

## シリコン鋼, シリコン-クロム鋼 PC 鋼線の レラクセーションについて

本 田 一 郎\* ・ 鈴 木 栄 三\*\*  
鈴 木 昭 弘\*\*\* ・ 小 森 英 樹\*\*\*  
寺 岡 信 宏\*\*\*

### 1. ま え が き

近時、欧米にて原子力発電用の圧力容器または格納容器にプレストレスト コンクリートが用いられるようになり、低レラクセーション性と昇温時の特性にすぐれた鋼線またはストランドが、大型ポストテンション用プレストレッシング材料として要求されつつある。

一般に PC 鋼線として用いられているものは、冷間伸線後に Stress-relieving された高引張強さの高炭素鋼線（以下 C-steel wire とする）であるが、上記のような要求を満足するものとして、hot stretch 処理された“Stabilized wire”<sup>1)</sup>に代表される mechanical treated wire または strand<sup>2)</sup>があり、かなりの使用実績<sup>3)</sup>がある。

われわれは chemical wire ともいえる低合金鋼線で、冷間伸線後 stress relieving によって同上の要求を満足するものについて述べてみる。これは PC 鋼線に限らずばね用にも適用することができるものである<sup>4),5)</sup>。

ここではシリコンを添加ベースにしたシリコン鋼 PC 鋼線（以下 Si-steel wire とする）さらにクロムを加えたシリコンクロム鋼 PC 鋼線（以下 Si-Cr steel wire とする）などで、特に経済性を阻害する鋼種でもなく、一連の鋼線加工技術の開発により、高引張強さでかつじん性に富むものが得られる。また、応力腐食についても焼入れ、焼戻しタイプのものとは異なり、従来の PC 鋼線に比してもそんな色がないし、headability では C-steel wire よりすぐれた結果が得られている。

C-steel wire のレラクセーション値は一般に 20°C で引張強さの 70% の初期負荷後 1000 時間では 6% 程度であるが、Si-steel wire にては 3~6%、Si-Cr steel wire にては 1.8% 前後とすることができる。

レラクセーションの測定はかなりの精度を必要とするだけでなく、長期にわたって行なわれるので試験機が数

多く必要とされる。この点につきわれわれは Loadcell を用いたテスターを開発したので、これらについてもあわせて述べてみたい。

### 2. シリコン鋼, シリコン-クロム鋼 PC 鋼線

一般に使用されている C-steel wire は 20°C、0.7  $\sigma_B$ 、24 時間後のレラクセーション値は 2.5% 前後となる。これに合金元素を添加することにより、冷間伸線ワイヤとしての特性をもたせ、かつ低レラクセーションを得たいということから、Si および Si-Cr steel wire をとりあげ、開発をすすめてきた。

PC 鋼線は一般に高引張強さを要求されるため、それを得るためには冷間伸線による加工硬化によるものと、焼入れ、焼戻しによる硬化の二つのタイプが考えられる。高炭素鋼では焼入れ、焼戻しによるものは、応力腐食と遅れ破壊などの現象がはげしく起こる可能性があるため通常の PC 鋼線としてあまり用いられていない。Si、Si-Cr steel wire などは、一般に焼入れ、焼戻し処理時、焼入性を高め、特に Si のフェライト強化による高降伏点、高弾性限はばね性を向上する。Si-Cr steel wire はこれに加えて、耐熱性の改良などですでに実用化され、熱処理 PC 鋼線<sup>6)</sup>としても低レラクセーション性が注目されていた鋼種であるが、Si、Si-Cr steel wire について通常の高炭素鋼 PC 鋼線のごとく、冷間加工性に富むソルバイト組織を得て、これを伸線加工し、高引張強さの PC 鋼線を得るという考えは、高炭素低合金鋼という範ちゅうに入るため難かしく、今まであまり考慮されておらず、わずかに Schwier<sup>7)</sup>が Si-Mn 鋼線を焼入れ焼戻し後伸線したものである stress-relieved wire 10 mm 前後のものについて、低レラクセーション性があると報告しているだけである。

冷間伸線タイプの製造工程を Fig. 1 に示すが、伸線前の熱処理において加工性に富むソルバイトを得ることが、伸線能を高め高引張強さを得る条件である。もちろん十分なじん性を必要とすることはいうまでもないが、stress-relieving により、高引張強さを保有せしめた

\* 鈴木金属工業株式会社取締役技術部長

\*\* " 技術部次長

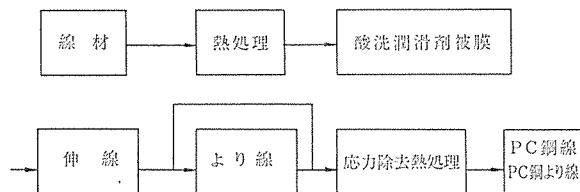
\*\*\* " 技術部研究課

Table 1 Chemical composition

(%)

	Specimens	C	Mn	Si	P max	S max	Cu max	Cr	Reference
Specification	C-Steel	0.75-0.85	0.30-0.90	0.12-0.32	0.025	0.025	0.20	—	JIS
	Si-Steel	0.70-0.80	0.30-0.90	1.00-1.50	0.025	0.025	0.20	—	
	Si-Cr Steel	0.50-0.75	0.30-0.90	1.00-1.60	0.025	0.025	0.20	0.20-1.0	SAE 9254
Used sample	C-Steel	0.73-0.80	0.70-0.90	0.22-0.30	0.011-0.020	0.010-0.013	0.05-0.07	—	
	Si-Steel	0.72-0.78	0.52-0.89	1.10-1.49	0.008-0.018	0.005-0.013	0.05-0.06	—	
	Si-Cr Steel	0.52-0.59	0.66-0.73	1.39-1.52	0.008-0.016	0.008-0.012	0.05-0.06	0.58-0.70	

Fig. 1 General process of P C wire & strand



ままた、さらに特性の改善(伸び、ヤング率の回復、降伏点、弾性限の向上など)がなされている。Si, Si-Cr steel wire においてもこれと同じプロセスが採用されている。なお、Table 1 に示すごとく、Si, Mn, Cr などいわゆる合金元素を添加しているため、伸線前の熱処理および伸線後の stress-relieving の条件によって、特性に若干の差異がある。Photo 1~3 に C, Si, Si-Cr steel wire の stress-relieving の組織を示す。一般的な性状については、すでに報告<sup>8),9)</sup>してあるが、これらの結果をまとめて Table 2, 3 に示し、おもな点を述べると次のようになる。

a) 引張強さ Si-Cr steel wire については、加工硬化は C, Si-steel wire より少なく、現在の 0.50~0.60 C では 180 kg/mm<sup>2</sup> を越えさせることは難かしいので高炭素化の方向にある。Si-steel wire は同一炭素量ならば、むしろ C-steel wire より高引張強さが得られやすい。

b) 降伏点比 伸びが 4% 以上確保できる stress-relieving の条件で、Si-Cr steel wire の降伏点は引張荷重の 97% と非常に高く、Si-steel wire のそれも 95% と高い値を示している。

c) 弾性限比 Si-Cr steel wire の弾性限は引張荷重の 90% を越え、いちじるしく高い特徴をもっている。弾性限の高さが低レラクセーション性を支えているとも考えられる。

d) 昇温時における特性 Table 3 のみでは理解しにくい、Table 4 で常温における引張強度の応力比に対する鋼線の引張荷重および降伏点強度の温度変化を示す。例えば常温における引張強さの 80% に相当する応力下では、Si-Cr steel wire の破断は 375°C にて生ず

Photo 1 Electromicrograph of H.D. stress relieved C-steel wire 6 000 mag. (leplica)

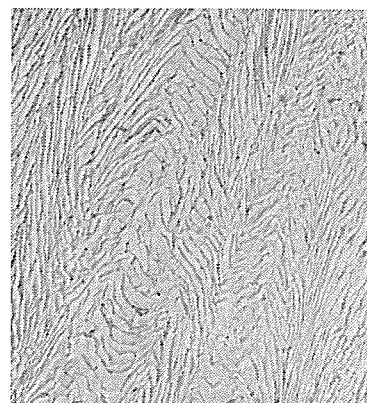


Photo 2 Electromicrograph of H.D. stress relieved Si steel wire 6 000 mag. (leplica)

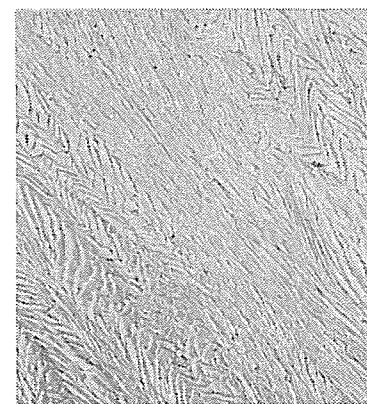


Photo 3 Electromicrograph of H.D. stress relieved Si-Cr steel wire 6 000 mag. (leplica)



(H.D. : Hard Drawn Type)

Table 2 Mechanical properties of C-steel, Si-steel and Si-Cr steel\* at ambient temperature

Steel	Dia (mm)	$\sigma_B$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{0.2}/\sigma_B$ (%)	$\sigma_{0.05}/\sigma_B$ (%)	$\epsilon$ (100 mm) %	$E$ (kg/mm <sup>2</sup> )	**Relaxation 0.70 $\sigma_B$ , 20°C		
							10 (h)	100 (h)	1 000 (h)
Carbon steel	5.0	168-195	88-93	80-85	4-8	20 000 - 21 000	2±0.3	3.5±0.5	6±1.0
	6.35	165-185							
	7.0	155-175							
	1/2"	175-205							
Si-steel	5.0	161-195	94-97	85-90	4-8	20 000 - 21 000	1.5±0.3	2.5±0.5	3.5±0.5
	6.35	165-185	92-95				2±0.3	3.5±0.5	5±1.0
	7.0	155-175	94-97				1.5±0.3	2.5±0.5	3.5±0.5
	1/2"	175-205							
Si-Cr steel	5.0	168-180	97-99	92-97	4-8	20 000 - 21 000	1.3±0.3	1.6±0.5	1.8±0.5
	6.35	165-177							
	7.0	155-175							
	1/2"	168-180							

\* Stress-relieved wire & strand

\*\* Load cell tester

Table 3 Mechanical properties at elevated temperature (size 5 mm)

Test Temp. (°C)	$\sigma_B$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{0.05}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$E$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon$ (100 mm) (%)	$\sigma_{0.2}/\sigma_B$ (%)	$\sigma_{0.05}/\sigma_B$ (%)
C-Steel (C=0.73% Si=0.25% Mn=0.86%)							
Room Temp.	184	169	151	20 900	6.5	91.9	82.1
50	179	159	149	20 700	6.5	88.8	83.2
100	175	149	139	20 800	6.5	85.1	78.3
150	175	146	131	21 400	6.5	83.4	74.8
200	169	134	119	20 700	7.0	79.3	70.4
250	167	131	101	19 800	11.5	78.4	60.5
300	150	119	98	19 800	12.0	79.4	65.0
350	134	102	75	18 700	13.0	76.1	56.0
400	114	90	69	18 000	13.0	79.0	60.5
Si-Steel (C=0.72% Si=1.22% Mn=0.86%)							
Room Temp.	178	166	154	20 800	7.0	93.2	86.5
50	178	166	154	20 500	7.0	93.2	86.5
100	177	154	144	19 900	7.0	87.0	87.1
150	172	150	136	19 800	7.0	87.2	79.1
200	172	144	127	20 100	8.0	83.7	73.8
250	171	130	100	20 100	11.0	76.0	58.5
300	164	120	91	19 700	13.0	73.2	55.5
350	145	113	89	20 400	13.0	77.9	61.4
400	128	97	74	20 200	13.0	95.8	57.8
Si-Cr Steel (C=0.59% Si=1.45% Mn=0.74% Cr=0.60%)							
Room Temp.	179	174	171	20 400	7.0	97.2	95.5
50	179	174	171	20 400	7.0	97.2	95.5
100	175	170	163	20 000	7.0	97.1	93.1
150	173	159	148	19 500	7.0	91.9	85.5
200	171	151	139	19 400	8.0	88.3	81.3
250	170	143	130	19 100	12.0	84.1	76.5
300	166	142	126	18 400	14.0	85.6	75.9
350	154	130	106	17 400	14.0	83.8	68.9
400	133	115	94	16 800	14.0	86.5	70.7

**Table 4** Temperature at rupture and yield based on percentage of room temperature strength

Percentage of room temperature strength (%)	Temperature to rupture (°C)			Temperature to yield (°C)		
	C-Steel	Si-Steel	Si-Cr Steel	C-Steel	Si-Steel	Si-Cr Steel
95	150	265	250	—	—	—
90	250	310	325	30	80	140
85	280	330	350	60	135	195
80	305	350	375	150	210	300
75	335	380	395	185	240	325
70	360	—	—	260	275	360
65	—	—	—	295	325	390
60	—	—	—	325	370	(415)
55	—	—	—	350	400	—
50	—	—	—	390	—	—

Heating time 10 min    Measuring time 5 min  
 Holding time 5 min    Test carried up to 400°C

るが、C-steel wire では 305°C で破断する。Si-steel wire は 350°C でその中間に位置する。

降伏点強度においても同じく 80% としたとき、C-steel wire の 150°C に対して Si-steel wire が 210°C、Si-Cr steel wire が 300°C と合金鋼線の方が耐熱度は高いといえる。

### 3. レラクセーション試験機

レラクセーション測定の特徴として、恒温室内試験、長時間の測定などで、多数の試験機を要することが挙げられる。われわれは過去、アバットに緊張した試験片の dead weight による deflection からレラクセーションを求める方法<sup>10)</sup>や横振動の変化を測定して求める方法<sup>11)</sup>など数々の試験法を試みたが、恒温が得られなかったため、所期の成果が得られなかったことが多い。

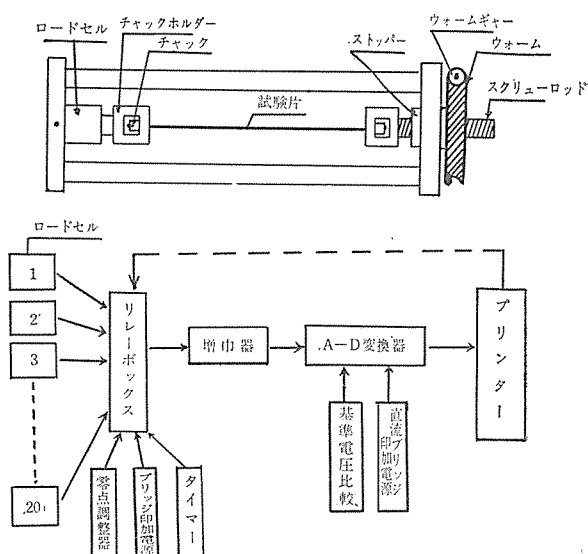
一般にレラクセーションの試験機として、レバー式や振動法を用いる試験機が知られている。レバー式はゲージレングス間の測定であるので、ウェッジの影響を受けることがない利点がある。その反面、地震などの振動の影響を受けやすく、かなり高価であるので数多く設置できない難点がある。振動法は操作、解析が面倒であるようであるが、目下研究中である。

上記の欠点を補なう意味で、われわれは Load cell の荷重検出性に着目して、独自にこれを用いた試験機を開発した。概略を **Photo 4** および **Fig. 2** に示す。すなわち、ウォーム機構を介して、スクリーロッドの移動にて緊張を与え、他端固定部に Load cell を組み込んである。Load cell では内部の鋼棒に貼った Strain gage のひずみ量を測定する。ひずみ測定器は多点デジタル方式のものを使用している。アンカー方法は wire の場合、**Photo 5, 6** に示すごとく、ボタンヘッドをしたうえで、焼入れ3つ割りチャックを用い、ストランド用では4つ割りチャックを **Photo 7** のごとく用いている。

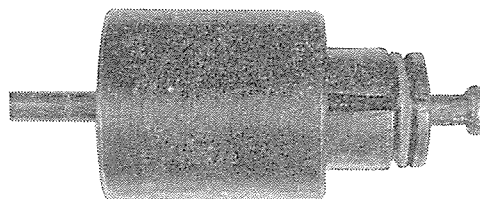
**Photo 4** Load cell relaxation tester



**Fig. 2** Relaxation testing machine by load cell



**Photo 5** Wedge for anchor at the load cell tester



**Photo 6** Cross section of the wedge

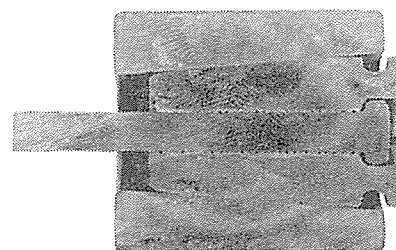
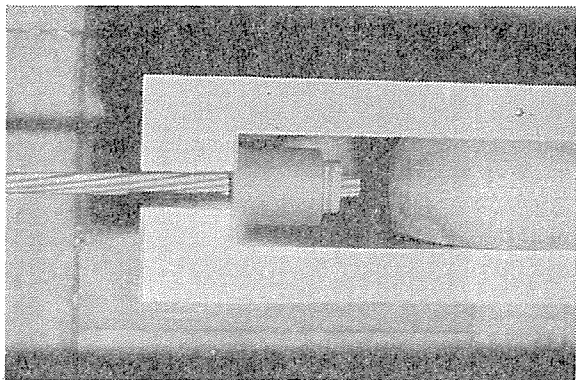


Photo 7 Anchorage for strand



当初は装置各部に生ずるひずみ、スクリーロッドとギヤ部のなじみおよびスクリーロッドの微動、ウェッジなどに問題があり、レバー式の試験機に対してリラクゼーションロスが大きかったりしたが、ワイヤストレインゲージなどを使用して、装置の点検、改良を加えて現在では、測定に何等不安のない状態に達している。

Load cell 法の測定上の問題点としては、

1) 温度 これは  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  の恒温室に試験機を設置しているが、まだ完全ではないと考えている。スイスの EMPA では  $20 \pm 0.2^\circ\text{C}$  で、われわれもこの水準にもっていく必要があるものとする。

2) 初期負荷条件 wire については1分以内、ストランドについては4分以内に所定の荷重値に負荷している。荷重速度は任意に選択しうる。

3) ウェッジ アンカーの不适当によるすべりこみの問題があるが、このときは測定開始時において明らかにわかるので、サンプルの交換、ウェッジの交換などを行なっている。

4) Load cell の精度 鋼線の gage length 約 600 mm (試料は約 750 mm), Load cell 中の丸棒の長さ約 100 mm (全体長さ約 250 mm), 鋼線は測定荷重にて、最大 0.7% 程度の伸びが生ずるので、 $600 \times 0.7\% = 4.2$  mm の伸びが生ずることになる。Load cell の丸棒は最大弾性限の 1/5 程度で使用されるので、鋼線の使用最大ひずみを 0.7% とすると  $0.7\% \times 1/5 = 0.14\%$  程度の伸びが Load cell の丸棒の伸びとなる。ここで、 $4.2 : 0.14 = 1 : 0.03$  の比率であるので、リラクゼーション時の鋼線の伸びの 97% 分は荷重減少となるが、3% の伸びは Load cell に吸収され、厳密な意味では定ひずみでないともいえるが、測定上では多少リラクゼーションロスが少なめにでもしても、無視できるものと考えてよい。なお、Load cell の精度は  $\pm 0.5\%$  (full scale), デジタルカウンタは  $\pm 0.1\%$  である。

われわれが使用している試験機は、Load cell 式テスター 28 台 (20 t 10 台, 5 t 18 台) およびレバー式テスター 7 台 (20 t 2 台, 10 t 2 台, 5 t 2 台, 3 t 1 台) である。レバー式 20 t 高温リラクゼーションテスターを Photo 8 に、その機構および高温加熱炉の制御図を Fig. 3, 4 に示す。

Photo 8 High temperature relaxation tester and recorder

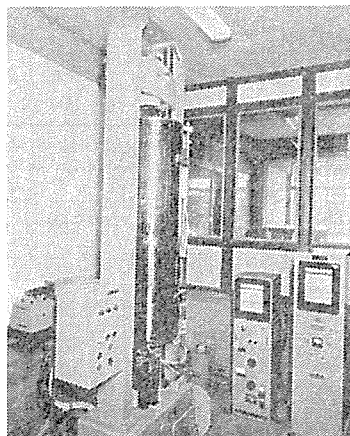


Fig. 3 Principle of a high temperature relaxation tester

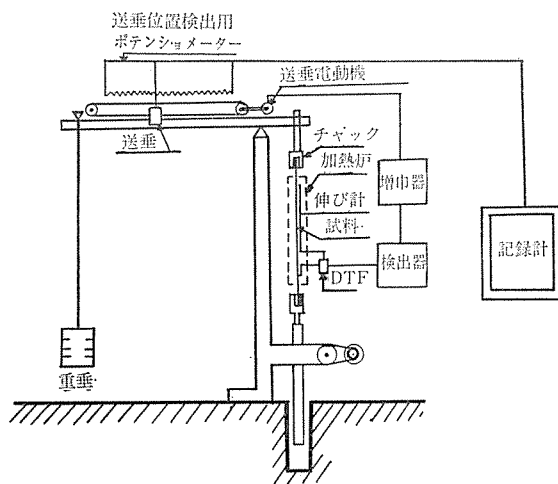
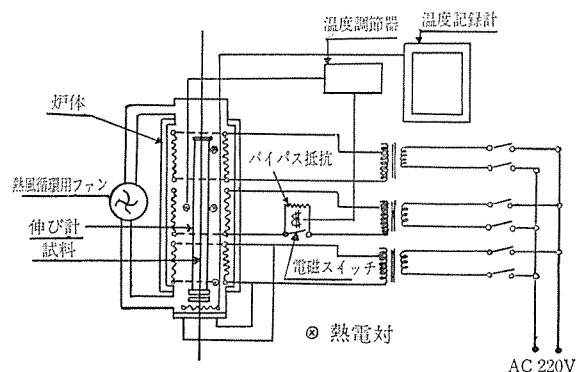


Fig. 4 Heating furnace for high temperature relaxation tester



#### 4. レラクセーションについて

レラクセーションについては各種の貴重な記述、報告<sup>12)</sup>がなされている。その1つ「レオロジー」<sup>13)</sup>による考え方で説明してみる。

鋼線に外力がかかっていると、鋼線自体が長く stress をかけられることに降伏してしまい、ついには内部に構造変化を起して（測定できない場合もある）外力を吸収（stress の減少）することになる。すなわち、外力によって内部的に流動を起しているということになる。この現象は降伏点以下の stress でも起こるのであって、いいかえると弾性と粘性が共存するわけである。

まず、弾性域ではフックの法則から次式が成立する。

$$\epsilon = \frac{1}{E} S \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{dS}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

粘性域ではニュートンの法則から次式が成立する。

$$\epsilon = \frac{1}{\eta} S t \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{S}{\eta} \dots\dots\dots (4)$$

したがって、レラクセーションの基本式は、 $\epsilon = \epsilon_f + \epsilon_n$  ( $\epsilon$ : 全ひずみ,  $\epsilon_f$ : フックの法則によるひずみ,  $\epsilon_n$ : ニュートンの法則によるひずみ) であるから、次のようになる。

$$\frac{dS}{dt} = E \frac{d\epsilon}{dt} - \frac{S}{\lambda} \dots\dots\dots (5)$$

$S$ : ストレス                       $E$ : ヤング率  
 $dS$ : ストレス減少量            $\eta$ : 粘性係数

$d\epsilon$ : ひずみ量            $\lambda \left( = \frac{\eta}{E} \right)$ : レラクセーションタイム

レラクセーションについては変化を一定にしておく場合を考えるので、 $\frac{d\epsilon}{dt} = 0$  である。そうすると時間とともに stress がどのように変化するかがわかる。すなわち

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S}{\lambda}$$

$$\therefore \frac{dS}{S} = -\frac{1}{\lambda} dt \dots\dots\dots (6)$$

両辺を積分すると、

$$\log S = \left( -\frac{t}{\lambda} \right) + C$$

最初の  $S$  を  $S_0$  とすると ( $t=0$  のとき  $S=S_0$ )  $C = \log S_0$  である。そこで

$$\log S = \log S_0 - \frac{t}{\lambda} \dots\dots\dots (7)$$

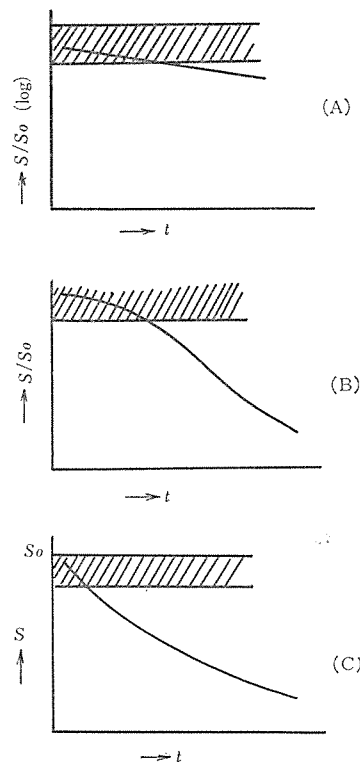
よって

$$\log \frac{S}{S_0} = -\frac{t}{\lambda} \dots\dots (8) \quad \text{または} \quad S = S_0 e^{-\frac{t}{\lambda}} \dots\dots (9)$$

である。

この関係を Fig. 5 に示す。ただし、鋼線についてはハッチングした領域内である。

Fig. 5 The type of relaxation curves



上記のレラクセーションタイム ( $\lambda$ ) は、 $t=\lambda$  とおくと

$$S = S_0 e^{-1} = \frac{S_0}{e}$$

となり、ちょうどレラクセーションタイムだけ経ったあとでは stress は始めの stress  $S_0$  の  $1/e$  になっていることを示す。

レラクセーションタイムは、まず変形があって、その仕事はポテンシャルエネルギーとして内部に蓄えられることになる。レラクセーションタイム  $\lambda$  は、熱力学的には次のように表わすことができる。

$$\lambda = A \exp(n/RT) \dots\dots\dots (10)$$

$A, n$ : 定数            $T$ : 絶対温度            $R$ : 気体定数

すなわち、絶対温度とともに急激に減少する。いいかえるとレラクセーションは温度を上げると大きく進行することになる。

#### 5. 鋼線のレラクセーション

鋼線のレラクセーションは初期負荷応力、負荷手順、温度さらに鋼種、製造条件などの要因によって影響される<sup>14), 15)</sup>。なお、現時点では、試験法などの違いによる影

響が大きいため、べつべつに求められた数値に対して比較解析が厳密には認められていない<sup>16)</sup>。

また、測定結果の表示法は種々の考え方のもとに提案されているが、現在のところ定まったものはない。したがって、長期レラクセーションの推定法についても同じことがいえる。われわれはレラクセーションの初期段階を経過してから後のレラクセーションの方向、具体的にはレクラセーションカーブの傾きがむしろ初期段階の解析より重要であろうと考え以下この方向で論を進めたい。

一般にレラクセーションの試験は、常温における降伏点の 80% または引張強さの 70% の緊張力での長時間試験が行なわれる。また初期負荷のストレスレベルをこれより高めた状態での試験や、高温での加速試験などが行なわれている。

現在わが国においては長期にわたるレラクセーションデータの公表されているものが少なく、ほとんど海外からの文献などより情報を得ている。

そのおもなもの 1 つに Prestressed Concrete Institute のジャーナルに発表された<sup>14)</sup>、A study of stress relaxation があるが、その中に、1964 年以前の世界各所にて発表されたレラクセーションデータを整理し、次式を提案している。

$$f_s^{17)} = \frac{f_{si}}{1+10^n} \quad n = -1.3 + \frac{\log t}{3} \left( \frac{f_{si}}{f_y} - 0.55 \right) \dots\dots\dots(11)$$

$f_s$  : 応力負荷後  $t$  時間の残留応力

$f_{si}$  : 初期負荷応力

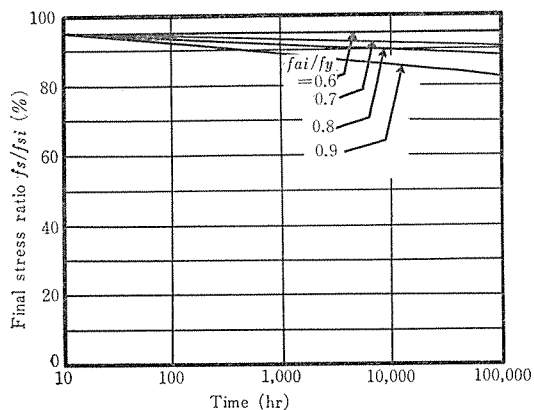
$f_y$  : 0.1% オフセット応力

$t$  : 時間 (h)

$n$  : 時間と初期負荷の Ratio との関数

この関係を Fig. 6 に示す。この図から  $f_s/f_{si}$  (または  $S_0/S$ ) と対数時間との間に直線関係がうかがえ、したがって、次式が得られるとしている。

Fig. 6 Variation of stress with time according to equation (PCI Journal)

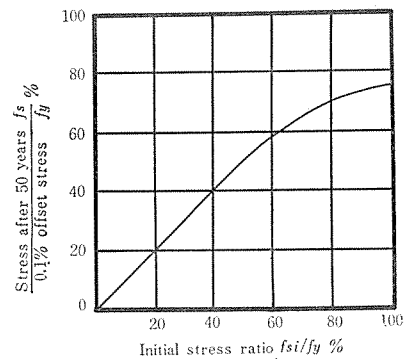


$$\frac{f_s}{f_{si}} = 1 - \frac{\log t}{10} \left( \frac{f_{si}}{f_y} - 0.55 \right) \dots\dots\dots(12)$$

ただし、 $\frac{f_{si}}{f_y} \geq 0.55$

これより 50 年後の残留応力を求めたものが Fig. 7 である。

Fig. 7 Comparison of the remaining stress after 50 years, based on equation with the initial stress (PCI Journal)



これらの議論は、Papsdorf, Schwier<sup>18)</sup> が提案した対数時間と残留ストレスとの間で逆 S 型のカーブを描くことを前提としている。さらに昇温時のテスト結果から、ストレスと対数時間の関係で反曲点があるとの考え方に、さらに Stussi<sup>19)</sup> による疲労における限度曲線の考え方をレラクセーションにとり入れたものとされている。

次に Cahill, Branch<sup>19)</sup> は stabilized wire and strand (stress-relieving 温度付近にて塑性伸び 1% 以上の stretch 処理にて代表されるもので、低レラクセーション性が認められている) について、Long-Term Relaxation Behaviour を発表し、Logarithm Strain-Rate と Logarithm Time との間に直線関係があるとした。すなわち Logarithm Relaxation と Rate-Logarithm Time との間にも直線関係があることになる。Cahill はこれに基づいて、スタビライズド処理材については、長期のレラクセーションを推定すべきであるとしている。しかしながら、この直線性はかなりのばらつきの上に実験的に示されたものようであり、われわれもこの考え方に特に異存はないが、個々のデータの取扱いについて、特に 100 時間までのデータについては直線関係の取扱いは慎重でなければならないと考える。

ここでわれわれはまずレラクセーションの表現方法として、前章で示した Fig. 5 の (A), (B), (C) のパターンを参考に、実際に、C, Si, Si-Cr steel wire, Hot stretched C-steel wire について得た同一 1000 時間データを使って表わしてみた。レラクセーション量を  $S_0 - S/S_0 = 1 - S/S_0$  とし、(A) に相当するものが Fig. 8, (B) に相当するものが Fig. 9 として求められる。(C)

研究用の当社作製資料は概念的表示にとどまり、これは鋼線のレラクセーションには用いていない。さらに Fig. 10 では全対数で表示してみた。以上の図には 10<sup>6</sup> 時間までの単純外そう線が示してある。この中で Fig. 8 の表示は見やすく、かつ外そう推定法として興味ある方法であろう。

次に同一データについて Cahill らの考え方から得られる Relaxation Rate を用いて表わすと Fig. 11 のようになる。さらに Fig. 12 には、Si-steel wire について応力レベルを 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9  $\sigma_B$  として求めたデータについて表示してみた。ここで、Relaxation Rate は若干の曲がりがあるが、100~1000 時間の直線で 10<sup>6</sup> 時間まで延長してある。

前に示した Fig. 10 は Relaxation Rate の考え方をレラクセーションカーブに適用したものとして考えてよく、この Logarithm (Relaxation-Time) にて直線関係が得られるならば、Relaxation Rate にても直線が得られることは自明であろう。

長期推定法として、時間と温度をリンクする Larson-

Miller Parameter<sup>20)</sup> を用いることができそうである。これは一種の加速試験法として考えてよい。すなわち、高温での短時間の実測値を得て LMP 図を作成し、これより低温の長時間の外そう値を求めることができる。ただし、実際より高めに出ることが認められている。ただ昇温試験は試験自体むずかしく、データのばらつきも多いようである。

Cahill<sup>19)</sup> らは、stabilized wire and strand について Fig. 13 に示すように推定値と実測値がほぼ一致するのではないかとしている。われわれは Si-Cr steel wire について Fig. 14 に示してみたが、若干高めに出る。

以上 Si, Si-Cr steel wire について、C-steel wire または Hotstretched C-steel wire との比較の上に図式的に外そうを試みたが、これと式の計算より求めたものを加えて、40 年の推定値を、Table 5 に示す。なお後述する折線法による外そう値もあわせて示した。これからわかるとおり、それぞれの鋼種、処理方法などにより、それぞれのレベルは定まり、ほぼ近似的に等しい値を示していることがわかる。また Si-Cr steel wire についてはかなりの低レラクセーション性が認められる。

以上の推定法とは別に高温データによる推定法として、鳥居、岩田、勝又<sup>15)</sup>らは、一般の stress relieving

Fig. 8 Logarithm relaxation value vs time

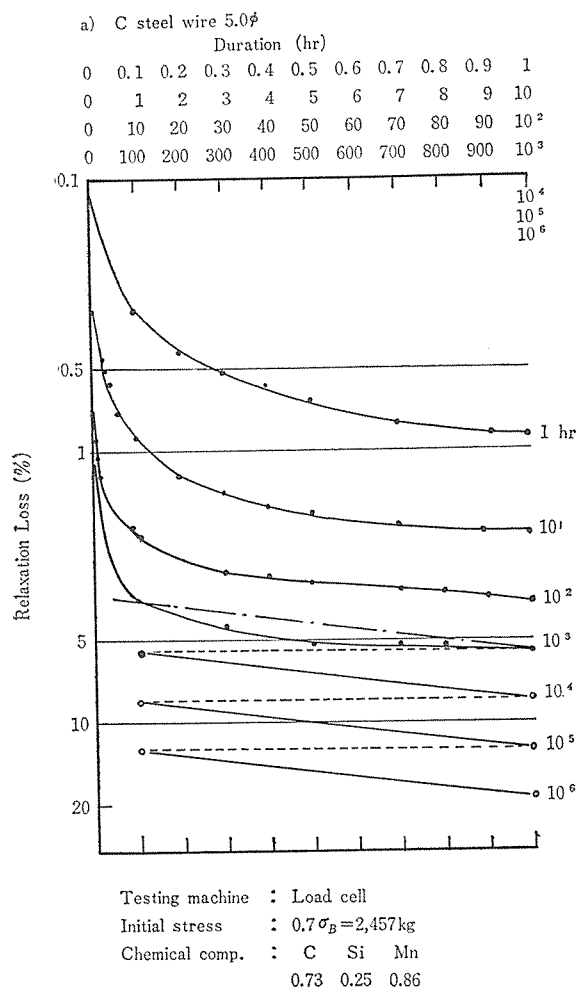


Fig. 8 Logarithm relaxation value vs time

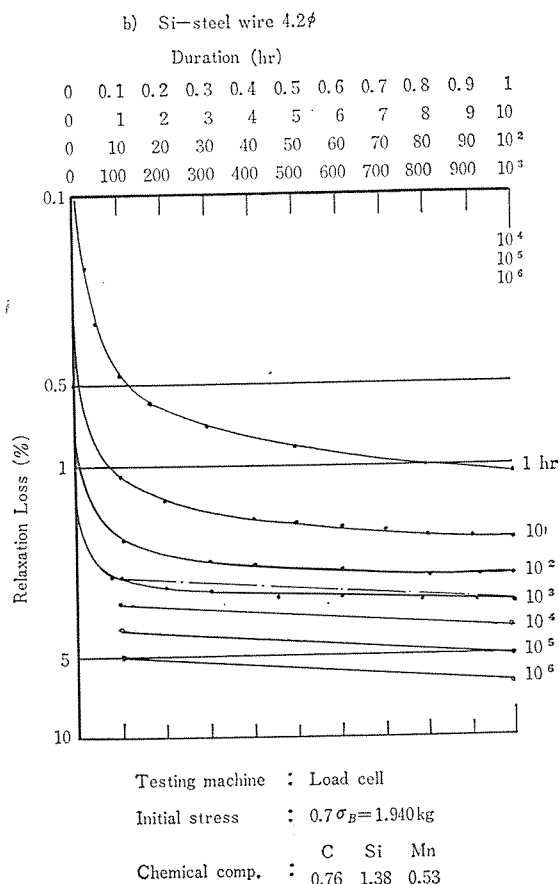
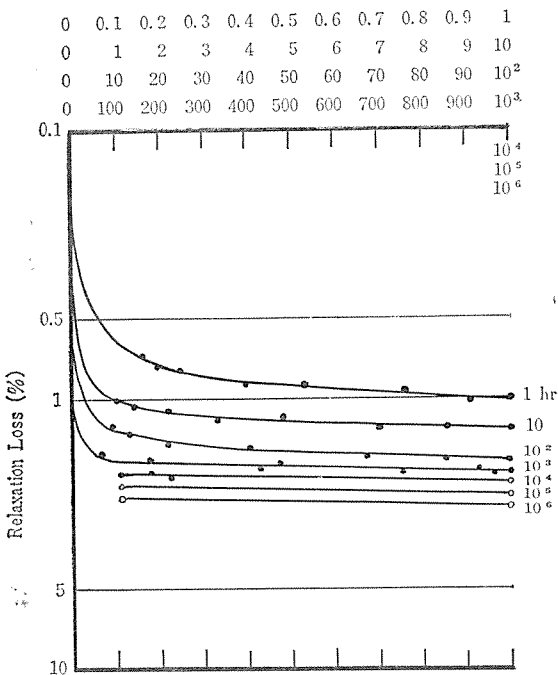




Fig. 8 Logarithm relaxation value vs time

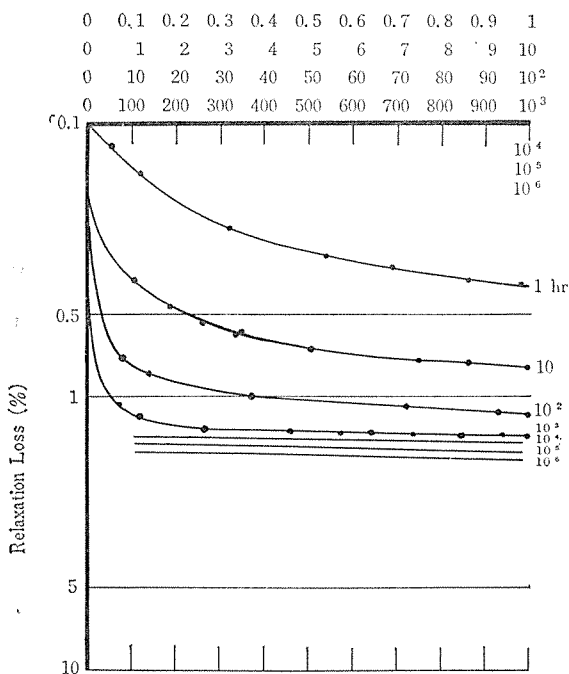
c) Si-Cr steel wire 7 mm  
Duration (hr)



Testing machine : Load cell  
Initial stress :  $0.7\sigma_B = 4,368\text{kg}$   
Chemical comp. : C Si Mn Cr %  
                  : 0.53 1.39 0.73 0.65

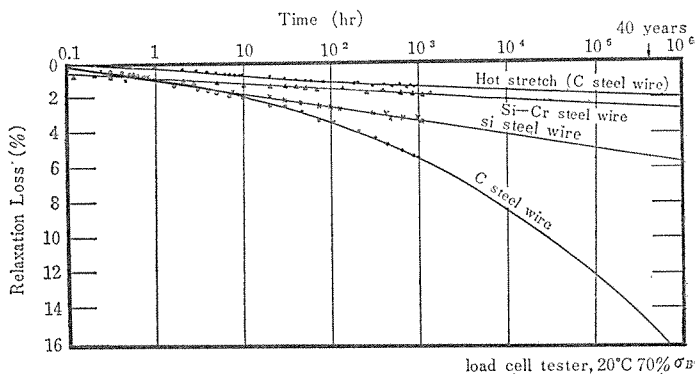
Fig. 8 Logarithm relaxation value vs time

d) Hot stretch wire (C-steel wire) 6.35φ



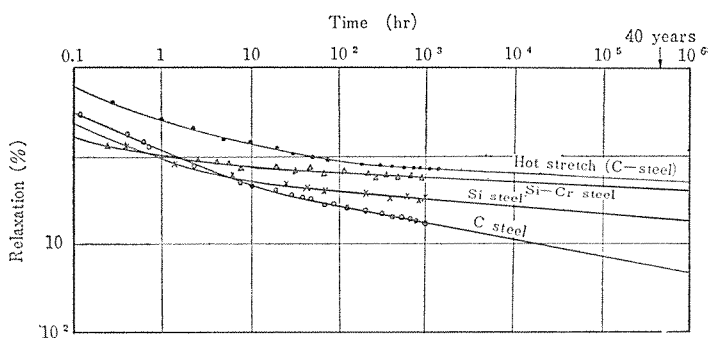
Testing machine : Load cell  
Initial stress :  $0.7\sigma_B = 3,871\text{kg}$   
Chemical comp. : C Si Mn %  
                  : 0.73 0.27 0.73

Fig. 9 Relaxation value vs logarithm time



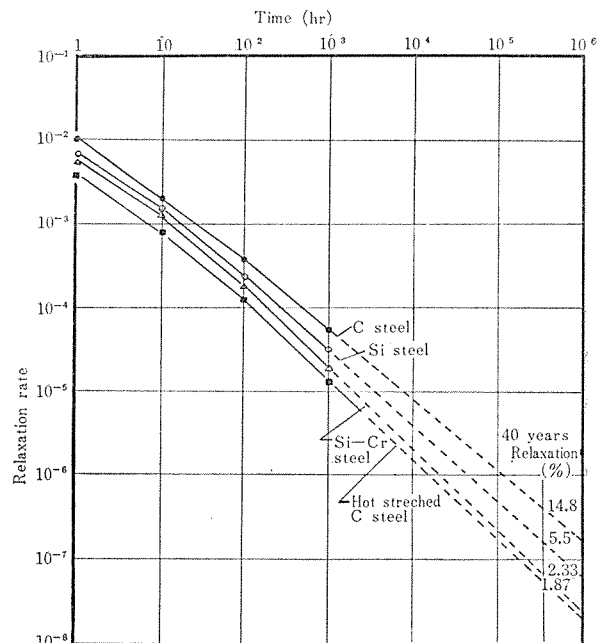
load cell tester, 20°C 70%  $\sigma_B$

Fig. 10 Logarithm relaxation value vs logarithm time



Load cell tester, 20°C 70%  $\sigma_B$

Fig. 11 Relaxation rate vs time (logarithm)



Load cell tester, 20°C 70%  $\sigma_B$

された C-steel wire について、径 2.9 mm で  $0.64\sigma_B$  を初期負荷とした昇温試験を行ない、リラクセーションカーブに反曲点が現われるとして検討を試み、その結果リラクセーションが 5.5% のとき、各温度でのカーブが

時間に無関係に反曲点を示すとしており、この関係を Fig. 15 のように示している。これに Si-Cr steel wire のデータを入れてみた。鳥居らはこれをもとに1つの長期推定法を提案している。この考え方に基づいてわれわれは 3 000 時間昇温データについて表示すると Fig. 16 のようになる。

これと類似の考え方に折線法による外そう法<sup>21)</sup>があるが、折線法はラプチュアー試験に適用され、その根拠として組織変化が確認されている。Cahill は Hot stretch された stabilized C-steel wire and strand について、転位論的に冷間伸線および Hot stretching によ

Fig. 12 Relaxation rate vs time at various initial stress (logarithm)

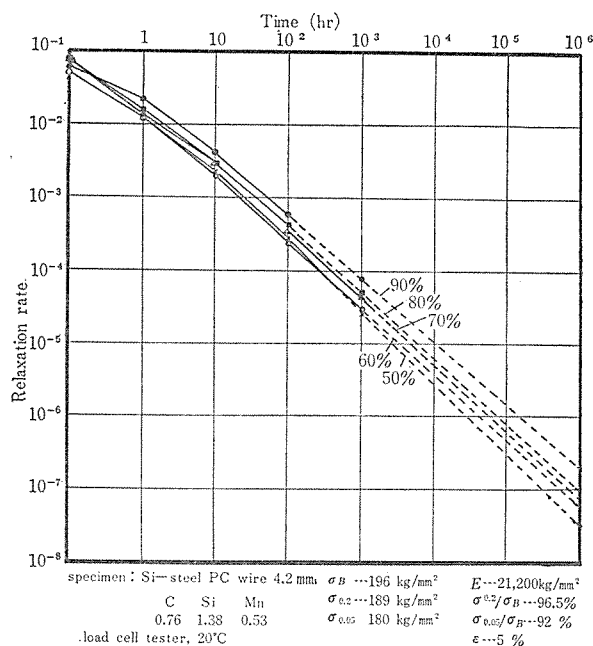


Table 5 Comparison of extrapolational estimate method of approximate relaxation loss after 40 years,  $0.7 \sigma_B$  at 20°C.

Estimate method	C-steel	Si-steel	Si-Cr steel	Hot stret. (C-steel)	Drawing method	Fig. No.	Applied
Time-log Relaxation	14.0	5.4	2.35	1.75	STRAIGHT-LINE	8	
log Time-Relaxation	15.5	5.4	2.5	1.9	CURVED-LINE	9	
log Time-log Relaxation	15.1	5.2	2.45	1.91	STRAIGHT-LINE	10	
Relaxation Rate	14.8	5.5	2.33	1.87	STRAIGHT-LINE	11	STABILIZED WIRE & STRAND
log Time-log Relaxation	16.5	6.0	2.5	1.95	STRAIGHT-LINE with BREAKS	18	
LMP	—	—	4.7	—	CURVED LINE	14	STABILIZED WIRE & STRAND Si-Cr WIRE & STRAND
log Time-log Relaxation	—	—	NOT APPLIED	—	STRAIGHT LINE with BREAKS	16	
$\frac{f_s}{f_{si}} = 1 - \frac{\log t}{10} \left( \frac{f_{si}}{f_y} - 0.55 \right)$	12.2	NOT (10.6)	REASONABLE (12.5)	(13.56)	CALCURATION	FORMULA 13	ONLY STRESS-RELIEVED C-STEEL WIRE

Fig.—13 Larson-Miller master curve  $LMP = T(20 + \log_{10} t) \times 10^{-3}$  (By Cahill, Branch)

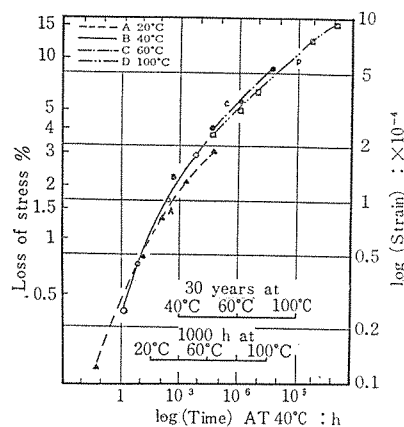


Fig. 14 LMP master curve (Si-Cr steel wire  $0.7 \sigma_B$ )

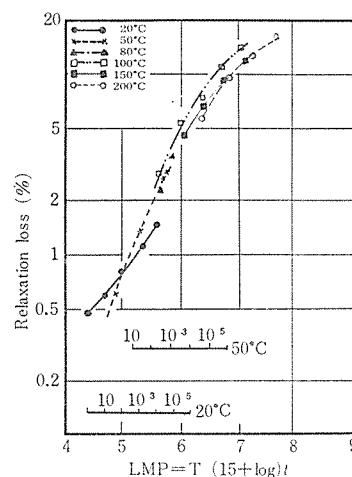
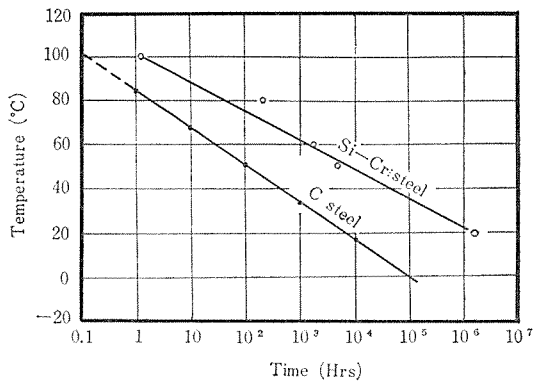


Fig. 15 Temperature vs time of changing point (by Tori Iwata and Katsumata)



り発生した転位がロックされることを低レラクセーション性の根拠としている。通常の stress relieving された鋼線でも、室温にては組織変化があるとは思えないが、転位論的にはレラクセーションの長時間経過中に転位がロックされることが十分考えられ、この意味では、折線法的な考え方も今後検討されるであろう。

ここで、折線法的な考え方に基づいて、われわれは常温における C, Si, Si-Cr steel wire および strand, そして Hot stretched C-steel wire について検討した結果は、それぞれ Fig. 17, 18 のようになる。

また Schwier<sup>7)</sup>は、通常の P C 鋼線にて用いられる伸線加工度より加工度があまり進まないところにレラクセーション値が少ない領域があるとしているが、われわれは、むしろ加工度を増したところに—(これは size effect 的であるが) 細径のものの方がレラクセーション値が少ない傾向にあると考えている。その例を Si-Cr steel wire について、折線法的な考え方によって、Fig. 19 に示す。

さらに、Si-Cr steel wire について昇温試験の結果を表示すると Fig. 20 のようになる。

なおその他、参考のために、昇温時の 1000 時間レラクセーションを Fig. 21 に、種々初期応力の 1000 時間レラクセーションを Fig. 22 に示す。

以上 Si, Si-Cr steel wire について C-steel wire と比較の上に、多種の表示方法を取り入れて説明したが、Si-Cr steel wire についてはかなりの低レラクセーション性が確認されている。Si-steel wire については伸線加工度のとれない 6.35, 7.0 mm などでは低レラクセーション性はあまり期待できないが、5 mm 以下において伸線加工度を高め適当な stress relieving を行なえば、通常の C-steel wire に比してレ

ラクセーション性を改良できる。Si, Si-Cr steel wire などについての理由づけについては専門的すぎるので、本報告ではさけるが、前述のとおり一般的にい方で弾性限が高いためであるとしてよいであろう。

Fig. 16 Relaxation value of Si-Cr steel wires according to the method of Estimation by Tori. Iwata and Katsumata

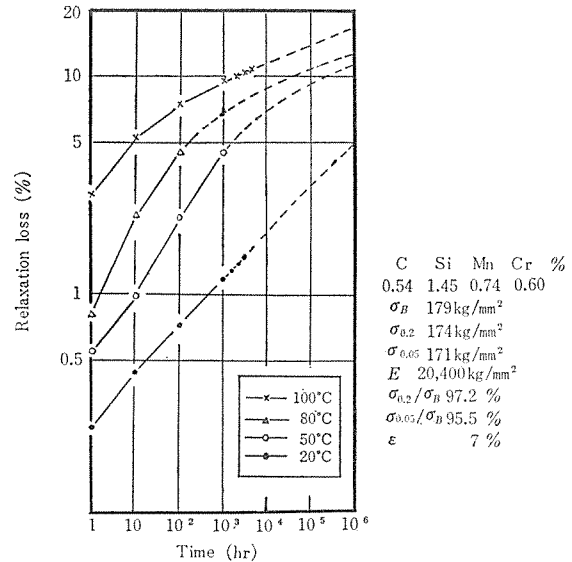


Fig. 17 Relaxation value of strands vs time

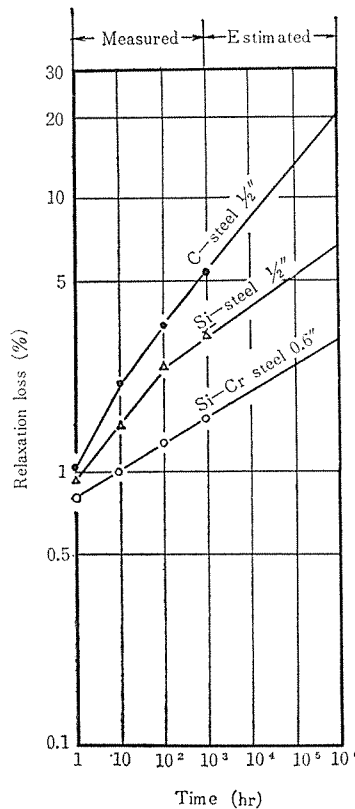
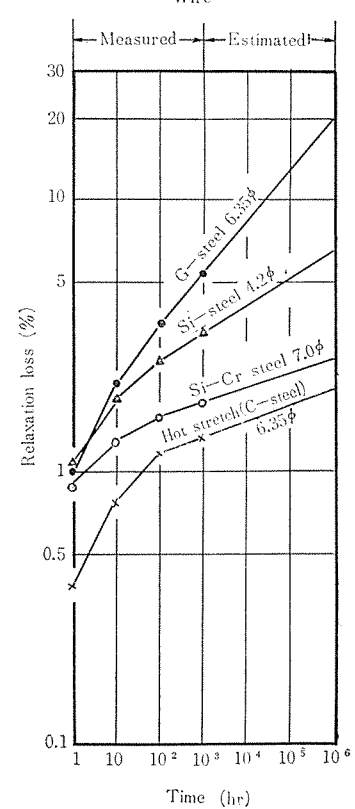


Fig. 18 Relaxation value of wires vs time



なお、レラクセーションの推定法は外  
 そう法に頼ることが多いが、推定線は曲  
 線より直線の方が好ましいことはいうま  
 でもないが、どんな方法を用いるにしま  
 も 1000 時間を越える実測データが今後  
 必要となるであろう。なお、長期にわた  
 る実測例として、Magura<sup>14)</sup>らは振動法  
 にて、C-steel wire (0.192")で、0.705  
 $\sigma_B$  ( $\sigma_B=185 \text{ kg/mm}^2$ )の応力レベルにて、  
 常温 81720時間の測定を行なって12.8%  
 のレラクセーション値を得ている。われ  
 われの推定では、40年では16%近辺と  
 なる。さらにCarson<sup>22)</sup>は、C-steel (5.  
 1 mm)で  $0.70 \sigma_B$  ( $\sigma_B=170 \text{ kg/mm}^2$ )の  
 応力レベルにて、18°C 5年間のレラク  
 セーションは製造条件により異なり、そ  
 れぞれ 5.6, 7.6, 9.6% の値を得てい  
 る。このなかにはかなり低いものもあり、  
 これから 40 年を推定してみると、8.9,  
 10.8, 13.5% 近辺になる。

レラクセーションとクリープとは、機  
 構的にほぼ同じものとして取扱えるの  
 で、昇温時の各ストレスレベルにおける  
 レラクセーションテストを数多く行なえ  
 ば、クリープ関係で用いられている各

Fig. 19 Comparison of relaxation  
 value with various finishing size.  
 (Initial stress=70% of UTS at  
 20°C)

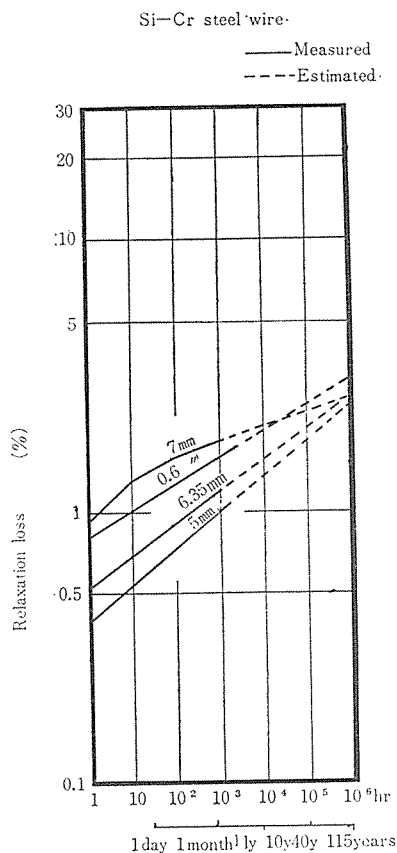


Fig. 20 Relaxation loss (%) at  
 elevated temperatures  
 (Initial stress=70% of UTS at  
 room temperature)

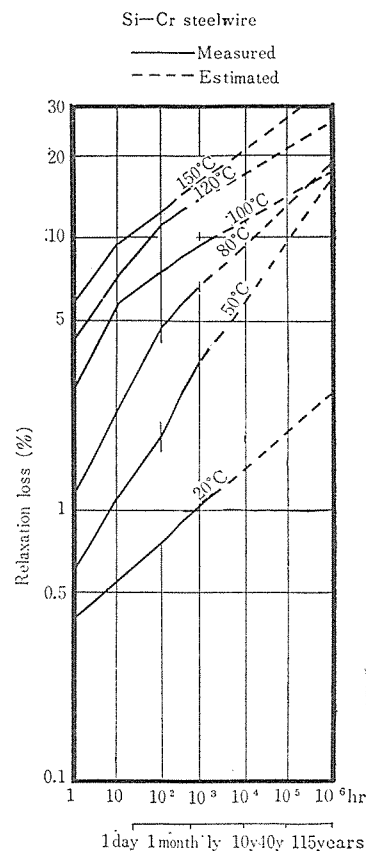


Fig. 21 Relaxation value after 1000 hr at  
 elevated temperature (stress=70%  
 of UTS at room temperature)

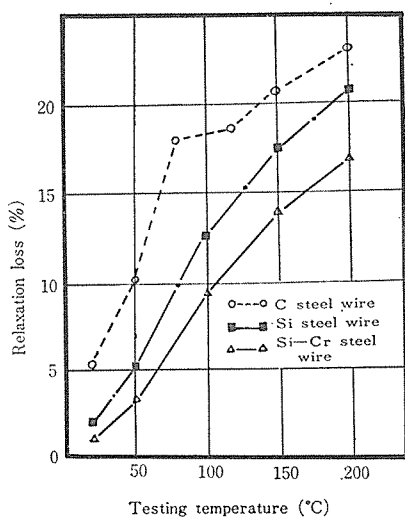
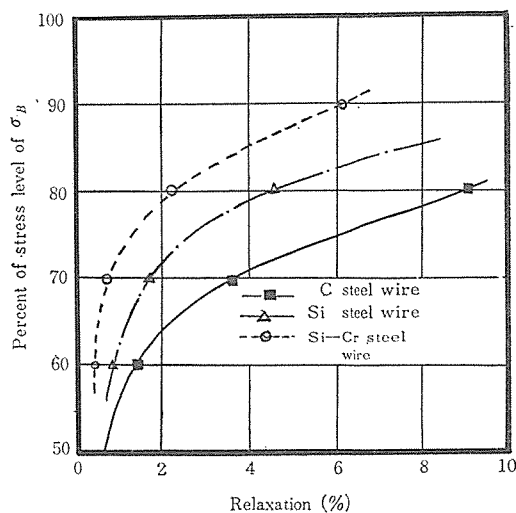


Fig. 22 Relaxation value after 100 hr of  
 various initial stress at 20°C



種推定法—Larson-Miller<sup>20)</sup>, Serby-Dorn<sup>23)</sup>, Manson-  
 Haferd<sup>24)</sup> 法などの適用がさらに明らかになり、これら  
 より、推定法および加速試験法の研究も進むものではな  
 いかと考えられる。

併せて、弾性限で各種材料のレラクセーションデータ  
 を整理することも、簡易鑑別法としての研究課題であろ  
 う。

6. む す び

紙面の関係で Si, Si-Cr steel wire の応力腐食, じん性その他について述べられなかったが, これらについても良い結果が得られている。特にヘッディングテストについては Si, Si-Cr steel wire は C-steel wire とほぼ同一かそれ以上の結果が得られており, いずれ改めて発表する機会をまちたいと考える。

結論として次のようにいうことができる。

1) 冷間伸線, 応力除去処理を施した Si, Si-Cr steel wire は P C 鋼線としての機械的性質を満足する。ただし, 降伏点比は非常に高い。

2) Si-Cr Steel wire は低リラクセーション性があり, 20°C, 0.7  $\sigma_B$ , 1000 時間の数値は 1.8% 程度である。Si-Steel wire については製造条件により異なるが, Si-Cr steel wire と C-steel wire のちょうど中間的なレベルである。

3) レラクセーションテスターとして, ロードセル法を紹介したが, 恒温室内では十分実用にたえる。

4) レラクセーション推定法に, 各種表示とそれらの外そう法が用いられているが, 鋼種, 特殊処理したものを, それぞれ分けて考えれば, どの推定法でも, ほぼ近似的な値を外そうできる。Logarithm Relaxation Loss Time (Fig. 8) など簡単で適当ではないかと思われる。

5) Si-Cr steel wire は特に昇温時の特性にすぐれている。

参 考 文 献

- 1) T. Cahill : "The Development of stabilized Wire and Strand", Wire and Wire Products, Oct. 1964.
- 2) E.A. Shiply : "The Production and Properties of Dyformed Prestressed Concrete Strand", Wire and Wire Products, Dec. 1967.
- 3) London Conference of Prestressed Concrete Vessel

- 1967.
- 4) I. Honda : "High Tensile Hard Drawn Cr-Si Steel Wire", Wire Journal, May, 1969.
- 5) 本田, 他 : 高温引張強さの冷間伸線 Cr-Si ばね鋼線, ばね論文集 (日本ばね工業会) Vol. 19, 1969.
- 6) 辻村・小林・谷・山本 : 熱処理 P C 鋼線のリラクセーション性について, 材料試験 11-111.
- 7) Schwier : "Stress Corrosion and Relaxation of High Carbon Steel Wire for Prestressed Concrete", Wire and Wire Products, Dec. 1955.
- 8) I. Honda, T. Hanajima : "Improved Properties of Stress-Relieved Low Alloy Steel Wires", Journal of P.C.I., 14-2 April. 1969.
- 9) 本田・鈴木他 : Si 鋼および Si-Cr 鋼 P C 鋼線によるリラクセーションの改良, プレストレスト コンクリート技術協会第 9 回研究発表会, Feb. 1969.
- 10) Gifford : "Creep Tests on Prestressing Steel", Magazine of Concrete Association, 15-14, Dec. 1953.
- 11) The University of Illinois : P.C.I. Journal, 9-2 Apr. 1964.
- 12) 平・鈴木 : レラクセーションとクリープの相関性について, 材料試験 11-2, 昭和 37 年 3 月
- 13) 井本立也 : レオロジー入門, 高分子化学刊行会 p. 35.
- 14) Magura, Sozen, Siess : Journal of P.C.I., 9-2, Apr. 1964.
- 15) 鳥居・岩田・勝又 : 材料試験, 11-11, Dec. 1962.
- 16) 田中 : プレストレスト コンクリート 10-4, Oct. 1968.
- 17) F. Stussi : International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 19, 1959.
- 18) Papsdorf, Schwier : Stahl und Eisen, 78-14, 1958.
- 19) Cahill, Branch : Conference on P C Pressure Vessel at London group-D, paper 19, 1967.
- 20) Larson, Miller : Trans. Am. Soc. Engrs., 77, p. 765 ~771. Jul. 1952,
- 21) 前田・清重 : 組織変化を考慮したオーステナイト鋼の長時間クリープラプチュア強度の推定, 材料, Vol. 13, No. 126, p. 5.
- 22) R.H. Carson : Effect of Temperature on Prestressing Wire, London Conference of PCPV.
- 23) Serby, Dorn : Trans. A.S.M., 46, 113, (1954).
- 24) Manson, Hafered : NACA TN 2890, (1953).

1969.12.19・受付

会 員 増 加 に つ い て お 願 い

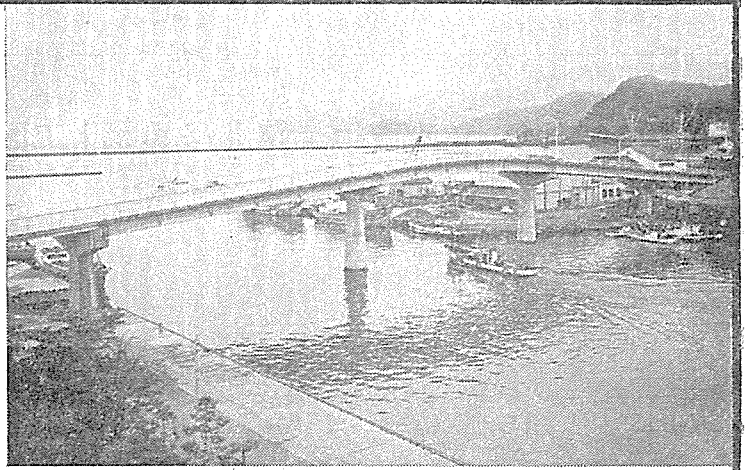
会員の数はその協会活動に反映するもので, 増加すればそれだけ多くの便益が保証されています。現在の会員数は創立当時に比較すると約 4 倍の 1500 余名ですが, まだまだ開拓すべき分野が残されております。お知合いの方を一人でも余計ご紹介下さい。事務局へお申し出で下されば 入会申込書 はすぐお送りいたします。

申込先 : 東京都中央区銀座 2 の 12 の 4 銀鹿ビル 3 階

プレストレスト コンクリート技術協会 TEL (541) 3595



港大橋  
(敦賀市)



ピーエスコンクリート設計施工並に製作

## 日本ピー・エス・コンクリート株式会社

顧問 加賀山之雄      顧問 稲浦鹿蔵      取締役社長 有馬義夫

本社	福井県敦賀市泉125号2番地	電話敦賀 1400(代)
東京営業所	東京都千代田区大手町1丁目4番地(大手町ビル3階362号室)	電話東京 201-8651(代)
大阪営業所	大阪市北区堂島上2丁目39番地(毎日産業ビル別館5階)	電話大阪 344-7731(代)
名古屋営業所	名古屋市中村区広井町2丁目54番地(交通ビル5階52号室)	電話名古屋 571-4515(代)
福岡営業所	福岡市天神一丁目10番24号(福岡三和ビル3階)	電話福岡 74-9426
北陸営業所	福井県敦賀市泉125号2番地	電話敦賀 1400

# スパイラルシース



特許 第506996号

神奈川県工業試験所で  
製品の優秀性 実証



PC器材専門製造



## 鋼弦器材株式会社

取締役社長 平野勝之助

本社 横浜市西区中央2丁目42番6号  
電話 横浜 (441) 5851(代)

製造工場 (合)平野機械製作所

関西支社 大阪鋼弦器材株式会社