

海底ケーブルの動的特性に関する実験

鹿児島大学工学部 学生員 ○久留島卓朗 横路祥一郎
鹿児島大学工学部 正員 河野 健二 愛甲 頼和

1. まえがき

狭い国土を有する我が国において今後、地下空間や海洋の開発がいま以上に進むと考えられる。海洋に構造物を設置した場合、構造物は様々な外力を受けることが考えられるが、なかでも潮流力は海洋構造物に常に生じているものである。海底ケーブルが設置される海底面は不規則であり、ケーブルが海底面に定着しているとは限らない。また、特に水深が深い場合、海底ケーブルの応答は潮流力による影響が大きいと考えられる。本研究では、潮流力（流体力）を受ける海底ケーブルの動的特性を明らかにするためモデル実験及び解析を行なった。

2. 実験手順

海底ケーブルの実験モデル(図-1)は、硬質の塩化ビニル管(一般管(VP) JIS K 6741-1975)のVP40(外径48mm, 内径40mm)、VP30(外径38mm, 内径31mm)の2種類を用いて作成する。スパン長は140cm, 120cmでモデルに浮力が生じるようにしたものとする。2つのパターンを測定する。モデルは、水平に置き、流れ(一様流)方向に対して垂直に両端単純支持で設置する。そして、モデル中央の裏面と上部に1枚ずつ、またスパンの両1/4点の上部に1枚ずつひずみゲージを貼り、それぞれの点のひずみを測定した。流速は、0.05m/s 毎上げていき、モデルが渦により共振し応答がピークを越えるところまでデータを取る。また、各流速毎に3000個のデータ(0.01秒間隔)を計測した。この実験は、鹿児島大学水産学部にある回流水層(全長5.0m, 水深1m, 幅2m)を利用して行った。

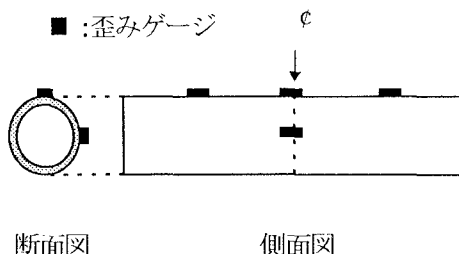


図-1 実験モデル

3. 実験結果と考察

図-2は、モデル中央部における最大変位応答とモデル半径の比($A/(d/2)$)と換算流速($V_r = V/fd$)の関係を表したものである。スパン長は140cmで直径の異なる2種類のモデルについて比較したものである。2種類のモデルは似た傾向を示している。データ数が少ないため、もっと多くのデータをとる必要があると考えられるが、換算流速が6~7程度の範囲にあるとき渦振動による共振が生じている。次に、各モデルとも共振時において振幅がかなり大きくなっている。大きくなるものは、モデルの直径と同じぐらいの最大変位応答が生じる場合があるため、この領域において通常の応答変位よりかなり大きな応答が予想される。特に、スパン長140cm、直径48mmのモデルの応答で、主要振動数は、渦振動により共振していると思われる1.10m/sから1.40m/sにおいては、4.00Hz位のほぼ一定の振動数を取るのに対して、1.45m/sとなると振動数が6.47Hzと急激に上昇する。この点から、共振域では応答の主要振動数はあまり変化しないことが分かる。他の実験結果についても同様の結果が得られた。

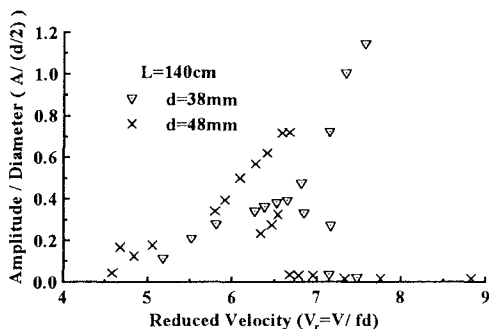


図-2 換算流速と最大応答の関係 (L=140cm)

4. 解析とその結果

モデル実験に対して、シミュレーションで渦振動による応答の評価を行う。ここで、流れに直交する方向（渦振動の生じる方向）に生じるケーブルの応答の評価に用いる運動方程式は、

$$M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + C \frac{\partial y}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = F(x, t) \cdots \cdots (1) \quad F(x, t) = \frac{1}{2} \rho d C_L V^2 \cos \Omega t - \left[\left(\frac{C_a \rho \pi d^2}{4} \right) \ddot{y} + \frac{1}{2} C_D \rho d \text{sign}(\dot{y}) \dot{y}^2 \right] \cdots \cdots (2)$$

M : 質量 EI : 曲げ剛性 C : 減衰 F(x, t) : 流体力(揚力, 減衰力を含む) ρ : 流体の密度 C_L : 揚力係数 d : 構造物の直径 V : 流れ方向の流速 C_a : 質量係数 C_D : 抗力係数 Ω : 渦列の振動数
で、最終的には、i 次モードの運動方程式(i = 1, 3, 5 · · ·)は、

$$\left(1 + \frac{C_a \rho \pi d^2}{4m} \right) \ddot{q}_i(t) + 2\beta_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \frac{4}{i\pi m} \left[\frac{1}{2} \rho d C_L V^2 \cos \Omega t - \frac{1}{3} C_D \rho d \text{sign}(\dot{y}) \dot{q}_i(t)^2 \right] \cdots \cdots (3)$$

となる。式(2)において、1項目は揚力項、2項目は慣性力項、3項目は流体力減衰項を表している。ここで、問題となるのが1項目の振動数 Ω である。実験で得られた時刻歴応答をフーリエ変換してスペクトル表示すると、いくつかの振動数でピークがでてくる。このように、振動モードが激しく変化しているために、単純に振動数 Ω を決定することができない。そこで本解析では、実験で得た時刻歴応答をスペクトル解析し、いくつか適当な振動数を選び振動数 Ω とすることにした。

それを用いてシミュレーションを行い、実験で測定した応答との違いについて検討を加える。また、3項目の流体力減衰項の非線形項を等価線形化法により線形化して用いても良いが、本解析では、そのまま非線形項を入れたままシミュレーションを行うことにする。また、揚力係数 C_L については、各モードにより変化するため図-3に示すように換算流速($V_r = V/fd$)の関数で表されるものを用いることにする。図-4は、スパン140cm、直径48mmのモデルのスパン中央部における、流れに垂直な方向の最大変位応答と流速との関係を示したものである。シミュレーションで用いた係数は、減衰定数0.036、ヤング率 4.82×10^4 (kgf/cm²)は、実験から求めた値を用い、質量係数1.5抗力係数1.2である。実線は実験値を表し、破線はシミュレーションの値を表したものである。この図では各流速の最大値はだいたい一致していることが分かる。先ほど述べたように振動数 Ω の取り方の違いによりシミュレーションの値はかなり変化する。さらに、海底ケーブルの動的特性を明らかにするためには、構造物の固有振動数や振動モードと渦振動の振動数との関連性について検討しておく必要があると思われる。

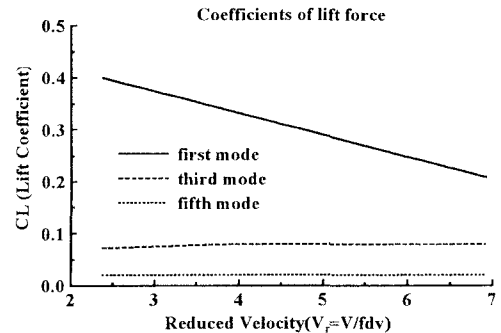


図-3 揚力係数

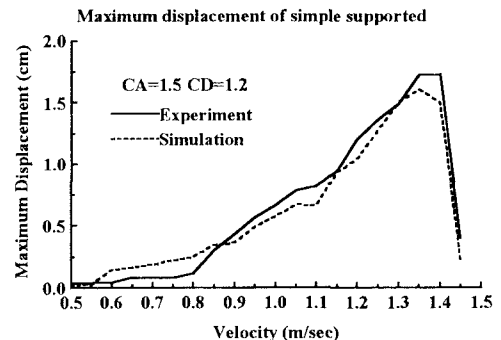


図-4 最大変位応答の比較

5. まとめ

ケーブルは多くの振動モードを持っているため、解析を行ううえで振動数の把握がとても重要となることが分かった。また渦振動により共振する範囲は、比較的狭いが応答に与える影響はかなり大きいことが分かった。

参考文献 岡口 喜彦 他：海底ケーブルの動的特性に関する研究，土木学会西部支部講演概要集，pp142-143，1996. 3. 21