

透 水－土中の水の流れ

～土ではなく水の流れに注目する土質力学～



名古屋大学地盤力学研究室
中野正樹

1

はじめに

土質力学・工学の対象とする材料

もちろん
土, 地盤

しかし, この「透水」のみは, 対象とする材料が**水**である.

土は「素焼き」に例えられ, 土の中を**水が**出入りしても,
土は伸びたり縮んだりしない.

→ 「圧密」と大きく違う.

2

講義の流れ

1. 水が土の中を流れるには
2. ダルシー則
3. 連続の式
4. ダルシー則と連続式の応用
5. 浸透力(透水力)
6. まとめ

3

1. 水が土の中を流れるには

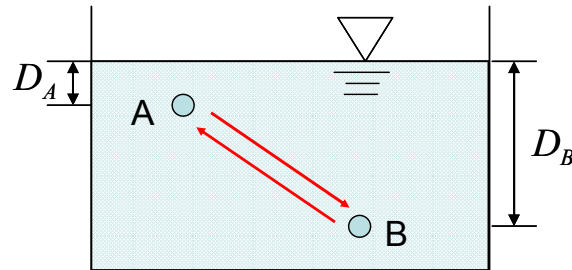
4

1. 水が土の中を流れるには

風呂桶の水はなぜ静止しているのか？

■なぜ、点Aから点Bに(あるいは逆に)水は動かないのか？

(1)圧力の違い, (2)位置(深さ)の違い
から考察する.

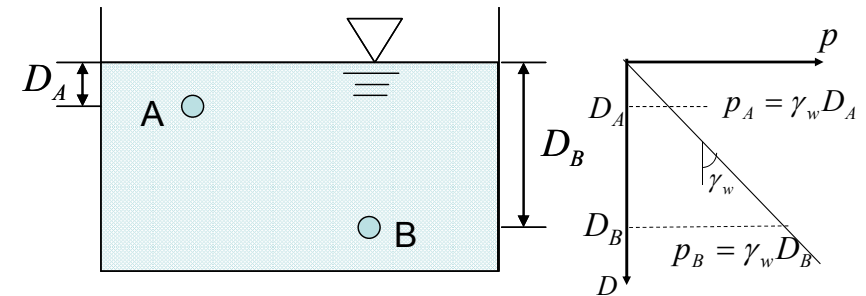


5

1. 水が土の中を流れるには

点Aと点Bの圧力(静水圧)の違い

■水面からの深さをそれぞれ D_A, D_B とすると,
静水圧分布より, それぞれの圧力 p_A, p_B (静水圧) はわかる.

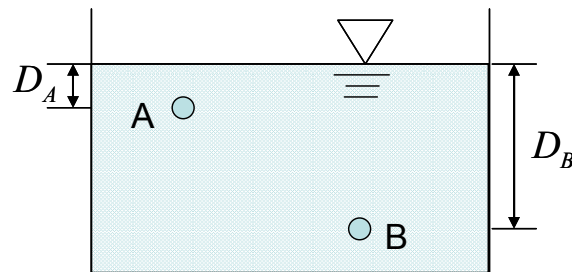


6

1. 水が土の中を流れるには

点Aと点Bの圧力(静水圧)の違い

点A: $p_A = \gamma_w D_A$, 点B: $p_B = \gamma_w D_B$ より $p_A < p_B$
⇒しかし, 水は流れない.



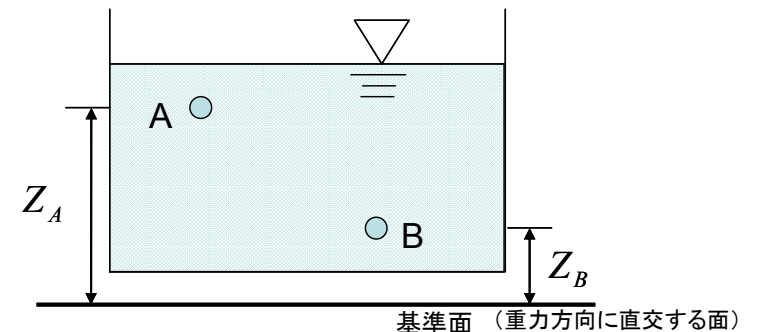
圧力差があるから水は流れるのではない.

7

1. 水が土の中を流れるには

点Aと点Bの基準面からの高さの違い

今度は, 点A: z_A , 点B: z_B より $z_A > z_B$
⇒しかし, やはり水は流れない.



基準面からの高さの違いで水は流れるのではない

8

1. 水が土の中を流れるには

風呂桶の水はなぜ流れないのか？

全水頭(ヘッド) = 水圧 / 水の単位体積重量 + 基準面からの高さ

と定義し、つまり水圧も位置の単位であらわして、
点Aと点Bの全水頭 $h(A)$, $h(B)$ を調べると、

$$h(A) = \frac{p_A}{\gamma_w} + z_A = \frac{\gamma_w D_A}{\gamma_w} + z_A = D_A + z_A$$

$$h(B) = \frac{p_B}{\gamma_w} + z_B = \frac{\gamma_w D_B}{\gamma_w} + z_B = D_B + z_B$$

$$h(A) = h(B)$$

となり、点Aと点Bの全水頭が同じであるから水は流れない。

(Bernouilli, 19世紀)

9

1. 水が土の中を流れるには

風呂桶の水はなぜ流れないのか？

$$h(A) = \frac{p_A}{\gamma_w} + z_A = \frac{\gamma_w D_A}{\gamma_w} + z_A = D_A + z_A$$

圧力水頭 位置水頭

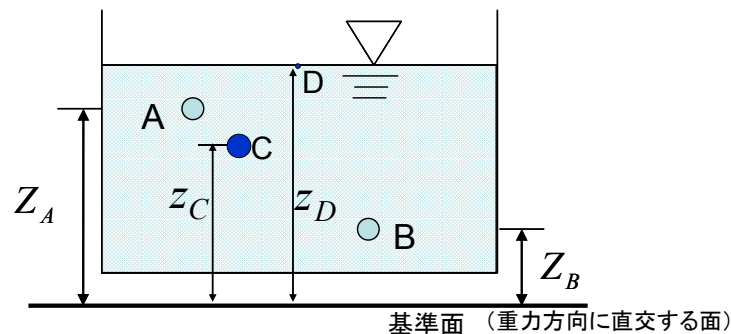
水の流れでは、速度水頭も考えるが、土中の水の水速は非常に遅いので、無視する

10

1. 水が土の中を流れるには

風呂桶のあらゆる位置での全水頭は？

【問題1】点C, Dでの全水頭と点A, Bの全水頭を比較せよ。



11

1. 水が土の中を流れるには

風呂桶のあらゆる位置での全水頭は？

【解答】点C, Dでの全水頭と点A, Bの全水頭を比較せよ。

$$h(C) = \frac{p_C}{\gamma_w} + z_C = \frac{\gamma_w D_C}{\gamma_w} + z_C = D_C + z_C = z_D$$

$$h(D) = \frac{p_D}{\gamma_w} + z_D = 0 + z_D = z_D$$

$$h(A) = h(B) = h(C) = h(D) = z_D$$

風呂桶のどの位置においても、全水頭は等しく、基準面から水面までの高さになる。したがってどの位置の水も動かない(流れない)

12

1. 水が土の中を流れるには

水が土の中を流れるには？

【しつもん】 水が土の中を流れるには？

【こたえ】

水頭に(位置的な)差があると, 水は流れると考える.

つぎの「ダルシー則」へ

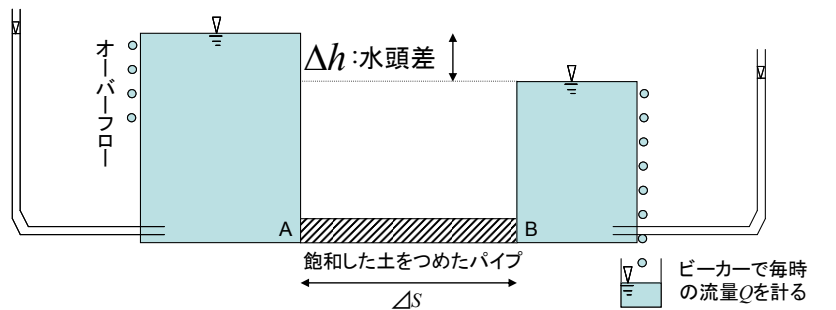
13

2. ダルシー則

14

2. ダルシー則

土の中の水の流れの特徴



基準面 (重力方向に直交する面)

水をゆっくり流すため, パイプに土を詰めている.

- * パイプ: 断面積 A の変らない筒 (シリンダー), 長さは Δs
- * 水槽Aと水槽Bの全水頭差は常に Δh
- * 毎時の流量 Q を計測

15

2. ダルシー則

土の中の水の流れの特徴

実験してみると,

$$\frac{Q}{A} \propto \frac{\Delta h}{\Delta s}$$

なる関係が得られた.
つまり,

- * 水槽Aと水槽Bの全水頭差 Δh が大きいほど,
- * パイプの長さ Δs が短いほど,
- * もちろん, 断面積 A が大きいほど
⇒ 水はたくさん流れる (毎時の流量 Q は大きい)

16

2. ダルシー則

土の中の水の流れの特徴

ここで、
毎時の流量 Q ($\text{m}^3/\text{時間}$)、断面積 A (m^2) より、
単位断面積あたりの流量 Q/A ($\text{m}/\text{時間}$) は水の速度 v
の大きさを表す。したがって

$$v = k \frac{\Delta h}{\Delta s}$$

なる関係が得られる。
比例定数 k は透水係数と呼ばれ、単位は m/hour や m/sec や、
 cm/sec である。また、

17

2. ダルシー則

ダルシー則 (Darcy's Law, 1856年)

いままでは「大きさ(スカラー)」で話してきましたが、速度 v をベクトルで表示すると、

$$\mathbf{v} = k\mathbf{i} = -k \frac{\Delta h}{\Delta s}$$

ここで $\mathbf{i} = -\Delta h / \Delta s$ は動水勾配と呼ばれる無次元量である。

【問題2】なぜ $\mathbf{v} = -k \frac{\Delta h}{\Delta s}$ とマイナスがつくのでしょうか？

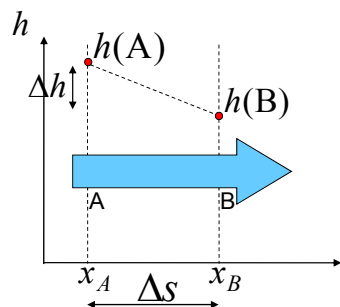
18

2. ダルシー則

ダルシー則 (Darcy's Law, 1856年)

【問題2】なぜマイナスがつくのでしょうか？

【解答】水がAからBに流れるとする。今、
水の流れる方向を正にとる。すなわち $\Delta s > 0$ とすると、
水頭は流れる方向と逆に小さくなる。すなわち $\Delta h < 0$ 。つまり
 $\Delta h / \Delta s$ は負となり、透水係数は正であることから、マイナスをつけないと、 v
がマイナスとなり、BからAへ流れると表してしまう。



$$x_B = x_A + \Delta s$$

$$h(B) = h(A) + \Delta h$$

傾き(勾配)は

$$\frac{h(B) - h(A)}{x_B - x_A} = \frac{\Delta h}{\Delta s}$$

19

2. ダルシー則

ダルシー則 (Darcy's Law, 1856年)

【問題2】なぜマイナスがつくのでしょうか？

【解答】

あまり、難しく考える必要はない。
全水頭の違いがわかっている(難しく考えず正の値を計算する)、
流れる距離がわかっているれば、
流れる水の速さ(大きさ)は、

$$\frac{\text{全水頭の差}}{\text{流れる距離}} \times \text{透水係数}$$

そして、水是水頭の高いところから低いところへ流れる(方向はわかる)

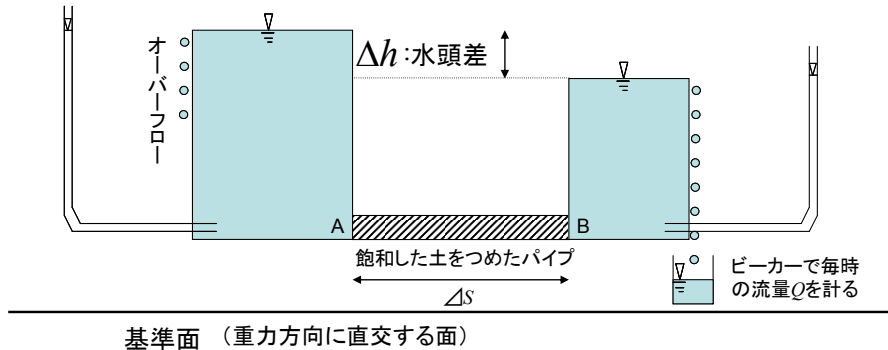
これで十分です！

20

2. ダルシー則

ダルシー則 (Darcy's Law, 1856年)

【重要】「パイプには水が流れているのだから、また、水槽Aでは水を供給し、水槽Bでは水を流しているのだから、本当は、水槽Aの水も水槽Bの水も流れている。」と思うのが当然。



21

2. ダルシー則

ダルシー則 (Darcy's Law, 1856年)

【重要】

土中の中を水が流れるため、パイプの中の水の流れは遅く、流れていないと間違えるぐらい無視できる。

土質力学で水槽が出てきたら、全水頭は一定と考えて差し支えない！？

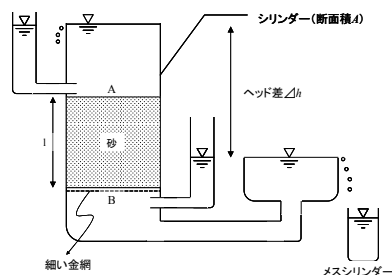
22

2. ダルシー則

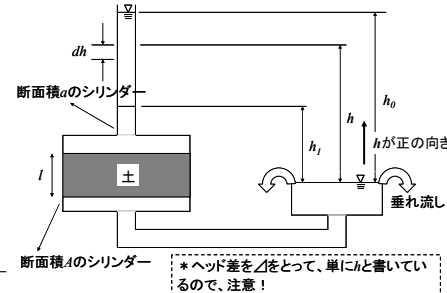
透水係数 k の求め方

いくつか求め方がある。
(室内透水試験)

① 定水位透水試験



② 変水位透水試験



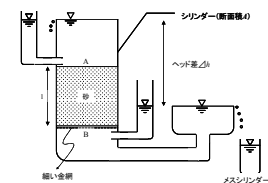
23

2. ダルシー則

透水係数 k の求め方

測定 of のしやすさによって、土の種類で使い分ける。

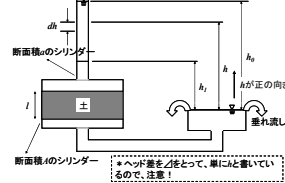
① 定水位透水試験



粘土のような透水性の悪い土は、なかなか透水せず、メスシリンダーの流量が少ない

→ 粘土には向かない

② 変水位透水試験



砂のような透水性のよい土は、すぐに透水するため、スタンドパイプの水位を正確に読み取れない

→ 砂には向かない

24

2. ダルシー則

定水位透水試験による透水係数 k の求め方

時間 Δt の間に、メスシリンダーに流入した水量を R とすると、流量 Q (たとえば m^3/hour)は、

$$Q = \frac{R}{\Delta t} = vA$$

水の速度 v は、ダルシー則より、動水勾配が $\Delta h/l$ から、

$$Q = \frac{R}{\Delta t} = vA = k \frac{\Delta h}{l} A$$

したがって、透水係数 k は、

$$\therefore k = \frac{R \times l}{A \times \Delta h \times \Delta t}$$

25

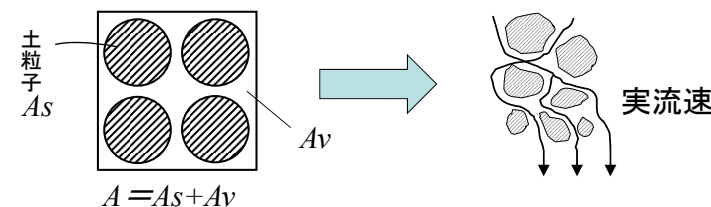
2. ダルシー則

$Q = vA$ について

v の大きさは、毎時の流量 Q をパイプ(シリンダー)の全断面積 A で割ったもの、つまり、

$$|v| = \frac{Q}{A}$$

断面積 A を土粒子断面積 A_s と間隙断面積 A_v , $A = A_s + A_v$ として、ダルシー則の流速を、間隙をすり抜けて流れる実流速、 $v = Q/A_v$ ととらえてはいけない。



26

2. ダルシー則

$Q = vA$ について

ダルシー則の流速とは、

毎時の流量 Q が $Q = vA$

で計算できるような、マクロな「平均」流速のこと。

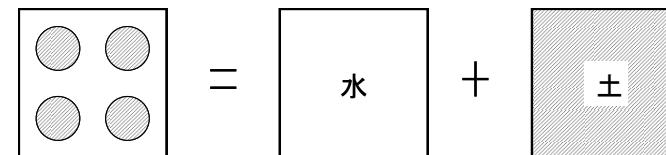
ダルシー則で水の流れを表すときは、もはやそこに土粒子は存在しない、土が占めている体積は全部水が占めていると考えている

27

2. ダルシー則

$Q = vA$ について

土の圧密では、



全断面積 A を、全部水が占めているし、全部土粒子が占めていると考える

<2相(水～土系)混合体理論によるモデル化>.

28

3. 連続の式

～水は連続している～

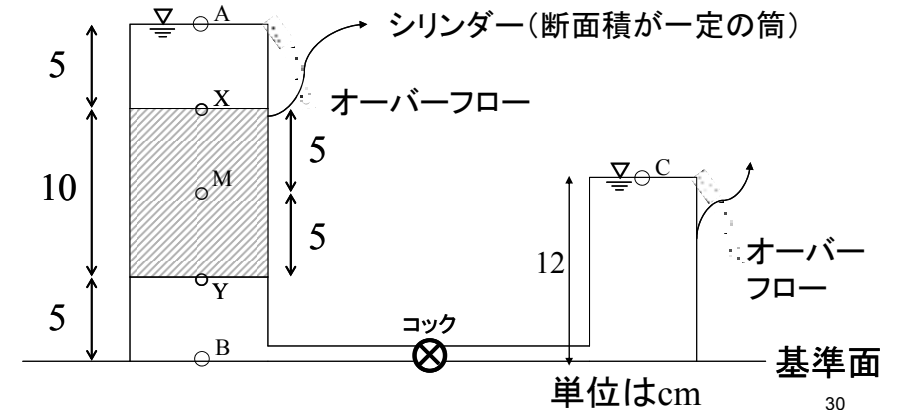
入ってくる水の量と出てゆく水の量は等しい

29

3 連続の式

一次元透水試験と水頭

シリンダー(断面積が一定の筒)を使った透水試験を考える



30

3 連続の式

一次元透水試験と水頭

【問題3】基準面を装置の底面にとって、コック閉のときと、コック開(にして十分時間が経過したあと)のときについて、表を埋めよ

	コック閉			コック開		
水頭	圧力水頭	位置水頭	全水頭	圧力水頭	位置水頭	全水頭
A	②	①	③	⑥	⑤	⑦
X	④	①	④	⑧	⑤	⑧
M	④	①	④	⑩	⑤	⑩
Y	④	①	④	⑨	⑤	⑨
B	④	①	④	⑨	⑤	⑨

31

3 連続の式

一次元透水試験と水頭

【解答(コック閉)①】まずわかるのは、位置水頭。
基準面の高さをうめましょう！

【解答(コック閉)②】点Aは大気圧なので、圧力水頭は？

【解答(コック閉)③】点Aの全水頭は、全水頭＝圧力水頭＋位置水頭より求めることができる

【解答(コック閉)④】水は流れていない(静止している)ので、圧力は静水圧、また全水頭は、どの高さでも等しい。

32

3 連続の式

流れているときの水頭

【解答(コック開)⑤】水は上から下へ流れる. それでもやはりわかるのは位置水頭. 基準面の高さをうめましょう!

【解答(コック開)⑥】点Aは大気圧なので, 圧力水頭もわかる.

【解答(コック開)⑦】点Aの全水頭は, 圧力水頭+位置水頭からわかる.

【解答(コック開)⑧】水槽内は(たとえ水が動いていても)全水頭はどこでも一定. 点AとXの全水頭は等しく, 圧力水頭もわかる.

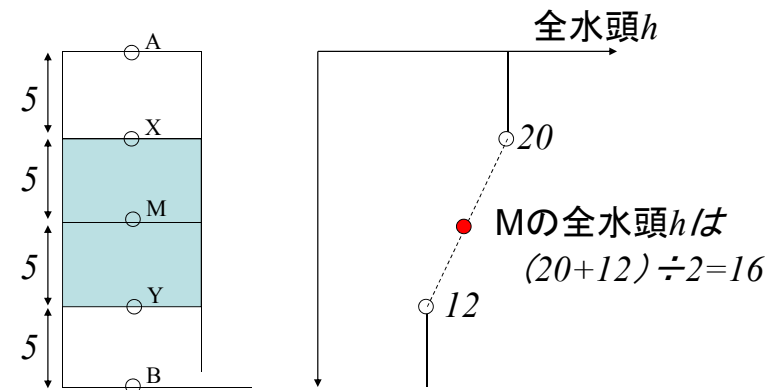
【解答⑨】同様に, 点C, B, Yの全水頭は一定. 点Cの位置水頭は高さからわかり, 圧力水頭はゼロより, 全水頭がわかる. よって点B, Yの全水頭はゲット! ついで圧力水頭もゲット!

【解答(コック開)⑩】点Xと点Yの全水頭が違うから, 水は流れる. 点Mの全水頭を求めるのが, この問題の最も重要なところ. 点XとYの中間にあるので, 全水頭も中間の値にしよう!

33

3 連続の式

シリンダーの全水頭分布

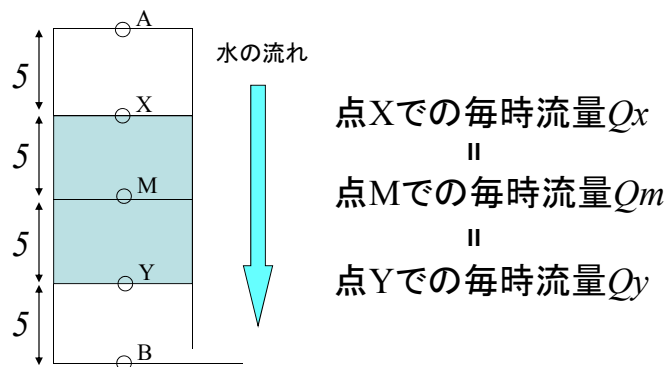


断面積A一定のシリンダーの全水頭分布は直線

34

3 連続の式

シリンダーの流量, 流速分布



水は伸びたり, 縮んだり, 切れたりしないので, 土のある区間での水の出入りの毎時流量は等しい

35

3 連続の式

シリンダーの流量, 流速分布

シリンダーの断面積Aは一定であるので, 各地点での流速 v を求めることができる

$$\text{点Xでの毎時流量 } Q_x \quad Q_x = v_x A$$

$$\text{点Mでの毎時流量 } Q_m \quad Q_m = v_m A$$

$$\text{点Yでの毎時流量 } Q_y \quad Q_y = v_y A$$

$$v_x = v_m = v_y$$

流速 v は, 位置(深さ z)によらず一定

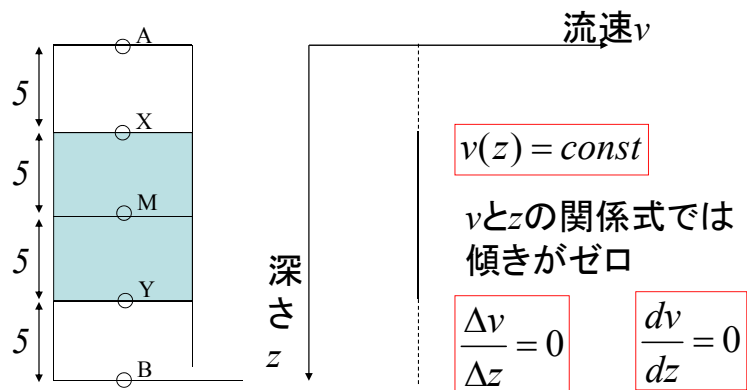
一次元の「連続の式」

36

3 連続の式

シリンダーの流量, 流速分布

流速 v は, 位置(深さ z)によらず一定とは,



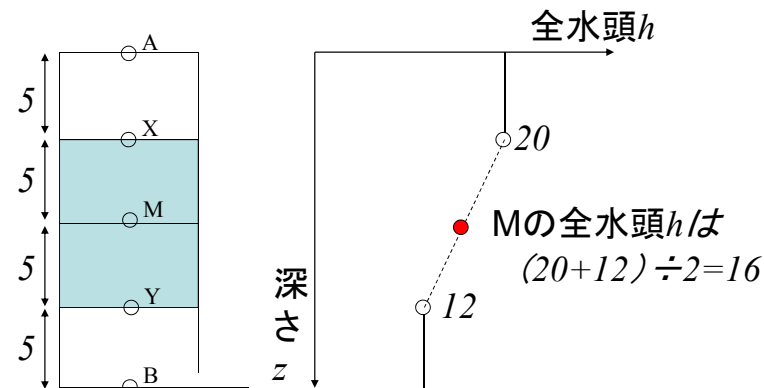
赤枠も一次元連続の式と呼ぶ

37

3 連続の式

シリンダーの全水頭分布

【問題4】断面積 A 一定のシリンダーの全水頭分布はなぜ直線なのか



38

2 連続の式

シリンダーの全水頭分布

【解答】

「一次元連続の式」: $\frac{\Delta v}{\Delta z} = 0 \Rightarrow \frac{dv}{dz} = 0$

一次元のダルシー則 $v = -k \frac{\Delta h}{\Delta s} \Rightarrow v = -k \frac{dh}{dz}$
(s を z に変えて)

$$\frac{dv}{dz} = \frac{d}{dz} \left(-k \frac{dh}{dz} \right) = -k \frac{d^2 h}{dz^2} = 0 \Rightarrow \frac{d^2 h}{dz^2} = 0$$

全水頭 h を2かい微分したらゼロ

39

3 連続の式

シリンダーの全水頭分布

【解答】

全水頭 h を2かい微分したらゼロ $\frac{d^2 h}{dz^2} = 0$

微分方程式を解く

$$h = az + b$$

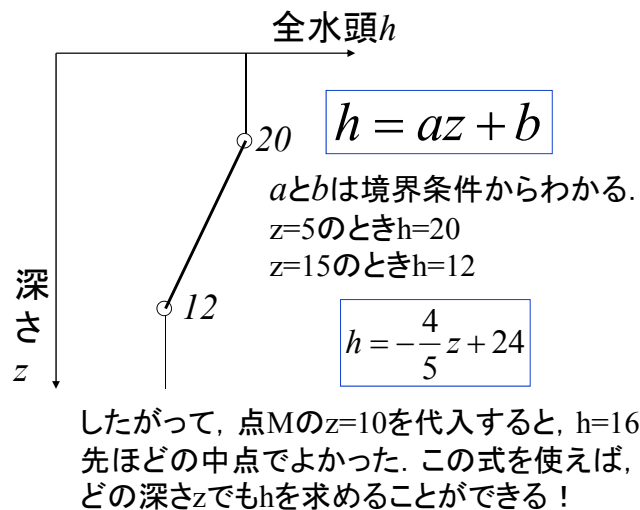
$y = ax + b$ x と y のグラフでの直線の式

z と h のグラフでの直線の式

40

3 連続の式

シリンダーの全水頭分布は直線



41

4. ダルシー則と連続式の応用

(1) 水平堆積層の等価な均質層の透水係数

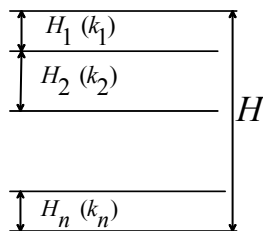
- * やはりダルシー則と連続の式から導かれる
- * 等価といいながら, 特異な層があるとそれに引きずられる.

42

4 ダルシー則と連続式の応用

水平堆積層の等価な均質層の透水係数(鉛直)

【問題5】透水係数 $k_1, k_2, \dots, k_n$ の土が $H_1, H_2, \dots, H_n$ の層厚で水平に堆積している. この不均質堆積層と、鉛直流量を同じくするという意味で等価な均質層の(等価)透水係数 k を求めよ

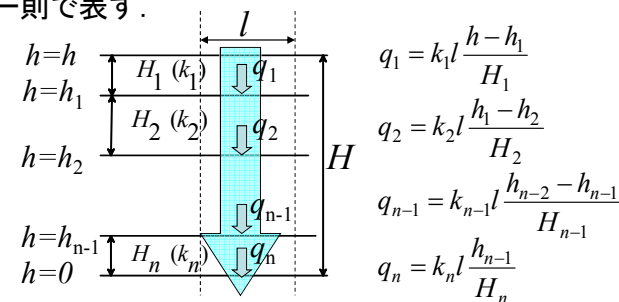


43

4 ダルシー則と連続式の応用

水平堆積層の等価な均質層の透水係数(鉛直)

【解答】①表層の全ヘッド $h=h$, 下端を $h=0$ とする. 各層の全水頭を表層から, $h_1, h_2, \dots, h_{n-1}$ として, 対象とする幅を l とおき, 各層の流量 q をダルシー則で表す.



②連続の式より $q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n = q$

44

4 ダルシー則と連続式の応用

水平堆積層の等価な均質層の透水係数(鉛直)

【解答】③ k_i と H_i を左辺にもってゆき、全ての項をたし合わせる。
それと、等価な透水係数 k_v と全水頭差 h と流れる距離 H と比較する。

$$\begin{aligned}
 q_1 &= k_1 l \frac{h - h_1}{H_1} & \longrightarrow & \quad q \frac{1}{l} \frac{H_1}{k_1} = h - h_1 \\
 q_2 &= k_2 l \frac{h_1 - h_2}{H_2} & \longrightarrow & \quad q \frac{1}{l} \frac{H_2}{k_2} = h_1 - h_2 \\
 &\vdots & & \quad \vdots \\
 q_{n-1} &= k_{n-1} l \frac{h_{n-2} - h_{n-1}}{H_{n-1}} & \longrightarrow & \quad q \frac{1}{l} \frac{H_{n-1}}{k_{n-1}} = h_{n-2} - h_{n-1} \\
 q_n &= k_n l \frac{h_{n-1}}{H_n} & \longrightarrow & \quad q \frac{1}{l} \frac{H_n}{k_n} = h_{n-1} \\
 & & + & \\
 & & \quad q \frac{1}{l} \left(\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \cdots + \frac{H_n}{k_n} \right) = h
 \end{aligned}$$

45

4 ダルシー則と連続式の応用

水平堆積層の等価な均質層の透水係数(鉛直)

【解答】④それと、等価な透水係数 k_v と全水頭差 h と流れる距離 H と比較する。

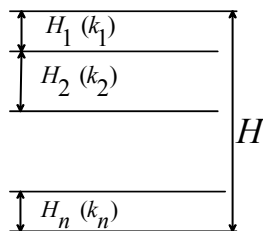
$$\begin{aligned}
 q \frac{1}{l} \left(\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \cdots + \frac{H_n}{k_n} \right) &= h \\
 q &= k_v l \frac{h}{H} \longrightarrow q \frac{1}{l} \frac{H}{k_v} = h \\
 k_v &= \frac{H}{\left(\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \cdots + \frac{H_n}{k_n} \right)}
 \end{aligned}$$

46

4 ダルシー則と連続式の応用

水平堆積層の等価な均質層の透水係数(水平)

【問題6】この不均質堆積層と、水平流量を同じくするという意味で等価な均質層の(等価)透水係数 k を求めよ



47

4 ダルシー則と連続式の応用

水平堆積層の等価な均質層の透水係数(水平)

【解答】①右から左へ流れるとして、右端の全水頭 $h=h$ 、左端を $h=0$ と、流れる距離を L とする。各層の流量 q をダルシー則で表す。

$$\begin{aligned}
 q_1 &= k_1 H_1 \frac{h}{L} \\
 q_2 &= k_2 H_2 \frac{h}{L} \\
 q_{n-1} &= k_{n-1} H_{n-1} \frac{h}{L} \\
 q_n &= k_n H_n \frac{h}{L}
 \end{aligned}$$

②全流量は

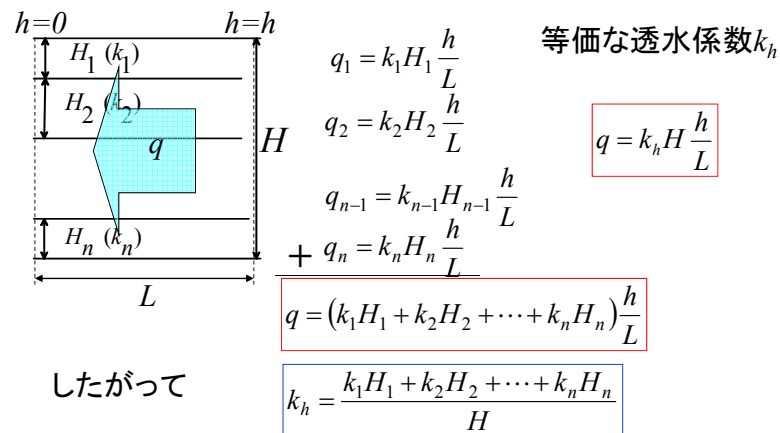
$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \cdots + q_n$$

48

4 ダルシー則と連続式の応用

水平堆積層の等価な均質層の透水係数(水平)

【解答】③各層の流量をたし合わせ、それと、等価な透水係数 k_h と全水頭差 h と流れる距離 L と比較する。



49

4 ダルシー則と連続式の応用

水平堆積層の等価な均質層の透水係数【考察】

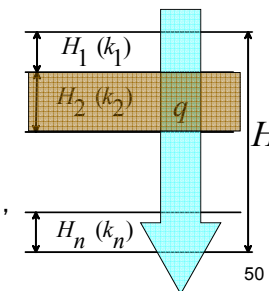
鉛直透水係数: 同じ層厚として、透水係数 k_2 と他の透水係数とを比べ、

$$k_v = \frac{H}{\left(\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \dots + \frac{H_n}{k_n} \right)} \rightarrow k_v = \frac{n}{\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} \right)}$$

① 小さかったら、 $\frac{1}{k_2}$ のみが k_v を支配する

② 大きかったら、 $\frac{1}{k_2}$ は k_v に対し無視される

一層でも透水係数の極めて低い層があったら、等価な透水係数は一気に低くなる。



50

4 ダルシー則と連続式の応用

水平堆積層の等価な均質層の透水係数【考察】

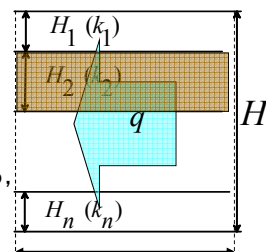
水平透水係数: 同じ層厚として、透水係数 k_2 と他の透水係数とを比べ、

$$k_h = \frac{k_1 H_1 + k_2 H_2 + \dots + k_n H_n}{H} \rightarrow k_h = \frac{k_1 + k_2 + \dots + k_n}{n}$$

① 小さかったら、 k_2 は k_h に対し無視される

② 大きかったら、 k_2 のみが支配する

一層でも透水係数の極めて高い層があったら、等価な透水係数は一気に高くなる。



51

4. ダルシー則と連続式の応用

2次元定常浸透の正方形フローネットによる図式解法
⇒ 透水量、各地点での水圧などを求めることができる

52

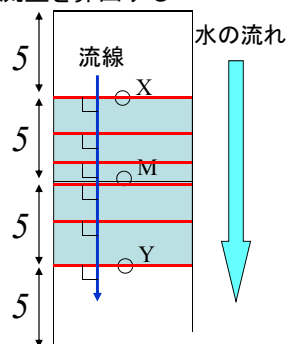
4 ダルシー則と連続式の応用

等ポテンシャル線と流線

等ポテンシャル線: 全水頭の等しい点を連ねた線

流線: 水の流れる方向の線

2次元問題を取り上げているので「線」となっている。単位奥行き方向を考慮して流量を算出する



【重要】

問題4での透水試験のシリンダーについて、**赤い線**は全て**等ポテンシャル線**。もちろん下端に近づくほど、全水頭は小さくなる。

流線と比較すると、**両者は直交する**。

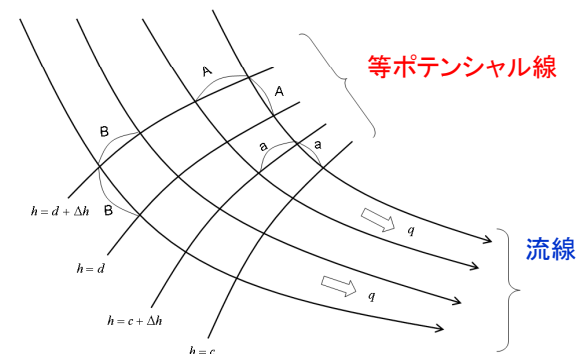
53

4 ダルシー則と連続式の応用

正方形フローネットとその特徴

■正方形フローネット(square flow net)

対象とする透水場を**等ポテンシャル線**と**流線**による**正方形網目**で覆ったものと言う。



等ポテンシャル線と流線は直交するよう作図。

54

4 ダルシー則と連続式の応用

正方形フローネットとその特徴

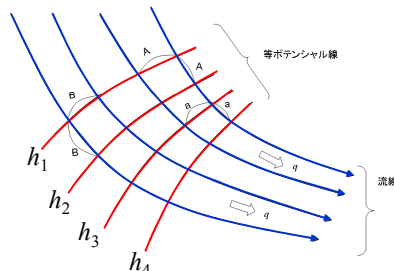
①流管はどれも流量は同じ

隣り合う流線が作る管を**流管**といい、流管はどれも毎時の流量が等しい

$$q_1 = kB \frac{h_1 - h_2}{B} = k(h_1 - h_2)$$

$$q_2 = kA \frac{h_1 - h_2}{A} = k(h_1 - h_2)$$

$$\therefore q_1 = q_2 = q$$



②水頭差はどこも同じ

隣り合う**等ポテンシャル線**と間の水頭差はどれも等しい

$$q = kB \frac{h_1 - h_2}{B} = ka \frac{h_3 - h_4}{a}$$

$$\therefore h_1 - h_2 = h_3 - h_4 = \Delta h$$

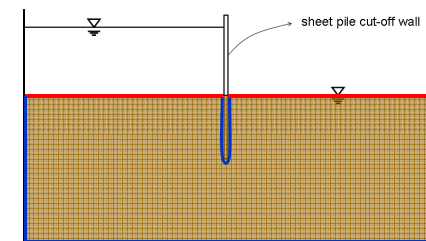
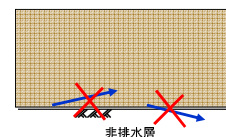
55

4 ダルシー則と連続式の応用

正方形フローネットの描き方

①境界の**等ポテンシャル線**を描く

②不透水層に沿って、**流線**を描く



③**流線**に直交するよう等ポテンシャル線を描く

④正方形フローネットになるよう**流線**を描く

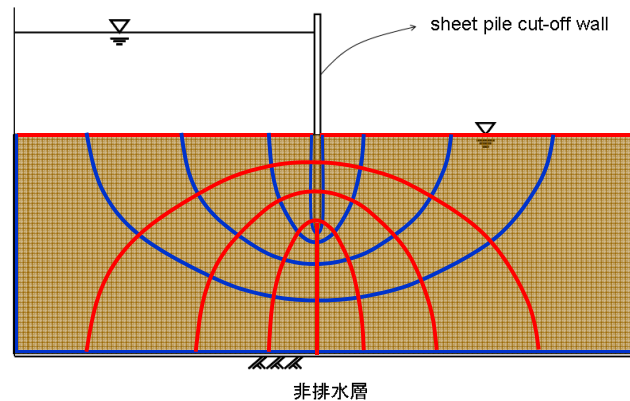
【注意】(1)細かく等ポテンシャル線を描くと、それだけ全水頭がわかるが、流線もそれだけ書かねばならない

(2)矢板からはなれたところは無視

56

4 ダルシー則と連続式の応用

正方形フローネットの描き方



57

4 ダルシー則と連続式の応用

正方形フローネットにより流量、水圧を求める

【問題7】 $H=20\text{m}$, 透水係数 $k=1.0\text{m/day}$ とし,

①堤長1mあたり1日の漏水量を求めよ.

②点aの高さを求めよ.

③点bでの間隙水圧はいくらか? なお, 基準面(不透水層を $z=0\text{m}$ とし, 上向きを正)としたとき, 点bの高さ z_b は8mとする



山口柏樹著「土質力学」技報堂より

58

4 ダルシー則と連続式の応用

正方形フローネットにより流量、水圧を求める

【解答】 $H=20\text{m}$, 透水係数 $k=1.0\text{m/day}$ とし,

①下流は大気圧なので, 全水頭はゼロ. したがって全水頭差は20m. 等ポテンシャル線は10等分($n_d=10$)なので $\Delta h=2\text{m}$. 1つの流管に流れる水の流量は堤長1mあたり $q = k\Delta h = 2.0\text{m}^2/\text{day}$, 流量は流管は3つ(n_f)なので,

$$Q = k\Delta h \times n_f = 6.0\text{m}^2/\text{day}$$

②点aは等ポテンシャル線が上流から数えて1番目なので, 全水頭 H_a は, $H - \Delta h = 20 - 2 = 18\text{m}$. 大気圧なので, 圧力水頭はゼロ. したがって, 位置水頭(高さ)は, 18m.



59

4 ダルシー則と連続式の応用

正方形フローネットにより流量、水圧を求める

【解答】 $H=20\text{m}$, 透水係数 $k=1.0\text{m/day}$ とし,

③点bは点aと同じ等ポテンシャル線上なので, 全水頭は18m. 点bの高さ z_b は8mとなので, 圧力水頭は,

$$\frac{u_b}{\gamma_w} + 8 = 18(\text{m})$$

$$u_b = 10(\text{m}) \times \gamma_w (\text{tf}/\text{m}^3) = 10(\text{tf}/\text{m}^2) = 98.1(\text{kPa})$$



山口柏樹著「土質力学」技報堂より
 $kH \times \frac{n_f}{n_d}$

60

4 ダルシー則と連続式の応用

正方形フローネットにより流量、水圧を求める

- * 透水係数を k (m/day)
- * 全水頭差を H (m)
- * 等ポテンシャル線で分割される数 n_d
- * 流管の数 n_f

とすると、単位幅1mあたりの、全流量 Q は、

$$Q = kH \times \frac{n_f}{n_d} (\text{m}^2/\text{day})$$



山口柏樹著「土質力学」技報堂より
61

5. 浸透力(透水力)

水が土の中を流れると、
流れる方向に浸透力(物体力)が土に働く

浸透力は、流そうとする動水勾配と水の単位体積重量の積

$$i \times \gamma_w$$

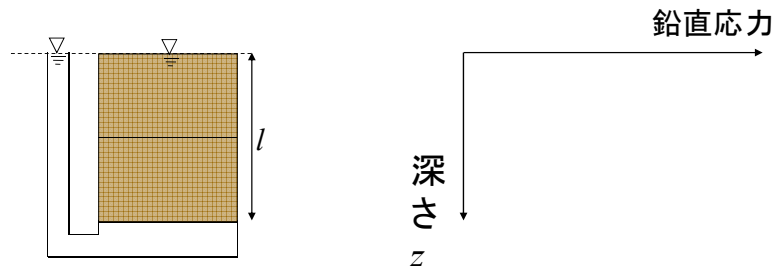
62

5 浸透力(透水力)

土中の深さ方向の鉛直応力分布

【問題8】土の単位体積重量を γ_{sat} として

- ①土の鉛直全応力(全土被り圧)分布を求めよ
- ②静水圧分布より、③有効応力(有効土被り圧)分布を求めよ



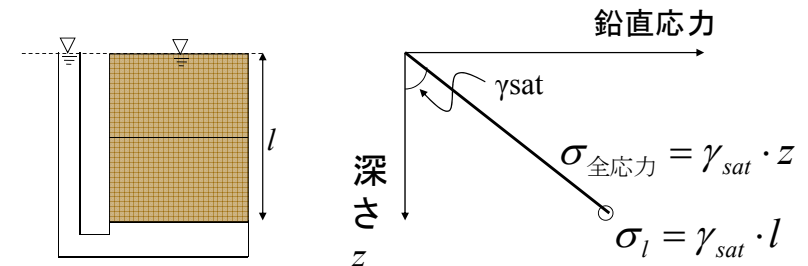
63

5 浸透力(透水力)

土中の深さ方向の鉛直全応力分布

【解答】

- ①全応力とは、 γ_{sat} による応力分布のこと。



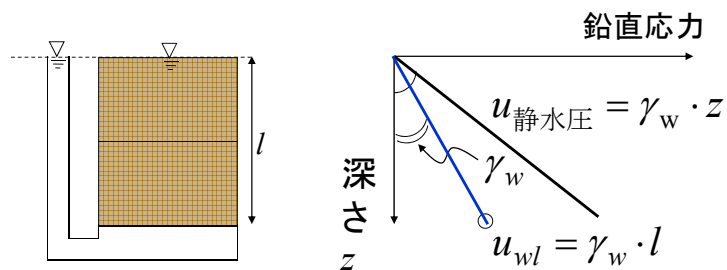
64

5 浸透力(透水力)

土中の深さ方向の静水圧分布

【解答】

②静水圧分布は, γ_w による応力分布のこと.



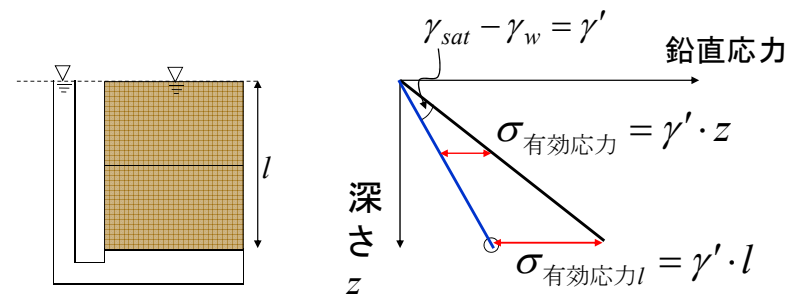
65

5 浸透力(透水力)

土中の深さ方向の鉛直有効応力分布

【解答】

③有効応力分布はその差引.



66

5 浸透力(透水力)

有効応力と水中単位体積重量

【解答】

水中単位体積重量 γ' に' (ダッシュ)がついているのは, , , ,

$$\gamma_{sat} - \gamma_w = \gamma'$$

$$\sigma - u_w = \sigma' \quad (\text{有効応力の原理})$$

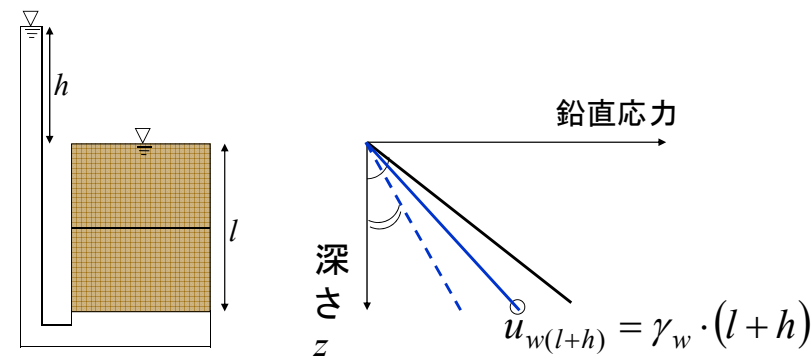
土に有効な土被り圧を与えるため, 有効単位体積重量とも呼ぶ有効土被り圧 $\gamma'z$ がゼロになると, 土として存在しなくなる.
(クイックサンド, ボイリングなどで起こる現象)

67

5 浸透力(透水力)

土中に水が流れた場合の水圧分布

では, 左のスタンドパイプを上伸ばし, h の水位差をつくり, 水を流しましょう. 【問題9】水の流れは上→下, 下→上?

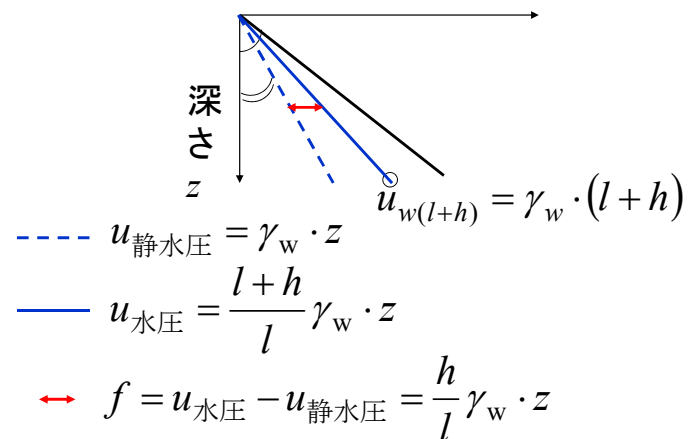


68

5 浸透力(透水力)

土中に水が流れた場合の水圧分布

鉛直応力分布に注目すると、鉛直応力

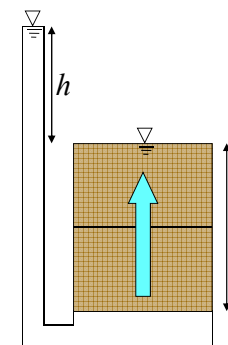


69

5 浸透力(透水力)

浸透力

$$f = \frac{h}{l} \gamma_w \cdot z \text{ に注目すると,}$$



h : 全水頭差

l : 土中を流れる距離

$\frac{h}{l}$: 水を下から上に流せしめる,
動水勾配 i

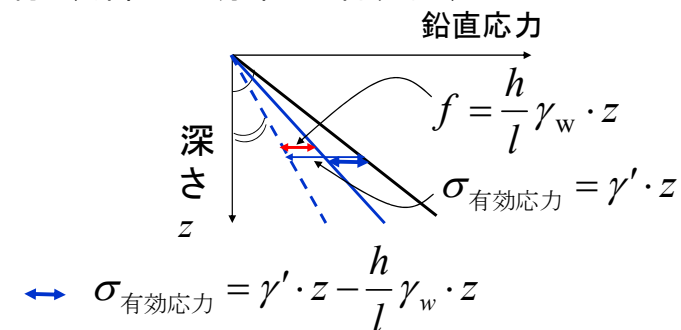
$$\frac{h}{l} \gamma_w : \text{浸透力}$$

70

5 浸透力(透水力)

浸透力による有効土被り圧の減少

再び、鉛直応力分布に注目すると、



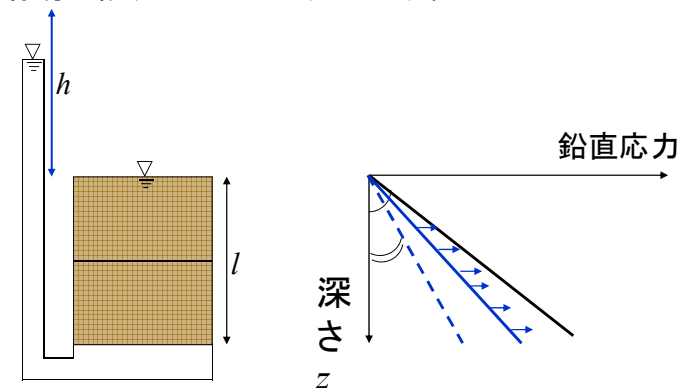
土中を水が流れることにより、
浸透力分の有効土被り圧が減少する。

71

5 浸透力(透水力)

浸透力による有効土被り圧の減少

では、左のスタンドパイプをどこまで上げれば、
有効土被り圧はゼロになるでしょうか？



72

5 浸透力(透水力)

限界動水勾配

先ほどの有効土被り圧の式にゼロを代入する

$$\sigma_{\text{有効応力}} = \gamma' \cdot z - \frac{h}{l} \gamma_w \cdot z = 0$$

$$\therefore \frac{h}{l} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

動水勾配が上の式になると、有効土被り圧はゼロとなる。
このような動水勾配を限界動水勾配という。

水中単位体積重量 γ' は、間隙比 e と比重 G_s で表せるので、
限界動水勾配は以下のようになる。

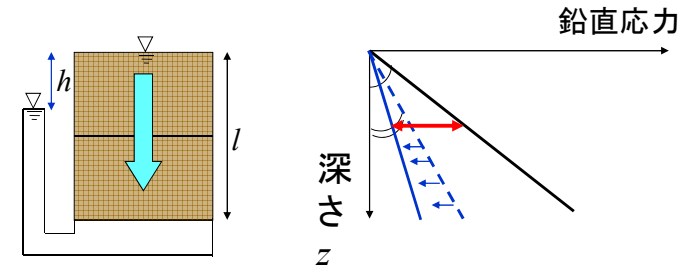
$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w \cdot \frac{1}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

73

5 浸透力(透水力)

浸透力による有効土被り圧の増加

水を流すと、有効応力は減少するばかりではない！
浸透力で増加することもある！



74

講義のまとめ

1. 水が土の中を流れるには
* 全水頭(圧力水頭+位置水頭)の違いで水は流れる。

2. ダルシー則

- * マクロ的な平均流速を求める式

$$v = ki = -k \frac{\Delta h}{\Delta s}$$

マイナスは余り気にしない。流れる方向は、
全水頭の高いところから低いところへ。

75

講義のまとめ

3. 連続の式

- * 一次元の連続の式は、水の流速はどの位置でも同じ。

$$v(z) = \text{const}$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta z} = 0$$

$$\frac{dv}{dz} = 0$$

* 土の中を流れる水を考える場合、水槽は全水頭はどこでも等しいと考える。

76

講義のまとめ

4. ダルシー則と連続式の応用

(1) 水平堆積層の等価な均質層の透水係数.

* ダルシー則と連続の式から導かれる.

$$k_h = \frac{k_1 H_1 + k_2 H_2 + \dots + k_n H_n}{H}$$

$$k_v = \frac{H}{\left(\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \dots + \frac{H_n}{k_n} \right)}$$

* 「等価」といいながら、特異な層が一つでもあると、等価な透水係数はその層に引きずられる.

77

講義のまとめ

4. ダルシー則と連続式の応用

(2) 正方形フローネットによる流量の計算.

- ・ 透水係数を k (m/day)
- ・ 全水頭差を H (m)
- ・ 等ポテンシャル線で分割される数 n_d
- ・ 流管の数 n_f

とすると、単位幅1mあたりの、全流量 Q は、

$$Q = kH \times \frac{n_f}{n_d} \left(m^2 / day \right)$$

全水頭 = 圧力水頭 + 位置水頭から、水圧も求めることができる.

78

講義のまとめ

5. 透水力(浸透力)

浸透力は、流そうとする動水勾配と水の単位体積重量の積

$$i \times \gamma_w$$

限界動水勾配は、有効土被り圧がゼロとなるとき動水勾配: クイックサンド、ボーリングが起こるときなど.

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w \cdot \frac{1}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

79



JGS中部支部・土質力学初級集中講座
2010.7.10

透 水—土中の水の流れ

～土ではなく水の流れに注目する土質力学～

ご清聴ありがとうございました
質問などがございましたら、下記へ
nakano@civil.nagoya-u.ac.jp

80