

# 土の締固め特性(compaction)

## 土の締固めの効果

締固めとは？  
何を増加させる？

- 家の土台: 沈下減少(硬くなる)
- テニスクレイコート: ボールの弾み向上(硬くなる)
- 河川堤防: 硬く、強く、水が通り難くなる

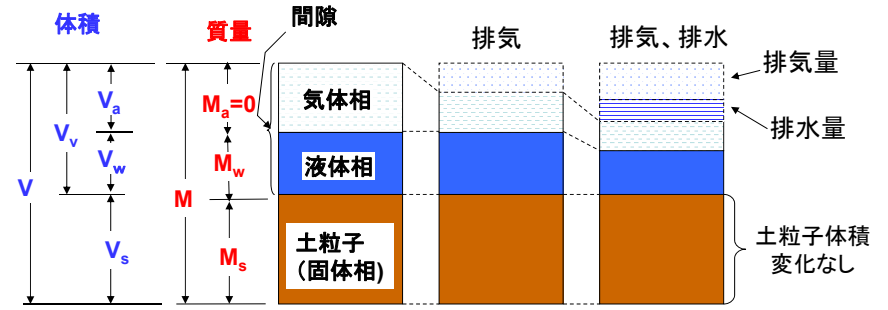
## すべての土構造物の築造には締固めが行われる

- 道路盛土、鉄道盛土、宅地造成 <=> 沈下対策、安定性向上
- 空港、掘削後の埋め戻し <=> 沈下対策
- 廃棄物処分場のライナー <=> 難透水層
- フィルダム <=> 沈下対策、安定性の向上、難透水層
- 緩い砂地盤 <=> 液状化対策

1

# 土の締固め

水は空気より抜け難い【特に、不飽和ではwhy?】



締固め:  
空気と水の強制排出  
間隙の減少  
密度の増加(乾燥密度)  $\rho_d = \frac{M_s}{V} = \frac{\rho_s}{1+e}$

間隙比減少  
含水比変化なし

含水比変化  
間隙比  $e = \frac{V_v}{V_s}$

含水比  $w = \frac{M_w}{M_s} \times 100(\%)$

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

2

# 土の締固め効果

締固めに影響する因子  
( $\rho_d$ の大小)

$\rho_d$ の絶対値       $\rho_d$ の変化量(圧縮性)

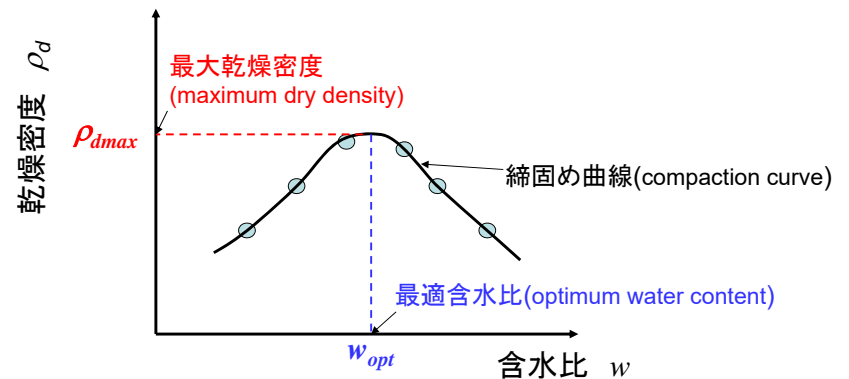
- 土の種類(粒径) (砂⇔粘土)
- 粒度 (良い⇔悪い)
- 含水比 (小さい⇔大きい)
- 締固エネルギー (大きい⇔小さい)
- 締固め方法

(動的、静的、ブルドーザ、ローラー、振動ローラ)

3

# 土の締固め曲線

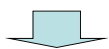
締固めエネルギー、方法を同じにして、含水比( $w$ )だけを変化させて、締固めを行って、 $w$ と $\rho_d$ の関係をプロットする。



4

# Proctorの原理(1933)

“締固めに影響を及ぼす諸因子の中で含水比(w)以外の条件を同じにして、wだけを変えていくと、乾燥密度( $\rho_d$ )が最大となる含水比(最適含水比: $w_{opt}$ )が存在する。”



“エネルギーを大きくしても、含水比が適切でないと、小さな締固めエネルギーの $\rho_d$ に及ばないことがある。”

例えばどんな不具合？

実験理論: 定量的な理論では $w_{opt}$ や $\rho_d$ は求められない。  
定性的な説明は可。

# 締固め機構

定性的な $w_{opt}$ の存在理由:

wが小さい時

粘性土: 土が硬すぎ圧縮困難、亀裂が入る  
砂質土: 圧縮しても結合力が期待できない (サクシオンが小さい)  
粒子が加圧中に自由に動く (せん断変形にエネルギーが消費される)

この中間のwで  
 $\rho_d$ 最大

wが大きい時

砂質土: サクシオン消失  
粘性土: 液状化(強度低下、せん断変形) → エネルギー消費



締固めが効率的に行われる条件:

- ①土粒子が密実化するための再配列(適当な水分: 潤滑材)
- ②一旦密実化したら、そのままの状態を保つ結合力(サクシオン)

細粒土では、 $w_{opt}$ は $w_p$ (塑性限界)よりやや上、 $w_p$ : サクシオンは最大、but 硬すぎ

# 締固め曲線と飽和度

$$eS_r = wG_s$$

ゼロ空隙曲線 (zero void ratio curve)  
( $S_r=100\%$ の時の $\rho_d$ とwの関係)

$$e = \frac{w}{S_r} \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

$$(\rho_d)_{sat} = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho_w}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{100}} \quad (1)$$

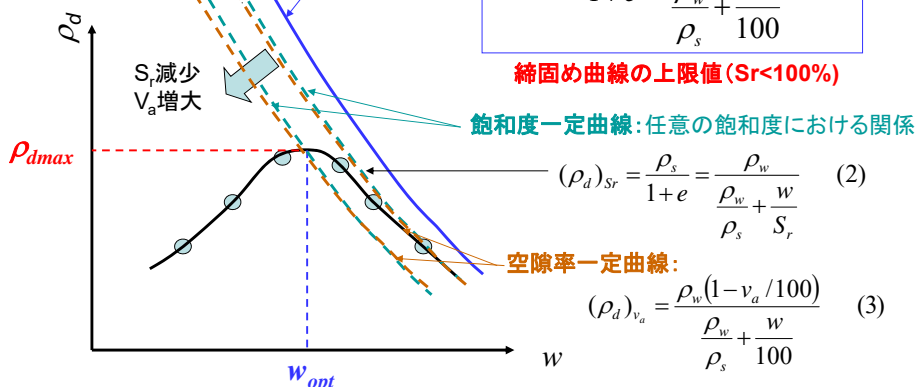
締固め曲線の上限値 ( $S_r < 100\%$ )

飽和度一定曲線: 任意の飽和度における関係

$$(\rho_d)_{S_r} = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho_w}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{S_r}} \quad (2)$$

空隙率一定曲線:

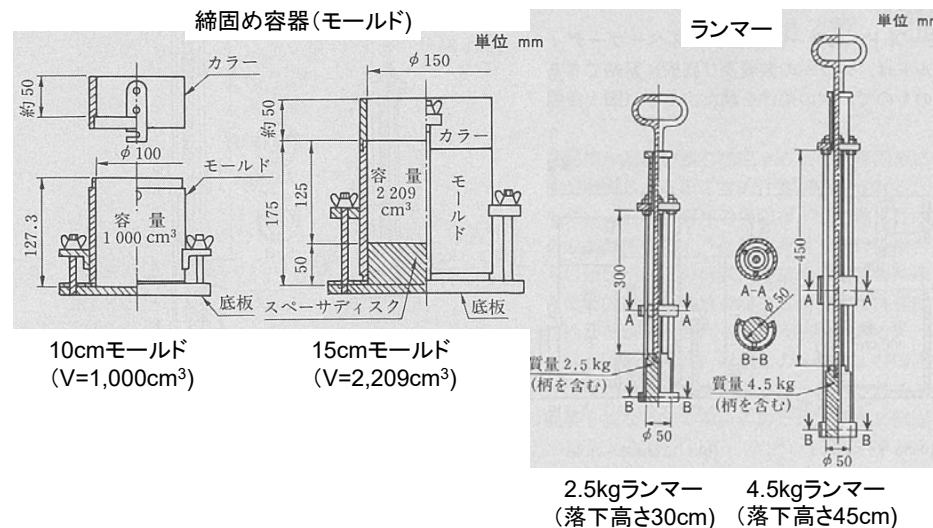
$$(\rho_d)_{v_a} = \frac{\rho_w(1-v_a/100)}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{100}} \quad (3)$$



$w_{poi}$ まで、 $\rho_d$ 上昇、飽和度上昇、 $w_{opt}$ 越すと飽和度の上昇頭打ち、 $\rho_d$ 減少

# 締固め試験

突固めによる土の締固め試験 (JIS A1210)



# 突固め試験の種類と方法

呼び名	ランマー質量 (kg)	落下高さ (cm)	モールド内径 (cm)	モールド容積 (cm³)	突固め層数	一層当たりの突固め数	許容最大粒径 (mm)
A	2.5	30	10	1000	3	25	19
B	2.5	30	15	2209	3	55	37.5
C	4.5	45	10	1000	5	25	19
D	4.5	45	15	2209	5	55	19
E	4.5	45	15	2209	3	92	35.5

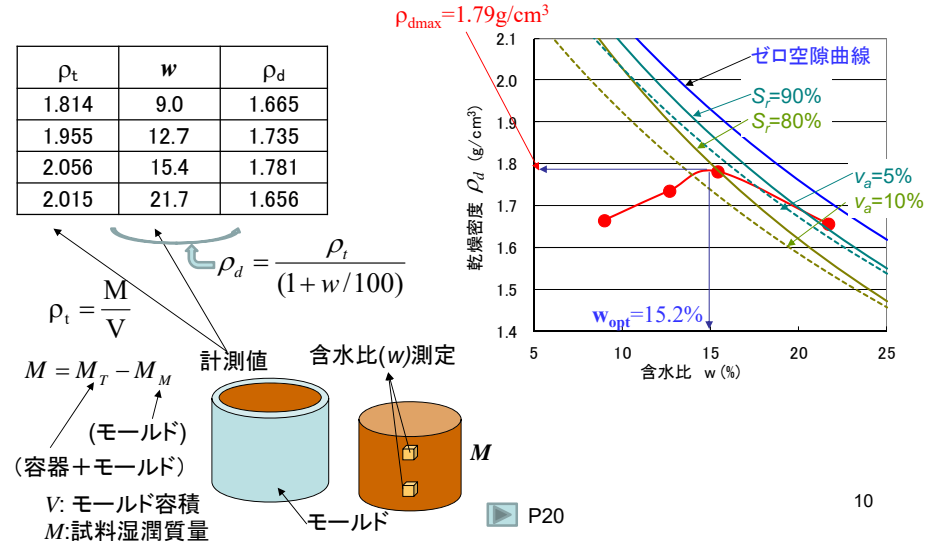
## 試料の準備法:

- a: 乾燥法、繰返し法
- b: 乾燥法、非繰返し法
- c: 湿潤法、非繰返し法

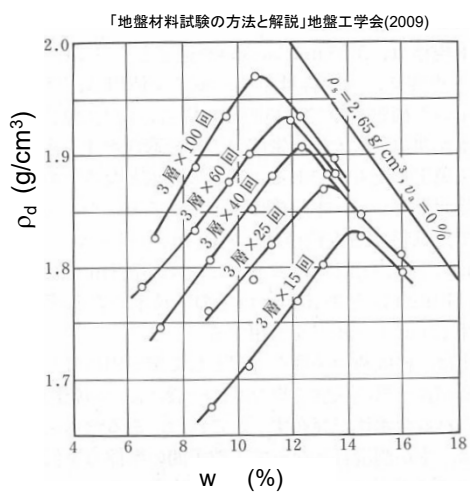
乾燥法: 一旦乾燥、加水 (w増加)  
 湿潤法: 自然状態のwから、w増減

繰返し法: 試料再利用  
 非繰返し法: 再利用なし

# 締固め試験結果 (学生実験: 江戸崎砂)



# 締固めエネルギーの影響

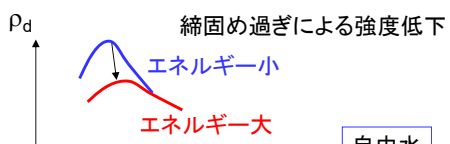


エネルギー大:  $\rho_{dmax}$  大  
 $w_{opt}$  小

why: 高エネルギー高圧縮、これを保つ大きなサクション (小さな含水比)

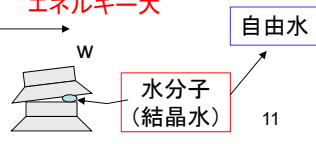
but 火山灰土(ローム)

過剰転圧 (over-compaction)

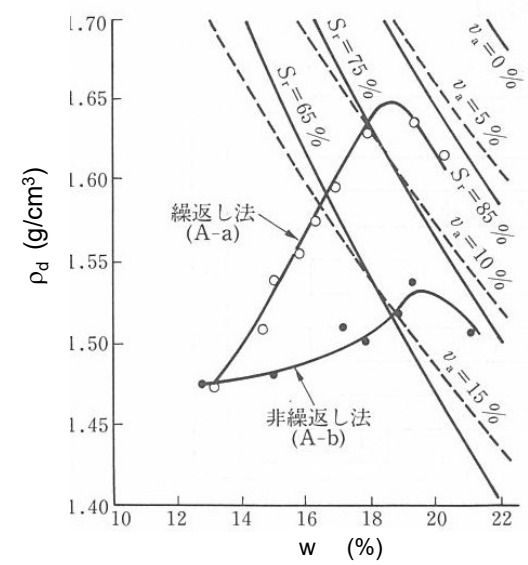


破碎性材料

加水ハロヒサイト



# 繰返し法と非繰返し法



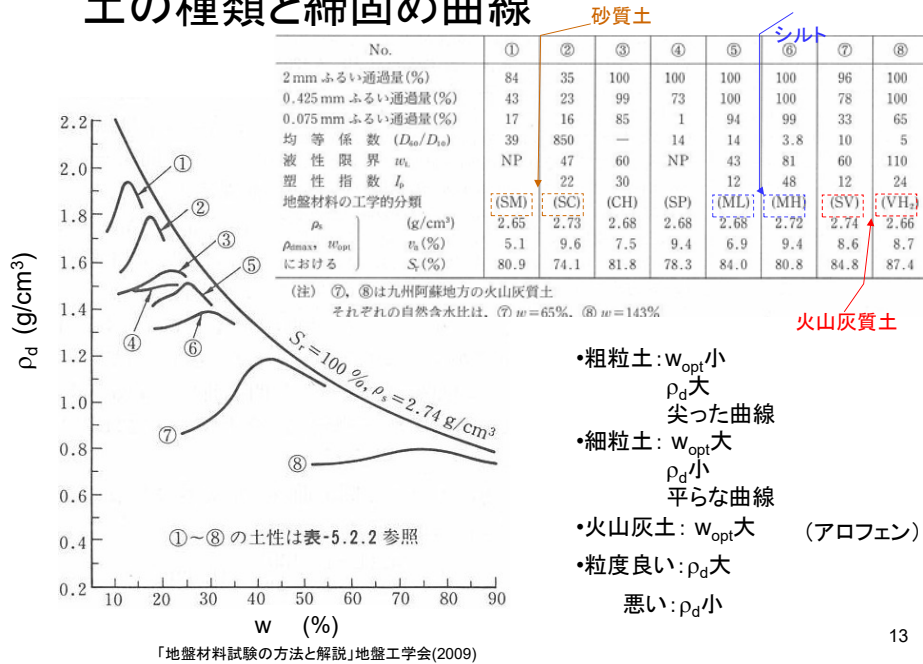
締固めによる粒子破碎

細粒化

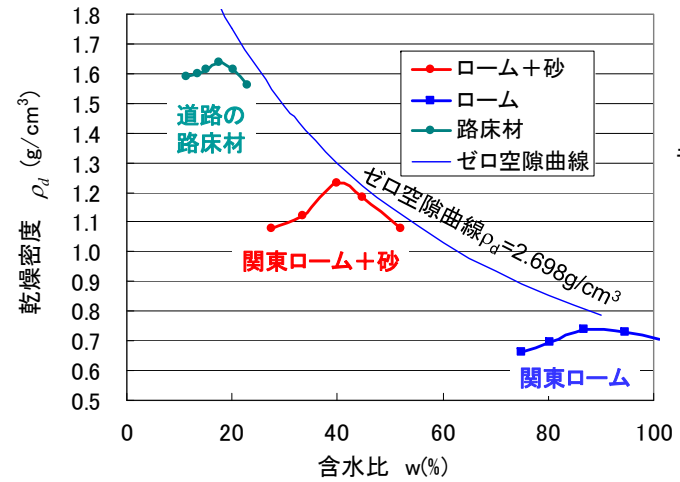
締め固め特性の変化

火山灰土、まさ土(風化花崗岩)

# 土の種類と締固め曲線



# 学生実験結果



もし、実験の結果  
ゼロ空隙曲線  
の上にデータが  
プロットされたら  
？

# 締固め特性の影響要因

	ρ <sub>d</sub> の絶対値	ρ <sub>d</sub> の変化量(圧縮性)
土の種類(粒径)	砂質土 > 粘性土	含水比の影響: 砂敏感(特にw <sub>opt</sub> 付近)、粘土鈍感 圧縮性: 砂小、粘土大
粒度	粒度が広範囲なものほど大	不明確
含水比	Proctorの原理 	含水比の影響は、その他の因子の影響を受けるが、w <sub>opt</sub> 付近で特に敏感
締固めエネルギー	エネルギー大なほど大、ただし、過転圧は除く。	含水比の影響: 不明確(ややエネルギーが大きなほうが締固め曲線が立ってきてwに対して敏感になる) 圧縮性: エネルギー大きな程、密度大、圧縮性小
締固め方法	砂: 動的な締固めが効果的 粘土: 静的な締固めが効果的	締固め曲線は、締固め方法で変わるので、当然wに対するρ <sub>d</sub> の変化割合も影響を受ける。

# 本日のTechnical terms

- プロクターの原理: Proctor's principle
- 締固め: compaction;
- 締固め曲線: compaction curve;
- 最大乾燥密度: maximum dry density;
- 最適含水比: optimum water content;
- ゼロ空隙曲線: zero void ratio curve;
- 締固めエネルギー: compaction energy
- 突固めによる締固め試験: test method for soil compaction using a rammer
- 過剰転圧: over-compaction;

## 小テスト(7/26)

関東ローム(ρ<sub>s</sub>=2.7g/cm<sup>3</sup>)に対して、締固め試験を行い、以下の結果を得た。  
 締固め曲線を描き、最大乾燥密度(ρ<sub>dmax</sub>)と最適含水比(w<sub>opt</sub>)を求めよ。  
 また、図にはゼロ空隙曲線とSr=90%一定曲線を描け。

ρ <sub>t</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1.3	1.45	1.4
w (%)	80	90	100

## 宿題(提出7/31)

p9の5つの方法における、単位体積当たりの締固めエネルギーを求めよ。

# Micro-structure of unsaturated soils

江戸崎砂:  $\rho_s = 2.72\text{g/cm}^3$

$D_{60} = 0.57\text{mm}$ ,  
 $D_{50} = 0.47\text{mm}$ ,  
 $D_{30} = 0.25\text{mm}$ ,  
 $D_{10} = 0.019\text{mm}$

$U_c = D_{60}/D_{10} = 30$   
 $U_c' = D_{30}^2/D_{10}D_{60} = 1.9$

粒度良い土  $\left\{ \begin{array}{l} U_c > 10 \\ 1 < 1U_c' < 3 \end{array} \right.$



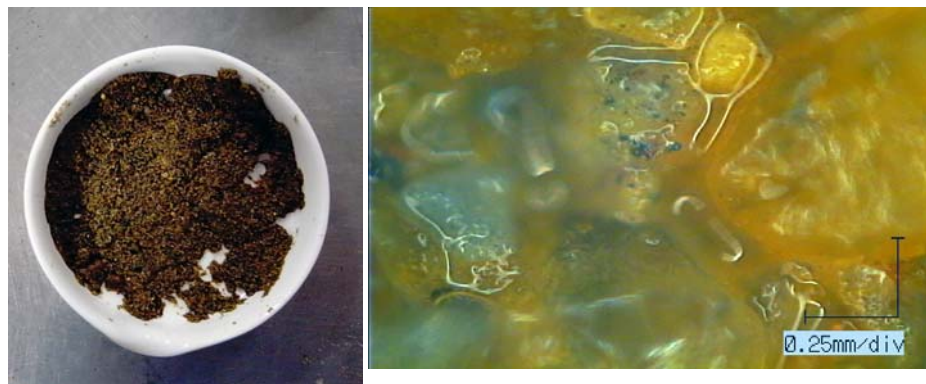
乾燥土  $w = 0 \sim 1\%$

# Micro-structure of unsaturated soils



不飽和土  $w = 16\% \sim w_{opt}$

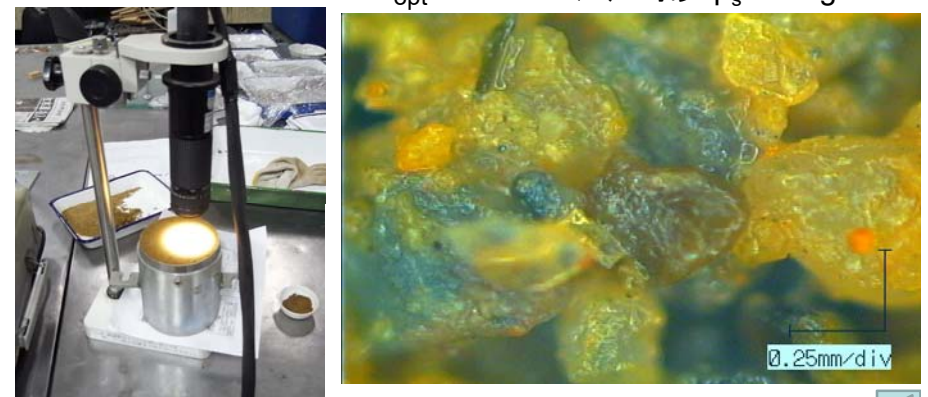
# Micro-structure of unsaturated soils



不飽和土  $w = 23\% \gg w_{opt}$

# Micro-structure of unsaturated soils

締固め土  $w_{opt} = 15.0\%$  江戸崎砂:  $\rho_s = 2.72\text{g/cm}^3$



$M_T = 6.54\text{kg}$   
 $M_M = 4.50\text{kg}$   
 $V_M = 1000\text{cm}^3$

$$\rho_t = 2.04\text{g/cm}^3$$

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{(1 + w/100)}$$

$\rho_d = 1.781\text{g/cm}^3$   
 $e = 0.527$   
 $S_r = 79.4\%$

$w = 15.4\% \cong w_{opt}$