

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

関西国際空港は、大阪湾の沖合 5km に人工島として建設された海上空港で、現在地盤沈下が問題となっている。既往の研究¹⁾では弾粘塑性有限要素解析を用いた長期変形の解析が行われており、二次元の解析では沈下量の実測値とほぼ一致する結果が得られている。今後、地盤全体の変形挙動の予測を行うために三次元での解析が求められている。しかし、三次元での解析は地盤のモデル化が困難であること、計算時間が長いことなどの問題点が挙げられる。そこで、本研究は完全排水条件下で載荷による地盤内応力増分の三次元分布を求めた上で、低次元の圧密沈下解析を行い局所的な沈下量を求める手法を確立することを目的とする。この手法では、完全排水条件とすることにより、過剰間隙水圧の消散を考慮しないため計算時間が短縮できる。本論文では理論解との比較によりプログラムの検証解析を行った上で、関西国際空港地盤の粘土層をモデル化する際に用いている弾粘塑性体で解析を行いその応力増加分布を考察する。

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載荷する解析を行い、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載荷条件を示す。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。載荷は、モデル上面左端から 1.6m に $\Delta p = 0.98 \text{ kN/m}^2$ を瞬時に載荷した。

数値解析の結果得られた載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ている。

3. 構成モデル(関口モデル)³⁾

関西国際空港の建設時の段階的・長期的な載荷の影響を考慮できるため、本研究では粘土層を弾粘塑性体としてモデル化している。また、弾粘塑性構成モデルのうち、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関口モデルを用いて数値解析を行っている。関口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. 弾粘塑性体モデルを用いた解析

本節では、弾粘塑性体モデルを用いて数値解析を行った。解析モデルと境界条件および載荷条件を図 4 に、解析用地盤定数一覧を表 2 に示す。モデル上

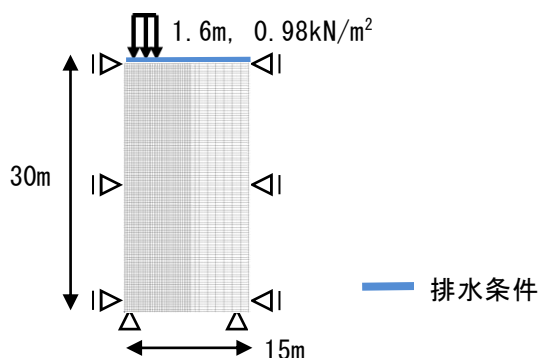


図 1. 解析モデル(弾性体)

表 1. 数値解析用地盤定数一覧(弾性体)

せん断弾性係数(kN/m²)	3.57E+07
ポアソン比	0.33
透水係数(m/day)	1.00E+02

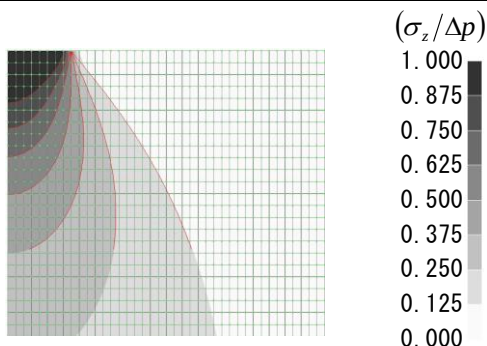


図 2. 数値解とブシネスクの解との比較

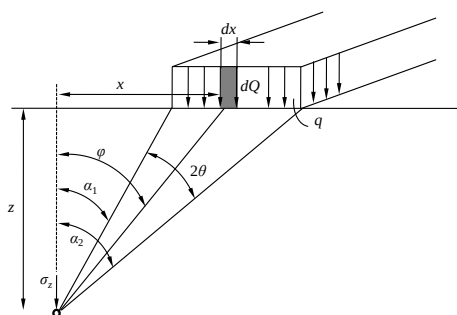


図 3. 帯状荷重による地盤内応力

面左端から 1.6m に $\Delta p=98\text{kN/m}^2$ を瞬時に载荷した。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と弾粘塑性体での数値解を载荷幅 B を目盛として表したものを図 5 に示す。弾粘塑性体では、弾性体に比べ応力増加分布は深さ方向に小さく、水平方向に大きくなることが分かった。また図 5(c) より、弾粘塑性体では、载荷範囲から水平方向に離れた地点で、深部地盤で応力増加が見られる。

5. まとめ

新たに開発した三次元有限要素解析コードによって得られる数値解は弾性体のブシネスク解を正確に再現でき、その妥当性を確認した。また弾粘塑性体

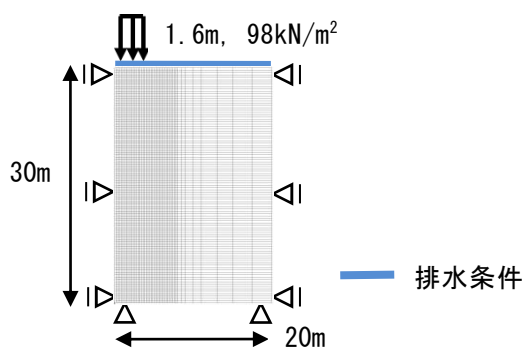
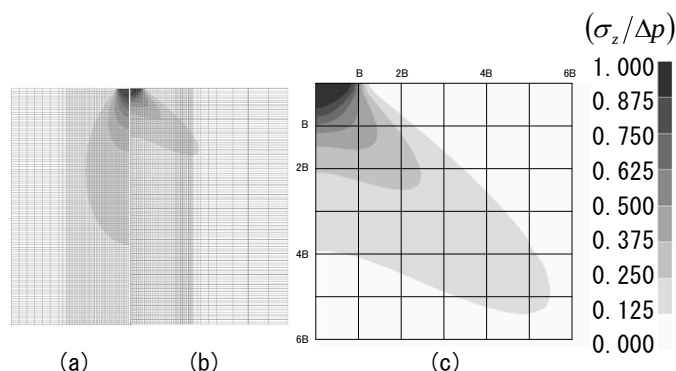


図 4. 解析モデル(弾粘塑性体)

表 2. 数値解析用地盤定数一覧(弾粘塑性体)

圧縮指数 λ	0.3063	静止土圧係数 K_0	0.583
膨潤指数 κ	0.0306	せん断剛性係数 G_0 (kPa)	716.473
二次圧縮指数 α (day ⁻¹)	0.0068	圧密降伏応力 p_c (kPa)	(初期応力と同値)
基準体積ひずみ速度 v_0 (day ⁻¹)	7.27E-06	初期間隙比 e_0	1.252
限界応力比 M	1.200	透水係数 k_0 (m/day)	1.000E+02
ポアソン比 ν	0.3684	透水係数変化指数 λ_k	0.3063



(a)弾性体 (b)弾粘塑性体 (c)载荷幅を B とした時の地盤内応力増分の鉛直成分分布

図 5. 地盤内応力増分の鉛直成分分布

に対する同様の解析により、変形を無視できない材料に対しては、载荷応力の影響範囲が深度方向には狭く、側方方向には広がることがわかった。

参考文献

- 1) Mimura, M. and Jeon, B.: Numerical Assessment for the behavior of the pleistocene marine foundations due to construction of the 1st phase island of kansai international airport, *Soils and Foundations*, Vol. 51(6), 2011.
- 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, 土木学会論文報告集, No.269, pp.95-104, 1978.
- 3) Sekiguchi, H., Nishida, Y., and Nakai, E.: "Analysis of partially-drained triaxial testing of clay", *Soils and Foundations*, Vol. 21(3), 1981.