論説報告
第27卷第1號 昭和16年1月

吊橋に於ける索條の曲げに就て

會員 金 俊 三*

要旨 本論文は先づ本邦吊橋に普通なる型式の子繩索條の實斷面積及び慣性モーメントの略算につき提案し，次で Stewart の實驗數値より素線の太さ，索條の太さ，綱車直徑を函數とする索條の破壞强に關する實驗式を誘導し、更にこれより吊橋索條の曲げに對する受沓接觸面の安全なる最小半徑を與ふべき條件式を，上記實斷面積の略算係數を使用して求めた。最後にこれによる 二，三の算例を試みた。

目 次

I. 索條の斷面積及び慣性モーメントの略算

1. 斷面積

先づ子繩 (strand) だけに就て考へる。蕊線の周圍を第一層第二層と撚つた場合の蕊線を含む凡ての素線 (single wire) が同じ太さのときは斷面積について次の關係が成立する。

$$\frac{F_s'}{F'}=\frac{3}{4}+\frac{1}{4(4p^2+4p+1)} \quad \cdots\cdots (1.1)$$

但し F_s': 子繩に於ける全素線の斷面積

F': 子繩の直徑を有つ圓の面積

p: 蕊線を取巻く素線の層數

從つて

p	1	2	3
$F_s' : F'$	0.7778	0.7600	0.7551

故に

$$c_2'=\frac{F_s'}{F'} \quad \cdots\cdots (1.2)$$

とすれば層數 p が增すに從つて c_2' は更に 0.75 に接近する。

今本邦の吊橋に普通の圖-1 の如き 6 撚共心の索條を考ふれば子繩との間に

$$F=9F', \quad F_s=7F_s'$$

なる關係があるから，從つて

$$c_2=\frac{F_s}{F}=\frac{7}{9}c_2' \quad \cdots\cdots (1.3)$$

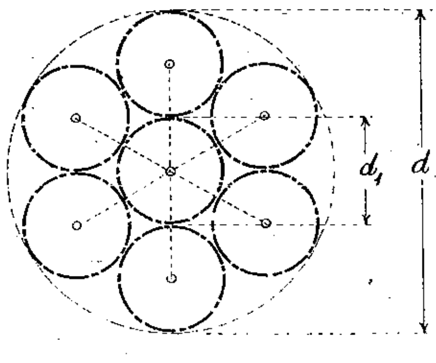
但し F: d を直徑とする圓の面積

F_s: 索條に於ける全素線の斷面積

d: 索條の直徑

d_1: 子繩の直徑

圖-1. 索條 6 撚共心



以上 3 式により索條の實斷面積を簡單に計算し得る筈であるが，上記の如く c_2' は p の變化に對して相互近接した値をとるから近似的に

* 工學士 北海道帝國大學助教授

$$c_2'=\begin{cases}0.757\ (p=2,3,4^{1)}\ \text{に對して})\\0.778\ (p=1\ \text{に對して})\end{cases} \quad\cdots\cdots(1.4')$$

と假定すれば

$$c_2=\begin{cases}0.5888\ (p=2,3,4)\\0.6051\ (p=1)\end{cases} \quad\cdots\cdots(1.4)$$

として實際上大した差支はない。以下二,三の例につき精度を吟味してみる。

算例-1. 7 本線 6 撚共心 索條直徑 20 mm.

索條構造式 $=(1_{2.311}+6_{2.222})+6(_{2.311}+6_{2.222})$[2]

$F_s'=27.4608\,\text{mm}^2$, $F''=34.9066\,\text{mm}^2$, $F_s=192.2256\,\text{mm}^2$, $F=314.1593\,\text{mm}^2$.

∴ $c_2=0.6119$ 即ち誤差 1.1 %

算例-2. 19 本線 6 撚共心 ($p=2$) 索條直徑 48 mm

索條構造式 $=(1_{3.328}+6_{3.200}+12_{3.200})+6(1_{3.328}+6_{3.200}+12_{3.200})$

$F_s=1\,074.2466\,\text{mm}^2$, $F=1\,809.5616\,\text{mm}^2$

∴ $c_2=0.5937$ 誤差 0.8%

算例-3. 37 本線 6 撚共心 ($p=3$) 索條直徑 54 mm

索條構造式 $=(1_{2.674}+6_{2.571}+12_{2.571}+18_{2.571})+6(1_{2.674}+6_{2.571}+12_{2.571}+18_{2.571})$

$F_s=1\,347.5686\,\text{mm}^2$, $F=2\,290.2264\,\text{mm}^2$

∴ $c_2=0.5884$ 誤差 0.068%

即ち (1.4) 式の精度は p が増加して素線の本數が多くなるほど高くなるのである。

2. 慣性モーメント

本項は本論文には直接の關係はないが此處で述べる。子繩の慣性モーメントを J_s' とすれば (圖-2),

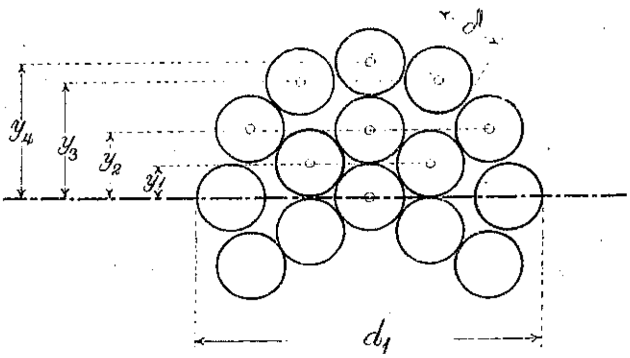
$$J_s'=i\frac{\pi\delta^4}{64}+\Sigma f y^2 \quad\cdots\cdots(2.1)$$

但し δ: 素線の直徑

i: 素線の本數

$$f=\frac{\pi\delta^2}{4}.$$

圖-2. 子 繩



子繩の直徑をもつ丸鋼の慣性モーメントを J' とすれば,

$$c_1'=\frac{J_s'}{J'} \quad\cdots\cdots(2.2)$$

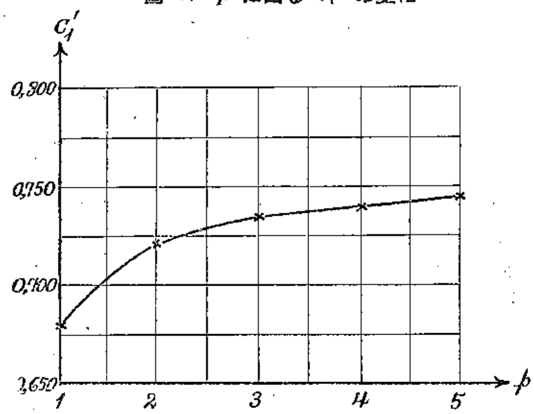
但し $J'=\dfrac{\pi d_1^4}{64}$

從つて[3]

p	1	2	3	4	5
c_1'	0.679	0.722	0.735	0.741	0.745

これによつて圖-3 を得る。

圖-3. p に因る c_1' の變化



1) $p=4$ 以上は普通には殆んど必要がない。

2) 素線の太さを表はす添數の單位は mm.

3) Findeis, R.: Rechnerische Grundlagen des Baues von Drahtseibahnen, 1923, S. 9.

次にこの數字を平均して下の如く置くことゝする。

$$\left.\begin{array}{ll} p=1 & c_1'=0.679 \\ p=2,3,4 & c_1'=0.733 \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.3)$$

$J_{s,I}$, $J_{s,II}$ を夫々 I 軸及び II 軸に關する慣性モーメントとすれば（圖-4）

$$\left.\begin{array}{l} J_{s,I}=nJ_s'+F_s'\Sigma\eta^2 \\ J_{s,II}=nJ_s'+F_s'\Sigma\xi^2 \end{array}\right\} \cdots\cdots (2.4)$$

但し　n：子繩の數

然るに

$$J_{s,I}=\frac{J}{9^2}\left[nc_1'+c_2'\left(\frac{12}{d}\right)^2\Sigma\eta^2\right]$$

但し

$$J=\frac{\pi d^4}{64}$$

であるから，從つて

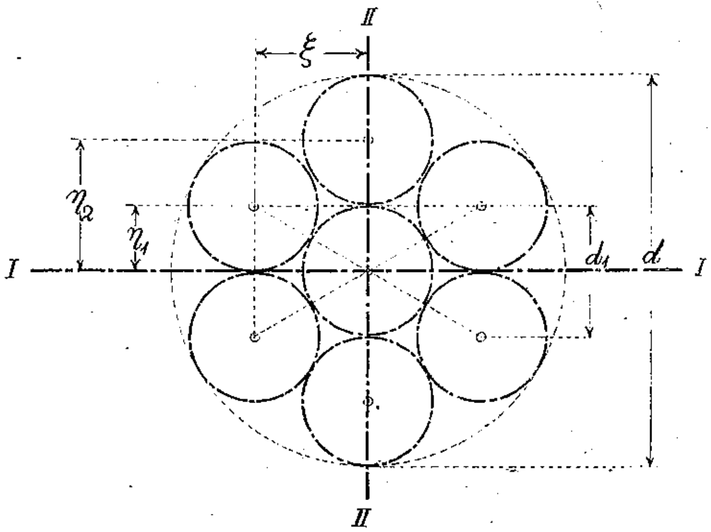
$$c_{1,I}=\frac{J_{s,I}}{J}=\frac{nc_1'}{81}+\frac{16}{9}c_2'\frac{\Sigma\eta^2}{d^2}$$

同樣に

$$c_{1,II}=\frac{J_{s,II}}{J}=\frac{nc_1'}{81}+\frac{16}{9}c_2'\frac{\Sigma\xi^2}{d^2}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.5)$$

圖-4.　索條 6 撚共心



(2.3), (1.4′) から上式は

$$\left.\begin{array}{l} c_{1,I}=\begin{cases} 0.0083\ 8272n+1.3831\ 11\dfrac{\Sigma\eta^2}{d^2} & (p=1) \\ 0.0090\ 4938n+1.3457\ 78\dfrac{\Sigma\eta^2}{d^2} & (p=2,3,4) \end{cases} \\ c_{1,II}=\begin{cases} 0.0083\ 8272n+1.3831\ 11\dfrac{\Sigma\xi^2}{d^2} & (p=1) \\ 0.0090\ 4938n+1.3457\ 78\dfrac{\Sigma\xi^2}{d^2} & (p=2,3,4) \end{cases} \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (2.6')$$

一方 6 撚共心であるから（圖-4）

$$n=7,\quad \Sigma\eta^2=4\eta_1^2+2\eta_2^2=\frac{d^2}{3},\quad \Sigma\xi^2=4\xi^2=\frac{d^2}{3}$$

故に

$$\left.\begin{array}{l} c_{1,I} \\ c_{1,II} \end{array}\right\}=c_1=\begin{cases} 0.0586\ 79+0.4610\ 37=0.5197\ 16 & (p=1) \\ 0.0633\ 46+0.4485\ 93=0.5119\ 39 & (p=2,3,4) \end{cases}$$

或は實用上

$$c_1=\begin{cases} 0.5197 & (p=1) \\ 0.5119 & (p=2,3,4) \end{cases} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.6)$$

として簡單に 6 撚共心索條の素線斷面による慣性モーメントを略算し得る。以下二,三の例につき上式の精度を吟味してみる。

算例-1.　前節 1. 算例-1. の索條 $(p=1)$.

惑線の太さは異るが (2.1) と相似の考え方により

$$J_s'=8.5797+59.7595=68.3392\ \mathrm{mm}^4$$

從つて (2.4) により

$$\therefore\quad J_s=7J_s'+F_s'\frac{d^2}{3}=478.3744+3\ 661.4400=4\ 139.8144\ \mathrm{mm}^2$$

一方　$J=7\ 8$[illegible]$4\ \mathrm{mm}^4$

$\therefore\ c_1=\frac{J_s}{J}=0.5271$ 卽ち (2.6) 式の誤差 1.4%

算例-2. 前節 1. 算例-2. の索條誤差 ($p=2$).

圖-5 に於て

$$x_1=\frac{\delta_0}{2},\quad x_2=\frac{\delta+\delta_0}{2},$$

$$x_3=\frac{\sqrt{3}}{4}(3\delta+\delta_0),\quad x_4=\frac{3\delta+\delta_0}{2},$$

$$J_s'=98.6711+2\,283.3845=2\,382.0556\,\mathrm{mm}^4$$

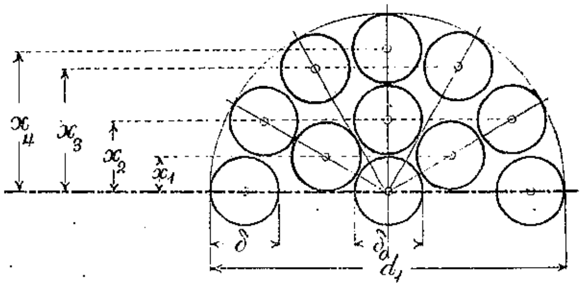
$$\therefore\ J_s=16\,674.3892+117\,860.1984$$

$$=134\,534.5876\,\mathrm{mm}^4$$

$$J=260\,576\,\mathrm{mm}^4$$

$\therefore\ c_1=0.5163$ 誤差 0.86%

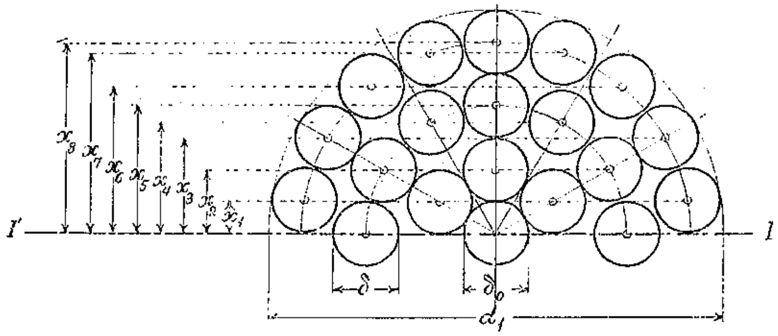
圖-5. 19 本線子繩



算例-3. 前節 1. 算例-3. の索條 ($p=3$).

圖-6 に於て $x_1=\frac{\delta_0}{2},\quad x_2=\frac{\delta+\delta_0}{2},\quad x_3=\delta+\frac{\delta+\delta_0}{4},$

圖-6. 37 本線子繩



$$x_4=\frac{\sqrt{3}}{4}(3\delta+\delta_0),\quad x_5=\frac{3\delta+\delta_0}{2},\quad x_6=\left(2.5\delta+\frac{\delta_0}{2}\right)\cos40°,$$

$$x_7=\left(2.5\delta+\frac{\delta_0}{2}\right)\cos20°,\quad x_8=2.5\delta+\frac{\delta_0}{2},$$

$$J_s'=79.7209+3\,767.6704=3\,847.3913\,\mathrm{mm}^4$$

$$\therefore\ J_s=26\,931.7391+187\,119.5159=214\,051.2550\,\mathrm{mm}^4$$

$$J=417\,393\,\mathrm{mm}^4$$

$\therefore\ c_1=0.5128$ 誤差 0.18%

卽ち此の場合も (2.6) 式の精度は素線の本數が多くなる程高くなるのである。

II. 張力と曲げを受くる靜索の破壞强さ

吊橋塔柱の上などでは索條は大きな角度を以て屈折せらる。此の場合素線間の摩擦が十分で索條斷面が一體となつて働くものとすれば索條は大きな曲げを受けることになるが，若し此の摩擦が小さくて素線相互間の可動性を考へ得るときは索條の曲げは卽ち素線の曲げの問題に近づく。

3. 曲げに關する諸式

索條に誘發さるゝ曲げ應力度が比例限度以下なるときの算定式は種々提案されてゐる。

$$\mathfrak{b}=\nu E\frac{\delta}{D}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(3.1)$$

但し　σ：索條に誘發する曲げ應力度

E：素線の彈性係數

D：綱車の直徑

δ：素線の直徑

係數 ν の値 $=1$	Reuleux, 1876
$\frac{3}{8}$	J. Hrabák, 1902
0.5	J. Isaachsen, 1907
$\cos^2 a \cos^2 b$	R. W. Chapman, 1908
$\cos a \cos b$	S. Hardesty, 1918
$\frac{E_r}{E}$	J. F. Howe, 1918
$\frac{2}{3}\cos^2 a \cos^2 b$	B. R. Leffler, 1928
0.44	F. C. Carstarphen, 1933
0.35	機械學會

上に於て

a：子繩中心線と素線との間の角

b：索條及び子繩の中心線間の角

E_r：索條の彈性係數

而してこれらのものは何れも索條の曲げを素線の曲げの問題に還元して素線を直線と見做したる場合の Reuleux の理論的な式を經驗上過大なりとして，之に加工を加へたものである。

Carstarphen は又螺旋發條の理論を索條素線に適用して曲げを受くる索條の引張强さの減少度を計算せむことを提案した[4]。彼の理論は後述 Stewart の行つた實驗の結果と極めて良く一致して，今の處曲げを受くる索條の破斷の現象を說明すべきこれ以上の理論は見當らないやうである。

4. D. M. Stewart の實驗

Ingersoll-Rand 會社技師 D. M. Stewart は張力と曲げを受くる靜索の破斷に至るまでに具現すべき諸性質につきて精細な實驗を行つた[5]。彼が到達した數個の結論中特に破斷現象に關して顯著なるものを擧ぐれば，

i) 索條彎曲部に於ける引張應力度は荷重の增減に對して精確に純張力の場合と同樣に增減する。之に累加さるべき曲げ應力度は綱車の直徑に關係するも荷重の增減には全く無關係である。

ii) 索條彎曲部に於ける最大應力度は綱車との切點或は其の直上に生じ索條の破斷は此の點に起る。最小應力度は綱車の頂點に生ずる。

iii) 曲げの影響による索條の破壞强さの減小率は索條直徑と溝底に於ける綱車直徑との比に對して直線的に變化する。

iv) 曲げ應力度算定公式中螺旋發條理論による Carstarphen のものが實驗值豫定に對して滿足すべき數值を與へる。

而して彼の實驗中其の要項及び破斷の數值は次の如くである。この中必要なものだけ米瓩法に換算した（**表-1, 表-2, 表-3, 表-4**）。

---

[4] Carstarphen: Effect of Bending Wire Rope, Proceedings of A. S. C. E, 1931.

[5] Stewart: Behavior of Stationary Wire Ropes in Tension and Bending, Transactions of A. S. C. E, 1937.

表-1. 供試體の性質 (麻心, 直徑 1")

No. of set	Type	Lay	Forming
(a) 6×7 Construction			
1	Cast steel*)	Regular	Non-preformed
2	Cast steel	Regular	Preformed
3	Cast steel	Lang	Non-preformed
4	Cast steel	Lang	Preformed
(b) 6×19 Construction (6-Filler Wires)			
9	Cast steel	Regular	Non-preformed
10	Cast steel	Regular	Preformed
11	Cast steel	Lang	Non-preformed
12	Cast steel	Lang	Preformed
13	Plow steel	Regular	Non-preformed

*) Grade of steel: Cast steel 144–155 kg/mm²
Plow steel 165–176 〃

表-2. 素線の太さ

Construction	Number of wires in 1-strand	Diameter in inches
6×7	One core wire	0.115
	Six outer wires	0.105
6×19	One core wire	0.073
	Six intermediate wires	0.068
	Six filler wires	0.028
	Twelve outer wires	0.065

表-3. 綱車上の曲げを受くる供試體の破壞荷重 (kg)

Set No.	Sheave Diameter, in inches:			
	18	14	10	7
1	29 337	28 804	27 760	26 592
2	28 770	28 010	27 522	26 808
3	30 232	29 631	29 076	28 123
4	29 166	29 053	28 089	26 955
9	31 491	30 754	29 938	28 259
10	31 004	30 550	29 507	28 395
11	33 135	32 750	32 410	31 242
12	30 459*)	31 945*)	31 321	30 584
13	35 199	34 927	34 564	33 022

*) Fractured at socket.

表-4. 供試體の純張力破壞荷重 (kg)

Set No.	Load
1	31 004
2	29 371
3	31 525
4	30 573
9	32 614
10	31 661
11	34 020
12	32 659
13	37 581

5. 實驗式誘導

著者は Stewart が敢へて爲さなかつた實驗式の誘導を彼の實驗數値より試みて, 索條の破壞強さに影響を持つ
2 因子卽ち張力と曲げの兩應力度の關係を土木技術者に親しい形で分明にしたいのである。その形は

$$\sigma = \frac{S}{F_s} + E'\frac{\delta}{D} \quad \cdots\cdots (5.1)$$

但し σ: 純張力に於ける索條の破壞強さ

S：網車を通る索條の引張破壞荷重

E'：彈性係數と同じ單位をもつ或る係數

δ：最大なる素線の直徑

この中 σ は表-4 から，S は表-3 から既知であるから，未知係數 E' は次の關係から算出される。

$$E'=\frac{D}{\delta}\left(\sigma-\frac{S}{F_s}\right)$$

或は

$$\left.\begin{aligned}\frac{E'}{E_r}&=\frac{1}{E_r}\cdot\frac{D}{\delta}\left(\sigma-\frac{S}{F_s}\right)\\E_r&=1\,000\,000\ \mathrm{kg/cm^2}\end{aligned}\right\}\qquad\cdots\cdots(5.2)$$

經驗上索條の曲げは素線の曲げといふことであるから本來素線の彈性係數 E を E_r の代りに採用しなければ筋が透らないのであるが，E' そのものが E_r, E の何れよりも小であり又上記のやうに E_r の値は計算上至極便利なので E_r を採用したのである。而して (5.2) 式を利用して Stewart の値から例へば Set No. 1, $D=18''$ の計算をやれば

$$\delta=0.115''\qquad\frac{D}{\delta}=156.522\qquad F_s=2.4132\ \mathrm{cm^2}$$

$$\sigma=12\,848\ \mathrm{kg/cm^2}\qquad S=29\,337\ \mathrm{kg}$$

$$\therefore\ E'/E_r=0.1081\ 57$$

このやうにして表-5 を得る。

表-5. E'/E_r の値

Set No.	D ('') 18	14	10	7
1	0.1081 57	0.1110 26	0.1169 57	0.1113 31
2	0.0389 74	0.0686 61	0.0666 09	0.0623 92
3	0.0838 96	0.0955 65	0.0882 61	0.0858 27
4	0.0912 52	0.0766 96	0.0894 79	0.0912 44
9	0.1173 70	0.1511 23	0.1553 47	0.1770 13
10	0.0685 48	0.0903 29	0.1250 72	0.1327 12
11	0.0924 66	0.1031 78	0.0934 27	0.1128 63
12	0.2298 08*)	0.0579 18*)	0.0776 73	0.0842 87
13	0.2490 41	0.2157 54	0.1752 10	0.1853 55

*) Fractured at socket.

表-5 によつて 7 本線 6 撚 Cast Steel (Set No. 1, 2, 3, 4), 19 本線 6 撚 Cast Steel (Set No. 9, 10, 11, 12), 91 本線 6 撚 Plow Steel (Set No. 13) に對して E'/E_r を實驗式であらはさうとするのであるが，4. の Stewart の實驗結果で明かなやうに索條の曲げ應力度は比 d/D と直線比例をなすといふ事實から E'/E_r を d/D の一次函數として表はせば，索條の破壞强さ σ に關する (5.1) 式はこれらの場合に對して結局次の如くに求めらる。

$$\left.\begin{aligned}&\sigma=\frac{S}{F_s}+c\cdot E_r\cdot\frac{\delta}{D}\\&\text{但し}\quad c=0.0808\ 29+0.0629\ 04\left(\frac{d}{D}\right)\quad\text{7 本線 6 撚麻心 Cast Steel}\\&\qquad\ \ c=0.0824\ 96+0.3171\ 22\left(\frac{d}{D}\right)\quad\text{19 本線 6 撚麻心 Cast Steel}\\&\qquad\ \ c=0.2707\ 58-0.6967\ 00\left(\frac{d}{D}\right)\quad\text{同　上　Plow Steel}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(5.3)$$

以上は勿論最小自乘法によつたのであるが，更に上記 3 種の區別を無視して表-5 の全體より實驗式を求むれば次式を得る。

$$c=0.1041\ 28+0.0795\ 39\left(\frac{d}{D}\right) \quad \cdots\cdots (5.4)$$

次に上式による算出値と實驗値 σ' とを比較すれば表-6 を得る。

表-6. σ'/σ の値

Set No.	公 式 (5.3)												公 式 (5.4)							
	6×7 Cast Steel				6×19 Cast Steel				6×19 Plow Steel				6×7 Cast Steel				6×19 Cas & Plow Steel			
	18″*)	14″	10″	7″	18″	14″	10″	7″	18″	14″	10″	7″	18″	14″	10″	7″	18″	14″	10″	7″
1	1.012	1.017	1.027	1.028	1.008	1.022	1.028	1.047	·	·	·	·	1.020	1.001	1.004	0.995	·	·	·	·
2	0.977	0.989	0.981	0.964	·	·	·	·	·	·	·	·	0.985	0.973	0.959	0.933	·	·	·	·
3	1.000	1.006	1.001	0.995	·	·	·	·	·	·	·	·	1.007	0.991	0.979	0.964	·	·	·	·
4	1.003	0.994	1.002	1.002	·	·	·	·	·	·	·	·	1.011	0.979	0.980	0.970	·	·	·	·
9	·	·	·	·	1.008	1.022	1.028	1.047	·	·	·	·	·	·	·	·	1.003	0.992	0.989	0.996
10	·	·	·	·	0.993	0.998	1.011	1.012	·	·	·	·	·	·	·	·	0.988	0.969	0.978	0.963
11	·	·	·	·	1.001	1.003	0.994	0.996	·	·	·	·	·	·	·	·	0.996	0.975	0.960	0.953
14	·	·	·	·	1.041	0.986	0.986	0.975	·	·	·	·	·	·	·	·	1.038	0.958	0.950	0.932
15	·	·	·	·	·	·	·	·	1.004	0.998	0.988	1.009	·	·	·	·	1.037	1.014	0.999	1.002

*) 網車直徑

III. 索條受沓の最小半徑

吊橋の主索に索條を使用する場合或は大直徑を有する主索への吊材として索條を使用する場合, 純張力に對して採用された索條斷面に如何程の曲げ應力度が發生するかは明確にせらるべき問題であるが, 土木技術の領域に於ては此の問題は從來殆んど觸れられてゐなかつたやうである。而してかゝる場合曲げ應力度をも考へた複合應力度が索條の破壞强さに對して所定の安全率を傷けない程度に索條の曲げの最小半徑を設計する必要がおこるのである。

6. 條件式の誘導

(5.3), (5.4) の兩式は破壞强さに關するものであるが, 比例限度以下に對しても此の關係が成立つものと假定すれば, 最大複合應力度に對して索條斷面を決定すべき條件としては

$$\frac{B_w}{\sigma F_s} \geqq \psi \quad \cdots\cdots (6.1)$$

但し　B_w: 索條の保證破斷力

ψ: 安全率

σ: (5.3) 式による複合應力度

今

$$\left.\begin{aligned} \delta &= \frac{d}{m} \\ R &= \frac{D}{2} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (6.2)$$

とすれば (1.3) により $F_s=c_2\dfrac{\pi d^2}{4}$ であるから, (5.3) 式により

$$\sigma F_r = S+\frac{\pi c c_2}{8m}E_r\frac{d^3}{R} \qquad \text{從つて} \qquad \frac{B_w}{\psi} \geqq S+\frac{\pi c c_2}{8m}E_r\frac{d^3}{R}$$

又

$$c=\alpha+\beta\frac{d}{R} \quad \cdots\cdots (6.3)$$

と置けば結局 R の二次方程式を得て, これより受沓の接觸部の最小半徑を決定すべき次の關係が生れる。

$$\left.\begin{aligned} &\frac{R}{d} \geqq \gamma\left[1+\sqrt{1+\frac{2\beta}{\alpha\gamma}}\right], \\ \text{但し} \quad &\gamma=\frac{\alpha\pi c_2}{16m}\cdot\frac{E_r d^2}{\left(\dfrac{B_w}{\psi}-S\right)} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots (6.4)$$

上式の計算に必要な數値を擧げれば

i) $E_r=1\,000\,000\,\mathrm{kg/cm^2}$

ii) $m=9$ 7 本線 6 撚, $m=15$ 19 本線 6 撚, $m=21$ 37 本線 6 撚

iii) $c_2=0.5888$ $p=2, 3, 4$ $c_2=0.6051$ $p=1$

iv)

	α	$2\beta/\alpha$
7 本線 6 撚 Cast Steel	0.080829	0.77824
19 本線 6 撚 Cast Steel	0.082496	3.8441
19 本線 6 撚 Plow Steel	0.270758	−2.5731
全體平均	0.104128	0.76386

7. 計算例

以上により二,三算例をやつてみる。

算例-1. 主索最大應力=120 t, $\psi=3$,

主索に索條 3 本を使用する。

$\therefore\ S=120/3=40$ t (1 本當)

之に對して次の如き索條を使用する

19 本線 6 撚共心,[6] $B_w=125$ t, $d=4.8$ cm, Cast Steel.

$$\frac{B_w}{\psi}-S=\frac{125\,000}{3}-40\,000=1\,666.\dot{6}\ \mathrm{kg}$$

$$\therefore\ \gamma=8.78970$$

$$\sqrt{1+\frac{2\beta}{\alpha\gamma}}=1.1989$$

$$\therefore\ R\geqq 8.7897\cdot 2.1989\cdot d, \qquad R\geqq 19.3277\,d$$

即ち $R\geqq 92.77$ cm

今 $R=95$ cm を採用せる場合, 曲げ應力度はどの程度になるか。

$$F_s=c_2\frac{\pi d^2}{4}=10.655\ \mathrm{cm^2}, \qquad \frac{S}{F_s}=\frac{40\,000}{10.655}=3\,754\ \mathrm{kg/cm^2}$$

$$c=0.082496+0.317122\cdot\frac{4.8}{190}=0.090507$$

$$c\cdot E_r\frac{\delta}{D}=c\cdot E_r\frac{d}{mD}=152\ \mathrm{kg/cm^2}$$

$$\therefore\ \sigma=3\,754+152=3\,906\ \mathrm{kg/cm^2}$$

$$\text{破壞應力度}=\frac{125\,000}{10.655}=11\,732\ \mathrm{kg/cm^2}$$

$$\therefore\ \psi'=\text{實際の安全率}=\frac{11\,732}{3\,906}\fallingdotseq 3$$

算例-2. 主索最大應力=389 t[7]

主索に索條 6 本を使用するものとすれば

---

[6] 本來麻心の式であるが共心に對しても適用する。

[7] Müller-Breslau: Die graph. Stat. d. Bauk. Bd. II, 1 Abt., S. 292.

$$S=\frac{389}{6}=64.8\dot{3}\ \mathrm{t}\quad (1\ 本當)$$

$\psi=3$ として次の如き索狀を採用する。

37 本線 6 撚共心[8], $B_w=203$ t, $d=6.2$ cm, Cast Seel.

$$\frac{B_w}{\psi}-S=\frac{203}{3}-64.8\dot{3}=2\,833.\dot{3}\ \mathrm{kg}$$

$$\therefore\quad \gamma=7.7773\,7$$

$$\sqrt{1+\frac{2\beta}{\alpha\gamma}}=1.0479\,6$$

$$\therefore\quad R\geqq 15.9277\cdot d,\qquad R\geqq 98.75\ \mathrm{cm}$$

仍て $R=100$ cm を採用すれば

$$F_s=17.7763\ \mathrm{cm}^2\qquad \frac{S}{F_s}=3\,647\ \mathrm{kg/cm}^2\qquad c=0.1065\,94\qquad c\cdot E_r\frac{\delta}{D}=157\ \mathrm{kg/cm}^2$$

$$\therefore\quad \sigma=3\,647+157=3\,804\ \mathrm{kg/cm}^2$$

$$\frac{B_w}{F_s}=\frac{203\,000}{17.7763}=11\,420\ \mathrm{kg/cm}^2$$

$$\therefore\quad \psi'=\frac{11\,420}{3\,804}=3.$$

算例-3. George Washington Bridge.

かゝる大主索は本論實驗式の適用範圍外にある。更に Twisted Type と Parallel Type との違ひがあり，受沓上の主索斷面が hexagonal である等の事情があるが，斷面を圓形として敢へて式 (5.4) を適用してみる。判斷上の目安を提供する程度である。

$S=36\,000$ t (Der Bauing. '29, s. 865)

索線の平均强さ $=234$ kips/sq.in. $=16\,453$ kg/cm² (Proc. A. S. C. E., '33, p. 303)

主索直徑 $d=914.4$ mm $=61$-子綱 @ 434-素線 $=26\,474$ 本-素線

素線直徑 $\delta=4.97$ mm

素線 1 本の强さ $=3.192$ t

素線繼手の效率を 98% とすれば (Proc. A. S. C. E., '33, p. 303),

主索 1 本の强さ $B_w=0.98\cdot 3.192\cdot 26\,474=82\,814.907$ t

Yielding point と Working stress との比を 1.8 として, $\psi=2.28$

と假定すると

$$\frac{B_w}{\psi}-S=322.328\ \mathrm{t}\qquad m=\frac{d}{\delta}=183.984\qquad F=\frac{\pi d^2}{4}=6\,566.9443\ \mathrm{cm}^2\qquad F_s=5\,135.9825\ \mathrm{cm}^2$$

$$c_2=\frac{F_s}{F}=0.7821\qquad \gamma=2.1651\,5\qquad \sqrt{1+\frac{2\beta}{\alpha\gamma}}=1.1631\,0$$

$$\therefore\quad R\geqq 4.6834\cdot d,\qquad R\geqq 428.3\ \mathrm{cm}$$

今 $R=430$ cm を採用すれば

$$\frac{S}{F_s}=7\,009\ \mathrm{kg/cm}^2\qquad \frac{d}{D}=0.1063\,26\qquad c=0.1125\,85\ [(5.4)\ 式]\qquad c\cdot E_r\frac{\delta}{D}=65\ \mathrm{kg/cm}^2$$

$$\therefore\quad \sigma=7\,009+65=7\,074\ \mathrm{kg/cm}^2$$

$$\frac{B_w}{F_s}=\frac{82\,814\,907}{5\,135.9825}=16\,124\ \mathrm{kg/cm}^2$$

$$\therefore\quad \psi'=\frac{16\,124}{7\,074}=2.28.$$

George Washington Bridge の實際では塔柱上では $R=8.687$ m の圓曲線，橋臺上ではそれが 17.069 m から

[8] 式 (5.4) を使用する。

3.962 m まで變化する曲線を採用してゐる。

算例-4. Rheinbrücke in Köln-Mülheim.[9]

この Schleicher 教授の設計になる名橋はその主索として Felten & Guilleaume, Carlswerk の Locked Coil 型索條を使用してゐる。矢張り (5.4) 式を適用して曲げ應力度の限度を想像してみやう。以下の計算では

$$\psi=2.75$$

としてやつてみることゝする。

$$S=213\,\mathrm{t} \qquad B_w=592\,\mathrm{t} \qquad \frac{B_w}{\psi}-S=2\,273\,\mathrm{kg} \qquad d=8\,\mathrm{cm} \qquad \delta=4.2\,\mathrm{mm} \qquad m=19.0476$$

$$c_s=\frac{F_s}{F}=0.8465$$

$$\therefore\quad \gamma=25.5838\,4$$

$$\sqrt{1+\frac{2\beta}{\alpha\gamma}}=1.0148\,19$$

$$\therefore\quad R\geqq 51.5467\cdot d, \qquad R\geqq 412.37\ \mathrm{cm}$$

從つて $R=400\,\mathrm{cm}$ を採用するものとすれば

$$\frac{S}{F_s}=5\,006\ \mathrm{kg/cm^2} \qquad \frac{d}{D}=0.01 \qquad c=0.1049\,23 \qquad c\cdot E_r\frac{\delta}{D}=55\ \mathrm{kg/cm^2}$$

$$\therefore\quad \sigma=5\,006+55=5\,061\ \mathrm{kg/cm^2}$$

$$\frac{B_w}{F_s}=13\,913\ \mathrm{kg/cm^2}$$

$$\therefore\quad \psi'=\frac{13\,913}{5\,061}=2.75$$

而してこの種の索條は普通のものに比較して彈性係數が著しく高く又素線間の摩擦も大きいのであるから，$R=400$ cm として實際受咨の設計をなすものとすれば，曲げ應力度は 55 kg/cm² を限度として之より高位にあり從つて安全率は 2.75 より低位となるべきことは想像されるところである。

算例-5. Mount Hope Bridg, Ambassador Bridge.

此の兩橋は架渡中同時に主索子繩の破損を惹起したのであるが，今前者につき計算を試みれば[10]，

$$\text{主索直徑}=11''$$

子繩 7 本が中心のものゝ周圍を 6 本で取卷くものと假定して子繩の直徑を出せば

$$\text{子繩の直徑}\ d=\frac{11''}{3} \qquad \text{strand shoe の直徑}\ D=19'' \qquad \frac{d}{D}=0.1929\,8$$

$$c=0.1194\,77\quad [(5.4)\ \text{式}] \qquad \frac{\delta}{D}=\frac{0.162''}{19''}=\frac{1}{117.284} \qquad c\cdot E_r\frac{\delta}{D}=1\,019\ \mathrm{kg/cm^2}$$

破損發見時の直應力

$$\frac{S}{F_s}=2\,250\ \mathrm{kg/cm^2}\quad (\text{最大荷重の } 40\%)$$

$$\therefore\quad \sigma=2\,250+1\,019=3\,269\ \mathrm{kg/cm^2}$$

以上は勿論大體の計算ではあるが strand shoe で大約直應力の 50% 近くの曲げ應力を受けることゝなる。色々の事情が報告されてゐるが，素線の破損が兩橋とも strand shoe の切點に生じてゐる事實から，破損の各種原因が結局曲げに關する此の弱點に強く集中したらうといふことは上記數字に照合して考へられるのである。

---

[9] Schleicher, F.: Die Strassenbrücke über den Rhein in Köln-Mülheim. Der Bauingenieur, 29, S. 825.

[10] Engineering News-Record, 1929, p. 516 & 564.