

逆 T 型鉄塔基礎の引揚解析と支持力メカニズムの評価

東北大学 学生会員 ○阿部翼
 東北大学 学生会員 中市翔也
 東北大学 正会員 山川優樹
 東北大学 生会員 池田清宏

1. はじめに

多くの大型送電線鉄塔が傾斜地盤や複雑な地盤といった厳しい条件下に建設されているが、その設計に用いる支持力算定式と現実とが必ずしも一致していない。本研究では合理的な設計のため、数値解析の利点を生かし様々な条件下での解析を行い基礎の引揚支持力と支持力発揮メカニズムを評価する。使用する地盤構成モデルを変えらることで地盤材料の降伏面の形状を変化させ、支持力の評価値と破壊メカニズムへの影響を検証した。特に、基礎の引揚げに伴う地盤の進行的な破壊挙動と局所的なひずみの進展の様子に着目して考察を行った。次に地盤と基礎の境界条件設定の違いが、引揚支持力ならびに地盤破壊形状に与える影響を考察した。

2. 解析手法

数値解析には、有限変形弾塑性 FEM 解析コードを使用した。地盤材料の構成式は、非関連流れ則に従い、また応力 3 不変量依存性を導入した拡張 Drucker-Prager モデルである。このモデルの降伏関数 f および塑性ポテンシャル関数 g の具体形を以下に示す。

$$f(p, q, \theta; \chi) := \zeta_f(\theta; \rho_f)q + \alpha p - (\sigma_{y0} - \chi(\xi)) \quad (1)$$

$$g(p, q, \theta; \chi) := \zeta_g(\theta; \rho_g)q + \beta p - (\sigma_{y0} - \chi(\xi)) \quad (2)$$

このモデルでは、内部摩擦角 ϕ およびダイレイタンシー角 ψ と関連する係数の α , β , Lode 角依存性を表す関数の $\zeta_f(\theta; \rho_f)$, $\zeta_g(\theta; \rho_g)$, 限界応力比・ダイレイタンシー係数の三軸圧縮側・伸張側の比である、定数 ρ_f , ρ_g を用いた。定数 ρ_f , ρ_g を用いることで降伏面形状を図-1 のように変化させることができる。また、 p は等方応力、 q は偏差応力、 θ は Lode 角、 σ_{y0} は初期降伏応力である。 $\chi(\xi)$ は等方硬化に関わる応力内部変数であり、ひずみ内部変数 ξ と仕事共役であるが、ここでは硬化・軟化を考慮しないこととし、 $\chi(\xi) = 0$ とした。

なお、等方引張状態での静水圧軸上の降伏面のとがり点を回避し、また適切な引張抵抗とするため、降伏面の頂点を二次関数的に平滑化している。弾性構成式については等方変形に対する弾性モデルの応答として指数関数形を仮定し、引張側に等方応力の上限を設けた。

3. 模型実験と数値解析の対比

本研究では比較対象として、水平地盤での遠心模型を用いた逆 T 型基礎の引揚実験¹⁾を参照する。模型は、想定実寸法の 75 分の 1 で、使用した土は、まさ土(砂質土)で

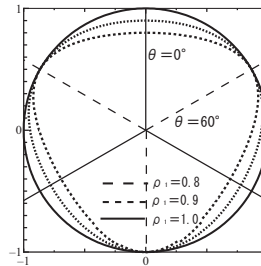


図-1 偏差応力面における本構成モデルの降伏面形状

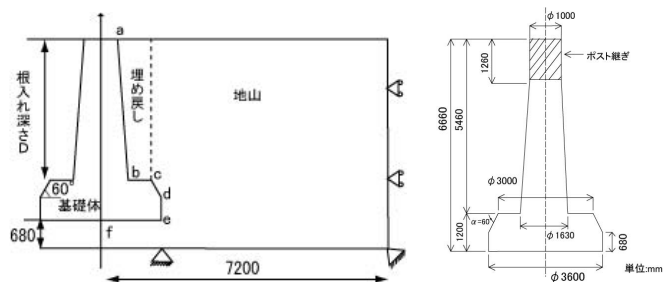


図-2 実験の模型地盤の全体図と基礎の想定実寸法

あり、含水比 17.4%, 湿潤密度 $\rho = 1.604(\text{g}/\text{cm}^3)$, 間隙比 0.963 である。根入れ深さは $D = 5.40\text{m}$ である。基礎体は、 60° の拡底角度を持つ円形床版部と円形断面を有する柱体部から構成される。図-2 に実験の模型地盤の全体図と基礎の想定実寸法を示す。

解析モデルは軸対称条件を仮定し、模型の基礎体および地盤の断面の 2 分の 1 の領域を解析対象とした。実験では、金属性の土台上に基礎体を設置していたが、解析では、実地盤での施工状況を考え、基礎体は地盤上に直接設置されているものと仮定した。引揚荷重は基礎体頂頭中央に作用させる。実験では基礎体の床板部鉛直側面に接する地盤は、引揚時に床板下部に出来る空洞部に崩れて落ちている。松尾²⁾により提案された支持力算定式では、この部分の摩擦抵抗も考慮されているが、実験の観察結果に基づき、その寄与分は小さいものと判断し、境界条件の設定は図-2 の区間 bcd では基礎と地盤の要素を固着とし、区間 def を剥離とした。区間 ab については、実験でも挙動が不明確であり、この箇所の境界条件設定についての検討は第 5 章で行う。地盤の自重による初期応力を考慮し、水平応力は鉛直応力に静止土圧係数 K_0 を乗じた値を用いている。但し、 K_0 値は全領域で一定で 1.0 としている。今回の解析に用いた材料定数を表-1 に表す。

ここでは有限要素の種類と要素分割を変えた解析を行い、解析精度を検証する。アイソパラメトリック要素を用いた、要素数 210 の一次要素と二次要素、要素数の 600 一次要素と二次要素の 4 種類のモデルの解析結果が図-3

Keyword: 逆 T 型鉄塔基礎, 引揚支持力, 有限要素解析, 弾塑性構成モデル
 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06, Phone: 022-795-7420, Fax: 022-795-7418, E-mail: abe@msd.civil.tohoku.ac.jp

である。二次要素を用いるとピークが早くあらわれ、要素数が多いほうが実験値に近づいており、すべり面も明確に発生し、精度が高くなることが確かめられた。

表-1 解析に用いた定数	
質量密度(原地盤)	16.1 kN/m ³
質量密度(埋戻し部)	14.8 kN/m ³
体積弾性係数 κ	83.3 MPa
せん断弾性係数 μ	38.5 MPa
粘着力 c	5.2 kPa
内部摩擦角 ψ	32.0°
ダイレイタンシー角 ψ	14.0°

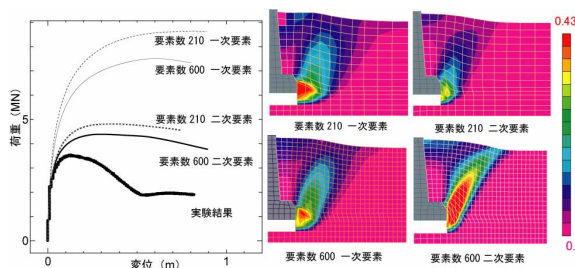


図-3 要素分割を変えた場合の荷重-変位関係と偏差ひずみ分布図

4. 引揚支持力の発揮メカニズム評価

一般に土の三軸圧縮・伸張側で強度は異なるが、基礎引揚の際にどちらの強度が支配的か検証する必要がある。実際、図-5 右の様に基礎引揚の終局状態においてすべり面発生部分での Lode 角分布は 30° 付近であり、圧縮・伸張の中間に位置している。この影響を定量的に求めるために、定数 ρ_f を 1.0~0.8 まで変化させ、3 章で解析精度が高かった要素数 600 の二次要素モデルで解析を行った。定数 ρ_g は 1.0 で一定とした。

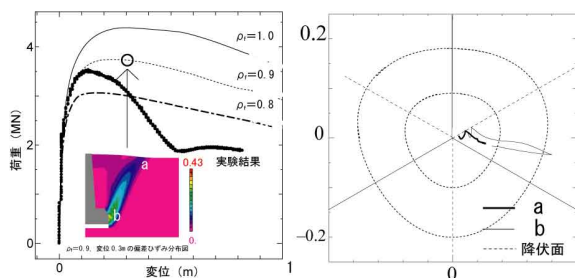


図-4 ρ_f を変えた場合の荷重-変位関係と降伏面図

図-4 の荷重-変位関係から、 ρ_f が小さいほど支持力は低下し、ピークを早く迎えた。 ρ_f を変化させてもすべり面に定性的な変化はなく、いずれも図-4 の左のコンター図のような形状になった。図-4 の右は点 a, b の要素の局所的挙動である。破壊が進行するにつれすべり面付近の要素の Lode 角は 60° 付近から 30° 付近に移っていくことがわかる。図-5 からも、すべり面付近の Lode 角は 60° 前後から 30° 付近へと推移していくことがわかる。つま

り引揚支持力に対して Lode 角 30° 付近の地盤強度は支配的であると言える。

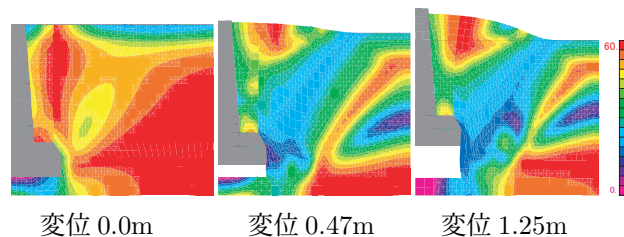


図-5 $\rho_f = 0.9$ の Lode 角分布図

5. 境界条件の設定による影響

引揚時には、基礎と地盤の境界面で剥離や摩擦が発生している。図-2 の区間 bcd は固着、区間 def は剥離しているが、区間 ab の境界面の関係は明らかになっていない。そこで区間 ab の境界条件を変えることで、その影響を考察した。境界条件は区間 ab を水平方向のみを拘束と水平・鉛直方向を拘束と剥離の 3 ケースである。解析モデルは要素数 600 の二次要素モデルである。

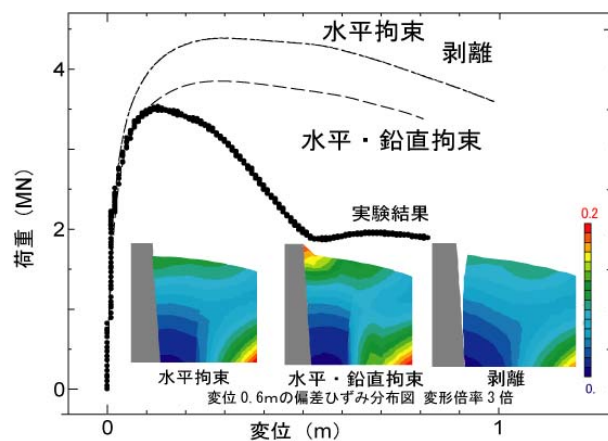


図-6 境界条件を変えた場合の荷重-変位関係

図-6 のように水平・鉛直を拘束させた場合の引揚支持力が他に比べて約 15% 小さい結果となった。これは、他の 2 ケースより基礎頂点中心部から地盤破壊面の地表到達位置までの距離が約 11cm ほど短くなっていることから、すべり面が内側に発生し、すべり土塊が減少しているからである。以上の結果より、区間 ab の境界条件設定は地盤の破壊形状と引揚支持力に大きな影響を与えると確認された。

6. まとめ

本研究では地盤構成モデルに改良を加えることにより、地盤の三軸伸張側の強度が引揚支持力に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。

参考文献

- 1) 池田清宏: 逆 T 型基礎の引揚支持力評価への弾塑性有限要素解析の適用性に関する考察
- 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)