

送電線クランプ部における素線の繰返し磨耗破損の解析

東北大学大学院工学研究科 学生員 定兼 弘憲
 東北大学大学院工学研究科 正会員 岸野 佑次
 (財)電力中央研究所 正会員 清水 幹夫

1. はじめに

送電線ケーブルは、鋼製の芯線とこれを取り巻くアルミ線の素線が束ねられたより線構造をもつ。送電線にはクランプによりねじれ防止ダンパーが取り付けられているが、このダンパーの送電線把持部においてより線が切れる「素線切れ」と呼ばれる事故が頻発している。

この素線切れの発生メカニズムを解明する目的で既に、粒状要素法¹⁾と有限要素法の組み合わせによる3次元解析が試みられている²⁾。ここでは、この解析手法を改良し、繰返しの影響を考慮した解析手法を開発し、これに基づいて考察を行った。

2. 解析方法

a) 概要

ねじれ防止ダンパーはアーマロッドを介して送電線に装着されている。図-1に送電線クランプ部断面構成の概念図を示す。なお、図-1に示すようにクランプは一端をヒンジで結合した一對の半円弧よりなっている。本研究では、粒状要素法を用いて行った断面内の2次元接触力分布解析³⁾で得られた接触力法線方向成分を与えた状態に対して素線間の長手方向の相対すべりの解析を行うために、有限要素法を用いた解析を行った。長手方向のすべりの解析手法を以下に示す。

b) 長手方向に付与する強制変位

長手方向には外乱の影響による曲げおよびせん断により素線間の相対変位が生じることを想定し、ここでは図-2に示すように、対称点を外して設置したクランプ近傍の送電線端部に線形分布する強制変位を与えることとし、クランプ部の接触の効果で素線間に不均一な相対変位を生じさせた。クランプ部素線間接触点におけるすべりに対しては、送電線断面内の素線間すべりと同様にCoulombの摩擦則を導入することとした。長手方向には強制変位増分を逐次与えることとし、1解析ステップの変位増分の大きさは一定とした。

c) 剛性行列の構成

送電線を構成する素線を1次元有限要素に分割して剛性行列を構成する。クランプ部左右のケーブルの長さを1:2としているので、要素の長さを一定として、クランプ部の左側は1要素、右側は2要素として定式化を行う。1つの素線に関する剛性関係は、節点番号1, 4をそれぞれ強制変位を付与する両端の節点として、次式のように示すことができる。

$$\begin{bmatrix} 2k & -k \\ -k & 2k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_2 + ku_1 \\ f_3 + ku_4 \end{Bmatrix}$$

ここに、 $k, u_n, f_n (n=1, 2, \dots, 4)$ は素線の軸力に対する剛性および n 番目節点の節点変位と節点力である。ここで、2本の素線がすべらずに拘束されたとして両者の相互作用を考慮した剛性行列を表すと次のようになる。

$$\begin{bmatrix} 2k+R & -k & -R \\ -k & 2k & \\ -R & & 2k'+R & -k' \\ & & -k' & 2k'+R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u'_2 \\ u'_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_2 + ku_1 \\ f_3 + ku_4 \\ f'_2 + k'u'_1 \\ f'_3 + k'u'_4 \end{Bmatrix}$$

ここに、'を付した量は2本目の素線に関する量である。また R は素線間の長手方向相対変位に対する剛性である。以下、全ての素線に対して同様の考え方で全体剛性方程式を構成する。長手方向の素線間のすべりはCoulombの摩擦則に従って断面内の粒状要素解析で求める接触力に基づき決定する。

d) Newton-Raphson法による逐次解析

クランプ部の各接点力学モデルは、弾完全塑性体とみなすことができる。逐次解析においては、各解析ステップにおいて全接点を弾性体とみなした全体剛性方程式により接触力を求める。その接触力をCoulombの摩擦則を用いて修正し、最終的に平衡状態が得られるまで繰返すこととした。

3. 解析条件

解析に用いたデータを表-1に示す。また、要素間摩擦角を 10° 、接触素線間の長手方向における剛性 R を 6.51×10^6 (N/mm)に定め、重力は無視した。上下端に与える1解析ステップ当りの強制変位増分は 1.0×10^{-5} (mm)とし、片振幅が $1.0 \sim 8.0 \times 10^{-3}$ (mm)の5段階で両振り繰返し载荷を行う。この繰返し载荷はある接触点ですべりによって生じた摩擦エネルギーの積分値が 5.0×10^{-4} (N・m)に至るまで継続する。本文ではこの時点でその接触点で接している素線が破断するものと仮定する。以上のような解析を上下方向に曲げを想定した強制変位を与えた場合について行う。なお断面内の接触力分布についてはクランプ部の締め付け角が 5.5° に対するもの³⁾を用いる。

4. 解析結果と考察

振幅が最も小さいものと大きいものについて接触力長手方向成分の変化、並びに摩擦エネルギーの変化をそれぞれ図-3, 4および図-5, 6に示す。これらの図に示した2接触点は、設定した摩擦エネルギーに到達した接触点Aとその次に摩擦エネルギーが大きかった接触点B (図-1参)である。各図の横軸に関しては、図-3, 5にお

キーワード：送電線ケーブル、素線切れ、粒状要素法、有限要素法、Newton-Raphson法

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

TEL 022-217-7425

ける100解析ステップが片振幅 1.0×10^{-3} (mm)、図-4, 6における800解析ステップが片振幅 8.0×10^{-3} (mm)に相当する。本解析において繰り返し载荷を行った際、図-3, 4からわかるように接触点A, Bは接触力長手方向成分が振動しながら絶対値が増加しすべりに至った。本来中心近くにある接触点A, Bの接触力法線方向成分の値は大きくすべりが生じ難い傾向にある。しかし、ここで行った曲げおよびせん断の解析においては、周辺部の微小なすべりの集積として接触点A, Bの接触力長手方向成分が図-3, 4のように増加したと考えられる。このため、他のすべりを生じている接触点に比べて接触力法線方向成分の大きさが大きいと最終的にすべりが生じた際の摩擦エネルギーが図-5, 6からわかるように急激に増加するに至ったと考えられる。また、図-5より振幅が小さい方では摩擦エネルギーは線形的な増加をしているが、図-6の振幅が大きい方の摩擦エネルギーは非線形的な増加をしている。これは、振幅が大きい場合、すべりが生じる接触点の数が多いことから、接触点A, Bがより大きな影響を他の接触点から受けたためと考えられる。次に、図-7に設定した摩擦エネルギーに到達した際の繰り返し回数と振幅の関係を示す。この図からは、材料の疲労試験でよく見られるSN曲線と類似した傾向が見られる。このことは、本文で提案した解析手法が素線切れの主要なメカニズムと考えら

れる疲労破壊を説明する上で有用であることとを示していると考えられる。

5. おわりに

本文においては、繰り返し外乱の影響を考慮した素線切れメカニズムを説明するための手法の提案を行った。この手法を用いた結果、送電線クランプ部の素線は、繰り返し外乱の影響を受けることにより、断面中心部に摩擦エネルギーが蓄積される様子を解析することができた。今後、実際の素線切れの事例と対照させながら詳細な解析を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 岸野佑次：新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析，土木学会論文集，No.406，pp.97-106.
- 2) 鈴木孝夫，岸野佑次，清水幹夫：送電線クランプ部における素線切れのメカニズムに関する研究
- 2) 清水幹夫，岸野佑次，岩井有人：架空送電線の素線切れに関する数値的検討，構造工学論文集，Vol.45A，pp.19-26.

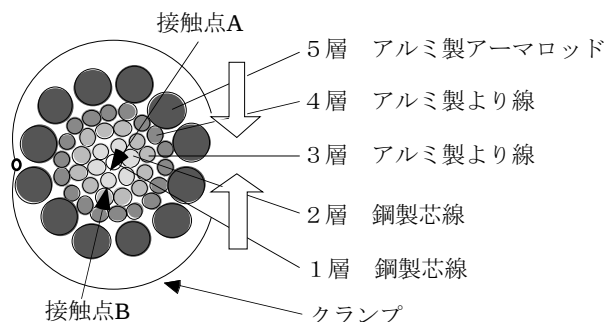


図-1 送電線断面構成概念図

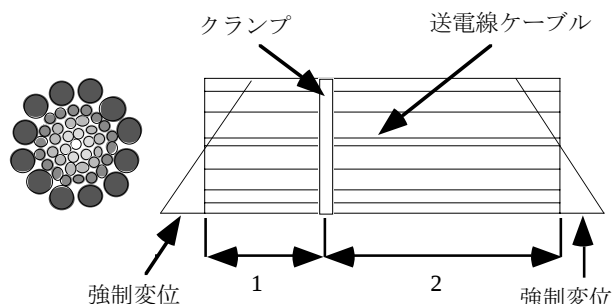


図-2 送電線端部に付与する曲げを想定した強制変位

表-1 解析データ

	ヤング率(N/mm)	断面積(mm ²)	要素長(mm)
1層	2.10×10^6	8.04	10
2層	2.10×10^6	8.04	10
3層	7.03×10^5	8.04	10
4層	7.03×10^5	8.04	10
5層	7.03×10^5	35.2	10

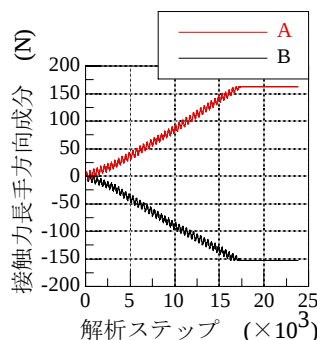


図-3 接触力長手方向成分
(振幅 1.0×10^{-3} mm)

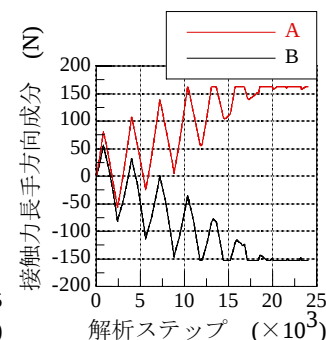


図-4 接触力長手方向成分
(振幅 8.0×10^{-3} mm)

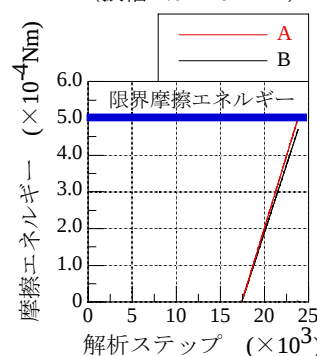


図-5 摩擦エネルギー
(振幅 1.0×10^{-3} mm)

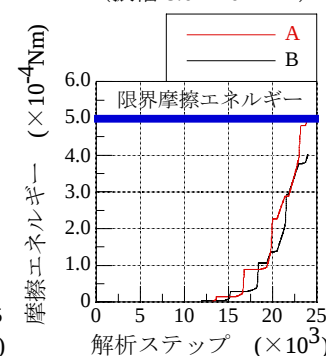


図-6 摩擦エネルギー
(振幅 8.0×10^{-3} mm)

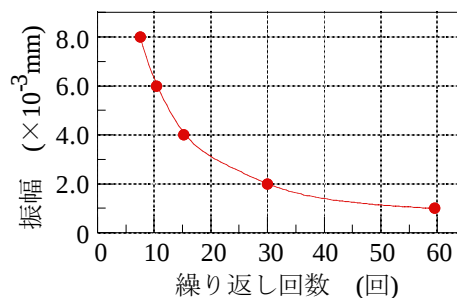


図-7 SN曲線