土質力学

編著者:安福規之

著 者:石藏良平・大嶺 聖・笠間清伸・酒匂一成

蒋 宇静・末次大輔・杉本知史・林 泰弘

福林良典・松原 仁・椋木俊文・村上 哲

山本健太郎

はしがき

本書は、山内豊聡先生(九州大学名誉教授)の教科書「土質力学」のリブート本として九州・沖縄在住の教員で協働して執筆した土質力学の入門書である。リブートには再出発、再始動という意味があり、はじめて土質力学を学ぶ学生や技術者の独習に適した内容となっている。手元に一冊、置いていただいて、必要な時に何度でも読み直していただきたいテキストである。

本書を執筆するにあたっては、執筆者間での意見交換、出版社 の要望等を踏まえ、次のような事項に留意している。

- 1) 九州・沖縄在住の若手の教員が協働して、各章間のつながりを共有しながら執筆する。
- 2) その際、山内先生の2001年版(最終版)の教科書の構成 を最大限活かし、考え方の理解に充填を置きつつ、新たに定 着している知見も取り入れて、より現状にあった内容を実現 する。
- 3) 各章に「はじめに」の節を新たに設け、どのようなことが その章で学べるのかを学生の視点から分かりやすく示す。
- 4) 各章には、理解を深めるために必要な「例題」を設けるとともに、理解の確認が独自でできるよう「演習問題」を各章に設定する。また、演習問題の解答例や式の誘導過程などは、Web 等を活かして丁寧でわかりやすいものとする。
- 5) 地盤工学用語辞典 ((公社) 地盤工学会編,2006年) の見出し用語として示されている「技術用語」が検索できるように標記を工夫する。
- 6) これからの土質力学として「土質力学で学べること」、「土 の動的性質」および「地盤の環境と防災」に関する新たな章 を組み入れ、学生の理解の幅を広げる工夫をする。
- このような点を随時、執筆者で確認しながら執筆を進め、漸く

14名の執筆者で一つのまとまった本を創り上げることができた。この本の企画のお話をいただいて爾来,10年ほどの歳月が流れている。

執筆者の多くの目を通して書くことで、必要な内容や情報、新たな知見などを総合的に意見交換でき、好都合なことは多くあるものの、やはり一緒に書くことの難しさもある。形式の統一、書きぶりや内容の濃淡などに注意しながら、一体性や一貫性のあるものに近づける努力はしたつもりであるが、なお十分でない点も多々あることは予見される。今後、構成内容や記述方法など、学生を含め読者諸氏のご批判・ご意見をいただきながらよりわかりやすくまた充実した内容になるよう随時改善していきたいと考えている。

この山内先生の土質力学のリブート本の執筆依頼があった際に、お話を受けてよいものかどうかとても悩んだ。理由はいろいるあった。そんな中、三浦哲彦先生(佐賀大学名誉教授)、落合英俊先生(九州大学名誉教授)にご相談し、一歩踏み出せるよう背中をそっと押していただいた。

本書に取り上げた引用文献や参考文献の著者に感謝の意を表すとともに、もっと適切な引用があったかもしれないと思う。その引用や参照については、どうかご寛容をお願いしたい。また、今回の執筆のきっかけを創っていただいた理工図書の方々に深甚の謝意を表したい。

末筆ながら、故山内豊聡先生(九州大学名誉教授)、故石堂稔 先生(元九州産業大学教授)、故巻内勝彦先生(日本大学名誉教授)、 故林重徳先生(佐賀大学名誉教授)がこのリブート本の上梓を喜 んでいただいていれば本当にうれしい。

2022年6月

記号一覧

- A **活性度** (activity), 供試体の断面積, ハーゲンポアズイユ を考えるときの管の内断面積, 間隙水圧係数
- A_f 試料の破壊時の断面積,破壊時の間隙水圧係数 A
- A。 供試体の断面の間隙部分の面積
- A。 土粒子の全表面積
- A₀ 試料の初期の断面積
- B 間隙水圧係数, 載荷重の幅
- C 土中の間隙水に伝達される比率
- C_q 二次圧密係数 (coefficient of secondary consolidation)
- C_c
 圧縮指数 (compression index)
- C。 管の形に関係する定数
- Cs 土粒子の圧縮率
- Cw 水の圧縮率
- D 排水長
- D_c 締固め度
- D_f 根入れ長
- D_r 相対密度 (relative density)
- D₁₀ 有效径 (effective grain size)
- E 土の変形係数 (modulus of deformation), スライス側面 に作用する間隙水圧
- E_0 初期接線変形係数 (initial tangent modulus)
- E_{50} 割線変形係数 (secant modulus)
- F₁ 液状化に関する安全率
- F_c 粘着力に関する安全率
- F。 摩擦角に関する安全率
- $F_{\rm s}$ 安全率
- G せん断弾性係数 (shear modulus), せん断剛性
- G_s 砂粒子の比重

- H 全水頭差,供試体の最終の厚さ,擁壁の高さ,すべり面深 さ,スライス側面に作用する水平力
- H_c 擁壁の限界高さ, 臨界高 (限界高さ)
- H。 供試体の固体部分の厚さ
- H... 地下水面の位置(地表面からの深さ)
- *I.* コンシステンシー指数 (consistency index)
- I_L 液性指数(liquidity index)
- I_b 塑性指数 (plasticity index)
- I_s 沈下係数
- L 長さ、すべり面長さ、せん断応力比
- L_f 試料の破壊時の長さ
- L₀ 試料の初期の長さ
- K 土圧係数
- K_a 主働土圧 (active earth pressure) 係数
- K_{ae} 地震時の主働土圧係数
- K_{cg} クーロンの主働土圧係数
- K_{cp} クーロンの受働土圧係数
- K_b 受働土圧 (passive earth pressure) 係数
- K₀ 静止土圧係数
- N すべり面上に作用する垂直力
- N" 有効垂直力
- N_B ブーシネスクによる集中荷重に関する影響数
- N_c , N_q , N_γ 支持力係数
- N_d 深さ係数
- $N_{\rm s}$ 安定係数
- No オスターバーグによる台形荷重に関する影響数
- OCR 過圧密比(overconsolidation ratio)
- P_a 主働土圧合力
- Pae 地震時の主 働土圧合力
- P_L 液状化指数

- P_N 垂直全荷重
- P, 受働土圧合力
- Q 集中荷重
- R ハーゲンポアズイユを考えるときの管の内半径, すべりに 対する抵抗力, 円弧の半径, 繰返しせん断強度比
- S サクション、圧密沈下量、すべり面上で発揮できるせん断 抵抗力
- S_f 最終沈下量
- S_r 飽和度 (degree of saturation)
- St 鋭敏比
- SPT 標準貫入試験
- T 滑動を抑止するために必要なせん断抵抗力
- T_s 表面張力
- T_v 時間係数 (time factor)
- U 揚圧力, 平均圧密度, すべり面に作用する間隙水圧の合力
- *U.* 均等係数 (uniformity coefficient)
- U_c ' 曲率係数 (coefficient of curvature)
- U_z **圧密度** (degree of consolidation)
- V 土全体の体積. スライス側面に作用する鉛直力
- V_f 試料の破壊時の体積
- V_0 試料の初期の体積
- V。 土粒子の体積
- V_v 間隙の体積
- V_w 間隙水の体積
- W 土くさびの重量, すべり土塊の重量
- a, b 幅, 長さ
- a_v 圧縮係数
- c 形状係数, 粘着力
- c_{α} 各種粘着力をまとめた表記

- $c_{\alpha m}$ すべり面に発現される土の粘着力
- c' 粘着力(有効応力表示)
- c_{cu} CD 試験で求まる粘着力
- c_d CD 試験で求まる粘着力
- c, 残留時の粘着力
- c, UU 試験で求まる粘着力, 非排水せん断強さ
- c_v **圧密係数** (coefficient of consolidation)
- d 円管の内径, 矢板の根入れ
- dR 微小反力
- e 間隙比 (void ratio)
- e。 限界間隙比
- f_B (m,n) ブーシネスクによる長方形等分布荷重に関する影響 数
- f_x, f_y, f_z x, y, z 方向の外力
- f_0 $(\sigma_1 \sigma_3)_f \sim \sigma_{3f}$ 平面における破壊線の切片の値
- f_1 $(\sigma_1-\sigma_3)_{\rm f}/2\sim(\sigma_1+\sigma_3)_{\rm f}/2$ 平面における破壊線の切片の値
- g 重力加速度
- i 裏込め地盤の水平面からの傾斜角
- i_x , i_y , i_z x,y,z 方向の動水勾配
- i_c 限界動水勾配
- h 減衰定数 (damping ratio)
- h_c 毛管上昇高 (capillary height)
- $h_{\rm p}$ 圧力水頭
- k 透水係数
- k_d 乱した土の透水係数
- k_h 水平震度
- k_H 水平方向の透水係数
- k_T 任意の温度における透水係数
- k_u 自然状態の乱さない土の透水係数

- k_V 鉛直方向の透水係数
- *l* すべり面の長さ
- m 土全体の質量
- m。 土粒子の質量
- m... 間隙水の質量
- m, 体積圧縮係数 (coefficient of volume compressibility)
- m_0 $(\sigma_1 \sigma_3)_f \sim \sigma_{3f}$ 平面における破壊線の傾き
- m_1 $(\sigma_1 \sigma_3)_f/2 \sim (\sigma_1 + \sigma_3)_f/2$ 平面における破壊線の傾き
- n 間隙率 (porosity), 乱流時のダルシ―則に適用する実験 値
- p **圧密圧力** (consolidation pressure), 平均主応力
- p' 平均主応力 (有効応力表示)
- *þ*_a 大気圧
- た。 **圧密降伏応力**(consolidation vield stress)
- p。 浸透水圧
- po先行圧密圧力 (pre-consolidation pressure), 地表面に作用する載荷圧
- q 単位時間における流量, 軸差応力, 偏差応力, 載荷重 (サーチャージ)
- 線荷重強さ
- q_u 一軸圧縮強さ
- q_r 乱さない試料の一軸圧縮強さ
- q_{ur} 同じ試料を完全に乱したときの一軸圧縮によるピーク強さ
- q' 偏差応力(有効応力表示)
- q'_{ur} 乱さない試料の強さのピークと同じひずみに対する乱した 試料の強さ
- r 一次圧密比、距離、すべり面に対する垂線の長さ
- r_l 動水半径
- r_f 微小反力の作用線の半径
- s せん断強さ

- u 間隙水圧
- *u, v, w x,y,z* 方向の変位
- u_i 初期間隙水圧
- u_w 水圧, すべり面に作用する間隙水圧
- v 浸透流速
- v_b 間隙中を流れる水の実流速
- v_x, v_y, v_z 流入速度の成分
- w 含水比 (water content)
- w_L 液性限界 (liquid limit)
- w_b **塑性限界** (plastic limit)
- w_{obt} 最適含水比
- w。 収縮限界 (shrinkage limit)
- x 摩擦円の中心から粘着力の合力に至る距離
- z 深さ
- z₀ 引張クラック深さ
- ΔE スライス側面に作用する間隙水圧のスライス間力
- ΔH 水平方向のスライス間力
- Δp' 平均主応力 (有効応力表示)
- ΔV 体積の増加量,鉛直方向のスライス間力
- Δ *u* 過剰間隙水圧 (excess pore water pressure)
- $\Delta \sigma_{l}$ 最大主応力(有効応力表示)の増加量
- $\Delta \sigma_3$ 最小主応力(有効応力表示)の増加量
- α すべり面の傾斜角
- α_h 最大加速度
- β 水平面を基準とする擁壁背面の傾斜角、斜面の傾斜角
- δ 壁面摩擦角,壁面と裏込め土との摩擦角
- γ 土の単位体積重量
- γ' 土の水中単位体積重量 (有効単位体積重量)

- γ_d 乾燥単位体積重量(dry unit weight)
- γ_{sat} **飽和単位体積重量** (saturated unit weight)
- γ_{sub} 水中単位体積重量 (submerged unit weight)
- γ_t 湿潤単位体積重量(wet unit weight)
- γω 水の単位体積重量
- ν せん断ひずみ
- γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} xy, yz, zx 面におけるせん断ひずみ (shear strain)
- ε 圧縮ひずみ
- εα 軸対象条件における軸方向のひずみ
- ε, 軸対象条件における横方向のひずみ
- ε_r , ε_v , ε_z x,y,z 方向の線ひずみ(linear strain)
- ε_π 体積ひずみ (volumetric strain)
- η 水の粘性係数
- θ 体積含水率 (water ratio), 角度, 水平面からの角度, すべり面の傾斜角
- v ポアソン比
- ξ , η 長さ
- ρ 距離, 密度
- ρ_d 乾燥密度 (dry density)
- ρ_{dmax} 最大乾燥密度
- ρ_s 土粒子の密度(soil particle density)
- ρ_{sat} 飽和密度 (saturated density)
- ρ_{sub} 水中密度(submerged density)
- ρ_t 湿潤密度 (wet density)
- ho_w 水の密度
- **全応力** (total stress), 垂直応力, すべり面上に作用する垂直応力
- σ_h 水平応力
- σ_r 鉛直応力
- σ_1 最大主応力

- σ_{lp} 軸応力のピーク値
- σ_2 中間主応力
- σ_3 最小主応力
- σ' **有効応力** (effective stress), すべり面上に作用する有効 垂直応力
- σ'。 有効拘束圧
- σ'_{i} 最小有効主応力
- σ'_{o} ρ 方向の垂直応力 (円筒座標)
- σ', 接線方向の応力(円筒座標)
- σ'_{v} 降伏応力 (yield stress)
- $\sigma'_{x}, \sigma'_{y}, \sigma'_{z}$ x, y, z 方向の垂直応力 (有効応力)
- σ'。 最大有効主応力, 有効上載圧
- $\sigma'_{h,a}$ ランキンの主働土圧
- $\sigma'_{h,p}$ ランキンの受働土圧
- σ_1 最大主応力(有効応力表示)
- σ_2 ' 中間主応力(有効応力表示)
- σ_3 最小主応力(有効応力表示)
- τ せん断応力
- τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} yz, xz, xy 面におけるせん断応力
- χ 飽和度によって決まる不飽和パラメータ
- φ せん断抵抗角
- φ' せん断抵抗角 (有効応力表示)
- ϕ_{α} 各種せん断抵抗力をまとめた表記
- $\phi_{\alpha m}$ すべり面に発現される土のせん断抵抗角
- ϕ_{cu} CD 試験で求まるせん断抵抗角
- ϕ_d CD 試験で求まるせん断抵抗角
- ϕ_r 残留時のせん断抵抗角
- ϕ_u UU 試験で求まるせん断抵抗角

目 次

記号一覧

第1章 「土質力学」で学べること

1.1 はじめに ·······	1
1.2 地盤にかかわる問題と求められる役割や機能	1
1.3 海上空港の連絡橋建設プロジェクト - 連絡橋を支える地質	盤 -
	3
1.4 まとめ - 土質力学の周辺分野	5
演 習 問 題	7
第2章 土の物理的性質と分類	
2.1 はじめに	9
2.2 岩石からの土の生成	9
2.3 土の三相構成と状態量の定義	11
2.3.1 土の構成	11
2.3.2 基本的物理量の定義	12
2.3.3 土の諸量に関する測定方法	16
2.4 土の粒度分布の表現	19
2.5 土のコンシステンシー	22
25.1 コンシステンシーとは	22
2.5.2 測 定 方 法	23
25.3 コンシステンシー限界から得られる諸定数	24
2.6 土の工学的分類	27
2.6.1 地盤材料の分類	27
2.6.2 粗粒土の分類	28
2.6.3 細粒土の分類	30
演 習 問 題	32

第3章 土の締固め

0.1	100		OC
3.2	土	の締固めの目的と機構	35
3.3	締	固め試験	37
3.3	3.1	締固め試験の方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	37
3.3	3.2	締固め曲線に及ぼす影響因子	42
3.3	3.3	締固めによる土の力学的性質の変化	44
3.4	現	場での締固め	45
3.4	4.1	転	45
3.4	4.2	施工管理方法·····	46
演習	引图	月 題	48
		第4章 土中水の物理	
4.1	1+	じめに	51
		中水の毛管上昇・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	51
4.2		中小の七官工弁	
4.3			55
4.4		ルシー則と透水係数	56
4.5		水係数に影響する要素	59
	5.1	透水係数のモデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	59
	5.2	土の粒度	61
4.5	5.3	浸透水の性質	61
4.5	5.4	間隔比と透水係数の関係	62
4.5	5.5	土の構造	63
	5.6	飽和度と透水係数の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	64
4.6	土	の透水性を評価する試験方法	66
4.6	6.1	実験室における透水係数の測定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	67
4.7		戸とボーリングによる現場透水試験	70
4.8	異	なる層から成る土の透水係数	72
4.8	8.1	水の流れが層に平行の場合・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	72

4.8.2 水の流れが層に垂直の場合	73
4.9 流線網(flow net)と浸透圧 ·····	73
4.10 流線網の描き方と流量及び揚圧力の計算	76
4.11 クイックサンド	80
演 習 問 題	84
第5章 土の圧密	
5.1 はじめに	87
5.2 土中の有効応力	87
5.3 土の圧密試験	90
5.3.1 実験装置と試験結果の一例	90
5.3.2 最終沈下量の計算	92
5.3.3 圧密降伏応力	96
5.3.4 構造物直下および複数層の圧密沈下量	97
5.4 土の圧密理論	100
5.4.1 圧密現象のモデルと仮定	100
5.4.2 圧密方程式	101
5.4.3 圧密方程式の解	105
5.4.4 圧密度と圧密沈下量	105
5.4.5 沈下時間	109
5.5 時間沈下曲線から得られる圧密定数	111
5.5.1 圧密係数	111
5.5.2 透水係数	115
5.5.3 一次元圧密比	115
5.6 圧密促進工法	123
5.6.1 サンドドレーン工法	123
5.6.2 プレローディング工法	125
5.6.3 その他	125
演 習 問 題	127

第6章 土のせん断とせん断強さ

6.1	は	じめに······	133
6.2	主	応力とモールの応力円	133
6.3	土	のせん断抵抗と破壊規準	136
6.4	せ	ん断試験	138
6.4	1.1	せん断試験の種類	138
6.4	1.2	圧密条件と排水条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	139
6.4	1.3	三軸圧縮試験	140
6.4	1.4	一面せん断試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	150
6.4	1.5	一軸圧縮試験 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	154
6.4	1.6	ベーンせん断試験	156
6.5	砂	質土のせん断特性	156
6.6	粘	性土のせん断特性	158
6.6	5.1	練返し効果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	158
6.6	5.2	せん断強さに及ぼす先行圧密および排水の影響	159
6.6	5.3	クリープ・・・・・	164
	5.4	土 構 造	165
演習	引官	月題	166
		第7章 土の繰返しせん断と液状化	
7.1	は	じめに	169
7.2	地	震時の地盤被害	169
7.3	土	の繰返しせん断	172
7.3	3.1	基礎方程式	172
7.3	3.2	繰返しせん断試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	173
7.3	3.3	繰返しせん断を受ける土の変形特性	176
7.3	3.4	繰返しせん断を受ける土の強度特性	177
7.4	砂	地盤の液状化と対策	178
7.4	1.1	液状化のメカニズム	178

7.4.2 液状化判定	0
7.4.3 液状化対策	1
演習問題18	2
数0	
第8章 地盤内応力	
8.1 はじめに	5
8.2 弾性論による応力とひずみ	5
8.3 鉛直集中荷重による地盤の応力 … 19	0
8.4 種々の地表面荷重による地盤中の応力 19	3
8.4.1 集中荷重	3
8.4.2 線 荷 重	4
8.4.3 帯 荷 重	5
8.4.4 長方形等分布荷重	8
8.4.5 台形荷重 20	1
8.5 地盤反力と応力集中 … 20	2
8.6 土の変形係数とポアソン比 20	4
演習問題20	5
然の本 U. 郎のひむ・1 ビ	
第9章 地盤の安定:土圧	
9.1 はじめに 20	9
9.2 裏込め土に作用する応力 … 20	19
9.3 土圧の概念 (静止土圧, 主働土圧, 受働土圧) 21	0
9.4 静止土圧	2
9.5 ランキン土圧 21	.3
9.5.1 土圧とモールの応力円の関係 … 21	3
9.5.2 主働土圧と受働土圧・・・・・・・・21	4
9.5.3 土圧分布と土圧合力 … 21	7
9.6 クーロン土圧	:3
9.6.1 土圧の定義・・・・・・・22	:3
9.6.2 土くさびに作用する力のつり合い 22	:3

9.6.3 境界条件が複雑な場合の土圧係数	228
9.6.4 地震時土圧の考え方	229
9.7 土圧理論の適用範囲と特徴	230
演 習 問 題	232
付 録	234
佐 10 幸 - Ju m のかけ・十七十	
第10章 地盤の安定:支持力	
10.1 はじめに	235
10.2 基礎構造物と地盤の支持力	235
10.3 支持力の算出のための地盤の原位置試験	239
10.4 基礎の沈下	242
10.5 浅い基礎の支持力	246
10.5.1 支持力算定公式の導出	246
10.5.2 支持力算定公式の修正と運用	250
10.5.3 基礎形状と支持力	251
10.6 杭基礎の支持力	255
10.6.1 杭 基 礎	255
10.6.2 杭基礎の支持力	256
10.6.3 ネガティブフリクション	260
10.6.4 群 杭 効 果	261
演 習 問 題	263
જ 11 호 ULBE 이 스타스 · NI 그	
第11章 地盤の安定:斜面	
11.1 はじめに	267
11.2 斜面破壊の種類と安全率	267
11.3 斜面安定解析に用いる土のせん断強さ	270
11.4 無限斜面の安定計算 (無限斜面法)	272
11.4.1 地下水位がすべり面よりも深い位置にある場合	272
11.4.2 すべり面上に定常浸透流がある場合	273
11.5 円弧すべりに対する斜面安定計算	275

11.5.1	極限平衡法を用いた計算法	277
11.5.2	安定係数を用いた図解法	288
11.6 複	合すべりを起こす斜面の安定計算	296
	第12章 地盤の環境と防災	
12.1 は	じめに	299
12.2 地	盤の環境機能・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	300
12.2.1	保水機能と水循環	300
12.2.2	净 化 機 能	302
12.2.3	土中の物質循環・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	304
12.3 地	盤汚染、廃棄物の処分および副産物の有効利用技術	
		305
12.3.1	土壌・地下水汚染の対策技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	305
12.3.2	廃棄物の埋立処分	307
12.3.3	副産物の有効利用技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	310
12.4 地	盤環境と地盤防災	314
12.4.1	地球環境問題と土地劣化	314
12.4.2	気候変動と地盤災害に対する適応策	316
12.4.3	持続可能な社会の構築に向けて	319
演習問	題	322
付	録	324

第1章 「土質力学」で学べること

1.1 はじめに

人間社会が活動を続け、発展していくために必要な道路、橋梁、トンネル、基礎構造物、下水道施設、港湾構造物などの社会基盤施設は全て地盤に支えられている。これらの施設を安全かつ合理的・経済的に建設し、周辺環境への配慮の上で、期待される機能を十分に発揮させるためには、それを支える「地盤そのもの」と「工学的材料としての土」の特性を正しく理解し、それらを科学的に分析し、工学的に工夫して取り扱うことが重要である。

本章では、まず、この教科書が想定している地盤の問題を紹介し、その上で、自然の生成物である地盤や土のもつ機能・役割について考えてみる。次いで、具体的な事例として、海上に建設された新北九州空港とその連絡橋建設プロジェクトを通して、地質・地盤工学的な課題を取り上げ、地盤の成り立ちを適切に理解し、土質力学を学ぶことの必要性や意義をまとめる。

最後に、土質力学の周辺分野を紹介し、本章のまとめとする。

1.2 地盤にかかわる問題と求められる役割や機能

地盤は、先に述べた生活・社会基盤施設を整備する場、多様な生物が生存する場、地下水を涵養する場、食料等を生産する場、 廃棄物を受け入れる場などとしての多様な役割を担っている。それぞれの役割に応じて、力学的、工学的に無機質な材料として分析したり、化学的あるいは農学的に生きた有機質な材料として考えたりと、地盤を理解し、分析する視点は多岐にわたっている。そうした中で、本テキストは、地盤やそれを構成する土を力学的な視点から考え、理解することを中心に据えた内容となっている。

本テキストが関係する地盤の問題をあげると、例えば、1) 宅 地等の造成など土で構造物をつくるうえでの「材料としての問 題」、2) 地盤が構造物を支える際の「支持地盤としての問題」、3) 土を掘り、土を留めるときの「地盤の安定の問題」、4) 土中に水を留め、水が土中を流れる際の「地下水の問題」、そして、5) 地盤で廃棄物を受け入れる「地盤環境の問題」などがある¹⁾。

図 1.1 の示す宅地等の造成のように土で構造物をつくる場合には、まず、土の状態を表す諸量を求め、現場の土の状態をつかむ必要があるし、土を工学的に分類し、材料土としての性質を客観的に理解することも大切となる。また、材料土の締固め具合や保水性を知ることも土で構造物をつくる際には重要となる。

次いで、図1.2 に示すようにビルを建設するような場合、地盤がどの程度の構造物の重さを支えられるのかを分析する必要がある。そのためには、土の圧縮性や土の強度や変形の性質を調べ、それらの特性を把握し、適切に評価分析することが必要となる。それによって、構造物を支える適切な支持地盤を選択したり、適切な地盤に改良したりといった判断に繋がっていく。





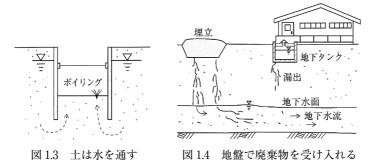


図1.2 構造物を支える

加えて、地盤は、本来、土粒子が集まって構成されており、多くの間隙を有している。その間隙の大きさは、砂質や粘土質の地盤それぞれで異なっている。図1.3のように地下水面よりも下にある地盤の間隙は水で満たされているのが一般的である。この図で示すように地盤を地下水以下まで掘削するような建設工事では、地下水が土中を移動し、流れることによって掘削している壁が崩れたり、その底面が膨れ上がったりといったトラブルが生じ

ることがしばしばである。こうした問題に対処するためには、土 中の水の流れの基本的な特性を理解し、事前に対応策を準備して おくことが肝要となる。また、地盤環境の問題として図1.4のよ うに廃棄物を地盤で受け入れる場合には、土中の水の流れだけで はなくて、漏水などに関係して土中に含まれる化学的な成分の流 れも分析することが求められる。

本テキストでは、このような地盤の問題を考える上で基本とな る知識や考え方の素養が段階的に身に着くよう内容や構成の工夫 がなされている。



1.3 海上空港の連絡橋建設プロジェクト - 連絡橋を支える地盤 -

ここでは、海上に建設された九州を代表する新北九州空港と 京都郡の苅田町を結ぶ連絡橋の建設プロジェクトを紹介し2). 十

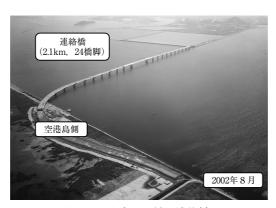


図 1.5 上空から見た連絡橋

質力学を学ぶことの意義や必要性の一端を説明する。新北九州空港は、周防灘沖2kmの海上に約370haの埋立てによって、2005年に開港した海上空港である。図1.5は、上空から見た新北九州空港連絡橋を示しており、陸域と空港を結んでいる。この海上空港と陸上部をつなぐ橋長約2kmの連絡橋建設においては、本テキストで修得できる地盤工学的な知見がいろんな場面で活かされている。

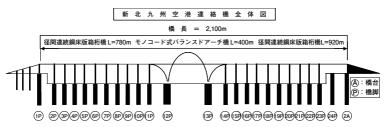


図 1.6 橋脚 24 基, 橋台 1 基および杭基礎で支えられる 新北九州空港連絡橋全体図

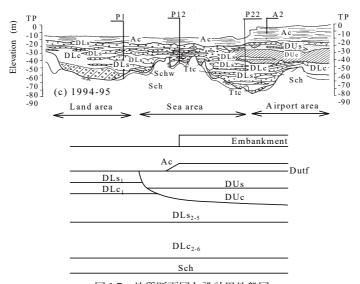


図 1.7 地質断面図と設計用地盤図 (上図:地質断面図,下図:設計用地盤図)

連絡橋は、図1.6に示すように橋脚、橋台と杭状の基礎(杭基 礎と称する)によって支えられている。また、その杭基礎は地盤 によって支持されることになるので、対象とする地盤が深さに応 じてどのような力学的な特性を有しているかを知らなければ、杭 の大きさや種類、設置深さなどを適切に決めることができない。 加えて. 杭の形状や設置深さを決めるためには. その杭基礎によっ てどれほどの荷重を支える必要があり、そのためにどこの深さの どの地盤に杭を設置するのが良いのかを原位置調査や室内土質試 験などの結果に基づいて図17のような地盤の状態を表す断面図 を描いて判断することになる。

本プロジェクトでは、橋脚、橋台を支える杭基礎の効率的な施 工に繋げるために、設計のための地盤物性値、具体的には、地盤 内の水の流れの理解に必要な物性値、土の変形や強さに関する土 質定数などは、原位置での試験や室内での土質試験の結果を反映 して決定されている。また、 杭基礎の支持力を算定するために、 図17(上図)に示した地質断面図をもとに技術者の工学的判断 を加えて図1.7(下図)に示す設計用地盤図が描かれている。こ の地盤図を得るためには、地質学と地盤工学に関連した幅広い知 識が求められ、地盤を専門とする技術者の腕の見せ所である。こ うした設計用地盤図や、設計に必要な地盤の物性値をどのように 決めていくのかは、土木技術者の蓄積されている経験や土質力学 的な素養が深くかかわってくることになる。

本テキストの各章の内容には、上記の実務における地盤調査・ 分析. 設計・施工. 維持管理を行う上で. 土木技術者として身に 付けておくべき土と地盤に関する基礎的な事項が多く含まれてい る。

1.4 まとめ - 土質力学の周辺分野 -

「地盤工学用語辞典(地盤工学会, 2006年) | に土質力学の学 術的な定義と共にその周辺分野が示されている。学会が公認して

いるこの辞典では、「地盤工学」という体系のなかで「土質力学」 が定義づけされている³⁾。ここでは、その記述内容の一端を紹介 し、本章のまとめとしたい。

「地盤工学(geotechnical engineering)とは、地盤および材料としての土や岩、さらに人工的な地盤材料も含めてそれらを取り扱う学問分野」である。その中で、「土に関する工学的問題について、土の物理化学的な性質や力学的な性質を基に、力学や水理学などの諸原理を応用する学問体系を土質力学(soil mechanics)という。」と記されている。続いて、「土の化学的性質を調べる土壌学(soil science, pedology)あるいは歴史や成因を調べる地質学(Geology)とは異なり、土質力学の知見は構造物や基礎の設計・施工に必要な土質工学(soil engineering)およびその一分野である基礎工学(foundation engineering)の基本となるものである。」と説明されている。

このような枠組みの中で「土質力学」が定義づけされていることを認識し、皆さんには土質力学の周辺分野にも思いをはせながら、土質力学を学んでいただきたいと思う。

演習問題

【問題 1.1】

本章を踏まえ、地盤にかかわる問題を二つ挙げ、地盤の役割や 機能について簡潔にまとめよ。

【問題 1.2】

ふるさとや住まいの周辺にある地盤構造物をひとつ選び、その 地盤構造物の歴史や役割などを調べて簡潔にまとめよ。

【問題 1.3】

近年起こった地盤災害を調べ、その特徴をまとめよ。

【問題 1.4】

SDGs の掲げる 17 の目標と 169 の具体的なターゲットの中で 「土質力学」の内容が役立つと思われるものをいくつか選び、選 んだ理由を記せ。

【問題 1.5】

鉄やコンクリート材料と比較して、土質材料らしさはどのよう なところにあるか。思うところを記せ。

引用文献

- 1) 土質試験 基本と手引き 第一回改訂版(2008). 公益社団法 人 地盤工学会
- 2) 新北九州空港連絡橋 委員会報告書(2005). 新北九州空港連 絡橋設計施工委員会
- 3) 地盤工学用語辞典(2006), 公益社団法人 地盤工学会

第2章 土の物理的性質と分類

2.1 はじめに

土は様々な大きさの土粒子から構成されており、その基本構成は土粒子と間隙に分けられる。間隙は、土が地下水面以下にある場合は水で満たされるが、地下水面よりも上では、水あるいは空気で満たされている。よって土は、土粒子、水ならびに空気といった固体、液体ならびに気体の三相からなる。

土は火山からの噴出物や、地中で固結した岩塊などが長い年月 を経て風化したものなど、自然由来のもので構成されていること から、各地各所に存在する土において同一のものであることは極 めてまれである。同じ種類の土でも、間隙の大きさや間隙を占め る水の割合によって、物理的性質や力学的性質が大きく異なる。 加えて、土の種類が違えば、これらの性質は全く異なるため、そ の土に含まれる土粒子の大きさの構成割合や、土粒子に対する間 隙の割合、間隙水が含まれる割合などを明らかにすることは、そ の土の性質を知る上での基本的かつ重要な情報となる。

本章では、土の成因、組成・粒度・コンシステンシーといった 土の物理的性質や、これらに基づく土の分類について述べる。

2.2 岩石からの土の生成

粒の粗い砂や細かい粘土といった土が生成されるもとは岩石である。岩石が土の生成や地盤の形成へと変化する過程とそれに関係する成因は、図 2.1 によって表現できる。地表付近や上部マントルの岩石は、造岩鉱物の集合体で形成されているが、その成因により火成岩、堆積岩、変成岩に分類される。火成岩は、地球内部のマグマが固結あるいは噴出して固結したものであり、花崗岩、流紋岩などがある。堆積岩は、岩石が風化、侵食、運搬されて堆積した土が長期にわたる物理的・化学的・生物的変化を受けて固

結し、岩石化するいわゆる**続成作用**(diagenesis)により固結したものであり、砂岩、石灰岩などがある。さらに変成岩は、火成岩や堆積岩がマグマの高温や高圧による**変成作用**(metamorphism)を受けて性質が変化したものであり、例えば、片岩、ホルンフェルスと呼ばれるものがある。

このようにして生成した岩石は、まず大気、水、植物などによる風化作用により、岩塊、岩屑、土へと変質あるいは細粒化が進行する。その時、土がその場に残存しているものを定積土(residual soil)(もしくは残積土)と呼ぶ。さらに、岩塊、岩屑あるいは定積土は、重力による崩落、流水による流出、風による飛散、火山からの噴出、氷河の移動など、様々な形態で移動、運搬されて堆積するが、このように移動して生成される土を運積土(transported soil)と呼ぶ。通常、豪雨、洪水時の流水による移動が多く、川の上流から下流への運搬過程では、河床勾配が緩くなると流速が低下するので、粒径が大きい粗粒土(coarse-grained soil)から堆積を始め、下流ほど細粒土(fine-grained soil)が堆積し、海にも達する。また、粗粒土は角張った形状であるが、流下に伴って角が取れて丸みを帯びた形状に変わる。

運搬された土は、河川の中・下流に堆積することで、盆地や平野を形成するが、運積土は形成過程の違いにより、河成堆積土、海成堆積土と呼ばれ、形成された地層を沖積層(Alluvium)、これらで構成される地盤を沖積地盤と呼ぶ。また、沖積層の下層は、一般に沖積層より地質年代が古く、続成作用により固結化が進行している洪積層(Diluvium)と呼ばれる地層が存在し、これらで構成される地盤を洪積地盤と呼ぶ。

また、地質年代に着目した場合、新生代を二分したうちの現在から約164万年前までを**第四紀**(Quaternary Period)と呼ぶ。 第四紀のうち、約1万年前以前を**更新世**(Pleistocene Epoch)、 同以後を**完新世**(Holocene Epoch)と呼ぶ。これらの時期に形成された地層をそれぞれ**更新統**(Pleistocene Series)、**完新統**

(Holocene Series) と表現する。概ね、洪積層と更新統、沖積層 と完新統が地質年代で対応するが、近年ではそれぞれ後者を用い ることが一般的である。

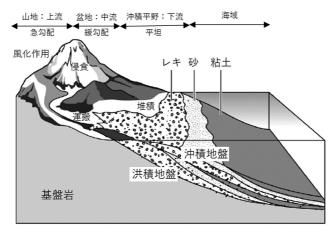


図 2.1 岩石から土の生成と地盤の形成の過程

2.3 十の三相構成と状態量の定義

2.3.1 土の構成

土は、図 2.2 に示すように、固体 (土粒子)、液体 (水)、気体 (空 気など)の三相で構成されている。また、土粒子の部分以外を間 隙と呼び、ここに水や空気が存在する。これらの割合によって、 硬軟や湿潤、乾燥といった土の性質は種々変化する。土の状態を 定量的に表すため、例えば間隙の体積と土粒子の体積の割合、水 の質量と土粒子の質量の割合などを求めることがある。本節では. 図 2.2 の土の三相構成を模式的に表した図をもとに、これら土の 状態量の定義について述べる。

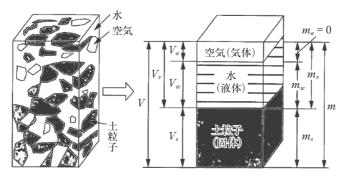


図 2.2 土の三相構成とその模式図

2.3.2 基本的物理量の定義

(1) 体積に関連する物理量

空気と水によって占められている土粒子間の空間を間隙という。固体の体積に対する間隙の体積の比を間隙比(void ratio)という。

$$e = \frac{V_v}{V_s} \tag{2.1}$$

ここに、e: 間隙比、 V_v : 間隙の体積、 V_s : 土粒子の体積 間隙比は一般に小数で表し、百分率は用いない。間隙の大きさを表す別の指標として**間隙率**(porosity)があるが、これは百分率で表す。

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (\%) \tag{2.2}$$

ここに、n: 間隙率、V: 土全体の体積

つまり、間隙比は土粒子の体積に対する間隙の体積の割合、間隙率は土全体の体積に対する間隙の体積の割合である。例えば土が圧縮した場合、前者は一般に分子の値のみ変化するのに対し、後者は分母、分子とも変化することから、類似した物理量であるが、求まる値は異なる。また、両者の関係は以下のように表される。

$$e = \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{V_v / V}{1 - V_v / V} = \frac{n / 100}{1 - n / 100} = \frac{n}{100 - n}$$
 (2.3)

したがって、逆に間隙率を間隙比で表すと、以下のように表される。

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100 \text{ (\%)}$$
 (2.4)

同じ土について,緩い状態と密な状態の間隙の大きさを比較するため,次式のような相対密度(relative density)を用いる。一般に,砂の D_r が $0 \sim 30\%$ はゆるい状態, $70 \sim 100\%$ は密な状態とされる。

$$D_r = \frac{e_{\text{max}} - e}{e_{\text{max}} - e_{\text{min}}} \times 100 \text{ (\%)}$$
 (2.5)

ここに、 D_r :相対密度、e:対象とする土の間隙比、

 e_{\max} , e_{\min} :対象とする土がとり得る最大および最小の間隙比間隙中の水の体積の割合を**飽和度**(degree of saturation)といい,以下のように百分率で表す。

$$S_r = \frac{V_w}{V_c} \times 100 \text{ (\%)}$$
 (2.6)

ここに、 S_r : 飽和度、 V_w : 間隙水の体積

土中の間隙が水で飽和した状態であれば S_r =100%であり、完全に乾燥していれば S_r =0%である。

さらに、土全体に占める間隙水の体積の割合を体積含水率 (water ratio) と呼び、以下のように百分率で表す。主として、土壌学の分野で用いられる。

$$\theta = \frac{V_w}{V} \times 100 \quad (\%) \tag{2.7}$$

ここに、 θ : 体積含水率

(2) 質量と体積に関係する物理量

地盤工学の分野では一般に、土粒子の質量に対する間隙水の質量の比を百分率で表し、これを含水比(water content)という。

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (\%) \tag{2.8}$$

ここに、w:含水比、 m_w :間隙水の質量、 m_s :土粒子の質量 完全な乾燥状態の土の含水比はもちろん 0% であるが、湿潤状態の土の含水比は土の種類により様々である。例えば干潟の粘土 のような土の含水比は 200% や 300% という値を示すこともあり、 土粒子の質量の 2 倍、 3 倍の間隙水が含まれる状況もありうる。

土粒子の比重(specific gravity of soil particle)は、土粒子と水との関係を表す上で欠かせない指標であり、土粒子の密度(soil particle density)と水の密度の比として、以下のように表される。

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{m_s}{\rho_w V_s} \tag{2.9}$$

ここに、 G_s : 土粒子の比重、 ρ_s : 土粒子の密度、 ρ_w : 水の密度、 m_s : 土粒子の質量、 V_s : 土粒子の体積

通常、自然に存在する土は湿潤状態で存在することが多く、このような土の単位体積当たりの質量を**湿潤密度**(wet density)という。

$$\rho_t = \frac{m}{V} \tag{2.10}$$

ここに、 ρ_t : 湿潤密度、m: 土全体の質量

また、上述の土粒子の比重ならびに飽和度、間隙比を用いて湿潤密度を表すと以下の式のようになる。これより、飽和度や間隙比が変化する土の湿潤密度を求めることができる。

$$\rho_{t} = \frac{m_{s} + m_{w}}{V} = \frac{G_{s} \cdot V_{s} + V_{w}}{V_{s} + V_{v}} \cdot \rho_{w} = \frac{G_{s} + \frac{V_{w}}{V_{v}} \cdot \frac{V_{v}}{V_{s}}}{1 + \frac{V_{v}}{V_{s}}} \cdot \rho_{w}$$

$$= \frac{G_{s} + \frac{S_{r}}{100} \cdot e}{1 + e} \cdot \rho_{w}$$
(2.11)

地下水面の上昇などにより、湿潤状態の土の間隙が水で飽和し

た状態となった場合、このような土の単位体積当たりの質量を**飽 和密度**(saturated density) ρ_{sat} といい、式(2.11) に飽和度 100% を代入することで、以下のように表される。

$$\rho_{sat} = \frac{m_s + m_w}{V} = \frac{G_s + e}{1 + e} \cdot \rho_w \tag{2.12}$$

さらに土が水中に没し、浮力を受ける状態となったときは、飽和密度から水の密度を差し引いて得られる**水中密度**(submerged density) ρ_{sub} を用いて計算する。

$$\rho_{sub} = \rho_{sat} - \rho_{w} = \frac{G_{s} - 1}{1 + e} \cdot \rho_{w}$$
 (2.13)

一方、完全な乾燥状態の土の単位体積当たりの質量を**乾燥密度** (dry density) ρ_d といい、式(2.11) に飽和度 0% を代入することで、以下のように表される。土粒子の詰まり具合(締固めの程度)を表すために用いられる。

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{G_s}{1+\rho} \cdot \rho_w \tag{2.14}$$

(3) 土の密度と単位体積重量の関係

一般に土の密度は、土の締まり具合や体積の変化を取り扱う場合に用いられる。一方、後述の章で学ぶ地盤の支持力、土圧、斜面の安定や地盤沈下などにおける土被り圧の算定では、力の釣り合いを考えるため、重力を加味した土の単位体積重量を用いる。重量 Wと質量 m の関係は、以下のように表される。

$$W = m \cdot g \tag{2.15}$$

ここに、g: 重力加速度 (9.81m/s²)

土の湿潤密度に対する土の**湿潤単位体積重量** (wet unit weight) γ_t は、以下のように表される。

$$\gamma_{t} = \frac{W}{V} = \frac{m}{V} \cdot \mathcal{G} = \rho_{t} \cdot \mathcal{G}$$
 (2.16)

これに倣い, 前項の土の湿潤密度(式(2.11)), 飽和密度(式(2.12)), 水中密度(式(2.13)), 乾燥密度(式(2.14)) に対する.

土の湿潤単位体積重量 γ_t , 飽和単位体積重量(saturated unit weight) γ_{sat} , 水中単位体積重量(submerged unit weight) γ_{sub} , 乾燥単位体積重量(dry unit weight) γ_d は、それぞれ以下のように表される。

$$\gamma_t = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{G_s + \frac{S_r}{100 \cdot e}}{1 + e} \cdot \gamma_w$$
(2.17)

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \cdot \gamma_w \tag{2.18}$$

$$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w = \frac{G_s - 1}{1 + e} \cdot \gamma_w \tag{2.19}$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s}{1+e} \cdot \gamma_w \tag{2.20}$$

2.3.3 土の諸量に関する測定方法

(1) 土粒子の密度

土粒子の密度 ρ_s を測定する方法として、JIS で規格化されている「土粒子の密度試験」が用いられる。これは、土に含まれる土粒子部分のみの単位体積当たりの質量を求めるために行われる。

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \tag{2.21}$$

土粒子のみの質量 m_s は、炉乾燥により土を完全に乾燥することで簡単に得られるが、土粒子体積 V_s の直接的な測定は困難なため、図 2.3 のような容量 $50 \sim 100$ ml のガラス製のピクノメーターを用いて、図 2.4 に示す要領で土粒子の体積を水の体積に置き換え、水の質量の測定値から算定する。

$$V_s = \frac{m_s + m_a - m_b}{\rho_w} \tag{2.22}$$

ここに、 m_a : 蒸留水で満たしたピクノメーターの質量 m_b : 土試料と蒸留水で満たしたピクノメーターの質量

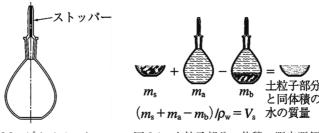


図2.3 ピクノメーター

図 2.4 土粒子部分の体積の測定要領

土を構成する成分には、無機質のケイ酸塩鉱物や石灰質および 有機質などがある。たいていの土粒子は、無機質の鉱物で構成さ れており、一般的な無機質の鉱物の密度が $25 \sim 28 \text{g/cm}^3$ であ るので、土粒子の密度もこの範囲の値を示すことが多い。しかし、 相対的に比重の小さな有機質分を含む泥炭などは、土粒子密度が $1.4 \sim 2.3 \text{g/cm}^3$ とかなり低い値となることがある ¹⁾。

(2) 土の湿潤密度

先述の式 (2.10) で定義される湿潤密度 pt は、土全体の単位体 積当たりの質量を表し、自立する塊状の土を対象とし、その体積 と質量を測定して求める。質量 m の測定は、(1) の土粒子の密 度の測定と同様に簡単である。一方、体積 Vの測定は「ノギス法」 と「パラフィン法」の2種類が IIS で規格化されている。

ノギス法は、図2.5に示すように円柱形に作成した土の供試体 の寸法をノギスで直接測定して. 体積 V を求める方法である。 一方、成形が困難な場合に用いられるパラフィン法は、図26に 示すように供試体周面に溶かしたパラフィンを塗布し、塗布前の 質量と見かけの水中質量から次式を用いて体積を間接的に求める 方法である。

$$V = \frac{m_1 + m_2 - m_3}{\rho_w} - \frac{m_1 - m}{\rho_b}$$
 (2.23)

ここに、m:供試体質量、m:パラフィン塗布後の供試体質量、 m₂: 水中における質量測定用容器の見かけの質量, m₃: 水中に おけるパラフィン塗布後の供試体と質量測定用の容器の見かけの質量, ρ_w : 水の密度, ρ_b : パラフィンの密度



図 2.5 ノギス法による供試体の質量・体積測定の方法

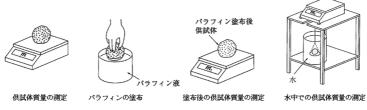


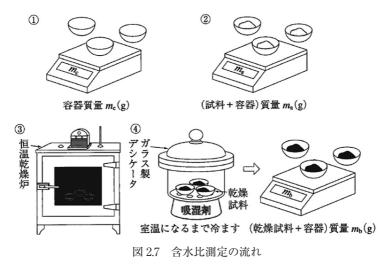
図 2.6 パラフィン法による供試体の体積測定の流れ

(3) 含水比

先述の式 (2.8) で定義される含水比wは、土粒子の質量に対する間隙に含まれる水の質量を、乾燥前後の土の質量を測定することによって求められる。JIS で規格化されている図 2.7 に示す方法により、蒸発皿に入れた土試料の湿潤状態の質量を測定した後、 110 ± 5 \mathbb{C} の炉乾燥によりおおよそ 24 時間かけて水を蒸発させ、完全に乾燥した土試料の質量を測定し、含水比を求める。

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100 \tag{2.24}$$

ここに、 m_a : 試料と容器の質量、 m_b : 乾燥試料と容器の質量、 m_c : 容器の質量



2.4 土の粒度分布の表現

土を構成する土粒子は、2.2 で述べたように様々な成因によって生み出されている。河川の上流では**粒径**(particle size)の大きい岩塊や礫が渓流や河岸に存在するが、河口に向かうに従い、主に物理的な摩耗作用により、砂や粘土のような大きさとなって河岸や河床、海底に堆積している。同じように火山からの噴出物でも、火口付近には比較的大きなものが多く分布しているのに対し、遠方に離れれば火山灰などの微粒子が堆積している。

土粒子は、このように同じような性質の鉱物から構成されていても、場所や堆積環境によってその粒径が大きく異なる。土を構成している土粒子の大小の混合割合を粒度といい、その分布によって土の分類がなされる。表 2.1 は、土粒子の粒径区分とその呼び名をまとめたものである。

これらの分類を行うため、JISで規格化されている「土の粒度 試験」と呼ばれる方法が用いられる。この方法において、粒径 0.075mm以上の粗粒分の粒径については、その粒子が通過でき る金属製網ふるいの目開きの寸法により表すのに対し、粒径

引

あ

浅い基礎 236 圧縮係数 94.95 圧縮波 172 圧密 87.100 圧密圧力 90 圧密係数 104, 111, 115 圧密降伏応力 96 **圧密試験** 87.90 圧密促進工法 123 圧密沈下 87 圧密沈下量 97,105 圧密度 105 圧密排水三軸圧縮試験 271 圧密排水三軸試験 178 圧密排水せん断試験 140 圧密非排水三軸圧縮試験 271 圧密非排水せん断試験 140 圧密方程式 102, 105 圧密理論 87 安全率 82,270,287 安定係数 291

1)

一次圧密比 116

一軸圧縮試験 139, 154, 155, 158,

271

一面せん断試験 139インクビン効果 53

う

打込み杭 255 埋込み杭 256 運積土 10

え

鋭敏比 158

液状化 169,171 液状化強度曲線 177 液状化強度比 177 液状化現象 171 液状化対策 181 液状化対策工法 181 液性限界 22.24 液性指数 25 SDGs 314, 320 S波 172 X線CT法 56 H^2 則 110 N値 180, 239, 241, 242, 258 円弧すべり面 268,275.282 鉛直支持力 256

お

応力経路 149 応力集中 202 応力履歴 137 オーバーコンパクション 45 オスターバーグ 201 帯荷重 195 帯状基礎 246

か

過圧密粘土 96 過圧密比 96 カードポードウイックス排水工法

塊状すべり 269 海成堆積土 10 角ひずみ 190 カサグランデ 157 重ね合わせの原理 245 火山灰質土 28 火山灰質粘性土 30

海溝型地震 170

荷重-沈下曲線 238 過剰間隙水圧 100, 101, 103, 106 河成堆積土 10 活性度 26 割線せん断弾性係数 173 割線変形係数 204 簡易ビショップ法 286, 287, 288 環境アセスメント 308 間隙水圧係数 145.146 間隙比 12 間隙率 12 完新世 10 完新統 10 含水比 13, 18, 36, 40 乾燥単位体積重量 16 乾燥密度 15.36.37.40 緩速せん断試験 140 関東大震災 170 簡便分割法 279

き

既製杭 255 基礎 235 基礎工学 6 キャサグランデ法 96 急速せん断試験 139 強度増加率 160 強度定数 136 極 135 極限支持力 238 極限周面抵抗力度 257 極限先端支持力度 257 極限平衡状態 269 極限平衡法 277 局所せん断破壊 238 曲線定規法 112 曲率係数 21 許容支持力 238, 242 許容地耐力 242 許容沈下量 242

切土斜面 267 均等係数 21

<

杭 255 杭基礎 255 クイッククレー 158 クイックサンド 80.81.82 クーロン 223 クーロン土圧 209 クーロンの主働・受働土圧係数 229

クーロンの主働土圧係数 225 クーロンの受働土圧係数 227 クーロンの土圧理論 223,228.

クーロンの破壊規準 136.272 クーロンの破壊規準線 212.213. 214, 215, 216

229, 230

クーロンの摩擦則 257 クリープ 164,269 繰返し三軸強度比 177 繰返し三軸試験 173 繰返し三軸試験方法 176 繰返しせん断応力振幅比 177 繰返しせん断強度曲線 177 繰返しせん断ひずみ振幅 176 繰返しねじりせん断試験方法

繰返し非排水三軸試験 175

176

群杭効果 262 群杭効率 262

け

群杭 256

計画安全率 270 形状係数 61 限界間隙比 157 限界動水勾配 81 **懸架水** 36

154

減衰定数 173.176 建設汚泥 311 建設発生土 311 建築基礎構造設計指針 241, 250, 252, 258

٦

工学的基盤 169 更新世 10 更新統 10 洪積地盤 10 洪積層 10 降伏応力 185 降伏荷重 238 工法規定方式 46 コーン指数 311 国際連合砂漠化対処条約 314 国連環境計画 315 コンシステンシー 22 コンシステンシー限界 22.24 コンシステンシー指数 25 コンピュータ断層法 56

さ

サイクリック・モビリティ 178 最終沈下量 92 最小主応力 134.141 最小主応力面 134 最大乾燥密度 35, 42, 44, 46 最大主応力 134,141 最大主応力面 134.135 最適含水比 35, 36, 42, 43, 44, 45 サイト特性 171 細粒土 10 サウンディング 239 サクション 52.55 砂質土 28 砂漠化 315 サフィックス 213.214

残積十 10 サンドドレーン工法 123 残留せん断強さ 144

L

c'φ'法 271, 282, 287 c , φ , 法 271, 272, 286 CD 試験 140.144.149.157.271 CU 試験 140, 144, 149. 271 CU 試験 140, 144, 149, 153, 271 時間係数 105 軸差応力 134 試算用すべり面 276 支持杭 259, 262 地震 169 地震応答解析 176,180 地震基盤 169 地震動 169 自然共生社会 319 自然斜面 267 持続可能な開発目標 314,320 湿潤単位体積重量 15 湿潤密度 14 質量保存則 103 地盤環境に関する環境基準 305 地盤工学 6.299 地盤反力 202 締固めエネルギー 39.42.44 締固め曲線 35.40.42 締固め試験 37 締固め仕事量 39 締固め度 46.47 斜面安定計算法 279 斜面眉 267 斜面先 267 斜面先破壊 275 収縮限界 22 修正フェレニウス法 284 三軸圧縮試験 139.140.142.145. 集中荷重 193

周面抵抗力 256 周面摩擦力 257 主働圧くさび領域 246 受働圧領域 247 主働状態 210 受働状態 210 主働土圧 212 受働土圧 212 受動土圧係数 248 受働土圧合力 247 首都直下地震 317 循環型社会 319 循環型社会形成推進基本法 310 循環資材 310 初期接線変形係数 204 真空圧密工法 125 侵食 269 浸透水圧 76

す

水中単位体積重量 16 水中密度 15 スウェーデン法 279 スケンプトン 26,95 ストークスの法則 20 スラブ内地震 170 スロッシング現象 171 寸法効果 250

せ

正規圧密 96 正規圧密粘土 96 静止土圧 212 静止土圧係数 212, 220 ゼロ空気間隙曲線 41 全応力 87 全応力解析 271 線荷重 194, 195 先行圧密圧力 96 せん断応力 141 せん断剛性 176 先端支持力 256 せん断弾性係数 189 せん断強さ 133,136 せん断抵抗 136 せん断抵抗角 136 せん断波 172 せん断ひずみ 188,190 全般せん断破壊 238 線ひずみ 187

そ

相対密度 13 層流 58 続成作用 10 速度ポテンシャル 75 塑性限界 22,24 塑性指数 24,26 塑性図 30 塑性平衡状態 210 粗粒士 10

た

大気圧工法 125 台形荷重 201 体積圧縮係数 93,95 体積含水率 13 体積ひずみ 189 第四紀 10 ダイレイタンシー 144,151,156, 178,179 ダルシーの法則 57,67,68,89, 101,103

ダルシー流速 56 段階載荷型 90 短期安定問題 271 単杭 256 単純斜面 268 単純せん断 153 断層 170 弾塑性体モデル 185

ち

地下水位低下工法 126 地下水汚染 305 地球温暖化 319,320 地質学 6 中央点破壊円 276 沖積地盤 10 沖積層 10 中立点 261 チュボタリオフ 158 長期安定問題 271 長方形等分布荷重 198 直接基礎 237

つ

通過質量百分率 20 突固め試験 39 突固めによる土の締固め試験方法 37

土の液性限界試験 23土の締固め 35土の塑性限界試験 23土の粒度試験 19

て

定水位透水試験 67 定積土 10 低炭素社会 319 底部破壊 275 テイラー 111, 291 適合性 190 テルツァーギ 100, 101, 158, 246, 291 テルツァーギの支持力係数 249 テルツァーギの支持力公式 250,

転圧 46

電気浸透工法 126

لح

土圧 209 土圧係数 212 土圧合力 219 透水係数 44,57,61,64,67,111,

動水勾配 56,57 東北地方太平洋沖地震 170,171 等ポテンシャル線 73,74,75,78, 79

道路橋示方書 237,241 道路橋示方書・同解説 252 道路土工切土工・斜面安定工指針 270

道路土工盛土工指針 270 土質工学 6,299 土質対学 6,299 土質力学 6,299 土壌汚染 305 土壌汚染対策法 305 土壌学 6,299 土粒子の比重 14 土粒子の密度 14

な

内部摩擦角 136 内陸型地震 170 南海地震 170 南海トラフ地震 317

土粒子の密度試験 16

に

二次圧密 115,116 二次圧密係数 116

ね

251

根入れ長 237 根入れ幅比 236 根入れ深さ 237 ネガティブフリクション 260 練返し効果 158 粘性土 28,30 年代効果 96

の

ノギス法 17

は

背圧 141
バイオレメディエーション 306
廃棄物処分場 309
排土杭 256
パイピング 82
破壊条件式 280
ハザードマップ 318
場所打ちコンクリート杭 255
蜂巣構造 43
発生土 311
パラフィン法 17
阪神・淡路大震災 170,316

15

非圧密非排水三軸圧縮試験 271 非圧密非排水せん断試験 139 P. 值 180 P波 172 非円弧すべり面 288 東日本大震災 316 ピクノメーター 16 ビショップの厳密法 285 ヒステリシス 53 ヒステリシスループ 173,176 引張クラック深さ 218 非排水繰返し三軸試験 177 非排土杭 256 標準貫入試験 239 表層地盤 169 表面張力 51

品質規定方式 46

15

 ϕ_u =0 法 271 ファイトレメディエーション

306

ブーシネスク 190, 192, 200, 243 フェレニウス 291 フェレニウス法 279.287 フォルヒハイマー 76 深い基礎 236 深さ係数 291 複合斜面 268 複合すべり面 268 フックの法則 188 不同沈下 242 不飽和浸透流方程式 64 プラントル 246 プレローディング工法 125 プロクター 37.39 分割法 276 分級された土 21 噴砂 80

\wedge

平衡含水比 55 ベーンせん断試験 139,156 変形係数 188,189,204 偏差応力 134 変水位透水試験 68 変成作用 10

ほ

ポアズイユの法則 59 ポアソン比 188, 192, 204 放射状せん断領域 247 飽和単位体積重量 16 飽和度 13 飽和密度 15 北海道東方沖地震 170

ま

マグニチュード 169 摩擦円 295, 296 摩擦円法 293, 295 摩擦杭 259 マトリックポテンシャル 52

H

三笠法 96 ミッチェル 196 密度浮ひょう理論 20

t;

無限斜面 269, 272 無限斜面法 272

め

メニスカス 36,52,53

₺

毛管現象 51 毛管力 54 モール・クーロンの破壊規準 137, 138

モールド 37,38 モールの応力円 134,137,142, 149,212,215 盛土斜面 267

ゃ

ヤーキー 213, 220

ゆ

UNCCD 314 UNEP 315 有機質土 28,30 有効応力 87 有効応力解析 271 有効径 21 UU 試験 139, 140, 155, 271

ょ

揚圧力 78 陽イオン交換容量 302

6

ライフサイクルアセスメント

319

ラプラス方程式 75 ランキン 213 ランキン土圧 209, 213 ランキンの主働土圧 214, 215, 217, 218 ランキンの受働土圧 215, 216,

217, 218, 219 ランキンの主働土圧係数 215 ランキンの受働土圧係数 216 ランキンの主働・受働土圧係数 229

ランキンの土圧理論 228, 230 ランマー 37, 38

6)

リサイクル 309 リデュース 308 粒径 19 粒径加積曲線 20,21 粒径幅の広い土 21 リユース 309 流線 73,74,75 流線網 73,75,76 流動 269 臨界円 276 臨界円 276 臨界高 289,292 臨界すべり面 276

ħ

礫質土 28

連続基礎 246 連続載荷型 90

わ

綿毛構造 43

著 者 略 歴

いしくら りょうへい

石藏 良平 (第5章, 第9章)

1979年 福岡県生まれ

2008年 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 博士後期課程 修了 現 在 九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 准教授, 博士 (工学)

1964 年 沖縄県生まれ

1989 年 九州大学大学院工学研究科修士課程水工土木学専攻 修了

現 在 長崎大学 教授,博士(工学)

かさま きよのぶ **笠間 清伸** (第5章, 第7章)

1973年 福岡県生まれ

1998年 九州大学大学院工学研究科修士課程建設システム工学専攻 修了 現 在 九州大学 教授, 博士 (工学)

さこう かずなり **酒乞 一成** (第 10 章, 第 11 章)

1977年 鹿児島県生まれ

2004年 鹿児島大学大学院理工学研究科博士後期課程 システム情報工学 専攻 修了

現 在 鹿児島大学学術研究院理工学域工学系 教授 博士(工学)

じゃん いじん **蒋 宇静** (第 11 章)

1962年 中国江蘇省生まれ

1985年 山東科技大学大学院資源工学研究科岩盤力学専攻修士課程 修了

1993年 九州大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程 修了

現 在 長崎大学大学院総合生産科学域 教授,博士(工学)

すえつぐ だいすけ

末次 大輔(第1章,第6章,付録)

1974年 佐賀県生まれ

1999年 九州大学大学院工学研究科修士課程建設システム工学専攻 修了

現 在 宮崎大学工学教育研究部 教授,博士(工学)

すぎもと さとし **杉本 知史** (第2章)

1977年 大阪府生まれ

2005年 九州大学大学院工学府博士課程 建設システム工学専攻 修了

現 在 長崎大学大学院 総合生産科学域システム科学部門 准教授,博 + (工学)

はやし やすひろ **林 泰弘**(第3章,第4章)

1967年 山口県生まれ

2001年 熊本大学大学院自然科学研究科環境科学専攻博士課程 修了

現 在 九州産業大学建築都市工学部 教授,博士(工学),技術士(建設 部門)

ふくばやし よしのり

福林 良典 (第10章)

1973年 京都府生まれ

1998年 京都大学大学院工学研究科修士課程土木システム工学専攻 修了

現 在 宮崎大学工学教育研究部 准教授,博士(工学)

まつばら ひとし 松原 **仁** (第3章, 第7章)

1976年 沖縄県生まれ

2005年 琉球大学大学院理工学研究科生産エネルギー工学専攻 修了

現 在 琉球大学工学部 准教授,博士(工学)

むくのき **椋木 俊文**(第4章,第6章)

1972年 福岡県生まれ

2001 年 熊本大学大学院自然科学研究科環境科学専攻 修了

在 熊本大学大学院自然科学研究部 教授,博士(工学)

さとし むらかみ **哲**(第7章, 第12章) 村上

1968 年 長崎県生まれ

1994年 九州大学大学院工学研究科修士課程水工土木学専攻 修了

現 在 福岡大学工学部社会デザイン工学科教授,博士(工学)

やすふく のりゆき 安福 **規之**(第1章, 第2章)

1958年 福岡県生まれ

1983年 山口大学大学院工学研究科修士課程土木工学専攻 修了

現 在 九州大学 教授, 工学博士

やまもとけん た ろう 山本健太郎(第8章,第9章)

1969 年 神奈川県生まれ

1998 年 能本大学大学院自然科学研究科環境科学専攻 修了

在 大分大学減災・復興デザイン教育研究センター准教授,博士(工学)

土質力学

2022年9月17日 初版第1刷発行



編著者 安 福 規 Ż

柴山 悲 呂 子 発行者

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) FAX 03(3262)8247 振替口座 00180-3-36087 番 http://www.rikohtosho.co.jp

②安福 規之 2022年

Printed in Japan ISBN 978-4-8446-0918-6

印刷·製本:(株)丸井工文社

(日本複製権センター委託出版物)
*本書を無断で複写複製 (コピー) することは、著作権法上の例外を除き、 孝じられています。本書をコピーされる場合は、事前に日本複製センター (電話:03-3401-2382) の許諾を受けてください。 *本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上の例外を 除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデ ジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも著作権法違反です。

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