

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560598

研究課題名(和文)地震による基礎の不同変位を受けた送電鉄塔 - 地盤連成系の余耐力評価

研究課題名(英文)Effect of foundation displacement by earthquake on ultimate strength of suspension- and tension-type electric power transmission towers

研究代表者

池田 清宏 (Ikeda, Kiyohiro)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50168126

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、地震などによる地盤変形による送電鉄塔基礎の不同変位とそれに伴う鉄塔の損傷を定量的に評価し、損傷を受けた地盤 - 基礎 - 鉄塔連成系の耐風終局強度を合理的に評価することを目的とした。震害における典型的な地盤破壊形態を対象とし、鉄塔に作用する風外力を現行設計における方法に基づいて設定し、地盤 - 基礎 - 鉄塔連成系の3次元・大変形・弾塑性解析により、地震後の鉄塔の耐荷・変形性能に関する研究を行った。

研究成果の概要(英文)：In response to failure reporting of transmission towers due to support movements, in this research project, the ultimate strengths of such towers were evaluated by a series of three-dimensional nonlinear elasto-plastic finite element analyses for suspension and tension towers with several heights. Realistic external loads used in the standard design code, including tower's own weights, tension forces of transmission cables, and wind loads that vary with seasons were introduced as an equivalent nodal load in the finite element analysis. The ultimate strength of the towers under imposed support movements was estimated by a load factor of the design load. The ultimate strength tended to be reduced greatly when the support movement attained at a certain level, while such reduction of strength was quite different depending on the tower type, season load, and the direction of support movement. These results were discussed in comparison with the technical standard for support movement.

研究分野：鋼構造・応用力学

キーワード：送電鉄塔 耐震 余耐力 地盤変形 斜面 不同変位 弾塑性 FEM解析

1. 研究開始当初の背景

送電鉄塔系は、電線・鉄塔・基礎・地盤という力学特性が異なる複数の構成要素から成る。設計においては各構成要素について個別に照査が行われるが、全ての構成要素を一括考慮した全体解析による検討がなされることは少ない。しかし、送電鉄塔系全体の中で各構成要素が満たすべき性能を規定する上で、実際の使用条件下における構成要素間の相互作用を明らかにすることは工学的に重要な課題である。

鉄塔基礎と地盤に関する研究としては、基礎の引揚支持力について1960年代頃から国内外で盛んに研究が始まった。最近では有限要素法を用いた逆T型鉄塔基礎の引揚支持力評価に関する研究が行われている。また、基礎と地盤との相互作用を考慮した基礎の支持力検討も行われている。

送電鉄塔の倒壊・損傷に対しては風荷重が支配的である。電線や鉄塔に作用した風荷重は鉄塔部材を介して基礎、そして地盤へと伝達される。この荷重伝達に着目して鉄塔・基礎・地盤の全体解析を行った研究があり、鉄塔脚部の支持条件によって鉄塔の崩壊形態に違いが見られることが示されている。

一方、地震荷重による被害については、電線支持碍子や相間スペーサー等の損傷を除けば、鉄塔自体の損傷事例はこれまでの地震で見られていない。しかし、地震等により鉄塔周辺の地盤に亀裂・沈下・隆起等が発生し、基礎が変位すること(脚部不同変位)によって鉄塔脚部の根開きが拡大して部材に変形や損傷が生じる事例が確認されている(図-1、図-2)。また、東日本大震災での福島第一原子力発電所事故の一因として、周辺土砂崩壊による外部電源供給用鉄塔の倒壊が挙げられた。ほかに、地すべり等に起因する鉄塔倒壊による大規模停電等が発生しており、地盤変状による鉄塔および基礎の安定性評価が急務となっている。



図-1 地盤変状による脚部不同変位 (左手前の脚) 図-2 脚部不同変位による部材損傷事例

2. 研究の目的

本研究では地震などに起因する地盤変形による鉄塔脚部の不同変位が鉄塔の耐荷力に及ぼす影響の評価を目的とする。脚部不同変位による鉄塔の耐荷力低下を定量評価することは、地震等の災害後における修繕の要

否や優先度の判断基準を策定するための基礎的知見の整備に資するものと考えられる。本研究では、実際の送電ルートで採用されている標準鉄塔を忠実に再現した有限要素解析モデルを構築し、電線支持形式と継脚の異なる数種の鉄塔を対象として検討を行う。

3. 研究の方法

本研究では、交流66 kV 線路で採用されている標準鉄塔の一種である懸垂型の6621 型標準鉄塔(継脚32.0m, 18.5m)及び耐張型の6628 型標準鉄塔(継脚30.5m)の3 種類を検討対象とした。鉄塔の腕金先端に対する設計荷重の載荷点およびその方向を図3 に示す。本研究で用いた有限要素解析コードは有限変位・有限変形理論に基づくもので、分岐・座屈問題も取り扱うことができる。

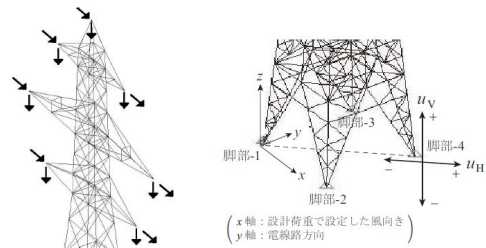


図-3 鉄塔腕金先端に作用する荷重の模式図 図-4 脚部不同変位の設定

設計荷重をその発生因子によって、死荷重 FD (鉄塔の自重、電線の常時張力)と活荷重 FL (風、着氷、着雪に起因する荷重)とに分けて考え、一定の死荷重作用状態に対して活荷重を漸増載荷した。つまり、鉄塔に載荷する全荷重ベクトル(有限要素解析における節点荷重ベクトル)は $F = FD + kFL$ となる。ここで k は活荷重係数である。本研究では前述の3種類の鉄塔についてそれぞれ季節によって特性の異なる3種類の荷重(高温季(H)、低温季(L)、湿型着雪時(S))の下での耐荷挙動解析を行ったが、本研究成果報告書では高温季(H)荷重下での懸垂型6621 型鉄塔(継脚32.0m)の結果のみを示す。

以下の手順で脚部不同変位が発生した後の鉄塔の耐荷挙動解析を行った。

- (1) 4脚全ての変位を拘束した状態で、鉄塔に死荷重 FD を載荷する。
- (2) 脚部-4に対して、図4に示した各方向の強制変位 uH または uW を所定量だけ与える。強制変位を与える過程では、死荷重 FD を載荷した状態を維持し、脚部-4以外の3つの脚部の変位は拘束する。
- (3) 脚部-4に対する強制変位が所定量 uH , uW に達したら、脚部-4の変位を拘束する。
- (4) 死荷重 FD を維持した状態で、活荷重係数 k を乗じた荷重 kFL を載荷する。活荷重係数 k の値をゼロから漸増させ、 k が最初の極大値 $kult$ を示したときの荷重を最大耐荷力とする。

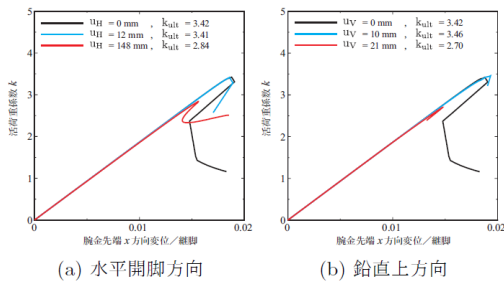


図-5 脚部不同変位による最大耐荷力の低下

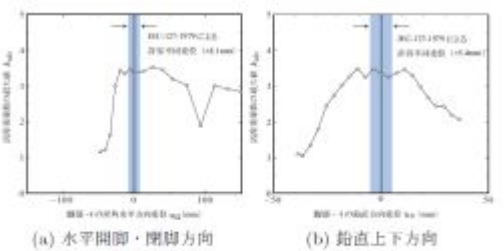


図-6 脚部不同変位による最大耐荷力の低下

上で述べた手順で解析を行った結果の一例として、懸垂型の6621型標準鉄塔(継脚32.0m)に対して水平開脚方向および鉛直上方向の脚部不同変位を与えたときの荷重-変位関係を図5に示す。脚部不同変位による最大耐荷力の低下挙動を図6に示す。水平対角方向の不同変位については、開脚方向では、脚部不同変位の増加に伴う耐荷力の低下は緩やかで、 $u_H = 50\text{mm}$ を付近で耐荷力の低下が始まり、 $u_H = 100\text{mm}$ 付近で k_{ult} が2を下回るまで低下する。その後、耐荷力は再び3を超える程度まで回復し、緩やかに低下していく。一方、閉脚方向については、 $u_H = 20\text{mm}$ 付近で k_{ult} が急激に低下をはじめ、最終的には1程度まで低下する。鉛直上方向に変位させたときは、 $u_V = 12\text{mm}$ 付近までは耐荷力の顕著な低下は見られないが、その後耐荷力が急激に低下する。鉛直下方向に変位させたときも同様の低下挙動がみられる。

送電用支持物設計標準1)(JEC-127-1979)では、鉄塔基礎の許容変位(鉄塔根開きに対する脚間相対変位の比)を定めている。図6には、JEC-127-1979による許容値から算定される不同変位の範囲をグレー領域で示した。この許容値の範囲内の脚部不同変位では、最大耐荷力の大きな低下はみられない。

図7は $u_H = 53\text{mm}$ 、 $u_H = 111\text{mm}$ の場合に終局耐荷力を示した時点における部材の塑性降伏の様子を示した図である。塑性降伏していない箇所を青色で、塑性降伏した箇所を赤色で示した。両図を見比べて分かる通り、不同変位量が小さいときは鉄塔の中間部に損傷がみられる。一方、不同変位量が大きくなると、鉄塔の脚部を中心に損傷がみられる。すなわち、鉄塔の崩壊形態は、不同変位の大きさによってかなり異なる。こうした崩壊形態の変化挙動は、閉脚方向および鉛直上下方向においても定性的には同様であることが確認され

た。

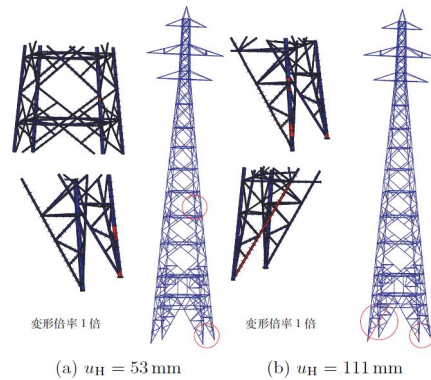


図-7 最大荷重時における部材の塑性降伏

4. 研究成果

本研究では、地震などに起因する地盤変形による送電鉄塔の脚部不同変位が鉄塔に及ぼす影響の評価を目的として、脚部不同変位による鉄塔の耐荷力低下挙動および部材損傷について有限要素法により検討した。水平・鉛直方向ともに、不同変位がある値を超えると耐荷力が急激に低下することが確認された。しかし、耐荷力の顕著な低下をもたらす不同変位の大きさや耐荷力の低下程度は、不同変位の方向によってかなり異なることが分かった。また、鉄塔の崩壊形態は不同変位の大きさによって異なっているが、崩壊形態の変化の様子は定性的には不同変位の方向によらず共通であった。さらに、漸増荷重に伴う部材の損傷進展を調べたところ、鉄塔が終局耐荷力を迎えるはるか前の段階で部材の一部に塑性降伏が生じており、部材降伏の発生様態は不同変位の大きさや方向によって異なっていた。本研究で行った検討は4脚のうち1脚に特定方向の不同変位を与えたときの挙動を調べたものであり、複数の基礎が同時に様々な方向に変位するような場合については今後さらに検討が必要である。

本研究では、地震などに起因する地盤変形による送電鉄塔基礎の不同変位が鉄塔の耐荷力に及ぼす影響の評価を目的として、脚部不同変位による鉄塔の耐荷力低下挙動を検討した。本研究で行った検討は鉄塔の全体耐荷力のみに着目したものであり、鉄塔の崩壊形態や部材損傷の発生位置、個々の部材の損傷進展について検討したものではないことには注意が必要である。すなわち、全体耐荷力が十分に確保されていても、部材損傷が発生している懸念がある。脚部不同変位と設計荷重の作用下における部材損傷の進展挙動と、それが全体耐荷力に及ぼす影響の解明は、地震等の災害後における修繕判断に有用と思われる、今後詳細な検討を行う必要がある。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

山川優樹、溝江弘樹、千田大、戸田文、池田清宏、田村洋、寺田賢二郎、斜面近傍に位置する逆T字型送電鉄塔基礎の引揚支持力解析、土木学会論文集 C (地圏工学)、査読有、Vol. 71、No. 1、2015年、1-13、DOI:10.2208/jiscejge.71.1

千田大、山川優樹、橋口公一、池田清宏、塑性変形勾配テンソルの乗算分解による有限変形・異方性回転硬化下負荷面 Cam-clay モデル、土木学会論文集 A2 (応用力学)、査読有、Vol.69、No.2、2013年、255-266、DOI:10.2208/jiscejam.69.1_255

山川優樹、古澤集平、池田清宏、砂質土の直方体供試体における3次元的分岐・局所化挙動、土木学会論文集 A2 (応用力学)、査読有、Vol.69、No.2、2013年、267-278、DOI:10.2208/jiscejam.69.1_267

藤井文夫、山川優樹、井上吉弘、三原康子、小林卓哉、非対称特異行列のクリティカルな左固有ベクトルの力学的意味付けとその例説、日本機械学会論文集 A 編、査読有、Vol.79、No.808、2013年、791-806、DOI:10.1299/kikaia.79.1791

[学会発表](計8件)

高橋一平、山川優樹、池田清宏、戸田文、増田雅芳、溝江弘樹、送電鉄塔の終局耐荷挙動に対する脚部不同変位の影響評価、平成26年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集、CD-ROM/Paper No. III-50、2015年3月7日、東北学院大学(宮城県多賀城市)

小泉陽彦、戸田文、山川優樹、池田清宏、増田雅芳、溝江弘樹、斜面近傍に位置する逆T字型鉄塔基礎の引揚支持力への法肩近接および斜面傾斜角の影響、平成26年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集、CD-ROM/Paper No. III-51、2015年3月7日、東北学院大学(宮城県多賀城市)

高橋一平、山川優樹、溝江弘樹、千田大、戸田文、池田清宏、田村洋、斜面近傍に位置する逆T型送電鉄塔基礎の引揚支持力解析、平成25年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集、CD-ROM/Paper No. III-17、2014年3月8日、八戸工業大学(青森県八戸市)

千田大、山川優樹、池田清宏、橋口公一、塑性変形勾配テンソルの乗算分解による地

盤材料の有限変形・回転硬化異方性弾塑性モデル、第48回地盤工学研究発表会、2013年7月23日~2013年7月25日、富山国際会議場(富山県富山市)

佛川隆晃、大塩雅人、山川優樹、池田清宏、砂質土供試体の密度不均一性による強度と局所変形モードの変動に関する考察、第48回地盤工学研究発表会、2013年7月23日~2013年7月25日、富山国際会議場(富山県富山市)

古澤集平、大塩雅人、山川優樹、池田清宏、地盤材料の3次元変形における分岐・局所化挙動、第48回地盤工学研究発表会、2013年7月23日~2013年7月25日、富山国際会議場(富山県富山市)

山川優樹、千田大、池田清宏、橋口公一、塑性変形勾配テンソルの乗算分解による摩擦性材料の有限変形弾塑性モデル、第62回理論応用力学講演会、2013年3月6日~2013年3月8日、東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区)

千田大、山川優樹、池田清宏、橋口公一、塑性変形勾配テンソルの乗算分解による摩擦性材料の有限変形・非線形移動硬化弾塑性モデル、第47回地盤工学研究発表会、2012年7月14日~2012年7月16日、八戸工業大学(青森県八戸市)

[図書](計1件)

Koichi Hashiguchi, Yuki Yamakawa
Introduction to Finite Strain Theory for Continuum Elasto-plasticity(Wiley Series in Computational Mechanics)
2012、440ページ、John Wiley & Sons Inc.

[その他]

ホームページ等
<http://msd.civil.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者
池田 清宏(IKEDA, KIYOHIRO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50168126

(2)研究分担者
山川 優樹(YAMAKAWA, YUKI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 80324010

田村 洋(TAMURA, HIROSHI)
東京工業大学・理工学研究科・助教
研究者番号: 10636434