはかなり異なっており、また予測値と実験値との差も大きい。実験中に観測された高次モードの空力振動が1次モードのギャロッピングに何らかの影響を与えたのではないかと考えて以下の解析を行ってみた。

3. 2自由度ギャロッピングとしての扱い

図3に見られた、高次モードの混在が一次モードのギャロッピングに及ぼす影響を解析的な立場から検討してみる。問題は多いが定性的な傾向をつかむという目的を考えて、空気力としては準定常理論を適用する。

解析の簡易さのために、1次モードと振幅の大きくて3次モードをここでは考える。すなわち、タワーの変位 $y(x, t)$ を、モード $\phi_1(x)$ 、 $\phi_3(x)$ を用いて $y = \phi_1(x) y_1(t) + \phi_3(x) y_3(t)$ と表し、運動方程式に代入する。空気力 $F, {}^a$ は速度 y の関数として与えるが、断面比 1:1.5 の空気力係数を用いることとする。結局、多少の近似を使うと

$$\ddot{y}_1 + \omega_1^2 y_1 = \alpha_1 \dot{y}_1 + \alpha_2 \dot{y}_1^3 + \alpha_3 \dot{y}_1 \dot{y}_3^2, \quad \ddot{y}_3 + \omega_3^2 y_3 = \alpha_4 \dot{y}_3 + \alpha_5 \dot{y}_3^3 + \alpha_6 \dot{y}_1^2 \dot{y}_3$$

という非線形項のみがcouplingした運動方程式が得られる。ここで $\alpha_1 \sim \alpha_6$ は空気力係数、モード、風速、モード別構造減衰他により決まる定数である。 y_1, y_3 の漸近解として

$$y_1 = a_1(t) \cos \Phi_1 + \varepsilon y_{11}(a_1, a_3, \Phi_1, \Phi_3), \quad y_3 = a_3(t) \cos \Phi_3 + \varepsilon y_{33}(a_1, a_3, \Phi_1, \Phi_3)$$

とおく。ここで $\Phi_1 = \omega_1(t - \Psi_1(t))$ 、 $\Phi_3 = \omega_3(t - \Psi_1(t) - \Psi_3(t))$ 、 a_1, a_3, Ψ_1, Ψ_3 を slowly varying 関数と考えて定常解を求めると

$$(a_1 = 0, a_3 = 0), (a_1 \neq 0, a_3 = 0), (a_1 = 0, a_3 \neq 0), (a_1 \neq 0, a_3 \neq 0)$$

の4つの解が得られる。諸値を代入して求めたのが図4のV-A曲線である。図2の V_r と図4の V (m/s) は $V = 0.105 V_r$ の関係があるが、定量的な比較は先に述べた理由により困難である。

図4において点1では安定でギャロッピングはない。点2では3次モードのみ。点3では一次モードは不安定で3次モードのみ。この3次モードによる自励振動が結果的に一次モードの限界風速をさらにおし上げた結果になっている。このことは図2の予測値と実験値の差に対応しているのかもしれない。点4では一次、三次モードともに安定（ただしどちらか一方）であるが、これは実験での非定常な応答に対応するものと想像される。さらに高風速のときは実験では一次モードのみしか検出されなかったが、この解析ではそのことは説明できない。

定量的な説明には至らないが、高次モードの重畳により、一次モードの発振風速が高まるという定性的説明は行いえたのではないかと考えている。実験的な検証、空気力の取り扱いに残されている問題も多いので、さらに検討を重ねていく必要がある。

1) Fujino, Y, Ito, M, Pennung, W, "Suppression of Galloping of Bridge Tower by TMD" Fac. of Eng. Report, Univ. of Tokyo (投稿中)

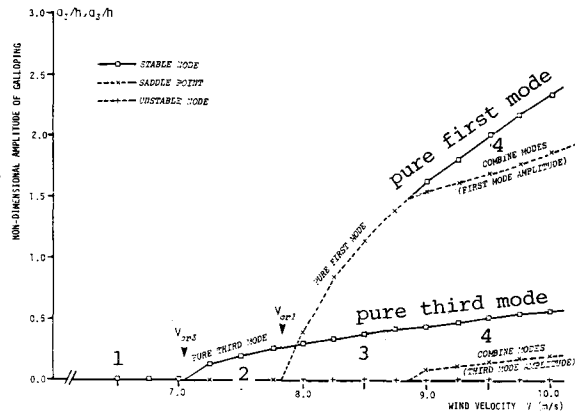


図4 2自由度系のV-A曲線