

実物大ケーブルを用いた クリープ・リラクセーション試験

CREEP AND RELAXATION TESTS OF FULL SIZE CABLES

波邊 英一*・亀井 正博**・井下 泰具***・中出 収****

By Eiichi Watanabe, Masahiro Kamei, Yasutomo Inoshita and Osamu Nakade

Presented herein is creep and relaxation tests of the full size cables. Tests considered several combinations of three different types of commercial cables: LCR, PWS and Parallel wire strand with tight fitting polyethylene sheath with three different commercial sockets of Zn-poured, HiAm and NS anchorages. In result of tension tests for investigation of initial creep, relative displacement between socket and strand are about from 0.1mm to 1.4mm. The maximum creep coefficient varied from 0.78% to 6.9% ;whereas maximum relaxation varied from 1.4% to 16.6% with the above mentioned cables and sockets. Some of the specimens are still being tested and are undergoing significant creep and relaxation behavior.

1. はじめに

昨今吊橋、斜張橋に代表されるケーブルを主要構造部材とした橋梁形式が数多く採用されてきているが、一般にケーブル部材は弾性体として扱われている。しかし、文献1)に示されているように、ケーブルは時間の経過とともにその形状および応力状態が変化する粘弾性体である事が知られている。そのため、ケーブルの経時的挙動特性（クリープ・リラクセーション）について十分な検討を行うことにより、架設時のケーブル張力管理のみならず、供用後のケーブル張力および桁キャンバーの変化の予測等、維持管理のための重要なデータが得られるものと考えられる。

本試験ではこの観点に立つて、第一にケーブル架設時の張力管理に大きな影響を与えるケーブルの初期クリープ現象に着目し、ケーブルに張力が導入された初期段階における挙動（ストランドの定着部前面からの抜け出し量、定着部の応力分布）を4本の実物大ケーブルを用いた引張試験により調査した。²⁾次に、長期

* 正員 Ph. D.,工博 京都大学教授 土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)
 ** 正員 工修 大阪市建設局街路部立体交差課 (〒530 大阪市北区梅田1-2-2-500)
 *** 正員 工修 大阪市建設局土木部橋梁課 (〒530 大阪市北区梅田1-2-2-500)
 **** 正員 工修 日立・松尾・三菱・横河 J. V.

的なクリープ・リラクセーションに着目し、供試体として3種類のストランドと3種類の定着形式を組み合わせた9本の実物大ケーブルを用い、ケーブルを線形粘弾性体と仮定し、1～3年の長期にわたって計測を行うことにより、その粘弾性パラメータの同定を行った。

2、 初期クリープ試験

2、1 試験方法

(1) 供試体

試験に使用した供試体は、Table-2.1に示す4種類でストランド3と定着1、定着3を組み合わせたものである。ここで、ストランド3は素線に弾性係数を低下させない程度のよりを施したものであり、定着1、定着3は商品名としてそれぞれHiAmソケット、NSソケットと呼ばれている。定着3については、素線本数の差による影響を調べるために、素線本数が163本、121本、91本の3種類（Cable-B1,B2,B3）を用意した。なお、ケーブル長がCable-AとCable-Bとで異なるが、これは試験装置の制約を受けたためであり、本試験結果に影響を及ぼすものではないと考えられる。

Table-2.1 供試体諸元

	Cable-A	Cable-B1	Cable-B2	Cable-B3
ケーブル長(m)	3.5	4.5	4.5	4.5
素線径(mm)	φ7.11	φ7.11	φ7.11	φ7.11
素線本数	163	163	121	91
ケーブル様式	ストランド3	ストランド3	ストランド3	ストランド3
ソケット様式	定着1	定着3	定着3	定着3
断面積(cm ²)	64.72	64.72	48.04	36.13
破断強度(tonf)	1036	1036	769	578
プレロード	なし	0.45Pu 30分	0.45Pu 30分	0.45Pu 30分

(2) 抜け出し量計測方法

抜け出し量は、本来定着部前面の口元部からケーブルが抜け出した変位量とすべきである。しかし、ソケット前面には、支圧板、試験機治具があり計測値にはケーブル自身の弾性変形、クリープ変形を含むことが予想されるためかなりの誤差を生じることになる。そのため、本試験では定着部前面のケーブル抜け出し量と、定着内の素線もしくは鋳込み合金部（コーン部）が前面に押し出される量とが等しいと仮定し、Fig.-2.1に示すように、定着部後面に設置した変位計でその変位量を測定した。

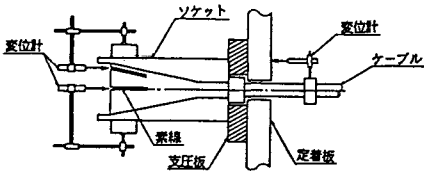


Fig.-2.1 変位測定要領

(3) 定着部の応力計測方法

定着部からケーブルが抜け出した場合、定着部に作用している応力状態に変化が生じるものと思われる。そこで、定着部の前面、中央、後面の定着部外周に歪ゲージを貼付し、各荷重段階における定着部各部の歪を測定した。なお、歪から応力への換算にあたっては、2軸平面応力状態を仮定している。

(4) 載荷方法

試験装置の概要をFig.-2.2に、載荷ステップをFig.-2.3に示す。

図に示すようにケーブルに載荷する最大荷重は破断荷重の1/3とし、初期値から最大荷重までは荷重と変位（抜け出し量）の非線形性を把握するために、50tピッチで載荷する。この時、各荷重レベルにおけるクリープ特性を比較するため各50t載荷時に5分間荷重を保持し変位量を計測している。そして荷重が各ケーブルの最大荷重（=1/3Pu）に達した後、一旦除荷する。これを1サイクルとし3回繰り返し（Cable-B2,B3は2回）した後、最大荷重の状態からそのまま荷重を1時間保持することにした（但し、試験の都合上、Cable-B3については1時間保持は実施しない）。なお、載荷荷重の初期値が10tとなっているのは横型引張試験機を用いて

おり、低応力時の供試体のサグの影響を取り除くため、10tのオフセット荷重を載荷しているためである。

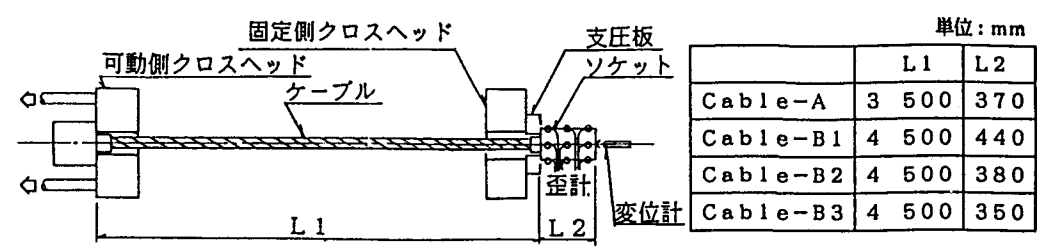


Fig.-2.2 実験概要図

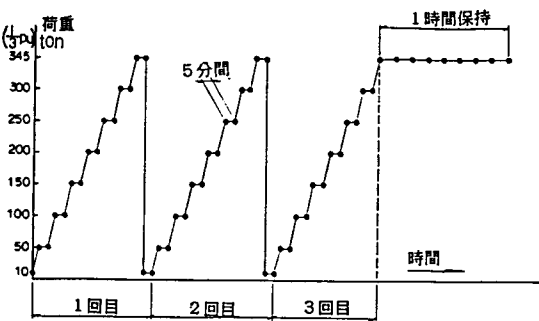


Fig.-2.3 載荷要領図

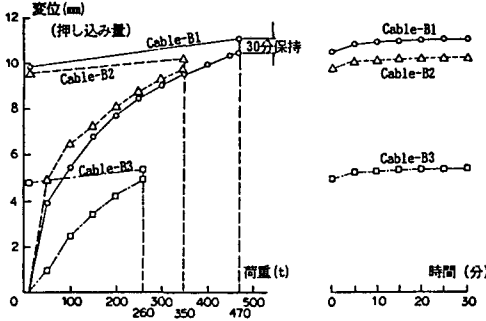


Fig.-2.4 プレコンプレッション結果

2、2 試験結果および考察

(1) プレコンプレッション

定着3を有するCable-B1,B2,B3については、通常の製作方法どおりプレコンプレッションを施した。プレコンプレッションとは、破断荷重の45％に相当する荷重で定着部後面から鋳込み合金部を押し込むことを言い、標準的に 5分間以上載荷することとなっている。

Fig.-2.4に本試験で用いた3種類のケーブルのプレコンプレッション時の荷重－変位曲線ならびに時間－変位曲線を示す。

変位量は5mm－10mm程度と差がみられるが、載荷時の曲線形状はいずれも上に凸のカーブを描いており、3種類のケーブルに有意な差はないと考えられる。また、時間－変位曲線からわかるように、各ケーブルとも変位は約15分程度で定常状態を示しており、今回行った30分間の荷重載荷はプレコンプレッションの目的を十分満足していることがわかる。

(2) 抜け出し量

Fig.-2.5に各ケーブルの抜け出し量と載荷荷重の関係を示す。

Cable-Aでは、載荷直後の荷重域において比較的大きな抜け出しが見られるが、載荷荷重の増加に伴って抜け出しの増加量は減少している。各荷重レベルにおけるクリープ（5分間荷重保持による抜け出し）は、荷重が大きくなるに従い増加している。しかし2回目、3回目の載荷時になるとほとんど抜け出しは生じず、繰り返し載荷による影響は無いと言って良い。試験終了時には、約1.4mmの抜け出し量が計測されたが、図からわかるように、これは1回目の載荷によって生じたものがほとんどである。cable-Aについては、プレコンプレッションを施していないこと、さらにCable-Aの1回目の載荷－変位曲線と、前項のCable-Bのプレコ

ンプレッションの載荷－変位曲線を比較すると、載荷直後の低荷重で大きな変位を生じ、次第に変位量が減少するという共通の特性を有していることを考慮すると、Cable-Aにおける1回目の載荷は、Cable-Bのプレコンプレッションに相当していると考えられる。

Cable-B1,B2,B3の抜け出し量は、プレコンプレッションによって初期の抜け出しがほぼ終了しているため、いずれも0.3mm以下と微小であった。しかし荷重－変位曲線は、Cable-Aの場合と異なっており、最大荷重の半分位の荷重領域までは全く抜け出しは生じないが、そこから荷重が増加するに従って抜け出しが生じている。また、Cable-B1の荷重－変位曲線を見ると、繰り返し載荷により若干抜け出し量が増加していることがわかる。ただし、その変位量は極わずかであり、設計上は何等問題は無いと考えられる。

Cable-B1,B2,B3の抜け出し量には、顕著な差は認められず、今回行った試験での素線本数（91本、121本、163本）による抜け出し量への影響は少ないものと思われる。

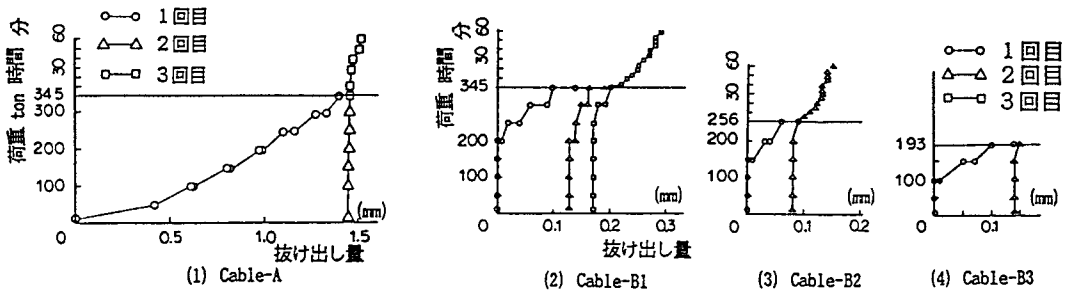


Fig.-2.5 抜け出し量測定結果

(3) 定着部の応力

ケーブル張力が導入されると定着部には、ケーブル軸方向、定着部円周方向、定着部厚さ方向の応力が生じる。ここでは、定着部厚さ方向の応力を無視し、軸方向および周方向の平面応力状態を仮定した。その結果をFig.-2.6(a)～(d)に示す。

Cable-Aでは、軸方向応力分布が載荷回数に依らず同じ分布形状である。最大圧縮応力が定着部口元で生じ、載荷荷重の増加および繰り返し載荷に対し、弾性的かつ可逆的な挙動を示している。周方向応力の分布を見ると、1回目載荷時の最大荷重（345t）で生じた応力が除荷後も残留し、2、3回目の載荷時には定着部口元を除けば、荷重レベルに関係なく同じ応力分布である。この結果は、抜け出し量の測定結果に照らし合わせてみると、2、3回目の載荷時の抜け出し量が生じなかったことに関連している。一旦抜け出すと定着部全体にプレストレスが生じ、それ以後の抜け出しに抵抗しているものと考えられる。

一方、Cable-B1では、周方向応力は定着部中央で最大となり、荷重レベルに無関係な応力分布形状である。これはプレコンプレッションの影響で、既に1回目の載荷前からプレストレスが生じていたものと考えられる。これは、Cable-Aの2、3回目載荷時と同じ挙動である。軸方向の応力分布は、定着部口元で最大となり、定着部中央より後ろ側では応力レベルが低い。これは定着3を有するCable-B1,B2,B3に共通の現象である。また、繰り返し載荷により、周方向および軸方向の応力分布が、わずかではあるが変化している。

3、クリープ・リラクセーション試験

3、1 試験方法

本試験で採用した方法は一定の荷重のもとでのひずみを計測する厳密な意味でのクリープ試験と、一定の

強制ひずみのもとでの荷重を計測する厳密な意味でのリラクセーション試験との中間的な方法であり、Fig.-3.1に試験装置の全体図、寸法を示す^{1) 3)}。試験方法は、まず油圧ジャッキにより供試体の破断強度の約1/3に相当する張力を導入し、定着部のナットまたはシムプレートによりこれを周囲の4本の鋼パイプに定着し、張力を保持する。なお、反力は4本の鋼パイプで保持するものとし、計測項目はロードセルによって測定されるケーブルの張力、変位計により計測されるケーブルの定着部からの抜け出し量、鋼パイプのひずみ、および温度である。

3、2 試験の原理

本試験ではケーブルを線形粘弾性体、鋼パイプを弾性体と仮定しているが、ケーブルの線形粘弾性モデルとして、Fig-3.2に示す3要素モデルを採用した⁴⁾。このモデルにおける応力 σ_c とひずみ ϵ_c の関係は次式のようになる。なお、以後、添字Cはケーブル、Sは鋼パイプに関する諸量を表すものとする。

$$\dot{\sigma}_c + \lambda \sigma_c = E_1 (\dot{\epsilon}_c + \mu \epsilon_c) \quad \dots (3.1)$$

ここに $\mu = E_2 / \eta$; $\lambda = (E_1 + E_2) / \eta$;

$E_1, E_2: (\text{kg}/\text{m}^2)$ $\eta: (\text{day} \cdot \text{kg}/\text{m}^2)$

また、 $\text{dot}(\cdot)$ は時間 t に関する微分を表す。

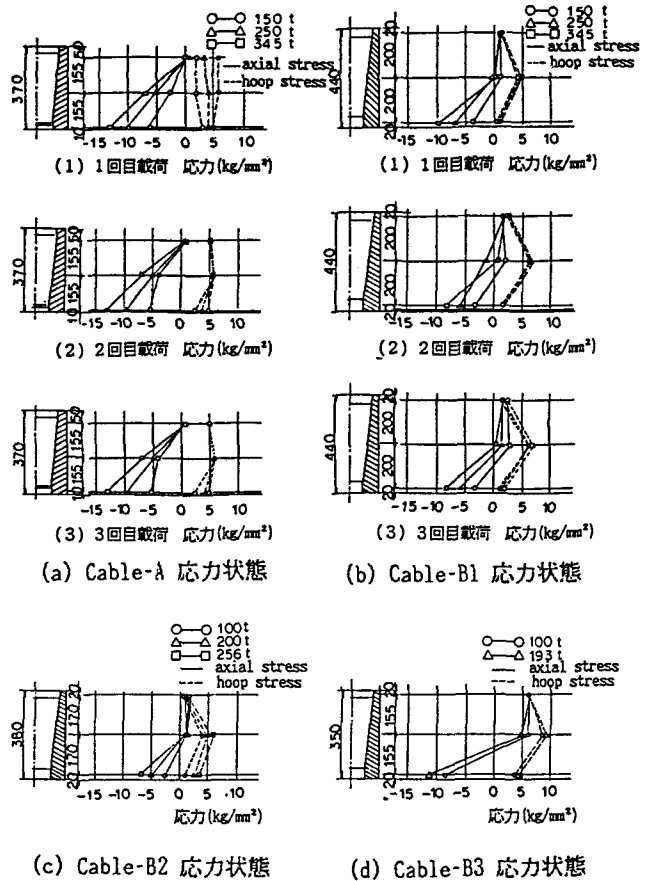


Fig.-2.6 定着部の応力状態

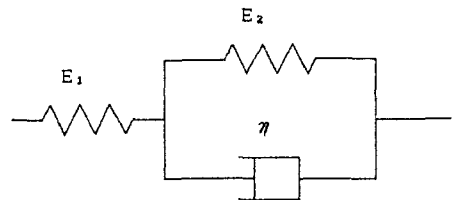


Fig.-3.2 3要素モデル

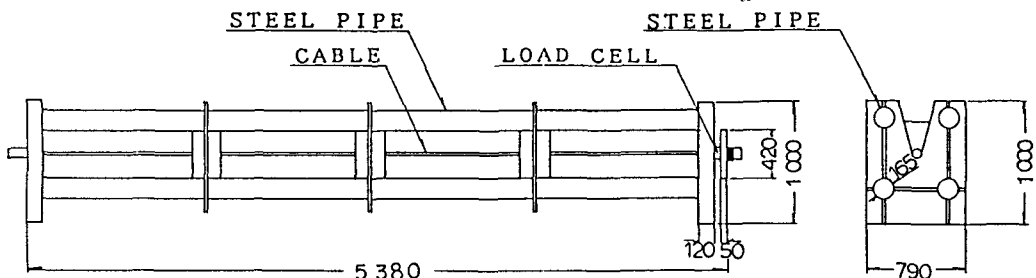


Fig.-3.1 供試体の形状及び寸法

式(3.1)をラプラス変換することによりラプラス像空間 s における弾性係数 $E_c(s)$ は次式で表すことができる。

$$\frac{\bar{\sigma}_c(s)}{\bar{\epsilon}_c(s)} = E_1 \frac{s + \mu}{s + \lambda} \quad \dots \quad (3.2)$$

ここに $\bar{\sigma}_c(s)$ と $\bar{\epsilon}_c(s)$ はそれぞれ $\sigma_c(t)$ と $\epsilon_c(t)$ のラプラス変換を表す。

つぎにケーブルの引張力 $P(t)$ は初期張力 P_0 、リラクセーション係数 α 、時間特性を支配するパラメータ κ を用いて次のように表されるものとする。なお、 $P(t)$ は引張を正にとっている。

$$P(t) = P_0 [\alpha + (1 - \alpha) \cdot \exp(-\kappa t)] \quad \dots \quad (3.3)$$

式(3.3)をラプラス変換し、式(3.2)を用いると、 $\bar{\epsilon}_c(s)$ は次のようになる。

$$\bar{\epsilon}_c(s) = - \frac{P_0(s + \lambda)(s + \alpha \kappa)}{E_1 A_c(s + \mu)(s + \kappa)s} \quad \dots \quad (3.4)$$

ここに A_c はケーブルの断面積である。また Δs を初期張力を導入したときの定着部のナットの移動量とすると、ケーブルひずみ $|\epsilon_c(t)| (= P(t)/A_c E_c(t))$ 、 $E_c(t)$ はケーブルの弾性係数と鋼パイプのひずみ $\epsilon_s(t) (= P(t)/A_s E_s)$ 、ただし、 A_s は鋼パイプの断面積、 E_s は鋼パイプの弾性係数) の関係は次のようになる。

$$|\epsilon_c(t)| + \epsilon_s(t) = \Delta s / L = \text{const} \quad \dots \quad (3.5)$$

ここで L は供試体の全長である。次に、式(3.5)をラプラス変換して式(3.4)に代入し、 $\bar{\epsilon}_s(s) = \bar{P}(s)/(E_s A_s)$ であることを考慮すれば、以下の条件式を得る。

$$\mu = \alpha \kappa, \quad \kappa = \frac{\lambda + \mu \frac{E_1 A_c}{E_s A_s}}{1 + \frac{E_1 A_c}{E_s A_s}} \quad \dots \quad (3.6)$$

また、式(3.6)を式(3.4)に代入し、これをラプラス逆変換することにより、時間領域におけるひずみ $\epsilon_c(t)$ として次式を得る。

$$\epsilon_c(t) = \epsilon_{c0} [\beta + (1 - \beta) \cdot \exp(-\kappa t)] \quad \dots \quad (3.7)$$

$$\text{ここに} \quad \epsilon_{c0} = - \frac{P_0}{E_1 A_c}, \quad \beta = \frac{\lambda}{\kappa}$$

そして定数の同定を行うために、得られたデータに対してそれぞれ式(3.3)と式(3.7)を用いて最小二乗法を適用すればよい。その手法については次節で述べる。

3.3 粘弾性定数の同定法

試験により得られたデータをもとに、それぞれのケーブルについて粘弾性定数の同定を行う。

試験によって任意の時刻 $t_i (i=1, \dots, n)$ に対して、無次元化された軸力 $p_i = P(t_i)/P_0$ と無次元化されたひずみ $q_i = \epsilon_c(t_i)/\epsilon_{c0}$ が求められる。式(3.3)と式(3.7)の共通項である $\exp(-\kappa t_i)$ を考慮すれば次式が導かれる。

$$\exp(-\kappa t) = (p_i - \alpha)/(1 - \alpha) = (q_i - \beta)/(1 - \beta) \quad \dots \quad (3.8)$$

ここで最小二乗法を用いて定数の同定を行う。いま次のような量 I を考え、これを最小化することにする。

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [(1 - \beta)(p_i - \alpha) - (1 - \alpha)(q_i - \beta)]^2 \quad \dots \quad (3.9)$$

また、 β と α の関係は $\rho = E_2/E_1$ が極めて長期間の観測によってしか正確にわからないことから、いまこ

れを既知であると仮定すると、次式を得る。

$$\beta = \frac{\lambda}{\kappa} = \frac{\mu}{\kappa} \cdot \frac{\lambda}{\mu} = \alpha \zeta \quad \dots (3.10)$$

これを式(3.9)に代入し、Iを α で極小化する。

$$\frac{\partial I}{\partial \alpha} = 0 \quad \dots (3.11)$$

その結果、次式が得られる。

$$(a_{11} + 2\zeta a_{12} + \zeta^2 a_{22}) \alpha = b_1 + \zeta b_2 \quad \dots (3.12)$$

$$\text{ここに } a_{11} = \sum_{i=1}^n (q_i - 1)^2 \quad ; \quad a_{12} = \sum_{i=1}^n (1 - p_i)(q_i - 1) \quad ; \quad a_{22} = \sum_{i=1}^n (1 - p_i)^2$$

$$b_1 = \sum_{i=1}^n (q_i - p_i)(q_i - 1) \quad ; \quad b_2 = \sum_{i=1}^n (q_i - p_i)(1 - p_i) \quad \dots (3.13)$$

この式より α が得られ、次に κ を求めるために最小二乗法を適用する。このとき p_i を式(3.3)で近似すればよいが具体的には $(p_i - \alpha)$ と $(1 - \alpha) \cdot \exp(-\kappa t_i)$ を考え、この両者の対数の誤差が最小となるようにした。このとき二乗誤差は次式ようになる。

$$I = \sum_{i=1}^n [1 \ln(1 - \alpha) - \kappa t_i - 1 \ln(p_i - \alpha)]^2 \quad \dots (3.14)$$

$\partial I / \partial \kappa = 0$ より κ は次式のようになる。

$$\kappa = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(1 - \alpha) \cdot t_i - \sum_{i=1}^n \ln(p_i - \alpha) \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2} \quad \dots (3.15)$$

これによって α と κ の値の同定を行うと、式(3.6)より λ 、 μ が逆に求められることになる。

3、4 試験の経過

本試験では供試体として9本のケーブルを用いており、以下それぞれをケーブルタイプ1～ケーブルタイプ9で表す。ケーブルタイプ1～ケーブルタイプ5とケーブルタイプ6～ケーブルタイプ9はそれぞれ異なった場所において試験が行われており、これらは冒頭に述べたようにそれぞれ3種類のストランドと3種類の定着形式の組み合わせである。ここで、ストランド1、ストランド2は商品名としてはPWS、LCR、ストランド3は、NEW PWSあるいはSPWCと呼ばれている。また、定着2は亜鉛定着、定着1、定着3は商品名としてはHi Amソケット、NSソケットと呼ばれている。これらのケーブルタイプのストランドの種類、定着形式、力学的諸量等はTable-3.1に示す通りである。

Fig.-3.3～Fig.-3.6はケーブルタイプ1～ケーブルタイプ4、ケーブルタイプ6、ケーブルタイプ9のリラクセーションの様子を示したものである。つぎにFig.-3.7～Fig.-3.10はケーブルタイプ1～ケーブルタイプ4、

ケーブルタイプ6、ケーブルタイプ9のクリープの様子を表している。ここで、図中、白抜きの丸印は計測値を示しており、この計測値を基に同定した結果を実線で示している。

Fig-3.3、Fig-3.7を見ればわかるようにケーブルタイプ1についてはリラクセーション、クリープともに約20日で収束したと見なすことができる。そこで試験開始後約9カ月をもってケーブルタイプ1の計測は終了し、新たにケーブルタイプ5（ストランド3、定着3）の計測を行っている。ケーブルタイプ8～ケーブルタイプ9については、試験開始後約90日しか経過しておらず試験は継続中である。

また、Table-3.2にはケーブルタイプ1～ケーブルタイプ9の計測値をもとに同定された結果としての粘弾性定数の値を示す。

Table-3.1 供試体の種類、力学的諸量

ケーブルタイプ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ケーブル長 (m)	5.414	5.452	5.433	5.433	5.416	5.4	5.4	5.4	5.4
ケーブル構造	ストラット ¹	ストラット ¹	ストラット ²	ストラット ²	ストラット ³	ストラット ¹	ストラット ³	ストラット ¹	ストラット ³
ソケット形式	定着1	定着2	定着1	定着2	定着3	定着1	定着1	定着3	定着3
断面積 (cm ²)	7.265	7.265	6.05	6.05	7.265	7.31	7.31	7.31	7.31
破断強度 (tonf)	114	114	81.4	81.4	118	116	116	116	116
初期導入張力 (tonf)	31.2	27.0	23.4	21.4	25.7	38.75	38.43	37.8	37.83

Table-3.2 粘弾性定数の同定結果

	ケーブルタイプ1	ケーブルタイプ2	ケーブルタイプ3	ケーブルタイプ4	ケーブルタイプ5	ケーブルタイプ6	ケーブルタイプ7	ケーブルタイプ8	ケーブルタイプ9
D	21.65	7.037	4.955	3.508	25.00	46.08	35.59	21.37	21.28
α	0.966	0.924	0.854	0.835	0.972	0.986	0.983	0.977	0.973
β	1.014	1.055	1.026	1.069	1.011	1.0078	1.0102	1.0224	1.0185
γ	0.0233	0.0066	0.0068	0.0054	0.014	0.0563	0.0597	0.0386	0.0530
μ	0.0226	0.0061	0.0058	0.0045	0.014	0.0555	0.0587	0.0377	0.0516
λ	0.0235	0.0070	0.0070	0.0058	0.014	0.0567	0.0603	0.0394	0.0540
η	$1.79 \cdot 10^{18}$	$2.30 \cdot 10^{18}$	$1.37 \cdot 10^{18}$	$1.26 \cdot 10^{18}$	$5.63 \cdot 10^{18}$	$1.63 \cdot 10^{18}$	$1.23 \cdot 10^{18}$	$1.14 \cdot 10^{18}$	$2.9 \cdot 10^{18}$
T	42.96	150.99	147.37	182.59	70.64	17.76	16.74	25.91	18.87

κ, μ, λ : 1/day

η : day $\cdot$ kg/m²

T : day

3. 5 試験結果の考察

まず、ケーブルタイプ1～ケーブルタイプ5の供試体についての試験結果について考察を加える。

Table-3.2をみれば各供試体のクリープ量は主に定着形式に依存していることがわかる。これは装置の剛性が高いため、ケーブルとしての見かけのクリープはおもに定着部からの抜け出しで支配されているからであろう。また、クリープ係数は定着1で1.014～1.026であるのに対し、定着2では1.055～1.069と、定着2の方がクリープ挙動が顕著である。ここでクリープ係数は初期ひずみに対するクリープひずみを含めた全ひずみの比として定義している。また定着2を有するケーブル（ケーブルタイプ2とケーブルタイプ4）は共に400日付近から二次的なクリープ挙動が観測される。

さて、リラクセーション量はおもにストランドの種類に依存しており、ストランド1で3.4%～7.6%であるのに対し、ストランド2では14.6%～16.6%となっており、ストランド2のほうがリラクセーション挙動は顕著である。これはストランド1はその素線がただ束ねられただけであるのに対し、ストランド2では素線が撚りあわされた構造となっており、素線のクリープ・リラクセーションに加え、撚りに起因する構造的なク

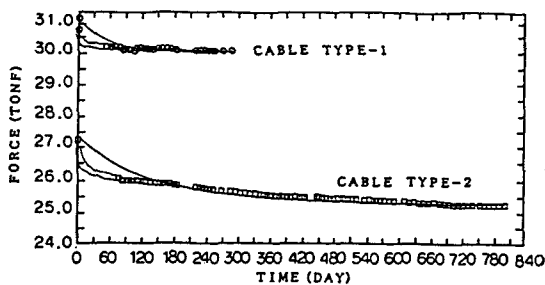


Fig.-3.3 ケーブル力の経時挙動 (ケーブルタイプ1,2)

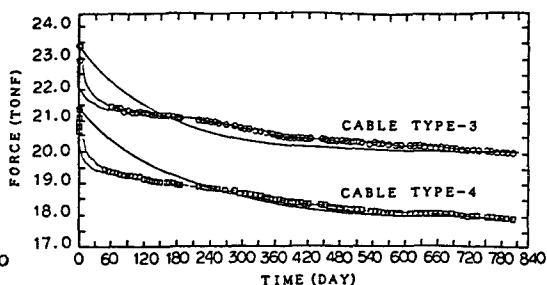


Fig.-3.4 ケーブル力の経時挙動 (ケーブルタイプ3,4)

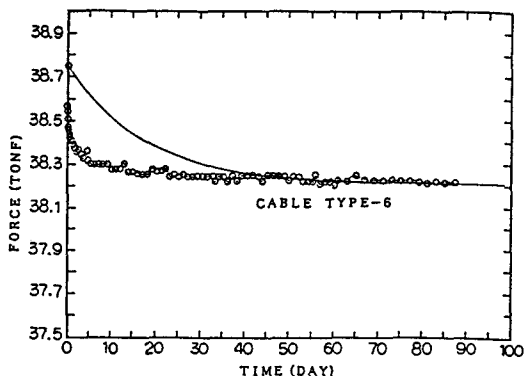


Fig.-3.5 ケーブル力の経時挙動 (ケーブルタイプ5)

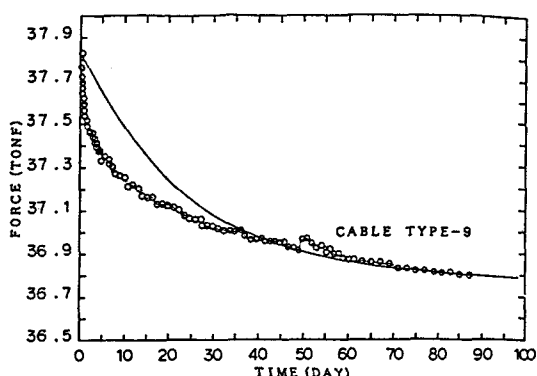


Fig.-3.6 ケーブル力の経時挙動 (ケーブルタイプ9)

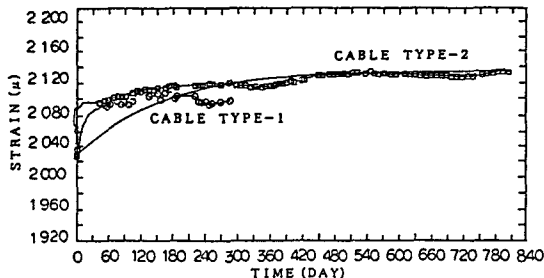


Fig.-3.7 ケーブルひずみの経時挙動 (ケーブルタイプ1,2)

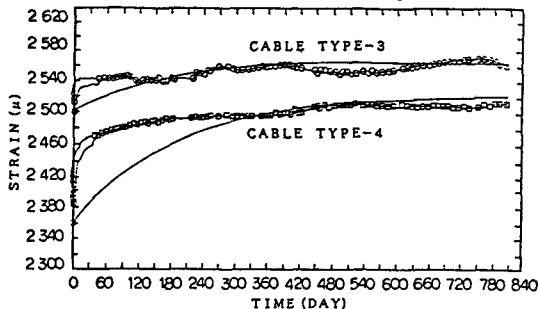


Fig.-3.8 ケーブルひずみの経時挙動 (ケーブルタイプ3,4)

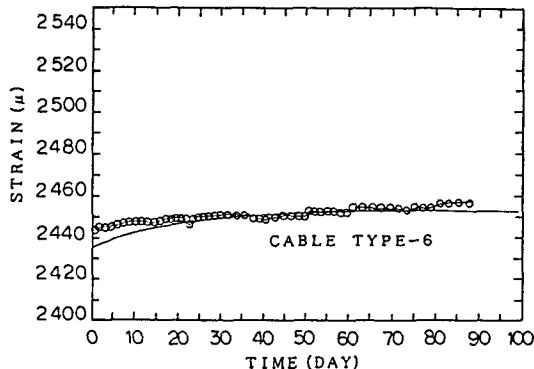


Fig.-3.9 ケーブルひずみの経時挙動 (ケーブルタイプ6)

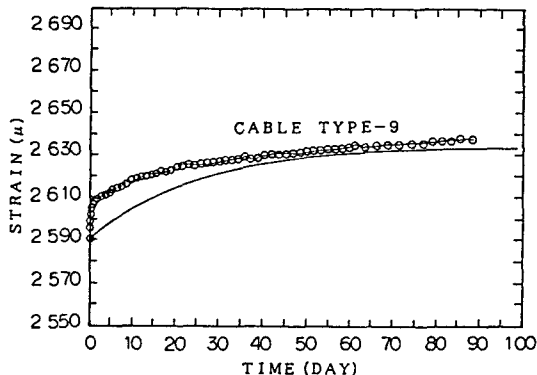


Fig.-3.10 ケーブルひずみの経時挙動 (ケーブルタイプ9)

リープ・リラクセーションが発生するからであると考えられる。以上よりこの4本の中ではストランド1、定着1の組み合わせが最もクリープ・リラクセーションが少ないという結果が得られた。ただし、ストランド2ではこのような構造伸びを事前に除去するためプレストレッシングとして破断強度の約45%の荷重下で5分間保持することが通常行われている。

つぎにケーブルタイプ5であるが、まず、リラクセーション量は2.8%とストランド1と同程度である。またケーブルとしてのクリープ係数であるが、定着2に近い性質を有する定着部であるにもかかわらず見かけ上は1.011と非常に少ない値になっていることがわかる。

つぎにケーブルタイプ6～ケーブルタイプ9の供試体の試験結果について考察する。

まず、Fig.-3.5、6およびFig.-3.9、10をみればクリープ・リラクセーション挙動ともに定着形式に依存した挙動をしているようであり、Table-3.2をみればクリープ係数は定着1で1.0078～1.0102、定着2で1.0185～1.0224である。またリラクセーション量は定着1で1.4%～1.7%、定着3で2.3%～2.7%である。ケーブルタイプ1～ケーブルタイプ5の結果と異なりクリープ係数がストランドの種類よりも定着形式に依存しているのはストランド1とストランド3は似通った構造を有しており、クリープ特性も類似しているからであると思われる。クリープ・リラクセーション特性は定着1の方が良好であるようだが、ケーブルタイプ5で得られた結果と同じく定着3も定着2に近い性質を有するにも関わらず、性能は大きく改善されていることがわかる。

これは定着3ではストランド製作時、予めプレコンプレッションと称して定着部の後方より亜鉛コーンをストランドの破断強度の約45%に相当する荷重で約30分かけて押し込む処理を行っているため、クリープ挙動の一部は計測開始までにすでに終了しており、Fig.-3.10はその後に引き続いて起こるクリープ挙動であると解釈できる⁵⁾。一方ケーブルタイプ1～ケーブルタイプ4に対してはプレコンプレッションを行わず、供試体を試験機にセットした時点でストランドの破断強度の33%に相当する引張荷重を導入し、5分間保持している。このようにそれぞれのケーブルタイプによって試験条件が大きく異なるため、各ストランド、各定着のクリープ・リラクセーション性能の優劣についてはここでは断定すべきではないであろう。

4. おわりに

3種類のストランドと3種類の定着形式を組み合わせたケーブルについて、初期クリープ及び長期のクリープ・リラクセーション試験を行い、ストランドの定着部前面からの抜け出し量の測定、定着部の応力計測および粘弾性パラメーターの同定を行った。初期クリープの実験では、ストランドの抜け出し量をケーブル製作時のプレコンプレッション、定着部の応力分布と関連付けて考察を加えており、ケーブルが大型化し且つ定着部にはコンパクトさが要求される今日、今回の試験結果は有用なデータを提供するものと思われる。また、斜張橋等高次の不静定構造物で主桁とケーブルの作用が高度にバランスしている構造物ではケーブルのクリープ・リラクセーションにより荷重分担が変化し予期せぬ桁キャンパー、ケーブル張力の変化の発生する可能性のあることが知られており⁶⁾ 長期のクリープ・リラクセーション試験の結果がこれら検討の際の一資料となれば幸いと考える。

ところでクリープとは一定荷重下での歪の変化であり、一般的に歪の増加と考えられているが、荷重除荷時には逆方向すなわち歪が減少する方向にクリープが進行することが知られている。このような荷重の載荷除荷の繰り返しは、斜張橋の張り出し架設時のケーブル張力の変化によく見られるところであり、すなわちこのような荷重履歴を受けたケーブルの経時挙動特性が斜張橋全体の構造系に及ぼす影響は大きいものと考えられる。そのため、このことを試験で確認するため、現在試験中のケーブルタイプ6～ケーブルタイプ9で計画を進めており、この結果については稿を改めて報告したいと考えている。

なお、Fig.-3.5、6、Fig.-3.9、10をみればわかるように計測開始から90日の時点ではケーブルタイプ6～ケーブルタイプ9のケーブル力とケーブルひずみの経時挙動は依然として継続しており、今後もケーブル力、ケ

ケーブルひずみの値は大きく変化することが予想される。それにとまって粘弾性定数の同定値も変わってく
ると思われるため、経時挙動が収束するまで長期的な観測が必要であろう。

参考文献

- 1) E.Watanabe et al; Full-size Creep and Relaxation Tests on Steel Cables, Int.Nat.Conf.
Cable-Stayed Bridges, Bangkok, (1987), pp.951-962
- 2) 渡邊 英一・亀井 正博・井下 泰具; 初期荷重によるケーブル定着部の抜け出し量測定実験、第4
4 回土木学会年講概要集、I-246、1989
- 3) 渡邊 英一・楠葉 誠司・杉山 功・杉井 謙一・奥村 勝良; 実物大ケーブルのクリープ・リラク
セーション試験およびニールセン橋の経時挙動予測、構造工学論文集、(1989)
- 4) Y.Niwa, H.Nakai, E.Watanabe, I.Yamada; On Long-Term Behavior of Cables in Cable-Stayed
Bridges, Proc. of JSCE, No.368(1986)
- 5) JSS IV 04-1983; 建築ケーブル設計施工指針、JSSC Vol 19, No.207, (1983), pp.1-62
- 6) 楠葉 誠司・渡邊 英一・亀井 正博・吉川 紀・栗田 章光; 架設段階を考慮した斜張橋のクリー
プ・リラクセーションに関する研究、第44 回土木学会年講概要集、I-244、1989

(1990年1月26日受付)