

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

東北大学 学生会員 ○千田大
東北大学 学生会員 箕輪健太郎
東北大学 正会員 山川優樹
東北大学 正会員 池田清宏

1. 序論

本研究ではこの有限要素法を用いて逆 T 型送電鉄塔基礎の引揚解析を行い、基礎―地盤連成系の挙動について考察する。設計計算で現在用いられている対数らせん式による結果や、既往の模型実験の結果との比較を行い、数値解析により引揚支持力や地盤破壊形状を適切に評価しうるかを検証する。また、数値解析を用いて、地盤傾斜角によって引揚支持力や地盤破壊挙動がどのように変化するかを調べる。それによって、引揚支持力評価に対する弾塑性有限要素解析の適用性を検証する。

2. 解析手法とその適用性検証

(1) 解析手法

本研究で用いた有限変形・弾塑性有限要素法は、リターンマッピング法に基づく応力積分とそれに整合した接線係数を導入したもの¹⁾である。地盤の弾塑性構成モデルには、Drucker-Prager 型弾塑性モデルを用いている。塑性硬化は等方硬化のみとし、移動硬化は考慮しない。

(2) 有限要素解析モデル

解析に用いた逆 T 型基礎の形状および寸法を 図-1 に示す。床板縁端部上側の拡底角度は、ここでは 30° とした。水平地盤の有限要素解析モデルを 図-2 に示す。8 節点要素を用い、数値積分は完全積分とした。図-3 に水平地盤モデルの境界条件を示す。基礎体と地盤との境界条件については、区間 abcd (図中、太線で示した部分) では基礎体と地盤を固着とし、剥離により大きな荷重の伝達が無いと考えられる区間 def では基礎体と地盤を最初から切り離した。区間 ef では抵抗がないものと仮定した。

解析に用いた地盤の材料定数を 表-1 に示す。これらの値は、まさ土を念頭において一般的と思われる値として設定したものである。

表-1 地盤材料定数

土の湿潤密度 ρ_t	13 kN/m ³
粘着力 c	16 kN/m ²
内部摩擦角 ϕ	27°
ダイレイタンシー角 ψ	12°
ヤング率 E	100 MN/m ²
ポアソン比 ν	0.3
硬化係数 h	0 kN/m ²

(3) 水平地盤の有限要素解析

対数らせん式による引揚支持力計算では、重要な土質定数として粘着力 c と内部摩擦角 ϕ が用いられるが、ダイレイタンシー角 ψ はあまり重要視されていない。そこで、関連流れ則 ($\phi = \psi = 27^\circ$) と非関連流れ則 ($\phi = 27^\circ, \psi = 12^\circ$) の 2 ケースについて水平地盤において解析を行った。

引揚変位～引揚荷重関係を 図-4 に示す。引揚変位 25 mm での引揚荷重を比較すると、非関連では概ね荷重は一定となっているのに対し、関連型の方は荷重が漸増を続けている。次に、せん断ひずみ分布を 図-5 に示す。関連型では曲線を描きながら横に大きく広がっているのに対し、非関連型では直線的で横への広がり方は小さく、また、ひずみ集中域の幅は関連型よりも若干小さい。帯状のひずみ集中域で囲まれた基礎柱体部周辺の地盤は、基礎

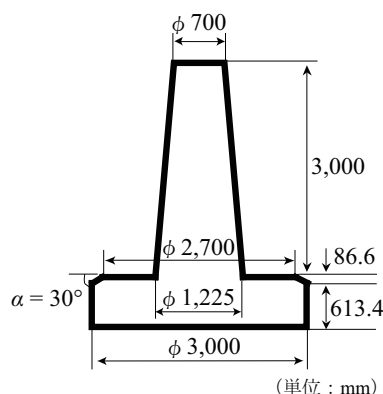


図-1 逆 T 型基礎の形状・寸法 (水平地盤の場合)

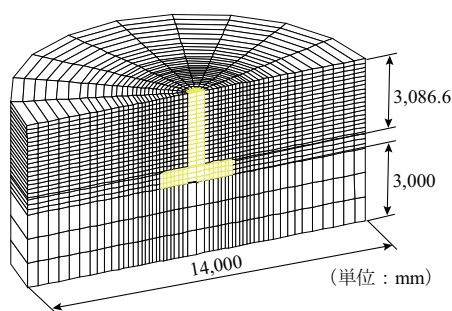


図-2 有限要素解析モデル (水平地盤)

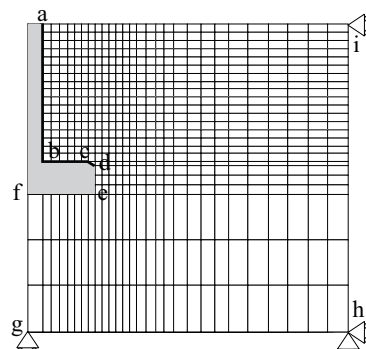


図-3 境界条件

Keywords: 送電鉄塔, 逆 T 型基礎, 地盤―基礎体―構造物の連成挙動

〒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: chida@civil.tohoku.ac.jp

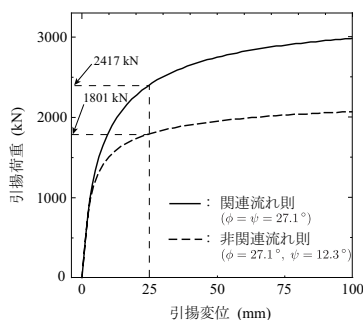


図-4 関連・非関連流れ則による荷重～変位関係の違い（水平地盤）

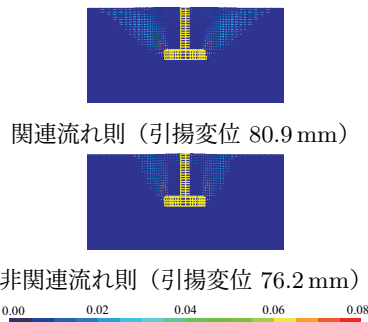


図-5 関連・非関連流れ則によるせん断ひずみ分布の違い（水平地盤）

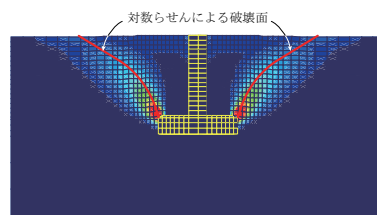


図-6 対数らせんによる破壊面形状と有限要素解析結果（関連流れ則）との比較

引揚げ時には殆ど変形せずに土塊となり、その自重が引揚抵抗に寄与する。また、帯状のひずみ集中域では、地盤のせん断応力が引揚抵抗に寄与する。関連型の方が明らかに土塊重量は大きく、せん断ひずみが集中している領域の幅も広いことから、関連型の方が非関連型よりも大きな引揚支持力を示す。

有限要素解析結果について、対数らせん式²⁾による引揚支持力の計算値との比較を行い、本解析手法の適用性の評価を行う。地盤の内部摩擦角が同一であっても、ダイレイタンシー角によって破壊面（実際にはひずみが集中する領域）の角度や形状は異なるため、ここでは関連流れ則を用いた場合の結果との比較を行う。

砂質地盤での許容引揚支持力 R_{ta} を与える対数らせん式は、次のように与えられる²⁾。

$$R_{ta} \text{ (kN)} = \frac{1}{F_1} \left[G + \frac{k}{F_2} \left\{ \gamma(K_1 - V_{c1}) + \frac{c}{1.5} K_2 + R_f \right\} \right] \quad (1)$$

式(1)の計算に際して用いた諸量を表-2に示す。ここでは、第2.2)節で示した有限要素解析での境界条件に整合させ、基礎体の床板側面における摩擦抵抗力は無いものとした ($R_f = 0$)。また、各種安全率の値は $F_1 = 1$, $F_2 = 1$ とし、水平方向荷重の転倒モーメントによる支持力低下は考慮しないものとした ($k = 1$)。この条件で計算された許容引揚支持力は $R_{ta} = 1,087 \text{ kN}$ であった。

一般に逆 T 型基礎（実規模寸法）の引揚支持力では、上部構造（鉄塔）への影響を考慮して引揚げ変位 25 mm 時の荷重を極限支持力、その 1/1.5 の値を降伏支持力と考えることが多い。有限要素解析により得られた 25 mm 変位時の荷重、およびその 1/1.5 の値と、対数らせん式による計算値との比較を表-3に示す。有限要素解析による降伏支持力は、対数らせん式による評価値よりも大きな値となっている。この主な原因としては、8 節点 1 次要素に完全積分を組み合わせて用いた事による有限要素自体の性能の問題^{3),4)}が挙げられる。

次に、対数らせんで表される地盤破壊面の形状と、有限要素解析で得られたひずみ集中域との比較を行う。図-6

には、関連流れ則を用いた解析で得られたせん断ひずみ分布と、対数らせんで表される地盤破壊面とを重ねて示した。解析で得られた地盤破壊面（厳密にはひずみ集中域）は、対数らせんと概ね一致しており、有限要素解析では定性的には良好に変形挙動を表現できている。

3. 結論

有限変形・弾塑性有限要素解析により、ひずみ局所化に代表される地盤の変形挙動の定性的な側面を再現することができ、地盤の進行的な破壊挙動を考慮に入れた支持力評価に対する適用性の一端を示すことができた。

参考文献

- 1) 池田清宏, 山川優樹, 森田耕平, 堀本壮亮, 尾崎利行: 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, 土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 1, pp. 1-12, 2007.
- 2) 送電用鉄塔基礎適用動向専門委員会: 送電用鉄塔基礎の設計, 「電気共同研究」, 第 58 巻, 第 3 号, 社団法人電気共同研究会, 2002.
- 3) de Borst, R., Vermeer, P. A.: Possibilities and limitations of finite elements for limit analysis, *Géotechnique*, Vol. 34, No. 2, pp. 199-210, 1984.
- 4) 田中忠次, 川本治: 地盤・斜面崩壊の三次元有限要素解析—動的緩和法の適用—, 農業土木学会論文集, Vol. 131, pp. 79-86, 1987.

ここでは文献²⁾に従い「極限支持力」という用語を用いているが、これは限界状態設計法で一般に用いられる用語法とは異なり、終局限界状態ではなく使用限界状態での支持力に相当する。

表-2 対数らせん式による引揚支持力計算で用いた諸量

地盤の単位体積重量 γ	13 kN/m ³
地盤の粘着力 c	16 kN/m ²
地盤の内部摩擦角 ϕ	27°
基礎体の重量 G	0 kN
床板縁端上面より上の基礎体土中体積 V_{c1}	2.79 m ³
床板幅 B (m)	3.00
地表面から床板縁端上面までの深さ D	3.0866 m
対数らせんの中心角 θ_0	44.2°

表-3 対数らせん式による引揚支持力の計算値との比較

FEM: 変位 25 mm の荷重（極限）	2,417 kN
FEM: 変位 25 mm の荷重の 1/1.5（降伏）	1,611 kN
対数らせん式による計算値	1,087 kN