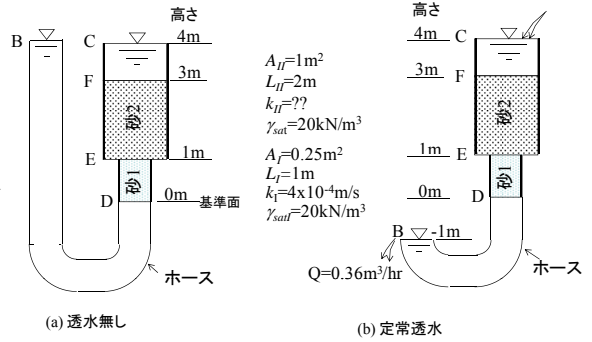


# 2011 土質力学第一 期末試験問題、解答例

1. 下図のような透水係数( $k$ )、断面積( $A$ )、厚さ( $L$ )、単位体積飽和重量( $\gamma_{sat}$ )をもつ2種の砂(砂1、砂2)からなる2層試料の透水を考える。容器上端(C点)と下部に取り付けられたホース端部(B点)の高さが4mと等しく、水で満たされた状態(a)から、B点の高さを徐々に-1mまで下げて定常透水(b)を行った。その結果、 $Q=0.36\text{m}^3/\text{hr}$ の流量速度を得た。断面変化部の影響は無視でき、試料内では流れはすべて鉛直方向に一次的に生じていると仮定して、以下の間に答えよ。尚、水の単位体積重量は $\gamma_w=10\text{kN/m}^3$ とする。(25点)



- (1) 流れがない状態(a)の時のD,E,F点の全水頭と鉛直有効応力( $\sigma'_v$ )はそれぞれいくらか。
- (2) 定常透水(b)の時の砂1と砂2の流速( $v_I, v_{II}$ )はそれぞれいくらか。
- (3) 定常透水時のD,E,F点の全水頭はそれぞれいくらか。なお、基準面はD点の位置とする。
- (4) D,E点の水圧( $u$ )、並びに鉛直有効応力はそれぞれいくらか。
- (5) 砂2の透水係数( $k_{II}$ )を求めよ。
- (6) (a)の状態からBを更に徐々に上げて、B側から水を供給し、砂試料に上向きの流れを生じさせた場合、どちらかの砂が最初に限界動水勾配( $i_{cr}$ )に達するか。またその時のB点の高さはいくらか。

解答:  $h$ : 全水頭、 $h_e$ : 位置水頭、 $h_p$ : 圧力水頭、 $u$ : 水圧とする。

- (1) 静水状態であり、流れがない、従って、水頭差はなく、水頭は一定:  $h_D=h_E=h_F=4\text{m}$

水圧  $u=\gamma_w z$  ( $z$ : 水深)  $\sigma'_v = \sigma - u$ ,

D点:  $u_D = 40\text{kPa}$ ,  $\sigma_D = \gamma_w \times 1 + \gamma_{sat} \times 3 = 70\text{kPa}$ ,  $\therefore \sigma'_{vD} = 30\text{kPa}$

E点:  $u_E = 30\text{kPa}$ ,  $\sigma_E = \gamma_w \times 1 + \gamma_{sat} \times 2 = 50\text{kPa}$ ,  $\therefore \sigma'_{vE} = 20\text{kPa}$

F点:  $u_F = 10\text{kPa}$ ,  $\sigma_F = \gamma_w \times 1 = 10\text{kPa}$ ,  $\therefore \sigma'_{vF} = 0\text{kPa}$

- (2)  $v = Q/A$ ,

$v_I = \frac{0.36}{0.25} = 1.44\text{m/hr} = 4.0 \times 10^{-4}\text{m/s}$ ,  $v_{II} = 0.36\text{m/hr} = 1.0 \times 10^{-4}\text{m/s}$

- (3) CF間、DB間では損失無し、従って、 $h_C=h_F=4\text{m}$ ,  $h_B=h_D=-1\text{m}$  (B,Cでは、圧力水頭ゼロ、位置水頭のみ)より、砂1について

$i_I = \frac{h_E - h_D}{L_I} = \frac{v_I}{k_I} = \frac{4 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-4}} = 1.0$ ,  $\therefore h_E = h_D + 1 \times 1 = 0\text{m}$

- (4)  $h_p = h - h_e$   $h_{pD} = -1 - 0 = -1$ ,  $u_D = h_{pD} \gamma_w = -10\text{kPa}$ ,  $\sigma'_{vD} = \sigma_{vD} - u_D = 70 - (-10) = 80\text{kPa}$

$u = h_p \gamma_w$ ,  $h_{pE} = 0 - 1 = -1$ ,  $u_E = h_{pE} \gamma_w = -10\text{kPa}$ ,  $\sigma'_{vE} = \sigma_{vE} - u_E = 50 - (-10) = 60\text{kPa}$

$h_{pF} = 4 - 3 = 1$ ,  $u_F = h_{pF} \gamma_w = 10\text{kPa}$ ,  $\sigma'_{vF} = \sigma_{vF} - u_F = 10 - 10 = 0\text{kPa}$

- (5)  $i_{II} = \frac{h_F - h_E}{L_{II}} = \frac{4}{2} = 2.0 = \frac{v_{II}}{k_{II}} = \frac{1 \times 10^{-4}}{k_{II}}$ ,  $\therefore k_{II} = 5.0 \times 10^{-5}\text{m/s}$

- (6)  $k_I k_{II}$ と連続の条件より、砂2の動水勾配は砂1の2倍となり、砂2が最初に限界動水勾配に達する。

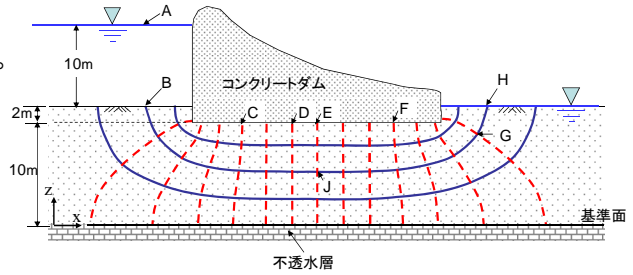
$i_{II} = 2i_I$ ,  $\Delta h_{II} = 4\Delta h_I$ ,  $\Delta h_{BC} = \Delta h_I + \Delta h_{II} = \frac{5}{4}\Delta h_{II}$

$i_{II} = \frac{4/5 \Delta h_{BC}}{L_{II}}$ ,  $\therefore i_{cri} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} = 1.0$ ,  $\Delta h_{BCcri} = \frac{5}{4} \times 2 = 2.5\text{m}$

$h_{eB} = 4 + 2.5 = 6.5\text{m}$

2. 下図に示すような重力式コンクリートダム下の均質な地盤内の二次元定常透水を考える。図に示す正方形フローネット、水理境界条件、地盤条件(土粒子比重 $G_s=2.7$ 、透水係数 $k=10^{-4}m/s$ 、飽和単位体積重量 $\gamma_{sat}=20kN/m^3$ 、水の単位体積重量 $\gamma_w=10kN/m^3$ )を用いて以下の問に答えよ。尚、基準面は下部不透水面高さとする。(30点)

- (1) 不透水面で $z=0$ における境界条件を示せ。
- (2) この条件での単位奥行き一日当りの透水量を求めよ。
- (3) B点、J点の全水頭( $h$ )、及び間隙水圧( $u$ )はそれぞれいくらか。
- (4) G点の有効鉛直応力( $\sigma'_{vg}$ )はいくらか。なお、G点の深さは地表面から4mとする。
- (5) J点近傍の動水勾配、並びに流速はいくらか。
- (6) 単位時間当たりの透水量を1/10にするために、DE間でダム底面から不透水層上面までグラウトを注入した。注入部の透水係数はいくらまで下げる必要があるか。
- (7) グラウト注入と前後でC点とF点の間隙水圧はどのように変化するか。



### 解答

(1) 不透水面の $z$ 方向の流れ(動水勾配)ゼロ  $\frac{dh}{dz} = 0 \quad \text{at } z = 0$

(2)  $q = -k(N_f/N_d)(h_H - h_B)$  より、 $N_f=4$ ,  $N_d=14$ ,  
 単位奥行き幅(1m)、一日当りの透水量は  $q = 10^{-4} \times (4/14) \times 10 = 2.86 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec} = 24.7 \text{ m}^3/\text{day/m}$

(3) 境界条件より、 $h_A = h_B = 22\text{m}$ 、 $u_B = 100\text{kPa}$ 、 $BH$ 間の水頭差 $\Delta h = 10\text{m}$ 、ダム下、J点の前後の等ポテンシャル線は鉛直、従って、正方形の一片の長さは、2.5m、J点の $z = 2.5 \times 2 = 5\text{m}$   
 正方形フローネットより(等ポテンシャル線の分割数 $N_d = 14$ )、等ポテンシャル線間の損失水頭 $dh = 10/14$   
 従って、J点の水頭は、 $h_J = h_B - 7dh = 22 - 7dh = 17\text{m}$ 、J点の水圧は、 $h_{pJ} = h_J - h_{eJ}$ 、 $u = h_{pJ} \gamma_w$  より、 $u_J = (17 - 5) \times 10 = 120\text{kPa}$

(4) G点の全水頭は、 $h_G = 12 + dh$ 、 $u_G = h_G - h_{eG} = 12 + 10/14 - 8 = 4 + 20/14$ 、 $\sigma_G = \gamma_{sat} z$ 、

$$\sigma'_G = \sigma_G - u_G = 80 - (40 + 100/14) = 32.9\text{kPa}$$

(5) J点付近の正方形の一辺は2.5m、  
 従って、 $i_D = dh/2.5 = 0.29$ 、 $v_D = ki_D = 2.9 \times 10^{-5} \text{ m/s} = 2.50 \text{ m/day}$

(6) グラウトを注入してもフローネットの形は変わらない、従って、透水量を1/10にするためにはDE間以外の動水勾配 $dh$ を1/10( $dh' = 1/14$ )にすればよい。DE以外のポテンシャルドロップ数は13であるので、この間の総損失水頭は、13/14となり、DE間の損失水頭 $dh'_{DE}$ は $10 - 13/14 = 127/14$ となる。

連続の条件より、 $v = ki = \text{const}$

$$v = k(dh'/2.5) = k_{DE}(dh'_{DE}/2.5), \quad \therefore k_{DE} = \frac{1}{127} \times 10^{-4} = 7.8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$

(7)

C点: グラウト前	$h_C = h_B - 4dh = 22 - 40/14$	$h_{pC} = h_C - h_{eC} = 12 - 40/14 = 9.14$	$u_C = h_{pC} \gamma_w = 91\text{kPa}$
後	$h'_C = h_B - 4dh' = 22 + 4/14$	$h'_{pC} = h'_C - h_{eC} = 12 - 4/14 = 11.71$	$u'_C = h'_{pC} \gamma_w = 117\text{kPa}$
F点: グラウト前	$h_F = h_H + 4dh = 12 + 40/14$	$h_{pF} = h_F - h_{eF} = 2 + 40/14 = 4.86$	$u_F = h_{pF} \gamma_w = 49\text{kPa}$
後	$h'_F = h_H + 4dh' = 12 - 4/14$	$h'_{pF} = h'_F - h_{eF} = 2 + 4/14 = 2.29$	$u'_F = h'_{pF} \gamma_w = 23\text{kPa}$

3. 土粒子密度が等しい( $\gamma_s=2.65\text{g/cm}^3$ )3種類の土(路床材、砂質ローム、粘土質ローム)に対して、突固めによる締固め試験を行った。締固め試験では、1,000ml容積のモールド、質量2.5kg、落下高さ30cmのランマーを用い、3層に分けて、各層25回突固めた。その結果、以下の表に示すような結果を得た。以下の間に答えよ。(30)

注意: 下表で試料2については、湿潤密度と含水比しか与えられていない。

試料1					
平均含水比w (%)	14.0	15.5	18.0	21	23.0
乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.59	1.60	1.63	1.60	1.56
試料2					
湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.38	1.51	1.72	1.71	1.64
平均含水比w (%)	27.0	32.0	38.0	43.0	50.0
試料3					
平均含水比w (%)	74.8	80.5	87.0	93.0	100.0
乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.67	0.73	0.83	0.74	0.70

- この締固め方法での単位体積当りの締固めエネルギーはいくらか?
- 添付のグラフ用紙に締固め曲線を描け。
- この締固め条件での3つの試料の最適含水比( $w_{opt}$ )、最大乾燥密度( $\gamma_{dmax}$ )はいくらか。
- 図中にゼロ空隙曲線を描け。
- 路床材、砂質ローム、粘土質ロームは、試料1~3のそれぞれどれか? また、その根拠も簡単に説明せよ。
- 3試料の試験の中で、計測ミスで正しい試験結果になっていない含水比と乾燥密度の関係が1点ある。それは、どの資料の何番目の計測点か。また、その理由も述べよ。
- 試料2を用いて現場締固め試験を行ったところ、含水比 $w=44\%$ で、湿潤密度 $\gamma_t=1.62\text{g/cm}^3$ となった。この現場締固めにおける締固め度( $D_c$ )、飽和度( $S_r$ )と空隙率( $v_a$ )、間隙比( $e$ )を求めよ。

(1) エネルギー密度  $E_d = M \cdot g \cdot h \cdot N_B \cdot N_L / V$  ここで、 $N_B$ : 1層当り落下回数、 $N_L$ : 層数  
 $= 2.5 \times 9.8 \times 0.3 \times 25 \times 3 / (1,000 \times 10^{-6}) = 551 \times 10^3 \text{ Nm/m}^3 = 551 \text{ kJ/m}^3$

(2) 締固め曲線は次ページ

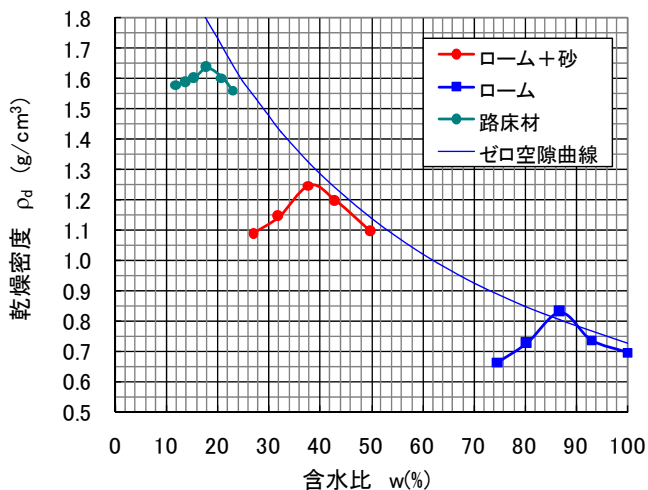
$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w/100}$$

(3)  $w_{opt}$ 、 $\rho_{dmax}$  は、締固め曲線より

	試料1	試料2	試料3
$w_{opt}$ (%)	18	39	87
$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.64	1.25	0.8

(4)  $(\rho_d)_{sat} = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho_w}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{100}}$

ゼロ空隙曲線は右図



- 試料1: 粘土質ローム (最適含水比最も大きく、最大乾燥密度最小)  
 試料2: 路床材 (もっとも工学的に優れている (密度が大きい))  
 試料3: 砂質ローム (粘土質ロームに比べて左上に来る)
- 試料3の3番目のサンプル、最大乾燥密度がゼロ空隙曲線の上に位置したから。
- 現場締固め土の乾燥密度は、 $\rho_d=1.125\text{g/cm}^3$

$$D_c = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100 = 90\%, \quad \rho_d = \frac{\rho_s}{1+e} \quad \text{より} \quad e = \frac{2.65}{1.125} - 1 = 1.36$$

$$S_r = \frac{\rho_s \cdot w}{\rho_w} = 86\%, \quad v_a = \frac{V_a}{V} \times 100 = \frac{V_v - V_w}{V_s + V_v} \times 100 = \frac{e(100 - S_r)}{1+e} = 8.0\%$$

4. 不飽和状態で締め固めた土が、雨水浸透などにより飽和状態に近くなると強度や、剛性、透水性等が変化する。これらがどのように変化し、また何故変化するのかを簡単に説明せよ。(10点)

解答例：締め固め時は、土は不飽和状態であり、飽和することにより、

・強度の低下や、圧縮性の増加、沈下が生じる。=>(理由)飽和度が上昇することにより、不飽和状態で発揮されているサクションが、減少、消失するため。

・透水性は増加する。=>(理由)不飽和時は、空気部では水を通すことができず、微細な空気の存在により、飽和状態に比べると、透水のための有効断面積が小さくなるとともに、仮想的な流管径が小さくなる。従って、不飽和時の透水性は、飽和時に比べると小さい。

5. 以下の問に答えよ。(15)

(1) 以下の英語を和訳せよ。

i) degree of saturation, ii) hydraulic gradient, iii) Darcy's law, iv) falling head permeameter test, v) capillary suction  
vi) optimum water content

i) 飽和度、ii) 動水勾配、iii) ダルシー側、iv) 変水位透水試験、v) 毛管負圧、vi) 最適含水比

(2) 以下の日本語を英訳し、簡単に説明せよ。

i) 間隙比、ii) プロクターの原理、iii) 凍上

i) void ratio: 土粒子(固相)体積( $V_s$ )に対する間隙(液相と気相)体積( $V_v$ )の比、 $e = V_v / V_s$

ii) Proctor's Principle: 含水比以外の条件を一定にして、土を締め固めた場合、乾燥密度が最大となる含水比(最適含水比)が存在する。

iii) frost heave: 寒冷地において、冬場、毛管作用によって地表面に近くに供給された地下水が凍結し、地盤が上昇する現象。これにより路盤等が膨張し、解凍後強度、剛性が低下する。