

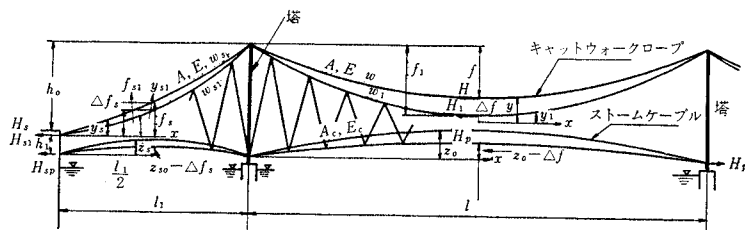
長大吊橋に用いるキャットウォークの一試案と、 その風荷重応力および温度変化の影響について

EFFECTS OF WIND LOAD AND TEMPERATURE CHANGE ON THE STRESSES OF CAT-WALK OF A LONG SPAN SUSPENSION BRIDGE

村上 巳里*・三田村 武**
By Misato Murakami and Takeshi Mitamura

要 旨 吊橋架設に用いるキャットウォークはその自重が小さいため風荷重の影響を大きく受ける。特に長大吊橋のキャットウォークには耐風設計上特別な考慮が必要である。風荷重に対するキャットウォークの剛性はその水平張力に關係するが、これを増大するためには、そのサグが制限されているため、自重を増すかまたはプレテンションを導入するかである。しかし前者は架設資材の重量が増すとともに風荷重も増大する結果となって有効な方法ではないと考えられるので、本文では後者について検討を行なった。従来外国の長大吊橋（わが国ではまだ長大吊橋の建設例がない）に用いられたキャットウォークは、その設計風速が小さいため、特別な耐風設計がなされた構造ではない。すなわちストーム ケーブルに導入される張力はキャットウォーク ロープのそれにくらべて小さく、吊材は鉛直である。通常長大吊橋のストーム ケーブルのサグは航行船舶の關係より制限され、その形状は比較的フラットなものになるため、それだけストーム ケーブルに大きな張力を導入しなければならない。ここに述べる試案はストーム ケーブルに大きなプレ張力を導入しキャットウォーク ロープを変形させるとともにその張力をも増大させることとし、さらに斜め吊材を用いてキャットウォーク断面を三角形断面にし、その剛性を増すようにした。本文はこのような構造のキャットウォークの風荷重に対する工学的特性を検討するため理論的解析を行なったものである。またキャットウォークの温度変化による変形はケーブル架設作業に大きな影響をあたえる。特に温度変化によるプレテンションの増減はキャットウォークの変形の大きな要因となるのでその理論的解析も行なった。

図-1 プレテンション導入による変形および応力



状および応力

キャットウォークはストーム ケーブルなど含めて、その自重の分布から近似的にカタナリー曲線に架設されるものとし、図-1 に示すような座標を用いれば、中央径間では、

$$y = \frac{H}{w} \cosh \frac{w}{H} x \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$S = \frac{H}{w} \sinh \frac{w}{H} x \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$T = H \cosh \frac{w}{H} x \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。

ただし、 H : キャットウォーク ロープの水平張力 (t)
 w : ロープに沿った自重 (t/m)
 S : ロープ長 (m)
 T : ロープの張力 (t)

である。また $x = \frac{l}{2}$, $y = f + \frac{H}{w}$ より

$$f + \frac{H}{w} = \frac{H}{w} \cosh \frac{wl}{2H} \quad \dots\dots\dots (4)$$

をうる。

ただし、 f : プレテンション導入前のサグ (m)
 l : 中央径間長 (m)

である。式 (4) より H および H/w を求めることによって式 (1)~(3) の諸量をうることができる。

一方側径間では、

$$y_s = \frac{H_s}{w_s} \left[\cosh \left(\frac{w_s}{H_s} x + C_1 \right) - \cosh C_1 \right] \quad \dots\dots (5)$$

$$C_1 = \sinh^{-1} \left(\frac{w_s \cdot h_0}{2 H_s \sinh \frac{w_s l_1}{2 H_s}} \right) - \frac{w_s l_1}{2 H_s} \quad \dots\dots (6)$$

1. 考 察

(1) プレテンション導入前のキャットウォークの形

* 正会員 日本道路公団関門架橋調査事務所

** 正会員 (株) 神戸製鋼所市場開発部

$$S_s = \frac{H_s}{w_s} \left[\sinh \left(\frac{w_s}{H_s} l_1 + C_1 \right) - \sinh C_1 \right] \dots\dots (7)$$

となる。

ただし、 h_0 : 塔頂とアンカーの高低差 (m)

l_1 : 側径間長 (m)

およびその他の記号については原則として中央径間に用いた記号にサフィックス s を付したものである。また $x=l_1/2$, $y=f_s$ より

$$H_s = \frac{w_s l_1}{4 \left[\sinh^{-1} \left(\frac{w_s \cdot h_0}{2 H_s \sinh \frac{w_s l_1}{2 H_s}} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{w_s \cdot f_s}{2 H_s \sinh \frac{w_s l_1}{4 H_s}} \right) \right]} \dots\dots (8)$$

をうる。式(8)より H_s または H_s/w_s を求めることによって式(5)~(7)の諸量を求めることができる。

(2) プレテンション導入後のキャットウォークの形状および応力

ストーム ケーブルにプレテンションを導入することによってキャットウォーク ロープに付加荷重が載荷され、そのサグは大きくなる。いまプレテンション導入後の記号にサフィックス 1 を付けると、プレテンション導入後の式は、中央径間では、

$$y_1 = \frac{H_1}{w_1} \cosh \frac{w_1}{H_1} x + C \left. \begin{array}{l} \\ C = \frac{H}{w} - \frac{H_1}{w_1} \end{array} \right\} \dots\dots (9)$$

$$S_1 = \frac{H_1}{w_1} \sinh \frac{w_1}{H_1} x \dots\dots (10)$$

$$T_1 = H_1 \cosh \frac{w_1}{H_1} x \dots\dots (11)$$

となる。

ただし、 w_1 : キャットウォークの自重+付加荷重である。また $x = \frac{l}{2}$, $y_1 = \frac{H_1}{w_1} + f_1$ より

$$f_1 + \frac{H_1}{w_1} = \frac{H_1}{w_1} \cosh \frac{w_1 l}{2 H_1} \dots\dots (12)$$

をうる。キャットウォーク ロープの水平張力はロープの幾何長と理論長が等しいことより求めることができる。水平張力の増分 ($H_1 - H$) によるロープの伸びは $l/2$ について

$$\Delta S = \frac{1}{AE} \int_0^{l/2} \Delta T \cdot ds = \frac{H_1 - H}{AE} \int_0^{l/2} \cosh^2 \frac{w_1}{H_1} x \cdot dx \dots\dots (13)$$

である。したがって $S + \Delta S = S_1$ より

$$H_1 = \frac{2 A E w_1 \left(\frac{H_1}{w_1} \sinh \frac{w_1 l}{2 H_1} - \frac{H}{w} \sinh \frac{w l}{2 H} \right)}{H_1 \left(\sinh \frac{w_1 l}{2 H_1} \cosh \frac{w_1 l}{2 H_1} + \frac{w_1 l}{2 H_1} \right)} + H \dots\dots (14)$$

をうる。

ただし、 A : ロープの断面積 (m^2)

E : ロープの弾性係数 (t/m^2)

である。したがって式(12)より H_1/w_1 を、式(14)より H_1 をうることによって式(9)~(11)の諸量を求めることができる。

一方ストームケーブルはプレテンション導入前においては、

$$z = \frac{4 z_0}{l^2} (l-x)x$$

で示される放物線にキャットウォーク ロープより吊られていて無応力である。キャットウォークのサグを Δf だけ大きくするためには $p = w_1 - w$ の付加荷重をキャットウォークに載荷しなければならない。プレテンション導入後もストームケーブルは近似的に放物線を保持しているとすれば、

$$z = \frac{4}{l^2} (z_0 - \Delta f) (l-x)x \dots\dots (15)$$

で示される。この場合の水平張力は

$$H_p = \frac{p l^2}{8(z_0 - \Delta f)} \dots\dots (16)$$

である。

ただし、 p : $w_1 - w$ (t/m)

z_0 : プレテンション導入前のサグ (m)

Δf : キャットウォークのサグ調整量 (m)

である。ストームケーブルの張力は

$$T_p = H_p \left\{ 1 + 8 \frac{(z_0 - \Delta f)^2}{l^2} \right\} \dots\dots (17)$$

である。

一方側径間では、

$$y_{s1} = \frac{H_{s1}}{w_{s1}} \left[\cosh \left(\frac{w_{s1}}{H_{s1}} x + C_2 \right) - \cosh C_2 \right] \dots (18)$$

$$C_2 = \sinh^{-1} \left(\frac{w_{s1} \cdot h_0}{2 H_{s1} \sinh \frac{w_{s1} l_1}{2 H_{s1}}} \right) - \frac{w_{s1} l_1}{2 H_{s1}} \dots (19)$$

$$S_{s1} = \frac{H_{s1}}{w_{s1}} \left[\sinh \left(\frac{w_{s1} l_1}{H_{s1}} + C_2 \right) - \sinh C_2 \right] \dots (20)$$

となる。

また $x = \frac{l_1}{2}$, $y_{s1} = f_{s1}$ より

$$\frac{w_{s1}}{H_{s1}} = \frac{4}{l_1} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{w_{s1} \cdot h_0}{2 H_{s1} \sinh \frac{w_{s1} l_1}{2 H_{s1}}} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{w_{s1} \cdot f_{s1}}{2 H_{s1} \sinh \frac{w_{s1} l_1}{4 H_{s1}}} \right) \right] \dots\dots (21)$$

をうる。水平張力の増分 ($H_{s1} - H_s$) によるロープの伸びは

$$\Delta S_s = \frac{(H_{s1} - H_s) H_{s1}}{2 A E w_{s1}} \left[\sinh \left(\frac{w_{s1} l_1}{H_{s1}} + C_2 \right) \cosh \left(\frac{w_{s1} l_1}{H_{s1}} + C_2 \right) - \sinh C_2 \cosh C_2 + \frac{w_{s1} l_1}{H_{s1}} \right] \dots\dots (22)$$

であるから、 $S_s + \Delta S_s = S_{s1}$ より

$$H_{s1} = \frac{2AEw_s \left[\frac{H_{s1}}{w_{s1}} \left\{ \sinh \left(\frac{w_{s1}l_1}{H_{s1}} + C_2 \right) - \sinh C_2 \right\} - \frac{H_s}{w_s} \left\{ \sinh \left(\frac{w_s l_1}{H_s} + C_1 \right) - \sinh C_1 \right\} \right]}{H_{s1} \left[\sinh \left(\frac{w_{s1}l_1}{H_{s1}} + C_2 \right) \cosh \left(\frac{w_{s1}l_1}{H_{s1}} + C_2 \right) - \sinh C_2 \cosh C_2 + \frac{w_{s1}l_1}{H_{s1}} \right]} + H_s \dots (23)$$

をうる。式(21)より w_{s1}/H_{s1} を、式(19)より C_2 を、式(23)より H_{s1} を求めることによって式(18)、(20)を解くことができる。ストームケーブルの形状および水平張力は中央径間と同様にして、

$$z_s = \frac{4}{l_1^2} (z_{s0} - \Delta f_s) (l_1 - x)x \dots (24)$$

$$H_{sp} = \frac{p_s l_1^2}{8(z_{s0} - \Delta f_s)} \dots (25)$$

$$T_{sp} = H_{sp} \left\{ 1 + 8 \frac{(z_{s0} - \Delta f_s)^2}{l_1^2} \right\} \dots (26)$$

をうる。ただし $p_s = w_{s1} - w_s$ である。

(3) 風荷重による変形および応力

キャットウォークは風荷重により図-2に示すような変形をすれば、水平力のつりあいより

$$-H_1 \frac{d^2 \delta_1}{dx^2} - (H_p + H_c) \frac{d^2 \delta_2}{dx^2} = W \dots (27)$$

となる。

- ただし、 δ_1 : キャットウォークの変位 (m)
- δ_2 : ストームケーブルの変位 (m)
- H_c : ストームケーブルの変位による張力の増分 (t)
- W_1 : キャットウォークに作用する風荷重 (t/m)
- W_2 : ストームケーブルに作用する風荷重

図-2 (a) プレテンション導入後のキャットウォーク

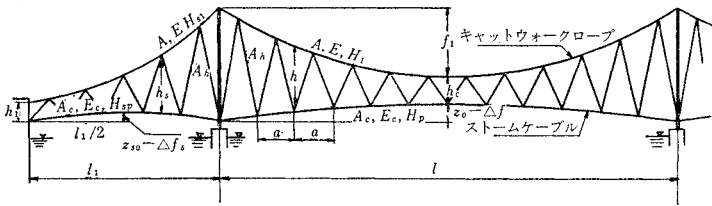
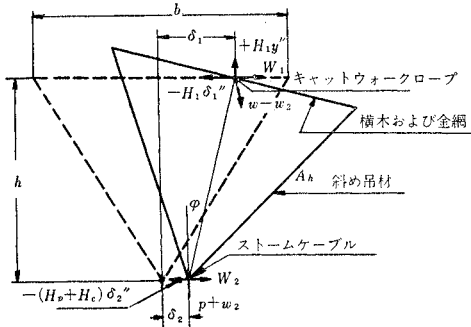


図-2 (b) 風荷重によるキャットウォークの変形



(t/m)
 $W : W_1 + W_2$
である。また幾何学的関係よりキャットウォークのねじれ角は、

$$\varphi = \frac{1}{h} (\delta_1 - \delta_2)$$

$$h = \frac{H_1}{w_1} \cosh \frac{w_1}{H_1} \left(\frac{l}{2} - x \right) - \frac{H_1}{w_1} + h_c \dots (28)$$

$$+ (z_0 - \Delta f) \left\{ 1 - \frac{4}{l^2} (l-x)x \right\}$$

で示される。ねじれモーメントのつりあいより

$$-G \frac{d}{dx} \left(J \frac{d\varphi}{dx} \right) = (W_1 + H_1 \frac{d^2 \delta_1}{dx^2}) h - (p + w_2) h \cdot \varphi \dots (29)$$

をうる。

- ただし、 J : キャットウォークのねじれ剛性 (m⁴)
- G : せん断弾性係数 (t/m²)
- w_2 : ストームケーブルなどの重量 (t/m)

である。

式(27)より、 $x=0$, $\delta_1 = \delta_2 = 0$, および $x=l$, $\delta_1 = \delta_2 = 0$ なる境界条件を用いれば、

$$H_1 \delta_1 + (H_p + H_c) \delta_2 = M_0 \dots (30)$$

をうる。

ただし、 $M_0 = \frac{W}{2} \cdot (l-x)x$ である。

式(28)より

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{1}{h} \left(\frac{d\delta_1}{dx} - \frac{d\delta_2}{dx} \right) - \frac{(\delta_1 - \delta_2)}{h^2} \frac{dh}{dx} \dots (31)$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{1}{h} \left(\frac{d^2 \delta_1}{dx^2} - \frac{d^2 \delta_2}{dx^2} \right) - \frac{2}{h^2} \left(\frac{d\delta_1}{dx} - \frac{d\delta_2}{dx} \right) \cdot \frac{dh}{dx} + \frac{(\delta_1 - \delta_2)}{h^2} \left\{ \frac{2}{h} \left(\frac{dh}{dx} \right)^2 - \frac{d^2 h}{dx^2} \right\} \dots (32)$$

をうる。式(29)~(32)より δ_1 について整理すると、

$$\beta_1 \frac{d^2 \delta_1}{dx^2} + \beta_2 \frac{d\delta_1}{dx} + \beta_3 \delta_1 = K \dots (33)$$

となる。

ただし、 $\beta_1 = \frac{J}{h} \left(1 + \frac{H_1}{H_p + H_c} \right) + \frac{H_1 \cdot h}{G}$

$$\beta_2 = \left(\frac{J'}{h} - \frac{2Jh'}{h^2} \right) \left(1 + \frac{H_1}{H_p + H_c} \right)$$

$$\beta_3 = \left[J \left(\frac{2h'^2}{h^2} - \frac{h''}{h^2} \right) - \frac{J' \cdot h'}{h^2} - \frac{p + w_2}{G} \right] \left(1 + \frac{H_1}{H_p + H_c} \right)$$

$$K = -\frac{W_1 \cdot h}{G} + \left(\frac{J'}{h} - \frac{2Jh'}{h^2} \right) \cdot \frac{M_0'}{H_p + H_c} + \left\{ J \left(\frac{2h'^2}{h^3} - \frac{h''}{h^2} \right) - \frac{J' \cdot h'}{h^2} - \frac{p + w_2}{G} \right\} \frac{M_0}{H_p + H_c} - \frac{J \cdot W}{h(H_p + H_c)}$$

である。式 (33) を解くことによりキャットウォークの変位を、式 (30) よりストームケーブルの変位を、式 (28) よりキャットウォークのねじれ角を求めることができるが、式 (33) の係数 β は x の関数であるため直接積分することは困難である。ここでは近似解として級数を用いる。級数として

$$\delta_1 = \sum_{i=1}^n a_i \sin \frac{i\pi}{l} x \dots\dots\dots (34)$$

を式 (33) に代入し、 $x = x_j (j=1 \sim n)$ において満足するよう a_i を決めれば δ_1 を求めることができる。また式 (33) の H_c は未知数であるが、ストームケーブルの内的および外的仕事等しいことより求めると、外的仕事は、

$$W_0 = -\frac{1}{2}(H_p + H_c) \int_0^l \frac{d^2\delta_2}{dx^2} \times \delta_2 \cdot dx$$

となる。また内的仕事は、

$$W_i = \left(H_p + \frac{1}{2}H_c \right) \frac{H_c}{A_c E_c} l$$

となり、 $W_0 = W_i$ より

$$H_c = -\frac{A_c E_c (H_p + H_c)}{2 \left(H_p + \frac{1}{2}H_c \right) l} \int_0^l \frac{d^2\delta_2}{dx^2} \cdot \delta_2 \cdot dx \dots (35)$$

をうる。

ただし、 A_c : ストームケーブルの断面積 (m^2)

E_c : ストームケーブルの弾性係数 (t/m^2)

である。ここに

$$\frac{d^2\delta_2}{dx^2} = -\frac{W + H_1 \frac{d^2\delta_1}{dx^2}}{H_p + H_c}, \quad \delta_2 = \frac{M_0 - H_1 \delta_1}{H_p + H_c}$$

であることより、式 (35) は

$$H_c = -\frac{A_c \cdot E_c}{2 \left(H_p + \frac{1}{2}H_c \right) (H_p + H_c)} \left[\frac{W^2 l^2}{12} + \frac{WH_1}{\pi} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i}{i} \right) (\cos i\pi - 1) + \frac{WH_1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^n a_i \cdot i \cdot \pi \cos i\pi - \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i}{i} \right) (i^2 \pi^2 - 2) (\cos i\pi + 2) \right\} + \frac{H_1^2}{2} \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \sum_{i=1}^n (a_i \cdot i)^2 \right] \dots\dots\dots (35)'$$

となる。

キャットウォークのねじれ剛性は斜め吊材に変形後も引張力が作用しているものとするれば、斜め吊材およびデッキ (歩行用金網および綾索) の換算板厚はそれぞれ

$$S_1 = \lambda \frac{\frac{a}{2} \left\{ \left(\frac{b}{2} \right)^2 + h^2 \right\}^{1/2} A_h}{\left\{ \left(\frac{a}{2} \right)^2 + \left(\frac{b}{2} \right)^2 + h^2 \right\}^{3/2}}$$

$$S_2 = \lambda \frac{abA_d}{(a^2 + b^2)^{3/2}} + d$$

となる。閉合三角断面のねじれ剛性は

$$J_d = \frac{4 \left(\frac{bh}{2} \right)^2}{\oint \frac{dS}{S}} = \frac{b^2 h^2}{\frac{S_2}{2} + \frac{S_1}{2}}$$

となる。しかし、一般的に $S_1 \ll S_2$ であることより上式は近似的に

$$J_d = \lambda \frac{ab^2 h^2 A_h}{4 \left\{ \left(\frac{a}{2} \right)^2 + \left(\frac{b}{2} \right)^2 + h^2 \right\}^{3/2}} \dots\dots\dots (36)$$

となる。

ただし、 a : 斜め吊材間隔 (m)

b : キャットウォークの幅 (m)

A_h : 斜め吊材の断面積 (m^2)

A_d : 綾索の断面積 (m^2)

d : 歩行用金網の換算板厚 (m)

$$\lambda = \frac{E}{G}$$

である。

以上は中央径間についてであるが、側径間については斜め吊材長に関する式を、

$$h_s = \frac{H_{s1}}{w_{s1}} \left[\cosh \left(\frac{w_{s1}}{H_{s1}} x + C_2 \right) - \cosh C_2 \right] + h_1 - \frac{4}{l_1^2} (z_{s0} - d f_s) (l_1 - x) x \dots\dots\dots (37)$$

に変更すれば、中央径間の式を用いて計算することができる。

ただし、 h_1 : キャットウォークとストームケーブルの定着高低差 (m) である。

(4) 温度変化による変形および応力

プレテンションを導入したキャットウォークの温度変化による変形はプレテンションを導入しないものそれと異なる。

図-3 に示すキャットウォークに温度変化量 $T^\circ C$ を生じた場合、キャットウォーク ロープの長さは中央径間では、

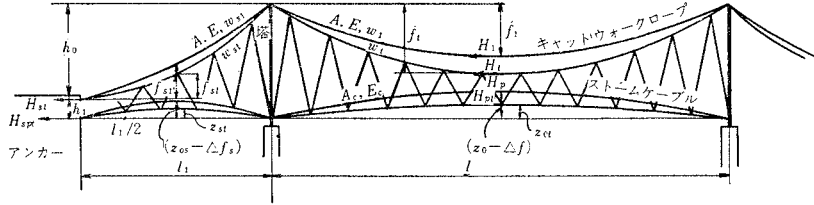
$$\left. \begin{aligned} \text{理論長 } S_t &= 2S_1(1 + \alpha T) + 2 \frac{(H_t - H)}{AE} \\ &\quad \cdot \int_0^{l/2} \cosh^2 \frac{w_t}{H_t} x dx \\ \text{幾何長 } S_t &= 2 \frac{H_t}{w_t} \sinh \frac{w_t l}{2H_t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (38)$$

となる。

ただし、 S_t : 温度変化 $T^\circ C$ におけるキャットウォーク ロープの長さ (m)

H_t : 温度変化 $T^\circ C$ におけるキャットウォーク ロープの水平張力 (t)

図-3 温度変化による変形および応力



w_t : 温度変化 $T^\circ\text{C}$ のキャットウォークの自重+付加荷重 (t/m)

α : ロープまたはケーブルの線膨張係数

である。キャットウォークロープの理論長および幾何長が等しいことより

$$H_t = \frac{2AEw_t \left\{ \frac{H_t}{w_t} \sinh \frac{w_t l}{2H_t} - \frac{H_1}{w_1} \sinh \frac{w_1 l}{2H_1} (1 + \alpha T) \right\}}{H_t \left(\sinh \frac{w_t l}{2H_t} \cosh \frac{w_t l}{2H_t} + \frac{w_t l}{2H_t} \right)} + H_1 \quad (39)$$

をうる。

一方ストームケーブルの長さは、

$$\begin{aligned} \text{理論長 } L_t &= L(1 + \alpha T) + \frac{H_{pt} - H_p}{A_c E_c} \int_0^l \{1 + (z')^2\} dx \\ &= l \left\{ 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{z_0 - \Delta f}{l} \right)^2 (1 + \alpha T) \right. \\ &\quad \left. + \frac{H_{pt} - H_p}{A_c E_c} \left\{ 1 + \frac{16}{3} \left(\frac{z_{st}}{l} \right)^2 \right\} l \right\} \\ \text{幾何長 } L_t &= l \left\{ 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{z_{st}}{l} \right)^2 \right\} \quad (40) \end{aligned}$$

である。

ただし、 L_t : 温度変化 $T^\circ\text{C}$ におけるストームケーブルの長さ (m)

H_{pt} : 温度変化 $T^\circ\text{C}$ におけるストームケーブルの水平張力 (t)

z_{st} : 温度変化 $T^\circ\text{C}$ におけるストームケーブルのサグ (m)

である。式 (40) より

$$H_{pt} = \frac{\left[\left\{ 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{z_{st}}{l} \right)^2 \right\} - \left\{ 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{z_0 - \Delta f}{l} \right)^2 \right\} \cdot (1 + \alpha T) \right] A_c E_c}{1 + \frac{16}{3} \left(\frac{z_{st}}{l} \right)^2} + H_p \quad (41)$$

をうる。また斜め吊材の伸びを無視すれば、

$$f_t = f_1 + (z_0 - \Delta f) - z_{st} \quad (42)$$

なる関係がある。

ただし、 f_t : 温度変化後のキャットウォークのサグである。

キャットウォークの自重と付加荷重は近似的に、

$$w_t = w_1 + 8 \frac{z_{st}}{l^2} (H_{pt} - H_p) \quad (43)$$

であり、キャットウォークロープは温度変化後も近似的にカタナリー曲線を保持しているとすれば、

$$f_t + \frac{H_t}{w_t} = \frac{H_t}{w_t} \cosh \frac{w_t l}{2H_t} \quad (44)$$

なる関係がある。したがって未知数 H_t, H_{pt}, w_t, f_t および z_{st} は式 (39) および式 (41)~(44) を用いてくり返し計算により求めることができる。

一方側径間についても中央径間と同様な考察により温度変化後のキャットウォークロープの水平張力は、

$$\begin{aligned} H_{st} &= \frac{2AEw_{st} \left[\frac{H_{st}}{w_{st}} \left\{ \sinh \left(\frac{w_{st} l_1}{H_{st}} + C_3 \right) - \sinh C_3 \right\} \right.}{H_{st} \left\{ \sinh \left(\frac{w_{st} l_1}{H_{st}} + C_3 \right) \cosh \left(\frac{w_{st} l_1}{H_{st}} + C_3 \right) \right.} \\ &\quad \left. \left. - \frac{H_{s1}}{w_{s1}} \left\{ \sinh \left(\frac{w_{s1} l_1}{H_{s1}} + C_2 \right) - \sinh C_2 \right\} (1 + \alpha T) \right\} \right.}{\left. - \sinh C_3 \cosh C_3 + \frac{w_{st} l_1}{H_{st}} \right\} + H_{s1}} \quad (45) \end{aligned}$$

である。

$$\text{ただし、} C_3 = \sinh^{-1} \left(\frac{w_{st} \cdot h_0}{2H_{st} \sinh \frac{w_{st} l_1}{2H_{st}}} \right) - \frac{w_{st} l_1}{2H_{st}}$$

である。

またストームケーブルの水平張力は近似的に

$$\begin{aligned} H_{spt} &= \frac{\left[\left\{ 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{z_{st}}{l_1} \right)^2 \right\} - \left\{ 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{z_{s0} - \Delta f_s}{l_1} \right)^2 \right\} (1 + \alpha T) \right] A_c E_c}{1 + \frac{16}{3} \left(\frac{z_{st}}{l_1} \right)^2} \\ &\quad + H_{sp} \quad (46) \end{aligned}$$

となる。斜め吊材の伸びを無視すれば、

$$f_{st} = f_{s1} - (z_{s0} - \Delta f_s) + z_{st} \quad (47)$$

となる。キャットウォークの自重および付加荷重は近似的に

$$w_{st} = w_{s1} + 8 \frac{z_{st}}{l_1^2} (H_{spt} - H_{sp}) \quad (48)$$

で示される。温度変化後のキャットウォークのサグは

$$f_{st} = \frac{H_{st}}{w_{st}} \left[\cosh \left(\frac{w_{st} l_1}{2H_{st}} + C_3 \right) - \cosh C_3 \right] \quad (49)$$

となる。したがって未知数 $H_{st}, H_{spt}, w_{st}, f_{st}$ および z_{st} は式 (45)~(49) よりくり返し計算により求めることができる。

2. 数値計算例

以上考察において求めた式を用いてつぎのような構造諸元を有するキャットウォークの数値計算を行なった。

構造諸元

[長さ関係]	[断面積重量関係]	[荷重関係]
$l=1500\text{ m}$	$A=1.3 \times 10^{-2}\text{ m}^2$	$W_1=0.095\text{ t/m}$
$l_1=750\text{ m}$	$A_c=2.0 \times 10^{-2}\text{ m}^2$	$W=0.120\text{ t/m}$
$f=140\text{ m}$	$E=1.3 \times 10^7\text{ t/m}^2$	$T=\pm 30^\circ\text{C}$
$f_s=45\text{ m}$	$E_c=2.0 \times 10^7\text{ t/m}^2$	
$4f=5\text{ m}$	$w=0.3\text{ t/m}$	
$4f_s=5\text{ m}$	$w_s=0.3\text{ t/m}$	
$z_0=45\text{ m}$	$w_2=0.15\text{ t/m}$	
$z_{s0}=45\text{ m}$	$A_k=0.2 \times 10^{-2}\text{ m}^2$	
$h_0=160\text{ m}$	$\alpha=1.2 \times 10^{-5}$	
$h_c=10\text{ m}$	$G=0.8 \times 10^7\text{ t/m}^2$	
$h_1=25\text{ m}$		
$a=20\text{ m}$		
$b=6.0\text{ m}$		

(1) プレテンション導入による応力

プレテンション導入によってキャットウォークのサグが $4f$ (または $4f_s$) だけ変化した場合の応力は 表-1 に示すようになる。

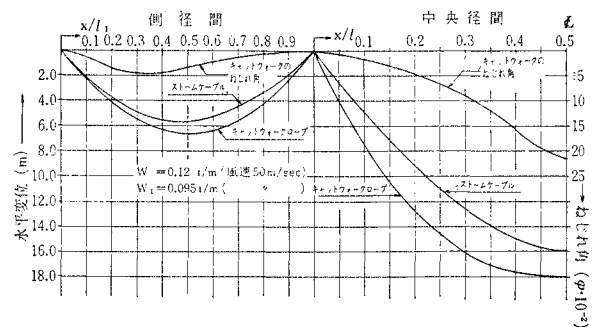
表-1

	中央径間	側径間
キャットウォーク ロープの初期水平張力	$H=609.55\text{ t}$	$H_s=618.13\text{ t}$
キャットウォーク ロープのプレテンション導入後の水平張力	$H_1=872.65\text{ t}$	$H_{s1}=880.97\text{ t}$
ストームケーブルの水平張力	$H_p=1015.79\text{ t}$	$H_{sp}=378.68\text{ t}$
キャットウォークの自重+付加荷重	$w_1=0.4444\text{ t/m}$	$w_{s1}=0.4985\text{ t/m}$

表-2

中央径間 ($H_p+H_c=1130.42\text{ t}$)				側径間 ($H_{sp}+H_{sc}=468.46\text{ t}$)			
x/l	$\delta_1(\text{m})$	$\delta_2(\text{m})$	$\varphi(10^{-2})$	x/l_1	$\delta_1(\text{m})$	$\delta_2(\text{m})$	$\varphi(10^{-2})$
0.0	0	0	0	0.0	0	0	0
0.10	7.467	4.984	1.940	0.10	2.352	2.164	1.331
0.20	12.875	9.169	4.864	0.20	4.183	3.843	3.700
0.30	16.184	12.585	9.143	0.30	5.504	5.018	4.780
0.40	17.739	14.968	15.984	0.40	6.350	5.618	4.274
0.50	18.069	15.907	21.623	0.50	6.685	5.712	3.242
0.6	17.739	14.968	15.984	0.60	6.483	5.355	2.307
0.7	16.184	12.585	9.143	0.70	5.722	4.588	1.537
0.8	12.875	9.169	4.864	0.80	4.390	3.446	0.911
0.9	7.467	4.984	1.940	0.90	2.465	1.942	0.369
1.0	0	0	0	1.0	0	0	0

図-4 風荷重によるキャットウォークおよびストームケーブルの変位



(2) 風荷重による変形および応力

風荷重によるキャットウォークおよびストームケーブルの変形および応力は 表-2 に示すようになり、これをグラフにすると 図-4 のようになる。

(3) 温度変化による変形および応力

温度変化によるキャットウォークおよびストームケーブルの変形および応力は 表-3 に示すようになる。

表-3

上段+30°C
下段-30°C

変形および応力	中央径間	側径間
キャットウォークの水平張力	$H_l=828.47\text{ t}$ 917.81 t	$H_{sl}=801.65\text{ t}$ 959.76 t
ストームケーブルの水平張力	$H_{pl}=862.24\text{ t}$ 1170.49 t	$H_{spl}=283.26\text{ t}$ 476.79 t
キャットウォークのサグ	$f_l=145.261\text{ m}$ 144.711 m	$f_{sl}=40.365\text{ m}$ 34.651 m
キャットウォークの自重+付加荷重	$w_l=0.4227\text{ t/m}$ 0.4665 t/m	$w_{sl}=0.4405\text{ t/m}$ 0.5368 t/m

(4) 構造特性

プレテンションを導入するキャットウォークの静的構造特性を調べるため種々の荷重とその変形および応力の関係を求めると以下 図-5~7 のようになる。

図-5 サグ調整量と水平張力との関係

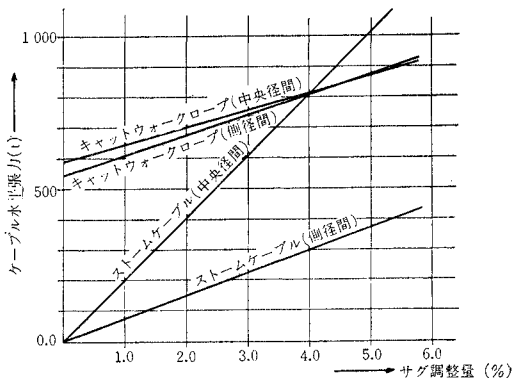


図-6 風荷重と変形との関係

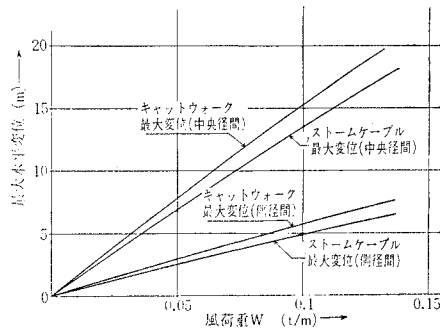
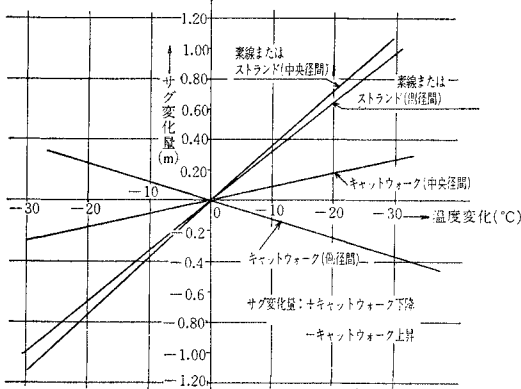


図-6 に示すようにキャットウォークおよびストームケーブルの変形は風荷重にほぼ比例することがわかる。キャットウォークのサグは温度変化にほぼ比例しているが、図-7 に示すように、中央径間で

図-7 温度変化とサグ変化の関係



は温度上昇によりキャットウォークは下降するが、側径間では逆に上昇する。いま温度変化前後に形状の変化がない ($f_1=f_t, H_1/w_1=H_t/w_t$) とすれば、式 (39) より

$$\alpha T = -\frac{H_t - H_1}{2AE} \left[\cosh \frac{w_t l}{2H_t} + \frac{\frac{w_t l}{2H_t}}{\sinh \frac{w_t l}{2H_t}} \right] \dots\dots\dots (50)$$

をうる。式 (44) より

$$\cosh \frac{w_t l}{2H_t} = 1 + f_1 \frac{w_1}{H_1} \dots\dots\dots (51)$$

をうる。また式 (38) より

$$\frac{\frac{w_t l}{2H_t}}{\sinh \frac{w_t l}{2H_t}} = \frac{l}{S_t} \dots\dots\dots (52)$$

をうる。また $H_t = \frac{w_t l^2}{8f_t}, H_1 = \frac{w_1 l^2}{8f_1}$ であるから、

式 (51), (52) を式 (50) に代入して

$$\alpha T = -\frac{l^2}{8AEf_1} (w_t - w_1) \left\{ 1 + 4 \frac{f_1^2}{l^2} - \frac{S_t - l}{2S_t} \right\} \dots\dots\dots (50)'$$

をうる。一方ストームケーブルについても同様にして、式 (41) および式 (43) より求めれば、

$$\alpha T = -\frac{l^2 (w_t - w_1)}{8 A_c E_c (z_0 - d f)} \cdot \left\{ 1 + \frac{16}{3} \left(\frac{z_0 - d f}{l} \right)^2 \right\} \left\{ 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{z_0 - d f}{l} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (53)$$

となる。式 (50)' と式 (53) が等しいとおき、二次の項を省略すると、

$$AEf_1 = A_c E_c (z_0 - d f) \dots\dots\dots (54)$$

となる。この結果より温度変化によるキャットウォークの上昇および下降はキャットウォークおよびストームケーブルの断面積、弾性係数および温度変化前のサグに関係することがわかる。また架設された素線またはストランドのサグ変化とキャットウォークのそれとの差が大きくなることは架線作業にとって好ましいことではないので側径間では温度変化によってプレテンションを加減しなければならない。

む す び

去る 42 年 5 月土木学会より本州四国連絡架橋に関する技術的検討報告書が提出され、その技術的可能性と問題点が明らかにされたことや、また関門大橋の建設も実施されるようになったことをあわせ考えると吊橋架設に用いる構造物の詳細な検討が必要である。わが国は諸外国に比してきびしい自然条件(風)下にあるため、キャットウォークなど架設用構造についても常に耐風設計を考慮しなければならない。しかし筆者の知る範囲ではキャットウォークの耐風設計に関する理論的解析を行なった文献がなかったので、ここにその一試案について理論的解析を行なった。もとよりこのような構造物は静的解析のほか動的解析および模型実験によって検証されなければならない。

参 考 文 献

- 1) 村上巴里:新しい吊橋形式について(その1), 道路, 1966年9月
- 2) 村上巴里:モノケーブル吊橋の風荷重応力について, 第21回年次学術講演会講演概要, 土木学会, 昭和41年5月
- 3) 村上巴里:長大吊橋に用いるキャットウォークの耐風設計について, 第22回年次学術講演会講演概要, 土木学会, 昭和42年5月

(1967.6.20・受付)