

地盤-基礎体-構造物の相互作用を考慮した 送電線鉄塔系の安定性解析

中市 翔也*
Syouya NAKAICHI

*長岡技術科学大学大学院工学研究科建設工学専攻（主査：宮木 康幸 助教授）

1. はじめに

土木工学が対象としている社会基盤施設は広範に渡っており、構造物の設計には、地盤、鋼構造など広範にわたる専門知識が取り入れられている。しかし、現行の設計法は、それらの相互作用について考慮されていることは稀である。本研究の対象である送電線鉄塔系についても、鉄塔や地盤といった構成要素毎にそれぞれ安定性検討がなされているが、その相互作用については十分に考慮されていない¹⁾。下部構造に関する既往の研究²⁾³⁾⁴⁾では、単基礎の引揚げが中心であり、現実の鉄塔基礎のように近接した複数の基礎体の引揚げ・押し込みについては検討されていない。また、鉄塔に作用する風荷重等は、鉄塔を伝達して基礎体の引揚げ・押し込・水平荷重となる。しかし、現在まで行われてきた検討⁴⁾では、基礎体に引揚げ荷重として、直接作用させており、現実的な引揚げ荷重や鉄塔を通しての風荷重伝達のメカニズム等については検討されていない。

以上から、送電鉄塔系全体を考慮した合理的設計指針確立のためには、鉄塔-基礎-地盤の連成挙動を解明することが不可欠である。本研究では地盤-基礎単体、鉄塔、それらの連成系で三次元有限要素解析を行い、その結果から地盤-基礎体-構造物の相互作用と構造系全体での安定性照査の重要性について検討を行った。

2. 基礎体の近接の影響

下部構造での検討では、複数の基礎体の引揚げに着目し、基礎体の近接効果による支持力低下について検討を行う。送電線鉄塔基礎において一般的に用いられている逆T字型基礎では、図-1に示すように、引揚げに伴うすべり面は地表面に近づくにつれて外側に広がる。そのため、基礎体が近接している場合、互いの基礎体周辺地盤のせん断抵抗を發揮する領域が互いに重なり合い、単純に単体基礎の2倍の支持力を發揮し得ない懸念がある。

(1) 基礎体の近接に伴う支持力低減の検討

検討に使用する有限要素モデルを図-2に示す。この解析モデルの基礎体は、柱体部および床板ともに簡単のために四角柱として、地盤中に2基設置している。地盤材料は非関連流れ則に伴うDrucker-Pragerモデル（材料定数は三軸引張側の算定）、基礎体は破壊を考慮しない為、弾性体と仮定している。また、地盤および基礎体は自重による初期応力を考慮している。このモデルについて、基礎体中心間隔を3500mmから12000mmまで変え

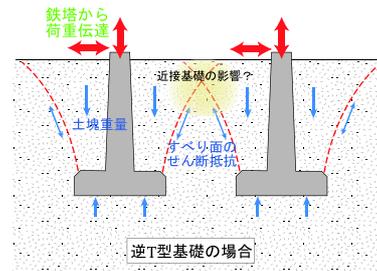


図-1 群杭効果 (逆T字型基礎)

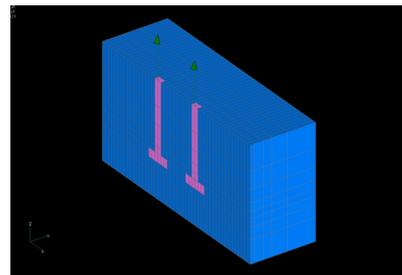


図-2 下部構造有限要素モデル

て基礎体を鉛直上方向に引揚げ、基礎体の近接に伴う支持力低減効果の検討を行う。

解析の結果得られた基礎体中心間隔 6000mm のモデルのせん断ひずみ分布を図-4に示す。せん断ひずみ集中が、近接基礎の影響を受けていることがわかる。また、得られた基礎体床版間距離 a と根入れ深さ D の比および支持力低減について図-3に示す。ここで用いている最大引揚げ荷重係数 K は、

$$K = \frac{\text{基礎体の近接を考慮した最大引揚げ荷重}}{\text{単基礎の解析により求められた最大引揚げ荷重}} \quad (1)$$

により表され、基礎体近接時の最大引揚げ荷重を、近接基礎の影響を受けていない単基礎の最大引揚げ荷重を基準として正規化した値である。この結果を見ると、基礎体の近接に伴い最大引揚げ荷重係数 K が小さくなり、基礎体の引揚げ支持力が低下していることがわかる。なお、本研究で用いた解析モデルにおいては、最大で約 27% の支持力低減が確認されている。

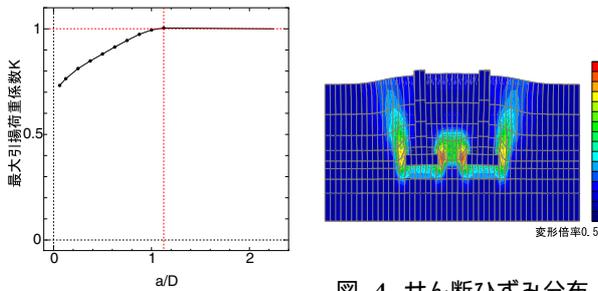


図-3 a/Dと最大引揚荷重

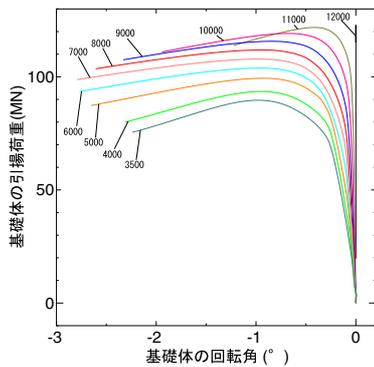


図-5 基礎体回転角と引揚荷重の関係

(2) 引揚時の基礎体剛体回転の検討

次に解析の結果、得られた基礎体頭頂部の変位から基礎体の剛体回転量を求め、基礎体近接に伴う剛体回転についての検討を行う。

基礎体の回転角と鉛直荷重の関係を示した図を図-5に示す。図-5を見ると、引揚げ初期においては基礎体中心間隔によらず、引揚荷重と回転角の関係はほぼ線形の関係であり、全体的に近接するほど小さな荷重で大きく回転する傾向が強い事がわかる。また、基礎体上下端の剛体回転に伴う水平変位量について検討を行うと、基礎体間の距離が短いほど基礎体床板付近の水平変位が制限され、剛体回転に伴って基礎体上端が外側へ変位することが確認された。一方、基礎体中心間隔が十分に離れている場合には、基礎体床板付近の水平拘束が基礎体中心間隔が狭い場合に比べ緩く、剛体回転量が増加しても基礎体上端の水平変位量は大きくならない。

これにより、基礎体中心間隔が狭い場合には、下部構造の引揚支持力の低下に加え、基礎体と鉄塔の接合部近傍での鉄塔部材の変形および局所応力の発生にも注意する必要があることがわかる。

(3) 基礎体の根入れ深さによる支持力低減効果の発現

図-2に示すような逆T字型基礎のすべり面は、根入れ深さが深くなるほど、より外側へと広がる傾向がある。そこで、根入れ深さを変えた有限要素モデルについて数値解析を行い、その支持力低減効果について検討を行う。解析に用いたモデルは、前項までの検討で用いた基礎体中心間隔 6000mm のモデルと単基礎の有限要素モデルについて、根入れ深さを 4000mm, 8000mm, 12000mm と設定したものである。それぞれの解析結果から根入れ深さの違いによる支持力の低減を求める。

解析の結果を図-6に示す。なお、ここで用いている最

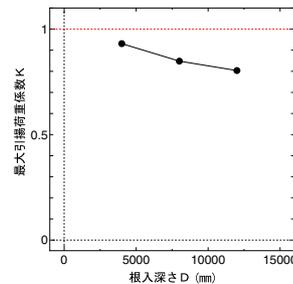


図-6 根入れ深さの影響

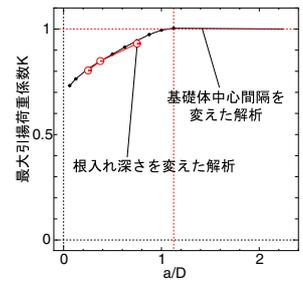


図-7 a/Dによる比較

大引揚荷重係数 K は、式(1)によりあらわされる。この結果を見ると根入れ深さ D が大きくなることにより、同じ基礎体中心間隔であっても支持力が低減している。これにより、根入れ深さを大きくすることにより、基礎体の近接に伴う支持力低減が発現しやすく、構造物の建設の際には注意が必要である事が確認された。なお、基礎体中心間隔と根入れ深さによる検討結果を比較すると、図-6に示すように a/D による最大引揚荷重係数の変化は非常に相関が高いことがわかり、この二つの指標により基礎体近接に伴う支持力低減を表現できる可能性を見出せた。

3. 鉄塔から伝達される基礎体引揚荷重

鉄塔についての検討では、荷重の伝達メカニズムについて検討を行った。鉄塔に作用する風荷重等は、鉄塔を伝達しそれぞれの鉄塔脚部の基礎体へ基礎体の引揚荷重または押込荷重、水平荷重として伝達される。既往の研究においては、それらの大きさや作用荷重の傾斜角度はあまり評価されていないため、この検討を行う。

解析に使用した有限要素モデルを図-8に示す。このモデルは、鉄塔部材を Timoshenko はり要素により構成されている。また、はり要素の構成則は等方硬化 von Mises とした。なお、簡単のため、鉄塔頭頂部付近は取り除いており、鉄塔の支柱体下端部(以下、脚部)はすべて完全固定としている。また、荷重の作用方向により鉄塔支柱材対角方向に水平荷重を作用させるモデルを Case-a、鉄塔の水平材ならびに腹材方向に水平荷重を作用させるモデルを Case-b として検討を行う。

(1) 鉄塔に作用する水平荷重と鉛直引揚荷重

鉄塔単体解析により得られた鉄塔頭頂部水平方向の荷重変位関係と、水平荷重の増加に伴う反力の鉛直成分の変化を図-9、図-10に示す。図-9を見ると、Case-a の座屈荷重は約 75kN であるのに対し、Case-b は約 152kN と倍以上の荷重で座屈している。この形状の鉄塔は、一般的に四角鉄塔と呼ばれるタイプのもので、水平 xy 方向に高い耐力を有する鉄塔であると言われている。しかし、本解析結果からは、荷重条件によっては座屈荷重に倍以上の違いがあることがわかった。

また、図-10をみると、Case-a では水平荷重が作用している支柱体の脚部③に大きな鉛直上向き反力が生じ(圧縮応力が生じている)、小さな荷重で座屈が発生しているのに対し、Case-b では鉛直上向きおよび下向きの反力の大きさが同値であり、Case-a と比較し大きな荷重で座屈が発生している。基礎体に作用する鉛直引揚荷重はそれぞれの支柱体脚部の反力の鉛直成分とは逆向きに同

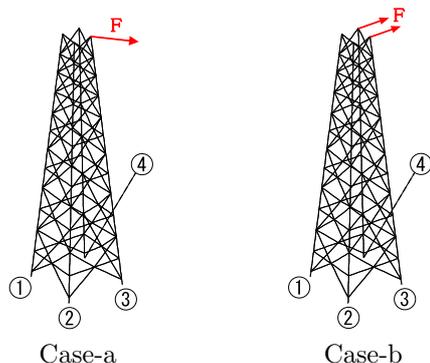


図-8 三次元梁モデル

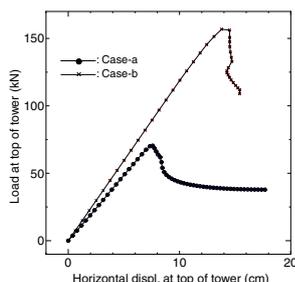


図-9 荷重変位関係

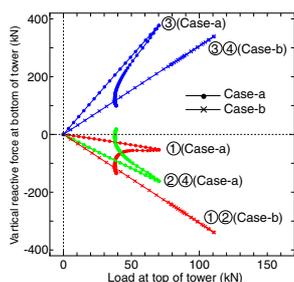


図-10 鉄塔下端の鉛直反力

じ大きさで作用すると推定されるため、Case-a の脚部③、および Case-b の脚部③、④ に押込力が作用しているものと考えられる。

なお、この結果は簡易的で小規模な鉄塔モデルにより検討を行っているため、今後は詳細なモデルにより検討を行い、荷重条件による鉄塔耐力の変化について検討を行いたい。

(2) 座屈による荷重伝達メカニズムの変化

図-10 を見ると、Case-a については鉄塔部材の座屈後、荷重の再配分により反力の発生傾向が変化している。一方、Case-b については鉄塔の座屈後も反力の発生傾向に違いは無い。図-11 に Case-a の座屈前と座屈後の軸力図を示す。これを見ると、Case-a の座屈前には①の主柱体近傍の腹材および水平材には大きな軸力は生じていないのに対し、座屈後には鉄塔全体の腹材および水平材に大きな軸力が生じている。これは脚部③の主柱体が座屈し、その拘束の影響が軽減されたため、鉄塔の剛体回転の回転軸が脚部③近傍から、徐々に脚部①側に移動した事による。Case-a の荷重モードでは鉄塔部材の座屈に伴い基礎体に作用する鉛直引揚荷重の伝達メカニズムが変化しているのである。なお、Case-b については鉄塔の座屈に伴って、荷重の再配分が発生しないために、単純に除荷が発生している。

これにより、鉄塔の荷重条件や座屈挙動によっては、基礎体の鉛直引揚荷重の大きさや向きが変化し、荷重伝達のメカニズムも変化する可能性がある事が確認された。鉄塔に作用する荷重は常に変化するため、荷重の伝達メカニズムおよび作用状況の変化にも注意が必要である。

(3) 鉄塔に作用する水平荷重と基礎体の引揚角度

鉄塔脚部に生じる反力の鉛直成分および水平成分から求めた基礎体に作用する引揚荷重の最大角度を表-1 に示

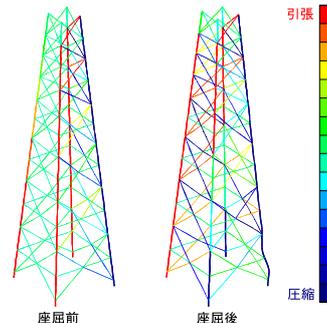


図-11 座屈前後の軸力図 (Case-a)

表-1 引揚傾斜角度

	Case-a	Case-b
脚部-1	6.58°	5.82°
脚部-2	6.03°	5.82°
脚部-3	—	—
脚部-4	6.03°	—

す。なお、表に示す最大角度は、絶対値でその大きさを示しており、鉛直上方向からの角度である。また、表中の - は、基礎体へ押込荷重が作用すると推測される脚部である。この結果から、どの荷重モードでも最大で約 7° の引揚傾斜角度であるということがわかった。

昨年度、馬郡により行われた引揚傾斜角度と最大引揚荷重の関係について、図-12 に示す。この図は、引揚傾斜角度 β を $\beta = -90^\circ \sim 90^\circ$ と変化させ、その時の最大引揚荷重を最大引揚荷重係数 K を用いて表している。なお、ここでの最大引揚荷重係数 K は、水平地盤、鉛直引揚荷重作用時の最大引揚荷重をもとに、地盤傾斜角度 (α°)、引揚角度 (β°) 時の最大引揚荷重を正規化した値である。

今回の解析結果から、図-12 の赤線の範囲内が、現実的な引揚角度の限界値であると考えられる。ただし、鉄塔に作用する荷重は、送電線を通して伝わる耐張力と鉄塔全体に作用する風荷重があり、今回行った解析は、鉄塔上部に荷重を作用させているものであり、実在の鉄塔系においては送電線を通して伝わる張荷重と考えることができる。今後の研究では風荷重を導入してより現実的な水平分力または引揚角度について検討を行いたい。

4. 荷重条件による鉄塔倒壊メカニズムの変化

地盤-基礎体-鉄塔の連成系モデルでは、各構成要素の相互作用と、荷重方向と鉄塔倒壊伝達メカニズムに与える影響について検討を行う。解析に使用した有限要素モデルを図-13 に示す。このモデルは図-8 に下部構造を付け加えたモデルである。このモデルの地盤材料の構成則は非関連流れ則に伴う Drucker-Prager モデル (材料定数は三軸引張側の算定)、基礎体は破壊を考慮しない為に弾性体と仮定している。

解析の結果得られた鉄塔頭頂部水平方向の荷重変位関係と基礎体の鉛直変位量を図-14、図-15 に示す。また、連成系モデル地盤内の変形状況を図-16 に示す。図-9,10 とこれらの結果の検討を行う。

まず、荷重変位関係に着目すると、Case-a、Case-b 共に初期の傾きにあまり違いは無い。しかし、Case-a は水平変位が進行せず、小さな変位量で鉄塔が座屈している。一方、Case-b は水平荷重の増加に伴って変位量が大きく

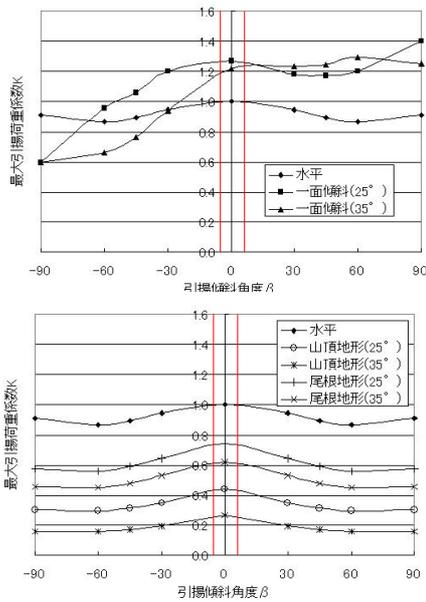


図-12 引揚傾斜角度と最大引揚荷重係数の関係

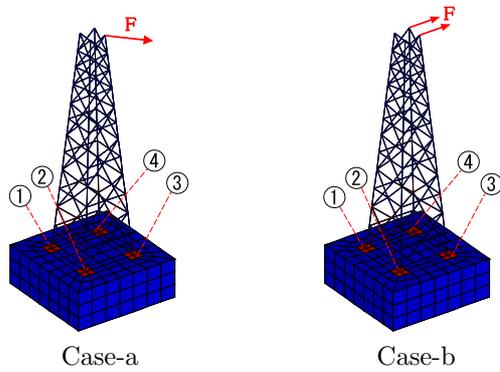


図-13 連成系モデル

っており、Case-a と比較して Case-b は地盤変形の影響を受けやすい荷重モードであるということがわかる。

基礎体の鉛直変位量に関しては、鉄塔の単体解析と同様に Case-a では脚部③に、大きな押し込み力が発生し座屈が発生している。対して、Case-b では鉄塔に作用する水平荷重により、脚部①、②が大きく引揚げられている事がわかる。なお、Case-b については、脚部③④の主柱材に座屈が発生しているが、それは基礎体が大きく引揚げられた後である。よって、Case-a は荷重モードに対して鉄塔の座屈強度が小さく、地盤の変形が進行する前に鉄塔の座屈が発生しており、鉄塔の座屈を起因とする鉄塔倒壊が心配される。一方、Case-b のような荷重モードは、鉄塔の座屈強度が Case-a より高く、鉄塔部材に座屈が発生する前に基礎体が引揚げられ倒壊する可能性が高い。これにより、鉄塔の倒壊メカニズムが荷重の作用方向の影響を受ける可能性があることを見出すことができた。

この荷重条件による鉄塔の倒壊メカニズムの違いについて、実際の鉄塔倒壊事例⁵⁾と比較・検討を行ったところ、Case-a に近い荷重条件では鉄塔部材の座屈して鉄塔が倒壊、Case-b に近い荷重条件では地盤の大変形を原因とする鉄塔倒壊している事が確認された。これにより、実鉄塔系と解析モデルには荷重の作用条件や基礎体の形状、規模、形状等に違いはあるものの、現実の鉄塔においても荷重方向により鉄塔倒壊メカニズムの変化する可能性

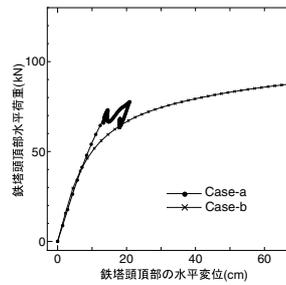


図-14 荷重変位関係

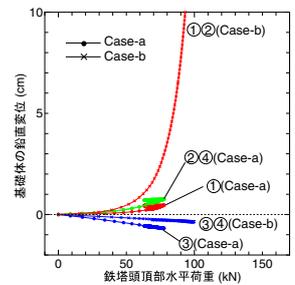


図-15 基礎体の鉛直変位量

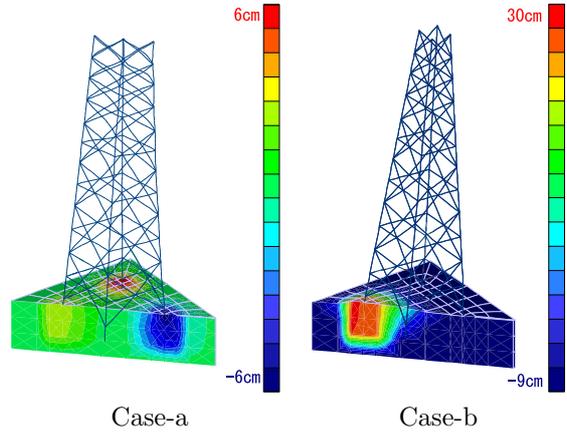


図-16 内部変形状況

が高いことが確認された。

5. まとめ

本研究の結果、基礎体の近接に伴い引揚支持力が低減する事が確認され、基礎体近接に伴う剛体回転が鉄塔へ影響する可能性があることが確認された。また、鉄塔から基礎体への荷重伝達メカニズムと、座屈に伴う荷重の再分配から伝達メカニズムが変化する可能性があることが明らかになった。地盤-基礎体-構造物連成系の検討より、荷重モードにより鉄塔倒壊メカニズムが影響を受ける可能性があることが確認され、鉄塔倒壊事例の比較によりその可能性が高いことが確認された。

以上より、今回研究対象とした送電線鉄塔のような力学特性が大きく異なる複数の構成要素からなる系では、構造系全体で考えた場合に非常に危険な破壊モードを見逃す可能性は大いにあり、構造系全体での安定性検討が重要であることを確認できた。

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
- 2) 松尾 稔: 送電用鉄塔基礎の引揚抵抗力について, 土木学会論文集, 第 105 号, pp. 9-18, 1964.
- 3) 北原 義浩: 送電用大型鉄塔基礎の引抜き耐荷力と変形の研究, 東京大学博士論文, 1993.
- 4) 九州電技開発株式会社: 鉄塔基礎引揚実験に関する報告書.
- 5) 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: 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, 経済産業省 原子力安全・保安院 電力安全課, 2002.