

偏心荷重を受けた砂地盤上の剛性基礎の数値極限解析

鹿児島大学 正会員 山本 健太郎

1. はじめに

地盤上における基礎はしばしば、風、水圧、土圧などの荷重から生ずるモーメントが原因で偏心および傾斜荷重を受ける。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（鉛直荷重が偏心して作用する）と中心・傾斜荷重（基礎中心に傾斜荷重が作用する）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）<sup>1)</sup>を偏心および傾斜荷重を受けた砂質土地盤上の剛な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。

2. 既存研究

現在までに、数値極限解析は 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<sup>1)</sup>。基礎に対する主な研究としては、Ukritchon ら<sup>2)</sup>は組み合わせ荷重下での不均質な粘性土地盤における基礎の非排水状態での安定性を評価するために数値極限解析を適用した。現在のところ、数値極限解析を用い、偏心および傾斜荷重を受けた砂質土地盤上の剛な基礎の支持力を調べた研究は見当たらない。

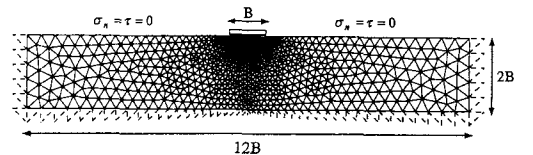
3. 解析手法

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<sup>4)</sup>も実施した。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、その問題を解くために Newton-Raphson 法を適用した。

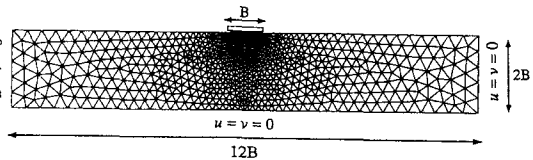
4. 解析結果

図-1 には下界解析並びに上界解析用有限要素メッシュの一例を示す。できるだけ良い解を得るために、基礎端周辺においては十分にメッシュを細かくすることを実施した。左右と下の境界は極限支持力と破壊メカニズムに影響を与えない範囲内で、メッシュの数を増やすためにできるだけ基礎に近くなるように設定した。地盤は砂質土地盤を想定し、そのパラメータは  $c_u=0$ 、 $\phi=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ 、 $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$  と設定した。基礎幅は  $B=1 \text{ m}$  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  $e$  の符号に関しては、Meyerhof<sup>5)</sup>と同様に、基礎の中心から左側を正の向きとしている。偏心量、基礎幅比( $e/B$ )の範囲は、 $e/B=0, 1/12, 1/6, 1/3$  とした。また、図-2 には有限要素解析で用いられたメッシュ、図-3 には  $\phi=35^\circ$  の時の中心・鉛直荷重における有限要素解析からの  $q_b/\gamma B$  と無次元化された垂直変位との関係を示す。より正確な極限荷重を求めるために、multi-increment steps を用いた。

図-4 には様々な内部摩擦角をもつ砂質土地盤に対する



(a) 下界解析のメッシュ



(b) 上界解析のメッシュ

図-1 典型的な有限要素メッシュと境界条件

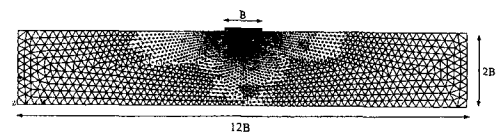


図-2 有限要素解析で用いられたメッシュ

$q_b/\gamma B$  と偏心量、基礎幅比( $e/B$ )との関係を示す。縦軸には  $\gamma B$  で無次元化された極限支持力、横軸には基礎幅  $B$  に対する偏心量  $e$  の比( $e/B$ )を示す。図中のプロットは本解析結果からの下界値、上界値と FEM からの解並びに Meyerhof<sup>5)</sup> と Hansen<sup>6)</sup> の提案式(1)と(2)から計算された値を示す。

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

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

ここに、 $B$ : 基礎幅、 $e$ : 偏心量、 $\alpha$ : 垂直線からの基礎上に作用する荷重の傾斜角、 $\phi$ ,  $\gamma$ : 砂質土の内部摩擦角並びに単位体積重量、 $B - 2e$ : Meyerhof<sup>5)</sup> による有効基礎幅、式(1)と(2)の  $N_\gamma$  はそれぞれ Meyerhof<sup>5)</sup> と Hansen<sup>6)</sup> によって提案された支持力係数である。図-4を見ると、FEM から得られた解がだまかに下界値と上界値の中央に位置してることがわかる。式(1)と(2)によって計算された  $q_b/\gamma B$  は偏心量が大きい場合、 $e/B > 0.2$  ( $\phi = 30^\circ$ ),  $e/B > 0.25$  ( $\phi = 35^\circ$ ),  $e/B > 0.3$  ( $\phi = 40^\circ$ ), 上界値よりも大きいことがわかる。これらの解のみが下界値と上界値によって、挟み撃ちにされていないこともわかる。また、常に Meyerhof による解は Hansen による解よりも大きい。さらに、 $\phi$  が大きくなる時、Meyerhof と Hansen による解の差は、特に  $e/B = 0$  の時に大きいことがわかる。 $e/B$  が増加するにつれて、Meyerhof と Hansen による解の差が徐々に小さくなることも観察された。図-4より、式(1)と(2)は偏心量が大きくなる時、解析結果の上界値より大きな支持力となる傾向が見られた。

## 5. 終わりに

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るので、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  $e/B \geq 1/3$  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. 投稿中。
- 4) Abbo, A. J.: Finite element algorithms for elastoplasticity and consolidation, *Ph. D. thesis*, Univ. of Newcastle, Australia, 1997.
- 5) Meyerhof, G. G.: Some recent research on the bearing capacity of foundations, *Can. Geotech. J.*, 1(1), 16-26, 1963.
- 6) Hansen, J. B.: A revised and extended formula for bearing capacity, *Danish Geotech. Inst. Bull.*, 28, 5-11, 1970.

### 【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。

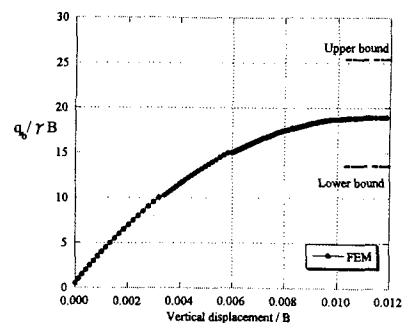


図-3 有限要素解析からの  $q_b/\gamma B$  と無次元化された垂直変位との関係 ( $\phi = 35^\circ$ ,  $e/B = 0$ )

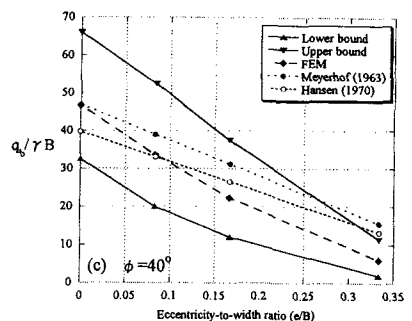
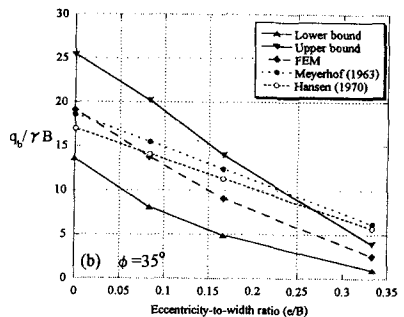
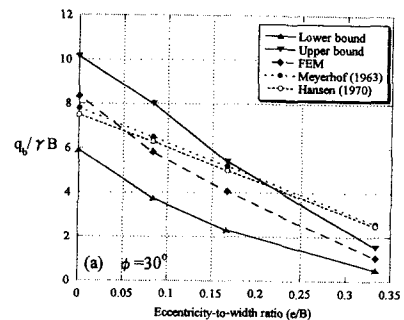


図-4 様々な内部摩擦角に対する  $q_b/\gamma B$  と偏心量、基礎幅比( $e/B$ )との関係 ( $\alpha = 0^\circ$ )