

アルミ被電力ケーブルの諸特性

Various Characteristics of Aluminum-Sheathed Power Cables

今井 敏雄*
Toshio Imai

大内 敬次*
Keiji Ōuchi

松山 圭宏*
Yoshihiro Matsuyama

内 容 梗 概

最近わが国において、アルミ被電力ケーブル使用の機運がようやく高まろうとしているが、この形のケーブルの使用上の諸問題について検討した結果を述べる。

鉛に比較してアルミは導電率がよいので、シース損がどの程度増すかについて検討したが、電流容量に及ぼす影響は少なく、たかだか1~5%程度である。

アルミ被ケーブルを管路布設に用いた場合、鉛に比べて毎日負荷変動に対する許容ひずみを大きくとれるので、マンホール寸法を縮小することができる。

クリープ強度についても、鉛に比べ非常に大きくとれるので、OFケーブル、ガス圧ケーブルなどの鉛被補強層を省略することができる。

その他油流抵抗の低減などの効果も大きく、取り扱い上も従来の鉛被ケーブルに比して特別の困難性はない。

最後にアルミ被を用いた各種ケーブルの構造例と簡単な経済性を例示した。

第1表 ケーブル試料

No.	品 名	シース内径 (mm)	厚 度 (mm)	外 径 (mm)
1	平滑アルミ被ケーブル	24.4	1.35	27.1
2	コルゲートアルミ被ケーブル	41.9	1.8	山径 53.5 谷径 45.5

1. 緒 言

アルミ被ケーブルは、従来より欧州特にドイツを中心として広く使用されてきたのであるが、わが国においても最近その有利性が認められ、日立電線株式会社においても西ドイツシュレーマン社よりアルミ押出機を輸入し、製造態勢を確立した。

この報告においては、アルミ被ケーブルの使用上の問題に焦点を絞って、筆者らの検討結果を述べる。アルミ被を電力ケーブルに用いた場合、その特長は

- (1) 外部からの機械的力に対して強固であるため、直埋布設の場合は鋼帯鎧装(がいそう)を省略でき、管路布設の場合は、マンホール内のシースひずみを大きくとることができるので、マンホール寸法を縮小することができる。

また架空布設の、アルミ被特有の布設法も採用することができる。

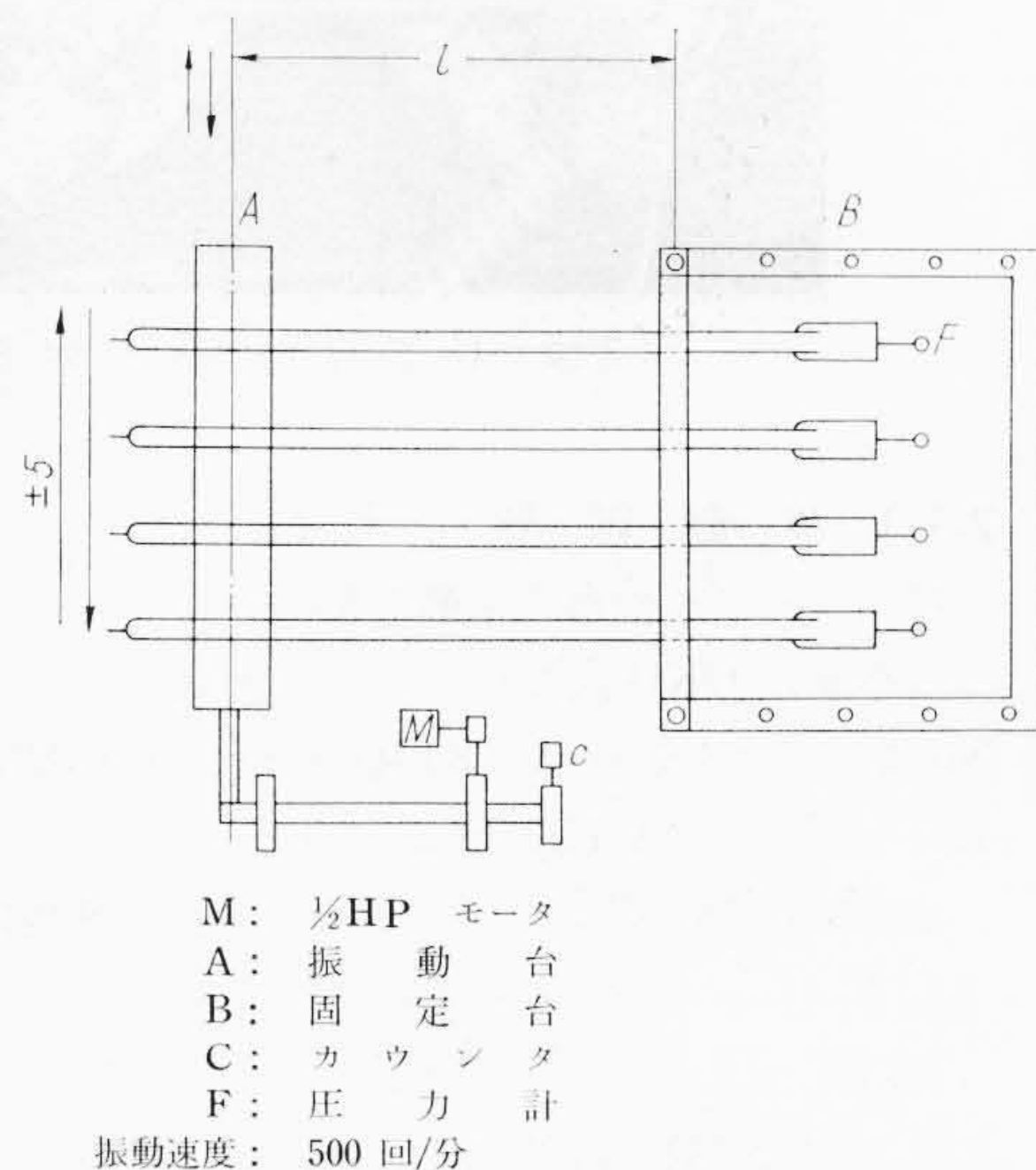
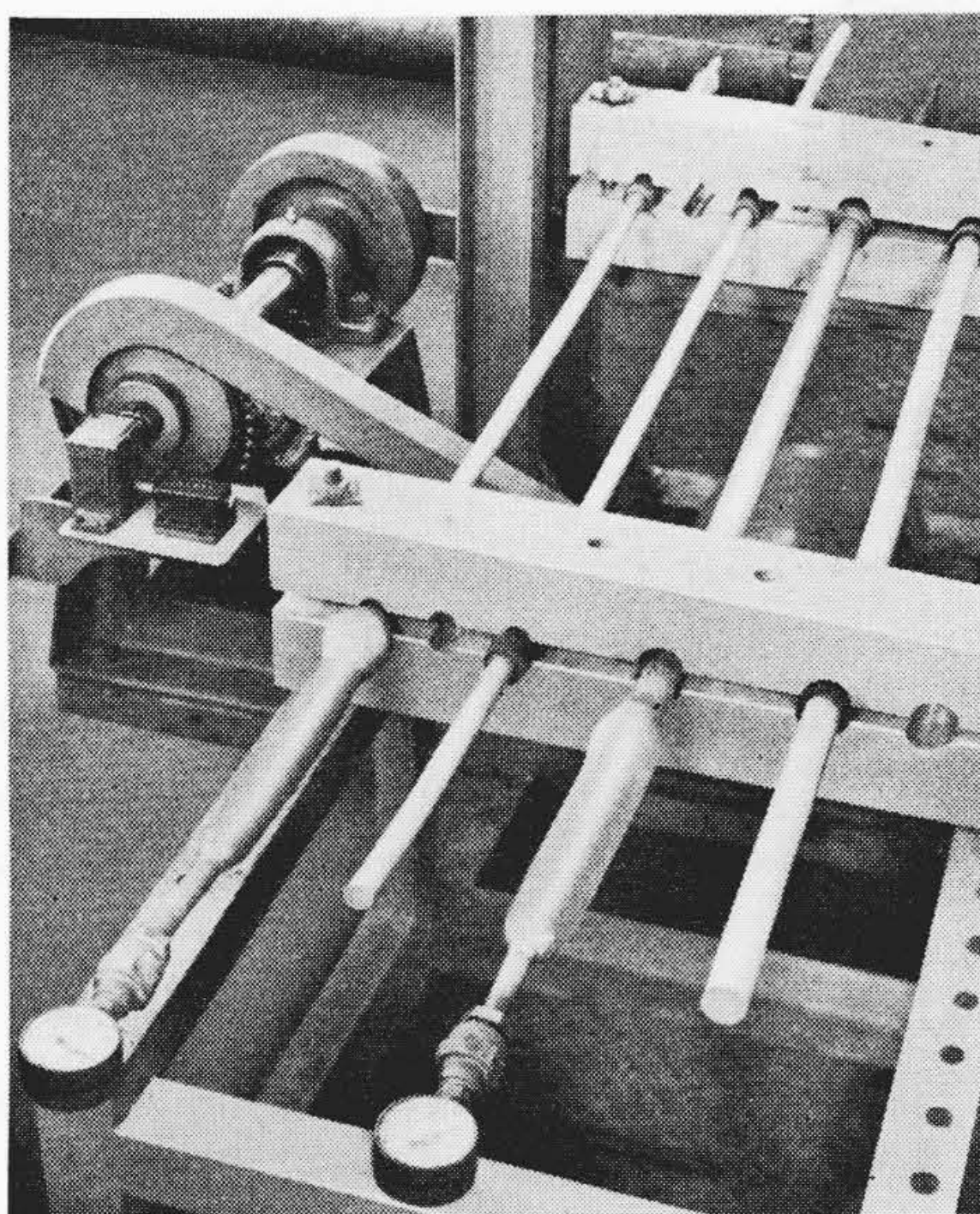
- (2) アルミはクリープ強度が非常に大きいので、内圧形ケーブルに適用すれば、シースの補強層を省略することができる。
- (3) 比重が鉛に比較して約1/4.2であるから、ケーブル重量が鉛被の場合の60~70%程度に低減する。
- (4) 価格が安くなる。

これらの特長に対して、鉛被より不利ではないかと心配される点は

- (1) 鉛よりかたいので、取り扱い上難点にならないか。
- (2) 導電率が鉛の約7.6倍であるため、渦電流損が増し、電流容量が減るのではないか。
- (3) ケーブルの布設許容曲げ半径はどうか、鉛被の場合より大きくならないか。

などの点である。

* 日立電線株式会社日高工場



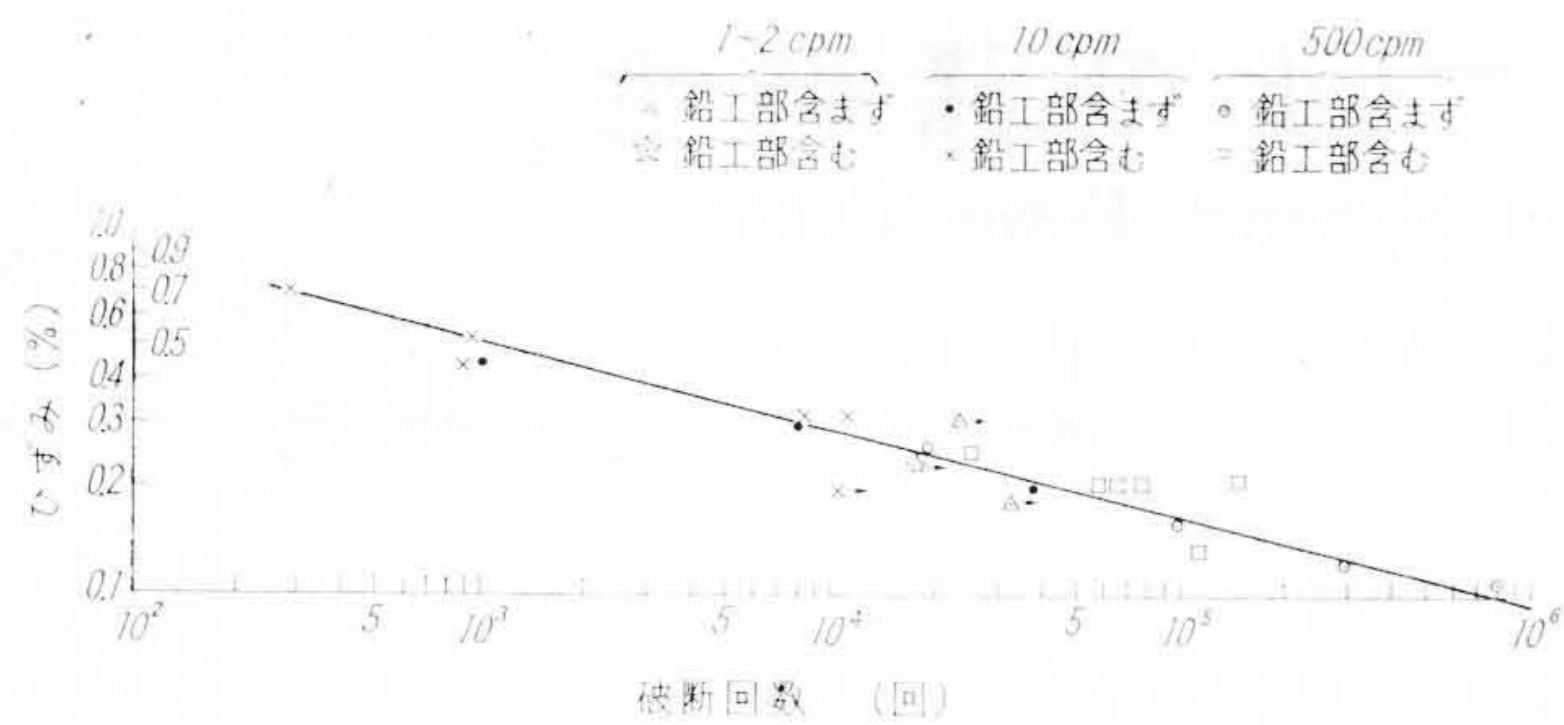
第1図 振動試験装置

これらの点の中でケーブル使用上特に関心が深いと思われる、繰返し曲げ特性、シース損、クリープ強度などの点について検討結果を述べ最後に経済性について付言する。

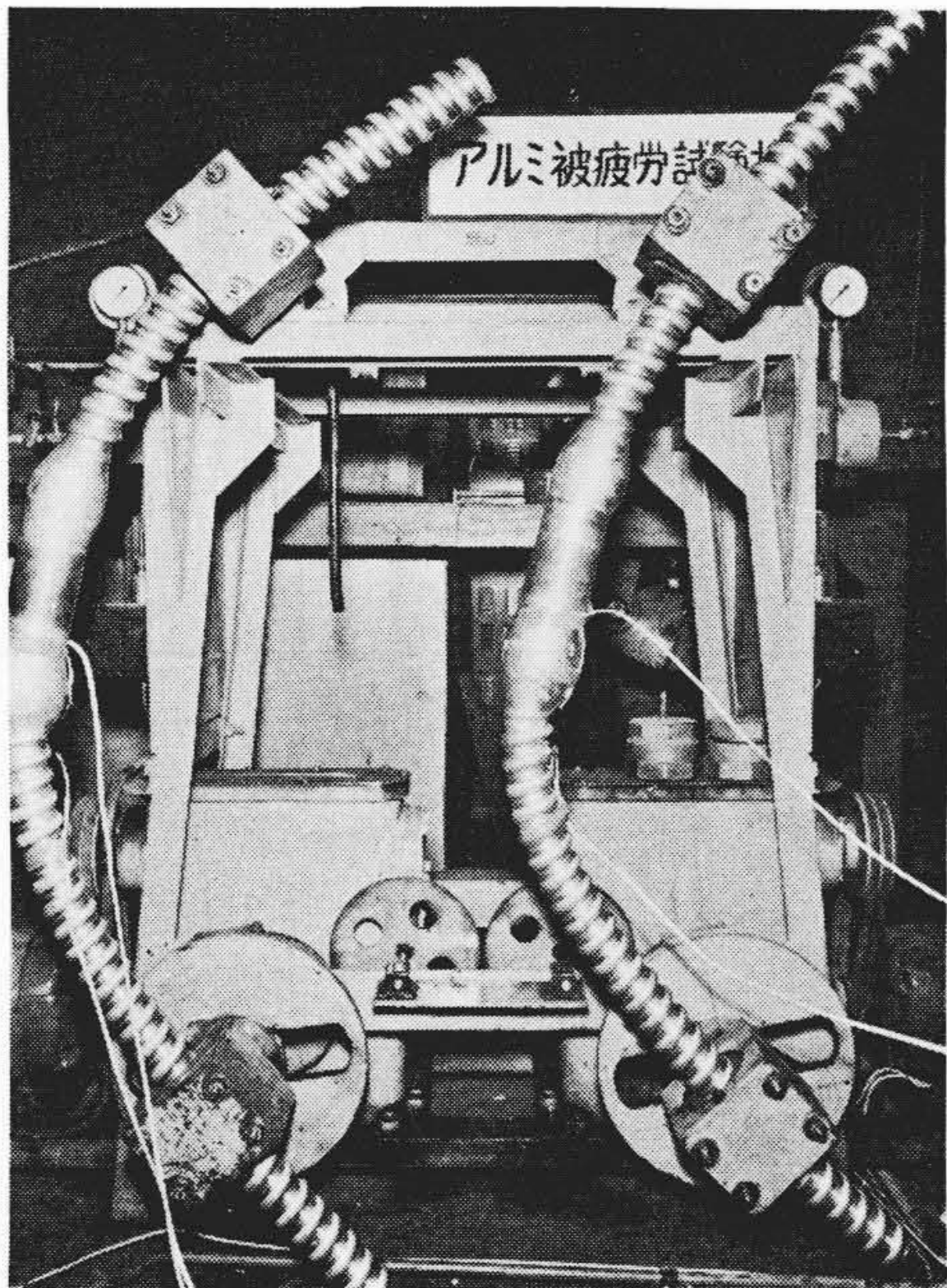
2. アルミ被ケーブルの繰返し曲げ特性とオフセット寸法

2.1 繰返し曲げ特性

ケーブルが布設された状態においてうける繰返し曲げには、種々のものが考えられるが、大別するとたとえば橋梁添架、架空布設などの場合のような比較的周波数の高い振動の曲げと、管路布設の場合のような1日1回の繰返しサイクルの曲げとにわかれる。これらの曲げに対する耐力は、鉛の場合では再結晶温度が常温であるため、曲げの速さによって大きく変わるが、アルミの場合はどうかということを知るためつぎのような実験を行なった。



第 2 図 アルミ被の繰返し曲げ試験結果



第 3 図 U 字形曲げ試験機

2.1.1 振 動 試 験

供試ケーブルの構造を第 1 表に示す。コルゲート付きの場合、その形状は OKD 式である。また供試アルミ被の特性は、試料 No. 1 の場合引張り強さ 8.1 kg/mm²、伸び 32%、試料 No. 2 の場合、引張り強さ 9.4 kg/mm² である。

試験器は第 1 図に示すとおりで、振動速度は 500 サイクル/分である。シースのひずみは抵抗線ひずみ計により測定した。

供試ケーブルのシース内部にガスを充てんし、シースの破断によって曲げ回数が自動的に記録されるようにした。試験結果は第 2 図に示す。

2.1.2 U 字形曲げ試験

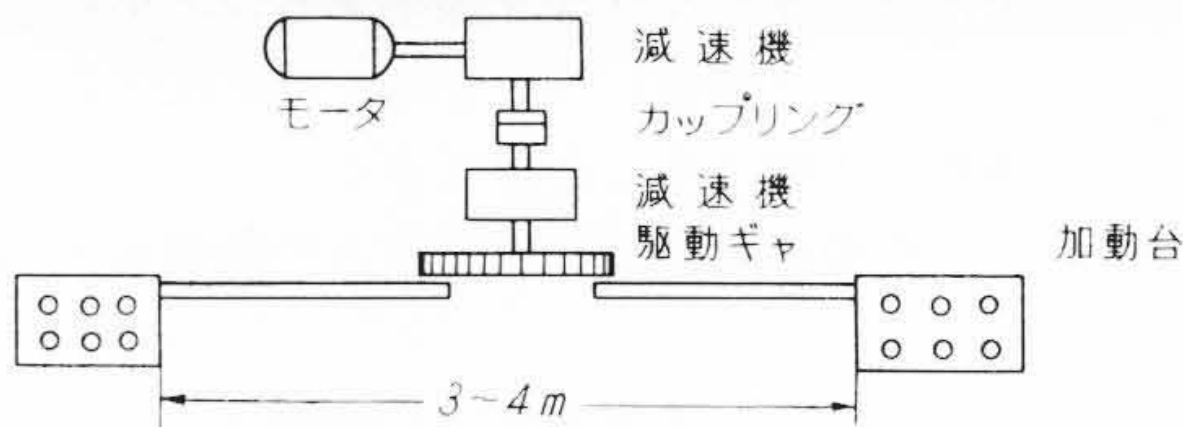
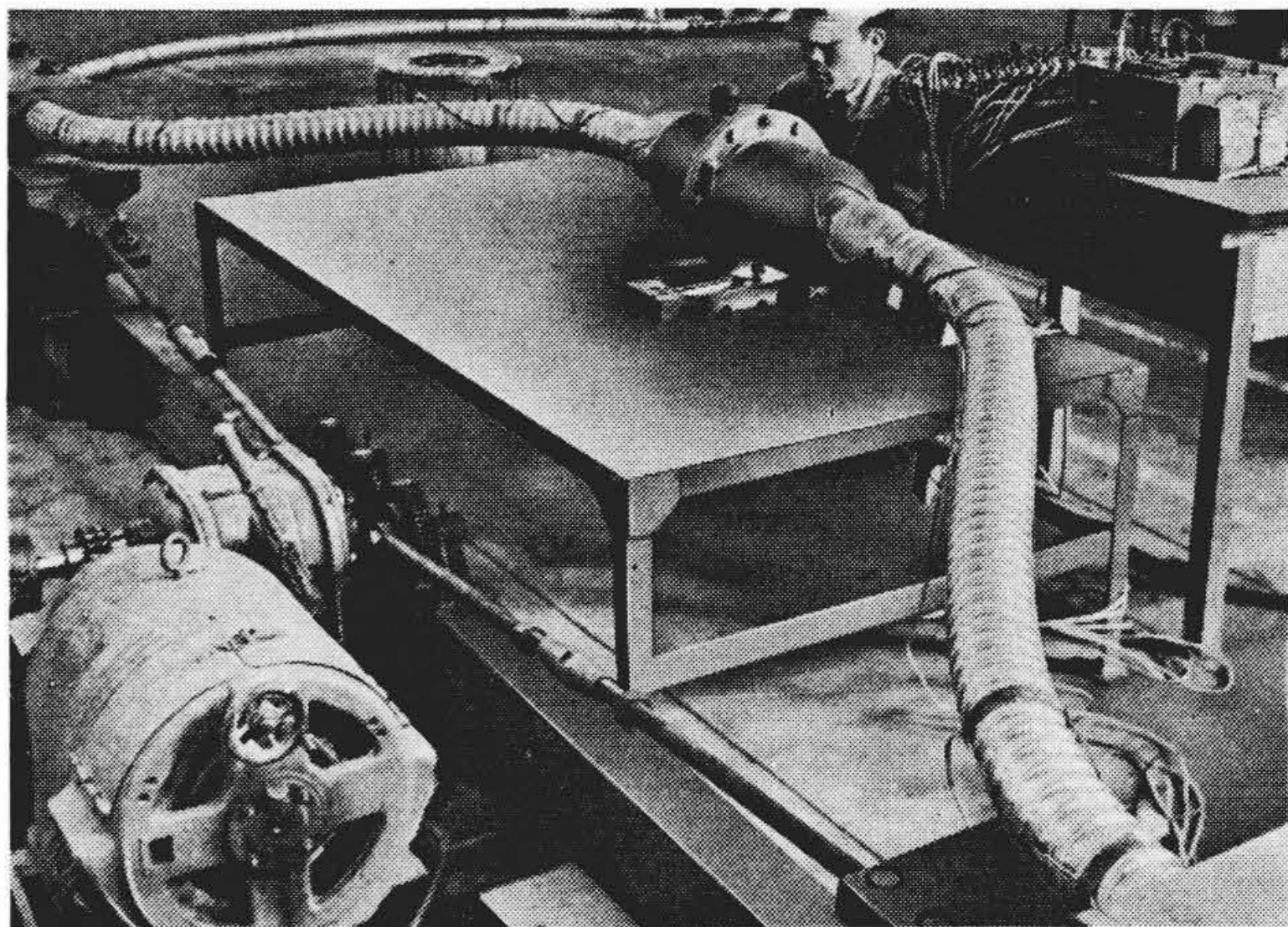
次に上記振動試験よりも曲げ速度の遅い場合の特性を調べるため U 字形曲げ試験を行なった。供試ケーブルは 33 kV 3×160mm² ガス圧ケーブルで OKD 式コルゲート付である。曲げ速度は 10 サイクル/分、試験装置を第 3 図に示す。曲げの振幅を片端で±0～70 mm とし、ひずみの大きさ 0.2～0.6% に合わせるよう加減して調節した。

なお試料は鉛工を含むものと含まないものの 2 種類用いた。試験の結果は第 2 図に示すとおりである。

2.1.3 マンホール曲げ試験

管路布設のケーブルにおいては、管路内ケーブルの熱伸縮をマンホール内に逃がすため、オフセットをとる必要があるが、この部分に発生するひずみの許容値をどれくらいにとれるかということが、実用上大きい問題となる。

そこでこの点を試験するために、第 4 図に示すようなマンホー



第 4 図 マンホール試験機

ル試験機を用いて、繰返し曲げ試験を行なった。供試ケーブルは第 1 表 No. 1 ケーブルおよび OKD 形コルゲート付き 70 kV 3×250mm² OF ケーブルで、曲げ速度は 1 サイクル/分または 2 サイクル/分である。振幅は抵抗線ひずみ計のひずみの読みを所期の値に合わせるよう、両端の移動量を±20 mm 以下で調節している。

またオフセットの形状をきめる場合のケーブル曲げ半径は、最も過酷な場所でシース谷外径の約 10 倍であり、オフセット長さは第 1 表 No. 1 ケーブルの場合 1 m、70 kV 3×250 mm² の場合 2.3 m、またオフセット幅は前者が 300～400 mm、後者が 700 mm である。

試験結果は、前記の振動試験、U 字形曲げ試験の結果とあわせて第 2 図に示した。この図からわかるように、曲げの速さとは無関係に破断回路とひずみの大きさは両対数スケールで直線関係が成り立つ。また、1 日 1 回の負荷サイクルを受けるものとすれば、30 年で約 11,000 回の繰返し回数となるので、許容破断回数を 20,000 回とすれば、0.25% のひずみまで許容しうることが結論できる。またケーブルの布設曲げ半径はシース谷外径の 15 倍までは許容することができる。

2.2 マンホール寸法設計例

前述のような実験より得られた数値を用いて 60 kV 3 心 OF および 275 kV 単心 OF ケーブルにつき、鉛被の場合とアルミ被の場合

第 2 表 計 算 条 件

項 目	記 号	鉛被ケーブル	波付アルミ被ケーブル
シ ー ス 外 径	D	89.2 mm	山 径 97.8 mm 谷 径 85.2 mm
ケ ー ブ ル 重 量	W	29 kg/m	17 kg/m
ケーブル導体の通日温度変化	T_c	25℃	25℃
アルミシースの通日温度変化	T_s	—	17℃
シースの許容ひずみ	δ	0.15%	0.25%
銅の膨張係数	C_1	1.67×10^{-6}	1.67×10^{-6}
アルミの膨張係数	C_2	—	2.40×10^{-6}
導 体 断 面 積	A_1	$3 \times 3.25 \text{ cm}^2$	$3 \times 3.25 \text{ cm}^2$
アルミ被断面面積	A_2	—	6.44 cm ²
導 体 の ヤ ン グ 率	E_1	$5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
(波付) アルミ被のヤング率	E_2	—	$1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ (1)
人孔内オフセット拘束力	K	200 kg	400 kg (2)
管路とケーブルの摩擦係数	μ	0.3	0.3
人 孔 間 隔	L	200 m	200 m
許 容 曲 げ 半 径	—	鉛被外径の 10 倍	アルミ被谷外径の 15 倍

注：(1) (2) は実測値による

のマンホール寸法の比較を行なってみる。

2.2.1 60 kV 3×325 mm² OF ケーブルの場合

計算の条件を第2表に示す。アルミ被ケーブルの場合シースの伸び弾性について考慮する必要がある。まずシースの毎日温度変化の大きさを推定する。負荷は正弦波的变化をするものと仮定すると、次式が成り立つ⁽¹⁾。

$$H_{\text{total}} = H_{\text{int}} + \{1 - (Lf)\} H_{\text{et}} + (Lf) H_{\text{ext}}$$

$$H_{\text{et}} = 0.120 \rho \log_{10} \frac{50}{D_e} \sqrt{\frac{\alpha}{f}}$$

ただし H_{total} : 全熱抵抗 (Thermal Ω -ft)

H_{int} : 導体とシース間の熱抵抗 (Thermal Ω -ft)

H_{et} : 土壤の過渡熱抵抗 (Thermal Ω -ft)

H_{ext} : 損失率の影響が及ばない範囲の土壤熱抵抗 (Thermal Ω -ft)

(Lf) : 損失率

ρ : 土壤固有熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}/\text{cm}^3$)

D_e : シース外径 (in)

α : 土壤の熱拡散係数 (in/h)

f : 1日の負荷サイクル数

シースの温度変化 T_s は近似的に次式で与えられる。

$$T_s = \frac{\{1 - (Lf)\} H_{\text{et}}}{H_{\text{int}} + \{1 - (Lf)\} H_{\text{et}}} \times T_c$$

ただし T_c : 導体の毎日温度変化 ($^{\circ}\text{C}$)

である。

これらの式において $\rho=80$, $f=1$, $D_e=9.15$ cm, $(Lf)=0.6$, $\alpha=2.75$ in/hr, $H_{\text{int}}=20$ および $T_c=25$ とおくと,

$$H_{\text{et}} = 0.0120 \times 80 \times 304.8 \log_{10} \frac{50}{9.15/2.54} \sqrt{\frac{2.75}{1}} \\ = 106.0 \quad (^{\circ}\text{C}/\text{W}/\text{cm}^3)$$

$$T_s = \frac{(1-0.6) \times 106}{20 + (1-0.6) \times 106} \times 25 = 17 \quad (^{\circ}\text{C})$$

つぎに導体とシースを合成した合成伸び弾性係数を求める。合成伸び弾性係数を E とすると

$$E = E_1 + E_2 \frac{A_2 C_2 T_2}{A_1 C_1 T_1}$$

である。

ただし A_1 : 導体の断面積 (mm^2)

A_2 : シースの断面積 (mm^2)

C_1 : 銅の線膨張係数

C_2 : アルミの線膨張係数

T_1 : 導体の温度変化 ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 : シースの温度変化 ($^{\circ}\text{C}$)

E_1 : 導体の伸び弾性係数 (kg/mm^2)

E_2 : シースの伸び弾性係数 (kg/mm^2)

60 kV 3×325 mm² OF ケーブルの場合, E_2 の値は第5図の実測値により $E_2=1,000$ kg/mm² である。またそのほかの数値は, $T_1=25^{\circ}\text{C}$, $T_2=17^{\circ}\text{C}$, $A_1=3 \times 3.25$ cm², $A_2=6.44$ cm², $C_1=1.67 \times 10^{-5}$, $C_2=2.4 \times 10^{-5}$ であるから,

$$E = 5 \times 10^5 + 1 \times 10^5 \times \frac{6.44 \times 2.4 \times 10^{-5} \times 17}{3 \times 3.25 \times 1.67 \times 10^{-5} \times 25} \\ = 5.7 \times 10^5 \quad (\text{kg}/\text{cm}^2)$$

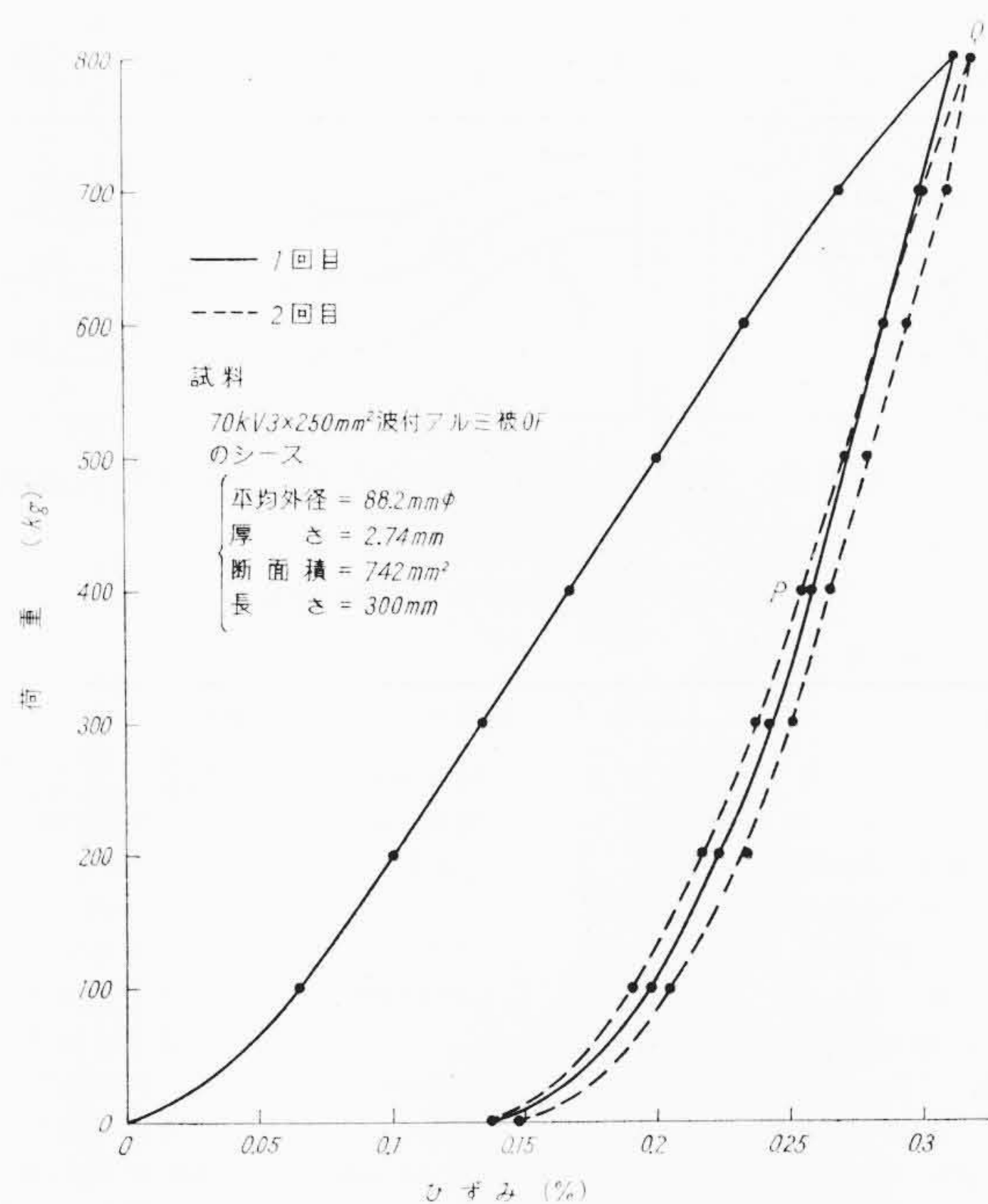
マンホール内の拘束力の大きさは、鉛被およびアルミ被の場合とも、実測値を採用している。

以上のような数値に基づきケーブルの移動量を計算すると第3表のとおりである。

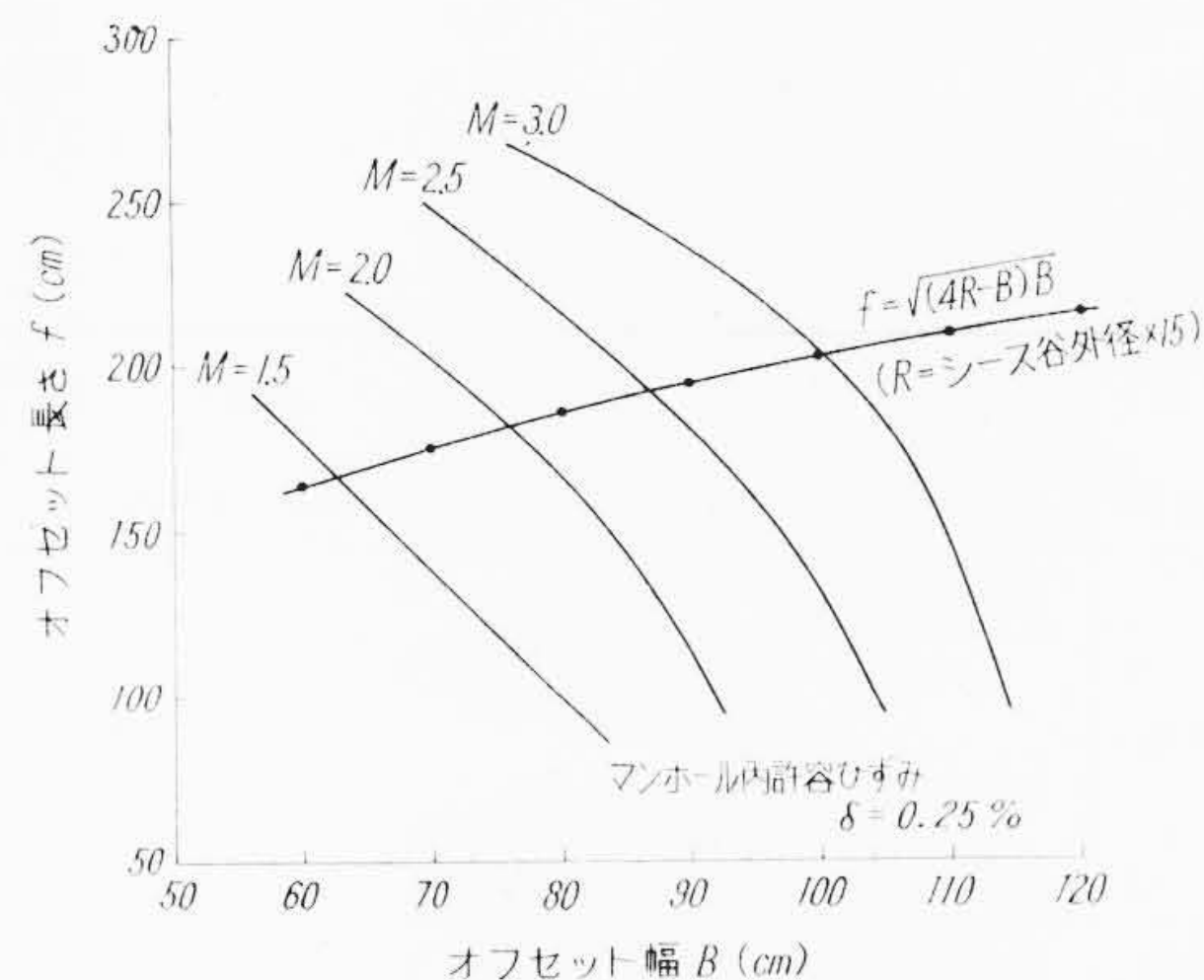
つぎにオフセット幅と長さの関係を C. A. Bauer の式および曲

第3表 ケーブルの移動量

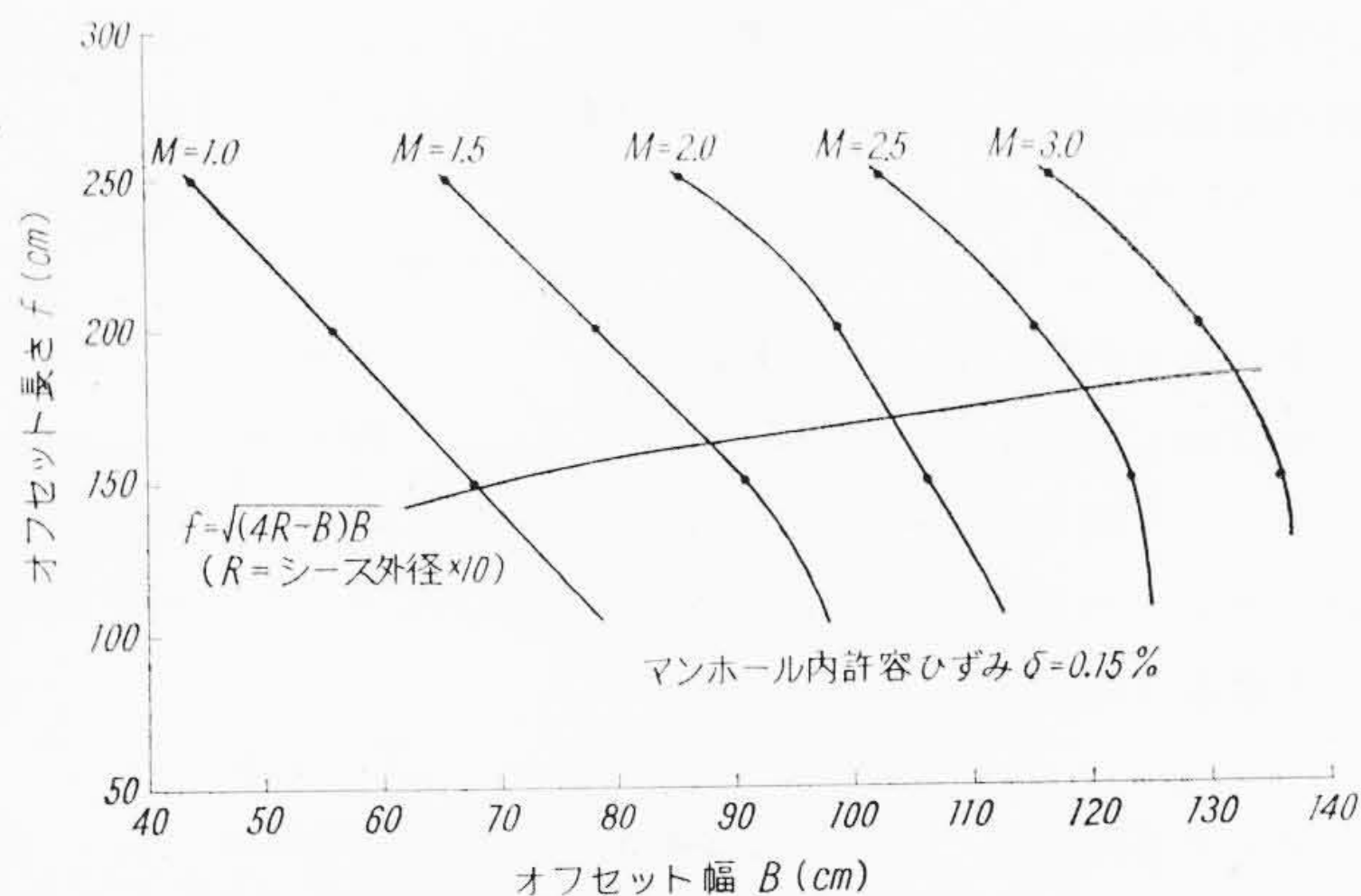
項目	計算式	鉛被ケーブル	アルミ被ケーブル
不動帯の長さ	$L_c = (CAET - 2K) / W_p$	188 m	298 m
最大移動量	$L_c > L$ のとき $M = \left(CT - \frac{2K}{AE} \right) L - \frac{W_p}{2AE} L^2$ $L_c < L$ のとき $M_c = 2C^2 AE \left(T - \frac{2K}{CAE} \right)^2 / 4 W_p$	3.15 cm	3.64 cm
片端の移動量	$M/2$ または $M_c/2$	1.6 cm	1.9 cm



第5図 アルミ被の圧縮弾性

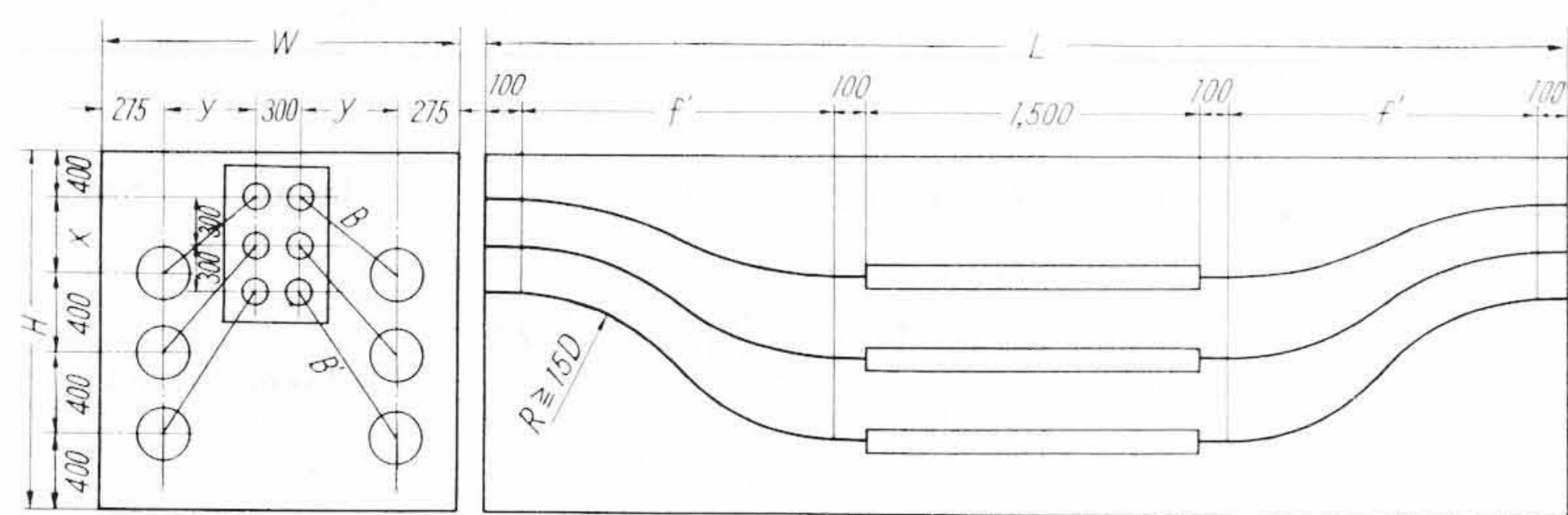


(A) アルミ被OFケーブル

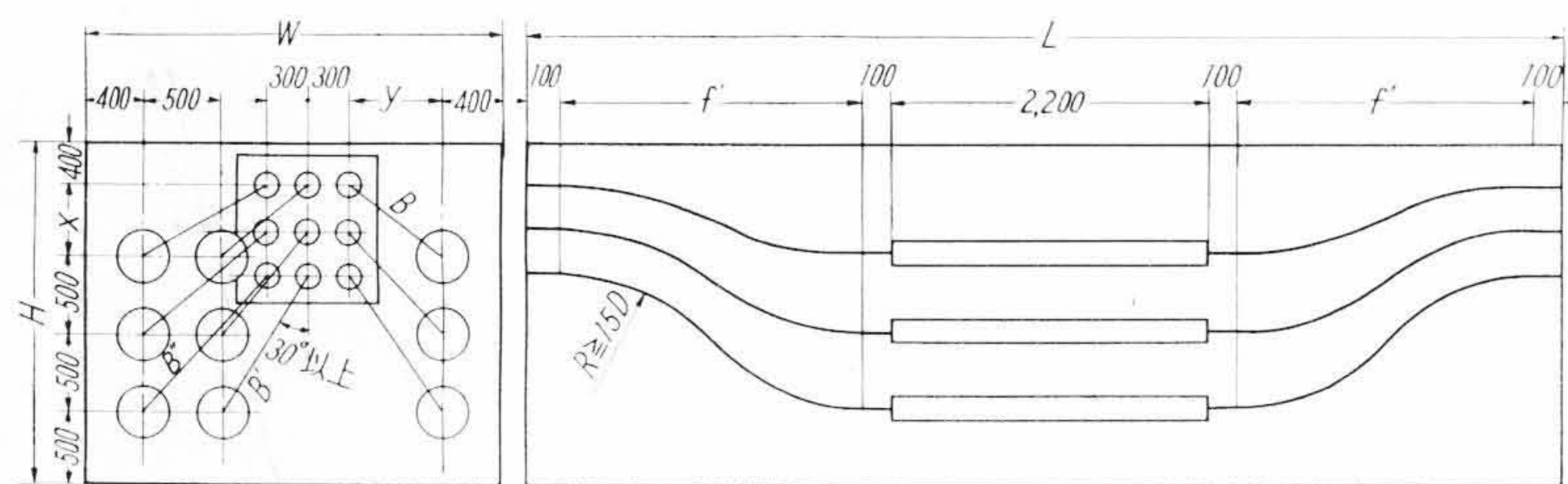


(B) 鉛被OFケーブル

第6図 オフセット長さとの関係



第 7 図 60 kV 3×325 mm² OF ケーブル人孔断面図



第 8 図 275 kV 1×1,000 mm² OF ケーブル人孔断面図

第 4 表 計算条件および移動量

(A) 計算条件				
項 目	記 号	鉛被ケーブル	波付アルミ被ケーブル	
シ ー ス 外 径	D	94.1 mm	谷径 92.2 mm	山径 105.4 mm
ケ ー ブ ル 重 量	W	32 kg/m	20 kg/m	
ケーブル導体の通日温度変化	T_c	25℃	25℃	
アルミシースの通日温度変化	T_s	—	10℃ ⁽¹⁾	
シ ー ス の 許 容 ひ ず み	δ	0.15%	0.25%	
銅 の 膨 張 係 数	C_1	1.67×10^{-5}	1.67×10^{-5}	
アルミの膨張係数	C_2	—	2.40×10^{-5}	
導 体 断 面 積	A_1	10.0 cm ²	10.0 cm ²	
アルミシース断面積	A_2	—	7.27 cm ²	
導 体 の ヤ ン グ 率	E_1	5×10^5 kg/cm ²	5×10^5 kg/cm ²	
(波付) アルミ被のヤング率	E_2	—	1×10^5 kg/cm ²	
人孔内オフセット拘束力	K	200 kg	400 kg ⁽²⁾	
管路とケーブルの摩擦係数	μ	0.3	0.3	
人 孔 間 隔	L	200 m	200 m	
許 容 曲 げ 半 径	—	鉛被外径の 15 倍	アルミ被谷外径の 15 倍	

注：(1) 計算値 (2) 実測値

(B) 移 動 量				
項 目	計 算 式	鉛被ケーブル	アルミ被ケーブル	
不動帯の長さ	$L_c = (CAET - 2T) / W\mu$	176 m	243 m	
最大移動量	$L_c > L$ のとき $M = \left(CT - \frac{2K}{AE} \right) L - \frac{W\mu}{2AE} L^2$	2.97 cm	4.23 cm	
	$L_c < L$ のとき $M_c = 2C^2AE \left(T - \frac{2K}{CAT} \right) / 4W\mu$			
片端の移動量	$M/2$ または $M_c/2$	1.5 cm	2.1 cm	

げ半径の関係から求めると第 6 図のようになる。この図から 第 3 表の移動量に対するオフセット幅(B)と長さ(f)が求まり、つぎのようになる。

	鉛 被	アルミ被
オフセット幅 B	80cm	70cm
オフセット長 f	205cm	190cm

ケーブルの布設回線数を 6 回線とし、第 7 図のような配置の場合、マンホール体積を最小ならしめるようなマンホール寸法は、つぎのようになる。

	鉛 被	アルミ被
マンホール高さ H	2,200 mm	2,200 mm
マンホール幅 W	1,908 mm	1,680 mm
マンホール長さ L	6,020 mm	5,800 mm

これを容積で比較すると、アルミ被にした場合容積比で約 10% の低減となる。

2.2.2 275 kV 1×1,000 mm² OF ケーブルの場合

計算の方法は上記と全く同様であるが、計算条件および計算結果をまとめて第 4 表に示す。

この結果により、3 回線布設の場合の配置を 第 8 図のとおりとすれば、最小容積となるようなマンホール寸法は、つぎのとおりとなり、アルミ被とすることにより容積で約 9% の低減となる。

	鉛 被	アルミ被
マンホール高さ H	2,541 mm	2,460 mm
マンホール幅 W	2,560 mm	2,500 mm
マンホール長さ L	7,300 mm	7,020 mm

3. 電 流 容 量

アルミは、その導電率が鉛の約 8 倍であるため、渦流損などによる損失が増大し、電流容量を減ずるのではないかという懸念がある。この点に関する検討結果について述べる。

3.1 3 心ケーブル (共通アルミ被) の場合

鉛被ケーブルの場合、共通シース 3 心ケーブルの渦流損失は小さいので、許容電流の算定にあたってはこれを無視しているが、アルミ被の場合、これが無視できないとすれば、どのくらいの大きさになるかということに関して、実測を行なった。

供試ケーブルは 70 kV 3×250 mm² OF ケーブル (OKD 形コルゲート) 5 m で、これの導体実効抵抗を、シースのある場合とない場合について実測し、渦電流損はその差として求められる。測定回路を 第 9 図に示す。

通電電流は 100, 250, 500 A の 3 種類とし、通電時間は測定可能範囲の 1 ~ 2 分程度に制限した。これは導体の温度上昇による誤差を減らすのが目的である。

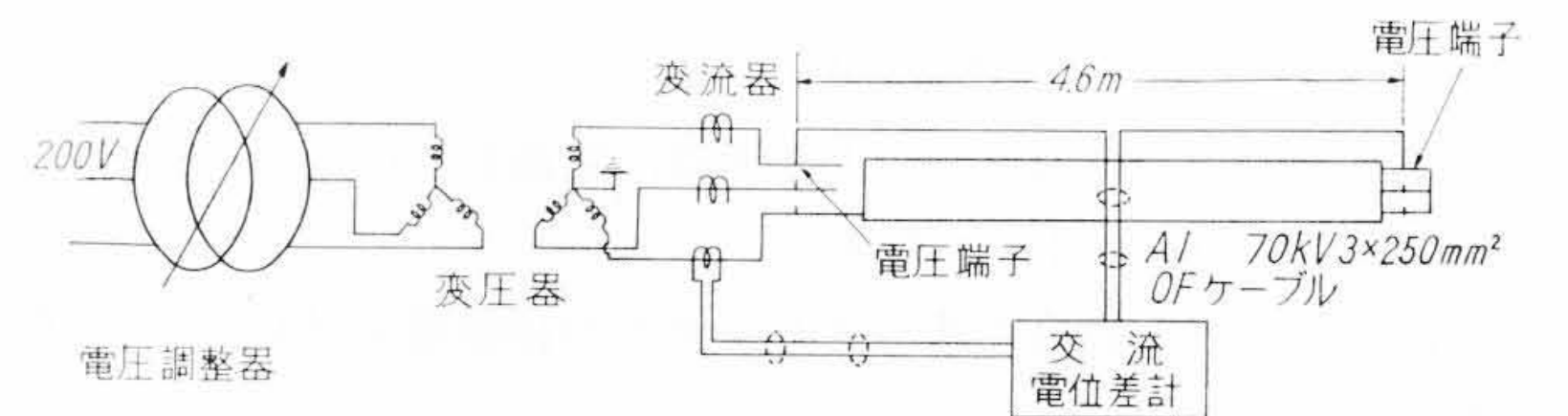
測定結果を 第 5 表に示す。これからわかるようにシースの存在による実効抵抗の増大分は約 10% である。すなわち銅損に対するシース損の比が 10% ということになる。

この測定結果と、種々の計算方式によって計算した結果を比較してみるとつぎのようになる。

まず J. H. Neher, M. H. Mc Grath 両氏の計算方式⁽²⁾によればシース損と銅損の比 P はつぎの式で与えられる。

$$P = \frac{P_s}{3I^2R} = \frac{3R_s}{R} \left\{ \frac{\left(\frac{2S}{D_{sm}} \right)^2}{\left(\frac{5.2R_s}{f} \right)^2 + 1} + \frac{\left(\frac{2S}{D_{sm}} \right)^4}{4 \left(\frac{5.2R_s}{f} \right)^2 + 1} + \frac{\left(\frac{2S}{D_{sm}} \right)^8}{16 \left(\frac{5.2R_s}{f} \right)^2 + 1} \right\}$$

ただし P : シース損/銅損
 P_s : シ ー ス 損 (W/cm)
 I : 電 流 (A)
 R : 導体直流抵抗 (Ω /cm)



第 9 図 測 定 回 路

第5表 実効抵抗測定結果

(A) 測定結果		Al シース有						Al シース無		
シースの有無		青 相			赤 相			赤 相		
相 別										
通電電流 (A)		100	250	500	100	250	500	100	250	500
実効値	電流 (A)	100	250	500	100	250	500	100	250	500
	電圧 (mV)	54.94	136.7	267.2	54.24	136.4	267.8	54.94	139.0	270.8
位相角	電流	280°30′	307°06′	330°23′	161°48′	186°45′	211°34′	161°25′	187°59′	211°00′
	電圧	232°27′	259°11′	283°08′	113°17′	139°39′	164°10′	108°31′	135°16′	158°53′
	電流電圧の差 (θ)	48°03′	47°55′	47°15′	48°31′	47°06′	47°24′	52°54′	52°43′	52°07′
cos θ		0.6685	0.6702	0.6788	0.6624	0.6807	0.6769	0.6032	0.6057	0.6141
Z (×10 ⁻⁴ Ω/4.6 m/気温)		5.394	5.47	5.35	5.424	5.46	5.36	5.494	5.57	5.42
抵抗 R	(×10 ⁻⁴ Ω/4.6 m/気温)	3.600	3.665	3.630	3.590	3.715	3.630	3.310	3.37	3.325
	(×10 ⁻⁵ Ω/m/20℃)	8.28	8.40	8.33	8.23	8.47	8.28	7.52	7.66	7.57
大気温度 (℃)		5.0	6.0	6.0	6.0	7.0	7.0	8.5	8.5	8.5

(B) 実効抵抗の変化				
通電電流	シースの有無 相 別	交流実効抵抗		
		Al シース有		増加分
		青 相	赤 相	
100A		8.28	8.23	7.52
250A		8.40	8.47	7.67
500A		8.33	8.28	7.57

(注) ○実効抵抗の単位 ×10⁻⁵ Ω/m/20℃
○増加分は赤相の値である。青相も大差ない。

第6表 P の値の計算値と実測値の比較

計 算 式	計 算 値	実測値 (平均)
Neher, Mc Grath の式	0.102	0.098
Arnord の式	0.118	
Dwight の式	0.137	

R_s : シース直流抵抗 (Ω/cm)
 S : 導体の中心とケーブル中心との間の距離 (cm)
 D_{sm} : シースの平均直径 (cm)
 f : 周波数 (サイクル/s)
 また A. H. M. Arnord 氏の式⁽³⁾は

$$P = \frac{X_s^2 X^2 \left\{ \frac{2(d+S)}{\sqrt{3}(d-t_s)} \right\}^2}{5 \cdot \left\{ 1 + \frac{X_s^4}{16} \right\} \{1 + \lambda_p\}^{\frac{1}{2}}}$$

$$X_s^2 = \frac{4\omega}{R_s}, \quad X^2 = \frac{4\omega}{R}$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{3}{2} \alpha^2 G(X_1)}{\left\{ 1 - \frac{5}{24} \alpha^2 H(X_1) \right\}}$$

$$\alpha = \frac{d}{d+S}, \quad X_1 = \sqrt{k \cdot X^2} \quad (k=1.0)$$

$$F(X) = \frac{X}{2\sqrt{2}} \left(1 + \frac{3}{8X^2} \right) - \frac{3}{4}$$

$$G(X) = \frac{X}{4\sqrt{2}} \left(1 + \frac{1}{8X^2} \right) - \frac{1}{8}$$

$$H(X) = \frac{F(X)}{G(X)}$$

ただし P : シース損/銅損
 ω : 角周波数 $2\pi f$, f : 周波数
 R_s : シース直流抵抗 (Ω/cm)
 R : 導体直流抵抗 (Ω/cm)
 d : 導体外径 (cm)
 S : 導体間の絶縁体の厚さ (cm)
 d_s : シース外径 (cm)
 t_s : シース厚さ (cm)
 λ_p : 近接効果

また H. B. Dwight 氏の式⁽⁴⁾は

$$P = \frac{2a^2}{Cl} \frac{\rho_s}{\rho_c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{S^{2n}}{C^{2n}} \left(\frac{l^4}{l^4 + n^2} \right) \sin \left(\frac{n\pi}{3} \right)$$

ただし P : シース損/銅損
 a : 導体半径 (cm)
 C : シース平均直径 (cm)
 t : シース厚さ (cm)
 ρ_s : シースの体積固有抵抗 (Ω-cm)
 ρ_c : 導体の体積抵抗率 (Ω-cm)
 S : 導体の中心とケーブル中心との間の距離 (cm)
 $l^2 = \omega \frac{2\pi Ct}{\rho_s}$

これらの式に諸数値を代入して計算した結果と実測値を比較して示すと第6表のようになる。これからわかるように J. H. Neher, M. H. Mc Grath 両氏の式が最も実測値に近い値を与える。

そこで、この式によりシース損を計算し、60 kV 3×80mm² および 325 mm² について、6 孔式管路布設の条件で許容電流計算を行った。結果を第7表に示す。これからわかるように、アルミ被とした場合許容電流の減少率は 80 mm² の場合で 2.5%, 325 mm² の場合で 6% にすぎない。並列ケーブル条数が減れば、さらにこの低下率が減ってくることはもちろんであり、空中布設または直埋布設の場合も、シースから外側の熱抵抗が減るので、減少率は少なくなる。

3.2 3 心ケーブル (各心アルミ被) の場合

各心アルミ被 3 心ケーブルは 20~30 kV 級 SL ケーブルに代わって用いられる SA ケーブルが主として対象となるが、この場合のシース損としては、シースの長さ方向に各相間を循環する電流による損失と、近接効果による渦電流損失とにわかれる。これらは次の式で与えられる⁽⁵⁾。

$$P = Y_{sc} + Y_{se}$$

$$Y_{sc} = \frac{R_s}{R_c} \frac{X_m^2}{(R_s^2 + X_m^2)}$$

第7表 許容電流計算表

計 算 式	単 位	325mm ²		80mm ²	
		鉛被PE防食	アルミ被PE防食	鉛被PE防食	アルミ被PE防食
$R_1 = \frac{P_1}{6\pi} \times G_1 \times K$	℃/W/cm	$\frac{550}{6\pi} \times 1.20 \times 0.6 = 21.0$	$\frac{550}{6\pi} \times 1.14 \times 0.6 = 20.0$	$\frac{550}{6\pi} \times 1.72 \times 0.6 = 30.1$	$\frac{550}{6\pi} \times 1.66 \times 0.6 = 29.0$
$R_2 = \frac{P_2}{2\pi} \times \log_e \frac{d_3}{d_2} \times \frac{d_3}{d_4}$	℃/W/cm	$\frac{400}{2\pi} \log_e \frac{90.2}{89.2} \times \frac{97.2}{91.2} = 4.9$	$\frac{400}{2\pi} \log_e \frac{103.8}{85.2} = 12.6$	$\frac{400}{2\pi} \log_e \frac{66.2}{65.2} \times \frac{73.2}{67.2} = 6.45$	$\frac{400}{2\pi} \log_e \frac{77.4}{61.4} = 14.65$
$R_3 = \frac{10}{\pi} \times \frac{P_3}{d_5}$	℃/W/cm	$\frac{10}{\pi} \times \frac{900}{99.2} = 28.9$	$\frac{10}{\pi} \times \frac{900}{103.8} = 29.3$	$\frac{10 \times 900}{\pi \times 73.2} = 39.1$	$\frac{10 \times 900}{\pi \times 77.4} = 37.0$
$R_4 = K \frac{gNLf}{2\pi} \log_e \frac{4l}{L}$	℃/W/cm	$0.7 \times \frac{6 \times 80 \times 0.6}{2\pi} \log_e \frac{4 \times 1,935}{\sqrt{570 \times 870}} = 76.8$			
$R_{th} = R_1 + (1+P)/(R_2+R_3+R_4)$	℃/W/cm	$21.0 + (1+0.0433)/(4.9+28.9+76.8) = 136.5$	$20.0 + (1+0.13)/(12.6+29.3+76.8) = 154.0$	$30.1 + (1+0.007)/(6.45+39.1+76.8) = 153.3$	$29.0 + (1+0.0226)/(14.65+37.0+76.8) = 160.4$
$C = \frac{0.02413 \times \varepsilon}{\log_{10} \frac{D}{d}}$	μF/km	$\frac{0.02413 \times 3.7}{\log_{10} \frac{36.5}{22.6}} = 0.429$		$\frac{0.02413 \times 3.7}{\log_{10} \frac{26.0}{11.3}} = 0.246$	
$W_d = 2\pi f CE^2 \tan \delta$	W/cm	$2\pi \times 50 \times 0.429 \times 10^{-11} \times 66,000^2 \times 0.005 = 0.0294$		$2\pi \times 50 \times 0.246 \times 10^{-11} \times 66,000^2 \times 0.005 = 0.01685$	
$r = R_6 \times K_1 \times 10^{-5}$ ただし $K_1 = 1 + Y_{cs} + Y_{cp}$	W/cm	$0.0678 \times 1.04 \times 10^{-5} = 0.0706 \times 10^{-5}$		$0.2725 \times 1.002 \times 10^{-5} = 0.2735 \times 10^{-5}$	
$I = \sqrt{\frac{1}{N_r} \left(\frac{T_1 - T_2}{R_{th}} - W_d \right)}$	A	$\sqrt{\frac{80-25}{136.5} - 0.0294} / \sqrt{3 \times 0.0706 \times 10^{-5}} = 420$	$\sqrt{\frac{80-25}{154.0} - 0.0294} / \sqrt{3 \times 0.0706 \times 10^{-5}} = 394$	$\sqrt{\frac{80-25}{153.3} - 0.0168} / \sqrt{3 \times 0.2735 \times 10^{-5}} = 204$	$\sqrt{\frac{80-25}{160.35} - 0.01685} / \sqrt{3 \times 0.2735 \times 10^{-5}} = 199$

$$Y_{se} = \frac{R_s}{R_c} \left\{ A_1 \left(\frac{r_m}{S} \right)^2 + A_2 \left(\frac{r_m}{S} \right)^3 \right\} \left(\frac{R_s}{\omega} \right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{S}{r_m} \right)$$

$$X_m = 2 \omega \log_e \frac{S}{r_m} \times 10^{-4} \quad (\Omega/1,000 \text{ ft})$$

ただし S : 導体中心間隔 (cm)

r_m : シース平均半径 (cm)

R_c : 導体抵抗 ($\Omega/1,000 \text{ ft}$)

R_s : シース抵抗 ($\Omega/1,000 \text{ ft}$)

ω : 角周波数 $0.061 \pi f \times 10^{-3}$

A_1 : ケーブル配置によって定まる定数, SAケーブルの場合 3

A_2 : ケーブル配置によって定まる定数 SA ケーブルの場合 1.25

この式に, 一例として 20 kV 3×60 mm² および 250 mm² の SA ケーブルの諸元を代入して計算すると, P の値はおおよそつぎのようになる。

60 mm² 2% (SL では 0.4%)

250 mm² 13% (SL では 0.6%)

この数値を代入してたとえば2回線布設の場合につき計算すると電流量の低減率は

60 mm² では 0 %

250 mm² では 4.5%

となる。

3.3 単心ケーブルの場合

通常鉛被単心ケーブルの場合, 鉛被を非接地もしくはクロスボンド接地方式によりシース循環電流が流れないようにすれば, 渦流損は無視できるが, アルミ被ケーブルの場合この大きさはどうなるかということについて検討してみる。

3.2で述べた Y_{se} の式は, K. W. Miller 氏が与えた式で, この導出にあたってはシースの渦電流の自己インダクタンスを無視し (シースの抵抗値が大きい場合はほぼ正しいが, アルミ被大サイズの場合のようにシース抵抗が低い場合は必ずしも正しくない) シース抵抗の低い場合の実験的補正項として分母に $1/5(S/r_m)$ を入れたものである。

筆者の1人は, シースの渦電流の自己インダクタンスを考慮に入れた場合の計算式を導出した⁽⁶⁾。これによるとシース損と銅損の比

P は次式で与えられる。

$$P = \frac{R_s}{R_c} \left\{ A_1 \left(\frac{r_m}{S} \right)^2 + A_2 \left(\frac{r_m}{S} \right)^4 \right\} \left(\frac{R_s}{\omega} \right)^2$$

単位系は任意であるが, A_1, A_2 を計算する便利からいうと, CGS e. m. u. がよい。 A_1 および A_2 は次式で与えられる。

$$A_1 = 2 \times \left[\frac{1}{C_M^2} K(1) \sum_{M=1}^k (I_M^2 + J_M^2) + \frac{1}{C_M C_Y} K^2(1) (\cos(A_M - B_Y) \sum_{\substack{M, Y=1 \\ M \neq Y}}^k (I_M I_Y + J_M J_Y)) \right]$$

$$A_2 = 2 \times \left[\frac{1}{4} \frac{1}{C_M^4} K(2) \sum_{M=1}^k (I_M^2 + J_M^2) + \frac{1}{4} \frac{1}{C_M^2 C_Y^2} K^2(2) \cos 2(A_M - B_Y) \sum_{\substack{M, Y=1 \\ M \neq Y}}^k (I_M I_Y + J_M J_Y) \right]$$

ただし M, Y : 考えるケーブルに影響を及ぼす並列ケーブル

No. (1~k)

I, J : 各ケーブルの電流の実数部および虚数部

(CGS emu)

A, B : 各ケーブルの, 考えるケーブルに対する空間的
角度差

$$K(1) = \frac{1}{1 + \left(\frac{r_{mt}}{2} \right)^2 \left(\frac{4\pi\omega}{\sigma} \right)^2}$$

$$K(2) = \frac{1}{1 + \left(\frac{r_{mt}}{4} \right)^3 \left(\frac{4\pi\omega}{\sigma} \right)^2}$$

R_s : シース抵抗 (CGS emu)

R_c : 導体抵抗 (CGS emu)

ω : 角周波数 ($2\pi f$)

r_m : シース平均半径 (cm)

S : 線間距離 (cm)

t : シース厚さ (cm)

σ : アルミ被の導電率 (CGS emu)

A_1 および A_2 の値の計算は, 条数が多い場合は電子計算機による

ケーブル配列	$\bigcirc W \bigcirc V \bigcirc U$ $R=4.9\text{cm}$ として $t=0.25\text{cm}$ 計算 $\bigcirc W \bigcirc V \bigcirc U$ $\textcircled{6} W \textcircled{7} V \textcircled{2} U$ $\textcircled{6} W \textcircled{7} V \textcircled{2} U$ $\textcircled{5} W \textcircled{4} V \textcircled{3} U$ $\textcircled{5} W \textcircled{4} V \textcircled{3} U$				
	$A_1 A_2$	A_1	A_2	A_1	A_2
	ケーブル				
A_1 および A_2 の値	1	12.22	3.69	2.81	3.69
	2	4.57	3.06	3.71	2.46
	3	4.1	1.71	3.01	1.07
	4	9.72	2.54	3.82	2.11
	5	4.1	1.71	3.01	1.07
	6	4.57	3.06	3.77	2.53

第10図 A_1 および A_2

のが便利である。275 kV 1,000 mm² 3回線布設の場合第10図のような配列につき日立電子計算機 HITAC 3010 を用いて計算した結果を第10図下欄に示す。これからわかるように、ケーブルの配列の方法によってシース損を大幅に減少させることが可能である。

たとえば 275 kV ケーブルにおいて、 $A_1=4.2$ 、 $A_2=2.52$ の場合につき、 P を計算するとつぎのようになる。

1,000 mm² の場合 10%

800 mm² の場合 7%

K. W. Miller の式で計算すると、上記の値より 30~40% 過大な値を与える。

この値が鉛被ケーブルに比較してどれくらいの許容電流値の減少をもたらすかについて、9孔式管路布設の条件で計算するとつぎのようになる。

1,000 mm² の場合 5%

800 mm² の場合 4%

サイズがより小さい場合は減少率はさらに減ってくる。

4. 耐内圧強度

アルミ被を圧力形ケーブルに適用した場合問題となるのは、クリープに対する強さをどこまでとれるかということである。もちろん鉛被よりもはるかに強固であるため内圧補強層を省略できるが、シース内径との関係で、円周応力の許容限を定めておく必要がある。従来この点に関する数値としては、F & G の 99.8% 純度で 1.5 kg/mm² 99.5% 純度で 2.5 kg/mm² という値⁽⁷⁾ が公表されているのみであるがその根拠となる実験方法については明らかにされていない。筆者らはこの点に関し、われわれの設計製造条件によるケーブルについて実験を行なった。

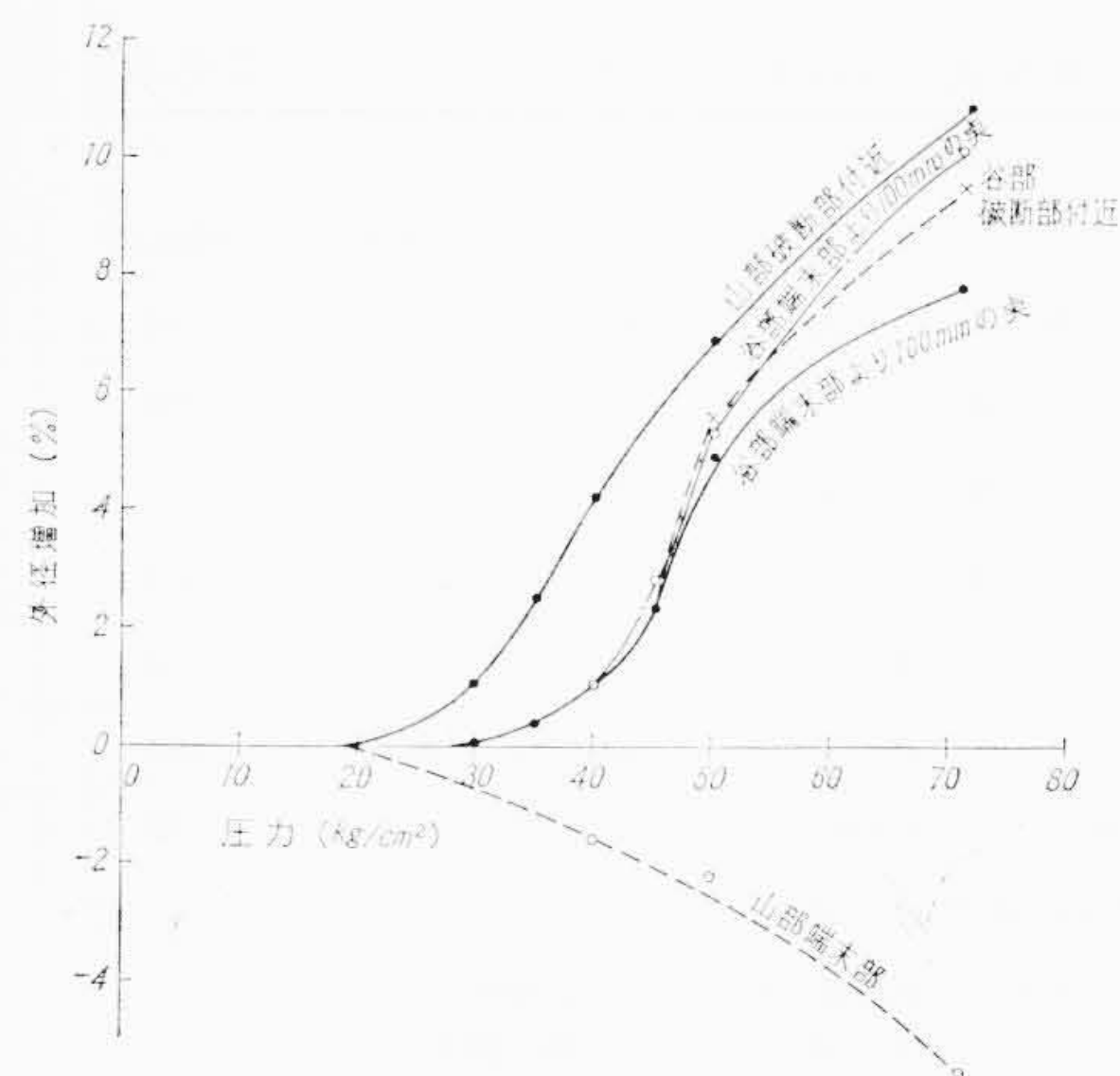
実験の方針は、比較的低応力の内圧を印加し、シース表面に抵抗線ひずみ計を張り、ひずみの時間的変化を記録する。これにより単位時間あたりのクリープの速さを求め、30年間の使用期間においても、破断伸びに達しない応力の限界値を求める。

まず内圧破壊試験により破壊時の伸びを 70 kV 3×250 mm² OF ケーブルについて測定したところ、第11図に示すとおり、約 10% である。この場合圧力の印加方法は 10 kg/cm² 15 分間保持したのち、10 kg/cm² 15 分ステップで昇圧している。

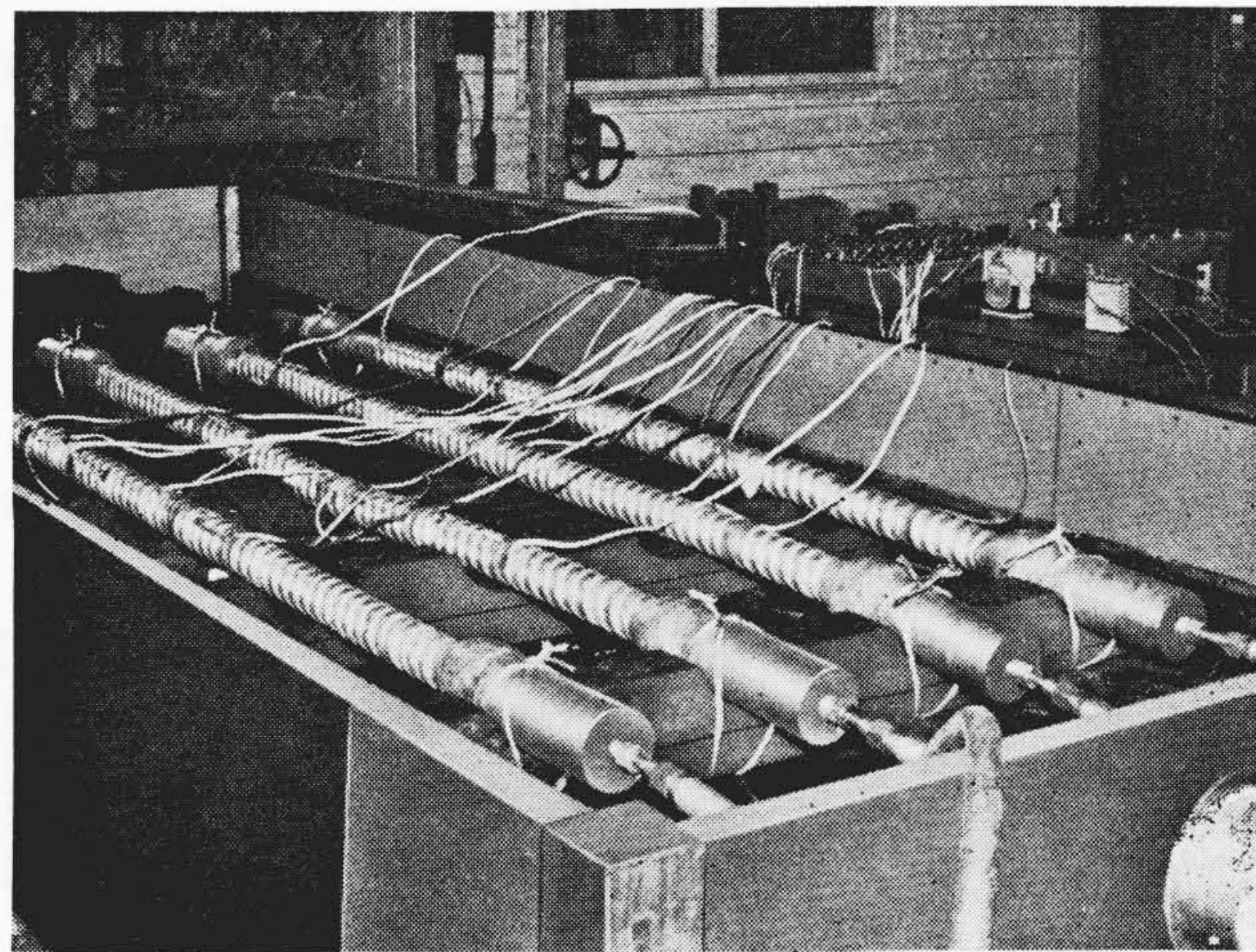
つぎにクリープ試験に使用したケーブルは 33 kV 3×160 mm² 高ガス圧ケーブルで、1 試料の長さは 2 m、シースの谷部内径 40.5 mm、谷部外径 44.3 mm、山部外径 54.9 mm、OKD 形コルゲートである。

試験の状況を第12図に示す。内圧は油圧ポンプにより印加し、応力は円周応力換算値で 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 kg/mm² とした。なお試料の両端末は長さ方向に移動しないように固定した。

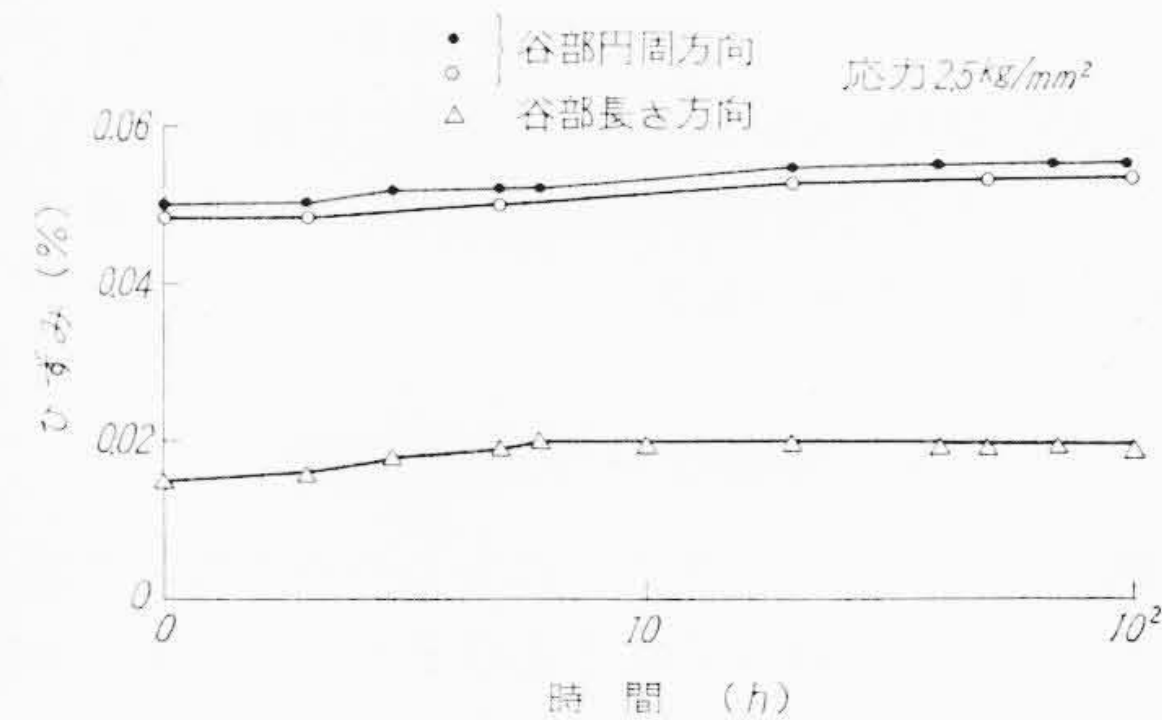
ひずみ測定結果の一例を第13図に示す。この曲線より、各部の



第11図 内圧破壊試験時の外径変化



第12図 クリープ試験装置



第13図 ひずみ測定結果の一例

第8表 クリープ率

応力 (kg/mm ²)	クリープ率 (×10 ⁻⁵ %/h)			
	谷部円周方向	谷部長さ方向	山部円周方向	山部長さ方向
3.0	4.2	4.8	2.6	4.4
2.5	3.3	2.2	—	—
2.0	3.2	3.5	2.6	3.1
1.5	3.9	2.3	1.8	2.1

クリープ速度と応力の関係を求めると第8表のとおりとなる。

30年間で 10% 伸びに到達するクリープ速度は

$$\frac{10(\%)}{30 \times 365 \times 24} = 3.8 \times 10^{-5} \quad (\%/h)$$

であるから、第8表の結果から、応力 2.5 kg/mm² まで使用可能であるが、安全をみると 2.0 kg/mm² とするのが妥当である。この値は鉛被でいわれている 0.088~0.12 kg/mm² に比較して十分大きく、内圧ケーブルの補強層を省略することが可能となる。

第 9 表 60 kV 3 心 OF ケーブルの変化油量

ケーブル	鉛 被		アルミ被	
	80mm ²	325mm ²	80mm ²	325mm ²
導 体 内	41	172	41	172
絶 縁 体 内	755	1,140	755	1,140
介 在 部 分	478	890	—	—
油 通 路 内	321	632	912	1,800
コ ル ゲ ー ト 部 分	—	—	235	410
合 計	1,595	2,834	1,943	3,522
変 化 油 量 (l/km)	65.8	117	80.2	145
鉛被ケーブルに対する比率	—	—	1.22	1.24

(注) 計算条件: 絶縁油の膨張係数 0.00075
温度変化 10~65℃

5. 油流抵抗とオイルデマンド

アルミ被をOFケーブルに適用した場合、3心ケーブルでは介在部の油通路が省略できるので、油流抵抗が小さくなる。この点に関する測定結果の一例を示すと、70 kV 3×250 mm² アルミ被OFケーブルでは、鉛被ケーブルの油流抵抗の約24%である。したがって温度油圧変化の点で給油区間を長くとることができる。

たとえば60 kV 3×80~325 mm² 鉛被OFケーブルでは2,000 m区間ではFT-PT給油などの両端給油を必要とするが、アルミ被ケーブルでは片端給油で十分である。

ただしアルミ被の場合は介在部およびコルゲート部の油の量が若干ふえるので、変化油量は鉛被ケーブルに比較して若干増大する。

一例として60 kV 80 mm² および325 mm² のOFケーブル2,000 m 1回線について、鉛被ケーブルとアルミ被ケーブルの場合で比較した結果を第9表に示す。また給油区間を2,000 m とするとアルミ被の場合、セル数の増大は鉛被に比較して7~13%程度に過ぎない。

以上が3心ケーブルの場合であるが、単心ケーブルの場合は、油流抵抗はコルゲート部分の油通路が加わるが寸法的に小さいので、たとえば275 kV 1,000 mm² の場合、鉛被に比較して1%程度下がるに過ぎない。一方変化油量は若干増大するが、その程度は上記ケーブルの場合で15%程度である。

6. 各種ケーブル構造例

アルミ被紙ケーブルとして考えられるもののうち、代表例として20 kV 級SAケーブルと60 kV 級3心OFケーブルをとりあげ、その構造を第10表に示す。

SAケーブルにおいてはシースをコルゲートしないが、60 kV 3心OFケーブルではOKD形コルゲートを施す。

7. 結 言

以上述べたように、アルミ被ケーブルは鉛被ケーブルに比較して種々のすぐれた特長をもっており、不利な点と考えられる事項についても検討の結果、技術的メリットを失うことなく使用されうることがわかった。なお本文においては述べなかったが、経済性につい

第 10 表 ケーブル構造例

項 目		単 位	60 kV 3 心 OF		20 kV 3 心 SA	
			325mm ²	80mm ²	250mm ²	60mm ²
導 体	形 状	—	圧 縮 円 形			
	外 径	mm	22.0	10.7	19.2	9.3
絶 縁	導体上カーボン	mm	0.3			
	絶 縁 紙	mm	6.95	7.35	5.05	5.55
	絶縁紙上カーボン	mm	0.15			
遮 へ い 層 厚 さ		mm	0.25	0.25	0.15	
ア ル ミ 被	厚 さ	mm	2.3	1.8	1.3	1.1
	谷 外 径	mm	85.2	61.4	32.8	23.5
	山 外 径	mm	97.8	71.4		
	コ ル ゲ ー ト	—	OKD	OKD	無	
線 心 防 食 厚 さ		mm	—		1.0	
より合わせ上バインダ厚さ			—		1.0	
ポリエチレン厚さ		mm	3.0	3.0	4.0	3.0
概 算 外 径		mm	106	79	86	66
概 算 重 量		kg/km	17,000	6,700	12,600	5,200
導体抵抗 (20℃)	標 準	Ω/km	0.0557	0.224	0.0726	0.305
	最 大	Ω/km	0.0563	0.224	0.0715	0.301
標 準 静 電 容 量		μF/km	0.429	0.246	0.49	0.27

ては従来の鉛被ケーブルに比べて有利であること、および日立電線株式会社日高工場のモデル管路において70 kV 3×250 mm² OFケーブルおよび20 kV 3×250 mm² SAケーブルについて、引き入れ、くせとり、接続実験を行なった結果、何ら取り扱い上の支障がないことを確認している。

わが国においてはじめてアルミ被ケーブルが大量に使用されるのは、国鉄新幹線給電用70 kV OFケーブルにおいてであるが、これを契機として広く採用されるであろうと思われる。

なおマンホール寸法に関しては、実験より得られた数値を用いて計算した結果を示したが、今後実負荷試験によりさらに検討を加える考えである。

終わりに、検討の過程において種々ご指導、ご教示いただいた東京電力株式会社地中線課福田課長ほか関係者のかたがた、日立電線株式会社内藤副工場長、水上部長ほか関係者のかたがた、また実測を担当協力いただいた日立電線株式会社第1研究課相田氏、第2研究課川西主任、電力ケーブル課大畠主任の諸氏に対し深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) J. H. Neher: TAIEE., 72, pt. III p. 541~5 (1953)
- (2) J. H. Neher, M. H. Mc Grath: TAIEE., 76, pt. III p. 752~72 (1957)
- (3) A. H. M. Arnold: JIEE., 81, p. 52~66 (1940)
- (4) H. B. Dwight: TAIEE., 50, p. 993~8 (1931)
- (5) Underground Systems Reference Book.
- (6) 今井: 電気学会雑誌投稿中
- (7) H. W. Lücking, W. Ochel: CIGRE., No. 224 (1960)