

# 2015 年 土質力学第一期末試験問題解答例

## 問1

1. 以下の問に答えよ。

(1) 以下の用語を英訳せよ。

i) Darcy's law, ii) hydraulic gradient, iii) optimum water content, iv) 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) 動水勾配、v) 飽和度

(2) 以下の英語を和訳し、それぞれについて単に説明せよ。

i)

“飽和した土中内の応力(全応力 $\sigma$ )は、有効応力( $\sigma'$ )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) プロクターの原理 => 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( $\rho_d$ )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( $\gamma_{sat}$ )は $20\text{kN/m}^3$ 、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) 地表面からの深さ20m地点の鉛直・水平全応力 ( $\sigma_v$ 、 $\sigma_h$ ) と鉛直・水平有効応力 ( $\sigma'_v$ 、 $\sigma'_h$ ) はそれぞれいくらか。
- (2) 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。
- (3) 図に示すような水平角 $45^\circ$ の面に作用する、有効直応力 ( $\sigma'_{45}$ )、せん断力( $\tau_{45}$ )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。なお、地下水位以浅での単位体積重量 ( $\gamma_t$ ) は $18\text{kN/m}^3$ とする。

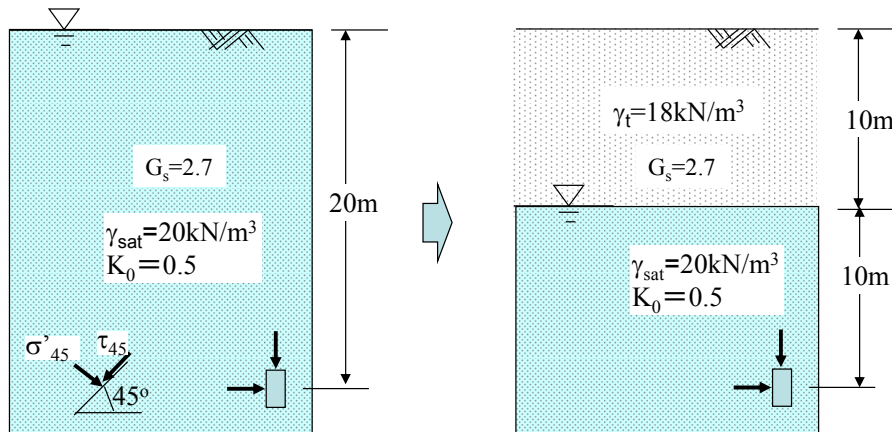
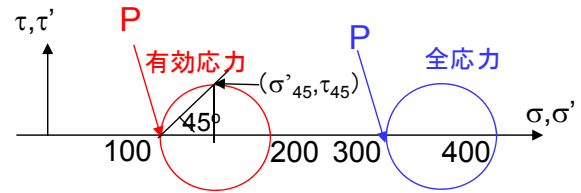


図-1

解答:

(1)

$$\begin{aligned} \sigma_v &= 20\gamma_{sat} = 400 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma'_v &= \sigma_v - u = \sigma_v - 20\gamma_w = 200 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma'_h &= K_0\sigma'_v = 0.5 \times 200 = 100 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma_h &= \sigma'_h + u = 100 + 200 = 300 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$



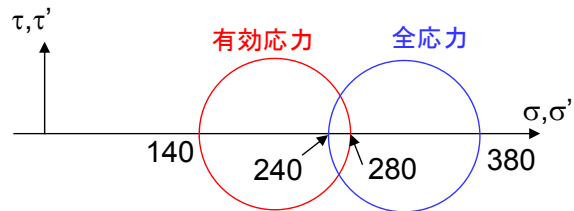
(2) 水平地盤 => 鉛直、水平応力は主応力(σ<sub>1</sub> or σ<sub>3</sub>)

(3) 極より45°の線を引き円と交わった点の応力が(σ<sub>45</sub>, τ<sub>45</sub>)

$$(\sigma'_{45}, \tau_{45}) = \left( \frac{100+200}{2}, -\frac{200-100}{2} \right) = (150, 50) \text{ (kN/m}^2)$$

(4)

$$\begin{aligned} \sigma_v &= 10\gamma_t + 10\gamma_{sat} = 380 \text{ kN/m}^2, \quad \sigma'_v = \sigma_v - u = \sigma_v - 10\gamma_w = 280 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma'_h &= K_0\sigma'_v = 0.5 \times 280 = 140 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma_h &= \sigma'_h + u = 140 + 100 = 240 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$



第3問 解答例: h: 全水頭、h<sub>e</sub>: 位置水頭、h<sub>p</sub>: 圧力水頭、u: 水圧とする。

3. 図-2のような一様断面円筒容器内の飽和単位体積重量(γ<sub>sat</sub>)、水中有効重量(γ')が同じで、透水係数(k)が異なる2種類の砂(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、水の流れるない静水圧状態であった。次いで、B点の高さを7mとし、B点からの注水を続け、円筒内の水位を容器上端(6m)に固定し定常透水を行った結果、Q=0.27m<sup>3</sup>/hrの流量速度となった。水の単位体積重量をγ<sub>w</sub>=10kN/m<sup>3</sup>として、以下の間に答えよ。(20)

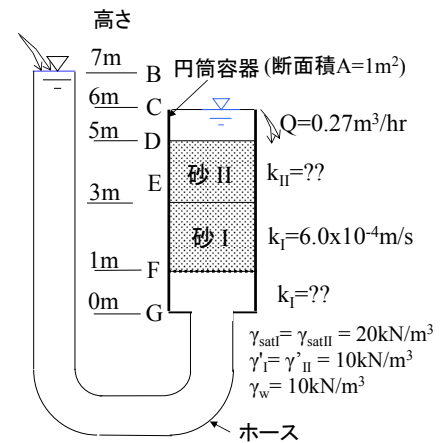


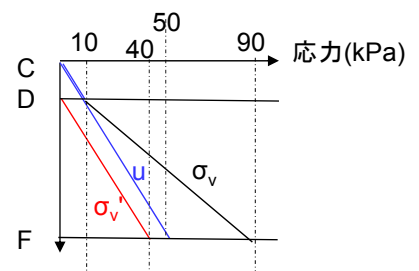
図-2 2層砂試料の定常透水

- (1) 透水前の静水圧状態(水面高さ6m)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。
- (2) 定常透水試験時のD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。
- (3) 砂IIの透水係数(k<sub>II</sub>)を求めよ。
- (4) ホース端B点の位置をゆっくり上昇させた時、最初にボーリングが発生する砂どちらか、また、その時のB点とC点の水位差はいくらか。

回答: 全応力:σ、有効応力:σ'、間隙水圧:u

(1) C-D間: σ<sub>v</sub> = γ<sub>w</sub>z, u = γ<sub>w</sub>z, σ'<sub>v</sub> = σ<sub>v</sub> - u ここでzはCからの深さ

D-G間: σ<sub>v</sub> = γ<sub>w</sub>1 + γ<sub>sat</sub>(z-1), u = γ<sub>w</sub>z, σ'<sub>v</sub> = σ<sub>v</sub> - u



$$(2) \quad v = Q/A = v_I = v_{II} = v_{III} = \frac{0.27}{1.0} = 0.27 \text{ m/hr} = 7.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

CD間、FB間では損失無し、従って、 $h_C = h_D = 6\text{m}$ 、 $h_B = h_F = 7\text{m}$  (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、

$$i_I = \frac{h_F - h_E}{L_I} = \frac{v_I}{k_I} = \frac{0.75 \times 10^{-4}}{6 \times 10^{-4}} = 0.125, \quad \therefore h_E = h_F - 0.125 \times 2 = 6.75 \text{ m}$$

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

$$h_{pE} = h_E - h_{eE} = 6.75 - 3 = 3.75, \quad \therefore u_E = h_{pE} \gamma_w = 37.5 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_{vE} = \sigma_{vE} - u_E = 50 - 37.5 = 12.5 \text{ kN/m}^2$$

(3)

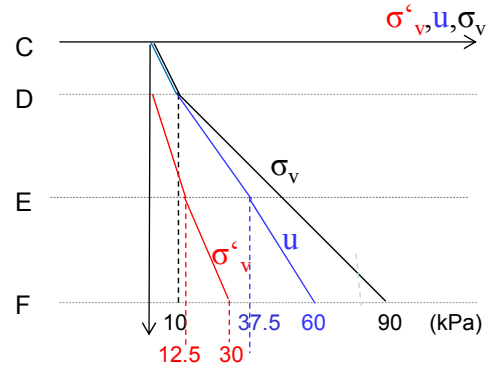
$$i_{II} = \frac{h_E - h_D}{L_{II}} = \frac{0.75}{2} = \frac{v_{II}}{k_{II}}, \quad \therefore k_{II} = 0.75 \times 10^{-4} \times \frac{2}{0.75} = 2.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

(4) 損失水頭は、砂IIの方が大きいため、動水勾配も大きく、最初に砂IIが限界動水勾配に達する。

$$\text{限界動水勾配は} \quad i_{cri} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = 1.0$$

動水勾配はBC間の水頭差に比例するため、

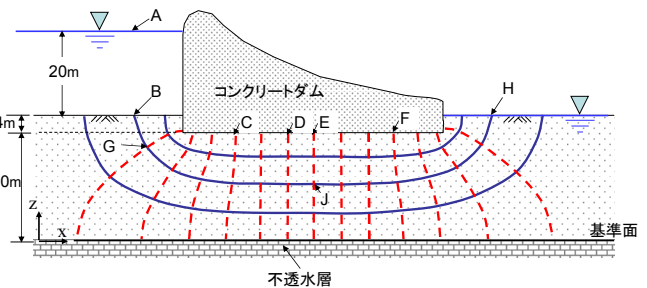
$$1\text{mで} i_{II} = 0.75/2 \text{なので、} \Delta h_{BCcri} = 1(\text{m}) \times i_{cri}/i_{II} = 2/0.75 = 2.67 \text{ m}$$



#### 問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、E点、H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( $\sigma'_{vg}$ )はいくらか。なお、G点の深さは地表面から7m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1/5にするために、DE間でダム底面から不透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。



第4 問解答例:  $h$ : 全水頭、 $h_e$ : 位置水頭、 $h_p$ : 圧力水頭、 $u$ : 水圧とする。

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

(2) 境界条件より、 $h_A = h_B = 44\text{m}$ 、 $u_B = 200\text{kPa}$ 、 $h_H = 24\text{m}$ 、 $u_H = 0\text{kPa}$ 、  
BH間の水頭差 $\Delta h = 20\text{m}$ 、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 $dh = 20/14$

従って、E点の水頭は、 $h_E = h_B - 7dh = 44 - 7dh = 34\text{m}$ 、

E点の水圧は、 $h_{pE} = h_E - h_{eE}$ 、 $u = h_{pE} \gamma_w$ より、 $u_E = (34 - 20) \times 10 = 140\text{kPa}$

(3) G点の全水頭は、 $h_G = h_B - 1dh = 44 - dh = 42.57m$ ,

G点の圧力水頭は $h_{pG} = h_G - h_{eG} = 42.57 - 17 = 25.57m$

=>水圧  $u_G = h_{pG} \times 10 = 255.7kPa$  => 鉛直有効応力  $\sigma'_{vg} = \sigma_{vg} - u_G = 200 + 7 \times 20 - 255.7 = 84.3kPa$

(4) J点付近の正方形の一辺は5m、従って、

$i_j = dh/5 = (20/14)/5 = 0.286$ ,  $v = ki_j = 1.43 \times 10^{-5} m/s = 1.23m/day$

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

$$Q = 5 \times 10^{-5} \times \frac{4}{14} \times 20 = 2.86 \times 10^{-4} m^3 / s = 3600 \times 24 = 24.7 m^3 / day$$

(6) 流量を1/5にするためには、DE間以外の動水勾配は、1/5となり、DE間以外の損失水頭は $10/7 \times 13 \times 1/5$ となり、

従って、DE間の損失水頭 $\Delta h'_{DE}$ は $20 - 10/7 \times 13/5 = 16.29m$ 、動水勾配は $i'_{DE} = \Delta h'_{DE}/2.5 = 3.26$ 、DE間の $ik$ が原地盤の

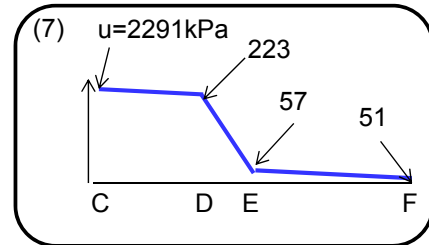
1/5になるので、 $i'_{DE} k'_{DE} = 1/5 i_{DE} k_{DE} \Rightarrow k'_{DE} = 1/5 (i_{DE}/i'_{DE}) k_{DE} = 0.2((10/7)/5)/3.26 \times 5 \times 10^{-5} = 8.8 \times 10^{-7} m/s$

$h_C = h_B - 4(dh)/5 = 44 - 8/7 \Rightarrow u = (h_C - h_{eC})\gamma_w = 228.6kPa$

$h_D = h_B - 6(dh)/5 = 44 - 12/7 \Rightarrow u = (h_C - h_{eC})\gamma_w = 222.9kPa$

$h_E = h_H + 6(dh)/5 = 24 + 12/7 \Rightarrow u = (h_C - h_{eC})\gamma_w = 57.1kPa$

$h_D = h_H + 4(dh)/5 = 24 + 8/7 \Rightarrow u = (h_C - h_{eC})\gamma_w = 51.4kPa$



### 第5問 解答例:

5. 土粒子密度が等しい( $\gamma_s = 2.70 g/cm^3$ )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	80	86	93	100
乾燥密度 $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.694	0.744	0.780	0.746	0.650
試料2					
平均含水比w (%)	24.0	29.0	36.0	41.0	45
乾燥密度 $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.113	1.186	1.265	1.220	1.179
試料3					
湿潤密度 $\gamma_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.809	1.958	2.054	2.030	2.017
平均含水比w (%)	9.0	12.5	15.4	18.0	22.0

(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( $\gamma_{dmax}$ )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 $\gamma_t = 1.91 g/cm^3$ 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 $\rho_w = 1.0 g/cm^3$ とせよ)。

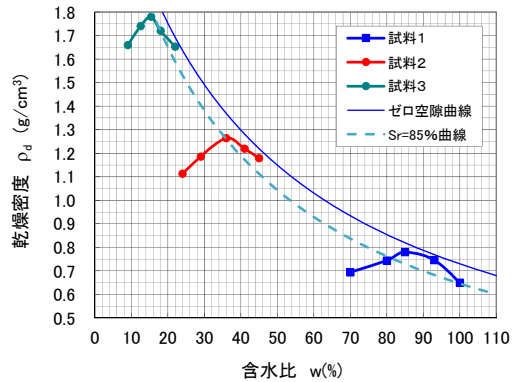
### 第5問解答例

(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) 締固め曲線は右図  $\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w/100}$

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

	試料1	試料2	試料3
$w_{opt}$ (%)	84~87	36~37	15~16
$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.78	1.27	1.78



(4) ゼロ空隙曲線は右図  $(\rho_d)_{sat} = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho_w}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{100}}$

飽和度85%曲線右図  $(\rho_d)_{Sr} = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho_w}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{S_r}}$

(5) 試料3：密度が大きく、大きな強度、高い剛性が期待できる、また含水比判断して砂質土であり、水はけも良い

(6) 試料1の5番目のサンプル、含水比大きくなると飽和度が大きくなり、ゼロ空隙曲線に近づくが、この点は飽和度が極端に低下している。

(7) 現場締固め土の乾燥密度は、 $\rho_d = 1.592 \text{ g/cm}$

$$D_c = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100 = 89\%, \quad \rho_d = \frac{\rho_s}{1+e} \quad e = \frac{2.7}{1.592} - 1 = 0.696$$

$$S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot w / e = 75.5\%, \quad v_a = \frac{V_a}{V} \times 100 = \frac{V_v - V_w}{V_s + V_v} \times 100 = \frac{e(100 - S_r)}{1+e} = 9.2\%$$

### 第6問 解答例

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、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。