トラフ砂埋布設ケーブルの熱伸縮
33 k V 系統への O F ケーブルの適用
アメリカ・ロスアンゼルス市水道電気局納 230 k V × 1,000 M C M 高油圧パイプケーブル62
超高圧 OFケーブル用アルキルベンゼン油の諸特性67
アルミ被コルゲート形状に関する一考察
エポキシ樹脂製品のケーブル付属品への応用



# トラフ砂埋布設ケーブルの熱伸縮

Thermal Expansion of Power Cables Buried with Sand into Troughs

飯 塚 喜八郎\* 沼 尻 文 哉\*\* 吉 博 通\*\* Ħ Kihachirô Iizuka Fumiya Numajiri Hiromichi Yoshida

#### 旨 要

東京電力株式会社では洞道内布設重要ケーブルの防災対策としてトラフにケーブルを布設し砂埋する方式を 採用している。この際のトラフ支持方式を検討するため、2種類のケーブルを用いて熱伸縮特性を調べた。等 価摩擦係数は鉛被ケーブルでは砂埋深さによって大きく変わるが、コルゲートアルミ被ではあまり変わらない こと、鉛被ケーブルでは導体温度変化が大きいとトラフがスネークすることなどが明らかにされた。

#### 1. 緒 言

多回線の収納あるいは共同こう採用などの事情から都市内ではケ ーブルを洞道内に布設する機会が多い。とくに超高圧大容量 OF ケ ーブルを洞道内に布設する場合には事故時の他回線への波及を考え て防災対策が重視される。このため、洞道内において OF ケーブル をトラフ砂埋布設する方式が採用されている。このような布設方式 におけるトラフおよびトラフ支持物に与える応力は検討されていな いので、今回 275 kV アルミ被 OF ケーブルおよび 154 kV 鉛被 OF

(2)に対してはトラフ全体をコロの上に置きトラフ端に生ずる力を 測定した。図1にトラフの配置状況を示す。

砂埋条件としては、砂をトラフに満した場合(砂埋 45 cm), 2/3 入れた場合(砂埋 30 cm) および砂埋 45 cm で水分を大にした場合 の3ケースを考え,布設は直線布設と曲線布設とについて行なった。 トラフ両端の荷重は砂埋45cmについてのみ求めたが、トラフの下 にコロを入れて布設し、両端のロードセルによって測定した。いず れの場合もケーブル両端は自由である。

測定項目はケーブル各部の温度,移動量,トラフの荷重および砂

ケーブルを約180m布設して,砂埋条件を変えて熱伸縮時のケーブ ルの挙動を観察し、ケーブルをトラフ内に砂埋布設する場合の設計 資料を得ることができた。なお、この研究は東京電力株式会社の依 頼により行なったものである。

# 2. 実験の概要

## 2.1 実験装置

日立電線株式会社日高工場内に内容積45×45×600 cmのコンク リート製トラフ300個(180m)を並べ、日射の影響を避けるため全 体に日よけをかけて、ケーブルを布設した。供試したケーブルは

154 kV 1×800 mm<sup>2</sup> クロロプレン防食鉛被 OF ケーブル 178 m 3条俵積み

275 kV 1×1,200 mm<sup>2</sup> ビニル防食アルミ被(コルゲート) OF ケ

ーブル171m1条

の2種で、絶縁端子によって導体と金属シー スを一体にし、導体のみに通電した。電源に は2,000 kVA 単相大電流変圧器を用い(3条 は直列接続),導体温度変化を40℃以上にす る電流 (1,200~1,700A) を 6~7時間通電・17 ~18時間遮断を1サイクルとして通電した。

#### 2.2 実験種類と測定項目

管路あるいは直埋布設については多くの研 究があり, ケーブル熱伸縮理論も発表されて いるので(1)(2),今回の実験の目標を次にお いた。

- (1) 布設設計に必要な基本的データの 獲得

の含水率で、そのほかに湿度、気温も測定された。図2は布設略図 と各測定量の配置を示したものである。

# 実験結果とその検討

## 3.1 直線布設

## 3.1.1 ケーブルの熱伸縮特性

砂中にケーブルを埋設した場合には砂の拘束によってケーブル の伸縮量は減少する。この伸縮量は砂埋の深さによって異なる。 図3はケーブルに通電サイクルを加えた場合のケーブル端の移動 の一例であるが、温度上昇時のケーブルの伸びは1サイクルと2 サイクルとで異なっている。これは両サイクルの通電前にケーブ ルに残留している内部応力が異なるためで,2サイクル目以後 は同一の伸縮を繰り返すようになる。したがって、繰り返し負荷 サイクルを対象とする場合には2サイクル以降のケーブルの移動



53 -









東京電力株式会社 \* \*\* 日立電線株式会社日高工場 (a) トラフ配置 (c) コロ配置状況 図1 実験配置

量が重要になる。以下,2サイクル以降のケーブルの移動を主体 に解析することにする。

図4は砂埋30cmの場合の154kV OF ケーブルの移動量と導 体温度変化の関係である。パラメータは図2(a)に示されるダイ ヤルゲージの位置(数字は中央点からの距離)で,右側を+,左 側を一で示した。移動量は30℃程度までは二次曲線で上昇する が,30℃以上で折れてほぼ直線的に上昇する。中央の0点はこの 温度で左側に移動し始める。この原因はケーブルは両端自由であ るにもかかわらずケーブルの内部応力が高まって図5(a)に示さ

図3 負荷サイクルによるケーブル移動量の変化

(154 kV OF ケーブル)

れるように中央より2m左の所でトラフが横に数cm移動したこ とによるもので、154 kV ケーブルでの一連の実験後ケーブルは 図5(b)のようなスネーク(スネーク量5cm)を生じた。

砂埋なしおよび砂埋の3種の条件において得られたケーブル端 での移動量(2サイクル目)は図6にまとめられているが、ケーブ ル移動量は砂埋なし,砂埋30 cm,砂埋45 cmの順に逐次半減し ている。しかし, 上面から散水して砂の含有水分を増すと砂は締 まるにもかかわらず移動量は大きくなる。ケーブル表面と砂の接 触面に水が介在して摩擦抵抗を減らすのであろう。3条俵積みの

図4 154 kV OF ケーブルの移動量

50





(直線布設,砂埋 30 cm, 2 サイクル)





— 54 —

砂埋布設ケーブルの熱伸縮 1323 ŀ ラ フ



----- 55 -----







(砂埋 45 cm コロ有)

上下相による移動量の差は少ないので図6は平均で示した。な お,砂埋しないときには図5(c),(d)のように俵積みは両端と もくずれる。

一方, 275 kV OF ケーブルは1条のみで試験したが、コルゲー トシースであるためケーブルの伸縮量は154 kV OF ケーブルに 比べて図7のように低下する。しかも、散水した場合には砂の締 めによって伸縮は非常に少なくなる。コルゲートによるケーブル 表面の波が砂にせん断力を与えて移動するため,水分層の介在よ りも砂の締まりの効果が大きく作用するものと解される。 3.1.2 トラフ両端の荷重 トラフを図1(c)のようにコロ上に乗せ、ケーブル伸縮によっ てトラフ両端に生ずる荷重をロードセルで測定した。図8(a)は 2種のケーブルについて+側端の荷重を示したものである。154 kV OF ケーブルのドラフの荷重は2サイクルでは温度上昇に対

トラフスネーク状況 (d) (154 kV OF ケーブル3条)

して飽和曲線を示すのに対して, 3サイクルでは直線的に近い形で 上昇する。2サイクル目の温度変 化33℃でトラフがスネークした

ケーブル3条で最大3.7t,275 kV OFケーブル1条で1.35tで

154 kV 鉛被 OF ケーブルは両 端自由の状態でも33℃の温度上 昇点よりスネークを生ずる。スネ ークによるトラフの横方向の移動 は図8(b)のとおりである。最大 変位のトラフ No.9 をロードセル

を介して固定して3サイクル目を通電すると、図8(c)のような 橫方向の荷重が得られた。また、トラフを固定したため数m離れ た他の場所にスネークが生じていた。4 サイクル目の前半の荷重 が低下しているのもこのためである。図8(c)には導体温度上昇 の時間変化も示してある。

図8(d)はスネーク状況であるが、これらの関係から、トラフの スネークは導体温度変化 30℃ までは起こらないが(布設長 110 m

以上として), 30℃以上ではトラフが横方向に移動すること、ト ラフの移動は700kgの力で押えられることなどが明らかになっ た。なお,275 kV アルミ被 OF ケーブルではトラフのスネークは 生じない。 3.2 曲線布設 3.2.1 ケーブルの熱伸縮特性 図2(d)のようにトラフを90mと70mに分けてL形に布設 1324 昭和41年11月

日

評

立

論



図9 曲線布設時ケーブル移動量

し,直角部は半径5mの円弧にして,曲線部にあるトラフ12個 はすべてコンクリート基礎に山形鋼で固定された。直線部は85m と65mになっている。曲線部のトラフのうち,図2(e)に示す 5個はロードセルを介して固定されている。

ケーブル両端を自由にして導体通電し,各直線部の両端で測定 した移動量を図9に記したが,ケーブルは図中の略図に示した矢 印方向に伸び,ちょうど2ルートのケーブルが独立に布設されて いるかのように伸縮する。したがって,曲線部分のケーブルは砂 中を横に数 cm 移動している。伸縮の傾向は2種のケーブルとも



W: ケーブルの重量 (kg/m) α: 銅の線膨張係数 (1/℃) θ: 導体温度変化 (℃) μ: 等価摩擦係数

この力 $F_1$ によってx点におけるdx長のケーブルの伸び $dm_1$ は

$$dm_1 = \frac{F_1 dx}{AE} = \left(\alpha \theta - \frac{\mu W x + K}{AE}\right) dx \dots (2)$$

同じである。

## 3.2.2 トラフに生じる荷重

(1) トラフ両端の荷重

曲線部を固定しているのでトラフ端の荷重は直線布設と同程 度の荷重になると予想したが、トラフ端の荷重に寄与するケー ブル長は各直線部の半分長で、荷重の最大値は次のようであ った。

65 m 側	85 m 側
1,380 kg	1,760 kg
550 kg	710 kg
	65 m 側 1,380 kg 550 kg

(2) 曲線部トラフの荷重

一方,図2(d)に示した曲線部トラフ12個のうちの5個について,ケーブル伸縮時に生ずる荷重を測定した。図10は154 kV OF ケーブルの場合の荷重であるが,10℃以上の温度変化ではトラフ3,4の荷重が減り,1,5の荷重が大きくなっていく。曲線部へのケーブルの伸び出しによりケーブルの埋設形状が変わるためである。荷重の最大値は154 kV OF ケーブル3条で306 kg,275 kV OF ケーブル1条で110 kg であった。

曲線部トラフにはケーブル1条当たり百数十キログラムの荷 重が加わるものと推定しなければならないであろう。

# 4. 理論的検討

4.1 熱伸縮係数

## 4.1.1 熱伸縮の基本式

ケーブルのトラフ引入れは一般にコロ引きによる場合が多く, 通電以前にはケーブルに内部応力は残留していないものと考えら れる。砂埋後導体温度を上昇させれば,熱膨張によるケーブルの で示される。しかし、 $F_1 \leq 0$ の部分ではケーブルは移動しないので、温度変化 $\theta$ のときケーブルが移動する範囲はケーブル端より

の点までである。したがって、ケーブル端の移動量(伸び) $m_1$ は $m_1 = \int_0^{x'} dm_1 = \left(\alpha \theta x - \frac{\mu W x^2}{2AE} - \frac{Kx}{AE}\right)_0^{x'} = \frac{AE}{2\mu W} \left(\alpha \theta - \frac{K}{AE}\right)^2$ (4)

となるが、上式はあくまで(3)式の条件で成立するので、ケーブ ル全長をl(m)とすれば x'<l/2 でなければならない。すなわち

$$\theta_{c_1} = \frac{\mu W l + 2K}{2AE\alpha} \quad \dots \quad (5)$$

とすれば, $\theta$  が $\theta < \theta c_1$ のときにのみ(4)式が成立する。 $\theta \ge \theta c_1$  で あれば不動域はなくなるので,(4)式の積分の上限はl/2となり, 移動量は次式で示される。

一方,伸びきったケーブルには伸びる際の抵抗力 ( $\mu W x + K$ ) に等しい圧縮力が残留する。したがって,負荷遮断後には,伸び きったときからの温度変化を $\theta$ と考えれば

 $F_1'=AE\alpha\theta-2(\mu Wx+K)$  .....(7) の力がケーブルを縮ませる方向に作業することになる。

次サイクルの伸びについても,縮みきったケーブルに残留する 内部応力は ( $\mu W x + K$ ) で,ケーブルに作用する力は(7)式とま ったく同一になり,ケーブル端の移動量(伸び) $m_2$ は

伸張力と摩擦による砂の抑制力が作用して,ケーブル端から x (m)の距離の点でケーブルを移動させる力 F<sub>1</sub>(kg)が発生する。 この力は次式で表わされる。

F<sub>1</sub>=AEαθ-(μWx+K) .....(1)
ここに、A: ケーブルの導体断面積 (mm<sup>2</sup>)
E: ケーブルの弾性率 (kg/mm<sup>2</sup>)
K: ケーブル端の拘束力 (kg), この場合は零

となる。ここで、x"は



で、やはり導体温度変化の関数であり、(5)式と同様に不動域が なくなる温度変化θc2(臨界温度変化と呼ぶ)



トラフ砂埋布設ケーブルの熱伸縮

N	布 設 条 件		A伸縮係数レ	B 等 価 摩 擦 係 数 µ		
NO.	ケーブル	砂埋条件	平均值 (mm/℃ <sup>2</sup> )	平均值	9値  標準偏差	変動係数
1		砂 埋 30 cm	0.0310	0.41	0.09	0.22
2	154 kV OF ケーブル	砂 埋 45 cm	0.0153	0.83	0.15	0.18
3		砂 45 cm 水分大	0.0175	0.72	0.15	0.21
4		砂 埋 30 cm	0.0200	1.10	0.24	0.23
5	275 kV OF ケーブル	砂 埋 45 cm	0.0177	1.24	0.38	0.31
6		砂 45 cm 水分大	0.0110	2.01	0.50	0.25

表1 熱伸縮係数と等価摩擦係数

(注) ケーブル定数

		154 kV OF	275 kV OFA
А	(mm <sup>2</sup> )	800	1,200
Е	$(kg/mm^2)$	5,000	6,000
W	(kg/m)	22.1	22.8
$\alpha$	$(1/^{\circ}C)$	1.	$.67  imes 10^{-5}$

を境にして変わるので、結局 m2 は次のようになる。

$$m_{2} = \begin{cases} \frac{AE}{4\mu W} \left( \alpha \theta - \frac{2K}{AE} \right)^{2}, & \theta < \theta_{c_{2}}.....(11 \text{ a}) \\ \frac{l}{2} \left( \alpha \theta - \frac{\mu Wl + 4K}{2AE} \right), & \theta \ge \theta_{c_{2}}.....(11 \text{ b}) \end{cases}$$

ケーブルの機械的特性の検討には繰り返しの移動量が主体とな るので(11)式が基本となる。

# 4.1.2 トラフ砂埋時のケーブル伸縮係数

表2 トラフに生じる最大荷重(砂埋45cmの場合)

	布 設 長	トラフ端の最	$\mathbf{D}$ / A	
5 - 7 N	(m)	(A) 計算値	(B) 実験値	B/A
	176	4,830	3, 670	0.76
154 kV OF ケーブル 3 条	85	2, 320	1, 760	0.76
	65	1, 780	1,760 1,380	0.75
	170	2,400	1, 350	0.56
275 kV OF ケーブル 1 条	170     2,400       75 kV OF ケーブル     85       1 条     1,200	1,200	710	0.59
	65	920	550	0.60

θc2を求めると、154 kV OF ケーブルでは48℃、275 kV OF ケ ーブルでは40℃となる。逆に,実際のケーブル運転時の繰り返し 負荷による導体温度変化分を20℃と考えると、不動域のなくなる 臨界のケーブル長はやはり(10)式より $\theta_{c_2}=20$ としたときの l と して求められる。すなわち,154 kV OF ケーブルで72 m, 275 kV OF ケーブルで85mとなるので、一般のケーブル系統ではマン ホールロにおけるケーブルの伸縮量はケーブル長に無関係に決定 されているといえる。

# 4.2 トラフに生じる荷重

ケーブルは砂による摩擦抵抗に抗して伸びる。ケーブルが動く区 間のこの抵抗力がトラフに伝達されトラフ両端に生じるものと推定 される。ケーブル不動区間では内部応力が高まるのみでトラフに伝

本実験では両端が自由であるので K=0 であり、中間に不動域 が存在する場合にはケーブル端の伸縮量 m2は(11a) 式より

$$m_2 = \nu \theta^2$$
,  $\nu = \frac{AE\alpha^2}{4 \,\mu W}$  .....(12)

となる。レは移動量と導体温度変化の関係を規定する係数で、こ れをケーブルの熱伸縮係数と名付けることにする。レの中で、μ のみが布設条件によって変わる量で、他はケーブル種類によって きまる定数である。

実験結果によると154 kV OF ケーブル3条の上下相のケーブ ル移動量には大きな差はないので、熱伸縮係数レはケーブル配置 によって変わらず、ケーブルの種類と砂埋条件によって変わる量 と考えられる。図6および図7のうち不動域が存在する範囲のデ ータより求めたレの値の平均値は表1A欄のとおりである。 一 方,各砂埋条件におけるケーブルの等価摩擦係数 μは熱伸縮係数 レから

として求められる。ケーブル定数として表1(注)の値を仮定して 求めたµを表1B欄に示した。これらのµの平均値を短尺ケーブ ルで機械的に求めたµの値と比較してみると、たとえば表1の No.2の場合で0.90, No.5の場合には1.42とになって、表1のµ の標準偏差内にはいっている。 μの値の変動係数は 20% 前後で ある。表1より次のことが結論されよう。

- (a) 鉛被ケーブルでは砂埋深さを30cmから45cmにする とµは約2倍になる。
- コルゲートアルミ被ケーブルではμは1を越える。しか (b) も砂埋深さによってµはあまり大きく変化しない。
- (c) 砂の水分が多くなるとケーブル表面に水分層が介在し

達される力はない。ケーブルの移動範囲は(9)式であるので, x"長 に作用する全摩擦力 T (kg) は

となり、このTがトラフ端に現われる力になる。実際にはトラフと 地面とに摩擦があるのでトラフ端の荷重は必ずTよりも小さい。こ の力も温度変化が θc2 以上では一定となり次のように示される。

表2は(15b)式によってTの最大値を計算し実験値の最大のもの と比較したものである。計算値の60~80%の値が実験によって測 定されている。

#### 5. 結 言

以上,長期間にわたって行なった実験結果を紙面の都合上要約し て説明したが、おもな結論を取りまとめると次のとおりである。

- (1) 各砂埋条件における等価摩擦係数を統計的に算出した。
- トラフのスネークは700kg以上の力で防止できる。 (2)
- トラフに生じる荷重は地面とトラフとの摩擦力で全部吸収 (3)される。
- 曲線布設時の曲線部トラフにはケーブル1条当たりの百数 (4)十キログラムの力が加わる。

終わりに,本店地中線課在任中に本研究の計画に当たられた東京 電力株式会社北東京電力所地中線課長古越博氏および南東京電力所 地中線課副長青柳隆之氏,ならびに日立電線株式会社今井敏雄氏に お礼申し上げるとともに,実験を担当された日立電線株式会社仲沢 亮二および本田儀弘両氏に感謝する次第である。

- - て,表面に波のない(鉛被)ケーブルではすべりやすく

— 57 —

なる。

# 4.1.3 不動域の関係

不動域がなくなる臨界の導体温度変化 θc2 は(10) 式で示される が,K=0としてこの実験での直線布設砂埋45cmの場合における

考 文 献 参 (1) C.A. Bauer & R.J. Nease: Elec. Eng. 73, 281 (1954) (2) 武藤, 津元: 藤倉電線技報 22 号, 42 (昭 37)