

【土の指示的性質】

(1)土の組成

土は、土粒子の集合体で出来ているが、ツブツブなので、当然土粒子どうしの間にはスキマができる。このスキマを間隙と呼ぶが、一般の自然の土の間隙には、水と空気が入っている。ただし、海底の地盤や陸上でも地下水位よりも下の地盤には、間隙が完全に水に満たされている土もある。この間隙がすべて水である土を「飽和土」と呼ぶ。逆に、間隙の中に空気も含まれている土を「不飽和土」と呼ぶ。ここでは、より複雑な場合である不飽和土を対象にして説明する。

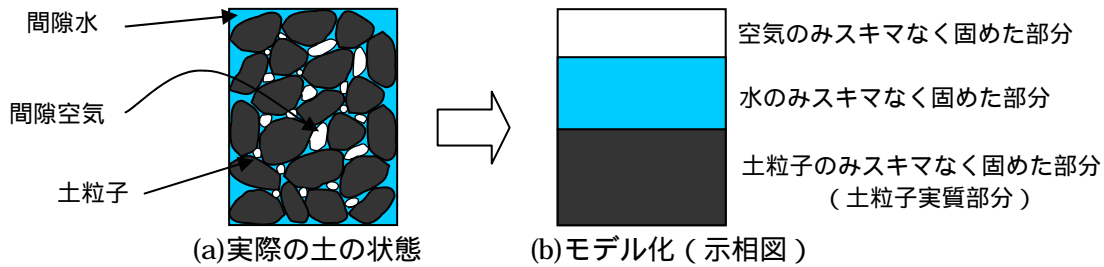


図 1: 示相図によるモデル化

実際の不飽和土は図 1(a)のように、土粒子、間隙水、間隙空気が混ざり合って存在しているが、そのままでは、それぞれの割合がわかりにくいので、図 1(b)のように土粒子、水、空気をそれぞれ完全に分離してしまっ考える。特に土粒子実質部分というのは、ツブツブの土を一旦ドロドロに溶かして、もう一度型に入れてカチカチに固めたような状態を想像する。このようにモデル化した図(示相図とも呼ぶ)を用いて、土の基本的な物理量を考える。

(2)基本的な物理量の定義

土の物性を考える場合には、土粒子、水、空気の割合が重要であるが、割合にも質量の割合と体積の割合があるので注意する。

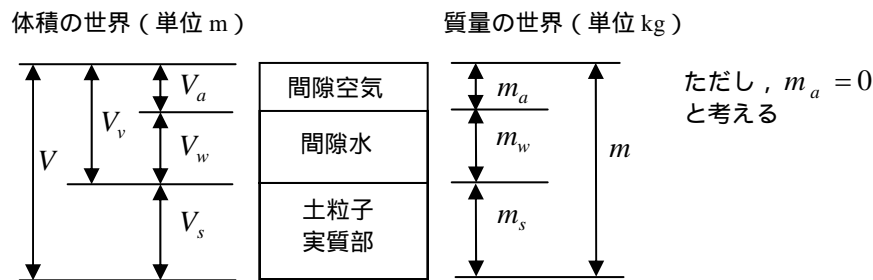


図 2: 体積と質量に関する基本的な諸量の定義

とにかく覚えるべき 3 つの重要な割合

体積の世界での重要な割合:

間隙比 $e = \frac{V_v}{V_s}$

土粒子の体積に対するスキマの体積の割合
土粒子の詰まり具合を表す非常に重要なインデックス

飽和度 $S_r = \frac{V_w}{V_v}$

スキマの体積の中で、さらに水の体積が占める割合
不飽和の度合いを表し、飽和土なら 1 (飽和度 100%) となる。
百分率で表すのが通例となっている。

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

質量の世界での重要な割合：

$$\text{含水比 } w = \frac{m_w}{m_s}$$

土粒子の質量に対する間隙水の質量の割合
計測するのが最も簡単かつ正確なために、土の性質を表すための最も基本的かつ重要なインデックス
飽和土ならば、間隙比と1対1の関係となる。
百分率で表すのが通例となっている。

$$\text{(含水比(\%)) } w = \frac{m_w}{m_s} \times 100$$

体積の世界と質量の世界を結ぶ量：「(質量)密度」(単位：kg/m³)

各相のみで(土粒子は土粒子、水は水として)考える密度

$$\text{水の(質量)密度} : \rho_w = m_w / V_w$$

$$\text{土粒子の(質量)密度} : \rho_s = m_s / V_s$$

(空気の質量をゼロと考えるので、間隙空気の密度は定義しない)

「土(土粒子、水、空気の集合体)」を1つの物質の塊(体積V)として考える密度

$$\text{土の湿潤密度} : \rho_t = m / V \quad (\text{スキマに間隙水がある湿潤状態})$$

$$\text{土の乾燥密度} : \rho_d = m_s / V \quad (\text{スキマは空気だけの乾燥状態})$$

密度どうしの割合：「比重」

$$\text{比重} : G_s = \rho_s / \rho_w$$

水の密度に対する、土粒子実質部の密度の割合
土は鉱物の集合で出来ているので、どんな土でも大体
2.65~2.8程度であり、大差はない(と言う点が重要)

以上の定義をきちんと覚えておけば、土の基本的な物理量はだいたい計算できる。

(3)密度と単位体積重量

$$\text{密度}(\rho) = \text{質量}(m) / \text{体積}(V) \quad \text{単位：kg/m}^3 \text{ (SI 単位)}, \text{ t/m}^3$$

$$\text{単位体積重量}(\gamma) = \text{重量}(W) / \text{体積}(V) \quad \text{単位：kN/m}^3 \text{ (SI 単位)}, \text{ tf/m}^3$$

密度と体積重量(質量と重量)の違いは重力加速度gがかかっているかどうかであり、

$$\gamma = \rho g \quad (W = mg)$$

となるので、SI単位で書けば

$$\text{水の密度}(\rho_w) \text{は } 1000 \text{kg/m}^3, \text{ 水の単位体積重量}(\gamma_w) \text{は } 9.8 \text{kN/m}^3$$

と明らかに異なることがわかるが、重力単位系で書くと、

$$\text{水の密度}(\rho_w) \text{は } 1 \text{ t/m}^3, \text{ 水の単位体積重量}(\gamma_w) \text{は } 1 \text{ tf/m}^3$$

となり、「f」が付くかどうかだけの違いとなる。ちなみに「f」は重力加速度が加わっていることを示す記号であり、「フォースあるいは重(じゅう)」と読む。日本では、実務において依然として、SI単位より重力単位を使用する人が多いので注意する。

各種の単位体積重量(単位 kN/m³(SI単位), tf/m³)

$$\gamma_w = W_w / V_w \quad (\text{水の単位体積重量})$$

$$\gamma_s = W_s / V_s \quad (\text{土粒子の単位体積重量}) \quad \text{事実上ほとんど使わない}$$

$$\gamma_t = W / V \quad (\text{土の湿潤単位体積重量})$$

$$\gamma_d = W_s / V \quad (\text{土の乾燥単位体積重量})$$

以上の他に、土が飽和した場合の単位体積重量(土の飽和単位体積重量 γ_{sat})も

よく使用する

(4)土の密度（あるいは単位体積重量）の別の表現式

上で表した各種の密度（あるいは単位体積重量）は始めに定義した，間隙比，飽和度，含水比等を用いて別の式で表現することができる。特に，土粒子，水，空気集合体としての土の密度は，1つの物質ではないので，式は複雑になるが，諸量の定義を抑えていけば難しいものではない。

土の湿潤密度

$$\rho_t = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_v} = \frac{\rho_s \cdot V_s + \rho_w \cdot V_w}{(1+e)V_s} = \frac{\rho_s + \rho_w \cdot V_w/V_s}{1+e} = \frac{\rho_w \cdot G_s + \rho_w \cdot (V_w/V_v)(V_v/V_s)}{1+e}$$

$$= \frac{G_s + S_r \cdot e}{1+e} \rho_w \quad \text{土の湿潤単位体積重量：} \gamma_t = \frac{G_s + S_r \cdot e}{1+e} \gamma_w$$

土の乾燥密度

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{m_s}{V_s + V_v} = \frac{\rho_s \cdot V_s}{(1+e)V_s} = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{G_s}{1+e} \rho_w$$

$$\text{土の乾燥単位体積重量：} \gamma_d = \frac{G_s}{1+e} \gamma_w$$

の飽和度 0% ($S_r = 0$) の場合と考えても良い。

土の飽和単位体積重量（通常，飽和密度というものは定義しない）

の飽和度 100% ($S_r = 1$) の場合と考える。

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w$$

土の水中単位体積重量（この場合も通常，水中密度というものは定義しない）

さらに，飽和土が完全に地下水水中にある場合には，浮力が働く

ただし，この場合は，土粒子ひとつひとつに浮力が働くのではなく，土としての塊に対して浮力が働くと考える。すなわち，図3のように袋に入った土の重量を考えていると思えば良い。

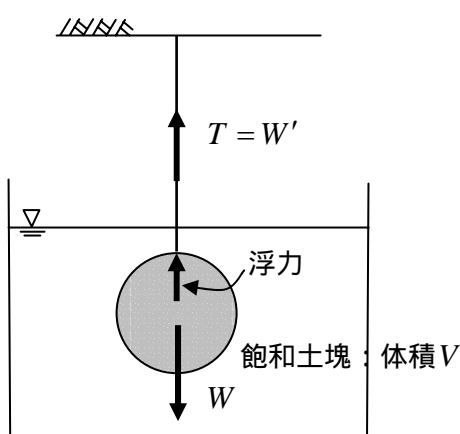


図3

モデル化

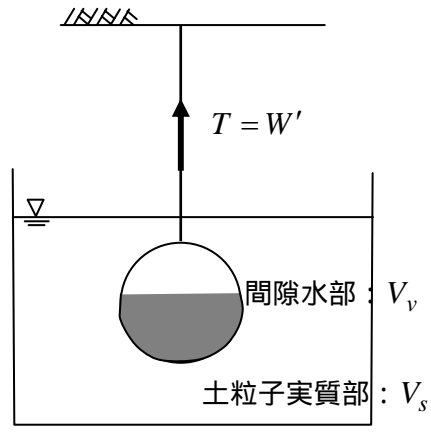


図4

図3のように，飽和土をそのまま袋に詰めて水槽に沈めた場合に，つり下げたヒモに作用する重量 W' は，全重量 $W = \gamma_{sat} V$ から浮力 $\gamma_w V$ を差し引くことにより，

$$W' = \gamma_{sat} V - \gamma_w V = (\gamma_{sat} - \gamma_w) V = \gamma' V$$

したがって，水中単位体積重量は

$$\gamma' = \frac{W'}{V} = \gamma_{sat} - \gamma_w = \frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w - \gamma_w = \frac{G_s - 1}{1+e} \gamma_w$$

しかしながら，実際の地下水位以下の土は袋に入っているわけではないので，もう少し補足しておかなければならない。

図4のように、飽和土が袋の中で間隙水と土粒子実質部(隙間なし)の状態に完全に分かれたとすれば、つり下げたヒモに作用する重量 W' は、

$$W' = \frac{(\gamma_w - \gamma_w)V_v + (\gamma_s - \gamma_w)V_s}{\text{間隙水の重量は水中ではゼロ}} = (\gamma_s - \gamma_w)V_s$$

したがって、単位体積当たりの重量は、

$$\frac{W'}{V} = (\gamma_s - \gamma_w) \frac{V_s}{V} = (\gamma_s - \gamma_w) \left(\frac{1}{1+e} \right) = \frac{\gamma_s}{1+e} - \frac{\gamma_w}{1+e} = \underbrace{\frac{\gamma_s}{1+e} + \frac{e \cdot \gamma_w}{1+e}}_{\gamma_{sat}} - \underbrace{\frac{e \cdot \gamma_w}{1+e} - \frac{\gamma_w}{1+e}}_{\gamma_w} = \gamma'$$

つまり、 γ' は V 全体に均質に分布していると仮定した土粒子の集合(隙間あり)を水中で支えている重量である。

結局、飽和土の全重量 W は $W = \gamma_{sat} V = (\gamma' + \gamma_w) V = \gamma' V + \gamma_w V$ と表され、

- ・ V が全部土(隙間あり)とした時の土の水中での重量 $\gamma' V$ と
- ・ V が全部水とした時の水の重量 $\gamma_w V$ との和と考えるべき。

(注：この考え方が、後で学ぶ有効応力の概念に密接に結びつく。)

(5) 飽和度, 含水比, 間隙比の関係

$$\frac{m}{m_s} = \frac{m_s + m_w}{m_s} = 1 + w \quad \text{より} \quad m_s = \frac{m}{1+w} \quad \text{よって, } V_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{\rho_t}{\rho_s} \frac{V}{w+1}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1 = \frac{1}{\frac{\rho_t}{\rho_s} \frac{1}{w+1}} - 1 = \frac{\rho_s(w+1)}{\rho_t} - 1 = \frac{\rho_s(w+1)}{\frac{G_s + S_r \cdot e}{1+e} \rho_w} - 1 = \frac{G_s(w+1)(1+e)}{G_s + S_r \cdot e} - 1$$

したがって、 $1+e = \frac{G_s(w+1)(1+e)}{G_s + S_r \cdot e}$ $G_s + S_r \cdot e = G_s(w+1)$ $\therefore S_r \cdot e = G_s \cdot w$
 当然求め方はいくつもある

(6) その他の物理量

間隙率: $n = \frac{V_v}{V}$ (全体の体積の中で間隙の体積が占める割合)

空気間隙率: $n_a = \frac{V_a}{V}$ (全体の体積の中で空気の体積が占める割合)

(7) 土の粒度

土は粒径によって図5のように分類される。

		粒径(mm)								
		0.005	0.075	0.25	0.85	2	4.75	19	75	300
粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫	粗石	巨石	
		砂			礫			石		
細粒分		粗粒分						石分		

図5: 日本での土の粒径による区分

土質力学の授業で扱う材料は、粘土~砂(せいぜい細礫)

自然の土は色々な粒径の土粒子で構成されているので、この区分を行うために、フルイ分け試験を行う。

フルイ分け試験：

フルイの目(mm)：0.075, 0.106, 0.25, 0.425, 0.85, 2, 4.75, 9.5, 19, 26.5, 37.5, 53, 75

上のようなフルイを使って土をフルイ分けして、土全体の重量に対して、それぞれのフルイの目を通過した土の重量の和の割合（通過重量百分率）を計算して片対数グラフにプロットする。

粒径加積曲線

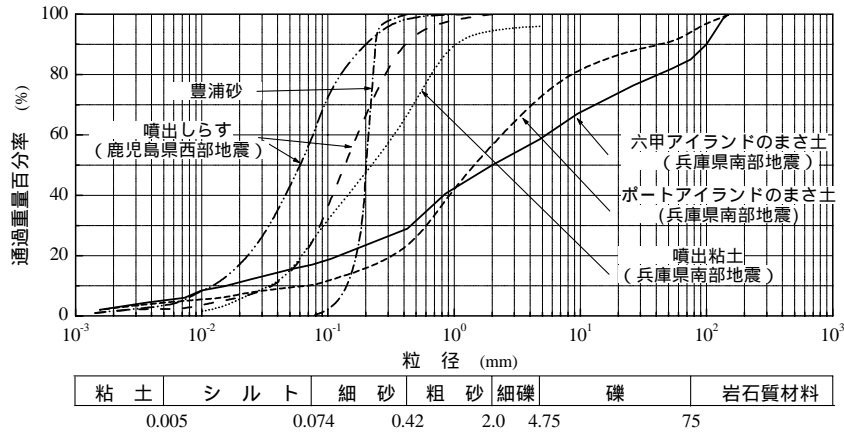


図 6: 実際の土の粒径加積曲線の例

では、細かすぎてフルイ分けが出来ないような、粒径 0.075(mm)以下のシルトや粘土はどのように粒径を求めるのか？

沈降分析

土粒子の沈む速さによって粒径を決める。大きい土粒子は比較的早く沈み、細かい土粒子ほどいつまでも水中を浮遊している。

粒度分布から得られる土の性質の指標

土粒子の平均的な大きさの指標： 平均粒径 D_{50}

大小の土粒子の混合具合の指標： 均等係数 $U_c = D_{60} / D_{10}$

U_c が大きいほど不均等 粒度分布が良い

U_c が小さいほど均等 粒度分布が悪い

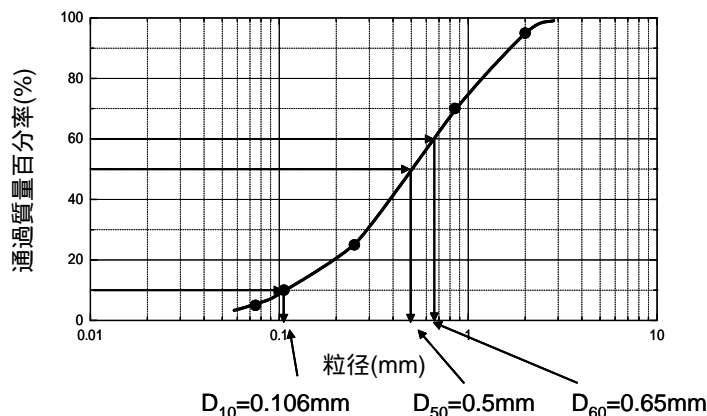
U_c が大きい土

- ・良く締め固めると密度の大きい固い土塊になる。
- ・良く締め固めないと緩い状態のまま

U_c が小さい土

- ・良く締め固めてもそれほど密度の大きい固い土塊にならない。
- ・良く締め固めなくても、そこそこの密度になる。

(軽く振動を与えてやれば簡単に締まる)



均等係数 $U_c = D_{60} / D_{10} = 0.65 / 0.106 = 6.13$

(8)土の統一分類法

実際の土は色々な粒径の土が混ざって構成されていることは今まで述べた通り。
土の粒度から、さらに細かく土を分類し、それぞれの性質を推定する。

扱う材料：土質材料（75mm未満）

粒径(mm)				
0.005	0.075	2	75	
粘土	シルト	砂	礫	石
細粒分		粗粒分		石分

大分類

粗粒土 75μm以上の土が50%を超える（細粒分 < 粗粒分）

細粒土 75μm以下の土が50%以上（細粒分 ≥ 粗粒分）

高有機質土（ピート）

人工材料

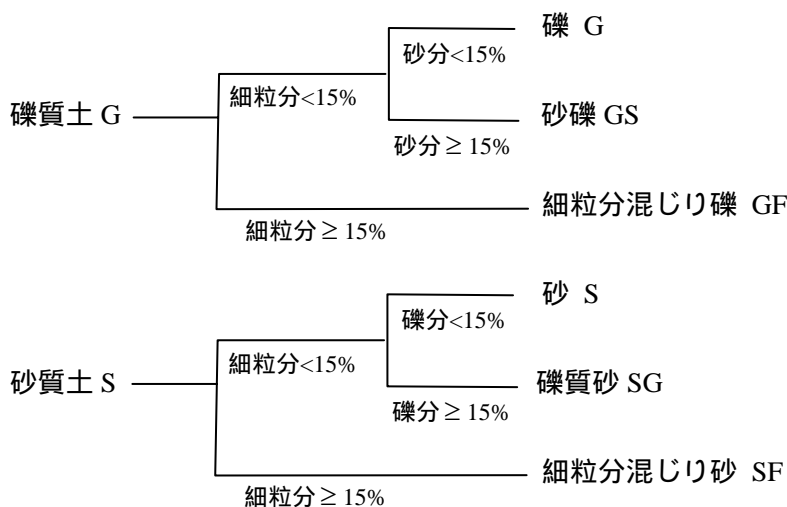
性質が異なる

粗粒土 — 礫質土 G（礫分 > 砂分），
砂質土 S（砂分 ≥ 礫分）

さらに中分類，小分類

細粒土 — 粘性土 C_s — 粘土 C
有機質土 O，シルト M } 塑性図で分類（次節で説明）
火山灰質粘土 V

中分類（粗粒土対象）



小分類（粗粒土対象）

三角座標を用いる

{	~質	15%以上	50%未満
	~まじり	5%以上	15%未満
	何もつけない	5%未満	

粗粒土の中分類，小分類において細粒分(75μm以下)の混入割合が分類のポイントとなる理由：

粒径 D の土は，土粒子 1 個あたりの体積 $\propto D^3$

土粒子 1 個あたりの表面積 $\propto D^2$

$$\text{全土粒子数 } n \propto \frac{1}{D^3} \quad \text{総表面積 } a = nD^2 \propto \frac{1}{D^3} \cdot D^2 = \frac{1}{D}$$

では、 $D=0.001\text{mm}$ の粘土 と $D=1\text{mm}$ の砂 が同じ体積だけあったとすれば。

粘土の粒子数は砂の粒子数の $(10^3)^3 = 10^9 = 10$ 億倍

粘土粒子の総表面積は、砂粒子の総表面積の $10^3 = 1000$ 倍
粒子の小さい土は重量比が小さくても粒子数、粒子総表面積が大きい
土の力学的な性質に及ぼす影響は非常に大きい
(きちんと分類することが重要)

(9) 細粒土 (主に粘土) のコンシステンシー

日本の土の分類法では、 $5\mu\text{m}$ 以下の非常に細かい土粒子で構成されている土を粘土と呼ぶ。純粋な土壌学では、粘土鉱物 (概ね $2\mu\text{m}$ 以下) で構成されているものだけを粘土と呼ぶ。粘土は土粒子、間隙水、間隙空気の構成割合によって、変形のしやすさや流動に対する抵抗性等、その性質 (コンシステンシーと呼ぶ) を色々と変化させる。通常は、土粒子、間隙水、間隙空気の混合割合は、最も計測が簡単な含水比を基準して議論する。

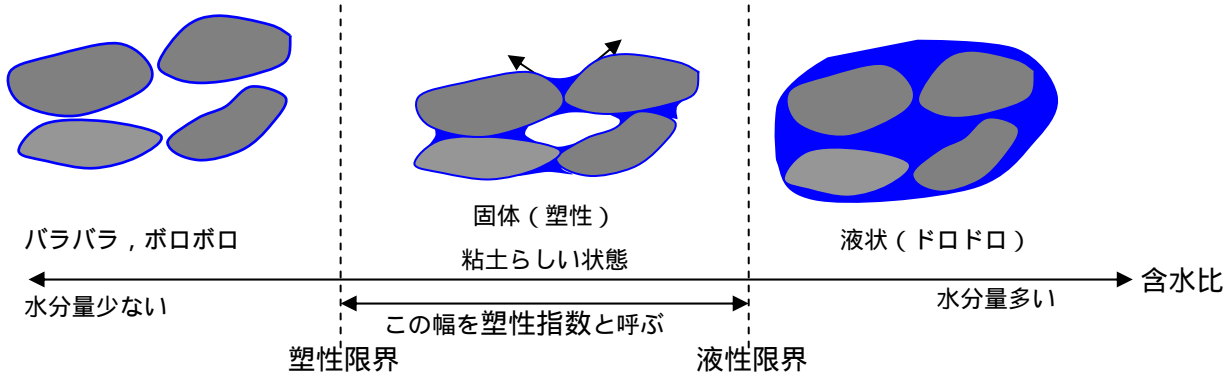
粘土の先天的な性格を表すインデックス: 塑性限界, 液性限界, 塑性指数

粘土らしい粘土とは?

粘土あそびがしやすい。すなわち、簡単に変形して、かつ、その形を維持し続ける。

塑性と呼ぶ

形を維持する力 粒子間力 メニスカス力 粘土鉱物の場合、電気的な力も働く)



塑性指数が大きな粘土ほど、粘土らしい粘土であり、塑性指数は粘土の持って生まれた性格を表す。塑性指数から粘土の色々な性質が予測できる (色々な経験式、実験式が提案されている)。

粘土の現在の生活状況を表すインデックス: 自然含水比 w (または w_n)

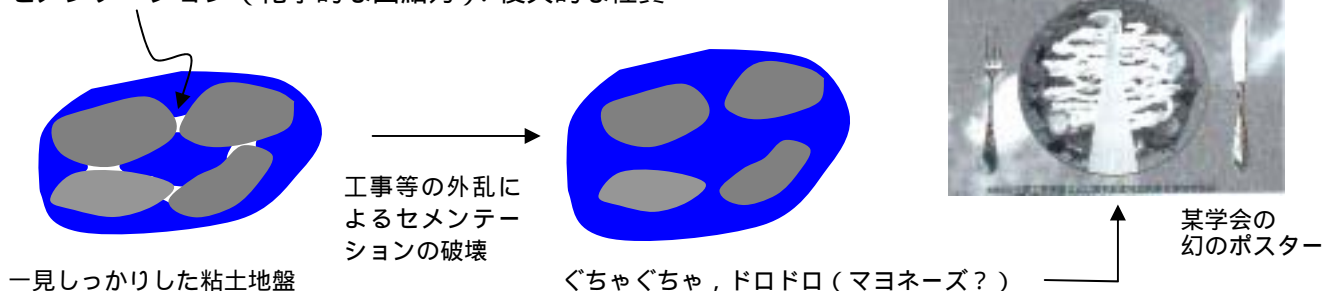
自然含水比と塑性限界, 液性限界を見比べれば、その粘土がどのような状態 (ポロポロ, ほどよい, ドロドロ) にあるのか想像がつく。

しかし、我々が住んでいる粘土地盤には、

自然含水比 > 液性指数

という粘土がたくさんある。(有明, 関東ローム, 有楽町...)

セメンテーション (化学的な固結力): 後天的な性質



コンシステンシーを表すインデックス

塑性限界： w_p （ボロボロの固体状態での含水比）

液性限界： w_L （ドロドロの流動状態での含水比）

塑性指数： $I_p = w_L - w_p$ （塑性の性質を呈する含水比の幅）

液性指数： $I_L = \frac{w - w_p}{I_p}$ （1に近いほど現在の状態が液性限界に近いことを表す）

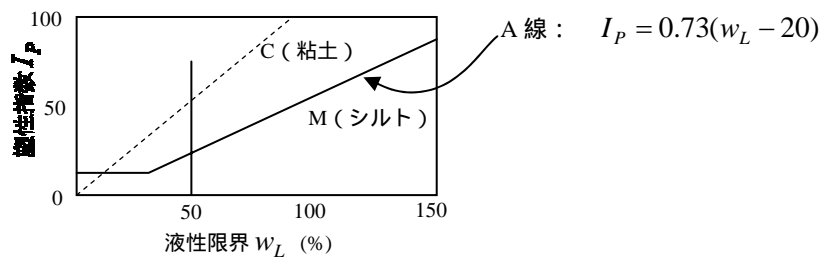
対象とする粘土の流動しやすさを表すインデックス

コンシステンシー指数 $I_c = \frac{w_L - w}{I_p}$ （1に近いほど現在の状態が塑性限界に近いことを表す）

対象とする粘土の流動に対する抵抗性を表すインデックス

その他のインデックス，収縮限界，粘土の活性度，鋭敏比

細粒土の分類はフルイ分けできないので，塑性図を用いて行う。



(10)粗粒土（主に砂）の状態を表すインデックス

粒径の大きな砂のような粗粒土は，細粒土ほど含水状態によって大きく性質を変えることはない。また，通常は塑性限界，液性限界は計測不能であり，塑性指数はゼロとなる非塑性(non-plastic)の土であるために，細粒土のような分類はできない。そのため，粗粒土の分類は，水分量には着目せず，土粒子の詰まり具合を直接調べる方法が用いられる。

相対密度： $D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$

e_{max} ：最大間隙比， e_{min} ：最小間隙比， e ：現在の間隙比

相対密度	詰まり具合
0 ~ 15%	非常に緩い
15 ~ 35%	緩い
35 ~ 65%	中位
65 ~ 85%	密
85 ~ 100%	非常に密

(11)粘土と粘土鉱物

粘土鉱物 カオリン鉱物群 （例： カオリナイト）

スメクタイト鉱物群（例： モンモリナイト）

雲母粘土鉱物群 （例： イライト）

シリカ層（4面体シート） SiO_2

ギブサイト（8面体シート） $Al(OH)_3$
 $Al^{3+}, Fe^{3+}, Mg^{2+}$

