

2018 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) 以下の用語を英訳せよ。

- i) 動水勾配, ii) 透水係数, iii) 掘抜き井戸, iv) 土の締固め, v) 最大乾燥密度, vi) 最適含水比,
- vii) 毛管上昇, viii) 含水比

解答:i) hydraulic gradient, ii) coefficient of permeability, iii) artesian well, iv) soil compaction,
v) maximum dry density, vi) optimum water content, vii) capillary rise, viii) water content

(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、説明では(1)の用語を2つ以上用いること。

i) ダルシー則、ii)プロクターの原理、iii)凍上

i) Darcy's (Darcian) law:

$$v = -k \frac{dh}{dl} = ki$$

土中水の流量速度(v)は動水勾配(i)に比例する。その比例定数のことを透水係数と呼ぶ。ここでhはピエゾ水頭、lは流れ方向の長さ。

ii) Proctor's principle

“土の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。

iii) Frost heave:

寒冷地では、冬季地表面近くの温度は零度以下となり、間隙水が凍結する。その一方で地下水は凍結せず、毛管上昇によって、表層近くに水が供給され更なる凍結が起こる。結果として、表層部分の含水比、間隙の増加が生じ、気候が暖かくなって間隙水が融解すると、道路路床、舗装等に大きな損傷が生じる。毛管上昇高さは、大きな毛管負圧(サクション)が生じやすい土粒子径、間隙サイズが小さな土ほど大きくなる。そのため粒径が小さな細砂やシルト質、火山灰質土で凍上起こりやすく、粒径が大きな礫質土では毛管上昇起こりにくく、また透水係数が極端に小さな粘土では水の移動が起こりにくく、凍上も起こりにくい。

2.

図-1のような2層試料の定常透水試験を行う。試験では粗砂、細砂、シルトの土試料を用意し、この中から2試料を用いて表1に記した3ケースについて2層地盤を作成し、2層とも完全飽和状態の下で図に示すような条件(試料厚さ、上流、下流端の水位)で下向きの透水を行った。3試料の透水係数(k)、飽和単位体積重量(γ_{sat})、断面積(A)、厚さは図1、表2に示す通りでありある。水の単位体積重量は $\gamma_w = 10\text{kN/m}^3$ 、基準面は現在のホース下流端B点の位置とし、容器内面の摩擦はゼロであるとして以下の間に答えよ。なお、回答は有効数字2桁でよい。(30)

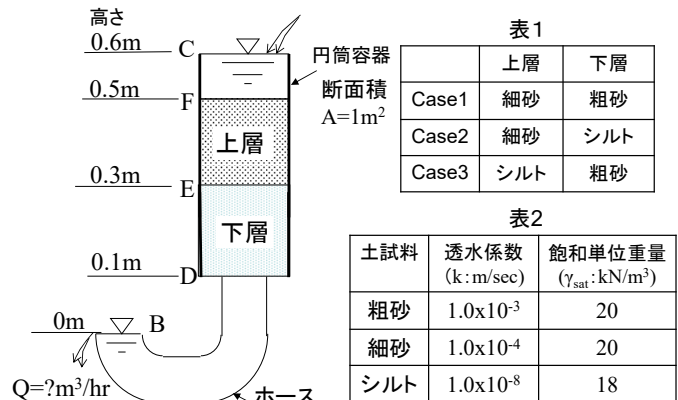


図-1 二層試料の定常透水

$\gamma_w = 10\text{kN/m}^3$

- (1) Case1におけるD、E、F点の位置水頭、全水頭、圧力水頭、水圧はいくらか。
- (2) Case1の単位時間当たり透水量Q (m³/hr) はいくらか。
- (3) Case2の単位時間当たりの透水量Q (m³/hr) はいくらか。
- (4) Case 1においてホース端B点の位置をゆっくり上昇させC点と同じ高さとし、流れない静水圧状態とした。この時のD、E点の鉛直全応力、有効応力はいくらか。
- (5) (4)の状態において、粗砂の静止土圧係数 $K_0=0.5$ として、下層中央深さ(0.2m)の土要素のモールの応力円を描き、全応力、有効応力について描き、極の位置を示せ。
- (6) ホース端BをC点より高くし、B端から水を供給することにより試料に上向きの流れを生じさせた。この条件で3ケースについてB端を徐々に上昇させていくと、ケースによって異なる破壊現象(ボイリング、ヒービング、パイピング)が現れた。それぞれの破壊現象が生じる可能性の高いケースを選び、その理由を簡単に説明せよ。
- (7) (6)でボイリングが生じるケースにおける、ボイリング発生時のB点の高さはいくらか。

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) B点高さを基準(Datum)として、 $h_{eF}=0.5m$, $h_{eE}=0.3m=h_{eD}=0.1m$
 CF間、DB間では損失無し、従って、 $h_C=h_F=0.6m$, $h_B=h_D=0m$ (B,Cでは、圧力水頭ゼロ、位置水頭のみ)
 より、砂上層(U)、下層(L)IIについて

$$v_U = v_L = k_U i_U = k_L i_L, \quad i_U = \frac{h_F - h_E}{L_U}, \quad i_L = \frac{h_E - h_D}{L_L} \text{より}, \quad (0.6 - h_E)10^{-4} = (h_E - 0)10^{-3}, \quad \therefore h_E = 0.6/11 = 0.055m$$

$$h_p = h - h_e, \quad u = \gamma_w p_p \text{より},$$

$$h_{pF} = h_F - h_{eF} = 0.6 - 0.5 = 0.1m, \quad u_F = 1.0kPa$$

$$h_{pE} = h_E - h_{eE} = 0.055 - 0.3 = -0.245m, \quad u_E = -2.45kPa$$

$$h_{pD} = h_D - h_{eD} = 0 - 0.1 = -0.1m, \quad u_D = -1.0kPa$$

	全水頭 (m)	位置水頭 (m)	圧力水頭 (m)	水圧 (kPa)
F	0.6	0.5	0.10	1.0
E	0.055	0.3	-0.245	-2.45
D	0	0.1	-0.10	-1.0

(2)
$$Q_{case1} = Av = 1v_U = 1v_L = \frac{0.6 \cdot 10^{-3}}{11 \cdot 0.2} = 2.7 \times 10^{-4} m^3 / s = 0.98 m^3 / hr$$

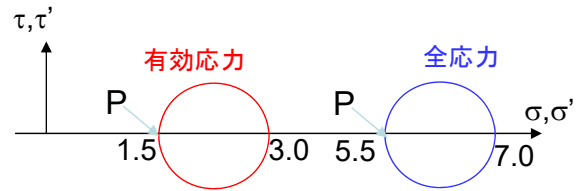
- (3) 細砂とシルトの透水係数の差は 1.0×10^4 であり、FC間の損失水頭の細砂の割合は、 $1/10001$ 、有効数字2桁では無視でき、 $iL \sim 0.6/0.2=3$ と近似できる

$$Q_{case2} = Av = 1v_L = 3 \times 10^{-8} m^3 / s = 1.08 \times 10^{-4} m^3 / hr$$

- (4)
$$\sigma_v = 0.1\gamma_w + (0.5-z)\gamma_{sat}, \quad u = (0.6-z)\gamma_w,$$

$$\sigma_{vE} = 5kPa, \quad \sigma'_{vE} = 2kPa, \quad \sigma_{vD} = 9kPa, \quad \sigma'_{vD} = 4kPa$$
- (5)
$$\sigma_{v_{z=0.2}} = 7kPa, \quad \sigma'_{v_{z=0.2}} = 3kPa,$$

$$\sigma'_{h_{z=0.2}} = K_0 \sigma'_{v_{z=0.2}} = 1.5kPa, \quad \sigma_{v_{z=0.2}} + u = 5.5kPa$$



- (6) B点を上昇した時の高さ $z_B (>0.6m)$ とするとD点の全水頭、水圧は $h_D=h_B$, $u_D=10z_B-1$ (kPa)

・ボーリングは、Case1で最も早く生じる。

上層の砂の動水勾配が、下層より10倍大きく、有効応力ゼロの状態に最も早くなる。

・ヒービングは、透水性が小さいシルト層が含まれるケースで生じる。シルト層下面の揚圧力(間隙水圧×断面積(A))が、その上部の全荷重(土+水)の荷重を超えると、それらを持ち上げる。シルト層がある2ケースの中では、

Case3で最も早く生じる、粗砂のロスが無視できるので、E点の水圧は $u_D=10z_B-2$ (kPa)となり、更に持ち上げる重量のうち土の部分は上層(シルト層)のみであるから、下部にシルトがあるCase2より、低いB点の高さでヒービングが生じる

・パイピングも透水性の低いシルト層が含まれるケースで起こりやすい、このケースでは上部に砂層があり、ヒービングが起こり難く、高い上向きの動水勾配をかけることが出来るCase2で起こりやすい。

- (7) FD間の水頭差は $z_B-0.6$ 、限界動水勾配 i_{cri} は、

(1) と同様にして、 $(h_E - 0.6)10^{-4} = (z_e - h_E)10^{-3}, \quad \therefore h_E = (10z_e + 0.6)/11$

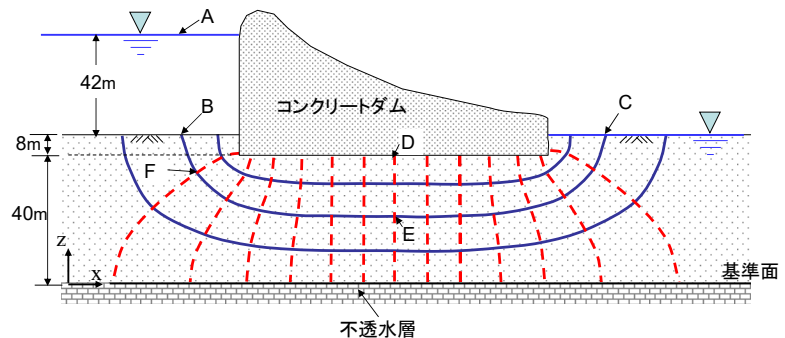
$$i_{cri} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = 1.0 \quad \text{であるので} \quad i_U = \frac{h_E - 0.6}{0.2} = i_{cri} \text{より} \quad \frac{10}{11}z_B - \frac{10}{11}0.6 = 0.2 \quad z_B = 0.6 + 0.2 \cdot \frac{11}{10} = 0.82m$$

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砂質土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 $k=1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 、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高さとする。（30）

- (1) 上流（B点）側、下流側（C点）の地盤表面、および下部不透水面($z=0$)における境界条件式（変数は全水頭 h ）を示せ。
- (2) D点の全水頭（ h ）、及び間隙水圧（ u ）はそれぞれいくらか。
- (3) F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15mとする。また、G点におけるコンクリートダムの荷重伝播の影響は無視できるものとする。
- (4) E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) ダム下の透水量を下げるために砂地盤中に遮水構造としての矢板を不透水層まで貫入することが検討されている。コンクリート部には矢板を貫入できないため、この矢板貫入はダムの上流側面、下流側面いずれからのみ可能である。この貫入にはどちら側が適しているか、その理由を含めて答えよ

回答例

- (1) 上流側地盤表面で水頭一定： $h=90\text{m}$
 下流側でも $h=48\text{m}$
 不透水面の z 方向の流れ $\frac{dh}{dz} = 0$
 (動水勾配) ゼロ：



- (2) 境界条件より、 $h_A=h_B=90\text{m}$ 、 $u_B=420\text{kPa}$ 、 $h_C=48\text{m}$ 、 $u_C=0\text{kPa}$ 、
 BH 間の水頭差 $\Delta h=42\text{m}$ 、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 $dh=42/14=3\text{m}$
 従って、D点の水頭は、 $h_D=h_B-7dh=90-7 \times 3=69\text{m}$ 、
 D点の水圧は、 $h_{pD}=h_D-h_{eD}$ 、 $u=h_{pD} \times 10=290\text{kPa}$

- (3) F点の全水頭は、 $h_F=h_B-dh=90-3=87\text{m}$ 、
 F点の圧力水頭は $h_{pF}=h_F-h_{eF}=87-33=54\text{m}$
 \Rightarrow 水圧 $u_G=h_{pG} \times 10=540\text{kPa}$ \Rightarrow 鉛直有効応力 $\sigma'_{\text{vg}}=\sigma_{\text{vg}}-u_G=15 \times 20+10 \times 42-540=180\text{kPa}$

- (4) E点付近の正方形の一辺は $10/4=2.5\text{m}$ 、従って、
 $i_F=dh/10=3/10=0.3$ 、 $v=ki_F=1.0 \times 10^{-6} \times 0.3=3.0 \times 10^{-7} \text{m/s}=0.026 \text{m/day}$

- (5) $q=-k(N_f/N_d)(h_B-h_C)$ より、単位奥行き幅(1m)、一日当りの透水量は
 $Q=1 \times 10^{-6} \times \frac{4}{14} \times 42=1.2 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}=1.04 \text{m}^3/\text{day}/\text{m}$

- (6) 上流側
 【理由：下流側で地下水流を止めると、ダム下面に大きな水圧（流れがなくなると最大500kPa）が作用し、その揚力によって、ダムが不安定化する。】

厳密には、ダムと地盤との間の有効応力が大きく低下し、滑動力(ダム背面から作用する水圧、地震力等)に対して十分は抵抗力(ダム底面での摩擦力(これは摩擦係数と有効荷重(ダムの重量から揚力を引いたもの)が得られなくなる。

- 4.土粒子密度が等しい ($\rho_s=2.7\text{g/cm}^3$) 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2209ml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 (%)	10.0	14.0	17.0	21.0	28.0
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.627	1.668	1.703	1.648	1.559
試料2					
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.450	1.578	1.730	1.731	1.715
平均含水比w (%)	24.0	29.0	35.0	41.0	48.0
試料3					
平均含水比w (%)	70	78	85	93	102
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.691	0.739	0.765	0.715	0.678

- 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。
- 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、どの試料の何番目の計測点か。また、その理由も述べよ。
- 試料1を用いて現場締固め試験を行ったところ、含水比 $w=20\%$ で湿潤密度 $\rho_t=1.924\text{g/cm}^3$ 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
 $= 2.5 \times 9.8 \times 0.3 \times 55 \times 3 / (2,209 \times 10^{-6}) = 549 \times 10^3 \text{ Nm} / \text{m}^3 = 549 \text{ kJ} / \text{m}^3$

- (2) 締固め曲線は左図

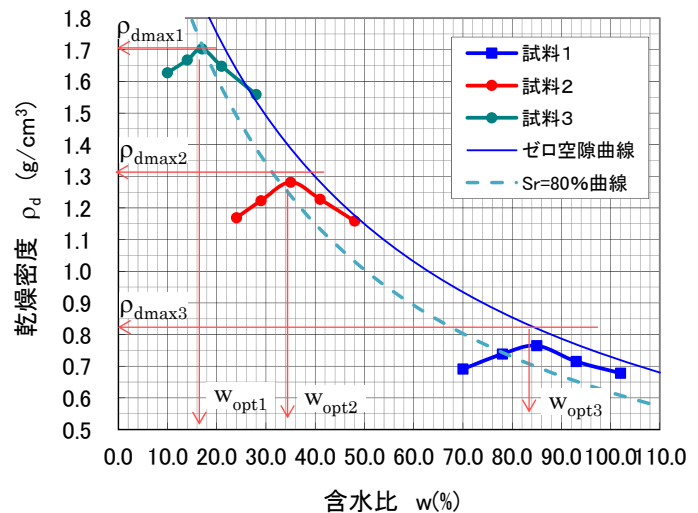
$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w/100}$$

- (3) w_{opt} 、 ρ_{dmax} は、締固め曲線より

	試料1	試料2	試料3
w_{opt} (%)	17.0	35.0	85.0
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.703	1.281	0.765

(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、 $S_r=80\%$ 一定曲線は右図



- 試料1: 路床材 (もっとも工学的に優れている (密度が大きい))
 試料2: 砂質ローム (試料1、3の中間的な性質)
 試料3: 粘土質ローム (最適含水比が大きく、最大乾燥密度が小さい、粒径の小さな粘土分を多く含んでいる)
- 試料1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。
- 現場締固め土の乾燥密度は、 $\rho_d = 1.924 / (1 + 0.2) = 1.603 \text{ g/cm}^3$

$$D_c = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100 = 94\%, \quad \rho_d = \frac{\rho_s}{1 + e} \quad \text{より} \quad e = \frac{2.65}{1.579} - 1 = 0.684$$

$$S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} w / e = 79\%, \quad v_a = \frac{V_a}{V} \times 100 = \frac{V_v - V_w}{V_s + V_v} \times 100 = \frac{e(100 - S_r)}{1 + e} = 8.6\%$$

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オンが、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、サクシオ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、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。