

# 土の基本的物理量

教科書1-8p

## 岩 => 土

風化: 物理的作用(母岩の細粒化)  
 化学的作用(化学構造の変化: 粘土化)

土粒子の基本物理量:

その他の土粒子の性質

- ?
- ?
- ?
- ?

- 粒径 (D) grain size
- 密度 ( $\rho_s$ )、or 比重 (specific gravity :  $G_s = \rho_s / \rho_w$ )  
 土粒子密度試験

	0.005	0.075	0.25	0.85	2.0	4.75	19	75	300	(mm)
粘土 (clay)	シルト (silt)		細	中	粗	細	中	粗	粗石 (コブル)	巨石 (ボルダー)
			砂 (sand)			礫 (gravel)			石 (stone)	

日本の土粒子粒径区分 (JGS)

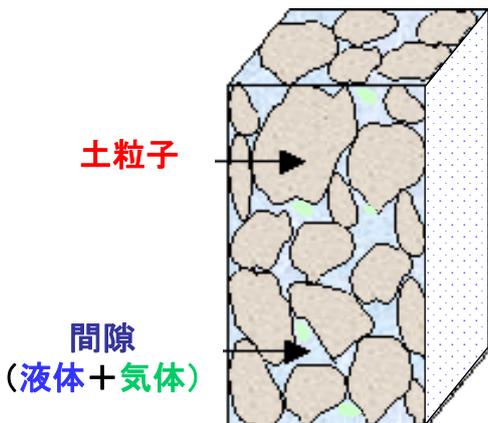
cobble

boulder

実際の土、**広範囲な粒径**を持った土粒子の集合体:

## 土の状態量

土粒子以外の部分の状態



• 間隙 (void) の大きさ:

- 間隙比 (void ratio:  $e$ ): 土粒子体積に対する比
- 間隙率 (porosity:  $n$ ): 土全体積に対する間隙の割合

• 間隙の中の水の量: 乾燥 ⇔ 湿潤 ⇔ 飽和

- 含水比 (water content:  $w$ ):  
土粒子質量に対する水の質量比
- 体積含水率 (volumetric water content:  $\theta$ ):  
土全体積に対する水体積の割合
- 飽和度 (Degree of saturation:  $S_r$ ):  
間隙体積に対する水体積の割合
- 空気間隙率 (air content:  $v_a$ ):  
土全体積に対する空气体積の割合

液体 (e.g. 水) の性質:

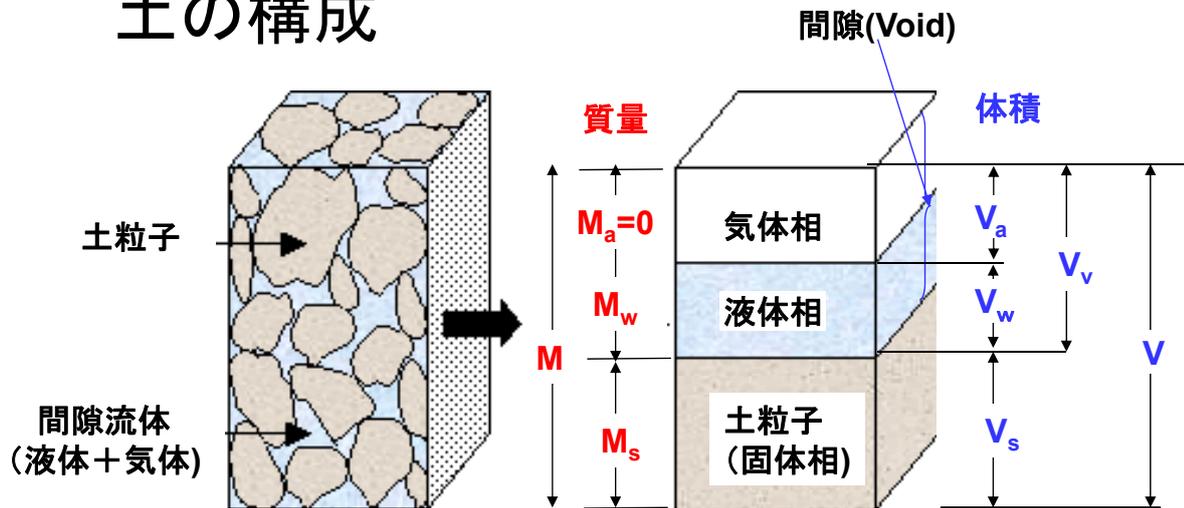
- 密度 ( $\rho_w$ )、
- 粘性 ( $\mu$ )
- 体積圧縮係数 ( $m_v$ )

$$m_v = 4.4 \times 10^{-4} (1/MPa)$$

体積ひずみ  $\varepsilon_v = m_v \Delta p$

• その他 (詰まり方、構造)

# 土の構成



間隙の相対的な大きさの指標

間隙比(void ratio):  $e = \frac{V_v}{V_s}$ , 間隙率(porosity):  $n = \frac{V_v}{V}$   $S_r = 100\% \Rightarrow n = \theta$

流体(水)の相対的な量

含水比:  $w = \frac{M_w}{M_s} \times 100(\%)$ , 体積含水率:  $\theta = \frac{V_w}{V} \times 100(\%)$

•飽和土 (saturated soil):  $V_v = V_w$  ( $V_a = 0$ )

•不飽和土 (unsaturated soil):  $V_v \neq V_w$  ( $V_a \neq 0$ )

飽和度:  $S_R = \frac{V_w}{V_v} \times 100 (\%)$

空気間隙率:  $v_a = \frac{V_a}{V} \times 100 (\%)$

3

## 土の状態量の関係

•eとnの関係:  $n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_s + V_v} = \frac{eV_s}{V_s + eV_s} = \frac{e}{1+e}$  (1)

•eとwの関係  $\Leftarrow S_r \rho_s / \rho_w (=G_s)$   $eS_r = G_s w$  (2)

$\rho_s$ : 土粒子密度試験

土の状態量は最も基本的な情報: Why?

- 詰まり具合 (密度)
  - => 地盤内の応力、土構造物の重さ (荷重=>外力)
- 水の通しやすさ (透水性)
- 締め固めやすさ (締め固め特性)
- 土としての強度 (強さ)、剛性 (変形のし難さ)



土の力学特性は、eとwの影響を強く受ける

# 土の密度、単位体積重量

•土の密度:  $M/V = f(\rho_w, \rho_s \text{ (or } G_s), e, S_r) = g(\rho_w, \rho_s \text{ (or } G_s), e, w)$

直接求められる量:

密度、 $w$ 、 $\rho_s$ 、 $\rho_w$ から計算する量

4種類の密度(単位体積質量)

•飽和密度:  $\rho_{sat}$  ( $S_r=100\%$ )

(saturated density)

•湿潤密度:  $\rho_t$  ( $0 < S_r < 100\%$ )

(bulk density)

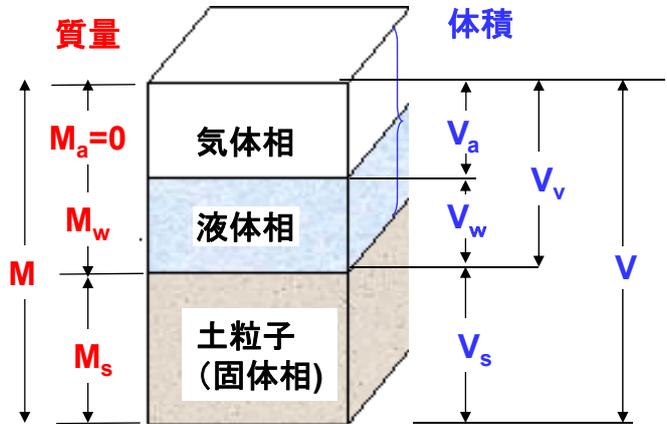
•乾燥密度:  $\rho_d$  ( $S_r=0\%$ )

(dry density)

•水中(有効)密度:  $\rho'$

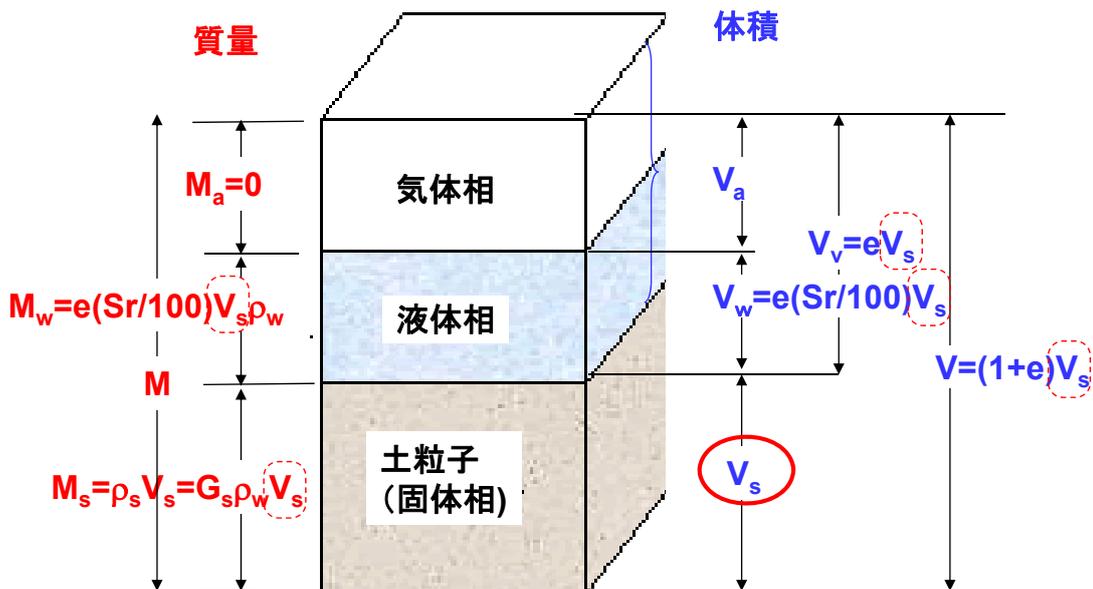
(浮力分を差引く)

(submerged effective density)



単位:  $g/cm^3$ ,  $kg/m^3$ ,  $t/m^3$

## 土要素の体積、質量と状態量の関係



土粒子の体積( $V_s$ )を基準(unit)とすると便利:  
間隙比( $e$ )=>土粒子体積を1とした間隙の体積

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + M_w (S_r = 100\%)}{V} = \frac{V_s \rho_s + V_v \rho_w}{(1+e)V_s} = \frac{\rho_s + e\rho_w}{1+e} = \frac{G_s + e}{1+e} \rho_w \quad (3)$$

$$\rho_t = \frac{M_s + M_w (S_r \neq 100\%)}{V} = \frac{V_s \rho_s + \frac{S_r}{100} V_v \rho_w}{(1+e)V_s} = \frac{\rho_s + \frac{S_r}{100} e \rho_w}{1+e} = \frac{G_s + \frac{S_r}{100} e}{1+e} \rho_w \quad (4)$$

$$= \frac{M_s + M_w}{V} = \frac{M_s + w/100 M_s}{V} = \frac{(1+w/100)\rho_s}{1+e} = \frac{(1+w/100)G_s}{1+e} \rho_w = (1+w/100)\rho_d \quad (5)$$

$$\rho_d = \frac{M_s + M_w (S_r = 0\%)}{V} = \frac{V_s \rho_s}{(1+e)V_s} = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{G_s}{1+e} \rho_w \quad (6)$$

$$eS_r = G_s w \quad (2)$$

(2),(5)式からも  
(3),(4)式は導出できる

$$\rho' = \frac{M_s + M_w (S_r = 100\%)}{V} - 1 \cdot \rho_w = \frac{\rho_s - \rho_w}{1+e} = \frac{G_s - 1}{1+e} \rho_w \quad (7)$$

## 単位体積重量( $\gamma$ :unit weight)

比体積( $f$ ) =  $1+e$

Specific volume

単位: [F]/[V]=g[M]/[V]:

重力単位系: gf/cm<sup>3</sup>, kgf/cm<sup>3</sup>, tf/m<sup>3</sup>

SI単位系: kN/m<sup>3</sup>

e.g.,  $\rho_t = 1\text{g/cm}^3$ の土の $\gamma_t$ は $1\text{gf/cm}^3$ 、 $9.81\text{kN/m}^3$



7

## 本日のTechnical terms

粘土: **clay**; シルト: **silt**; 砂: **sand**; 礫: **gravel**

密度: **density**; 比重: **specific gravity**

間隙比: **void ratio**;

間隙率: **porosity**;

含水比: **water content**;

飽和度: **degree of saturation**; 空気間隙率: **air content**

飽和密度( $\rho_{sat}$ ): **saturated density**;

湿潤密度( $\rho_t$ ): **bulk density**;

乾燥密度( $\rho_d$ ): **dry density**;

水中(有効)密度( $\rho'$ ): **submerged effective density**;

比体積( $f$ ): **specific volume**

課題(6/20):

(1) 湿潤状態で質量60gの土を炉乾燥したら40gとなった。この土の含水比 $w$ はいくらか。

(2) ある土の湿潤状態での密度 $\rho_t$ と含水比 $w$ がそれぞれ、 $2.0\text{g/cm}^3$ と20%であった。この土の土粒子密度( $\rho_s$ )が $2.5\text{g/cm}^3$ として、この土の間隙比( $e$ )、間隙率( $n$ )と飽和度( $S_r$ )を求めよ。

(3) 土粒子密度 $2.7\text{g/cm}^3$ の土が、間隙比が1で含水比が20%の状態にある。

この土の湿潤密度( $\rho_t$ )、飽和密度( $\rho_{sat}$ )、乾燥密度( $\rho_d$ )を求めよ。

8

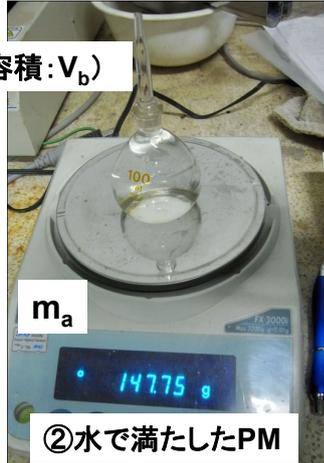
# 土粒子密度試験手順(1)



ピクノメータ(容積: $V_b$ )

$m_c$

①空のピクノメータ(比重ビン)



$m_a$

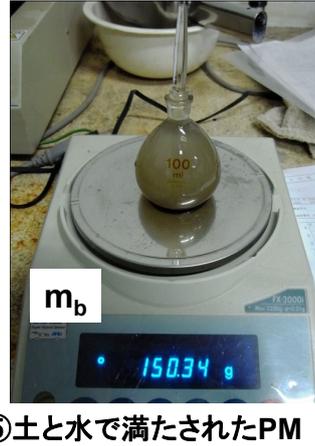
②水で満たしたPM



湿潤質量: $M$   
(土粒子質量 $m_s$ )  
(土粒子体積 $V_s$ )

$m_s, V_s$   
未知

③土試料をピクノメータに入れる



$m_b$

⑤土と水で満たされたPM



④煮沸: why

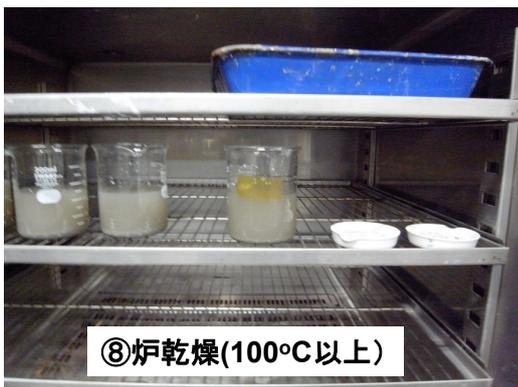
# 土粒子密度試験手順(2)



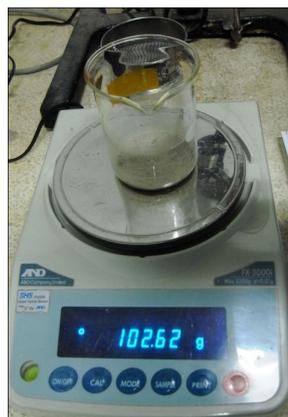
⑥空のビーカー



⑦土を水と共にビーカーの中へ



⑧炉乾燥(100°C以上)



⑨ビーカーと乾燥した土

$$m_a - m_c = V_b \rho_w \quad ??$$

$$m_b - m_c = m_s + (V_b - V_s) \rho_w$$

$$m_s = ⑨ - ⑥ = \text{土の乾燥質量}$$

$$V_s = (m_a + m_s - m_b) / \rho_w$$

$$\rho_s = m_s / V_s$$

この土の $\rho_s$ ?  
計測精度は十分か?



# 間隙比、密度の確認 デモンストレーションと結果の整理(宿題)

(以下は昨年度の例)

**粗礫材:  $V=500\text{cm}^3$**

**$M_s=718\text{g}$**

$\rho_d \Rightarrow 1.44\text{g/cm}^3$

水の量:  $V_w=218.4 \Rightarrow M_w=V_w\rho_w$

$V_s=281.6$

$e=V_w/V_s=0.78$

$\rho_s=2.55\text{g/cm}^3$

$\rho_{\text{sat}}=1.87\text{g/cm}^3$

$\rho'=0.87\text{g/cm}^3$

**細礫材:  $V=200\text{cm}^3$**

**$M_s=281.6\text{g}$**

$\rho_d \Rightarrow 1.41\text{g/cm}^3$

$V_w=V_v=84.3$

$V_s=115.7$

$e=0.73$

$\rho_s=2.43\text{g/cm}^3$

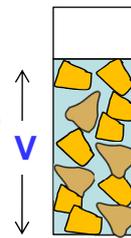
$\rho_{\text{sat}}=1.83\text{g/cm}^3$

$\rho'=0.83\text{g/cm}^3$

仮定  
 $S_r=100\%$   
(空気ゼロ)

妥当??  
空気があったら?

容器内の  
土の嵩



入れた水の量:  $V_w$

$V_v=92.9$   
 $V_w=84.3$

$S_r=91\%$

$\rho_s$ が既知なら  
 $\Rightarrow 2.63\text{g/cm}^3$

$V_s=107.1$   
 $e=0.87$

赤字の項目のみ計測

黒字の項目は計測値より求める

+  $\rho_w=1.0\text{g/cm}^3$  水を入れる前の土試料の質量:  $M_s$

11

計測項目

## 土の基本物理量の測定

既知

	容積 (V) (cm <sup>3</sup> )	土粒子質量 (M <sub>s</sub> ) (g)	水質量 (M <sub>w</sub> ) (g)	水密度 (ρ <sub>w</sub> ) (g/cm <sup>3</sup> )	土粒子密度 (ρ <sub>s</sub> )	飽和度 (S <sub>r</sub> ) (%)	間隙比 (e)	含水比 (w) (%)
+ 細砂 ρ <sub>s</sub> =2.65								
	粗礫	788.1		1		100		
+ 混合 ρ <sub>s</sub> =2.65	粗砂	270.0		1	2.63g/cm <sup>3</sup>			
	備考	計測	計測	仮定	*1,*2	*1,*2	$V_w/(V-V_w)*2$	$M_w/M_s$

	土粒子体積 (V <sub>s</sub> ) (cm <sup>3</sup> )	土粒子密度* (ρ <sub>s</sub> ) (g/cm <sup>3</sup> )	飽和密度 (ρ <sub>sat</sub> ) (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (ρ <sub>d</sub> ) (g/cm <sup>3</sup> )	水中有効密度 (ρ') (g/cm <sup>3</sup> )
粗礫					
粗砂					
備考	$V-V_w, M_s/\rho_s$	$*M_s/(V-V_w)$	$(M_s+M_w)/V$	$M_s/V$	$\rho_{\text{sat}} - \rho_w$

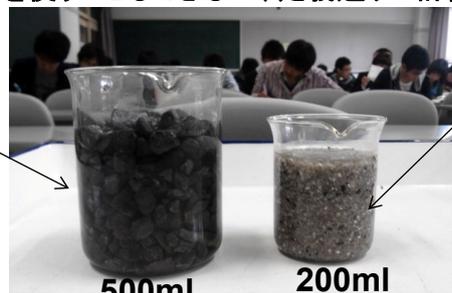
課題  
表の完成  
結果の考察

\*1: 厳密には間隙の空気は完全には排除されておらず、 $S_r < 100\%$ である。特に、細かい土。その場合、実際の $e$ ,  $\rho_s$ ,  $\rho_{\text{sat}}$ ,  $\rho'$ は増加。但し、粗粒子はほぼ100%を仮定でき、土粒子密度を求めることができる。

\*2:  $V_s$ と $V_w$ がわかれば、飽和度は計算できる。 $V_s=M_s/\rho_s$ ,  $V_w=M_w/\rho_w$

\*3: 密度の計算では、 $e$ を用いた式を使うこともできるが、定義通りに計算すれば $e$ はなくても求められる。

粗礫  
容積 $500\text{cm}^3$   
容器質量: **53.7 g**  
容器+土: **841.8 g**  
注入水質量: ? g



粗砂  
容積 $200\text{cm}^3$   
容器質量: **104.9 g**  
容器+土: **374.9 g**  
注入水質量: ? g



12