

# 水工建筑物

专    业：港口海岸及治河工程

任课老师：李典庆 冯晓波

武汉大学水利水电学院

2021



# 水工建筑物

---

0

绪 论

---

1

第一章 重力坝

---

2

第二章 拱坝

---

3

第三章 土石坝

---

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

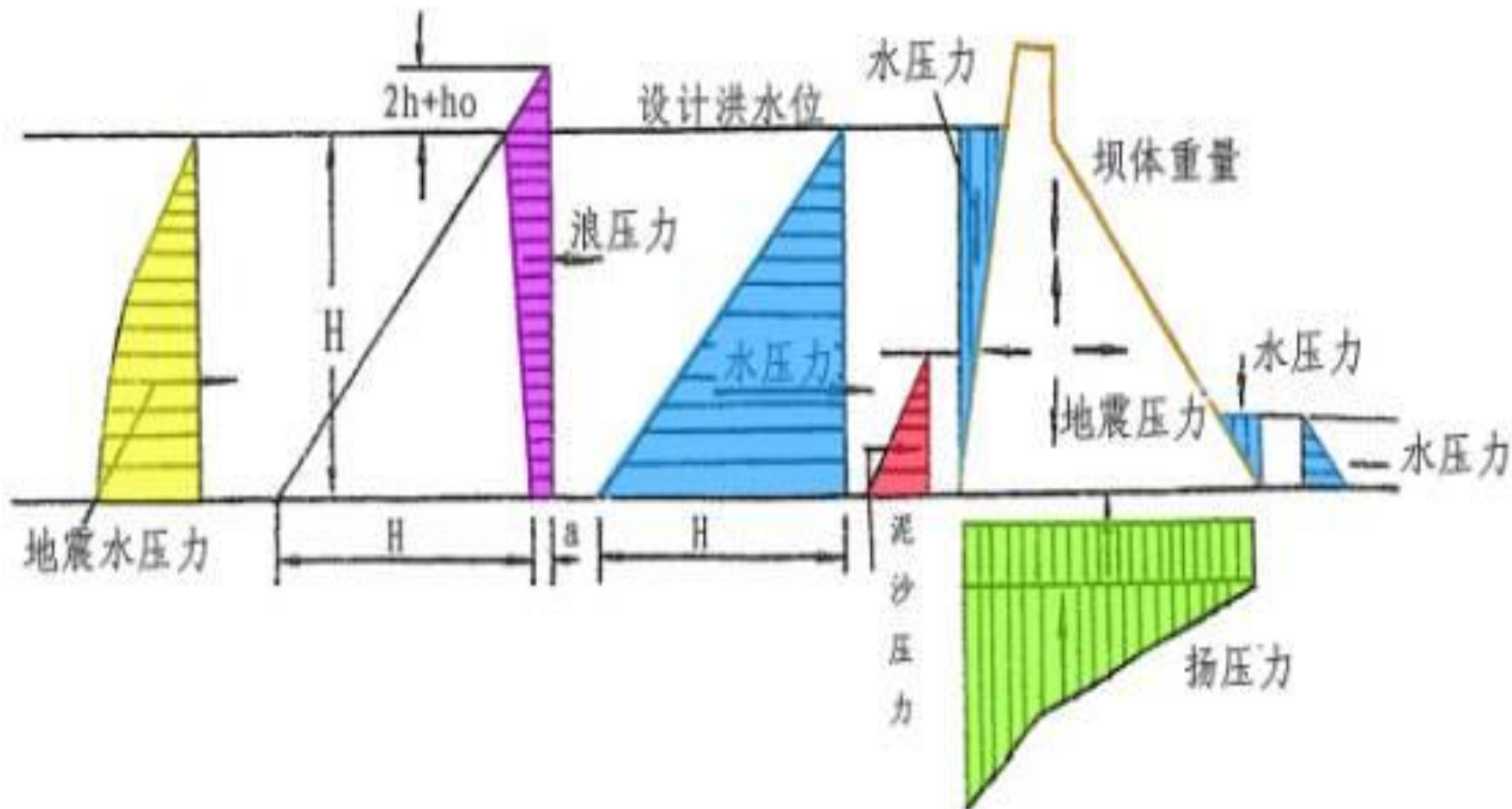
---

### 一、重力坝的荷载

1. 自重（包括坝体及坝上**永久性**设备）
2. 静止水压力（上、下游坝面，水平、竖直方向）
3. 动水压力（对溢流坝段）
4. 扬压力
5. 淤沙压力
6. 浪压力
7. 冰压力
8. 地震荷载
9. 其他荷载

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载



重力坝上作用力示意图

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 一、重力坝的荷载

#### 1. 自重

➤ 坝体自重( $W$ )按坝体**结构尺寸**和**材料容重**计算:

$$W = \gamma_c V$$

- 式中:  $\gamma_c$  — 坝体材料容重, 即  $\rho_c g$ 。如混凝土  $\gamma_c = 23.0 \sim 23.5 \text{ kN/m}^3$ ; 浆砌石  $\gamma_c = 21.5 \sim 23.5 \text{ kN/m}^3$

➤ 永久性设备自重: 闸门、**固定**启闭机等

- 车辆、**活动**启门机不计入

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 一、重力坝的荷载

#### 2. 静水压力

$$P_W = \gamma H$$

- 作用于单位坝长上游坝面静水压力的**水平分力**:

$$P_{ZH} = \frac{1}{2} \gamma H_1^2$$

- 作用于单位坝长上游坝面静水压力的**铅直分力**:

$$P_{ZV} = \frac{1}{2} \gamma n H_1^2$$

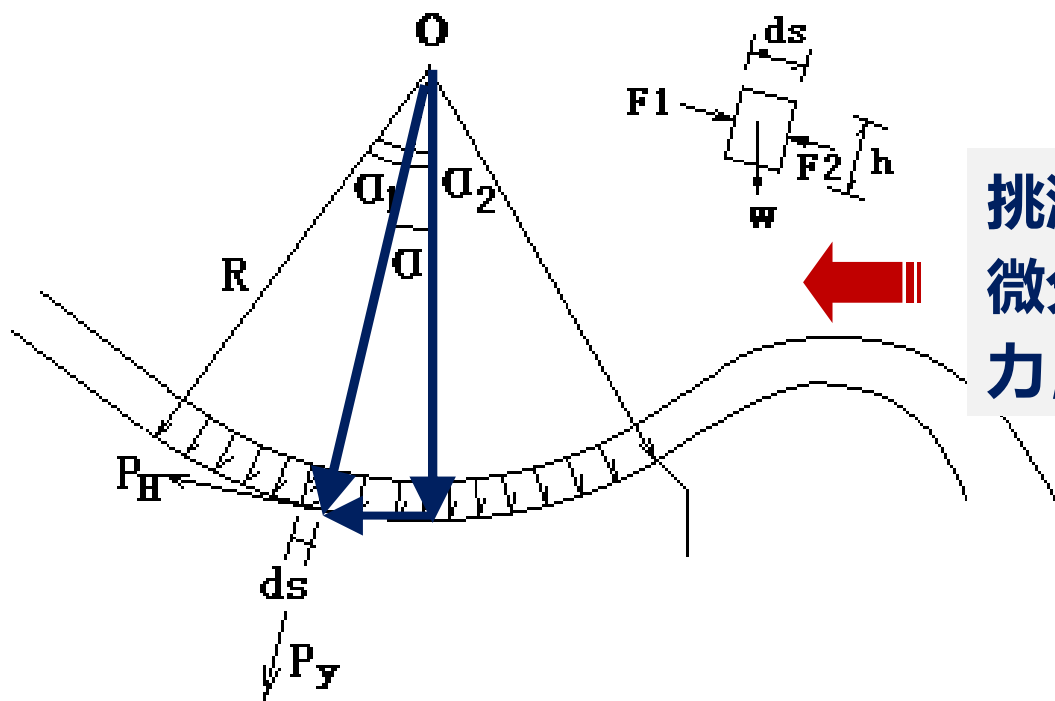
- 式中:  $\gamma$  — 水体容重;  $n$  — 坡度系数, 即  $\tan\varphi$

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 3. 动水压力

动水压力是指水流流经建筑物表面时，由于**流速方向和大**  
**小**发生改变而对建筑物产生的作用力，垂直于建筑物表面，  
多发生于**溢流坝面**



挑流鼻坎反弧段：忽略  
微分体自重和侧面水压  
力，仅计离心力

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 3. 动水压力

➤ 微分体质量  $m = \frac{\gamma h ds}{g}$

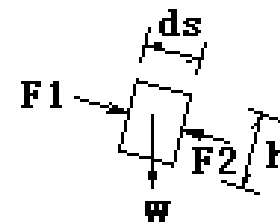
➤ 微分体离心力  $p = \frac{mv^2}{R} = \frac{\gamma h v^2 ds}{gR}$

➤ 单宽流量  $q = v \times h \times 1 = vh$

$$\frac{ds}{R} = \frac{R d\alpha}{R} = d\alpha$$

• 式中：  $\gamma$  — 水体容重 (kN/m<sup>3</sup>)

$v$  — 反弧段的平均流速 (m/s)





## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 3. 动水压力

➤ 可将微分体离心力表达为：

$$p = \frac{\gamma h v^2 ds}{gR} = \frac{\gamma h v^2 d\alpha}{g} = \frac{\gamma q v d\alpha}{g}$$

➤ 水平分力（设顺时针方向为正）：

$$\begin{aligned} p_{dx} &= \int_{-\alpha_2}^{\alpha_1} p \sin \alpha d\alpha = \frac{\gamma q}{g} v \int_{-\alpha_2}^{\alpha_1} \sin \alpha d\alpha \\ &= \frac{\gamma q}{g} v (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \end{aligned}$$

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 一、重力坝的荷载

#### 3. 动水压力

➤ 铅直分力（设顺时针方向为正）：

$$\begin{aligned} p_{dy} &= \int_{-\alpha_2}^{\alpha_1} p \cos \alpha d\alpha \\ &= \frac{\gamma q}{g} v \int_{-\alpha_2}^{\alpha_1} \cos \alpha d\alpha \\ &= \frac{\gamma q}{g} v (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1) \end{aligned}$$

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 一、重力坝的荷载

#### 4. 扬压力

##### 渗透水压力

##### ➤ 产生原因:

重力坝挡水后，在水位差作用下，上游水将通过**坝体的孔隙与坝基裂隙**向下游渗透，渗透水将对坝体和坝基产生渗透水压力

##### ➤ 渗透水压力的特点:

- 同一点上各向压强相等——各向同性
- 垂直于作用面——方向
- 其铅直分力称为扬压力

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 4. 扬压力

##### 4.1 坝底扬压力

包括两部分 { 由下游水深引起的**浮托力**  
由上下游水头差引起的**渗透压力**

- 基岩节理、裂隙等分布规律复杂，渗透水压力的实际分布难以通过理论计算而得
- 通常由经验假定：若坝底面未做任何防渗排水处理，则沿坝底面**直线分布**，即在坝底面沿程渗流水头损失相等

铅直向上的力，减小了作用在地基上的有效压力，降低了抗滑能力，**对坝体抗滑稳定不利！**



措施？

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 一、重力坝的荷载

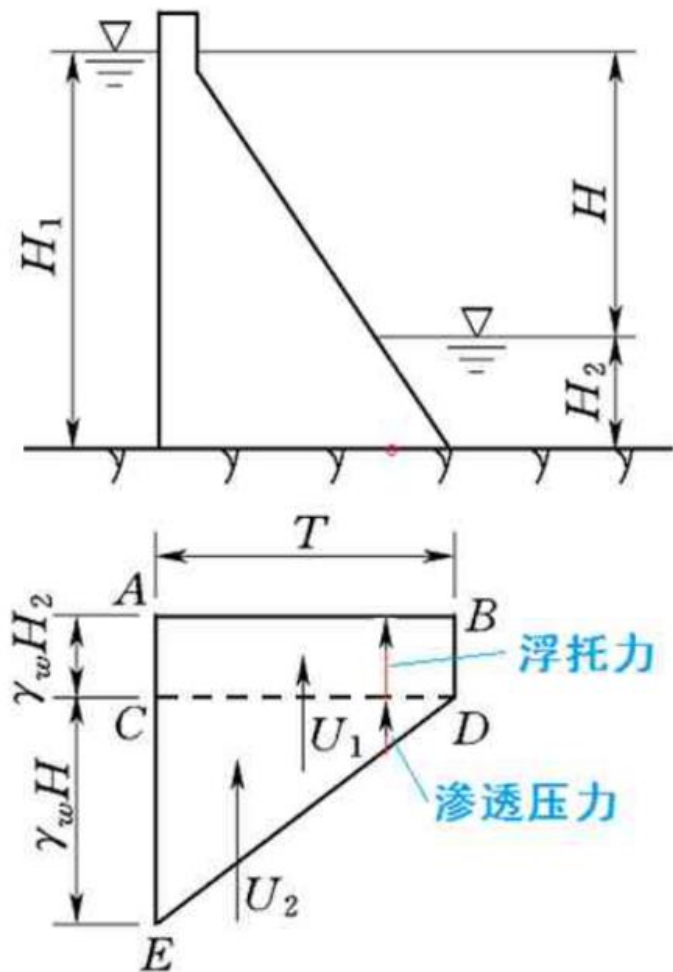
#### 4. 扬压力

##### 4.2 减小扬压力的措施

- **防渗帷幕**：为了减少坝底扬压力 + 坝基渗流量，在坝底靠上游侧的基岩内钻孔，用高压水泥浆灌入孔内，渗入充填岩石节理、裂隙形成的不透水幕墙
- **排水**：为进一步减小扬压力，在防渗帷幕后的基岩钻孔，排除部分透过帷幕的水流

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

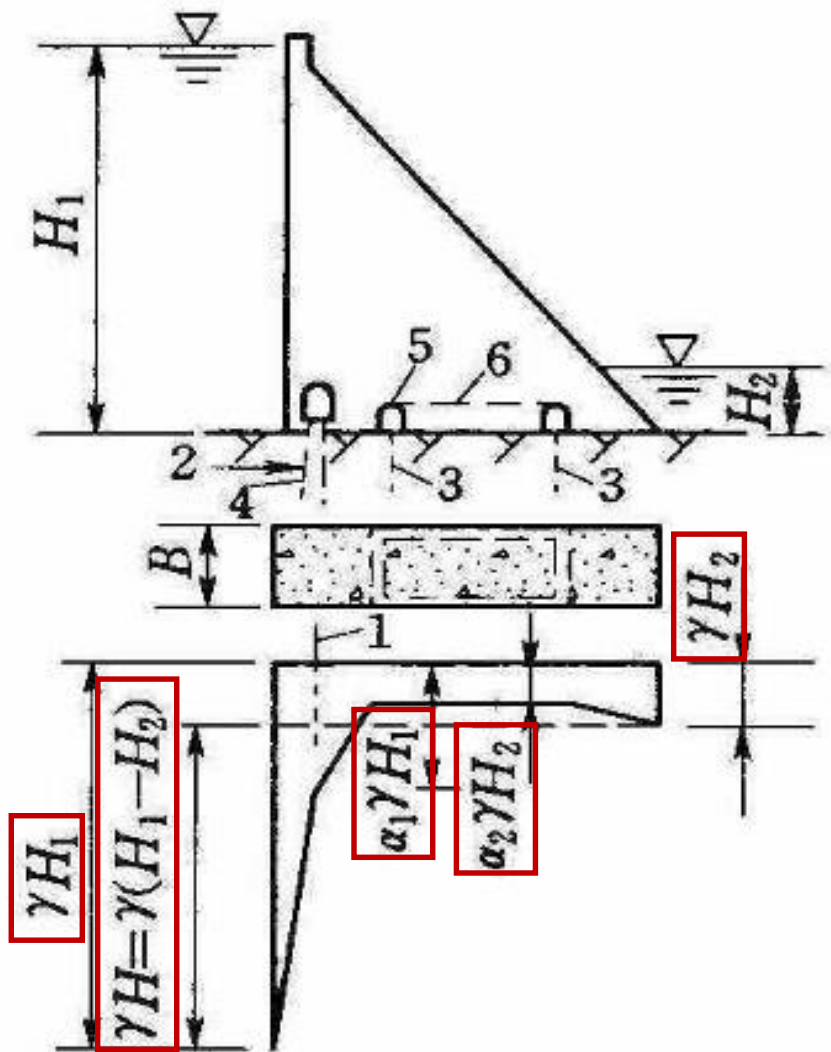


**无防渗排水措施的坝底扬压力分布**

## 有防渗排水措施的坝底扬压力分布

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载



坝基有帷幕和主排水孔幕、2排副排水孔幕，并采取抽排，帷幕后坝基较大范围的渗透压力得到更大释放

$$\alpha_1=0.20$$

$$\alpha_2=0.50$$



## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 一、重力坝的荷载

#### 4. 扬压力

##### □ 关于坝底扬压力的几点说明

##### ➤ 坝底扬压力定义：

坝底面上**铅直向上的渗透压力与浮托力的总和**

##### ➤ 坝基面倾向上游时坝底扬压力计算？

$$W_{\text{扬}} = \frac{(\gamma H_1 + \gamma H_2)}{2} B$$

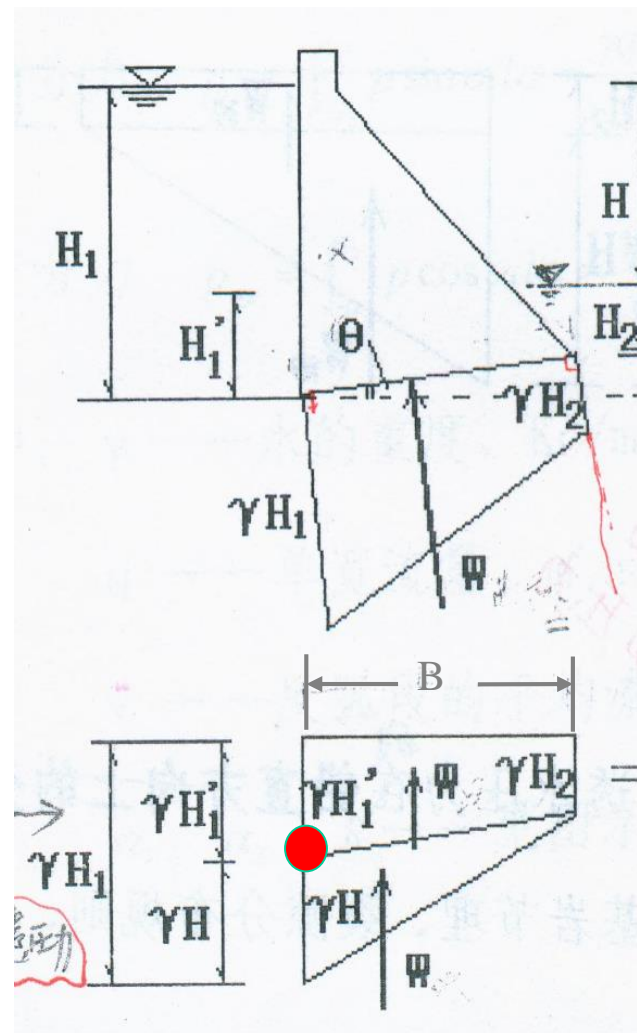
## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### ➤ 坝基面倾向上游时坝底扬压力计算

##### ✓ 简化计算方法：

- (1) 先绘出**坝底水平投影线段**，因渗透水压强在各方向的大小相等，所求扬压力是铅直方向，故在坝踵、坝趾处的水压力强度为 $\gamma H_1$ 、 $\gamma H_2$
- (2) 连接二者底端，可得扬压力分布图
- (3)  $B = L \cos \alpha$ ,  $L$ 为坝底面长度
- (4)  $H_1' = (H_2 + L \sin \alpha)$  计算浮托力



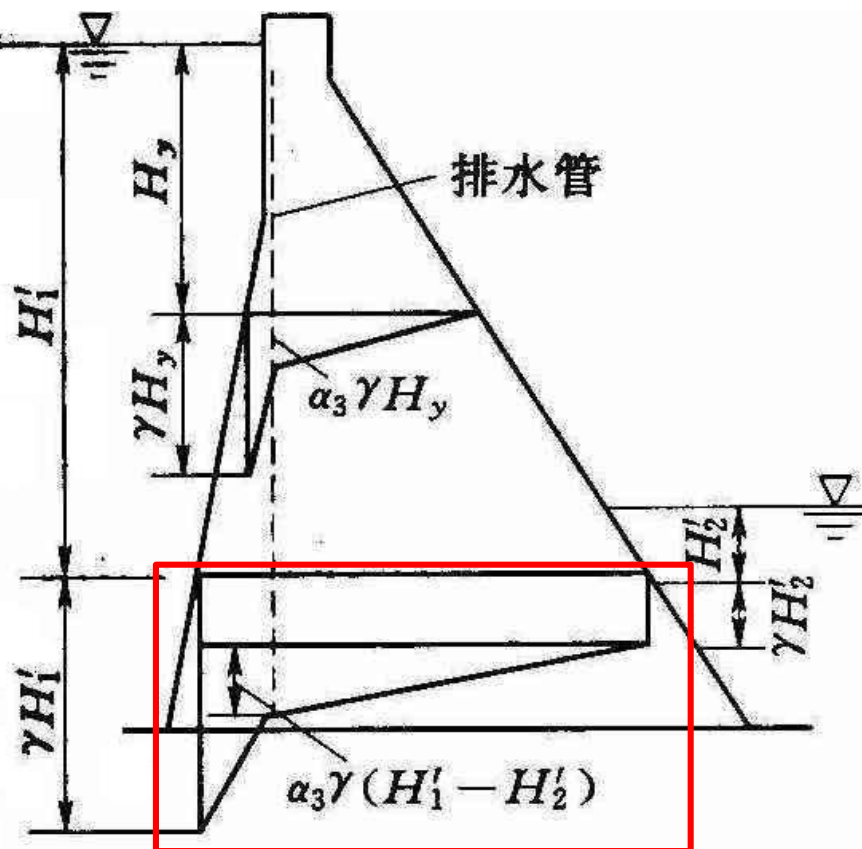
## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 4. 扬压力

##### 4.3 坝体扬压力

- 渗流不仅发  
透性相对比  
只要有足够  
流到下游坝



坝体材料渗  
漏些而已，  
而经过坝体

图 1-6 坝体扬压力计算图

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 5. 泥沙压力

- 挟带淤积面产生
- 按水深再计算

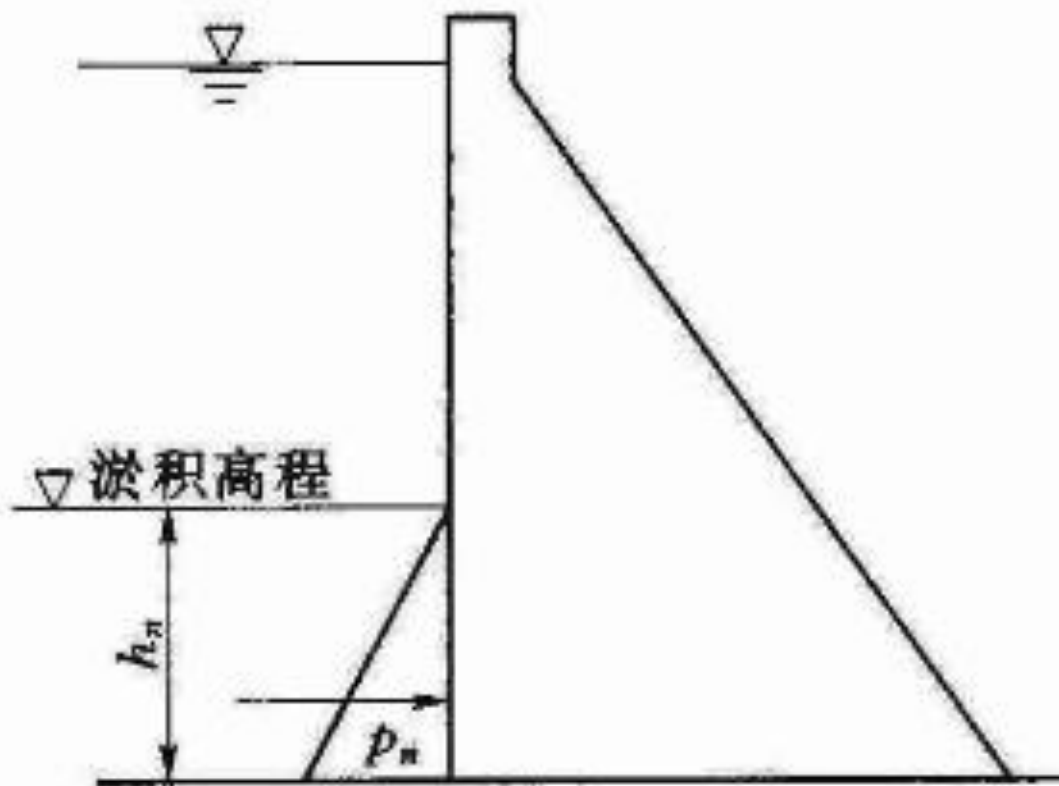


图 1-7 泥沙压力计算图

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 一、重力坝的荷载

#### 5. 泥沙压力

$$p_n = \frac{1}{2} \gamma_n h_n^2 \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \right)$$

$h_n$  — 坝前泥沙淤积厚度

$\gamma_n$  — 淤沙的浮容重，通过试验或工程类比确定

$\varphi_n$  — 淤沙的内摩擦角，根据坝前淤沙的粒径范围和淤积年限，参考类似工程的实测资料确定

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 6. 浪压力

- **成因**：空气流动（风），带动水体，形成波浪，波浪对坝面产生的压力
- **波浪的三要素**：波高、波长、波浪中心线距静水面距离

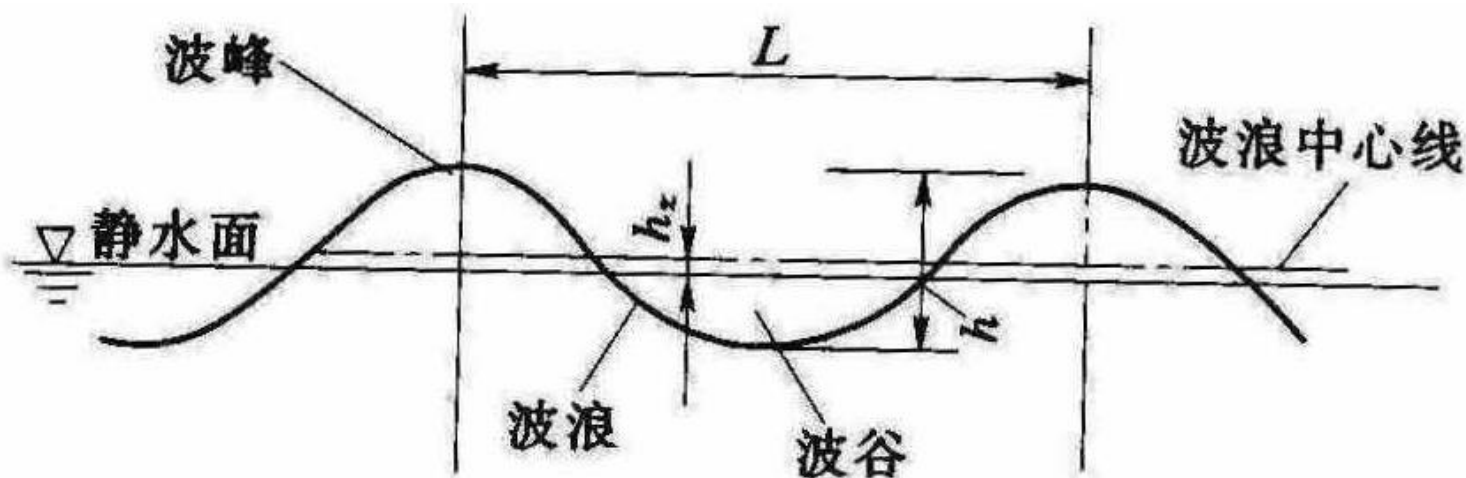


图 1-8 波浪示意图

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 6. 浪压力

- 波峰—波浪在静水位以上部分
  - 波谷—波浪在静水位以下部分
  - 波高—波峰顶与波谷底之间的垂直高差
  - 波长—两相邻波峰顶或波谷底之间的距离
  - 波浪中心线—平分波高的水平线
- (为什么波浪中心线高于静水面？)

由于水的阻力比空气阻力大，因而波峰比较尖锐，波谷比较平坦，这样导致波浪中心线高出静水面原因

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 一、重力坝的荷载

#### 6.1 波浪要素计算

计算公式及其适用条件（重点内容）：

- 对于平原、滨海地区水库，采用**莆田试验站**（位于福建）公式计算波高和波长
- 对于丘陵、平原地区水库，采用**鹤地水库**（位于广东）公式
- 对于内陆狭长水库，采用**官厅水库**（位于河北）公式



## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 6.1 波浪要素计算

##### □ 官厅水库公式

$$\frac{gh_p}{v_0^2} = 0.0076v_0^{-1/12} \left( \frac{gD}{v_0^2} \right)^{1/3}$$

累计频率为 $p$ 的  
波高, 如 $h_{5\%}$

累计频率为 $p$ 的波高, 如 $h_{5\%}$   
对应(20-250)

$$\frac{gL_m}{v_0^2} = 0.331v_0^{-1/2.15} \left( \frac{gD}{v_0^2} \right)^{1/3.75}$$

累计频率波高与平均波高比  
值可查教材表 1-1 得到: 如  
 $h_{5\%}/h_m=1.95$  可得 $h_m$

$$H_m (\text{水域平均水深}) = (H_{\text{设计/校核水位}} - \text{坝底高程}) \times \frac{2}{3}$$

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 6.1 波浪要素计算

➤  $v_0$  为计算风速 (m/s)

- 当浪压力参与基本荷载组合时, 采用**重现期为50年** (频率为2%) 的年最大风速
- 当浪压力参与特殊荷载组合时, 采用**多年平均最大风速**

➤  $D$  为风区长度 (有效吹程, m)

- 当坝前水域较宽, 并且主风向大致迎大坝正面吹来时, 吹程为计算点至对岸的直线距离 (图1-9)

➤ 波浪中心线高出静水位的高度

$$h_z = \frac{\pi h_{1\%}^2}{L_m} \operatorname{cth} \frac{2\pi H}{L_m}$$

静水深(m)

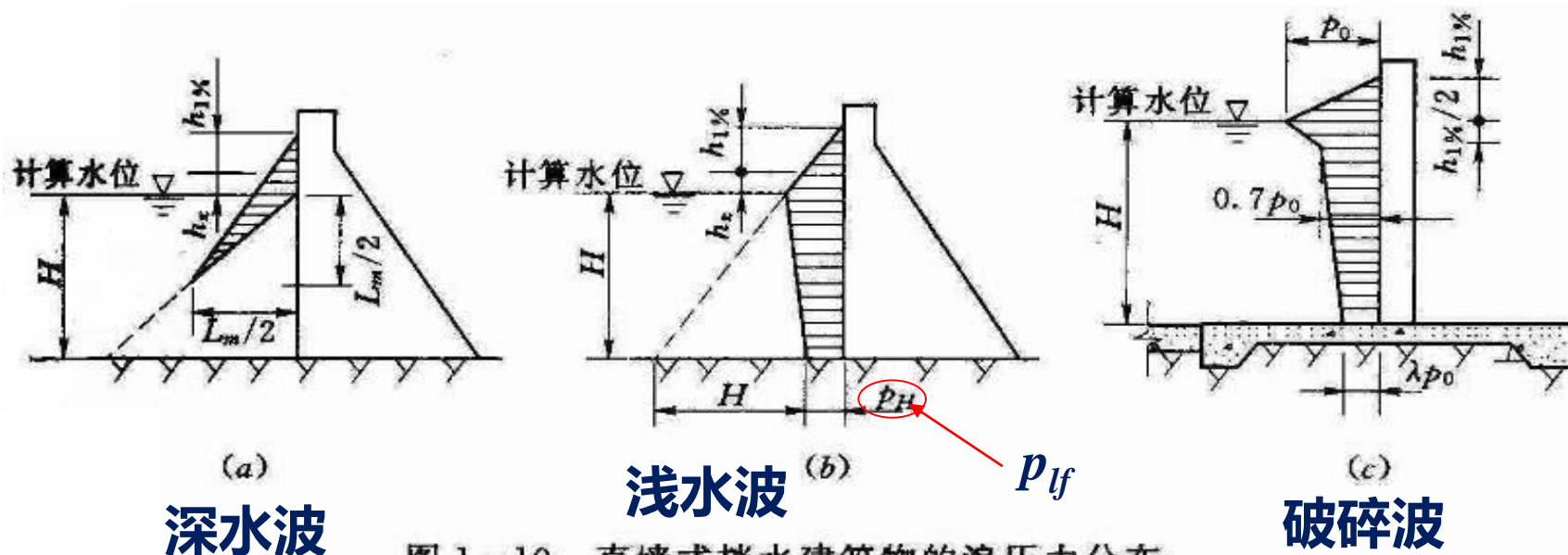
## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 6.2 浪压力计算

□ 浪压力：波浪对建筑物迎水面的冲击力

- 沿水深逐渐减弱
- 根据水深（波浪运动受库底的影响程度）按三种波态计算



## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

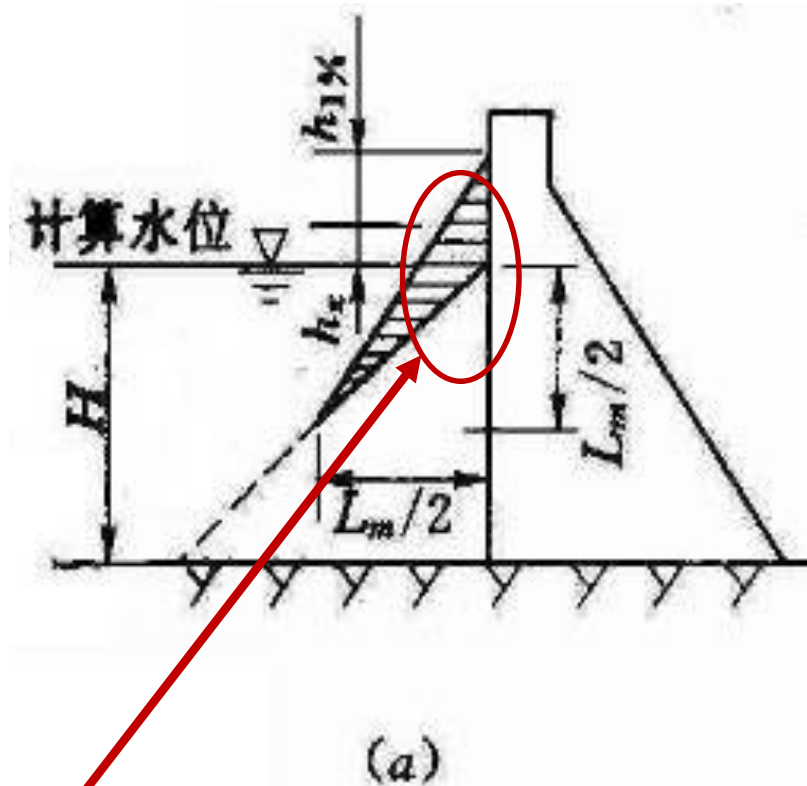
#### 6.2 浪压力计算

➤ 深水波 ( $H_{cr} \leq H$  且  $H \geq L_m/2$ )

坝前有足够水深，波浪不会破碎，静水面  $L_m/2$  下的波浪压强可以不计

其中：  $H_{cr} = \frac{L_m}{4\pi} \ln \frac{L_m + 2\pi h_{1\%}}{L_m - 2\pi h_{1\%}}$

$$P_{wk} = \frac{1}{4} \gamma_w L_m (h_{1\%} + h_z)$$



已知 $h_{5\%}$ 如何计算 $h_{1\%}$ ?

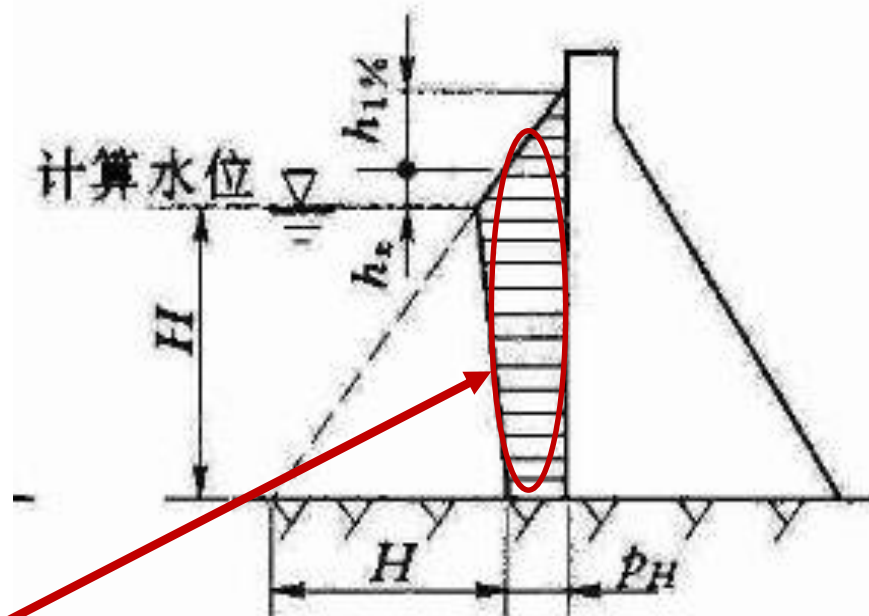
## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 6.2 浪压力计算

➤ 浅水波 ( $H_{cr} \leq H$  且  $H < L_m/2$ )

上游坝踵处的波浪压强不能忽略



$$\begin{aligned} P_{wk} &= \frac{1}{2} (\gamma_w H + p_{lf}) (H + h_z + h_{1\%}) - \frac{1}{2} \gamma_w H^2 \\ &= \frac{1}{2} [(h_{1\%} + h_z) (\gamma_w H + p_{lf}) + H p_{lf}] \end{aligned}$$

其中  $p_{lf}$  为剩余浪压力强度:

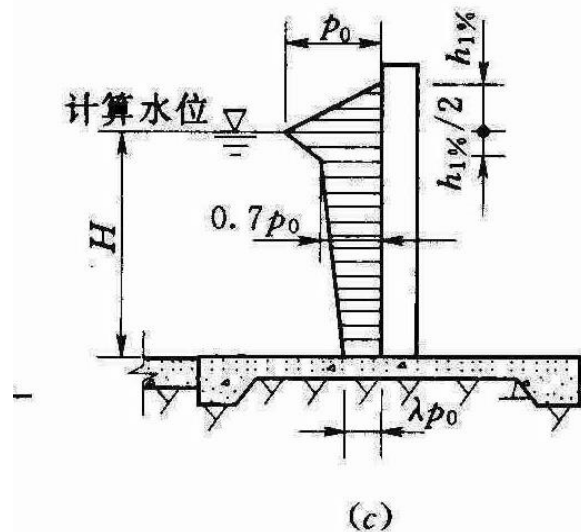
$$p_{lf} = \gamma_w h_{1\%} \operatorname{sech} \frac{2\pi H}{L_m}$$

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 6.2 浪压力计算

##### ➤ 破碎波 ( $H_{cr} > H$ )



两个梯形+三角形面积之和

$$\begin{aligned} P_{wk} &= \frac{(0.7p_0 + \lambda p_0)(H - h_{1\%}/2)}{2} + \frac{(0.7p_0 + p_0) \times h_{1\%}/2}{2} + \frac{1}{2} p_0 \times h_{1\%} \\ &= \frac{(0.7 + \lambda)p_0 H - h_{1\%}/2}{2} - \frac{(0.7 + \lambda)p_0 h_{1\%}}{4} + \frac{3.7 p_0 \times h_{1\%}}{4} \\ &= \frac{(0.7 + \lambda)p_0 H}{2} - \frac{(0.7 + \lambda)p_0 h_{1\%}}{4} + \frac{3.7 p_0 \times h_{1\%}}{4} \\ &= \frac{(0.7 + \lambda)p_0 H}{2} + \frac{3.0 p_0 h_{1\%} - \lambda p_0 h_{1\%}}{4} \\ &= \frac{(0.7 + \lambda)p_0 H}{2} + \frac{p_0}{2} (1.5 - 0.5\lambda) h_{1\%} \end{aligned}$$

式中： $\lambda$ 为建筑物底面的浪压力强度折减系数，当 $H \leq 1.7h_{1\%}$ 时，采用 0.6；当

$H > 1.7h_{1\%}$ 时，采用 0.5。 $p_0$ 为计算水位处的浪压力强度 ( $kN/m^2$ ) 按下式计算：

$$p_0 = K_i \gamma_w h_{1\%} \quad (1-12)$$

式中： $K_i$ 为底坡影响系数，按教材表 1-2 采用。

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 7. 冰压力

两种类型 { 静冰压力  
冻冰压力

##### 7.1 静冰压力

- **成因**：寒冷地区，水库表面将结冰，当气温升高时，冰层膨胀，对建筑物产生的压力
- **大小**：冰层厚度 + 开始升温时的气温 + 温升率。  
规范建议静冰压力按表1-3取值

##### 7.2 动冰压力

- 当冰破碎后，受风和水流的作用而漂流，冰块撞击在坝面或闸墩上时将产生动冰压力
- SL744-2016 《水工建筑物荷载设计规范》
- SL211-2006 《水工建筑物抗冰冻设计规范》

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 8. 地震荷载

□ 在地震区建坝，应考虑地震荷载的影响

多种形式 { 地震惯性力  
地震动水压力  
地震动土压力

注：地震对扬压力、泥沙压力的影响一般不予考虑

□ 描述地震大小强弱的标准：震级 + 地震烈度

震级：根据地震发生时，地球内部释放的能量大小划分的，6级以上产生较大破坏

地震烈度：根据对该地区的破坏程度划分的，最高烈度为12度



## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 8. 地震荷载（震级 VS 地震烈度）

##### ➤ 地震按震级大小的分类情况

- 弱震：震级小于3级的地震；
- 有感地震：震级等于或大于3级、小于或等于4.5级的地震  
中强震：震级大于4.5级，小于6级的地震；（如彝良地震）
- 强震：震级等于或大于6级的地震（如玉树地震）

##### ➤ 地震荷载大小（设计值）与建筑物所在地区的地震烈度有关

- 基本烈度：未来50年内在一般场地条件下可能遭遇的超越概率为10%的地震烈度值；
- 设计烈度：抗震设计中实际采用的地震烈度  
=基本烈度（一般）+ 1度（抗震设防类别为甲类）

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 一、重力坝的荷载

#### 8. 地震荷载

##### □ 《水工建筑物抗震设计规范》规定

- 对地震烈度**6度**以下地区 (**NO**)
- 一般只考虑危害最大的水平方向地震作用，但对设计烈度为**8、9度**的**I、II级**挡水建筑物，同时考虑水平和竖向地震惯性力 (**YES**)，不考虑竖向动水压力 (**NO**)

##### □ 地震荷载计算方法

- 根据具体情况选用拟静力法或动力法
- 对于地震设防为**甲类**的工程，采用动力法
- 对于抗震设防为**乙、丙类**，设计烈度低于**8度**，且坝高不超过**70m**的重力坝可采用拟静力法

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 一、重力坝的荷载

#### 8.1 地震惯性力（重点内容）

- 重力坝沿轴线方向的刚度很大，这个方向的地震惯性力将传至两岸，仅计顺河流方向的水平地震惯性力
  - 满库时按地震波向**上游**，地震惯性力向**下游**
  - 空库时按地震波向**下游**，地震惯性力向**上游**
- 地震惯性力的大小可根据规范（如SL203-97《水工建筑物抗震设计规范》）选取

#### 8.2 地震动水压力

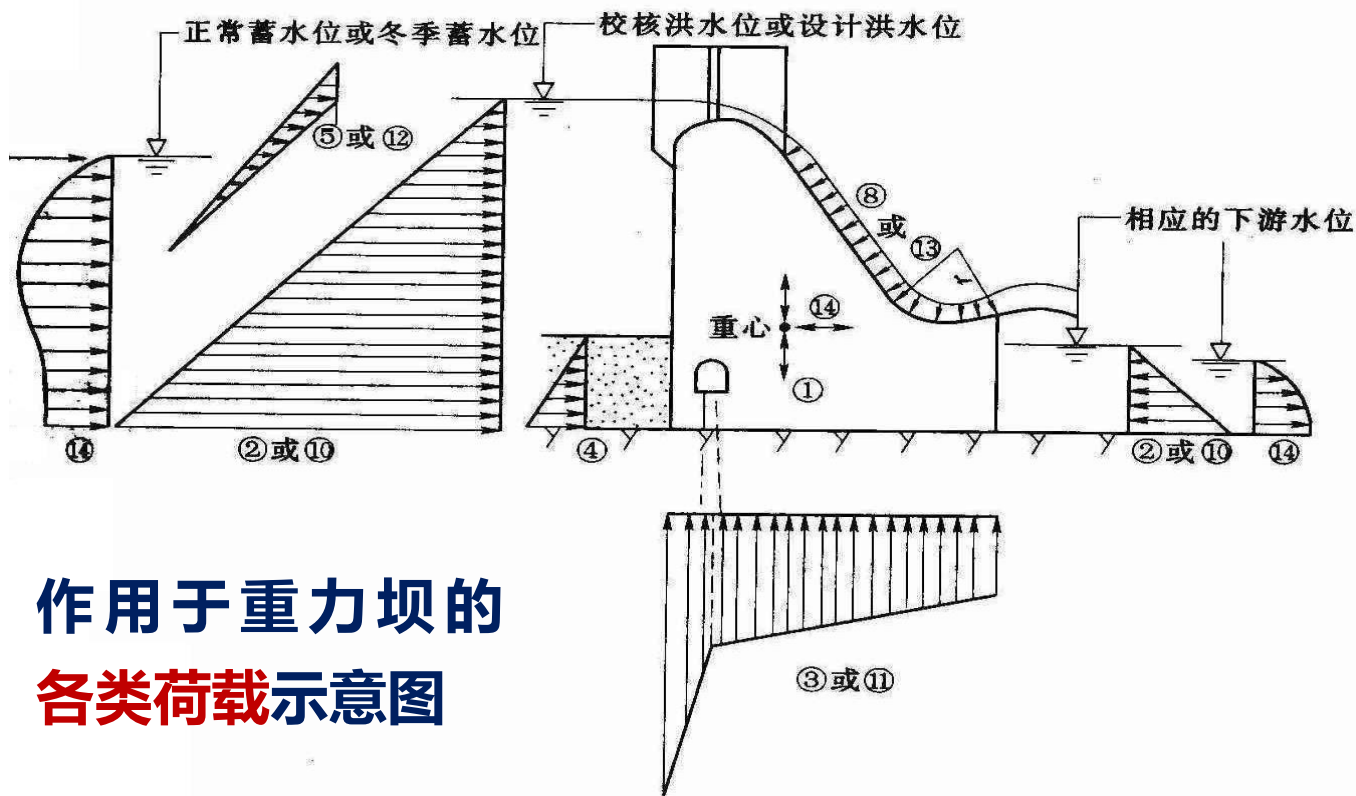
- 地震时，坝前坝后的水随之震动，形成作用在坝面上的激荡力
- 拟静力法计算重力坝地震作用的公式见（1-16）

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

### 一、重力坝的荷载

#### 9. 其他荷载

- 作用于重力坝其他荷载包括风荷载、雪荷载等，由于对重力坝的影响比较小，一般情况下可以不考虑



作用于重力坝的  
各类荷载示意图

# 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

## 二、荷载组合（16字原则）

### □ 定义

在规定的计算情况下，同时作用在结构上的荷载集合

注：除自重荷载之外，荷载总是**变化**的，而且这些荷载存在的概率也是变化的，设计时应考虑这些荷载同时出现的可能性（如冰压力 + 浪压力）

### □ 分类

- **基本荷载**：长期作用（如自重）或在建筑物工作期间经常出现的荷载
- **特殊荷载**：偶然作用（如校核水位时的静水压力、浪压力等）或特别罕见（如地震）的荷载

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 二、荷载组合（16字原则）

#### ➤ 基本荷载组合

基本荷载组合是由经常出现的荷载组成的荷载集合，用于建筑物的**正常设计情况**。由于出现的概率较大，设计规范中规定了较大的安全系数和安全超高

#### ➤ 特殊荷载组合

特殊荷载组合是指包含特殊荷载（偶然出现的荷载）的组合，用于**校核情况**。由于出现的概率小，故安全系数和安全超高均较小

# 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

## 二、荷载组合（16字原则）

《混凝土重力坝设计规范SL319-2005》规定的重力坝设计中应考虑的基本荷载组合和特殊荷载组合

表 1-6

荷 载 组 合

荷载组合	主要考虑情况	荷 载									附 注
		自重	静水压力	扬压力	泥沙压力	浪压力	冰压力	地震荷载	动水压力	土压力	
基本组合	(1) 正常蓄水位情况	①	②	③	④	⑤				⑦	土压力根据坝体外是否有土石而定（下同）
	(2) 设计洪水位情况	①	②	③	④	⑤			⑧	⑦	
	(3) 冰冻情况	①	②	③	④		⑥			⑦	静水压力及扬压力按相应冬季库水位计算
特殊组合	(1) 校核洪水情况	①	⑩	⑪	④	⑫			⑬	⑦	
	(2) 地震情况	①	②	③	④	⑤		⑭		⑦	静水压力、扬压力和浪压力按正常蓄水位计算，有论证时可另作规定

## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 本节小结

- 1、重力坝8种主要荷载
- 2、扬压力定义及其计算
- 3、浪压力计算公式及其适用范围、波高计算方法
- 4、地震荷载：基本烈度+设计烈度

地震惯性力方向（满库VS空库情况）

- 5、荷载组合：基本荷载VS特殊荷载



## 第二节 重力坝的荷载及荷载组合

---

### 复习思考题

- 重力坝的主要荷载有哪些？
- 什么叫扬压力、渗透压力、浮托力？
- 什么叫基本组合？什么叫特殊组合？