偏心及び傾斜荷重を受けた砂地盤上の剛性基礎の極限解析

鹿児島大学工学部 正会員 山本健太郎

<u>1. はじめに</u>

地盤上における基礎は上部構造物からの重力による鉛直荷重のみならず、しばしば、風力、波力、地震力、 裏込め土圧などの水平荷重から生ずるモーメントが原因で偏心及び傾斜荷重を受ける可能性が高いと考えら れる。実務ではそのような荷重を受ける基礎の設計は普通、偏心・鉛直荷重と中心・傾斜荷重の二つの部分に 分けて行われる。本研究では、Sloan によって提案された数値極限解析(上界解析と下界解析)¹⁾を偏心及び傾 斜荷重を受けた砂地盤上の剛性基礎に対しても極限荷重を求めることが可能なように定式化を行った。そして、 現在用いられている設計手法の妥当性を数値極限解析の結果と比較することにより、検証することを目的とし ている。

<u>2. 既存研究</u>

現在まで、数値極限解析は主に Sloan によって、多様な工学的に重要な安定問題に対する設計チャートを描 くために用いられてきた^{1),2)}。現在のところ、数値極限解析を用い、偏心及び傾斜荷重を受けた砂地盤上の剛 性基礎の支持力を調べた研究は見当たらない。

<u>3. 解析手法</u>

本研究では、境界値問題に対して有限要素法による空間離散化を適用し、極限解析を線形計画問題として定 式化を行い、数値解析による手法を用いる。詳細に関しては、参考文献 3)にゆずるものとする。ここでは、数 値極限解析の結果と比較するために有限要素解析⁴⁾も実施もした。最初、静的応力場を設定するために水平地 盤に重力を作用させ、それから極限荷重を求めるために荷重を増分的に与えた。そして、その非線形問題を解 くために Newton-Raphson 法を適用した。

<u>4. 解析結果</u>

下界解析と上界解析用有限要素メッシュ並びに有限要素解析で用いたメッシュの詳細は、参考文献 5)にゆず るものとする。地盤は砂地盤を想定し、そのパラメータは $c_u=0$ 、 $=30^\circ$, 35° , 40° 、 =20 kN/m³と設定し た。基礎幅は B=1 m とし、 q_b は基礎の base における単位面積当たりの荷重を表す。偏心量 e と荷重傾斜角 の符号に関しては、基礎の中心から左側と垂直線から時計回りを正の向きとしている。偏心量、基礎幅比(e/B) と荷重傾斜角()の範囲は、e/B=0, 1/12, 1/6, 1/3、 $=0^\circ$, 5° , 10° , 15° とした。図 - 1 には中心・鉛直荷重に

対する rough な剛性基礎上での支持力係数 N と内部摩擦角 との関係 を示す。ここでは、数値極限解析の結果である下界値、上界値と FEM からの解、並びに Caquot and Kerisel⁶⁾, Meyerhof⁷⁾, Hansen⁸⁾, Michalowski⁹⁾による提案式が比較されている。有限要素メッシュに関 しては、メッシュを十分細かくし、より正確な解を得るために解析領 域が半分のメッシュを用いた。支持力係数 N の提案式に関して、 35°では、Michalowski, Caquot and Kerisel, Meyerhof, Hansen の順に大 きい。下界値と上界値は =25°と 30°の時の Michalowski, Caquot and Kerisel の値を除いて、すべての値を挟み撃ちにすることができた。こ の Michalowski, Caquot and Kerisel による値は =25°と 30°の時に、 他の提案式と比較すると N を大きく評価する傾向があると考えられる。 下界値と上界値の差並びに、Meyerhof と Hansen による解の差は が大 きくなるにつれて、徐々に大きくなることがわかる。また、FEM から



図 - 1 中心・鉛直荷重に対する 支持力係数 N と内部摩擦角 と の関係

キ・ワ・ド:基礎、支持力、極限解析、有限要素法

住所:〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40 鹿児島大学工学部海洋土木工学科, Tel: 099-285-8475, Fax: 099-258-1738

の解は Meyerhof による解と良い一致を示した。図 - 2 には =35°の 時の e/B=0, 1/12, 1/6, 1/3 に対する q_b/ Bと荷重傾斜角()との関係を 示す。縦軸には B で無次元化された極限支持力、横軸には荷重傾斜 角()を示す。図中のプロットは本解析結果からの下界値と上界値、 FEM からの解、並びに Meyerhof⁷⁾, Hansen⁸⁾と本研究からの提案式に よって計算された値を示す。Meyerhof と Hansen は、偏心荷重による 基礎底面幅の減少を考慮した偏心及び傾斜荷重を受ける砂地盤上で の基礎の極限支持力 q_bを以下のように表現した。

$$q_b = \frac{1}{2}\gamma(B - 2e)(1 - \frac{\alpha}{\phi})^2 N_{\gamma} \quad \text{(Meyerhof, 1963)} \tag{1}$$

$$q_b = \frac{1}{2}\gamma(B - 2e)(1 - 0.7\tan\alpha)^5 N_{\gamma} \quad \text{(Hansen, 1970)}$$
(2)

ここに、*B*: 基礎幅、*e*: 偏心量、 : 垂直線からの基礎上に作用する
荷重の傾斜角、 , :砂質土の内部摩擦角並びに単位体積重量、
B-2*e*: Meyerhof⁷⁾ による有効基礎幅、式(1)と(2)の *N* はそれぞれ
Meyerhof⁷⁾と Hansen⁸⁾によって提案された支持力係数である。本研究
では、偏心量が大きい場合にも支持力が解析結果の上界値、下界値の
間に入るように次式を提案した。

$$q_b = \frac{1}{2}\gamma(B - 2.5e)(1 - \tan \alpha)^{2.5} N_{\gamma}$$
(3)

ここに、式(3)の N は式(2)と同様に、Hansen⁸⁾によって提案された支 持力係数である。式(3)の特徴としては、B-2eの代わりにB-2.5eが 用いられている点が挙げられる。図 - 2 から、FEM からの解が大まか に下界値と上界値の中央に位置してくることがわかる。Meyerhof と Hansen からの解は、図 - 2(b)の =0°と図 - 2(c), (d)の =0°, 5°, _{q,'} в 10°, 15°において FEM からの解よりも大きいことがわかる。特に、 図 - 2(d)で示される e/B=1/3 の時には、Meyerhof と Hansen からの解 は =0°, 5°, 10°に対して上界値よりも大きくなっている。また、 図 - 2(a)において =0°の時、本研究における提案式からの解は Hansen からの解に一致しているが、 が増加するにつれて FEM から の解に近づくことが観察される。さらに、図 - 2(b)~(d)を見ると、本 研究における提案式からの解は、Meyerhof と Hansen からの解に比べ て、FEM からの解に類似する傾向を示すことがわかった。

<u>5. 終わりに</u> 数値極限解析か

数値極限解析からの結果である下界値、上界値は正解値を挟み 撃ちにすることができ、他の提案式などと比較した場合にベンチ マークとなることができる。また、Meyerhof と Hansen による提案 式は、偏心量が大きい場合、特に *e*/*B*≥1/3の時、支持力を解析結 果の上界値より大きく評価する傾向があると考えられる。

【参考文献】 1) Sloan, S. W.: Limit analysis in geotechnical engineering, *Modern developments in geomechanics*, C. M. Haberfield, ed., Monash University, Melbourne, Australia, 167-199, 1995. 2) Ukritchon, B., Whittle, A. J. and Sloan, S. W.: Undrained limit analysis for combined loading of strip footings on clay, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 124(3), 265-276, 1998. 3) 山本健太郎: 偏心および傾斜荷重を受けた砂質土地盤における基礎の極限解析, 構造工学論文集 Vol.50A, 2004.3. 印刷中。 4) Abbo, A. J.: Finite element algorithms for elastoplasticity and consolidation, *Ph. D. thesis*, Univ. of Newcastle, Australia, 1997. 5) 山本健太郎: 偏心荷重を受けた砂質土地盤における剛性基礎の極限解析, 第 39 回地盤工学研究発表会,







図 - 2 =35°における q_b/Bと 荷重傾斜角 との関係

2004.7. 投稿中。 6) Caquot, A. and Kerisel, J.: Sur le terme de surface dans le calcul des fondations en milieu pulverulent, *Proc. of 3rd ICSMFE*, Zurich, 1, 336-337, 1953. 7) Meyerhof, G. G.: Some recent research on the bearing capacity of foundations, *Can. Geotech. J.*, 1(1), 16-26, 1963. 8) Hansen, J. B.: A revised and extended formula for bearing capacity, *Danish Geotech. Inst. Bull.*, 28, 5-11, 1970. 9) Michalowski, R. L.: An estimate of the influence of soil weight on bearing capacity using limit analysis, *Soils Found.*, 37(4), 57-64, 1997. 【謝辞】 著者に極限解析のオリジナルプログラムを快く提供し、有益な議論をいただいた Purdue University, Prof. Salgado に謝意を表します。