

III-202

粘性土の構成則(Cam-Clay Model)に関する実験的考察

法政大学工学部 学生会員 ○ 石井靖人

法政大学工学部 正会員 草深守人

御大林組

坪井伸一

御鉄建建設

由布壮一郎

1. 研究目的:

一般に、有限要素法により地盤の力学問題を解析する場合、土の応力-ひずみ関係を規定する構成則が解の妥当性を大きく左右する。本文では、Cam-Clay Model について必要なすべてのパラメータをごく一般的な一次元圧密試験と三軸圧縮試験(伸張試験等の特殊な応力径路を用いない)によって決定した場合、このモデルが土の応力-ひずみ関係をどの程度表現し得るか検討する。

2. 実験概要:

試験は、CH級の正規圧密粘土に対して、三軸 $\overline{CU}$, $K_a - \overline{CU}$, CD 圧縮試験及び一次元圧密試験を実施した。図-1は三軸圧縮試験から得られた応力-ひずみ関係の一例を示したものであるが、この図から、せん断破壊時における正確なピーク強度を判断する事は困難である。そこで、図-2に示すように全ての三軸圧縮試験結果を $p-q$ 図(平均圧力 $p = (\sigma_1' + 2\sigma_2')/3 = J_1/3$, 偏差応力 $q = \sigma_1' - \sigma_3' = 3\sqrt{J_2D}$)上にプロットして得られる応力径路が限界状態線に接する点をもって破壊と仮定する事にした。

図-3は一次元圧密試験から得られた $e-\log p$ 曲線であり、正規圧密過程と過圧密過程の $e-\log p$ 曲線の勾配は、それぞれ圧縮指数 $C_c = 0.243$, 膨張指数 $C_s = 0.091$ である。

3. Drucker-Prager Modelの材料パラメータの決定と考察:

Drucker-Prager Modelの破壊規準は次式で定義される。

$$f = \sqrt{J_2D} - \alpha J_1 - k = 0$$

ここで、 α, k は材料パラメータ、 J_1 は応力テンソルの第一不変量、 J_2D は偏差応力テンソルの第二不変量である。実験値の破壊強度を図-2の $p-q$ 図上で判定し、 $(J_1 - \sqrt{J_2D})$ 空間にプロットした結果を図-4に示す。この図より、圧縮状態での粘性土の破壊規準は Drucker-Prager Model により十分表現可能であると思われる。ただし、このモデルでは破壊に至るまでの連続的な降伏を表現する事が不可能である事、塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}^p$ は破壊包絡線上で、塑性体積ひずみ増分 $d\varepsilon_v^p$ が膨張方向に生じる事などの理由により、関連流れ則を仮定する限り、緩い砂や正規圧密粘土には適用できない事は明らかである。

4. Cam-Clay Modelの材料パラメータの決定:

このモデルは、限界状態(Critical State)理論を主要概念とする弾塑性モデルである。降伏規準は、せん断中の体積変化量 ε_v

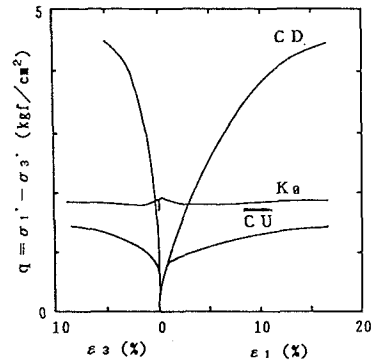


図-1 偏差応力-ひずみ関係

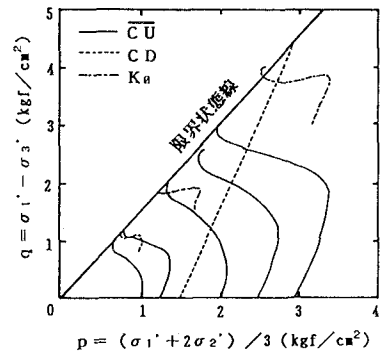


図-2 $p-q$ 応力径路

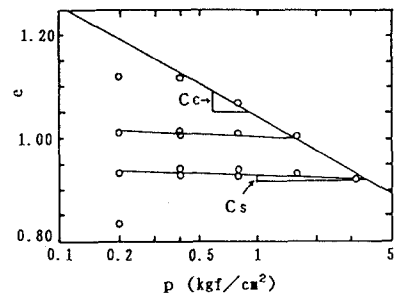


図-3 $e-\log p$ 曲線

が破壊後一定となりせん断ひずみ ε_s のみ累積する限界状態線と、限界状態に至るまでの平均圧力 p と偏差応力 q によって定義される移動降伏曲面で組み立てられている（図-5参照）。このモデルでは圧密履歴やせん断前の間隙比 e_0 によらず、平均圧力 p と偏差応力 q 及び間隙比 e の間に一義的な関係を仮定し、限界状態線及び移動降伏曲面を以下のように定義する。

$$\text{全間隙比増分} : d e = \lambda d p / p$$

$$\text{弾性間隙比増分} : d e^e = -\kappa d p / p$$

$$\text{限界状態線} : q = M p$$

$$\text{移動降伏曲面} : f = M^2 p^2 - M^2 p_0 p - q^2 = 0$$

ここで、 λ, κ, M は材料パラメータである。 λ, κ に関しては図-3の $e-\log p$ 曲線から得られる圧縮指数 C_c と膨張指数 C_s を用いて $\lambda = C_c / \ln 10 = 0.106$ 、 $\kappa = C_s / \ln 10 = 0.040$ 、 M に関しては図-2の限界状態線の勾配から求められ $M = 1.49$ となる。

5. Cam-Clay Modelによる三軸圧縮試験結果の推定と考察：

上記で決定した材料パラメータ (M, λ, κ) を用いて、対象とした粘性土の応力-ひずみ関係をCam-Clay Modelに対する次式の弾塑性構成則に従って逆推定し、三軸圧縮試験結果との比較を行った。

$$\begin{aligned} \text{体積ひずみ増分} : d \varepsilon_v &= d \varepsilon_v^p + d \varepsilon_v^e \\ &= \frac{\lambda}{1+e} \left(\frac{dp}{p} + \left(1 - \frac{\kappa}{\lambda} \right) \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{せん断ひずみ増分} : d \varepsilon_s &= d \varepsilon_s^p \\ &= \frac{\lambda - \kappa}{1+e} \left(\frac{dp}{p} + \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right) \frac{2\eta}{M^2 - \eta^2} \end{aligned}$$

ここで、 η は応力比 ($=q/p$) である。図-6はCD, CU試験に対する計算値と実測値の比較を示したものである。図より、CD試験では ($q - \varepsilon_s$) 関係において、小ひずみ領域で良い一致が見られるものの、大きなひずみ領域で差を生じている。又、($\varepsilon_v - \varepsilon_s$) 関係においては、全ひずみ領域でかなり良い一致が見られた。一方、CU試験では ($q - \varepsilon_s$) 関係において、全ひずみ領域でかなり良い一致を示している。これらの結果から、Cam-Clay Modelを用いる場合の材料パラメータは従来から一般に利用されている三軸試験機と圧密試験機によってほぼ決定可能であると思われる。さらに、図-1から判断できるように今回実施した三軸CU, Ka-CU, CD圧縮試験の破壊点がすべて限界状態線上に一致する事から、材料パラメータ M は最小限これら3種のいずれか1種類の試験を実施する事により決定可能であり、伸張試験等の特殊な応力径路に対する試験を必ずしも必要としないのではないと思われる。すなわち、もしこの事が今後の研究によって確認されれば、それほど高度な試験技術が必要としないごく一般的な三軸CU圧縮試験が試験結果の信頼性の確保、あるいは経済的な面からも望ましいと思われる。

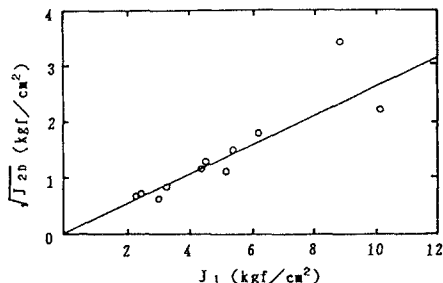


図-4 Drucker-Prager Model

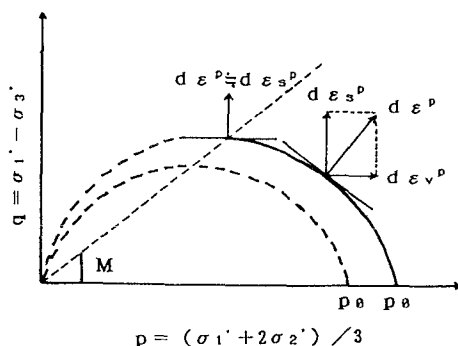


図-5 Cam-Clay Model

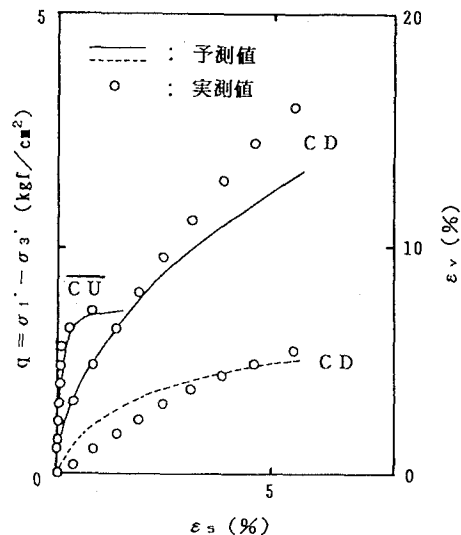


図-6 Cam-Clay Modelの計算値と実測値の比較