

第1章

土の基本的性質

土の基本的性質を理解するとともに、それを表すパラメータの種類と定義を学ぶ。さらに、そのパラメータをどのようにして求めるかについて計算演習を通して学ぶ。

1.1 土の組成と主な物理量

土は土粒子、水、空気から構成され、その土の組成は体積と質量によって図1・1に示す記号で表される。

1.2 土の粒径区分とその名称

土粒子は大きさにより名称が異なる。礫は粘土に比べて数千倍～数万倍の大きさがある。実際の土はさまざまな大きさの土粒子が混ざり合い、その割合で、その名称と力学的性質が異なる。



図1・1 土の組成

粘 土	シ ル ト	砂			礫			
		細 砂	中 砂	粗 砂	細 礫	中 礫	粗 礫	
		0.005 5	0.075 75	0.25 250	0.85 850 (μm)	2	4.75 19	19 75 (mm)

図1・2 粒径区分とその呼び名

(土質試験-基本と手引-(第三回改訂版) : (公社)地盤工学会、2022年、p.29図4.1をもとに作成)

1.3 粒径加積曲線と粒度特性を表す特性値

土の粒度特性は、粒径が $75 \mu\text{m}$ より大きい場合にはふるい分けによって粒度分布が求められる。また、 $75 \mu\text{m}$ 以下の粒径の場合には、沈降分析によって求められる。粒度分布は、縦軸を各ふるいに対する通過質量百分率、横軸は粒径(対数目盛)で表した粒径加積曲線によって図示される(図1・3)。粒径加積曲線で示される粒度特性の特性値は、通過質量百分率(%)に対応した粒径と粒径加積曲線の形状によって定義される均等係数や曲率係数で表される。

60%粒径 (D_{60})

50%粒径 (D_{50} 、平均粒径)

30%粒径 (D_{30})

10%粒径 (D_{10} 、有効径)

$$\text{均等係数 } U_c = D_{60}/D_{10} \quad (1.1)$$

$$\text{曲率係数 } U'_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (1.2)$$

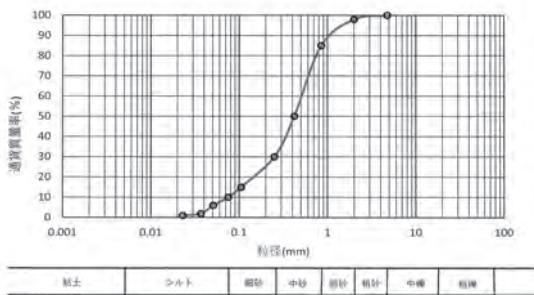


図 1・3 土の粒径加積曲線の例

表 1・1 試験によって測定される物理量

含水比	$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 [\%]$	(1.3) 含水比試験
土粒子の密度	$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} [\text{Mg/m}^3]$	(1.4) 土粒子の密度試験
湿潤密度	$\rho_t = \frac{m}{V} [\text{Mg/m}^3]$	(1.5) 湿潤密度試験
飽和密度	$\rho_{sat} = \frac{m}{V} [\text{Mg/m}^3]$	(1.6) 湿潤密度試験

表 1・2 相互関係式で算出される物理量

$$\text{乾燥密度 } \rho_d = \frac{m_s}{V} \quad : \rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}} [\text{Mg/m}^3] \quad (1.7)$$

$$\text{間隙比 } e = \frac{V_v}{V_s} \quad : e = \frac{\rho_s(1 + \frac{w}{100})}{\rho_t} - 1 \quad (1.8)$$

$$\text{間隙率 } n = \frac{V_v}{V} \quad : n = \frac{e}{1+e} \quad (1.9)$$

$$\text{飽和度 } Sr = \frac{V_w}{V_v} \times 100 [\%] \quad : Sr = \frac{w\rho_s}{e\rho_w} [\%] \quad (1.10)$$

$$\text{水中単位体積重量 } \gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad : \gamma' = \frac{mg_n - \rho_w g_n V}{V} [\text{kN/m}^3] \quad (1.11)$$

g_n : 重力加速度

1.4 土の基本的な物理量

土を定量的に表す物理量は体積と質量によって定義され、試験によって求められるもの(表1・1)と相互関係式によって試験結果から間接的に求められるもの(表1・2)がある。

1.5 コンシスティンシー限界

土は含まれる水の量によって固体状態、半固体状態、塑性状態、液体状態に分けられる。これらの状態の境目の含水比を収縮限界(w_s)、塑性限界(w_p)、液性限界(w_L)という(図1・4)。

塑性図(図1・5)は塑性指数 I_p と液性限界 w_L で、粘性土を分類したもので、これにより粘性土の力学的性質が推測される。

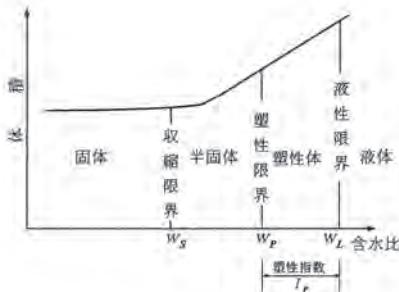


図1・4 コンシスティンシー限界

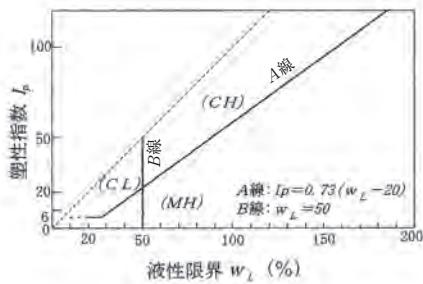


図1・5 塑性図

(土質試験-基本と手引-(第三回改訂版)：(公社)地盤工学会、2022年、p.54図6.6をもとに作成)

1.6 土の工学的分類

我が国の(公社)地盤工学会の基準では、まず高有機質土とそうでない土に分けられる。通常の土は、粒度やコンシスティンシー限界などによってさらに分類される。

- (1) 細粒土(細粒分 $\geq 50\%$ である土)：細粒分は粒径区分(図1・2)のシルトと粘土をいう。粒度とコンシスティンシー限界に応じて細分化される。細粒土は塑性図により、その土の強度特性、透水性、圧縮性など傾向が推測される。
- (2) 粗粒土(粗粒分 $> 50\%$ である土)：粗粒分は粒径区分(図1・2)の砂と礫をいう。粒度特性に応じて細分化される。

1.7 土の室内試験法

土の物理量は、実験室内で行われる物理試験で求めることができる。その試験法はJIS規格に定められている。室内試験で求められる物理量には以下のものがある。

含水比 w 、土粒子の密度 ρ_s 、湿潤密度 ρ_t 、最小乾燥密度 $\rho_{d\min}$ と最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ 、液性限界 w_L 、塑性限界 w_P 、収縮限界 w_s

1.8 原位置試験法—原位置における土の力学特性の推定

原位置で地盤強度を測定する代表的な原位置試験には以下のようなものがある。

スクリューウエイト貫入試験 N_{SW} (1m 貫入するのに要する半回転数)

標準貫入試験 N 値(30cm 貫入するのに要する打撃回数)

これらの値と種々の物理量の関係は実験公式の形で提案されており、実用上よく使われる。

1.9 締固め

(1) 締固め曲線

土の締固め具合は「突固めによる締固め試験」により明らかにされる。土の含水比を種々変えて突固めを行い、その乾燥密度を求めて図示したのが締固め曲線(図1・6)である。この図よりもともよく締まる含水比の値(最適含水比)とそのときの土の密度(最大乾燥密度)が分かる。

(2) 締固めエネルギー

「突固めによる締固め試験」における締固めエネルギーは、次式で表される。

$$E_C = \frac{W_R H N_B N_L}{V} \quad (1.12)$$

ここで、 W_R : ランマーの重量、 H : 落下高さ、 N_B : 一層当たりの突固め回数、 N_L : 層の数、 V : モールドの体積

(3) 土の締固め特性

砂質土：締固め曲線の傾きは急で最適含水比は低い。

粘土・シルト質ローム：締固め曲線の傾きは緩やかで、締固め効果は低い。最適含水比は高い。

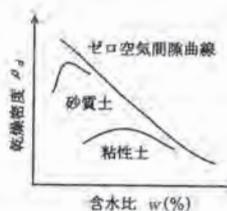


図1・6 締固め曲線の一例

1

基本問題

基本問題1 単位系の換算

水の単位体積重量は重力単位で $\gamma_w = 1.0 \text{ tf/m}^3$ と表される。これを SI 単位 [kN/m^3] で表せ。

解答 $1.0 [\text{tf}] = 1.0 [\text{t}] \times 9.8 [\text{m/s}^2] = 9.8 \times 10^3 \left[\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$

$$\therefore 1.0 [\text{tf/m}^3] = 1.0 \times 9.8 \times 10^3 \left[\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} / \text{m}^3 \right] = 9.8 \times 10^3 [\text{N/m}^3]$$

$$= 9.8 [\text{kN/m}^3]$$

答 9.8 kN/m^3

基本問題2 基本的物理量の定義

土の基本的物理量の記号とその定義について、空欄に当てはまるものを①～⑭から選べ。

含水比 : <input type="text"/> = <input type="text"/> × 100	乾燥密度 : <input type="text"/> = <input type="text"/>
<input type="text"/> : <input type="text"/> = <input type="text"/>	<input type="text"/> : <input type="text"/> = <input type="text"/>
間隙比 : <input type="text"/> = <input type="text"/>	湿潤密度 : <input type="text"/> = <input type="text"/>
飽和度 : <input type="text"/> = <input type="text"/> × 100	土粒子の密度 : <input type="text"/> = <input type="text"/>

- | | | | | | |
|------------------|-------------------------------|------------------|------------|-------|---------|
| ① ρ_t | ② ρ_d | ③ e | ④ ρ_s | ⑤ w | ⑥ S_r |
| ⑦ V : 土全体の体積 | ⑧ m : 土全体の重量 | ⑨ V_s : 土粒子の体積 | | | |
| ⑩ m_s : 土粒子の質量 | ⑪ V_w : 水の体積 | ⑫ m_w : 水の質量 | | | |
| ⑬ V_a : 空気の体積 | ⑭ $V_v = V_w + V_a$: 水と空気の体積 | | | | |

解答 含水比 : ⑤ $w = \frac{⑫ m_w}{⑩ m_s} \times 100\%$ 乾燥密度 : ② $\rho_d = \frac{⑩ m_s}{⑦ V}$

間隙比 : ③ $e = \frac{⑭ V_v}{⑨ V_s}$ 湿潤密度 : ① $\rho_t = \frac{⑧ m}{⑦ V}$

飽和度 : ⑥ $S_r = \frac{⑪ V_w}{⑭ V_v} \times 100\%$ 土粒子の密度 : ④ $\rho_s = \frac{⑩ m_s}{⑨ V_s}$

基本問題3 土粒子の密度試験結果の整理

次のような土粒子の密度試験の結果を得た。この結果より、試験時の温度における土粒子の密度を求めよ。ただし、試験時の蒸留水の密度を $\rho_w(T) = 1.0000 \text{Mg/m}^3$ とする。

表1・3

(蒸留水+ピクノメータ)の質量	$m_a = 155.313 \text{ g}$
(ピクノメータ+炉乾燥土+蒸留水)の質量	$m_b = 164.588 \text{ g}$
炉乾燥土の質量	$m_s = 15.211 \text{ g}$

解答 土粒子の密度の定義は $\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$ である。

ピクノメータ内の土粒子と同体積の水の質量は $m_s + (m_a - m_b)$ となる。したがって、水の密度 ρ_w を用いて土粒子の体積 V_s を求めれば、

$$V_s = \frac{m_s + (m_a - m_b)}{\rho_w}$$

となり、これを土粒子の密度の定義に代入すると、次式が得られる。

$$\therefore \rho_s = \frac{m_s}{m_s + (m_a - m_b)} \times \rho_w(T) \quad (1.13)$$

ここで、 $\rho_w(T)$ ：試験時の温度 $T^\circ\text{C}$ における水の密度

この式に密度試験の結果を代入すると、

$$\begin{aligned} \rho_s &= \frac{15.211 [\text{g}]}{15.211 [\text{g}] + (155.313 [\text{g}] - 164.588 [\text{g}])} \times 1.0000 [\text{g/cm}^3] \\ &= 2.563 [\text{Mg/m}^3] \end{aligned}$$

答 $\rho_s = 2.563 \text{ Mg/m}^3$

参考)

密度の単位 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ を m で表せば、 $\frac{\text{g}}{10^{-6}\text{m}^3} = 10^6 \times \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3}$ となり、

Mg (メガグラム) と m (メートル) で表しても、数値は変わらない。

すなわち、 $2.563 \text{ g/cm}^3 = 2.563 \text{ Mg/m}^3$ である。

基本問題4 含水比試験結果の整理

試料の含水比 w を測るために、含水比試験を行った。その結果、以下のようになつた。これをもとに、この試料の含水比を求めよ。

表1・4

(試料+容器)の質量	$m_a = 195.54 \text{ g}$
(炉乾燥試料+容器)の質量	$m_b = 163.76 \text{ g}$
容器の質量	$m_c = 100.15 \text{ g}$

解答 $w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 [\%] = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100 [\%]$ (1.14)

である。ただし、 m_w ：炉乾燥 110°C で失われる水の量、 m_s ：炉乾燥させた試料の質量。

したがって、

$$w = \frac{195.54 \text{ [g]} - 163.76 \text{ [g]}}{163.76 \text{ [g]} - 100.15 \text{ [g]}} \times 100 [\%] = 50.0 [\%]$$

答 $w = 50.0\%$

基本問題5 湿潤密度試験結果の整理

地盤から土をサンプリングして直径約 5 cm 、高さ約 10 cm の円筒形に整形した。この円筒形の大きさをノギスで測定したところ直径 5.020 cm 、高さ 10.015 cm となった。また、このとき供試体の質量を測定したところ 360.36 g であった。この試料土の湿潤密度 ρ_t を求めよ。

解答 式(1.5)より、 $\rho_t = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{\pi}{4} D^2 H}$ (1.15)

ここで、 m ：供試体の質量、 V ：供試体の体積、 D ：供試体の直径、 H ：供試体の高さ

したがって、 $\rho_t = \frac{360.36 \text{ [g]}}{\frac{\pi}{4} \times 5.020^2 \text{ [cm}^2\text{]} \times 10.015 \text{ [cm]}} = 1.818 \text{ [Mg/m}^3\text{]}$

答 $\rho_t = 1.818 \text{ Mg/m}^3$

基本問題6 自然状態における砂の相対密度の算定

ある自然状態の砂の含水比 w が 12.3% 、湿潤密度 ρ_t が 1.792 Mg/m^3 であった。この砂を乾燥させてモールド(容積 113.1 cm^3)に最も密に詰めたときの質量は 204.0 g 、最もゆるく詰めたときの試料は 156.0 g であった。この砂の自然状態における相対密度 D_r はいくらか。

ただし、砂の土粒子の密度 ρ_s を 2.75 Mg/m^3 とする。

解答 式(1.8)より、間隙比 $e = \frac{\rho_s(1 + \frac{w}{100})}{\rho_t} - 1$ であるから、

$$e = \frac{2.75 \text{ [g/cm}^3\text{]} \left(1 + \frac{12.3 \text{ [%]}}{100}\right)}{1.792 \text{ [g/cm}^3\text{]}} - 1 = 0.723$$

$$e_{\max} = \frac{2.75 \text{ [g/cm}^3\text{]} \left(1 + \frac{0.0 \text{ [%]}}{100}\right)}{\frac{156.0 \text{ [g]}}{113.1 \text{ [cm}^3\text{]}}} - 1 = 0.994$$

$$e_{\min} = \frac{2.75 \text{ [g/cm}^3\text{]} \left(1 + \frac{0.0 \text{ [%]}}{100}\right)}{\frac{204.0 \text{ [g]}}{113.1 \text{ [cm}^3\text{]}}} - 1 = 0.525$$

相対密度は、 $D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 \text{ [%]}$ (1.16)

$$\therefore D_r = \frac{0.994 - 0.723}{0.994 - 0.525} \times 100 \text{ [%]} = 57.8 \text{ [%]}$$

答 $D_r = 57.8\%$

基本問題 7 S_r , ρ_d ~ ρ 関係、相互関係式の証明

下に示す物理量間の相互関係式を各物理量の定義式を用いて証明せよ。

$$(1) \quad S_r = \frac{w\rho_s}{\rho w} \quad (2) \quad \rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}} \quad (3) \quad e = \frac{\rho_s(1 + \frac{w}{100})}{\rho_t} - 1$$

解答

(1) の解答：表 1・2 より、 $S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \text{ [%]}$ であるから、

$$S_r = \frac{\frac{V_w}{V_s}}{\frac{V_v}{V_s}} \times 100 \text{ [%]}$$

ここで、 $\frac{V_w}{V_s} = \frac{\frac{m_w}{V_s}}{\frac{m_w}{V_w}} = \frac{m_w \times m_s}{V_s \times V_w} = \frac{w}{100 \times \rho_s}$ となり、 $\frac{V_v}{V_s} = e$ である。

したがって、 $S_t = \frac{w\rho_s}{e\rho_w}$ となる。

(2) の解答：表 1・2 より、 $\rho_d = \frac{m_s}{V}$ であるから、

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{m - m_w}{V} = \frac{m}{V} - \frac{m_w}{V} = \frac{m}{V} - \frac{m_w}{m_s} \times \frac{m_s}{V} = \rho_t - \frac{w}{100} \times \rho_d \text{ となる。}$$

したがって、 $\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}}$ となる。

(3) の解答：表 1・2 より、 $e = \frac{V_v}{V_s}$ であるから、

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{1 - \frac{V_s}{V}}{\frac{V_s}{V}} = \frac{m - m \frac{V_s}{V}}{m \frac{V_s}{V}} = \frac{\frac{m}{V} - \frac{m}{V}}{\frac{m}{V}} = \frac{m}{V}$$

ここで、 $m = m_s + m_w$ であるから、

$$e = \frac{\frac{m_s + m_w}{V_s} - \frac{m}{V}}{\frac{m}{V}} = \frac{\frac{m_s}{V_s} + \frac{m_s}{V_s} \times \frac{m_w}{m_s}}{\frac{m}{V}} - 1 = \frac{\rho_s + \rho_s \times \frac{w}{100}}{\rho_t} - 1 \text{ となり。}$$

したがって、 $e = \frac{\rho_s \left(1 + \frac{w}{100}\right)}{\rho_t} - 1$ となる。

基本問題 8 含水比による乾燥密度の算定

湿潤密度 ρ_t が 1.431 Mg/m^3 の試料の含水比 w を測定したら 67.8% であった。この試料の乾燥密度 ρ_d を求めよ。

解答 (1.7) 式より、 $\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}} = \frac{1.431 [\text{g/cm}^3]}{1 + 0.678} = 0.853 [\text{Mg/m}^3]$

答 $\rho_d = 0.853 \text{ Mg/m}^3$

別解 土に含まれる固体成分(土粒子)の質量を $m_s = 100[\text{g}]$ と仮定すると、

$$w = \frac{m_w}{m_s} \text{ より、 } m_w = w \times m_s = 0.678 \times 100[\text{g}] = 67.8[\text{g}]$$

$$m = m_w + m_s = 167.8[\text{g}]$$

$$\rho_t = \frac{m}{V} \text{より、} \quad V = \frac{m}{\rho_t} = \frac{167.8[\text{g}]}{1.431[\text{cm}^3]} = 117.3 [\text{cm}^3]$$

$$\text{したがって、} \quad \rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{100[\text{g}]}{117.3[\text{cm}^3]} = 0.853 [\text{Mg/m}^3]$$

答 $\rho_d = 0.853 \text{Mg/m}^3$

この別解では、土粒子の質量を100[g]と仮定することにより、物理量の相互関係式を使わずに解いている。このように土の絶対量を問題としない場合、土粒子や水、あるいは土全体の質量や体積量を適当に仮定して、他の質量や体積量を具体的に計算できる。土粒子の質量 m_s を仮定すると容易に解けることが多い。

基本問題9 間隙比 e 、間隙率 n の算定

現場から試料土を立方体(10 cm × 10 cm × 10 cm)の形でサンプリングした。この土の湿潤質量を測定したところ $m=1856 \text{ g}$ であった。この試料の炉乾燥質量は $m_s=1444 \text{ g}$ 、土粒子の密度 $\rho_s=2.64 \text{ Mg/m}^3$ であった。サンプリングされた試料土の体積が $V=1000 \text{ cm}^3$ であると仮定して、間隙比 e と間隙率 n を求めよ。

解答 土粒子の体積 V_s は、

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{1444[\text{g}]}{2.64[\text{g/cm}^3]} = 547 [\text{cm}^3] \text{ であるから、}$$

間隙比 e は

$$e = \frac{V_u}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{1000[\text{cm}^3] - 547[\text{cm}^3]}{547[\text{cm}^3]} = 0.828$$

また、間隙率 n は

$$n = \frac{V_u}{V} = \frac{V - V_s}{V} = \frac{1000[\text{cm}^3] - 547[\text{cm}^3]}{1000[\text{cm}^3]} \times 100[\%] = 45.3[\%]$$

答 $\begin{cases} e=0.828 \\ n=45.3\% \end{cases}$

基本問題10 飽和度 S_r の算定

土粒子の密度 $\rho_s=2.67 \text{ Mg/m}^3$ 、間隙比 $e=3.081$ 、含水比 $w=102.8\%$ の土がある。この土の飽和度 S_r を求めなさい。ここで、水の密度は $\rho_w=1.00 \text{ Mg/m}^3$ としてよい。

解答 表 1.2 の(1.10)式より、 $S_r = \frac{w\rho_s}{e\rho_w} = \frac{102.8\% \times 2.67\text{[g/cm}^3\text{]}}{3.081 \times 1.00\text{[g/cm}^3\text{]}} = 89.1\%$

答 $S_r = 89.1\%$

別解 この問題も m_s の値を適当に仮定すると飽和度 S_r を求めることができる。

土粒子の密度は $\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$ である。ここで、 $m_s = 100\text{[g]}$ と仮定すると、

土粒子の体積は、 $V_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{100\text{[g]}}{2.67\text{[g/cm}^3\text{]}} = 37.453\text{[cm}^3\text{]}$

また、間隙比 $e = \frac{V_v}{V_s}$ であるから、 $V_v = eV_s = 3.081 \times 37.453\text{[cm}^3\text{]} = 115.39\text{[cm}^3\text{]}$

さらに、含水比 $w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\text{[%]}$ であるから、

これより、 $m_w = m_s \times \frac{w}{100} = 100\text{[g]} \times \frac{102.8\text{[%]}}{100} = 102.8\text{[g]}$

$V_w = \frac{m_w}{\rho_w} = \frac{102.8\text{[%]}}{1.00\text{[g/cm}^3\text{]}} = 102.8\text{[cm}^3\text{]}$

飽和度の定義は $S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\text{[%]}$ であるから、 $S_r = \frac{102.8\text{[cm}^3\text{]}}{115.39\text{[cm}^3\text{]}} \times 100\text{[%]} = 89.1\%$

答 $S_r = 89.1\%$

基本問題11 飽和密度、水中単位体積重量の算定式の誘導

飽和密度 ρ_{sat} 、水中単位体積重量 γ' を求める次式が成り立つことを物理量の定義式から証明せよ。

$$(1) \quad \rho_{sat} = \frac{\rho_s + e\rho_w}{1+e} \quad (1.17), \quad (2) \quad \gamma' = \frac{G_s - 1}{1+e} \gamma_w \quad (1.18)$$

解答

(1)の解答： $\rho_{sat} = \frac{m}{V}$ であるから、 $\rho_{sat} = \frac{m}{V_s + V_w} = \frac{\frac{m}{V_s}}{1 + \frac{V_w}{V_s}}$ となる。

$$\text{ここで、 } \frac{m}{V_s} = \frac{m_s + m_w}{V_s} = \frac{m_s}{V_s} + \frac{V_w}{V_s} \times \frac{m_w}{V_w}$$

また、飽和しているので $V_w = V_w$ であるから、

$$\therefore \frac{m}{V_s} = \frac{m_s}{V_s} + \frac{V_w}{V_s} \times \frac{m_w}{V_w} = \rho_s + e\rho_w$$

さらに、 $1 + \frac{V_w}{V_s} = 1 + e$ であるから、 $\rho_{sat} = \frac{\rho_s + e\rho_w}{1+e}$ となる。

(2)の解答： $\gamma' = \gamma_t - \gamma_w = (\rho_t - \rho_w) \cdot g_n$

ここで、 g_n ：重力加速度、 $\rho_t = \frac{m}{V}$ および $\rho_w = \frac{m_w}{V_w}$ であるから、

$$\gamma' = \left(\frac{m}{V} - \frac{m_w}{V_w} \right) g_n = \left(\frac{m}{V} \times \frac{V_w}{m_w} - 1 \right) \frac{m_w}{V_w} g_n$$

$$\text{ここで、 } \frac{m}{V} \times \frac{V_w}{m_w} - 1 = \frac{\frac{m}{V_s} \times \frac{V_w}{m_w}}{\frac{V}{V_s}} - 1 = \frac{\frac{m_s + m_w}{V_s} \times \frac{V_w}{m_w}}{\frac{V_s + V_w}{V_s}} - 1$$

$$= \frac{\frac{m_s}{V_s} \times \frac{V_w}{m_w} + \frac{V_w}{V_s} - \left(1 + \frac{V_w}{V_s} \right)}{1 + \frac{V_w}{V_s}}$$

また、飽和しているので、 $V_w = V_w$ である。

$$\therefore \frac{m}{V} \times \frac{V_w}{m_w} - 1 = \frac{\frac{m_s}{V_s} \times \frac{V_w}{m_w} + \frac{V_w}{V_s} - \left(1 + \frac{V_w}{V_s} \right)}{1 + \frac{V_w}{V_s}} = \frac{\frac{\rho_s}{1+e} - 1}{\frac{\rho_w}{1+e}} \text{となり、} \frac{\rho_s}{\rho_w} = G_s \text{(比重)とおけば、}$$

したがって、 $\gamma' = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w$ となる。

基本問題 12 飽和密度、水中単位体積重量の算定の算定

ある土の間隙比が $e = 3.350$ 、土粒子の密度が $\rho_s = 2.75 \text{ Mg/m}^3$ であった。この土の飽和密度 ρ_{sat} 、水中単位体積重量 γ' を求めよ。ここで、水の密度は $\rho_w = 1.00 \text{ Mg/m}^3$ としてよい。

解答 式(1.17)より

$$\text{飽和密度 } \rho_{sat} = \frac{\rho_s + e\rho_w}{1 + e} = \frac{2.75 [\text{g/cm}^3] + 3.350 \times 1.00 [\text{g/cm}^3]}{1 + 3.350} \\ = 1.40 [\text{Mg/m}^3]$$

水中単位体積重量の定義より

$$\begin{aligned} \gamma' &= \gamma_{sat} - \gamma_w = (\rho_{sat} - \rho_w) \times g_n \\ &= \{1.40 [\text{g/cm}^3] - 1.00 [\text{g/cm}^3]\} \times 9.8 [\text{m/s}^2] \\ &= 3.92 [\text{g/cm}^3 \cdot \text{m/s}^2] \\ &= 3.92 \times 10^3 [\text{kg/m}^3 \cdot \text{m/s}^2] \\ &= 3.92 \times 10^3 [\text{N/m}^3] \\ &= 3.92 [\text{kN/m}^3] \end{aligned}$$

答 $\begin{cases} \rho_{sat} = 1.40 \text{ Mg/m}^3 \\ \gamma' = 3.94 \text{ kN/m}^3 \end{cases}$

別解 与えられた条件は割合量だけなので、絶対量は適当に仮定して、土粒子の体積を $V_s = 1[\text{cm}^3]$ とすると、間隙の体積は $V_v = eV_s = 3.35[\text{cm}^3]$ であり、土全体の体積は $V = 4.35[\text{cm}^3]$ である。この土の間隙 $V_v = 3.35[\text{cm}^3]$ を水 $m_w = 3.35[\text{g}]$ で満たせば飽和状態となる。

一方、土粒子の質量は $m_s = V_s \rho_s = 1[\text{cm}^3] \times 2.75[\text{g}/\text{cm}^3] = 2.75[\text{g}]$ であるから、土全体の質量は $m = m_s + m_w = 6.10[\text{g}]$ となり、飽和密度は、

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m}{V} = \frac{6.10[\text{g}]}{4.35[\text{cm}^3]} = 1.40[\text{Mg}/\text{m}^3] \text{ となる。}$$

水中単位体積重量 γ' は、土の飽和単位体積重量 γ_{sat} から浮力を引いたものであるから、

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = (\rho_{\text{sat}} - \rho_w) \times g_n = 3.92[\text{kN}/\text{m}^3]$$

答 $\rho_{\text{sat}} = 1.40\text{Mg}/\text{m}^3$ 、 $\gamma' = 3.92\text{kN}/\text{m}^3$

基本問題13 含水比の調整

含水比 $w = 12.0\%$ の試料土が質量 18.5 kg だけある。この土を含水比 $w = 15.0\%$ にするためには、質量何 g の水を加えればよいか。

解答

含水比 $w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 [\%] = \frac{m_w}{m - m_w} \times 100 [\%]$ であるから、試料に含まれる水の質量は

$$m_w = \frac{m \frac{w}{100}}{1 + \frac{w}{100}} = \frac{18.5[\text{kg}] \times 0.12}{1 + 0.12} = 1.982[\text{kg}]$$

加えるべき水の量を $x[\text{kg}]$ とすれば、

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 [\%] = \frac{1.98 + x}{18.5 - 1.98} \times 100 [\%] = 15.0 [\%]$$

$$\therefore x = 0.5[\text{kg}]$$

答 0.5kg の水を加えればよい

基本問題14 物理試験結果からの間接的な物理量算定

土の試料の物理試験を行ったところ、湿潤密度 $\rho_t = 1.930\text{Mg}/\text{m}^3$ 、土粒子の密度 $\rho_s = 2.65\text{Mg}/\text{m}^3$ 、含水比 $w = 26.4\%$ であった。この試験結果をもとに、この

土の間隙比 e 、間隙率 n および飽和度 S_r を求めよ。ただし、水の密度を $\rho_w=1.00\text{Mg/m}^3$ とする。

解答 表 1.2 の相互関係式より、

$$\text{式(1.8)より、 } e = \frac{\rho_s \left(1 + \frac{w}{100}\right)}{\rho_t} - 1 = \frac{2.65[\text{g/cm}^3] \left(1 + \frac{26.4[\%]}{100}\right)}{1.930[\text{g/cm}^3]} - 1 = 0.736$$

$$\text{式(1.9)より、 } n = \frac{e}{1+e} \times 100[\%] = \frac{0.736}{1+0.736} \times 100[\%] = 42.4[\%]$$

$$\text{式(1.10)より、 } S_r = \frac{w\rho_s}{e\rho_w} = \frac{26.4[\%] \times 2.65[\text{g/cm}^3]}{0.736 \times 1.00[\text{g/cm}^3]} = 95.1[\%]$$

$$\text{答 } e=0.736, n=42.4\%, S_r=95.1\%$$

別解 与えられた条件は物理量（すなわち割合量）だけなので、絶対量を土粒子の質量を $m_s=100[\text{g}]$ と仮定すれば、次の 3 つの物理量から、

$$\cdot \text{乾燥密度 } \rho_s = \frac{m_s}{V_s} = 2.65[\text{g/cm}^3] \text{ より、}$$

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{100[\text{g}]}{2.65[\text{g}/\text{cm}^3]} = 37.73[\text{cm}^3]$$

$$\cdot \text{含水比 } w = \frac{m_w}{m_s} = 0.264 \text{ より、}$$

$$m_w = w \times m_s = 0.264 \times 100[\text{g}] = 26.4[\text{g}]$$

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w} = \frac{26.4[\text{g}]}{1.00[\text{g}/\text{cm}^3]} = 26.4[\text{cm}^3]$$

$$m = m_w + m_s = 26.4[\text{g}] + 100[\text{g}] = 126.4[\text{g}]$$

$$\cdot \text{湿潤密度 } \rho_t = \frac{m}{V} = 1.930[\text{g/cm}^3] \text{ より、}$$

$$V = \frac{m}{\rho_t} = \frac{126.4[\text{g}]}{1.93[\text{g}/\text{cm}^3]} = 65.49\text{cm}^3$$

$$V_v = V - V_s = 65.49[\text{cm}^3] - 37.73[\text{cm}^3] = 27.76[\text{cm}^3]$$

となる。これらの値より、

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{27.76[\text{cm}^3]}{37.73[\text{cm}^3]} = 0.736$$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{27.76[\text{cm}^3]}{65.49[\text{cm}^3]} = 0.424 = 42.4[\%]$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{26.4[\text{cm}^3]}{27.76[\text{cm}^3]} = 0.951 = 95.1[\%]$$

答 $e = 0.736$ 、 $n = 42.4\%$ 、 $S_r = 95.1\%$

基本問題 15 間隙比 e と間隙率 n の関係の証明

間隙比 e と間隙率 n の間には次のような関係がある。間隙比の定義式から誘導せよ。

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1.19)$$

解答

間隙比の定義は $e = \frac{V_v}{V_s}$ である。この式の右辺は以下のように変形できる。

$$\text{左辺} = \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{\frac{V_v}{V}}{1 - \frac{V_v}{V}} = \frac{n}{1-n} \text{となり、 } e = \frac{n}{1-n} \text{ が成り立つ。}$$

基本問題 16 液性限界試験結果の整理

ある土の液性限界試験を行って、下の表のような結果が得られた。この結果から流動曲線を描いて、液性限界 w_L 、塑性指数 I_p 、流動指数 I_f を求めよ。
なお、この土の塑性限界は $w_P = 98.0\%$ であった。

表 1・5

落下回数 N	46	32	24	15	8
含水比 w (%)	129	136	143	142	155

解答 液性限界試験結果より、片対数グラフに流動曲線を描くと右図のようになる。図より $N=25$ 回に対応する含水比を読み取ると、液性限界 $w_L=w_L=138[\%]$ である。

したがって、塑性指数 I_p は、

$$I_p = w_L - w_p = 138[\%] - 98[\%] = 40$$

流動指数 I_f は流動曲線（実際には直線）の傾き、すなわち落下回数 N を10倍変化させるのに必要な含水比 w である。図より、例えば $N=5$ のとき $w=157[\%]$ 、 $N=50$ のとき $w=130[\%]$ なので、

$$I_f = 157 - 130 = 27 \text{ となる。}$$

$$\text{答 } w_L = 138\%, I_p = 40, I_f = 27$$

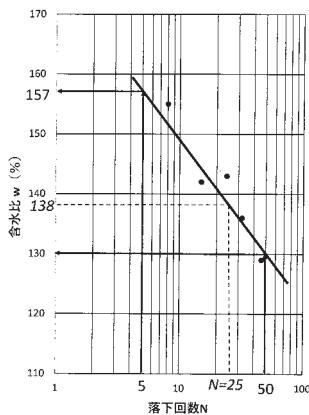


図 1.7

基本問題 17 コンシステンシー限界試験の結果による分類

ある試料土のコンシステンシー限界試験を行った結果、液性限界は $w_L=76.7\%$ 、塑性限界は $w_p=23.6\%$ となった。現場より採取したときの含水比は $w=58.6\%$ であった。この結果をもとに、次の問題を解け。

- (1) 塑性指数 I_p 、コンシステンシー指数 I_c および液性指数 I_L を求めよ。
- (2) 塑性図により、この試料土がどのような土であるかを分類せよ。

解答

$$(1) \text{ 塑性指数 } I_p = w_L - w_p = 76.7 - 23.6 = 53.1$$

$$\text{コンシステンシー指数 } I_c = \frac{w_L - w}{I_p} = \frac{76.7 - 58.6}{53.1} \\ = 0.341$$

$$\text{液性指数 } I_L = \frac{w - w_p}{I_p} = \frac{58.6 - 23.6}{53.1} = 0.659$$

$$\text{答 } I_p = 53.1, I_c = 0.341, I_L = 0.659$$

- (2) 塑性図上に示す位置から分かるように、この土は液性限界 w_L がB線($w_L=50\%$)より右に、A線($I_p=0.73(w_L-20)$)より上に位置しているので、圧縮性が大きく高塑性でねばねばした粘性土CH(粘土-高液性限界)に分類される。

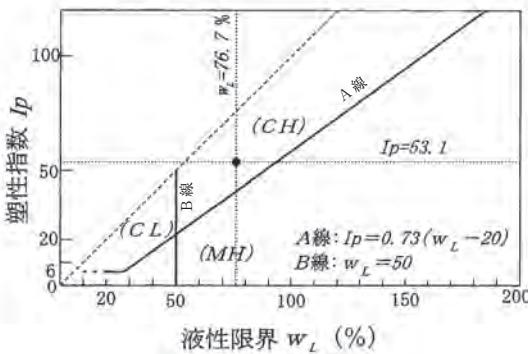


図1-8

(土質試験－基本と手引（第三回改訂版）：（公社）地盤工学会、2022年、p.54図6.6をもとに作成）

基本問題18 粒度試験結果の整理

ある土のふるい分け試験の結果、4.75mm ふるいは全量が通過したが、2 mm ふるいには 8.5g の試料が残留した。さらに順次に細かいふるいで振ったところ、ふるいの目開き径と残留質量のデータは、(0.85mm, 54.7g) (0.42mm, 124.8g) (0.25mm, 81.9g) (0.105mm, 71.1g) (0.075mm, 23.0g) となり、0.075mm ふるいを通過して受け皿に残った試料は 36.2g であった。この結果より、粒径加積曲線を描いて、この土の平均粒径 D_{50} 、均等係数 U_c 、曲線係数 U'_c を求めなさい。

解答 ふるい分け試験結果より、通過質量率を表1・6のように求める。

表1-6

成分	ふるい(mm)	残留質量(g)	通過質量(g)	通過質量率
礫分	4.75	0.0	$8.5 + 391.7 = 400.2$	$400.2/400.2 = 1.00$
	2.00	8.5	$54.7 + 337.0 = 391.7$	$391.7/400.2 = 0.98$
粗粒分	0.85	54.7	$124.8 + 212.2 = 337.0$	$337.0/400.2 = 0.84$
	0.42	124.8	$81.9 + 130.3 = 212.2$	$212.2/400.2 = 0.53$
	0.25	81.9	$71.1 + 59.2 = 130.3$	$130.3/400.2 = 0.32$
	0.105	71.1	$23.0 + 36.2 = 59.2$	$59.2/400.2 = 0.15$
	0.075	23.0	36.2	$36.2/400.2 = 0.09$
細粒分	(受け皿)	36.2	-	-

解答 求められた通過質量率をもとに、粒径加積曲線を描くと、図1・9のようになる。

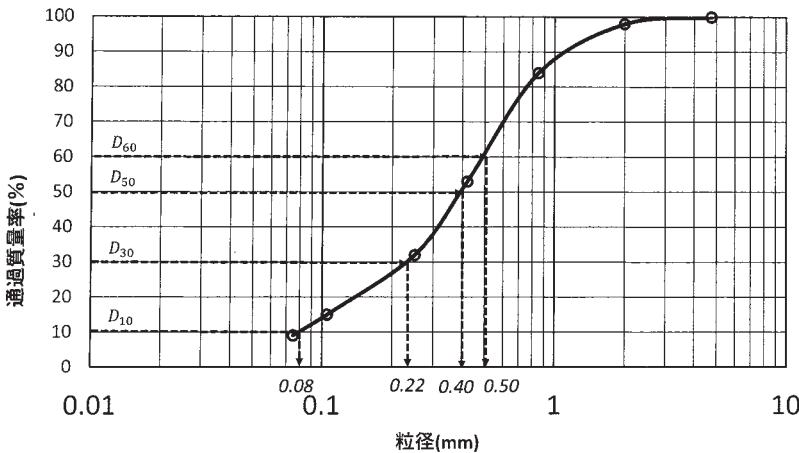


図 1・9

この粒径加積曲線より、

10%粒径は $D_{10}=0.080\text{mm}$ 、30%粒径は、 $D_{30}=0.22\text{mm}$ 、50%粒径は $D_{50}=0.40\text{mm}$ 、60%粒径は $D_{60}=0.50\text{mm}$ と読み取れるから、

平均粒径 $D_{50}=0.40\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=\frac{D_{60}}{D_{10}}=6.25$ 、曲率係数 $U'_c=\frac{(D_{30})^2}{(D_{60}D_{10})}=1.21$ となる。

答 $D_{50}=0.40\text{mm}$ 、 $U_c=6.25$ 、 $U'_c=1.21$

基本問題19 土の工学的分類

土の工学的分類法において、(GW)は(ア)(イ)、(SP)は(ウ)(エ)、(CH)は(オ)(カ)、(SG)は(キ)(ク)、(ML)は(ケ)(コ)、(GS)は(サ)(シ)のことである。
①粘土、②シルト、③砂、④礫、⑤火山灰、⑥粘土質土、⑦シルト質、⑧砂質、
⑨礫質、⑩火山灰質、⑪有機質、⑫粒径幅の広い、⑬分級された、⑭圧縮性の大
きい、⑮圧縮性の小さい

解答欄	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)
	(オ)	(カ)	(キ)	(ク)
	(ケ)	(コ)	(サ)	(シ)

解答 (ア) 12、(イ) 4、(ウ) 13、(エ) 3、(オ) 14、(カ) 1、(キ) 9、
(ク) 3、(ケ) 15、(コ) 2、(サ) 8、(シ) 4

解説：分類記号は英文字と記号で表す。中分類・小分類は主記号の組合せで表し、原則として構成粒子の多い順から(質量比)かつ細粒順に並べる。必要に応じて副記号と補助記号を用いる。

主な主記号

- R : 巨石(Rock)
G : 矿粒土(G-soil または Gravel)
S : 砂粒土(S-soil または Sand)
F : 細粒土(Fine Soil)
Cs : 粘性土(Cohesive soil)
M : シルト
C : 粘土(Clay)
O : 有機質土(Organic soil)
V : 火山灰質粘性土(Volcanic cohesive soil)
Pt : 高有機質土(Highly organic soil) または泥炭(Peat)

主な副記号

- W : Well graded(粒径幅の広い)
P : Poorly graded(分級された)
L : Low liquid limit
(低液性限界 $w_L < 50\%$)
H : High liquid limit
(高液性限界 $w_L \geq 50\%$)

基本問題20 締固めの歴史

次の文章の空欄に当てはまる解答を選び、解答欄に番号を記入せよ。
戦国時代の武将(ア)は(イ)に堤防を構築し、その一部は現存している。彼は、

堤防が決壊しないように、堤防の上で(ウ)を行った。

- ①武田信玄、②上杉謙信、③織田信長、④朝倉義景、⑤宇喜多直家、⑥長宗我元親、⑦信濃川、⑧淀川、⑨秋川、⑩高津川、⑪久慈川、⑫五ヶ瀬川、⑬釜無川、⑭姫川、⑮犀川、⑯神官によるお祓い、⑰僧侶による祈禱、⑲力士による土俵入り、⑳村民によるお祭り

解答欄	(ア)	(イ)	(ウ)
-----	-----	-----	-----

解答 (ア) 1

(イ) 13：釜無川と笛吹川の合流点付近のいわゆる「信玄堤」

(ウ) 19：堤防の上を定期的に多人数の村民が歩き回るために締固め効果が得られる。

基本問題 21 土の締固め特性

次の文章の空欄に当てはまる解答を選び、解答欄に番号を記入せよ。

締固めエネルギーが大きくなると土の最適含水比 w_{opt} は(ア)なり、最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ は(イ)なる。また、粒径が大きくなると最適含水比 w_{opt} は(ウ)なり、最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ は(エ)なる。

①大きく、②小さく

解答欄	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)
-----	-----	-----	-----	-----

解答

(ア) 2、(イ) 1、(ウ) 2、(エ) 1

基本問題 22 締固め試験結果の整理と盛土施工管理への適用

直径 10 cm のモールドと質量 2.5 kg のランマーを用いて突固めによる締固め試験を行った。試料土は 3 層に分けて各層 25 回ずつ突き固めた。試験結果を下に示す。以下の間に答えよ。

- (1) 締固め曲線を描いて、最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ と最適含水比 w_{opt} を求めよ。
- (2) 締固め曲線にゼロ空気隙曲線を記入せよ。

ただし、土粒子の密度を $\rho_s = 2.70 \text{ Mg/m}^3$ 、水の密度を $\rho_w = 1.00 \text{ Mg/m}^3$ とする。

(3) 締固め試験に用いた土を用いて盛土工事を行う。施工時の管理目標は「盛土の密度が締固め試験で得られた最大乾燥密度の 98.5% 以上である」というものであった。この条件を満足するためには、使用する盛土材料の土の含水比に許される範囲はいくらか。

表 1・7

含水比(%)	乾燥密度 $\rho_d (\text{Mg/m}^3)$
22.0	1.228
26.0	1.252
30.4	1.276
32.8	1.288
35.4	1.296
38.8	1.290
42.0	1.250
49.0	1.145

解答

(1) の答 最大乾燥密度 $\rho_{d\max} = 1.298 \text{ Mg/m}^3$ 、最適含水比 $w_{opt} = 36.7\%$

(2) の答 ゼロ空気間隙曲線を求める式は、 $\rho_{dsat} = \frac{\rho_w}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{100}}$ (1.20)

であるから、各含水比を代入して ρ_{dsat} を求めると表 1・8 のようになる。

表 1・8

含水比 (%)	22.0	26.0	30.4	32.8	35.4	38.8	42.0	49.0
$\rho_{dsat} (\text{Mg/m}^3)$	—	—	—	—	1.381	1.319	1.266	1.163

この値を締固め曲線上にプロットすると図に示すようなゼロ空気間隙曲線が得られる。

(3) の答 最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ の 98.5% は 1.279 Mg/m^3 である。したがって、締固め曲線から、この乾燥密度に対応する含水比は $w = 31.2\% \sim 39.8\%$ であることがわかる。

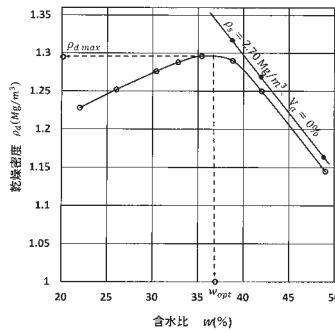


図 1・10

1

応用問題

応用問題1 収縮試験結果の整理と利用

ある粘土土の収縮試験と液性限界の試験結果を表1-9に示す。この結果より、この土の収縮限界 w_s と収縮比 R を求めよ。ただし、水の密度は $\rho_w=1.00\text{Mg/m}^3$ とせよ。

表1-9

試料土の含水比	$w=62.3\%$
試料土の体積	$V=19.4\text{ cm}^3$
炉乾燥試料土の体積	$V_0=15.2\text{ cm}^3$
乾燥土の質量	$m_d=18.81\text{ g}$

応用問題2 原位置での湿潤密度の測定

現場で土の湿潤密度 ρ_t を測るために地表面に穴を掘った。その土の質量を測ったら 1335 g であった。つぎに、その穴に乾燥砂を静かに注ぎ込んだところ 1045 g でちょうど穴が一杯になった。この砂の乾燥密度は $\rho_d=1.450\text{ Mg/m}^3$ である。このとき土の湿潤密度 ρ_t はいくらか。

応用問題3 間隙比 e 、間隙率 n の算定

箱の中に直径 1 cm の玉を入れた。最も密に詰めた場合、最も緩く詰めた場合について、それぞれの場合における間隙比 e と間隙率 n を求めよ。

応用問題4 物理量の間接的な算定

ある試料土の物理試験を行ったところ、湿潤密度 $\rho_t=1.980\text{ Mg/m}^3$ 、土粒子の密度 $\rho_s=2.65\text{ Mg/m}^3$ 、含水比 $w=24.6\%$ となった。この試験結果をもとに、次の値を算出せよ。

ただし、水の密度 $\rho_w=1.00\text{ Mg/m}^3$ とする。

(1) 間隙比 e 、間隙率 n 、飽和度 S_r 、乾燥密度 ρ_d

(2) 飽和密度 ρ_{sat} と水中单位体積重量 γ'

ただし、飽和させたときに間隙比 e は変わらないとする。

応用問題5 粒度特性による締固め特性の違い

土の粒度分布特性が変われば締固め曲線はどのように変わるか？図を用いて定性的に説明せよ。さらに、締固め曲線と透水係数の関係についても図を用いて説明せよ。

応用問題6 締固め試験結果の整理

次のような締固め試験結果が得られた。この結果をもとに次の間に答えよ。なおモールドの容積は 1000 cm^3 、質量 3788 g とする。また、土粒子の密度 $\rho_s = 2.68 \text{ Mg/m}^3$ である。

表 1-10

含水比(%)	容器+土(g)
51.5	4856
60.0	4956
71.2	5106
79.5	5204
84.0	5247
90.0	5245
98.5	5237

- (1) 乾燥密度 ρ_d と含水比の関係を図示して、最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ とそのときの含水比 w_{opt} を求めよ。
- (2) (1)で得られた図中にゼロ空気間隙曲線を描け。

応用問題7 混合土の含水比

含水比 w が 150.0% の軟弱な土 $3.5t$ に含水比 w が 10.0% の土 $3.2t$ を混ぜた。この混合土の含水比 w は何%になるか。

応用問題8 盛土に要する土量の算定

土取場から掘削した土をダンプトラックで所定の場所に運搬して盛り立てることにより、仕上がり体積が 20000 m^3 の盛土を建設することになった。土取場の

土の土質試験を行ったところ、自然状態で湿潤密度は $\rho_t = 2.180 \text{ Mg/m}^3$ 、含水比は $w = 15.2\%$ 、土粒子の密度は $\rho_s = 2.70 \text{ Mg/m}^3$ であった。また、締固め試験を行ったところ、最適含水比は $w_{opt} = 18.1\%$ 、その時の乾燥密度は $\rho_d = 1.762 \text{ Mg/m}^3$ であった。

そこで、盛土を建設する際には、土を運搬して建設現場で巻きだした後に散水して含水比を最適状態とし、ブルドーザー等によって締固め、乾燥密度が $\rho_d = 1.762 \text{ Mg/m}^3$ となるように施工した。

(1) 採取して運搬すべき土の質量を求めよ。

(2) 散水量（土取場から掘削した土 1t 当たりに加えるべき水の量）を求めよ。

応用問題 9 異なる含水比の土を混合したときの物理量

3種類の異なる含水比の土(乾燥土、 $w=25.0\%$ の土、 $w=40.0\%$ の土)を1.0tずつとり、これらを混合して突き固めて体積を 1.5 m^3 にした。この混合土の湿潤密度 ρ_t と飽和度 S_r を求めなさい。ただし、土粒子の密度 $\rho_s = 2.70 \text{ Mg/m}^3$ である。

応用問題 10 N 値の求め方

ある砂地盤の5mの深さで標準貫入試験を行ったところ、次の試験結果を得た。この深さにおけるN値を求めよ。また、この深さの地盤は緩いか密かを述べよ。

表 1-11

打撃回数	貫入深さ(cm)
1回目	4
2回目	5
3回目	5
4回目	5
5回目	4
6回目	4
7回目	3

記述問題 1
土が他の土木材料(鋼、コンクリート)と大きく違う点を説明せよ。

記述問題 2
自宅のある場所の地形と土質の状況をまとめよ。

記述問題 3
日本の代表的な特殊土について、その成因と土質工学的特徴を述べよ。

記述問題 4
運積土と定積土について説明せよ。それらの代表的な土をあげよ。

記述問題 5
【土の構造】にはどのようなものがあるかを説明せよ。

記述問題 6
土の工学的分類の方法について、その手順を簡単に説明せよ。

記述問題 7
コンシステンシー限界について以下の問いに答えよ。

- (1) 含水比と体積の図をもとに、コンシステンシー限界の種類を述べよ。
- (2) 液性限界、塑性限界を境に土の性質はどのように変わるか述べよ。
- (3) 普通の粘土と砂っぽい粘土における塑性指数の違いを述べよ。

堤防・貯水施設の建設や地盤の掘削工事では、土の中の水の流れを予測し透水量を適切に制御することが必要である。特に地盤内の水の速度が大きくなりすぎると地盤が破壊されて大きな事故につながる危険性があるので、土構造物を設計する際には透水速度・動水勾配の過大な部分が生じないように注意しなければならない。

地表面付近では土の間隙に空気と水が混在する不飽和状態となっている。寒冷地では地表付近の不飽和土の凍上が問題を引き起こすことが多い。

地下水面より下では地盤内に間隙水圧が作用している。土の変形や強度は、土全体に作用している全応力から間隙水圧を引いた有効応力によって左右される。

2.1 透水問題

(1) ダルシー(Darcy)の法則

土中の水の流速 v は動水勾配 i に比例する。すなわち、

$$v = ki \quad (2.1)$$

比例係数 k は土の透水性の大小を表すパラメータで、透水係数と呼ばれる。

透水係数 k は速度の単位をもっており、その単位は、m/sec を標準とする。

透水断面積を A とすれば、単位時間あたりの流量 Q は

$$Q = vA = kia \quad (2.2)$$

(2) 動水勾配と水頭

水頭 h は、その点における自由水面の高さとして表される。動水勾配 i とは水頭差 Δh を透水距離 L で割ったもの(水頭 h の勾配)である。

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2.3)$$

注) 水頭差を単に h と表記することもある。

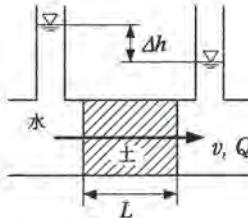


図 2.1 土の透水に関する模式図

(3) 透水試験

土の透水性を表す透水係数 k は実験により求める。室内透水試験として、比較的透水性の大きな土に適用する定水位透水試験と、透水性の小さな土に適用する変水位透水試験がある。また、現場透水試験として井戸からの地下水の汲み上げ量と井戸周辺地盤の地下水位の変化から透水係数を求める揚水試験がある。

(4) 非一様問題・非定常問題

ダルシー則に関するパラメータ(動水勾配 i 、透水係数 k)が地盤内の場所によって異なる場合(非一様問題)では、微小要素に関するダルシー則を境界条件にしたがって足し合わせる(積分する)ことによって問題を解く。また、パラメータが時間によって変化する場合(非定常問題)では、微小時間にに関するダルシー則を初期・最終条件にしたがって積分することによって問題を解く。

(5) 2次元透水(正方形流線網)

透水の流速や方向が位置によって異なる2次元透水現象は非一様問題である。これを解析的に解く(ラプラスの式を境界条件にしたがって積分する)ことは通常困難なので、等ポテンシャル線(水頭 h の等高線)と流線(流れの方向線)による図形的解法(正方形流線網)を用いることが多い。

a) 等方地盤での正方形流線網の描き方

- ①自由水に接する土の表面は等ポテンシャル線になる。
- ②不透水境界は流線になる。
- ③等ポテンシャル線と流線は直交する。

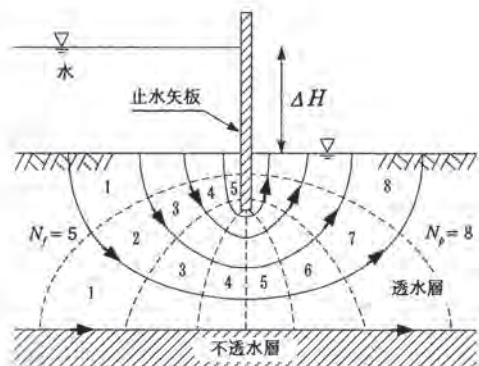


図 2-2 正方形流線網の例

④流線網の区画(要素)がなるべく正方形に近くなるように描く。

b) 等方地盤での正方形流線網の性質

⑤等ポテンシャル線の間の水頭差はどこも等しい。

⑥流線の間の流量はどこも等しい。

性質⑤⑥を用いれば、水頭・動水勾配・流速の分布や流量を容易に求められる。

いま、2次元地盤内の二つの境界における水頭差を ΔH 、等ポテンシャル線の間隔の数を N_p 、流線の間隔の数を N_f とすれば、地盤全体の透水流量 Q は

$$Q = k \Delta H \frac{N_f}{N_p} \quad (2.4)$$

(6) 透水によって生じる土の破壊

a) 砂質地盤のボイリング(boiling)

非粘着性地盤の堀削底面などにおいて、動水勾配が限界動水勾配 $i_{cr} = \frac{\gamma_t}{\gamma_w} - 1$ を越えると透水力によって土粒子が浮遊状態となり、地盤が破壊する。ここで、 γ_t は土の湿潤単位体積重量、 γ_w は水の単位体積重量である。

b) 細粒土のパイピング(piping)

粘着力を持つ細粒土であっても、動水勾配が非常に大きくなると土の表面(あるいは、透水性小から大への急変部)から土粒子が流出して孔を生じ、それが拡大して地盤全体の崩壊に至る。対策として、中間的な透水性を有するフィルター材を配置して透水性の急変部を解消する。

2.2 不飽和土の問題

(1) サクションと毛管現象

空気を含む土の間隙内では間隙水の表面張力によって水圧が空気圧よりも低下し、その分だけ地下水位から水が吸い上げられてくる(毛管現象)。水圧と空気圧の差をサクションという。間隙のサイズが小さいほどサクションは大きくなる。また、サクションによって土粒子間に吸着力が生じる。

(2) 凍上現象

気温が0度以下になると、地表付近の間隙水の凍結によって土中の間隙のサイズが小さくなるためにサクションが増大してより多くの地下水が地表付近に上昇する。この水が凍結膨張して地表面が大きく隆起してしまう。

2.3 間隙水圧

(1) 全応力・間隙水圧・有効応力

土に作用する全応力 σ は、土粒子が受け持つ有効応力 σ' と水が受け持つ間隙

水圧 u に分けて考えることができる。また、間隙水圧 u は、静水圧 u_0 と圧密荷重や土のせん断変形によって生じる過剰間隙水圧 u_e に分けて考えることができる。すなわち、

$$\sigma = \sigma' + u = \sigma' + (u_0 + u_e) \quad (2.5)$$

過剰間隙水圧が土の力学的性質に与える影響については、第3章 土の圧密と第4章 土のせん断強さで詳しく取り扱う。

(2) 地盤中の上載圧

地表面に圧力 q の分布荷重が作用し、土の湿潤単位体積重量が γ_t 、飽和単位体積重量が γ_{sat} 、地下水水面の深さが z_w であるとき、地表面から深さ z の位置の土に働く上載圧(鉛直応力成分) σ_v は

$$\text{地下水面上より上: } \sigma_v = \gamma_t z + q \quad (2.6)$$

$$\text{地下水面上より下: } \sigma_v = \gamma_t z_w + \gamma_{sat}(z - z_w) + q \quad (2.7)$$

また、水の単位体積重量を γ_w とすれば、地下水面上より下での静水圧は $u_0 = \gamma_w(z - z_w)$ のことで、載荷・変形前(過剰間隙水圧 $u_e = 0$)における地盤内(地下水面上より下)の有効上載圧は

$$\begin{aligned} \sigma'_v &= \sigma_v - u \\ &= \sigma_v - u_0 \\ &= \gamma_t z_w + (\gamma_{sat} - \gamma_w)(z - z_w) + q \\ &= \gamma_t z_w + \gamma'(z - z_w) + q \end{aligned} \quad (2.8)$$

と表される。ここに、 γ' は土の水中単位体積重量である。