

横河工務	正 員	池田 肇
横河橋梁	正 員	○原田康夫
横河橋梁	正 員	菅 七郎
東京大学	学生員	東原 紘道

1. 実験の目的および対象とした系

キャットウォークは水平方向の剛性が非常に小さいため風による変形が大きく、とくにわが国のようにきびしい自然条件のもとでは、これの剛性向上が重要な課題となることは明らかである。そのためにキャットウォークの性状を理論的、実験的に把握する必要があると考え、理論解析と合わせて一連の模型実験を行なった。対象とした系は図1に示されるとおり、キャットウォークとストームケーブルを鉛直なハンガーで結んだもの(MA型)、それを斜めステイで補強したもの(MB型)、およびキャットウォーク、ストームケーブル、斜めハンガーで三角形閉断面を形成したもの(MC型)の三種であり、ストームケーブルはそのライズを大きくとるために支間中央でメインケーブルに直接結合されている。

2. 理論解析

(1) 基本的仮定 中央点を原点に選び、メインケーブルを $y = y(x)$ 、ストームケーブルを $y^* = y^*(x)$ で表わす。また $y - y^* = \ell$ とし、以下の仮定を設ける。(i) ℓ の変化は小さい。(ii) 橋軸方向の変位は小さい。この仮定はメインケーブルとストームケーブルが中央点で緊縛されていることに根拠をもっている。

(2) 載荷前の状態 ケーブル反力の H または H^* を与えると形態は完全に定まってしまう。(計算式は省略する)

(3) 水平荷重 (P) および鉛直荷重 (Q) 全載による変形

$$\begin{aligned}
 \text{(i) MA 型} \quad & \left\{ \begin{aligned}
 H \frac{d^2 v}{dx^2} &= Q + (H^* + h^*) \frac{d^2(\ell \cos \theta)}{dx^2} - (h + h^*) \frac{d^2 y}{dx^2} - H^* \frac{d^2 \ell}{dx^2} \\
 H \frac{d^2 w}{dx^2} &= -\frac{P}{2} + (H^* + h^*) \frac{d^2(\ell \sin \theta)}{dx^2} \\
 \frac{d}{dx} \left[\ell^2(x) \frac{dy}{dx} \right] &= \left[\frac{H^* h - H h^*}{(H + h)(H^* + h^*)} \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{H^*}{H^* + h^*} \frac{d^2 \ell}{dx^2} + \frac{H T}{(H + h)(H^* + h^*)} \sum_{n=1}^{2N-1} \delta(x - x_n) \right] \ell \sin \theta \\
 &\quad - \frac{\ell}{H + h} (P \cos \theta + Q \sin \theta)
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

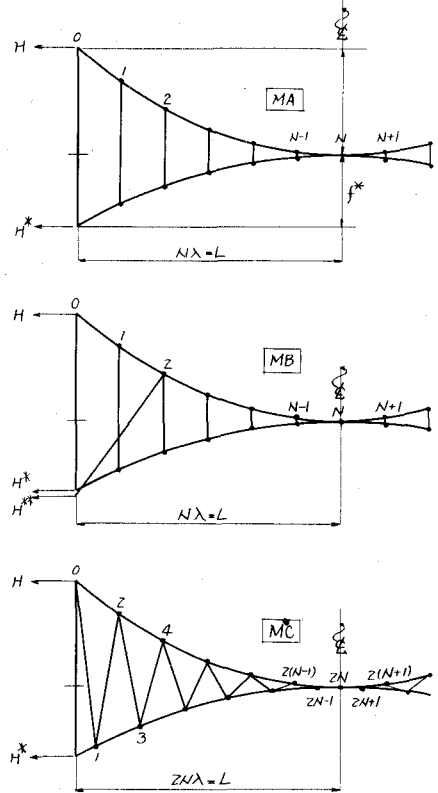


図1 対象とした系

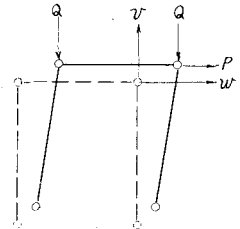


図2 MA型変形状態

$$H = H + H^* + h + h^*$$

h, h^* はおのおの H, H^* の増加分

T は変形前のハンガー張力

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta}{EA} \right) h &= -\frac{1}{H} (Ah - Bh^* + \theta_0^*) + \frac{1}{4H^2} \oint - \frac{H^* + h^*}{2H(H+h)} T_0 + \frac{H^* + h}{H^2(H+h)} U_0 + \frac{(H^* + h)^2}{2H^2(H+h)^2} S_0 \\ \left(\frac{\Delta}{EA} \right) h^* &= -\frac{1}{H} (-Bh + Ch^* + \theta_0^*) + \frac{1}{4H^2} \oint + \frac{1}{2H(H+h)} T_0^* - \frac{1}{H^2} U_0 + \frac{1}{2H^2} S_0 \end{aligned}$$

T_0, T_0^*, U_0, S_0 は二次的な伸びによる項であつて、通常はごく小さい。

$$T_0 = (H+h)^2 \int \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \frac{d(\ell \varphi^2)}{dx} dx \quad T_0^* = H^2 \int \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \frac{d(\ell \varphi^2)}{dx} dx$$

$$U_0 = (H+h) \int p(x) \frac{d(\ell \varphi)}{dx} dx \quad S_0 = H^2 \int \left(\frac{d(\ell \varphi)}{dx} \right)^2 dx$$

(II) MC 型

$$\begin{aligned} H \frac{d^2 v}{dx^2} &= 2Q + (H^* + h_3) \frac{d^2(\ell \cos \varphi)}{dx^2} - (h_1 + h_2 + h_3) \frac{d^2 y}{dx^2} - H^* \frac{d^2 \ell}{dx^2} + a(h_1 - h_2) \frac{d^2 \sin \varphi}{dx^2} \\ H \frac{d^2 v}{dx^2} &= -P + (H^* + h_3) \frac{d^2(\ell \sin \varphi)}{dx^2} - a(h_1 - h_2) \frac{d^2 \cos \varphi}{dx^2} \\ \frac{d}{dx} \left\{ \{ (2H + h_1 + h_2)(H^* + h_3) \} \left(\ell^2 (\omega + \alpha^2) + 4\alpha^2 (H + h_1)(H + h_2) \right) \frac{d\varphi}{dx} \right\} \\ &= 2H \{ a(h_1 - h_2) \cos \varphi - (H^* + h_3) \ell \sin \varphi \} \frac{d^2 y}{dx^2} - H^* \{ a(h_1 - h_2) \cos \varphi - (2H + h_1 + h_2) \ell \sin \varphi \} \frac{d^2 y^*}{dx^2} \\ &\quad - P \{ (H^* + h_3) \cos \varphi - a(h_1 - h_2) \sin \varphi \} - 2Q \{ (H^* + h_3) \ell \sin \varphi + a(h_1 - h_2) \cos \varphi \} \end{aligned}$$

$H = 2H + H^* + h_1 + h_2 + h_3$ h_i は第 i ケーブル反力の増加分

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta}{EA} \right) h_1 &+ \frac{A}{H} (h_1 + h_2) - \frac{B}{H} h_3 = -\frac{2}{H} \theta_0^* + \frac{1}{2H^2} \oint + \frac{H^* + h_3}{H^2} U + \frac{(H^* + h_3)^2}{2H^2} S - a\Xi \\ \left(\frac{\Delta}{EA} \right) h_2 &+ \frac{A}{H} (h_1 + h_2) - \frac{B}{H} h_3 = -\frac{2}{H} \theta_0^* + \frac{1}{2H^2} \oint + \frac{H^* + h_3}{H^2} U + \frac{(H^* + h_3)^2}{2H^2} S + a\Xi \\ \left(\frac{\Delta}{EA} \right) h_3 &- \frac{B}{H} (h_1 + h_2) + \frac{C}{H} h_3 = -\frac{2}{H} \theta_0^* + \frac{1}{2H^2} \oint - \frac{2H + h_1 + h_2}{H^2} U + \frac{(2H + h_1 + h_2)^2}{2H^2} S \end{aligned}$$

$$U = \int p(x) \frac{d(\ell \varphi)}{dx} dx \quad S = \int \left(\frac{d(\ell \varphi)}{dx} \right)^2 dx \quad \Xi = \int \frac{d\varphi}{dx} \frac{dy}{dx} dx$$

これらも小さい量である。

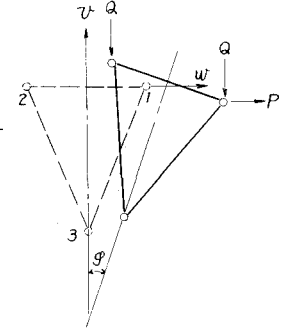


図5 MC型変形状態

(4) 鉛直荷重 (Q) 半載による変形

$$\begin{aligned} \text{(i) MA 型} \quad \left\{ \begin{aligned} H \frac{d^2 v}{dx^2} &= -h_1 \frac{d^2 y}{dx^2} - h_1^* \frac{d^2 y^*}{dx^2} \quad \text{-----} x < 0 \\ H \frac{d^2 v}{dx^2} &= Q - h_2 \frac{d^2 y}{dx^2} - h_2^* \frac{d^2 y^*}{dx^2} \quad \text{-----} x > 0 \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

$$H = H + H^* + h_1 + h_1^* = H + H^* + h_2 + h_2^*$$

いま、 $H \cdot v_{\text{center}} - h_1 f + h_1^* f^* = \alpha L$ なる α を用いると

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta}{EA} \right) h_1 &= -\frac{1}{H} (Ah_1 - Bh_1^* + 2\alpha f) \\ \left(\frac{\Delta}{EA} \right) h_1^* &= -\frac{1}{H} (-Bh_1 + Ch_1^* - 2\alpha f^*) \\ \left(\frac{\Delta}{EA} \right) h_2 &= -\frac{1}{H} (Ah_2 - Bh_2^* + 2\theta_0^* f) + f \frac{f^* - f}{L} \frac{1}{H} (h_2 - h_1) \\ \left(\frac{\Delta}{EA} \right) h_2^* &= -\frac{1}{H} (-Bh_2 + Ch_2^* + 2\theta_0^* f^*) - f^* \frac{f^* - f}{L} \frac{1}{H} (h_2 - h_1) \end{aligned}$$

(II) MC 型 $H \rightarrow 2H, h_1 \rightarrow 2h_1, h_2 \rightarrow 2h_2, Q \rightarrow 2Q$ の置換によつて (i) の結果をそのまま用いることができる。

(5) ねじり荷重による変形

MC 型の場合にはハンガーにたわみが発生するため、通常の解析は困難である。あらかじめたわむハンガーを想定して解き、その解とはじめの仮定が適合するか否かを検討する必要がある。一方 MA 型においてはハンガーはねじり荷重をたわまないため解析が容易である。以下では MA 型の結果を紹介する。

$$\begin{aligned} w_1 &= \frac{Q}{H_1 + H_2} (1 - \cos \theta), \quad w_2 = \frac{Q}{H_1 + H_2} (1 - \cos \theta), \quad H_1 = H + H^* + h_1 + h_1^*, \quad H_2 = H + H^* + h_2 + h_2^* \\ v_1 &= \frac{Q}{H_1 + H_2} \sin \theta + \frac{h_1 + h_2}{H_1 + H_2} (f - y) - \frac{h_1^* + h_2^*}{H_1 + H_2} (f^* - y^*) \end{aligned}$$

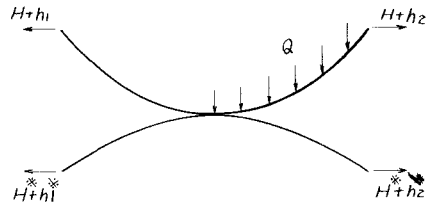


図4 鉛直荷重半載

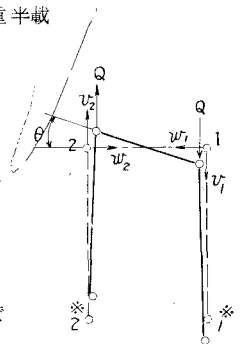


図5 ねじり荷重

$$\begin{cases} v_2 = \frac{q_1 q_2}{h_1 + h_2} \sin \theta - \frac{h_1 + h_2}{h_1 + h_2} (f - y) + \frac{h_1^* + h_2^*}{h_1 + h_2} (f^* - y) \\ \frac{d^2 \theta}{dx^2} + \alpha \cos \theta = 0, \quad \alpha = \frac{1}{2 h_1 h_2} \left[Q(h_1 + h_2) - \frac{2}{L} \{ f(h_1 h_2 - h_2 h_1) + f^*(h_2 h_1 - h_1 h_2) \} \right] \end{cases}$$

このままでは α の大きさは未知であるが、楕円関数を用いた解によれば α はかなり小さい。

$$\begin{cases} \frac{\Delta}{(EA)} (h_1 h_1 + h_2 h_2) = -(h_1 + h_2) A + (h_1^* + h_2^*) B, & \frac{\Delta}{(EA)} (h_2 - h_1) = \frac{4}{3} \alpha \alpha f L \\ \frac{\Delta^*}{(EA)^*} (h_1 h_1^* + h_2 h_2^*) = (h_1 + h_2) B - (h_1^* + h_2^*) C, & \frac{\Delta^*}{(EA)^*} (h_1^* - h_2^*) = \frac{4}{3} \alpha \alpha f^* L \end{cases}$$

ねじり荷重半載の場合は、(4)に準じて不静定反力の数が 8 個になるが、方程式の構成は全載の場合と同様になる。

〔記号〕 $A = \int \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx$, $B = - \int \left(\frac{dy}{dx} \right) \left(\frac{dy^*}{dx} \right) dx$, $C = \int \left(\frac{dy^*}{dx} \right)^2 dx$
 $p(x) = \sum P_n \left\{ \left(1 - \frac{n}{2N} \right) - \eta(x - n\lambda) \right\}$, $q(x) = \sum Q_n \left\{ \left(1 - \frac{n}{2N} \right) - \eta(x - n\lambda) \right\}$
 $0_f = \int \left(\frac{dy}{dx} \right) q(x) dx$, $0_f^* = \int \left(\frac{dy^*}{dx} \right) q(x) dx$, $\oint = \int p(x) dx$
 Δ , Δ^* はケーブル長, (EA) , $(EA)^*$ はケーブルの伸び剛性

3. 模型諸元および実験方法

区間 7.20 m のキャットウォークを設計し、模型の縮尺を形状寸法について 1/60、力（集中荷重）について 1/10000 とした。使用材料はつり元用鋼より線（メインケーブルに $2 \times 1.3 \text{ mm } \phi$, $E = 1.57 \times 10^6 \text{ kg}$; ストームケーブルに $2 \times 0.69 \text{ mm } \phi$, $E = 1.96 \times 10^6 \text{ kg}$ ）, 真鍮角材および鉛玉（自重相当分）である。荷重については水平載荷を基準に考え、実橋に作用する風速を 10 ~ 40 m/Sec とし、これに相当する重量の鉛玉を用いた。ストームケーブルに与えるプレテンションは $H^* = 3, 4, 5 \text{ kg}$ （MC では 6, 8, 10 kg）の 3 種類とした。

表 1 模型諸元

2L	主塔間隔	12.000 m
f	メインケーブルのサグ	1.067 m
f*	ストームケーブルのライズ	0.600 m
λ	格間距離 (MA, MB)	1.300 m
	格間距離 (MC)	0.500 m
b	巾員	0.058 m
A	メインケーブル断面積	0.01938 cm ²
A*	ストームケーブル断面積	0.004824 cm ²
g	キャットウォーク自重	0.756 kg/m
g*	ストームケーブル自重	0.0904 kg/m

4. 結果及び考察

MA 型を例にとれば（図 7）プレテンションと最大水平変位はほぼ直線的に変化にあり、 $H^* = 3 \rightarrow 5 \text{ kg}$ （ $H^* + h^*$ は 19% 増）によつて $\delta_{\max} = 19.87 \rightarrow 17.77 \text{ cm}$ （10% 減）である。施工性、工費を考えればプレテンションの増加（ストームケーブル断面の増加）をはかることは必ずしも得策でない。また風速と変形量については図 - 8 のような関係があり、MB 型と MC 型には変形量の差がほとんどないと言える。

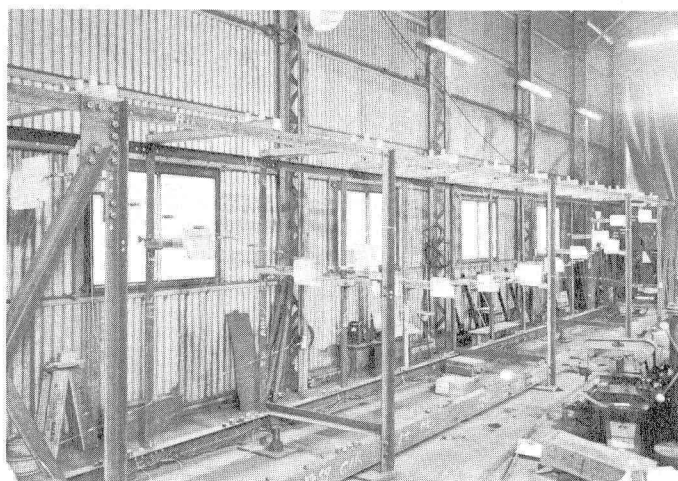
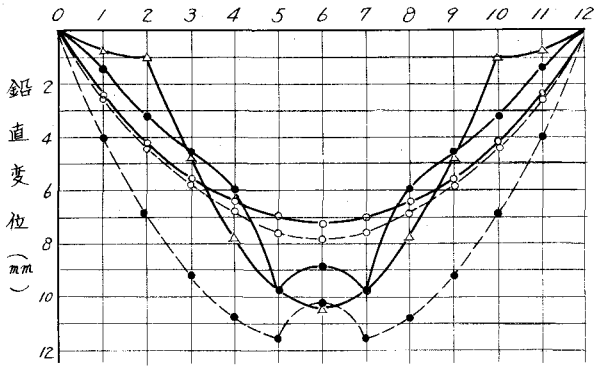
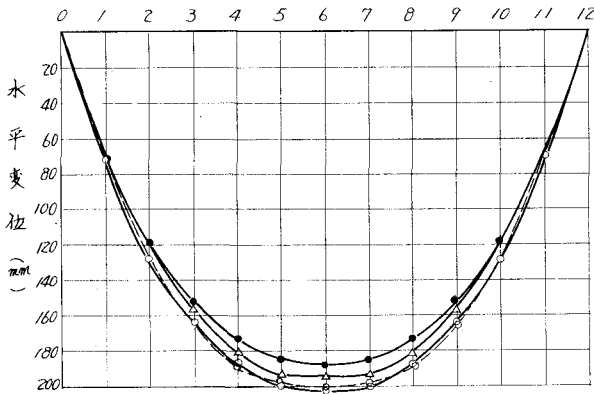


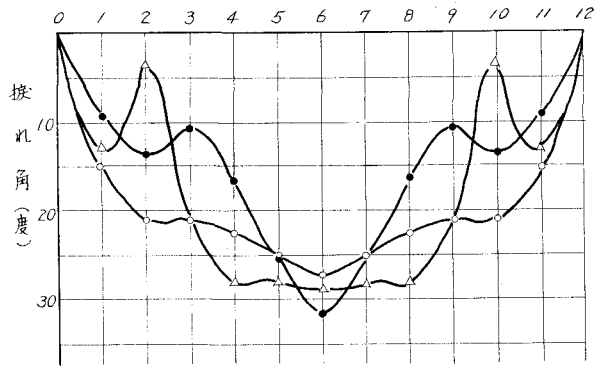
写真 キャットウォークの模型 (MC 型)



(a) 鉛直荷重全載 ($Q = 0.200 \text{ kg}$)



(b) 水平荷重全載 ($P = 0.462 \text{ kg}$)



(c) ねじり荷重全載 ($Q = 0.182 \text{ kg}$)

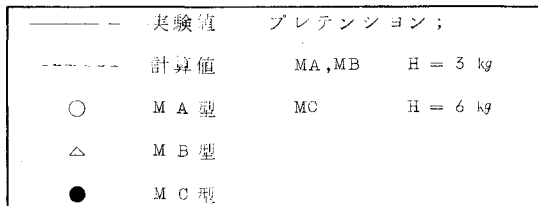


図6 変形状態

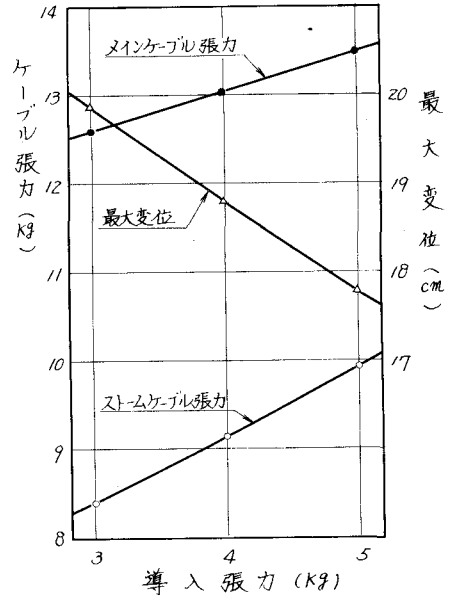


図7 プレテンションと水平変位 (MA)

表2 水平変位の縮尺 (MA, $H^* = 3 \text{ kg}$)

荷重	模型変位	実橋変位	縮尺
15m/Sec	4.652cm	2.600m	1/56.0
30	14.295	8.265	1/57.8
40	19.868	12.421	1/62.6

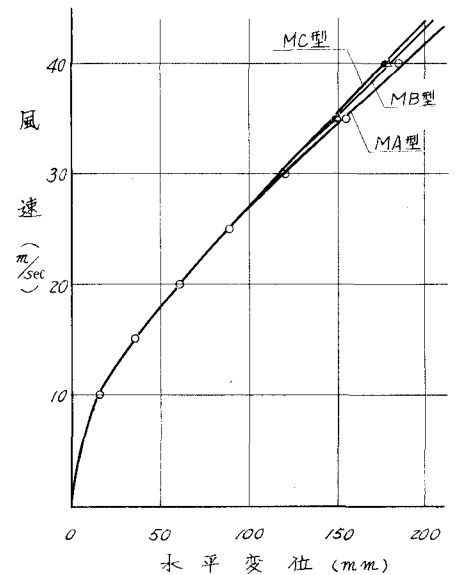


図8 風速と変形の対係