斜面近傍に位置する逆 T 字型送電鉄塔基礎の圧縮支持力解析

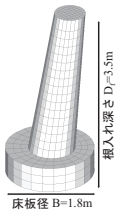
東北大学 学生会員 ○ 羅 家驊
東北電力（株）研究開発センター 溝江 弘樹
東北電力（株）電力システム部 増田 雅芳
東北大学 正会員 山川 優樹
東北大学 フェロー会員 池田 清宏

1. はじめに

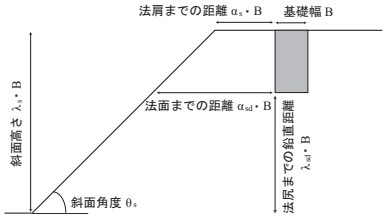
送電鉄塔基礎として多く用いられている逆 T 字型基礎は，図–1 に示すような 3 次元形状をもつ比較的根入れの深い基礎である．このような基礎について，電気協同研究会 [1](以下では電協研と略す) では，Terzaghi の支持力式 (1) による水平地盤の圧縮支持力の算定法を提示している．

$$q_u = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_\gamma + \gamma_2 D_f N_q \quad (1)$$

ここで，q_u は許容圧縮支持力度，N_c, N_γ, N_q は支持力係数（地盤の内部摩擦角 ϕ の関数），c は地盤の粘着力，γ_1 は地盤の単位体積重量，γ_2 は根入れ部分の土の単位体積重量，α, β は基礎の 3 次元形状係数，B は基礎幅，D_f は根入れ深さである．しかし，式 (1) を逆 T 字型基礎のように比較的根入れが深い基礎の支持力算定に適用するにあたっては，以下 3 つの点に注意が必要である．(i) 式 (1) は基本的に浅い基礎を対象としているため，たとえ第三項を考慮しても逆 T 字型基礎のような根入れの深い基礎の支持力を正しく評価できない可能性がある．(ii) 式 (1) は 2 次元帯基礎の支持力式をベースとして，3 次元形状係数を第一項，第二項にそれぞれ乗じることによって 3 次元支持力を算定しているが，これらは浅い基礎について定められたものであるため，逆 T 字型基礎における 3 次元形状効果や地盤物性の影響を適切に表していない可能性がある．



図–1 逆 T 字型基礎 18-35 型の解析モデル



図–2 傾斜地盤パラメータの定義

また，傾斜地盤では水平地盤と比較して支持力が減少するため，傾斜地盤支持力 q'_u については

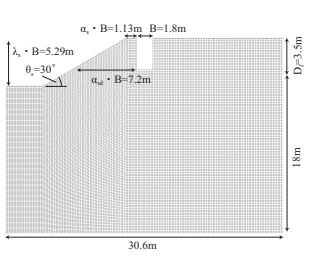
$$q'_u = \zeta_s \cdot q_u \quad (2)$$

のように式 (1) で算定される水平地盤支持力 q_u に低減係数 $\zeta_s (0 \le \zeta_s \le 1)$ を乗じることで算出している．低減係数 ζ_s は，図–2 に示す斜面角度 θ_s，基礎幅 B を基準とした斜面高さ比 λ_s および基礎から法肩までの距離比 α_s などの傾斜地盤パラメータ，地盤の粘着力 c，内部摩擦角 ϕ，単位体積重量 γ などの地盤材料定数を用いて，Kusakabe et al.[2] の上界定理に基づく極限解析の結果をもとに算出する．しかし，この低減係数は斜面近傍の浅い基礎を対象としており，逆 T 字型基礎のように比較的根入れの大きい基礎を対象としたものではない．そのような場合について，電協研では基礎と斜面の位置関係から基礎の根入れを低減補正するような方法を取っている．

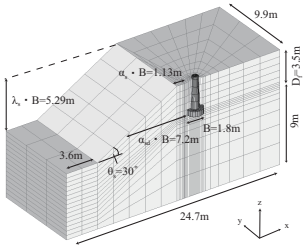
そこで本研究では，斜面近傍に設置された逆 T 字型基礎の圧縮支持力の現行算定法の適用性と妥当性を再検討する．基礎の圧縮支持力について弾塑性有限要素解析を行い，電協研算定法による支持力と比較し，その結果について考察した．さらに，逆 T 字型基礎の寸法・形状を忠実に再現した 3 次元モデルによる有限要素解析を行い，その結果を評価した．その際，基礎の斜面近接による圧縮支持力の低下挙動についてとくに詳しく検討した．また，斜面近接による地盤破壊の進展範囲の変化が支持力変化の重要な要因になっていると考えられるため，それについても検討した．

2. 地盤・基礎の解析モデル

図–1 に示した逆 T 字型基礎の寸法に従い，傾斜地盤における 2 次元帯基礎モデル図–3 と逆 T 字型基礎を忠実に再現したモデル (図–4) を作成した．地盤の弾塑性モデルには 2 次元解析については平面ひずみ条件下で c，ϕ を同定した Drucker–Prager モデル，3 次元解析については Mohr–Coulomb モデルを用い，$c = 15.876\,\mathrm{kPa}$ とし，ϕ は数通りを検討した．



図–3 傾斜地盤における 2 次元帯基礎の解析モデル例 ($\lambda_s = 2.94$, $\alpha_{sd} = 4$, $\theta_s = 30°$)



図–4 傾斜地盤における逆 T 字型基礎の 3 次元解析モデル例

3. 傾斜地盤についての検討

傾斜地盤における根入れのある基礎の圧縮支持力解析を (i)2 次元帯基礎，(ii) 逆 T 字型基礎について行い，その支持力を水平地盤と比較することにより，基礎の斜面近接による支持力低下挙動を検討した．また，電協研算定法による支持力低減率との比較を行うとともに，支持力低下の要因となる地盤破壊領域の進展挙動も考察した．

Key Words: 逆 T 字型基礎, 弾塑性有限要素解析, 圧縮支持力, 傾斜地盤, 法肩距離
〒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: luo.jiahua.p5@dc.tohoku.ac.jp

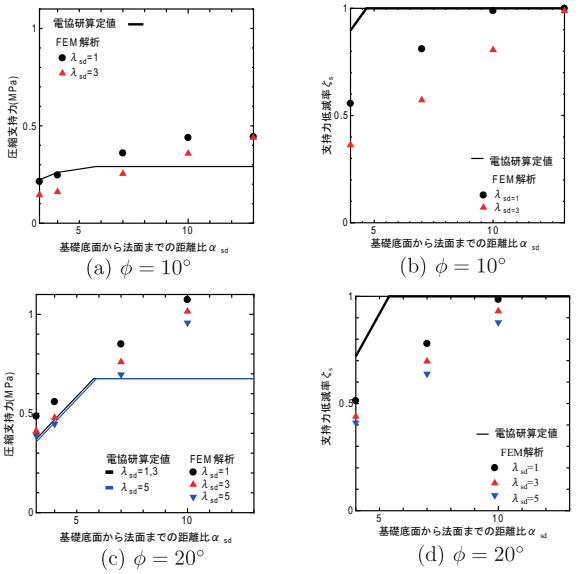
(i) の 2 次元解析結果と電協研算定法における傾斜地根入れ基礎の支持力と支持力低減低減率を比較したものを図–5 に示す．α_{sd} が小さくなり基礎が斜面に近接するほど支持力と支持力低下率が低下する挙動が確認されたが，本解析によって得られた ζ_s は α_{sd} が 10 程度以下の範囲では電協研算定値よりもかなり小さい．また，電協研算定法では $\phi = 10°$ で $\alpha_{sd} = 4.7$ 程度，$\phi = 20°$ で $\alpha_{sd} = 5.4$ 程度以上であれば斜面近接の影響を受けず，水平地盤と同等の支持力を確保できる結果 ($\zeta_s = 1$) となっているのに対し，本解析では $\phi = 10°, \phi = 20°$ 双方において，$\lambda_{sd} = 1$ のとき $\alpha_{sd} = 10$ 以上，$\lambda_{sd} = 3,5$ ではさらに大きな α_{sd} が必要という結果であった．

この原因を検討するため，$\phi = 10°, \lambda_{sd} = 1$ のケースにおける地盤降伏点付近のせん断ひずみ分布を図–6 に示す．電協研算定法では水平地盤と同等の支持力 ($\zeta_s \fallingdotseq 1$) となる同図 (b)$\alpha_{sd} = 7$ のケースにおいても，基礎底面谷側縁端から帯状のひずみ集中域が法尻に向かって進展しており，その影響により支持力が低下していると考えられる．一方，$\zeta_s = 1$ となった同図 (d)$\alpha_{sd} = 13$ のケースでは，水平地盤と同様の左右対称のひずみ分布を示しており，これにより斜面の影響を受けず水平地盤と同等の支持力が得られたと考えられる．水平地盤における解析結果を参考にこれらの解析結果を考察すると，基礎の根入れがある場合，電協研算定法で想定しているよりも広い範囲にひずみが進展するため斜面の影響を受けやすい結果になったと考えられる．

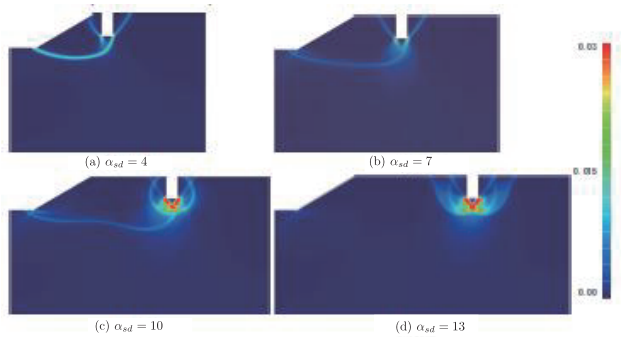
図–7(a) に (ii) の 3 次元解析で得られた荷重-変位関係を示す．電協研算定値および 2 次元帯基礎と同様に，基礎が斜面に近接して α_{sd} が小さくなるほど支持力が低下する挙動が確認された．有限要素解析で得られた圧縮支持力は電協研算定値の 3 倍程度の値を示した．また，図–7(c) に α_{sd} と ζ_s の関係を示す．有限要素解析では，水平地盤と同等の支持力を確保するには $\alpha_{sd} = 7$ 程度以上必要という結果であった．一方，先に図–5(b) に示した通り，同様の地盤定数，傾斜地盤形状において，2 次元帯基礎で水平地盤と同等の支持力を確保するには $\alpha_{sd} = 10$ 程度であった．また，α_{sd} が小さく，斜面近接の影響が生じる場合であっても，有限要素解析で得られた ζ_s の値は 2 次元帯基礎よりも逆 T 字型基礎の方が大きく，また，後者の方が ζ_s の電協研算定値に近い．これらのことから，2 次元帯基礎と比べて逆 T 字型基礎では斜面近接の影響が小さいことが分かった．図–7(b) に逆 T 字型基礎の $\alpha_{sd} = 4$ における地盤降伏後のせん断ひずみ分布 (地盤の半領域のみを表示) を示す．床板底面下部や基礎柱体部の周辺地盤にひずみがみられるが，2 次元帯基礎の解析でみられた図–6(a) 基礎底面から法尻方向へひずみ集中域が進展する様子はみられなかった．

4. 結論

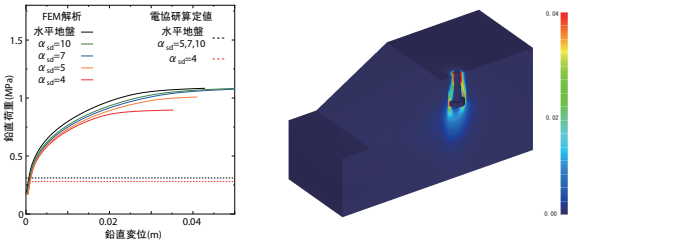
支持力低減率 ζ_s については，2 次元帯基礎の有限要素解析結果は電協研算定値よりも斜面近接の影響範囲及び影響程度が大きいという結果であった．しかし，2 次元帯基礎の解析で得られた圧縮支持力は，電協研算定値と概ね同程度ないしはそれよりも十分に大きく，電協研算定法は安全側の評価となっていることが確認された．また，その傾向は逆 T 字型基礎の 3 次元解析ではさらに顕著であった．一方，今回検討した斜面形状や地盤物性の範囲では，電協研による支持力算定法では逆 T 字型基礎の圧縮支持力についてはかなり安全側の評価となっていることが確認された．

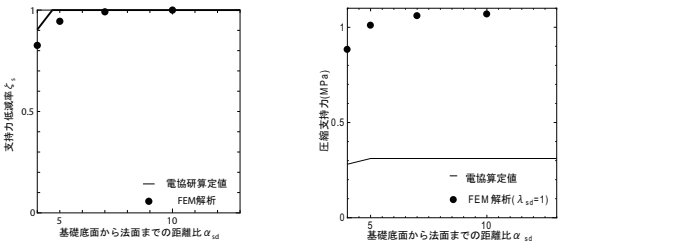


図–5 斜面近接が根入れのある 2 次元帯基礎の支持力と支持力低減率へ与える影響 ($\phi = 10°, 20°$)



図–6 2 次元帯基礎における地盤のひずみ分布 ($\phi = 10°, \lambda_{sd} = 1$ の例)





図–7 逆 T 字型基礎の 3 次元解析結果 ($\phi = 10°$)

参考文献

1) 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」，Vol. 58(3), 社団法人電気共同研究会, 2002.
2) Kusakabe, O., Kimura, T., Yamaguchi, H.: Bearing capacity of slopes under strip loads on the top surfaces, *Soils and Foundations*, Vol. 21, No. 4, pp. 29–40, 1981.