

# トラフ内砂埋布設ケーブルの曲線部における挙動

## Behavior of Power Cables Buried with Sand into Troughs at Curved Route

渡辺 義治\*  
Yoshiharu Watanabe

山下 隆三\*  
Takazō Yamashita

中村 弥久晴\*\*  
Yakuharu Nakamura

吉田 博通\*\*  
Hiromichi Yoshida

網野 弘\*\*\*  
Hiroshi Amino

斉藤 宏資\*\*\*  
Hiroshi Saitō

### 要 旨

東京電力株式会社では、OFケーブルを洞(どう)道内に布設する場合、主要送電幹線については、防災の見地から、ケーブルをトラフ内に砂埋布設する方式を採用している。その際のトラフ曲線部におけるアルミ被ケーブルの熱伸縮に伴う挙動特性について実験を行なった。その結果、ケーブルが熱伸縮の繰返しとともに、砂上へせり上がる現象を確認し、防災上問題となることがわかった。さらに、この防止策としては、ケーブルをビニルシートなどでおおったのち、砂埋する方式が非常に有効であること、およびその際のケーブルのシースひずみも許容ひずみ値より小さく、実用上問題ないことが明らかになった。

### 1. 緒 言

OFケーブルを洞道内に布設する場合、主要幹線については、事故時における他回線への事故波及ならびに他事故からの波及防止を考慮して、防災対策が重視される。このため、洞道内においては、ケーブルをトラフ内に砂埋布設する方式が採用されている。この砂埋布設ケーブルの熱伸縮に対する基礎検討は、すでに154 kV鉛被および275 kVアルミ被OFケーブルを用いた実規模の実験で検討され、L字形の布設ルートの場合には、両側の直線部からのケーブルの伸びが曲線部分に集中することが報告されている<sup>(1)</sup>。しかし、その際の曲線部におけるケーブルの挙動およびシースひずみに関しては報告されていないため、この点を解明しておくことが必要となり、今回275 kVアルミ被OFケーブルをトラフ曲線部に砂埋布設し、伸縮を与えた際のケーブルの挙動およびひずみについて実験検討を行なった。その結果、ケーブルの砂上へのせり上がり現象が起こって、防災上問題となることがわかり、さらにその防止策として有効な方法を得ることができた。ここではこれらの結果について報告する。

### 2. 実験の概要

#### 2.1 実験方法

今回行なった実験のトラフおよびケーブル配置は図1に示すとおりである。トラフを半径2.7 mの90度の曲がり状に配列し、両端部に直線区間3 mを設けた。使用したケーブルは、275 kV 1×1,200 mm<sup>2</sup>ビニル防食アルミ被OFケーブルで、川砂を50 mm厚さで敷きつめたトラフ内に3条俵積み布設し、その上に川砂を250 mm満たした。

ケーブルの伸縮は直線部末端にて機械的に行なった。すなわち、ケーブルの両末端で一体としたアルミシースと導体を3条一括して、ケーブル伸縮装置に連結させた。

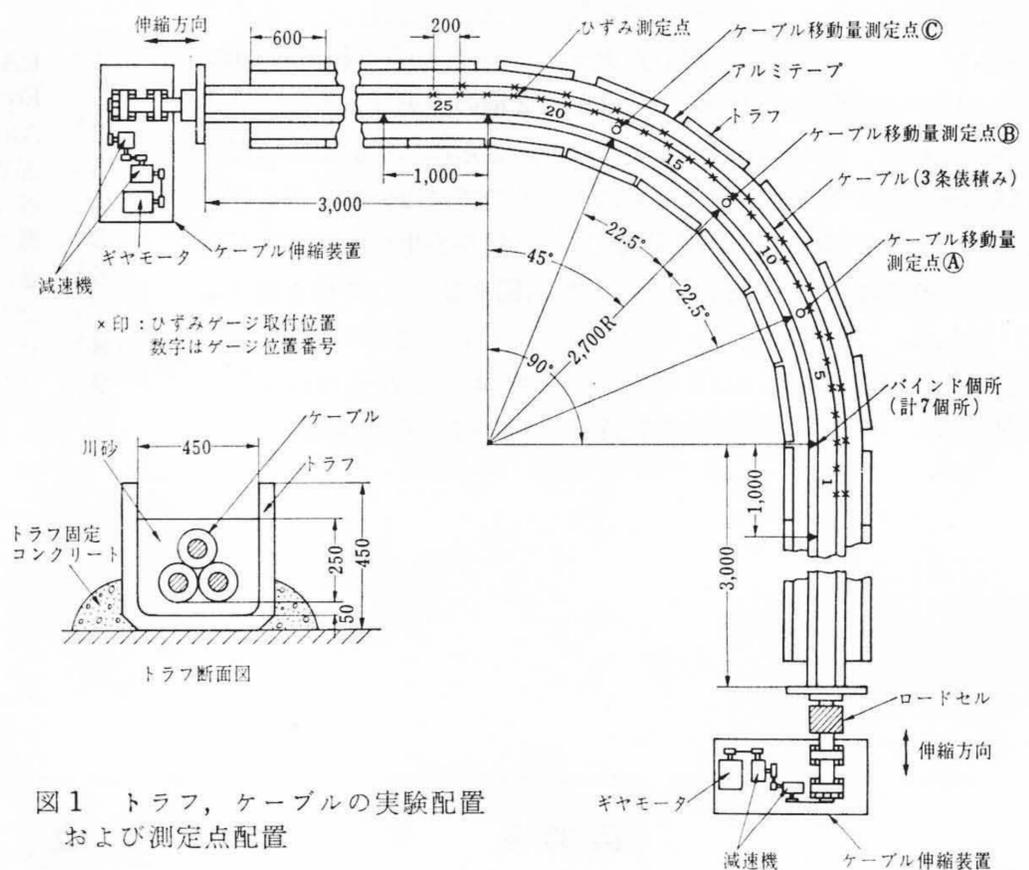


図1 トラフ、ケーブルの実験配置および測定点配置

#### 2.2 実験の種類

##### 2.2.1 実験条件

実験の種類と実験条件は表1に示すとおりである。実験No.1は、図2(a)に示すように、従来の砂埋の状態であり、これによって曲線部におけるケーブルの挙動を観察し、ケーブルのせり上がり現象を解明した。実験No.2~No.5はせり上がり防止方法について検討したものである。実験No.2では、図1に示す7箇所をステンレステープ(0.15×25 mm)で3条一括バンドした。実験No.3は、3条一括バンドした状態で、実験No.4およびNo.5はバンドしない状態で、ケーブルを厚さ0.2 mmのビニルシートでおおったのち砂埋したものである。実験No.1~No.4の実験では、通電負荷サイクル後、ケーブル導体温度が定常状態になったときの導体温度変化範囲(20°C)に相当する熱伸縮量だけを与えて行なった。

しかし、実際には、ケーブルにサイクル負荷が投入された際の熱伸縮量は無負荷時からの導体温度変化に対応して生ずるため、定常状態に達するまでにはある程度伸び出した状態になる。したがって、実験No.5ではこの状態に対するせり上がり防止方法が

\* 東京電力株式会社  
\*\* 日立電線株式会社研究所  
\*\*\* 日立電線株式会社日高工場

表1 実験条件

実験 No.	曲線部角度 (度)	曲率半径 (m)	伸縮速度 (mm/h)	伸縮量 (mm)	ケーブルの砂埋状態
1	90	2.7	4	8	図2(a) バインドなし
2					図2(b) バインド
3					図2(c) バインド
4					図2(c) バインドなし
5	90	2.7	4	表3参照	図2(c) バインドなし

表2 前提条件

項目	条件
ケーブル	275 kV 1×1,200 mm <sup>2</sup> アルミ被OFケーブル
布設条件	洞道内トラフ砂埋布設
基底温度	20℃
導体到達最高温度	80℃
サイクル負荷による温度変化	20℃ (定常状態において 60℃ ⇄ 80℃)
負荷サイクル	12h/12h

表3 伸縮量

伸縮サイクル	導体温度 (℃)	温度変化 (℃)	伸縮量 (mm)	積算伸縮量 (mm)
1 → 伸 ← 縮	60 45	40 -15	18.0 -5.5	18.0 12.5
2 → 伸 ← 縮	70 54	25 -16	10.0 -6.0	22.5 16.5
3 → 伸 ← 縮	76 58	22 -18	9.0 -7.0	25.5 18.5
4 → 伸 ← 縮	79 60	21 -19	8.5 -7.5	27.0 19.5
5 → 伸 ← 縮	80 60	20 -20	8.0 -8.0	27.5 19.5

注: → 伸はケーブル末端での軸方向の圧縮を表わし,  
← 縮はケーブル末端での軸方向の引張を表わす。  
5サイクル目以後は +8 mm, -8 mm の伸縮をくり返す。

実用上問題がないことを確認する実験を行なった。

2.2.2 実負荷サイクル時の伸縮量の決定

無負荷状態のケーブルに、サイクル負荷を投入した際のケーブルの温度変化特性を求めるにあたり、前提条件を表2のようにとった。

12時間の負荷サイクルでは、ケーブル本体の温度変化は飽和してしまうため、負荷サイクルによるケーブル導体温度の変動は、定常状態では次式により求められる。

$$\theta_1 = T_0 + W_2 R_{in} + \left\{ \frac{W_1(1-e^{-\alpha_2 t_1})e^{-\alpha_2 t_2} + W_2(1-e^{-\alpha_2 t_2})}{1-e^{-\alpha_2(t_1+t_2)}} \right\} R_{out}$$

$$\theta_2 = T_0 + W_1 R_{in} + \left\{ \frac{W_2(1-e^{-\alpha_2 t_2})e^{-\alpha_2 t_1} + W_1(1-e^{-\alpha_2 t_1})}{1-e^{-\alpha_2(t_1+t_2)}} \right\} R_{out}$$

.....(1)

- ここに、 $\theta_1$ : 導体到達下限温度
- $\theta_2$ : 導体到達上限温度
- $T_0$ : 基底温度
- $R_{in}$ : ケーブル部熱抵抗で、ここでは 109.5℃/W/cm を用いて。
- $R_{out}$ : 洞道部熱抵抗で、ここでは 228℃/W/cm を用いる。
- $\alpha_1$ : ケーブルの温度変化時定数

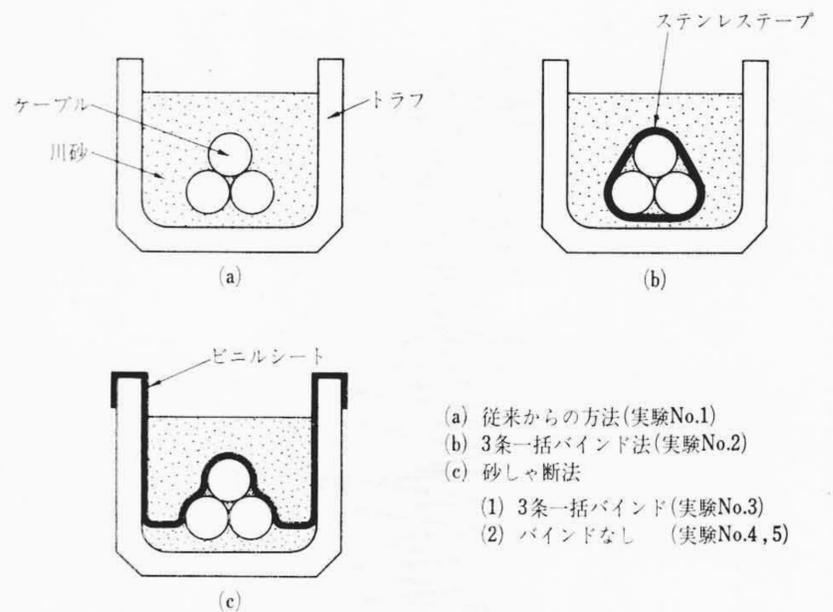


図2 ケーブルの砂埋状態

- $\alpha_2$ : 洞道内気温の温度変化時定数
- $W_1$ :  $\theta_1 \rightarrow \theta_2$  の温度変化をもたらす発生損失
- $W_2$ :  $\theta_2 \rightarrow \theta_1$  の温度変化をもたらす発生損失
- $t_1$ :  $W_1$  が発生する時間=12時間
- $t_2$ :  $W_2$  が発生する時間=12時間

ここで、温度変化定数を  $\alpha_1=0.558$  (1/h),  $\alpha_2=0.03$  (1/h) とすると、 $\theta_1=60$  (℃),  $\theta_2=80$  (℃) および(1)式より、

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= 0.21 \text{ (W/cm)} \\ W_2 &= 0.0815 \text{ (W/cm)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

となる。

無負荷状態(導体温度: 20℃)から上記サイクル負荷( $W_1, W_2$ )が継続的に加えられたとして導体温度を求めると、負荷を投入して  $t'$  時間後の導体温度  $T$  は

$$T(t') = T_1(t') - T_2(t'-12) + T_2(t'-24) - T_2(t'-36) + \dots + T_2(t'-12n) \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $t'-12n > 0$

$$T_1(t) = W_1 \{ R_{in}(1-e^{-\alpha_1 t}) + R_{out}(1-e^{-\alpha_2 t}) \}$$

$$T_2(t) = (W_1 - W_2) \{ R_{in}(1-e^{-\alpha_1 t}) + R_{out}(1-e^{-\alpha_2 t}) \}$$

で表わされる。これより、導体温度の変化を求め、これに相当するケーブルの伸縮量<sup>(1)</sup>を求めると、表3のようになる。なお、5サイクル目以後は +8 mm, -8 mm の伸縮を繰返す。

2.3 測定項目

2.3.1 ケーブル移動量

移動量は、図1に示すように、測定点A, B, Cの3箇所における上相ケーブルおよび下相ケーブル(曲線部外側のケーブル)の鉛直方向と横方向(曲率半径方向)の移動量をスケールで測定した。ただし、実験 No. 3~No. 5 の場合、ケーブルがシートでおおわれているため、上相ケーブルの移動量のみを測定した。

2.3.2 ケーブルシースひずみ

シースひずみは、図1に示すように、3条俵積みの上相ケーブルの曲線部外側に約 200 mm 間隔で 25 箇所および曲線部外側の下相ケーブルに約 410 mm 間隔で 13 箇所にひずみゲージを波付きアルミシースの谷部中央軸方向にはり、多点静的ひずみ測定器で測定した。

2.3.3 ケーブル端荷重および伸縮量

ケーブル端荷重は、ケーブル末端と伸縮装置の間にロードセルを入れ、自動記録計で測定し、ケーブル末端の伸縮量はダイヤルゲージで測定した。

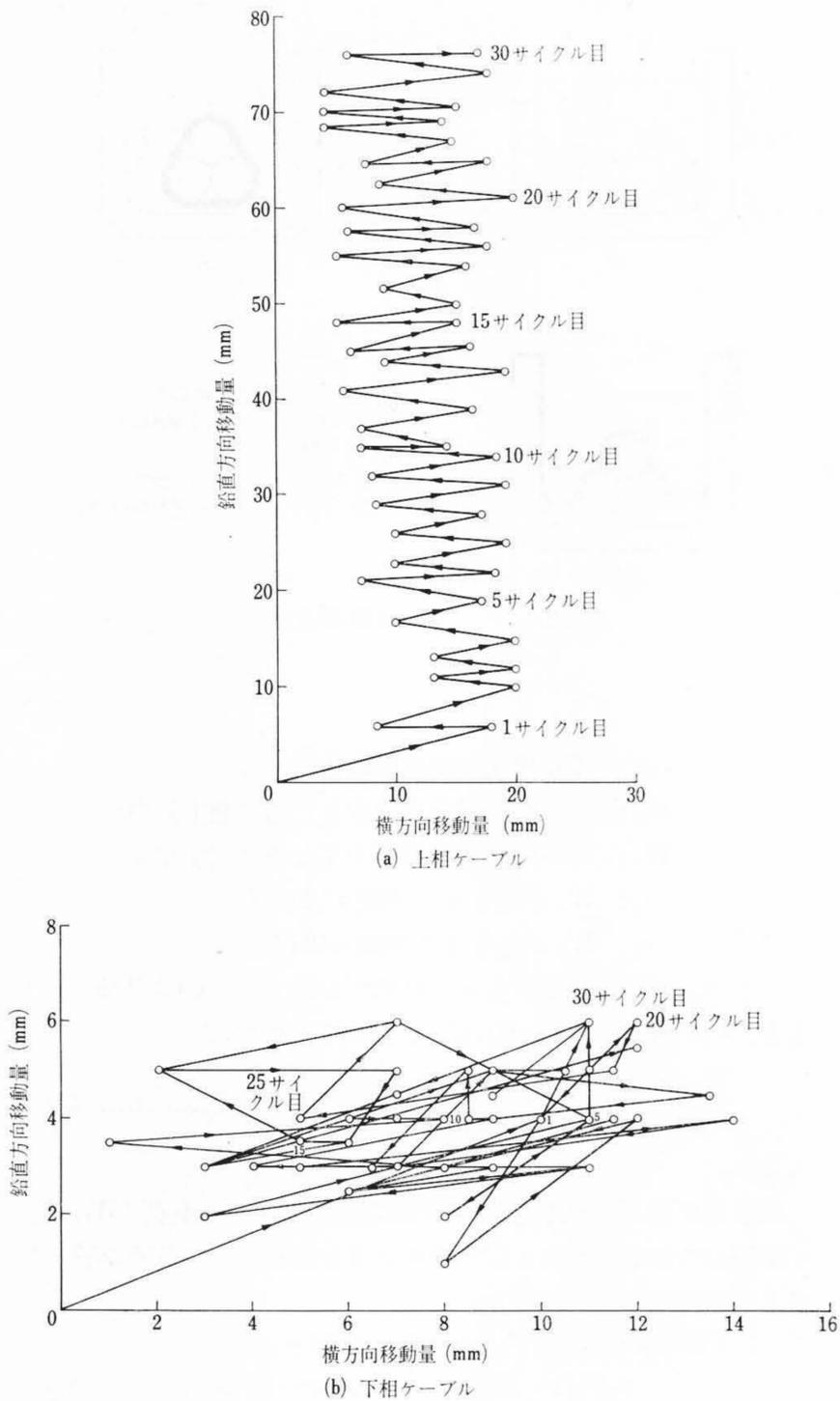


図3 ケーブルの挙動 (実験 No.1, 測定点 B)

3. 実験結果ならびに検討

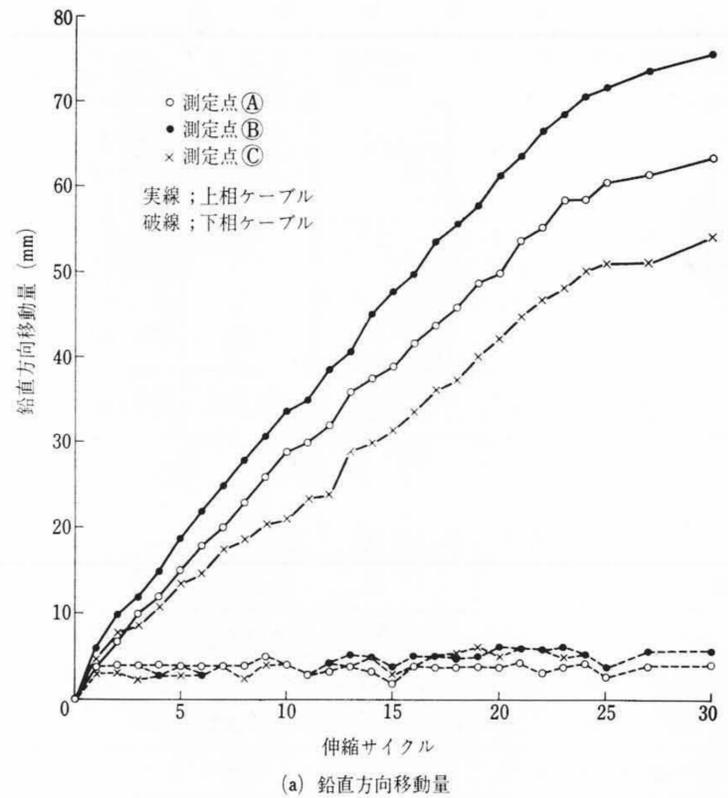
3.1 ケーブルのせり上がり現象

従来の方式で砂埋したケーブルを伸縮させた場合の曲線部中央のケーブル挙動は図3に示すとおりである。図中の鉛直および横方向移動量は上方および円弧外側方向への移動量を正とした。上相ケーブルの挙動は、図3(a)に示すように、ケーブルが伸び出してくると横方向に移動するとともに鉛直方向にも移動している。ケーブルが元の位置まで収縮すると、横方向の移動量は引き戻されて小さくなるが、鉛直方向の移動量は逆に再び増加している。したがって、ケーブルは、伸縮サイクルが増すにしたがって図3(a)のような動きをしながら、トラフ上面方向にせり上がる。

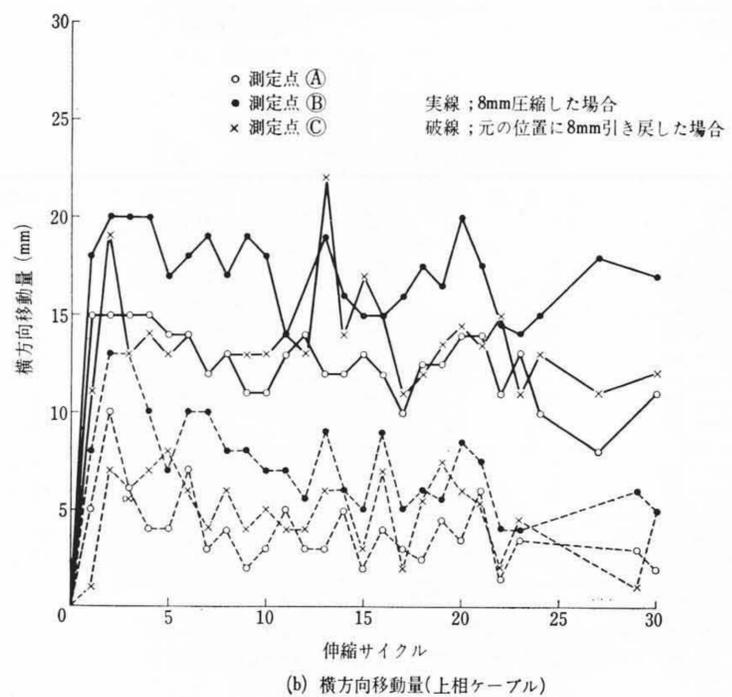
この曲線部におけるケーブルのせり上がり現象は、ケーブルの横方向への移動によるケーブル下への砂の流入およびケーブル形状が砂を押しつけて移動する際に受ける抵抗力によって、浮き上がりやすい円形になっているためであると推察される。

一方、下相ケーブルは、図3(b)に示すように、上相ケーブルのようなせり上がりは起こらず、不規則な挙動を示した。この原因としては、ケーブルに作用する砂の重量とケーブル重量の和がケーブルを押し上げようとする砂の抵抗力より大きいためであると考えられる。

図4にケーブル移動量と伸縮サイクルの関係を示す。上相ケーブ



(a) 鉛直方向移動量



(b) 横方向移動量(上相ケーブル)

図4 ケーブルの移動量 (実験 No.1)

ルの鉛直方向移動量は、図4(a)に示すように、伸縮サイクルが増すにしたがってほぼ直線的に増加し、曲線部中央での移動が最も大きく、30サイクル目で76mmもせり上がっているが、下相ケーブルの鉛直方向移動量は、伸縮サイクルに関係なく一定値を示し、約6mmの動きをするだけである。一方、ケーブルの横方向移動量は、図4(b)に示すように、上相および下相ケーブルとも各伸縮サイクルに対して、ある変動幅で大きく変動しているが、伸縮サイクルによる移動量の増加は認められない。

3.2 せり上がり防止法の効果

ケーブルのせり上がり現象は、上記のように、砂のケーブル下への流入およびケーブル形状に起因すると考えられるので、せり上がり防止法として、次の2方法について検討を行なった。その一つは、図2(b)に示すように、ケーブルを3条一括バンドして、その形状を正三角形とし、横方向の移動によって受ける砂の抵抗力が下方に向くようにするとともに、せり上がりが生じない下相ケーブルを上相ケーブルと一体にすることにより、上相ケーブルのせり上がりを防止しようとする方法である。ほかの一つは、図2(c)に示すように、ケーブルをビニルシートなどでおおってケーブル下への砂の流入を防ぐことにより、せり上がりを防止しようとする方法である。

以下、これらの結果について述べる。

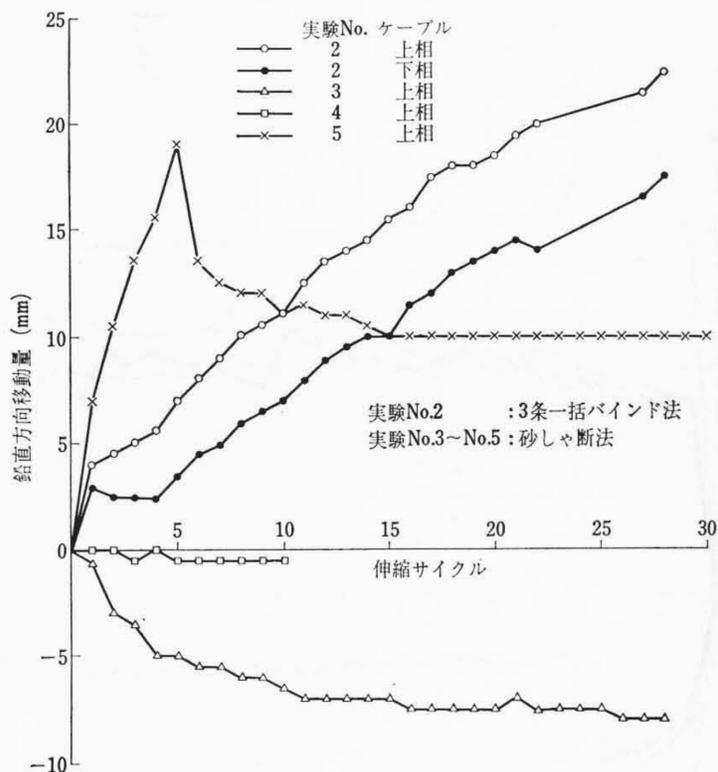


図5 ケーブルの鉛直方向移動量 (測定点 ②)

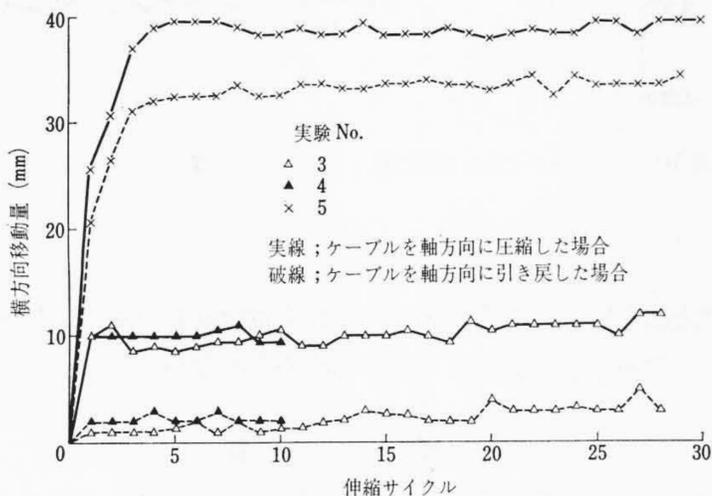


図6 上相ケーブルの横方向移動量 (測定点 ②)

図5はケーブルの鉛直方向移動量と伸縮サイクルの関係を示したものである。なお、図には、移動量が最大となる曲線部中央での移動量のみを示した。

実験 No.2のケーブルを3条一括バインドする方法では、ケーブルの鉛直方向移動量は上相および下相ケーブルとも、伸縮サイクルが増すにしたがって直線的に増加している。したがって、この方法では、せり上がりを防止することはできなかったが、その移動量は、図4(a)に示す実験 No.1の場合に比べて、約1/3以下に減少していることから、この方法でも若干の効果が認められたわけである。一方、実験 No.3およびNo.4のようにケーブルをビニルシートでおおったのち砂埋する方法では、ケーブルの鉛直方向移動量は負の値となり、ある伸縮サイクル以後で一定移動量を示し、せり上がりは起こらなかった。特に、実験 No.3の場合、実験 No.4に比べて、ケーブルが砂の中に沈む傾向にあるが、これはケーブルを3条一括バインドしたためと考えられる。したがって、せり上がり防止法としては、ケーブルをシートなどでおおってケーブル下への砂の流入を防ぐ砂しゃ断法がきわめて有効であることが明らかになった。

以上の結果より、この方法は、導体温度変化が定常状態になったのちのケーブル熱伸縮量に対しては効果的であることが明らかになったが、この方法がケーブルに無負荷状態からサイクル負荷が投入された場合の熱伸縮量に対しても問題がないことを、実験 No.5で

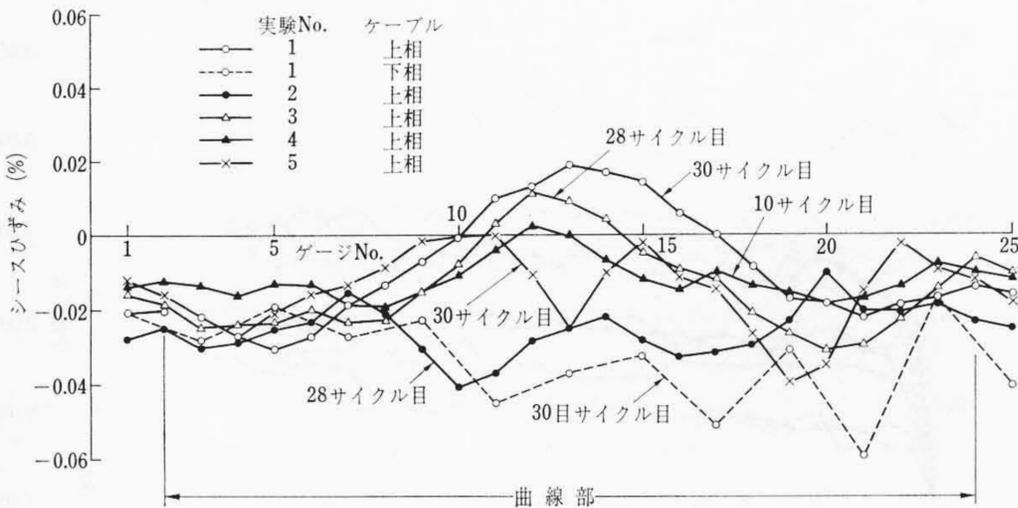


図7 曲線部におけるケーブルのシースひずみ分布

確認した。その結果、ケーブルの鉛直方向移動量は、図5に示すように、5サイクル目までは伸縮サイクルが増すにしたがって増加し、最大19mmまでせり上がったが、6サイクル目以後、しだいに減少し、15サイクル目から一定値となり、その値は10mmである。これは、ケーブルに与えられた伸縮量が、表3に示すように、5サイクル目までしだいに増加するためである。このように、導体温度上昇による積算伸縮量が27.5mmと非常に大きい値であっても、砂しゃ断法を採用すれば、せり上がりが起こらないことがわかった。

図6はケーブルの横方向移動量と伸縮サイクルの関係を示したものである。実験 No.2のケーブル横方向移動量は、図4に示す実験 No.1の場合と同様に各サイクルに対して大きく変動するが、実験 No.3~No.5の場合、図6に示すように、その移動量は変動幅も小さく、かつケーブルを元の位置に引き戻したときの移動量の変動幅も前者に比べて小さい。これは、シートでケーブル下への砂の流入を防いでいるため、砂の抵抗力が各サイクルごとにあまり変化しないものと考えられる。

### 3.3 ケーブルシースひずみ

曲線部に布設されたケーブルが伸縮を受けたときに生ずるケーブルシースひずみの分布を調べた結果は図7に示すとおりである。このシースひずみの値はケーブルを伸縮させたときのひずみの変動量で表わされている。なお、実験 No.2~No.5の下相ケーブルのひずみ分布は、実験 No.1のものと同様である。

実験 No.1, No.3およびNo.4の場合、上相ケーブルのひずみ分布は曲線部中央付近で正ひずみ、ほかの部分で負ひずみとなっているが、実験 No.1の下相ケーブルのシースひずみは全区間で負ひずみで不規則な分布を示している。実験 No.2の場合、上相ケーブルと下相ケーブルを一体としたため、その上相ケーブルのシースひずみ分布は、実験 No.1の下相ケーブルのひずみ分布と類似している。実験 No.5のひずみ分布は、1サイクル目では実験 No.1のような分布になるが、2サイクル目から曲線部中央付近がへこんだような分布になる。

次に、曲線部におけるケーブルの各伸縮サイクルに対する最大シースひずみを示すと図8になる。このひずみ値は実験開始時をゼロとしたひずみの絶対値で表わされている。実験 No.1~No.4の最大シースひずみは、伸縮サイクルに関係なく、ほぼ一定値を示し、上相ケーブルのひずみは最大約0.04%に、また、下相ケーブルでは最大約0.06%に落ちついている。実験 No.5の場合、伸縮量が5サイクル目までしだいに大きくなるため、下相ケーブルのひずみは3サイクル目で0.08%を示しているが、それ以後は減少し、ほかの場合と同じ値となる。

以上の結果、各実験での最大シースひずみはアルミシースの許容ひずみ値(0.25%)よりずいぶん小さく、せり上がり防止策として、

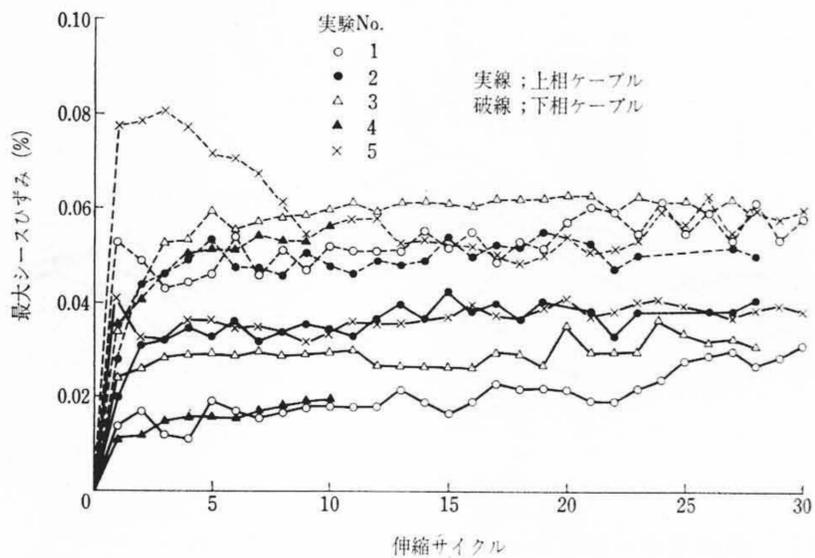


図8 曲線部における最大シースひずみ

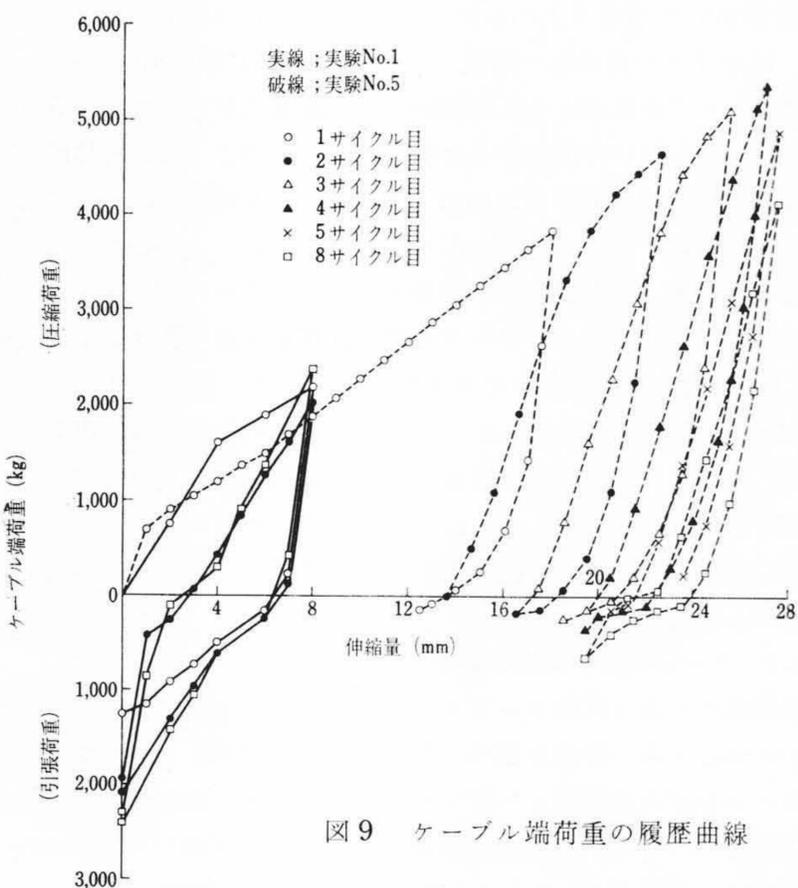


図9 ケーブル端荷重の履歴曲線

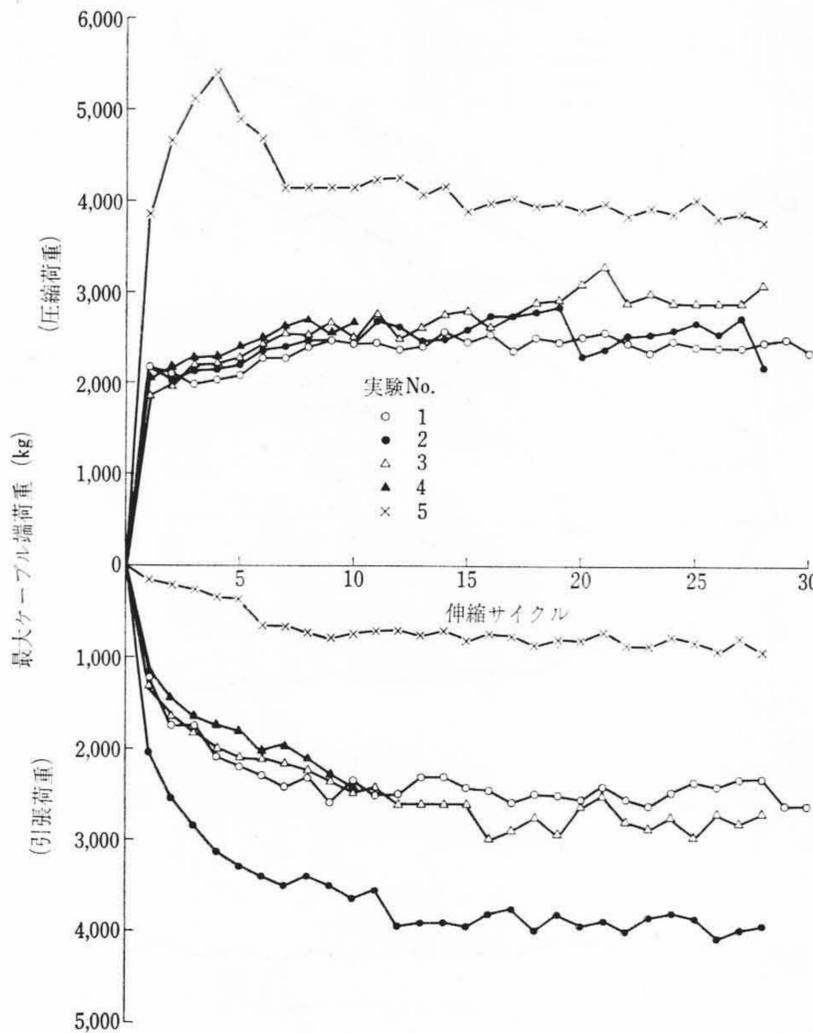


図10 最大ケーブル端荷重(ケーブル3条にかかる荷重)

砂しゃ断法を採用しても、シースひずみに関しては問題がないといえる。

3.4 ケーブル端荷重

ケーブル端荷重と伸縮量の関係を示したのが図9である。図中の圧縮荷重はケーブル両端を伸び出させるに要する荷重であり、引張荷重はケーブルを引き戻すに要する荷重である。実験 No. 1 のケーブル端荷重は図のような履歴曲線を描き、実験 No. 2~No. 4 の場合の履歴曲線も実験 No. 1 と同様となるが、実験 No. 5 の場合、伸縮量が5 サイクル目まで徐々に増加するため、ほかの場合と異なった履歴を示している。図10 は各伸縮サイクルに対する最大ケーブル端荷重を示したものであるが、ケーブル端荷重はある伸縮サイクル以上で一定となる。実験 No. 1~No. 4 の場合、ケーブルを伸び出させる際には、2,500~3,000 kg となり、引き戻す際には、実験 No. 2 では約 4,000 kg と大きい、実験 No. 1, No. 3 および No. 4 では、2,500~3,000 kg となる。実験 No. 5 の場合、圧縮荷重は4 サイクル目で 5,400 kg と大きくなるが、7 サイクル目以後はほぼ一定となり、約 4,000 kg である。しかし、引き戻す際の荷重は小さく約 800 kg である。このように、従来の砂埋方法あるいは新しい砂しゃ断法によ

る砂埋方法を行なっても、ケーブル端荷重は同じであり、ケーブルをシートでおおうことによる弊害は認められなかった。

4. 結 言

以上、トラフ砂埋布設された曲線部におけるアルミ被ケーブルの挙動およびせり上がり防止策の実験結果について説明したが、その結論をまとめると次のとおりである。

- (1) トラフ曲線部に砂埋布設されたケーブルは、その導体温度変化による熱伸縮により砂上にせり上がる現象がある。
- (2) ケーブルのせり上がり現象は、主としてケーブルの熱伸縮によって起こるケーブル下への砂の流入に起因するものと推定される。
- (3) ケーブルのせり上がり防止法としては、ケーブルをシートなどでおおったのち砂埋する方法が効果的である。
- (4) 新しい砂しゃ断法による砂埋方式を採用しても、ケーブルのシースひずみはアルミシースの許容ひずみ値(0.25%)内にじゅうぶんはいつている。

なお、ここでは述べなかったが、1 条布設の場合についても 154 kV 鉛被および 275 kV アルミ被 OF ケーブルについて実験を行ない、同様のせり上がり現象を確認しており、3 条布設に限ったものでないことを付言しておく。

終わりに、本研究に対して種々ご指導いただいた東京電力株式会社南東京電力所地中線課渡辺毅副長ならびに日立電線株式会社研究所福田部長、沼尻主任研究員に厚くお礼申し上げるとともに、実験を遂行するにあたって協力くださった研究所関係者のかたがたに深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 飯塚, 沼尻, 吉田: 日立評論 48, 1321 (昭41-11)