

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

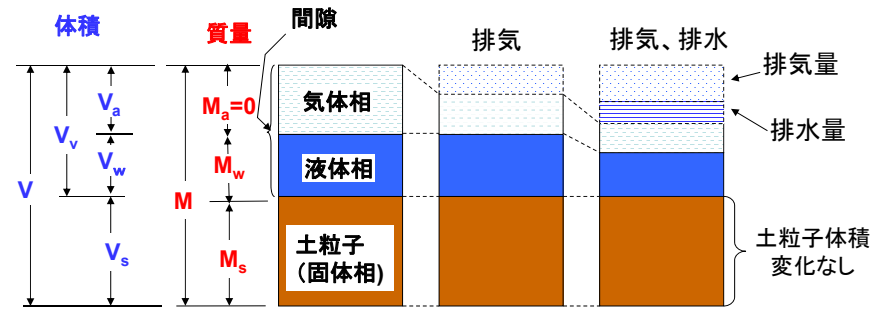
すべての土構造物の築造には締固めが行われる

- 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
(ρ_d の大小)

ρ_d の絶対値 ρ_d の変化量(圧縮性)

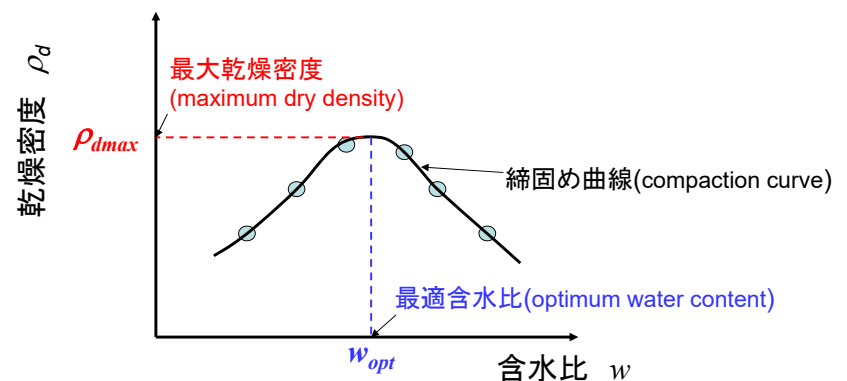
- 土の種類(粒径) (砂⇔粘土)
- 粒度 (良い⇔悪い)
- 含水比 (小さい⇔大きい)
- 締固エネルギー (大きい⇔小さい)
- 締固め方法

(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

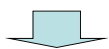
締固めエネルギー、方法を同じにして、含水比(w)だけを変化させて、締固めを行って、wと ρ_d の関係をプロットする。



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(ρ_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 ρ_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 ρ_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
 ρ_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)

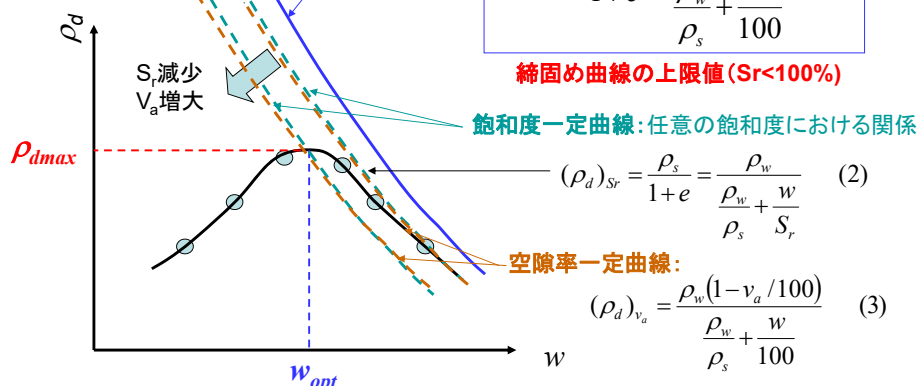
細粒土では、 w_{opt} は w_p (塑性限界)よりやや上、 w_p :サクシオンは最大、but 硬すぎ

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 ρ_d とwの関係)

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



締固め曲線の上限值($S_r < 100\%$)

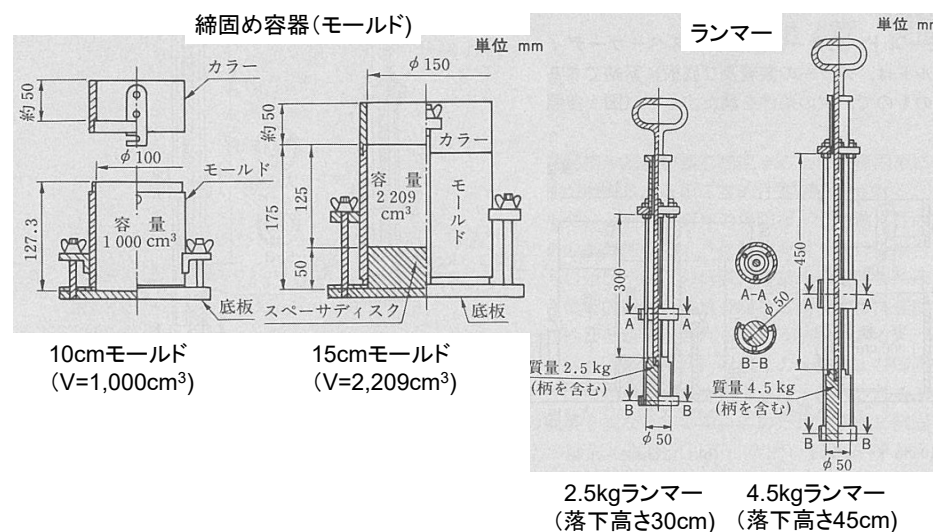
$$(\rho_d)_{S_r} = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho_w}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{S_r}} \quad (2)$$

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

w_{poi} まで、 ρ_d 上昇、飽和度上昇、 w_{opt} 越すと飽和度の上昇頭打ち、 ρ_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

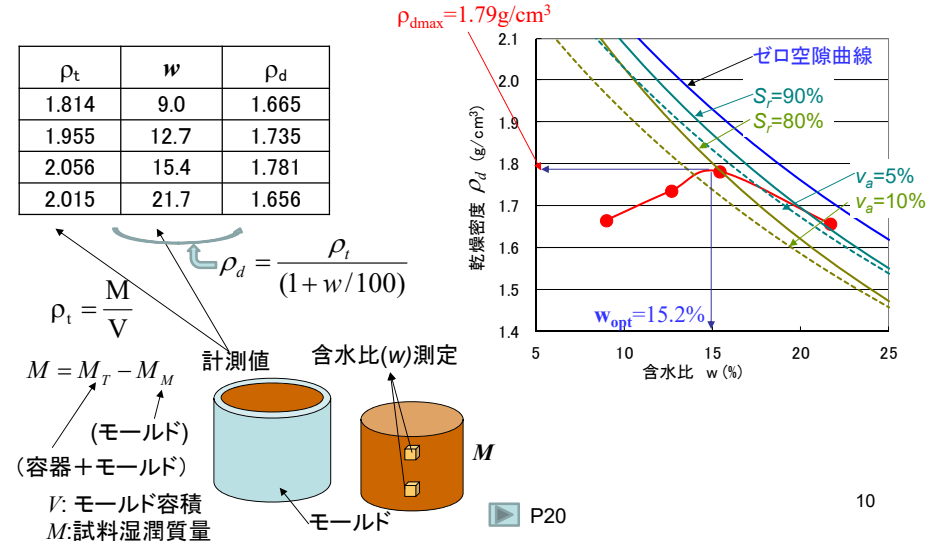
呼び名	ランマー質量 (kg)	落下高さ (cm)	モールド内径 (cm)	モールド容積 (cm³)	突固め層数	一層当たりの突固め数	許容最大粒径 (mm)
A	2.5	30	10	1000	3	25	19
B	2.5	30	15	2209	3	55	37.5
C	4.5	45	10	1000	5	25	19
D	4.5	45	15	2209	5	55	19
E	4.5	45	15	2209	3	92	35.5

試料の準備法:

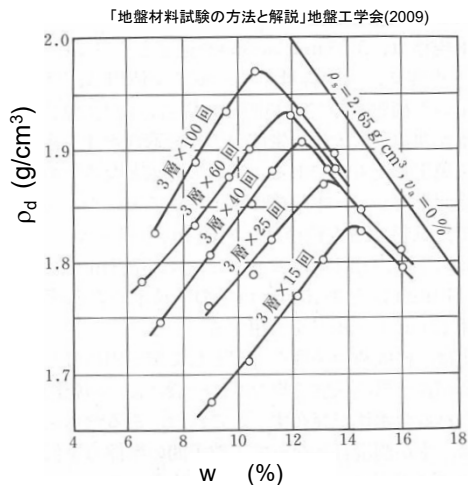
- a: 乾燥法、繰返し法
- b: 乾燥法、非繰返し法
- c: 湿潤法、非繰返し法

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

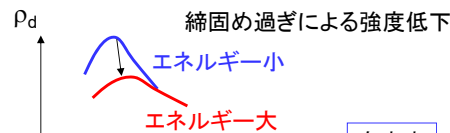


エネルギー大: ρ_{dmax} 大
 w_{opt} 小

why: 高エネルギー高圧縮、
 これを保つ大きなサクシオン
 (小さな含水比)

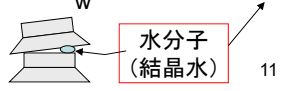
but 火山灰土(ローム)

過剰転圧(over-compaction)

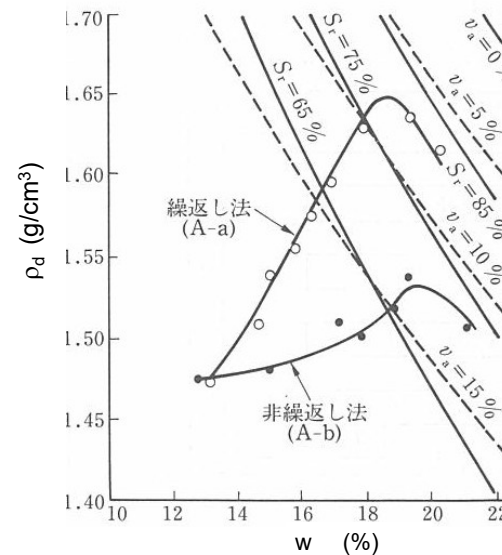


破碎性材料

加水ハロヒサイト



繰返し法と非繰返し法



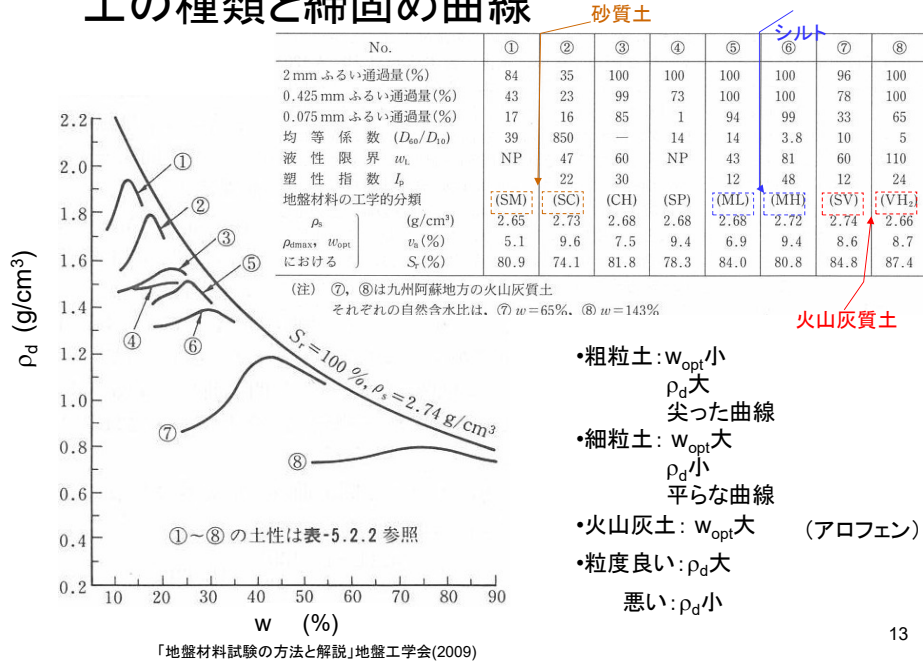
締固めによる粒子破碎

細粒化

締め固め特性の変化

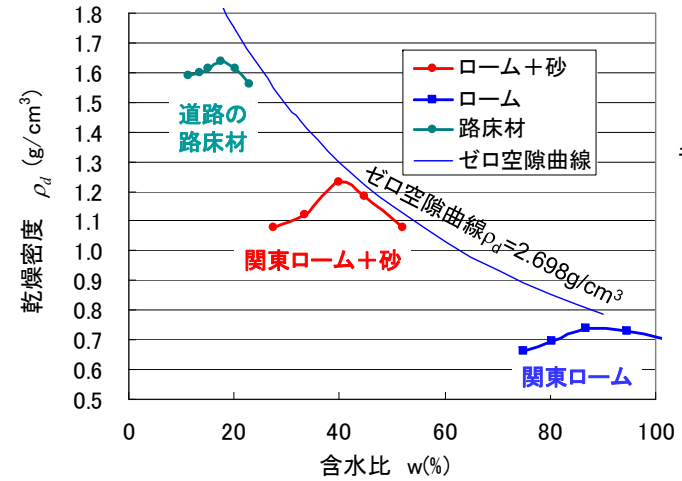
火山灰土、
 まさ土(風化花崗岩)

土の種類と締固め曲線



- 粗粒土: w_{opt}小, ρ_d大, 尖った曲線
- 細粒土: w_{opt}大, ρ_d小, 平らな曲線
- 火山灰土: w_{opt}大 (アロフェン)
- 粒度良い: ρ_d大, 悪い: ρ_d小

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 _d の絶対値	ρ _d 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 _{opt} 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 _{opt} 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き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 _d 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(7/25)

関東ローム(ρ_s=2.7g/cm³)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_{dmax})と最適含水比(w_{opt})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 _t (g/cm ³)	1.3	1.45	1.4
w (%)	80	90	100

宿題(提出7/29)

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



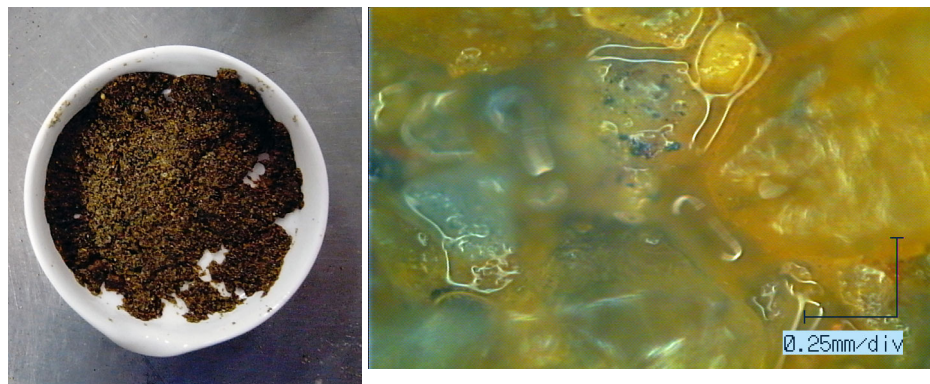
乾燥土 $w = 0 \sim 1\%$

Micro-structure of unsaturated soils



不飽和土 $w = 16\% \sim w_{opt}$

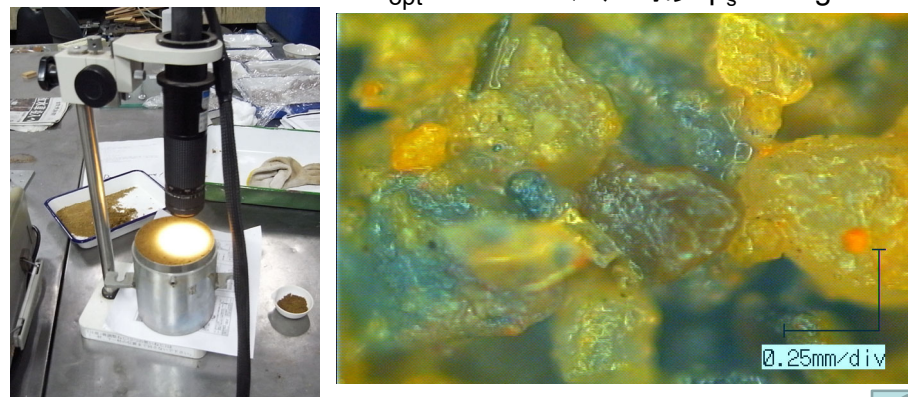
Micro-structure of unsaturated soils



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: $\rho_s = 2.72\text{g/cm}^3$



$$\left. \begin{array}{l} M_T = 6.54\text{kg} \\ M_M = 4.50\text{kg} \\ V_M = 1000\text{cm}^3 \end{array} \right\} \rho_t = 2.04\text{g/cm}^3 \rightarrow \rho_d = \frac{\rho_t}{(1+w/100)} \rightarrow \rho_d = 1.781\text{g/cm}^3$$

$$w = 15.4\% \cong w_{opt} \quad \left\{ \begin{array}{l} e = 0.527 \\ S_r = 79.4\% \end{array} \right. \quad \text{P6}$$