

# 平行線ケーブルの2次応力の解析と評価について

本州四国連絡橋公団 林 有一郎  
 “ “ “ 保田 雅彦  
 神戸製鉄所 新 家 徹

## 1. まえがき

吊橋用平行線ケーブルの2次応力は以前より検討すべき事項としてあげられながら、発生させる要因の不確かさおよび複雑さ、実験の困難さ等のためその評価についてはあまり具体例がない。理論的解析としては、T.A.Wyatt<sup>1)</sup>の研究があるがケーブル全体の2次応力を計算する場合のケーブルおよびバンドの変形量の仮定に問題がある。また、実験的研究としてはBear Mountain橋<sup>2)</sup>およびDelaware River橋<sup>3)</sup>において曲げ試験を行ない、バンディングおよびブラッシングの影響、索線の支え力、荷重—変形の関係が調べられた。また、西村<sup>4)</sup>、湊<sup>5)</sup>はこの種の実験研究を行なっている。山本<sup>6)</sup>はケーブルの塔部における曲げ性状の研究を行なっている。また実橋を直接測定した例として奥内橋<sup>7)</sup>の測定例がある。本研究は吊橋の各架設段階において生じる変形量を有限変形理論によって求め、これらの変形量から2次応力を計算し、平行線ケーブルの安全性について考察するのである。

## 2. 2次応力発生要因

2次応力発生箇所と要因を図-1、表-1に示す。表-1においてはタワーサドルやスプレサドル、およびエアスピニング工法の場合のスタンドリムーなどの屈曲部あるいはケーブルバンドの近傍において索線が曲げられることによって生ずる応力である。摩擦の影響を無視すれば索線1本ごとの曲げ応力は全索線とほぼ同一となる。(2)の2次応力は主としてケーブルの架設が終了し、それにケーブルバンドを取付けたのち、被剛桁などの死荷重が載荷するさいに生ずる。また(3)は、メインケーブルのラッピング後で、列車や自動車などの活荷重が載荷するさいに生ずる応力で、(2)の場合と同様な2次応力の発生状態となる。すなわち(2)、(3)の場合はケーブルをバンドやラッピングで締付けたため、荷重載荷時の索線相互のすべりを拘束し、ケーブル全体としての曲げ応力を発生させる。(4)はバンド部やサドル部で索線が引張応力や曲げ応力とは異なる支え応力を受け、この引張強度に

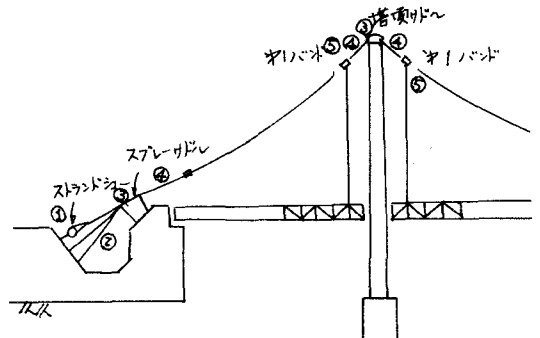


図-1 2次応力の発生箇所

| 発生の種類                   | 影響する因子                                                  | 発生箇所    |
|-------------------------|---------------------------------------------------------|---------|
| (1) 索線の曲げ応力             | シュ・サドルの曲率、バンドの回転角、索線長、索線張力                              | ①、⑤     |
| (2) ケーブルバンドの締付効果        | ケーブルバンドの長さ、間隔、締付力、索線間の摩擦係数、ケーブル長および空疎率、ケーブル張力およびバンドの回転角 | ④、⑤     |
| (3) ラッピング工法の締付効果        | ラッピングリバー張力、索線間の摩擦、索線長、ケーブル長、空疎率、ケーブル張力、バンドの回転角          | ④       |
| (4) 塔部の影響               | サドルの形状、曲率、摩擦係数、索線長および張力                                 | ③       |
| (5) その他の索線又はスタンド張力のバラツキ | 索線間の温度差、スタンドの製作誤差、架設時のバラツキ                              | 全域<br>② |

表-1 2次応力の発生要因

および影響を考りよしななければならない。ゆはケーブルの外尺と内尺あるいは日照部と日陰部などの素線間の温度差、あるいはケーブルの製作架設誤差による素線張力のバラツキ、あるいはスプレッド移動に伴うアンカースパンのストランド間張力のバラツキである。

図-1より明らかなように、2次応力が問題となる箇所は、アンカー近傍部およびタワー近傍部に集中しているがこの箇所は設計上の1次応力の最も大きい箇所である。このうち、サドルやストランドシェードの曲率による曲げ応力は線材のように延性の高い材料では2次応力としてはあまり問題にはならない。しかしタワー近傍のワイヤバンド付近では活荷重などによって曲げ応力が大きく変動することが予想される。またアンカースパンのストランド張力のバラツキについては文献<sup>(8)</sup>にあるので、ここでは素線の曲げ応力およびケーブル全体としての曲げ応力について数値計算し、各条を加えるものとする。

### 3. 2次応力の解析

#### 3-1. 素線の曲げ応力

T. A. Wyllieによれば、バンド部、サドル屈曲部、ストランドシェード部の各曲げ応力は次式で与えられる。

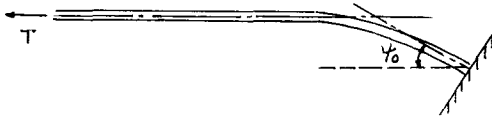


図-2

##### 1) バンド近傍の素線の曲げ応力

図-2より、 $\sigma_{B1} = 2y_0 \sqrt{E \sigma_n}$  , 但し  $\sigma_n$ : 1次応力 (1)

##### 2) サドル屈曲による素線の曲げ応力

図-3より、 $\sigma_{B1} = E \frac{r}{R}$

(2)

##### 3) ストランドシェード部の曲げ応力

図-4より  $\sigma_{B1} = E \frac{r}{2R}$

(3)

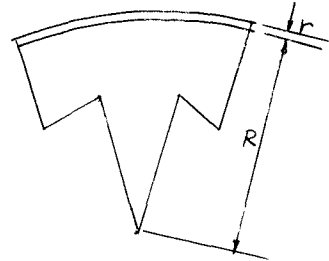


図-3

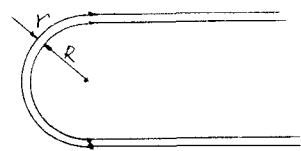


図-4

#### 3-2. ケーブル全体としての2次応力

##### 3-2-1. Wyllie理論の概要

ラッセング前の死荷重による2次応力はケーブルバンド締付によって起る。

ケーブルの変形を対称な2次放物線と仮定すると、パネル間ではラッセングされていないので摩擦によるせん断抵抗がないとし、バンド内ですべりがないとすればワイヤバンドでは、

$$\sigma_{B2} = (1-k - \frac{2}{n}) \frac{ED}{2Lh} y_0 \quad (4)$$

また、素線がバンド内で滑るとすれば

$$\sigma_{B2}' = \left\{ (1 + 0.27 \log e v) (1-k) - \frac{2}{n} \right\} \frac{ED}{2Lh} y_0 \quad (5)$$

但し、 $D$ : ケーブル径、 $k = \frac{y_{バンド}}{y_0} = \text{const}$ ,  $y_0$ : ケーブル端回転角、 $L$ : バンド間距離、 $n$ : 支間中のパネル数の1/2、 $v$ : バンド締付によるすべり抵抗係数とすべり限界モーメントとの比。

実際の計算ではサグ変化による2次応力は無視でき、バンド内で滑らないとすると

$$\sigma_{B2} = (1-k) \frac{ED}{2Lh} y_0 = \frac{ED}{2Lh} \Delta \theta \quad (6)$$

但し $\theta$ はケーブル端回転角でこの式は各パネルについて成立する。尚、この式は内門橋の補剛桁架設時の実測値に適用した場合よく合うという結果がでている。

死荷重完成後、ラッピンによってパネル間のケーブルにも集束部に摩擦によるせん断抵抗力が生じる。ケーブルと2層の正八角形の重ね板とすれば、そのせん断抵抗力の差によってすべりに差が生じ、この場合の曲げ剛性は次式のようになる。

$$\sigma_{bs} = (1.10 + \log_e 8) \sqrt{\frac{SE}{1-f}} \phi \quad (7)$$

但し、 $S$ : 摩擦せん断力,  $f$ : 空隙率,  $\phi$ : 端部角変化

### 3-2-2, 有限変形法による2次応力の解析

3-2-1で述べたようにWyattによる2次応力の解析では $y_0$ ,  $\Delta\theta$ ,  $\phi$ が計算されねばならないがそれらは次の手順によって有限変形法により計算できる。

step 1, 吊橋の完成形状を作る。

step 2, できあがった吊橋の完成形状のケーブル系に吊構造部死荷重を上向きに作用させる。  
これによって得られた形状をケーブル架設完了時の形状とする。

step 3, step 2 でできたケーブルに曲げ剛性を入れ、これにケーブルバンドをとりつけ、これを剛体として取扱う。この状態を各変形量の初期値とする。

step 4, step 3の状態に吊構造部死荷重を載荷する。その時の各部材の部材角変化, 等長回転角, 桁断面曲げモーメント, 軸力を求める。その場合step 1との変差修正はしない。

step 5, 活荷重を着目点に載荷し, step 4 と同じ量を求める。

#### 1), 断面力算定式

(1) トラス部材(ケーブル部材)

$$R_a = AE \frac{L - L_0}{L_0}$$

(2) 曲げ材(桁, 塔)

$$R_a = -AE \frac{L(H_0) - L_0}{L_0} \quad (9)$$

$$\text{但し, } \sigma = \frac{DS}{DM}, \quad DS = \left( \frac{1}{40} + \frac{1}{2800} \frac{T_0 L^2}{EI} \right) (\theta_a + \theta_b - 2\alpha)^2 + \left( \frac{1}{24} + \frac{1}{720} \frac{T_0 L^2}{EI} \right) (\theta_a - \theta_b)^2$$

$$DM = 1 - \frac{AL^3}{L_0 I} \left\{ \frac{(\theta_a + \theta_b - 2\alpha)^2}{2800} + \frac{(\theta_a - \theta_b)^2}{720} \right\}$$

$$M_a = Y_1 k_1 (\theta_a - \alpha) + Y_2 k_2 (\theta_b - \alpha) \quad (10)$$

$$M_b = Y_2 k_2 (\theta_a - \alpha) + Y_1 k_1 (\theta_b - \alpha) \quad (11)$$

$$\text{但し, } \begin{cases} k_1 = \frac{4EI}{L} & k_2 = \frac{2EI}{L} \\ Y_1 = 1 + \frac{L^2}{30EI} R_a & Y_2 = 1 - \frac{L^2}{60EI} R_a \end{cases}$$

$$S_a = \frac{M_a + M_b}{L} \quad (12)$$

$$S_b = -S_a \quad (13)$$

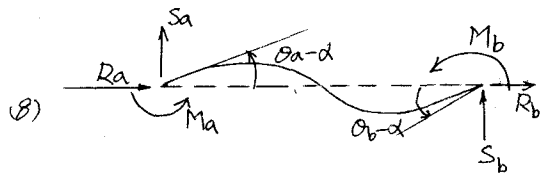


図-5 部材座標系

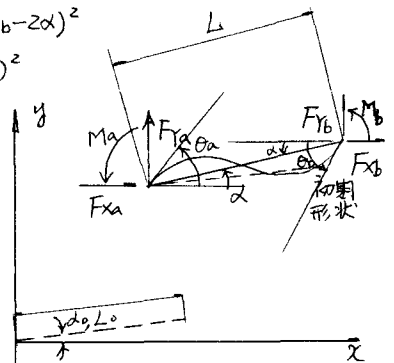


図-6 構造座標系

(3) 曲げ材 (引張力を受ける曲げ剛性とともケーブル)

$$R_a = -AE \frac{L(1+\sigma) - L_0}{L_0} \quad (14)$$

$$\text{但し, } \rho = C_1(\theta_a + \theta_b - 2\alpha)^2 + C_2(\theta_a - \theta_b)^2$$

$$C_1 = \frac{\rho(1 + \cosh \rho)(\rho + \sinh \rho) - 4 \sinh^2 \rho}{2 \rho^2 \sinh \rho} (2\psi_1 + \psi_2)^2$$

$$C_2 = \frac{\rho(1 - \cosh \rho)(\rho - \sinh \rho)}{2 \rho^2 \sinh^2 \rho} (2\psi_1 - \psi_2)^2$$

$$\rho = \sqrt{\frac{16EI}{EI}} \cdot L, \quad \psi_1 = \frac{\rho(\rho \cosh \rho - \sinh \rho)}{4K_T}, \quad \psi_2 = \frac{\rho(\sinh \rho - \rho)}{2K_T}$$

$$K_T = 2 - \cosh \rho + \rho \sinh \rho$$

$$R_b = -R_a$$

(15)

$$M_a = \frac{4EI}{L} \psi_1 (\theta_a - \alpha) + \frac{2EI}{L} \psi_2 (\theta_b - \alpha)$$

(16)

$$M_b = \frac{2EI}{L} \psi_2 (\theta_a - \alpha) + \frac{4EI}{L} \psi_1 (\theta_b - \alpha)$$

(17)

$$S_a = (M_a + M_b) / L$$

(18)

$$S_b = -S_a$$

(19)

2) 部材剛性マトリクス

1) トラス材 (主軸方向)

$$\begin{bmatrix} dF_{xa} \\ dF_{ya} \\ dF_{za} \\ dF_{xb} \\ dF_{yb} \\ dF_{zb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 & -k_{11} & -k_{12} & 0 \\ k_{21} & k_{22} & 0 & -k_{21} & -k_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_{11} & -k_{12} & 0 & k_{11} & k_{12} & 0 \\ -k_{21} & -k_{22} & 0 & k_{21} & k_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_a \\ dy_a \\ dz_a \\ dx_b \\ dy_b \\ dz_b \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\text{但し, } k_{11} = f \cos^2 \alpha + g \sin^2 \alpha, \quad k_{21} = k_{12} = (f - g) \cos \alpha \sin \alpha, \quad k_{22} = f \sin^2 \alpha + g \cos^2 \alpha$$

$$f = \frac{AE}{L_0}, \quad g = \frac{T}{L}$$

(2) 曲げ材 (主軸方向)

$$\begin{bmatrix} dF_{xa} \\ dF_{ya} \\ dF_{za} \\ dF_{xb} \\ dF_{yb} \\ dF_{zb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & -k_{11} & -k_{12} & -k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & -k_{21} & -k_{22} & -k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & -k_{31} & -k_{32} & -k_{33} \\ -k_{11} & -k_{12} & -k_{13} & k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ -k_{21} & -k_{22} & -k_{23} & k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ -k_{31} & -k_{32} & -k_{33} & k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_a \\ dy_a \\ dz_a \\ dx_b \\ dy_b \\ dz_b \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\text{但し } w = \theta_a + \theta_b - 2\alpha$$

$$k_{11} = \frac{AE}{L} \left\{ \frac{L(\cos^2 \alpha)}{L_0} - \sin^2 \alpha \right\} - \frac{3S_a}{L} \sin \alpha \cos \alpha - \frac{2EI}{L^2} \left( 2 \frac{\partial \psi_1}{\partial \alpha} + \frac{\partial \psi_2}{\partial \alpha} \right) w \sin \alpha + \frac{4EI}{L^3} (2\psi_1 + \psi_2) \sin^2 \alpha$$

$$k_{12} = \frac{AE}{L} \sin \alpha \cos \alpha + \frac{S_a}{L} (\cos^2 \alpha - 2 \sin^2 \alpha) - \frac{2EI}{L^2} \left( 2 \frac{\partial \psi_1}{\partial \alpha} + \frac{\partial \psi_2}{\partial \alpha} \right) w \sin \alpha - \frac{4EI}{L^3} (2\psi_1 + \psi_2) \sin \alpha \cos \alpha$$

$$k_{13} = -\frac{2EI}{L^2} (2\psi_1 + \psi_2) \sin \alpha$$

$$k_{21} = \frac{AE}{L} \sin \alpha \cos \alpha - \frac{S_a}{L} (\sin^2 \alpha - 2 \cos^2 \alpha) \\ + \frac{2EI}{L^2} (2 \frac{\partial Y_1}{\partial X_a} + \frac{\partial Y_2}{\partial X_a}) w \cos \alpha - \frac{4EI}{L^3} (2Y_1 + Y_2) \sin \alpha \cos \alpha$$

$$k_{22} = \frac{AE}{L} \left\{ \frac{L(1+\sigma)}{L_0} - \cos^2 \alpha \right\} + \frac{3S_a}{L} \sin \alpha \cos \alpha \\ + \frac{2EI}{L^2} (2 \frac{\partial Y_1}{\partial Y_a} + \frac{\partial Y_2}{\partial Y_a}) w \cos \alpha + \frac{4EI}{L^3} (2Y_1 + Y_2) \cos^2 \alpha$$

$$k_{23} = \frac{2EI}{L^2} (2Y_1 + Y_2) \cos \alpha$$

$$k_{31} = -\frac{2EI}{L^2} (2Y_1 + Y_2) \sin \alpha + \frac{M_a}{L} \cos \alpha + \frac{4EI}{L} (\theta_a - \alpha) \frac{\partial Y_1}{\partial X_a} + \frac{2EI}{L} (\theta_b - \alpha) \frac{\partial Y_2}{\partial X_a}$$

$$k_{32} = \frac{2EI}{L^2} (2Y_1 + Y_2) \cos \alpha + \frac{M_a}{L} \sin \alpha + \frac{4EI}{L} (\theta_a - \alpha) \frac{\partial Y_1}{\partial Y_a} + \frac{2EI}{L} (\theta_b - \alpha) \frac{\partial Y_2}{\partial Y_a}$$

$$k_{33} = \frac{4EI}{L} Y_1$$

$$k_{36} = \frac{2EI}{L} Y_2$$

$$k_{61} = -\frac{2EI}{L^2} (2Y_1 + Y_2) \sin \alpha + \frac{M_b}{L} \cos \alpha + \frac{2EI}{L} (\theta_a - \alpha) \frac{\partial Y_1}{\partial X_a} + \frac{4EI}{L} (\theta_b - \alpha) \frac{\partial Y_2}{\partial X_a}$$

$$k_{62} = \frac{2EI}{L^2} (2Y_1 + Y_2) \cos \alpha + \frac{M_b}{L} \sin \alpha + \frac{2EI}{L} (\theta_a - \alpha) \frac{\partial Y_1}{\partial Y_a} + \frac{4EI}{L} (\theta_b - \alpha) \frac{\partial Y_2}{\partial Y_a}$$

$$Y_1 = 1 + \frac{L^2}{30EI} R_a, \quad Y_2 = 1 - \frac{L^2}{60EI} R_a$$

$$\frac{\partial Y_1}{\partial X_a} = \frac{3AL}{5I} \left\{ 1 - \frac{3}{2} \frac{L(1+\sigma)}{L_0} \right\} \cos \alpha, \quad \frac{\partial Y_1}{\partial Y_a} = \frac{3AL}{5I} \left\{ 1 - \frac{3}{2} \frac{L(1+\sigma)}{L_0} \right\} \sin \alpha$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial X_a} = \frac{AL}{2I} \left\{ 1 - \frac{3}{2} \frac{L(1+\sigma)}{L_0} \right\} \cos \alpha, \quad \frac{\partial Y_2}{\partial Y_a} = \frac{AL}{2I} \left\{ 1 - \frac{3}{2} \frac{L(1+\sigma)}{L_0} \right\} \sin \alpha$$

(3) 曲げ残 (引張力を受ける曲げ剛性をもつケーン)

マトリックス表示, 各要素は(2)式と同じ。

$$\text{但し, } \begin{cases} \frac{\partial Y_1}{\partial X_a} = \frac{\partial Y_1}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial X_a}, \quad \frac{\partial Y_1}{\partial Y_a} = \frac{\partial Y_1}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial Y_a}, \quad \frac{\partial Y_2}{\partial X_a} = \frac{\partial Y_2}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial X_a}, \quad \frac{\partial Y_2}{\partial Y_a} = \frac{\partial Y_2}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial Y_a} \\ \frac{\partial Y_1}{\partial \rho} = \frac{\rho \cosh \rho + \rho \sinh \rho - \sinh \rho}{4k_T} - \frac{4Y_1^2}{\rho}, \quad \frac{\partial Y_2}{\partial \rho} = \frac{\sinh \rho + \rho \cosh \rho - 2\rho}{2k_T} - \frac{4Y_1 Y_2}{\rho} \\ \frac{\partial \rho}{\partial X_a} = \frac{AL}{I\rho} \left\{ 1 - \frac{3}{2} \frac{L(1+\sigma)}{L_0} \right\} \cos \alpha, \quad \frac{\partial \rho}{\partial Y_a} = \frac{AL}{I\rho} \left\{ 1 - \frac{3}{2} \frac{L(1+\sigma)}{L_0} \right\} \sin \alpha \end{cases}$$

③剛体の扱い

図-7において1-2部材は弾性体として剛性マトリックスは求めておいたものとする。EFS

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{Bmatrix}$$

$$\text{但し, } f_1 = \begin{Bmatrix} N_1 \\ Q_1 \\ M_1 \end{Bmatrix}, \quad d_1 = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \end{Bmatrix}$$

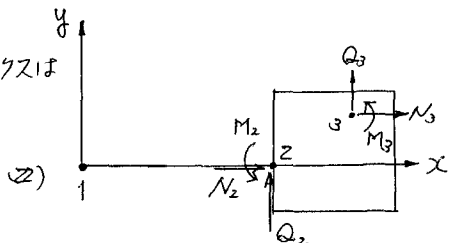


図-7

2-3 部材でのつりあいを取る

$$\begin{Bmatrix} N_2 \\ Q_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -y_2 & z_2 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} N_3 \\ Q_3 \\ M_3 \end{Bmatrix} = 0 \quad (23)$$

EPS  $f_2 - H_{23} f_3 = 0$  とする。 (24)

部材 2-3 に仮想変位  $d_2^*$ ,  $d_3^*$  を与えると  $-f_2^T d_2^* + f_3^T d_3^* = 0$  (25)

(25) を (24) へ代入すると  $d_3^* = H_{23}^T d_2^*$  (26)

(26) は実際の変位についてと置き  $d_3 = H_{23}^T d_2$  (27)

(24), (27) を (22) へ代入すると上式から

$$f_1 = k_{11} d_1 + k_{12} (H_{23}^T)^{-1} d_3$$

下式から  $H_{23} f_3 = k_{21} d_2 + k_{22} (H_{23}^T)^{-1} d_3$

$$f_3 = H_{23}^{-1} k_{21} d_1 + H_{23}^{-1} k_{22} (H_{23}^T)^{-1} d_3 \quad (28)$$

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{31} & k_{33} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_3 \end{Bmatrix} \quad (29)$$

$$\left. \begin{aligned} k_{12} &= k_{12} (H_{23}^T)^{-1} \\ k_{31} &= H_{23}^{-1} k_{21} = k_{13}^T \\ k_{32} &= H_{23}^{-1} k_{22} (H_{23}^T)^{-1} \end{aligned} \right\}$$

EPS (29) が剛体 2-3 を含む 1-2-3 の剛性マトリックスである。

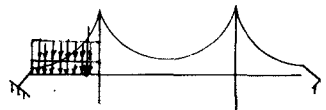
#### 4. 数値計算

| 諸元              | 単位                 |                   |
|-----------------|--------------------|-------------------|
| 素線径             | mm                 | 5                 |
| 全素線数            | 本                  | 39312             |
| 断面積             | m <sup>2</sup>     | 0.7705            |
| 空隙率             | %                  | 19.5              |
| 断面2次モーメント       | m <sup>4</sup>     | 0.07426           |
| ケーブル本数          | 1/側<br>当り          | 1本                |
| 弾性係数            | kg/mm <sup>2</sup> | 2×10 <sup>4</sup> |
| パネル長            | m                  | 13                |
| バンド長            | m                  | 中央 28<br>側 3.5    |
| 素線間マッパ係数        |                    | 0.20              |
| 素線バンド<br>のマッパ係数 |                    | 0.15              |
| ラブリヤ径           | mm                 | 4                 |
| 〃 張力            | kg                 | 150               |
| スパン割り           | m                  | 0.07426           |

case 1



case 2



| 着目   | 中央ケーブル1バンドの<br>傾斜角変化最大 | 側ケーブル1バンドの<br>傾斜角変化最大 |
|------|------------------------|-----------------------|
| 道路荷重 | 1.77 t/m × 660 m       | 1.77 t/m × 260 m      |
| 鉄道荷重 | 3.8 t/m × 320 × 1.12   | 3.8 t/m × 260 × 1.12  |
| 集荷重  | 36.875 t               | 36.875 t              |
| 温度   | +30°C                  | +30°C                 |

図-8

例示ケーブル径が最大となる予定の南備瀬瀬戸大橋の計画設計の諸元を用いる。表-2 にそのケーブル諸元と、図-8 に活荷重の載荷ケースを示す。

表-2

有限変形による解析で成題となるのは各部位のモデル化と構造系の作り方である。とくに、ケーブルの塔頂部での支持条件とケーブルの断面2次モーメントは不明確である。ケーブルの挙動は実際には、荷重の少ない状態では素線間には滑りが生じず、荷重の増加に伴ない断面2次モーメントは減衰していくものと考えらる。

|        |           | type 1               | type 2               | type 3               |
|--------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Step 2 |           | 5598 <sup>mm</sup>   | 5598 <sup>mm</sup>   | 5598 <sup>mm</sup>   |
| Step 4 |           | 365 <sup>mm</sup>    | 389 <sup>mm</sup>    | 15 <sup>mm</sup>     |
| Step 5 | 最大変位      | -2223 <sup>mm</sup>  | -2190 <sup>mm</sup>  | -2674 <sup>mm</sup>  |
|        | 素線間の曲げ変位  | -34229 <sup>mm</sup> | -34417 <sup>mm</sup> | -35417 <sup>mm</sup> |
|        | 中央素線の曲げ変位 | 266 <sup>mm</sup>    | 247 <sup>mm</sup>    | 220 <sup>mm</sup>    |

表-3. 補剛トラスの変位と応力

断面2次モーメントの最大値は同じ直径を持つ円形断面のソリッドビームのそれから空隙率によって減した値であり、最小値は全素線が完全に滑動を起す場合で素線の1本ずつのIの和と考えらる。ここでは、曲げ応力の最大となるソリッドビームのIを仮定して計算した。又、塔頂支持条件はピンと剛の2種類について計算した。又、ケーブルに曲げ剛性を入れた場合と入れない場合で補剛トラスへの影響を調べてみたのが表-3である。表から補剛トラスの設計にはケーブルの曲げ剛性を無視してよいことが分る。ここでtype 1とはソリッドビームのIを入れ、塔頂は固定。type 2はソリッドビームのIで塔頂ピン。type 3はケーブルの曲げ剛性を無視したものとである。ソリッドビームとしての2次応力の計算結果を図-9に示す。また、この有限変形解析により得られた変形量を用いてWyatt理論を適用した場合の2次応力とソリッドビームとしての2次応力との比較を表-4に示す。

## 5. 考察

表-4の結果を最大応力について整理すると表-5のようになる。最小引張強度160kg/mm<sup>2</sup>のワイヤに対してはソリッドビームで160/825≐1/9、Wyatt理論では160/112.7≐1/4の安全率となり、0.7% 金伸び耐力に対する安全率で8118/825≐1/4、118/112.7≐1/1となる。

又、疲労強度については現在の所、チェック切ゆのため、

真の引張疲労強度は求まっていないが回転曲げによる疲労試験結果があるので丸棒などの経験から次のような推算をするとすなわば $\sigma_w = 0.85\sigma_w'$ 、 $\sigma_w'$ ：引張疲労強度、 $\sigma_w'$ ：回転曲げ疲労強度)

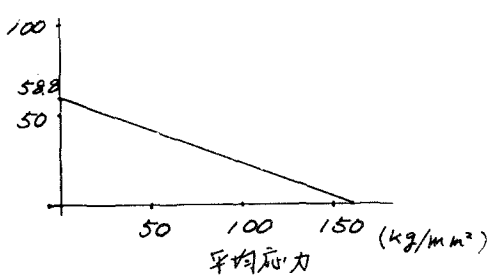
最小引張強度160kg/mm<sup>2</sup>のワイヤの場合の回転曲げ疲労強度は文献<sup>11)</sup>によれば34.5kg/mm<sup>2</sup>であるので肉抜き

| point | ソリッドビームの曲げ応力 |      |      | Wyattによる2次応力 |      |      |       |       |       |       |
|-------|--------------|------|------|--------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|       | 死荷重          | 活荷重  | 計    | 死荷重          |      |      | 活荷重   |       |       | 計     |
| 13    | 0.3          | -1.0 | -0.7 | 4.7          | 3.2  | 7.9  | -14.4 | -28.8 | -43.2 | -35.3 |
|       | -0.3         | 1.1  | 0.8  |              | 7.2  | 11.9 | 11.4  | 18.0  | 29.4  | 41.3  |
| 14    | -6.0         | 6.9  | 0.9  | 9.8          | 16.5 | 26.3 | 11.6  | 18.8  | 30.4  | 56.7  |
|       | 12.0         | 14.5 | 26.5 |              | 5.1  | 14.9 | 6.3   | 5.5   | 11.8  | 26.7  |
| 15    | 0.5          | 0.3  | 0.8  | -0.4         | -0.7 | -1.1 | 0     | 0     | 0     | -1.1  |
|       | -0.4         | -0.2 | -0.6 |              | -0.2 | -0.6 | 1.2   | 0.2   | 1.4   | 0.8   |
| 16    | 0.1          | -0.2 | -0.1 | -0.2         | -0.2 | -0.4 | 1.7   | 0.4   | 2.1   | 1.7   |
|       | -0.1         | 0.2  | 0.1  |              | -0.2 | -0.4 |       | 0     | 0     | -0.4  |
| 17    | 0.1          | 0    | 0.1  |              |      |      |       |       |       |       |

表-4

|      | ソリッドビーム |      |      | Wyatt理論 |      |        |
|------|---------|------|------|---------|------|--------|
|      | 死荷重     | 活荷重  | 最大   | 死荷重     | 活荷重  | 最大     |
| 一次応力 | 46.0    | 10.0 | 56.0 | 46.0    | 10.0 | 56.0   |
| 二次応力 | 12.0    | 14.5 | 26.5 | 26.3    | 30.4 | 56.7   |
| 合計   | 58.0    | 24.5 | 82.5 | 72.3    | 40.4 | 112.7* |

表-5 最大応力



引張疲労強度は  $345 \times 0.85 \times 2 = 58.8 \text{ kg/mm}^2$  となる。  
 こゝより耐久線図を図-10のように作ってみると、  
 平均応力  $50 \text{ kg/mm}^2$  では全振幅で  $3648 \text{ kg/mm}^2$  であるので  
 ソリッドセールの場合  $36/245 \div 1.5$ ,  $36/404 \div 0.9$   
 の安全率となる。Wyattによる最大応力では安全率  
 を割っているがこの活荷重の載荷は最悪で、疲労の  
 checkに用いる荷重は文献<sup>(12)</sup>によると列車単線である  
 ので応力としては約  $1/3$  程度となるであろう。

以上応力算出にはかなり安全側の算出をしているが  
 この応力算出のプロセスがまだはっきり解明されて  
 いないこと、素線だと曲げと引張を同時に受ける疲  
 労データの蓄積がないことなどから十分安全であるとい  
 えない。

#### 6. おまけ

プログラム作成にあたり(株)日本電算の小塚敏彦氏に、又、安全性  
 の点について本回公団の田島二郎氏にお話を伺った事を感謝する。

#### 7. 文献

- 1) T.A. Wyatt: A.S.C.E. ST. 7 July 1960
- 2) 「吊橋用平行線ケーブルの架設(設計資料)」建設省、工研、S.39.5
- 3) The bridge over the Delaware river, final report, June 1987
- 4) 田村、他「吊橋用ケーブルに関する基礎実験」S.43.5
- 5) 渡、他「吊橋用平行線ケーブルに関する実物大実験」神鋼技報 68, 4
- 6) 日本: 神鋼技報 Vol. 18, 1968, 4.
- 7) 「関川橋ケーブル2次応力測定調査」S.47.9, 本回公団
- 8) 「アーカの設計要領」S.48.10, 本回公団
- 9) 林有一郎: J.S.S.C. 第4回研究集会論文集
- 10) “ : “ 第7回 “
- 11) 本回技術調査報告書, 付属資料3, S.42.7
- 12) 本回連絡橋上部構造設計基準(案), S.48.9.1

