



西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

# 土力学 (第2版) 电子课件

廖红军  
H. J. Liao

新世纪土木工程系列教材

## 土力学

(第2版)

赵树德 廖红军 主编

高等教育出版社

H. J. Liao



# 简介

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

- 本电子课件为高等教育出版社土木工程系列教材《土力学》第2版(赵树德、廖红建主编)的配套课件。基于作者长期主讲《土力学》的电子教案编制而成。限于编者水平, 难免存在不妥之处, 恳请大家批评指正。
- 《土力学》第2版经修订共有10章内容, 其中1-8章是土力学的核心部分, 9-10章为选学内容。故本课件以1-8章的主要教学内容作为电子教案, 可为使用本教材的教师和学生提供教学和学习上的便利。

H. J. Liao



# 主要内容

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

第1章 土的物理性质

第2章 土的渗透性

第3章 地基中的应力

第4章 土的压缩性

第5章 土的抗剪强度

第6章 地基承载力

第7章 土坡稳定性

第8章 土压力和挡土墙

H. J. Li ao



## 第2章 土的渗透性及渗流

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

2.1 土的渗透性及举例

2.2 土的水理性质

2.3 地下水的  
运动方式和判别

2.4 达西定律  
及其适用范围

2.5 渗透系数的测定

2.6 二维渗流  
及流网应用

2.7 渗流力、流沙  
和潜蚀的危害及防治

2.8 渗流情况下的  
有效应力和孔隙水压力

H. J. Li ao



## § 2.1 土的渗透性及举例

- ∅ **渗透**：在水位差作用下，水透过土体孔隙的现象。
- ∅ **渗透性**：土具有被水透过的性质。
  
- 主要内容
  - ∅ 水在土体中的**渗透规律**
  - ∅ 渗透过程中**土体的变形**
  - ∅ 在渗流作用下的**有效应力**和**孔隙水压力**



## § 2.2 土的水理性质（一）

### 2.2.1 土的毛细水性质

#### ∅ 毛细现象

土中水在表面张力作用下沿着细小孔隙向上或其它方向移动的现象。

#### ∅ 工程影响

路基冻害、地下室潮湿、沼泽化和盐渍化等。

#### ∅ 毛细水最大上升高度

理论： $h_{max} = 4 \sigma / d \gamma_w$

汉森经验公式： $h_c = C / e d_{10}$

#### ∅ 毛细压力（毛细粘聚力）

在土粒接触面上由于空气和水分界面产生的表面张力。



## § 2.2 土的水理性质（二）

### 2.2.2 土的冻胀融陷特性

Ø **冻胀**：未冻结区水分不断向冻结区迁移和积聚，使冰晶体不断扩大，土层中形成冰夹层，土体发生隆起。

Ø **融陷**：土层解冻时，土中积聚的冰晶体融化，土体随之下陷。

#### - 冻融对工程影响

路基隆起，柔性路面鼓包、开裂，刚性路面错缝、折断，房屋、桥梁、涵管下沉或不均匀沉降等。

#### - 影响冻胀的因素

Ø **土**：毛细水现象严重的细粒土，如：粉砂、粉土、粉质黏土。

Ø **水**：冻结区附近地下水位较高，分有开敞型、封闭型冻胀。

Ø **温度**：气温缓慢下降，持续时间较长。



## § 2.3 地下水的运动方式和判别 (一)

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

### - 2.3.1 地下水运动的基本方式

#### Ø 按地下水的流线形态

**层流**：流线互相平行、水流平稳、流速均匀

**湍流**（紊流）：流线不规则、旋涡

#### Ø 按水流特征随时间的变化状况

稳定流运动

非稳定流运动

#### Ø 按水流在空间上的分布状况

一维、二维、三维流动

H. J. Li ao



## § 2.3 地下水的运动方式和判别 (二)

### - 2.3.2 地下水运动方式的判别

#### 临界雷诺数 $Re$

定义：运动流体的**惯性力**和**粘滞力**的比值（无量纲）。

作用：划分**层流**和**紊流**的定量界限。

- Ø 圆管中水的流动
- Ø 明渠中水的流动
- Ø 水流夹带泥沙
- Ø 在土的孔隙中水的流动



## § 2.4 达西定律 (一)

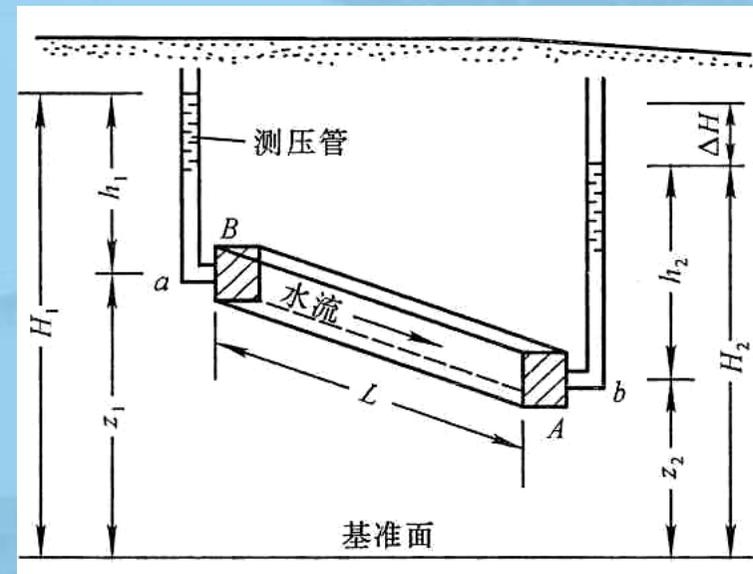
- **达西定律** — 层流渗透定律 (H. Darcy, 1856)

Ø 公式:

$$n = \frac{q}{t \cdot A} = k \cdot \frac{\Delta h}{L} = ki$$

Ø 量纲:

$$cm / s = \frac{cm^3}{s \cdot cm^2}$$



渗流装置示意图

$v$ 为**渗透速度**,  $q$ 为**流量**,  $k$ 为**渗透系数**,  $i$ 为**水头梯度**

渗透速度定义: **单位时间内流过单位土截面积的水量。**



## § 2.4 达西定律（二）

- **砂土**渗透速度符合达西定律:

$$n = ki = k \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

- **粘性土**渗透速度应考虑起始水头梯度:

$$n = k(i - i_0)$$

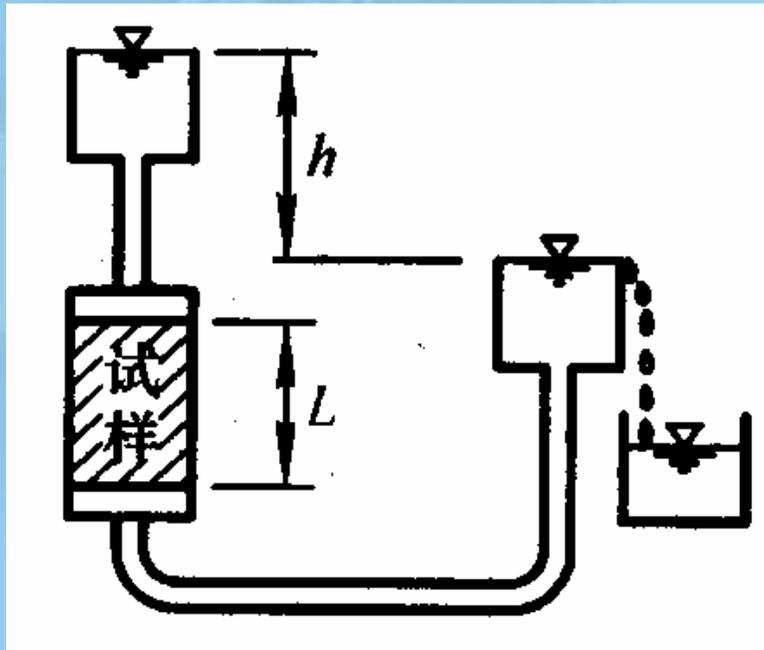
- **砾石、卵石**的粗颗粒，采用经验公式。



## § 2.5 渗透系数的测定 (一)

### 2.5.1 渗透系数 $k$ 的测定

#### 常水头法



常水头试验装置示意图

$$Q = n \cdot At = ki \cdot At$$

$$= k \frac{\Delta h}{L} \cdot At$$

$$k = \frac{QL}{Aht}$$

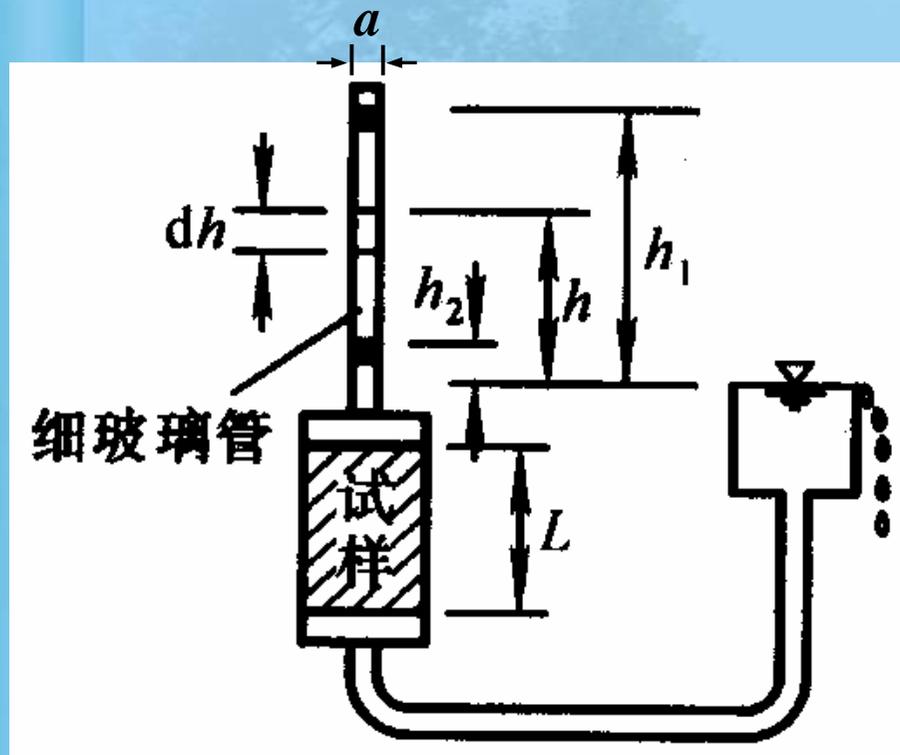


**适用：透水性强无粘性土**



## § 2.5 渗透系数的测定 (二)

### ∅ 变水头法



变水头试验装置示意图

$$dQ = -adh$$

$$dQ = \boxed{v} \cdot dt \cdot A$$

达西定律

$$= \boxed{ki} \cdot dt \cdot A$$

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

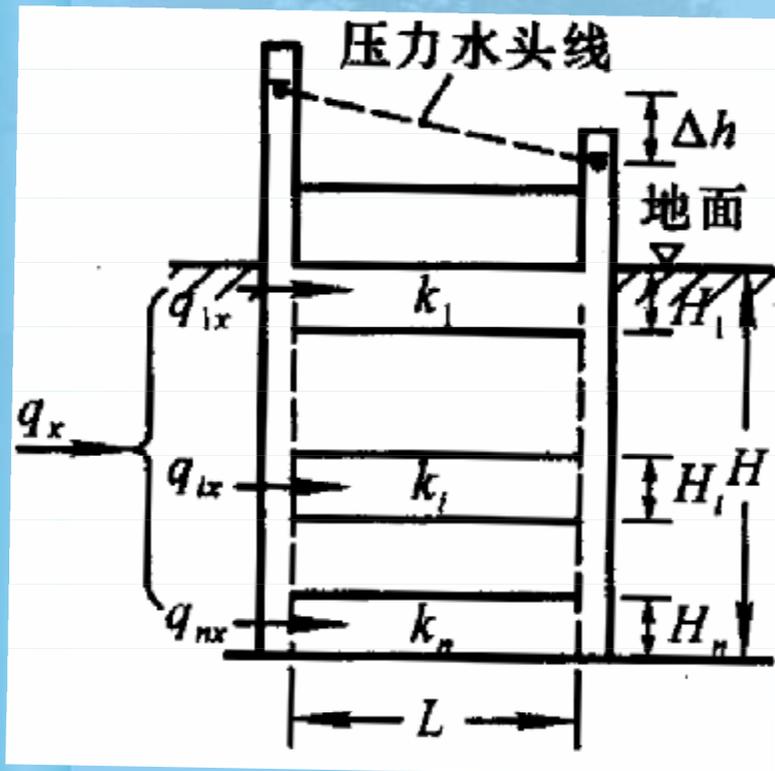
适用：透水性弱的粘性土



## § 2.5 渗透系数的测定 (三)

### 2.5.2 成层土的渗透系数

∅ 与土层面平行时的平均渗透系数



成层土渗流示意图

$$q_x = \sum_{i=1}^n q_{ix} = \sum_{i=1}^n k_i i \cdot H_i$$

$$q_x = k_x i \cdot H \quad \text{达西定律}$$

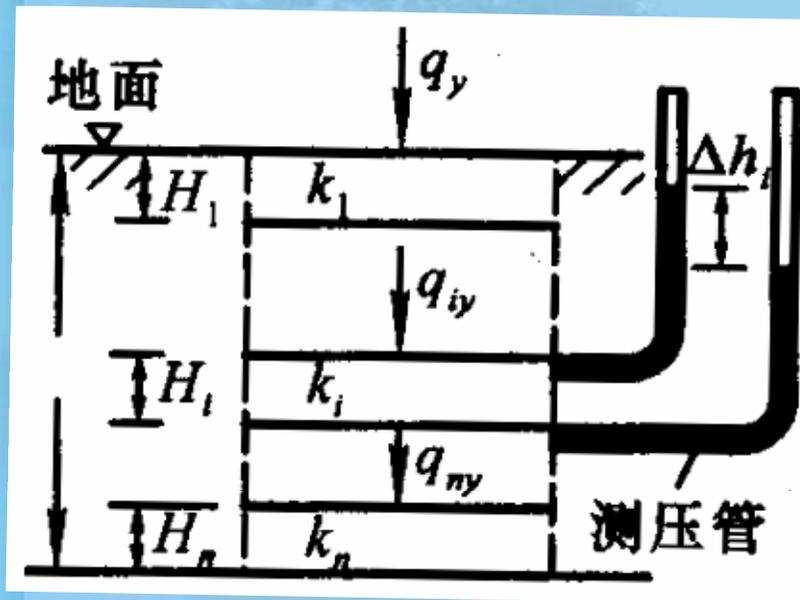
$$k_x = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n k_i \cdot H_i$$





## § 2.5 渗透系数的测定 (四)

∅ 与土层面垂直时的平均渗流系数



成层土渗流示意图

$$q_y = k_y \frac{h}{H} \cdot A$$
$$q_{iy} = k_i \frac{\Delta h_i}{H_i} \cdot A$$
$$q_y = q_{iy}$$

---

$$k_y = H / \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{k_i}$$



## § 2.5 渗透系数的测定（五）

### - 2.5.3 影响土渗透性的因素

Ø **砂性土**：颗粒大小、级配、密度、封闭气泡

级配越不好



颗粒越均匀



渗透性越好

级配越好



颗粒越不均匀



渗透性越不好

Ø **粘性土**：矿物成分、结合水膜厚度、土的结构构造

粘粒越多



渗透性越不好



## § 2.6 二维渗流及流网应用（一）

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

### - 2.6.1 流网的概念

- ∅ **迹线**：同一水质点在不同时刻位置点的连线。
- ∅ **流线**：在渗流方向上，同一时刻不同水质点的连线形成的曲线，在该曲线上所有各质点的瞬时流速矢量都和该曲线相切。在**稳定流**的情况下，**迹线**和**流线**重合。
- ∅ **等势线**：流线上势能相等的点的连线。
- ∅ **流网**：一组流线和一组等势线交织的正交网格。

H. J. Li ao



## § 2.6 二维渗流及流网应用 (二)

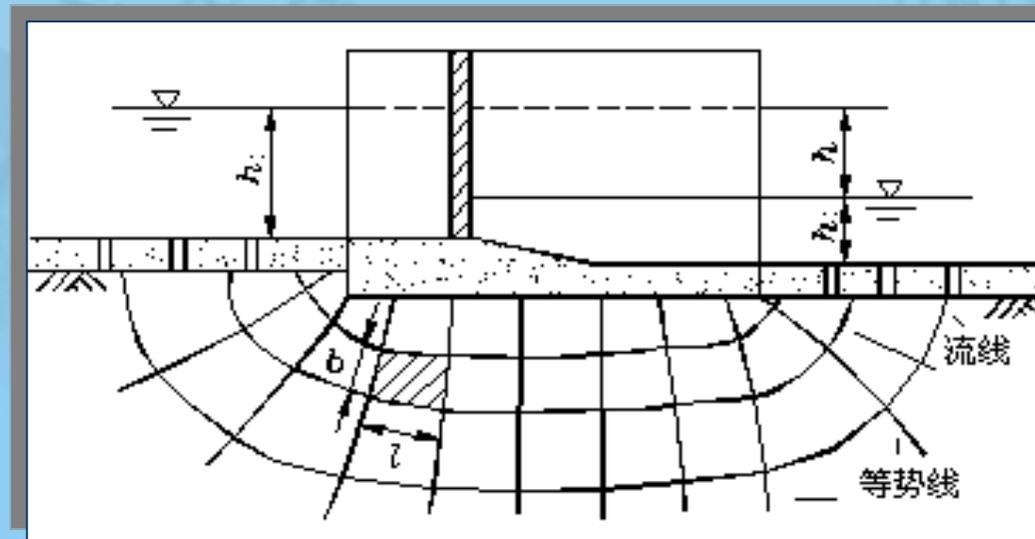
如果取相邻两条流线之间通过的流量相等，相邻两条等势线之间的势能差值相等：

### Ø 流线疏密程度

反映出地下水径流的强度不同，流线越密径流强度越大

### Ø 等势线疏密程度

反映出水力梯度的变化率，等势线越密水力梯度越大





## § 2.6 二维渗流及流网应用（三）

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

- 稳定流条件下，均匀且各向同性介质中的渗流：

∅ 渗流场：可以用拉普拉斯方程来描述

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

∅ 流线：可以用流函数  $\psi(x, z)$  来描述

流函数满足拉普拉斯方程

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

∅ 等势线：可以用势函数  $\phi(x, z)$  来描述

势函数满足拉普拉斯方程

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

H. J. Liao



## § 2.6 二维渗流及流网应用（四）

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

### - 2.6.2 流网作图的特点

- Ø 首先要弄清渗流场的**边界条件**
- Ø 流网中的**流线**和**等势线正交**，近似成**直角**
- Ø 作流网图时，使相邻两条流线之间通过的**流量相等**，相邻两条等势线之间的**势能差值相等**
- Ø **流网图**的最终完成只能是**逐步**做成的

H. J. Li ao



## § 2.6 二维渗流及流网应用 (五)

### 2.6.3 流网图的应用

以一个例子来说明

- 1、求图中A点的孔压
- 2、求渗流量

沿图中纵向取单位长度1m

单位时间内流量： $q = \frac{U}{n_d} \cdot b$

其中水力坡降： $J = \frac{h}{L}$   
过水断面

式中， $n_d$ 为沿流  
着等势线流带的划  
正方形网格，即：

则： $q_v = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

势能水头差： $h = P_1 - P_2 = 2.0 \text{ m}$

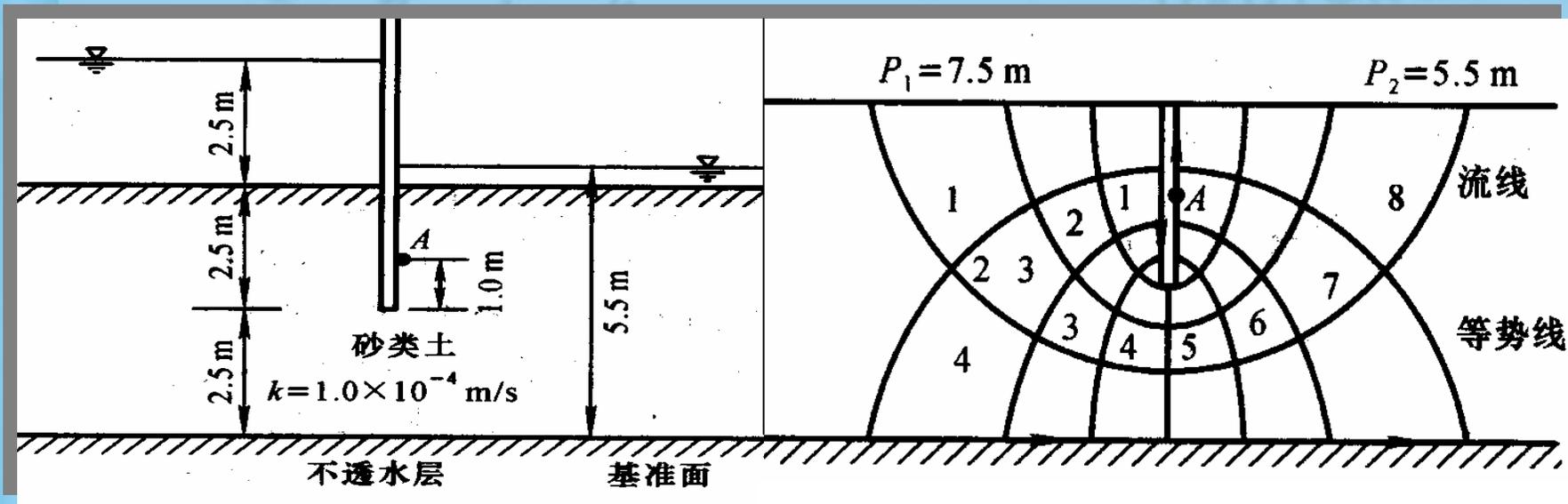
相邻等势线间的水头差为0.25m

故  $P_A = 5.875 \text{ m}$

A点总势能水头： $P_A = u_A / \gamma_w + z_A$

其中  $z_A = 3.5 \text{ m}$  为位置水头

则： $U_A = (P_A - z_A) \gamma_w = 23.75 \text{ kPa}$





## § 2.7 渗流力、流沙和潜蚀的危害及防治 (一)

### - 2.7.1 渗流压力

∅ 渗流时水对土颗粒骨架的压力即**动水压力** $G_d$  (KN/m<sup>3</sup>)

∅ 水所受到土的颗粒骨架的**阻力** $T$

$$T = - G_d$$

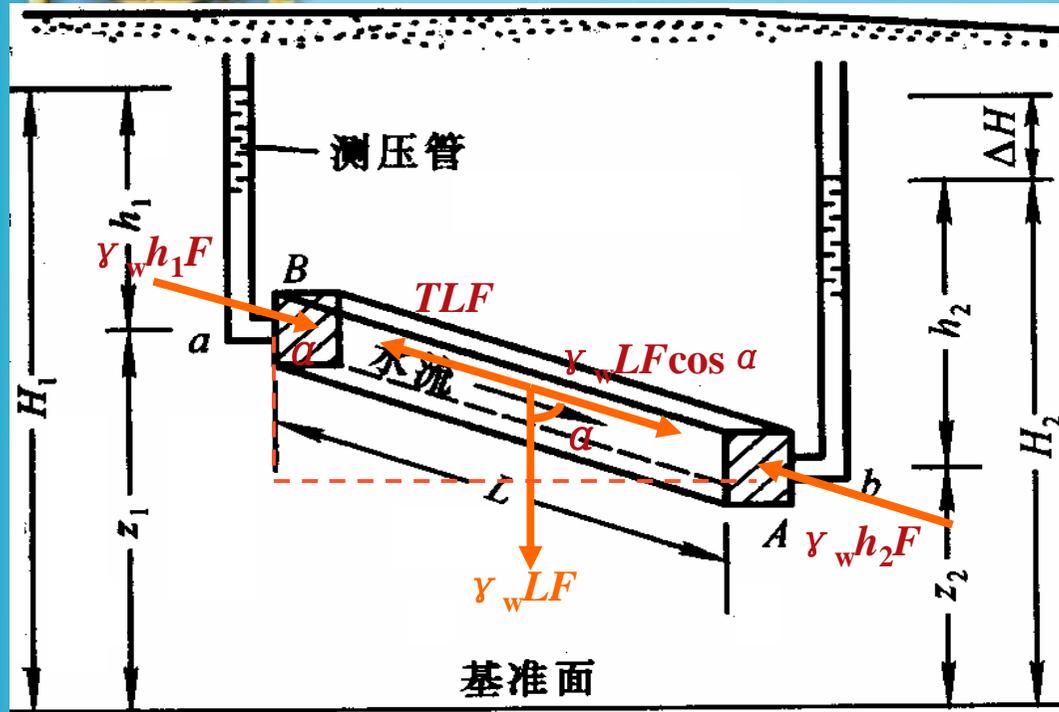
∅ **大小:**  $T = \gamma_w i$  (KN/m<sup>3</sup>)

∅ **方向:** 自上而下、自下而上、水平

∅ **作用:** 冲刷作用、影响土体渗流稳定性



# $T$ ( $G_d$ ) 公式的推导:



根据力的极限平衡，水柱BA上各力的平衡关系式

$$\gamma_w h_1 F + \gamma_w L F \cos \alpha - \gamma_w h_2 F - T F L = 0$$

消去公因子  $F$ ，并把

$$\cos \alpha = (z_1 - z_2) / L$$

代入，整理有

$$\gamma_w h_1 + \gamma_w (z_1 - z_2) - \gamma_w h_2 - T L = 0$$

$$\gamma_w [(z_1 - z_2) + (h_1 - h_2)] - T L = 0$$

由于  $z_1 + h_1 = H_1$ ， $z_2 + h_2 = H_2$

$$i = (H_1 - H_2) / L = [(z_1 - z_2) + (h_1 - h_2)] / L$$

整理得到  $T = \gamma_w i$

即动水压力  $G_d = -\gamma_w i$

动水压力  $G_d$  方向和渗流方向一致

H. J. Li ao

对水柱体BA受力分析:

前提: 水头差( $H_1 - H_2$ ); 长度  $L$ ; 截面积  $F$

忽略渗流水惯性力。

B截面水压力:  $f_B = \gamma_w h_1 F$

A截面水压力:  $f_A = \gamma_w h_2 F$

水流自重:  $\gamma_w L F$

土的颗粒骨架对水的阻力  $T$



## § 2.7 渗流力、流沙和潜蚀的危害及防治 (二)

### - 2.7.2 流沙

#### 流沙现象

Ø 在水下单位体积土的有效重力为:  $W' = g_{sat} - g_w = g'$

当土粒所受的动水压力等于或大于土的有效重力

$$G_d = g_w \cdot i \geq g' \quad \text{产生流沙}$$

Ø 土颗粒间的有效接触力为零，土粒呈悬浮状态，并随渗流水一起流动上涌，表土层变得象液体一样，完全失去抗剪强度，地层遭到破坏。



## § 2.7 渗流力、流沙和潜蚀的危害及防治 (三)

- 流沙形成的条件

### Ø 水动力条件

产生流沙临界状态:

$$G_d = g_w \cdot i \geq g'$$

流沙临界水力梯度:

$$i_{cr} = \frac{g'}{g_w} = (d_s - 1)(1 - n)$$

### Ø 颗粒级配

不均匀系数  $C_u < 10$ , 孔隙率  $n$  较大, 细粒填料 ( $d < 2\text{mm}$ ) 大于 30~35%, 土质疏松、透水快, 易发生流沙。



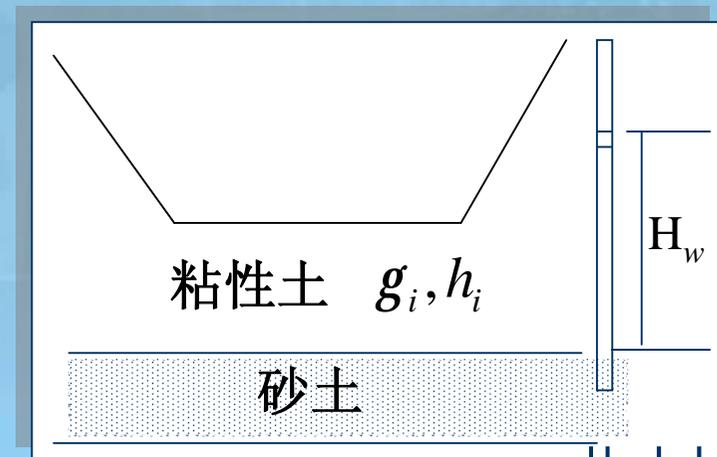
## § 2.7 渗流力、流沙和潜蚀的危害及防治 (四)

### - 流沙的防治

- Ø 施工上采取特殊处理：冻结法施工、打钢板桩、设防渗墙
- Ø 降低水力梯度 ( $i = \Delta h/L$ )：降低水头差  $\Delta h$ ，延长渗流路径
- Ø 对于基坑底面下有相对不透水层，其下有承压水时，应满足承压水以上土的总重量大于承压水的水压力：

$$\sum g_i h_i > g_w H_w$$

- Ø 填堵，抛填粗填料



H. J. Li ao



有一粘土层位于两砂层之间，其中砂层的湿重度 $r=17.6\text{kN/m}^3$ ，饱和重度 $r_{\text{sat}}=19.6\text{kN/m}^3$ ，粘土层的饱和重度 $r_{\text{sat}}=20.6\text{kN/m}^3$ ，土层厚度如图所示。地下水保持在地面以下1.5m处，若下层砂中有承压水，其测压管水位高出地面3m。若粘土层发生流沙，则下层砂中的承压水引起的测压管水位应当高出地面多少米？

**方法一：判断静水压力与土总重量之间的平衡**

$$\sum g_i h_i > g_w H_w$$

解：设测压管水位高出地面  $x$  m，

则砂土层上界面  $b$  以上：

**总静水压力**

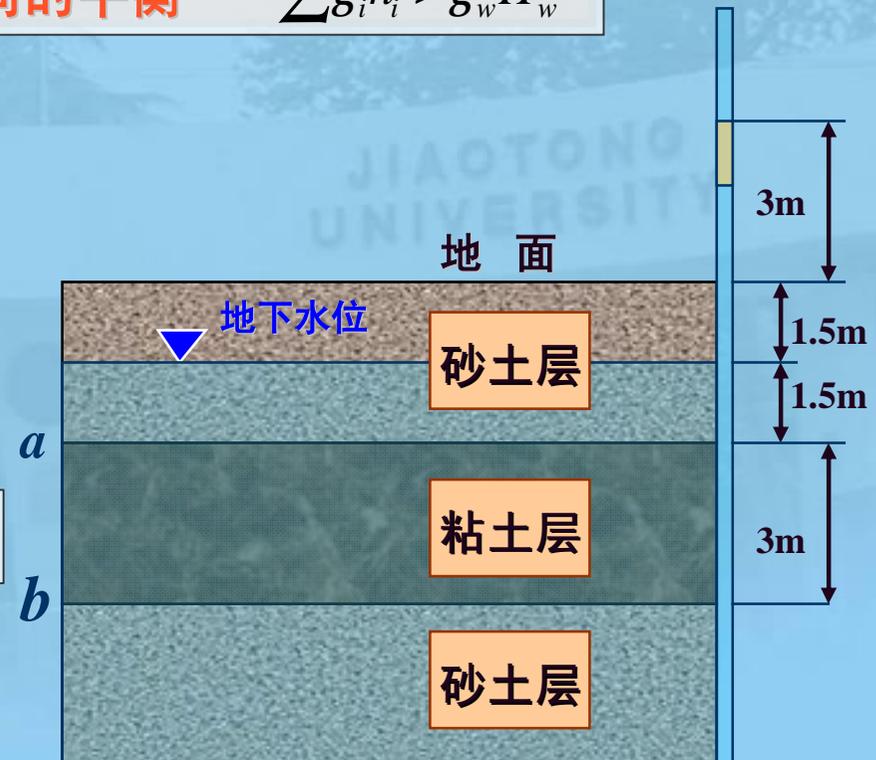
$$g_w H_w = g_w \times (3 + 1.5 + 1.5 + x)$$

**总重量**

$$\sum g_i h_i = g_1 h_1 + g_{2\text{sat}} h_2 + g_{3\text{sat}} h_3 = 117.6 (\text{kPa})$$

令静水压力=总重量，得  $x = 5.76\text{m}$

当高出地面5.76m时将发生流沙。



H. J. Li ao



## 例题1

**方法二：判断渗流压力与有效重量之间的平衡**  $\sum g_i h_i > g_w \Delta h$

解：设测压管水位高出地面  $x$  m，则砂土层上界面  $b$  以上：

**总渗流压力**

$$g_w i h_3 = g_w \frac{\Delta h}{h_3} h_3 = g_w \Delta h = 10 \times (1.5 + x)$$

其中， $h_3 = 3\text{m}$  为渗流压力作用的长度

**总有效重量**

$$\sum g_i h_i = g_1 h_1 + g_2' h_2 + g_3' h_3 = 72.6(\text{kPa})$$

令渗流压力=有效重量，得  $x = 5.76\text{m}$

当高出地面  $5.76\text{m}$  时将发生流沙。



## § 2.7 渗流力、潜蚀和流沙的危害及防治 (五)

### - 2.7.3 潜蚀

Ø **概念**: 在渗流下, 地下水对岩土矿物、化学成分产生溶蚀后, 水流将细小颗粒从较大颗粒的孔隙中带走的现象, 也称管涌。前者为**化学潜蚀**; 后者为**机械潜蚀**

Ø **潜蚀形成的条件**:

1) 水动力条件:  $i < i_{cr} / \text{安全系数} (1.5 \sim 2.0)$

$i_{cr}$  为临界水力梯度, 根据自下而上渗流、侧向渗流由经验公式确定。

2) 粒径级配

粒径级配不均匀因素  $C_u$  越大— $i_{cr}$  越小—越易发生潜蚀



## §2.7 渗流力、潜蚀和流沙的危害及防治（六）

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

### - 工程影响

岩土体内水土流失、形成孔穴、洞穴、溶洞；土体软化、抗剪强度降低，边坡及堤坝滑动、塌陷变形等。

### - 潜蚀的防治

- Ø 1. **降低水头梯度**：降低水头差  $\Delta h$ ，延长渗流路径  $L$
- Ø 2. **控制排水处条件**：设置反滤层（下细上粗）
- Ø 3. **堵塞空洞**：材料选取、施工密实度

H. J. Li ao



## § 2.8 渗流情况下的有效应力和孔隙水压力 (一)

### 2.8.1 饱和土体

有效应力原理:

$$S = S' + u$$

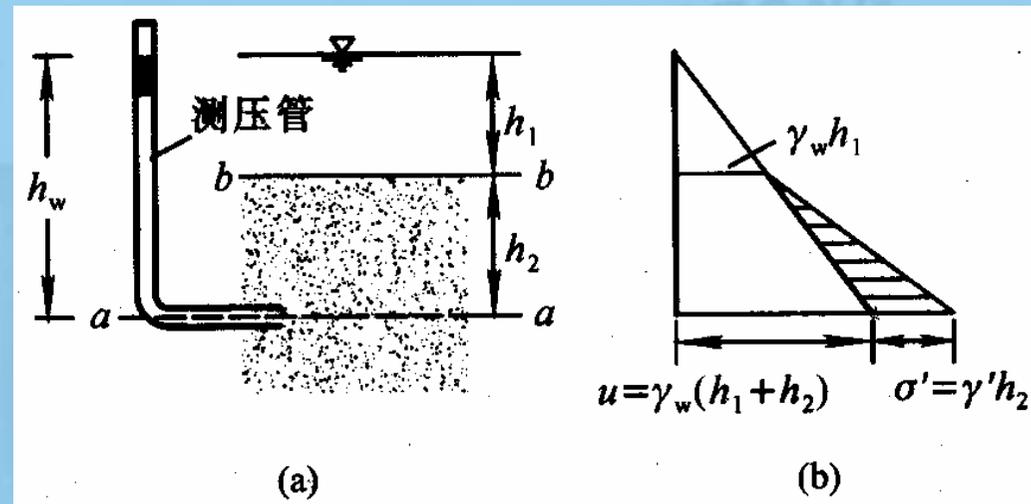
### 2.8.2 在静水条件下水平面上

$a-a$ 界面处:

$$S_a = g_w h_1 + g_{sat} h_2$$

$$u_a = g_w h_w$$

$$S_a' = S_a - u_a = g' h_2$$



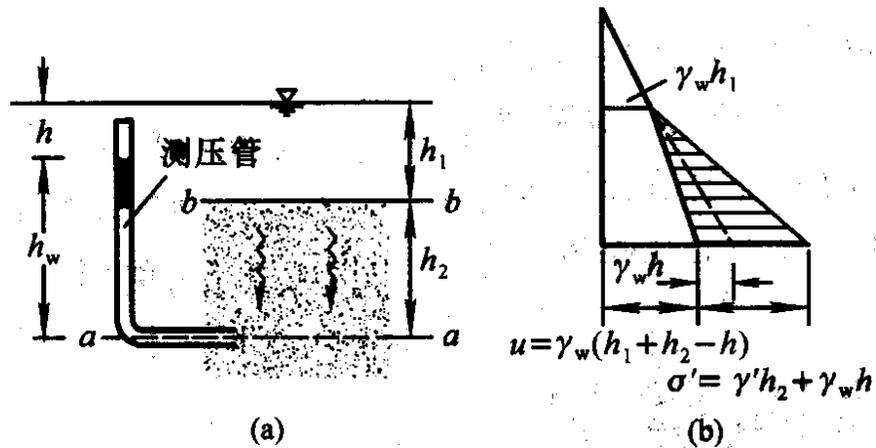
静水情况下的孔隙水压力和有效应力



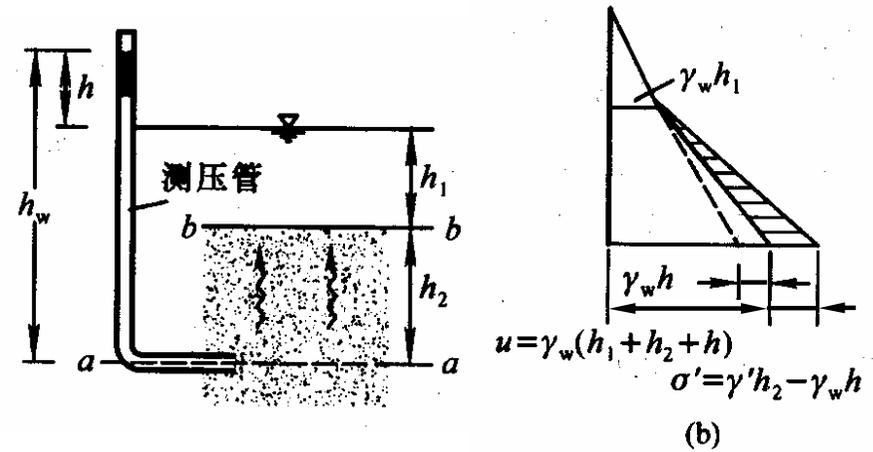
## § 2.8 渗流情况下的有效应力和孔隙水压力 (二)

### 2.8.3 在稳定渗流作用下水平面上

#### 1. 自上而下渗流



#### 2. 自下而上渗流



$$S_a = g_w h_1 + g_{sat} h_2$$

$$u_a = g_w h_w = g_w (h_1 + h_2 - h)$$

$$S_a' = S_a - u_a = g' h_2 + g_w h$$

$$S_a = g_w h_1 + g_{sat} h_2$$

$$u_a = g_w h_w = g_w (h_1 + h_2 + h)$$

$$S_a' = S_a - u_a = g' h_2 - g_w h$$

**流沙临界条件:**  $\sigma' = 0$  即  $\gamma' h_2 = \gamma_w h$  即  $\gamma' = \gamma_w i$   
 $i_{cr} = \gamma' / \gamma_w$  或  $G_{dcr} = \gamma_w i_{cr} = \gamma'$



## 例题2

已知条件同前例题1，试计算：粘土层内的孔隙水压力及有效应力随深度的变化并绘出分布图（假定承压水头全部损失在粘土层中）。

解：

**a-a界面**

$$S_a = g_1 h_1 + g_{1sat} h_2 = 17.6 \times 1.5 + 19.6 \times 1.5 = 55.8 kPa$$

$$u_a = g_w h_w = g_w h_2 = 10 \times 1.5 = 15 kPa$$

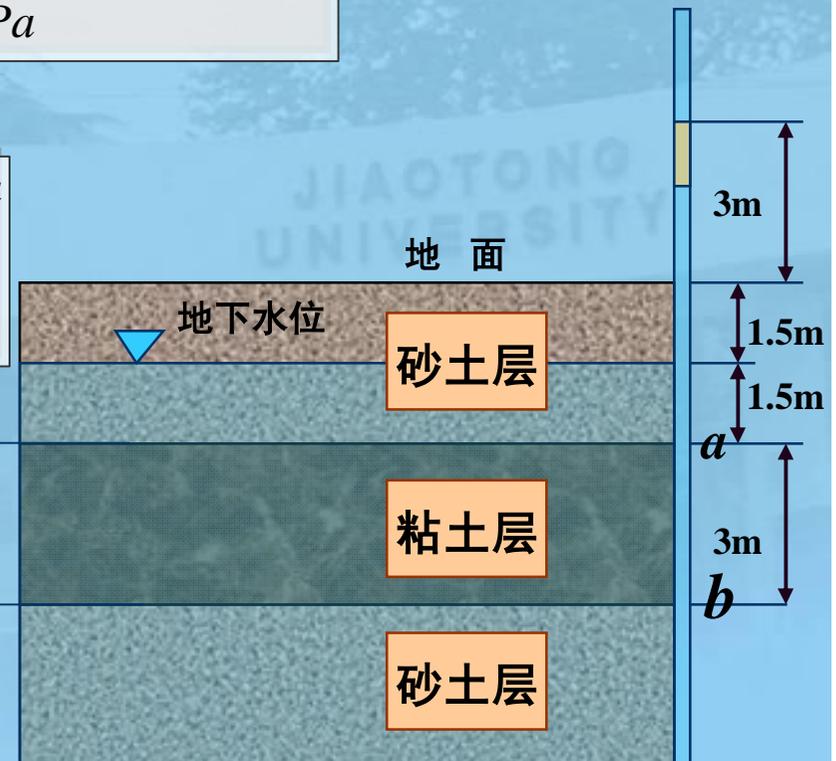
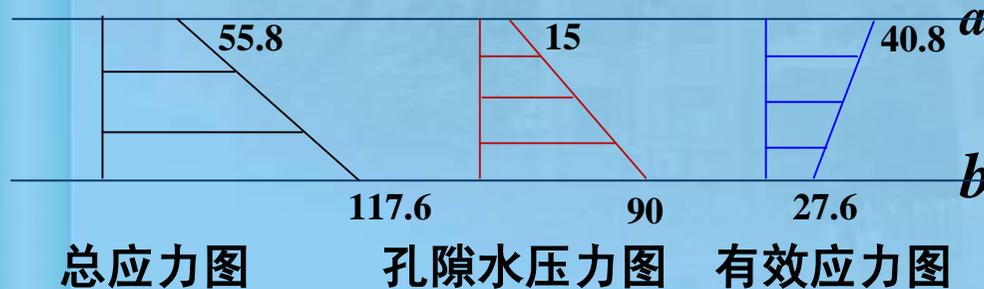
$$S_a' = S_a - u_a = 55.8 - 15 = 40.8 kPa$$

**b-b界面**

$$S_b = g_1 h_1 + g_{1sat} h_2 + g_{2sat} h_3 = 55.8 + 20.6 \times 3 = 117.6 kPa$$

$$u_b = g_w h_w = g_w (h_1 + h_2 + h_3 + h) = 10 \times 9 = 90 kPa$$

$$S_b' = S_a - u_a = 117.6 - 90 = 27.6 kPa$$



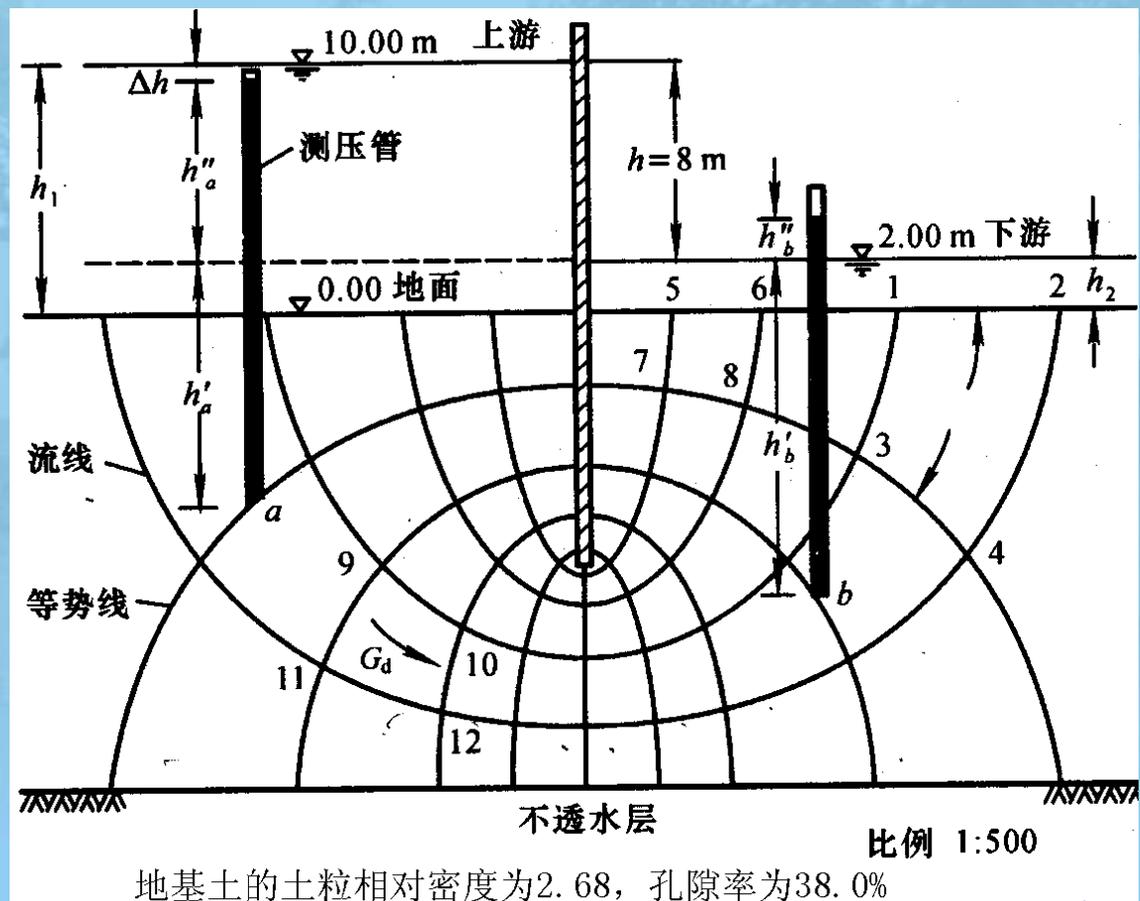
H. J. Li ao



## § 2.8 渗流情况下的有效应力和孔隙水压力 (三)

### 2.8.4 根据流网确定孔隙水压力 以闸基下的渗流为例来说明确定方法

- ① 求 $a$ 点的孔隙水压力和有效应力
- ② 渗流逸出处1-2是否发生流沙?
- ③ 图中网格9、10、11、12上的渗流力是多少?



H. J. Liao



## § 2.8 渗流情况下的有效应力和孔隙水压力 (四)

### ① 相邻等势线间的水头损失

$$\Delta h = h/10 = 0.8\text{m};$$

图中直接量得  $h_a' = 10\text{m}$  则  $h_a'' = h - \Delta h = 7.2\text{m}$

$$\therefore a \text{点 } h_w = h_a' + h_a'' = 17.2\text{m}$$

a点的孔隙水压力

$$u_a = \gamma_w h_w = 168.56\text{kPa}$$

其中由下游引起的静孔隙水压力为

$$u' = \gamma_w h_a' = 98\text{kPa}$$

由渗流引起的超孔隙水压力为

$$u'' = \gamma_w h_a'' = 70.56\text{kPa}$$

$$a \text{点总应力为 } \sigma = \gamma_w h_1 + \gamma_{\text{sat}} (h_a' - h_2) \\ = 258\text{kPa}$$

a点有效应力

$$\sigma' = \sigma - u = 89.44\text{kPa}$$

### ② 从图中直接量得平均渗径长度 $\Delta L = 8\text{m}$

$\therefore$  其平均水力梯度

$$i = \Delta h / \Delta L = 0.8/8 = 0.1$$

近似1-2处的逸出梯度

流土的临界水力梯度:

$$i_{\text{cr}} = (d_s - 1)(1 - n) = 1.04 > i$$

$\therefore$  1-2处不会发生流沙

### ③ 从图中直接量出9、10、11、12的平均渗流长度 $\Delta L = 5.0\text{m}$ , 两流线间的平均距离 $b = 4.4\text{m}$ , 其上渗流力

$$G_d = \gamma_w i b \Delta L = 34.5\text{kN/m}$$



- 本电子课件中部分未列入的章节可作为选学内容。各个学校可根据学时情况作适当的调整。

交通大学

JIAOTONG  
UNIVERSITY