# 第三章　土石坝


1 第一节　土石坝的类型、工作特点及基本要求

2 第二节　土石坝的剖面尺寸与构造

3 第三节　土石坝的渗流分析

4 第四节　土石坝的稳定分析

5 第五节　筑坝土料的选择与填筑要求

6 第六节　土石坝的地基处理

7 第七节　土石坝与坝基及其他建筑物的连接

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 国家目标

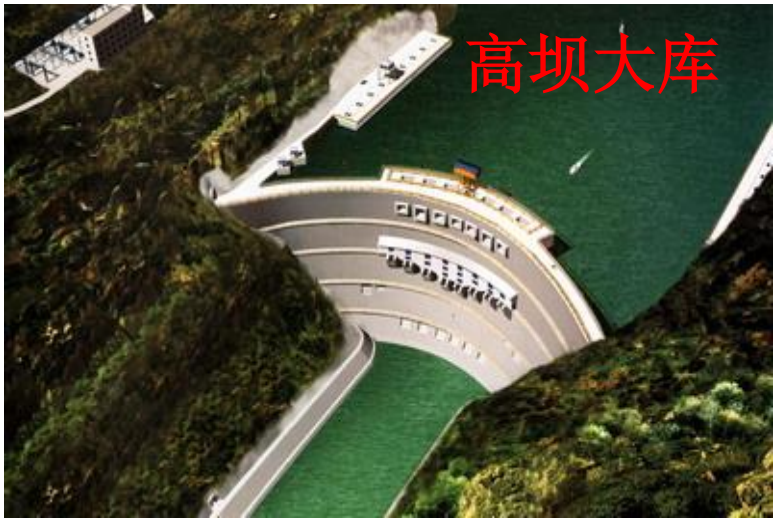
国家中长期科学和技术发展规划纲要
(2006-2020年)
中共中央国务院关于实施科技规划纲要
增强自主创新能力的决定

- 我国是水利大国，也是水电工程大国
- 水利水电工程安全事关经济、社会可持续发展

溃坝、决堤等是国家重大自然灾害监测与防御的重要内容--《国家中长期科学和技术发展规划纲要》（2006-2020）

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 水利水电工程无一例外涉及渗流控制



# 第三节　土石坝的渗流分析

## 渗流控制是水利水电工程安全的关键

- 我国已建水库8.7万座，病险水库达3.7万座，50%以上属于渗透稳定问题
- 国内外土石坝事故的40%以上、国内外52座拱坝安全事故中的15.4%与渗流作用有关
- 98’特大洪水期间，长江堤防险情，60～70%与管涌有关
- 90%以上的滑坡与渗流作用有关

美国Teton土坝因渗透破坏导致溃决

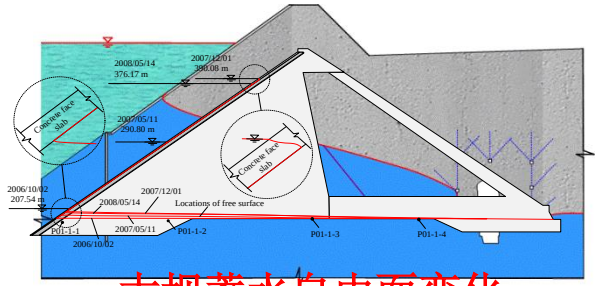
意大利瓦依昂高拱坝

# 工程应用与推广

## 1 水布垭面板堆石坝

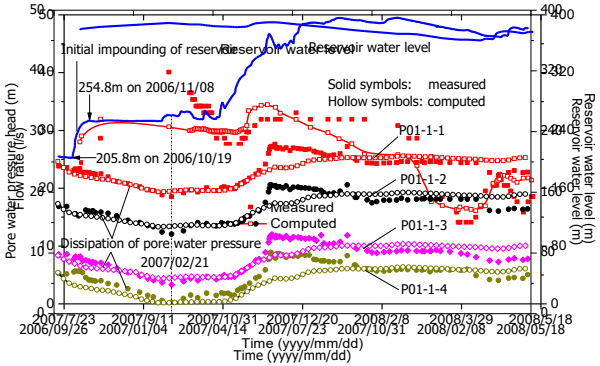
- 水布垭工程是世界上已建最高面板堆石坝，最大坝高233m，面板的防渗性能和大坝渗流控制效果事关工程成败

- 关键难题：一期面板开裂后防渗性能评估、厂坝区防渗排水系统渗控效果评价
- 研究工作：2003~2008年，理论分析、渗流数值模拟、渗流监测及反馈分析
- 贡献：渗控全过程跟踪反馈，蓄水期厂坝区防渗排水系统性能评估，为大坝蓄水、安全运行及水库调度提供了重要依据
- 效益：综合经济效益6000万元，成果在类似水电工程建设得到全面推广应用




大坝蓄水自由面变化

厂房区蓄水自由面变化



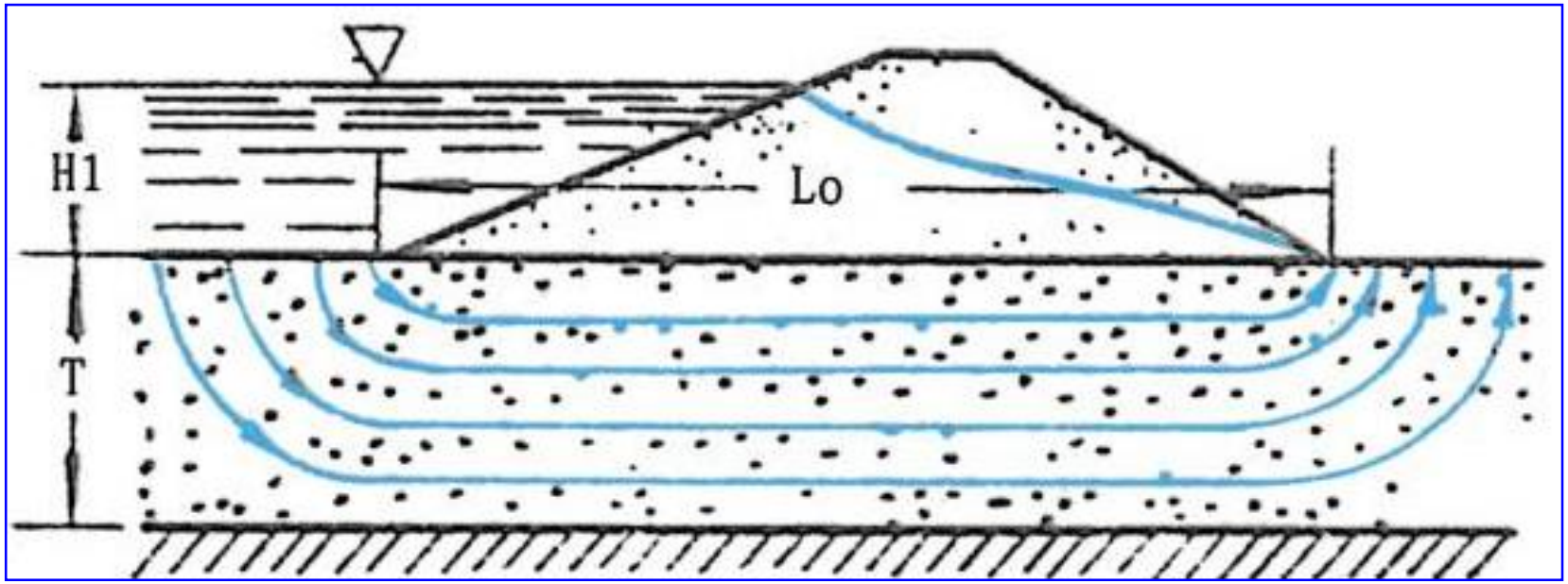

大坝渗量水位实测与计算对比

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 一、渗流分析的任务与方法

❒ **基本概念：**

**水库蓄水后，由于上下游水位差的关系，水流会通过坝体土粒之间的空隙从上游向下游流动**



# 第三节　土石坝的渗流分析

## 一、渗流分析的任务与方法

❒ 渗流分析方法：
(1) 流体力学方法
(2) **水力学方法**
(3) 流网法
(4) 试验法

### (1) 流体力学方法

满足达西定律，渗流区内任一点势函数满足拉普拉斯方程：

$$k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0$$

$k_x$，$k_y$——分别为$x$，$y$方向的渗透系数强度

- 对于简单的边界条件，上述方程有解析解
- 对于复杂边界条件，需借助**数值方法**

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 一、渗流分析的任务与方法

### (2) 水力学方法

➢ **基本假设：**

- 渗流是**层流**
- 渗流是**连续水流**
- 渗流是**稳定渐变流**：同一铅直过水断面上的渗透坡降和流速是常数
- 坝体材料为均质**各向同性** ➡ $k_x = k_y$
- 应用**达西定律**，并假定任一铅直过水断面内各点的渗透坡降相等，对不透水地基上的矩形土体，流过断面上的平均流速为（见下页）

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 一、渗流分析的任务与方法

### （2）水力学方法

断面平均流速：$v_x = -k\dfrac{dy}{dx}$

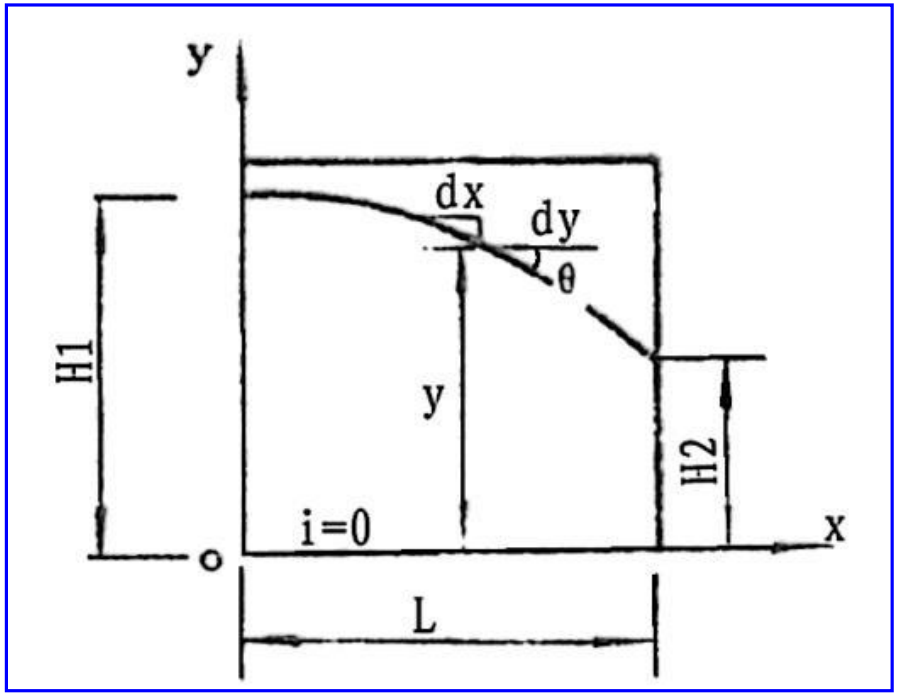
单宽流量：$q = v \cdot y = -ky\dfrac{dy}{dx}$

自上游向下游积分：

$$\int_0^L q dx = \int_{H_1}^{H_2} -ky dy$$

$$qL = -\frac{1}{2}k\left(H_2^2 - H_1^2\right)$$

$$q = \frac{k\left(H_1^2 - H_2^2\right)}{2L}$$




不透水地基上矩形土体的渗流计算图

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 一、渗流分析的任务与方法

### （2）水力学方法

自上游向区域中某点($x$，$y$)积分，得浸润线方程：

$$y=\sqrt{H_1^2-\frac{2q}{k}x}$$

在整个渗流区域积分得到单宽流量：

$$q=\frac{1}{2L}k(H_1^2-H_2^2)$$

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 一、渗流分析的任务与方法

### (2) 水力学方法

- 适用条件：
  - 只适用于边界条件简单规则的情况
  - 只适用于土壤均质各向同性的情况
  - 只适用于稳定渗流情况
  - 只能得出渗流断面的平均流速和平均渗透坡降，不能得出渗流场中任意一点的渗流要素

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 一、渗流分析的任务与方法

### (3) 流网法

- 凭借经验手工绘制流网无法保证准确性，对于复杂的土石坝根本无法绘制
- 根据有限元法计算结果和电模拟试验结果，可以绘制比较精确的流网。了解流网的特性对于渗流分析有所帮助：
  - 根据流网分布，可以快速找出可能发生渗透变形的部位并计算出渗透坡降
  - 根据流网可以计算出不同部位的单宽渗流量

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

虽然前面提到渗流分析水力学方法存在很多缺陷，但对于坝体结构简单、地基土层单一的中小型土石坝，水力学方法也还有一定应用价值

典型情况
- （1）不透水地基上均质土坝的渗流计算
- （2）有限深透水地基上土坝的渗流计算
- （3）土坝总渗流量的计算

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

### （1）不透水地基上均质土坝的渗流计算

绝对不透水地基是不存在的。但是如果$k_f < k/100$可认为地基不透水

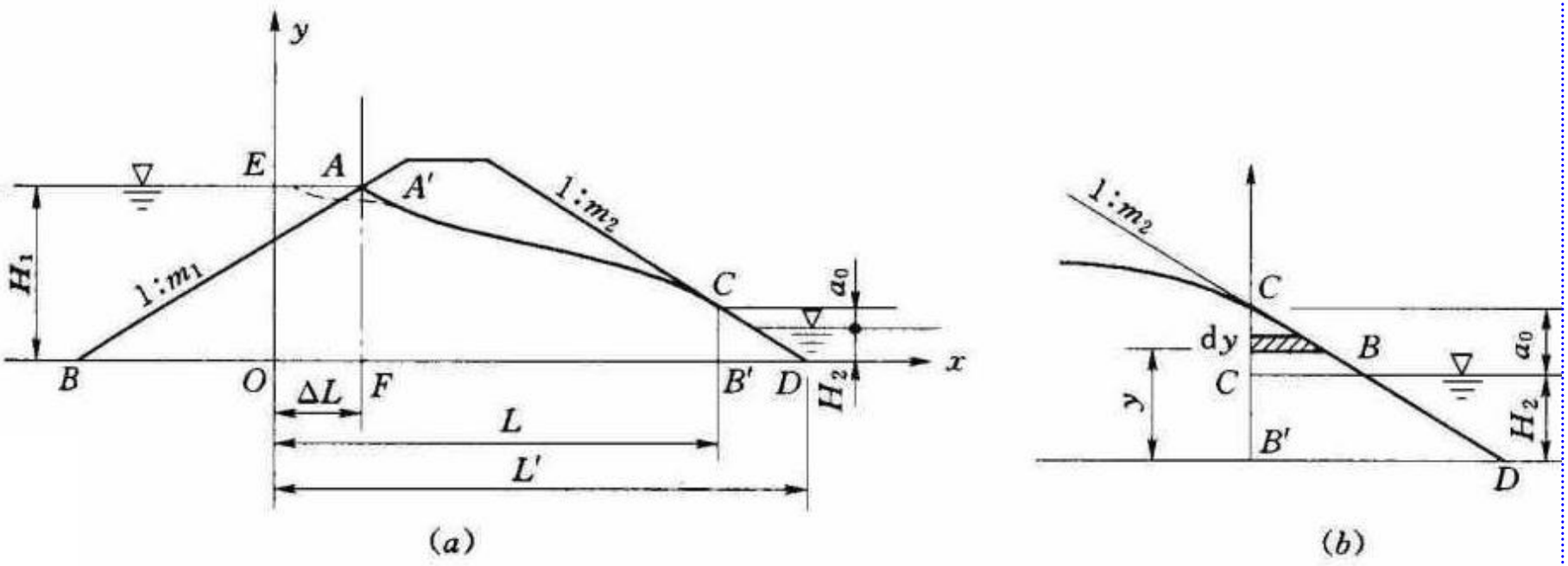



图 3－17　不透水地基无排水均质土石坝渗流计算图

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

### (1) 不透水地基上均质土坝的渗流计算

- 下游无排水或只设贴坡排水情况
  - 计算时将土坝剖面分为3段，即巴洛夫斯基-达赫勒（三段法）：①上游三角形段；②下游三角形段；③中间段
  - 根据电模拟试验结果，上游三角形可用高为$H_1$、宽为$\Delta L$的矩形来代替，矩形与三角形通过相同的流量$q$、消耗同样的水头。虚拟（等效）矩形宽度按下面的公式计算：

$$\Delta L = m_1 H_1 / (1 + 2m_1)$$

➡ 上游坝坡较陡时($m_1$<2)

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

### (1) 不透水地基上均质土坝的渗流计算

- 下游无排水或只设贴坡排水情况

坝内渗流区域就被分成*OECB′*和*B′CD*两段。上段为矩形土体，任一断面处单宽渗流量公式：

$$q_1 = k\left[H_1^2 - (\alpha_0 + H_2)^2\right] / 2L$$

下段三角形*CB′D* 中，以下游水面为界，分为水上部分和水下部分两个区，上、下两区求和得：

$$q_2 = k\frac{\alpha_0}{m_2}\left[1 + \ln\frac{\alpha_0 + H_2}{\alpha_0}\right]$$

# 第三节　土石坝的渗流分析

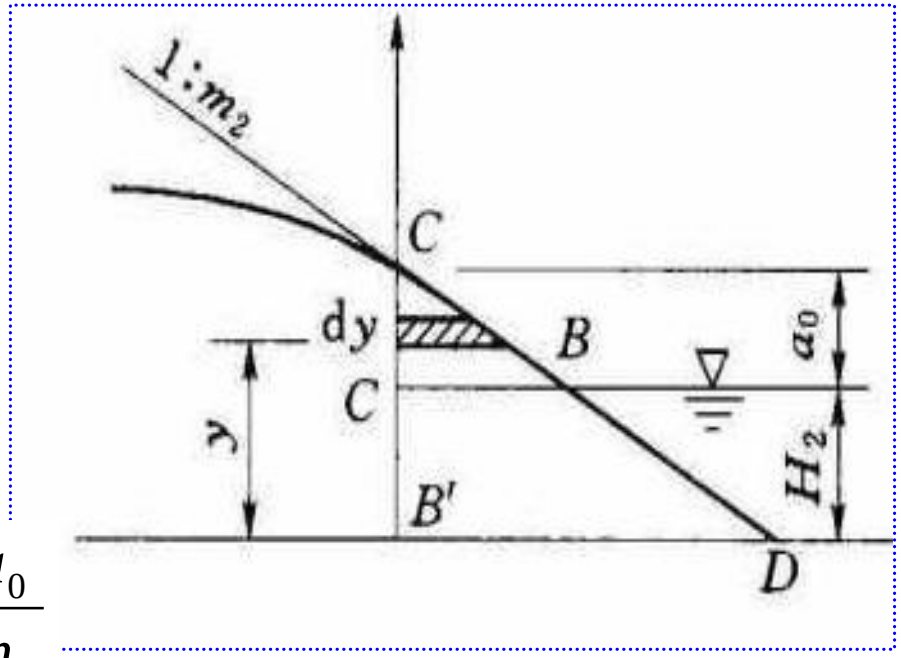
## ❒ 下游无排水或只设贴坡排水情况

➢ **水上部分渗流量：**

$$dq_1 = kJ_1 dy$$

$$= k\frac{(H_2 + a_0) - y}{m_2(H_2 + a_0 - y)}dy$$

$$= \frac{k}{m_2}dy$$




$$q_1 = \int_{H_2}^{H_2+a_0} dq = \frac{k}{m_2}\int_{H_2}^{H_2+a_0} dy = k\frac{a_0}{m_2}$$

➢ **水下部分渗流量：**

$$dq_2 = kJ_2 dy = k\frac{(H_2 + a_0) - H_2}{m_2(H_2 + a_0 - y)}dy = k\frac{a_0}{m_2}\frac{1}{(H_2 + a_0 - y)}dy$$

$$q_2 = k\frac{a_0}{m_2}\int_0^{H_2}\frac{dy}{(H_2 + a_0 - y)} = -k\frac{a_0}{m_2}\int_0^{H_2}\frac{d(H_2 + a_0 - y)}{(H_2 + a_0 - y)} = k\frac{a_0}{m_2}\ln\frac{H_2 + a_0}{a_0}$$

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

### (1) 不透水地基上均质土坝的渗流计算

- 下游无排水或只设贴坡排水情况

  - 根据渗流连续条件，$q_1=q_2=q$，联立求解以上 (3-15)、(3-16) 式，即可求出$a_0$及$q$值。代入公式(3-9)则可求得浸润线方程：

$$y^2=[H_1^2-(H_2+a_0)^2]\frac{x}{L}+(H_2+a_0)^2$$

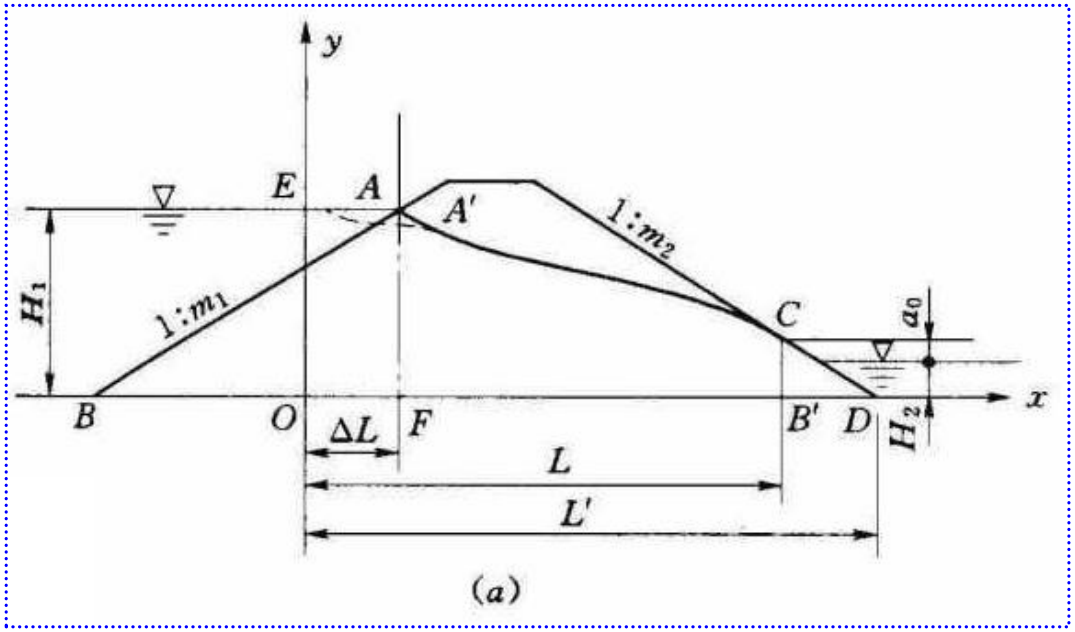
- $a_0$与渗透系数无关，只取决于上下游水位和坝的轮廓尺寸
- 上式表明，对于不透水地基上的均质坝，浸润线的形状、位置与渗透系数无关

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

### (1) 不透水地基上均质土坝的渗流计算

- 下游无排水或只设贴坡排水情况
  - 由于该浸润线是按上游面简化为铅直面求得的。故上游坝面附近的浸润线还需作适当修正：自$A$点作与坝坡$AB$正交的平滑曲线，曲线下端与计算求得的浸润线相切于$A'$点，$AA'C$即为所求的坝体浸润线



# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

### (1) 不透水地基上均质土坝的渗流计算

❒ 下游有褥垫式排水或棱体排水情况

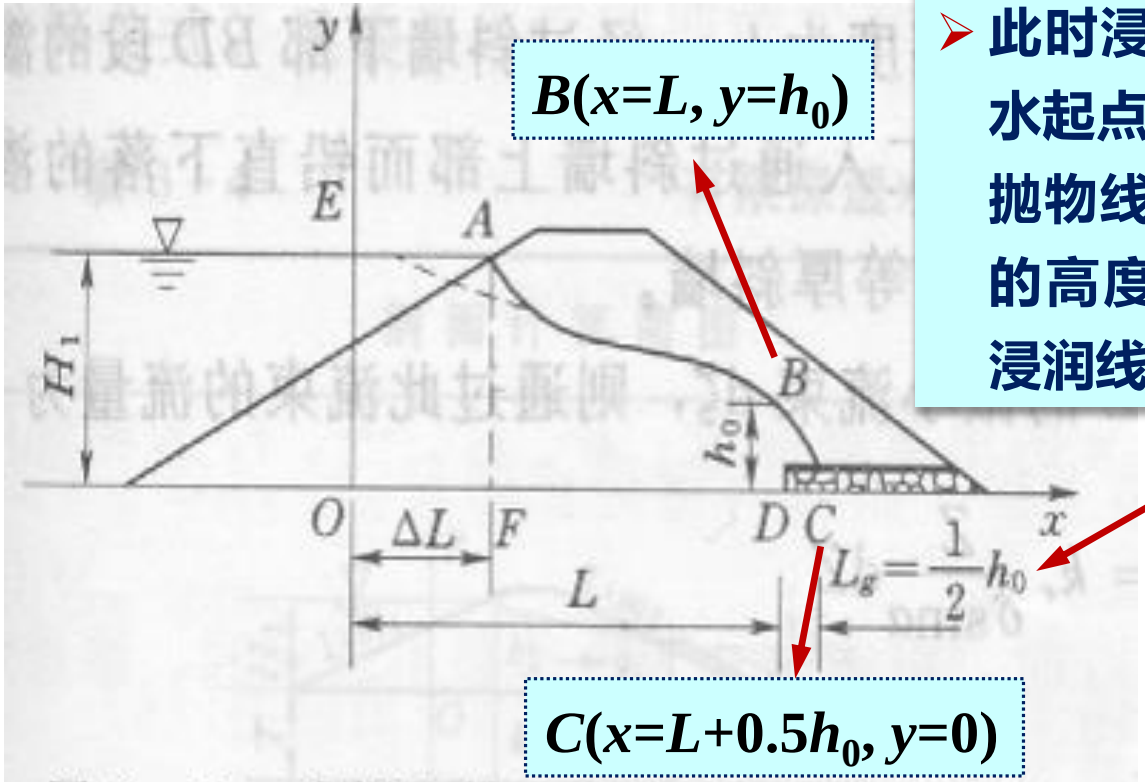



图 3－18　有褥垫排水的均质土坝渗流计算

➢ 此时浸润线可近似看作以排水起点$D$为焦点且通过$E$点的抛物线。排水起点处浸润线的高度为$h_0$，排水起点$D$至浸润线与$x$轴交点$C$的距离

抛物线方程

$$y=\sqrt{H_1^2-\frac{2q}{k}x}$$

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

### (1) 不透水地基上均质土坝的渗流计算

- 下游有褥垫式排水或棱体排水情况

➢ 浸润线方程：

$$L = \frac{y^2 - h_0^2}{2h_0} + x$$

➢ 将$E$点坐标$(0,H_1)$代入浸润线方程求得：

$$h_0 = \sqrt{L^2 + H_1^2} - L$$

➢ 单宽渗流量公式：

$$q = k(H_1^2 - h_0^2)/2L$$

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

### (1) 不透水地基上均质土坝的渗流计算

❒ 心墙土坝的渗流计算

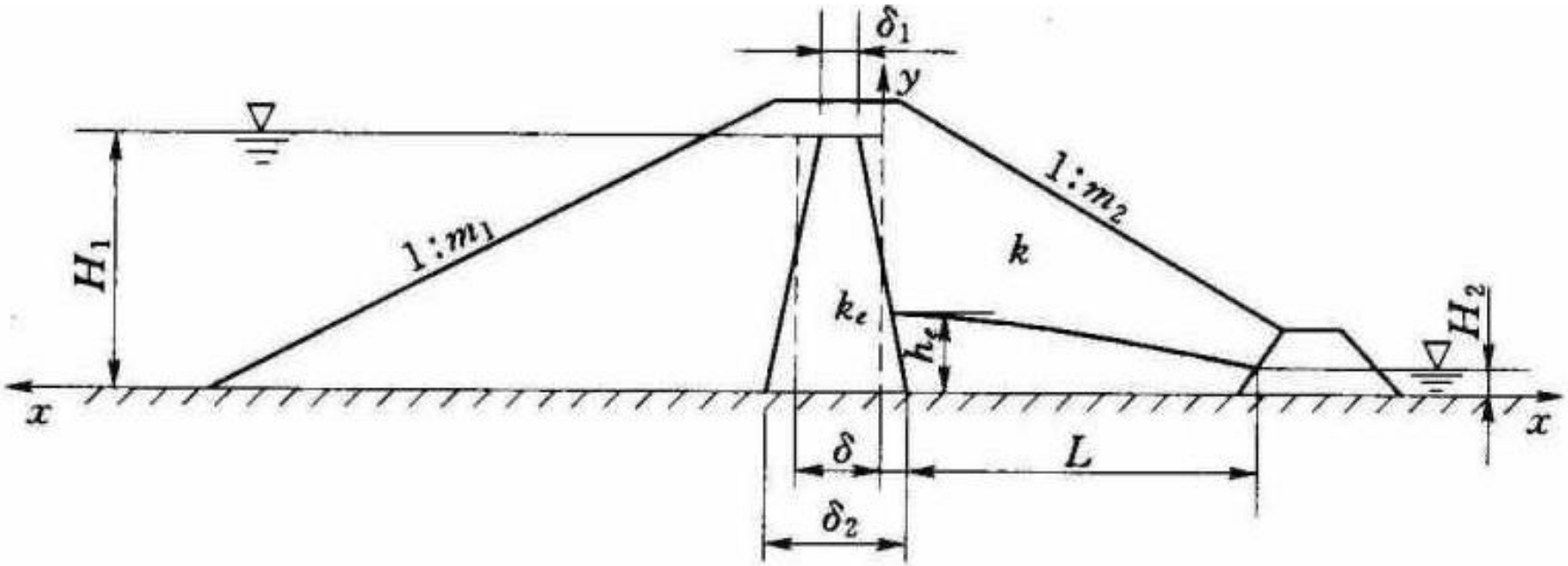



图 3－20　不透水地基上心墙土坝的渗流计算简图

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

### (1) 不透水地基上均质土坝的渗流计算

❒ **心墙土坝的渗流计算**

- 将心墙简化成等厚矩形断面，厚度为$0.5(\delta_1+\delta_2)$ 。心墙的渗透系数$k_e$远小于坝壳的渗透系数$k$，浸润线在心墙中形成很大跌落。假定心墙上游浸润线位置与水库水位相同，心墙下游浸润线高度为$h_e$。假定浸润线逸出点在下游水面与堆石内坡的交点处。

- 心墙段单位坝长渗流量：

$$q = k_e \frac{H_1^2 - h_e^2}{2\delta}$$

- 通过单位坝长下游坝壳的渗流量：

$$q = k \frac{h_e^2 - H_2^2}{2L} \Rightarrow y^2 = h_e^2 - \frac{2q}{k} x$$

## 二、水力学方法计算的典型情况

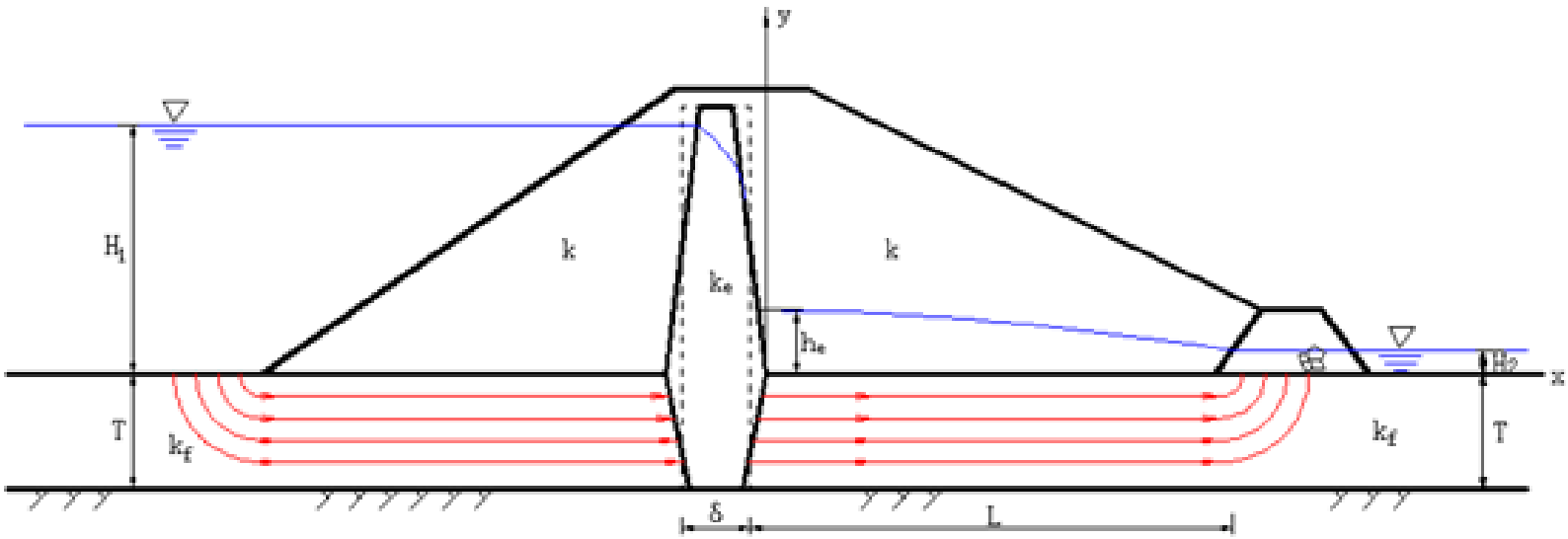
### （2）有限深透水地基上土坝的渗流计算

- 在计算有限深透水地基上的坝体渗流时，为简化计算，坝体与地基分开计算
- 计算坝体渗流时，可认为地基不透水，坝体渗流计算方法与前述不透水地基相同
- 计算地基渗流时，认为坝体不透水，按有压渗流计算
- 两部分渗流量之和即为该剖面单宽总渗流量

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

### （2）有限深透水地基上土坝的渗流计算




建造在厚度为$T$的透水地基上，心墙、坝壳、地基的渗透系数分别为$k_e$、$k$、$k_f$。　设心墙下游坡剩余水头为$h_e$，心墙等效矩形的宽度为$\delta$，则通过心墙的渗流量为：

$$q = k_e \frac{(H_1 + T)^2 - (h_e + T)^2}{2\delta}$$

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

### （2）有限深透水地基上土坝的渗流计算

- 通过下游坝壳的渗流量：

$$q_1 = k\frac{h_e^2 - H_2^2}{2L}$$

- 通过下游坝基的渗流量（近似按有压流计算）：

$$q_2 = k_f JT = k_f \frac{h_e - H_2}{L + 0.44T}T$$

$$q = q_1 + q_2 = k\frac{h_e^2 - H_2^2}{2L} + k_f \frac{h_e - H_2}{L + 0.44T}T$$

$h_e$ 和 $q$

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 二、水力学方法计算的典型情况

### (3) 土坝总渗流量的计算

- 根据地形、地质变化及坝体防渗、排水的情况，把土坝沿长度方向分为若干段，计算出每个断面的单宽流量，然后计算全坝的总渗流量，即：

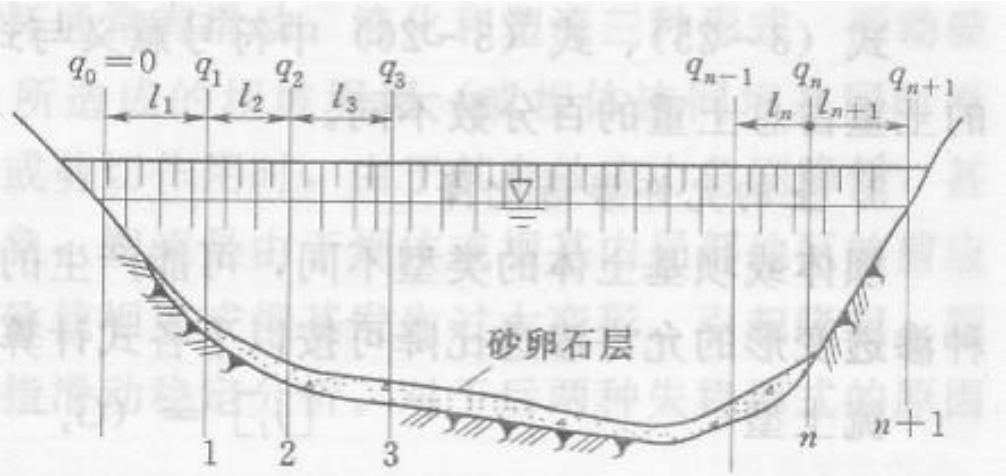


图 3－22　土石坝总渗流量计算简图

$$Q=\frac{1}{2}[q_1l_1+(q_1+q_2)l_2+\cdots+(q_{n-1}+q_n)l_n+q_nl_{n+1}]$$

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 三、土坝的渗流稳定分析

- 渗透变形

  土石坝及地基中的渗流，由于其机械或化学作用，可能使土体产生局部破坏的现象

- 渗流稳定分析的主要任务
  - 鉴别土的渗透变形形式
  - 判断坝体和坝基土体的渗透稳定性
  - 采取有效的控制渗透变形的措施

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 三、土坝的渗流稳定分析

### ❒ 渗透变形的形式

➢ 管涌

- **机械管涌**：无粘性土中的**细颗粒**在渗流作用下，从骨架孔隙通道流失的现象
- **化学管涌**：土体中的盐类等被渗流溶解带走的现象

➢ 流土

由于粘性土粒间有较强的胶结作用，在渗流作用下，局部土体表面隆起、顶穿或粗细颗粒同时浮动而流失的现象

## 三、土坝的渗流稳定分析

### ❒ 渗透变形的形式

- **接触冲刷**

  当渗流沿**两种渗透系数不同土层**的接触面流动时，将细颗粒沿层面带走的现象

- **接触流失**

  渗流方向**垂直于渗透系数相差较大**的两相邻土层面，可能产生接触管涌或接触流土的总称。接触管涌是指将无粘性土的细颗粒带入相邻粗颗粒土层的现象

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 三、土坝的渗流稳定分析

- 渗透变形的形式判别

  渗透变形形式的判别可参照GB50287-2016《水利水电工程地质勘察规范》规定的方法进行

  - 管涌与流土的判别。以土体中细颗粒的含量$p_c$作为判别依据
  - 接触冲刷的判别。对双层结构地基，以两层土的不均匀系数和粗细粒径的比值作为判别依据
  - 接触流失的判别。土层的不均匀系数以及粗细粒径的比值作为判别依据

# 第三节　土石坝的渗流分析

## 三、土坝的渗流稳定分析

- 土的允许渗透比降

不同的土体的类型，产生不同的渗透变形类型。不同的渗透变形类型用不同的允许渗透比降计算式。当**有试验资料**时：

- 流土型用式（3-27）
- 管涌型或过渡型用式（3-28）或式（3-29）
- 对于无粘性土，当**无试验资料**时，各种渗透变形的允许渗透比降可由表3-5中选用经验值