

三井造船 正員 井上 浩男
三井造船 南 真知
三井造船 遠山 泰美

1. まえがき 吊橋主塔は、架設途中において、カルマン渦との共振と思われる振動の発生することがある。このことは、風洞実験でも指摘され、実際の工事においても、振動の発生した報告がある。この振動は、その程度によっては、架設作業性にもとより、強度上からも問題となる。故に、制振装置の必要性が論じられ、具体的に工事にも用いられてきている。

制振装置は、架設時の一時的なものであるため、作業性を損わずかつ経済的であることが必要となり、これまで数多くの制振手法が研究されているにもかかわらず実際の工事に用いられたものは、塔頂よりケーブルを張り、他端に減衰を付加する手法がほとんどである。具体的には、(1)トラワイヤー方式、(2)スライディング・ブロック方式、(3)水中ブロック方式等である。

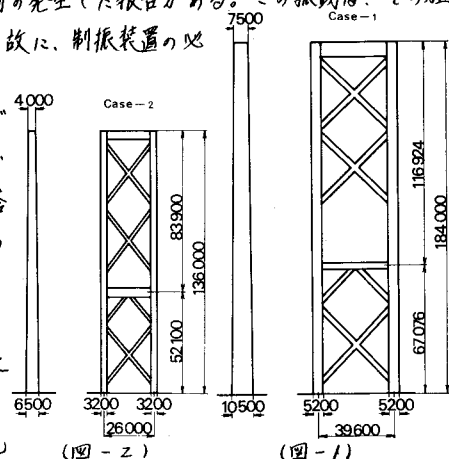
(4)し、実施例は、いずれも塔高130m程度のものであり、今後建設が予定されている180m以上の大規模な主塔に関して、その有効性が発揮できるかどうかの検討はなされていない。主塔の規模が大きくなれば、塔自体の質量も大きくなり、ケーブルも長く、太くなり、解析の際のモデル化を含めて、再検討をしてみる必要があると思われる。

本報告は、制振装置の解析手法の再検討と、大規模な主塔に対する有効性の2点を中心に、解析・計算を行ない、その特性について評価を加えたものである。具体的には、図-1、2に示すような、塔高184mの大規模主塔(Case-1)と、136mの中規模主塔(Case-2)について比較をした。

2. 耐風特性 主塔の制振については、まず、主塔自体の耐風特性の把握が必要である。Case-1については、弾性模型による風洞実験を行ない、図-3、4に示す応答特性を得た。1次モード共振風速は、図-3より実塔に換算して、18.8%を得た。又、共振風速下での特性曲線(図-4)から、塔頂振幅は、主塔の減衰率に逆比例して減少することがわかった。(主塔の対数減衰率を0.01と仮定すると塔頂振幅は6.6mとなる。) 故に、制振の効果については、系全体でなす仕事を、塔だけで散逸されるエネルギーと等置して、等価減衰係数(C_{eq})を定義し、その大きさを示すことにした。

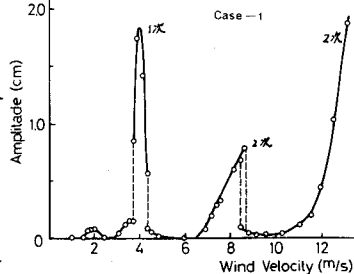
3. 基礎方程式 振動系のモデル化にあたっては、主塔を塔頂で1質点/自由度のバネ+ダッシュポット系にかきかえた。ブロック部も同様とした。

i) 簡易モデル振動運動方程式 右図に示すように、端部をモデル化した後に、2質点を結ぶケーブルを1本の直線バネに置きかえ、全体を2質点系としてモデル化した。但し、バネ係数はケーブルの質量・張力を考慮した上での有効バネ係数を用いた。結果として、次頁の形の運動方程式を得た。

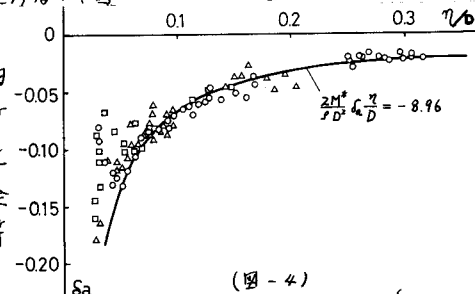


(図-2)

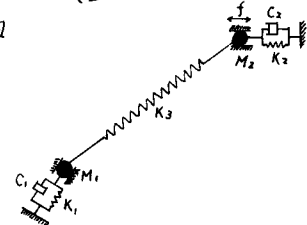
(図-1)



(図-3)



(図-4)



$$\begin{Bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} k_1 & -k_3 \\ -k_3 & k_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f \end{Bmatrix} \quad \text{①}$$

ii) 非線形運動方程式 大規模形式のため、ケーブルの質量・変形が、無視できなくなる可能性がある。故に、ケーブルを質点とバネに分割し、各質点でのつり合い条件から以下の運動方程式を得た。

$$m_i \ddot{x}_i + c_i \dot{x}_i = \sum_j T_{ij} + F_i(t) + m_i g \quad \text{②}$$

iii) 線形運動方程式 ②式において、静的釣合位置からの変位は微小であるとして、2次以上の項を省略し、線形方程式を得た。

$$m_i \ddot{u}_i + c_i \dot{u}_i + \sum_{j(i)} (K_{ij}) \{u_j\} = F_i - F_{i0} \quad \text{③}$$

4. 結果をうに考察 ①～③の方程式について、それぞれ解析プログラムを作成し、計算・比較を行なった。

まず、トラフタイヤー方式とブロック方式の比較について、Case-1の結果を図-5に示す。前者では、 K_1 を大きくして端部固定の状態に近づけることは、 C_{eq} が小さくなり、逆に、 $K_1=0$ として C_1 を最も有効に作用するようにしても、 C_{eq} は10倍程度にしか増えない。後者はブロック重量を大きくすれば、はるかに大きな効果が期待できるとともに、 C_1 の設定に対して許容誤差が小さくなる傾向にある。

次に、図-6に Case-2 のブロック方式での結果を示す。 C_{eq} が10倍程度になるまでは、 C_1 に対してほぼ直線的に C_{eq} も増加を示し、 C_1 を大きくとりすぎても、 C_{eq} の減少はわずかであり問題は少ない。

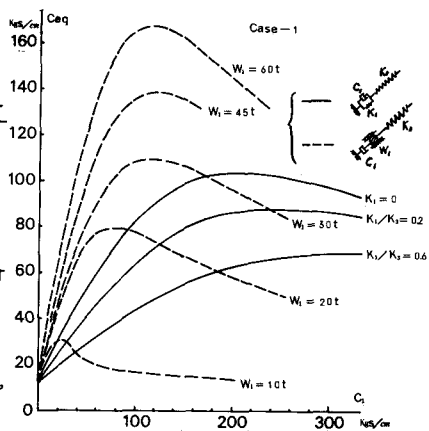
①と③の解析手法の違いによる結果を図-7に示す。Case-2 では、このような差はほとんどみられなかったことから、大規模形式の特徴であり①の手法だけで効果を判断することは危険ということになる。

Case-1 で C_{eq} を15倍以上にするには、ブロック重量は30tも必要となる。ここでは、ケーブルを途中で分岐させ、ブロック重量の軽減について可能性の検討を加えた。図-7に併記して示す。ケーブルの張り方を工夫すれば、ブロック重量は半分の15tで、直接式以上の制振効果の得られることがわかる。同時に、 C_1 に対する許容誤差がさらに小さいものとなり、減衰の付加にあたり、細心の注意が必要で、精度が要求される。

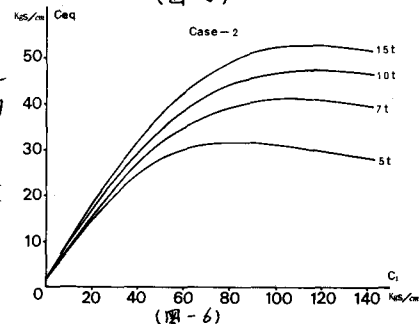
1次モード振動に対する制振を考えたが、同じ装置で2次モードにまで有効であれば、それにこしたことはない。図-8にその比較を示す。2次モードに対しては、直接式で C_{eq} が4倍程度で、分岐式では、 C_{eq} にほとんど変化がなく、いずれも2次モードには大きな効果は期待できない。その他、ケーブル径、張力、主塔減衰率、ブロック振幅、傾斜台位置・角度、分岐位置等、制振効果に影響を及ぼす各種項目についての検討も行うたが、結果はここでは略す。

5. 結論 大規模主塔の制振を考えるには、①の計算のみでは不十分であること、ブロック方式が有効であること、減衰効果を大きくするには、付加する減衰(C_1)の大きさを精度よく与えることが必要であること等である。

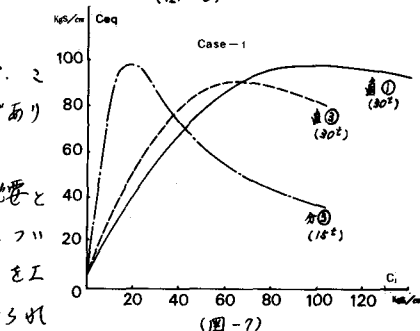
精度よく減衰を与えるためには、摩擦を利用したスライディング方式、粘性を利用した水中方式では、いずれも不十分であると思われ、ブロックの摩擦は極力小さくし、オイルダンパーをブロックに直判に付なして、適切な減衰を付加する手法を考案した。今後は、実験等により、その有効性について検証していく予定である。



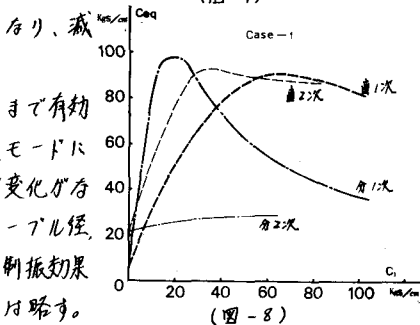
(図-5)



(図-6)



(図-7)



(図-8)