

## 第三章 吊 橋

### 第一節 總 論

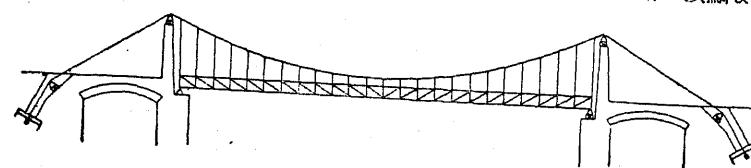
I. 種 別 吊橋 (Suspension bridge) に於ける力の作用は拱橋に於けると同様、全く明瞭にして而も美觀を有するので長徑間の橋に廣く用ひらる。古い型に於ては床が吊材に依り直接ケーブルより懸吊されてゐたから、荷重は其の作用點上のケーブルに垂下 (Sagging) を起し、從て荷重の進行につれ床に波動を生じた。此の缺點を除くため數格間に亘る縦桁及頑丈な高欄を造つて、荷重をケーブルの長い區間に分布する様に改めた。其の後補剛構を全徑間に設け一定間隔に於て之をケーブルに吊るす方法が考案せられし以來、吊橋の剛度を増進する上に頗る有效となつた。

交通量が多い場合他の型に比し吊橋が最も經濟的となる徑間長に關しては色々の意見があるが、ケルンに於ける道路橋架設の際には、約 200 m の支間に於ては拱及構橋が吊橋に勝れることを示した。クエベックに於ける前鐵道橋の設計では、支間  $2 \times 157.1\text{m} + 549\text{m}$  の突桁橋が吊橋より經濟的であつた。ボーネイ氏は鐵道橋に於ては支間 600 m 以上、道路橋に於ては支間 300 m 以上は吊橋が最も經濟的なりとした。

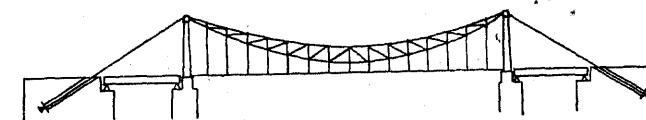
吊橋の重要な構成部は

- (1) 垂曲線をなすチエーン (Chain) 又はケーブル (Cable) とその背控 (Backstay)。
- (2) チエーン又はケーブルの水平張力を、橋梁自體の部分で受入る、ことが出來ない場合には、鈎着せるチエーン又はケーブル。
- (3) チエーン又はケーブルの最高點を支ふる石造又は鋼製塔。
- (4) 車道の吊材。
- (5) 補剛構。

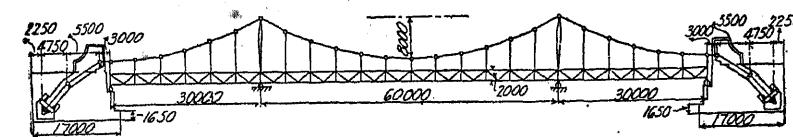
チエーン又はケーブルは一徑間 (第 209 圖及第 210 圖) 及數徑間 (第 211 圖) に亘り垂曲線 (Catenary) を形造る。前者に於てはチエーン又はケーブルの背控は、塔の頂點より鈎着點まで



第 209 圖



第 210 圖



第 211 圖

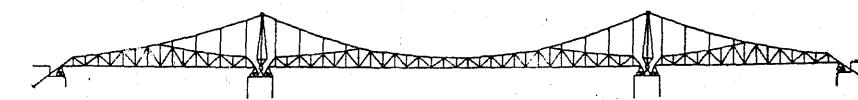
直線をなす。第 210 圖の端徑間にはチエーン又はケーブルに懸吊されない全く獨立した別箇の桁を架してある。チエーン又はケーブルは塔の頂點で、橋軸の方向に自由に動く様に支承せねばならない。若し之を頂點で固定すれば、塔はケーブルの水平分力に抵抗するを要す。然しケーブルの水平分力は寧ろ鈎着點まで導く方がいいから、塔の上では可動支承となす様にする。若し塔が振子柱で造られてゐる場合は (第 211 圖)、チエーン又はケーブルを其の頂點に固定する。

荷重を支へて垂曲線をなす部分にワイヤーケーブル (Wire cable) 又はアイバーチエーン (Eyebar chain) を用ふるかに依つてケーブル吊橋及チエーン吊橋に區別する。

補剛桁のチエーン又はケーブル並に車道に對する位置に依つて區別すれば、

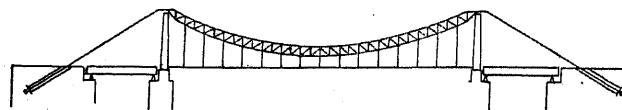
(1) 補剛桁が下にあるとき。補剛桁は吊材に依つてチエーン又はケーブルと連繫され車道を直接支へてゐる (第 209 圖)。此の場合にはチエーン又はケーブルは單に主徑間だけ垂曲線をなしてゐるから、補剛桁は一端固定他端可動の單桁となり一次不靜定となるが、補剛桁に一箇の鉸を挿入すれば靜定となる。第 211 圖の如くチエーン又はケーブルが數徑間に跨り垂曲線をなすときは、補剛桁は數徑間に亘る連續桁、各徑間毎に切れた單桁或は突桁として配置さる。前者の場合には徑間が  $n$  あれば  $n$  次不靜定となり、後者の場合には一次不靜定となる。

連續桁は一端固定他端可動となし、單桁の場合には各徑間毎に固定及可動支承を造る。其の固定支承に依つて橋軸の方向に作用する水平力を採り、之をチエーンに又はチエーンより橋臺に傳ふるには、チエーンを橋軸の方向に變位しない様に補剛桁と緊結することが肝要である。若し力学的不靜定の程度を變へざらんと欲せば固定支承を可動支承に置き代へねばならない (第 212 圖)。チエーン又はケーブルの面内には普通對風構を設けずして補剛桁の車道下にある弦面に設くる。

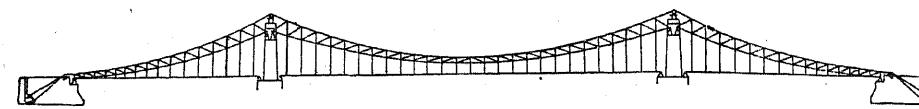


第 212 圖

(2) 補剛桁が上にあるとき。補剛桁とチエーン又はケーブルとは直接連繫され、車道は吊材に依つて支へられた形である(第210圖)。之は普通新月形をなしてゐるが、又或る場合には第213圖の如く平行弦を有するもの、第214圖の如く弦の間隔が塔の所で最大となれるものもある。



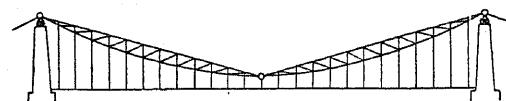
第 213 圖



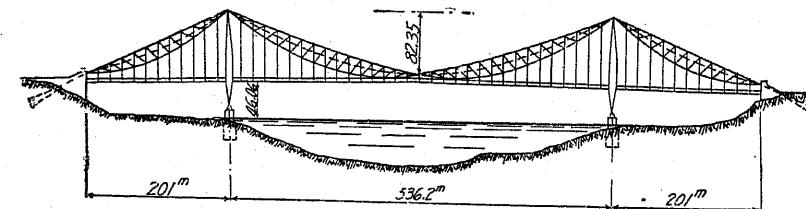
第 214 圖

前二者の場合には、補剛桁は塔上でチエーン又はケーブルと一點に會して共同に動く様に支承する。後者の場合に於ける補剛桁は、塔上で一點に會せないから特別の可動装置を必要とする。側徑間に於ける補剛桁の陸地側の端は橋臺上に可動的に支承する。

第210圖、第213圖及第214圖に示せる吊橋の力學的不靜定應力は、補剛桁に一箇の鉗を挿入することによつて之を除くことを得。第215圖、第216圖に於ては、下弦がケーブルとなり、上弦は中央の鉗より塔頂まで直線をなし、補剛構はケーブルの上にある。此の場合の上弦は活荷重のために壓力を受くる缺點を有す。

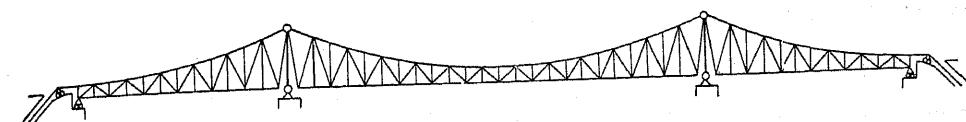


第 215 圖

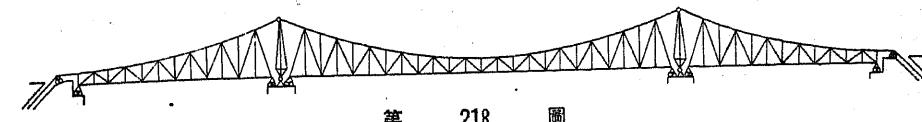


第 216 圖

(3) 補剛構の代りに剛性の結構々造となしたるもの(結構吊橋)。第217圖は車道の高に支承を有し而も橋臺上では可動支承となつてゐる。第218圖は第214圖に相當する結構吊橋で、結構下弦の支承は車道の高に置き、車道面内にある下弦は直線となつてゐる。上記三種の吊橋は各二



第 217 圖

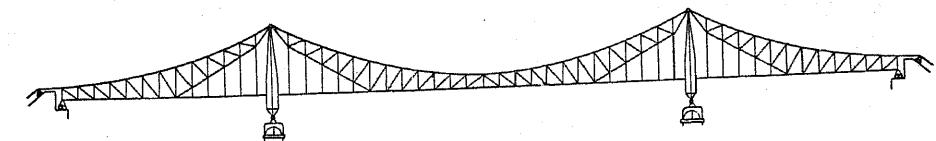


第 218 圖

箇の縦に動く可動承を有する。

結構吊橋の上弦となれるチエーン又はケーブルは、一般に總ての死荷重を受くる。

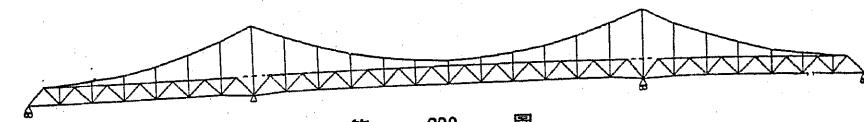
結構吊橋は(1)及(2)の補剛構と同様チエーン又はケーブルの補剛となり、且つ集合荷重をチエーン又はケーブルに等布する役目を有するものである。縦荷重もチエーン又はケーブルで受けて之を橋臺に傳達する。塔の附近に長い斜材を用ふることを避け、且つ補剛構の高を最大曲率線に合致するためには、第217圖の代りに第219圖、第218圖の代りに第212圖を用ふる。



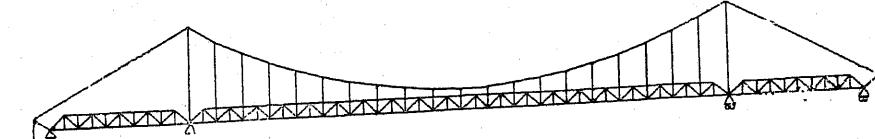
第 219 圖

前者では車道を連結する補剛構が上部に位し、後者ではチエーン又はケーブルに吊るされた補剛桁は下部に位してゐる。

前者の場合には車道上の風壓に対する面積が大きいから、特別の對風構及對傾構を必要とする



第 220 圖



第 221 圖



第 222 圖



ケーブルの長は（兩支點が同一水平線上にあるとき其の間の拠物線の長）

$$L = 2 \int_0^{\frac{l}{2}} ds = 2 \int_0^{\frac{l}{2}} \left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} dx$$

の一般式を積分して次の如くなる。

$$L = \frac{l}{2} (1 + 16n^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{l}{8n} \log_e \left[ 4n + (1 + 16n^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad \dots \dots \dots (12)$$

双曲線函数表を用ふるときは

$$L = \frac{l}{16n} (2u + \sinh 2u) \quad \dots \dots \dots (13)$$

式中

$$\sinh u = 4n \quad \dots \dots \dots (14)$$

に依る方が便利である。

近似式としては

$$L = l \left( 1 + \frac{8}{3}n^2 - \frac{32}{5}n^4 + \dots \right) \quad \dots \dots \dots (15)$$

を用ひ、 $n$  が小さいときは

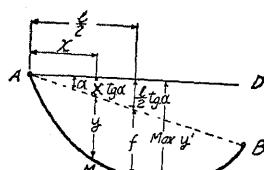
$$L = l \left( 1 + \frac{8}{3}n^2 \right) \quad \dots \dots \dots (16)$$

となすことが出来る。

(3) 非對稱徑間。ケーブルの兩端が同高でないときは、縦距  $y$  は斜弦  $AB$  (第 225 圖) より鉛直に測る。此の場合上述の方程式中 (1) より (7) までは其の儘用ひらるゝ。但し (7) 式は  $A$  を原點、 $AB$  を軸とせしときの方程式であるが、若し  $AB$  と  $\alpha$  の角度をなす水平線  $AD$  を軸とせば

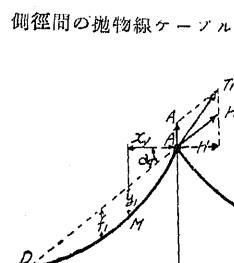
$$y = \frac{4fx}{l^2} (l-x) + x \tan \alpha \quad \dots \dots \dots (17)$$

非對稱拠物線ケーブル



第 225 圖

曲線の最下點  $V$  の横距は



側徑間の拠物線ケーブル

第 226 圖

$$x_v = \frac{l}{2} \left( 1 + \frac{l}{4f} \tan \alpha \right) \quad \dots \dots \dots (18)$$

曲線長を求むるには  $VA$  及  $VB$  を拠物線の半分と考へて (12) 又は (13) 式に適用し、其の結果を加ふればよろしい。

非對稱拠物線は吊橋の側徑間に起るのであるが、第 226 圖の符號を用ふれば

$$y_i = \frac{4f_i x_i}{l_i^2} (l_i - x_i) \quad \dots \dots \dots (19)$$

式中  $y_i$  及  $f_i$  は弦  $AD$  より鉛直に、 $x_i$  及  $l_i$  は水平に測るものとす。

曲線の眞の頂點  $V$  は  $D$  點の外側に在る (第 226 圖)。曲線の實際の長は、 $VA - VD$  或は (12) 式に依り算出せらるゝ各半拠物線の差に等しい。近似値としては次式を用ふる。

$$L_i = l_i \left( \sec \alpha_i + \frac{8}{3} \frac{n_i^2}{\sec^2 \alpha_i} \right) \quad \dots \dots \dots (20)$$

式中

$$n_i = \frac{f_i}{l_i}$$

側徑間に於けるケーブルの張力は、弦  $AD$  線 (第 226 圖) 内に作用し、次式に依つて表はさるゝ。

$$H_i = H \sec \alpha_i \quad \dots \dots \dots (21)$$

任意の點に於ける彎曲率は

$$M' = H y_i \quad \dots \dots \dots (22)$$

となり、水平張力は

$$H = \frac{w_i l_i^2}{8f_i} \quad \dots \dots \dots (23)$$

となる。中央及側徑間の水平張力  $H$  を等しくするには、(5) 及 (23) 式に依り次式を得。

$$\frac{w l^2}{8f} = \frac{w_i l_i^2}{8f_i} \quad \dots \dots \dots (24)$$

垂矢の比は

$$\frac{f_i}{f} = \frac{w_i l_i^2}{w l^2} \quad \dots \dots \dots (25)$$

ケーブルの任意の點の應力は

$$T = H (1 + \tan^2 \phi)^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots (26)$$

側徑間の中央  $x_i = \frac{l_i}{2}$  の點に於ては、曲線は弦と平行となるから、其の傾斜は  $\alpha_i$  となる。

從て

$$T = H(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1)^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

$x_1 = 0$  の支點に於けるケーブルの傾斜及應力は、次式に依つて與へらる。

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_1 &= \operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{4f_1}{l_1} \\ T_1 &= H \left[ 1 + \left( \operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{4f_1}{l_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

(4) 垂曲線 (Catenary)。ケーブルの自重に依る曲線は垂曲線となす。曲線の最下點を原點に採れば、垂曲線の方程式は

$$y = \frac{1}{2c}(e^{cx} + e^{-cx} - 2) \quad (29)$$

式中

$$c = \frac{w}{H}$$

となる。或は双曲線函数の項にて表せば

$$y = \frac{1}{c}(\cosh cx - 1) \quad (30)$$

となる。垂曲線の長は

$$\begin{aligned} L &= 2 \int_0^{\frac{l}{2}} \frac{1}{2}(e^{cx} + e^{-cx}) dx \\ &= \frac{1}{c} \left( e^{\frac{cl}{2}} - e^{-\frac{cl}{2}} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

或は

$$L = \frac{2}{c} \sinh \frac{cl}{2} \quad (32)$$

(29) 式を代入すれば

$$L = \frac{1}{c} \sqrt{2cy + c^2y^2} \quad (33)$$

となつて、頂點より曲線の任意の點に至る長を表す。

ケーブルの任意の點の應力は

$$T = H \frac{ds}{dx} \quad (34)$$

$H = \frac{w}{c}$  なるが故に

$$T = \frac{w}{c} \left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

之に (29) 式より得らる  $\frac{dy}{dx}$  を代入すれば

$$T = \frac{w}{2c}(e^{cx} + e^{-cx}) \quad (35)$$

或は

$$T = H \cosh cx \quad (36)$$

此の張力は徑間の端即ち  $x = \frac{l}{2}$  の點で最大となるから

$$T_1 = H \cosh \frac{cl}{2} \quad (37)$$

(30) 式と (36) 式とを比較して

$$T = w \left( y + \frac{1}{c} \right) = wy + H \quad (38)$$

を得。

徑間の中央即  $y = 0$  の處では  $T = H$ ,  $y = f$  の支點に於ては

$$T_1 = wf + H \quad (39)$$

垂比 (Sag-ratio)  $n = \frac{f}{l}$  が小さいときは、垂曲線の公式は抛物線の公式で書き換へることが出来る。

(5) ケーブルの變形。鞍 (Saddle) に於ける迄又は溫度の變化等彈性伸脹の結果、兩支點間に於けるケーブルの長は  $\Delta L$  だけ變化する。又塔の撓度或は鞍の變位に依つても徑間は  $\Delta l$  の變化を生ずる。此の結果生ずるケーブルの垂矢の變化  $\Delta f$  を求むれば、抛物線ケーブルに於ては

$$\Delta L = \frac{1}{15}(15 - 40n^2 + 288n^4)\Delta l \quad (40)$$

$$\Delta L = \frac{16}{15}n(5 - 24n^2)\Delta f \quad (41)$$

$$\Delta f = - \frac{15 - 40n^2 + 288n^4}{16n(5 - 24n^2)}\Delta l \quad (42)$$

溫度の變化に依つて生ずるケーブル長の變化は

$$\Delta L = \omega t L \quad (43)$$

式中  $t$  は溫度の變化、 $\omega$  は膨脹係数とす。

水平張力  $H$  を生ずる載荷に依りケーブルには次の平均應力を生ずる。

$$\frac{L}{l}H$$

彈性伸脹は

$$\Delta L = \frac{L}{l} \frac{\mu L}{E F} \quad (44)$$

となる。式中  $E$  はケーブルの弾性恒数、 $F$  は其の断面積とす。

弹性伸張に對する他の式は

$$\Delta L = \frac{Hl}{EF} \left(1 + \frac{16}{3} n^2\right) \quad \dots \dots \dots \quad (45)$$

ケーブル垂矢の變化  $\Delta f$  に依つて生ずる水平張力の變化は

$$\Delta H = -\frac{H}{f} \Delta f \quad \dots \dots \dots \quad (46)$$

となる。

## 2. 無補剛吊橋 (Unstiffened suspension bridge)

無補剛吊橋は重要な箇所には用ひられない。一般の形式は第 227 圖に示すが如く、二箇の塔上を通過し背控に依つて堅固なる地盤に碇着するケーブルより成る。車道は吊材に依りケーブルに懸垂する。補剛構がないから、ケーブルは載荷に應じて如何なる平衡曲線をも描くことが出来る。

(1) ケーブル及塔に於ける應力。チエーンを用ふる場合には、其の應力に比例して断面積を變化するも、ワイヤー・ケーブル (Wire cable) を用ふる場合は、其の断面積は全線に亘り一定となす。

ケーブル及吊材は橋床に比し軽いから、是等三つの合成重量は水平の単位長に對しては等布するものと考ふるを得。其の全死荷重を  $w$  (1米に付近) とせばケーブルは抛物線となるから、前述の (5) 乃至 (16) 式が適用される。ケーブルの最大應力は塔の所に起り、其の値は

$$T_w = \frac{wl^2}{8f} \sqrt{1+16n^2} \quad \dots \dots \dots \quad (49)$$

となる。

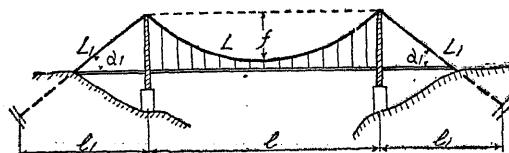
活荷重を  $p$  (1米に付近) とせば、ケーブルの最大活荷重應力は、活荷重が全徑間に満載せるときに起り、其の値は

$$T_p = \frac{pl^2}{8f} \sqrt{1+16n^2} \quad \dots \dots \dots \quad (47)$$

となるから、塔の箇所に於けるケーブルの全應力は

$$T_{w+p} = \frac{(w+p)l^2}{8f} \sqrt{1+16n^2} \quad \dots \dots \dots \quad (48)$$

背控が水平となす角度を  $\alpha_1$  とせば (第 227 圖)、背控の應力は



第 227 圖

$$T_1 = H \sec \alpha_1 = \frac{(w+p)l^2}{8f} \sec \alpha_1 \quad \dots \dots \dots \quad (49)$$

若しケーブルと背控とが塔の所で同一傾斜をなすときは、(48) 及 (49) 式は等しくなる。塔の所に於ける主ケーブルの鉛直反力は

$$(w+p) \frac{l}{2}$$

となる。背控がケーブルと同一傾斜をなすときは、ケーブルと同一の鉛直反力を有することになるから、塔の全應力は

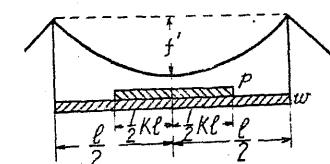
$$T = (w+p)l \quad \dots \dots \dots \quad (50)$$

となる。

(2) 中央載荷の場合の變形。部分載荷の場合には、無補剛ケーブルの抛物線形に歪を生ずる。

ケーブルの伸び及鞍の變位を考へざる場合に、曲線の歪に依つて生ずる撓度を見出さんとす (第 228 圖)。

ケーブルの中央に於ける最大鉛直撓度は、活荷重  $p$  が或る長  $l$  だけ載荷し、死荷重  $w$  が全徑間に亘り載荷せるときにつきに起る。



第 228 圖

歪みを生じたケーブルの垂矢は

$$f' = \frac{wl^2}{8H} + \frac{pl^2}{8H} k (2-k) \quad \dots \dots \dots \quad (51)$$

ケーブルの長は

$$l = \left(1 + \frac{8}{3} n^2\right)^{\frac{1}{2}} l + \frac{w^2 l^3}{24 H^2} (1 + 3qk + 3q^2 k^2 - qk^3 - 2q^2 k^3)^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots \quad (52)$$

式中

$$q = \frac{p}{w}$$

此の方程式を  $H$  に對して解いて、(51) 式に入れば

$$\frac{f'}{f} = \frac{1 + 2qk - qk^2}{(1 + 3qk + 3q^2 k^2 - qk^3 - 2q^2 k^3)^{\frac{1}{2}}} \quad \dots \dots \dots \quad (53)$$

$f'$  の最大値に對しては

$$k^4 (1 + 2q) q + 2k^3 (1 - q) q + 3k^2 (1 - q) - 4k + 1 = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (54)$$

(54) 式より  $k$  を求めて (53) 式に代入すれば、頂點の最大撓度に對して次の値を得。

	$\Delta f = f' - f$
$q = \frac{p}{w} = 0$	$\frac{1}{5}$
$k = 1.0$	$0.64$
$\Delta f = 0$	$0.013$

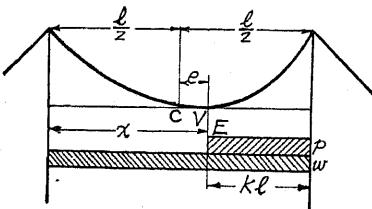
$\frac{1}{3}$        $\frac{1}{2}$       1      2      3

0.30      0.28      0.25      0.23      0.21

0.022      0.028      0.045      0.067      0.080  $f$

上表に依り、 $q = \frac{1}{4}$  乃至 4 の間に對しては、次の實驗値を得。

$$\left. \begin{aligned} k &= 0.20 + \frac{0.05}{q} \\ \Delta f &= (0.007 + 0.046 q - 0.0075 q^2) f \end{aligned} \right\} \quad (55)$$



第 229 圖

(3) 非對稱載荷の場合の變形。ケーブルの最下點の最大水平變位に依つて表はさるケーブルの最大歪みは、徑間の一端より任意の距離  $k$  だけ載荷せるときに生ずる(第 229 圖)。此の場合の  $k$  の値は

$$k = -\frac{w}{p} + \sqrt{\frac{w}{p} + \frac{w^2}{p^2}} \quad (56)$$

となるから、曲線の頂點 ( $V$ ) の徑間の中央 ( $c$ ) よりの最大偏差は

$$\frac{e}{l} = \frac{1}{2} + \frac{w}{p} - \sqrt{\frac{w}{p} + \frac{w^2}{p^2}} \quad (57)$$

となる。ケーブルの全垂矢は  $\frac{p}{w}$  の總ての値に對して一定であるから、徑間の中央に於けるケーブルの扛上は

$$\Delta f = \left( \frac{2e}{l+2e} \right)^2 f \quad (58)$$

となる。

$\frac{p}{w}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{4}{3}$	2	3	4
$e$	0.028	0.036	0.051	0.086	0.105	0.134	0.167	0.191 $f$
$\Delta f$	0.003	0.004	0.008	0.021	0.030	0.045	0.062	0.076 $f$

(4) ケーブルの伸脹に依つて生ずる撓度。鞍の變位又は塔頂の動搖がケーブルの辺る以前に起るならば、背控の伸脹は徑間長 ( $l$ ) を變へるが、主徑間のケーブル長 ( $L$ ) を變へることはない。

$$\Delta L = \omega t L + \frac{Hl}{EF} \left( 1 + \frac{16}{3} n^2 \right) \quad (59)$$

$$\Delta l = -2 \sec \alpha_1 \left( \omega t l_1 \sec \alpha_1 + \frac{Hl_1}{EF_1} \sec^2 \alpha_1 \right) \quad (60)$$

以上の値を (41) 及 (42) 式に代入して主ケーブルの撓度を得。即ち

$$\Delta f = \frac{15}{16(5n-24n^3)} \Delta L - \frac{15-40n^2+288n^4}{16(5n-24n^3)} \Delta l \quad (61)$$

鞍の變位 ( $\Delta l$ ) がケーブルの辺りに依つて生ずるならば、鎮碇 (Anchorage) 間に於ける(第 227 圖) ケーブルの全長は變らない。從て主ケーブルの長及徑間の變化は、次の關係を満足せねばならない。

$$\Delta L = \Delta l \cos \alpha_1 \quad (62)$$

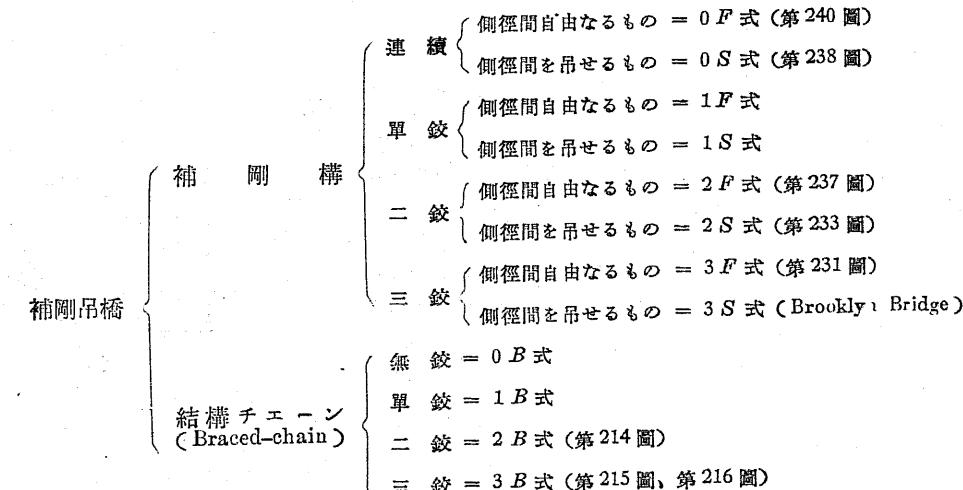
此の方程式を (61) 式に代入せば、頂點の撓度は

$$\Delta f = \frac{15 \cos \alpha_1 - (15-40n^2+288n^4) \Delta l}{16(5n-24n^3)} \quad (63)$$

となる。

3. 補剛吊橋 (Stiffened suspension bridge) ケーブルの扭歪に抵抗せしむるため、吊材に依つてケーブルに連結せし補剛構が出現した。側徑間は單にケーブルより吊るされ或は單獨に支えらるゝが、後者の場合には背控は直線をなす。主徑間の構は、塔の所で單支承となすか若くは側徑間に連續となす。構造物を靜定となし或は不靜定次を減するため、補剛構の中央には鉸を挿入する。

結構チエーン (Braced-chain) 式も亦補剛吊橋の一種であるが、此の場合には補剛構をケーブルより吊るす必要がない。其の代りにチエーン其のものが仰拱の形をなして、扭歪に抵抗するに足る充分の剛度を有してゐる。主徑間に於ける鉸の數に依つて補剛吊橋を次の通りに分類する。



2F 及 3F の形に於ては、側徑間は構造物の主要素に關係がないから、考慮の外に置く。從て此の形を一名單徑間橋 (Single-span bridge) とも謂ふ。

(1) 假定。補剛吊橋の理論を説くに當つて、構は活荷重に基くケーブルの變形を、實際上考慮せざるも差支ない程度に完全なる剛度を有するものと假定する。換言せば、外力の極率は構造物の變形に依つて變らない。

補剛構が剛度を有せざるとき或は徑間が長いときは、構及ケーブルの撓度は頗る大きくなつて閑却する譯にはいかないから、其の際は變形を考慮に入れた正確な計算方法を用ひねばならない。

普通次の假定をなす。

(a) ケーブルは、荷重に應じて平衡多角形を自由に造り得る様完全に可撓的である。

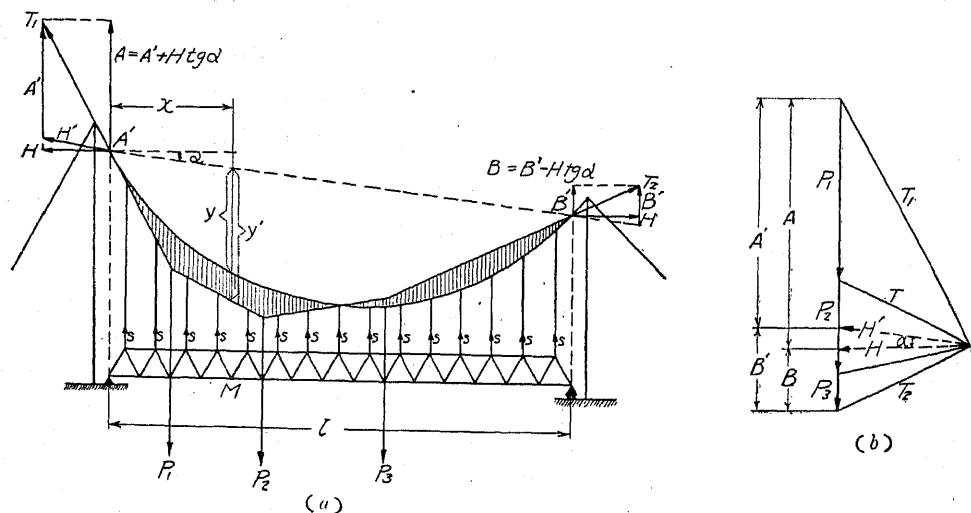
(b) 構は最初に水平直線をなし、一定の慣性率を有し、其の全長をケーブルに繫結された桁と考ふる。

(c) 構及ケーブルの死荷重は単位長に對して等布するものとする。從てケーブルの最初の形狀は拋物線である。

(d) ケーブル曲線の形狀及縱距は、載荷後も不變である。

(e) 死荷重は全部ケーブルで受け補剛構には何等の應力を生じないで、單に活荷重及溫度の變化に依つてのみ構に應力を生ずる。

(2) 基礎公式。補剛吊橋のケーブルは拋物線なりと假定するが故に、之にかかる荷重は水平単位長に就ては常に一定でなければならない。從て (5) 式乃至 (28) 式は、此の場合にも適用さる。



第 230 圖

格點が水平に等距離に在るときは、吊材の力は全部同一である (第 230 圖)。此の吊材の力はケーブルには下向きに、補剛構には上向きに作用する荷重となる。活荷重が如何様に載荷しても之を吊材に等布するのは補剛構の役目である。ケーブルは水平張力  $H$  (鎮碇に依り抵抗さる) と、吊材の下向きの力とで平衡状態にある。水平単位長に對する吊材の力を  $s$  で表せば

$$s = H \frac{8f}{l^2} \quad (64)$$

となる。

構は (第 230 圖) 下向きに働く任意の力と、上向きに働く等布せる吊材の力との間に平衡を保たねばならぬ。若し後者の力を取去れば、左端より  $\alpha$  の距離にある構の任意のセクションに於ける彎曲率  $M'$  及剪力  $Q'$  は、普通の桁 (桁が二或は二以上の支點上にあるかに依り單桁若は連續桁となる) に對すると同様に正確に決定することを得。若しケーブルがなくて全荷重を構のみで受くるときに、以上の彎曲率及剪力を生ずる。或るセクションに於て、吊材の力に因る彎曲率を  $-M_s$  とせば、補剛構に於ける總彎曲率は

$$M = M' - M_s \quad (65)$$

となり、同一のセクションに於て、吊材の力に因る剪力を  $-Q_s$  とせば、補剛構の總剪力は

$$Q = Q' - Q_s \quad (66)$$

となる。死荷重は、最初の吊材の力に依つて正確に平衡を保つてゐるから、以上の方程式には考慮してゐない。

補剛構が塔で鉸結された單桁ならば、索多角形の性質に依り (第 230 圖)。

$$M_s = H y \quad (67)$$

故に (65) 式は

$$M = M' - H y \quad (68)$$

所要のセクションに於けるケーブルの傾斜を  $\varphi$  とせば、吊材の力に依つて生ずる剪力は

$$Q_s = H \operatorname{tg} \varphi \quad (69)$$

なるが故に、(66) 式は

$$Q = Q' - H \operatorname{tg} \varphi \quad (70)$$

となる。

ケーブルの兩端  $A'$  及  $B'$  が同一高にないときは、 $A' B'$  線と水平線とのなす角度を  $\alpha$  とせば

$$Q = Q' - H(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \alpha) \quad \dots \dots \dots \quad (71)$$

となる。

$M'$  を敷箇の荷重に對し極距を  $H$  として造つた平衡曲線の縦距  $y'$  で表せば、(68) 式は

$$M = H(y' - y) \quad \dots \dots \dots \quad (72)$$

となる。即ち補剛構の任意のセクションに於ける彎曲率は、ケーブルの軸と荷重に對する平衡曲線との間の鉛直距離で表はすことが出来る（第 230 圖）。若し補剛構が敷徑間に亘り連續せるときは、(67) 乃至 (72) 式で表した關係は、塔の所での連續を考慮して修正せねばならない。其の公式は連續補剛構の項で述ぶる。

(3) 影響線。影響線を描くには、最初  $H$  の影響線を作る、夫には単位荷重の色々の位置に對して、 $H$  の値を描けばよろしい。三鉄吊橋の場合の  $H$  の影響線は三角形（第 231 圖、第 232 圖）、二鉄補剛構の場合の  $H$  線（第 233 圖、第 236 圖）は等布荷重を受くる單桁の撓曲線（Deflection curve）、連續補剛構の場合の  $H$  線は（第 238 圖）側徑間に等布荷重を受けた三徑間連續桁の撓曲線に類似である。

任意のセクションの彎曲率は

$$M = y \left( \frac{M'}{y} - H \right) \quad \dots \dots \dots \quad (73)$$

に依つて表さる。 $\frac{M'}{y}$  は極距  $y$  を以て作つた直線桁の彎曲率に對する影響線である。從て  $M$  は  $\frac{M'}{y}$  の影響線と  $H$  の影響線との縦距の差に比例する。以上の二影響線が重なつた場合（第 231 圖 b, 第 233 圖 b, c, 第 238 圖 b）は二線間に挟まつた部分が  $M$  を表すことになる。塔に鉄を有する補剛構の場合には、 $M'$  は單桁の彎曲率に等しく、其の影響線は所要のセクションに於て、次式の高を有する三角形となる。

$$\frac{M'}{y} = \frac{x(l-x)}{ly} \quad \dots \dots \dots \quad (74)$$

拠物線ケーブルに對しては

$$\frac{M'}{y} = \frac{l}{4f} \quad \dots \dots \dots \quad (75)$$

故に  $\frac{M'}{y}$  の三角形は、總てのセクションに對して同一の高  $\frac{l}{4f}$  を有する（第 231 圖 b, 第 233 圖 b）。側徑間のセクションに對する高は  $\frac{l_1}{4f_1}$ （第 233 圖 c）となる。 $H$  線と  $\frac{M'}{y}$  の三角形間に挟まれた面積に  $py$  を乘すれば、補剛構の  $X$  セクションに於ける最大及最小彎曲率となり、 $H$  線の下は正彎曲率、上は負彎曲率を示す（第 231 圖、第 233 圖、第 238 圖）。

補剛構の任意のセクションの剪力は (70) 式で與へらるゝが、之を書き直せば

$$Q = \left( \frac{Q'}{\operatorname{tg} \varphi} - H \right) \operatorname{tg} \varphi \quad \dots \dots \dots \quad (76)$$

となる。任意のセクション  $X$  に於ては  $\operatorname{tg} \varphi$  は一定で

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{4f}{l} \left( 1 - \frac{2x}{l} \right) + \operatorname{tg} \alpha \quad \dots \dots \dots \quad (77)$$

となる。(76) 式の括弧内は  $H$  線と  $\frac{Q'}{\operatorname{tg} \varphi}$  線との縦距の差となる。第 232 圖 (a)、(b) 及第 236 圖 (a) に示す如く、 $\frac{Q'}{\operatorname{tg} \varphi}$  は  $a_s$  及  $b_t$  の平行線を描いて求むることが出来る。其の方向は、兩端に於ける  $a_m$  及  $b_n$  に依つて一定する。

$$a_m = b_n = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \alpha} = \frac{l}{4f \left( 1 - \frac{2x}{l} \right)} \quad \dots \dots \dots \quad (78)$$

頂點  $s$  及  $t$  は、セクション  $X$  を通る鉛直線上に在る。

等布荷重に因つて生ずる最大剪力は、 $H$  及  $Q'$  の影響線内に含まる面積である。此の面積に  $p \operatorname{tg} \varphi$  を乘すれば、所要のセクションに於ける最大剪力  $Q$  が求めらるゝ。

4. 三鉄補剛構（Three-hinged stiffening truss） (1) 解析。補剛構の中央に鉄を挿入すれば、其の點に對する彎曲率は零となる。此の條件より、 $H$  の値が直接求めらるゝから三鉄補剛構は、静定となる。單桁の場合に徑間の中央に於ける彎曲率を  $M'_o$ 、其の點のケーブルの縦距を  $f$  とせば

$$H = \frac{M'_o}{f} \quad \dots \dots \dots \quad (79)$$

全徑間に活荷重  $p$  を満載せるとき、ケーブルは最大應力を受くる。其の場合の水平張力は

$$H = \frac{pl^2}{8f} \quad \dots \dots \dots \quad (80)$$

となる。之を (64) 式と比較すれば

$$s = p \quad \dots \dots \dots \quad (81)$$

を得。即ち満載活荷重の場合には、死荷重の場合と同様にケーブルが總ての荷重を受けて、構には應力を生じない。

任意のセクションの全彎曲率は

$$M = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (82)$$

となる。

端より  $kl$  の距離に單荷重  $P$  を置けば、中心鉄に對する彎曲率は

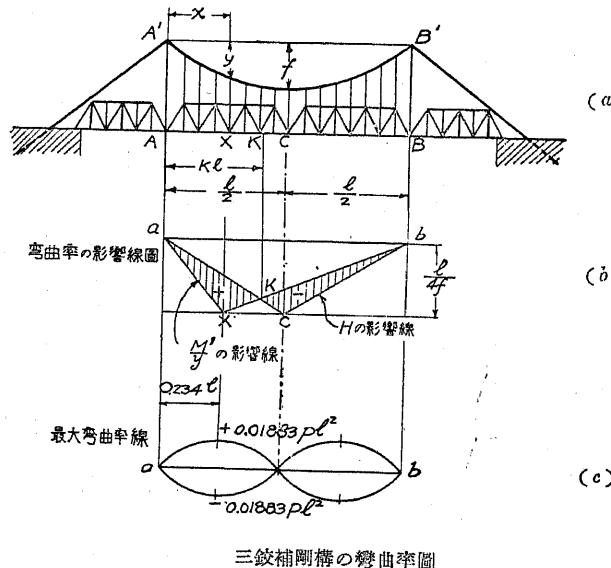
$$M'_o = -\frac{Pkl}{2}$$

なる故

$$H = \frac{Pkl}{2f} \quad \dots \dots \dots \quad (83)$$

$$\max H = \frac{Pl}{4f} \quad \dots \dots \dots \quad (84)$$

となる。



第 231 圖

第231圖(b)及第232圖(a)は  $H$  の影響線を示す。構が其の一端より  $kl$  だけ載荷せるときは

$$k < \frac{1}{2} \quad H = \frac{pl^2}{4f}(k^2) \quad \dots \dots \dots \quad (85)$$

$$k > \frac{1}{2} \quad H = \frac{pl^2}{8f}(4k-2k^2-1) \quad \dots \dots \dots \quad (86)$$

$k = 1$  の場合には(80)式となる。是等の値は、第231圖(b)及第232圖(a)より直接見出すことを得。

半径間載荷せるときは

$$H = \frac{pl^2}{16f} \quad \dots \dots \dots \quad (87)$$

(64)式より

$$s = \frac{1}{2} p \quad \dots \dots \dots \quad (88)$$

徑間の半分は  $s = \frac{1}{2} p$  の上向きの荷重、他の半分は同一の下向きの荷重  $p-s = \frac{1}{2} p$  を受けるから、載荷の半徑間には正、無載荷の半徑間には負の彎曲率

$$M = \frac{1}{4} p x \left( \frac{l}{2} - x \right) \quad \dots \dots \dots \quad (89)$$

を生じ、其の最大彎曲率は四分の一點 ( $x = \frac{1}{4}l$ ,  $x = \frac{3}{4}l$ ) に起り、其の値は

$$M = \pm \frac{1}{64} p l^2 = \pm 0.01562 p l^2 \quad \dots \dots \dots \quad (90)$$

となる。

(2) 補剛構に於ける彎曲率。第231圖(b)に示す陰線を施せる面積は、セクション  $X$  に於ける彎曲率の影響線圖である。 $x = \frac{l}{2}$  に對しては  $H$  及  $\frac{M'}{y}$  の影響線(三角形)は一致するから彎曲率は零となる。陰線の面積の各々に  $py$  を乘すれば  $X$  に於ける彎曲率の最大値を得。

彎曲率を計算上より求むるには、荷重が  $kl$  の部分に載荷せる場合を考へ、(68), (85)及(7)式に依り

$$x < kl \quad M = \frac{1}{2} p kl (2-3k)x - \frac{1}{2} p x^2 (1-2k^2) \quad \dots \dots \dots \quad (91)$$

$$\frac{dM}{dk} = 0 \text{ と置いて } \max M \text{ に對しては}$$

$$k = \frac{l}{3l-2x} \quad \dots \dots \dots \quad (92)$$

を得。之は  $H$  及  $\frac{M'}{y}$  の二つの影響線が交る零點、即ち限界點(Critical point)  $K$  に至る距離  $kl$  を定むる公式である(第231圖b)。 $k$  の値を(91)式に入れて

$$\max M = \frac{px(l-x)(l-2x)}{2(3l-2x)} \quad \dots \dots \dots \quad (93)$$

を得。

$$\frac{dM}{dx} = 0 \text{ より } M \text{ の絶対最大値は}$$

$$x = 0.234l, k = 0.395 \quad \dots \dots \dots \quad (94)$$

の點に起り、その値は

$$\max M = +0.01883 p l^2 = +\frac{1}{53} p l^2 \quad \dots \dots \dots \quad (95)$$

なるを知る。徑間の殘部分( $0.605l$ )に載荷せるときは最大負彎曲率を得。

$$\text{abs. min } M = -0.01883 p l^2 \quad (96)$$

(3) 補剛構に於ける剪力。 $H$  に対する影響線は第 232 圖に示すが如く、徑間の中央で  $\frac{l}{4f}$  の高を有する三角形である。此の上に單桁の剪力に  $1:\tan\varphi$  を乗じたるもの、影響線を描かば、所要のセクション ( $x < \frac{l}{4}$ ) に於ける剪力  $Q$  の圖表を得 (第 232 圖 a)。之に依れば限界點は  $x$  及  $kl$  の二點に存する。所要のセクションに於ける最大正剪力は、是等二點間の左徑間の部分が載荷せるとときに起る。限界點  $K'$  の位置は

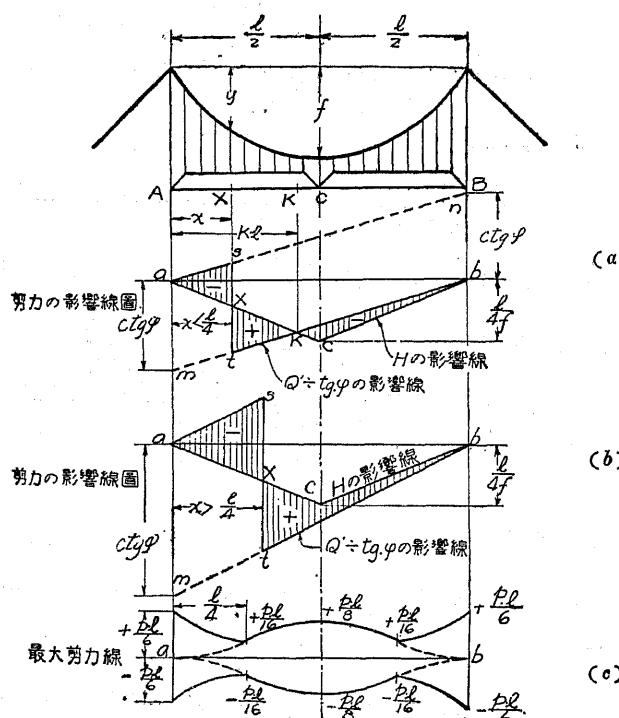
$$k' = \frac{1}{3 - 4 \frac{x}{l}} \quad (97)$$

より求めらる。

荷重が  $x$  及  $kl$  間に在るときは、 $x$  に於ける最大正剪力は

$$\max Q = \frac{p l}{2} \cdot \frac{\left(1 - 3 \frac{x}{l} + 4 \frac{x^2}{l^2}\right)^2}{3 - 4 \frac{x}{l}} \quad (98)$$

となる。



第 232 圖

$$x = 0, \quad k = \frac{1}{3}$$

$$\text{abs. max } Q = \frac{p l}{6} \quad (99)$$

$$x = \frac{1}{4}l, \quad k = \frac{1}{2}$$

$$\max Q = \frac{p l}{16} \quad (100)$$

$x > \frac{1}{4}l$  なるときの影響線圖は第 232 圖 (b) の如くなつて、限界點は  $X$  に只一つあるのみである。

$X$  點より右側に全部載荷せば

$$\max Q = \frac{p x^2}{2l} \left(3 - 4 \frac{x}{l}\right) \quad (101)$$

となり、其の値は  $x = \frac{1}{2}l$  卽ち中央で最大となり次の値を有す。

$$\max Q = \frac{p l}{8} \quad (102)$$

第 232 圖 (c) は最大正及負剪力の變化を示す。

ケーブルの兩端が同一高がないときは、(97) 乃至 (102) 式の解析に於て  $\tan\varphi$  の代りに、 $\tan\varphi - \tan\alpha$  と置き換ふればよろしい。

##### 5. 二鉸補剛構 (Two-hinged stiffening truss)

(1) 水平張力  $H$  の値。

$$H = - \frac{\int \frac{M'm}{EJ} dx}{\int \frac{m^2}{EJ} dx + \int \frac{u^2}{EF} ds} \quad (103)$$

式中  $M'$  は  $H = 0$  の場合任意の荷重に依つて補剛構に生ずる彎曲率

$m$  は  $H = 1$  にして無載荷の場合補剛構に生ずる彎曲率

$u$  は  $H = 1$  にして無載荷の場合ケーブル、塔及吊材に生ずる直應力

$J$  は補剛構の慣性率

$F$  はケーブル、塔及吊材の斷面積

とする。

無載荷の場合に二鉸補剛構に生ずる彎曲率は、(68) 式に依り

$$M = -Hy \quad (104)$$

となるから、 $H = 1$  なるときは

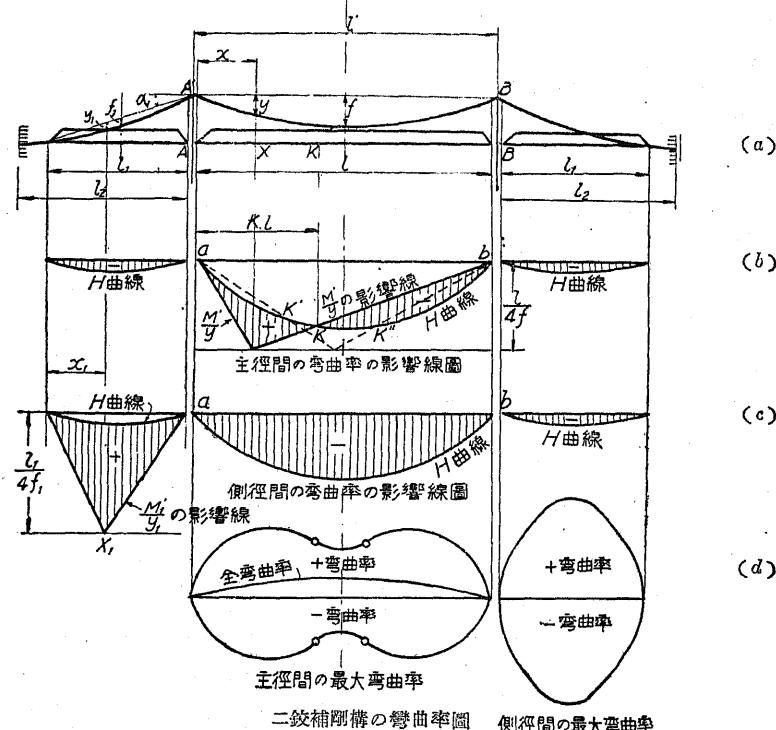
$$m = -y \quad (105)$$

$H = 1$  の時ケーブルの任意のセクションの應力は、(3) 式に依り

$$u = \frac{ds}{dx} \quad \dots \dots \dots \quad (106)$$

となる。(105) 及 (106) 式を (103) 式に代入して次式を得 (2F 及 2S 式に對して)。

$$H = \frac{\int \frac{M' y}{EJ} dx}{\int \frac{y^2 dx}{EJ} + \int \frac{ds^3}{EF dx^2}} \quad \dots \dots \dots \quad (107)$$



第 233 圖

第 233 圖に於て  $l$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $f$ ,  $\alpha$ ,  $J$  及  $F$  は主徑間に對するもの、 $l_1$ ,  $x_1$ ,  $y_1$ ,  $f_1$ ,  $\alpha_1$ ,  $J_1$  及  $F_1$  は側徑間に對するものとし、尚

$l'$  はケーブルの支間 (塔の中心間距離にして構支間の  $l$  より幾分大きい)

$l_2$  は塔より鎮碇までの距離 (構の側支間  $l_1$  より大きい)

$$n = \frac{f}{l}, \quad n_1 = \frac{f_1}{l_1}, \quad i = \frac{J}{J_1}, \quad r = \frac{l_1}{l} \quad \text{及} \quad v = \frac{f_1}{f} \quad \text{とせば}$$

$$H = \frac{\frac{3}{f^2 l} \left[ \int_0^l M' y dx + i \int_0^{l_1} M'_1 y_1 dx_1 \right]}{\frac{8}{5} (1+2irv^2) + \frac{3J}{Ff^2} \frac{E}{E_c} \frac{l'}{l} (1+8n^2) + \frac{6JE}{F_1 f^2 E_c l} l_2 \sec^3 \alpha_1 (1+8n_1^2)} \quad \dots \quad (108)$$

ケーブルが鐵索 (Wire rope) で作製されなければ  $E_c = E$  とす。(108) 式の分母は、2S 式の總ての吊橋に用ひらるゝから、之を  $N$  で表はし一つの橋に就ては一定である。若しケーブルの斷面が一定でなく、其の應力に比例して變化するときは (アイバーチエーンに於けるが如く)、(108) 式の  $8n^2$  を  $\frac{16}{3}n^2$  に、 $8n_1^2$  を  $\frac{16}{3}n_1^2$  に、 $\sec^3 \alpha_1$  を  $\sec^2 \alpha_1$  に代へ、 $F$  及  $F_1$  の代りに  $F_0$  (頂點に於けるケーブル斷面) を用ふる。

側徑間を背控に獨立して造るときは (第 237 圖 2F 式)、 $y$ ,  $f$ ,  $n$  又は  $v$  を含む項は無くなるから、(108) 式は

$$H = \frac{\frac{3}{f^2 l} \int_0^l M' y dx}{\frac{8}{5} + \frac{E}{E_c} \frac{3Jl'}{Ff^2 l} (1+8n^2) + \frac{6J}{F_1 f^2} \frac{E}{E_c} \frac{l_2 \sec^3 \alpha_1}{l}} \quad \dots \dots \dots \quad (109)$$

となる。ケーブルの斷面が一定でなく、其の應力と共に變化するときは (109) 式中  $8n^2$  を  $\frac{16}{3}n^2$  に、 $\sec^3 \alpha_1$  を  $\sec^2 \alpha_1$  に代へ、 $F$  及  $F_1$  の代りに  $F_0$  を插入する。

(2) 載荷の特別の場合に對する  $H$  の値。以上の式に於ける  $M'$  の値は、載荷方法に依つて異なるから、 $M'$  を  $x$  の函數とし  $y$  に (7) 式の値を用ひ、徑間の端より  $kl$  の距離に單荷重  $P$  を載せて積分すれば

$$\int M' y dx = \frac{1}{3} P f l^2 k (1 - 2k^2 + k^3) \quad \dots \dots \dots \quad (110)$$

を得。(108) 式に依り單荷重が、主徑間に在る場合は

$$H = \frac{1}{Nn} \cdot B(k) \cdot P \quad \dots \dots \dots \quad (111)$$

$$B(k) = k (1 - 2k^2 + k^3) \quad \dots \dots \dots \quad (112)$$

となり、 $B(k)$  の値は第 1 表又は第 234 圖より見出さる。

$P$  が徑間の中央に在るときは  $H$  最大となる。其のときは  $k = \frac{1}{2}$  なる故

$$\max H = \frac{5}{16} \frac{1}{Nn} P \quad \dots \dots \dots \quad (113)$$

側徑間に於て、 $P$  が其の何れかの端より  $k_1 l_1$  の距離に在るときは

$$H = \frac{1}{Nn} i r^2 v \cdot B(k_1) \cdot P \quad \dots \dots \dots \quad (114)$$

$$B(k_1) = k_1 (1 - 2k_1^2 + k_1^3) \quad \dots \dots \dots \quad (115)$$

$P$  が側徑間の中央に在るときは  $H$  は最大となる。其の際には  $k_1 = \frac{1}{2}$  なる故

$$\max H = \frac{5}{16} \frac{1}{Nn} i r^2 v P \quad \dots \dots \dots \quad (116)$$

(111) 及 (114) 式を  $k$  及  $k_1$  の各種の値に對して作圖せば、 $H$  の影響線を得(第233圖、第236圖)。此の曲線の最大縦距は、(113) 及 (116) 式に依つて與へらる。

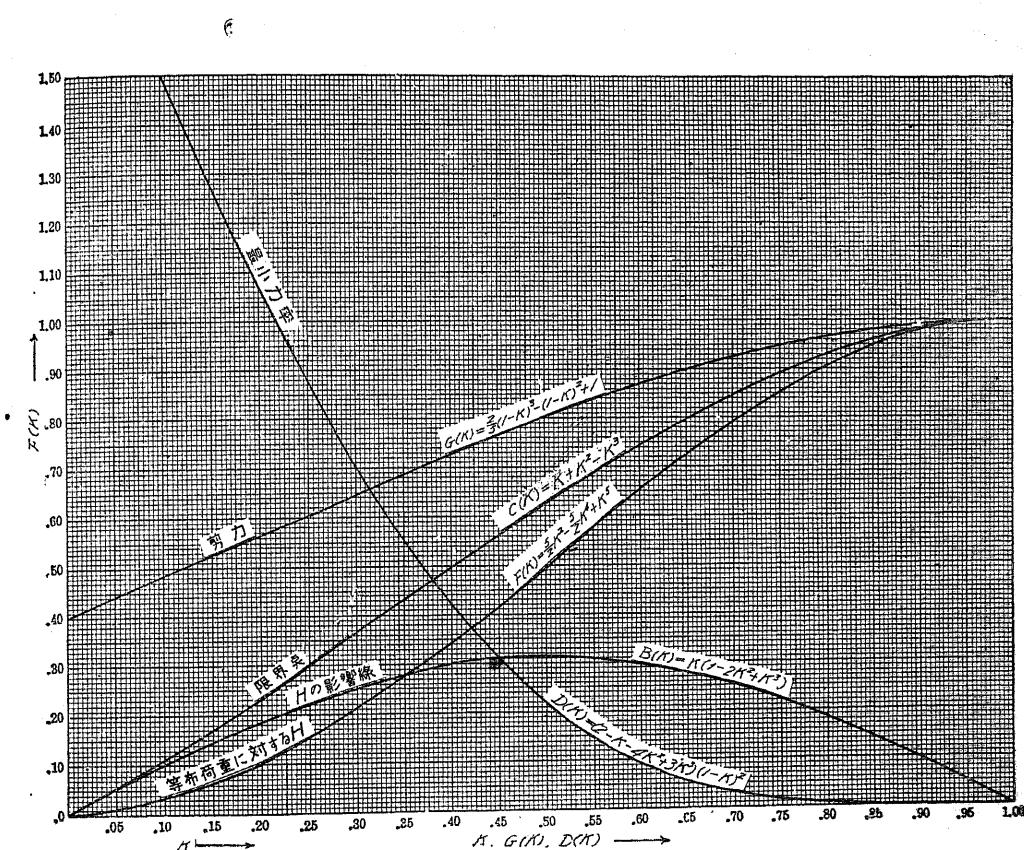
単位長に付  $p$  ( $kg$ ) の等布荷重が、主徑間の何れかの端より  $kl$  だけ擴がれるときは

$$H = \frac{1}{5Nn} \cdot F(k) \cdot pl \quad \dots \dots \dots \quad (117)$$

$$F(k) = \frac{5}{2}k^2 - \frac{5}{2}k^4 + k^5 \quad \dots \dots \dots \quad (118)$$

第 1 表

	$H$ の影響線	限界點	最小力率	等布荷重に對する $H$	剪力	
$k$	$B(k)$	$C(k)$	$D(k)$	$F(k)$	$G(k)$	$k$
	$k(1-2k^2+k^3)$	$k+k^2-k^3$	$(2-k-4k^2+3k^3)(1-k)^2$	$\frac{5}{2}k^2 - \frac{5}{2}k^4 + k^5$	$\frac{2}{5}(1-k)^3 - (1-k)^2 + 1$	
0	0	0	2.000 0	0	0.400 0	0
.05	.049 8	.052 4	1.751 1	.006 2	.440 4	.05
.10	.098 1	.109 0	1.509 0	.024 8	.481 6	.10
.15	.143 8	.169 1	1.279 0	.055 0	.523 2	.15
.20	.185 6	.232 0	1.065 0	.096 3	.564 8	.20
.25	.222 7	.296 9	.870 4	.147 4	.606 2	.25
.30	.254 1	.363 0	.696 2	.207 2	.647 2	.30
.35	.279 3	.429 6	.544 5	.274 0	.687 4	.35
.40	.297 6	.496 0	.414 7	.346 2	.726 4	.40
.45	.308 8	.561 4	.306 5	.422 3	.764 0	.45
.50	.312 5	.625 0	.218 8	.500 0	.800 0	.50
.55	.308 8	.686 1	.149 7	.577 8	.834 0	.55
.60	.297 6	.744 0	.097 3	.653 8	.865 6	.60
.65	.279 3	.797 9	.059 3	.726 0	.894 6	.65
.70	.254 1	.847 0	.033 2	.792 8	.920 8	.70
.75	.222 7	.890 6	.016 6	.852 6	.943 8	.75
.80	.185 6	.923 0	.007 0	.903 7	.963 2	.80
.85	.143 8	.958 4	.002 3	.945 0	.978 8	.85
.90	.098 1	.981 0	.000 5	.975 2	.990 4	.90
.95	.049 8	.995 1	.000 3	.993 8	.997 6	.95
1.00	0	1.000 0	0	1.000 0	1.000 0	1.00



第 234 圖

を得。 $F(k)$  は第1表及第234圖より求むことが出来る。

$k = 1$  なるときは  $F(k) = 1$  となる。

側徑間に於ては

$$H = \frac{1}{5Nn} i r^3 v \cdot F(k_1) \cdot p_l \quad \dots \dots \dots \quad (119)$$

ケーブル張力の水平分力は、全徑間に載荷せるとき即ち  $k = 1$  及  $k_1 = 1$  の時最大であるから、(117) 及 (119) 式に依り全水平力は

$$H = \frac{1}{5Nn} (1 + 2ir^3v) p_l \quad \dots \dots \dots \quad (120)$$

となる。活荷重が主徑間の中央部  $JK$  ( $x = jl$  より  $x = kl$  まで) に載荷せるときは、

(117) 式は

$$H = \frac{1}{5Nn} [F(k) - F(j)] p_l \quad \dots \dots \dots \quad (121)$$

となる。

$$F(j) = \frac{5}{2}j^2 - \frac{5}{2}j^4 + j^5 \quad \dots \dots \dots \quad (122)$$

荷重が両側徑間及  $JK$  の部分を除いた主徑間に載荷せるとときは

$$H = \frac{p l}{5 N n} [1 - F(k) + F(j)] + \frac{2 p_1 l}{5 N n} i r^3 v \quad \dots \dots \dots \quad (123)$$

となる。

(3) 補剛構に於ける彎曲率。任意のセクション（主徑間又は側徑間）の彎曲率は（68）式に依り

$$\begin{aligned} M &= M' - H y \\ M_1 &= M'_1 - H y_1 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (124)$$

或る徑間が無載荷の場合には  $M' = 0$  或は  $M'_1 = 0$  なるが故

$$\begin{aligned} M &= -H y \\ M_1 &= -H y_1 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (125)$$

となる。式中  $H$  は他の徑間の載荷又は溫度に依つて生ずるケーブル張力とす。

三徑間に満載せるときは（120）式の  $H$  の値を用ひ、主徑間の任意のセクションに對する全彎曲率は

$$M = \frac{1}{2} p x (l-x) \left[ 1 - \frac{8}{5N} (1 + 2 i r^3 v) \right] \quad \dots \dots \dots \quad (126)$$

となり、側徑間の任意のセクションに對する全彎曲率は

$$M_1 = \frac{1}{2} p x_1 (l_1 - x_1) \left[ 1 - \frac{8}{5N} (1 + 2 i r^3 v) - \frac{v}{r^2} \right] \quad \dots \dots \dots \quad (127)$$

第233圖 (b) 及 (c) に於て、(111) 式及 (114) 式に依つて與へらるゝ縦距で  $H$  曲線を描き、主徑間に於ては  $\frac{l}{4f}$ 、側徑間に於ては  $\frac{l}{4f_1}$  の一定高を有する  $\frac{M'}{y}$  三角形を描かば影響線圖が得らるゝ。陰線面積に  $p y$  を乘すれば所要の彎曲率となる。 $H$  曲線より下の面積は正即ち最大彎曲率、上の面積は負即ち最小彎曲率を表はす。

第233圖 (b) に示す限界點  $K$  に至る距離  $kl$  は、次の關係より求めらる。

$$C(k) = k + k^2 - k^3 = N n \frac{x}{y} \quad \dots \dots \dots \quad (128)$$

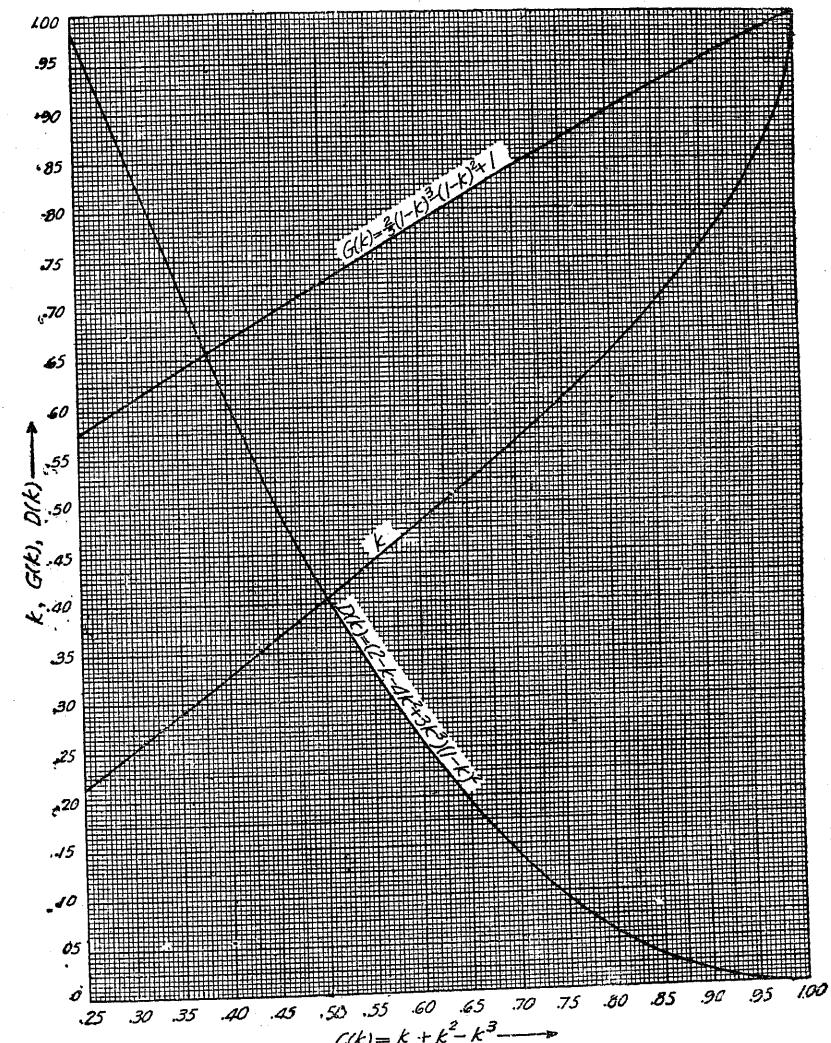
$C(k)$  の値は第1表、第234圖及第235圖より求めらる。

主徑間の任意のセクションの最大負彎曲率は、主徑間に於ける  $l - kl$  の長及兩側徑間を全部載荷せるとときに生ずる（第233圖 b）。

$$\min M = -\frac{2px(l-x)}{5N} [D(k) + 4ir^3v] \quad \dots \dots \dots \quad (129)$$

$$D(k) = (2-k-4k^2+3k^3)(1-k)^2 \quad \dots \dots \dots \quad (130)$$

$D(k)$  の値は第1表、第234圖及第235圖より求めらる。



第 235 圖

(129) 式を (126) 式より控除せば

$$\max M = \frac{1}{2} p x (l-x) \left[ 1 - \frac{8}{5N} \left\{ 1 - \frac{1}{2} D(k) \right\} \right] \quad \dots \dots \dots \quad (131)$$

第233圖 (b) に示す如く、此の  $\max M$  に相當する載荷は主徑間の一部分だけで、側徑間は

無載荷である。

一方の側徑間の  $x_1$  のセクションに於ける最大負彎曲率は（他の二徑間に載荷せる場合）

$$\max M_1 = -y_1 \frac{1+i r^3 v}{5 N n} p l \quad (132)$$

一方の側徑間自身に載荷せるととき最大正彎曲率を生ずる。

$$\max M_1 = \frac{r y_1}{8 n_1} \left(1 - \frac{8}{5 N} i r v^2\right) p l \quad (133)$$

補剛構（28式）の任意のセクションに對する最大及最小彎曲率は第233圖（d）に示してある。

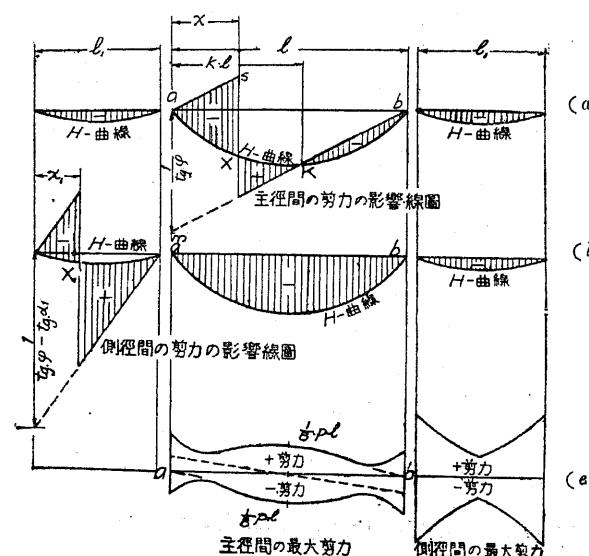
（4）補剛構に於ける剪力。三徑間全部に載荷せるととき、主徑間のセクション  $x$  に於ける全剪力は、（70）、（77）及（120）式に依り

$$Q = \frac{1}{2} p (l-2x) \left[1 - \frac{8}{5 N} (1+2i r^3 v)\right] \quad (134)$$

側徑間に於ける全剪力は

$$Q_1 = \frac{1}{2} p (l_1 - 2x_1) \left[1 - \frac{8}{5 N} \frac{v}{r^2} (1+2i r^3 v)\right] \quad (135)$$

剪力の影響線圖は第236圖（a）に示す通りで、陰線面積に  $p \operatorname{tg} \varphi$  を乘すれば鉛直剪力  $Q$  を得。H-曲線の下にある面積は正或は最大剪力、上にある面積は負或は最小剪力を表す。



第 236 圖

主徑間の  $X$  點から徑間の端まで載荷せば、（70）、（77）及（117）式に依り

$$\max Q = \frac{1}{2} p l \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \left[1 - \frac{8}{N} \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{l}\right) \cdot G\left(\frac{x}{l}\right)\right] \quad (136)$$

$$G\left(\frac{x}{l}\right) = \frac{2}{5} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^3 - \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 + 1 \quad (137)$$

となり、 $G\left(\frac{x}{l}\right)$  は第1表及第234圖より求めらる。

$x = 0$  から  $x = \frac{l}{2} \left(1 - \frac{N}{4}\right)$  までの徑間の端に於けるセクションに對して最大正剪力を生ずるためには、荷重は徑間の端までではなく  $K$  點（第236圖a）まで載荷せねばならない。 $K$  點の横距  $x = kl$  は次式より定めらる。

$$C(k) = k + k^2 - k^3 = \frac{N}{4} \frac{l}{l - 2x} \quad (138)$$

此のセクションに對しては、（136）式にて求めらる正剪力に、次式の値を加算する。

$$Q = \frac{1}{2} p l (1-k)^2 \left[ \frac{8}{N} \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{l}\right) \cdot G(k) - 1 \right] \quad (139)$$

$$\text{式中 } G(k) = \frac{2}{5} (1-k)^3 - (1-k)^2 + 1 \quad (140)$$

之は第1表、第234圖及第235圖より求めらる。

側徑間には限界點がない。第236圖（b）に示せる影響線圖は載荷條件を示してゐる。セクション  $x_1$  に於ける最大剪力は、其のセクションより塔まで載荷せるとときに起り、其の値は

$$\max Q_1 = \frac{1}{2} p l_1 \left(1 - \frac{x_1}{l_1}\right)^2 \left[1 - \frac{8}{N} i r v^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{x_1}{l_1}\right) \cdot G\left(\frac{x_1}{l_1}\right)\right] \quad (141)$$

となる。主徑間及側徑間に於ける最大負剪力は

$$\min Q = (134) \text{式} - \max Q \quad (142)$$

$$\min Q_1 = (135) \text{式} - \max Q_1 \quad (143)$$

となる。

（5）溫度應力。鎮碇間のケーブルの長は（16）及（20）式に依り

$$L = l \left(1 + \frac{8}{3} n^2\right) + 2 l_1 \left(\sec \alpha_1 + \frac{8}{3} \frac{n_1^2}{\sec^3 \alpha_1}\right) \quad (144)$$

溫度上昇の場合鎮碇間の長の増加は

$$\Delta L = \omega t L \quad (145)$$

となる。此の値を（103）乃至（108）式の分子に代入して

$$H_t = -\frac{3EJ\omega tL}{f^2 Nl} \quad (146)$$

を得。

構の任意のセクションの彎曲率は

$$M_t = -H_t y \quad (147)$$

鉛直剪力は

$$Q_t = -H_t (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \alpha) \quad (148)$$

となる。

(6) 補剛構の撓度。等布荷重が主徑間に載荷せるとき

$$\eta = \frac{5}{384} \left(1 - \frac{8}{5N}\right) \frac{pl^4}{EJ} \quad (149)$$

一般に荷重はセクション  $x$  に於て

$$\eta' = \frac{l-x}{l} \int_0^x \frac{M'}{EJ} x dx + \frac{x}{l} \int_x^l \frac{M'}{EJ} (l-x) dx \quad (150)$$

の撓度を生ずる。然るに (64) 式に依る吊材の力は、セクション  $x$  に於て次式に示すが如き上向きの撓度を生ずる。

$$\eta'' = -\frac{1}{3EJ} x(l^3 - 2lx^2 + x^3) \frac{f}{l^2} H \quad (151)$$

或は

$$\eta'' = \frac{fl^2}{3EJ} \cdot B \left(\frac{x}{l}\right) \cdot H \quad (152)$$

故に

$$\eta = \eta' - \eta'' \quad (153)$$

(149) 式は直接 (153) 式より導くことが出来る。

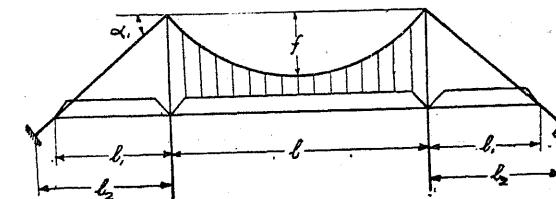
等布荷重  $p$  が半徑間に載荷せるときは、四分一點の撓度は

$$\eta = \frac{1}{2} \frac{5}{384} \frac{p}{EJ} \left(\frac{l}{2}\right)^4 \quad (154)$$

となる。溫度變化又は鎮碇の屈讓に因つて生ずる撓度は、(152) 式の  $H$  の代りに  $H_t$  又は屈讓に因つて生ずる水平張力を入れ換へて求むることが出来る。

(7) 直線背控 (Straight Backstay)。側徑間に於けるケーブルが補剛構に無関係なるときは (第 237 圖)、背控は直線となり  $f_1 = 0$  となる。

従つて側徑間は全く單桁として作用し、他徑間の荷重に依つて影響を蒙ることがない。尚主徑間及びケーブルの應力も、側徑間の荷重には無関係となる。



第 237 圖

(108) 式の  $H$  の分母は (109) 式の分母となり

$$N = \frac{8}{5} + \frac{3J}{Ff^2} \frac{E}{E_c} \frac{l'}{l} (1+8n^2) + \frac{6J}{F_1 f^2} \frac{E}{E_c} \frac{l_2}{l} \sec^3 \alpha_1 \quad (155)$$

を得。

全水平推力は

$$H = \frac{pl}{5Nn} \quad (156)$$

全彎曲率は

$$M = \frac{1}{2} p x (l-x) \left(1 - \frac{8}{5N}\right) \quad (157)$$

$$_{min} M = -\frac{2px(l-x)}{5N} \cdot D(k) \quad (158)$$

$$_{max} M = (157) \text{ 式} - (158) \text{ 式} \quad (159)$$

$$_{max} M_1 = \frac{1}{2} p_1 x_1 (l_1 - x_1) \quad (160)$$

全剪力は

$$Q = \frac{1}{2} p (l - 2x) \left(1 - \frac{8}{5N}\right) \quad (161)$$

側徑間に於ける全剪力

$$Q_1 = \frac{1}{2} p_1 (l_1 - 2x_1) \quad (162)$$

$$_{max} Q_1 = \frac{1}{2} p_1 l_1 \left(1 - \frac{x_1}{l_1}\right)^2 \quad (163)$$

ケーブルの全長

$$L = l' \left(1 + \frac{8}{3} n^2\right) + 2l_2 \sec \alpha_1 \quad (164)$$

6. 無铰補剛構 (Hingeless stiffening truss) (1) 総論。無铰補剛構は塔の所で連續せる構造となれる故、塔上で構に彎曲率を生ずる。補剛構の任意のセクションに於ける彎曲率及び剪力は、下向きに働く荷重による値 ( $M'$  及  $Q'$ ) と、上向きに働く吊材の力に依つて ( $M_s$  及  $Q_s$ ) とに分離される。したがつて各セクションに於ける下向きの荷重による彎曲率を  $M_1$  及  $M_2$ 、任意のセクション  $x$  に於ける下向きの荷重による彎曲率を  $M_1$  及  $M_2$  とする。

補剛構に於ける下向きの荷重による彎曲率を  $M_1$  及  $M_2$ 、任意のセクション  $x$  に於ける下向きの荷重による彎曲率を  $M_1$  及  $M_2$  とする。

に於ける單桁としての彎曲率を  $M_o$  とせば、連續構に働く下向きの荷重に因つて生ずる合成彎曲率は

$$\text{主徑間に於て } M' = M_o + \frac{l-x}{l} M_1 + \frac{x}{l} M_2 \quad (165)$$

$$\text{側徑間に於て } M' = M_o + \frac{x_1}{l_1} M_{1,2} \quad (166)$$

となる。

上向きに働く吊材の力は各徑間に於て均一で、主徑間の単位長には  $H \frac{8f}{l^2}$ 、側徑間の単位長には  $H \frac{8f_1}{l_1^2}$  となる。故に三彎曲率の定理に依り、塔上の彎曲率は

$$-Hm_1 = -Hm_2 = -H(ef) \quad (167)$$

式中  $f$  の係数は一定で、次式より求められる。

$$e = \frac{2+2irv}{3+2ir} \quad (168)$$

$$\text{但し } i = \frac{J}{J_1}, \quad r = \frac{l_1}{l}, \quad v = \frac{f_1}{f} \quad \text{とす。}$$

吊材の力に依つて生ずる單桁としての彎曲率は  $Hy$  で表さる。之に (167) 式を加算して吊材の力の合成彎曲率は

$$\text{主徑間に於て } M_s = H(y-ef) \quad (169)$$

$$\text{側徑間に於て } M_s = H\left(y_1 - \frac{x_1}{l_1} ef\right) \quad (170)$$

を得。 $x_1$  は徑間の自由端より測り、 $y_1$  は側ケーブルの  $D'A'$  よりの縦距とす(第238圖 a)。

(165)、(166)、(169) 及 (170) 式を (65) 式に挿入し(第239圖)

$$\text{主徑間に於ける彎曲率 } M = M_o + \frac{l-x}{l} M_1 + \frac{x}{l} M_2 - H(y-ef) \quad (171)$$

$$\text{側徑間に於ける彎曲率 } M = M_o + \frac{x_1}{l_1} M_{1,2} - H\left(y_1 - \frac{x_1}{l_1} ef\right) \quad (172)$$

を得。若し或る徑間が無載荷ならば、其の徑間の  $M_o$  は零となる。

下向きの荷重に依つて生ずる剪力は

$$\text{主徑間に於て } Q' = Q_o + \frac{M_2 - M_1}{l} \quad (173)$$

$$\text{側徑間に於て } Q' = Q_o + \frac{M_1}{l_1} \quad \text{又は } Q' = Q_o - \frac{M_2}{l_1} \quad (174)$$

式中  $Q_o$  は單桁の場合の剪力を表す。

上向きに働く吊材の力に依つて生ずる剪力は

$$\text{主徑間に於て } Q_s = H(\tg \varphi - \tg \alpha) \quad (175)$$

$$\text{側徑間に於て } Q_s = H\left(\tg \varphi_1 - \tg \alpha_1 - \frac{ef}{l_1}\right) \quad (176)$$

となる。(173)、(174)、(175) 及 (176) 式を (66) 式に挿入し合成剪力は

$$\text{主徑間に於て } Q = Q_o + \frac{M_2 - M_1}{l} - H(\tg \varphi - \tg \alpha) \quad (177)$$

$$\text{側徑間に於て } Q = Q_o + \frac{M_{1,2}}{l_1} - H\left(\tg \varphi_1 - \tg \alpha_1 - \frac{ef}{l_1}\right) \quad (178)$$

を得。或る徑間が無載荷のときは其の徑間の  $Q_o$  は零となり、二つの塔が同高なるときは主徑間に於ては  $\alpha = 0$  となる。

(2) 塔上の彎曲率。(165) 乃至 (178) 式の端彎曲率  $M_1$  及  $M_2$  は、三彎曲率の定理に依つて決定することが出来る。主桁の左端より  $k'$  の距離に單荷重  $P$  があるときは

$$M_1 = -Pl \cdot k(1-k) \frac{(3+2ir)(1-k)+2ir}{(3+2ir)(1+2ir)} \quad (179)$$

$$M_2 = -Pl \cdot k(1-k) \frac{(3+2ir)k+2ir}{(3+2ir)(1+2ir)} \quad (180)$$

となるから、

$$M_1 + M_2 = -\frac{3Pl \cdot k(1-k)}{3+2ir} \quad (181)$$

$$M_1 - M_2 = -Pl \cdot k(1-k) \frac{1-2k}{1+2ir} \quad (182)$$

を得。

$P$  が左側徑間の左端より  $k_1'$  の距離にあるときは

$$M_1 = -Pl \frac{2ir^2(1+ir)(k-k^3)}{(3+2ir)(1+2ir)} \quad (183)$$

$$M_2 = +Pl \frac{ir^2(k-k^3)}{(3+2ir)(1+2ir)} \quad (184)$$

主徑間に等布荷重を載荷せるときは

$$M_1 = M_2 = -\frac{pl^2}{4(3+2ir)} \quad (185)$$

左側徑間に等布荷重を載荷せるときは

$$M_1 = -\frac{p_1 l^2}{4} \frac{2ir^3(1+ir)}{(3+2ir)(1+2ir)} \quad (186)$$

$$M_2 = +\frac{p_1 l^2}{4} \frac{ir^3}{(3+2ir)(1+2ir)} \quad (187)$$

等布荷重が三径間に載荷せるときは

$$M_1 = M_2 = -\frac{pl^2}{4} \frac{1+ir^3}{3+2ir} \quad (188)$$

(3) 水平張力  $H$ 。水平張力に対する一般公式 (103) は、連續補剛構の場合にも適用される。吊材の力に依つて生ずる彎曲率に対する (104) 式は (169) 及 (170) 式に代り、(105) 式は

$$\text{主徑間に於て } m = -y + ef \quad (189)$$

$$\text{側徑間に於て } m = -y_1 + \frac{x_1 - ef}{l_1} \quad (190)$$

となる。

又

$$\int \frac{m^2}{EJ} dx = \frac{f^2 l}{3EJ} \left( \frac{8}{5} - 4e + 3e^2 \right) + \frac{2f^2 l_1}{3EJ_1} \left( \frac{8}{5} v^2 - 2ev + e^2 \right) \quad (191)$$

となるから、

$$H = \frac{\frac{3}{f^2 l} \left[ \int_0^l M'(y - ef) dx + i \int_0^{l_1} M'_1 \left( y_1 - \frac{x_1 - ef}{l_1} \right) dx_1 \right]}{\left[ \frac{8}{5} - 4e + 3e^2 + 2ir \left( \frac{8}{5} v^2 + e^2 - 2ev \right) + \frac{E}{E_e} \frac{3Jl'}{Ff^2 l} (1 + 8n^2) + \frac{E}{E_e} \frac{6J}{F_1 f^2} \frac{l_2}{l} \sec^3 \alpha_1 (1 + 8n_1^2) \right]} \quad (192)$$

上式の分母は一つの吊橋に就ては一定であるから、之を  $N$  で表す。若し塔の所に鉄を挿入せば連続係数  $e$  は零となるから、(192) 式は (108) 式に變ることになる。

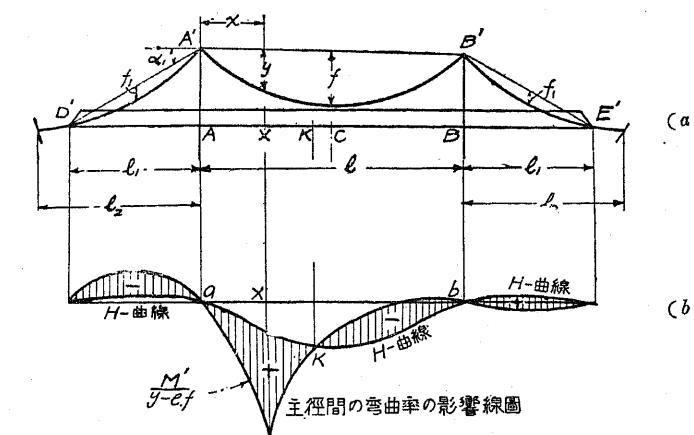
(4) 載荷の特別の場合に対する  $H$  の値。(192) 式の分子は載荷方法に従つて變化する。今單荷重  $P$  が、主徑間の何れかの端より  $kl$  の距離にあれば

$$H = \frac{1}{Nn} [B(k) - \frac{3}{2} e(k - k^2)] P \quad (193)$$

となる。同様に  $P_1$  が何れかの側徑間に於て其の自由端より  $k_1 l_1$  の距離にあれば

$$H = \frac{i r^2}{Nn} [v \cdot B(k_1) - \frac{e}{2} (k_1 - k_1^2)] P_1 \quad (194)$$

(193) 及 (194) 式より第 238 圖 (b) の如き  $H$  の影響線を描くことが出来る。



第 238 圖

主徑間が全部載荷せるときは

$$H = \frac{1}{Nn} \left( \frac{1}{5} - \frac{e}{4} \right) pl \quad (195)$$

兩側徑間が全部載荷せるときは

$$H = \frac{2ir^3}{Nn} \left( \frac{v}{5} - \frac{e}{8} \right) p_1 l \quad (196)$$

主徑間が何れかの塔より  $kl$  の距離だけ載荷せるときは

$$H = \frac{1}{5Nn} [F(k) - \frac{5e}{4} (3 - 2k) k^2] pl \quad (197)$$

側徑間の一つが其の自由端より  $k_1 l_1$  の距離だけ載荷せるときは

$$H = \frac{1}{5Nn} ir^3 [v \cdot F(k_1) - \frac{5}{8} e (2 - k_1^2) k_1^2] p_1 l \quad (198)$$

(5) 補剛構に於ける彎曲率。三徑間に全部載荷せるときは、主徑間の任意のセクションに於ける全彎曲率は

$$M = \left( \frac{1}{2} p - H \frac{4f}{l^2} \right) x (l - x) - e \left( \frac{1}{8} p l^2 - H f \right) \quad (199)$$

側徑間に於て、其の自由端より  $x_1$  の距離に在るセクションに於ける全彎曲率は

$$M = \left( \frac{1}{2} p - H \frac{4f_1}{l_1^2} \right) x_1 (l_1 - x_1) - e \left( \frac{1}{8} p l_1^2 - H f \right) \frac{x_1}{l_1} \quad (200)$$

上式中の  $H$  は (195) 及 (196) 式を組合せて求めらる。

他の載荷方法に依る彎曲率は一般式 (171) 及 (172) 式中、 $H$  の値には (193) 乃至 (198)

式、 $M_1$  及  $M_2$  の値には (179) 乃至 (188) 式を代入して算定することを得。

主徑間に於ける彎曲率に對して影響線を描かんと欲せば、(171) 式を

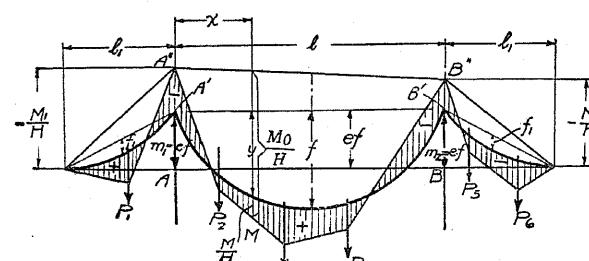
$$M = \left[ \frac{M_o + M_1 \frac{l-x}{l} + M_2 \frac{x}{l}}{y - ef} - H \right] (y - ef) \quad \dots \dots \dots \quad (201)$$

の如く書き換へて、 $H$  影響線の上に  $\frac{M'}{y - ef}$  に對する影響線を重ね、其の間に挿まれた部分を  $(y - ef)$  倍すれば彎曲率となる (第 238 圖 b)。

側徑間の彎曲率は、(172) 式を (202) 式の如く書き換へて其の影響線を描けばよろしい。

$$M = \left[ \frac{M_o + \frac{x_1}{l_1} M_{1,2}}{y_1 - \frac{x_1}{l_1} ef} - H \right] \left( y_1 - \frac{x_1}{l_1} ef \right) \quad \dots \dots \dots \quad (202)$$

連續補剛構に對しては影響線を描く方法は便利でないから、(72) 式又は第 230 圖の  $H$  を極距として平衡多角形を描く方が簡単である (第 239 圖)。閉弦  $A'B'$  の下  $ef$  の距離に基線  $AB$  を引けば、此の基線より測つたケーブルの縦距は、 $y - ef$  となり (169) 式の  $M_s$  を表す。與へられた荷重に對する平衡多角形  $A''MB''$  を同一基線上に同一極距  $H$  を以て作圖せば、 $AA''$  は  $-M_1$  を、 $BB''$  は  $-M_2$  を、 $A''B''$  以下に在る多角形の縦距は  $M_s$  を表す。故に (165) 式に依つて基線  $AB$  の下に測つた縦距は、 $M'$  を表すことになる。(65) 式に依りケーブル曲線



第 239 圖

と之に重ねた平衡多角形間に挿まれた部分に  $H$  を乘すれば、任意のセクションに於ける合成彎曲率  $M$  が得らる。單荷重  $P$  に對する平衡多角形は  $A''MB''$  は三角形となる。側徑間に對する作圖も第 239 圖に明かである。

(6) 溫度應力。溫度が  $t^\circ$  上昇せるため生ずる水平張力は

$$H_t = -\frac{3 E J \omega t L}{f^2 N l} \quad \dots \dots \dots \quad (203)$$

となり、 $N$  は (192) 式の分母、 $L$  は (144) 式に依つて與へらる。

補剛構に對する彎曲率は

$$\text{主徑間に於て} \quad M_t = -H_t (y - ef) \quad \dots \dots \dots \quad (204)$$

側徑間に於て

$$M_t = -H_t \left( y_1 - \frac{x_1}{l_1} ef \right) \quad \dots \dots \dots \quad (205)$$

となる。

鉛直剪力は

$$Q_t = -H_t (\tan \varphi - \tan \alpha) \quad \dots \dots \dots \quad (206)$$

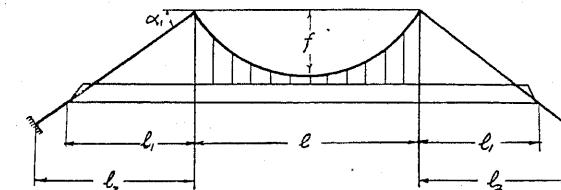
側徑間に於て

$$Q_t = -H_t \left( \tan \varphi_1 - \tan \alpha_1 - \frac{ef}{l_1} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (207)$$

となる。

(7) 直線背控 (第 240 圖)。側徑間の補剛構をケーブルと無關係に造れば背控は直線となり  $f_1 = 0$  となる。從て (165) 乃至 (207) 式中の  $f_1$ ,  $y_1$ ,  $n_1 = \frac{f_1}{l_1}$  又は  $v = \frac{f_1}{f}$  を含む項は全部無くなる。

トラスが連續せるため各徑間は他の徑間に依り影響を受くる。



連 繼 構

第 240 圖

(192) 式の分母は

$$N = \frac{8}{5} - 2e + \frac{E}{E_o} \frac{3J}{Ff^2} \frac{l'}{l} (1 + 8n^2) + \frac{6J}{F_1 f^2} \frac{E}{E_o} \frac{l_2}{l} \sec^3 \alpha_1 \quad \dots \dots \dots \quad (208)$$

となる。上式中

$$e = \frac{2}{3+2ir} \quad \dots \dots \dots \quad (209)$$

を表す。

側徑間に於ける彎曲率は

$$M = M_o + \frac{x_1}{l_1} M_{1,2} + H \frac{x_1}{l_1} ef \quad \dots \dots \dots \quad (210)$$

側徑間に於ける剪力は

$$Q = Q_o \pm \frac{M_{1,2}}{l_1} + H \frac{ef}{l_1} \quad \dots \dots \dots \quad (211)$$

となる。

集中荷重  $P_1$  が、何れかの側径間に在るときは、(194) 式は

$$H = -\frac{1}{2Nn} i r^2 e (k_1 - k_1^3) P_1 \quad \dots \dots \dots \quad (212)$$

となる。等布荷重が兩側徑間に載荷せるときは (196) 式は

$$H = -\frac{i r^2 e}{4Nn} p_1 l \quad \dots \dots \dots \quad (213)$$

となり、等布荷重が何れかの側徑間に於て、其の自由端より  $k_1 l_1$  の距離だけ載荷せるときは、

(198) 式は

$$H = -\frac{i r^2 e}{8Nn} (2 - k_1^2) k_1^2 p_1 l \quad \dots \dots \dots \quad (214)$$

となる。等布荷重が三徑間全部に載荷せるときは、側徑間に於ける全彎曲率の式 (200) は

$$M = \frac{1}{2} p x_1 (l_1 - x_1) - \frac{e x_1}{l_1} \left( \frac{1}{8} p l^2 - H f \right) \quad \dots \dots \dots \quad (215)$$

となる。

(205) 及 (207) 式は

$$M_t = + H_t \frac{x_1 e f}{l_1} \quad \dots \dots \dots \quad (216)$$

$$Q_t = + H_t \frac{e f}{l_1} \quad \dots \dots \dots \quad (217)$$

となる。

### 第三節 設 計 細 目

1. 吊橋に対する經濟的觀察 補剛構の高は所要の剛度に依つて決定するが、高を低くすれば工費も減少する。外觀及び架橋地點の關係等より特に低い構を必要とすることがあつて其の高は千差萬別であるが、普通最大支間の  $\frac{1}{30} \sim \frac{1}{60}$  内に變化する。鐵道橋では  $\frac{1}{45}$  より小さくてはいけない、尙其の場合の撓度は支間の  $\frac{1}{1000}$  を超過しない様にする。道路橋では支間 300m までは其の  $\frac{1}{50} \sim \frac{1}{70}$ 、支間 600m までは其の  $\frac{1}{70} \sim \frac{1}{90}$ 、900m までは其の  $\frac{1}{90} \sim \frac{1}{150}$  とし、支間 900m を超過すれば、死荷重の活荷重に對する比が著しく大きくなつて補剛を必要としないから補剛構を設けない。

連續構となした場合は單構の場合より其の高を低くする。

垂矢は  $\frac{1}{7} \sim \frac{1}{10} l$ 、普通  $\frac{1}{9} l$  となすも、徑間が著しく長くなれば以上の比よりも大きく探る。アメリカの吊橋に對するスタインマン (Steinman) 氏の研究に依れば

$$l = 300 \text{ m} \text{ なるとき } f = \frac{1}{8.2} l$$

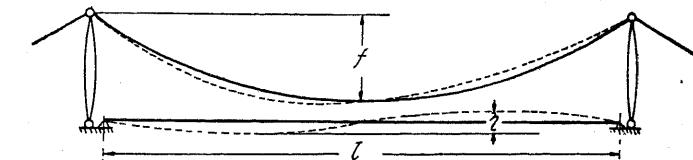
$$l = 600 \text{ m} \quad " \quad f = \frac{1}{7.7} l$$

$$l = 900 \text{ m} \quad " \quad f = \frac{1}{7.3} l$$

を最も經濟的なりとせり。

垂矢が大きくなれば、塔の工費及びチエーン並に吊材の長は増加するが、チエーンの力は減少する。垂矢を小さくすれば吊橋の可撓性が増加する。

今支間の四分一點を採り(第 241 圖)、先づ支間の半分次に他の半分に活荷重(單位長に付  $p$ )を載荷し、チエ



第 241 圖

ーンの伸び及チエーン支承の變位を度外視すれば、四分一點に於ける高的變化は略次の式に依つて求めらるゝ。

$$\eta = \frac{5}{384} \frac{p}{EJ} \left( \frac{l}{2} \right)^4 \quad \dots \dots \dots \quad (218)$$

式中  $l$  は支間、 $E$  は補剛構の彈性恒數、 $J$  は補剛構の惰性率(一定なりと假定す)とす。

$J$  に對して平均値を探れば、構の斷面が變化する場合にも上式は適用さるゝが、 $J$  の小さい値に對しては用ひられない。

今  $h$  を構の高、 $F$  を一つの弦の斷面積、 $\sigma$  を溫度の影響を考へず活荷重のみに依る最大應力をとし、活荷重に依つて生ずる補剛構の彎曲率を

$$M = \frac{1}{60} p l^2 = F h \sigma$$

とせば

$$J = \frac{F h^2}{2} = \frac{p l^2 h}{120 \sigma} \quad \dots \dots \dots \quad (219)$$

となる。従つて (218) 式は

$$\eta = \frac{50}{512} \frac{\sigma}{E} \frac{l^2}{h}$$

或は

$$\frac{\eta}{l} = \frac{1}{10} \frac{\sigma}{E} \frac{l}{h} \quad \dots \dots \dots \quad (220)$$

となる。

補剛構が法外の寸法でないときは

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{1}{4000} \sim \frac{1}{5000}$$

と置くことが出来るから

$$\frac{\eta}{l} = \frac{1}{40000} \frac{l}{h} \sim \frac{1}{50000} \frac{l}{h} \quad \dots \dots \dots \quad (221)$$

となる。

活荷重に因つて生ずる鉛直変化を  $\frac{1}{1000} l$  に制限せんとせば、補剛構の高は少くも  $\frac{1}{40} l \sim \frac{1}{50} l$  となさねばならない。既設の吊橋に就て其の例を求むれば、次の如し。

ブレスロウのカイザー橋

$$h = \frac{1}{35} l$$

紐育のウイリヤムスブルク橋

$$h = \frac{1}{43.5} l$$

ブダペストのエリザベス橋

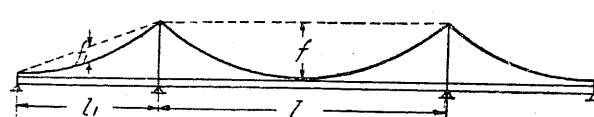
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{中央 } h = \frac{1}{61} l \\ \text{橋脚上 } h = \frac{1}{41} l \end{array} \right.$$

紐育のマンハッタン橋

$$h = \frac{1}{61.2} l$$

ケルンの新ライン橋

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{中央 } h = \frac{1}{57.7} l \\ \text{橋脚上 } h = \frac{1}{33.6} l \end{array} \right.$$



第 242 圖

係を有することになる(第242圖)。

$$g_1 \frac{l_1^2}{f_1} = g_2 \frac{l_2^2}{f_2} = \dots \dots \dots$$

故に

$$f_1 : f_2 : \dots \dots \dots = g_1 l_1^2 : g_2 l_2^2 : \dots \dots \dots \quad (222)$$

2. 吊橋に使用する材料 (1) 一般。補剛構は一般に建築鋼を以て造るが、時にはシリコン又は他の合金鋼を用ふることもある。吊材は亜鉛引鋼索(Galvanized steel rope)で造り其の直径 25~82 mm なるときは破壊強度は  $8.68 d^2$  とす。但し  $d$  は鋼索の直径で mm で表す。

塔は建築鋼で造るのが普通であるが、尚石、コンクリート又は木材を用ふることもある。

總ての鑄物例へば鞍(Saddle)、ケーブル帶(Cable band)、子繩杏(Strand shoe)、鎮碇用肘形關節(Anchorage knuckle)及鎮杏(Anchor shoe)には鑄鋼が使用せらる。

(2) チェーン材料。チェーンは炭素鋼で造るが、大きい强度を必要とするときは合金鋼若は高炭素鋼を用ふる。1903年ブダペストのドナウ河に架設されたエリザベス橋には次の化學成分より成るシーメンス・マルテン鋼を用ひた。

$$C = 0.12 \sim 0.15 \%$$

$$Si = 0.15 \sim 0.20 \%$$

$$Mn = 0.90 \sim 1.00 \%$$

其の鋼の抗張强度は  $5.0 \sim 5.5 t/cm^2$ 、伸長度 20% で其の許容應力は  $1.4 t/cm^2$  とせし故約 3.5 の安全率となる。

1915年ケルンと獨逸間のライン河に架したチェーン吊橋には 0.8~1.1% のニッケルとクロムとより成るクローム・ニッケル鋼を用ひた。其の强度は  $5.5 \sim 6.0 t/cm^2$ 、降伏點  $3.6 t/cm^2$ 、伸張度 18% で許容應力は  $1.75 t/cm^2$  とせし故 3.1 の安全率となる。

橋梁工事に對しアイバーを使用する米國に於ては、合金鋼の發明以來長徑間橋梁の發達が特に顯著なるものがある。紐育のブラックウェルアイランド橋(Blackwell Island bridge)に使用せしアイバーは次の化學成分を有する。

$$C = 0.35 \%$$

$$Mn = 0.70 \%$$

$$Ni = 3.25 \%$$

其の破壊強度  $6.0 t/cm^2$ 、降伏點  $3.5 t/cm^2$ 、伸張度は試驗片の長 200 mm に付 20%, 5500 mm に付 9% であった。

1910年頃からは合金鋼としては價格の低廉な高炭素鋼が全盛を極めてゐる。

米國では一般にアイバーに用ふる炭素鋼には次の條件を具備せしむる。

破壊強度  $4.8 \sim 5.3 t/cm^2$ 、降伏點  $2.6 t/cm^2$ 、伸張度は試驗片の長 5500 mm に付 12%。

獨逸では St 52 が經濟上及安全上最も適切なりと評價してゐる。

鋼の强度は化學成分に依るの外熱處理法に依つても之を増進することが出来る。

世界大戦中亞米利加橋梁會社 (American Bridge Company) は、破壊強度  $5.6 t/cm^2$ , 降伏點  $3.5 t/cm^2$  を有する低強度熱處理鋼 (Low strength heat-treated steel) を發見し先づ Pittsburg の三吊橋に、又 1926—1928 年には Köln-Deutz のライン橋にも使用された。1922 年には破壊強度  $7.4 t/cm^2$ , 降伏點  $5.3 t/cm^2$ , アイバーに對しては試験片の長  $5500 mm$  に付伸張度 5% の高強度熱處理炭素鋼 (High strength heat-treated carbon steel) が發見された。最初に之を使用せしはブラジルのフロリアノボリス橋 (Florianopolis Bridge. 径間  $340 m$ . 1922—6 年建設) で、長  $12200 mm$  の 12 本の棒鋼に付て實驗せし結果は次の如し。

破壊強度	$8.15 \sim 9.3 t/cm^2$	平均	$8.65 t/cm^2$
降伏點	$5.5 \sim 6.1$ "	"	$5.95$ "
伸張度	$5.7 \sim 7.7\%$	"	$6.8\%$

此の實驗の結果に基き最小破壊強度に對し 2.5 の安全率を採つて許容強度を  $3.27 t/cm^2$  と定めた。

ジョージワシントン橋のアイバーに對しては次の強度を採用した。

材 料	熱 處 理 鋼	
	高 強 度	低 強 度
破壊強度	$7.4 t/cm^2$	$5.63 t/cm^2$
降伏點	$5.28$ "	$3.52$ "
伸張度 (試験片の長 $5500 mm$ に付)	5%	8%
許容強度	$3.52 t/cm^2$	$2.32 t/cm^2$
安全率	2.1	2.4

十二回の實驗の結果に依れば平均破壊強度は約  $350 kg/cm^2$ , 平均降伏點は約  $230 kg/cm^2$  で所要の最低値より大きかつた。結局鎖錠用アイバーには低強度熱處理鋼、チーン夫自身には平行ワイヤーケーブルを使用した。

(3) ケーブル材料。ケーブルには普通平行ワイヤーケーブル (Parallel wire cable 平行針金索條) と撚ワイヤーロープ (Twisted wire rope 撚鋼索) とあり、何れも針金の集りである。針金材料としては高値鉛錠鋼又はシーメンス・マルテン鋼 (炭素含有量 0.8~0.9%) を使用する。

吊橋用直徑  $4 \sim 5 mm$  の針金の破壊強度は約  $20 t/cm^2$  であるが、實際之を使用する場合に其の強度を幾何に採るかは疑問の存する處だが、起重機のロープに對する重要な研究の結果に依れば  $18.5 t/cm^2$  の破壊強度を有する針金は、材質が段々脆弱となり且つ伸長性が小さくなる爲彎曲應

力に對し非常に敏感となることが明らかとなつたから、ワイヤーロープの破壊強度は  $16.5 t/cm^2$  を最大とした方がよろしいとの意見もある。

以上の實驗は起重機の場合で輶子上を走るとき可なり大きい彎曲率を受くるロープの研究である。然るに橋梁の場合に於ては斯の如き彎曲應力を受けないから Corl M. Bohny 博士は其の破壊強度を幾分高くして  $18 t/cm^2$  となすことが出来るとの説をなしてゐる。

亞米利加では防錆の目的を以て針金に亞鉛鍍金をなす。數年前紐育ブルツクリン橋のケーブル (之は亞鉛鍍金をしてない) の四十年存續せるものを検査せしに、被覆を取除いた所がケーブル内の針金は少しも缺點のない状態にあることを發見した。故に完全なる被覆とペンキ塗抹に依つて浸入を防止すれば亞鉛鍍金は施さなくとも差支ない。

二十年來米國の總ての吊橋に使用された平行ワイヤーケーブルの針金は次の物理的性質を有してゐる (針金の材料は Philadelphia の Delaware 橋の示方書に依る)。

針金直徑 (純斷面)  $4.88 mm$

" (亞鉛鍍金)  $5.00 mm$

破壊強度  $15.1 t/cm^2$

降伏點  $10.1$  "

伸張度 試験片の長  $250 mm$  に付 4% (最大)

總ての強度は鍍金せる針金に對するものを示してあるから鍍金も斷面に加算されてゐる。

以上の材料に對しては應力を  $10.1 t/cm^2$  と採る場合は其の伸張度は 0.75% を超過してはならない。

デラウェア橋に使用せしケーブルワイヤー (Cable wire) に對しては普通の供試體切斷試験の外、詳細なる實驗室の研究がなされた結果次の平均値が與へられた。

破壊強度  $15.6 t/cm^2$

$10.1 t/cm^2$  に於ては 伸張度 0.56%

$12.0 t/cm^2$  " " 0.75%

伸張度  $200 mm$  に付 4.9% (最大)

彈性恒數： 亞鉛鍍金の針金に對し  $1.87 t/cm^2$

裸の針金に對し  $1.97 t/cm^2$

許容強度は  $5.6 t/cm^2$  とせし故破壊強度に對する安全率は 2.7, 降伏點  $10.1 t/cm^2$  に對する安全率は 1.8 となる。

1932 年開通せし紐育ジョージワシントン吊橋に於ては針金の所要破壊強度が  $15.5 t/cm^2$  と定

められし故、其の許容強度は  $5.8 t/cm^2$  に高められた。針金の材料が段々其の强度を増加して來たことは次の表に明瞭である。

橋名	竣工年	破壊强度 $t/cm^2$
Brooklyn	1883	11.3
Williamsburg	1908	14.1
Manhattan	1910	14.8
Delaware-River	1926	15.1
George Washington	1932	15.5
Golden Gate	建設中	18.1

米國製の平行ワイヤーケーブルと比較するために、ケルン・ミュルハイム (Köln-Mülheim) のライン橋に使用せしワイヤーロープ (第281圖) の針金の强度を掲ぐれば次の如し。

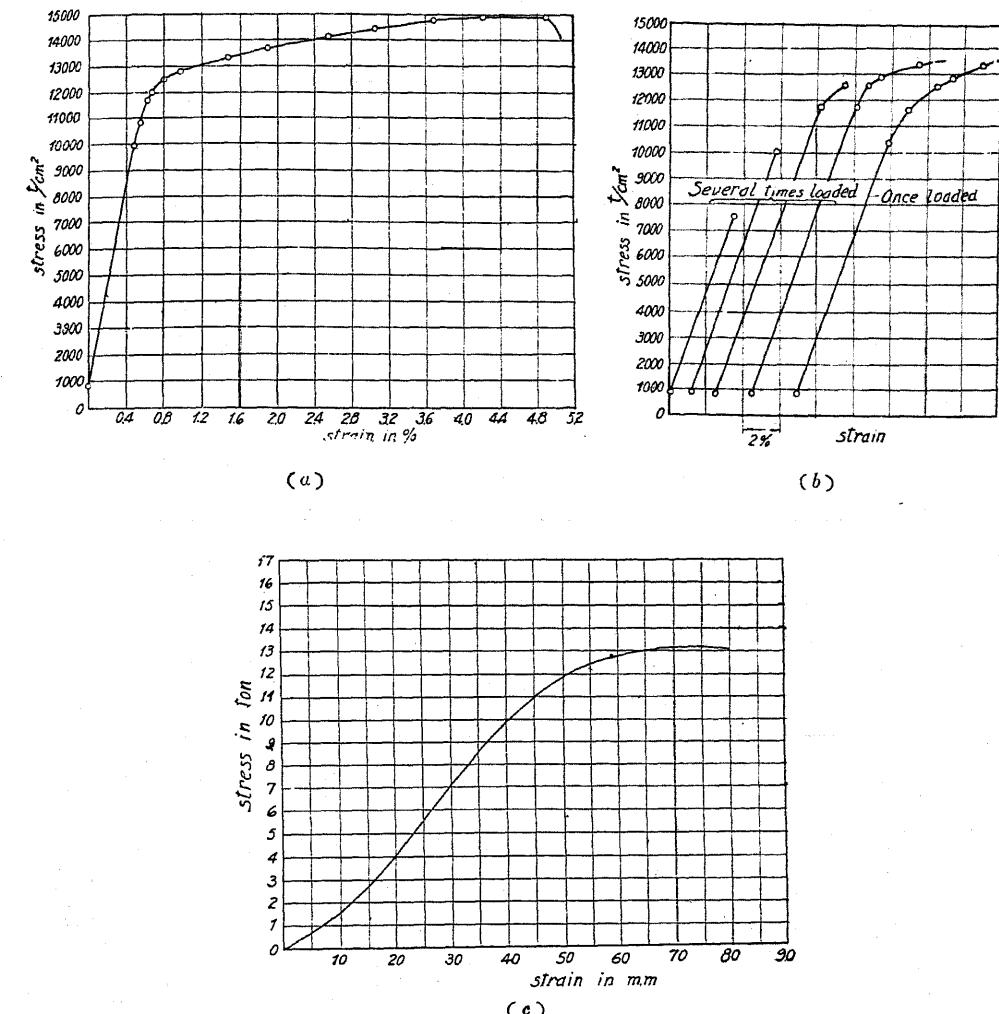
圓形針金	$14.5 \sim 15.0 t/cm^2$
楔形針金	$14.0 \sim 14.5 " "$
被覆針金	$13.5 " "$

楔形針金及被覆針金の破壊强度の小さいのは其の組立方法が完全でないためであり、圓形針金の强度の大きいのは楔及被覆針金の外方よりの壓迫に依るのである。

1925年迄は米國の吊橋は短徑間の場合に限り例外としてチェーンを用ひてゐたが、熱處理鋼より高强度アイバーを製出する様になつてからは、チェーンはケーブルの一大敵國となつた。1925年フロリアノボリス橋 (徑間 340 m) では、高强度熱處理鋼より製造せしアイバーが最初其の使用を豫定せられしケーブルの代用となつた。斯くしてケーブルとチェーンとの激しい競争は、1928年紐育ハドソン河の吊橋 (徑間 1067 m) の入札より始まり、此處ではチェーンの設計價格がケーブルの設計價格より著しく高かつたにも拘はらず、アイバーの單價は其の原價を償ふことが出来ない位低廉に落札した。夫で米國に於ける吊橋は次の時代に於てはアイバーチェーンが益々全盛を極むることとなるだらう。針金製造業者は從來の深刻なる失敗にも拘はらず未だ完全に撃退されず、最近は熱處理アイバーと再び競争場裡に立たんと第二段の方法を講じつゝある。

ワイヤーロープの應力變形率曲線圖を示せば第243圖の如し。

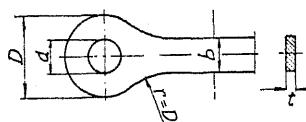
(a) 及 (b) はデラウエアー橋のケーブルワイヤーに對する Stress-strain diagram で、(a) 圖は破壊に至るまで一回の載荷、(b) 圖は降伏點を超えて數回載荷せられし場合、(c) 圖は破壊強度  $13.2 t$ 、伸長度試験片の長  $2600 mm$  に付  $80 mm$  のワイヤーロープの場合を示してゐる。



第 243 圖

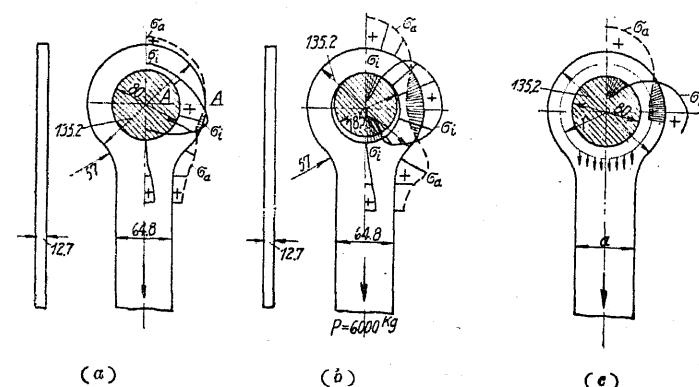
3. チェーン (Chain) チェーンはアイバー又は平鋼より成る。後者は屢々歐洲に用ひられケルンドイツ吊橋は其の例である。前者は米國が其の生國とも言ふべきで一般橋梁工事の抗張材に廣く使用され、從て其の製造技術は殆んど完成の域に達してゐる。第2表は米國で最も多く吊橋に用ひらるゝアイバーの標準寸法である。熱處理鋼より製造せしフロリアノボリス橋のアイバーでは、ボルトの支壓力を減ずるため其の頭は軀體より  $\frac{1}{8}$  吋 ( $3.2 mm$ ) 厚くなした。若しボルトとアイバー頭との間の壓力の分布及アイバー頭と、其の軀體との間の張力の分布が正確に選擇されるれば、頭に於ける應力の分布を理論的に取扱ふことはさまで困難でない。マタル (Mathar) の研究に依れば頭の外縁及内縁に於ける應力の分布は第244圖の如し。

第 2 表



軸 體		頭		
幅 <i>b</i>	厚	直 径 <i>D</i> mm	ボルト <i>d</i> mm	$\frac{D-d}{b}$
吋 mm	11/8~2 254.0	22½	571.5	9
		24	609.6	10½
		25	635.0	11½
吋 mm	12 304.8	26½	673.1	10
		28	711.2	11½
		29½	749.3	13
吋 mm	14 355.6	31	787.4	12
		33	838.2	14
		34	863.6	15
吋 mm	16 406.4	36	914.4	14
		37½	952.0	16
			406.4	1.344

(a) はボルトが孔にピッタリ合つた場合、(b) はボルトと孔の間に 1.5 mm の間隙がある場合、(c) は Beke が理論的取扱をなした場合の應力分布状態である。(a) では如何なる點に於ても降伏點を超過しない間は應力は殆んど軸應力に比例するが、(b) ではボルト頭との間に於ける壓力の傳達が荷重の増加に伴ひ變化するから (a) の分布とは異り、荷重が小さい間は以上傳達は一點でなされ、荷重が増大すれば頂點に於ける接觸個所は扁平となり變形した頭は段々



第 244 圖

ボルトに密着する様になる。荷重が小さいときは理論的に見出した應力線は(第244圖 c)實驗の結果(第244圖 b)と一致するけれども、荷重が大きいときは理論と實際との結果が一致することとは最早豫期されない。

實際はボルトが孔にピッタリ合つてゐるものと假定するから、其の應力分布は第244圖 (a) の如くなる。フロリアノボリス橋ではボルトの直徑は 292.1 mm で孔の内徑は之より 0.13 mm 大きかつた。又ジョージワシントン橋では以上に該當する寸法は 381 mm と 0.8 mm であつた。之をボルト直徑に比例して表せば以上の間隙は 0.04 及 0.2 % となる。然るにマタルの實驗では之を 2.3 % と探つてある。

アイバー頭部の危險斷面はアイバー軸に直角をなすセクション A-A で、此處には純粹の張應力  $\sigma_m$  の數倍に當る應力  $\sigma_i$  が孔の内側に生ずる。米國の標準斷面に於ては(第245圖 b)マタルの實驗に従へば常に

$$\sigma_i \doteq 4.0 \sigma_m \text{ となる。今}$$

$$= 1 \quad \text{安全率} = 2.5 \quad (\text{破壊強度 } \sigma_n \text{ に對し})$$

とせばアイバー自體に生ずる應力は  $\frac{\sigma_n}{2.5}$  となるから、セクション A-A に於ける應力は

$$\sigma_m = \frac{\sigma_n}{2.5 \times 1.35} = 0.29 \sigma_n \quad (2a = 1.35b)$$

となる。

最大緣維應力は次の如し。

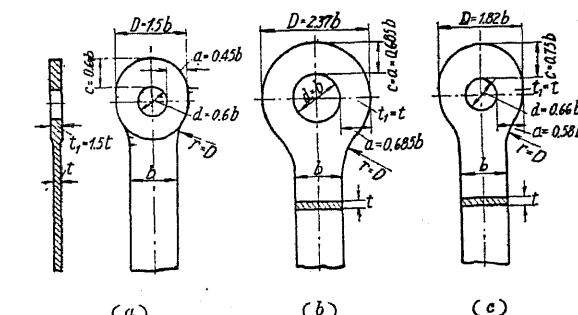
$$\sigma_i \doteq 4.0 \sigma_m \doteq 1.16 \sigma_n$$

アイバー材の降伏點を  $\sigma_f \doteq 0.65 \sigma_n$  とせば許容荷重の半分より少し大きな荷重の場合には降伏點に達し、荷重が一層大きくなれば頭には變形を生ずる。1913年リンデンタール(Lindenthal)の實驗に依れば軸體の破壊變形が 14.7 % なるときは頭の變形は 24 % に達する。

第244圖 (a) の形に於てはセクション A-A では

$$\sigma_i \doteq 2.0 \sigma_m$$

となつて米國標準形の半分に過ぎない。此の差を生ずる所以は第244圖 (a) では  $d = 1.23b$  の直徑を有するボルトは第245圖 (b) より著しく大きいし、又  $a = 0.42b$  を有する A-A セ



第 245 圖

クションは後者より著しく小さいからである、圓形のアイバー頭の應力に関する理論的研究の結果に依れば、ボルト直徑の變化は縁維應力に對しては單に輕微の影響を與ふるのみである。又 A-A セクションを小さくするためには先づ彎曲應力を小さくする必要がある。

以上各種實驗の結果を綜合すれば米國の標準に規定せる如く、アイバー頭は其の軀體よりも一層大きい強度を有せねばならないこととなるから、A-A セクション ( $2a t_1$ ) は軀體斷面の 1.35 倍とする。最大の荷重を受けた場合にも恒久變形を生ぜしめざるためには A-A セクションを狭くすればよろしい、之に依つて彎曲應力を小さくすることが出来る。幅を縮小しても A-A セクションに所要斷面積を保たしむるためには、頭を軀體より厚くすることが必要である（第 245 圖 a）。此の形に於ては A-A セクションの平均應力は

$$\sigma_m = \frac{\sigma_R}{2.5 \times 2.0 \times 0.45 \times 1.5} = 0.29 \sigma_R \quad (\text{但し } t_1 = 1.5 t)$$

となる。孔の内縁に於ける最大應力は第 244 圖 (a) に於ける如く

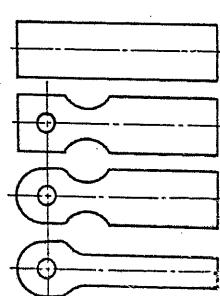
$$\sigma_i = 2.0 \sim 2.5 \sigma_m$$

より大なるべからず。又

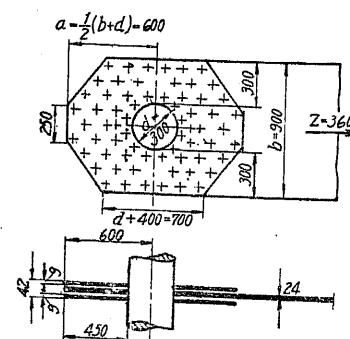
$$\sigma_i = 2.25 \sigma_m = 0.65 \sigma_R = \sigma_x$$

となる。第 245 圖 (a) に於ける頂部斷面は A-A セクションに對し約 35% 廣くする、蓋しマタルの實驗に從へば斯様に廣くすることは、頂部の應力を増加することなしに A-A セクションの縁維應力を好影響を與ふるからである。尙此の形の特徴は頭を厚くすることに依り、其の寸法が支壓力に依つて定まるボルトを非常に小さくすることが出来る。

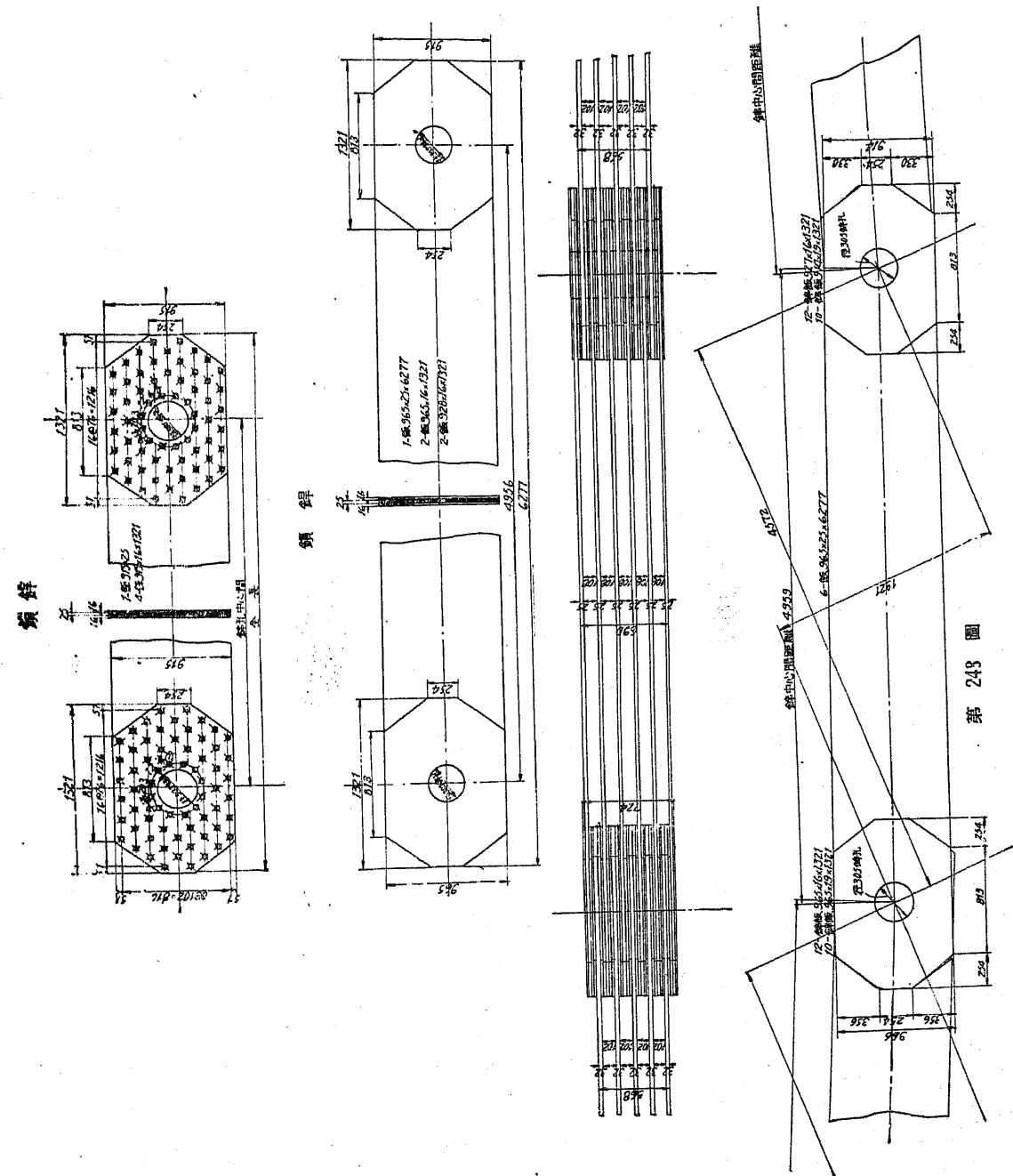
比較のため第 245 圖 (c) にはブダペスト (Budapest) のエリザベス橋のアイバー頭を並べてあるが、之は米國型とは著しく相違し其の頭は輾延又は鍛造に依らず、頭と同一幅を有する平鋼より製作せしもので其の過程は第 246 圖に示す通りである。



第 245 圖



第 247 圖



第 245 圖

此の製造方法は舊式で特別の工賃と無駄の材料を要するので、エリザベス橋に使用されたのは寧ろ除外例である。アイバー頭を輒延に依つて製作すること不可能の場合は、之をチェーンに用ふることを斷念して平鋼を其の代用とする。但し其の際は鉤の両端にはピン釘を當て、補強する。第247圖はライン河ケルンードイツ吊橋に用ひたチェーン鉤の例で、補強釘には $20\text{mm}$  鉄を用ひ其の配列を千鳥となして、鉄孔に依る断面の減少を最小ならしめてある。鉤の断面積は $90 \times 2.4 = 216\text{cm}^2$  であるが鉄の第一列に於ける純断面積は $216 - 2 \times 2.0 \times 2.4 = 206.4\text{cm}^2$  となり 4.5% の材料喪失となる。頭の純断面積は $2(30.0 - 2 \times 2.0) \times (2.4 + 2 \times 0.9) = 218.4\text{cm}^2$  で鉤よりも 6% 大きい。然し頭の部分に起る副應力を考慮すれば此の過剰断面は少なすぎる位で、補強釘をもう少し厚くする方が正當である。

第248圖は隅田川清洲橋に用ひたチェーン鉤の例である、其の材料はデュコール鋼 (Ducol steel) で次の成分を有する。

炭 素	0.2~0.3%	硅 素	0.1~0.2%
満 倣	1.4~1.6%	磷	0.035% 以下
硫 黄	0.03% 以下	銅	0.16% 以下

其の物理的性質は次の如し。

破壊強度  $6.3\text{t/cm}^2$

降伏點  $3.9\text{t/cm}^2$

伸長度 18% 以上 ( $200\text{mm}$  に付)

許容強度  $1.7\text{t/cm}^2$

第3表は 1900 年以後架設せられたチェーン吊橋を總括せるものである。

鉤の両端にピン釘を用ふる場合はピンの中心を切るセクションの有效断面積は、ピンの直徑が鉤の幅の  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{2}$  又は  $\frac{2}{3}$  なるかに従つて  $1.1A$ ,  $1.25A$  及  $1.4A$  となし、鉤軸の方向に於けるピンの先端では  $0.75A$  の有效断面積を保つ様にする。但し  $A$  は鉤の断面積とす。長径間のチェーンは大きい断面を要するを以てピンの長が過大となるから、之を避くるためチェーンを二本並べるか或は上下に重ねる。後者の場合には格間長が餘り短くなれば吊材は上のチェーンと下のチェーンとに交互に連結する。

チェーン構造の缺點は同一格間に於ける各鉤の應力が齊一でない事である、之は長の不正確、温度の差、彈性恒数の違ひ、ピンの彎曲及吊材の偏心載荷に基因するものである。

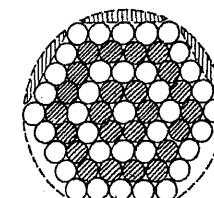
チェーンの幅は優美を主眼として選び支間の  $\frac{1}{200}$  以上となさない方がよろしい。エリザベス橋ではチェーンの外觀を出来るだけ細長にするため、約  $1\text{m}$  の間隔を保たして二つのチェーン

第 3 表

竣工年	橋名	徑間	材料の特性					チエーンの構成					
			材 料	降伏點	破壊強度	許容強度	安 全 率	形 狀	片側に於けるチエーン一本に於けるアイバー及び平鋼の枚数	同 寸 法 mm	同面積 cm <sup>2</sup>		
1903	Elisabeth橋 Budapest	290	鋼		5.0	1.4	3.5	アイバー	2	9&10	$10 \times 500 \times 25$	1 250 2 500	
1915	Rhein' 橋 Köln-Deutz	185	クロムニッケル鋼 1.1% Ni	3.6	5.5	1.75	3.1	平鋼	1	11&12	$11 \times 900 \times 24$	2 238 net 2 238	
1926 至 1928	Alleghany 河 Pittsburg 三 橋	155	熱處理鋼 低強度	3.5	5.6	1.9	3.0	アイバー	1	8&9	$8 \times 355 \times 51$	1 445 1 445	
1926	Florianopolis Brasil	340	熱處理鋼 高強度	5.3 5.5	7.4 8.2	3.3 2.5	2.25	アイバー	1	4	$4 \times 305 \times 51$	622 622	
1928	Pt. Pleasant Ohio	214	同 上	5.3	7.4	3.5	2.1	アイバー	1	2			
1928	Hudson 河 New York	1 067	熱處理鋼 高強度 低強度	5.3 5.5 3.5	7.4 7.7 5.6	3.5 2.2 2.3	2.1 2.2 2.4	アイバー	4	24	$24 \times 405 \times 57$ $244 \times 255 \times 48$	5 575 22 300 29 700	
1928	清洲 橋	91	デュコール鋼 1.5% Mn		3.9	6.3	1.7	3.7	平鋼	1	5	$5 \times 915 \times 32$	1 390 net 1 390

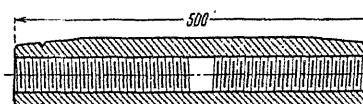
を上下に重ね、チエーンの幅を  $0.5\text{m}$  即ち支間の  $\frac{1}{580}$  に制限し、補剛構は上下兩チエーンより交互に吊してある。

4. ケーブル (Cable) 敷本或は數十本の針金を適當に撚り合せて一條の子繩 (Strand) を作り、此の子繩を集めたものがケーブルである (第249圖)。中央の心綱の周囲に 6 本の子繩があつて、其の外側は 12 本、18 本、24 本と増加してゐるから、六角形ケーブルは 7, 19, 37 又は 61 本の子繩を有することとなる。子繩は針金の集りであつて其の針金を平行に並べたものが平行ワイヤーケーブルとなり、針金を撚り合せたものがワイヤーロープとなる。



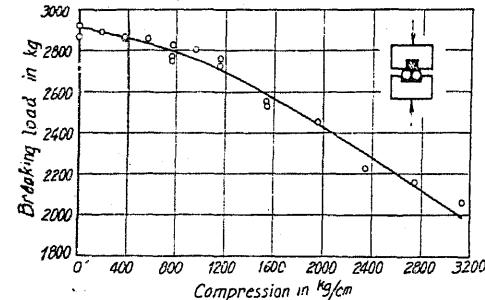
第 249 圖

(1) ワイヤーケーブル。現場で而も所定の位置で空中高く紡いだものである。針金の纏手は以前は二本の針金の端を重ね合せて其の上を細い針金で巻いたものだが、今日は針金の端を斜接にしてネジを切り、套管緊子 (Sleeve-nut) を被せたものが用ひられ最も有效 (能率 95%) である (第250圖)。纏手に於ける各針金の強度の減少がケーブルの強度に影響しない様にす



第 250 圖

るためには、繩手をケーブルの一点に集めないことである。繩手の数を少くするには針金の長を900~1000 mに製造する。針金を鍍金するのみならずケーブルの周囲も4 mm或は3.5 mの針金(軟く焼鍔し鍍金せるもの)を以てシッカリと連續的に巻いて湿氣を防ぎ、外側の針金を保護し、針金全體のかたまりを緊密に保つて互に擦れることのない様にし、一體として應力を受くる様にする。



第 251 圖

針金が張力  $S$  を受け同時に直徑  $D$  の滑車輪の周圍に曲げらるれば針金と滑車輪との間の壓力は

$$p = \frac{2S}{D} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{d^2}{D} \sigma_a t / \text{cm}$$

となる。デラウェア橋に於ては  $d$ (針金直徑) = 0.5 m,  $\sigma_a$ (許容強度) = 5.6 t/cm<sup>2</sup>,  $D = 975 \text{ cm}$  であるからケーブルの各針金に對し

$$p = 0.0024 \text{ t/cm}$$

となる。下側の針金は其の上部にある總ての針金の壓力を支承體に傳達せねばならないから、支承體の所では

$$p_{max} = 200 \times 0.0024 = 0.48 \text{ t/cm}$$

となる。此の壓力に對する破壞強度の減少は約 2% となる(第 251 圖)。

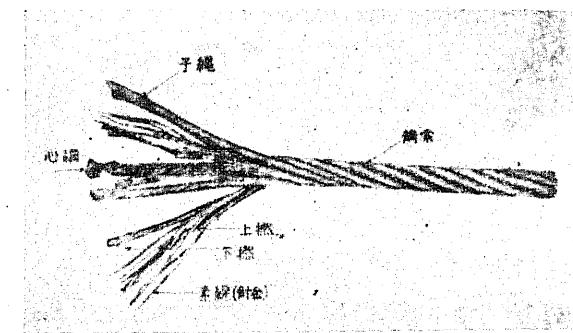
尙 37 本及 80 本の針金より成る子繩に就て實驗せしに、子繩の強度は針金の破壞強度の 95~97% に達するも針金の數が増加するに従ひ子繩の強度は減少する。其の理由は針金の數が増加すれば之を實際に平行に置き各針金に均一の負擔を課すことが困難なるからである。

ワイヤーケーブルは如何なる徑間長にも適應し、同一強度のワイヤーロープに比し低廉である。

紐育の East River に架せし三大吊橋の例を示せば次の如し。

	Brooklyn Bridge	Williamsburg Bridge	Manhattan Bridge
主徑間長	486.3 m	487.7 m	448 m
主徑間の自重(長 1 m に付)	{ 16.13 t	{ 24.73 t	{ 33.70 t
活荷重(長 1 m に付)	{ 9.37 t	{ 11.90 t	
ケーブル重量(橋長 1 m に付)	2 984 kg	4 560 kg	6 060 kg
ケーブル數	4	4	4
子繩の數	19(針金 331 本)	37(針金 208 本)	37(針金 256 本)
針金の直徑	4.3 mm	4.88 mm	4.9 mm
ケーブルの直徑	400 mm	473 mm	540 mm
ケーブルの最大應力	3 330 kg/cm <sup>2</sup>	3 530 kg/cm <sup>2</sup>	4 219 kg/cm <sup>2</sup>
ケーブルの破壊強度	11 250 kg/cm <sup>2</sup>	14 100 kg/cm <sup>2</sup>	14 800 kg/cm <sup>2</sup>

(2) ワイヤーロープ。ワイヤーロープの大きさに丁度適當する様に麻糸を撚合せて麻綱を作り、之に特種の油を含ませたものを心綱(Hemp Core)と謂ふ。ワイヤーロープは心綱を中心にして子繩數本(普通は 6 本)を適當に撚り合せたもので、心綱の代りに同じ針金の子繩を入れることもある之を共心と言ふ。即ち子繩は針金を撚り集めたもの、ロープは子繩を撚り集めたものである(第 252 圖)。



第 252 圖

ワイヤーロープの柔軟性(Flexibility)。ロープの柔軟性は其のロープの構造に依り異なるが、柔軟なるものを作るには細き素線(針金)を數多用ふる、例へば 37 本線 6 ツ撚りの如きものである。耐張力の強い素線で出来たロープは弱い素線で出来たものよりも柔軟性に乏しい。

ロープの撚り方。ロープの撚りと子繩の撚りとの方向が反対になつてゐるものと普通撚(Ordinary lay)、同方向のものをラングレー(Lang's lay)と稱する。普通のワイヤーロープでは素線も子繩も其の個性による彈力のため、常に解けやうとする反撥力を有するから、使用せぬ時でも素線は常に内應力の働きを受けるのみならず、一旦荷重がかかれれば其の力は各素線に均等に分布されない缺點がある。此の缺陷を除くため東京製綱株式會社では不反撥性ワイヤーロープの特許品を製作してゐる。

ラングレーは素線の傾斜が緩やかで外部との接觸面が長く、ロープ全體が平均に摩擦を受くるため普通撚に比し磨損の度合が少く、使用久しきに耐ゆるのみならず柔軟性に於ても普通撚に比

し優秀である。但しラングレーは撓りが戻る性質を有するから、荷重をかけたロープの一端が自由に廻轉し得る場合又は縫れ (Kink) の出來易い場合には不適當である。普通撓は之に反し素線の傾斜が急なるため、子繩の隆起せる短い部分のみ強く擦れ磨損の度合多く、耐久力の點ではラングレーに比し不利なるも、縫れを生ぜず且取扱ひ便なるため廣く使用される。

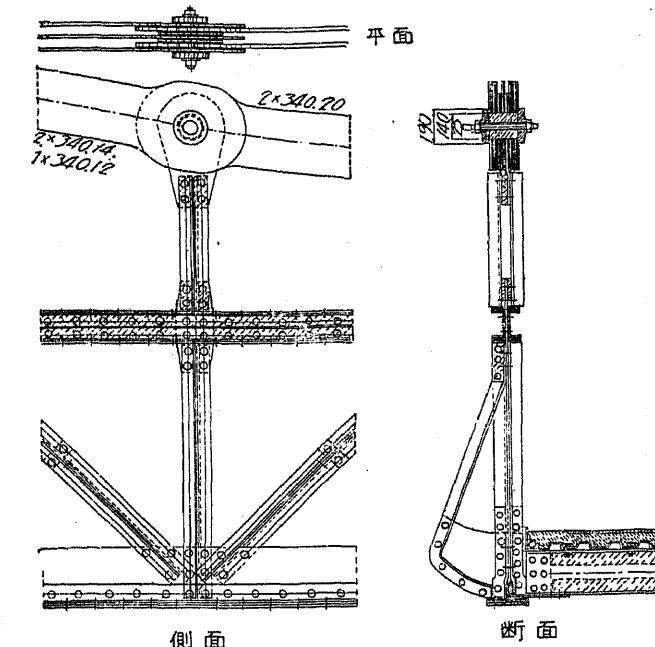
ワイヤーロープの大きさの測り方。ロープの大きさは直徑若くは圓周で稱へるが（直徑も圓周も外接圓に依る）日本標準規格では直徑を mm で示すことになつてゐる。

ワイヤーロープが  $n$  本の素線（徑を  $\delta$  とする）より成るときは其の全面積は  $F = n \frac{\pi}{4} \delta^2$  となり、ロープの直徑は約  $d = 1.33\sqrt{F}$  (cm) となる。螺旋針金 (Spiral wire) はロープの平均應力より 4~5% 高い應力を受け、中心の針金は螺旋針金より 15% 高い應力を受ける。ワイヤーロープをケーブルに用ふるときは、基礎公式を適用する際に彈性恒數  $E$  を遞減し建築鋼の場合の  $\frac{2}{3}$  とする。撓れの角度 18° の場合の一子繩の彈性恒數は平行ワイヤーの場合の 85% 即ち  $1687000 \text{ kg/cm}^2$  とし、7本若くは夫以上の子繩より成るワイヤーロープの彈性恒數は子繩の場合の 85% 即ち  $1406000 \text{ kg/cm}^2$  とする。

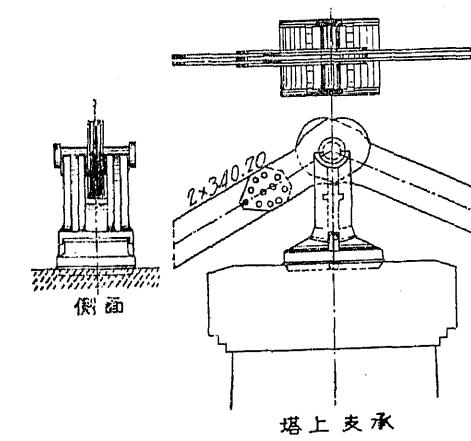
ワイヤーロープは針金及子繩の撓りのため荷重を受ければ初伸張 (Initial stretch) を生ずる、試験の結果に依れば小荷重に於て大きい伸張を起せば其の彈性恒數は  $700000 \text{ kg/cm}^2$  に減する。初伸張が起つた後（約  $1400 \text{ kg/cm}^2$  の単位應力に於て）には伸張度は著しく減少して、眞の彈性恒數は  $1400000 \text{ kg/cm}^2$  を示す様になる。 $E$  の低い値  $700000 \sim 1000000 \text{ kg/cm}^2$  はケーブルの死荷重伸長を測る場合に、高い値  $1400000 \text{ kg/cm}^2$  は活荷重及溫度應力を計算する場合に用ふる。

高い而も各種の伸張を生ずるからワイヤーロープで作つた吊材及ケーブルには、螺旋及ナットを備へて其の長を調節し以て假定の撓度及高度を保有せしむることが必要である。

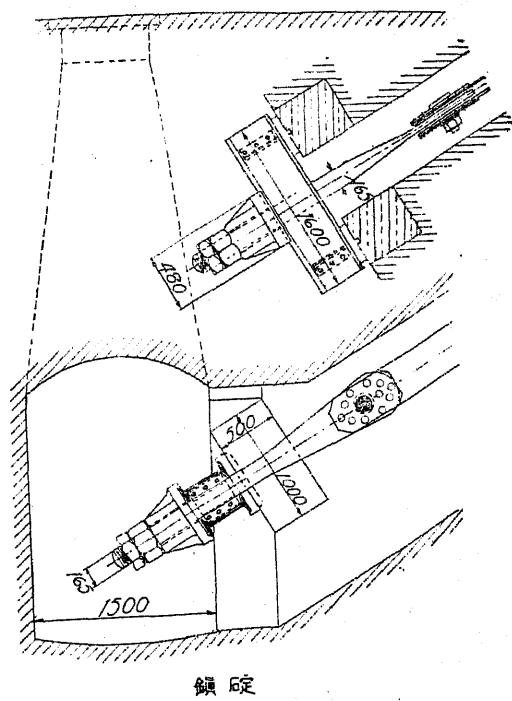
**5. チェーン吊橋 (Chain suspension bridge)** (1) チェーンが堅に並べし平鋼で造られしそき。第 253 圖は伯林のスプレーに架した人道橋の補剛構とチェーンの一部を示してゐる。左側のチェーンは二アイバー  $340 \times 14$  と、一アイバー  $340 \times 12$  より成り、右側のチェーンは二アイバー  $340 \times 20$  より成る。二山形鋼より成る吊材はアイバーに依つてチェーンに連結せり。吊材と補剛構とを連結する繩類は補剛構上弦を貫通してゐる。石造塔上に於けるチェーンの可動支承は第 254 圖に示すが如し。アイバーを締付くる鉄ボルト (Hinge-bolt) は振子承で受け、背控は二枚の平鋼  $340 \times 20$  よりなりビンを通してある塔上の短いアイバーと鉄結せり。背控の終端は鎖碇の所で鉄ボルトに依り棒鋼と連結し鎖を以て補強してある（第 255 圖）。棒鋼は鑄鋼臺にボルトで締付けてある、其の臺は二工形鋼の下に据えられて、チェーンの力を小さい支承鎖 (Bearing



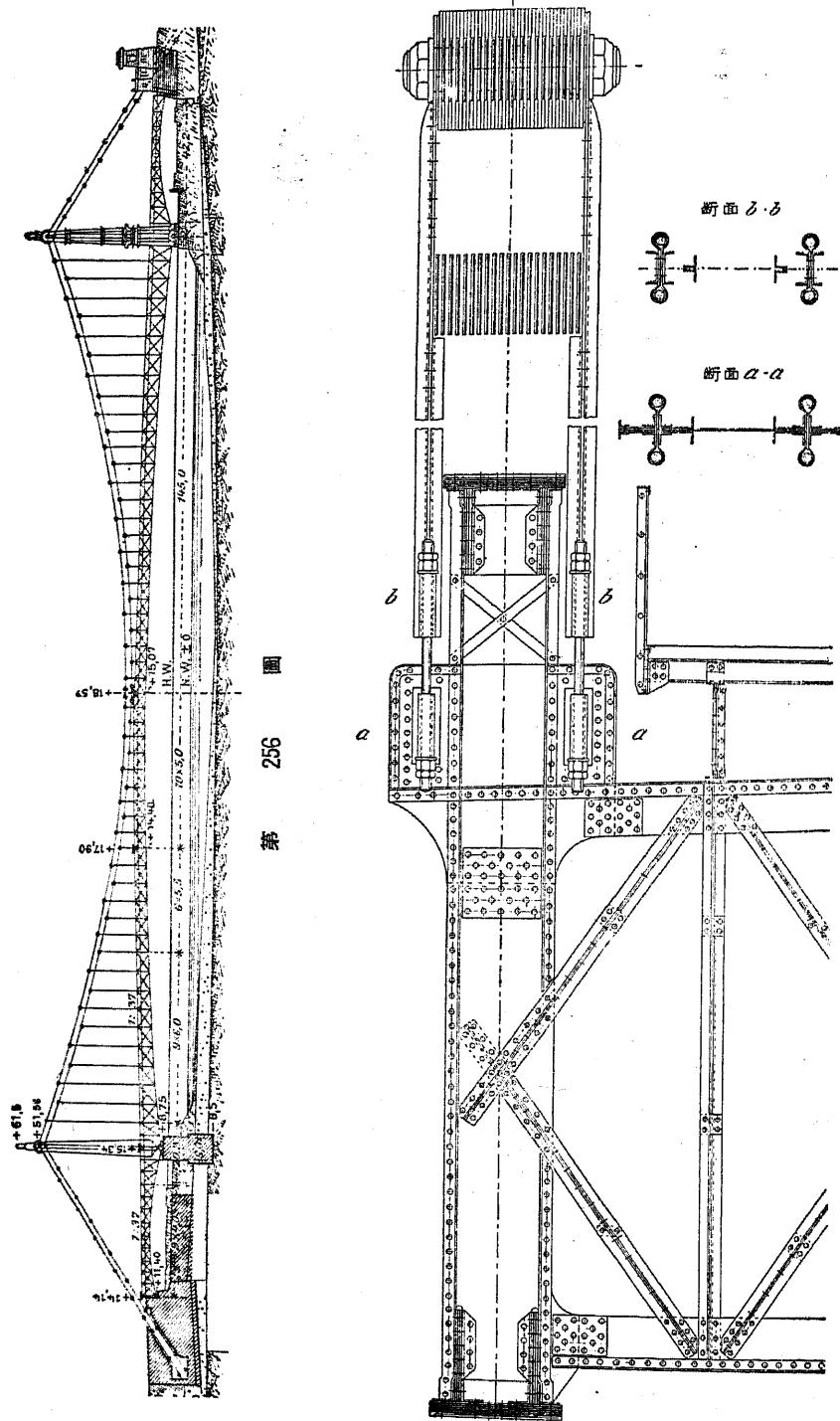
第 253 圖



第 254 圖



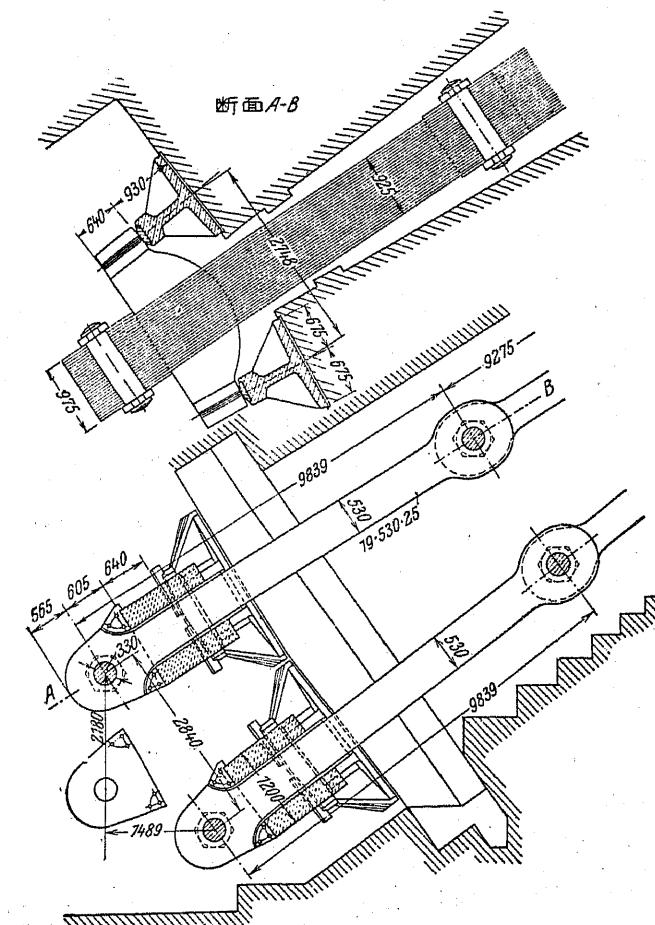
第 255 圖



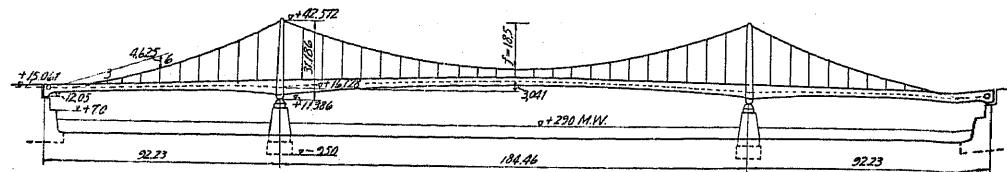
第 257 頁

**plate**) に依つて橋臺に傳達する。チエーン及鎖碇には橋臺内に設けた入り込み (Recess) に依り接近し得る様に造られ、掃除口を通つて入り込みの所まで遠することが出来る。

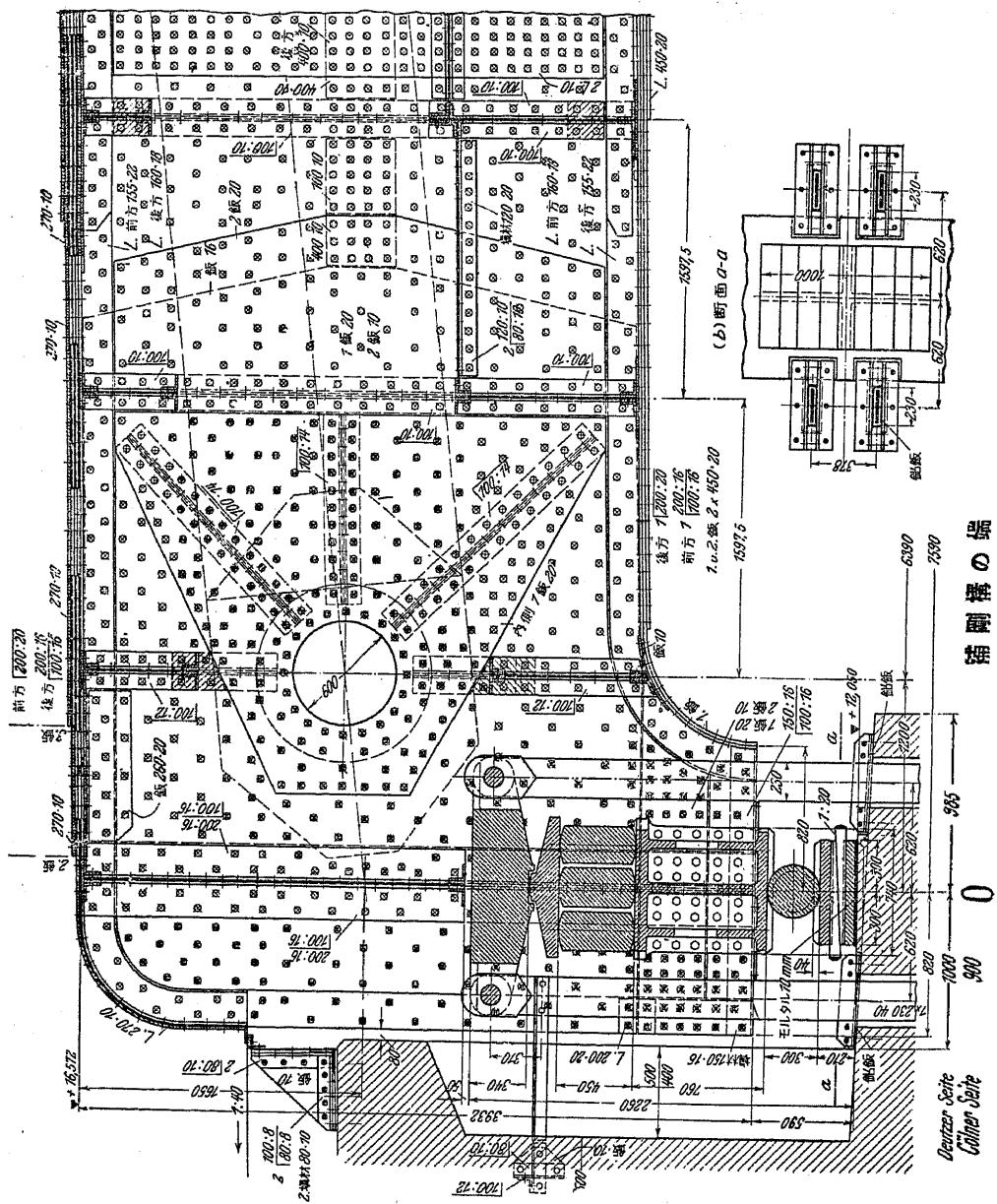
第256図乃至第258図は、ブダペストのエリザベス橋の一般圖及細目を示すのである、チーンは上下に二本を用ひてあつて、互に連結せず各自別々に鎮碇してある、吊材は上下のチーンと交互に連結する。吊鉤 (Suspender rod) と補剛構の取付は、第257図セクション *a-a* 及 *b-b* に明らかである。吊鉤との連結に特別の装置をなすこととは總ての吊橋に於て必要であつて、之がために補剛構は何等の苦心なく計算上の位置に保たれ、總ての格點には計算上の荷重を與ふることが出来る。第258図は鎮碇を示してゐる、各アイバー頭の間には圖に示すが如き形の薄鉢を挿入し、承臺と吊鉤の眼のある部分の薄鉢の隅は小さい鉢で補強し、薄鉢とアイバーとはボルトで締め付けてある。



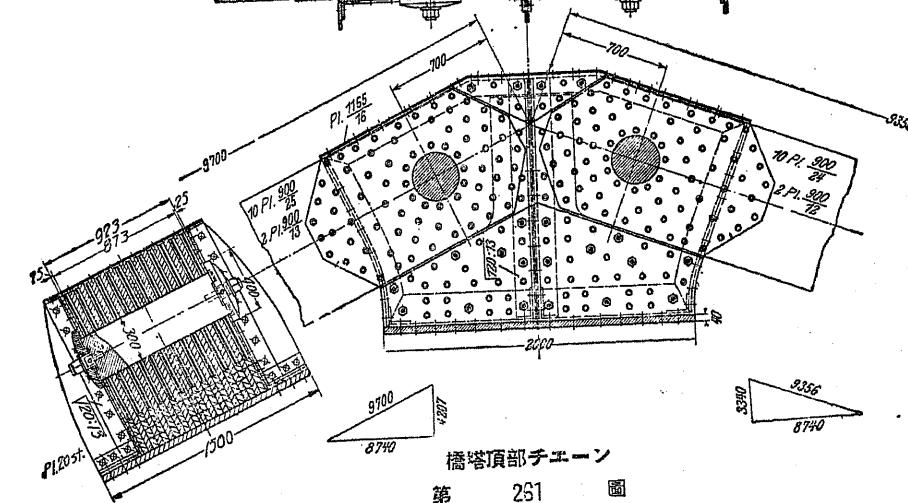
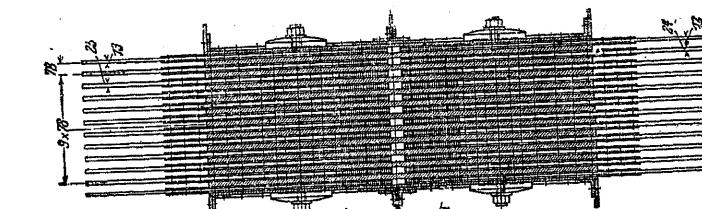
第 258 圖



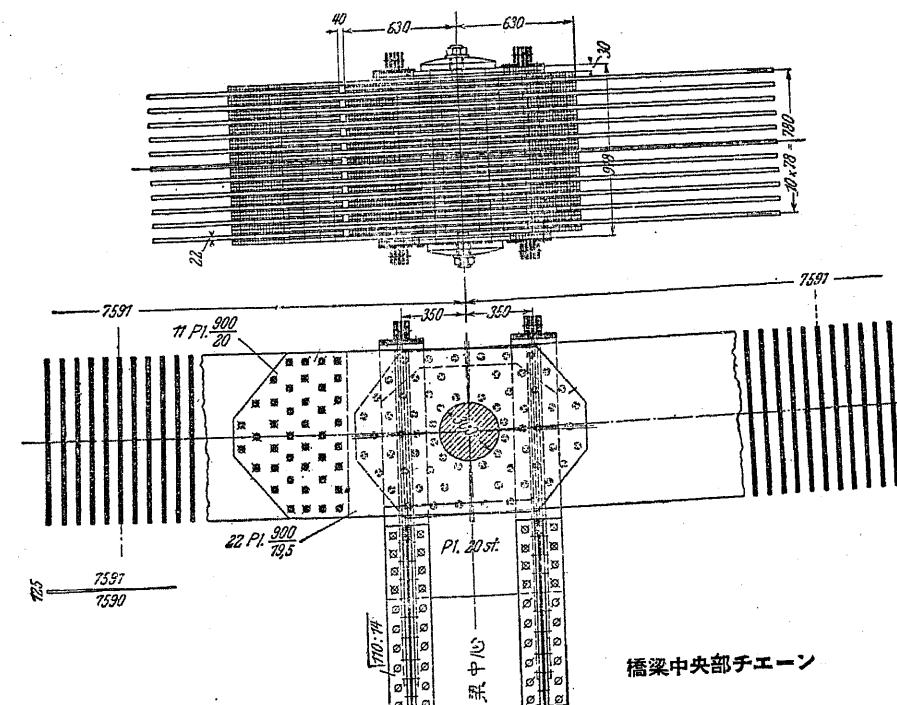
第 259 圖



端構造の刷縮



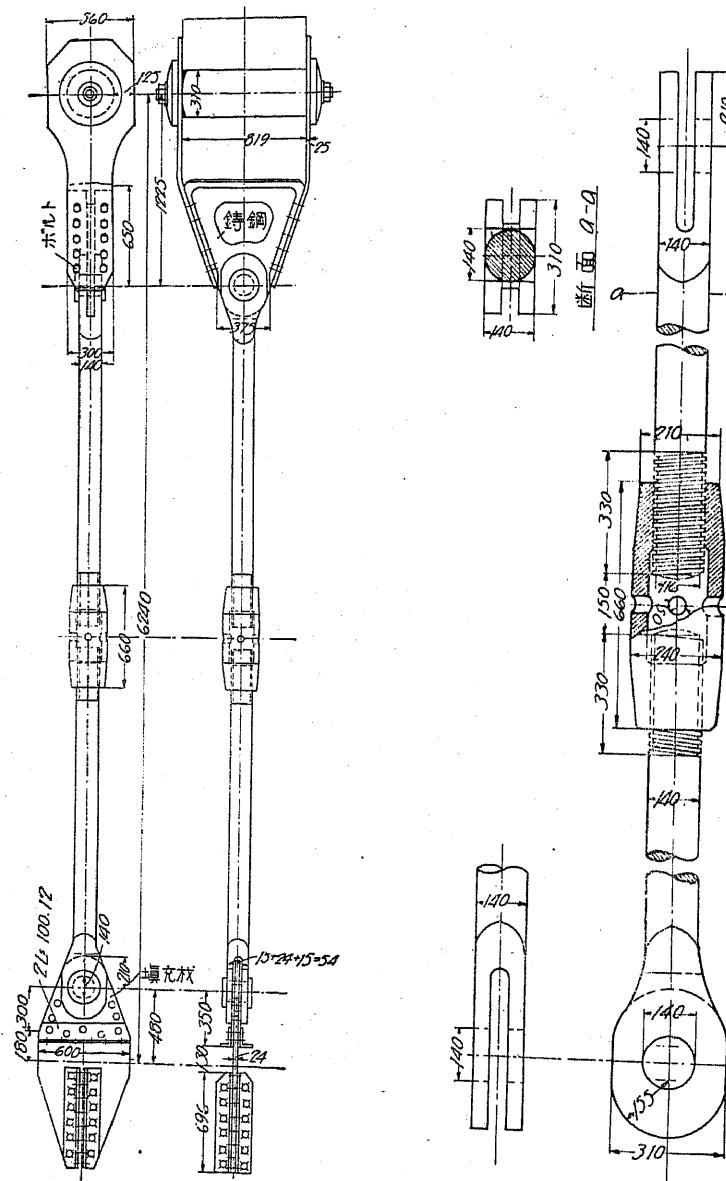
第 251



### 橋梁中央部チエーン

第 262

第259圖は1915年に竣工せしケルンのライン橋(道路橋)で、三徑間に亘るチェーンが補剛鉄桁を吊るし、補剛桁はチェーンの両端とは鉸で連結し水平張力を受くる三次不静定で四支點を有する連續桁である。中央徑間は $184.46\text{ m}$ 、側徑間は各 $92.23\text{ m}$ 、チェーンの垂矢は中央徑間で $18.5\text{ m}$ 即ち徑間長の $\frac{1}{10}$ 、側徑間 $4.62\text{ m}$ である。吊材の間隔は $7.59\text{ m}$ で、塔の兩側だけは



吊 材

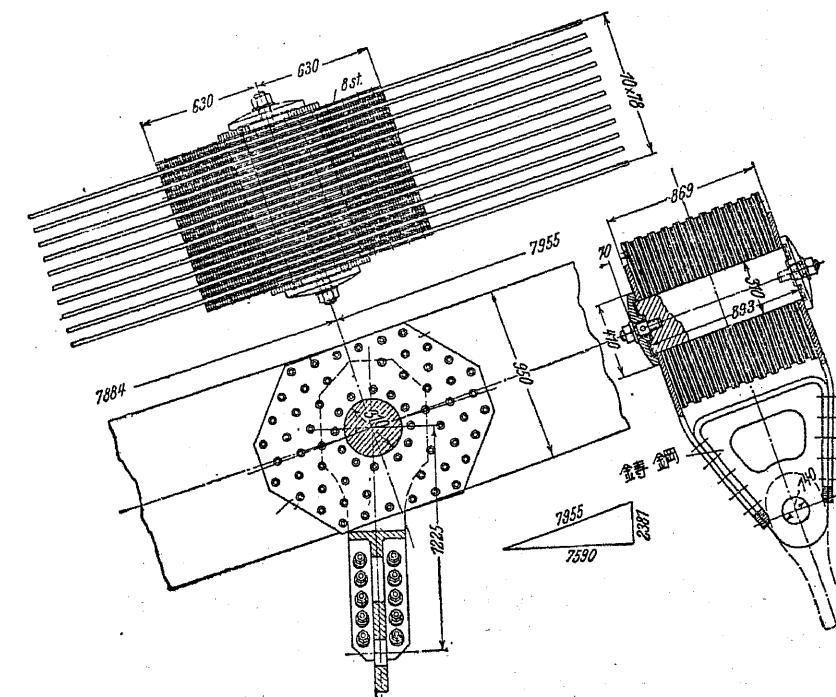
吊材詳細圖

8.74 となせり

補剛桁は複壁鋼桁より成り中央に於て 3.2 m, 兩端に於て 3.3 m, 塔の所では 5.50 m の高を有す。補剛桁の上線は車道の縦断勾配に倣ひ、兩橋脚及橋梁中央より 33.46 m 間は  $\frac{1}{40}$  の上り勾配、中央 66.92 m の間は 0.42 m の拱矢を有する拋物線形拱となれり。下線は大體上線に平行となし、側徑間に於ては橋脚より橋臺に至る間を滑かな曲線となしてある。補剛桁は 3.50 m の歩道の外側にあつて上部は密閉し、下部は開放された斷面を有し、腹板 ( $2 \times 320 \times 20$ ) の距離は 66 m, 上蓋鋼の幅は 90 (中央を分割する)、下蓋鋼の幅は各 45 cm で其の純間隔は 42 cm となし人の出入を便利ならしめてある。

補剛桁両端の細目は第260圖の如くボルト釘を用ひてチェーンとの繋結を圖り、又負反力を採るために支承は橋臺と鉤着せり。

チェーン及補剛桁はニッケル鋼(ニッケルとクローム 0.8~1.1%)で造り、破壊強度 5500~6500 kg/cm<sup>2</sup>, 降伏點 3600 kg/cm<sup>2</sup>, 破壊伸張度 18%, チェーンの許容強度を 1750 kg/cm<sup>2</sup> とし、副應力を加算するときは 2160 kg/cm<sup>2</sup>, 補剛桁に對しては許容強度を 1650 kg/cm<sup>2</sup>, 副應力を考へし場合は 2025 kg/cm<sup>2</sup> に増加した。



第 265 圖

チエーンは平鋼より成り、其の連結箇所は添鉄を以て補強する(第261圖及第262圖)。中央徑間に於けるチエーンは總て900mmの高を有し、塔上に於ては十枚の900×24と、二枚の900×12の平鋼より成る故(第261圖)、900×24の平鋼を十一枚使用せしと同結果になる。

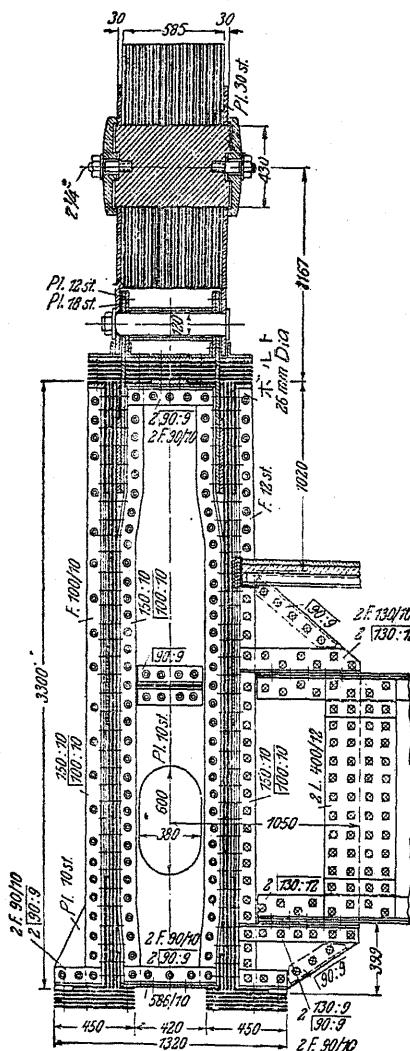
中央徑間の中央に會するチエーンは、十一枚の  $900 \times 20$  の平鋼より成り、二十二枚の  $900 \times 19.5$  の添鉄（第262圖）及徑  $300\text{ mm}$  のボルトを以て連結せり。側徑間に於けるチエーンの高は塔上で  $900\text{ mm}$ 、橋端で  $1500\text{ mm}$  となし、補剛桁の間に挿入するに便ならしめたり。側徑間のチエーンで塔に隣接せし部分は、十枚の  $900 \times 25$  平鋼と二枚の  $900 \times 13$  平鋼（第261圖）よ

り成り、桁端に於けるものは五枚の  $1500 \times 24$  平鋼及二枚の  $1500 \times 12$  平鋼、其の次のものは六枚の  $1500 \times 24$  平鋼、其の次からは各厚  $24\text{mm}$  のもの七枚を用ひ、其の高は  $1500\text{mm}$  より  $1300\text{mm}$  に減じてある。添釦は補強された各アーチ材の總厚が、 $39\text{mm}$  となる様な寸法となしてある。

吊材は徑 140 mm の棒鋼より成る(第 263 圖及第 264 圖)。其の上部はチェーンを取巻く錫鋼と鉗結し、其の下部は袖剛桁の上突縁を貫通する鍛と常に鉗結する。吊材は中央の所で切斷し、架設に際して袖剛桁の高を調整し得る様連結ナット(Coupling nut)で繋いである(第 264 圖)。

相隣接する各チェーンの繼手（第259圖）  
6點）は第265圖の如くなし、徑310mm  
のボルトの長は繼手に於ける全厚より幾分  
長くし、其の外側には軸の方向に螺旋を切  
り、建込ボルト（Stud-bolt）を挿入し、  
坐鐵とネヂで之を締付くる。

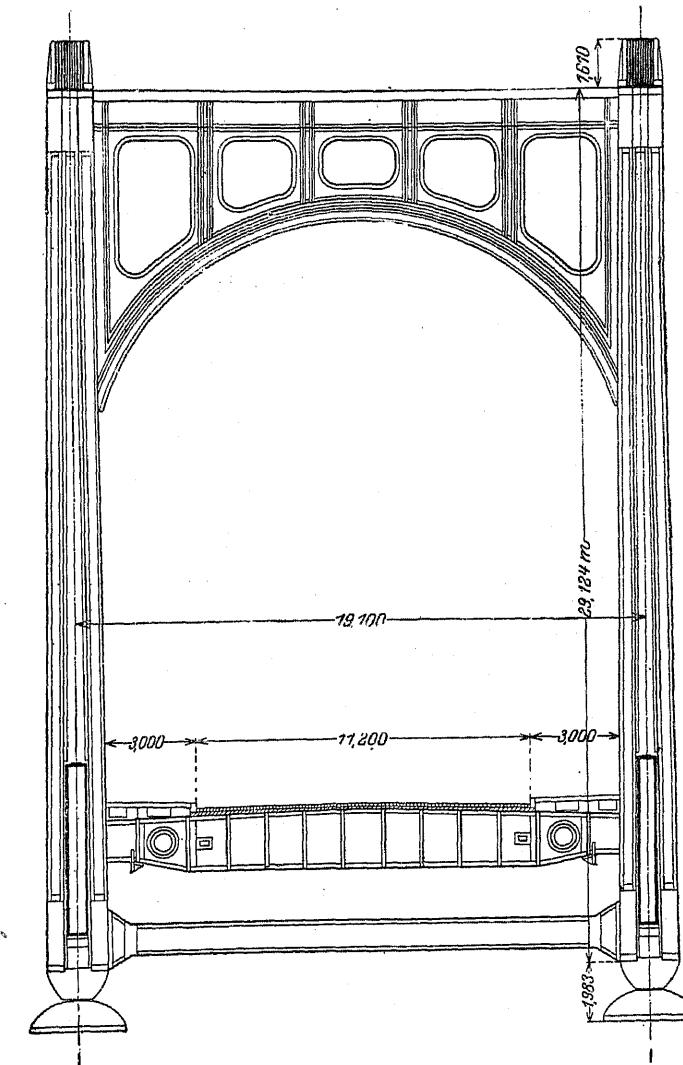
第266圖は第259圖3點に於ける細目を示すのである。



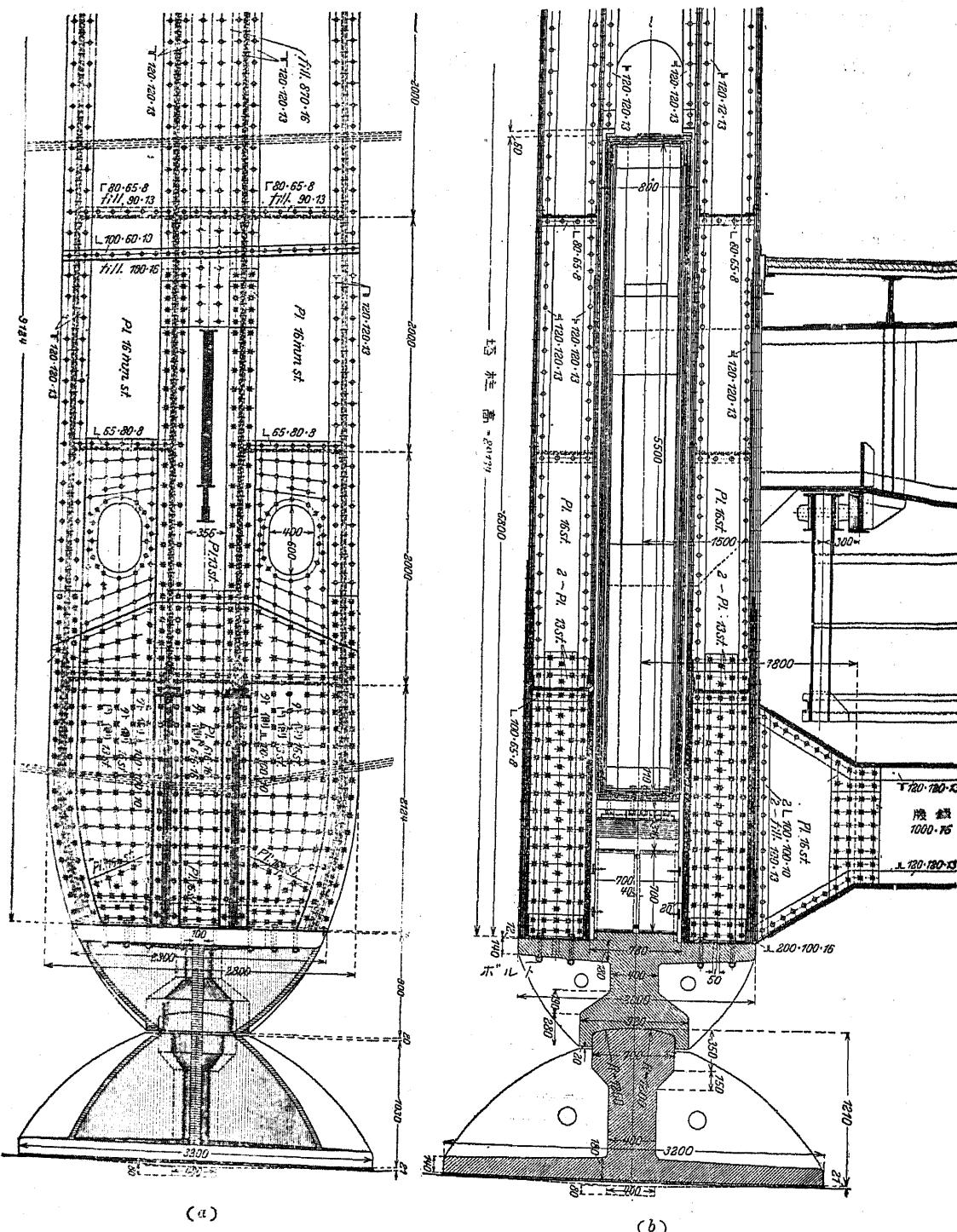
第 253

第267図は橋門、第268図は鉄脚を示し、(b)は補剛筋及支承の断面で、第269図は鉄脚の頭部を示してゐる。鉄脚は橋軸と並行せる四枚の16mm厚の板より成り、同厚の板で連結され、尚2.0m間隔にある隔板で補強されてゐる。

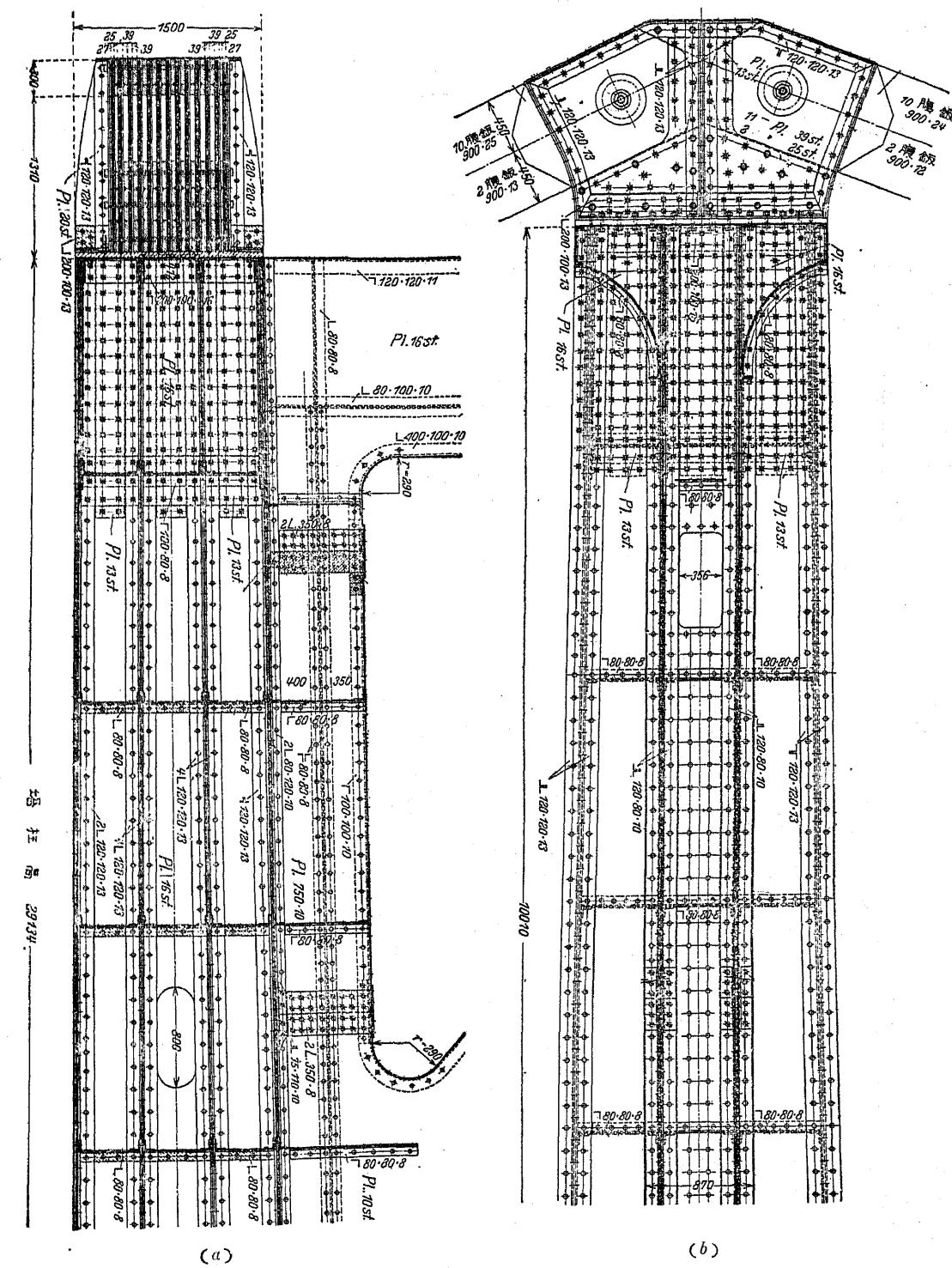
(2) チエーンが平鋼を重ね合はせて造られしとき。第270圖は1910年に完成せしブレスローのカイザー橋の一般圖であるが、補剛構及チエーンは歩道の外側に在る。垂矢  $\frac{1}{10}$  を有するチエーンは石造塔に支へられ、是より適當の傾斜で橋臺に導かれ、此處で方向を轉じて鉛直となし橋臺に鎮徳せり。補剛構は並行の弦を有し、上弦は車道上面に並行となし、中央に於て3脚



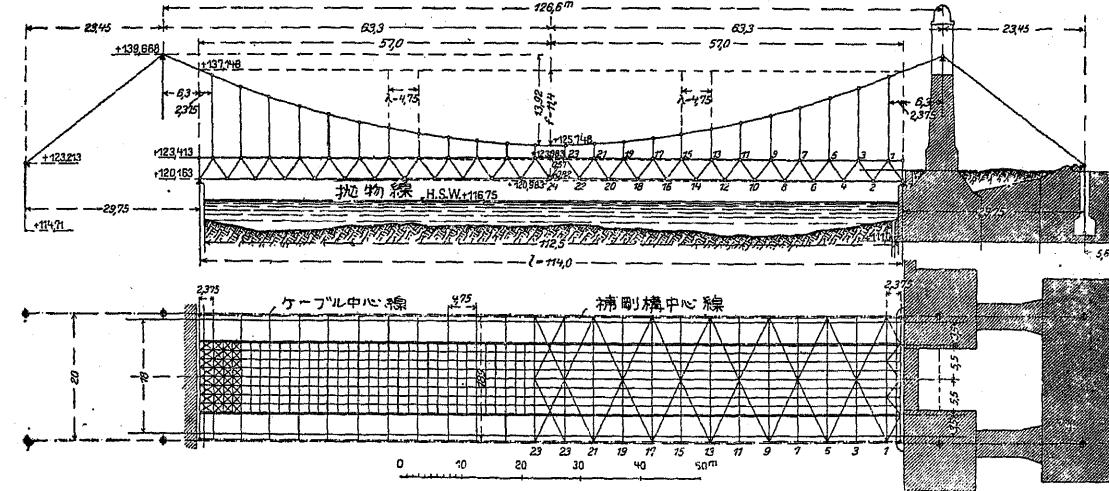
第 267 圖



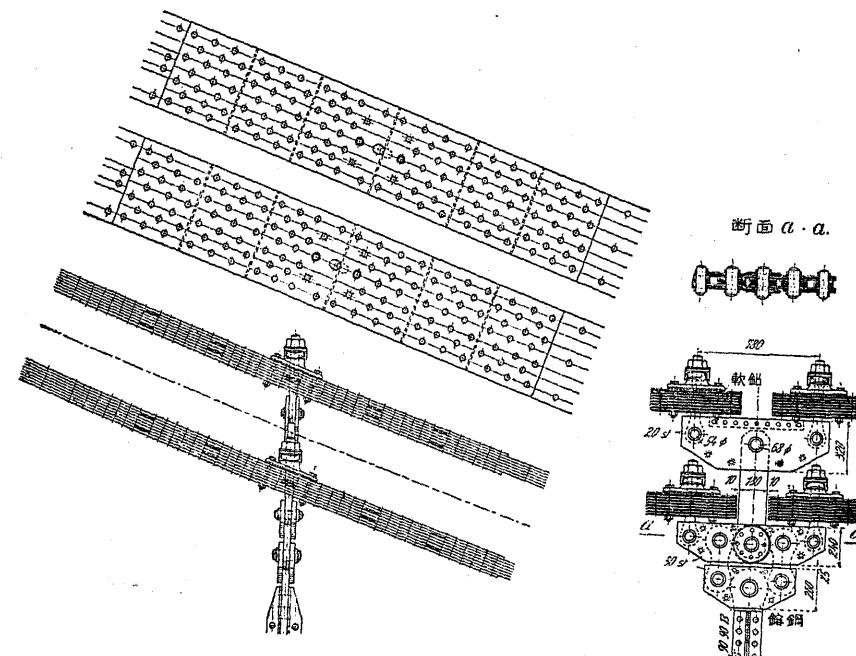
第 268 圖



第 269



第 270 頁

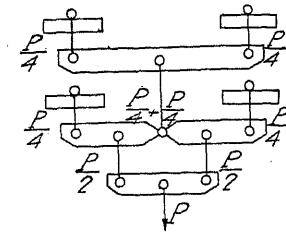


第 271 圖

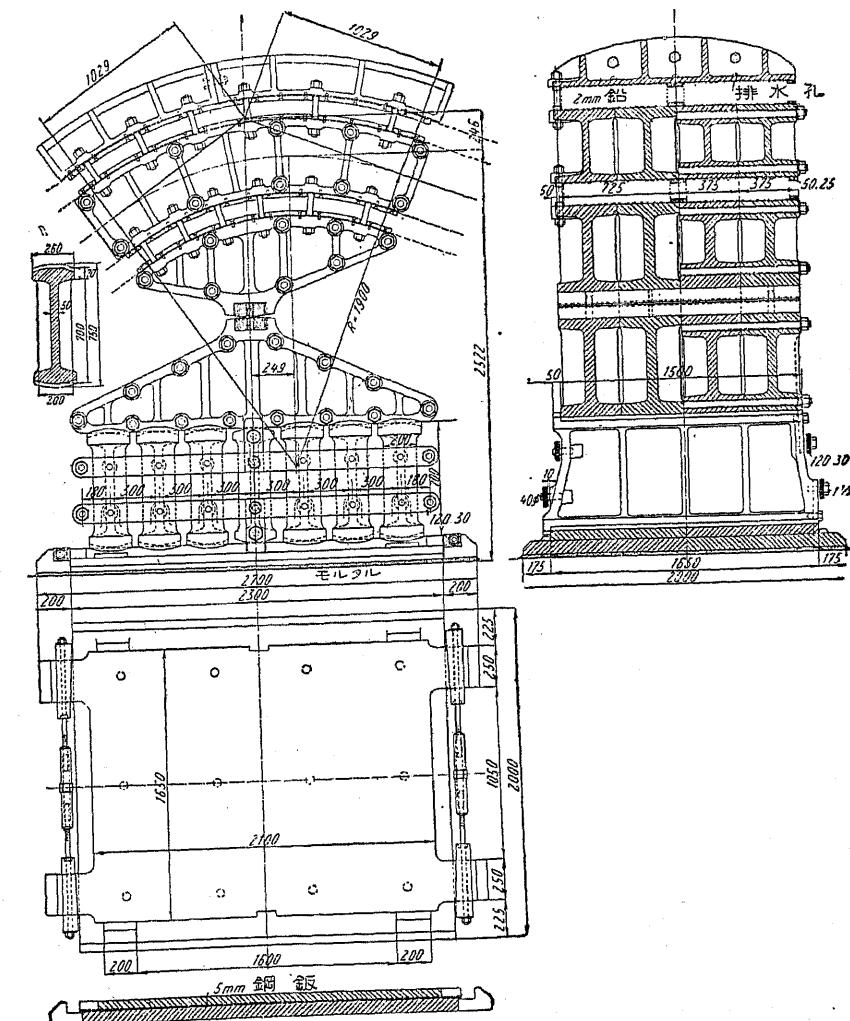
(徑間の  $\frac{1}{36}$ )、兩端に於て  $3.25\text{ m}$  の高を有する。

チエーンは四本のバンドより成り、各バンドは互に鉄結せし六本の  $580 \times 17$  平鋼より成る(第271圖)。平鋼を重ねた全厚を鉄結することは不可能であるから、唯一の平鋼の束よりチエーンを造らない様にする。チエーンの總ての斷面に應力を等布せんとせば、上下に用ひし各バンドを更に二箇の平行したバンドに分けることが必要である。上より來る太陽の

光線に依つて不平等に温められる結果、上下にあるバンドは不均一の膨脹をなすから、吊材との



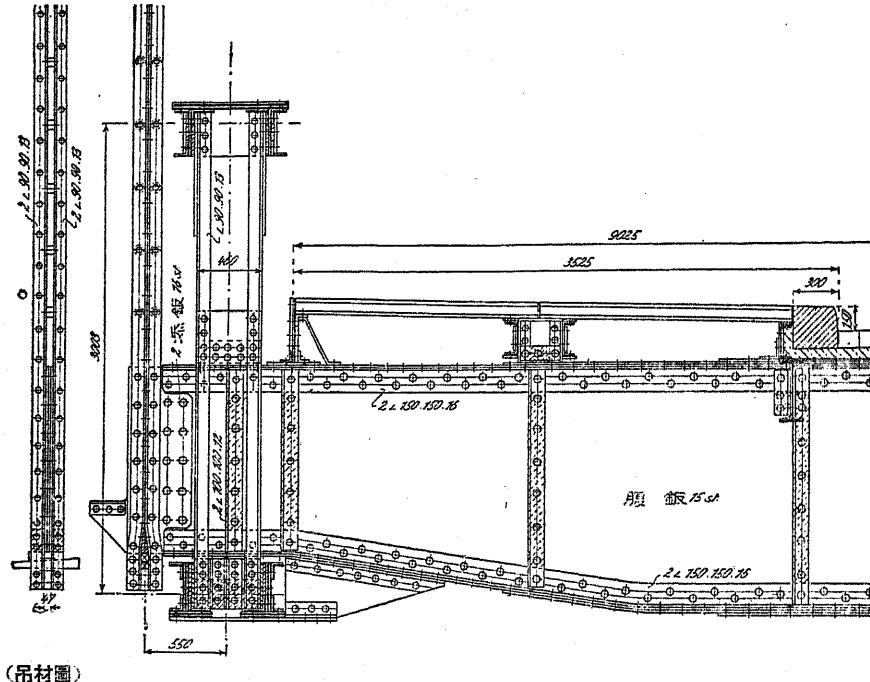
第 272 圖



第 273

取付箇所で相互に緊結すれば、不均一の應力を生ずる。之が上述の如くチエーンを一とせず上下左右のバンドに分たねばならない理由である。本橋に於ては第271圖の如き形に造り、各バンドが第272圖に示すが如く荷重の  $\frac{1}{4}$  を探る様になしてある。

チエーンの塔上に於ける支承は第273圖に明示するが如く、一枚の底板、七箇の輻子、支承臺、下方の二箇のバンドを載せる鞍、上方の二箇のバンドを導く中央部及要蓋より成り、後三者は互にボルト締めとなつてゐる。横桁は補剛構の鉛直材を貫通し（第274圖及第275圖）、其

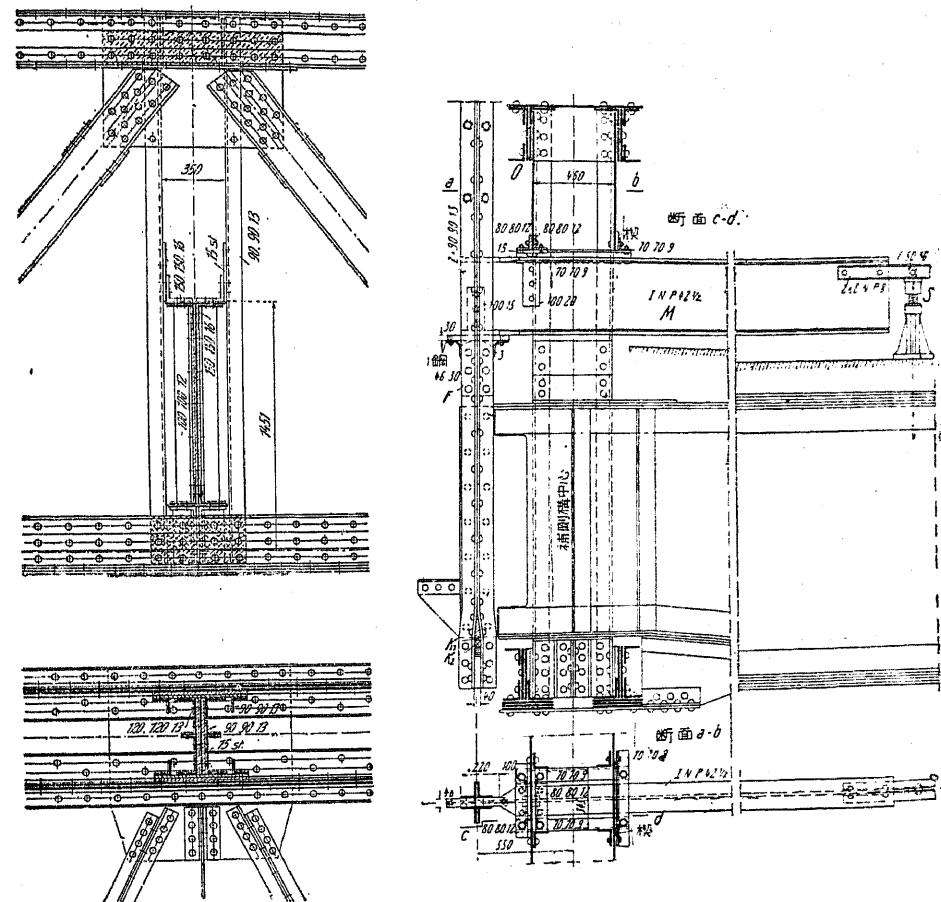


第 274 圖

の下部は鉛直材に鉄結せる横材に支へられ、其の上部は鉛直材に鉄結せる山形鋼及平鋼で保持される。又構軸を鉛直材の外側に延長し、之を補強して吊材に鉄結せば横剛度を増進するに效果がある。

補剛構は死荷重を受くることに關與するのみならず、チエーンを補剛し集中荷重をチエーンに等布する役目を有する。全死荷重を採つた後（未だ横桁と吊材とを鉄結する以前）には、總ての腹材と上弦の繫釘とのネジ締めを解けば、補剛構の應力は零となり、楔の裝置を弛むれば、支承の働きを中止することが出来るから、チエーンは計算上假定した形となる。

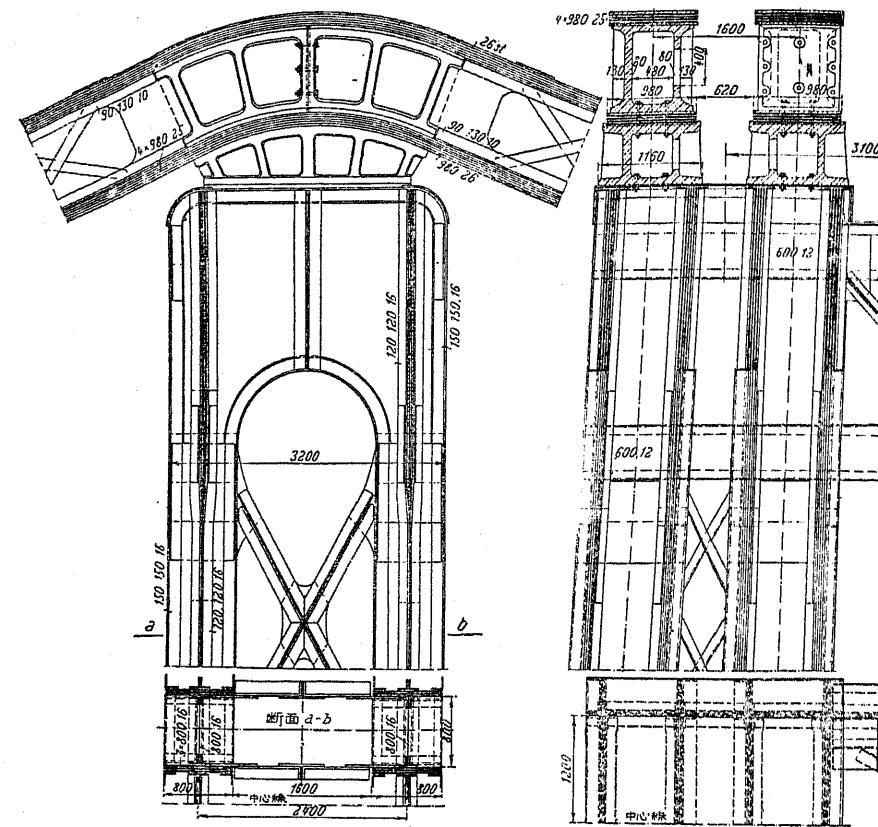
補剛構は計算上の形になさねばならなかつたか、之は車道及補剛構の上げ下げに依つて加減することが出来た。此の目的のため吊材の山形鋼間に補剛材 F（第276圖）を鉄結し、之と補剛構



第 275 圖

の上弦の繫釘 O との間に楔 M を嵌め、其の放端は車道に立てた壓螺旋（Set screw）S に連絡してある。補剛構が扛上せば、吊材の下部にある楔 k<sub>1</sub> 及 k<sub>2</sub> は S が上方に廻轉することにより弛められて後方に引寄せられ、補剛構が沈下せば、k<sub>1</sub> 及 k<sub>2</sub> は S の僅かの廻轉に依り弛められて元に歸るのである。然る後補剛構が吊材に對して所要の高だけ下に移動し、遂に楔がしつかりと引き締めらるゝまで S を振ぢ下ろす。正しい位置が完全に出來れば、上弦の繫釘に取付けた總ての腹材は螺旋で締められて、楔裝置の引き締めに依つて補剛構の支承は再び作用することになる。

次に吊材に孔を穿ち、未だ鉄結されない總ての接合を鉄結する。第277圖は下部に鉗を有する鐵塔上に於けるチエーンの支承を明示する。鐵塔は四箇の H 形断面より成り、縱及横の方向は山形鋼の綾構で互に連結してある。

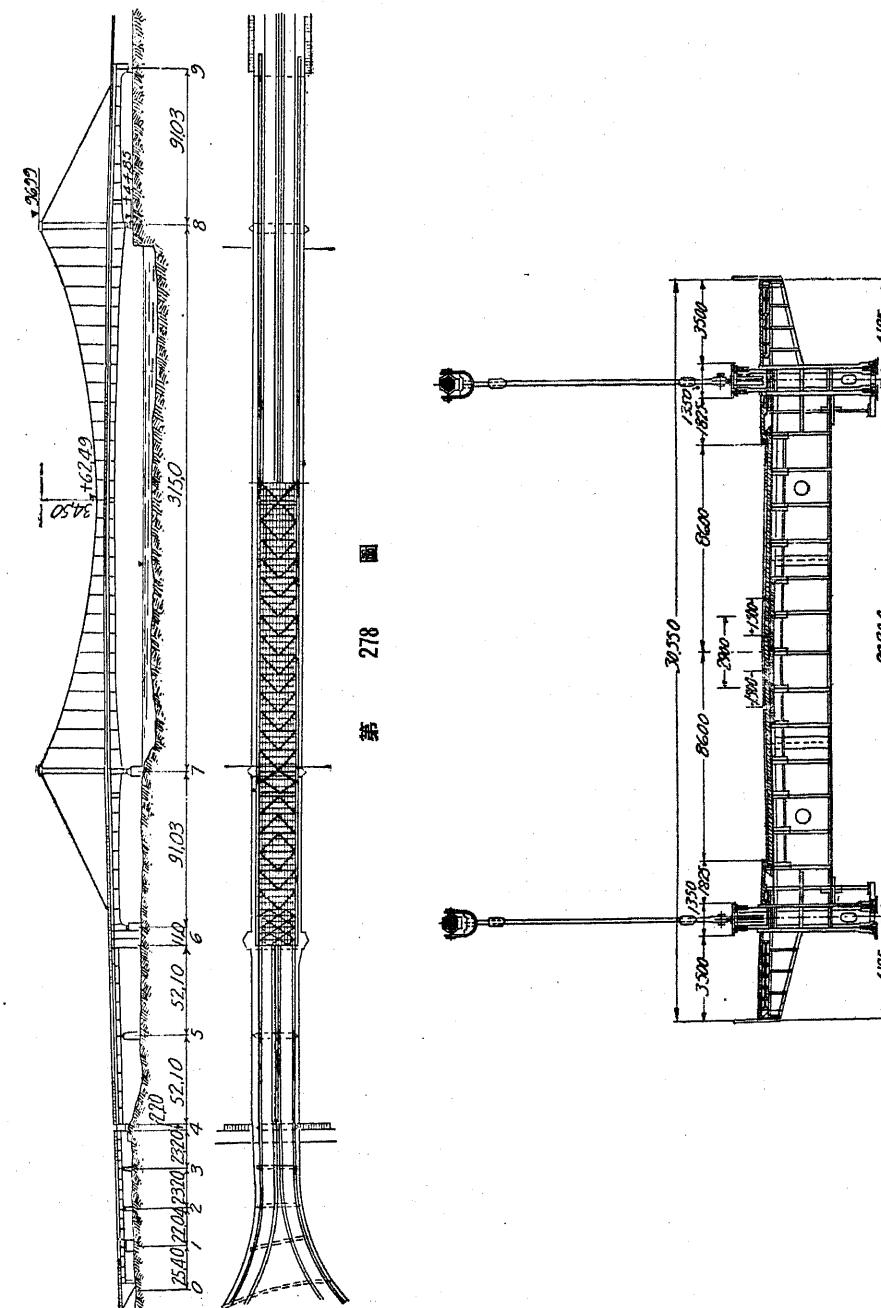


第 277 圖

6. ケーブル吊橋 (Cable suspension bridge) (1) ライン橋。ケルン・ミユルハイム (Köln-Mülheim) のライン橋 (第278図) は主徑間 315.0 m, 側徑間各 91.03 m で補剛鋼桁を有す。其の断面は第279図の如くで、補剛桁の中心間距離は 22.20 m, 車道幅 17.20 m, 自転車道は各 1.825 m 歩道は各 3.50 m であるが橋塔の所では 2.83 m, 橋の両端に於ては 3.225 m に縮小されてゐる。

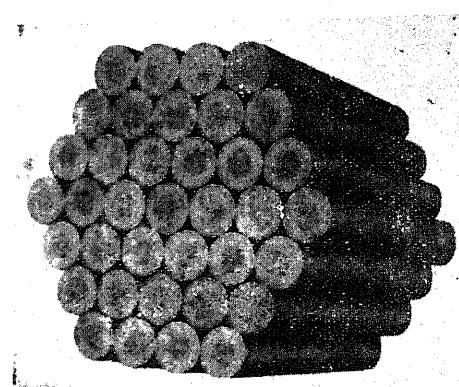
(a) ケーブル。此のケーブルには歐洲式の子繩ケーブル (Stranded cable) を用ひたが、其の特徴は工場で完全な機械を以て製作し得ること、架設の容易なること及架設期間を短縮し得ることにある。心綱を包むには、其の外皮として六本の子繩を要する。次に十二本、十八本、二十四本と六本宛を増加する。從て六角形のケーブルを造るには七本、十九本、三十七本及六十一本の子繩を要することとなる。本橋のケーブルには三十七本の子繩を集め (第280圖) 各子繩は約 218t の力を受けてゐる。

第281圖は本橋に用ひし子繩の断面である。

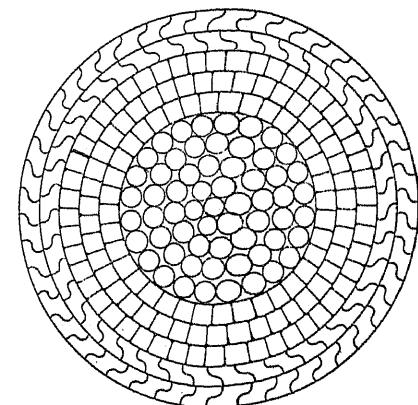


278

圖書



第 280 圖



第 281 圖

(i) 直径 4.2 mm の六十一本の圓形針金（心綱一本の外に 6, 12, 18, 24 の四列よりなる）は

$$\sigma_r = 145 \sim 150 \text{ kg/cm}^2 \quad F = 830 \text{ mm}^2$$

(ii) 4.2 mm 高の百二十九本の楔形針金 (36, 43; 50 の三列) は

$$\sigma_F = 140 \sim 145 \text{ kg/cm}^2 \quad F = 1800 \text{ mm}^2$$

(iii) 4.1 mm 高の八十七本の被覆針金 (41, 46 の二列) は

$$\sigma_k = 135 \text{ kg/cm}^2 \quad F = 1625 \text{ mm}^2$$

を有し、

計算上の總斷面積は ..... 4255  $mm^2$

計算上の破壊強度は ..... 604 t (各針金の強度の和)

實際上の破壊強度は ..... 592 t

子嚢の直徑は ..... 80 mm

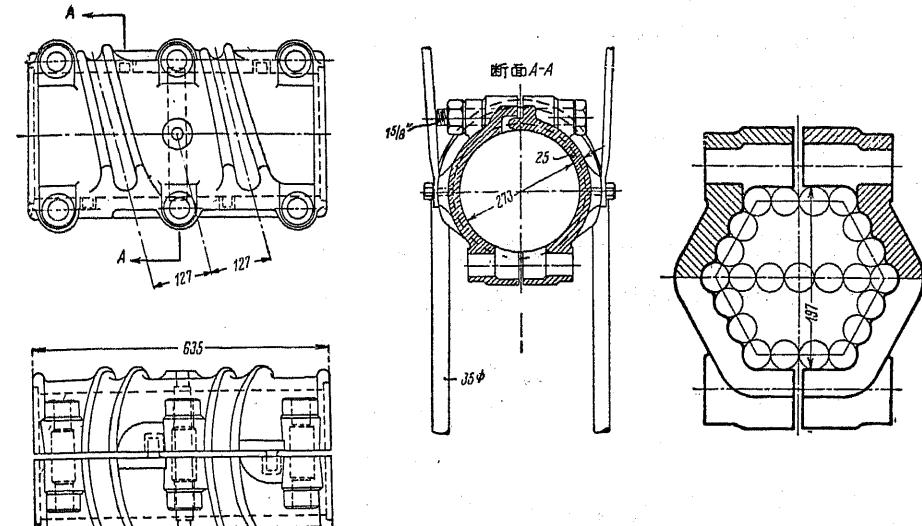
子糞の重量は ..... 36.7 kg/m<sup>3</sup>

となる。上式中  $\sigma_p$  は破壊強度、 $E$  は面積を表す

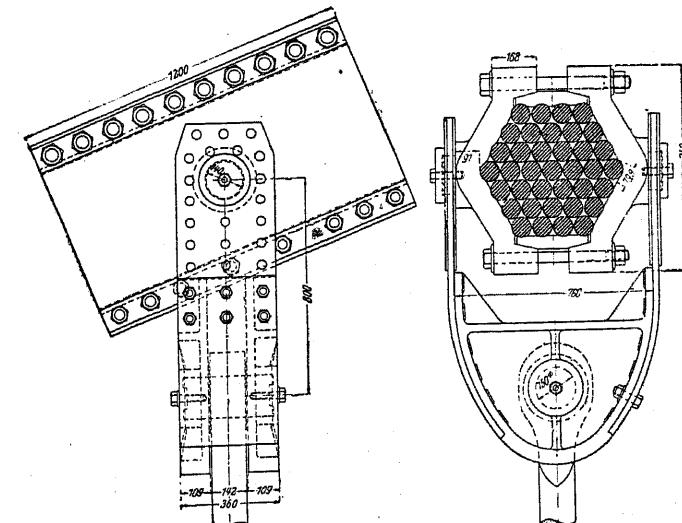
(b) ケーブル帯 (Cable band)。補剛構の荷重をケーブルに傳ふる吊材の連結にはケーブル帯を用ふる。吊材に作用する鉛直力は二つの分力に分解され、其の一はケーブル軸に直角の分力で之はケーブル帶の反力となり、他の一はケーブルに平行の分力で之はケーブルとケーブル帶間の摩擦に依りケーブルに傳はる。

以上の摩擦力はケーブル端をボルトでモーティスに締付ける場合の値である。

平行ワイヤーケーブルの場合は各子繩を一所に集めて水圧機で締付け初め六角形のものを圓形にす。デラウェア橋では六箇の圓筒でケーブルを締付けたが其の各圓筒は 55 の壓力を



第 283 圖

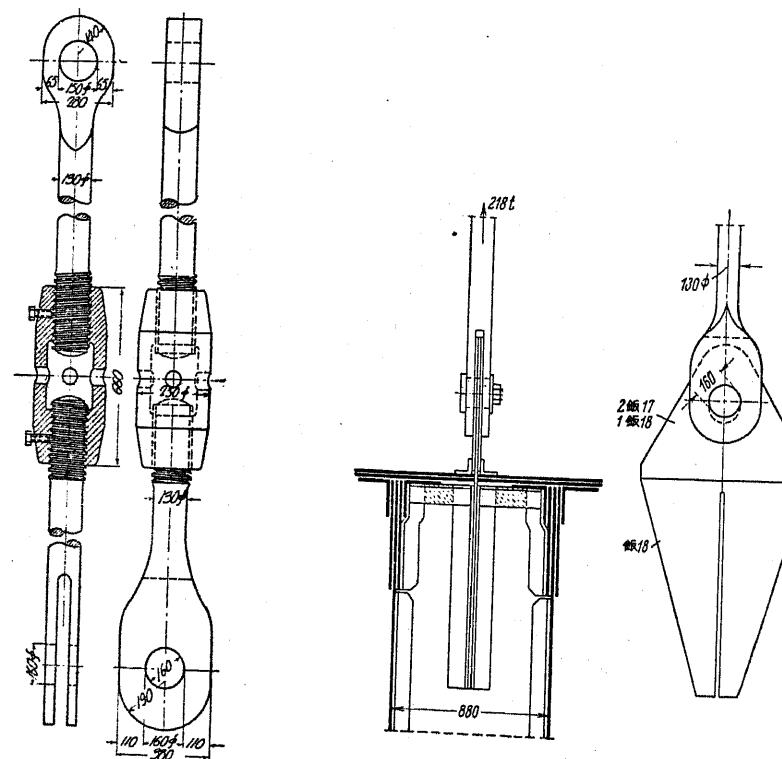


第 284 圖

有した。針金間の空隙は此の壓搾により著しく縮小され、ケーブルの直徑は完成後  $D = 1.23 - 1.26\sqrt{F}$  となつた。但し  $F$  は針金の總斷面積とする。此の結果に依れば尚針金總斷面積の 19~25% の空隙が存在することになる。ケーブルを壓搾した後にはケーブル直徑の約二倍の間隔に柔軟なる針金を卷いて之を締付くる。斯の如くして作り上げたケーブルの周圍にはケーブル帶を取付くる、第 282 圖は米國 Mt. Hope 橋に用ひたケーブル帶の例である。

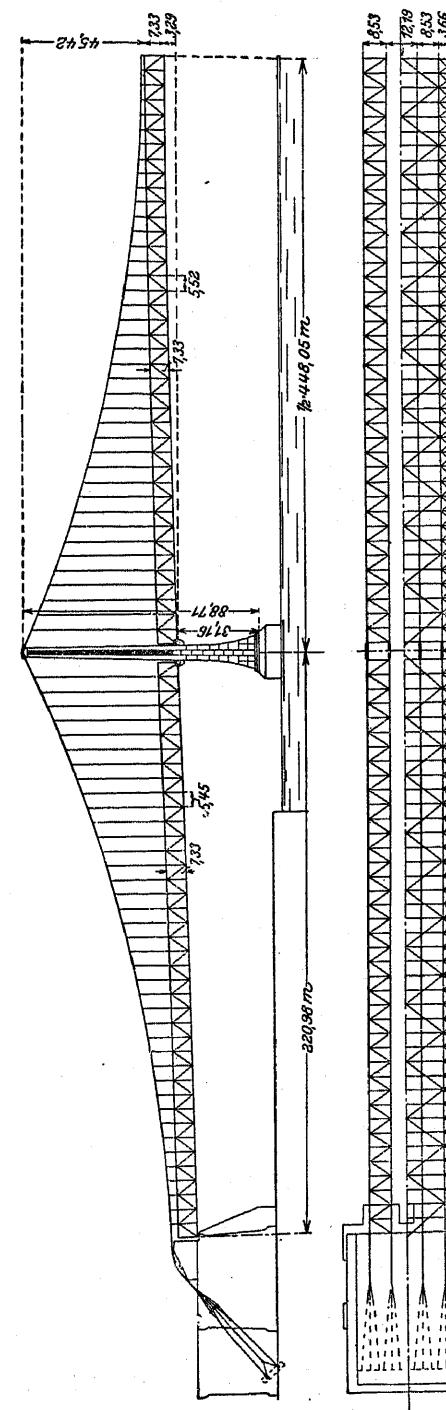
ケーブル帶は二箇の鑄鋼製皮殻より成り其の皮殻はボルトを以て締付くる。米國で常に用ふる吊材のロープは、ケーブル帶の軸に或る傾斜をなし、其の下端が漏斗状に廣がつた小溝に嵌めてある。

ワイヤーロープの場合にも子繩を集めて一つの束となし、之をケーブル帶で壓縮する。第283圖はカナダの Grand-Mere 橋のケーブル帶であるが、平行ワイヤーケーブルに對するもの（第282圖）と違つて六角形をなしてゐる。此のワイヤーロープは直徑 35 mm の子繩三十七本より成る。第284圖はライン橋に用ひたケーブル帶で、左右双方の皮殻は楔及ボルトを以て相互に且つ吊材を取付くるラーメンとも緊結してある。

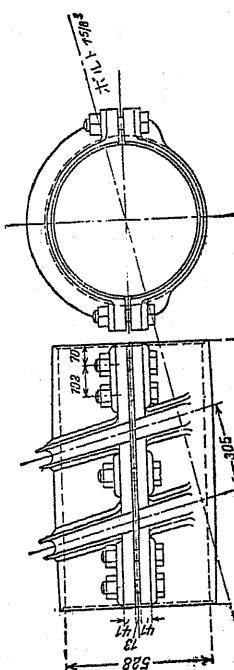


第 285 圖

第 286



287



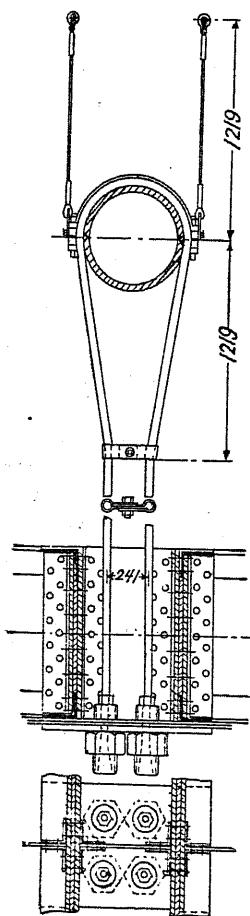
288

(c) 吊材。ケーブルと補剛構とを連結する吊材は  $130\text{ mm}$  の直径を有し、其の長を調節するため聯結螺旋 (Coupling nut) を挿入し (第285圖)、其の兩端にはアイバーを有し、螺絲は膨徳 (Upsetting) となしてある。吊材の各部は最大  $218.1t$  の張力に耐へ、兩眼の間の長は最長のもので  $32.52\text{ m}$ 、最短のもので  $2.18\text{ m}$  である。

第286圖は吊材と補剛構上弦との取付を示してゐる。

(2) マンハッタン橋。紐育のハドソン河に架したマンハッタン橋 (Manhattan bridge) は三徑間より成り、中央は  $448.05\text{ m}$ 、兩側は各  $220.98\text{ m}$  の長を有する (第 287 圖)。四本の主構を有し、兩側の  $8.53\text{ m}$  は高速及路面電車のため二階造りとなし、中央  $12.19\text{ m}$  は車道、最外側には各  $3.66\text{ m}$  の歩道を架出しとなしてある。構桁は主権の下端に連續して鉄を有しない。

補間構は高  $7.33\text{ m}$  の平行弦より成り、其の格間長は中央徑間に於ては  $5.52\text{ m}$ 、側徑間に於ては  $5.45\text{ m}$  である。



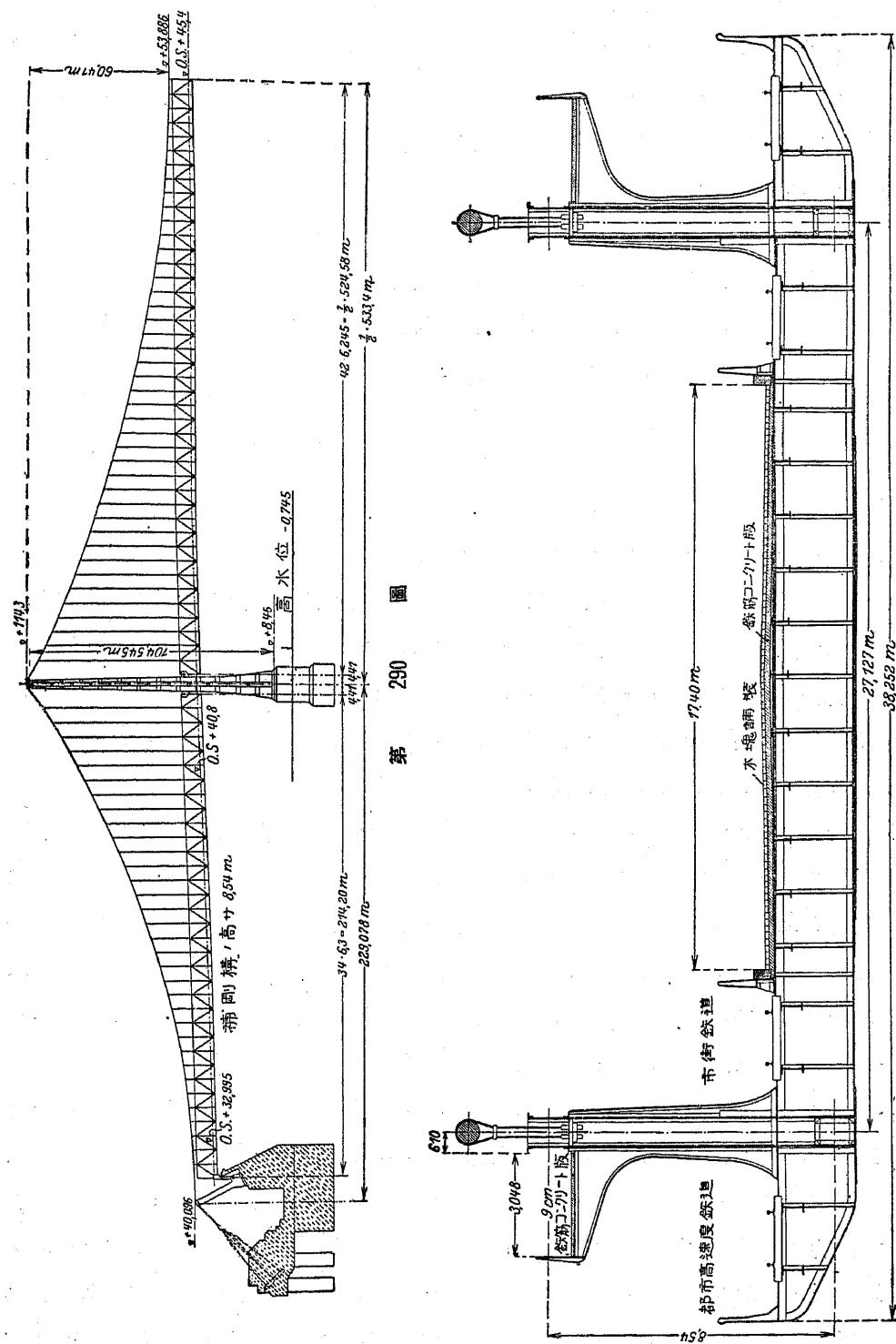
第 289 頁

吊材をケーブルに取付くるには、ケーブル帶に依る(第288圖)。之は突縁を有する環を双方より合せ其の突縁をボルトで締付け、其の内面は粗にしてケーブル上を走ることのない様にする。ロープ吊材の場合はケーブル帶にはロープを支ふるため、其の帶の外周に溝又は鞍を鋸造する。ケーブルの傾斜が種々であるから、ケーブル帶の溝にも種々の角度を與へねばならない。

ケーブルが針金の群より成るときは、帶の内側に柔かい  
鐵の填材を挿入して攔む力を増進し、且つ濕氣を防ぐこと  
が必要である。ケーブル帶はケーブルに濕氣の侵入するこ  
とのない様にせねばならないから、其の端縁は雨を驅逐す  
る様に設計し又總ての縫手は完全に填隙する。

吊材の放端は、高級鋼を鑄鍛（Drop-forging）して造つた糸（Socket）内に閉鎖する（第289圖）。ロープの端を糸の殻内に挿入し、針金の末端を開き、冷却に際しても收縮する虞なき鎔融せし鉛を其の間隙に填充する。マンハッタン橋に使用せしものは螺旋糸（Threaded socket）で圓墳形をなし、其の外周に螺旋を切りナットを締めてお

ケーブルの化學的成分は  $C < 0.85\%$ ,  $Mn = 0.55\%$ ,  $Si = 0.2\%$



291

より成り、其の許容強度は  $4220 \text{ kg/cm}^2$  で風壓を加算せるときは  $5132 \text{ kg/cm}^2$  となした。

(3) デラウェヤー橋。フィラデルフィヤ (Philadelphia) のデラウェヤー橋 (Delaware bridge) は  $229.08 \text{ m}$ ,  $533.4 \text{ m}$  及  $229.08 \text{ m}$  の三徑間より成る (第290圖)、第291圖は橋梁の断面を示す。中央徑間の垂矢は  $60.41 \text{ m}$ 、側徑間の垂矢は各  $11.28 \text{ m}$  で、ケーブルは六十一本の子繩より成り、各子繩は直徑  $4.97 \text{ mm}$  の三百六本の針金を撚つて造つたものである。18666本の針金の断面積は  $3626 \text{ cm}^2$  であつて、ケーブルを圧縮して圓形となした後には  $74 \text{ cm}$  の直徑を有してゐる。死荷重は中央徑間に於て  $38.69 \text{ t/m}$ 、側徑間に於て  $40.18 \text{ t/m}$  で、活荷重は普通  $8.93 \text{ t/m}$ 、特別に密集せる場合には  $17.86 \text{ t/m}$  を計算の基礎となした。故に水平推力は

$$\begin{aligned} \text{死荷重より} \quad H_g &= 11200 \text{ t} \\ \text{活荷重より} \quad H_p &= 4950 \text{ "} \\ H &= 16150 \text{ t} \end{aligned}$$

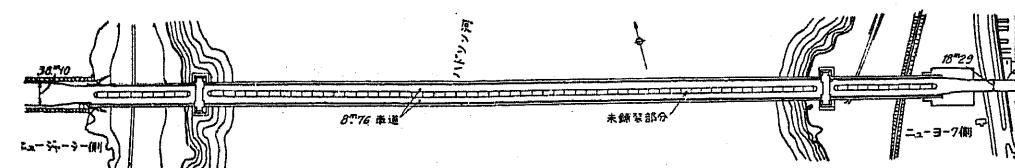
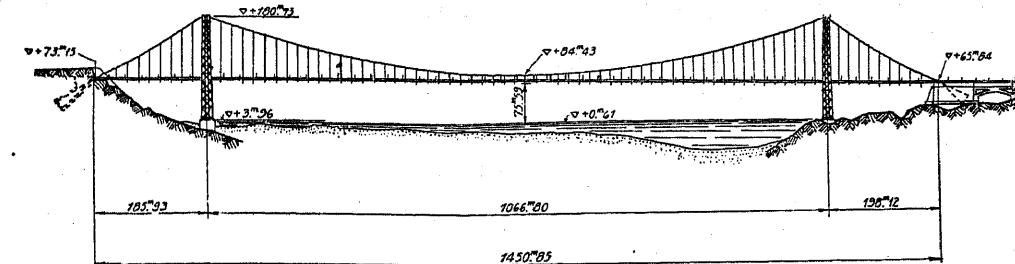
となる。

ケーブルの最大許容强度は  $5522 \text{ kg/cm}^2$  となした。

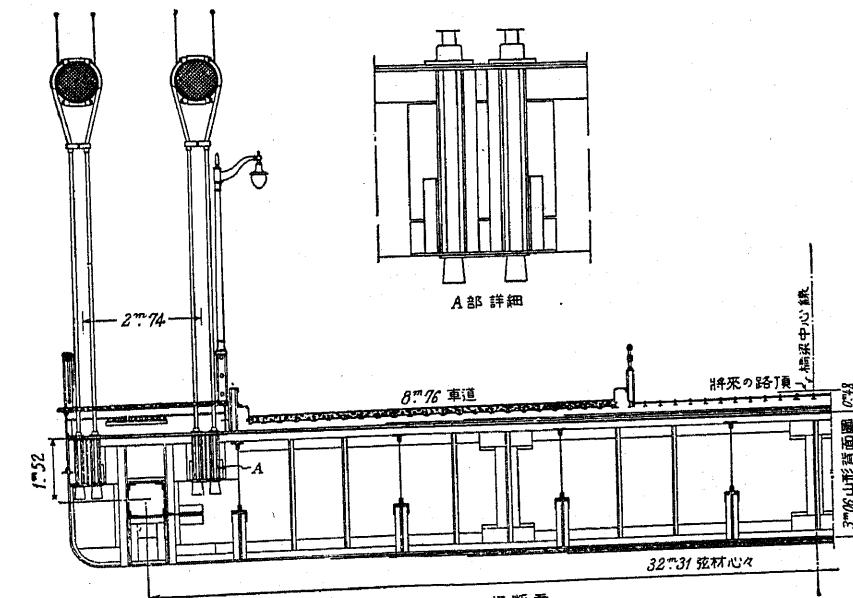
デラウェヤー橋の補剛構は平行弦で  $8.54 \text{ m}$  の高を有し、其の格間長は中央徑間に於て  $6.245 \text{ m}$ 、側徑間に於て  $6.3 \text{ m}$  である。弦には Ni 3.2% のニッケル鋼を用ひ、其の破壊強度を  $6320 \text{ kg/cm}^2$ 、降伏點を  $3870 \text{ kg/cm}^2$  とし、許容强度は張力に對しては  $2810 \text{ kg/cm}^2$ 、壓力に對しては  $2460 \text{ kg/cm}^2$  となした。腹材には硅素鋼 ( $C = 0.4\%$ ,  $Mn = 1.0\%$ ,  $Si = 0.2\sim0.45\%$ ) を用ひ許容强度を  $2210 \text{ kg/cm}^2$  となした。

(4) ジョージ・ワシントン橋 (George Washington bridge)。紐育ハドソン河に架した吊橋で主徑間  $1066.8 \text{ m}$ 、側徑間  $198.12 \text{ m}$  (紐育側) 及  $185.93 \text{ m}$  (=ニュージャージー側) を有し、二階は車道幅  $27.43 \text{ m}$ 、歩道幅各  $3.05 \text{ m}$ 、一階は電氣鐵道四線の計畫であるが、現在は二階の部分だけ建設され而も其の中央部は未鋪装の儘で將來の擴築に備へたる故、現在使用されてゐるのは兩側  $8.76 \text{ m}$  の車道と兩側歩道だけである。桁下の有效高は紐育側の塔の所で  $59.44 \text{ m}$ 、=ニュージャージー側の塔の所で  $64.01 \text{ m}$  となした。第292圖は其の平面、側面及断面圖である。

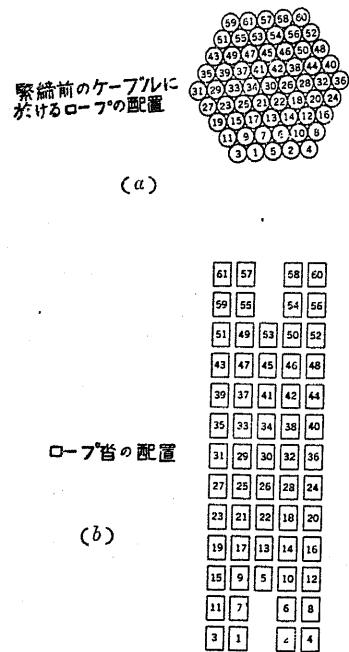
(a) ケーブル。直徑  $5 \text{ mm}$  の亞鉛引鋼線 26474 本を平行にして造られ  $914 \text{ mm}$  の直徑を有し車道の各側に一對並べられ、其の中心間距離は  $32.31 \text{ m}$ 、各側にあるケーブルの中心間隔は  $2.74 \text{ m}$  である。各ケーブルに於ける鋼斷面積は  $5180 \text{ cm}^2$  でロープの芯 (Strand shoe) より芯に至る長は約  $1.6 \text{ km}$ 、四本のケーブル内の針金の總重量は  $51000 \text{ t}$ 、針金の全長は  $168000 \text{ km}$  で赤道上に於ける地球の周圍の四倍より大きい。ケーブルは 61 本の子繩より成り (第293圖 a) 其の組立中は六角形をなしてゐるが最後には締めて圓形となすも、塔頂及鎮碇の鞍を通過する所



(a)

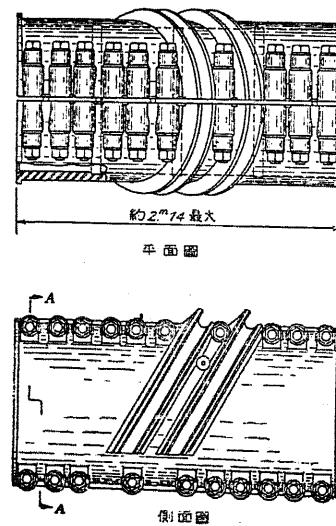


(b)



第 293 圖

穀の厚さは  $41\text{ mm}$  となせり。皮穀はボルトを締付くるため生ずる環張力 (Ring tension) のみならず尙多大の彎曲應力を受くる、蓋しボルトは皮穀に對し偏倚し、又ケーブル帶はケーブルを夫に合せる様締付けの際眞の圓形より多少變形するからである。

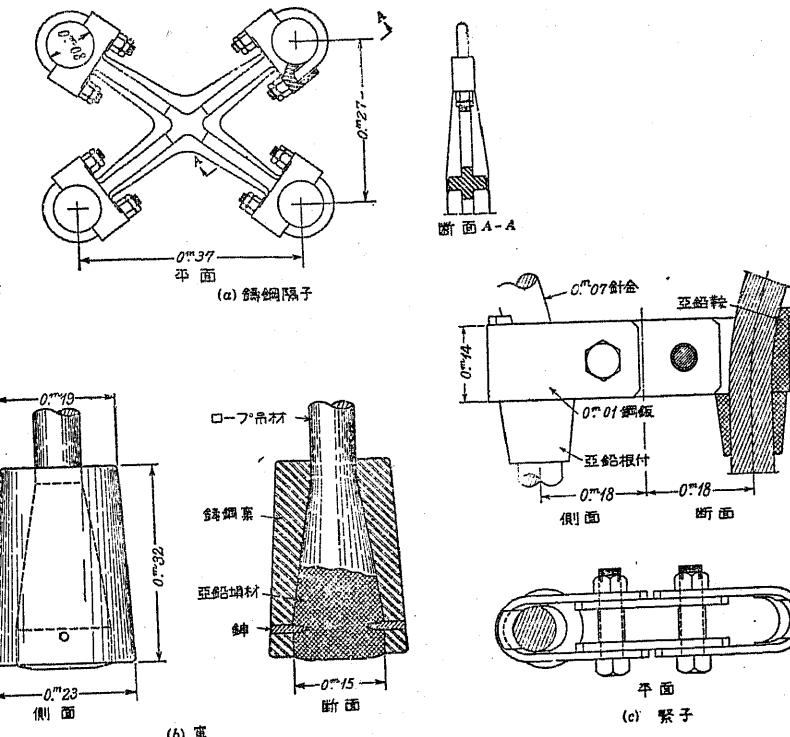


第 294 圖

では矢張六角形を保有する。

(b) ケーブル帶。ワイヤーロープ吊材を支ふるケーブル帶は二箇の半圓形鎌鋼より成り、之をボルトで完全に締付けて其の間にケーブルを把握する。各帶の外周にある溝に吊材ロープの綱耳を掛けてある(第294圖)。各格點のケーブル帶は主經間の中央を除き總てケーブルの傾斜部にあるから、吊材の張力に依り之が辻ることのない様に充分シツカリとケーブルを摑むことが必要である。其の摑む力は吊材の最大張力のケーブルに平行なる分力を許容摩擦係數で除した商に等しい、ケーブルに垂直の分力は摩擦を生ずるに有效なりとは考へない。以上の摑む力をボルトの許容強度で除すればボルト數を求める。摩擦係數は  $15\%$  と假定した。ケーブル帶の皮

穀の厚さは  $41\text{ mm}$  となせり。皮穀はボルトを締付くるため生ずる環張力 (Ring tension) のみならず専多大の彎曲應力を受くる、蓋しボルトは皮穀に對し偏倚し、又ケーブル帶はケーブルを夫に合せる様締付けの際眞の圓形より多少變形するからである。



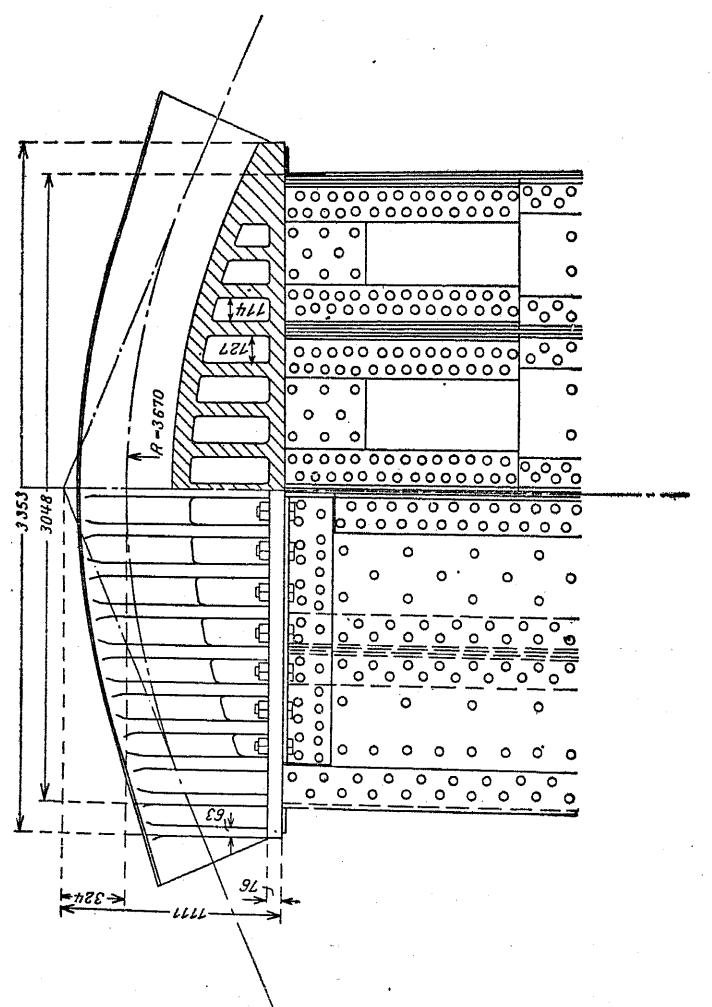
第 295 圖

(c) 吊材。吊材は直徑  $73\text{ mm}$  のワイヤーロープより成り、ケーブル帶の溝に其のループ (Loop) を掛け其の兩端は蓋 (Socket) となして直接横桁に連結してある(第295圖)。各格點に於て各ケーブルは二本の吊材を支ふるから、各格點には全部で八本の吊材即十六本のロープが掛つてゐる。吊材の最大長は  $208.79\text{ m}$ 、最短長は  $14.63\text{ m}$  である。吊材の最大應力は二個所で  $127\text{ t}$  即ち  $2450\text{ kg/cm}^2$  となり、内  $90.7\text{ t}$  即ち  $72\%$  は死荷重、残部は活荷重及溫度に依る應力である。吊材ロープは二個所で  $542\text{ t}$  の最小破壊強度 (ケーブル帶の直徑に等しい滑車輪の上力) を有するから四以上の安全率を保つてゐる。

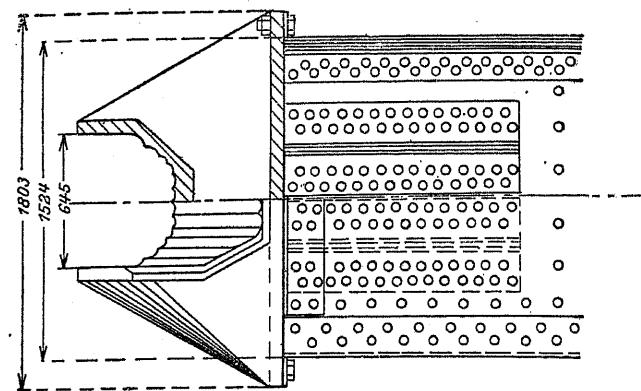
示方書に依ればロープに對しては  $90.7\text{ t}$  の張力の下で  $2.54\text{ m}$  の長の最大伸張を  $7.6\text{ mm}$  と規定してゐるから、之はロープの彈性恒數  $1190000\text{ kg/cm}^2$  に相當する。

7. 橋鞍 (Saddle) 及時形關節 (Knuckle) (1) 橋鞍。ケーブルは塔頂に在る橋鞍上を通過し連續してゐる。設計上では主ケーブルは塔を終點とし、背控ケーブルと塔上で特別連結をなす様に考へる。其の利益は組立に際して短いロープとして取扱ひ、塔上に於けるケーブルの彎曲す様に考へる。

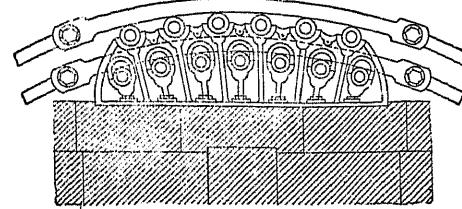
其の利益は組立に際して短いロープとして取扱ひ、塔上に於けるケーブルの彎曲す様に考へる。其の利益は組立に際して短いロープとして取扱ひ、塔上に於けるケーブルの彎曲す様に考へる。其の利益は組立に際して短いロープとして取扱ひ、塔上に於けるケーブルの彎曲す様に考へる。



296 圖



297 圖

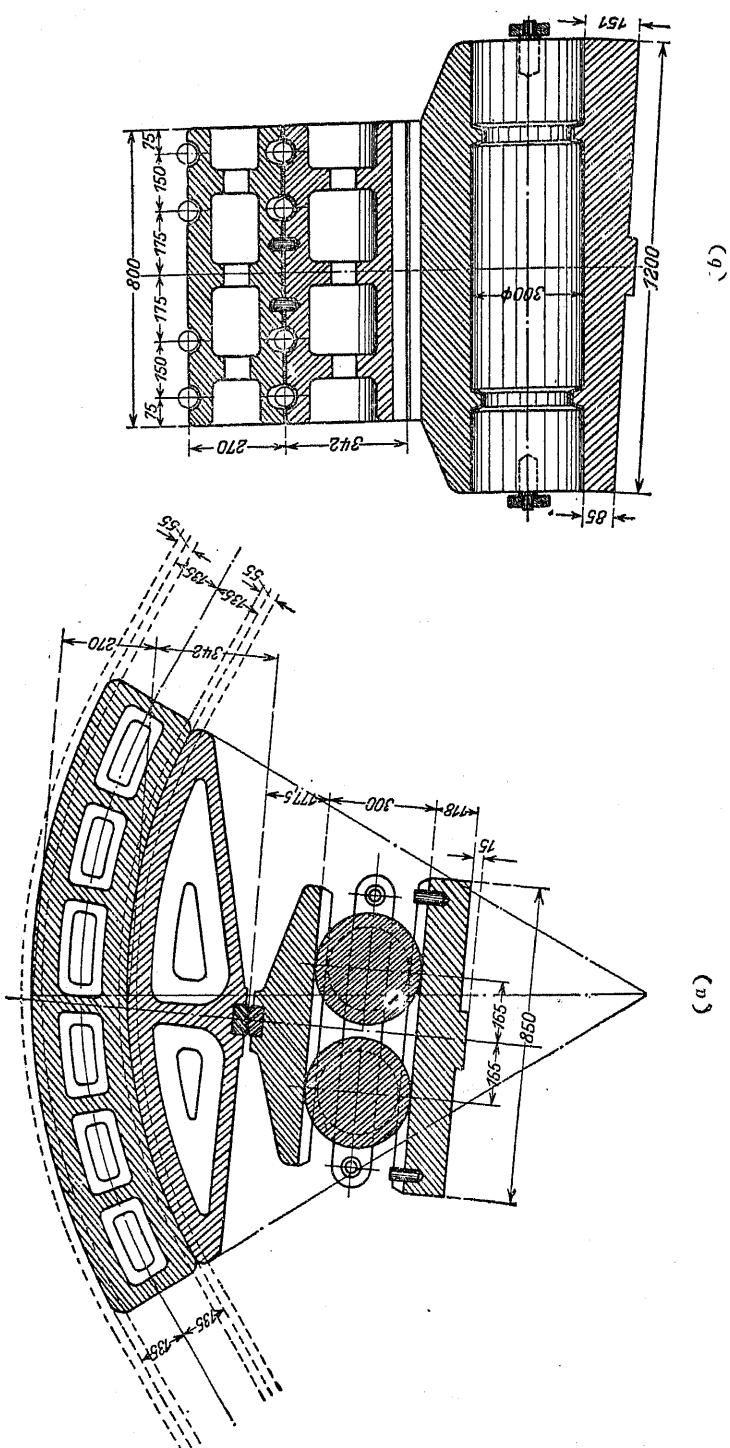


298 圖

控の應力が主ケーブルの應力より大なるときは、斷面を増加するため補助の子繩を背控に添加し、之を橋脚に連繫する設備をなす。ケーブル橋鞍は普通鑄鋼で製造し、塔頂にボルト締めにするか(第296圖)又は輥子を備ふる(第297圖)。第296圖はマンハッタン橋、第297圖はブダペストのダニウブ河に架したクラーク橋(Clark's Bridge)、第298圖はフランクフォルト・オン・マーン(Frankfort-on-Main)の吊橋、第299圖は Rio de Janeiro の渡橋(Aerial ferry)、第300圖はライン橋、第301圖及第302圖はジョージ・ワシントン橋に於ける橋鞍の例である。

第296圖の如き固定橋鞍を用ひしときは不平衡水平力を計算し、塔が振子形でないときは塔の設計には上述の力を考慮する。橋鞍が可動的ならば、種々の載荷状態の下に於ける鉛直反力の偏心に對して設備しなければならない。小さい橋では固定橋鞍の上でケーブル又はチェーンが滑動し得る様に造るのが最も簡単である。此の構造では摩擦のため塔頂に於ける不平衡水平力を消滅するわけにいかないから、大きい橋には輥子を用ふる方がいい。輥子を用ふれば、溫度及特殊の載荷のため生ずるケーブルの不平衡水平力に基づく塔頂の彎曲應力を減少することが出来るけれども、一面に於ては費用が嵩まり、組立が複雑となり維持も困難となるから、固定橋鞍の方がより安全で簡単な構造である。

(2) 肘形關節。之は背控又はアンカーチェーン(Anchor chain)が、其の方向をかへる鎮碇箇所に用ひらるゝもので(第303圖乃至第309圖)、チェーンの伸張に因る如何なる動搖にも應する様に設計する。普通第304圖及第305圖の如き摺動支承が肘形關節の接合に用ひられ、方の變化小なるときは最も適合した工法である。輥動支承(第303圖、第306圖乃至第309圖)



卷之三

圖 299

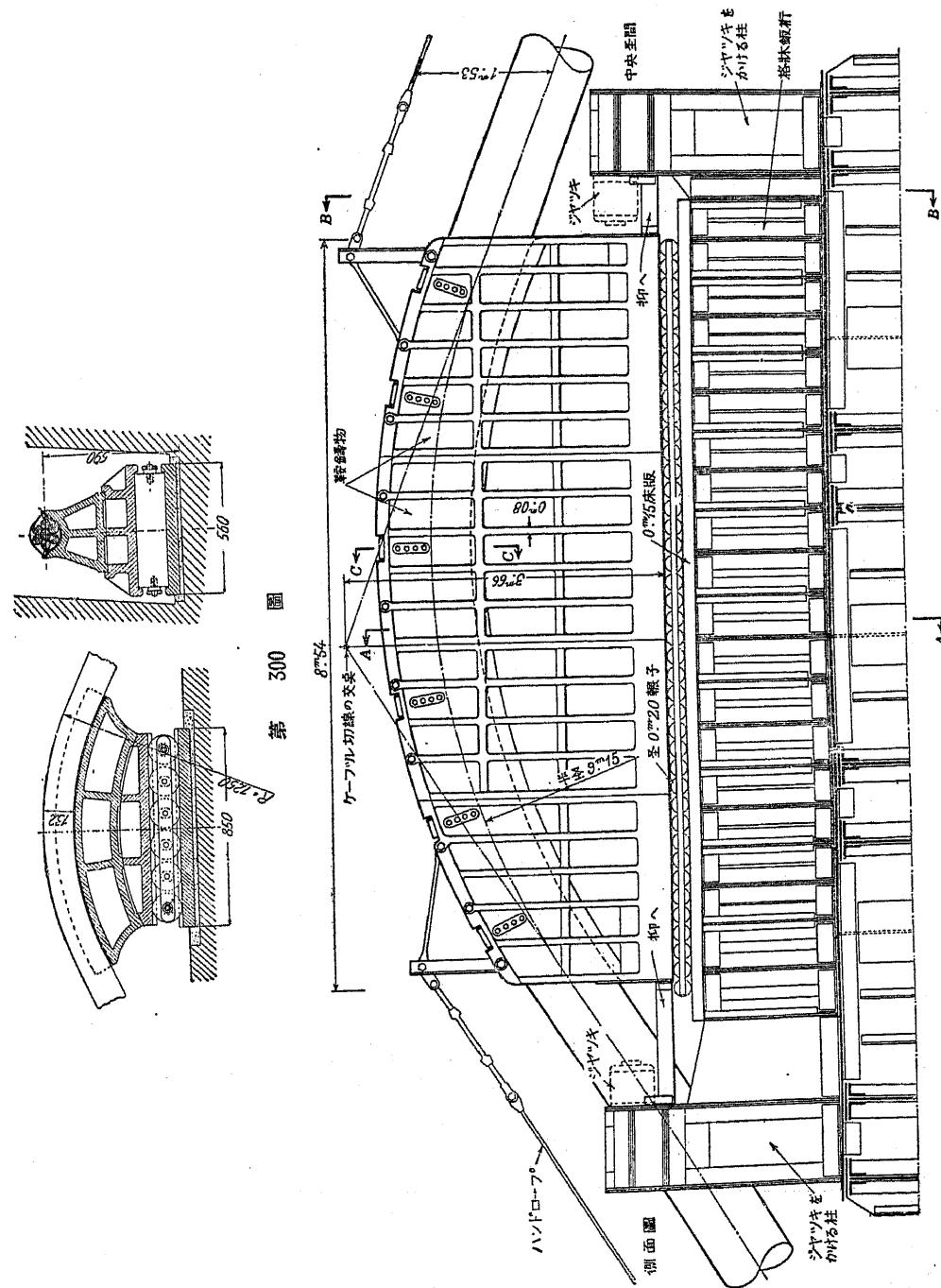
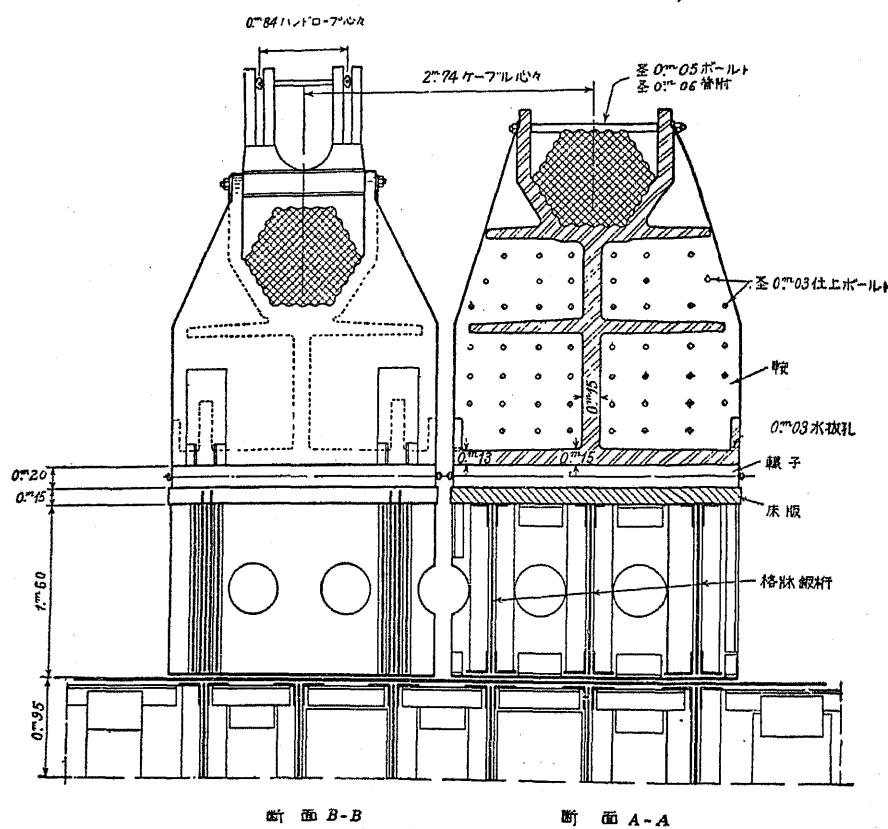
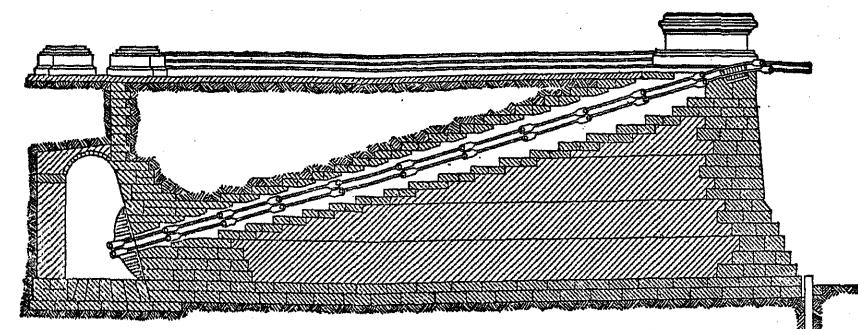
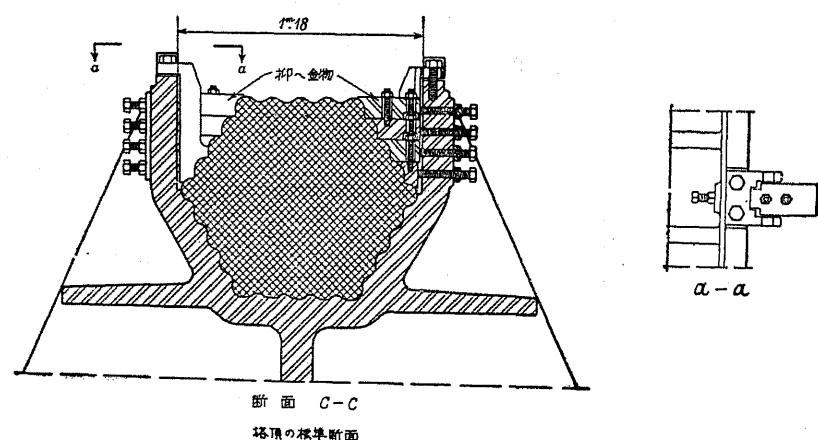


圖 300 第

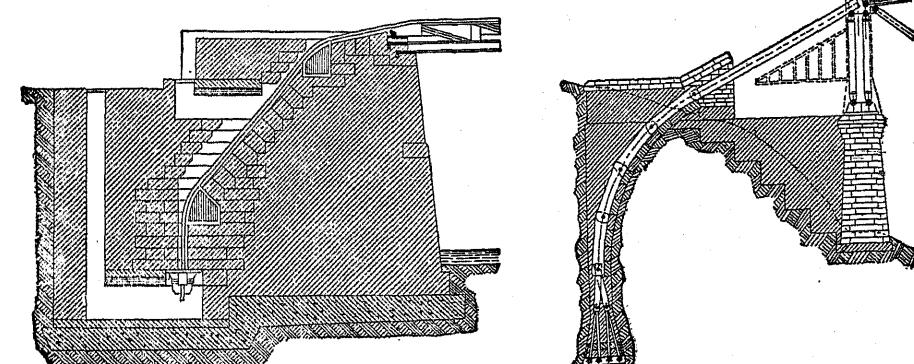
圖 301



第 302 圖



第 303 圖



第 304 圖

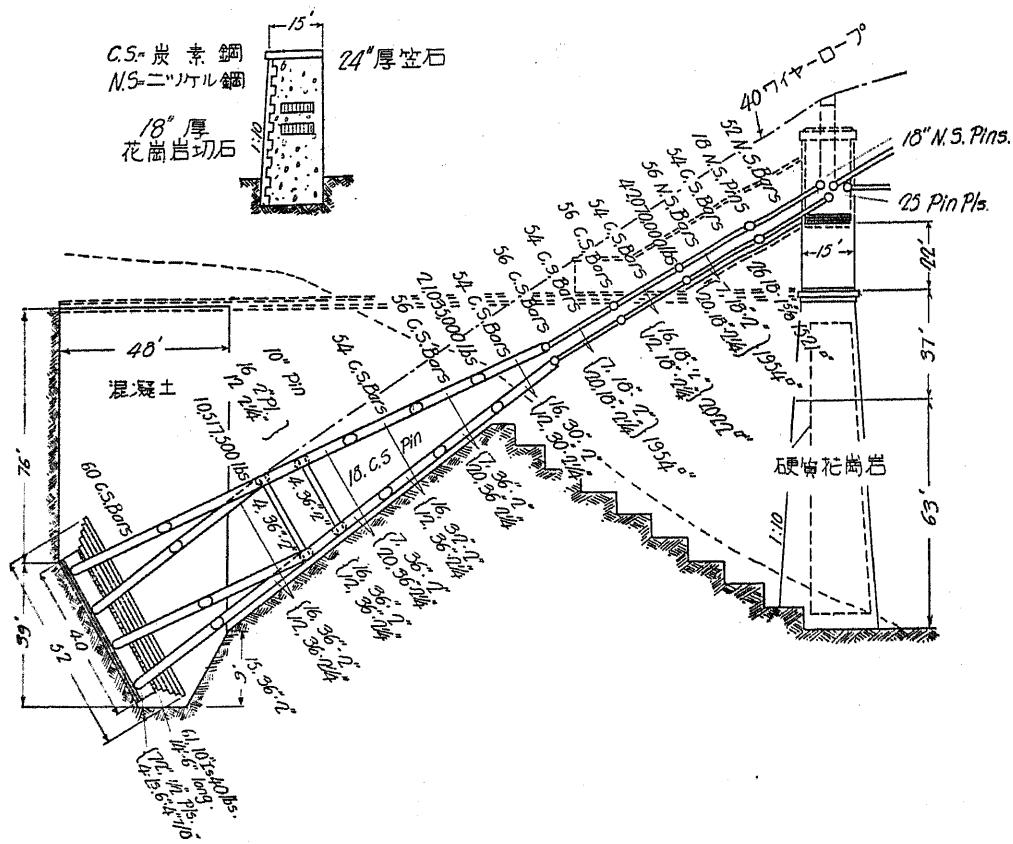
第 305 圖

はもつと適當な工法で、輥子の面はケーブル又はチエーンの角度の二等分線に直角となります。

第308圖及第309圖はジョージ・ワシントン橋の例で第310圖は其のロープ沓 (Strand shoe) を示す。

**8. 鎮 碇 (Anchorage)** (第309圖乃至第315圖) 吊橋の安全は一に鎮碇の完全なるや否やにかゝるのであるから、其の設計には慎重の研究を拂ひ、施工には完全な監督を必要とする。又完成後と雖常に鎮碇の状態を注意せねばならないから、維持及検査のため近寄り得る様に設計に際して考慮を拂ふことが肝要である。

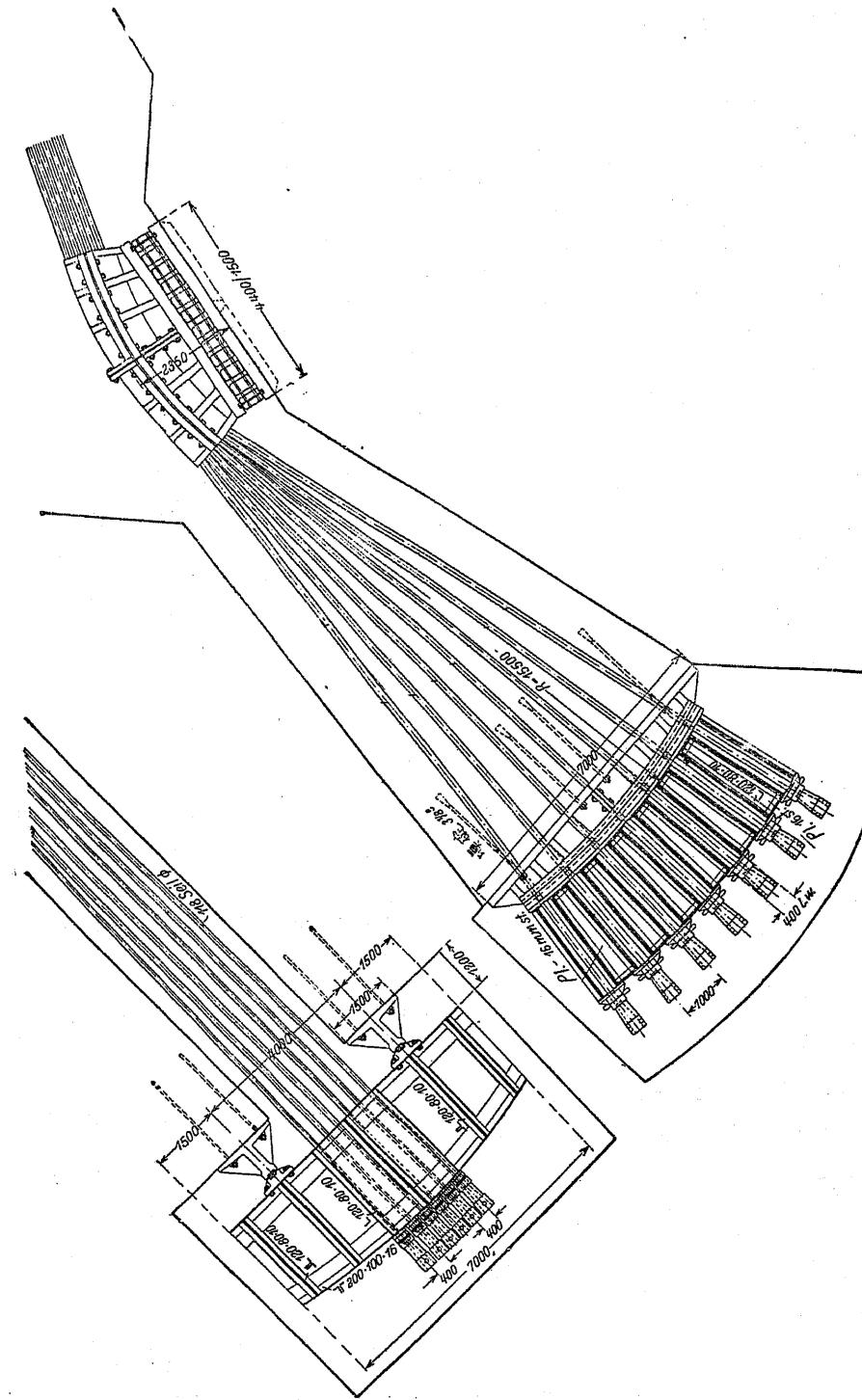
稀な場合として自然の岩石にケーブルを鎮碇し得るが、其の際にはチエーンを容るゝ豊坑又は隧道は、風化の虞なく且つ所要の鎮碇に對して充分の厚を提供し得る完全な岩石の處まで達せねばならない。多くは其の底部の摩擦若くは之と接觸する土の抵抗壓力に依つてケーブルの牽引力に抵抗する様な石工となし、之を地面以下に埋設し橋臺に併用するを常とする。ケーブル及チエーンは其の内で方向を轉換し鉛直に近づく様にする。鎮碇の石工は滑動に對するのみならず、横



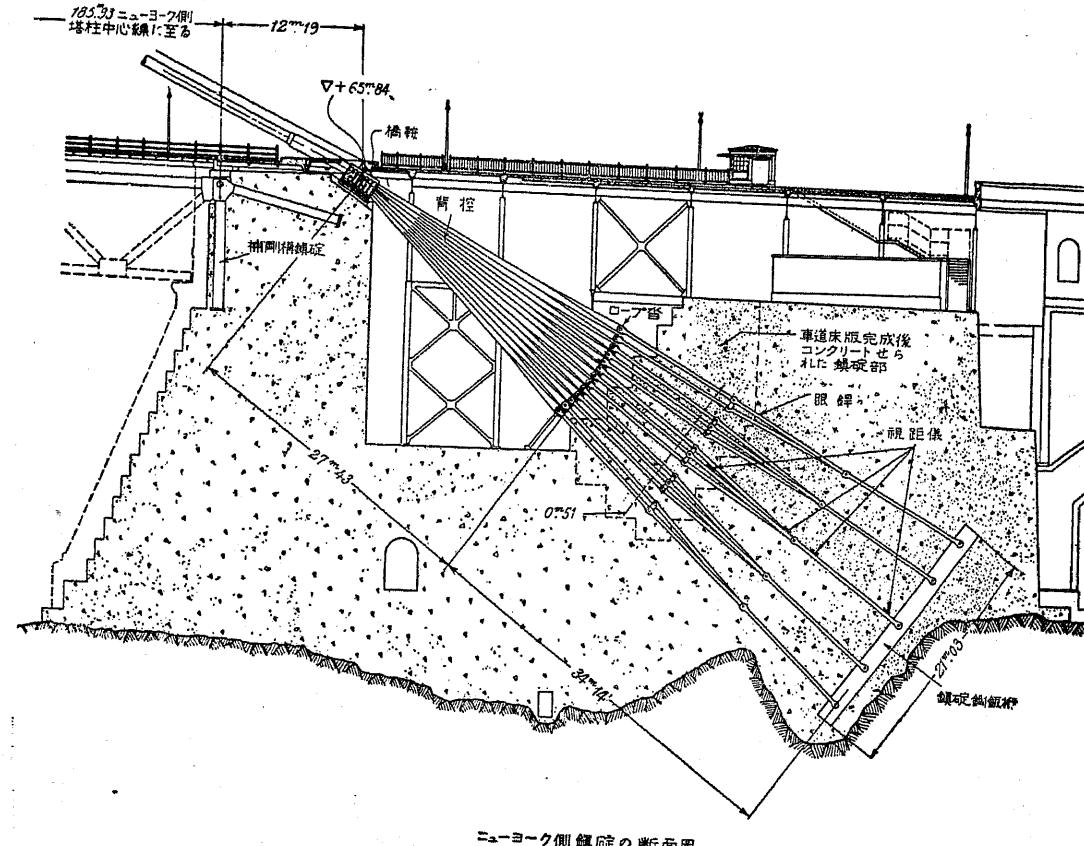
第 306 圖

振動又は顕覆に對しても安全ならざるべからず、又底部の壓力は基礎の支壓力を超過してはいけない。杭の基礎は鎮碇の變化に對し不安全であるから成る可く之を避け、已むを得ざる場合は傾斜杭を澤山に用ふる。ケーブル又はチェーンの端には錨釘（Anchor plate）或は反力釘桁（Reaction girder）を結合する。大きい橋では第303圖の如く検査のため石工内に隧道を残すこともある。稀に二つのケーブルをループとなすことあるも、成る可く各ケーブル又はチェーンの端は各別に鎮碇する方がよい。検査及ペンキ塗替へのため石工内に通路を設けざる場合は、ケーブル又はチェーンをコンクリート内に埋設し、空氣及濕氣を防ぐ防水剤を以て其の周圍を固むことが必要である。従つてケーブル又はチェーンを容るゝ堅坑は出来るだけ狭くして、之にコンクリート、セメント・モルタル、アスファルト・セメント又は他の防水剤を填充する。

第311圖は鎖碇體の三種を示してゐるが、地盤が砂利又は玉石等の場合は（第311圖a）水平力は石工と地盤間の摩擦に依り地盤に傳はる。地盤が岩石より成る場合は鎖碇體は第311圖(b)及(c)の如き形に造る。(b)圖に於ては水平力は摩擦に依らず段切り部分の支壓力に依り直



36



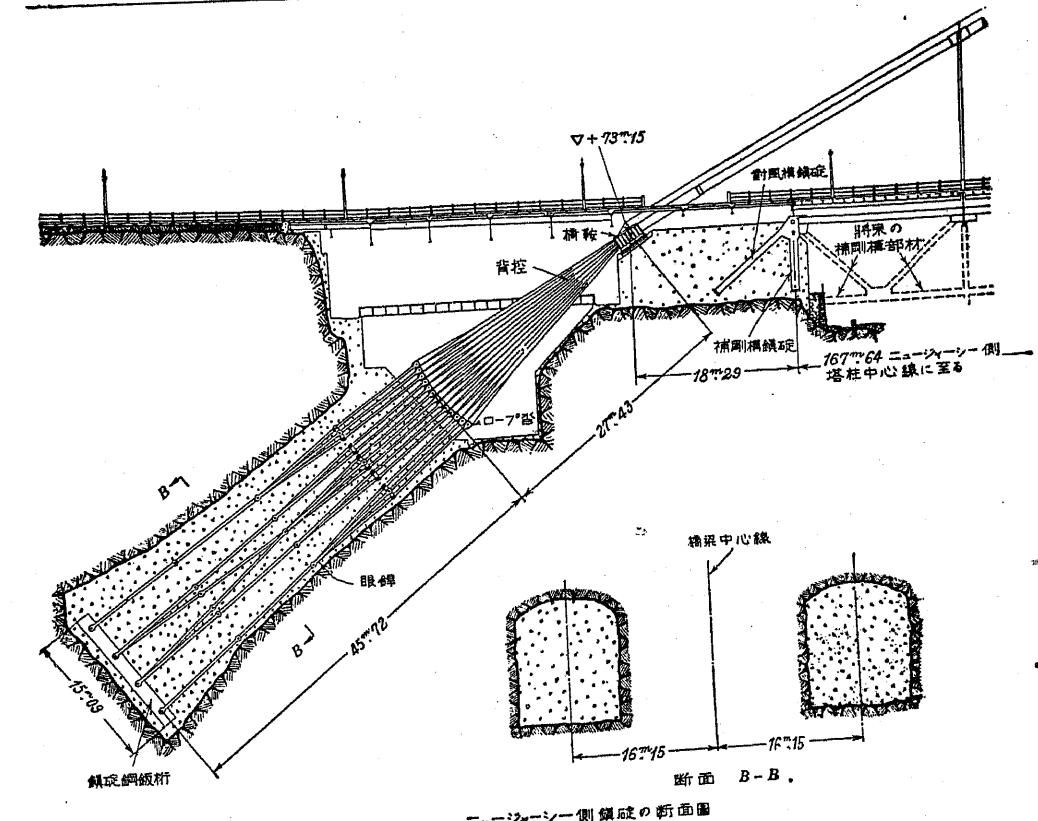
ニューヨーク側鎮碇の断面図

第 308 圖

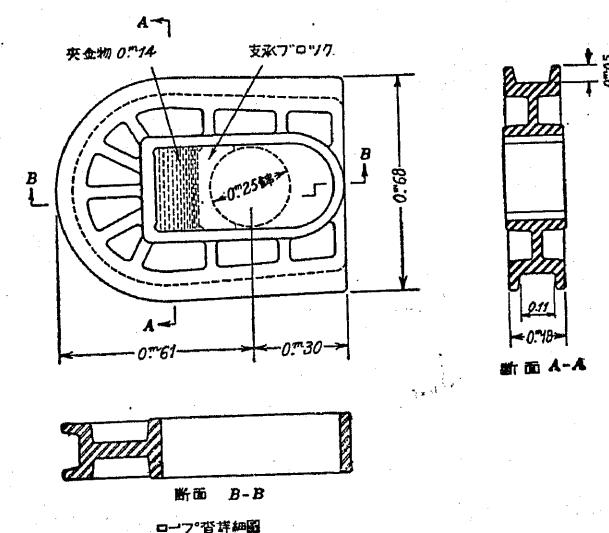
接岩石に傳はる。古い時代に出来た吊橋の橋臺は多くは石工で紐育のイースト河に架した橋、及ブダペストのエリザベス橋の如き其の例であるが、較近は施工の時間を節約するためコンクリートを施工する、ジョージ・ワシントン橋は其の例で紐育側の橋臺には約 80 000 m<sup>3</sup> のコンクリートが使はれた。

最近は又中空のコンクリート橋臺が實施される、之は大きい函を幾つか小室に仕切つて其處には砂を填充したものである。橋臺は地盤との接觸面に於て大きい摩擦力を有せねばならないから其の重量を大きくすることが必要である。故に高價なる材料の代りに其の地方で得らる廉價な砂で之を置き換へ、而も所要の重量を保たしむれば最も經濟的工法となる。Mt. Hope 橋の南橋臺は其の實例である（第 312 圖）。

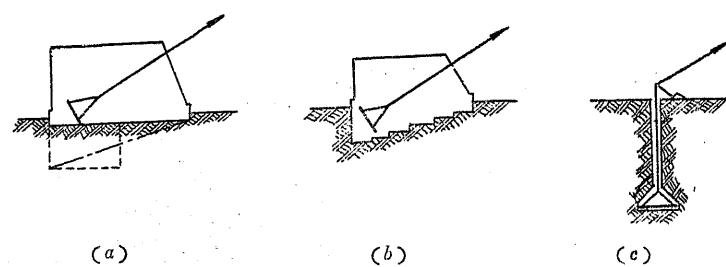
Mt. Hope 橋の北橋臺（第 313 圖）は第 311 圖（b）に相當する形をなし、其の前面にある部分はケーブルがアイバーに移る所を防水的に密閉する目的を有してゐる。本來の鎮碇體は背面の



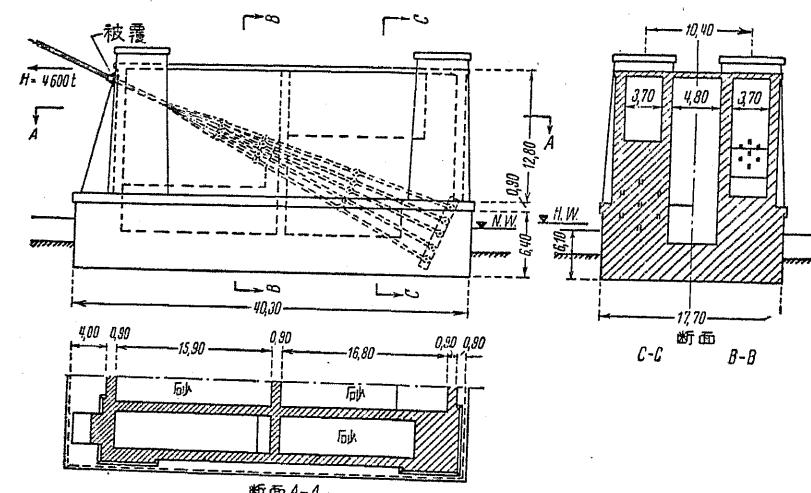
第 309 圖



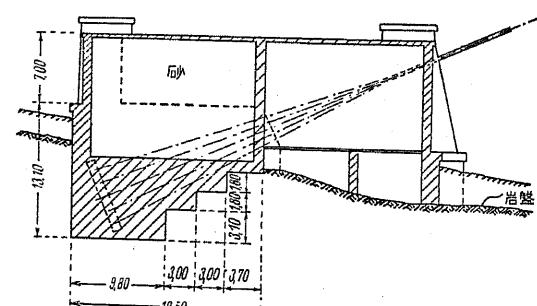
第 310 圖



第 311 圖

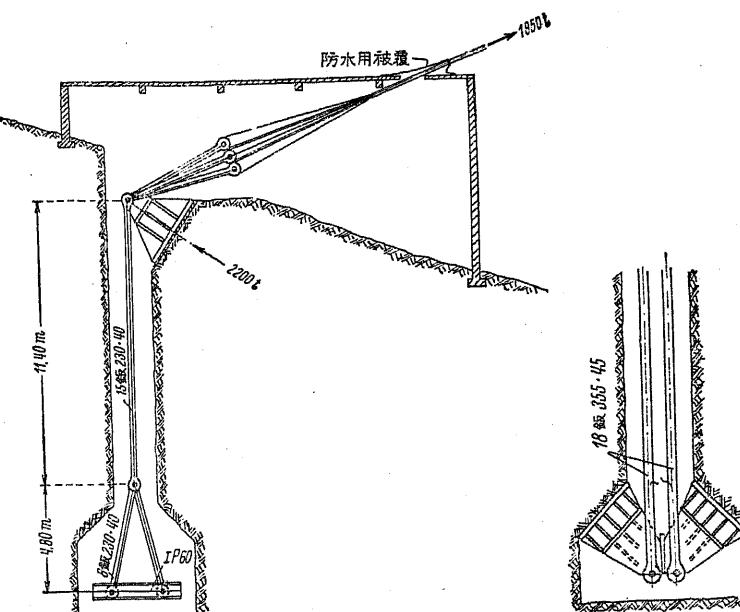


第 312 頁



第 313 圖

部分だけで充分で、碇着チエーンを埋設せる其の下半分はコンクリートを施工してある。第311圖(c)の鎖碇は吊橋が深い峡谷を渡る場合に其の側壁が鞏固なる岩石より成る時に適應する、第314圖は其の實例でハドソン河の支流 Rondout-Creek (紐育州キンギストン) に架した吊橋の鎖碇



第 314 圖

第 315 圖

碇である。第315圖は紐育より 80 km 上流のハドソン河に架した Bear-Mountain 橋(徑間 498 m, 1924 年開通) の鎮碇を示す。以上の碇着工は最も簡単にして而も經濟的である。堅坑は鉛直若くは斜に岩盤に掘鑿され其の下端は小室に擴がつてゐる。

第314圖の形に於ては一つの倒さ圓錐體に相當する岩石の重量が鎮碇として作用するものと假定する、其の圓錐體の尖頭は下端の小室と一致し、其の高は約 15 m, 其の側壁は鉛直に對し 45° 傾斜せる故此の圓錐體の容積は  $V = \frac{h^3}{3} = \frac{15^3}{3} = 3500 m^3$  となり、其の重さは約 8500 t となつて碇着チェーンに働く張力の 4.3 倍に相當する。堅坑内にはコンクリートを填充し其の上部は保護工を以て取囲む、此の保護工内でケーブルと碇着チェーンとを連結し尚ケーブルの入口には水の浸入を防ぐため被覆を施す。

ヨシノリトヨ橋の西橋臺（第309圖）も此の種類の實例である。

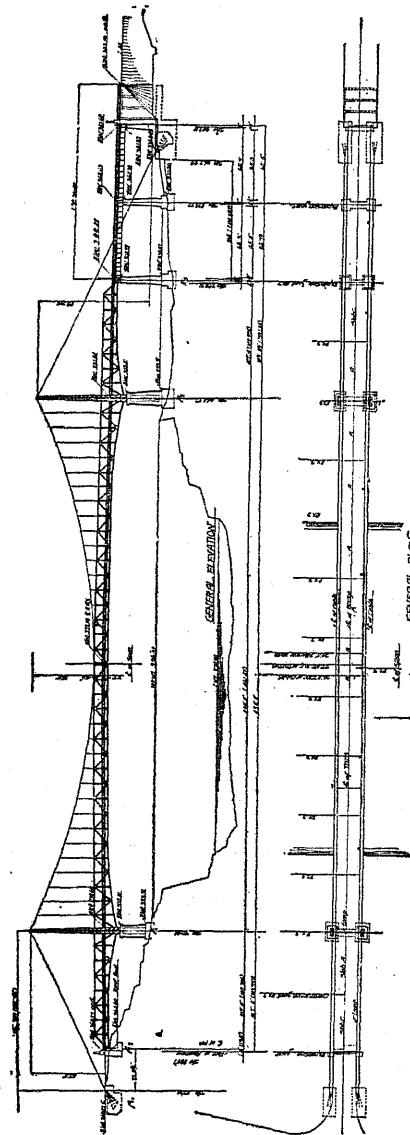
上記例における華文あるシニブル品種の例を示せば第4表の如し。

1931年四月、乃至甚吉は徳島縣池田に於て青雲川に架した三好橋の例を示したも

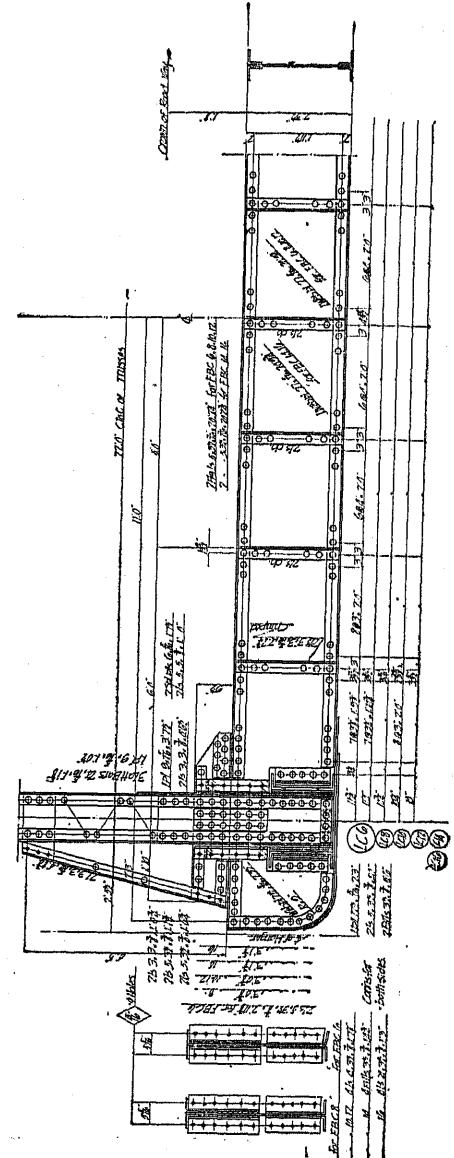
の石舟

二、シカゴ湖の入り口金門間に架けた世界最長の金門橋 (Golden Gate Bridge)

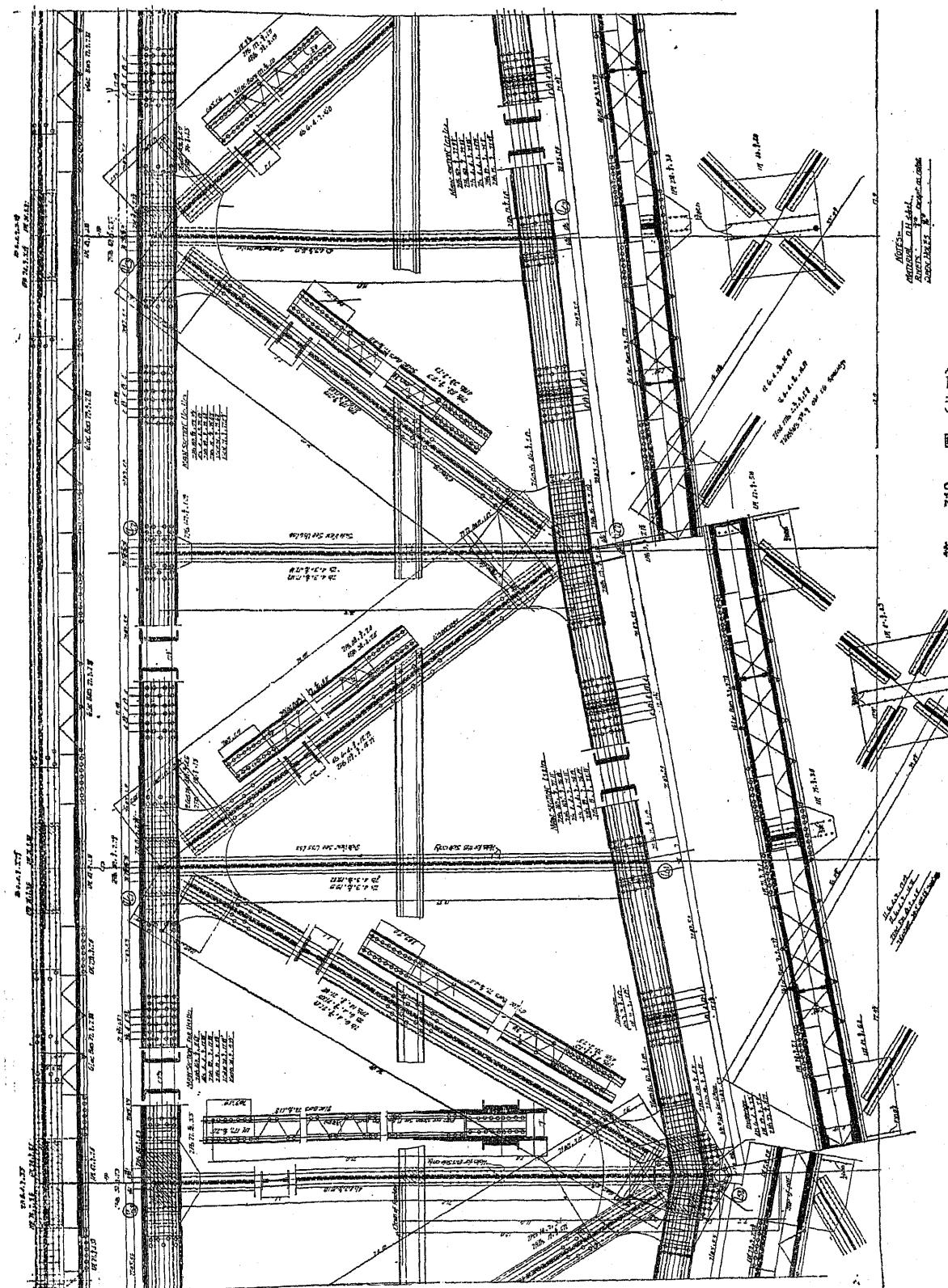
第317図はサンフランシスコ湾の入り口並木橋、東2(1)橋である。主径間 1280 m (4200')、側径間各 343 m (1125') より成る吊橋(道路橋)である。補剛構の中心間距離は 27.4 m (内車道 18.3 m, 歩道各 3.3 m) で、二つの並行せるワイヤー



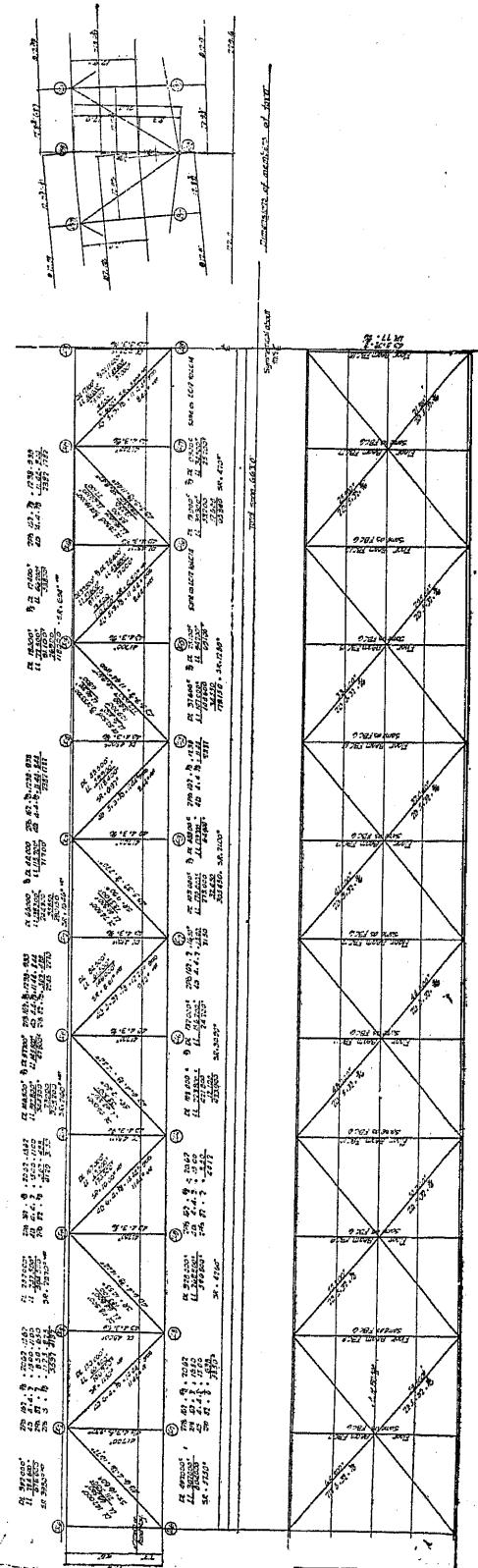
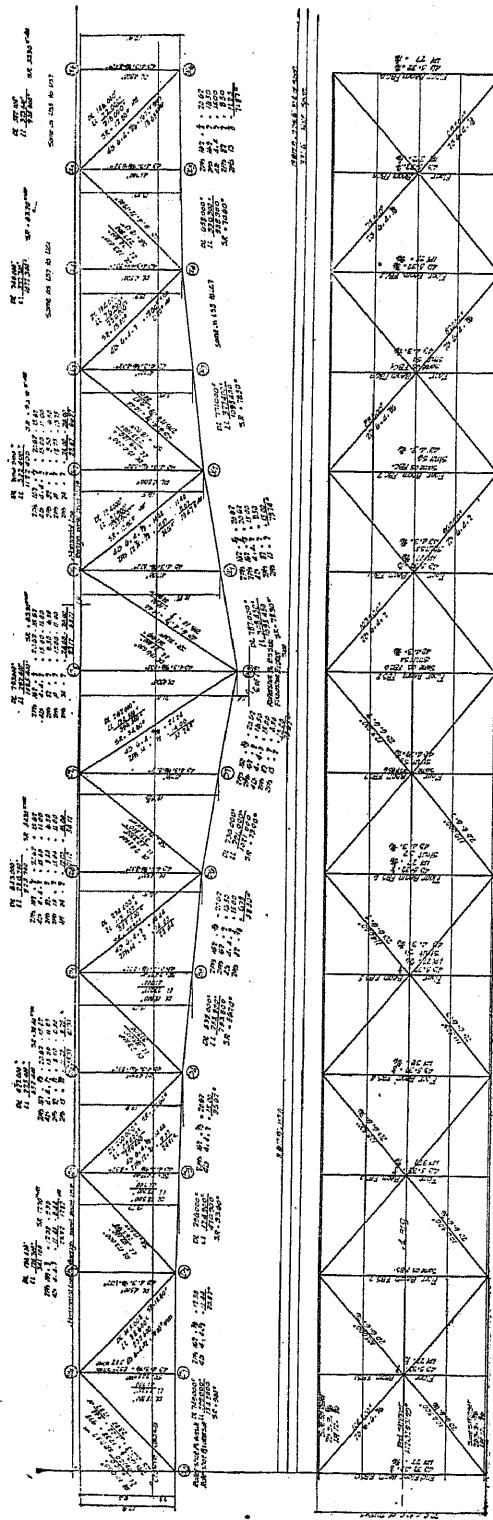
第 316 圖 (其一)



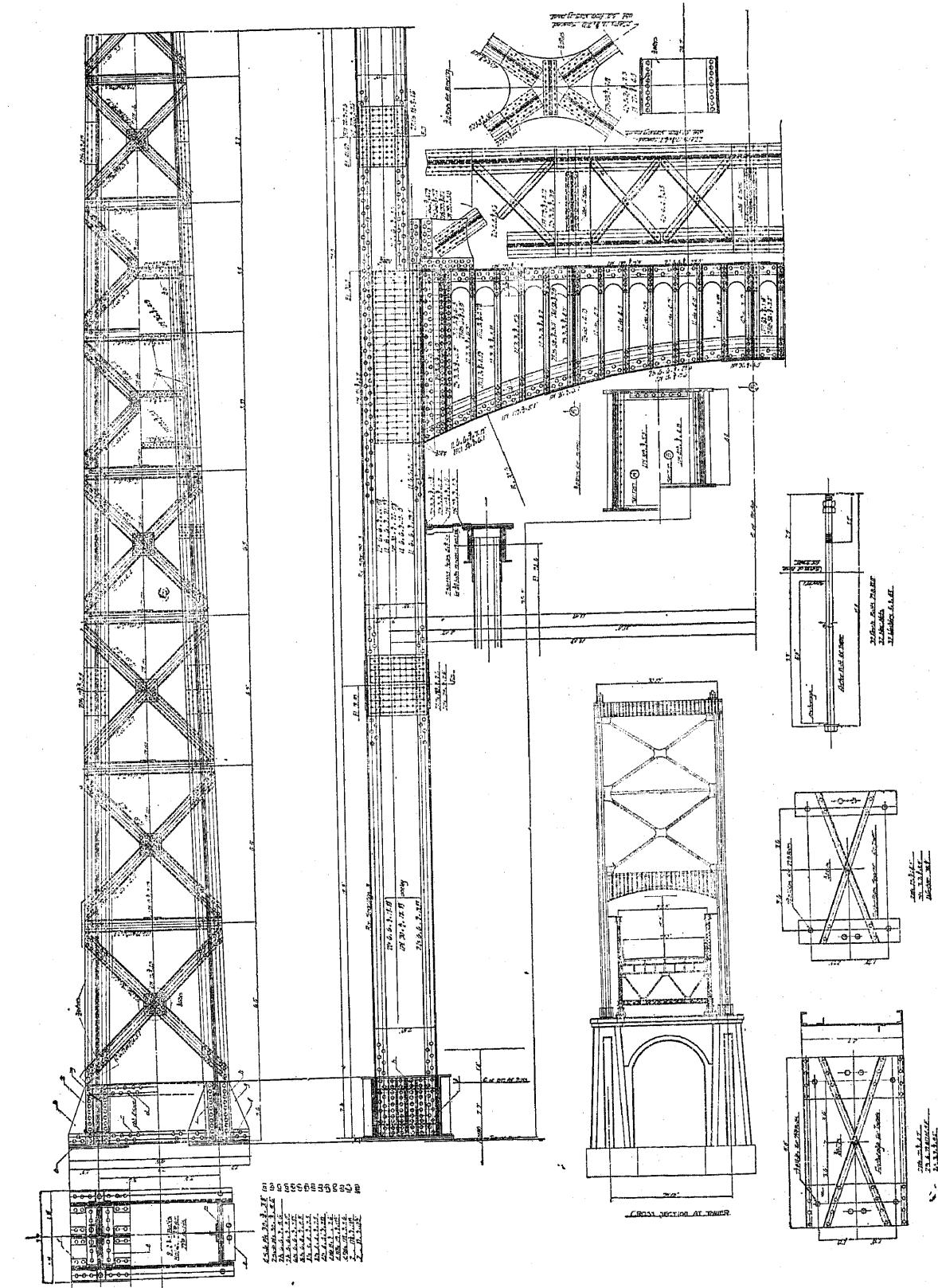
第 316 圖 (其二)



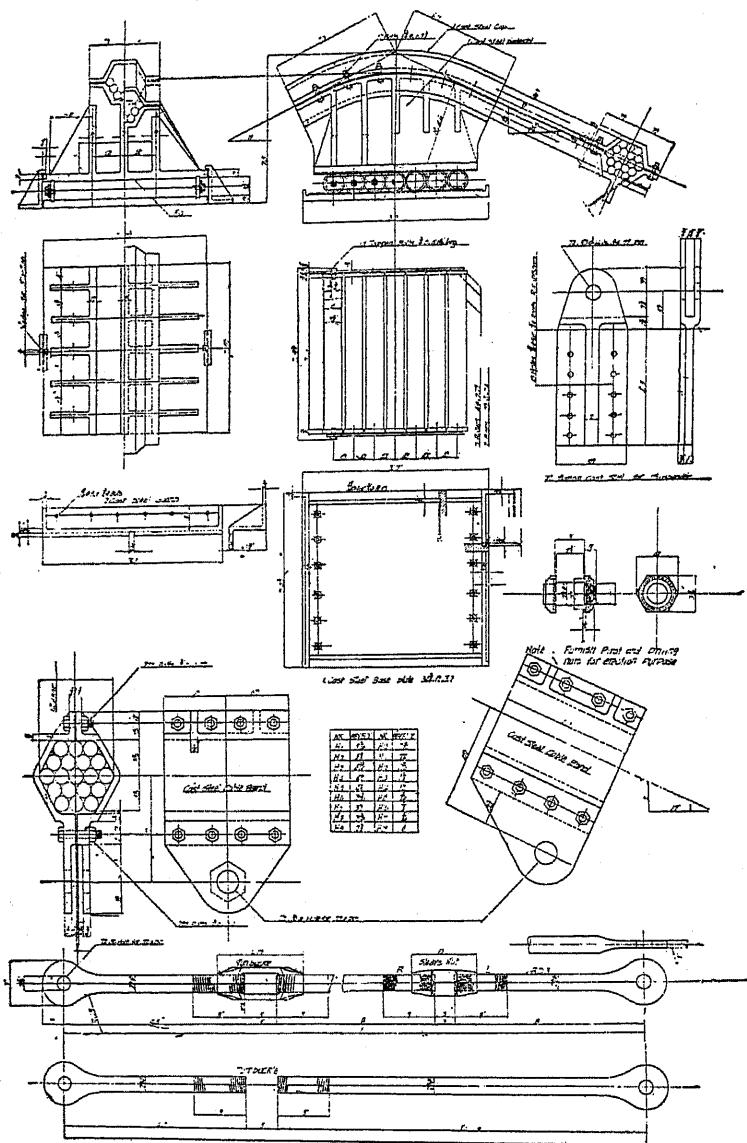
第 316 圖 (其三)



第 316 圖 (其四)

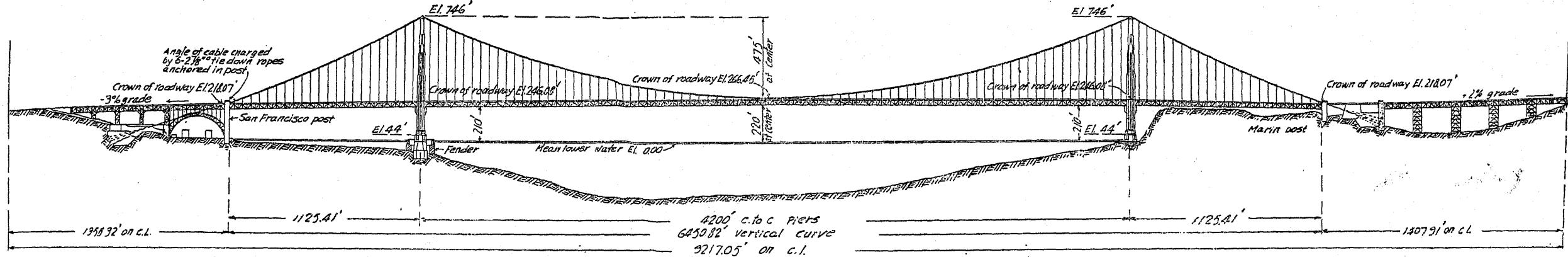


第 316 圖 (其五)

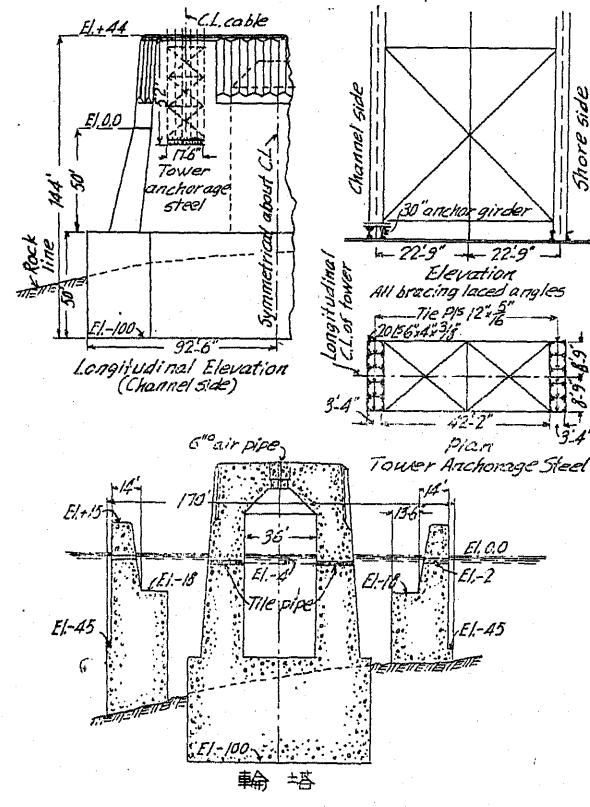


第 316 圖 (其六)

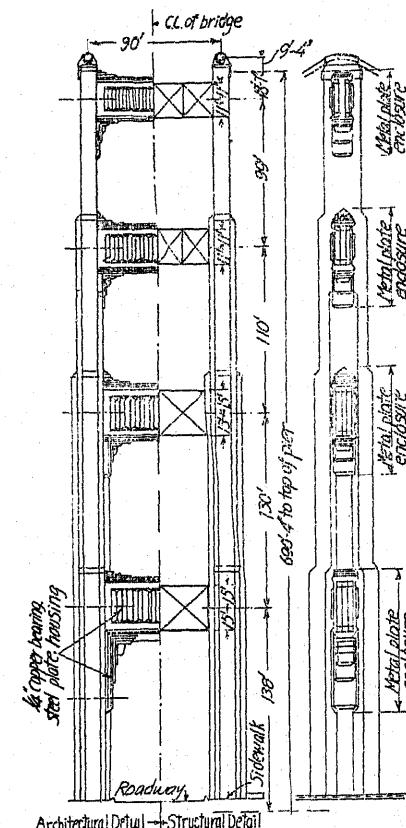
ケーブルは 92 cm の直徑で  $5360 \text{ cm}^2$  の断面積を有する。ケーブルの垂矢は 144.76 m であるから、垂矢と主径間長との比は 1:8.84 となる。吊材は二本の 73 mm のワイヤーロープより成り、其の間隔はケーブルに沿ひ 15.2 m となせり。塔脚は地震に対する安定度を確保するため、橋脚の内に 15 m だけ埋設せし建築鋼の結構に碇著し、塔自體は鉛直荷重の約 7 % に相當する地震荷重に對して設計してある。塔の應力、部材及連結箇所は、塔の頂上に於て縦又は横方向に 40 cm だけ撓度を起すものと假定してある。補剛構は平行弦のワーレン・トラスで高 7.6 m で



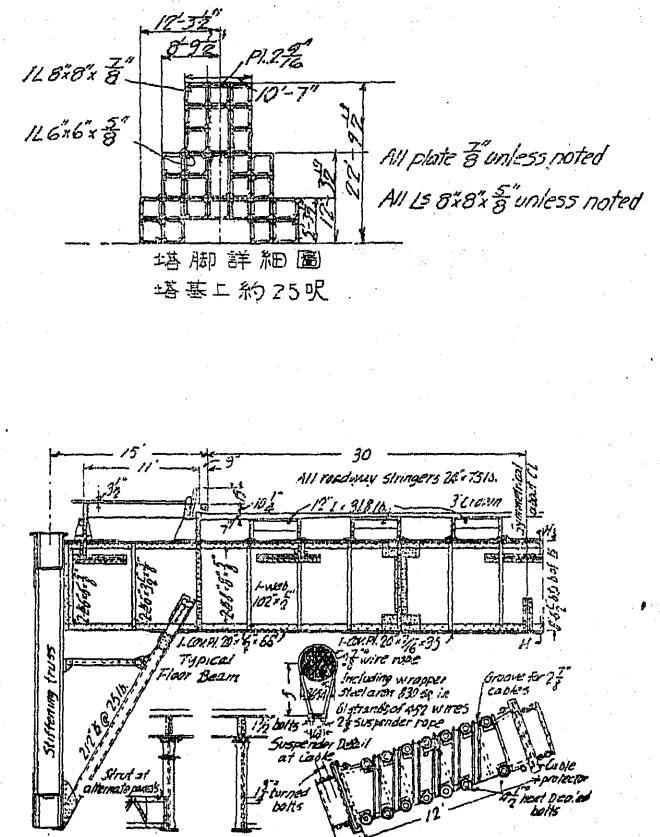
#### 側面圖



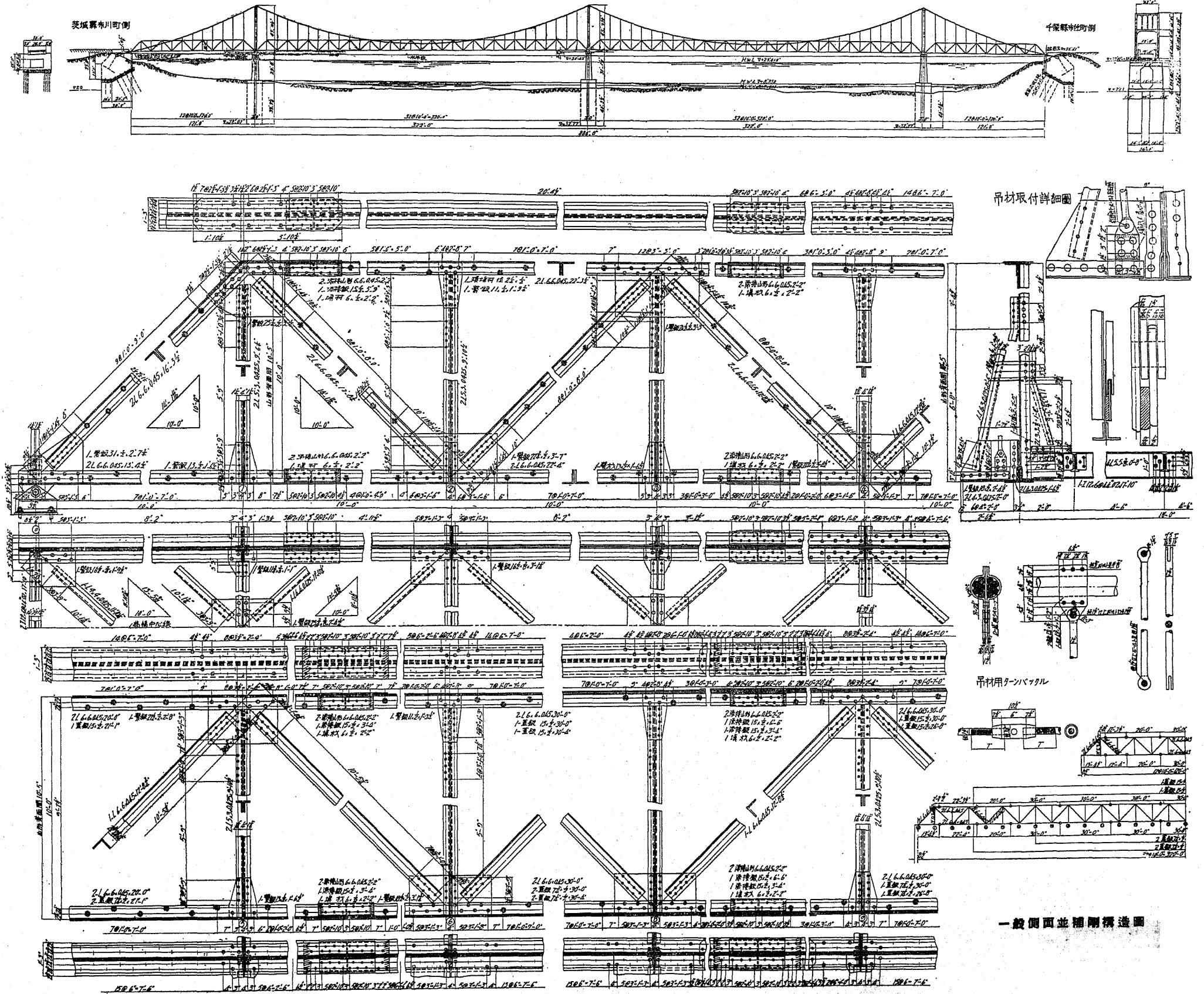
路面上部塔柱，側面

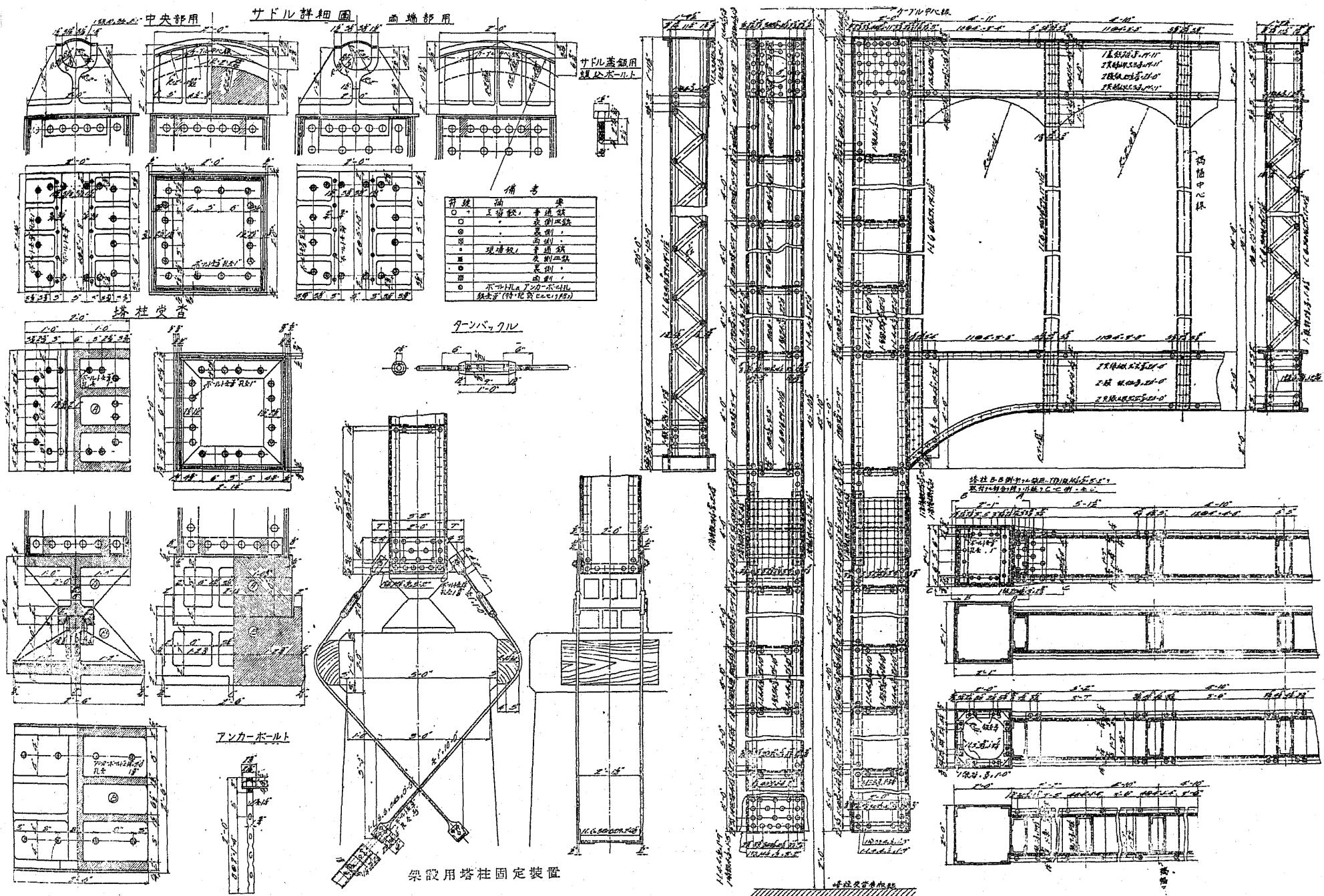


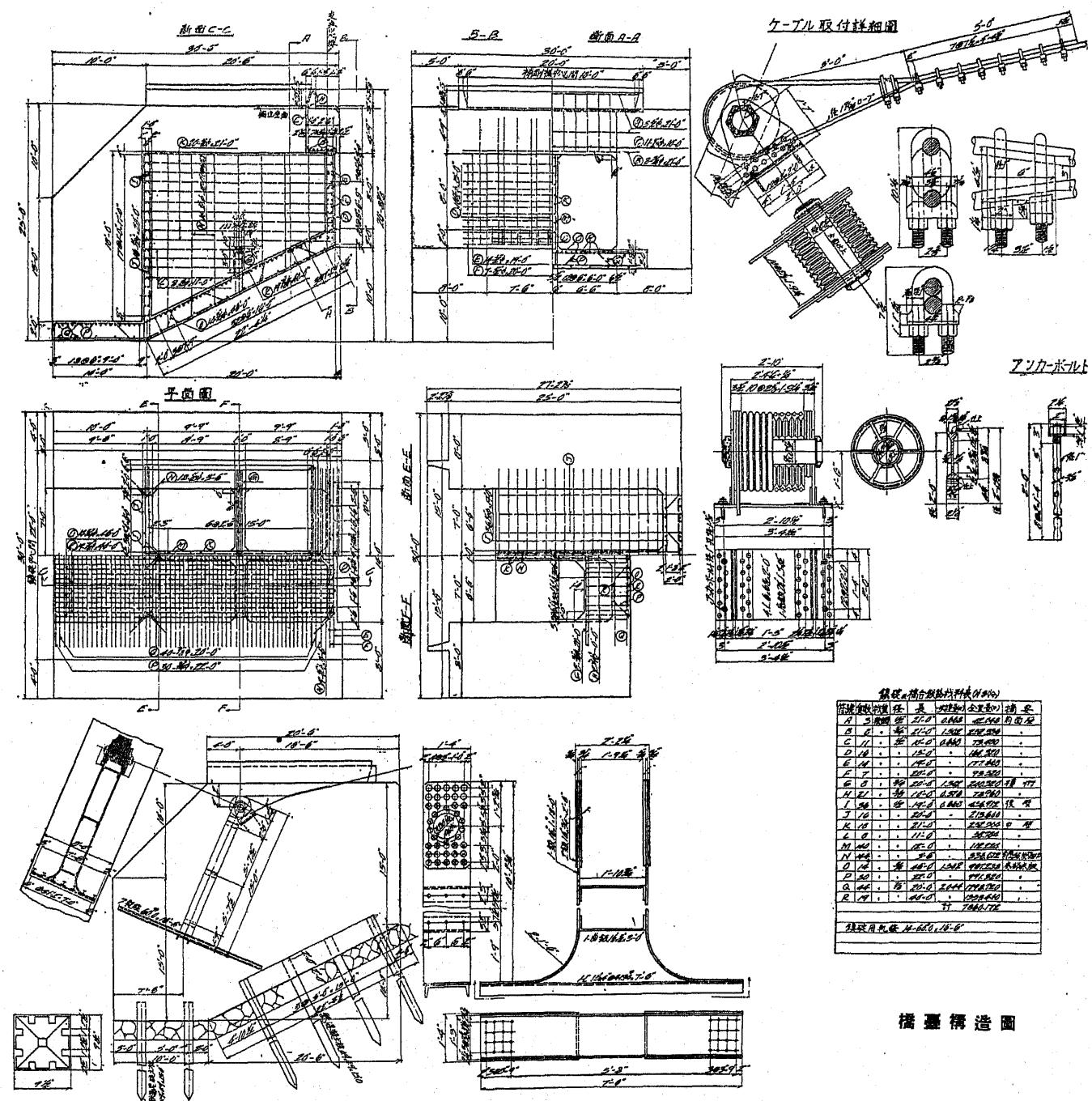
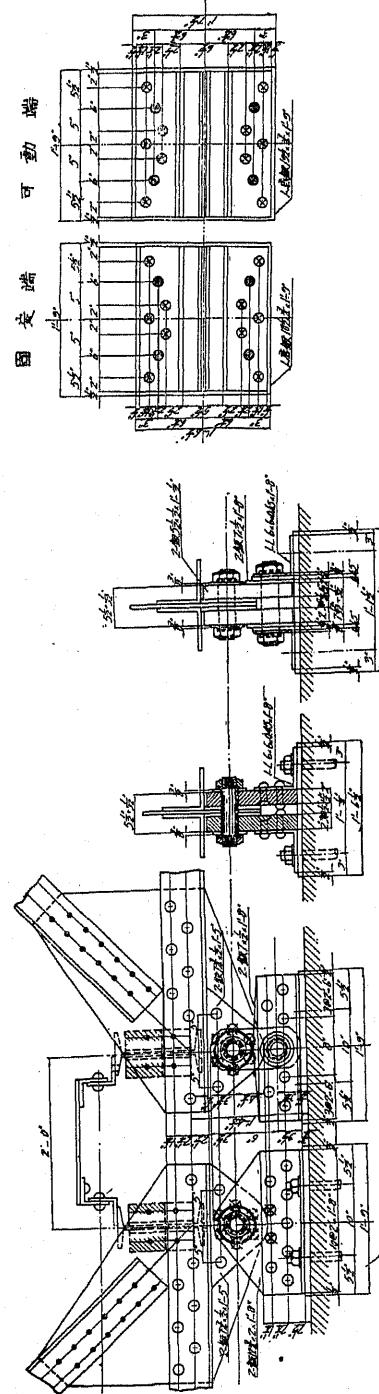
側徑間端部の  
ケーブル引下げバンド



第 317 頁







第 4 表

橋名	架設位置	架設年	徑間長		主徑間		幅員			頭空	ケーブル	吊材	補剛構			床構		用材	
			主徑間	側徑間	垂矢	垂矢比	車道	歩道	軌道				高	格間長	中心間隔	縦桁高	横桁高		
ゴールデンゲート	サンフランシスコ灣	工事中 1930起工	1280 <sup>m</sup>	343 <sup>m</sup>	144.76 <sup>m</sup>	1:8.84	18.3 <sup>m</sup>	各 3.3 <sup>m</sup>		67.0 <sup>m</sup>	徑 92 cm 断面 5360 cm <sup>2</sup> 61子繩 各 452本 の常温引ワイヤー	徑 7.3 cm のワイヤーロープ 2本	<sup>m</sup> 7.6	<sup>m</sup> 7.6	<sup>m</sup> 27.4	<sup>mm</sup> 600 (I 桁)	<sup>mm</sup> 2600	補剛構 弦材 シリコン鋼 腹材 炭素鋼 塔頂部 60m シリコン鋼 其他 炭素鋼 横桁 突線材 シリコン鋼 腹材 炭素鋼 縦桁構 炭素鋼 シリコン鋼	
ジョージワシントン	ハドソン河	1931	1067	198.2	96.3	1:10.8	上路 32.3 (8車線)	上路 各 3.24	下路 4本	64.9	61子繩 各 6番線 (0.196吋) 434本 のもの 4本 徑 91 cm 断面 5160 cm <sup>2</sup>	徑 7.3 cm のワイヤーロープ	8.1	18.3	32.3	1700	3100	補剛構 横桁 主要部分 シリコン鋼 補剛材填材等 炭素鋼 縦桁 突線材 シリコン鋼 腹材 炭素鋼 横構 シリコン鋼	
サンフランシスコ オーカーランド	サンフランシスコ灣	工事中 1934起工	704	353.6	70.4	1:10	上路 17.68 (6車線) 下路 9.45 (3車線)	上路 各約 0.5 下路 各約 0.5	下路 2本	69.0	徑 73 cm のもの 2本		9.1		20.12				
アンバツサダー	デトロイト河	1929	563.9				14.3	2.4		46.3	37子繩 各 6番線 熱処理ワイヤー 206本		6.7	7.4		2100	補剛構 弦材 シリコン鋼 腹材 炭素鋼 床構 炭素鋼		
フィラデルフィヤ キャムデン デラウェア	デラウェア河	1926	533.4	229.1	60.41	1:8.8	17.37	上路 各 3.05	4本	41.1	徑 76 cm 断面 3620 cm <sup>2</sup> 61子繩 各 6番線 306本		8.5	6.25	27.1	<sup>450</sup> ( 桁 )	2440	補剛構 弦材 端ロッカー ニッケル鋼 腹材 綾構 シリコン鋼 縦桁 横桁 シリコン鋼	
ペアーマウンテン	ハドソン河	1924	497.4	64.0	61.0	1:8.1	11.58	各 1.52			徑 43.2 cm 6番線 7252本	徑 6.4 cm のワイヤーロープ	9.14		16.76	<sup>460</sup> ( 桁 )		補剛構 シリコン鋼	
バーケンスブルグ	オハイオ河 (西ヴァーデニア)	1916	236.2	83.8			6.7	各 1.8		27.4	斷面 263.2 cm <sup>2</sup> 7子繩 各 8番線		6.4		7.3				
フォートストイベン	オハイオ河	1928	209.9	86.3	21.3	1:9.9	6.2			27.5	斷面 260.48 cm <sup>2</sup> 7子繩 各 8番線 280本		4.3		7.3				
セントジョーンズ	ウイリヤムテ河	1931	367.9	131.1	36.8	1:10	12.2	各 1.6		62.5	91子繩 各 6番線 184本		5.5			1700			
マウントホープ	マウントホープ灣	1929	366.0	153.0	36.6	1:10	8.2	各 0.76		41.3	徑 28 cm 7子繩 各 6番線 350本								
ケルンミユルハイム	ライン河	1929	315.0	91.0	34.5	1:9.1	17.2	各 3.5+1.825			徑 8.0 cm 断面 42.55 cm <sup>2</sup> (277本より成る) のワイヤーロープ 37本	徑 13 cm の眼鉗 2本	0.6 (複腹)	22.2	820~ 1142	2700~ 7400	ケーブル 炭素 0.64~0.74% マンガン 0.55~0.85% シリコン 0.12~0.25% 補剛構 床構 シリコン鋼 シリコン鋼		
グラントメヤー	ケベック	1929	289.2		28.8	1:10	5.5	各 1.0		5.8	37子繩 各 35本の ワイヤーより成る		3.7	3.7		<sup>360</sup> (I 桁)	<sup>760</sup> ( 鋼 桁 )		
ロンダウトクリーク	ニューヨーク キングストン	1922	214.9	53.7			6.7	各 2.3			徑 25 cm 6番線 1974本のもの 2本 側徑間にには 徑 26cm 2126本のもの 2本	徑 3.2 cm 環状ロープ	4.6 3.0	5.4					
ポートマウス	オハイオ河	1927	213.3	106.7	21.3	1:10	6.7	1.8		12.2	3子繩 各 8番線 486本		4.3	5.3	9.6				

格間長も  $7.6\text{ m}$  である、構の各格點は高  $2.2\text{ m}$  の横桁で繋結し、横桁の下部と補剛構とを連結する隅東 (Knee-brace) は、下弦面内の横安定度を増進する目的に用ひたものである。

第318圖は千葉縣布佐町と茨城縣布川町間の利根川に架設せし吊橋で、側徑間  $2=36.881\text{ m}$ , 中央徑間  $2=98.146\text{ m}$  を有する縣道橋である。

## 第四節 補剛吊橋の圖式解法

1. 本解法の特徴 本解法は補剛吊橋の項に述べたる假定の下に、直線背控にして平行弦補剛構を有する二鉸補剛吊橋の第一次計算に適用するものである。

假定の如くケーブルが拠物線をなす場合にはその  $H$ -線は殆ど拠物線をなし、 $H$ -線を之と影響面積を等しくする拠物線で置き換へるも結果に於て殆ど變りはない。此の拠物線形  $H$ -線を用ふれば反力軌跡は直線になり圖式解法が可能となる。

以下拠物線形  $H$ -線を用ひて補剛構の最大、最小彎曲率及最大、最小剪力を求める。

2. 拠物線形  $H$ -線 第三章 (109) 式に於て

$$\frac{1}{1 + \frac{5}{8} \frac{E}{E_c} \frac{3Jl'}{F_f^2 l} (1+8n^2)} + \frac{5}{8} \frac{6J}{F_f^2} \frac{E}{E_c} \frac{l_2 \sec^3 \alpha_1}{l} = \nu \quad \dots \quad (223)$$

と置けば、(110) 式と組合せて

$$H = \frac{5}{8} P \nu \frac{l}{f} k (1 - 2k^2 + k^3)$$

を得る。

此の  $H$ -線の面積  $\mathcal{A}_H$  は

$$\mathcal{A}_H = \frac{1}{8} P \nu \frac{l^2}{f} \quad \dots \quad (224)$$

となる。此の  $\mathcal{A}_H$  と面積を等しくする拠物線の最大縦距を  $Z$  とすると

$$\mathcal{A}_H = \frac{2}{3} Zl$$

であるから

$$Z = \frac{3}{16} P \nu \frac{l}{f}$$

を得る。

従つて拠物線形  $H$ -線は

$$H = \frac{4Z}{l^2}x(l-x) = \frac{3}{4}P\nu k(1-k)\frac{l}{f} \quad \dots \dots \dots \quad (225)$$

で表される。

3.  $\nu$  の値 前掲  $\nu$  はケーブル断面  $F$  が、 $\max H$  に對応する断面  $F_0$  と全長にわたり  $F = F_0 \sec \alpha$  の關係ある時は  $A'B'$  が傾斜せる場合につき

$$\nu = \frac{1}{1 + \frac{15}{16} \frac{h^2}{f^2} \frac{s_0}{l} \frac{E}{E_0} \frac{F_s}{F_0}} \quad \dots \dots \dots \quad (226)$$

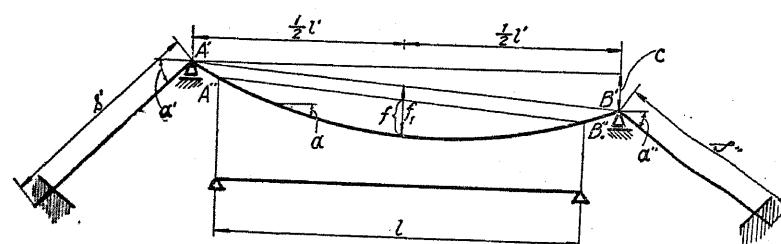
になる、但し  $F_s$  = 補剛構の平均弦材断面

$h$  = 補剛構高

$$s_0 = l' \left( 1 + \frac{16}{3} \frac{f_1^2}{l'^2} + \frac{e^2}{l'^2} \right) + s' \sec \alpha' + s'' \sec \alpha'' \quad (\text{第319図参照})$$

$E_0, E$  = ケーブル、補剛構の弾性恒数

である。



第 319 図

$F = F_0 \sec \alpha$  とするも、 $F$  を一定とするも結果に於て大差ない、以下本節に於ては前者の場合を取扱ふ。

温度變化に依る水平張力  $H_t$  は  $F = F_0 \sec \alpha$  に對する  $\nu$  を用ひ

$$H_t = \mp \omega E_0 F_0 t (1-\nu) \quad \dots \dots \dots \quad (227)$$

になる。こゝに  $\omega$  は伸縮係数、 $t$  は温度である。

是は第三章(103)式の分子を  $\omega t \Sigma S'_s$  で置き換へ、ケーブルに關する  $\Sigma S'_s$  を採り他は影響小なりとして省略すれば得られる。但し  $S'$  は  $H = -1$  に對する應力である。

4. 反力軌跡 反力軌跡は反力が張力である點のみが拱の場合と異り、其の求め方は拠物線二鉄拱に於けると全く同様で第一章(21)式により

$$\eta_k = \frac{4f}{3\nu}$$

である。

5. ケーブルと吊材の最大應力 ケーブルの最大水平張力を  $\max H$ 、吊材の最大張力を  $\max S$  とする

$$\max H = \frac{l^2}{8f} (g + p\nu) + \omega E_0 F_0 t (1-\nu) \quad \dots \dots \dots \quad (228)$$

$$\max S = \frac{\max H \cdot 8f\lambda}{l^2} \quad \dots \dots \dots \quad (229)$$

になる。但し  $g$  = 死荷重(単位長當り)

$p$  = 活荷重( " )

$\lambda$  = 格間長

であつてケーブルの徑間が補剛構の徑間より幾らか長いと云ふ事は省略してある。

6. 荷重満載時の補剛構の彎曲率及剪力 全徑間に亘り単位長當りに  $p$  なる荷重が載つた場合

$x$  点の彎曲率  $M_p$  は(224)式を参照し

$$M_p = \frac{px(l-x)}{2} - H_p y = \frac{px(l-x)}{2} - \frac{pl^2}{8f} \nu \frac{4fx(l-x)}{l^2}$$

即ち

$$M_p = \frac{px(l-x)}{2} (1-\nu) \quad \dots \dots \dots \quad (230)$$

になる。

又格間  $F_1 F_2$  に於ける剪力は構中央より格間中央までを  $x''$  とすれば(第323図参照)

$$Q_p = \frac{pl}{2} - px - H_p \tan \alpha'' = px'' - \frac{pl^2 \nu}{8f} \tan \alpha''$$

になる。

式中  $\alpha''$  は  $F' F''$  なるケーブル部分が水平となす角である。

ケーブルは拠物線であるから

$$\tan \alpha'' = \frac{dy}{dx} = \frac{4f}{l^2} (l-2x) = \frac{8f}{l^2} \left( \frac{l}{2} - x \right) = \frac{8f}{l^2} x''$$

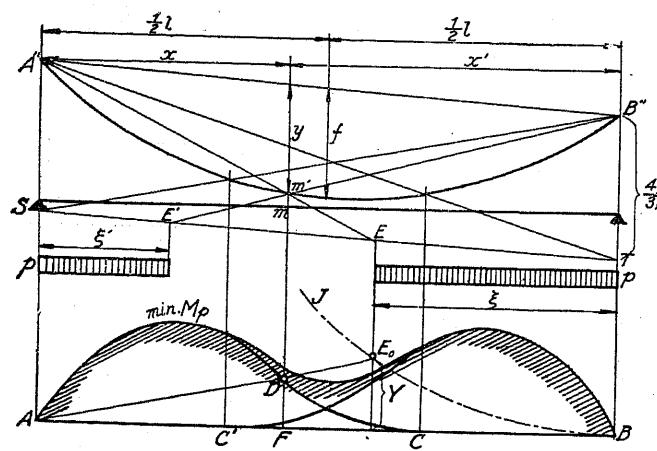
になる。

依つて

$$Q_p = px'' (1-\nu) \quad \dots \dots \dots \quad (231)$$

である。

(230)、(231)式を見ると  $M_p$  及  $Q_p$  は補剛構を單構と考へ  $(1-\nu)p$  を満載した場合の彎



第 320 圖

曲率及剪力と云ふ事になる。

7. 最大及最小彎曲率 第320圖に於て(補剛構は直線で書いてある)  $B''T = \frac{4f}{3\nu}$  にとり、  
 $TS$  を  $B''A''$  に平行にひけば  $TS$  は反力軌跡である。依て  $\xi'$  を通り  $A''E$  及  $B''E'$  をひき  
 $TS$  との交點を  $E$  及  $E'$  とすれば、 $E \sim B$ ,  $E' \sim A$  間に  $p$  が載ると  $m$  に最小彎曲率を生じ、  
 $E \sim E'$  間に載ると最大彎曲率を生ずる。 $EB = \xi$ ,  $E'A = \xi'$  とすれば、 $m$  に於ける最小彎曲率  $\min M_{mp}$  は(第一章第三節 3 参照)

$$\min M_{mp} = -\frac{p y \nu}{8 f l} (\xi^3 + \xi'^3) \quad \dots \dots \dots \quad (232)$$

である。

$m$  の最大彎曲率  $\max M_{mp}$  は

$$\min M_p + \max M_p = M_p$$

の關係があるから

$$\max M_{mp} = +\frac{p y \nu}{8 f l} (\xi^3 + \xi'^3) + \frac{p x (l-x)(1-\nu)}{2} \quad \dots \dots \dots \quad (233)$$

となる。

(232) 式は圖式的に次の如く求められる。

第320圖に於て水平線  $AB$  をとり  $Y = \frac{p \xi^3}{6l}$  なる三次抛物線  $BJ$  を描く。 $BJ$  と  $E$  の垂下線との交點  $E_0$  を求め  $AE_0$  を結ぶ。 $m$  の垂下線と  $AE_0$  の交點を  $D$ ,  $AB$  との交點を  $F$  とすれば

$$\overline{FD} = Y \frac{y}{4f} = \frac{p \nu y \xi^3}{8 f l}$$

であつて(232)式前項に他ならぬ。

斯かる  $D$  を  $\xi = 0$  に相當する點  $C$  と  $A$  との間の各點につき求めると  $CDA$  曲線を得る。同様に  $\xi$  につき  $\xi$  に於ける如く作圖し  $C'B$  曲線を求められる。 $CC'$  の間は兩曲線の縦距を加へ合せる。斯くして得た曲線が  $\min M_p$  を與へ第320圖に陰線を施してある面は即ち  $\min M_p$  面である。前述の三次抛物線を圖式で描くには、ある  $\xi$  の値  $\xi_1$  に對して

$$Y_1 = \frac{p \xi_1^3}{6l}$$

を計算する。然るときは三次抛物線は

$$Y = Y_1 \frac{\xi^3}{\xi_1^3}$$

の形になるから第321圖の如く作圖する。

即ち  $B$  より横距  $\xi_1$ , 縦距  $Y_1$  を採り  $H$  を求めて  $BH$  を結び、任意の點  $\xi$  に鉛直線を立て、これと  $BH$  の交點  $L$  より横軸に平行に  $LM$  をひき、 $MB$  と  $\xi$  に於ける鉛直線と  $N$  に交らしめ、更に  $N$  より横軸に平行に  $NO$  をひき  $OB$  と  $\xi$  に於ける鉛直線との交點  $P$  を求むれば  $P$  は三次抛物線上の一點である。斯くして各  $\xi$  に對し  $P$  を求むれば三次抛物線を得る。

$\xi_1$  としては補剛構端の格點に對應するものを選ぶのが便である。 $C$  點は  $x = l - \frac{l}{3\nu}$ ,  $C'$  點は

$x = \frac{l}{3\nu}$  の位置にある。 $\min M_p$  が求まれば、 $\max M_p$  は(233)式第二項に依る抛物線を描き縦距を加算すれば直に得られる。

$\min M_p$  を計算するには

$$y = \frac{4fx(l-x)}{l^3}$$

であつて且つ第320圖に見る如く

$$(l-\xi) : x = \frac{4f}{3\nu} : y$$

であるから

$$l - x = x'$$

とすれば

は

$$\min M_p = -\frac{py\nu\xi^3}{8fl}$$

となり計算が容易に出来る。

#### 8. 溫度變化に依り生ずる彎曲率 溫度變化に依る彎曲率 $M_t$ は

$$M_t = \mp H_t y = \mp \frac{8H_t f}{l^2} \frac{x(l-x)}{2} \quad (235)$$

であつて補剛構を単構と考へ  $\mp \frac{8H_t f}{l^2}$  なる等布荷重を載せた時の彎曲率に等しい。

9. 絶對最大彎曲率と弦材断面 絶對最大彎曲率は  $x = \frac{1}{4}l$ ,  $y = \frac{3}{4}f$  の極く近くに起る、此の位置に對應する荷重限界點は一つであるから最大彎曲率  $\max M$  は

$$\begin{aligned} \max M &= \max M_p + H_t y = -\min M_p + M_p + H_t y \\ &= \frac{px(3\nu x' - l)^3}{54\nu^2 x'^2} + \frac{px x'}{2}(1-\nu) + H_t y \end{aligned}$$

となる。式中  $x = \frac{1}{4}l$ ,  $x' = \frac{3}{4}l$ ,  $y = \frac{3}{4}f$  を入れると絶對最大彎曲率を得られ

$$\text{abs. } \max M = \frac{3p l^2}{32\nu^2} \left( \nu - \frac{4}{9} \right)^3 + \frac{3}{32} p l^2 (1-\nu) + \frac{3}{4} H_t f \quad (236)$$

となる。

此の  $\text{abs. } \max M$  に對し必要な  $F_s$  はその許容應力を  $\sigma$  と採れば

$$F_s = \frac{\text{abs. } \max M}{h\sigma}$$

であるから

$$F_s = \frac{3l^2}{32h\sigma} \left[ \frac{p}{\nu^2} \left( \nu - \frac{4}{9} \right)^3 + p(1-\nu) \right] + \frac{3}{4} H_t f \quad (237)$$

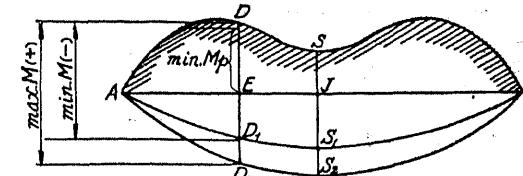
を得る。

斯くして得た  $F_s$  を  $\nu$  の計算に用ふる方がよろしい。蓋し  $\nu$  が減ると彎曲率が増加するから、 $\nu$  は幾分小さくとつた方が大きくとるよりも得策だからである。

#### 10. 彎曲率の集計

$$\min M = \max M_p - H_t y$$

$$\max M = \max M_p + H_t y = -\min M_p + M_p + H_t y$$



第 322 圖

で、之を圖示すると第322圖の如く  $ADSB$  は  $\min M_p$  曲線で  $AS_1B$  は  $\overline{S_1J} = -H_t f$  なる抛物線をなす。

$$ED_1 = -H_t y$$

であるから

$$\min M = -DD_1$$

となる。

次に垂矢

$$\overline{S_2J} = H_t f + p(1-\nu) \frac{l^2}{8}$$

なる抛物線  $AS_2B$  を描くと、 $x$  點に於ける縦距  $\overline{ED}_2$  は

$$\overline{ED}_2 = H_t y + p \frac{x(l-x)}{2}(1-\nu) = H_t y + M_p$$

で最大彎曲率は

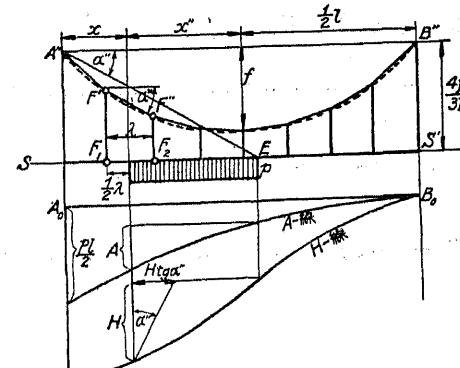
$$\max M = +DD_2$$

となる。

11. 最大及最小剪力 第323圖に於て ( $A''B''$  は水平とす)  $S''B'' = \frac{4f}{3\nu}$  にとり  $SS'$  を

$A''B''$  に平行にひく。 $F_1 F_2$  格間の活荷重に依る最大剪力  $\max Q_p$  は  $A''$  より  $F'' F''$  に平行なる直線をひき  $SS'$  との交りを  $E$  とすると、 $E$  が  $B_0$  より左にある場合は  $p$  が  $E$  から  $F_1 F_2$  格間の中央まで載つた場合に生ずる。此の荷重に對し左支承反力  $A$  と  $H$  を求むることに依り最大剪力は

$$\max Q_p = A - H \operatorname{tg} \alpha'' \quad (238)$$

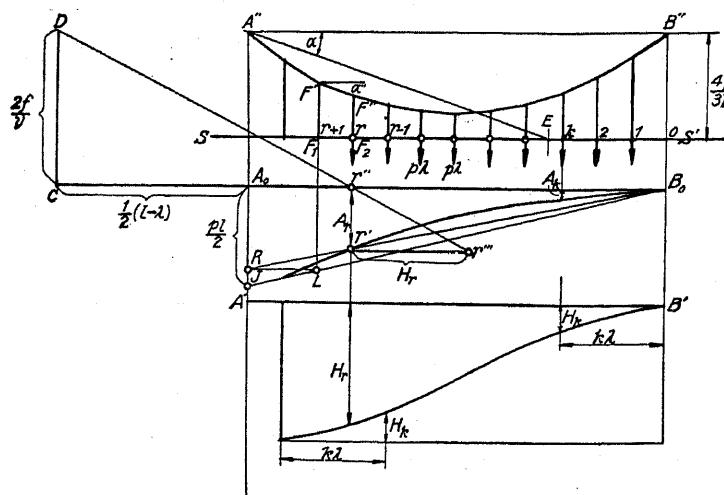


第 323 圖

で與へられる。こゝに  $\alpha''$  は  $F'' F''$  の水平となす角である。

$A$  及  $H$  は豫め第二  $A$ -線及び第二  $H$ -線を求めて置けば簡単に求められる。

第二  $A$ -線、第二  $H$ -線と云ふのは第324圖に於て荷重が 0 より左方に進むものとし、0 より  $k\lambda$  まで  $p$  が載荷された場合の  $A$  及び  $H$  を此の點の下に縦距としてとつた線であつて、



第 324 圖

第二  $A$ -線は拠物線である。

$E$  が  $B_0$  の右にある場合は、 $p$  を  $F_1 F_2$  格間の中央より 0 まで載せた時に  $F_1 F_2$  格間に  $\max Q_p$  を生ずる。最小剪力  $\min Q_p$  は

$$\min Q_p + \max Q_p = Q_p = p x'' (1 - \nu) \quad (239)$$

より求まる。他の格間につきても全く同様である。

格間が等しく格點荷重が一定の時は次の如くすると第二  $A$ -線及び第二  $H$ -線が圖式で求まる。

第324圖に於て 0 より  $r$  格點まで各格點に格點荷重  $p\lambda$  が載れる時は

$$A_r = \frac{p\lambda r(r+1)\lambda}{2l} \quad (240)$$

$$\begin{aligned} H_r &= \frac{3p\lambda\nu}{4f/l} [1(n-1) + 2(n-2) + \dots + r(n-r)] \lambda^2 \\ &= \frac{p\lambda^3\nu}{8f/l} r(r+1)(3n-2r-1) \end{aligned} \quad (241)$$

である。

(240) 及び (241) 式より

$$H_r = A_r \frac{1.5l - 0.5\lambda - r\lambda}{2f} \nu \quad (242)$$

を得る。

依つて第324圖の如く  $\overline{A_0J} = \frac{p\lambda}{2}$  にとり  $(r+1)$  の垂下線と  $B_0J$  との交點  $L$  を定める。LR を  $A_0B_0$  に平行にひき  $R$  と  $B_0$  を結ぶ、 $r$  の垂下線と  $B_0R$  との交點を  $r'$ 、 $B_0A_0$

との交りを  $r''$  とすると  $\overline{r''r'} = A_r$  になる。

次に  $B_0A_0$  を延長し  $A_0C = 0.5(l-\lambda)$  にとり  $CD = 2f:\nu$  にとると  $Dr''$  は  $r'$  を過る水平線と  $r'''$  で交り  $\overline{r''r'''} = H_r$  になる。

これで  $A_r$  と  $H_r$  が求めらるゝ。

$\max Q_p$  は  $FF''$  に平行にひいた  $A''E$  が  $SS'$  と交る點  $E$  から  $r$  格點まで各格點に  $p\lambda$  が載つた時に起るから、 $A_r$  及  $H_r$  から 0-E 間の荷重に依る  $A_k$  及  $H_k$  を減じた  $A$  及  $H$  に依つて求むればよい。即ち

$$A = A_r - A_k$$

$$H = H_r - H_k$$

$$\max Q_p = A - H \tan \alpha''$$

である。

### 12. 溫度變化に依る剪力 溫度變化に依る剪力 $Q_t$ は

$$Q_t = \mp H_t \tan \alpha'' = \mp \frac{8fH_t}{l^2} x'' \quad (243)$$

であつて補剛構を單構と考へ  $\mp \frac{8fH_t}{l^2}$  なる等布荷重を満載した時の剪力に等しい。

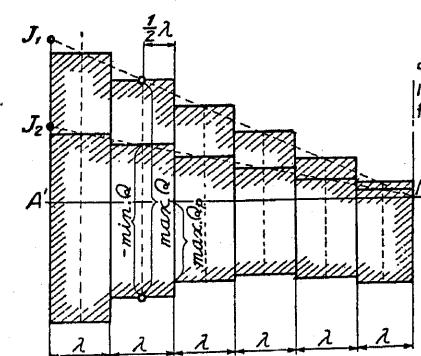
### 13. 剪力の集計

$$\max Q = \max Q_p + \frac{8fH_t}{l^2} x''$$

$$\min Q = \min Q_p - \frac{8fH_t}{l^2} x'' = -\max Q_p + Q_p - \frac{8fH_t}{l^2} x''$$

で圖に書くと第325圖の様になる。

即ち  $\max Q$  は  $A'B'$  から  $\max Q_p$  を採り之に単位長當り  $\frac{8fH_t}{l^2}$  の荷重を負載する場合の桁の剪力を加へればよろしい、後者は  $A'M = \frac{1}{2}l$ 、 $J_1 A' = \frac{4fH_t}{l}$  とすれば  $J_1 M$  なる直線に依つて表される。



第 325 圖

$$\max Q_p + A' J_1 \frac{x''}{0.5l} = \max Q_p + \frac{8fH_t}{l^2} x'' = \max Q$$

である。 $J_1 M$  を

$$\overline{A'J_2} = \frac{4fH_t}{l} - p(1-\nu) \frac{l}{2}$$

として  $J_2 M$  で置きかへると

$$\begin{aligned} \max Q_p + \overline{A'J_2} \frac{x''}{0.5l} &= \max Q_p + \frac{8fH_t}{l^2} x'' - p(1-\nu) x'' \\ &= \max Q_p + \frac{8fH_t}{l^2} x'' - Q_p = -\min Q \end{aligned}$$

となり  $\min Q$  を得る。

格間内では  $Q$  は一定であるから図の如くなる。

〔例〕第326図に示す補剛吊橋を圖式に依り解かんとす。

その一般寸法はケーブルの徑間  $l_1 = 75m$ , 補剛構の徑間  $l = 72m$ , 垂矢  $f = 9m$  ( $f_1 = 9.7m$ ), 補剛構の高  $2m$ , 格間長  $\lambda = 3m$ , 背笠の傾角  $35^\circ$ , 長  $s' = 27m$  とする。

荷重は死荷重を  $2.8t/m$ , 活荷重を  $1.5t/m$  とし温度変化を  $\pm 30^\circ C$  とする。

#### 1. $F_s$ : $F_0$ の假定

$$\frac{s_0}{l} = \frac{l_1}{l} \left[ 1 + \frac{16}{3} \frac{f_1^2}{l_1^2} + 2 \frac{s'}{l} \sec \alpha' \right] = 2.09$$

$$\nu = \frac{1}{1 + \frac{15}{16} \frac{h^2}{f^2} \frac{s_0}{l} \frac{E}{E_c} \frac{F_s}{F_0}}$$

$$E = 21 \times 10^6 t/m^2$$

$$E_c = 14 \times 10^6 t/m^2$$

を假定すると  $E/E_c = 1.5$  であるから

$$\nu = \frac{1}{1 + 0.1452 \frac{F_s}{F_0}}$$

となる。

$F_s$ :  $F_0$  を 0.94 に假定すると  $\nu = 0.88$  となる。

然るときは  $F_0$  及  $F_s$  は前掲の公式 (228) 及び (236) 式から求めらる。

$$\sigma_c F_0 = H_{\max} = \frac{l^2}{8f} (g + p\nu) + \omega E_c F_0 t (1 - \nu)$$

$\sigma_c$  をケーブルの許容應力とすれば上式の關係があるから、ケーブルの頂點に必要な斷面  $F_0$  は

$$F_0 = \frac{l^2 (g + p\nu)}{8f [\sigma_c - \omega E_c t (1 - \nu)]}$$

より求めらる。

依つて

$$\sigma_c = 3000 kg/cm^2 = 30000 t/m^2$$

$$\omega E_c t = 5040 t/m^2$$

とすれば

$$F_0 = 0.0101 m^2$$

となる。

ケーブル端に於て

$$\sec \alpha_1 = \sqrt{1 + \frac{16f^2}{l^2}} = \frac{1}{2}\sqrt{5} = 1.118$$

であるからケーブルに必要な最大斷面は

$$F_0 \sec \alpha_1 = 0.0113 m^2$$

に依り定めらる。

今の場合にはケーブル斷面を全長にわたり一定とするから  $F_0$  として上記の斷面を用ひる。

次に溫度變化に依る水平張力は

$$H_t = \omega E_c F_0 t (1 - \nu) = 6.83 t$$

であるから、補剛構弦材に必要な最大斷面は (237) 式

$$F_s = \frac{3l^2 p}{32 h \sigma} \left[ \frac{1}{\nu^2} \left( \nu - \frac{4}{9} \right)^3 + (1 - \nu) \right] + \frac{3H_t f}{4h \sigma}$$

に依り求めらる。

此  $F_s$  を  $\nu$  の計算に用ひるのであるが、 $\sigma = 1000 kg/cm^2 = 10000 t/m^2$  とすれば

$$F_s = \frac{3 \times 72^2 \times 1.5}{32 \times 2.0 \times 10000} \left[ \frac{1}{0.88^2} \left( 0.88 - \frac{4}{9} \right)^3 + 0.12 \right] + \frac{3 \times 6.83 \times 9.0}{4 \times 2.0 \times 10000} = 0.0106 m^2$$

を得る。

之に依つて

$$\frac{F_s}{F_0} = \frac{0.0106}{0.0113} = 0.938 \approx 0.94$$

となるから  $\nu = 0.88$  を用ひることとする。

ケーブルに生ずる最大張力は

$$\max H = \frac{l^2}{8f} (g + p\nu) + H_t = \frac{72^2}{8 \times 9.0} (2.8 + 1.5 \times 0.88) + 6.83 = 303.5 t$$

であつて、吊材に生ずる最大張力は

$$\max S = \max H \frac{8f\lambda}{l^2} = 303.5 \frac{8 \times 9 \times 3}{72^2} = 12.6 t$$

となる。

背笠に生ずる最大應力は

$$\max T = \max H \sec 35^\circ = 303.5 \times 1.2208 = 370.5 t$$

塔上の最大應力は

$$\max V = \max H (\tan 35^\circ + \tan \alpha_1) = 364.2 t$$

となる。

2. 補剛構弦材の應力 反力軌跡  $SS'$  は  $A''B''$  より

$$\frac{4f}{3\nu} = \frac{4 \times 9}{3 \times 0.88} = 13.64 m$$

の距離にあり、此の  $SS'$  と  $A''1', A''2', A''3' \dots$  との交り  $1_0, 2_0, 3_0 \dots$  は格點  $1, 2, 3 \dots$  に對する點になる（第326圖 a）。

是を求むるには、 $B''O'' = 4f = 36 m$  にとり、24等分し各分點を  $1'', 2'', 3'' \dots$  とする。次に  $A''1', A''2', \dots$  を結ぶと、此の直線は  $1, 2, 3 \dots$  の鉛直線よりケーブル上の點  $1', 2', 3' \dots$  を切り、 $SS'$  と  $1_0, 2_0, 3_0 \dots$  にて交る。

彎曲率を求むるに當りまづ  $\xi_1$  を圖から或は

$$\xi_1 = \frac{\frac{1}{3\nu} - \frac{1}{24}}{1 - \frac{1}{24}} l = 43.64 m$$

に依つて求める。 $B'$  より  $\xi_1$  をとり、此の位置に於ける三次拋物線の縦距を求めると

$$\frac{p \xi_1^3}{6l h} = \frac{1.5 \times 43.64^3}{6 \times 72 \times 2} = 143.1 t$$

となる。

$A'L_1B'$  及び  $A'L_2B'$  拠物線の垂矢は夫々

$$\frac{H_1 f}{h} = \frac{6.83 \times 9}{2} = 30.7 t$$

及び

$$\frac{H_2 f}{h} + \frac{p l^2}{8h} (1-\nu) = 30.7 + 58.3 = 89.0 t$$

となる。

作圖の結果格點  $1, 2, 3 \dots, 12$  に對し次の値を得た。

$$\max \frac{M}{h} = +30, +54, +73, +88, +100, +106, +109, +110, +109, +105, +103, +101 t$$

$$\min \frac{M}{h} = -20, -36, -47, -56, -62, -63, -62, -59, -54, -49, -45, -43 t$$

第326圖應力圖に各弦材應力を示してある。

3. 斜材應力 水平に對し傾角  $\varphi$  なる斜材の應力は

$$D = \pm \frac{Q}{\sin \varphi}$$

である。

こゝに  $Q$  は問題の格間に於ける剪力である。

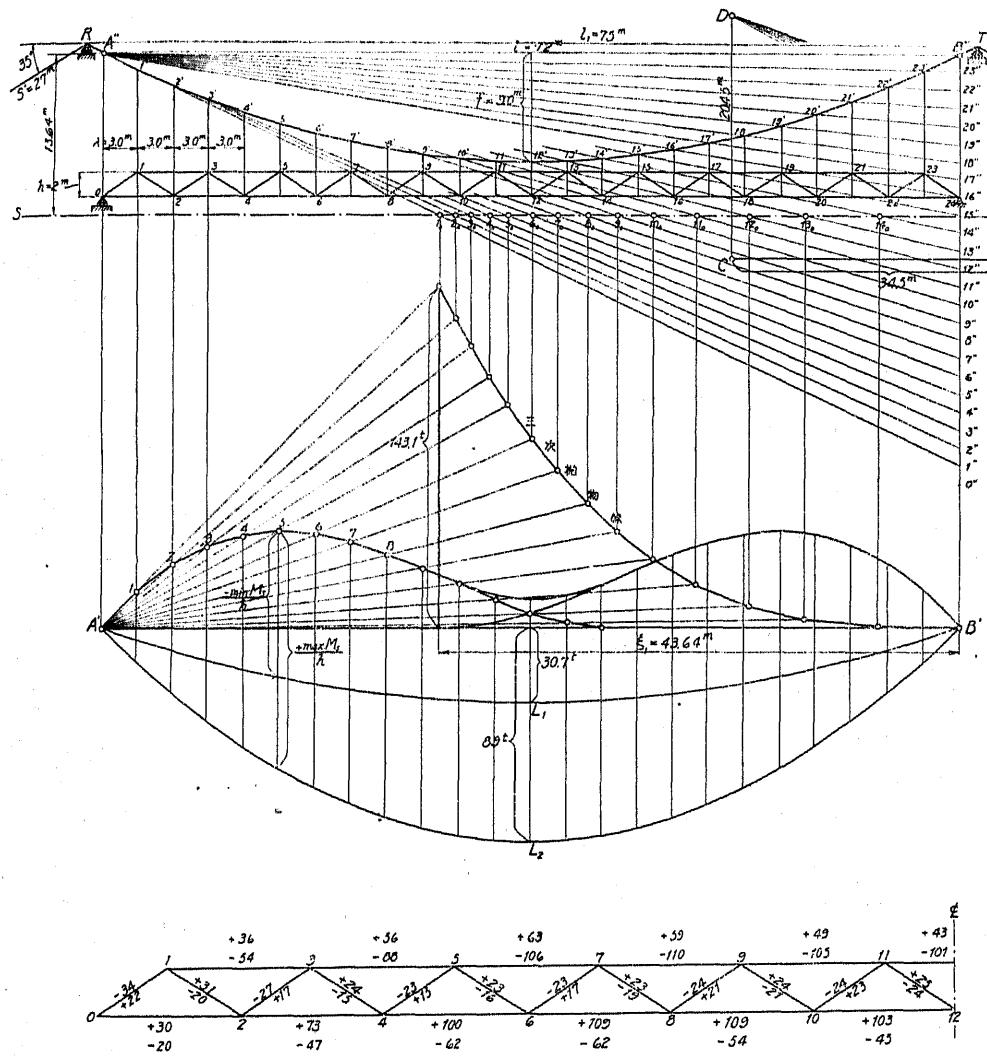
+ 符號は左の方に上つてゐる斜材、- 符號は右の方に上つてゐる斜材に對應する。

$\varphi$  が全斜材につき等しき時は  $Q' = \frac{Q}{\sin \varphi}$  を前述の方法で求めるとこれが直ちに斜材應力を與へること

になる。

先づ格點荷重  $p_1$  を載せて

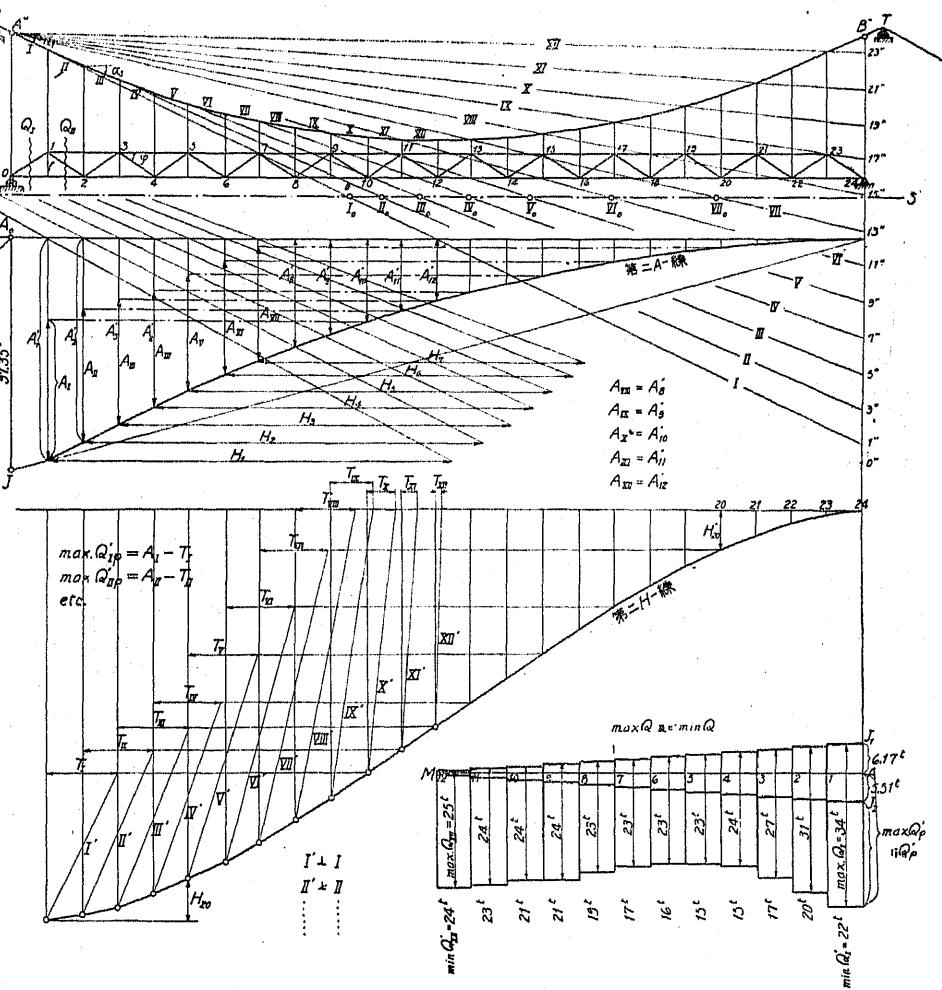
$$A_{p1} f = \frac{p l}{2 \sin \varphi} = \frac{1.5 \times 72 \times 1.8028}{2} = 97.35 t$$



應力圖 (a)

(a)

第 326 圖



(b)

により第二 ( $A : \sin \varphi$ ) 線を描く。

第二 ( $H : \sin \varphi$ ) 線は

$$\overline{AO} = \frac{1}{2}(l - \lambda) = \frac{1}{2}(72 - 3) = 34.5 \text{ m}$$

$$\overline{OD} = \frac{2f}{\nu} = \frac{2 \times 9}{0.88} = 20.45 \text{ m}$$

により第326圖(b)の様に作図する。同圖には  $A : \sin \varphi$ ,  $H : \sin \varphi$  を簡単に  $A'$  及び  $H'$  と書いてある。

$\max Q'_p$  を求むる作図法を格間  $\overline{23}$  を例にとって説明すれば、 $A''$  より  $\text{II}$  に平行に  $A''5''$  をひく。 $[A'' \text{と} 1'', 3'', 5'', \dots]$  を結ぶと此の線は夫々  $\text{I}$ ,  $\text{II}$ ,  $\text{III}, \dots$  に平行になる。 $A''5''$  と  $SS'$  の交りを  $\text{II}_0$  とするとこれは格間  $\overline{23}$  に對する點である。次に  $\text{II}_0$  と問題の格點との間の各格點  $3, 4, 5, \dots, 11$  に  $p\lambda$  を載せ、この状態に對し  $A$  及  $H$  を求めると

$$\frac{A}{\sin \varphi} = A'_{12} - A'_{12}$$

$$\frac{H}{\sin \varphi} = H'_{12} - H'_{12}$$

$$\max Q'_p = (A'_{12} - A'_{12}) - (H'_{12} - H'_{12}) \tan \alpha_3$$

となる。

第326圖には簡単に  $(A'_{12} - A'_{12})$  を  $A_{\text{II}}$ ,  $(H'_{12} - H'_{12}) \tan \alpha_3$  を  $T_{\text{II}}$  と書いてある。 $T_{\text{II}}$  は  $\text{II}$  に直角な  $\text{II}'$  を引き求めらる。

斯の如き方法で補剛構左半の各格間の  $\max Q'_p$  は

$$\max Q'_{p\text{I}} = A_{\text{I}} - T_{\text{I}}, \quad \max Q'_{p\text{II}} = A_{\text{II}} - T_{\text{II}}$$

の形で得られる。但しこれは  $\text{I}, \dots, \text{VII}$  に對する格間  $\text{I}$  より  $\text{VII}$  まであつて、 $\text{VII}$  の格間では、この右の各格點載荷の場合  $\max Q'_p$  を生じ  $A_{\text{VII}} = A'_{12}$  であり、 $T_{\text{VII}} = H'_{12} \tan \alpha_3$  である。

同様にして  $A_{\text{IX}} = \dots, T_{\text{IX}} = H'_{12} \tan \alpha_9$  で、以下之に倣う。

斯くして得られた  $\max Q'_p$  を第326圖(b)の下に  $AM$  直線から縦距としてとつてある。 $J_1M$  は

$$AJ_1 = \frac{4fH_t}{l \sin \varphi} = \frac{4 \times 9 \times 6.83}{72} = 6.17 t$$

に依り定めらる。

斯くして各格間の  $\max Q'$  は決定出来る。

$\min Q'$  を得るには  $J_1M$  の代りに  $J_2M$  を描き

$$AJ_2 = \frac{4fH_t}{l \sin \varphi} - p(1-\nu) \frac{l}{2 \sin \varphi} = -5.51 t$$

とすればよい。

結果は  $01, 12, \dots$  の各格間につき次の通りである。

$$\max Q = +34, +31, +27, +24, +23, +23, +23, +23, +24, +24, +24, +25 t$$

$$\min Q = -22, -20, -17, -15, -15, -16, -17, -19, -21, -21, -23, -24 t$$

補剛構の左支承の最大反力は端床桁の無い時は

$$A = D_1 \sin \varphi \quad \text{であるから} \quad \max A = +18.9 t \quad \min A = -12.2 t$$

となる。+ 符号は上向き、- 符号は下向き反力を意味する。

端床桁のある時は

$$m_{\text{max}} A = +18.9 + \frac{p\lambda}{2} = +18.9 + \frac{1.5 \times 3}{2} = +21.15 t$$

$m_{\text{min}} A$  は端床桁のない時と同じである。それは  $m_{\text{min}} A$  を生ずる状態では 0 には荷重はないからである。

## 第五節 挠 度 理 論

1. 緒 論 補剛吊橋の應力算定に於て一般に用ひられる近似計算法の理論は彈性理論 (Elastic Theory) で、之は第二節に述べたる如く構は活荷重に基くケーブルの變形を、實際上考慮せざるも差支ない程度に完全なる剛度を有するものと假定してゐる。彈性理論に基き算出せる彎曲率及剪力の値は實際生ずる値より可成大となり、安全ではあるが不經濟なることは免れない。一般に短徑間の場合とか、撓度が餘り大きくなき剛度の高い補剛構を有する場合は、彈性理論に基く計算法に依り比較的正確なる値を得ることが出来る。

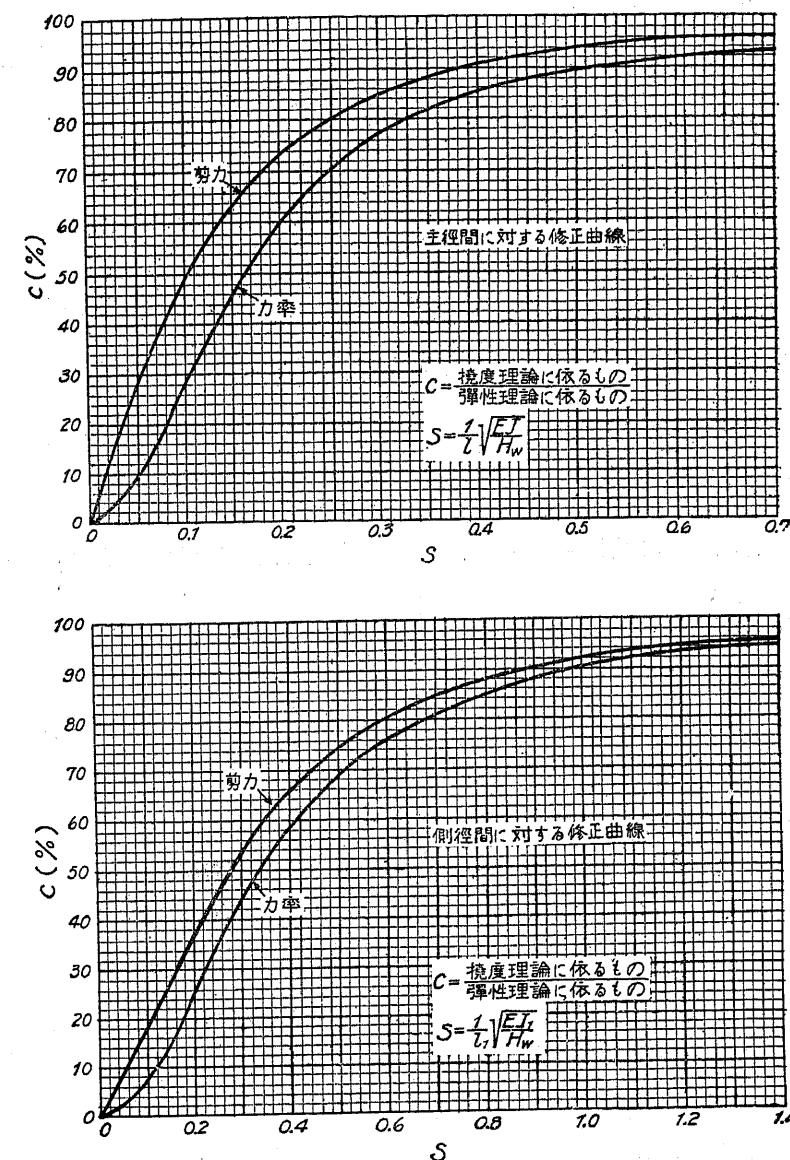
併し長徑間の場合、構の低い場合又は比較的死荷重の大なる場合は近似計算では餘りに不經濟となる故、其の際は構造物の變形を考慮に入れた精密計算を行はねばならない。此の精密計算法の理論は一般に撓度理論 (Deflection Theory) として知られて居るものである。

撓度理論に基く計算は相當煩雑なる故、時には時間の節約のため先づ彈性理論に依つて應力を算出し、精密計算に依る減少を適當なる係數を用ひて修正することがある。第 327 圖はベーカー (A. H. Baker) 氏が 1928 年に發表せる修正圖表である。

2. 撓度理論の沿革 補剛吊橋の計算に用ひる撓度理論はメラン (J. Melan) 氏に依つて創意され、1888 年彼の著書 “Theorie der eisernen Bogenbrücken und der Hängebrücken” の第二版に發表されたのである。

撓度理論を實際に採用した最初はマンハッタン橋 (Manhattan Bridge) の計算で、モザイフ (L. S. Moisseiff) 氏に依つてなされ、同氏は之に吊材を有する側徑間に適用される公式をも敷衍した。撓度理論は引き續きデラウェア橋 (Delaware Bridge)、フロリアノポリス橋 (Florinopolis Bridge)、マウントホープ橋 (Mount Hope Bridge)、グランド・メヤー橋 (Grand' Mere Bridge) 其他の吊橋にも採用された。

撓度理論の一つとして收斂三角級數 (Converging Trigonometric series) を用ひる方法が 1928 年にティモシエンコ (Timoshenko) 氏に依つて發表された。此の方法では  $H$ -方程式の誘導に際し吊橋荷重は均一なりとの假定を抹消して居るが、通常の精密計算法にて求めた  $H$  の値との



第 327 圖

差は僅小で實際には無視し得る程度のものである。

尙最近スタインマン (D. B. Steinman) 氏は連續、或は不連續、3 径間又は夫以上の多徑間の吊橋の何れにも應用出来る一般的撓度理論を發表した。

3. 撓度理論の基礎的假定 撓度理論に基き補剛吊橋の計算を行ふ場合には次の假定をなす。  
(a) ケーブルの最初の形狀は拋物線である (實際に於て眞の拋物線からの最大縱距偏倚は殆

んど 0.5% を超過しない)。

(b) 最初の死荷重 ( $w$ ) はケーブルに依つて支持され(之は最初の水平張力  $H_w$  を生ずる)補剛構には應力を生じない。

弾性理論の場合と異り、撓度理論ではケーブル曲線の縦距は載荷後も不變なりとは假定しない、即ちケーブル力の挾率の變化を考慮に入れるのである。

次に二鉄吊橋(2F式及2S式)に於ける撓度理論に就いて述べる。

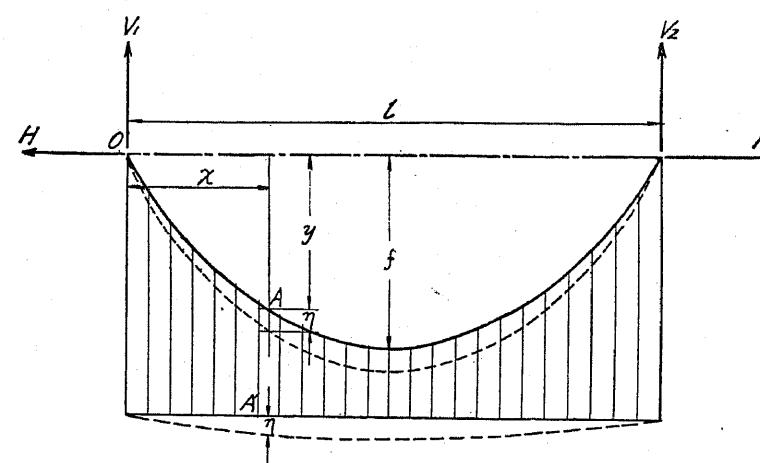
**4. 撓度理論に於ける基礎方程式** 径間に於ける撓度を無視する場合には径間の任意の點に於ける彎曲率は、弾性理論の基礎公式にて表はされ第三章(68)式に依り

$$M = M' - H y$$

である。今その點の撓度を  $\eta$  とすれば

$$M = M' - H(y + \eta)$$

となり、撓度は彎曲率の量を減じ從つて補剛構の材料の節約を圖る上に影響を有することが分る。



第 328 圖

第328圖に於てケーブル應力の水平分力を  $H_w + H$  とすれば、任意の點  $A'$  に於て構に應力を及ぼす吊材の彎曲率は  $(H_w + H)(y + \eta)$  となる。茲に  $H_w$  は死荷重及平均溫度に依るケーブル應力の水平分力、 $H$  は活荷重又は溫度變化等に依り生ずるケーブル應力の水平分力を示す。

然るに假定に依り  $H_w y$  は死荷重と平衡を保つ故、活荷重又は溫度變化と平衡を保つ彎曲率は  $(H_w + H)\eta + H y$  となる。従つて撓度を考慮せる場合補剛構に生ずる彎曲率は

$$M = M' - (H_w + H)\eta - H y \quad \dots \dots \dots \quad (244)$$

となる。(244)式は撓度理論に於ける基礎方程式である。

吊材の伸長を考慮しない時は任意の點の構には、その點に相當するケーブルと等しき撓度  $\eta$  を生ずるのである。

今補剛構の弾性恒数を  $E$ 、慣性率を  $J$  とし、撓曲理論を構に適用すれば

$$\frac{d^2\eta}{dx^2} = -\frac{M}{EJ}$$

上式に(244)式の値を代入し、且つ

$$c^2 = \frac{H_w + H}{EJ} \quad \dots \dots \dots \quad (245)$$

とすれば次式を得。

$$\frac{d^2\eta}{dx^2} = c^2\eta - \frac{c^2}{H_w + H} (M' - H y)$$

此の微分方程式を解けば、撓度の一般公式又は撓度曲線の方程式を得。即ち

$$\eta = \frac{H}{H_w + H} \left[ C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx} + \left( \frac{M'}{H} - y \right) - \frac{1}{c^2} \left( \frac{p}{H} - \frac{8f}{l^2} \right) \right] \quad \dots \dots \dots \quad (246)$$

茲に  $p$  は  $M'$  及  $H$  を生ずる等布活荷重を示す。

(246)式の値を(244)式に代入すれば  $M$  に對する一般公式又は  $M$ -曲線の方程式を得。

即ち

$$M = -H \left[ C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx} - \frac{1}{c^2} \left( \frac{p}{H} - \frac{8f}{l^2} \right) \right] \quad \dots \dots \dots \quad (247)$$

剪力  $Q$  に對する一般公式又は  $Q$ -曲線の方程式は(247)式を微分して求められる。

$$Q = \frac{dM}{dx} = -H c \left[ C_1 e^{cx} - C_2 e^{-cx} \right] \quad \dots \dots \dots \quad (248)$$

(246)、(247)及(248)の各式中の  $C_1$ 、 $C_2$  は積分常数にして、與へられた構造に對し荷重状態から決定せられ(次項参照)  $H$  の値は 6.に於ける値を用ふる。然しケーブルの撓度が僅小と考へられる場合には近似計算にて求めた  $H$  の値(第二節 5.)を用ひても差支ない。

(246)、(247)及(248)の各式より  $\eta$ 、 $M$  及  $Q$  の値は荷重  $p$  に比例しない事が分る。之は活荷重が作用しない前にケーブル内に生ずる死荷重應力の水平分力  $H_w$  が  $c$  の内に含まれて居るからである。此の理由に依り上記の方程式に對して影響線を畫く事が出來ない。然し近似計算法に依りて求めた影響線を参考として計算を進むれば、數回の試算に依り割合容易に其の最大値を求めることが出来る。

側徑間に於ける撓度、彎曲率及剪力の値は、中央徑間に於ける  $l, f$  の代りに夫々側徑間の  $l_b$ ,  $f_b$  を用ひ、 $c$  の代りに  $c_1$  を用ふればよい。茲に  $c_1^2 = \frac{H_w + H}{EJ_1}$  にして、 $J_1$  は側徑間補剛構の慣性率を表す。

次に近似計算に於ては、活荷重に依る吊材荷重 (Hanger pull) を其の徑間に於けるケーブルの全長を通じて一定と假定したのであるが、補剛構に依つて支持される単位長當りの活荷重の實際の量は次式で表はされるのである。

$$-\frac{d^2 M}{dx^2} = -\frac{dQ}{dx} = c^2 H [C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx}] \quad \dots \dots \dots \quad (249)$$

今  $p$  を単位長當りの活荷重とすれば、吊材に依つて支持される量は

$$s_1 = p - c^2 H [C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx}] \quad \dots \dots \dots \quad (250)$$

となる。(250) 式は吊材荷重に對する一般公式である。此の式より明かなる如く吊材荷重  $s_1$  は彈性理論に於ける如く一定の値でなく一つの變數となるのである。

5. 積分常數 (247)、(248) 及 (249) 式中の  $C_1$  及  $C_2$  は種々異なる荷重状態に對して決定すべきもので、 $p$  又は  $J$  の各異なる値に對し之に相當する常數  $C_1$  及  $C_2$  の一組の値を探るのである。

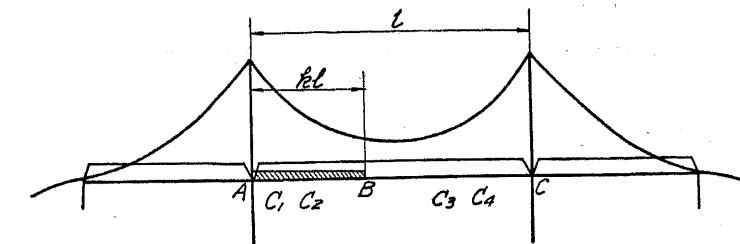
中央徑間に等布荷重  $p$  が満載し且  $J$  が一定なる場合には、(247) 式に於て  $x = 0$  及び  $x = l$  に對して  $M = 0$  となるから此の二條件より  $C_1$  及  $C_2$  を容易に求める事が出来る。  
即ち

$$\begin{aligned} C_1 + C_2 + \frac{1}{c^2} \left( \frac{8f}{l^2} - \frac{p}{H} \right) &= 0 \\ C_1 e^{cl} + C_2 e^{-cl} + \frac{1}{c^2} \left( \frac{8f}{l^2} - \frac{p}{H} \right) &= 0 \end{aligned}$$

の兩式を解いて

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= -\frac{1}{c^2(e^{cl}+1)} \left( \frac{8f}{l^2} - \frac{p}{H} \right) \\ C_2 &= C_1 e^{cl} \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (251)$$

次に等布荷重  $p$  が第329圖に示す如く徑間の左端より  $kl$  の間に載荷する場合には、載荷部分  $AB$  及無載荷部分  $BC$  に對する積分常數を同時に決定することが出来る。今載荷部分の常數を  $C_1$  及  $C_2$ 、無載荷部分の常數を  $C_3$  及  $C_4$  にて表はせば、是等の値は前に述べた條件と  $AB$  部分の右端及  $BC$  部分の左端に於ける彎曲率及剪力が等しいと云ふ條件から求める事が出来る。



第 329 圖

即ち (247) 及 (248) 式より

$$M_{AB} = -H \left[ C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx} + \frac{1}{c^2} \left( \frac{8f}{l^2} - \frac{p}{H} \right) \right] \quad \dots \dots \dots \quad (A)$$

$$M_{BC} = -H \left[ C_3 e^{cx} + C_4 e^{-cx} + \frac{8f}{c^2 l^2} \right] \quad \dots \dots \dots \quad (B)$$

$$Q_{AB} = -H c [C_1 e^{cx} - C_2 e^{-cx}] \quad \dots \dots \dots \quad (C)$$

$$Q_{BC} = -H c [C_3 e^{cx} - C_4 e^{-cx}] \quad \dots \dots \dots \quad (D)$$

然るに、

$x = 0$  に對して (A) 式に於ける  $M = 0$

$x = l$  に對して (B) 式に於ける  $M = 0$

$x = kl$  に對して (A) 式 = (B) 式

$x = kl$  に對して (C) 式 = (D) 式

なるが故に、(A) 乃至 (D) 式に此の條件を適用すれば、

$$C_1 + C_2 + \frac{1}{c^2} \left( \frac{8f}{l^2} - \frac{p}{H} \right) = 0$$

$$C_3 e^{cl} + C_4 e^{-cl} + \frac{8f}{c^2 l^2} = 0$$

$$C_1 e^{kl} + C_2 e^{-kl} + \frac{1}{c^2} \left( \frac{8f}{l^2} - \frac{p}{H} \right) = C_3 e^{kl} + C_4 e^{-kl} + \frac{8f}{c^2 l^2}$$

$$C_1 e^{kl} - C_2 e^{-kl} = C_3 e^{kl} - C_4 e^{-kl}$$

となる。之を解けば

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{\frac{p}{2Hc^2} [e^{cl}(1-k) + e^{-cl}(1-k) - 2e^{-cl}] - \frac{8f}{c^2 l^2}(1-e^{-cl})}{e^{cl}-e^{-cl}} \\ C_2 &= -C_1 - \frac{1}{c^2} \left( \frac{8f}{l^2} - \frac{p}{H} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (252)$$

$$\left. \begin{aligned} C_3 &= C_1 - \frac{p}{2Hc^2} e^{-k\omega t} = \frac{\frac{p}{2Hc^2} [e^{-\omega t}(e^{k\omega t} + e^{-k\omega t} - 2)] - \frac{8f}{c^2 l^2} (1 - e^{-\omega t})}{e^{\omega t} - e^{-\omega t}} \\ C_4 &= -C_3 e^{2\omega t} - \frac{8f}{c^2 l^2} e^\omega \end{aligned} \right\} \quad (253)$$

(246), (247) 及 (248) 式に依つて撓度、弯曲率及剪力を求める場合には、夫々與へられたる荷重状態に對して適當なる  $C_1$  及  $C_2$  の値を用ひなければならぬ。例へば第329圖に示す如き荷重状態に對して、 $AB$  間の任意の點に於ける撓度、弯曲率及剪力には (252) 式の  $C_1$  及  $C_2$  を用ひ、 $BC$  間の任意の點に對しては (253) 式に示せる  $C_3$  及  $C_4$  を用ふる。尙此の部分には活荷重が存在しないから (247) 及 (248) 式に於ける  $p$  の値は零とする。

他の荷重状態に對しても以上と同様の方法に依つて求めることが出来る。尙側徑間に對する常數の値は中央徑間に於ける場合と全く同様にして求める事が出来る。種々の荷重状態に對する常數の値を示せば第5表の通りである。

6.  $H$  の公式 多くの場合ケーブル應力の水平分力に對しては、近似計算に依るものより一層精密なる値を與ふる公式が望ましい。以下構及ケーブルの撓度を考慮に入れた場合の  $H$  の公式を導かん。

ケーブル應力  $H$  は主徑間並びに側徑間に於ける荷重及び溫度變化に依つて生ずるものであるから、 $H$  を誘導するためには鎖錠間のケーブル全體に就いて考慮すべきである。今吊材をケーブルの直下にて切斷せしものを想像し、その應力を外力に置き換ふれば、活荷重及び溫度變化に依つてケーブルに働く單位長當りの全荷重は  $s_1$  に等しい。此の活荷重及び溫度變化に依つてケーブルは引き伸ばされ、ケーブルに沿ひ或は上方に或は下方に鉛直移動を起す。此の鉛直移動中に爲された全仕事はケーブルの引き伸ばされる時に爲された全仕事に等しくなければならない。今ケーブルの引き伸ばされる時に爲された全仕事をケーブル内の應力變化に依るものと、溫度變化に依るものとの二つに分けて考へる。

應力に依るケーブル内の仕事。 $F$  をケーブルの均一斷面積、 $ds$  を長さの増分 (increment) とすれば、 $H$  に依るケーブル内の任意の點の應力は  $H \frac{ds}{dx}$  で表はされ、其の部分の伸びは  $\frac{H}{FE} \frac{ds}{dx} ds$  となる。載荷中ケーブル内の同一點に生ずる平均全應力は  $(\frac{H}{2} + H_w) \frac{ds}{dx}$  であるから、其の部分に爲された仕事は  $(\frac{H}{2} + H_w) \frac{H}{FE} \frac{ds^3}{dx^2}$  となる。従つてケーブルに於ける全仕事は次式の如くなる。

$$(\frac{H}{2} + H_w) \frac{H}{FE} \int_0^l \frac{ds^3}{dx^2} \quad \dots \quad (A)$$

溫度變化に依るケーブル内の仕事。 $\omega$  を溫度に依る伸縮係數、 $t$  を溫度變化とすれば、任意の部分  $ds$  に於ける長さの變化は  $\omega t ds$  である。平均應力は  $(\frac{H}{2} + H_w) \frac{ds}{dx}$  であるからケーブル全體に對して爲された全仕事は次式の如くなる。

$$(\frac{H}{2} + H_w) \omega t \int_0^l \frac{ds^2}{dx} \quad \dots \quad (B)$$

ケーブル内の全仕事。(A) 及 (B) 式よりケーブル内に於ける全仕事は次式に依つて表はされる。

$$(\frac{H}{2} + H_w) \frac{HL_s}{FE} + (\frac{H}{2} + H_w) \omega t L_t \quad \dots \quad (254)$$

$$\text{式中 } L_s = \int_0^l \frac{ds^3}{dx^2}, \quad L_t = \int_0^l \frac{ds^2}{dx} \text{ とす。}$$

鉛直移動に依る仕事。ケーブルの単位長當りの荷重は  $s_1$  であり、移動量は (246) 式に與へられた  $l$  であるから、爲された仕事は  $\int s_1 \eta dx$  で表はされる。死荷重はケーブルに沿ひ等布されるが、 $\int s_1 \eta dx$  を計算するために、附加荷重も等布されるものと假定する。之は 4. に於て述べた實際の狀態と反するものであるが、應力算定に際しては事實大した影響のないものである。以上の如く假定すれば単位長當りの荷重はその荷重に依つて生ずる弯曲率の二次導函數 (second derivative) に等しいと置く事に依つて  $s_1$  の値を求める事が出来る。即ちこの場合には弯曲率は  $(H + H_w)y$  となり、附加荷重に依る撓度の増分を考慮せざれば  $y = \frac{4fx}{l^2}(l-x)$  となる故

$$M = (H + H_w) \frac{4fx}{l^2}(l-x)$$

$$s_1 = -\frac{d^2 M}{dx^2} = +(H + H_w) \frac{8f}{l^2} \quad (\text{近似値})$$

となる。従つてケーブル内の平均荷重は  $(\frac{H}{2} + H_w) \frac{8f}{l^2}$  となる故、主徑間のケーブル内に於ける仕事は

$$\frac{8f}{l^2} \left( \frac{H}{2} + H_w \right) \int_0^l \eta dx \quad \dots \quad (C)$$

にて表はされる。同様に側徑間に於けるものは

$$\frac{8f_1}{l_1^2} \left( \frac{H}{2} + H_w \right) \int_0^{l_1} \eta_1 dx \quad \dots \quad (D)$$

となる。従つて主徑間及兩側徑間に於ける全仕事は (C) 及 (D) 式より次式の如くなる。

$$\frac{8f}{l^2} \left( \frac{H}{2} + H_w \right) \left[ \int_0^l \eta dx + \frac{2f_1 l^2}{f l_1^2} \int_0^{l_1} \eta_1 dx \right] \dots \quad (255)$$

$H$  の一般式。 (254) 式と (255) 式を等しく置き、尙  $\frac{f_1 l^2}{f l_1^2} = K$  とすれば

$$\left( \frac{H}{2} + H_w \right) \frac{H L_t}{F E} + \left( \frac{H}{2} + H_w \right) \omega t L_t = \frac{8f}{l^2} \left( \frac{H}{2} + H_w \right) \left[ \int_0^l \eta dx + 2K \int_0^{l_1} \eta_1 dx \right] \dots \quad (256)$$

上式に (246) 式の  $\eta$  の値を代入し  $H$  に就いて解けばケーブル応力の水平分力に対する一般式を得。即ち

$$H = \frac{\int_0^l \left( M' - \frac{p}{c^2} \right) dx + K \left[ \text{側徑間の項} \right] - \frac{l^2 \omega t}{8f} H_w L_t}{-\int_0^l (C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx}) dx - \frac{8f}{c^2 l^2} + \frac{2}{3} f l + 2K \left[ \text{側徑間の項} \right] + \frac{c^2 J l^2}{8f F} L_s + \frac{l^2 \omega t}{8f} L_t} \quad (257)$$

(257) 式の括弧内の項は各側徑間に對するもので、主徑間に對する前の項と全く同様の形に書く事が出来る。任意の徑間に於て荷重の無い場合には、その徑間に於ける  $M'$  及  $p$  の値は零となる。尙 (257) 式の右邊には  $H$  に關聯せる  $C_1$ ,  $C_2$  及  $L_t$  を含む故に、 $H$  の値は試算に依つて求めるのである。

$H$  の實用公式。 (257) 式に示す  $H$ -方程式は任意の特殊載荷状態に對して幾分之を簡単に表はすことが出来る。

今第329圖に示す如く等布荷重  $p$  が主徑間の左端より  $kl$  の部分にのみ載荷された場合の  $H$ -方程式は次の如くして求められる。

(257) 式に於て荷重状態に關係ある項は  $\int_0^l \left( M' - \frac{p}{c^2} \right) dx$ ,  $-\int_0^l (C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx}) dx$  及びこれに相當する側徑間の項である。前項に對しては第329圖より明かなる如く

$$\begin{aligned} \int_0^l \left( M' - \frac{p}{c^2} \right) dx &= \int_0^{kl} \left[ \frac{p k l}{2} (2-k)x - \frac{p x^2}{2} - \frac{p}{c^2} \right] dx + \int_{kl}^l \left[ \frac{p k^2 l}{2} (l-x) \right] dx \\ &= p k l \left[ \frac{k l^2}{12} (3-2k) - \frac{1}{c^2} \right] \dots \quad (258) \end{aligned}$$

となる。側徑間は無載荷なる故に相當する側徑間の項は零である。

$-\int_0^l (C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx}) dx$  の項に對しては、兩側徑間に對して考慮すべきである。先づ主徑間に對しては (252) 及 (253) 式に示す積分常數を代入すれば次式を得。

即ち

$$\begin{aligned} -\int_0^l (C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx}) dx &= -\int_0^{kl} (C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx}) dx - \int_{kl}^l (C_3 e^{cx} + C_4 e^{-cx}) dx \\ &= \frac{1}{c} \left\{ C_1 (2 - e^{cl} - e^{-cl}) + \frac{p}{2H c^2} [e^{cl(l-k)} + e^{-cl(l-k)} - 2 + 2e^{-cl}] + \frac{8f}{c^2 l^2} (1 - e^{-cl}) \right\} \\ &= \frac{1}{c(e^{cl} - e^{-cl})} \left\{ \frac{p}{H c^2} [e^{cl(l-k)} + e^{-cl(l-k)} - e^{cl} - e^{-cl} - e^{kl} - e^{-kl} + 2] \right. \\ &\quad \left. + \frac{16f}{c^2 l^2} (e^{cl} - 2 + e^{-cl}) \right\} \dots \quad (259) \end{aligned}$$

之に相當する側徑間の項は次の如くなる。

$$-2K \int_0^{l_1} (B_1 e^{c_1 x} + B_2 e^{-c_1 x}) dx$$

茲に  $B_1$  及  $B_2$  は側徑間に於ける積分常數で、無載荷の場合に  $p = 0$  となる外は (251) 式に與へられたものと相似の式となる。従つて

$$\begin{aligned} -2K \int_0^{l_1} (B_1 e^{c_1 x} + B_2 e^{-c_1 x}) dx \\ = -\frac{4KB_1}{c_1} (e^{c_1 l_1} - 1) = +\frac{32K}{c_1^3 l_1^2} \frac{(e^{c_1 l_1} - 1)}{(e^{c_1 l_1} + 1)} \dots \quad (260) \end{aligned}$$

となる。(258), (259) 及 (260) の各式の値を (257) 式に代入すれば

$$\begin{aligned} H &= \frac{p k l \left[ \frac{k l^2}{12} (3-2k) - \frac{1}{c^2} \right] - \frac{p}{c^2 (e^{cl} - e^{-cl})} [e^{cl(l-k)} + e^{-cl(l-k)} - e^{cl} - e^{-cl} - e^{kl} - e^{-kl} + 2] - \frac{l^2 \omega t}{8f} H_w L_t}{\frac{16f}{c^2 l^2} \frac{(e^{cl}-1)}{(e^{cl}+1)} - \frac{8f}{c^2 l} + \frac{2}{3} f l + K \left[ \frac{32f_1}{c_1^3 l_1^2} \frac{(e^{c_1 l_1} - 1)}{(e^{c_1 l_1} + 1)} - \frac{16f_1}{c_1^2 l_1} + \frac{4}{3} f_1 l_1 \right] + \frac{c^2 J l^2}{8f F} L_s + \frac{l^2 \omega t}{8f} L_t} \dots \quad (261) \end{aligned}$$

上式は第329圖の荷重状態に於けるケーブル応力の水平分力に対する方程式である。

任意の他の載荷状態に對しては同様の方法に依つて  $H$  の値を見出すことが出来る。第5表に種々の載荷状態に於ける  $H$  の公式を掲げてある。式中  $D_+$  及び  $D_-$  は溫度の昇降を示すものとす。

$H$ -方程式の分母を見るに荷重  $p$ , 荷重長  $k$ , 並びに溫度變化  $t$  を含む項がない故、種々の載荷状態に對して分母は不變である。従つて (261) 式に示せる分母は他の種々の載荷状態に於ける  $H$ -方程式の分母となることが出来る。今 (261) 式の分母を  $D$  で表せば

$$\begin{aligned} D &= \frac{16f}{c^2 l^2} \frac{(e^{cl}-1)}{(e^{cl}+1)} - \frac{8f}{c^2 l} + \frac{2}{3} f l + K \left[ \frac{32f_1}{c_1^3 l_1^2} \frac{(e^{c_1 l_1} - 1)}{(e^{c_1 l_1} + 1)} - \frac{16f_1}{c_1^2 l_1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{4}{3} f_1 l_1 \right] + \frac{c^2 J l^2}{8f F} L_s \pm \frac{l^2 \omega t}{8f} L_t \dots \quad (262) \end{aligned}$$

$D$  の式中には  $H$  に關係する變數  $c$  及  $c_l$  を含む故、 $D$  の値は荷重に應じ變化するので一定ではない。從つて計算を行ふ場合には先づ (262) 式の  $D$  を計算し、之を表に示せば便利である。第 331 圖は其の一例である。以後  $D_{+l}$  は溫度上昇の場合、 $D_{-l}$  は下降の場合を示すものとす。

(257) 式の分子の最後の項は溫度に關係する項にして、溫度上昇の場合には負符號を、下降の場合には正符號を探る。換言すれば  $H$  は溫度上昇の場合に減じ、下降の場合に増すのである。

7. 最大彎曲率及剪力を生ずる載荷狀態 任意の點に於ける彎曲率の値に對する載荷狀態の影響は、基本方程式 (244) を検討することに依り決定される。

任意の點に於ける最大正彎曲率は (244) 式より明かなる如く、 $M'$  を出来るだけ大きく採り同時に  $H$  を出来るだけ小さく採りたる時に生ずる。一般に斯る狀態は第 5 表 I, II 及 V に示す如く、該點の存する徑間が載荷され他の部分が無載荷の場合に起る。溫度は  $H$  の値を減少するため最高溫度を探るものとする。

任意の點に於ける最大負彎曲率は上記と正反対の場合に起り、第 5 表 III, IV 及 VII に示す如く該點の存する徑間が無載荷で、他の部分が載荷され、溫度は最低の場合である。

$M$  の最大及最小値に對する載荷狀態は第二章第 233 圖の  $M$ -影響線圖に示せるものと類似の狀態である。

任意の點の剪力は第三章 (70) 式に依り

$$Q = Q' - H \operatorname{tg} \phi$$

である。上式より明かなる如く最大正剪力は  $Q'$  を大きく  $H$  を小に採りたる場合に生じ、最大負剪力はこれと反対の場合に生ずる。從つて彎曲率の場合と同様の載荷狀態が之を満足するが、唯部分荷重が最大剪力を求めるとする斷面に於て終止すると云ふ違がある。最大正剪力に對する載荷狀態は第 5 表 I, II, VI に、最大負剪力に對しては同表 III, IV, VII に示してある。

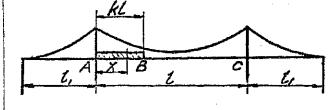
最大彎曲率及び剪力を生ずる荷重長は試算に依つて求めるが、此の場合彈性理論に依つて求めた荷重長を参考として割合簡単に求むることが出来る。一般に荷重長を 3 回位變へてやれば所要の最大値が得らる。

8. 特殊の載荷狀態に於ける  $H$  及  $C$  の値 設計に當り通常必要なる種々の載荷狀態に對する  $H$  及それに關聯せる  $C_1$  及  $C_2$  の値を計算し、これを表に示せば第 5 表の如くなる。

9. 最大撓度 主徑間中央に於ける最大撓度は活荷重が主徑間に満載され側徑間無載荷の場合にして、溫度は最高の場合に生ずる。此の載荷狀態は第 5 表 I に於て  $k = 1$  と置くか、II に於て  $k = k' = 0$ ,  $\lambda = 1$  と置いて求めることが出来る。積分常數  $C_1$  及  $C_2$  の値は何れの場

第 5 表

## 主 徑 間

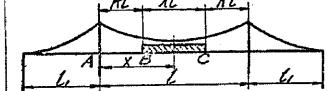
最大正彎曲率—終端、中央附近間 載荷狀態	主徑間 部分載荷 側徑間 無載荷	

$$H = \frac{p k l^2}{12} \left( 3 - 2k \right) - \frac{1}{c^2} + \frac{p}{c^3 (e^{cl} - e^{-cl})} \left[ e^{cl(1-k)} + e^{-cl(1-k)} - e^{cl} - e^{-cl} - e^{kcl} - e^{-kcl} + 2 \right] - \frac{l^2 \omega t H_w L_c}{8f D_{+l}}$$

AB 間に對し

$$C_1 = \frac{\frac{p}{2Hc^2} [e^{cl(1-k)} + e^{-cl(1-k)} - 2e^{cl}] - \frac{8f}{c^2 l^2} (1 - e^{-cl})}{(e^{cl} - e^{-cl})}$$

$$C_2 = -C_1 - \frac{1}{c^2} \left( \frac{8f}{l^2} - \frac{p}{H} \right)$$

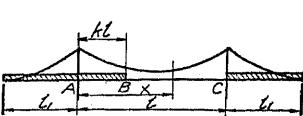
最大正彎曲率—中央附近 載荷狀態	主徑間 部分載荷 側徑間 無載荷	

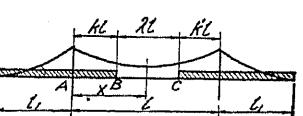
$$H = \frac{p \lambda l \left\{ \frac{l^2 [k(1-k) + k'(1-k')]}{4} + \frac{2l^2}{12} - \frac{1}{c^2} \right\} + \frac{p}{c^3 (e^{cl} - e^{-cl})} [e^{cl(1-k)} + e^{-cl(1-k)} + e^{cl(1-k')} + e^{-cl(1-k')} - e^{kcl} - e^{-kcl} - e^{k'cl} - e^{-k'cl}] - \frac{l^2 \omega t H_w L_c}{8f D_{+l}}}{D_{+l}}$$

BC 間に對し

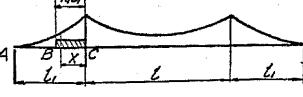
$$C_1 = \frac{\frac{p}{2Hc^2} [e^{k'cl} + e^{-k'cl} - (e^{kcl} + e^{-kcl}) e^{-cl}] - \frac{8f}{c^2 l^2} (1 - e^{-cl})}{(e^{cl} - e^{-cl})}$$

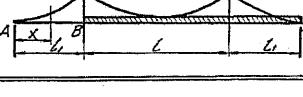
$$C_2 = -C_1 + \frac{p}{2Hc^2} (e^{kcl} + e^{-kcl}) - \frac{8f}{c^2 l^2}$$

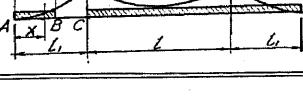
最大負彎曲率一終端、中央附近間 最大負剪力一終端及中央附近	主徑間 部分載荷 載荷狀態 側徑間 滿載荷 溫 度 最 低	
$H = \frac{p k l \left[ \frac{k l^3}{12} (3-2k) - \frac{1}{c^2} \right] + \frac{p}{c^3 (e^{cl}-e^{-cl})} [e^{cl(1-k)} + e^{-cl(1-k)} - e^{cl} - e^{-cl} - e^{kcl} - e^{-kcl} + 2] + 2p l_1 \left[ \frac{l_1^2}{12} - \frac{1}{c_1^2} \right] + \frac{4p}{c_1^3} \left( \frac{e^{c_1 l_1} - 1}{e^{c_1 l_1} + 1} \right) + \frac{l^2 \omega t H_m L_t}{8f}}{D_t}$ $B C \text{ 間に對し } C_1 = \frac{p}{2H c^2} [e^{-cl} (e^{kcl} + e^{-kcl} - 2)] - \frac{8f}{c^2 l^2} (1 - e^{-cl})$ $C_2 = -C_1 e^{2cl} - \frac{8f}{c^2 l^2} e^{cl}$		

最大負彎曲率一中 央 附 近 最大負剪力一終端、中央附近間	主徑間 部分載荷 載荷狀態 側徑間 滿載荷 溫 度 最 低	
$H = \frac{p l \left[ \frac{l^2}{12} - \frac{1}{c^2} \right] + 2p l_1 \left[ \frac{l_1^2}{12} - \frac{1}{c_1^2} \right] + \frac{2p}{c^3} \left( \frac{e^{cl} - 1}{e^{cl} + 1} \right) + \frac{4p}{c_1^3} \left( \frac{e^{c_1 l_1} - 1}{e^{c_1 l_1} + 1} \right) - [\text{II の分子}]}{D_t}$ $B C \text{ 間に對し } C_1 = \frac{p}{2H c^2} [(e^{kcl} + e^{-kcl}) e^{-cl} - e^{k'cl} - e^{-k'cl}] - \frac{1}{c^2} \left( \frac{8f}{l^2} - \frac{p}{H} \right) (1 - e^{-cl})$ $C_2 = -C_1 - \frac{p}{2H c^2} (e^{kcl} + e^{-kcl}) - \frac{1}{c^2} \left( \frac{8f}{l^2} - \frac{p}{H} \right)$		

最大正彎曲率	側 径 間							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>載荷狀態</th> <th>主徑間 一側徑間 他側徑間 溫 度</th> <th>無載荷 部分載荷 滿載荷</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>主徑間 一側徑間 他側徑間 溫 度</td> <td></td> <td>最 高</td> </tr> </tbody> </table> $H = \frac{p l_1 \left( \frac{l_1^2}{12} - \frac{1}{c_1^2} \right) + \frac{2p}{c_1^3} \left( \frac{e^{c_1 l_1} - 1}{e^{c_1 l_1} + 1} \right) - \frac{l^2 \omega t H_m L_t}{8f}}{D_+}$ $A B \text{ 間に對し } C_1 = -\frac{1}{c_1^2 (e^{c_1 l_1} + 1)} \left( \frac{8f_1}{l_1^2} - \frac{p}{H} \right)$ $C_2 = C_1 e^{c_1 l_1}$			載荷狀態	主徑間 一側徑間 他側徑間 溫 度	無載荷 部分載荷 滿載荷	主徑間 一側徑間 他側徑間 溫 度		最 高
載荷狀態	主徑間 一側徑間 他側徑間 溫 度	無載荷 部分載荷 滿載荷						
主徑間 一側徑間 他側徑間 溫 度		最 高						

最大正剪力	載荷狀態	主徑間 一側徑間 他側徑間 溫 度	無載荷 部分載荷 滿載荷	
$H = \frac{p k_1 l_1 \left[ \frac{k_1 l_1^2}{12} (3-2k_1) - \frac{1}{c_1^2} \right] - \frac{p}{c_1^3 (e^{c_1 l_1} - e^{-c_1 l_1})} [e^{c_1 l_1 (1-k_1)} + e^{-c_1 l_1 (1-k_1)} - e^{c_1 l_1} - e^{-c_1 l_1} - e^{k_1 c_1 l_1} - e^{-k_1 c_1 l_1} + 2] - \frac{l^2 \omega t H_m L_t}{8f}}{D_+}$ $B C \text{ 間に對し } C_1 = \frac{p}{2H c_1^2} [e^{c_1 l_1 (1-k_1)} + e^{-c_1 l_1 (1-k_1)} - 2e^{-c_1 l_1}] - \frac{8f_1}{c_1^2 l_1^2} (1 - e^{-c_1 l_1})$ $C_2 = -C_1 - \frac{1}{c_1^2} \left( \frac{8f_1}{l_1^2} - \frac{p}{H} \right)$				

最大負彎曲率	載荷狀態	主徑間 一側徑間 他側徑間 溫 度	滿載荷 部分載荷 滿載荷	
$H = \frac{p l \left( \frac{l^2}{12} - \frac{1}{c^2} \right) + p l_1 \left( \frac{l_1^2}{12} - \frac{1}{c_1^2} \right) + \frac{2p}{c^3} \left( \frac{e^{cl} - 1}{e^{cl} + 1} \right) + \frac{2p}{c_1^3} \left( \frac{e^{c_1 l_1} - 1}{e^{c_1 l_1} + 1} \right) + \frac{l^2 \omega t H_m L_t}{8f}}{D_t}$ $A B \text{ 間に對し } C_1 = -\frac{1}{c_1^2 (e^{c_1 l_1} + 1)} \frac{8f_1}{l_1^2}$ $C_2 = C_1 e^{c_1 l_1}$				

最大負剪力	載荷狀態	主徑間 一側徑間 他側徑間 溫 度	滿載荷 部分載荷 滿載荷	
$H = \frac{p k_1 l_1 \left[ \frac{k_1 l_1^2}{12} (3-2k_1) - \frac{1}{c_1^2} \right] - \frac{p}{c_1^3 (e^{c_1 l_1} - e^{-c_1 l_1})} [e^{c_1 l_1 (1-k_1)} + e^{-c_1 l_1 (1-k_1)} - e^{c_1 l_1} - e^{-c_1 l_1} - e^{k_1 c_1 l_1} - e^{-k_1 c_1 l_1} + 2] + [\text{VII の分子}]}{D_+}$ $A B \text{ 間に對し } C_1 = \frac{p}{2H c_1^2} [e^{c_1 l_1 (1-k_1)} + e^{-c_1 l_1 (1-k_1)} - 2e^{-c_1 l_1}] - \frac{8f_1}{c_1^2 l_1^2} (1 - e^{-c_1 l_1})$ $C_2 = -C_1 - \frac{1}{c_1^2} \left( \frac{8f_1}{l_1^2} - \frac{p}{H} \right)$				

合も (251) 式に與へられた値となる。

$x = \frac{l}{2}$ ,  $v = f$  及  $H' = \frac{p l^2}{8}$  を (246) 式に代入すれば、主徑間中央に於ける最大撓度は次の如くなる。

$$\max \eta = \frac{H}{H_n + H} \left[ C_1 e^{\frac{cl}{2}} + C_2 e^{-\frac{cl}{2}} + \frac{p l^2}{8H} + \frac{1}{c^2} \left( \frac{8f}{l^2} - \frac{p}{H} \right) - f \right] \dots \dots \dots (263)$$

側徑間中央に於ける最大撓度は第5表 I に於ける  $H$ ,  $C_1$  及  $C_2$  の値を (246) 式に代入して求める。即ちこの場合の式は (263) 式と同じ形となるが只側徑間に於ける項と置換へればよい。

非常に低い補剛構を有する橋梁に於ては主徑間の兩端部分に無載荷の場合に、主徑間中央に最大撓度を生ずる事がある。その際には第5表 I の場合に於て荷重長  $\lambda l$  を種々變じ、試算に依つて  $\eta$  の最大値を生ずる場合を求むる。

10. 径間無載荷の場合に於ける温度變化の影響  $H$  に對する種々の公式 (257), (261) 式及第5表 I 乃至 II に於て  $p = 0$  と置けば温度變化に依るケーブル張力の水平分力  $H_t$  は次式にて表はされる。

$$H_t = \pm \frac{l^2 \omega t}{8f} H_w L_t \dots \dots \dots (264)$$

積分常数は (251) 式より

$$C_1 = -\frac{8f}{e^{\frac{cl}{2}} (e^{cl} + 1)}; \quad C_2 = C_1 e^{cl} \dots \dots \dots (265)$$

温度變化に依る弯曲率は (247) 式より

$$M_t = -H_t \left( C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx} + \frac{8f}{e^{\frac{cl}{2}} l^2} \right) \dots \dots \dots (266)$$

主徑間中央 ( $x = \frac{l}{2}$ ) に於ける弯曲率は

$$\max M_t = -H_t \left( 2 C_1 e^{\frac{cl}{2}} + \frac{8f}{e^{\frac{cl}{2}} l^2} \right) \dots \dots \dots (267)$$

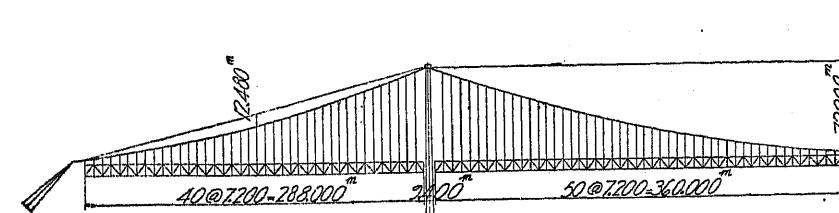
主徑間中央に於ける温度變化に依る撓度は (263) 式より

$$\max \eta_t = \frac{H_t}{H_n + H_t} \left[ 2 C_1 e^{\frac{cl}{2}} + \frac{8f}{e^{\frac{cl}{2}} l^2} - f \right] \dots \dots \dots (268)$$

側徑間に於ける夫々の値は (266) 乃至 (268) 式に於て  $c$ ,  $l$ ,  $f$  の代りに  $c_1$ ,  $l_1$ ,  $f_1$  を代入すればよろしい。

### 計算例

第330圖に示す二鉸吊橋に於て次の諸條件の下に、ケーブル應力の水平分力、弯曲率、剪力及び撓度を撓度理論に基いて求める。



第 330 圖

	主徑間	側徑間
徑 間	$l = 720m$	$l_1 = 288m$
垂 矢	$f = 72m$	$f_1 = 12.48m$
情 性 率	$J = \frac{12}{7} m^4$	$J_1 = \frac{7}{3} m^4$
補剛構各構當り死荷重	$w = 12t/m$	$w_1 = 13t/m$

補剛構材料の彈性恒数  $E = 21 \times 10^6 t/m^2$

温度  $t = \pm 30^\circ C$  伸縮係数  $\omega = 0.000012$

$L_s = 1562.16m$   $L_0 = 1465.33m$

1. 分母  $D$  の値 6. に説明せし如く  $H$ -方程式に於ける分母  $D$  の値は  $H$  の値のみに關係し載荷状態には無關係なる故、種々の計算に先立ち  $D$  の値を計算して置けば甚だ便利である。即ち (262) 式より  $H = 0 \sim 2500$  に對して  $\pm 30^\circ C$  の温度状態を考慮し  $D$  の値を求め其の結果を圖に示せば第331圖の如くなる。

2. ケーブル應力の水平分力の値  $3t/m$  の等布荷重が主徑間の左端と  $1/4$  點間に載荷し且つ温度最上昇の場合の  $H$  の値は次の如くして求める。

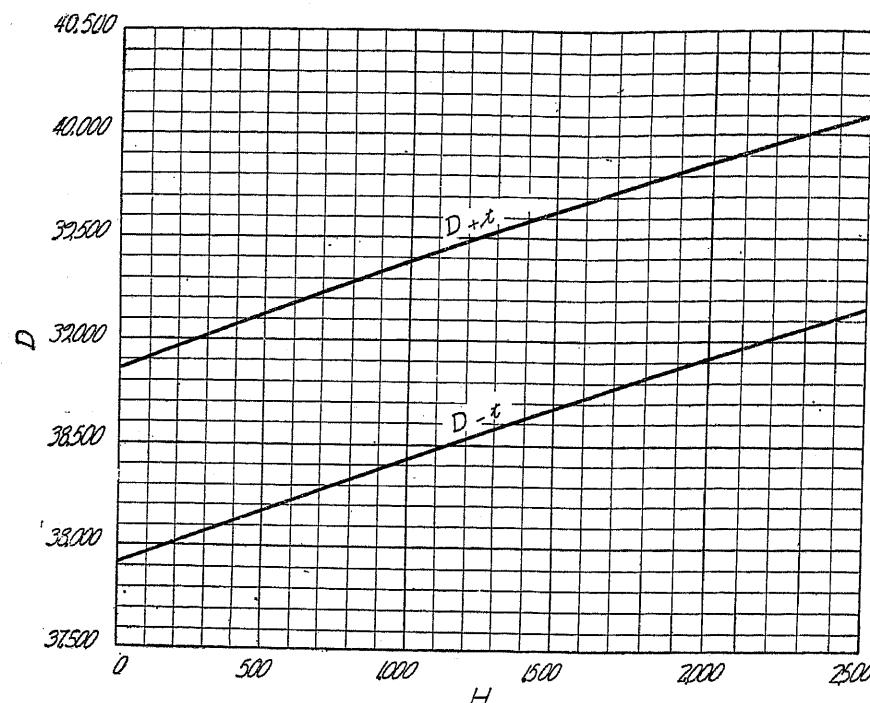
此の場合の  $H$  は第5表 I より

$$H = \frac{p k l \left[ \frac{k l^2}{12} (3 - 2k) - \frac{1}{\delta} \right]}{\frac{p}{e^3 (e^{cl} - e^{-cl})} [e^{ck(1-k)} + e^{-ck(1-k)} - e^{cl} - e^{-cl} - e^{ckl} - e^{-ckl} + 2] - \frac{l^2 \omega t H_w}{8f} L_t} \dots \dots \dots$$

上式中の  $c$  は  $H$  を含む項なるを以て、此の方程式は代入近似法に依つて解くのである。故に先づ  $H$  を假定し  $c$  の値を算出し上式の右邊を計算する。若し  $H$  の値を正しく假定すれば、代入の結果が假定の値に等しくなる。普通 2~3 回の試算に依つて  $H$  の假定値と計算値の誤差が 1% 以内に納まる結果を得る。

今  $H = 211t$  と假定すれば

$$c^2 = \frac{H + H_w}{EJ} = \frac{211 + 10800}{36 \times 10^6} = 0.000305861$$



第 331 圖

従つて

$$c = 0.0174889 \quad \frac{1}{c} = 57.179158 \quad \frac{1}{c^2} = 3269.4578 \quad \frac{1}{c^3} = 186944.8441$$

となる。

$k = 0.25$ ,  $p = 3$ ,  $l = 720$  なる故

$$pkl \left[ \frac{kl^2}{12} (3-2k) - \frac{1}{c^2} \right] = +12814492.788$$

$e^{cl}$  及び  $e^{kcl}$  を含む項の値は対数に依つて求めらる。即ち  $\log e = 0.4342945$  なる故

$$\log e^{cl} = 0.0174889 \times 720 \times 0.4342945 = 5.468637$$

$$\log e^{kcl} = 0.25 \times 5.468637 = 1.367159$$

種々の項の値は次の如くなる。

$$\log e^{cl} = 5.468637 \quad e^{cl} = 294195.94 \quad e^{-cl} = 0.0000034$$

$$\log e^{kcl} = 1.367159 \quad e^{kcl} = 23289.44 \quad e^{-kcl} = 0.04293$$

$$\log e^{(1-k)cl} = 4.101478 \quad e^{(1-k)cl} = 12632.13 \quad e^{-(1-k)cl} = 0.0000792$$

従つて分子の第二項は

$$-\frac{p}{c^3(e^{cl}-e^{-cl})} [-281585.14229] = +536794.204$$

分子の温度の項は

$$-\frac{l^2 \omega t H_w L_t}{8f} = -5127482.736$$

以上の結果より

分子の合計 = 8223804.256 となる。

第331圖の  $D_{+t}$  曲線より  $H = 211t$  に対する分母の値は 38970.116 となる故

$$H = \frac{8223804.256}{38970.116} = 211.03t$$

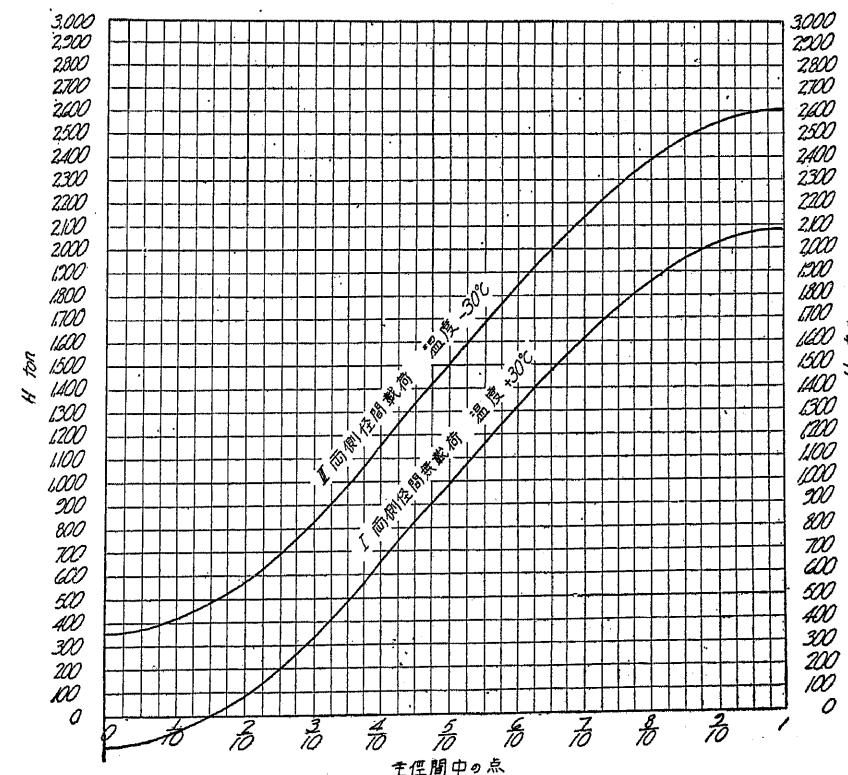
となり、假定値 211t に殆んど等しき故  $H = 211t$  を以て正しき値とする。

$3t/m$  の連續等布活荷重に對して主徑間に於ける  $H$  の値を第5表 I 及び III より求め、之を圖に示せば第332圖の如くなる。此の圖の I の曲線より明かなる如く、無載荷の場合には溫度上昇のために死荷重によるケーブル應力の量を減ずることになる。尙この現象は主徑間の左端より  $k = 0.150$  までの間に載荷する場合にも生ずるのである。

3. 主徑間の 1/4 點に於ける彎曲率 任意の點に於ける彎曲率は (247) 式より

$$M = -H \left[ C_1 e^{cx} + C_2 e^{-cx} - \frac{1}{c^2} \left( \frac{p}{H} - \frac{8f}{l^2} \right) \right]$$

尙主徑間の 1/4 點に最大正彎曲率を與へる載荷状態に對する積分常数は第5表 I より



第 332 圖

$$C_1 = \frac{\frac{p}{2Hc^2} [e^{cl(1-k)} + e^{-cl(1-k)} - 2e^{-cl}] - \frac{8f}{c^2l^2}(1-e^{-cl})}{e^{cl} - e^{-cl}}$$

$$C_2 = -C_1 - \frac{1}{c^2} \left( \frac{8f}{l^2} - \frac{p}{H} \right)$$

で表はされる。

近似計算に依り  $1/4$  点に最大正彎曲率を生ずる場合の荷重は主徑間の左端より  $k = 0.450$ までの間に載ることを知る(計算略)。この値を参考とし上式より  $k = 0.350, 0.375, 0.400, 0.425$  及び  $0.450$  の場合の彎曲率を計算せし結果  $k = 0.375$  の場合に最大値を與へることを知る。 $k$  の種々の値に對する  $H$  は第332図の曲線より求める。 $k = 0.375$  に對しては  $H = 571t$  となり從つて  $c^2 = 0.000\,315\,833$ ,  $c = 0.017\,771\,7$  となる。尙上式中の種々の項は次の値となる。

$$e^{cl} = e^{12.785\,624} = 360\,636.03$$

$$e^{-cl} = 0.000\,002\,773$$

$$e^{cl(1-k)} = e^{0.025cl} = 2972.817$$

$$e^{-cl(1-k)} = 0.000\,336\,4$$

$$\frac{p}{2Hc^2} = 8.317\,584$$

$$\frac{8f}{c^2l^2} = 3.518\,030$$

従つて

$$C_1 = \frac{8.317\,584 [2972.817 + 0.000\,336 - 0.000\,005] - 3.518\,030 (1 - 0.000\,003)}{360\,636.03 - 0.000\,003}$$

$$= +0.068\,554$$

$$C_2 = -0.068\,554 - 3\,166.226\,9 (0.001\,111\,11 - 0.005\,253\,94)$$

$$= +13.048\,586$$

$$1/4 \text{ 点の彎曲率に對しては } x = \frac{l}{4} \text{ なる故 } e^{cx} = e^{\frac{cl}{4}} = 24.505\,7, e^{-\frac{cl}{4}} = 0.040\,807$$

となる。故に

$$M = -571 [0.068\,554 \times 24.505\,7 + 13.048\,586 \times 0.040\,807 - 3\,166.226\,9 (0.005\,253\,94 - 0.001\,111\,11)] \\ = 6\,226.58\,tm$$

4. 主徑間中央に於ける彎曲率 主徑間中央に於ける最大正彎曲率は  $k = 0.37 \sim 0.63$  の間に等布荷重が載荷する場合に起る。 $H$  及び積分常数の公式は第5表Ⅱに與へられて居る。 $H$  の値を求めるには先づ  $k = 0.37$  及び  $0.63$  の場合の  $H$  を第332図より求め其の差を探り、之れより正しき  $H$  の値を近似法に依つて求めるのである。 $1/4$  点の彎曲率を求めたと同様の方法に依つて中央の最大正彎曲率を求むれば  $5\,085\,587$  となり、其の場合の  $H$  の値は  $731t$  である。

5. 主徑間端部に於ける剪力 主徑間の左端に於ける最大正剪力は等布荷重が左端より  $k = 0.200$  の間に載荷する場合にして其の場合の  $H$ ,  $C_1$  及び  $C_2$  の値は第5表Ⅰより求める。

第332図より  $H = 94t$  となる故、之より  $c$ ,  $C_1$  及び  $C_2$  を求むれば

$$c = 0.017\,396\,5 \quad C_1 = 4.298\,168 \quad C_2 = 97.485\,785$$

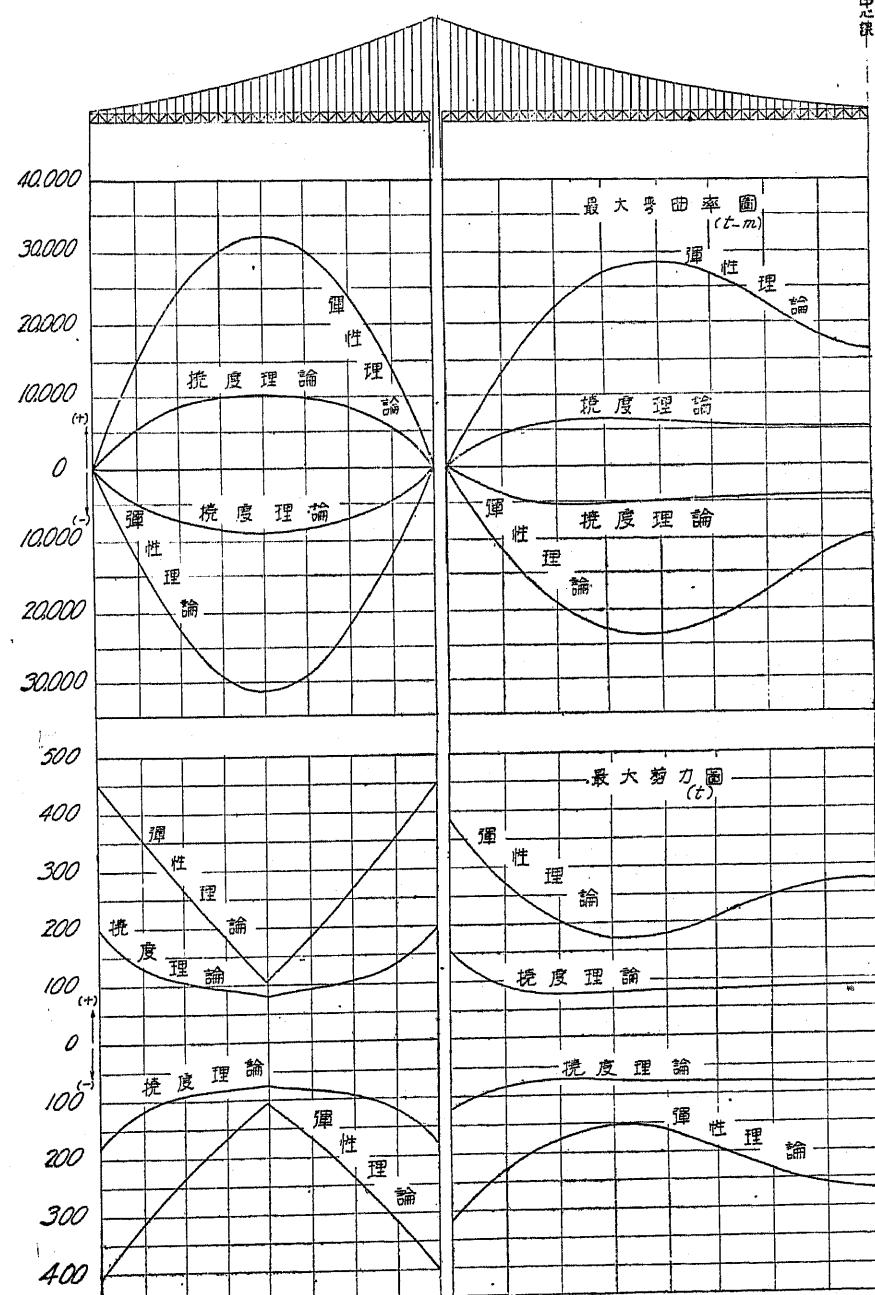
となる。主徑間の端部に於ては  $x = 0$  なる故  $e^{cx} = e^{-cx} = 1$  となる。従つて是等の値を(248)式に代入すれば、主徑間端部に於ける最大正剪力は

$$Q = -94 \times 0.017\,396\,5 (4.298\,168 - 97.485\,785) = 152.39\,t$$

となる。

6. 主徑間中央に於ける撓度 主徑間中央に於ける最大下向撓度は主徑間全載荷、側徑間無載荷にして溫度最上昇の場合に起る。撓度の一般公式は(246)式に依つて與へられ、今  $x = \frac{l}{2}$ ,  $M' = \frac{p l^2}{8}$  と置けば

$$\eta = \frac{H}{H+H} \left[ C_1 e^{\frac{cl}{2}} + C_2 e^{-\frac{cl}{2}} + \frac{p l^2}{8H} - \frac{1}{c^2} \left( \frac{p}{H} - \frac{8f}{l^2} \right) - f \right]$$



第 333 圖

となる。

第332図の曲線より主徑間全載荷、溫度最上昇の場合の  $H$  の値は  $2080t$  である。

從つて  $c^2 = 0.000357778$ ,  $c = 0.018915$  となる。積分常數は第5表 I に於て  $k = 1$  と置くか、  
に於て  $k$  及び  $k' = 0$  と置く事に依つて求める。即ち

$$C_1 = -\frac{1}{c^2(e^{cl} + 1)} \left( \frac{p}{H} - \frac{8f}{l^2} \right) \quad C_2 = C_1 e^{cl}$$

となり  $H = 2080t$  に對して

$$C_1 = +0.000001127 \quad C_2 = +0.925713160$$

となる。又  $e^{\frac{cl}{2}} = 906.3318$ ,  $e^{-\frac{cl}{2}} = 0.001103345$  となる故是等の値を上式に代入すれば撓度は

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{2080}{2080+10800} \left[ 0.000001127 \times 906.3318 + 0.925713 \times 0.001103 \right. \\ &\quad \left. + \frac{3 \times 720^3}{8 \times 2080} - 2795.031061 \left( \frac{3}{2080} - \frac{8 \times 72}{720^3} \right) - 72 \right] \end{aligned}$$

$$= 3,316.7 \text{ m}$$

となる。

7. 近似計算との比較 上述の如き計算方法に依り撓度理論に基く主徑間及び側徑間の各點に於ける轉曲率  
及び剪力を求め、尙比較のために彈性理論に基く夫々の値を求め、圖に示せば第333図の如くなる。

尙撓度理論及び彈性理論に依る値を比較すれば次の如くなる。

	撓度理論に依るもの (A)	彈性理論に依るもの (B)	$\frac{A}{B}(\%)$
主徑間 1/4 点の最大正轉曲率	6227 t m	28721 t m	21.7
主徑間端部の最大正剪力	152 t	385 t	39.6
側徑間中央の最大正轉曲率	10567 t m	32526 t m	32.5
側徑間端部の最大正剪力	199 t	452 t	44.0