

京都大学工学部

赤井 浩一

京都大学工学部

○ 田村 武

1. はじめに 粘土地盤の変形-応力解析を行うのに種々の方法が提案されているが、有効応力にもとづいた構成式を用いていわゆる Biot の圧密方程式を解くのが最も妥当なものと考えられる。むしろ、方程式の複雑さから数値解析によるざるをえないが、より現実的な変形-応力の時間的推移が追えるという意味で、現在のところこの方法にかわるものはない。本報告では、飽和土の構成式として太田らのもの、数値計算法として Christian の方法を採用し、主として非排水・排水（圧密）時における応力経路に着目して本手法の有効性、ダイレイタンシーの効果および塑性域・破壊域の発達について考察する。

2. 応力-ひずみ関係 太田らは塑性状態を維持する飽和土の固けき比の変化が圧密による成分とダイレイタンシーによる成分との代数和で求まるとして式(1)なる状態曲面を定義した。また、膨潤中では弾性状態にあると考えられることから式(2)なる弾性壁を定め、式(1)(2)の表す曲面の交線と $\sigma_m - \tau_{oct}$ 面に射影したものを降伏曲面(3)として求めた。これは等方圧密された飽和土に対する式であり、Roscoe が別の考え方から求めたものと完全に一致している。ここでは K_0 -圧密された地盤にもこれを適用し、以下に定める応力-ひずみ関係の基礎とする。

$$e - e_0 + \lambda \ln \frac{\sigma_m^*}{\sigma_{m0}^*} + \mu (1 + \tilde{e}_0) \frac{\tau_{oct}}{\sigma_m^*} = 0 \quad (1)$$

$$e - e_0 + \kappa \ln \frac{\sigma_m^*}{\sigma_{m0}^*} = 0 \quad (2)$$

$$f = \frac{\tau_{oct}}{\sigma_m^*} - \frac{\lambda - \kappa}{\mu (1 + \tilde{e}_0)} \ln \frac{\sigma_m^*}{\sigma_{m0}^*} = 0 \quad (3)$$

 e : porosity e_0, σ_{m0}^* : integral constants f : yield function σ_m^* : effective mean principal stress τ_{oct} : octahedral shear stress $\lambda, \kappa, \mu, \tilde{e}_0$: material constants

一般に、降伏曲面とそれに続く後続降伏曲面の決定法すなわち硬化法則が与えられた場合、任意の弾塑性応力-ひずみマトリックス D^E に対して、増分的な弾塑性応力-ひずみ関係式(4)を表現するマトリックス D^{EP} が式(5)のようにして定まる。本報告では、弾性壁内では等方弾性を仮定し、膨潤定数 κ より決定される体積弾性定数とポアソン比 $\nu (=1/3)$ を与えることにより非線形の Lamé 定数 $\tilde{\lambda}$, $\tilde{\mu}$ を式(6)のようにして求めた。

$$\{ d\sigma \} = [D^{EP}] \{ de \} \quad (4)$$

$$[D^{EP}] = [D^E] - \frac{[D^E] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} [D^E]}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} [D^E] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} - \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left(\frac{\partial \sigma_m^*}{\partial e} \right) \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\lambda} &= \left(\frac{1+e}{\kappa} \right) \sigma_m^* - \frac{2}{3} \tilde{\mu} \\ \tilde{\mu} &= \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \left(\frac{1+e}{\kappa} \right) \sigma_m^* \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

3. 破壊時の応力-ひずみ関係 z -方向を拘束した平面ひずみ条件下においては τ_{xz} , τ_{yz} は恒等的に

$$\begin{aligned} 0 \text{ となるが、とくに破壊時において式} \quad \begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \\ d\sigma_z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \tilde{\lambda} + 2\tilde{\mu} & \tilde{\lambda} & 0 \\ \tilde{\lambda} & \tilde{\lambda} + 2\tilde{\mu} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\lambda} + 2\tilde{\mu} \\ \tilde{\lambda} & \tilde{\lambda} & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} de_x \\ de_y \\ d\tau_{xy} \\ de_z \end{Bmatrix} \\ &\quad - \frac{2\tilde{\mu}}{3\tau_{oct}^2} \begin{Bmatrix} s_x s_x & s_x s_y & s_x \tau_{xy} \\ s_y s_x & s_y s_y & s_y \tau_{xy} \\ \tau_{xy} s_x & \tau_{xy} s_y & \tau_{xy} \tau_{xy} \\ s_z s_x & s_z s_y & s_z \tau_{xy} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} de_x \\ de_y \\ d\tau_{xy} \\ de_z \end{Bmatrix} \quad (7) \end{aligned}$$

における破壊域では σ_m^* , τ_{oct} 一定のもとで応力の再配分が行われているにすぎない。ただし、太田, Roscoe の原論文ではせん断弾性定数を考えていないため、破壊時にはせん断変形が無限大になるが、ここではポアソン比 ν を導入した結果、破壊時でも解が不安定にならず、単に σ_m^* , τ_{oct} が不変であるだけである。

4. 数値計算例と考察

横48m, 深さ24mの粘土地盤をFig.1のように35個の要素に分割しFEMで解析を行った。境界条件として左右端お

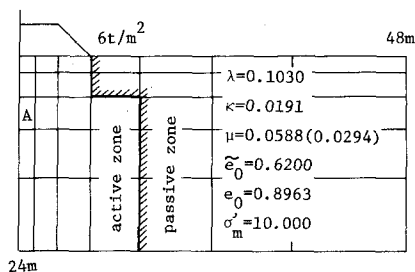


Fig.1

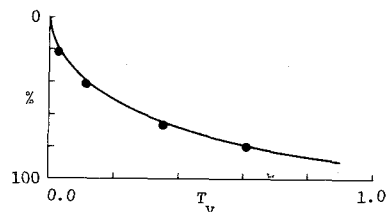


Fig.2

よび下端は滑らかで剛とし, 地表面には荷重として最大6t/m²の盛土を想定した。初期条件としては自重によるK₀圧密が完了した状態を变形の基準とした。なお, 地表面付近の強度を増すため垂直応力は3mの上載があるものとして算定した。計算にあたって非排水時の荷重を10等分し, 排水時は時間間隔を29ステップに分割した。圧密時の計算にはChristianの方法を用いているが, 線形弾性を仮定した一次元圧密に対する理論解の圧密度曲線と数値解がFig.2に示されている。これから計算値の誤差は約3%以内であることがわかる。本報告では初期状態などを以下の4つの場合に分けて非線形問題を解析した。

- Case 1: 正規圧密 (μ =大) Case 2: 正規圧密 (μ =小)
Case 3: 過圧密 (O.C.R.=小) Case 4: 過圧密 (O.C.R.=大)

Fig.3にはFig.1に示した要素Aにおける有効応力, 全応力径路が非排水径路の理論曲線とともにCase 1~4についてそれぞれ示されている。Case 4は非線形等方弾性であって非排水径路は τ_{oct} 軸に平行であり, 圧密径路は τ_{oct} を増加させるような曲線である。他の場合における非排水径路はほぼ完全に理論曲線に合致しており, 圧密開始とともに σ'_m が増加するが, μ の大きいものほど勾配が小さくなる。これは圧密に含まれる塑性的な体積圧縮が, 拘束応力 σ'_m が減少するに伴って τ_{oct} をいったん大きくするが, μ の大きなものは再びダイレイタンスーによってせん断エネルギーを減少しようとして τ_{oct} の値が小さくなる結果と考えられる。よってみかけ上, 弾性モデルと μ の大きいダイレイタンスーモデルとは圧密中同程度の勾配をもつ。

Fig.4にはCase 3において非排水条件のもとで盛土荷重を増大しつづけた場合に発生していく塑性域, 破壊域が斜線および二重斜線で記されている。過圧密という条件下では, それらの発達は過圧密比などに依存するが, 乾燥側と湿潤側の境界付近に初期応力 σ'_m のある第2層が最も早く破壊し, その後順次下へと成長していく。実際の盛土では最下段へ至るまでに崩壊するであろうが, 安定についての予測を立てる上でこれらの結論は意義深いものと思われる。

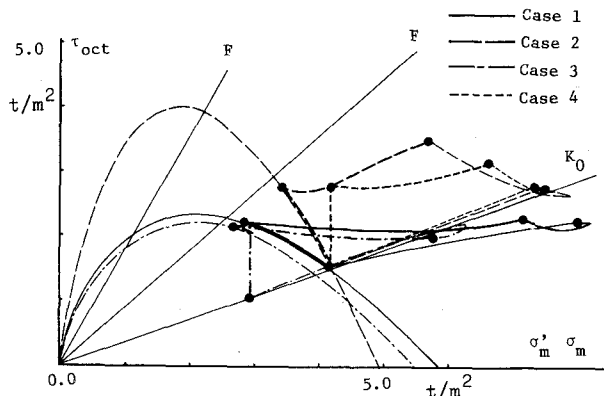


Fig.3

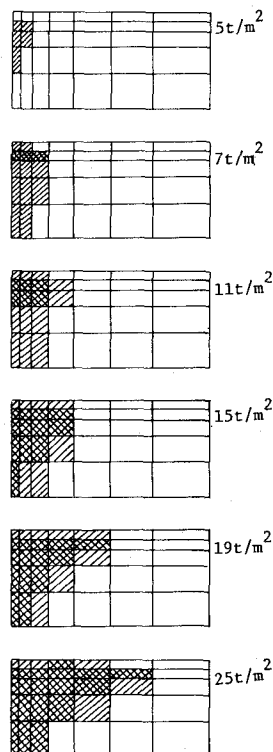


Fig.4