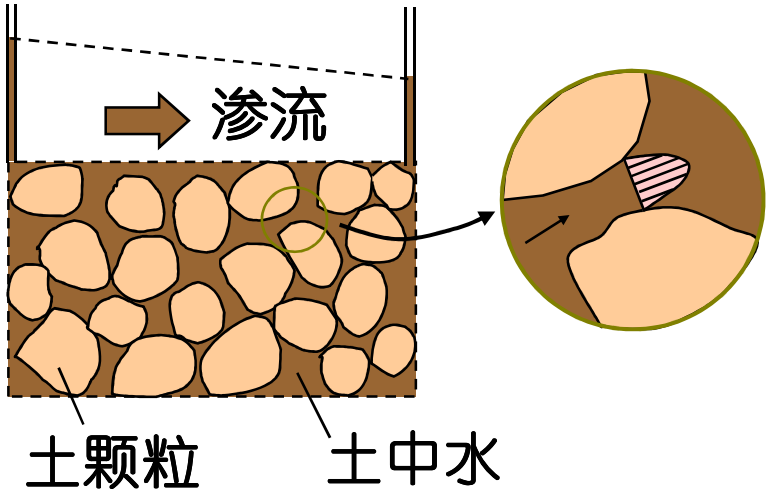
第2章：土的渗透性和渗流问题

§2.0　概述
§2.1　土的渗透性与渗透规律
§2.2　渗透系数及其确定方法
§2.3　渗透力与渗透变形
§2.4　平面渗流与流网

土体中的渗流

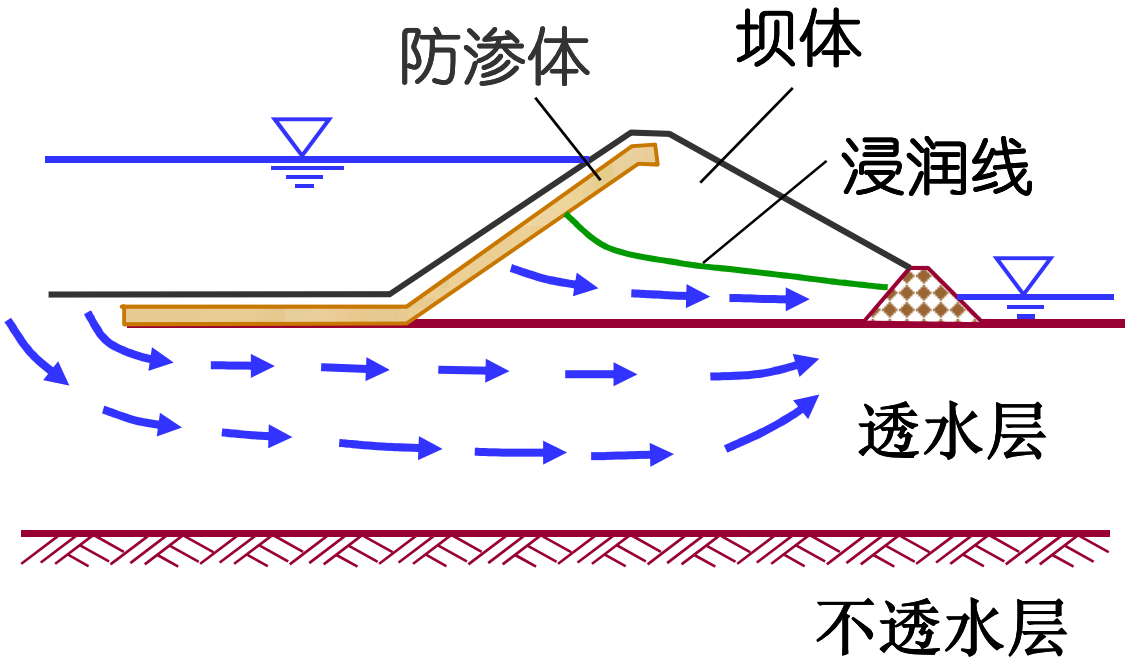
- 土是一种碎散的多孔介质，其孔隙在空间互相连通。当饱和土中的两点存在能量差时，水就在土的孔隙中从能量高的点向能量低的点流动



☞ 水在土体孔隙中流动的现象称为渗流

☞ 土具有被水等液体透过的性质称为土的渗透性

土石坝坝基坝身渗流

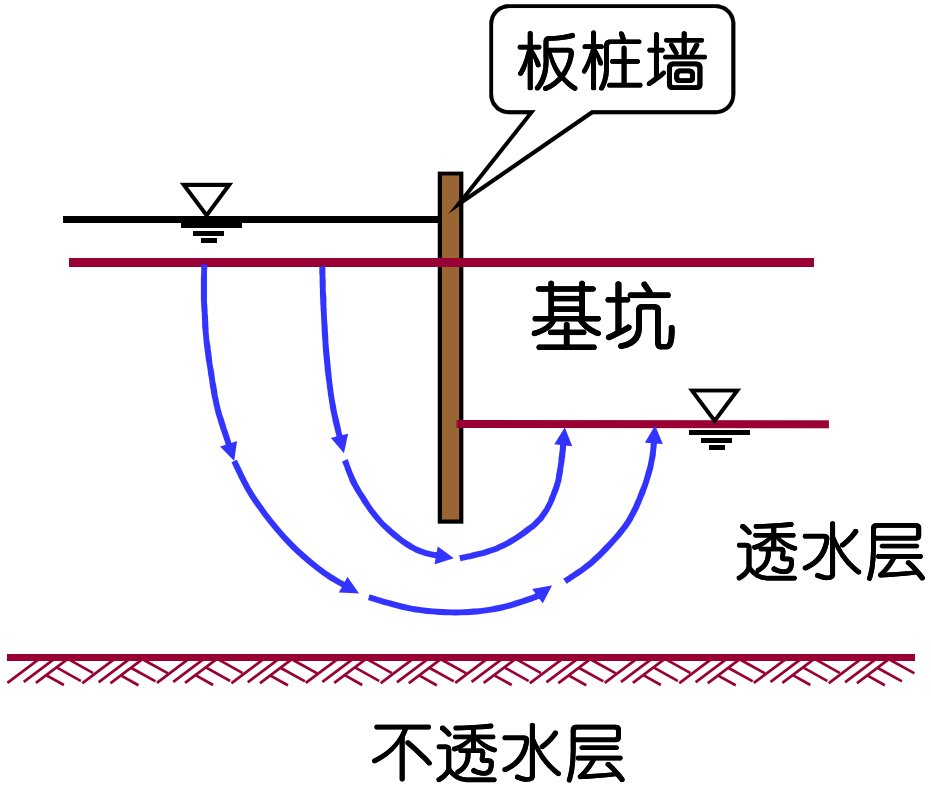


渗流问题：

1. 渗流量？
2. 渗透破坏？
3. 渗透力？

工程实例

板桩围护下的基坑渗流

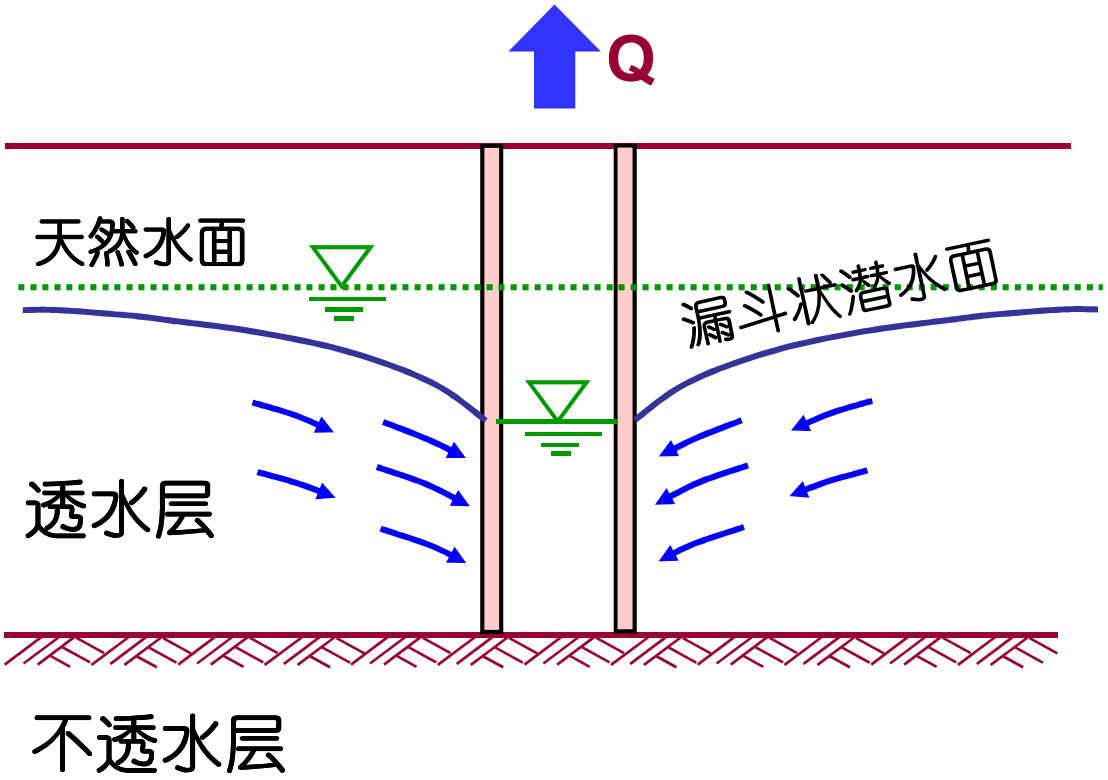


渗流问题：

1. 渗流量？
2. 渗透破坏？
3. 渗水压力？

工程实例

水井渗流

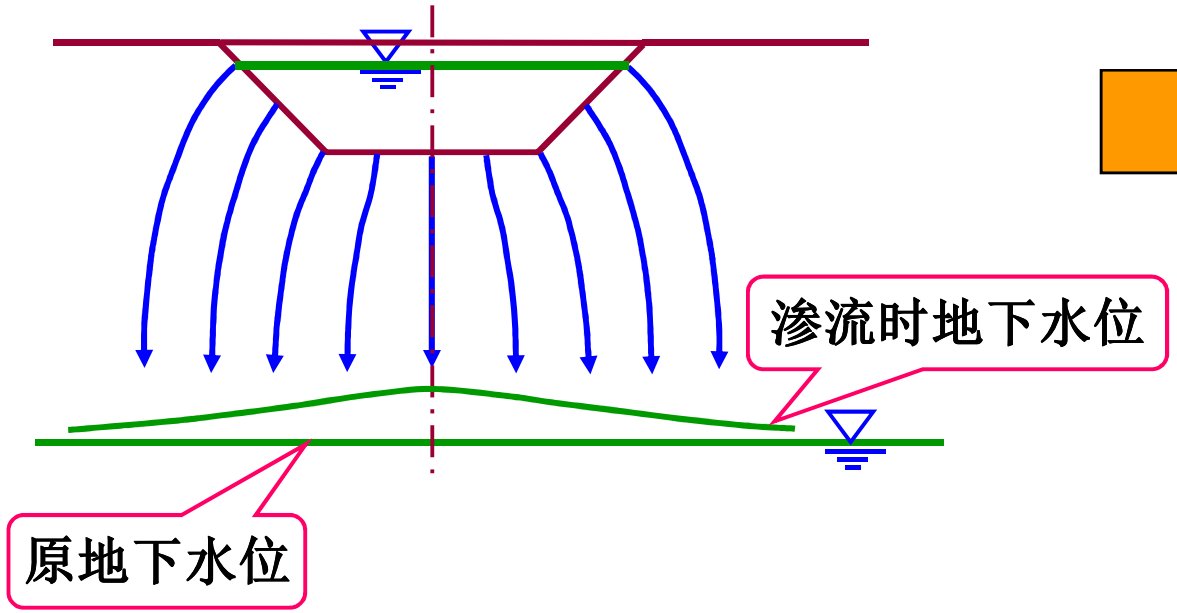


渗流问题：

1. 渗流量Q？

2. 降水深度？

渠道、河流渗流



渗流问题：

1. 渗流量？
2. 地下水影响范围？

降雨入渗引起的滑坡

渗流问题：

1. 渗透力？

2. 入渗过程？

事故实例

土的渗透特性

• 挡水建筑物
• 集水建筑物
• 引水结构物
• 基础工程
• 地下工程
• 边坡工程
渗透特性
变形特性
强度特性
• 渗流量
• 扬压力
• 渗水压力
• 渗透破坏
• 渗流速度
• 渗水面位置

第三章：土的渗透性和渗流问题

§2.0　概述 ✓

§2.1　土的渗透性与渗透规律

§2.2　渗透系数及其确定方法

§2.3　渗透力与渗透变形

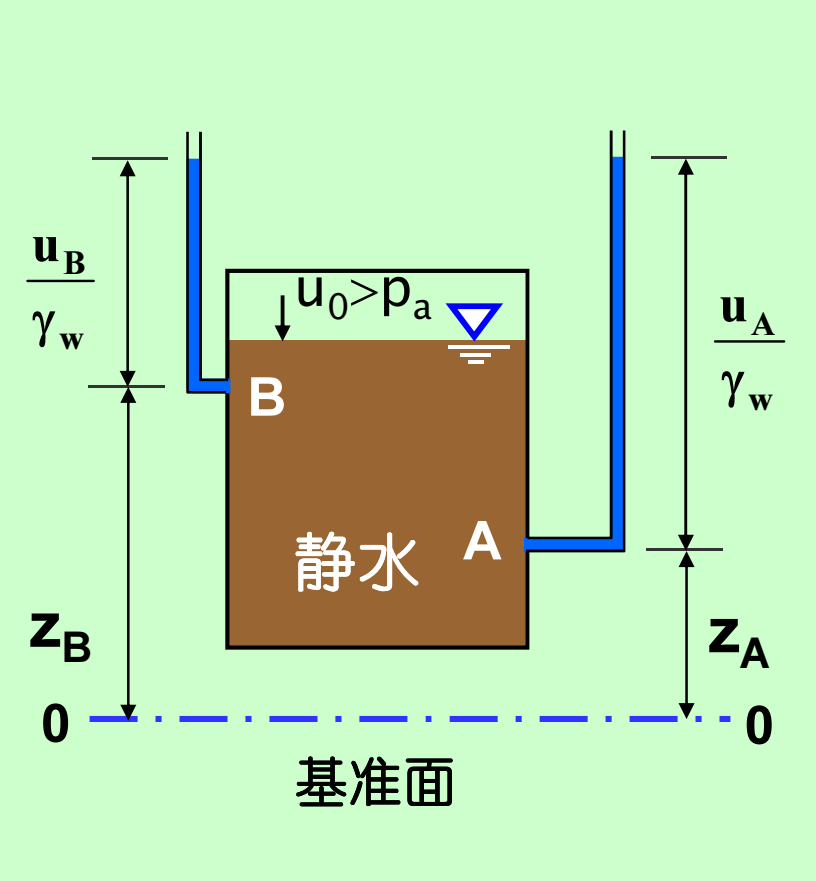
§2.4　平面渗流与流网

内容

土的渗透性与渗透规律

- 水头与水力坡降 → 渗流的驱动能量
- 土的渗透试验与达西定律 → 反映渗流特点的定律
- 渗透系数的测定及影响因素 → 土的渗透性
- 层状地基的等效渗透系数 → 地基的渗透系数

位置、压力和测管水头

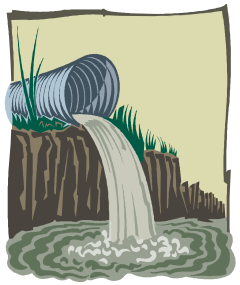


- 位置水头：到基准面的竖直距离，代表单位重量的液体从基准面算起所具有的位置势能
- 压力水头：水压力所能引起的自由水面的升高，表示单位重量液体所具有的压力势能
- 测管水头：测管水面到基准面的垂直距离，等于位置水头和压力水头之和，表示单位重量液体的总势能
- 在静止液体中各点的测管水头相等

P50

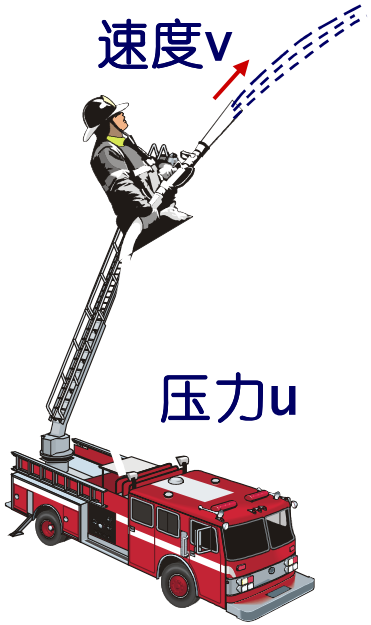
水流动的驱动力

水往低处流



位置：使水流从位置势能高处流向位置势能低处

水往高处“跑”

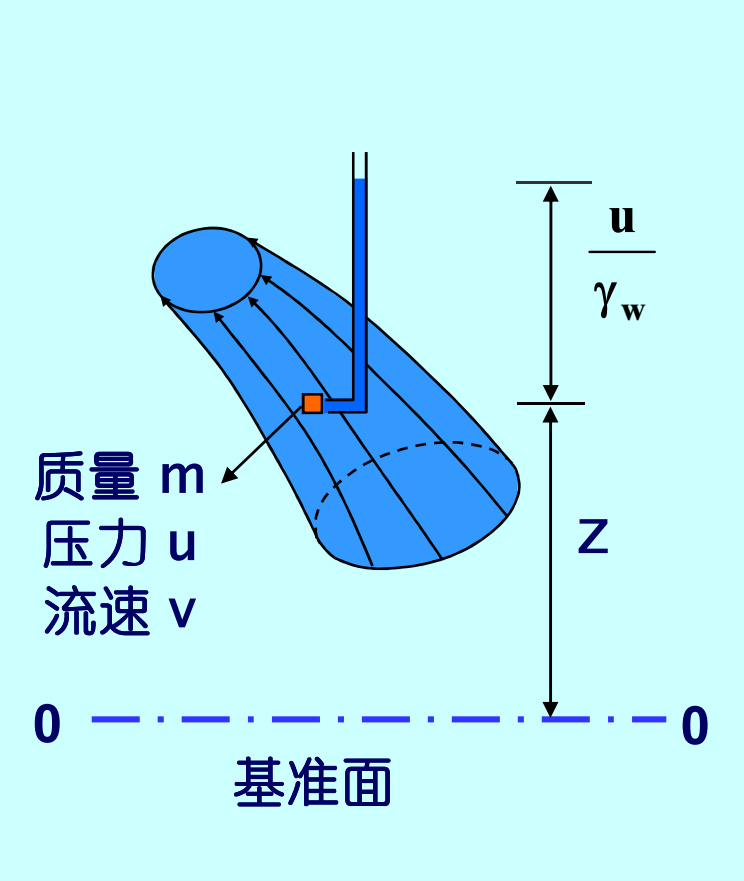


流速：水具有的动能

压力：水所具有的压力势能

也可使水流发生流动

水流动的驱动力 – 水头



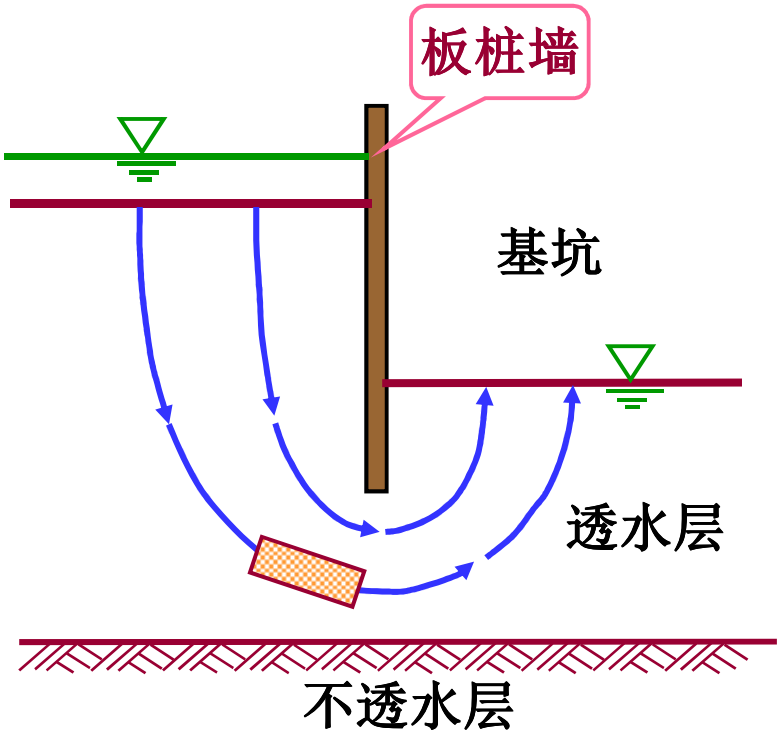
- 位置势能： mgz
- 压力势能： $mg\cdot\frac{u}{\gamma_w}$

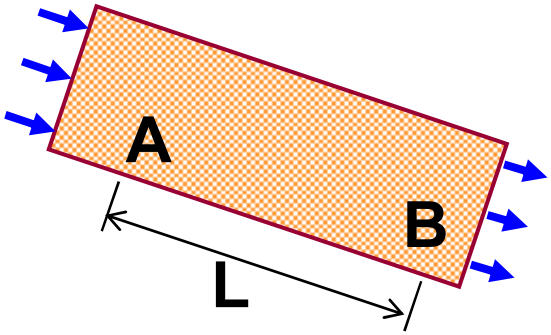
  水压力引起的自由水面的升高，方向向上
- 动能： $\frac{1}{2}mv^2$
- 总能量： $E=mgz+mg\cdot\frac{u}{\gamma_w}+\frac{1}{2}mv^2$
- 单位重量水流的能量：

$$h=z+\frac{u}{\gamma_w}+\frac{v^2}{2g}$$

称为总水头，是水流动的驱动力

1 渗流中的水头与水力坡降





渗流为水体的流动，应满足液体流动的三大基本方程：连续性方程、能量方程、动量方程

渗流问题的水头

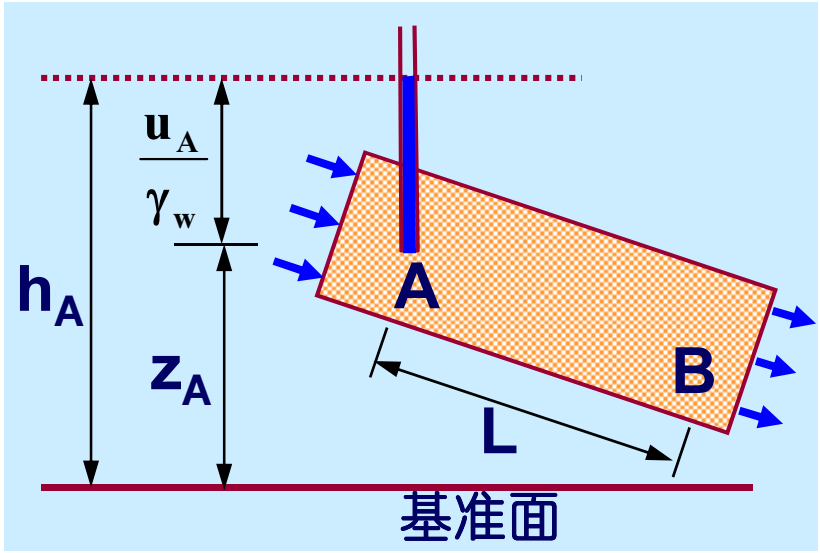
伯努利(Bernoulli D)方程

式2-1

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g}$$

- 总水头：单位重量水体所具有的能量
  - ✧ 位置水头Z：水体的位置势能（任选基准面）
  - ✧ 压力水头u/γ_w：水体的压力势能（u孔隙水压力）
  - ✧ 流速水头$V^2/(2g)$：水体的动能（对渗流多处于层流≈0）

- 渗流的总水头：$h = z + \frac{u}{\gamma_w}$



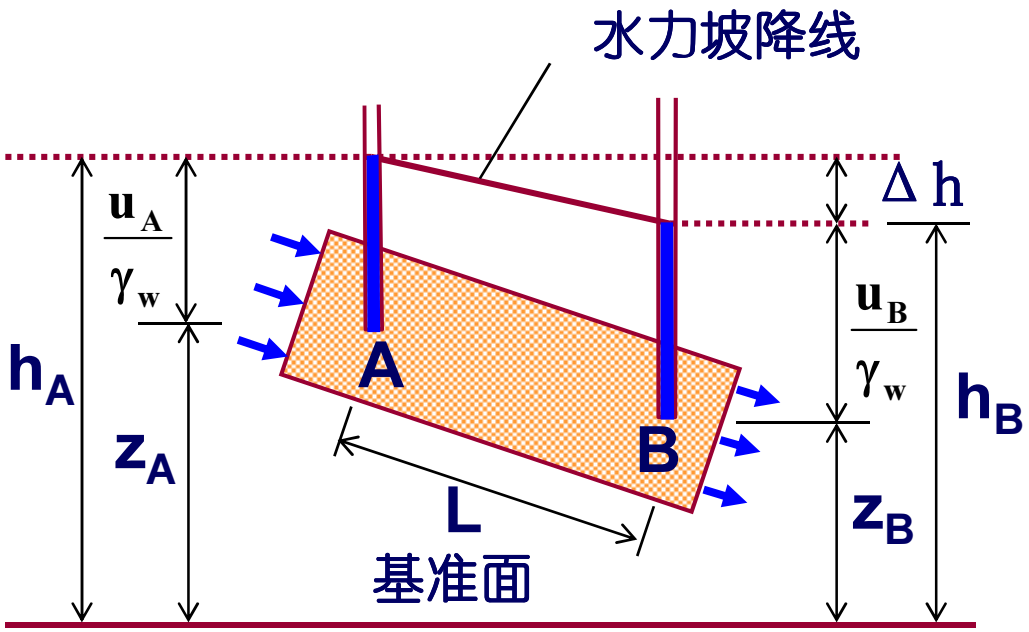
也称测管水头，是渗流的总驱动能，渗流总是从水头高处流向水头低处

P50 式2-1

水力坡降

- A点总水头：$h_A = z_A + \dfrac{u_A}{\gamma_w}$
- B点总水头：$h_B = z_B + \dfrac{u_B}{\gamma_w}$
- 二点总水头差：反映了两点间水流由于摩阻力造成的能量损失

$$\Delta h = h_A - h_B$$



- 水力坡降 i：单位渗流长度上的水头损失 $i = \dfrac{\Delta h}{L}$

P51　水力梯度==

2 达西渗透试验

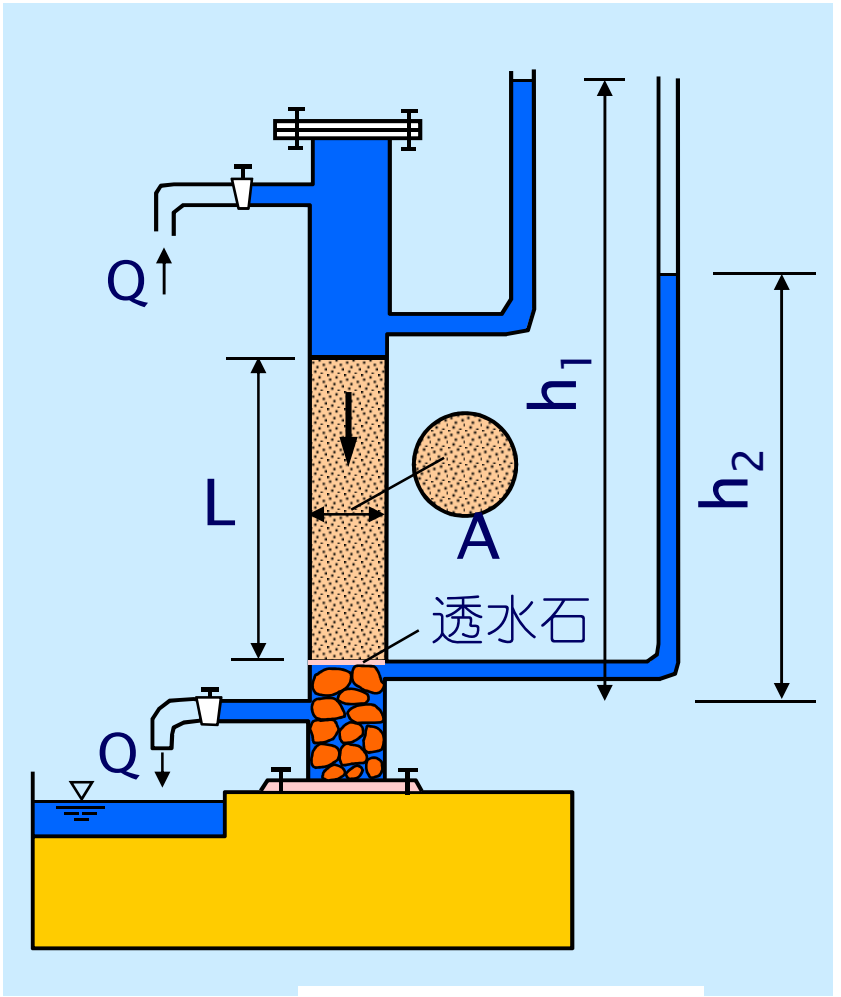
1856 年达西(Darcy)在研究城市供水问题时进行的渗流试验

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

或： $Q = kAi$

其中，A是试样的断面积

P53 式2-7



P53 图2-7

2 达西定律

$$v = \frac{Q}{A} = k \cdot i$$

- 达西定律：在层流状态的渗流中，渗透速度v与水力坡降i的一次方成正比，并与土的性质有关
- 渗透系数k：反映土的透水性能的比例系数，其物理意义为水力坡降i＝1时的渗流速度，单位： cm/s，m/s，m/day
- 渗透速度v：土体试样全断面的平均渗流速度，也称假想渗流速度 $v < v_s = \frac{v}{n}$

P54 公式2-11

公式2-10

其中，V_s为实际平均流速，孔隙断面的平均流速

实际平均流速Vs与假想渗流速度v之间的关系可以作为考题 P54

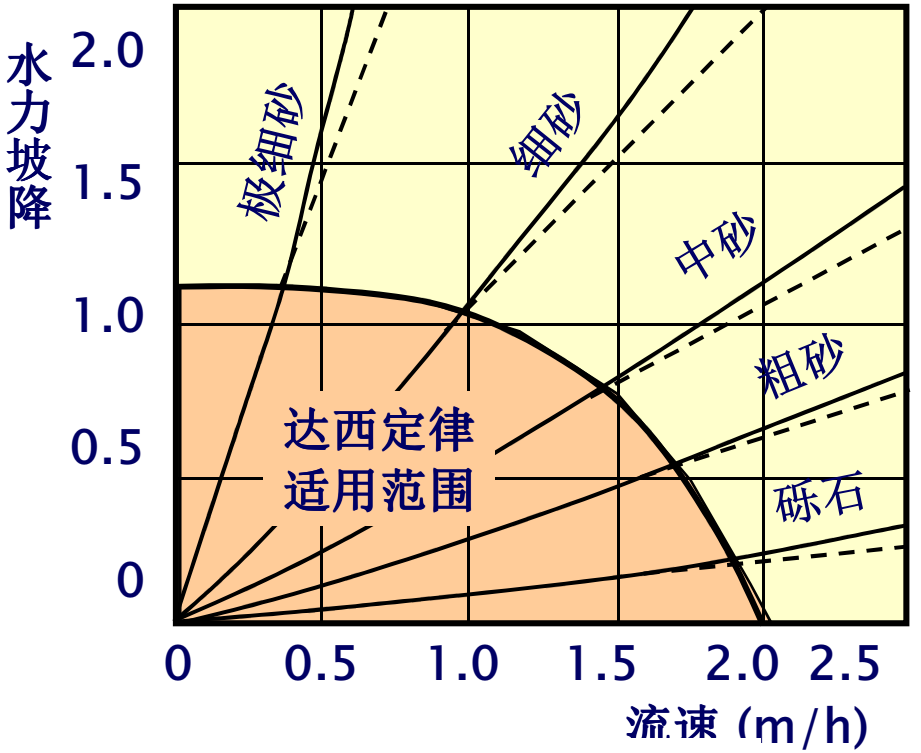
P53 务必注意单位

3 达西定律的适用范围

- 适用条件：层流（线性流动）

  ✧ 岩土工程中的绝大多数渗流问题，包括砂土或一般粘土，均属层流范围

  ✧ 在粗粒土孔隙中，水流形态可能会随流速增大呈紊流状态，渗流不再服从达西定律。可用雷诺数进行判断 ：



雷诺数为流体惯性力与粘滞力之比

$$R_e = \frac{v \cdot d_{10}}{\eta}$$

P54

R_e＜5时层流

R_e ＞200时紊流

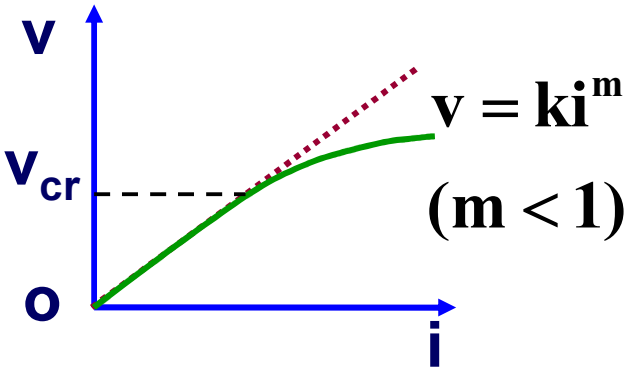
200＞ R_e ＞5时为过渡区

达西定律的适用范围

■ 两种特例

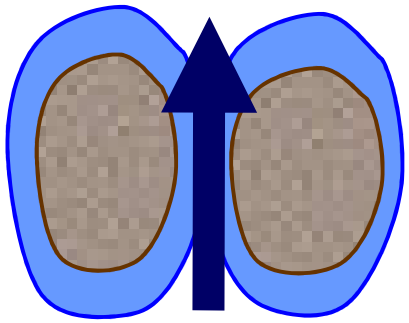
✧ 在纯砾以上的很粗的粗粒土如堆石体中，在水力坡降较大时，达西定律不再适用，此时：

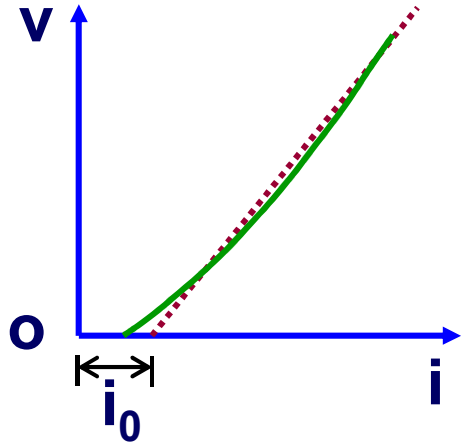
$$v = ki^m \qquad (m < 1)$$



✧ 对致密的粘性土，存在起始水力坡降i_0 ？？

$i > i_0$, $v = k \cdot (i - i_0)$





P54

渗透系数的测定方法

- ☞ 室内试验方法
  - 常水头试验法
  - 变水头试验法
- ☞ 野外试验方法
  - 井孔抽水试验
  - 井孔注水试验

P55例题2-3重要

P55 2.2.2

室内试验方法-常水头试验法

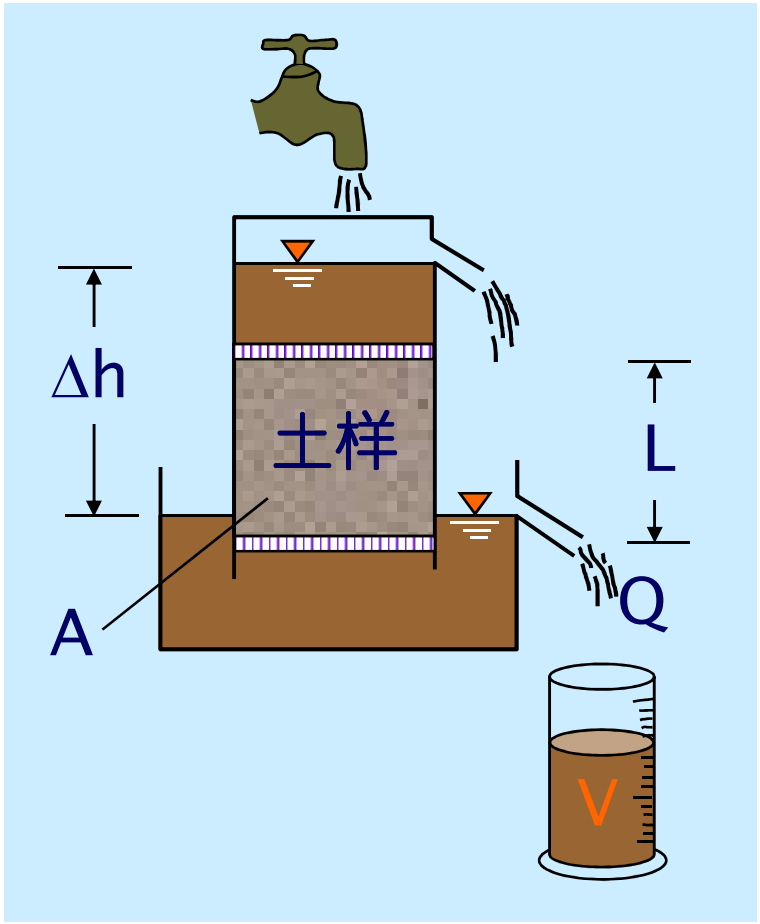
- 试验条件： Δh，A，L=const
- 量测变量： 体积V，t

$V=Qt=vAt$

$v=ki$

$i=\Delta h/L$

$$k=\frac{VL}{A\Delta ht}$$



- 适用土类：透水性较大的砂性土

P56 V—Volume v--velocity

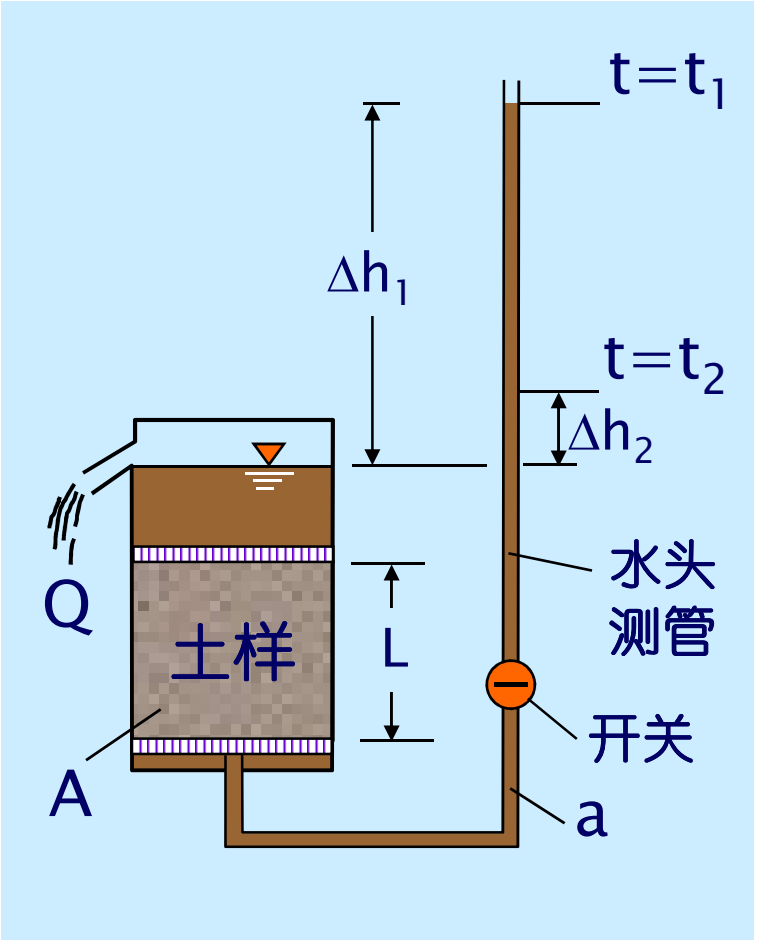
室内试验方法-变水头试验法

- 试验条件：Δh变化

  A，a，

  L=const

- 量测变量： Δh，t
- 适用土类：透水性较小的粘性土



P56

室内试验方法-变水头试验法

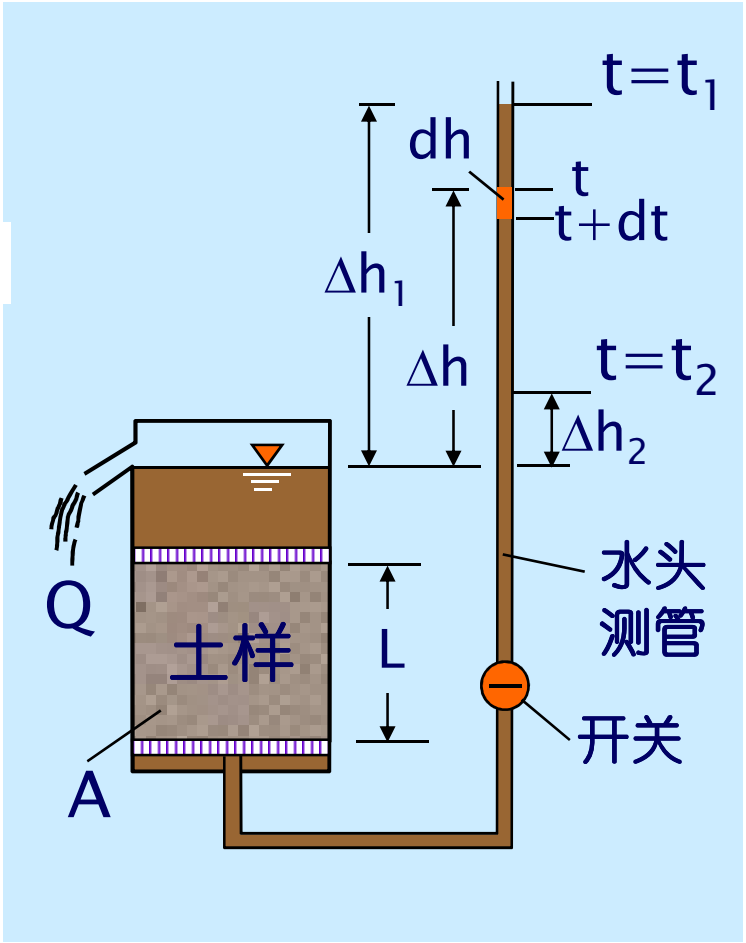
在t→t+dt时段内： **Entry === Outflow**

- 入流量： $dVe = -adh$
- 出流量： $dVo = kiAdt = k(\Delta h/L)Adt$
- 连续性条件： $dVe = dVo$

$$-adh = k(\Delta h/L)Adt \qquad dt = -\frac{aL}{kA}\frac{dh}{\Delta h}$$

$$\int_0^t dt = -\frac{aL}{kA}\int_{\Delta h_1}^{\Delta h_2}\frac{dh}{\Delta h} \qquad t = \frac{aL}{kA}ln\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$$

$$k = \frac{aL}{At}ln\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$$



选择几组量测结果，计算相应的k，取平均值

室内试验方法–小结

	常水头试验	变水头试验
条件	Δh=const	Δh变化
已知	Δh，A，L	a，A，L
测定	V，t	Δh，t
公式	$k=\frac{VL}{A\Delta ht}$	$k=\frac{aL}{At}\ln\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$
取值	重复试验后，取均值	不同时段试验，取均值
适用	粗粒土	粘性土

现场测定法—抽水试验

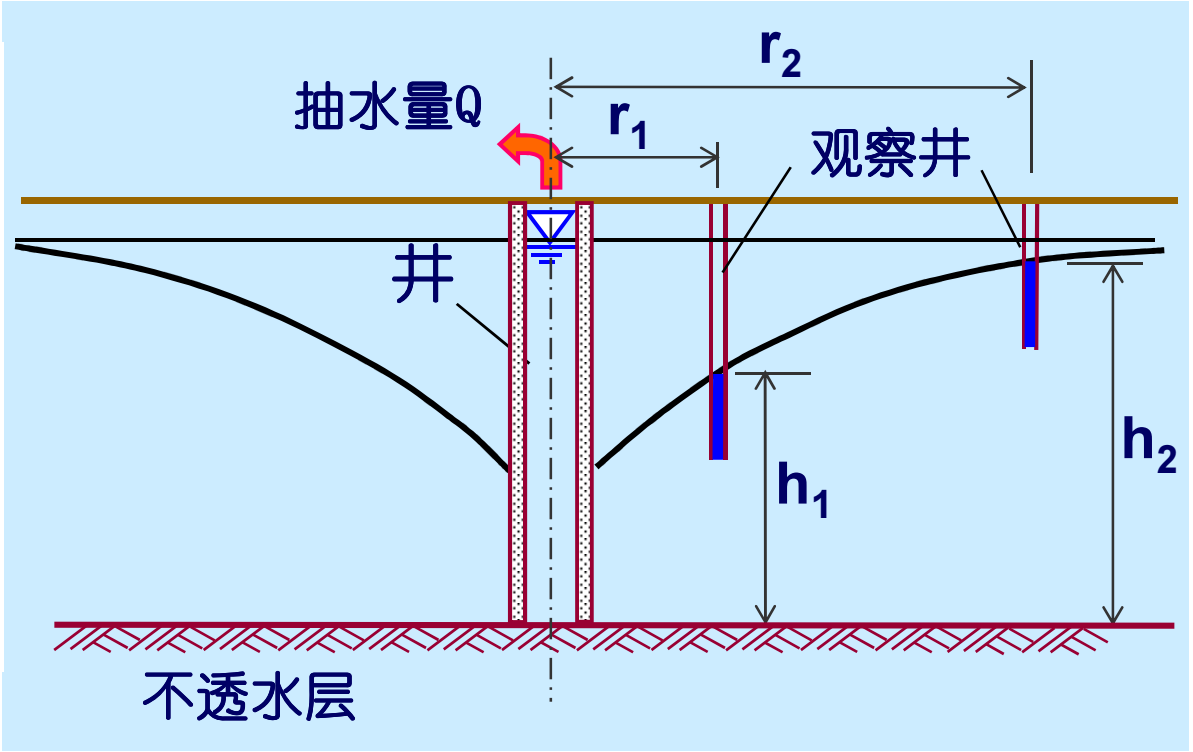
- 试验条件：

  $Q=const$

- 量测变量：

  $r=r_1$，$h_1=?$

  $r=r_2$，$h_2=?$



✧ 优点：可获得现场较为可靠的平均渗透系数

· 缺点：费用较高，耗时较长

P57

现场测定法—抽水试验

■ 计算公式：

A=2πrh

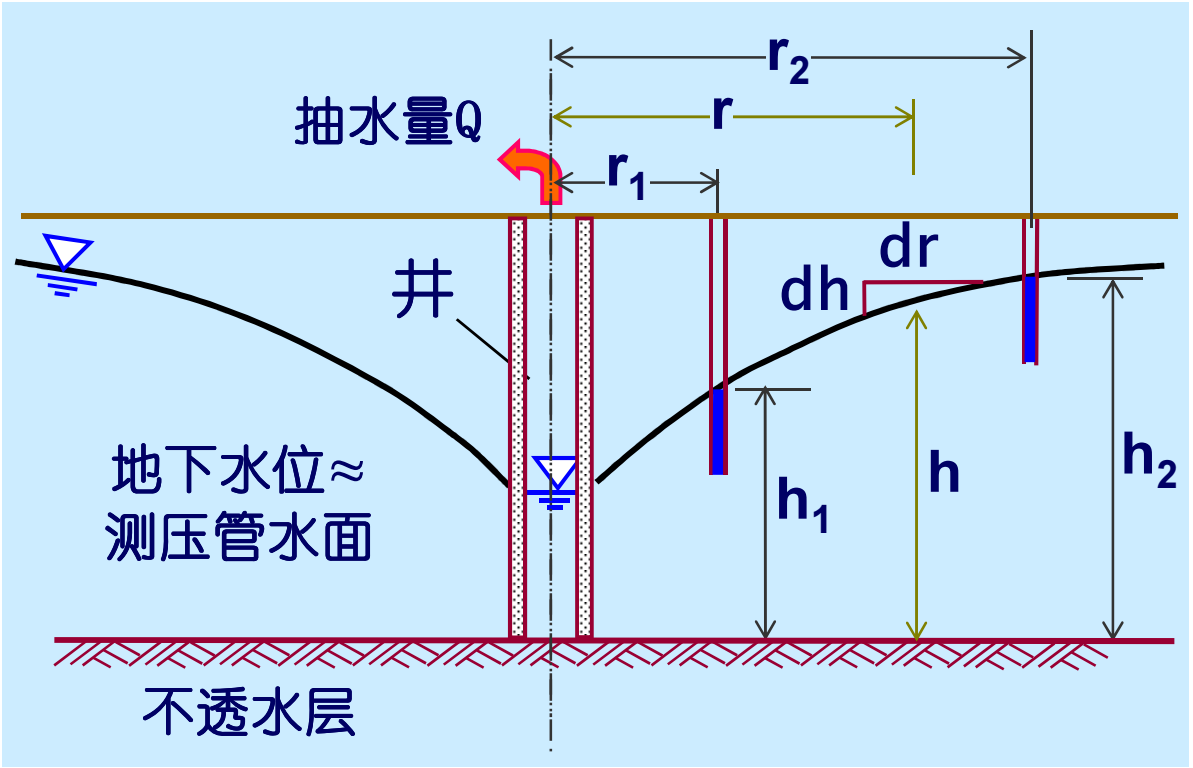
i=dh/dr

$$Q = Aki = 2\pi rh \cdot k\frac{dh}{dr}$$

$$Q\frac{dr}{r} = 2\pi khdh$$

$$Q\,ln\frac{r_2}{r_1} = \pi k(h_2^2 - h_1^2)$$

P58式2-18



$$k = \frac{Q}{\pi}\frac{ln(r_2/r_1)}{h_2^2 - h_1^2}$$

渗透系数的影响因素

✧ 土的性质

- 粒径大小及级配
- 孔隙比
- 矿物成分
- 结构

✧ 水的性质

P59

■ 是土中孔隙直径大小的主要影响因素

■ 因由粗颗粒形成的大孔隙可被细颗粒充填，故土体孔隙的大小一般由细颗粒所控制。因此，土的渗透系数常用有效粒径 d_{10}来表示，如哈臣（Hazan）公式：

$$k = c \cdot d_{10}^{2} \qquad (2\text{-}19)$$

渗透系数的影响因素

✧ 土的性质

- 粒径大小及级配
- 孔隙比
- 矿物成分
- 结构

✧ 水的性质

DEL

- 是单位土体中孔隙体积的直接度量
- 对于砂性土，常建立孔隙比e与渗透系数k之间的关系，如：

$$k = f(e^2)$$

$$k = f(\frac{e^2}{1+e})$$

$$k = f(\frac{e^3}{1+e})$$

渗透系数的影响因素

✧ 土的性质

- 粒径大小及级配
- 孔隙比
- 矿物成分
- 结构

✧ 水的性质

- 对粘性土，影响颗粒的表面力
- 不同粘土矿物之间渗透系数相差极大，其渗透性大小的次序为高岭石>伊利石>蒙脱石；当粘土中含有可交换的钠离子越多时，其渗透性将越低
- 塑性指数Ip综合反映土的颗粒大小和矿物成份，常是渗透系数的参数

DEL

渗透系数的影响因素

✧ 土的性质

- 粒径大小及级配
- 孔隙比
- 矿物成分
- 结构

✧ 水的性质

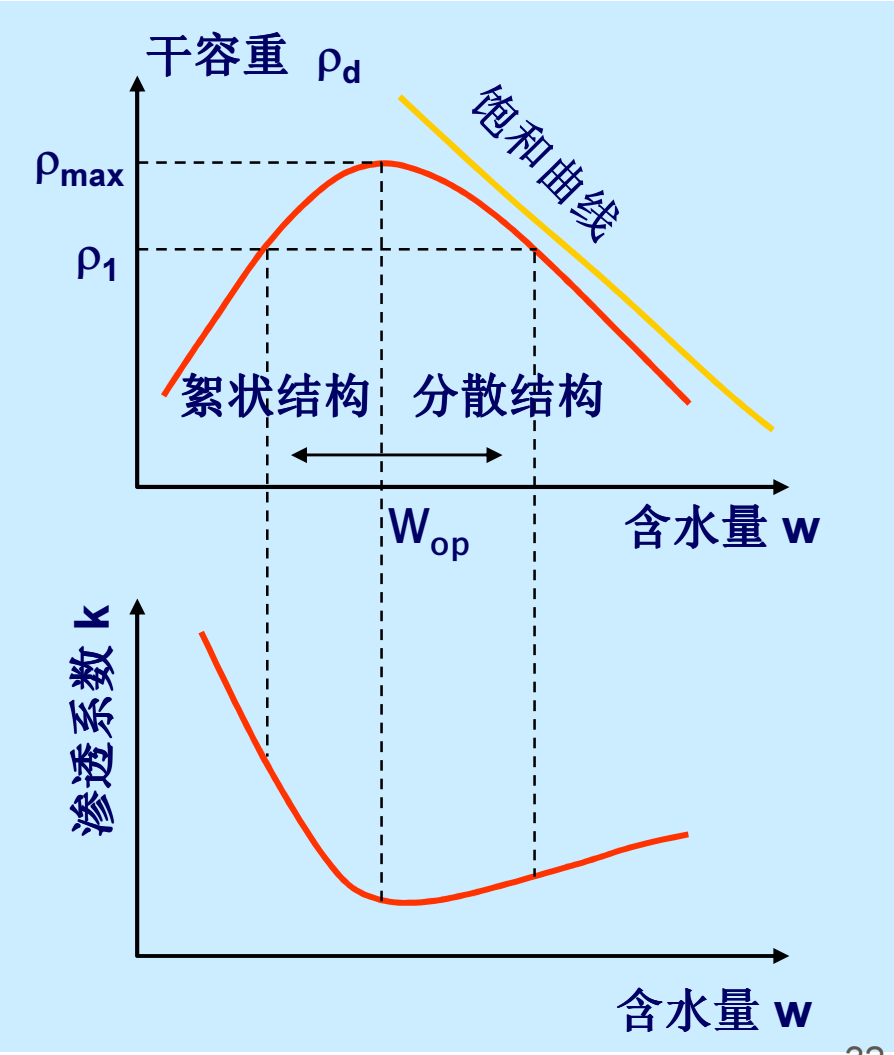
DEL

- 影响孔隙系统的构成和方向性，对粘性土影响更大
- 在宏观构造上，天然沉积层状粘性土层，扁平状粘土颗粒常呈水平排列，常使得$k_{水平} > k_{垂直}$
- 在微观结构上，当孔隙比相同时，凝聚结构将比分散结构具有更大的透水性

渗透系数的影响因素

- ✧ 土的性质
  - 粒径大小及级配
  - 孔隙比
  - 矿物成分
  - 结构
- ✧ 水的性质

DEL



渗透系数的影响因素

✧ 土的性质

- 粒径大小及级配
- 孔隙比
- 矿物成分
- 结构

✧ 水的性质

- 水的动力粘滞系数：

  温度↑，水粘滞性↓，k↑

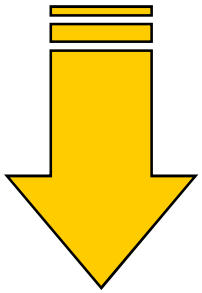
- 饱和度（含气量）：封闭气泡对k影响很大，可减少有效渗透面积，还可以堵塞孔隙的通道

P60 表2-3 土的渗透系数参考值

DEL

层状地基的等效渗透系数

天然土层多呈层状



- 确立各层土的k_i
- 根据渗流方向确定等效渗流系数

等效渗透系数

多个土层用假想单一土层置换，
使得其总体的透水性不变

P60 2.2.3

层状地基的水平等效渗透系数

单位宽度1

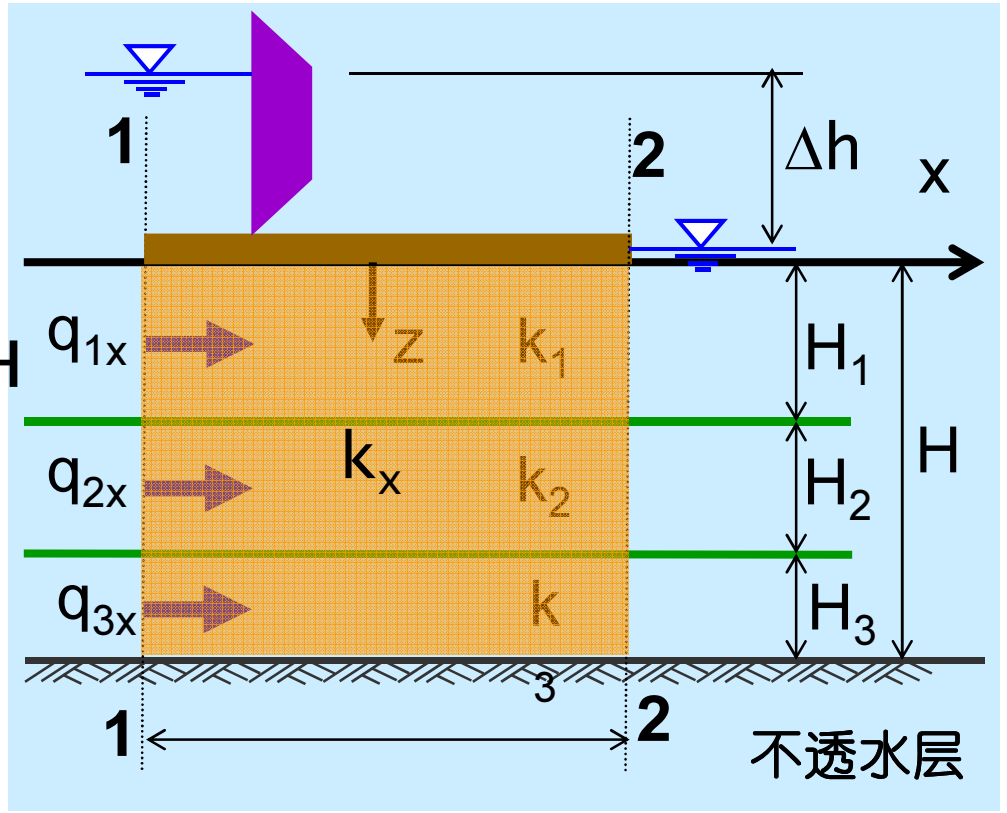
- 已知条件：$i_i = i = \dfrac{\Delta h}{L}$

$$H = \sum H_i$$

- 达西定律：$q_x = v_x H = k_x\, i\, H$

$$\Sigma q_{ix} = \Sigma k_i\, i_i\, H_i$$

- 等效条件：$q_x = \sum q_{ix}$



等降总流 ⇒ 等效渗透系数：$k_x = \dfrac{1}{H}\sum k_i H_i$ P61 式2-22

等效土层的总渗量等于各土层渗量之和

层状地基的垂直等效渗透系数

- 已知条件：$v_i = v$

$$\Delta h = \sum \Delta h_i \qquad H = \sum H_i$$

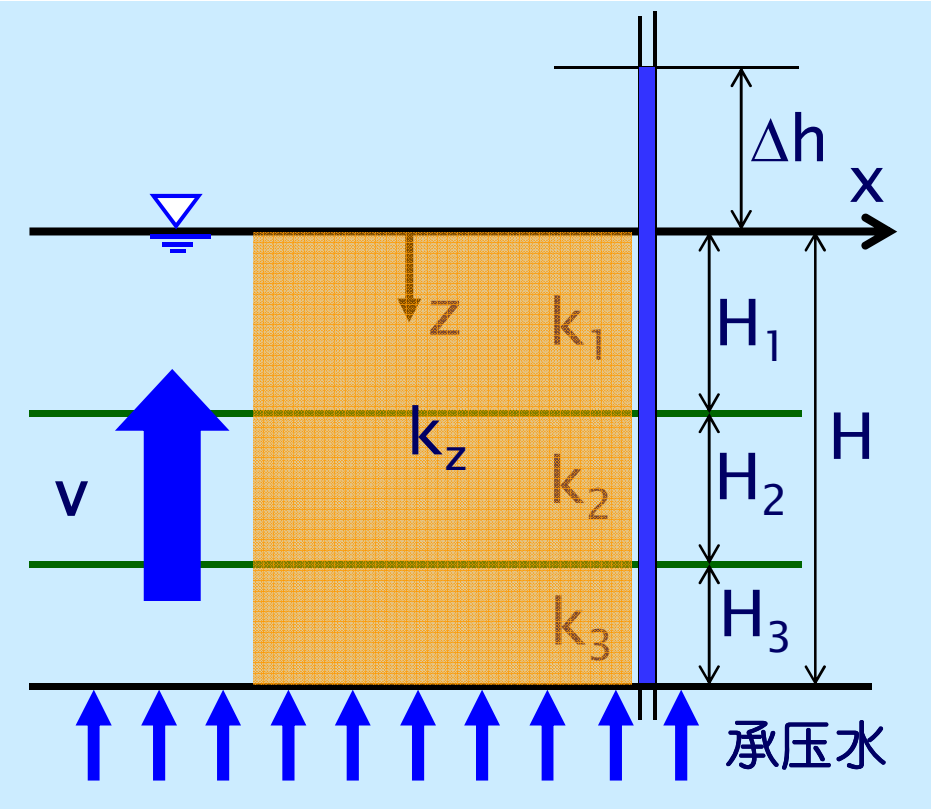
- 达西定律：$v_i = k_i (\Delta h_i / H_i)$

$$v = k_z (\Delta h / H)$$

- 等效条件：

$$\Delta h_i = \frac{v_i H_i}{k_i} \qquad \Delta h = \frac{vH}{k_z}$$

$$\frac{vH}{k_z} = \Delta h = \sum \Delta h_i = \sum \frac{v_i H_i}{k_i}$$



等效渗透系数：

$$k_z = \frac{H}{\sum \frac{H_i}{k_i}}$$

P62 式2-27

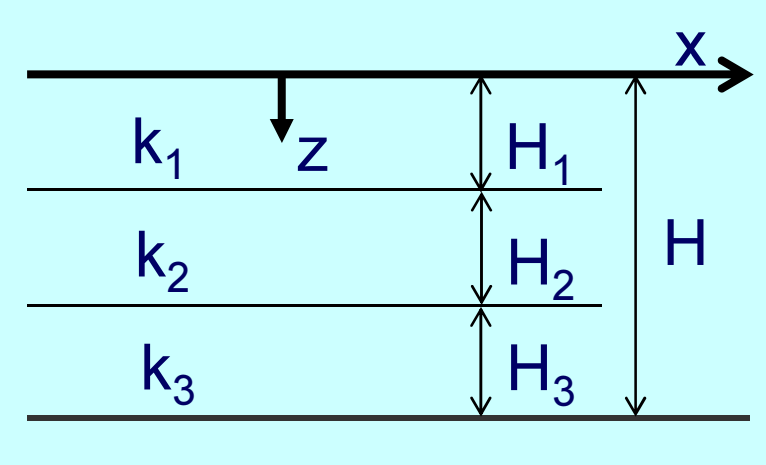
渗流总损

总水头损失是各层水头损失之和

层状地基的等效渗透系数

■ 算例说明

$$H_1 = 1.0m, \quad k_1 = 0.01m/day$$
$$H_2 = 1.0m, \quad k_2 = 1m/day$$
$$H_3 = 1.0m, \quad k_3 = 100m/day$$



$$k_x = \frac{\sum k_i H_i}{H} = 33.67m/day$$

按层厚加权平均，由较大值控制

$$k_z = \frac{H}{\sum \frac{H_i}{k_i}} = 0.03m/day$$

层厚倒数加权平均，由较小值控制

P62 例题2-4

层状地基的等效渗透系数

	水平渗流情形	垂直渗流情形
条件	$q=\sum q_i;H=\sum H_i;$ $i_i=i=\frac{\Delta h}{L}$	$v_1=v_2=\ldots=v;$ $\Delta h=\sum h_i;H=\sum H_i$
已知	$H_1,H_2\ldots;k_1\ldots$	$H_1,H_2\ldots;k_1,k_2\ldots$
等效	$q=k_x iH$	$v=k_z i=k_z\frac{\Delta h}{H}$
公式	$k_x=\frac{1}{H}\sum k_i H_i$	$k_z=\frac{H}{\sum\frac{H_i}{k_i}}$

等降总流

等速总损

小　结

- 水头与水力坡降
  - 总水头=位置水头+压力水头
  - 水头是渗流的驱动力
- 渗透试验与达西定律
  - 达西定律
  - 渗透系数、渗透速度
  - 达西定律的适用条件
- 渗透系数的测定及影响因素
  - 常水头试验
  - 变水头试验
  - 抽水试验
  - 渗透系数影响因素
- 层状地基的等效渗透系数
  - 水平等效渗透系数
  - 垂直等效渗透系数

第三章：土的渗透性和渗流问题

§2.0 概述 ✓

§2.1 土的渗透性与渗透规律 ✓

§2.2 渗透系数及其测定方法

§2.3 平面渗流与流网 →

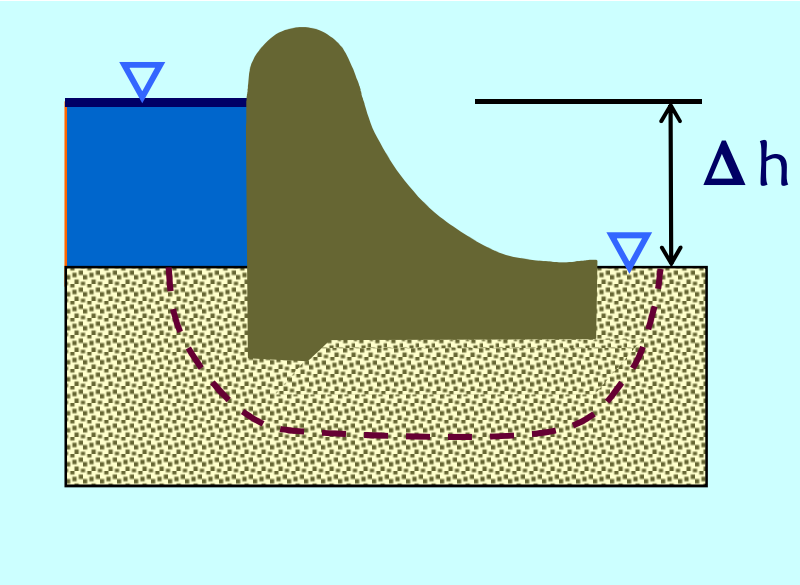
- ✧ 平面渗流的基本方程及求解
- ✧ 流网的绘制及应用

§2.4 渗透力与渗透变形

平面稳定渗流

■ 平面问题：渗流剖面和产生渗流的条件沿某一个方向不发生变化，则在垂直该方向的各个平面内，渗流状况完全一致。

对平面问题，常取dy=1m单位宽度的一片来进行分析



■ 稳定渗流：流场不随时间发生变化的渗流

P63

$h=h(x,z)$，$v=v(x,z)$ ⇒ 与时间无关

渗流的连续性方程

✧ 单位时间流入单元的水量：

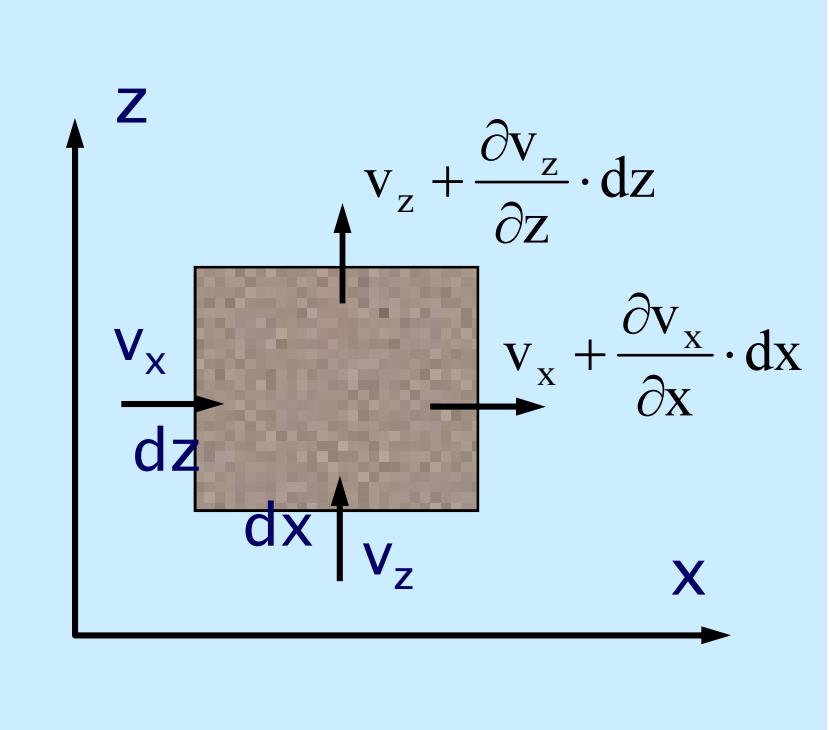
$$dq_e = v_x dz + v_z dx$$

✧ 单位时间内流出单元的水量：

$$dq_o = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx\right) dz + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz\right) dx$$

✧ 连续性条件：$dq_e = dq_o$

Entry Outflow



渗流的连续性方程：$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$

渗流的运动方程

✧ 渗流的连续性方程：$\dfrac{\partial v_x}{\partial x}+\dfrac{\partial v_z}{\partial z}=0$

✧ 达西定律：$v_x=k_x\dfrac{\partial h}{\partial x};\qquad v_z=k_z\dfrac{\partial h}{\partial z}$

渗流的运动方程：$k_x\dfrac{\partial^2 h}{\partial x^2}+k_z\dfrac{\partial^2 h}{\partial z^2}=0$

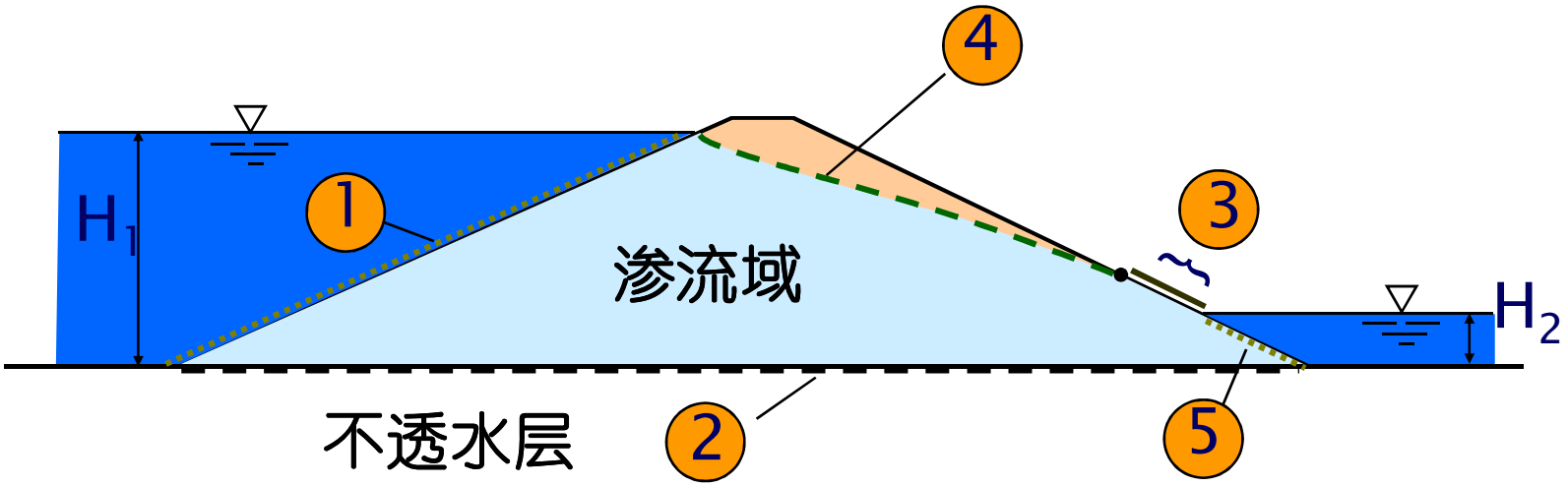
☞特例：各向同性均质土体 $k_x=k_z$

$\dfrac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 h}{\partial z^2}=0$

Laplace方程，描述渗流场内水头的分布，是平面稳定渗流的基本方程

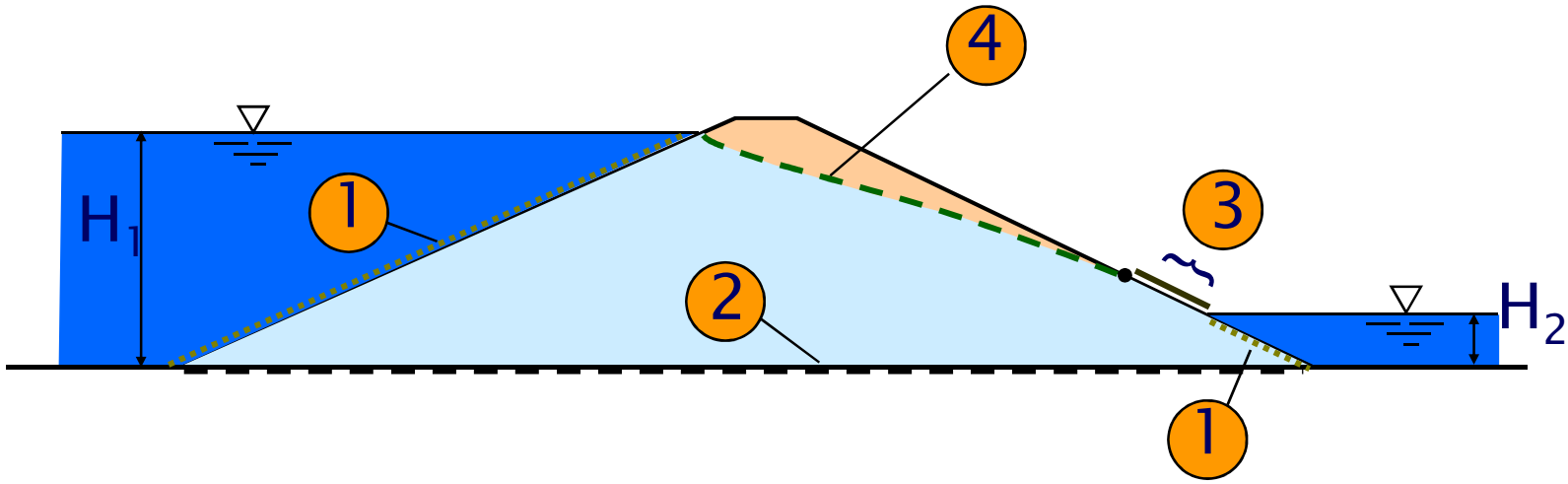
渗流的边界条件

课堂讨论：土石坝渗流问题的边界条件



P65

渗流的边界条件



① 水头边界条件　　在边界Ω_1上给定水头

② 流速边界条件　　在边界Ω_2上给定法向流速

③ 渗出面　　在边界Ω_3上$H=z$，$v_n>0$

④ 自由水面*　　在边界Ω_4上$H=z$，$v_n=0$

平面稳定渗流问题描述

- 运动方程：$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$

或：$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$

- 边界条件：

① 水头边界条件　　在边界Ω_1上给定水头

② 流速边界条件　　在边界Ω_2上给定法向流速

③ 渗出面　　在边界Ω_3上$h=z$，$v_n>0$

④ 自由水面*　　在边界Ω_4上$h=z$，$v_n=0$

渗流分析的方法

- 数学解析法或近似解析法：求取渗流运动方程在特定边界条件下的理论解，或者在一些假定条件下，求其近似解
- 数值解法：有限元、有限差分、边界元法等，近年来得到迅速地发展
- 电比拟试验法：利用电场来模拟渗流场，简便、直观，可以用于二维问题和三维问题
- 流网法：简便快捷，具有足够的精度，可分析较复杂断面的渗流问题

P66

势函数

为研究问题方便，引进一个标量函数 $\phi(x,z)$

■ 流速势或势函数：$\phi = -k\mathrm{h} = -k(\frac{\mathrm{u}}{\gamma_w} + z)$

*h*为测管水头

则有：$\mathrm{v_x} = \frac{\partial \phi}{\partial \mathrm{x}}, \quad \mathrm{v_z} = \frac{\partial \phi}{\partial \mathrm{z}} \quad \Rightarrow \quad \vec{\mathrm{v}} = \mathbf{grad}\phi$

渗流流速矢量为标量函数 ϕ的梯度，相应的流动为有势流动，该标量函数被称为势函数

满足达西定律的渗流问题是一个势流问题

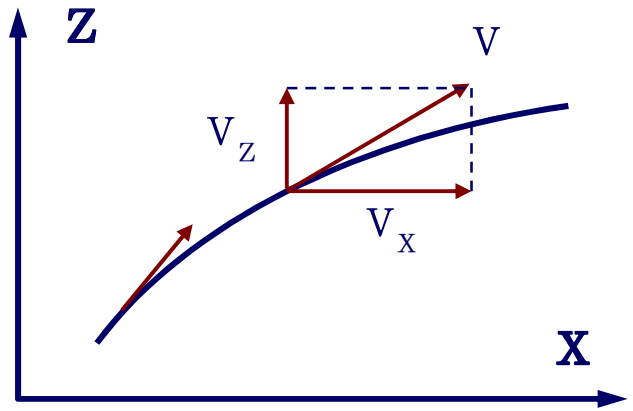
■ 势函数的特性：

- 等势面是等水头面
- 两条等势面的势值差同其水头差成正比

P66

流函数

- 定义：流线是流场中的曲线，在这条曲线上所有各质点的流速矢量都和该曲线相切



- 流线的方程：$\dfrac{dz}{dx}=\dfrac{v_z}{v_x}$

$$\Rightarrow \quad v_x dz - v_z dx = 0$$

交叉求偏导然后相等

为某一函数全微分的充要条件为 $\dfrac{\partial v_x}{\partial x}=\dfrac{\partial(-v_z)}{\partial z}$ 连续性方程

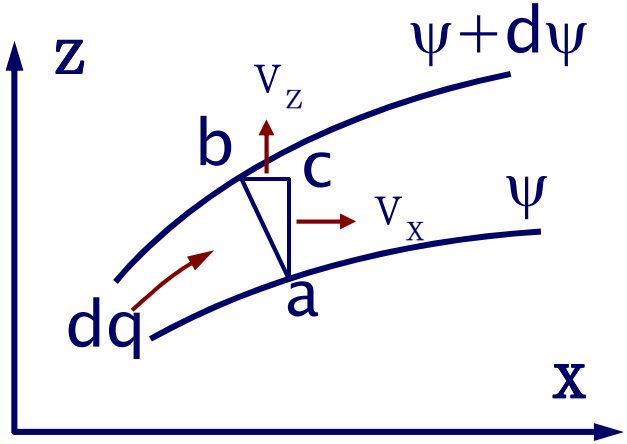
该连续性方程在渗流场中是恒等成立的，且

必然存在函数ψ，称为流函数，且有：$\dfrac{\partial \psi}{\partial x}=-v_z;\quad \dfrac{\partial \psi}{\partial z}=v_x$

流函数的性质

- 性质一：流线互不相交，在同一条流线上，流函数的值为一常数

$$v_x dz - v_z dx = \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial z} dz = d\psi = 0$$



- 性质二：两条流线流函数的差值等于其间通过的流量

a和b为两流线间的过水断面，a(x, z)， b(x−dx, z+dz)

$$dq = v_x \cdot ac + v_z \cdot cb = v_x \cdot dz - v_z \cdot dx = \frac{\partial \psi}{\partial z} dz - (-\frac{\partial \psi}{\partial x}) dx = d\psi$$

DEL

势函数与流函数

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

$$v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0$$

1）势函数和流函数均满足拉普拉斯方程

2）势函数和流函数正交，一点两线的斜率互成负倒数

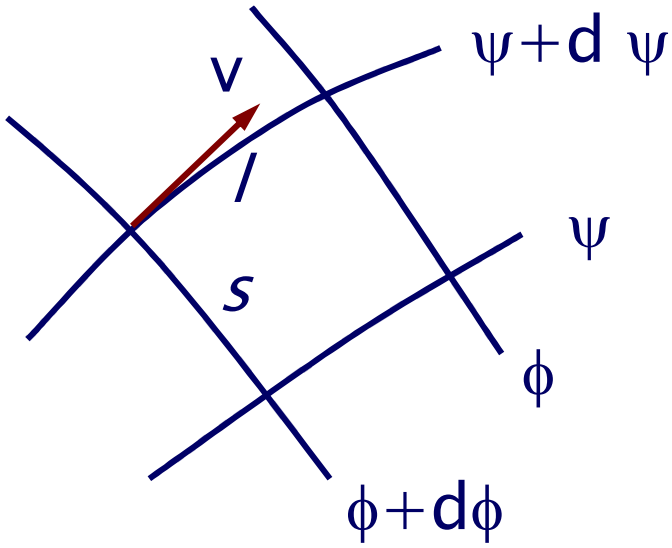
3）势函数和流函数是互为共轭的调和函数，两者均完备地描述了同一个渗流场

4）当对调边界条件时，势函数和流函数两组曲线可互换

DEL

流网及其特性

- 在流场中，流线和等势线（等水头线）组成的网格称为流网
  - ☞ 流线和等势线正交
  - ☞ 流网中应使相邻流线间的流函数差和相邻等势线间的势函数（水头）差不变
  - ☞ 流网中每一网格的边长比为常数，通常取为1



$$\frac{d\phi}{d\psi}=\frac{v_x dx+v_z dz}{-v_z dx+v_x dz}=\frac{v\cdot l}{v\cdot s}=\frac{l}{s}$$

P68

流网的画法

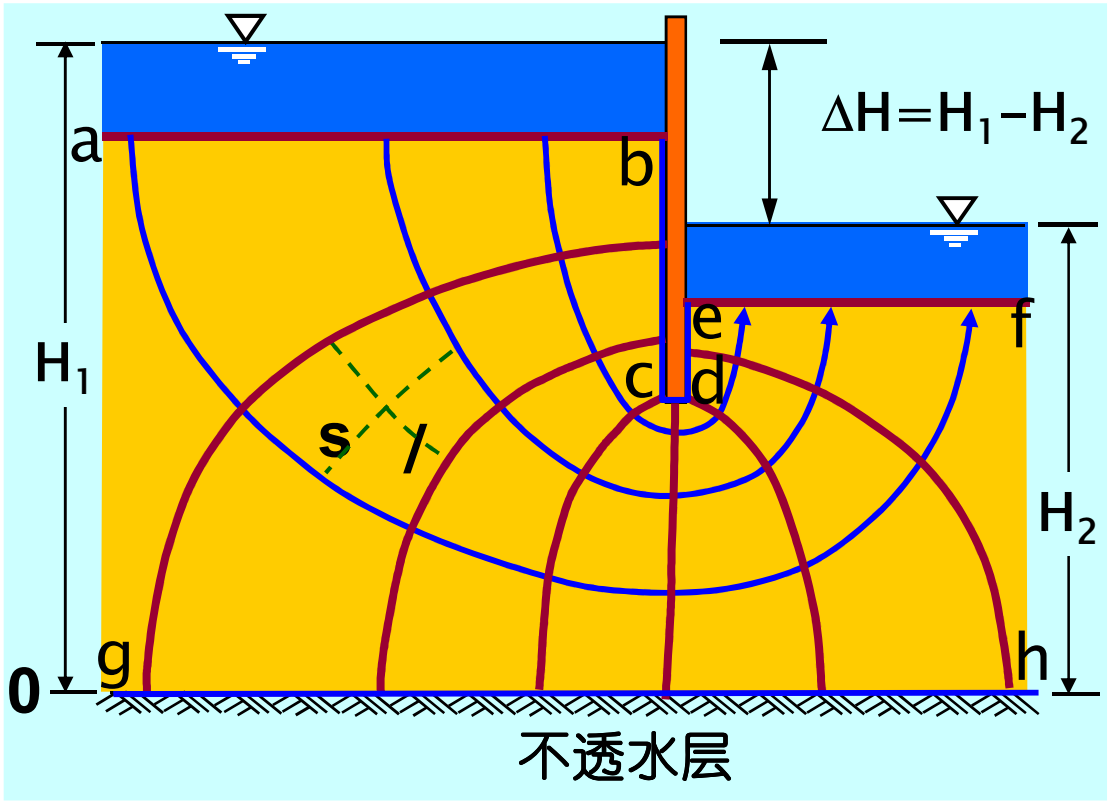
1）确定边界条件：边界流线和首尾等势线

2）研究水流的方向：流线的走向

3）判断网格的疏密大致分布

4）初步绘制流网的雏形：正交性、曲边正方形

5）反复修改和检查

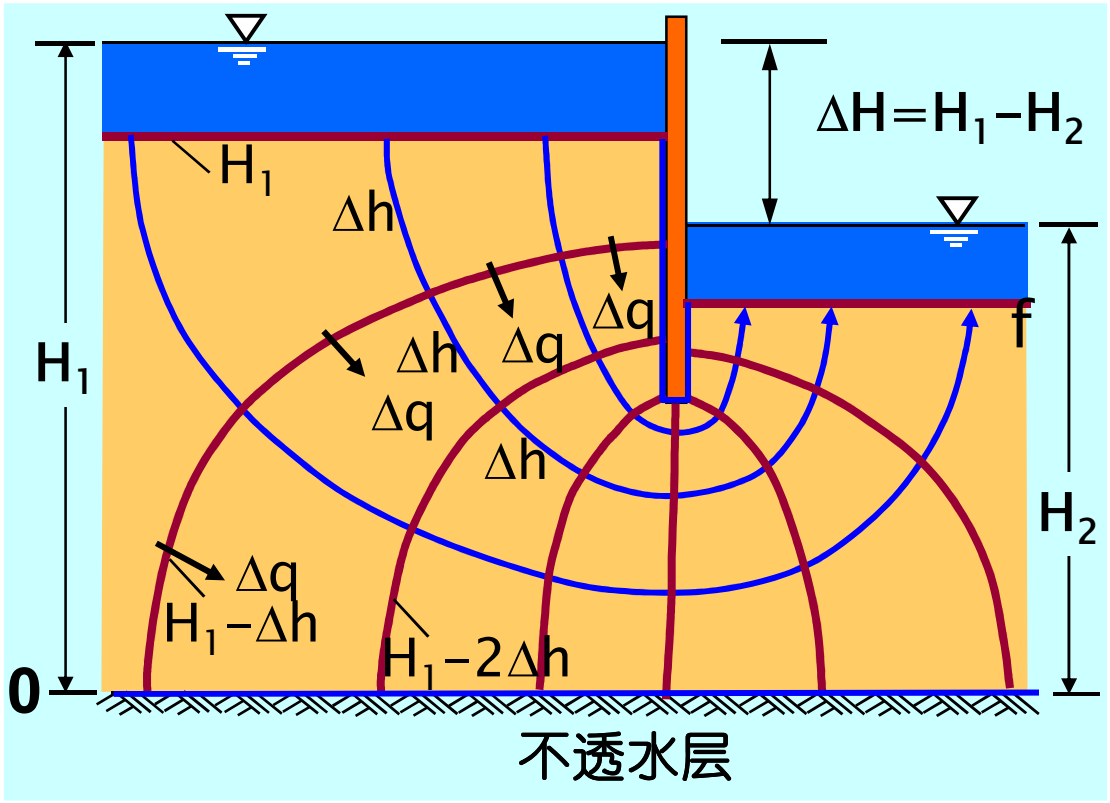


要点：边界条件、正交性、曲边正方形、多练习

P69

流网的应用

- 测管水头 h
- 水力坡降 $i = \Delta h / l$
- 确定孔压 $(h - h_z) \times \gamma_w$
- 确定流速 $v = k \cdot i$
- 确定流量



$$\Delta q = k \frac{\Delta h}{l_i} \cdot s_i = k \cdot \Delta h$$

$$q = M \cdot \Delta q = M \cdot k \cdot \Delta h$$

流道数

P69-71

可以一起看书

例题2-5要看会

小　结

- 平面渗流的基本方程及求解
  - 连续性方程
  - 运动方程
  - 边界条件
  - 求解方法
- 流网的绘制及应用
  - 势函数
  - 流函数
  - 流网及特性
  - 流网的画法
  - 流网的应用

第三章：土的渗透性和渗流问题

§2.0　概述 ✓

§2.1　土的渗透性与渗透规律 ✓

§2.2　土的渗透系数及其确定方法 ✓

§2.3　平面渗流与流网

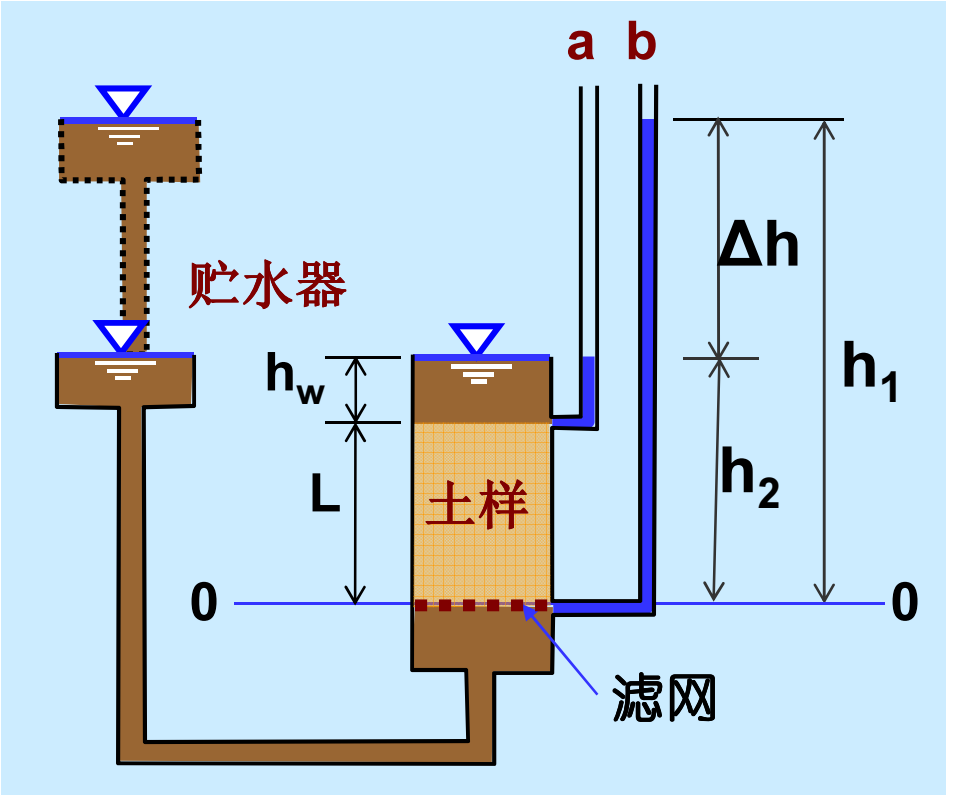
§2.4　渗透力与渗透变形 →

- ✧ 渗透力
- ✧ 临界水力坡降
- ✧ 渗透变形（渗透破坏）

P72

渗透力-试验观察

- $\Delta h=0$　静水中，土骨架会受到浮力作用。无渗流
- $\Delta h>0$　水在流动时，水流受到来自土骨架的阻力，同时流动的孔隙水对土骨架产生一个摩擦、拖曳力。



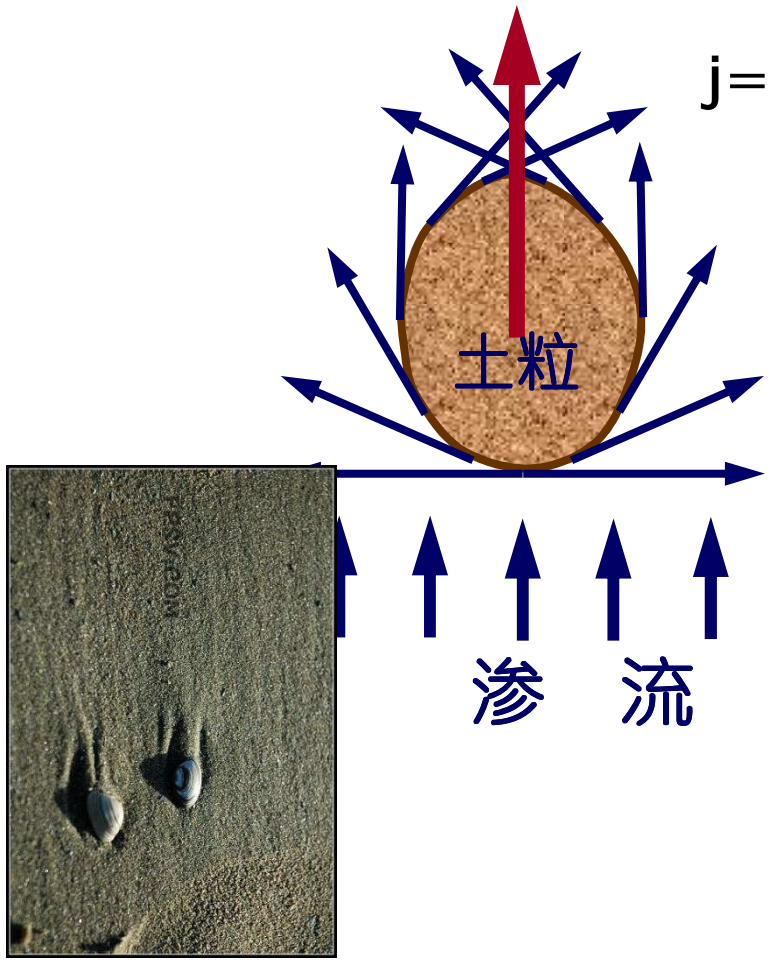
渗透力j：渗透作用中，孔隙水对土骨架作用力，方向与渗流方向一致

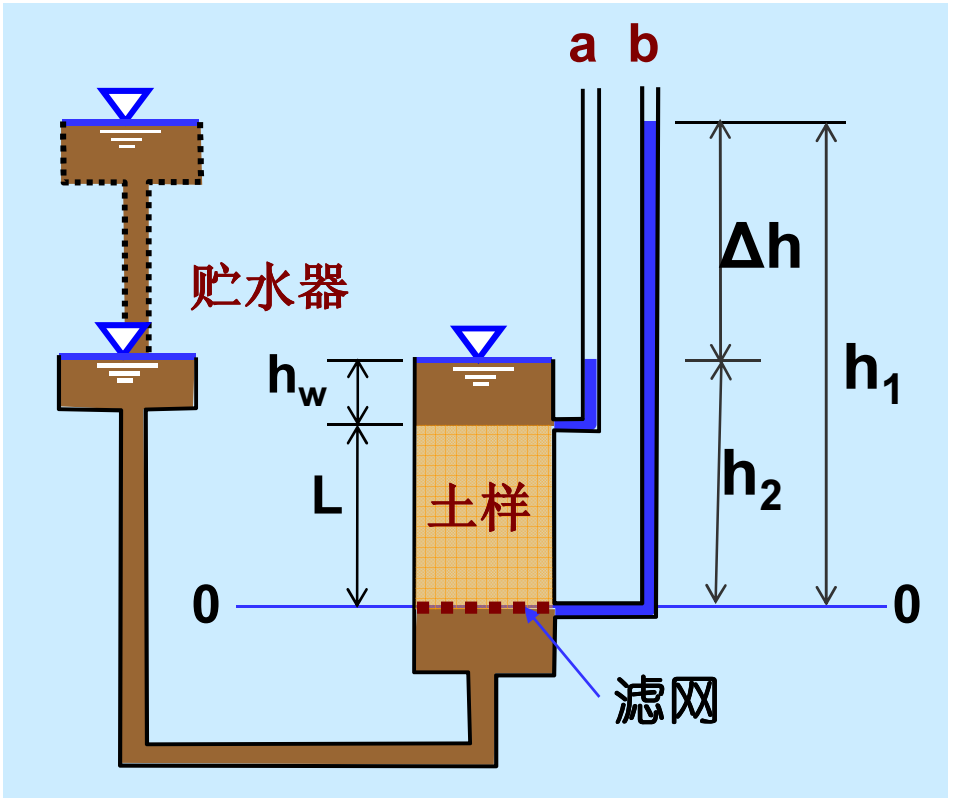
P72 2.4.1

渗透力–试验观察

渗透力 j：体积力

$j = \gamma_w i$

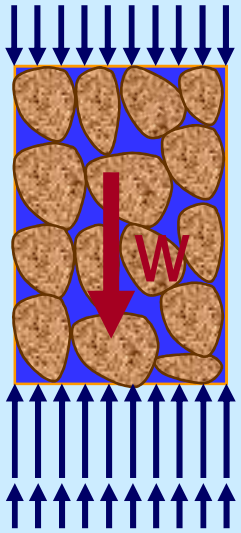




渗透力j：单位土体内土骨架所受到的渗透水流的拖曳力

渗透力-受力分析

■ 土水整体受力分析-静水



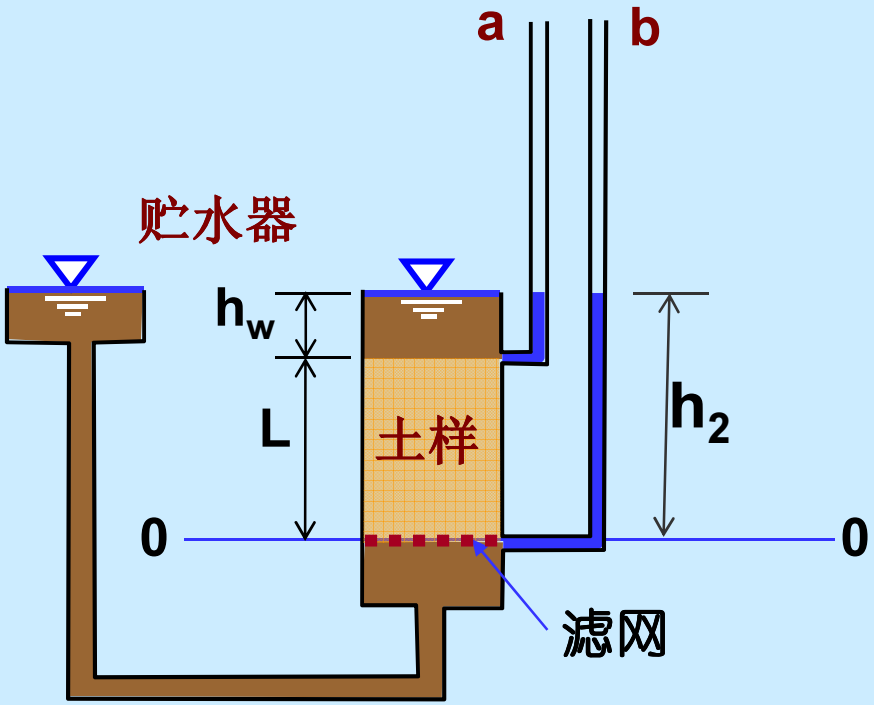
截面积
A=1

$P_1 = \gamma_w h_w$

$W = L\,\gamma_{sat}$
$= L(\gamma' + \gamma_w)$

$P_2 = \gamma_w h_2$

$R = ?$



R 下部滤网的支撑反力

$$R + P_2 = W + P_1$$

$$R + \gamma_w h_2 = L(\gamma' + \gamma_w) + \gamma_w h_w$$

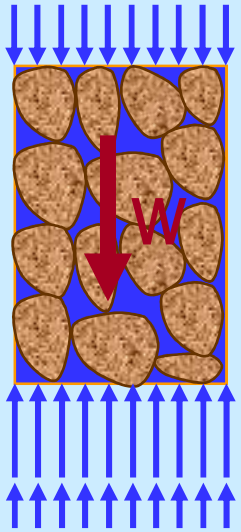
$$R = \gamma' L$$

P73 图2-26

渗透力–受力分析

■ 土水整体受力分析–渗流

截面积
A=1

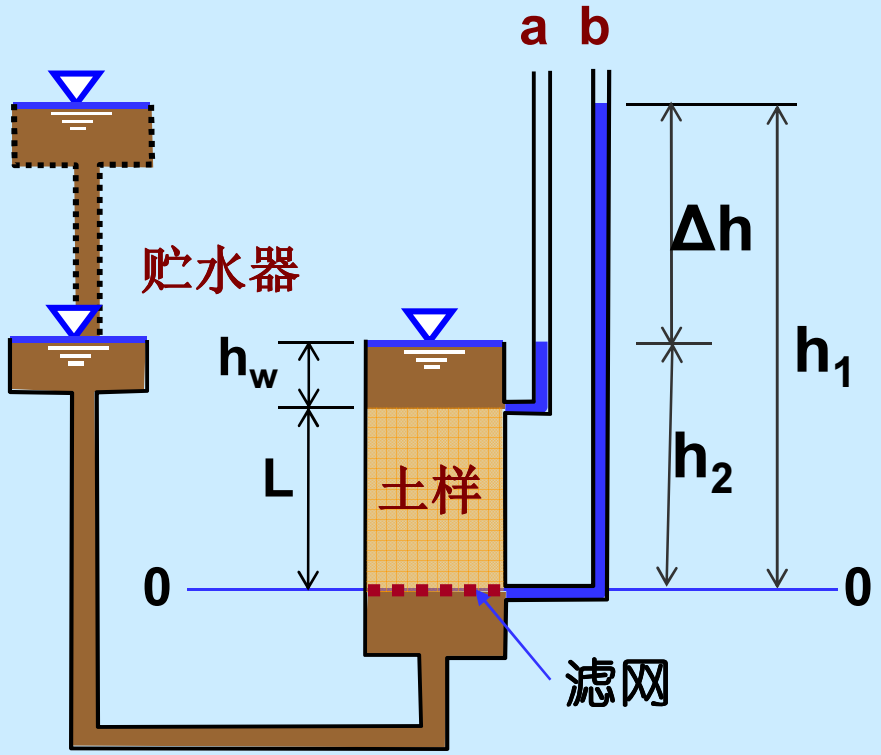


$P_1 = \gamma_w h_w$

$W = L\,\gamma_{sat}$
$= L(\gamma' + \gamma_w)$

$P_2 = \gamma_w h_1$

$R = ?$



$$R + P_2 = W + P_1$$

$$R + \gamma_w h_1 = L(\gamma' + \gamma_w) + \gamma_w h_w$$

$$R = \gamma' L - \gamma_w \Delta h$$

渗透力-受力分析

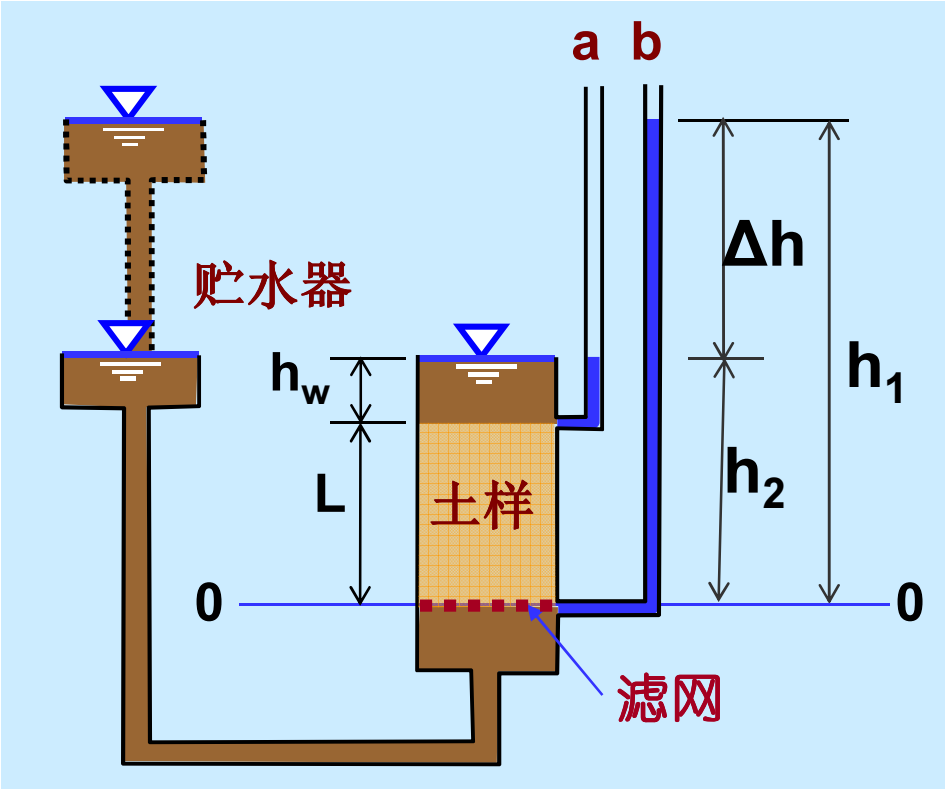
■ 土水整体受力分析- 对比

- 静水中的土体 $R = \gamma' L$
- 渗流中的土体 $R = \gamma' L - \gamma_w \Delta h$

向上渗流存在时，滤网支持力减少

减少的部分由谁承担？

总渗透力： $J=\gamma_w \Delta h$

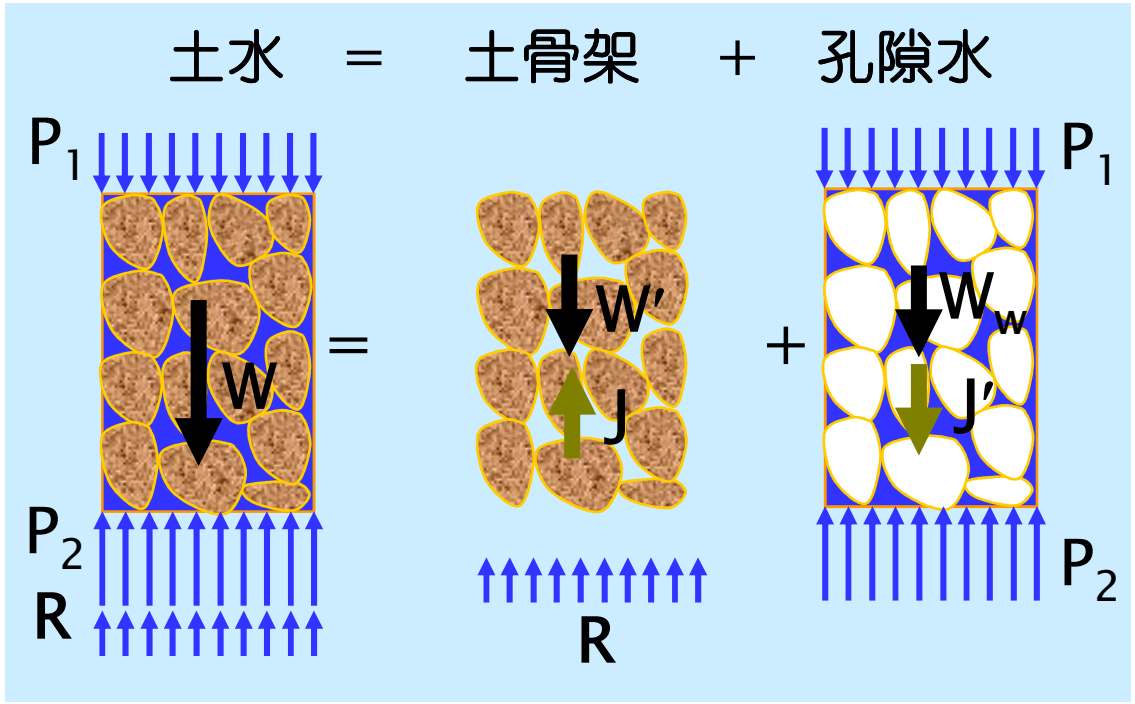


☞ 渗透力j：单位土体内土骨架所受到的渗透水流的拖曳力

公式2-48牢记 $j = J/V = \gamma_w \Delta h / L = \gamma_w i$ P73 式2-48

渗透力-受力分析

■土水隔离受力分析



- 土骨架受力分析：

  有效重量：$W'=L\gamma'$

  总渗透力：$J=Lj$

  滤网的反力：R

- 孔隙水受力分析：

  水压力：$P_1=\gamma_w h_w$

  $P_2=\gamma_w h_1$

  总渗透力：$J'=J$

  水重+浮力反力：

  $W_w=V_v\gamma_w+V_s\gamma_w=L\gamma_w$

孔隙水受力平衡 $j=\gamma_w i$

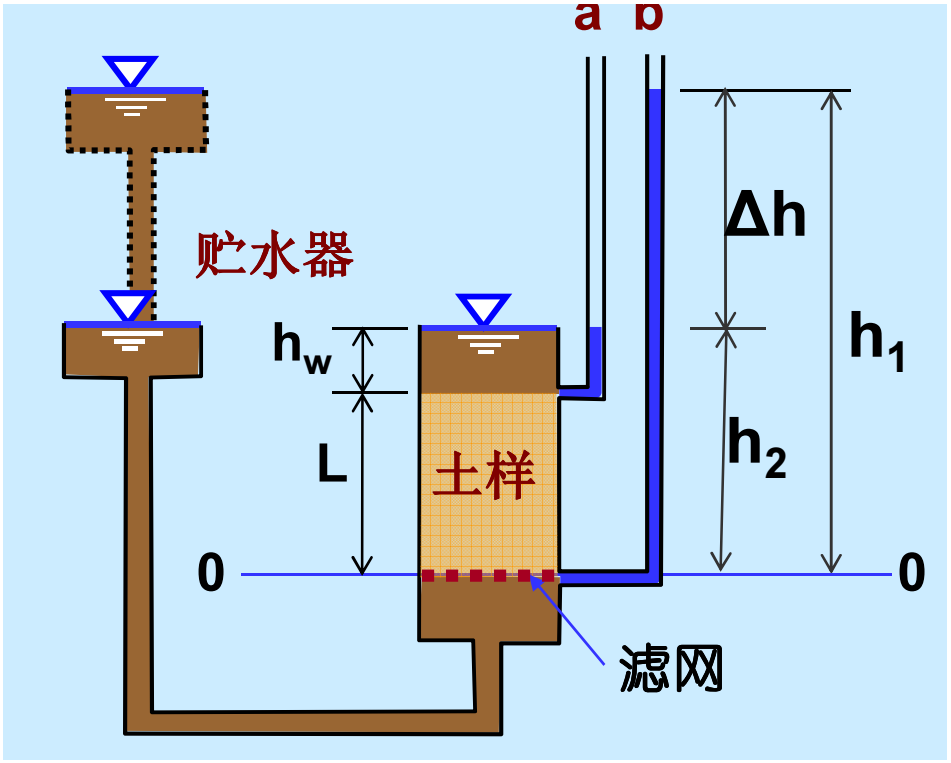
土骨架受力平衡 $R=\gamma' L-\gamma_w \Delta h$

清华教材更详细

见清华书上公式P74

■ 3 临界水力坡降

向上渗流存在时，滤网支持力减少。当滤网支持力为零时的水力坡降称为临界水力坡降i_{cr}，它是土体开始发生流土破坏时的水力坡降：



$$R = \gamma' L - \gamma_w \Delta h = 0$$

$$i_{cr} = \Delta h / L = \gamma' / \gamma_w$$

由于 $\gamma' = \dfrac{(G_s - 1)\gamma_w}{1+e}$

$$i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1+e}$$

i_{cr}取决于土的物理性质

P76 式2-51

公式2-51牢记

渗透力-受力分析

渗透力的性质

- 物理意义：单位土体内土骨架所受到的渗透水流的拖曳力，它是一种体积力
- 大小：$j = \gamma_w i$
- 方向：与水力坡降方向一致
- 作用对象：土骨架

渗透变形

- 土工建筑物及地基由于渗流作用而出现的变形或破坏称为渗透变形或渗透破坏。渗透变形是土工建筑物发生破坏的常见类型

- 基本类型：

  - 管涌
  - 流土

  } → 单一土层渗透变形的两种基本型式

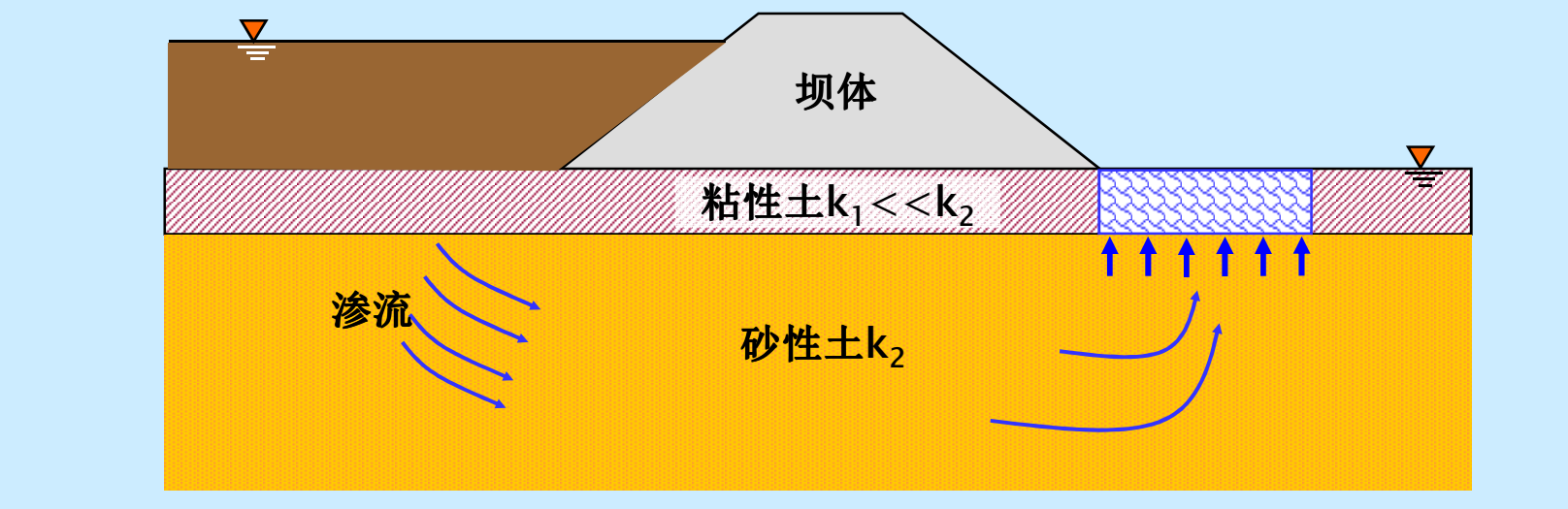
  - 接触流土
  - 接触冲刷

  → 不同土层渗透变形的两种基本型式

P76 2.4.2

渗透变形 – 流土

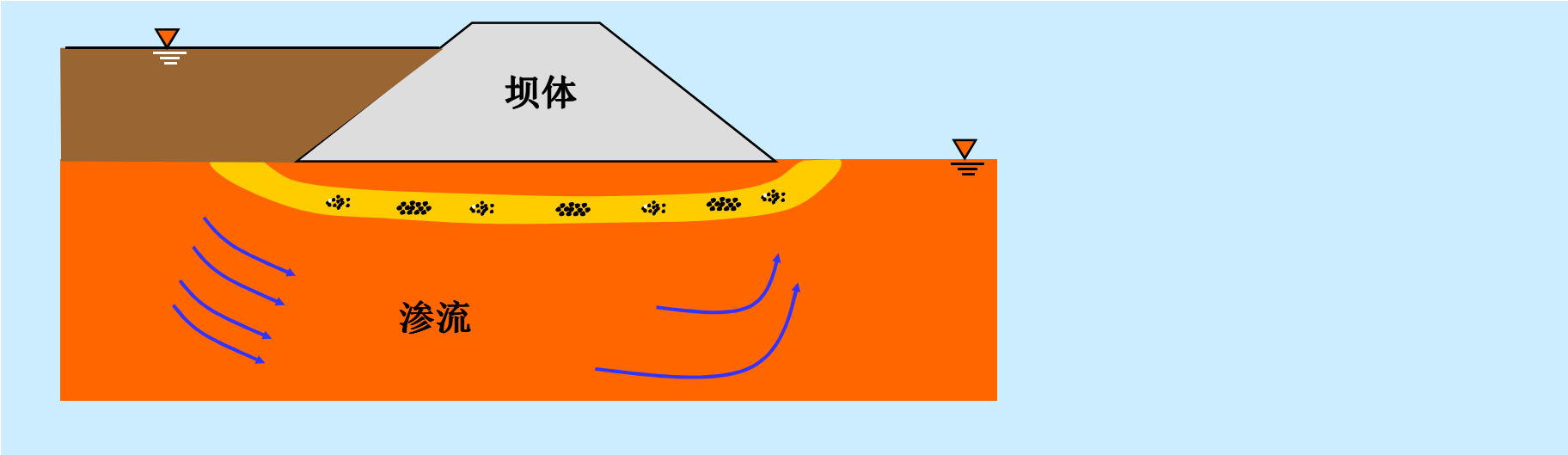
- 流土：在向上的渗透作用下，表层局部范围内的土体或颗粒群同时发生悬浮、移动的现象。任何类型的土，只要水力坡降达到一定的大小，都可发生流土破坏



☞ 原因：$i = i_{cr}$　　$i_{cr} = \dfrac{\gamma'}{\gamma_\omega} = \dfrac{G_s - 1}{1 + e}$　　与土的密实度有关

渗透变形 – 管涌

- 在渗流作用下，一定级配的无粘性土中的细小颗粒，通过较大颗粒所形成的孔隙发生移动，最终在土中形成与地表贯通的管道



☞ 原因　内因：有足够多的粗颗粒形成大于细粒直径的孔隙
外因：渗透力足够大

1. 在渗透水流作用下，细颗粒在粗颗粒形成的孔隙中移动流失

过程演示

2. 孔隙不断扩大，渗流速度不断增加，较粗颗粒也相继被水带走

3. 形成贯穿的渗流通道，造成土体塌陷

流土与管涌的比较

	流土	管涌
现象	土体表层局部范围的颗粒同时发生移动	土体内细颗粒通过粗粒形成的孔隙通道移动
位置	只发生在水流渗出的表层	可发生于土体内部和渗流溢出处
土类	只要渗透力足够大，可发生在任何土中	一般发生在特定级配的无粘性土或分散性粘土
历时	破坏过程短	破坏过程相对较长
后果	导致下游坡面产生局部滑动等	导致结构发生塌陷或溃口

P76-78

流土可能性的判别

- 在自下而上的渗流逸出处，任何土，包括粘性土和无粘性土，只要满足渗透坡降大于临界水力坡降这一水力条件，均要发生流土：

  - ☞ $i < i_{cr}$:土体处于稳定状态
  - ☞ $i > i_{cr}$:土体发生流土破坏
  - ☞ $i = i_{cr}$:土体处于临界状态

- 工程设计： $$i \le [i] = \frac{i_{cr}}{F_s}$$

[i]：允许坡降

F_s：安全系数 1.5~2.0

还可定义：F_s=重力与渗透力之比

P77

管涌可能性的判别

- 土是否会发生管涌，取决于土的性质：
  - 粘性土（分散性土例外）属于非管涌土
  - 无粘性土中发生管涌必须具备相应的几何条件和水力条件

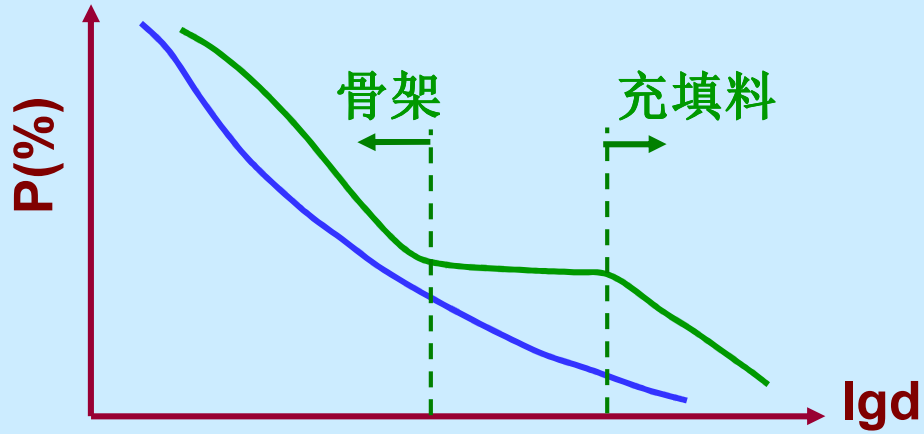
P77

■ 无粘性土管涌的判别

- 几何条件
- 水力条件

☞发生管涌的必要条件：粗颗粒所构成的孔隙直径大于细颗粒直径

P78



级配		孔隙及细粒	判定
较均匀土 (Cu≤10)		粗颗粒形成的孔隙小于细颗粒	非管涌土
不均匀土 (Cu>10)	不连续	细粒含量>35%	非管涌土
		细粒含量<25%	管涌土
		细粒含量=25-35%	过渡型土
	连续 $d_0=0.25d_{20}$	$d_0 < d_3$	非管涌土
		$d_0 > d_5$	管涌土
		$d_0 = d_3-d_5$	过渡型土

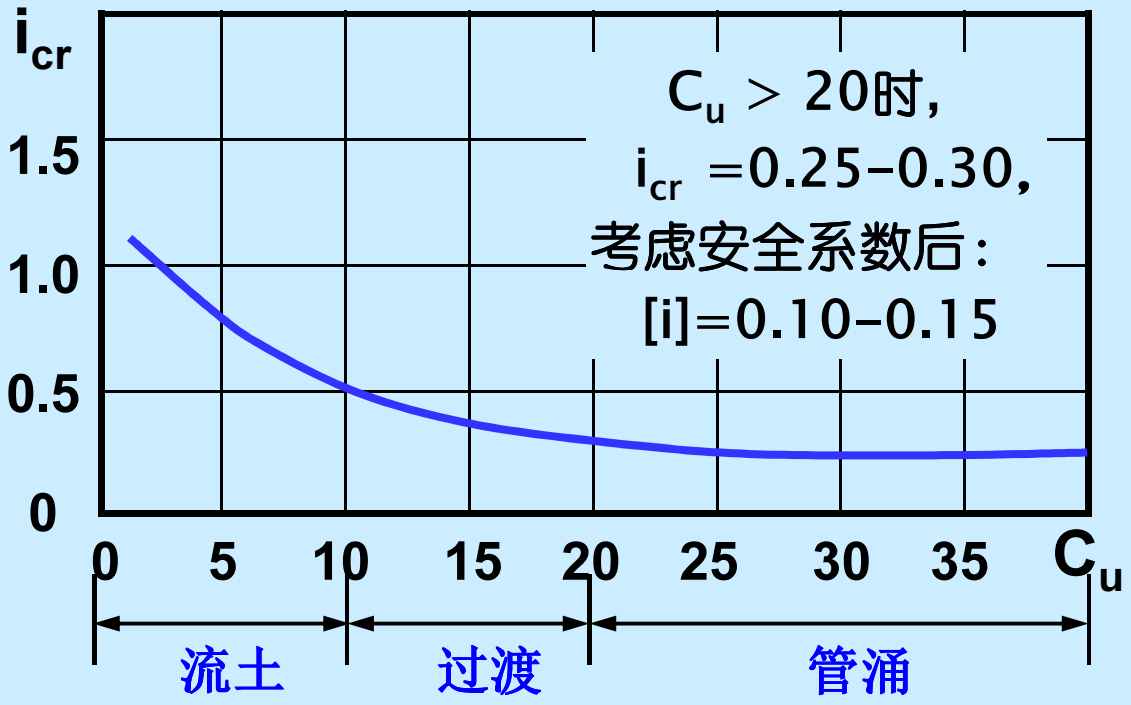
■ 无粘性土管涌的判别

- 几何条件
- 水力条件

☞ 渗透力能够带动细颗粒在孔隙间滚动或移动。可用管涌临界水力坡降表示

P79

伊斯托敏娜（苏）



中国学者

水力坡降	级配连续土	级配不连续土
破坏坡降 i_{cr}	0.20-0.40	0.1-0.3
允许坡降 [i]	0.15-0.25	0.1-0.2

渗透变形的防治措施

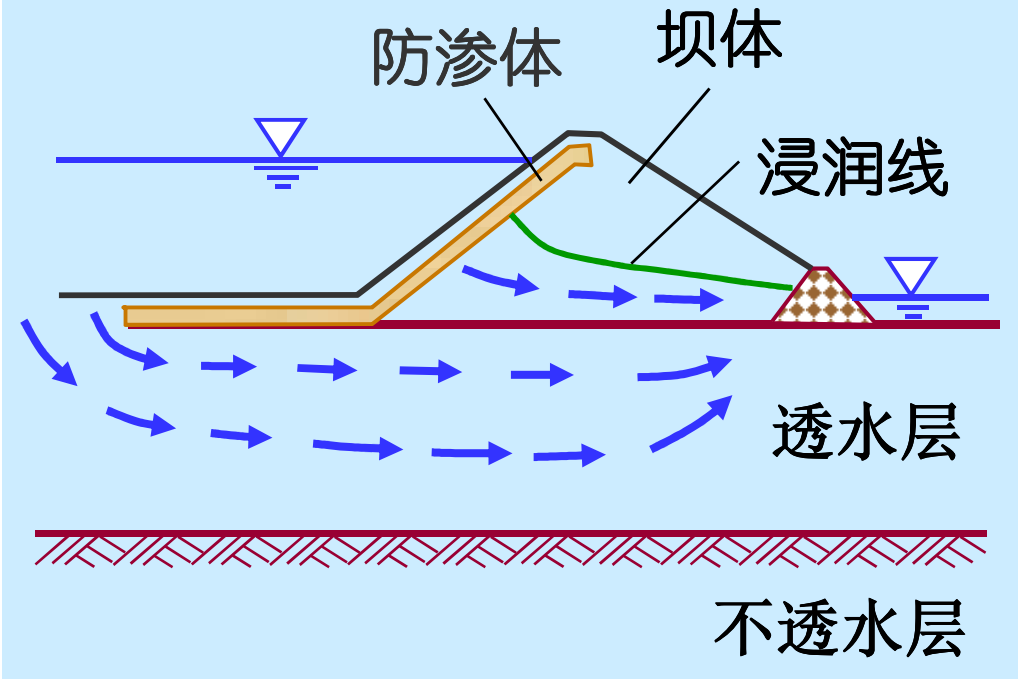
■ 防治流土

$$i \le [i] = \frac{i_{cr}}{F_s}$$

☞减小i：上游延长渗径

下游减小水压

☞增大[i]： 下游增加透水盖重



■ 防治管涌

- 改善几何条件：设反滤层等
- 改善水力条件：减小渗透坡降

P80 3

例题2-6

第三章：土的渗透性和渗流问题

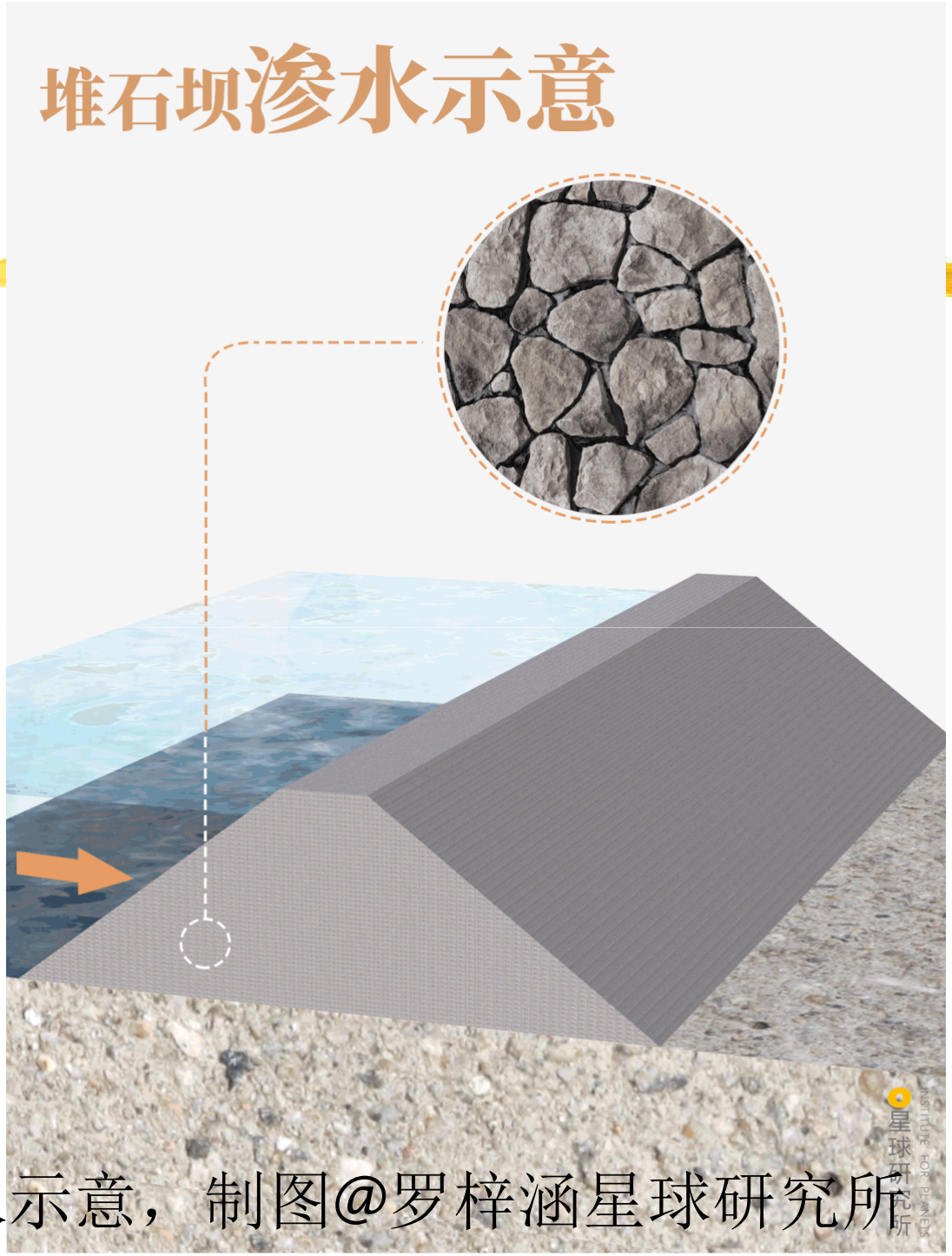
§2.0　概述 ✓

§2.1　土的渗透性与渗透规律 ✓

§2.2　土的渗透系数及其确定方法 ✓

§2.3　渗透力与渗透变形 ✓

§2.4　平面渗流与流网 ✓



堆石坝渗水示意，制图@罗梓涵星球研究所

小　　结

工程实例
渗流问题

土的渗透性
及渗透规律
- 渗流中的水头与水力坡降
- 渗透试验与达西定律
- 渗透系数的测定及影响因素
- 层状地基的等效渗透系数

二维渗流
及流网
- 平面渗流的基本方程及求解
- 流网的绘制及应用

渗透力与
渗透变形
- 渗透力：概念与计算
- 渗透变形：类型、条件、防治

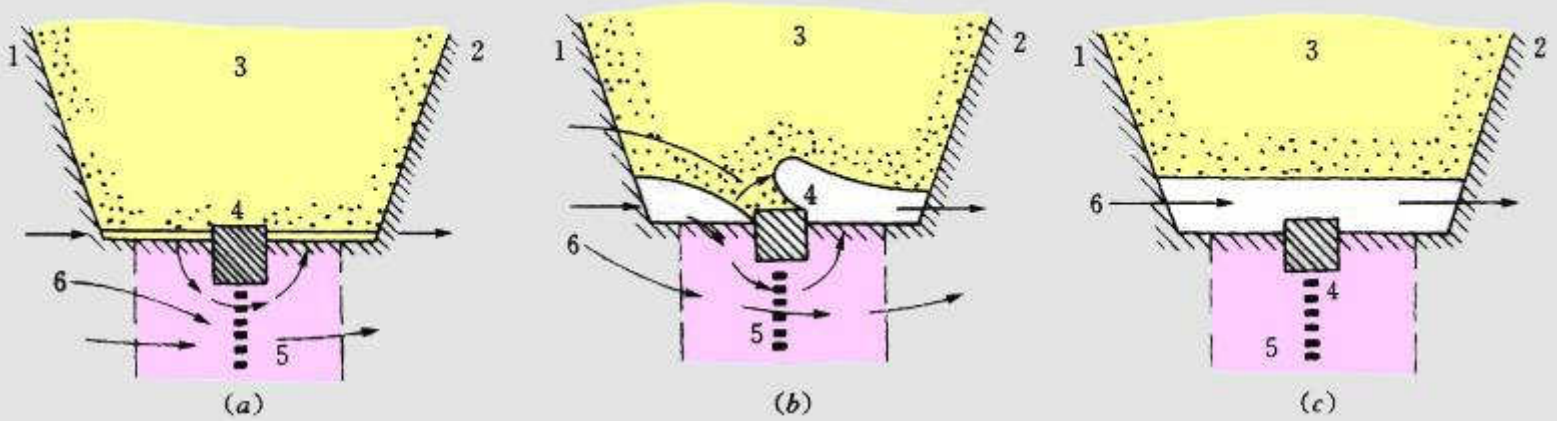
Teton坝失事现场现状

土坝，高90m，
长1000m，
1975年建成，
次年6月失事

原因

渗透破坏：冲蚀
水力劈裂

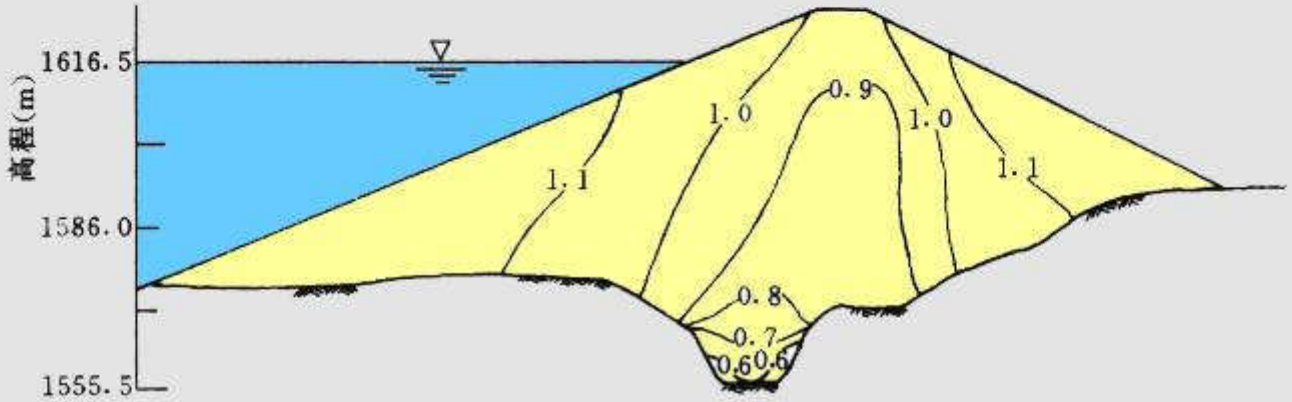
土石坝坝基坝身渗流破坏实例



灌浆盖板下渗漏引起管涌破坏的机理

(a) 第一期：槛槽底面灌浆盖板的上、下游分别形成通道，渗水从盖板下岩石张开节理中通过；(b) 第二期：盖板顶部的填土在其上、下游很高的水力梯度作用下，被水穿透；(c) 第三期：渗水在槛槽底部形成管涌短路

1—上游；2—下游；3—槛槽填土；4—灌浆盖板；5—帷幕范围；6—渗流



坝内垂直应力与上部压重的比值等值线

九江大堤决口

1998年8月7日
13:10发生管涌险情，
很快形成宽62m的
溃口

原因　堤基管涌

焦点词汇：豆腐渣工程

沟后面板砂砾石坝

位于青海省，高71米，长265米，建于1989年。

1993年8月7日突然发生溃坝，是现代碾压堆石坝垮坝的先例。

广州京广广场基坑塌方

珠海祖国广场基坑失事

西藏易贡巨型滑坡

2018年10月11日金沙江堰塞湖

- 时间：2000年4月9日约20时
- 规模：滑坡体自相对高差近3330m的雪峰阳坡滑下，历时约10分钟，滑程8km。堆积体长、宽各约2500m，平均厚60m，最厚100m，体积约2.8亿-3.0亿m^3。
- 地质：滑坡堆积体80%以上是砂性土
- 险情：堵塞易贡藏布江成堰塞湖，湖水面积22km^2，湖长17km，水位以每天0.5-0.6m的速度上涨，湖水无下泄通道，预计6月底湖水将上涨至堆积体顶，拦存湖水将达40亿-60亿m^3

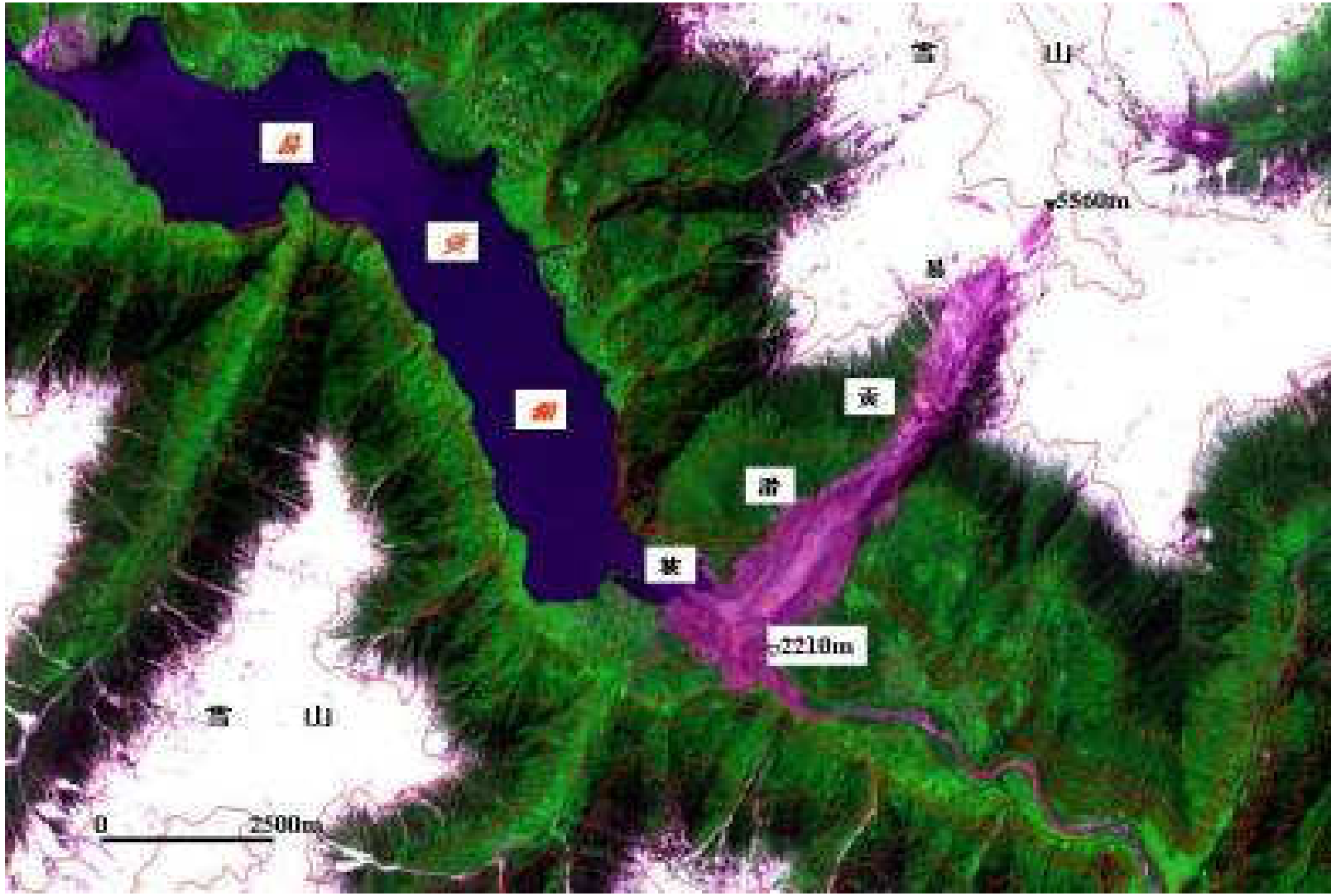
2018年10月11日凌晨四点左右，西藏昌都市江达县波罗乡境内的金沙江两岸，发生山体滑坡，滑坡体量大，造成金沙江断流并形成堰塞湖。危及附近的波公村、宁巴村、白格村等村庄安全，通往波罗乡的必经桥梁和部分农田被江水淹没。

截至2018年10月11日19时共转移群众10367名，波罗乡及波公村、宁巴村已形成“孤岛”。

截至2018年10月13日上午9时左右，金沙江白格堰塞湖右岸拢口已完全冲开，江水以每秒5000立方米左右的流量奔流而下，堰前水位迅速下降，湖水水位下降20多米，溃坝隐患已完全消除。

降雨入渗引起的滑坡

西藏易贡巨型高速滑坡



西藏易贡巨型高速滑坡

降雨入渗引起的滑坡

易贡巨型滑坡现场

易贡滑坡处理预案

- 预案一：加强监测，上、下游移民工作，库满自溢漫顶溃口
- 预案二：在堆积体最低处开渠引流，水库溢流漫顶溃口。
- 预案三：在右岸山体垭口开溢洪道，改造堆积体成坝，堰塞湖成库

最终采用预案二

易贡滑坡处理结果

- 武警部队等700多名抢险人员，奋战33天，累计开挖土石方135.5万m^3，有效降低了堆积体过水高程24.1m，减少拦存湖水约20亿m^3
- 施工队伍6月4日撤离；6月8日6时40分，泄水渠过水，至11日2时50分堆积体溃决；11日21时，滑坡体拦存的湖水按预定方案完全下泄
- 泄洪时易贡湖库容量已达30多亿立方米

Ref: 李广信 张丙印 于玉贞 土力学 第三版 清华大学出版社 2022.08

The end

文件名格式：班级 学号 姓名 简略实验名称

邮件标题同文件名

Any questions please 发送至

xingzhengwu@163.com