

科学技術庁	正員	山脇	良雄
埼玉大学	正員	山口	宏樹
東京大学	正員	藤野	陽三
東京大学	正員	伊藤	学

1. まえがき 通信線と吊材としてのケーブルを一体化した構造をもつ通信ケーブルは、現在主に施工上の利点から数多く利用されているが、図-1に示すような8字型断面を有するこのケーブルは、強風下でギャロッピングと呼ばれる空力不安定振動を発生することがある。このギャロッピング振動による断線事故を生じており、この現象の解明とその対策は急務となっている。そこで、本研究では8字型断面ケーブルの動特性の解明とギャロッピング発生時の動的応答特性の把握を試みた。なお、対象ケーブルのスパンは30m、サグ比は3%である。

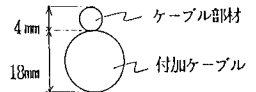


図-1 ケーブル断面形状

2. 支配方程式の定式化 鶴田¹、野村²による実験的研究によれば、ギャロッピング振動時にケーブルはねじれ変位を伴った円挙動を示すことが明らかになっている。そこで、ここでは、8字型断面ケーブルを、ねじれ剛性を有し、直交3軸方向の変位と部材軸まわりの変位の4つの自由度をもつ一次元部材として取り扱い、山口の定式化³を参考に対象ケーブルの3次元運動方程式を導いた。その際、付加ケーブルについては、剛性を有しない付加質量であると考えた。つまり、軸力とねじりモーメントの断面力はケーブル部材にのみ生ずるものとし、付加ケーブルは、分布外力および分布モーメントに関係するだけであるとしている。ここでは、紙面の制約上、この支配方程式の具体的な記述は省略する。この支配方程式は非線形偏微分方程式であり、そのままの形で解析することが困難であるため、以後の解析では線形化された増分形支配方程式を用い、近似解法としてGalerkin法を適用した。

風力によるケーブルの静的変形 ケーブルのギャロッピング振動においては、静的な吹き流され角 β と迎角 θ が大きく影響するため、ケーブルの静的つり合い形状を把握することが重要である。そこでまず、上記の支配方程式を用い、荷重増分法により、風によって吹き流されたケーブルのスパン1/4点での静的変形状を求めた。1:5断面の三分力特性を用いて計算し

た結果を図-2.aに示す。

また、野村の実験による測定結果²を図-2.bに示したが、両者を比較すると、高風速域で吹き流され角 β の値が若干異なっているが計算値は実験値にはば一致していると言える。

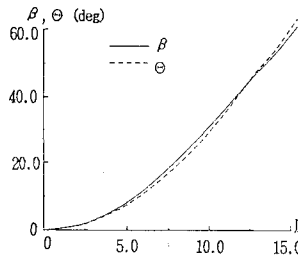
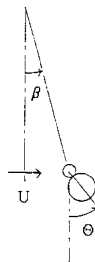


図-2.a 静的変形計算結果

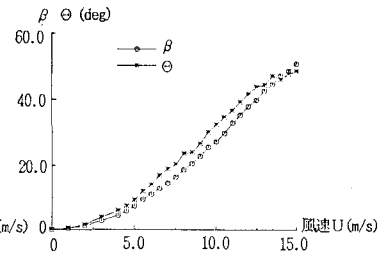


図-2.b 静的変形実験結果

3. 8字型断面ケーブルの動特性 対象ケーブルの動的な基本的特性を把握するため、線形自由振動解析を行ったが、その結果、面外振動に対してねじれ振動が連成して生ずることが明らかとなった。その固有モードを、ここでは、無風時の場合の面外2次モードに関して図-3.aに示す。図-3.aから、面外最大変位1cmに対して、最大7.6°のねじれ変位が連成している。野村の実験においても面外振動とねじれ振動の連成が確認されている²。この測定結果を図-3.bに示したが、実験では面外変位1cmに対し、ねじれの連成変位は

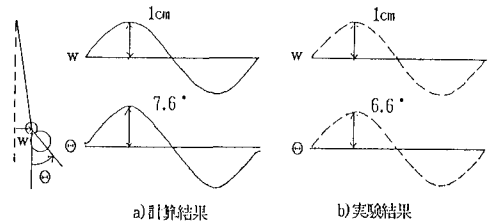


図-3 面外振動とねじれ振動の連成

6.6° となっており、オーダー的によく一致している。この面外振動とねじれ振動の連成は、付加ケーブルの効果を無視し、ねじれ剛性を有する単一ケーブルとして解析すると全く現れず、付加ケーブルに働く慣性力をつくるモーメントがねじれとの連成を誘起していることが明らかとなった。

有風時の固有振動解析では、支配方程式に外力項として空気力も加わる。空気力は、迎角 θ の値によって変化するため、増分形の支配方程式にねじれ変位に対応する空気力の増分項が復元力として加わることになる。たとえば、2次元モデルの鉛直方向の運動方程式

$$m\ddot{y} + k_y y + L = 0 \quad (L: \text{揚力})$$

において、増分を考えれば、

$$m\delta\ddot{y} + k\delta y + \frac{dL}{d\theta}\delta\theta = 0$$

となる。左辺第3項が、ねじれ変位増分 $\delta\theta$ に伴う復元力項である。

この効果を取り入れて、固有振動解析を行った場合、面外モードの振動方向が大きく影響を受け、必ずしもケーブル面直角方向とはならないという結果を得た。その一例として、風速 $U = 6 \text{ m/s}$ における2次モードの振動方向を図-4に示した。図-4から、面内振動はケーブルのつくる面内で振動するが、面外振動方向は、ケーブル面直角方向から、72°ものずれが見られる。面外振動に関してのみ、このような振動方向のずれが現れるのは、上述のように面外振動に連成してねじれ変位が生じ、その結果、空気力の迎角による変動の影響が大きくなるためであると思われる。この点については実験の確認を行うことが必要と考えている。

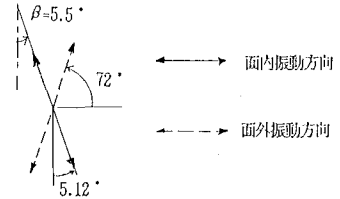


図-4 有風時($U=6\text{m/s}$)の固有振動モードの振動方向

4. ギャロッピング振動の時間応答解析 ギャロッピング振動特性解明のため、対象とするケーブルの自励振動の時間応答解析を行った。作用空気力は準定常理論を用いて評価した。また、野村の実験²によれば、ギャロッピング振動時に出現するモードは、2次モードであることが明らかとなっているため、固有振動解析の結果得られた面内、面外2次モードを近似解として解析を行った。その応答解析結果を風速 12m/s 、 14m/s の場合について図-5.a, 5.bに示す。この図は鉛直変位 v と水平変位 w の時間応答とそのリサージュを示したものであり、面内方向に初期速度を与えた解析例である。

図-5.aから、風速 12m/s では、振動は面内方向を保ったまま減衰している。風速 12m/s 以下の場合もこれと同様の減衰振動を示した。図-5.bより、風速 14m/s では、自励的な不安定振動を生じていることがわかる。しかしながら、実験で確認されている定常的な円振動を得るまでには至っていない。なお、風速 12m/s の場合にも、振動が自励的に増大するような振動方向が存在することも明らかとなった。

実験によればギャロッピングの発振風速は 11.5m/s であり、この解析において不安定振動の生ずる風速と比較的によく一致している。

以上、8字断面を有するケーブルの動特性、およびギャロッピング振動に関して有意な知見が得られた。しかし、ギャロッピング発生時の定常振幅の把握はできておらず、さらに検討する必要がある。

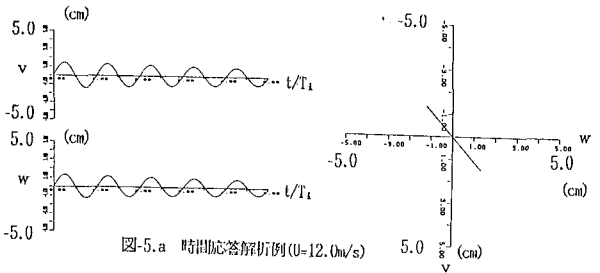


図-5.a 時間応答解析例($U=12.0\text{m/s}$)

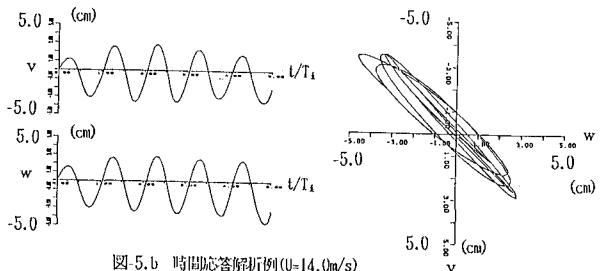


図-5.b 時間応答解析例($U=14.0\text{m/s}$)

参考文献

- 1) 鶴田郁夫：架空通信ケーブルの空力不安定振動，東京大学修士論文，1983。
- 2) 野村和男：異形断面架空ケーブルの空力弾性振動，東京大学卒業論文，1984。
- 3) 山口宏樹：ケーブルの動力学的特性の関する研究，東京大学博士論文，1979。