

【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。

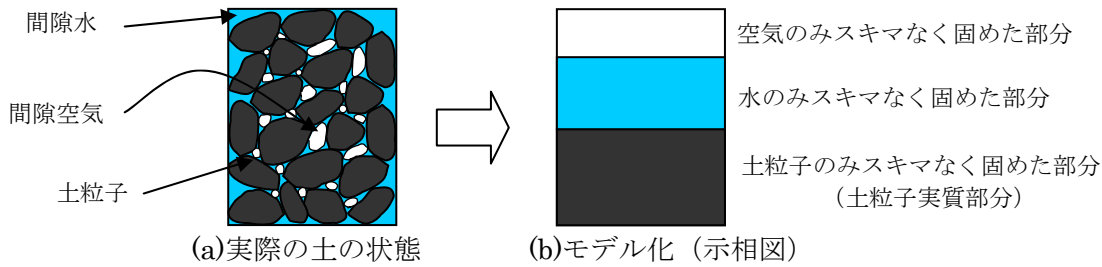


図 1: 示相図によるモデル化

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。

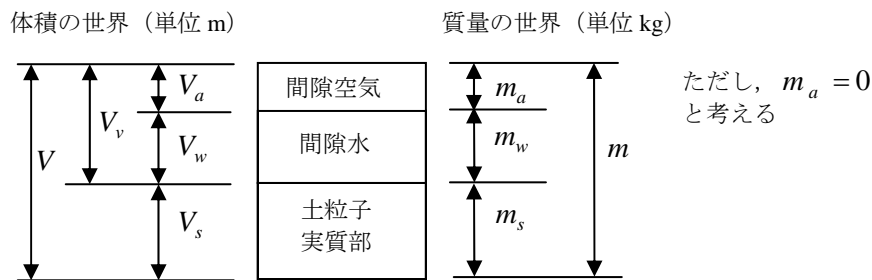


図 2: 体積と質量に関する基本的な諸量の定義

● 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。

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

- 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

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

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

(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

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

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

密度どうしの割合：「比重」

$$\text{比重} \quad : G_s = \rho_s / \rho_w$$

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

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

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

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)

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

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

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

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

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、空気の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れば難しいものではない。

①土の湿潤密度

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

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

②土の乾燥密度

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

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

①の飽和度 0% ($S_r = 0$) の場合と考えるても良い。

③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）

①の飽和度 100% ($S_r = 1$) の場合と考える。

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

④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。

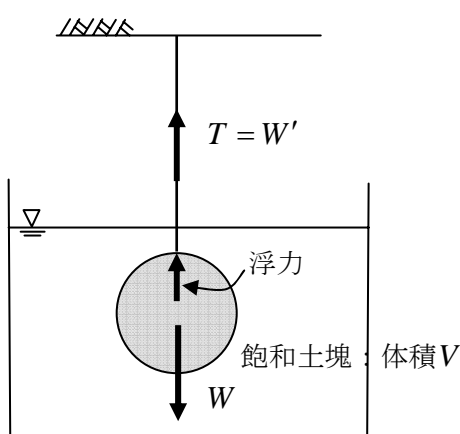


図3

モデル化

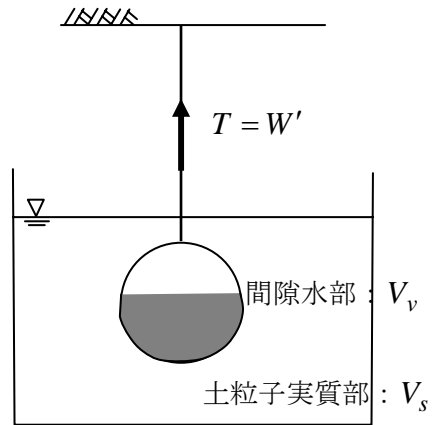


図4

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、

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

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

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

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

$$\text{したがって, } 1+e = \frac{G_s(w+1)(1+e)}{G_s + S_r \cdot e} \quad \rightarrow \quad G_s + S_r \cdot e = G_s(w+1) \quad \therefore S_r \cdot e = G_s \cdot w$$

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

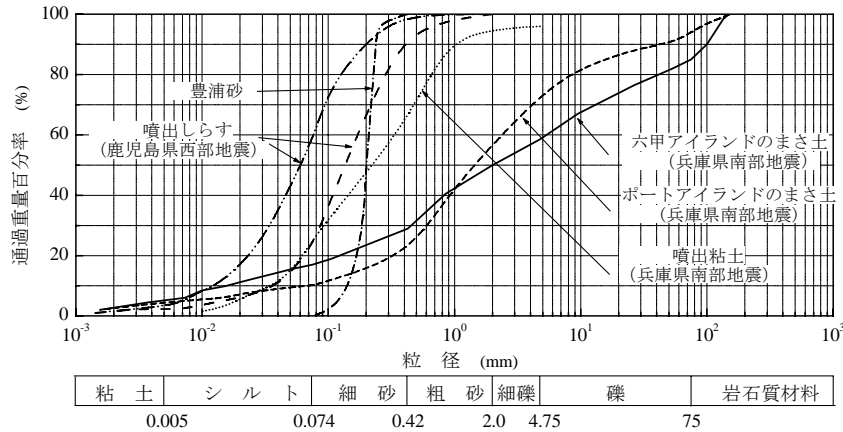


図 6：実際の土の粒径加積曲線の例

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

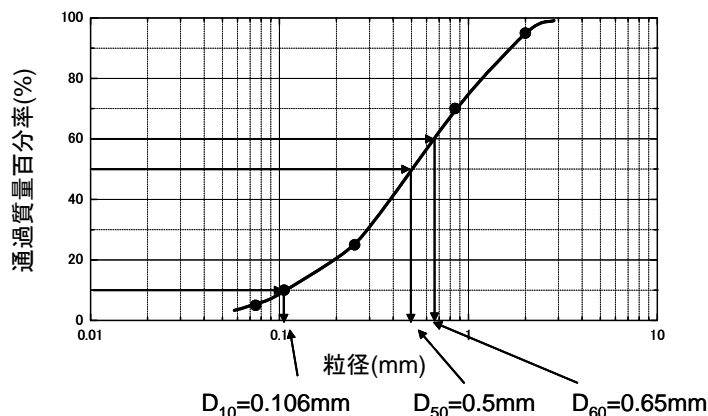
U_c が大きい土

- ・ 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 75 μ m 以上の土が 50% を超える (細粒分 < 粗粒分)

細粒土 75 μ m 以下の土が 50% 以上 (細粒分 \geq 粗粒分)

高有機質土 (ピート)

人工材料

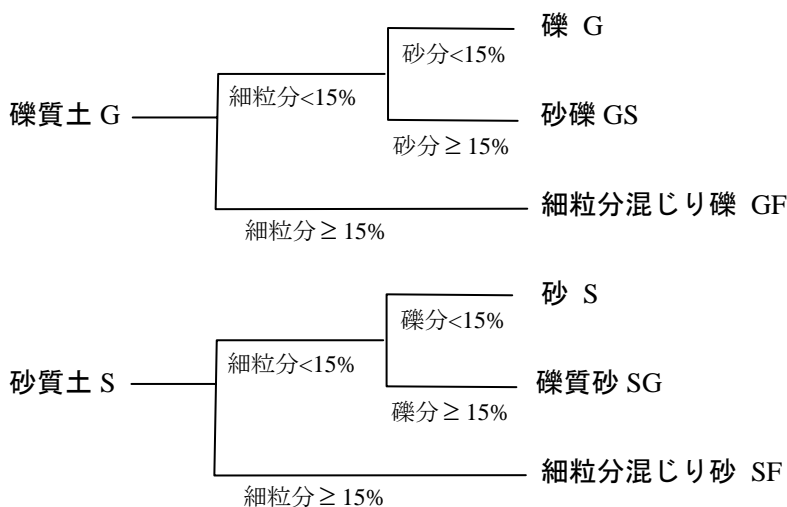
性質が異なる

粗粒土 — 礫質土 G (礫分 > 砂分),
 — 砂質土 S (砂分 \geq 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 (75 μ m 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。

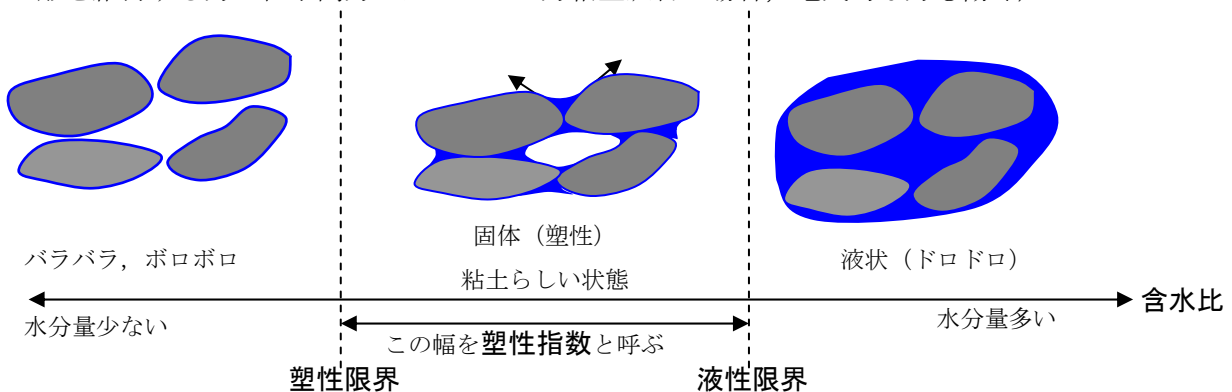
粘土の先天的な性格を表すインデックス：塑性限界、液性限界、塑性指数

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)

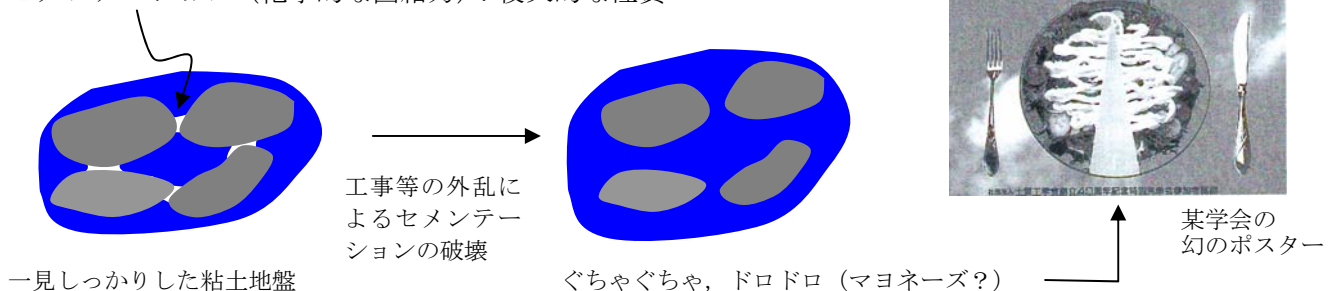
自然含水比と塑性限界、液性限界を見比べれば、その粘土がどのような状態 (ボロボロ、ほどよい、ドロドロ) にあるのか想像がつく。

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



一見しっかりした粘土地盤

ぐちゃぐちゃ, ドロドロ (マヨネーズ?)

某学会の
幻のポスター

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)

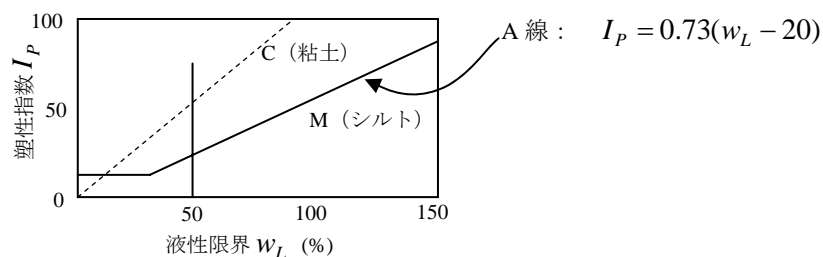
→対象とする粘土の流動しやすさを表すインデックス

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。

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

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

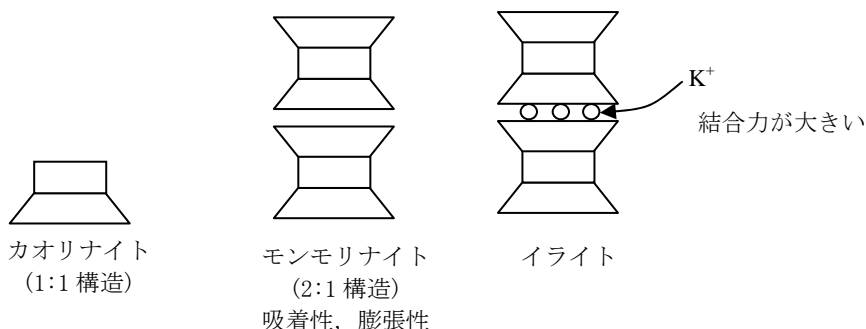
粘土鉱物 カオリン鉱物群 (例: カオリナイト)

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
 $\text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mg}^{2+}$



【土の締固め】

(1) 飽和土 (あるいは乾燥砂) と不飽和土

土は土粒子と土粒子の間隙の中の水と空気の 3 つの要素で構成されている。一般に、不飽和土の場合、「サクション (負圧): ※次節で説明」の効果により、間隙が完全に水に満たされた飽和土や間隙に全く水が無い乾燥砂に比べて見かけの「粘着力」が発生する。

(2) 不飽和土におけるサクション

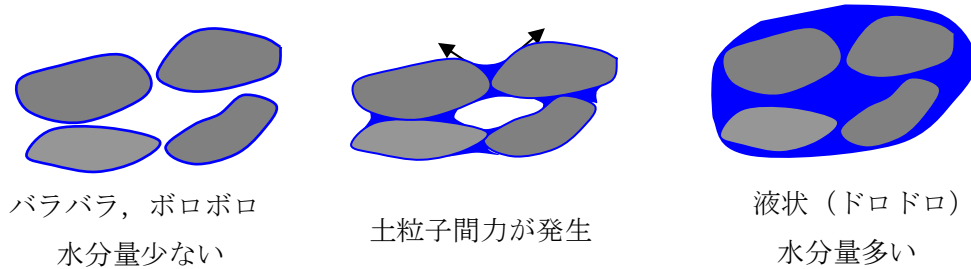


図 1 含水量による土粒子の付着の違い

粘土の塑性限界, 液性限界を勉強した時に, 粘土のコンシステンシーは土粒子と水との混合割合によることを理解したが, 粘土よりもっと粒径の大きな土であっても, この土粒子と水と (正確に言えば空気と) の混合割合により, 変形やせん断の性質が変わる。その原因は, 土粒子間に適度に付着した間隙水の表面張力による。中央の図のように, 土粒子間の付着水にメニスカスが出来ている場合には, 水には表面張力が作用している。右図のように, 水面に細いパイプを立てた場合には, 毛管作用によりパイプ内の水面は上昇する。これはパイプ内に出来たメニスカスにより, 水に表面張力 $T(N/m)$ が生じるために, 水圧と大気圧との間に圧力差が生じることによる。すなわち, パイプ内で考えると,

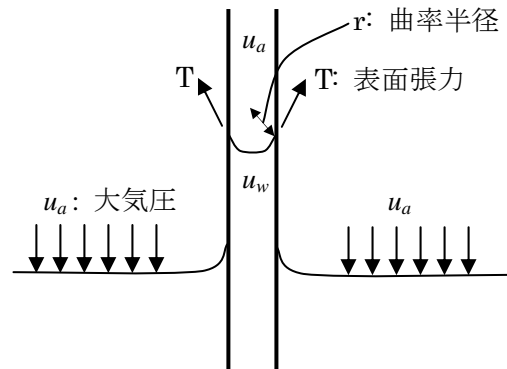


図 2 細いパイプ内の毛管水

$$u_a - u_w = \frac{2T}{r}$$

となり, 明らかにパイプ内の水圧は大気圧 (=0) より低くなり, 水圧は負の圧力 (負圧) となる。このような圧力差が, 土粒子に付着した間隙水と空気圧との間に生じる場合には, 間隙水は土粒子同士を吸引する力を発生することになる。実際の土粒子間の付着水のメニスカスは, パイプ内よりも複雑な形状であるが, 原理は同じである。この間隙空気圧 (一般には大気圧) と間隙水圧の差を「サクション」と呼ぶ。

(3) サクションと土の締固め

海辺の砂浜でトンネルが掘れるような丈夫な砂山を作るコツは, いかに丁度良い具合に砂を湿らすかであったはず。湿らす程度が少ないとバラバラになるし, 湿らせすぎるとドロドロになってしまう。適度な湿り気を持たせて締固めることによってできた土塊において, その土塊を構成するそれぞれの土粒子間の

結合力は、主にサクシオンによって成り立っている。サクシオンは土粒子間のメニスカスの形状に依存するので、土粒子の粒径、土粒子間の距離（すなわち詰まり具合）、そして水分の量が密接に関連しあって、結合力であるサクシオンが決まる。そのため、サクシオンは土の締固めにとって、非常に重要である。

(4) 突固め試験と最適含水比・最大乾燥密度

締固め土塊の粒子間に働くサクシオン云々の理屈はともかくとして、実務ではより高性能な締固め土塊をつくらなければならない。高性能な土塊とは、硬く（すなわち剛性が高く変形性が小さい）、壊れにくい（すなわちせん断強度が大きい）ものである。結局、そのような高性能な土塊とは、土粒子がぎっしりと詰まっており、間隙が少ない土塊とすることができる。

プロクターは、同じ粒度の土を様々な含水比に調整したものをを用いて、締固めて土塊を作る実験をした結果、最も密詰めにするための最適な含水比があることを見いだした。これをプロクターの指導原理と呼び、土質力学の三大原理のひとつに数えられる。

突固め試験（締固め試験とも呼ぶが正式名称は突固め試験）

右図に示すモールドとランマーを用いて行う。モールドの大きさは土の粒径によるが、それほど大きな粒径の土を用いる場合でなければ、通常は直径10cmのものを用いる。ランマーの質量は標準で2.5kgのものを用いるが、高い安定性を必要とする構造物のためには、4.5kgのものを用いる場合もある。締固める土は、モールド内に3層に分けて入れ、それぞれの層に対して15回ずつ、高さ30cmからランマーを自由落下させることにより突固める。土の種類によって、1層あたりの突固め回数を変えることにより、締固めエネルギーを変えて実験を行う。



土の密詰めの度合いを表すための尺度は、間隙比、相対密度、乾燥密度などあるが、締固めの管理では乾燥密度 ρ_d が用いられる。

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} = \frac{\rho_s \cdot V_s}{V} = \frac{\rho_s}{V/V_s} = \frac{\rho_w \cdot G_s}{(V_s + V_v)/V_s} = \frac{\rho_w \cdot G_s}{1 + e} = \frac{\rho_w \cdot G_s}{1 + G_s \cdot w / S_r} \quad (\because G_s \cdot w = S_r \cdot e)$$

$$\therefore \rho_d = \frac{\rho_w \cdot G_s}{1 + G_s \cdot w / S_r} \quad (1)$$

乾燥密度 ρ_d を縦軸に、含水比 w を横軸において、式(1)をプロットすると図3に示すような曲線になる。ただし、2つの軸の変数以外に、もう一つのパラメータとなる飽和度 S_r が式(1)に含まれているために、同じ土だからと言っても、締固め曲線式(1)は唯一のものとはならず、条件に応じて何本にもなる。

図に示すように締固め曲線は上に凸の曲線になり、最大値をもつ。その縦軸の最大値を**最大乾燥密度** $\rho_{d \max}$ と呼び、その最大値を与える含水比を**最適含水比** w_{opt} と呼ぶ。すなわち、不飽和土を最も効果的に締固めるのに最適な含水量というものが存在することを表しており、砂浜の砂山で得た子供のころの経験を裏付けるものとなっている。

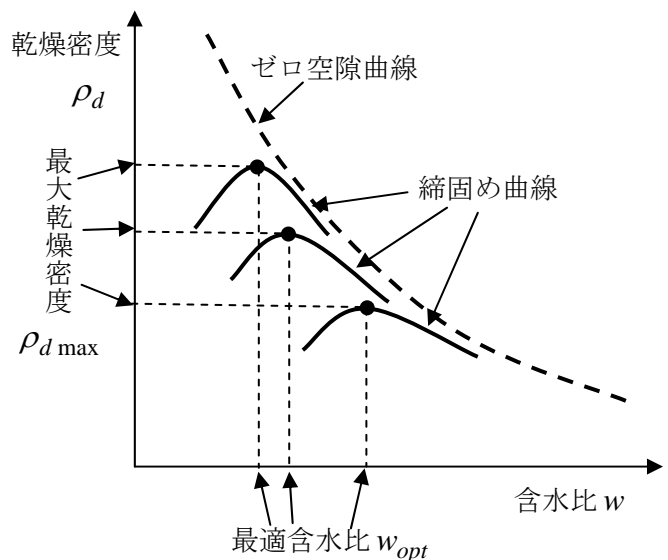


図3 締固め曲線

図3の締固め曲線は、最適含水比の時に最大乾燥密度となるが、それ以上含水量を増やしていく（すなわち図では右側にずれてゆく）と乾燥密度は低下してくる。その際、すべての締固め曲線はある曲線（図3中の太い破線）に漸近してゆくことがわかる。この曲線は、

$$\rho_d = \frac{\rho_w \cdot G_s}{1 + G_s \cdot w} \quad (2)$$

と表される。すなわち、式(1)の締固め曲線の飽和度 $S_r = 1$ （飽和土）の特別な場合に相当し、間隙がすべて水（飽和土）の場合に相当する。この場合、土によって比重 G_s は一定であるので、変数は ρ_d と w だけとなり、式(2)は双曲線になる。この式(2)の双曲線を、**ゼロ空気間隙曲線**と呼ぶ。先に「土によって比重 G_s は一定である」と述べたが、土粒子の比重は実はバラついたとしてもせいぜい2.5~2.8とかその程度の範囲であるため、ゼロ空気間隙曲線はどのような土であってもほとんど同じとなることに注意する。

(5) 締固め曲線が変動する要因

締固め曲線は、ゼロ空気間隙曲線に漸近して、何本も定義できるが、ではそのように何本にもなる要因には何があるのだろうか。要因は2つあり、1つは締固めるのに要するエネルギー（**締固めエネルギー**）であり、もう1つは締固める土の**粒度分布**である。

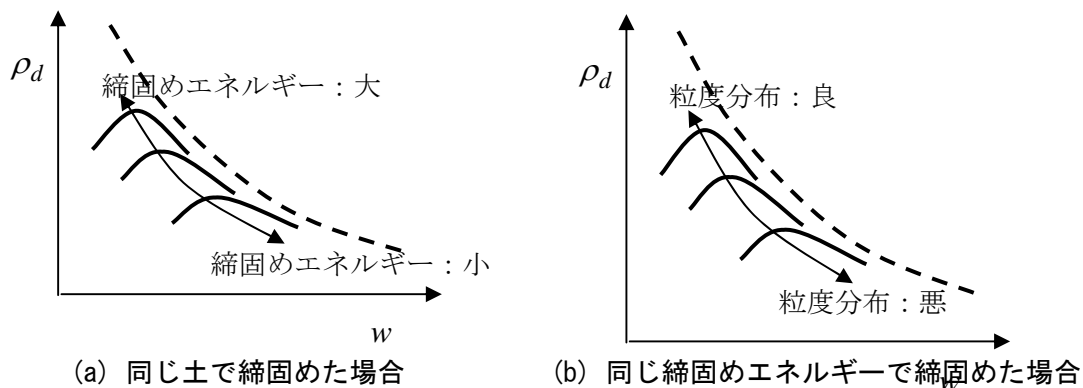


図4 締固め曲線の変動の要因

締固めエネルギーが大きく、また、粒度が良いほど、最大乾燥密度は大きくなり、それに応じて最適含水比は小さくなる。ちなみに粒度が良いとは、粒度分布（粒径加積曲線）が寝ている（様々な粒径の土がまざった）土のことであり、締固めをするのに「良い」ということである。

このように2つの要因により締固め曲線が異なるものになる原因は、土粒子間力であるサクションが、土粒子間の間隙水のメニスカスによって発揮されていることと密接に関連している。すなわち、締固め土ができるメカニズムは、概略以下のように説明できる。ある締固めエネルギーが加えられる（ランマーやローラーで突固められる）ことにより、土粒子は一旦、強制的に密詰め構造になる。しかし、含水比が小さすぎる場合、極端な場合は乾燥している場合には、突固められてせつかく密詰めになっても、土粒子間力が働かないために、密詰め構造が維持できずにバラバラに戻ってしまう。要するに、間隙水は、突固めによって強制的に作られる密詰め構造を維持するための粒子間力（サクション）を発揮するのに適度な量だけ必要になる。大きなエネルギーで締固めれば、より密詰めの構造をつくることができるが、その際には個々の土粒子間の距離も縮まるので、土粒子間に付着した間隙水が作るメニスカスが適度なサクションを発揮するには、曲率半径が小さくなる必要が生じるため、結果として含水比が小さい方がサクションは大きくなり、密詰め構造を維持するのに適した環境となる。また、粒度分布が良い土を用いる場合には、もともと大きな土粒子の隙間に小さな土粒子が入り込むために、密度が大きくなるのに加え、個々の土粒子間の距離も小さいので、やはり少ない量の間隙水の方が、メニスカスの曲率半径が小さくなり、大きなサクションを発揮する。

(6) 実施工における締固めⅠ（土の含水量）

突固め試験によって、最も土塊の密度を大きくすることができる最適含水比が得られたとする。もし、工事に用いるために用意した土の含水比が、最適含水比より小さかった場合には、施工時にその土をローラー等によって転圧する際に、最適含水比に近くなるように調整して水を散布しながら施工すれば効果的である。また、最適含水比を若干上回っている場合であったも、施工中の転圧等の土工により、土はほとんど乾燥してゆく場合が多いので、問題なく最大乾燥密度に近い土構造物ができる場合がある（むしろ、最適含水比を若干上回っている方が、水の散布の必要もないので経済的で理想的な状態である）。しかし、用意した土が最適含水比を大幅に上回ってしまっているような場合には、脱水させながら施工するのは非常に困難であるために、本来は施工には適さない土となる。特に細粒分が多く、かつ、含水比が高い場合には、ヘドロ状になってしまい全く施工には使用できないどころか、「汚泥（※実際にドロドロのだけで汚くなくても）」と分類されて産業廃棄物の扱いとなる。最近では、汚泥の処分費も馬鹿にならないことから、発生した現地において、脱水処理して再び土木材料として再利用するような試みも多く行われてきている。

(7) 実施工における締固めⅡ（効率の良い締固め）

突固め試験では、モールドと呼ばれる鉄製の円筒容器の中で土の突固めを行った。そのように非常に拘束がきいた容器の中では、締固めエネルギーが効率よく土に伝わり、締固めの効率が高くなる。これがビニール袋の中に土を入れて突固めても、全く締固まらないことは簡単に想像できる。実際の施工においても如何に拘束をかけたままで締固めを行うかは工夫のいるところである。

右図は盛土擁壁を作る場合の補強土工法の紹介である。この補強土工法では、締固め土塊内に、水平に 30cm 間隔でジオグリッドと呼ばれる伸び張力の大きい網状の補強材を敷き詰めて施工する（図中点線がジオグリッド敷設位置）。このジオグリッドを敷き詰めて、ローラーによる転圧締固めを行うと、広い範囲で土に拘束圧が加わり、コンクリートに匹敵するような非常に強固な土塊ができる。

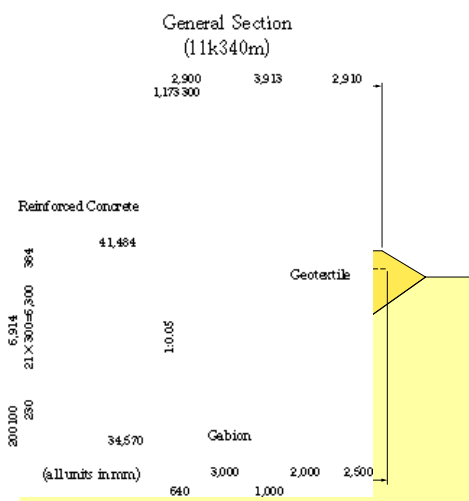


図 6 補強土工法による盛土擁壁

(8) 実施工の現場で用いられる現場密度管理法

砂置換法

穴を掘る

粒径の揃ったきれいな砂を入れる*

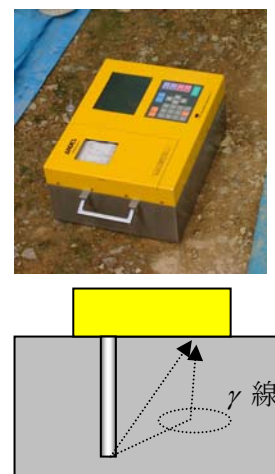
質量 M を計測

穴の体積 $V = M_s / \gamma_d$

∴ 現場の土の密度 $\gamma = M / V$

*粒径の揃ったきれいな乾燥砂を自由落下させると、ほぼ毎回同じ乾燥密度 γ_d となるので、穴に投入した砂の質量 M_s が分かれば、穴の体積 V が分かる。

RI による密度管理法



【土の指示的性質の演習問題】

単位に対する注意:

密度と単位体積重量, 質量と重量 の関係:

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

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

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,

$$\gamma = \rho g$$

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。

問題

高速道路の盛土を築造するのにあたり, 材料土を近隣の土取り場から調達することになった。以下の問いに答えよ。

- (1) 土取り場における土全体の湿潤密度は 1.8 t/m^3 であった。この土の土粒子密度は 2.7 t/m^3 であり, 含水比は 15% であった。この土取り場における土の間隙比と飽和度を求めよ。

仮に体積 V の土取り場の土について考える。土の質量 M は湿潤密度 ρ_t を用いて,

$$M = \rho_t \cdot V$$

また, この土で土粒子が占める質量 M_s を含水比 $w = M_w / M_s$ を用いて求める。

$$M = M_w + M_s \text{ より, } \quad (\leftarrow \text{空気の質量は無視することに注意})$$

$$\frac{M}{M_s} = \frac{M_w}{M_s} + \frac{M_s}{M_s} = w + 1 \quad \text{よって} \quad M_s = \frac{M}{w + 1} = \frac{\rho_t}{w + 1} V$$

この土の土粒子の占める体積 V_s は土粒子密度 ρ_s を用いて、

$$V_s = \frac{M_s}{\rho_s} = \frac{\rho_t}{\rho_s} \frac{V}{w+1}$$

$V = V_s + V_v$ より、この土の間隙の体積は $V_v = V - V_s$ であるから間隙比 e は

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

$$\text{したがって、} e = \frac{2.7 \times 1.15}{1.8} - 1 = 0.725$$

また、間隙水の占める体積 V_w は、間隙水の質量 M_w と密度 ρ_w より

$$V_w = \frac{M_w}{\rho_w} = \frac{w \cdot M_s}{\rho_w} = \frac{w \cdot \frac{\rho_t}{\rho_s} V}{w+1} = \frac{w}{w+1} \frac{\rho_t}{\rho_w} V \quad (\because M_w = w \cdot M_s)$$

飽和度 S_r は

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\frac{w}{w+1} \frac{\rho_t}{\rho_w} V}{1 - \frac{\rho_t}{\rho_s} \frac{1}{w+1}} = \frac{\frac{w}{w+1} \frac{\rho_w}{\rho_t}}{\frac{\rho_s}{\rho_t} - \frac{1}{w+1}}$$

$$\text{したがって、} S_r = \frac{0.15/1}{1.15/1.8 - 1/2.7} = 0.559 \quad \therefore 55.9\%$$

(2) 締固めによって築造される盛土の乾燥密度は 1.75t/m^3 を目標としている。この盛土の密度と飽和度を求めよ。

ここでは、盛土の体積をあらためて V と仮定する。

(※別に V' でも V_1 でも何でもかまわないが簡単のため、(1)と同じ V とおくが、混乱はないと考える。)

この盛土を築造するために必要な土全体の中で土粒子の占める質量 M_s は、

$$M_s = \rho_d \cdot V$$

盛土は締固めによって築造されるが、締固める前と後では土の間隙が小さくなるだけで、土粒子と間隙水の量は変わらないことに注意する。すなわち、含水比は間隙水と土粒子の質量の比であるので、含水比は締固めによって変化せず、(1)で使用した含水比 ($w = 0.15$) がそのまま使用できる。(もちろん、締固め中に水は蒸発などして、無くなることはないとは仮定している)

したがって、この盛土に含まれる間隙水の質量 M_w は、

$$M_w = w \cdot M_s = w \cdot \rho_d \cdot V$$

盛土の質量 M は、 $M = M_s + M_w$ より、

$$M = M_s + M_w = (1+w) \cdot \rho_d \cdot V$$

したがって、盛土の密度（ここでは湿潤密度 ρ_t ）は、

$$\rho_t = \frac{M}{V} = (1+w) \cdot \rho_d = 1.15 \times 1.75 = 2.01 \text{ (t/m}^3\text{)}$$

また、この盛土において土粒子が占める体積 V_s は

$$V_s = \frac{M_s}{\rho_s} = \frac{\rho_d}{\rho_s} V \quad \text{であり、}$$

間隙水が占める体積 V_w は

$$V_w = \frac{M_w}{\rho_w} = \frac{w \cdot M_s}{\rho_w} = \frac{w \cdot \rho_d}{\rho_w} V$$

一方、間隙全体（間隙水+間隙空気）が占める体積は $V_v = V - V_s$ より、

$$V_v = V - \frac{\rho_d}{\rho_s} V = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) V$$

結局、この盛土の飽和度 S_r は

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\frac{w \cdot \rho_d}{\rho_w} V}{\left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) V} = \frac{w \cdot \rho_d}{\rho_w \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right)} = \frac{0.15 \times 1.75}{1 \times \left(1 - \frac{1.75}{2.7}\right)} = 0.746 \quad \therefore 74.6\%$$

(3) 盛土築造後に大雨が降り、盛土の間隙に雨水が完全に浸潤してしまい、飽和度が 100% になってしまった。この時の盛土の湿潤密度はいくらか。

飽和度 100%，すなわち $S_r = 1.0$ となり、間隙中はすべて水で満たされてしまい、間隙水の体積は V_v （(2)で求めた値）となる。

したがって、浸潤後の盛土内の間隙水の質量 M'_w は、

$$M'_w = \rho_w \cdot V_v = \rho_w \cdot \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) V$$

盛土全体の質量は土粒子の占める質量 M_s と M'_w との和であるので、

$$M = M_s + M'_w = \rho_d \cdot V + \rho_w \cdot \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) V$$

浸潤後の盛土の湿潤密度は

$$\rho_t = \frac{M}{V} = \rho_d + \rho_w \cdot \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) = 1.75 + 1 \times \left(1 - \frac{1.75}{2.7}\right) = 2.10 \text{ (t/m}^3\text{)}$$

以上は、密度 ρ と質量 M を使って計算をしているが、単位体積重量 $\gamma (= \rho g)$ を用いて議論する場合には、質量の代わりに重量 $W (= Mg)$ を用いることに注意する。

問題のポイント：

①いろいろな式を丸暗記せずに、とにかく最低限、

$$\text{含水比 } w = \frac{M_w}{M_s} (= \frac{W_w}{W_s})$$

$$\text{間隙比 } e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$\text{飽和度 } S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

質量と体積の関係式 (or 重量と体積の関係式)

$$M_s = \rho_s V_s \quad (W_s = \gamma_s V_s)$$

$$M_w = \rho_w V_w \quad (W_w = \gamma_w V_w)$$

$$M = \rho_t V \quad (W = \gamma_t V)$$

$$M_s = \rho_d V \quad (W_s = \gamma_d V)$$

(※このうち、湿潤密度 ρ_t と乾燥密度 ρ_d は、土全体 (土粒子と水と空気) の体積 V に対して定義されていることに注意する)

さえ知っていれば、このような問題は必ず解ける。

② 締固め前後で変化するのは、空気が入っている間隙の体積だけであることを忘れずに覚えておく。

すなわち、盛土に含まれる

- ・土粒子：体積も質量も変わらない。
- ・間隙水：体積も質量も変わらない。
- ・間隙空気：体積は変わるが、質量は無視する。

したがって、含水比は土粒子と間隙水の質量比 (重量比) なので、

- ・盛土の含水比も変わらない。
- もちろん、間隙比、飽和度は体積の比なので、
- ・盛土の間隙比、飽和度は変わる。

③この問題は実際の体積や質量が具体的に与えられていないので、若干ややこしくなっている (式の誘導のようになっている)。しかし、具体的な数字が与えられた問題ならば、順番に計算していけばよいので、電卓さえ使えばもっと簡単に解ける。