

支線式鉄塔の解析について

菅野京七^{*1} 清水賢治^{*2}

小高昭夫^{*3} ○堀江文雄^{*4} 大河原 勝積^{*5}

§ 1. 序

風や地震の作用による支線式鉄塔の挙動は一般にかなり複雑であり、その動的性状は勿論のこと、静的性状すらあまりよく説明されていない。支線式鉄塔の解析については、従来 F. Blich⁽¹⁾, Cohn, Edward and Perrin Henri⁽²⁾, Fiesenheiser, E.⁽³⁾, Dean Donald L.⁽⁴⁾, Paskitt T. J. and Livesley R. K.⁽⁵⁾, 水畑⁽⁶⁾, Rudolph Szilard⁽⁷⁾, Ezra G. Adley⁽⁸⁾, M. F. Barstein⁽⁹⁾, Richard J. McCaffrey and Alois J. Hartman⁽¹⁰⁾ 等がある。ところで周知のごとく、支線式鉄塔は支線の弛度起因する変形の幾何学的非線形性と力学的不安定性のために、その解析は種々の困難を生じる。このため従来行われて来た支線式鉄塔の解析では、支線を受ける支柱を剛体として扱ったり、支線の弛度に伴う変形の非線形性は考慮しても外力を受ける支線と支柱との相互作用が明らかにされていない。

本報告では、主として風圧力を受ける支線式鉄塔の設計上必要となる静的風圧力の作用による支線および支柱の変形と応力、支線・支柱系としての弾性安定の問題そして動的特性としての固有振動等についての解析手法について述べ、しかるのちに簡単なモデルについて、支線の初張力や風圧力が支線・支柱系の変形や応力におよぼす影響について検討する。さらにとくに微小変形時における支線・支柱系の座屈荷重とそのモードを算出する。最後に微凡時における固有振動および強凡時(大変形時)における固有振動の解析を行い、両者の比較を行う。

§ 2. 静的外力による支線・支柱系の解析

2.1 仮定 (1) 支線は張力のみ負担する微小な直線要素から構成される。(2) 支柱は曲げと軸方向力を負担する。すなわち剛体ではない。(3) 支線および支柱はつねに弾性範囲内にある。

2.2 解析のプロセス

(1) 支線の Cable Analysis : 無凡時において、各支線はその自重や純線荷重によってカテナリー状に変形して支線・支柱系が釣合っている。この状態を解析の初期値と考えるため、各支線を構成する各直線要素の正確な座標と初張力を反復法による Cable Analysis により算出する。

(2) 3次元部材要素の非線形剛性マトリックス : 張力の影響と大変形に伴う幾何学的非線形性を考慮した支線部材要素および軸力に伴う $P-\Delta$ 効果を考慮した支柱部材要素の各3次元非線形剛性マトリックスを算出する。

(3) 支線・支柱系の全体剛性マトリックス : 各支線は一種の3次元トラスとも考えられるのに反して、支柱は3次元フレームである。支線・支柱系の全体剛性マトリックスを算出する際、3次元フレームとしての全体剛性マトリックスの中に3次元トラスの全体剛性マトリックスを組み込むことになり、これに伴って性質の異なる構造物の変形の適合性の問題や変形の自由度数がきわめて大きくなるという困難が生じる。そこで支柱の全体剛性マトリックスをこれと等価

は力学的特性を有する3次元トラスとして全体剛性マトリックスに縮少する。このようにして得られた支柱の縮少剛性マトリックスと各支線の全体剛性マトリックスとを直接適合させることにより、支線・支柱系の全体剛性マトリックスを導出し得る。

- (4) 増分載荷法および反復法による支線・支柱系の非線形解析：解析の出発点としては、各支線には初張力、支柱は初軸圧があらかじめ作用しており、この釣合い状態に僅かな外力が作用しただけでも特に支線の幾何学的形状が著るしく変動するという非線形性を示す。このため、各支線や支柱には外力を漸増載荷させ、さらにこれによって生ずる各部材の軸方向力や座標の変化を考慮して、それらが一定値に近づくまで反復繰り返えすという非線形解析を、各増分載荷に対して繰り返し行えば、各載荷の段階での支線・支柱系の変形、応力および動的解析が必要となる接線剛性マトリックス等が算出される。

2.3 支線の Cable Analysis

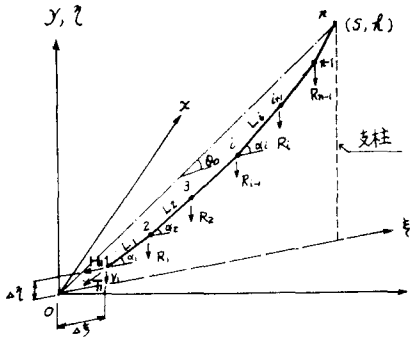


図2-1 モデル化された3次元支線

3次元空間にある支線の自重や絶縁碑子によって生ずるカタナリーや各要素の張力を算出するために、支線の端部に導入する初張力を与えられ、図2-1に示すように支線が有限な直線要素から成るとすれば、絶縁碑子を含めた支線の自重が $R_1, R_2, \dots, R_n$ のように作用するから、Cable Analysis⁽¹¹⁾により支線の各部に生ずる張力と座標が決定される。この解析は最初に適当な座標を設定して、端部の変位が適合されるまで、すなわち不適合移動量が $\Delta\xi = 0, \Delta\eta = 0$ となるまで反復計算を行う。この場合計算の収束を加速させるために、カタナリーの座標を

近似的に次のように決めるとよい。周知のごとくカタナリーの方程式は

$$T \frac{d}{d\xi} (\tan \theta) = \frac{w}{\cos \theta} \quad 2.1$$

である。ここに T は支線張力、 w は鉛直分布荷重、 θ は T の水平成分に対する傾斜角。 $\tan \theta = d\eta/d\xi$ とし、かつ近似的に $\sin \theta \approx \sin \theta_0$ (一定) とおき、 $\lambda = w / (T \sin \theta_0)$ とすると(2.1)式は容易に解かれ、境界条件 $\xi = 0$ で $\eta = 0$ 、 $\xi = S$ で $\eta = h$ を導入すれば、結局カタナリーの座標を決める曲線の方程式は

$$\eta = h \frac{e^{\lambda \xi} - 1}{e^{\lambda S} - 1} \quad 2.2$$

となる。すなわち支線の近似的なカタナリー曲線は、その自重と張力により決定される。

2.4 支線部材要素の非線形剛性マトリックス

図2-2に示すように、3次元直交座標系にある支線部材要素が変形して行く過程において、ある状態において任意の座標と張力が設定されているとき、この状態からさらに変形したとき、全体座標系から見た材端力 $Q_1, Q_2, \dots, Q_6$ および材端変形 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_6$ の関係は、部材の回転を考慮した部材の歪エネルギー・カスチリアーノの定理を適用することによって得られる。⁽¹²⁾

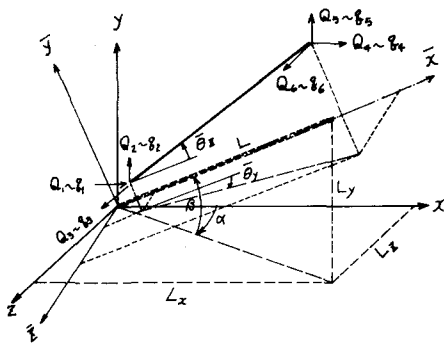


図 2-2 3次元直交座標系と変位座標系

$$\begin{aligned} \bar{e} &= \{\lambda_x(q_4 - q_1) + \mu_x(q_5 - q_2) + \nu_x(q_6 - q_3)\} / L, \\ \bar{\theta}_y &= \{\lambda_y(q_4 - q_1) + \mu_y(q_5 - q_2) + \nu_y(q_6 - q_3)\} / L, \quad \bar{\theta}_z = \{\lambda_z(q_4 - q_1) + \mu_z(q_5 - q_2) + \nu_z(q_6 - q_3)\} / L, \\ \lambda_x &= \cos \alpha \cos \beta, \quad \mu_x = \sin \beta, \quad \nu_x = \sin \alpha \cos \beta, \quad \lambda_y = -\cos \alpha \sin \beta, \quad \mu_y = \cos \beta, \quad \nu_y = -\sin \alpha \sin \beta, \\ \lambda_z &= -\sin \alpha, \quad \mu_z = 0, \quad \nu_z = \cos \alpha, \quad \cos \alpha = L_x / \sqrt{L_x^2 + L_z^2}, \quad \sin \alpha = L_z / \sqrt{L_x^2 + L_z^2}, \\ \cos \beta &= \sqrt{L_x^2 + L_z^2} / L, \quad \sin \beta = L_y / L \end{aligned}$$

$$[T]^c = \begin{bmatrix} [\lambda]^c & \\ & [\lambda]^c \end{bmatrix} \quad [\lambda]^c = \begin{bmatrix} \lambda_x & \mu_x & \nu_x \\ \lambda_y & \mu_y & \nu_y \\ \lambda_z & \mu_z & \nu_z \end{bmatrix} \quad 2.5$$

$\{Q\}_0^c$ は、ある載荷段階における存在張力 T_0 および温度歪による軸力 T_t 等にかかわる材端力ベクトルで、 $\{Q\}_0^c = \{-\lambda_x(T_0 + T_t), -\lambda_y(T_0 + T_t), -\lambda_z(T_0 + T_t), \lambda_x(T_0 + T_t), \lambda_y(T_0 + T_t), \lambda_z(T_0 + T_t)\}$ である。剛性マトリックス $[K]^c = [K]_0^c + [K]_1^c$ は次式にて表わすことが出来る。

$$[K]^c = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot & -1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -1 & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} + \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} \cdot & \bar{\theta}_z & \bar{\theta}_y & \cdot & -\bar{\theta}_x & -\bar{\theta}_y \\ \bar{\theta}_x & \bar{\theta}_x^2 & \bar{\theta}_y \bar{\theta}_x & -\bar{\theta}_x & -\bar{\theta}_x^2 & -\bar{\theta}_y \bar{\theta}_x \\ \bar{\theta}_y & \bar{\theta}_y \bar{\theta}_x & \bar{\theta}_y^2 & -\bar{\theta}_y & -\bar{\theta}_y \bar{\theta}_x & -\bar{\theta}_y^2 \\ \cdot & -\bar{\theta}_x & -\bar{\theta}_y & \cdot & \bar{\theta}_x & \bar{\theta}_y \\ -\bar{\theta}_x & -\bar{\theta}_x^2 & -\bar{\theta}_y \bar{\theta}_x & \bar{\theta}_x & \bar{\theta}_x^2 & \bar{\theta}_y \bar{\theta}_x \\ -\bar{\theta}_y & -\bar{\theta}_y \bar{\theta}_x & -\bar{\theta}_y^2 & \bar{\theta}_y & \bar{\theta}_y \bar{\theta}_x & \bar{\theta}_y^2 \end{bmatrix} + \frac{T}{L} \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & -1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & -1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & -1 & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & -1 & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad 2.6$$

(2.6) 式の第 1 項がいわゆる線形項で、 $[K]_0^c$ で表わし、第 2 項および第 3 項が非線形項である。この項の中で、部材回転角 $\bar{\theta}_y$, $\bar{\theta}_z$ および張力 T は、部材端変形に依存しているから、線形項のように一義的に決らず、したがって反復法による非線形解析が必要となる。

2.5 支柱部材要素の非線形剛性マトリックス

支柱は、最初垂直に位置しているが、外力により曲げ変形を遂げながら大きく変形し、また支線からの軸力の影響が顕著である。そこで図 2-3 に示すように、3次元直交座標系にある任意の支柱部材要素が変形するとき、高い軸圧縮力に伴う附加曲げの影響を考慮した非線形剛性マトリックスは次式にて表わすことが出来る。⁽³⁾

$$\{Q\}^M = \{Q\}_0^M + [T]^M \{ [K]_0^M + [K]_1^M \} [T]^M \{g\}^M \quad 2.7$$

ここに材端力および材端モーメントベクトル $\{Q\}^M = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{12}\}$, 材端変形および材端回転

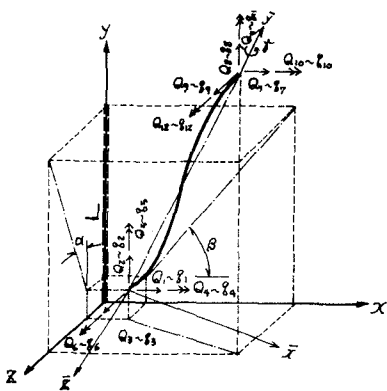


図 2-3 3次元支柱要素の座標と要素座標

よる非線形性を考慮すれば次式にて表わされる。

$$[K]^M = \begin{bmatrix} 12EI_x/L^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12EI_y/L^3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12EI_z/L^3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6EI_x/L^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6EI_y/L^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6EI_z/L^2 \end{bmatrix} + \frac{P_0}{L} \begin{bmatrix} 6/5 & 0 & 0 & -L/10 & -6/5 & 0 \\ 0 & 6/5 & 0 & 0 & 0 & -L/10 \\ 0 & 0 & 6/5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2L^2/15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2L^2/15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2L^2/15 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

ここに I_x, I_y, I_z は、各座標軸まわりの断面2次モーメントおよび極2次モーメント、 G はせん断剛性である。 L は部材長である。

2.5 支線・支柱系の全体剛性マトリックス

まず(2.8)式で表わされる支柱部材要素の剛性マトリックスをもとにして、支柱系のみの全体剛性マトリックスを作成し、これを支線系と同じ変位の自由度のみを有する剛性マトリックス $[K]_u^M$ に reduction する。このとき、支柱の節点力ベクトル $\{P\}^M$ と節点変位 $\{p\}^M$ の関係は次のようになる。

$$\{P\}^M = \{P\}_0^M + [K]_u^M \{p\}^M \quad (2.9)$$

ここに $\{P\}^M, \{p\}^M$ は、図 2-4 に示すように $\{P\}^M = \{ \dots P_{x,i} P_{y,i} P_{z,i} \dots \}$, $\{p\}^M = \{ \dots p_{x,i} p_{y,i} p_{z,i} \dots \}$ である。

さて支線系と支柱系がある載荷段階において一体として協力し、外力に抵抗し得るためには、両者の系の各節点において外力との釣合いおよび変形の適合性が満足されなければならない。すなわち支線・支柱系の各節点に作用する外力ベクトルを $\{F\}^T = \{ \dots F_{x,i} F_{y,i} F_{z,i} \dots \}$, 節点の変位ベクトルを $\{u\}^T = \{ \dots u_{x,i} u_{y,i} u_{z,i} \dots \}$

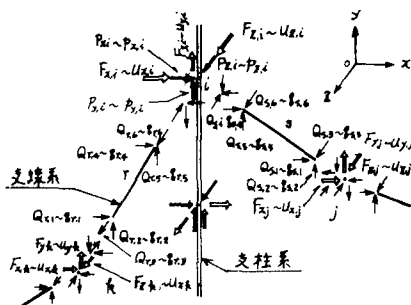


図 2-4 Reduction された支柱と支線の相互作用

とすれば次式が成立する。

$$\{F\} = \{F\}_0 + [K]\{u\} \quad 2.10$$

ここに $[\beta]^M$ を支柱の支線・支柱系に対する適合マトリックス, $[\beta]_s^C$ を支線要素 (s) の支線・支柱系に対する適合マトリックスとし, 支線部材要素の数を m とすれば

$$\{F\}_0 = [\beta]^T \{P\}_0^M + \sum_{s=1}^m [\beta]_s^T \{Q\}_{0,s}^C \quad 2.11$$

$$[K] = [\beta]^T [K]_u^M [\beta]^M + \sum_{s=1}^m [\beta]_s^T [K]_s^C [\beta]_s^C \quad 2.12$$

2.6 増分載荷反復法による支線・支柱系の解析

風や地震等による外力が作用しない平衡状態にある支線・支柱系は, (2.10)式において $0 = \{F\}_0 + [K]\{u\}_0$ を満足しており, 僅かな増分載荷による増分変位 $\{\Delta u\}$ を決定するため, $\{\Delta F\}_i = \{F\}_0 + [K]_i \{\{u\}_0 + \{\Delta u\}_i\}$ と $0 = \{F\}_0 + [K]_i \{u\}_0$ の差をとり, これを一般に平衡状態にある (I-1)step から (I) step への増分載荷に拡張すれば

$$\{\Delta F\}_i = [K]_i \{\Delta u\}_i, \quad \longrightarrow \quad \{\Delta F\}_i = [K]_{i-1} \{\Delta u\}_i \quad 2.13$$

となる。ところで, (2.13)式から (I) step における増分変位 $\{\Delta u\}_i$ を算出するのに, (I-1) step における剛性マトリックス $[K]_{i-1}$ を用いて第1近似解としての増分変位 $\{\Delta u\}_i$ を求め, これを用いて変更された剛性マトリックス $[K]_{i-1}^1$ を用いて第2近似解としての増分変位 $\{\Delta u\}_i^2$ を求め, 同様のプロセスを続けて $\{\Delta u\}_i^n \simeq \{\Delta u\}_i^{n-1}$ となるまで反復計算を続けられ, (I) step における増分変位が $\{\Delta u\}_i \simeq \{\Delta u\}_i^n$ として得られる。ゆえに (I) step までの全変位 $\{u\}_i$ は $\{u\}_i = \{u\}_{i-1} + \{\Delta u\}_i$ であり, 次の (I+1) step において用いる初期の剛性マトリックス $[K]_i = [K]_{i-1}^n$ である。このようなプロセスを各 step に対して続けることにより, 全荷重に対する変位を算出することが出来る。勿論支線・支柱系の各部材要素の応力等も容易に算出し得る。

§3. 静的風圧力による2段支線式鉄塔の解析とその検討

3.1 鉄塔モデルと設計要件

本報で対象とする鉄塔モデルは, 図3-1に示すように, 高さ80mの2段支線式鉄塔である。支柱は, STK41鋼管を3本を主材として鋼管ラチスで粗立てられ, 支線は, 亜鉛鍍片より鋼索を用いる。なお実際にはこの支線式鉄塔の高さは150m(4段支線)であるが, 解析の便宜上2段支線とした。その代り支柱の軸方向力は4段支線そのまゝとする。

さてここで考える設計上の要件としては, 支線に与える初張力と風向である。すなわち実際に採用する支線初張力の場合を CASE 2 (2段支線基部張力 $T_0 = 7.68t$), 支線初張力が弱い場合を CASE 1 ($T_0 = 5.42t$), 支線初張力が強い場合を CASE 3 ($T_0 = 8.88t$) とする。さらに図3-1に示すように風向がA風の場合とB風の場合を考える。これらの各条件のもとで支線式鉄塔の解析を行い, それに伴って得られた解析結果をいかに設計に反映させるかについて考える。なお風圧力は便宜上支線および支柱ともに速度圧 $q = 180 \text{ kg/m}^2$ まで荷重を載荷させる。このとき支柱の各変位に作用する

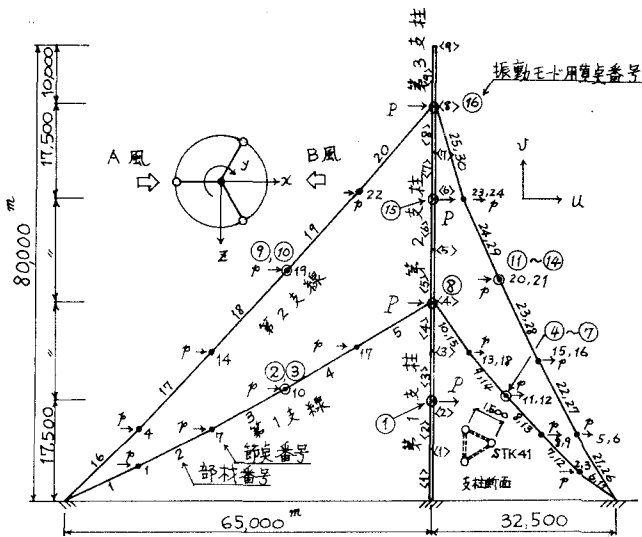


図 3-1 解析用 2 段支線式鉄塔
(註) $P=3.3^t$, $p=0.033^t$, ⊙ 固有振動自由度位置

水平力 $P=3.3^t$, 支線の各点には作用する水平力 $p=0.033^t$ とする。

解析において用いる支線・支柱系の断面諸元関係を表 3-1 に示す。

解析の結果得られた各場合の支線および支柱の変形を表 3-2 に示す。この結果から次のことがわかる。まず支柱については、A 風の場合よりも B 風の場合の方が変形が大きく、かつ CASE 3, CASE 2, CASE 1 の順に大きくなっている。支線については、A 風時風上側第 1 支線は、B 風よりも A 風の方が大きく、その他すべての支線は A 風よりも B 風の方が変形が大きいこ

表 3-1 支線・支柱系の諸元

部 材	諸 元	I_x	I_y	I_z	A	E	ρ
	断面 2 次 モーメント cm^4	断面 2 次 モーメント cm^4	断面 2 次 モーメント cm^4	断面積 cm^2	ヤング率 t/cm^2	密度 t/m	
第 1 支柱	661,612.5	1,323,225.0	661,612.5	176.43	2,100.0	0.270	
第 2 支柱	542,025.0	1,084,050.0	542,025.0	144.54	2,100.0	0.270	
第 3 支柱	458,775.0	917,550.0	458,775.0	122.34	2,100.0	0.270	
支 線	—	—	—	32.29	1,500.0	第 18 線 0.029 第 28 線 0.031	

表 3-2 支線・支柱系の変形一覧表 (Z 方向の変形 w を省く) (単位; cm)

部 材	節 点 番 号	A 風						B 風					
		CASE 1		CASE 2		CASE 3		CASE 1		CASE 2		CASE 3	
		u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
支 線	1	-42.3	108.3	-20.0	44.4	-18.2	40.6	29.1	-94.8	22.1	-54.4	20.5	-49.3
	2	6.4	-37.1	6.4	-18.4	6.0	-16.7	-1.5	71.6	0.7	36.6	0.2	32.0
	3	6.4	-37.1	6.4	-18.4	6.0	-16.9	-1.5	71.6	0.7	36.6	0.2	32.0
	4	-62.3	72.0	-38.3	42.0	-31.7	34.2	-70.8	-92.4	46.5	-59.5	39.7	-45.0
	5	6.2	-28.3	6.8	-18.1	6.0	-15.1	13.7	70.4	4.2	34.3	2.6	27.0
	6	6.2	-28.3	6.8	-18.1	6.0	-15.1	13.7	70.4	4.2	34.3	2.6	27.0
	7	-67.1	162.2	-30.6	66.8	-27.4	59.3	54.4	-156.5	34.4	-80.8	31.1	-71.6
	8	13.5	-59.3	10.4	-26.7	9.6	-24.2	-5.9	108.5	-0.2	54.2	-0.9	46.7
	9	13.5	-59.3	10.4	-26.7	9.6	-24.2	-5.9	108.5	-0.2	54.2	-0.9	46.7
	10	-65.3	159.3	-29.7	65.6	-26.1	57.4	48.4	-145.6	32.4	-77.3	28.7	-67.5
	11	23.1	-56.3	12.3	-25.7	11.2	-23.0	-16.1	105.6	-3.3	53.1	-3.6	45.1
	12	23.1	-56.3	12.3	-25.7	11.2	-23.0	-16.1	105.6	-3.3	53.1	-3.6	45.1
	13	30.4	-33.4	12.3	-16.5	11.0	-14.5	-33.5	67.0	-9.1	34.6	-8.2	28.9
	14	-93.3	104.4	-56.3	60.4	-45.4	48.0	120.1	-147.1	67.8	-76.7	59.9	-61.5
	15	14.1	-41.9	12.0	-25.0	10.2	-20.6	15.2	104.5	3.5	49.1	1.6	37.8
	16	14.1	-41.9	12.0	-25.0	10.2	-20.6	15.2	104.5	3.5	49.1	1.6	37.8
	17	-31.0	103.0	-16.2	42.6	-13.9	36.8	7.0	-83.6	14.6	-48.2	13.1	-41.8
	18	30.9	-33.4	12.3	-16.3	11.0	-14.5	-33.5	67.0	-9.1	34.6	-8.2	28.9
	19	-88.4	100.0	-52.7	57.3	-41.5	44.7	102.7	-131.1	60.0	-69.7	48.8	-59.2
	20	22.2	-37.8	15.4	-23.0	12.8	-18.6	1.0	100.6	-2.4	46.5	-2.8	35.2
	21	22.2	-37.8	15.4	-23.0	12.8	-18.6	1.0	100.6	-2.4	46.5	-2.8	35.2
	22	-45.3	65.6	-27.8	36.0	-21.6	27.7	31.0	-74.4	26.2	-41.7	22.0	-32.9
	23	29.7	-22.7	17.3	-14.1	13.6	-11.3	-29.3	63.2	-13.2	29.2	-10.3	21.8
	24	29.7	-22.7	17.3	-14.1	13.6	-11.3	-29.3	63.2	-13.2	29.2	-10.3	21.8
支 柱	1	13.87	-0.10	3.63	-0.02	3.30	-0.01	-17.70	-0.19	-5.6	-0.03	-4.40	-0.03
	2	25.64	-0.18	6.68	-0.03	6.00	-0.03	-33.94	-0.35	-10.5	-0.06	-9.11	-0.05
	3	33.95	-0.23	8.84	-0.04	7.74	-0.04	-47.59	-0.48	-14.4	-0.08	-12.21	-0.07
	4	39.64	-0.26	10.82	-0.05	9.20	-0.05	-58.61	-0.56	-18.0	-0.10	-14.80	-0.08
	5	43.64	-0.27	13.31	-0.06	11.10	-0.06	-66.99	-0.62	-21.8	-0.12	-17.48	-0.09
	6	44.74	-0.27	15.60	-0.07	12.59	-0.06	-72.26	-0.65	-25.2	-0.13	-19.58	-0.10
	7	42.08	-0.27	16.83	-0.08	13.00	-0.06	-74.48	-0.67	-27.4	-0.14	-20.37	-0.11
	8	37.15	-0.24	17.38	-0.08	12.69	-0.07	-75.00	-0.68	-28.8	-0.15	-20.34	-0.12
	9	31.07	-0.21	17.88	-0.08	12.21	-0.07	-75.27	-0.68	-30.3	-0.15	-20.15	-0.12

(註) CASE 1 ; 初張力 $T_0=5.42^t$, CASE 2 ; 初張力 $T_0=7.68^t$, CASE 3 ; 初張力 $T_0=8.88^t$

表 3-3 支線・支柱系の部材応力一覽表

(単位: 曲げモーメント(tm), 軸方向力(t))

部 材	部 材 番 号	曲 げ モ ー メント	部 材 応 力										
			CASE 1			CASE 2			CASE 3				
			無 風	A 風	B 風	無 風	A 風	B 風	無 風	A 風	B 風		
支 線	1		4.62	13.44	6.75	8.59	16.39	6.61	9.22	16.85	6.85		
	2		4.77	12.44	4.12	8.76	15.77	5.72	9.40	16.39	6.19		
	3		4.95	12.24	2.54	8.96	15.70	5.61	9.60	16.40	6.19		
	4		5.17	12.81	4.73	9.17	16.15	6.26	9.81	16.80	6.76		
	5		5.43	13.85	6.85	9.40	16.78	7.29	10.03	17.49	7.62		
	6		4.62	3.98	10.68	8.59	7.40	13.92	9.22	7.91	14.11		
	7		4.77	4.03	8.96	8.76	7.41	13.58	9.40	7.95	13.90		
	8		4.95	4.18	8.43	8.96	7.56	13.60	9.60	8.12	13.98		
	9		5.17	4.41	9.32	9.17	7.83	13.96	9.81	8.39	14.30		
	10		5.43	4.74	10.91	9.40	8.20	14.59	10.03	8.73	14.81		
	11		4.62	3.98	10.68	8.59	7.40	13.92	9.22	7.91	14.11		
	12		4.77	4.03	8.96	8.76	7.41	13.58	9.40	7.95	13.90		
	13		4.95	4.18	8.43	8.96	7.56	13.60	9.60	8.12	13.98		
	14		5.17	4.41	9.32	9.17	7.83	13.96	9.81	8.39	14.30		
	15		5.43	4.74	10.91	9.40	8.20	14.59	10.03	8.73	14.81		
	16		5.42	11.51	6.72	7.68	13.66	5.95	8.88	14.65	6.48		
	17		5.76	11.32	4.01	8.04	13.33	5.25	9.26	14.59	6.17		
	18		6.14	11.56	3.08	8.43	13.55	5.45	9.66	14.88	6.49		
	19		6.56	12.11	5.21	8.85	14.17	6.28	10.07	15.43	7.17		
	20		7.04	12.85	7.26	9.31	15.04	7.30	10.51	16.11	7.99		
	21		5.42	4.69	13.51	7.68	6.65	11.83	8.88	7.63	12.65		
	22		5.76	4.91	11.90	8.04	6.83	11.73	9.26	7.89	12.75		
	23		6.14	5.23	11.67	8.43	7.19	12.00	9.66	8.27	13.08		
	24		6.56	5.68	12.72	8.85	7.67	12.54	10.07	8.74	13.58		
	25		7.04	6.22	14.38	9.31	8.22	13.27	10.51	9.24	14.17		
	26		5.42	4.69	13.51	7.68	6.65	11.83	8.88	7.63	12.65		
	27		5.76	4.91	11.90	8.04	6.83	11.73	9.26	7.89	12.75		
	28		6.14	5.23	11.67	8.43	7.19	12.00	9.66	8.27	13.08		
	29		6.56	5.68	12.72	8.85	7.67	12.54	10.07	8.74	13.58		
	30		7.04	6.22	14.38	9.31	8.22	13.27	10.51	9.24	14.17		
支 柱	1	MB	-97.3	-	-100.90	-12.67	-102.49	-	-97.3	-	-100.90	-12.67	-102.49
		MT	-	11.50	-	-	-	10.55	-101.07	-	-	11.50	-12.67
	2	MB	-97.3	-	-100.90	-12.67	-102.49	-	-97.3	-	-100.90	-12.67	-102.49
		MT	-	22.36	-	-	-	20.52	-101.07	-	-	22.36	-24.63
	3	MB	-97.3	-	-100.91	-24.63	-102.50	-	-97.3	-	-100.91	-24.63	-102.50
		MT	-	22.36	-	-	-	22.86	-101.07	-	-	22.36	-24.63
	4	MB	-97.3	-	-100.91	-9.20	-102.50	-	-97.3	-	-100.91	-9.20	-102.50
		MT	-	5.11	-	-	-	3.35	-101.07	-	-	5.11	-9.20
	5	MB	-48.6	-	-50.39	-6.74	-51.26	-	-48.6	-	-50.39	-6.74	-51.26
		MT	-	12.42	-	-	-	14.01	-50.50	-	-	12.42	-6.74
	6	MB	-48.6	-	-50.39	-8.74	-51.26	-	-48.6	-	-50.39	-8.74	-51.26
		MT	-	4.75	-	-	-	3.05	-50.50	-	-	4.75	-8.74
	7	MB	-48.6	-	-50.39	-23.91	-51.27	-	-48.6	-	-50.39	-23.91	-51.27
		MT	-	21.77	-	-	-	20.0	-50.51	-	-	21.77	-23.91
	8	MB	-48.6	-	-50.39	-12.16	-51.27	-	-48.6	-	-50.39	-12.16	-51.27
		MT	-	11.07	-	-	-	10.17	-50.51	-	-	11.07	-12.16
	9	MB	-1.0	-	-1.0	-	-1.0	-	-1.0	-	-1.0	-	-1.0
		MT	-	-	-	-	-	-0.02	-1.0	-	-	-	-1.0

(註) MB; 部材脚部曲げモーメント, MT; 部材頭部曲げモーメント, *; 部材軸方向力

とわかる。しかも支柱の場合と同様に A 風および B 風ともに CASE 3, CASE 2, CASE 1 の順に変形が大きくなっている。注目すべきは支線の変形は、支柱の変形よりも one order 異なる位に大きいことであり、支線の非線形性の大きいことが理解出来る。

次に支線・支柱系の応力であるが、まず支柱については、A 風よりも B 風の方が大きく、しかも支線初張力が大きい CASE 3 よりも CASE 2 の方が応力は大きく、更に CASE 2 よりも CASE 1 の方が応力が大きくなることは明確である。これは曲げモーメントについてであるが、軸方向力については A 風と B 風の相異や支線初張力 CASE 1, CASE 2 および CASE 3 の相異はきわめて小さい。ゆえにこの点に関しては、支線の初張力を大きくする方が支柱の静的設計に関する限り有利となる。しかも支線の応力に関しては、B 風よりも A 風の方が大きいので、A 風で設計することになるが、初張力が支線の応力におよぼす影響は割合少ないので、支線初張力を大きくしても支線の設計がそれほど不経済とはならないと思われる。

§ 4. 支線・支柱系の固有振動

支線・支柱系の動的挙動は、きわめて大きい非線形性のために複雑で、容易に理解しがたい。そこで、ここでは、便宜上図 3-1 中に示される位置のみの水平および上下方向に振動自由度を有する

16 自由度系を設定し、無風時のいわば微小変形時（支線のバネ効果が小さい）の固有振動および A 風時で支線初張力が CASE 2 のときの大変形時における固有振動を曲げせん断振動系のような解析に準じて求め、その結果のうち支柱と支線の主要振動型のみを図 4-1 に示す。

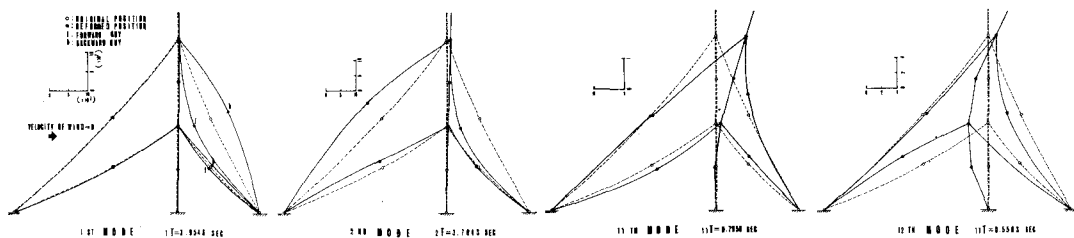


図 4-1(a) 支線・支柱系の固有振動型（無風時，支線初張力 CASE 2）

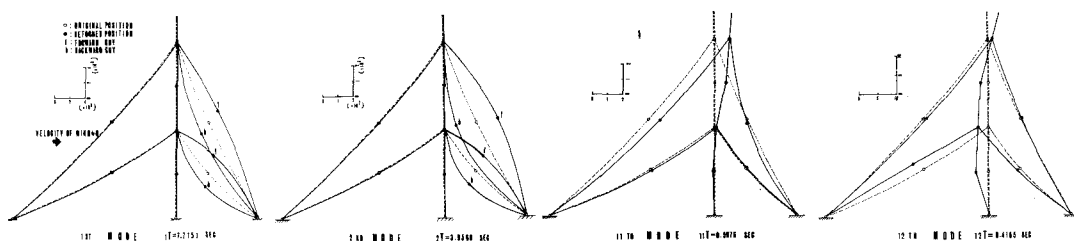


図 4-1(b) 支線・支柱系の固有振動型（風速度圧 $q=180 \text{ kg/m}^2$, A 風，支線初張力 CASE 2）

§ 5. 支線・支柱系の座屈

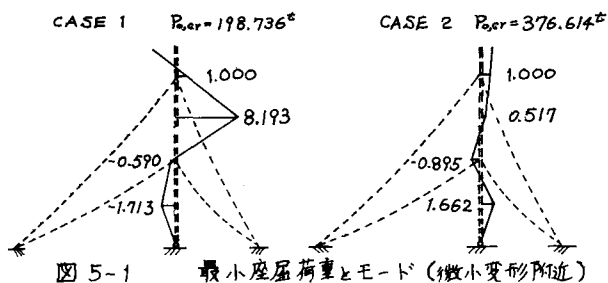


図 5-1 最小座屈荷重とモード（微小変形附近）

支線・支柱系としての弾性不安定性については、よく分かっていないが、とくに強風時には何らかの原因で、一種の不安定現象が生ずることも考えられる。そこでここでは簡単のために無風時附近での微小変形時の弾性不安定にもとづく座屈が生ずるかどうかについて、支線初張力が CASE 1 と CASE 2 の場合について解析し、その結果を図 5-1 に示す。解析の方法は剛性マトリックスの線形項 $[K]$ と非線形項 $P_0[K]$ の和から成る全体剛性マトリックスの行列式 $|K_0 + P_0 K| = 0$ となるようにして求める。座屈荷重 P_{cr} は第 2 支線における支柱の軸方向力に到するときのもので、いまの場合、微小変形の段階では、座屈の可能性は殆んどないといえよう。

§ 6. 結び

静的解析にもとづく支線・支柱系の設計の問題は殆んど処理可能と思われるが、動的解析にもとづく設計要領の確立が今後の課題である。（文献は日本建築学会 関東支部第 8 回学術研究発表会、1973.3）

*1 NHK 技術本部建築部主管，*2 企建築部，*3 (株)小高研究所長・工学博士，*4 企研究開発部長，*5 企研究員