

剛塑性有限要素法を用いた基礎の根入れを有する地盤の支持力解析 Bearing capacity analysis with penetration by using RPFEM

水野和憲¹, 森 弘一²

1 岐阜工業高等専門学校・環境都市工学科・kazu@gifu-nct.ac.jp

2 名古屋港管理組合・企画調整室

概 要

一般に、根入れ深さが基礎幅までの浅い剛な帯基礎による地盤の支持力算定にはテルツァギーの支持力公式が用いられる。本研究は、同様の支持力問題（ただし、ここでは飽和粘性土地盤を対象とした急速載荷の支持力問題に限る）に剛塑性有限要素法を適用し、その有用性の確認を検討した。特に、1) 基礎の形状、2) 地盤内の不均一応力分布、3) 基礎側面と地盤間の摩擦について、これらが極限支持力に与える影響を調べた。得られた知見として、本研究の条件下では、1) と 2) を同時に考慮することで、根入れ深さに伴う極限支持力の増加がテルツァギーの支持力公式と同様に線形増加すること、また、基礎の形状によっては 3) の影響のため支持力公式の補正などが実施されるが、本解析手法であれば、基礎形状に関係なく、一つの解析手法で極限支持力が算定可能であることが明らかとなった。

キーワード：支持力，剛塑性有限要素法，根入れ

1 はじめに

一般に、図 1 に示すような根入れを有した剛な帯基礎（基礎底面は粗）による水平地盤の極限支持力の算定には Terzaghi の支持力公式が用いられる。ここで、内部摩擦角ゼロ（ $\phi=0$ ）で、粘着力 c_u なる強度を有している均一な粘性土地盤を想定すると、Terzaghi の支持力公式は次式¹⁾を得る。

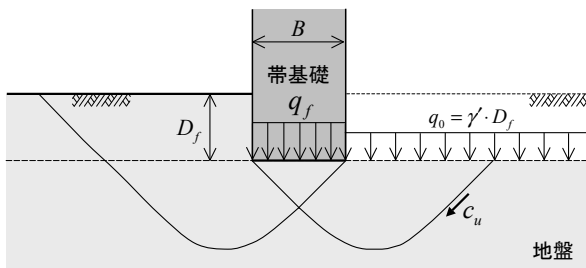


図 1 基礎の支持力問題

$$q_f = 5.71c_u + \gamma' D_f \quad (1)$$

ここで、 q_f ：極限支持力 [kN/m²]、 c_u ：非排水せん断強度 [kN/m²]、 γ' ：土の有効単位体積重量 [kN/m³]、 D_f ：基礎の根入れ深さ [m] である。式 (1) の右辺第 2 項は基礎側方の根入れ部を押え荷重として表現したものであ

り、 c_u と γ' が地盤内で一定であれば、極限支持力 q_f と根入れ深さ D_f は線形関係となっている。しかし、式 (1) で得られる極限支持力 q_f は、1) 基礎幅 B に無関係である、2) 地盤内の強度 c_u は均一とする、3) 基礎側面と地盤間の摩擦（相互作用）は考慮しない、と理想化して算出される。

そこで本研究は、これらの影響を考慮できる支持力問題の計算手法として、浅岡ら^{3),4)}の剛塑性有限要素法（Rigid Prastic Finite Element Method、以下、RPFEM と呼ぶ）に着目した。この RPFEM は、Cam-clay モデルの限界状態の構成式と非排水条件での水～土骨格連成式を用いることにより、地盤内の不均一な初期有効応力分布を与えて支持力解析を行うことができる。この計算手法を用いて本研究は、根入れを有する基礎の形状、地盤内の応力不均一性および基礎側面と地盤間の摩擦の有無などが極限支持力 q_f にどのように影響を及ぼすかを検討した。また、Terzaghi の支持力公式との比較から、RPFEM の有用性についても再検討した。

2 基礎の形状が極限支持力に及ぼす影響

本研究では、基礎の形状を表すパラメータとして根入れ幅比 D_f/B を用いる。根入れ幅比が $0 \leq D_f/B \leq 1$ であれば横長の形状をした基礎であり、 $1 < D_f/B$ であ

ば縦長の形状をした基礎である．一般に，前者を「浅い基礎」と呼び，後者を「深い基礎」と呼ぶ²⁾．ここでは，基礎の形状 D_f/B が極限支持力 q_f に及ぼす影響について検討した．

2.1 解析条件

計算に用いた有限要素メッシュは，3種類の基礎幅 B (4m,8m,12m) に対して，根入れ深さ D_f をそれぞれ 0.25 倍，0.5 倍，0.75 倍，1 倍したもの，および根入れのない形状に対応した合計 15 種類である．計算は，基礎幅の中心線より左右対称性を考慮した半断面地盤とし，二次元平面ひずみ条件下で行った．一例として，基礎幅 $B=4\text{m}$ ，根入れ深さ $D_f=4\text{m}$ ($D_f/B=1$) の有限要素メッシュおよび境界条件を図 2 に示す．また，地盤内は等方性 ($K_0=1.0$) を有する飽和粘性土地盤を想定し，急速に基礎載荷した場合の極限支持力について求める．なお，ここでは基礎の形状のみの影響を検討するため，地盤内の応力は一定 ($\sigma'_v=40\text{kN/m}^2$ で均一な応力分布) と仮定し，基礎端部には特異点処理を施した．

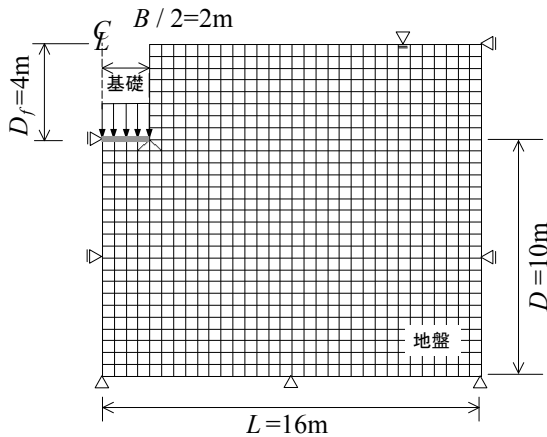


図 2 有限要素メッシュと境界条件 ($D_f/B=1$)

次に，本計算では基礎が基礎近傍の地盤の変位を拘束する役割を果たすことに着目し，基礎と接する土の節点間に「距離不変」，「角度不変」の 2 種類の制約条件を導入することで基礎をモデル化した⁵⁾．つまり，粗い基礎はこの 2 つの制約条件を同時に課すことで表現できる．図 3 に示すように，本章では基礎底面と地盤間においては粗とし，基礎側面と地盤間には「距離不変」の制約条件を外すことで滑らかな基礎側面とモデル化した．

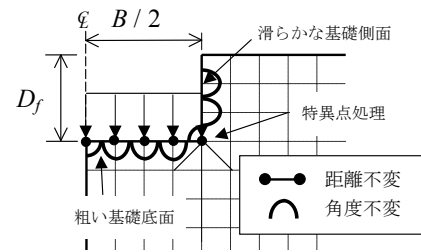


図 3 基礎のモデル化

2.2 解析結果

基礎の形状を表す根入れ幅比 D_f/B と極限支持力 q_f の関係を図 4 に示す．

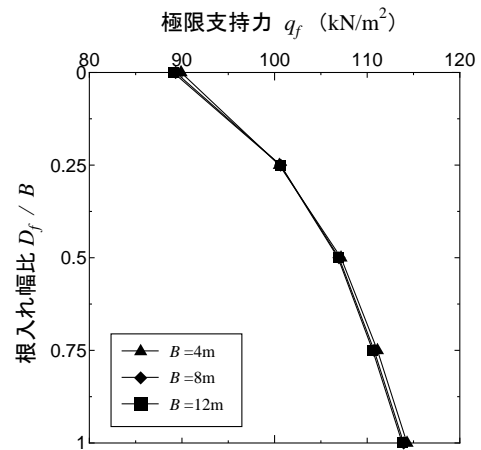


図 4 根入れ幅比と極限支持力の関係

図 4 より，地盤内の応力分布が一定であれば，極限支持力 q_f は基礎の大きさに関係なく形状のみに依存することがわかった．また，根入れ幅比 D_f/B が大きくなるにつれて極限支持力 q_f も大きくなるのがわかる．しかし，その関係は線形ではなく，根入れ幅比 D_f/B が大きくなるにつれて極限支持力 q_f はあまり増加しにくくなるのがわかる．

次に， $B=4\text{m}$ を取り上げ，根入れ幅比 $D_f/B=0, 0.25, 0.75, 1$ の 4 つの基礎形状の破壊時変位速度場を図 5 に示す．根入れ幅比 $D_f/B=0$ と $D_f/B=0.25$ の変位速度場を比較すると，1m の根入れ深さの増加によって，破壊領域（塑性流れ）が拡大している．一方，根入れ幅比 $D_f/B=0.75$ と $D_f/B=1$ の変位速度場を比較すると，

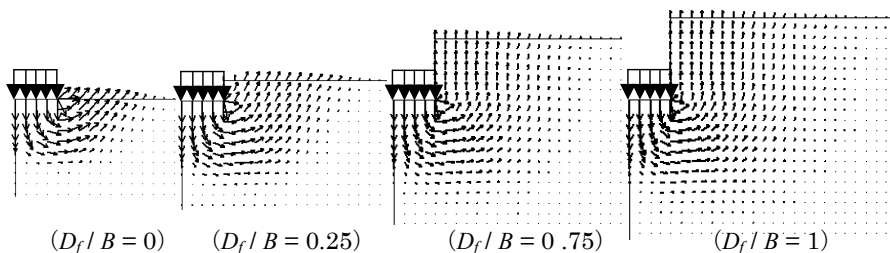


図 5 基礎の形状の違いによる破壊領域の変化（破壊時変位速度場）

同じ 1m の根入れ深さの増加でも、破壊領域の大きさはあまり変化していない．すなわち、破壊領域の大きさの変化が極限支持力 q_f の増加と関係していると考えられる．

3 地盤内の応力不均一性による影響

3.1 解析条件

本章では、図 6 に示すように、実際の土の自重を考慮した地盤内の応力不均一性が極限支持力にどのような影響を及ぼすのかを検討した．この不均一な応力分布として、本研究では土の有効単位体積重量 $\gamma' = 6.5 \text{ kN/m}^3$ で深さ方向に単調増加する三角形分布を採用した．その他の条件については、2 章と同様である．

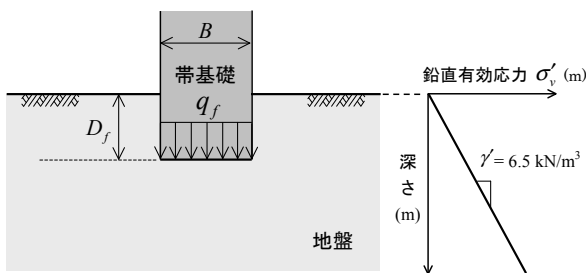


図 6 地盤内の鉛直有効応力

3.2 解析結果

根入れ幅比 D_f/B と極限支持力 q_f の関係を図 7 に示す．

図 7 を前出の図 4 と比較すると、基礎の形状（根入れ幅比 D_f/B ）が同じでも、基礎の大きさに伴い極限支持力 q_f も大きくなり、両者の関係は比例関係が成り立つことがわかった．この理由として、基礎幅 B の大きい基礎は根入れ深さ D_f も大きくなり、地盤の深部、すなわち地盤内の応力が大きいところで破壊が生じるため、極限支持力も大きくなったと考えられる．

次に、図 7 の縦軸を根入れ深さ D_f で整理したものが図 8 である．本計算の条件下においては、異なる基礎幅でも同じ根入れ深さであれば、得られる極限支持力はほぼ同程度となることがわかった．また、図 8 中には Terzaghi の支持力公式（式 (1)）によって得られる極限支持力 q_f の値（図中、白丸）も併記した．ここで、式 (1) 中の非排水せん断強度 c_u については、各根入れ深さ D_f に相当する有効土被り圧から、Cam-clay モデル（ただし、材料定数は RPFEM と同じ）に従う粘土の非排水条件下での破壊時せん断応力を求め、これを平面ひずみ条件下で算出したものを用いた．そして、 c_u は地盤内で均一として各根入れ深さ D_f における極限支持力 q_f を計算した．これをみると、RPFEM と Terzaghi の支持力公式で得られる極限支持力はほぼ一致し、同様の線形関係を示すことが明らかとなった．

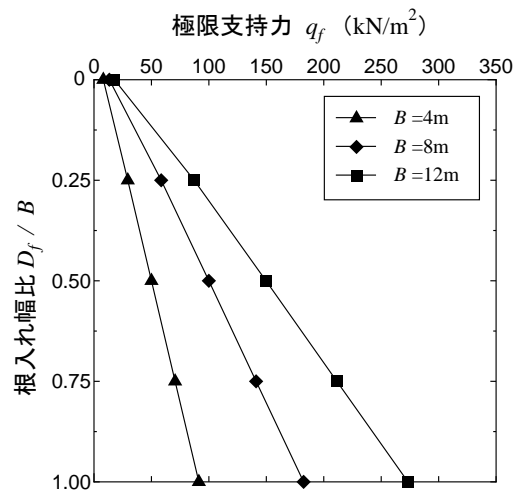


図 7 根入れ幅比と極限支持力の関係

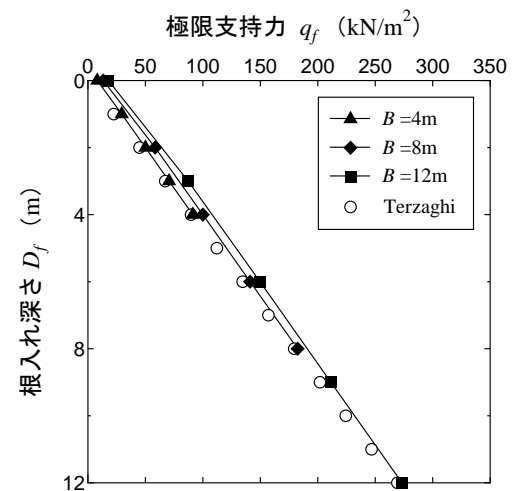


図 8 根入れ深さと極限支持力の関係

4 基礎側面と地盤間の摩擦の影響

基礎の根入れがある程度深くなると、基礎側面と地盤間の摩擦の影響が無視できない．そこで本章では、基礎側面と地盤間において十分に摩擦が作用している（粗い基礎側面）と想定し、この作用が極限支持力にどのような影響を及ぼすかを検討した．

4.1 解析条件

前章までに用いた有限要素メッシュに加え、さらに深い基礎 ($1 < D_f/B$) での摩擦の影響を検討するために、 $B=4\text{m}$ の基礎については根入れ深さ D_f を B の 1.5 倍および 3 倍した有限要素メッシュを新たに加えて計算を行った．なお、2.1 で説明したように、ここでは基礎側面に接する土の節点間に「距離不変」、「角度不変」の制約条件を 2 つ同時に課して極限つり合い計算を解くことにより、摩擦の影響を考慮できる極限支持力 q_f を算出した．その他の条件についても前章までと同様であり、地盤内の応力分布も不均一とした．

4.2 解析結果

根入れ幅比 D_f/B と極限支持力 q_f の関係を図9に示す。基礎側面と地盤間の摩擦の影響を検討するために3章の解析結果（摩擦なし、黒色マーク）も図9中に併記した。なお、ここでは基礎幅 $B=8\text{m}$ の結果については省略した。

図9より、基礎側面と地盤間の摩擦を考慮すると、すべての場合において極限支持力は向上することがわかる。例えば、 $D_f/B=1$ となる $B=4\text{m}$ では約28%、 $B=12\text{m}$ では約21%程度の支持力増加である。しかし、 $B=4\text{m}$ の $D_f/B=3$ では約60%の支持力増加となった。また、摩擦を考慮しない場合は根入れ幅比と極限支持力はおおむね線形関係であるが、摩擦を考慮することで、特に深い基礎 ($1 < D_f/B$) において極限支持力が非線形的に向上した。

図10は根入れ深さ D_f と極限支持力 q_f の関係に整理したものであり、摩擦を考慮した結果のみを表している。図10の $B=4\text{m}$ の基礎に着目すると、摩擦を考慮しても $D_f=4\text{m}$ まで ($0 \leq D_f/B \leq 1$ まで) は、図8と同様に、基礎幅 B に関係なく同程度の極限支持力 q_f が得られる。しかし、 $1 < D_f/B$ となる根入れ深さ $D_f=4\text{m}$ 以深において、 $B=4\text{m}$ の極限支持力 q_f が $B=12\text{m}$ のそれを大きく上回る結果となった。つまり、同じ根入れ深さであっても、摩擦を考慮すると縦長の形状をした深い基礎の方が大きな極限支持力を得られることがわかった。

図11に、基礎幅 $B=4\text{m}$ 、根入れ深さ $D_f=12\text{m}$ の非常に細長い基礎 ($D_f/B=3$) を設置した場合の破壊時変位速度場を示す。これをみると、基礎側面と地盤間が粗いため基礎近傍の土は図5と違って、鉛直下方に塑性流れが見られる。

5 おわりに

本研究は、根入れを有する基礎の支持力問題にRPFEMを適用し、1) 基礎の形状、2) 地盤内応力不均一性、3) 基礎側面と地盤間の摩擦がそれぞれ極限支持力にどのような影響を及ぼすかを検討した。

1) および2) までの条件であれば、PRFEMとTerzaghiの支持力公式は、ほぼ同じ極限支持力を得ることができた。本来、Terzaghiは理想的な仮定に基づいて支持力公式を考案しているが、PRFEMによって実地盤に近い条件を取り入れた結果と同程度となることが明らかとなった。また、RPFEMでは基礎側面と地盤間の摩擦について考慮できるので、基礎の根入れ深さ D_f や基礎の形状に関係なく、一つの解析手法で様々な支持力問題での極限支持力が算定可能であることが明らかとなった。

なお、今回は2次元の平面ひずみ条件で解析を実施したが、今後の課題として、軸対称条件にて、杭基礎のような $1 < D_f/B$ の基礎形状の支持力解析を行うつもりである。

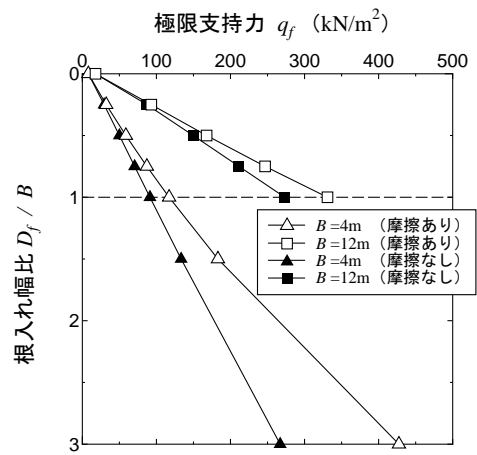


図9 根入れ幅比と極限支持力の関係

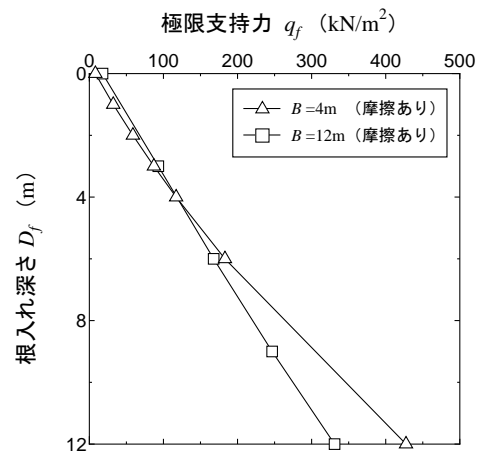


図10 根入れ深さと極限支持力の関係

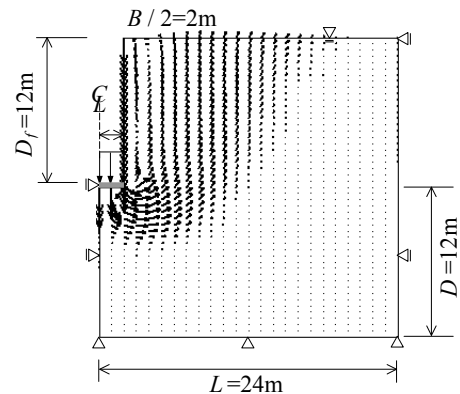


図11 破壊時変位速度場 ($D_f/B=3$)

参考文献

- 1) 石原研而：土質力学，丸善，pp.268-271，1988.
- 2) 山口柏樹：土質力学，技法堂出版，pp.253，1969.
- 3) 浅岡顕：支持力と有効応力，土と基礎，Vol.36，No.6，pp.43-49，1988.
- 4) 小高猛司：水-土骨格連成極限つり合い解析に基づく複合地盤の支持力に関する研究，名古屋大学学位論文，1993.
- 5) Asaoka, A., Noda, T. and Kaneda, K.: Displacement/Traction boundary conditions represented by constraint conditions on velocity field of soil, Soils and Foundations, Vol.38, No.4, pp.173-181, 1998.