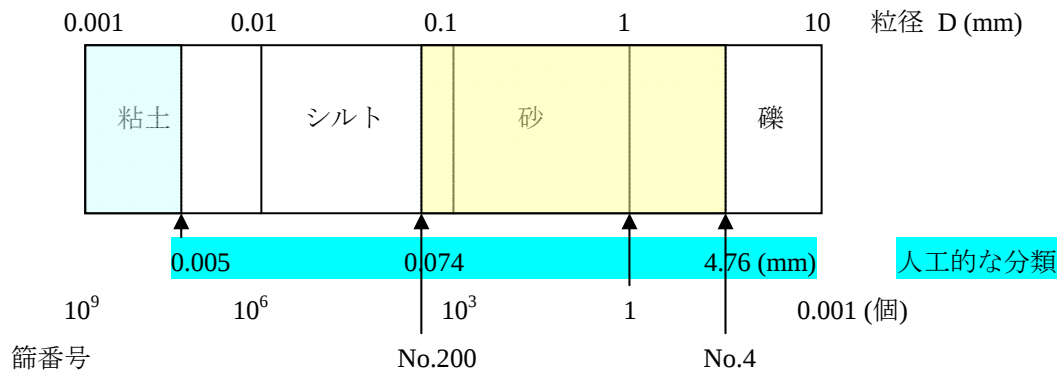


1. 2 の粒度

[ここで地盤の形成での、河川での分級について再度説明する]

●粒子の総体積 V_s が同一である土塊において、粒径 D が小さくなると、a) ほぼ D^3 に逆比例して粒子の総数 n が増える。b) (粒子数 $n \propto \frac{V_s}{D^3}$) · (粒子表面積 $\propto D^2$) $\propto \frac{1}{D}$ に比例して、即ち D に逆比例して粒子の総表面積が増える。

$D = 0.001 \text{ mm}$ の粘土と $D = 1 \text{ mm}$ の砂を比較すると、粒子総数で 10 億倍、粒子総表面積で 1,000 倍異なる。

→粒径の小さい土の成分は、重量が少なくても「粒子総数、及び粒子総表面積」が相対的に多くなるので、その存在が土全体の力学的性質（変形・強度特性、透水性等）に及ぼす影響が大きくなる。

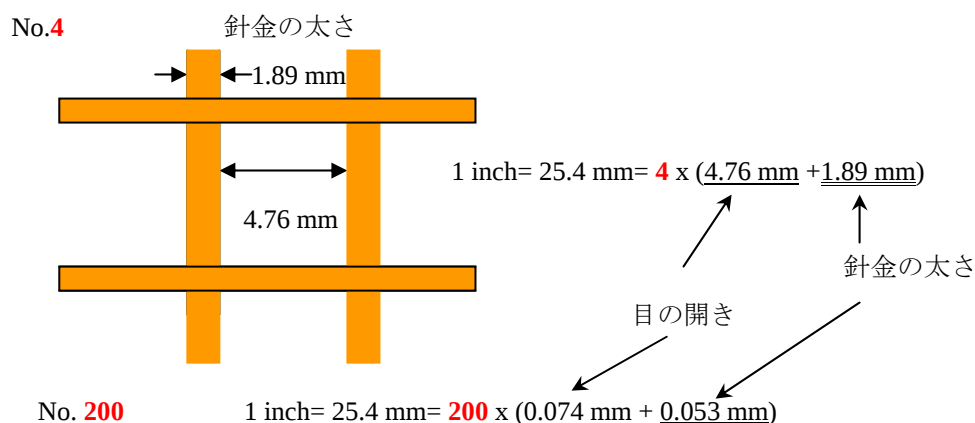
例) 10 % 重量の粘土成分が混じった砂は、粘土っぽい。透水性が低くなるとか、締め固めにくいとかの粘土的な性質を示すようになる。

篩分け（ふるいわけ）

a) 実は、球形でない土の粒子の大きさをどうやって測定するのか？定義するのか？という複雑な問題。

b) しかし、実用性から目が正方形の篩を使用： 土の粒子の形は正方形ではない。

(篩の名称)

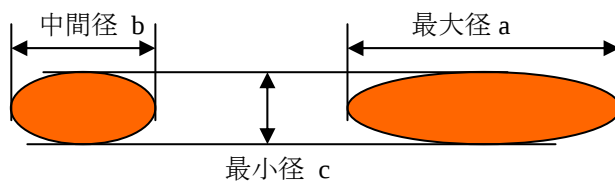


これ以下の細い針金の篩は、作成しにくい。

従って、篩分けする限界（出来る限界粒径 0.050 mm）

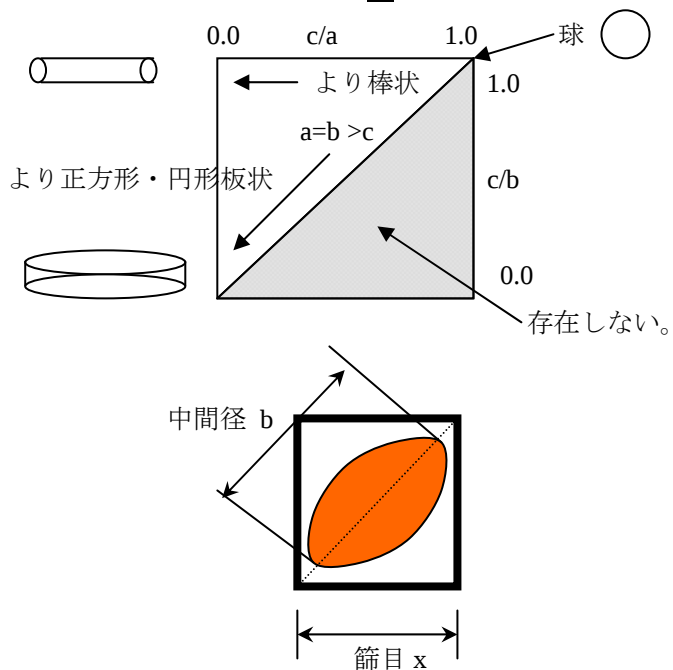
1.2 土の粒度

(土の粒子の形)



厳密には、粒子の大きさは a, b, c で表現される。

また全体的な形は、 $a/b, b/c$ の比で示される



その他、表面の角張りの程度を表す index が必要;
roundness, angularity

この篩は、 $b < x \cdot \sqrt{2} - \alpha$ (アルファ) の粒子が通過が可能。

しかし、実際の篩分け作業で、通過するとは限らない。さぼるほど通過しない。

ふるい方を規定： 十分にふるう： つまり、1 分間の通過率が残留分の 1% 以下になるまで。

(機械化が必要。しかし、自動ふるい機械は結構面倒)。

教科書図 1. 6

重量通過百分率 Percentage finer by weight, P

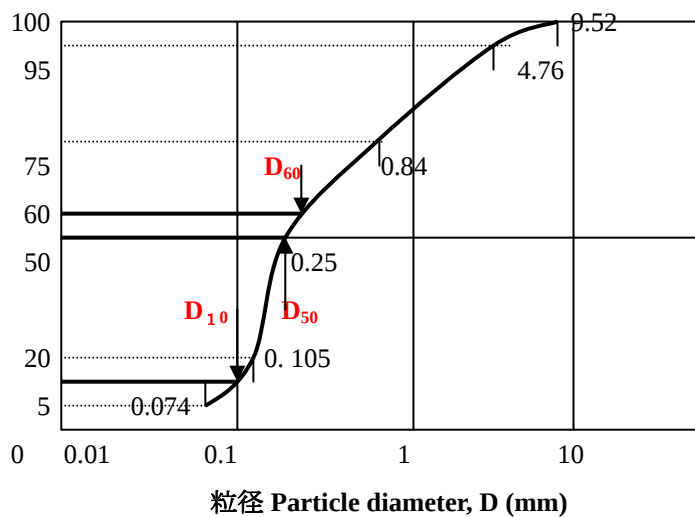


図1. 5, 1. 6の説明

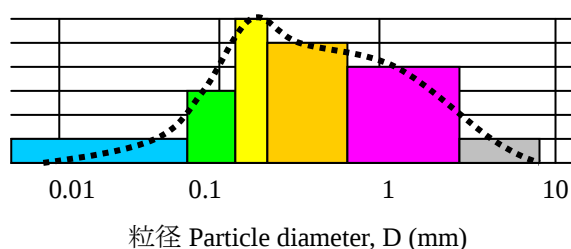
粒径が小さくなると、総粒子表面積、さらに粒子数が急激に増加することに注目。

ふるい目 (mm)	ふるい目間の 概略平均 粒径 = D_{ave} (mm)	そのふるい目に残留し た土の重量 (gf)とその 重量比 (X)	そのふるい目を通過 した土の重量(g)とその 重量比 (%)	ふるい目間に ある土の粒子 数の比 A	ふるい目間に ある土の表面 積の比 B
9.52		0 (g)	0	1,000 (g)	100 %
	5.0			1	1
4.76		50	X= 1	950	95
	2.8			23	7
0.84		200	4	750	75
	0.545			3,860	37
0.25		250	5	500	50
	0.1775			134,112	141
0.105		300	6	200	20
	0.0895			$5.23 \cdot 10^5$	335
0.074		150	3	50	5
	0.037	50 (74 μ m のふるいを 通過した量)	1		$2.47 \cdot 10^6$
		合計=1,000 gf	20		$A=(5/D_{ave})^3 \cdot X$ $B=(5/D_{ave}) \cdot X$

●なぜ、加積型のプロットをするのか？

元々のデータは、棒グラフで直接表現できる。しかし、棒グラフでは、任意の二つの粒子径の間にある土の重量を求めることができない。

棒グラフを連続した分布図でも、任意の二つの粒子径の間にある土の重量を求めるためには、面積を計算しなければならない。



●粒子の平均的大きさの表現； D_{50} (平均粒径 mean diameter)：重量での平均。

●大小の粒子の混合状態の表現； $U_c = D_{60}/D_{10}$

均等係数 (Coefficient of uniformity)； U_c が大きいほど不均等

・ 本当は、不均等係数 (Coefficient of non-uniformity)

・ U_c 大の土： non-uniform graded (well graded) soils: 締固め度により、性質が大きく変わる。

a) 締固めていないと、非常緩い状態になる（細かい粒子が大きい粒子の直接接触を妨害して、roller の役割を果たす）。例) 神戸市 Port Island の埋め立て土

b) 良く締固めると、密度が大きくなり、個々の粒子がより多くの周囲の粒子に接することになって回転や移動がしにくくなりより安定することから、非常に強い土になる。 例) Rock fill dam

・ U_c 小の土： uniform graded (poorly graded) soils

a) 締固めに、大きなエネルギーは要らない。

1.2 土の粒度

- b) 良く締固めても粒子接点数がある程度(4－6)以上になることはなく、密度が大きく非常に強い土になることはできない。

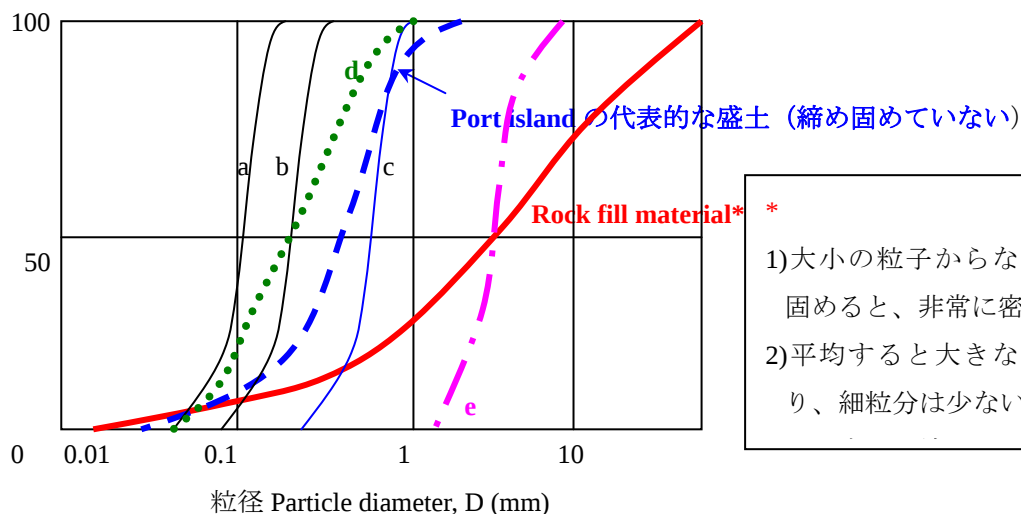
土の粒度分布演習 1)

以下の表は篩い分け試験の結果である。この表を完成して、粒度分布曲線を描き、 D_{50} と U_c を求めよ。

ふるい目 (mm)	ふるい目間の概略平均 粒径 = D_{ave} (mm)	そのふるい目に残留し た土の重量 (gf)	そのふるい目を通過 した土の重量(g)とそ の重量比 (%)	
9.52		0 (g)		
	5.0			
4.76		30		
	2.8			
0.84		150		
	0.545			
0.25		200		
	0.1775			
0.105		180		
	0.0895			
0.074		120		
	0.037	40 (74 μ m のふるい を通過した量)		
		合計= gf		

様々な粒度分布の材料

重量通過百分率 Percentage finer by weight

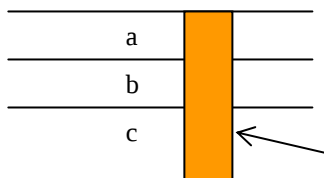


- 1) 大小の粒子からなる⇒締め固めると、非常に密になる
- 2) 平均すると大きな粒子であり、細粒分は少ない。⇒排水

■ Rockfill ダムの盛土材料として適切なのは、大粒径、大きな均等係数の材料（何故？）

■ a, b, c: 自然の河川、海岸堆積した砂・粘土は、堆積時に分級(segregation)している。

河川堆積層； 洪水(流速大、大粒径のものが堆積)・高水位・低水位（流速小、小粒径のシルト・粘性土が堆積）の繰り返しにより異なる粒径の薄い堆積層の繰り返し。



このように sampling してから、
粒度試験をすると、d のようになり、実態から離れる。

●Port Island の埋め立て層と旧道路橋耐震設計示方書物語：

- 1) D_{50} が 2 mm 以上の礫は、液状化しにくい、としていた。e のような礫を想定していた。理由は、礫は一般には透水係数が高く、地震時に正の過剰間隙水圧が蓄積しにくく、従って液状化しにくいから。
- 2) Port Island の埋め立て土。液状化した。阪神高速道路の基礎杭、caisson 基礎に大被害。桁の落下。
- 3) 地震後の担当技術者の言い訳。この埋め立て土の D_{50} が 2 mm に達するものもあった（大多数ではない）。上記示方書に従って、液状化しないと判定した。
- 4) しかし、上記示方書の精神は、「透水係数が高く、地震時に正の過剰間隙水圧が蓄積しにくいような礫は液状化しにくい」。条文の下に書いてある解説には、この点を説明してある。また、不明なときは、よく調査しなさい、とも書いてある。事実、その後類似のまさ土を用いて埋め立てた御坊の関西電力埋め立て地、関西空港の埋め立て地等は、液状化の虞れありとして、締め固めている。
- 5) 示方書を書いたとき(1976 年頃；龍岡 20 歳代後半)は、このような well-graded の礫に近い土で液状化の可能性を考慮する必要があるような地盤の存在をあまり想定していなかった。これは、この

1.2 土の粒度

ような粒度を持つ自然状態の土は通常古い地盤（洪積世以前の河川敷・泥流跡）であり非常に密であり、また液状化した例は無かったからである。従って、不十分な規定と言える（これは反省点）。

- 6) 現在まで、改訂済み。 $D_{50}=2\text{ mm}$ の制限は無くした。「 D_{50} が 10 mm 以下で、かつ D_{10} が 1 mm 以下の土層は液状化の判定をする必要がある」と変更。しかし、無駄な地盤調査が増える結果になっていると思う。
- 7) NHK 等の記者が私を非難。しかし、技術者は万能（神）ではない。全力と誠意を尽くして判断したことは、犯罪ではないと思う。

1. 3 $\pm$ の consistency

- 1) 液性限界、塑性限界の含水比： どのような粘土か、例えば、どの程度**粘土ばい**か（**水を保持する能力があり、粘土細工が出来るような形を作る力がある**）を、表現するための手段である。粘土の変形・強度特性を直接表現していないが、その良い指標((Index)である。一方、砂礫では、個々の粒径の測定は面倒であり、それを基本にして分類作業はできない。従って別の Index が必要となる（即ち、相対密度）。

2) consistent $\rightarrow$ consistency

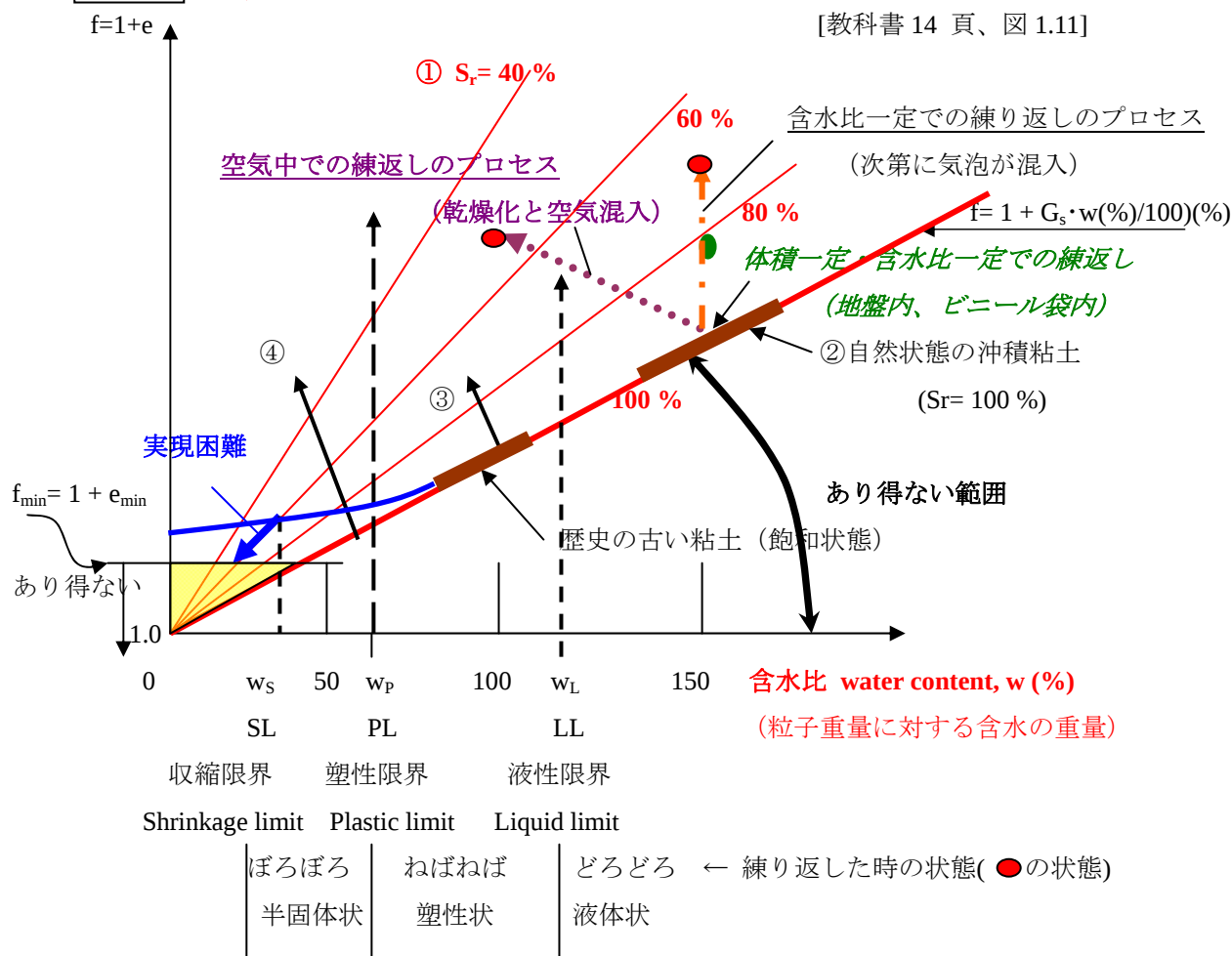
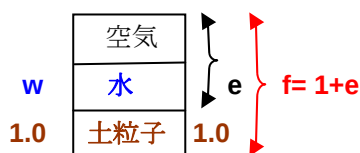
- a) the state of always keeping to the same principles or course of action. 一貫性
b) the degree of firmness 堅固さ、stiffness 硬さ or thickness。地盤工学では、こちらの意味で用いる。

3) 体積比 $f = \frac{V}{V_c} = 1 + e = 1 + \frac{G_s \cdot w}{S_r} \approx 1 + \frac{2.7 \cdot w(\%) }{S_r(\%)}$ (粒子体積に対する土粒子体積の比) ①の関係

$$\text{Refer to; } e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w \cdot S_r}}{\frac{W_s}{\gamma_s}} = \frac{\gamma_s \cdot W_w}{\gamma_w \cdot W_s} = \frac{G_s \cdot w}{S_r} \approx \frac{2.7 \cdot w(\%)}{S_r(\%)}$$

$$S_r = V_w/V_v, \quad \therefore V_v = V_w/S_r = W_w/(\gamma_w \cdot S_r)$$

$$V_s = W_s / \gamma_s$$



1.2 土の粒度

$f_{\min}$: 完全な乾燥状態あるいは飽和状態であり suction が zero の状態でも、どのような方法を用いても、これ以上粒子を密に詰められない限界。

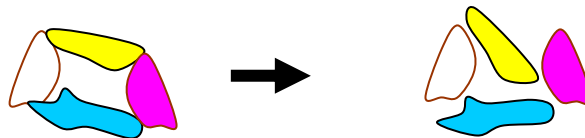
- 砂では、乾燥していたり、完全飽和していれば、この状態になることは可能である。
- しかし、飽和粘土では、炉乾燥をしない限り、間隙水を完全に追い出すのは困難なので、 $f_{\min}$ に近づくのは実際には困難。
- 不飽和粘土でも、粒子間に強い suction が作用するので、 $f_{\min}$ まで締め固めるのは不可能。

②自然状態の粘性土； $w_n > w_L$ であっても、地盤内では周囲の粒子と接触して粒子間力が発揮されていて有効拘束圧によって拘束されている。また、海底堆積の軟弱粘土には粒子間にセメンテーションが若干存在していることがある。無い場合でも、電気的な力で引きつけ合っている。従って、安定していて、液体状ではない。

しかし、 $w > w_L$ で、**体積一定・含水比 w 一定（あるいはそれに近い状態）の状態**で練返すと、

- ・粒子間セメンテーションが破壊。
- ・粒子が間隙水内に浮いた状態（有効拘束圧はゼロの状態）になりうる。

→ドロドロの液体状になる



- ・**空気中での練り返し**：空気を含みながら、体積が増加しながら練り返される。多少空気が混入して、粒子間が suction により引き寄せられる。しかし、粒子間の噛み合わせが基本的に無いので、含水比が高いと、どろどろの状態になりうる。

例1) 関東ローム；

+自然状態； $w_n = 120\%$, $S_r \sim 100\%$ 、地下水位以上でも $S_r > 90\%$ のことが多い。

粒子間にセメンテーションあり。2階建ての日本家屋程度ならば、深い基礎など不要（我が家）。

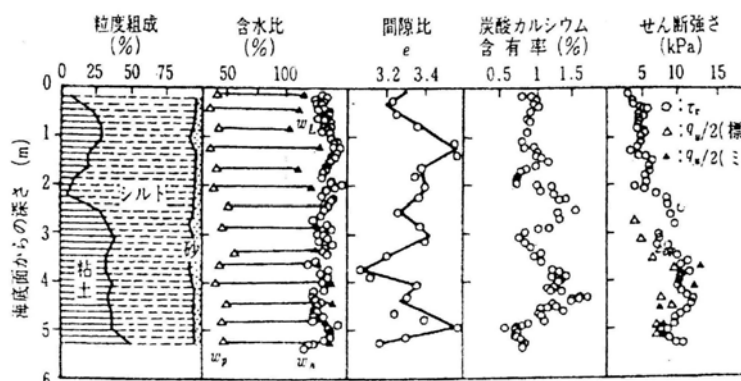
+ $w_L = 85\%$ 程度で、 $w_n > w_L \rightarrow$ 練り返して粒子間のセメンテーションを破壊すると、ドロドロになる。

歩くのも大変になる。富士山周辺の中央高速道路建設での盛土工事：難工事

例2) 図参照： 自然の海底粘土でも、 $w_n > w_L$

羽田飛行場の埋め立て。海底面近くの沖積粘土。練り返すと液体状になる。マヨネーズと命名。

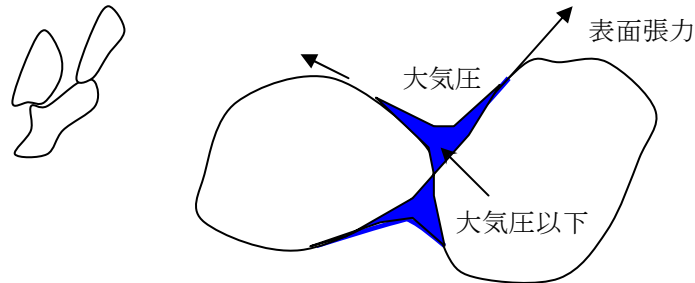
工事に大支障。大規模地盤改良（排水工事、セメント混合）。マヨネーズ協会から抗議文。



③ $w_L > w > w_P$, $S_r = 100\%$ の状態からの練り返し。

a) 練り返しとともに、若干乾燥し、空気混入。

- ・ 間隙比が小さくなっているので、練り返しても、粒子の噛み合いが完全には外れない。
- ・ 混入した空気が作る *meniscus* が、粒子を引きつける*。



この二つのメカニズムで、構造力ができる。

- ・ 陶芸、粘土細工が出来る状態。

b) 粒径が小さいほど、単位面積当たりのこの力*が強くなるから、より広い範囲の含水比で「**塑性状態**」を作れる。

- ・ 特に、粒径が小さいほど高い含水比でもドロドロになりにくい。液性限界が大きい。つまり、粘土っぽい。

c) 塑性指数(plasticity index); $I_p = w_L - w_P$ [w_L と w_P は % 表示であるが、 I_p には % はつけない]

PI が大きいほど、粘土っぽいとも言える。PI の大きさは粘土の血液型。

④ w_P (塑性限界) $> w > w_S$ (収縮限界)。

仮に、 $S_r = 100\%$ の状態から出発しても、

空気中で練り返えすと空気が浸入する。しかし、粒子間を表面張力でつなぎ止めておくほど十分な水がない。

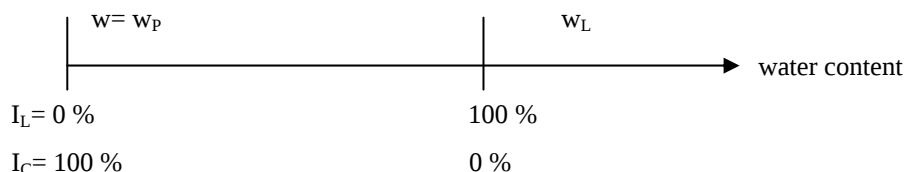
- ・ 粒子が分離して、ボロボロの状態になる。

液性指数(Liquidity index);

自然の状態の粘土が、練り返され乱されるとどうなるか、という指標

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} \times 100\%$$

$I_L > 100\%$ だと、練り返すと液体状になる。(東京湾の海底の粘土は、 $I_L > 100\%$)

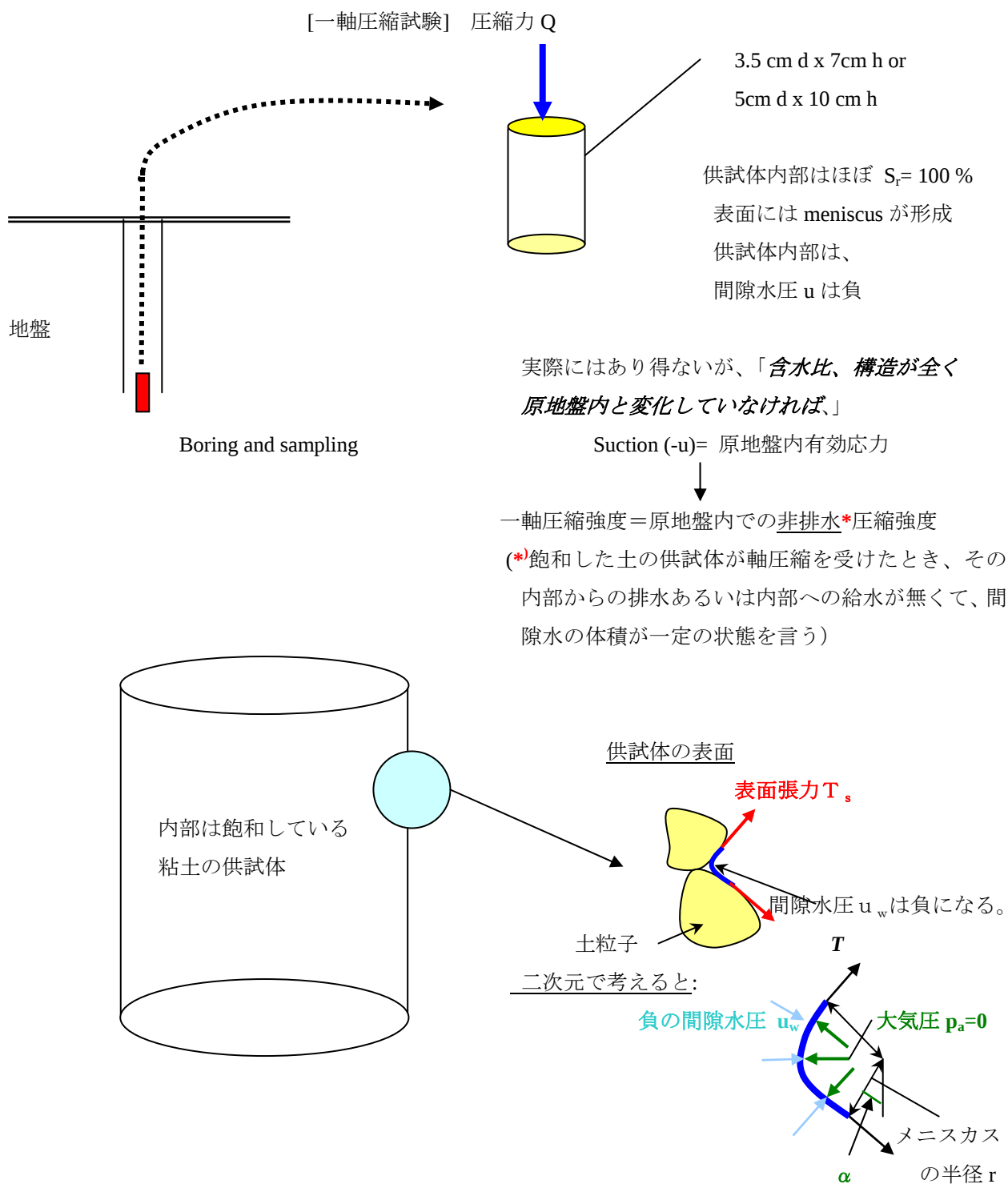


Consistency index; $I_C = [w_L - w] / [w_L - w_P]$: 日本語無し。あまり使われない。

土の液性指数 演習[1]

ある粘土の塊の重量 W は 400 gf であり、炉乾燥した後の重量は W_s は 300 gf であった。一方、この粘土の塑性限界 w_P は 12% であり、液性限界 w_L は 25 % であった。液性指数と塑性指数はそれぞれいくらか？
また、この粘土塊を空気中で練り返すとどのような状態になるか？

1.3.5 鋭敏比 (Sensitivity ratio)



(絶対圧としての間隙水圧) $u_w = p_a - T_s/r$,

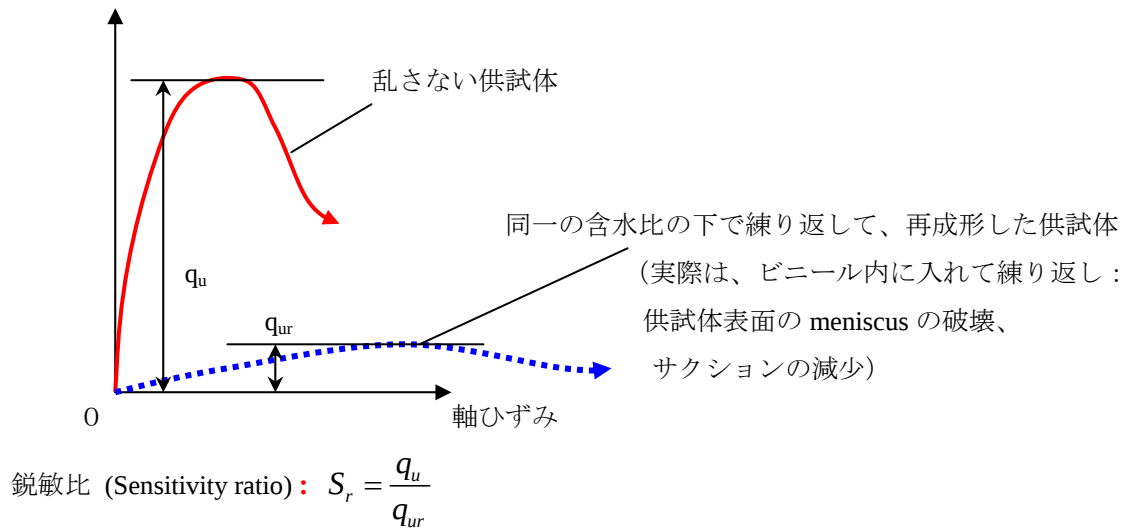
(Gauge 圧としての間隙水圧) $u = -T_s/r$

$$(p_a - u_w) \cdot 2 \cdot r \cdot \cos \alpha = 2 \cdot T_s \cdot \cos \alpha$$

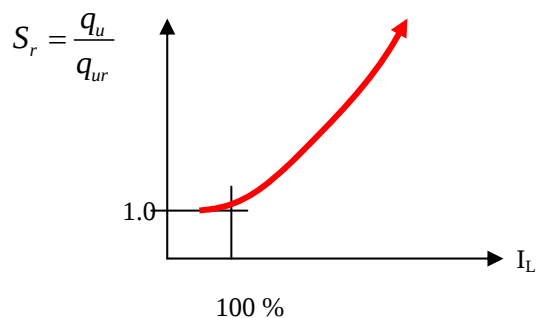
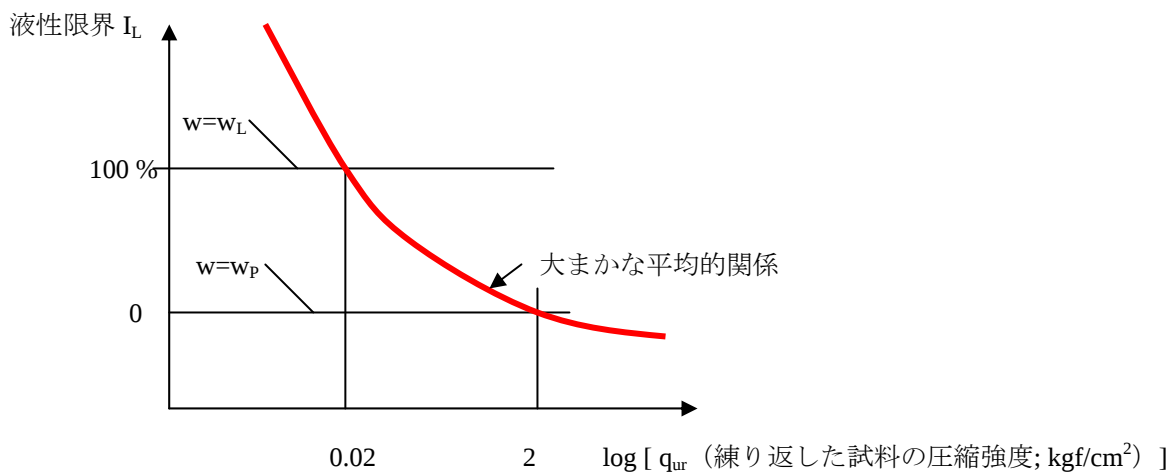
同じ T_s に対して、 r が小さいほどサクション $(p_a - u_w) = (-u)$ は小さくなる。

1.2 土の粒度

圧縮応力 $q = Q / (\text{供試体断面積})$



→ 鋭敏比が高いほど、一定含水比で乱されると、より液体状になりうる。

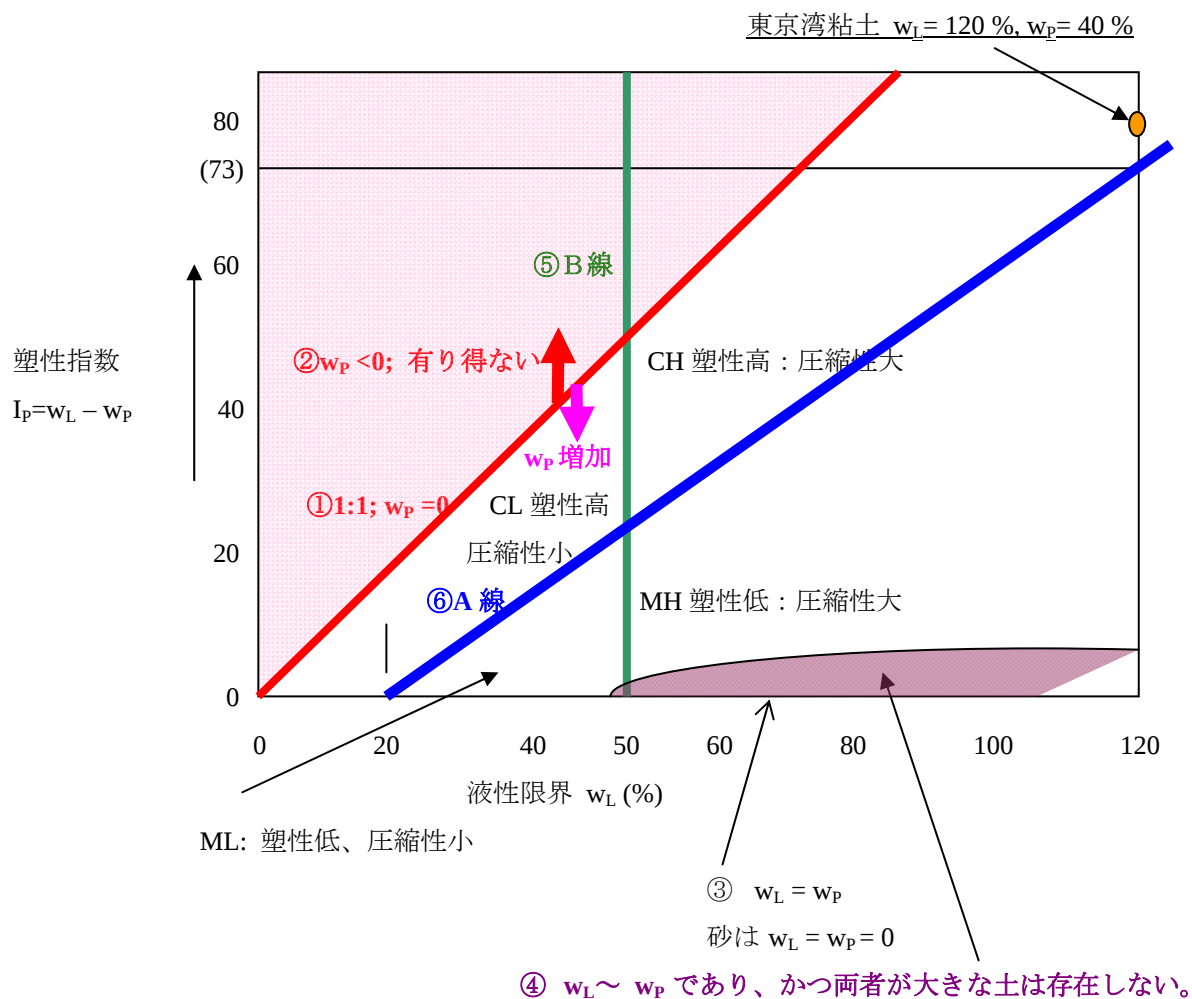


I_L が大きい粘土を練り返すと、より液体状になる。

極端な例) Norway の Quick clay; I_L : 3 以上、 $S_t=500$ →

Norway の Quick clay の崩壊 (例) : 平和な牧場が、小さな掘削が原因で、地盤がまるで液体のように流れて行く信じられない様子を記録した珍しい Video。

図 1.17; 塑性図： 粘性土の分類；どんな粘土かの大略的表現のため（Casagrande の提案）



⑤粘土の状態は、現在の含水比に左右されるので、塑性図状で同一位置にある粘土でも、含水比が異なると異なる挙動をする。しかし、自然状態の軟弱沖積粘性土は、自然含水比 $w_n \sim w_L$ であることが多い。従って、通常は w_L が大きいほど、 w_n が大きい。→ 自然含水比 $w_n \sim$ 大きな w_L であれば圧縮性が高い。

B線： $w_L = 50\%$ ；土の圧縮性の境界。

B線より左 L: Low compressibility

B線より右 H: High compressibility

⑥ 塑性指数 I_p が高いほど、塑性状態にある含水比の範囲が大きい → より粘土っぽい。

A線: $I_p = 0.73(w_L - 20)$: w_L が大きくなると I_p が大きくなる

自然含水比 $w_n \sim w_L$ である時、

A線より上：高塑性粘土 C: clay 粘土っぽい。

A線より下：低塑性粘土 M: Mol シルトっぽい。粘土っぽくない。

同一地層で自然状態にある軟弱粘土；A線に平行に分布することが多い。

$dw_L/dw_P = 1/0.73$ ； w_P が大きくなると I_p は大きくなる。しかし、 w_P の増加率よりも w_L の増加率の方が大きい。従って、 $I_p = 0.73(w_L - 20)$ 。勾配は 1.0 よりも小さい 0.73 である。

1.4 相対密度(relative density) :

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 (\%)$$

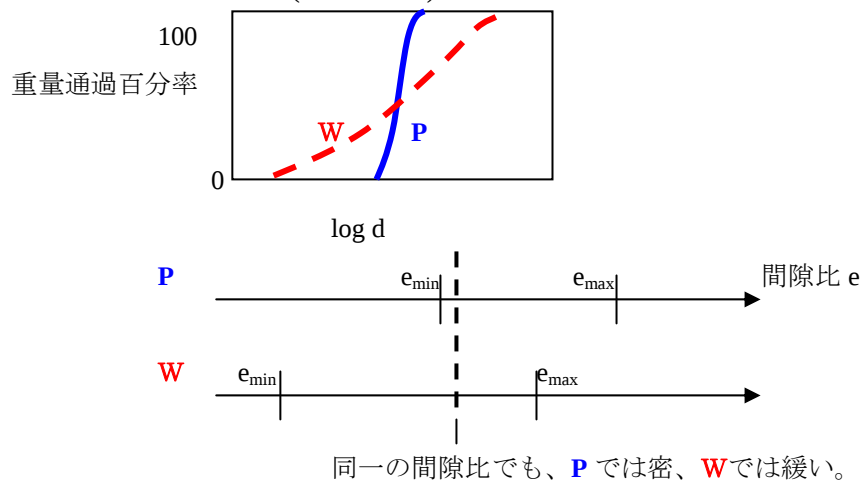
・液性指数で砂礫の締め具合（密度の程度）を概略分類しようとする、全て $NP(w_L \sim w_P \sim 0 \%)$ があるので、分類不能。

・液性指数に対応するのが、相対密度。

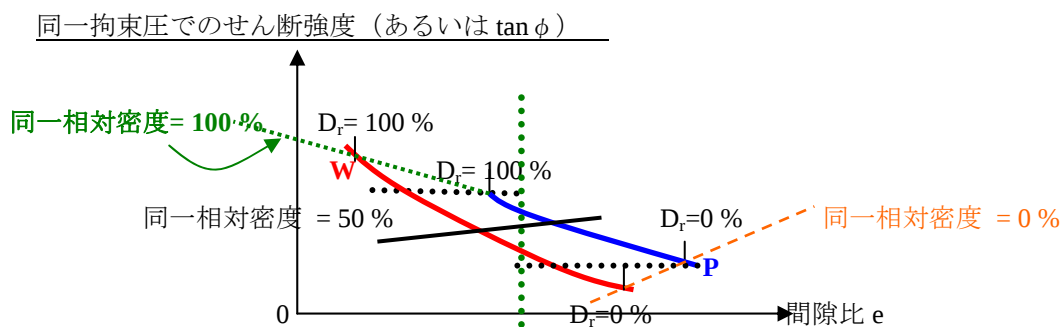
塑性限界 $w_P \rightarrow$ 最小間隙比 $e_{\min}$; 最も密な状態の間隙比

液性限界 $w_L \rightarrow$ 最大間隙比 $e_{\max}$; 最も緩い状態の間隙比

・砂礫の締め具合を表現する目的に対して、間隙比の値そのものよりも、相対密度の方が相当まし(much better)。



・しかし、絶対的なものではない。即ち、相対密度で砂礫の変形・強度特性等の物性の大略は分かるが、正確には分からない。

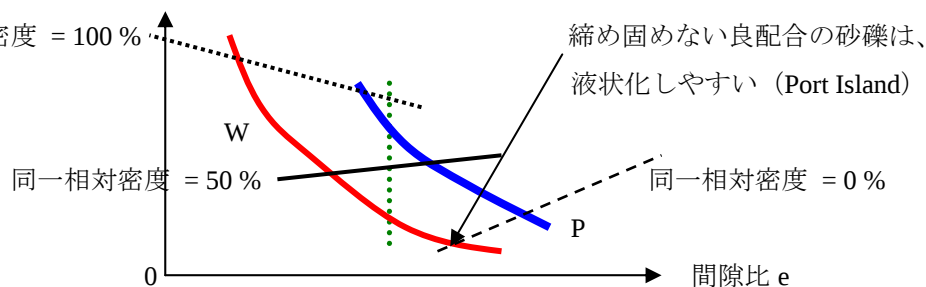


- 1) 同一間隙比では、**W**の方が**P**よりも弱い。
- 2) 即ち、異なる砂の強度を推定する場合、通常密度では、間隙比よりも、相対密度の方がまし。
- 3) しかし、 $e = e_{\min}$ では、**W**の方が**P**よりも強い。締め固める場合、**W**の材料の方が良い（但し、適当に粒径が大きくて、排水性が高い必要がある）。
- 4) また、 $e = e_{\max}$ では、**W**の方が**P**よりも弱い。

非排水状態での液状化に対する抵抗（これだけの強さの地震力が来たら液状化する）。

この場合も、間隙比よりも相対密度の方がまし。

同一相対密度 = 100 %  締め固めない良配合の砂礫は、

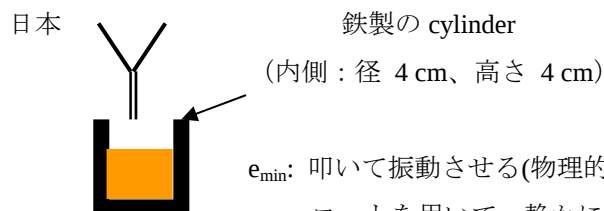


$e = e_{\min}$ では、Wの方がPよりも強いが、同一間隙比では、Wの方がPより弱い。

相対密度を求める上での諸問題点

- ・ $e_{\max}$ と $e_{\min}$ をどうやって求めるのか。

- a) ある規定された方法で測定する。しかし、国によって求め方が異なる。

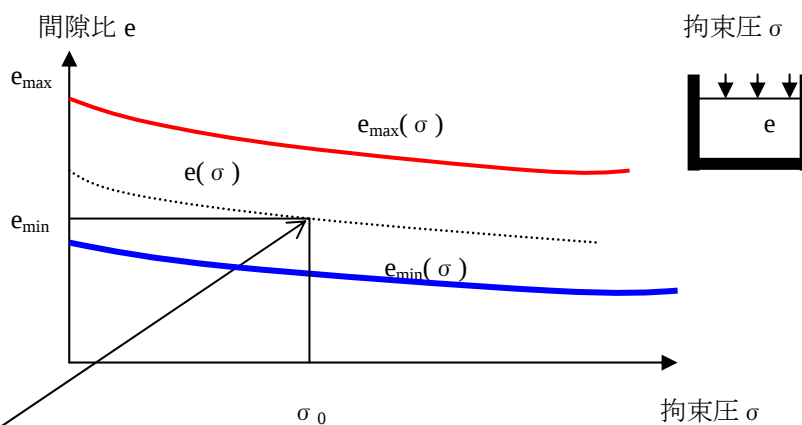


$e_{\min}$: 叩いて振動させる(物理的に可能な最小間隙比ではない)。

$e_{\max}$: ロートを用いて、静かにそそぎ込む

(物理的に可能な最大間隙比ではない)。

- b) 一般に拘束圧が無い状態で $e_{\max}$ と $e_{\min}$ を求める。しかし、間隙比は拘束圧 σ の増加とともに減少し、 $e_{\max}$ と $e_{\min}$ である間隙比は、拘束圧が高いほど、減少する。



原地盤内でこの状態にある砂は、無拘束状態での $e_{\max}$ と $e_{\min}$ を用いると相対密度はかなり大きく、かなり密であると判定される。しかし、拘束圧 σ_0 の下では、それほど密ではない。Uc が大きいほど、拘束圧の増加による間隙比の減少の度合いは大きく、上記問題が顕在化する。

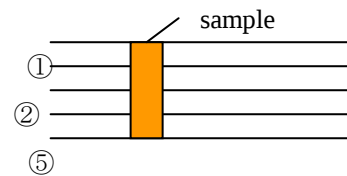
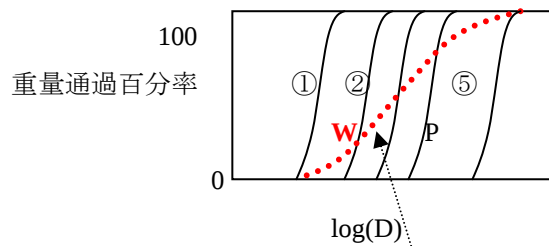
●拘束圧 σ の影響を考慮した相対密度 $D_r(\sigma) = \{e_{\max}(\sigma) - e(\sigma)\} / \{e_{\max}(\sigma) - e_{\min}(\sigma)\} \times 100 (\%)$

を用いるべきであるという意見もあるが、測定が面倒。

1.2 土の粒度

c) 貧配合の薄層の相対密度を求めるのは面倒。

・

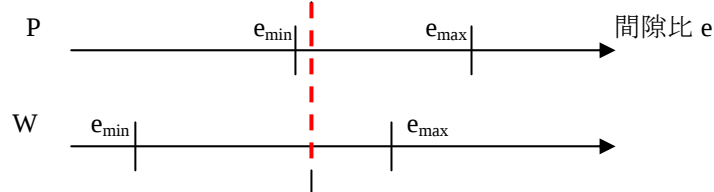


原位置で、薄い層が層構造を作っている場合。

各層が poorly graded でも、それらをまとめてサンプリングして、粒度試験、密度試験をしてしまうと。

→ well graded soil と誤判定される (下図のような判定になる)。

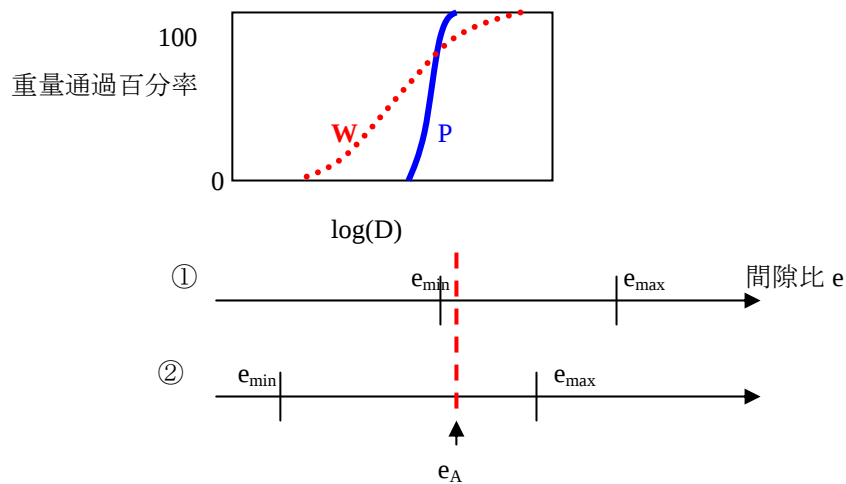
→ 相対密度の過小評価がされる。



平均間隙比に対して、緩いと判定される。 $D_r < 0\%$ もあり得る。

相対密度演習 [1]

良配合の土(W)と貧配合の土(P)がある。下記の①と②には、それぞれ W と P のどちらの種類の土の間隙比特性を表しているのかを示せ。同一の間隙比 e_A での土の相対密度(%)の概略値を示せ。



1. 5 土の工学的分類

- ・分類しても、それだけでは本質に迫れないが、分類は学問の入り口。

植物学、動物学、精神学を見よ。 血液型のようなもの。

- ・礫、砂、シルト、粘土、と言う分類は粗っぽすぎる。また、この分類では、大小の粒径が混合している場合は、どうした良いか分からなくなる。

- ・注意することは、「**同一の分類名でも、締固めの程度、含水比、飽和度によって土の変形・強度特性等は全く異なる**」、ということである。

→従って、土の工学的分類だけで、土の強度を必要とする安定計算等の設計計算はできない。

しかし、土という材料を用意しようとする立場、また判定する立場には、極めて有用である。

- ・良い分類法とは、

a) 同じ名前(label)の土は、大体同じ様な工学的性質を持つ（例えば、締固め易い・にくい、相対密度が 100 % ならば大体この程度のせん断強度、硬さを持つ等の類推が出来る）。

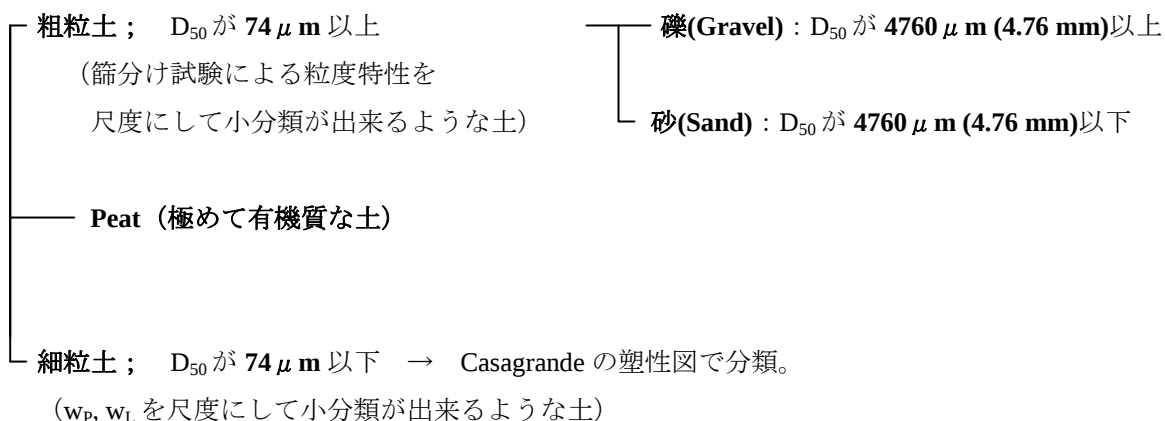
b) 簡易な方法で分類が可能。

c) 個人差が出にくいこと。

例) 鉄道・道路の盛土には、これこれの土を用いなさい。これこれの土は用いてはいけません、と言う規定になっている。

(例、M, O, C は用いてはいけない。締固めにくい、従って弱く、変形性の高い状態になりやすい)。

統一分類法



小分類

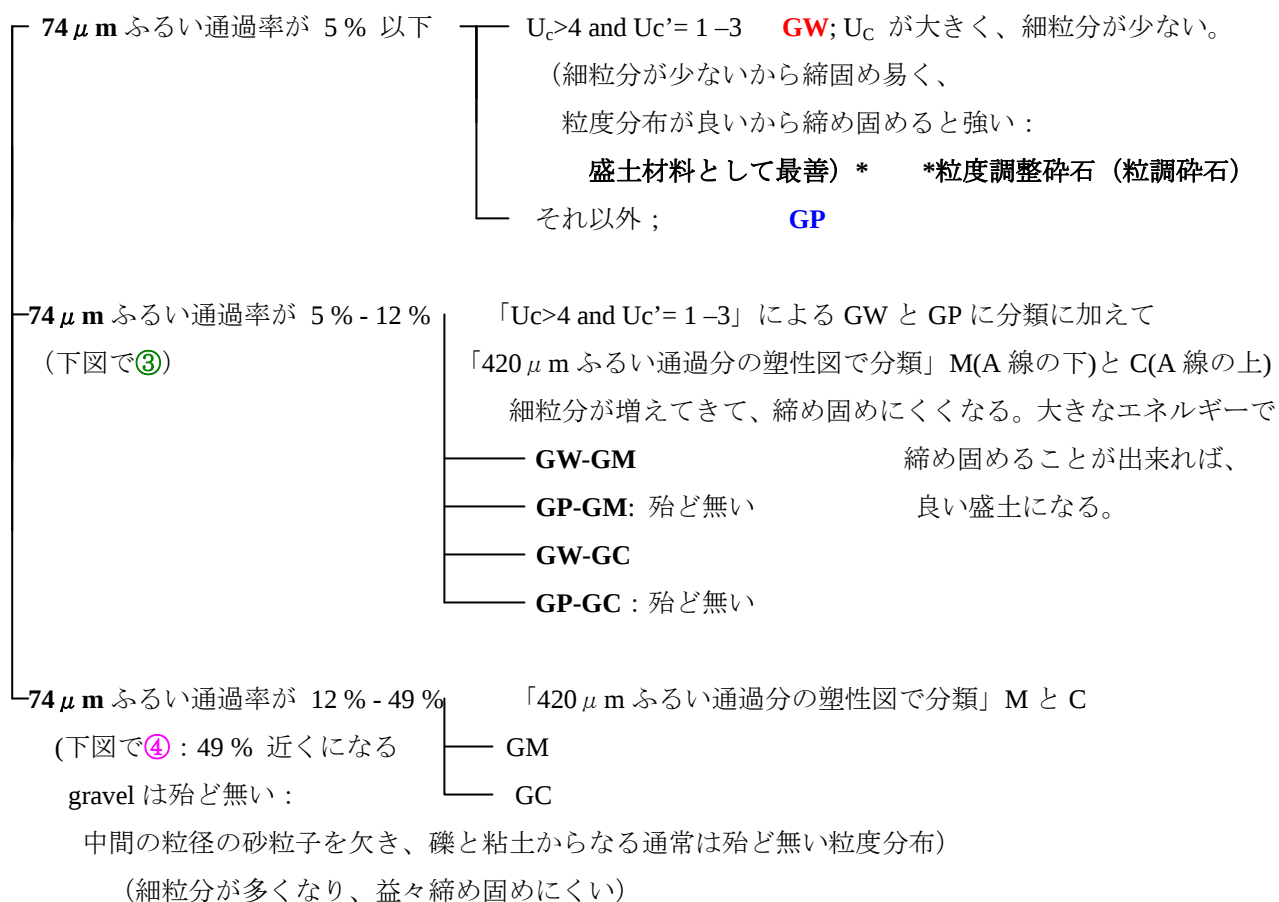
[礫(Gravel) : D_{50} が $4760 \mu\text{m}$ (4.76 mm) 以上] を、細粒分の含有率によってさらに細かく分類

理由： 粒径が小さいと 比表面積、粒子数／単位重量 が飛躍的に大きくなり、少ない重量でも小粒径の土の性質が土全体の性質（例えば、締め固め易さ、透水性等）を支配するようになる。

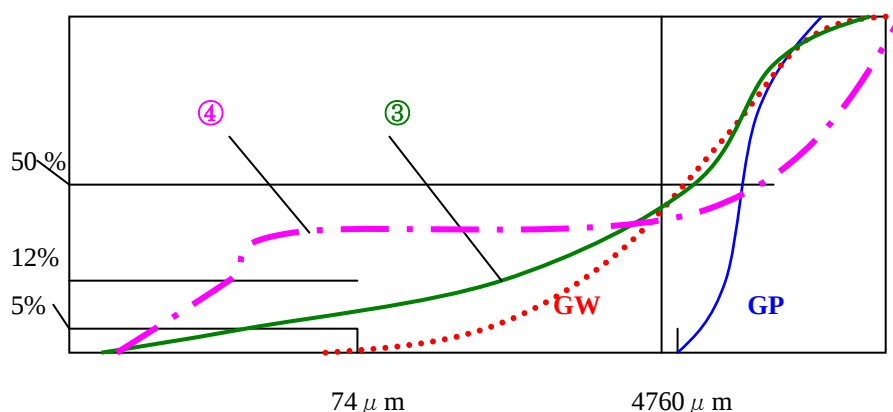
例) $D = 4760 \mu\text{m}$ (4.76 mm) と $74 \mu\text{m}$ (0.074 mm)

粒子数の比率 2.66×10^5 倍、 比表面積： 64 倍。

このような小粒径の土の混合率を考慮できる分類法が必要となる。



$U_c' = D_{30}^2 / (D_{10} \cdot D_{60})$: 曲率係数； これが大きいくほど、細かい粒子が相対的に多い (図 1.10)



[砂(Sand) : 4760 μ m ふるい通過率が 50 % 以下以上]を、細粒分の含有率によってさらに細かく分類

