

ひずみ軟化地盤材料の構成式に関する研究

鳥取大学工学部 正会員 清水正喜
鳥取大学大学院 学 員 ○ 中谷政利

1. はじめに

ひずみ軟化地盤材料の挙動を表現できる構成式はいくつか提案されているが、有効応力で記述したものは少ない。本報告は、Cam Clay及び修正Cam Clayモデルの、ひずみ軟化材料への適用性について検討するものである。すなわち、それらのモデルによって、礫質不攪乱まき土の応力-ひずみ挙動を予測し、実際の挙動と比較検討する。以下 $\{\cdot\}$ は6行1列の列ベクトル、 $\langle\cdot\rangle$ は1行6列の行ベクトル、 $[\cdot]$ は6×6のマトリックスを表す。

2. 弾塑性応力-ひずみ増分関係

全ひずみ増分 $\{e\}$ は弾性ひずみ増分 $\{e^e\}$ と塑性ひずみ増分 $\{e^p\}$ の和であると仮定する。弾性ひずみ増分と応力増分 $\{\sigma\}$ の関係は、弾性マトリックス $[D^e]$ を介して $\{\sigma\}=[D^e]\{e^e\}$ で与えられる。ここに $[D^e]$ の成分はせん断弾性係数 G 及び体積弾性係数 K で表されるものであるが、本研究では G 及び K は応力の関数である。塑性ひずみにより硬化(軟化)するような負荷関数 F は一般に $F=F(\{\sigma\}, \{e^p\})$ と書くことができる。応力空間における負荷曲面は $F=0$ で与えられる。関連流れ則と塑性降伏継続条件より、一般的弾塑性応力-ひずみ・増分関係は $\{\sigma\}=[D^{ep}]\{e\}$ となる。ここに、 $[D^{ep}]=[D^e]-\langle a\rangle[D^e]\langle a\rangle-\langle b\rangle\{a\}^{-1}\cdot([D^e]\{a\}\langle a\rangle[D^e])$ 、 $\{a\}=\langle\partial F/\partial\sigma_{11}, \partial F/\partial\sigma_{22}, \partial F/\partial\sigma_{33}\rangle^T$ 、 $\langle b\rangle=\langle\partial F/\partial e_{11}, \partial F/\partial e_{22}, \partial F/\partial e_{33}\rangle$ 。

Cam Clay及び修正Cam Clayモデルの負荷関数¹⁾は、

$$F = F(p, q, p_c) = q/p + M \cdot \ln(p/p_c) \cdots \text{Cam Clay} \quad (1)$$

$$(q/p)^2 + M^2(1-p_c/p) \cdots \text{修正Cam Clay} \quad (2)$$

ここに、 p は、有効応力の1次不偏量； q は、偏差応力の2次不偏量の平方根； p_c は、硬化パラメータであり、塑性体積ひずみ v^p と、次の関係がある。 $p_c = p_{c0} \cdot \exp(\beta \cdot v^p)$ 、 $\beta = (1+e)/(\lambda - \kappa)$ 。 λ, κ は $e - \ln p$ 面上での等方圧縮及び、膨潤(再圧縮)指数である。又、 p_{c0} は、 p_c の初期値であって、初期降伏曲線の大きさを表す。 M は、Critical Stateの応力比。これらのモデルにおいて、弾塑性・応力-ひずみ・増分マトリックス $[D^{ep}]$ を構成するためには、 $\lambda, \kappa, p_{c0}, M$ の4つのパラメータが必要である。

3. 礫質不攪乱まき土の排水せん断挙動の予測

3. 1 パラメータの決定

図1、図2は、礫質不攪乱まき土の側圧一定の排水三軸圧縮試験の結果²⁾である。これらの挙動を予測するために必要なパラメータの決定方法について述べる。尚、図1に示すピークまでは弾性的であるとした。

・弾性的性質 実験より、体積弾性係数 K 及び、せん断弾性係数 G は、それぞれ次式で評価できる： $K = 400 \cdot p$ ； $G = 110 \cdot \sigma_r + 23000$ [kpa]

・Critical State応力比 M は、残留状態における強度定数($\phi' = 31.3^\circ$)より $M = 1.26$ とした。

・ κ は、図2の $e - \log p$ 関係のピークまでの直線部分の勾配より決定した。一方、 λ は、本来等方圧縮試験を行って決めなければならないが、行っていないので、ここでは、図2のピーク以後の直線的部分の勾配から決定した。

・ p_{c0} は、初期降伏曲線の大きさを表す。初期降伏曲線は、(1)、(2)式で、 $v^p = 0$ 、 $F = 0$ として得られる。その時、Cam Clayモデルでは q/p と $\log p$ とが、修正Cam Clayモデルでは $(q/p)^2$ と $1/p$ とが、それぞれ直線となる。応

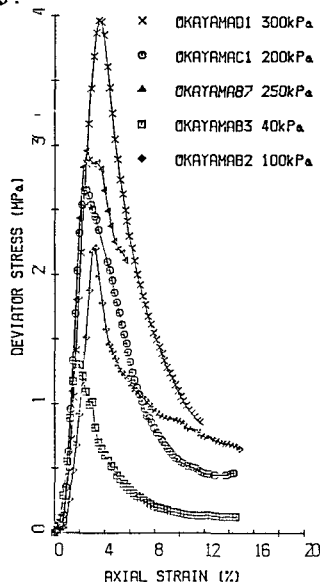


図1：軸差応力～軸ひずみ関係

力-ひずみ関係のピークではじめて塑性に達すると仮定しているので、ピーク時の応力は $F=0$ の関係を満す。図3は、CamClayモデルを適用するために応力-ひずみ関係のピーク時の応力状態について、 q/p と $\log p$ の関係をプロットしたものである。実験値のばらつきのために、すべての供試体にたいして、ひとつの初期降伏曲線が定まらない。そこで、各供試体に対して、各モデルを適用して決定される p_{co} の値の平均値を、計算上の p_{co} とした。Cam Clayモデルでは、 $p_{co} = 6180(\text{kPa})$ 、修正Cam Clayモデルでは、 $p_{co} = 5264(\text{kPa})$ である。

3. 2 計算値と実験値との比較

Cam Clayモデルの結果について示す。図4は、図1に対応する計算による $q-e$ 関係である。図5は、図2に対応する計算による $e-\log p$ 関係である。これら図には、側圧40(kPa)の場合の結果を示していない。それは、計算によって、ひずみ軟化を示さなかったからである。この理由については今後の課題としたい。図4と図1を比較すると、計算値は、大きい側圧で行われた実験のピーク応力を過小に評価し、逆に小さい側圧で行われた実験のそれは過大に評価している。これは、 p_{co} の決定に際して、先に述べたように平均値をとったためである。しかし、ひずみ軟化の挙動はかなりよく表せている。図5と図2を比較すると、ピーク後の体積変化挙動に若干のずれはあるものの、かなり良い一致が見られている。

4. おわりに、

礫質不攪乱まき土のように、典型的な弾性-ひずみ軟化塑性型の材料にたいしては、Cam Clayと修正Cam Clayモデルが適用可能であることがわかった。ただし、 p_{co} の値によっては、正しくひずみ軟化を示さない応力状態の範囲がある。材料の弾性的性質とも関連があると思われる。今後の課題として残した。

参考文献

- 1) Roscoe & Burland(1968):On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay, Eng.Plasticity, Cambridge Univ. Press,pp.535-609.
- 2) 清水, 岡田(1986):礫質不攪乱まき土の三軸排水せん断特性,第21回土質工学研究発表会,pp.475-478

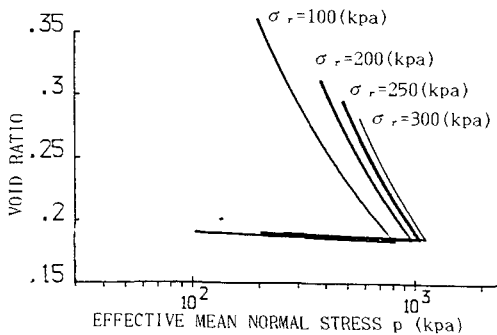


図5 せん断中の間隙比と平均有効応力の関係

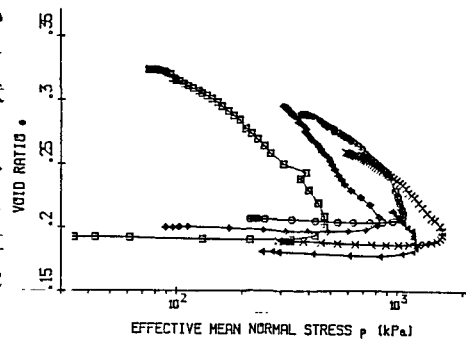


図2: せん断中の間隙比と平均有効応力の関係

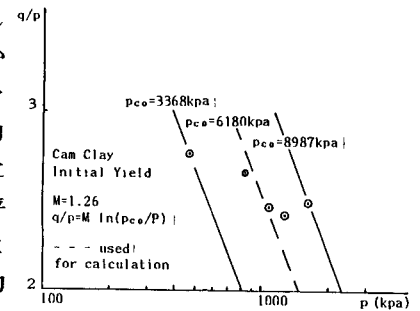


図3 応力-ひずみ関係のピーク時の応力状態

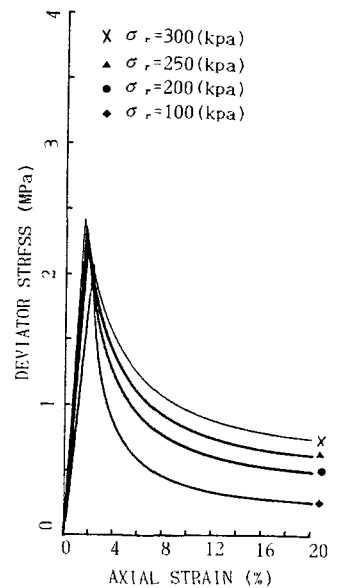


図4 軸差応力-軸ひずみ関係