

斜張橋の桁曲げ、ねじれおよびケーブル の基本振動数の相対的關係の検討

Relations between fundamental natural frequencies
of girder and cables in cable-stayed girder bridges

長井正嗣* 川畑 治** 有村英樹***

By Masatsugu Nagai, Osamu Kawabata and Hideki Arimura

This paper presents the relations of fundamental natural frequencies of girder and cables in cable-stayed the girder bridges. Flexural and torsional frequencies of the girder are given using design parameters, such as center span length, rigidity ratio of girder to cable and tower shapes. Comparison of them with cable frequency is made, and then the possibility of the relations of 1:1 and 2:1 are explained. Furthermore, the ratio of the torsional frequency to flexural frequency of the girder is presented. It is explained that the higher frequency ratio is obtained compared with that of suspension bridges.

1. まえがき

斜張橋は主桁、塔とケーブルといった特性の異なる主要要素で構成される橋梁形式で、全体の振動特性が複雑になることが知られている。とくに、剛性(長さ、断面積)の異なるケーブルが多数配置されることから、以下に説明するようなケーブルを中心とした斜張橋の振動問題がしばしば話題となる。

現在とくに風に起因するケーブルの振動とその制振対策が実務設計上重要な検討課題となっているが¹⁾、この他にケーブルの振動発現に関する話題として以下の点が挙げられる^{2),3)}。

- a). 桁とケーブルの固有振動数が接近する線形共振。例えば、桁が励振されると同じ振動数を有するケーブルが振動し、ケーブルの疲労問題を考える場合に考慮の余地がある。
- b). 桁の振動に励起されるケーブルのパラメトリック振動⁴⁾。すなわち、桁のある周期での励振に伴いケーブルの張力が同じ周期で変動する。その際、ケーブルの変動張力の周期とケーブルの振動周期の比が整数倍に一致していると不安定な振動が生じることになる。

これらの発現の可能性はいずれも桁とケーブルの振動数が互いにどのような関係にあるか、という点に大きく依存している。したがって、斜張橋の支間長とか形態(塔形状、主桁断面形式)に応じてそれぞれの振動数の関係を事前に把握しておけば、それら振動の発現の可能性、あるいはなんらかの振動が発現した場合の原因同定に当たって有益と考える。また、ケーブルの振動までも同時に考慮にいたれた多自由度の応答解析がどのような支間、形態の斜張橋でどの振動モードに対して重要な意味を有するかといった判断を行なう上でも、振動数の関係を実橋で明らかにしておくことは有益と考える。斜張橋は最近建設の機会が多くまた長大化の傾向も著しいとはいえ、400mを超える斜張橋となると、その数もまた形態もまだまだ限られているのが実情のため、以上のような検討を行なっておくことは有益と考える。しかしながら、主要設計パラメータに応じて両者の関係を明解に説明した報告は見あたらない。

*	工博 長岡技術科学大学 助教授 建設系	(〒 940-21	長岡市上富岡町 1603-1)
**	長岡技術科学大学大学院修士課程	(〒 940-21	長岡市上富岡町 1603-1)
***	工修 (株) 駒井鉄工 大阪橋梁設計部設計一課	(〒 555	大阪市西淀川区中島 2-5-1)

以上は、主に桁、ケーブル間の連成系の振動に関連する問題であるが、この他に桁自身の振動問題では桁の曲げ、ねじれの振動数間の関係を把握しておくことも概略の耐風安定性の照査を行なう上で重要となる。これまで、斜張橋のねじれ振動数は吊橋に比してかなり高いといわれているものの、斜張橋の幾何および力学パラメータに応じた両者の差異を明解に説明した報告は見あたらない。とくに、斜張橋が長大化しても以上の関係が成立するかを検討しておくことは今後の長大橋の計画上也有益と考えられる。

さて、斜張橋の基本振動数を検討する際、それらを支配する設計パラメータが極めて多いことは周知の事実である。このような問題に対応する意味もあって、著者らはこれまで3径間マルチファンタイプ斜張橋の桁の曲げ、ねじれの基本振動数の算定式をレーリーの原理に基づき提案してきた^{5),6)}。そこでは、支間長をパラメータとするとともに、曲げ振動については、桁とケーブルの剛比をパラメータに、ねじれ振動については、塔形状(A、H形塔)、桁(開、閉断面)とケーブルの剛比をパラメータとした検討を行ってきた。本文では、以上の検討結果にあわせケーブルの振動数の予測を含め、それぞれの振動数がどのような関係にあるかを明らかにし、今後の上記振動問題の検討また基本的な構造形態選定計画のための一助とする。

2. ケーブルの振動数の予測

図-1に示すケーブルの振動数を予測する。ケーブル種としては、我国で実績が多い7mmφの亜鉛メッキ素線からなるノングラウトタイプを対象とする。ケーブルの1次の振動数は、次に説明する条件下(後出の式(2)のパラメータの範囲に依存する)で、以下の式で与えられる。

$$f_c = \frac{1}{2\ell_c} \sqrt{\frac{N_c}{w_c/g}} \quad (1)$$

ここで、 w_c はケーブルの単位長さあたりの重量、 g は重力加速度($=9.8 \text{ m/sec.}^2$)である。

さて、式(1)が成立するためには、以下のパラメータ⁷⁾の範囲を調査する必要がある。

$$P_{ge} = \left(\frac{8f}{\ell_c}\right)^3 \frac{E_c A_c}{w_c \ell_c} \quad (2)$$

ここで、 f はケーブルのサグ、 $E_c (=2.0 \times 10^7 \text{ tf/m}^2)$ はケーブルのヤング係数、 A_c はケーブルの断面積である。

検討にあたっては、以下の一般的と考えられる仮定を設けた。

- ケーブルの断面積はその最大応力が $0.9\sigma_a$ ($\sigma_a = 64000 \text{ tf/m}^2$: 亜鉛メッキ素線の許容応力)で設計されるものとする。
- 死荷重時の張力は、一般ケーブルでは設計最大張力の80%、側径間端部に配置されるアンカーケーブルでは60%とする。
- ケーブル長さが最大となる最上段ケーブルを対象とし、塔高さは中央径間長の1/5とする。

ケーブルサイズ、長さを種々変化させて計算を行なった。その結果、 P_{ge} の値はケーブルサイズ(素線本数)

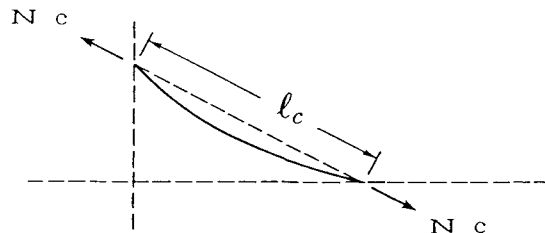


図-1 ケーブル

の影響を受けないこと、一般ケーブルではケーブル水平投影長で500m(中央径間長で約1000m程度)まで式(1)が適用できること、アンカーケーブルの振動数は、支間1000m程度になると、式(1)で評価した値に対して20%程度高くなるがわかった。

アンカーケーブルの死荷重時張力が最大張力の60%という仮定を一つの目安と考えて、大略中央径間長1000mまでのケーブルに対して式(1)を適用することとする。

さて、式(1)の両辺に l_c を乗じた値をケーブルの各サイズについて計算するとほぼ一定値となった。したがって、ケーブルの振動数はケーブルサイズに関係なく長さ(具体的には取り付け位置)に依存して変化することになる。これより斜張橋のケーブル内で最大の固有周期を有する最上段ケーブルを対象に、支間長に応じて計算した固有周期を以後示すこととする。なお、中段(支間の1/4点に取り付け)ケーブルの固有周期は最上段ケーブルの1/2程度となる。

3. 桁の曲げ、ケーブルの1次振動数の関係

文献5)では、桁曲げ1次振動数の算定式を、幾何および力学パラメータを用いて与えた。また、支間の変化に伴う振動数の変化についても概略予測を行なった。

ここでは、箱断面桁として大和川橋梁の諸元⁸⁾を、また主桁曲げ剛性の大きいダブルデッキートラスとして六甲大橋の諸元⁸⁾を用いて、支間の変化に伴う振動数を予測しケーブルの振動数と比較する。

図-2にその結果を示す。図中、○、●印は、それぞれ箱桁、トラス桁について実橋または試設計した橋梁の固有周期を表す。また、 $T_c/2$ はケーブルの周期を1/2した値で、実線の桁周期がこの値と一致するとき桁、ケーブルの振動数が2:1の関係となる。これより、以下のことが推測できる。

- 箱桁断面を有する桁の曲げ1次の振動数とケーブルの1次振動数は支間長に関わりなく一致することはまず有り得ないと考えてよい。両者の差はかなり大きいことから、桁の低次の振動数についても同様のことがいえる。ダブルデッキートラスのように桁曲げ剛性がかなり大きい場合に限り、アンカーケーブルのように死荷重時導入張力の小さいケーブルと振動数が一致する可能性が多少ある。また、両者の振動数は比較近いことから、1次を除く低次の振動数がケーブルの振動数に一致する可能性がある。
- 箱断面桁で、側径間に中間橋脚を設けた実橋の振動数を図中に△印で示す。この場合、ダブルデッキートラス桁と同程度の振動数となっており、ダブルデッキートラス桁について考察したことと同様のことがいえる。
- 桁の曲げ振動に関しては、桁の低次の振動数とケーブルの振動数に2:1の関係が生じることはないといえる。

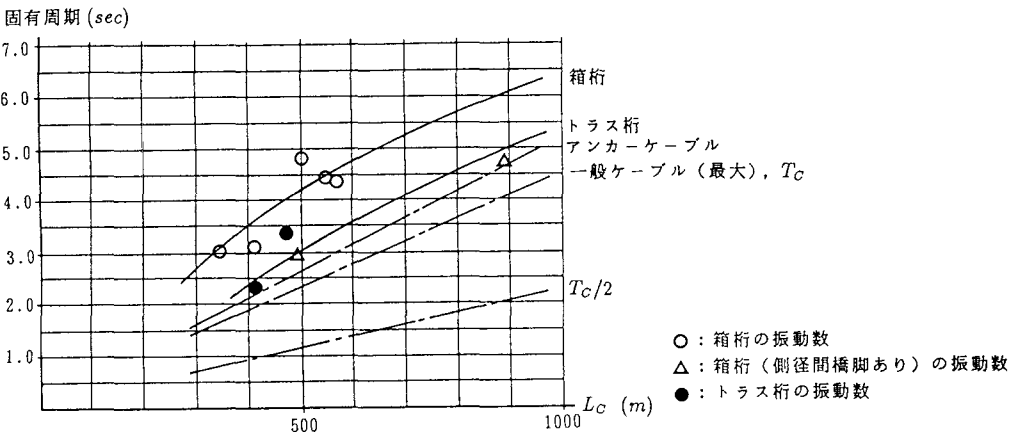


図-2 桁の曲げ固有周期とケーブルの固有周期

4. 桁のねじれ振動数の予測とケーブル振動数の関係

桁のねじれ振動数は塔形状 (A、H 形状) また桁断面形式 (開、閉断面) で大きく変化する。さて、著者らはねじれ振動数の算定式⁶⁾を提案している。この算定式を用いて、以上のパラメータとともに支間長を変化させて振動数の予測を行い、続いてケーブルの振動数との比較を行なう。

4-1 箱断面桁

(1) A 形塔 2 面吊 A 形塔の 1 次固有周期の算定式は、中央径間に等分布トルク荷重 (強度 m_t) 満載時の桁の最大ねじれ角 ξ_{MAX} を用いて、

$$T = \frac{\pi\sqrt{\pi}}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{\gamma_s I_P \xi_{MAX}}{m_t}} \quad (3)$$

と与えられる。

ここで、 g は重力加速度、 I_P は極慣性モーメントである。また、A 形塔のねじれ振動モードは箱断面形式に関係なく中央径間内のみに生じ、また塔のモード値は小さい。

ξ_{MAX} の算定式も既に文献 9) で以下のように与えている。

$$\xi_{MAX} = \frac{4m_t}{B_G^2} \frac{0.9\sigma_a}{E_c} \frac{\zeta_A}{W_G(1+1.3\omega)} \frac{L_A^2}{h_T} \quad (4)$$

ここで、 B_G はケーブルの吊間隔 (橋軸直角方向) で橋幅に等しいとする。 W_G は桁の死荷重強度、 ω は等分布活荷重強度と死荷重強度の比、 L_A は中央径間最上段ケーブル (中央径間中央に定着) の長さ、 h_T は桁上塔高さ、 ζ_A は文献 9) で定義されている値で、等分布の単位トルク荷重が中央径間に満載された時のケーブルの伸びを表すパラメータ (付録参照) である。

式 (4) を式 (3) に代入し、 $E_c = 2.0 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$ 、 $\sigma_a = 64000 \text{ tf/m}^2$ 、中央径間長 (L_c) / 桁上塔高さ (h_T) = $n_h = 5.0$ を支間長に関わりなく一定と仮定すると、以下の式を得る。

$$T = 0.23 \sqrt{\frac{\gamma_s I_P}{B_G^2 W_G (1+1.3\omega)}} \sqrt{\zeta_A} \sqrt{L_c} \quad (5)$$

さて、実橋断面を用いて周期を予測してもよいが、ここでは図-3 に示す箱断面を対象に断面諸元を以下のように仮定して検討を進める。

$$\begin{aligned} A_{eq} &= A_G + \frac{\gamma_c}{\gamma_s} A_c \\ I_P &= \left(\frac{B_G}{12}\right)^2 \left[A_G + \frac{\gamma_c}{\gamma_s} A_c \left\{ 1 + 3 \left(\frac{H}{B_G}\right)^2 \right\} + \frac{4A_W}{A_G} + \left(\frac{H}{B_G}\right)^2 (6A_f + 2A_W) \right] \\ &\doteq \left(\frac{B_G}{12}\right)^2 A_{eq} \\ W_G &= 1.3\gamma_s A_{eq} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 γ_c 、 γ_s はそれぞれ舗装、鋼の単位体積重量である。なお、式 (6)₂ で下線部はその影響が小さいと考えられるため、また簡略化のため無視した (但し、過小評価することになる)。

式 (6) を式 (5) に代入し、 $\omega = 0.2$ とし、仮に桁のねじれ剛性を無視すると、 $\zeta_A = 1.1$ とおけて (桁のねじれ剛性がかなり小さい状態)、最終的に

$$T = 0.054 \sqrt{L_c} \quad (7)$$

なる簡単な予測式を得る。實際上、斜張橋のねじれ剛性を評価する上で、箱桁のねじれ剛性は長大支間になっても無視できない。そのため、箱断面の桁高さを $3m$ 程度と仮定して、付録の ζ_A を参照して計算した結果を図-4 に示す。周期は範囲をもって与えられるが、周期の長い方が6車線橋梁、短い方が2車線橋梁に対応する。また、図中に実橋または試設計橋梁の周期を○印で示す。

実際の橋梁の周期を予測する場合、後死荷重の設定条件等の差に起因して、ここで仮定した極慣性モーメントと大きく異なることが予想される。事実、そのことに起因して本評価式は20~30%程度短かい周期となっている(○印との比較)。したがって、実際の極慣性モーメントが既知の場合は、その値と式(6)₂で評価した I_P との比をルート倍して式(7)の T に乗じる必要がある。なお、ケーブルの振動数との関係を論じる際には、この点を念頭にいった考察を行なう。

(2) H形塔 文献6)では、H形塔をもつ斜張橋の固有周期算定式が与えられている。勿論、その算定式を用いれば、A形塔の場合と同様にしてH形塔をもつ斜張橋の固有周期の予測が可能となる。本文では、両形状の差を簡単に表示するために、両者の動特性の差を説明しつつ、H形塔の固有周期をA形塔の固有周期に係数倍する形で予測する。

塔形状をH形状に変更すると、全体のねじれ剛性の低下に起因して周期が長くなる。また、1次の振動モード形も変化する。つまり、塔柱がそれぞれ逆方向に振動し、側径間の桁にも振動が生じる。まず、全体のねじれ剛性の低下については、 $\gamma_{CG,J}^{(9)}$ (ケーブルと桁の純ねじれの剛比パラメータ：付録参照)に応じて、H、A形塔での ξ_{MAX} の比が与えられている。それを図-5に示す。桁の振動モード形については、H形塔では側径間のモード値がA形塔の場合より大きくなるものの、箱断面を前提とすればその値は小さい。そのため、桁にモードが生じることによる振動数の変化は小さい(最大1000m程度の斜張橋を考えてもその影響は小さい)。また、塔のモード値であるが、この影響を特定するには困難を伴う。そこで、いくつかの試算を行いその結果を参照して、A形塔に対して約5%の周期の上昇を仮定することとした。

したがって、H形塔に変更すると、図-5で示されるねじれ角の比をルート倍し、さらに5%増した値で以て固有周期を概略予測する。具体的には、箱桁高さを $3m$ とし、また死荷重強度を $18tf/m$ と仮定して $\gamma_{CG,J}$ を計算した。その結果が同じく図-4に示される。この場合も、周期は幅をもって与えられるが、A形塔の場合と同様である。

図中にH形塔を有する実橋(但しダブルデッキートラス桁)の1次固有周期を●印で示す。実橋との比較では、本評価式が周期を短く評価するようである。しかしながら、ねじれ周期の支間に伴う変化の傾向は抑えられていると考える。

また、図-4には我国の吊橋の固有周期¹⁰⁾が示される。これより、斜張橋のねじれ周期が吊橋に比してかなり短いことがわかる。

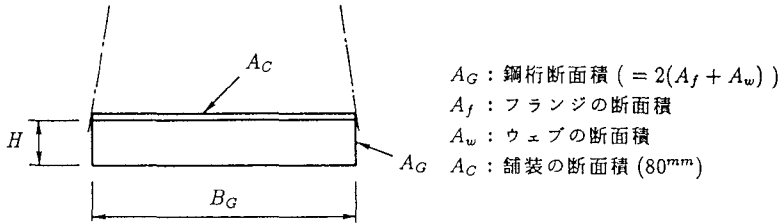


図-3 閉断面桁

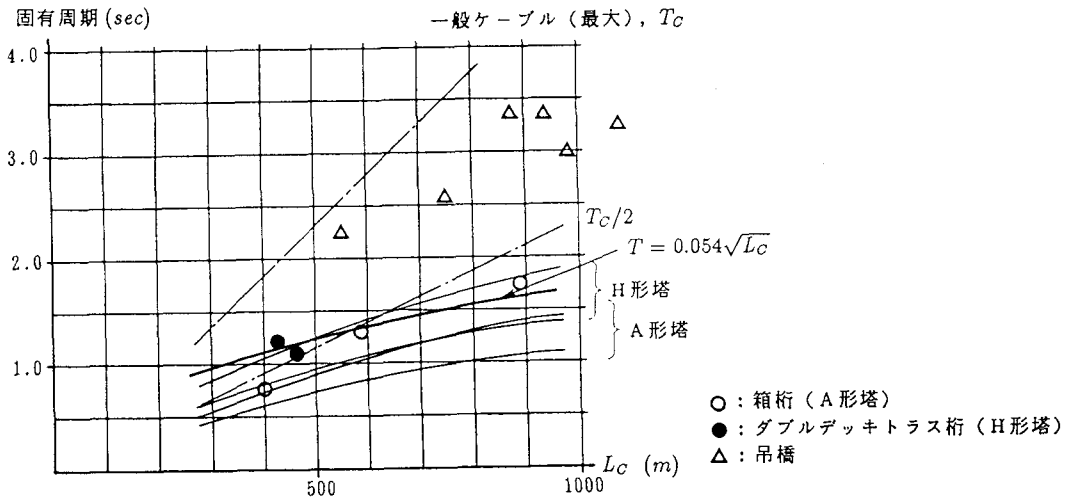


図-4 桁 (閉断面) のねじれ固有周期とケーブルの固有周期

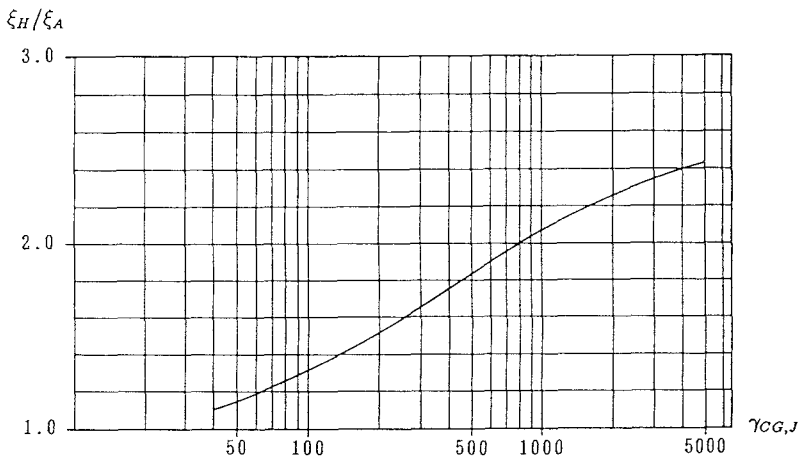


図-5 H, A 形塔の最大ねじれ角の比

4-2 開断面桁

(1) A形塔 図-6 に示す開断面桁について、4-1 と同様の手順で検討を行なう。このとき、いくつかの断面を対象に計算を行い、断面諸元を大略以下のように仮定した。

$$\begin{aligned}
 A_{eq} &= A_G + \frac{\gamma_c}{\gamma_s} A_c \\
 I_P &\doteq \left(\frac{B_G}{12} \right)^2 (1.4 A_{eq}) \\
 W_G &= 1.3 \gamma_s A_{eq}
 \end{aligned} \tag{8}$$

桁のねじれ剛性を無視できることから、 $\zeta_A = 1.1$ として、これらを式(5) に代入すると、

$$T = 0.065 \sqrt{L_c} \tag{9}$$

を得る。結果を図-7 に示す。なお、開断面桁で支間 600m を超える計画には無理が多いと判断して 600m

までを対象とした。

(2) H形塔 4-1(2)で説明した通り、H形塔に変更すると、全体のねじれ剛性の低下とともに、振動モード形も大きく変化する。これらの影響を特定するには困難を伴う。ここでは、A、H形塔での振動モード形の差に起因する側径間の影響を約10%(側径間桁のモード値を中央径間の半分と仮定)、塔の影響を4-2と同様5%と見込む。また、ねじれ変位の増加については、これまでの数値計算結果から、最大ねじれ角で約2.2~2.5倍となる⁹⁾。以上より、全体でA形塔に対して約1.7~1.8倍の固有周期を概略予測する。

図-7に結果を示すが、前述の通り周期には幅をもたせている。図中の○印は実橋の値(ただし、開・閉断面)、また、⊙印は合成2主桁(試設計を含む)の値である。比較する橋梁の数は限られているものの、本評価式で大略予測可能と考える。

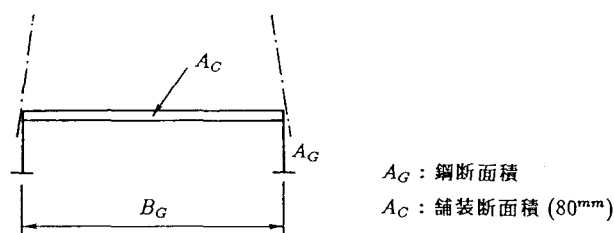


図-6 開断面桁

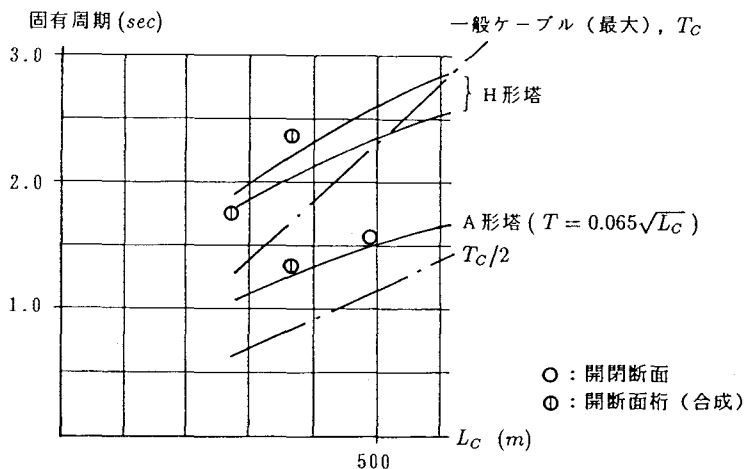


図-7 桁(開断面)のねじれ固有周期とケーブルの固有周期

4-3 ケーブルの振動数との比較

箱断面桁を対象とした図-4に、また開断面桁を対象とした図-7にケーブルの振動数をあわせ示す。

まず、箱断面の場合について考察する。ケーブルの最大(最上段ケーブル)の1次周期は桁のねじれ1次周期よりかなり長いため、中段から下段ケーブルについて両者の振動数の一致が考えられる。また、2:1の振動数の関係については、上段から中段の範囲のケーブルで成立する可能性が大きいといえる。

次に、開断面については、H形塔の場合、支間が400~600mで上段ケーブルを中心に振動数が一致する可能性が大きい。逆に支間が短くなるとその可能性が少なくなる。一方、2:1の振動数の関係は低次の振動では生じにくいと考えられる。A形塔の場合、ねじれ振動モード形が中央径間の中央部にのみ値を持つことに注意する必要がある(つまり、中央径間側の上段部のケーブルとのみ連成する)。これより、支間長が200~400mの範囲では共振の可能性があるといえる。一方、2:1の振動数の関係は桁1次振動では生じにくいといえる。

以上のように、ねじれ振動に関しては、低次の振動に対して構造形態、支間に応じて、1:1 また 2:1 の振動数の関係が現れることが明らかになった。とくに、2:1の振動数の関係は、桁に開断面を採用するとねじれ周期が長くなることに起因して生じにくくなる。むしろ、箱桁とかトラス桁のように桁ねじれ剛性の大きい場合に生じやすいといえる。

5. 桁の曲げ、ねじれ1次振動数比の関係

桁の鉛直曲げとねじれ(A形塔)の1次固有周期の算定式⁴⁾⁵⁾より、両者の振動数比(ω_t/ω_b)の評価式として以下の式を得る。その際、 $n_h=5.0$ 、中央径間長/側径間長= $n_{cs}=2.3$ 、 $\omega=0.2$ を仮定している。

$$\frac{\omega_t}{\omega_b} = 2.1 \sqrt{\frac{1 + 5.6\alpha}{\zeta_A}} \quad (10)$$

ここで、 ω_t は桁のねじれ1次振動数、 ω_b は曲げ1次振動数、 α は文献4)で定義されるが、側径間最上段ケーブルの設計張力のうち、活荷重の占める割合(<1.0)である。

箱桁について、いくつかの断面を仮定して計算を行なうと、A形塔の場合、幅員に応じて6から2車線で、4~5程度となり、H形塔の場合でも3~5程度とかなり大きな値が得られた。なお、前述の通り本評価式は極慣性モーメントを小さく評価している可能性があり、したがって実橋に比して振動数比を多少大きく評価している可能性がある。また、我国の吊橋でのこの値は1.6~2.1である¹⁰⁾。

開断面の場合でも同様の検討を行なうと、A形塔で3~3.5、H形塔では1.5~2.0程度と予測される。これより、H形塔で開断面を有する斜張橋の振動数比は吊橋に近いと言える。

なお、側径間内に中間橋脚を設けると、A形塔ではねじれ振動数の変化は小さいものの、曲げ振動数が高くなり振動数比は小さくなる。H形塔では、曲げ、ねじれ振動数ともに中間橋脚を設けない場合に比して高くなる。本文では中間橋脚の影響は考慮されていない。

6. まとめ

斜張橋の桁1次振動数(周期)を、支間長、塔形状(AまたはH形状塔)、桁断面形式(開または開断面桁)といった基本的な設計パラメータを用いて予測した。また、ケーブルの1次振動数(周期)の予測を行い、両者の比較から、1:1 また 2:1 振動数比の可能性について検討を行った。さらに、桁の曲げ、ねじれの振動数比についても検討を行った。

本検討より得られた結果を要約すると以下の通りとなる。

- 桁の曲げ振動数とケーブルの振動数に着目すると、支間、桁断面形式にかかわらず両者が一致する(線形共振)可能性は少ない。また桁振動数とケーブル振動数の関係が2:1となる可能性はまったくないことを明らかにした。但し、ダブルデッキトラス桁や側径間に中間橋脚をもつ箱断面桁の斜張橋では、1次を除く低次の振動数とケーブルの振動数が一致する可能性がある。
- 桁のねじれ振動数とケーブルの振動数に着目すると、支間長、塔形状、桁断面形式といった前述のパラメータの組合せに応じて、1:1、2:1の関係が生じることを明らかにした。これより、桁、ケーブル間の連成振動系はねじれ、それも比較的 low 次のねじれ振動に対して意味をもつことになる。
- 桁の曲げ、ねじれの振動数比を前述のパラメータに応じて明らかにした。そして、箱断面桁(トラス桁はもとより)を採用すれば、長支間領域においても吊橋に比してかなり高い振動数比が得られることを明らかにした。この理由として、斜張橋のねじれ周期がかなり短い点があげられる。これは、吊橋と異なりケーブルの回転慣性への寄与が小さく、2面吊ケーブルのねじれ剛性への寄与が大きいためである。

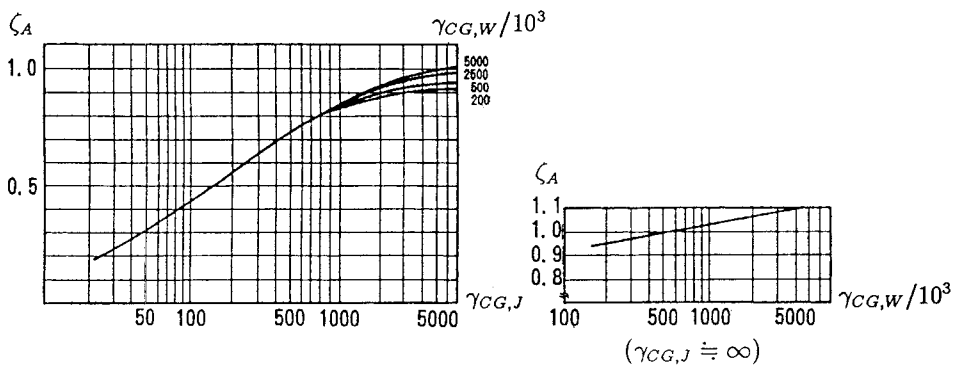
斜張橋はその形態がバリエーションに富む(設計変数が多く設計自由度が高い)こと、また長大橋での実績もまだまだ少ないことを考えると、本文で示した主要パラメータを考慮した予測は今後の計画に有益と考える。

あとがき

本検討の範囲では、桁の曲げ、ねじれ1次振動のみに着目している。この他に、桁の水平(横曲げ)振動数、塔単独の振動数とケーブルの振動数の関係を調査する必要があると考える。

2:1の振動数比については、これまで実橋での発現の報告は見あたらない。パラメトリック振動の発現は、振動数の関係以外に励振力、減衰が関係しており、今後実橋での調査が必要と考えている。

付録



係数 ζ_A 算定図

$\gamma_{CG,J}$: ケーブルのねじれ剛性(K)⁹⁾と桁の純ねじれ剛性(GJ)との比($=KB_G^2/(GJ/L_c)$)

$\gamma_{CG,W}$: ケーブルのねじれ剛性(K)⁹⁾と桁のそりねじれ剛性(EI_W)との比($=KB_G^2/(EI_W/L_c^3)$)

参考文献

- 1) 藤野陽三：構造物の制振対策(土木分野)、日本風工学会誌、No.44、1990
- 2) H.E.Langso and O.D.Larsen:Generating Mechanisms for Cable Stay Oscillations at the Farø Bridges、Proc. of International Conference on Cable-Stayed Bridges、1987
- 3) 藤野陽三、P.Warnitchai and B.M.Pacheco：ケーブル・はりモデルを用いた斜張橋の内部共振に関する実験と解析、土木学会論文集、No.432/I-16、1991
- 4) ボローチン(近藤誠治、中田和夫訳)：弾性系の動的安定、コロナ社、1972
- 5) 長井正嗣、佐野信一郎、小松貴雄：斜張橋の曲げ1次固有周期の算定とその性状に関する検討、土木学会構造工学論文集、Vol.36A、1990
- 6) 長井正嗣、佐野信一郎、大鳥靖樹、川畑治：斜張橋のねじれ1次固有周期の算定とその性状に関する一検討、土木学会構造工学論文集、Vol.37A、1991
- 7) N.J.Gimsing(伊藤學監訳)：吊形式橋梁－計画と設計－、建設図書、1990
- 8) (社)建設コンサルタント協会：斜張橋の実績調査報告、1982
- 9) 長井正嗣、佐野信一郎、大鳥靖樹、小松貴雄：斜張橋のねじれ最大変位の算定と変形特性に関する検討、土木学会構造工学論文集、Vol.37A、1991
- 10) 本州四国連絡橋特集、橋梁と基礎、Vol.18、No.8、1984

(1991年9月30日受付)