

2016 土質力学第一 期末試験問題、解答例

1. 以下の間に答えよ。(25)

(1) 以下の英語を和訳せよ。

- i) water content, ii) void ratio, iii) hydraulic gradient, iv) artesian well, v) optimum water content
 解答:i) 含水比、ii) 間隙比、iii) 動水勾配、iv) 掘ぬき井戸、v) 最適含水比

(2) 以下の日本語を英訳し、それぞれについて簡単に説明せよ。

i) ダルシー則、 ii) 砂のボイリング、iii)プロクターの原理、vi)フィルター材、v)過剰転圧

i) Darcy's (Darcian) law:

$$v = -k \frac{dh}{dl} = ki \quad \text{土中水の流量速度}(v) \text{は動水勾配}(i) \text{に比例する。ここで} h \text{はピエゾ水頭、} l \text{は流れ方向の長さ}$$

ii) sand boiling

粘着力がない砂質土内で上向き透水による透水力が土粒子の重力と等しくなるか、それ以上になると、土の有効応力(粒子間接触力)がゼロとなり、強度が失われて、砂が沸騰した液体のようにふるまう現象。

iii) Proctor's principle

“締固めに影響を及ぼす諸因子の中で含水比(w)以外の条件を同じにして、 w だけを変えていくと、乾燥密度(ρ_d)が最大となる含水比(最適含水比: w_{opt})が存在する。

iv) filter material

粘性土のような細粒土を遮水材として用いる構造物(例えば、ロックフィルダム)で透水による細粒分のパイピング等の浸食を防止するために用いられる細粒分から粗粒分(礫材)まで広範な粒度組成をもつ材料。

v) over-compaction

盛土材料を締め固めるときに過剰に転圧を行ってしまい土の強度が低下する現象を言う。

粘土や火山灰質粘性土などは締め固め作業によって、非自由水が自由水となることや粒子破碎等が原因。

2. 図-1のような一様断面円筒容器(断面積 $A=1.0\text{m}^2$)内の飽和単位体積重量(γ_{sat})、水中有効重量(γ')が同じで、透水係数(k)と厚さが異なる3種類の砂(砂I, 砂II, 砂III)からなる3層試料に対して図示された条件で定水位透水試験を行った。試験前は、下部ホースの端B点はC点と同じ高さであり、水の流れはない静水圧状態であった。次いで、B点の高さを0mとし、C点からの注水を続け、水位を容器上端の高さ(5m)に固定し定常透水を行った結果、 $Q=0.18\text{m}^3/\text{hr}$ の流量速度をB点で得た。3砂資料もと比重 $G_s=2.7$ 、水の単位体積重量 $\gamma_w=10\text{kN/m}^3$ として、以下の間に答えよ。(25)

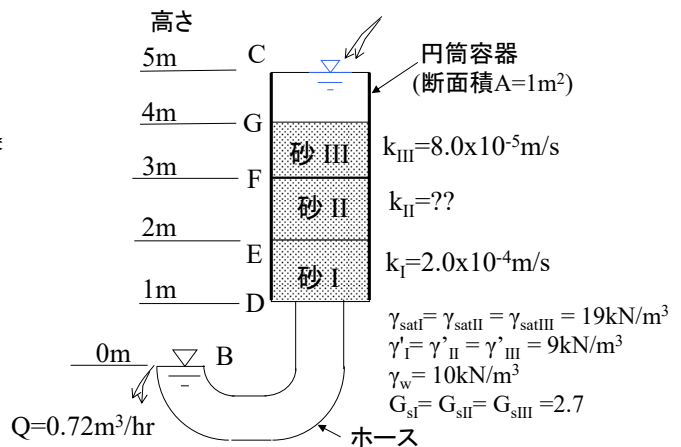


図-1

- 砂の間隙比 e はいくらか。
- 透水前の静水圧状態(水面高さ5m)における、C点からD点までの全応力、間隙水圧、有効応力の深さ方向の分布を描け。
- 定常透水試験時のD, E, F, G点の全水頭はそれぞれいくらか。なお、基準面はB点(0m)の位置とする。
- この時のC点からD点までの全応力、間隙水圧、有効応力の深さ方向の分布を描け。
- 砂IIの透水係数(k_{II})を求めよ。
- ホース端B点の位置を上昇させ、試料内の流れを上向きにした場合、最初にボイリングが発生する砂はどれか、また、その時のB点とC点の水位差とボイリング発生直前の流量速度はいくらか。

解答例 $\gamma' = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w = 9, \quad \gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w = 19$

(1) $\therefore 1.9(e + 1) = G_s + e \Rightarrow e = \frac{0.8}{0.9} = 0.89$

以下の解答では、 h : 全水頭、 h_e : 位置水頭、 h_p : 圧力水頭、 u : 水圧とする。

(2) 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：

$$h_D = h_E = h_F = h_G = h_C = 5\text{m 水圧 } u = \gamma_w z \quad (z: \text{水深})$$

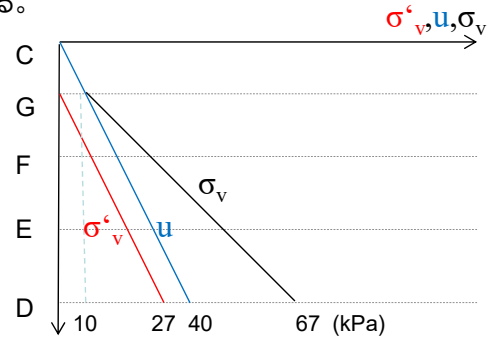
$$D: u = 4\gamma_w = 40\text{kPa}, \quad \sigma_v = 1 \cdot \gamma_w + 3 \cdot \gamma_{sat} = 67\text{kPa}, \quad \sigma'_v = \sigma_v - u = 27\text{kPa}$$

$$E: u = 3\gamma_w = 30\text{kPa}, \quad \sigma_v = 1 \cdot \gamma_w + 2 \cdot \gamma_{sat} = 48\text{kPa}, \quad \sigma'_v = 18\text{kPa}$$

$$F: u = 2\gamma_w = 20\text{kPa}, \quad \sigma_v = 1 \cdot \gamma_w + 1 \cdot \gamma_{sat} = 29\text{kPa}, \quad \sigma'_v = 9\text{kPa}$$

$$G: u = 1\gamma_w = 10\text{kPa}, \quad \sigma_v = 1 \cdot \gamma_w + 0 \cdot \gamma_{sat} = 10\text{kPa}, \quad \sigma'_v = 0\text{kPa}$$

$$C: h_{pC} = 4 - 4 = 0, \quad u_F = h_{pC}\gamma_w = 0\text{kPa}, \quad \sigma'_{vC} = \sigma_{vC} - u_C = 0\text{kPa}$$



$$(3) \quad v = Q/A = v_I = v_{II} = v_{III} = \frac{0.72}{1.0} = 0.72\text{m/hr} = 2.0 \times 10^{-4}\text{m/s}$$

CF間、DB間では損失無し、従って、 $h_C = h_G = 5\text{m}$, $h_B = h_D = 0\text{m}$ (B,Cでは、圧力水頭ゼロ、位置水頭のみ)

より、砂 I、IIIについて

$$i_I = \frac{h_E - h_D}{L_I} = \frac{v_I}{k_I} = \frac{2 \times 10^{-4}}{2 \times 10^{-4}} = 1.0, \quad \therefore h_E = h_D + 1.0 \times 1 = 1.0\text{m}, \quad i_{III} = \frac{h_G - h_F}{L_{III}} = \frac{v_{III}}{k_{III}} = \frac{2 \times 10^{-4}}{8 \times 10^{-5}} = 2.5, \quad \therefore h_F = h_G - 2.5 \times 1 = 2.5\text{m}$$

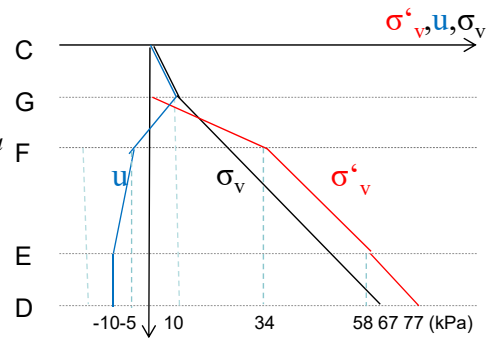
(4) 全応力は変化なし、また $h_p = h - h_e$, $u = h_p \gamma_w$ より

$$h_{pD} = 0 - 1 = -1, \quad u_D = h_{pD}\gamma_w = -10\text{kPa}, \quad \sigma'_{vD} = \sigma_{vD} - u_D = 67 - (-10) = 77\text{kPa}$$

$$h_{pE} = 1.0 - 2 = -1.0, \quad u_E = h_{pE}\gamma_w = -10\text{kPa}, \quad \sigma'_{vE} = \sigma_{vE} - u_E = 48 - (-10) = 58\text{kPa}$$

$$h_{pF} = 2.5 - 3 = -0.5, \quad u_F = h_{pF}\gamma_w = -5\text{kPa}, \quad \sigma'_{vF} = \sigma_{vF} - u_F = 29 - (-5) = 34\text{kPa}$$

$$h_{pG} = 6 - 5 = 1, \quad u_G = h_{pG}\gamma_w = 10\text{kPa}, \quad \sigma'_{vG} = \sigma_{vG} - u_G = 10 - 10 = 0\text{kPa}$$



$$(5) \quad i_{II} = \frac{h_F - h_E}{L_{II}} = \frac{1.5}{1} = 1.5 = \frac{v_{II}}{k_{II}} = \frac{2 \times 10^{-4}}{k_{II}}, \quad \therefore k_{II} = \frac{2}{1.5} \times 10^{-4} = 1.33 \times 10^{-4}\text{m/s}$$

(6) 連続の条件を満足するためには

$$k_I i_I = k_{II} i_{II} = k_{III} i_{III} = k_I \Delta h_{DE} = k_{II} \Delta h_{EF} = k_{III} \Delta h_{FG} = C,$$

$$\Rightarrow 2 \frac{\Delta h_{DE}}{1} = 1.33 \frac{\Delta h_{EF}}{1} = 0.8 \frac{\Delta h_{FG}}{1} \quad \text{従って、砂IIIの動水勾配がもっと大きいので、砂IIIで最初にボーリングする。}$$

また、

$$\Delta h_{DE} + \Delta h_{FG} + \Delta h_{FG} = \Delta h_{CB} \quad \text{であり、限界動水勾配、} i_{cri} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = 0.9 \quad \text{であるので、}$$

この時の $\Delta h_{FG} = i_{cri} \cdot 1 = 0.9\text{m}$ となる。

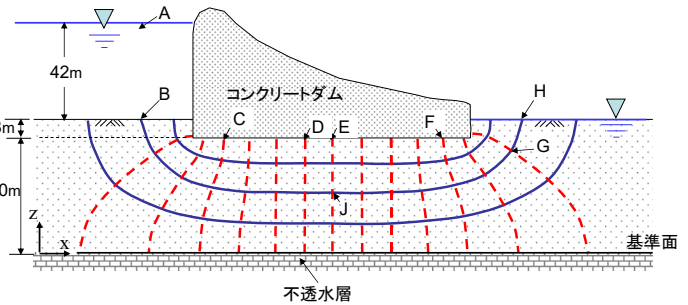
$$\text{従って、この時の全水頭差 } \Delta h_{CB} = \Delta h_{DE} + \Delta h_{FG} + \Delta h_{FG} = \left(\frac{0.8}{2} \cdot 1 + \frac{0.8}{1.33} \cdot 1 + 1 \right) \Delta h_{FG} = 1.84\text{m}$$

また、その時の透水量は、

$$Q = vA = v_I = v_{II} = v_{III} \\ = \frac{0.4}{2} \times 0.9 \times 2 \times 10^{-4} = \frac{0.8}{1.33} \times 0.9 \times 1.33 \times 10^{-4} = 0.9 \times 0.8 \times 10^{-4} = 7.2 \times 10^{-5}\text{m/s} = 0.26\text{m/hr}$$

3. 図-2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トネット、水理境界条件、地盤条件(土粒子比重 $G_s=2.7$ 、透水係数 $k=1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 、飽和単位体積重量 $\gamma_{\text{sat}}=20 \text{kN/m}^3$ 、水の単位体積重量 $\gamma_w=10 \text{kN/m}^3$)を用いて以下の間に答えよ。尚、基準面は下部不透水層上面とする。(25)

- (1) 不透水面 $z=0$ および上流側地盤表面の境界条件式(変数は全水頭 h)を示せ。
- (2) C点、E点の全水頭(h)、及び間隙水圧(u)はそれぞれいくらか。
- (3) G点の有効鉛直応力(σ'_{vg})はいくらか。なお、G点の深さは地表面から14mとする。
- (4) J点近傍の動水勾配、並びに流速はいくらか。
- (5) この条件での単位奥行き一日当りの透水量を求めよ。
- (6) 単位時間当たりの透水量を(5)の1/50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ことがあるか。
- (7) グラウト注入の前後でC-F間の間隙水圧分布はどのように変化するか。概略を図示せよ。



回答例

- (1) 不透水面の z 方向の流れ(動水勾配)ゼロ: $\frac{dh}{dz} = 0$
 地盤表面で水頭一定: $h=90\text{m}$

図-2

- (2) 境界条件より、 $h_A=h_B=90\text{m}$ 、 $u_B=400\text{kPa}$ 、 $h_H=48\text{m}$ 、 $u_H=0\text{kPa}$ 、
 BH 間の水頭差 $\Delta h=42\text{m}$ 、正方形フロートネットより(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 $dh=42/14=3\text{m}$
 従って、C点の水頭は、 $h_C=h_B-3dh=90-3dh=81\text{m}$ 、
 C点の水圧は、 $h_{pC}=h_C-h_{eC}$ 、 $u=h_p \gamma_w$ より、 $u_C=(81-40) \times 10=410\text{kPa}$
 E点の水頭は、 $h_E=h_B-7dh=90-3dh=69\text{m}$ 、
 E点の水圧は、 $h_{pE}=h_E-h_{eE}$ 、 $u=h_p \gamma_w$ より、 $u_E=(69-40) \times 10=290\text{kPa}$

- (3) G点の全水頭は、 $h_G=h_H+dh=48+dh=51\text{m}$ 、

G点の圧力水頭は $h_{pG}=h_G-h_{eG}=51-34=17\text{m}$

=>水圧 $u_G=h_{pG} \times 10=170\text{kPa}$ => 鉛直有効応力 $\sigma'_{\text{vg}} = \sigma_{\text{vg}} - u_G = 14 \times 20 - 170 = 110\text{kPa}$

- (4) J点付近の正方形の一辺は10m、従って、

$i_j=dh/5=3/10=0.3$ 、 $v=ki_j=4.0 \times 10^{-5} \times 0.3 \text{m/s} = 1.2 \times 10^{-5} \text{m/s} = 1.04 \text{m/day}$

流れが平行であるため、J点近傍の正方形同じサイズで一辺が5m

- (5) $q = -k(N_f/N_d)(h_B-h_F)$ より、単位奥行き幅(1m)、一日当りの透水量は

$$Q = 4 \times 10^{-5} \times \frac{4}{14} \times 42 = 4.80 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s} = 3600 \times 24 = 41.5 \text{m}^3/\text{day}$$

- (6) 流量を1/5にするためには、DE間以外の動水勾配は、1/50となり、DE間以外の損失水頭は $3 \times 1/50$ となり、

従って、DE間の損失水頭 $\Delta h'_{DE}$ は $42 - 3/50 \times 13 = 41.22\text{m}$ 、動水勾配は $i'_{DE} = \Delta h'_{DE}/10 = 4.122$ 、DE間の ik が原地盤の

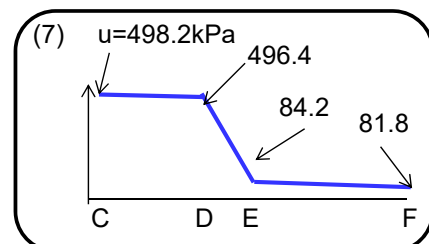
1/50になるので、 $i'_{DE} k'_{DE} = 1/50 i_{DE} k_{DE} \Rightarrow k'_{DE} = 1/50 ((0.3)/4.122 \times 4) \times 10^{-5} = 5.8 \times 10^{-8} \text{m/s}$

$h_C = h_B - 3(dh)/5 = 90 - 3(3/50) \Rightarrow u = (h_C - h_{eC}) \gamma_w = 498.2 \text{kPa}$

$h_D = h_B - 6(dh)/5 = 90 - 6(3/50) \Rightarrow u = (h_C - h_{eC}) \gamma_w = 496.4 \text{kPa}$

$h_E = h_H + 6(dh)/5 = 48 + 7(3/50) \Rightarrow u = (h_C - h_{eC}) \gamma_w = 84.2 \text{kPa}$

$h_F = h_H + 3(dh)/5 = 48 + 3(3/50) \Rightarrow u = (h_C - h_{eC}) \gamma_w = 81.8 \text{kPa}$



4.土粒子密度が等しい ($\rho_s=2.70\text{g/cm}^3$) 3種類の土に対して、突固めによる締固め試験を行った。締固め試験では2,209ml容積のモールド、質量4.5kg、落下高さ45cmのランマーを用い、5層に分けて、各層55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3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 (%)	70	80	85	93	100
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.694	0.744	0.780	0.746	0.700
試料2					
平均含水比w (%)	23.0	28.0	35.0	40.0	50.0
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.122	1.195	1.274	1.229	1.173
試料3					
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.831	1.956	2.031	2.018	2.017
平均含水比w (%)	9.0	12.4	15.4	18.0	21.5

- (1) 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?
- (2) 添付のグラフ用紙に締固め曲線を描け。(解答用紙とともに提出せよ。)
- (3) 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(ρ_{dmax})はいくらか。
- (4) 図中にゼロ空隙曲線、飽和度 $S_r=85\%$ 一定曲線を描け。
- (5) 3つの試料の中で路床材として適しているのは、どの試料か? また、その根拠も簡単に説明せよ。
- (6) 3つの試料の試験の中で、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、どの試料の何番目の計測点か。また、その理由も述べよ。
- (7) 試料1を用いて現場締固め試験を行ったところ、含水比 $w=22\%$ で湿潤密度 $\rho_t=1.933\text{g/cm}^3$ 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。(水の密度 $\rho_w=1.0\text{g/cm}^3$ とせよ)。

回答例

(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
 $= 4.5 \times 9.8 \times 0.45 \times 55 \times 5 / (2,209 \times 10^{-6}) = 2.47 \times 10^6 \text{ Nm/m}^3 = 2.47 \text{ MJ/m}^3$

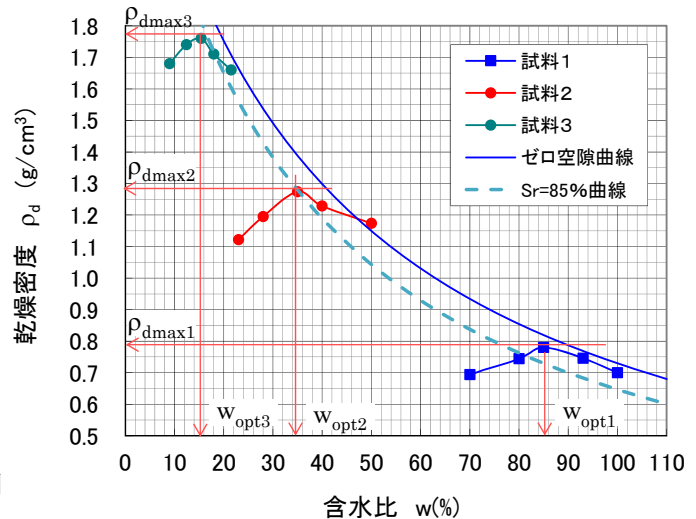
(2) 締固め曲線は次ページ $\rho_d = \frac{\rho_t}{1+w/100}$

(3) w_{opt} 、 ρ_{dmax} は、締固め曲線より

	試料1	試料2	試料3
w_{opt} (%)	85	35.0	15.5
ρ_{dmax} (g/cm ³)	0.78	1.275	1.76

(4) $(\rho_d)_{sat} = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho_w}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{100}}$
 $(\rho_d)_{Sr=90\%} = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho_w}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{90}}$

ゼロ空隙曲線、 $S_r=85\%$ 一定曲線は右図



- (5) 試料3: 路床材 (もっとも工学的に優れている (密度が大きい))
- (6) 試料2の5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。
- (7) 現場締固め土の乾燥密度は、 $\rho_d=1.584\text{g/cm}^3$

$D_c = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100 = 90.0\%$, $\rho_d = \frac{\rho_s}{1+e}$ より $e = \frac{2.65}{1.125} - 1 = 0.704$
 $S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} w / e = 84.4\%$, $v_a = \frac{V_a}{V} \times 100 = \frac{V_v - V_w}{V_s + V_v} \times 100 = \frac{e(100 - S_r)}{1+e} = 6.5\%$

第5問 解答例

5. 現場締固めでは、通常締固め時の土の含水比を最適含水比より大きめにして、所定の締固め度を得る。その理由を締固め土の強度、圧縮性、透水性を用いて説明せよ。(10)

強度、剛性について：締固め時は、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)不飽和状態で発揮されているサクシヨンが、飽和することにより減少、消失するため。

したがって、飽和することによる強度や剛性の低下に伴う、沈下や破壊を抑えるためには、その低下量を小さくする必要があり、湿潤サイドで締固めを行う。

・透水性について：土の透水性は、間隙の寸法に大きく影響を受けるが、特に大きな間隙によって決まる。また、間隙空気は水を通さないため、飽和度が大きくなると透水性は大きくなる。締固め材を遮水構造として用いる場合、小さな透水性が必要となるが、小さな透水性を得るためには、なるべく締固めを均質に行い、大きな間隙の形成を避けるとともに、飽和度上昇による透水性の上昇を抑える必要がある。

湿潤側で締固めを行うと、水が潤滑材の役割を果たし、締固め土が比較的均質な状態となり、更に締固め後の飽和度も乾燥側に比べると大きく、飽和化に伴う透水性の増加量を抑えることができる。