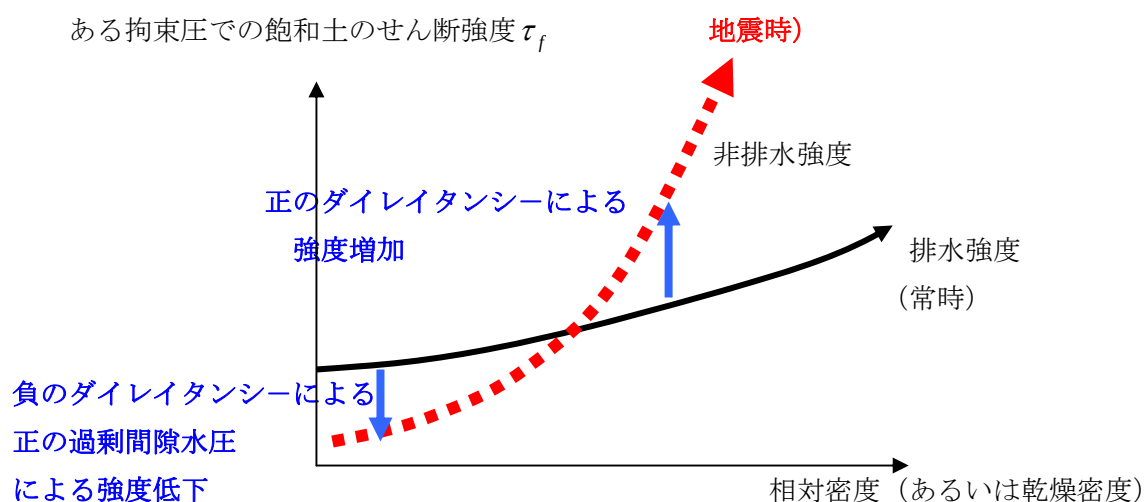


第3章 土の締固め

3. 1 締固めた土の性質

○既に存在している自然状態の土の対比としての「材料としての土」=「ダム、鉄道・道路盛土、宅地等の建設の為の材料としての土」について考える。

- この場合、製造のプロセス（盛土材料の選択と締固め作業）が、製品（盛土）の性能（安定性と変形性）を決める。
- なんやかや言うが、結局、良く締固まりやすい材料を用いて土を良く締固め、高い相対密度（あるいは乾燥密度）を実現するほど、「良い盛土」を実現できる。



○特に、地震時と豪雨時の安定性を向上するためには、排水設備の整備とともに、少しでも良く締め固めた方が良い。

[締め固めるとダイレイタンス性が強くなる: 手品]

- 土の乾燥密度（より正確には締固め度）に言及しなければ、「良い土」、「悪い土」と言う区別はできない。

＊しかし、「締固めにくい土」、「締固め易い土」の区別による「良い土、悪い土」と言う区別はある。

例1) 粒度分布が良く（均等係数 U_c が大きく）、粒径がある程度大きければ、透水係数も大きく排水しやすく、またサクシオンが小さいため締固めやすく、良く締固めたならば高い乾燥密度が得られる。これは、良い土である。

例2) 鉄道のバラスト。貧配合で大粒径。取り扱いやすい（この点では良い材料）。しかし、高い乾燥密度は得にくい。列車荷重で変形しやすい（この点では悪い材料）。

例3) 高含水比粘性土： 粘性土でも、仮に良く締め固められれば、良い土になる」
しかし、実際は、

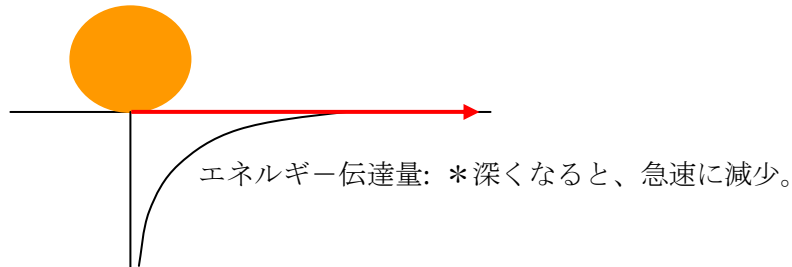
- 粒径が小さいために透水性が低い。締固めの時に間隙水を追い出しにくい。
- 不飽和状態でのサクシオンが強いため、締固めにくい。

c. 粒子が角張っていて扁平→密実になりにくい。

d) 同じ土でも、

① 締固めエネルギーが大きいほど、良く締固められる。

② 締固め時の撒き出し層厚(lift)が薄いほど（例えば、20 cm 以下）、良く締め固められる。
60 cm は厚すぎる。



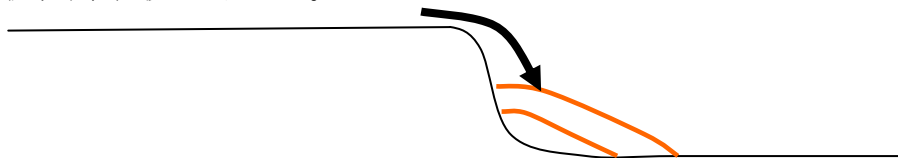
- 1.0 の締固め energy で、lift（撒き出し層厚）= 15 cm で締め固めた方が、
2.0 の締固め energy で、lift= 30 cm で締固めるよりも、均等に良く締め固まる。
3.0 の締固め energy で、lift= 45 cm で締固めるよりも、はるかに均等に良く締め固まる。

③ 最も良く締固めができる含水比が存在する。

上記 1, 2, 3 の管理は、何れも手間が掛かる（人件費が掛かる、建設費が掛かる）。

しかし： 土工の工費は、締固め工に大きく左右される。

a) 最悪の盛土建設法→ **盛りこぼし工法**。 関東ロームの盛りこぼし、最悪。
戦争中、直後の河川盛土。



b) 締固め検査が、非常に大切。手を抜いたら（lift を大きく、締固め回数を少なくしたら）、儲かる。

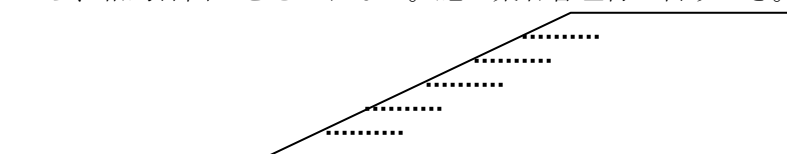
c) どうしても締固めざろう得ない工法を採用する場合がある。

* 鉄道関係での**盛土締固め管理材**（その発展形態としての、補強土盛土）

斜面近くは、

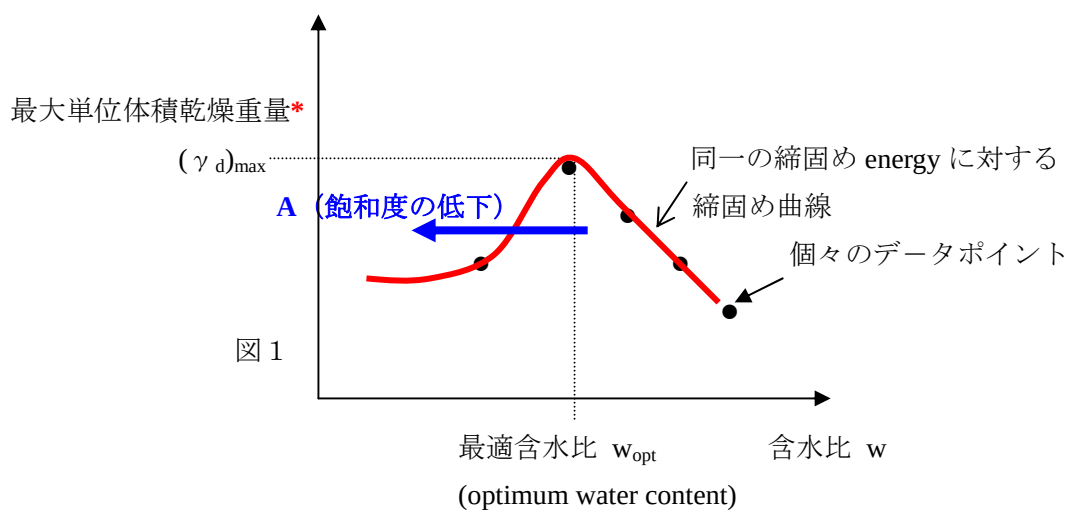
- 1) 締固め重機が載りにくい。重機が載ると斜面が壊れて危険。従って、締固め作業がしにくいので、締め固めがおろそかになりやすい。
- 2) 拘束圧が低く強度が低い。また、降雨の影響を受けて弱化しやすい。
- 3) 従って、破壊しやすい。

→30 cm 鉛直間隔でネットを敷く。ネットを敷くために平面を作らなければなら
ないから、結局締固めをさぼれない。施工業者管理材と言うべき。



3. 1. 1 締固め曲線と最適含水比

$$\text{単位体積乾燥重量 } \gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e}$$



*あるいは最大乾燥密度 $(\rho_d)_{\max}$

○ w_{opt} の存在の発見 (Proctor、米国)

○ 何故、 γ_d が最大になる含水比、 w_{opt} が存在するのか？

→ 二つの相反するメカニズムが存在しているから。

(Peak が存在するときは、常に何か二つ以上の相反するメカニズムが存在している)

a) メカニズム 1 : 図 1 の A の方向で考えて、

(含水比 $w \rightarrow$ 小) $\rightarrow$ (同一の γ_d で考えると、飽和度 $S_r \rightarrow$ 小) $\rightarrow$ (suction $\rightarrow$ 大)
 $\rightarrow$ (締固め抵抗 $\rightarrow$ 大)

つまり、図 1 で A の様に進もうとすると、より多くの締固め energy が必要である。

従って、一定の締固め energy ならば、曲線のようになる。

b) メカニズム 2 :

○ w がある程度以上になると、間隙水を追い出すことなく含水比が一定のままでは、 γ_d が大きくなれない。[$\gamma_d - w$ 曲線]が、[$\gamma_d - w$ 曲線の上限]にぶつかってしまう。

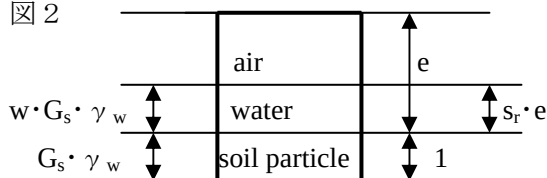
○ 締固め時に間隙水を追い出して含水比を下げることであれば、締固め乾燥密度は上昇する。しかし、通常は (特に自然含水比が高い細粒分が多い土では)、これは難しい。

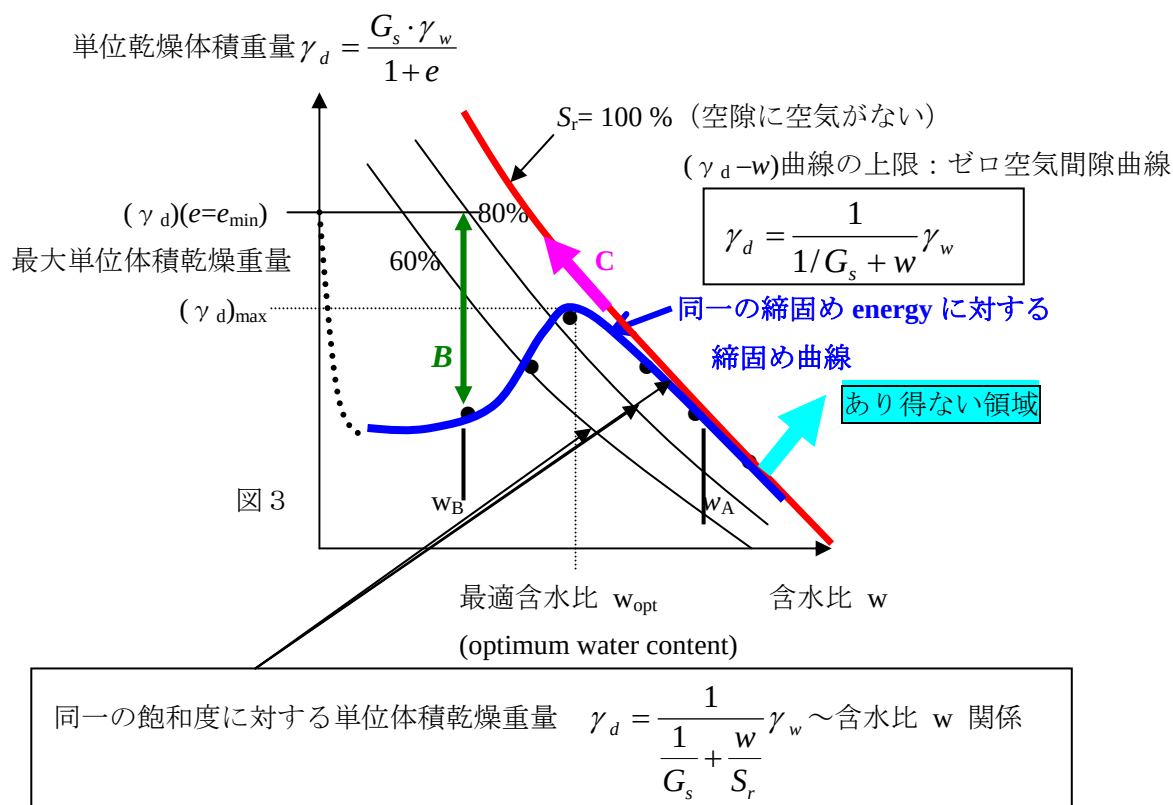
$$\text{単位体積乾燥重量 } \gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + \frac{w \cdot G_s}{S_r}} = \frac{1}{\frac{1}{G_s} + \frac{w}{S_r}} \gamma_w$$

下図から、 $(s_r \cdot e) \cdot \gamma_w = w \cdot G_s \cdot \gamma_w$

従って、 $e = (w \cdot G_s) / s_r$

図 2

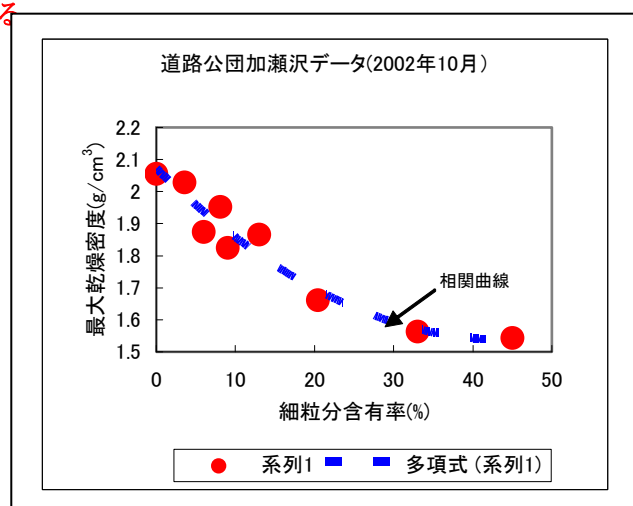




- 含水比 $w=w_B$ では、更に高い締め固めエネルギーを用いた締め固めによって、更に空気を追い出すことができれば、 γ_d はまだ **B** だけ大きくなる余地がある。
- しかし、含水比 $w=w_A$ では、更に高い締め固めエネルギーを用いた締め固めによって、仮に全ての空気を追い出すことができて、間隙水を追い出さない限り、 γ_d が大きくなる余地は無い。
 - ・ 間隙水を追い出せば、**C** のように締め固められるが、間隙水を追い出すのは空気を追い出すよりも遙かに難しい。特に細粒土になるほど。
- なお、 w が 0 % に近づくと、suction が作用しなくなるから、単位体積乾燥重量 γ_d は、大きくなり

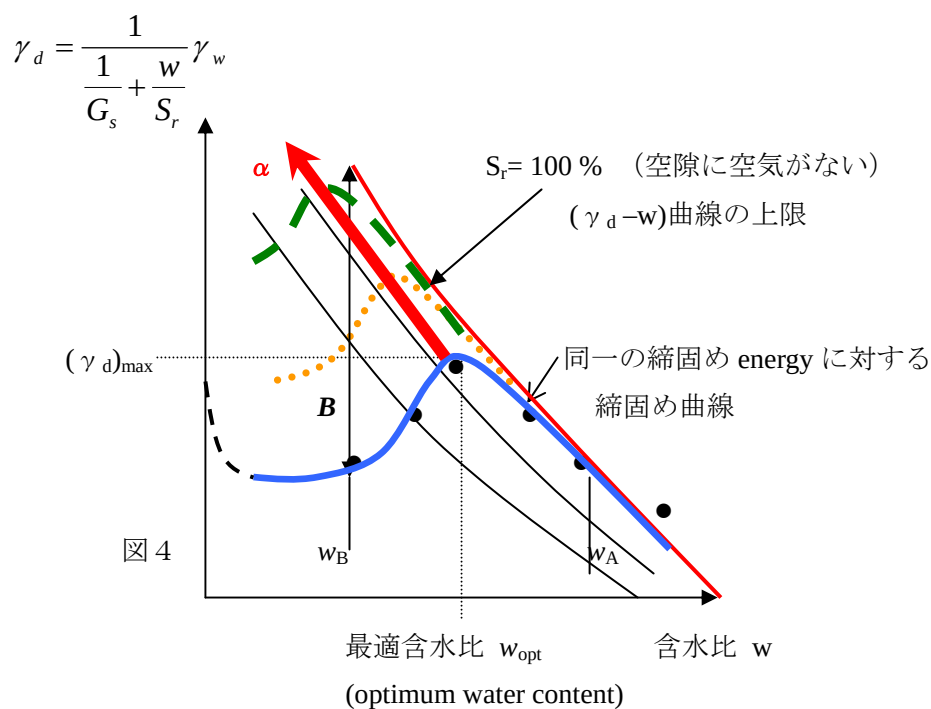
$$\gamma_d(e=e_{\min}) = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e_{\min}} \quad \text{となる。これは、砂質土では実現するが、粘性土では実現しない。}$$

細粒分が多いほど、同一の均等係数でも suction が大きくなり乾燥最大密度は小さくなる傾向にある



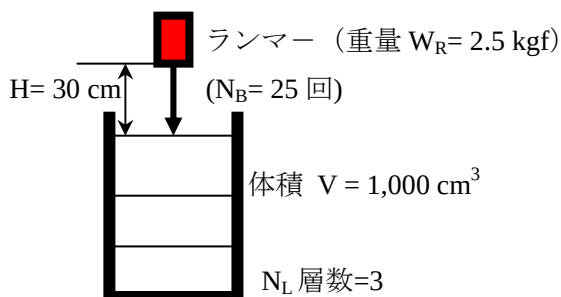
3. 1. 2 土の締固め試験

- 含水比 $w=w_B$ では図3のBの分に相当する残存間隙空気量は、締固め energy が大きいほど、より追い出せる。
- 含水比 $w=w_A$ では、締固め energy を大きくしても間隙水を追い出さなければ、 γ_d が大きくなる余地はない。
- 従って、締固め energy を大きくすれば、図4の矢印 α のように、「 $(\gamma_d)_{\max}$ が大きくなり、 w_{opt} が小さくなる」。



- 異なる締固め装置・方法を用いれば、締固め曲線が異なる。

→室内試験では、標準締固め方法が定められている。教科書 53, 54 頁。



*標準締固め energy $E_c = (W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L) / V = 56 \text{ cm} \cdot \text{kgf} / \text{cm}^3$

*実際の締固め試験での、 γ_d の求め方。

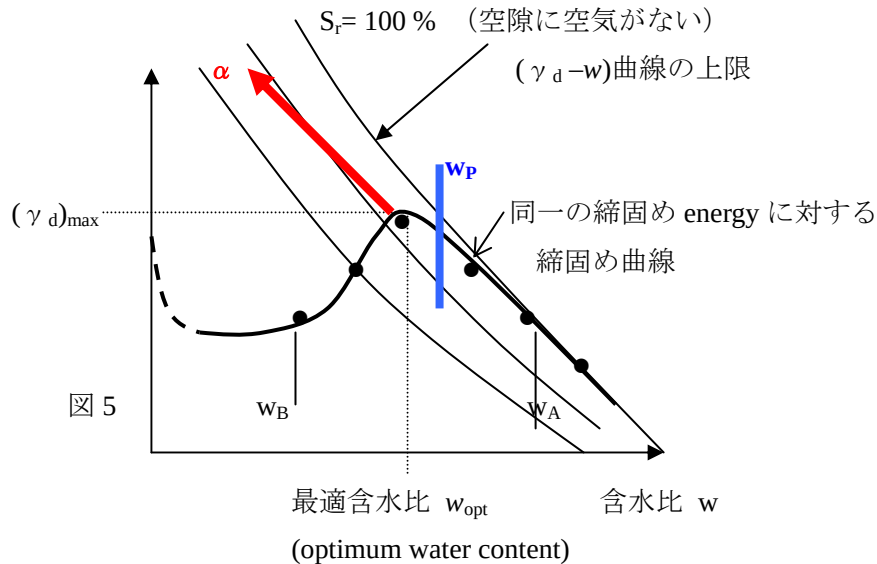
$\gamma_t = W/V$ と w を測定する。

$$\text{単位体積乾燥重量 } \gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + w}$$

現場での諸問題

- a) 異なる締固め装置・方法を用いれば、締固め曲線が異なる。
→異なる締固め energy での締固め曲線が必要。
- b) 初期含水比の影響。

$$\text{単位体積乾燥重量: } \gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1+e}$$



○湿った我が国では、 $w > w_{opt}$ のことが多い。

従って、乾かさないと良く締め固まらない。

例) 道路公団：関東ロームの締固め。

なかなか乾かない。生石灰などを混合することもある。

雨の日は、締固め工事をしてはいけない。土を濡らしてはいけないし、良く締め固まらない。

○乾燥した地域（外国に多い）では、 $w < w_{opt}$ のことが多い。

散水して締め固める必要がある。

例) Hawaii 島、Mauna Kea での天文台基礎工事。海岸から 4000 m の高さの山頂まで、水を運搬。

○粒度特性の影響。

i) 粒径が大きいくほど、suction が小さく、また空気と間隙水が抜けやすい。

→締め固めやすい。図4、5での矢印 α の方向に移ることが容易。

ii) U_c が大きいくほど、 e_{min} が小さい (γ_{max} が大きい)。→締め固めやすい。

図4、5での矢印 α の方向になる。 $(\gamma_d)_{max}$ が $(\gamma_d)_{e=e_{min}} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1+e_{min}}$ により近づく。

iii) 細粒分がある程度多い場合の締固めの問題：

a) 細粒分が多くなり粘性土的になると塑性限界 w_p は上昇して、最適含水比 w_{opt} に近くなる。

b) 最適含水比 w_{opt} が塑性限界 w_p よりも 10 % 程度以上大きくないと、含水比が最適含水比 w_{opt} で締固め作業をすると、含水比が w_p よりも若干大きい状態なので練返し状態になり、締め固めにくくなる。

c) 細粒分は、出来るだけ少ない方が締固めやすい。

○現場でも盛土工事の管理： 締固め度での締固め管理

締固め度：

教科書に載っていないが、実務で用いている。

$$D_c = \frac{\gamma_d}{(\gamma_d)_{\max}} (\times 100\%) = \frac{\rho_d}{(\rho_d)_{\max}} (\times 100\%)$$

γ_d は、現場で測定した値。

$(\gamma_d)_{\max}$ は、室内締固め試験の結果。

- 現場での礫混じり砂、最良分混じりの砂礫土等は、 $(\gamma_d)_{\min}$ を、室内締固め試験で求めることは難しい。従って、相対密度は用いることは少ない。
- 現場での締固め管理： D_c (degree of compaction) が、例えば 90 % 以上であるように規定する。
 - 1) しかし、 $D_c = 90\%$ は、高い密度状態ではない。
 - 2) 同一の現場で同じ種類の盛土材料を用いることにした場合でも、実際に使用する盛土材料は時間と場所に変化してゆく。従って、現場のそれぞれの箇所で γ_d を測定した試料の粒度特性と、 $(\gamma_d)_{\max}$ を求めた締固め試験で用いた所謂現場の代表的な試料は通常は一致しない。従って、 γ_d と $(\gamma_d)_{\max}$ は同一の試料を用いて求めているわけではない。したがって、仮に「同一の試料を用いて γ_d と $(\gamma_d)_{\max}$ を求めた場合の本当の D_c 」が 95% 程度であっても、「上記の現在の方法で測定された D_c 」は 90 % ～ 105% のようにばらつく。従って、「測定された D_c の最小値が 90 % であること」のような規定にせざろう得ない。
 - 3) 最近の規定： 測定された D_c の最小値は 90% 以上で、平均値が 95% 以上。

第3章 土の締固め

締固め 演習 1)

盛土材料を任意に選べて締固め工法を任意に規定できるとして、出来るだけ良く締固まった盛土を建設する方法を示せ。

締固め 演習 2)

図-1 に示す A は、ある一定の締固めエネルギーによって得られたある土の締固め曲線である。

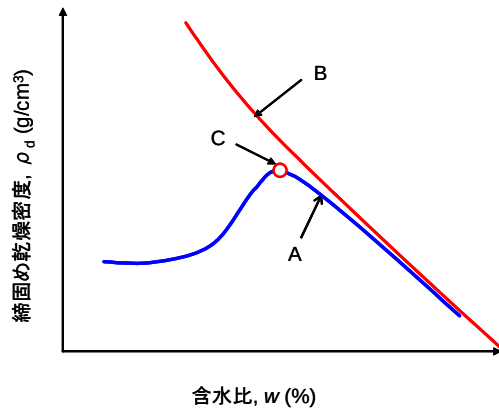


図-1

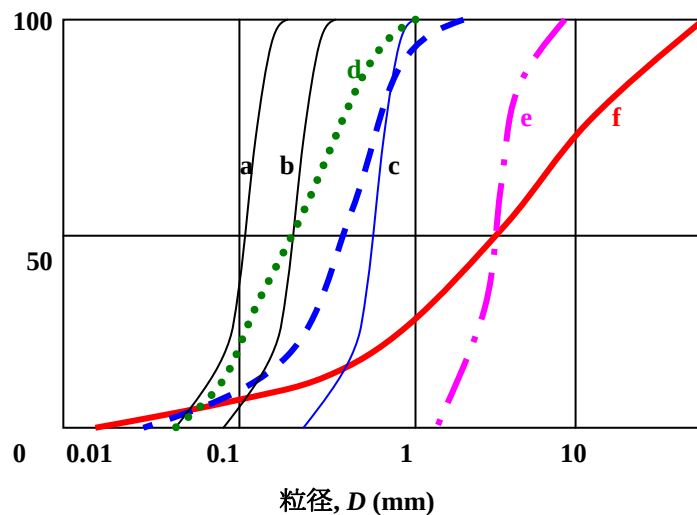
以下の問いに答えよ。

- 点 C の縦座標と横座標の物理的意味を示せ。
- 曲線 B の意味を示せ。
- 曲線 A は、何故点 C の様にある含水比で締固め乾燥密度が極大値を示すのかを説明せよ。
- 締固めエネルギーが増加すると点 C がどのように移動するのかを示せ。

土の締固め 演習 3)

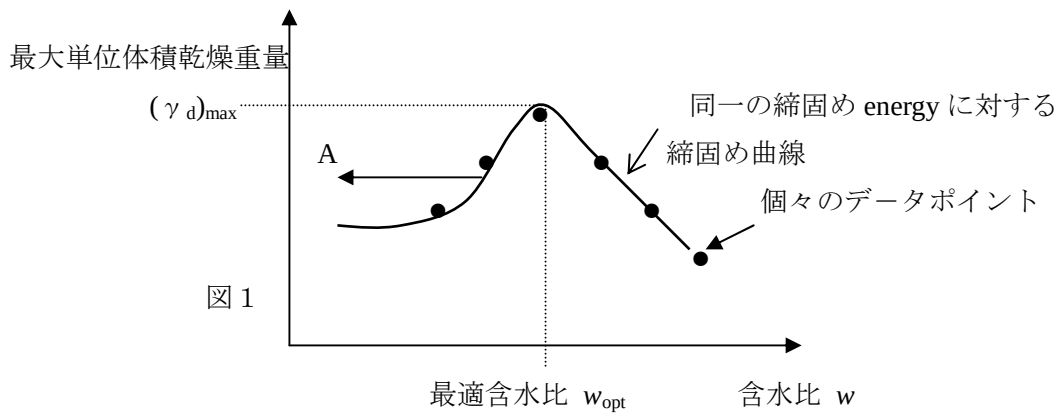
下図に示す a から f の土質材料の内、ロックフィルダムの材料として最適なものを記号で答え、その理由を説明せよ。

重量通過百分率



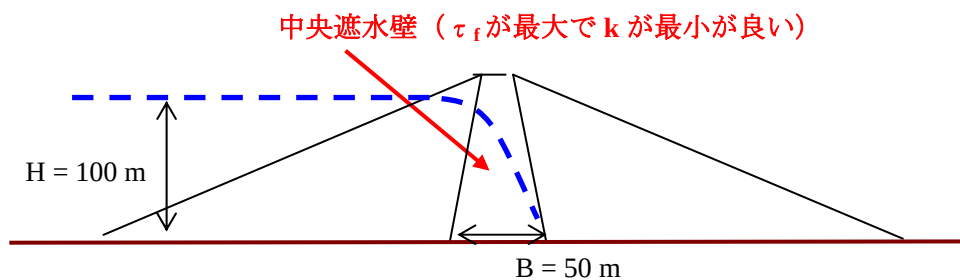
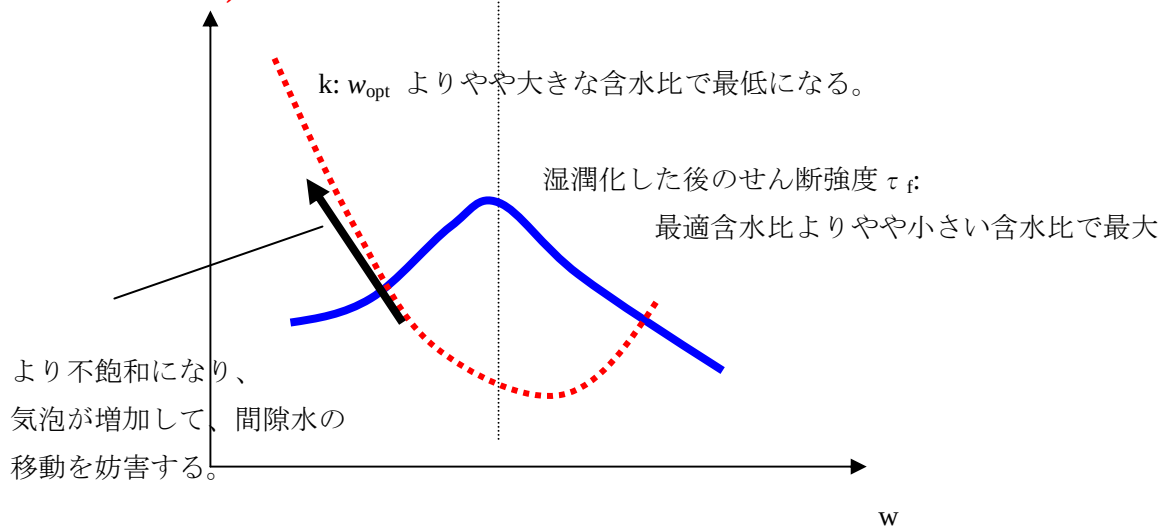
締め固めた土の力学的性質

$$\text{単位体積乾燥重量 } \gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e}$$



湿潤化後のせん断強度 τ_f

$\log(\text{湿潤後の透水係数 } k)$



$v = i \cdot k$ の意味。

v : 流速 (cm/sec) : i : 動水勾配 ; 単位はない。 上図では、大略 $i = 2$

k : 透水係数(cm/sec)