

吊橋の風圧による横座屈

竹 間 弘 *
岡 内 功 **

1 まえがき

長大スパン吊橋が風圧をうけて横座屈を生ずる現象は Tacoma 橋の落橋事故に関連して、東大平井教授が最初に注目し指摘されたものである。¹⁾ 平井教授は吊橋の捩れ振動の安定性を論じて、その振動の安定限界が横座屈の基礎式から求められる限界値と一致することにより、横座屈現象の重要性を主張された。その後、この点に関して静的実験および風洞実験がいくつか試みられ、実験的検討が進められている。²⁾

ところで、吊橋の横座屈問題に関する基礎式を正面から解いて行くことは、複雑な境界条件あるいは荷重条件のもとでは困難なことが多い。そこで、今回エネルギー法により、二三の吊橋形式の横座屈現象に対する限界風速を、近似的に求めて見た。もともと、この問題に対するエネルギー法の適用は Vlasov 氏らが既に行っているところであるが、³⁾ 本文は、曲げおよび捩れ変形を起した際のポテンシャルエネルギーを求め、Ritz の方法により各種吊橋形式の限界風速を定めて若干の考察を行ったものである。

2 吊橋の横座屈変形におけるポテンシャルエネルギー

吊橋補剛桁に風が吹きつけ、その風圧により補剛桁が図-1のように横座屈を起す場合、系のポテンシャルエネルギーは次のようになる。

a) 補剛桁の歪エネルギー : A_1 ,

補剛桁の曲げ剛性、捩れ剛性、曲げ捩れ剛性をそれぞれ EI , KG , EC_w とすれば、補剛桁の歪エネルギー A_1 は、

$$A_1 = \frac{EI}{2} \int_L (\tau'')^2 dZ + \frac{EC_w}{2} \int_L (\varphi'')^2 dZ + \frac{KG}{2} \int_L (\varphi')^2 dZ$$

- 1) 平井 敦 ; 吊橋の捩れ振動に対する安定性について
土木学会誌 Vol. 28. No. 9 (1942)
- 2) 平井敦ほか ; 若戸大の耐風安定性に関する実験的研究
日本道路公団報告 (1960)
平井敦ほか ; 吊橋に対する風洞実験について
第10回橋梁、構造工学研究発表会(1963)など
- 3) V. Z. Vlossov ; Thin-Walled Elastic Beams,
Second Edition. 1958

* 中央大学理工学部

** 同上

b) ケーブルの歪エネルギーおよび位置エネルギー : A_2

ケーブルの死荷重による張力の水平成分を片側ケーブル当り H とすれば、ケーブルの歪エネルギーと位置エネルギーの和 A_2 は、

$$A_2 = -H \int_L \tau'' \tau dZ - \frac{Hb^2}{4} \int_L \tau'' \tau dZ$$

$$+ \frac{E_c A_c}{LE} \frac{64f^2}{\ell^4} \left[\left(\int_L \tau dZ \right)^2 \right]$$

$$+ \frac{b^2}{4} \left(\int_L \varphi dZ \right)^2 \quad]$$

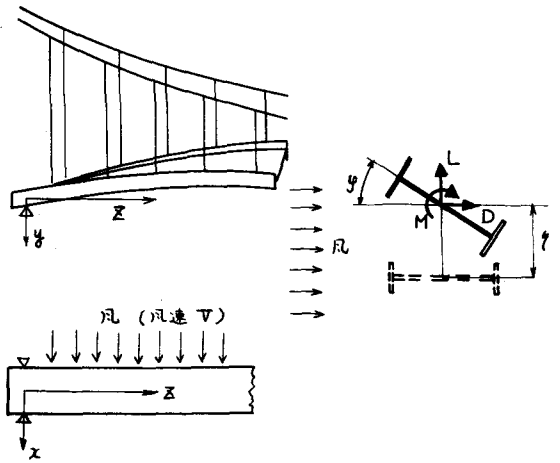


図 - 1

c) 荷重の位置エネルギー : A_3

吊橋補剛桁に作用する風力は周知のとおり

揚力 L 、抗力 D および弾性中心に関するモーメント M に分けられるが (図-1)、これらはそれぞれ補剛桁単位長当り次のように表わされる。

$$L = C_l p b = S p b \varphi$$

$$D = C_d p b$$

$$M = C_m p b^2 = S_t p b^2 \varphi$$

ここで $S = \frac{dC_l}{d\varphi}$, $S_t = \frac{dC_m}{d\varphi}$ であり, $p = \frac{\rho V^2}{2}$ である。

これらの外力のなす仕事 A_3 は、

$$A_3 = - \frac{S p b}{2} \int_L \varphi \tau dZ + \frac{S_t p b^2}{2} \int_L \varphi^2 dZ + \int_L \delta \eta e \tau'' \varphi dZ$$

最終項のうち $\delta \eta e$ は抗力 D による補剛桁に作用する水平面内の曲げモーメントである。

以上によつて、吊橋全体のポテンシャルエネルギー Π は次のようになる。

$$\Pi = A_1 + A_2 - A_3$$

$$= \int_L \left[\frac{EI}{2} (\tau'')^2 + \frac{EC_w}{2} (\varphi'')^2 + \frac{KG}{2} (\varphi')^2 \right] dZ$$

$$- \int_L \left[H \tau'' \tau + \frac{Hb^2}{4} \varphi'' \varphi \right] dZ + \frac{E_c A_c}{L} \frac{64f^2}{\ell^4} \left[\left(\int_L \tau dZ \right)^2 + \frac{b^2}{4} \left(\int_L \varphi dZ \right)^2 \right]$$

$$- \int_L \left[\frac{S_t p b^2}{2} \varphi^2 + \delta \eta e \tau'' \varphi - \frac{S p b}{2} \tau \varphi \right] dZ \dots \dots (1)$$

(1)式で表わされる Π が極小となる条件から座屈風速が定められる。

3 単径間吊橋の限界風速

前に述べたように Ritz の方法により限界風速を求めることとして、図-2 のような単径間吊橋の場合を最初に取り上げる。

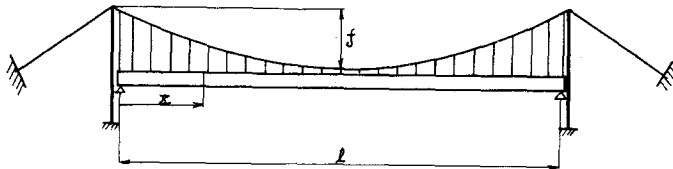


図 - 2

この吊橋補剛桁の境界条件を満足する変形 τ , φ を次のようにおく。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= A \sin \lambda Z \\ \varphi &= B \sin \lambda Z \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

ここで $\lambda = \frac{n\pi}{\ell}$ であり、A, B は任意定数である。

また抗力 D による曲げモーメント ηr_e は

$$\eta r_e = \frac{(\ell - Z) Z}{2} C_d p b \dots\dots (3)$$

となる。

先づ逆対称変形の場合を考えることとして、

$$\lambda = \frac{2n\pi}{\ell}, \quad (n = 1, 2, \dots\dots) \text{ とすれば,}$$

$\int_0^\ell \tau dZ = \int_0^\ell \varphi dZ = 0$ であるから、(2), (3) を (1) に代入すれば、

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{\ell}{2} \left[\frac{EI}{2} \lambda^4 A^2 + \frac{EC_w}{2} \lambda^4 B^2 + \frac{KG}{2} \lambda^2 B^2 \right. \\ &\quad + H \lambda^2 A^2 + \frac{Hb^2}{4} \lambda^2 B^2 + \frac{S_p b}{2} AB \\ &\quad \left. - \frac{S_t p b^2}{2} B^2 + \kappa C_d p b AB \right] \\ &= \frac{\ell}{2} \left[\lambda^4 EJ \frac{A^2}{2} \lambda^2 \overline{KG} \frac{B^2}{2} - S_t p b^2 \frac{B^2}{2} + \nu p b AB \right] \dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、

$$EJ = EI + \frac{2H}{\lambda^2} \left\{ \right.$$

$$\left. \begin{aligned} \overline{KG} &= EC_w \lambda^2 + KG + \frac{Hb^2}{2} \\ \nu &= \kappa Cd + \frac{S}{2} \\ \kappa &= \frac{1}{4} \left(\frac{\lambda^2 \ell^2}{3} + 1 \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

Π が極小であるようA, Bを定めるためには

$$\frac{\partial \Pi}{\partial A} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial B} = 0$$

したがつて,

$$\frac{\partial \Pi}{\partial A} = \frac{\ell}{2} \left[\lambda^4 EJ \cdot A + \nu pb B \right] = 0$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial B} = \frac{\ell}{2} \left[\nu pb \cdot A + (\lambda^2 \overline{KG} - St pb^2) B \right] = 0$$

の同次連立方程式が得られ、ここでAおよびBが恒等的に0でない条件から次の座屈条件式が得られる。

$$\begin{vmatrix} \lambda^4 EJ & \nu pb \\ \nu pb & \lambda^2 \overline{KG} - St pb^2 \end{vmatrix} = 0 \quad \dots\dots (6)$$

(6)式より、 p の限界値として

$$\begin{aligned} pk &= \sqrt{\frac{4\nu^2 b^2 \lambda^6 EJ \cdot \overline{KG} + St^2 b^4 \lambda^8 EJ^2 - St b^2 \lambda^4 EJ}{2 \nu^2 b^2}} \\ &= \frac{\sqrt{4\nu^2 \frac{1}{b^2 \lambda^2} \frac{\overline{KG}}{EJ} + St^2 - St}}{2 \nu^2} EJ \cdot \lambda^4 \quad \dots\dots (7) \end{aligned}$$

したがつて、限界風速 V_k は

$$V_k^2 = \frac{\sqrt{4\nu^2 \frac{1}{b^2 \lambda^2} \frac{\overline{KG}}{EJ} + St^2 - St}}{\rho \nu^2} EJ \cdot \lambda^4 \quad \dots\dots (8)$$

より求められる。

今 St の影響は小さいとして、無視すれば

$$V_k^2 = \frac{2\lambda^3}{\nu \rho b} EJ \cdot \overline{KG} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となり、これに $\lambda = \frac{2\pi}{\ell}$ を代入すれば平井教授が与えられた限界風速の式

$$V_k^2 = \frac{4\pi\sqrt{128}}{C_d\mu\rho b\ell^3} \sqrt{EJ \cdot \overline{KG}}$$

と、実際上ほとんど一致した値となる。

次に対称変形の場合を考えると、この場合には

$$\lambda = \frac{(2n-1)\pi}{\ell}, \quad (n=1, 2, \dots)$$

として、(4)式に $n \frac{4}{\lambda^2} (A^2 + \frac{b^2}{4} B^2)$ を付け加えな

ければならない。

ここで

$$n = \frac{E_c A_c}{L_E} \frac{64 f^2}{\ell^4}$$

である。したがって座屈条件式は

$$\begin{vmatrix} \lambda^4 EJ + \frac{16n}{\ell\lambda^2} & \nu pb \\ \nu pb & \lambda^2 \overline{KG} + \frac{4nb^2}{\ell\lambda^2} - St pb^2 \end{vmatrix} = 0$$

となるが、(8)式と同じ形で限界風速に関する式を与えるために、

$$\left. \begin{aligned} (EJ)_h &= EJ + \frac{16n}{\ell\lambda^6} \\ (\overline{KG})_h &= \overline{KG} + \frac{4nb^2}{\ell\lambda^4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

とおく。

(10) 式を用いれば対称変形の場合の限界風速は

$$V_k^2 = \frac{\sqrt{4\nu^2 \frac{1}{b^2\lambda^2} \frac{(\overline{KG})_h}{(EJ)_h} + St^2} - St}{\rho \nu^2} (EJ)_h \cdot \lambda^4 \dots\dots (11)$$

として与えられる。

4 Tower stay を持つ吊橋の限界風速

3, に述べた方法と同様にして、図-3のようにTower stay をもつ吊橋の場合の限界風速を検討して見る。

stay の補剛桁への取付点を支点から a の距離にあるとして、その長さを S, 伸び剛性を $E_s A_s$ であるとする。

今 stay 取付点における補剛桁の変位を $\tau a, \varphi a$ とすれば、stay の伸び ΔS および張力の増分 T は、

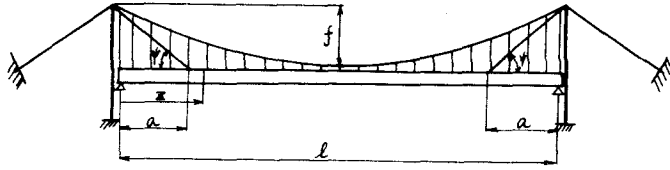


図 - 3

$$\Delta S = \left(\tau a \pm \frac{b}{2} \varphi a \right) \sin \psi$$

$$T = \frac{E_s A_s}{S} \sin \psi \left(\tau a \pm \frac{b}{2} \varphi a \right)$$

となつて、全部の stay における歪エネルギー A_s は、

$$\begin{aligned} A_s &= \sum \frac{T \Delta S}{2} = \frac{2 E_s A_s}{S} \sin \psi \left(\tau a^2 + \frac{b^2}{4} \varphi_a^2 \right) \\ &= 2 R_a \left(\tau a^2 + \frac{b^2}{4} \varphi_a^2 \right) \dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

となり、この A_s が(4)式の Π に加わることとなる。

ここで、 $R_a = \frac{E_s A_s}{S} \sin^2 \psi$ である。

ところで、stay をもつ吊橋の座屈変形を自由振動波形で近似することとして、次のようにおく、

$$\left. \begin{aligned} \tau &= A \left(\sin \lambda Z + t \sin 2 \lambda Z \right) \\ \varphi &= B \left(\sin \lambda Z + t \sin 2 \lambda Z \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (13)$$

ここで簡単のため逆対称変形の場合のみを考え

$\lambda = \frac{2 \pi}{\ell}$ とすれば、エネルギー式は

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{\ell}{2} \left[\frac{EI}{2} \lambda^4 (1 + 16 t^2) A^2 + \frac{EC_w}{2} \lambda^4 (1 + 16 t^2) B^2 \right. \\ &\quad + \frac{KG}{2} \lambda^2 (1 + 4 t^2) B^2 + H \lambda^2 (1 + 4 t^2) A^2 \\ &\quad + \frac{Hb^2}{4} \lambda^2 (1 + 4 t^2) B^2 + \frac{S p b}{2} (1 + t^2) A B \\ &\quad \left. - \frac{S t p b^2}{2} (1 + t^2) B^2 + C d p b(\kappa)_s A B \right] \\ &\quad + 2 R_a \left(\tau a^2 + \frac{b^2}{4} \varphi_a^2 \right) \dots \dots \dots (14) \end{aligned}$$

(14) 式から前と全く同様にして限界風速を与える式を求めれば、次のように(8)、(11)式と同形のものが得られる。

$$V_k^2 = \frac{\sqrt{4(\nu)_s^2 \frac{1}{b^2 \lambda^2} \frac{(KG)_s}{(EJ)_s} + (St)_s^2 - (St)_s}}{\rho (\nu)_s^2} (EJ)_s \lambda^4 \quad \dots (15)$$

ここで、

$$(EJ)_s = EI(1 + 16t^2) + \frac{2H}{\lambda^2} (1 + 4t^2) + \frac{8R_a}{\ell \lambda^4} m$$

$$(KG)_s = EC_w \lambda^2 (1 + 16t^2) + KG (1 + 4t^2) + \frac{Hb^2}{2} (1 + 4t^2) + \frac{2b^2}{\ell \lambda^2} R_a m$$

$$(\nu)_s = \frac{S(1+t^2)}{2} + (\kappa)_s C_d$$

$$(\kappa)_s = \frac{1}{4} \left[\left(\frac{\lambda^2 \ell^2}{3} + 1 \right) + t^2 \left(\frac{4\lambda^2 \ell^2}{3} + 1 \right) \right]$$

$$(St)_s = St(1 + t^2)$$

$$m = \sin^2 \lambda a + 2t \sin \lambda a \sin 2\lambda a + t^2 \sin^2 2\lambda a$$

5 連続補剛吊橋の限界風速

最近、連続補剛吊橋が、鉄道用吊橋として好適であるなどの観点から新たな注目をあびているが、次に図-4のような吊橋に全径間一様な風荷重が作用する場合の横座屈に対する限界風速を求めた結果を示す。

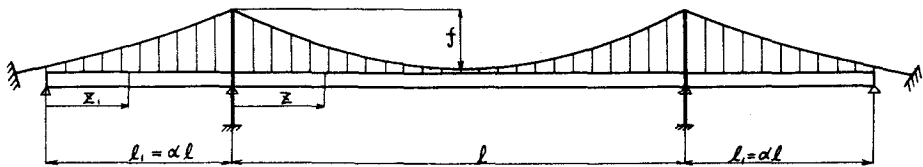


図 - 4

連続補剛吊橋の横座屈変形を、Bleich にならつて連続パリの曲げ座屈変形で近似する。すなわち、逆対称変形の場合について、

側径間に対して

- 4) Bleich 他； The Mathematical Theory of Vibration in Suspension Bridges (1950)

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{A}{N} \left(\frac{\sin \lambda Z_1}{\sin \lambda \ell_1} - \frac{Z_1}{\ell_1} \right) \\ \varphi &= \frac{B}{N} \left(\frac{\sin \lambda Z_1}{\sin \lambda \ell_1} - \frac{Z_1}{\ell_1} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

主径間に対して

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{A}{N} \left\{ \frac{\sin \lambda \left(\frac{\ell}{2} - Z \right)}{\sin \frac{\lambda}{2} \ell} - \frac{2}{\ell} \left(\frac{\ell}{2} - Z \right) \right\} \\ \varphi &= \frac{B}{N} \left\{ \frac{\sin \lambda \left(\frac{\ell}{2} - Z \right)}{\sin \frac{\lambda}{2} \ell} - \frac{2}{\ell} \left(\frac{\ell}{2} - Z \right) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots (18)$$

の変形を行うものと仮定する。(17), (18)式で示される τ , φ は境界条件,

$$Z_1 = 0 \text{ および } Z_1 = \ell_1 \text{ で } \tau = \varphi = 0$$

$$Z = 0 \text{ および } Z = \frac{\ell}{2} \text{ で } \tau = \varphi = 0$$

を満足する。また λ は、中間支点上の連続条件を満足するように定められるが、結局、

$$\frac{\lambda}{\tan \lambda \ell_1} + \frac{\lambda}{\tan \frac{\lambda}{2} \ell} - \frac{1}{\ell_1} - \frac{2}{\ell} = 0 \dots\dots\dots (19)$$

の方程式の根として与えられる。

ところで、抗力による曲げモーメント γ_{re} は

側径間に対して

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{re} &= \left\{ \frac{Z_1 (\alpha \ell - Z_1)}{2} - \frac{k \ell}{\alpha} Z_1 \right\} C d p b \\ \gamma_{re} &= \frac{1}{2} (\alpha \ell Z_1 - Z_1^2) C d p b \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

主径間に対して

$$= \left\{ \frac{Z (\ell - Z)}{2} - k \ell^2 \right\} C d p b$$

$$= \left\{ b \ell^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\ell}{2} - Z \right)^2 \right\} C d p b$$

であつて、ここで

$$a = \alpha - \frac{2k}{\alpha}$$

$$b = \frac{1}{4} - k$$

$$k = \frac{\alpha^3 + 1}{4(2\alpha + 3)}$$

である。

以上に示した τ , φ , θ を(1)式に代入して, Π を計算すれば, 結局,

$$\begin{aligned} \Pi = \ell \left\{ \frac{EI}{2} \lambda^4 A^2 + \frac{EC_W}{2} \lambda^4 B^2 + \frac{KG}{2} \lambda^2 B^2 \right. \\ + H\lambda^2 A^2 + \frac{Hb^2}{4} \lambda^2 B^2 + \frac{SCpb}{2} AB \\ \left. - \frac{S_t Cpb^2}{2} B^2 + (\kappa)_c Cdpb AB \right\} \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

となる。

ここで

$$C = 1 + \frac{1 + 2\alpha}{3N^2}$$

$$N^2 = \frac{\alpha}{\sin^2 \lambda \ell_1} + \frac{1}{2 \sin \frac{\lambda \ell}{2}} - \frac{1}{\lambda^2 \ell \ell_1} - \frac{2}{\lambda^2 \ell^2}$$

$$(\kappa)_c = \frac{D}{N^2}$$

$$\begin{aligned} D = a \left(\frac{\lambda^2 \alpha^2 \ell^2}{\sin^2 \lambda \ell_1} + \frac{2}{\sin \lambda \ell_1} + \frac{\lambda \alpha \ell}{2} - \frac{2}{\tan \lambda \ell_1} - \frac{7}{4} \right. \\ + b \left(\frac{\lambda^2 \ell^2}{\sin^2 \frac{\lambda}{2} \ell} + \frac{\lambda \ell}{\tan \frac{\lambda}{2} \ell} - 4 \right) \\ - \left(\frac{\alpha \lambda^2 \ell^2}{6 \sin^2 \lambda \ell_1} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\alpha^2 \lambda \ell}{2 \tan \lambda \ell_1} - \frac{23}{4} \frac{1}{\lambda \ell} - \frac{5}{2} \alpha + \frac{6}{\alpha \lambda^2 \ell^2} \right) \\ - \left(\frac{\lambda^2 \ell^2}{48 \sin^2 \frac{\lambda}{2} \ell} - \frac{1}{8} + \frac{3}{16} \lambda \ell - \frac{47}{8} \frac{1}{\lambda \ell} - \frac{5}{4} + \frac{12}{\lambda^2 \ell^2} \right) \end{aligned}$$

(21) 式を用いて, 前と同様に限界風速を求めれば,

$$V_k^2 = \frac{\sqrt{4(\nu)_c^2 \frac{1}{b^2 \lambda^2} \frac{KG}{EJ} + (St)_c^2 - (St)_c}}{\rho(\nu)_c^2} \cdot EJ \cdot \lambda^4 \dots (22)$$

ここで

$$(\nu)_c = \frac{SC}{2} + (\kappa)_c Cd$$

$$(St)_c = StC$$

である。

6 数値的検討

前述の吊橋各種形式の風圧による横座屈の限界風速は、いずれも次の形で表わすことができる。

$$V_k^2 = \frac{\sqrt{4(\nu)^2 \frac{1}{b^2(\lambda)^2} \frac{\overline{KG}}{EJ} + (St)^2} - (St)}{\rho(\nu)^2} (EJ)(\lambda)^4$$

ここで (EJ) , (\overline{KG}) , (ν) などは、それぞれ形式に応じて表-1 のような内容のものとなる。

上式によれば限界風速に大きく関係する因子として (EJ) , (\overline{KG}) , (ν) , (λ) などが考えられるが、このうち (EJ) , (\overline{KG}) は主として剛性に関係するものであり、 (λ) は座屈波形に関連する数値である。また (ν) は補剛桁断面形状により変化する空気力係数によつて主として支配されるものである。今これらの影響を見るため、若干の実際橋の諸元に基き、前述の各種形式の場合に対する限界風速を計算すると表-2 のようである。

この結果から、断面諸元が単径間の場合と同一であればステイの取付け、あるいは連続補剛桁形式の採用により著しく座屈限界風速の増加を期待できることが知られる。

表 一 1

	单 径 間		Tower Stay	連 続 補 則
	逆 对 称 变 形	对 称 变 形		
(λ)	$\frac{2n\pi}{\ell}$	$\frac{(2n-1)\pi}{\ell}$	$\frac{n\pi}{\ell}$	$\frac{\lambda}{\tan \lambda \ell_1} + \frac{\lambda}{\tan \frac{\lambda}{2} \ell} - \frac{1}{\ell} - \frac{2}{\ell} = 0$ の根
(EJ)	$EI + \frac{2H}{(\lambda)^2}$	$EI + \frac{2H}{(\lambda)^2} + \frac{16n}{(\lambda)^6}$	$EI(1+16t^2) + \frac{2H}{(\lambda)^2}(1+4t^2) + \frac{8R_a}{\ell(\lambda)^4} m$	$EI + \frac{2H}{(\lambda)^2}$
(\overline{KG})	$EC_w(\lambda)^2 + KG + \frac{Hb^2}{2}$	$EC_w(\lambda)^2 + KG + \frac{Hb^2}{2} + \frac{4nb^2}{\ell(\lambda)^4}$	$EC_w\lambda^2(1+16t^2) + KG(1+4t^2) + \frac{Hb^2}{2}(1+4t^2) + \frac{2b^2R_a}{\ell(\lambda)^2} m$	$EC_w(\lambda)^2 + KG + \frac{Hb^2}{2}$
(ν)	$(\kappa) Cd + \frac{S}{2}$	$(\kappa) Cd + \frac{S}{2}$	$(\kappa) Cd + \frac{S}{2}(1+t^2)$	$(\kappa) Cd + \frac{S}{2} C$
(κ)	$\frac{1}{4}(\frac{\lambda^2 \ell^2}{3} + 1)$	$\frac{1}{4}(\frac{\lambda^2 \ell^2}{3} + 1)$	$\frac{1}{4}(\frac{\lambda^2 \ell^2}{3} + 1) + t^2(\frac{4\lambda^2 \ell^2}{3} + 1)$	$\frac{D}{N^2}$
(St)	St	St	St(1+t^2)	StC

表 — 2

		单 位	A 橋	B 橋	C 橋	D 橋	E 橋
実 橋 諸 元	l	m	853	1141	988	1000	367
	l_1	m	335	548	305	400	89
	f	m	85.3	105.2	98.8	80	35
	b	m	18.3	20.7	22.8	34	19.6
	EI	$10^8 - t\phi m^2$	1.193	1.680	0.254	3.397	0.189
	KG	$10^7 - t - m^2$	0.995	1.706	3.240	4.817	0.160
	EC_w	$10^{10} - t - m^4$	0.26	0.91	0.05	5.56	0.14
	H	$10^4 t$	0.688	1.160	0.666	3.023	0.366
	Cd	—	0.26	0.35	0.08	0.31	0.25
	St	—	0	-0.1	2.6	0	-0.13
S	—	1.54	0	4.9	0.29	1.49	
单 径 間 (逆 对 称 变 形)	(λ)	$10^{-3} 1/m$	7.37	5.51	6.36	6.28	17.12
	(EJ)	$10^8 t - m^2$	3.73	9.33	3.55	18.71	0.44
	(\overline{KG})	$10^7 t - m^2$	1.124	1.982	3.415	6.784	0.272
	$(\overline{KG}) / (EJ)$	10^{-2}	3.02	2.12	9.63	3.63	6.20
	(ν)	—	1.690	1.239	2.733	1.242	1.612
	V_k	m/sec	116	121	76	183	171

		単 位	A 橋	B 橋	C 橋	D 橋	D 橋
単 徑 間 (對 稱 變 形)	(λ)	10^{-3} l/m	3.68	2.75	3.18	3.14	8.56
	(EJ)	10^8 t-m^2	119.4	320.9	186.7	556.1	14.3
	($\overline{\text{KG}}$)	10^7 t-m^2	2.34	4.31	5.67	20.64	1.17
	($\overline{\text{KG}}$)/(EJ)	10^{-2}	0.196	0.134	0.305	0.371	0.819
	(ν)	—	1.049	0.375	2.536	0.478	1.008
	V_k	m/sec	148	249	70	322	280
ス テ イ を も つ 場 合	(λ)	10^{-3} l/m	7.37	5.51	6.36	6.28	17.12
	(EJ)	10^8 t-m^2	498.4	883.6	311.7	1846.8	67.0
	($\overline{\text{KG}}$)	10^7 t-m^2	40.03	54.90	59.07	277.80	24.39
	($\overline{\text{KG}}$)/(EJ)	10^{-2}	0.803	0.621	1.095	1.504	3.639
	(ν)	—	25.83	19.23	13.86	16.10	27.29
	V_k	m/sec	239	218	192	405	445
連 続 補 剛 の 場 合	(λ)	10^{-3} l/m	11.95	8.04	7.50	10.11	21.11
	(EJ)	10^8 t-m^2	2.16	5.27	2.62	9.31	0.35
	($\overline{\text{KG}}$)	10^7 t-m^2	1.147	2.013	3.416	7.132	0.294
	($\overline{\text{KG}}$)/(EJ)	10^{-2}	5.32	3.82	13.03	7.66	8.33
	(ν)	—	1.431	0.545	3.112	0.674	1.971
	V_k	m/sec	228	294	82	431	206

7 むすび

以上、各種吊橋形式の風圧による横座屈風速の近似値をエネルギー法の適用により求めた結果について述べて来た。しかし、今回は吊橋形式の差異が限界風速に与える影響の検討に主眼をおいたものであつて、前述の限界風速を与える式の精度自体には、たとえば座屈変形の仮定、水平横変位の無視等々に多くの問題が残されていることも否めないことである。これらについては今後さらに検討の下次の機会に報告致したいと考えている。終りに本文を草するに当り、御指導と御注意を導いた東大平井教授、伊藤助教授、大学院学生宮田利雄氏に深甚の謝意を表する次第である。