

# 損傷を受けた送電鉄塔の修繕シミュレーション： 損傷要因に応じた修繕方法と強度回復程度の評価

東北大学  
東北大学  
東北電力株式会社  
東北電力ネットワーク株式会社

学生会員 ○立崎 理久  
正会員 山川 優樹  
溝江 弘樹  
室井 亮

## 1. 序論

送電鉄塔は強風による過大荷重や地震や地すべりによる送電鉄塔脚部の不同変位によって損傷の発生が懸念される場合は点検が行われる。しかし、点検の際の損傷程度の判断目安は定性的なものが用いられているのが現状であり、点検者の主観や経験に依存したものとなっている。そうして把握された損傷状態の評価に応じて、部材交換などの修繕や建て替えの判断が行われている。

本研究では、損傷が生じた送電鉄塔に対して行った修繕による強度回復程度を評価するとともに、これらの結果を基に客観的かつ合理的な修繕の基準を策定するための基礎となる知見を提供することを目的とする。これにより、電力インフラの経済性・耐災害性向上に繋がりたいと考えている。

## 2. 鉄塔の有限要素モデルと解析手法

### (1) 解析対象・外力条件

本研究では図-2で示す東北電力ネットワーク（株）の交流 66 kV 線路で広く用いられている標準鉄塔の一種である懸垂型鉄塔（継脚 32.0 m）」を検討対象とした。



図-1 懸垂型送電鉄塔の例

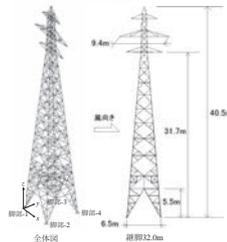


図-2 懸垂型標準鉄塔の全体図と概略寸法図

外力条件は、鉄塔の設計で標準的に用いられる荷重条件をベースとして、季節による違いを考慮した高温季(H)、低温季(L)、湿型着雪時(S)の3種類が設定されているが、今回は高温季(H)のみを行った。耐荷挙動解析では、自重・電線張力・風圧荷重・着氷着雪荷重などをベースとして、荷重発生因子の特性に応じて定荷重  $F_D$  と変動荷重  $F_L$  に分け、後者には変動荷重係数  $k$  を乗じて以下の式ように作用させた。

$$F = F_D + kF_L \quad (1)$$

$k = 1$  のときが設計荷重に対応する。

### (2) 解析方法

三次元弾塑性有限要素法による送電鉄塔の耐荷挙動解析を行った。鉄塔を有限要素モデル化する際には、2節点一次アイソパラメトリック Timoshenko 梁要素を用いた。また、

(1) で示した定荷重と変動荷重は、図-3と図-4で示すように等価節点荷重に換算して作用させた。

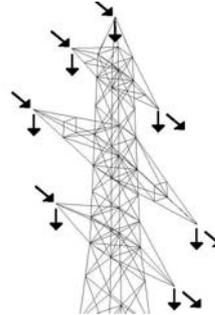


図-3 腕金先端荷重の模式図

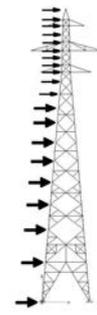


図-4 塔体風圧荷重の載荷点

### (3) 修繕方法

部材交換と脚部不同変位除去の2通りの修繕方法を、損傷要因が異なるケースに対して適用する。

#### ● 強風被害想定時

まず強風被害を模擬した解析を行い、そのときに変形量が大きい部材上位2つを交換し、その後再載荷を行うことで修繕後耐荷力を調べた。

#### ● 脚部不同変位発生時

まず脚部不同変位発生を模擬した解析を行う。

##### － 部材交換

変形量が大きい部材上位2つを交換し、その後再載荷を行うことで修繕後耐荷力を調べた。

##### － 脚部不同変位除去

脚部不同変位を除去し、その後再載荷を行うことで修繕後耐荷力を調べた。

### (4) 強度低下率と強度回復率

送電鉄塔の損傷による強度低下率と修繕による強度回復率の定義を以下の式と図-5で示す。 $k_{ult}^0$ は無損傷鉄塔の耐荷力、 $k_{ult}^{dam}$ は損傷時の耐荷力、 $k_{ult}^{res}$ は修繕後の耐荷力である。

● 損傷による強度低下率：
$$\frac{k_{ult}^0 - k_{ult}^{dam}}{k_{ult}^0} \quad (2)$$

● 正規化損傷後耐荷力：
$$\frac{k_{ult}^{dam}}{k_{ult}^0} \quad (3)$$

● 修繕による強度回復率：
$$\frac{k_{ult}^{res} - k_{ult}^{dam}}{k_{ult}^0 - k_{ult}^{dam}} \quad (4)$$

● 正規化修繕後耐荷力：
$$\frac{k_{ult}^{res}}{k_{ult}^0} \quad (5)$$

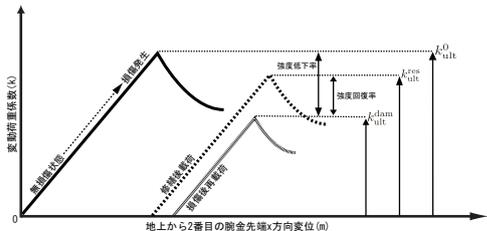


図-5 強度低下率と強度回復率の定義

### 3. 修繕による強度回復程度の評価

部材交換の結果を表-1 と表-2 に、脚部不同変位除去の結果を表-3 に示す。表-1 から強風被害想定時は主材交換によって一定の修繕効果が得られているが、表-2 から顕著な脚部不同変位発生時は部材交換による修繕効果がないことが確認できる。一方表-3 から脚部不同変位除去は一定の修繕効果が得られている。第4.章ではこのような結果になった要因を部材力を用いることで力学的に考察する。

表-1 強風被害想定時、部材交換による強度回復程度

無損傷時耐荷力		損傷時			
$k_{ult}^0$		$k_{dam}^{ult}$	強度低下率 (%)	正規化損傷後耐荷力 (%)	
3.323		2.591	22.04	77.96	
主材交換		腹材交換			
$k_{res}^{ult}$	強度回復率 (%)	正規化修繕後耐荷力 (%)	$k_{res}^{ult}$	強度回復率 (%)	正規化修繕後耐荷力 (%)
2.930	46.32	88.17	2.580	-1.475	77.64

表-2 鉛直下方向脚部不同変位発生時、部材交換による強度回復程度

脚部不同変位大きさ (mm)	JEC 許容目安比較 (何倍か)	無損傷耐荷力 $k_{ult}^0$	損傷時耐荷力		
			$k_{dam}^{ult}$	強度低下率 (%)	正規化損傷後耐荷力 (%)
13.37	2.494	3.323	3.186	4.147	95.85
36.10	6.730		1.800	45.85	54.15
主材交換		腹材交換			
$k_{res}^{ult}$	強度回復率 (%)	正規化修繕後耐荷力 (%)	$k_{res}^{ult}$	強度回復率 (%)	正規化修繕後耐荷力 (%)
3.235	35.71	97.33	3.186	0.1255	95.86
1.933	8.742	58.16	1.718	-5.384	51.69

表-3 鉛直下方向脚部不同変位除去による強度回復程度

脚部不同変位大きさ (mm)	JEC 許容目安比較 (何倍か)	無損傷耐荷力 $k_{ult}^0$	脚部不同変位除去		
			$k_{res}^{ult}$	強度回復率 (%)	正規化修繕後耐荷力 (%)
13.37	2.494	3.323	3.252	48.09	97.85
36.10	6.730		3.358	102.3	101.0

### 4. 修繕効果の有無に関する力学的検討

無損傷鉄塔に対する耐荷挙動解析を行った所、圧縮部材応力が大きく発生した箇所では変形が進展することが観察された。また、曲げモーメントやせん断力、引張部材応力の進展の仕方も観察したが、変形箇所との関係性は見いだせなかった。このことから、圧縮部材応力が変形の支配的要因であることが確認できる。

無損傷鉄塔に対する載荷過程における圧縮部材応力の進展の仕方と、各修繕後の再載荷時の圧縮部材応力の進展の仕方を比較することで、修繕効果の有無の要因を力学的に検討する。

一定の修繕効果が得られている図-7 と図-9 の圧縮部材応力の進展の仕方は、図-6 の無損傷鉄塔の圧縮部材応力の進展の仕方と似ており、黄色で囲った圧縮部材応力が大きくなった箇所が一致している。一方、図-8 では、脚部-4 に与えた不同変位によって脚部-2 に発生した圧縮部材応力が部材交換によって解消されず、再載荷時に脚部-2 の K 結構部

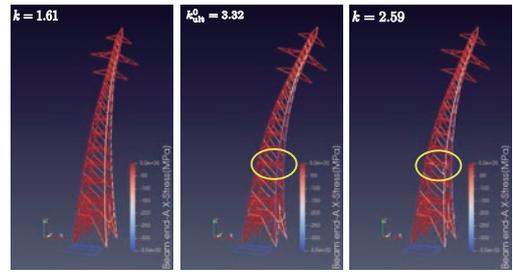


図-6 無損傷鉄塔の圧縮部材応力の進展の仕方

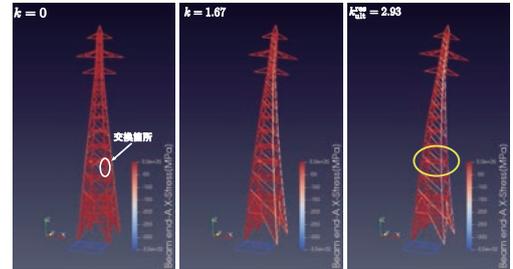


図-7 強風被害想定時・主材交換・圧縮部材応力の進展の仕方

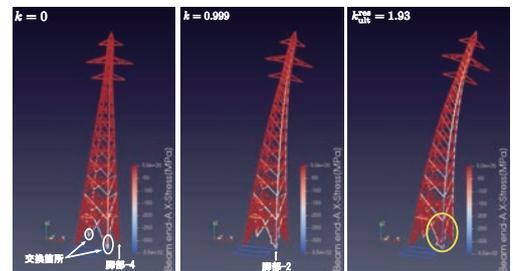


図-8 鉛直下方向脚部不同変位 36.10 mm・主材交換・圧縮部材応力の進展の仕方

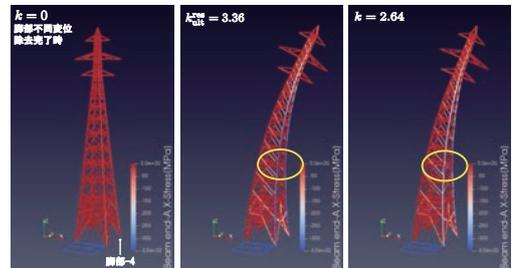


図-9 鉛直下方向脚部不同変位 36.10 mm 除去・圧縮部材応力の進展の仕方

の主材に過大な圧縮部材応力が生じている様子が観察できる。これにより耐荷力が低下したままである。

### 5. まとめ

本研究では、曲げ変形の顕著な部材を交換する方法で修繕シミュレーションを行った。しかし、条件によって当該部材の周辺の圧縮部材応力を適切に除去できない場合があり、その場合は十分な修繕効果が得られなかった。一方で、当該部材の周辺の圧縮部材応力を適切に除去すると、再載荷時の圧縮部材応力の進展の仕方が無損傷鉄塔に対する載荷過程と同様となり、高い修繕効果が得られることが確認された。水平開脚方向の脚部不同変位を与えたときの部材交換と不同変位除去でも同様の結果が得られたが、紙面の制約上省略した。

#### 参考文献

- 1) 電気学会電気規格調査会標準規格，送電用支持物設計標準 (JEC-127-1979)，電気書院，1979。