

飽和粘性土地盤の支持力解析における引張り領域の取扱いに関する一考察

Study on influence of tensile stress zone in saturated clay on ultimate bearing capacity

山栗 祐樹 (金沢大・自然研) 小林 俊一 (金沢大・理工) 西藤 潤 (京都大・工) 松本 樹典 (金沢大・理工)
 Yuki YAMAKURI, Kanazawa University
 Shun-ichi KOBAYASHI, Kanazawa University
 Jun SAITO, Kyoto University
 Tatsunori MATSUMOTO, Kanazawa University
 FAX: 076-234-4644 E-mail: koba@se.kanazawa-u.ac.jp

For metal material models, shear strength does not depend on mean stress. A $\phi = 0$ material such as saturated clay is also the same. For $\phi = 0$ material, even if a mean stress is on tensile stress zone, it will not affect to failure behavior in metal material model. But, previous studies that examined the applicability of the metal material model to the failure behavior of the ground material, haven't been found. In this paper, numerical experiments were conducted, to investigate the influences of tensile stress zone of soil on ultimate bearing capacity, using a rigid-plastic finite element method based on the lower bound theorem.

1. はじめに

浅い基礎の支持力理論は既に多くの理論的研究による知見の集積がある。これらの支持力理論は、もともとは金属塑性論の研究に端を発する。金属材料では、せん断で材料が塑性変形・破壊するモデル、せん断応力による破壊規準 (Tresca 規準)、八面体せん断応力による破壊規準 (von-Mises 規準) を利用する。塑性加工に必要な金属材料の表面に剛体を押し込むボンチ問題の解析解が Prandtl の解である。

Hill の解は Prandtl 解よりも後年になって提案されたメカニズムである。速度場からも明らかなように母材とボンチの間が滑らかな場合に成立する。これら金属材料のモデルでは、せん断強度は平均応力に依存しない。飽和した正規圧密粘土のような $\phi = 0$ 材料でも同様である。そこで金属塑性論に基づく Prandtl の解を粘性土地盤上の浅い基礎の支持力問題に適用し、極限支持力評価に用いるようになった。

さて、これらの支持力理論では、地盤材料の破壊挙動は金属材料のモデルを借用したものである。 $\phi = 0$ 材料では平均応力が引張り領域であっても、モデル上は破壊挙動には影響を及ぼさない。しかしながら、引張り試験で材料強度を測定する金属材料とは異なり、地盤材料 (あるいはコンクリート材料) は圧縮領域で材料強度を測定するため、引張り領域での強度特性には不明点が多い。また、材料の不均一性に起因するバラつきが多く、マクロ的な物性値としての信頼性も低い。

引張り領域の有無が支持力解に与える影響に関する研究は見当たらない。そこで本稿では、著者らの開発した混合型剛塑性有限要素法¹⁾ を利用し、引張り領域の有無と極限支持力の関係について数値実験を行った結果について報告する。

2. 定式化

応力場を未知量とする下界法に基づく剛塑性有限要素法¹⁾ を拡張し、以下の非線形最適化問題を検討する。

$$\text{Find } \max_{\sigma, \alpha, \mathbf{p}} \alpha \quad (1a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} = \alpha \boldsymbol{\Gamma}_0 + \boldsymbol{\Gamma}_c + \mathbf{D}_d^T \mathbf{p} \quad (1b)$$

$$f_i(\boldsymbol{\sigma}_i) \leq 0, \quad \forall i \in V \quad (1c)$$

$$(I_1)_i \leq 0, \quad \forall i \in V \quad (1d)$$

ここに、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力場、 α は荷重係数、 \mathbf{p} はディリクレ反力、 \mathbf{B} は係数行列、 $\boldsymbol{\Gamma}_0$ は基準荷重、 $\boldsymbol{\Gamma}_c$ は一定荷重、 \mathbf{D}_d はディリクレ条件に関する行列である。式 (1b) は空間離散化した力の釣

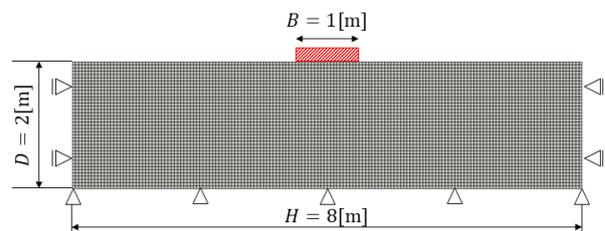


Fig.1 Finite element mesh

Table1 Bearing capacity factor N_c

without $I_1 \leq 0$	with $I_1 \leq 0$	Cox 1962
5.479 (+6.6%)	5.235 (+1.8%)	5.142

Table2 Horizontal bearing capacity q_u [kN/m²]

without $I_1 \leq 0$	with $I_1 \leq 0$	Exact solution
11.452 (+14.5%)	10.090 (+0.9%)	10

合い式、式 (1c) は降伏条件である。式 (1d) が今回新たに追加された応力テンソルの第 1 不変量 I_1 に関する制約条件で、平均応力の意味で引張り領域を許さない条件である。添え字 i は領域内の全ての積分点 (応力評価点) である。

3. 2次元浅い基礎の支持力解析を例にした数値実験

(1) 数値実験条件

自重の影響を無視できる飽和粘性土地盤を対象とする。数値実験は平面ひずみ条件での 3次元解析とし、3次元 6面体 20 節点の 2次アイソパラメトリック要素、また要素内 $2^3 = 8$ 個の積分点による空間離散化を行った。地盤材料は von-Mises モデルで非排水せん断強度は $c_u = 10$ [kPa] を用いた。数値実験に用いた 3次元有限要素メッシュ (節点数: 45803, 要素数: 6400) を図 1 に示す。底面は固定支点、側面はスライダ支点とした。基準荷重として、大きさ 1 [kN/m²] の分布荷重を鉛直下向きまたは水平左向きに載荷した。剛・摩擦なしの基礎を表現するために、基礎の節点に対して鉛直方向の節点変位速度が等しくなるように拘束条件を付加した。

(2) 数値実験結果 (鉛直載荷の場合)

本数値実験で得られた支持力係数 $N_c = q_u/c$ を表 1 に示す。数値解析解の精度は Cox²⁾ による特性曲線法の解と比較した。括弧内の数値は相対誤差を示している。表 1 より、 I_1 に制約条件を課すことで精度が向上することが分かる。

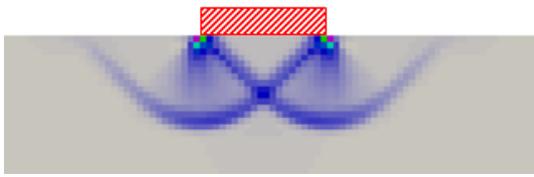


Fig.2 Equivalent strain rate distribution with $I_1 \leq 0$ for vertical load

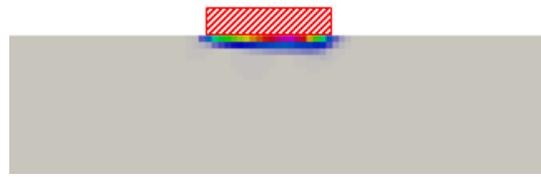


Fig.6 Equivalent strain rate distribution with $I_1 \leq 0$ for horizontal load

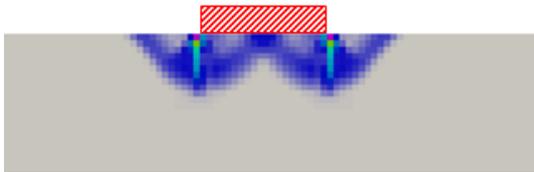


Fig.3 Equivalent strain rate distribution without $I_1 \leq 0$ for vertical load

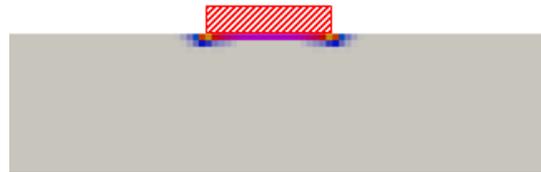


Fig.7 Equivalent strain rate distribution without $I_1 \leq 0$ for horizontal load

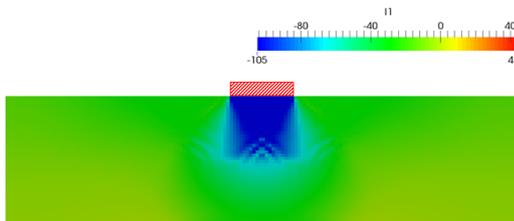


Fig.4 I_1 distribution with $I_1 \leq 0$ for vertical load

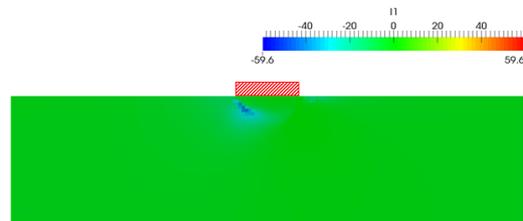


Fig.8 I_1 distribution with $I_1 \leq 0$ for horizontal load

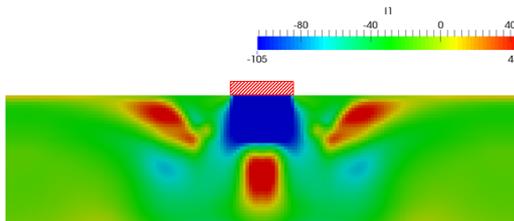


Fig.5 I_1 distribution without $I_1 \leq 0$ for vertical load

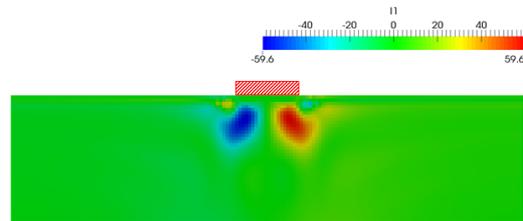


Fig.9 I_1 distribution without $I_1 \leq 0$ for horizontal load

相当塑性ひずみ速度分布を図 2, 3 に示す。 I_1 制約条件の有無によって異なる 2 つの崩壊メカニズム, Prandtl のメカニズム, Hill のメカニズムが現れる。この理由を I_1 分布 (図 4, 5) から考察する。 I_1 の制約がない場合には, 基礎直下および周辺に I_1 の意味で引張り領域が出現する。金属材料は十分に大きな引張強度を有するため特に問題はないが, $\phi = 0$ 地盤材料に過度な引張強度を期待できない。そのため I_1 制約条件を課した Prandtl 解が出現すると考えるのが妥当である。

なお, 本数値実験では基礎底面と地盤を完全に滑らかであると仮定していることに注意されたい。実際の基礎構造物と地盤のインターフェースは完全に固着しているため, 実問題に対するこの仮定の妥当性は別途検討する必要がある。

(3) 数値実験結果 (水平载荷の場合)

数値実験で得られた単位幅当たりの水平極限支持力 q_u を表 2 に示す。水平極限支持力の解析解は, 地盤のせん断抵抗のみ作用するため非排水せん断強度 c_u となる。分布荷重を鉛直方向に载荷した場合と同様, I_1 に制約条件を課することで精度が向上することが分かる。

相当塑性ひずみ速度分布を図 6, 7 に示す。 I_1 制約条件の有無に依らず, 基礎が水平方向に移動する破壊モードが得られる。 I_1 の分布図を図 8, 9 に示す。 I_1 の制約がない場合には, 基礎の右下周辺において, I_1 の意味で引張り領域が出現する。こ

4. おわりに

古典的な支持力理論について, 引張り領域の有無が及ぼす影響を数値実験によって検討した。 $\phi = 0$ 材料の場合, 金属塑性論をそのまま適用すると過度な引張り強度を期待する可能性があることを示した。今後は, 引き続き傾斜荷重や偏心荷重に対する支持力について, 引張り領域の影響を議論する必要がある。また, c, ϕ 地盤のように自重の影響を無視することができない場合についても議論していく。

参考文献

- 1) Kobayashi, S.: Hybrid type rigid plastic finite element analysis for bearing capacity characteristics of surface uniform loading, *Soils and Foundations*, Vol. 45, No. 2, pp. 17-27, 2005.
- 2) Cox, A. D.: Axially symmetric plastic deformation in soils -II -indentation of ponderable soils, *Int. J. Mechanical Sciences*, Vol.4, 371-380, 1962.