

第1章 土の生成と土質力学の基本

要点

目的：土質力学が扱う土について，生成プロセス，土の構造，土層や地盤の構成およびその取り扱い方法を知るとともに，生成の違いによる土の物理的，力学的特性の類似点，相異点を理解し，透水，圧密，せん断などの個別の特性を学ぶための基礎とする。

キーワード：岩石，風化作用，粗粒土，細粒土，地盤のモデル化，応力～ひずみ関係

1.1.1 地質年代的な地盤の生成

約 260 万年前から現在までの第四紀は，1 万年前までが更新世，その後が完新世であり，現在は新生代の第四紀の完新世である。約 2 万年前の最終水期までの海退は，海進に転じて海面は上昇したが，川の上流から運搬された土砂が堆積し，現在の海岸平野の沖積層が形成された。なお，地質年代的に若い 1 万年前以降の沖積層は十分に固結していないため，軟弱地盤と呼ばれる。

1.1.2 岩石からの土の生成

土は，岩石（火成岩，堆積岩，変成岩）が，大気，水，植物などによる風化作用（物理的作用，化学的作用，植物的作用）により，岩塊，岩屑，礫，砂，粘土へと細粒化あるいは変質することにより生成される。

1.1.3 地盤の構造とモデル化

土質力学が対象とするのは，沖積地盤（運積土が主体）および自然斜面での表層地盤（定積土が主体）である。ほぼ同じ堆積環境の下で連続して堆積した土は，同じ物理的特性や強度特性を持つと見なされて，土層の区分が行われる。各土層は三次元の深さ方向や平面方向に不均一に変化しているが，土質力学の

基礎的専門知識の範囲では、一次元の成層地盤および二次元の単一地盤に簡易化している。なお、これらのモデル化は、圧密などの特性により異なる。

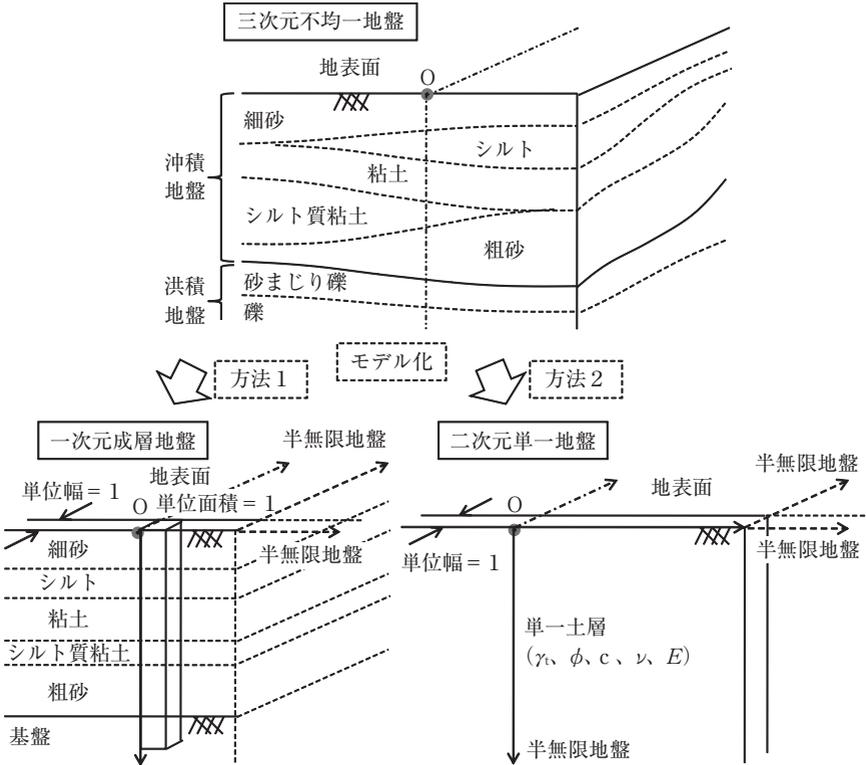


図 1.6 実際の地盤の構造と土質力学で想定する地盤

1.1.4 土の構造と物理的特性, 力学的特性

土は三相で構成され、土粒子は土の骨格を形成する。骨格構造は粗粒土と細粒土で異なるが、骨格構造から土の透水性、せん断強度および締固めが理解できる。さらに、細粒土では、ランダム構造、綿毛構造、配向構造の骨格構造があり、力学特性が異なる。

1.1.5 土の応力・強度特性、変形特性の取り扱い

土は外力を受けて変形し、応力～ひずみ関係がある。土ではせん断ひずみを用いることが基本であるが、微小ひずみ領域では弾性と見なし、ひずみが大きくなると塑性状態に移行し、破壊に至る。土質力学では、取り扱う力学的な現象により、想定する応力～ひずみ関係が異なり、地盤内の応力と変位は弾性領域、土のせん断強度、土圧、支持力および斜面のすべりは破壊点、液状化は破壊点から破壊ひずみ領域で考えている。

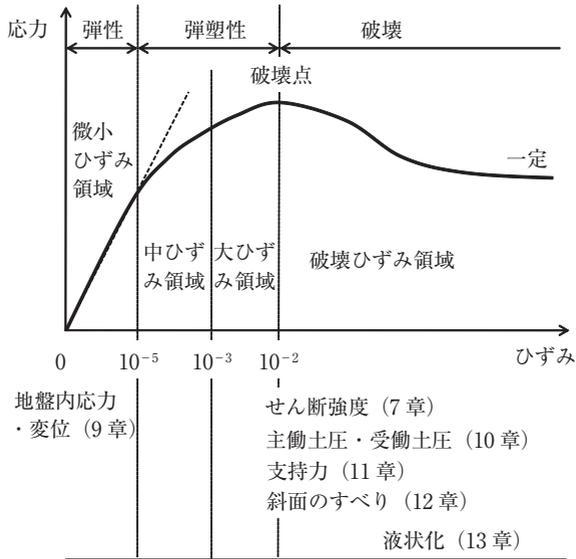


図 1.10 土質力学で考える土のひずみ領域

基礎・応用問題

問題 1.1 以下の文の（ ）に適当な数値，用語を記せ。

地質年代の第四紀は現世から約（ ① ）万年前までを完新世，これより古い年代を更新世という。沖積層と洪積層の境界は概ね今から（ ② ）万年前である。岩石はその成因により火成岩，（ ③ ）および変成岩の3種類がある。岩石は大気，水および植物などによる風化作用により，細片化，変質あるいは細粒化する。この風化作用には物理的作用，（ ④ ）および植物的作用がある。

【解答】 ① 1 ② 2 ③ 堆積岩 ④ 化学的作用

問題 1.2 粗粒土と細粒土の主な性質の違いを3つ挙げよ。

【解答】 ① 粗粒土は細粒土より間隙が大きく，透水性が高いが，細粒土は間隙が小さく，透水性が低い。② 粗粒土は一般に圧密は考えないが，細粒土は圧密を考える。③ 粗粒土のせん断強度の主要因は内部摩擦角で，細粒土は粘着力である。

問題 1.3 水の単位体積重量 γ_w が 9.81kN/m^3 であることを水の密度 $\rho_w = 1\text{g/cm}^3$ (Mg/m^3) から誘導せよ。

【解答】 $\gamma_w = \rho_w \times g = 1,000\text{kg/m}^3 \times 9.81\text{m/s}^2 = 9,810\text{kg} \cdot \text{m/s}^2/\text{m}^3$

ここで， $1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 1\text{N}$ であるので，

$$\gamma_w = \rho_w \times g = 9,810\text{N/m}^3 = 9.81\text{kN/m}^3$$

記述問題

- 記述 1.1 生成プロセスの違いによる岩石の種類を3つ挙げて、それらの生成プロセスを説明せよ。
- 記述 1.2 岩石から粘土に至るまで変化するプロセスを説明せよ。
- 記述 1.3 岩石の風化作用の原因を3つ挙げて、それぞれの作用の特徴を説明せよ。
- 記述 1.4 定積土と運積土の生成プロセスの差異を説明せよ。
- 記述 1.5 粗粒土の緩詰め状態と密詰め状態を比較して、それぞれのせん断強度の大小の差異を述べよ。
- 記述 1.6 細粒土の3つの骨格構造の名称を示し、それらの生成プロセスの差異と工学的な特徴を説明せよ。
- 記述 1.7 細粒土のランダム構造と配向構造を比較して、それぞれの透水性の差異を述べよ。
- 記述 1.8 細粒土の圧密について、土粒子の骨格構造から説明せよ。
- 記述 1.9 土の諸特性ごとに対象とする“応力～ひずみ関係”は異なり、土では微小ひずみ領域および破壊ひずみで考える、それぞれの土の特性を述べよ。
- 記述 1.10 土層の等方性と異方性について説明せよ。
- 記述 1.11 軟弱地盤の生成プロセスと土質力学的な特徴、課題を説明せよ。

第2章 土の物理的特性と試験法

要点

目的：土の状態を表す物理量を求めるとともに、土の粒度特性やコンシステンシーを理解し、地盤材料の工学的分類を知る。

キーワード：土の物理量，粒度，コンシステンシー，工学的分類

2.1 土の構成と状態を表す物理量

図 2.2 の記号を用いて、主な物理量を式 (2.1)～(2.3), (2.6) に示す。式 (2.11) の γ_t は間隙が飽和している場合は γ_{sat} と記す。地下水位以下では浮力が作用し、式 (2.12) の水中単位体積重量 γ' となる。土の密実の程度は式 (2.13) の相対密度 D_r で表す。

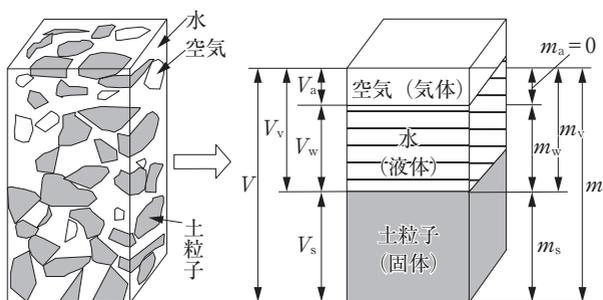


図 2.2 土の三相の模式

$$w = (m_w/m_s) \times 100\% \quad (2.1)$$

$$\rho_s = m_s/V_s \text{ (g/cm}^3, \text{ Mg/m}^3) \quad (2.2)$$

$$\rho_t = m/V \text{ (g/cm}^3, \text{ Mg/m}^3) \quad (2.3)$$

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \rho_t/(1 + w/100) \text{ (g/cm}^3, \text{ Mg/m}^3) \quad (2.6)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = (V - V_s)/V_s = V/V_s - 1 = \rho_s/\rho_d - 1 \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} n &= V_v/V \times 100 = (V_v/(V_s + V_v)) \times 100 \\ &= e/(1 + e) \times 100 \text{ (\%)} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \frac{w\rho_s}{e\rho_w} \text{ (\%)} \quad (2.9)$$

$$\gamma_t = \rho_t \times g \text{ (kN/m}^3) \quad (2.11)$$

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = ((\rho_s - \rho_w)/(1 + e)) \times g \text{ (kN/m}^3) \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} D_r &= ((e_{\text{max}} - e)/(e_{\text{max}} - e_{\text{min}})) \times 100 \\ &= (1/\rho_{d\text{min}} - 1/\rho_d)/(1/\rho_{d\text{min}} - 1/\rho_{d\text{max}}) \times 100 \text{ (\%)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

ここに、 w ：含水比、 ρ_s ：土粒子の密度、 ρ_t ：湿潤密度、 ρ_d ：乾燥密度、 e ：間隙比、 n ：間隙率、 S_r ：飽和度、 γ_t ：湿潤単位体積重量、 γ_{sat} ：飽和単位体積重量、 γ' ：水中単位体積重量、 D_r ：相対密度、 g ：重力加速度。

2.2 土の粒度

土粒子の粒径分布を粒度といい、粒径 0.075mm 以上の大きな粒子はふるい分析、これ未満は沈降分析で通過質量百分率を求め、両者の結果を連続させて全体の粒度分布が得られる。沈降分析は比重浮ひょう理論によりストークスの法則から水中を降下する球形粒子が式 (2.19) で求められる。

$$d = \sqrt{30\eta L / \{g(\rho_s - \rho_w)t\}} \quad (2.19)$$

ここに、 d ：粒径 (mm)、 η ：水の粘性係数 (20° は $1.002 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$)、 L ：沈降距離 (mm)、 g ：重力加速度 (980cm/sec^2)、 t ：沈降時間 (min)。

2.3 土のコンシステンシー

細粒分 5%未満において、式 (2.23) の均等係数 $U_c \geq 10$ の土を「粒径幅の広い」、 $U_c < 10$ を「分級された」という。 $U_c \geq 10$ と式 (2.24) の曲率係数 $U'_c = 1 \sim 3$ を満足する場合に「粒径幅の広い」という場合もある。

$$U_c = D_{60}/D_{10} \quad (2.23)$$

$$U'_c = (D_{30})^2/(D_{10} \times D_{60}) \quad (2.24)$$

ここに、 D_{10} : 10%粒径、 D_{30} : 30%粒径、 D_{60} : 60%粒径。

2.3 土のコンシステンシー

式 (2.27) の塑性指数 I_p は土の力学的性質と密接に関係し、式 (2.28) の液性指数 I_L や式 (2.29) のコンシステンシー指数 I_c は、液性限界や塑性限界に対する自然含水比 w_n の状態を示している。

$$I_p = w_L - w_p \quad (2.27)$$

$$I_L = (w_n - w_p)/I_p \quad (2.28)$$

$$I_c = (w_L - w_n)/I_p \quad (2.29)$$

ここに、 w_L : 液性限界 (%), w_p : 塑性限界 (%), w_n : 自然含水比 (%)

2.4 地盤材料の工学的分類

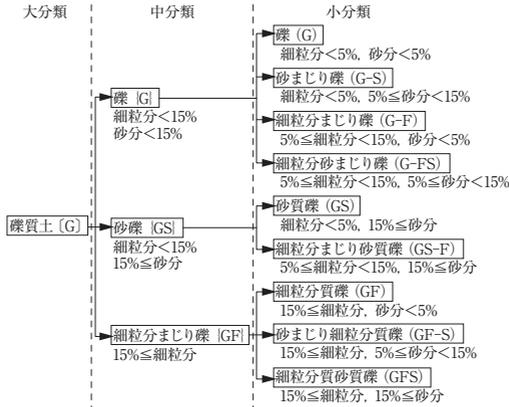


図 2.11 礫質土の中小分類

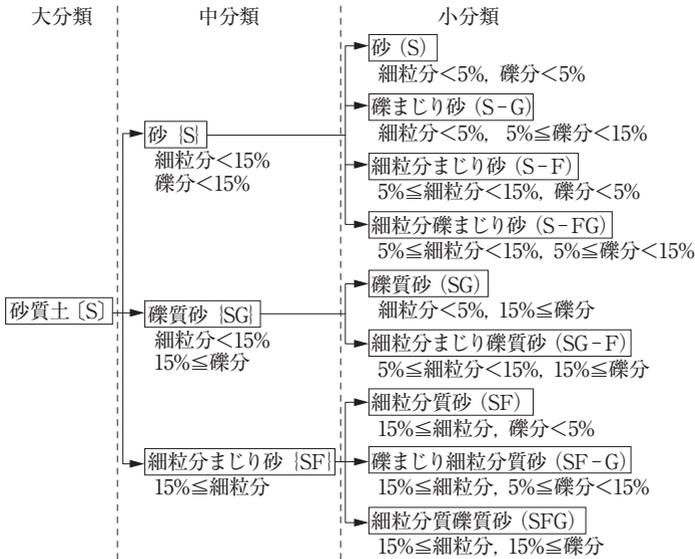


図 2.12 砂質土の中小分類

2.4 地盤材料の工学的分類

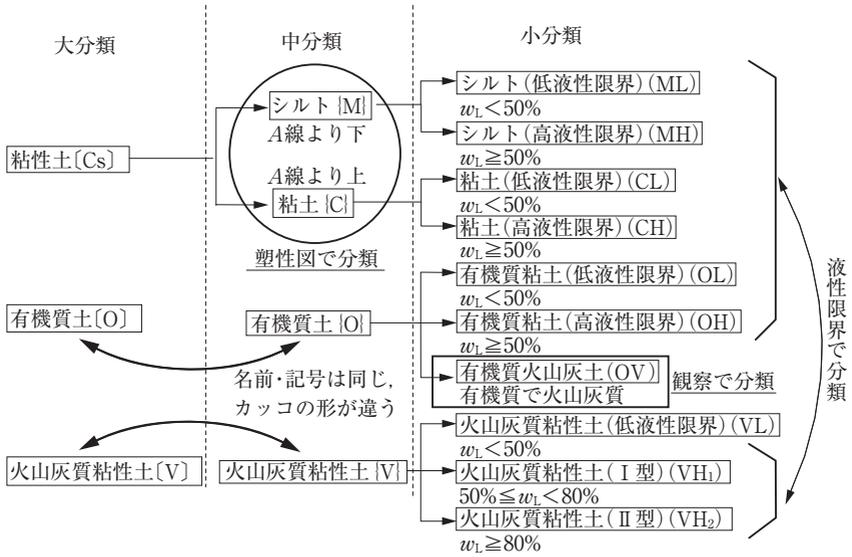
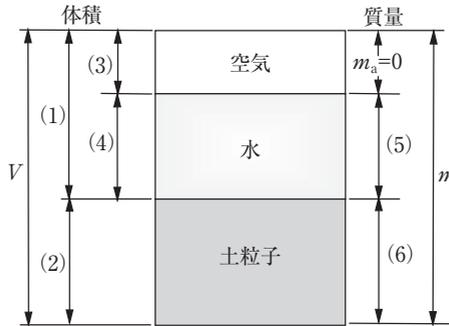


図 2.13 細粒土の中小分類

基礎・応用問題

問題 2.1 図は土の構成である。図中の番号の記号を答えよ。



【解答】 (1) V_v , (2) V_s , (3) V_a , (4) V_w , (5) m_w , (6) m_s

問題 2.2 問題 2.1 の体積，質量に関する記号を用いて，土の間隙比 e ，間隙率 n (%)，含水比 w (%)，飽和度 S_r (%) を表せ。

【解答】
$$e = \frac{V_a + V_w}{V_s}, n = \frac{V_a + V_w}{V} \times 100, w = \frac{m_w}{m_s} \times 100, S_r = \frac{V_w}{V_a + V_w} \times 100$$

問題 2.3 $e \cdot S_r = G_s \cdot w$ を誘導せよ。ここで， e は間隙比， S_r は飽和度 (%), G_s は比重， w は含水比 (%) である。

【解答】 土粒子および，水の密度をそれぞれ ρ_s ，および ρ_w とすると，

$$w = \frac{\rho_w V_w}{\rho_s V_s} \times 100 = \frac{V_w}{V_s} \times \frac{\rho_w}{\rho_s} \times 100 = \frac{V_w}{V_s} \frac{1}{G_s} \times 100 \quad \text{よって} \quad \frac{V_w}{V_s} = \frac{G_s w}{100}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_a + V_w} \times 100 = \frac{V_w/V_s}{(V_a + V_w)/V_s} \times 100 = \frac{G_s w}{e} \quad \text{から,} \quad e S_r = G_s \cdot w \quad \text{となる。}$$

問題 2.4 質量 46.832g のピクノメータに蒸留水を満たして質量を計ったところ $m_a = 157.232\text{g}$ であった。次に、ピクノメータに完全に乾燥した $m_s = 22.604\text{g}$ の土を入れて空気を抜いた。そのときの質量（ピクノメーター + 水 + 土）は $m_b = 171.281\text{g}$ であった。土粒子の密度 ρ_s を求めよ。ただし、水の密度 ρ_w は 0.99820g/cm^3 とする。

【解答】 $m_s = 22.604\text{g}$, $m_a = 157.232\text{g}$, $m_b = 171.281\text{g}$ であるので、

$$V_s = \frac{m_s + m_a - m_b}{\rho_w} = \frac{22.604 + 157.232 - 171.281}{0.99820} = 8.570\text{cm}^3$$

よって、土粒子の密度は、 $\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{22.604}{8.570} = 2.637\text{g/cm}^3$

問題 2.5 湿った砂の供試体の体積は 464cm^3 で、質量は 793g である。また、この砂の乾燥質量は 735g 、土粒子の密度 ρ_s は 2.650g/cm^3 である。この砂の湿潤密度 ρ_t 、乾燥密度 ρ_d 、間隙率 n 、間隙比 e 、含水比 w および飽和度 S_r を求めよ。水の密度 ρ_w は 1.000g/cm^3 とする。

【解答】 $V = 464\text{cm}^3$, $m = 793\text{g}$, $m_s = 735\text{g}$ から、 $V_s = m_s / \rho_s = 735 / 2.650 = 277.4\text{cm}^3$ 間隙の体積は $V_v = V - V_s = 464 - 277.4 = 186.6\text{cm}^3$ 、水の質量 $m_w = m - m_s = 793 - 735 = 58\text{g}$ 、水の体積 $V_w = m_w / \rho_w = 58 / 1 = 58\text{cm}^3$

よって、湿潤密度 $\rho_t = m / V = 793 / 464 = 1.709\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d = m_s / V = 735 / 464 = 1.584\text{g/cm}^3$ 、間隙率 $n = (V_v / V) \times 100 = 186.6 / 464 \times 100 = 40.2\%$ 、間隙比 $e = V_v / V_s = 186.6 / 277.4 = 0.673$ 、含水比 $w = m_w / m_s \times 100 = 58 / 735 \times 100 = 7.9\%$ 、飽和度 $S_r = V_w / V_v \times 100 = 58 / 186.6 \times 100 = 31.1\%$

問題 2.6 土粒子の密度 $\rho_s = 2.650\text{g/cm}^3$ ，間隙比 $e = 0.95$ ，含水比 $w = 45.1\%$ の粘性土がある。この土の湿潤密度 ρ_t と乾燥密度 ρ_d を求めよ。

【解答】
$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + e} = \frac{2.650}{1 + 0.95} = 1.359\text{g/cm}^3$$

$$\rho_t = \rho_d \left(1 + \frac{w}{100}\right) = 1.359 \times \left(1 + \frac{45.1}{100}\right) = 1.972\text{g/cm}^3$$

問題 2.7 含水比 $w = 15.0\%$ の土が 3000.0g ある。これを含水比 $w = 20.0\%$ にするために加える水の質量を求めよ。

【解答】
$$m_s = \frac{m}{1 + \frac{w}{100}} = \frac{3000.0}{1 + \frac{15.0}{100}} = 2608.7\text{g}$$

$$w(\%) = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \text{ から, 加える水の質量 } \Delta m_w = \frac{1}{100} \Delta w \times m_s = \frac{1}{100} (20.0 - 15.0) \times 2608.7 = 130.4\text{g}$$

問題 2.8 含水比 7.6% ，土粒子の密度 2.600g/cm^3 の砂地盤において，原位置での湿潤密度は 1.730g/cm^3 であった。この砂の最も緩い状態と最も密な状態の間隙比はそれぞれ 0.670 と 0.464 である。この砂の原位置での間隙比と相対密度 D_r を求めよ。

【解答】 乾燥密度
$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}} = \frac{1.730}{1 + 0.076} = 1.608\text{g/cm}^3$$
 原位置の間隙比は，
$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{2.600}{1.608} - 1 = 0.617$$
 相対密度
$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 = \frac{0.670 - 0.617}{0.670 - 0.464} \times 100 = \frac{0.053}{0.206} \times 100 = 25.7\%$$

問題 2.9 土の湿潤密度 ρ_t を計測するために地表面に穴を掘った。その穴から取り出した土の質量は 1335.0g であった。次に、その穴に乾燥砂を静かに注ぎ込んだところ 1045.0g でちょうど穴が満たされた。この砂の乾燥密度は $\rho_d = 1.450\text{g/cm}^3$ である。この地盤の湿潤密度 ρ_t を求めよ。

【解答】 穴の体積 $V = \frac{1045.0}{1.450} = 720.7\text{cm}^3$, $\rho_t = \frac{1335.0}{720.7} = 1.852\text{g/cm}^3$

問題 2.10 $100,000\text{m}^3$ の土がある。その間隙比 e は 1.220 である。この土を用いて間隙比 0.780 の盛土が何 m^3 造成できるかを求めよ。

【解答】 $V = V_s + V_v = V_s \left(1 + \frac{V_v}{V_s}\right) = V_s(1 + e)$ より, $V_s = \frac{V}{1 + e} = \frac{100,000}{1 + 1.220} = 45,045\text{m}^3$ よって, 間隙比 0.780 の場合の盛土の体積 V は, $V = V_s(1 + e) = 45,045(1 + 0.780) = 80,180\text{m}^3$

問題 2.11 ある土の粒度をふるい分析により調べ、下表の結果が得られた。この結果をもとに粒径加積曲線を描き、10%粒径 D_{10} , 30%粒径 D_{30} , 50%粒径 D_{50} , 60%粒径 D_{60} および均等係数 U_c と曲率係数 U'_c を求めよ。

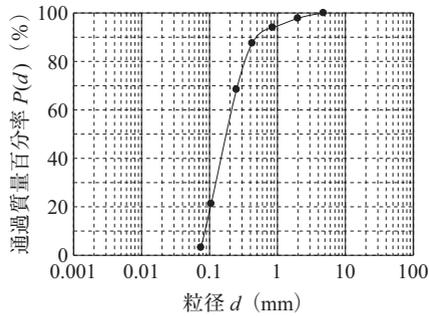
ふるいの目開き (mm)	ふるいに残留した試料 (g)
4.75	0.0
2.0	2.5
0.850	4.2
0.425	7.2
0.250	21.3
0.106	52.5
0.075	20.2
受皿	3.6

【解答】 設問の表から次表が得られる。

第 2 章 土の物理的特性と試験法

ふるいの目開き (mm)	残留量 (g)	通過量 (g)	通過質量百分率 (%)
4.75	0.0	111.5	100.0
2.0	2.5	109.0	97.8
0.85	4.2	104.8	94.0
0.425	7.2	97.6	87.5
0.25	21.3	76.3	68.4
0.106	52.5	23.8	21.3
0.075	20.2	3.6	3.2
受皿	3.6	-	-

上記の計算結果をグラフにプロットすると、下図が得られる。



上図より, $D_{10} = 0.085\text{mm}$, $D_{30} = 0.12\text{mm}$, $D_{50} = 0.18\text{mm}$, $D_{60} = 0.22\text{mm}$

$$\text{均等係数 } U_c = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.22}{0.085} = 2.59, \quad \text{曲率係数 } U'_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{(0.12)^2}{0.085 \times 0.22} = 0.77$$

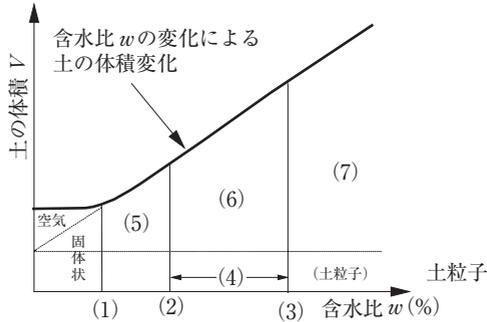
問題 2.12 沈降分析により粒度を調べる。73.4g の乾燥土試料が入った 1,000 cm^3 の懸濁液で、沈降試験開始から $t = 30$ 分経過後に、比重浮ひょうの読みが $\rho = 1.0115$ であった。このとき計測される粒径および通過質量百分率を求めよ。ただし、浮ひょうの計測深さ（有効深さ）は $L = 150\text{mm}$ 、試験時水温による水の粘性係数 $\eta = 1.053 \times 10^{-3}$ (Pa·s)、土粒子および水の密度は、そ

それぞれ $\rho_s = 2.800\text{g/cm}^3$, $\rho_w = 1.000\text{g/cm}^3$, 重力加速度は $g = 980\text{cm/s}^2$ とする。

【解答】 粒径 $d = \sqrt{\frac{30\eta}{(\rho_s - \rho_w)g} \cdot \frac{L}{t}} = \sqrt{\frac{30 \times 1.053 \times 10^{-3}}{(2.800 - 1.000) \times 980} \cdot \frac{150}{30}}$
 $= 0.00946\text{mm}$

$$\begin{aligned} \text{通過百分率 } P(d) &= \frac{V}{m_s} \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} (\rho - \rho_w) \times 100 \\ &= \frac{1000}{73.4} \frac{2.800}{1.800} (1.0115 - 1) \times 100 = 24.4\% \end{aligned}$$

問題 2.13 図は土の含水比 w の変化によって生じる体積変化を示したものである。図中の番号の名称を答えよ。

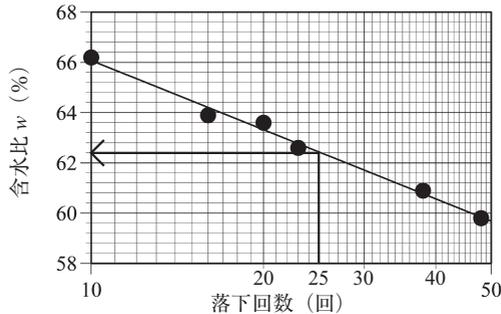


【解答】 (1) 収縮限界 w_s , (2) 塑性限界 w_p , (3) 液性限界 w_L , (4) 塑性指数 I_p , (5) 半固体状, (6) 塑性状, (7) 液状

問題 2.14 ある土について液性限界試験を行った結果、表の落下回数と含水比の関係を得た。流動曲線（落下回数と含水比の関係図）を書いて、液性限界 w_L を求めよ。また、塑性限界 w_p が 34.9% の場合、塑性指数 I_p を求めよ。

落下回数 (回)	48	38	23	20	16	10
含水比 w (%)	59.8	60.9	62.6	63.6	63.9	66.2

【解答】落下回数が 25 回の時の含水比をグラフから読み取る。 $w_L = 62.4\%$ 、塑性限界が 34.9% であるので、塑性指数 I_p は $I_p = w_L - w_p = 62.4 - 34.9 = 27.5$ となる。



問題 2.15 ある土についてコンシステンシー限界試験を行ったところ、自然含水比 w_n は 64.8% 、液性限界 w_L は 71.8% 、塑性限界 w_p は 25.9% であった。塑性指数 I_p 、液性指数 I_L 、コンシステンシー指数 I_c を求めよ。

【解答】塑性指数： $I_p = w_L - w_p = 71.8 - 25.9 = 45.9$

$$\text{液性指数：} I_L = \frac{w_n - w_p}{I_p} = \frac{64.8 - 25.9}{45.9} = 0.85$$

$$\text{コンシステンシー指数：} I_c = \frac{w_L - w_n}{I_p} = \frac{71.8 - 64.8}{45.9} = 0.15$$

問題 2.16 試料 A (礫分 50%，砂分 50%，細粒分 0%)、試料 B (礫分 5%，砂分 15%，細粒分 80%，液性限界 $w_L = 80.2\%$ 、塑性限界 $w_p = 60.2\%$) について、地盤材料の工学的分類名を求めよ。ただし、細粒分は粘性土 [Cs] とする。塑性図の A ラインは $I_p = 0.73(w_L - 20)$ 、B ラインは $w_L = 50\%$ である。

【解答】 試料 A は、粗粒分 100% で礫分と砂分が同じ 50% であるので大分類は砂質土 [S] となる。細粒分 5% 未満で礫分 15% 以上であるので、小分類は礫質砂 (SG) となる。試料 B は細粒分 80% で粘性土 [Cs] である。塑性図 (下図) の A ラインの下に位置し、液性限界は B ライン以上の値であるので、シルト (高液性限界) (MH) となる。さらに、礫分 5% で砂分 15% であるので、礫まじり砂質シルト (高液性限界) (MHS-G) となる。

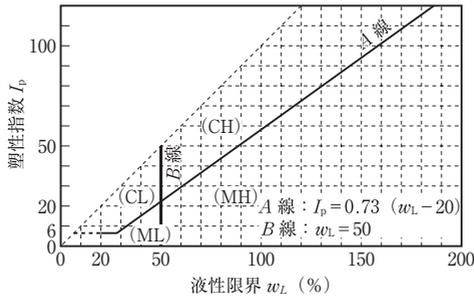


図 2.14 塑性図

問題 2.17 以下に 4 種類の土の通過質量百分率 (%) とコンシステンシー試験の結果を示す。この表から地盤材料の工学的分類名を求めよ。ただし、細粒分は粘性土 [Cs] とする。

ふるいの目開き (mm)	土質1	土質2	土質3	土質4
25				100
10				91
4.8				84
2	100		100	79
0.85	71		98	67
0.4	40		96	54
0.25	24		93	48
0.11	14	100	87	41
0.075	12	98	84	38
0.05	10	94	80	33
0.005	7	26	36	1
0.001	5	4	8	0
w_L (%)	N.P.	46	84	56
w_p (%)	N.P.	16	42	29

【解答】土質 1 は、礫分 0%，砂分 88%，細粒分 12%，コンシステンシー限界は NP である。よって、粘性土まじり砂 (S-C_s) となる。土質 2 は、礫分 0%，砂分 2%，細粒分 98%， $w_L = 46\%$ ， $I_p = 30$ である。砂分は 5% 未満であるので表記しない。よって、塑性図（問題 2.16 の【解答】参照）より粘土（低液性限界）(CL) となる。土質 3 は、礫分 0%，砂分 16%，細粒分 84%， $w_L = 84\%$ ， $I_p = 42$ である。塑性図より細粒分はシルト（高液性限界）(MH) であるので、砂質シルト（高液性限界）(MHS) となる。土質 4 は、礫分 21%，砂分 41%，細粒分 38%， $w_L = 56\%$ ， $I_p = 27$ である。細粒分質礫質砂 (SFG) となる。塑性図より細粒分は粘土（高液性限界）(CH) であるので、粘土（高液性限界）質礫質砂 (SCHG) となる。

問題 2.18 土質 1（礫分 3%，砂分 94%，細粒分 3% で均等係数 $U_c = 12$ ）および土質 2（礫分 94%，砂分 4%，細粒分 2% で均等係数 $U_c = 3.5$ ）の工学的分類を求めよ。

【解答】土質 1 は粗粒分 97% で礫分 < 砂分であるので大分類は砂質土 [S]，小分類は砂 (S) となる。細粒分 5% 未満で均等係数 $U_c = 12$ であるので、粒径幅の広い砂 (SW) となる。土質 2 は粗粒分 98% で礫分 > 砂分であるので大分類は礫質土 [G]，小分類は礫 (G) となる。細粒分 5% 未満で均等係数 $U_c = 3.5$ であるので、分級された礫 (GP) となる。

問題 2.19 液性限界 w_L または塑性限界 w_p が測定不能 (NP) の粘性土 [Cs] の工学的分類名は何か。

【解答】シルト {M}

問題 2.20 土の基本的特性に関する以下の記述の正誤を判断せよ。

- (1) 粘土の塑性指数は、砂のそれよりも小さい。
- (2) 土の含水比は、水の質量と土粒子の質量の比をパーセントで表したもので、100%を超えることはない。
- (3) 間隙比は1より大きい値をとることがあるが、間隙率は100%より大きい値にならない。
- (4) 粘土の間隙比は、砂のそれよりも小さい。
- (5) 土を粒径で区分すると、シルト、粘土、砂、礫の順番で粒径が大きくなる。
- (6) コンシステンシー指数 I_c がゼロ以下の粘土は、乱されれば液状となって不安定な状態になる。
- (7) 均等係数の小さな土は、締固めがしやすい。
- (8) 飽和度とは土粒子の体積に対する間隙中の水の体積の百分率のことである。
- (9) 一般に、粘土の乾燥密度は、砂の乾燥密度よりも小さい。
- (10) 間隙や土粒子の体積を直接測定することは困難であるため、間隙比 e は土粒子の密度 ρ_s と乾燥密度 ρ_d から計算する。

【解答】 (1) 誤り：砂は水を加えても塑性状を示さない。(2) 誤り：間隙比の大きい粘土の場合100%を越える。(3) 正解：柔らかい粘土の間隙比は2~3程度になる。間隙率 n と間隙比 e には、 $n = (e/(1+e)) \times 100$ の関係がある。すなわち、間隙率は100%より大きい値にならない。(4) 誤り：粘土の間隙比は1~3程度で、砂は1より小さいのが普通。(5) 誤り：粘土、シルト、砂、礫の順番である。(6) 正解：コンシステンシー指数がゼロ以下の粘土は、自然含水比が液性限界に等しいかそれ以上である。(7) 誤り：均等係数が大きい土ほど、土粒子の粒径の幅が広いから、締固めはしやすくなる。これは良配合と呼ばれ、逆の場合は貧配合である。(8) 誤り：飽和度とは、土の間隙の体積に対する間隙中の水の体積の比をパーセントで表したものである。(9) 正解：粘土の間隙比は砂よりも大きいため、粘土の密度の方が小さくなる。(10) 正解： $e = (\rho_s/\rho_d) - 1$ から計算するのが一般的である。

記述問題

記述 2.1 土の基本構造を説明せよ。

記述 2.2 粒径加積曲線の定義とその活用法を説明せよ。

記述 2.3 土の懸濁液に入れた比重計の位置は、時間経過によりどのように変化するか、また、その理由を説明せよ。

記述 2.4 土の間隙にある水が、間隙を占める割合を示す指標を示し、その意味を説明せよ。

記述 2.5 塑性限界と液性限界について、それぞれの意味を述べよ。

記述 2.6 液性指数とコンシステンシー指数について、それぞれの定義と両者の関係を述べよ。

記述 2.7 砂の相対密度の定義を示し、その意味を説明せよ。

記述 2.8 土の分類に用いられる三角座標の意味と活用法を説明せよ。

第3章 有効応力と間隙水圧

要点

目的：地盤の変形や強度を予測するために、作用する応力に関わる地盤内に存在する水の影響や有効応力の考え方を理解する。

キーワード：有効応力，全応力，間隙水圧，地下水位，サクシオン

3.1 土中の滞水状態

流れがなく滞水した地下水を持つ地盤内では、水圧がゼロとなる地下水位面（あるいは地下水位）が存在する（図 3.1）。一般的には地下水位面以下の領域は間隙が水で満たされた飽和状態にあり、地下水位面以上の領域では地下水位面から離れるにしたがって飽和度が低下していく。地下水位面以下では正の間隙水圧が存在するが、流れのない状態では地下水位からの深度 z によって式 (3.10.2) の静水圧 u が等方的に作用する。

$$u = \gamma_w z \quad (3.10.2)$$

ここで、 γ_w は水の単位体積重量である。この状態を静水圧状態という。地下水位面以上の領域では、負の水圧が作用し、その絶対値をサクシオンと呼ぶ。この地下水位面以上で静水圧の影響範囲を毛管水帯と呼ぶ。降雨水の浸透により地下水位面が変化し、地震の外力の作用によって水圧は変化するが、静水圧からの超過分を過剰間隙水圧という。

第3章 有効応力と間隙水圧

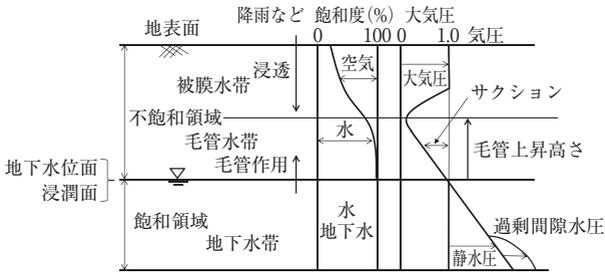


図 3.1 地盤内の滞水状態

3.3 応力とその基本

地盤内で発揮される応力の多くは、土の自重によって生じる。特に鉛直応力 σ_z (σ とする) は、地表面からの深度 z により、式 (3.2) で与えられる。

$$\sigma = \gamma_t z \quad (3.2)$$

ここで、 γ_t は土の湿潤単位体積重量であり、 σ は全応力である。また、地盤内では間隙水圧 u が作用しており、地盤の変形や強度は、全応力と間隙水圧が土粒子骨格に作用することで決定される。テルツァーギは有効応力 σ' が土粒子骨格に作用するとし、式 (3.3) の関係を示した。

$$\sigma = \sigma' + u \quad (3.3)$$

式 (3.3) は、任意の断面における全応力は、有効応力と間隙水圧の合力と釣り合う関係を示し、これを“有効応力の原理”と呼ぶ。なお、飽和状態では土粒子に作用する水圧として説明できるが、地下水位以上の不飽和領域では飽和度によって水圧の作用面積が変化するため、次式の有効飽和度 S_e を水圧に乘以て表現される。

$$\sigma = \sigma' + S_e u \quad (3.3)'$$

3.4 多様な条件による鉛直応力

地下水位の有無、地表面上の荷重の作用など、多様な条件における地盤内の応力（特に、水平面に作用する鉛直応力 σ_z ）を求める必要がある。図 3.7 は基

3.4 多様な条件による鉛直応力

本的な地盤構造と土質特性である。ここで、水中単位体積重量（＝水中湿潤密度）は、水の単位体積重量（＝密度）により、式(3.6)の関係がある。

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad \text{あるいは} \quad \rho' = \rho_{\text{sat}} - \rho_w \quad (3.6)$$

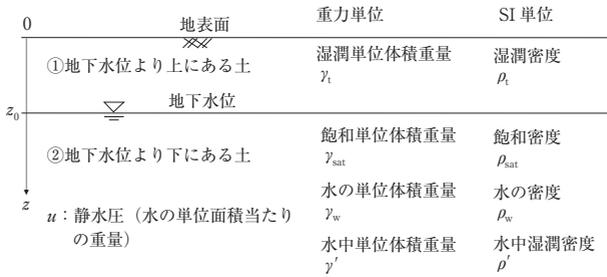


図 3.7 地盤構造と土質特性の基本

地下水位がある地盤について例示すると、地下水位が深度 z_0 にある地盤の応力は図 3.11 になる。地下水位より上の全応力は、式(3.7)である。

$$\sigma = \gamma_t z \quad (3.7)$$

また、地下水位より下の全応力、間隙水圧および有効応力は、(3.9) 式である。

$$\sigma = \gamma_t z_0 + \gamma_{\text{sat}}(z - z_0) \quad (3.9.1)$$

$$u = \gamma_w(z - z_0) \quad (3.9.2)$$

$$\sigma' = \sigma - u = \gamma_t z_0 + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w)(z - z_0) = \gamma_t z_0 + \gamma'(z - z_0) \quad (3.9.3)$$

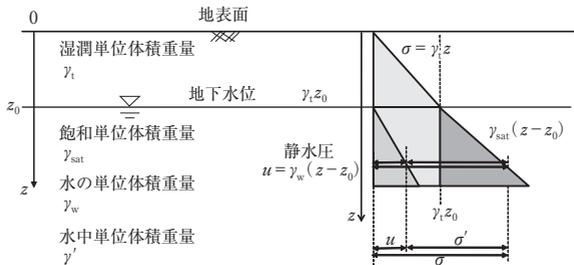


図 3.11 地下水位がある地盤

基礎・応用問題

問題 3.1 下記の () 部を埋め、文章を完成させなさい。

底面積 A (m^2) で、深さ z (m) の直方体の土塊があり、その質量は M (t) である。このとき、土塊の全重量 W (kN) は、重力加速度 g (m/s^2) を用いると、(ア) であり、土塊の底面に作用する鉛直応力は、(イ) となる。また、土の湿潤単位体積重量 γ_t (kN/m^3) は、(ウ) となり、(イ) に代入し、コンテナ底部に作用する鉛直応力を湿潤単位体積重量で表すと、(エ) になる。つまり、土塊の底面の鉛直応力は、土塊の底面積に関係なく、単位体積重量とその深さによって表されることが分かる。

【解答】 ア： Mg ， イ： $\frac{Mg}{A}$ ， ウ： $\frac{Mg}{Az}$ ， エ： $\gamma_t z$

問題 3.2 層厚 3m の土層 A の下に土層 B がある地盤がある。土層 A は、土粒子比重 2.65、間隙比 0.5、飽和度 80% の土から成る。土層 B は、乾燥単位体積重量 16kN/m^3 、含水比 30% の土から成る。以下の問いに答えよ。

- (1) 土層 A、B の湿潤単位体積重量を求めよ。ただし、水の単位体積重量は 10kN/m^3 とする。
- (2) 地表面から深度 8m での鉛直全応力を求めよ。

【解答】 (1) 土層 A について、土粒子が占める体積を 1 とすると、間隙体積は 0.5 となり、土全体の体積は 1.5 である。このとき、土粒子重量は $2.65 \times 10 = 26.5$ で表される。飽和度の値より、間隙 0.5 中に占める水の体積は $0.5 \times \frac{80}{100} = 0.4$ 水の重量は $10 \times 0.4 = 4$ となり、土全体の重量は 30.5 体積で割ると、 $\gamma_t = 30.5 \div 1.5 = 20.3\text{kN/m}^3$ 土層 B は、土全体の体積を 1 とすると、土粒子重量は 16 含水比より、水の重量を求めると、 $16 \times \frac{30}{100} = 4.8$ 土の全重量は、20.8 よって、湿潤単位体積重量は $\gamma_t = 20.8 \div 1 = 20.8\text{kN/m}^3$ 別法：定義式から、土層 A は、 $\gamma_t (= \rho_t \cdot g) = (\rho_s + eS_r \rho_w / 100) \cdot g / (1 + e) =$

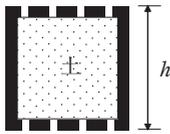
$$\gamma_w(\rho_s/\rho_w + eS_r/100)/(1+e) = \gamma_w(G_s + eS_r/100)/(1+e) = 10 \times (2.65 + 0.5 \times 80/100)/(1+0.5) = 10 \times 3.05/1.5 = 20.3\text{kN/m}^3$$

$$\text{土層 B は, } \gamma_t (= \rho_t \cdot g) = \rho_d \cdot g/(1 + w/100) = 16 \times (1 + 30/100) = 16 \times 1.3 = 20.8\text{kN/m}^3$$

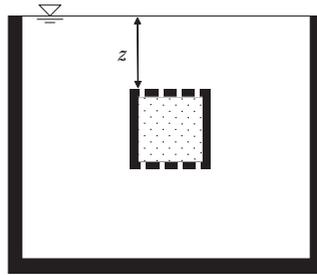
- (2) 土層 A の下面における鉛直全応力は, $(\sigma_z)_{z=3} = \gamma_{tA} \times 3 = 20.3 \times 3 = 60.9\text{kN/m}^2$ 深度 8m の水平面の鉛直全応力は, $(\sigma_z)_{z=8} = (\sigma_z)_{z=3} + \gamma_{tB} \times (8 - 3) = 60.9 + 20.8 \times 5 = 164.9\text{kN/m}^2$

問題 3.3 図 (a) に示す細孔の空いた容器に土が詰まっている。この土の土粒子の単位体積重量は γ_s 、間隙比は e 、含水比は w である。水の単位体積重量を γ_w とし、次の問いに答えよ。

- (1) 容器の底面に作用する鉛直応力を求めよ。
- (2) この容器を図-3(b) のように深さ z の水中に沈めて飽和させた場合、土が容器の底面に作用する鉛直応力を求めよ。
- (3) (2) のとき水中単位体積重量を用いても同じになることを示せ。



(a) 容器



(b) 容器の水浸

【解答】(1) 土粒子の体積を 1 とすると、土粒子重量は γ_s 、含水比より水の重量を求めると、 $\frac{w\gamma_s}{100}$ このとき、土全体の体積は $1+e$ なので、湿潤単位体積重量は $\gamma_t = \left(r_s + \frac{wr_s}{100}\right)/(1+e) = \frac{\gamma_s}{1+e} \left(1 + \frac{w}{100}\right)$ よって、底面に

作用する鉛直応力は $\gamma_t h = \frac{\gamma_s h}{1+e} \left(1 + \frac{w}{100}\right)$

(2) 水中では飽和状態にあるので、飽和単位体積重量 $\gamma_{\text{sat}} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e}$ を用いる。

底面での全応力は $\sigma = \gamma_w z + \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e} h$ 、間隙水圧は $u = \gamma_w (z + h)$

底面には有効応力が作用するので、 $\sigma' = \sigma - u = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} h$

(3) 水中単位体積重量は、 $\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e}$

底面に作用する応力は、 $\gamma' h = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} h$ であり、(2) と同じになる

問題 3.4 地表面から 2m の深さに地下水位がある地盤がある。地表近くの土の物理試験を行ったところ、土粒子比重 2.7、含水比 30%、飽和度 80% であった。以下の問いに答えよ。

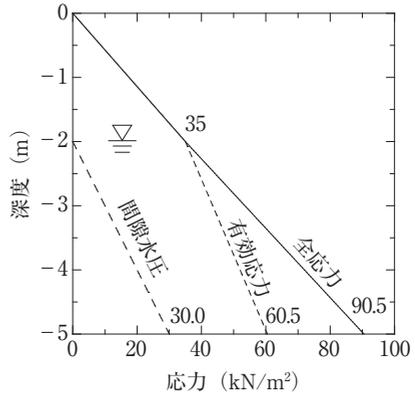
- (1) この地盤の湿潤単位体積重量および飽和単位体積重量を求めよ。ただし、水の単位体積重量は 10kN/m^3 とする。
- (2) 地表面から 5m の深さまでの全応力、間隙水圧、有効応力分布を求めよ。

【解答】 (1) 土粒子が占める体積を 1m^3 とすると、土粒子重量は 27kN 含水比 30% なので、水の重量は $27 \times \frac{30}{100} = 8.1\text{kN}$ 水の体積は $8.1 \div 10 = 0.81\text{m}^3$ 飽和度が 80% での間隙体積は $0.81 \times \frac{100}{80} = 1.01\text{m}^3$ よって、土全体の体積は 2.01m^3 湿潤単位体積重量は、 $\gamma_t = \frac{27 + 8.1}{2.01} = 17.5\text{kN/m}^3$ 飽和単位体積重量は、間隙が水で満たされた場合なので、 $\gamma_{\text{sat}} = \frac{27 + 1.01 \times 10}{2.01} = 18.5\text{kN/m}^3$

別法： $S_r = wG_s/e$, $\rho_d = \rho_s/(1+e)$, $\rho_t = \rho_d(1+w/100)$ から、 $\gamma_t = \rho_t \cdot g = \rho_d \cdot g(1+w/100) = \rho_s \cdot g/(1+e) \times (1+w/100) = G_s \cdot \gamma_w / (1+wG_s/S_r) \times (1+w/100) = 2.7 \times 10 / (1+30 \times 2.7/80) \times (1+0.3) = 35.1/2.01 = 17.5\text{kN/m}^2$ 飽和でも間隙比は同じなので、 $e = wG_s/S_r = 30 \times 2.7/80 = w \times 2.7/100$

から、 $w = 300/8\%$ よって、 $\gamma_{\text{sat}} = G_s \cdot r_m(1 + w/100)/(1 + wG_s/S_r) = 2.7 \times 10(1 + 3/8)/(1 + 1.01) = (27 + 10.1)/2.01 = 18.5\text{kN/m}^2$

- (2) 地下水位のある深度 2m までは、鉛直全応力算定には湿潤単位体積重量を用い、地下水以下では飽和単位体積重量を用いる。また、地下水位以下では深度に応じて間隙水圧が作用し、有効応力は全応力と間隙水圧との差として計算すると、右図の応力分布になる。



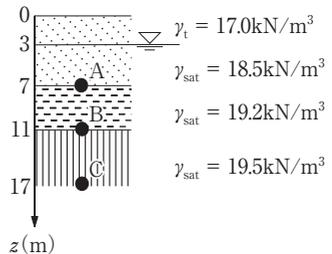
つまり、深度 2m = 全応力 = $17.5 \times$

$2 = 35\text{kN/m}^2$ 、間隙水圧 $u = 0\text{kN/m}^2$ 、有効応力 $\sigma' = 35 - 0 = 35\text{kN/m}^2$ 深度 5m = $\sigma = 35 + 18.5 \times (5 - 2) = 90.5\text{kN/m}^2$ $u = 10 \times (5 - 2) = 30\text{kN/m}^2$ 、 $\sigma' = 90.5 - 30 = 60.5\text{kN/m}^2$

問題 3.5 水深 100m の海底地盤で、海底から 1.5m の深さにおける全応力、間隙水圧、有効応力を求めよ。ただし、この地盤の飽和単位体積重量を 19.5kN/m^3 、水の単位体積重量を 9.8kN/m^3 とする。

【解答】 全応力は、 $\sigma = 9.8 \times 100 + 19.5 \times 1.5 = 1009.3\text{kN/m}^2$ 間隙水圧は、 $u = 9.8 \times (100 + 1.5) = 994.7\text{kN/m}^2$ 有効応力は、 $\sigma' = \sigma - u = 1009.3 - 994.7 = 14.6\text{kN/m}^2$

問題 3.6 ある地盤でボーリングにより土層の柱状図を作成し、右図を得た。このとき、深度 A、B、C における鉛直全応力、間隙水圧、鉛直有効応力を求めよ。ただし、水の単位体積重量を 9.8kN/m^3 とする。



【解答】 A 点：全応力 $\sigma_A = 17.0 \times 3 + 18.5 \times 4 = 125\text{kN/m}^2$

$$\text{間隙水圧 } u_A = 9.8 \times 4 = 39.2\text{kN/m}^2$$

$$\text{有効応力 } \sigma'_A = \sigma_A - u_A = 125 - 39.2 = 85.8\text{kN/m}^2$$

B 点：全応力 $\sigma_B = \sigma_A + 19.2 \times 4 = 201.8\text{kN/m}^2$

$$\text{間隙水圧 } u_B = 9.8 \times 8 = 78.4\text{kN/m}^2$$

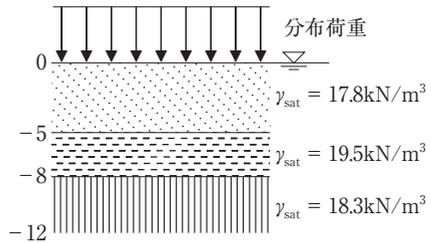
$$\text{有効応力 } \sigma'_B = \sigma_B - u_B = 201.8 - 78.4 = 123.4\text{kN/m}^2$$

C 点：全応力 $\sigma_C = \sigma_B + 19.5 \times 6 = 318.8\text{kN/m}^2$

$$\text{間隙水圧 } u_C = 9.8 \times 14 = 137.2\text{kN/m}^2$$

$$\text{有効応力 } \sigma'_C = \sigma_C - u_C = 318.8 - 137.2 = 181.6\text{kN/m}^2$$

問題 3.7 図に示す地盤の地表面に広く盛土をしており、 60kN/m^2 の分布荷重が作用している。このときの地盤内の鉛直全応力分布、間隙水圧分布、鉛直有効応力分布を図示せよ。



【解答】 地表面分布荷重は全応力として作用し、以下の算出により、下図（次ページ）の応力分布が得られる。なお、 $z \leq 0$ に注意。

全応力： $z = 0\text{m}$ で、 60kN/m^2 、

$$z = 0 \sim -5\text{m} \text{ では、 } \sigma = 60 + 17.8 \times z \quad \therefore \quad z = -5\text{m} \text{ で } 149\text{kN/m}^2$$

$$z = -5 \sim -8\text{m} \text{ では、 } \sigma = 149 + 19.5 \times (-z - 5)$$

$$\therefore \quad z = -8\text{m} \text{ で } \sigma = 207.5\text{kN/m}^2$$

$$z = -8 \sim -12\text{m} \text{ では、 } 207.5 + 18.3 \times (-z - 8)$$

$$\therefore \quad z = -12\text{m} \text{ で } 280.7\text{kN/m}^2$$

間隙水圧： $u = -9.8z$ $z = -5\text{m}$ で、 49kN/m^2 $z = -8\text{m}$ で、 78.4kN/m^2

$$z = -12\text{m} \text{ で、 } 117.6\text{kN/m}^2$$