

東京大学大学院 学生員 真下和孝

東京大学工学部 正 員 宮田利雄

東京大学大学院 学生員 山口宏樹

1. まえがき

斜張橋、送電線、ガイタワー、繫留ケーブル等のいわゆるケーブル構造は、剛性が小さく、変形しやすい構造であって、風の作用下においても、よく振動することが経験される。このような可撓性に富む、線状構造系としてのケーブル構造が風の作用を受けて示す空力弾性振動について考えるとき、ケーブル構造に固有な動力学的応答特性を、固有な断面形状、あるいは複数本のケーブルの空間配列状況に基づく空気力学的特性とともに考察検討することが必要である。本報においては、斜張橋ケーブル、単一素線ケーブル、あるいは複数本の素導体から成る多導体送電線ケーブルの空力弾性振動に関して二、三の考察を行なうこととする。

2. 斜張橋の動特性におけるケーブル部材の効果

斜張橋の一部材としてのケーブルの動特性を調べるため、全長10mの簡易斜張橋模型を用い、桁を加振することにより振動実験を行なった(図1参照)。本模型では、長いケーブルの固有振動数は、全体系の固有振動数より若干高くなっている。ケーブルと桁の共振曲線と比較した結果、全体系の固有振動数で加振した場合、ケーブルは桁の影響によりかなりの振動をするが、逆に、ケーブルの共振点では、桁の振動は小さい。言い換えれば、鉛直面内振動に限れば、ケーブル自体の、全体系の振動に及ぼす影響は小さい。

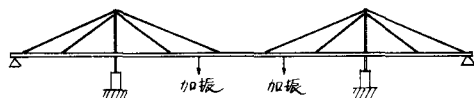


図1 斜張橋模型

他方、ケーブルの固有振動数付近で加振した場合、ケーブルには面内方向の共振と共に面外方向の振動が現われた。この面外不安定振動と呼ばれる現象は、ケーブルの共振点付近でなく観察されている。ケーブル重量が大きく、全体系の固有振動数と、長いケーブルの固有振動数が比較的接近しているケースにおいては、全体系の固有振動数で加振した場合、ケーブルの面外不安定振動が発生し(この時ケーブルの鉛直方向振動数はほぼ固有振動数であった)、それが桁に伝わって、桁が著しい回転振動を起こした。このようなケーブル単体固有の不安定振動が構造物全体の動的挙動に影響を与える現象が観察されたことは興味深いことである。

3. ケーブルの非線形動特性

このようなケーブルの動的不安定現象は本実験のほかにも、単一ケーブル、ガイケーブルの振動実験において観察され、また、音響学の分野においても弦の同様の現象が観察されている。

これらは、単一ケーブルにケーブルを含む鉛直面内方向の周期外力が作用する場合、外力振動数、鉛直たわみ振幅によっては面外方向の横揺れを生じ、ついには回転運動をするという形の現象である。この現象は、ケーブルの鉛直面内変位、および面外変位に関する運動方程式が、その幾何学的非線形項を介して連成するために生ずるものであり、面外方向の運動のみに着目すれば一種の動的不安定現象と考えられるものである。

4. ケーブル構造の空力弾性振動の観測例^{2,3)}

実規模送電線の自然風の下での振動観測試験が実施されたが、その研究報告から観測結果の一例を引用すると次のようであった。図2に模式的に示すようなスペーサにより区切られた人工着氷素導体から成る送電線の観測によれば、ギャロッピング時に送電線軸鉛直面内に橋内軌道を描いて振動する。橋内の長軸は、鉛直線からおよそ15°傾き、長軸と短軸の比は振動モード形により2:1〜7:1と変化した。また、ギャロッピングの最大振

幅は振動モード形により異なること、高風速域では風速が大きくなっても増大しない、いわば最大振幅の飽和現象が見られるなどである。

ところで、ギャロッピング現象の説明によく用いられる Parkinson らの手法によれば、ギャロッピング時の定常振幅が求まるが、この解では、高風速域での振幅は風速に比例して直線的に増加し、上述した送電線で観測された振幅の飽和を説明し得ない。このほかの現象をも含めた問題の解析的な説明のためには、可撓性に富むケーブル構造の特性、ならびに作用外力の特性を考慮した考察が必要であろう。

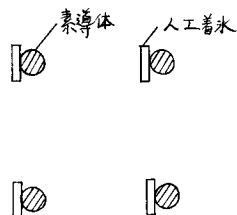


図2 4導体人工着氷送電線断面図

5. ケーブル断面の後流中での空力弾性振動の実験例^{4,5)}

送電線の空力弾性振動に関連した Wardlaw と Cooper の風洞実験⁴⁾によれば、図3のように風路直角方向に平行に、上流側は固定し、下流側を十字のバネで弾性支持した2本の送電線素导体断面を設置した場合、下流側素导体に不安定振動現象が観測された。これは、上流側素导体の後流中に下流側素导体が位置するために励起される現象と考えられる。その発振風速は、下流側素导体の平衡位置 (x_0/d , y_0/d)、風路方向と鉛直方向の振動数 f_x , f_y 、振動数比 f_x/f_y 、吹き流し角、乱れの強さに依存する。また、この不安定振動は一般に楕円軌道の定常リミットサイクルに発達し、長軸は、ほぼ水平方向である。図3に示すように、楕円軌道上の素导体の回転方向は一定で、後流の中心付近で上流側へ、後流の下端では下流側に向くと報告されている。

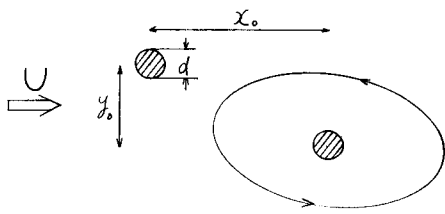


図3 2導体送電線の後流中での挙動

一方、坂田らは風路直角方向に平行に2本の六角断面柱ケーブルを、上下流側ともバネにより支持して鉛直/自由度の振動を許した2次元模型の風洞実験を行なっている。⁵⁾これによると、下流側ケーブルの振幅の方が上流側ケーブルの振幅より若干大きく、またギャロッピング振動が発生する風速以下の低風速でも、下流側ケーブルは、微小ではあるが、上流側ケーブルの約2~3倍の振幅で振動することが報告されている。この現象も下流側ケーブルが上流側ケーブルの後流中に入ることに起因する現象と考えられる。

6. まとめ

ケーブルは、面外不安定振動現象に見られるように、単体それ自体にも非線形な動特性を持ち、さらに斜張橋、送電線等のケーブル構造のように、ケーブル部材と他の部材の相互作用が加わり、常に構造的に非線形な系として取扱う必要があると言い得る。さらに、このケーブル構造の空力弾性振動を考える場合、斜張橋ケーブルに見られるようなラッピング等のために非円形断面となったケーブル、および送電線、斜張橋に見られる複数平行ケーブル等について、従来の空力弾性振動的理解に加えて、後流中における不安定振動現象のような非線形振動現象として問題の把握をする必要があると思われる。

参考文献 1) 山口, 宮田, 伊藤: ケーブル系の非線形動的応答における一挙動, 第24回構造工学シンポジウム, 1978.

2) Matsubayashi, Y., et al.: An Experimental Study of Bundle Conductor Galloping on The Kasatori-Yama Test Line For Bulk Power Transmission, Proc. Int. Conf. on Large High Voltage Electric Systems, 1979.

3) 中部電力, 関西電力, 電力中央研究所: 大容量送電線の技術開発共同研究統合報告書, 1976.

4) Wardlaw, R.L., Cooper, K.R., Watts, J.A.: Wind Tunnel and Analytical Investigations into The Aeroelastic Behaviour of Bundled Conductors, Transactions Paper, IEEE Power Eng. Soc., IEEE PES Summer Meeting and Energy Resources Conf., 1979.

5) 横山, 山川, 坂田: 斜張橋の大形化に対するケーブルの振動とその防止対策, 三菱重工技報 Vol. 14 No. 3, 1977.