

東京電力株式会社 地中線総建設所 正会員 浦沢義彦

1. まえがき

POFケーブル(Pipetype Oil Filled Cable)とは一般ケーブルの外皮に相当する部分に鋼管を使用し、鋼管内にケーブル導体3本を一括して引入れ絶縁油を充填し、常時15~20^{MPa}程度の圧力を加圧かつ循環させ冷却するケーブルである。

POFケーブルは、

- 1) 最外層に鋼管を使用するので、外傷に対して安全度が高く、地中埋設に適している。
- 2) ケーブル単長を一般ケーブルの3倍とすることができ、人孔数を大幅に節減できる。
- 3) 絶縁性能が良く、大容量送電に適している。

などの利点を有しており、当社では66^{kV}、154^{kV}のPOFケーブルの建設および運転実績をふまえ、現在275^{kV}POFケーブルによる大容量地中送電線路の建設を進めている。

POFケーブルの設計にあたっては、電気工学的な設計が主となるが、POFケーブル最外層の鋼管としてはJIS G 3454 圧力配管用炭素鋼鋼管 — 275^{kV} POFケーブルの場合は、250A Sch 20あるいは300A Sch 30 — を使用しているため、パイプラインとしての設計が土木工学的な課題となってくる。

一般の構造物の設計にあたり考慮すべき荷重としては、外部荷重(機械的外力) — 活荷重、土圧、水圧、自重、内圧、振動、風、沈下、地震、沈下 etc — と内部荷重、すなわち材料の物性に基づく内力 — 温度変化、乾燥収縮、クリープ、レラクセーション etc — があげられるが、一般の土木構造物に対しては、前者による応力が周知の如く支配的である。したがって通常の構造物では常時作用する機械的外力が主荷重となり、内部荷重は従荷重となり、内部荷重に対しては許容応力の割増という形で対処するのが一般的である。

しかし、POF鋼管の場合はケーブルに通電すると、ケーブルの各種熱抵抗により最外層のPOF鋼管は相当の温度上昇を受け、また負荷の変動によりPOF鋼管は大きな温度変化(50~80°程度)を受けるため、POFケーブルの土木工学的設計にあたっては、POF鋼管の熱挙動が最も大きな問題となり、常時運転状態の場合、機械的外力は従荷重となり、熱荷動が主荷動となる。

すなわちパイプラインとしてのPOFケーブルの土木工学的アプローチは、配管系に発生する応力の中にも特に条件のない張り、熱応力の解析とその処理が最も究極的な課題といえる。

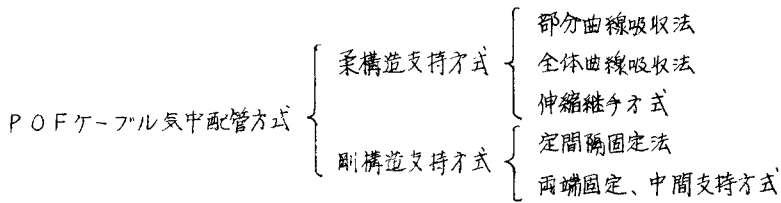
POFケーブルの布設方式としては、直埋方式と気中配管方式とがあり、いずれの型式も種々の設計上の問題点はあるが、気中配管方式の方が設計上の問題点が多い。

したがって本研究ではPOFケーブルの気中配管方式と熱挙動対策との関連について概説するとともに、気中配管方式の中で剛構造支持方式をとりあげ、剛構造支持方式のうちでも従来採用実績のない両端固定、中間支持方式の基本概念および現在までの研究成果、今後の方針などについて述べることを目的としている。

2. POFケーブルの気中配管方式と熱挙動対策設計¹⁾

POFケーブルは直埋が原則ではあるが、地中送電線路は公道を占有するため既設埋物、地元環境、あるいは道路管理者などの制約により、シールドや開削洞道(含共同溝)を採用する機会が年々増加しており、必然的に洞道内気中配管を採用せざるを得ない場合が多い。

POF鋼管を配管するにあたっては、前述の如く、POF鋼管の熱伸縮対策に最大の配慮を払わなければならないが、POFケーブル気中配管方式と熱伸縮対策設計とを分類すると次のようになる。



POFケーブル気中配管系の熱伸縮対策としては、上記の如く各種の方法が考えられるが、いずれを採用するかは占用する道路の線形、幅員、工事規制条件および洞道内空寸法、巨長などから判断すべきものといえる。

以下に夫々の設計上の特徴、問題点、現況などについて概述する。

(1) 柔構造支持方式

前述した如く、POF鋼管気中配管系の設計にあたっては、熱伸縮対策が最大の問題点になるが、従来の気中配管系の設計においては、鋼管の熱伸縮応力の一部を変位に解放、すなわち熱伸縮応力により鋼管内に蓄積されるひずみエネルギー U の一部を変形エネルギー U_p に転換する柔構造支持方式が広く採用されている。すなわち柔構造支持方式の場合はエネルギー的に考えると、鋼管のひずみエネルギー U は

$$U = U - U_p$$

ここで U : 熱伸縮を拘束した場合のPOF鋼管内に蓄積されるひずみエネルギー
 U_p : 変形エネルギー

上式で表わされ、熱伸縮を拘束した場合よりPOF鋼管内部に蓄積されるひずみエネルギーは U_p 分だけ減少することになる。

柔構造支持方式の原理は上述の如くであり、POF鋼管の応力面より考えると最も好ましい気中配管系の熱伸縮対策といえ、従来までの気中配管系の熱伸縮対策はすべてこの柔構造支持方式が用いられている。

柔構造支持方式を細分類すると、上記の如く3種類の方式に分類できるが、部分曲線吸収法とは図-1に示す如く、パイプラインの一部に曲率 R が小さく交角 I_A が大きな曲線部を設け、この曲線部のたわみ性を利用してPOF鋼管の内部に発生するひずみエネルギーを変位のエネルギーに解放する方式で、一般の洞道内気中配管および橋梁系の場合に採用している。

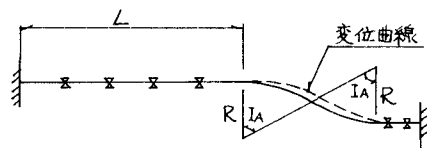


図-1 部分曲線吸収法

部分曲線吸収法の場合、曲率半径 R 、交角 I_A 、熱伸縮吸収長 L 、および曲線部の所要箇所数が問題となるが、おのおのの相関関係にあり、曲線部の曲げ剛性、鋼管の曲げ加工およびケーブル引込等の関係より250Aおよび300A鋼管の場合 $R \geq 10^3$ 、 $I_A \geq 30^\circ$ の条件は一般に必要となることは理論的に確かめられている。

全体曲線吸収法とは図-2に示す如く、鋼管を当初より全体的に大きな曲線(Sine Curve)を描かせて配管——スネーク配管——し、鋼管が温度変化を受けた場合、配管系を全体的に変位させ、鋼管応力の一部を変位に解放する方式で、ラールド洞道内の配管系に広く採用されている。



図-2 全体曲線吸収法

曲線吸収が不可能で、なおかつ気中配管方式を採用せざるを得ない場合の柔構造支持方式の一部として、伸縮継手(Expansion Joint)の採用が考えられる。

すなわち図-3に示す如く、パイプラインの中間に
適当な間隔で伸縮継手(E.J.)を挿入して軸方向熱膨
動変位を伸縮継手部で吸収する方式で、原理は曲線吸
収法と全く同様といえる。



図-3 伸縮継手(E.J.)

しかしPOF鋼管の熱伸縮変位は非常に大きく、現在、POF鋼管用大ストロークの伸縮継手を開発研究
しているが、現時点ではPOF鋼管用の大ストローク吸収可能な伸縮継手の実用化には種々の問題があり、
POFパイプラインへの採用実績はないというのが現状である。

(2) 剛構造支持方式

剛構造支持方式はエネルギー論的に考えると、直埋POFパイプラインと類似している。

すなわち鋼管の受ける温度変化によるひずみエネルギーをすべて鋼管内へのひずみエネルギーとして蓄積
させるというのが、その基本概念である。

剛構造支持方式としては前述の如く、定間隔固定法

と、両端固定、中間定間隔支持法とに分類できるが、

前者は図-4に示すように、POF鋼管が短柱となる

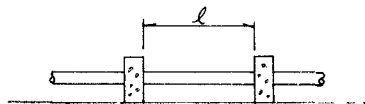


図-4 定間隔固定法

間隔 L にて、コンクリートあるいは鋼材により完全固定する方式で、POFパイプラインの構造系は巨長に
関係なく、固定間隔 L の両端固定はりとなるため解析は容易である。

しかし、いわゆる定間隔固定法は狭い洞道内でのPOF鋼管の固定作業が難しく、かつ固定部の応力、防
食層あるいは修繕作業などに問題があるため、やむを得ない場合を除いては採用することはなく、かつ長ス
パンのPOFパイプラインへの適用例はない。

剛構造支持方式のもう一つ的方式として図-5に示
す如く、両端固定、中間支持法があるが、本方式は従
来採用実績のないPOFパイプラインの支持方式であ
る。

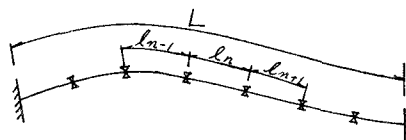


図-5 両端固定、中間支持法

剛構造支持方式は常時高応力状態で供用に供するも

のであり、POF鋼管の応力面より考えると曲線吸収が最も望ましいが、地中送電線路は公道を占用するた
め、曲線吸収に必要な線形および洞道スペースを確保することが非常に困難となってきている。

したがって、道路線形に無関係で、なおかつ最少スペースで配管可能な形式を取り入れることが、我々都
市土木技術者の使命となってきているため、本研究では長スパンの実用路線に計画している両端固定、中間
支持法によるPOFパイプラインの設計について以下に述べる。

3 両端固定、中間支持法によるPOF気中配管系の設計

本研究で対象とする両端固定、中間支持法は図-5に示す如く、あるスパン L にて、POFパイプラインの両
端を固定し、長さ L なる鋼管の座屈を防止するためにパイプラインの中間を L_n なる間隔にて管軸直角方向の変
位のみを拘束する方式で、中間支持点においては管軸方向の変位を拘束しないというのが、基本概念であり、そ
の構造系は軸力を受ける多径間連続梁となるため解析は容易ではない。

すなわち本方式においてはパイプラインの固定長 L は人孔間隔となるが、 L は大体10m前後であり、中間
支持間隔をSTPG-38, 300A, Sch 30, の鋼管を用いた場合、6mとすると100節点となり、パイプライ
ンが直線形としても通常の配管系解析用プログラムでは解析できない。

一般にPOFパイプラインは直線系であることはなく、多少の曲線系が入っている。

常識的に考えると、線形、支持間隔および温度条件が与えられれば、POFパイプラインの挙動解析は可能と
あるが、節点数が非常に多いため、すべての条件を包括した解析は不可能である。

したがって、本方式の設計にあたっては熱挙動解析と機械的外力による挙動解析とを別々に行ない、重ね合わせる設計を採用している。熱挙動解析にあたっては、通常の配管解析用プログラムでは解析が不可能のため、C.R.C.(株)が米国AUTON社より輸入したAUTOFLEXおよびDYNAFLEXというプログラムを使用し解析することとし、機械的外力による挙動解析は、パイプラインの一部を取り出し、両端ピン構造のはりとして解析した。

300A、Sch 30 のPOF鋼管の実線路解析の一例を示すと、下表の通りとなる。但しこの場合POFパイプラインの線形は図-6に示す通りであり、支持間隔は定間隔6mとし、くいる。

また温度変化を60℃、内圧を20^{kgf}/cm²とし、さらに曲線部は直管の送り込みを原則とするため布設時応力が生じているものとする。

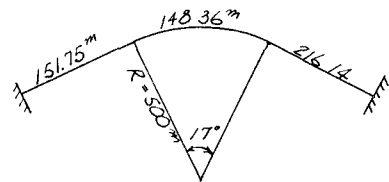


図-6 解析用線形

表-1 解析結果の一例

	軸方向応力 σ_1	円周方向応力 σ_2	せん断応力 τ	合成応力 σ_e
直線部	-1325.3	369.2	0	1543.4
曲線部	-465.8 -2184.8	369.2	25.1	2391.3

表-1に示す如く、POFパイプラインに発生する応力は軸方向応力が支配的であり、中でも熱応力が直管部において1436^{kgf}/cm²、曲線部において1537^{kgf}/cm²と大きく熱挙動が最も問題となることが明らかである。

NB-1;単位^{kgf}/cm²、 σ_1 , σ_2 の記号は圧縮-,引張+
NB-2;合成応力は、Von Misesのせん断ひずみエネルギー説による。

表-1の応力を見ると、通常の鋼構造に発生する応力^{に比べ}異常に高く、従来の鋼構造に採用している許容応力から判断すると許容され得ない応力レベルである。しかしPOFパイプラインにおいては、主荷重が熱応力であり機械的外力は従荷重となり、機械的外力より規定される許容応力とは根本的に異なる概念を導入している、すなわち、原子力あるいは火力発電所用配管系で採用している熱応力より規定される許容応力を用いている。その詳細は今日、省略するが、許容応力の基本は「AMERICAN NATIONAL STANDARD CODE FOR PRESSURE PIPING」のう5、ANSI, B31.1²⁾ B31.3³⁾ B31.7⁴⁾を参考にして規定している。以上に示す考え方で、設計を進めているが、従来採用実績のない新しい気中配管方式であるため、不全の配慮が必要である。特に熱応力が支配的であるため、パイプラインの熱挙動を明確にする必要がある。

したがって現在理論解析と実際の熱挙動との関連を把握するため、模型実験を実施しており、その詳細は別途報告する予定であるが、理論解析値と実際の熱挙動はかなり良い精度で一致するということが明らかとなったため、実線路への適用は充分可能であるとの結論を導く。

4. 今後の方針

常時運転状態における両端固定、中間支持方式のPOFケーブルへの適用性については、かなり解明されてきているが、今後は模型実験による熱挙動を更に解明するとともに、異常時、すなわち地震時、油圧サージ時等についても検討を加え、設計に万全を期する予定である。

参考文献

- 1) 村上、浦沢「POFケーブルの配管系の設計について」第15回電力土木研究発表会(電中研主催)
- 2) ANSI B31.1 Power Piping Systems 1967
- 3) ANSI B31.3 Petroleum Refinery Piping 1966
- 4) ANSI B31.7 Nuclear Power Piping 1969