

根固め基礎の有限要素支持力解析

池谷 真希^{*1} 吉富 隆弘^{*1} 赤石 勝^{*2} 杉山 太宏^{*3}

Finite Element Analysis of Bearing Capacity of Foot Protection Foundation

by

Maki IKEYA^{*1}, Takahiro YOSHIDOMI^{*1}, Masaru AKAISHI^{*2} and Motohiro SUGIYAMA^{*3}

(Received on Apr. 1, 2019 and accepted on May 9, 2019)

Abstract

The bearing capacity of soil is important in numerous geotechnical problems. Its value for foot protection foundations appears to be governed by the strength of the soil and the penetration depth of the foot protection. An elasto-plastic finite element analysis taking account of strain softening behavior was developed, and the results agreed well with the classical ultimate bearing capacity equations for shallow footings. It is shown that finite element analysis is a reasonable and reliable procedure for estimating the bearing capacity of foot protection foundations.

Keywords: Foot protection foundation, Bearing capacity, Finite element analysis

1. まえがき

根固め杭では、基礎地盤に接する基礎の面積をより大きくすることによって支持力の増加を期待している。根固め部の根入れ深さや支持地盤の強度に対し、根固め部の強度をどの程度に設定すべきか明らかでない。また、支持層が砂礫地盤か岩盤かによって、施工の健全性、あるいは掘削土砂の根固め材への混入度合いや支持力が影響を受ける可能性がある。この論文は、弾塑性有限要素解析により 1) 根固め部の大きさや強度そして根入れ深さと支持力の関係、2) 土丹層（固結度の低い泥岩層や洪積層の硬質粘性土層をいう）を支持層とした場合のひずみ軟化挙動が支持力に及ぼす影響を検討している。

Terzaghi の支持力公式によれば、地盤の破壊モードで支持力係数が異なる¹⁾。土がかなり密か硬い場合と、土が緩いかかなり軟らかい場合で、地盤の破壊モードはそれぞれ全般せん断破壊あるいは局所せん断破壊と呼ばれている。基礎の荷重～沈下量曲線の形状から地盤の破壊モードの判定が必要とされるが、現場載荷試験の荷重～沈下量曲線から地盤の破壊モードや支持力を判断しにくい。また、支持力を決定する沈下量の大きさにも合理的根拠が見出せない。地盤が極限支持力に到達した時、すべり面上すべての点が同時に最大せん断抵抗力を発揮しているとは考えられない。土丹のように残留強度を有する場合、載荷重の増加に伴い極限状態に到達する地点が、地盤内で徐々に広がりすべり面が形成される、所謂、進行性破壊と推測しうる。進行性破壊に関係する地盤の支持力解析に弾塑性有限要素解析は有用と考えられる。近

年、三軸圧縮試験結果を利用した土の弾粘塑性応力ひずみ関係の研究と、その成果を実際の設計に利用する数値計算法が著しく進展した²⁾。地盤工学会出版図書に記述されている弾塑性有限要素解析プログラム GA3D によって、Terzaghi の極限支持力が十分に推定しうる事が明らかにされている³⁾。GA3D を用いた計算で根固め杭基礎の支持力を検討するが、土の残留強度を考慮するためプログラムの一部を著者らが改造している。

2. 三軸圧縮試験による泥岩の残留強度

石川県珠洲市で採取した珪藻質泥岩の圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。泥岩の比重 2.13, 自然含水比 120% である。中容量三軸圧縮試験機（最大圧密圧力 5MPa）を利用してのひずみ速度 0.175%/min でバックプレッシャー 0.5 MPa を用いた。

Fig.1 は、6つの等方圧密圧力で行った三軸 CU 試験の偏差応力軸ひずみ関係である。等方圧密試験で求めたこの試料の圧密降伏応力は約 1.5MPa である。いずれの結果も軸ひずみ 2~3% で最大偏差応力に到達後、偏差応力は減少する。軸ひずみ 15% の偏差応力を残留強度 q_r とし、最大偏差応力 q_p との比を残留強度比と定義して、圧密圧力との関係を示したのが Fig.2 である。図から、その値は圧密圧力によって若干変化するが、平均値は 0.78 である。本研究では、残留強度比 0.7 を次章以降の有限要素解析の参考値として利用する。

3. 有限要素解析結果と考察

*1 工学研究科建築土木工学専攻修士課程

*2 東海大学名誉教授

*3 工学部土木工学科教授

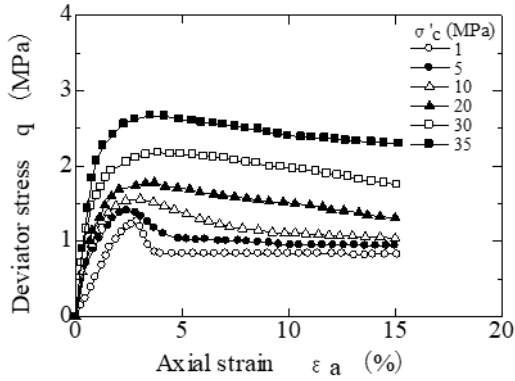


Fig.1 Stress-strain relationship of CU test performed on soft rock.

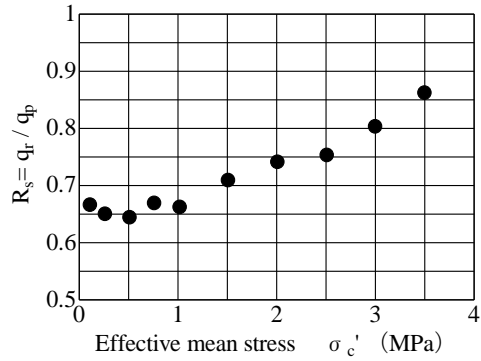


Fig.2 Relationship between consolidation pressure and residual strength ratio, $R_s(=q_r/q_p)$.

3. 1 降伏基準

群馬大学で開発された三次元弾塑性プログラム GA3Dの一部を著者らが次のように改良し、ひずみ軟化挙動を表現しうる土モデルを支持力 FE 解析に用いた。その応力ひずみ関係の模式図を Fig.3 に示した。GA3D に導入されている弾塑性モデルでは、応力が図中○印で示す降伏応力あるいはピーク強度 q_p に到達し、降伏関数 $F>0$ となった場合には、降伏応力を超えた超過応力をゼロ、すなわち $F=0$ となるまで減じ、応力が補正される。本研究では、 $F>0$ となった要素の応力を Fig.3 中の●印で示す残留強度 q_r で定義する新たな降伏面 $F_r=0$ まで低下させることでひずみ軟化挙動を表現した。

プログラム GA3D の降伏関数は、Mohr-Colomb 式(1)である。降伏後の残留強度を表す降伏関数 $F_r=0$ も Mohr-Colomb 式で表わす。強度定数 c, ϕ の下付き添え字“r”の有無でその違いが示される。

$$F = -I_1 \cdot \sin \phi + \frac{1}{2} \{3(1 - \sin \phi) \sin \theta + \sqrt{3}(3 + \sin \phi) \cos \theta\} \sqrt{J_2} - 3c \cdot \cos \phi = 0 \quad (1)$$

ここに、 I_1 と J_2 は応力不変量、 θ は Lode 角である。平均有効主応力 σ_m を一定にし、応力を降伏面 $F_r=0$ 上に移動する補正は、 π 平面上の応力補正を意味する。

3. 2 一次元圧縮試験の残留強度と支持力

立方体 1 要素を用い、残留強度のみを変化させて FE 計算した一軸圧縮試験の応力ひずみ関係を Fig.4 に示した。計算に用いた土質定数は図中に示した。設定した強度が正確に計算されており、Fig.4 は GA3D のプログラムチェックでもある。

支持力解析には、Fig.5 の要素図を用いた。杭基礎幅 1 m の節点に 20cm まで 1cm 毎の強制変位を与えその反力を支持力とした。支持層に根入れがない場合は剛体載荷とし、根入れがある場合は杭基礎に作用した地盤反力を支持力としている。根固め部の幅は、原則として基礎杭幅の 2 倍 (2m) とするが、その影響を調べる場合、根固め部なしまで変化させた。支持層土丹や根固め部の強度や弾性係数は、計算結果の各図中に示した。

基礎の根入れ深さゼロで実施した支持力解析結果が Fig.6 である。図の縦軸は、計算された地盤反力も泥岩の

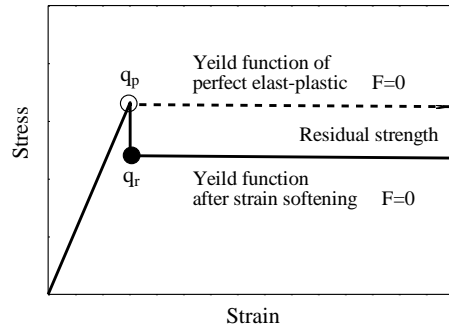


Fig.3 Stress-strain relationship considering strain softening.

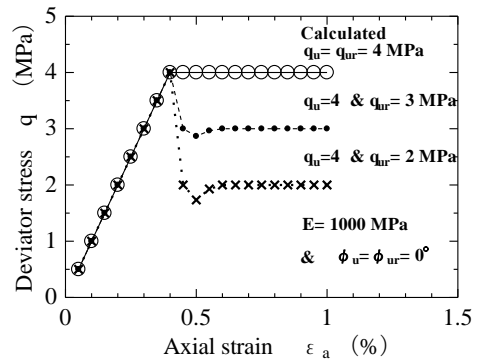


Fig.4 Stress-strain relationship of unconfined compression test calculated by changing residual strength.

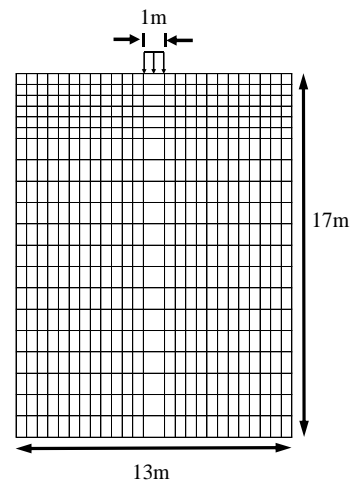


Fig.5 Finite element mesh.

粘着力 $C_u (=2\text{MPa})$ で除して支持力係数 N_c としている。Fig.6 中に○印で示した完全弾塑性モデルでは、支持力係数 N_c の最大値 ($N_c=5.9$) から明らかのように、Terzaghi の支持力係数における $\phi=0$ の時の $N_c=5.3$ とほぼ同じ値が計算されている。GA3D による有限要素解析の有用性を示すものである。Fig.6 の●印、残留強度比 0.7 の場合は、残留強度比と同じ程度に N_c が減少している。ひずみ軟化挙動すなわちひずみの増加にともない強度低下を示す土丹地盤では、支持力も低下すると考えられるので、支持力の評価には残留強度を適切に評価する必要性を示すものである。ただし、Terzaghi の支持力公式における局所破壊モードの支持力係数が、せん断抵抗角ゼロで全般せん断破壊と同じとなることに留意すべきである。

Fig.7(a), (b)は、Fig.6 の残留強度比 1 と 0.7 の計算結果から杭の沈下量 S に伴う降伏領域の広がり (ハッチ部分) を示したものである。降伏後強度が低下する残留強度比 0.7 の場合、沈下量が増加しても降伏領域が拡大しないため支持力が小さくなると理解される。支持力を増加させるには、載荷重を分散させる必要性が両図の降伏領域の違いから明らかである。

3.3 根入れ深さや残留強度の支持力への影響

支持層に根固め基礎を貫入させた深さ ($D_f=1\text{m}, 2\text{m}$) の変化による支持力係数 N_c と基礎の沈下量 S との関係を図.8 に示した。Fig.8 の丸印は、Fig.6 の $D_f=0\text{m}$ の結果である。 D_f が 1m, 2m と増加するとともに支持力は著しく増加する。

残留強度比 0.7 の場合のみの計算結果であるが、 $S=20\text{cm}$ における残留強度比 0.7 と 1 の N_c 比は、 $0.72(=3.32/4.61; D_f=0\text{m})$, $0.57(=6.52/11.46; D_f=1\text{m})$, $0.55(=7.73/13.96; D_f=2\text{m})$ と低下している。根入れが大きいほど強度比は低下、すなわち強度の低下割合が増加して、支持力に対する根入れ効果が減少している。

3.4 根入れ部地盤強度の支持力への影響

支持層の土丹強度 2MPa に対し根固め部の強度を 4, 3, 2 MPa と変化させて、 $D_f=2\text{m}$ 、残留強度比 1 とした場合の支持力係数 N_c と沈下量 S の計算結果が Fig.9 である。支持層と根固め部の強度が 2 MPa と同じでも、基礎の根入れ $D_f=2\text{m}$ であると $N_c \approx 10$ と支持力公式の 2 倍程度となり、根入れ効果が大きい。また、支持層を構成する土の強度によって、施工する根固めの強度を適切に選択することが重要である。

3.5 根入れ部径の影響

基礎杭幅 1m, $D_f=2\text{m}$ で根入れ根固め部の幅を変化させた場合の N_c と S の計算結果が Fig.10 である。根固め幅 1m と 0.4m の沈下量 20cm における N_c の比は 0.93 程度で、根固め部の幅の減少が、支持力、 N_c に及ぼす影響は他の要因に比べると少ないようである。

根固め部の有無が支持力に及ぼす影響を調べた計算結果が Fig.11 である。 $D_f=1, 2\text{m}$ で根固め部を設けない場合、それぞれ□印と△印で示した計算結果から、 $D_f=1\text{m}$ と 2m で根固め部の有無による沈下量 20cm 時の N_c の比

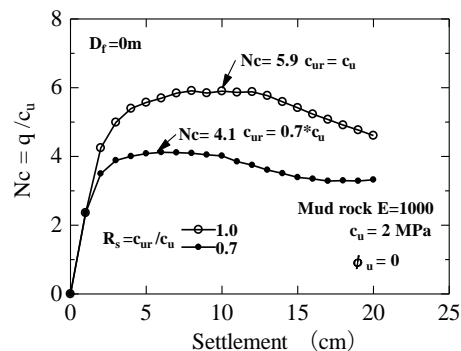


Fig.6 Influence of residual strength on the bearing capacity of foundations without foot protection.

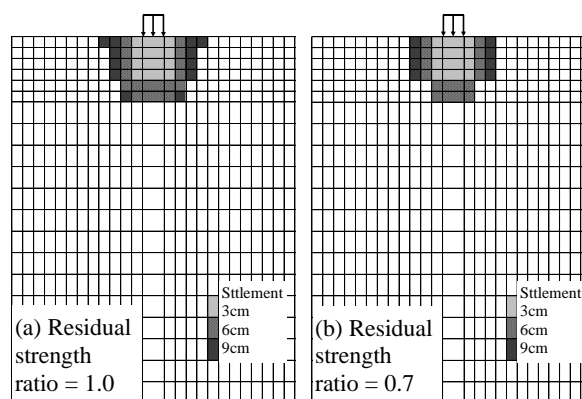


Fig.7 Extent of yield element.

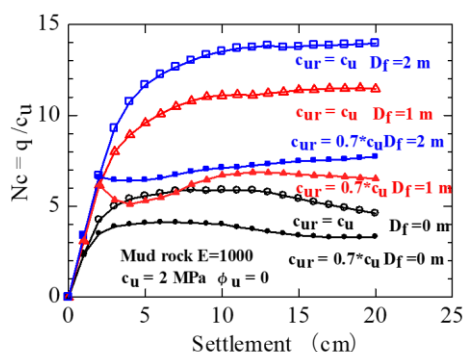


Fig.8 Effects of residual strength and penetration depth on bearing capacity.

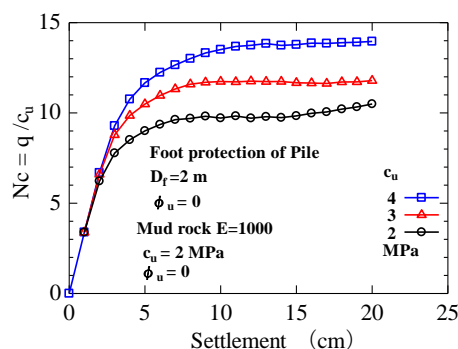


Fig.9 Effects of rooting area and penetration depth on bearing capacity.

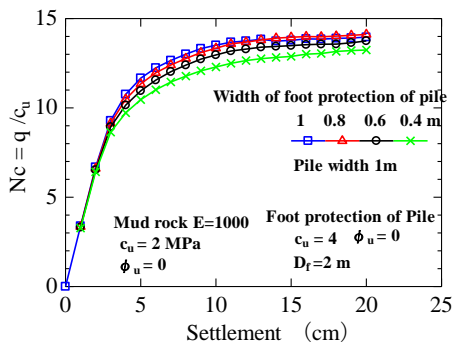


Fig.10 Influence of rooting size on bearing capacity.

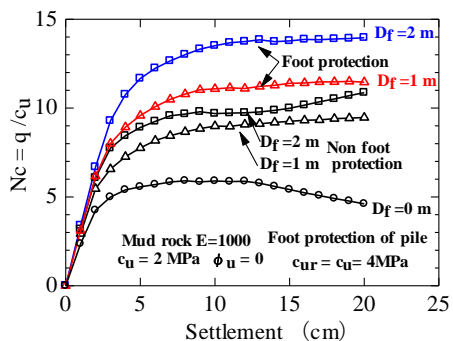


Fig.11 Bearing capacity with and without the foot protection.

は、それぞれ 0.77 と 0.82 となる。本解析では、根固め部の断面積は杭と同じであり、根固め部を加えた杭体の断面積は杭単体の 2 倍となるが、計算によれば支持力増加率は 20~30% である。

Fig.12(a), (b)は、残留強度比 1 は共通で根固め部有無による基礎の沈下量 S と降伏領域の広がりとの関係を示している。両図の比較から根固め部の有無は、降伏領域の広がり大きく影響しない。残留強度比の低下に伴う支持力への影響とは異なる。支持力増加を期待し根固め部の強度を増加させても基礎と根固めとの接触部の強度あるいは付着力を明確にしない限り、その効果は明確にできない。

これらの計算結果から根固め基礎の支持力は、①根入れ深さ D_r 、②根固め部径の大きさとその強度、③支持層の残留強度などが複雑に関係し合うことが明らかである。弾塑性有限要素解析では、支持層と根固め部や根固め部と基礎を連続体として解析している。それら境界面にすべり面あるいは亀裂が発生し、それが支持力に影響していると考えられるため、今回の計算結果にはいくつかの問題点が含まれている。一方で、現在採用されている設計法の問題点を考えるのに有用な情報も得られていると考えられる。支持力模型実験による上記の 3 項目についての検討も今後の課題である。

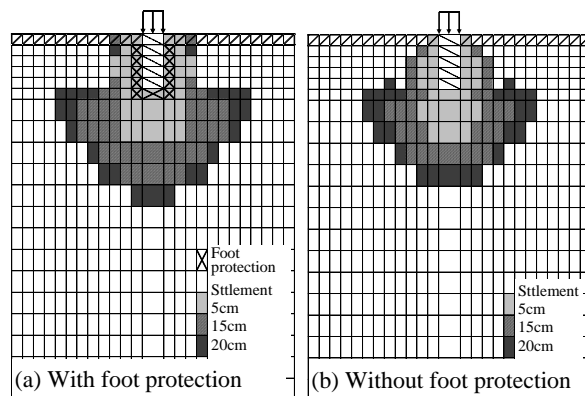


Fig.12 Extent of yield element (residual strength ratio = 1.0).

4. 結言

残留強度を考慮した弾塑性有限要素解析により検討した根固め基礎の条件変化と支持力に関し、得られた結果を要約すると以下となる。

- 1) Terzaghi の支持力公式ではせん断抵抗角がゼロの場合、支持力係数 N_c は破壊モードに影響されないが、弾塑性有限要素解析により推定する支持力は根入れ深さに比例し、残留強度比の影響を受ける。
- 2) 根固め部の強度や根固め部の幅が支持力に与える影響は、大きくない。
- 3) 根固め基礎の支持力は多くの条件に支配されるため、弾塑性支持力解析を利用してその影響を設計段階で把握することが、支持力の的確な把握に繋がる。

参考文献

- 1) テルツァギ・ペック：土質力学 基礎編，星埜和也訳，丸善株式会社，33. 浅いフーチングの支持力，pp.188~195, (1966).
- 2) 土質工学会編：土の強さと地盤の破壊入門，1987.
- 3) 社団法人地盤工学会：弾塑性有限要素法をつかう，地盤技術者のための FEM シリーズ③, (2003).
- 4) 廖紅建，赤石勝，林正夫：不連続面のある珪藻質軟岩の残留強度特性，土木学会論文集，No.529/III-33, pp.103-111, (1995.12).