

# 土 木 学 会 論 文 集

第 59 号・別 冊 (3-3)

## 吊橋用スパイラル・ロープの弾性的性質

正 員	田	中	五	郎
正 員	西	脇	威	夫
准 員	島	田	静	雄

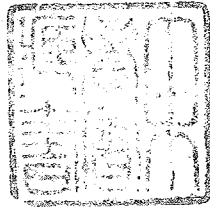
---

TRANSACTIONS  
OF THE  
JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS

NO. 59, EXTRA PAPERS (3-3)

BEHAVIOURS OF SPIRAL ROPE FOR SUSPENSION BRIDGES

*By Gorō Tanaka, C.E. Member, Takeo Nishiwaki, C.E. Member and  
Shizuo Shimada, C.E. Assoc. Member*



December 1958  
TOKYO JAPAN

---

昭和 33 年 12 月

土 木 学 会

# 吊橋用スパイラル・ロープの弾性的性質

正員 田 中 五 郎\*  
 正員 西 脇 威 夫\*\*  
 准員 島 田 静 雄\*\*\*

## BEHAVIOURS OF SPIRAL ROPE FOR SUSPENSION BRIDGES

By Gorō Tanaka, C.E. Member, Takeo Nishiwaki, C.E. Member and  
 Shizuo Shimada, C.E. Assoc. Member

**Synopsis:** The paper states some elastic behaviours of spiral rope specially manufactured for suspension bridges.

Furthermore, the authors have developed the theoretical formulae concerning elastic deformation of spiral rope, compared the computed values with the experimental results, and given a reasonable hint for pretension works.

**要旨** 吊橋用に製造されたスパイラル・ロープの引張り試験を行い、伸び、トルクおよび両端を回転自由にした場合のより戻り角度を測定して、その弾性的性質を実験的に調べた。

更にスパイラル・ロープの弾性的変形に対して理論式を導き、実験値と計算値を比較検討し、プリテンション加工の一指針を与えた。

### I. ま え が き

従来わが国では、吊橋用主ケーブルとしてストランドド・ロープが主に使用されて、それを構成するスパイラル・ロープが採用されることはほとんど皆無であつた。その理由としては、吊橋主ケーブルに利用できる程太いスパイラル・ロープを製作していなかつたこと。そして、もしもあつたとしても、架橋現場においてリールからロープをのぼす場合、あるいはロープ端の合金止めを行う作業が、ストランドド・ロープに比べて、かなり難点が多いことなどをあげることができよう。しかしそのような製造あるいは現場作業に難点はあるが、恐らくは、スパイラル・ロープの方がストランドド・ロープより吊橋主ケーブル用には優れていると思われる。そして、最近富山県大渡橋にはスパイラル・ロープが採用され、また若戸橋にもスパイラル・ロープが採用される気運にあつて、吊橋用主ケーブルは、徐々にスパイラル・ロープへと移つて行くのではないかと思われる。

普通に製造されたロープは、使い始めの頃には Hooke の法則が必ずしも成立せず、また伸び量が割合に多い。この性質を取除く一つの方法として、ロープを使用するに先立つてロープにある荷重をかける。このことをプリテンション加工を行うと言つているが、その方法（荷重の大きさ、荷重のかけ方など）については不明であつた。

著者達は、最近吊橋主ケーブル用に製造されたスパイラル・ロープより、数本の試験片を採り、それらの引張り試験を行つた。そして、それらの結果と、著者達の導いた理論式よりスパイラル・ロープの弾性的振舞を調べた。更に前述のようなプリテンション加工の意義を理論式から眺めて、結局プリテンション加工とはロープの見かけのポアソン比を一定にして、なるべく 0.3 に近くなるようにすることであるという結論に達した。

### II. 実 験 の 概 要

#### §1. 試 験 片

試験片として使用したスパイラル・ロープの断面を図-1 および写真-1 に示す。各諸元を示すと表-1 のようになる。ピッチ角  $\alpha$  は図-2 に示すようにとる。ピッチ角は  $\alpha$  よりを正とする。ピッチは層心径の 11 倍になつているから各層に対して一定である。ロープの単位長さ当り重量は、16.02 kg であつた。

表-1 の諸元を持つスパイラル・ロープより約 4 m の試験片を 9 本製作したが、その中の 1 本は後述のような

\* 東京大学講師，横河橋梁製作所，常務取締役

\*\* 東京大学助手，工学部土木工学教室

\*\*\* 東京大学大学院学生，数物系土木工学科博士課程

図-1 試験用ロープ断面

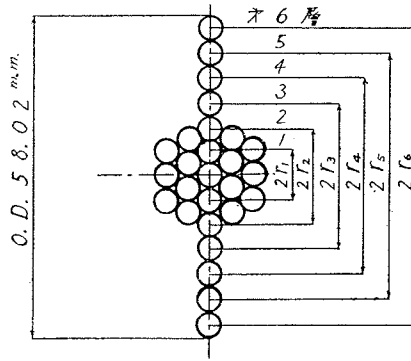


図-2 ピッチ角の取り方

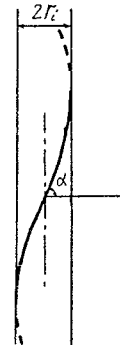


写真-1 実験に使用したスパイラル・ロープ

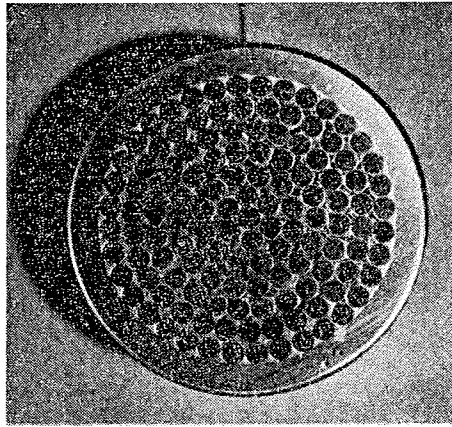


表-1 断面諸常数

層 No. <i>i</i>	素線径 $d_i$ cm	断面積 $A_i$ cm <sup>2</sup>	二次モーメント $J_{Bi}$ cm <sup>4</sup>	極モーメント $J_{Ti}$ cm <sup>4</sup>	層本数 $n_i$	層半径 $r_i$ cm	よ(±) Z→+	$\sin \alpha_i$	$\cos \alpha_i$
0	0.474	0.17646	$2.478 \times 10^{-3}$	$4.956 \times 10^{-3}$	1	0		1.00000	0
1	0.444	0.15483	$1.908 \times 10^{-3}$	$3.816 \times 10^{-3}$	6	0.459	-	0.96155	0.27462
2	"	"	"	"	12	0.903	-	"	"
3	"	"	"	"	18	1.347	-	"	"
4	"	"	"	"	24	1.791	+	"	"
5	"	"	"	"	30	2.235	-	"	"
6	"	"	"	"	36	2.679	+	"	"
$\Sigma$					127				

$n_i A_i$ cm <sup>2</sup>	$\pm r_i n_i A_i$ cm <sup>3</sup>	$r_i^2 n_i A_i$ cm <sup>4</sup>	$\pm n_i / r_i$ cm <sup>-1</sup>	$n_i / r_i^2$ cm <sup>-2</sup>	ヤング係数 $E$ kg/cm <sup>2</sup>	$G/E$
0.17646					$1.88 \times 10^6$	0.433
0.92898	- 0.42640	0.195149	-13.0719	28.4791	"	"
1.85796	- 1.67774	1.514997	-13.2890	14.7165	"	"
2.78694	- 3.75401	5.056649	-13.3630	9.9206	"	"
3.71592	+ 6.65521	11.919486	+13.4003	7.4820	"	"
4.64490	-10.38135	23.202321	-13.4228	6.0057	"	"
5.57388	+14.93242	40.003965	+13.4378	5.0160	"	"
19.68504	5.34813	81.892567	-26.3086	71.6199		

プリテンション加工を行ったロープより採った。試験片の両端は電気亜鉛で合金どめとした。

§2. 実験項目

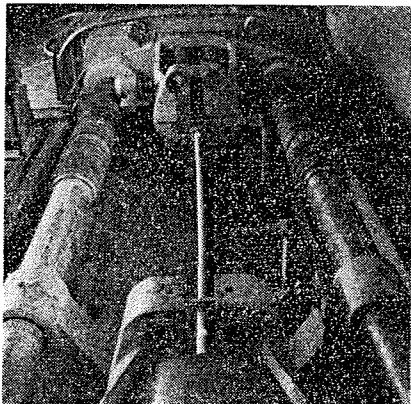
実験では次に示すような事項を測定観察した。

- 1) 破断に至るまでの荷重—変形曲線の性状および破断強度
  - 2) 荷重を 0~100 t 程度で繰返す時の伸びの性状
  - 3) 一定荷重の下に一定時間放置したときの伸びの性状
  - 4) 荷重とより戻り角度の関係
  - 5) 荷重と引張りによつて生ずるトルクの関係
  - 6) ロープ径の細り—見かけのポアソン比
- 上記各項を対象としての次の実験を行った。

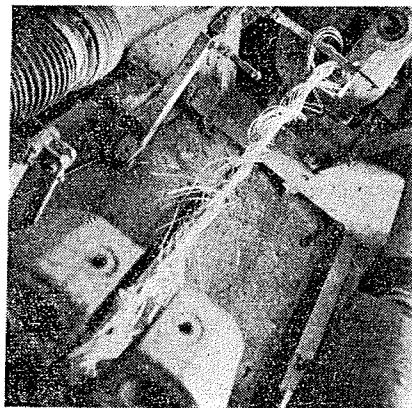
- 1) 破断試験—試験機による自記—(単調増荷)
- 2) 破断試験—Catheto meter による伸び並びにノギスによる径の細りの測定—(繰返し荷重)
- 3) より戻り角度およびトルクの測定

なお、以上のほかに素線に対して引張試験、疲労試験等を行った。  
 実験実施中の状況および付属品等を 写真—2~4 に示す。

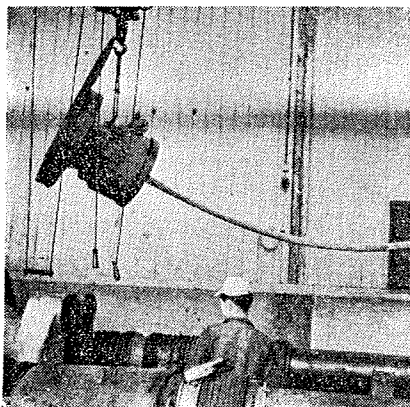
写真—2 試験機に取り付けた試験用ワイヤー ロープ



写真—3 破断した状況



写真—4 より戻り角を測定する装置をつけた試験用ワイヤー ロープ



### §3. 実験結果

#### A: 素線

任意に抽出した素線の試験結果の一例を 表—2 に示す。このような実験に基づいて、素線の性質として次の諸数値を採用した。

引張強さ  $175 \text{ kg/mm}^2$

弾性限度  $90 \text{ kg/cm}^2$

$E=1.8 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

$G=7.8 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

$G/E=0.433$

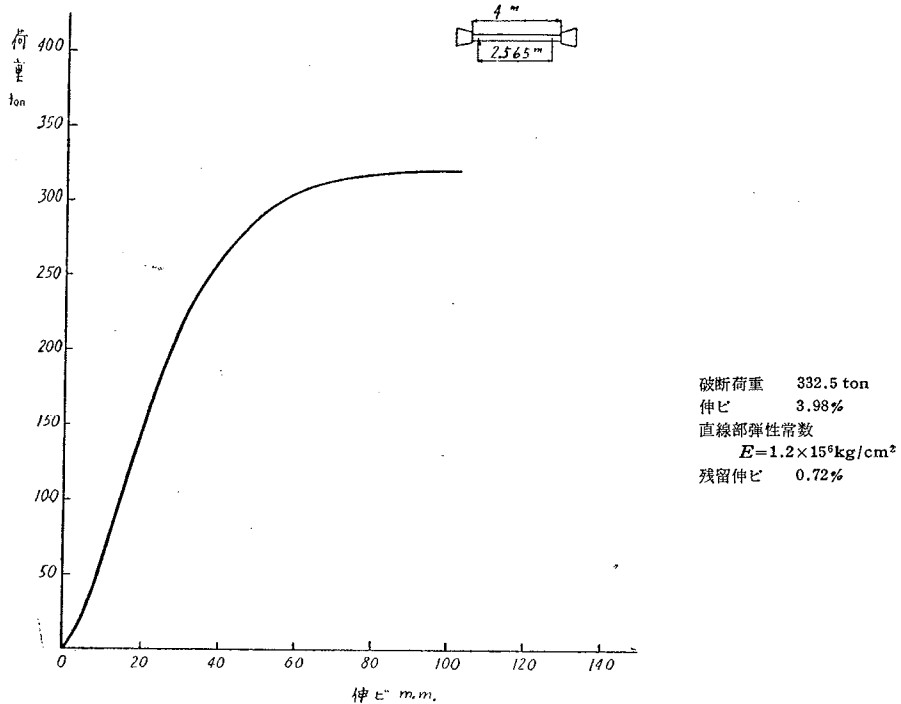
#### B: スパイラル・ロープ

表-2 素線の試験成績一例

項目 番 号	線 径 mm	破 断 力 kg	抗 張 力 kg/mm <sup>2</sup>	弾 性 限 度 60%	捻 回 D×100 17 回	亜鉛メッキ試験		
						捲 付	タ ン パ ン	付 着 量
						D×20 6 回	1分, 3回	g/m <sup>2</sup>
			標準 175					270
1	4.45	2740	176	90	39	良	良	372
2	4.44	2700	175	—	39	〃	〃	390
3	4.45	2740	176	—	40	〃	〃	387
4	4.45	2770	178	90	37	〃	〃	388
5	4.45	2780	179	—	39	〃	〃	376
6	4.46	2710	174	91	38	〃	〃	370
7	4.45	2760	177	—	37	〃	〃	374
8	4.45	2760	177	—	40	〃	〃	356
9	4.45	2720	175	90	39	〃	〃	382
10	4.44	2710	175	—	38	〃	〃	367
11	4.45	2760	177	—	40	〃	〃	369
12	4.45	2710	174	—	39	〃	〃	358
13	4.45	2710	174	—	39	〃	〃	366
14	4.45	2740	176	—	40	〃	〃	374
15	4.45	2760	177	92	40	〃	〃	386
16	4.45	2760	177	—	40	〃	〃	370
17	4.45	2740	176	—	37	〃	〃	382
18	4.45	2720	175	—	39	〃	〃	366
19	4.45	2740	176	—	39	〃	〃	359

実験によつて得られた数値をグラフにしたものを 図-3~図-10 に示す。

図-3は破断するまでの単調増荷の場合の荷重と伸びのグラフである。低荷重の部分では、曲線は下に凸になつて荷重がある程度大きくなると荷重と伸びは比例してくる。低荷重のところの荷重と伸びの関係は、多孔質の物質にみられる性質と類似しており、ロープの場合には、素線相互の間に空ゲキが存在しているためと考えられる。このように素線相互の空ゲキのためなどから生ずる伸びを構造的の伸びと総称して、素線の荷重に比例する伸びにこれが加わつて図のような形状になると考えられる。この構造的の伸びを取除くのが、前記のようにプリテンション加工の目的である。

図-3  $\sigma$ - $\epsilon$  曲線 (0→破断, 単調増荷)

荷重が 110 t 付近の直線からヤング係数を求めると、 $1.20 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 。その直線部分を荷重が小さくなる方へ伸ばし、横軸との交点の横座標を読むと、荷重が 0 になつた場合の伸びが求まるが、これを残留伸びと考えると、0.72% となる。破断に至るまでの伸びは 3.98% で破断力は 322.5 t であり、公称破断力との比は約 1.07 であつた。なお 図-3 は試験機に自記させた荷重-伸び図である。

自重による試験片のたわみの影響は、本実験ではすべて無視してある。試験片が放物線型にたわむと仮定するならば、引張力が 10 t の時のたわみが 5 m の標点間距離におよぼす誤差は  $10^{-6}$  程度のものである。同様にして引張力 5 t で 4 m の標点間距離におよぼす誤差も同程度となる。

図-4 において、第一回の増荷の場合と伸びの関係は、図-3 の場合の 0→150 t の部分を拡大したと同じ意味のものである。ヤング係数は図に記入のとおりであるが、初回より次回へと増大の傾向にあると思われ、また低荷重部分の曲線の形状は、初回より次回の方がかなり直線的と言ひうる。この程度のロープの 150 t の荷重によつて、すなわち破断力の 1/2 の荷重によつて、構造的伸びはかなりよく除去できるものと思われる。伸びは Cathetometer によつて測定した。

伸びの測定と平行してロープ径の測定も行つた。その結果よりロープとしてのポアソン比を求めることができ、数値を図に記入した。ロープ径とはいわゆる外径のことである。ポアソン比も漸次減少していることがわかる。

図-4 伸びおよび直径の細り (0→150 t→0→150 t→破断)

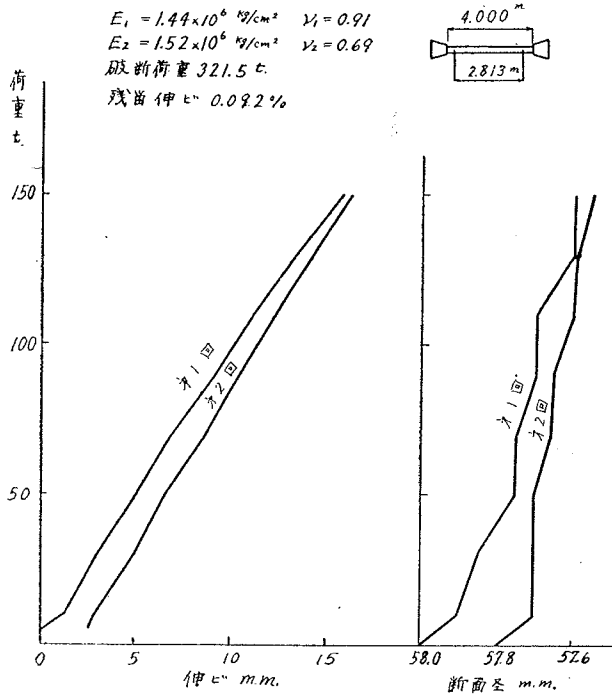


図-5 は 150 t の荷重に到達するまでに 20 t 増荷して 10 t 除荷することを繰返ししながら、伸びとロープ径を測定したものである。150 t から 5 t に除荷する場合荷重と伸びが直線関係にあるものとする、初回の除荷に対し、 $E_w = 1.53 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、次回の除荷に対して  $1.50 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  のヤング係数が得られた。図-4 の第一回目の増荷の場合のヤング係数と、図-5 の第一回目の除荷の場合のヤング係数は大分差があるが、これは構造的な伸びが、荷重の繰返しによつて取除かれて行くためであるが、この  $E$  の値の差は繰返しと共に減少して、一定の  $E$  の値になるものと思われる。

図-6 は、繰返し荷重の場合の荷重と伸びの関係を示す。各回の場合のヤング係数は、図に記入したが、繰返し回数と共に増大して行くことがわかる。この載荷状態の場合低荷重の部分では同じような様相を示しているが、これは構造的伸びが除去しきれずに残っているものと思われる。

図-7 も繰返し荷重の場合であるが、この試験片は 80 t で約 28 回の繰返し、および 60 t で 2 時間放置、さらに 37.5 t で 1 時間放置という荷重の組合わせを 14 回受けたロープから採つたものである。ヤング係数は図

図-5 伸びおよび直径の細り (0→30→20→40→30→50……150 t)

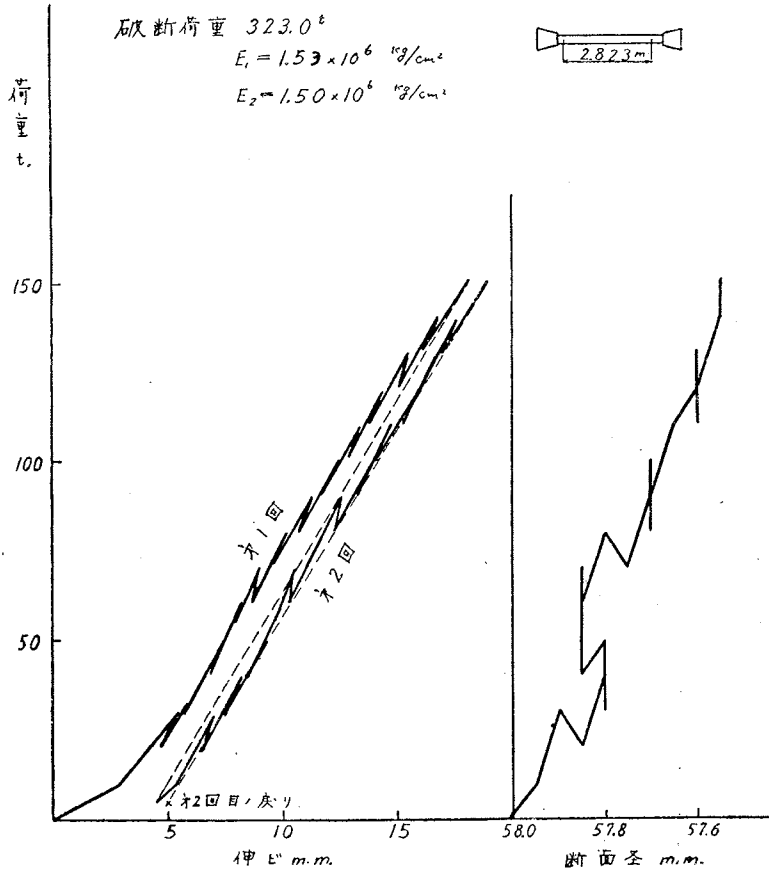
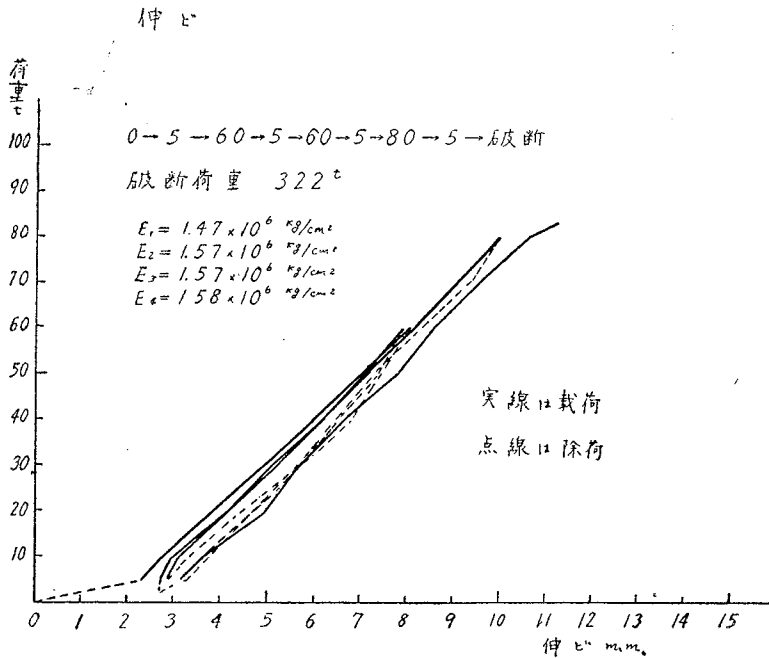


図-6



に記入したように初回、次回とも意外に低い値を示した。このことは、試験片を製作するに当つて、約 4m の長さに切断したとき、表層の素線により戻りが生じたものと思う。このため、プリテンション加工の効果がある程度薄れたものと思われる。破断強度の公称破断力に対する比は 1.06 であつた。

図-7 は Catheto meter による測定値であるが、図-8 に試験機に自記させたものを示す。試験機のレンジ切替のため 0→60t→5t→150t→0t と、それに続く 0t→破断の曲線の縦座標は異なつてゐる。構造的伸びも、前記の理由で存在している。しかし図-8 の右の曲線では、ほとんど荷重 0t から伸びは荷重に比例しているとみなしうる。さらに同図に示されている点線の曲線は、図-3 に掲げた曲線である。時前になにも加工されないロープは、低荷重時には曲線は下に凸になつており、また直線とみなしうる区間でも、ヤング係数(曲線の勾配)は小さい。さらに、破断に近づいた時の曲線が、プリテンションを行つたものはやや下向の状態にあるが、時前になら加工を受けていないものは、ほとんど下向しない。これは各素線が、十分伸びて、断面にくびれが生じないことを示している。この一例によつて適当なプリテンション加工はかなりロープの性質を改良することがわかる。

図-9 は、ある一定荷重を継続しかけていた場合の伸びを調べた一例である。100t かけて除荷し再び 50t まで増荷して 2 時間放置した場合に生じた伸びは Catheto meter では測定できなかつた。しかしこれは、この場合の荷重のかけ方で伸びが全く生じないことを意味するのではない。ゲージレングス 2935 mm に対して 1/100 mm 以上の伸びが出なかつただけである。

図-10 はロープ径の荷重による減少を示したものである。

図-11 は試験片の一端を回転に対して自由として荷重をかけるとより戻りが生ずるが、その場合の荷重と角度との関係を示している。角度は試験長 3982 mm に対してのより戻り角度を示している。

図-12 はより戻りが生ずるためのトルクを荷重に対して求めたものである。図-

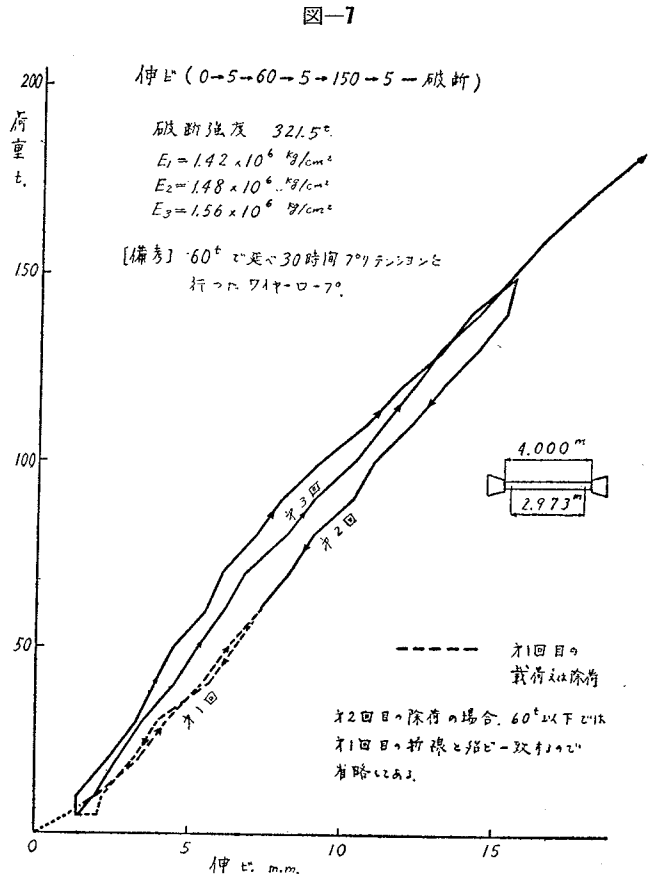
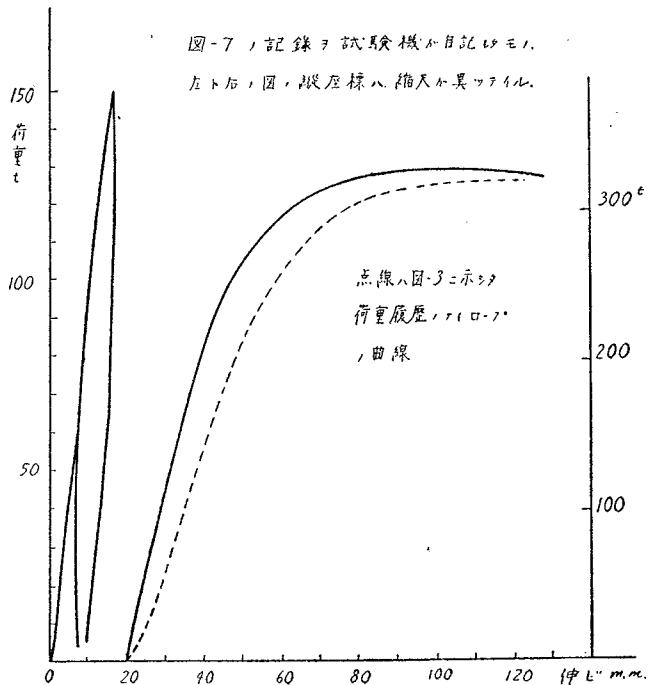
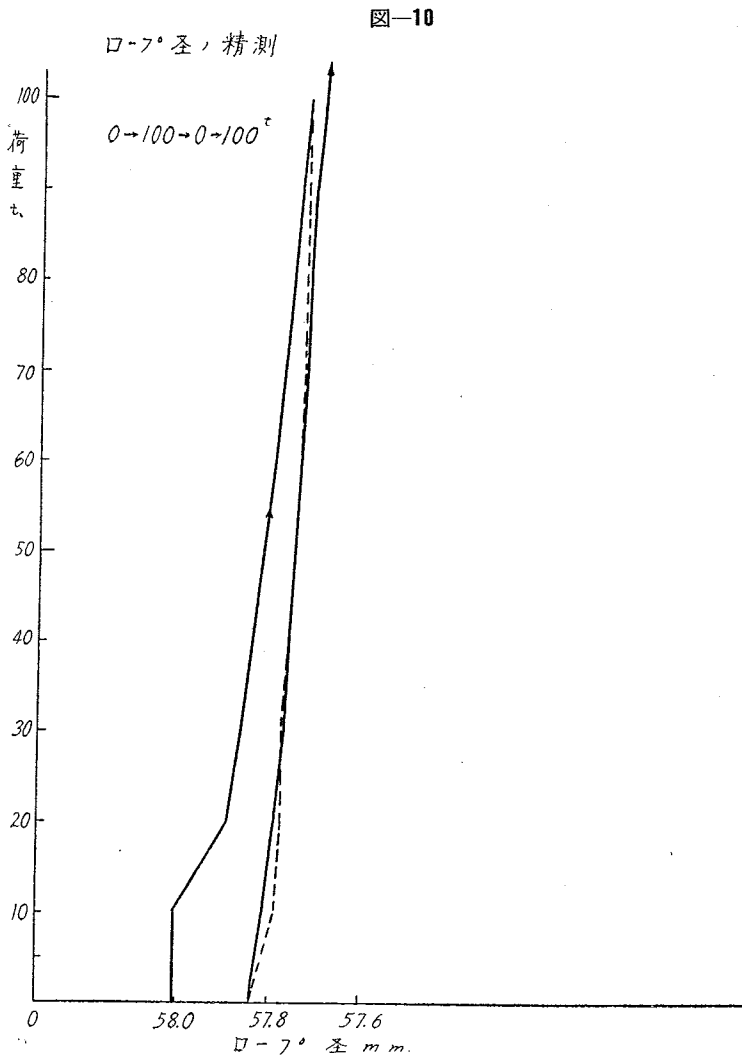
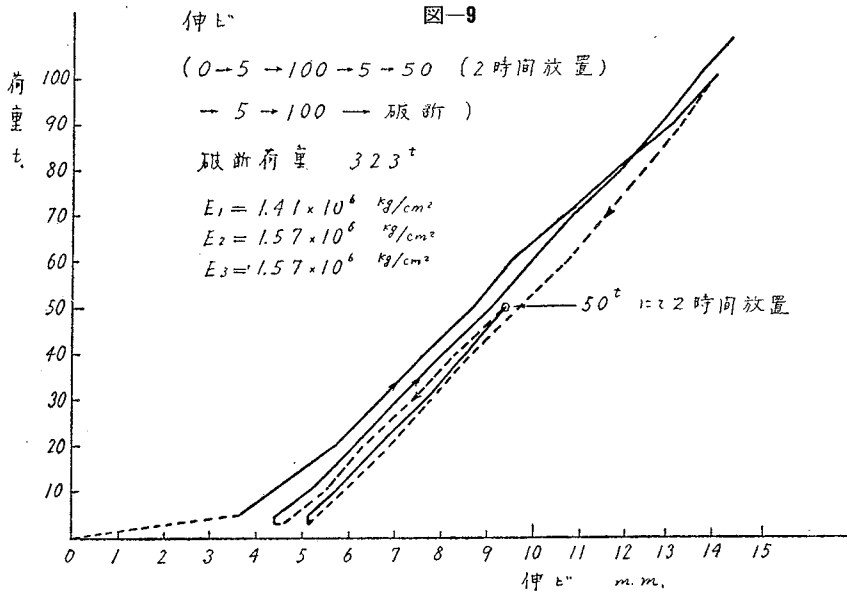


図-8







11, 図-12 に対しては, 後記のようにして求めた計算値が示してある。なお, 両図に対する値は, 0 t→60 t→0 t→60 t と 2 回連続して測定した値の平均値を求めてグラフにしたものである。図-11, 図-12 より, もしこのロープを, 破断力に対して安全率 3.0 で使用すると, 1 m 当り約 4° のより戻りが生じ, 250 m のロープに対して 1000° のより戻りが生ずることになる。さらに両端を固定するならば, トルクとしては 80 kg-m 近いものが生じていることになるから, ロープを使用する場合には, そのことも一応考えておかなければならない。

図-11

図-12

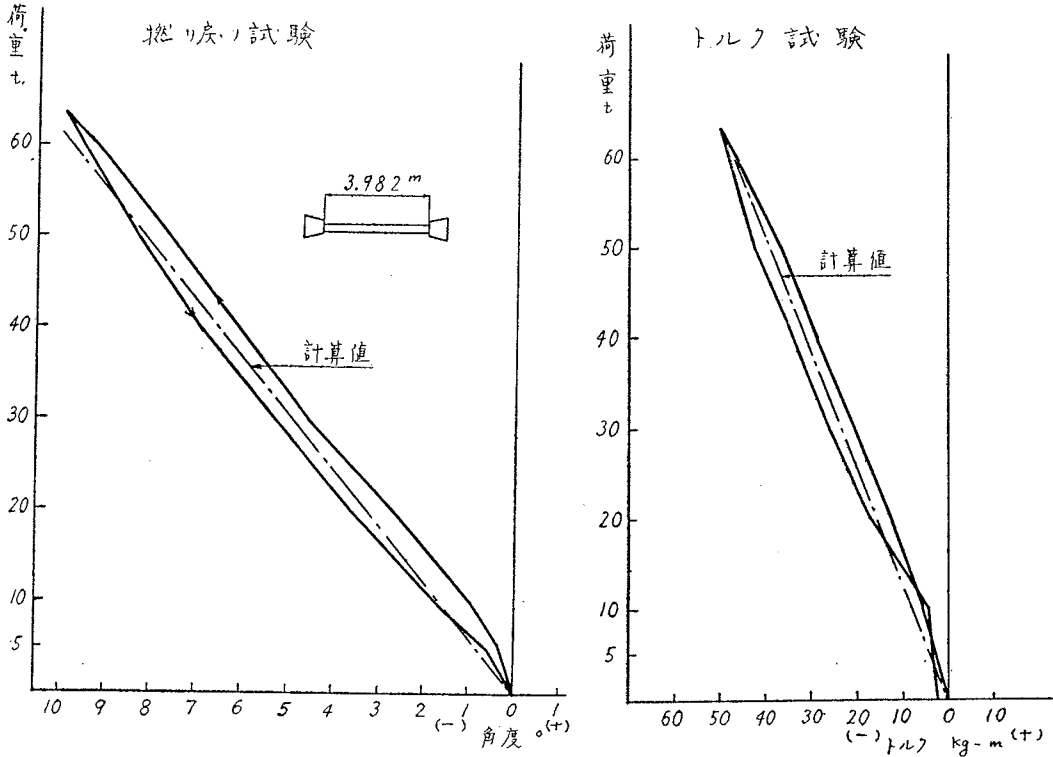


図-13 は, 実際に吊橋に使用できる長さのもの, プリテンション加工の経過を示している。ロープの支点は 5 m ごとに設けてあるので, 前記理由から, 伸びの初期読みは 10 t で行つた。従つて, それより低荷重の場合の伸びの状態をこのデータから観察することができない。60 t で 2 時間放置している時の時間の経過に対する伸びの状態を図-14 に示したが, この図から 2 時間後にまだ伸びは引続いて生じていたと見なすことができる。

除荷の場合も含めてヤング係数を求めると表-3 のようになる。伸びが 2 時間後にまだ生じつつあつたこと, 2 時間後の除荷に対するヤング係数が  $1.54 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  位であつたことから, 図に示したような荷重のかけ方は, このロープに対してやや小さめであると思われる。

表-3 図-13 の場合の  $E_w$  の変化 (単位は  $\text{kg/cm}^2$ )

第 1 回目の 10 t → 80 t	第 1 回目の 80 t → 10 t	第 2 回目の 10 t → 80 t	第 2 回目の 80 t → 10 t	第 3 回目の 10 t → 60 t	2 時間後の 60 t → 10 t
$1.42 \times 10^6$	$1.52 \times 10^6$	$1.50 \times 10^6$	$1.52 \times 10^6$	$1.51 \times 10^6$	$1.54 \times 10^6$

14 本の同様なプリテンション加工の結果をみると, 2 時間後の除荷に対して, ヤング係数が増大したもの, 変らぬもの, 減少したものがある。すなわち公称破断力の 1/5 程度の荷重を 2 時間かけても, ヤング係数を一定程度に収斂させることに期待はそれ程かけられない。

なお, この実験は図-12 までに示した実験とは試験機も異なっており, 荷重の精度も悪い。さらに伸びはスケール・テープで読んでいるからそれらによる誤差は当然含んでいるので, 図-12 までの実験結果に比べては精度は劣るものである。

図-13

Gauge Length 171408 m.m.

$$E_1 = 1.42 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_2 = 1.50 \times 10^6$$

$$E_3 = 1.51 \times 10^6$$

$$E_4 = 1.54 \times 10^6$$

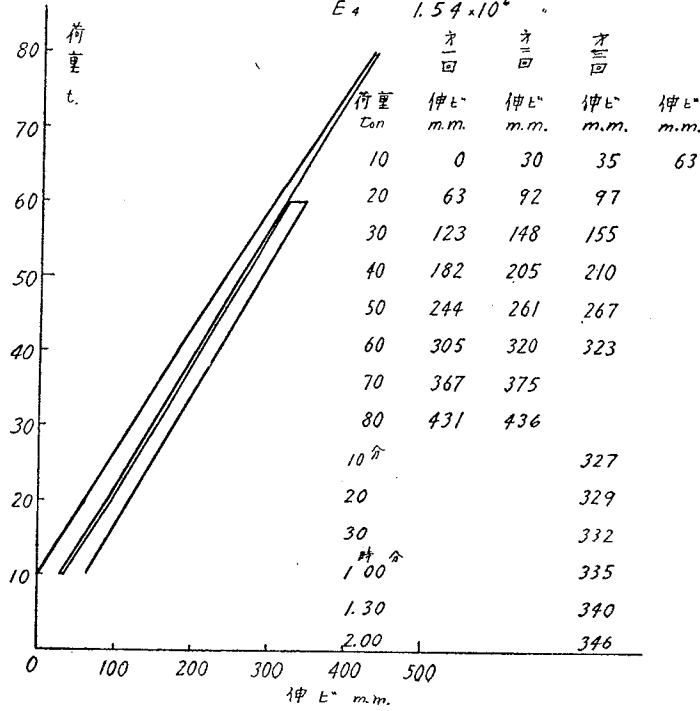
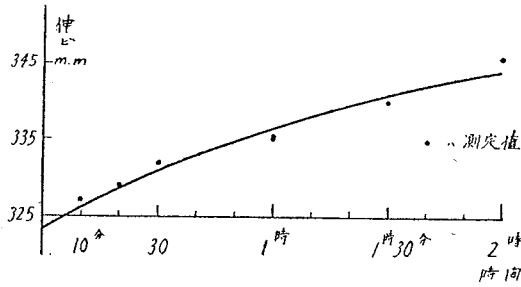


図-14



### III 理論弾性常数その他

#### §1. 幾何学的条件

スパイラル・ロープの任意の層の素線の直径を  $d_i$ 、その層の素線の数  $n_i$ 、巻きつけられているスパイラルの半径を  $r_i$ 、 $z$  よりの方向を正としてピッチ角を図-15 のように定め、さらに座標軸として、ロープの軸を  $z$  軸、ロープ軸に直角な任意の断面を基準の  $xy$  面とし、 $xyz$  の方向は右手系になるように選んでおく。

素線上の任意の点の座標は、素線の長さを  $t$  とすると  $t$  をパラメーターとして次式によつて与えられる。

$$x = r_i \cos \theta_i$$

$$y = r_i \sin \theta_i$$

$$\left. \begin{aligned} z &= t \sin \alpha_i \\ \text{ただし } \theta_i &= \frac{t \cos \alpha_i}{r_i} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

あるいは素線上の任意の点の位置ベクトルを  $\mathbf{r}$  とすると

$$\mathbf{r} = \{x, y, z\} \dots\dots\dots (1)'$$

素線の切線方向余弦は (1) 式より

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -\cos \alpha_i \sin \theta_i \\ \frac{dy}{dt} &= \cos \alpha_i \cos \theta_i \\ \frac{dz}{dt} &= \sin \alpha_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

あるいは、切線ベクトルを  $\mathbf{V}$  とすると

$$\mathbf{V} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \left\{ \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right\} \dots\dots\dots (2)'$$

位置ベクトル  $\mathbf{r}$  と  $\mathbf{r} + d\mathbf{r}$  の点の切線ベクトルを  $\mathbf{V}, \mathbf{V} + d\mathbf{V}$ 。

$\mathbf{V}$  と  $\mathbf{V} + d\mathbf{V}$  のなす角を  $d\varphi$  とすると、位置ベクトル  $\mathbf{r}$  の点の曲率  $k$  は次式で定義することができる。

$$k = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}$$

$d\mathbf{V}/dt$  は  $\mathbf{r}$  に直角なベクトルであり、その大きさは  $k$  である。そのベクトルの方向を  $\mathbf{C}$  とするならば、Serret-Frenet の公式の一つとして知られている次式が求まる。

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = k\mathbf{C} \dots\dots\dots (3)$$

$\mathbf{C}$  を主法線ベクトルと名づけるならば、考えている点の曲率を  $k_i$  として

$$\mathbf{C} = \frac{1}{k} \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \left\{ \frac{1}{k_i} \frac{d^2x}{dt^2}, \frac{1}{k_i} \frac{d^2y}{dt^2}, \frac{1}{k_i} \frac{d^2z}{dt^2} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

式 (3) より曲率  $k$  は次式で求まる。

$$k_i^2 = \left( \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \right)^2 = \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{d^2y}{dt^2} + \frac{d^2z}{dt^2} = \left( \frac{\cos^2 \alpha_i}{r_i} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

式 (2) と式 (5) より、主法線ベクトルの各成分は

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{k_i} \frac{d^2x}{dt^2} &= -\cos \theta_i \\ \frac{1}{k_i} \frac{d^2y}{dt^2} &= -\sin \theta_i \\ \frac{1}{k_i} \frac{d^2z}{dt^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)'$$

陪法線は切線と主法線に直交している。そこで、陪法線ベクトルを  $\mathbf{N}$  とすると、 $\mathbf{V}, \mathbf{C}, \mathbf{N}$  の間には次の関係が成立つので  $\mathbf{N}$  が求まる。

$$\mathbf{N} = \mathbf{V} \times \mathbf{C} = \frac{1}{k} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} \times \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \dots\dots\dots (6)$$

式 (2)、式 (4)' より

$$\mathbf{N} = \{ \sin \alpha_i \sin \theta_i, -\sin \alpha_i \cos \theta_i, \cos \alpha_i \} \dots\dots\dots (6)'$$

振率を  $\rho$  とすると、Serret-Frenet の公式より

$$\frac{d\mathbf{N}}{dt} = -\rho \mathbf{C}$$

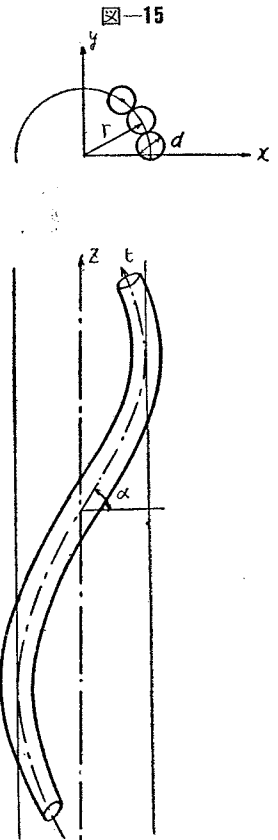
考えている点の振率を  $\rho_i$  とすると式 (6)' より

$$\rho_i^2 = \left( \frac{d\mathbf{N}}{dt} \right)^2 = \left( \frac{\sin \alpha_i \cos \alpha_i}{r_i} \right)^2 \dots\dots\dots (7)$$

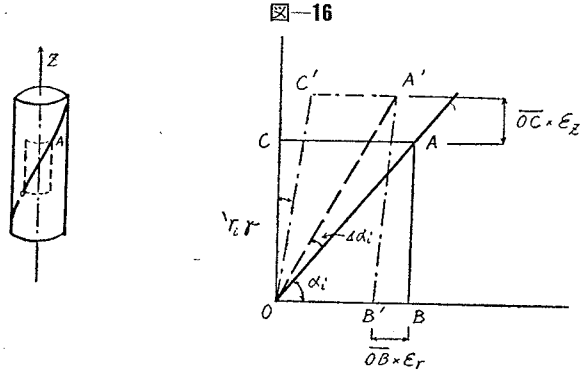
が得られる。

§2. 層の微小変形による素線の変形

図-15



スパイラル・ロープが引張力を受けて変形すると、ロープは単位長さ当り  $z$  方向に  $\epsilon_z$  の伸びと、付加的に生ずるねじりモーメントによる  $r$  の角変位 ( $z$  の正方向に反時計廻りに角変位するものを正とする) と、さらにワイヤ一径の細りによる層心径の縮み  $\epsilon_r$  とが生ずる。



変形は微小であるとして 図-16 を参照しながら素線 OA の変形を求める。変形前に OAB をなしていた部分が変形後 OA'B' になつたとする。すなわち素線 OA は伸びて OA' となり、ピッチ角  $\alpha$  は  $\Delta\alpha_i$  だけ変わり、OB は OB' に縮む。そこで、三角形 OAB に対し、

$$\overline{OA}^2 = \overline{OB}^2 + \overline{AB}^2 - 2 \overline{OB} \overline{AB} \cos B$$

角Bは直角であることに注意して両辺の微分を求めると

$$\Delta \overline{OA} \cdot \overline{OA} = \Delta \overline{OB} \cdot \overline{OB} + \Delta \overline{AB} \cdot \overline{AB} + \overline{OB} \cdot \overline{AB} \cdot \Delta B$$

$\overline{OA}$ ,  $\overline{OB}$ ,  $\overline{AB}$  のひずみは  $\epsilon_\alpha$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_z$  に等しいとおくと、

$$\Delta \overline{OA} = \overline{OA} \cdot \epsilon_\alpha, \Delta \overline{OB} = \overline{OB} \cdot \epsilon_r, \Delta \overline{AB} = \overline{AB} \cdot \epsilon_z$$

そこで

$$\overline{OA}^2 \cdot \epsilon_\alpha = \overline{AB}^2 \cdot \epsilon_z + \overline{OB}^2 \cdot \epsilon_r + r_i \gamma \overline{OB} \cdot \overline{AB}$$

ゆえに

$$\epsilon_\alpha = \epsilon_z \sin^2 \alpha_i + \epsilon_r \cos^2 \alpha_i + r_i \gamma \sin \alpha_i \cos \alpha_i \dots\dots\dots (8)$$

同様に

$$\Delta \alpha_i \sin \alpha_i \cos \alpha_i = (\epsilon_z - \epsilon_\alpha) \sin^2 \alpha_i \dots\dots\dots (9)$$

式 (8), 式 (9) を使って

$$\Delta \alpha_i = (\epsilon_z - \epsilon_r) \sin \alpha_i \cos \alpha_i - r_i \gamma \sin^2 \alpha_i \dots\dots\dots (10)$$

§3. 層の形状の変化

前述のように、素線に  $\epsilon_\alpha$  の伸びが生じ、層心径が  $\epsilon_r$  縮み、ピッチ角が  $\Delta\alpha_i$  変化すると、それに伴つて素線の形状は、曲率  $k_i$  および捩率  $\rho_i$  の状態から曲率  $k_i + \Delta k_i$ , 捩率  $\rho_i + \Delta\rho_i$  へ、そして  $r_i$  は  $r_i(1 + \epsilon_r)$ ,  $\alpha_i$  は  $\alpha_i + \Delta\alpha_i$  に変化する。曲率、捩率の変化量は式 (5), 式 (7) を参照して次式より求まる。

$$\begin{aligned} \Delta k_i &= k_i \epsilon_\alpha + \left\{ \frac{\cos^2 (\alpha_i + \Delta \alpha_i)}{r_i (1 + \epsilon_r)} - \frac{\cos^2 \alpha_i}{r_i} \right\} \\ &= - \frac{\sin^2 \alpha_i \cos^2 \alpha_i}{r_i} \epsilon_z + \frac{\sin^2 \alpha_i \cos^2 \alpha_i}{r_i} \epsilon_r + r_i \sin \alpha_i \cos \alpha_i (2 - \cos^2 \alpha_i) \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \rho_i &= \rho_i \epsilon_\alpha + \left\{ \frac{\sin (\alpha_i + \Delta \alpha_i) \cos (\alpha_i + \Delta \alpha_i)}{r_i (1 + \epsilon_r)} - \frac{\sin \alpha_i \cos \alpha_i}{r_i} \right\} \\ &= \frac{\sin \alpha_i \cos^3 \alpha_i}{r_i} \epsilon_z - \frac{\sin \alpha_i \cos^3 \alpha_i}{r_i} \epsilon_r + r_i \sin^4 \alpha_i \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

§4. 外力の釣合条件式

素線の任意の断面に生ずる断面力としては、軸力、せん断力、曲げモーメント、ねじりモーメントが考えられる。そして、軸力は前記  $V$  に平行であり、せん断力は  $V$  に直角。曲げモーメントの軸は  $V$  に直角であり、ねじりモーメントは  $V$  に平行である。今それぞれをベクトルとして次のように表わす。

$$\text{断面力} \begin{cases} F \begin{cases} T & \text{軸力} & (V \text{ と平行}) \\ S & \text{せん断力} & (V \text{ と直交}) \end{cases} \\ M \begin{cases} M_B & \text{曲げモーメント} & (V \text{ と直交}) \\ M_T & \text{ねじりモーメント} & (V \text{ と平行}) \end{cases} \end{cases}$$

外力  $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{P} \text{ 単位素片に作用する外力} \\ \mathbf{m} \quad \quad \quad \text{モーメント} \end{array} \right.$

基準位置の  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{M}$  をそれぞれ  $\mathbf{F}_0$ ,  $\mathbf{M}_0$  とすると, 上記各量の間には次の式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F} &= \mathbf{T} + \mathbf{S} = \mathbf{F}_0 + \int_0^t \mathbf{p} dt \\ \mathbf{M} &= \mathbf{M}_B + \mathbf{M}_T = \mathbf{M}_0 + \int_0^t \mathbf{m} dt + \int_0^t (\mathbf{F} \times \mathbf{V}) dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

§5. スパイラル・ロープの応力

素線の曲げ剛さを  $EJ_B$ , ねじり剛さを  $GJ_T$ , 伸び剛さを  $EA$  とする。素線に  $\epsilon_\alpha$  のヒズミが生ずるような応力  $T$  の大きさを

$$T = EA \epsilon_\alpha$$

で表わす。応力は大きさと方向を持つているからベクトルとして取扱うことができる。 $\epsilon_\alpha$  の変位の方向は  $\mathbf{V}$  と平行であるから上式の大きさを持ち、 $\mathbf{V}$  の方向に平行なベクトル  $\mathbf{T}$  は上記の応力を表わすものと考えられる。

すなわち  $\mathbf{T} = -EA \epsilon_\alpha \mathbf{V} \dots\dots\dots (14)$

モーメントもベクトルであるから上と同様の取扱いができる。 $\mathbf{M}_B$  は  $\mathbf{V}$  の方向に直交するベクトルであり、 $\mathbf{M}_T$  は  $\mathbf{V}$  の方向に平行なベクトルである。よつて

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}_B &= -kJ_B \mathbf{N} \\ \mathbf{M}_T &= -\rho GJ_T \mathbf{V} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

そこで全モーメント  $\mathbf{M}$  としては

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_B + \mathbf{M}_T = -kJ_B \mathbf{N} - \rho GJ_T \mathbf{V} \dots\dots\dots (16)$$

外力のモーメント  $\mathbf{m}$  がない場合を考えると, 式 (13) より

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_0 + \int (\mathbf{F} \times \mathbf{V}) dt$$

ゆえに  $\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \mathbf{F} \times \mathbf{V} = k\rho (EJ_B - GJ_T) \mathbf{C} - EJ_B \cdot \frac{dk}{dt} \mathbf{N}$

せん断力  $\mathbf{S}$  は,  $\mathbf{F}$  の中で  $\mathbf{V}$  と直交するものであるから

$$\mathbf{C} = (\mathbf{N} \times \mathbf{V}), \mathbf{N} = (\mathbf{V} \times \mathbf{C}) = -(\mathbf{C} \times \mathbf{V})$$

の関係を利用して

$$\mathbf{F} \times \mathbf{V} = \mathbf{S} \times \mathbf{V}$$

からせん断力  $\mathbf{S}$  は次式で求まる。

$$\mathbf{S} = k\rho (EJ_B - GJ_T) \mathbf{N} + EJ_B \cdot \frac{dk}{dt} \mathbf{C} \dots\dots\dots (17)$$

そこで  $\mathbf{F}$  は  $\mathbf{T}$  と  $\mathbf{S}$  を合成して

$$\mathbf{F} = \mathbf{T} + \mathbf{S} = -EA \epsilon_\alpha \mathbf{V} + k\rho (EJ_B - GJ_T) \mathbf{N} + EJ_B \cdot \frac{dk}{dt} \mathbf{C} \dots\dots\dots (18)$$

ピッチ角  $\alpha$  は, 各層で不変であり, 一層内では常数であるから曲率は, 素線上の各点で常数と見なすことができる。よつてわれわれが取上げているスパイラル・ロープの  $\mathbf{F}$  は次式で示される。

$$\mathbf{F} = -EA \epsilon_\alpha \mathbf{V} + k\rho (EJ_B - GJ_T) \mathbf{N} \dots\dots\dots (19)$$

また式 (16) より,  $dk, d\rho$  の変化が生じたとき, 合モーメントの変化量  $\mathbf{M}$  は

$$\mathbf{M} = -EJ_B \cdot dk \mathbf{N} - GJ_T d\rho \mathbf{V} \dots\dots\dots (20)$$

で与えられる。

式 (19), 式 (20) は素線の応力を与える式であるが, 素線をより合わせて作ったスパイラル・ロープの応力は, 各素線のものを集計すればよい。そこで層本数が  $n_i$  本である任意の層の応力を考えると, その層の  $z$  軸方向の応力およびモーメントは, 式 (19), 式 (20) の  $z$  軸方向の成分の  $n_i$  倍になる。 $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3$  を右手系の基礎ベクトルとすると, その層の軸応力  $P_z$  は式 (19) から,  $\mathbf{F}$  の合力として  $z$  軸方向の成分の  $n_i$  倍すなわち

$$\begin{aligned} P_z &= [-EA \epsilon_\alpha (\mathbf{V} \cdot \mathbf{E}_3) + (EJ_B \rho dk - GJ_T k d\rho) (\mathbf{N} \cdot \mathbf{E}_3)] n_i \\ &= \left[ -EA \sin^3 \alpha_i - \frac{EJ_B}{r_i} \cos^4 \alpha_i \sin^3 \alpha_i - \frac{GJ_T}{r_i^2} \cos^6 \alpha_i \sin \alpha_i \right] n_i \epsilon_z \\ &+ \left[ -EA \cos^2 \alpha_i \sin \alpha_i + \frac{EJ_B}{r_i^2} \cos^4 \alpha_i \sin^3 \alpha_i + \frac{GJ_T}{r_i^2} \cos^6 \alpha_i \sin \alpha_i \right] n_i \epsilon_r \end{aligned}$$

$$+ \left[ -EA r_i \cos \alpha_i \sin^2 \alpha_i + \frac{EJ_B}{r_i} \cos^3 \alpha_i \sin^2 \alpha_i (2 - \cos^2 \alpha_i) - \frac{GJ_T}{r_i} \cos^3 \alpha_i \sin^4 \alpha_i \right] n_i r \dots (21)$$

モーメント  $M_z$  は

$$A_1 = \cos \theta_i E_1 + \sin \theta_i E_2$$

を定義すると

$$\begin{aligned} M_z &= [(r_i A_1 \times F) \cdot E_3 - EJ_B \Delta k (N \cdot E_3) - GJ_T \Delta \rho (V \cdot E_3)] n_i \\ &= [-EA \varepsilon_\alpha r_i \cos \alpha_i + EJ_B \Delta k (-\rho r_i \sin \alpha_i - \cos \alpha_i) + GJ_T \Delta \rho (k r_i \sin \alpha_i - \sin \alpha_i)] n_i \\ &= \left[ -EA r_i \cos \alpha_i \sin^2 \alpha_i + \frac{EJ_B}{r_i} \cos^3 \alpha_i \sin^2 \alpha_i (2 - \cos^2 \alpha_i) - \frac{GJ_T}{r_i} \cos^3 \alpha_i \sin^4 \alpha_i \right] n_i \varepsilon_z \\ &+ \left[ -EA r_i \cos^3 \alpha_i - \frac{EJ_B}{r_i} \cos^3 \alpha_i \sin^2 \alpha_i (2 - \cos^2 \alpha_i) + \frac{GJ_T}{r_i} \cos^3 \alpha_i \sin^4 \alpha_i \right] n_i \varepsilon_r \\ &+ [-EA r_i^2 \cos^2 \alpha_i \sin \alpha_i - EJ_B \cos^2 \alpha_i \sin \alpha_i (2 - \cos^2 \alpha_i)^2 - GJ_T \sin^7 \alpha_i] n_i r \dots \dots \dots (22) \end{aligned}$$

§4. 数値計算

式 (21), 式 (22) に本実験に使用したスパイラル・ロープの諸常数 (表-1 参照) を使つて計算すると表-4 のようにして  $P_z, M_z$  に対して次式が求まる。

表-4

	①		×①	
$P_z^*$	$-\Sigma (n_i A_i \sin^3 \alpha_i)$	=	-17.5203	$E \varepsilon_z$
	$-\Sigma (n_i / r_i^2) \cos^4 \alpha_i \sin^3 \alpha_i \times J_{Bi}$	=	-0.0007	$E \varepsilon_z$
	$-\Sigma (n_i / r_i^2) \cos^6 \alpha_i \sin \alpha_i \times J_{Ti}$	=	-0.0001	$G \varepsilon_z$
	$-\Sigma (n_i A_i \cos^2 \alpha_i \sin \alpha_i)$	=	-1.4147	$E \varepsilon_r$
	$+\Sigma (n_i / r_i^2) \cos^4 \alpha_i \sin^3 \alpha_i \times J_{Bi}$	=	+0.0007	$E \varepsilon_r$
	$+\Sigma (n_i / r_i^2) \cos^6 \alpha_i \sin \alpha_i \times J_{Ti}$	=	+0.0001	$G \varepsilon_r$
	$-\Sigma (r_i n_i A_i \cos \alpha_i \sin^2 \alpha_i)$	=	-1.3579	$E r$
	$+\Sigma (n_i / r_i) \cos^3 \alpha_i \sin^2 \alpha_i (2 - \cos^2 \alpha_i) \times J_{Bi}$	=	-0.0018	$E r$
	$-\Sigma (n_i / r_i) \cos^3 \alpha_i \sin^4 \alpha_i \times J_{Ti}$	=	+0.0018	$G r$
$M_z^*$	$-\Sigma (n_i r_i A_i \cos \alpha_i \sin^2 \alpha_i)$	=	-1.3579	$E \varepsilon_z$
	$+\Sigma (n_i / r_i) \cos^3 \alpha_i \sin^2 \alpha_i (2 - \cos^2 \alpha_i) \times J_{Bi}$	=	-0.0018	$E \varepsilon_z$
	$-\Sigma (n_i / r_i) \cos^3 \alpha_i \sin^4 \alpha_i \times J_{Ti}$	=	+0.0018	$G \varepsilon_z$
	$-\Sigma (n_i r_i A_i) \cos^3 \alpha_i$	=	-0.1108	$E \varepsilon_r$
	$-\Sigma (n_i / r_i) \cos^3 \alpha_i \sin^2 \alpha_i (2 - \cos^2 \alpha_i) \times J_{Bi}$	=	+0.0018	$E \varepsilon_r$
	$+\Sigma (n_i / r_i) \cos^3 \alpha_i \sin^4 \alpha_i \times J_{Ti}$	=	-0.0018	$G \varepsilon_r$
	$-\Sigma (n_i r_i^2 A_i) \cos^2 \alpha_i \sin \alpha_i$	=	-5.9385	$E r$
	$-\Sigma (n_i) \cos^2 \alpha_i \sin \alpha_i (2 - \cos^2 \alpha_i)^2 \times J_{Bi}$	=	-0.0089	$E r$
	$-\Sigma (n_i) \sin^7 \alpha_i \times J_{Ti}$	=	-0.3850	$G r$

\*  $P_z$  はケーブルに引張力が作用する時に符号は - となる。 $M_z$  は右廻りにモーメントが作用するものを +。

$$P_z = -(17.5210 \varepsilon_z + 1.4140 \varepsilon_r + 1.3589 r) E \dots \dots \dots (23)$$

$$M_z = -(1.3589 \varepsilon_z + 0.1098 \varepsilon_r + 6.1137 r) E \dots \dots \dots (24)$$

ただし、ロープに引張力が作用する時  $P_z$  は負であり、モーメントは右廻りを正とする。

A : スパイラル・ロープのヤング係数

スパイラル・ロープのヤング係数として  $E_w$  を次式で定義する。

$$E_w = \frac{P_z}{\varepsilon_z \cdot \Sigma A}$$

そうすると、 $r=0$  の場合に対して  $E_w$  の式は

$$\begin{aligned} E_w &= \frac{17.5210 + 1.4140 \varepsilon_r / \varepsilon_z}{19.685} E \\ &= \left( 0.8901 + 0.07183 \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_z} \right) E \dots \dots \dots (25) \end{aligned}$$

$\varepsilon_r / \varepsilon_z$  はスパイラル・ロープの見かけ上のポアソン比であつて、ロープにプリテンションをかけるならばその前後でも異なり、また新しいロープと古いロープで異なる。始めのうちは割合大きな数であるが、次第に小さくなると思われる。しかし鋼のポアソン比である 0.3 より小さくなることはあり得ない。

素線のヤング係数を  $1.8 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  として計算すると  $\varepsilon_r / \varepsilon_z$  の各値に対して表-5 の結果が得られる。Bach 係数 (ロープとしてのヤング係数を  $E_w$ , 素線のヤング係数と  $E$  とすると  $E_w / E$  で定義する) も並記

してあるが、ストランドッド・ロープに対して、Howe の与えた実験式より求めた計算値は 0.4~0.48 であり、本実験に用いたスパイラル・ロープのそれがおおむね 0.8 位であることと比較すると、スパイラル・ロープの方が素線を効率よく使っていると考えられる。

B: トルク

式 (24) より  $r=0$  の場合の  $M_z$  を求めると

$$\frac{M_z}{P_z} = -(0.06903 - 0.00558\nu) \frac{E}{E_w} \dots (26)$$

ただし、 $\nu = -\epsilon_r/\epsilon_z$  である。この式の結果を表-6 に示す。

いうまでもなく、表-6 の数値は、ロープの両端を回転に対して拘束して引張つた場合に、内力として生ずるねじりモーメント - トルク を示す。

C: より戻り角

式 (24) において  $M_z=0$  とすると、ロープをより戻りに対して自由な状態とした場合のより戻り角度を示す式が得られる。

$$r = \frac{-1.3589 + 0.1098\nu}{6.1137} \frac{P_z}{\Sigma A \cdot E_w}$$

ゆえに

$$\left. \begin{aligned} \frac{r}{P_z} &= -7.042 \times 10^{-6} \text{ rad/t/cm} \\ &= -4.035 \times 10^{-2} \text{ 度/t/m} \end{aligned} \right\} \dots (27)$$

表-5  $E_w$  の計算値

$\nu = -(\epsilon_r/\epsilon_z)$	Bach 係数*	$E_w$
0	0.8901	$1.602 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
0.3	0.8686	$1.563 \times 10^6 \text{ "}$
0.4	0.8614	$1.551 \times 10^6 \text{ "}$
0.5	0.8542	$1.538 \times 10^6 \text{ "}$
0.6	0.8470	$1.525 \times 10^6 \text{ "}$
0.8	0.8326	$1.499 \times 10^6 \text{ "}$
1.0	0.8183	$1.473 \times 10^6 \text{ "}$

\* Bach 係数 =  $\frac{\text{ロープのヤング係数}}{\text{素線のヤング係数}}$

表-6 トルクの計算値

$\nu$	$M_z/P_z$ (kg-cm/t)
0	-0.775
0.4	-0.775
0.6	-0.775
0.8	-0.775
1.0	-0.775

#### IV. 考 察

##### §1. ヤング係数

スパイラル・ロープのヤング係数は素線のヤング係数、セン断弾性係数に支配され、さらにピッチ角、ロープ径の細りにも関係することは式 (25) により明らかである。表-3 によれば、初回の載荷と除荷に対するヤング係数は後者の場合が大である。他の実験の場合でも同様のことが言える。これは荷重の繰返しにより漸次やりが加かつて行くことを示している。式(25)によれば、これは  $|\epsilon_r/\epsilon_z|$  が減少することを示しているのであり、その数の性質上一定値に収敛することが期待される。 $|\epsilon_r/\epsilon_z|$  はポアソン比にあたりスパイラル・ロープでは1より大となることも考えられるが、これは純弾性変形の外に構造的な変形があるからである。しかし前述のように、荷重の繰返しによつて一定値すなわち 0.3 に向つて収斂して行く。実験に使用したロープでは  $\nu = -\epsilon_r/\epsilon_z = 0.6$  の場合 Bach 係数は 0.85 で、ヤング係数は素線のそれに対して 15%減となる。 $\nu=0.3$  に対するヤング係数は、式(25)より  $1.563 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  となる。素線のヤング係数が  $1.8 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  である限り、この実験に使用したロープのヤング係数に、それより大きい数を望むことはできない。実際に使用するロープでは適当なプリテンションを行つて、おおむね  $1.54 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  位の値となると考えるのが妥当ではないかと考えられる。

実験によつて得られたヤング係数は  $\nu=0.91$  に対し  $1.44 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\nu=0.69$  に対し  $1.52 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  であつて、おのおのの  $\nu$  に対する計算値はそれぞれ  $1.48 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、 $1.51 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  となり測定値は計算値の 0.97倍および 1.01 倍となつて計算値とよくあうことが確かめられた。

吊橋を設計する場合、鋼とケーブルのヤング係数の比が問題になるが、この実験に使つた程度のロープで適当なプリテンションを実施すれば、その値として 2.1/1.5=1.4 位が採用できるのであつて、従来 stranded rope に対して慣用されていた約 2.0 という値は spiral rope に対してはやや大にすぎる感じがする。

##### §2. 荷重と伸び

自記された記録、あるいは Catheto meter による記録からしてどのような場合でも荷重が 25 t を越えるで一応直線関係にあるとみても差支えないようであるが、それ以下では、荷重履歴によつて一言では言い切れない。しかし初回より次回へと回を重ねるとともに、直線関係にある部分が低い荷重から始まることは認めうる。また初回の荷重に小さな荷重を使つた場合の方が、大きな荷重を使つた場合より、次回の直線関係と見なすことができる部分が荷重の大きい所から始まる。すなわち 60 t を 2 回かけた場合 3 回目に対する曲線はまだ構造的な伸びが存在している。最初に 150 t かけると、2 回目からほとんど直線的に始まる。初回到 100 t かけても次回に



は若干構造的伸びが残るが 60 t かけた場合より少ないと思える。ある程度より戻りが生じていても、その前にかなり多くの荷重履歴があると、60 t 位の载荷によつて、そのより戻りを取除くことができるが、さらに 150 t かけるとほとんど荷重 0 から直線関係にあると見ることができる。

### §3. プリテンション

特殊な加工を受けない新しいロープを使う場合 プリテンションを行い、その構造的な伸びを除去して使用することが望ましい。ところでロープには構造的な伸びが存在しているが、ある程度荷重を加えることにより、それらを除去することができる。またより高い一定なヤング係数を持たすことができるが、ロープをその状態にするのがプリテンションの目的と言われてきた。しかし、それらの理論的な説明は何も与えられなかつた。いま式(24)を想起するならば、ロープのヤング係数は  $\nu = -\epsilon_r/\epsilon_z$  の一次関数であることがわかる。 $\nu$  がすべての荷重範囲で不変であれば、ヤング係数も不変である。ところがロープのような構造の場合、多孔質の物質が応力によつて密度を変えるのと似たように、引張りによつてよりがさらにかかるとなる。このため、 $\nu$  が変わり、ヤング係数が変わり、応力-変形曲線は直線とはならない。しかし  $\nu$  は荷重の繰返しによつてある一定値に収斂することが期待できるのであるが、そうすれば  $E_w$  も一定値となる。これがプリテンションの効果と考えられる。要するにプリテンションとは、引張力を加えることによつて  $\nu$  を一定値に収斂させることであるというる。

さてプリテンション加工はどの程度の荷重で、どのように行うかについては、従来ほとんどはつきりした方針が定まっていなかつたようである。図-9 によると 100 t まで荷重をかけて除荷し、次回に 50 t で 2 時間放置して伸びが生じなかつたことは前述の通りである。また 図-13 が示すように、170 m のロープに 80 t まで 2 回繰返して载荷し、さらに 60 t で 2 時間放置した場合、図-14 に示すような伸びがでた。そして §1. で述べたように、この程度の荷重で得られる  $\epsilon_r/\epsilon_z$  は大体一定となつて、プリテンション効果もある程度期待できる。そこで、もつとプリテンションの効果を期待するには長期時間の载荷に頼らねばならない。しかし、2 時間では、伸びはとまらないから、2 時間で、長期荷重による、プリテンションの効果期待するには不足である。

さてプリテンションとしては可能であれば素線の弾性限界付近までの荷重を用いるのが望ましい。そうすれば、少くともその荷重範囲では応力と変形は直線関係にあることが期待できる。もしも、これ程の荷重が得られなければ、可能な範囲の荷重を繰返すか、さらに一定時間载荷状態を継続することである。しかし、载荷時間の決定はかなり、慎重検討を要する。実験結果からわかるようにある程度の時間では、プリテンションの効果期待することはできない場合もある。

結局、プリテンションとしては、実験の結果から、荷重は使用荷重の 2 倍。そして、さらに十分プリテンションの効果期待する程の载荷継続を行う。実験に用いたスパイラル・ロープのプリテンションとしては、150 t 位の荷重で繰返し荷重の後にさらに 2 時間位の载荷継続時間が必要であると思われる。

## V. む す び

以上の実験の結果を要約すると次の二項になる。

### (1) ストランデッド・ロープとスパイラル・ロープの比較

いままでに発表されている実験結果と、著者達が行つたそれとを比べると、ストランデッド・ロープに対し、後者の方がはるかに高い Bach 係数が得られる。

吊橋設計に際して  $E/E_w = 1.4$  位にとれる。そのため補剛桁の応力には、スパイラル・ロープの方が有利である。構造が、スパイラル・ロープの方が単純であるので、プリテンションの効果が比較的得易い。

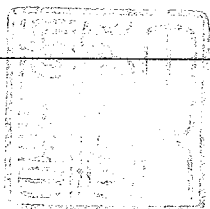
### (2) プリテンション

プリテンションとは、使用に先立ち引張力を加えてロープの  $\nu$  を一定にすることである。従つて、素線の弾性限界付近まで荷重をかけると、プリテンションの効果はかなり確実に期待できる。

本実験に使用したロープでは 150 t 位までのプリテンション荷重が必要である。

## 参 考 文 献

- 1) 寺沢寛一：数学概論
- 2) Weatherburn: Differential Geometry
- 3) 平井 敦：鋼橋(Ⅲ)



昭和 33 年 12 月 20 日 印刷

昭和 33 年 12 月 25 日 発行

土木学会論文集第 59 号・別冊(3-3)

定価 60 円(〒 10 円)

著 者 東京都文京区本富士町 東京大学 田中五郎, 西脇威夫, 島田静雄  
編 集 者 東京都新宿区四谷一丁目 社団法人 土 木 学 会 国分正胤  
印 刷 者 東京都港区赤坂溜池5 株式会社 技 報 堂 大沼正吉

発 行 所 社 団 法 人 土 木 学 会

東京都新宿区四谷一丁目 電話(35) 5130・5138・5139 振替東京 16828 番