

「様々な地形条件および荷重条件における逆T型送電線鉄塔基礎の支持力検討」

馬郡 正規*

Masaki Magoori

*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

1.1 研究の背景

社会経済活動を反映して電力需要は大都市に集中している。それに伴い送電線鉄塔も大型化したものが、山岳丘陵地帯に多く作られている。現在、台風の大型化、長距離大電力送電線の効率化の開発も進んでいるため、送電線の長距離・大型化はますます増加していくと考えられる。しかし、現行の設計法¹⁾は、標準的な基礎体寸法や地盤条件を基準にしているため、標準的でないものに対しては、実情とは隔たりのある過程を含んだ計算式を用いてしまう場合がある。そのため危険な設計や不経済な設計になる可能性が起りえる。以上のことから、送電線鉄塔をより合理的に設計することが求められる。

1.2 既往の研究

これまで、電力会社などでは、設計の合理化やコスト低減を図るためにすべり線形状に注目した各種試験が行われてきた。その結果、すべり面や地盤のひび割れなどの破壊集中が地盤の傾斜角度により変化することがわかった。

また、山川・池田²⁾の大変形・弾塑性解析プログラムの開発により、フーチング基礎の支持力問題における (a) 主動くさび (b) パンチング破壊のリアルなシミュレーションを行える段階にいたっている。実際に、このプログラムを使用し、桑本ら³⁾によって逆T型鉄塔基礎に引き上げ力が作用したシミュレーションが行われた。その結果、せん断ひずみ集中領域が対数らせん状に発生し、模型地盤のすべり面を表現できた。しかし、最大引き上げ荷重は、解析結果のほうが実験結果よりも大きかった。

本研究で用いる山川ら²⁾の弾塑性FEM解析プログラムは、実験結果を定性的にシミュレーションできる。昨年これをを用いて、遠心模型実験の結果に近い値を再現できることが確認された。

1.3 本研究の目的

本研究では、弾塑性FEM解析プログラムを用いてシミュレーションを行う。はじめに、遠心模型実験との比較により、メッシュ分割の依存性について検証し、鉄塔基礎の引揚シミュレーションをよりリアルに表現可能な最適モデルを構築する。その後、様々な地形条件、荷重条件の影響について検証し、逆T型鉄塔基礎を合理的に設計するために有益な情報を与えることを目的とする。

2. 数値解析の精度検証と模型実験との対比

2.1 逆T型鉄塔基礎の模型実験

ここでは、遠心模型実験⁴⁾について概説する。実験は実物の75分の1縮尺模型を用いて、75Gの遠心場で行われたものである。図-1の左図に実物の基礎体寸法を示し、右図に地盤と基礎体の模型寸法を示す。実験条件と材料の物理特性を表-1に示す。水平地盤、地盤の傾斜角25°、35°で実験が行われた。実験結果については、解析結果とともに後述する。

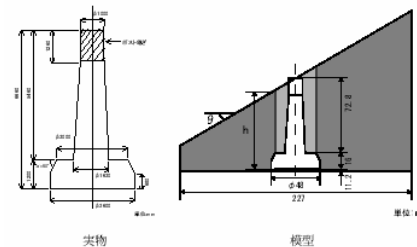


図-1 模型寸法

表-1 模型実験での地盤材料定数

	根入れ深さ D(m)	含水比 (%)	湿潤密度 ρ (g/cm ³)	間隙比
水平地盤	5.40	17.4	1.604	0.963
傾斜地盤25°	6.24	15.5	1.621	0.926
傾斜地盤35°	6.60	15.7	1.649	0.914

2.2 軸対称モデルを用いたFEM解析の性能照査

弾塑性FEMプログラムに新しく3次元モデルに加え、軸対称条件下の挙動を2次元断面より簡易的に計算することが可能な機能が追加された。そこで、水平地盤における模型実験と比較を行い、その有効性を検証した。

数値解析には、弾塑性FEM解析プログラムを使用し、地盤材料の構成式は非関連流れ則に従うDrucker-Pragerモデルとする。地盤の自重による初期応力を考慮する。模型は軸対称であると仮定し、ここでは、水平地盤を比較対象とするので、模型は軸対称であると仮定した。境界条件は側面が鉛直方向フリー、底面は完全固定とする。軸対称モデル(左)と境界条件(右)を図-2に示す。解析に用いた材料パラメータを表-2に示す。ここで、表-2に示す各記号は、地山の湿潤密度ρ₁、埋戻し地盤の湿潤密度ρ₂、ポアソン比ν、弾性係数E、Mohr-Coulombの粘着力c、内部摩擦角θ_f、ダイレイタンシー角θ_gを表す。降伏応力τ_{y0}はMohr-Coulombの粘着力c、内部摩擦角θ_fにより

$$\hat{\tau}_{y0} = \frac{6c \cos \theta_f}{(3 + A \sin \theta_f)}$$

のように決定する。ただし、本研究にすべての解析においては $A=1$ とする。

また、解析モデルの要素タイプにはアイソパラメトリック 2 次要素を用い、要素数、節点数は、984、300 とした。

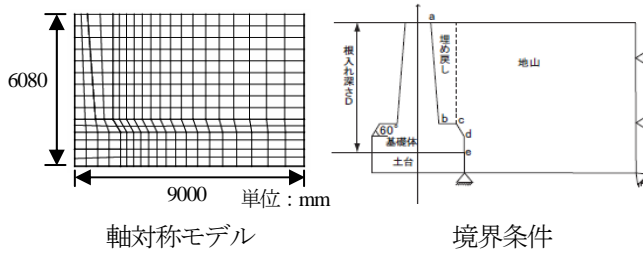


図-2 解析モデル

表-2 解析モデルのパラメータ

	ρ (kN/m ³)	c(kPa)	θ_f (°)	θ_g (°)	E(MPa)	ν
地山	16.0	5.2	32	14	100	0.3
埋戻し	14.8	5.2	32	14	100	0.3

解析結果を図-3 に示す。これより、軸対称条件の FEM 解析により、水平地盤の実験で現れた対数螺旋状のすべり面形状を良好に表現できることが確認された。

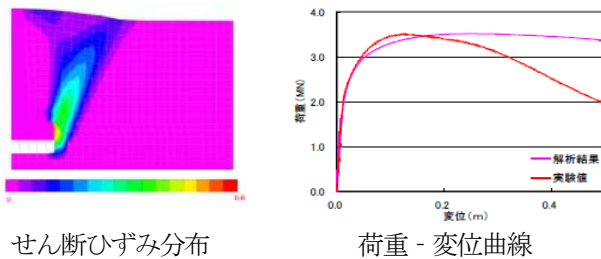


図-3 解析結果

2.3 メッシュ分割が解析精度に与える影響

有限要素法を用いるにあたり、メッシュの分割数、分割配向、要素性能が解析精度に及ぼす影響は非常に大きい。よって、X-Z 断面と周方向の 2 つの観点から、メッシュ分割の影響性について検討を行った。X-Z 断面の比較対象として、1 次要素は要素数 175(15×15)、600(20×30)、2400(40×60)、5400(60×90)を行った。また、2 次要素として、要素数を 175(15×15)、600(20×30)、2400(40×60)と増やし比較した。周方向については、3 次元モデルを用い、周方向にメッシュを 3、4、6、8 分割したものを比較した。その結果を図-4 に示す。これより、周方向の影響は、X-Z 断面に比べ小さいことが確認された。

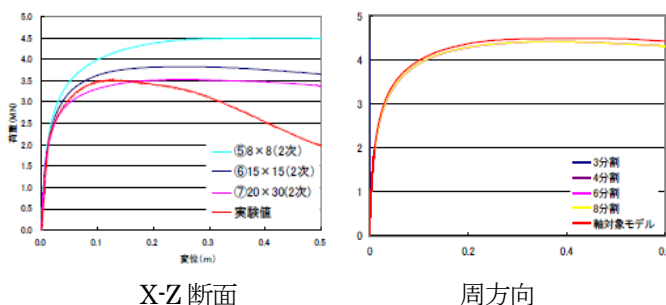


図-4 メッシュ分割が引揚荷重に与える影響

2.4 模型実験と数値解析との比較

2.3 節での検討を踏まえ、比較的良好な解析精度を与えるメッシュ分割で 3 次元モデルを作成した。これを用いた FEM 解析と模型実験との比較により、精度検証を行う。解析モデルの節点数と要素数はそれぞれ 5100 と 961 とする。境界条件、材料パラメータについては同様のものを使用した。解析結果を図-5 に示す。

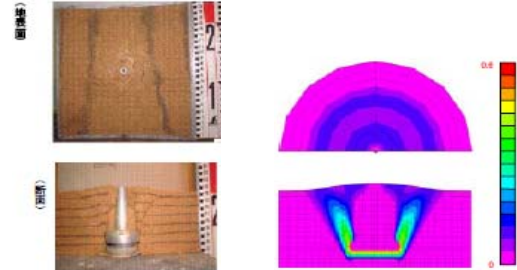


図-5 せん断ひずみ分布図の比較

これより、すべり面形状、発生位置とも非常に一致している。また、解析により得られた最大引揚荷重は実験値よりも 3.7%程度小さい程度で、良好な精度であった。よって、今回の解析モデルを用いることにより、水平地盤の基礎対引揚挙動をリアルにシミュレーション可能なことが確認された。

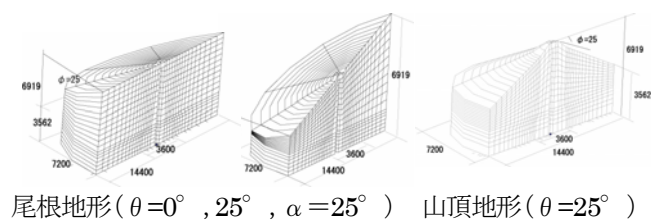
3. 傾斜角や地形が

引き上げ支持力特性に与える影響

現行の設計法では、基本的な基礎体寸法や地盤条件を基準にしているため、特殊な形状・寸法の基礎体を用いる場合や傾斜地盤・尾根などの複雑な地形では、危険な設計、不経済な設計に陥る可能性がある。そこで、一面斜面、山頂地形、尾根地形について三次元モデルを用いて解析を行い、地形が引揚支持力特性に与える影響について調べる。根入れ深さは、根入れ深さが最小となる谷側の基礎体の拡底部端部とする。解析ケースを表-3 に示し、そのうち主な解析モデルを図-6 に例示する。

表-3 解析ケース

地形タイプ	傾斜角度 θ (°)	稜線の傾斜角 α (°)	根入れ深さ(m)
一面斜面	25, 35	0	5.4
山頂地形	25, 35	0	5.4
尾根地形	0	25, 35	5.4
	25	25	5.4



尾根地形 ($\theta=0^\circ, 25^\circ$), $\alpha=25^\circ$) 山頂地形 ($\theta=25^\circ$)

図-6 主な解析モデル

図-7 より、一面斜面 ($\theta=25^\circ, 35^\circ$) において、山側で埋

戻し地盤と地山との境界面に基礎底部縁部から、ほぼ鉛直情報に向かってせん断ひずみ集中領域が進展し、一方、谷側では外側に拡がってせん断ひずみ集中領域が進展しており、両者で異なる傾向が見て取れる。これは、実際の施工状況では、埋戻しと地山との境界面が弱面となることが考えられるため、さらにひずみ集中領域は顕著となる。このような地盤挙動が見られるのは、山側と谷側で地盤破壊領域内側の土塊重量が異なるため、両者でせん断抵抗力の差が生じ、基礎体がせん断抵抗力の低い山側方向へ回転したため、谷側が破壊したと考えられる。そこで、山側、谷側の両方でのすべり面近傍の局所的な破壊挙動を知るために、要素内のガウス点での力学応答を調べた。その結果、せん断ひずみ E_s ~ せん断応力 q 関係より、山側が谷側よりもせん断抵抗力を発揮していることが確認された。また、せん断応力 q ~ 等方応力 p 関係より、谷側では、せん断ひずみの増加に伴い、応力が圧縮側から引張側へ入ったことが確認された。基礎体頭頂部付近では、初期状態から引張力を受けていることがわかる。これは、地表面に近く自重の影響が極めて小さいため、圧縮応力が低かったことが原因と考えられる。以上より、一面斜面において、せん断抵抗力により引揚支持力を発揮するのは、山側部分であるが、支持力低下の鍵を握るのは谷側部分であると言える。

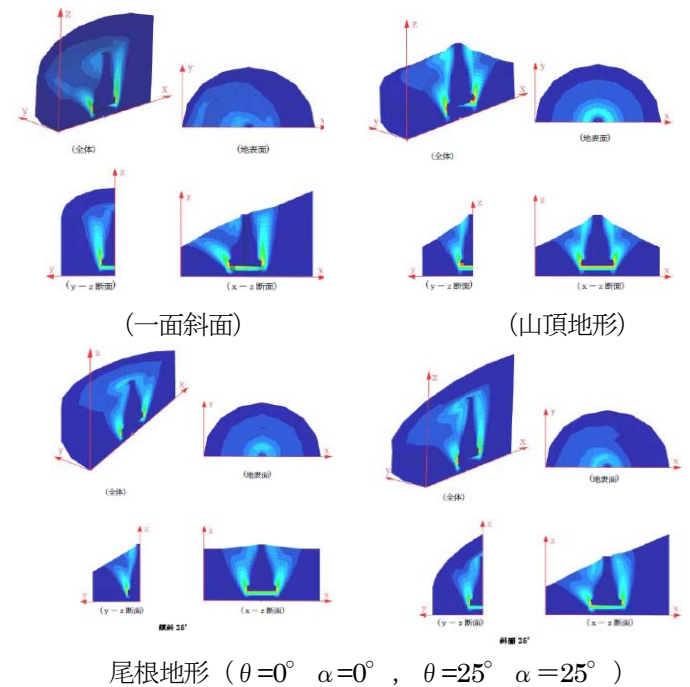
尾根地形 $\theta=0^\circ$ では、初期段階で、せん断ひずみ集中領域が基礎体底部から水平地盤と同様に外側に伸びているのがわかる。しかし、途中から基礎体頭頂部からせん断ひずみ集中領域が進展し、最終的にははとっくり形状をしたすべり面を形成する。これは、水平地盤や傾斜地盤に比べ基礎体頭頂部付近の土塊が少ないため、せん断抵抗力が低く、頭頂部付近で引張力が働いたためせん断ひずみが発生し、破壊したと思われる。その結果、すべり土塊重量とせん断抵抗領域による支持力の和が低下し、最大引揚げ荷重が減少したと考えられる。

一方、尾根地形 ($\theta=25^\circ, \alpha=25^\circ$) では、山側で埋戻し地盤と地山との境界にせん断ひずみ集中領域が発生しており、谷側では外側に向かうせん断ひずみ集中領域と基礎体頭頂部から進展するせん断ひずみ集中領域の2種類が確認される。これはモデルの形状が、一面斜面と屋根地形 (傾斜角 0°) を組み合わせたものであり、その点に着目すると、せん断ひずみ分布図も両者の特徴を併せ持っている。この結果から、複雑傾斜地盤のすべり面についても、いくつかの単純傾斜のコンター図を組み合わせることによって、予測できると思われる。また最大引揚げ荷重においても、一面斜面と尾根地形 ($\theta=0^\circ$) の両方の特性を持つため、減少幅が大きくなった。

山頂地形 ($\theta=25^\circ, 35^\circ$) では、尾根地形で見られる頭頂部付近で引張力に伴う、せん断ひずみが発生したため破壊したと思われる挙動がさらにはっきりと確認される。地表面では非常に綺麗な同心円状のせん断ひずみ分布を示している。最大引揚げ荷重は今回の解析ケースの中で最も減少幅が大きくなっていった。この要因として、最も土塊重量の減少が多く、基礎体頭頂部に発生したひずみ集中領域のた

めに、すべり面がとっくり形状になり、すべり土塊重量とせん断抵抗領域による支持力の和が低下したためと考えられる。

以上をまとめると、破壊面 (すべり面) の発達方向が鉛直に近づくに従い、破壊面上に作用する直応力は減少し、墓面上で発揮されるせん断抵抗力が減少する。また、破壊面と地表面に囲まれる土塊自重も減少し、急激な支持力低下を起こすと考えられる。よって、傾斜角や地形によるすべり面の形状与える影響は、最大引揚げ荷重にも影響を及ぼすため、これを考慮することは、逆 T 型鉄塔基礎を設計する上で非常に重要であることが確認された。



尾根地形 ($\theta=0^\circ, \alpha=0^\circ, \theta=25^\circ, \alpha=25^\circ$)

図-7 主なせん断ひずみ分布図

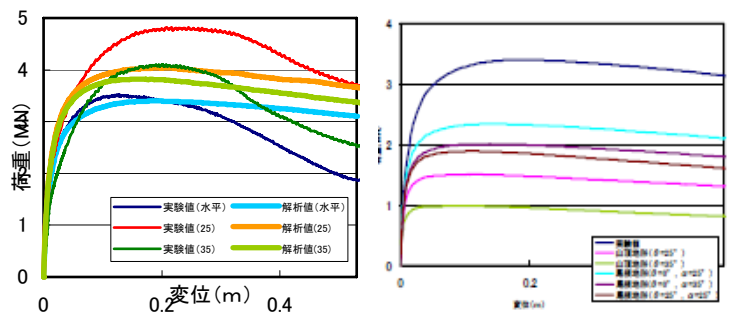


図-8 荷重変位関係

4. 水平荷重が引揚支持力に与える影響

実際の送電線鉄塔では、鉄塔基礎にかかる荷重が鉛直方向から $10^\circ \sim 20^\circ$ 傾いて作用することがよくあると一般的に言われている。また、現在、東北大学数理設計研究室では、鉄塔 - 基礎 - 地盤を含めた統合的解析システムの構築を試みているが、鉄塔に強風や地震荷重が作用する場合、基礎体にはほぼ水平に荷重が作用するケースがあり、この場合、鉛直引揚挙動とは全く異なる挙動が確認されている。そこで、本章では様々な傾斜地盤において水平荷重の引き

上げ支持力特性に与える影響について検討する。

解析には、3節と同じ、要素タイプ、境界条件、材料モデル、材料パラメータを使用する。解析対象とする地盤形状は、水平地盤と3章で用いた一面斜面（水平地盤を含む）、山頂地形、尾根地形（ $\alpha=0^\circ$ のみ）の3種類とする。引揚角度は $\beta=-90,-60,-45,-30,0,30,45,60,90$ と変化させて解析を行う。ここで、 β の符号は山側荷重を正、谷側荷重を負とする。基礎体引揚方向を変えた解析の模式図を図-9に示す。

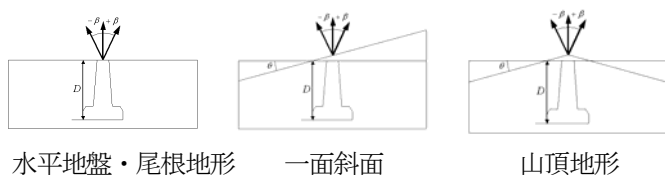


図-9 基礎体引揚方向を変えた解析の概略図

解析結果を図-10に示す。縦軸の最大引揚荷重係数 K は、水平地盤（ $\theta=0^\circ$ ）に鉛直引揚げ荷重を作用させた場合の最大引揚げ荷重を1として正規化したものである。ここで、最大引揚げ荷重係数 K は、

$$K = \frac{\text{地盤の傾斜角度 } \theta \text{ のときの最大引揚げ荷重}}{\text{水平地盤}(\theta=0^\circ)\text{に鉛直引揚げ荷重を作用させた場合の最大引揚げ荷重}} \quad \dots (3.1)$$

一面斜面では、引揚角度 β の増減に伴い、山側では変化が小さく、谷側では大きく減少している。これは、谷側方向の引揚げ荷重の水平成分が増加することにより、山側方向ではひずみ集中領域がみられないことから、すべり土塊重量とせん断抵抗領域による支持力の和が低下し、また、基礎体頭頂部では水平荷重の影響による引張が発生し、ひずみが進展するため破壊しやすくなったと考えられる。一方、山側方向への引揚げ角度が増加する場合は、水平支持力が大きいので、引揚角度によってすべり土塊重量とせん断抵抗領域の支持力の和が低下しても、引揚支持力全体に与える影響は低くなったと思われる。山頂地形でも、引揚げ荷重の増加にともない最大引揚げ荷重の減少がみられたが、一面斜面と比較すると減少率は少ない。この要因は、山頂地形では鉛直引揚時においても、すべり面内側のすべり土塊が非常に狭く、基礎体頭頂部に発生する引張ひずみによる引揚げ荷重の低下が起こっていると考えられる。また、引揚角度 β が 60° 以上になる場合、水平荷重による水平抵抗力に比べ、鉛直荷重によるせん断抵抗力が非常に小さくなり、最大引揚げ荷重は水平荷重に対する水平抵抗力のみに起因することになる。

尾根地形は、山頂地形と同様の傾向が見られる。前節で山頂地形と尾根地形のすべり面が非常に類似していることが確認されていることから、引揚角度の最大引揚げ荷重に対する影響はすべり面によるものが大きいといえる。

以上の結果から、最大引揚げ荷重に対する水平荷重の水平成分による影響は大きく、引揚角度による最大引揚げ荷重の増減傾向は、すべり面の発生形状と深く関連しているこ

とが確認された。

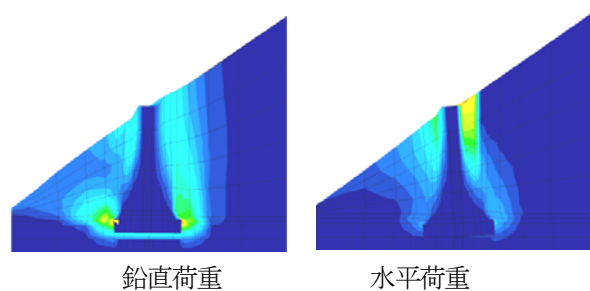


図-10 一面斜面におけるせん断ひずみ分布図

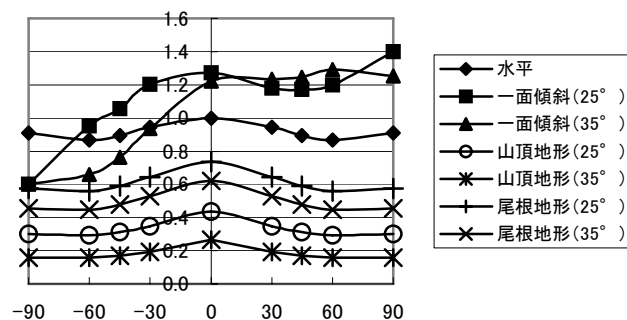


図-11 引揚角度 β と最大引揚げ荷重係数 K の関係

5. 結論

様々な地形条件における逆T型基礎の引揚げに伴う地盤の破壊挙動を、弾塑性FEMを用いてシミュレーションすることで、定性的に表現することができる。本研究で得られた知見を要約すると以下の通りである。

1. 複雑傾斜地盤のすべり面について、いくつかの単純傾斜のコンター図を組み合わせることにより、予測できる可能性を示した。
2. 地盤形状の違いから発生する様々なすべり面形状が、引揚支持力に与える影響について捉えることができた。
3. 引揚角度による最大引揚げ荷重の増減傾向は、すべり面の発生形状と深く関連していることが定性的に示された。
4. 地盤の進行的破壊挙動やすべり面の形成をリアルにシミュレーション可能な本解析の有効性が示された。

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) 山川優樹、寺田賢二郎、池田清宏、鳥居邦夫：圧縮場における弾塑性体の分岐解析とパスジャンプ挙動、土木学会論文集、No. 701/III-58, pp. 73-86, 2002
- 3) 桑本寛之：逆T型基礎引揚時の変形局所化応答の三次元シミュレーション：東北大学工学部土木工学科卒業論文、2004
- 4) 九州電気開発株式会社：鉄塔基礎引揚実験に関する報告書、2002
- 5) 松尾稔：地盤工学会信頼性設計の理念と実際、技報堂、1984