

圧密が粘土の粒子構造におよぼす影響 (圧密と弾性係数 および降伏値との関係)

京都大学工学研究所 正員 村山 鋼郎

1. いままでの成果

乱されない粘土が圧密や破壊をうけない応力状態のもとでは、粘土骨格に生ずるせん断変形特性は、構成粒子の微視的変形より合成されるとして統計学的に処理して次の結果⁽¹⁾を得た。〔1〕粒子構造が破壊しない主応力差の限度は降伏値として σ_0 で示される。〔2〕粘土骨格のレオロジー特性は図-1の力学模型(η_2 :構造粘性、 τ_0 :内部摩擦力)で示される。〔3〕図-1中のせん断弾性要素 G_1 , G_2 は“粒子間の弾性係数” e から誘導され、次式で示される。式中、 α_1 , α_2 , β_2 , C はすべて定数。

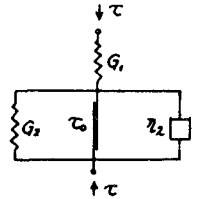


図-1

$$G_1 = e/c\alpha_1, \quad G_2 = e/c\alpha_2\beta_2 \quad (1)$$

〔4〕粘土に外圧として主応力差 σ が加えられたとき粒子に生ずる力を f とし、 f のために粒子間隔 λ は $\Delta\lambda$ だけ変化する。 $\Delta\lambda$ のために粒子間で安定していたけん引力と反撥力の平衡がやがられ、粒子をもとの位置に回復させようとする。 $\Delta\lambda$ の小さいときはこの回復力は変形に比例するとすれば外力 f と回復力との関係は次式で示される。

$$f = e \cdot \Delta\lambda / \lambda \quad (2)$$

上式中の比例係数 e を粒子間の弾性係数と仮称する。〔5〕三軸応力下のクリープひずみ ε は、変形が終局に近い部分以外では、図-1の力学模型と解いて次式で示される。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma - \sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma - \sigma_0}{B_2 E_2} \log(A_{2p} \cdot B_2 \cdot E_2 \cdot t), \quad \frac{d\varepsilon}{d \log t} = \frac{\sigma - \sigma_0}{B_2 E_2} \quad (3)$$

ここに、 E_1 , E_2 は G_1 , G_2 より誘導したヤング係数で $E_1/G_1 = E_2/G_2$, A_{2p} , B_2 はレオロジー定数、 t は時間である。

2. 圧密がおよぼす要素諸元の影響

粘土が圧密応力 σ_m (平均主応力で示す)によって安定に達したときの粒子間距離 λ は、加圧がDebyeの理論にもとづく粒子帯電の斥力とつりあうとしてSalasとSerratos⁽²⁾は次の関係を与えている。

$$\sigma_m = A'_m \cdot \exp(-K \cdot \lambda) \quad (A'_m, K: \text{定数}) \quad (4)$$

一方、粘土を等方圧密したとき、圧密圧力 σ_m 、圧縮強度 σ_u 、上限降伏値 σ_0 と含水比 w との関係は図-2のようになり、各線は半対数紙上で互いに平行となる。故に圧縮指数 C_c とすれば σ_m , σ_u は、

$$\sigma_m = A_m \cdot \exp(-2.3 w/C_c), \quad \sigma_u = A_u \cdot \exp(-2.3 w/C_c) \quad (5)$$

(4), (5)両式より、 $A_m = A'_m$, $K\lambda = 2.3 w/C_c$ となり、 σ_m , σ_u は次式で示される。

$$\sigma_m = A_m \cdot \exp(-K\lambda), \quad \sigma_u = A_u \cdot \exp(-K\lambda) \quad (6)$$

粘土の圧密は非可逆現象であるから、圧密による粒子間距離の短縮は圧密応力 σ_m が先行圧密応力 σ_{mc} よりも大きい場合のみ発生する。 σ_{mc} における σ_u , λ の値をそれぞれ σ_{uc} , λ_c と記せば、

$$\sigma_m > \sigma_{mc} \text{ では, } \sigma_u / \sigma_{uc} = \sigma_m / \sigma_{mc} = \exp\{-K(\lambda - \lambda_c)\} \quad (7)$$

また Salas と Serratos は、安定状態の粘土粒子には引力と斥力が平衡し、前者は Van der Waal 力で λ^{-6} に比例する力として、後者は電荷の斥力として $\exp(-K\lambda)$ に比例する力で示されるとした。故に

$$W\lambda^{-6} = K_s \cdot \exp(-K\lambda) \quad (\equiv f_s) \quad (\text{ここに } W, K_s \text{ は定数}) \quad (8)$$

故に粒子に外力 f が与えられたときのつり合いは次式で与えられる。

$$f + W(\lambda - d\lambda)^{-6} = K_s \cdot \exp\{-K(\lambda - d\lambda)\}$$

上式を Taylor 展開して微少な高次の項を無視し、 $f/(d\lambda/\lambda) (=e)$ を算出すると次式が得られる。

$$e (= f/(d\lambda/\lambda)) = \{K_s \cdot \exp(-K\lambda)\} \cdot \{K\lambda - 6\}$$

これに (6) 式を代入して、

$$e/\sigma_m = (K_s/A_m)(K\lambda - 6) \quad (9)$$

同様に、 λ_c の粒子間隔の粘土の e を e_c とすれば、

$$e_c/\sigma_m = K_s/A_m(K\lambda_c - 6) \quad (10)$$

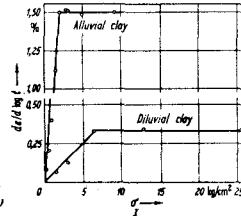


図-3

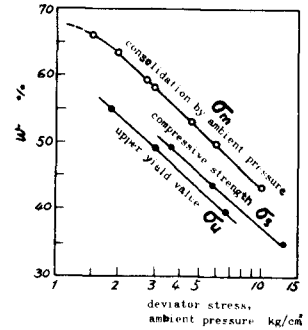


図-2

$$(7), (8), (9), (10) \text{ 式より, } e = \{(\sigma_m/\sigma_{mc}) - (f_s/e_c) \log(\sigma_m/\sigma_{mc})\} e_c \quad (11)$$

上式右辺において、 $\log(\sigma_m/\sigma_{mc})$ は $\sigma_m/\sigma_{mc} (>1)$ に比して非常に小さく、また (f_s/e_c) はひずみのオーダーの数で小さい数と考えられるので、右辺第2項を第1項に比して無視すると、

$$\text{過圧密領域 } (\sigma_m/\sigma_{mc}) \text{ では, } e = (\sigma_m/\sigma_{mc}) \cdot e_c \quad (12)$$

通常の圧密試験は一種の側方拘束の3軸圧縮試験である。圧密平衡時の静止土圧係数 K_0 は Bishop のおていのように粘土の種類が決まれば一定値とみられるから圧密軸圧力を σ_1 で示せば、試料に加わる平均主応力 σ_m 、主応力差 σ はそれぞれ $\sigma_m = (1+2K_0)\sigma_1$, $\sigma = (1-K_0)\sigma_1 \equiv \mu\sigma_1$ で示される。 σ_{1c} の先行圧密応力をもつ粘土を圧密する場合、前述したように、圧密応力 σ_1 が σ_{1c} より小さい ($\sigma_{1c} > \sigma_1$; 過圧密状態) ときは粘土の弾性、降伏値などの値には変化がない。一方 σ_1 が $\sigma_{1c} < \sigma_1$ (正常圧密状態) のときは弾性、降伏値などの値は増加し、その関係は 1. [3], 1. [5] の関係および (12) 式より次式の関係が得られる。すなわち $\sigma_1 > \sigma_{1c}$ の場合には、

$$\frac{E_1}{E_{1c}} = \frac{E_2}{E_{2c}} = \frac{\sigma_0}{\sigma_{0c}} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{mc}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_{1c}} \quad (\text{ここに添字 } c \text{ を付した値は } \sigma_{1c} \text{ の先行荷重をもつ粘土の諸元値。}) \quad (13)$$

2次圧密は脱水压密を終了した粘土に生ずるクリープであると考えられるので、上述の成果の妥当性を正常圧密領域 ($\sigma_1 < \sigma_{1c}$) と過圧密領域 ($\sigma_1 > \sigma_{1c}$) における2次圧密速度の実験で検照する。

(A) 正常圧密領域: この領域では弾性係数に変化がないから (3) 式の E_2 , σ に E_{2c} , $\mu\sigma_1$ を代入して、

$$\frac{d\epsilon}{d \log t} = \frac{\mu\sigma_1 - \sigma_0}{B_2 E_{2c}} \div \frac{\mu}{B_2 E_{2c}} \sigma_1 \quad (\sigma_0 \text{ は } \sigma_{1c} \text{ に比べて小さいから無視した。}) \quad (14)$$

(b) 過圧密領域: この領域では (3) 式の E_2 , σ に (13) 式の E_2 , $\mu\sigma_1$ を代入して、

$$\frac{d\epsilon}{d \log t} = \frac{\mu\sigma_1 - \sigma_0}{B_2 E_2} \div \frac{\mu\sigma_1}{B_2 E_2} = \frac{\mu\sigma_1}{B_2 E_{2c}} \cdot \frac{\sigma_{1c}}{\sigma_1} = \frac{\mu}{B_2 E_{2c}} \sigma_{1c} = \text{const} \quad (15)$$

図-3 は2次圧密速度の実験結果⁽³⁾であつて、 $\sigma_1 < \sigma_{1c}$ では $d\epsilon/d \log t$ は (14) 式のように σ_1 に比例し、 $\sigma_1 > \sigma_{1c}$ では (15) 式のように σ_1 に無関係に一定となり、理論の妥当性が検照された。

引用文献: (1) 村山胡郎: 材料, 14巻, 139号, 昭40.4, pp.282-288. (2) Salas, J.A.T. & J.M. Serratos: Proc. 3rd Int. Conf. S.M.F.E. Vol. I, 1953, pp.112-118 (3) 柴田徹: 地盤工学, 6号 昭35.7, pp.29-37.