

第2章：土的渗透性和渗流问题

主讲：刘勇健



第2章：土的渗透性和渗流问题

✧ 本章提要

- 土的渗透性和渗透规律
- 平面渗流与流网
- 渗透力与渗透变形

✧ 学习要点

- 物理概念和意义
- 土是多孔介质

第2章：土的渗透性和渗流问题

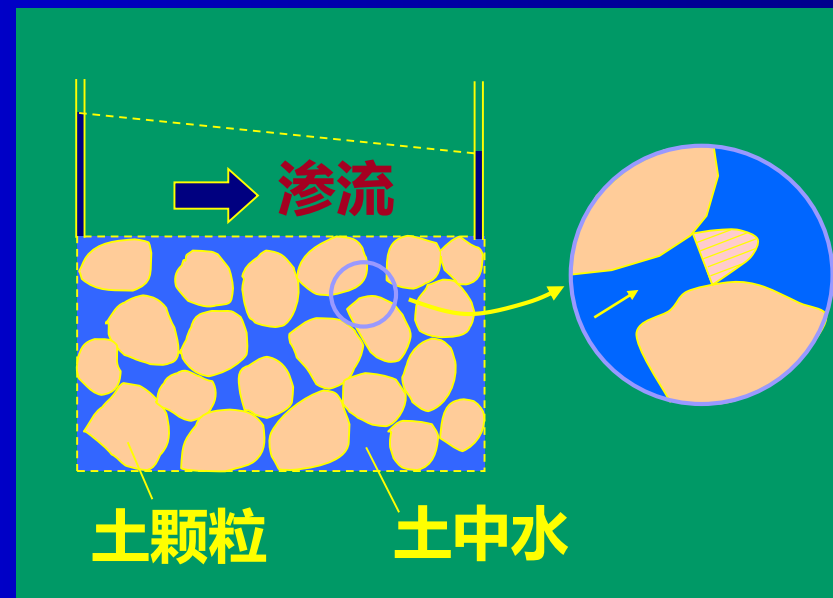
§ 2.1 概述

§ 2.2 土的渗透性与渗透规律

§ 2.3 平面渗流与流网的概念

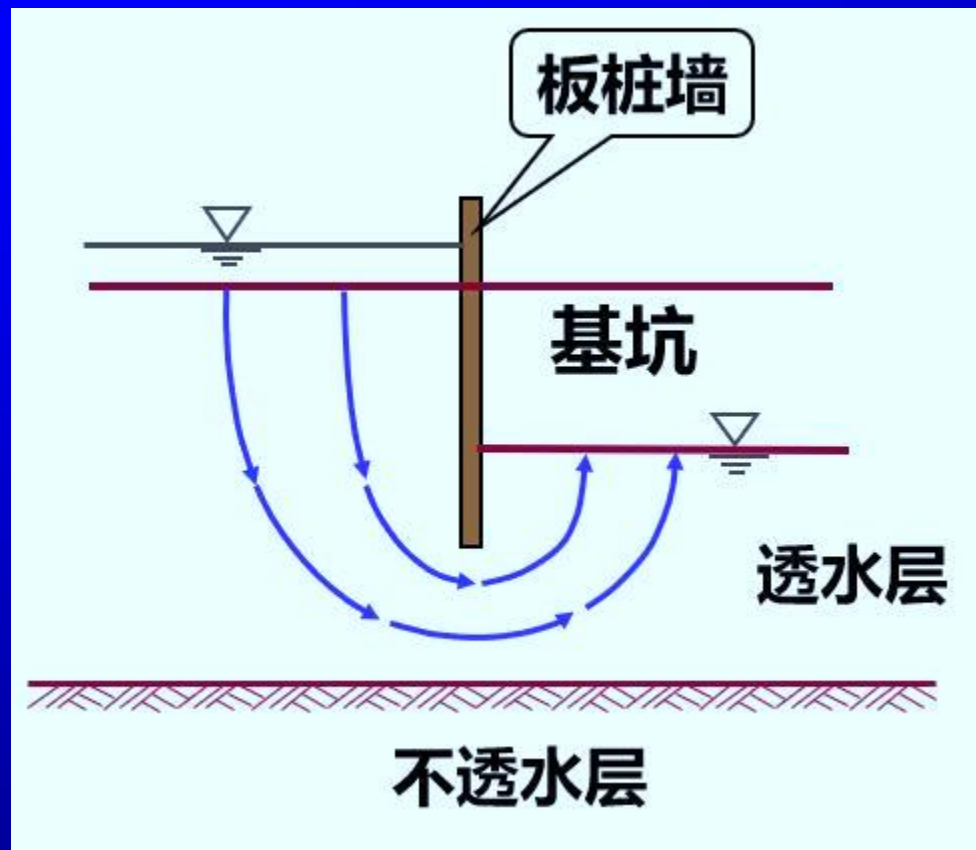
§ 2.4 渗透力与渗透变形

- 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**
- ➡ 土具有被水等流体透过的性质称为土的**渗透性**

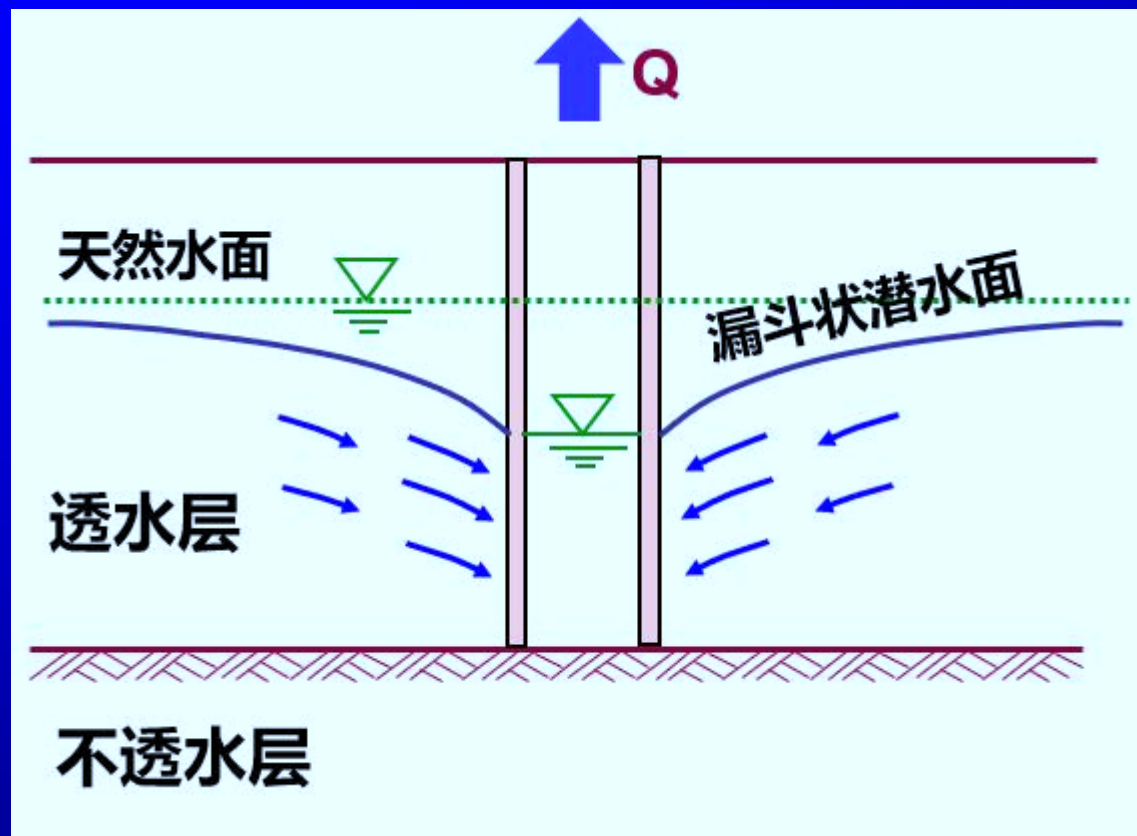
土体中的渗流



渗流问题:

1. 渗流量?
2. 渗透破坏?
3. 渗水压力?

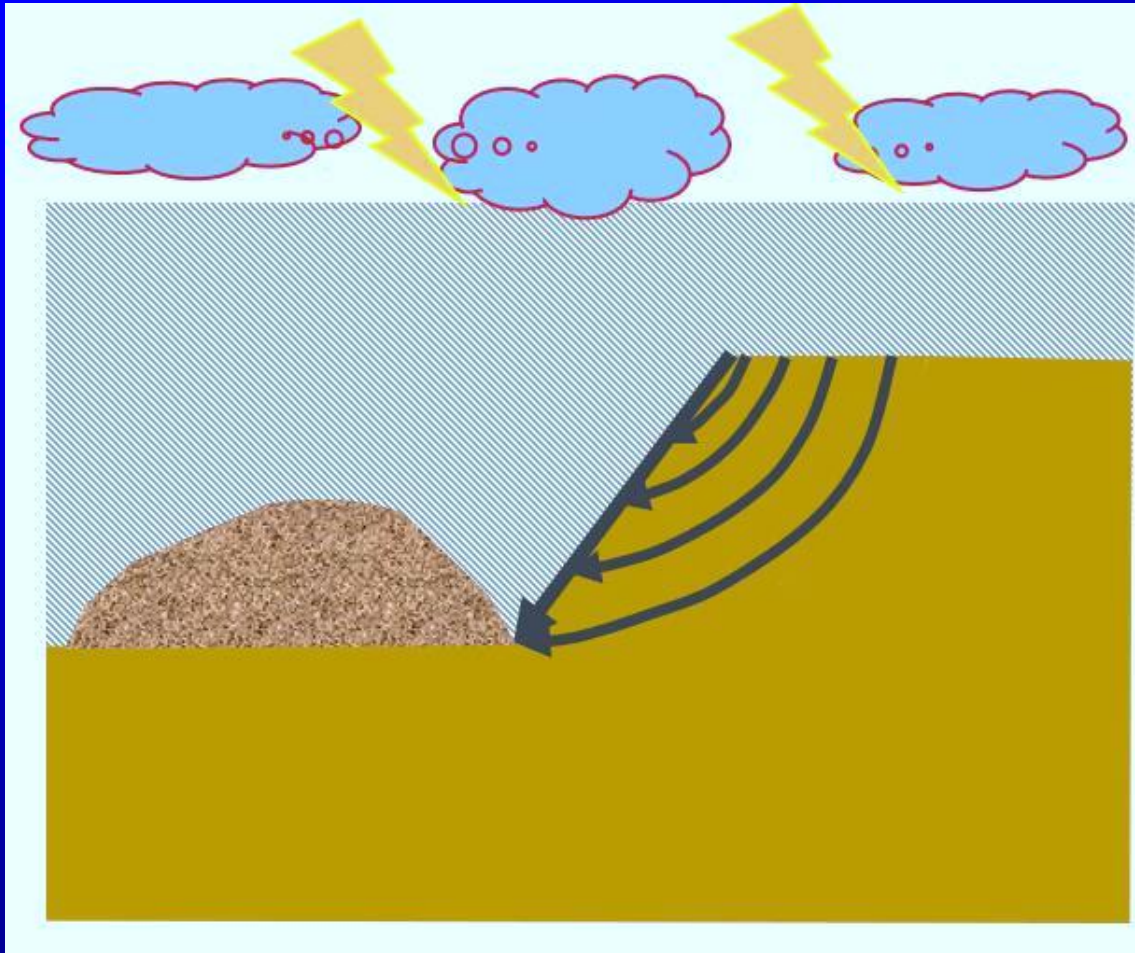
板桩围护下的基坑渗流



渗流问题:

1. 渗流量 Q ?
2. 降水深度?

水井渗流



渗流问题:

1. 渗透力?
2. 边坡的稳定?

降雨入渗引起的滑坡

- 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



- 渗流量
- 扬压力
- 渗透力
- 渗透破坏
- 渗流速度
- 渗水面位置

土的渗透特性

第2章：土的渗透性和渗流问题

§ 2.1 概述

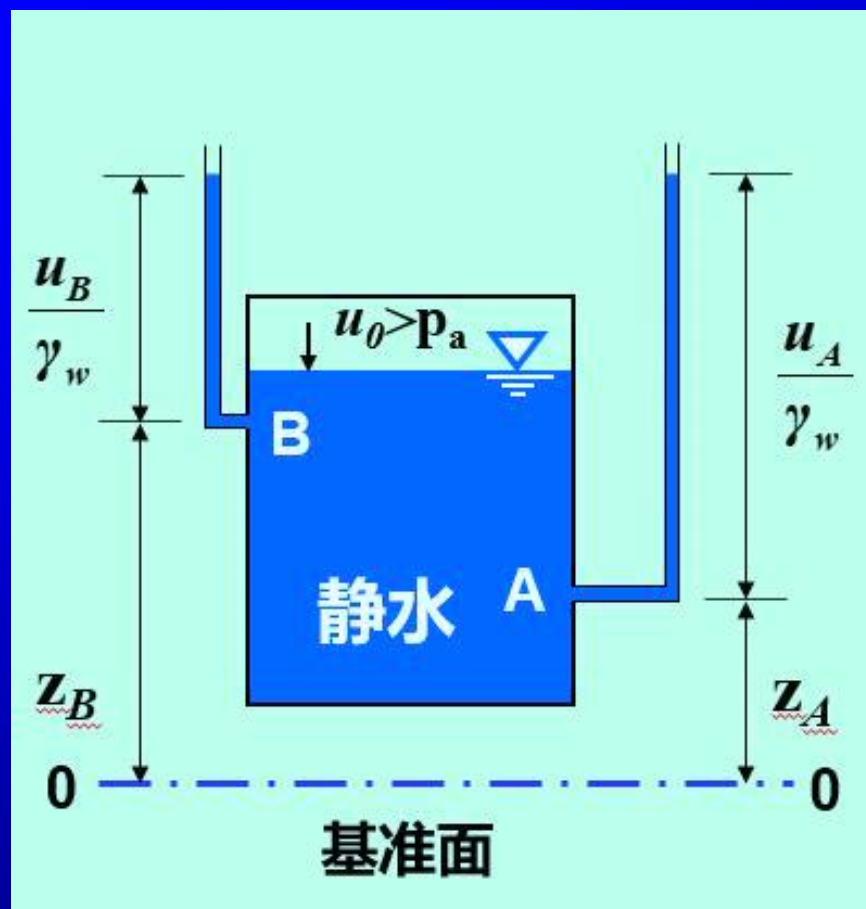
§ 2.2 土的渗透性与渗透规律

§ 2.3 平面渗流与流网的概念

§ 2.4 渗透力与渗透变形

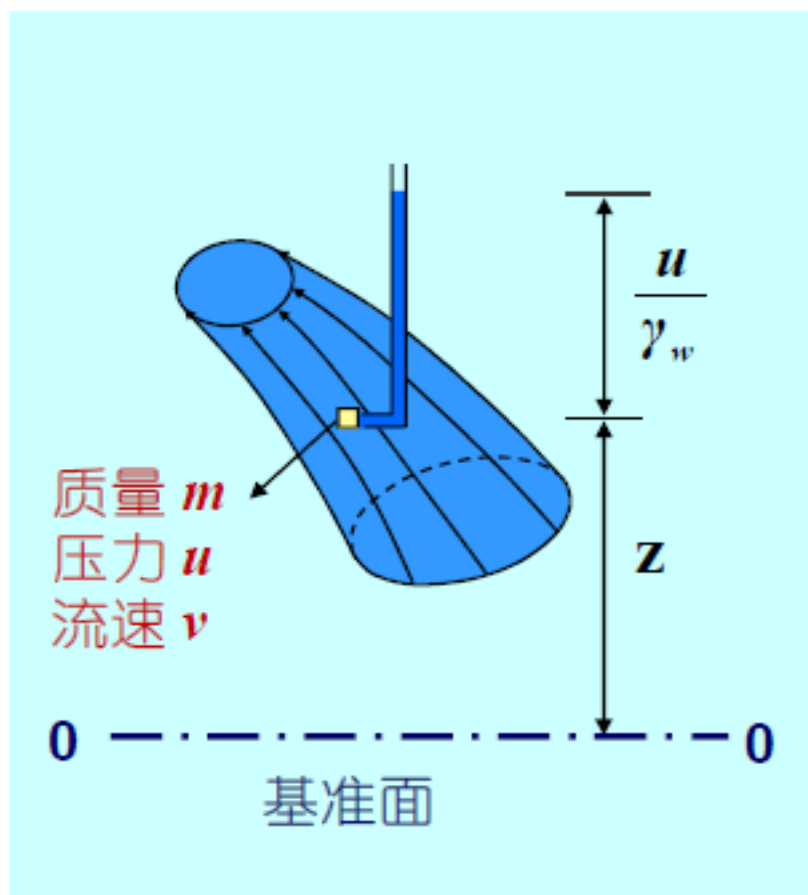


§2.2 土的渗透性与渗透规律



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



■ 位置势能: mgz

■ 压力势能: $mg \cdot \frac{u}{\gamma_w}$

■ 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

水流动的驱动力 - 水头

- A点总水头:

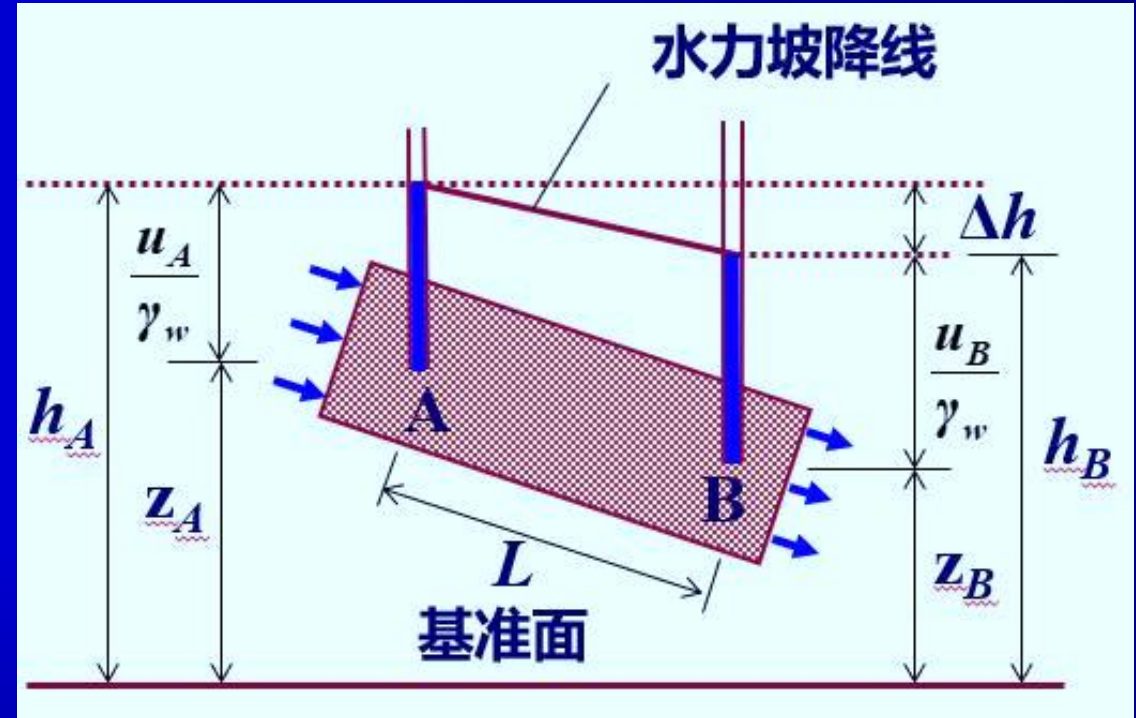
$$h_A = z_A + \frac{u_A}{\gamma_w}$$

- B点总水头:

$$h_B = z_B + \frac{u_B}{\gamma_w}$$

- 二点总水头差:

$$\Delta h = h_A - h_B$$

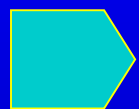


- 水力坡降 i : 单位渗流长度上的水头损失

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

水力坡降

1856 年达西(Darcy) 渗流试验

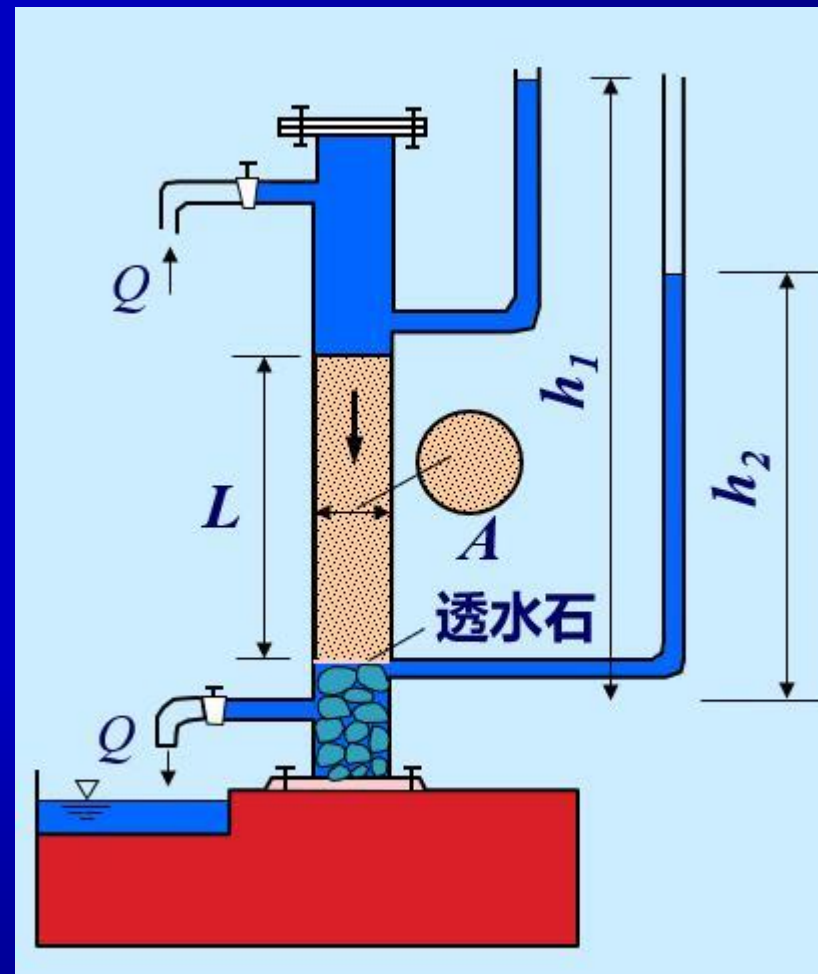


$$Q \propto A \frac{\Delta h}{L}$$

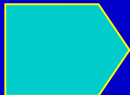
或:

$$Q = kAi$$

其中, A 是试样的断面积



达西渗透试验


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

- **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。
 - 物理意义：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

$$v < v_s = \frac{v}{n}$$

其中， v_s 为实际平均流速，孔隙断面的平均流速

达西定律

■ 达西定律的适用条件：层流（线性流动）

岩土工程中，绝大多数渗流，无论是发生于砂土或一般黏土中，均属层流范围，故达西定律均可使用

两个例外

✧ 紊流

✧ 致密黏土

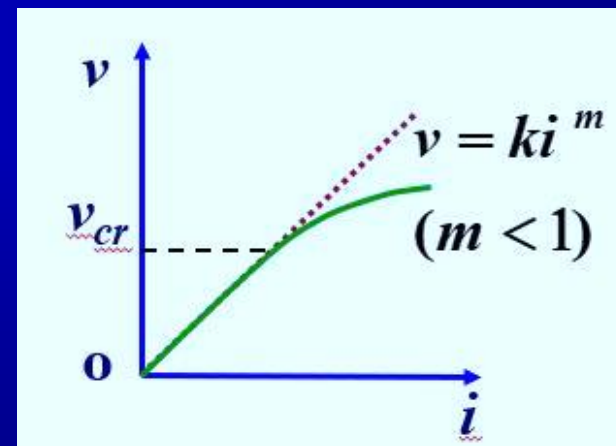
- 在很粗的粗粒土中，水力坡降较大时，水流可能会呈紊流状态，达西定律不再适用
- 可用雷诺数 Re 或临界流速 v_{cr} 来判断

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

$R_e < 5$ 层流

$R_e > 200$ 紊流

$200 > R_e > 5$ 过渡



达西定律的适用范围

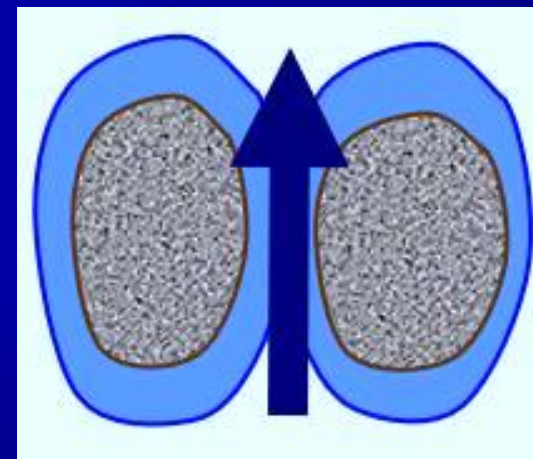
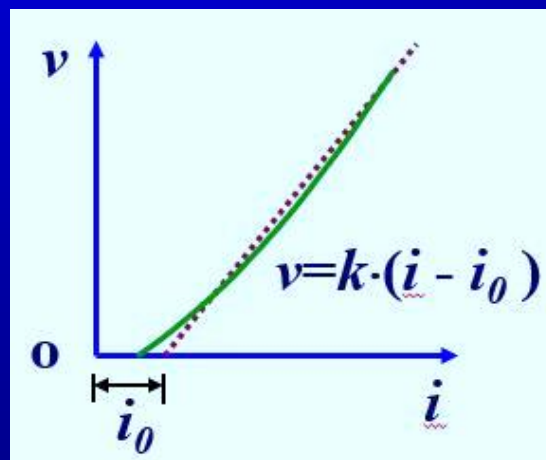
■ 达西定律的适用条件：层流（线性流动）

- ✧ 对致密的黏性土，存在起始水力坡降 i_0 ？
- ✧ 黏土颗粒外具有较厚的结合水膜，占据了土体孔隙的过水通道

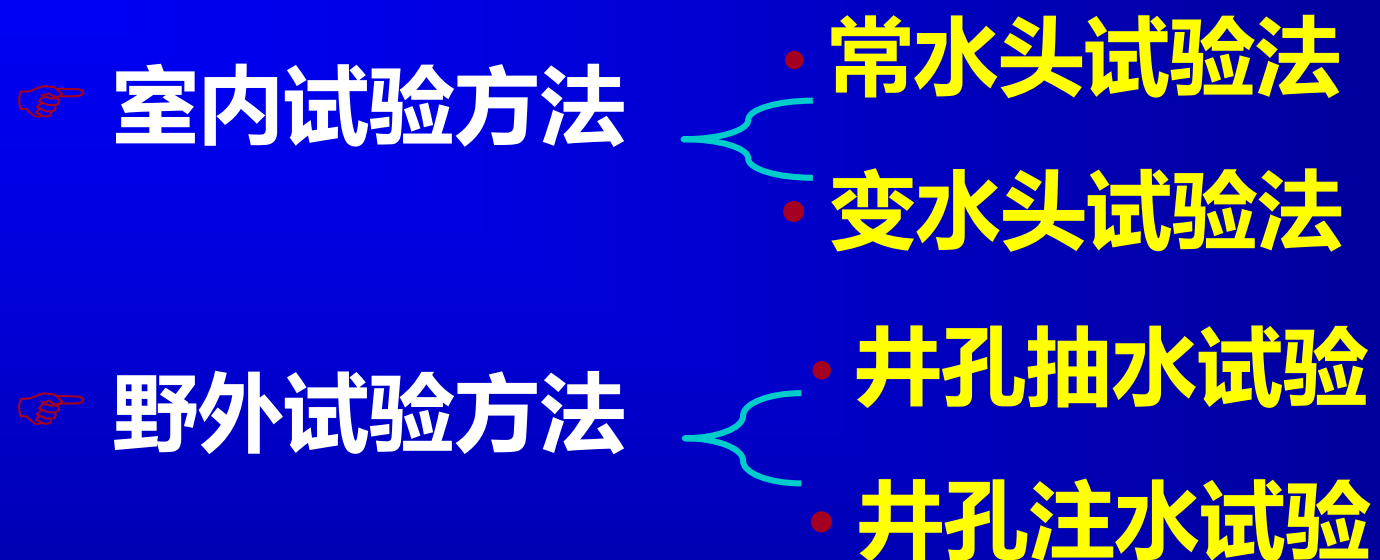
两个例外

✧ 紊流

✧ 致密黏土



达西定律的适用范围



渗透系数的测定方法

■ **试验条件:** Δh , A , $L=\text{const}$

■ **量测变量:** 体积 V , t

$$V = Qt = vAt$$

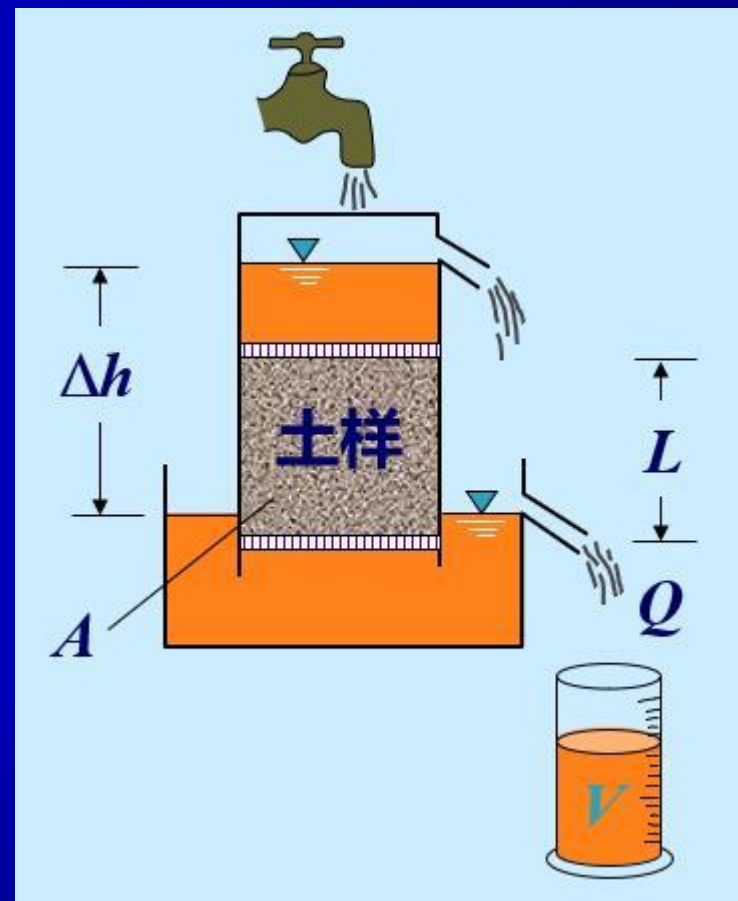
$$v = ki$$

$$i = \Delta h/L$$

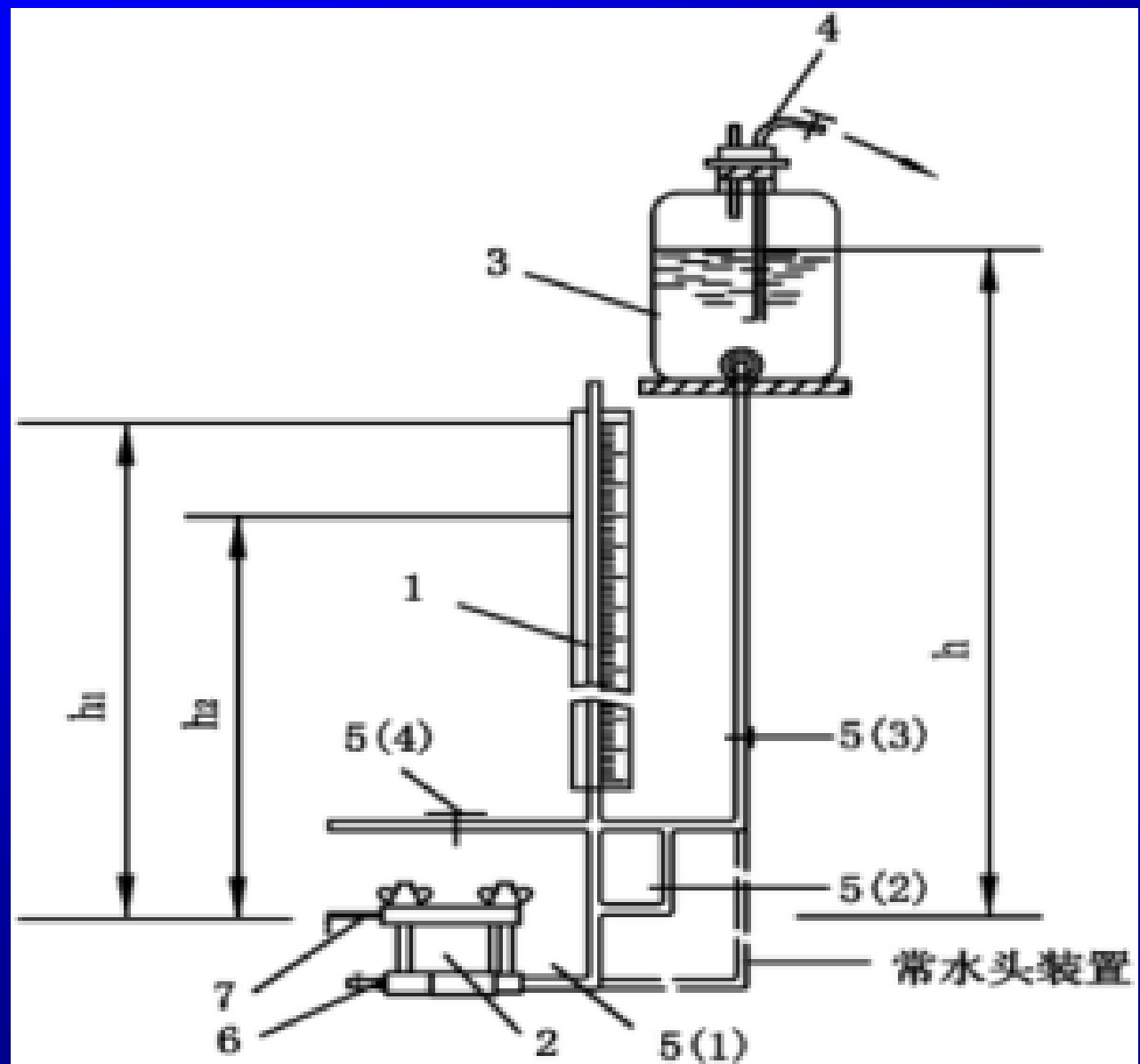


$$k = \frac{VL}{A\Delta ht}$$

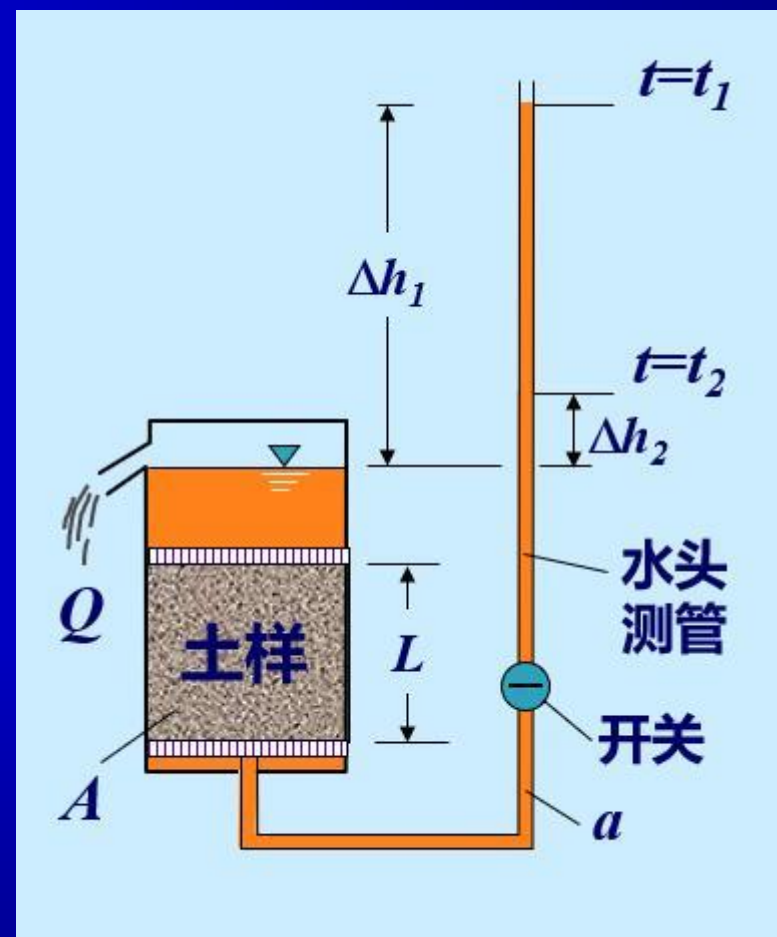
■ **适用土类:** 透水性较大的砂性土



室内试验方法-常水头试验法



- 试验条件: Δh 变化
 $A, a, L = \text{const}$
- 量测变量: $\Delta h, t$
- 适用土类: 透水性较小的黏性土



室内试验方法-变水头试验法

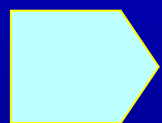
在 $t \rightarrow t+dt$ 时段内:

- 入流量: $dV_e = -adh$
- 出流量: $dV_o = kiA dt = k \frac{\Delta h}{L} A dt$
- 连续性条件: $dV_e = dV_o$

$$-adh = k \frac{\Delta h}{L} A dt$$

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = -\frac{aL}{kA} \int_{\Delta h_1}^{\Delta h_2} \frac{dh}{\Delta h}$$

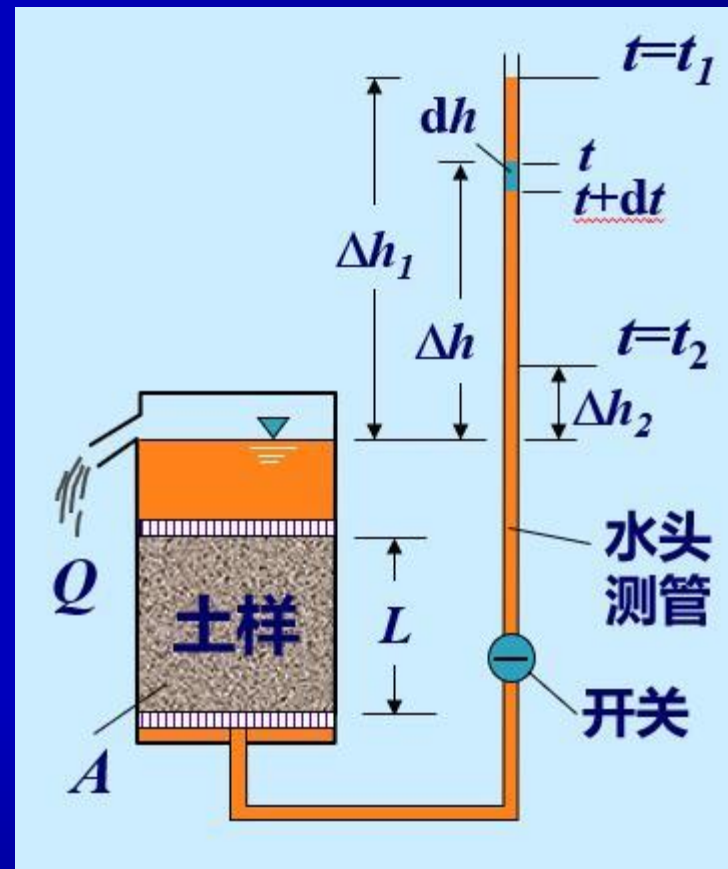
$$t_2 - t_1 = \frac{aL}{kA} \ln \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$$



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

选择几组量测结果, 计算相应的 k , 取平均值

室内试验方法-变水头试验法



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

室内试验方法—小结

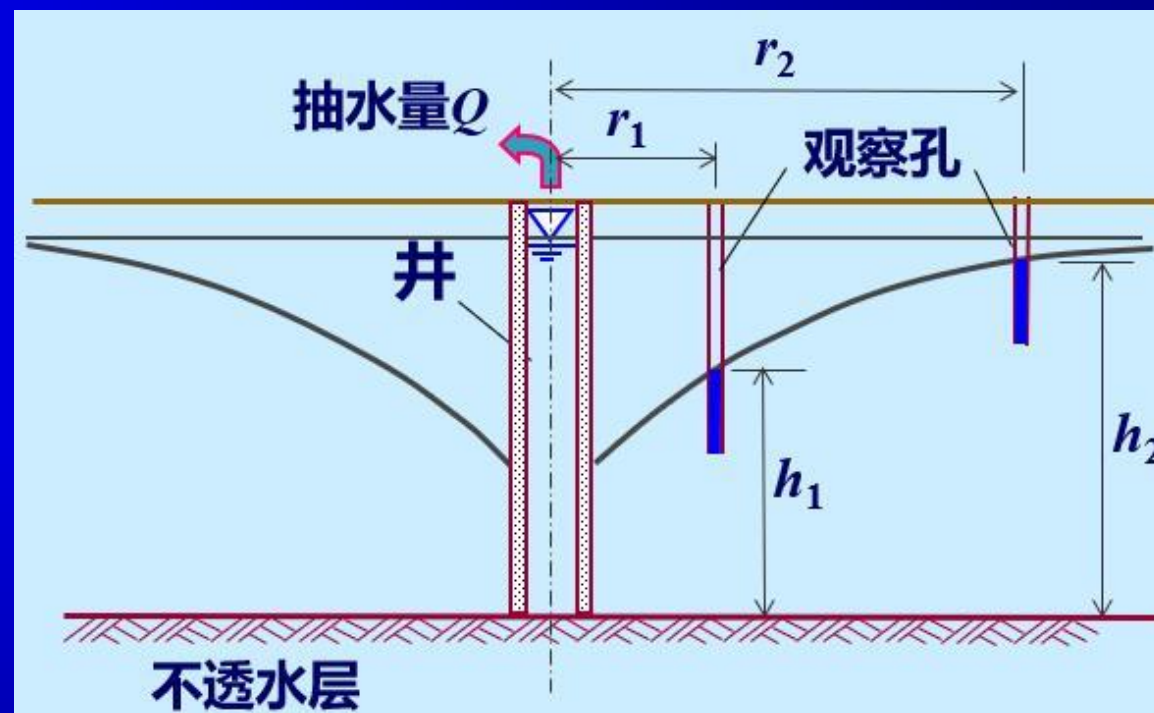
■ 试验条件:

$$Q = \text{const}$$

■ 量测变量:

$$r=r_1, \quad h_1=?$$

$$r=r_2, \quad h_2=?$$



✧ 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

现场测定法—抽水试验

■ 计算公式:

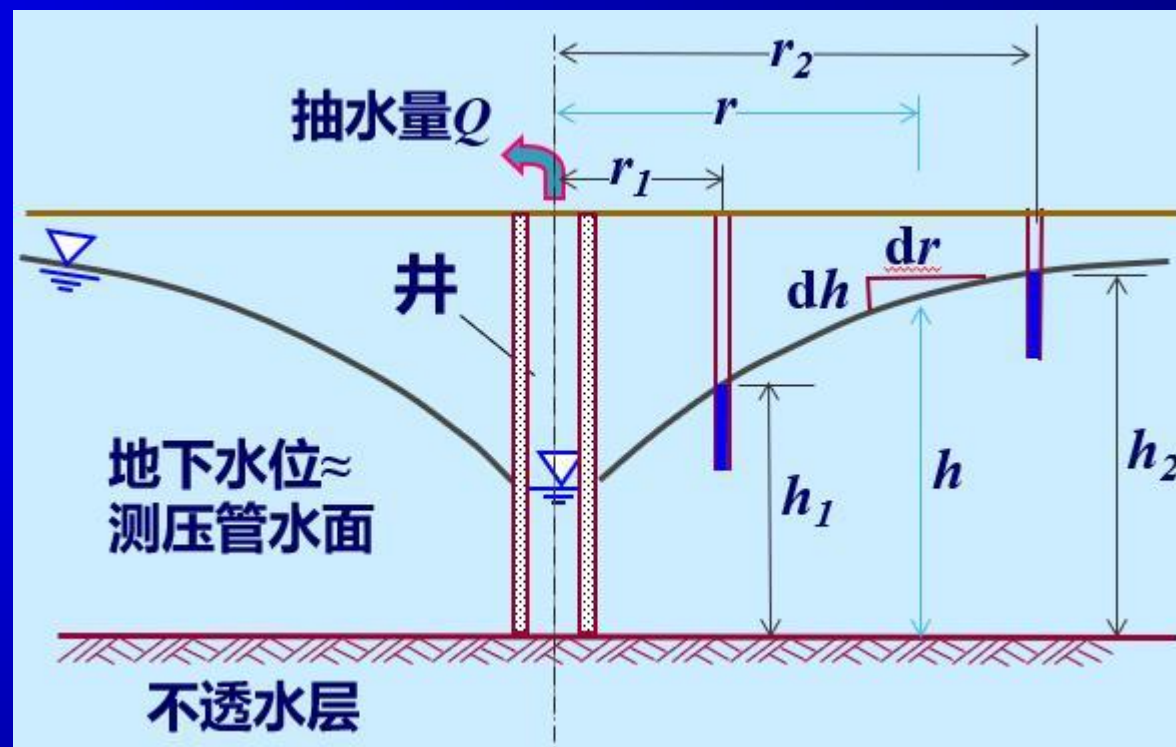
$$A=2\pi rh$$

$$i=dh/dr$$

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

$$Q \frac{dr}{r} = 2\pi kh dh$$

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



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

现场测定法—抽水试验

✧ 土的性质

• 粒径大小及级配

- 孔隙比
- 矿物成分
- 结构
- 饱和度

✧ 水的性质

- 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，如哈臣公式：

$$k = c \cdot d_{10}^2$$

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
- 饱和度

✧ 水的性质

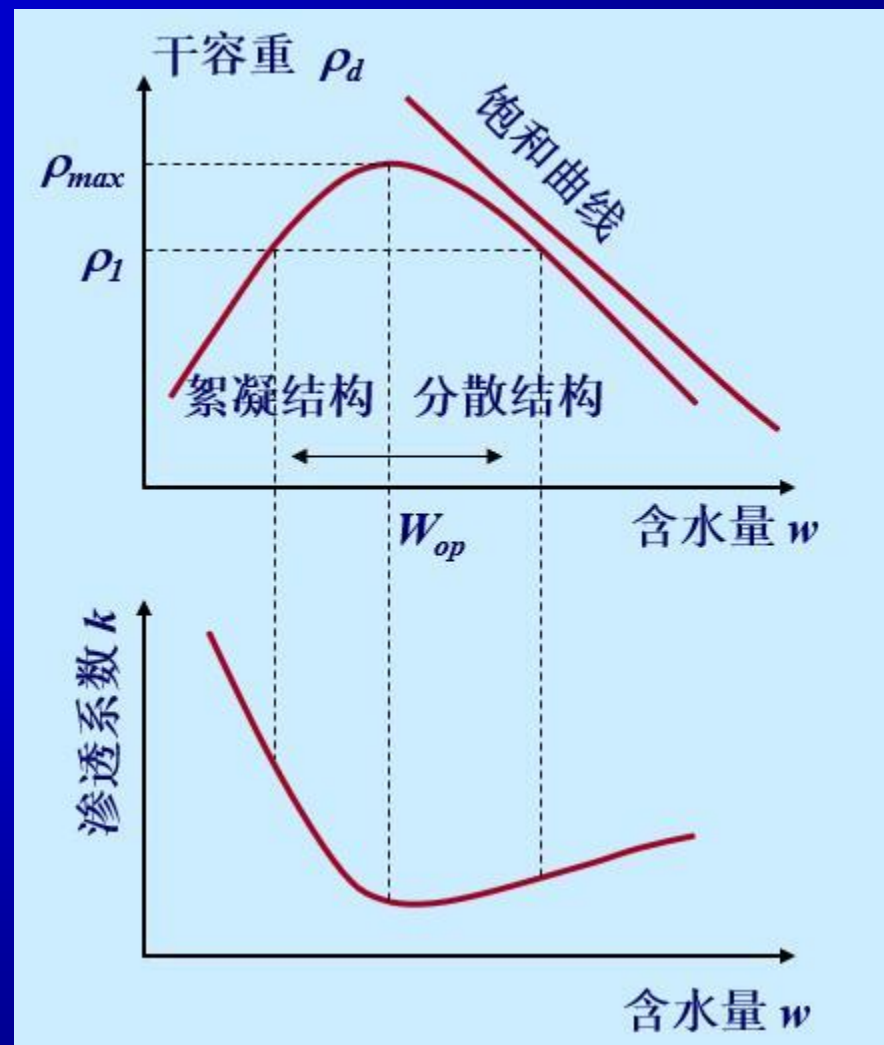
- 影响孔隙系统的构成和方向性，对黏性土影响更大
- 在宏观构造上，天然沉积层状黏性土层，扁平状黏土颗粒常呈水平排列，常使 $k_{\text{水平}} > k_{\text{垂直}}$
- 在微观结构上，当孔隙比相同时，凝聚结构将比分散结构具有更大的透水性

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
- 饱和度

✧ 水的性质



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
- 饱和度

✧ 水的性质

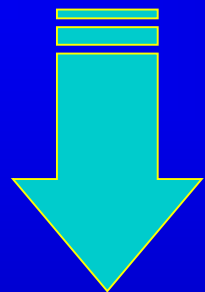


■ 水的动力黏滞系数:

温度 $\uparrow$, 水黏滞性 $\downarrow$, $k\uparrow$

渗透系数的影响因素

天然土层多呈层状



- 确立各层土的 k_j
- 根据渗流方向确定等效渗流系数

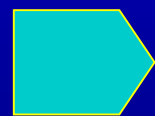
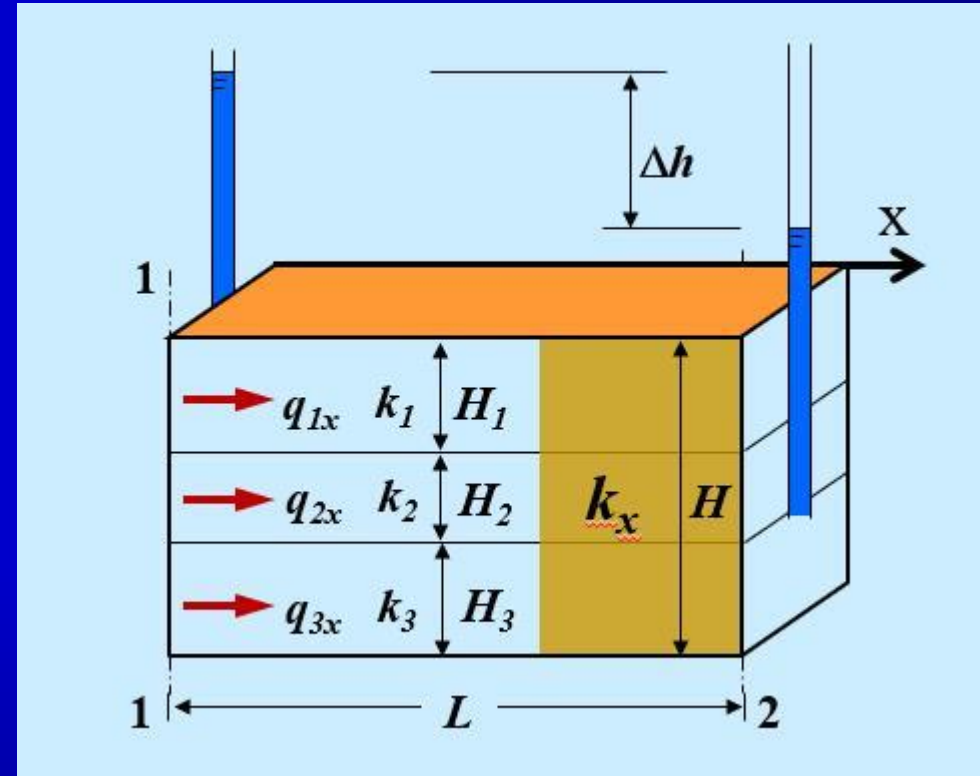
等效渗透系数



多个土层用假想单一土层置换，
使得其总体的透水性不变

层状地基的等效渗透系数

- 已知条件: $i_j = i = \frac{\Delta h}{L}$
 $H = \sum H_j$
- 达西定律: $q_x = v_x H = k_x i H$
 $\sum q_{jx} = \sum k_j i_j H_j$
- 等效条件: $q_x = \sum q_{jx}$



等效渗透系数:

$$k_x = \frac{1}{H} \sum k_j H_j$$

层状地基的水平等效渗透系数

■ 已知条件:

$$v_j = v$$

$$\Delta h = \sum \Delta h_j$$

$$H = \sum H_j$$

■ 达西定律:

$$v_j = k_j (\Delta h_j / H_j)$$

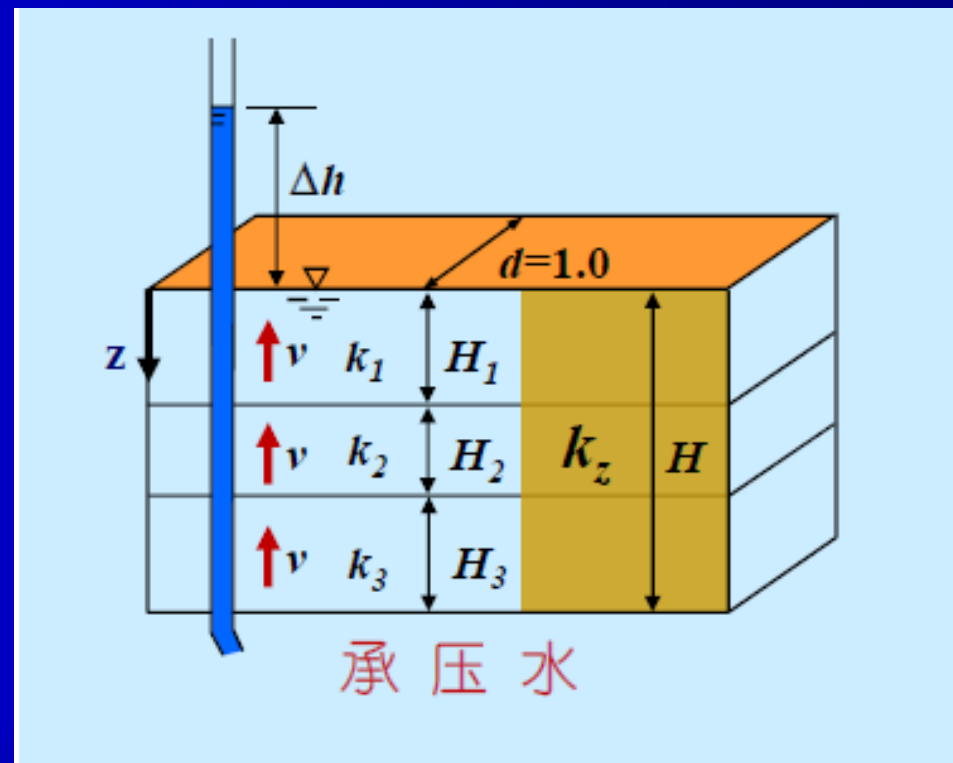
■ 等效条件:

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

$$\Delta h_j = \frac{v H_j}{k_j}$$

$$\Delta h = \frac{v H}{k_z}$$

$$\frac{v H}{k_z} = \Delta = \sum \Delta h_j = \sum \frac{v H_j}{k_j}$$



等效渗透系数:

$$k_z = \frac{H}{\sum \frac{H_j}{k_j}}$$

层状地基的垂直等效渗透系数

■ 算例说明

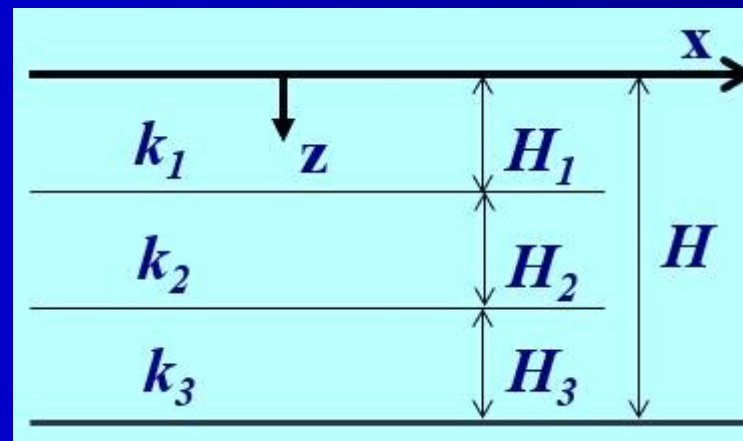
$$H_1 = 1.0m, \quad k_1 = 0.01m / day$$

$$H_2 = 1.0m, \quad k_2 = 1m / day$$

$$H_3 = 1.0m, \quad k_3 = 100m / day$$

$$k_x = \frac{\sum k_j H_j}{H} = 33.67m / day$$

$$k_z = \frac{H}{\sum \frac{H_j}{k_j}} = 0.03m / day$$



按层厚加权平均，由较大值控制

层厚倒数加权平均，由较小值控制

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	$q = \sum q_j$ $H = \sum H_j$ $i_j = i = \frac{\Delta h}{L}$	$v_1 = v_2 = \dots = v$ $\Delta h = \sum h_j$ $H = \sum H_j$
已知	$H_1, H_2 \dots$ $k_1, k_2 \dots$	$H_1, H_2 \dots$ $k_1, k_2 \dots$
等效	$q = k_x i H$	$v = k_z i = k_z \frac{\Delta h}{H}$
公式	$k_x = \frac{1}{H} \sum k_j H_j$	$k_z = \frac{H}{\sum \frac{H_j}{k_j}}$

层状地基的等效渗透系数

§2.3 平面渗流与流网的概念



§ 2.3 平面渗流与流网的概念

一、平面渗流的基本方程及求解

1. 基本方程

对于稳定渗流

$$h=h(x,z), \quad v=v(x,z)$$

与时间无关

取单宽: $dy=1$

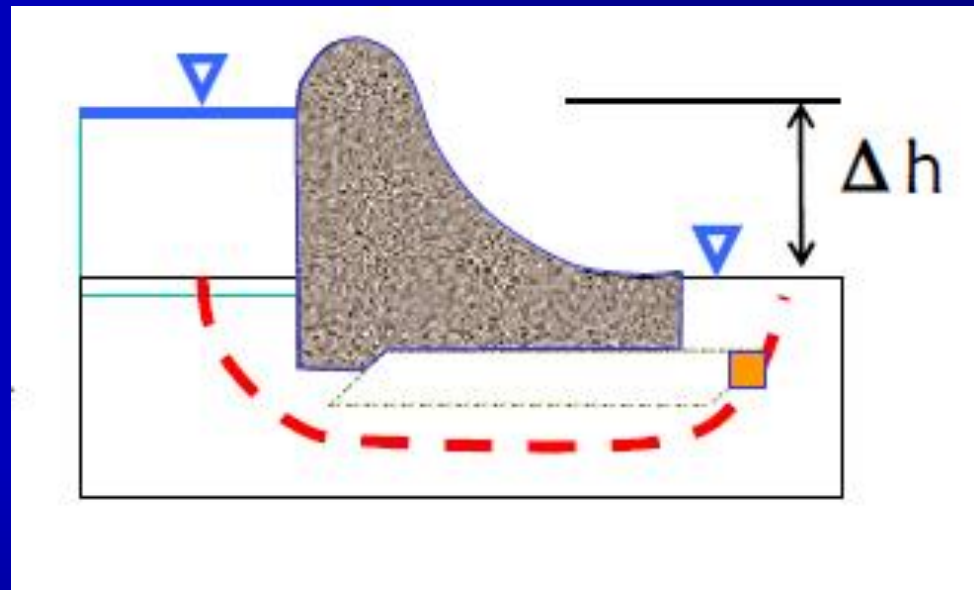
连续性条件

达西定律

假定: $\mathbf{k}_x = \mathbf{k}_z$

→ 平面渗流的基本方程

↓
Laplace方程

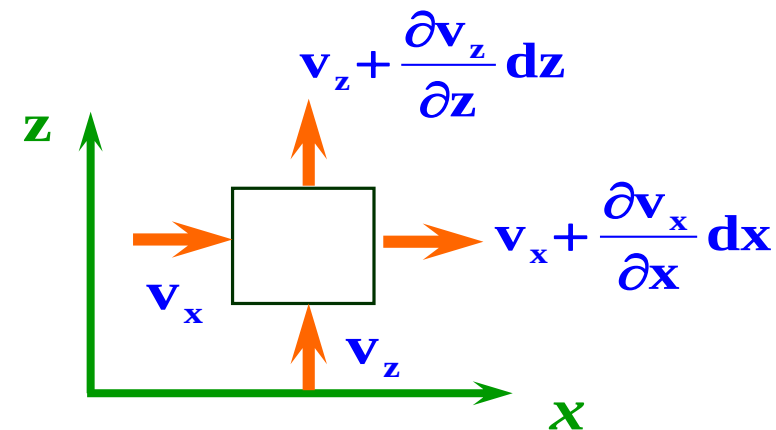


连续性条件

$$dq_e = v_x dz + v_z dx$$

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

$$dq_e = dq_o \rightarrow \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$



达西定律

$$v_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x}; \quad v_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

假定

$$k_x = k_z$$

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

Laplace方程

2. 求解方法

基本方程

边界条件

解析方法

通解：两个共轭调和函数

势函数 $\Phi(x,z)$
流函数 $\Psi(x,z)$

等势线
流线

特定解

适用于边界条件简单的情况

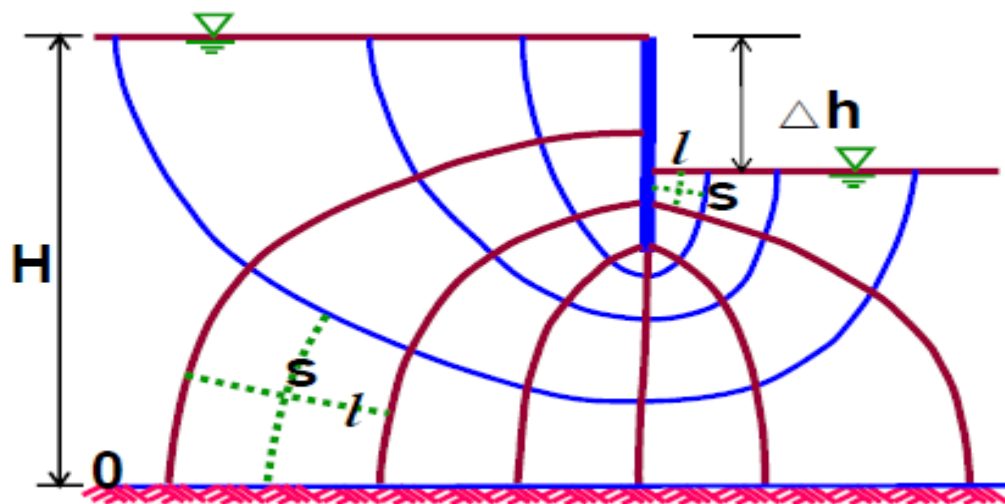
边界条件

二、流网的绘制及应用

- **流网**——渗流场中的两族相互正交曲线;
- **等势线和流线所形成的网络状曲线簇。**
- **流线**——在流场中每一点上都与速度矢量相切的曲线称为。
- **等势线**——测管水头相同的点之连线 。
- **流网法**——通过绘制流线与势线的网络状曲线簇
- **来求解渗流问题。**

基本要求

1. 正交性：流线与等势线必须正交
2. 各个网格的长宽比 c 应为常数。取 $c=1$ ，即为曲边正方形
3. 在边界上满足流场边界条件要求，保证解的唯一性。

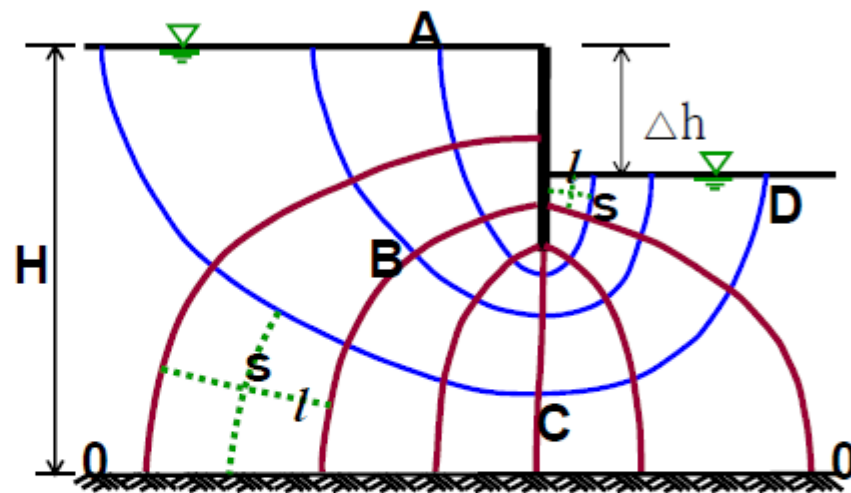


绘制方法

根据渗流场的
边界条件



确定边界流线
和首尾等势线



正交性

曲边正方形



初步绘制流网

精度较高的流网图

流线→等势线→反复修改，调整



流网特点

- 与上下游水位变化无关 $\Delta h = \text{const}$;
- 与 k 无关;
- 等势线上各点测管水头 h 相等;
- 相邻等势线间的水头损失相等;
- 各流槽的渗流量相等。



§2.4 渗透力与渗透变形

☞ 渗透力的概念

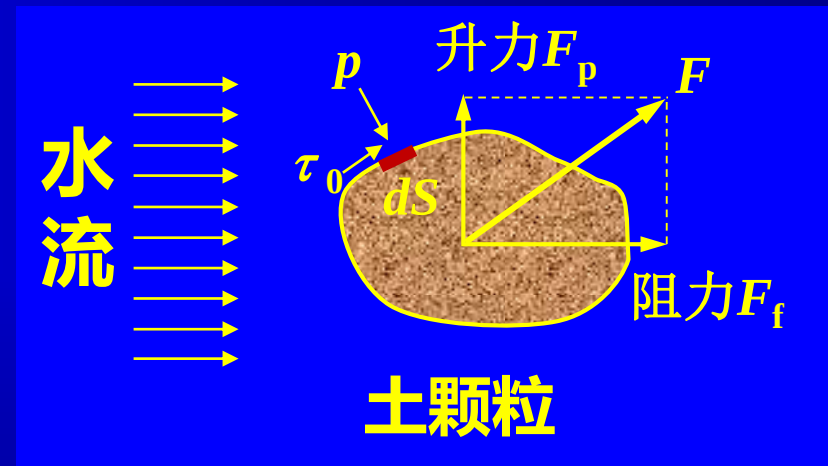
☞ 临界水力坡降

☞ 渗透变形和渗透破坏

渗透力和渗透变形

☞ **渗透力 j** ：单位体积土体内土骨架所受到的渗透水流的推动和拖曳力

- 大小： $j = \gamma_w i$
- 方向：水力坡降方向
- 作用对象：土骨架
- 性质：体积力

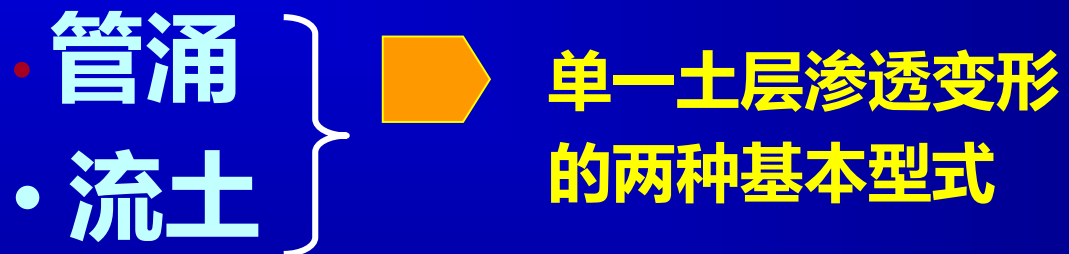


平面流场中土颗粒受力分析

渗透力的性质

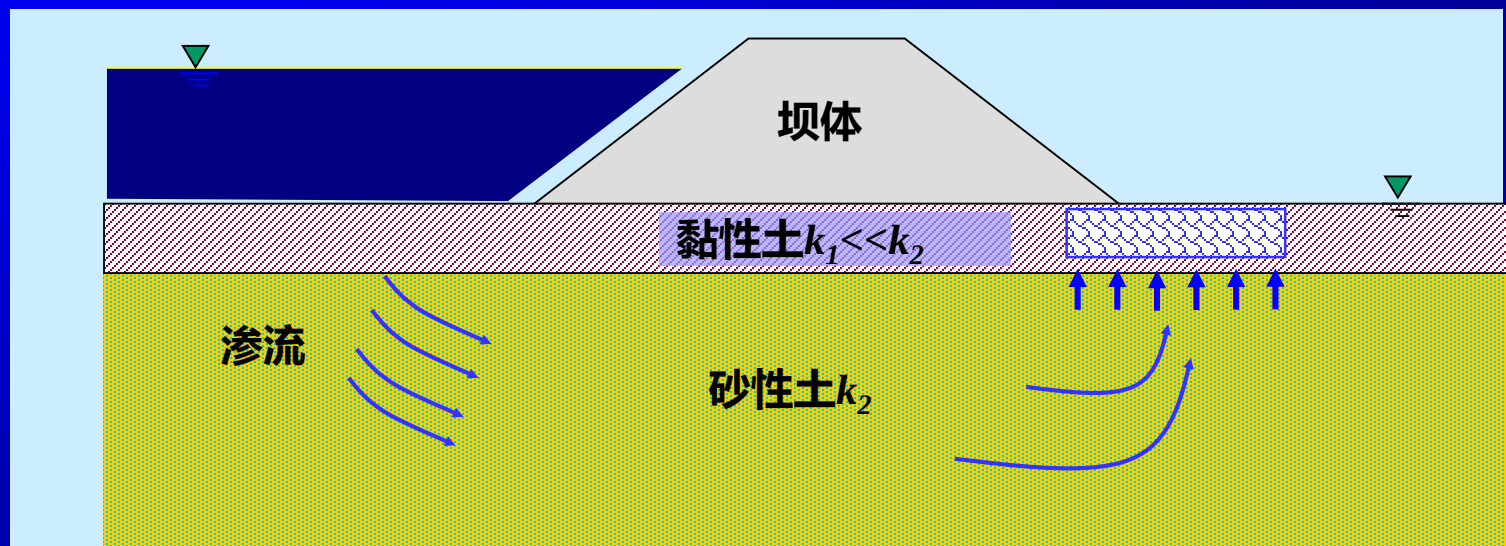
- **土工建筑物及地基由于渗流作用而出现的变形或破坏称为渗透变形或渗透破坏。渗透变形是土工建筑物发生破坏的常见类型**

- **基本类型：**



渗透变形

- **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：

$$i = i_{cr}$$

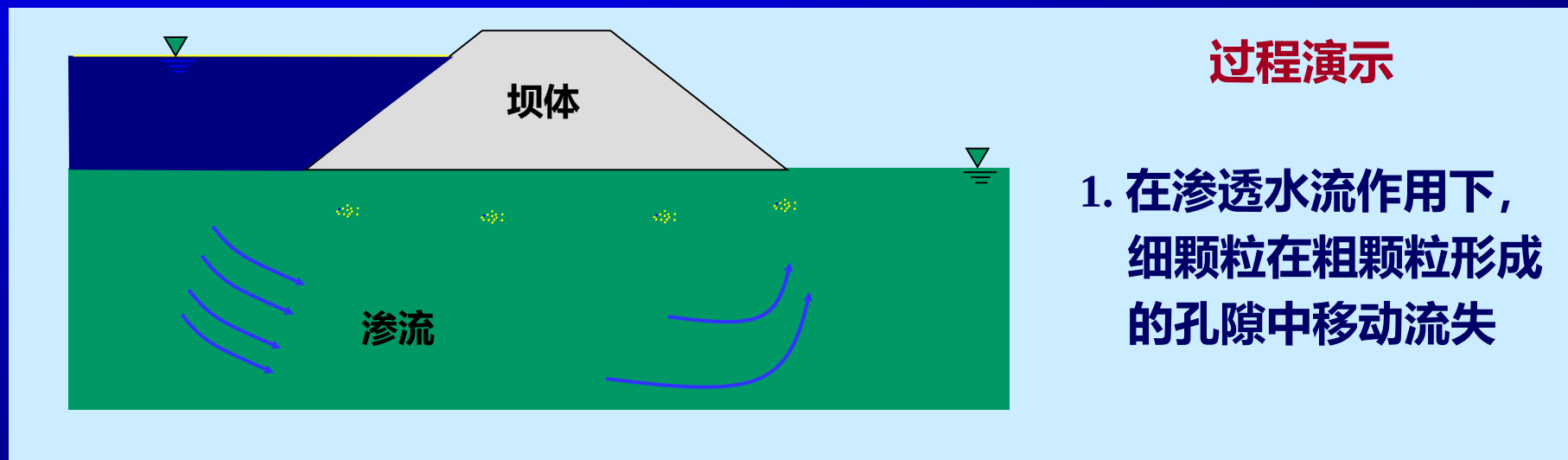
$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

与土的密实度有关

渗透变形 - 流土

■ **管涌**：在渗流作用下，一定级配的非黏性土中的细小颗粒，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

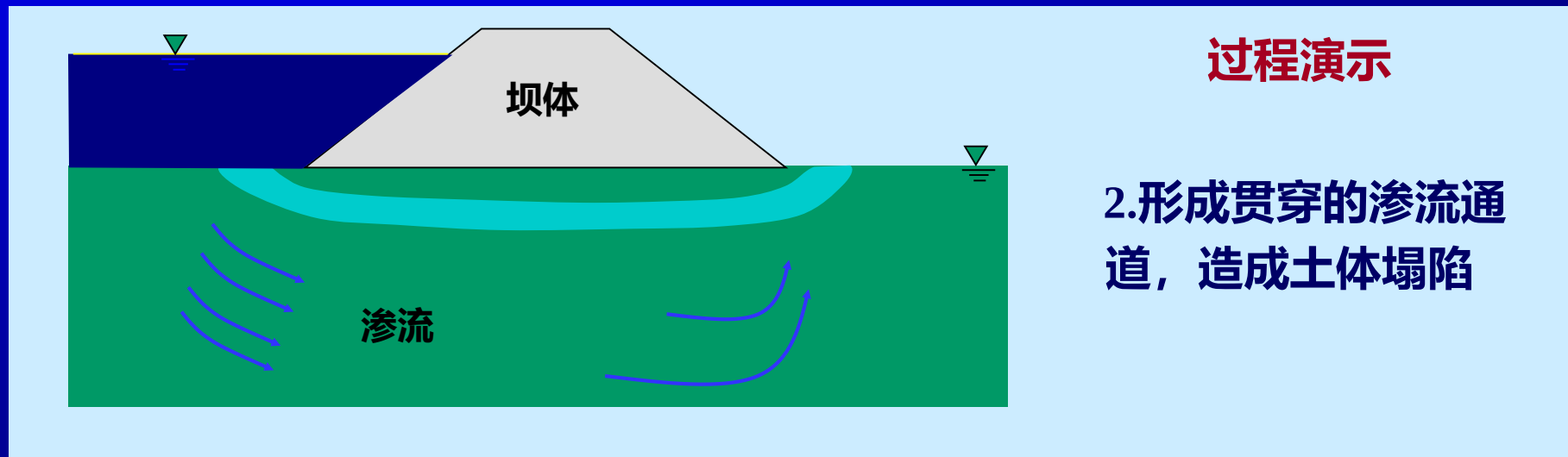
👉 **原因** 内因：有足够多的粗颗粒形成大于细粒直径的孔隙
外因：渗透力足够大



渗透变形 – 管涌

👉 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



渗透变形 – 管涌

	流土	管涌
现象	土体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黏性土或分散性黏土
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

流土与管涌的比较

- 在自下而上的渗流逸出处，任何土，包括黏性土和无黏性土，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：

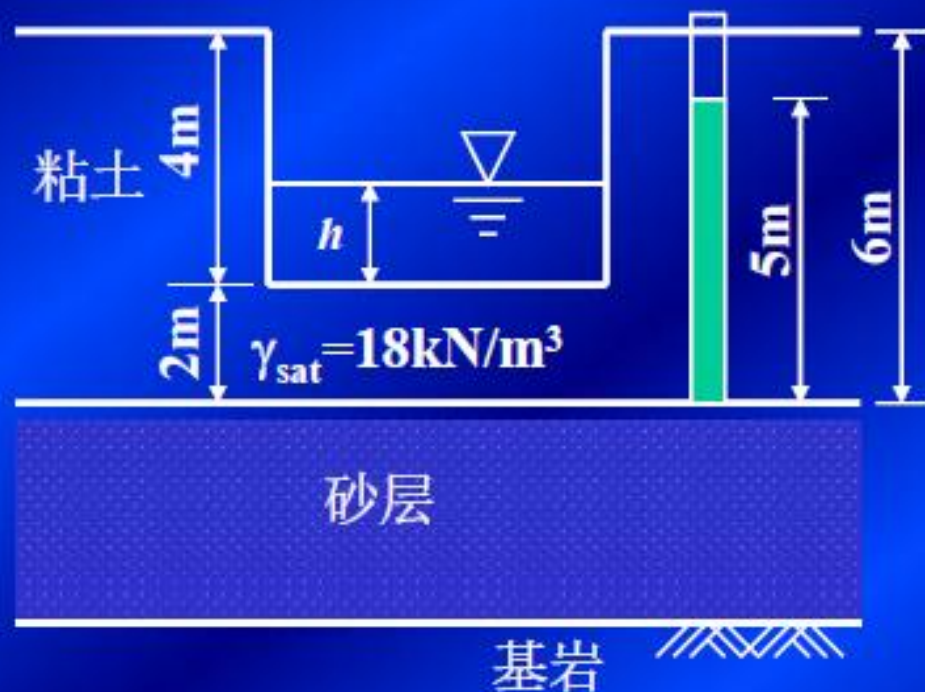
$$i \leq [i] = \frac{i_{cr}}{F_s}$$

$[i]$: 允许坡降

F_s : 安全系数 1.5~2.0

流土可能性的判别

例题：某地基土层剖面如图所示，砂层为承压水层，根据测压管中水位可知，承压水头高出砂层顶面5m。现在粘土层中开挖基坑4m，要求确定防止基坑底板发生流土的水深 h 至少有多深？



解：当渗透力 $j = \gamma'$ 时，土层发生流土破坏。

计算粘土层的渗透力 j ：

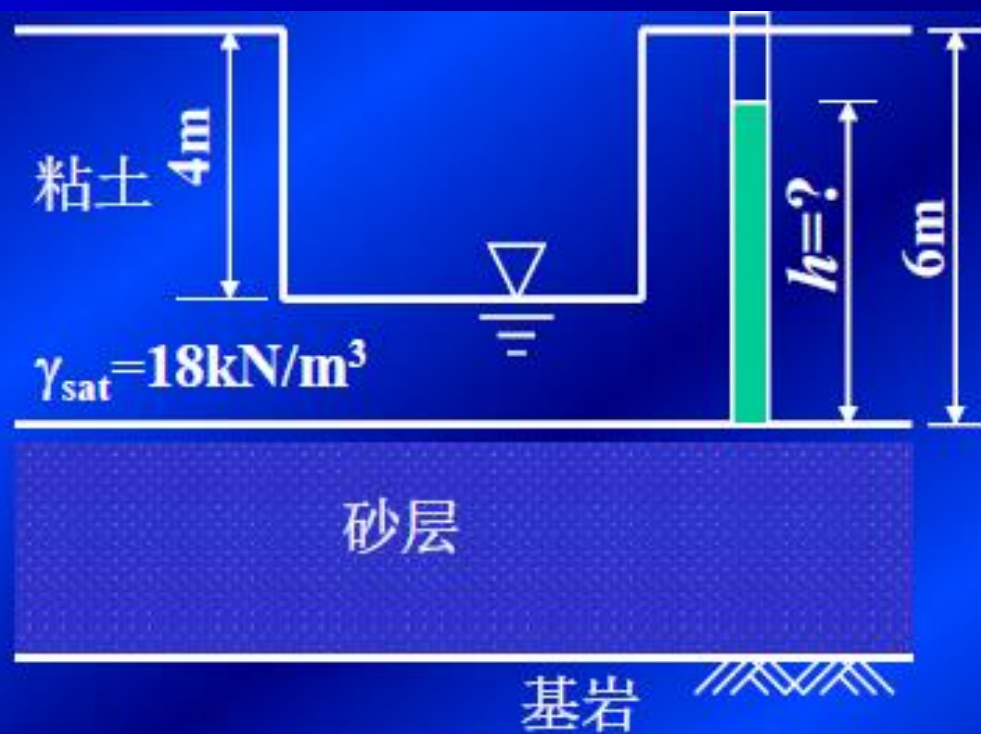
$$j = i\gamma_w = \frac{\Delta h}{\Delta L} \gamma_w = \frac{5 - (h + 2)}{6 - 4} \gamma_w$$

$$j = \gamma'$$

$$\gamma' = 8,$$

$$\text{解得： } h = 1.4 \text{ m}$$

例题：某地基土层剖面如图所示，保持基坑底面水深为0，承压水头 h 为多高时即可发生流土？



解：当渗透力 $j=\gamma'$ 时，土层发生流土破坏。

计算粘土层的渗透力 j ：

$$j = i\gamma_w = \frac{\Delta h}{\Delta L} \gamma_w = \frac{h - (6 - 4)}{6 - 4} \gamma_w = \frac{h - 2}{2} \gamma_w$$

$$j = \gamma'$$

$$\gamma' = 8, \quad \text{解得：} h = 3.6m$$

即当 $h > 3.6m$ 时，基坑将发生流土破坏。

第2章：土的渗透性和渗流问题

§2.1 概述

§2.2 土的渗透性与渗透规律

§2.3 平面渗流与流网

§2.4 渗透力与渗透变形

