

東京大学 学生員 山口宏樹

東京大学 正員 宮田利雄

1. まえがき

動特性の異なる複数個の部材より成る構造の、全体としての動特性を考える場合に着目すべきことは、単一部材としての動特性が構造系の一部材になったことによりいかに変化するか、全体系の動特性に各部材がどのように寄与しているかということである。これを知るためには各部材間の動的相互作用に関する研究が必要となる。

吊橋、斜張橋、ガイタワー等のケーブル・桁系構造を考えた場合、完全可撓性、非抗圧縮性、伸張性等の特有の性質を有するケーブルと桁とは、その動特性にかなりの差があるため、それらを組み合せた構造系の動的挙動は非常に複雑となり、吊橋を除けばその動的研究は多いとは言えない。そこで本研究では、ケーブル・桁系構造の最も基本的なものの一つとして、図-1のような単一ケーブル吊り片持梁を考え、ケーブル初期張力およびケーブルの質量をパラメータとした模型実験、さらに線形域内でのケーブル・桁連成振動の数値解析を行ない、特に固有振動数、および固有モードにおける相互作用について考察した。

2. ケーブル・桁系の動特性

ここでの解析法はガイタワーの振動を扱った McCaffrey¹⁾ の方法と同じであり、その解析上の仮定として、ケーブルについては初期形状が偏平で、ケーブルの弦の直交方向のみの運動を考えるものとし、桁については曲げと軸力を受ける片持梁として扱い、鉛直方向の曲げ振動のみを考えるものとした。また連成効果としては、ケーブルの運動方程式に桁先端の変位による効果を取り入れ、桁の運動方程式には振動中のケーブル張力の効果を取り入れた。その結果、全体としてケーブルと桁とが連成した線形な運動方程式が得られ、変数分離して固有値問題とし、解析を行った。

同時に行なった模型実験の結果から、この解析法の妥当性が線形の範囲内である程度検証されたので、パラメータ解析を行なうことにし、パラメータとしてケーブルと桁の質量比 $(\rho_L)/(\rho_B)$ 、およびケーブル張力に関する無次元量 $H/(EI/l_0^2)$ を選んだ（添字 B, c はそれぞれ桁、ケーブルの物理量を意味する）。解析結果として得られる固有振動は、モード形からケーブル振動が支配的なものと桁振動が支配的なものとに分類でき、前者の固有振動数はケーブルの物理量のみにより無次元化し、後者の固有振動数については桁の物理量のみで無次元化した。すなわち、無次元振動数を λ_c, λ_B とすれば（ ω は固有円振動数）,

$$\omega_{c_i} = \frac{\lambda_{c_i}}{l_c} \sqrt{\frac{H}{\rho_c}}, \quad \omega_{B_i} = \left(\frac{\lambda_{B_i}}{l_B} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho_B}} \quad (i=1, 2, 3, \dots)$$

となる。この無次元固有振動数 λ の各パラメータによる変化をみたものが図-2、図-3である。それを見ると質量比、張力-剛性比の値のかなりの範囲で λ はほぼ一定となっており、固有振動数における相互作用はほとんどないものと考えられる。ちなみに、この一定の $\lambda_{c_i}, \lambda_{B_i}$ と単一部材としてのケーブル、および桁（片持梁、先端単純支持片持梁）の無次元振動数と比較すると、 λ_{c_i} は両端拘束の単一ケーブルの無次元振動数より大きい値をとるが、振動次数に比例する傾向は変えておらず、また λ_{B_i} は低次においては先端単純支持の片持梁の無次元振動数に近いのに対し、高次になると先端自由の片持梁のそれに近づく、5次ではほとんど一致するところがあった。しかし、ケーブル・桁系の固有振動を二種に分類したものの、両者の固有振動数が近づくとケーブル、桁どちらの振動が支配的な区別できなくなり、ケーブル・桁系としての固有モードとなって無次元固有振動数が一定値から多少はずれた値をとっている（図-2、図-3における不連続域がそれである）。なお、図-3で $H/(EI/l_0^2)$

が0に近づくと特に1次の振動数に入かなり変動が見られるが、これは張力がいさく、同じ質量のケーブルに対してサグが大きくなって扁平形状の仮定が成立しなくなるためであろうと考えられる。

以上の線形範囲内の動特性の他に 模型実験においては非線形挙動が観察された。その一つに 加振が鉛直面内であるのに對し、変位が大きくなるにつれてケーブルが3次元的面外回轉運動を行ない、桁も横撓れを生ずるという現象がみられた。ケーブル固有の非線形挙動がケーブル・桁系全体の挙動に反映された一例といえよう。

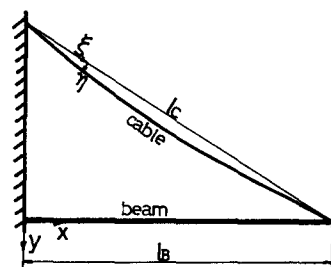


図-1

3. あとがき

各部分間の動的相互作用を考えるには個々の部材の動特性が把握されていなければならないが、桁については既述の理論でかなりの範囲のものについて把握されていると考えられるものの、ケーブルについてはそれが古典的な問題であるにもかかわらず、ケーブル特有の動特性の把握は未だ不十分であるといえる。それはケーブルが特性上、極めて剛性の小さい部材でかなりの非線形性を呈すること起因していると考えられる。ケーブルについての既往の理論では完全可撓性、伸張性を考慮した運動方程式を扱う際に、非抵抗縮性がケーブルの動特性に對し最も支配的な性状であると思われるにもかかわらず、それをほきり考慮してゐらず、この意味でケーブル固有の非線形性状が把握し切れていないと思われる。また3次元面内撓動を扱ったものがほとんどであり、これもケーブル固有の性状と思われる3次元面内安定振動(実験で観察されたし、文献にも見られる)についても明らかにされていない。剛性の小さなケーブル構造の動特性を考える場合、最終的にはその非線形挙動が重要となるのであって、単一ケーブルの非線形特性把握が不可欠である。

ところでケーブル・桁系の動特性としてその振動減衰性状についても考慮すべきであって、減衰特性の上における相互作用の効果が重要な問題の一つといえる。従来この減衰については各固有振動に對応するものとして便宜的に扱われてきたが、たとえばケーブルと桁との接合部におけるエネルギー逆散に基づく減衰のようなものについては表わし得ていない。過渡応答的なものも含めた動的解析においては減衰をエネルギー伝播の観点から考慮し、振動問題として扱うよりも、振動問題としてエネルギー的に扱うほうが有用ではないかと思われる。それと同時にここでの解析をより複雑なケーブル・桁系構造に拡張することも必要となるであろう。今後検討して行きたい。

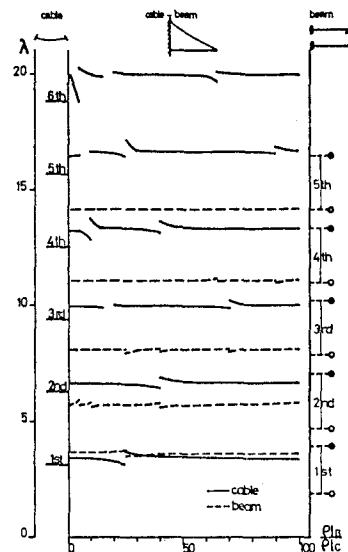


図-2

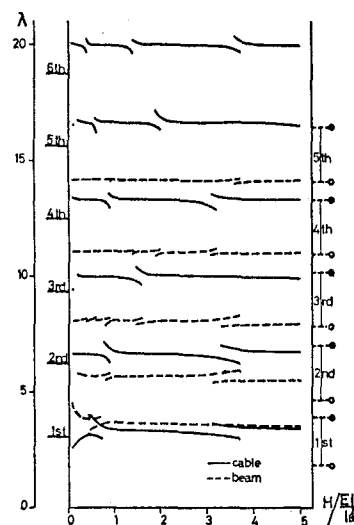


図-3

[参考文献]

- 1) R. J. McCaffrey and A. J. Hartmann, "Dynamics of Guyed Towers", ASCE, ST6, June 1972
- 2) A. G. Davenport and G. N. Steels, "Dynamic Behavior of Massive Guy Cables," ASCE, ST2, April 1965