

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04566

研究課題名（和文）地震や台風で損傷を受けた送電施設の修繕シミュレーション：健全性回復程度の定量評価

研究課題名（英文）Analysis of damaged transmission tower due to natural hazards: Evaluation of soundness recovery after restoration

研究代表者

山川 優樹 (Yamakawa, Yuki)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80324010

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：強風等の過大荷重による部材変形や、鉄塔周辺の地盤変状に起因する基礎の変位（脚部不同変位）により、送電鉄塔に損傷が生じる事例が確認されている。本研究では弾塑性有限要素解析により、こうした外的作用による鉄塔の損傷挙動と損傷後の耐荷力低下程度を評価した。さらに、損傷を受けた鉄塔について部材交換や脚部不同変位除去等の修繕を模擬した解析を行い、修繕による耐荷力の回復程度を評価した。その結果、損傷形態や修繕方法によって修繕効果に顕著な相違がみられることが確認された。このことから、効果的な修繕を行うためには、損傷形態に応じて適切な修繕方法を選択することの重要性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、強風荷重や脚部不同変位による鉄塔の損傷挙動と耐荷力低下について有限要素解析により評価した。さらに、損傷が生じた鉄塔に対して修繕を模擬した解析を行い、修繕による耐荷力回復程度の定量評価を試みた。その結果、修繕方法によって修繕効果に顕著な相違がみられ、損傷要因や損傷形態に応じて修繕方法を適切に選択することの必要性が示唆された。本研究により、修繕後の性能回復程度の定量評価が可能となった。この成果は、損傷要因や損傷形態に応じて合理的な修繕方法の選定を可能とするための基盤技術整備に寄与し、電力インフラの耐災害性向上と損傷後の迅速な復旧を行うための技術開発に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：This study examined the progress of damages and the ultimate strength of transmission tower subjected to excessive loads due to strong winds and foundation displacement due to ground deformations using 3D finite element analysis, especially focusing on the distribution of damaged members and the accompanying strength degradation. We then performed repairing analysis of the damaged tower, which simulated repair measures by replacing damaged members and removing foundation displacement, and thereby evaluated the degree of strength recovery after the repair. The analysis result revealed that the efficacy of repair significantly depends not only on the repair methods but also on the distribution of damaged members associated with the cause of damage. This implies that the proper choice of repair measures according to damaged state is crucially important for effective recovery of the tower strength.

研究分野：非線形連続体力学，弾塑性力学，計算地盤力学，応用力学

キーワード：送電鉄塔 電力インフラ 耐災害性 損傷・修繕シミュレーション 構造物の健全性評価 耐荷力 部材損傷 基礎不同変位

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

送電鉄塔に作用する外力としては、一般に風や着氷雪による荷重が支配的である。これらの荷重は鉄塔部材に座屈・折損や伸び変形等の損傷をもたらす。2019年9月に房総半島を中心に大きな被害をもたらした台風15号では鉄塔2基が倒壊し、大規模な電力供給障害が生じた。過去の台風では、鉄塔本体や電線等に作用する強風荷重が部材を介して基礎へと伝達され、基礎の引揚破壊が生じた事例もある(文献①)。こうした荷重伝達に着目して鉄塔-基礎-地盤の全体系解析を行った研究がある(文献②)。

一方、地震荷重については、がいしや相間スペーサー等の損傷を除けば、塔体に直接作用する地震荷重による鉄塔本体の損傷事例はほとんどみられていない(例えば文献③)。しかし、鉄塔周辺の地盤変状に起因する基礎の変位(本研究では「脚部不同変位」とよぶ)によって、図1のように鉄塔の脚部周辺の部材に損傷が生じることがある。2011年東日本大震災での福島第一原子力発電所事故では、周辺土砂崩壊による外部電源供給用鉄塔の倒壊が事故の一因として挙げられた(文献④)。こうした事例を踏まえると、地盤変状等に起因する脚部不同変位による鉄塔の損傷挙動の把握は重要な研究課題である。



図1: 地震時の脚部不同変位による鉄塔の部材損傷事例(2007年新潟県中越沖地震)

しかし、部材変形や脚部不同変位の損傷程度と鉄塔全体の耐力低下程度との定量的関係は明らかになっていない。そのため、部材変形等の「大・中・小」といった定性的区分で損傷程度を評価することも多く、そのような場合、損傷評価は点検者の主観や経験に依存したものになりうる。また、損傷評価に基づいて部材交換等の局所的な原状復旧による修繕は一般に行われているが、こうした修繕方法によって鉄塔の健全性を十分に回復できているかは明確になっていない。すなわち、修繕後の性能回復程度を定量評価する方法が未確立であるため、修繕効果を定量保証した形で効果的な修繕方法を選定するための枠組みが十分に整備されていないのが現状である。

### 2. 研究の目的

上述の背景を踏まえると、鉄塔に対する様々な外的作用に起因する損傷が鉄塔の耐荷性能に及ぼす影響を正確に把握するとともに、修繕効果を定量評価する方法の開発が不可欠である。大型台風や大規模地震災害といった過酷ハザード事象への備えとして、送電設備の耐災害性の把握、電力安定供給のための機能確保に対する要求、災害時の電力早期復旧に係る取り組みに関する認識が高まっている状況下、鉄塔の損傷・修繕に関する研究は工学的に意義が大きいと考える。

本研究では、強風荷重や脚部不同変位による鉄塔の損傷と耐力低下について三次元有限要素解析により検討した(損傷解析)。つづいて、損傷が生じた鉄塔に対して修繕を模擬した解析(修繕解析)を行い、修繕による耐力回復程度の定量評価を試みた。これにより、損傷状態に応じた合理的な修繕方法の選定を可能とするための基盤技術の構築を目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 研究方法の概要

実際の送電ルートで採用されている標準鉄塔の一種を検討対象とする。鉄塔に損傷を及ぼす外的作用として、強風による過大荷重と、脚部不同変位を想定した損傷解析を行い、鉄塔の耐力を評価する。また、損傷状態に対する再載荷解析により損傷後耐力を評価する。つづいて、修繕を模擬した解析モデルについて修繕後耐力を評価し、修繕による強度回復程度を調べる。その際、2通りの異なる修繕方法として、損傷した部材の交換と、脚部不同変位の除去を考え、模擬した修繕解析を行う。前述の2種類の外的作用に起因する部材損傷を詳細に分析し、損傷様態、修繕方法、修繕効果の相互の関連性について検討する。

#### (2) 鉄塔の有限要素解析モデル

本研究では、実際の交流66kV線路で採用されている懸垂型標準鉄塔の一種(継脚32.0m、高さ40.5m、脚部根開き6.425m)を検討対象とし、それを再現した有限要素解析モデルを用意した。鉄塔の全体図と寸法を図2に示す。x軸を線路直角方向、y軸を線路方向、z軸を鉛直上向きに取る。図中に示すように4脚を「脚部1」～「脚部4」と称する。

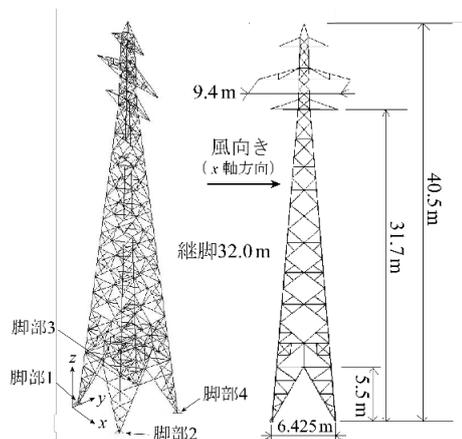


図2: 検討対象とした懸垂型標準鉄塔

鉄塔のモデル化には2 節点一次アイソパラメトリック Timoshenko 梁要素を用いた。検討対象とした鉄塔では全部材で等辺山形鋼が用いられている。本研究では断面積および強軸・弱軸まわりの最大・最小の断面二次モーメントが等辺山形鋼と等しい箱形断面の梁部材としてモデル化した。部材の鋼種は鉄塔構造図の記載（日本鉄塔協会「送電用鉄塔設計仕様」に準拠）に従った。各鋼種（SS400 および SS540）の材料定数は、文献⑤の表-1（材質及び強度区分別許容応力度表）に記載があるものはその値を用い、記載がないものは鋼材の一般的な値とした。鋼材の構成則には von Mises 降伏規準を用いた等方硬化弾塑性モデルを採用した。全部材で1 部材を5 要素に分割した。本研究で検討対象とした懸垂型標準鉄塔のモデルでは4540 要素、3967 節点である。

### (3) 鉄塔の作用する外力の設定

有限要素解析での作用外力には、塔体設計で一般的に用いられる設計荷重を用いた。季節による荷重特性の違いを考慮し、一般に高温季(H)、低温季(L)、湿型着雪時(S)の3 種類の季節荷重が考慮される。このうち台風の襲来等が多い夏から秋にかけての季節を想定した高温季(H)荷重のみについて解析を行った。径間長400 m として想定荷重を設定した。設計荷重を有限要素解析に導入する際には、設計荷重と等価な節点荷重に換算した上で鉄塔の解析モデルに作用させた。

地線および電線の支持点（塔頂および腕金先端）に作用する荷重は、垂直荷重、水平横荷重、水平縦荷重に大別される。垂直荷重は鉛直下方向荷重で、地線・電線や着氷・着雪の重量、電線張力の垂直角度荷重等が含まれる。水平横荷重は線路直角方向の水平荷重で、電線張力の水平角度荷重、電線等に作用する風圧荷重等が含まれる。水平縦荷重は線路方向の水平荷重で、電線の不平均張力による荷重等が想定されるが、本研究では考慮しないこととした。

これらの荷重のほか、塔体重量と塔体に直接作用する風圧による荷重を考慮した。

塔体重量については、鋼材の単位体積重量は一般に $7.8 \times 10^3 \text{ kgf/m}^3$  前後であるが、本研究では接合プレート・ボルト・付帯設備等の重量を考慮して定められている一般的な割増率（最下腕金位置およびその上部で1.48、それより下部で1.10）を考慮しつつ、有限要素解析による自重解析で鉄塔4 脚の鉛直反力合計が塔体設計での重量計算値（検討対象鉄塔では接合プレート・ボルト・付帯設備等を含めて8,033 kgf）と等しくなるように、鉄塔上部で $1.1377 \times 10^4 \text{ kgf/m}^3$ 、鉄塔下部で $8.4558 \times 10^3 \text{ kgf/m}^3$  と設定した。重力加速度は $9.8 \text{ m/s}^2$  とした。

風荷重方向は線路直角方向（図2 でx 軸正方向）とし、単位風圧は高温季(H)で $310 \text{ kgf/m}^2$ 、低温季(L)でその0.5 倍、湿型着雪時(S)で0.3 倍とした。風向き方向に直交するy-z 面への部材投影面積に上述の単位風圧を乗じた値をパネルごとに合計し、それを四等分して風上側パネル四隅の格点に載荷する。

本研究では荷重の発生要因による性質の違いを考慮して、上述の設計荷重  $F$  を定荷重  $F_D$  と変動荷重  $F_L$  に分類し、変動荷重係数  $k$  を用いて次式のように表す。

$$F = F_D + kF_L \quad \cdots \text{式(1)}$$

定荷重  $F_D$  は、腕金先端等に作用する垂直荷重のうち着氷・着雪重量を除いた電線等の重量、電線張力等による垂直角度荷重、水平横荷重のうち電線張力等による水平角度荷重、および塔体重量からなるものとする。変動荷重  $F_L$  は、腕金先端等に作用する垂直荷重のうち着氷・着雪重量による電線等の重量、水平横荷重のうち電線等の風圧荷重、塔体風圧荷重からなるものとする。

### (4) 強風および脚部不同変位を想定した損傷・修繕解析

本研究では、強風による損傷を想定した解析と、脚部不同変位を想定した解析を行い、各想定作用による鉄塔の損傷状態および損傷前後の耐荷力を評価した。さらに、損傷部材の交換または脚部不同変位の除去による修繕を模擬した解析を行い、修繕後の強度回復程度の評価を試みた。

強風を想定した損傷解析の手順は以下の通りである。

- ・手順1：鉄塔の4 脚全てを固定した状態で、定荷重  $F_D$  を載荷する。
- ・手順2：定荷重を載荷したまま、変動荷重  $F_L$  を  $k=0$  から漸増載荷する。損傷により荷重  $F$  が増加から減少に転じたとき、荷重係数  $k$  の最大値  $k_{\text{ult}}^0$  を「無損傷時耐荷力」と定義する。最大荷重点を超えて荷重が減少に転じた後、損傷が進行した状態 ( $k = k^* < k_{\text{ult}}^0$ ) まで解析を続行する。
- ・手順3：変動荷重を  $k=0$  まで除荷し、定荷重だけが作用した状態にする。これは実際の損傷後の点検時の荷重状態を想定している。この状態で部材変形等の損傷状態を評価する。
- ・手順4：損傷後の耐荷力を評価するため、変動荷重  $F_L$  を  $k=0$  から再度漸増載荷する。この再載荷過程での  $k$  の最大値  $k_{\text{ult}}^{\text{dam}}$  を強風想定時の「損傷後耐荷力」と定義する。

強風による損傷後の修繕解析の手順は以下の通りである。

- ・手順1：損傷解析の手順3において、曲げ変形が顕著な部材を検出する。最も大きな曲げ変形が生じている部材から順に、所定の本数の部材を交換対象とする。
- ・手順2：交換対象部材と接続している隣接部材の節点に仮支持力を与えた状態で、交換対象部材を取り除く。仮支持力の大きさは、交換対象部材の軸力から算出する。
- ・手順3：同一箇所新しい部材を入れ、両端を隣接部材の節点と接続した後、仮支持力を取り除く。
- ・手順4：修繕後の耐荷力を評価するため、変動荷重  $F_L$  を  $k=0$  から再度漸増載荷する。 $k$  の最大値  $k_{\text{ult}}^{\text{rep}}$  を「部材交換による修繕後耐荷力」と定義する。

上述した損傷解析と修繕解析によって評価される各状態での耐荷力の概念図を図 3 に示す。それらの値をもとに耐荷力に関する以下の評価値を定義する。

$$\begin{aligned}
 (\text{損傷後の強度低下率}) &= (k_{\text{ult}}^0 - k_{\text{ult}}^{\text{dam}}) / k_{\text{ult}}^0 \\
 (\text{修繕後の強度回復率}) &= (k_{\text{ult}}^{\text{rep}} - k_{\text{ult}}^{\text{dam}}) / (k_{\text{ult}}^0 - k_{\text{ult}}^{\text{dam}}) \\
 (\text{正規化損傷後耐荷力}) &= k_{\text{ult}}^{\text{dam}} / k_{\text{ult}}^0 \\
 (\text{正規化修繕後耐荷力}) &= k_{\text{ult}}^{\text{rep}} / k_{\text{ult}}^0
 \end{aligned}
 \quad \dots \text{式(2)}$$

脚部不同変位を想定した損傷・修繕解析について以下に述べる。送電用支持物設計標準 (JEC-127-1979) (文献⑥) では、不同変位の許容変位量を鉄塔の根開き (脚間寸法) に対して水平方向で 1/800 程度、鉛直方向で 1/1200 程度としている。本研究で検討対象とした鉄塔の根開きは 6.425 m なので、許容変位量は水平方向で 8.0 mm 程度、鉛直方向で 5.4 mm 程度である。実際には鉄塔 4 脚それぞれに様々な方向の不同変位が生じることが考えられるが、本研究では図 4 に示すように脚部 4 だけに不同変位が生じる場合に限定して検討することとし、水平対角開脚方向の不同変位  $u_H > 0$  が生じるケースと、鉛直下方向の不同変位  $u_V > 0$  が生じるケースの 2 通りを考える。

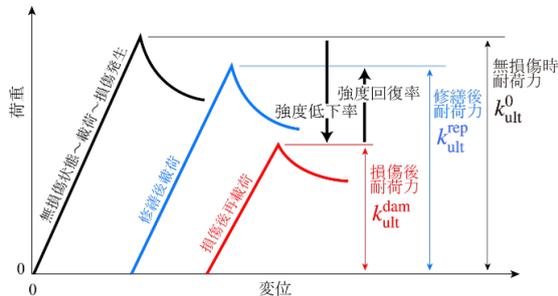


図 3：各状態での耐荷力の概念図

脚部不同変位を想定した損傷解析の手順は以下の通りである。脚部不同変位が発生していない状態での無損傷時耐荷力  $k_{\text{ult}}^0$  は、強風を想定した損傷解析の手順 1～手順 2 と同様に評価する。

- ・手順 1：鉄塔の 4 脚全てを固定した状態で、定荷重  $F_D$  を載荷する。
- ・手順 2：定荷重を載荷したまま、脚部 1, 2, 3 を固定した状態で、脚部 4 に所定量の不同変位 ( $u_H$  または  $u_V$ ) を強制変位として与えたあと、脚部 4 を固定する。この状態で部材変形等の損傷状態を調べる。
- ・手順 3：定荷重を載荷したまま、変動荷重  $F_L$  を  $k=0$  から漸増載荷する。  $k$  の最大値  $k_{\text{ult}}^{\text{dam}}$  を脚部不同変位想定時の「損傷後耐荷力」と定義する。

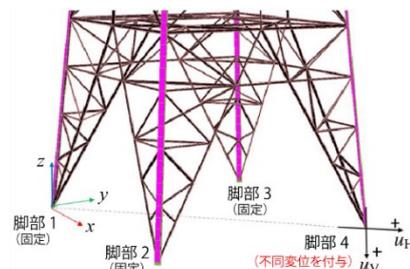


図 4：脚部不同変位の設定

脚部不同変位によって損傷した状態に対して、以下 2 つの異なる修繕方法 A, B を考える。いずれの修繕方法においても、上述の損傷解析の手順 2 の状態で修繕を行う。

- ・修繕方法 A：強風による損傷に対する修繕解析と同様の手順で、顕著な曲げ変形が生じている部材を所定本数だけ交換する。
- ・修繕方法 B：脚部 4 に不同変位 ( $u_H$  または  $u_V$ ) と逆方向の強制変位を与えることにより不同変位を除去し、脚部 4 を健全時の位置まで戻す。

修繕後耐荷力の評価方法は、強風想定時の修繕解析の手順 4 と同様である。修繕方法 A, B に対して、それぞれ「部材交換による修繕後耐荷力」と「脚部不同変位除去による修繕後耐荷力」を定義する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 強風を想定した損傷・修繕解析の結果

強風を想定した損傷解析で顕著な曲げ変形が生じた部材の位置と変形状況を図 5 に示す。同図は、  $k_{\text{ult}}^0 = 3.32$  を経て  $k^* = 2.59$  に低下するまで解析を行った後、  $k=0$  まで除荷した状態 (強風を想定した損傷解析の手順 3 の状態) を示している。第 15, 第 16 パネルの支柱材での損傷が顕著である。第 18, 第 19 パネルの補助材にも損傷がみられる。

損傷解析と修繕解析で得られた無損傷時、損傷後、および部材交換による修繕後の荷重-変位関係を求め、図 3 の概念に基づき式(2)により損傷後の強度低下率と修繕後の強度回復率を求めた。損傷後の強度低下率は 22.0%であった。修繕解析では、曲げ変形による損傷が顕著な支柱材 2 本を交換した場合は 46.3%の強度回復率が得られた。一方、腹材 2 本を交換した場合は修繕効果がみられず、むしろ修繕後

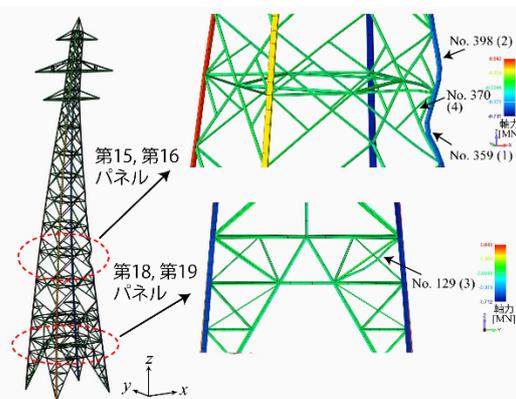


図 5：強風を想定した損傷解析で得られた損傷状態 (変形倍率 5 倍、括弧内数字は部材曲げ変形の大きさ順)

耐力力が損傷後耐力力を数%下回る結果となった。

(2) 脚部不同変位を想定した損傷・修繕解析の結果

水平開脚方向の脚部不同変位  $u_H$  を想定した損傷解析で顕著な曲げ変形が生じた部材の位置と変形状況を図 6 に示す。図には  $u_H = 16.0 \text{ mm}$ ,  $72.1 \text{ mm}$ ,  $109.8 \text{ mm}$  を与えたときの部材損傷状態を示した。これらの不同変位は、文献⑥が定める許容変位量の約 2.0 倍, 9.0 倍, 13.7 倍に相当し、損傷後の強度低下率はそれぞれ  $-0.54\%$ ,  $13.2\%$ ,  $16.9\%$  であった。鉛直下方向の脚部不同変位  $u_V = 13.4 \text{ mm}$ ,  $36.1 \text{ mm}$  による解析も行った。強度低下率はそれぞれ  $4.2\%$ ,  $45.9\%$  であった。部材損傷の状況は、紙面の制約により図示を省略する。以上の結果から、水平開脚方向の不同変位  $u_H$  よりも鉛直下方向の不同変位  $u_V$  の方が鉄塔の耐力力低下に及ぼす影響が大きいことが確認された。ただし、方向や大きさが異なる脚部不同変位が鉄塔の耐力力に及ぼす影響の程度については、今後さらなる検討が必要である。

脚部不同変位  $u_H$ ,  $u_V$  によって損傷が生じた各状態に対して、修繕方法 A, B による修繕解析を行った。水平開脚方向の不同変位  $u_H$  による損傷に対する修繕後の強度回復率は、修繕方法 A による支柱材や腹材の部材交換では  $10\%$  未満の回復率に留まった。一方、修繕方法 B により不同変位  $u_H = 109.8 \text{ mm}$  を除去した後の強度回復率は  $96.8\%$  と無損傷時に近い値まで回復できることが確認され、修繕方法 B の有効性がみられた。鉛直下方向の不同変位  $u_V$  による損傷に対する修繕方法 A による強度回復率は、 $u_V = 13.4 \text{ mm}$  の場合は支柱材 2 本の交換により  $35.7\%$  の強度回復がみられたが、それ以外の場合は  $10\%$  未満であり、修繕方法 A による強度回復率は小さかった。一方、修繕方法 B では、 $45.9\%$  と著しい強度低下率がみられた  $u_V = 36.1 \text{ mm}$  のときでも無損傷時に近い耐力力まで回復でき、不同変位の除去による修繕の有効性がみられた。

(3) 修繕による強度回復程度に関する考察

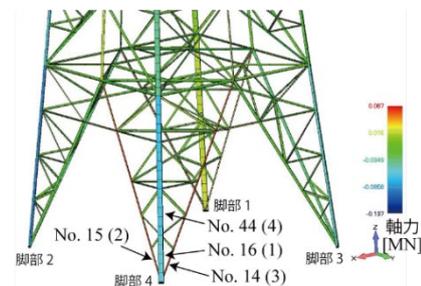
強風荷重による損傷が生じた鉄塔に対して、部材交換による修繕を模擬した解析を行い、修繕後耐力力を評価した。その結果、損傷が顕著な支柱材 2 本を交換した場合には、無損傷時に近い耐力力まで回復させることはできなかったが、部材交換による修繕にはある程度有効性がみられた。脚部不同変位による損傷に対しては、部材交換と脚部不同変位除去の 2 種類の修繕方法を考え、それぞれの修繕効果を比較した。その結果、部材交換による修繕では十分な強度回復がみられなかった。これとは対照的に、本研究で検討した範囲の不同変位では、不同変位を除去する修繕により無損傷時耐力力に近い値まで強度回復できる場合があることが確認された。

このように修繕方法によって修繕効果に顕著な相違がみられ、損傷要因や損傷形態によっては部材交換による修繕が必ずしも有効でない場合があることが確認された。以上の結果から、損傷要因や損傷形態に応じて修繕方法を適切に選択することの必要性が示唆される。

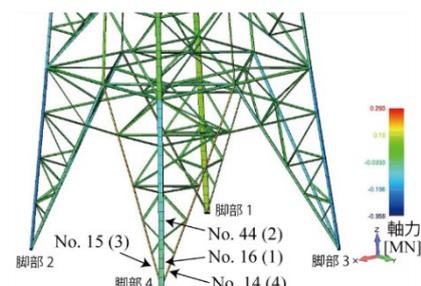
本研究では、懸垂型標準鉄塔の一種を対象として、高温季(H)荷重が作用する場合に限定し、単一の脚部に対する不同変位を想定した検討を行った。異なる型式・継脚の鉄塔に対して各種の季節荷重や脚部不同変位が作用する場合において、本研究で得た結果がどの程度まで一般性をもって適用可能かについては、今後さらに検討が必要である。

〈引用文献〉

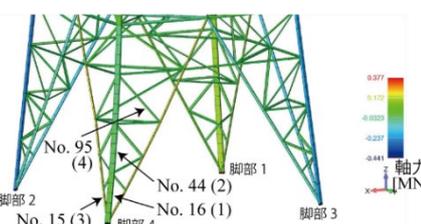
- ① 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会：送電線鉄塔倒壊事故調査ワーキンググループ報告書（平成 14 年 11 月 28 日），2002。
- ② 山川優樹，中市翔也，池田清宏，尾崎利行，松村政秀，北田俊行：地盤－基礎－送電鉄塔の連成作用を考慮した三次元解析と安定性の検討。土木学会論文集 C, Vol. 64, No. 4, pp. 782-801, 2008。
- ③ 土木学会鋼構造委員会：東日本大震災鋼構造物調査特別委員会報告書，第 2.4 節電力関連施設等 (pp. 111-124), 2012。
- ④ 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所内外の電気設備の被害状況等に係る記録に関する報告を踏まえた対応について（指示）に対する報告について。平成 23 年 5 月 23 日発表資料。
- ⑤ 日本鉄塔協会：等辺山形鋼許容応力表〔電気設備の技術基準の解釈（1997）及び JEC-127（1979）準拠〕1997 年改訂。平成 9 年 8 月。
- ⑥ 電気学会電気規格調査会：送電用支持物設計標準（JEC-127-1979）。電気書院，1979。



(a) 水平開脚方向の不同変位  $u_H = 16.0 \text{ mm}$



(b) 水平開脚方向の不同変位  $u_H = 72.1 \text{ mm}$



(c) 水平開脚方向の不同変位  $u_H = 109.8 \text{ mm}$

図 6：水平開脚方向の脚部不同変位を想定した損傷解析で得られた損傷状態（括弧内数字は部材曲げ変形の大きさ順）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 井口拓哉, 佐藤大貴, 羅家か, 山川優樹	4. 巻 76 (2)
2. 論文標題 非硬化ひずみ領域を導入した拡張下負荷面モデルの完全陰の応力計算法の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_193-I_204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.2_I_193	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Koichi Hashiguchi, Tatsuya Mase, Yuki Yamakawa	4. 巻 17 (3)
2. 論文標題 Elaborated subloading surface model for accurate description of cyclic mobility in granular materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Geotechnica	6. 最初と最後の頁 699-719
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11440-021-01203-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamakawa Yuki, Hashiguchi Koichi, Sasaki Tomohiro, Higuchi Masaki, Sato Kiyoshi, Kawai Tadashi, Machishima Tomohiro, Iguchi Takuya	4. 巻 45 (16)
2. 論文標題 Anisotropic subloading surface Cam clay plasticity model with rotational hardening: Deformation gradient based formulation for finite strain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics	6. 最初と最後の頁 2321-2370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/nag.3268	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 立崎理久, 山川優樹, 溝江弘樹, 室井亮
2. 発表標題 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
3. 学会等名 令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Yamakawa, Takuya Iguchi, Jiahua Luo
2. 発表標題 Deformation-gradient-based formulation of Cam-clay plasticity model with anisotropic rotational hardening and subloading surface concept
3. 学会等名 14th WCCM & ECCOMAS 2020
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井口拓哉, 佐藤大貴, 羅家か, 山川優樹
2. 発表標題 非硬化塑性ひずみ領域を導入した拡張下負荷面モデルの完全陰的応力計算法の開発
3. 学会等名 第23回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立崎理久, 山川優樹
2. 発表標題 送電鉄塔の強風や基礎不同変位による部材損傷と修繕による耐荷力の回復程度の評価
3. 学会等名 令和元年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap (山川優樹) <a href="https://researchmap.jp/read0122059">https://researchmap.jp/read0122059</a> 東北大学 大学院工学研究科 土木工学専攻 数理システム設計学研究室 (スタッフ: 山川優樹) <a href="http://msd.civil.tohoku.ac.jp/staff_yamakawa.html">http://msd.civil.tohoku.ac.jp/staff_yamakawa.html</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------