

2019 土質力学第一 期末試験問題、解答例

1. 以下の間に答えよ。(20)

(1) 以下の英語を和訳せよ。

i) Darcy's law ii) hydraulic gradient, iii) optimum water content, vi) void ratio, v) degree of saturation

解答: i) ダルシー則, ii) 動水勾配, iii) 最適含水比, iv) 間隙比, v) 飽和度

(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) 有効応力の原理、ii) 砂のボイリング、iii) プロクターの原理 iv) フィルター材:

i) Principle of effective stress

“飽和した土中内の応力(全応力 σ)は、有効応力(σ')と等方的な間隙水圧(u)の和で表される。全応力と間隙水圧の差である有効応力($\sigma'=\sigma-u$)は、すべて土粒子骨格に作用するものである。

したがって、土の圧縮、せん断、強度、剛性と言った応力の変化に伴う計測しうる量は、もっぱら有効応力の変化によって生じる。言い換えると、これらの量の変化がないということは有効応力も変化していないということである。”

ii) sand boiling/ boiling of sand

“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

“土の締め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、乾燥密度が最大(最大乾燥密度(ρ_{dmax}))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。

2図-1のような平らで一様な砂地盤を考える。はじめ左図のように地下水面は地表面にあり、地下水位以深では土は飽和し、単位体積重量(γ_{sat})は 20kN/m^3 である。砂の比重 $G_s=2.7$ 、静止土圧係数 $K_0=0.5$ 、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。(20)

- (1) 地表面からの深さ15m地点の鉛直・水平全応力(σ_v 、 σ_h)と鉛直・水平有効応力(σ'_v 、 σ'_h)はそれぞれいくらか。
- (2) 深さ15m地点の土要素のモールの応力円を全応力、有効応力についてそれぞれ描け。また、有効応力のモール円には極(P)の位置も示せ。
- (3) 図に示すような水平角 30° の面に作用する、有効直応力(σ'_{30})、せん断力(τ_{30})を求めよ。
- (4) 右図に示すように、地下水位が深さ10mまで低下した。この時に深さ15mの地点の土要素のモールの応力円を全応力、有効応力についてそれぞれ描け。なお、砂の間隙比は変化せず、地下水位以浅での単位体積重量(γ_t)は 18kN/m^3 とする。
- (5) 地下水低下後の地下水面より上の砂の飽和度(S_r)は何%か。

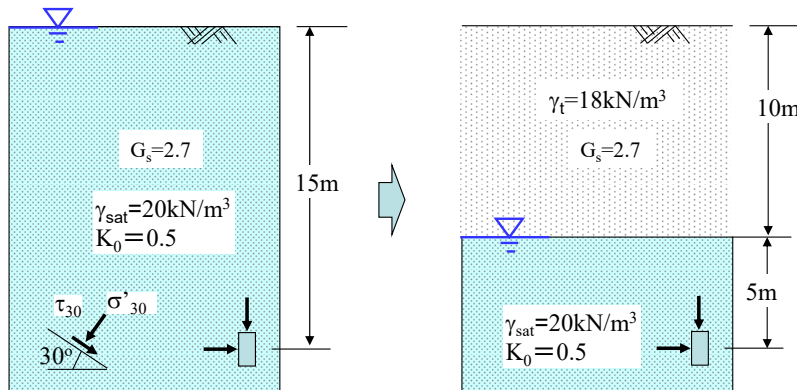
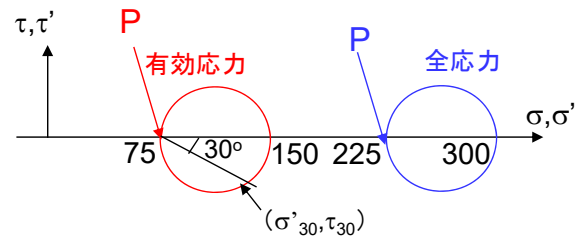


図-1

解答:
(1)

$$\begin{aligned} \sigma_v &= 15\gamma_{sat} = 300 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma'_v &= \sigma_v - u = \sigma_v - 15\gamma_w = 150 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma'_h &= K_0\sigma'_v = 0.5 \times 150 = 75 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma_h &= \sigma'_h + u = 75 + 150 = 225 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

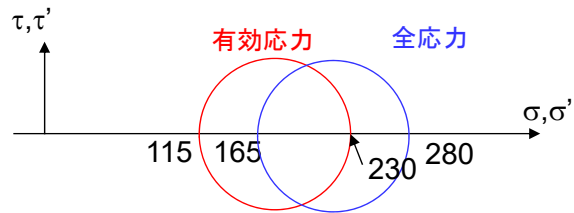


(2) 水平地盤 => 鉛直、水平応力は主応力(σ₁ or σ₃)

(3) 極より30°の線を引き円と交わった点の応力が(σ₃₀, τ₃₀)

$$(\sigma'_{45}, \tau_{45}) = \left(\frac{75+150}{2} + \frac{75}{2} \cos 60^\circ, -\frac{75}{2} \sin 60^\circ \right) = (131.25, -32.48) \text{ (kN/m}^2)$$

(4) $\sigma_v = 10\gamma_t + 5\gamma_{sat} = 280 \text{ kN/m}^2$, $\sigma'_v = \sigma_v - u = \sigma_v - 5\gamma_w = 230 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma'_h = K_0\sigma'_v = 0.5 \times 230 = 115 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma_h = \sigma'_h + u = 115 + 50 = 165 \text{ kN/m}^2$



(5) $\frac{Gs+e}{1+e} \gamma_w = \gamma_{sat} \Rightarrow \frac{2.7+e}{1+e} 10 = 20 \Rightarrow e = 0.7$

$$\frac{Gs+eSr}{1+e} \gamma_w = \gamma_t \Rightarrow \frac{2.7+0.7Sr}{1+0.7} 10 = 18 \Rightarrow Sr = \frac{1.8 \times 1.7 - 2.7}{0.7} = 0.514 = 51.4\%$$

3. 図-2のような一様断面円筒容器内の砂、礫からなる飽和2層試料に対して図示された条件で定水位透水試験を行う。高さの基準を容器下端(D)として、下部ホース端(B)は-1mの高さで固定されている。2試料の飽和単位体積重量(γ_{sat})、透水係数(k)は図に示す通りであり、土粒子比重G_sはいずれも2.7である。水の単位体積重量をγ_w=10kN/m³として、以下の問に答えよ。(20)

- (1) 砂の間隙比はいくらか。
- (2) 定常透水時のF,E,D点の全水頭(h)、圧力水頭(h_p)、間隙水圧(u)はそれぞれいくらか。
- (3) 一時間当たりの透水量Q (m/hr)はいくらか。
- (4) ホース端B点の位置をゆっくり上昇させた時、砂層がボーリングした、その時のB点の高さはおよそ何mか。

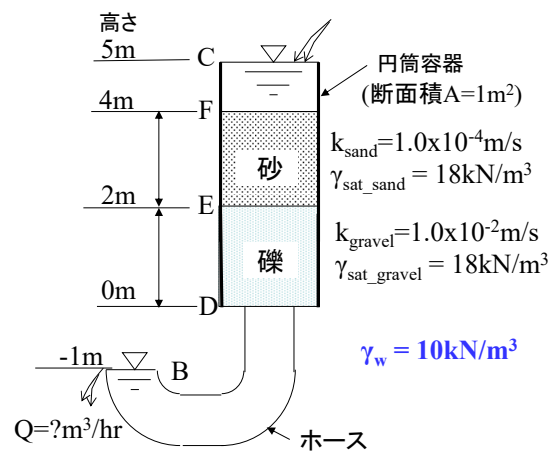


図-2 2層試料の定常透水

解答例：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。

$$(1) \quad \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w = \gamma_{sat} \Rightarrow \frac{2.7 + e}{1 + e} 10 = 20 \Rightarrow e = \frac{2.7 - 2.0}{1.0} = 0.7$$

(2) D点高さを基準(Datum)として、

CF間、DB間では損失無し、 $h_C = h_F = 5\text{m}$ 、 $h_B = h_D = -1\text{m}$ (B,Cでは、圧力水頭ゼロ、位置水頭のみ)
従って、 $h_{pF} = h_F - h_e = 1\text{m}$ 、 $h_{pD} = h_D - h_e = -1\text{m}$ 、 $u_F = h_{pF} \gamma_w = 10\text{kPa}$ 、 $u_D = h_{pD} \gamma_w = -10\text{kPa}$

$$v_{sand} = v_{gravel} = k_{sand} i_{sand} = k_{gravel} i_{gravel}, \quad i_{gravel} = \frac{h_F - h_E}{2}, \quad i_{sand} = \frac{h_E - h_D}{2} \text{より}$$

$$(5 - h_E) 10^{-4} = (h_E - (-1)) 10^{-3}, \quad \therefore h_E = -95 / 101 = -0.94\text{m}$$

$$h_{pE} = h_E - h_e = -0.94\text{m}, \quad u_E = h_{pE} \gamma_w = -9.4\text{kPa}$$

$$\begin{aligned} F: h_F &= 5\text{m}, \quad h_{pF} = 1\text{m}, \quad u_F = 10\text{kPa} \\ D: h_D &= -1\text{m}, \quad h_{pD} = -1\text{m}, \quad u_D = -10\text{kPa} \\ E: h_E &= -0.94\text{m}, \quad h_{pE} = -0.94\text{m}, \quad u_E = -9.4\text{kPa} \end{aligned}$$

$$(3) \quad Q = Av = 1v_U = 1v_L = \frac{101 - 95}{101} \cdot \frac{1}{2} \cdot 10^{-2} = 2.97 \times 10^{-4} \text{m}^3 / \text{s} = 1.07 \text{m}^3 / \text{hr}$$

(4) FD間の水頭差は $z_B - 5$ 、限界動水勾配 i_{cri} は、

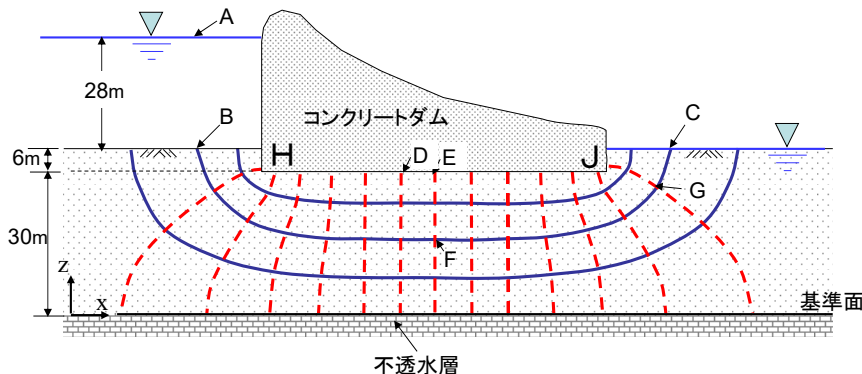
$$(2) \text{と同様にして、} (h_E - 5) 10^{-4} = (z_B - h_E) 10^{-2}, \quad \therefore h_E = (100z_e + 5) / 101$$

$$i_{cri} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = 1.0 \quad \text{であるので} \quad i_{sand} = \frac{h_E - 5}{2} = i_{cri} \text{より} \quad \frac{100}{101} z_B + \frac{5}{101} - 5 = 2 \Rightarrow z_B = (7 \times 101 - 5) / 100 = 7.02\text{m}$$

礫の損失水頭は砂の1/100でほぼ無視できる、 $i_{sand} \approx \frac{h_B - 5}{2} = i_{cri}$ より およそ7m

4.図-3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 $k=5 \times 10^{-5}\text{m/s}$ 、飽和単位体積重量 $\gamma_{sat}=20\text{kN/m}^3$ 、水の単位体積重量 $\gamma_w=10\text{kN/m}^3$ ）を用いて以下の問に答えよ。尚、基準面は下部不透水面高さとする。(25)

- (1) 不透水面で $z=0$ における境界条件式（変数は全水頭 h ）を示せ。
- (2) B点、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F点の深さは地表面から10mとする。
- (4) F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1/10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必要があるか。
- (7) グラウト注入の前後でダム底面の間隙水圧分布はどのように変化するか。概略(数値は不要)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: $\frac{dh}{dz} = 0$

(2)境界条件より、 $h_A=h_B=64\text{m}$ 、 $u_B=280\text{kPa}$ 、 $h_C=36\text{m}$ 、 $u_H=0\text{kPa}$ 、

BH間の水頭差 $\Delta h=28\text{m}$ 、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 $dh=28/14=2\text{m}$

従って、D点の水頭は、 $h_D=h_B-7dh=64-7dh=50\text{m}$ 、

D点の水圧は、 $h_{pD}=h_D-h_{eD}$ 、 $u=h_{pD}\gamma_w$ より、 $u_D=(50-30)\times 10=200\text{kPa}$

(3) G点の全水頭は、 $h_G=h_C+dh=36+dh=38\text{m}$ 、

F点の圧力水頭は $h_{pG}=h_G-h_{eG}=38-26=12\text{m}$

=>水圧 $u_G=h_{pG}\times 10=120\text{kPa}$ => 鉛直有効応力 $\sigma'_{vG}=\sigma_{vG}-u_G=10\times 20-120=80\text{kPa}$

(4) F点付近の正方形の一辺は $30/4=7.5\text{m}$ 、従って、

$i_F=dh/7.5=2/7.5=0.267$ 、 $v=ki_F=5.0\times 10^{-5}\times i_F=1.33\times 10^{-5}\text{m/s}=1.15\text{m/day}$

(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

$$Q = 5 \times 10^{-5} \times \frac{4}{14} \times 28 = 4.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m} = 34.6 \text{ m}^3 / \text{day} / \text{m}$$

(6) 流量を1/10にするためには、DE間以外の動水勾配は、1/10となり、DE間以外の損失水頭は $2\times 13\times 1/10$ となり従って、DE間の損失水頭 $\Delta h'_{DE}$ は $28-2.6=25.4\text{m}$ 、動水勾配は $i'_{DE}=\Delta h'_{DE}/7.5=3.39$ 、DE間の ik が原地盤の1/10になるので、 $i'_{DE}k'_{DE}=1/10 i_{DE}k_{DE}$ => $k'_{DE}=1/10(i_{DE}/i'_{DE})k_{DE}=0.1\times 2/25.4/5\times 10^{-5}=3.9\times 10^{-7}\text{m/s}$

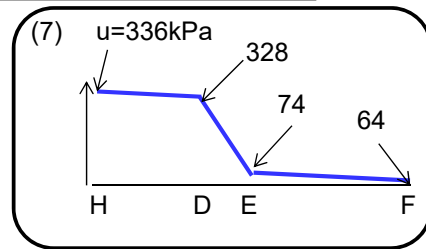
図のH、J点

$$h_H = h_B - 2(dh)/10 = 64 - 4/10 \Rightarrow u = (h_H - h_{eH})\gamma_w = 336\text{kPa}$$

$$h_D = h_B - 6(dh)/10 = 64 - 12/10 \Rightarrow u = (h_C - h_{eC})\gamma_w = 328\text{kPa}$$

$$h_E = h_C + 7(dh)/10 = 36 + 14/10 \Rightarrow u = (h_C - h_{eC})\gamma_w = 74\text{kPa}$$

$$h_D = h_H + 2(dh)/10 = 36 + 4/10 \Rightarrow u = (h_C - h_{eC})\gamma_w = 64\text{kPa}$$



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	78	85	95	100
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.691	0.739	0.773	0.718	0.679
試料2					
平均含水比w (%)	24.0	29.0	35.0	41.0	55
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.161	1.217	1.270	1.220	1.113
試料3					
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.805	1.910	1.990	1.994	1.980
平均含水比w (%)	9.5	13.0	15.5	19.0	23.0

- 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。(解答用紙とともに提出せよ。)
- 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。
- 図中にゼロ空隙曲線、と飽和度80%一定曲線を描け。
- 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。
- 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、どの試料の何番目の計測点か。また、その理由も述べよ。
- 試料3を用いて現場締固め試験を行ったところ、含水比 $w=20\%$ で湿潤密度 $\rho_t=1.920\text{g/cm}^3$ 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。(ここで、水の密度は $\rho_w=1.0\text{g/cm}^3$ 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

$$= 2.5 \times 9.8 \times 0.3 \times 25 \times 3 / (1,000 \times 10^{-6}) = 551 \times 10^3 \text{ Nm} / \text{m}^3 = 551 \text{ kJ} / \text{m}^3$$

(2) 締固め曲線は左図

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

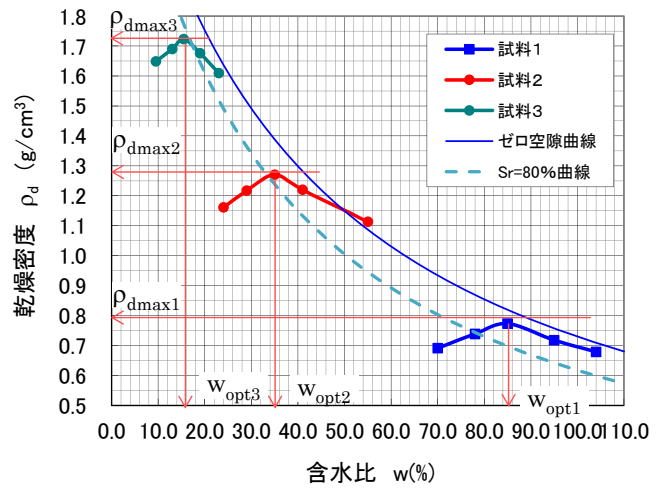
(3) w_{opt} 、 ρ_{dmax} は、締固め曲線より

	試料1	試料2	試料3
w_{opt} (%)	85	35	15.5
ρ_{dmax} (g/cm ³)	0.773	1.270	1.723

(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、Sr=80%一定曲線は右図



(5) 路床材は試料3、乾燥密度も大きく、強度・剛性が高いことが推測されるから

(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、 $\rho_d = 1.920 / (1 + 0.2) = 1.60 \text{ g/cm}^3$

$$D_c = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100 = 92.9\%, \quad \rho_d = \frac{\rho_s}{1+e} \quad \text{より} \quad e = \frac{2.65}{1.579} - 1 = 0.688$$

$$S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} w / e = 78.5\%, \quad v_a = \frac{V_a}{V} \times 100 = \frac{V_v - V_w}{V_s + V_v} \times 100 = \frac{e(100 - S_r)}{1+e} = 8.7\%$$

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、対象土構造物を道路盛土、ロックフィルダムのコア部として、それぞれに求められる機能と締固め土の強度、圧縮性、透水性等に関連づけて説明せよ。(10)

解答例

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ョンが、飽和することにより減少、消失するため。

したがって、道路盛土等では、飽和することによる強度や剛性の低下することにより、沈下や破壊の可能性が上がる。それらを抑えるためには、その低下量を小さくする必要があり、サクションが比較的小さい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。ロックフィルダムのコア部のように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、土自体も比較的柔らかいため、締固め土が均質な状態となり、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。