

## 第1章

# 土の状態を表わす基本量

岩石が風化作用を受けてできた土粒子が堆積し、物理的あるいは化学的な作用を受けて様々な土の性質や土の構造を作り上げる。土の構造の配列は砂質土では、図 1.1(a) に示した模式図のように重力の作用だけで積み重なる。これを単粒構造と呼ぶ。粘性土は、図 1.1(b) の比較的小さな圧力を受けて堆積した分散構造や、図 1.1 (c) の大きな圧力を受けて堆積している状態を示す配向構造がある。また、これらの土は不均質な物質で、固体部分の固相、液体部分の液相と気体部分の気相の三相体で構成されている。固相、液相、気相は、それぞれ土粒子、間隙水、間隙空気と呼ばれ、それらの量的な相互関係により、土の状態を定量的に表わす指標となっている。

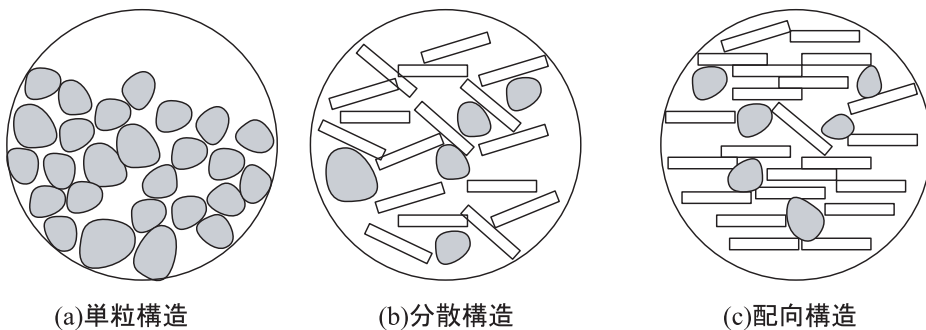


図 1.1 土の構造

## 1.1 土の状態を表わす諸量

図 1.2 は各相の質量 ( $m$ : mass) と重量 ( $W$ : weight) を左側に示し、各相の体積 ( $V$ : volume) を右側に示している。添字の  $a, w, s$  は air, water, soil (solid) を意味する。

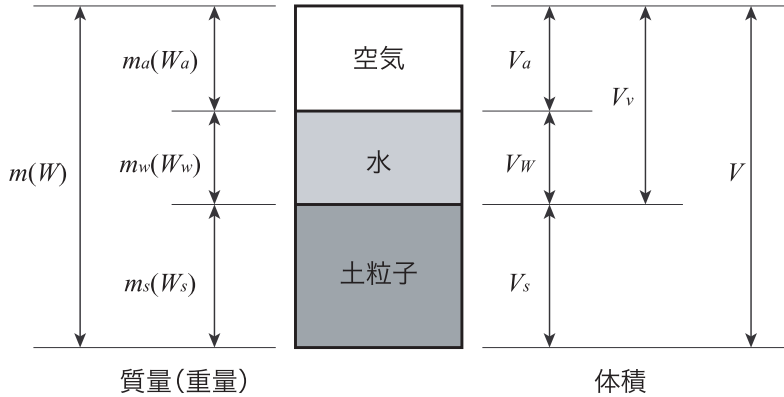


図 1.2 土の構成図

土の状態を表わす諸量は、図 1.2 に示した記号を使って、次に示す名称で呼ばれる。

1. 間隙比 ( $e$ )

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.1)$$

2. 間隙率 ( $n$ )

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 (\%) \quad (1.2)$$

3. 飽和度 ( $S_r$ )

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 (\%) \quad (1.3)$$

4. 含水比 ( $w$ )

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 (\%) \quad (1.4)$$

5. 土粒子の密度 ( $\rho_s$ )

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (1.5)$$

土粒子の比重  $G_s$  は、土粒子の密度を水の密度で除したものである。

6. 土の密度には湿潤密度 ( $\rho_t$ )、乾燥密度 ( $\rho_d$ )、飽和密度 ( $\rho_{sat}$ )、水中密度 ( $\rho_{sub}$ ) があり、次の関係で求められる。

$$\begin{aligned}\rho_t &= \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w + m_a}{V} \\ \rho_d &= \frac{m_s}{V} \\ \rho_{sat} &= \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V} \\ \rho_{sub} &= \frac{m_s - \rho_s V_s}{V} = \rho_{sat} - \rho_w\end{aligned}\tag{1.6}$$

単位は全て、 $\text{g/cm}^3$  である。

7. 土の単位体積重量は、6. の土の密度のそれぞれに重力加速度  $g$  ( $9.80665 \text{ m/s}^2$ 、 $9.81 \text{ m/s}^2$ ) を乗じることにより重量になる。  
例えば、 $\rho_t$  ( $\text{g/cm}^3$ ) は、

$$\gamma_t = \rho_t g \text{ (kN/m}^3\text{)}\tag{1.7}$$

となる。

## 1.2 土の状態を表わす諸量の関係式

また，土の状態量には，次の関係があり，これらを利用することによって未知量を求めることが可能である．なお，実験から直接求められるものは，土粒子の密度，含水比，湿潤密度である．

8.

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{n}{1-n} \\
 n &= \frac{e}{1+e} \\
 S_r &= \frac{w\rho_s}{\rho_w e} \\
 \rho_d &= \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}} \\
 e &= \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

また，次の式は土の密度と飽和度との関係から土の密度の状態変化を求められる式であり，覚えておくと便利である．

9.

$$\begin{aligned}
 \rho_t &= \frac{\rho_s + \rho_w e \frac{S_r}{100}}{1+e} \\
 S_r = 100\% &\rightarrow \rho_{sat} \\
 S_r = 0\% &\rightarrow \rho_d
 \end{aligned} \tag{1.9}$$

である．

土の状態量を算定する問題には，図 1.2 の構成図の使用を限定し，式 (1.1)～式 (1.7) を利用するものと，式 (1.8),(1.9) で解く方法がある．勿論，混合して用いてもよい．

### 1.3 土の粒度とコンシステンシー

土の粒度試験結果は、土粒子の大きさの分布状況から、その性質を推定し、土質材料としての適正についても判断を下すために用いられる。その判定のための係数として、

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

がある。平均粒径は、 $D_{60}$  または  $D_{50}$  が用いられる。 $D_{10}$  は特に、有効径と呼ばれ利用される。

土のコンシステンシーは粒径でいうなら 0.075 mm 以下の細粒分を 50% 以上含む土の水分変化にともなう状態の変化を表現したものである。

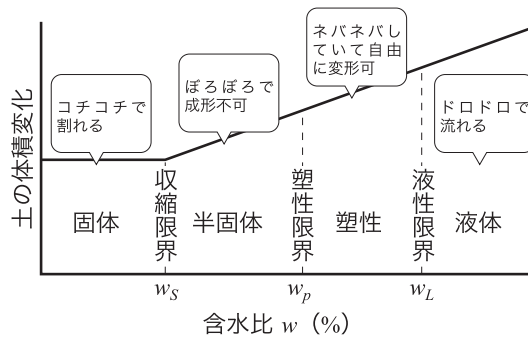


図 1.3 コンシステンシー限界

図 1.3 に示したコンシステンシー限界と、塑性指数  $I_p$  と液性指数  $I_L$  (%) とコンシステンシー指数  $I_c$  (%) は覚えておきたい。 $I_L$  と  $I_c$  の関係は図 1.4 に示した関係にある。

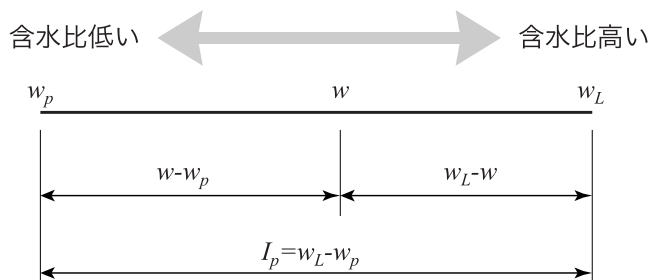


図 1.4  $I_L$  と  $I_c$  の関係

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p}, \quad I_c = \frac{w_L - w}{I_p} = 1 - I_L$$

$I_L$  は 0 に近いほど,  $I_c$  は 1 に近くなるほど安定した状態にある.

..... 例題演習 .....

例題 1.1

ある土の湿潤密度は  $1.81 \text{ g/cm}^3$  で、土粒子の密度が  $2.71 \text{ g/cm}^3$ 、含水比が 12% であった。この土の① 乾燥密度、② 間隙比、③ 間隙率、④ 飽和度を求めて、土の構成図を完成せよ。

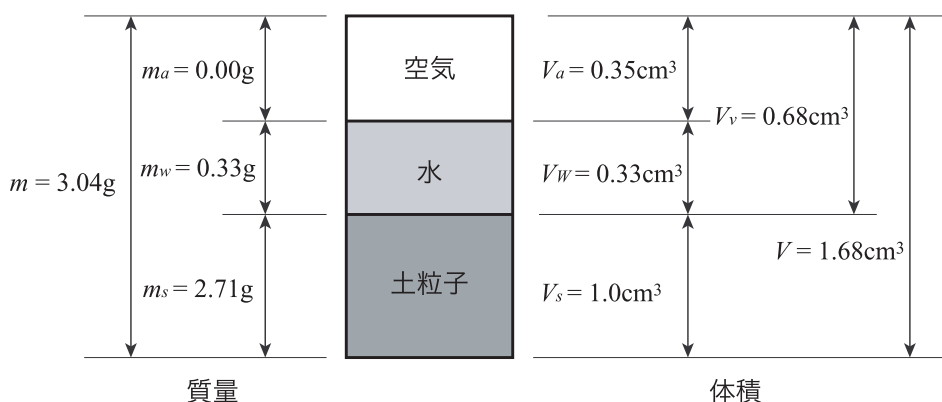


図 1.5 例題 1 の土の構成図

例題 1.1 の解答例

$V_s = 1 \text{ cm}^3$  とすれば、 $\rho_t = 1.81 \text{ g/cm}^3$  であり、 $m = 1.81 \text{ g}$  となる。

$\rho_s = 2.71 \text{ g/cm}^3$  であるから、 $m_s = 2.71 \text{ g}$  である。

$w = 12 \%$  であるから、 $m_w = 2.71 \times 0.12 = 0.33 \text{ g}$  で  $V_w = 0.33 \text{ cm}^3$  から、

$$m = m_s + m_w = 2.71 + 0.33 = 3.04 \text{ g}$$

$\rho_t = 1.81 \text{ g/cm}^3$  から、

$$V = \frac{3.04}{1.81} = 1.68 \text{ cm}^3, \quad V_v = V - V_s = 1.68 - 1.0 = 0.68 \text{ cm}^3$$

したがって、

$$V_a = V_v - V_w = 0.35 \text{ cm}^3, \quad \rho_d = \frac{m_s}{V} = 1.61 \text{ g/cm}^3, \quad e = \frac{V_v}{V_s} = 0.68$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 = \frac{0.68}{1.68} \times 100 = 40.5 \%$$

$$S_r = \frac{V_w}{V} \times 100 = \frac{0.33}{0.68} \times 100 = 48.5 \%$$

例題 1.1 の別解答例

式 (1.8) の関係式を用いれば,

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}} = \frac{1.81}{1 + \frac{12}{100}} = 1.62 \text{ g/cm}^3$$

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{2.71}{1.62} - 1 = 0.67$$

$$n = \frac{e}{1 + e} = \frac{0.67}{1.67} = 40.1 \%$$

$$S_r = \frac{w\rho_s}{\rho_w e} = \frac{12 \times 2.71}{1.0 \times 0.67} = 48.5 \%$$

土を所定の含水比に調整するとき、加水する量を計算する場合は、 $m = m_s + m_w$  であるから

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100$$

から  $m_w = \frac{m_s w}{100}$  よって,

$$m = m_s + \frac{m_s w}{100} = m_s \left( 1 + \frac{w}{100} \right)$$

の関係式を使う。



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	例題 1.1										
2											
3	湿潤密度	$\rho t$	1.81	$g/cm^3$							
4	土粒子の密度	$\rho s$	2.71	$g/cm^3$							
5	含水比	$w$	12	%							
6											
7	空気部分の質量	$M_a$	0	$g$							
8	水部分の質量	$M_w$	0.33	$g$							
9	土部分の質量	$M_s$	2.71	$g$							
10	全体の質量	$M$	3.04	$g$							
11	空気部分の体積	$V_a$	0.35	$g/cm^3$							
12	水部分の体積	$V_w$	0.33	$g/cm^3$							
13	間隙部分の体積	$V_v$	0.68								
14	土部分の体積	$V_s$	1	$g/cm^3$							
15	全体の体積	$V$	1.68	$g/cm^3$							
16	乾燥密度	$\rho d$	1.61	$g/cm^3$							
17	間隙比	$e$	0.68								
18	間隙率	$n$	40.5	%							
19	飽和度	$S_r$	48.5	%							
20											
21	別解:										
22	乾燥密度	$\rho d$	1.62	$g/cm^3$							
23	間隙比	$e$	0.67								
24	間隙率	$n$	40.1	%							
25	飽和度	$S_r$	48.5	%							

図 1.6 例題 1.1 エクセル解答例

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	例題 1.1										
2											
3	湿潤密度	$\rho t$	1.81	$g/cm^3$							
4	土粒子の密度	$\rho s$	2.71	$g/cm^3$							
5	含水比	$w$	12	%							
6											
7	空気部分の質量	$M_a$	=0								
8	水部分の質量	$M_w$	=ROUND(C9*(C5/100),2)								
9	土部分の質量	$M_s$	=ROUND(C4*C14,2)								
10	全体の質量	$M$	=SUM(C7:C9)								
11	空気部分の体積	$V_a$	=C15-C12-C14								
12	水部分の体積	$V_w$	=C8								
13	間隙部分の体積	$V_v$	=C11+C12								
14	土部分の体積	$V_s$	=1								
15	全体の体積	$V$	=ROUND(C10/C3,2)								
16	乾燥密度	$\rho d$	=ROUND(C9/C15,2)								
17	間隙比	$e$	=ROUND(C13/C14,2)								
18	間隙率	$n$	=ROUND(C13/C15*100,1)								
19	飽和度	$S_r$	=ROUND(C12/C13*100,1)								
20											
21	別解:										
22	乾燥密度	$\rho d$	=ROUND(ROUND(C10/C15,2)/(1+C5/100),2)								
23	間隙比	$e$	=ROUND(C4/C22,2)-1								
24	間隙率	$n$	=ROUND(C23/(1+C23)*100,1)								
25	飽和度	$S_r$	=ROUND((C5*C4)/(1*C23),1)								

図 1.7 例題 1.1 エクセル計算式

## 例題 1.2

土の密度  $1.68 \text{ g/cm}^3$  のある土の含水比が 18 % であった．この土の含水比を 25 % にするには  $1 \text{ m}^3$  当たりいくらの水を加えたらよいか．

## 例題 1.2 の解答例

$1.68 \text{ g/cm}^3$  は  $1.68 \text{ t/m}^3$  であるから，

$$1.68 \text{ t} = m_s \left( 1 + \frac{18}{100} \right) \rightarrow m_s = 1.42 \text{ t}$$

$1 \text{ m}^3$  当たりの加水量を  $x$  とおけば，

$$1.68 \text{ t} + x = 1.42 \times \left( 1 + \frac{25}{100} \right) \rightarrow x = 0.095 \text{ t} = 95 \text{ kg}$$

1	例題 1.2								
2									
3	土の密度	$\rho_t$	1.68	$g/cm^3$					
4	含水比	$w$	18	%					
5	含水比(目標値)	$w'$	25	%					
6									
7	土の乾燥質量	$M_s$	1.42	$t/m^3$					
8	加水量	$x$	95	kg					
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									

図 1.8 例題 1.2 エクセル解答例

1	例題 1.2								
2									
3	土の密度	$\rho_t$	1.68	$g/cm^3$					
4	含水比	$w$	18	%					
5	含水比(目標値)	$w'$	25	%					
6									
7	土の乾燥質量	$M_s$	=ROUND(C3/(1+C4/100),2)						
8	加水量	$x$	=(C7*(1+C5/100)-C3)*1000						
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									

図 1.9 例題 1.2 エクセル計算式

## 例題 1.3

土の湿潤密度が  $1.75 \text{ g/cm}^3$  で、含水比が  $21\%$  であった。この土を  $500\,000 \text{ m}^3$  掘削して、ある現場に運び含水比を変化させないで盛土を構築することにした。盛土の乾燥密度は  $1.70 \text{ g/cm}^3$  を目標とした。掘削現場の土の間隙比と盛土の間隙比を求めよ。構築した盛土の体積と飽和度を求めよ。土粒子の密度は  $2.75 \text{ g/cm}^3$  である。また、盛土の必要体積が  $500\,000 \text{ m}^3$  のときの掘削土量は何  $\text{m}^3$  必要か。

## 例題 1.3 の解答例

掘削現場の土の

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}} = \frac{1.75}{1 + \frac{21}{100}} = 1.45 \text{ g/cm}^3$$

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{2.75}{1.45} - 1 = 0.897$$

盛土の間隙比は、

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{2.75}{1.70} - 1 = 0.617$$

掘削現場の土の体積は、

$$V = V_v + V_s = 500\,000 \text{ m}^3$$

であるから、固体部分の体積  $V_s$  は、

$$\frac{V_v}{V_s} = 0.897$$

↓

$$V_v = 0.897V_s \quad V = 0.897V_s + V_s = 500\,000 \text{ m}^3 \quad V_s = \frac{500\,000}{1.897} = 263\,574 \text{ m}^3$$

一方、盛土の間隙比は、

$$\frac{V_{v1}}{V_s} = 0.618$$

↓

$$V_{v1} = 0.618V_s = 0.618 \times 263\,574 = 162\,889 \text{ m}^3$$

であるから、全体の体積  $V_1$  は、

$$V_1 = V_{v1} + V_s = 162\,889 + 263\,574 = 426\,463 \text{ m}^3$$

飽和度は、

$$S_r = \frac{\rho_s w}{\rho_w e} = \frac{2.75 \times 21}{1 \times 0.618} = 93.4\%$$

$$V_1 = V_{v1} + V_s = 500\,000 \text{ m}^3$$

$$V = 0.618V_s + V_s = 500\,000 \text{ m}^3 \rightarrow V_s = 309\,023 \text{ m}^3$$

$$V = 0.896V_s + V_s = 0.897 \times 309\,023 + 309\,023 = 586\,218 \text{ m}^3$$

1	例題 1.3									
2										
3	湿潤密度 (掘削現場)	$\rho_f$	1.75	$g/cm^3$						
4	含水比 (掘削現場)	$w$	21	%						
5	掘削土量	$V$	500000	$m^3$						
6	乾燥密度 (盛土)	$\rho_d'$	1.7	$g/cm^3$						
7	土粒子の密度	$\rho_s$	2.75	$g/cm^3$						
8										
9	乾燥密度 (掘削現場)	$\rho_d$	1.45	$t/m^3$						
10	間隙比 (掘削現場)	$e$	0.897	$t/m^3$						
11	間隙比 (盛土)	$e'$	0.818	$t/m^3$						
12	土粒子の体積 (盛土)	$V_s$	263574	$kg$						
13	土粒子の体積 (掘削現場)	$V_s'$	428463	$m^3$						
14	飽和度 (盛土)	$S_r$	93.4	%						
15	掘削土量	$x$	586218	$m^3$						
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										

図 1.10 例題 1.3 エクセル解答例

1	例題 1.3									
2										
3	湿潤密度 (掘削現場)	$\rho_f$	1.75	$g/cm^3$						
4	含水比 (掘削現場)	$w$	21	%						
5	掘削土量	$V$	500000	$m^3$						
6	乾燥密度 (盛土)	$\rho_d'$	1.7	$g/cm^3$						
7	土粒子の密度	$\rho_s$	2.75	$g/cm^3$						
8										
9	乾燥密度 (掘削現場)	$\rho_d$	=ROUND(C3/(1+C4/100),2)							
10	間隙比 (掘削現場)	$e$	=ROUND(C7/C9-1,3)							
11	間隙比 (盛土)	$e'$	=ROUND(C7/C8-1,3)							
12	土粒子の体積 (盛土)	$V_s$	=ROUND(C5/(1+C10),0)							
13	土粒子の体積 (掘削現場)	$V_s'$	=ROUND(C12*(1+C11),0)							
14	飽和度 (盛土)	$S_r$	=ROUND((C7*C4)/(1*C11),1)							
15	掘削土量	$x$	=ROUND(C5/(1+C11))*(1+C10),0)							
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										

図 1.11 例題 1.3 エクセル計算式

## 例題 1.4

ある土のコンシステンシー限界試験を行ったところ， $LL(w_L) = 71.8 \%$ ， $PL(w_p) = 24.9 \%$ ，自然含水比 ( $w_n$ ) は  $64.8 \%$  であった．塑性指数  $PI (I_p)$ ，液性指数  $I_L$  およびコンシステンシー指数  $I_c$  を求めよ．

## 例題 1.4 の解答例

$$PI = LL - PL = 71.8 - 24.9 = 46.9$$

$$(w_n - w_p)/I_p = (64.8 - 24.9)/46.9 = 0.85 \%$$

$$I_c = (w_L - w_n)/I_p = (71.8 - 64.8)/46.9 = 0.15$$

$$I_c = 1 - I_L = 1 - 0.85 = 0.15 \%$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	例題 1.4									
2										
3	液性限界	LL	71.8 %							
4	塑性限界	PL	24.9 %							
5	自然含水比	wn	64.8 %							
6										
7	塑性指数	PI	46.9							
8	液性指数	IL	0.85 %							
9	コンシステンシー指数	Ic	0.15 %							
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										

図 1.12 例題 1.4 エクセル解答例

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	例題 1.4									
2										
3	液性限界	LL	71.8 %							
4	塑性限界	PL	24.9 %							
5	自然含水比	wn	64.8 %							
6										
7	塑性指数	PI		=C3-C4						
8	液性指数	IL		=ROUND((C5-C4)/C7,2)						
9	コンシステンシー指数	Ic		=ROUND((C3-C5)/C7,2)						
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										

図 1.13 例題 1.4 エクセル計算式