

### III-71 カムクレイモデルを用いた正規圧密粘土地盤の支持力解析

名古屋大学 学 O 大塚 悟  
名古屋大学 正 浅岡 顕

#### 1. はじめに

カムクレイモデルを用いた正規圧密粘土地盤の支持力解析を考察する。最初に地盤の全域で限界状態を想定した極限解析を行うことは、不均質なMises材料に対する極限解析と等価なことを確認する。

つぎに、その「不均質」のありようはいわゆる非排水支持力、部分排水支持力、排水支持力で異なることを言いそれぞれの計算手法を与える。そしてこの報文では特に内形基礎の非排水支持力の計算事例を基礎体が剛な場合と柔な場合とに分けて示し、地盤内部での破壊時過剰水圧分布も与える。最後に考察する。

#### 2. 限界状態での塑性流れと不均質Mises体

カムクレイの降伏関数は限界状態勾配 $M$ 、ダイレイタンス係数 $D$ 、硬化パラメータ $P'_0$ を用いて、

$$f = MD \ln \frac{P'}{P'_0} + D\eta, \quad \eta = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{S_{ij} S_{ij}}{P' P'}} \quad P': \text{平均有効応力}, S_{ij}: \text{偏差応力} \quad (1)$$

で表される。これに関連流れ則を適用して塑性ヒズミ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^P$ が得られるが、 $\dot{\epsilon}_{ij}^P \rightarrow \infty$  (破壊)となる条件として $\partial f / \partial P' = 0$ を与えると、 $\eta = M$  (破壊条件式, 限界状態式) (2)

が得られる。この条件では同時に $\dot{\epsilon}_v^P = 0$ となっていて $\dot{\epsilon}_{ij}^P$ は実は不定になるが、各成分間の速度の比率は $S_{ij}$ の比率に比例することがわかる。すなわち $\dot{\epsilon}_{ij}^P$ の方向は $S_{ij}$ の方向と一致し、

$$\dot{\epsilon}_{ij}^P = H \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = H \left( \frac{3D}{2P'^2 \eta} \right) S_{ij} \quad (3)$$

式(2)を見るとあたかもExtended Mises 則のように見えるが、式(3)で表される塑性流れはMises 材料の塑性流れに一致している。従って式(2)は、Mises 強度定数 $\sigma_s^2 = S_{ij} S_{ij}$ を $P'$ の地盤内分布に応じて分布させた不均質Mises体の解析を要求していることがわかる。この点をもう少し詳しくつぎに調べる。

#### 3. 正規圧密粘土地盤の極限解析

上で述べたことに従えば、地盤の全域で限界状態を想定する極限解析は不均質Mises体の極限解析と同じであり、これは剛塑性有限要素法によって2、3次元を問わず容易にしかも確実にすることができるといえる。

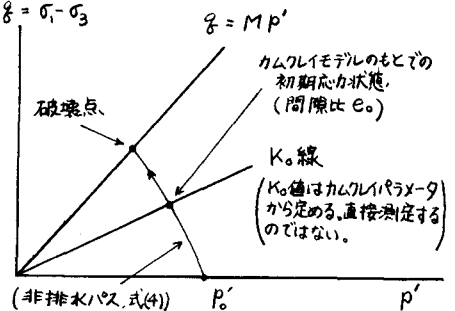
(1) 非排水支持力解析: 載荷前の地盤が非排水で挙動する時、 $\bar{\epsilon} = \sigma_1 - \sigma_3$

右の図に示したパラメータ $P'_0$ 、 $e_0$ を用いて応力は

$$\frac{\lambda}{(1+e_0)D} \ln \frac{P'}{P'_0} + \eta = 0 \quad (\text{非排水条件式}) \quad (4)$$

を満足する。これと式(2)から $P'$ を消去することができてMises 強度定数 $\sigma_s^2$ は次式のように $P'_0$ の地盤内分布に応じて与えればよいことがわかる。(パラメータ $P'_0$ の室内土質試験による決定法は省略)

$$\sigma_s^2 = S_{ij} S_{ij} = \frac{2}{3} \left\{ M P'_0 \exp(-\lambda) \right\}^2, \quad \lambda = 1 - K/\lambda \quad (5)$$



この不均質Mises体の極限解析から求まる平均応力 $P$ と、式(5)→式(2)から求まる $P'$ との差 $P - P'$ から過剰間隙水圧分布を求めることができる。計算事例は後に示す。

(2) 排水支持力解析: 非排水支持力解析における式(4)に相当するものは、簡単に、

$$P' = P \quad (\text{排水条件式}) \quad (6)$$

解析の手順は以下の逐次近似法によるが、これの第1式と第2式の間で式(6)が用いられる。

$$P(x)_n = \text{RPFEM} [\sigma_0^2(x)_{n-1}], \quad \sigma_0^2(x)_n = \frac{2}{3} (M \dot{P}'_n(x))^2 \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

ここにRPFEMは強度分布 $\sigma_0^2(x)$ のもとで剛塑性有限要素法によって平均応力の地盤内分布を求める演算子。イテレーションの各回で求まる支持力値は指数関数的に収束することを、経験的に、知っておりこれを逆用すると計算時間はすこぶる短縮する。

(3) 部分排水支持力解析: 例えば著者らによる文献<sup>(2)</sup>を参照。

以上で全域境界状態の仮定が妥当なものであるかどうか、変形解析の極限と比較した事例として例えば著者らによる文献<sup>(3)</sup>を挙げる。それによれば両者は良い一致を示している。剛塑性解析の特筆すべき利点は計算の確実性にある。

#### 4. 円形基礎を支える粘性土地盤の非排水支持力

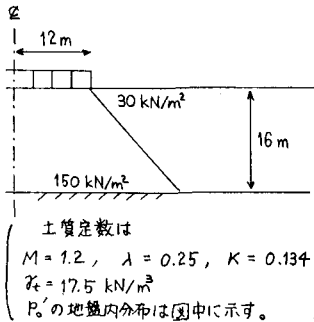
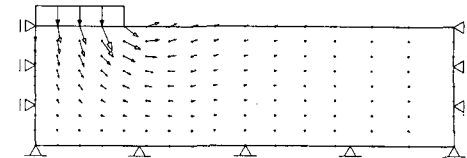
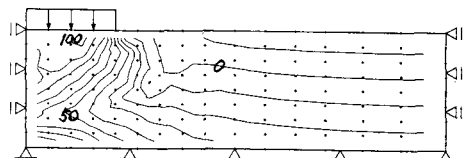


図1 対象地盤の境界条件と土質定数

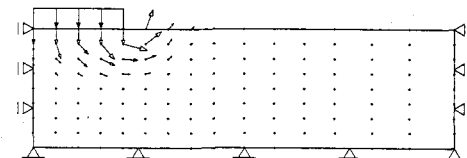
本章では正規圧密粘土地盤を不均質Mises地盤にみたてて円基礎に対する非排水支持力を算定し、破壊時の地盤状態(過剰水圧分布)を明らかにする。対象とする地盤および土質条件は図1に示す。ここでは基礎底面が柔らかな場合(応力境界値問題)と硬い場合(変位速度境界値問題)について剛塑性有限要素解析を行った。図2, 図3は解析結果である。図2に示すように変位速度に制約があると破壊メカニズムも制約され、従って極限支持力は大きくなる。この破壊メカニズムの制約による影響は図3に示す過剰間隙水圧分布にも顕著な相違となって現れている。詳細な考察は省略する。



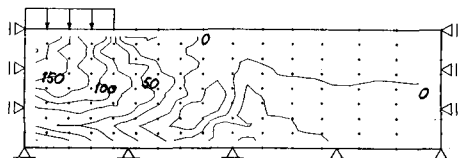
(a) 応力境界値問題 ( $\gamma_f = 115 \text{ kN/m}^2$ )



(a) 応力境界値問題



(b) 変位速度境界値問題 ( $\gamma_f = 160 \text{ kN/m}^2$ )



(b) 変位速度境界値問題

図2 破壊時の変位速度図

図3 破壊時の過剰水圧分布(単位:  $\text{kN/m}^2$ )

#### 5. おわりに

異方圧密状態を初期値にとる克明な構成式(関口太田モデルのこと)に従えば、例えば非排水強度について言うと、 $(\sigma_{ij}, \sigma_{ij})_{\text{failure}}$ は $(\sigma_{ij}, P)_{\text{failure}}$ と $(\sigma_{ij}, \dot{P})_{\text{initial}}$ のふたつの応力状態に依存し式(5)のようではない。勿論、式(3)は望むべくもない。すなわちこの構成式に忠実な $(\sigma_{ij}, \sigma_{ij})_{\text{failure}}$ を与える応力状態 $(\sigma_{ij}, \dot{P})_{\text{failure}}$ をMises材料からiterativeに求めることはできても、塑性流れの方向は正解とは多少のずれを生じる。この考察はここでは省略した。

(参考文献) (1) Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi, T. (1984): Limit Analysis of Soil Structure by Rigid Plastic Finite Method, Soils and Foundations, vol. 24, No. 1, p.p. 34-42. (2) 浅岡 大場 悟 (1986): 粘土地盤の極限荷重に及ぼす部分排水効果, 第21回土質工学研究発表会. (3) Asaoka, A. and Otsuka, S.: The Analysis of A Normally Consolidated Clay Foundation under Embankment Loading, Soils and Foundations (to appear).