

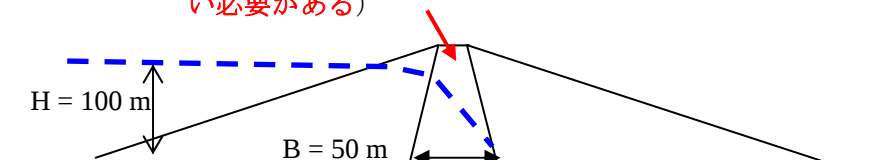
第4章 透水

まえがき： 地盤・土構造物の中の水の流れを学ぶ目的。

目的1) 地盤・土構造物の中を進む水の量を求める。透水の量を制御する。

例) 水を止めたい場合

ロックフィルダムの中央遮水壁（透水係数 k が十分小さい必要がある。せん断強度 τ_f もある程度大きい必要がある）



$v = i \cdot k$ の意味。

v : 地盤内平均流速(cm/sec)

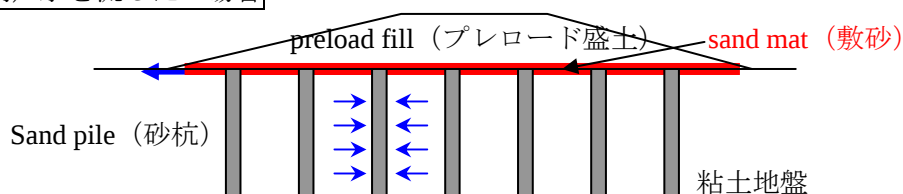
i : 動水勾配(Hydraulic gradient); 単位はない。上図では、大略 $i = 100/50 = 2$,

k : 透水係数(cm/sec): 土の物性

→盛土材料の選択（細粒分の多い土）と締固め法（含水比と締固め度）の調整による透水性

k の制御（できるだけ小さくする）と遮水壁の厚さ設計。

例) 水を流したい場合



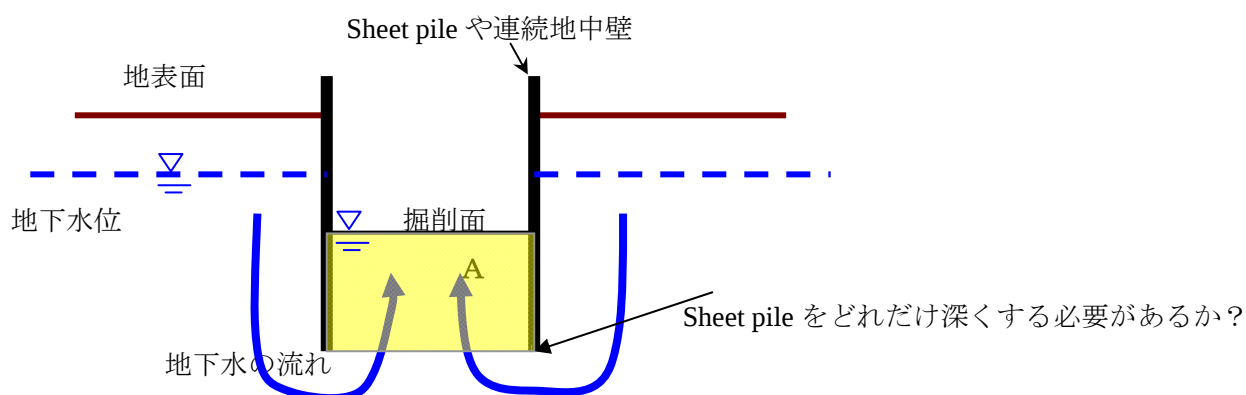
○sand pile と preload fill を用いないと、圧密終了までに非常に長期間（例えば 100 年）掛かる。

・最近では、人工的な排水材を用いている。Paper drain から、より水を通しやすい pipe 状のものをネットや不織布等の filter 材で包んだ物を用いている。

○sand pile の直径と間隔はどうしたら良いか？ k の値は？

目的2) 地下水の流れが、地盤を破壊しないようにする：

水の流れが、地盤に及ぼす力〔浸透力 seepage force〕の大きさを知る

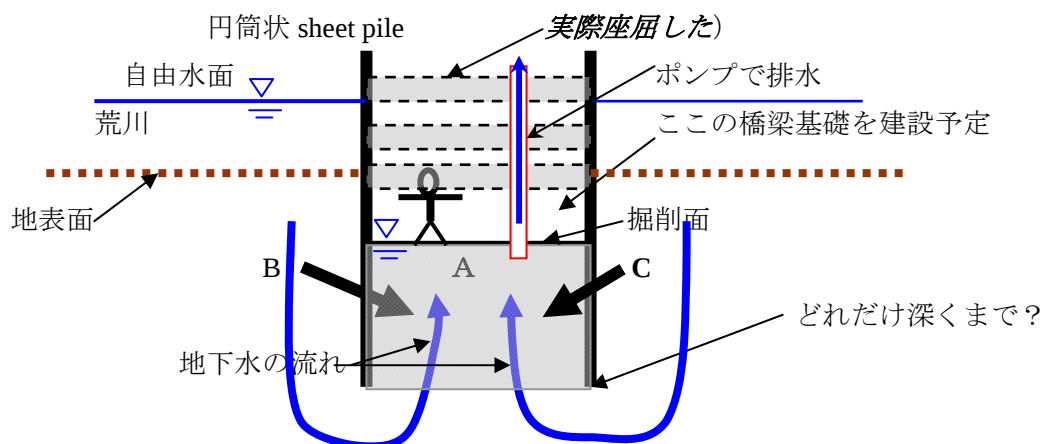


○地盤の中を進む水の流れは、土粒子によって妨害されている。

○その反作用として、水の流れは土粒子に力を及ぼしている（浸透力）。

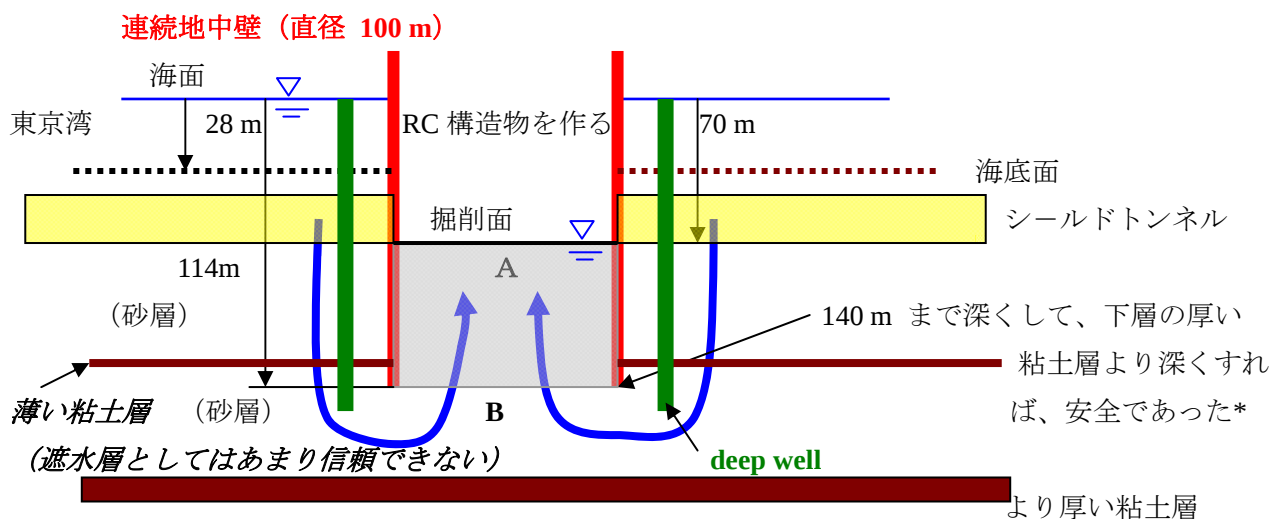
○sheet pile が浅いと、A の土塊が地下水の流れのために、土の粒子が動かされようとする。不安定になる（液体のようになることもある）。→boiling 等

引張り力ではなく、圧縮力が働くから、座屈する可能性がある。）



地盤の変形は一樣でないから、ring は座屈しやすかった。ring beam が次々と破壊し、sheet pile が B、C の様に崩壊し、10 人以上の労働者が死亡。その後、ring beam 工法の禁止。

東京湾横断道路、川崎側人工島



どのような対処をしたか？ 緊急対策と、恒久対策。

4. 1 Darcy(French)の法則

静水状態（地盤内で水が静止している状態）

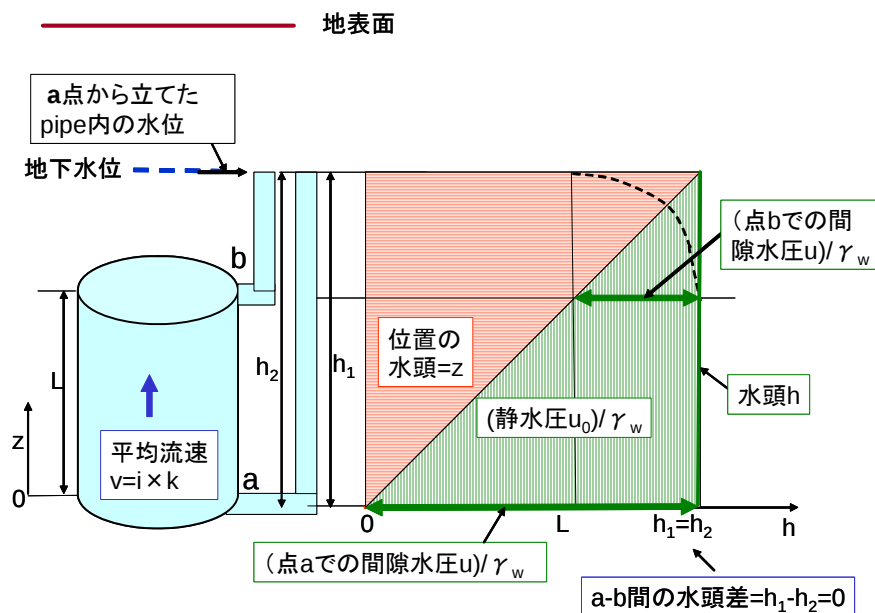


図 1

地下水位：「絶対圧としての間隙水圧 u_w 」=大気圧 p_a 、「ゲイジ圧である間隙水圧 u 」=0、である面。

点 a と点 b に、上下端が解放されているパイプを鉛直に立てている。

パイプの上端での自由水面（絶対圧 u_w =大気圧, p_a ；ゲイジ圧=0）

- 地下水が流れていないときは、「これらの pipe の内部での水面の高さ」と地下水位は一致する。
- 地下水が流れているときは、「これらの pipe 内での水面の高さ」と地下水位は異なる。
- **h: 水頭(head)**：上下端面だけが解放されている pipe 内の自由水面（頭）の高さ、あるいは、その場所に立てた pipe 内での水面の高さ

$h=0$ の基準は任意。ここでは、点 a での $z=0$ を基準としている。

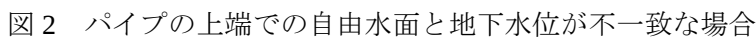
◆ 「間隙水圧 (pore water pressure)=その場所での間隙水の圧力」と水頭の相違の理解

$$\text{水頭(head)} = \text{パイプの中の水の柱の頭} = (\text{間隙水圧 } u) / \gamma_w + \text{位置の水頭}(z) \quad (1)$$

[注目点]

○点 a と点 b では、間隙水圧が異なる。

○しかし、点 a と点 b では水頭が同一であるから、この 2 点間には水が流れない。



(1)式と(2)式から、

従って、点 a と点 b の間の水頭差 $\Delta h =$

(点 a での水頭: h_1) - (点 b での水頭: h_2) = (点 a での $\Delta u / \gamma_w$) - (点 b での $\Delta u / \gamma_w$)

○この2点間には、水が流れるのは点 a と点 b の間で水頭差 $\Delta h = h_1 - h_2$ があるからである。

即ち、過剰間隙水圧が存在していて、2 点間で過剰間隙水圧が異なるからである。

○二点間に間隙水圧(pore water pressure)の差があっても、その2点間に水が流れるとは限らない。

この任意の方向の 2 点間の head 差を Δh とすると、

- * 平均流速は、本当の間隙水の本当の流速 v_w ではなく、仮想的なものであり、 $v < v_w$ である。

⁺ 透水係数は、層がある地盤等では方向によって異なる（異方的透水性：ここでは扱わない）

平均流速 v は、間隙水の本当の流速 v_w ではなく、仮想的なものである。 $v < v_w$ である。

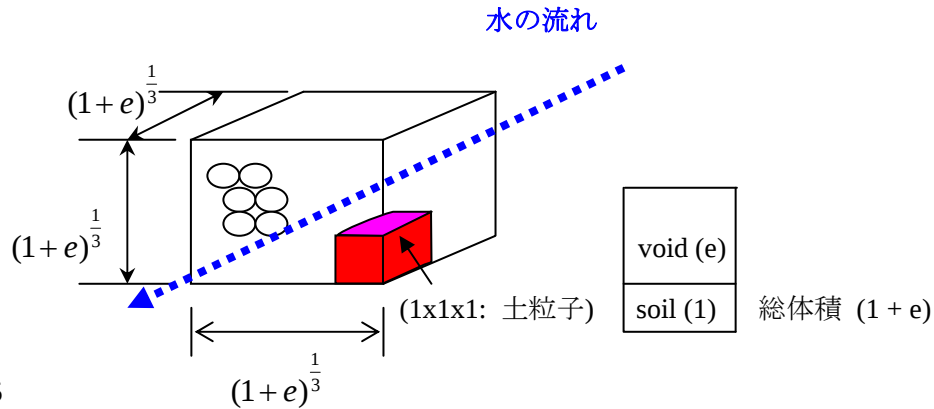


図-5

V (平均流速) $\cdot A$ (断面積) $= V_w$ (間隙水の実際の流速) $\cdot A_v$ (断面での平均間隙率) (1)
と仮定すると、

$$v \cdot (1+e)^{\frac{2}{3}} = v_w \cdot \{(1+e)^{\frac{2}{3}} - 1.0\} \quad (2)$$

$$v = v_w \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{(1+e)^{\frac{2}{3}}} \right\} \quad (3a); \quad v_w = v \cdot \frac{(1+e)^{\frac{2}{3}}}{(1+e)^{\frac{2}{3}} - 1.0} \quad (3b)$$

間隙比 e が小さくなるほど、「真の流速 v_w 」 / 「平均流速 v 」 の比は、大きくなる。

○ 今、 v_w が i に支配されていて、 $v_w = \alpha \cdot i$ (α は $(D_{10})^2$ に比例) であるとする、(3a)から、

$$v = \alpha \cdot i \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{(1+e)^{\frac{2}{3}}} \right\} \quad (4)$$

また、 $v = k \cdot i$ であるので、

$$\text{従って、} k = \alpha \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{(1+e)^{\frac{2}{3}}} \right\} \quad (5)$$

→ k は、間隙比が e が小さいほど小さい。たとえば、 $e=0.0$ のとき $k=0.0$ 。

○ 実際は、三次元的に複雑な流れ。

経験式：

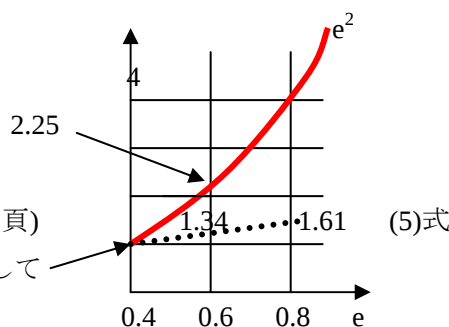
$$k = f(e) \cdot g(D_{10});$$

$$k = f(e) \cdot g(D_w)^* \quad (*: \text{教科書 67 頁})$$

ここで 1.0 として

例) Zunker: $k = (C_z / \mu) \cdot e^2 \cdot D_{10}^2$

C_z : 比例定数



Remarks:

1) e^2 は $\left\{ 1 - \frac{1}{(1+e)^{\frac{2}{3}}} \right\}$ よりも、 e の変化に敏感。三次元効果のため。

第4章 透水

2) 粘土地盤の場合、圧密が進むと間隙比が低下して、透水係数は低下する。

3) μ : 流体の粘性係数。これが大きいほど k は小さい。

4) D_{10} : 10% 径。なぜ、 D_{50} ではないのか？

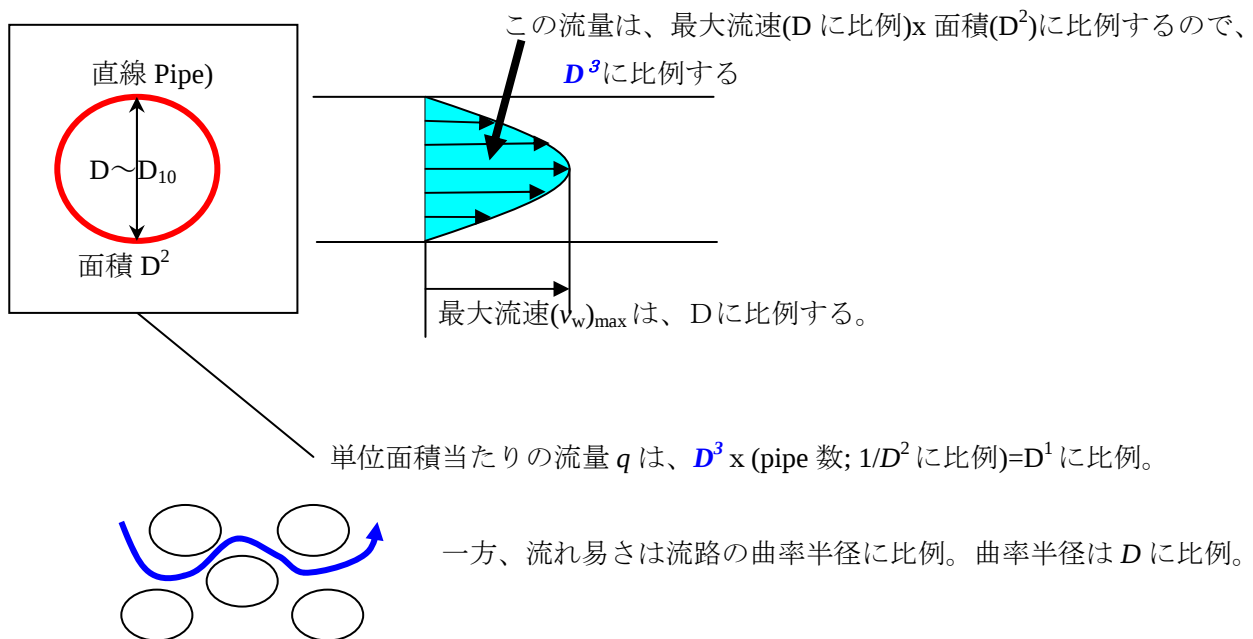
→ 小さい粒径の粒子が間隙水が流れる pipe の大きさを決定する。

これが小さいほど、 k は小さい。

5) $k = (C_z/\mu) \cdot e^2 \cdot D_{10}^2$: なぜ、2 乗？

例) Hazen: $k = C_k(0.7 + 0.003 T) \cdot D_{10}^2$ (この式は間隙比 e が入っていないで、不合理)

● 透水係数 k が D_{10} の 2 乗に比例する理由。



両者併せると、流量 q は D^2 に比例。

流速は $v = q/t = k \cdot i$ であるので、透水係数 k も D^2 に比例する。

第4章 透水

すると、粘性土、シルト、細砂、中砂、粗砂、礫と粒径が変化すると、透水係数、平均流速、流量は飛躍的に変化する。

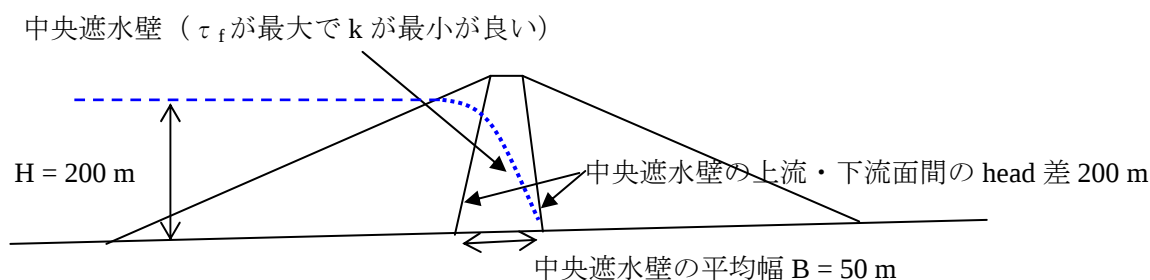
粒子径 D が小さいほど、 e が大きい。しかし、異なる粒径の土の透水係数を大まかに比較すると、

●68 頁。 k の値は、 D_{10}^2 にほぼ比例している。

粘土とシルトの境界： $D = 0.002 \text{ mm}$; $k = 10^{-7} \text{ cm/sec}$

砂と礫の境界： $D = 2.0 \text{ mm}$; $k = 10^{-0} \text{ cm/sec}$

D の比: 10^3 。 D^2 の比: 10^6 。 k の比: 10^6 以上



大略値として、 $i = 200\text{m}/50\text{m} = 4$

$k = 10^{-7} \text{ cm/sec}$ の意味。 → v : 流速 $= 4 \times 10^{-7} (\text{cm/sec}) = 12.6 \text{ cm/year}$: 事実上の不透水。

$k = 10^{-0} \text{ cm/sec}$ の意味。 → v : 流速 $= 4 \times 10^{-0} (\text{cm/sec}) = 144 \text{ m/hour}$: 事実上の透水。

● k が 10 倍変化したら、流量には大変な差が生じる。

a) しかし、 k は、粒径の変化に非常に敏感に反応。

→従って、一様な地盤でも k の正確な推定は難しい。

b) しかも、実際の地盤は一様ではない。特に、他と k が大きく異なる水平方向の薄い層の存在とその連続性を把握するのが難しい。

→粘土層の中の k が特に大きい砂層の、水平方向の流れに対する大きな影響。

→砂層の中の k が特に小さい粘土層の、鉛直方向の流れに対する大きな影響

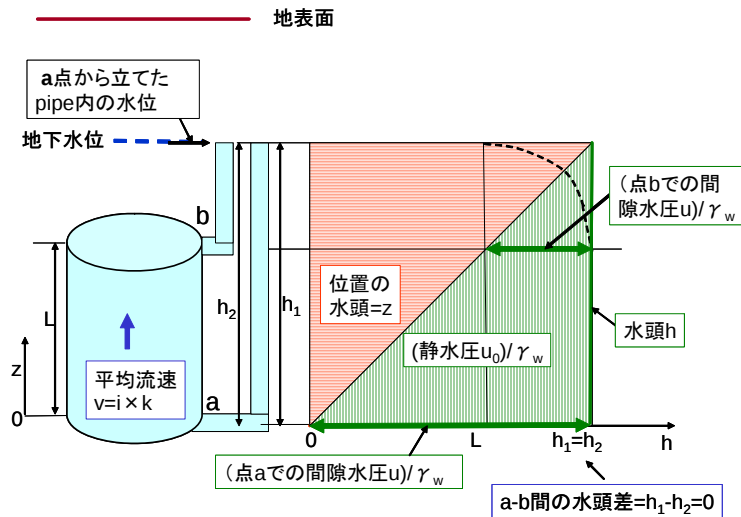
(東京湾横断道路川崎側人工島の場合)。

第4章 透水

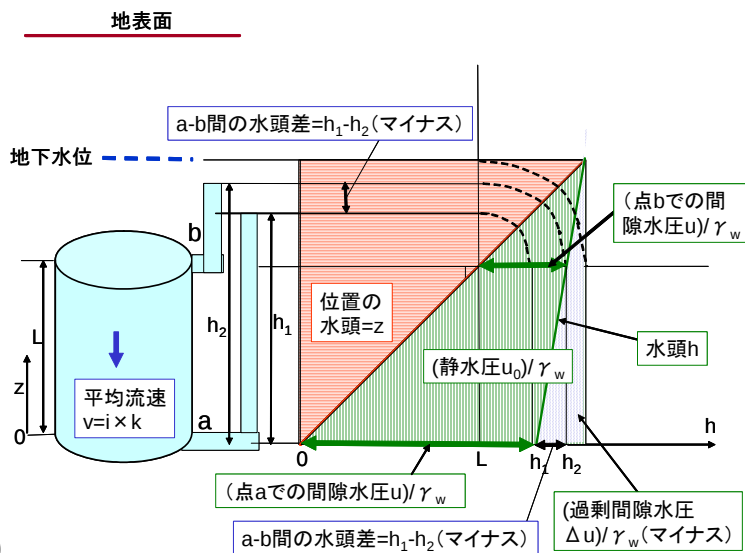
透水演習 1) 次の三つの場合の地盤内の水頭 h と間隙水圧 u , 過剰間隙水圧 Δu の鉛直分布を描け。

- 地盤内を間隙水が移動していない静水状態。
- 地盤内を上方から下方に透水している状態（流れは時間的に一定の定常流とする）。
- 地盤内を下方から上方に透水している状態（流れは時間的に一定の定常流とする）。

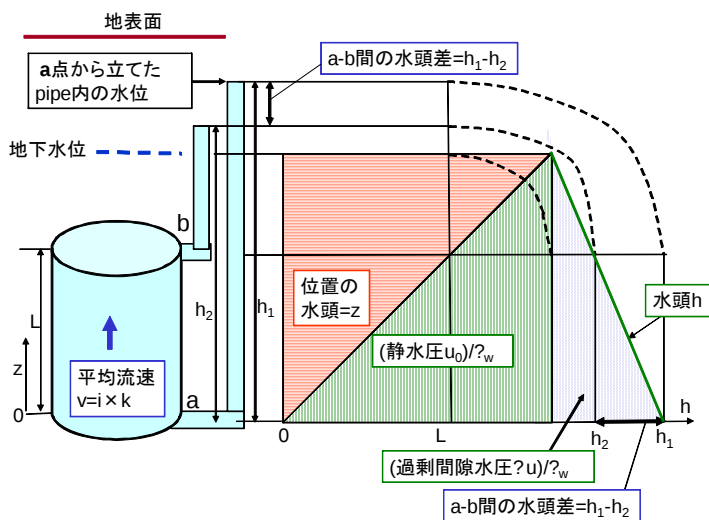
答)



a)



b)



c)

水が斜め方向に流れている状態（定常流）

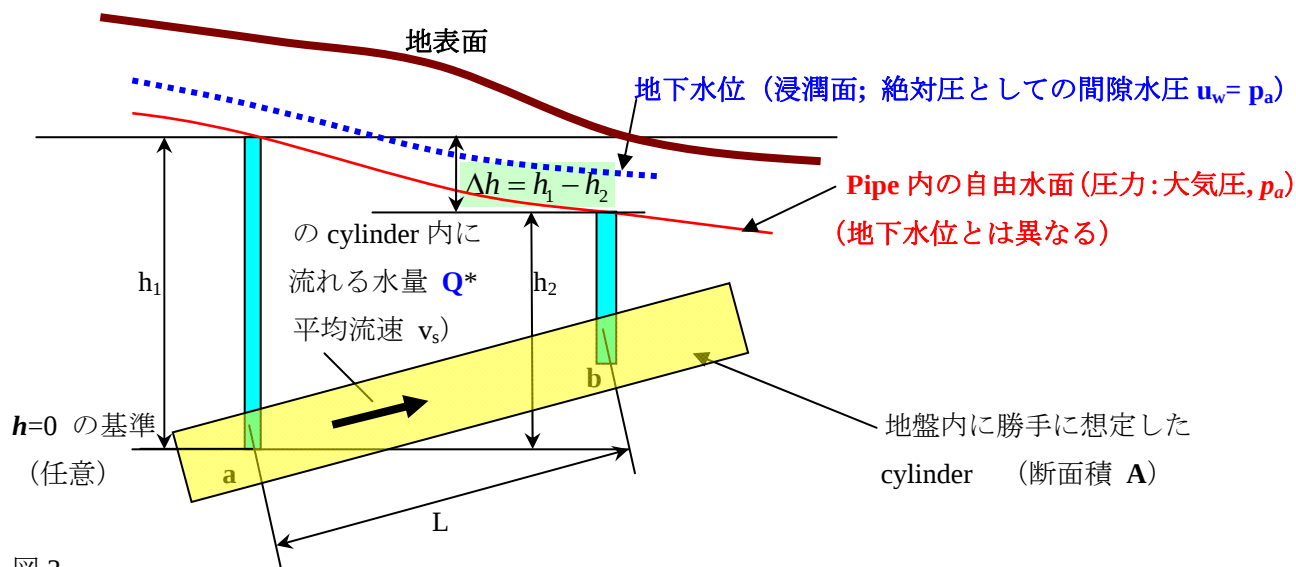


図 3

○ この cylinder 内の流量は、 $Q^* = v_s \cdot A = k \cdot i_s \cdot A = k \cdot (\Delta h / L) \cdot A$; $i_s = \Delta h / L = (h_1 - h_2) / L$

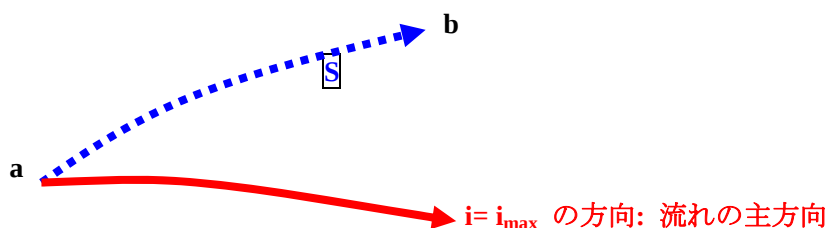
○ この cylinder の軸方向は、この場所の流れの主方向と一致しているとは限らない。

* なぜならば、**定常状態の流れの主方向**は、地下水面に平行的である。

* 「任意の 2 点 a, b 間の平均流速」が、その位置での最大の流速とは限らない。

つまり、**S**方向の動水勾配: $i_s = \frac{\partial h}{\partial s}$ とすると、**S**方向の流速は、 $v_s = k_s \cdot i_s$ (k_s は **S**方向の透水係数)。

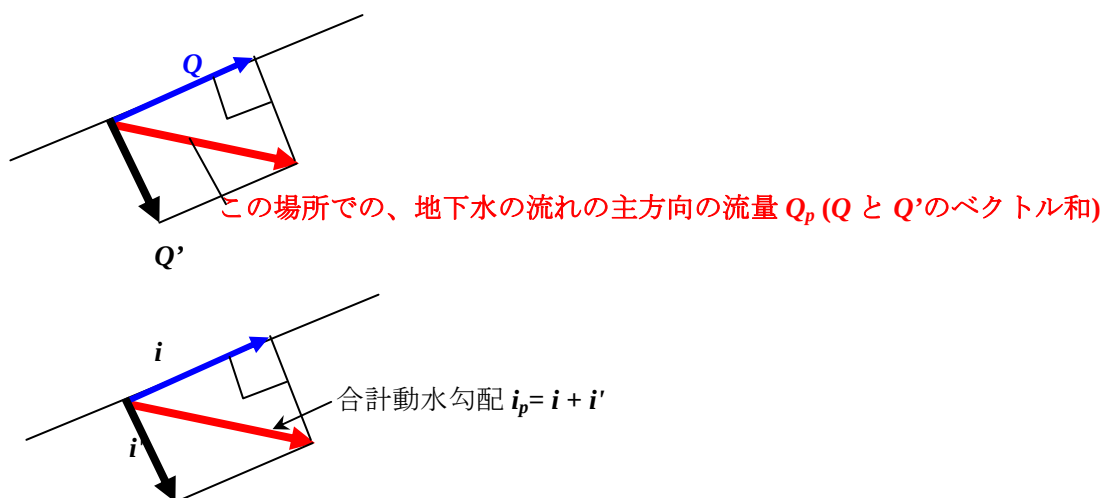
図 3a

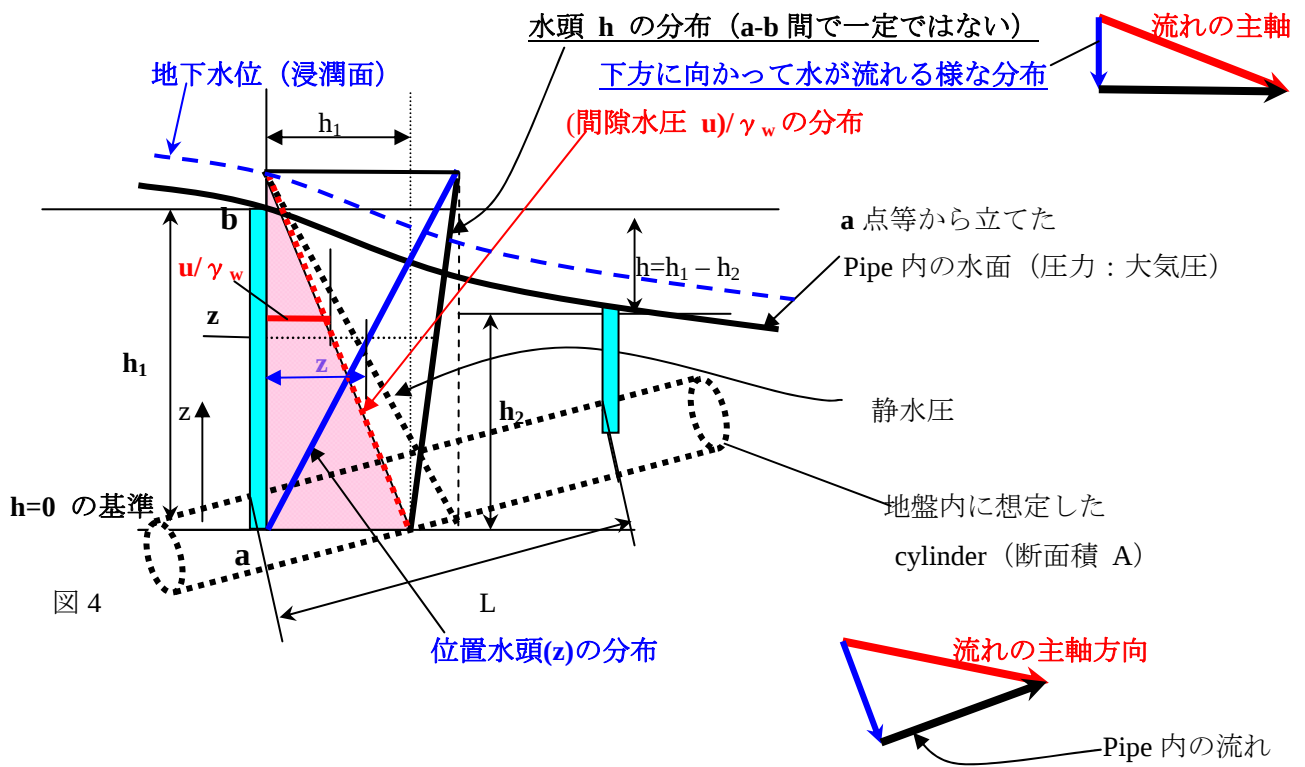


この図の場合は、cylinder の軸方向は**流れの主方向**と一致していない。

場所の**主方向の流量** Q_p は、**S**方向の流量 Q よりも大きい。

図 3b





4. 2 透水係数

室内での求め方

a) 定水位透水試験

k が大きいときに適切。すぐ、答えが求まる。

k が小さいと、単位時間あたりの流量 Q が少ないので、すぐ答えが求まらないし、精度が出ない。

(しかし、現在は電子天秤等を用いることが出来て、Q の測定精度が向上したので、k が小さくてもこの試験法で OK)

$$\text{流量} : Q \cdot dt = k \cdot A \cdot \frac{h}{L} \cdot dt$$

$$k = \frac{Q \cdot L}{h \cdot A}$$

b) 降水位透水試験

k が小さいときに適切。答えを得るのに時間がかかるが、正しい答えが求まる。

$$\text{流量} : -a \cdot dh = k \cdot A \cdot \frac{h}{L} \cdot dt$$

$$\text{積分して、} -\int_{h_0}^{h_1} a \cdot dh = \int_{t=0}^{t_1} k \cdot A \cdot \frac{h}{L} \cdot dt$$

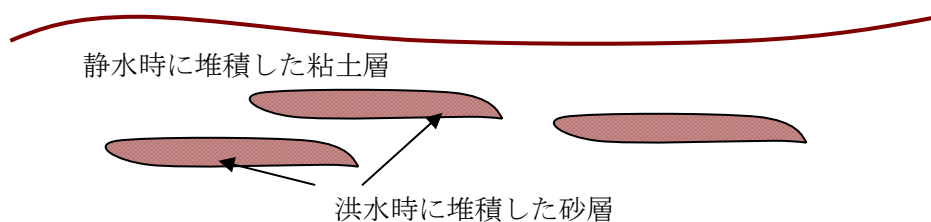
$$-\int_{h_0}^{h_1} d(\ln h) = \int_{t=0}^{t_1} \frac{k \cdot A}{a \cdot L} \cdot dt : \quad \ln \frac{h_0}{h_1} = \frac{k \cdot A}{a \cdot L} \cdot t_1$$

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t_1} \ln \frac{h_0}{h_1} : \quad k = \frac{\ln 10 \cdot a \cdot L}{A \cdot t_1} \log_{10} \frac{h_0}{h_1} = \frac{2.3 \cdot a \cdot L}{A \cdot t_1} \log_{10} \frac{h_0}{h_1}$$

4. 2. 2 透水係数の値（教科書 72 頁図 4.11）

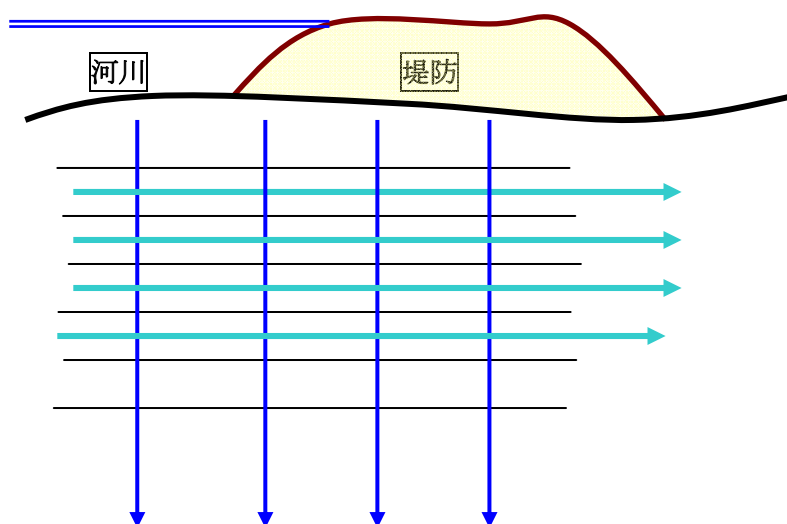
成層地盤の透水係数

成層地盤の例： a) 河川堆積



b) 盛土

盛り立て時により、土質が異なる。粘性土が多い層。砂分が多い層。



鉛直方向の平均透水係数 k_v と、各層の透水係数との関係は？

*砂層の中に、 k が特に小さい粘土層があれば、その粘土層(透水係数 k_c 、非常に小さい)のため、実質的に不透水になる。大略 $k_v = k_c$ (非常に小さい) となる。

→この粘土層の存在を見逃すと、鉛直方向の平均透水係数 k_v を著しく過大評価する。

水平方向の平均透水係数 k_h と、各層の透水係数との関係は？

*粘土層中に、 k が特に大きい砂層があれば、その砂層(透水係数 k_s 、非常に大きい)のため、実質的に透水性になる。

大略 $k_h = k_s$ (非常に大きい)となる。

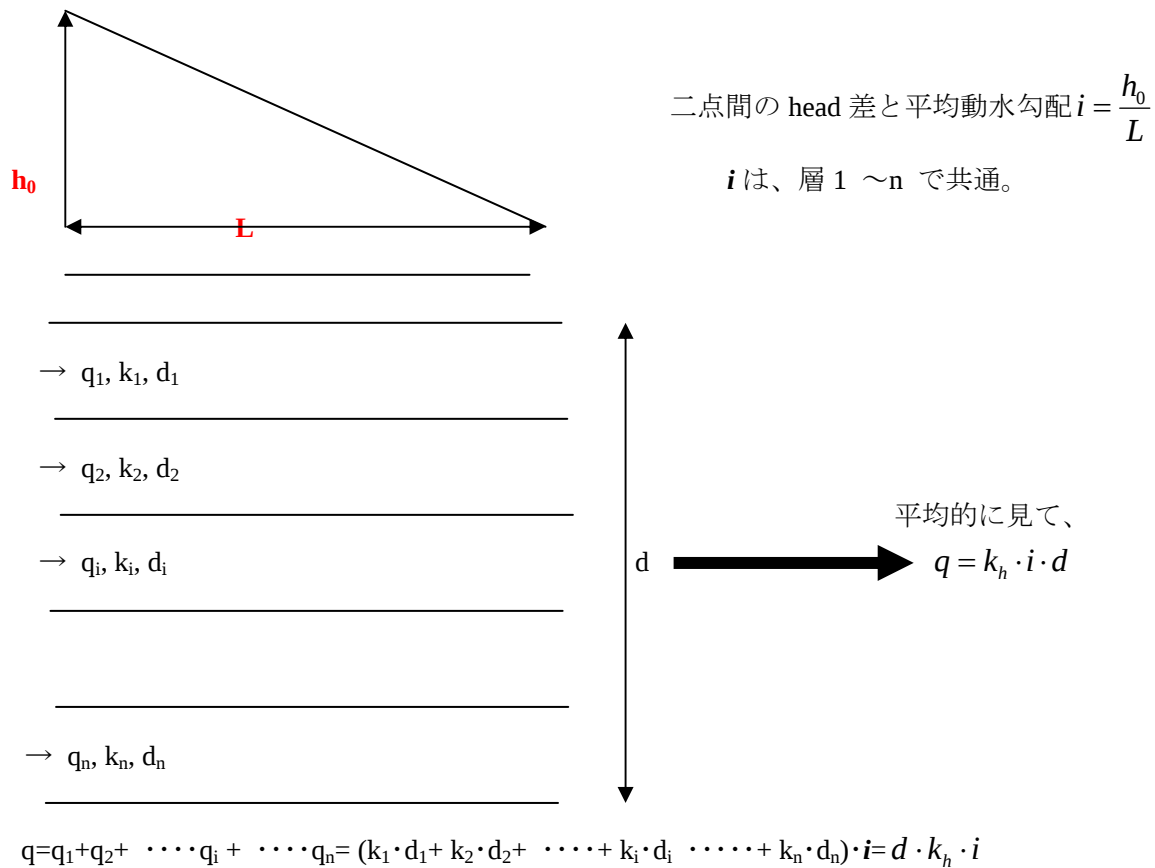
→この砂層の存在を見逃すと、水平方向の平均透水係数 k_h を著しく過小評価する。

例) ダム：河川堤防の支持地盤の透水性の評価の問題。

●従って、成層地盤の平均的透水特性は、通常非常に異方的 ($k_h \gg k_v$) である。

第4章 透水

(1) 水平方向の平均透水係数 k_h

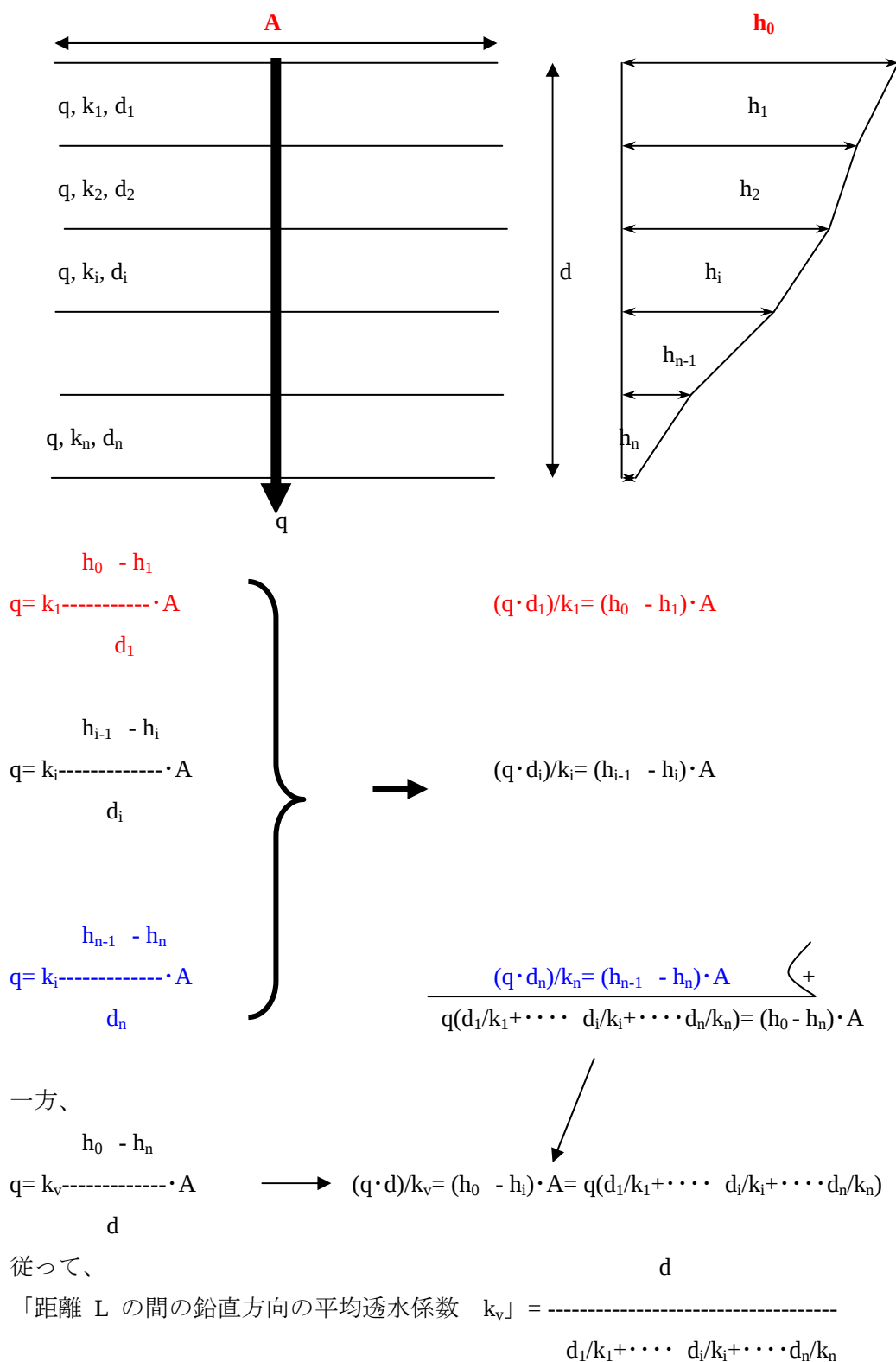


「距離 L の間の水平方向の平均透水係数 k_h 」 =
$$\frac{k_1 \cdot d_1 + k_2 \cdot d_2 + \dots + k_i \cdot d_i + \dots + k_n \cdot d_n}{d}$$

- k が非常に小さい層は、厚さが大きくても影響は小さい。
- k が非常に大きな層の影響は、厚さが小さくても影響は大きい（例、 $k_i = \infty$ ならば $k_h = \infty$ ）。

(2) 鉛直方向の平均透水係数 k_v

流量 q は層 1~n で共通



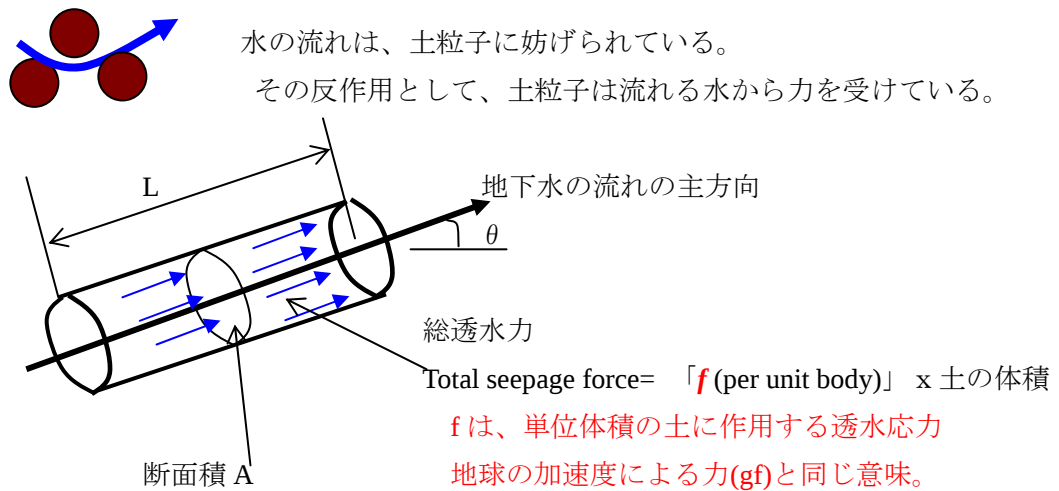
→ k が非常に大きな層は、厚さが大きくても影響は小さい。

→ k が非常に小さな層の影響は、厚さが小さくても影響は大きい（例、 $k_i = 0$ ならば $k_v = 0$ ）。

第4章 透水

4. 3 透水安定性

4. 3. 1 透水力 f (地球の重力のような body force)

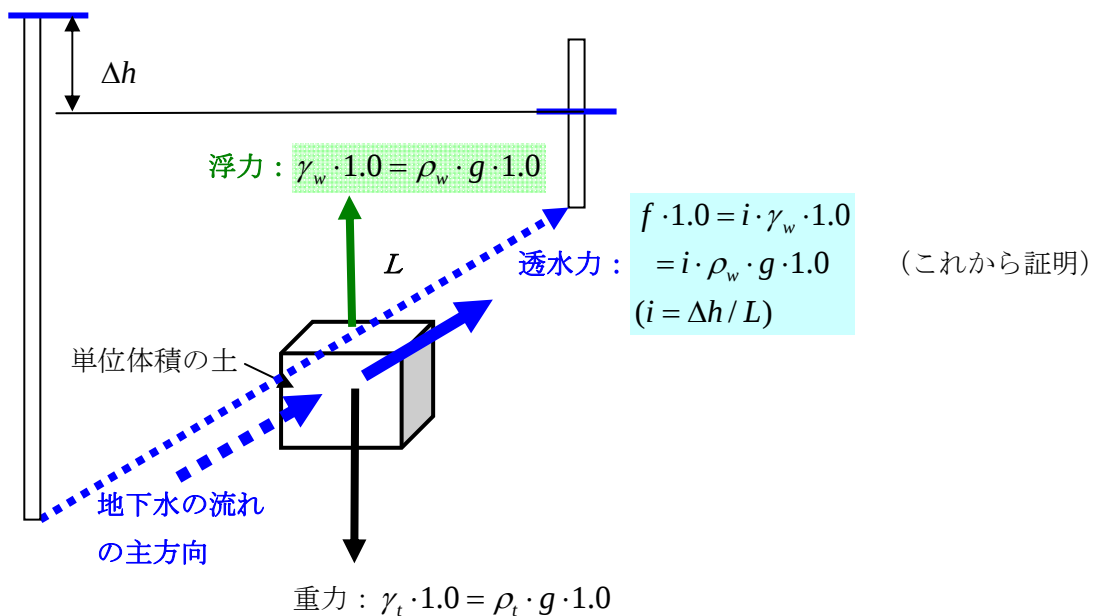


単位体積あたりの透水力 f の単位 : $f = i \cdot \gamma_w$ (gf/cm³) : $f = i \cdot \rho_w \cdot g$ (kN/m³)

$$1 \text{ gf/cm}^3 = 9.8 \text{ kN/m}^3$$

1N = 1kg の物質に 1m/sec² = (0.98/10 f) の加速度を与える力なので、これを用いて換算する。

(マクロ的に見た地下水位以下の土に作用する三つの力)



透水力 f と地下水に平均的流れ速度 v との関係は？

注) 必ずしも、流れの主方向に沿って考察する必要はない。ある方向 x の透水力 f_x は、 x 方向の動水

勾配 $i_x = \frac{\partial h}{\partial x}$ (これに対応するのが x 方向の流速成分 $v_x = i_x \cdot k$) に対して、 $f_x = i_x \cdot \gamma_w$ のようにして

求まる。

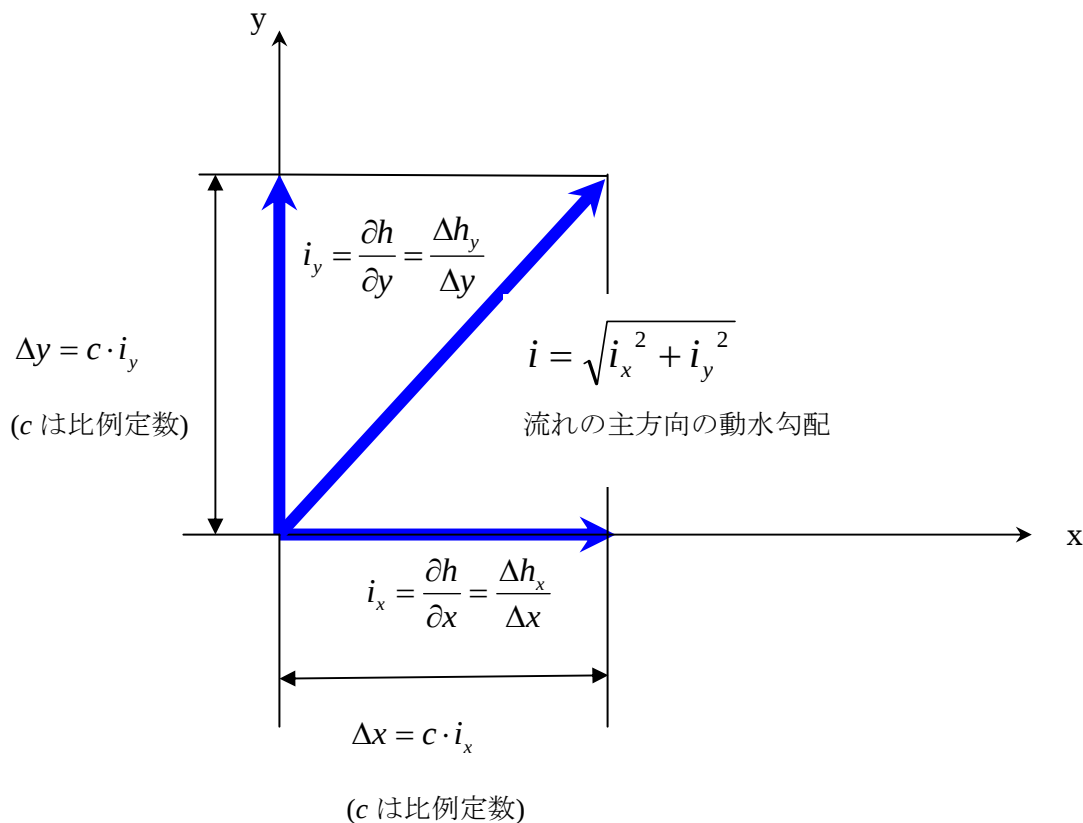
今、一様等方地盤内の一様な流れ（流れの方向が直線上）を考える。

(1) 動水勾配はベクトル和： $i = \sqrt{i_x^2 + i_y^2}$

(2) 流れの主方向の動水勾配の定義： $i = \frac{\Delta h}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}$; $\Delta h = \Delta h_x + \Delta h_y$

(1)と(2)は同時に成り立っている。なぜならば、 Δy と Δx を、それぞれ i_x と i_y に比例した長さになるように決めると、

$$\begin{aligned} i &= \frac{\Delta h}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} = \frac{\Delta h_x + \Delta h_y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} = \frac{i_x \cdot \Delta x + i_y \cdot \Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \\ &= \frac{i_x \cdot c \cdot i_x + i_y \cdot c \cdot i_y}{\sqrt{(c \cdot i_x)^2 + (c \cdot i_y)^2}} = \frac{c \cdot (i_x^2 + i_y^2)}{\sqrt{(c \cdot i_x)^2 + (c \cdot i_y)^2}} = \sqrt{i_x^2 + i_y^2} \end{aligned}$$



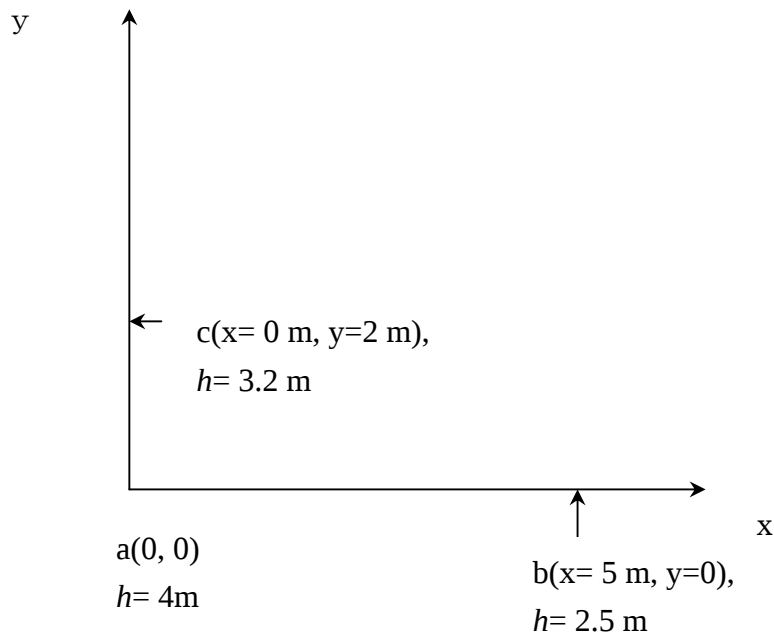
従って、流れの主方向の流速も $v_x = i_x \cdot k$ と $v_y = i_y \cdot k$ のベクトル和であり、

透水力 f も、 $f_x = i_x \cdot \gamma_w$ と $f_y = i_y \cdot \gamma_w$ のベクトル和である。

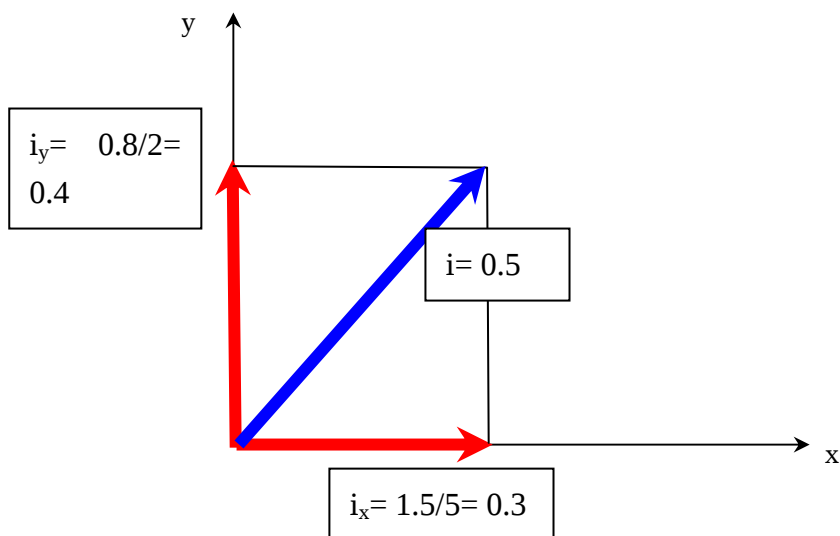
第4章 透水

透水演習 2)

下図のように、点 $a(x=0, y=0)$ での水頭を 4 m として、点 $b(x=5\text{ m}, y=0)$ で水頭 3.85 m が、点 $c(x=0\text{ m}, y=2\text{ m})$ で 3.2 m が観察された。流れの主方向を求め、その方向の動水勾配 i を求めよ。



[答]



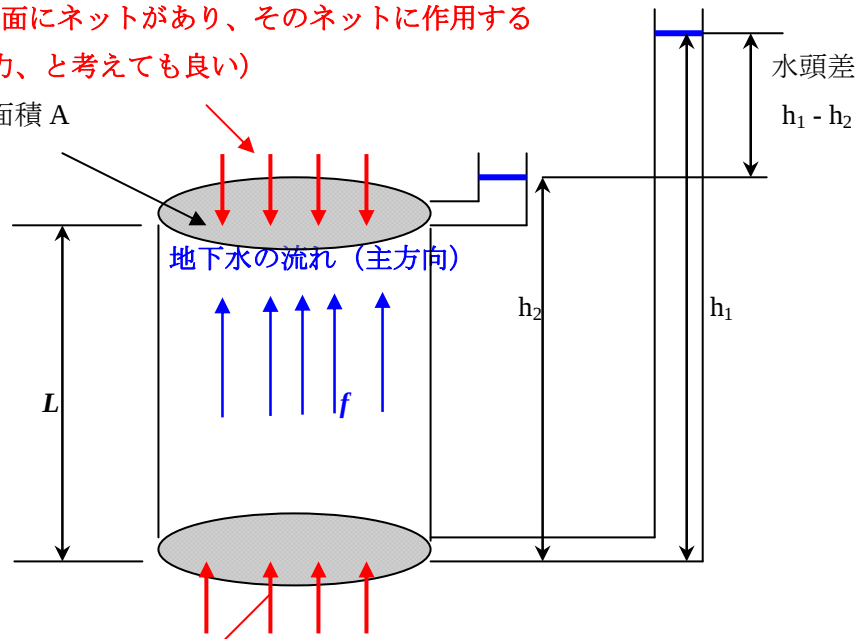
以下では、地下水の「流れの主方向」に対して考察する。まず簡単な場合から。

「地下水の流れの主方向が鉛直上方の場合」

F2: 「この面で土粒子に作用する力」／「面積 A」: 有効応力に相当

(この面にネットがあり、そのネットに作用する
応力、と考えても良い)

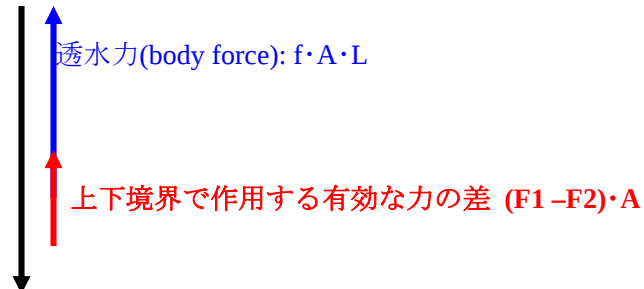
断面積 A



F1: 「この面で土粒子に作用する力」／「面積 A」: 有効応力に相当

土粒子に作用する力で考えると（水圧を考えない有効応力的思考）

土粒子に作用する「地球の
重力」マイナス「浮力(body force)」:
= $\gamma' \cdot A \cdot L$ (γ' を用いて
いるので、浮力は考慮済み)

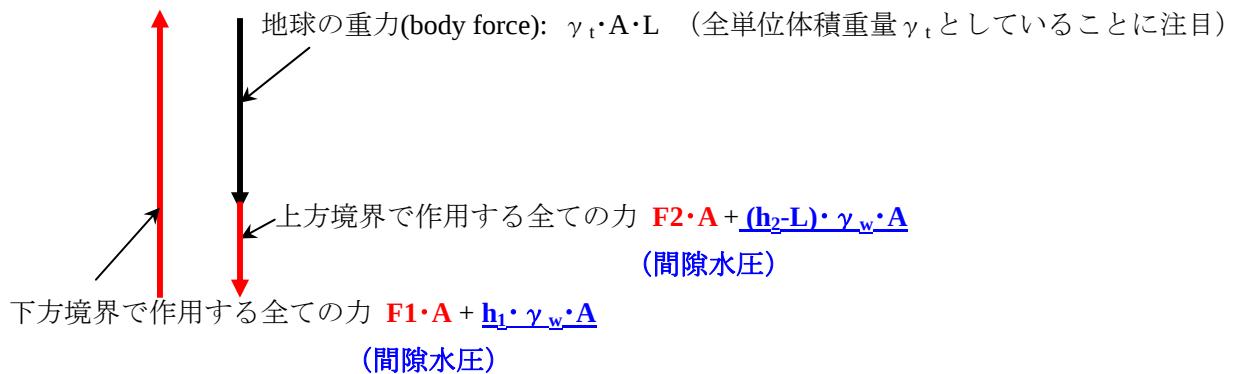


$$\gamma' \cdot A \cdot L = f \cdot A \cdot L + (F1 - F2) \cdot A \quad (1a)$$

または、
$$\gamma' \cdot A \cdot L - f \cdot A \cdot L = (F1 - F2) \cdot A \quad (1b)$$

土粒子と間隙水を一体として考えると（全応力的思考）

●透水力 f は内力となり、考える必要がなくなる。



従って、
$$F1 \cdot A + h1 \cdot \gamma_w \cdot A = \gamma_t \cdot A \cdot L + F2 \cdot A + (h2-L) \cdot \gamma_w \cdot A \quad (2a)$$

$$(F1 - F2) \cdot A = - (h1 - h2) \cdot \gamma_w \cdot A + (\gamma_t - \gamma_w) \cdot A \cdot L \quad (2b)$$

式(1)と式 (2)から、 $(F1 - F2) \cdot A$ を消すと、

$$\gamma' \cdot A \cdot L - f \cdot A \cdot L = - (h1 - h2) \cdot \gamma_w \cdot A + (\gamma_t - \gamma_w) \cdot A \cdot L \quad (3a)$$

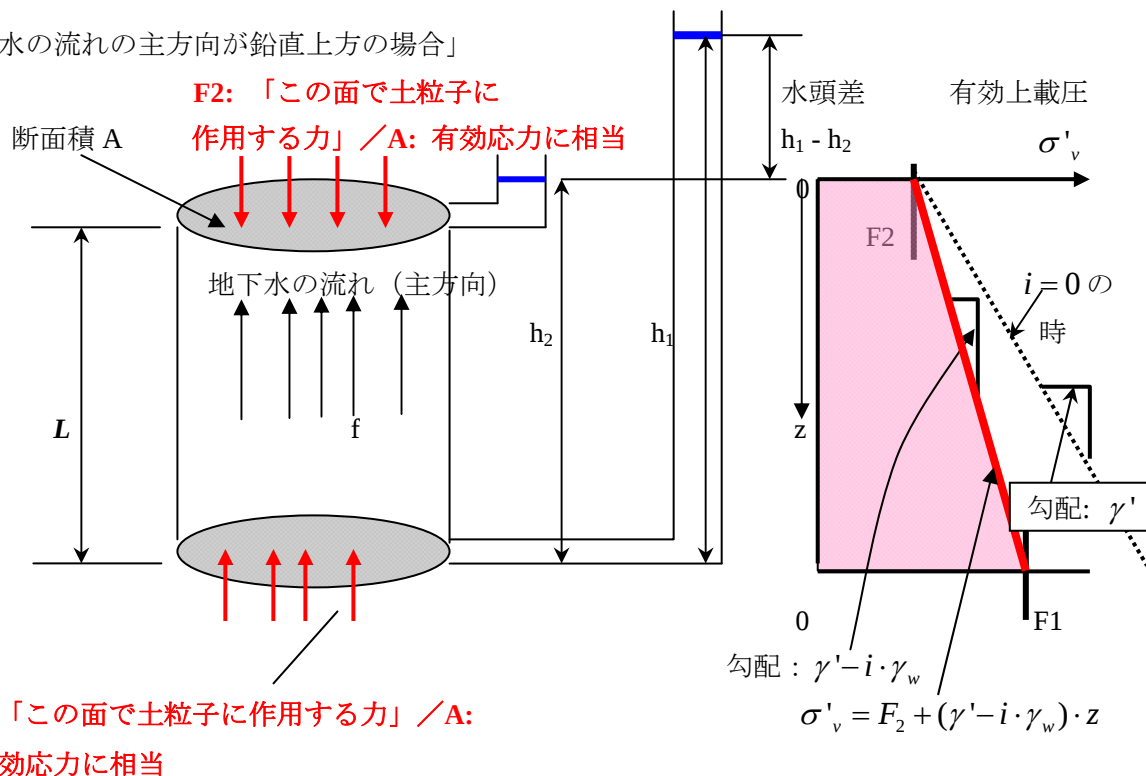
$$(h1 - h2) \cdot \gamma_w \cdot A + \underbrace{\gamma' \cdot A \cdot L - (\gamma_t - \gamma_w) \cdot A \cdot L}_{\text{zero}} = f \cdot A \cdot L \quad (3b)$$

透水力 (単位は単位体積重量) $f = \frac{h1 - h2}{L} \cdot \gamma_w = i \cdot \gamma_w$

- 1) f が大きいほど、土塊を持ち上げる総透水力 $f \cdot A \cdot L$ は、大きくなる。
- 2) f は、動水勾配 i に比例。
- 3) f は、透水係数 k には独立であることに注目。従って、土質（粘土、砂等）とは独立。
 同一の f でも、 k が大きいほど平均流速 v が大きくて、湧水量が多くなる。
 つまり、 f は、流速 $v = i \cdot k$, 流量 $q = v \cdot A = i \cdot k \cdot A$ とは直接関係ない。従って、湧水量だけ見ている、土を動かそうとする浸透力の大きさ、直接は分からない。
- 4) しかし、同一地盤で、 A が一定の条件の下で湧水量 q が急増してきたのならば、それは動水勾配 i が急増したか、地盤が破壊して地盤の透水係数 k が急増したためである。前者の場合は、浸透力 f の急増を表していて、後者の場合は地盤が破壊しつつあることを示していて、いずれにせよ地盤破壊の危険が切迫していることになる。

定性

「地下水の流れの主方向が鉛直上方の場合」



(1)式から、

$$\begin{aligned} (F1 - F2) &= (\gamma' - f) \cdot L \\ &= (\gamma' - i \cdot \gamma_w) \cdot L \quad (4) \end{aligned}$$

↑ 見かけの土の水中単位体積重量

この場合も ; $i = \frac{h_1 - h_2}{L}$

鉛直方向の有効応力の増加率 :

$$\frac{d\sigma'_v}{dz} = \frac{\Delta\sigma'_v}{L} = \frac{F1 - F2}{L} = \gamma' - f = \gamma' - i \cdot \gamma_w \quad (= \text{見かけの水中重量}) \quad (4b)$$

今、上面での有効拘束圧 $F2=0$ にした状態を考える。

$$(4) \text{式から} \quad F1 = (\gamma' - i \cdot \gamma_w) \cdot L \quad (5)$$

(Q) $F2=0$ の時、 $F1=0$ となったならば、どうなるか。(A) 長さ L 全体に亘って、土粒子を拘束している鉛直方向の応力 (有効応力) σ'_v がゼロになる。同時に水平方向の応力 (有効応力) σ'_h もゼロになる。

→ 真の粘着力がない土ならば、まさに液体のようになろうとする。

 $F2=0$ で $F1=0$ となる条件

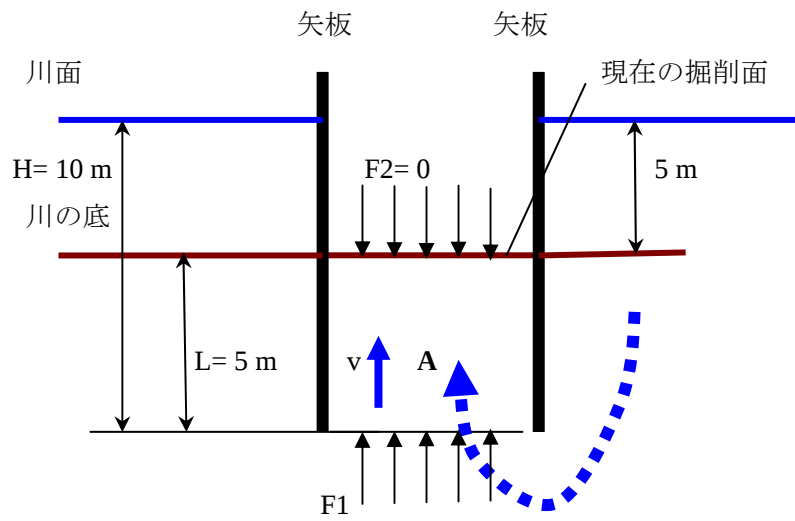
$$(5) \text{式から} \quad i = \frac{\gamma'}{\gamma_w} (= i_c) \quad (6)$$

$$i_c: \text{限界動水勾配: } i_c = \frac{G_s - 1.0}{1.0 + e}$$

1) 間隙比 e が大きいほど、小さくなる。2) G_s は 2.7 程度なので、 $e=0.7$ 程度の砂では、 $i_c=1.0$ 程度。

第4章 透水

下図の場合、 $i = \frac{H-L}{L} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} (= i_c)$; $i_c = 1.0$ ならば、 $H=2L$ の時に限界状態になる。

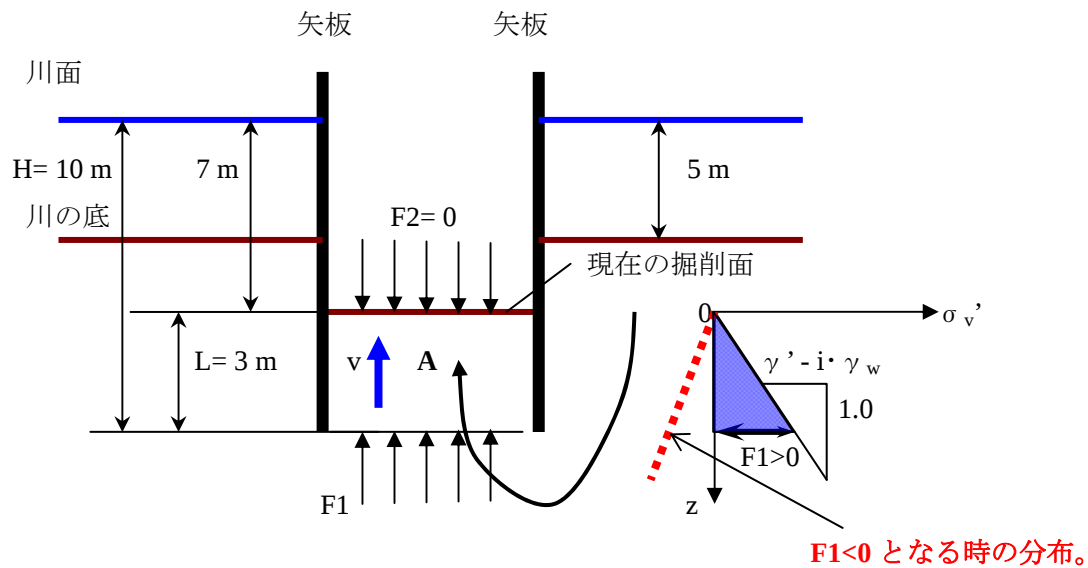


この場合、地盤要素 A の上下面での水頭差 $\Delta h = 5\text{ m}$

従って、動水勾配 $i = \Delta h / L = 5 / 5 = 1.0$

(Q) $F_2=0$ の時で、 $F_1<0$ となったならば、どうなるか。

例)



この場合、地盤要素 A の上下面での水頭差 $\Delta h=7\text{ m}$

従って、動水勾配 $i= \Delta h/L= 7/3= 2.33$

(A) (4)式から 見かけの土の水中単位体積重量 $(\gamma' - i \cdot \gamma_w) < 0$ (7)

→ 上方に対して、動き始める。

$$i < i_c \text{ の時の力のつり合い: } \gamma' \left\{ 1 + \frac{d^2 u}{dt^2} \cdot \frac{1}{g} \right\} - i \cdot \gamma_w = 0$$

u は、砂粒子の上方への変位量。 $\gamma' (d^2 u/dt^2)/g$ は上方への慣性力。

この式から、 $(\gamma' - i \cdot \gamma_w) < 0$ の時は、上方に対して加速運動が生じる。

→ ◎砂は、沸騰したようになる (Boiling)。

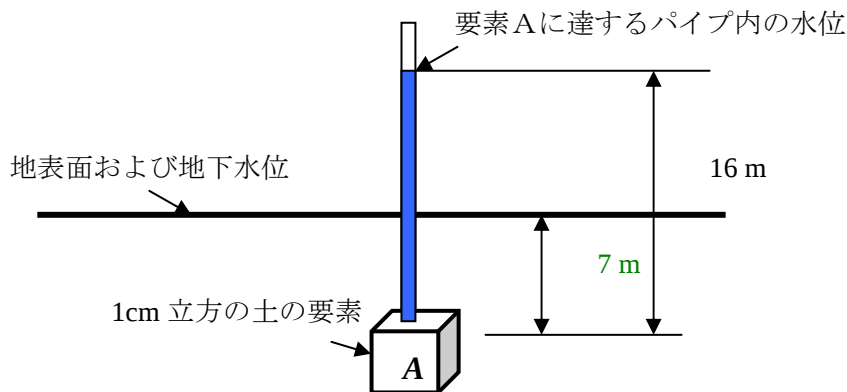
◎粘性土でも、液体のようになる。

→ 真の粘着力がある土でも、周辺摩擦がないのならば、領域 A は全体として浮き上がる。

第4章 透水

透水演習 3)

下図に示す一様な細砂地盤内の 1 cm 立方の要素 A（間隙比 $e=0.7$ ，粒子比重 $G_s=2.7$ ）に作用する三種類の力を示し、それぞれの大きさと方向を示せ。水の単位体積重量を γ_w 、密度を ρ_w とせよ。また、この地盤の安定性を述べよ。



[答]

要素 A には、下方に重力： $\gamma_t \cdot 1.0 = \rho_t \cdot g \cdot 1.0$ (gf) が、上方に浮力 $\gamma_w \cdot 1.0 = \rho_w \cdot g \cdot 1.0$ (gf) と透水力 $f \cdot 1.0 = i \cdot \gamma_w \cdot 1.0 = i \cdot \rho_w \cdot g \cdot 1.0$ ($i = \Delta h / L$) (gf) が作用している。

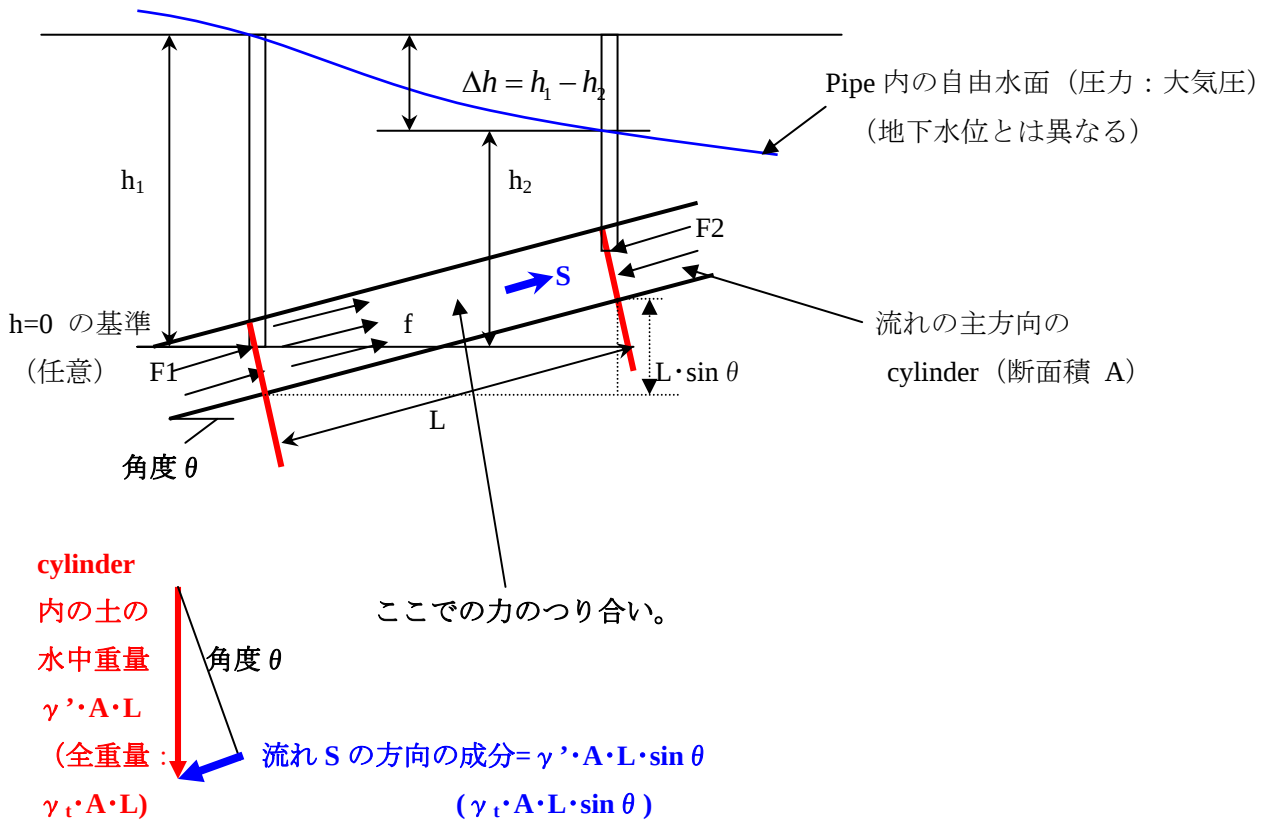
動水勾配は $i = \frac{16-7}{7} = 1.29$ 、従って上方への透水力は $f = i \cdot \gamma_w = 1.29 \cdot \gamma_w$ (gf)

砂の水中単位体積重量は $\gamma' = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w = \frac{2.7 - 1}{1 + 0.7} \gamma_w = \gamma_w$ 。

上方への透水力が「砂の重力-浮力」 $= \gamma' \cdot 1.0 = \gamma_w \cdot 1.0$ (gf) よりも大きいので、地盤は不安定になり、液体のようになる。

第4章 透水

「では、流れの主方向が傾斜している場合の地盤の透水安定性は？」



土粒子に流れの主方向に作用する力のつり合いは、

$$\text{間隙水圧を考慮しないで、} \quad \gamma' \cdot A \cdot L \cdot \sin \theta = f \cdot A \cdot L + (F_1 - F_2) \cdot A \quad (1a')$$

$$\text{または、} \quad \gamma' \cdot A \cdot L \cdot \sin \theta - f \cdot A \cdot L = (F_1 - F_2) \cdot A \quad (1b')$$

土粒子と間隙水を一体として考えた時の力のつり合いは、

$$F_1 \cdot A + h_1 \cdot \gamma_w \cdot A = \gamma_t \cdot A \cdot L \cdot \sin \theta + F_2 \cdot A + (h_2 - L \cdot \sin \theta) \cdot \gamma_w \cdot A \quad (2a')$$

$$(F_1 - F_2) \cdot A = -(h_1 - h_2) \cdot \gamma_w \cdot A + (\gamma_t - \gamma_w) \cdot A \cdot L \cdot \sin \theta \quad (2b')$$

(1b'), (2b')から、 $(F_1 - F_2) \cdot A$ を消すと、

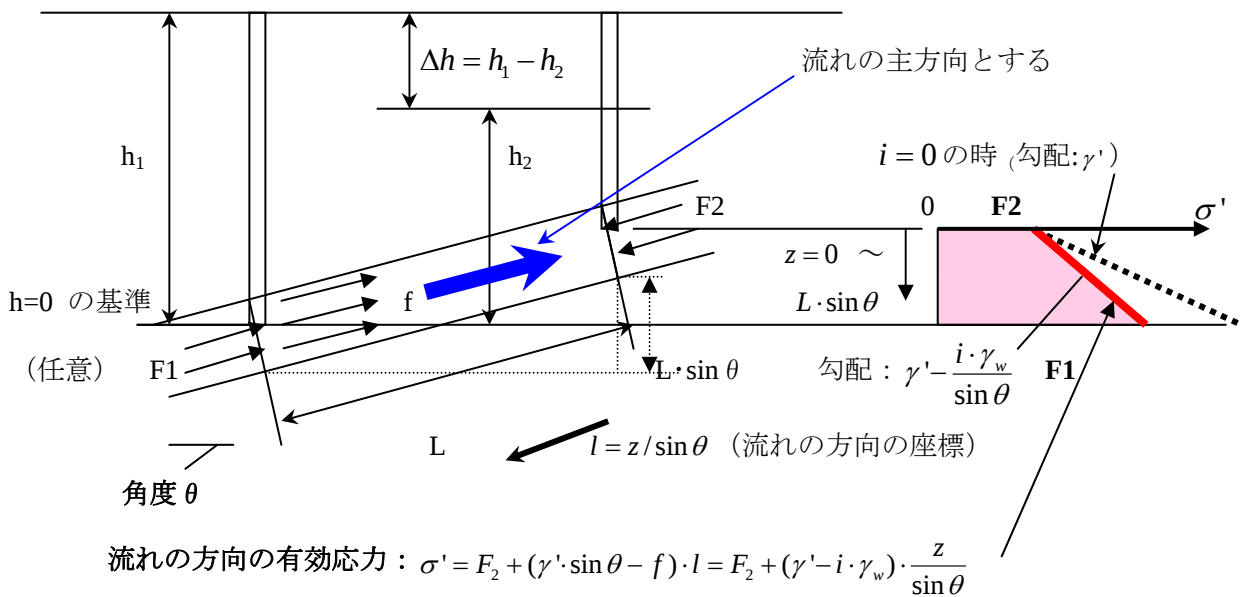
$$\gamma' \cdot A \cdot L - f \cdot A \cdot L = -(h_1 - h_2) \cdot \gamma_w \cdot A + (\gamma_t - \gamma_w) \cdot A \cdot L \cdot \sin \theta \quad (3a')$$

$$(h_1 - h_2) \cdot \gamma_w \cdot A + \underbrace{\gamma' \cdot A \cdot L \cdot \sin \theta - (\gamma_t - \gamma_w) \cdot A \cdot L \cdot \sin \theta}_{\text{zero}} = f \cdot A \cdot L \quad (3b')$$

$$\text{S の方向の透水力} \quad f = \frac{h_1 - h_2}{L} \cdot \gamma_w = i_s \cdot \gamma_w \quad (i \text{ は S の方向の動水勾配})$$

f に関する式の形は、同一の動水勾配 i_s に対して流れの方向 θ に関係ない。

ただし、地盤の透水に対する安定性は、 θ は大いに関係ある（次に説明）。



(1')式から、 $(F1 - F2) = (\gamma' \cdot \sin \theta - f) \cdot L$

$= (\gamma' \cdot \sin \theta - i \cdot \gamma_w) \cdot L$ (4')

見かけの土の水中単位体積重量の流れの方向の成分

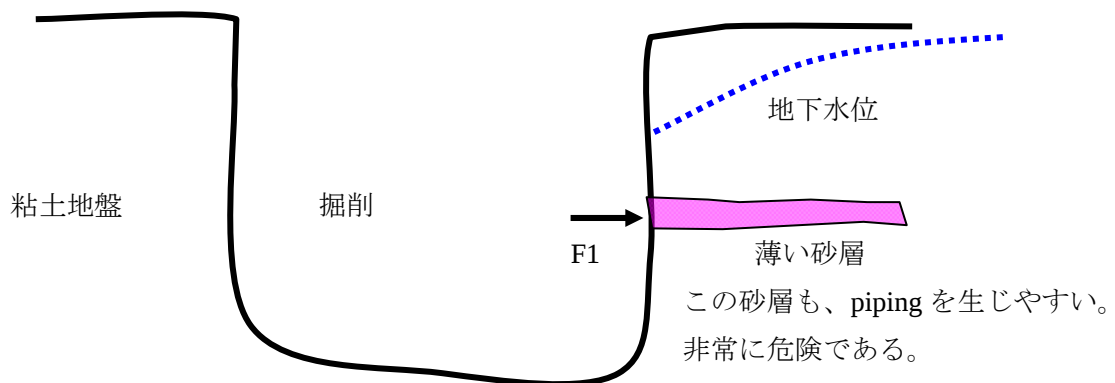
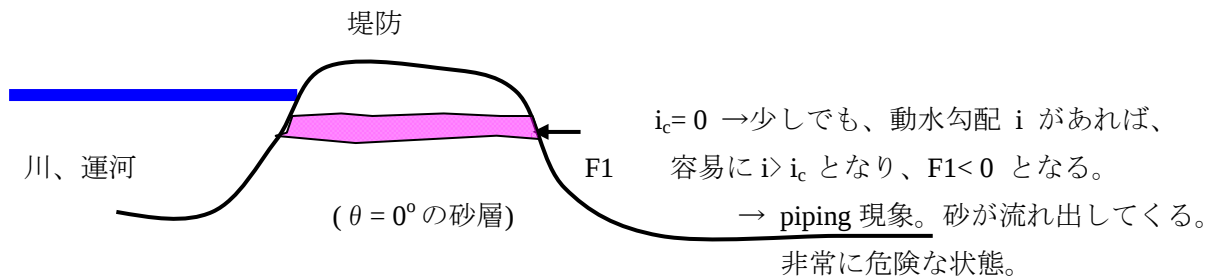
今、上からの有効拘束圧 $F2=0$ にした状態を考える。

(4')式から $F1 = (\gamma' \cdot \sin \theta - i \cdot \gamma_w) \cdot L$ ($\theta \leq 90^\circ$) (より一般的な式) (5')

$F1=0$ となる条件

(5')式から $i = \frac{\gamma' \cdot \sin \theta}{\gamma_w} (= i_c)$ ($\theta < 90^\circ$) (6') i_c : 限界動水勾配

(6')式 → 同一の条件では、 θ が 90° よりも小さくなるほど、 i_c は小さくなる。



注) これらの問題では、砂層と周囲の粘土地盤の間の摩擦が、piping 発生に抵抗しているので、

第4章 透水

実際の限界動水勾配 i_c は、(6')式による値よりも大きい。

(Q) $F_2 = 0$ の時で、 $F_1 < 0$ となったならば、どうなるか。

(A) (4')式から 見かけの土の水中単位体積重量の流れの方向の成分

$$(\gamma' \cdot \sin \theta - i \cdot \gamma_w) < 0 \quad (\theta < 90^\circ) \quad (7')$$

→ 流れの主方向に対して、動き始める。

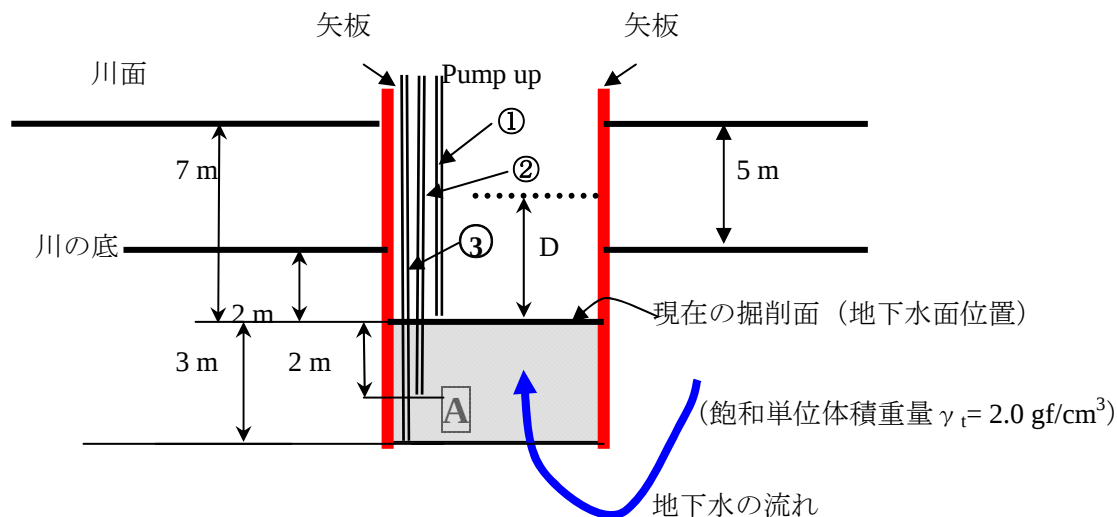
第4章 透水
透水演習 4)

下図の様に、河川の中で橋脚の建設のために地盤掘削工事をしていた。地盤の A の部分が十分強くないと、円形に配置した矢板が内側に倒壊する恐れがある。

現場に、新入社員の桂君が派遣されていた。掘削面では、多くの作業員が掘削作業をしていた。

(問1) 掘削面からの湧き水の量が、急に多くなってきた。作業員は、慌てふたむいた。不幸なことに、君以外に他に技術者は居なかった。緊急処置として、君は何をするか。その処置の理由も述べよ。

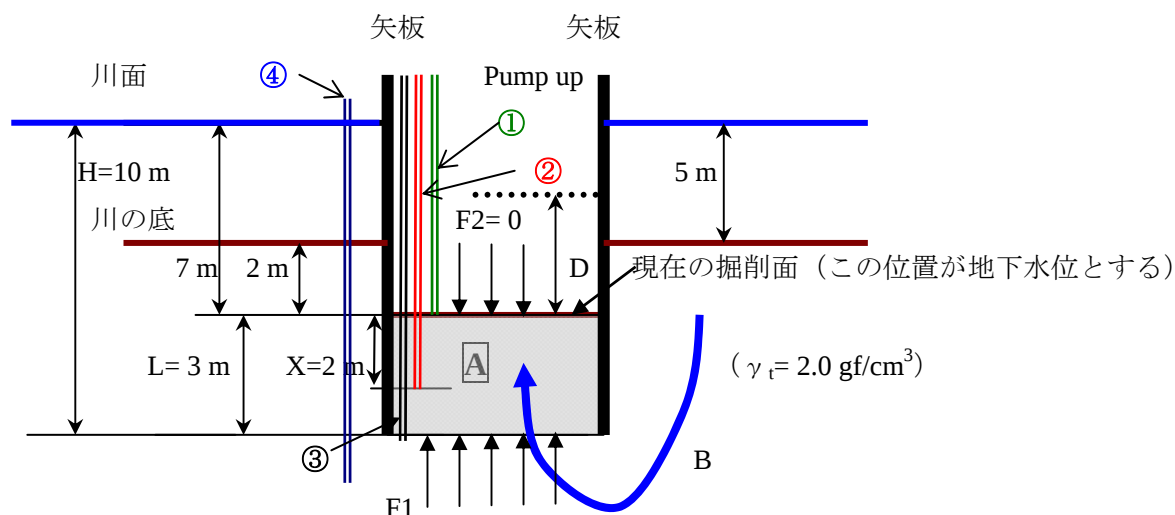
- 1) 前もって用意してあった強力な揚水ポンプを数台用いて、①のように掘削地盤面から排水し、湧き水を常に全部排水するようにする。適切な処置をしたから大丈夫であると、作業員を説得して、掘削作業を継続させる。
- 2) 前もって掘削面から 2 m 深い位置に吸水口を配置してあった排水孔②から、強力な揚水ポンプを数台用いて排水する。適切な処置をしたから大丈夫であると作業員を説得して掘削作業を継続させる。
- 3) 前もって掘削面の底面に吸水口を配置してあった排水孔③から、強力な揚水ポンプを数台用いて排水する。適切な処置をしたから大丈夫であると、作業員を説得して掘削作業を継続させる。
- 4) 直ちに作業員を待避させ、水を注入する。注入深さ D は、少なくとも
 - a) 川面の水位までとする。
 - b) 川の底の位置とする。
 - c) 4 m とする。
- 5) 掘削底面に直ちに防水シートをはり、その上に捨てコンクリートを打ち、湧き水が出てこないようにする。適切な処置をしたから大丈夫と、作業員を説得して、掘削作業を継続させる。



(問2) この矢板設計に不備があれば、批判せよ。

(問3) 前日まで、掘削面での湧き水は少なかった。現場監督していた先輩技術者長谷川氏は、「地盤の不安定性は掘削面からの湧き水の量に比例するので、湧水量の多少で判断すれば良い」、言っていた。この先輩技術者は、信頼するに足りるか？

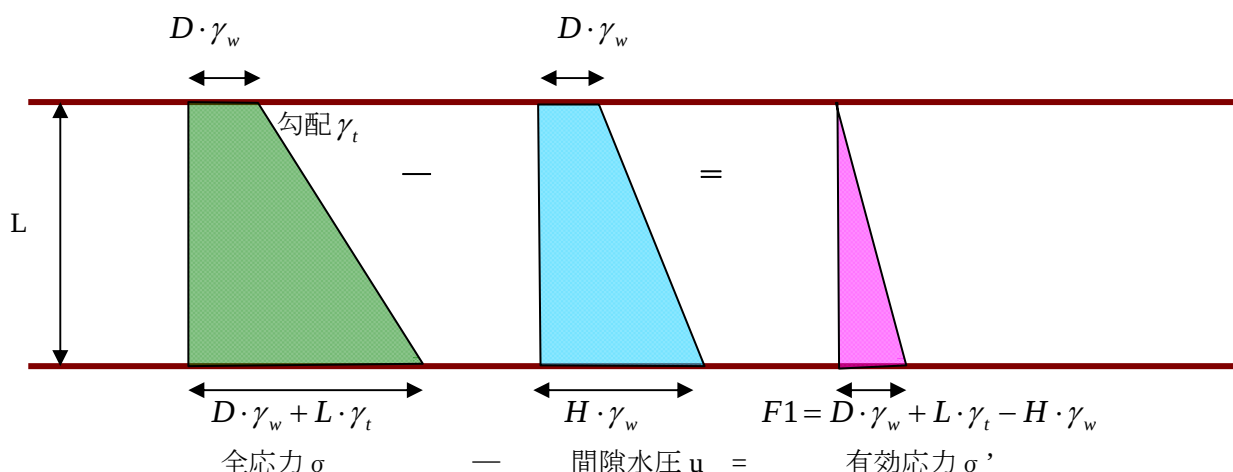
[答]



- 1) A の底面での水圧は、周囲の水域が十分広くて、B のような水の流れあっても、ほぼ周囲の静水圧に等しいとする。すると、動水勾配 i は、 $i = (H - L)/L = (10 - 3)/3 = 7/3$
→ 矢板の深さ(H)が大きいくほど、 i は小さくなり、A の領域は安定化する。
- 2) 限界動水勾配は、(6)式から $i_c = \gamma' / \gamma_w = 1.0$
- 3) 従って、 $i > i_c$ である。A の領域と周囲の矢板地盤の間の摩擦（信頼できない）が、A の領域が押し上げられるの抵抗しているの、このレベルまで掘削されるまで、かろうじて安定を保っていたと言える。
- 4) $H - L = 7 \text{ m}$ が工事の条件から必要ならば、 $i = i_c$ となる条件は、 $(H - L)/L = i_c = 1.0$ から、 $H - L = 7 \text{ m}$ に対して $L = 7 \text{ m}$ となる。従って、 $H = (H - L) + L = 7 \text{ m} + 7 \text{ m} = 14 \text{ m}$ 以上が、矢板と領域 A の間に摩擦が無くても、A の領域が安定する矢板の長さ。
- 5) 今のままで、緊急に安定化させるための注水する深さを $D \text{ m}$ とすると、

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = 1.0 \text{ なので、} i = (H - L - D)/L = i_c = 1.0 \text{ から、} D = 4 \text{ m。}$$

(別法) 以下のような応力・圧力の深度分布となる。

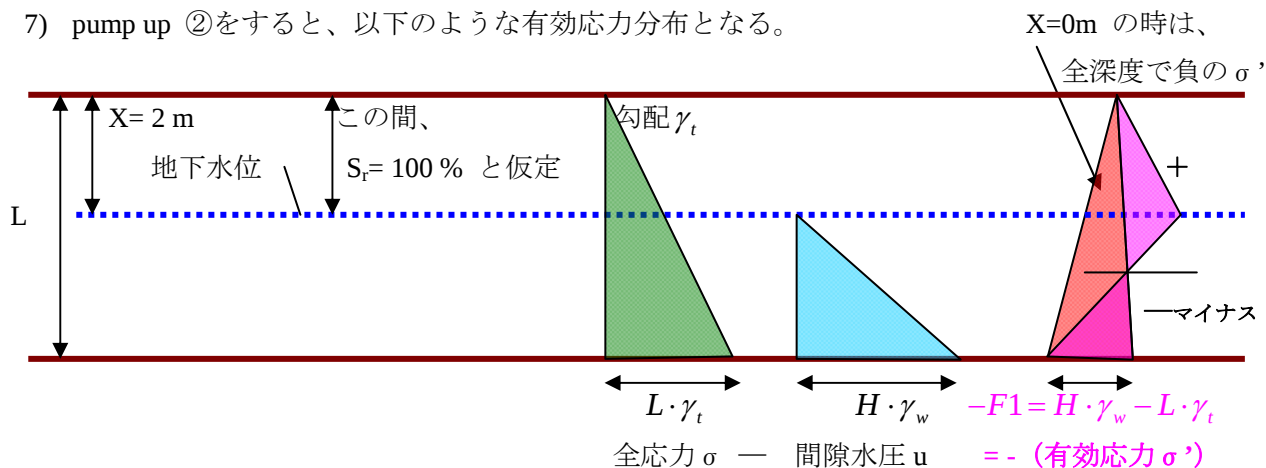


$$F1 = (\gamma' - i \cdot \gamma_w) \cdot L = \sigma = (D \cdot \gamma_w + L \cdot \gamma_t) - u = (H \cdot \gamma_w) \text{ が正であるためには、} D > H - \frac{\gamma_t}{\gamma_w} \cdot L = 4 \text{ m である}$$

必要がある。(この時の動水勾配: $i = \frac{H - L - D}{L}$)

- 6) 上図のように pump up ①をいくらしても、動水勾配 i は減少しないので、A の領域の透水安定性は全く改善されない。むしろ、掘削面よりも上に溜まった水を排水すると動水勾配 i を大きくするから、より危険になる。

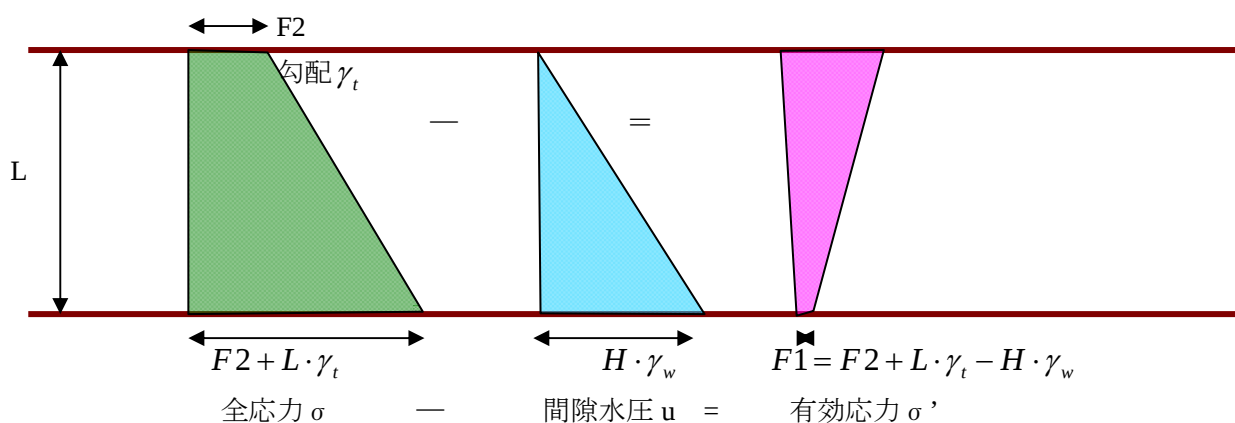
- 7) pump up ②をすると、以下のような有効応力分布となる。



従って、掘削面直下は安定するが、依然として不安定で強度が無くなっている層は残る。恒常的な解決策ではない。

- 8) pump up ③は、領域 A の底面の水圧を下げるので、 i が減少する。従って、L 領域の全体が安定化する。しかし、地盤の透水性が高いと、大量の地下水を汲み上げなければならないので、効果が出ないことになる。
- 9) 押さえ $F2$ が十分大きければ、安全になる。

以下のような有効応力分布となる。



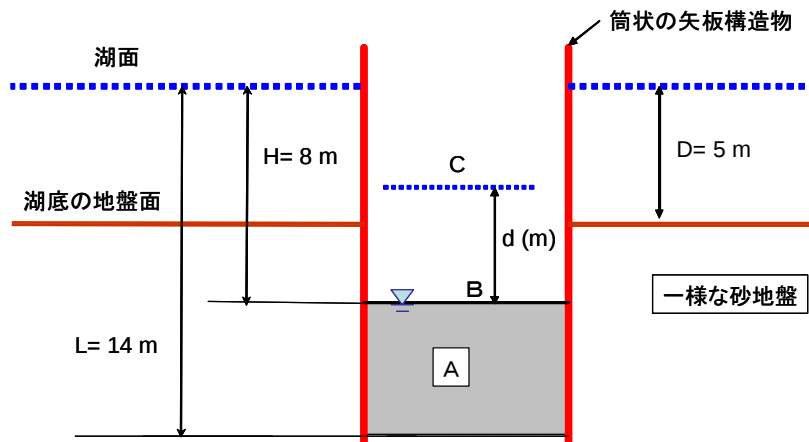
$F1 = F2 + (\gamma' - i \cdot \gamma_w) \cdot L = F2 + L \cdot \gamma_t - H \cdot \gamma_w$ が正であるためには、

$$(i = \frac{H-L}{L})$$

$F2 > (H \cdot \gamma_w - L \cdot \gamma_t)$ である必要がある。 $10 \text{ tonf/m}^2 - 6 \text{ tonf/m}^2 = 4 \text{ tonf/m}^2$

かなり大量のコンクリートが必要となる。

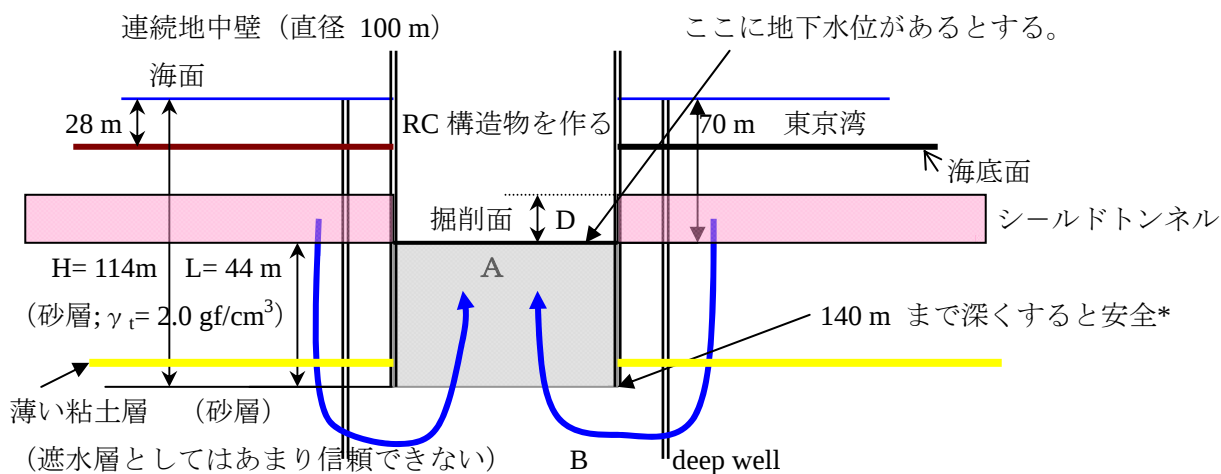
下図のように、湖内で一様な砂地盤（平均間隙比 $e = 0.7$ ，粒子比重 $G_s = 2.7$ ）内に筒状の矢板構造物を建設している。掘削面 B の位置に地下水位がある。領域 A の底面での間隙水圧は、周囲の地盤内での静水圧に一致しているとする。



次の問に答えよ。

- 領域 A 内の動水勾配 i の値を求めよ。
- 領域 A は、下方から上方への透水により不安定である。その理由を説明せよ。
- 矢板構造物内にどれだけの水深 $d\text{(m)}$ の水を注入すると領域 A は安定化するかを、答えよ。

下図は東京湾横断道路で川崎側人工島を建設して時に発生した時の状況を表している。



「Deep well が有効に働いていて、かつ薄い粘土層が遮水層として機能して、A の領域の底面での水圧が十分低く下がっている」場合は安全である。しかし、そうでないとななるか？

[答]

- 領域 A の底面での水圧は、周囲の水域が十分広くて、B のような水の流れあっても、ほぼ周囲の静水圧に等しいとする。

すると、動水勾配 i は、 $i = (H - L)/L = (114 - 44)/44 = 70/44 = 1.59$

- 仮に、A の領域（砂的）での透水係数を $k = 10^{-2} \text{ cm/sec} = 10^{-4} \text{ m/sec}$ とすると、湧水量は、流量で $q = v \cdot A = i \cdot k \cdot A = 1.59 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec} \cdot (50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times \pi) = 1.2 \text{ m}^3/\text{sec}$ 。これは、大量の湧水。

- 限界動水勾配は、(6)式から $i_c = \gamma' / \gamma_w = 1.0$ 。

従って、 $i > i_c$ である。「Deep well 機能+ 粘土層遮水効果」が有効に働かなければ、非常に危険。A の土塊が、浮き上がる危険がある。A の地盤の破壊。周囲の地盤の破壊。地下連壁の破壊。人工島全体の破壊。

- 今のままで、緊急に安定化させるための注水する深さを $D \text{ m}$ とすると、

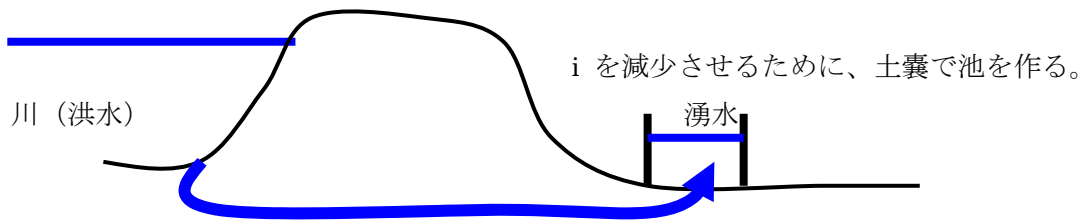
$$i = (H - L - D)/L = (114 - 44 - D)/44 = i_c = 1.0 \text{ から、} D = 26 \text{ m。}$$

- 掘削深度 $H - L = 70 \text{ m}$ が工事の条件から必要ならば、

$$i = i_c \text{ となる条件は、} (H - L)/L = i_c = 1.0 \text{ から、} L = 70 \text{ m。}$$

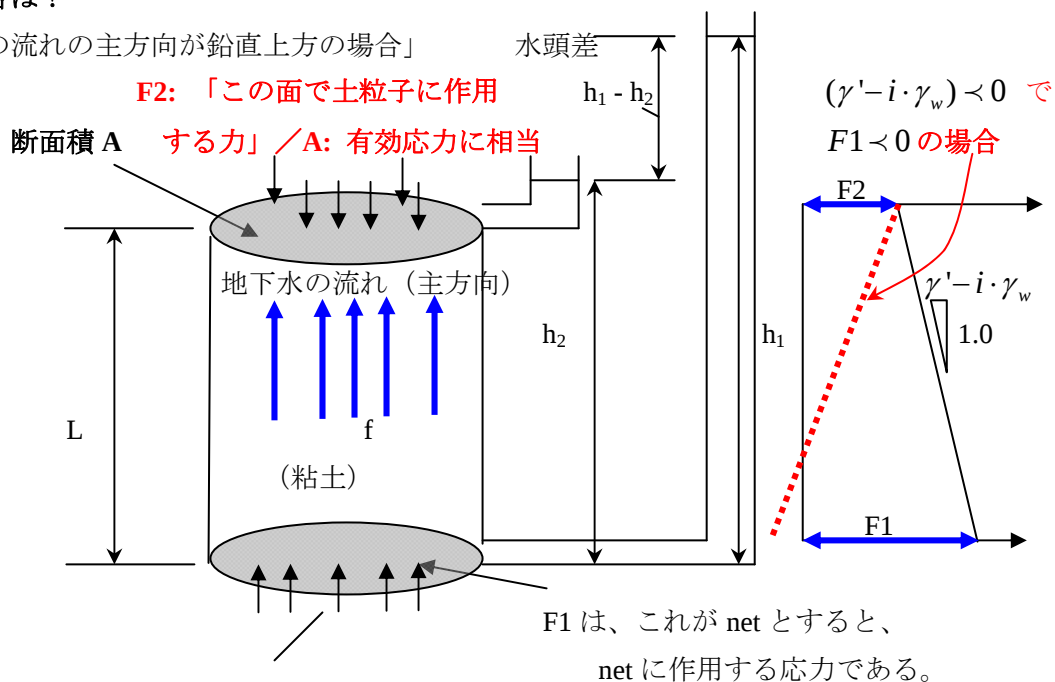
従って、 $H = (H - L) + L = 70 \text{ m} + 70 \text{ m} = 140 \text{ m}$ 以上が、A の領域が安定する地下連続壁の深さ。

月の輪工法



粘性土の場合は？

「地下水の流れの主方向が鉛直上方の場合」



F_1 : 「この面で土粒子に作用する力」 / A : 有効応力に相当

1) $F_2 > 0.0$ が作用していても、

「底面に作用する全応力 = $F_1 + h_1 \cdot \gamma_w$ 」 > 「上面に作用する全応力 = $F_2 + (h_2 - L) \cdot \gamma_w + \gamma_t \cdot L$ 」 となり、シリンダーを下から押す力の方が上から押さえる力のより大きくなると、

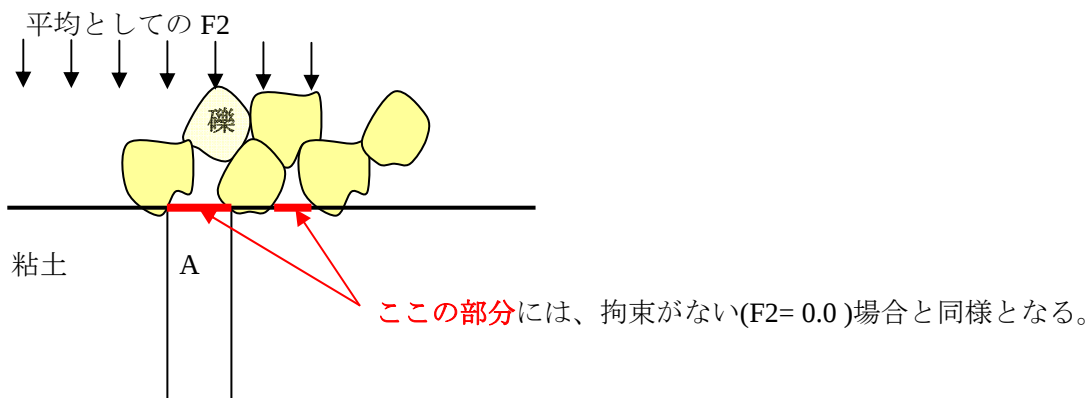
即ち、「シリンダー底面での有効応力 F_1 」 = $F_2 + (\gamma' - i \cdot \gamma_w) \cdot L < 0.0$ になると、シリンダー周辺の摩擦力がなければ、boiling しないで、cylinder 内の粘土が一体となって浮き上がる。砂の場合のように、流量が多くないので、実際の流速 V_w が小さくなり、粒子はバラバラには運動しない。

2) では、 F_2 が十分大きくて、

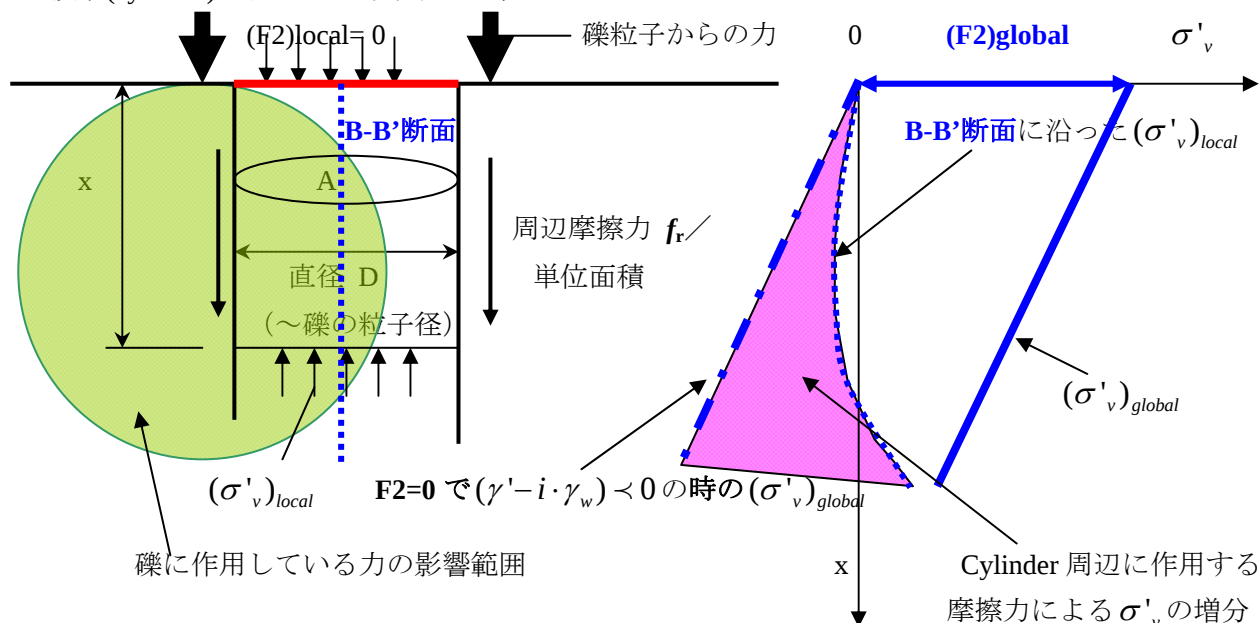
「底面に作用する全応力 = $F_1 + h_1 \cdot \gamma_w$ 」 < 「上面に作用する全応力 = $F_2 + (h_2 - L) \cdot \gamma_w + \gamma_t \cdot L$ 」 となっており、「シリンダー底面での有効応力 F_1 」 = $F_2 + (\gamma' - i \cdot \gamma_w) \cdot L > 0.0$ となっておれば、安全か？

(Answer) これは、 F_2 の与え方次第。

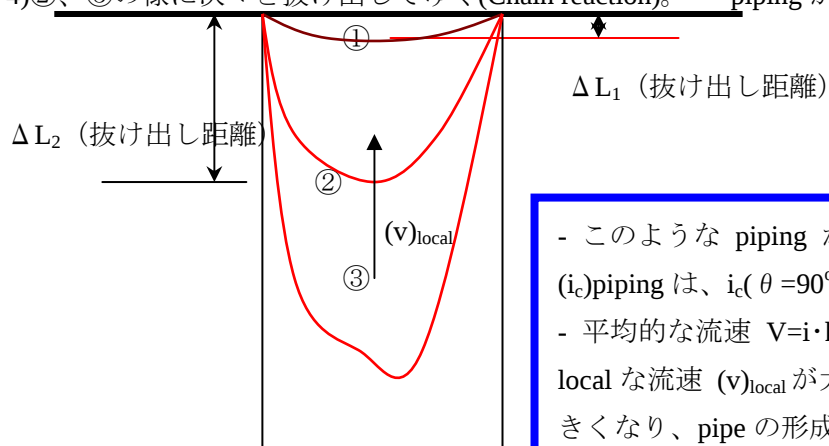
粘土の粒径よりも遙かに大きな径を持つ礫で押さえていると、平均として F_2 が十分大きくても、



Aの領域(cylinder)を拡大して考察すると、

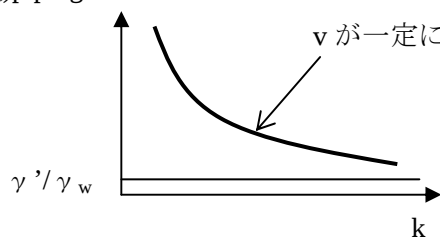


- 鉛直の B-B'断面で、深さ x で働いている $(\sigma'_v)_{local}$ は $(\sigma'_v)_{global} = F2 + (\gamma' - i \cdot \gamma_w)x$ よりも小さい。周辺摩擦 f_r により、「 $F2=0$ の時の $(\sigma'_v)_{global}$ 」 $= (\gamma' - i \cdot \gamma_w)x$ よりは大きくなる。
- 周辺摩擦 f_r の影響は、地表に近い所では中心軸 B-B'に近いほど小さい。従って、B-B'断面に沿った $(\sigma'_v)_{local}$ は上図のようになる。深くなると礫粒子からの力の影響が大きくなり、 $(\sigma'_v)_{local}$ は $(\sigma'_v)_{global}$ に近づく。
- 従って、まず下図に示す①のように浅い領域が不安定になる。すると、流れの距離 L が減少し、動水勾配 $i = (\text{一定の head 差}) / (L - \Delta L)$ が増加し、ますます不安定になる。
- ②、③の様に次々と抜け出してゆく (Chain reaction)。→ piping が生じる。

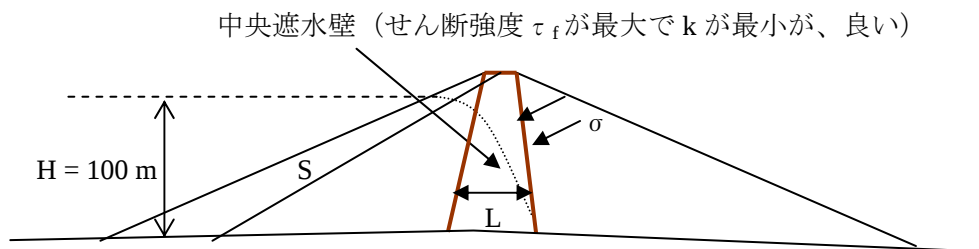


- このような piping が生じる macro 的な動水勾配 $(i_c)_{piping}$ は、 $i_c(\theta=90^\circ) = \gamma' / \gamma_w$ よりも大きい。
- 平均的な流速 $V = i \cdot k$ が大きいほど、pipe 中の local な流速 $(v)_{local}$ が大きくなり、pipe を掘る力が大きくなり、pipe の形成が早くなる。

$(i_c)_{piping}$



→ k が小さいほど、 $(i_c)_{piping}$ は大きい。



(Q) このダムは、粘性土の中央遮水壁と rock fill 材が直接接している。このダムは、長期的に見て安全か？

(A) 中央遮水壁の下流側で piping が生じる。

所定の粘土地盤（粘土層）に対するこのような piping を防ぐには？

① 遮水壁の透水係数 k を小さくして流速 $v = k \cdot i$ を小さくして、仮に piping が発生し始めようとしても、急速に進展しないようにする。

② $(\sigma')_{local} = (\gamma' - i \cdot \gamma_w)x + (\text{pipe 周辺摩擦力 } f_r \text{ による有効拘束圧の増分})$ を大きくして、piping が発生しないようにする。

a) f_r を大きくする。そのためには、平均的な有効拘束圧 σ (F2 に相当) を大きくする。

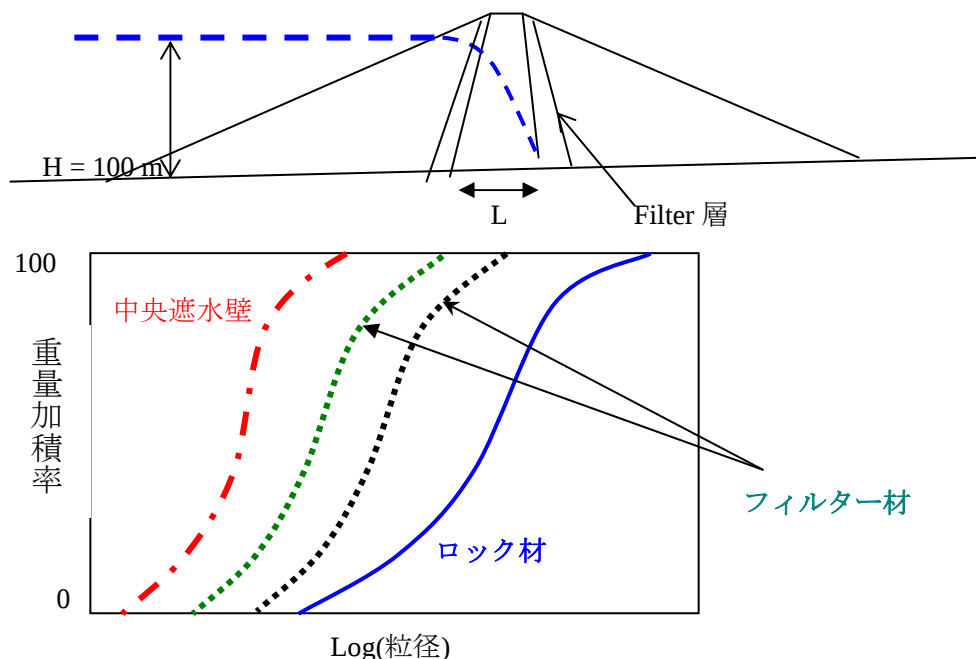
中央遮水壁には、 σ が存在する。S のような表面近くの遮水壁は有効応力 σ' が小さいので土では作れない（S に遮水壁を建設する場合は、RC 構造物か geomembrane で作る必要がある）。

b) 動水勾配 i を小さくする。そのためには、 L を大きくする。

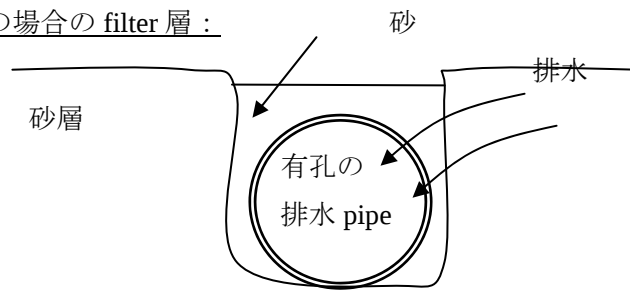
L は、 i に比例して、すなわち、深さに比例して大きくする。

c) (f_r による有効拘束圧の増分) は (粘土層に接している礫の粒子間距離 D) が小さいほど大きい。従って、 D を小さくする。このためには、遮水壁（粘土）に接する粒子の径 D の粘土粒子に対する比を適当に小さくする。最も重要！

→ ダム本体（大粒径の rock 材）と遮水槽（粘土）の間に、粘土に対して十分径 D が小さく、rock に対しては、径 D が十分大きい filter 層を設ける。



他の場合の filter 層：



砂層と pipe が直接接していると、砂は pipe 内に入っていく。

→Pipe がつまる。砂地盤が破壊される。

三つの異なる対処法

- 1) pipe の周りの埋め土は、filter 材として適切な径の礫を用いる。
- 2) pipe の周りを不織布などで囲む。
- 3) 礫を pipe の替わりにして、その周りを不織布で囲んでも排水 pipe の替わりになる。