

改訂版 わかる土質力学220問

—基礎から応用までナビゲーター—

安田 進 片田 敏行
後藤 聡 塚本 良道 共著
吉嶺 充俊



理工図書

改訂版

わかる土質力学

220問

—基礎から応用までナビゲーター—

安田 進 片田 敏行
後藤 聡 塚本 良道 共著
吉嶺 充俊

理工図書

まえがき

構造物を建設する場合や災害から構造物を守る場合には、地盤に関する様々な知識が必要である。この分野の学問を総称して地盤工学と呼ぶが、その基本となっているのが土質力学である。本書は大学で土質力学を学ぶ際に利用する演習書として作成したものである。

土質力学に限らないが、大学で専門科目を学ぶ場合、講義を受け教科書を読んだだけではなかなか理解できない。演習問題を数多く解いてみて、やっと理解できることが多い。考えてみると、我々は小学生の頃から演習問題を数多く解きながら勉強してきている。大学でも同じである。

土質力学の演習書は過去にいくつか出版されてきている。筆者達もそれらをもとに勉強してきた。このように既にいくつか演習書はある中、学生諸君向けの演習書を目指してあえて本書を作成してみた。そして、以下のような特長を持たせるように工夫をした。なお、本書は、2003年の初版以降の学問の進展に応じて見直しを行った改訂版である。

- (1) 土質力学は内容が多岐に亘っているため、それに対応するために演習問題は数多く解いた方がよい。そこで、全部で約220問にも及ぶ問題を作成した。
- (2) 演習問題にも簡単なものから難解なものまである。そこで、基本問題と応用問題とに分けて、自分の達成度に応じて問題を選べるようにした。また、計算問題だけでなく記述問題に答えることも大切なので、記述問題も別個に含めた。
- (3) 物事を理解していくには順番がある。そこで、本書の問題を順番に解いていくと自然に理解できるように工夫した。
- (4) 解答の導き方が理解できるように、基本問題では正解を詳しく記述した。また、単位や有効数字を正確に答えることも大切なので、それも正解の中に丁寧に記述した。本書の問題は関数電卓を用いて具体的な数値を解答することを前提としているが、特に有効数字と単位が整合していることが重要である。卒業後に実務を行う際にも、常に有効数字を考慮して設計・施工を行う必要がある。土質試験結果の表示には、有効数字は3桁が基本となっているが、地盤調査では2桁しか表示できない値もある。実務ではこれらを総合して判断した有効数字で設計・施工が行われる。
- (5) 一般に土質力学の各章の内容は独立していて一貫性がないように見られるが、実務では各章の内容を総合して地盤工学の諸問題を解決している。そこで、このような流れが分かるように、第9章に総合問題を設けた。ただし、この章を解くには土質力学周辺の知識も必要なので、第8章として地盤改良方法など特に重要な知識の演習も加えてある。
- (6) 各大学で用いられている教科書は多種多様であり、それらの教科書によって記号や式の記述方法が多少異なる。そこで、各章の最初にポイントを設けて、本書で用いる記号や式を示し、演習問題を解く際に混乱しないようにした。

本書を作成するにあたって、執筆者の5人は各自問題の案を持ち寄り、議論を重ねて問題の取捨選択をした。従って、全員で本書を作成したと言えるが、各自が主に担当した章を示すと以下ようになる。

第1章：片田、第2章：吉嶺、第3・6章：塚本、第4章：後藤、

第5・7・8・9章：安田

土質力学は難しく困るとの学生諸君の声をよく聞く。教える方の立場の筆者達も確かに土質力学は難しいと感じている。それに対して本書が少しでも役に立つことを願っている。学生諸君が将来産官学の各分野で活躍される際には種々の資格を有していることが必要となる。例えば、①技術士、②建築士、③地盤品質判定士、④土木施工管理技士、⑤土木学会認定土木技術者資格、といった資格があるが、これらの資格試験勉強の際にも本書を利用していただければ幸いである。

なお、本書の出版にあたっては理工図書の方々に大変お世話になった。深く感謝する次第である。

Contents

まえがき

第1章 土の基本的性質

1.1 土の組成と主な物理量	1
1.2 土の粒径区分とその名称	1
1.3 粒径加積曲線と粒度特性を表す特性値	1
1.4 土の基本的な物理量	3
1.5 コンシステンシー限界	3
1.6 土の工学的分類	3
1.7 土の室内試験法	4
1.8 原位置試験法-原位置における土の力学特性の推定	4
1.9 締固め	4
基本問題	5
応用問題	23
記述問題	26

第2章 土の中の水

2.1 透水問題	27
2.2 不飽和土の問題	29
2.3 間隙水圧	29
基本問題	31
応用問題	43
記述問題	45

第3章 土の圧密

3.1 最終圧密沈下量の計算	46
3.2 圧縮量(圧密沈下量)に関わるパラメータ	47
3.3 圧密時間・圧密沈下量の時間経緯の計算	47

3.4 圧密時間に関わるパラメータと透水係数	48
3.5 圧密試験結果の解釈と利用	48
基本問題	49
応用問題	58
記述問題	62

第4章 土のせん断強さ

4.1 地盤内の任意方向における応力	64
4.2 有効応力の原理	64
4.3 土の破壊規準	65
4.4 室内せん断試験	66
4.5 ダイレイタンスー、排水条件および間隙圧係数	66
4.6 砂地盤の液状化	68
基本問題	69
応用問題	90
記述問題	98

第5章 土 圧

5.1 土圧の種類と静水圧、側圧との関係	100
5.2 ランキンの土圧理論	101
5.3 クーロンの土圧理論	102
5.4 土圧に対する擁壁等の安定性	103
5.5 掘削限界深さ	104
基本問題	105
応用問題	115
記述問題	119

第6章 地盤の弾性沈下と支持力

6.1 地盤内に発生する応力の推定法	120
--------------------------	-----

6.2 浅い帯基礎の極限支持力の算定法	120
6.3 杭基礎の極限支持力の算定法	122
基本問題	124
応用問題	138
記述問題	143

第7章 斜面の安定

7.1 基本的な考え方	144
7.2 直線状のすべりに対する安定計算	144
7.3 円弧状のすべりに対する安定計算	145
7.4 テイラーの安定係数から簡易に安全率を求める方法	146
基本問題	147
応用問題	152
記述問題	156

第8章 調査・構造物の設計・施工・ 維持管理を行うために必要な知識

8.1 地形・地質	157
8.2 構造物の基礎の選定方法	157
8.3 杭の施工方法の種類	158
8.4 軟弱地盤対策工法	158
基礎問題	159
応用問題	162
記述問題	164

第9章 総合問題

総合問題1 軟弱粘性土地盤の盛土の圧密に関する問題	165
総合問題2 砂質土地盤に直接基礎を設置する場合の問題	173
総合問題3 砂地盤を掘削し、埋設管を埋め戻す場合の問題	177

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。

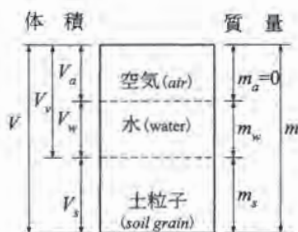


図1-1 土の組成

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

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 μm 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 μm 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)

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

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

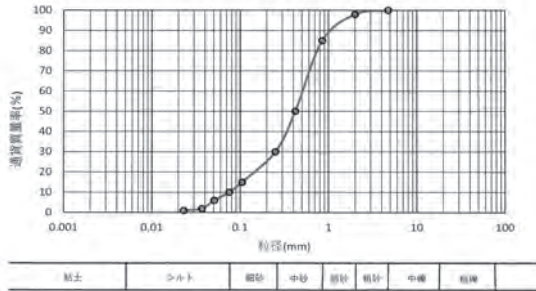


図 1・3 土の粒径加積曲線の例

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	$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} [\text{Mg}/\text{m}^3]$	(1.4)	………土粒子の密度試験
湿潤密度	$\rho_t = \frac{m}{V} [\text{Mg}/\text{m}^3]$	(1.5)	………湿潤密度試験
飽和密度	$\rho_{sat} = \frac{m}{V} [\text{Mg}/\text{m}^3]$	(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

乾燥密度	$\rho_d = \frac{m_s}{V}$	$:\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}} [\text{Mg}/\text{m}^3]$	(1.7)
間隙比	$e = \frac{V_v}{V_s}$	$:\ e = \frac{\rho_s \left(1 + \frac{w}{100}\right)}{\rho_t} - 1$	(1.8)
間隙率	$n = \frac{V_v}{V}$	$:\ n = \frac{e}{1 + e}$	(1.9)
飽和率	$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 [\%]$	$:\ S_r = \frac{w \rho_s}{e \rho_w} [\%]$	(1.10)
水中単位体積重量	$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$	$:\ \gamma' = \frac{m g_n - \rho_w g_n V}{V} [\text{kN}/\text{m}^3]$	(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。

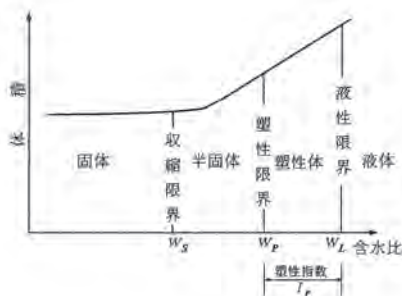


図1・4 コンシステンシー限界

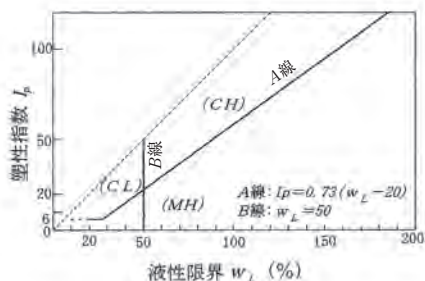


図1・5 塑性図

(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} (1 m 貫入するのに要する半回転数)

標準貫入試験 N 値 (30 cm 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。この図よりもっ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。

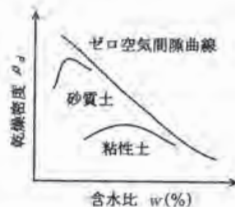


図 1・6 締固め曲線の一例

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 $[\text{kN/m}^3]$ 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 style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> = <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> $\times 100$	乾燥密度： <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> = <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/>
間隙比： <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> = <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/>	湿潤密度： <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> = <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/>
飽和度： <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> = <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> $\times 100$	土粒子の密度： <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> = <input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 50px; height: 20px;" 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、以下のようになった。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	$m_c=100.15 \text{ g}$

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

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。

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

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

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

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 $e = \frac{\rho_s \left(1 + \frac{w}{100}\right)}{\rho_t} - 1$ であるから、

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

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

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

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

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

答 $D_r = 57.8\%$

基本問題 7 S_r 、 $\rho_d \sim \rho$ 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。

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

解答

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

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

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

したがって、 $S_r = \frac{w\rho_s}{e\rho_w}$ 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、

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

ここで、 $m = m_s + m_w$ であるから、

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

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、

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

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

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

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

$$\text{答 } \rho_d = 0.853 \text{Mg}/\text{m}^3$$

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 $m=1856$ gであった。この試料の炉乾燥質量は $m_s=1444$ g、土粒子の密度 $\rho_s=2.64$ Mg/m³であった。サンプリングされた試料土の体積が $V=1000$ cm³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、

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

間隙比 e は

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

また、間隙率 n は

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

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

基本問題10 飽和度 S_r の算定

土粒子の密度 $\rho_s=2.67$ Mg/m³、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 $\rho_w=1.00$ Mg/m³ としてよい。

解答

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

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、 $V_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{100[\text{g}]}{2.67[\text{g}/\text{cm}^3]} = 37.453[\text{cm}^3]$

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

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

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

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

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

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、 $\rho_{sat} = \frac{m}{V_s + V_v} = \frac{\frac{m}{V_s}}{1 + \frac{V_v}{V_s}}$ となる。

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

また、飽和しているので $V_v = V_w$ であるから、

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

さらに、 $1 + \frac{V_v}{V_s} = 1 + e$ 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、

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

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

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

また、飽和しているので、 $V_v = V_w$ である。

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

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

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

水中単位体積重量の定義より

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

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

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、

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

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

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 0.5 kg 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 $\rho_w = 1.00 \text{ g/cm}^3$ とする。

解答 表 1.2 の相互関係式より、

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

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

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

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

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、

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

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

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

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

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

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

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

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

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

となる。これらの値より、

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

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

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

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 は $w_L=138[\%]$ 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、

$$I_f = 157 - 130 = 27 \text{ となる。}$$

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

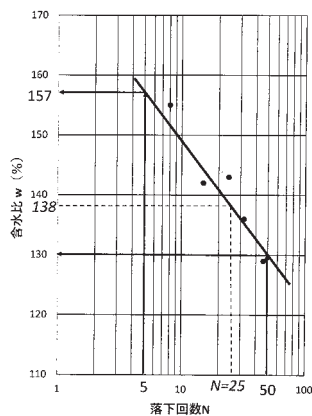


図 1.7

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ため、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。

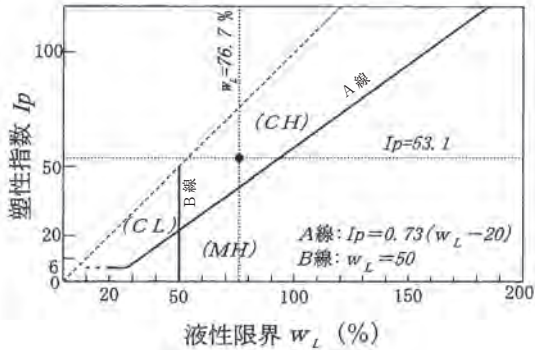


図 1・8

(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	
粗粒分	礫分	4.75	0.0	$8.5 + 391.7 = 400.2$	$400.2/400.2 = 1.00$
		2.00	8.5	$54.7 + 337.0 = 391.7$	$391.7/400.2 = 0.98$
	砂分	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。

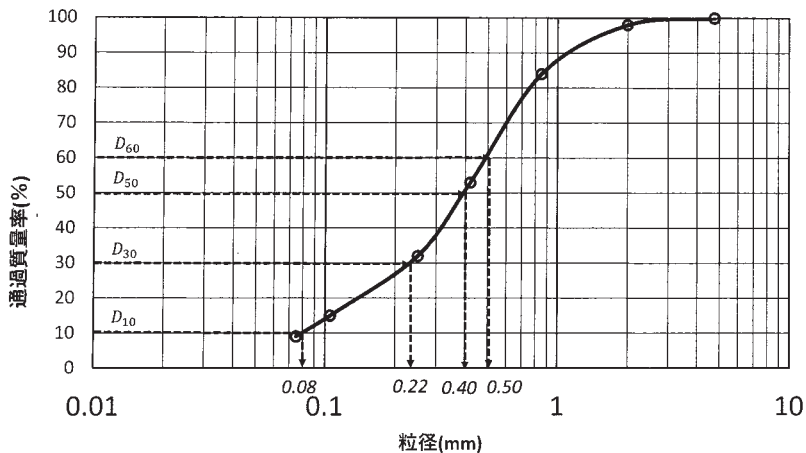


図1・9

この粒径加積曲線より、

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

平均粒径 $D_{50} = 0.40$ 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 $D_{50} = 0.40$ mm、 $U_c = 6.25$ 、 $U'_c = 1.21$

第1章 応用問題の解答

応用問題1の解答

含水比が収縮限界 w_s より大きいとき、乾燥による土全体の体積減少量 ΔV が水の蒸発量 ΔV_w に等しい（空气体積は変化しない）と仮定すれば、

$$w_s = w - \frac{(V - V_0) \rho_w}{m_s} \times 100[\%] \text{であるから、}$$

$$w_s = 62.3[\%] - \frac{\{19.4[\text{cm}^3] - 15.2[\text{cm}^3]\} \times 1.00[\text{g}/\text{cm}^3]}{18.81[\text{g}]} \times 100[\%] = 40.0[\%]$$

収縮比とは含水比の変化量 Δw に対する体積変化率 $\Delta V/\Delta V_0$ の比であるから、

$$\Delta w = 0.623 - 0.4 = 0.223 \text{となり、} \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{19.4[\text{cm}^3] - 15.2[\text{cm}^3]}{15.2[\text{cm}^3]} = 0.276 \text{であるので}$$

$$\text{収縮比は、} R = \frac{0.276}{0.223} = 1.24 \text{となる。}$$

答 $w_s = 40.0[\%]$ 、 $R = 1.24$

応用問題2の解答

穴の大きさは、 $1045[\text{g}]/1.450[\text{g}/\text{cm}^3] = 720.7[\text{cm}^3]$

穴の土の質量は1335gであるから、この土の湿潤密度は、

$$\rho_t = \frac{1335[\text{g}]}{720.7[\text{cm}^3]} = 1.852[\text{Mg}/\text{m}^3] \quad \text{答 } \rho_t = 1.852 \text{ Mg}/\text{m}^3$$

応用問題3の解答

- ・最も緩く詰めた場合：玉が隣接する6個の玉と接触している「単純立方形」がもっとも緩い状態になる。このとき、1個の玉に外接する立方体の体積 V は

$$V = (2R)^3 = 8R^3 [\text{cm}^3]$$

ここで、 R は玉の半径である。

1個の玉の体積 V_s は、 $V_s = \frac{4}{3}\pi \times 0.5^3 [\text{cm}^3]$

したがって、間隙比の定義より

$$\text{間隙比 } e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{8 \times 0.5^3 [\text{cm}^3] - \frac{4}{3}\pi \times 0.5^3 [\text{cm}^3]}{\frac{4}{3}\pi \times 0.5^3 [\text{cm}^3]} = 0.909 \quad \dots \text{答}$$

$$\text{間隙率 } n = \frac{e}{1+e} \times 100 [\%] = \frac{0.909}{1+0.909} \times 100 [\%] = 47.6 [\%] \quad \dots\text{答}$$

・最も密に詰めた場合：1層目を単純立方形に並べ、その上の層の玉を1層目の4個の玉の間に納まるように並べる。これを繰り返して玉を詰めたとき、もっとも密な状態となる。このとき $V = (32/\sqrt{2})R^3$ となる。

この立方体の中に半球が6個、1/8球が8個入っている。1球の体積は $\frac{4}{3}\pi R^3$ であるから、 $V_s = 4 \times \frac{4}{3}\pi R^3$ となる。

$$\text{したがって、間隙比 } e = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{\frac{32}{\sqrt{2}}R^3 - 4 \times \frac{4}{3}\pi R^3}{4 \times \frac{4}{3}\pi R^3} \text{ であるから、}$$

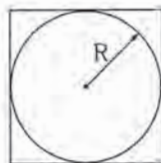
$$\therefore e = 0.351 \quad \dots\text{答}$$

となる。また、間隙率 n は

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100 [\%] = 26.0 [\%] \quad \dots\text{答}$$

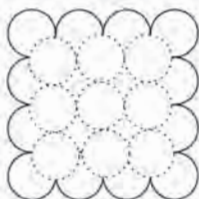


(a)



(b)

図1・11 もっとも緩く詰めた場合



(a)



(b)

図1・12 もっとも密に詰めた場合

応用問題4の解答

$$(1) \text{ 間隙比 } e = \frac{\rho_s \left(1 + \frac{w}{100}\right)}{\rho_t} - 1 = \frac{2.65 [\text{g/cm}^3] (1 + 0.246)}{1.98 [\text{g/cm}^3]} - 1 = 0.668 \quad \dots\text{答}$$

$$\text{間隙率 } n = \frac{e}{1+e} \times 100 [\%] = \frac{0.668}{1+0.668} \times 100 [\%] = 40.0 [\%] \quad \dots\text{答}$$

$$\text{飽和度 } S_r = \frac{w\rho_s}{e\rho_w} = \frac{24.6 [\%] \times 2.65 [\text{g/cm}^3]}{0.668 \times 1.00 [\text{g/cm}^3]} = 97.6 [\%] \quad \dots\text{答}$$

$$\text{乾燥密度 } \rho_d = \frac{\rho_t}{1+w/100} = \frac{1.980 [\text{g/cm}^3]}{1+0.246} = 1.589 [\text{Mg/m}^3] \quad \dots\text{答}$$

$$(2) \text{ 飽和密度 } \rho_{sat} = \frac{\rho_s + e\rho_w}{1+e} = \frac{2.65 [\text{g/cm}^3] + 0.668 \times 1.00 [\text{g/cm}^3]}{1+0.668} \\ = 1.989 [\text{Mg/m}^3] \quad \dots\text{答}$$

$$\begin{aligned} \text{水中単位体積重量 } \gamma' &= \gamma_{sat} - \gamma_w = (\rho_{sat} - \rho_w) \times g_n \\ &= \{1.989 [\text{g/cm}^3] - 1.00 [\text{g/cm}^3]\} \\ &\quad \times 9.8 [\text{m/s}^2] \\ &= 9.69 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] / \text{cm}^3 \\ &= 9.69 \times 10^3 [\text{N/m}^3] \\ &= 9.69 [\text{kN/m}^3] \quad \dots\text{答} \end{aligned}$$

応用問題5の解答

砂質分を多く含む土(図1・13中①)では、最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ は高くなり、最適含水比 w_{opt} は低くなる。そして締固め曲線の傾きは急で含水比 w が変わると乾燥密度の変化は大きく(図1・14中①)、高い締固め効果が得られる。これに対して細粒分を多く含む土(図1・13中②の土)では、最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ は小さく最適含水比 w_{opt} は大きくなる。また、締固め曲線の傾きは緩やか(図1・14中②)で含水比 w が変化しても締固め効果にそれほど差が見られない。

図1・15は透水係数～含水比の関係と乾燥密度～含水比の関係(締固め曲線)を比較したものである。図で分かるようにもっともよく締まったときの最適含水比より若干湿潤側で透水係数はもっとも小さな値を示す。

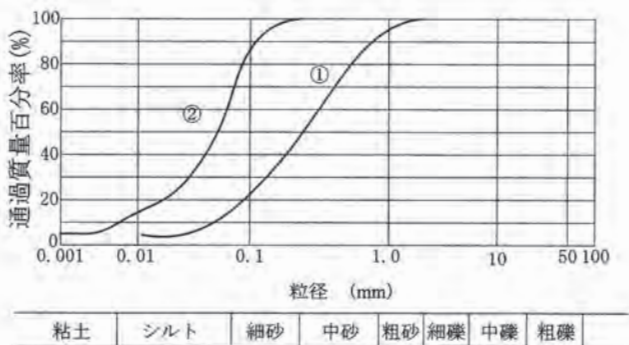


図 1-13

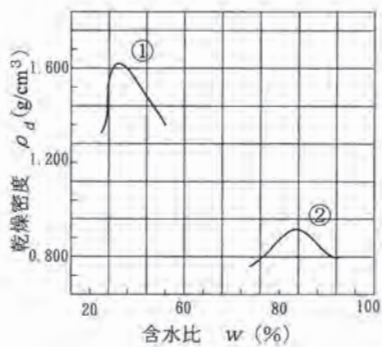


図 1-14

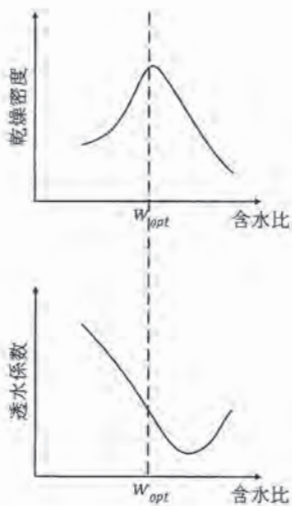


図 1-15

(土質試験 - 基本と手引 - (第三回改訂版)・(社)地盤工学会2022年、p.78図9.4をもとに作成)

応用問題 6 の解答

(1)の答：締固め試験結果より表 1-12 が得られる。

表 1・12

含水比 (%)	土 (g)	湿潤密度(Mg/m ³)	乾燥密度 (Mg/m ³)
51.5	1068	1.068	0.705
60.0	1168	1.168	0.730
71.2	1318	1.318	0.770
79.5	1416	1.416	0.789
84.0	1459	1.459	0.793
90.0	1457	1.457	0.767
98.5	1449	1.449	0.730

この計算結果より $\rho_d \sim w$ の関係を図示すると締固め曲線(図 1・16)が得られる。この図より、最大乾燥密度 $\rho_{d \max} = 0.794 \text{ Mg/m}^3$ 、そのときの最適含水比 $w_{opt} = 82.5\%$ …答

(2)の答

ゼロ空気間隙曲線は、 $\rho_{d \text{ sat}} = \frac{\rho_w}{\frac{\rho_s}{100} + w}$ である。

各含水比を代入して $\rho_{d \text{ sat}}$ を求めると表 1・13 が得られる。この計算結果を締固め曲線に代入すると図 1・16 のようになる。

表 1・13

含水比 (%)	$\rho_{d \text{ sat}}$ (Mg/m ³)
51.5	—
60.0	—
71.2	—
79.5	—
84.0	0.824
90.0	0.786
98.5	0.736

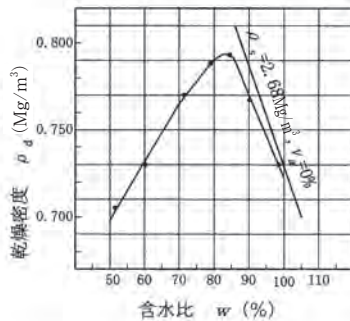


図 1・16

応用問題7の解答

含水比の定義より、

$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100[\%]$ であり、さらに、 $m = m_s + m_w$ であるから、

$$m_s = \frac{m}{1 + \frac{w}{100}}, \quad m_w = m - m_s \text{ となる。}$$

したがって、

含水比 w が 150.0% の土 3.5[t] に含まれる

土粒子の質量は $m_s = 1400$ [kg]、水の質量は $m_w = 2100$ [kg]

また、含水比 10.0% の土 3.2[t] に含まれる

土粒子の質量は $m_s = 2909$ [kg]、水の質量は $m_w = 291$ [kg]

この二つの土を混ぜると

土粒子の質量は $m_s = 1400$ [kg] + 2909 [kg] = 4309 [kg]

水の質量は $m_w = 2100$ [kg] + 291 [kg] = 2391 [kg]

となり、含水比は $w = \frac{2391 \text{ [kg]}}{4309 \text{ [kg]}} \times 100 [\%] = 55.5 [\%]$

…答

応用問題8の解答

(1) 最大乾燥密度 $\rho_d = 1.762$ [g/cm³] における、盛土の湿潤密度 ρ_t は

$$\rho_t = \rho_d \left(1 + \frac{w}{100} \right) = 1.762 \text{ [g/cm}^3] \times (1 + 0.181) = 2.081 \text{ [Mg/m}^3]$$

盛土の仕上がり体積は 20000 [m³] であるから、最適含水比に調整した総土量 M は

$$M = 20000 \text{ [m}^3] \times 2.081 \text{ [g/cm}^3] = 41620 \text{ [t]}$$

この土は加水して含水比 18.1% に調整されているので、乾燥土に換算したときの総土量 M_s を求めると、

$$M_s = \frac{41620 \text{ [t]}}{1 + \frac{18.1 [\%]}{100}} = 35241 \text{ [t]}$$

自然含水比 15.2% のときの水量 M_w は、

$$M_w = \frac{w}{100} M_s = \frac{15.2 [\%]}{100} \times 35241 \text{ [t]} = 5357 \text{ [t]}$$

したがって、

$$M = M_s + M_w = 35241 [\text{t}] + 5357 [\text{t}] = 40598 [\text{t}] \quad \dots\text{答}$$

(2) 掘削土 1m^3 当たり、

$$\text{掘削土の質量 } m = 2.181 [\text{g/cm}^3] \times 1 [\text{m}^3] = 2.181 [\text{t}]$$

$$\text{土粒子の質量 } m_s = \frac{m}{1+w/100} = \frac{2.181 [\text{t}]}{1+0.152} = 1.893 [\text{t}]$$

$$\text{含水量 } m_w = m - m_s = 0.288 [\text{t}]$$

加水量を x とすれば、加水後の含水比 w は、

$$\frac{m_w + x}{m_s} \times 100 = \frac{0.288 [\text{t}] + x}{1.893 [\text{t}]} \times 100 [\%] = 18.1 [\%]$$

$$\therefore x = 0.055 [\text{t}]$$

したがって、掘削土 $1[\text{t}]$ 当たりでは、

$$\frac{0.055}{2.181} = 0.0252 [\text{t}] = 25.2 [\text{kg}] \quad \dots\text{答}$$

応用問題9の解答

1t 当たりの土の土粒子質量 m_s と含水量 m_w を求めると、

乾燥土： $m_s = 1.0[\text{t}]$ 、 $m_w = 0[\text{t}]$

$$\text{含水比 } 25.0\% \text{ の土： } m_s = \frac{m}{1+w/100} = \frac{1.0 [\text{t}]}{1+0.25} = 0.8 [\text{t}]$$

$$m_w = m - m_s = 0.2 [\text{t}]$$

含水比 40.0% の土： $m_s = 0.714[\text{t}]$ 、 $m_w = 0.286[\text{t}]$

これら3種類の土を混ぜ合わせると

$$m = 3.0 [\text{t}]、m_s = 2.514 [\text{t}]、m_w = 0.486 [\text{t}]$$

したがって、混合土の含水比は

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 = \frac{0.486}{2.514} \times 100 [\%] = 19.3 [\%]$$

となり、間隙比 e は

$$e = \frac{V\rho_s}{m_s} - 1 = \frac{1.5 [\text{m}^3] \times 2.70 [\text{g/cm}^3]}{2.514 [\text{t}]} - 1 = 0.611$$

飽和度 S_r は、

$$S_r = \frac{w\rho_s}{e\rho_w} = \frac{19.3 [\%] \times 2.70 [\text{g/cm}^3]}{0.611 \times 1.00 [\text{g/cm}^3]} = 85.3 [\%] \quad \dots\text{答}$$

著者略歴

安田 進 (やすだ すずむ)

1975年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了

現在 東京電機大学名誉教授

工学博士、技術士（総合技術管理部門、建築部門）、
土木学会特別上級土木技術者（地盤・基礎）

片田 敏行 (かただ としゆき)

1980年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了

現在 東京都市大学名誉教授

工学博士

後藤 聡 (ごとう さとし)

1987年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了

現在 山梨大学准教授

工学博士、技術士(建設部門)

塚本 良道 (つかもと よしみち)

1993年 英国ケンブリッジ大学大学院博士課程満期退学

現在 東京理科大学教授

Ph. D.

吉嶺 充俊 (よしみね みつとし)

1992年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了

現在 東京都立大学准教授

博士(工学)

作図・編集協力 たなか 田中 ともひろ 智宏 (五洋建設株式会社)

参考図書

1. 地盤調査、土質試験方法など

- 地盤工学会；「地盤工学用語辞典」、2006年
地盤工学会；「地盤調査－基本と手引き－改訂版」、2013年
地盤工学会；「土質試験－基本と手引き－第3回改訂版」、2022年
地盤工学会；「地盤改良の調査・設計と施工」、2013年
日本建築学会；「建築基礎設計指針」、2019年

2. 土質力学や地盤工学の本

- 石原研而；「土質力学」第3版、丸善出版、2018年
内村太郎，内山久雄；「ゼロから学ぶ土木の基本地盤工学」、オーム社、2013年
菊本 統，西村 聡，早野公敏；「図説わかる土質力学」、学芸出版社、2015年
澤 孝平；「地盤工学」第2版、森北出版、2020年
常田賢一，澁谷啓，片岡沙都紀，河井克之，鳥居宣之，新納格，秦吉弥；
「基礎からの土質力学」、理工図書、2017年
三田地利之；「土質力学入門」第2版、森北出版、2020年
安川郁夫，今西清志，立石義隆，栗津清；「絵とき土質力学」改訂3版、オーム社、
2013年
安田進，山田恭央，片田敏行；「土質力学」改訂2版、オーム社、2014年
安田進；「トコトンやさしい地盤工学の本」、日刊工業新聞社、2020年
吉嶺充俊；「Excelで学ぶ土質力学」、オーム社、2006年

3. 土質力学の演習書

- 岡 二三生；「土質力学演習」、森北出版、1995年
河上房義編；「土質力学演習基礎編」（第3版）、森北出版、2002年
近畿高校土木会；「解いてわかる！土質力学」、オーム社、2012年
常田賢一，澁谷啓，片岡沙都紀，河井克之，鳥居宣之，新納格，秦吉弥；
「理解を深める土質力学320問」、理工図書、2017年

改訂版 わかる土質力学 220 問

—基礎から応用までナビゲート—

2023 年 1 月 21 日 初版発行



著 者 安 片 田 敏 進
後 藤 田 田 行
塚 本 藤 藤 聡
吉 嶺 充 道
発 行 者 柴 山 斐 呂 子

発 行 所

〒102-0082 東京都千代田区一番町 27-2

理工図書株式会社

電 話 03 (3230) 0221 (代表)

F A X 03 (3262) 8247

振替口座 00180-3-36087 番

© 2023 年

丸井工文社 ISBN 978-4-8446-0919-3

*本書の内容の一部あるいは全部を無断で複写複製（コピー）することは、
法律で認められた場合を除き著作者および出版社の権利の侵害となります。
ですのでその場合には予め小社あて許諾を求めて下さい。

自然科学書協会会員★工学書協会会員★土木・建築書協会会員

Printed in Japan