

「斜張橋に用いたプレハブ平行線ケーブル に関する実験—石狩河口橋—」

正員 小西輝久*

正員 ○高橋陽一**

正員 新山惇***

ま え が き

吊橋や斜張橋の主ケーブルには、従来エアスピニングの平行線ケーブルやロックドコイルロープが用いられているが、最近これに代ってプレハブ平行線ケーブル(Prefabricated Parallel Wire Strand PPWS)を使用する例が多くなってきた。大橋梁への実施例としては、米国ロードアイランド州の New Port 橋(中央径間488m吊橋)、豊里大橋(215m斜張橋)、石狩河口橋(160m、斜張橋)、上吉野川橋(250m吊橋)、関門橋(712m吊橋)荒川大橋(160m斜張橋)等がある。

プレハブ平行線ケーブル(以下PPWSと略記)は、エアスピニング工法にくらべて現場でケーブルを構成するのが容易であること、ロックドコイルロープにくらべて単位面積当りの強度が大きく、より減りがないために見かけの弾性係数が大きくとれること等が特徴である。

石狩河口橋では道内ではじめてこのPPWSを採用したが、従来のPPWSに関する実験研究は必ずしも寒冷地を意図したものではないので、ここでは主として低温時におけるPPWSの性質についての実験結果について詳述する。

1. 本橋主径間部の構造概要

本橋の主径間部の構造諸元は次のとおりである。

型 式 : 3角主塔をもつ3径間連続斜張橋

支 間 割 : 64,000+160,000+64,000mm

幅 員 : 10,000mm(車道8,000,歩道2,000)

ケ タ 高 : 2,000mm

補剛ケタ : 扁平1箱ケタ

Web間隔 : 11.350mm

2. 主ケーブルの設計

主ケーブルにはPPWSを採用したが、各ケーブル共素

線127本構成のストランド4本(素線508本)を束ねたものであり各ケーブルにかかる張力は表—1のとおりである。

このストランドの保証破断力は391.0tonであり、設計上の弾性係数は $E=19.5 \times 10^6 \text{ kg/mm}^2$ である。

またストランドを構成する素線の製作仕様は表—2に示すとおりである。なお表—2には参考値として若戸大橋の主ケーブル(スパイラルロープ)の場合を併記してある。

3. 本橋用PPWSに関する試験結果と考察

3.1 素線の引張試験

先ず、ストランドを構成する素線(φ5mm、標点長250mm)の引張試験を320本の試料について行なった。

素線の弾性係数測定の一例を図—2に示す。

この結果、素線の0.7%耐力は126~133kg/mm²、弾性係数は $E=19,970 \sim 20,530 \text{ kg/mm}^2$ であった。またのび率は5.25~6.00%であり、弾性係数、のび率とも構造用鋼材にくらべて小さいが、JIS G3502規定のピアノ線材とはほぼ同一の性質である。

3.2 ストランドの引張試験

次にPPWS127(素線127本構成)の常温における引張試験と、-30℃における引張試験を行ない両者の比較をした。常温におけるストランドの破断荷重は $P=438,0 \text{ t}$ 、446,0 t(>391,0 t)、弾性係数 $E=19,800 \text{ kg/mm}^2$ 、20,000kg/mm²(>19,500kg/mm²)であった。

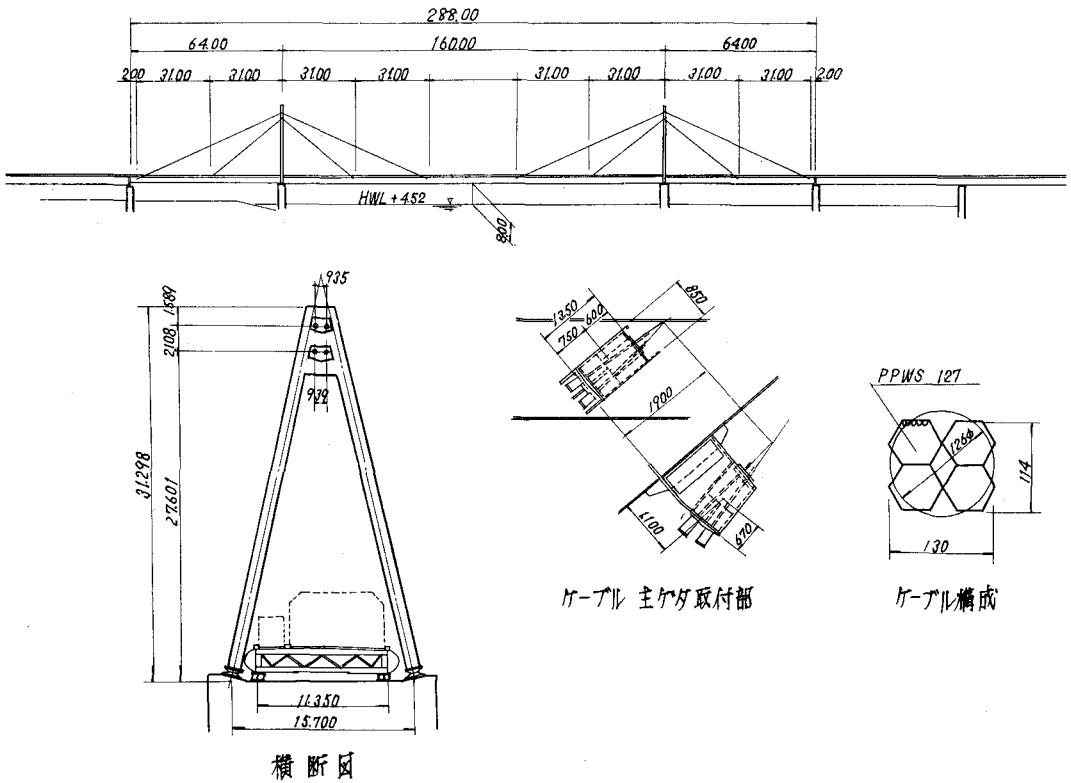
低温時のストランドの引張試験は、のび測定部1.50mを図—3に示すような冷却装置の中に入れ、工業用アルコールとドライアイスによって温度を調節し得るようにし保証破断力391.0 tまでの引張試験を行なった。(写真—1)

のびの測定は試験片から約2mはなれた位置からカセットメーター(精度1/100mm)で20 t毎にのびを読みとった。

* 北海道開発局 道路建設課

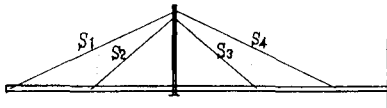
** 同 札幌開発建設部 道路一課

*** 同 同 石狩河口橋事業所



図一 石狩河口橋主径間部

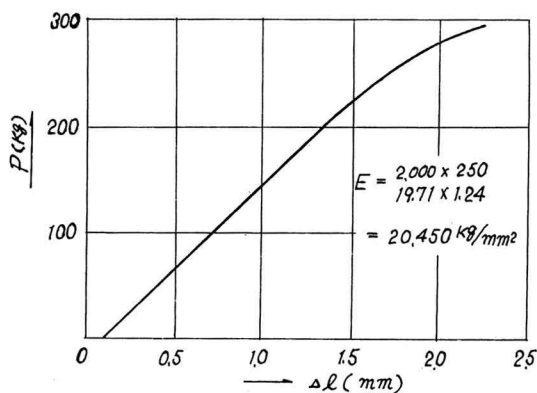
表一 1 cable 当り作用力



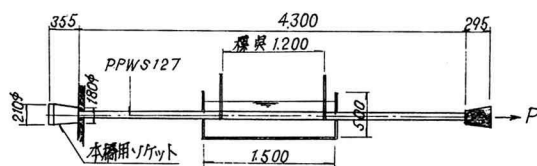
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
死荷重	212.4	167.8	191.5	192.4
雪荷重	36.1	28.6	32.5	32.8
プレストレス	37.4	2.3	2.2	37.7
持続荷重計	285.9	198.7	226.2	262.9
活荷重	156.9	150.2	115.6	114.1
合計	442.8	348.9	341.8	377.0
ケーブル構成	4x PPWS127	d0	d0	d0
安全率	3.52	4.48	4.49	4.15

表二 石狩河口橋, 若戸橋, 素線比較

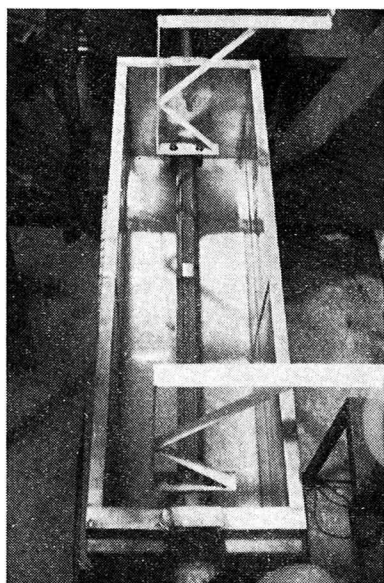
項目	石狩河口橋	若戸橋
鋼材	化学成分 % JISG 3502 BWRS 2 B	鋼種 KPR 80 C
線径	JISG 3502	準 JISG 3502
線径公差	11.0 ± 0.4 mm	10.0 ± 0.3 mm
線径許容差	5.00 ± 0.06 mm	d0 4.98 ± 0.02
引張強さ	165 kg/mm ² 以上	160 kg/mm ² 以上
0.7% 耐力	122 " "	
弾性係数	20000 kg/mm ² 以上	20000 kg/mm ² 以上
ねじり回数	100d/7 以上	18 以上
亜鉛付着量	300 g/m ² 以上	300 g/m ²
延性	3d 8 以上	
脱酸処理	4 以上	5 以上
伸び	4.0% 以上 (GL 250)	4%
グリッドキット	2000 mm 以上	
グリッドアップ	450 mm 以下	
表面処理	クロマト処理	煮アノニ浦
ストランド	切断荷重 PPWS 127 391t 以上	φ61 310t 以上
弾性係数	19500 kg/mm ² 以上	16000 kg/mm ² 以上
間隔誤差	+10 - 0 mm	700 ± 20 mm



図—2 素線弾性係数測定



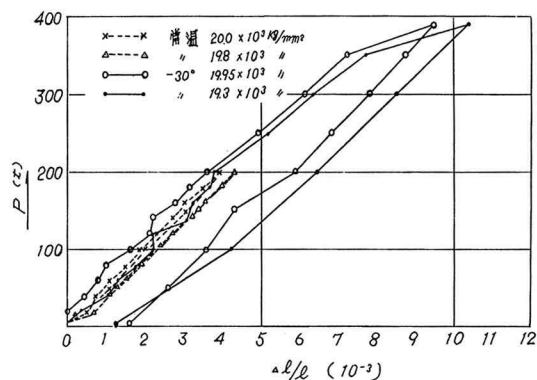
図—3 スtrand低温引張試験装置



写真—1 スtrand低温引張試験

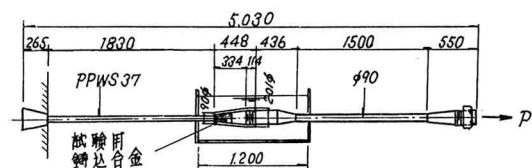
試験中の温度変化は $-30^{\circ}\text{C} \sim 32^{\circ}\text{C}$ であり、この試験を2ヶの試料について行なったが、保証破断力内では素線に何らの異常も認められなく弾性係数も $19,300$ と $19,950 \text{ kg/mm}^2$ (常温における同一試料で $19,800$ と $20,000 \text{ kg/mm}^2$) であり低温時にはいく分 E が減少する傾向がみられたが、ほとんど有意差は認められない。

図—4 は常温及び低温におけるPPWS 127 の引張試験結果を示す。

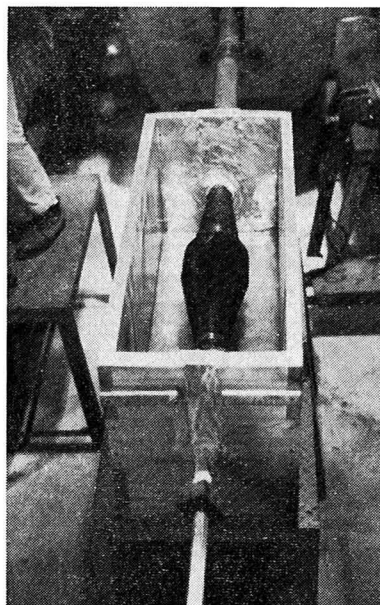


図—4 常温、低温ストランド E 比較

また、上の試験でストランドの弾性係数は素線とくらべると明らかに低下する(約1%)ことが認められる。これは素線の応力分布の不均等、ソケットング金属のクリープ等が影響しているものと思われる。この傾向はケーブルにおいてさらに低下することが予想されるが本橋ではすべてのストランドについて、ソケットング金属にプレロードをかけることによりクリープの影響を減少させ、現場架設の段階で間接的に見かけの E を測定して張力を補正することとしている。



図—5 ソケット部低温試験装置



写真—2 ソケット部低温引張試験

3.3 ソケット鋳込み境界部の引張試験

一般にピアノ線は400℃以上の高温に長時間さらされると引張強度が低下することが知られている。(Jänicheの実験)本橋用のソケットティングメタル(2%含銅亜鉛)は458~462℃(仕様は460±5℃)で鋳込まれたので、ストランドとソケット部との境界の素線の性質が低下することが予想されるのでこの部分の常温および-30℃における引張荷重下の状態を観察することとした。試料は装置の関係で図-5に示すようにPPWS37用のものを作成しこれに保証破断力の114tまで載荷した。写真-2は試験中の状況を示す。

この結果、常温、低温いずれの場合も特異な現象が認められず設計荷重の範囲では十分に安全であると判断した。

3.4 ソケットおよびストランドのひずみ分布測定

PPWSのソケットおよびケーブルのひずみ分布を測定する目的で図-6に示すような本橋用の実寸法の供試体で図に示すヶ所における周方向および軸方向(ストランドは軸方向のみ)のひずみを測定した。荷重は5tから20tおきに200tまで載荷した。

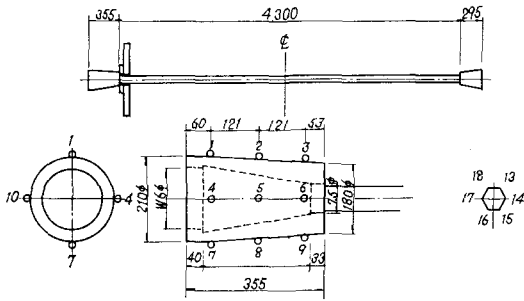


図-6 ソケット、ストランドのひずみ測定カ所

ソケット各位置における軸線方向のひずみ変化を図-7、図-8に、またソケットの周方向のひずみ変化を図-9に示す。図-10はストランドのひずみ変化を示す。とくにソケットの端部に近い位置における軸方向のひずみ分布は図-11のようになる。

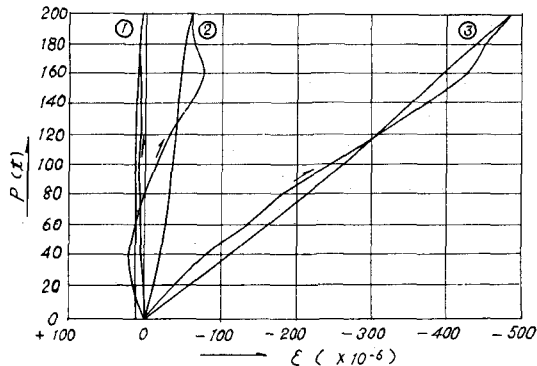


図-7 ソケット部ひずみ分布(軸方向)(1)

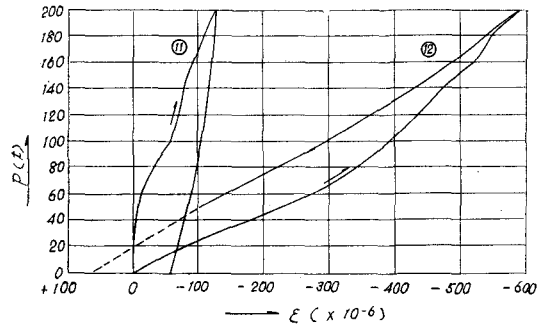


図-8 ソケット部ひずみ分布(軸方向)(2)

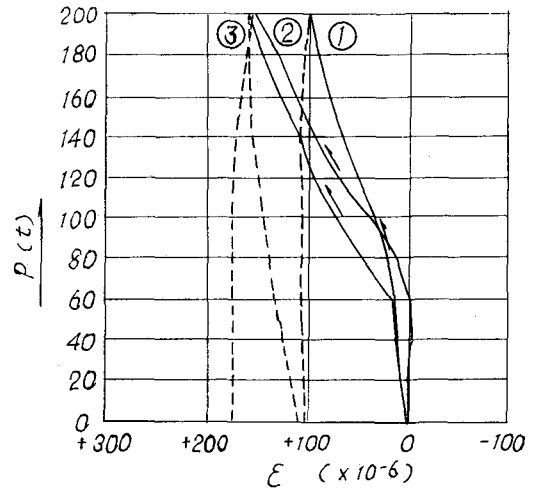


図-9 ソケット部ひずみ分布(周方向)

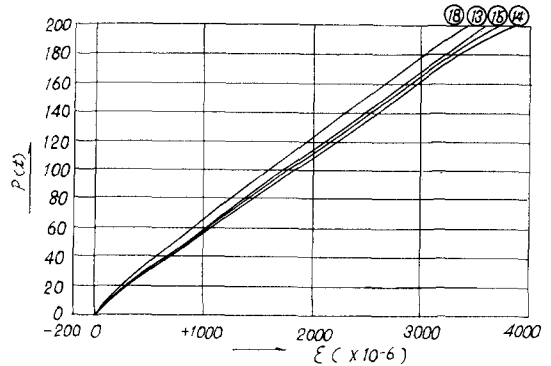
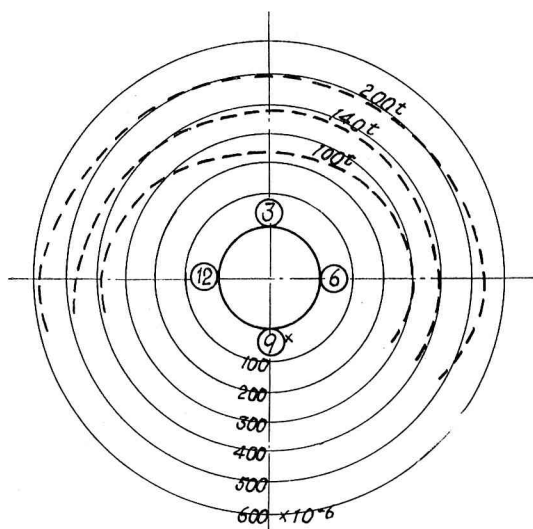


図-10 素線ひずみ分布



図—11 ソケットひずみ分布(軸方向)

ソケットの軸線方向のひずみ分布は当然のことであるがケーブル側に圧縮応力が、後方では引張応力が働いており、周方向では hoop tension の影響によって張力が観測されている。

ソケットの長さ L_0 は次のようにして決定される。

まず、PPWSの素線とコースメタルの最小附着長 l_1 は

$$l_1 = \frac{W}{\pi d B} S_f \quad (1)$$

ここに W : 素線 1 本当り設計荷重 (kg), d : 素線径 (mm), B : コースメタルの附着力 (kg/mm^2), S_f : 安全率である。 B の値としては、若戸橋における実験結果 2.1 ~ 2.8 kg/mm^2 でありここでは 2.1 kg/mm^2 に対して安全率 2.5 をとり $B = 0.84 \text{ kg}/\text{mm}^2$ とした。

$$\therefore l_1 = \frac{130,000/127}{3.14 \times 5 \times 0.84} \times 3 = 232 \text{ mm}$$

これに余長をとり $l_1 = 315 \text{ mm}$ とした。

一方ソケット内面に作用する内圧を $p_n \text{ kg}/\text{mm}^2$ とすれば、

$$p_n = \frac{\cos \varphi \cdot W}{A \sin (\varphi + \theta)} \quad (2)$$

ここに φ : ソケット内面とコースメタル間のマサツ角 ($\varphi = \tan^{-1} 0.2$ とする), W : 設計荷重 (kg), A : コースメタル附着面積 (mm^2), θ : ソケット内面のテーパ角 (8°),

$$\therefore p_n = \frac{0.9805 \times 130,000}{102381 \times 0.3308} = 3.8 \text{ kg}/\text{mm}^2$$

この内圧 p_n をうける時ソケットの最大フープテンション σ_{max} は次式のようにになる。

$$\sigma_{max} = p_n \cdot \frac{D_{1m}^2 + D_{2m}^2}{D_{1m}^2 - D_{2m}^2} \quad (3)$$

D_{1m} : ソケットの平均外径 (mm)

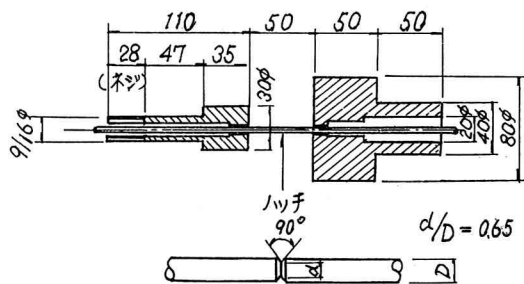
D_{2m} : " 平均内径 (mm)

$$\therefore \sigma_{max} = 3.8 \frac{195^2 + 114.5^2}{195^2 - 114.5^2} = 7.8 \text{ kg}/\text{mm}^2 < \text{許容引張応力 } 13 \text{ kg}/\text{mm}^2$$

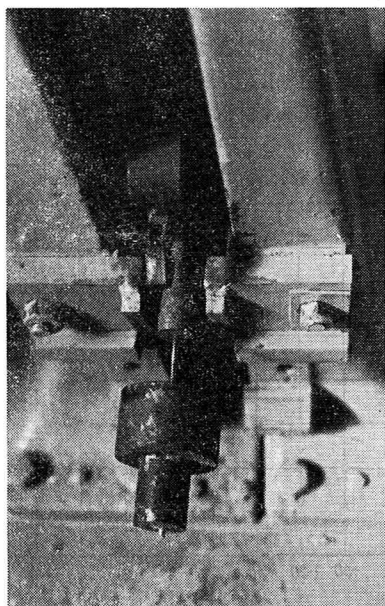
3.5 素線の耐衝撃性試験

低温下における吊橋用ケーブルの素線の耐衝撃性を測定した資料としては Nicols (英) の実験があるのみで我が国ではまだその例がない。

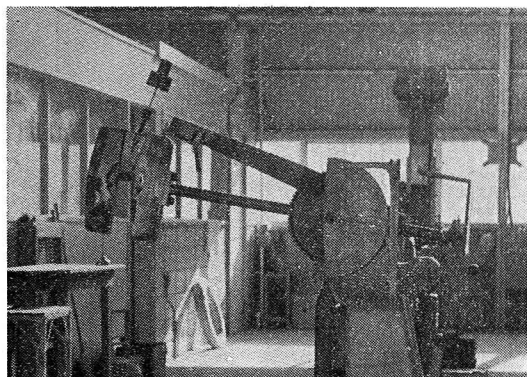
しかしとくにくり返し荷重を直接うける斜張橋の主索では低温下における微小なノッチ部における耐衝撃性の低下が予想される。このため本橋では、素線 $\phi 5 \text{ mm}$ に深さ 0.875 mm のノッチをつけ素線の軸方向に impact を与える装置を試作し $+20^\circ$, -30° , -50° , -60°C における吸収エネルギーを測定した。図—12 に試験片の寸法を、写真—3, 4 に試験の状況を示す。



図—12 素線衝撃試験片 TP



写真—3 素線衝撃試験片



写真—4 素線衝撃試験

附属金具の付加重量により吸収エネルギーの評価は次式によって換算した。

$$E = WR(\cos \beta - \cos \alpha) + wr\{\cos(\beta - \gamma) - \cos(\alpha + \gamma)\} \quad (4)$$

$$e = \frac{E}{F'} = \frac{4E}{\pi d^2} \text{ (kg} \cdot \text{m/mm}^2\text{)} \quad (5)$$

ここに

W : シャルピー試験機固有の重錘重量 31.31kg

R : " " 重心までの距離 0.5778m

α : 打撃エネルギーを与える為の重錘張り角 100°

β : 試料破断後の振り上げ角

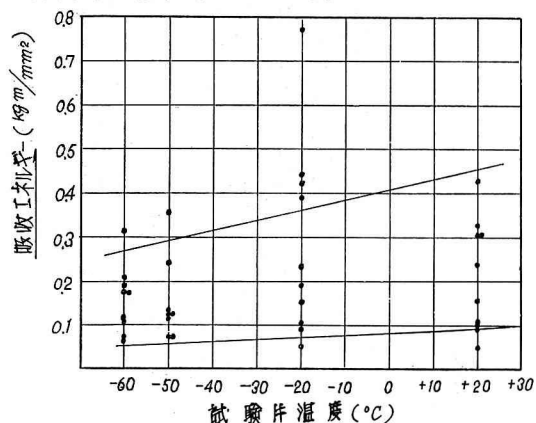
$$\therefore \left| \frac{dE}{E} \right| = \frac{|\sin \beta - \left(\frac{wr}{WR}\right)\sin(\beta - \alpha)| \cdot |d\beta| + |\sin \alpha - \left(\frac{wr}{WR}\right)\sin(\alpha + \gamma)| \cdot |d\alpha|}{|(\cos \beta - \cos \alpha) - \left(\frac{wr}{WR}\right)\{\cos(\beta - \gamma) - \cos(\alpha + \gamma)\}|} \quad (7)$$

いま $\alpha = 100^\circ$, $\beta = 95^\circ$ とすれば

$$\frac{dE}{E} = 11.6 |d\beta| + 11.5 |d\alpha| = 23.1 |d\beta| \quad (8)$$

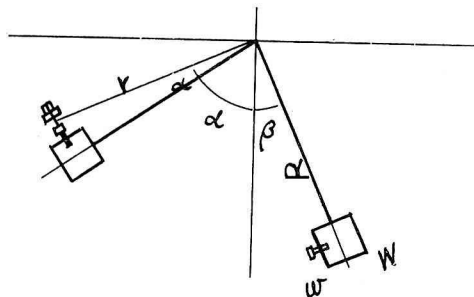
dE/E の誤差を10%以内にするとき $|dE/E| \leq 0.1$ において $|d\beta| \leq 0.00433$ となり β , α の誤差を $25'$ 以下の精度でよみとらなければならないので注意深く角度を読みとった。

衝撃試験の結果を図—14に示す。



図—14 素線衝撃試験結果

w : 試料取付けのための重心までの距離 (各個測定約 0.290kg)
 r : 試料取付金具の重心までの距離 0.750m
 γ : 重錘と附属金具との重心のズレ角 $1^\circ 40'$



図—13

試料の表面温度は試料取付中に上昇するので、予め冷却槽からの試料の取出しからセットまでの時間中の表面温度上昇度を測定して表面温度補正曲線を作成しておいて、試験時に所定の表面温度になるようにした。

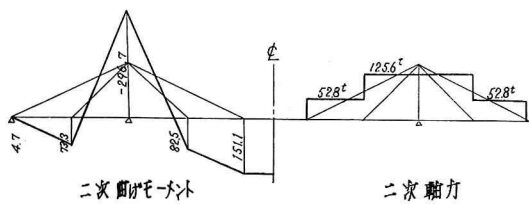
一方上に示すような装置で試験を行なう場合角度目盛りのよみとり誤差による吸収エネルギーの誤差を求めると次のようになる。

$$dE = \left(\frac{\partial E}{\partial \beta}\right)d\beta + \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha}\right)d\alpha \quad (6)$$

試験の結果は各温度毎に非常にバラツキが大きいが、これは鑄込み部の附属の良否によってエネルギーの吸収が異なるためと思われる。また、各温度間の有意差はほとんど認められないが、 -60°C になると吸収エネルギーが減少する傾向にある。

4. 鑄込み合金のプレローディング

ソケット部の鑄込みメタルは $zn-cu 2\%$ の合金でありこの合金とソケット内面のマサツと支圧によってケーブルにかかる荷重が支持される。このマサツ力は持続荷重によってクリープすることが考えられこれによって主ゲタに2次応力が発生することになる。例えば1ケーブル当り10mmづつクリープした時の主ゲタ断面力の場合の増加分を図—15に示す。



図—15 ケーブルクリープによる2次断面力

このため本橋ではソケット鋳込み金属の押し出し試験を行なった。測定の結果を図-16に示す。

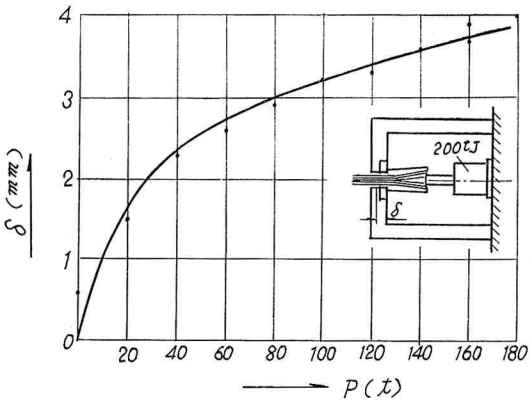


図-16 ソケット金属プレローディング試験

この試験の結果より本橋では死荷重による持続荷重（1ストランド当り約80t）又は押しだし量3mm程度のプレローディングを与えクリープの影響を少なくするようにした。

5. ケーブル取付部の構造

ケーブルと主ゲタおよび主塔への取付けは両端共固定の状態にし、2次応力の増加と製作上の容易さを考慮して主塔頂部で連続する形成をさせた。両者の取付部の構造を写真-5、6に示す。

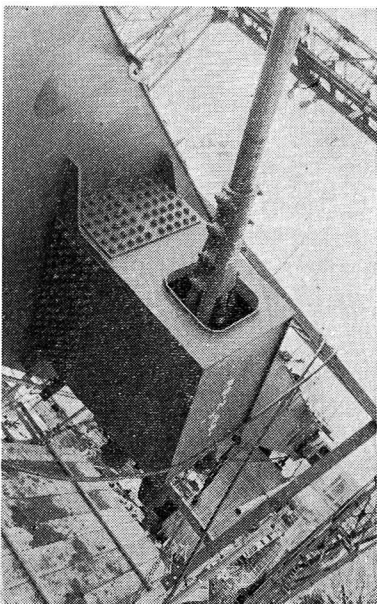


写真-5 ケーブルと主桁の取合

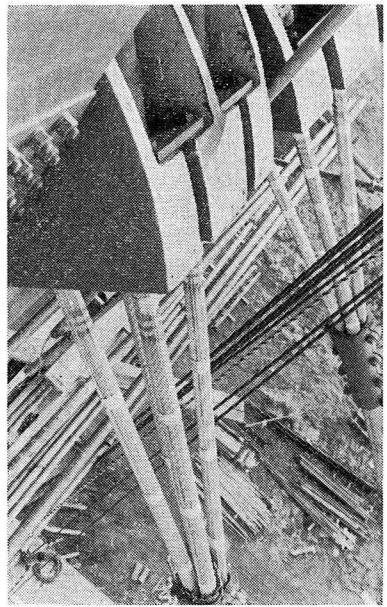


写真-6 ケーブルとタワーサドルの取合

ストランドはリールから外されると同時に橋面上に展開され、4本ひとまとめにして、ケーブルの形状を予め整えておき、ケーブルバンドで締付けてから所定の位置にセットされた。ストランドの展開、架設は極めて順調に行なわれ第1次調整も含めて架設に要した日数は1ケーブル当り約2日間であった。

6. ケーブルの防錆

大口径ケーブルの防錆には wire wrapping を行なうのが一般的であるが、本橋のように小径（φ126mm）の場合には plastic wrapping が採用されることが多い。本橋ではケーブル架設から防錆処置まで約12ヶ月かかるので素線に特にクロメート処理を行ない、図-17に示すような組成の plastic wrapping を行なうこととしている。

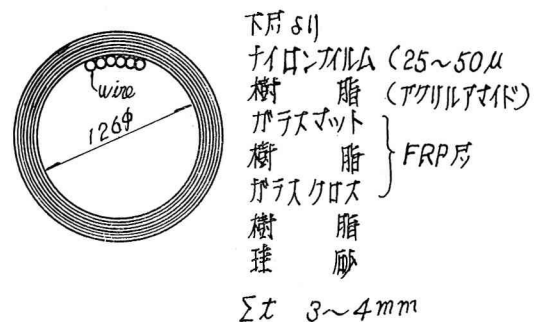


図-17 プラスチックラッピング

む す び

以上石狩河口橋に採用したプレハブ平行線ストランドの素線の強度、低温時の耐衝撃性、ストランドの低温時と常温時の性質の比較実験、設計上の考え方等についてのべたが、我々の試験の範囲ではプレハブ平行線ストランドは -30°C （我が国における実用範囲）以内では常温におけるとほとんどその性質に差はなく安定した材料であると判断される。

本橋のケーブル架設は極めて順調に進められPPWS採用の目的を達しているが、なお設計上次のような点が十分には解決されていない。

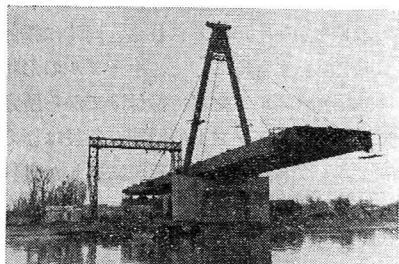
① 鑄込み温度の素線に与える影響

② ストランドとソケットの境界部の応力伝達状況と疲労

③ ケーブル架設中の素線の乱れや回転による素線の応力の不均一

④ ケーブルとともに主塔とのとり合い部の構造

写真一7に本橋の架設中の状況を示す。



写真一7 石狩河口橋 左岸部

本橋用PPWSの諸実験は札幌開発建設部石狩河口橋建設事業所の計画のもとに、東京製鋼KK土浦工場で行なわれたものでとくに、東京製鋼KK根来広平氏、の御指導をいただいたことを附記し感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Nordbrücke Düsseldorf : E. Beyer 他 1958.
- 2) 石狩河口橋用ケーブル関係総合試験成績書：札幌開発建設部 1970. 7
- 3) 若戸橋調査報告書：日本道路公団 1963, 10
- 4) 石狩河口橋の計画について：小西，高橋 第9回道路会議論文集 1969, 10
- 5) 3径間連続斜張橋の設計：小西，高橋，新山 土木学会北海道支部研究発表会 1970, 2
- 6) 石狩河口橋の設計（第1報）：小西，大窪，高橋 第23回建設省技術研究会講演概要 1969, 11
- 7) ケーブル定着部の応力拡散について（石狩河口橋第2報），小西，高橋，戸島，新山，第24回建設省技術研究会講演概要 1970, 11
- 8) The Mechanical Properties of Carbon Steel Wire at Low Temperature : R.W. Nicols, The Wire Industry 1956, June, July.