

## 2012 土質力学第一 期末試験問題、解答例

1. 以下の間に答えよ。(15)

(1) 以下の英語を和訳せよ。

i) optimum water content, ii) void ratio, iii) degree of saturation, iv) effective stress, v) hydraulic gradient

解答:i) 最適含水比、ii) 間隙比、iii) 飽和度、iv) 有効応力、v) 動水勾配

(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) 定水位透水試験、ii) プロクターの原理

i) constant head permeameter test:

土の透水係数(k)を求めるため室内試験。一定断面のモールド内の土試料に上下面の水頭差(Δh)(動水勾配i)を一定の状態の(定常)透水を起こさせ、単位時間流量からもまる速度流速vとダルシー則(v=ki)より、kを求める。  
試験時間と測定精度の関係上、この試験は比較的透水係数が大きな土に適している。

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。

2. 右図のようなスタンドパイプ断面積 $a=0.5\text{cm}^2$ 、供試体断面積 $A=100\text{cm}^2$ 、供試体高さ $L=10\text{cm}$ の変水位試験装置を用いて、細砂試料の透水試験を室温(15°C)と同じ温度の水を用いて行った。この温度における水の密度を $1\text{g/cm}^3$ として以下の間に答えよ。(15)

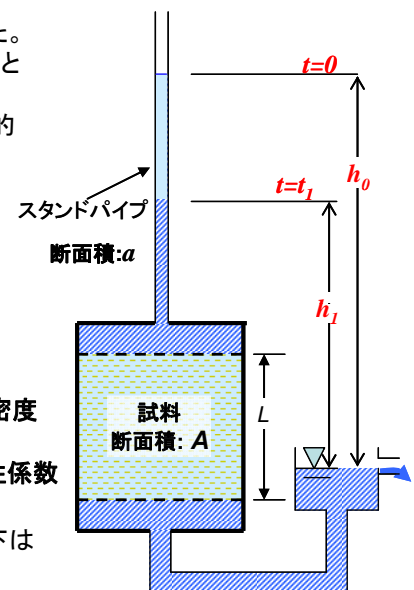
- 時間 $t=0\text{sec}$ と $100\text{sec}$ におけるスタンドパイプ水面と排水面の高さの差 $h_0, h_1$ はそれぞれ $100\text{cm}$ と $50\text{cm}$ であった。この細砂試料の透水係数はいくら。
- 上記と試験を室温、水温のみが高温(30°C)で、他は全く同じ条件で行った。この時の時間 $t=100\text{sec}$ におけるスタンドパイプ水面の高さは4°Cに比べると高いか、低いかわ、その理由とともに答えよ。
- 変水位透水試験の適用土質(透水係数)の範囲について説明せよ。定性的な説明でOK。

$$(1) \quad k = \frac{aL}{A} \cdot \frac{\ln(h_0/h_1)}{t_1 - t_0} = \frac{0.5 \times 10}{100} \cdot \frac{\ln(2)}{100} \\ = 3.5 \times 10^{-4} \text{ cm/sec} = 3.5 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$$

- (2) 透水係数 $k$ は、土固有の定数ではなく、流体の密度や粘性係数によって変化する。水の密度は、温度によってそれほど変化しないが、粘性は温度の影響を大きく受け、30°Cの粘性係数は15°Cの約0.7である。従って、透水係数 $k$ は大きくなるため、スタンドパイプ内の水位の落下は速くなり、水面の位置は15°Cの場合より低くなる。

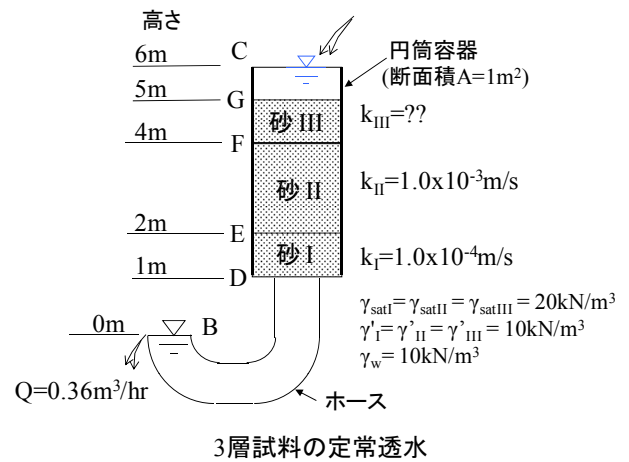
$$k = \frac{k_s \rho g}{\mu}$$

絶対透水係数  $k_s$       流体の密度  $\rho$       流体の粘性係数  $\mu$



- (3) 理論的には、どのような土質でも適用は可能であるが、透水係数が大きいとスタンドパイプの水位の降下スピード速すぎて、正確な測定が難しく。一方、小さすぎると非常に長い実験時間を要する。従って、適用範囲は、透水係数が大きすぎず、小さすぎずということになり。  $10^{-9}\text{m/s} < k < 10^{-4}\text{m/s}$ 程度(特殊な変水位装置はのぞく)。

3. 右図のように飽和単位体積重量 ( $\gamma_{sat}$ )、水中有効重量 ( $\gamma'$ ) 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、 $Q=0.36\text{m}^3/\text{hr}$ の流量速度をB点で得た。水の単位体積重量は $\gamma_w=10\text{kN/m}^3$ として、以下の問に答えよ。(30)



- (1) 砂の間隙比  $e$  と比重  $G_s$  の関係を求めよ。
- (2) 透水前の静水圧上端 (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。  
とCの水位差はいくらか。
- (3) 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。
- (4) D,E,F,G点の水圧はそれぞれいくらか。
- (5) 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。
- (6) 砂IIIの透水係数 ( $k_{III}$ ) を求めよ。
- (7) ホースBの位置を上昇させ、試料内の流れを上向きにした場合、最初にボーリングが発生する砂はどれか、またその時のBとCの水位差はいくらか。

解答

(1)

$$\gamma' = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w = 10, \quad \gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w = 20$$

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

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:

$$h_D = h_E = h_F = h_G = h_C = 6\text{m 水圧 } u = \gamma_w z \quad (z: \text{水深})$$

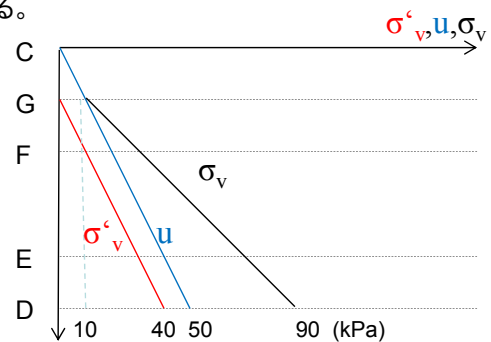
$$D: u = 5\gamma_w = 50\text{kPa}, \quad \sigma_v = 1 \cdot \gamma_w + 4 \cdot \gamma_{sat} = 90\text{kPa}, \quad \sigma'_v = \sigma_v - u = 40\text{kPa}$$

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

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

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

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



(3)  $v = Q/A = v_I = v_{II} = v_{III} = \frac{0.36}{1.0} = 0.36\text{m/hr} = 1.0 \times 10^{-4}\text{m/s}$

CF間、DB間では損失無し、従って、 $h_C = h_G = 6\text{m}$ ,  $h_B = h_D = 0\text{m}$  (B,Cでは、圧力水頭ゼロ、位置水頭のみ)

より、砂 I、II について、

$$i_I = \frac{h_E - h_D}{L_I} = \frac{v_I}{k_I} = \frac{1 \times 10^{-4}}{1 \times 10^{-4}} = 1.0, \quad \therefore h_E = h_D + 1 \times 1 = 1\text{m}, \quad i_{II} = \frac{h_F - h_E}{L_{II}} = \frac{v_{II}}{k_{II}} = \frac{1 \times 10^{-4}}{1 \times 10^{-3}} = 0.1, \quad \therefore h_F = h_E + 2 \times 1 = 1.2\text{m}$$

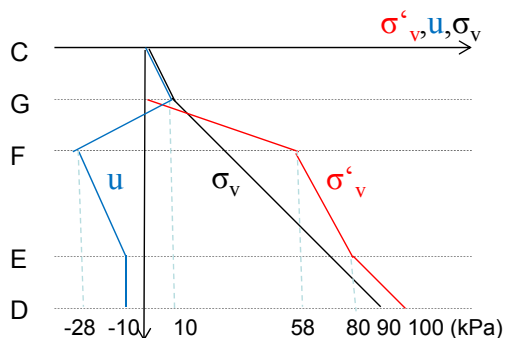
(4) (5) 全応力は変化なし、また  $h_p = h - h_e$ 、 $u = h_p \gamma_w$  より

$$h_{pD} = 0 - 1 = -1, \quad u_D = h_{pD} \gamma_w = -10\text{kPa}, \quad \sigma'_{vD} = \sigma_{vD} - u_D = 90 - (-10) = 100\text{kPa}$$

$$h_{pE} = 1 - 2 = -1, \quad u_E = h_{pE} \gamma_w = -10\text{kPa}, \quad \sigma'_{vE} = \sigma_{vE} - u_E = 70 - (-10) = 80\text{kPa}$$

$$h_{pF} = 1.2 - 4 = -2.8, \quad u_F = h_{pF} \gamma_w = -28\text{kPa}, \quad \sigma'_{vF} = \sigma_{vF} - u_F = 30 - (-28) = 58\text{kPa}$$

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



$$(6) \quad i_{III} = \frac{h_G - h_F}{L_{III}} = \frac{4.8}{1} = 4.8 = \frac{v_{III}}{k_{III}} = \frac{1 \times 10^{-4}}{k_{III}}, \quad \therefore k_{III} = \frac{1}{4.8} \times 10^{-4} = 2.08 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

(7) 連続の条件を満足するためには

$$k_I i_I = k_{II} i_{II} = k_{III} i_{III} = k_I \Delta h_{DE} = k_{II} \frac{\Delta h_{EF}}{2} = k_{III} \Delta h_{FG} = C,$$

$\Rightarrow 1 \Delta h_{DE} = 10 \frac{\Delta h_{EF}}{2} = \frac{1}{4.8} \Delta h_{FG}$  従って、砂皿の動水勾配がもっと大きいので、砂皿で最初にボーリングする。

また、

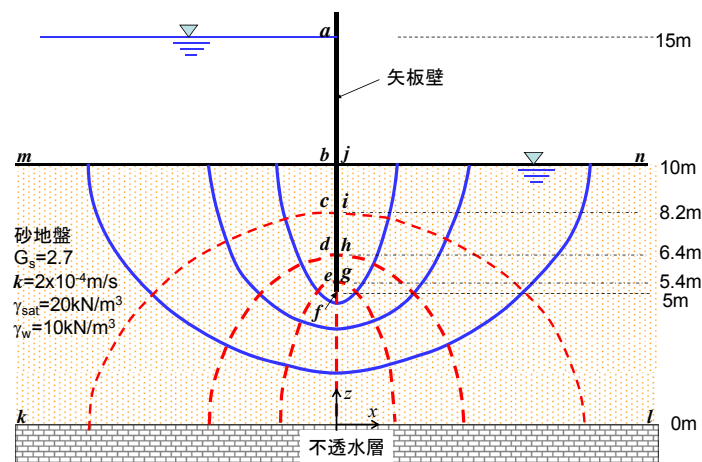
$$\Delta h_{DE} + \Delta h_{FG} + \Delta h_{FG} = \Delta h_{CB} \quad \text{であり、限界動水勾配、} i_{cri} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = 1.0 \quad \text{であるので、}$$

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

$$\text{従って、この時の全水頭差} \quad \Delta h_{CB} = \Delta h_{DE} + \Delta h_{FG} + \Delta h_{FG} = \left( \frac{1+0.2}{4.8} + 1 \right) \Delta h_{FG} = 1.25 \text{ m}$$

4. 下図のような砂地盤中の矢板壁締切り周り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  $k=2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 、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、矢板面は完全に滑でせん断力はゼロと仮定できるものとする。(25)

- (1) 境界  $mb$  と  $kl$  の境界条件式を示せ。この時、座標軸は図に示す  $x, z$  を、また全水頭、位置水頭、圧力水頭の記号には、 $h, h_e, h_p$  をそれぞれ用いよ。
- (2) 矢板の  $c$  点と  $i$  点の水圧 ( $u_c, u_i$ )、並びに有効鉛直応力 ( $\sigma'_{vc}, \sigma'_{vi}$ ) はそれぞれいくらか。
- (3) この条件での単位奥行き一日当りの透水量を求めよ。
- (4)  $ff$  間の平均動水勾配はいくらか。
- (5)  $ff$  間の平均動水勾配が限界動水勾配 ( $i_{cr}$ ) となる  $a$  点の地盤表面からの水位はいくらか。



(1) mbで水頭一定:  $h=15m$ , klでz方向の動水勾配ゼロ  $\frac{dh}{dz} = 0$

(2) 境界条件より、 $h_a=h_b=15m$ , bj間の水頭差 $\Delta h=5m$ 、正方形フローネットより(等ポテンシャル線の分割数 $N_d=8$ ,流管数 $N_f=4$ )、等ポテンシャル線間の損失水頭  
 $dh=5/8=0.625$   
 従って、c点の水頭は、 $h_c=15-dh=14.375m$ 、またi点の水頭は、 $h_i=10+dh=10.625m$

c点の水圧は、 $h_p=h-h_e$ ,  $u=h_p \gamma_w$ より、 $u_c=(14.375-8.2) \times 10=61.75kPa$ 、i点の水圧 $u_i=(10.625-8.2) \times 10=24.25kPa$   
 c点の有効応力は、 $\sigma'_{vc}=10 \times 5 + 20 \times 1.8 - u_c=24.25kPa$ 、i点の有効応力 $\sigma'_{vh}=36-24.25=11.75kPa$

(3)  $q=-k(N_f/N_d)(h_B-h_F)$ より、 $N_f=4$ ,  $N_d=8$ , 単位奥行き幅(1m)、一日当りの透水量は  
 $q=2 \times 10^{-4} \times (4/8) \times 5=5 \times 10^{-4} m^3/sec=43.2m^3/day/m$

(4) 平均動水勾配:  $i_{av}=2.5/5=0.5$

(5) 限界動水勾配:  $i_{cr} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} = 1.0 = 2i_{av}$

従って、 $(h_a-h_j)_{cr}$ は、現在の2倍で、aの水位は地盤面から10m

5. 土粒子密度が等しい( $\rho_s=2.70g/cm^3$ )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 (%)	13.0	15.5	18.0	21	23.0
乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.54	1.59	1.645	1.59	1.53
試料3					
平均含水比w (%)	25.0	30.0	36.0	41.0	52
乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.11	1.18	1.26	1.22	1.16
試料3					
湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.18	1.30	1.42	1.41	1.39
平均含水比w (%)	75.0	80.0	87.0	93.0	100.0

- 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( $\gamma_{dmax}$ )はいくらか。
- 図中にゼロ空隙曲線、飽和度 $S_r=90\%$ 一定曲線を描け。
- 粘土質ロームは、どの試料か? また、その根拠も簡単に説明せよ。
- 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。
- 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 $\rho_t=1.92 g/cm^3$ 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 $\rho_w=1.0g/cm^3$ とせよ)。

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

(2) 締固め曲線は次ページ

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

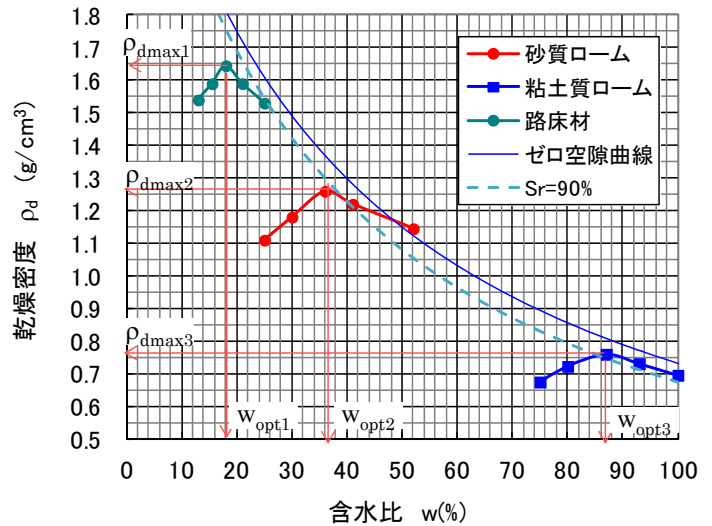
(3)  $w_{opt}$ 、 $\rho_{dmax}$  は、締固め曲線より

	試料1	試料2	試料3
$w_{opt}$ (%)	18	36.5	88
$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.645	1.26	0.76

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

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

ゼロ空隙曲線、 $Sr=90\%$ 一定曲線は右図



(5) 試料3：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1：路床材（もともと工学的に優れている（密度が大きい））

試料2：砂質ローム（粘土質ロームに比べて左上に来る）

(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、 $\rho_d=1.574\text{g/cm}^3$

$$D_c = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100 = 95.7\%, \quad \rho_d = \frac{\rho_s}{1+e} \quad \text{より} \quad e = \frac{2.65}{1.125} - 1 = 0.716$$

$$S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} w / e = 83\%, \quad v_a = \frac{V_a}{V} \times 100 = \frac{V_v - V_w}{V_s + V_v} \times 100 = \frac{e(100 - S_r)}{1+e} = 7.1\%$$

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。その理由を説明せよ。(10)

解答例：締固め時は、土は不飽和状態であり、土中にはかなりのサクシオンが生じている。しかし、施工後、降雨等により飽和度が上がるとサクシオンが減少、消失する。これに伴い、強度の低下や、圧縮性の増加、沈下が生じる。この割合は、含水比の変化が大きいほど大きい。従って、同じ締固め度（乾燥密度）を得るのであれば、初期含水比が大きく、飽和度が高い状態のほうが、施工後の飽和度の変化は小さく、上述のようなトラブルを避けることができる。