

Br. 70-02

本州四国連絡架橋調査
材 料 構 造 調 査
調 査 資 料 No. 61

土 木 研 究 所 資 料
第 5 8 8 号

還元法による吊橋主塔の橋軸方向の計算

昭和 4 5 年 4 月

建 設 省 土 木 研 究 所

要 旨

吊橋主塔の橋軸方向の解析を還元法 (Reduktions Verfahren) によって行ない、本四 1500m 吊橋概略設計の 19 の載荷ケースおよび関門吊橋第 1 次設計の 12 の載荷ケースについて、電算により数値計算を行なった。

その結果、応力計算において従来の方法によるものとほぼ同じ数値が得られ、さらにこの方法では塔頂での弾性拘束および塔基部の回転の影響などを考慮することができるので、計算法の有用性が確認できた。

なお、全体座屈に対する安全性については、今後解明すべき点を論ずるにとどめた。

Key words : 橋梁, 吊橋, 上部構造, 主塔, 設計

目 次

ま え が き

§ 1. 現行設計法の概要	1
1-1 応力計算	1
1-2 座屈計算	1
§ 2. 還元法の理論	3
2-1 格間マトリックスの誘導	3
2-2 格点マトリックスの誘導	6
2-3 応力計算	7
2-4 座屈計算	8
§ 3. 数値計算例Ⅰ：本四1500m吊橋主塔	9
3-1 断面諸元	9
3-2 荷重ケース	11
3-3 計算結果	14
3-4 概略設計との比較	21
§ 4. 数値計算例Ⅱ：関門吊橋主塔	25
4-1 断面諸元	25
4-2 荷重ケース	26
4-3 計算結果	28
4-4 第1次設計との比較	32
§ 5. 考 察	35
5-1 応力計算	35
5-2 座屈計算	35
あ と が き	36

付 録 電算プログラム	37
(1) インプットデータの記号	37
(2) フローチャート	38
(3) プログラム	40

まえがき

吊橋主塔の橋軸方向の応力計算は、変断面片持ばりの微分方程式をもとにした Blair Birdsell の方法によって現在行なわれているが、主塔の全体座屈に対する検討が不十分のように思われる。

そこで今回はこの問題への1つのアプローチとして還元法 (Reduktions Verfahren) による数値計算を行ない、その結果を従来の方法によるものと比較した。

昭和45年4月

橋梁研究室長 国 広 哲 男

橋 梁 研 究 室 藤 原 稔

井 刈 治 久

§ 1. 現行設計法の概要

1.1 応力計算

現行の設計法で吊橋主塔の橋軸方向の応力計算を行う場合はつぎのように考えている。

- (1) 長大吊橋のケーブルの剛性が非常に大きいので主塔自体の剛性はそれに比べて無視でき、また主塔に作用する荷重によるケーブルの水平変位も無視できるものと考えて図 1.1 (a) に示す吊橋を図 1.1 (b) のような構造として塔頂鉛直反力 P と塔頂水平変位 δ を

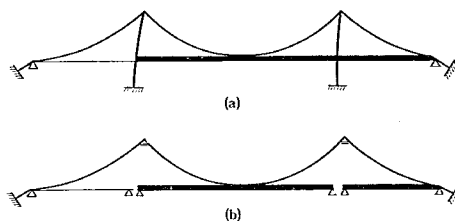


図 1.1

- たわみ理論によって求める（土木研究所吊橋用プログラム SSV-2 参照）。
(2) つぎに、塔頂に(1)で求めた塔頂鉛直反力 P_0 と塔頂水平変位 δ が作用する変断面の主塔自体にさらに鉛直集中荷重 P_i 、水平集中荷重 H_i および水平分布荷重 p_i が図 1.2 のように作用した場合の変形量と断面力を Blair Birdsall の考え方で求める（土木研究所吊橋用プログラム TOW-2 参照）。

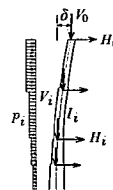


図 1.2

1.2 座屈計算

現行の方法では、図 1.2 に示す変断面主塔と等価な断面 2 次モーメントをもつ等断面主塔の塔頂に鉛直反力 P と水平力 F が作用して塔頂が δ だけ変位した場合について考えている（図 1.3）。この場合 F は鉛直反力 P と塔頂変位 δ と剛性 EI の関数としてつぎのように表わされる。

$$F = \frac{Pn\delta}{\tan n\delta - n\delta} \quad (1.1)$$

ここに

$$n = \sqrt{\frac{P}{EI}} \quad (1.2)$$

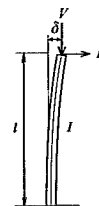


図 1.3

通常の設計では $F \geq 0$ となるように主塔の剛性をきめているが、これは上端自由下端固定の柱（図 1.4 (a)）の座屈チェックにはかからない。

すなわち (1.1)、(1.2) 式より次式のようになる。

$$P \leq \frac{\pi^2 EI}{(2l)^2} \quad (1.3)$$

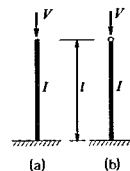


図 1.4

ところが応力解析は上端ヒンジ下端固定の柱（図 1.4 (b)）について行っており、この場合の座屈荷重はつぎのようになる。

$$P = \frac{\pi^2 EI}{(0.7l)^2} \dots\dots\dots (1.4)$$

したがって部材がつねに弾性体であると考えれば(1.3)式と(1.4)式から設計荷重は座屈荷重に対しておよそ8倍の安全率をもつことになる。

§ 2. 還元法の理論

2.1 格間マトリックスの誘導

図 2.1 のように両端に軸圧縮力、曲げモーメントおよびせん断力をうけ、格間に分布横荷重をうける等断面部材の格間マトリックスを求める。

このような部材の力のつりあい方程式は次式で表わされる。

$$EI w''''(x) + N w''(x) = p(x) \quad (2.1)$$

また、

$$\mu^2 = \frac{N l^2}{EI} \quad (2.2)$$

とおくと (2.1) 式はつぎのようになる。

$$w''''(x) + \frac{\mu^2}{l^2} w''(x) = \frac{p(x)}{EI} \quad (2.3)$$

(2.3) 式の両辺のラプラス変換をとって整理すると次式が得られる。

$$\bar{w}(s) = \frac{1}{s} w(0) + \frac{1}{s^2} w'(0) + \frac{1}{s(s^2 + \frac{\mu^2}{l^2})} w''(0) + \frac{1}{s^2(s^2 + \frac{\mu^2}{l^2})} w'''(0) + \frac{\bar{p}(s)}{s^2(s^2 + \frac{\mu^2}{l^2})} \cdot \frac{1}{EI} \quad (2.4)$$

ここに

$$\bar{w}(s) = \int_0^\infty e^{-sx} w(x) dx \quad (2.5)$$

$$\bar{p}(s) = \int_0^\infty e^{-sx} p(x) dx \quad (2.6)$$

(2.4) 式の逆変換を行なうと次式が得られる。

$$w(x) = w(0) + x w'(0) + \frac{l^2}{\mu^2} (1 - \cos \frac{\mu}{l} x) w''(0) + \frac{l^3}{\mu^3} (\frac{\mu}{l} x - \sin \frac{\mu}{l} x) w'''(0) + \frac{1}{EI} \cdot \frac{l^3}{\mu^3} \int_0^x (\frac{\mu}{l} (x - \xi) - \sin \frac{\mu}{l} (x - \xi)) p(\xi) d\xi \quad (2.7)$$

(2.7) 式を x に関してそれぞれ 1, 2, 3 回微分するとつぎの 3 つの式が得られる。

$$w'(x) = w'(0) + \frac{l}{\mu} \sin \frac{\mu}{l} x \cdot w''(0) + \frac{l^2}{\mu^2} (1 - \cos \frac{\mu}{l} x) w'''(0) + \frac{1}{EI} \cdot \frac{l^2}{\mu^2} \int_0^x (1 - \cos \frac{\mu}{l} (x - \xi)) p(\xi) d\xi \quad (2.8)$$

$$w''(x) = \cos \frac{\mu}{l} x \cdot w''(0) + \frac{l}{\mu} \sin \frac{\mu}{l} x \cdot w'''(0) + \frac{1}{EI} \cdot \frac{l}{\mu} \int_0^x \sin \frac{\mu}{l} (x - \xi) \cdot p(\xi) d\xi \quad (2.9)$$

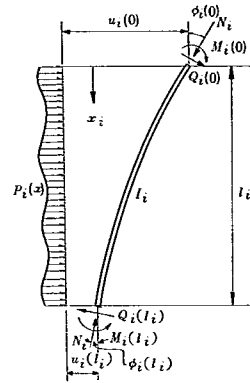


図 2.1

$$w''(x) = -\frac{\mu}{l} \sin \frac{\mu}{l} x \cdot w'(0) + \cos \frac{\mu}{l} x \cdot w''(0) + \frac{1}{EI} \int_0^x \cos \frac{\mu}{l} (x-\xi) \cdot p(\xi) d\xi \cdots (2.10)$$

しかるに

$$w'(x) = \phi(x) \cdots (2.11)$$

$$w''(x) = -\frac{1}{EI} M(x) \cdots (2.12)$$

$$w'''(x) = -\frac{1}{EI} Q(x) \cdots (2.13)$$

であるから (2.11) ~ (2.13) 式を (2.7) ~ (2.10) 式に代入して整理するとつぎの4つの式が得られる。

$$w(x) = w(0) + x \cdot \phi(0) - \frac{l^2}{\mu^2} (1 - \cos \frac{\mu}{l} x) \frac{M(0)}{EI} - \frac{l^3}{\mu^3} (\frac{\mu}{l} x - \sin \frac{\mu}{l} x) \frac{Q(0)}{EI} \\ + \frac{1}{EI} \cdot \frac{l^3}{\mu^3} \int_0^x [\frac{\mu}{l} (x-\xi) - \sin \frac{\mu}{l} (x-\xi)] p(\xi) d\xi \cdots (2.14)$$

$$\phi(x) = \phi(0) - \frac{l}{\mu} \sin \frac{\mu}{l} x \cdot \frac{M(0)}{EI} - \frac{l^2}{\mu^2} (1 - \cos \frac{\mu}{l} x) \frac{Q(0)}{EI} \\ + \frac{1}{EI} \cdot \frac{l^2}{\mu^2} \int_0^x [1 - \cos \frac{\mu}{l} (x-\xi)] p(\xi) d\xi \cdots (2.15)$$

$$M(x) = \cos \frac{\mu}{l} x \cdot M(0) + \frac{l}{\mu} \sin \frac{\mu}{l} x \cdot Q(0) - \frac{l}{\mu} \int_0^x \sin \frac{\mu}{l} (x-\xi) \cdot p(\xi) d\xi \cdots (2.16)$$

$$Q(x) = -\frac{\mu}{l} \sin \frac{\mu}{l} x \cdot M(0) + \cos \frac{\mu}{l} x \cdot Q(0) - \int_0^x \cos \frac{\mu}{l} (x-\xi) \cdot p(\xi) d\xi \cdots (2.17)$$

(2.14) ~ (2.17) 式をベクトル表示すると次式が得られる。

$$Y(x) = F(x) \cdot Y(0) \cdots (2.18)$$

$$\text{したがって } Y(x) = \{ w(x), \phi(x), M(x), Q(x), 1 \}^T \cdots (2.19)$$

$$Y(0) = \{ w(0), \phi(0), M(0), Q(0), 1 \}^T \cdots (2.20)$$

$$F(x) = \begin{bmatrix} 1 & x & -\frac{l^2}{\mu^2} \cdot \frac{1}{EI} (1 - \cos \frac{\mu}{l} x) & -\frac{l^3}{\mu^3} \cdot \frac{1}{EI} (\frac{\mu}{l} x - \sin \frac{\mu}{l} x) & w_0(x) \\ 0 & 1 & -\frac{l}{\mu} \cdot \frac{1}{EI} \sin \frac{\mu}{l} x & -\frac{l^2}{\mu^2} \cdot \frac{1}{EI} (1 - \cos \frac{\mu}{l} x) & \phi_0(x) \\ 0 & 0 & \cos \frac{\mu}{l} x & \frac{l}{\mu} \sin \frac{\mu}{l} x & M_0(x) \\ 0 & 0 & -\frac{\mu}{l} \sin \frac{\mu}{l} x & \cos \frac{\mu}{l} x & Q_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots (2.21)$$

$$w_0(x) = \frac{1}{EI} \cdot \frac{l^3}{\mu^3} \int_0^x \left[\frac{\mu}{l} (x-\xi) - \sin \frac{\mu}{l} (x-\xi) \right] p(\xi) d\xi \quad (2.22)$$

$$\phi_0(x) = \frac{1}{EI} \cdot \frac{l^2}{\mu^2} \int_0^x \left[1 - \cos \frac{\mu}{l} (x-\xi) \right] p(\xi) d\xi \quad (2.23)$$

$$M_0(x) = -\frac{l}{\mu} \int_0^x \sin \frac{\mu}{l} (x-\xi) \cdot p(\xi) d\xi \quad (2.24)$$

$$Q_0(x) = -\int_0^x \cos \frac{\mu}{l} (x-\xi) \cdot p(\xi) d\xi \quad (2.25)$$

いま図 2.1 における部材 i に注目して (2.18)~(2.25) 式において $x=l_i$ とすると以下の式が得られる。

$$Y_i(l_i) = F_i \cdot Y_i(0) \quad (2.26)$$

$$Y_i(l_i) = \{ w(l_i), \phi(l_i), M(l_i), Q(l_i), 1 \}^T \quad (2.27)$$

$$Y_i(0) = \{ w(0), \phi(0), M(0), Q(0), 1 \}^T \quad (2.28)$$

$$F_i = \begin{bmatrix} 1 & l_i & -\frac{l_i^2}{\mu_i^2} \frac{(1-\cos \mu_i)}{EI_i} & -\frac{l_i^3}{\mu_i^3} \frac{(\mu_i - \sin \mu_i)}{EI_i} & w_{0i} \\ 0 & 1 & -\frac{l_i}{\mu_i} \frac{\sin \mu_i}{EI_i} & -\frac{l_i^2}{\mu_i^2} \frac{(1-\cos \mu_i)}{EI_i} & \phi_{0i} \\ 0 & 0 & \cos \mu_i & \frac{l_i}{\mu_i} \sin \mu_i & M_{0i} \\ 0 & 0 & -\frac{\mu_i}{l_i} \sin \mu_i & \cos \mu_i & Q_{0i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$w_{0i} = \frac{1}{EI_i} \cdot \frac{l_i^3}{\mu_i^3} \int_0^{l_i} \left[\frac{\mu_i}{l_i} (l_i - \xi) - \sin \frac{\mu_i}{l_i} (l_i - \xi) \right] p_i(\xi) d\xi \quad (2.30)$$

$$\phi_{0i} = \frac{1}{EI_i} \cdot \frac{l_i^2}{\mu_i^2} \int_0^{l_i} \left[1 - \cos \frac{\mu_i}{l_i} (l_i - \xi) \right] p_i(\xi) d\xi \quad (2.31)$$

$$M_{0i} = -\frac{l_i}{\mu_i} \int_0^{l_i} \sin \frac{\mu_i}{l_i} (l_i - \xi) p_i(\xi) d\xi \quad (2.32)$$

$$Q_{0i} = -\int_0^{l_i} \cos \frac{\mu_i}{l_i} (l_i - \xi) p_i(\xi) d\xi \quad (2.33)$$

(2.29) 式で与えられた F_i が格間 i の格間マトリックス (Feld Matrix) であり, (2.26) 式を用いることによつて格間 i の中で $x_i=0$ における断面力および変形量 $Y_i(0)$ から $x_i=l_i$ における断面力および変形量 $Y_i(l_i)$ を求めることができる。

p_i が一定の場合には (2.30)~(2.33) 式は以下のようになる。

$$w_{0i} = \frac{1}{EI_i} \cdot \frac{l_i^4}{\mu_i^4} \left(\cos \mu_i - 1 + \frac{\mu_i^2}{2} \right) \cdot p_i \quad (2.34)$$

$$\phi_{0i} = \frac{1}{EI_i} \cdot \frac{l_i^3}{\mu_i^3} (\mu_i - \sin \mu_i) \cdot p_i \quad (2.35)$$

$$M_{0i} = -\frac{l_i^2}{\mu_i^2} (1 - \cos \mu_i) \cdot p_i \quad (2.36)$$

$$Q_{0i} = -\frac{l_i}{\mu_i} \sin \mu_i \cdot p_i \quad (2.37)$$

2.2 格点マトリックスの誘導

図 2.2 のように付加モーメント ΔM_i と付加せん断力 ΔQ_i が格点 i に作用した場合を考える。

吊橋主塔のたわみ曲線のたわみおよびたわみ角はその全長にわたって連続であるから次式が得られる。

$$w_{i+1}(0) = w_i(l_i) \quad (2.38)$$

$$\phi_{i+1}(0) = \phi_i(l_i) \quad (2.39)$$

また図 2.2 において曲げモーメントとせん断力のつりあいからそれぞれ次式が得られる。

$$M_{i+1}(0) = M_i(l_i) + \Delta M_i \quad (2.40)$$

$$Q_{i+1}(0) = Q_i(l_i) + \Delta Q_i \quad (2.41)$$

しかるに ΔM_i は格点 i に集中モーメント T_i が作用したときに生ずる。

したがって次式を得る。

$$\Delta M_i = T_i \quad (2.42)$$

図 2.3 のように格点 i に垂直力 R_{i1} , R_{i2} が e_{i1} , e_{i2} だけ主塔中心から偏心して作用する場合 T_i はつぎのようになる。

$$T_i = e_{i1} R_{i1} - e_{i2} R_{i2} \quad (2.43)$$

また ΔQ_i は格点 i に作用する鉛直力 V_i と水平力 H_i の各成分の和によって生ずる。

したがって図 2.4 を参考にして次式を得る。

$$\Delta Q_i = V_i \sin \phi_i(l_i) + H_i \cos \phi_i(l_i) \quad (2.44)$$

ところが通常 ϕ_i は微小であるので (2.44) 式はつぎのようになる。

$$\Delta Q_i = V_i \phi_i(l_i) + H_i \quad (2.45)$$

(2.42), (2.45) 式をそれぞれ (2.40), (2.41) 式に代入すると次式が得られる。

$$M_{i+1}(0) = M_i(l_i) + T_i \quad (2.46)$$

$$Q_{i+1}(0) = V_i \phi_i(l_i) + Q_i(l_i) + H_i \quad (2.47)$$

(2.38), (2.39), (2.46), (2.47) 式をベクトルに表示すると次式が得られる。

$$Y_{i+1}(0) = U_i \cdot Y_i(l_i) \quad (2.48)$$

$$\text{ここに } Y_{i+1}(0) = \{w_{i+1}(0), \phi_{i+1}(0), M_{i+1}(0), Q_{i+1}(0), 1\}^T \quad (2.49)$$

$$Y_i(l_i) = \{w_i(l_i), \phi_i(l_i), M_i(l_i), Q_i(l_i), 1\}^T \quad (2.50)$$

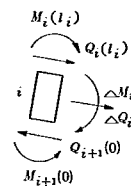


図 2.2

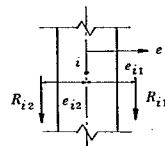


図 2.3

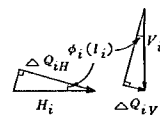


図 2.4

$$U_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & T_i \\ 0 & V_i & 0 & 1 & H_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (2.51)$$

(2.51)式で与えられた U_i が格点 i の格点マトリックス(Punkt Matrix)であり、(2.48)式を用いることによって格間 i の $x_i = l_i$ における断面力および変形量 $Y_i(l_i)$ から格間 $(i+1)$ の $x_{i+1} = 0$ における断面力および変形量 $Y_{i+1}(0)$ を求めることができる。

2.3 応 力 計 算

図2.5に示すように塔頂が w_0 だけ水平変位した吊橋の主塔に荷重として F_i , H_i , T_i , p_i が作用した場合、格点における断面力および変形量 Y_i はそれぞれつぎのような関係がある。

$$Y_1(l_1) = F_1 Y_1(0) \quad \dots\dots\dots (2.52)$$

$$Y_2(0) = U_1 Y_1(l_1) \quad \dots\dots\dots (2.53)$$

$$Y_2(l_2) = F_2 Y_2(0) \quad \dots\dots\dots (2.54)$$

$$\vdots$$

$$Y_i(l_i) = F_i Y_i(0) \quad \dots\dots\dots (2.55)$$

$$Y_{i+1}(0) = U_i Y_i(l_i) \quad \dots\dots\dots (2.56)$$

$$\vdots$$

$$Y_n(0) = U_{n-1} Y_{n-1}(l_{n-1}) \quad \dots\dots\dots (2.57)$$

$$Y_n(l_n) = F_n Y_n(0) \quad \dots\dots\dots (2.58)$$

したがって、これらの式から次式が得られる。

$$Y_n(l_n) = F_1 U_1 F_2 \dots\dots\dots F_i U_i \dots\dots\dots U_{n-1} F_n Y_1(0) \quad \dots\dots\dots (2.59)$$

ここに F_i は2-1節で求めた格間マトリックスであり、格間 i の部材寸法および格間 i に作用する荷重などによってきまる。また U_i は2-2節で求めた格点マトリックスであり、格点 i に作用する荷重によってきまる。また $Y_1(0)$ および $Y_n(l_n)$ はそれぞれ $x_1 = 0$ および $x_n = l_n$ における断面力および変形量を表わすベクトルであり、次式で表わされる。

$$Y_1(0) = \{ w_1(0), \phi_1(0), M_1(0), Q_1(0), 1 \}^T \quad \dots\dots\dots (2.60)$$

$$Y_n(l_n) = \{ w_n(l_n), \phi_n(l_n), M_n(l_n), Q_n(l_n), 1 \}^T \quad \dots\dots\dots (2.61)$$

ところが、塔頂および塔基部の境界条件を考えると以下の式が得られる。

$$w_1(0) = w_0 \quad \dots\dots\dots (2.62)$$

$$M_1(0) = T_0 \quad \dots\dots\dots (2.63)$$

$$w_n(l_n) = 0 \quad \dots\dots\dots (2.64)$$

$$\phi_n(l_n) = 0 \quad \dots\dots\dots (2.65)$$

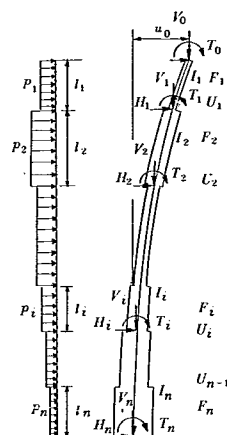


図 2.5

したがって(2.59)式を演算する場合、右辺の未知数は $\phi_1(0)$ と $Q_1(0)$ の2つだけとなり、これらは左辺の条件式(2.64)、(2.65)から求められることになる。未知数 $\phi_1(0)$ 、 $Q_1(0)$ が求まれば(2.52)～(2.58)式を用いて任意の格点の断面力および変形量を求めることができる。

なお格間マトリックス F_i の計算に必要な軸圧縮力 N_i は図2.6を参考にしてつぎのように求められる。

$$\Delta N_k = V_k \cos \phi_k - H_k \sin \phi_k \quad (2.66)$$

$$N_i = \sum_{k=0}^{i-1} \Delta N_k \quad (2.67)$$

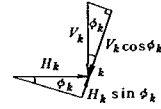


図 2.6

$$\text{したがって } N_i = \sum_{k=0}^{i-1} (V_k \cos \phi_k - H_k \sin \phi_k) \quad (2.68)$$

$\phi_k \neq 0$ とすると(2.68)式はつぎのようになる。

$$N_i = \sum_{k=0}^{i-1} V_k \quad (2.69)$$

吊橋主塔に作用する荷重および変形量のうちケーブルによる塔頂鉛直反力 V_0 および塔頂水平変位 w_0 は吊橋全体の荷重状態に対してたわみ理論によって求められる値である。この場合ケーブルの剛性が非常に大きいので吊橋全体の剛性に与える主塔の剛性の影響は通常無視してよい。このような考え方にもとづいて作成されたのが土木研究所の吊橋用プログラムSSV-2である。

2.4 座 屈 計 算

座屈塔頂鉛直反力を V_{cr} とすると(2.69)式より次式が得られる。

$$N_i = V_{cr} + \sum_{k=1}^{i-1} V_k \quad (2.70)$$

(2.70)式を(2.2)式に代入するとつぎのようになる。

$$\mu_i^2 = \frac{V_{cr} l_i^2}{EI_i} + \frac{l_i^2 \sum_{k=1}^{i-1} V_k}{EI_i} \quad (2.71)$$

(2.71)式を用いて(2.59)式を演算すると(2.62)～(2.65)式の境界条件から $\phi_1(0)$ と $Q_1(0)$ に関する連立方程式がつぎのような形で求まる。

$$A(V_{cr}) \phi_1(0) + B(V_{cr}) Q_1(0) = 0(V_{cr}) \quad (2.72)$$

$$D(V_{cr}) \phi_1(0) + E(V_{cr}) Q_1(0) = F(V_{cr}) \quad (2.73)$$

したがって座屈の定義にもとづいてつぎの式を解けば V_{cr} が求まる。

$$\begin{vmatrix} A(V_{cr}) & B(V_{cr}) \\ D(V_{cr}) & E(V_{cr}) \end{vmatrix} = 0 \quad (2.74)$$

§ 3. 数値計算例 I : 本四1,500m 吊橋主塔

3.1 断面諸元

数値計算の対象にした本四1500m吊橋主塔の断面諸元および一般図をそれぞれ表3.1および図3.1に示す。

表 3.1 本四1500m吊橋主塔の断面諸元

(片側塔柱あたり)

格間番号 i	格 間 長 l_i (m)	断 面 積 A_i (m ²)	断 面 2 次 モーメント I_i (m ⁴)	中立軸最外 縁 y_i (m)	断 面 係 数 W_i (m ³)
1	4.860	1.974720	11.306615	3.530	3.172451
2	2.400	1.980000	11.456514	3.560	3.187678
3	15.250	2.013440	12.448907	3.750	3.289880
4	15.250	2.180576	14.863701	3.941	3.739296
5	15.250	2.214192	16.017313	4.132	3.844770
6	15.250	2.247632	17.246019	4.322	3.959141
7	15.250	2.327941	19.341349	4.513	4.253151
8	15.250	2.358864	20.747185	4.704	4.378891
9	15.250	2.436304	23.213674	4.894	4.710567
10	15.250	2.710248	28.932956	5.085	5.652072
11	15.250	2.833208	32.073236	5.275	6.041295
12	6.250	2.891120	33.958443	5.354	6.302606
13	9.000	2.910824	35.011712	5.466	6.365765
14	6.520	2.925256	35.804391	5.548	6.414259
15	1.000	2.927368	35.921934	5.560	6.421511
16	13.500	2.957112	37.619580	5.729	6.527777
17	13.500	3.030856	40.782073	5.898	6.874928
18	13.500	3.060424	42.630325	6.066	6.988578
19	13.500	3.090168	44.572798	6.235	7.110033
20	4.180	3.143496	46.826002	6.288	7.406834

* (本州四国連絡道路橋三径間補剛吊橋概略設計設計計算書, 建設省近畿地方建設局本州四国連絡道路調査事務所,

1967年)

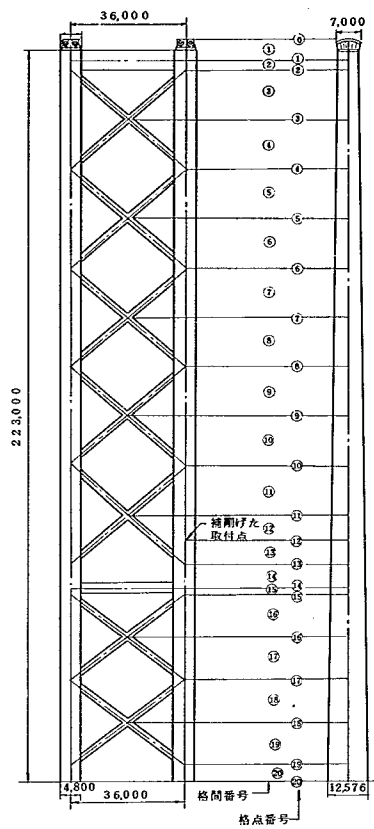


図 3.1 本四 1500 m 吊橋主塔の一般図

3.2 荷 重 ケ ー ス

数値計算で考慮した荷重ケースは表3.2に示すとおりである。

表 3.2 数値計算で考慮した荷重ケース

荷 重 ケース	荷 重 の 組 合 わ せ	活荷重の載荷状態	風荷重または地震 荷重の載荷状態	ケーブル 温度変化	主塔に作用する風荷重 または地震荷重の方向	主塔に作用す る荷重の位置 および大きさ
1	$D + T + L$			-30℃		表 3.3 参照
2				+30℃		
3				-30℃		
4-1	$D + T + W$			+30℃	側径間側から中央径間 側へ作用	表 3.4 参照
4-2				+30℃	中央径間側から側径間 側へ作用	
5-1				-30℃	側径間側から中央径間 側へ作用	
5-2				-30℃	中央径間側から側径間 側へ作用	
6-1	$D + T + L/2 + W/2$			-30℃	側径間側から中央径間 側へ作用	表 3.5 参照
6-2				-30℃	中央径間側から側径間 側へ作用	
7-1				+30℃	側径間側から中央径間 側へ作用	
7-2				+30℃	中央径間側から側径間 側へ作用	
8-1	$D + T + L/2 + W/2$			+30℃	側径間側から中央径間 側へ作用	表 3.5 参照
8-2				+30℃	中央径間側から側径間 側へ作用	
9-1				-30℃	側径間側から中央径間 側へ作用	
9-2				-30℃	中央径間側から側径間 側へ作用	
10-1	$D + T + L/2 + EQ$ (EQ:橋軸方向の地 盤動)			+30℃	側径間側から中央径間 側へ作用	表 3.6 参照
10-2				+30℃	中央径間側から側径間 側へ作用	
11-1				-30℃	側径間側から中央径間 側へ作用	
11-2				-30℃	中央径間側から側径間 側へ作用	

表3.3 荷重の組合わせ $D+T+L$ において塔に作用する荷重および塔頂移動量

(片側塔柱あたり)

格点番号	死荷重 各ケース共通 $W'(t)$	鉛直格点荷重 (ケーブル反力, 補剛けた反力など)											
		ケース 1				ケース 2				ケース 3			
		$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$
0	203.7	26026.7	0			27290.3	0			28283.1	0		
1	112.2												
2	332.1												
3	301.8												
4	409.0												
5	319.4												
6	416.6												
7	331.4												
8	435.4												
9	367.0												
10	480.0												
11	165.8												
12	337.1	-17.4	7.00	7.89	-7.00	24.6	7.00	-6.85	-7.00	-1.6	7.00	-1.6	-7.00
13	226.9												
14	68.0												
15	404.9												
16	371.4												
17	466.0												
18	379.3												
19	365.2												
20	—												
塔頂移動量 (m)		-127.1 (= -122.1 - 0.050)				134.1 (= 129.1 + 0.050)				-0.080 (= -0.030 - 0.050)			

表3.4 荷重の組合わせ $D+W+T$ において塔に作用する荷重および塔頂移動量

(片側塔柱あたり)

格点番号	死荷重 各ケース共通 $W'(t)$	ケース 4								ケース 5							
		鉛直格点荷重 (ケーブル反力など)				水平荷重 (風荷重)				鉛直格点荷重 (ケーブル反力など)				水平荷重 (風荷重)			
		$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$	$F(t)$	$W_L(\frac{1}{m})$	$F(t)$	$W_L(\frac{1}{m})$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$	$F(t)$	$W_L(\frac{1}{m})$	$F(t)$	$W_L(\frac{1}{m})$
0	203.7	25034.3	0							25168.7	0						
1	112.2					427		-427						427		-427	
2	332.1					233		-233						233		-233	
3	301.8																
4	409.0					466		-466						466		-466	
5	319.4																
6	416.6					466		-466						466		-466	
7	331.4																
8	435.4					466		-466						466		-466	
9	367.0																
10	480.0					466		-466						466		-466	
11	165.8																
12	337.1	8.6	7.00	8.6	-7.00					-8.6	7.00	-8.6	-7.00				
13	226.9					233		-233						233		-233	
14	68.0					181.6		-181.6						181.6		-181.6	
15	404.9					222		-222						222		-222	
16	371.4																
17	466.0					445		-445						445		-445	
18	379.3																
19	365.2					222		-222						222		-222	
20	—																
塔頂移動量 (m)						0.218 (= 0.168 + 0.050)								-0.218 (= -0.168 - 0.050)			

表3.5 荷重の組合せ $D + T + L/2 + W/2$ において塔に作用する荷重および塔頂移動量

(片側塔柱あたり)

格点番号	死荷重 各ケース共通	ケース 6								ケース 7							
		鉛直格点荷重 (ケーブル反力など)				水平荷重(風荷重)				鉛直格点荷重 (ケーブル反力など)				水平荷重(風荷重)			
						ケース 6-1		ケース 6-2						ケース 7-1		ケース 7-2	
		$W(t)$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$	$F(t)$	$W_L(\frac{1}{m})$	$F(t)$	$W_L(\frac{1}{m})$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$	$F(t)$	$W_L(\frac{1}{m})$	$F(t)$
0	203.7	25966.9	0							26163.0	0						
1	112.2					214		-214						214		-214	
2	332.1					117		-117						117		-117	
3	301.8																
4	409.0					233		-233						233		-233	
5	319.4																
6	416.6					233		-233						233		-233	
7	331.4																
8	435.4					233		-233						233		-233	
9	367.0						137		-137						137		-137
10	480.0					233		-233						233		-233	
11	165.8																
12	337.1	-130	7.00	35.2	-7.00					166	7.00	-31.1	-7.00				
13	226.9					117		-117						117		-117	
14	68.0					90.8		-90.8						90.8		-90.8	
15	404.9					11.1		-11.1						11.1		-11.1	
16	371.4																
17	466.0					22.3		-22.3						22.3		-22.3	
18	379.3																
19	365.2					11.1		-11.1						11.1		-11.1	
20	-																
塔頂移動量(m)		-07.47(=-0.697-0.050)								0.804(=0.754+0.050)							

(表3.5つづき)

格点 番号	死 荷 重 各ケース共通	ケ ー ス 8						ケ ー ス 9						
		鉛 直 格 点 荷 重 (ケーブル反力など)				水平荷重 (風荷重)		鉛 直 格 点 荷 重 (ケーブル反力など)				水平荷重 (風荷重)		
		ケース 8-1		ケース 8-2		ケース 9-1		ケース 9-2						
$W(t)$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$	$F(t)$	$W_L(\frac{1}{m})$	$F(t)$	$W_L(\frac{1}{m})$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$	$F(t)$	$W_L(\frac{1}{m})$
0	2 0 3.7	26587.7	0				26727.0	0						
1	1 1 2.2				214		-214						214	-214
2	3 3 2.1				117		-117						117	-117
3	3 0 1.8													
4	4 0 9.0				233		-233						233	-233
5	3 1 9.4													
6	4 1 6.6				233		-233						233	-233
7	3 3 1.4													
8	4 3 5.4				233		-233						233	-233
9	3 6 7.0													
10	4 8 0.0				233		-233						233	-233
11	1 6 5.8													
12	3 3 7.1	12.4	7.00	12.4	-7.00			-52	7.00	-52	-7.00			
13	2 2 6.9				117		-117						117	-117
14	6 8 .0				90.8		-90.8						90.8	-90.8
15	4 0 4.9				11.1		-11.1						11.1	-11.1
16	3 7 1.4													
17	4 6 6.0				22.3		-22.3						22.3	-22.3
18	3 7 9.3													
19	3 6 5.2				11.1		-11.1						11.1	-11.1
20	-													
塔 頂 移 動 量 (m)		0.286 (= 0.236 + 0.050)						-0.148 (= -0.098 - 0.050)						

表3.6 荷重の組合わせ $D+T+L/2+EQ$ (橋軸方向地震動) において塔に作用する荷重および塔頂移動量

(片側塔柱あたり)

格 点 番 号	死 荷 重 各ケース共通 $W(t)$	ケース 10								ケース 11							
		鉛 直 格 点 荷 重 (ケーブル反力など)				水平荷重(地震荷重)				鉛 直 格 点 荷 重 (ケーブル反力など)				水平荷重(地震荷重)			
		ケース 10-1		ケース 10-2		ケース 11-1		ケース 11-2		ケース 11-1		ケース 11-2		ケース 11-1		ケース 11-2	
		$R(t)$	$e'(m)$	$R(t)$	$e'(m)$	$F(t)$	$W_L(\%)$	$F(t)$	$W_L(\%)$	$R(t)$	$e'(m)$	$R(t)$	$e'(m)$	$F(t)$	$W_L(\%)$	$F(t)$	$W_L(\%)$
0	203.7	30338.0	0			652		-652		30508.0	0			652		-652	
1	112.2	(-26572.9+3765.1)				359		-359		(-26742.9+3765.1)				359		-359	
2	332.1					1063		-1063						1063		-1063	
3	301.8					966		-966						966		-966	
4	409.0					1309		-1309						1309		-1309	
5	319.4					1022		-1022						1022		-1022	
6	416.6					1333		-1333						1333		-1333	
7	331.4					1060		-1060						1060		-1060	
8	435.4					1393		-1393						1393		-1393	
9	367.0					1174	0	-1174	0					1174	0	-1174	0
10	480.0					1536		-1536						1536		-1536	
11	165.8					531		-531						531		-531	
12	337.1	26.1	7.00	-2.9	-7.00	75.4		-75.4		-189	7.00	98	-7.00	75.4		-75.4	
13	226.9					726		-726						726		-726	
14	68.0					218		-218						218		-218	
15	404.9					1296		-1296						1296		-1296	
16	371.4					1188		-1188						1188		-1188	
17	466.0					1491		-1491						1491		-1491	
18	379.3					1214		-1214						1214		-1214	
19	365.2					1169		-1169						1169		-1169	
20	—					—		—						—		—	
塔 頂 移 動 量 (m)		1.057(=0.421+0.050+0.464+0.122)								0.915(=0.279+0.050+0.464+0.122)							

3.3 計 算 結 果

数値計算の結果, 得られた各荷重ケースにおける断面力を表3.7, 図3.2, 図3.3に, 応力度を表3.8, 図3.4, に, 座屈荷重を表3.9にそれぞれ示す。

表3.7 各荷重の組合わせにおける橋軸方向の曲げモーメントおよび軸力

格 点	$D + T + L$					
	ケース 1		ケース 2		ケース 3	
	$M(tm)$	$N(t)$	$M(tm)$	$N(t)$	$M(tm)$	$N(t)$
1	-1477	26343	1583	27606	-96	28599
2	-2209	26675	2367	27938	-144	28931
3	-6858	26977	7345	28240	-447	29233
4	-11407	27386	12207	28649	-742	29642
5	-15793	27705	16884	28969	-1025	29961
6	-19934	28122	21285	29385	-1291	30378
7	-23791	28453	25364	29717	-1537	30709
8	-27313	28888	29070	30152	-1759	31145
9	-30485	29255	32383	30519	-1956	31512
10	-33308	29735	35308	30999	-2129	31992
11	-35809	29901	37875	31165	-2280	32158
12	-37409	30300	39469	31458	-2335	32491
13	-38650	30527	40720	31685	-2408	32718
14	-39473	30595	41544	31753	-2455	32786
15	-39594	31000	41664	32158	-2462	33191
16	-41082	31371	43133	32529	-2546	33563
17	-42297	31837	44303	32995	-2611	34029
18	-43243	32216	45181	33374	-2660	34408
19	-43918	32581	45765	33740	-2690	34773
20	-44072	32581	45887	33740	-2696	34773

(表 3.7 つづき)

格 点	(D + T + W) / 1.35							
	ケース 4-1		ケース 4-2		ケース 5-1		ケース 5-2	
	M/1.35 (tm)	N/1.35 (t)	M/1.35 (tm)	N/1.35 (t)	M/1.35 (tm)	N/1.35 (t)	M/1.35 (tm)	N/1.35 (t)
1	-1347	18778	1722	18778	-1723	18877	1348	18877
2	-1918	19024	2478	19024	-2481	19123	1920	19123
3	-4976	19247	6715	19247	-6722	19347	4980	19347
4	-7462	19550	10356	19550	-10366	19650	7468	19650
5	-8814	19787	12824	19787	-12836	19887	8821	19887
6	-9538	20096	14604	20096	-14617	20195	9545	20195
7	-9107	20341	15160	20341	-15173	20441	9113	20441
8	-8062	20664	15020	20664	-15032	20763	8067	20763
9	-5900	20935	13677	20935	-13686	21035	5903	21035
10	-3186	21291	11697	21291	-11702	21391	3187	21391
11	570	21414	8596	21414	-8596	21513	-571	21513
12	2247	21676	7162	21676	-7160	21750	-2250	21750
13	4801	21844	4937	21844	-4932	21918	-4805	21918
14	6859	21895	3098	21895	-3092	21969	-6863	21969
15	7316	22195	2673	22195	-2667	22269	-7320	22269
16	13879	22470	-3488	22470	3499	22544	-13884	22544
17	20725	22815	-10000	22815	10015	22889	-20732	22889
18	28261	23096	-17267	23096	17285	23170	-28268	23170
19	35995	23366	-24799	23366	24820	23441	-36002	23441
20	38492	23366	-27247	23366	27269	23441	-38499	23441
格 点	(D + T + L / 2 + W / 2) 1.25							
	ケース 6-1		ケース 6-2		ケース 7-1		ケース 7-2	
	M/1.25 (tm)	N/1.25 (t)	M/1.25 (tm)	N/1.25 (t)	M/1.25 (tm)	N/1.25 (t)	M/1.25 (tm)	N/1.25 (t)
1	-1524	20729	140	20729	-84	21183	1585	21183
2	-2227	20995	157	20995	-74	21449	2318	21449
3	-6383	21237	-44	21237	301	21690	6665	21690
4	-10176	21564	-516	21564	943	22017	10641	22017
5	-13270	21819	-1536	21819	2130	22273	13907	22273
6	-15893	22153	-2807	22153	3552	22606	16688	22606
7	-17740	22418	-4589	22418	5477	22871	18675	22871
8	-19078	22766	-6572	22766	7589	23220	20134	23220
9	-19624	23060	-9023	23060	10152	23513	20782	23513
10	-19687	23444	-11634	23444	12862	23897	20929	23897
11	-19017	23576	-14682	23576	15993	24030	20327	24030
12	-18884	23864	-16237	23864	17575	24288	20214	24288
13	-18181	24045	-18124	24045	19500	24470	19539	24470
14	-17519	24100	-19574	24100	20974	24524	18895	24524
15	-17338	24424	-19870	24424	21274	24848	18716	24848
16	-14611	24721	-24029	24721	25473	25145	16015	25145
17	-11586	25093	-28232	25093	29703	25518	13006	25518
18	-8048	25397	-32699	25397	34186	25821	9472	25821
19	-4259	25689	-37164	25689	38654	26113	5679	26113
20	-3002	25689	-38580	25689	40067	26113	4419	26113

(表 3.7 つづき)

格 点	$(D + T + L/2 + W/2) / 1.25$							
	ケース 8-1		ケース 8-2		ケース 9-1		ケース 9-2	
	M/1.25(tm)	N/1.25(t)	M/1.25(tm)	N/1.25(t)	M/1.25(tm)	N/1.25(t)	M/1.25(tm)	N/1.25(t)
1	-567	21523	1107	21523	-978	21634	698	21634
2	-795	21789	1603	21789	-1409	21900	991	21900
3	-1938	22030	4445	22030	-3844	22141	2545	22141
4	-2779	22357	6947	22357	-5948	22469	3788	22469
5	-3022	22613	8790	22613	-7406	22724	4417	22724
6	-2949	22946	10224	22946	-8477	23057	4707	23057
7	-2278	23211	10956	23211	-8870	23323	4375	23323
8	-1311	23559	11265	23559	-8871	23671	3715	23671
9	224	23853	10876	23853	-8204	23964	2456	23964
10	2018	24237	10098	24237	-7178	24348	905	24348
11	4340	24370	8673	24370	-5534	24481	-1201	24481
12	5355	24659	7989	24659	-4769	24742	-2137	24742
13	6879	24841	6906	24841	-3577	24924	-3556	24924
14	8088	24895	5990	24895	-2590	24978	-4694	24978
15	8349	25219	5772	25219	-2361	25302	-4944	25302
16	12068	25516	2579	25516	961	25599	-8537	25599
17	15907	25889	-832	25889	4478	25972	-12273	25972
18	20084	26192	-4679	26192	8407	26276	-16371	26276
19	24334	26485	-8696	26485	12482	26568	-20564	26568
20	25697	26485	-10008	26485	13807	26568	-21914	26568
格 点	$(D + T + L/2 + EQ) / 1.45$							
	ケース 10-1		ケース 10-2		ケース 11-1		ケース 11-2	
	M/1.45(tm)	N/1.45(t)	M/1.45(tm)	N/1.45(t)	M/1.45(tm)	N/1.45(t)	M/1.45(tm)	N/1.45(t)
1	-1639	21141	3431	21141	-3314	21258	1761	21258
2	-2386	21370	5065	21370	-4891	21487	2568	21487
3	-5951	21578	14256	21578	-13715	21695	6516	21695
4	-8343	21860	22120	21860	-21220	21977	9278	21977
5	-9156	22080	28164	22080	-26919	22197	10444	22197
6	-8687	22367	32574	22367	-31004	22485	10303	22485
7	-6625	22596	34987	22596	-33114	22713	8541	22713
8	-3311	22896	35680	22896	-33533	23014	5495	23014
9	1549	23149	34338	23149	-31947	23267	868	23267
10	7646	23480	31282	23480	-28676	23598	-5027	23598
11	15294	23595	26237	23595	-23443	23712	-12502	23712
12	18755	23843	23990	23843	-21126	23938	-15900	23938
13	23955	24000	20009	24000	-17054	24095	-21018	24095
14	27999	24047	16750	24047	-13736	24142	-25009	24142
15	28630	24326	16232	24326	-13210	24421	-25632	24421
16	38232	24582	7973	24582	-4846	24677	-35143	24677
17	48653	24903	-1457	24903	4664	24998	-45494	24998
18	60111	25165	-12266	25165	15529	25260	-56905	25260
19	72271	25417	-24118	25417	27414	25512	-69038	25512
20	76274	25417	-28094	25417	31396	25512	-73038	25512

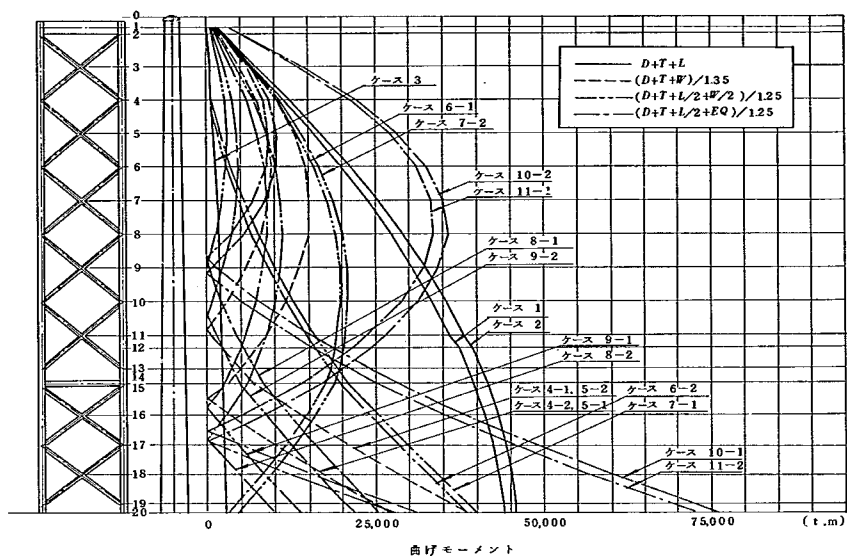


図 3.2 各荷重の組合せにおける橋軸方向の曲げモーメント

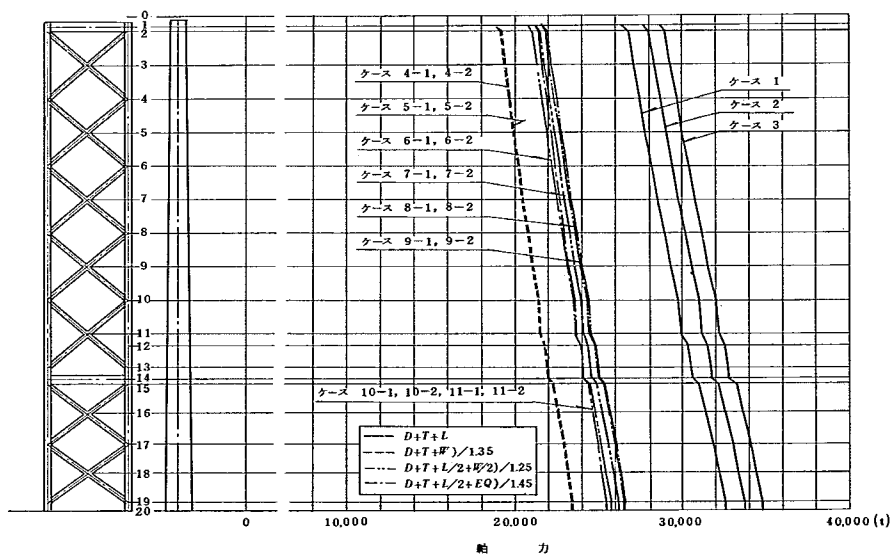


図 3.3 各荷重の組合せにおける軸力（橋軸方向の計算）

表 3.8 各荷重の組合わせにおける橋軸方向の縁端での応力度

(kg/cm²)

格 点	D + T + L								
	ケース 1			ケース 2			ケース 3		
	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}
1	-46	-1334	-1380	-49	-1398	-1447	-3	-1448	-1451
2	-69	-1347	-1416	-74	-1411	-1485	-4	-1461	-1466
3	-207	-1340	-1546	-221	-1403	-1624	-13	-1452	-1465
4	-302	-1256	-1558	-324	-1314	-1638	-20	-1359	-1379
5	-407	-1251	-1659	-436	-1308	-1744	-26	-1353	-1380
6	-500	-1251	-1751	-533	-1307	-1841	-32	-1352	-1384
7	-555	-1222	-1777	-592	-1277	-1868	-36	-1319	-1355
8	-619	-1225	-1844	-659	-1278	-1937	-40	-1320	-1360
9	-643	-1201	-1843	-683	-1253	-1935	-41	-1293	-1335
10	-585	-1097	-1683	-621	-1144	-1764	-37	-1180	-1218
11	-589	-1055	-1644	-623	-1100	-1723	-37	-1135	-1173
12	-590	-1048	-1638	-622	-1088	-1710	-37	-1124	-1161
13	-603	-1049	-1652	-636	-1089	-1724	-38	-1124	-1162
14	-612	-1046	-1658	-644	-1085	-1729	-38	-1121	-1159
15	-613	-1059	-1672	-645	-1099	-1743	-38	-1134	-1172
16	-626	-1061	-1686	-657	-1100	-1757	-39	-1135	-1174
17	-612	-1050	-1662	-641	-1089	-1729	-38	-1123	-1161
18	-615	-1053	-1668	-643	-1091	-1733	-38	-1124	-1162
19	-614	-1054	-1669	-640	-1092	-1732	-38	-1125	-1163
20	-592	-1036	-1628	-616	-1073	-1689	-36	-1106	-1142

格 点	(D + T + W') / 1.35											
	ケース 4-1			ケース 4-2			ケース 5-1			ケース 5-2		
	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}
1	-42	-951	993	-54	-951	-1005	-54	-956	-1010	-42	-956	-998
2	-60	-961	-1020	-77	-961	-1038	-77	-966	-1043	-60	-966	-1025
3	-150	-956	-1106	-202	-956	-1158	-202	-961	-1163	-150	-961	-1111
4	-198	-897	-1094	-275	-897	-1171	-275	-901	-1176	-198	-901	-1099
5	-227	-894	-1121	-331	-894	-1224	-331	-898	-1229	-227	-898	-1126
6	-239	-894	-1133	-366	-894	-1260	-366	-899	-1265	-239	-899	-1138
7	-212	-874	-1086	-354	-874	-1228	-354	-878	-1232	-212	-878	-1091
8	-183	-876	-1059	-341	-876	-1217	-341	-880	-1221	-183	-880	-1063
9	-124	-859	-984	-288	-859	-1148	-289	-863	-1152	-124	-863	-988
10	-56	-786	-842	-206	-786	-991	-206	-789	-995	-56	-789	-845
11	-9	-756	-765	-141	-756	-897	-141	-759	-901	-9	-759	-769
12	-35	-750	-785	-113	-750	-863	-113	-752	-865	-35	-752	-788
13	-75	-750	-825	-77	-750	-828	-77	-753	-830	-75	-753	-828
14	-106	-748	-855	-48	-748	-796	-48	-751	-799	-106	-751	-857
15	-113	-758	-871	-41	-758	-800	-41	-761	-802	-113	-761	-874
16	-211	-760	-971	-53	-760	-813	-53	-762	-816	-211	-762	-974
17	-300	-753	-1052	-145	-753	-897	-145	-755	-900	-300	-755	-1055
18	-402	-755	-1157	-246	-755	-1000	-246	-757	-1003	-402	-757	-1159
19	-504	-756	-1260	-347	-756	-1103	-347	-759	-1106	-504	-759	-1262
20	-517	-743	-1260	-366	-743	-1109	-366	-746	-1112	-517	-746	-1263

(表 3.8 つづき)

格 点	$(D + T + L/2 + W/2) / 1.25$											
	ケース 6-1			ケース 6-2			ケース 6-3			ケース 6-4		
	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}
1	-48	-1050	-1097	-4	-1050	-1054	-3	-1073	-1075	-49	-1073	-1122
2	-69	-1060	-1130	-5	-1060	-1065	-2	-1083	-1086	-72	-1083	-1155
3	-192	-1055	-1247	-1	-1055	-1056	-9	-1077	-1086	-201	-1077	-1278
4	-270	-989	-1259	-14	-989	-1003	-25	-1010	-1035	-282	-1010	-1292
5	-342	-985	-1328	-40	-985	-1025	-55	-1006	-1061	-359	-1006	-1365
6	-398	-986	-1384	-70	-986	-1056	-89	-1006	-1095	-418	-1006	-1424
7	-414	-963	-1377	-107	-963	-1070	-128	-982	-1110	-436	-982	-1418
8	-433	-965	-1398	-149	-965	-1114	-172	-984	-1156	-456	-984	-1441
9	-414	-846	-1360	-190	-846	-1137	-214	-965	-1179	-438	-965	-1403
10	-346	-865	-1211	-204	-865	-1069	-226	-882	-1108	-368	-882	-1250
11	-313	-832	-1145	-241	-832	-1074	-263	-848	-1111	-334	-848	-1182
12	-298	-825	-1123	-256	-825	-1081	-277	-840	-1117	-319	-840	-1159
13	-284	-826	-1110	-283	-826	-1109	-304	-841	-1145	-305	-841	-1146
14	-271	-824	-1095	-303	-824	-1127	-325	-838	-1163	-293	-838	-1131
15	-268	-834	-1103	-308	-834	-1142	-329	-849	-1178	-290	-849	-1139
16	-223	-836	-1058	-366	-836	-1202	-388	-850	-1238	-244	-850	-1094
17	-168	-828	-995	-408	-828	-1236	-430	-842	-1272	-188	-842	-1030
18	-115	-830	-944	-465	-830	-1295	-486	-844	-1330	-135	-844	-978
19	-60	-831	-891	-520	-831	-1351	-541	-845	-1386	-79	-845	-924
20	-40	-817	-858	-518	-817	-1335	-538	-831	-1369	-59	-831	-890

格 点	$(D + T + L/2 + W/2) / 1.25$											
	ケース 8-1			ケース 8-2			ケース 9-1			ケース 9-2		
	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}
1	-18	-1090	-1108	-35	-1090	-1124	-31	-1096	-1126	-22	-1096	-1117
2	-25	-1100	-1125	-50	-1100	-1150	-44	-1106	-1150	-31	-1106	-1137
3	-58	-1094	-1153	-134	-1094	-1228	-116	-1100	-1215	-77	-1100	-1176
4	-74	-1025	-1099	-184	-1025	-1209	-158	-1030	-1188	-100	-1030	-1131
5	-78	-1021	-1099	-227	-1021	-1248	-191	-1026	-1217	-114	-1026	-1140
6	-74	-1021	-1095	-256	-1021	-1277	-212	-1026	-1238	-118	-1026	-1144
7	-53	-997	-1050	-256	-997	-1253	-207	-1002	-1209	-102	-1002	-1104
8	-30	-999	-1028	-255	-999	-1254	-201	-1003	-1205	-84	-1003	-1088
9	-5	-979	-984	-229	-979	-1208	-173	-984	-1157	-52	-984	-1035
10	-35	-894	-930	-177	-894	-1072	-126	-898	-1025	-16	-898	-914
11	-71	-860	-932	-143	-860	-1003	-91	-864	-955	-20	-864	-884
12	-84	-853	-937	-126	-853	-979	-75	-856	-931	-34	-856	-890
13	-107	-853	-961	-108	-853	-961	-56	-856	-912	-56	-856	-912
14	-125	-851	-976	-93	-851	-944	-40	-854	-894	-73	-854	-927
15	-129	-861	-991	-89	-861	-951	-37	-864	-901	-77	-864	-941
16	-184	-863	-1047	-39	-863	-902	-15	-866	-880	-130	-866	-996
17	-230	-854	-1084	-12	-854	-866	-65	-857	-922	-177	-857	-1034
18	-286	-856	-1142	-67	-856	-922	-120	-859	-978	-233	-859	-1092
19	-340	-857	-1197	-122	-857	-979	-175	-860	-1034	-288	-860	-1147
20	-345	-843	-1188	-134	-843	-977	-185	-845	-1031	-294	-845	-1139

(表 3.8 つづき)

格 点	$(D + T + L/2 + EQ) / 1.45$											
	ケース 10-1			ケース 10-2			ケース 11-1			ケース 11-2		
	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}
1	-51	-1071	-1122	-107	-1071	-1178	-103	-1077	-1180	-55	-1077	-1131
2	-74	-1079	-1153	-157	-1079	-1237	-152	-1085	-1237	-80	-1085	-1165
3	-179	-1072	-1251	-429	-1072	-1501	-413	-1078	-1491	-196	-1078	-1274
4	-221	-1002	-1224	-586	-1002	-1589	-563	-1008	-1571	-246	-1008	-1254
5	-236	-997	-1233	-727	-997	-1724	-694	-1003	-1697	-269	-1003	-1272
6	-218	-995	-1213	-816	-995	-1811	-777	-1000	-1777	-258	-1000	-1259
7	-155	-971	-1125	-816	-971	-1787	-773	-976	-1748	-199	-976	-1175
8	-75	-971	-1046	-809	-971	-1780	-760	-976	-1736	-125	-976	-1100
9	-33	-950	-983	-724	-950	-1674	-674	-955	-1629	-18	-955	-973
10	-134	-866	-1001	-550	-866	-1416	-504	-871	-1375	-88	-871	-959
11	-252	-833	-1084	-432	-833	-1264	-386	-837	-1222	-206	-837	-1043
12	-296	-825	-1120	-378	-825	-1203	-333	-828	-1161	-251	-828	-1079
13	-374	-824	-1198	-312	-824	-1137	-266	-828	-1094	-328	-828	-1156
14	-434	-822	-1256	-260	-822	-1082	-213	-825	-1038	-388	-825	-1213
15	-443	-831	-1274	-251	-831	-1082	-204	-834	-1039	-397	-834	-1231
16	-582	-831	-1414	-121	-831	-953	-74	-834	-908	-535	-834	-1370
17	-704	-822	-1525	-21	-822	-843	-67	-825	-892	-658	-825	-1483
18	-855	-822	-1678	-175	-822	-997	-221	-825	-1046	-810	-825	-1635
19	-1011	-823	-1833	-337	-823	-1160	-383	-826	-1209	-966	-826	-1791
20	-1024	-809	-1833	-377	-809	-1186	-422	-812	-1233	-981	-812	-1792

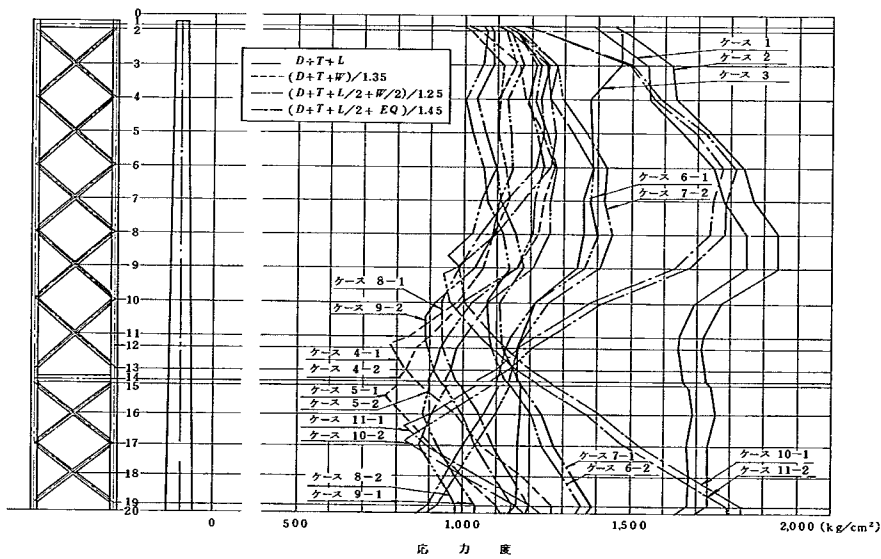


図 3.4 各荷重の組合せにおける橋軸方向の縁端での応力度

表 3.9 各荷重の組合わせにおける座屈塔項反力

ケース	座屈塔項反力 V_{cr} (t)	設計塔項反力 V_0 (t)	安全率 V_{cr}/V_0
1	192,546	26,230	7.34
2	192,560	27,494	7.00
3	192,556	28,487	6.76
4-1	192,553	25,238	7.63
4-2	192,553	25,238	7.63
5-1	192,558	25,372	7.59
5-2	192,558	25,372	7.59
6-1	192,551	25,800	7.46
6-2	192,551	25,800	7.46
7-1	192,556	26,367	7.30
7-2	192,556	26,367	7.30
8-1	192,551	26,791	7.19
8-2	192,551	26,791	7.19
9-1	192,556	26,931	7.15
9-2	192,556	26,931	7.15
10-1	192,551	30,542	6.30
10-2	192,551	30,542	6.30
11-1	192,556	30,712	6.27
11-2	192,556	30,712	6.27

3.4 概略設計との比較

本四1500m吊橋概略設計の結果と今回行った還元法による結果を応力について比較すると図3.5のようになる。

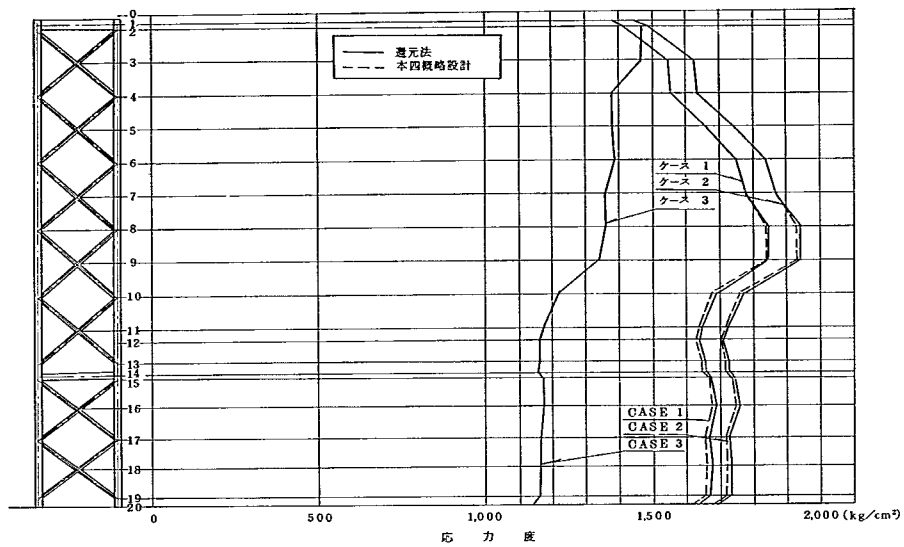


図 3.5 (a) 橋軸方向の応力度に関する還元法による値と概略設計の値との比較

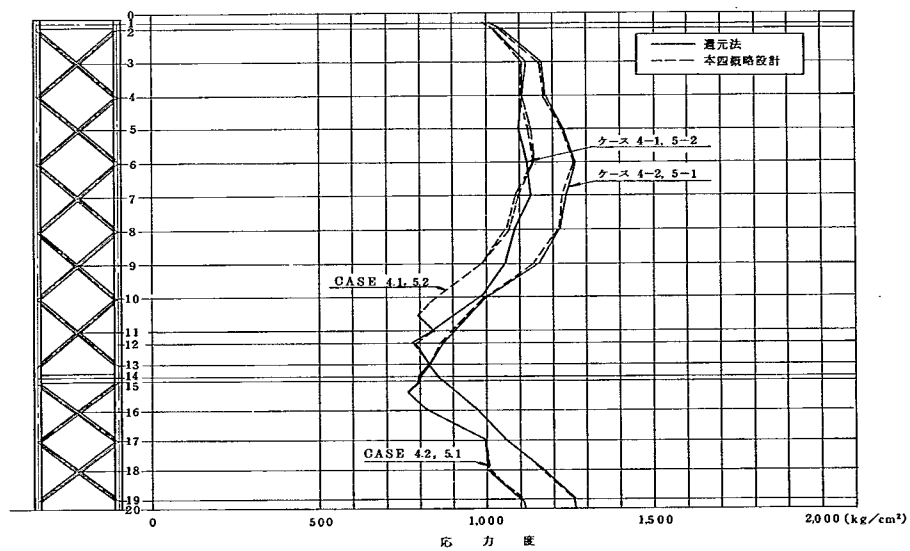


図 3.5 (b) 橋軸方向の応力度に関する還元法による値と概略設計の値との比較

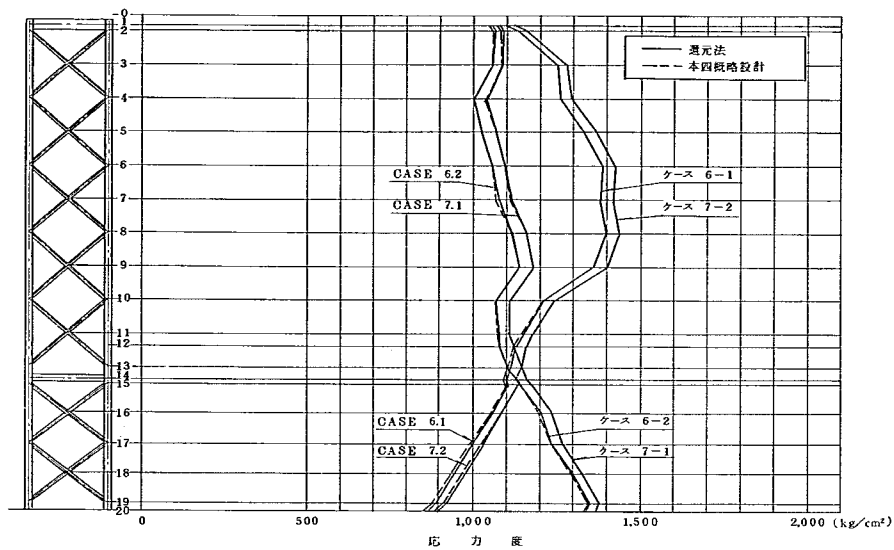


図 3.5 (c) 橋軸方向の応力度に関する還元法による値と概略設計の値との比較

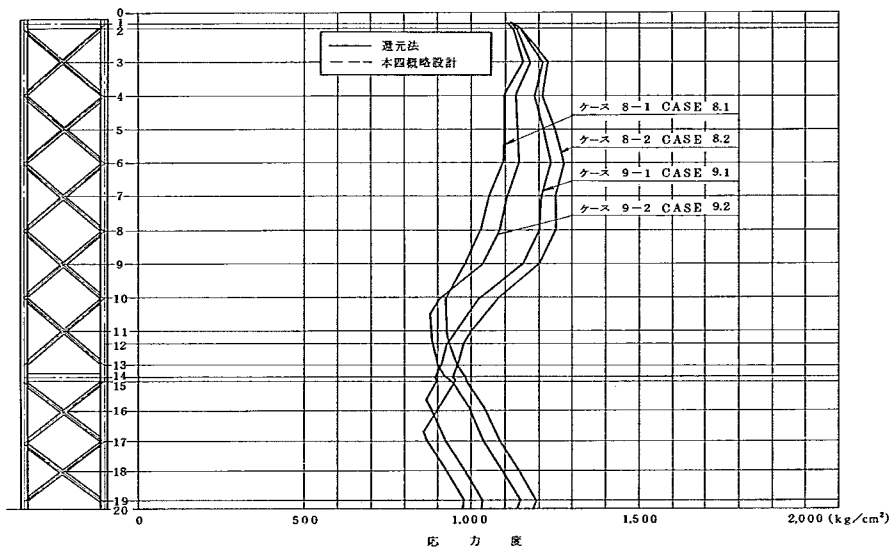


図 3.5 (d) 橋軸方向の応力度に関する還元法による値と概略設計の値との比較

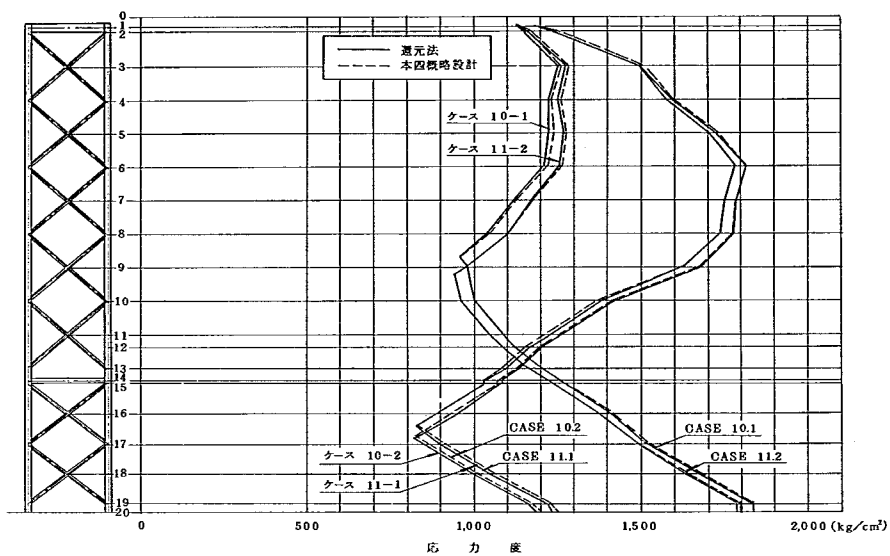


図 3.5 (e) 橋軸方向の応力度に関する還元法による値と概略設計との比較

§ 4. 数値計算例Ⅱ：関門吊橋主塔

4.1 断面諸元

数値計算の対象にした関門吊橋主塔^{*}の断面諸元および一般図をそれぞれ表 4.1 および図 4.1 に示す。

表 4.1 関門吊橋主塔の断面諸元

(片側塔柱あたり)

格間番号 i	格 間 長 l_i (m)	断 面 積 A_i (m ²)	断 面 2 次 モーメント I_i (m ⁴)	中立軸最外 縁 距 離 y_i (m)	断 面 係 数 W_i (m ³)
1	2.200	0.7644	1.6478	2.100	0.7847
2	2.000	0.7672	1.6824	2.120	0.7928
3	2.700	0.7711	1.7305	2.150	0.8041
4	29.500	0.8414	2.4478	2.480	0.9838
5	29.500	0.8838	3.1645	2.815	1.1246
6	0.500	0.8846	3.1781	2.820	1.1272
7	6.200	0.8934	3.3449	2.890	1.1578
8	5.400	0.9012	3.4967	2.950	1.1853
9	27.500	0.9686	4.5390	3.260	1.3932
10	27.500	1.0082	5.5057	3.565	1.5435
11	3.000	1.0124	5.6167	3.600	1.5602

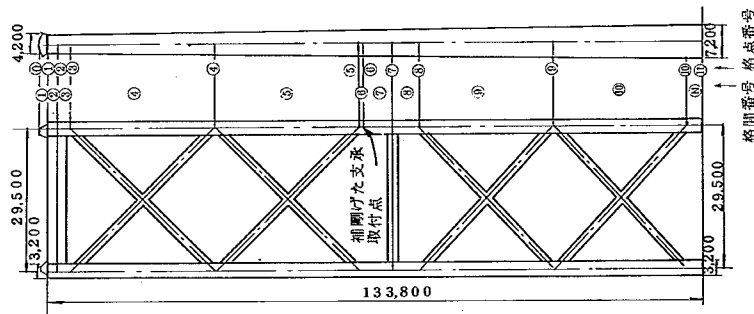


図 4.1 関門吊橋主塔の一般図

* (関門橋塔第一次設計計算書, 日本道路公団福岡支社関門架橋工事事務所, 昭和44年)

4.2 荷重ケース

数値計算で考慮した荷重ケースは表4.2に示すとおりである。

表4.2 数値計算で考慮した荷重ケース

荷重ケース	荷重の組合せ	活荷重の載荷状態	風荷重または地震荷重の載荷状態	ケーブル温度変化	主塔に作用する風荷重または地震荷重の方向	主塔に作用する荷重の位置および大きさ
1	$D + T + L$			-30℃		表4.3参照
2				+30℃		
3-1				+30℃		
3-2				-30℃		
4-1-1	$D + T + W$			-30℃	側径間側より中央径間側へ作用	表4.4参照
4-1-2				-30℃	側径間側より中央径間側へ作用	
5-1-1	$D + T + L/2 + EQ$ (EQ:橋軸方向地震動)			+30℃	側径間側より中央径間側へ作用	表4.5参照
5-1-2				-30℃	中央径間側より側径間側へ作用	
5-2-1				+30℃	側径間側より中央径間側へ作用	
5-2-2				-30℃	中央径間側より側径間側へ作用	
6-1	$D + T + L/2 + EQ$ (EQ:鉛直方向地震動)			+30℃	鉛直下方へ作用	表4.6参照
6-2				-30℃	鉛直下方へ作用	

表4.3 荷重の組合せ $D + T + L$ において塔に作用する荷重および塔頂移動量

(片側塔柱あたり)

格点番号		鉛直格点荷重（ケーブル反力，補剛けた反力など）																			
		各ケース共通				ケース 1				ケース 2				ケース 3-1				ケース 3-2			
		$W(t)$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$			
0	45.0	9881	0			11353	0			11549	0			11711	0						
1	6.1																				
2	74.2																				
3	141.2																				
4	274.2																				
5	144.1																				
6	26.6	35.4	425	139.4	-4.25	69.8	4.25	-266	-4.25	68.4	4.25	61.4	-4.25	48.4	4.25	46.4	-4.25				
7	130.9			14.2	0			14.2	0			14.2	0			14.2	0				
8	160.8																				
9	286.8																				
10	182.2																				
11	-																				
塔頂移動量(m)		-0.303				0.404				0.357				0.205							

表 4.4 荷重の組合わせ $D + W + T$ において塔に作用する荷重および塔頂移動量

(片側塔柱あたり)

格 点 番 号	死 荷 重		鉛直格点荷重 (ケーブル反力など)				水 平 荷 重 (風 荷 重)			
	各 ケ ー ス 共 通						ケース 4-1-1		ケース 4-1-2	
	$W(t)$	$R(t)$	$e(m)$	$R'(t)$	$e'(m)$		$F(t)$	$W_L(t/m)$	$F(t)$	$W_L(t/m)$
0	45.0	973.4	0							
1	6.1									
2	74.2						24.2		-24.2	
3	141.2						14.6		-14.6	
4	274.2						29.2		-29.2	
5	144.1						14.6		-14.6	-14.7
6	26.6	36.4	4.25	41.4	-4.25					
7	130.9						68.2		-68.2	
8	160.8						14.1		-14.1	
9	286.7						28.2		-28.2	
10	182.2						14.1		-14.1	
11	-									

塔 頂 移 動 量 (m)	-0.247	-0.247
---------------	--------	--------

表 4.5 荷重の組合わせ $D + T + L/2 + EQ$ (橋軸方向地震動) において塔に作用する荷重および塔頂移動量

(片側塔柱あたり)

格 点 番 号	死 荷 重 各ケース共通	ケース 5-1								ケース 5-2							
		鉛 直 格 点 荷 重				水平荷重（地震荷重）				鉛 直 格 点 荷 重				水平荷重（地震荷重）			
		（ ケーブル反力など ）				ケース 5-1-1		ケース 5-1-2		（ ケーブル反力など ）				ケース 5-2-1		ケース 5-2-2	
		$W(t)$	$R(t)$	$e(m)$	$R(t)$	$e(m)$	$F(t)$	$W_L(\frac{t}{m})$	$F(t)$	$W_L(\frac{t}{m})$	$R(t)$	$e(m)$	$R(t)$	$e(m)$	$F(t)$	$W_L(\frac{t}{m})$	$F(t)$
0	45.0	10,433	0			9.7		-9.7		10,705	0			9.7		-9.7	
1	6.1					12.3		-12.3						12.3		-12.3	
2	74.2					19.3	29.1	-19.3	-29.1					19.3	29.1	-19.3	-29.1
3	141.2					11.7	29.2	-11.7	-29.2					11.7	29.2	-11.7	-29.2
4	274.2					23.4	3.02	-23.4	-3.02					23.4	3.02	-23.4	-3.02
5	144.1					11.7	3.22	-11.7	-3.22					11.7	3.22	-11.7	-3.22
6	26.6	89.4	4.25	-53.6	-4.25	-	3.32	-	-3.32	14.4	4.25	107.4	-4.25	-	3.32	-	-3.32
7	130.9			7.1	0	36.8	3.34	-36.8	-3.34			7.1	0	36.8	3.34	-36.8	-3.34
8	160.8					11.3	3.38	-11.3	-3.38					11.3	3.38	-11.3	-3.38
9	286.7					22.6	3.49	-22.6	-3.49					22.6	3.49	-22.6	-3.49
10	182.2					11.3	3.67	-11.3	-3.67					11.3	3.67	-11.3	-3.67
11	-					-	3.77	-	-3.77					-	3.77	-	-3.77

塔 頂 移 動 量 (m)	0.476	0.476	-0.336	-0.336
---------------	-------	-------	--------	--------

表 4.6 荷重の組合わせ $D + T + L/2 + EQ$ (鉛直方向地震動) において塔に作用する荷重および塔頂移動量

(片側塔柱あたり)

格 点 番 号	死 荷 重	鉛直格点荷重 (ケーブル反力, 地震荷重など)							
		ケ ー ス 6 - 1				ケ ー ス 6 - 2			
		$H'(t)$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$	$e''(m)$	$R'(t)$	$e'(m)$	$R''(t)$
0	45.0	3.4	0	10,973	0	3.4	0	11,201	0
1	6.1	0.5	0			0.5	0		
2	74.2	5.6	0			5.6	0		
3	141.2	12.8	0			12.8	0		
4	274.2	20.6	0			20.6	0		
5	144.1	10.8	0			10.8	0		
6	26.6	2.0	0	76.8	2.88	2.0	0	41.8	0.05
7	130.9	9.8	0	7.1	0	9.8	0	7.1	0
8	160.8	12.1	0			12.1	0		
9	286.7	21.5	0			21.5	0		
10	182.2	13.7	0			13.7	0		
11	—	—	—			—	—		
塔頂移動量(m)		0.357				0.177			

4.3 計 算 結 果

数値計算の結果, 得られた各荷重ケースにおける断面力を表 4.7, 図 4.2, 図 4.3 に, 応力度を表 4.8, 図 4.4 に, 座屈荷重を表 4.9 にそれぞれ示す。

表4.7 各荷重の組合わせにおける橋軸方向の曲げモーメントおよび軸力

格 点	$D + T + L$							
	ケース 1		ケース 2		ケース 3-1		ケース 3-2	
	$M(tm)$	$N(t)$	$M(tm)$	$N(t)$	$M(tm)$	$N(t)$	$M(tm)$	$N(t)$
0	0	9926	0	11398	0	11594	0	11756
1	-38	9932	126	11404	119	11600	69	11762
2	-167	10006	241	11478	227	11674	132	11836
3	-276	10148	396	11620	374	11816	216	11978
4	-1412	10422	2017	11894	1901	12090	1099	12252
5	-2367	10566	3332	12038	3132	12234	1808	12396
6	-2823	10767	3760	12108	3180	12390	1827	12517
7	-2989	10912	3978	12253	3385	12535	1944	12662
8	-3122	11073	4149	12414	3548	12696	2037	12823
9	-3626	11360	4766	12700	4150	12983	2379	13110
10	-3847	11542	4964	12882	4381	13165	2506	13292
11	-3854	11542	4961	12882	4384	13165	2507	13292
格 点	$(D + T + W) / 1.35$				$(D + T + L/2 + EQ) / 1.45$			
	ケース 4-1-1		ケース 4-1-2		ケース 5-1-1		ケース 5-1-2	
	$M/1.35(tm)$	$N/1.35(t)$	$M/1.35(tm)$	$N/1.35(t)$	$M/1.45(tm)$	$N/1.45(t)$	$M/1.45(tm)$	$N/1.45(t)$
0	0	7244	0	7244	0	7226	0	7226
1	-331	7248	215	7248	-274	7230	470	7230
2	-627	7303	406	7303	-502	7282	876	7282
3	-971	7408	607	7408	-760	7379	1375	7379
4	-3734	7611	1866	7611	-2207	7568	5355	7568
5	-4411	7718	1280	7718	-970	7667	6217	7667
6	-4419	7795	1239	7795	-507	7710	6622	7710
7	-4296	7892	895	7892	87	7806	6385	7806
8	-3863	8011	284	8011	816	7917	5939	7917
9	-709	8223	-3584	8223	5728	8114	2082	8114
10	3897	8358	-8577	8358	12472	8240	-4240	8240
11	4470	8358	-9172	8358	13299	8240	-5059	8240
格 点	$(D + T + L/2 + EQ) / 1.45$							
	ケース 5-2-1		ケース 5-2-2		ケース 6-1		ケース 6-2	
	$M/1.45(tm)$	$N/1.45(t)$	$M/1.45(tm)$	$N/1.45(t)$	$M/1.45(tm)$	$N/1.45(t)$	$M/1.45(tm)$	$N/1.45(t)$
0	0	7414	0	7414	0	7601	0	7758
1	-444	7418	304	7418	78	7606	40	7763
2	-826	7469	558	7469	149	7661	77	7818
3	-1293	7567	852	7567	245	7767	127	7924
4	-4924	7756	2674	7756	1249	7970	647	8127
5	-5479	7855	1738	7855	2071	8077	1070	8234
6	-5733	7957	1426	7957	2236	8150	1079	8317
7	-5441	8053	881	8053	2374	8252	1150	8419
8	-4950	8163	190	8163	2484	8371	1207	8538
9	-915	8361	-4585	8361	2894	8583	1421	8751
10	5492	8487	-11273	8487	3056	8718	1510	8886
11	6314	8487	-12098	8487	3059	8718	1512	8886

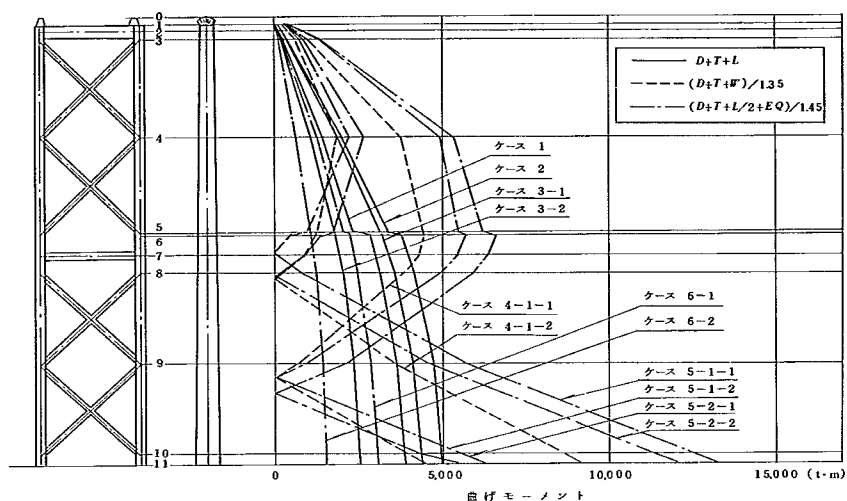


図 4.2 各荷重の組合せにおける橋軸方向の曲げモーメント

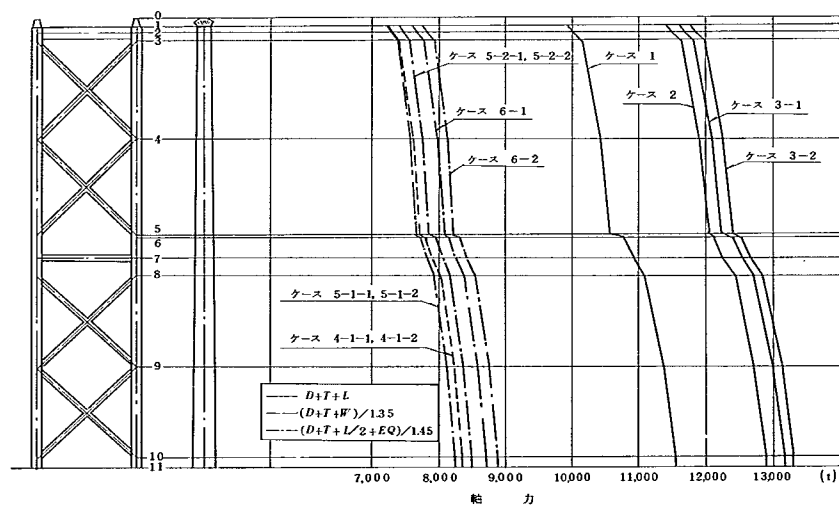


図 4.3 各荷重の組合せにおける軸力（橋軸方向の計算）

表 4.8 各荷重の組合わせにおける橋軸方向の縁端での応力度

(kg/cm²)

格 点	$D + T + L$											
	ケース 1			ケース 2			ケース 3-1			ケース 3-2		
	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}
1	11	1299	1311	16	1492	1508	15	1518	1533	9	1539	1548
2	21	1304	1325	30	1496	1527	29	1522	1550	17	1543	1559
3	34	1316	1350	49	1507	1556	47	1532	1579	27	1553	1580
4	143	1239	1382	205	1414	1618	193	1437	1630	111	1456	1568
5	210	1195	1406	296	1362	1658	279	1384	1663	161	1403	1563
6	250	1217	1468	334	1369	1702	282	1401	1683	162	1415	1577
7	258	1221	1480	344	1371	1715	292	1403	1695	168	1417	1585
8	263	1229	1492	350	1377	1728	299	1409	1708	172	1423	1595
9	260	1173	1433	342	1311	1653	298	1340	1638	171	1353	1524
10	249	1145	1394	322	1278	1599	284	1306	1590	162	1318	1481
11	247	1140	1387	318	1272	1590	281	1300	1581	161	1313	1474
$(D + T + W) / 1.35$												
格 点	ケース 4-1-1			ケース 4-1-2			ケース 5-1-1			ケース 5-1-2		
	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}
	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}
1	42	948	990	27	948	976	35	946	981	60	946	1006
2	79	952	1031	51	952	1003	63	949	1012	111	949	1060
3	121	961	1081	75	961	1036	94	957	1051	171	957	1128
4	379	905	1283	189	905	1094	224	899	1123	543	899	1443
5	392	873	1265	114	873	987	86	868	954	553	868	1420
6	392	881	1273	110	881	991	45	872	917	587	872	1459
7	371	883	1254	77	883	961	7	874	881	552	874	1425
8	326	889	1215	24	889	913	69	878	947	501	878	1379
9	51	849	900	257	849	1106	411	838	1249	149	838	987
10	252	829	1082	556	829	1385	808	817	1625	275	817	1092
11	286	826	1112	588	826	1413	852	814	1666	324	814	1138
$(D + T + L/2 + EQ) / 1.45$												
格 点	ケース 5-2-1			ケース 5-2-2			ケース 6-1			ケース 6-2		
	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}
	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}	σ_M	σ_N	σ_{M+N}
1	57	970	1027	39	970	1009	10	995	1005	5	1016	1021
2	104	974	1078	70	974	1044	19	999	1017	10	1019	1029
3	161	981	1142	106	981	1087	30	1007	1038	16	1028	1043
4	499	922	1421	271	922	1193	127	947	1074	66	966	1032
5	487	889	1376	155	889	1043	184	914	1098	95	932	1027
6	509	900	1408	127	900	1026	198	921	1120	96	940	1036
7	470	901	1371	76	901	977	205	924	1129	99	942	1042
8	418	906	1323	16	906	922	210	929	1138	102	947	1049
9	66	863	929	329	863	1192	208	886	1094	102	903	1005
10	356	842	1198	730	842	1572	198	865	1063	98	881	979
11	405	838	1243	775	838	1614	196	861	1057	97	878	975

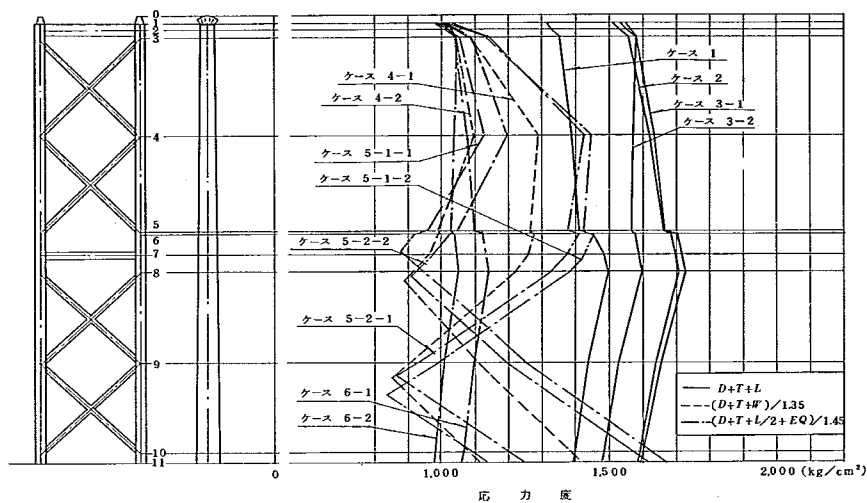


図 4.4 各荷重の組合わせにおける橋軸方向の縁端での応力度

表 4.9 各荷重の組合わせにおける座屈塔頂反力

ケース	座屈塔頂反力 $V_{cr}(t)$	設計塔頂反力 $V_0(t)$	安全率 V_{cr}/V_0
1	78,695	9,926	7.93
2	78,737	11,398	6.91
3-1	78,709	11,594	6.79
3-2	78,720	11,756	6.70
4-1-1	78,730	9,779	8.05
4-1-2	78,730	9,779	8.05
5-1-1	78,741	10,478	7.51
5-1-2	78,741	10,478	7.51
5-2-1	78,714	10,750	7.32
5-2-2	78,714	10,750	7.32
6-1	78,691	11,021	7.14
6-2	78,686	11,249	6.99

4.4 第1次設計との比較

関門吊橋第1次設計の結果と今回行った還元法による結果を応力について比較すると図4.5のようになる。

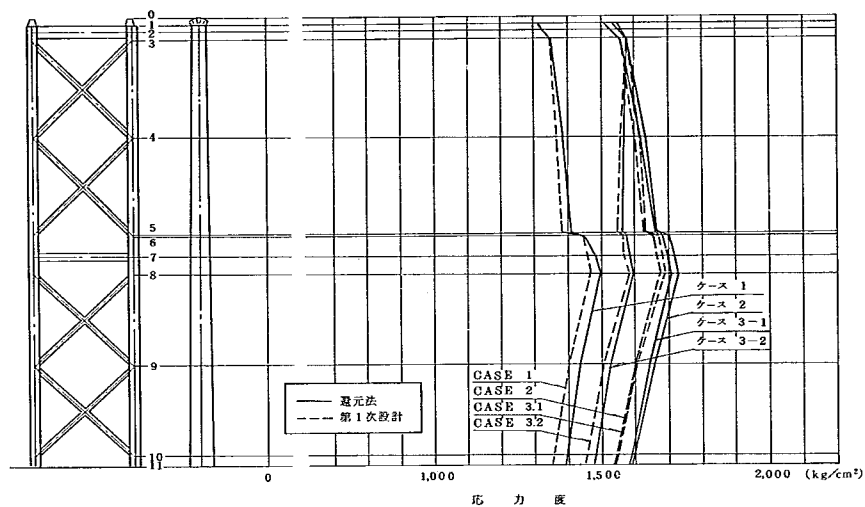


図 4.5 (a) 橋軸方向の応力度に関する還元法による値と第1次設計の値との比較

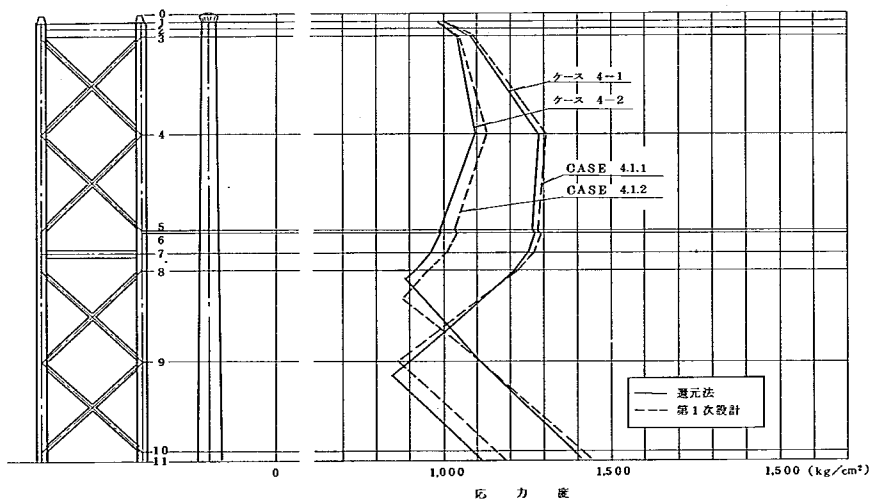


図 4.5 (b) 橋軸方向の応力度に関する還元法による値と第1次設計の値との比較

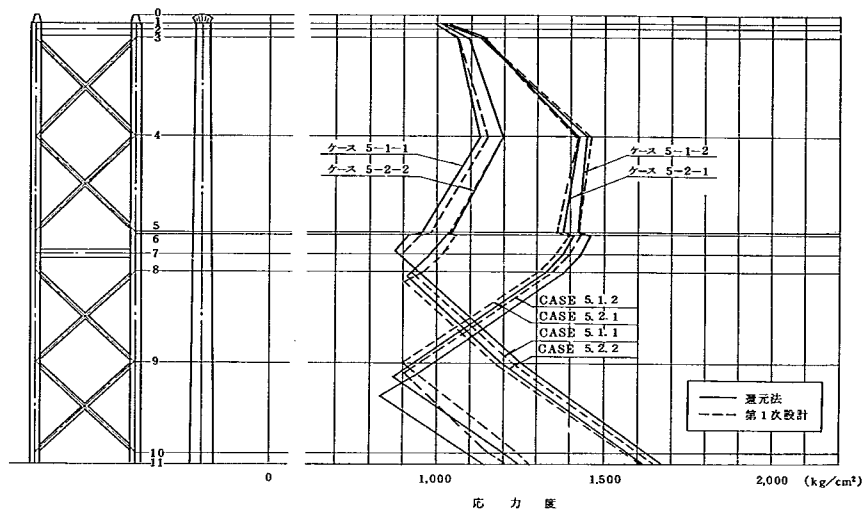


図 4.5 (c) 橋軸方向の応力度に関する還元法による値と第1次設計の値との比較

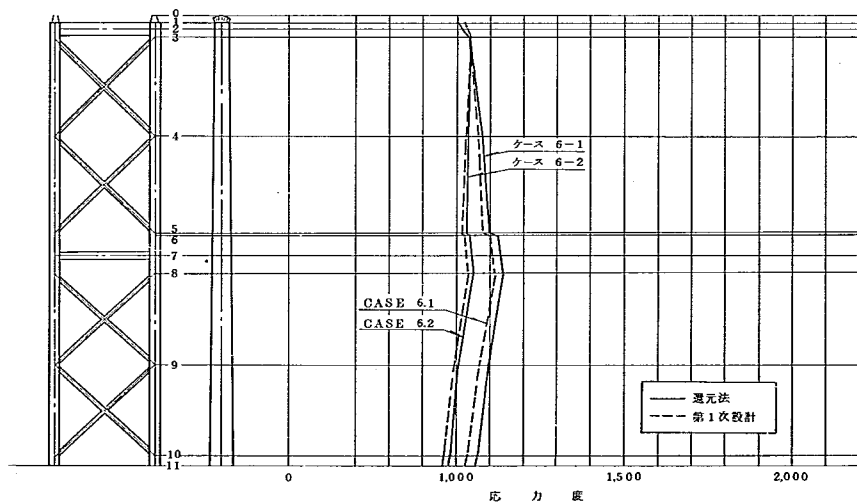


図 4.5 (d) 橋軸方向の応力度に関する還元法による値と第1次設計の値との比較

§ 5. 考 察

5.1 応 力 計 算

応力計算については図 3.5 および図 4.5 からわかるように、現在の計算法においても今回行った還元法においても大差なくいずれの方法によってもよいと思われる。ただし、これらの方法においても格間では横方向分布荷重および断面 2 次モーメントを一定、自重は格点に作用する集中荷重であると仮定しているが、これによる誤差は格間を細かくすることによって小さくできる。

また還元法では塔頂および塔基部に対して任意の境界条件を与えることができるので、たとえば塔頂においてケーブルが塔自体に作用する横荷重に対してバネの作用をする場合や、塔基部が回転する場合などに対しても応力計算を容易に行なうことができる。

しかし、これらのバネ定数や回転角をいくらに設定するかなどは別途考慮しなければならない。

5.2 座 屈 計 算

還元法では主塔の変断面の影響を考慮した塔頂座屈反力を求めているが、この値はあくまで部材が弾性域内にあることを前提にしている。

したがって表 3.9 および表 4.9 に示した安全率は 1-2 節で述べたように 8 に近い値となっているが、材料の降伏点を考慮するとこの値は小さくなる。たとえば図 5.1 には SM50 鋼に対する座屈応力と細長比の関係を示してあるが、いま $l/r = 100$ の場合を例にとって考えてみる。主塔の剛性を決める場合、現在では 1-2 節で述べたよう

に上端自由下端固定と考えているが、実際の構造は上端ヒンジ下端固定に近いので弾性座屈に対しては $42.3/5.2 = 8.1$ という安全率がある。しかし降伏点を考えるとこの値は $32.0/5.2 = 6.2$ となる。さらに図 5.1 の Euler 曲線と降伏点を示す直線の交点附近では実際には非弾性座屈が生ずるのでこの値はさらに小さくなるものと思われる。なお本四 1500 m 吊橋主塔と関門吊橋主塔の l/r はそれぞれ $225.46/3.449 = 65.3$ 、 $133.8/1.9118 = 70.1$ である。ここに l は主塔の実高、 r は平均断面 2 次半径である。

以上述べてきたことはいわゆる微小変形理論による線形微分方程式の固有値問題としての限界座屈荷重である。

すなわち図 5.2 のように柱に垂直荷重 V と横荷重 p が作用して塔頂で δ だけ変位している場合を考えても、座屈を固有値問題として扱おうかぎり図 5.3 に示し

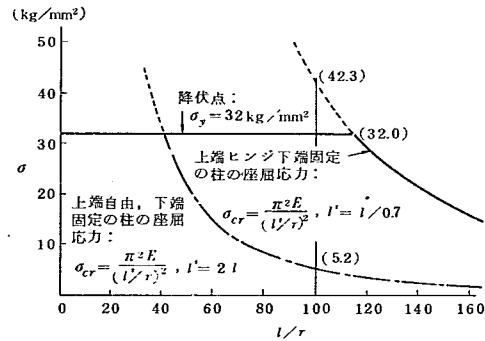


図 5.1 座屈応力と細長比の関係 (SM50)

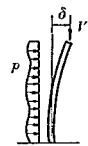


図 5.2

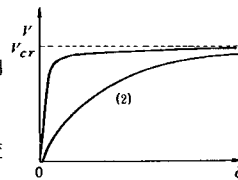


図 5.3

た P_{cr} の値しか得られない。ところが実際の柱の挙動は図 5.3 の曲線(1)または曲線(2)のようになり、これを設計に考慮しようとすれば P ばかりでなく δ についても限界値を与える必要がある。ただし柱の実際の挙動が曲線(1)および曲線(2)のいずれになるかは柱の剛性および横荷重 p の大きさによって異なる。この曲線を求めるにはいわゆる beam-column の考え方によらなければならない。しかし横荷重が小さくかつ剛性が大きくて変形が非常に小さなものであれば柱の挙動は曲線(1)のようになり、近似的には固有値問題としての限界座屈荷重に対してのみ検討を行えばよいことになる。

あ と が き

今回は吊橋主塔の橋軸方向に関する応力計算と座屈計算を還元法によって行ない、その結果を現在の計算法による値と比較するにとどめた。吊橋主塔の設計思想の上で問題となる点を § 1 現行設計法の概要および § 5 考察において述べたが、今後は耐荷力に対する設計安全率のとり方および設計手順の確立という面から吊橋主塔を扱ってゆくことが必要であろう。

なお還元法の基本式の誘導にあたっては、長大橋センター青柳氏の「ケーブルの復元力を考慮した吊橋主塔の設計法」を参考にさせていた。いた。

付録 電算プログラム

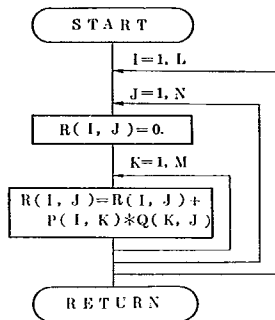
(I) インプットデータ

記 号	単 位	説 明
1	N	格 点 数 (MAX:29)
2	E	T/M ² 塔材の弾性係数
3	ALFT	# の線膨脹係数
4	EL(I)	M 格間 I の長さ
5	B(I)	M 格点 I における塔柱断面の橋軸直角方向の長さ
6	D(I)	M # 橋軸方向の長さ
7	A(I)	M ² # 横断面積
8	A I(I)	M ⁴ # 断面二次モーメント
9	Y 1(I)	M # 線端距離 (側径間側)
10	Y 2(I)	M # # (中央径間側)
11	S(I)	T 格点 I に作用すると考える塔の自重
12	J	13~19 (荷重データ) の入力の数
13	I	格点番号
14	P 1(I)	T 格点 I に作用する鉛直集中荷重
15	P 2(I)	T #
16	E 1(I)	M P 1(I) の偏心量
17	E 2(I)	M P 2(I) #
18	PH(I)	T 格点 I に作用する水平方向集中荷重
19	PW(I)	T/M 格間 I に作用する水平方向等分布荷重
20	DEL	M 塔頂の水平移動量 (塔基部との間の相対水平変位)
21	SE	M S(0) の偏心量
22	T	℃ 塔柱の温度変化
23	S(0)	T 塔頂に作用するケーブルからの垂直反力
24	GITA	RAD 塔基礎の回転角
25	CK	T/M 塔のバネ定数
26	CASE	座屈荷重を求める場合 0, 求めない場合は -1
27	ES 1	T 座屈荷重を求める場合の座屈荷重の初期値 (≧ 0)
28	ESS	T # の増加間隔 (≧ 0)
29	I	入力データのコントロール

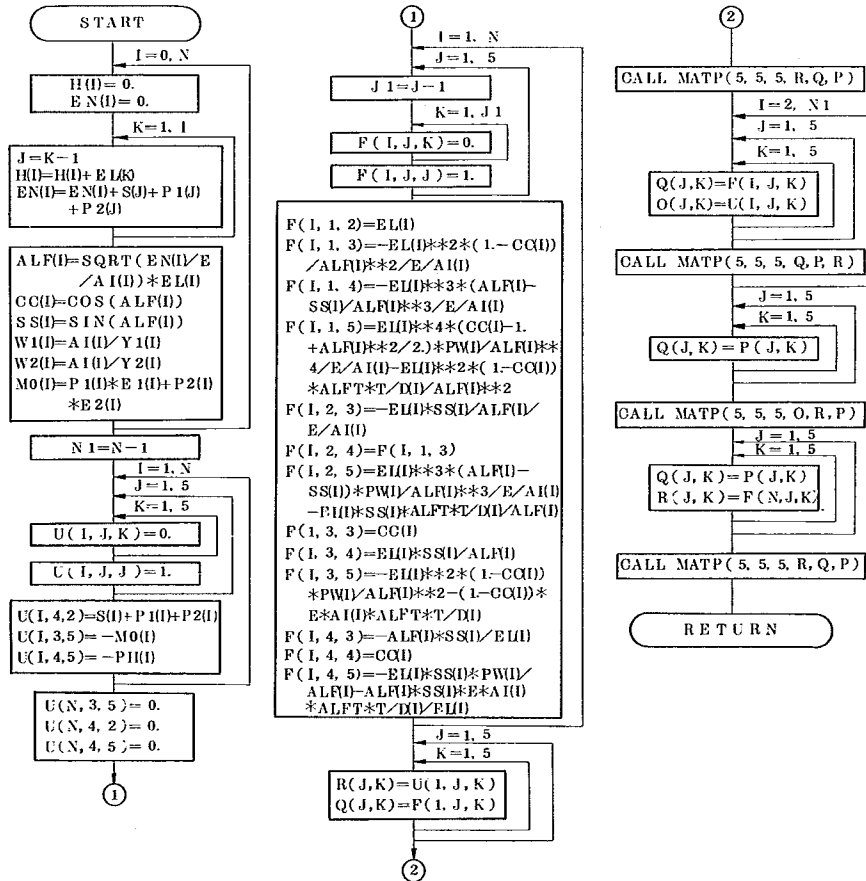
O MAIN PROGRAM



○ SUB ROUTINE MATP(L, N, M, P, Q, R)



○ SUB ROUTINE FELD



(3) プログラム

```

begin
  comment TOWER NO KEISAN      BRIDGE SECTION      1970/02/02
          ***** BO5800 *****
          ***** STRESS Pcr ONLY *****;
  real E,ALF1,CITA,CK,DEL,SE,T,R1,R2,R3,R4,ES0,ES1,ES2,ESS,EPS,SMAT1,SMAT2,ETCR;
  integer I,J,K,L,M,N,NN,11,J1,K1,KK,KAI,CASE,KAISEI,ETC1;
  array A,B,CC,D,DA,AL,H,EL,EN,BM,SH,DE,W,Y1,Y2,S,W1,W2,ALF,SS,PW,SM1,SM2,
        SN,S1,S2,TAU,EA,P1,P2,E1,E2,M0,PHI(0:30);
        U,F(1:30,1:5,1:5),O,P,Q,R(1:5,1:5),Y,YY(0:30,1:5);
  procedure PRINT(String); string String; OUT(6,String);
- 10-

  procedure MATP(ML,MM,MN,MP,MQ,MR);
  value ML,MM,MN; integer ML,MM,MN; array MP,MQ,MR;
  begin integer 11,JJ,KK;
    for 11=1 step 1 until ML do
      for JJ=1 step 1 until MN do
        begin MR[11,JJ]=0;
          for KK=1 step 1 until MM do
            MR[11,JJ]=MR[11,JJ]+MP[11,KK]*MQ[KK,JJ];
          end;
        end of MATP;
- 20-

  procedure PR1(PS,PN,PA);
  value PN; string PS; integer PN; array PA;
  begin integer NN;
    CRLF(2); PRINTS(' VECTOR OF '); PRINTS(PS); CRLF(3);
    for NN=1 step 1 until PN do
      begin OUT1(6,'5ZD3B',NN);
        if PA[NN]=0 then PRINTS(' 0. ') else OUT1(6,'B-D.6D*+DDB',PA[NN]); CRLF;
      end;
    end of PR1;
  procedure PR2(PS,PN,PK,PA);
- 30-

  value PN,PK; string PS; integer PN,PK; array PA;
  begin integer NN,KK;
    CRLF(2); PRINTS(' MATRIX OF '); PRINTS(PS); CRLF(3);
    for KK=1 step 1 until PK do OUT1(6,'10R.5Z',KK); CRLF(2);
    for NN=1 step 1 until PN do
      begin OUT1(6,'4ZB',NN);
        for KK=1 step 1 until PK do
          begin
            if PA[NN,KK]=0 then PRINTS(' 0. ') else OUT1(6,'B-D.6D*+2DB',PA[NN,KK]);
          end;
- 40-

        CRLF;
      end; CRLF(3);
    end of PR2;
  procedure PR3(PS,PL,PK,PN,PA);
  value PL,PK,PN; string PS; integer PL,PK,PN; array PA;
  begin integer LL,KK,NN;
    CRLF(2); PRINTS(' MATRIX OF '); PRINTS(PS); CRLF(3);
    for LL=1 step 1 until PL do
      begin PRINT1(5,LL); CRLF(3);
        for NN=1 step 1 until PN do
- 50-

```

```

OUT1(6,'10B.5Z',NN); CRLF(2);
for KK=1 step 1 until PK do
begin OUT1(6,'4ZB',KK);
for NN=1 step 1 until PN do
begin if PA[LL,KK,NN]=0 then PRINTS(' 0'
else OUT1(6,'B-D.6n+2DB',PA[LL,KK,NN]);
end; CRLF;
end;
CRLF(2);
end;
- 60-

CRLF(3);
end of PR3;
procedure FELD;
begin
for I=0 step 1 until N do
begin
H[I]=0; EN[I]=0;
for K=1 step 1 until I do
begin
J=K-1;
- 70-

H[I]=H[I]+EL[K];
EN[I]=EN[I]+S[J]+P1(J)+P2(J);
end;
ALF[I]=SQRT(EN[I]/E/ALF[I])*EL[I];
CC[I]=COS(ALF[I]);
SS[I]=SIN(ALF[I]);
W1[I]=A[I]/Y1[I];
W2[I]=A[I]/Y2[I];
M0[I]=P1[I]*E1(I)+P2(I)*E2(I);
end;
- 80-

N1=N-1;
for I=1 step 1 until N do
begin
for J=1 step 1 until 5 do
for K=1 step 1 until 5 do
if J=K then U[I,J,K]=1 else U[I,J,K]=0;
U(I,4,2)=S(I)+P1(I)+P2(I);
U(I,3,5)=-M0(I);
U(I,4,5)=-PH(I);
end;
- 90-

U(N,4,2)=U(N,4,5)=U(N,3,5)=0;
for I=1 step 1 until N do
begin
for J=1 step 1 until 5 do
begin
for K=1 step 1 until (J-1) do
F[I,J,K]=0;
F[I,J,J]=1;
end;
- 100-
F[I,1,2]=EL[I];

```

```

F[1,1,3]=-EL[1]↑2*(1-CC[1])/ALF[1]↑2/E/A[1];
F[1,1,4]=-EL[1]↑3*(ALF[1]-SS[1])/ALF[1]↑3/E/A[1];
F[1,1,5]=EL[1]↑4*(CC[1]-1+ALF[1]↑2/2)*PW[1]/ALF[1]↑4/E/A[1];
      -EL[1]↑2*(1-CC[1])*ALFT*T/D[1]/ALF[1]↑2;
F[1,2,3]=-EL[1]*SS[1]/ALF[1]/E/A[1];
F[1,2,4]=F[1,1,3];
F[1,2,5]=EL[1]↑3*(ALF[1]-SS[1])*PW[1]/ALF[1]↑3/E/A[1];
      -EL[1]*SS[1]*ALFT*T/D[1]/ALF[1];
F[1,3,3]=CC[1];
F[1,3,4]=EL[1]*SS[1]/ALF[1];
- 110-
F[1,3,5]=-EL[1]↑2*(1-CC[1])*PW[1]/ALF[1]↑2
      -(1-CC[1])*E*A[1]*ALFT*T/D[1];
F[1,4,3]=-ALF[1]*SS[1]/EL[1];
F[1,4,4]=CC[1];
F[1,4,5]=-EL[1]*SS[1]*PW[1]/ALF[1]
      -ALF[1]*SS[1]*E*A[1]*ALFT*T/D[1]/EL[1];
end;
for J=1 step 1 until 5 do
  for K=1 step 1 until 5 do
    begin
      R[J,K]=U[1,J,K];
      Q[J,K]=F[1,J,K];
      end;
MATP(5,5,5,R,Q,P);
for I=2 step 1 until N1 do
  begin
    for J=1 step 1 until 5 do
      for K=1 step 1 until 5 do
        begin
          Q[J,K]=F[1,J,K];
          O[J,K]=U[I,J,K];
          end;
MATP(5,5,5,O,P,R);
for J=1 step 1 until 5 do
  for K=1 step 1 until 5 do
    begin
      Q[J,K]=P[J,K];
      R[J,K]=F[N,J,K];
      end;
MATP(5,5,5,R,O,P);
end of FELD;
START:
  READ(N,E,ALFT);
L00:
  for I=0 step 1 until N do
- 120-
- 130-
- 140-
- 150-

```

```

      READ(EL[I],B[I],D[I],A[I],AI[I],Y1[I],Y2[I],S[I]);
L01:  READ(J);
      for K=1 step 1 until J do
        READ(I,P1(I),P2(I),F1(I),E2(I),PH(I),PW(I));
L02:  READ(DEL,SF,T,S[0],C[TA],CK);
      FELD;
      if CK=0 then go to L03;
      BM[0]=S[0]*SE;
- 160-
      R1=P[1,2]-P[1,1]*S[0]/CK;
      R2=P[2,2]-P[2,1]*S[0]/CK;
      R3=P[2,4]+P[2,1]/CK;
      R4=P[1,4]+P[1,1]/CK;
      BM[0]=BM[0]+M0[0];
      SM[0]=R1*(P[2,1]*DEL+P[2,3]*BM[0]+P[2,5]-C[TA])
        -R2*(P[1,1]*DEL+P[1,3]*BM[0]+P[1,5])/(R2*R4-R1*R3);
      DA[0]=(P[1,1]*DEL+P[1,3]*BM[0]+P[1,5]+R4*SM[0])/R1;
      DE[0]=DEL*(SH[0]-S[0]*DA[0])/CK;
      go to L04;
- 170-
L03:  BM[0]=S[0]*SE+M0[0];
      DA[0]=-((P[1,1]*P[2,4]-P[1,4]*P[2,1])*DEL+(P[1,3]*P[2,4]-P[1,4]*P[2,3])*BM[0]
        +(P[1,5]*P[2,4]-P[1,4]*P[2,5])+P[1,4]*C[TA])/(P[1,2]*P[2,4]-P[1,4]*P[2,2]);
      SH[0]=(-P[1,1]*DEL-P[1,3]*BM[0]-P[1,5]-P[1,2]*DA[0])/P[1,4];
      DE[0]=DEL;
L04:  Y[0,1]=DE[0];
      Y[0,2]=DA[0];
      Y[0,3]=RM[0];
- 180-
      Y[0,4]=SH[0];
      Y[0,5]=1;
      for I=1 step 1 until N do
        begin
          for J=1 step 1 until 5 do
            for K=1 step 1 until 5 do
              begin
                R[J,K]=U[I,J,K];
                Q[J,K]=F[I,J,K];
              end;
- 190-
          for J=1 step 1 until 5 do
            begin
              real X;
              X=0;
              for K=1 step 1 until 5 do
                X=X+Q[J,K]*Y[I-1,K];
              YY[I,J]=X;
            end;
          for J=1 step 1 until 5 do
            begin
- 200-

```

```

real X;
X=0;
for K=1 step 1 until 5 do
  X=X+R[J,K]*YY[I,K];
Y[I,J]=X;
endi
endi
end;
if A(0)≤0 then A[0]=A[1];
if W1(0)≤0 then W1[0]=W1[1];
if W2(0)≤0 then W2[0]=W2[1];

EN[N+1]=EN[N]+S[N];
for I=0 step 1 until N do
  begin
    DE[I]=Y[I,1];
    DA[I]=Y[I,2];
    BM[I]=Y[I,3];
    SH[I]=Y[I,4];
    SM1[I]=-BM[I]/W1[I];
    SM2[I]= BM[I]/W2[I];
    EN[I]=EN[I+1];

    SN[I]=EN[I]/A[I];
    S1[I]=SN[I]+SM1[I];
    S2[I]=SN[I]+SM2[I];
    TAU[I]=SH[I]/A[I];
    EA[I]=EN[I];
  end;
CRLF(4); PRINTS(' INPUT DATA'); CRLF(2);
PRINT('4B'LENGTH HEIGHT INERTIA AREA SECTION'7B');
PRINT('EDGE DISTANS SEC. MODULUS TOWER HEIGHT');
PRINTS(' J L H I A B D YM YS ');
PRINTS('WM WS S '); CRLF;
for I=0 step 1 until N do
  begin
    OUT9(6,'ZD,2(3ZD,3D),B,2(2ZD,5D),4(-ZD,3D)',
      1,EL[I],H[I],A[I],A[I],B[I],D[I],Y1[I],Y2[I]);
    OUT3(6,'2(-ZD,5D),6ZD,2D,/',W1[I],W2[I],if I=0 then P1(0) else S[I]);
  end;
CRLF(3);
SPACE(65); PRINTS('DEL ='); PRINTF(2,5,DEL); PRINTS('TEMP. ='); PRINTF(2,2,T);
PRINTS('C E ='); PRINTF(8,0,E); CRLF(2);

PRINTS(' VERTICAL FORCE LATERAL FORCE'); CRLF;
PRINTS(' J R1 E1 R2 E2 F WL'); CRLF;
for J=0 step 1 until N do
  begin
    OUT7(6,'ZD,2(-5ZD,2D,-ZD,3D),-4ZD,3D,-3ZD,3D,/',
      J,(if J=0 then S(0) else P1(J)),E1(J),P2(J),E2(J),PH(J),PW(J));
  end;
if N≥12 then EJECT;
CRLF(3); PRINTS(' RESULTS OF CALUCULATION'); CRLF(3);
PRINTS(' F ='); PRINTF(6,4,(S[0]*DA[0]+(P1(0)+P2(0))*DA(0)+PH(0)-SH[0]));

```

- 210-

- 220-

- 230-

- 240-

- 250-

```

CRLF(3);
PRINTS('      DEF.      DEF.ANG.  AXI.FORCE  SHEAR  R.MOMENT  NORMAL ');
PRINT('STRESS'47B'SHEAR STRESS'/'');
PRINTS(' J      Y      TAN      N      Q      M      N/A');
PRINTS('      -M/WM      M/WS');
PRINTS('      SM      SS      Q/A'); CRLF;
for I=0 step 1 until N do
begin
OUT6(6,'ZD,-ZD.5D,-ZD.7D,-5ZD.4D,-47D.4D,-5ZD.4D',
I,DE[I],DA[I],-EN[I],-SH[I],-BM[I]);
OUT6(6,'6(-5ZD.4D),/,-SN[I],-SM1[I],-SM2[I],-S1[I],-S2[I],-IAU[I]);
end;
ES0=S(0)+P1(0)+P2(0);
READ(CASF);
if CASE<0 then go to L07;
READ(ES1,ESS);
if ES1<1.0 then ES1=1; SMAT1=0;
KAI=0; KAISEI=50; KK=10; EPS=8;
if CASE=1 then PRINT('13/, KAI Pcr SMAT'/'');
L05:
SMAT2=SMAT1;
KAI=KAI+1;
S(0)=ES1;
FELD;
SMAT1=P(1,2)*P(2,4)-P(1,4)*P(2,2);
if CASE=1 then
begin PRINTI(4,KAI); PRINTF(6,3,ES1); PRINTF(3,7,SMAT1); PRINTR(7,P(1,2));
PRINTR(7,P(1,4)); PRINTR(7,P(2,2)); PRINTR(7,P(2,4)); CRLF;
end;
if ABS(SMAT1)*EPS < KAI*KAISEI then go to L06;
ES2=ES1;
if KK=0 ^ SMAT1*SMAT2>0 then ESS=ESS/2;
ES1=ES1+ESS;
if KAI<2 ^ SMAT1*SMAT2>0 then go to L05;
ESS=-ESS/2;
ES1=ES2+ESS;
KK=0;
go to L05;
L06:
if CASE=1 then PRINT('///,53(* ',QK,...,///');
PRINT(1/5B'CRITICAL LOAD ='); PRINTF(6,2,ES1);
PRINT(1/5B'SAFETY FACTOR ='); PRINTF(4,4,ES1/ES0);
PRINT(' = Pcr / P ='); PRINTF(6,2,ES1); PRINTS('');
PRINTF(6,2,ES0); CRLF;
L07:
EJECT;
for ETCR=1.25,1.35,1.45 do
begin
CRLF(2); PRINTS(' 1/'); PRINTF(1,2,ETCR);
CRLF(2);

```

```

PRINTS(, DEF, DEF*ANG, AXI*FORCE, SHEAR, B*MOMENT, NORMAL ');
PRINT('STRESS'478'SHEAR STRESS'); CRLF(1);
PRINTS(, J, Y, TAN, N, Q, N, N/A');
PRINTS(, -M/WM, M/WS');
PRINTS(, SM, SS, W/A'); CRLF(1);
for I=0 step 1 until N do
begin
OUT6(6, ZD, -ZD.5D, -ZD.7D, -5ZD.5B, -4ZD.5B, -5ZD.5B,
I*DE(1), DA(1), -EA(1)/ETCR, -SH(1)/ETCR, -BM(1)/ETCR);
OUT6(6, '6(-5ZD.5B),/');
- 310-
-SN(1)/ETCR/10.0, -SM1(1)/ETCR/10.0, -SM2(1)/ETCR/10.0, -S1(1)/ETCR/10.0,
-S2(1)/ETCR/10.0, -TAU(1)/ETCR/10.0);
end;
CRLF(2);
end;
EJECT;
if KFY(0) then
begin
PR1('ALF/', N, ALF);
PR1('CC/', N, CC);
- 320-
PR1('SS/', N, SS); EJECT;
PR3('U/', N, 5, 5, U); EJECT;
PR3('F/', N, 5, 5, F); EJECT;
PR2('P/', 5, 5, P);
PR2('Y/', N, 5, Y);
EJECT;
end;
comment NEXT DATA;
READ(1);
if I=1 then go to L01 else
- 330-
if I=2 then go to L02 else
if I=3 then go to L03 else
if I=4 then go to START else
if I=0 then go to L00;
end;

```