

## 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<sup>1)</sup>。

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。

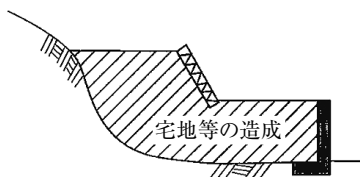


図 1.1 土で構造物をつくる

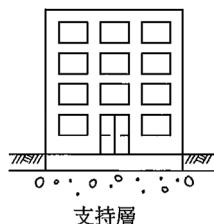


図 1.2 構造物を支える

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、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。

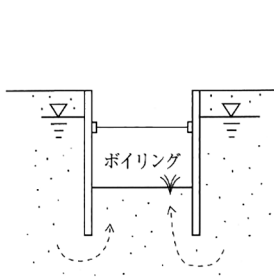


図 1.3 土は水を通す

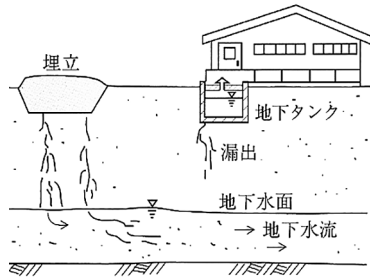


図 1.4 地盤で廃棄物を受け入れる

### 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荻田町を結ぶ連絡橋の建設プロジェクトを紹介し<sup>2)</sup>、土

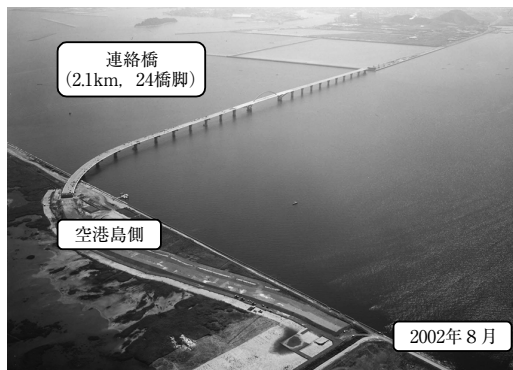


図 1.5 上空から見た連絡橋

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 2 km 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 2 km 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。

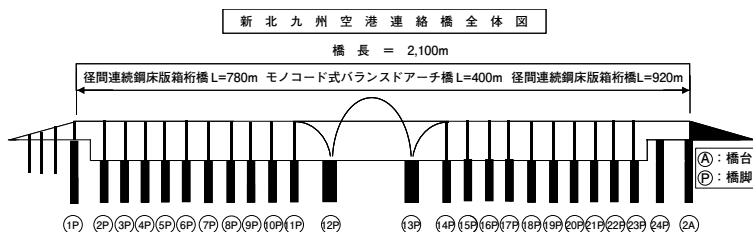


図 1.6 橋脚 24 基、橋台 1 基および杭基礎で支えられる新北九州空港連絡橋全体図

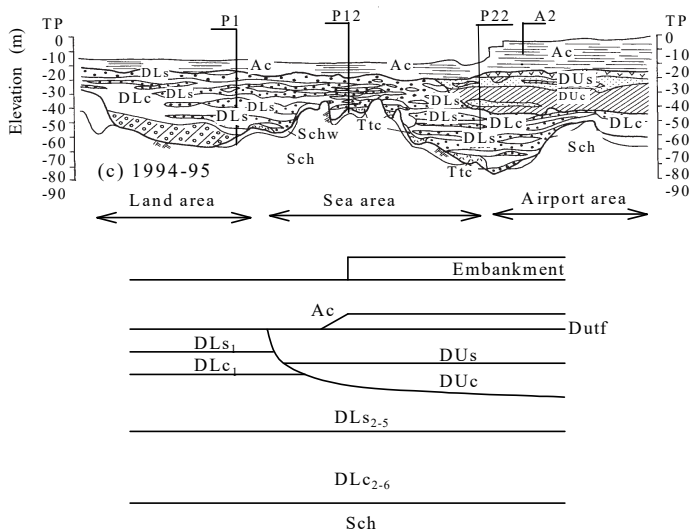


図 1.7 地質断面図と設計用地盤図  
(上図：地質断面図，下図：設計用地盤図)

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 1.7 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 1.7（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<sup>3)</sup>。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います。

## 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・生物的变化を受けて固

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。

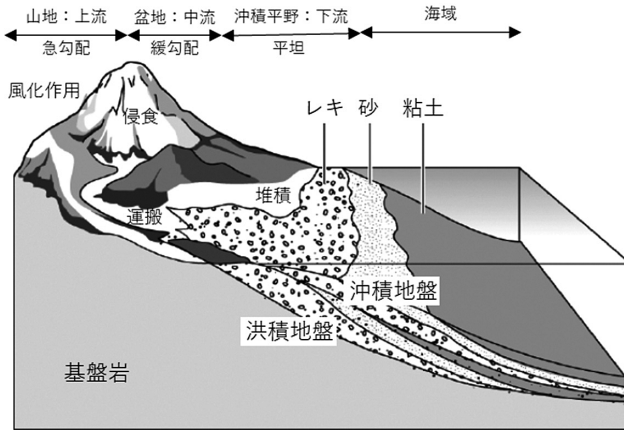


図 2.1 岩石から土の生成と地盤の形成の過程

## 2.3 土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。

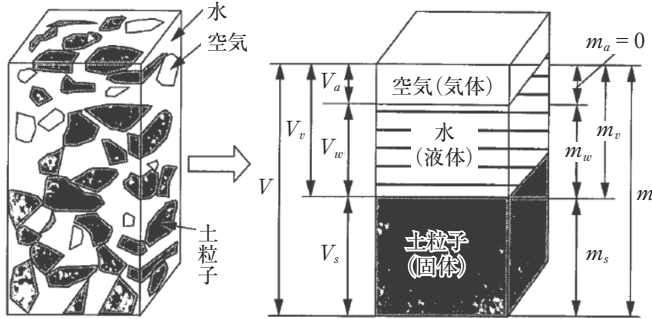


図 2.2 土の三相構成とその模式図

### 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。

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.1)$$

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。

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

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。

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

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。

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

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 ~ 30% はゆるい状態、70 ~ 100% は密な状態とされる。

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

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。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (\%) \quad (2.6)$$

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。

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

ここに、 $\theta$  : 体積含水率

## (2) 質量と体積に関する物理量

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。

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

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。

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{m_s}{\rho_w V_s} \quad (2.9)$$

ここに、 $G_s$ ：土粒子の比重、 $\rho_s$ ：土粒子の密度、 $\rho_w$ ：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。

$$\rho_t = \frac{m}{V} \quad (2.10)$$

ここに、 $\rho_t$ ：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。

$$\begin{aligned} \rho_t &= \frac{m_s + m_w}{V} = \frac{G_s \cdot V_s + V_w}{V_s + V_v} \cdot \rho_w = \frac{G_s + \frac{V_w}{V_v} \cdot \frac{V_v}{V_s}}{1 + \frac{V_v}{V_s}} \cdot \rho_w \\ &= \frac{G_s + \frac{S_r}{100} \cdot e}{1 + e} \cdot \rho_w \end{aligned} \quad (2.11)$$

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)  $\rho_{sat}$  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。

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

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)  $\rho_{sub}$  を用いて計算する。

$$\rho_{sub} = \rho_{sat} - \rho_w = \frac{G_s - 1}{1 + e} \cdot \rho_w \quad (2.13)$$

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)  $\rho_d$  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。

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{G_s}{1 + e} \cdot \rho_w \quad (2.14)$$

### (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。

$$W = m \cdot g \quad (2.15)$$

ここに、 $g$  : 重力加速度 ( $9.81\text{m/s}^2$ )

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

$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{m}{V} \cdot g = \rho_t \cdot g \quad (2.16)$$

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  $\gamma_t$ , 飽和単位体積重量 (saturated unit weight)  $\gamma_{sat}$ , 水中単位体積重量 (submerged unit weight)  $\gamma_{sub}$ , 乾燥単位体積重量 (dry unit weight)  $\gamma_d$  は, それぞれ以下のように表される。

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

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \cdot \gamma_w \quad (2.18)$$

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

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

### 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  $\rho_s$  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。

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2.21)$$

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 ~ 100ml 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。

$$V_s = \frac{m_s + m_a - m_b}{\rho_w} \quad (2.22)$$

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



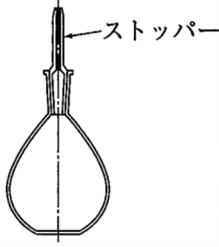


図 2.3 ピクノメーター

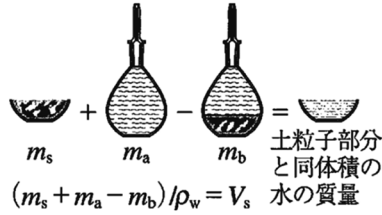


図 2.4 土粒子部分の体積の測定要領

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  $2.5 \sim 2.8 \text{g/cm}^3$  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<sup>1)</sup>。

## (2) 土の湿潤密度

先述の式 (2.10) で定義される湿潤密度  $\rho_t$  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 JIS 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 2.6 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。

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

ここに、 $m$ ：供試体質量、 $m_1$ ：パラフィン塗布後の供試体質量、 $m_2$ ：水中における質量測定用容器の見かけの質量、 $m_3$ ：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,  $\rho_w$ : 水の密度,  $\rho_p$ : パラフィンの密度

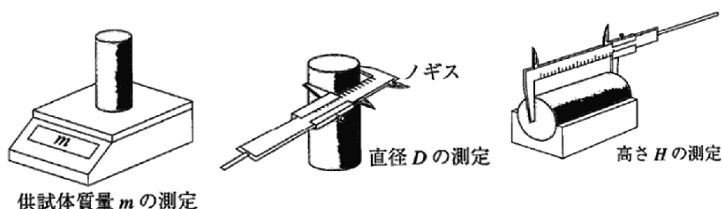


図 2.5 ノギス法による供試体の質量・体積測定の方法

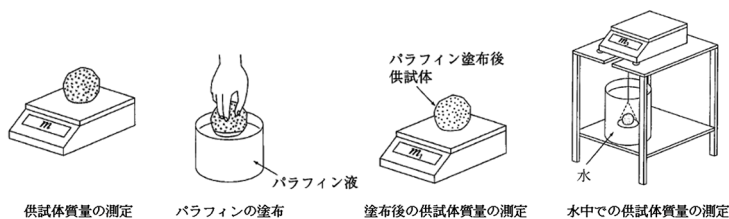


図 2.6 パラフィン法による供試体の体積測定の流れ

### (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,  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  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。

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100 \quad (2.24)$$

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

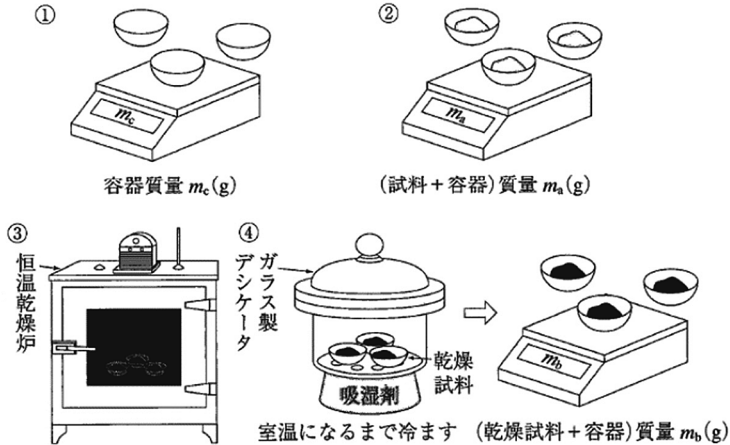


図 2.7 含水比測定の流れ

## 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溪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

表 2.1 土粒子の粒径区分と呼び名

粒 径 (mm)									
0.005		0.075	0.25	0.85	2.0	4.75	19	75	300
粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫	粗石(コブル)	巨石(ボルダー)
		砂			礫			石	
細粒分		粗粒分					石分		

0.075mm 未満の細粒分の粒径については、水中を下降する速度が同じである球形粒子の直径により表すことが特徴的である。粒径が非常に細かいためふるいによる分析が行えないことから、「ストークスの法則」と「密度浮ひょう理論」に基づく土の懸濁液を用いた沈降分析という方法により、土に含まれる細粒分の粒径と通過質量百分率を推定する方法である<sup>2)</sup>。

実際の土は、このような呼び名で表される大きささまざまな粒径の土粒子が混じり合っていることから、それぞれの区分ごとの質量に基づいて全体に対する割合を求め、粒径と土粒子の混合割合との関係を曲線グラフで表現する。この時、粒径は数桁の差が生じるため対数軸で表し、混合割合は各粒径より小さな土粒子の全質量に対する百分率（これを通過質量百分率という）で表す。この曲線を**粒径加積曲線**（grain size accumulation curve）といい、図 2.8 のように単調増加のグラフとして描かれ、最大粒径において通過質量百分率の値が 100% を示す。図中の 3 つのグラフはそれぞれ、①：細粒分が多い土、②：粒径が狭い範囲に集中している土、③：粒径が広い範囲にわたって分布する土、として分類することができる。特に、②と③においては、それぞれ「分級された締固め特性の悪い土」、「粒径幅の広い締固め特性の良い土」のように、盛土構造物の材料としての適用性の判断に用いられる<sup>3)</sup>。

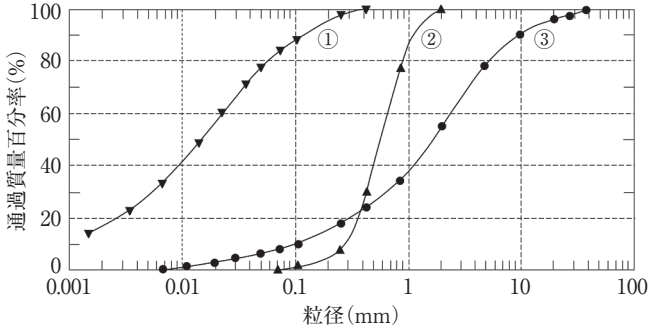


図 2.8 土の粒度試験より得られる粒径加積曲線の例

粒径加積曲線における通過質量百分率の10%に対応する粒径  $D_{10}$  を特に**有効径** (effective grain size) と呼ぶ。さらに、30%, 60% に対応する粒径  $D_{30}$ ,  $D_{60}$  を用いて次式によって表す  $U_c$  および  $U'_c$  をそれぞれ**均等係数** (uniformity coefficient), **曲率係数** (coefficient of curvature) と呼び、土の粒度の広がりや形状を数値化したものである。

$$U_c = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.25)$$

$$U'_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2.26)$$

均等係数  $U_c$  は、粒径加積曲線の傾きを表すもので、大きくなるほど粒径の幅が広いことを示している。細粒分5%未満の粗粒土に対し、 $U_c \geq 10$  の土は「粒径幅の広い土」といい、 $U_c < 10$  の土を「分級された土」という。一方、曲率係数  $U'_c$  は、粒径加積曲線のなだらかさを表すもので、この値が1に近い程曲線はなだらかとなり、種々の大きさの土粒子を含むことになる。通常、 $U_c \geq 10$  かつ  $1 \leq U'_c \leq 3$  の場合、その土は「粒度が良い」とされる。

## 2.5 土のコンシステンシー

### 2.5.1 コンシステンシーとは

2.4 で示した粘土やシルトといった細粒分を乾燥質量で 50% 以上含む細粒土は、含水比の大きさによって、ドロドロの液状からネバネバの塑性状、半固体状、さらには固体状に変化する。図 2.9 は、この様子を土の体積と含水比との関係の下で示したものである。このような土の含水比の変化による状態の変化や、変形に対する抵抗の大小のことを、土のコンシステンシー (consistency) という。このとき、土の種類や粒度によりコンシステンシーが変化する含水比が大きく異なり、これらの値がその土の特徴を表すのに役立つ。このうち、土が塑性状から液状に遷移する境界の含水比を**液性限界**  $w_L$  (liquid limit)、塑性状から半固体状に遷移する境界の含水比を**塑性限界**  $w_p$  (plastic limit)、土の含水量をある量以下に減じてもその体積が減少しない半固体状から固体状に遷移する境界の含水比を**収縮限界**  $w_s$  (shrinkage limit) とそれぞれ定義し、これらを総称して**コンシステンシー限界** (consistency limit, Atterberg limit) という。

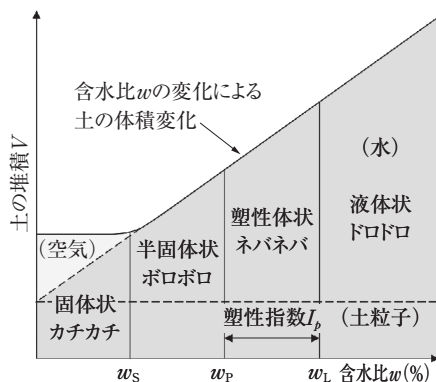


図 2.9 土のコンシステンシーの変化と含水比・土の体積との関係

### 2.5.2 測定方法

土の液性限界ならびに塑性限界を測定する方法として、JISで規格化されている「土の液性限界・塑性限界試験」がある。

表 2.2 に、液性限界ならびに塑性限界の測定例<sup>4)</sup>を示す。

表 2.2 液性限界・塑性限界の測定例

土の種類	液性限界 $w_L$ (%)	塑性限界 $w_p$ (%)
粘土（沖積層）	50 ～ 130	30 ～ 60
シルト（沖積層）	30 ～ 80	20 ～ 50
粘土（洪積層）	35 ～ 90	20 ～ 50
関東ローム	80 ～ 150	40 ～ 80

#### (1) 土の液性限界試験

図 2.10 に示すように、直径約 10cm 程度の黄銅皿の中に水でよく練り混ぜた土試料を盛り、ヘラなどを用いて最大厚さ約 1cm となるよう成形し、溝切ゲージで成形試料の中央を二分する。これを、予め黄銅皿の落下高さが 1cm となるよう調整した液性限界測定器に取り付け、測定器のハンドルを 2 回 / 秒の速度で回し、黄銅皿を落下させる。二分した試料が約 1.5cm にわたって接合した時の落下回数を記録する。

この試験では、落下回数 25 回に相当する含水比を液性限界と定義している。そのため、少なくとも落下回数 25 ～ 35 回のが 2 組、10 ～ 25 回のが 2 組の結果がそれぞれ得られるよう、異なる含水比の下でこの操作を繰り返し、落下回数と含水比との関係を片対数グラフで表した流動曲線（図 2.11）から、 $w_L$  を求める。

#### (2) 土の塑性限界試験

図 2.12 に示すように、液性限界試験で用いた同じ土試料の塊をよく練り、すりガラス板上で手のひらで転がして直径約 3mm のひも状に達したとき、きれぎれとなる、すなわち塑性状となるときの含水比について、3 回の測定値の平均より塑性限界  $w_p$  を

求める。細砂やシルトを多く含む低塑性の土で塑性限界が求められない場合には、NP（non plastic：非塑性）とする。

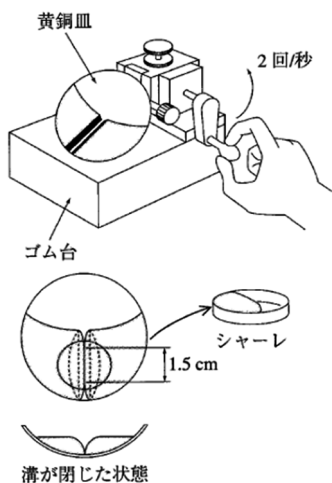


図 2.10 液性限界試験の様子

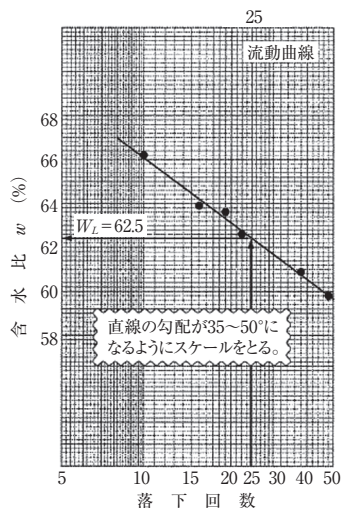


図 2.11 流動曲線の描画例

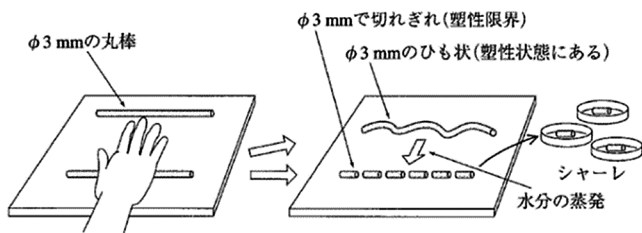


図 2.12 塑性限界試験の様子

### 2.5.3 コンシステンシー限界から得られる諸定数

2.5.2 に示す土質試験により得られた液性限界、塑性限界の値から、以下の土の状態を表す諸定数が求められる。これらの値は、個々の土の性質が大きく異なることから、相対的に比較しやすいようにするために、定義されている。

#### (1) 塑性指数 $I_p$

塑性指数 (plasticity index) は、液性限界  $w_L$  と塑性限界  $w_p$  の差を表すものであり、その土が塑性状態を呈する含水比の範囲



を示す。

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

この値は、細粒土の分類上重要な指標として利用されるほか、粘土の種類が同じであれば、粘土分含有量にほぼ比例することから、土工材料としての利用において塑性指数が大きな土は好ましくない<sup>5)</sup>とされる。

## (2) 液性指数 $I_L$

**液性指数** (liquidity index) は、自然状態にある土の含水比 (自然含水比)  $w_n$  が液性限界  $w_L$  や塑性限界  $w_p$  に対して、相対的にどの程度にあるのかを示したもので、相対含水比とも呼ばれる。自然含水状態における土の相対的な硬さ・軟らかさを表す指標であり、次式により求められる。

$$I_L = \frac{w_n - w_p}{w_L - w_p} = \frac{w_n - w_p}{I_p} \quad (2.28)$$

自然含水比が液性限界に近い場合、液性指数は1に近くなり、一般に変形抵抗の小さい軟弱な正規圧密粘土に多い。一方、自然含水比が塑性限界に近い場合、液性指数は0に近くなり、圧縮強度の大きな過圧密粘土に多く見られる。

## (3) コンシステンシー指数 $I_c$

**コンシステンシー指数** (consistency index) は、粘性土の相対的な硬さや安定度を表す指数であり、次式により求められる。

$$I_c = \frac{w_L - w_n}{w_L - w_p} = \frac{w_L - w_n}{I_p} \quad (2.29)$$

自然含水比が塑性限界に近ければ、コンシステンシー指数は1に近くなり、硬く圧縮強度も大きい。一方、自然含水比が液性限界に近ければ、コンシステンシー指数は0に近くなり、液状の軟らかい不安定な状態を表す。

## (4) 活性度 $A$

細粒土の物理的、力学的性質を支配するのは、主として粘土含有率と粘土粒子の性質にある。これはコンシステンシー限界と密

接な関係があることにつながる。このような細粒土の働きを定量的に示す指標として、**活性度** (activity) が定義されており、次式により求められる。

$$A = \frac{I_p}{2\mu\text{m 以下の粘土含有率 (\%)}} \quad (2.30)$$

スケンプトン (Skenmpton) は、式 (2.30) 右辺の 2 つの値について、様々な土を対象に分析を行い、図 2.13 のような結果を得た<sup>6)</sup>。これらの対象土においては、粘土含有率が高くなるほど塑性指数が増加するとともに、各対象土によって増加割合を表す活性度が異なることが分かる。

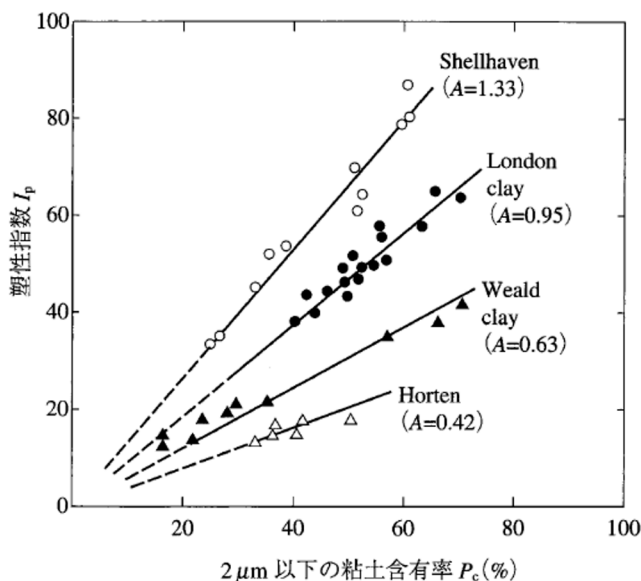


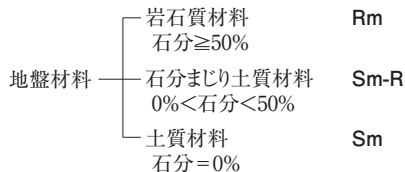
図 2.13 活性度に関する調査分析例

## 2.6 土の工学的分類

地盤材料の観察による評価や、粒度、液性限界・塑性限界などの比較的簡単な試験の結果に基づいて、地盤材料を工学的特徴の類似したグループに分類することを地盤材料の工学的分類という。礫や砂などの粗粒分の多い材料の工学的性質は、粒度に強く依存しているのに対し、シルトや粘土などの細粒分の多い材料の工学的性質は、コンシステンシーに強く依存している。地盤材料の多くは、粗粒分と細粒分の両方を含んでいるので、粒度とコンシステンシー限界に基づいて分類される。本節では、粗粒土と細粒土に分けて、その分類の定義について述べる。

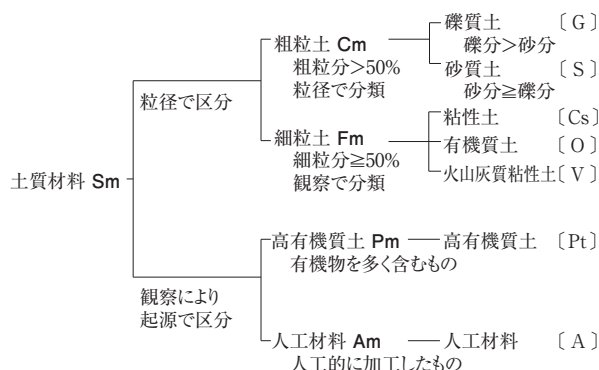
### 2.6.1 地盤材料の分類

地盤材料の工学的分類体系は、粒径区分でいうところの石分の含有率によって、図 2.14 のように定められている。また、粒径 75mm 未満の土質材料は、粗粒分または細粒分の含有率、礫分または砂分および有機物の含有率、人工材料であるかによって図 2.15 のように大分類される。



注：含有率％は地盤材料に対する質量百分率

図 2.14 地盤材料の工学的分類体系



注：含有率%は土質材料に対する質量百分率

図 2.15 土質材料の大分類

## 2.6.2 粗粒土の分類

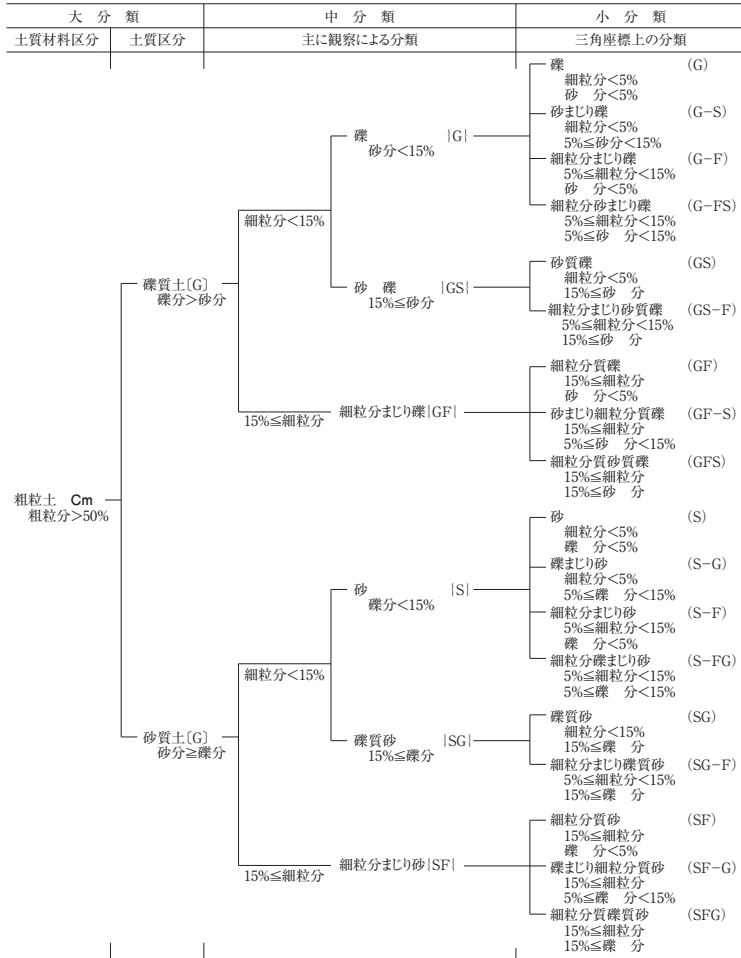
図 2.15 に示すように、粗粒土は礫質土[G]と砂質土[S]の2種類の分類に分けられる。

礫質土(gravelly soil)は礫分、砂分および細粒分の含有率によって、礫 [G]，砂礫 [GS]，細粒分まじり礫 [GF] に中分類し，さらに細粒分，砂分の含有率によって小分類する。例えば，細粒分が10%，砂分が10%，礫分が80%であれば，「細粒分砂まじり礫」と表す。

さらに，図 2.16 に示すように**砂質土** (sandy soil) は礫分，砂分および細粒分の含有率によって，砂 [S]，礫質砂 [SG]，細粒分まじり砂 [SF] に中分類し，さらに細粒分，砂分の含有率によって小分類する。例えば，細粒分が3%，砂分が62%，礫分が35%であれば，「礫質砂」と表し，5%未満の細粒分は標記しない。

また，粗粒土の細区分として，表 2.3 に示すような細粒分が5%未満のものに関し，均等係数によって分類するものと，表 2.4 に示すように観察によって細粒分を「粘性土」，「有機質土」あるいは「火山灰質土」に判別した上で，標記の「細粒分」ならびに記号の「F」をそれぞれより具体的な標記に置き換えるものがある。なお，小分類以下の表現に限り，「○○質」は質量構成比が

15～50%のものを、「〇〇まじり」は同5～15%のものを表し、  
後者のみ記号間にハイフンを添える。



注：含有率%は土質材料に対する質量百分率

図 2.16 粗粒土の分類

表 2.3 細粒分 5% 未満の粗粒土の細区分

均等係数の範囲	分類表記	記号
$U_c \geq 10$	粒径幅の広い	W
$U_c < 10$	分級された	P

表 2.4 細粒分 5% 以上混入粗粒土の細区分

細粒分の判別結果	記号	分 類 表 記
粘 性 土	Cs	粘性土まじり○○, 粘性土質○○
有 機 質 土	O	有機質土まじり○○, 有機質○○
火山灰質土	V	火山灰質土まじり○○, 火山灰質○○

### 2.6.3 細粒土の分類

図 2.15 に示すように、細粒土は粘性土[Cs]、有機質土[O]、火山灰質粘性土[V]の 3 種類の大分類に分けられる。

**粘性土** (cohesive soil) は、液性限界と塑性指数との関係を示した図 2.17 の**塑性図** (plasticity chart) によって、シルト {M}、粘土 {C} に中分類し、さらに液性限界に基づいて低液性限界 L、高液性限界 H に小分類する。**有機質土** (organic soil) は中分類がなく、液性限界および観察等に基づいて、低液性限界 L、高液性限界 H、火山灰土 V に小分類する。**火山灰質粘性土** (volcanic cohesive soil) も同様に中分類はなく、液性限界に基づいて、低液性限界 L、高液性限界 I 型  $H_1$ 、同 II 型  $H_2$  に小分類する。

これらをまとめたものを図 2.18 に示す。細粒土で大分類したもののうち、粗粒分が 5% 以上混入するものは、表 2.5 に従って細区分することができる。

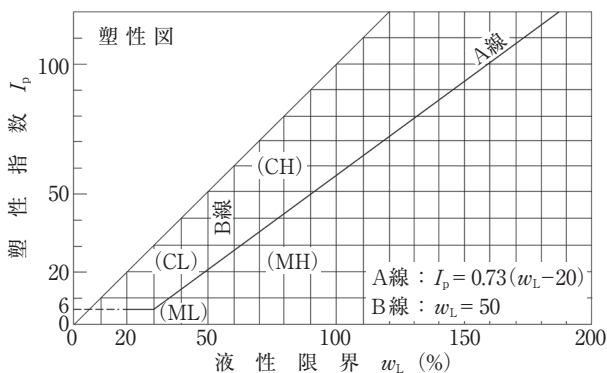


図 2.17 塑性図