

日本道路公団
関門建設所受託

関門橋
設計施工調査

関門橋架設構造物の耐風性に関する調査 報 告 書

昭和 45 年 3 月

建設省 土木研究所

目 次

緒 言

1. 調 査 の 概 要	1
1-1 調査の目的	1
1-2 調査の方法の概要	1
1-3 キャット・ウォークの諸元	1
2. キャット・ウォークの固有振動解析	3
2-1 まえがき	3
2-2 基礎方程式	3
2-3 ケーブルのサグの影響	7
2-4 格点が3次元に配置され、変形が2次元である場合	9
2-5 数値計算結果	9
3. 風洞模型実験	15
3-1 まえがき	15
3-2 模 型	16
3-3 実験結果	20
3-3-1 三分力試験の結果	20
3-3-2 パネ支持模型実験結果	22
4. 結 び	24

附 属 資 料

1. キャット・ウォークの固有振動解析プログラム	27
1.1 記 号	27
1.2 入力フォーマット	27
1.3 プログラム	27
2. kk-3G-69 75G 風洞模型実験結果	32

緒 言

先年来調査を続けて来た関門橋も昨年度下部工が着工し、今年中には上部工の架設も始まろうとしている。

昭和42年度から構造研究室では日本道路公団の委託により関門橋の補剛桁及び主塔に関する耐風調査を続けて来たが今年は架設構造物の耐風性に関する調査を委託された。上部工の架設中の耐風性に関する問題としては主ケーブル架設用足場であるキャット・ウォークの耐風性と架設中の吊構造部の耐風性の問題がある。特に後者は補剛桁の架設順序や架設用の設備を左右する重要な問題であるが、架設中の吊構造部の剛性の推定が非常に困難なこと、及び補剛桁の本締めまでは床版のコンクリート打設が行なわれないであろうとの見通しから動的不安定現象に関する危険性が少ないであろうとの予測にもとづき、今年はキャット・ウォークの耐風性に関する調査を行なって来た。ここにその結果を報告する。

昭和45年3月

土木研究所構造研究室

室 長 大久保 忠 良

研究員 榎 波 義 幸

1. 調査の概要

1-1 調査の目的

吊橋の主ケーブルの架設や吊材の碇着のために用いられる架設用足場であるキャット・ウォークは主塔やケーブルベントピヤーの間にケーブルを張りわたし、それをストームケーブルで補強したものであるが、重量が小さく応力部材がすべて引張材で、曲げ部材や剪断力に抵抗する部材が皆無であるため変形能の大きい振動しやすい構造物である。従って風による振動等も考えられるため、その対策として風の抵抗の少ない金網を使って足場をつくり遮蔽効果の大きい材料は使用していない。然しながら剛性の小さい構造物であって風による振動も充分予想され、一方風によってひきおこされる振動がキャット・ウォークを破壊に導くことはなくとも作業を妨害する可能性のあることは考えておく必要がある。今回の調査の目的はキャット・ウォークの作業限界風速を明らかにすることであるが、そのためにはキャット・ウォークの振動性状の解明と風洞模型実験による空力特性の調査が必要となる。そこで今回はキャット・ウォークの固有振動特性の理論的解析と模型実験による検証及び風洞模型実験を行なった。このうち風洞模型実験には多小疑問の点もあるが架設後のキャット・ウォークの挙動を観察してその妥当性を検討する意味も含めてあえて実験を行なった。

1-2 調査の方法の概要

構造物の耐風性を明らかにするためにはまずその振動特性を解明しなければならない。

そこでキャット・ウォークのようなケーブル・システム・振動数を明らかにするために、まずその理論的解析を行ない、しかる後に、振動模型実験でこれを確かめた。

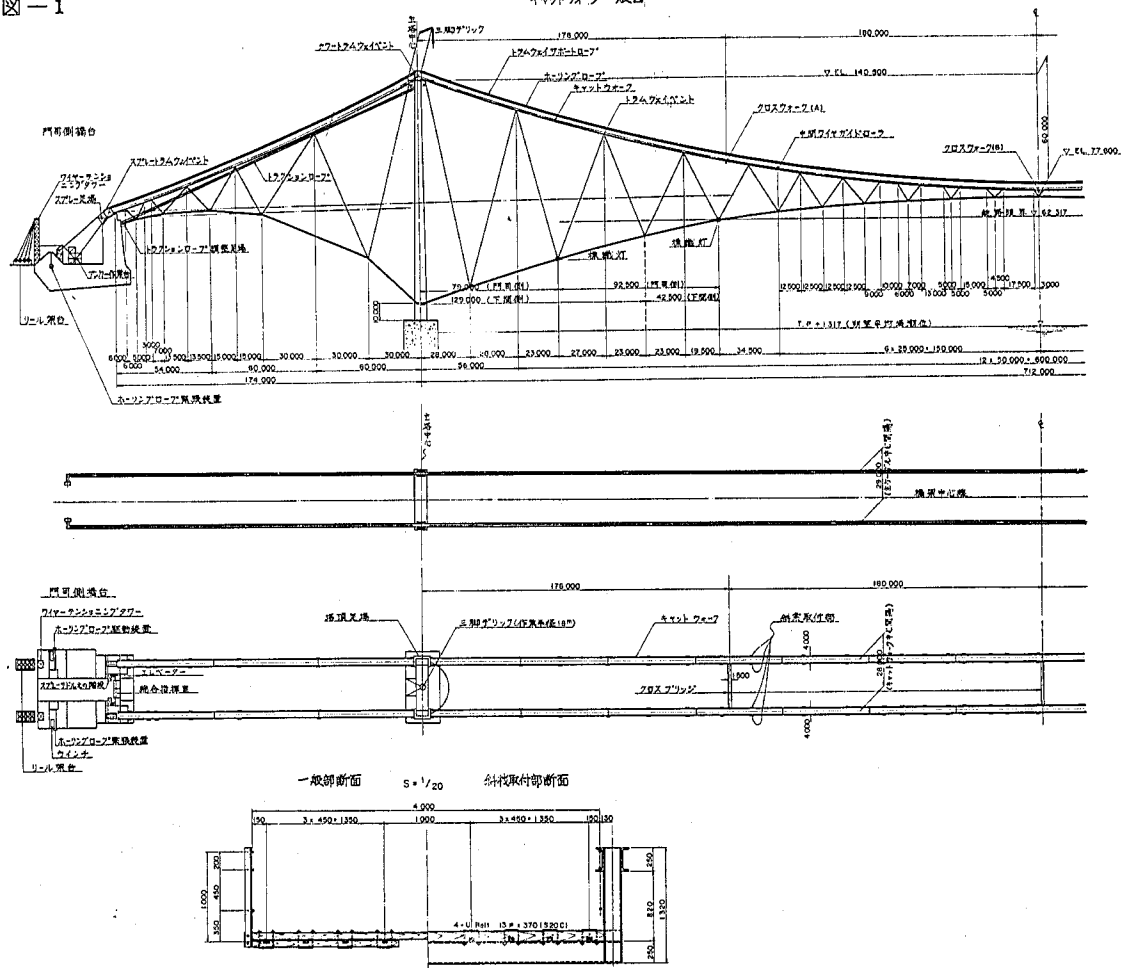
本来ならば風洞模型実験は実物の振動数を解明して後行なわねばならぬが、今回は実験期間及び実験条件に対して振動数がしめる割合がさほど重要でないことから、実物の振動数を仮定して、この条件のもとで風洞実験を行なった。キャット・ウォークに予想される不安定振動は撓み振動、振り振動及びその連成振動であるが、振り振動に関する振動方程式を誘導することが困難であったため、まず撓み振動の不安定現象のみを検討し、もし実験中に振りの不安定振動があらわれるようであればあらためて検討することとなった。また模型を構成している部材のロープ、金網と云ったRe数の影響も予想されること等から模型は2種類について実験した。

1-3 キャット・ウォークの諸元

関門橋のキャット・ウォークの一般図を図-1に、その諸元を表-1に示す。

図-1

キャットウォーク断面図



表一 1 キャット・ウォーク諸元

	キャット・ウォーク	ストームケーブル	ハンガーロープ
幅員	4.0 m		
ロープの及び本数	$\phi 40 \text{mm} \times 8$	$\phi 50 \text{mm} \times 1$	$\phi 1 \text{ m} \times 1$
ロープの断面積	6 0.8 cm^2	2 3.8 cm^2	1.5 6 cm^2
水平張力	2 17.4 t	7 1.7 t	
ロープの形状	カテナリー	放物線	直線
サグ及びライズ	6 0.7 m	6 0.8 m	
自重	1 10 Kg/m	3 0 Kg/m	
付加荷重 (プレテンション)	6 9 Kg/m		

2. キャット・ウォークの固有振動解析

2-1 まえがき

キャット・ウォークの如き構造物の振動解析の理論的手法としてはいくつかの近似解法が考えられるがここではキャット・ウォークを平面ケーブル構造として質点系におきかえエネルギー法で解いてみた。ただし以下の式の誘導及び数値計算に際しては次の如き仮定をおくものとする。

1. 質量は全て格点に集中させる。
2. 各部材は質点間に直線にはられているものとし、そのたるみを無視する。
3. 振動は微小振巾のものを考える。
4. 構造物は平面構造とし振動は二次元とする。

上記の仮定のうち1についてはその妥当性がすでに実証されているが、2については多少の疑問があるのであとで説明するように部材のたるみの影響についても多少検討してみた。また、吊橋のキャット・ウォークの如き構造物に於ては4.の仮定はなんら問題がないと予想されるので、ここでは試案1の如き立体構造も平面構造におきかえて数値計算を行なっている。

2-2 基礎方程式

先にも述べた如く、ここではenergy法でまず静的な釣合式を求め、D'Alembertの原理に従い基礎方程式を誘導した。以下にその計算を詳述する。

構造物に外力が作用した場合のtotal potential energy E はstrain energyを U 、自重のなす仕事を W 、外力のなす仕事を V とすれば、

$$E = U + W + V$$

$$= \sum_{m=1}^M U_m - \sum_{j=1}^J W_j - \{F\}^T \{x\}$$

ここに $\{F\}$: 外力の列ベクトル

$\{x\}$: 格点の変位をあらわすベクトル

U_m : 部材 m の歪エネルギー

W_j : 格点 j の自重のなす仕事

M : 部材の総数

J : 格点の総数

系の各格点での釣合式は次式で与えられる。(図-2)

$$\frac{\partial E}{\partial x_{ji}} = \sum_{m=1}^M \frac{\partial U_m}{\partial x_{ji}} - \sum_{j=1}^J \frac{\partial W_j}{\partial x_{ji}} - F_{ji} = 0$$

ここに x_{ji} : j 点の i 方向への変位

F_{ji} : j 点に作用する i 方向への力

これらの strain energy U_m のうち格点 j で結びついている部材の strain energy だけが点 j の変位 x_{ji} の関数であるから点 j での釣合式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial E}{\partial x_{ji}} = \sum_{m=1}^N \frac{\partial U_{jm}}{\partial x_{ji}} - \frac{\partial W_j}{\partial x_{ji}} - F_{ji} = 0$$

上式を直交座標系に変換すれば,

$$\frac{\partial E}{\partial x_j} = \sum_{m=1}^N \frac{\partial U_{jm}}{\partial x_j} - F_{xj} = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial y_j} = \sum_{m=1}^N \frac{\partial U_{jm}}{\partial y_j} - W_j - F_{yj} = 0$$

ここに N : j 点に集まる部材の総数

W_j : j 点に集中して考える重量

部材 j^a に作用する外力を P_{ja} , それによる伸びを e_{ja} とすれば P_{ja} は初期張力 P_{ja0} と伸びによる増分の和であらわされる。

$$P_{ja} = P_{ja0} + EA \cdot \frac{e_{ja}}{L_{ja}}$$

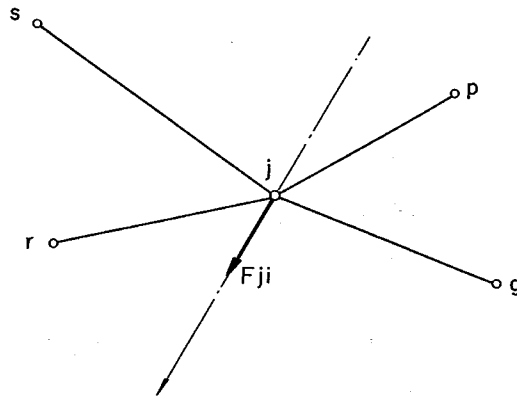


図-2 釣合形

$$U_{jn} = \int P_{jn} de_{jn}$$

$$= \int (P_{jn0} + EA \cdot \frac{e_{jn}}{L_{jn}}) de_{jn}$$

$$= P_{jn0} e_{jn} + EA \cdot \frac{e_{jn}^2}{2L_{jn}}$$

$$\therefore \frac{\partial U_{jn}}{\partial x_{ji}} = P_{jn0} \frac{\partial e_{jn}}{\partial x_{ji}} + \frac{EA}{L_{jn}} \cdot e_{jn} \frac{\partial e_{jn}}{\partial x_{ji}}$$

ここに L_{jn} : 部材 jn の長さ

従って直交座標系においては,

$$\sum_{n=1}^N P_{jn0} \frac{\partial e_{jn}}{\partial x_j} + \sum_{n=1}^N \frac{EA_n}{L_{jn}} e_{jn} \frac{\partial e_{jn}}{\partial x_j} - F_{jx} = 0$$

$$\sum_{n=1}^N P_{jn0} \frac{\partial e_{jn}}{\partial y_j} + \sum_{n=1}^N \frac{EA_n}{L_{jn}} e_{jn} \frac{\partial e_{jn}}{\partial y_j} - w_j - F_{jy} = 0$$

各格点の釣合時の座標を X_i , 外力による変位を x_i とすると ($j=1, \dots, R$)

$$L_{jn}^2 = \sum_{i=1}^R (X_{ni} - X_{ji})^2 \quad (L_{jn} + e_{jn})^2 = \sum_{i=1}^R \{ (X_{ni} - X_{ji}) + (x_{ni} - x_{ji}) \}^2$$

2 次以上の項を微小項として重視すると,

$$(L_{jn} + e_{jn})^2 - L_{jn}^2 = 2L_{jn} e_{jn}$$

$$\therefore e_{jn} = \frac{\sum_i \{ 2(X_{ni} - X_{ji}) + (x_{ni} - x_{ji}) \} (x_{ni} - x_{ji})}{2L_{jn}}$$

$$\frac{\partial e_{jn}}{\partial x_{ji}} = -\frac{1}{L_{jn}} \{ (X_{ni} - X_{ji}) + (x_{ni} - x_{ji}) \}$$

従って以上の式を直交座標系に変換すると,

$$e_{jn} = \{ 2(X_n - X_j) + (x_n - x_j) \} (x_n - x_j) / 2L_{jn}$$

$$+ \{ 2(Y_n - Y_j) + (y_n - y_j) \} (y_n - y_j) / 2L_{jn}$$

$$= \frac{1}{L_{jn}} \{ (X_n - X_j)(x_n - x_j) + (Y_n - Y_j)(y_n - y_j) \}$$

$$\frac{\partial e_{jn}}{\partial x_j} = -\frac{1}{L_{jn}} \{ (X_n - X_j) + (x_n - x_j) \}$$

$$\frac{\partial e_{jn}}{\partial y_j} = -\frac{1}{L_{jn}} \{ (Y_n - Y_j) + (y_n - y_j) \}$$

$$e_{jn} \frac{\partial e_{jn}}{\partial x_j} = -\frac{1}{L_{jn}^2} \{ (X_n - X_j)(x_n - x_j) + (Y_n - Y_j)(y_n - y_j) \} (X_n - X_j)$$

$$e_{jn} \frac{\partial e_{jn}}{\partial y_j} = -\frac{1}{L_{jn}^2} \{ (X_n - X_j)(x_n - x_j) + (Y_n - Y_j)(y_n - y_j) \} (Y_n - Y_j)$$

従って j 点における釣合式は

$$\begin{aligned} \sum_{a=1}^N \{ P_{ja0} \{ \frac{1}{L_{ja}} \{ (X_a - X_j) + (x_a - x_j) \} \} + \frac{EA_a}{L_{ja}} \cdot \frac{1}{L_{ja}^2} \{ (X_a - X_j)^2 (x_a - x_j) \\ + (X_a - X_j) (Y_a - Y_j) (y_a - y_j) \} + F_{jx} \} = 0 \\ \sum_{a=1}^N \{ P_{ja0} \{ \frac{1}{L_{ja}} \{ (Y_a - Y_j) + (y_a - y_j) \} \} + \frac{EA_a}{L_{ja}} \cdot \frac{1}{L_{ja}^2} \{ (X_a - X_j) (Y_a - Y_j) (x_a - x_j) \\ + (Y_a - Y_j)^2 (y_a - y_j) \} + W_j + F_{jy} \} = 0 \end{aligned}$$

無載荷時の釣合条件式から

$$\sum_{a=1}^N P_{ja0} \frac{X_a - X_j}{L_{ja}} = 0 \quad \sum_{a=1}^N P_{ja0} \frac{Y_a - Y_j}{L_{ja}} + W_j = 0$$

従って、

$$\begin{aligned} \sum_{a=1}^N \{ \frac{P_{ja0}}{L_{ja}} (x_a - x_j) + \frac{EA_{aj}}{L_{ja}^3} \{ (X_a - X_j)^2 (x_a - x_j) + (X_a - X_j) (Y_a - Y_j) (y_a - y_j) \} \} \\ + F_{jx} = 0 \\ \sum_{a=1}^N \{ \frac{P_{ja0}}{L_{ja}} (y_a - y_j) + \frac{EA_{aj}}{L_{ja}^3} \{ (X_a - X_j) (Y_a - Y_j) (x_a - x_j) + (Y_a - Y_j)^2 (y_a - y_j) \} \} \\ + F_{jy} = 0 \end{aligned}$$

上式が平面ケーブル構造の変形の方程式である。

さて、D'Alembert の原理によれば、

$$F_{jx} = -m_j \frac{\partial^2 x_j}{\partial t^2} \quad F_{jy} = -m_j \frac{\partial^2 y_j}{\partial t^2}$$

と、おきかえることに静的な釣合式から運動方程式が求められる。

$$\begin{aligned} -m_j \frac{\partial^2 x_j}{\partial t^2} + \sum_{a=1}^N \{ P_{ja0} \frac{1}{L_{ja}} (x_a - x_j) + \frac{EA_{ja}}{L_{ja}^3} \{ (X_a - X_j)^2 (x_a - x_j) + (X_a - X_j) (Y_a - Y_j) \\ (y_a - y_j) \} \} = 0 \\ -m_j \frac{\partial^2 y_j}{\partial t^2} + \sum_{a=1}^N \{ P_{ja0} \frac{1}{L_{ja}} (y_a - y_j) + \frac{EA_{ja}}{L_{ja}^3} \{ (X_a - X_j) (Y_a - Y_j) (x_a - x_j) + (Y_a - Y_j)^2 \\ (y_a - y_j) \} \} = 0 \end{aligned}$$

更にこれをかきあらためれば

$$\begin{aligned} -m_j \frac{\partial^2 x_j}{\partial t^2} - \sum_{a=1}^N \{ \frac{P_{ja0}}{L_{ja}} + \frac{EA_{ja}}{L_{ja}^3} (X_a - X_j)^2 \} X_j + \sum_{a=1}^N \{ P_{ja0} + \frac{EA_{ja}}{L_{ja}^3} (X_a - X_j)^2 \} X_a \\ - \sum_{a=1}^N \{ (X_a - X_j) (Y_a - Y_j) \frac{EA_{ja}}{L_{ja}^3} \} Y_j + \sum_{a=1}^N \{ (X_a - X_j) (Y_a - Y_j) \frac{EA_{ja}}{L_{ja}^3} \} Y_a = 0 \\ -m_j \frac{\partial^2 y_j}{\partial t^2} - \sum_{a=1}^N \{ \frac{P_{ja0}}{L_{ja}} + \frac{EA_{ja}}{L_{ja}^3} (Y_a - Y_j)^2 \} Y_j + \sum_{a=1}^N \{ P_{ja0} + \frac{EA_{ja}}{L_{ja}^3} (Y_a - Y_j)^2 \} Y_a \\ - \sum_{a=1}^N \{ (X_a - X_j) (Y_a - Y_j) \frac{EA_{aj}}{L_{ja}^3} \} X_j + \sum_{a=1}^N \{ (X_a - X_j) (Y_a - Y_j) \frac{EA_{aj}}{L_{ja}^3} \} X_a = 0 \end{aligned}$$

上式が平面ケーブル構造の運動方程式である。

2-3 ケーブルのサグの影響

最初の仮定でも明らかな如く上記運動方程式の誘導にあたっては部材は格点間に直線に張られていると仮定した。この仮定はケーブルの分布質量に比して初期張力が大きい場合やケーブルが比較的鉛直に近い角度に張られた場合には問題ないがこの逆の場合にはこの仮定が成立するか否かは明らかではない。そこでここではこのサグの影響の第一近似でもってこの仮定の可否を判断しようとするものである。ここではケーブルの弾性係数の補正係数と形であらわすものとする。

点 $(X_j, Y_j), (X_a, Y_a)$ 間にサグ f_{ja} , 初期張力 P_{ja0} で張られたケーブルが $(X_j + x_j, Y_j + y_j), (X_a + x_a, Y_a + y_a)$ に変形しサグが $f_{ja} + \Delta f_{ja}$, 張力が $P_{ja0} + \Delta P_{ja}$ に変化したとする。

計算を簡単化するため、変形条件を次の如く定める。

$$\frac{X_j - X_a}{Y_j - Y_a} = \frac{x_j - x_a}{y_j - y_a}$$

また以下の如く変数を定義する。

$$X_{aj} = X_a - X_j, \quad Y_{aj} = Y_a - Y_j,$$

$$x_{aj} = x_a - x_j, \quad y_{aj} = y_a - y_j,$$

$$L_{aj}^2 = X_{aj}^2 + Y_{aj}^2$$

$$(L_{aj} + \Delta L_{aj})^2 = (X_{aj} + x_{aj})^2 + (Y_{aj} + y_{aj})^2$$

また q_{aj} を点 a, j 間に張られたケーブルの単位長当りの重量とすれば、このケーブルの全重量 W_{aj} は

$$W_{aj} = q_{aj} \cdot L_{aj}$$

i 変形前の力及び長さの関係

$$P_{ja0} = \frac{q_{aj} X_{aj}^2}{8 f_{ja}} \cdot \frac{L_{aj}}{X_{aj}}$$

$$= \frac{W_{aj} X_{aj}}{8 f_{ja}}$$

$$l_{aj} = L_{aj} \left(1 + \frac{8}{3} \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} \right)$$

ここに l_{aj} はサグを考えたケーブルの長さ、 n はサグ比、 α はケーブルが水平となす角度である。

ii 変形後の力及び長さの関係

$$P_{ja0} + \Delta P_{ja} = \frac{W_{aj} (X_{aj} + x_{aj})}{8 (f_{ja} + \Delta f_{ja})}$$

$$l_{aj} + dl_{aj} = (L_{aj} + dL_{aj}) \left\{ 1 + \frac{8}{3} \frac{1}{\sec^4 \alpha} \left(\frac{f_{aj} + df_{aj}}{X_{aj} + dX_{aj}} \right)^2 \right\}$$

$$dl_{aj} = \int_0^{l_{aj}} \frac{1}{EA_{aj}} dP_{aj} dl$$

$$\Rightarrow \frac{dP_{aj}}{EA_{aj}} l_{aj}$$

上式を更に変形すると

$$\begin{aligned} P_{aj0} + dP_{aj} &= \frac{W_{aj} X_{aj} \left(1 + \frac{X_{aj}}{X_{aj}} \right)}{8 f_{aj} \left(1 + \frac{df_{aj}}{f_{aj}} \right)} \\ &= \frac{W_{aj} X_{aj}}{8 f_{aj}} \left(1 + \frac{X_{aj}}{X_{aj}} \right) \left(1 - \frac{df_{aj}}{f_{aj}} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dP_{aj} &= \frac{W_{aj} X_{aj}}{8 f_{aj}} \left(\frac{X_{aj}}{X_{aj}} - \frac{df_{aj}}{f_{aj}} \right) \\ &= P_{aj0} \left(\frac{X_{aj}}{X_{aj}} - \frac{df_{aj}}{f_{aj}} \right) \end{aligned}$$

$$l_{aj} + dl_{aj} = (L_{aj} + dL_{aj}) \left\{ 1 + \frac{8}{3} \cdot \frac{1}{\sec^4 \alpha} \left(\frac{f_{aj} + df_{aj}}{X_{aj} + dX_{aj}} \right)^2 \right\}$$

$$= (L_{aj} + dL_{aj}) \left\{ 1 + \frac{8}{3} \cdot \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} \left(\frac{1 + \frac{df_{aj}}{f_{aj}}}{1 + \frac{dX_{aj}}{X_{aj}}} \right)^2 \right\}$$

$$= (L_{aj} + dL_{aj}) \left\{ 1 + \frac{8}{3} \cdot \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} \left(1 + 2 \frac{df_{aj}}{f_{aj}} \right) \left(1 - 2 \frac{dX_{aj}}{X_{aj}} \right) \right\}$$

$$= (L_{aj} + dL_{aj}) \left\{ 1 + \frac{8}{3} \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} + \frac{8}{3} \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} \left(\frac{2df_{aj}}{f_{aj}} - \frac{2dX_{aj}}{X_{aj}} \right) \right\}$$

$$\therefore dl_{aj} = dL_{aj} \left\{ 1 + \frac{8}{3} \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} \right\} + \frac{16}{3} \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} \left(\frac{df_{aj}}{f_{aj}} - \frac{dX_{aj}}{X_{aj}} \right) (L_{aj} + dL_{aj})$$

$$\therefore \frac{dP_{aj}}{EA_{aj}} l_{aj} = \frac{dL_{aj}}{L_{aj}} l_{aj} - \frac{16}{3} \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} (L_{aj} + dL_{aj}) \frac{dP_{aj}}{P_{aj0}}$$

$$\Rightarrow \frac{dL_{aj}}{L_{aj}} l_{aj} - \frac{16}{3} \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} \cdot \frac{dP_{aj}}{P_{aj0}} L_{aj}$$

従ってみかけの Young 率 E は,

$$\begin{aligned} E = \frac{dP_{aj}/A_{aj}}{dL_{aj}/L_{aj}} &= l_{aj} \left\{ \frac{l_{aj}}{E} + \frac{16}{3} \cdot \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} \cdot \frac{A}{P_{aj0}} \cdot L_{aj} \right\}^{-1} \\ &= E \cdot \left\{ 1 + \frac{16}{3} \cdot \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} \frac{EA}{P_{aj0}} \frac{L_{aj}}{l_{aj}} \right\}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= E \cdot \frac{1 + \frac{8}{3} \frac{n^2}{\sec^4 \alpha}}{1 + \frac{8}{3} \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} + \frac{16}{3} \frac{n^2}{\sec^4 \alpha} \cdot \frac{EA_{a,j}}{P_{a,j} \cdot L_{a,j}^4}} \\
&= E \cdot \frac{1 + \frac{1}{24} \frac{W_{a,j}^2}{P_{a,j}^2} \cdot \frac{X_{a,j}^4}{L_{a,j}^4}}{1 + \frac{1}{24} \frac{W_{a,j}^2}{P_{a,j}^2} \cdot \frac{X_{a,j}^4}{L_{a,j}^4} + \frac{1}{12} \frac{W_{a,j}^2}{P_{a,j}^2} \cdot \frac{X_{a,j}^4}{L_{a,j}^4} \cdot EA_{a,j}}
\end{aligned}$$

従ってサグによるみかけの Young 率の低下は次のような補正を行なえばよい。

$$m = \frac{1 + \frac{1}{24} \frac{W_{a,j}^2}{P_{a,j}^2} \cdot \frac{X_{a,j}^4}{L_{a,j}^4}}{1 + \frac{1}{24} \frac{W_{a,j}^2}{P_{a,j}^2} \cdot \frac{X_{a,j}^4}{L_{a,j}^4} + \frac{1}{12} \frac{W_{a,j}^2}{P_{a,j}^2} \cdot \frac{X_{a,j}^4}{L_{a,j}^4} \cdot EA_{a,j}}$$

2-4 格点が3次元に配置され、変形が2次元である場合

図-3で示されるキャット・ウォークは、格点配置は3次元であるがその変形は2次元である。この場合には次のようにとりあつかうことができる。格点 (X_a, Y_a, Z_a) (X_i, Y_i, Z_i) が $(X_a + x_a, Y_a + y_a, Z_a + z_a)$, $(X_i + x_i, Y_i + y_i, Z_i + z_i)$ に変形した場合の伸び e_{ia} は

$$\begin{aligned}
e_{ia} &= \{2(X_a - X_i) + (x_a - x_i)\} (x_a - x_i) / 2L_{ia} \\
&\quad + \{2(Y_a - Y_i) + (y_a - y_i)\} (y_a - y_i) / 2L_{ia} \\
&\quad + \{2(Z_a - Z_i) + (z_a - z_i)\} (z_a - z_i) / 2L_{ia}
\end{aligned}$$

但し変形が2次元であることから $Z_a = Z_i = 0$

$$\begin{aligned}
\therefore e_{ia} &= \{2(X_a - X_i) + (x_a - x_i)\} (x_a - x_i) / 2L_{ia} \\
&\quad + \{2(Y_a - Y_i) + (y_a - y_i)\} (y_a - y_i) / 2L_{ia}
\end{aligned}$$

$$\text{ここに } L_{ia} = \{(X_a - X_i)^2 + (Y_a - Y_i)^2 + (Z_a - Z_i)^2\}^{1/2}$$

上の式からも明らかな如く系の strain energy を規定するひずみは Z 座標の影響を受けない。従って式 (1) の代わりに式 (2) を用いればこの場合の運動方程式及び弾性係数の補正係数が求まる。

2-5 数値計算結果

以上の計算式はフォートランでプログラムされており入力データとして格点座標、初期張力、ロープ以外の質量及び格点の拘束条件等を用いれば計算できるようになっている。数値計算としては図3及び図4に示すようなトラストハンガー型式のキャット・ウォークとパラレルハンガー型式のキャット・ウォークの2通りの場合について計算した。入力データは表-2及び表-3に示す。計算は電子計算機の計算能力と構造物の格点数の関係で対称モードと逆対称モードに分けて行なった。対称モードと逆対称モードは中央点での境界条件

図-3 試案1 (トラスドハンガー型キャットウォーク)

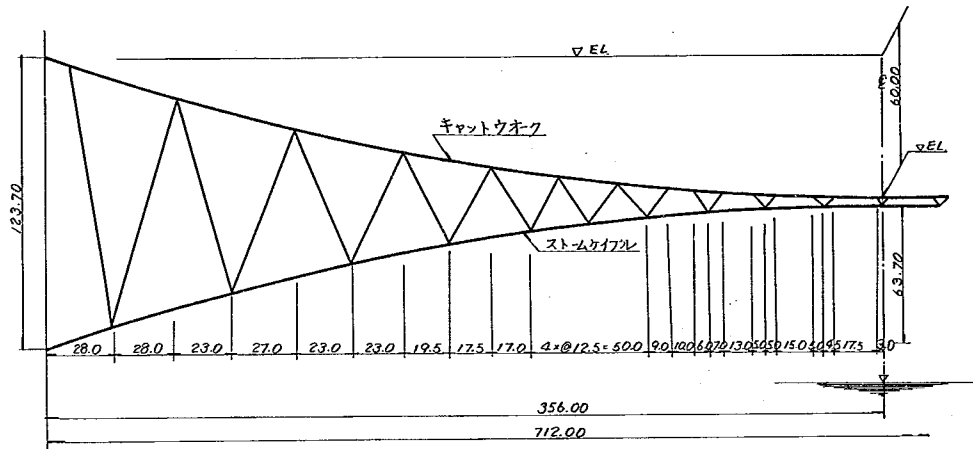
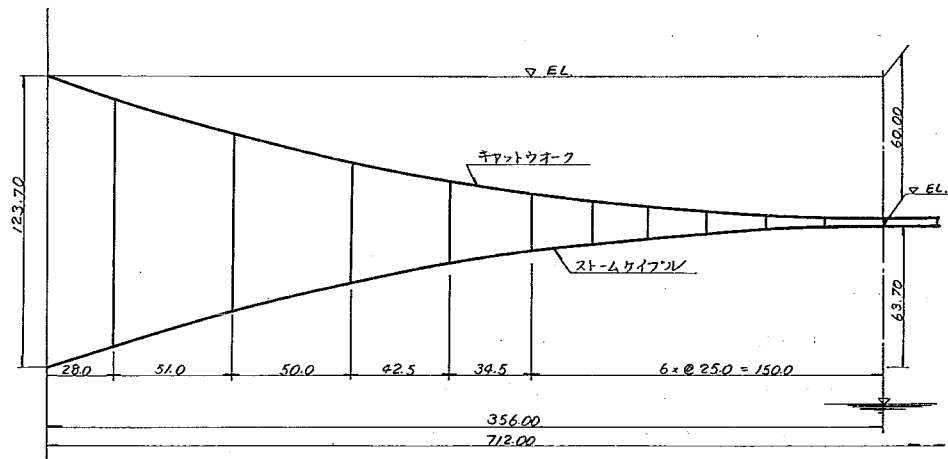


図-4 試案2 (平行ハンガー型キャットウォーク)



(中央点の拘束条件)が多少変わるだけである。

なお、計算は格点間ケーブルのサグの影響を無視している。

表 2-1 モデル 1 (トラスハンガー) の入力データ

格点	格点の拘束条件	格点の重量 (ton)	格点の x 座標 (m)	格点の y 座標 (m)	格点の z 座標 (m)
1	固 定	0.0000E+00	0.000	123700	2900
2	"	0.0000E+00	0.000	0.000	0.000
3	自 由	0.3519E+01	5.000	122007	2900
4	"	0.1679E+01	28.000	9067	0.000
5	"	0.5782E+01	57.000	106105	2900
6	"	0.1567E+01	79.000	23765	0.000
7	"	0.5433E+01	106.000	92934	2900
8	"	0.1420E+01	129.000	35605	0.000
9	"	0.4656E+01	152.000	82932	2900
10	"	0.1173E+01	171.500	43884	0.000
11	"	0.3707E+01	189.000	76357	2900
12	"	0.9020E+00	206.000	49348	0.000
13	"	0.3024E+01	218.500	72055	2900
14	"	0.7550E+00	231.000	52803	0.000
15	"	0.2572E+01	243.500	65082	2900
16	"	0.7530E+00	256.000	55266	0.000
17	"	0.1740E+01	265.000	66966	2900
18	"	0.1269E+01	275.000	66112	2900
19	"	0.7520E+00	281.000	57337	0.000
20	"	0.1433E+01	288.000	65215	2900
21	"	0.1267E+01	301.000	64449	2900
22	"	0.7510E+00	306.000	58816	0.000
23	"	0.1376E+01	311.000	63970	2900
24	"	0.1485E+01	326.000	63431	2900
25	"	0.7500E+00	331.000	57704	0.000
26	"	0.1485E+01	335.500	63201	2900
27	"	0.1292E+01	353.000	63004	2900
28	(上下自由, 水平拘束)	0.3750E+00	356.000	60000	0.000
29	()	0.0000E+00	356.000	63000	2900

注 () の条件は対称振動波形的場合、逆対称振動波形的の拘束条件は上下拘束水平自由

表 2-2 モデル 1 (トラスハンガー) の入力データ

部材の始点と終点	部材の断面積 (mm ²)	部材の初期張力 (ton)
1 3	0.0608	229569
2 4	0.0238	75364
3 4	0.0056	2975
3 5	0.0608	227719
4 5	0.0056	3003
4 6	0.0238	74616
5 6	0.0056	2460
5 7	0.0608	224819
6 7	0.0056	2747
6 8	0.0238	73683
7 8	0.0056	2520
7 9	0.0608	222480
8 9	0.0056	2369
8 10	0.0238	73047
9 10	0.0056	2199
9 11	0.0608	220810
10 11	0.0056	1993
10 12	0.0238	72593
11 12	0.0056	2014
11 13	0.0608	219739
12 13	0.0056	1248
12 14	0.0238	72304
13 14	0.0056	1485
13 15	0.0608	218959
14 15	0.0056	1563
14 16	0.0238	72103
15 16	0.0056	1679
15 17	0.0678	218429
16 17	0.0056	1567
16 19	0.0238	71946
17 18	0.0608	218179
18 19	0.0056	1504
18 20	0.0608	218239
19 20	0.0056	1659
19 22	0.0238	71825
20 21	0.0608	217789
21 22	0.0056	1657
21 23	0.0608	217640
22 23	0.0056	2631
22 25	0.0238	71745
23 24	0.0608	217549
24 25	0.0056	2188
24 26	0.0608	217459
25 26	0.0056	2017
25 28	0.0238	71705
26 27	0.0608	217429
27 28	0.0056	1749
27 29	0.0608	217399

表 3-1 モデル 2 (パラレルハンガー) の入力データ

格点	格点の拘束条件	格点の重量 (tan)	格点の x 座標 (mm)	格点の y 座標 (mm)
1	固 定	0.0000 E+00	0.000	0.000
2	"	0.0000 E+00	0.000	-123.800
3	自 由	0.1335 E+01	45.000	-109.400
4	"	0.4895 E+01	45.000	-14.210
5	"	0.4620 E+01	89.000	-26.250
6	"	0.1260 E+01	89.000	-97.200
7	"	0.1140 E+01	129.000	-87.720
8	"	0.4180 E+01	129.000	-35.600
9	"	0.3630 E+01	165.000	-42.730
10	"	0.9900 E+00	165.000	-80.500
11	"	0.7950 E+00	195.000	-75.440
12	"	0.2915 E+01	195.000	-47.730
13	"	0.2365 E+01	218.000	-50.980
14	"	0.6450 E+00	218.000	-72.140
15	"	0.6000 E+00	238.000	-69.680
16	"	0.2200 E+01	238.000	-53.410
17	"	0.2200 E+01	258.000	-55.450
18	"	0.6000 E+00	258.000	-67.610
19	"	0.6000 E+00	278.000	-65.920
20	"	0.2200 E+01	278.000	-57.120
21	"	0.2200 E+01	298.000	-58.410
22	"	0.6000 E+00	298.000	-64.610
23	"	0.6000 E+00	318.000	-63.690
24	"	0.2200 E+01	318.000	-59.320
25	"	0.2090 E+01	338.000	-59.850
26	"	0.5700 E+00	338.000	-63.150
27	(上下自由, 水平拘束)	0.5400 E+00	356.000	-63.000
28	(")	0.2090 E+01	356.000	-60.000

注 () の条件は対称振動波形の場合、逆対称振動波形の拘束条件は上下拘束、水平自由

表 3-2 モデル 2 (パラレルハンガー) の入力データ

部材の始点と終点	部材の断面積 (mm ²)	部材の初期張力 (ton)
1 4	0.0608	228.049
2 3	0.0238	75.289
3 4	0.0016	4.356
3 6	0.0238	74.420
4 5	0.0608	225.439
5 6	0.0016	4.158
5 8	0.0608	223.269
6 7	0.0238	73.709
7 8	0.0016	3.762
7 0	0.0238	73.129
8 9	0.0608	221.530
9 10	0.0016	3.267
9 12	0.0608	220.439
10 11	0.0238	72.700
11 12	0.0016	2.624
11 14	0.0238	72.420
12 13	0.0608	219.569
13 14	0.0016	2.228
13 16	0.0608	218.920
14 15	0.0238	72.269
15 16	0.0016	1.980
15 18	0.0238	72.060
16 17	0.0608	218.489
17 18	0.0016	1.980
17 20	0.0608	218.049
18 19	0.0238	71.989
19 20	0.0016	1.980
19 22	0.0238	71.840
20 21	0.0608	217.829
21 22	0.0016	1.980
21 24	0.0608	217.670
22 23	0.0238	71.769
23 24	0.0016	1.980
23 26	0.0238	71.700
24 25	0.0608	217.399
25 26	0.0016	1.881
25 28	0.0608	217.399
26 27	0.0238	71.700
27 28	0.0016	1.782

計算結果を図5及び図6に示す。また固有振動数の比較を表4に示す。

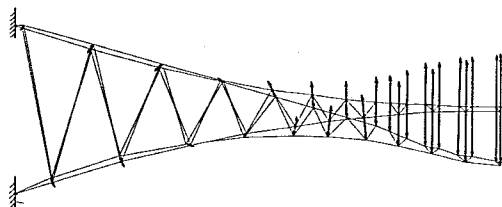
この結果から明らかな如くキャット・ウォークのスパン長、キャット・ウォークブレ及びストームケーブルの断面積、初期張力が同じにもかかわらずトラスドハンガー型式のキャット・ウォークの固有振動数は平行ハンガーのそれに較べてはるかに高い。また振動モードの上からみるとトラスドハンガー型式の場合には主塔附近の拘束が強いことが明らかとなっている。

表-4 キャット・ウォークの固有振動数

		トラスドハンガー型式	平行ハンガー型式
対称波形	1次振動	0.2918 %	0.2187 %
	2次振動	0.5811	0.3342
	3次振動	0.7004	0.3992
	4次振動	1.006	0.5409
逆対称波形	1次振動	0.4813	0.1687
	2次振動	0.5808	0.3211
	3次振動	0.8573	0.4748
	4次振動	1.1950	0.6140

対称一次振動

固有周期 3.43 sec



対称二次振動

固有周期 1.72 sec

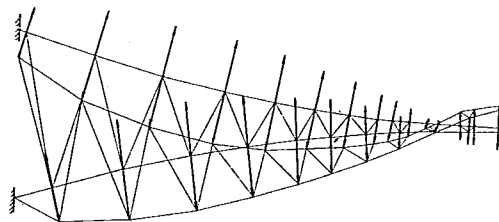


図-5-1 トラスドハンガー型式

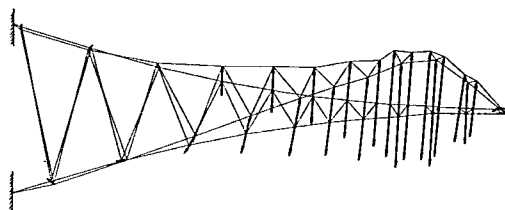
キャットウォークの振動波形

図-5-2 トラスドハンガー型式

キャットウォークの振動波形

逆対称一次振動

固有周期 2.08 sec



逆対称二次振動

固有周期 1.72 sec

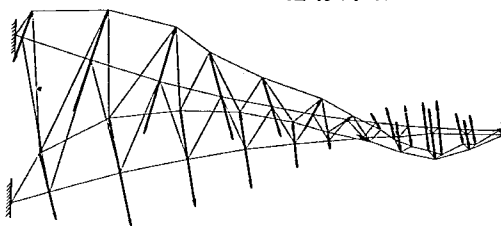


図-5-3 トラスドハンガー型式

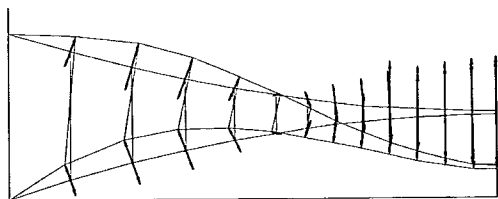
キャットウォークの振動波形

図-5-4 トラスドハンガー型式

キャットウォークの振動波形

対称一次振動

固有周期 4.57 sec



対称二次振動

固有周期 2.99 sec

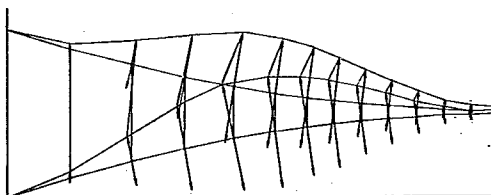


図-6-1 パラレルハンガー型式

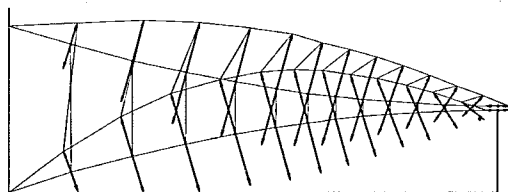
キャットウォークの振動波形

図-6-2 パラレルハンガー型式

キャットウォークの振動波形

逆対称二次振動

固有周期 5.93 sec



逆対称二次振動

固有周期 3.11 sec

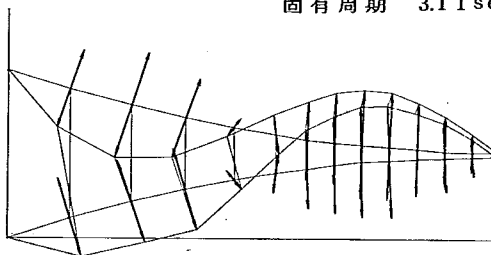


図-6-3 パラレルハンガー型式

キャットウォークの振動波形

図-6-4 パラレルハンガー型式

キャットウォークの振動波形

3. 風洞模型実験

3-1 まえがき

風洞模型実験で構造物の耐風性を確かめるためには模型は原型に対していくつかの相似条件を満足しなければならない。

これらの相似条件の1つに空気の粘性 (Reynolds 数) に関するものがある。この相似条件は構造物のまわりの気流に関するもので非常に重要な因子であるが、一般の低圧風洞では他の相似条件を同時に Reynolds 数に関する相似関係を満足させることは実物実験以外には不可能である。幸い我々が扱う構造物の多くは角ばったものが多く、気流の構造物の表面から剝離する点の上流側の捩角部に固定され、風速の影響をうけないため Reynolds 数に関する相似条件を重視するのが普通である。しかし捩角部をもたない滑らかな構造物においては、この因子は無視できない。従ってキャット・ウォークの場合、主要部材はケーブル、金網といった円形であり、Reynolds 数の影響が考えられる。一方キャット・ウォークは主として気流を遮蔽する金網に使用されている素線の径は $1 \sim 3$ 程度のものであり、風速 20 m/s における Reynolds 数はおおよそ $1.3 \sim 4.0 \times 10^3$ 程度となりこの範囲では例えば抗力は風速の増加に逆比例して減少する。

以上のように模型実験においては Reynolds 数に関する相似が必要であることは明らかであるが実際には不可能であること、また模型についても正確な幾何学的相似が不可能で例2は金網等は充実率だけしか相似できず寸法的には実物のそれとかなり近いこと等も考慮して、ひとまず Reynolds 数に関する相似を無視して実験を行なった。従って、今回の実験は検証実験と云うよりも実物の風の中での振動と対比して風洞実験の妥当性を検討することを目的としている。

なお今回の実験も手法は従来のものと全く同じで、空気力係数を求めるための三分力試験と空力安定性を調べるためのパネ支持模型実験を実施した。このうち後者については振りの振動数が求まらなかったため相似則としては次に説明するような撓みの一自由度フラッターからもとまるものを適用したが、模型は2自由度に支持した。但しこの場合振りに関する相似則は一切満足していない。

風洞模型はまず第1に幾何学的形状が実物と相似でなければならないが、この模型では市販の金網の規格の制約があって、金網に関しては充実率が等しいものを選んで用いた。また前章でものべた如くキャット・ウォークの振り振動数を求めることが困難であったため、模型実験も主として撓みの1自由フラッターを対象とした。

撓みの1自由度フラッターの方程式は

$$I_z \ddot{\eta} + C_z \dot{\eta} + K_z \eta = \rho B V \eta [f(V_r) + i g(V_r)]$$

ただし f, g はいずれも $V_r = V/NB$ (reduced velocity) のみの関数また,

また, I_z : 質量, C_z : 減衰をあらわす定数, K_z : バネ定数

ρ : 空気密度, B : 構造物の代表長, V : 風速

ここで運動が調和振動であると仮定すると,

$$\eta = \eta e^{2\pi N t i} \quad \dot{\eta} = 2\pi N i \eta e^{2\pi N t i} \quad \ddot{\eta} = -4\pi^2 N^2 \eta e^{2\pi N t i}$$

従って $-4\pi^2 N^2 I_z + 2\pi N i C_z + K_z = 2\pi N i \rho B V [f(V_r) + i g(V_r)]$

$$\therefore \begin{cases} -4\pi^2 N^2 I_z + K_z = -2\pi N \rho B V f(V_r) \\ 2\pi N C_z = 2\pi N \rho B V g(V_r) \end{cases}$$

この式に $V_r = V/NB$, $N_z = \frac{1}{2\pi} K_z / I_z$ を代入すると,

$$V_r g(V_r) = \frac{1}{2\pi \rho N^2 B^2} (K_z - 4\pi^2 N^2 I_z)$$

$$= \frac{2\pi I_z}{\rho B^2} \left(\frac{N_z^2}{N^2} - 1 \right)$$

$$V_r f(V_r) = \frac{C_z}{\rho N B^2}$$

一般に1自由度振動系の場合気流中での振動数は無風時とあまり変わらないため $N = N_z$ とおける。従って上の第1式は零となる。

更に $\delta_z = C_z / (2 I_z N_z)$ から

$$V_r f(V_r) = \frac{2 I_z \delta_z}{\rho B^2}$$

この辺が実物と模型で一致しなければならない。従って,

$$\therefore \frac{V}{N_z B}, \quad \frac{I_z \delta_z}{\rho B^2}$$

が模型と実物で一致しなければならぬ。

3-2 模 型

模型は製作精度を考慮して1:7と1:10の縮尺のものをつくった。模型は出来るだけ原型と幾何学的に相似になるよう心がけたが, 防護用の金網等は縮尺模型化することが不可能であったためこれらの部分については部材の形状と充実率をあわせた。模型の一般図を図7, 8に示す。

☒ - 7

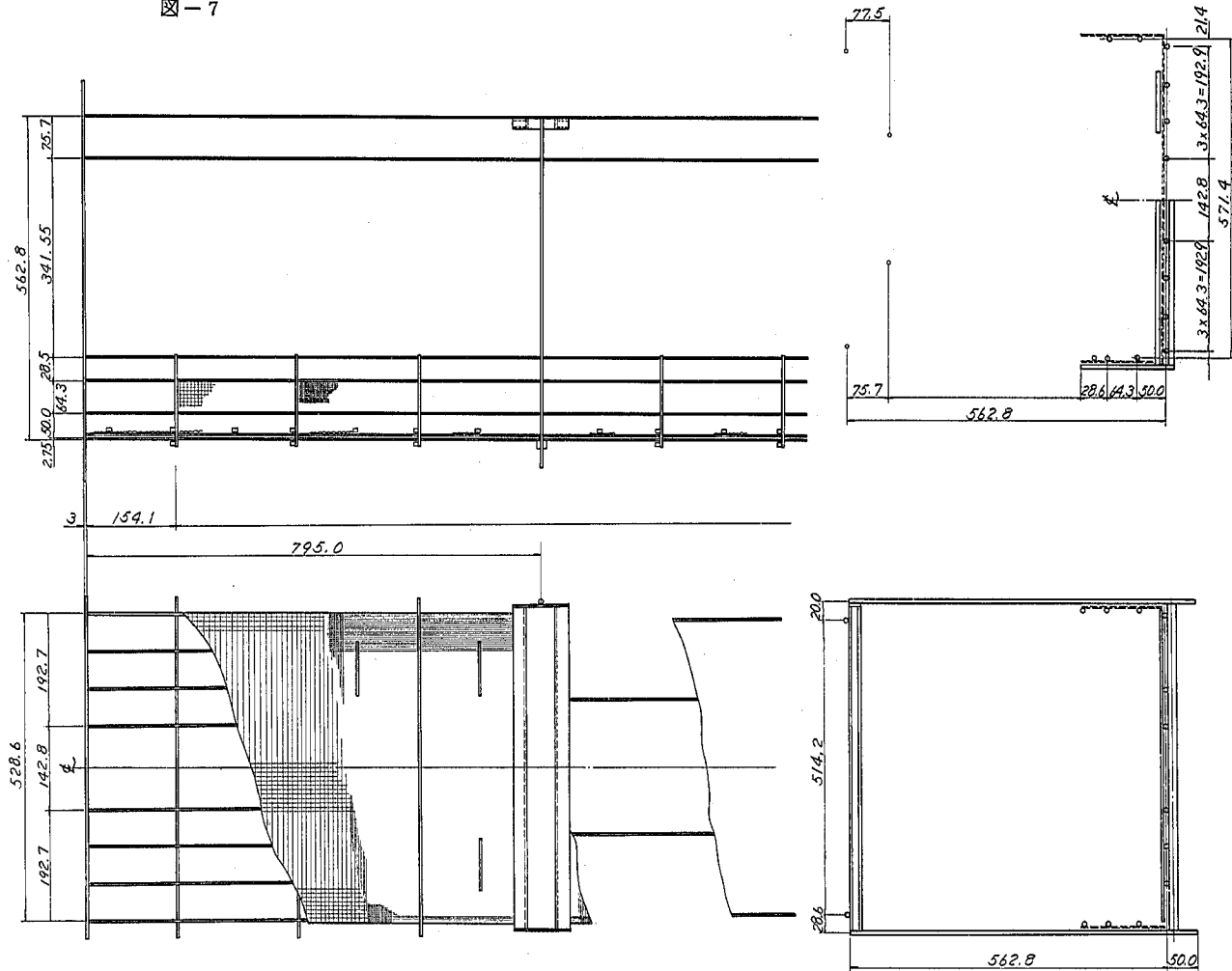
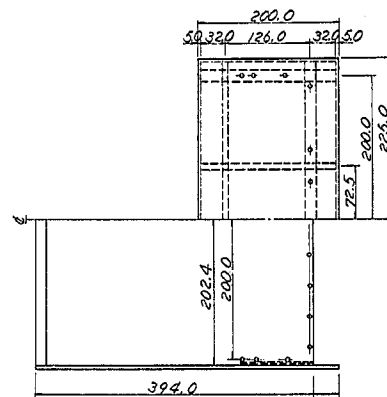
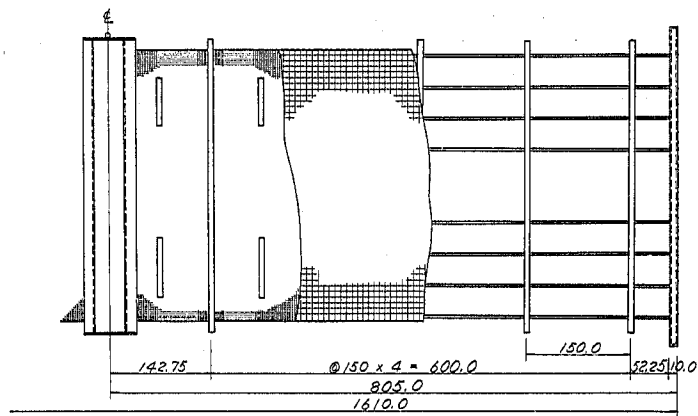
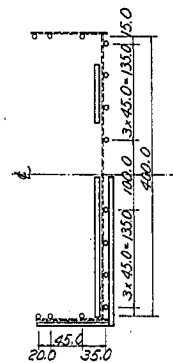
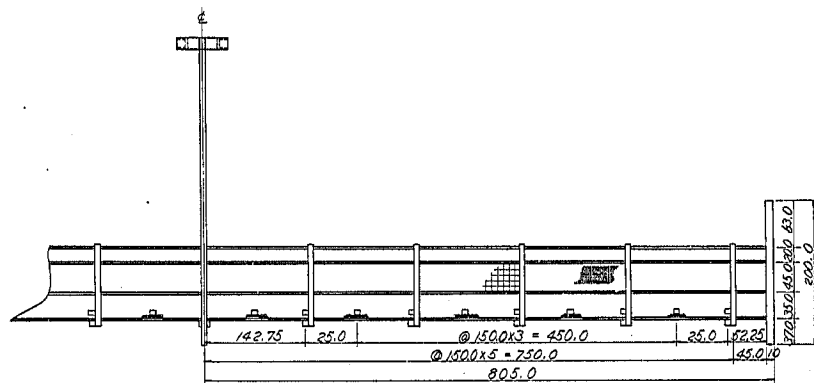
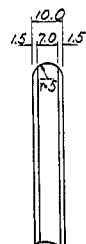


图 - 8



これらの模型の他に10分の1縮尺の模型について2つの追加実験を実施した。1つは模型の側面を全部紙で覆ったもの、もう一つは側面の防護金網を実物寸法で30cm程度に低くしたものである。なお実験に使用した装置は昨年度のものと同じであるが、実物の構造減衰がはっきりしないため電磁ダンパーの使用をとりやめ、出来るだけ減衰を小さくして実験した。模型の諸元を表5に示す。

なお実験中の模型の構造減衰に関しては詳しく表6に示してある。

表 - 5 模型諸元

	実 物	模 型 1		模 型 2	
		所 安 値	採 用 値	所 安 値	採 用 値
縮 尺		1 : 7	1 : 7	1 : 10	1 : 10
重 量	150 Kg/m	4870g/model	$\frac{g}{model}$ 6790 * 7140	2400g/model	model 2430 * 2720 ** 2590
構 造 減 衰	0.03	0.03	0.021 * 0.023	0.03	0.047 * 0.045 ** 0.045
$I_z S_z / B^2$	0.28	0.28	0.27 * 0.32	0.28	0.45 * 0.48 ** 0.46
作業用足場金網	5φ 50×75mm 1.0φ キックウ 10mm目		1.2φ 2mesh 0.345φ 10mesh		0.4φ 16mesh
(全上充実率)	16.0% 26.7%		18.0% 25.3%		φ 44.0%
手すり用金網	3φ 75×150mm 1.0φ キックウ 10mm目		10φ 2mesh 0.345φ 10mesh		0.5φ 12mesh
(全上充実率)	6.0% 26.7%		15.1% 25.3%		41.7%

値 *は模型の側面を紙でおおったもの

**は模型の手すり用金網を実物寸法で30cmとしたもの

表 6 撓み振動の減衰率

迎角 模型名	-7.5°	-5.0°	2.5°	0.0°	+2.5°	+5.0°	+7.5°
kk-3G-70-10CW	0.064	0.046	0.043	0.051	0.040	0.036	0.048
kk-3G-70-10CW ₁	0.037	0.042	0.039	0.040	0.038	0.040	0.043
kk-3G-69-10CW ₂	0.054	0.049	0.049	0.045	0.045	0.044	0.043
kk-3G-69-7CW		0.033	0.017	0.021	0.021	0.030	
kk-3G-69-7CW ₁		0.031	0.021	0.023	0.024	0.023	

3-3 実験結果

3-3-1 三分力試験の結果

三分力試験の結果を図9, 10に示す。従来の実験に較べて空力モーメントが非常に大きくなっているが, これは三分力天秤への取付け方法の差で他の原因によるものとは考えられない。

さて実験結果からみて各空気力係数は Reynolds 数の影響をうけていないとは云えない。例えば抗力係数についてみれば実験時の風洞風速を大きくすると抗力係数が多少低下しており, これは円型部材に関する他の風洞実験の結果ともよく一致している。

図-9 KK-3G-70 7CW 三分力曲線

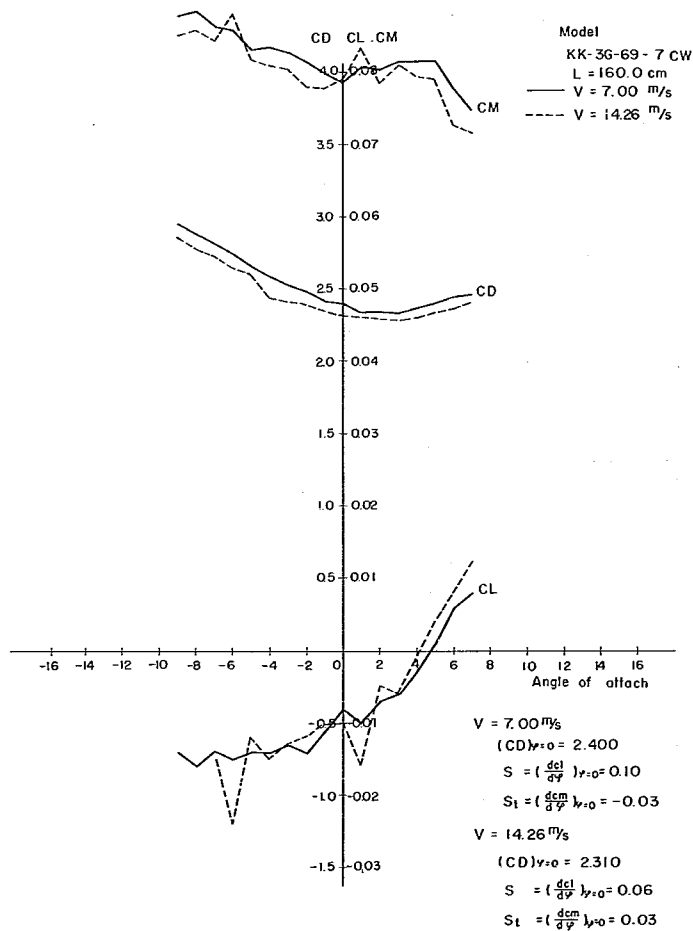


图-10-1 kk-3G-70 10CW 3分力曲线

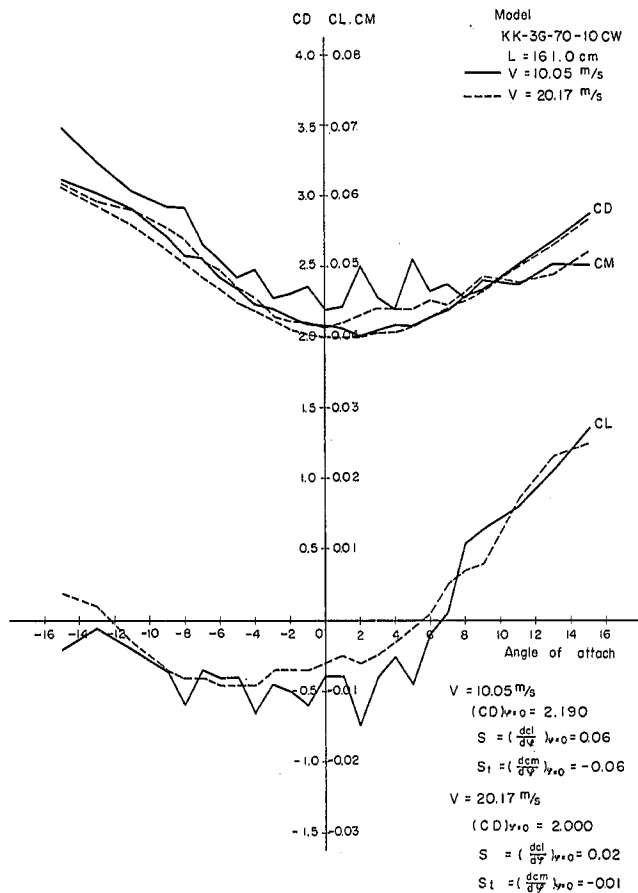
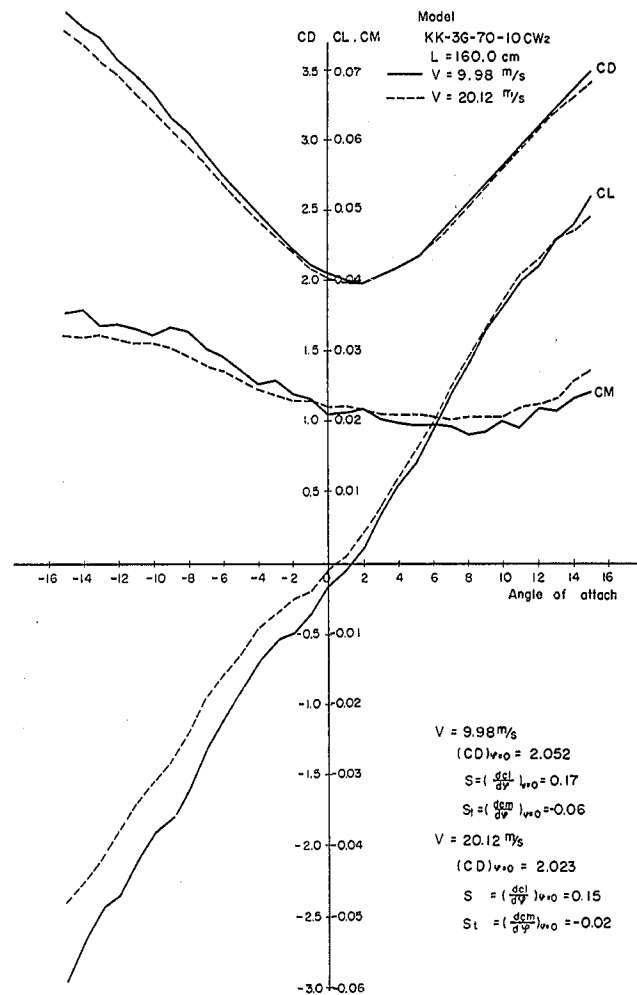


图-10-2 kk-3G-70 10CW' 3分力曲线



3-3-2 パネ支持模型実験結果

パネ支持模型実験の結果を図11, 12に示す。

図-11-1 kk-3G-70 7CW₁ V-A曲線

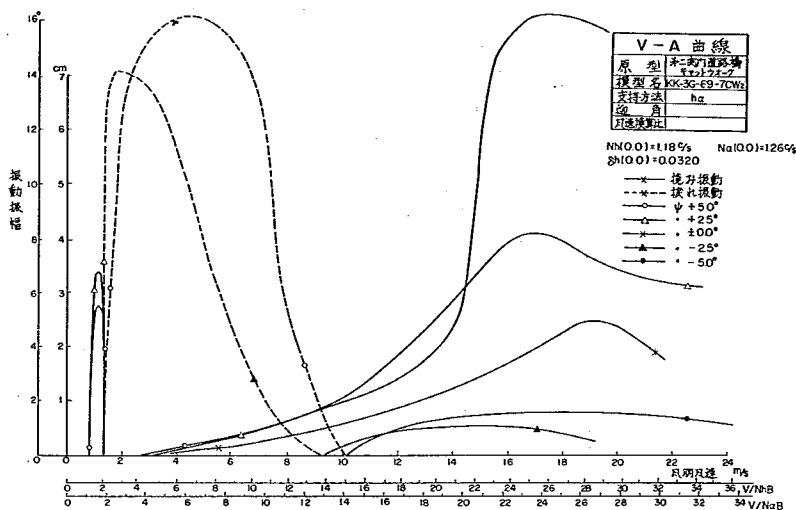


図-11-2 kk-3G-70 7CW V-A曲線

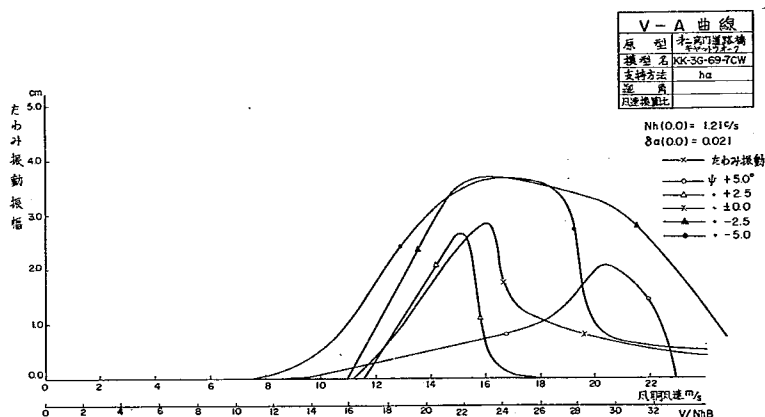


図-11-3

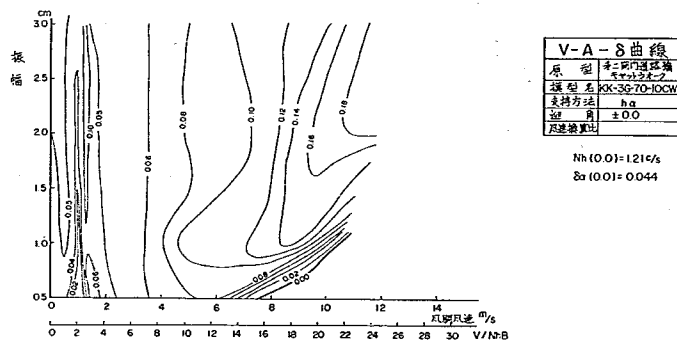


图-12-1 KK-3G-70 10CW₁ V-A曲线

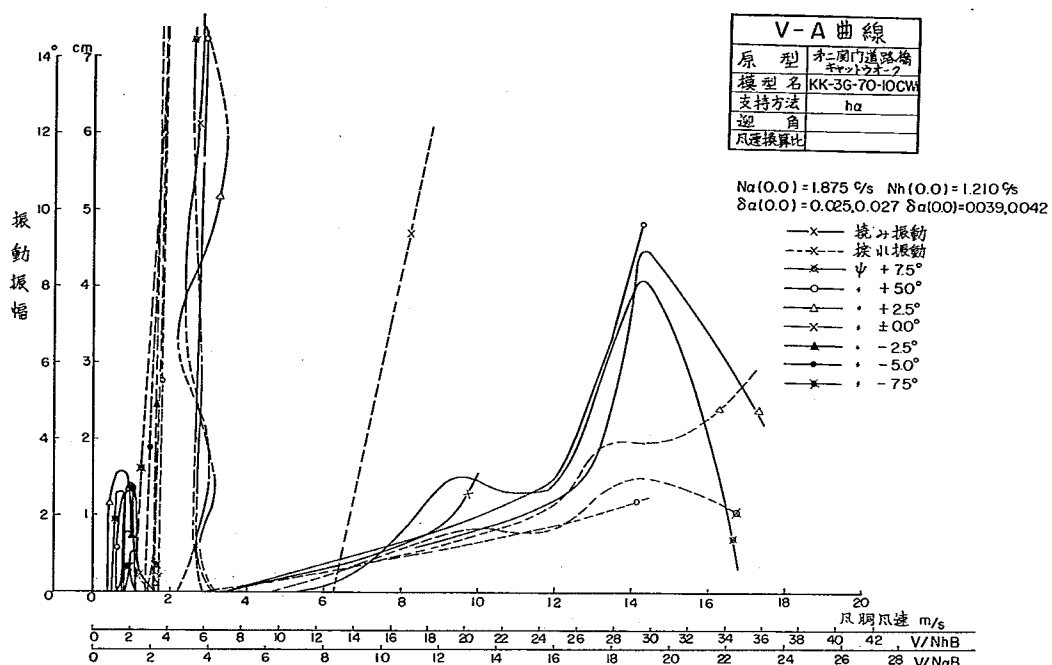
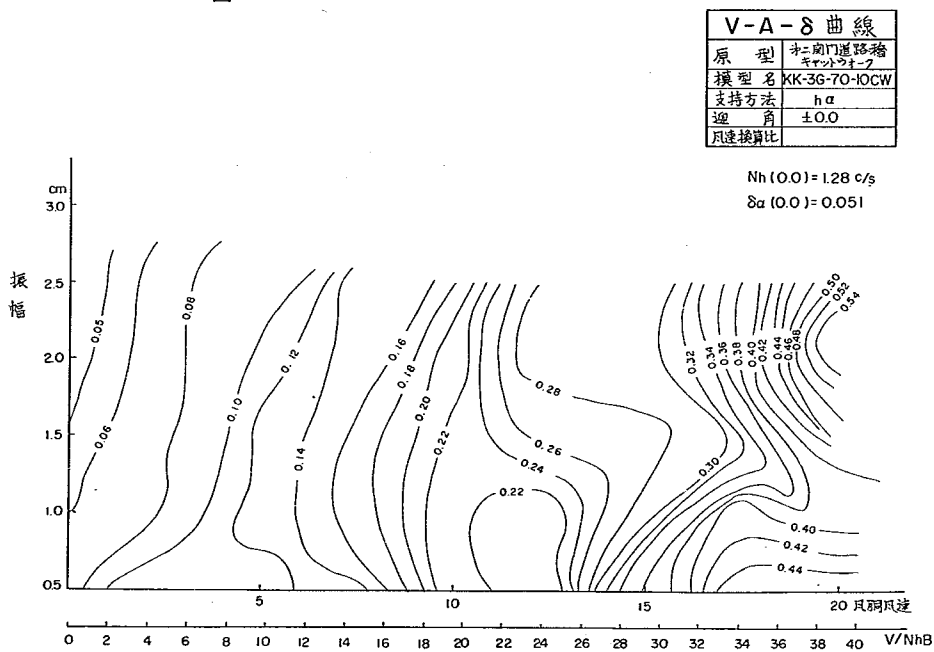


图-12-2



まず個々の実験結果について観察してみると、側面を紙で閉塞したもの(図)は非常に不安定で広い風速の範囲にわたって不安定振動があらわれている。また紙で閉塞していない模型は縮尺1:7の模型だけに不安定振動があらわれて1:10の模型では振動があらわれていない。この実験結果の差は主として構造減衰の差によるものと思われる。縮尺1:10の模型については側面の防護金網の高さを35cm(実物で)にしたものについても実験したがこの場合についても規則的な振動はあらわれなかった。

この実験がReynolds数の影響をあまり受けていないとすれば、以上の実験結果から次のようなことが推論されよう。

1. 側面の閉塞効果が大きい場合の不安定振動は撓み振動と振り振動が共に観察されたが、それらの連成振動はあらわれていない。また振動の種類としても風速の領域によっては、風琴振動と自動振動があらわれる。
2. 側面の閉塞効果が小さい場合には風琴振動はあらわれない。構造系の減衰が小さい場合にはギャロッピングが起る。
3. 側面の防護金網の高さが低い(35cm)場合の性質も(2)の場合と同様である。
4. 実物における不安定振動の発限の可能性はその構造減衰の大きさによる。もし起るとすれば20m/S~30m/Sの風速で発現するものと思われる。

4. 結 び

以上の実験結果はあくまでもReynolds数の影響をうけていないと云う仮定にたつものであって、従ってその検証のためにも是非実物の挙動の観測が望まれる。

また振り振動についても十分な考察を加えることができなかったが、この点についても実物の観測でその不安定振動の発限の有無をたしかめる必要があろう。

なお巻末にキャット・ウォークの固有振動解析のプログラム及び昨年度行なった実験で報告できなかったものについての実験結果を掲げてある。

附 属 資 料

1. キャット・ウォークの固有振動解析プログラム

1.1 記号

TL: 標 題

ICMAX: 固有値を求めるためのヤコビ法の試行回数 (≈ 5000) の制限

ERROR: ヤコビ法のノルム誤差

MF: 節点の総数

YOUNG: ヤング率 t/m^2

RO: 材料密度 t/m^3

IM: 節点の番号

KP: 当該節点につらなり, これより番号の大きい節点の個数

MH: 節点の性質を示す指標

= 0 : 自由 = 1 : 上下自由水平拘束

= 2 : 上下拘束, 水平自由 = 3 : 固定

W: 格点に集中して考える重量 (ケーブル分をのぞく)

X, Y, Z: 節点の座標

MI: IMの相手側の番号

A1: IM-MI 部材の断面積 m^2

X2: の初明張力 ton

1.2 入力フォーマット

T	L
---	---

20 A 4

I	C	M	A	X	E	R	R	O	R
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

I 6

E 1 0 . 4

M	F	Y	O	U	N	R	O
---	---	---	---	---	---	---	---

I 6

2 E 1 0 . 4

I	M	K	P	M	H	W	X	Y	Z
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

3 I 2

F 6 . 3

3 F 8 . 3

I	M	M	I	A	1	X	2
---	---	---	---	---	---	---	---

2 X, I 2, 2 X

2 E 1 2 . 5

(注) 2 X 部分はスキップする

1.3 プログラム

```

COMMON/DS/AA(81,81),BT(81,81),ISK1
COMMON/SP/EV(80),ET(80),AD(80),ERROR,NAT,ICMAX
COMMON WW(40,4),EL(40,4),AR(40,4),SN(40,4),CS(40,4),YOUN,
*PS(40,4),WO(40,4),TL(20),
1KA(40),KP(40),NA(40,4),NAP(40,4),NP(40,4),MH(40,2),JM(40),
2MF,IO
DIMENSION A(3,100),XYZ(3,40)
READ(40,8) (TL(I),I=1,20)
WRITE(50,9) (TL(I),I=1,20)
READ(40,4) ICMAX,ERROR
READ(40,4) MF,YOUN,RO
WRITE(50,10) MF,YOUN,RO
WRITE(50,13)
DO 27 M=1,MF
READ(40,14) IM(M),KP(M),MH(M,1),WO(M),XYZ(1,M),XYZ(2,M),XYZ(3,M)
27 WRITE(50,15) IM(M),KP(M),MH(M,1),WO(M),XYZ(1,M),XYZ(2,M),XYZ(3,M)
13 FORMAT(1H, 10X,3HIM,3HKP,4,3HMH,8X,3HWO,8X,5HX(A),3X,5HY(A),
13X,4HZ(A)/)
14 FORMAT(3I2,F6,3,F8,3)
15 FORMAT(9X,3I3,3X,E15,4,3F10,3)
16 FORMAT(2X,I2,2X,2E12,5)
WRITE(50,7)
M=1
21 IF(M-MF) 22,22,25
22 K2=KP(M)
IF(K2) 24,24,23
23 DO 26 I=1,K2
READ(40,16) M1,A1,X2
A2=XYZ(1,M1)-XYZ(1,M)
A3=XYZ(2,M1)-XYZ(2,M)
A4=XYZ(3,M1)-XYZ(3,M)
A5=SQRT(A2**2+A3**2+A4**2)
EL(M,I)=A5
SN(M,I)=A3/A5
CS(M,I)=A2/A5
AR(M,I)=A1
NP(M,I)=M1
WW(M,I)=A1*RO
PS(M,I)=X2
26 WRITE(50,6) M,M1,A5,A1,A2,A3,A4,X2
24 CONTINUE
M=M+1
GO TO 21
25 CONTINUE
M=1
45 IF(M-MF) 46,46,55
46 I=1
N=1
47 IF(N-M) 48,54,54
48 K1=KP(N)
J=1
49 IF(J-K1) 50,50,53
50 IF(NP(N,J)-M) 51,52,51
51 J=J+1
GO TO 49
52 NA(M,I)=N
NAP(M,I)=J
I=I+1
53 N=N+1
GO TO 47

```

```

54 KA(M)=I-1
M=M+1
GO TO 45
55 CONTINUE
IO=0
M=1
57 IF(M-MF) 58,58,69
58 I1=MH(M,1)+1
59 GO TO (60,61,62,63),I1
60 N=1
ICR=2
GO TO 68
61 N=2
ICR=1
GO TO 68
62 N=3
ICR=1
GO TO 68
63 N=0
ICR=0
64 MH(M,2)=N
IM(M)=IO+1
IO=IO+ICR
M=M+1
GO TO 57
69 CONTINUE
M=1
ISK1=1
75 IF(M-MF) 76,76,170
76 CONTINUE
DO 71 I=1,3
DO 71 J=1,10
71 A(I,J)=0,
LL=IM(M)
A1=0,
A2=0,
A4=0,
X1=WO(M)
K1=KA(M)
K2=KP(M)
JUN=0
I=1
77 IF(I-K1) 78,78,81
78 M1=NA(M,I)
J=NAP(M,I)
EL1=EL(M1,J)
AR1=AR(M1,J)
SN1=-SN(M1,J)
CS1=-CS(M1,J)
WW1=WW(M1,J)
PS1=PS(M1,J)
80 EN1=YOUN*AR1/EL1
IF(JUN) 83,83,84
81 JUN=1
I=1
82 IF(I-K2) 83,83,147
83 EL1=EL(M,I)
AR1=AR(M,I)
SN1=SN(M,I)
CS1=CS(M,I)

```

```

      WW1=WW(M,1)
      PS1=PS(M,1)
      M1=NP(M,1)
      GO TO 80
84  CONTINUE
85  CONTINUE
      PS1=PS1/EL1
      Z1=SN1**2
      Z2=CS1**2
      B1=-EN1*Z2-PS1
      B2=-EN1*SN1*CS1
      B4=-EN1*Z1-PS1
      X1=X1+0.5*WW1*EL1
      A1=A1-B1
      A2=A2-B2
      A4=A4-B4
      JJ=JM(M1)
      MM1=MH(M1,2)
      IF(MM1) 158,158,103
103 IF(MM1) 144,146,104
104 GO TO (130,140,180),MM1
130 ICR=2
      GO TO (134,135,138),MM1
134 A(1,JJ)=B1
      A(2,JJ)=B2
      A(1,JJ+1)=B2
      A(2,JJ+1)=B4
      GO TO 146
135 A(1,JJ)=B2
      A(2,JJ)=B4
      GO TO 146
138 A(1,JJ)=B1
      A(2,JJ)=B2
      GO TO 146
140 ICR=1
      GO TO (144,145,148),MM1
144 A(1,JJ)=B2
      A(1,JJ+1)=B4
      GO TO 146
145 A(1,JJ)=B4
      GO TO 146
148 A(1,JJ)=B2
      GO TO 146
180 ICR=1
      GO TO (184,185,188),MM1
184 A(1,JJ)=B1
      A(1,JJ+1)=B2
      GO TO 146
185 A(1,JJ)=B2
      GO TO 146
188 A(1,JJ)=B1
146 CONTINUE
      I=I+1
      IF(JUN) 77,77,82
147 CONTINUE
150 GO TO (154,155,157),MM1
154 A(1,LL)=A1
      A(1,LL+1)=A2
      A(2,LL)=A2

```

```

      A(2,LL+1)=A4
      AD(LL)=X1
      AD(LL+1)=X1
      GO TO 156
155 A(1,LL)=A4
      AD(LL)=X1
      GO TO 156
157 A(1,LL)=A1
      AD(LL)=X1
156 CONTINUE
149 CONTINUE
      DO 160 I=1,ICR
      WRITE (50,1) (A(I,J),J=1,10)
      DO 159 J=1,10
159 AA(ISK1,J)=A(I,J)
      ISK1=ISK1+1
160 CONTINUE
158 M=M+1
      GO TO 75
170 CONTINUE
      WRITE (50,1) (AD(I),I=1,10)
      DO 171 I=1,10
171 AD(I)=AD(I)/9.8
      CX1=0.
      DO 172 I=1,10
      CX1=CX1+AD(I)
      AD(I)=CX1
      NAT=10
      CALL EIGEN
      CALL RESP
38 STOP
      1 FORMAT(1H,1P10E12.4)
      3 FORMAT(2X,12.2X,5E12.5)
      4 FORMAT(16.2E10.4)
      5 FORMAT(6(3I2,F6.3))
      6 FORMAT(9X,2I3,6X,1P6F15.4)
      7 FORMAT(1H,125X,
      * 1HL,14X,1HA,14X,1HX,14X,1HY,14X,1HZ,14X,2HPS/)
      8 FORMAT(20A4)
      9 FORMAT(1H1,20A4/)
10 FORMAT(1H,20X,3HMF=.12,4H E=.1PE9.2,4H RO,E9.2/)
11 FORMAT(1H,10X,3HIM,3HKP,3HMH,8X,2HWU/)
12 FORMAT(9X,3I3,3X,1PE15.4)
      END

```

```

SUBROUTINE EIGEN
COMMON/DS/AT(81,81),BT(81,81),ISK2
COMMON/SP/EV(80),ET(80),AD(80),ERROR,NAT,ICMAX
DIMENSION IEV(81)
C
AT,AD = BT,AD,EV,ET,GV
EN=NAT
DO 7 I=1,NAT
7 AT(NAT+1,I)=SQRT(AD(I))
DO 8 I=1,NAT
DO 8 J=1,NAT
AT(I,J)=AT(I,J)/(AT(NAT+1,I)*AT(NAT+1,J))
8 BT(I,J)=0.
DO 9 I=1,NAT
9 BT(I,I)=1.
IC=0.
DO 30 I=1,NAT
DO 30 J=1,NAT
IF(I-J) 29,30,29
29 C1=C1+AT(I,J)**2
30 CONTINUE
C1=SQRT(C1)
IC=1
EO=ERROR*C1
E1=C1
31 E1=E1/EN
11 K=1
ID=0
12 IF(K-NAT) 13,32,32
13 L=K+1
14 IF(I-NAT) 15,15,19
15 IF(ABS(AT(K,L))-E1) 16,16,18
16 L=L+1
GO TO 14
32 IF(ID) 17,17,11
17 IF(EO-E1) 31,50,50
18 CONTINUE
IR=K
IS=L
GO TO 20
19 CONTINUE
K=K+1
GO TO 12
20 CONTINUE
ID=1
IF(IC-ICMAX) 22,22,75
22 CO=AT(IR,IR)-AT(IS,IS)
CO=0.5*CO
C1=AT(IR,IS)
IF(CO) 23,24,23
23 T1=C1*SIGN(1.,CO)/SQRT(CO**2+C1**2)
T2=ABS(1.-T1**2)
T2=SQRT(T2)
SA=T1/SQRT(2.*(1.+T2))
CA=SQRT(1.+T2)/2.
GO TO 25
24 SA=0.70710678
CA=SA
25 CONTINUE
I=1
35 IF(I-NAT) 36,36,37

```

```

36 C3=AT(I,IR)*CA+AT(I,IS)*SA
C4=AT(I,IS)*CA-AT(I,IR)*SA
AT(I,IR)=C3
AT(I,IS)=C4
C3=BT(I,IR)*CA+BT(I,IS)*SA
C4=BT(I,IS)*CA-BT(I,IR)*SA
BT(I,IR)=C3
BT(I,IS)=C4
I=I+1
GO TO 35
37 I=1
38 IF(I-NAT) 39,39,40
39 C3=AT(IR,I)*CA+AT(IS,I)*SA
C4=AT(IS,I)*CA-AT(IR,I)*SA
AT(IR,I)=C3
AT(IS,I)=C4
I=I+1
GO TO 38
40 CONTINUE
IC=IC+1
GO TO 16
50 DO 51 I=1,NAT
EV(I)=AT(I,I)
IEV(I)=I
DO 51 J=1,NAT
51 AT(I,J)=BT(J,I)/AT(NAT+1,J)
I=1
55 IF(I-NAT) 56,62,62
56 J=I+1
C3=EV(I)
57 IF(J-NAT) 59,58,61
58 IF(C3-EV(J)) 60,60,59
59 EV(I)=EV(J)
EV(J)=C3
C3=EV(I)
I1=IEV(I)
IEV(I)=IEV(J)
IEV(J)=I1
60 J=J+1
GO TO 57
61 I=I+1
GO TO 55
62 CONTINUE
WRITE(50,2) (EV(I),I=1,NAT)
I=1
65 IF(I-NAT) 66,66,68
66 I1=IEV(I)
DO 67 J=1,NAT
67 BT(I,J)=AT(I1,J)
I=I+1
GO TO 65
68 CONTINUE
DO 74 K=1,NAT
ET(K)=6.2831853/SQRT(EV(K))
RETURN
75 WRITE(50,76) EO,E1,IC
GO TO 50
76 FORMAT(1H ,17HCONTROL OVER EO=.E11.4*6H E1=.E11.4*15)
1 FORMAT(1H ,16)
2 FORMAT(1H ,1P10F12.4)
END

```

```

SURROUTINE RESP
COMMON/DS/AA(81,81),BT(81,81),ISK1
COMMON/SP/EV(80),ET(80),AD(80),ERROR,NAT,ICMAX
COMMON WW(40,4),EL(40,4),AR(40,4),SN(40,4),CS(40,4),YOUN,
*PS(40,4),WO(40),TL(20),
1KA(40),KP(40),NA(40,4),NAP(40,4),NP(40,4),MH(40,2),IM(40),
2MF,IO
DIMENSION PF(70,3),XX(40,2)
CX1=AD(10+1)
CY1=0.
DO 35 I=1,10
WRITE(50,1)
X4=0.
X5=0.
DO 29 M=1,MF
M1=MH(M,2)
J=IM(M)
X1=BT(1,J)
X2=BT(1,J+1)
20 IF(M1) 27,27,21
21 GO TO (23,25,24),M1
23 X4=X4+X1*AD(J)
X5=X5+X2*AD(J+1)
GO TO 28
25 X5=X5+X1*AD(J)
X2=X1
X1=0.
GO TO 28
24 X4=X4+X1*AD(J)
X2=0.
GO TO 28
27 X1=0.
X2=0.
28 CONTINUE
XX(M,1)=X1
XX(M,2)=X2
29 CONTINUE
PF(1,1)=X4
PF(1,2)=X5
PF(1,3)=(X4**2+X5**2)/CX1
WRITE(50,7) 1,EV(1),ET(1),(PF(1,J),J=1,3)
WRITE(50,2)
DO 30 M=1,MF
30 WRITE(50,7) M,(XX(M,J),J=1,2)
WRITE(50,10)
WRITE(50,9)
M=1
156 IF(M-MF) 157,157,163
157 K1=KP(M)
K=1
160 IF(K-K1) 161,161,162
161 J=NP(M,K)
EL1=EL(M,K)
AR1=AR(M,K)
SN1=SN(M,K)
CS1=CS(M,K)
Z1=XX(J,1)-XX(M,1)
Z2=XX(J,2)-XX(M,2)
C1=YOUN*AR1*(CS1*Z1+SN1*Z2)/EL1
C2=C1+PS(M,K)

```

```

WRITE(50,6) M,J,C1,C2
K=K+1
GO TO 160
162 M=M+1
GO TO 156
163 CONTINUE
CY1=CY1+PF(1,3)
IF(CY1-0.95) 35,35,36
35 CONTINUE
36 RETURN
1 FORMAT(1H1,5X,30HEIGEN VALUES AND EIGEN VECTORS//
*,12X,3H NO,9X,4HP**2,11X,6HPERIOD,9X,2HFX,13X,2HFY,13X,4HF**2/)
2 FORMAT(//,24X,1HU,14X,1HV/)
5 FORMAT(1H //,20X,12HDISPLACEMENT//,25X,1HU,14X,1HV/)
6 FORMAT(9X,213,1P5E15.4)
7 FORMAT(12X,13,1P5E15.4)
9 FORMAT(24X,8HAX.FORCE,7X,3HPS+/)
10 FORMAT(1H )
END

```

2. kk-3G-69 75G 風洞模型実験結果

実 験 条 件

	原 型	理 論 値	採 用 値
縮 尺		1 : 75	1 : 75
重 量	21336t/m/bvidge	6070 g/model	5160g/model
極 慣 性 Moment	25186tm sec ² /m	1274gcmsec ² /model	2010gcmsec ² /model
撓 み 振 動 数	0.190		1.52 c/s
振 れ 振 動 数	0.454		3.28 c/s
振 動 数 比	1 : 2.39		1 : 2 : 6
風 速 換 算 比			h...1 : 9.4 α...1 : 10.4
バ ネ 強 度			480 g/cm
バ ネ 間 隔			42.2 cm
支 持 方 法			h α
迎 角			± 0.0° ± 2.0° ± 4.0° ± 5.0°
風速零での構造減衰			0.045
備 考			

附圖 模型KK-3G-69 75G

