

三次元弾粘塑性有限要素解析による粘土地盤の地盤内応力について

京都大学大学院 学生会員 ○元宗美郷, 矢田啓晃
 フェロー会員 三村衛
 正会員 肥後陽介

1. はじめに

盛土や掘削による外力载荷を受ける実地盤の挙動は三次元的である。特に、関西国際空港基礎地盤の変形のように、排水層の三次元的な透水性が結果に大きく影響する問題では、断面二次元モデルによる解析には厳しい限界があり、三次元的なアプローチが不可欠であることがわかってきている。そこで本稿では、新たに構築した三次元弾粘塑性有限要素コード¹⁾を用いて弾性地盤上に载荷を行う数値解析を実施し、载荷に伴う地盤内応力の理論解との比較によってコードの妥当性を検証する。また、地盤を弾粘塑性体の粘土層とした場合についても同様の数値解析を行い、地盤内応力に対する粘塑性と過圧密の影響について考察する。

2. 弾性体モデルを用いた解析

本研究では二相混合体理論と赤井・田村の方法²⁾に基づき混合体のつり合い式を有限要素法で、間隙水の連続式を有限体積法で離散化した三次元解析コードを用いる。まず、本解析コードで地盤内の応力分布を正しく評価できることを確認するために、地盤表面に帯状荷重を载荷する解析を行い、その結果をブシネスクの解と比較検証する。

図1に解析モデルと境界条件および载荷条件を示す。対称性を考慮して、奥行きは1要素、半断面でモデル化した。境界条件は、モデル底面を完全に固定、奥行き方向に関しては全ての節点で変位を固定し、側端では水平方向の変位も固定している。また、水理境界条件として、モデル上面のみを排水条件、他の表面は全て非排水条件とした。表1に解析用地盤定数一覧を示す。透水係数を大きく設定することにより、完全排水とみなせる条件で解析を行った。载荷は、モデル上面左端から1.6mの範囲に $\Delta p=9.80\text{kN/m}^2$ を瞬時に载荷した。

数値解析の結果得られた载荷荷重に対する増加応力の鉛直成分の割合 $\sigma_z/\Delta p$ のコンター図を図2に示す。

閾値は0.875, 0.750, 0.625, 0.500, 0.375, 0.250, 0.125

の8段階とした。図中の赤線が下式(1)より得られる、各閾値に対応する帯状荷重を想定した場合(図3)のブシネスクの解である。

$$\sigma_z = \frac{\Delta p}{\pi} (2\theta + \sin 2\theta \cos 2\phi) \quad (1)$$

ただし、 $2\theta = \alpha_2 - \alpha_1$ 、 $2\phi = \alpha_1 + \alpha_2$ である。図より、数値解は理論解と概ね一致しており、本解析コードは地盤内応力を正しく表現し得ることが確認された。

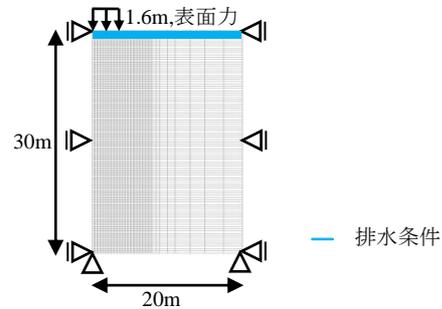


図1. 解析モデル

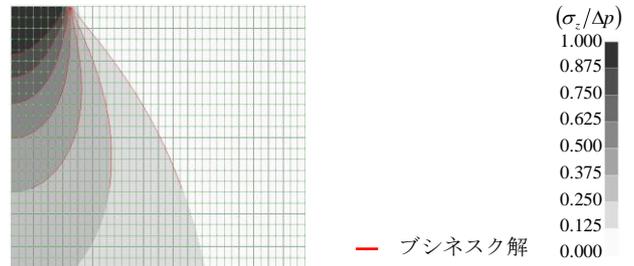


図2. 数値解とブシネスク解の比較

表1. 数値解析用地盤定数一覧(弾性体)

ヤング率 $E(\text{kN/m}^2)$	9.12E+04
ポアソン比 $\nu(-)$	0.33
透水係数 $k(\text{m/day})$	8.64E-05

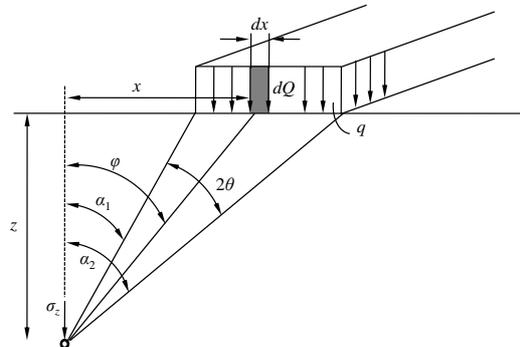


図3. 帯状荷重による地盤内応力

キーワード 数値解析 粘土地盤 弾粘塑性 地盤内応力

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2 棟 224 TEL:075-383-3306 FAX:075-383-3307

3. 構成モデル(弾粘塑性モデル)³⁾

粘性土地盤は弾性的ではなく、時間依存性を伴う塑性変形を起こす。そこで、本節では地盤を弾粘塑性体としてモデル化し、载荷に伴う地盤内応力の挙動について検討する。解析にあたり、粘塑性ポテンシャルの導出において二次圧縮指数や基準体積ひずみ速度といった長期変形挙動を表現するのに適したパラメータを考慮することができる関口によって提案された弾粘塑性モデル³⁾を適用する。同モデルの粘塑性ポテンシャルは次式で表される。

$$F = \alpha \cdot \ln \left[1 + \frac{\dot{v}_0 \cdot t}{\alpha} \exp \left(\frac{f}{\alpha} \right) \right] = v^p \quad (2)$$

ここに、 α :2次圧縮指数、 \dot{v}_0 :基準体積ひずみ速度、 t :経過時間、 v^p :粘塑性体積ひずみであり、 f は応力関数である。

4. 弾粘塑性モデルを用いた数値解析

本節では、弾粘塑性モデルでモデル化した地盤で前節と同様の解析を行う。解析モデルは図1と同じとし、地盤定数としては、一覧を表2に示す関西国際空港基礎地盤の更新統粘土層のものを用いた。排水条件・境界条件は第2節での解析条件と同様に設定した。

まず、過圧密比を1.203に設定し、初期状態が過圧密領域にある条件で、モデル上面左端から1.6mの範囲に $\Delta p=9.8\text{kN/m}^2$ を瞬時に载荷した。その結果得られた $\sigma_z/\Delta p$ の分布を図4(b)に示す。応力増分分布は、ブシネスク解と一致する弾性体に近い圧力球根を示すが、弾性体よりも応力増加範囲が小さくなっている。

次に、比較のために、圧密降伏応力を初期状態と等しく設定することによって、地盤全体を正規圧密状態とし、モデル上面左端から1.6mの範囲に $\Delta p=98\text{kN/m}^2$ を载荷した。解析によって得られた $\sigma_z/\Delta p$ の分布を図5(a)に示す。図5(b)に示す過圧密粘土の応力分布と比べて応力伝播域は浅部にとどまり、水平方向への広がりが大きくなるのがわかる。

5. まとめ

新たに開発した三次元弾粘塑性有限要素解析コードによって、载荷に伴う粘土地盤の地盤内応力特性を検討した。その結果、過圧密地盤では弾性体に対するブシネスク解に近い挙動を示す一方、正規圧密地盤では応力伝播領域が、深さ方向には限定的で浅部にとどまるのに対し、水平方向に大きくなるのがわかった。

表 2. 数値解析用地盤定数一覧(弾粘塑性体)

領域	過圧密領域	正規圧密領域
圧縮指数 λ	0.0405	0.4046
膨潤指数 κ	0.0040	0.0405
初期間隙比 e_0	1.900	
ポアソン比 $\nu(-)$	0.300	
透水係数 $k(\text{m/day})$	8.64E-03	
限界応力比 M	1.400	
過圧密比	1.203	
二次圧縮指数 α	0.00698	
基準体積ひずみ速度 $\dot{v}_0(\text{day}^{-1})$	6.98E-06	
静止土圧係数 K_0	0.540	
透水係数変化指数 λ_k	0.4046	
単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	19.60	

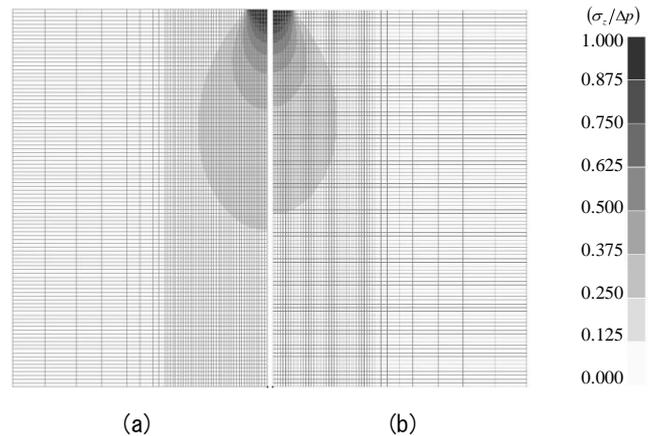


図 4. 地盤内応力(弾性体との比較)

(a)弾性体 (b)弾粘塑性モデル(初期状態:過圧密領域)

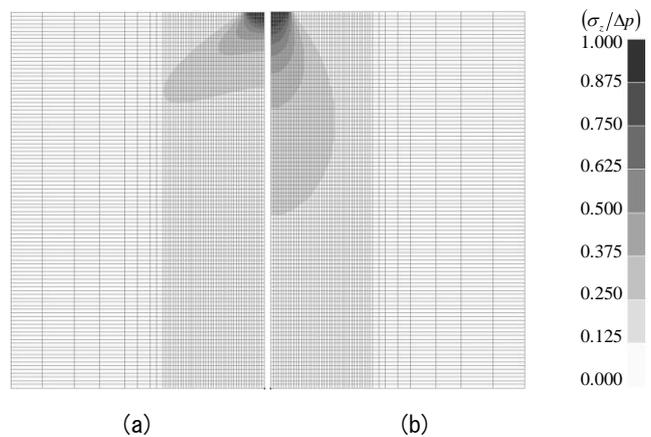


図 5. 粘土地盤における地盤内応力(過圧密領域の有無)

(a)弾粘塑性モデル(初期状態:正規圧密領域)

(b)図4(b)を再掲

参考文献

- 1) 矢田啓晃, 三村衛, 肥後陽介, 元宗美郷: 数値解析による海底地盤の3次元変形挙動評価手法の開発, 地盤工学研究発表会発表講演集, 2015.
- 2) 赤井浩一, 田村武: 弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析, 土木学会論文集, No.269, pp.95-104,1978.
- 3) Sekiguchi, H.: Rheological Characteristics of Clays, Proc.9th ICSMFE, Vol.1, pp.289-292, 1977.