

2017 土質力学第一 期末試験問題、解答例

1. 以下の問に答えよ。(15)

(1) 以下の英語を和訳せよ。

i) void ratio, ii) effective stress iii) hydraulic gradient, iv) artesian well, v) optimum water content

解答: i) 間隙比、ii) 有効応力、iii) 動水勾配、iv) 堀ぬき井戸、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) プロクターの原理

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。ここで h はピエゾ水頭、 l は流れ方向の長さ

ii) 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。

2. 図-1のような平らで一様（間隙比一定）な砂地盤を考える。はじめ地下水面は地表面下10m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/m³、地下水位以浅での単位体積重量（ γ_t ）は18kN/m³であった。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 $\gamma_w=10\text{kN/m}^3$ として以下の問に答えよ。（20）

- (1) この砂地盤の間隙比(e)、地下水位以浅の飽和度(S_r)はそれぞれいくらか。
- (2) 地表面からの深さ20m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。
- (3) 深さ20m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。
- (4) 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})はそれぞれいくらか。
- (5) 図に示すように、地下水位が地表面まで上昇し、全層が飽和した時の深さ20m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。

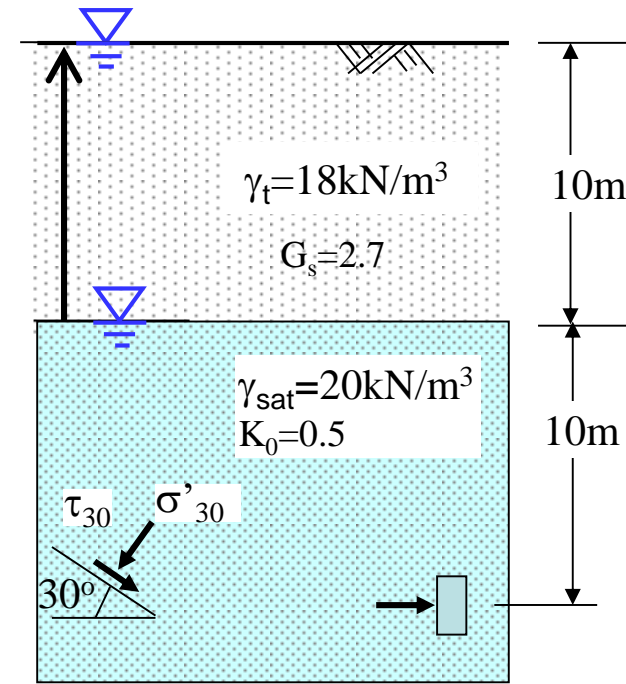


図-1

解答例

$$(1) \quad \gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w = 20, \quad \gamma_t = \frac{G_s + e S_r / 100}{1 + e} \gamma_w = 18$$

$$\therefore 2(e + 1) = G_s + e \Rightarrow e = 2.7 - 2 = 0.7$$

$$S_r = 100 \times \frac{1.8 \times 1.7 - 2.7}{0.7} = 51.4\%$$

解答:

$$(2) \sigma_v = 10\gamma_t + 10\gamma_{sat} = 380 \text{ kN/m}^2, \quad \sigma'_v = \sigma_v - u = \sigma_v - 10\gamma_w = 280 \text{ kN/m}^2$$

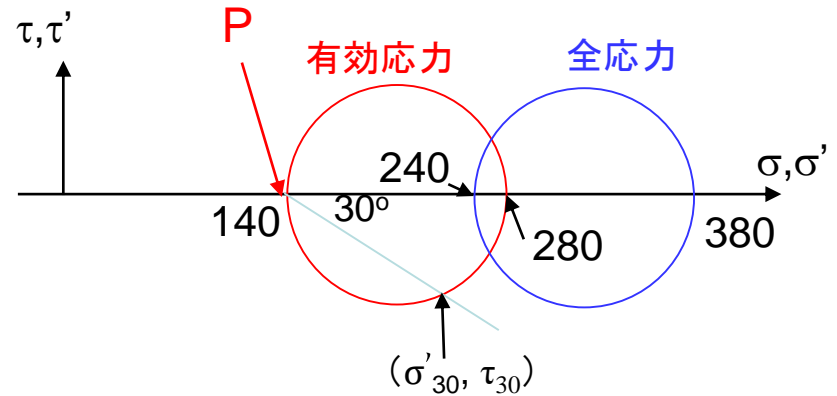
$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v = 0.5 \times 280 = 140 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_h = \sigma'_h + u = 140 + 100 = 240 \text{ kN/m}^2$$

(3) 水平地盤 => 鉛直、水平応力は主応力 (σ_1 or σ_3)

(4) 極より 30° の線を引き円と交わった点の応力が (σ'_{30}, τ_{30})

$$(\sigma'_{30}, \tau_{30}) = \left(\frac{140 + 280}{2} + \frac{280 - 140}{2} \cos 60^\circ, -\frac{280 - 140}{2} \sin 60^\circ \right) = (245, 60.6) \text{ (kN/m}^2)$$

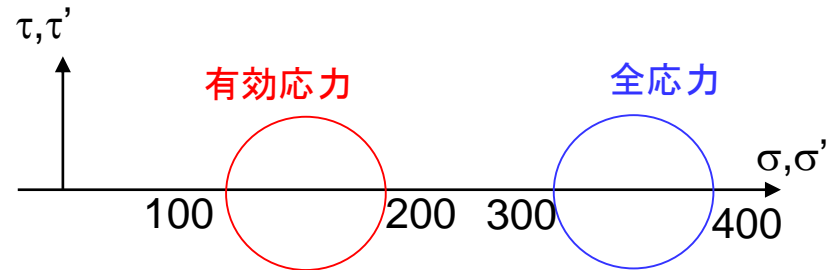


$$(5) \sigma_v = 20\gamma_{sat} = 400 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = \sigma_v - 20\gamma_w = 200 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v = 0.5 \times 200 = 100 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_h = \sigma'_h + u = 100 + 200 = 300 \text{ kN/m}^2$$



3. 図-2のような透水係数 (k)、断面積 (A)、厚さ (L)、単位体積飽和重量 (γ_{sat})、をもつ2種の砂(砂I、砂II)からなる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。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 -1m とし、C点からの注水进行、円筒内の水位を容器上端(4m)に固定し、定常透水を行った結果、 $Q=0.36\text{m}^3/\text{hr}$ の流量速度となった。断面変化の影響は無視でき、試料内の流れはすべて鉛直方向に一次元的に生じていると仮定し、以下の間に答えよ。なお、水の単位体積重量は $\gamma_w=10\text{kN/m}^3$ として、基準面はF点の位置とする。(20)

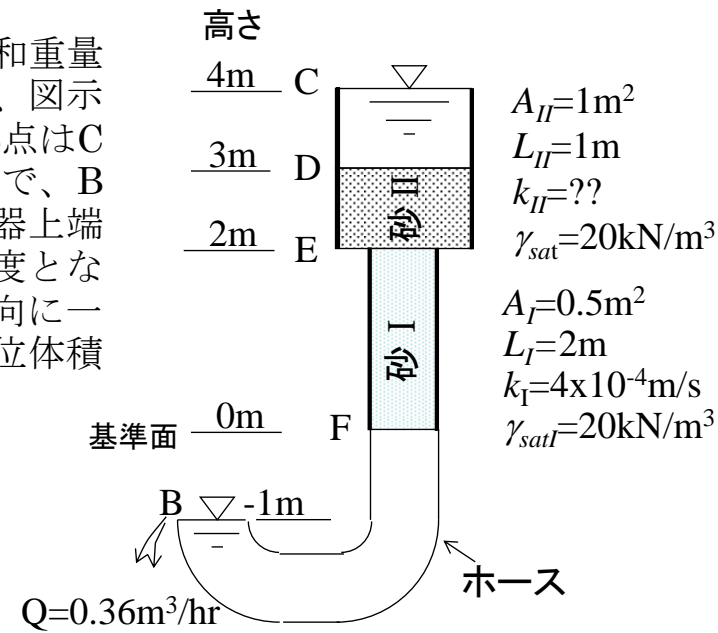


図-1 図-2 2層砂試料の定常透水

- 透水前の静水圧状態 (水面高さ4m)における、C点からF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点、E点、F点での全水頭、全応力、間隙水圧、有効応力はそれぞれいくらか。
- 砂IIの透水係数 (k_{II}) を求めよ。
- ホース端B点の位置をゆっくり上昇させた時、どちらの砂が最初にボイリングを起こすか。また、その時のB点とC点の水位差はいくらか。

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) (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:

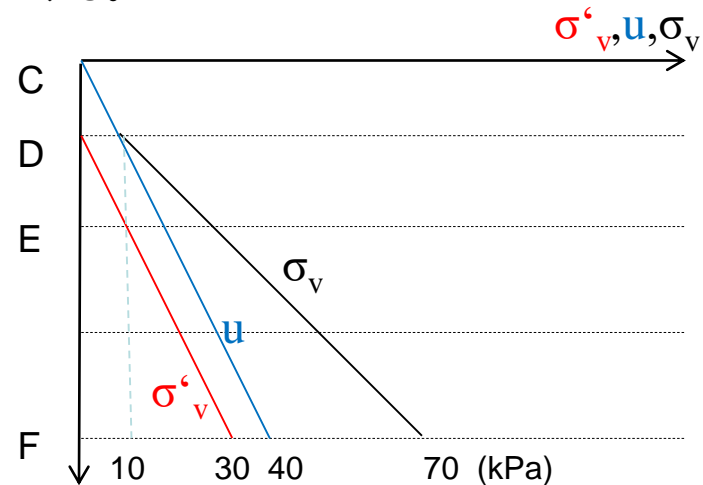
$$\underline{h_C=h_D=h_E=h_F=4\text{m}} \text{ 水圧 } u=\gamma_w z \text{ (z:水深)}$$

$$C: u=0\gamma_w=0\text{kPa}, \sigma_v=0\cdot\gamma_w=0\text{kPa}, \sigma'_v=\sigma_v-u=0\text{kPa}$$

$$D: u=1\gamma_w=10\text{kPa}, \sigma_v=1\cdot\gamma_w=10\text{kPa}, \sigma'_v=0\text{kPa}$$

$$E: u=2\gamma_w=20\text{kPa}, \sigma_v=1\cdot\gamma_w+1\cdot\gamma_{sat}=30\text{kPa}, \sigma'_v=10\text{kPa}$$

$$F: u=4\gamma_w=40\text{kPa}, \sigma_v=1\cdot\gamma_w+3\cdot\gamma_{sat}=70\text{kPa}, \sigma'_v=30\text{kPa}$$



$$(2) \quad v = Q/A = v_I = \frac{0.36}{0.5} = 0.36 \text{ m/hr} = 2.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}, \quad v_{II} = \frac{0.36}{1.0} = 0.36 \text{ m/hr} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s},$$

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

$$i_I = \frac{h_E - h_D}{L_I} = \frac{v_I}{k_I} = \frac{2 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-4}} = 0.5, \quad \therefore h_E = h_F + 0.5 \times 2 = 0\text{m},$$

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

$$h_D = 4\text{m}, \quad h_{pD} = 4 - 3 = -1\text{m}, \quad u_D = h_{pD} \gamma_w = 10\text{kPa}, \quad \sigma'_{vD} = \sigma_{vD} - u_D = 10 - (10) = 0\text{kPa}$$

$$h_E = 0\text{m}, \quad h_{pE} = 0 - 2 = -2\text{m}, \quad u_E = h_{pE} \gamma_w = -20\text{kPa}, \quad \sigma'_{vE} = \sigma_{vE} - u_E = 30 - (-20) = 50\text{kPa}$$

$$h_F = -1\text{m}, \quad h_{pF} = -1 - 0 = -1\text{m}, \quad u_F = h_{pF} \gamma_w = -10\text{kPa}, \quad \sigma'_{vF} = \sigma_{vF} - u_F = 70 - (-10) = 80\text{kPa}$$

$$(3) \quad i_{II} = \frac{h_D - h_E}{L_{II}} = \frac{4}{1} = 4, \quad k_{II} = \frac{v_{II}}{i_{II}} = \frac{1 \times 10^{-4}}{4} = 2.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

(4) 砂Iより砂IIの上向き導水勾配の方が、8倍大きく、
砂IIでボーリングが起きる。

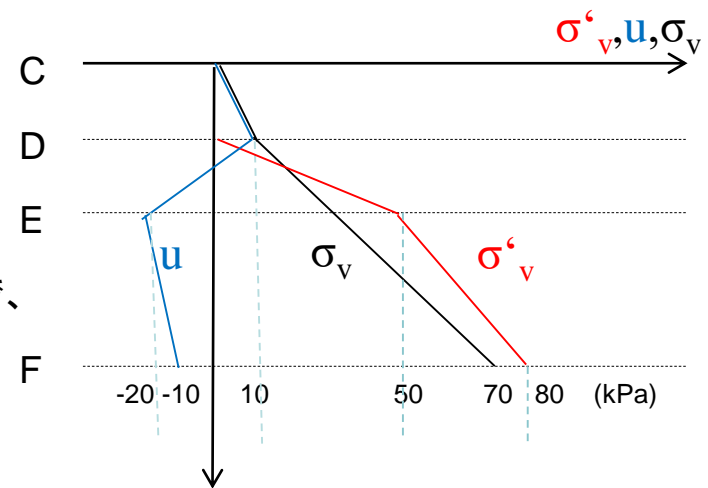
$$\Delta h_{DE} + \Delta h_{EF} = \Delta h_{CB} \text{、限界動水勾配 } i_{cri} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = 1.0 \text{ であるので、}$$

この時の $\Delta h_{FG} = i_{cri} \cdot 1 = 1.0\text{m}$ で、この時の全水頭差

$$\Delta h_{CB} = \Delta h_{DE} + \Delta h_{EF} = \left(1 \times i_{cr} + \frac{1}{8} i_{cr} \cdot 2 \right) = 1.25\text{m}$$

【おまけ】その時の透水量は、

$$Q = vA = v_I A = v_{II} A = \frac{1}{8} \times 4 \times 10^{-4} \times 0.5 = 1 \times 2.5 \times 10^{-5} \times 1 = 2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 0.09 \text{ m}^3/\text{hr}$$



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 $k=1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 、飽和単位体積重量 $\gamma_{\text{sat}}=20 \text{kN/m}^3$ 、水の単位体積重量 $\gamma_w=10 \text{kN/m}^3$ ）を用いて以下の問に答えよ。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点とF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5m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1/10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ことが必要か。
- (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。
- (8) ダム下の透水量をさらに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。

Hint: ダム下の水圧はダムを持ち上げる力（揚力）となる。

回答例

(1) 地盤表面で水頭一定： $h=65\text{m}$

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

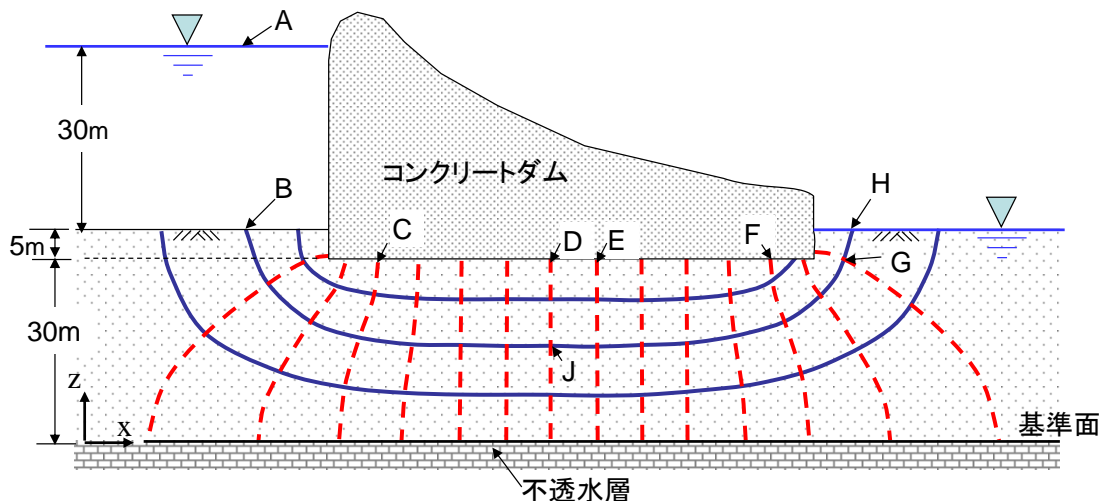


図-3 重力式ダム下地盤の定常透水における正方形フローネット

(2)境界条件より、 $h_A=h_B=65\text{m}$ 、 $u_B=300\text{kPa}$ 、 $h_H=35\text{m}$ 、 $u_H=0\text{kPa}$ 、

BH間の水頭差 $\Delta h=30\text{m}$ 、正方形フローネットより(等ポテンシャル線の分割数 $N_d=15$)、

等ポテンシャル線間の損失水頭 $dh=30/15=2\text{m}$

従って、D点の水頭は、 $h_D=h_B-7dh=65-7dh=51\text{m}$ 、

D点の水圧は、 $h_{pD}=h_D-h_{eD}$ 、 $u=h_p g_w$ より、 $u_D=(51-30)\times 10=210\text{kPa}$

F点の水頭は、 $h_F=h_H+3dh=35+3dh=41\text{m}$ 、

E点の水圧は、 $h_{pF}=h_F-h_{eF}$ 、 $u=h_p g_w$ より、 $u_F=(41-30)\times 10=110\text{kPa}$

(3) G点の全水頭は、 $h_G=h_H+dh=35+dh=37\text{m}$ 、

G点の圧力水頭は $h_{pG}=h_G-h_{eG}=37-30=7\text{m}$

=>水圧 $u_G=h_{pG}\times 10=70\text{kPa}$ => 鉛直有効応力 $\sigma'_{vg}=\sigma_{vg}-u_G=5\times 20-70=30\text{kPa}$

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

$i_j=dh/7.5=2/7.5=0.267$ 、 $v=ki_j=1.0\times 10^{-5}\times i_j=2.7\times 10^{-6}\text{m/s}=0.23\text{m/day}$

(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

$$Q = \frac{1 \times 10^{-5} \times \frac{4}{15} \times 30}{15} = 8.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{ s} / \text{ m} = 6.9 \text{ m}^3 / \text{ day} / \text{ m}$$

(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で、DE間以外の損失水頭は $2\times 1/10$ となる。

従って、DE間の損失水頭 $\Delta h'_{DE}$ は $30-2/10\times 14=27.2\text{m}$ 、動水勾配は $i'_{DE}=\Delta h'_{DE}/7.5=3.63$ 、DE間の ik が原地盤の1/10

になるので、 $i'_{DE}k'_{DE}=1/10 i_{DE}k_{DE} \Rightarrow k'_{DE}=1/10(i_{DE}/i'_{DE})k_{DE}=0.1((2/7.5)/(27.2/7.5))\times 1.0\times 10^{-5}=7.3\times 10^{-8}\text{m/s}$

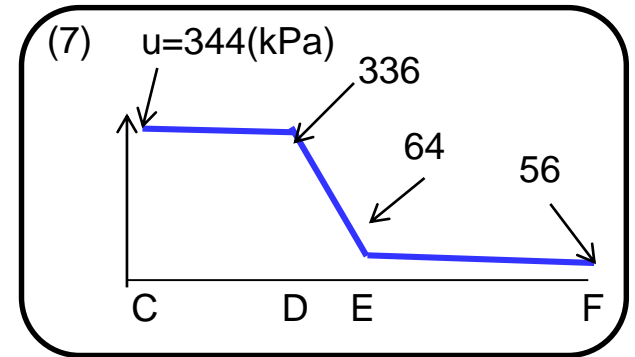
(7)

$$h_C = h_B - 3(dh)/10 = 65 - 3(2/10) \Rightarrow u = (h_C - h_{eC})\gamma_w = 344kPa$$

$$h_D = h_B - 7(dh)/10 = 65 - 7(2/10) \Rightarrow u = (h_D - h_{eD})\gamma_w = 336kPa$$

$$h_E = h_H + 7(dh)/10 = 35 + 7(2/10) \Rightarrow u = (h_E - h_{eE})\gamma_w = 64kPa$$

$$h_F = h_H + 3(dh)/10 = 35 + 3(2/20) \Rightarrow u = (h_F - h_{eF})\gamma_w = 56kPa$$



(8) 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350kPa）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。

5. 土粒子密度が等しい ($\rho_s=2.65\text{g/cm}^3$) 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。以下の問に答えよ。(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 (%)	11	15	18	21	24
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.595	1.635	1.661	1.620	1.592
試料 2					
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.434	1.578	1.727	1.725	1.730
平均含水比w (%)	25	30	36	42	50
試料 3					
平均含水比w (%)	70	80	86	93	100
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.695	0.744	0.768	0.720	0.685

- (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を描け。
- (5) 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。
- (6) 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。
- (7) 試料1を用いて現場締め固め試験を行ったところ、含水比 $w=21\%$ で湿潤密度 $\rho_t = 1.910 \text{ g/cm}^3$ 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
 $= 2.5 \times 9.8 \times 0.3 \times 25 \times 3 / (1,000 \times 10^{-6}) = 551 \times 10^3 \text{ Nm/m}^3 = 551 \text{ kJ/m}^3$

(2) 締固め曲線は次ページ

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

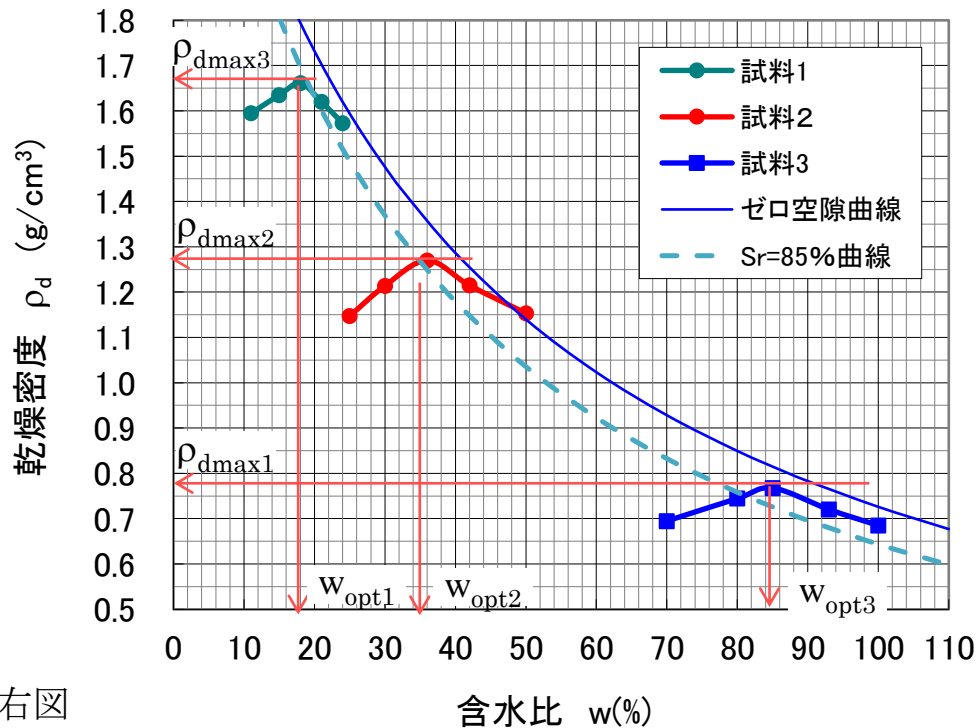
(3) w_{opt} 、 ρ_{dmax} は、締固め曲線より

	試料1	試料2	試料3
w_{opt} (%)	18.0	36.0	85.0
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.661	1.272	0.768

(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, 【参考】 Sr=85%一定曲線は右図



(5) 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）

(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、 $\rho_d = 1.579 \text{ g/cm}^3$

$$D_c = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100 = 95\%, \quad \rho_d = \frac{\rho_s}{1+e} \quad \text{より} \quad e = \frac{2.65}{1.579} - 1 = 0.679$$

$$S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} w / e = 82.0\%, \quad v_a = \frac{V_a}{V} \times 100 = \frac{V_v - V_w}{V_s + V_v} \times 100 = \frac{e(100 - S_r)}{1+e} = 7.3\%$$

6. 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、透水性等に関連して説明せよ。(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、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。