

水工建筑物

20 4:43 PM

水工建筑物

- 使用教材：水工建筑物（第3版）
- 学分获得：期末考试(80%) + 平时成绩(20%)
- 学习方式：讲授、自学 + 课堂讨论、思考题
课堂讲授时，以现行规范为准，
每课一总结

第一章 绪论

一. 水利枢纽与水工建筑物



1. 水工建筑物的分类

按承担任务分：挡水建筑物、泄水建筑物、输水建筑物、取水建筑物、整治建筑物（导流堤、护岸、护底等）、专门建筑物（水闸、船闸、升船机等）

2. 水利工程的特点

（与一般土建工程相比）工程量大、工期长、投资大

(1) 工作条件复杂(地形地质、渗流、泄水、淤积、地震)

(2) 受自然条件制约、施工难度大

施工导流、渡汛截流、施工技术

(3) 效益大、对环境的影响大

防洪、发电、供水、灌溉、航运；移民、生态平衡变化。

(4) 失事后果严重

二. 水利工程的发展状况

1999年底统计：共建成水库8万余座

80年代前，坝高 >100 米的水库 8座

80年代后，建设规模极大提高（高坝大库及巨型大型电站）

到1999年，坝高 >100 米的水库34座

代表性的有：**三峡、二滩、水布垭、小浪底**等

计划至2020年，1000万KW/年，水电约25%

重点发展区域：以西南为主，如澜沧江、大渡河、乌江、雅砻江、金沙江、长江、黄河等

第二章 水工建筑物设计综述

第一节 水利工程的设计任务和特点

一. 水利技术工作

关键环节

勘测、规划、**工程设计**、施工、工程管理和科技开发

工程设计：指水利枢纽与水工建筑物的设计

——**水利工程的设计任务**

目的：了解和掌握各种水工建筑物的结构形式、

设计原则和基本理论

适度了解本学科的一些**新进展**

二. 水利工程设计的特点

1. 个性突出

独特的水文、气象、地形地质等自然条件

2. 工程规模大、风险大

3. 重视规程、规范的指导作用

4. 建筑物边施工边工作

施工期间坝体挡水、汛期泄水、机组发电等

三. 评价工程设计标准

1. 适用性

2. 安全性

3. 经济合理性

第二节 水工建筑物设计的步骤和特点

一、水工建筑物设计的工作步骤

1 收集资料及信息

2 明确工程的总体规划及其对枢纽和建筑物的功能要求

3 提出方案

└——设计工作的目标

4 筛选可行的可比较方案

5 对方案进行分析、比较、评价，选定设计方案

6 对建筑物进行优化定型及细部构造的设计

7 初定建筑物的施工方案

8 对方案进行评价及验证

图纸 → 施工 → 运行、管理、监测 ↔
检验设计

二、水利枢纽分等和建筑物分级

安全、效益及经济合理性

《水利水电工程等级划分及洪水标准》

工程规模	等别	总库容 (亿m ³)	防洪 排涝 灌溉 供水 发电				
			校核水位以下的净库容				
大()		>10	例：三峡				
大()		1 ~ 10	总库容：393亿立方				
中型		0.1~1	米， 等工程				
小()		0.01~0.1					
小()		0.01 ~ 0.001					

枢纽中的各种**水工建筑物**，进行分级

根据其所属**工程**的等别、在工程中的**作用**和**重要性**，分为5级

等别	永久建筑物		临时建筑物
	主要建筑物	次要建筑物	
	1	3	4
	2	3	4
	3	4	5
	4	5	5
	5	5	

水工建筑物的级别不是绝对的，对于 ~ 等工程，经论证可提高或降低其建筑物的级别。

建筑物级别不同，对其要求也不相同。

如：**设计基准期、抗御灾害能力、安全性、运行可靠性及建筑材料**

例：三峡工程

等工程、主要建筑物为1级

洪水标准：千年设计、万年 + 10%校核

三 设计方法的特点

逆向思考：预期结果——措施

第三节 水工建筑物上的作用及作用效应组合

一.作用与作用效应

作用：指外界环境对水工建筑物的影响。

主要作用有：重力、水作用、渗透水作用
风及波浪作用、冰及冰冻作用、
温度作用、土及泥沙作用、
地震作用等

结构分析的
主要内容

作用效应：建筑物对外界作用的响应。

如：应力、变形、振动等。

荷载：在进行结构分析时，如果一开始即可用一个明确的外力来代表外界环境的影响，则此作用称为荷载，也叫直接荷载。

直接荷载 如：自重、水荷载

间接荷载：在进行结构分析时，无法用一个明确的外力来表示，其作用及产生的作用效应只能在结构分析中同步求出。

如：地震作用、温度作用等

《水工建筑物荷载设计规范》

1 自重

建筑物的重量及其上设备的重量

2 水及渗透水作用

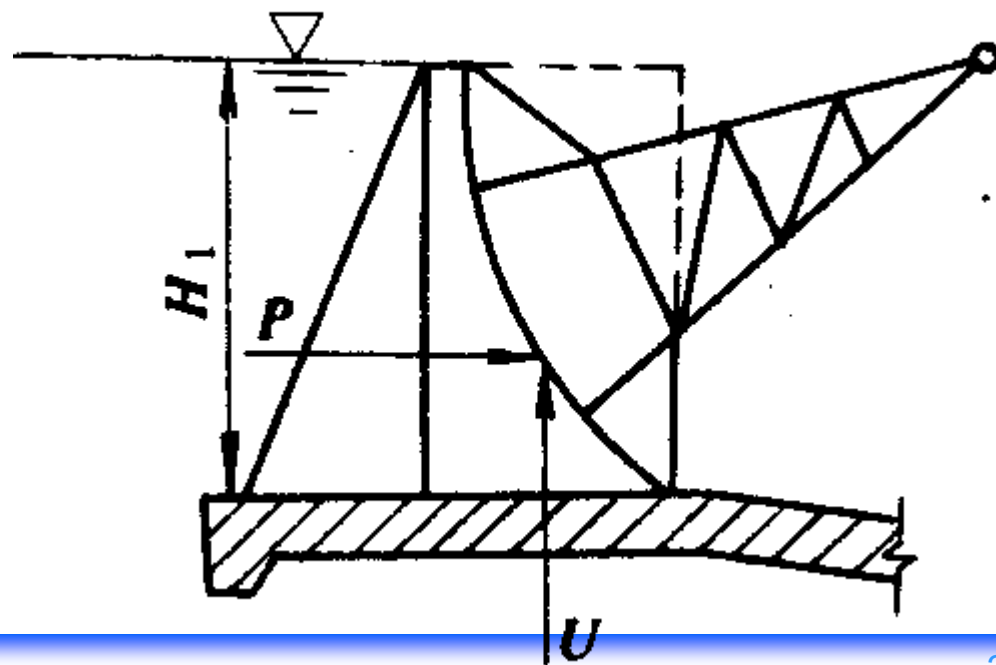
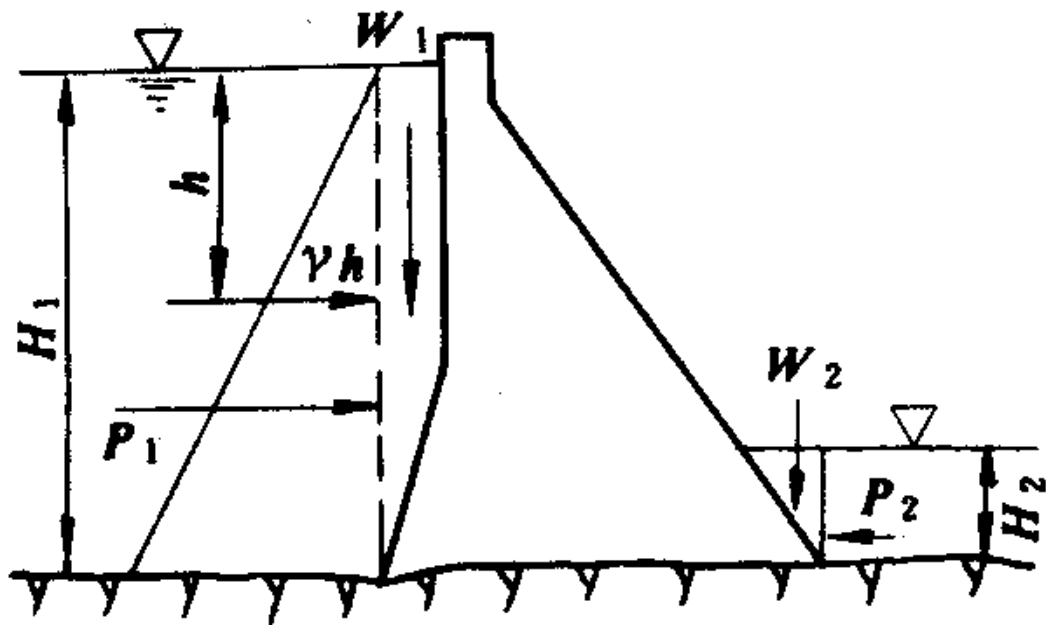
(1) 静水压力：大小随上下游水位而定

静水压强： $p = \gamma h$ kPa

γ ——水的容重，取 $9.81\text{kN} / \text{m}^3$

静水压力： $P = \frac{1}{2} \gamma h^2$ kN

注意：斜面、折面、曲面承受的总静水压力

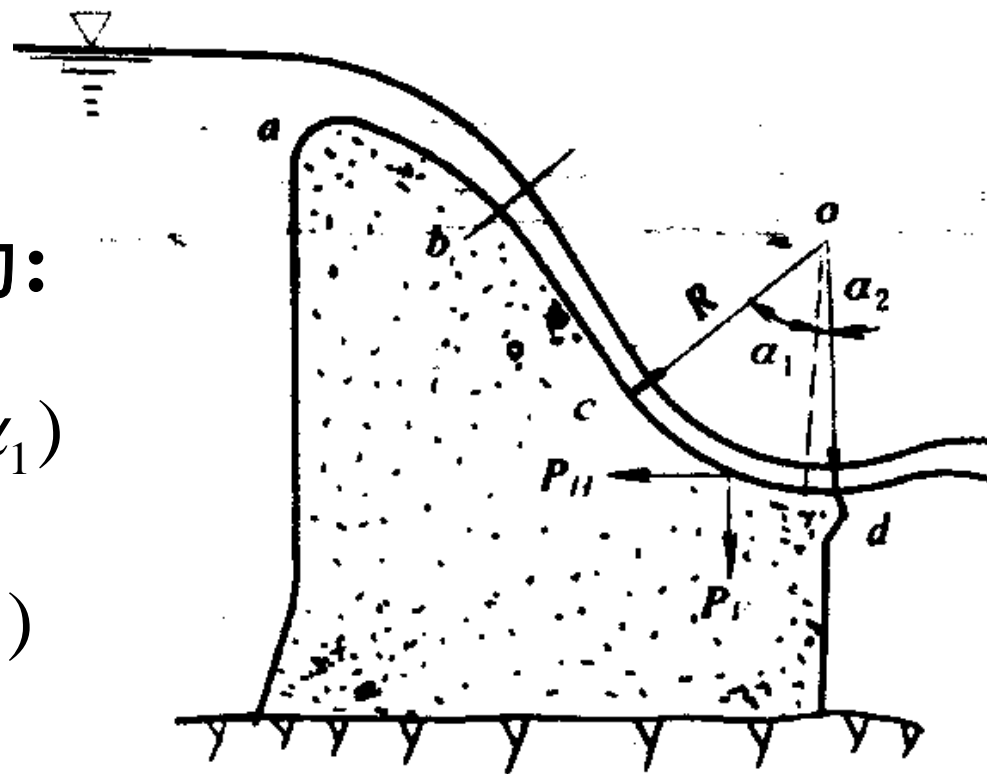


(2) 动水压力：

溢流坝面反弧段上
单位宽度的动水压力为：

$$P_H = \frac{\gamma}{g} qv(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$$

$$P_V = \frac{\gamma}{g} qv(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)$$



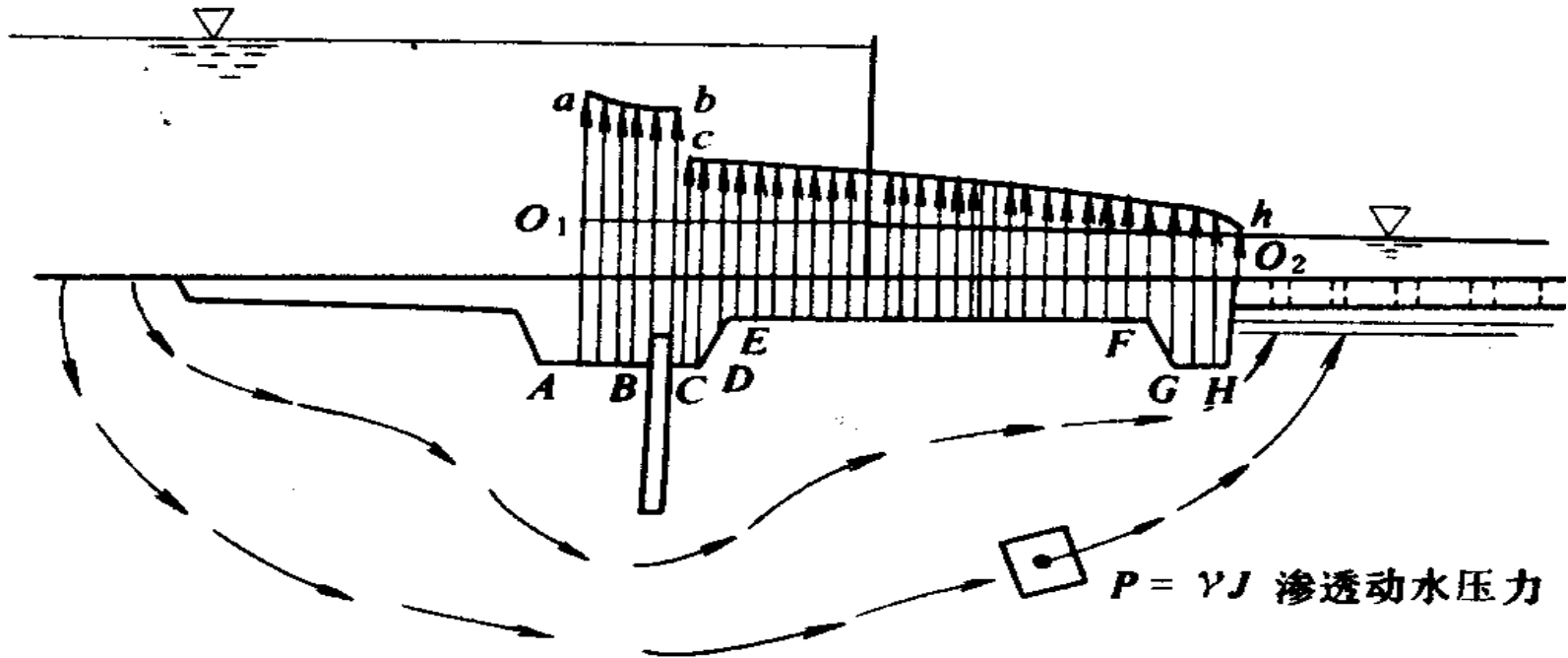
v :反弧最低点处的断面平均流速，m/s

q :单宽流量， $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$

作用位置：近似取为反弧段中心

(3) 渗透水扬压力：

两部分：浮托力 + 渗透压力(水头差)

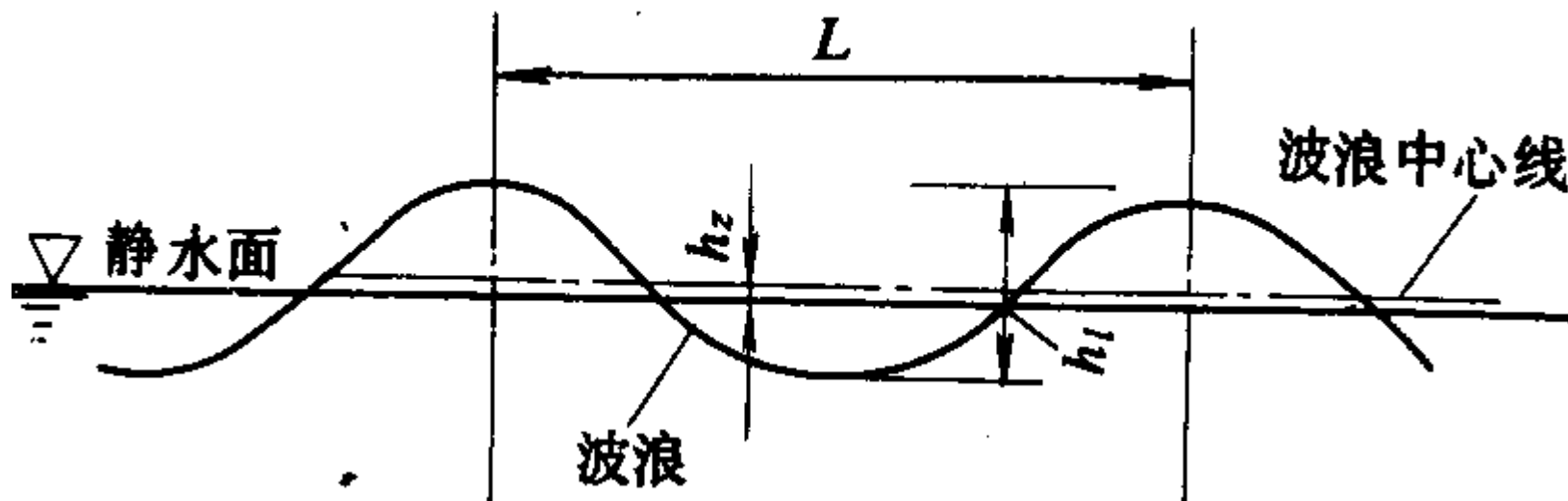


注意：上下游水位，与工作状态有关，需配套使用。

3 波浪作用

波浪几何要素、波浪形态、建筑物迎水面直立与否

(1) 波浪几何要素： h_L 、 L 、 h_Z



半经验公式确定波浪要素，分别适用于峡谷水库、平原水库、海岸带水库

如峡谷水库，采用
官厅公式：

$$\begin{cases} L = 10.4(h_L)^{0.8} \quad (\text{m}) \\ h_L = 0.0166 V_0^{5/4} D^{1/3} \quad (\text{m}) \end{cases}$$

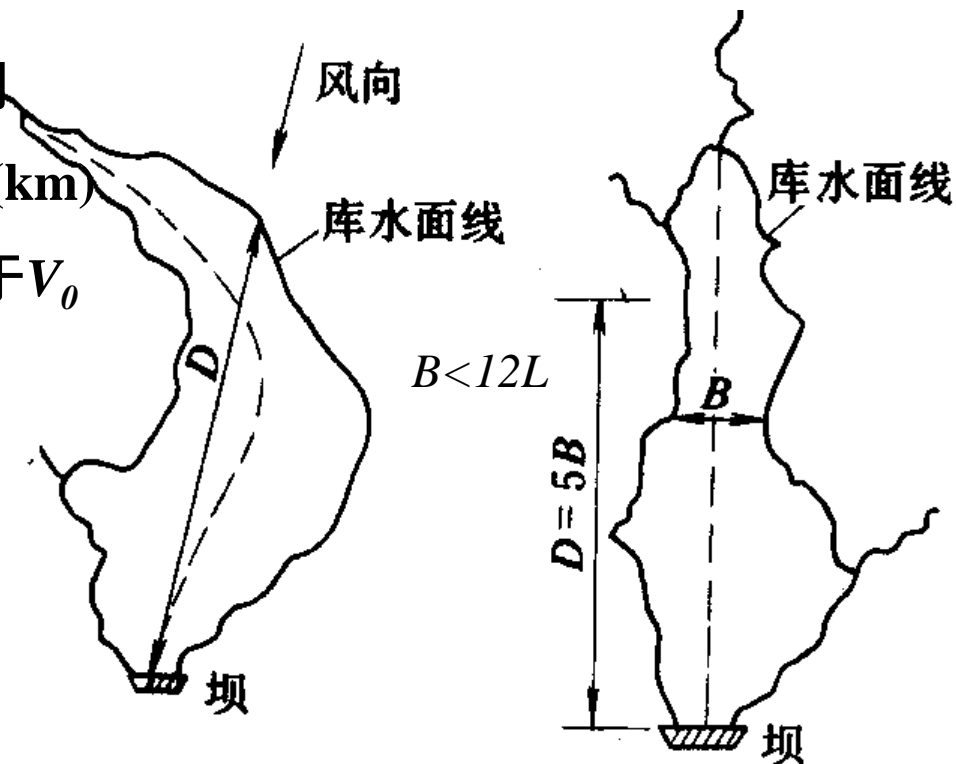
V_0 ：计算风速(m/s)，设计、校核不同

D ：风作用于水域的长度，称为吹程(km)

h_L ：为累计概率为5%的波高，适用于 $V_0 < 20\text{m/s}$ ， $D < 20\text{km}$ 且

$$gD/V_0^2 = 20 \sim 250$$

$$h_z = \frac{\pi h_1^2}{L} \text{cth} \frac{2\pi H}{L}$$



注意：公式的适用范围及各参数的意义及单位

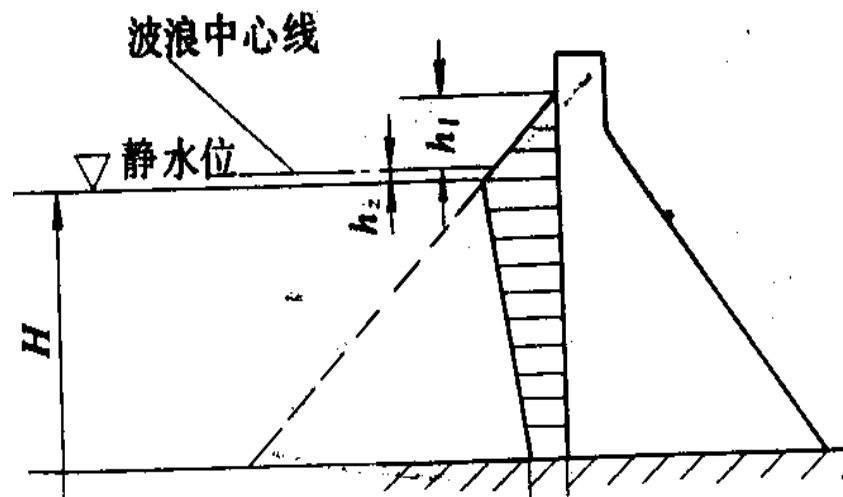
？若是求累计概率为1%的波高，怎么办？

(2) 波浪形态：

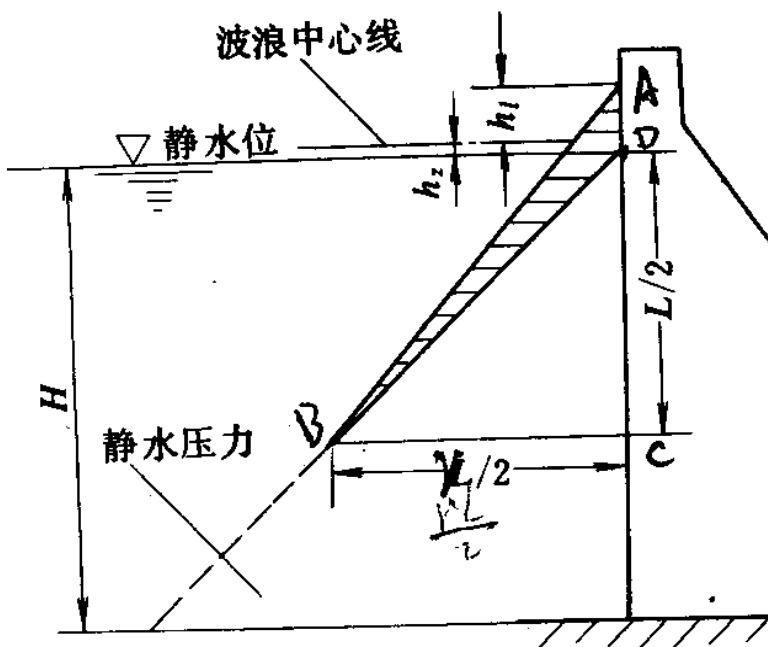
深水波 (水深 $H > L/2$)

浅水波 (临界水深 $H_0 < H < L/2$)

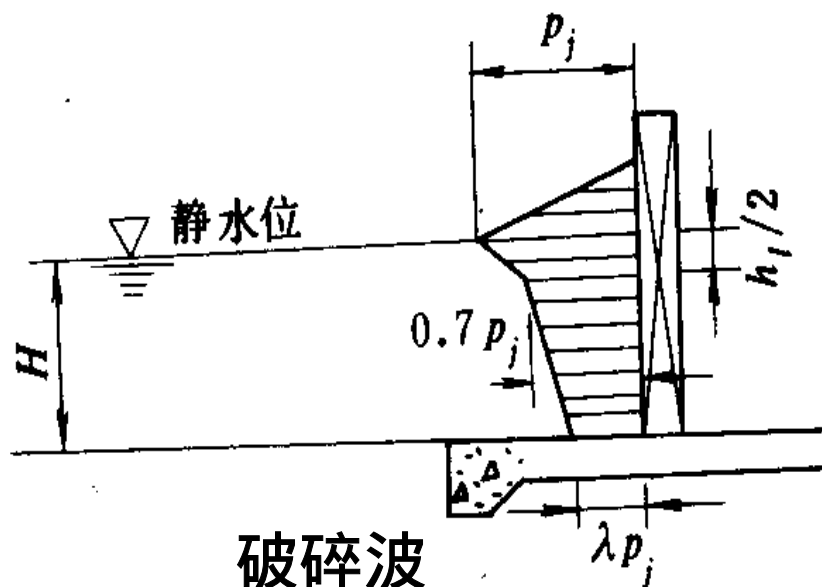
破碎波 ($H < H_0$)



浅水波



深水波



破碎波

4 土压力及泥沙压力

土压力计算，根据土力学公式

泥沙压力：

库容/年入沙量 $\left\{ \begin{array}{l} >100 \text{ 可不考虑} \\ <30 \text{ 淤积严重，基本作用} \end{array} \right.$

$$\text{公式： } p_s = \frac{1}{2} \gamma_{sb} h_s^2 \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_s}{2} \right)$$

注意：近似计算、浮容重、淤积高程(携沙量、淤积年限)

? 若坝的上游面为折线时，泥沙压力会有何不同？

5 冰压力及冰冻作用

(1) 静冰压力

表面结冰 $\xrightarrow{\text{温升}}$ 冰层膨胀 \longrightarrow 产生压力

静冰压力大小与冰层厚度、温升时的气温、温升率有关，可查表得到。

(2) 动冰压力

冰块破裂
冰块在风的作用下撞击坝面 } 动冰压力

作用在铅直坝面或其它宽长建筑物上的动冰压力：

$$F_{bk} = 0.07 V_i d_i \sqrt{A_i f_{ib}}$$

作用在独立墩柱上的动冰压力

$$F_{p1} = m f_{ib} b d_i$$

$$F_{p2} = 0.04 V_i d_i \sqrt{m f_{ib} A_i \gamma}$$

V_i - 冰块流速 m/s

d_i - 冰块厚度 m

A_i - 冰块面积 m^2

f_{ib} - 冰块抗压强度 Mpa

m - 墩柱前沿平面形状系数

F_{bk} 、 F_{p1} 、 F_{p2} - MN

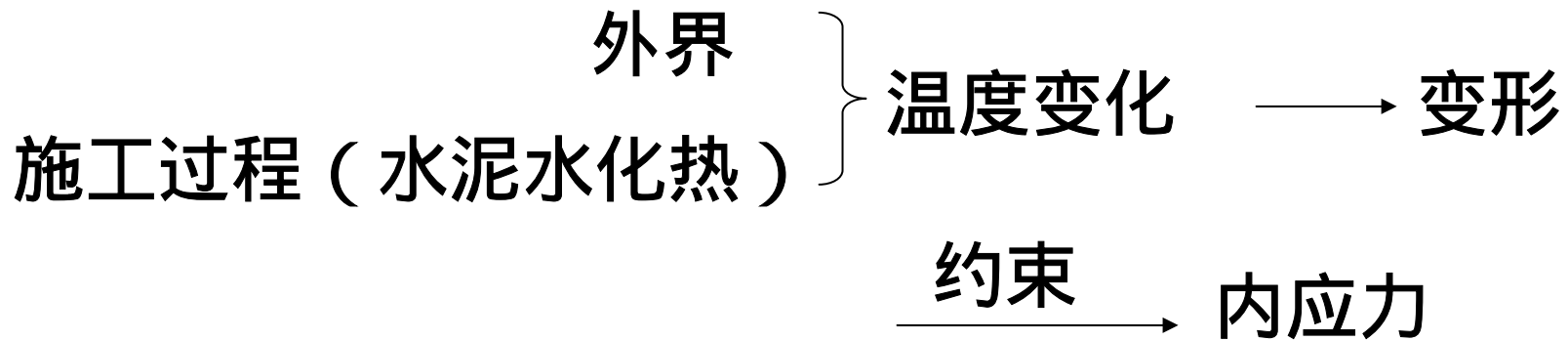
(3) 冰冻作用

冻土 膨胀——冻胀力——建筑物或保护层变形、失稳破坏

融化——土体强度骤降，可导致建筑物破坏。

6 温度作用

结构由于温度变化产生的应力、变形、位移等，称为温度作用。



7 风作用 { 一般不考虑
高耸孤立建筑物需考虑

8 地震作用

二. 建筑物的作用效应分析方法

数学模型：解析法、差分法、有限元法

物理模型（模型试验）

经验类比

三. 作用效应组合

建筑物承受的作用，按持续时间分为：

永久作用 (永久荷载)：在设计基准期内其值保持不变。如:自重

可变作用：在设计基准期内，长期存在，但数值变动明显。
如：各种水荷载

偶然作用：在设计基准期内有一定遭遇机率，持续时间短，但结构反应强度大，是一种不可忽视的作用。如地震、校核洪水

工作状况：持久状况、短暂状况、偶然状况

作用效应组合：

第一类正常运用情况下的**基本组合**、第二类为**施工检修组合**、第三类为非常情况下的**特殊组合**

第四节 水工建筑物的安全性及抗震分析

一. 水工建筑物的安全性

安全储备 { 单一安全系数法
 { 分项系数极限状态设计法——规范

1. 极限状态

当整个结构(包括地基)或结构的一部分超过某一特定状态，结构就不能满足设计规定的某种功能要求时，称此种特定状态为该功能的极限状态。

《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》规定

极限状态设计包括 { 承载能力极限状态设计
 { 正常使用极限状态设计

承载能力极限状态：

刚体失去平衡；超过材料强度；塑性变形过大；土石结构或地基、围岩产生渗透失稳等。

正常使用极限状态：

结构或构件影响正常使用或达耐久性的极限值。

如：影响结构正常使用或外观变形、对人员或设备仪表有不良影响的振动等。

假如：用 $R(\cdot)$ 代表结构的抗力， $S(\cdot)$ 代表作用效应

要保证安全 则必须使 $R(\cdot) - S(\cdot) > 0$

2. 设计原则

有一定的安全储备，必须 $R(\cdot) - S(\cdot) > 0$

(1) 单一安全系数法： $R / S = K$

(2) 分项系数极限状态设计法

$$\gamma_0 \psi S(\cdot) \leq \frac{1}{\gamma_d} R(\cdot) \quad \text{—— 承载能力极限状态设计}$$

$$\gamma_0 S'(\cdot) \leq c / \gamma_d \quad \text{—— 正常使用极限状态设计}$$

γ_0 结构重要性系数， ψ 设计状况系数， γ_d 结构系数， c 功能限值

$S(\cdot)$ —— 作用效应函数，包括几何参数和各种作用的标准值及分项系数

$R(\cdot)$ —— 抗力函数，包括几何参数和材料性能的标准值及分项系数

$S'(\cdot)$ —— 作用效应函数，包括几何参数、各种作用和材料性能的标准值

二. 水工建筑物的抗震分析

《水工建筑物抗震设计规范》 SL203 -97

1. 地震作用

里氏震级，分9级；震中；地震烈度，分12度

基本烈度：指该地区在今后50年内可能遭遇的较大地震，其超越概率在10%。

2. 抗震设计

抗震设计时，一般取基本烈度作为**设计烈度**，1级壅水建筑物可在基本烈度的基础上提高1度。

抗震设计 { 抗震计算
 { 工程抗震措施

《水工建筑物抗震设计规范》规定：

- (1) 6度以下可不进行抗震计算，但1级壅水建筑物需采取抗震措施。
- (2) 设计烈度高于9度或设计烈度为9度的高度大于250米的壅水建筑物，抗震安全性需进行专门论证。

3. 地震作用效应的分析方法

地震作用效应是一种典型的动态作用，其分析方法需根据工程的抗震设防等级来选定。

工程抗震 设防等级	建筑物级别	场地基本烈度
甲	1(壅水)	6
乙	1(非壅水)、2(壅水)	
丙	2(非壅水)、3	7
丁	4、5	

地震作用效应的分析方法：

甲级：动力法

乙、丙级：动力法或拟静力法

丁级：拟静力法或着重采取抗震措施

动力法：

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = [M]\{\ddot{X}_0\}$$

时程分析法 —— 差分法求解

振型分解法 { 振型分解时程法
振型分解反应谱法

拟静力法

采用动力理论 → 地震惯性力 $\xrightarrow{\text{静力学方法}}$ 地震作用效应

总结

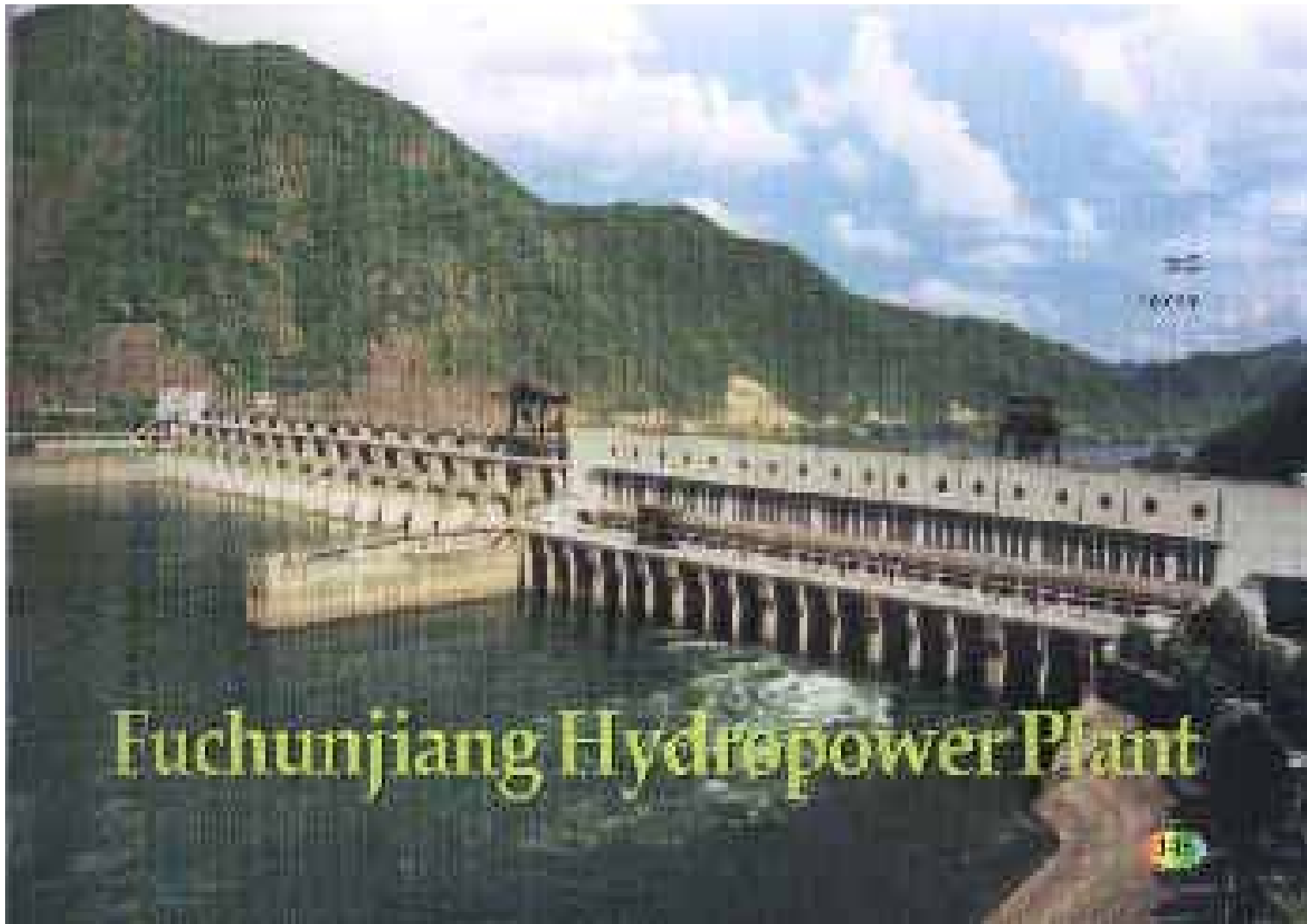
1. 水利枢纽的分等和土工建筑物的分级
2. 各种荷载的计算方法
3. 作用效应组合、作用效应分析方法
4. 土工建筑物安全储备的表达方法、设计准则
5. 极限状态设计的内容、表达方式
6. 基本烈度、设计烈度
7. 地震作用效应的分析方法

思考题

1. 水工建筑物的分类？
2. 为什么对水利工程要分等，根据什么分等？
3. 若某枢纽库容70万方，灌溉面积70万亩，水电站装机2万千瓦，这时枢纽中的坝、溢洪道、电站厂房、施工围堰应分别定为几级？

第三章 岩基上的重力坝

第一节 概述



浙江 富春江
水电站

三峡大坝





107

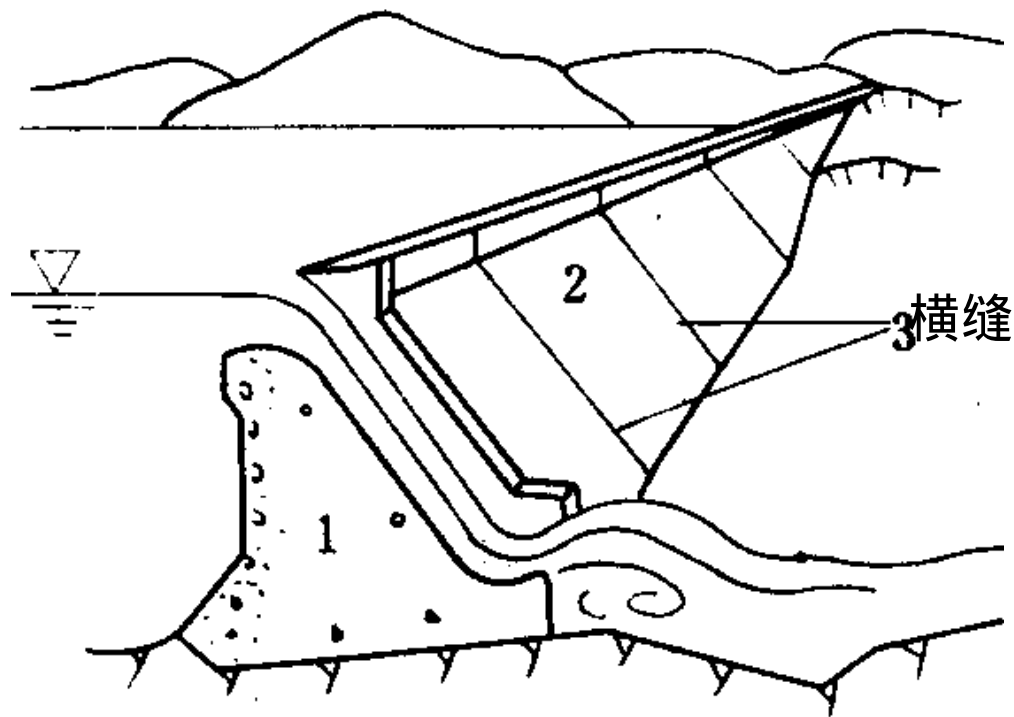
湖北高坝洲
97年开工

万家寨水电站



一. 重力坝的工作原理和特点

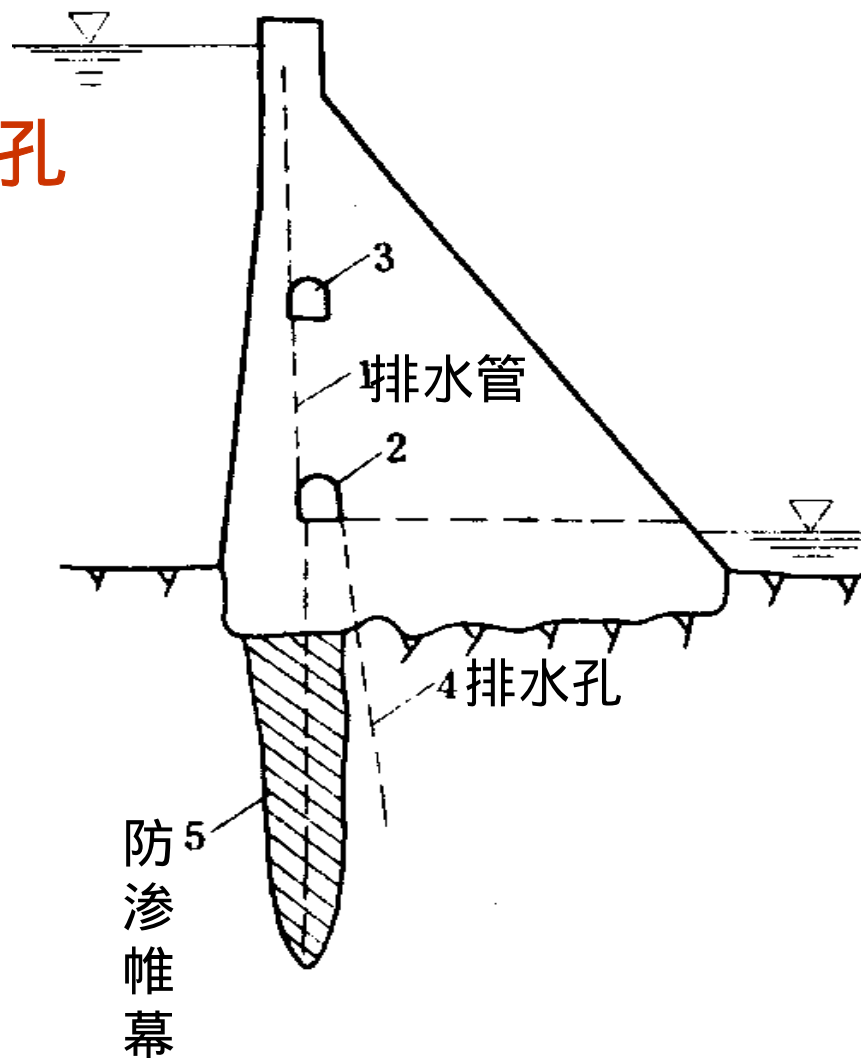
1. **依靠坝体自重**，满足**稳定**和**强度**要求。
2. **横缝**：为适应地基变形、温度变化和混凝土的浇筑能力，沿坝轴线方向用横缝将坝体分成若干个独立工作的坝段。



3. 坝内设**排水管**

4. 坝基设**防渗帷幕及排水孔**

减小渗流对坝体稳定和
应力的不利影响



优点：安全可靠、对地形条件适应性强；
枢纽泄洪问题易解决；
施工及施工导流方便。

缺点：

体积大，材料用量多、需温控；
坝体应力低，材料强度得不到充分发挥；
坝体与地基接触面积大，扬压力大，不利于稳定。

二.重力坝的设计内容

1. 剖面设计
2. 稳定分析
3. 应力分析
4. 构造设计
5. 地基处理
6. 溢流坝和泄水孔口设计
7. 监测设计

第二节 重力坝的荷载及其组合

一. 荷载

自重、静水压力和动水压力、扬压力、浪压力、泥沙压力、土压力、冰压力、地震荷载、温度作用等

1. 扬压力（坝基、坝体）

采用简化的计算图形

如图所示：有、无排水孔幕不同

扬压力折减系数，

与岩体、帷幕深度厚度及排水孔有关。

2. 地震荷载

拟静力法：

地震设防等级为乙丙类的：设计烈度小于8度且 $H \leq 70\text{m}$ 的重力坝

地震荷载：地震惯性力、地震动水压力和动土压力

(1) 地震惯性力

图示

作用在质点*i*的水平向地震惯性力代表值为：

$$F_i = a_h \xi G_{Ei} \alpha_i / g$$

水平向设计地震加速度代表值

集中在质点*i*的重力作用代表值

地震作用的效应折减系数，取0.25

质点*i*的动态分布系数

$$\alpha_i = 1.4 \frac{1 + 4(h_i / H)^4}{1 + 4 \sum_{j=1}^n \frac{G_{Ej}}{G_E} (h_j / H)^4}$$

h_i 为质点的高度

(2) 地震动水压力

单位宽度坝面的总地震动水压力 $F_0 = 0.65 a_h \xi \rho_w H_0^2$

作用位置：水面下 $0.54H_0$ 处

若为**倾斜迎水坝面**，动水压力代表值应乘一折减系数

(3) 地震动土压力

二. 荷载组合

荷载按性质分：基本荷载和特殊荷载

基本荷载：

- 1 自重
- 2 正常蓄水位的水荷载
 - 2a 上下游静水压力
 - 2b 扬压力
- 3 淤沙压力 4 土压力
- 5 设计洪水位的水荷载
 - 5a 上下游静水压力
 - 5b 扬压力 5c 动压力
- 6 浪压力
 - 6a 50年重现期风速引起的浪压力
 - 6b 多年平均最大风速引起的浪压力

7 冰压力

8 其它出现机会较多的作用

特殊荷载：

9 校核洪水位的水荷载

9a 上下游静水压力

9b 扬压力 9c 动压力

10 地震作用

11 其它出现机会很少的作用

荷载组合分：基本组合和特殊组合

基本组合：属于设计情况或正常情况，由同时出现的基本荷载组成。

特殊组合：属于校核情况或非常情况，由同时出现的基本荷载和一种特殊荷载组成。

荷载组合表

设计状况	作用组合	主要考虑情况	作用类别									备注
			自重	静水压力	扬压力	淤沙压力	浪压力	冰压力	动水压力	土压力	地震作用	
持久状况	基本组合	1. 正常蓄水位情况	1)	2)	2)	3)	6) a)	—	—	4)	—	土压力根据坝体外是否有填土而定(下同)以发电为主的水库
		2. 防洪高水位情况	1)	5)	5)	3)	6) a)	—	5)	4)	—	以防洪为主的水库,正常蓄水位较低
		3. 冰冻情况	1)	2)	2)	3)	—	7)	—	4)	—	静水压力及扬压力按相应冬季库水位计算
短暂状况	基本组合	施工期临时挡水情况	1)	2)	2)	—	—	—	4)	—		
偶然状况	偶然组合	1. 校核洪水情况	1)	9)	9)	3)	6) b)	—	9)	4)	—	
		2. 地震情况	1)	2)	2)	3)	6) b)	—	—	4)	10)	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

第三节 重力坝的抗滑稳定分析

——重力坝设计的一项重要内容

目的：核算坝体沿坝基面或沿地基深层软弱结构面抗滑稳定的安全度。

处理方法：
┌ 平面问题（各坝段独立工作）
└ 空间问题（软弱结构面构成空间滑动体）

一. 沿坝基面的抗滑稳定分析

——可取一个坝段或单宽进行分析

采用抗剪断公式计算

认为坝体混凝土与基岩接触良好

抗滑稳定抗力函数 $R(\cdot) = f'_R \sum W_R + c'_R A_R$

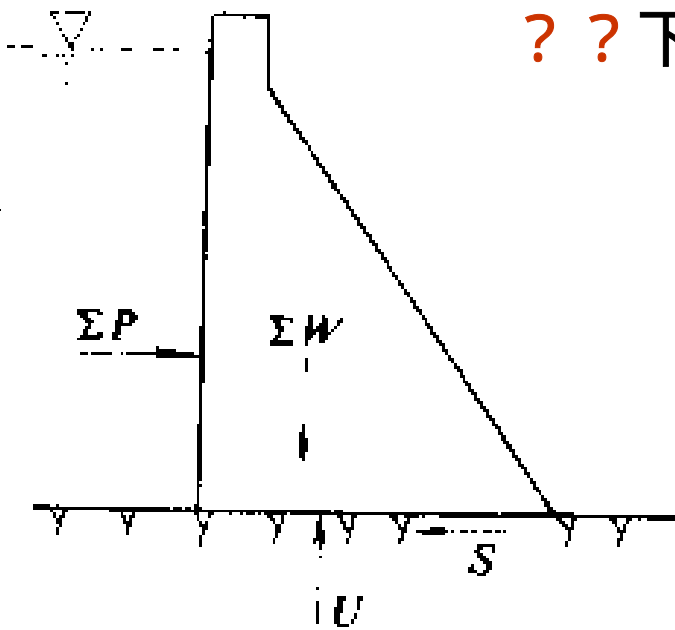
作用效应函数 $S(\cdot) = \sum P_R$

$\sum W_R$ 坝基面上的全部法向作用之和

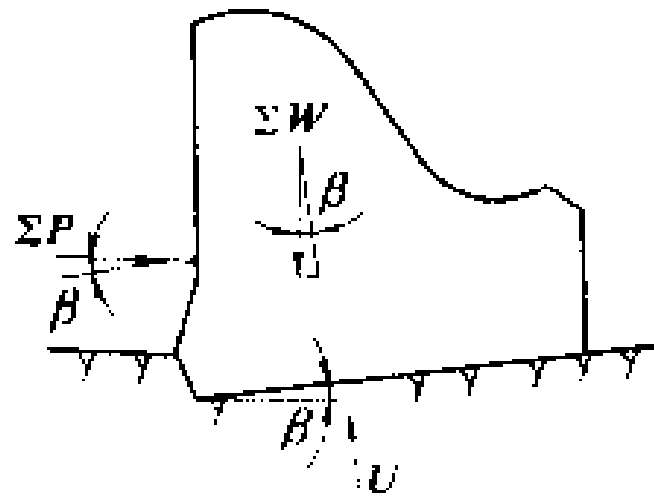
f'_R, c'_R 坝基面抗剪断参数

$\sum P_R$ 坝基面上的全部切向作用之和

?? 下列哪种情况对稳定有利？



(a)



(b)

二. 深层抗滑稳定分析

坝基内存在不利的缓倾角断层或软弱结构面，挡水后，在水荷载作用下，坝体连同部分基岩就有可能沿这些软弱结构面产生滑移，即所谓的深层滑动。

深层滑动，其失稳机理和计算方法仍是研究课题

常用的计算方法：刚体极限平衡法、有限元法

1. 单斜面深层抗滑稳定计算

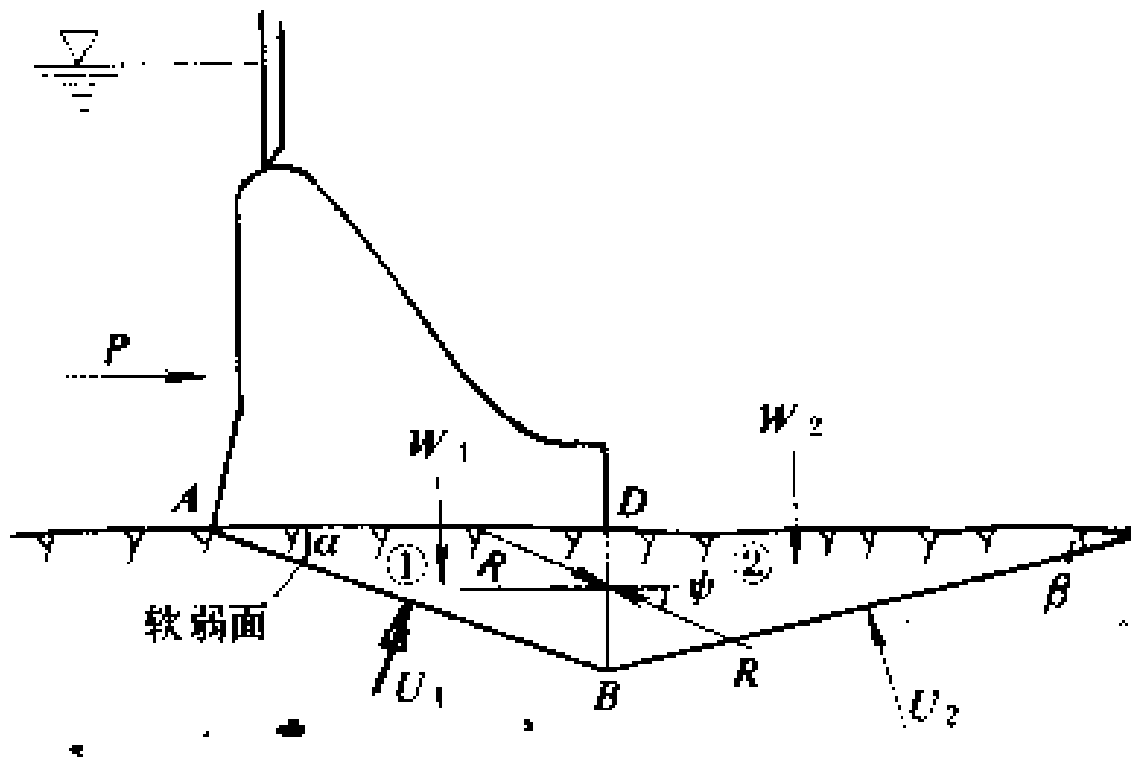
(如图)

计算时将软弱面以上的坝体和地基视为刚体，按抗剪断公式计算

2. 双斜面深层抗滑稳定计算

计算方法：

剩余推力法
被动抗力法
等安全系数法
完全滑动法



剩余推力法：

假定块 先达到极限状态，即沿AB面上的滑动力 = 抗滑力
求出R；再对块 进行稳定分析，采用承载能力（抗滑稳定）
极限状态设计式进行稳定校核。

剩余推力法

块 达到极限平衡状态

即：滑动面上 **滑动力 = 抗滑力**

$$\text{抗滑力 } R(\cdot) = N \cdot f + cA$$

列出块 沿滑动面上的：**滑动力、抗滑力**

$$\gamma_0 \psi S(\cdot) \leq \frac{1}{\gamma_d} R(\cdot)$$

被动抗力法：与剩余推力法相反

先假定块 达到极限状态，使沿BC面上的滑动力 = 抗滑力
求出R；再对块 进行稳定分析。

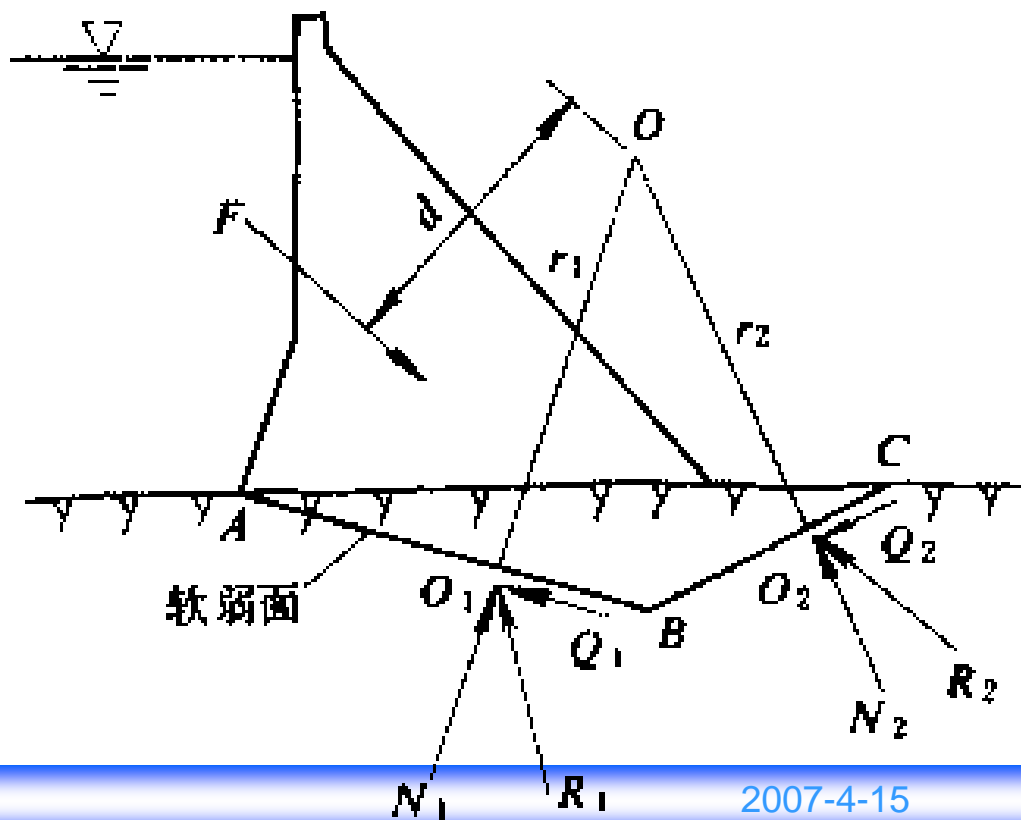
等安全系数法：

分别列出块 块的抗滑力与滑动力之比，并使其相等，
以求出R，再回代验算稳定性。

完全滑动法：

采用抗滑力距与滑动力距之
比，来验算稳定性。

O是瞬时中心， R_1 、 R_2
及其作用点需先求得



抗滑稳定极限状态设计式的结构系数

组合类型	结构系数
基本组合	1.2
偶然组合	1.2

注：包括建基面、层面、深层滑动面

三. 岸坡坝段的抗滑稳定分析

岸坡坝段，其坝基面倾向河床时，坝体在自重的作用下有沿岸坡下滑的趋势，加上坝体上游面的水压力，有向下游及河床滑动的趋势，构成三维受力。

四. 提高坝体的抗滑稳定性的工程措施

1. 坝体上游面倾斜，利用一部分水重增加稳定性。
2. 采用合理的开挖轮廓线。
3. 设置齿墙
4. 抽水措施，降低作用在坝底的扬压力
5. 加固地基（提高 f' 和 c' 值）
6. 横缝灌浆
7. 预应力方法

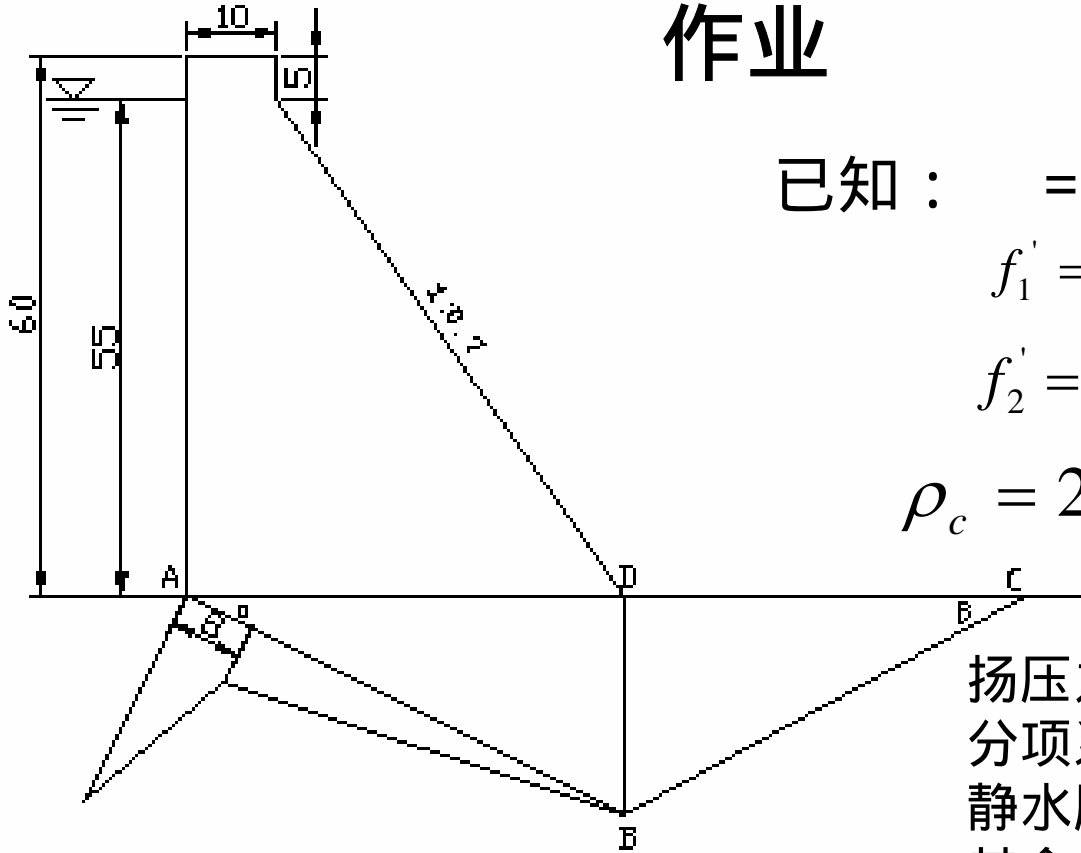
总结

1. 重力坝的工作原理与特点
2. 重力坝的荷载及其组合
3. 重力坝抗滑稳定分析的内容：沿坝基面和深层抗滑稳定分析（单斜面、双斜面）
4. 抗滑稳定分析方法：**刚体极限平衡法**和有限元法
5. 双斜面深层抗滑稳定分析方法：剩余推力法、被动抗力法、等安全系数法、完全滑动法

思考题

1. 在进行重力坝设计时，有哪些可能的荷载组合？说明在设计洪水情况（基本组合）和地震情况（特殊组合）下各有哪些荷载。
2. 重力坝深层滑动有哪几种破坏形式？计算方法？
3. 如图，计算地震惯性力及地震动水压力

作业



已知： $\varphi_1 = 17.2^\circ$ $\varphi_2 = 25^\circ$

$$f_1' = 1.0 \quad c_1' = 50T / m^2$$

$$f_2' = 1.2 \quad c_2' = 30T / m^2$$

$$\rho_c = 2.4T / m^3 \quad \rho_G = 2.1T / m^3$$

扬压力折减系数为0.2；

分项系数：

静水压力为1.0；渗透压力为1.2；
其余参数均已考虑了分项系数。

重要性系数为1.0；设计状况系数
为1.0(持久工作状态)。

用三种方法（剩余推力法、被动抗力法
及等安全系数法）对此重力坝进行深层
抗滑稳定分析。

分析 φ 、 c 、 ρ 变化对稳定的影响。

($\varphi = 10^\circ \sim 60^\circ$ ； $c = 10^\circ \sim 60^\circ$ ；
 $\rho = -90^\circ \sim 90^\circ$)

第四节 重力坝的应力分析

——重力坝设计中的一项非常重要的内容

目的：

检验大坝在施工期和运用期是否满足强度要求；
为解决设计和施工中的某些问题，如混凝土分区、
某些部位的配筋等提供依据。

重力坝的应力状态与很多因素有关：

坝体轮廓尺寸、 荷载、 地基性质、
施工过程、 温度变化等

应力分析的过程：

- 1、进行荷载计算及荷载组合
- 2、选择合适的方法进行应力计算
- 3、检验大坝各部位的应力是否满足强度要求

分析方法：{ 模型试验
材料力学法
数值分析法

结果近似

一. 材料力学法

1. 基本假定

坝体混凝土为均质、连续、各向同性的弹性材料。

视坝段为**固接于地基上的悬臂梁**，不考虑地基变形对坝体应力的影响，并认为各坝段独立工作，横缝不传力。

假定坝体水平截面上的正应力 σ_y 按**直线分布**，不考虑廊道等对坝体应力的影响。

- ## 2. 坝体边缘应力
- (1) 水平截面上的正应力
 - (2) 剪应力
 - (3) 水平正应力
 - (4) 主应力

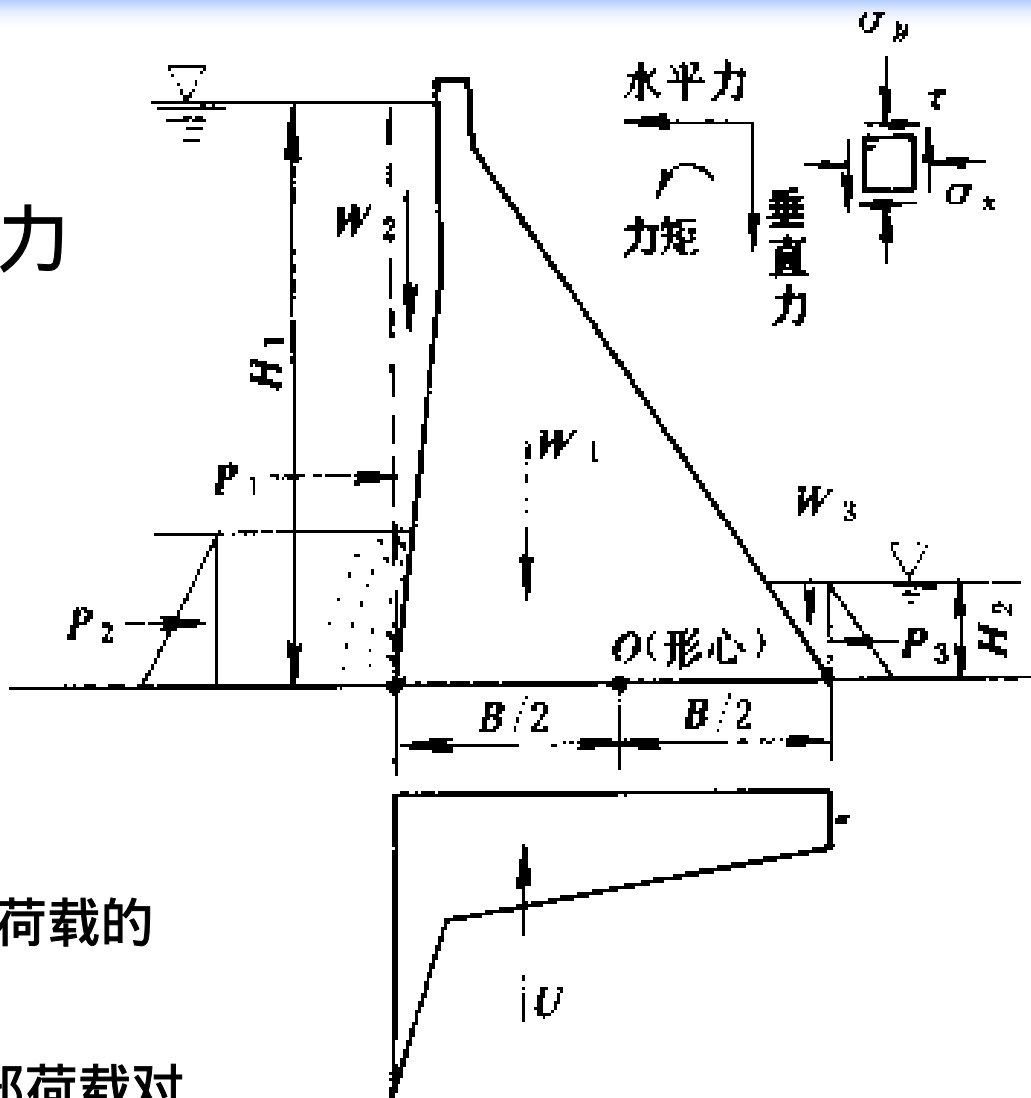
2. 边缘应力

(1) 水平截面上的正应力

σ_y 按直线分布，故可采用偏心受压公式计算

$$\sigma_{yu} = \frac{\sum W}{B} + \frac{6\sum M}{B^2} \quad (\text{kPa})$$

$$\sigma_{yd} = \frac{\sum W}{B} - \frac{6\sum M}{B^2} \quad (\text{kPa})$$



$\sum W$ 作用于计算截面以上全部荷载的铅直法分力之和，kN；

$\sum M$ 作用于计算截面以上全部荷载对截面垂直水流流向形心轴的力矩总和，kN-m；

B ——计算截面的长度，m。

(2) 剪应力

根据边缘微分体平衡条件求上下游边缘剪应力

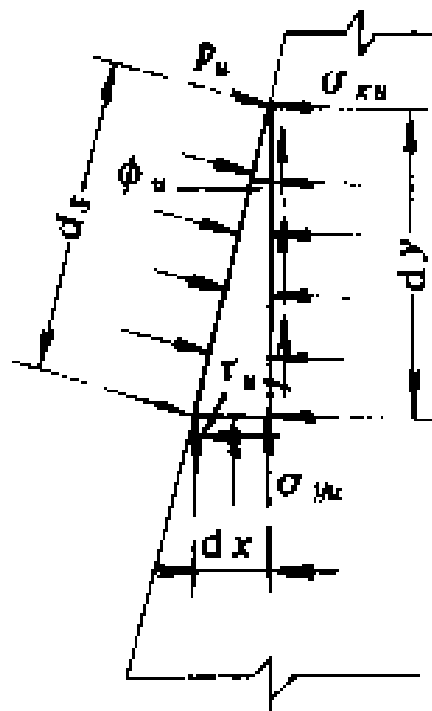
上游边缘微分体：

$$\sum F_y = 0$$

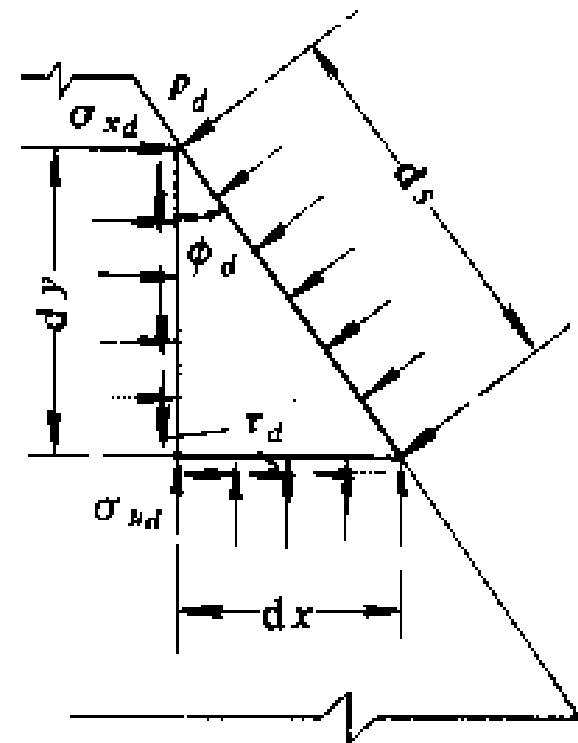
$$p_u \sin \phi_u ds = \sigma_{yu} dx + \tau_u dy$$

$$\tau_u = (p_u - \sigma_{yu}) \operatorname{tg} \phi_u$$

$$\tau_u = (p_u - \sigma_{yu}) n \quad (\text{kPa})$$



上游边缘微分体



下游边缘微分体

同样，对下游边缘微分体：

$$\sum F_y = 0$$

$$\tau_d = (\sigma_{yd} - p_d) m \quad (\text{kPa})$$

(3) 水平正应力

$$\sum F_x = 0 \quad \sigma_{xu} = p_u - \tau_u n \quad \sigma_{xd} = p_d + \tau_d m \quad (\text{kPa})$$

(4) 主应力

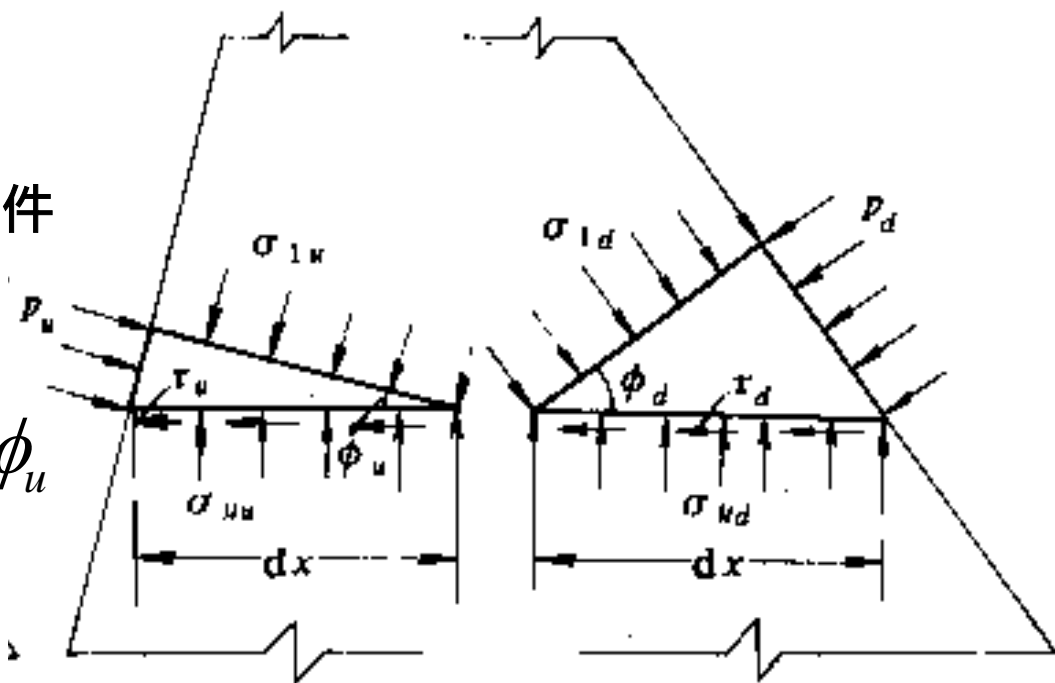
取上游坝面微分体，由平衡条件

$$\sum F_y = 0 \quad \text{得：}$$

$$\sigma_{1u} = (1 + \text{tg}^2 \phi_u) \sigma_{yu} - p_u \text{tg}^2 \phi_u$$

$$= \frac{\sigma_{yu} - p_u \sin^2 \phi_u}{\cos^2 \phi_u}$$

$$= (1 + n^2) \sigma_{yu} - p_u n^2 \quad (\text{kPa})$$



$$\sigma_{2u} = p_u \quad (\text{kPa})$$

$$\text{同理：} \quad \sigma_{1d} = (1 + m^2) \sigma_{yd} - p_d m^2 \quad (\text{kPa})$$

$$\sigma_{2d} = p_d \quad (\text{kPa})$$

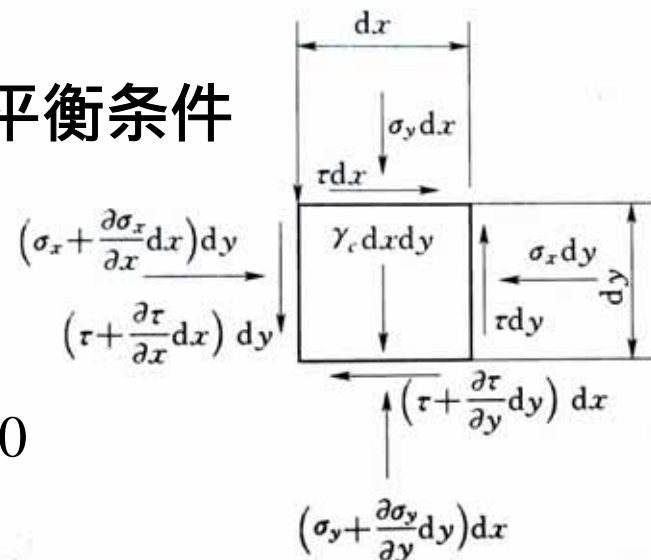
?? 问题

1. 若上游侧有泥沙压力，公式中 P_u 该是什么？
2. 讨论上游面坝坡对坝体应力有何影响？

3. 内部应力的计算

在坝体内取单位厚度微分体 ($dx dy$), 由平衡条件

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} - \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \frac{\partial \tau}{\partial x} - \gamma_c = 0 \end{cases}$$



(1) 坝内水平截面上的正应力 σ_y

根据假定，坝内水平截面上的正应力按直线分布，可设

$$\sigma_y = a + bx$$

坐标原点取在下游坝面，由偏心受压公式及边界条件可得：

$$\begin{cases} x = 0 \\ \sigma_y = \sigma_{yd} \end{cases} \longrightarrow a = \frac{\sum W}{B} - \frac{6 \sum M}{B^2} \quad \begin{cases} x = B \\ \sigma_y = \sigma_{yu} \end{cases} \longrightarrow b = \frac{12 \sum M}{B^3}$$

(2) 剪应力 τ

$$\sigma_y = a + bx \quad \text{代入} \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \frac{\partial \tau}{\partial x} - \gamma_c = 0$$

$$\text{积分, 可得: } \tau = a_1 + b_1x + c_1x^2$$

可以看出坝内剪应力为抛物线分布

(3) 水平正应力 σ_x

$$\tau = a_1 + b_1x + c_1x^2 \quad \text{代入} \quad \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} - \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0$$

$$\text{可得: } \sigma_x = a_2 + b_2x + c_2x^2 + d_2x^3$$

坝内水平正应力呈三次曲线分布

(4) 主应力 $\sigma_1\sigma_2$

任意点的应力状况 $\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau$ $\xrightarrow{\text{材料力学}}$ $\sigma_1\sigma_2$

若 σ_y 不是按直线分布（比如抛物线）， σ_x τ 会是什么样呢？

4. 考虑扬压力时的计算

（同学自己推导）

二. 有限元法分析

一般高于100m的坝、特别重要的坝或地震高烈度区，要用有限元进行计算。

三. 强度指标

1. 采用材料力学法分析时，规范规定的强度指标：

a) 正常使用极限状态：

短期及长期组合，坝踵(计入扬压力)不出现拉应力；

长期组合，坝体上游面(计入扬压力)垂直应力不出现拉应力；

短期组合，下游坝面垂直拉应力不大于0.1MPa。

b) 承载能力极限状态：

基本组合和偶然组合，坝趾及选定截面下游端点的**抗压强度**承载能力极限状态

$$S(\cdot) = \left(\frac{\sum W}{B} - \frac{6 \sum M}{B^2} \right) (1 + m^2)$$

$$R(\cdot) = f_c \quad \text{或} \quad R(\cdot) = f_R$$

2. 采用有限元法分析时，控制标准：

坝基上游面，拉应力（计入扬压力）区宽度宜小于坝底宽度的0.07倍（垂直拉应力分布宽度 / 坝底面宽度）或坝踵至帷幕中心线的距离。

坝体上游面，拉应力（计入扬压力）区宽度宜小于计算截面宽度的0.07倍或计算截面上游面至排水管中心线的距离。

四. 影响坝体应力的因素

1. 地基变形模量

地基对坝体的约束作用，与本身的刚度特性有关。坝底附近应力会受到地基刚度的影响。

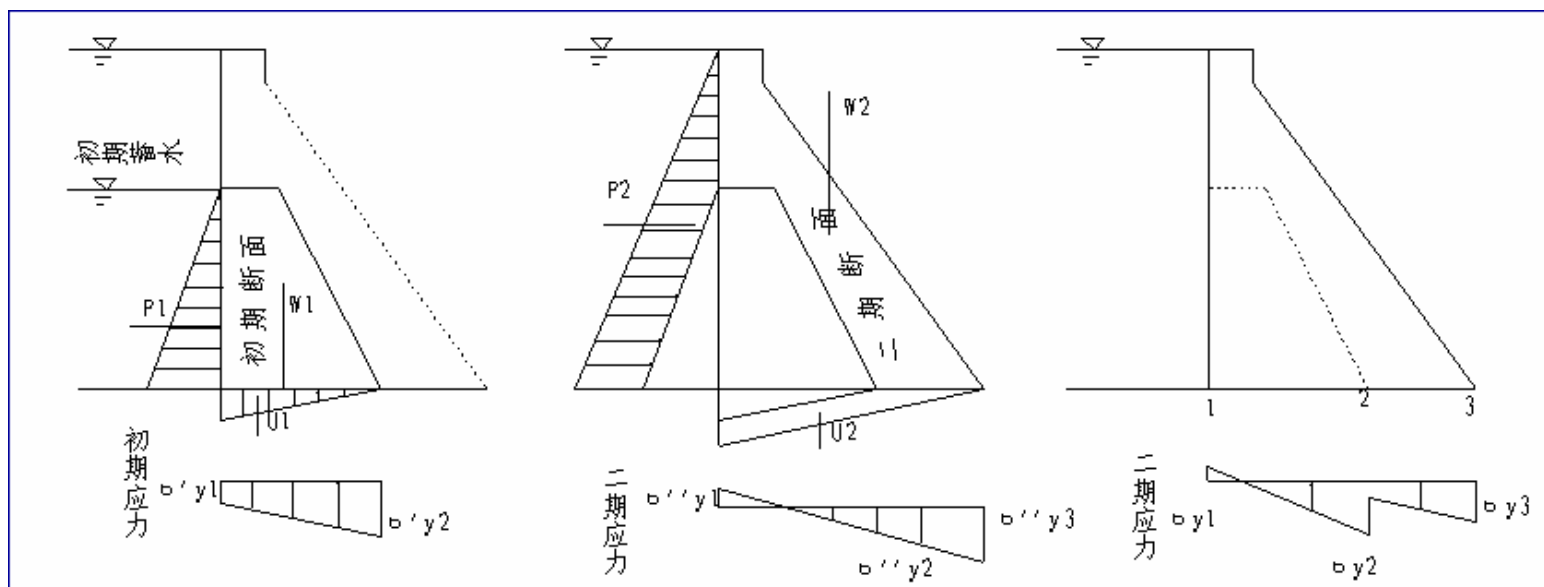
地基刚度与坝体刚度相差过大，易出现应力集中现象。

2. 坝体混凝土分区

不同分区，其弹性模量不同

3. 纵缝：上游坡度不同，应力分布不同。

4. 分期施工：



5. 温度变化及施工过程

第五节 重力坝的渗流分析、温度应力与裂缝防治

一. 渗流分析

稳定渗流的平面问题：
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0$$

二. 温度应力

稳定温度的平面问题：
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0$$

三. 温度裂缝和防止措施

裂缝多是由温度应力引起的，裂缝可分为：

贯穿性裂缝和**表面裂缝**(不大于30cm) (画图说明)

成因与危害

防止措施：合理分缝、分块、提高混凝土质量、温度控制

温控措施：

1. 降低混凝土的浇注温度：骨料预冷、加冰屑拌和、埋石、减少水泥用量
2. 减少水泥水化热温升：冷却水管、减少浇注层厚度
利用仓面散热
3. 混凝土表面养护和保护：

本次课重点

- 1.重力坝的应力分析。重点掌握材料力学方法。
2. 强度指标
3. 影响坝体应力的各种因素。
4. 重力坝的温度裂缝和防止措施

思考题

1. 重力坝应力分析的材料力学法的基本假定
2. 重力坝的上游坝面坡度为什么不能太大？（结合公式说明）
3. 重力坝应力控制标准（强度指标）
4. 纵缝对坝体应力的影响。
5. 重力坝的温度裂缝的类型及防止措施

第六节 重力坝的剖面设计

一. 设计原则

满足强度和稳定要求，保证大坝安全；工程量小；运用方便；便于施工。

二. 基本剖面

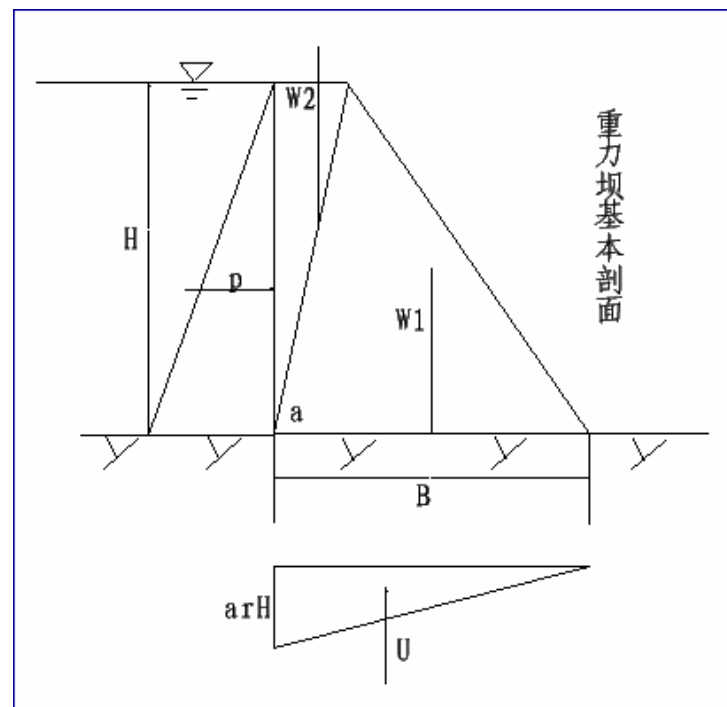
在**自重**、**静水压力**、**扬压力**三项主要荷载作用下，满足稳定和强度要求，并使工程量最小的**三角形剖面**。

当 $a > 90^\circ$ 时，即上游面为倒坡。

空库时，三角形重心可能超过底边三分点在下游面产生拉应力，而且倒坡不便施工。

当 $a < 90^\circ$ 时，可利用水重帮助稳定。

但角度太小时，满库时合力可能超过底边三分点（偏下游）在上游面产生拉应力。上游面坡度越缓，第一主应力越易成为拉应力，故 a 角不宜太小。



规律：

- 1) 施工运用方便多做成 $\alpha = 90^\circ$
- 2) f 较低时，为满足稳定，减小 α 角，利用水重
- 3) 工程经验

上游坡 $n=0 \sim 0.2$

下游坡 $m=0.6 \sim 0.8$

三. 实用剖面

1. 坝顶宽度

一般(8~10)%坝高；常态混凝土 3m；碾压混凝土 5m。
当坝顶布置移动式启闭机时，应满足轨距要求。(如图)

2. 坝顶高程 ——高于校核洪水位

坝顶或防浪墙顶高于静水位的超高值： $\Delta h = h_l + h_z + h_c$

h_l — $h_l\%$ ； h_c — 安全加高

坝顶或防浪墙顶高程 = $\begin{cases} \text{正常蓄水位(设计洪水位)} + \Delta h \\ \text{校核洪水位} + \Delta h_{\text{校}} \end{cases}$
二者之大值

3. 常用剖面形态

三种常用剖面形态，分别适用的情况。(画图)

三峡大坝：

正常蓄水位：175m

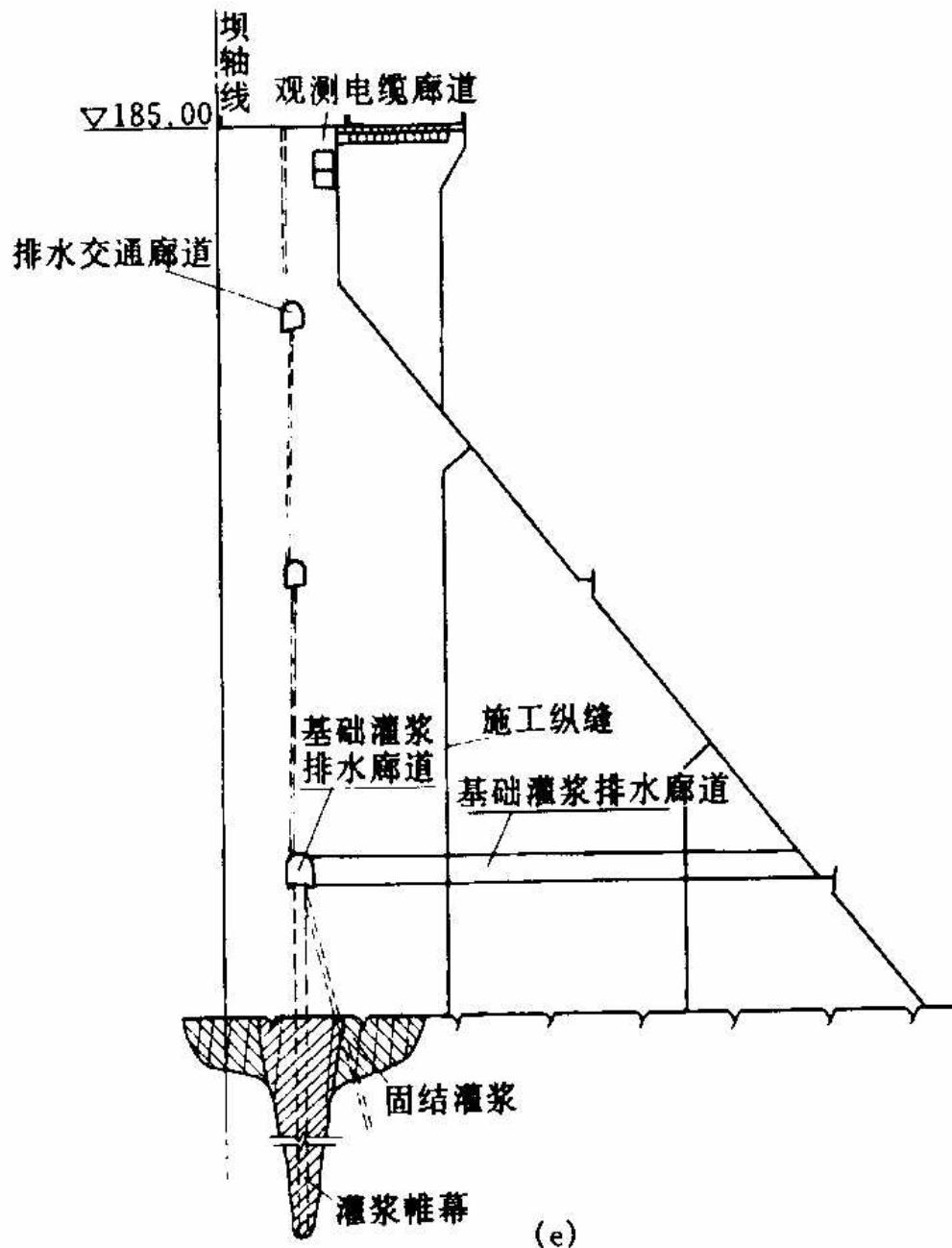
校核洪水位：180.4m

$m=0.7$ $n=0$

云南大朝山水电站

$m=0.7$

$n=0.2$



坝顶



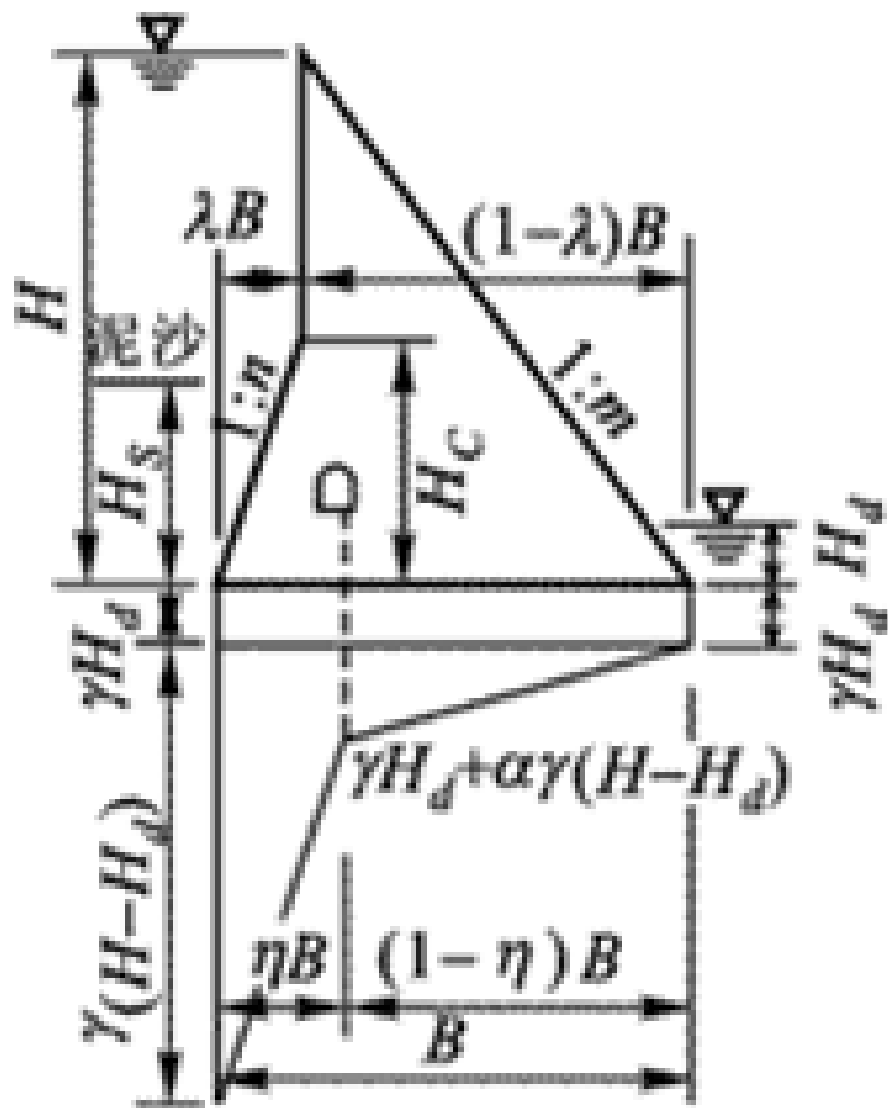
四 剖面优化设计

目的：在给定荷载条件下采用最经济、最合理的设计

优化设计方法：

- 传统重复设计法
- 准则法

根据重力坝设计规范关于抗滑稳定和坝踵应力的规定，按断面面积最小的要求（考虑上游坝面有折坡、上下游面有水压荷载、坝底扬压力呈折线分布、上游面有泥沙压力等情况）可推导出求解重力坝基本断面参数的方程以及最优解的判别式。



第七节 泄水重力坝

——既是泄水建筑物，又是挡水建筑物。



任务：泄洪、向下游输水、排沙、放空水库和施工导流等

泄水方式：坝顶溢流式和坝身泄水孔泄水式

一. 溢流重力坝

1. 溢流重力坝应满足的泄洪要求

- (1) 足够的孔口尺寸、良好的孔口体形、较高的流量系数 m ；
- (2) 水流平顺，不产生不利的负压和振动，避免空蚀；
- (3) 下游河床不产生危及坝体安全的局部冲刷；
- (4) 不产生折冲水流，不影响其它建筑物的正常运行；
- (5) 有能灵活控制水流下泄的设备。

2. 孔口设计

考虑的因素：

洪水标准、下游防洪要求、库水壅高有没有限制、泄水方式、枢纽所在地形地质条件等。

(1) 洪水标准

永久性建筑物洪水标准(混凝土坝、浆砌石坝)

建筑物级别	1	2	3	4	5
运用情况					
正常运用（设计）	1000 ~500	500 ~ 100	100 ~50		
非常运用（校核）	5000~2000	2000 ~1000	1000~500		

(2) 孔口形式

开敞溢流式和大孔口溢流式两种

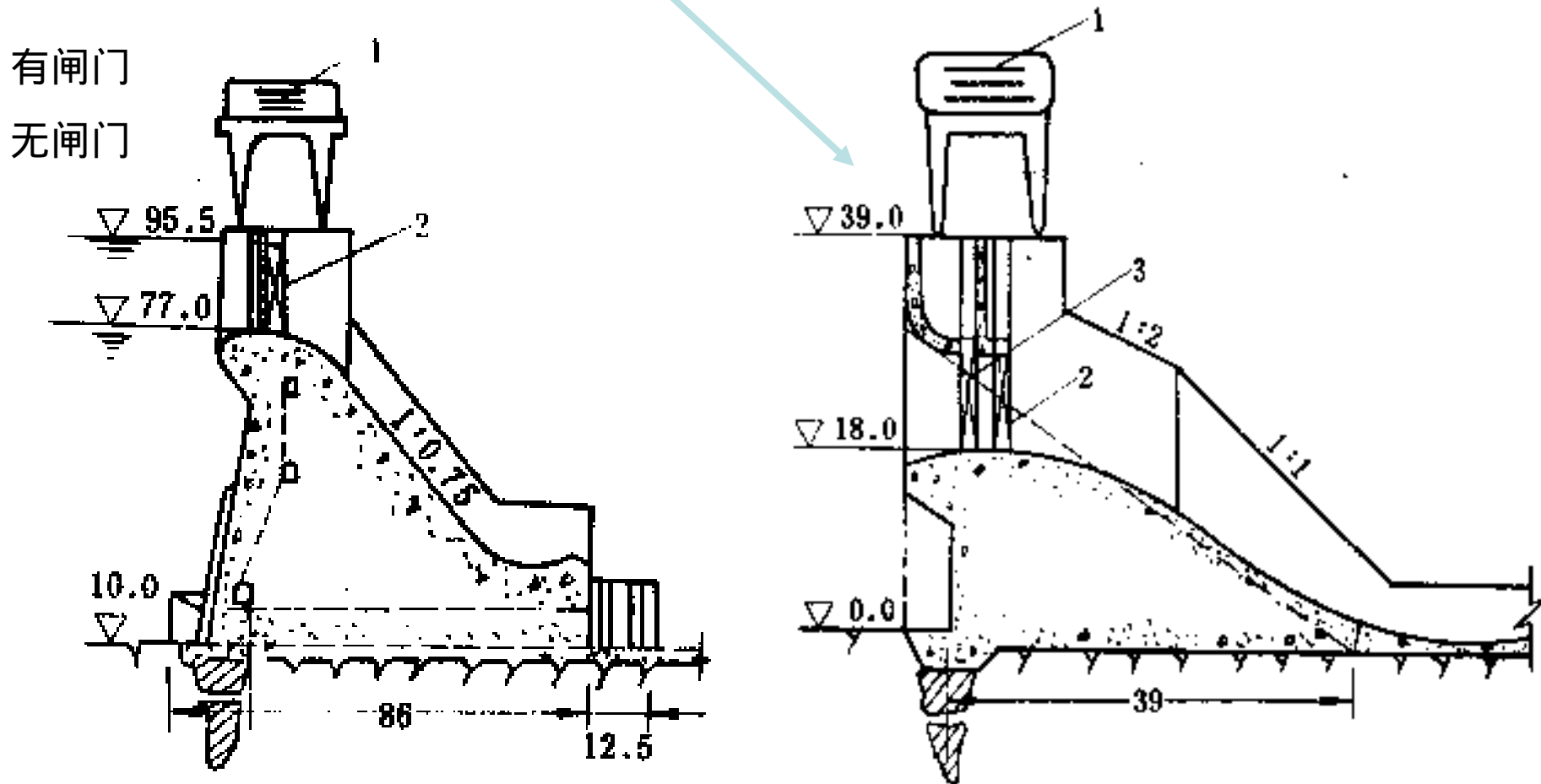


图 3-42 开敞溢流式重力坝

(3) 孔口尺寸

考虑的因素：泄洪要求、闸门和启闭机械、枢纽布置、
下游水流条件

下泄流量 Q 、单宽流量 q 、孔口宽度 b 、孔口数 n 、
溢流长度 L 、堰顶高程

$$q = Q / L$$

$$Q = nb\epsilon m\sqrt{2g}H_0^{3/2}$$

$$L_0 = nb + (n - 1)d$$

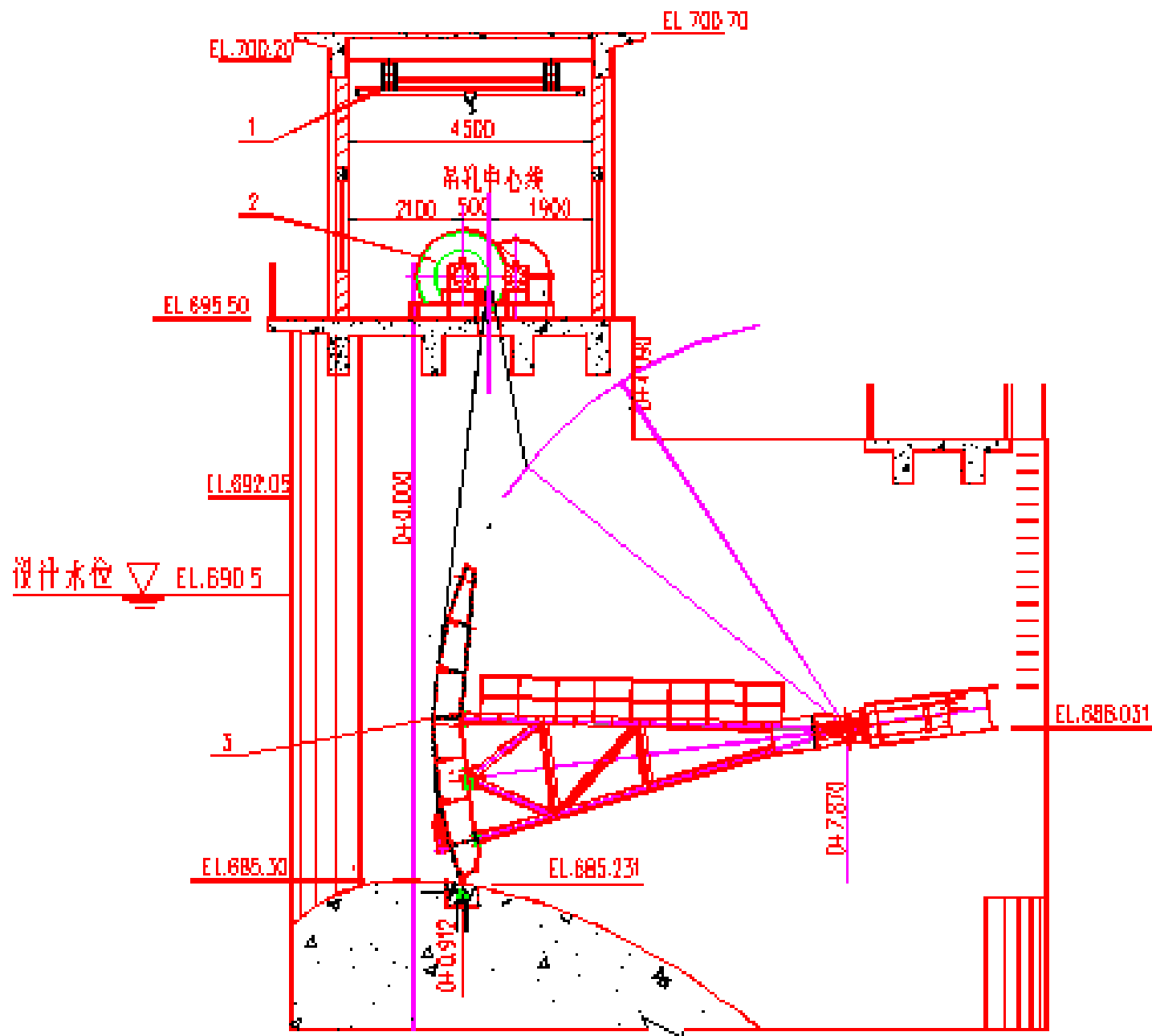
$$Q = nb\alpha m\sqrt{2g(H_0 - \alpha a)}$$

(4) 闸门和启闭机

{ 工作门
事故检修门

{ 平面闸门
弧形闸门

启闭机 { 固定式
移动式



小浪底水库弧门

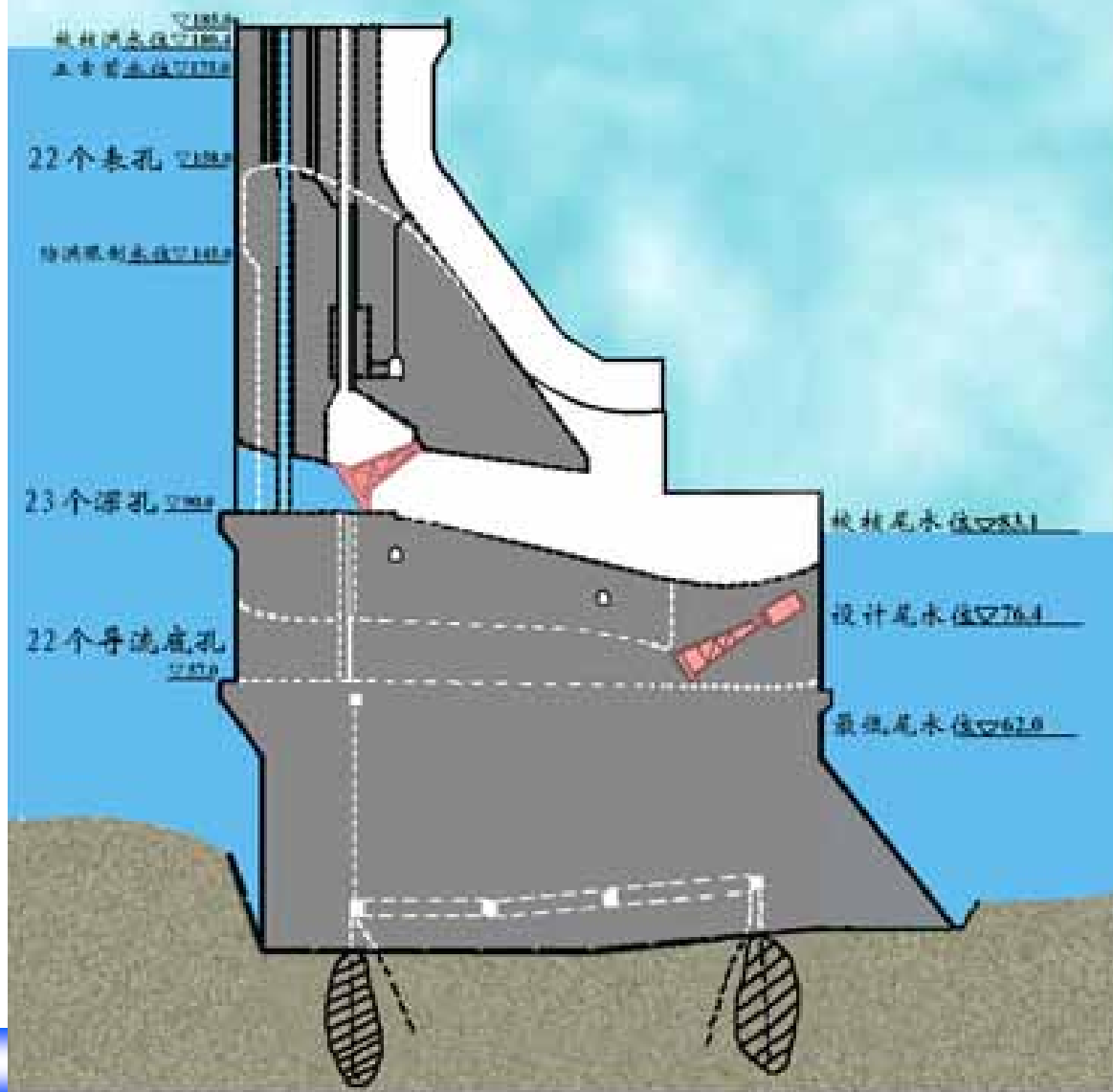


泄洪表孔：
孔口净宽8米高17米，溢
流堰顶高程158米）

平面闸门

活动式门机

溢流坝段剖面图





(5) 闸墩和工作桥

闸墩平面形状、厚度（平面、弧形）、长度、高度、缝墩、门槽



闸墩平面形状





水冠和冲击波

(6) 横缝布置



两种方式 { 闸墩中间
溢流孔跨中

3. 泄水重力坝设计中的几个有关高速水流的问题

空化和空蚀、掺气、水流脉动、冲击波

空化：气核 $\xrightarrow[\text{膨胀}]{\text{压力降低}}$ 小空泡

空蚀：空化水流 \longrightarrow 高压区，空泡受压溃灭 \longrightarrow 冲击力

主要原因： 流速、溢流面不平整

空蚀易发生的位置：

溢流面、反弧起点、闸门槽底槛及下游侧、变坡处

防止措施：

合理的溢流面体形

设置掺气装置

采用抗空蚀性能好的材料

提高施工质量

掺气：自掺气与强迫掺气

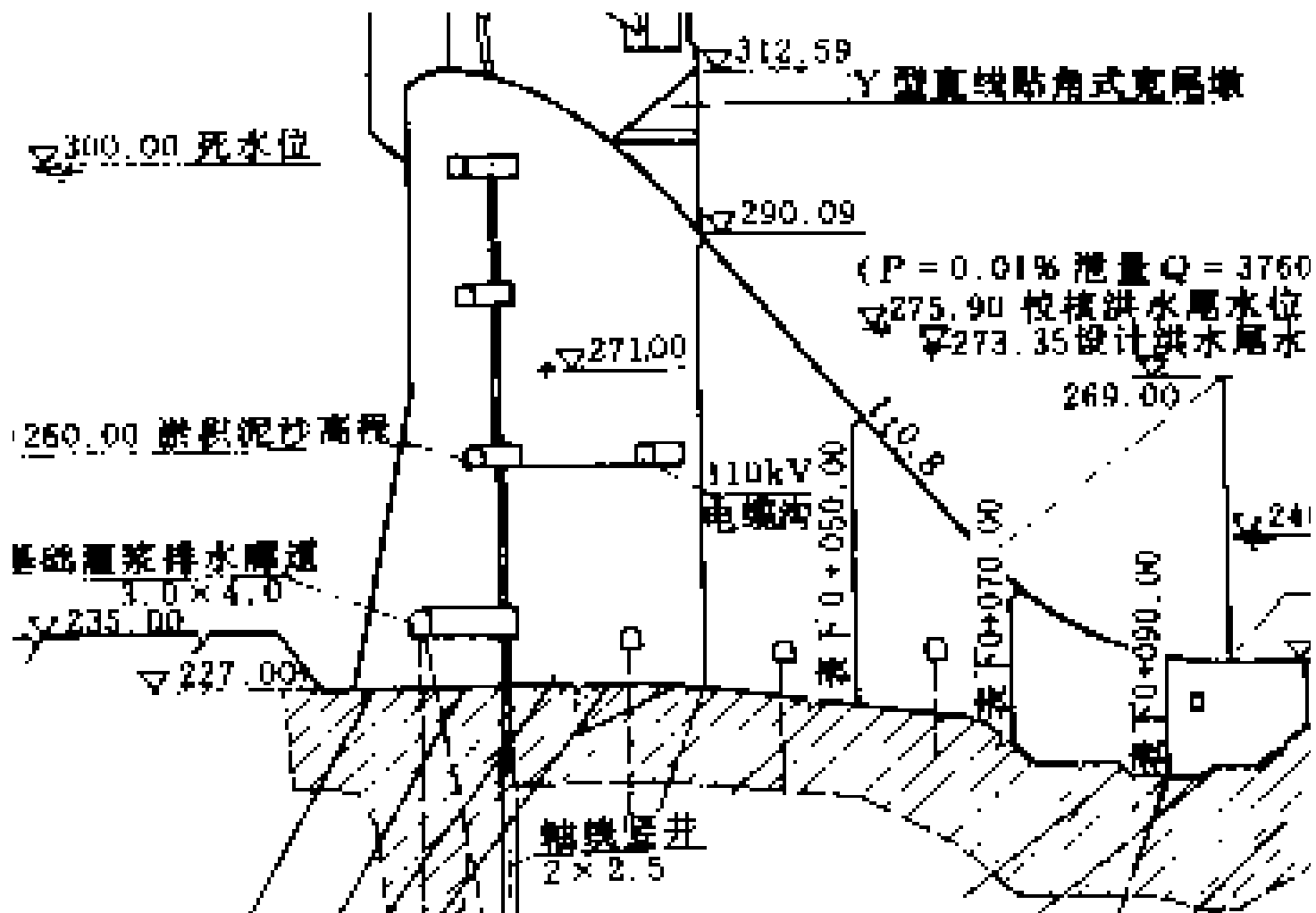
水流脉动：流速和压力随时间变化；对建筑物的影响(增大瞬时荷载、共振、增加气蚀破坏的可能性)

冲击波：断面变化处产生冲击波

4. 溢流面体形设计

设计原则：{ 较高的 m ， Q 大
水流平顺，不产生不利的负压和空蚀破坏；
体形简单、造价低、便于施工

溢流面组成：顶部曲线段、中间直线段和反弧段



安康水电站

(1) 顶部曲线段

——关键部位

克 - 奥曲线、WES曲线

WES曲线

上游段曲线和下游段曲线

H_d —— 定型设计水头，

$H_d = (75 \sim 95)\% H_{校}$

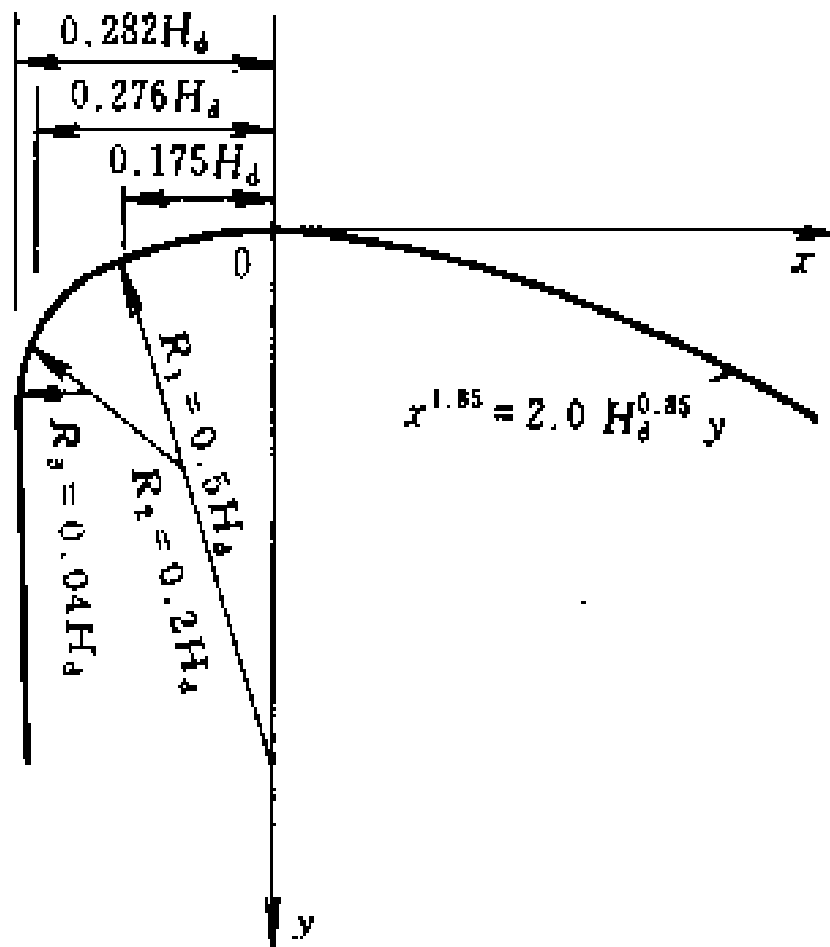
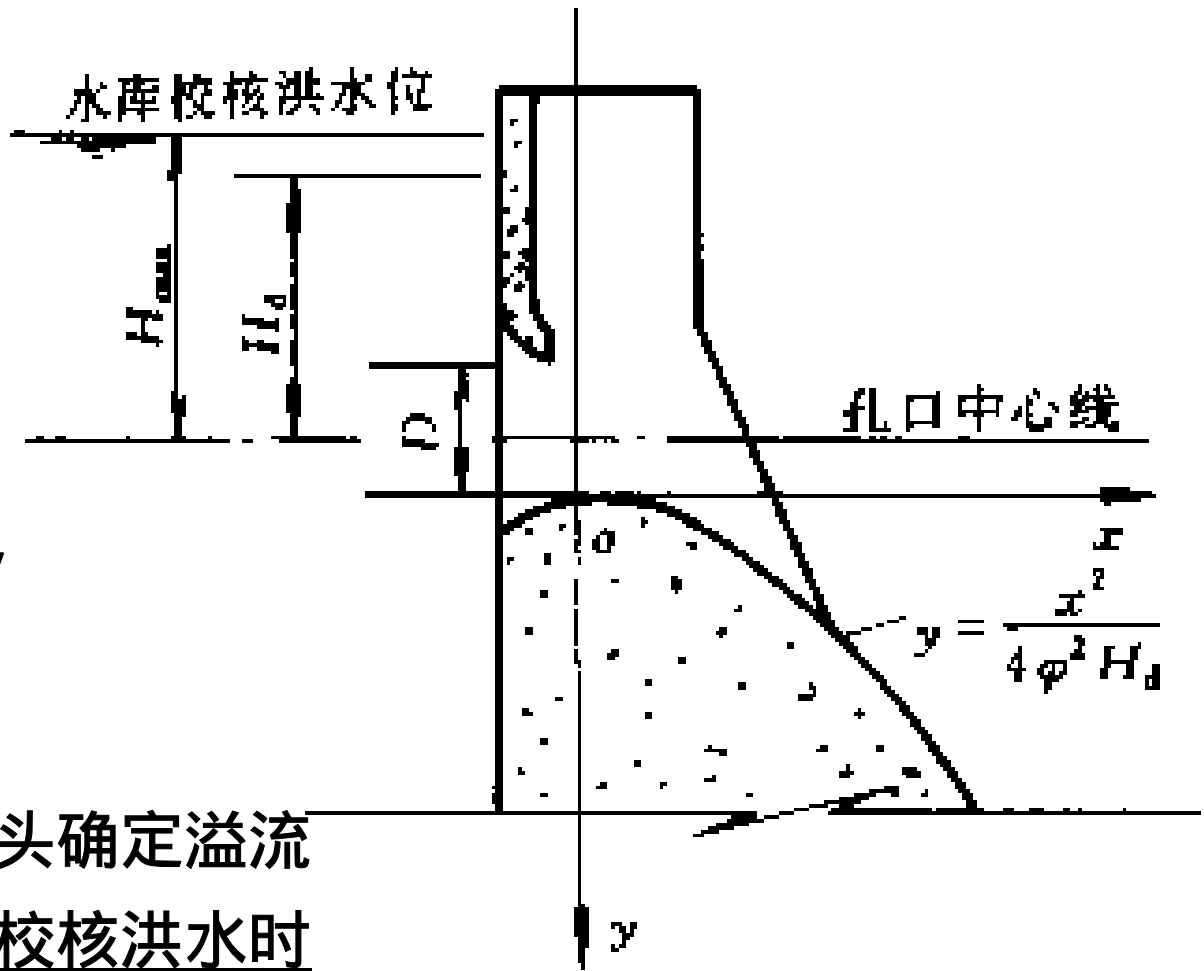


图 A1 上游面为铅直面的
堰顶上游段堰面曲线

有胸墙的大孔口

$H_{\max} / D > 1.5$, 按孔口射流曲线设计(图)

1.2 $H_{\max} / D \leq 1.5$,
模型试验确定



注意：按定型设计水头确定溢流堰顶部曲线，当通过校核洪水时将出现负压，要求负压值不得超过6m水柱高。

(2) 反弧段

目的：使从堰面下泄的水流能够平顺转向。

反弧半径R应结合下游效能设施来确定。

$$\text{挑流 } R=(4\sim 10)h \quad \text{底流 : } R = \frac{10^x}{3.28} \quad x = \frac{3.28v + 21H + 16}{11.8H + 64}$$

流速 $v < 16\text{m/s}$ ，取下限值

h ——校核洪水闸门全开时，反弧段最低点处的水深，m

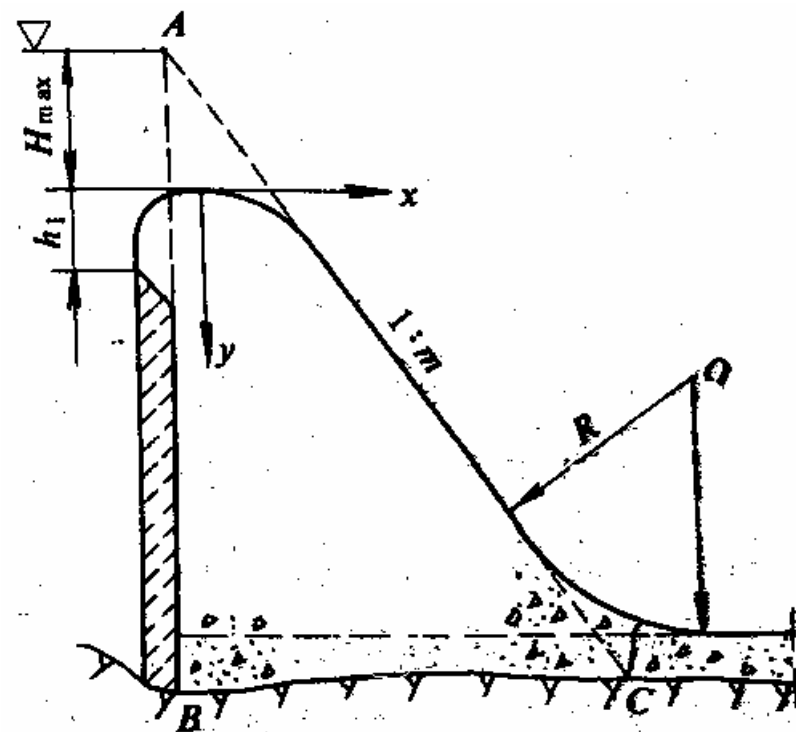
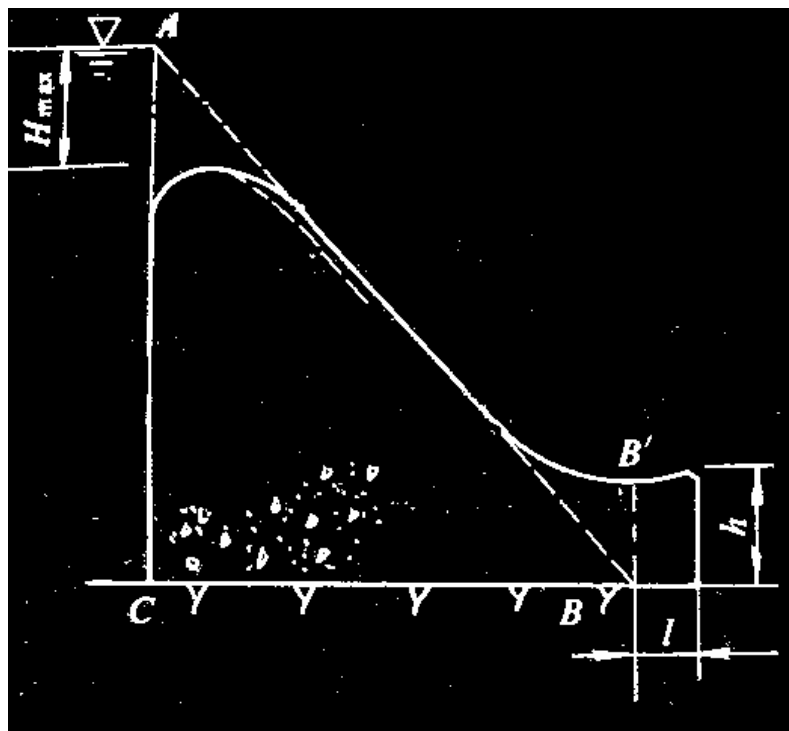
(3) 中间直线段

要求：与坝顶曲线和下部反弧段相切、坡度与非溢流坝段相同

(4) 剖面设计

要求与非溢流坝基本剖面相适应

若剖面小于基本三角形，则可适当调整堰顶曲线，使其与三角形斜边相切。



大于基本三角形，可将堰顶突向上游。

溢流堰较低时，堰面顶部曲线可直接与反弧段相接，无中间直线段。

5. 消能防冲设计

设计原则： 能量消耗、不冲刷、水流平稳、简单、工程量小

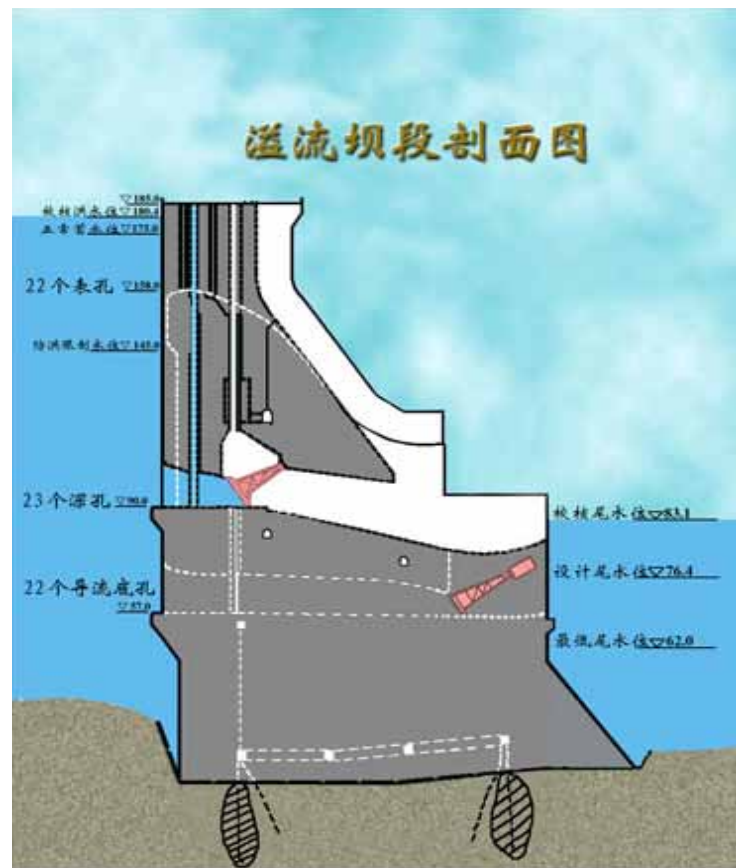
常用消能工形式：挑流消能、底流消能、面流消能、消力戽消能

(1)挑流消能—— 重点掌握

适用于：基岩比较坚固的高、中水头泄水建筑物。

优缺点：

设计内容：确定鼻坎形式、高程、反弧半径、挑角，计算水舌挑距、冲坑深度。



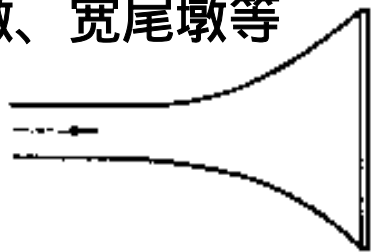


20 4:43 PM

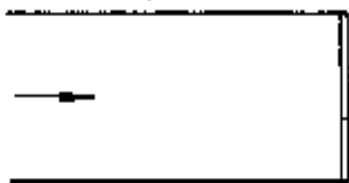
挑流消能



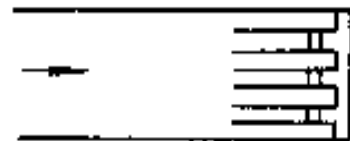
挑流鼻坎形式：连续坎、扩散坎、差动坎、斜挑坎、高低坎、窄缝坎、分流墩、宽尾墩等



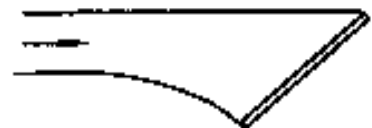
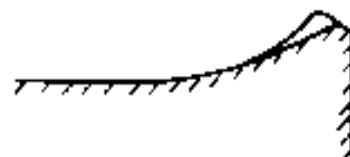
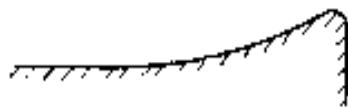
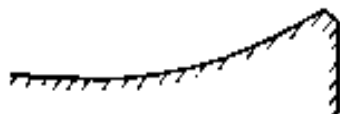
(a) 扩散坎



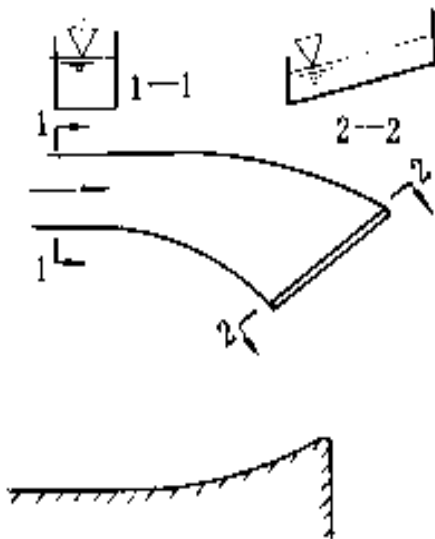
(b) 连续坎



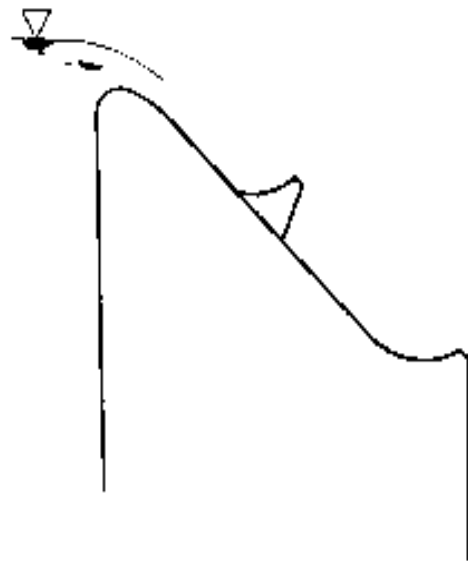
(c) 差动坎



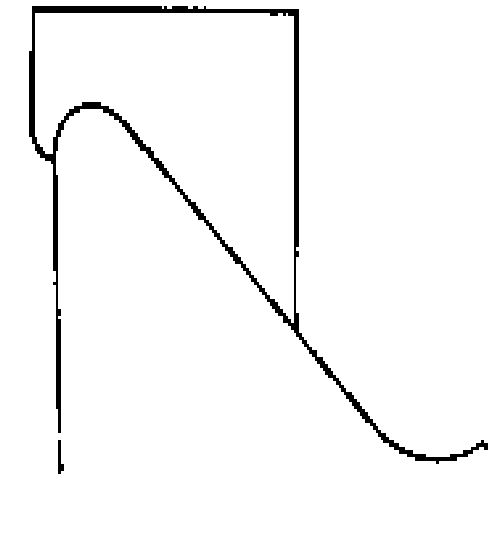
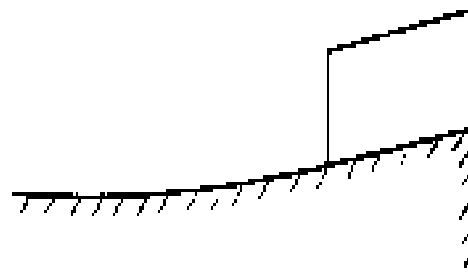
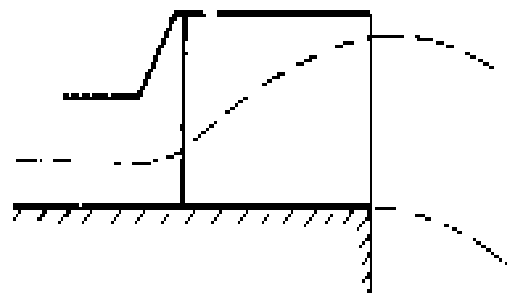
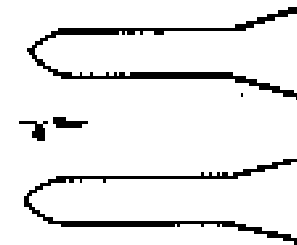
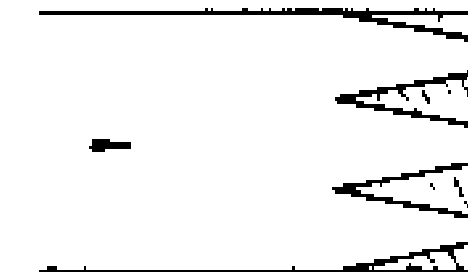
(d) 斜挑坎



(e) 扭曲坎



(f) 高低坎



(g) 窄缝坎

(h) 分流墩

(i) 宽尾墩

安康溢流坝采用宽尾墩形式



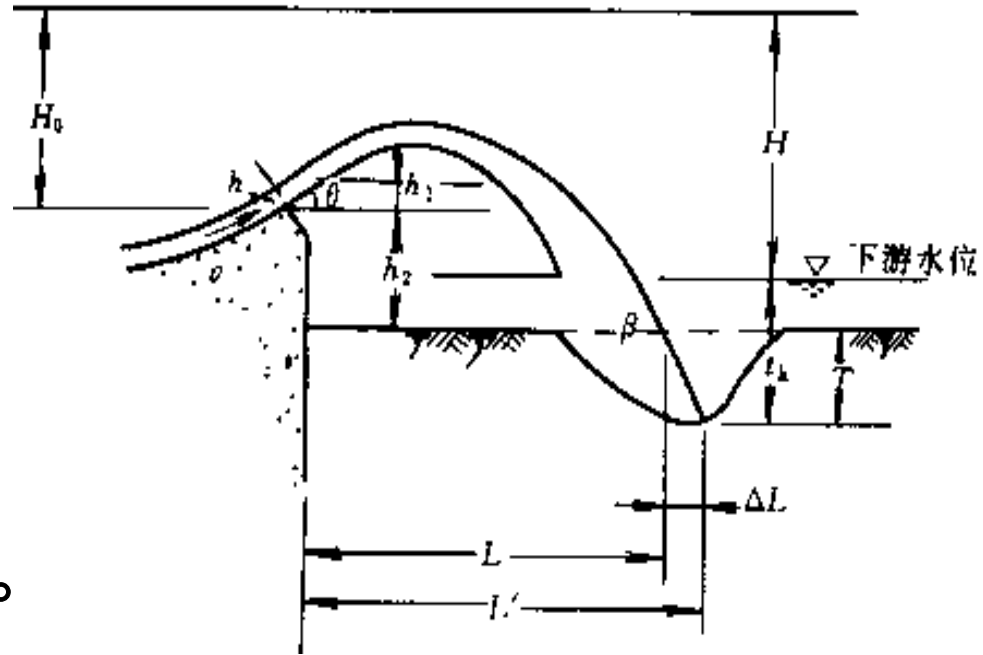
凤滩电站：采用高、低鼻坎挑流，水流空中撞击消能

连续坎设计：

鼻坎反弧半径

$$R=(8\sim 10)h$$

鼻坎最低高程：宜高出宣泄规定的洪水标准时的下游水位，但可略低于下游最高水位。



挑流鼻坎的挑角： $15^\circ \sim 35^\circ$

$$h_1 = h \cos \theta$$

$$v_1 = 1.1v = 1.1\varphi \sqrt{2gH_0}$$

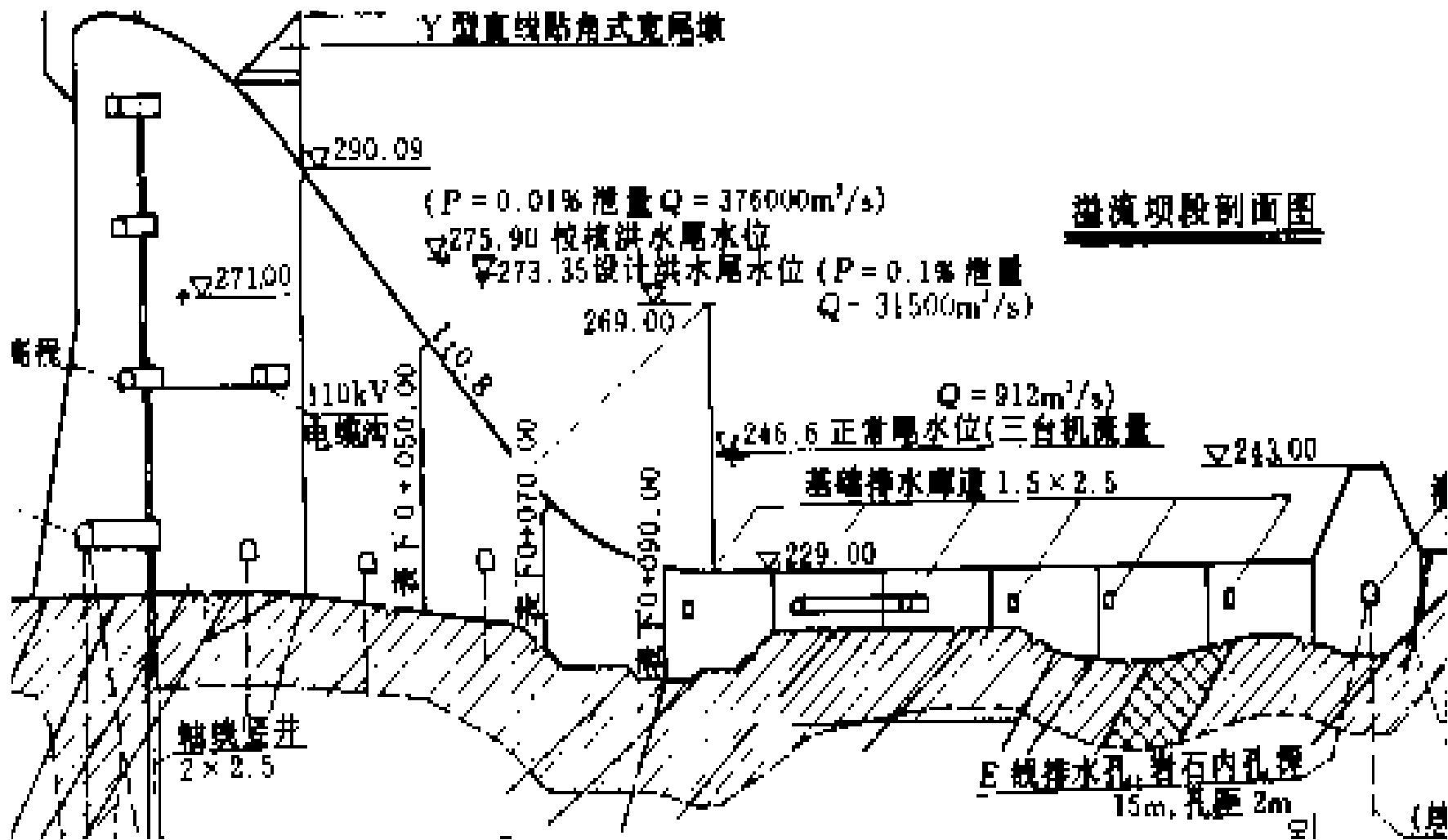
$$L = \frac{1}{g} [v_1^2 \sin \theta \cos \theta + v_1 \cos \theta \sqrt{v_1^2 \sin^2 \theta + 2g(h_1 + h_2)}]$$

$$\Delta L = T \tan \beta$$

$$L' = L + \Delta L \quad t_k = kq^{0.5} H^{0.25}$$

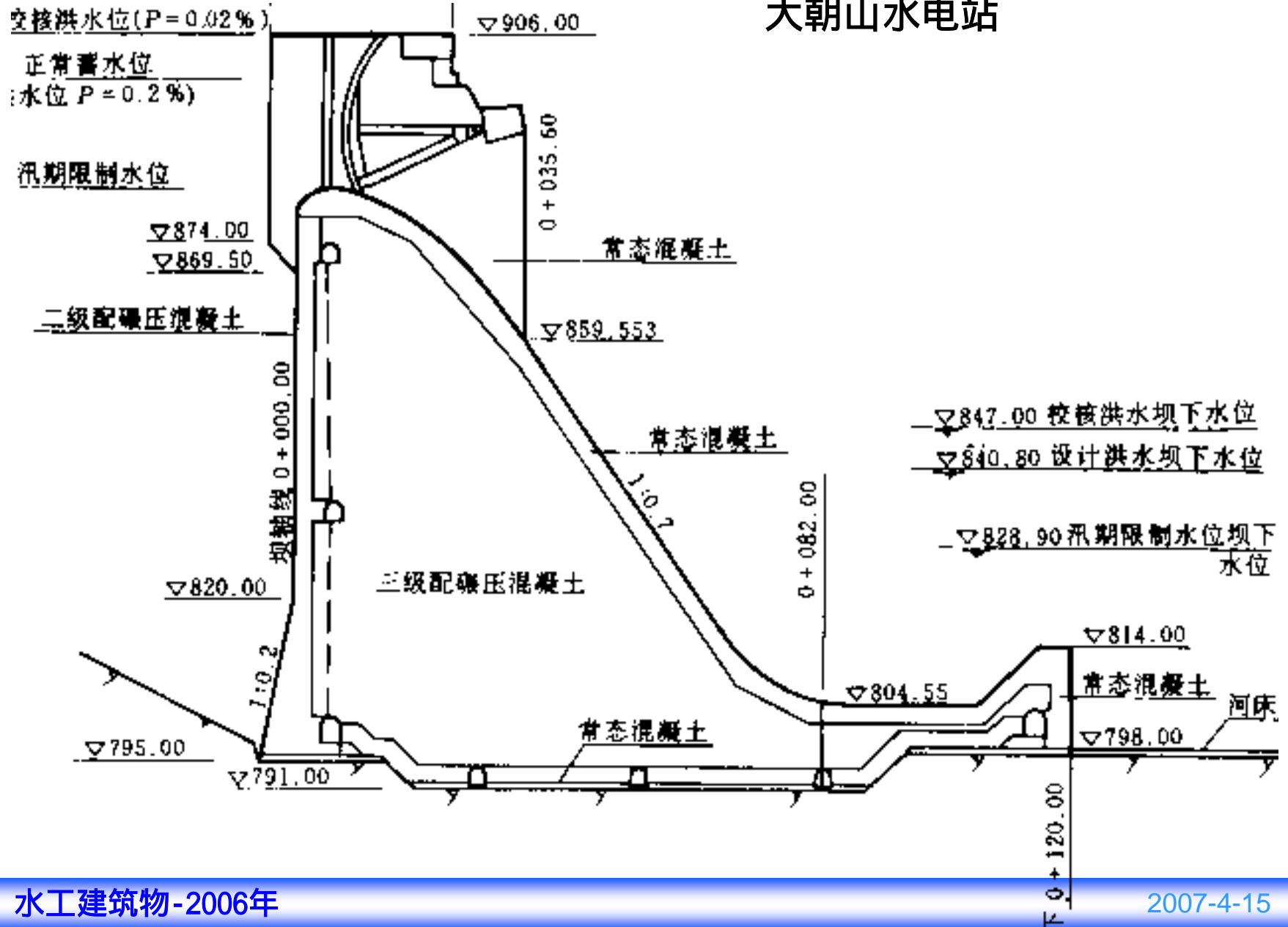
$$L' / t_k > 2.5$$

(2)底流消能 —— 通过水跃将急流转变为缓流。



安康水电站

大朝山水电站



底流消能试验



底流消能的关键：

设计时，要注意能产生一定淹没度的水跃。

措施：护坦未设消力坎形成消力池；

降低护坦高程；

既降低护坦高程又设消力坎；

优点：流态稳定、消能效果好；对地质条件和尾水变幅适应性强；雾化小。

缺点：工程量大，造价高

适用于中、低坝，且下游水位稳定，尾水较深。

消力戽消能



6. 联合消能

- (1) 多种泄水建筑物联合消能。如：表孔 + 深孔
- (2) 多种消能工联合消能。如：宽尾墩 + 底流消能

7. 下游折冲水流及防止措施

折冲水流： 水流不能很好扩散 主流两侧回流 强度不同
主流被压向一侧 冲刷河岸

防止措施： 枢纽布置上
闸门操作
导流墙等

二. 坝身泄水孔

1 作用与工作特点

进水孔处于水下

作用： 预泄库水、排沙、放空水库、施工导流、随时向下游放水

工作特点： 孔口内水流流速高，易产生负压、空蚀和振动。

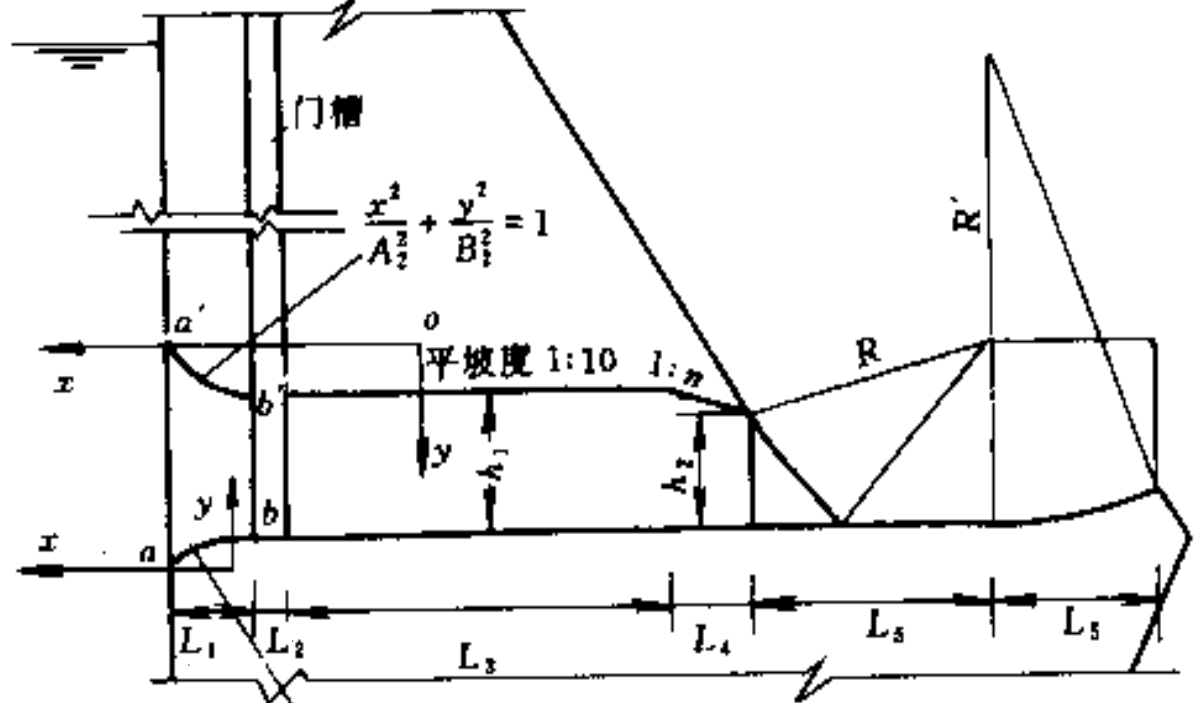
水头高、启门力大。

门体结构、止水、启闭设备复杂。

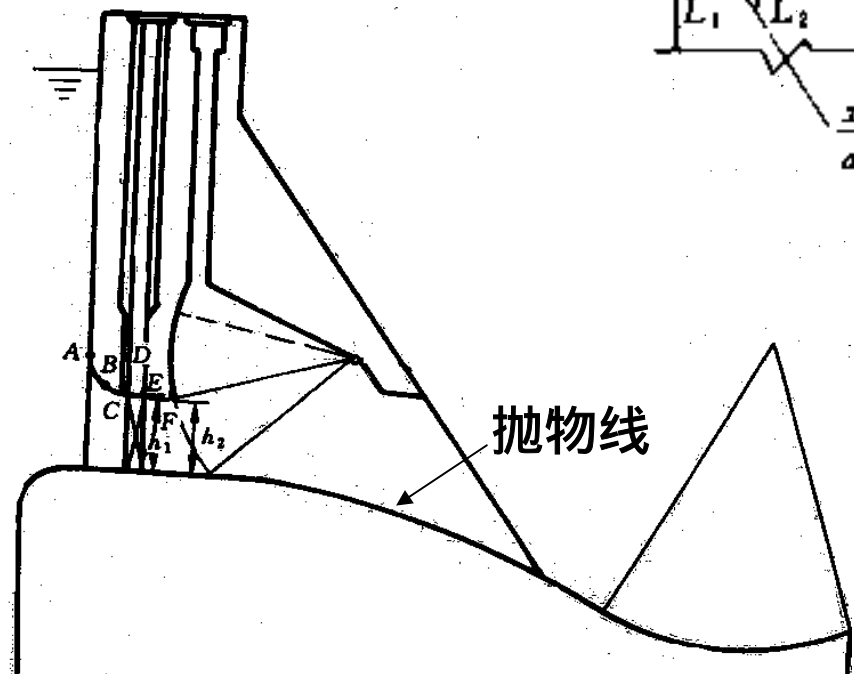
2 坝身泄水孔的形式及布置

按位置分： 中孔、底孔； **按水流条件分：** 有压、无压

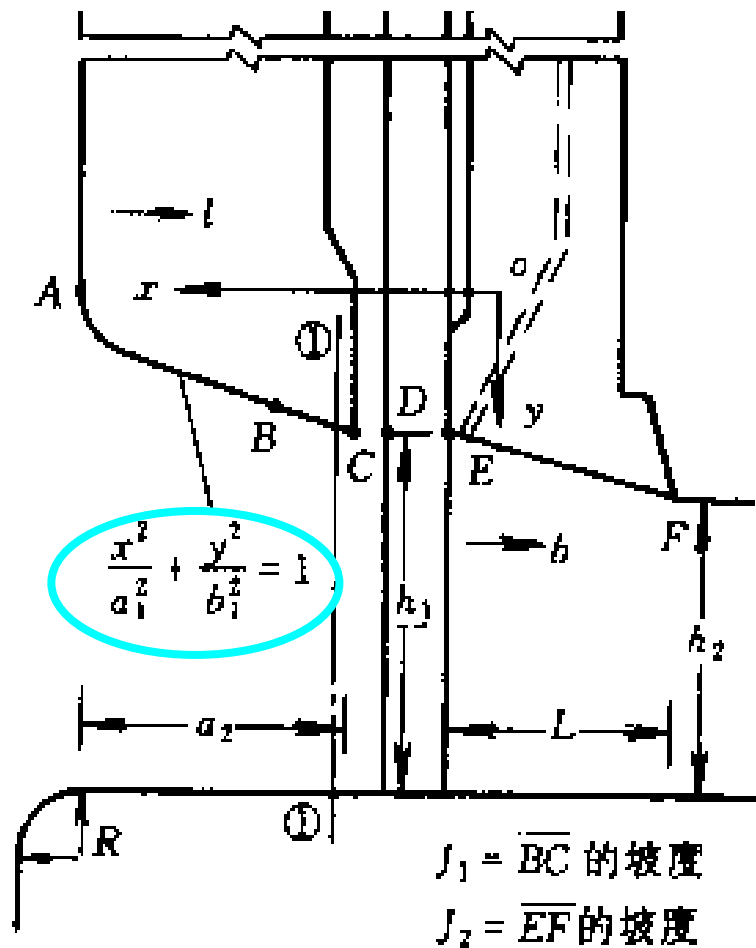
优缺点



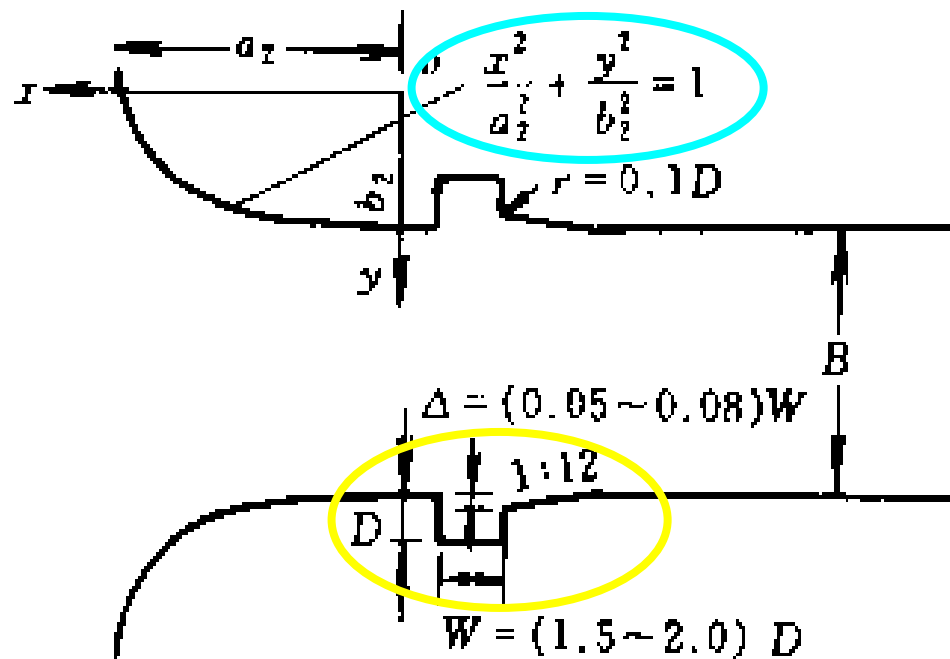
有压坝身泄水孔



无压坝身泄水孔



无压坝身泄水孔压力段布置图



$$a_1 = kh_1$$

$$b_1 = a_1 / 3$$

$$a_2 = 3b_2$$

$$b_2 = (0.22 \sim 0.27) B$$

深孔顶部曲线

$$\frac{x^2}{11^2} + \frac{y^2}{3.67^2} = 1$$

侧曲线

$$\frac{x^2}{4.5^2} + \frac{y^2}{1.3^2} = 1$$

底孔顶部曲线

$$\frac{x^2}{12^2} + \frac{y^2}{4^2} = 1$$

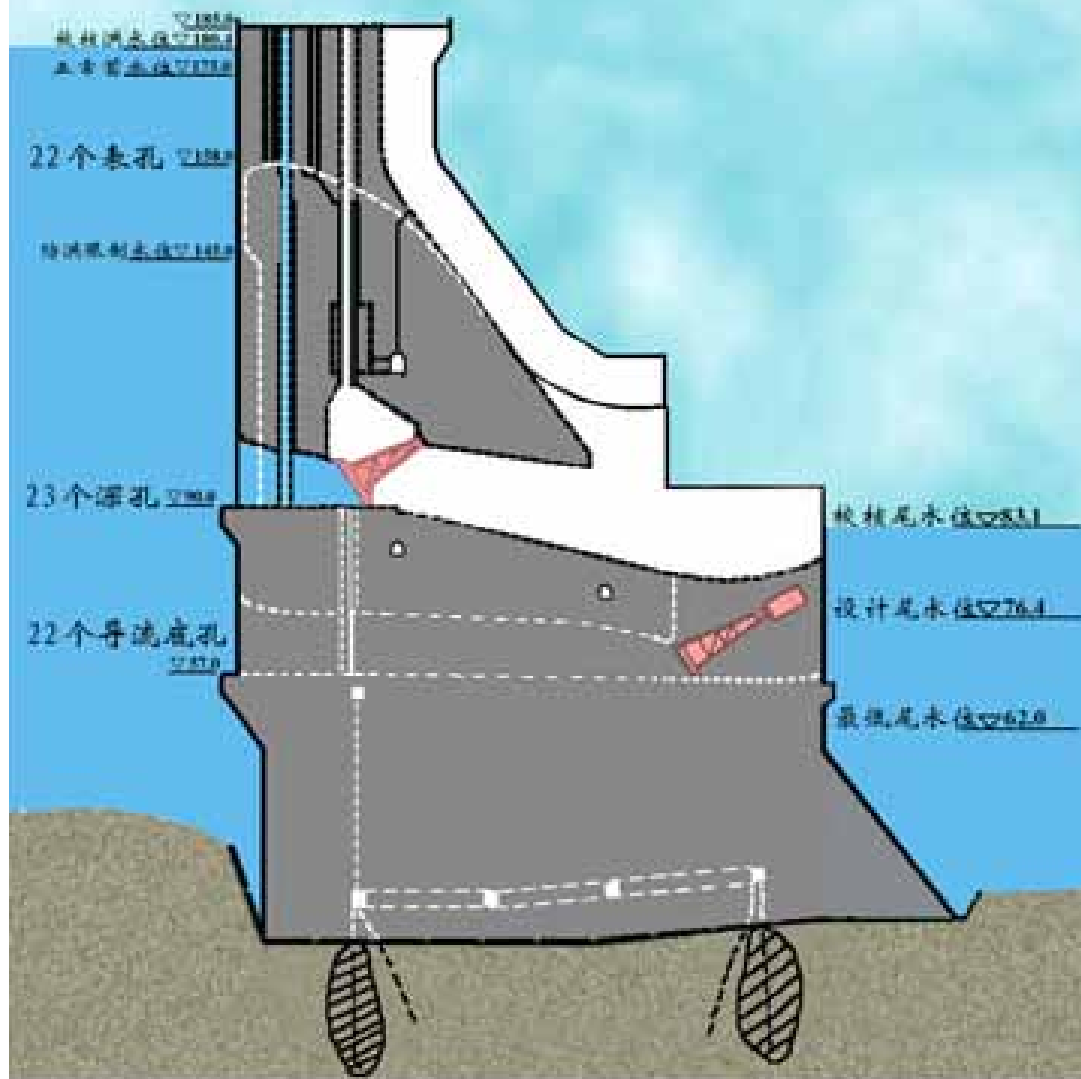
侧曲线

$$\frac{x^2}{4.8^2} + \frac{y^2}{1.2^2} = 1$$

洞身(矩形、圆形) 渐变段

平压管和通气孔

溢流坝段剖面图



重点掌握的内容

1. 重力坝的基本剖面与实用(设计)剖面
2. 溢流重力坝的孔口形式及其特点
3. 溢流重力坝的孔口设计
4. 空化与空蚀
5. 溢流面体形设计、设计定型水头
6. 基本消能形式有哪几种？底流消能和挑流消能各有何特点？设计的关键是什么？
7. 有压泄水孔与无压泄水孔设计上有何不同？

第八节 重力坝的地基处理

重力坝一般需建在**岩基**上

地基处理的任务： 防渗；
提高基岩的强度和整体性。

处理后的地基应达到的要求：

1. 具有**足够的强度**，以承受坝体的压力。
2. 具有**足够的整体性和均匀性**，以满足坝基抗滑稳定和减少不均匀沉陷。
3. 具有**足够的抗渗性**，以满足渗透稳定，控制渗流量。
4. 具有**足够的耐久性**，以防止岩体性质在水的长期作用下发生恶化。

一. 坝基的开挖与清理

1. 坝基开挖深度

《混凝土重力坝设计规范》DL 5108 - 1999 规定：

- 100m以上的重力坝需建在新鲜、微风化或弱风化下部基岩上；
- 50m~100m的坝可建在微风化至弱风化中部基岩上；
- 50m以下的坝可建在弱风化中部至上部基岩上。

2. 坝基开挖中的处理

靠近坝基面的缓倾角尽可能清除；

基岩面略向上游倾斜；

避免高低悬殊的突变等

二. 坝基的固结灌浆

目的：提高基岩的整体性和强度，降低地基的透水性。

固结灌浆设计内容：

- 1 . 灌浆位置：高坝或岩基裂隙发育，全坝基灌浆；一般情况下在坝踵坝趾处灌浆。
- 2 . 灌浆孔的深度：一般5 ~ 8m；帷幕上游区8 ~ 15m
- 3 . 灌浆孔的间距：孔距、排距 3 ~ 4m
- 4 . 灌浆孔的排列形式：梅花形
- 5 . 灌浆孔的钻孔方向：与主要裂隙面正交。
- 6 . 灌浆的压力：在不扰动基岩的前提下尽量大。
无混凝土盖重时为0.2 - 0.4MPa
有混凝土盖重时为0.4 - 0.7MPa

三. 帷幕灌浆

目的：降低坝底渗透压力，防止坝基内产生机械或化学管涌；
减少坝基和绕坝渗漏量，使其在允许范围内。

1、帷幕位置：帷幕中心线离上游面距离约0.1倍底宽

2、帷幕灌浆范围：河床至两岸，帷幕应连续。

3、帷幕深度

应根据作用水头和基岩的地质情况确定

地基内透水层厚度不大时，帷幕可伸入相对隔水层3~5m；

当透水层埋藏较深或分布无规律时，通常取(0.3~0.7)倍水头。

相对隔水层的透水率 q { 坝高100m以上， $q=1\sim 3Lu$
坝高50m~100m， $q=3\sim 5Lu$
坝高50m以下， $q=5Lu$

透水率计算公式为 $q = Q/Lp$

式中： q 试段透水率，单位：Lu；
 L 试段长，单位：m；
 Q 渗流量，单位：L/min；
 p 试段压力值，单位：MPa.

4、帷幕灌浆孔的排数、孔距、排距

排数：坝高100m以下，可采用1排；地质条件差的，可采用两排。

采用两排时，孔深一排为设计深度，另一排取1/2设计深度。

孔距 1.5~3m、**排距** 宜比孔距略小

钻孔方向：穿过岩体主要裂隙和层理，倾向上游 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$

5、灌浆压力

帷幕孔顶段(1.0~1.5)倍坝前静水头
底段(2~3)倍坝前静水头

四. 坝基排水

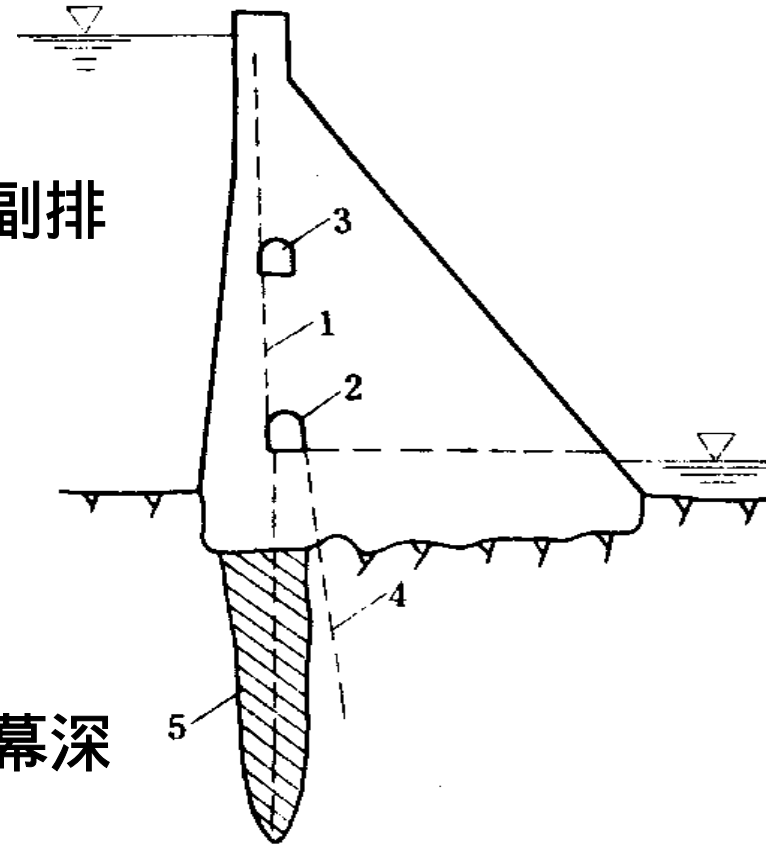
目的：充分降低坝基渗透压力并排除渗水。

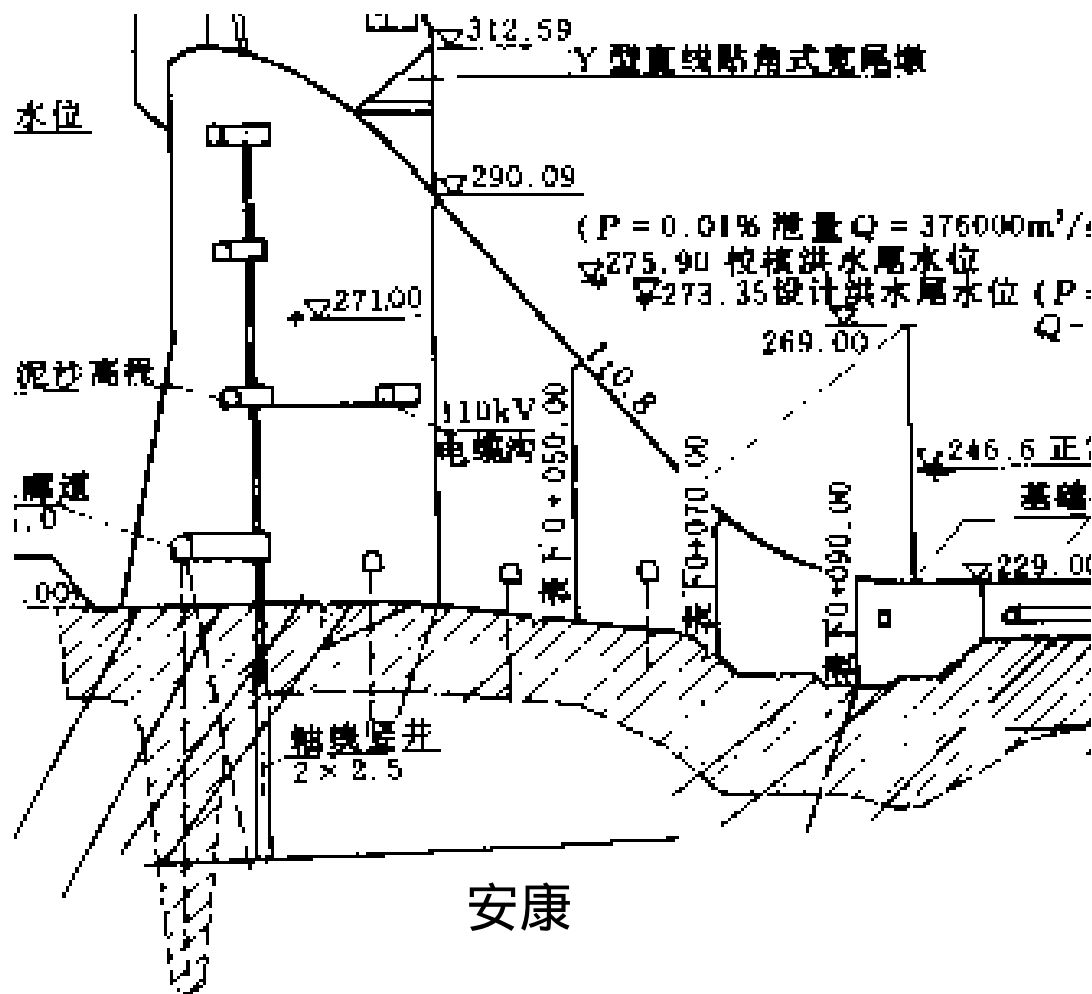
- 主排水幕(帷幕后)
- 主排水幕 + 纵横向廊道组成的副排水系统

孔距：主排水孔2 - 3m；
副排水孔3 - 5m

孔径：150 - 200mm

深度：主排水孔为(0.4-0.6)倍帷幕深
副排水孔6 - 12m





- 主排水幕 + 纵横向廊道组成的副排水系统

五. 断层破碎带、软弱夹层和溶洞的处理

1、断层破碎带（倾角较陡）

规模不大，但对基础强度和压缩变形有一定影响时

——**混凝土塞**加固

规模大，影响范围广，且对基础强度和压缩变形有较大影响时

——进行专门的处理设计

2、缓倾角软弱结构面

根据埋深不同，分别采用：

混凝土置换、混凝土深齿墙、混凝土塞——提高抗剪能力

抗滑桩、预应力锚索、化学灌浆等——保证抗滑稳定

3、溶洞

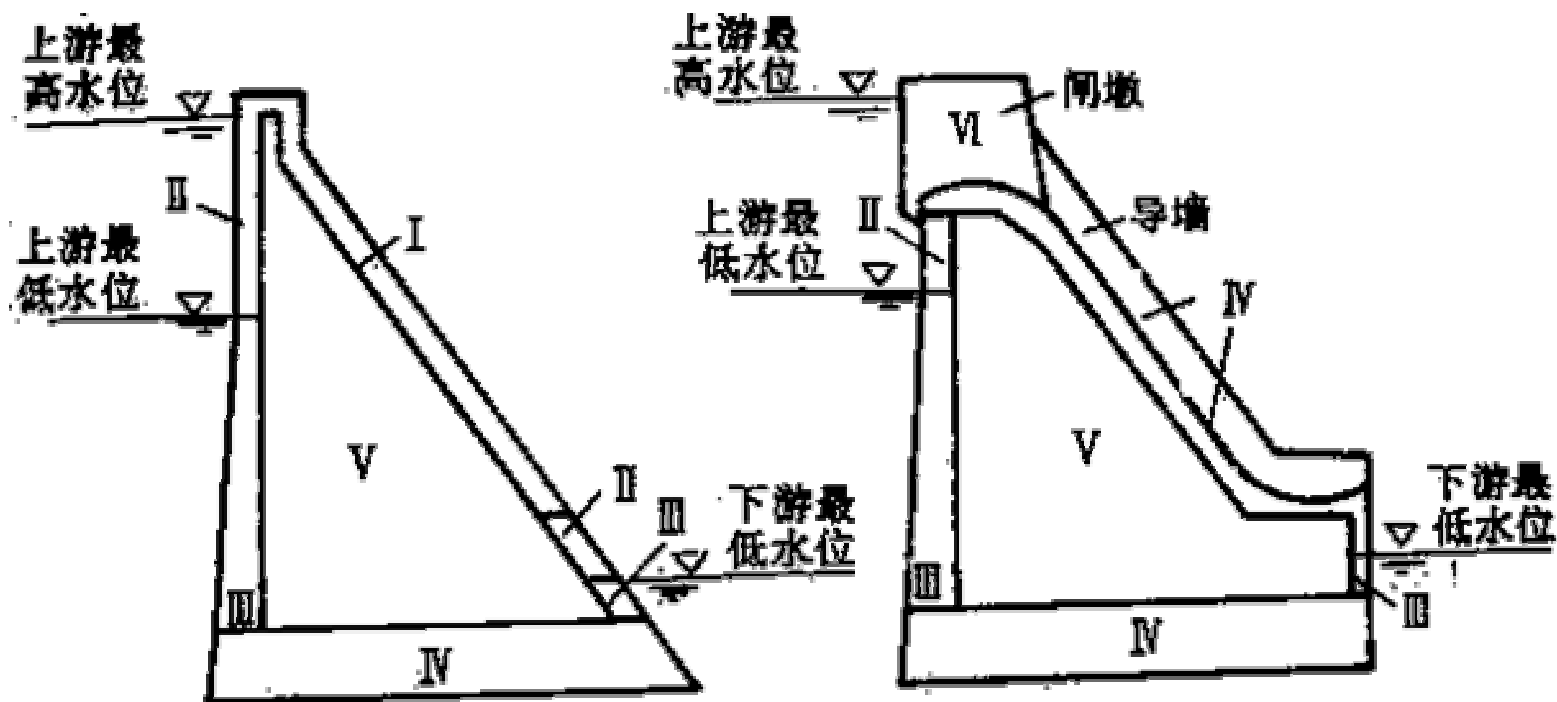
防渗帷幕灌浆、防渗墙

思考题

1. 重力坝对地基有何要求？
2. 地基处理的任务是什么？
3. 固结灌浆的目的是什么？范围？
4. 帷幕灌浆的目的是什么？帷幕深度、厚度、灌浆压力如何确定？
5. 坝基排水的目的是什么？如何布置？
6. 为什么要对断层、破碎带进行处理？应如何处理？

第九节 重力坝的构造

一. 坝体混凝土分区



抗冻； 抗冻； 强度、抗渗； 强度、低热；

低热、强度； 强度、抗冻、抗侵蚀、抗冲刷。

二. 重力坝的分缝、分块

缝的分类 { 横缝
纵缝
水平施工缝

1. 横缝

作用

横缝间距：15~20m~24m

类型 { 永久性横缝：伸缩缝或沉降缝，大小1~2cm。
临时性横缝
坝段与基岩面的连接

处理方法 { 永久性横缝：缝面为竖直平面，不灌浆。
临时性横缝：缝面设键槽和灌浆系统灌浆

2. 纵缝

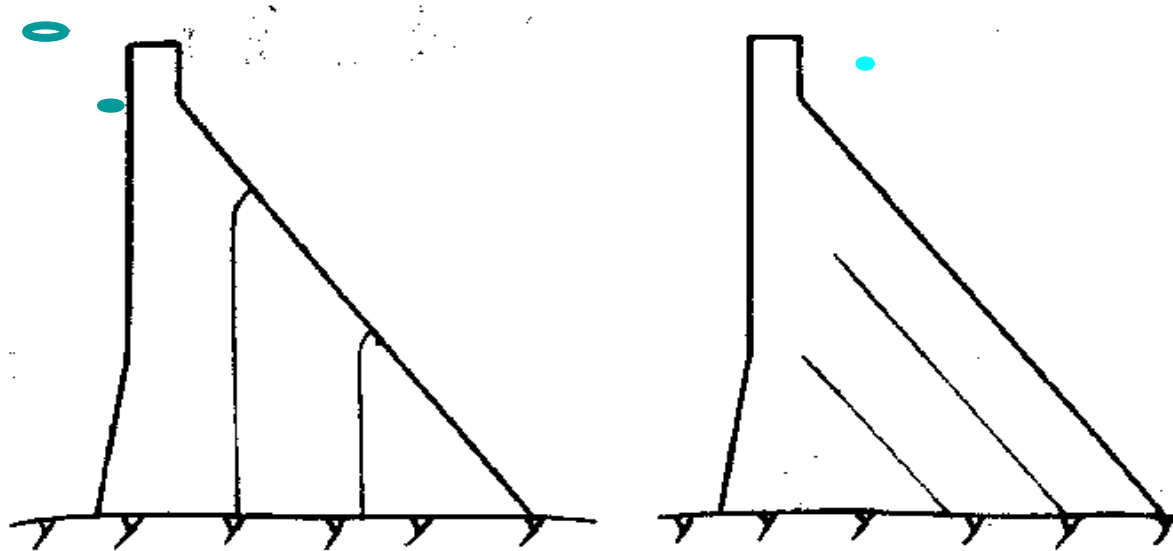
作用:

纵缝间距：15~30m

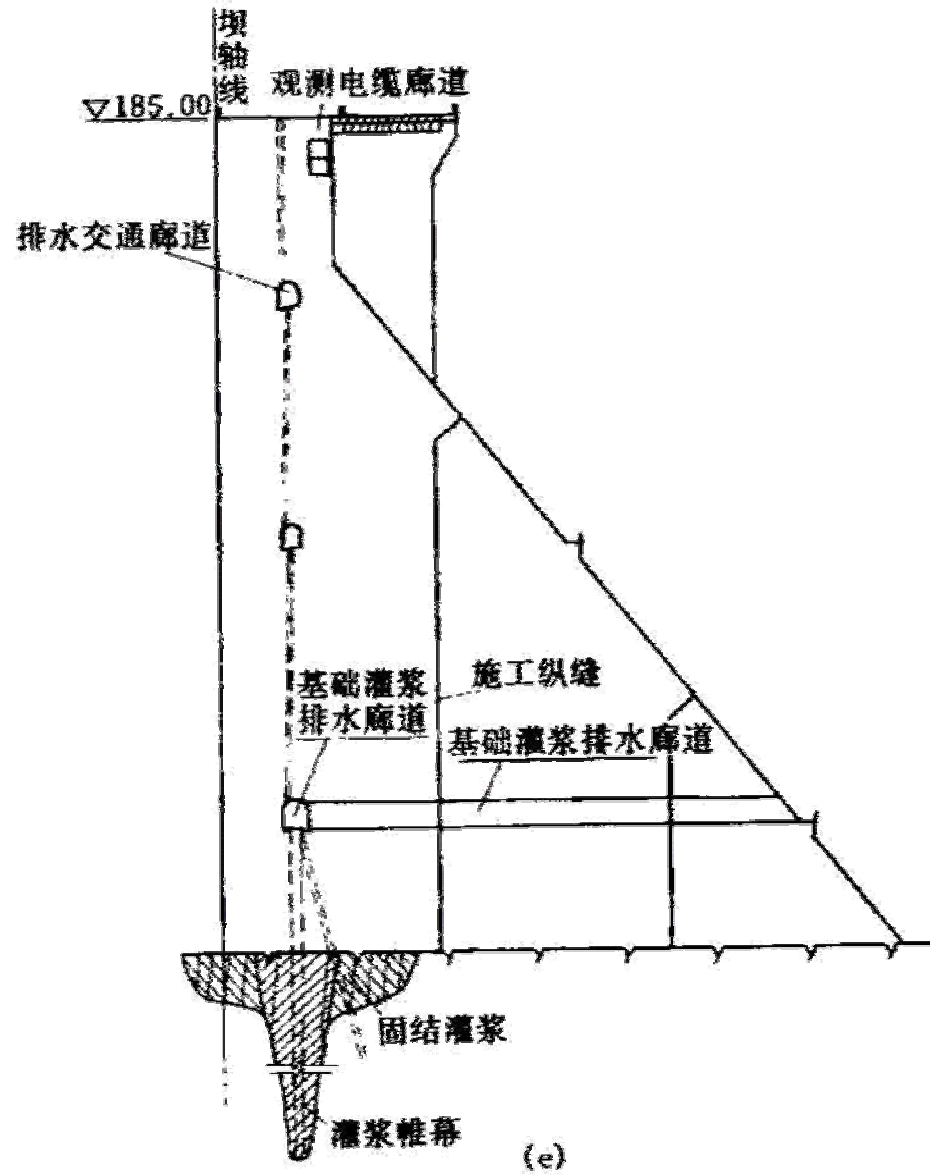
按布置形式分：竖缝、斜缝、错缝

竖缝型式：缝面设水平向键槽，并布置灌浆系统——灌浆。

斜缝型式：缝面可不灌浆，适用中低坝。



！！条件允许，可不设纵缝，采用通仓浇筑。



(e)

3. 水平施工缝

是指上下浇筑块结合面处的缝

浇筑层厚度，需根据容许温差计算确定。

处理方法：冲洗 → 麻面，铺设2~3cm厚水泥砂浆、再浇筑

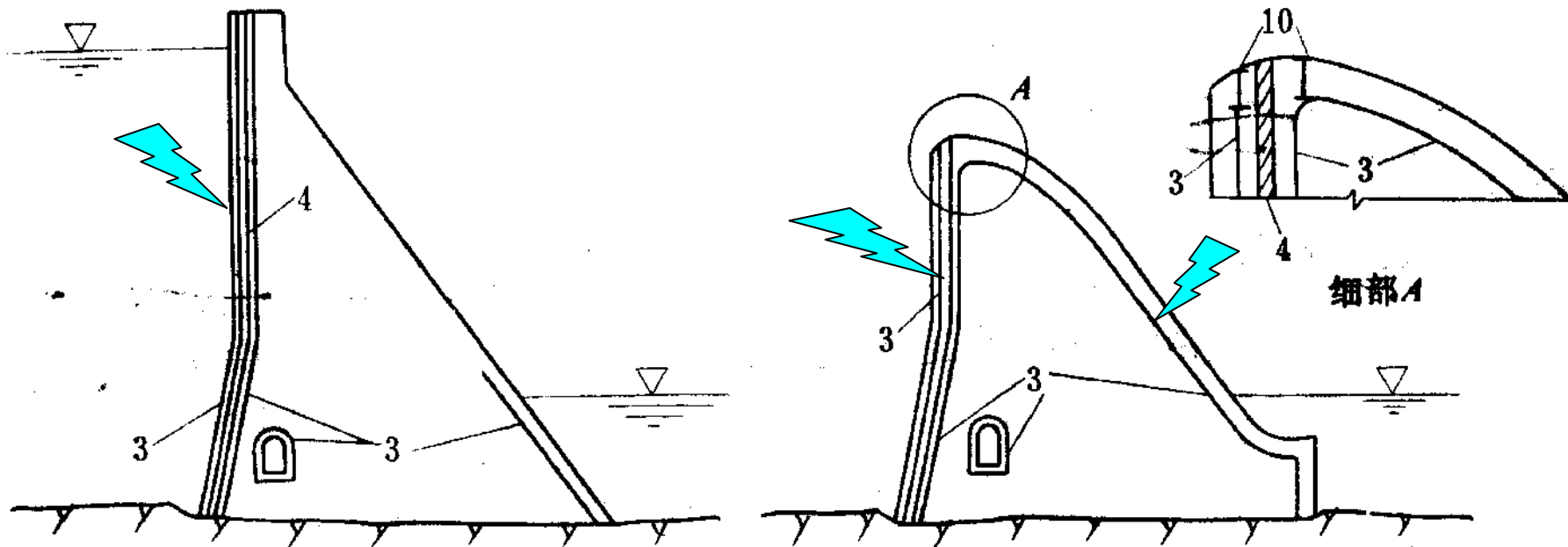
！！注意：同一坝段，相邻浇筑块水平施工缝应错开。

防止削弱坝体水平截面的抗剪强度

三. 坝体止水和排水

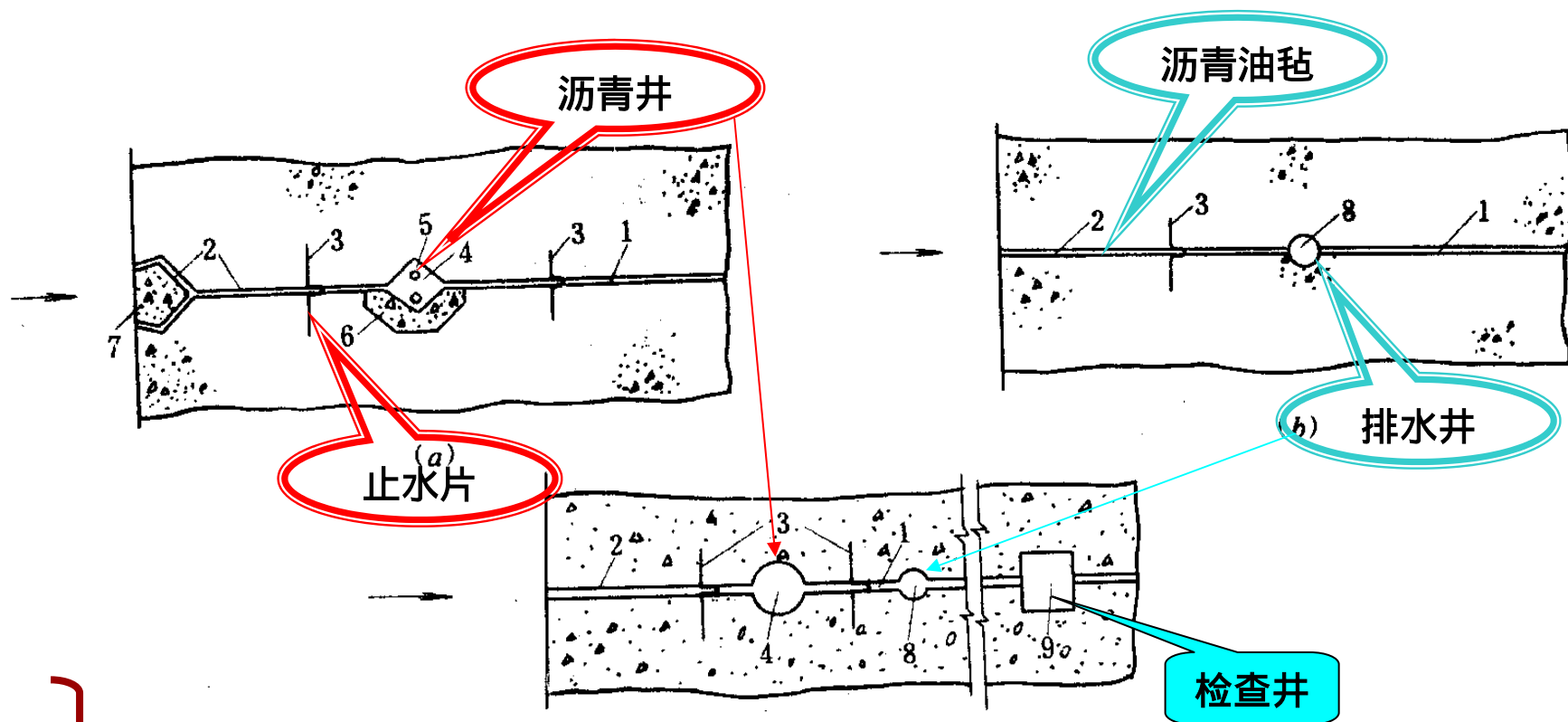
1. 止水

位置：横缝上游面、溢流面、下游面最高尾水位以下、坝内廊道和孔洞穿过分缝处的四周等部位



高坝：设2道铜片止水；

中低坝：第1道铜片止水，第2道橡胶止水。



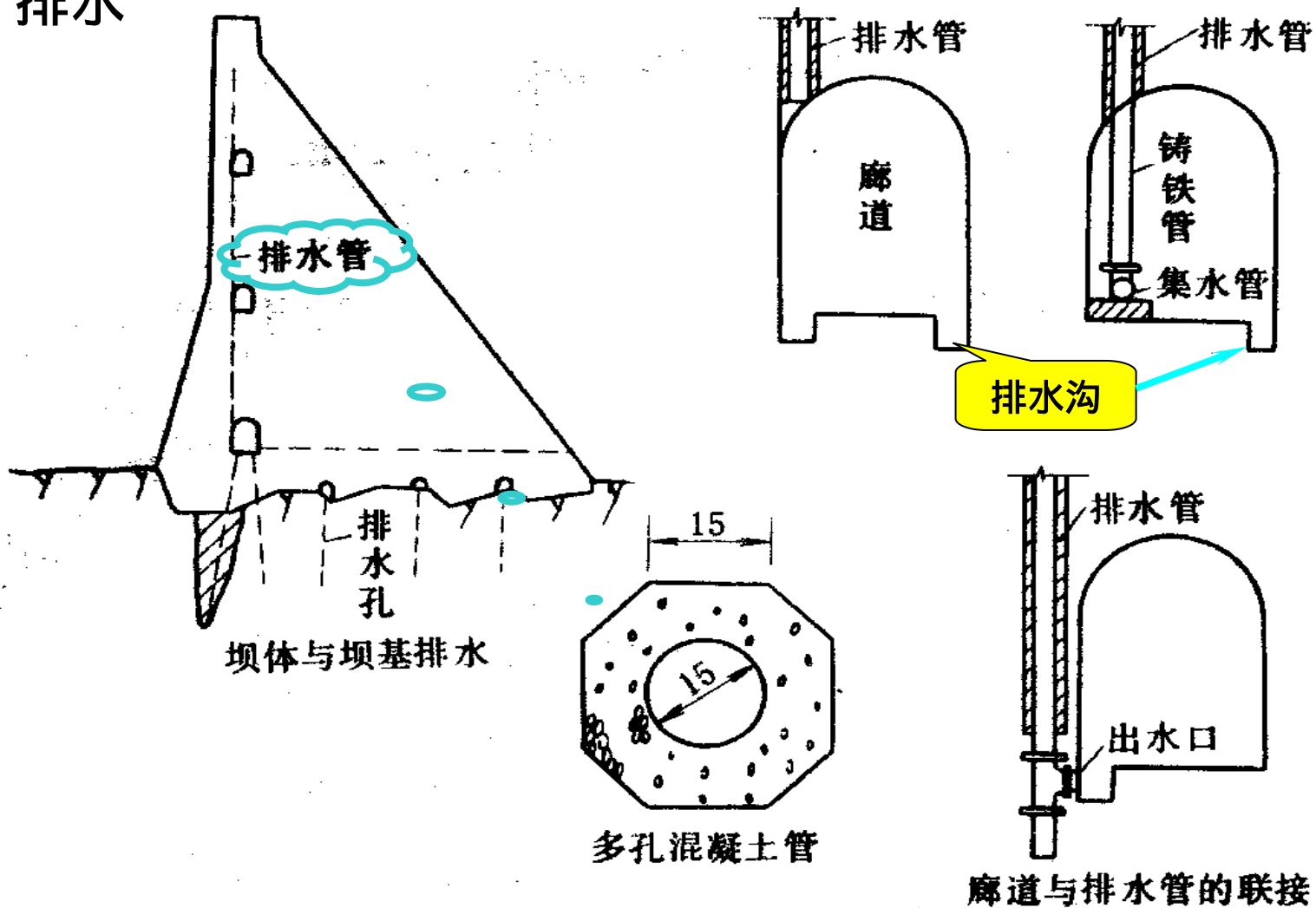
止水铜片形状、厚度(1~1.6mm)

止水铜片必须与坝基岩石妥善连接，埋入基岩内30~50cm；
顶部至最高水位以上

横缝



2. 排水



排水沟尺寸30x30cm，底坡 0.3%

排水管间距2~3m，内径15~25cm

四. 廊道系统

1. 基础灌浆廊道

离坝基面 >1.5 廊道宽, 距离上游面 $(0.05\sim 0.1)H$ 且 $>4\sim 5m$

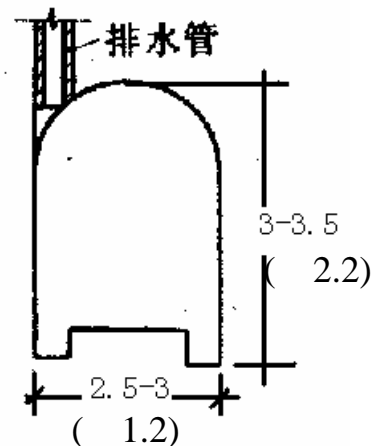
2. 检查和坝体排水廊道

每30m高设一层, 距离上游面 $(0.05\sim 0.07)H$ 且 $3m$

尺寸: 宽 $2.5\sim 3m$ 高 $3\sim 3.5m$ (基础灌浆廊道)

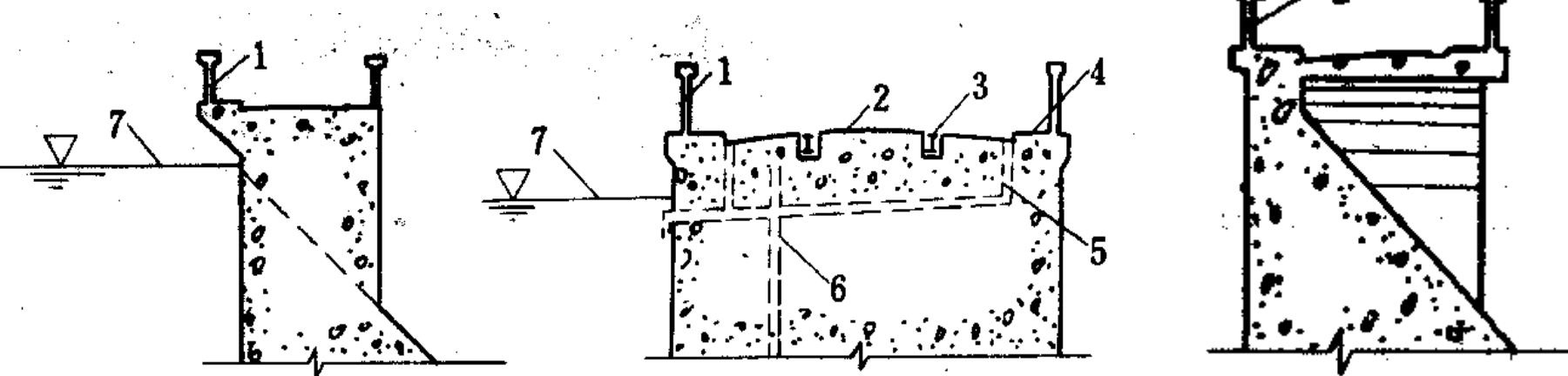
1.2m

2.2m(检查和坝体排水廊道)



城门洞型

五. 坝顶



第十节 碾压混凝土重力坝及其它形式重力坝

一. 碾压混凝土重力坝

1. 优点

- 工艺程序简单，施工速度快；
- 胶凝材料用量少，水泥水化热温升大大降低，温控容易；
- 可使用大型通用机械设备，提高混凝土运输和填筑的工效；
- 不设纵缝，降低造价。



2.碾压混凝土坝的设计

材料：无塌落度的干硬性混凝土

混凝土分区：“金包银”(RCD) - 观音阁；全碾压式(RCC)

坝体防渗：常态混凝土防渗；沥青砂浆防渗层

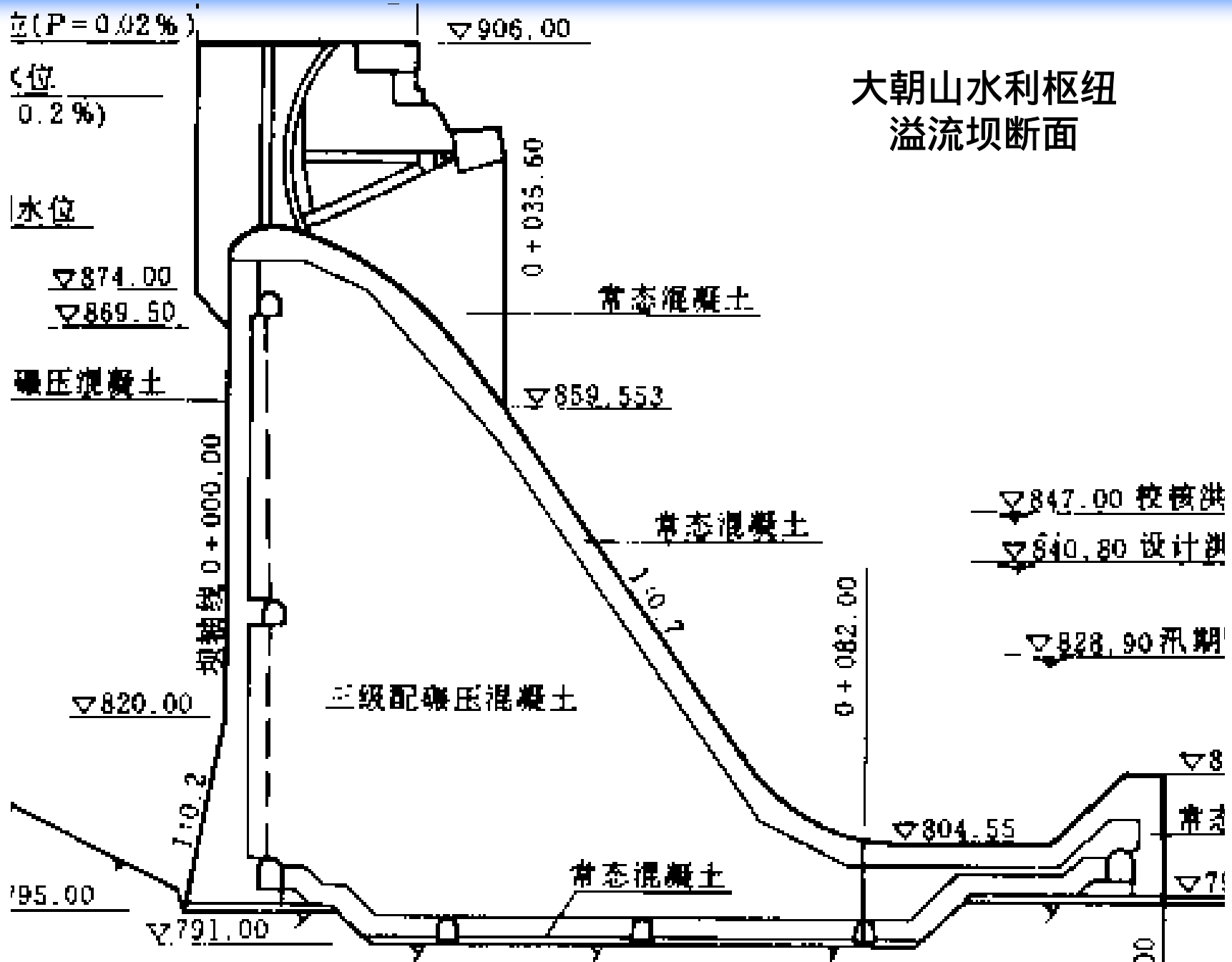
坝体排水

坝体分缝：不设纵缝，横缝可减少

坝内廊道：适当减少

温度控制

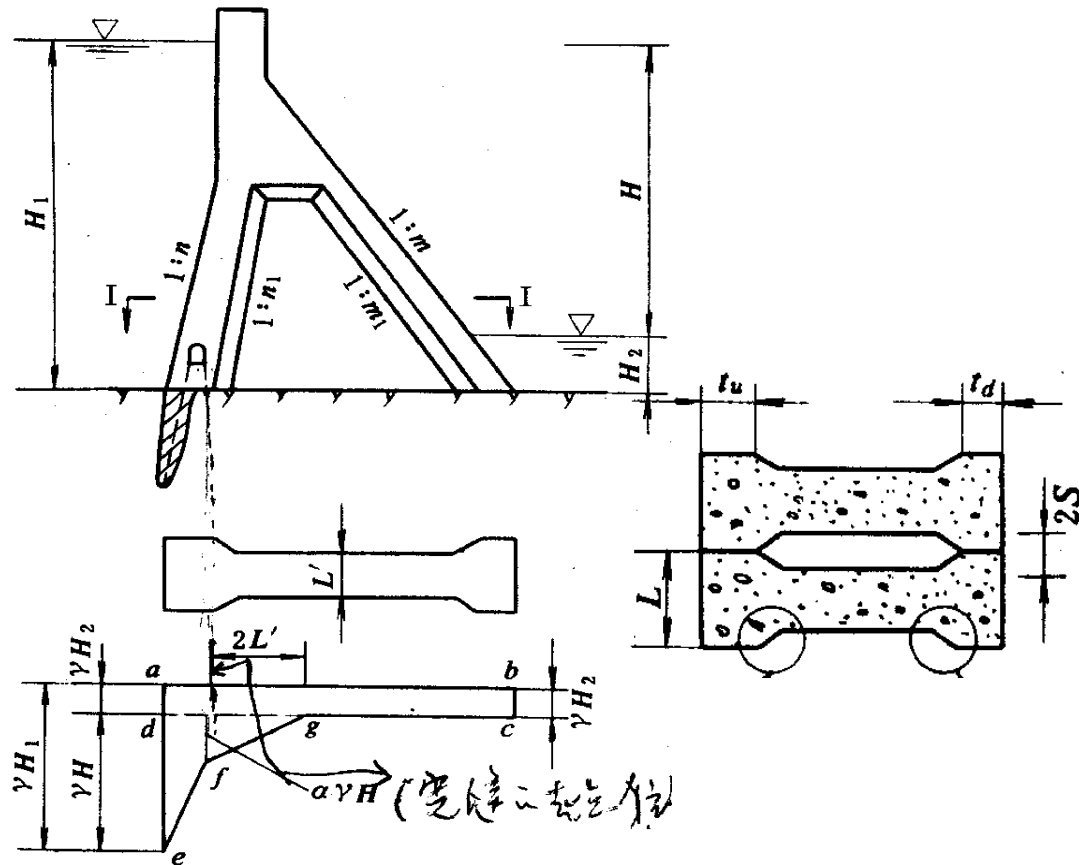
大朝山水利枢纽 溢流坝断面



二. 浆砌石重力坝

构造特点：坝体防渗、溢流坝面衬护、坝体分缝

三. 宽缝重力坝



工作特点：坝基渗水通过宽缝排出，渗透压力明显降低；作用面积小，扬压力小。

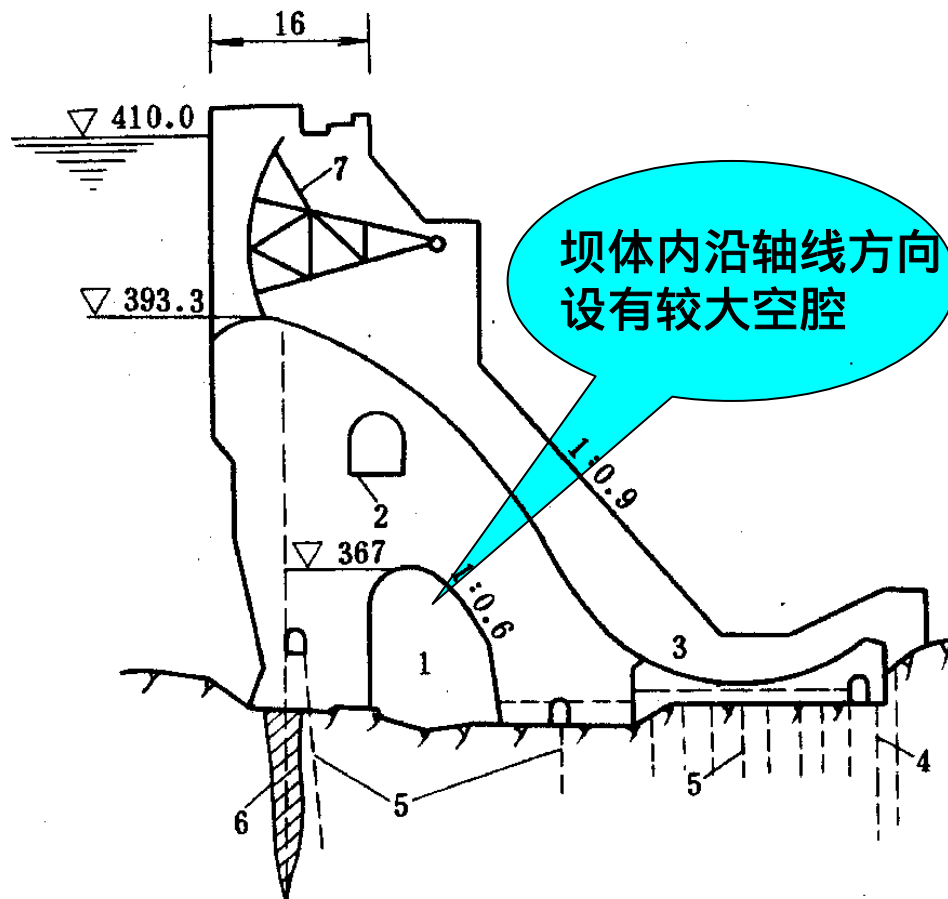
四. 空腹重力坝

特点：

空腔下部不设底板，减少了坝底面上的扬压力。

空腔内可布设水电站厂房。

陕西石泉电站



空腹重力坝的应力状态复杂，材料力学法不适用，需用有限元法进行计算。

思考

1. 横缝纵缝的作用、分类及处理方法。
2. 重力坝哪些部位需设置止水设施？
3. 碾压混凝土重力坝与常态重力坝相比，设计上有什么不同？
4. 宽缝重力坝的特点。
5. 空腹重力坝的特点。

第四章 拱坝



隔河岩水库大坝

二滩水库大坝



第一节 概述

一. 拱坝的工作特点

(一) 结构与受力特点

1. 固接于基岩的空间壳体结构

平面上：凸向上游的拱形；（图示）

垂直面上：比重力坝瘦薄，有时也呈凸向上游的弯曲形状。

2. 拱坝是一种推力结构——拱坝结构上的根本特点

坝体承受的荷载 $\left\{ \begin{array}{l} \text{一部分通过拱作用} \longrightarrow \text{两岸岩体；} \\ \text{一部分通过梁作用} \longrightarrow \text{坝底基岩。} \end{array} \right.$

！！坝体稳定，主要依靠两岸拱端的反作用，而不只是靠坝体重量来维持。

3. 拱坝是一个周边固定的高次超静定结构

坝体内力分布以**压应力**为主，压力分布较均匀，有利于发挥材料强度。

4. 超载能力强

5. 抗震能力高

世界最高的英古里拱坝（272m），修建在9级强地震区；
我国龙羊峡水库，大坝为重力拱坝(178m)，建在9度地震区。

6. **基岩变形**和**温度变化**对拱坝应力影响显著。

设计时必须考虑基岩变形，且把温度作用列为一项**基本荷载**。

7. 坝体断面小

断面小，体积小，混凝土方量少，经济。

！！基岩稳定才具有现实意义

(二) 地形条件

——是决定拱坝的结构型式、工程布置及经济性的主要因素。

要求：在平面上是向下游收缩的狭窄河谷段。

河谷的**形状特征**，以“**宽高比**” L/H 表示

——作为修建拱坝的一项指标。

L/H 小 → 拱作用大，坝体可薄。

“**厚高比**” T/H ，可体现拱坝的厚薄程度。

$L/H < 1.5$ (狭窄河谷)，建薄拱坝 $T/H < 0.2$

$L/H = 1.5 \sim 3.0$ (稍宽河谷)，建中厚拱坝 $T/H = 0.2 \sim 0.35$

$L/H = 3.0 \sim 4.5$ ，建厚拱坝 (重力拱坝) $T/H > 0.35$

$L/H > 4.5$ ，拱作用小，建重力坝

即使 L/H 相同，但河谷的断面形状若不同，拱坝的形状也会相差很大。

如：V形河谷，可选双曲拱坝

U形河谷，可选单曲拱坝

(三) 地质条件

——拱坝修建中的一个关键问题

两岸的基岩必须能承受由拱端传来的推力

(四) 泄流消能条件

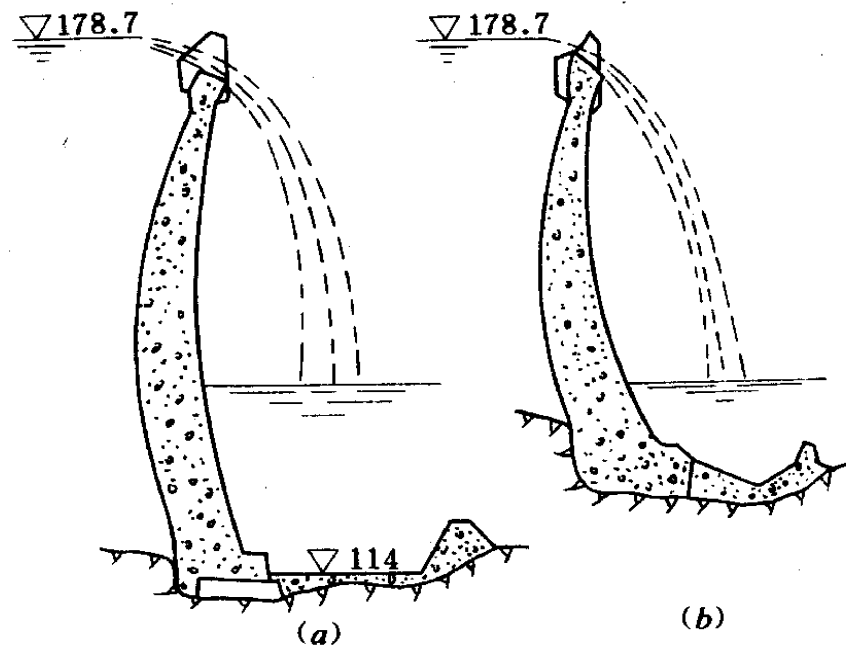
泄水建筑物分类

坝身式：表孔、浅孔、中孔、深孔和底孔
岸边式
隧洞式

坝身泄水方式：

1. 自由跌流式
2. 鼻坎挑流式
3. 滑雪道式——拱坝特有的一种泄洪方式
4. 坝身泄水孔式

跌流式泄水



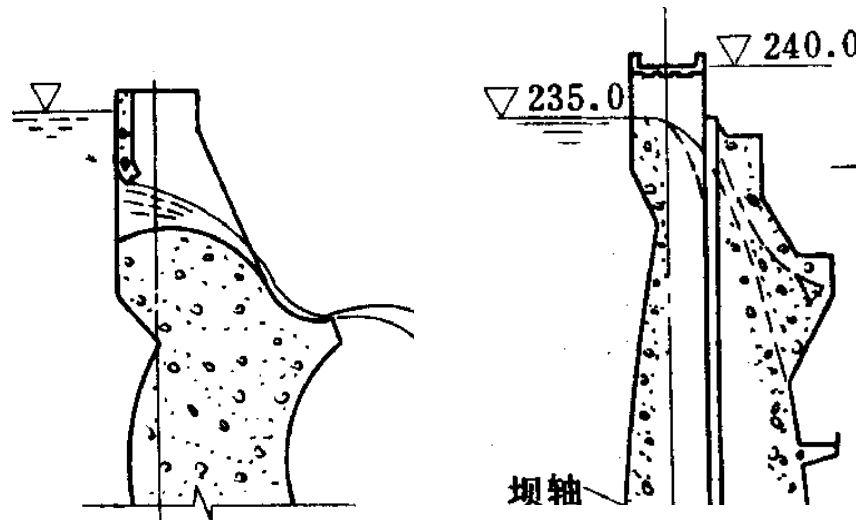
较薄的双曲拱坝或小型拱坝常采用跌流式泄水方式

适用于：基岩良好的坝址

挑流式泄水

重力拱坝多采用挑流

优点：泄水可远离坝址



跌流和挑流的堰面曲线：

$$x^n = KH_d^{n-1} y \quad \text{幂曲线——表孔}$$

$$y = \frac{x^2}{4\phi^2 H_d} \quad \text{抛物线——浅孔}$$

滑雪道式泄水

泉水电站



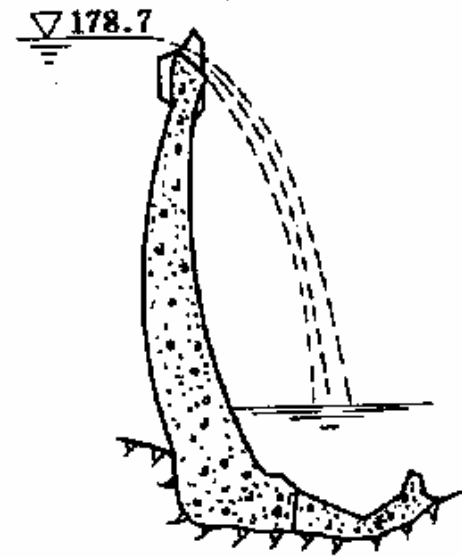
溢流面由堰面顶部曲线和与之相连的泄槽组成

优点：挑距远，适用于泄洪量大、较薄的拱坝

消能方式：

- 跌流消能（跌流泄水）
- 挑流消能（其它泄水方式）
- 底流消能或戽流消能（深式泄水孔）

多种坝身泄水孔联合运用



跌流消能

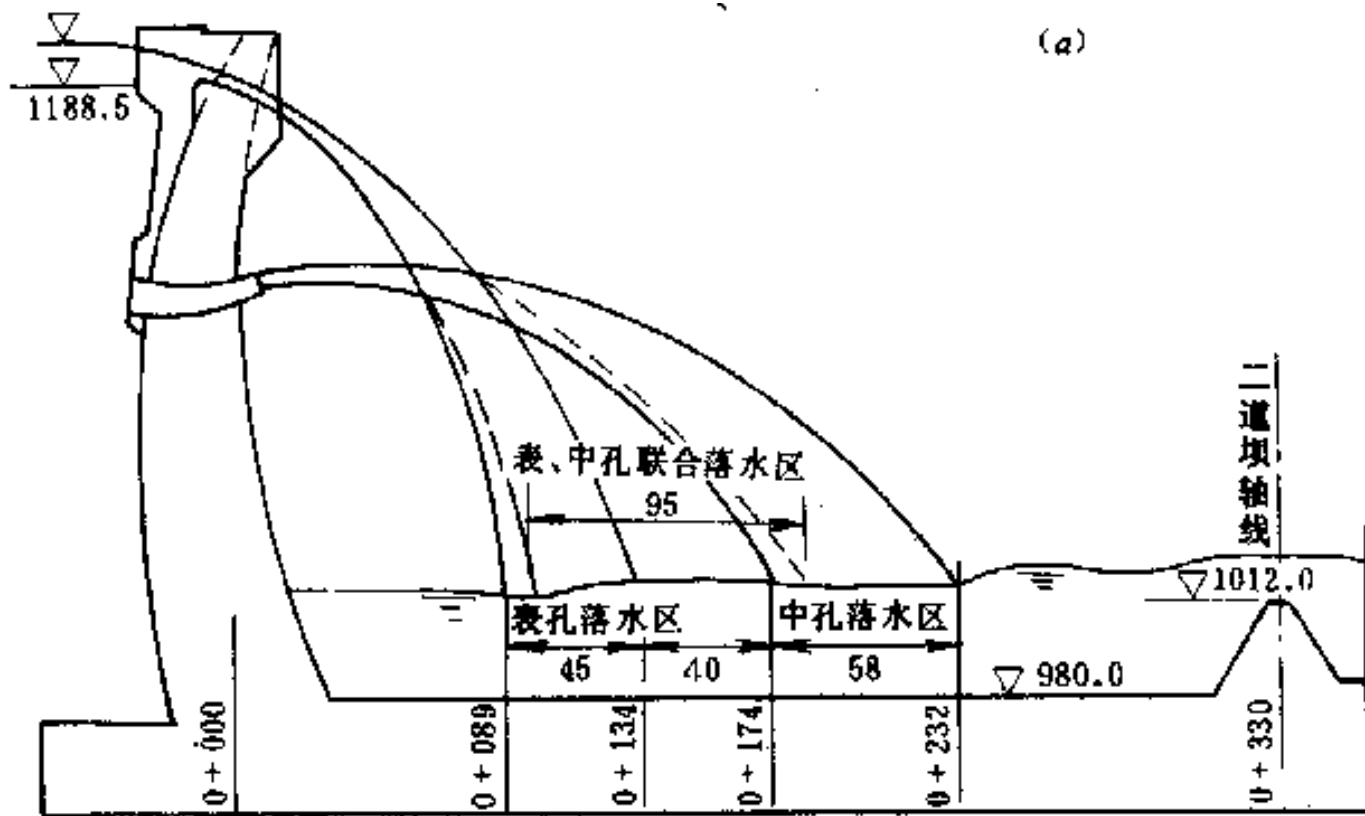
跌流消能：水流从坝顶表孔直接跌落到下游河床，利用下游水垫消能。

二滩大坝



7个表孔沿坝顶呈径向布置，坝后消能防冲建筑物包括水垫塘和二道坝及二道坝下游护坦——跌流消能

6个中孔布置在表孔闸墩的下部，出口采用挑流消能



二滩电站：表孔 + 中孔泄洪

消能建筑物：水垫塘和二道坝及二道坝下游护坦

(五) 施工条件

1. 拱坝封拱

横缝（径向）、纵缝，蓄水前需灌浆封填(封拱)，使坝连成整体。

?? 封拱温度

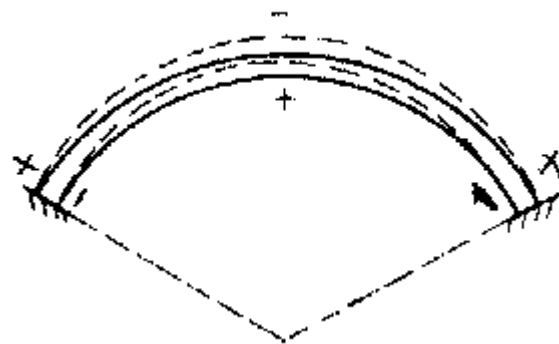
坝体处于温升状态时：

坝体受力(M 、 Q)与水压力作用刚好相反，有利于降低坝内应力；

轴力 N 方向相同，对坝端的推力加大，不利稳定。

故封拱温度通常选得较低

一般选在年平均气温或略低时，
进行封拱。



2. 拱坝倒悬(图)

二. 拱坝发展情况

20世纪初，美国 221m高胡佛拱坝

1936年 意大利首先建成双曲拱坝

我国70年代拱坝发展很快：广东80m泉水双曲拱坝、陕西石门双曲拱坝等为代表

80年代，149.5m白山重力拱坝，龙羊峡(178m)

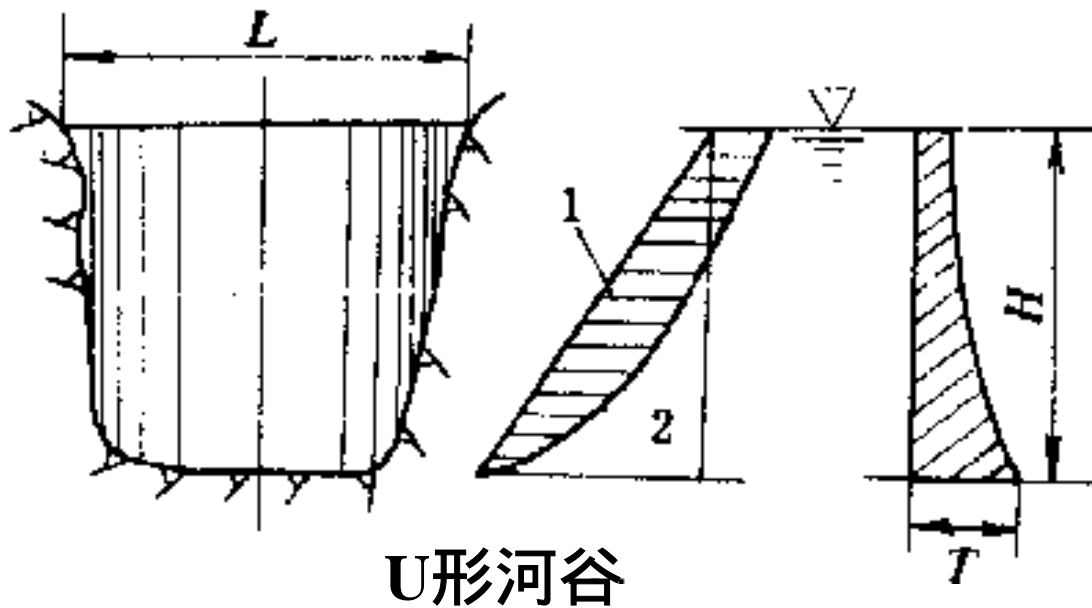
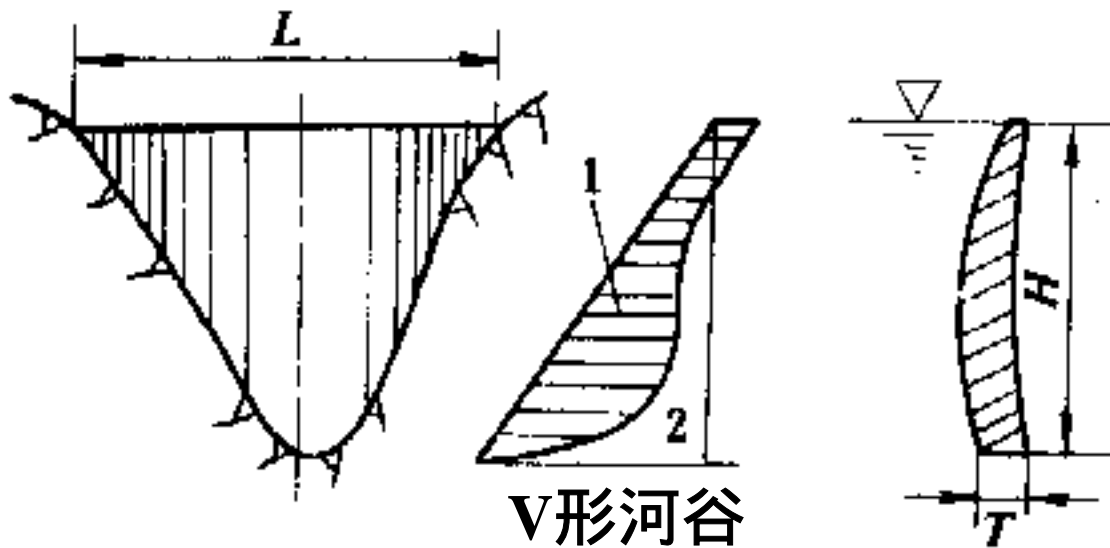
90年代，隔河岩、李家峡、二滩(240m)

2002年开工了小湾工程，坝高292m双曲拱坝

重点与思考

1. 拱坝的结构受力特点
2. 拱坝的坝身泄水方式及消能方式
3. 拱坝坝址对地形地质的要求有哪些？
4. 拱坝封拱、温降对坝体应力及稳定的影响
5. 拱坝主要作用荷载有哪些？

1. 拱坝的横缝为永久缝吗？如何处理？
2. 画出作用在重力坝坝底面的扬压力计算简图
 - (a) 坝踵设有灌浆帷幕、主排水孔幕
 - (b) 坝踵设有灌浆帷幕、主排水孔、副排水孔及抽排水系统



1—拱荷载
2—梁荷载

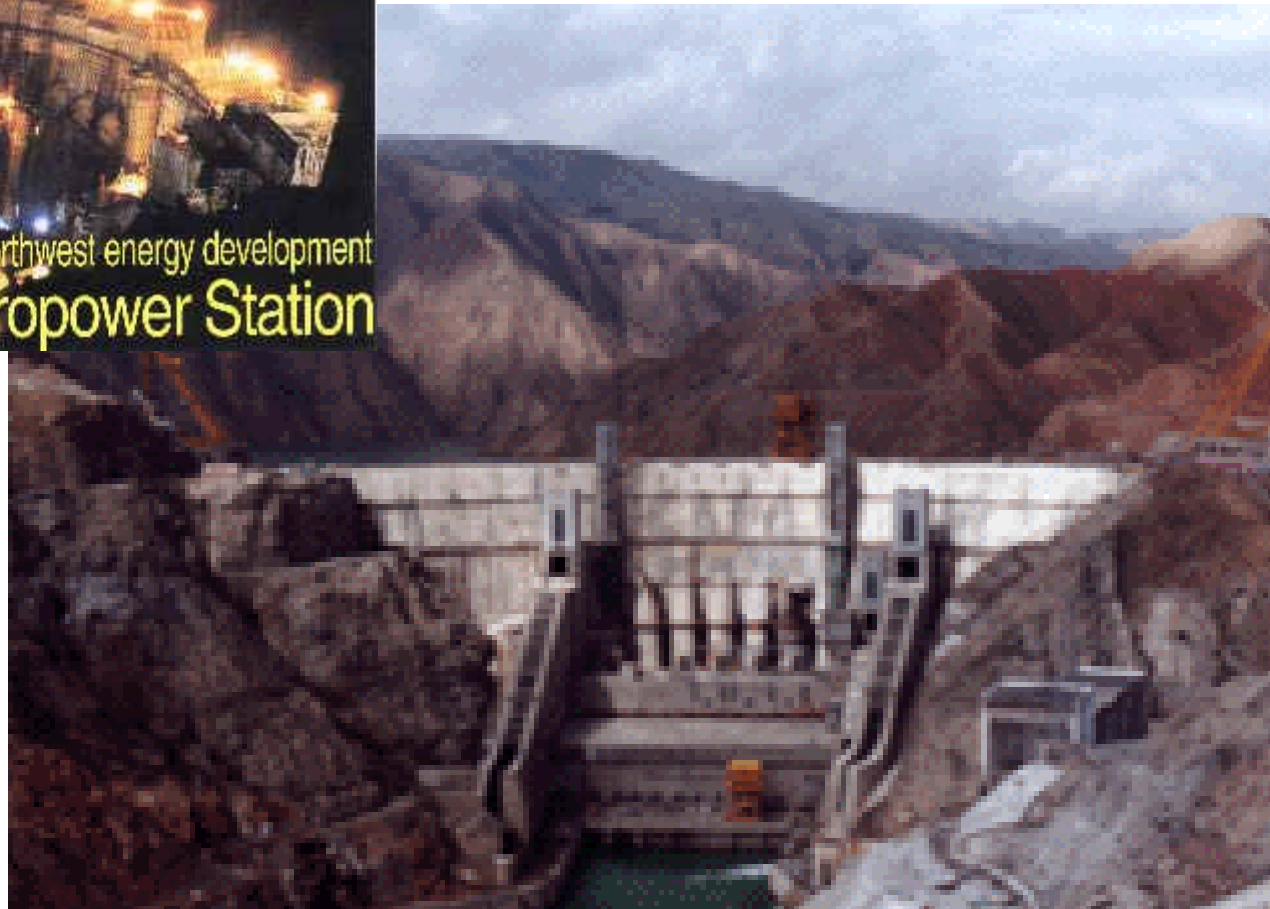
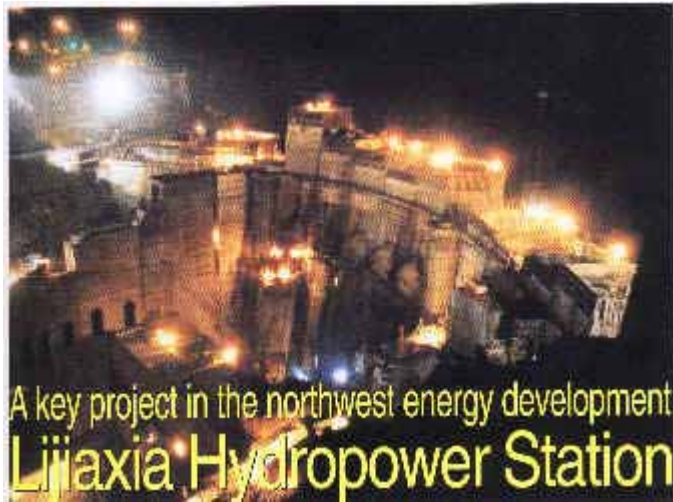
[返回](#)

龙羊峡



白山





李家峡

第二节 拱坝荷载及组合

《混凝土拱坝设计规范》SL282-2003

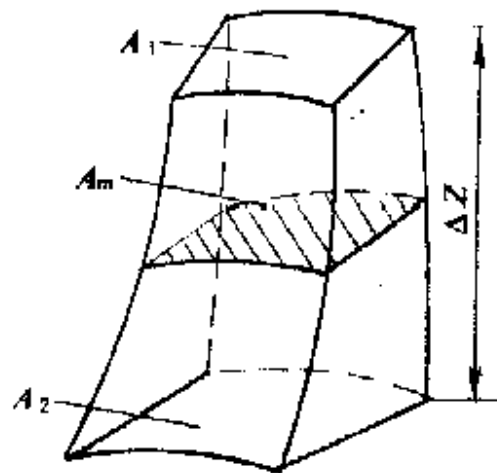
一. 拱坝的作用荷载

自重、静水压力、扬压力、动水压力、泥沙压力、冰压力、浪压力、**温度荷载**及地震荷载

1. 自重——梁承担

$$G = \frac{1}{6} \gamma_c \Delta Z (A_1 + 4A_m + A_2)$$

$$G = \frac{1}{2} \gamma_c \Delta Z (A_1 + A_2) \quad \text{简化计算公式}$$



2. 水平径向荷载——拱、梁共同承担

静水压力、泥沙压力、冰压力、浪压力

——计算方法同重力坝

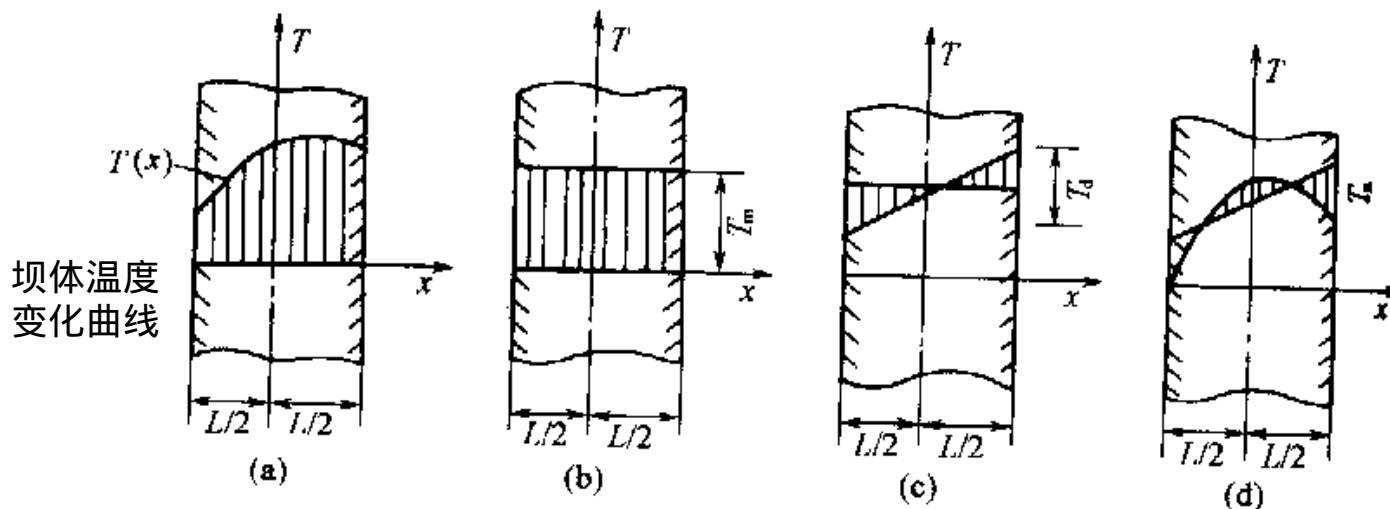
3. 水重 —— 近似假定由梁承担

4. 扬压力

稳定分析时(对坝基及拱座)，要计入扬压力。

坝体应力分析时，**薄拱坝**可以不计扬压力。

5. 温度荷载 —— 拱坝设计中的一项基本荷载



(b) 均匀温度变化 T_m —— 温度荷载的主要部分(影响拱圈M、N；梁M)

(c) 等效线性温差 T_d —— 对拱圈力矩影响较大

(d) 非线性温度变化 T_n —— 对整体影响小，设计中可不考虑

6. 地震荷载

包括地震惯性力、地震动水压力和动土压力

地震效应分析方法：动力法（振型分解反应谱法）或拟静力法

水平向(顺、垂直河流向)地震作用、垂直向地震作用(8、9度的1、2级双曲拱坝)

拟静力法：工程抗震设防等级类别为乙、丙类的设计烈度低于8度且坝高不超过70m的拱坝。

各层拱圈各质点**水平地震惯性力**(径向作用)：

$$F_i = a_h \xi G_{Ei} \alpha_i / g$$

水深y处地震动水压力：

$$p_{w(h)} = \frac{7}{8} a_h \rho_w \sqrt{H_0 y} \alpha_i \xi$$

动态分布系数：坝顶3.0、坝基1.0，沿高程直线内插，沿拱圈均匀分布

二. 荷载组合（自学）

温升、温降

第三节 拱坝的布置

拱坝的基本尺寸 { 拱圈的平面形式
各层拱圈轴线的半径和中心角
拱冠梁上下游面的形状及沿高程的厚度

坝高已定，先拟定**顶拱轴线**，然后是拱冠梁和拱圈的形式及尺寸

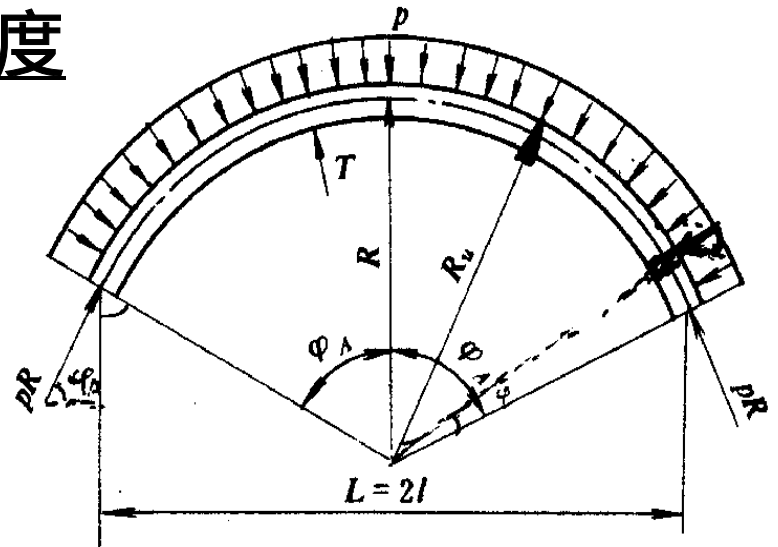
一. 拱圈的半径、中心角和厚度

取单位高度的等截面水平圆拱进行分析

由“圆筒公式”可得：
$$T = \frac{pR_u}{\sigma}$$

R_u 大，厚度T大，体积V大；

R_u 小，厚度T小，但跨度L一定，中心角大，弧长长，体积V也随之增大。

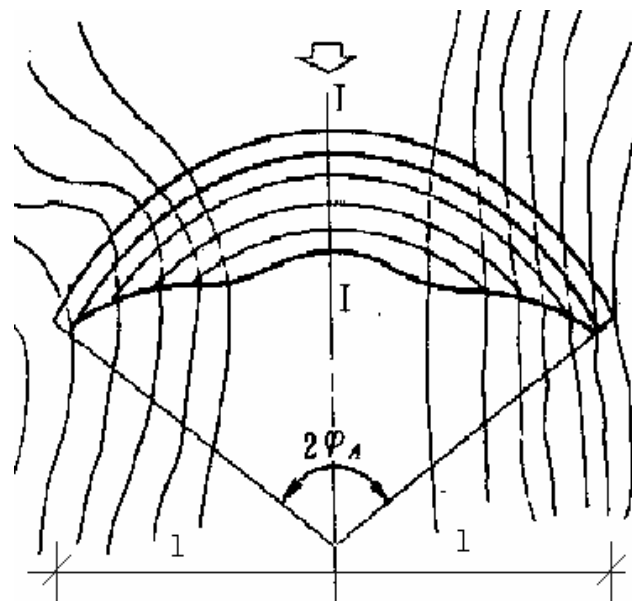


拱圈体积 $V = 2\varphi_A \cdot RT$

$$R_u = R + \frac{T}{2} = \frac{l}{\sin \varphi_A} + \frac{T}{2}$$

当体积V最小时，

$$2\varphi_A = 133^{\circ}57'$$



中心角 $2\varphi_A$ 大小，对拱坝会有怎样影响??

$2\varphi_A$ 大小会直接影响到坝肩的稳定

$2\varphi_A$ 较大时，对坝肩稳定不利

规范规定，水平拱圈最大中心角

$$2\varphi_A = 75^{\circ} \sim 110^{\circ}$$

实际工程多采用 $75^{\circ} \sim 95^{\circ}$

二. 拱圈的平面形式

早期采用单心圆弧形拱

现在形状多种多样：抛物线、椭圆、双曲线、多圆心拱、对数螺旋线、统一二次曲线等变曲率拱形

三圆心拱：隔河岩、紧水滩、李家峡、白山

抛物线拱：二滩、东风、建设中的小湾292m、溪落渡273m

对数螺线拱：拉西瓦

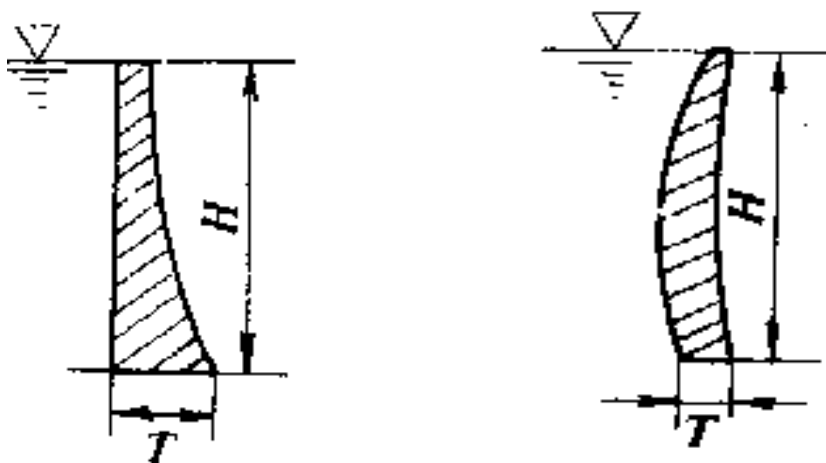
最合理的拱圈形式应当是：变曲率、变厚度、扁平的。

- 其**压力线接近拱轴线**，使截面压应力分布趋于均匀；
- 传到两岸岩体上的合力方向与岩体的交角较大，以利坝肩稳定。

抛物线拱的优点：曲率变化连续、压应力分布均匀、利于坝肩岩体稳定

三. 垂直剖面(拱冠梁)的形式和尺寸

形式：单曲（U形河谷）、双曲（V形河谷）



单曲拱坝：其上游面铅直，下游面是斜线或折线，仅在水平面上呈曲线形。

双曲拱坝：在水平面及铅直面上均有曲率，各层拱圈的中心角和半径是变化的。

双曲拱坝与单曲拱坝相比，其优点是：

1. 上游凸出，自重可抵消一部分水压力产生的应力，坝底上游面的竖向拉应力可显著降低。

2. 双曲拱坝使拱坝具有壳体作用，进一步改善了应力分布。

竖向拱作用，使悬臂梁的弯距减小，对降低坝体的拉应力有利。

3. 双曲拱坝顶部倒悬，增加了拱座的垂直应力，提高了两岸基岩的稳定性。

4. 各层拱圈中心角均接近理想的中心角，应力条件好。

缺点：施工复杂

1. 坝顶厚度 T_c

按工程规模和运用要求来定，一般3~5m，不小于3m。

初步估算 $T_c = 0.0145 (2R_0 + H)$

$$T_c = 0.01(1.2L_1 + H) \quad \text{—— 美国垦务局}$$

L_1 —— 坝顶高程处，拱端可利用基岩面间的直线距离(m)

R_0 —— 顶拱轴线半径(m)，可取 $0.61L_1$

H —— 坝高(m)

2. 坝底厚度 T_B

—— 拱坝剖面设计的一项控制参数，它取决于坝高、坝型、河谷形状、地质、荷载及材料等因素。

初估 $T_B = \sqrt[3]{0.0012HL_1L_2\left(\frac{H}{122}\right)^{H/122}} \quad \text{—— 美国垦务局}$

L_2 —— 坝底以上 $0.15H$ 处拱端可利用基岩面间的直线距离(m)

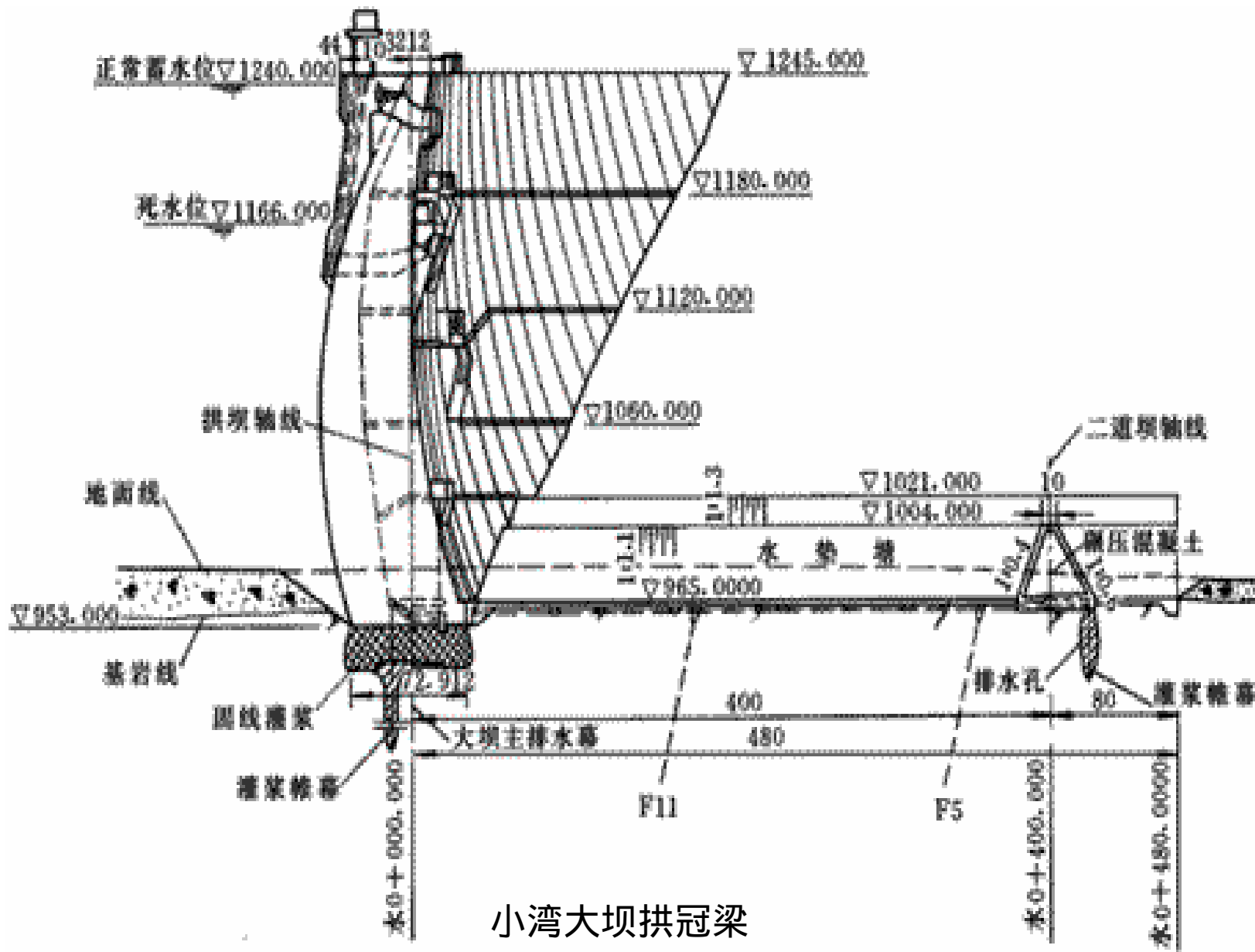
$$T_{0.45H} = 0.95T_B$$

3. 拱冠梁尺寸

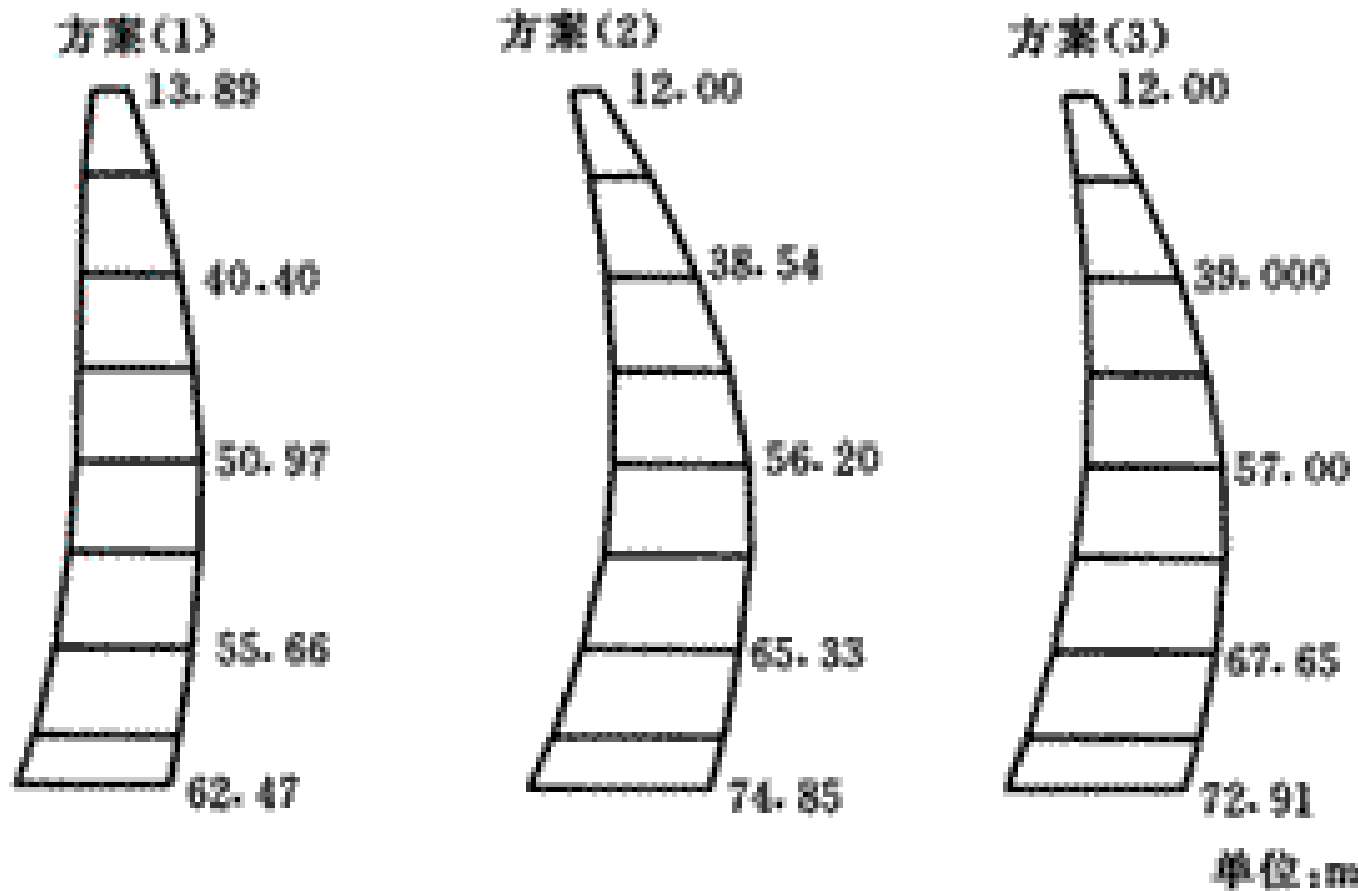
美国垦务局推荐的各部位尺寸——适合双曲拱坝

高程 \ 偏距	上游偏距	下游偏距
坝顶	0	T_c
$0.45H$	$0.95T_B$	0
坝底	$0.67T_B$	$0.33T_B$

如图所示：



小湾大坝拱冠梁



- (1) 坝踵的拉应力区和拉应力数值较大；
- (2) 坝体纵向曲率较大，施工期和低水位运行期下游面的应力状态较好；在自重作用下，中上部高程的上游面拱冠附近出现拉应力；坝体动力反应较大。动、静综合拉应力较大；
- (3) 动、静应力小，选此方案。厚高比0.25。

四. 拱坝布置的原则和步骤

原则：在**满足稳定**和**建筑物运用要求**下，通过调整拱坝外形尺寸，使坝体材料强度得到充分发挥，控制拉应力在允许范围内，而坝体工程量最省。

坝体应力、拱座稳定、工程造价

- 拱坝布置的步骤：

根据坝址地质地形资料，定出开挖深度，画出坝址可利用基岩面等高线的地形图。

在可利用基岩面等高线的地形图上，拭定顶拱轴线位置，画出顶拱内外缘弧线。

初步拟定拱冠梁剖面尺寸，同时拟定各高程拱圈的厚度。

切取若干垂直剖面，检查其轮廓是否光滑连续，是否有过大倒悬。

根据以上选定的坝体尺寸，进行应力计算、坝肩岩体抗滑稳定校核。

评价拱坝体型的合理性，修改拱坝体型确定最终方案。

工程量计算。

第四节 拱坝的应力分析

分析方法分为：数值计算和结构模型试验

数值计算法：结构力学法、**有限元法**、壳体理论计算法

结构力学法：圆筒法、纯拱法、**拱梁分载法**

！！“规范”规定：拱坝应力分析应以**拱梁分载法**或**有限元计算成果**，作为衡量强度安全的主要指标。

1、2级拱坝和高拱坝或情况比较复杂的拱坝，除用拱梁分载法计算外，还应采用有限元法计算。必要时，应进行结构模型试验加以验证。

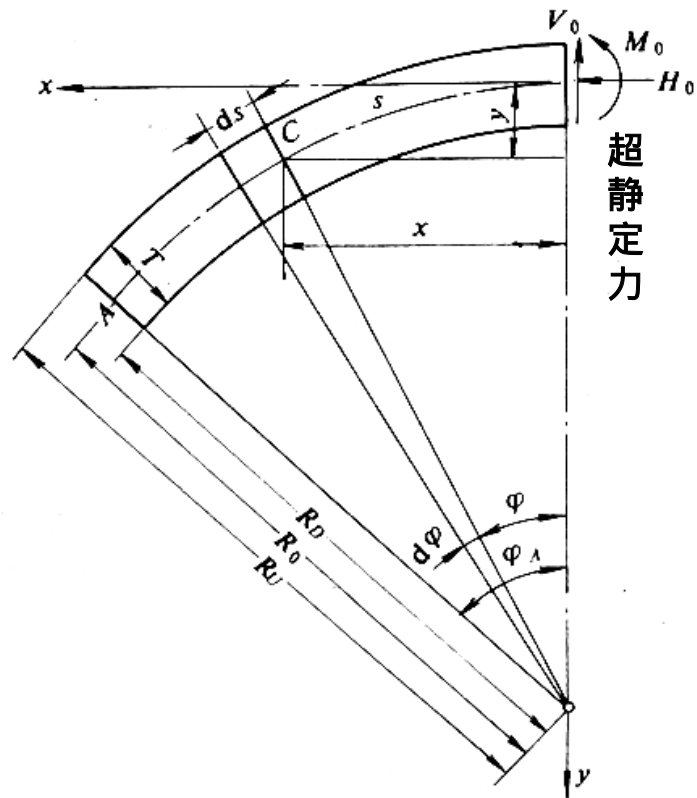
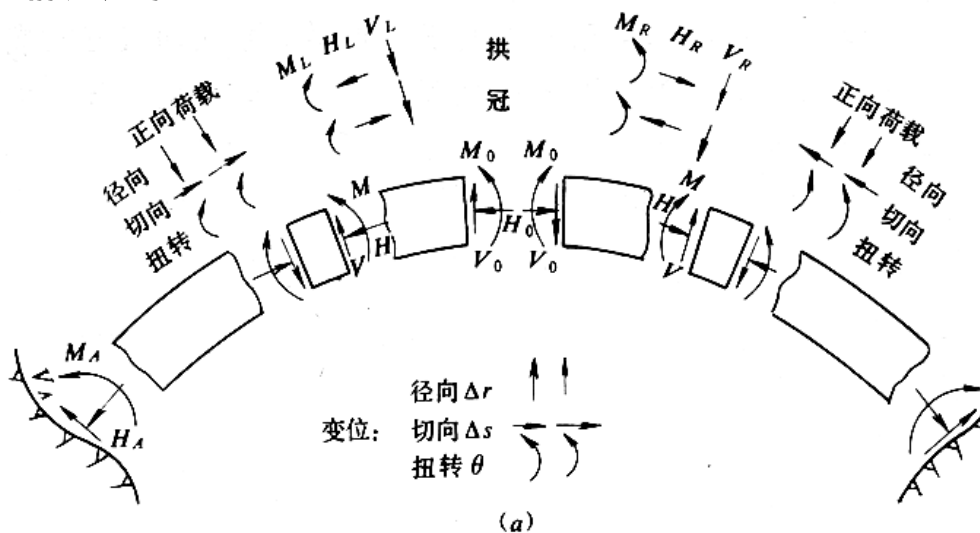
一. 纯拱法

假定拱坝是由若干层独立的拱圈叠合而成的，每层拱圈可作为弹性固定拱计算。计算中，假定荷载全部由水平拱圈承担。

纯拱法是拱梁分载法中的一个重要组成部分

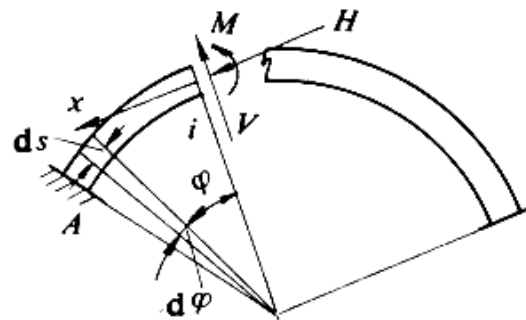
设想沿拱冠（或任意断面）处切开，拱的左右两部分就可按**静定的弧形悬臂梁**计算。

M_L 、 H_L 、 V_L 为任意截面上由外荷载产生的静定力系



任意径向截面，其内力 M 、 H 、 V 分别为：

$$\begin{cases} M = M_0 + H_0 y + V_0 x - M_L \\ H = H_0 \cos \varphi - V_0 \sin \varphi + H_L \\ V = H_0 \sin \varphi + V_0 \cos \varphi - V_L \end{cases}$$



M_0 、 H_0 、 V_0 未知??

利用切口处的变形连续条件，可得：

$$\begin{cases} A_1 M_0 + B_1 H_0 + C_1 V_0 = D_1 & \text{——转动连续条件} \\ C_1 M_0 + B_2 H_0 + C_2 V_0 = D_2 & \text{——径向变位连续条件} \\ B_1 M_0 + B_3 H_0 + B_2 V_0 = D_3 & \text{——切向变位连续条件} \end{cases}$$

其中：A、B、C形常数，与拱圈尺寸及基岩变位有关

D载常数，除与拱圈尺寸及基岩变位有关外，还与荷载有关

M_0 、 H_0 、 V_0 \longrightarrow M 、 H 、 V

用偏心受压公式计算坝体上下游面的边缘应力 $\sigma_x = \frac{H}{T} \pm \frac{6M}{T^2}$

厚拱坝应力分布不是直线

二. 拱梁分载法

将拱坝看成是由许多水平拱圈和垂直悬臂梁组成的空间结构，外荷载一部分由拱系承担，一部分由梁系承担。

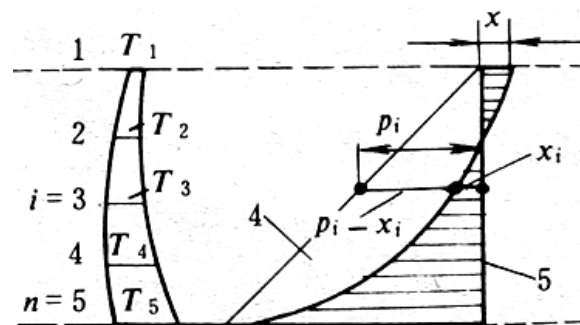
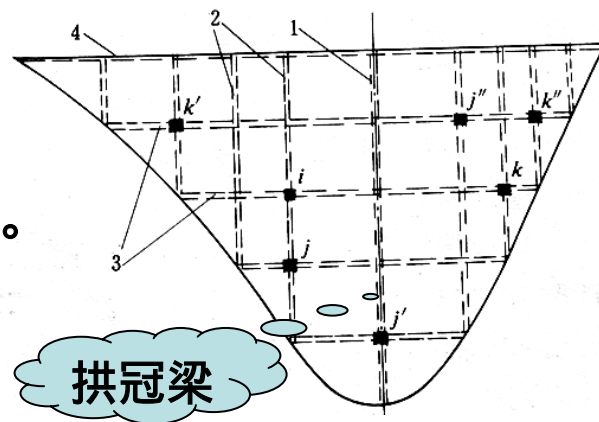
荷载分配原则：拱和梁的荷载分配，由梁和拱两系统在交点处变位一致的条件来决定。

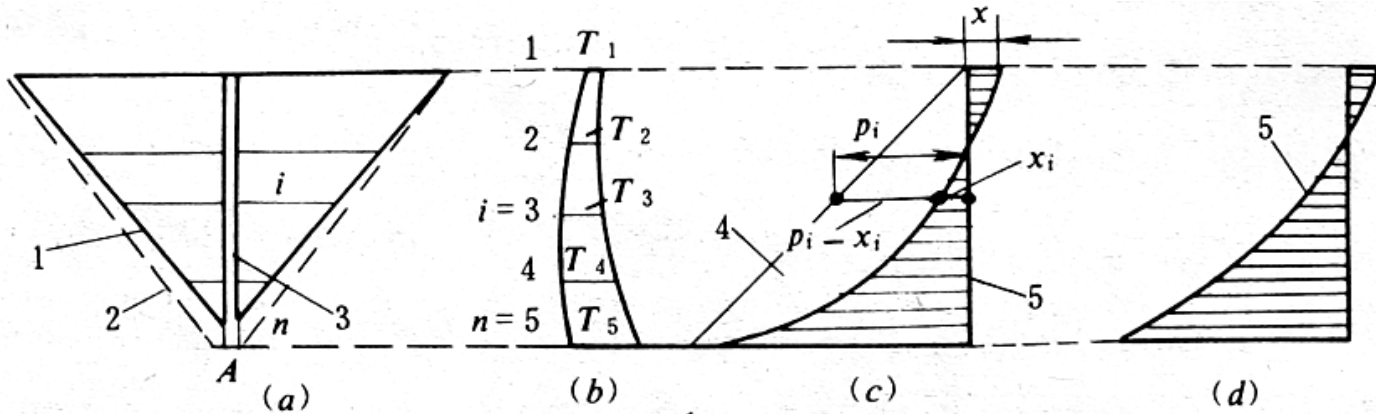
荷载分配后 { **梁**是静定结构，可按**悬臂梁**计算；
拱的应力可按弹性拱的**纯拱法**计算。

拱梁分载法可分为 { “拱冠梁法”
“多拱多梁法”

1. 拱冠梁法

——多拱多梁法的一种简化方法
取拱冠梁及5~7层拱





根据拱冠梁与各层拱圈交点处径向变位一致，可得：

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + \delta_i^w$$

$$= (p_i - x_i) \delta_i + \Delta A_i$$

梁的变位
拱的变位

由于水平荷载作用，在拱冠梁 i 点产生的的径向变位
第 i 层拱圈由于均匀温度变化 t_m 在拱冠处产生的水平径向变位

拱冠梁 i 点由于铅直荷载作用产生的水平径向变位
第 i 层拱圈由于均布径向荷载产生的水平径向变位

p_i ——总水平荷载强度

2. 多拱多梁法

——取7~9个梁，5~7层拱

垂直截面上：

轴向力 H
水平力矩 M_z
径向剪力 V_r

扭距 M_s
垂直力矩 M_r
竖向剪力 V_z

相当于拱圈的轴力、弯矩和剪力

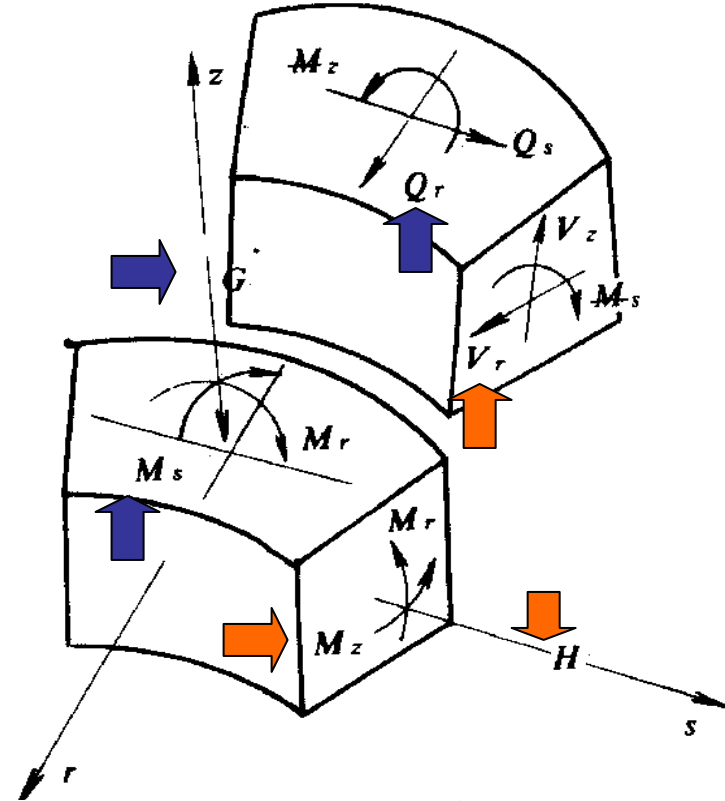
水平截面上：

法向力 G
垂直力矩 M_s +
竖向剪力 Q_r

扭距 M_z
垂直力矩 M_r
切向剪力 Q_s

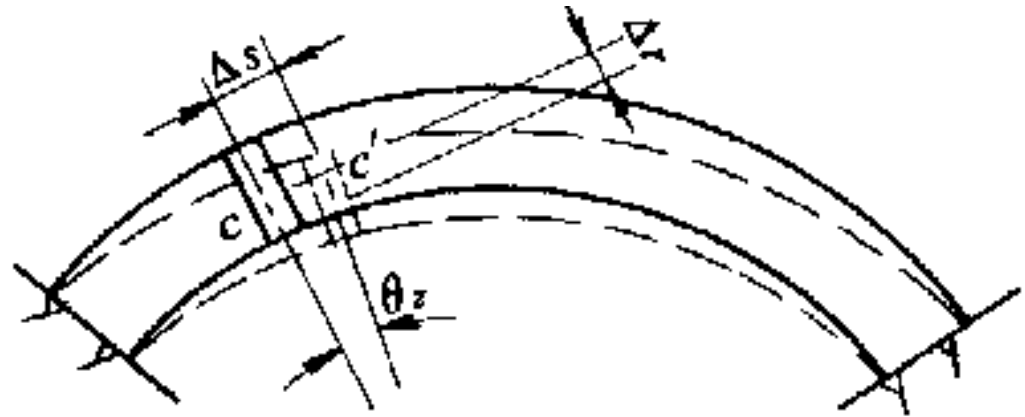
相当于悬臂梁的重力、弯矩和剪力

坝体内任意切取一个微元体



根据拱和梁各交点
变位一致的条件，来进行荷载分配

空间结构中，任意点的变位有6个：3个线变位和3个角变位



按拱坝的实际工作状态，
只有**径向变位**、**切向变位**和**水平转角**是主要的。

拱梁的荷载分配，只要根据这三个变位分量一致即可决定。

三. 控制标准

1. 拱梁分载法计算时，坝体的主拉应力和主压应力，应符合：

(1) 容许压应力 = 混凝土的极限抗压强度 / 安全系数

(2) 容许拉应力：基本组合，拉应力不大于1.2MPa；非地震情况的特殊组合，拉应力不大于1.5MPa。

2. 有限元法计算时，坝体的主拉应力和主压应力，应符合：

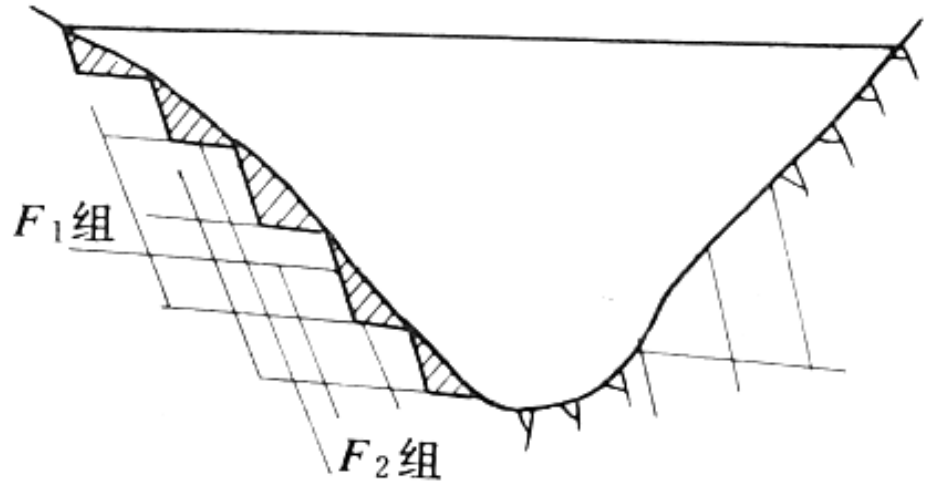
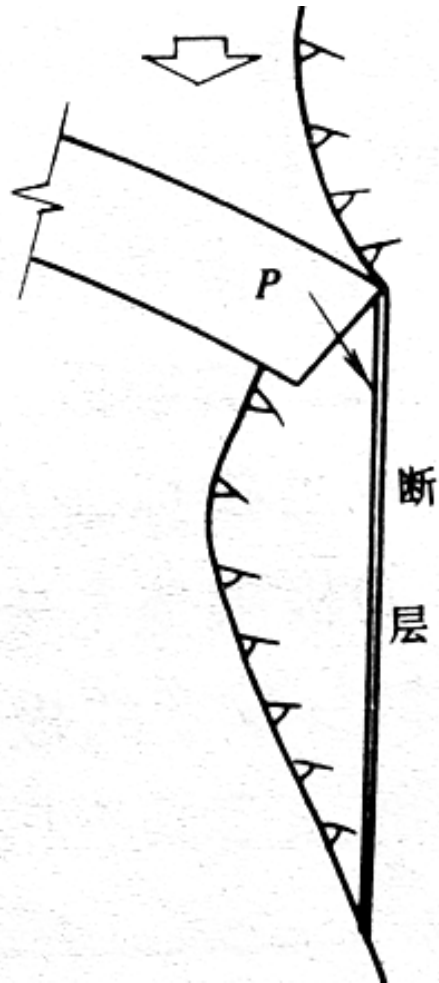
(1) 容许压应力 = 混凝土的极限抗压强度 / 安全系数

(2) 容许拉应力：基本组合，拉应力不大于1.5MPa；非地震情况的特殊组合，拉应力不大于2.0MPa。

3. 施工期

坝体横缝灌浆前，按单独坝段分别进行验算，坝体最大拉应力不大于0.5MPa。

第五节 坝肩岩体稳定分析



稳定分析方法 { 计算分析法 :刚体极限平衡法、有限元法
模型试验法 :地质力学模型试验

规范规定：

拱座抗滑稳定的计算方法以**刚体极限平衡法**为主。

1、2级拱坝或地质情况复杂的拱坝应辅以有限元法或其它方法进行分析。

刚体极限平衡法基本假定：

1. 将滑动体视为刚体
2. 只考虑滑动体上力的平衡
3. 忽略拱坝的内力重分布作用
4. 达极限平衡状态时，滑裂面上的剪力达极限

! 采用刚体极限平衡法计算稳定时，应采用拱梁分载法的计算成果。

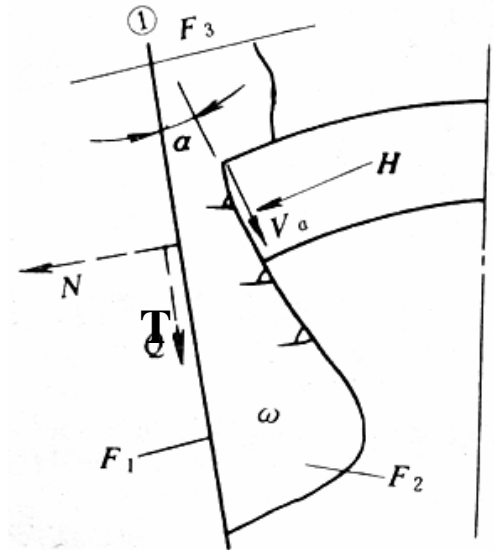
分析时，一般先取若干个不同高程的单位拱圈进行**分层计算**。

若局部不稳定，再分析整体的稳定性。

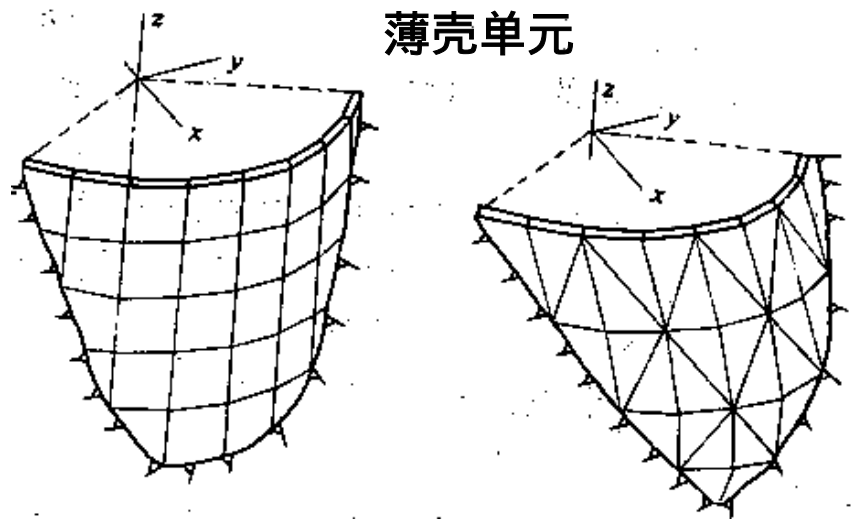
采用的公式：

$$K_1 = \frac{\sum (Nf_1 + c_1 A)}{\sum T} \quad \text{高拱坝及1、2级拱坝}$$

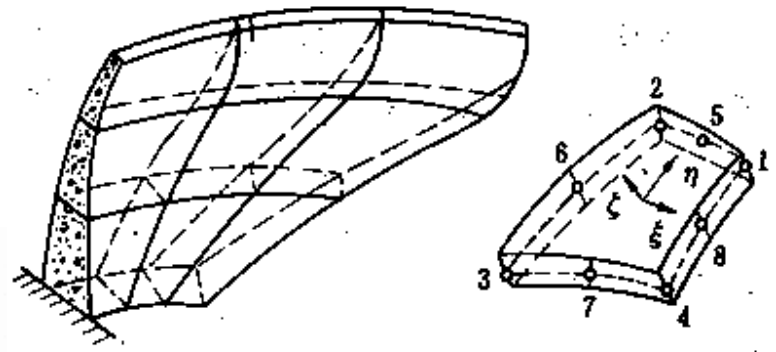
$$K_2 = \frac{\sum Nf_2}{\sum T}$$



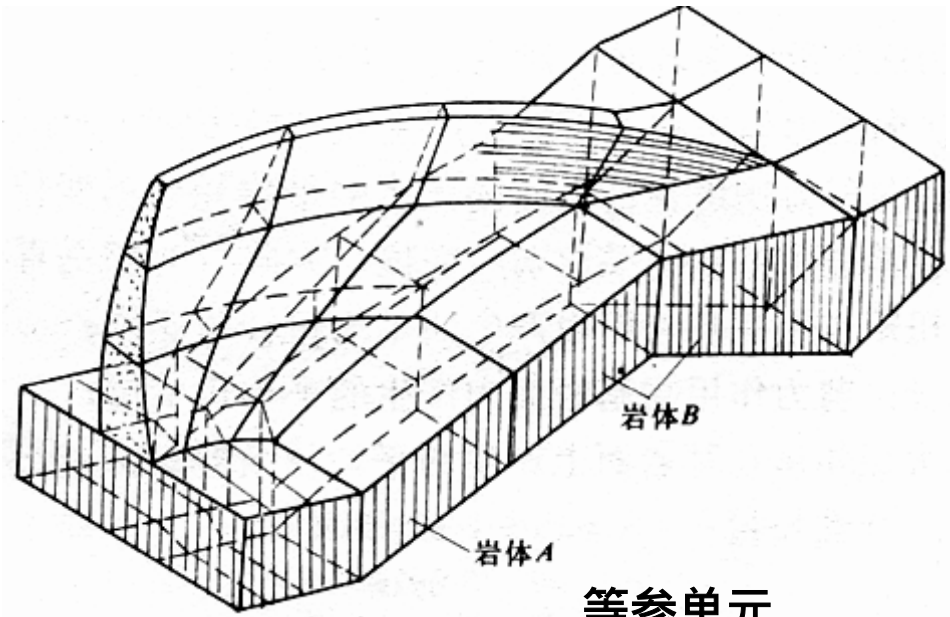
将拱坝视为空间壳体或
三维连续体



薄壳单元



厚壳单元



等参单元

[返回](#)

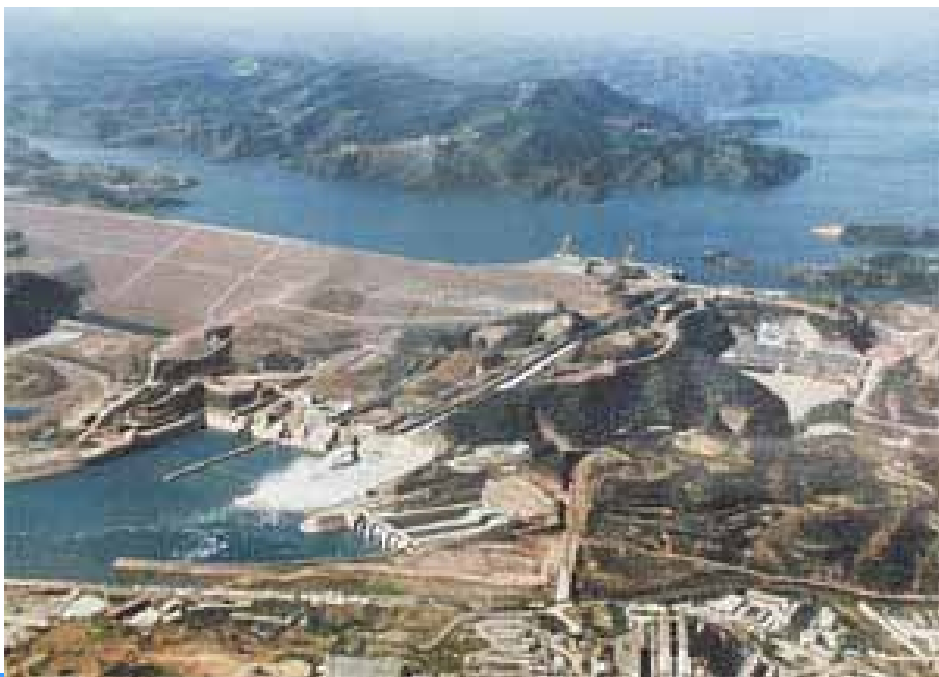
重点与思考

1. 拱坝主要作用荷载有哪些？
2. 拱圈中心角对坝肩稳定有何影响？
3. 拱坝结构形式有哪两种？分别适合什么样的河谷形状？
4. 合理的拱圈形式应当是什么样的？
5. 拱坝布置的原则
6. 坝肩岩体稳定的分析方法有哪几种？刚体极限平衡法的基本假定是什么？

第五章 土石坝

第一节 概述

一. 土石坝发展概况



小浪底水库大坝(154m)

1. 土石坝得以广泛应用和发展的原因

土石坝1/2、拱坝1/3、重力坝数量下降

- (1) 可以就地、就近取材
- (2) 能适应各种不同的地质、地形和气候条件
- (3) 大容量、多功能、高效率施工机械的发展和利用
- (4) 岩土力学理论、试验手段和计算技术的发展
- (5) 高边坡、地下工程结构、高速水流消能防冲等土石坝配套工程设计和施工技术的综合发展

缺点：坝身不能泄洪；施工导流及渡汛困难；粘土施工受气候制约。

2. 现状

最高土石坝335米——罗贡坝(塔吉克斯坦)

我国高土石坝较少(地质条件好、防渗体选料局限、施工机械差)

80年代末，百米以上土石坝有3座：碧口、石头河、鲁布革

建设中的最高土石坝233米——水布垭

二. 土石坝设计的基本要求

1. 应具有**足够的断面**维持坝坡的稳定。
2. 设置良好的防渗和排水设施**以控制渗流**。(控制渗流范围、方向、逸出坡降以提高抗滑和渗流稳定;减少渗漏量)
3. 根据现场条件, 选择好筑坝**土石料的种类、坝的结构形式以及各种土石料在坝内的配置**。
4. 泄水建筑物应具有**足够的泄洪能力**。
5. 采取适当的构造措施, 使坝运行可靠和耐久。

三. 土石坝的类型

1. 按坝高分: 高坝($>70\text{m}$)、中坝($30\sim 70\text{m}$)和低坝($<30\text{m}$)
2. 按施工方法分: **碾压式**、冲填式、水中填土坝和定向爆破堆石坝

四. 碾压式土石坝

按土料在坝身内的配置和防渗体所用的材料种类，可分为6类：

均质坝、土质心墙坝、土质斜墙坝、多种土质坝、人工材料心墙坝和人工材料面板坝

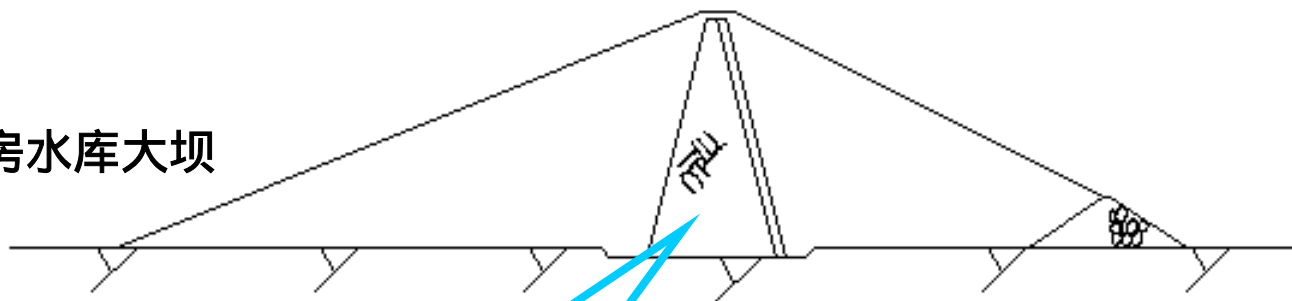
1. 均质坝：



坝体主要由一种土料组成，同时起防渗和稳定作用。

2. 土质心墙坝：

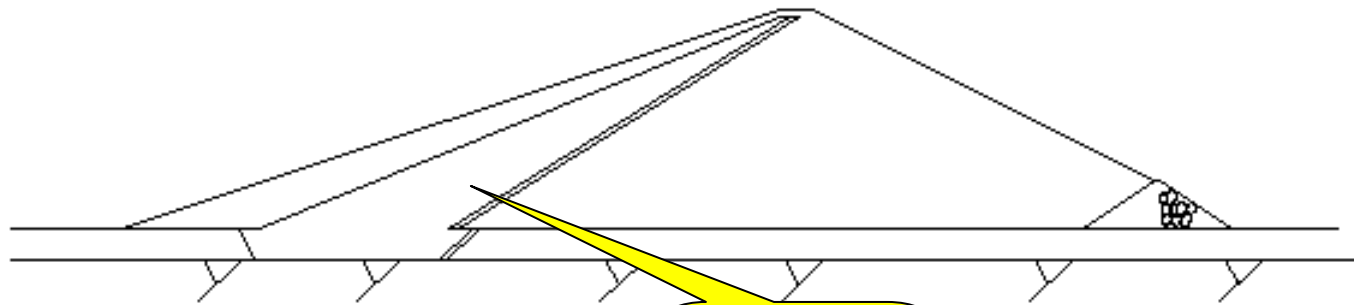
碧口、大伙房水库大坝



由相对不透水或弱透水土料构成中央防渗体，以透水土石料构成坝壳。

3. 土质斜墙坝

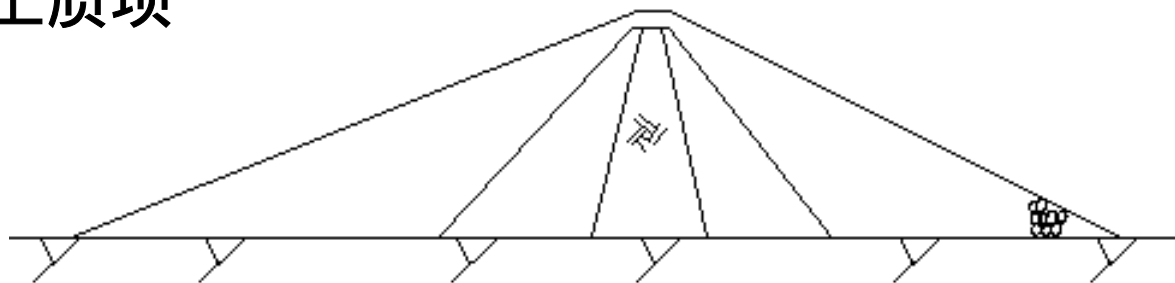
(密云水库大坝)



由相对不透或弱透水土料构成上游防渗体，以透水土石料构成下游支撑体。

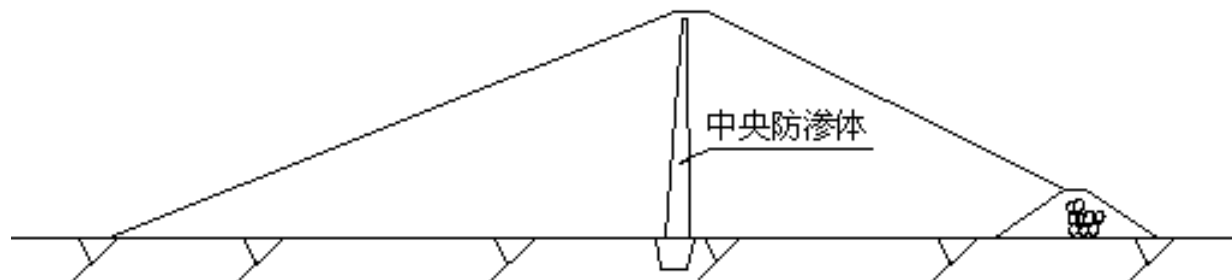
(小浪底水库大坝——斜心墙坝)

4. 多种土质坝



坝体由多种土料构成，以细土料建成中央或靠近上游的防渗体，坝体其它部位则由各种粗粒土料构成。

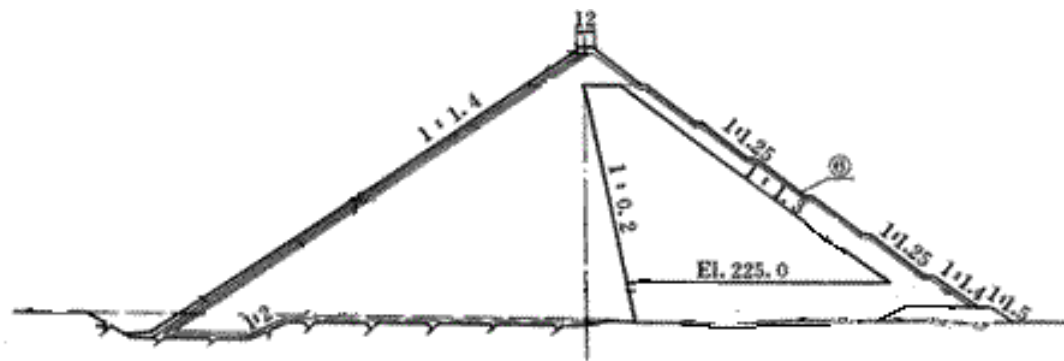
5. 人工材料心墙坝 (茅坪溪防护大坝、尼耳基主坝)



中央防渗体由沥青混凝土或钢筋混凝土构成，坝壳由透水或半透水土石料构成。

6. 人工材料面板坝

(水布垭大坝)



坝的支撑体由透水或半透水石料组成，上游防渗面板由钢筋混凝土、沥青混凝土或塑料薄膜等材料构成。

第二节 土石坝的基本剖面

《碾压式土石坝设计规范》SL274-2001

一. 坝顶高程

1. 无防浪墙

坝顶高程 = 静水位 + y ; $y = R + e + A$ (规范)

- 计算情况
- (1) 设计洪水位 + 正常运用条件的坝顶超高
 - (2) 正常蓄水位 + 正常运用条件的坝顶超高
 - (3) 校核洪水位 + 非常运用条件的坝顶超高
 - (4) 正常蓄水位 + 非常运用条件的坝顶超高 + 地震安全超高

！！坝顶高程取其中之最大值

2. 有防浪墙

**！！坝顶高程：正常运行条件下，应高出静水位0.5m；
非常运用条件下，不低于静水位。**

！！注意：

设计的坝顶高程，是指坝体沉降稳定后的高程，竣工时的坝顶高程应留有足够的沉降量。

寒冷地区坝顶应有足够厚度保护土质防渗体。

二. 坝顶宽度

无特殊要求，高坝坝顶宽度10 ~ 15m；中低坝5 ~ 10m。

应考虑：心(斜)墙顶部及反滤层布置的需要。

三. 坝坡

坝坡坡度对坝体稳定和坝体工程量的大小起重要作用。

可参考已建坝的经验或近似方法初步拟定，最终通过稳定计算确定。

1. 上游坡度比下游坡度缓。

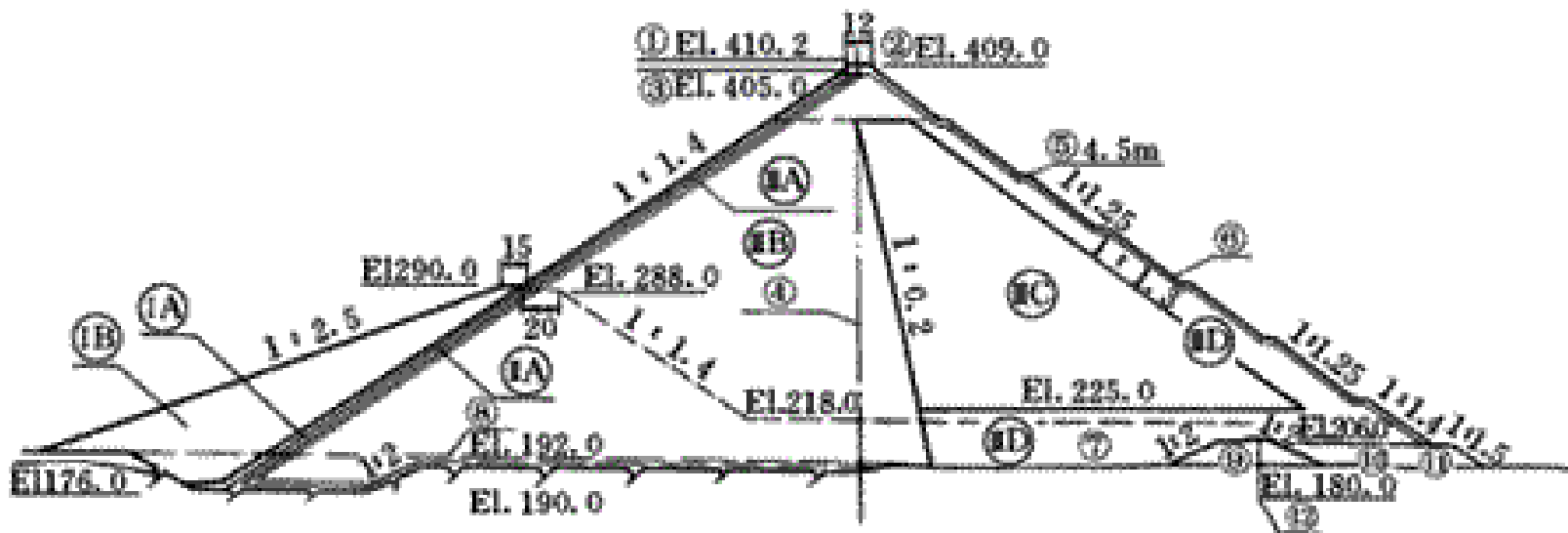
2. 上游坡度：土质斜墙坝比心墙坝缓

下游坡度：心墙坝（尤其是厚心墙坝）比斜墙坝缓。

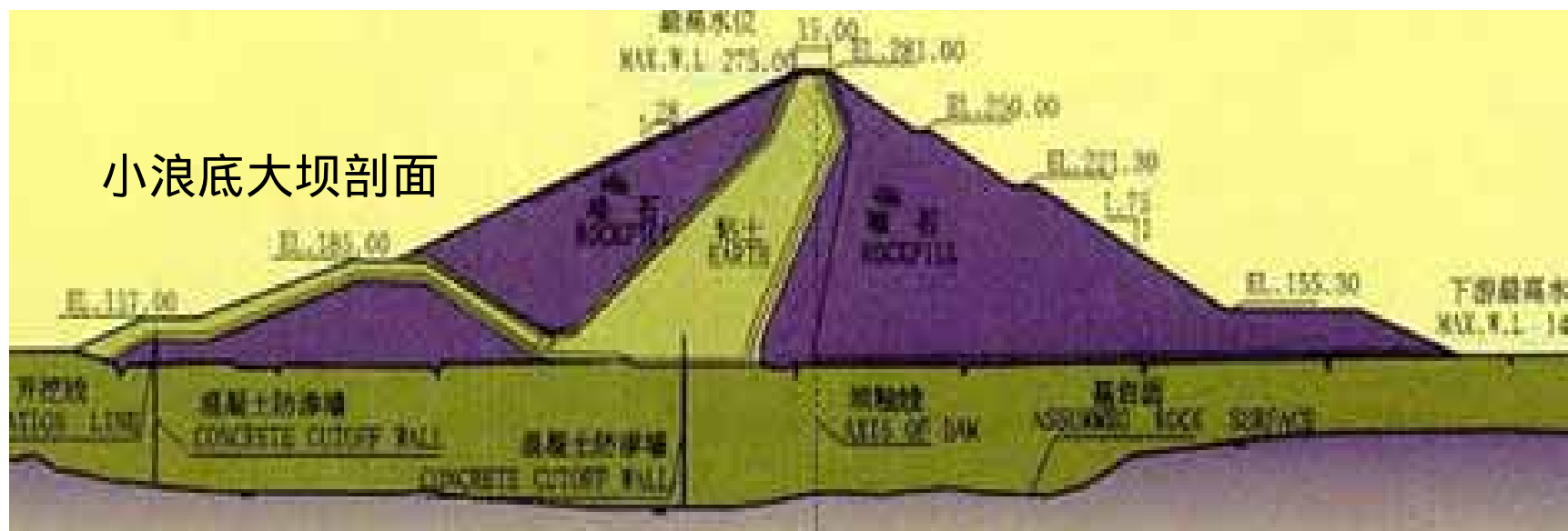
（坝坡稳定受心墙或斜墙土料特性的影响）

3. 人工材料面板坝，坝坡较陡。

沥青混凝土面板坝上游坡不宜陡于1:1.7



4. 下游坝坡设马道



马道作用 { 拦截雨水、防止冲刷坝面；
交通、检修及观测之用；
利于稳定

每10~30m设一马道，最小宽度不宜小于1.5m

第三节 土石坝的渗流分析

一. 渗流分析的目的及内容

目的 { 为坝坡稳定计算提供依据；
检验土体的渗透稳定性；
确定渗流水量损失并设计排水系统的容量。

内容 { 确定浸润线位置
确定渗流的主要参数——渗流流速 v 、渗透坡降 J
确定渗流量

二. 渗流分析

渗流特点：**无压渗流**、**有浸润面**，可看作**稳定渗流**。
渗流分析中，假定 $v=kJ$

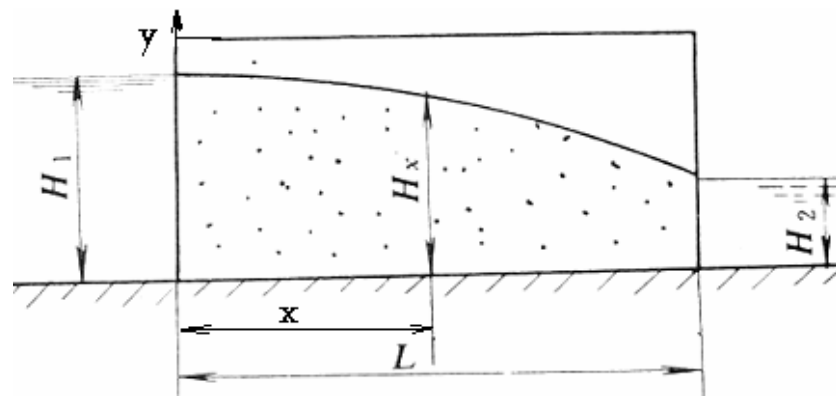
渗流分析方法：

水力学法、流网法、有限元法、电模拟法

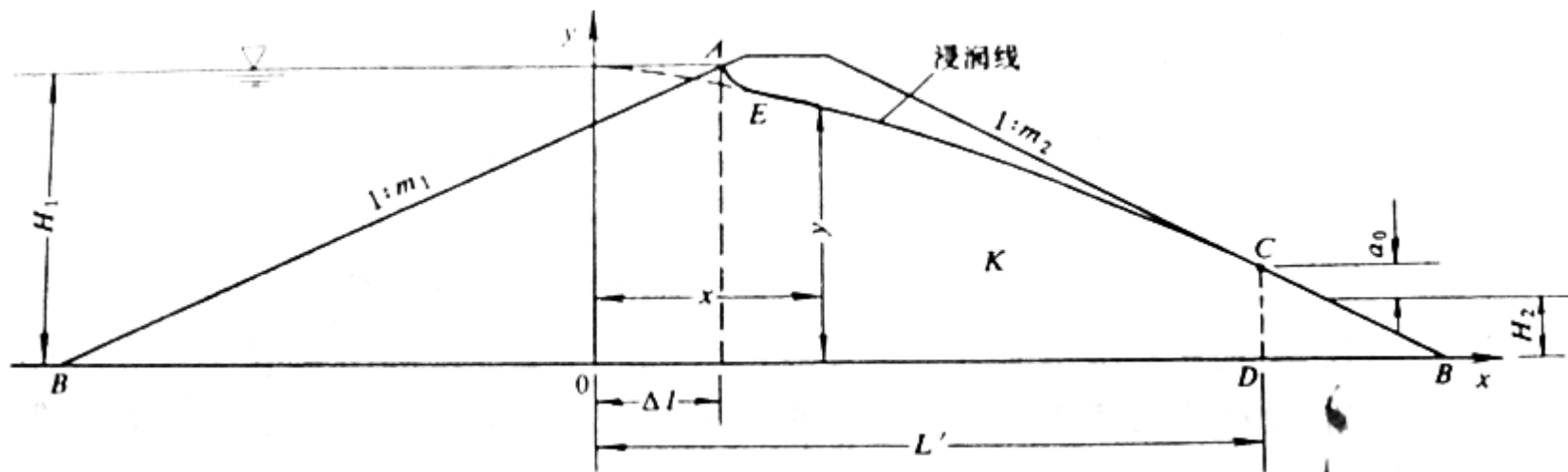
水力学法

假定：渗流区可用矩形断面的渗流场模拟。

$$\left\{ \begin{array}{l} q = k \frac{H_1^2 - H_2^2}{2L} \\ H_1^2 - H_x^2 = \frac{x}{L} (H_1^2 - H_2^2) \end{array} \right.$$



1. 以均质坝为例

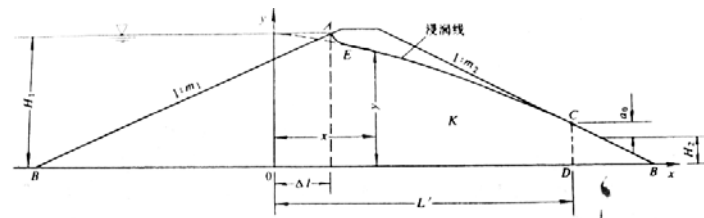


先将上游三角形用一**等效的矩形**（以通过同样多流量及消耗同样大水头为依据）代替。其宽度 $l=0.4H_1$ 。

等效的矩形再与中间段合并求解。

假定任意铅直线上各点的水力坡降均等于浸润线的坡降。
 根据达西定律，通过该铅直断面的渗透流量为：

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



过逸出点的铅直断面，对于逸出点c(L', a₀+H₂)

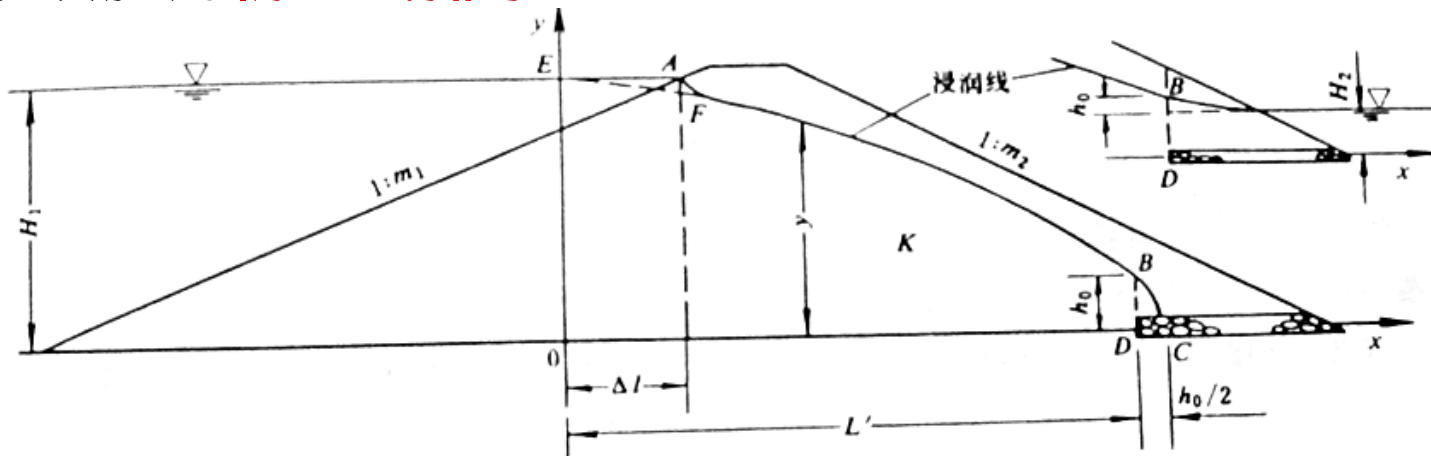
$$q_1 = \frac{k}{2L'} (H_1^2 - (a_0 + H_2)^2)$$

通过下游三角形的渗流量， $q_2 = \frac{ka_0}{m_2} (1 + \ln \frac{a_0 + H_2}{a_0})$
 近似为：

由连续条件 $q_1 = q_2$ ，即可求出 a_0 和 q

排水设施为贴坡排水时（如图），因贴坡排水基本不影响坝体浸润线的位置，故计算方法同上。

排水设施为褥垫式排水：



下游无水时，EBC段浸润线可认为是一**抛物线**，其焦点为排水体的起点D。

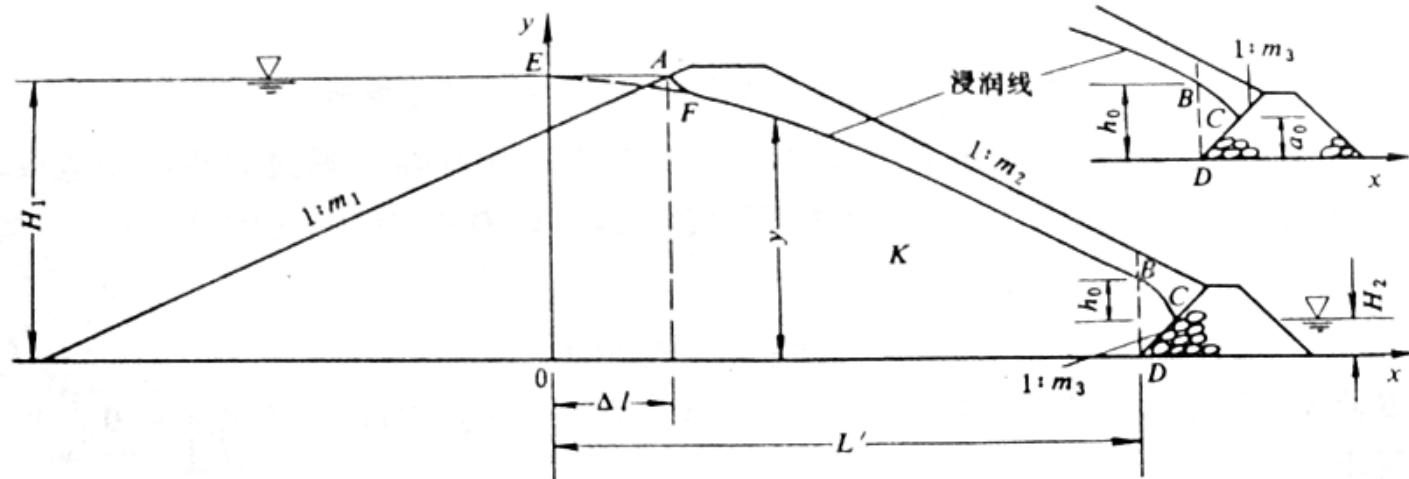
$$\text{浸润线方程：} L' = \frac{y^2 - h_0^2}{2h_0} + x$$

$$\text{渗流量：} q = \frac{k}{2L'} (H_1^2 - h_0^2)$$

$$\text{在E点：} L' = \frac{H_1^2 - h_0^2}{2h_0} \longrightarrow h_0 = \sqrt{L'^2 + H_1^2} - L'$$

下游有水时，浸润线不再与排水相交，而与下游水位成切线相连。

排水设施为棱体排水 (分下游有水和无水)



下游无水：

浸润线在棱体排水上游端D点处的渗透水深 h_0

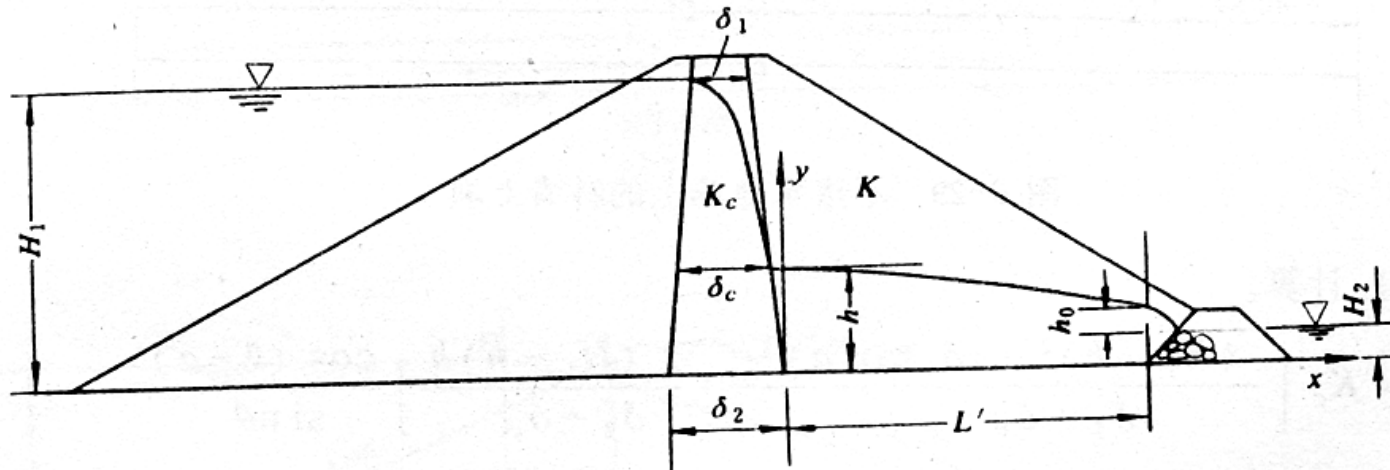
$$h_0 = \sqrt{L'^2 + H_1^2} - L'$$

C点高度：
$$a_0 = \frac{q}{2k(1 + m_3^2)^{1/2}}$$

单宽渗流量：
$$q = \frac{k}{2L'} (H_1^2 - h_0^2)$$

浸润线方程：
$$q = \frac{k}{2x} (H_1^2 - y^2)$$

2. 不透水地基上心墙坝的渗流计算 (有不同的算法)



可将心墙化为等厚 的矩形, $\delta = (\delta_1 + \delta_2)/2$

由于心墙的渗透系数 $k_c \ll$ 坝体 k , 故可认为上游浸润线水平(与库水同高); 排水设施为棱体排水时, 假定浸润线逸出点为下游水位与堆石体内坡的交点。

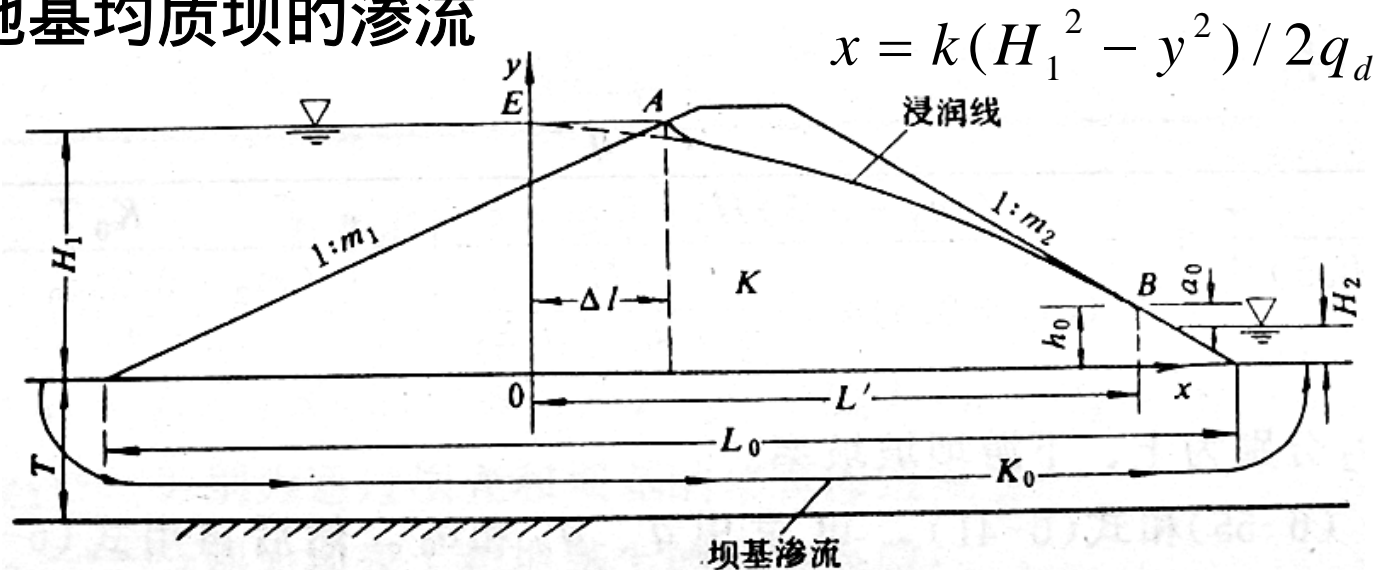
通过心墙段的渗流量 : $q = \frac{k_c}{2\delta} (H_1^2 - h^2)$

联立两方程, 即可求得 q 、 h

通过心墙下游坝壳的渗流量 : $q = \frac{k}{2L} (h^2 - H_2^2)$

下游浸润线方程为 : $x = \frac{k}{2q} (h^2 - y^2)$

3. 透水地基均质坝的渗流



通过坝体和坝基总的单宽渗流量：

$$q = q_d + K_0(H_1 - H_2)T / (L_0 + 0.88T)$$

q_d 坝体单宽渗透流量,可按不透水地基上的均质坝进行计算。

K \leq K_0 时

$$a_0 = \frac{q}{\frac{K}{m_2} \left[1 + \frac{(m_2 + 0.5)H_2}{(m_2 + 0.5)a_0 + 0.5H_2} \right] + \left[\frac{K_0 T}{m_2(a_0 + H_2) + 0.44T} \right]}$$

K $>$ K_0 时

$$a_0 = \frac{q}{\frac{K}{m_2 + 0.5} \left[1 + \frac{(m_2 + 0.5)H_2}{(m_2 + 0.5)a_0 + \frac{m_2 H_2}{2(m_2 + 0.5)}} \right] + \left[\frac{K_0 T}{a_0(m_2 + 0.5) + m_2 H_2 + 0.44T} \right]}$$

三. 水库水位下降对渗流的影响

主要对均质坝影响较大

四. 土坝的渗流变形及其防护

宏观上：表现为对坝体应力和变形的影响，可用连续介质力学方法分析。

微观上：作用于无粘性土的颗粒或粘性土的土骨架上，使其失去平衡，产生渗透变形。

1. 渗流变形形式

管涌、流土、接触冲刷、剥离、化学管涌

管涌：坝体或坝基土体中部分颗粒被渗流水带走的现象。

！！管涌只发生在无粘性土中

流土：在渗流作用下，粘性土或均匀无粘性土体被浮动的现象。

接触冲刷：渗流方向与交界面平行

剥离：一般发生在粘性土与粗粒土接触面处。

化学管涌：土体中的盐类被渗流水溶解带走的现象。

防渗设计：选择好筑坝土料、**防渗结构形式**、**过渡区**和排水**反滤**

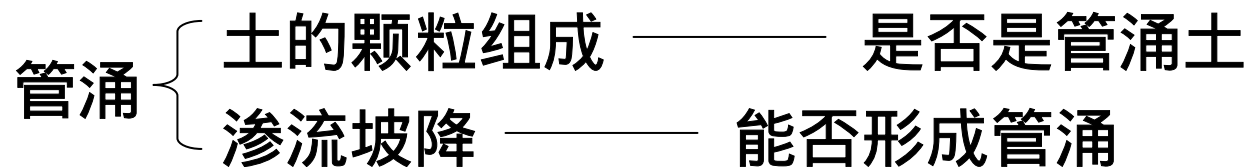
2. 渗流稳定性分析

查明坝体、坝基的**管涌土**、**流土**及**范围**；

确定发生渗流变形的**临界坡降**、相应的**容许坡降**；

不会造成危害的可被渗流水带走的**细粒土的百分比**。

管涌土、流土的判别



判断是否为管涌土？

土体中的最大空隙 d_0 (cm):

$$d_0 = 0.455 (1 + 0.057 \eta)^{1/6} \frac{n}{1-n} d_{17}$$

d_{17} —— 级配曲线中含量小于17%的土粒最大粒径 (cm)

—— 不均匀系数

n —— 空隙率

可被渗流水带走的土颗粒的粒径 $d_c=0.77d_0$ (cm)

若土的颗粒组成中只有不到3% ~ 5%的土粒粒径 $<d_c$ ，则为非管涌土

能否形成管涌？

能将粒径为 d_c 的土粒带走的渗流临界坡降为：

$$J_c = \varphi_0 d_c \sqrt{ng / (vk)}$$

$$\varphi_0 = 0.60 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1 \right) [0.82 - 1.8n + 0.0062(\eta - 5)] \sin\left(30^\circ + \frac{\theta}{8}\right)$$

流土

无粘性土 $\left\{ \begin{array}{l} D_a / d_3 \leq 5.4 \\ D_a = 0.455 \eta^{1/6} \frac{n}{1-n} D_{17} \end{array} \right.$ 满足此条件，则不会发生流土。

当 $\eta = 10$ 时，下游无压重的无粘性土的临界坡降：

$$J_c = (1-n)(\gamma_s / \gamma_0 - 1) + 0.5n$$

粘性土 $\left\{ \begin{array}{l} \text{完整型} \\ \text{有裂隙型} \end{array} \right.$

思考

1. 若水位、库址自然条件相同时，土石坝与重力坝是否等高？土石坝的防浪墙起挡水作用时，墙顶、坝顶、防渗体顶高程怎样确定？
2. 拟定土石坝坝坡时，不同材料的边坡变化有什么规律？
3. 两个均质坝除坝身材料渗透系数不同外，其它均相同，则它们的浸润线、渗透流速、渗透坡降及渗流量是否相同，为什么？

作业

锦州小凌河防洪堤渗流计算与分析

第四节 土石坝的稳定分析

一. 稳定分析目的、方法和控制标准

1. 目的： 分析坝体和坝基可能发生的稳定破坏形式、核算其稳定性；选择坝体经济剖面。
2. 计算工况及计算内容

四种计算工况：

施工期(包括竣工期)、稳定渗流期、库水降落期和正常运用遇地震

计算内容

施工期的上、下游坝坡
稳定渗流期的上、下游坝坡
库水降落期的上游坝坡
正常运用遇地震的上、下游坝坡

3. 土石坝滑动面的形状

滑动面的形状：圆弧、折线或圆弧与直线组合形式（图）

粘性土(均质坝)滑动面：圆弧

无粘性土滑坡：折线型

4. 土石抗剪强度指标

各种计算工况，土体的抗剪强度均采用有效应力法计算。

$$\tau = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi' = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'$$

粘性土：

施工期应同时采用总应力法计算

$$\tau = c_u + \sigma \operatorname{tg} \varphi_u$$

水库降落期应同时采用总应力法计算

$$\tau = c_{cu} + \sigma'_c \operatorname{tg} \varphi_{cu}$$

无粘性土：

抗剪强度指标采用排水剪的 c' 和 φ' ，

堆石、砂砾石等粗粒无粘性土，其内摩擦角随法向应力增加而减小，呈非线性关系。

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)$$

土体滑动面的小主应力

大气压力

与土性质有关的实验参数

一个大气压下的摩擦角

规范规定：1级高坝，有条件可采用上述公式确定的抗剪强度指标。

混凝土面板堆石坝的粗粒料应采用。

5. 稳定分析方法及安全系数

应采用刚体极限平衡法

瑞典圆弧法、简化毕肖普法(simplified Bishop)、Morgenstern-Price、Spencer、Janbu、滑楔法等

计及条间作用力的坝坡抗滑稳定最小安全系数

运用条件	工程等级			
	1	2	3	4、5
正常运用	1.50	1.35	1.30	1.25
非常运用	1.30	1.25	1.20	1.15
非常运用	1.20	1.15	1.15	1.10

不同方法计算，安全系数不同，应配套使用！！

混凝土面板坝采用非线性抗剪强度指标计算坝坡稳定，安全系数取值同表。

不计条块间作用力时(如瑞典圆弧法)：应比表中数值减小8%，1级坝正常运用最小安全系数不小于1.30。

二. 瑞典圆弧法

假定坝坡失稳破坏可简化为**平面问题**，破坏面为**圆弧形面**。

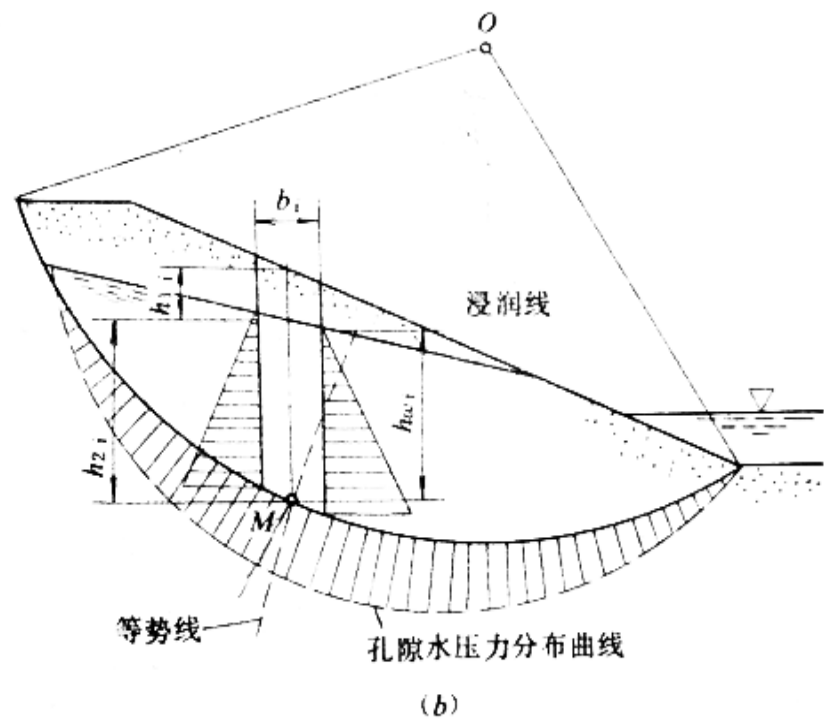
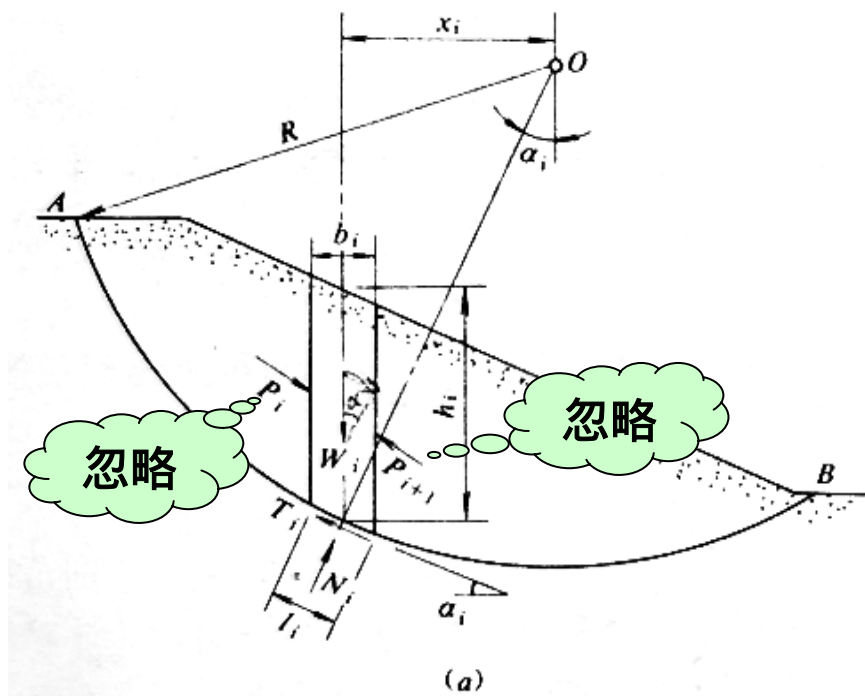
均质坝、厚心墙坝、厚斜墙坝——可用此法

应进行有效应力分析也可采用总应力分析

计算时，将滑动土体划分成若干土条，忽略土条间的相互作用力。

只满足滑动土体整体力矩平衡条件，不满足条块的静力平衡条件。

$$\text{抗滑稳定安全系数} : k_c = \frac{\text{抗滑力矩}}{\text{滑动力矩}}$$



$$k_c = \frac{\sum [c'_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \phi'_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

孔隙水压力

对渗流水压力 u 的近似处理：

计算抗滑力时，浸润线以下部分采用浮容重进行计算；

计算滑动力时，浸润线以下、下游水位以上部分采用饱和容重进行计算

最危险滑弧位置的确定：需选择一系列的滑动面计算

土料的凝聚力越强，滑动面越深。

三. 简化的Bishop法

计算中，考虑土条间的相互作用力

适用于有效应力分析及总应力分析

对于均质坝、厚心墙坝、厚斜墙坝，《碾压式土石坝设计规范》建议采用简化的Bishop法。

忽略土条间的切向力 X_i

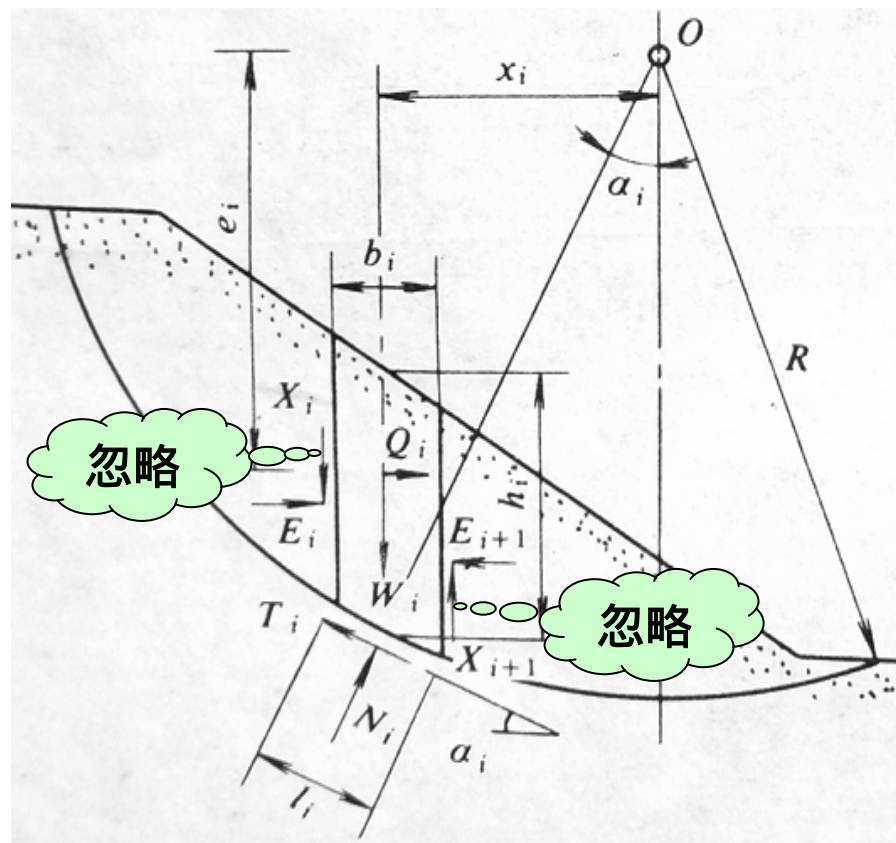
根据摩尔 - 库仑条件：

$$T_i = \frac{1}{k} [c'l_i' + (N_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \varphi_i']$$

由每一土条竖向力平衡，

可求出 N_i 的表达式：

$$N_i \cos \alpha_i = W_i - T_i \sin \alpha_i$$



由稳定安全系数定义，得到 k 的表达式：

$$k = \frac{\sum [c'l_i' + (N_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \varphi_i']}{\sum W_i \sin \alpha_i + \sum Q_i e_i / R}$$

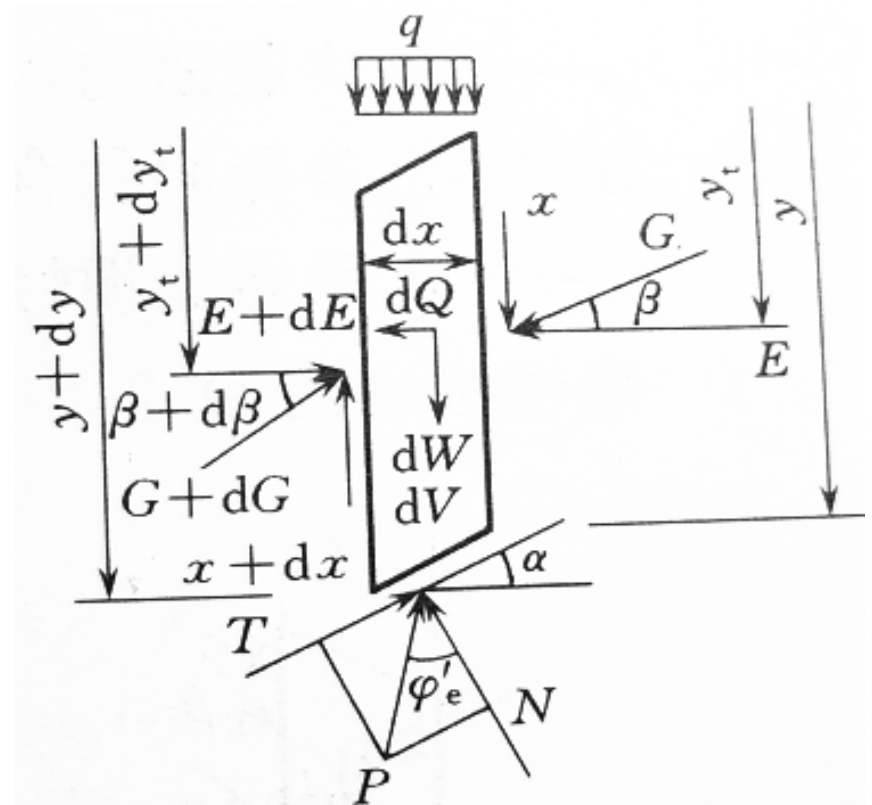
瑞典圆弧法、简化的毕肖普法——圆弧滑动面

适合分析均质坝、厚心墙坝及厚斜墙坝

四. Morgenstern-Price法

对于坝基有软弱夹层、薄心墙、薄斜墙坝的坝坡稳定分析及其它任何坝型，可采用**满足力和力矩平衡**的Morgenstern-Price等方法

计算中，假设 $x/E = f(z)$



第五节 土石坝的固结、沉降与应力分析

一. 固结与沉降分析 —— 针对粘性土地基及防渗体

1. 固结分析

(1) 固结概念

$$\sigma = \sigma' + u$$

σ' 增大 \longrightarrow 变形到稳定

(2) 固结分析的目的

了解孔隙水压力 u 、沉降 $\sim t$ 的变化、评价对坝坡失稳和坝基承载力的影响。

(3) 固结分析的方法

太沙基（单向固结）、比奥固结理论（二、三维问题）

2. 沉降分析

分层总和法

$$s = \sum_{i=1} \frac{\Delta e_i}{1 + e_i} h_i$$

二. 应力和变形计算

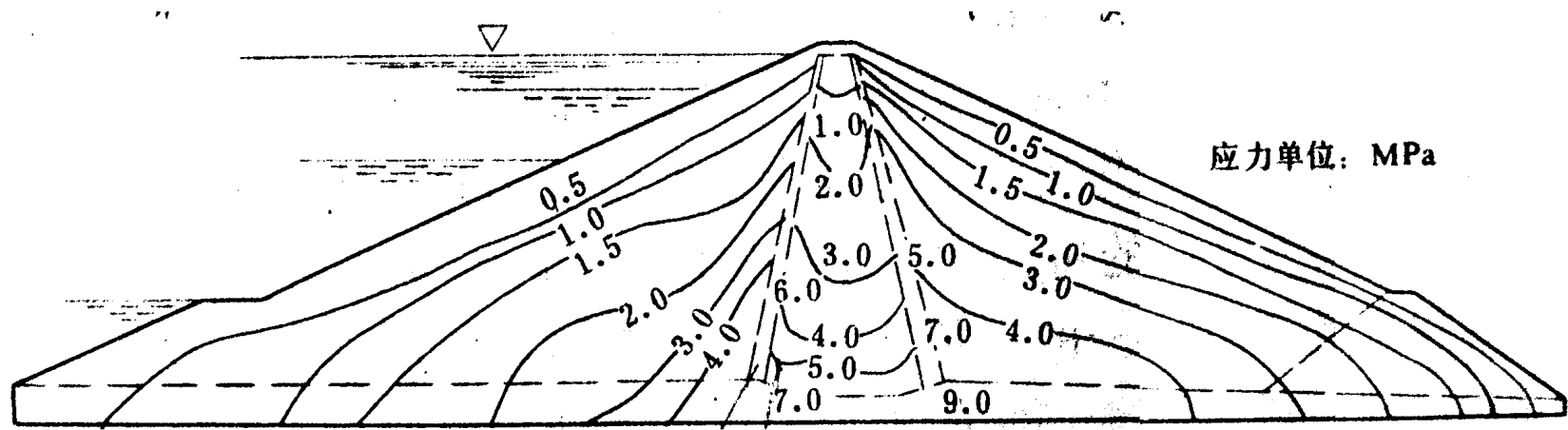
—— 针对高坝

目的 {

- 控制坝体裂缝
- 分析坝体稳定
- 为刚性防渗结构提供设计依据
- 确定坝顶预留沉陷值

Duncan and Zhang模型 - 双曲线型非线性弹性模型

有限元法计算



应力单位: MPa

竖向应力分布

拱效应： 由于坝壳和心墙材料性质不同，坝壳很快达到沉降稳定而心墙则由于固结慢，还在继续沉降，坝壳通过与心墙接触面上的摩擦力作用阻止心墙沉降，这就是坝壳对心墙的拱效应。

水力劈裂：

由于库水压力的作用，使防渗体中已存在的闭合裂缝重新张开或产生新的裂缝。

总结与要求

1. 稳定分析的方法
2. 重点掌握简化的毕肖普法和瑞典圆弧法
3. 了解土石坝的固结、沉降与应力分析

思考

1. 用圆弧滑动法为什么要假定一系列的弧才能确定是否稳定？

第六节 筑坝用土石料及填筑标准

筑坝土石料的一般要求：

- (1) 土石料的工程性质要与使用目的相适应，且具有长期稳定性。
- (2) 就地、就近取材，减少弃料，少占或不占农田，并优先考虑枢纽建筑物开挖料的利用。
- (3) 便于开采、运输和压实。

一. 防渗体土料

1. 选择原则

(1) 防渗性：均质坝 $k \leq 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 心墙和斜墙 $k \leq 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

(2) 水溶盐含量(按质量计)： $\leq 3\%$

(3) 有机质含量(按质量计)：均质坝 5%；心墙和斜墙 2%

(4)有较好的塑性和渗透稳定性

(5)浸水与失水时体积变化小

2. 防渗体材料

粘土、壤土等细粒土——中低坝

砾石土、风化砾石土——高坝

3. 砾石土防渗料(含砾粘性土)

含有相当多粗粒土($d>5\text{mm}$)、又有一定数量的细粒土($d<5\text{mm}$)

与粘性土相比 {

- 抗剪强度高、压缩性小、适应变形能力差
- 对含水率影响不敏感，可在潮湿气候下施工
- 裂隙可自愈
- 变形模量高，与坝壳材料能较好匹配，从而减轻拱效应

作为防渗体的
砾石土

粒径 $d > 5\text{mm}$ 的颗粒含量 50% ;
最大粒径应 150mm或铺土厚度的 $2/3$;
粒径 $d < 0.075\text{mm}$ 的颗粒含量 15% ;
填筑时不得发生粗粒架空现象

！！颗粒级配良好、粗粒不架空且满足防渗要求

4. 其它防渗土料

红粘土、分散性粘土、黄土、膨胀土等

5. 填筑标准

含砾和不含砾粘性土

应以**压实度**和**最优含水率**作为设计控制指标。

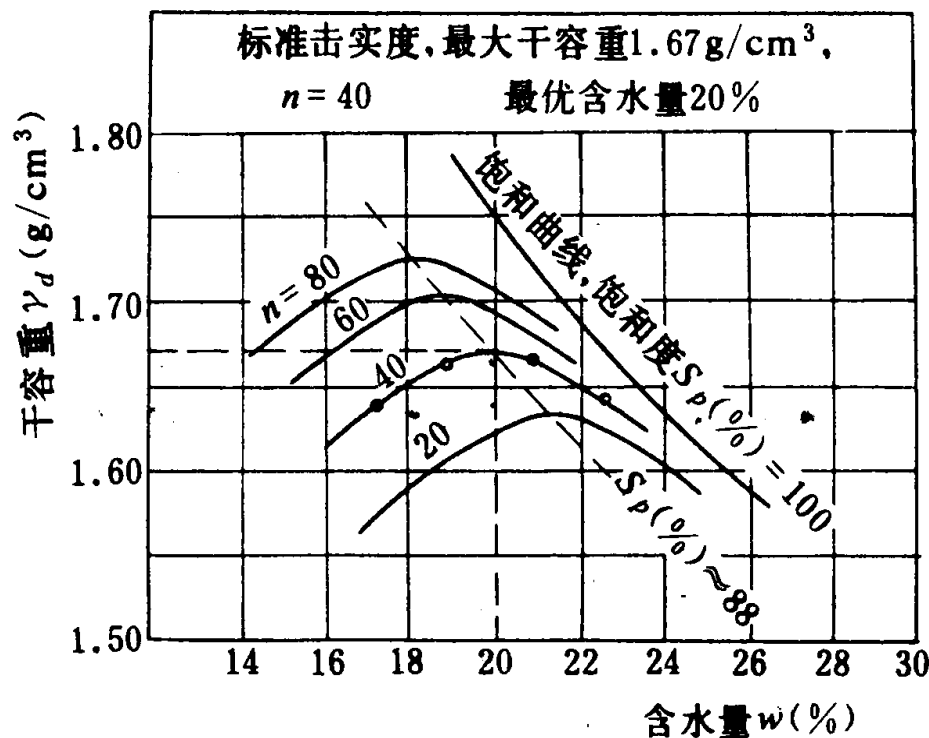
1、2级坝和高坝的压实度应为98%~100% ; 3级以下坝96%~98%。

设计地震烈度为8度、9度宜取大值

土料**压实程度**受击实功能的控制，同时又随含水量变化。

最优含水率：

在一定的压实功能条件下，达到最佳压实效果的含水量。



粘性土的填筑含水量一般控制在最优含水量附近：

当要求土料具有良好塑性时，可略大于最优含水量；

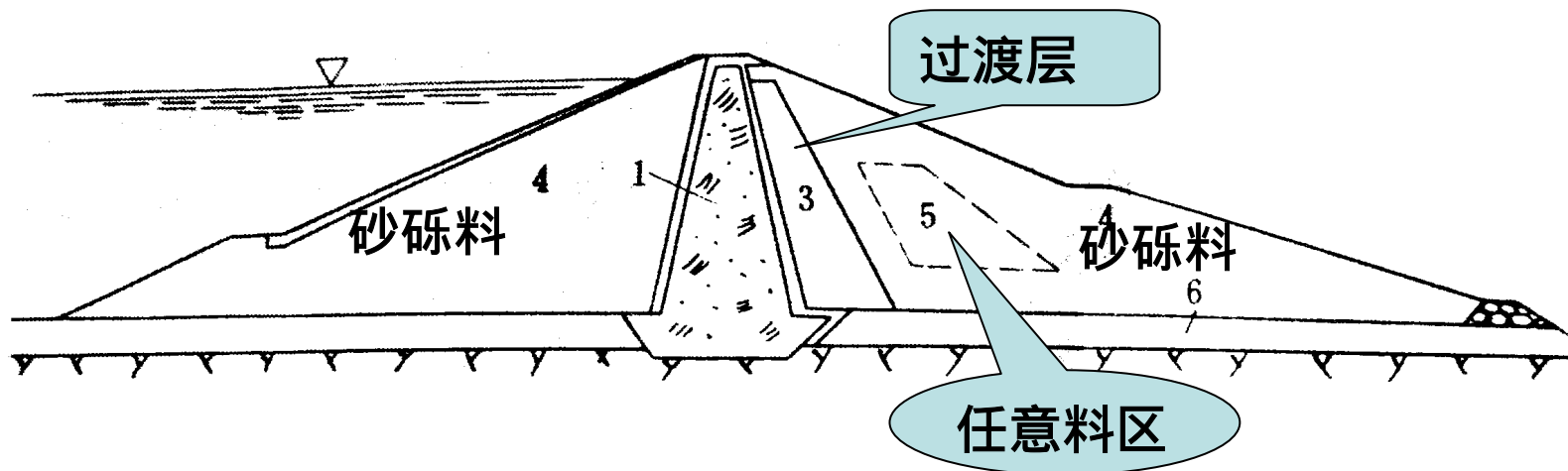
当要求土料具有高密度时，可略低于最优含水量。

二. 坝壳料

要求： 较高的强度； 上游坝壳的水下部分及水位变动区、下游坝壳的水下部位，要求具有良好的排水性能。

料场开采和建筑物开挖的无粘性土(如：砂、砾石、卵石、漂石等)、石料和风化料、砾石土均可用来做坝壳料，但必须**根据其性质配置于坝壳的不同部位**。

质量差的、粒径小的石料放在内侧；质量好的、粒径大的放在外侧。



任意料区(干燥区)：细料较多、难以自由排水，宜放此处，外包排水过渡层。

填筑标准：

1. 砂砾石和砂，应以**相对密度**作为设计控制指标。

- 砂砾石的相对密度不低于0.75;
- 砂的相对密度不低于0.70;
- 反滤料宜为0.70

地震区土石坝：浸润线以上 0.70；

浸润线以下 0.75~0.85(按地震烈度不同)

2. 堆石宜以**孔隙率**为设计控制指标

规范规定：土质防渗体分区坝和沥青混凝土心墙坝的堆石料，孔隙率宜为20%~28%。

实际施工时，一般按**碾压参数**和**干容重**同时控制

填料	机械	碾重	铺筑层厚	碾压遍数	压实度	压实干容重	加水量
风化砂	振动碾	17t	60cm	6~8	98%	1.94	12%
石渣混合料	振动碾	17	60cm	8	98%	2.1	25%
石渣料	振动碾	17	80cm	8	n<25%	2.15	25~30%
堆石料	振动碾	17	100cm	8	n<25%	2.15	较充分

三. 反滤料、过渡料及排水体材料

要求：

质地致密，抗水性和抗风化能力能满足工程运用条件的要求；

具有要求的级配；

具有要求的透水性；

反滤料和排水材料中粒径小于0.075mm的颗粒含量应 5%

第七节 土石坝的构造

一. 防渗体

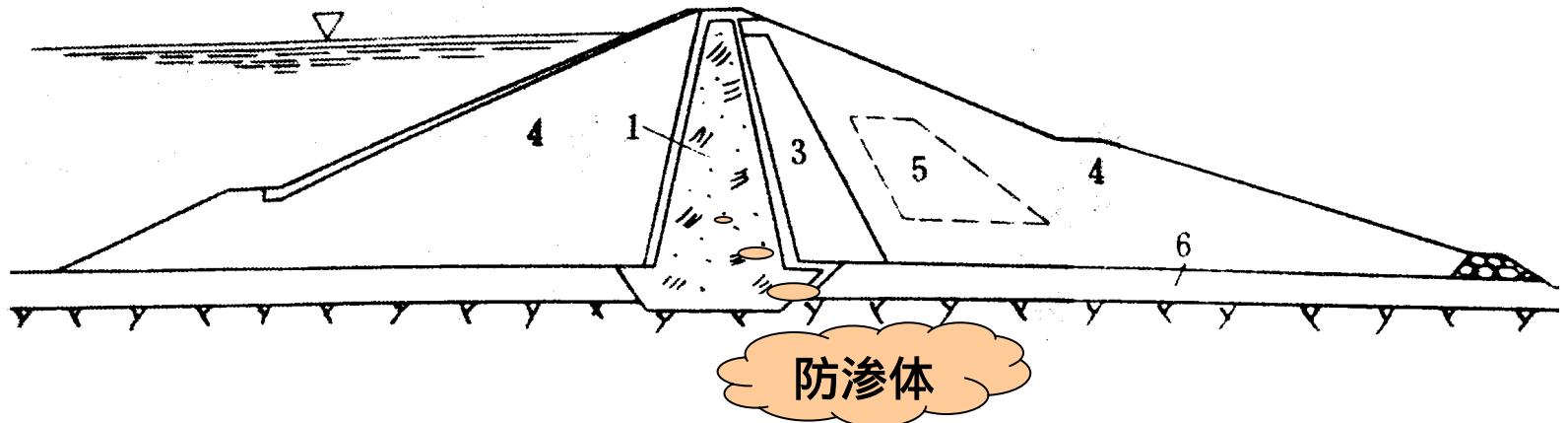
(一) 土质防渗体

土质防渗体结构尺寸，除应满足将渗透坡降、浸润线和渗流量降到所要求的范围内，还要满足结构和施工上的要求。

1. 厚度（自上而下逐渐加厚）

顶部水平宽(厚)度 3.0m；

底部厚度：心墙 1/4水头；斜墙 1/5水头



2. 防渗体顶部高程

防渗体顶部高程 = 正常蓄水位或设计洪水位 + 超高

(超高：心墙0.3~0.6m、斜墙0.6~0.8m)

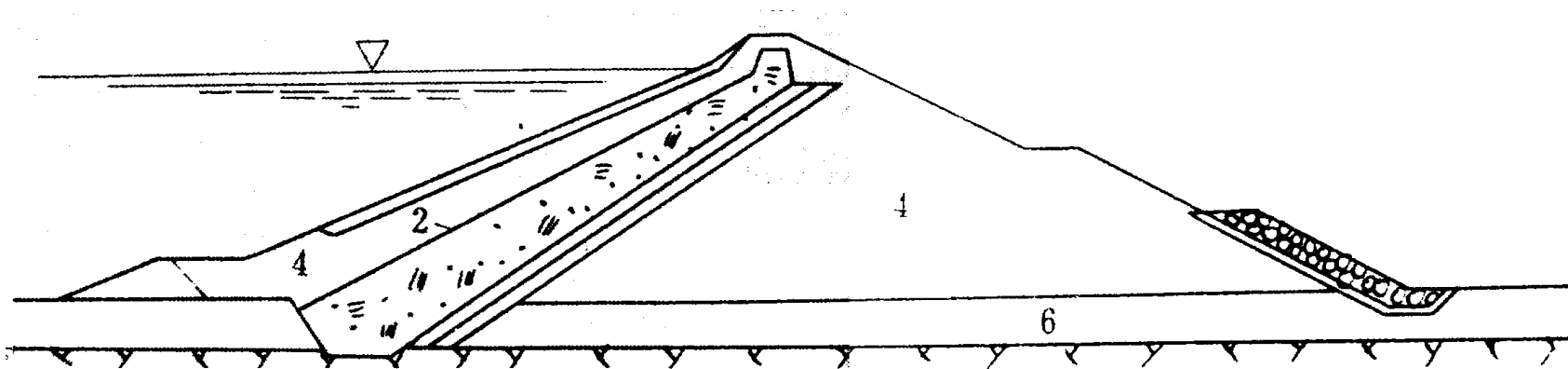
非常运用条件下，不得低于校核洪水位

！！注意：有防浪墙时，心墙顶不得低于正常运用时的静水位。

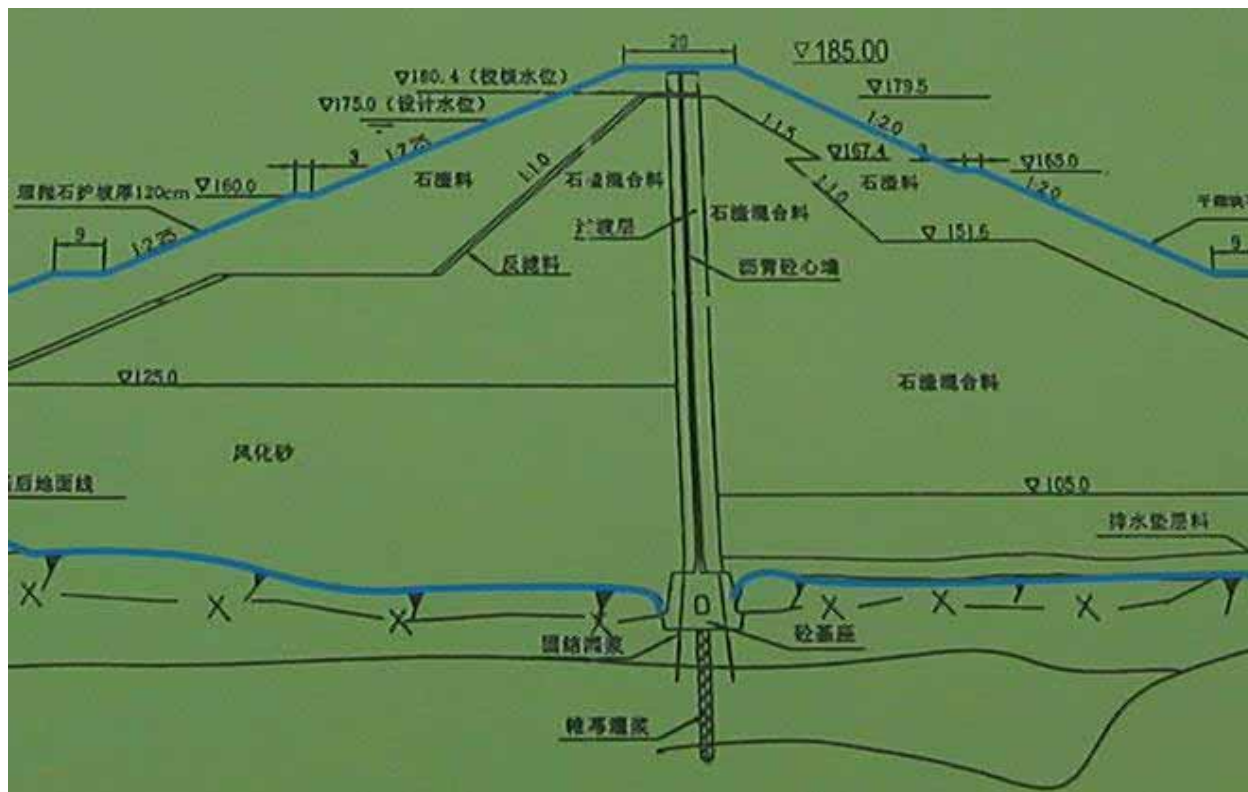
3. 保护层

心墙、斜墙的顶部和斜墙的上游侧，应设保护层，防止冰冻和干裂。

保护层厚度：不小于该地区的冻结和干燥深度



(二) 沥青混凝土防渗墙



心墙

心墙两侧设过渡层
墙顶厚度 30cm
底部 40cm

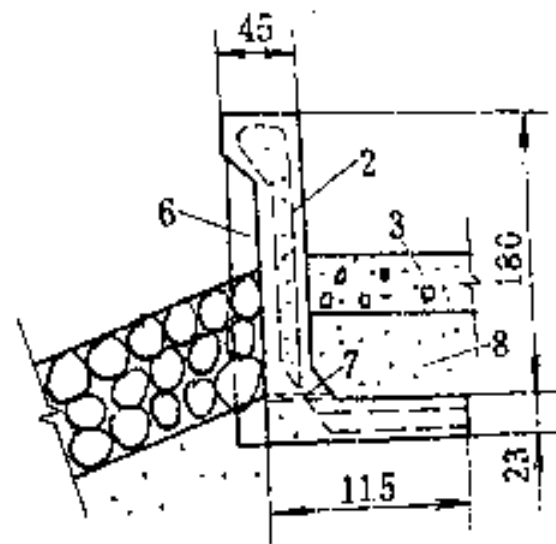
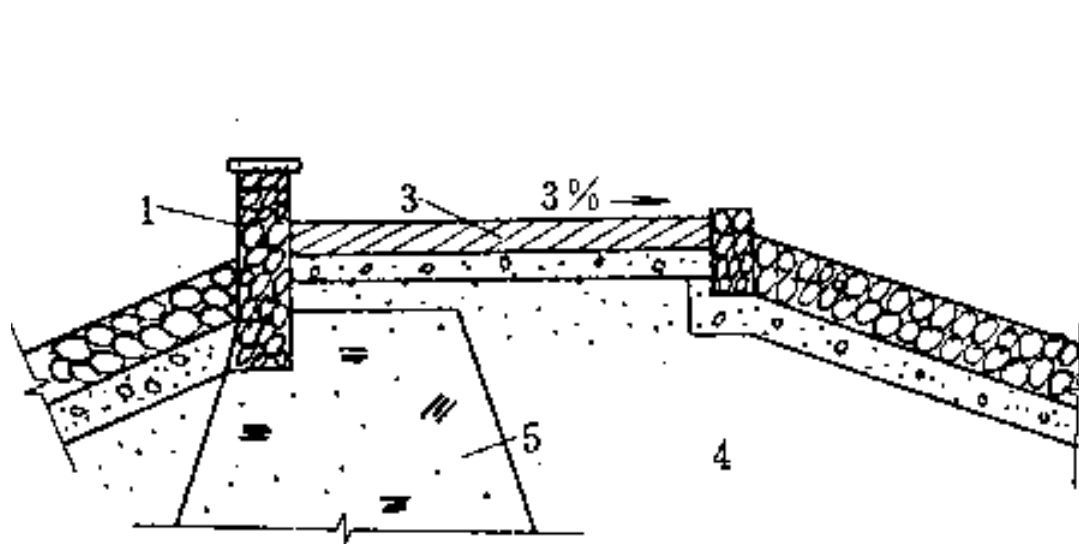
斜墙

厚度 20cm

下铺由沥青碎石和
碎石组成的垫层

二. 坝顶和护坡

(一) 坝顶



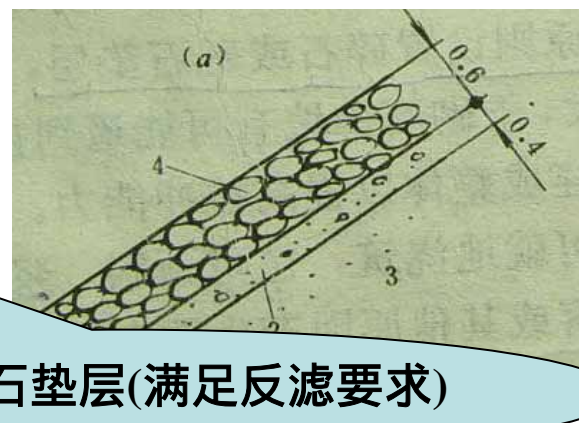
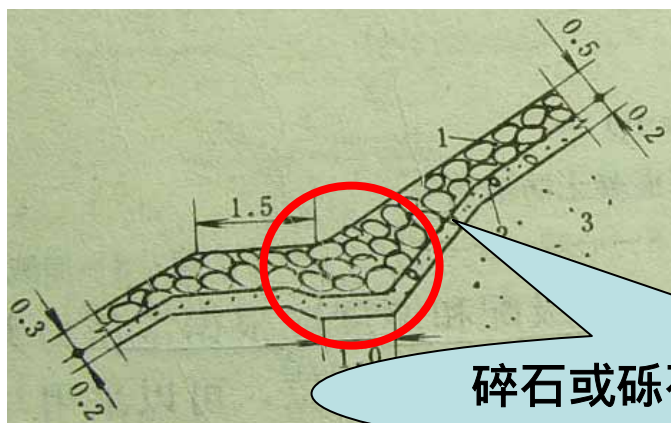
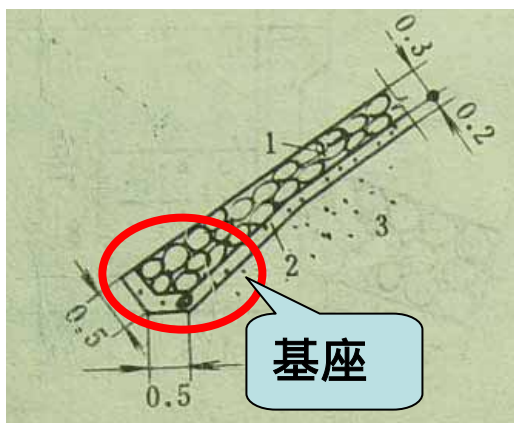
防浪墙应和防渗体紧密连接
坝顶面应有一定坡度2%~3%

(二) 护坡

1. 上游护坡

目的：保护上游坝面，免受波浪淘刷、顺坡水流冲刷、冰层和漂浮物等的破坏作用。

护坡形式：砌石、堆石；砌石 + 水泥砂浆勾缝；沥青(钢筋)混凝土
(需设排水孔)



护坡范围：自坝顶至水库最低水位以下2.5m，级以下的坝(1.5~2.0)m。

护坡石块的大小、级配和厚度：根据波浪要素按规范要求计算确定

2. 下游护坡（如图）

目的：保护下游坝面，免受冻胀、干裂及蚁鼠等动物的破坏；防止雨水、大风、水下部位的风浪、冰层和水流的作用。

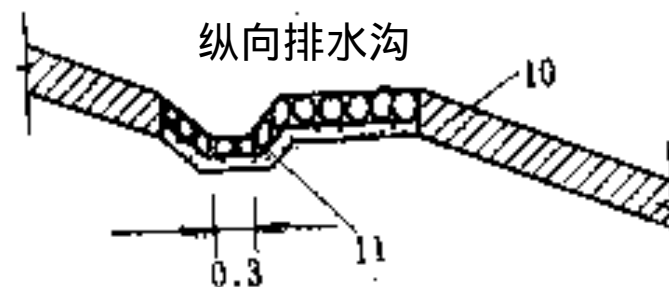
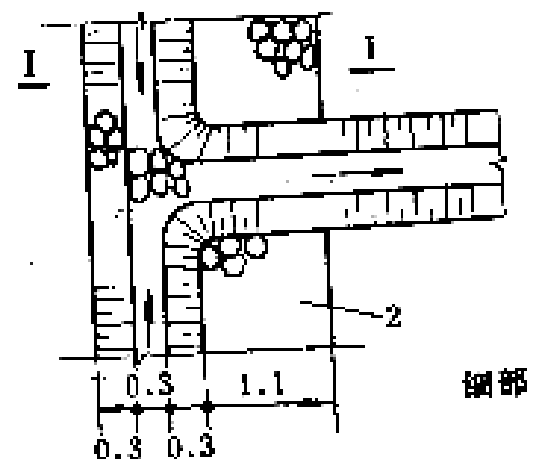
护坡形式：干砌石；
堆石、卵石或碎石；
草皮——粘性土均质坝；
钢筋混凝土框格填石。

护坡范围：除排水棱体外需全部护砌

除砌石和堆石坝坡外，坝面应设排水系统。

另外，坝坡与岸坡连接处设排水沟。

排水沟尺寸：应排走1小时的暴雨径流而不漫流坝面。



三. 坝体排水和反滤层

土石坝渗流控制的原则：防、排结合，排水和反滤是其重要的组成部分。

1. 坝体排水

作用：控制和引导渗流，降低浸润线，加速孔隙水压力消散，以增强坝的稳定性，并保护坝坡免遭冻胀破坏。

常用形式：棱体排水、贴坡排水、坝内排水、综合排水等

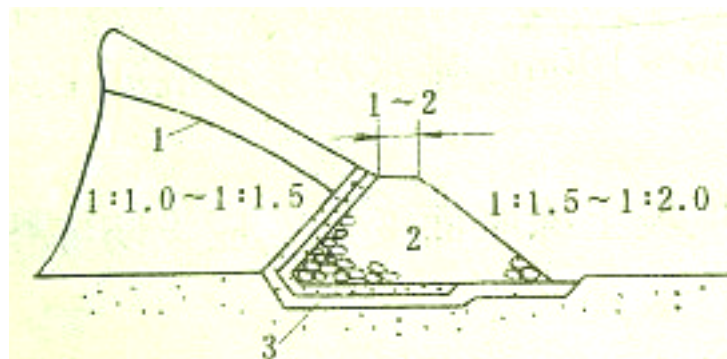
(1) 棱体排水(滤水坝趾)

优点：不仅可降低浸润线、防止坝坡冻胀破坏、保护下游坝脚不受尾水淘刷，而且还能增强坝的稳定性。

缺点：石料用量大、费用高，施工干扰大，检修困难。

设计原则：要保证浸润线位于下游坝坡的冻结深度以下

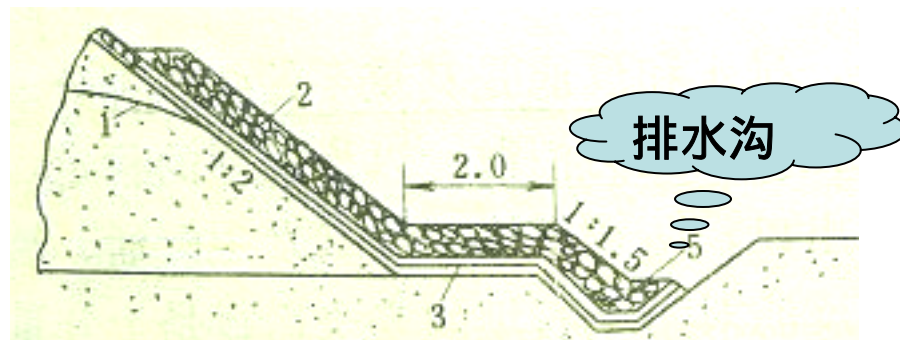
棱体顶高程：高于最高水位(1、2级坝高出1m以上，其它高出0.5m以上)；并应超过波浪沿坡面的爬高。



(2) 贴坡排水

优点：简单、省料，施工方便，易于检修。

缺点：不能降低浸润线，易因冰冻而失效。



排水沟应有足够的深度，以便结冰后，有足够的断面进行排水。

贴坡厚度：应大于冰冻层厚度。

贴坡高度：应高于坝体浸润线出逸点，超过高度应使浸润线在该地区冻结深度以下，1、2级坝 2m；3、4、5级坝 1.5m。
同时应超过波浪沿坡面的爬高。

适用于：下游无水的中小型均质坝或浸润线位置较低的中等高度的坝

(3) 坝内排水

坝内排水有：褥垫排水、排水管、网状排水带、竖式排水等

褥垫排水：沿坝基面平铺，由块石组成的水平排水层，外包反滤层。

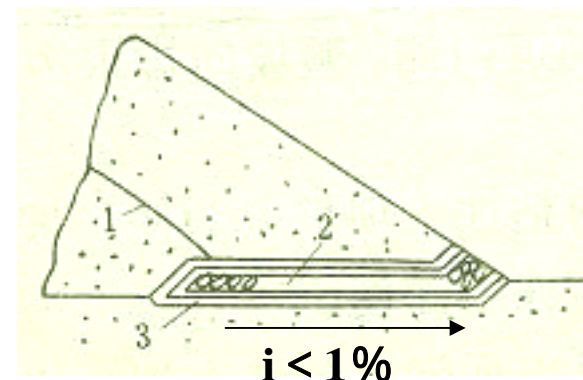
优点：可有效降低浸润线，有助于坝基排水、加速软粘土地基的固结。

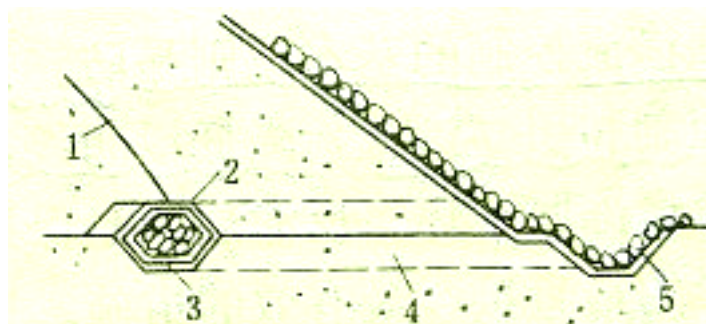
缺点：对不均匀沉降的适应性差，易断裂、难检修。
当下游水位高于排水设施时，降低浸润线的效果大大降低。

最大深度：粘性土均质坝为坝底宽的 $1/2$ ；

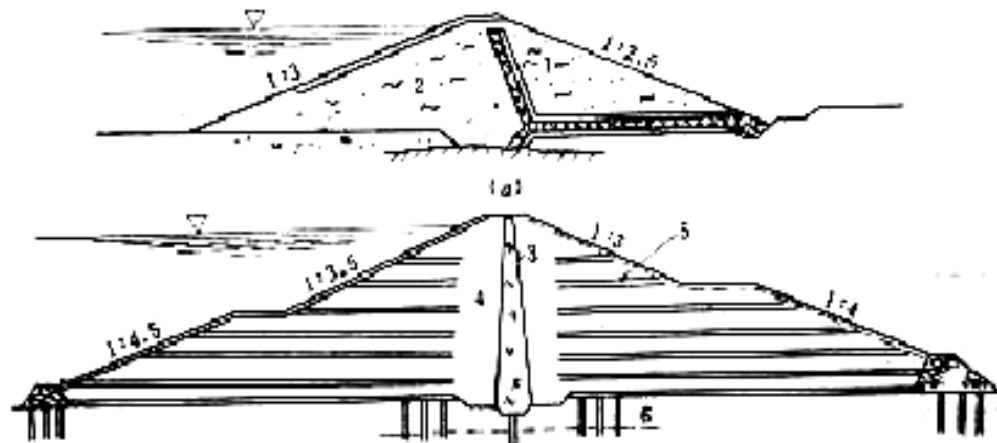
砂性土均质坝为坝底宽的 $1/3$ ；

土质防渗体分区坝，宜与防渗体的下游相连接。





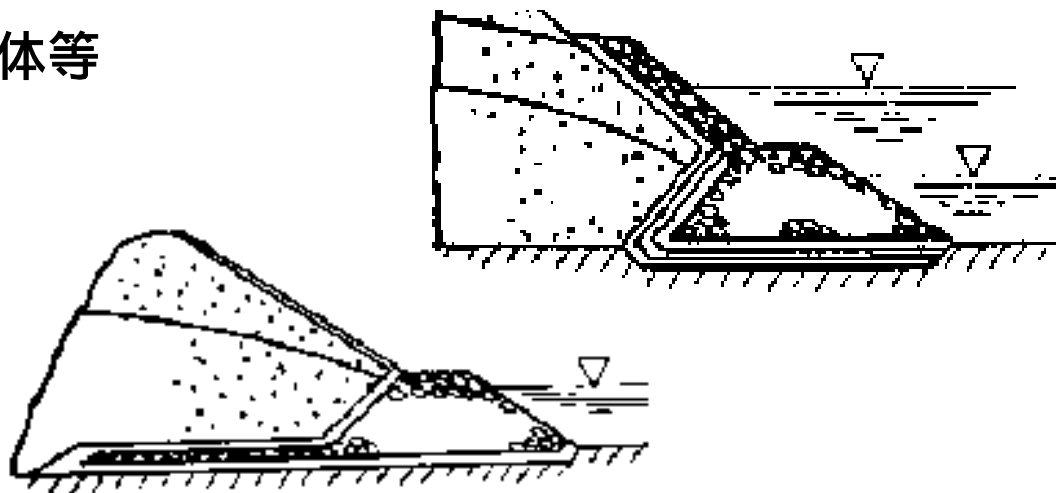
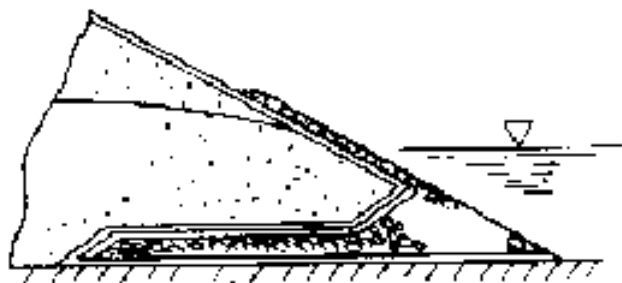
坝内排水管



(4) 综合排水

将几种不同形式的排水组合在一起，形成综合排水系统。

如：贴坡 + 棱体；褥垫 + 棱体等

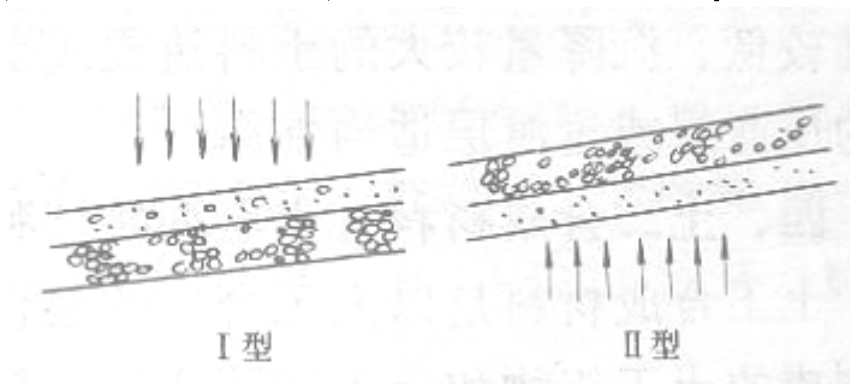


2. 反滤层和过渡层

反滤层作用：滤土排水、保护渗流出口，防止渗流逸出处出现管涌、流土等渗流变形。

位置： { 土质防渗体与坝壳、截水槽与坝基透水层之间；
渗流逸出处(如上游护坡与坝壳料之间)
进入排水处

反滤层：由1~3层级配均匀、耐风化的砂、砾或碎石构成，每层的粒径随渗流方向增大。



对反滤层的要求：

被保护土层不会发生管涌等有害渗流变形

渗透性应大于被保护土，以便能通畅的排出渗水。

反滤层一方面**要有足够小的孔隙**，以防止土颗粒被冲入孔隙或通过孔隙而被带走；

另一方面**要有足够大的孔隙**，以排出渗流水且不被细颗粒淤塞而失效。

过渡层 作用：避免在刚度相差较大的两种土料之间产生急剧变化的变形和应力。

！！注意：反滤层可起过渡层的作用，但过渡层不一定能满足反滤的要求。

反滤料设计准则：

被
保
护
土
料

无粘性土 $\left\{ \begin{array}{l} D_{15} / d_{85} \leq 4 \sim 5 \\ D_{15} / d_{15} \geq 5 \end{array} \right.$ D 反滤料粒径
 d 被保护土料的粒径

(不均匀系数： $= 5 \sim 8$)

若不均匀系数大于8，宜取 $= 5 \sim 8$ 的细粒部分的 d_{15} 、 d_{85} 计算。

粘性土

按土料所含粒径小于0.075mm的百分比A不同，而采用不同的方法：

$$\left. \begin{array}{l} A = 85\% : D_{15} \leq 9 d_{85} \\ A = 40\% \sim 85\% : D_{15} \geq 0.7\text{mm} \\ A = 15\% \sim 39\% : D_{15} \geq 0.425\text{mm} \end{array} \right\} \text{—— 滤土要求}$$

$$D_{15} \geq 4 d_{15} \text{ —— 透水性要求}$$

四. 土工合成材料在土石坝防渗和排水反滤中的应用

1. 土工膜

用于防渗，多用于斜墙坝 $k \leq 1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$

2. 土工织物

用于排水反滤系统和护坡垫层 $k = 10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$



茅坪溪沥青心墙施工中

[返回](#)



五. 土石坝裂缝与防治

(一) 裂缝的类型和成因

裂缝的类型（按成因划分）：变形裂缝、水力劈裂裂缝、干缩冻融裂缝、滑坡裂缝

1. 变形裂缝

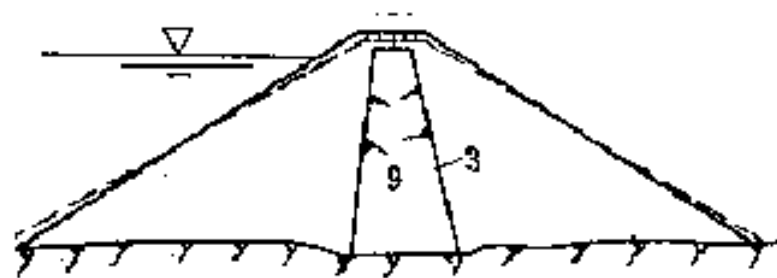
成因：应力和变形过大，超过坝体材料的承受能力。

变形裂缝的种类，按形态分：

纵向裂缝、横向裂缝、内部裂缝

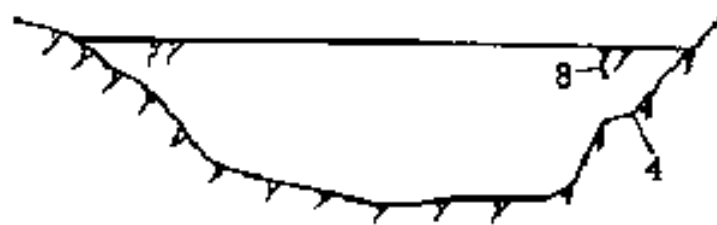
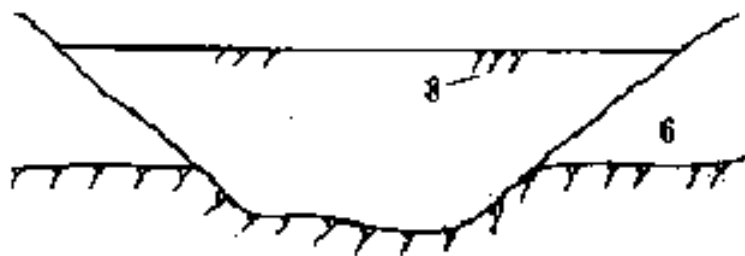
(1) 纵向裂缝：

高压压缩地基上，裂缝多发生在坝顶和坝坡中部。



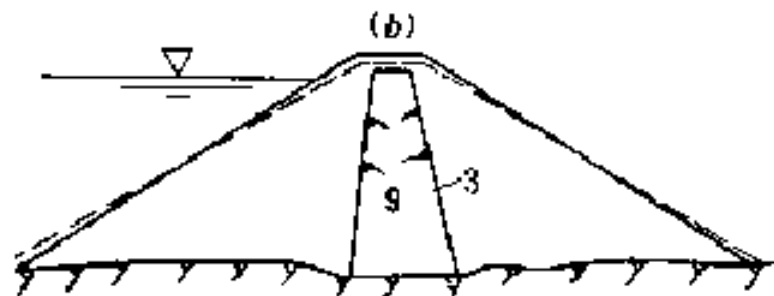
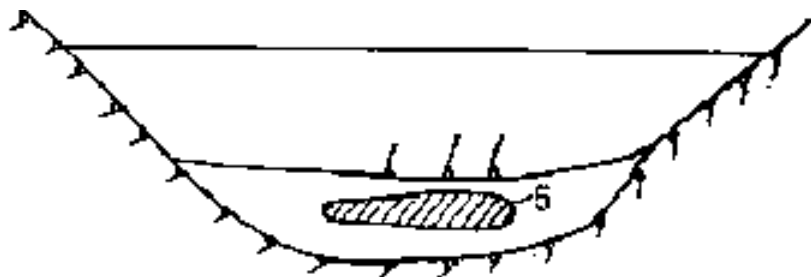
土质斜墙坝的斜墙裂缝(如图)

(2) 横向裂缝：缝的走向垂直于坝轴线



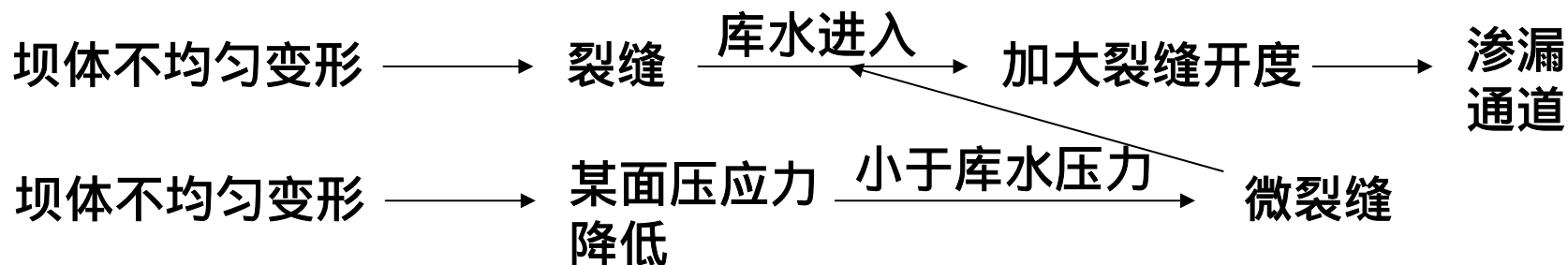
在坝轴线方向不均匀沉降而引起的拉伸缝

(3) 内部裂缝：由于坝身、坝基的不均匀沉降引起的，发生在坝体内部，危害很大。



“土拱效应”

2. 水力劈裂裂缝



3. 干缩冻融产生的裂缝

(二) 土石坝裂缝防治措施

1. 合理设计坝体结构及细部结构

- (1) 土料分区时，避免将粒径相差悬殊的两种土料相邻布置以免变形过大；粘土心(斜)墙与坝壳间应设置足够厚的过渡区。
- (2) 较高的土石坝，若用粘土做防渗材料，斜墙坝比心墙坝好，因斜墙坝拱效应小。
- (3) 渗流出口应铺设足够厚度的反滤层，对易于出现裂缝的部位适当加厚。
- (4) 坝轴线布置成略向上游的拱形

2. 土料选择

防渗体土料(斜墙、心墙中上部 - 适应变形性能好；心墙中下部 - 压缩性要低；含有一定量粗骨料 - 减小心墙压缩性，防止拱效应过大)

坝壳料(风化料、粉细砂等不宜填筑在浸润线以下；细粒及泥质含量应尽量减少)

过渡区料(宜填筑自动淤填土料)

3. 合宜的施工措施和运行方式

3. 合宜的施工措施和运行方式

施工到一定高度，可减缓土料填筑的速率，待沉降大致完成再填。

上游坝壳料易失陷时，宜边填筑边蓄水。

施工间歇阶段，保护坝面。

运行期，水位上升或下降速率不能过快。

(三) 土石坝裂缝处理

1. 表面裂缝 挖、填、夯实

2. 深部裂缝 灌浆

3. 严重裂缝 混凝土防渗墙

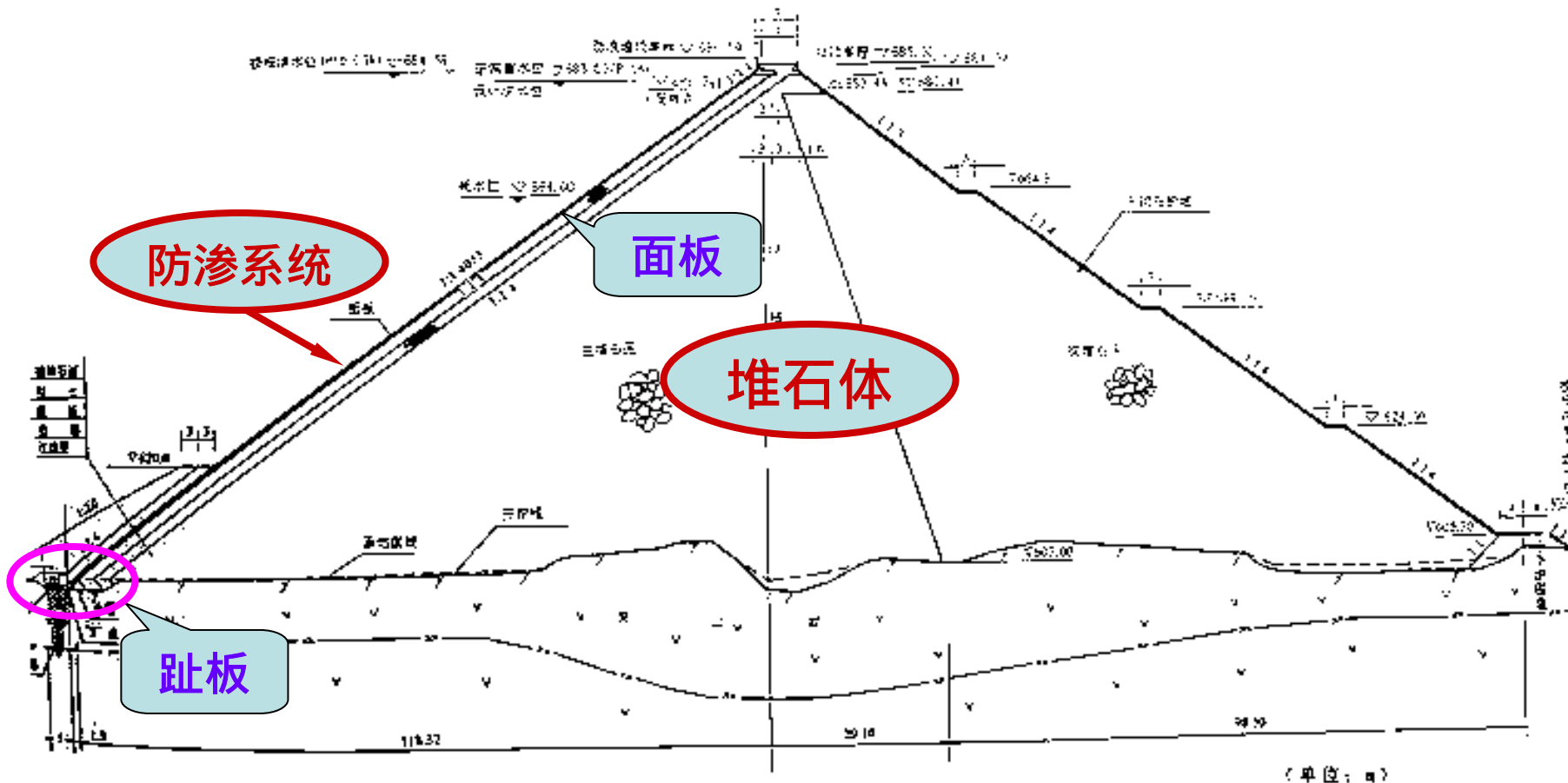
第八节 面板堆石坝

《混凝土面板堆石坝设计规范》 DL/T 5016-1999

- 特点
- 结构上
 - 水压作用于上游面板，全部堆石体保持坝的稳定；
 - 堆石密度大，抗剪强度高，坝坡可较陡，工程量小。
 - 抗震性能好(透水性好，地震时不存在孔隙水压力上升)
 - 施工上
 - 各部分受力不同，堆石体可分区；
 - 施工期可以拦洪，也可过水，减少了施工导流和汛期防汛的工程措施；
 - 堆石体的施工受雨季和严寒等气候条件干扰少。
 - 运行和维修上：即使出现裂缝，也易检查和维修。

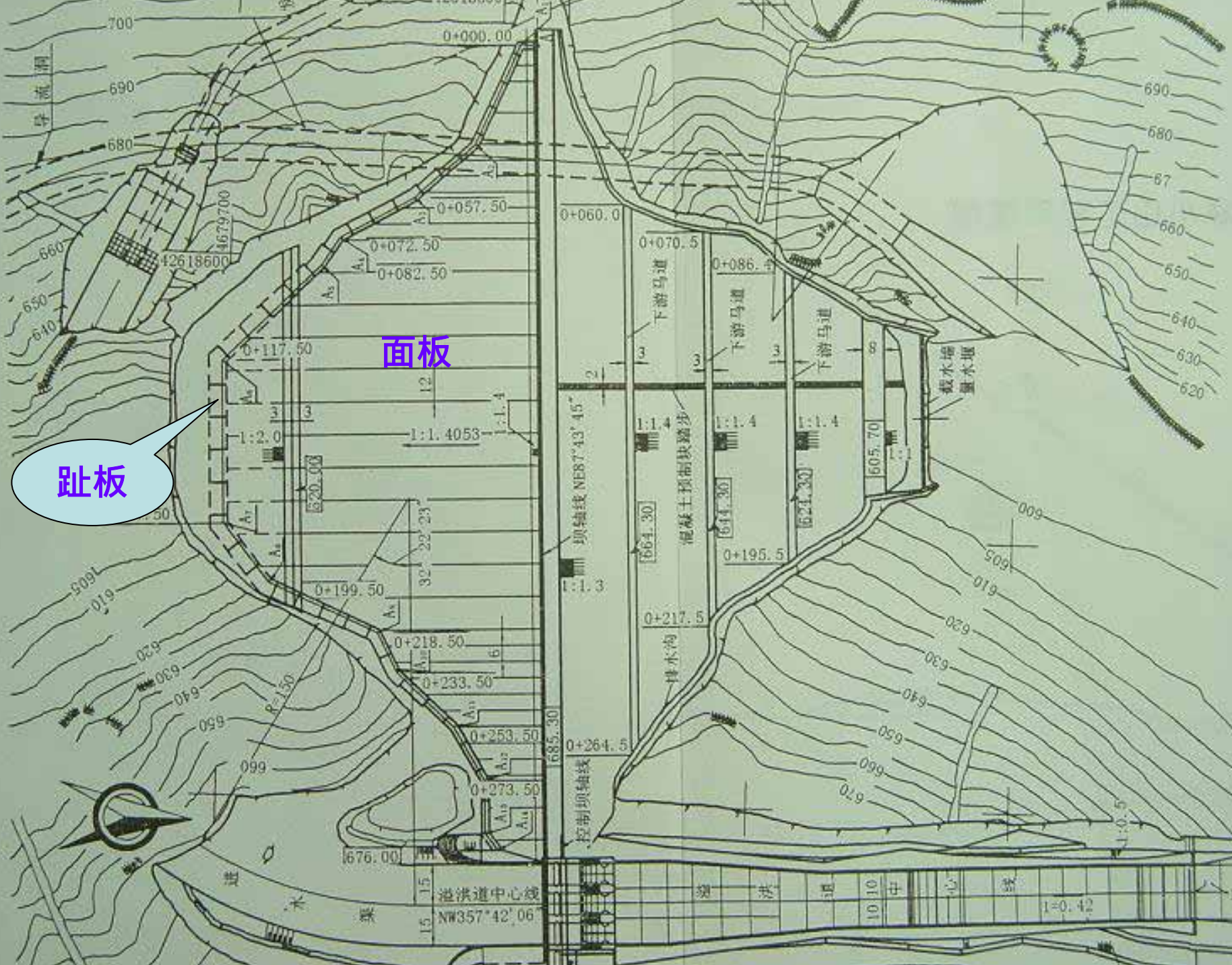
组成：

堆石体与防渗系统



面板坝组成：**防渗系统 + 堆石体**

1. **防渗系统**：**钢筋混凝土面板**及其与河床和岸坡相连接的**趾板**等构成
2. **堆石体**：**垫层区、过渡区、主堆石区、次堆石区**



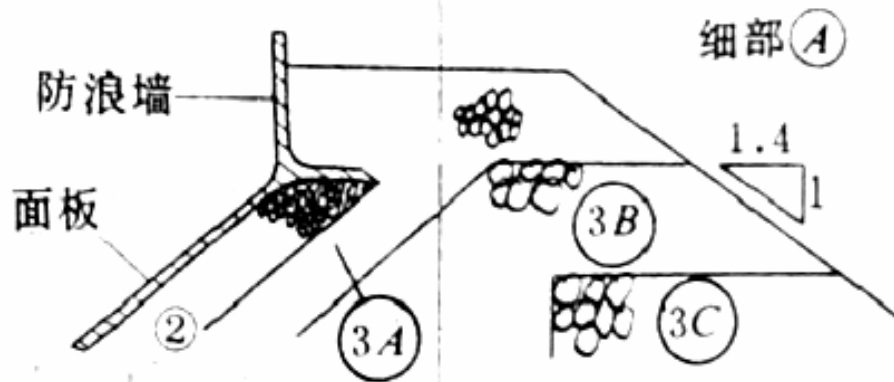
趾板

面板

一. 坝剖面与堆石体设计

1. 坝顶和坝坡

顶部设有L型钢筋混凝土防浪墙



防浪墙与面板间保证良好止水

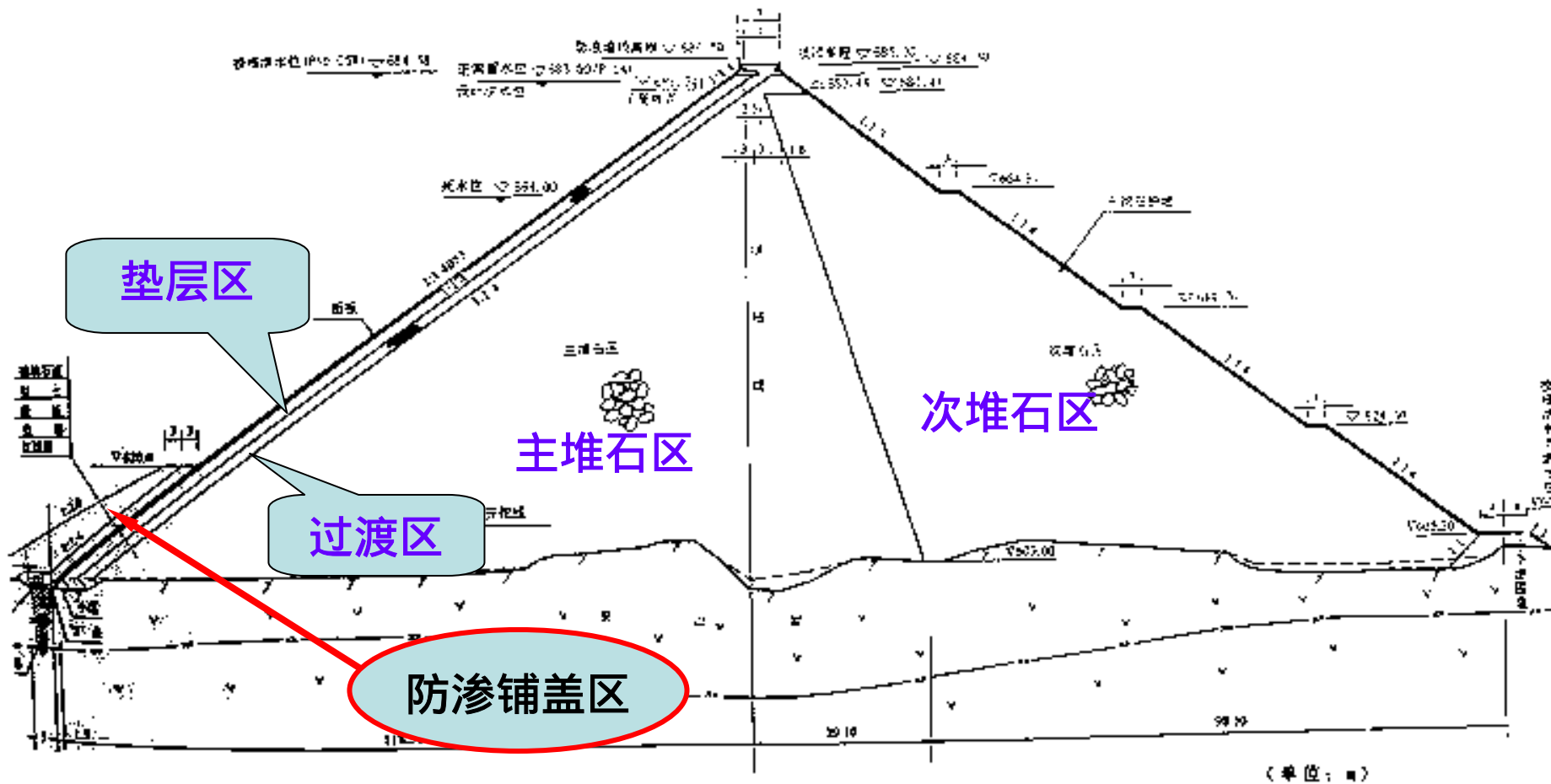
墙底与坝顶连接处的堆石宽度不小于9米，墙高4~6米。

坝坡：硬岩1:1.3~1:1.4；天然砂砾石 1:1.5~1:1.6；软岩或软基上筑坝，坝坡由稳定计算确定。

马道：上游坡不设马道，下游坡如无特殊要求也可不设马道。

2. 堆石体材料分区

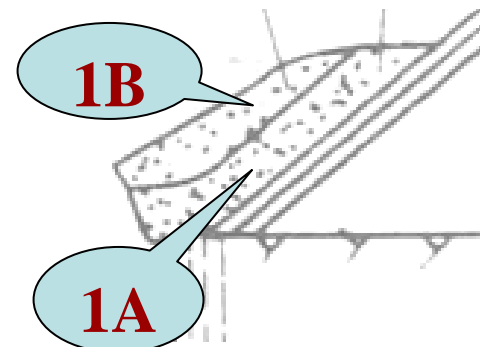
防渗铺盖区、垫层区、堆石区



防渗铺盖区——此区可设可不设

1A 防渗土料碾压填筑

1B 任意料，起保护作用



3. 垫层区

直接位于面板下部，为面板提供均匀而可靠的支撑；具有半透水性；同时将水压力均匀传到堆石体。

作用 { 平整上游坡面，避免面板出现应力集中；
减小变形，改善面板的受力条件；
发挥一定的防渗作用。

垫层料的选用：有良好的级配，压实后具有低压缩性、高抗剪强度。宜选用新鲜、坚硬且具有较好耐久性的石料。

天然砂砾石料、人工砂石料或两者的混合料。

渗透系数宜为： $(1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}) \text{ cm / s}$

高坝要求：粒径 d 最大为80mm ~ 100mm;

$d < 5\text{mm}$ 的颗粒含量宜为30%~50%;
 $d < 0.075\text{mm}$ 的颗粒含量不宜超过8%。 } 半透水性

水平宽度：3m，岸坡处可适当加宽。

特殊垫层区：位于周边缝下游垫层区内。最大粒径不超过40mm。

填筑标准：设计孔隙率15%~20%

如：吉林松江河梯级小山工程

d 最大为80mm ~ 100mm;

$d < 5\text{mm}$ 的颗粒含量为35%； $d < 0.1\text{mm}$ 的颗粒含量 5%。

不均匀系数 25；孔隙率 21%

$k : (1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}) \text{cm/s}$

4. 堆石区(过渡区、主堆石区和次堆石区)

过渡区：位于垫层区与主堆石体之间，保护垫层并共同起渗流控制作用。

主堆石区：是承受水荷载的主要支撑体。

次堆石区：基本不承受水荷载，主要起稳定坝坡的作用。
要求具有低压缩性、高抗剪强度，适宜的级配。

最大粒径不应超过压实层厚度；

$d < 5\text{mm}$ 的颗粒含量不宜超过 20%；

$d < 0.075\text{mm}$ 的颗粒含量不宜超过 5%。

下游水位以下的堆石区：应用坚硬、抗风化能力强的堆石料，压实后能自由排水；

下游水位以上的堆石区：对坝料的要求可降低。

过渡区、主堆石区和次堆石区之间应满足渗流和压缩模量逐渐变化的原则。

过渡区宽度：可与垫层区等宽

填筑标准：

	过渡料	主堆石料	下游堆石料
设计孔隙率	18%~22%	20%~25%	23%~28%

小山工程

	最大粒径 (mm)	干密度 (t/m^3)	孔隙率 (%)
过渡区	200 ~ 300	2.14	22
主堆石	500 ~ 600	2.09	24
次堆石	500 ~ 1000	2.04	26

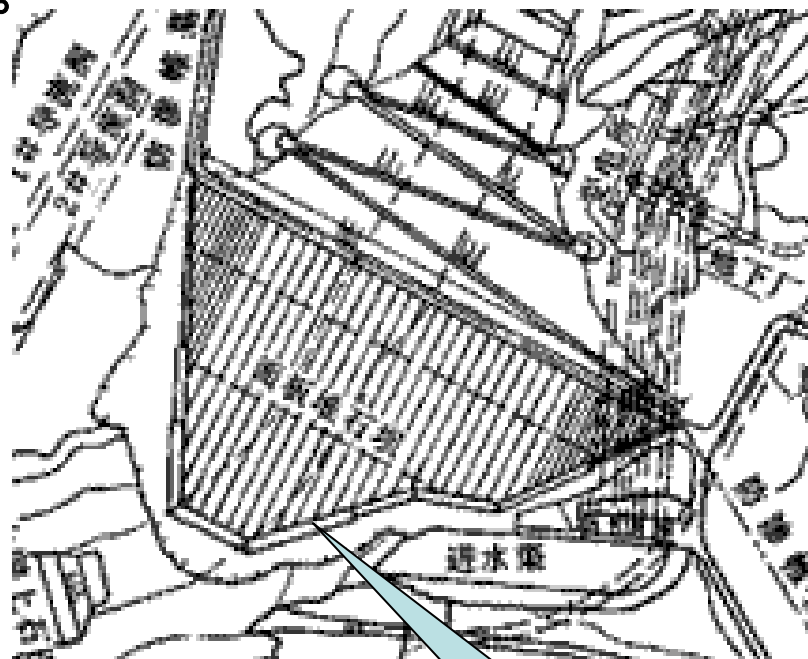
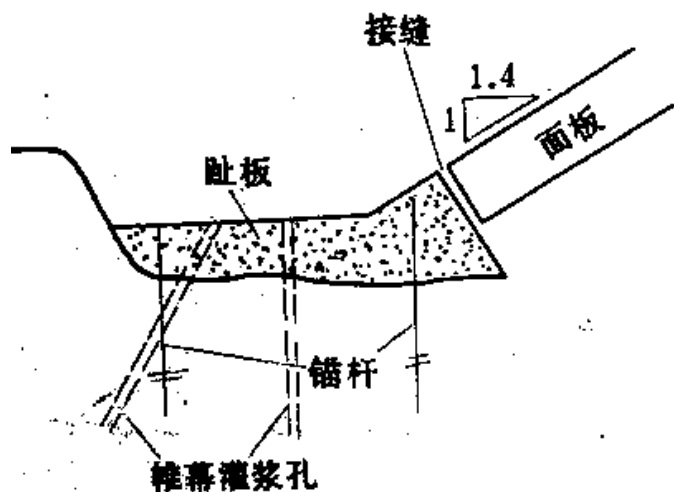
水布榭工程

垫层区	80	2.25	17
过渡区	300	2.20	18.8
主堆石	800	2.18	19.6
次堆石	800	2.15	20.7

二. 面板及堆石体防渗结构设计

防渗系统组成：面板、趾板、趾板地基的灌浆帷幕、周边缝和面板间的接缝止水等构成。

1. 趾板



作用

保证面板与河床及岸坡间的不透水连接
作为坝基帷幕灌浆的盖板
滑模施工的起始工作面

趾板

趾板厚度：不小于0.3m，可小于与之相连接的面板的厚度。

趾板宽度：可根据趾板下基岩的**允许水力坡降**和**地基处理**措施确定
最小宽度宜为3m

允许水力坡降	新鲜、微风化	弱风化	强风化	全风化
	20	10 ~ 20	5 ~ 10	3 ~ 5

趾板配筋：单层双向钢筋，每向配筋率0.3%~0.4%；
岩基上趾板，钢筋保护层厚10~15cm；非岩基在截面中部

锚筋、地基进行固结灌浆和帷幕灌浆

趾板分缝：施工缝间距15m左右，缝内钢筋穿过，不设止水。

转折处和地形地质条件变化处设置伸缩缝(适应地基的不均匀变形)，
并设止水

2. 面板——防渗的主体

面板厚度(m)：应使面板承受的水力梯度 ≤ 200 ，高坝顶部厚0.3m；

底部厚度： $t = 0.3 + (0.002 \sim 0.0035)H$

中低坝可采用0.3~0.4m厚的等厚面板

面板分缝：垂直缝的间距12~18m，不设水平伸缩缝。

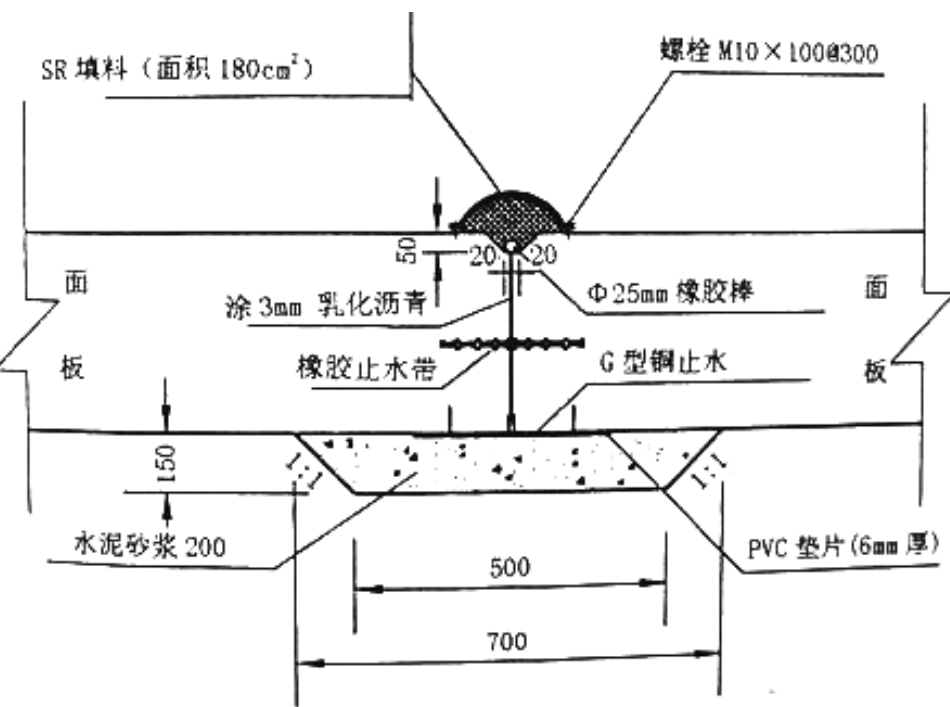
垂直缝作用：适应坝体变形、降低温度应力、便于施工

面板配筋：单层双向钢筋，面板截面中部，
每向配筋率0.3%~0.4%。

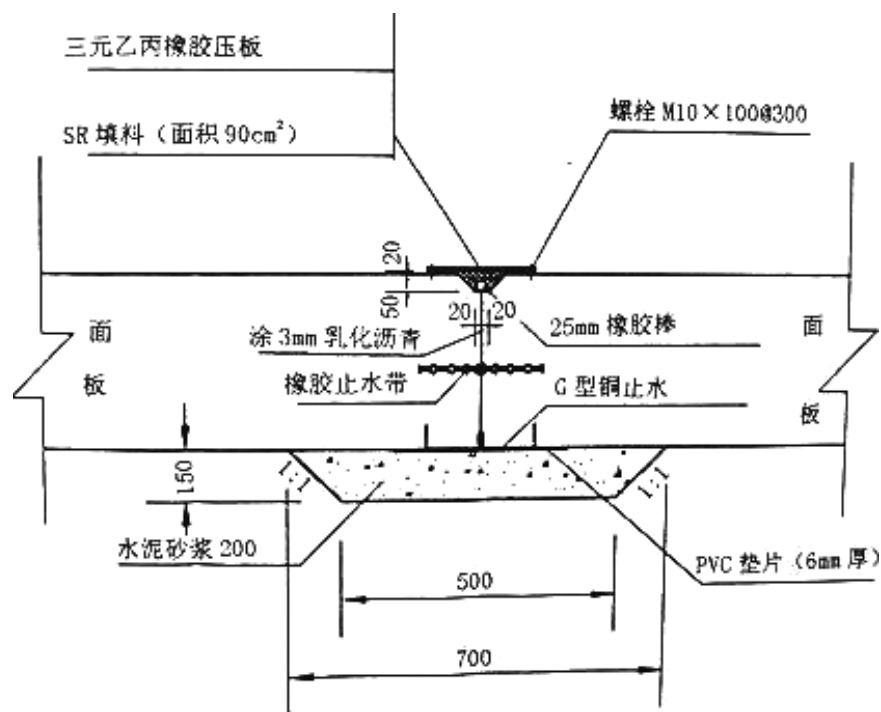
面板及趾板配置的钢筋为温度筋，防止温度裂缝和干缩裂缝，并能适应较小的不均匀沉降所产生的应力。

3. 缝的止水处理

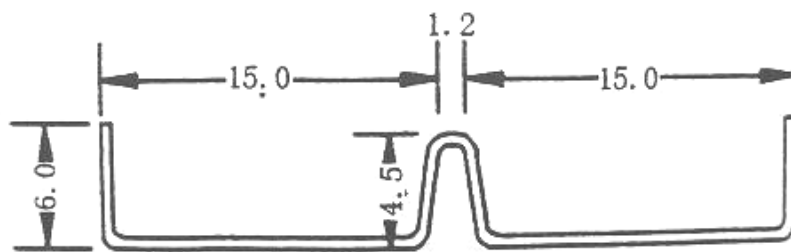
缝的类型 { 垂直缝(A型—拉缝、B型—压缝)
周边缝



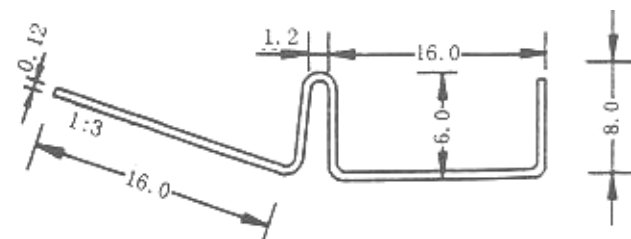
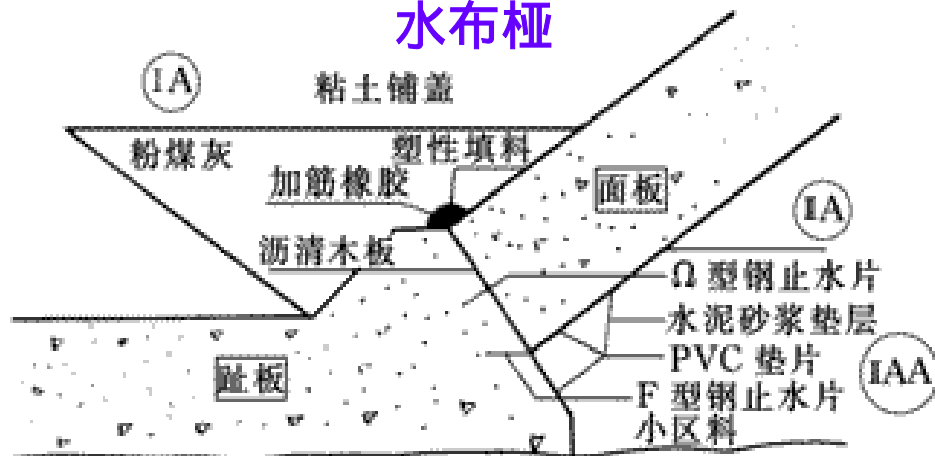
垂直缝 A 止水详图



垂直缝 B 止水详图

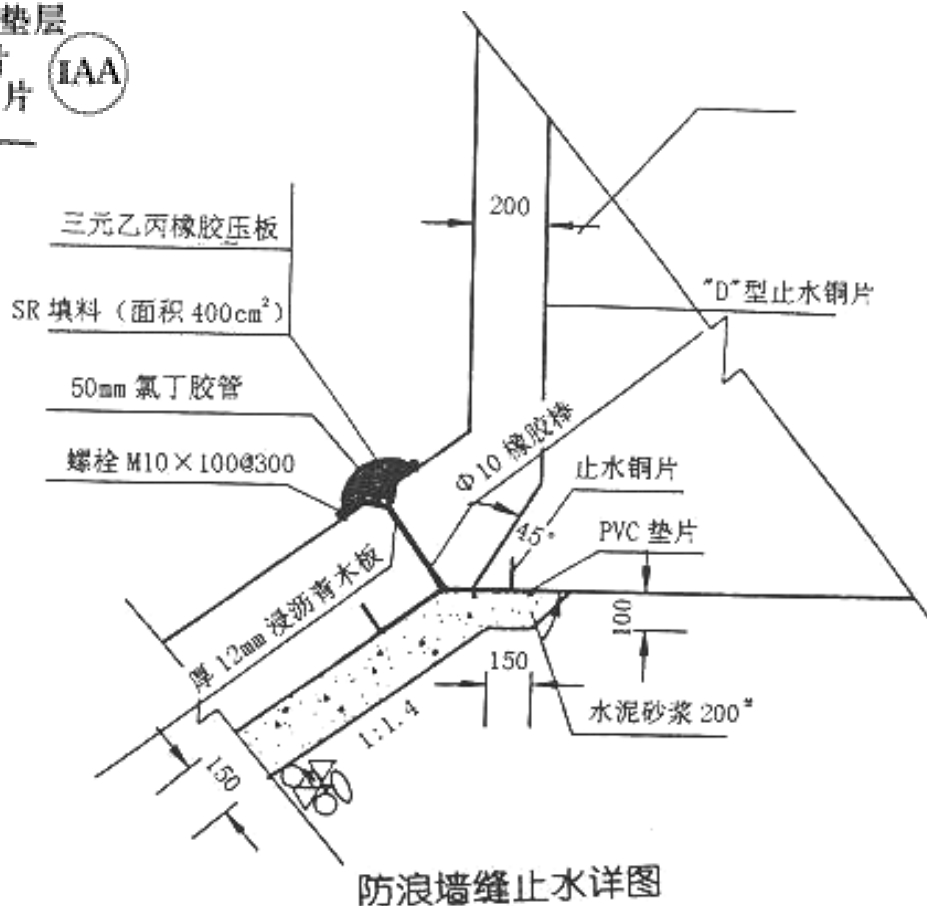
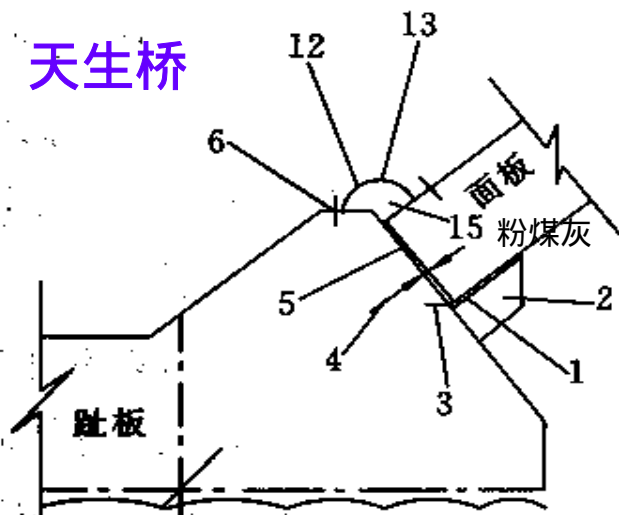


水布桩



周边缝

天生桥



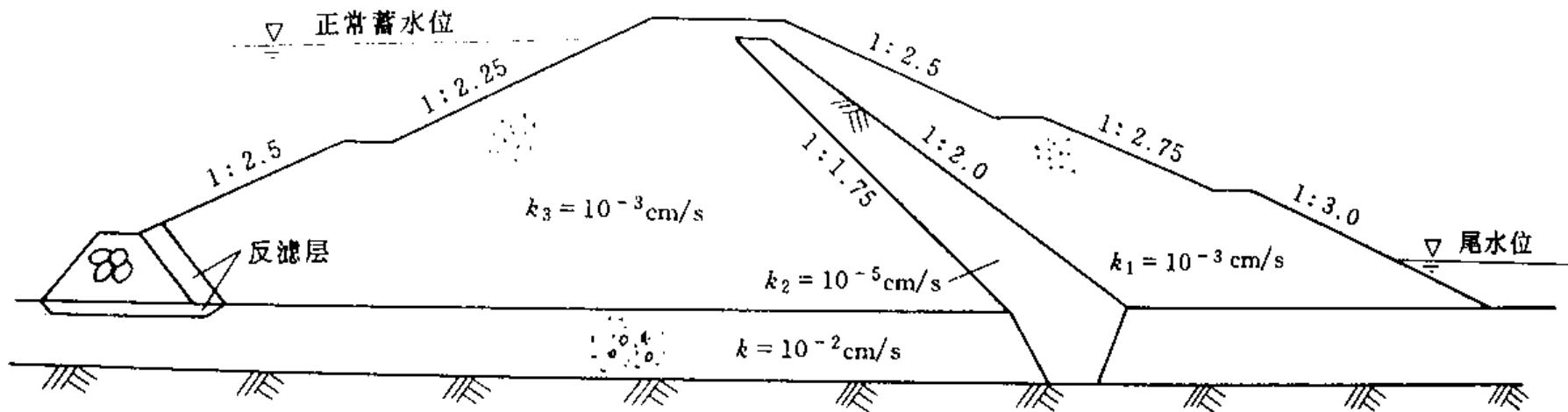
防浪墙缝止水详图

总结与思考

1. 土石坝的防渗体、坝壳料(包括反滤层、过渡层和排水体)选择上的要求、填筑标准。
2. 土石坝坝体构造（坝顶、防渗体、排水、过渡层和反滤层），设计上有何要求？
3. 土石坝裂缝的种类及成因、裂缝的防治与处理
4. 面板坝的特点、组成
5. 硬岩堆石面板坝典型剖面、各分区的作用及设计要求
6. 面板坝防渗系统的组成及结构设计

1. 渗流变形的形式有哪些？宜发生在什么部位？
2. 坝体排水的形式及特点
3. 土石坝设计中，哪些部位需设置反滤层？能否用过渡层代替反滤层？
4. 土拱效应、水力劈裂

说出图中设计不合理的原因



图中斜墙顶高程与正常蓄水位相同

第九节 土石坝的坝基处理及其与其它建筑物的连接

土石坝坝基处理的基本要求是：

- 控制**渗流**，以免出现有害的渗透变形；
- 控制**稳定**，使坝基有足够的强度，避免发生整体或局部滑动；
- 控制**变形**，防止不均匀沉降，引起坝体裂缝。

一. 岩基处理

岩基上**覆盖层较薄**时 { 防渗体座落在基岩上形成截水槽
高坝：可将大部分覆盖层挖除

防渗体底部岩面需进行灌浆处理

二. 砂砾石坝基处理

砂砾石地基透水性大，主要是控制渗流，做好防渗和排水。

垂直防渗设施：粘性土截水槽、混凝土防渗墙、灌浆帷幕等

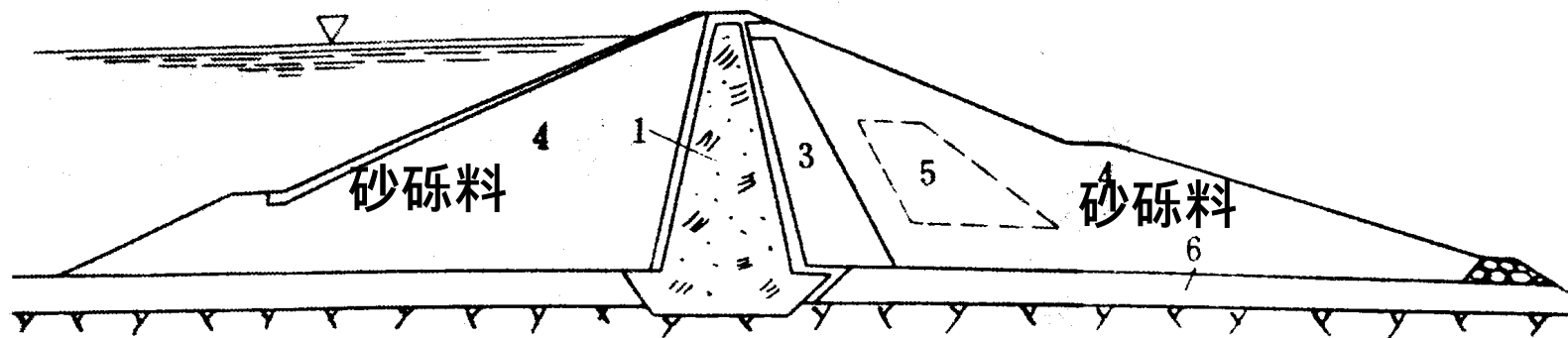
水平防渗设施：上游水平防渗铺盖

下游排水设施：水平排水垫层、排水减压井、下游透水盖重等

垂直防渗设施，应设在防渗体的底部，均质坝可设在距上游坝脚 $1/3\sim 1/2$ 坝底宽处。底部宜伸入相对不透水层。

1. 粘性土截水槽

当砂砾石层不太厚时，深度在15m以内，可采用明挖回填粘土截水槽。



截水槽底宽，应根据回填土料的允许渗透比降、土料与基岩接触面抗渗流冲刷的允许渗透比降和施工条件确定。

2. 混凝土防渗墙

当砂砾石层深度在80m以内，可采用混凝土防渗墙。

防渗墙厚度应根据坝高和施工条件确定；

墙底宜嵌入基岩0.5~1m，顶部插入防渗体内，不低于2m。



小浪底大坝坝基砂砾石层防渗，采用厚1.2m的混凝土防渗墙，其最大造孔深度81.9m，是目前中国最深的防渗墙。

3. 帷幕灌浆

砂砾石层很深

帷幕顶部厚度 T ： $T=H/J$ （ J 帷幕的允许比降）

帷幕深度，伸入相对不透水层，不小于5m。

4. 防渗铺盖

中小型工程采用，一般当上游有天然铺盖或坝前淤积物较厚时可考虑。

作用：延长渗径，使渗流坡降 J 控制在允许范围内。

5. 下游排水减压设施

当水平防渗不能有效降低渗透压力时，可采用排水沟或减压井。

三. 细砂、软粘土及失陷性黄土坝基处理

不宜作坝基，应尽可能挖除。

处理措施：振冲法、强夯、砂井排水等

四. 土石坝与坝基岸坡及其它建筑物的连接

1. 坝体与坝基的连接

均质坝 { 地基为粘性土不透水土基，采用齿槽 (如图)
地基为岩基，采用混凝土齿墙

土质心(斜)墙坝 { 地基为粘性土，采用齿槽
地基为岩基，采用混凝土齿墙或混凝土垫

防渗体应座落在相对不透水土基或经防渗处理的坝基上；

坝基为岩基，防渗体和反滤层宜与坚硬、不冲蚀和可**灌浆**的岩石连接。

2. 坝体与岸坡的连接

主要指土质防渗体与岸坡的连接

要求岸坡：

大致平顺，不应成台阶状、反坡或突然变坡。

岩石岸坡，不宜陡于1:0.5；土质岸坡，不宜陡于1:1.5。

3. 与混凝土建筑物的连接

插入式

翼墙(侧墙)式

思考题

1. 请分别画出在岩基上和在有15m深砂砾石覆盖层的地基上修建粘土心墙坝的典型剖面，说明不同设计的理由。
2. 画图说明粘土(斜)心墙与不同地基(土基、岩基)的连接。

第六章 水闸



第一节 概述

一. 水闸的功能与分类

水闸是一种低水头的水工建筑物，兼有挡水和泄水的作用。

水闸的类型

按承担的任务不同，分为：

拦河闸(节制闸)、取水闸(进水闸)、分洪闸、排水闸、拦潮闸和冲沙闸



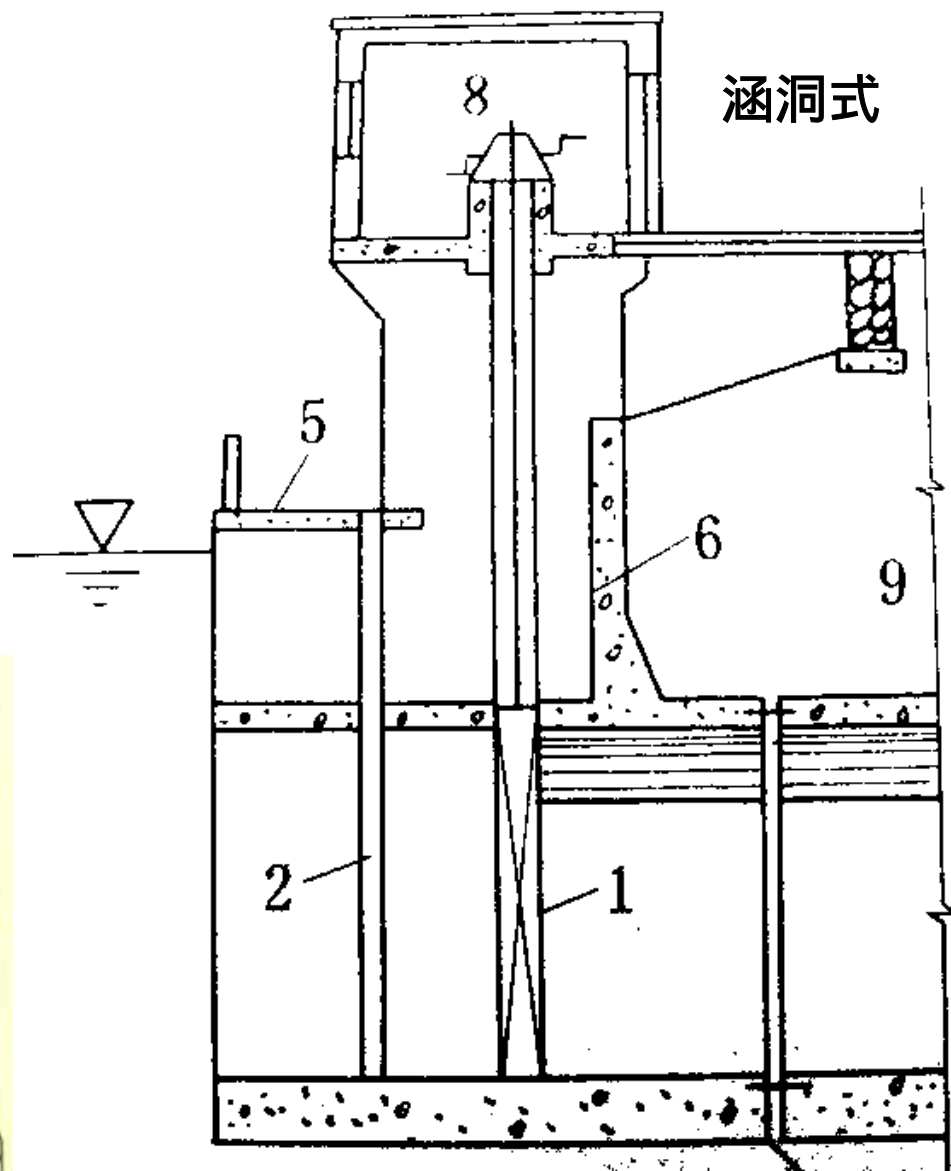
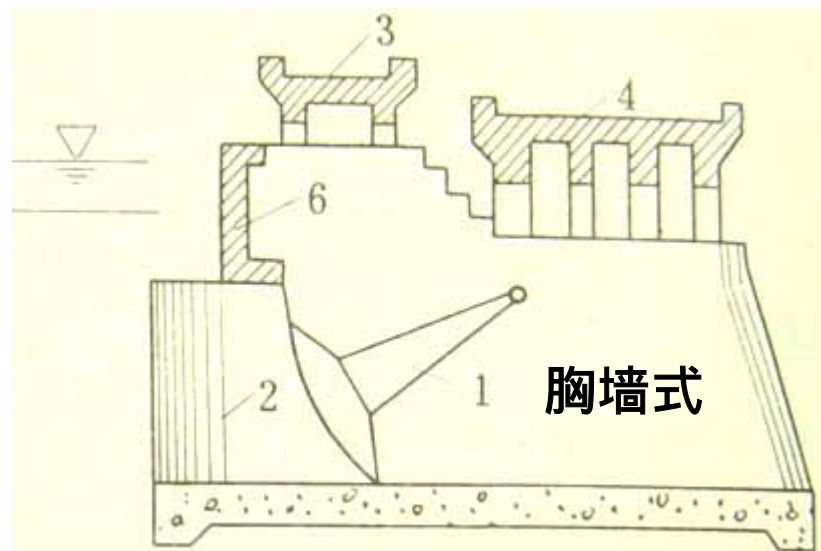
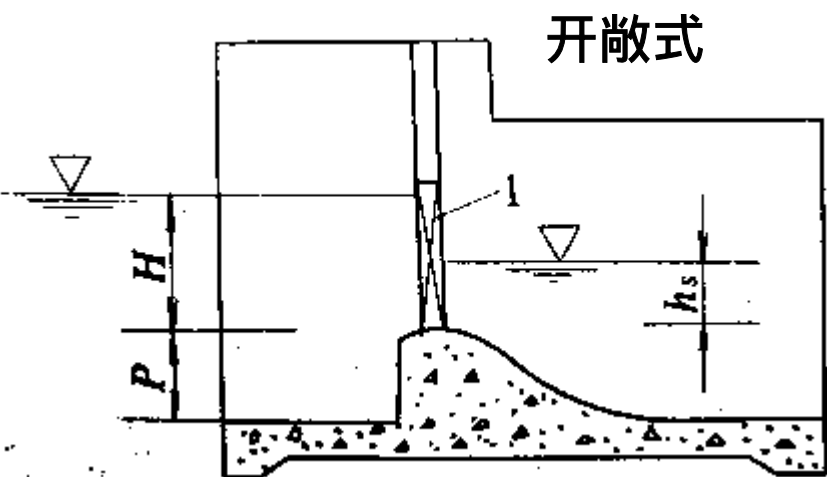
PPS 115873
766

19 8:02 AM



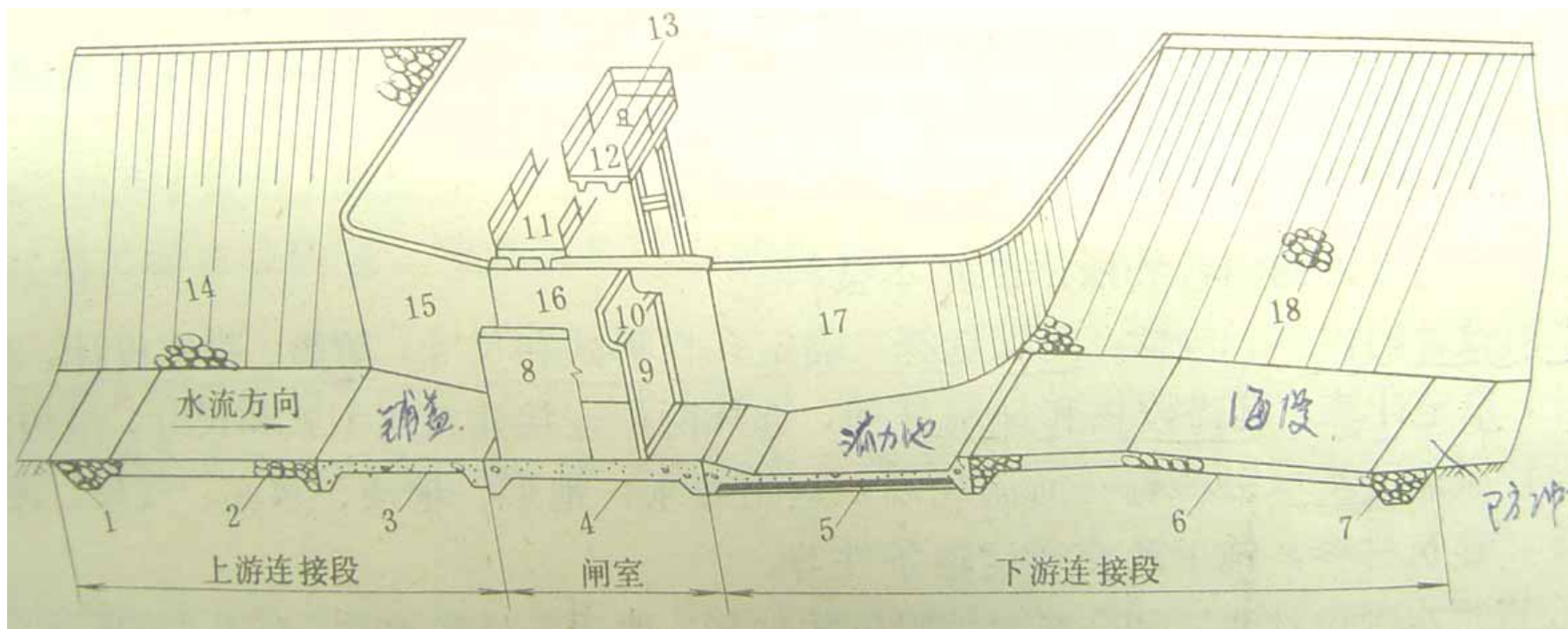
19 7:49 AM

按闸室结构形式可分为：



二. 水闸的组成

闸室、上游连接段、下游连接段



3b. 上游连接段

是控制流量、调节水位的关键部位，是水闸的主体部分。
组成：由上游防冲槽、防渗铺盖、上游护坡、翼墙等组成。

作用：铺盖板扩散水流边墩止闸下游的冲刷，交通桥、启闭机

作用：引导水流平顺进入闸室，保护两岸及河床免遭冲刷。
闸底板将上部结构重量及荷载传至地基，并兼有防渗和防冲作用。

1. 闸室段

是控制流量、调节水位的关键部位，是水闸的主体部分。

包括：闸底板、闸墩、边墩、闸门、工作桥、交通桥、启闭机

闸底板将上部结构重量及荷载传至地基，并兼有防渗和防冲作用。

2. 上游连接段

组成：由上游防冲槽、防渗铺盖、上游护坡、翼墙等组成

作用：引导水流平顺进入闸室，保护两岸及河床免遭冲刷

3. 下游连接段

组成：由护坦、海漫、下游防冲槽、翼墙、护坡等组成

作用：消能和扩散水流、防止对下游的冲刷

三. 水闸的工作特点

1. 土基压缩性大、承载力低、抗滑稳定性差
2. 土基的抗冲刷能力差

下游水位变化，影响过流能力及流态，易引起冲刷；

波状水跃；折冲水流

3. 土基渗流，渗流力影响闸室稳定、易引起渗透变形破坏

四. 水闸设计的内容

闸址选择、孔口形式尺寸、防渗排水设计、消能防冲设计、
稳定计算、沉降计算、
地基处理、两岸连接建筑物的形式尺寸

第二节 闸址选择和孔口设计

一. 闸址选择

任务、地形、地质、水文、施工、过闸水流流态等
适宜地基：壤土、中砂、粗砂和砂砾石

二. 闸孔设计

堰型选择、堰顶高程或闸底板顶高程、单孔尺寸及闸室总宽度

1. 堰型选择

宽顶堰：泄流能力稳定、结构简单， m 小，易产生波状水跃。

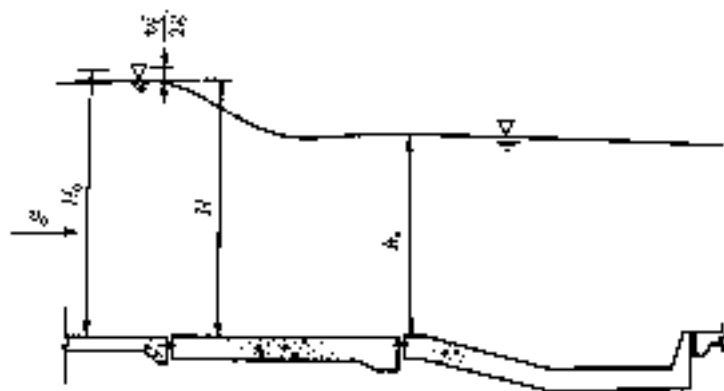
低实用堰（梯形、曲线形、驼峰形）： m 大，但易受尾水影响。

2. 闸底板(堰)顶高程的选定

根据任务、泄流或引水流量、上下游水位及河床的抗冲能力等确定。

3. 闸孔总净宽度、单孔宽度、闸室总宽度

根据给定的设计流量、上下游水位和初拟的底板顶高程及堰型，分别就不同的水流（堰流、孔流）情况，计算闸孔总净宽。



$$B_0 = \frac{Q}{\sigma_{em} \sqrt{2g} H_0^{\frac{3}{2}}}$$

$$B_0 = \frac{Q}{\mu_0 h_s \sqrt{2g} (H_0 - h_s)}$$

第三节 水闸的防渗、排水设计

一. 水闸的防渗长度及地下轮廓线的布置

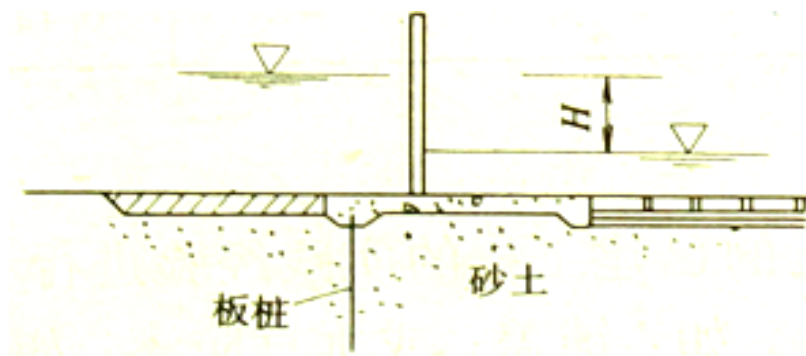
1. 防渗长度的确定

两个概念：防渗长度、地下轮廓线

地下轮廓线：不透水的铺盖、板桩及底板与地基的接触线，称为地下轮廓线，它也是闸基渗流的第一根流线。

防渗长度：地下轮廓线的长度。

根据《水闸设计规范》SL265 - 2001：可研阶段，初拟 $L = CH$ 。



2. 地下轮廓的布置

依地基情况，遵循防参与排水相结合的原则进行布置。

上游侧：设置水平铺盖、垂直防渗（齿墙、板桩、混凝土防渗墙、灌浆帷幕等）；

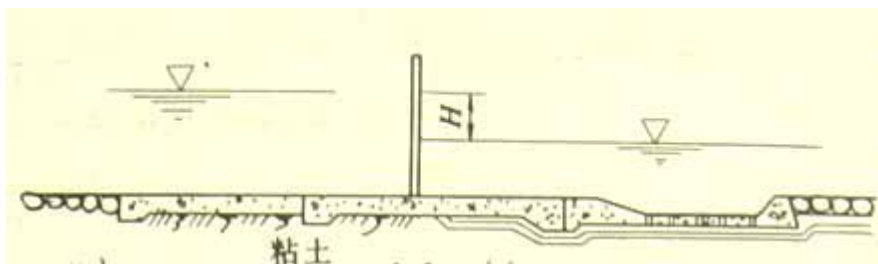
目的：延长渗径，以减小作用在底板上的渗透压力。

下游侧：设置排水设施

目的：使地基渗水能尽快排出，防止在渗流出口附近发生渗透变形。

（1）粘性土地基

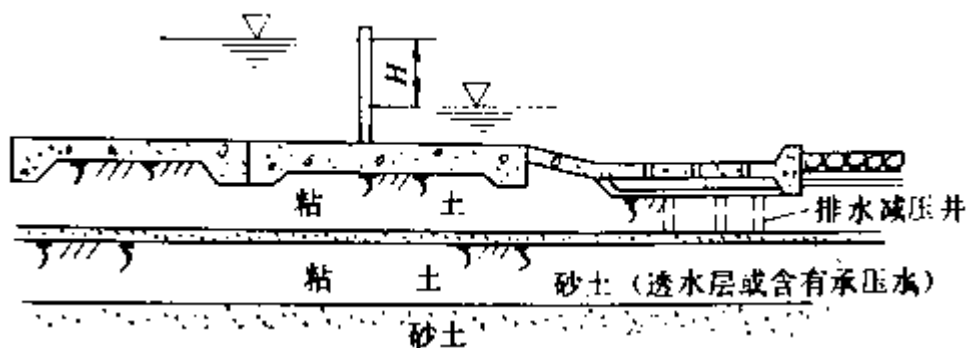
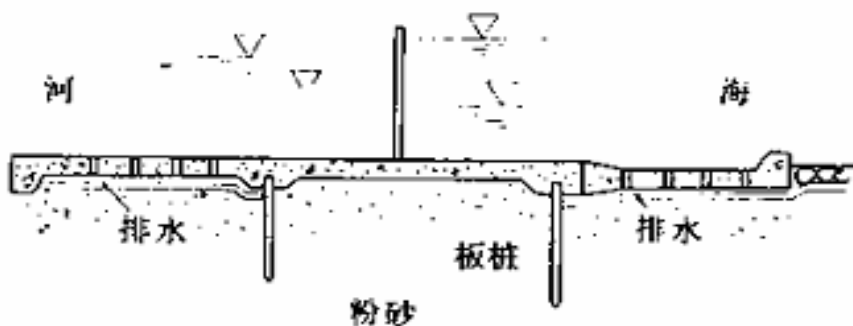
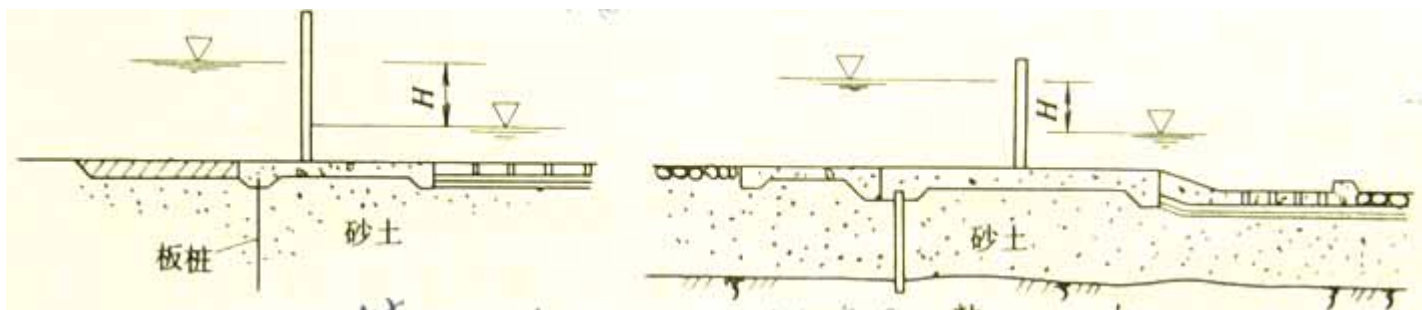
K 小、 f 小，故应以减小渗透压力，提高闸室的抗滑稳定性为主。



！！粘性土地基不用板桩！

(2) 砂性土地基

K 大、 f 大，抵抗渗透变形的能力较差，应以减少渗漏量和防止发生渗透变形为主。



二. 渗流计算

求解：渗流压力、渗透坡降 J 、渗透流速 v 及渗流量 Q

渗流特点：有压渗流，地基均匀且各项同性，符合达西定律。

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

计算方法 {

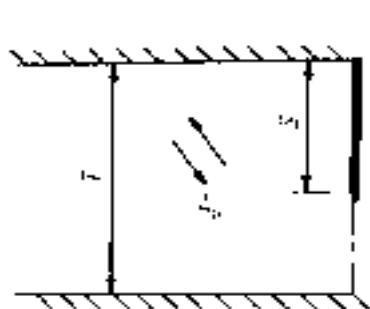
- 流网法
- 改进的阻力系数法
- 全截面直线法(直线法)
- 数值算法
- 电模拟法

1. 全截面直线法(直线法)

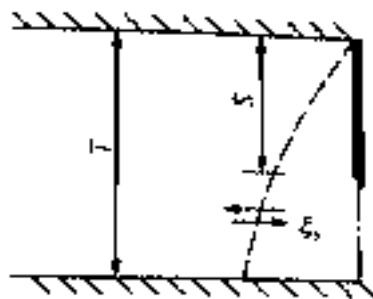
假定渗流沿地基轮廓的渗透坡降相同，即水头损失按直线分布。

(如图)

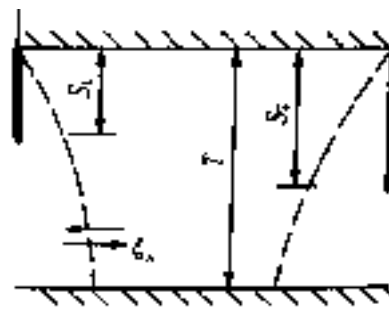
ξ_i ——渗流段的阻力系数，与渗流段的几何形状有关。



进出口段

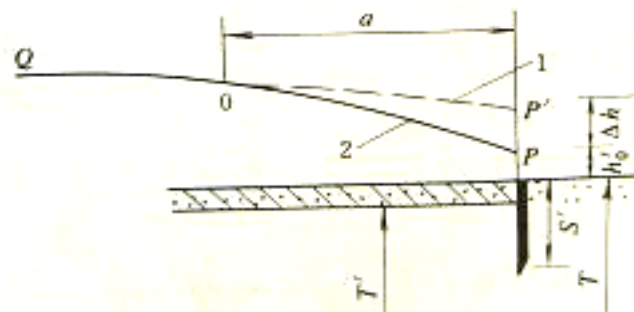
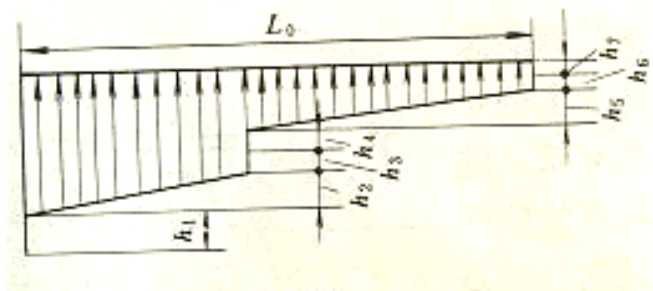


内部垂直段



内部水平段

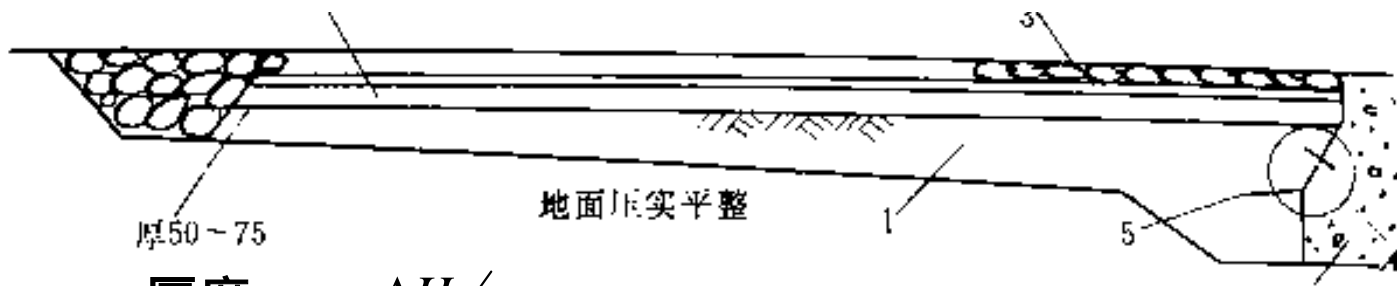
对渗流进出口处进行修正



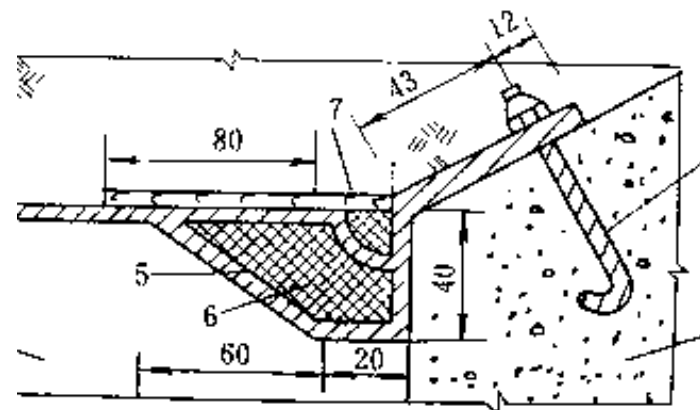
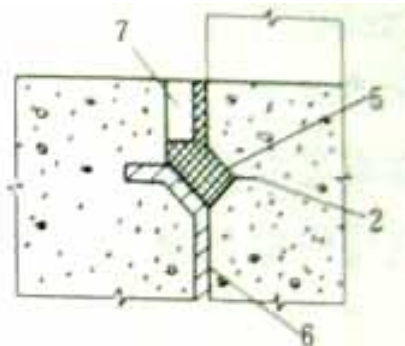
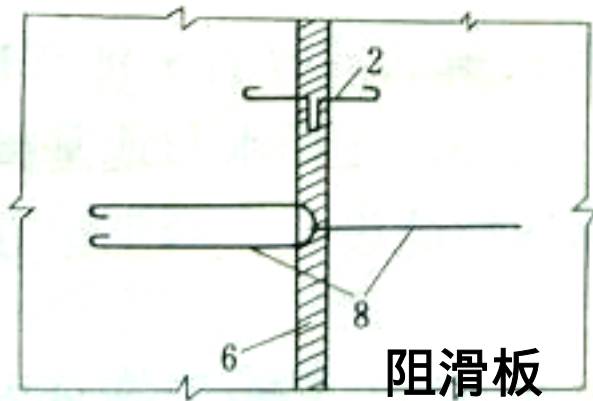
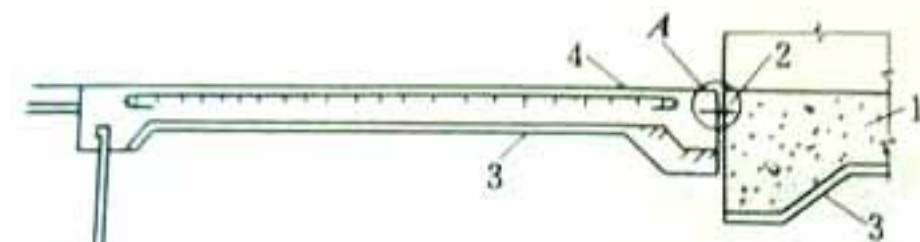
！！渗流出口处，逸出坡降较大，应控制使其小于容许坡降值。

三. 防渗及排水设施

1. 铺盖：粘土铺盖、沥青混凝土铺盖、钢筋混凝土铺盖——水平防渗



$$\text{厚度} : \delta = \Delta H / J$$



铺盖长度：由地下轮廓设计方案确定。

2. 板桩

长度视地基透水层深度而定。

3. 齿墙

可增加闸室稳定，延长渗径，一般深为1米左右。

4. 其它防渗设施

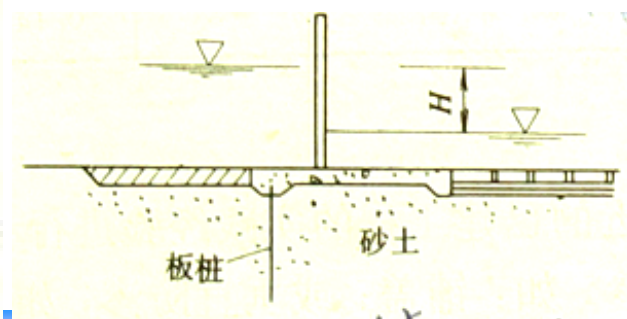
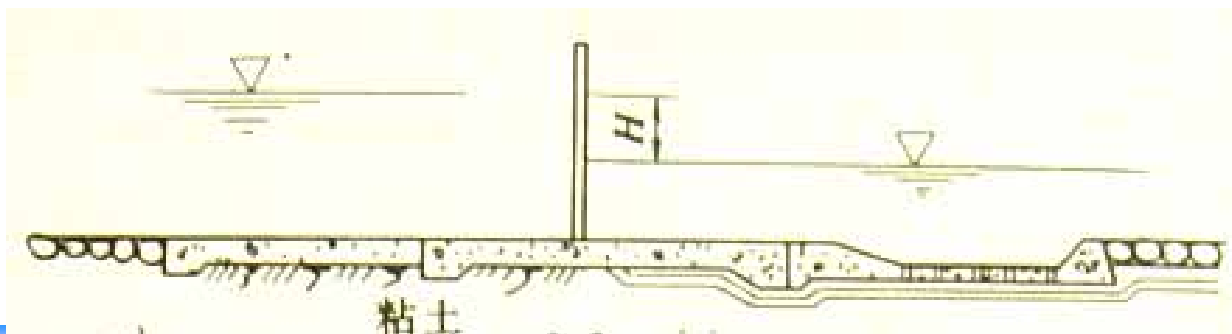
混凝土防渗墙、旋(定)喷混凝土防渗墙

5. 排水及反滤

排水孔设置在护坦，梅花形布置

铺设在护坦、浆砌石海漫底部或闸底板下游段起导渗作用的砂砾石层

厚度约 20 ~ 30cm，符合反滤层设计。



第四节 水闸的消能防冲设计

土质河床抗冲能力低，闸下冲刷普遍，需采取措施(从设计和运行方式上)。

过闸水流的特点：
水深由浅 → 深；
闸下出流由孔流 → 堰流；
由自由出流 → 淹没出流。

水流流态复杂、易出现折冲水流和波状水跃

一. 底流消能工设计

为什么多采用此种消能方式？

如何达到底流消能效果，即设计的关键是什么？

当尾水深度不能满足要求时，应采取什么措施？

1. 消力池长度、深度及底板护坦厚度的确定

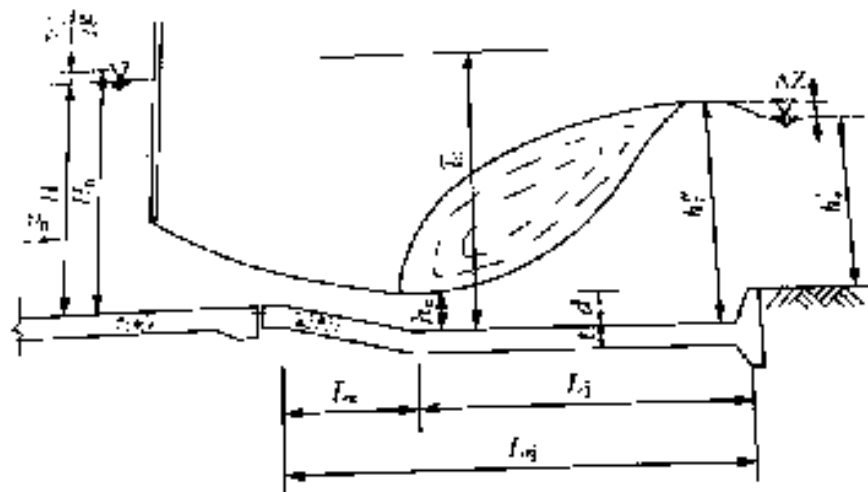
消力池长度、深度

《水力学》

《水闸设计手册》

《水闸设计规范》

厚度：需按抗冲、抗浮要求计算



2. 消力池的构造

构造钢筋

齿墙 护坦末端设置，以增加稳定性

排水孔 减小作用在护坦底板上的扬压力

沉降缝 设置位置



二. 海漫及防冲槽

1. 海漫

作用

要求：

- 有一定粗糙度
- 有一定透水性
- 有一定柔性

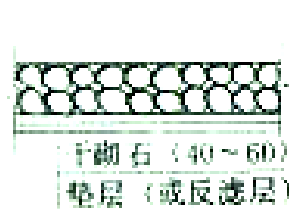
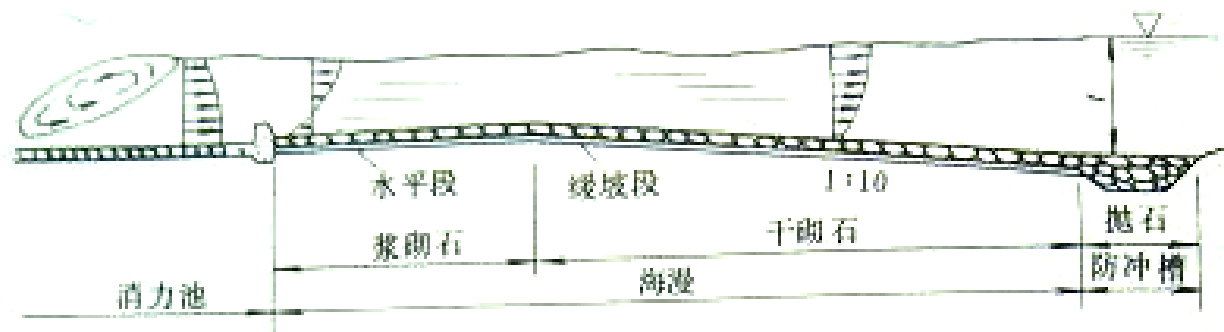
常用形式：

干(浆)砌石海漫

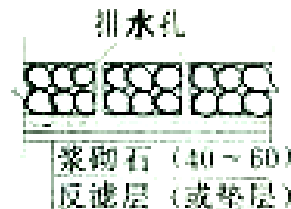
混凝土海漫

钢筋混凝土海漫

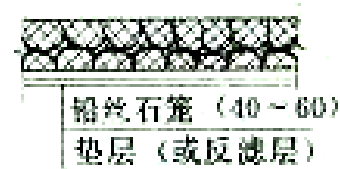
长度：
$$L = k_2 \sqrt{q} \sqrt{H}$$



(a)



(b)



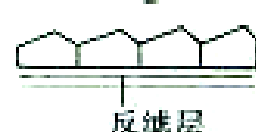
(c)



(d)



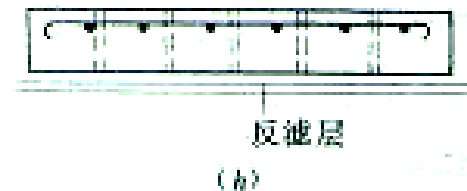
(e)



(f)

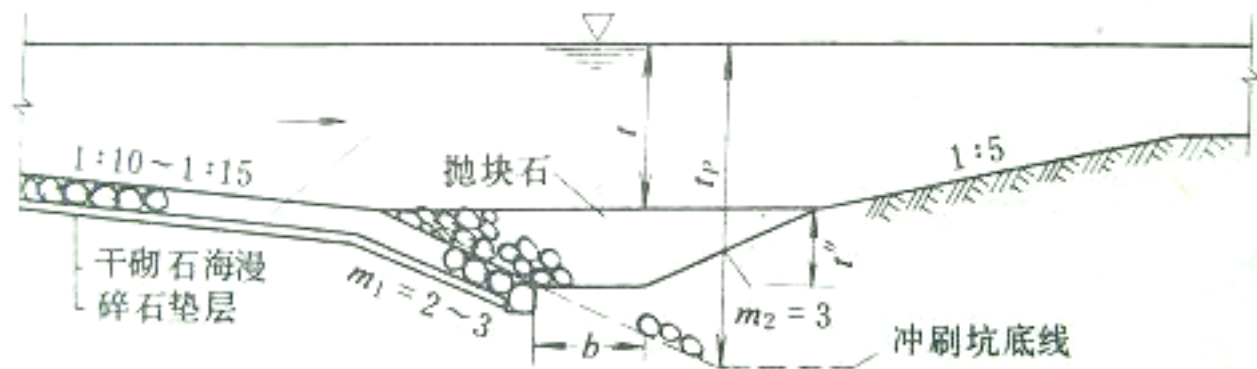


(g)



(h)

2. 防冲槽

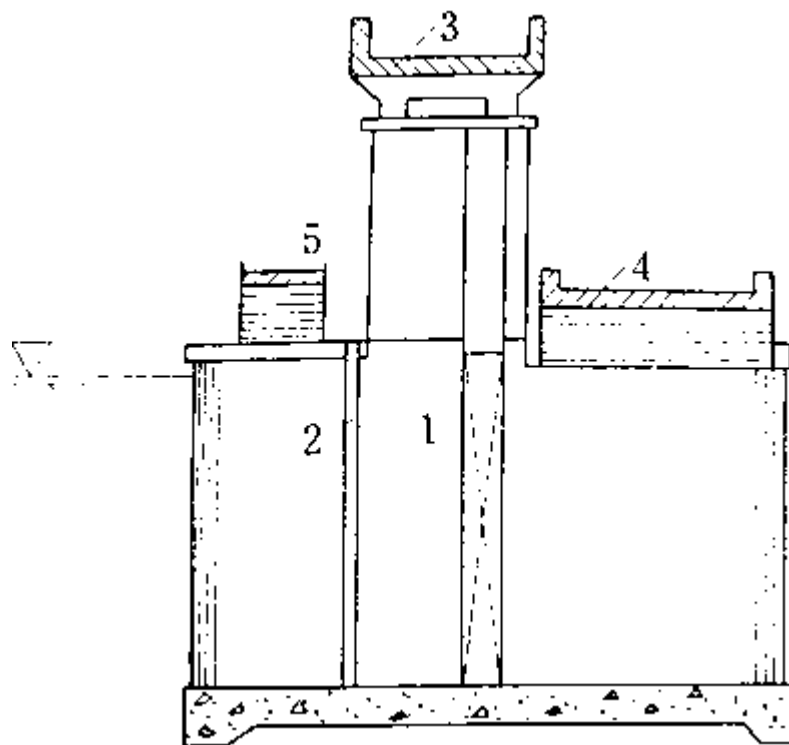


3. 翼墙与护坡

第五节 闸室布置及构造

一. 底板

闸室底板类型：**水平底板**和低实用堰



多孔水闸——设横缝

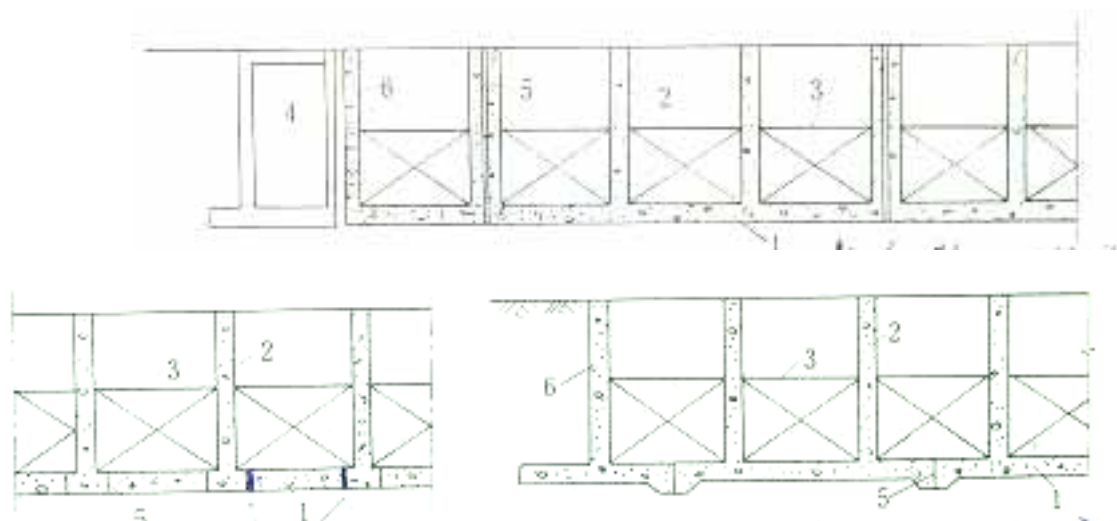
目的：适应地基的不均匀沉降和减小底板内的温度应力

整体式底板：横缝设在闸墩中间，闸墩与底板连在一起。

分离式底板：

特点

★ 底板应满足强度和抗滑稳定要求



底板厚度：必须满足强度和刚度要求，一般大中型(1/5~1/8)单孔宽

底板长度：与地基条件有关

砂砾石地基(1.5~2.0)H；粘土(2.5~3.5)H

配筋率 0.3%

二. 闸墩

三. 闸门

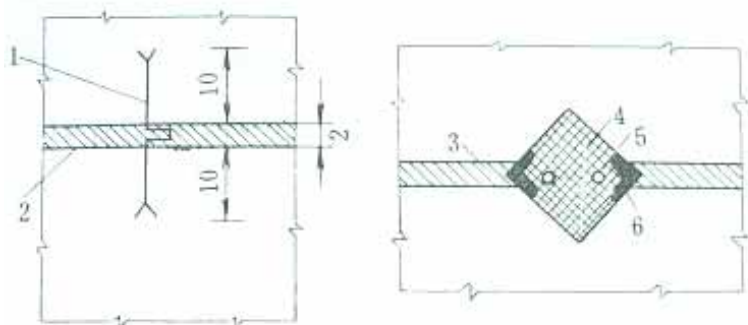
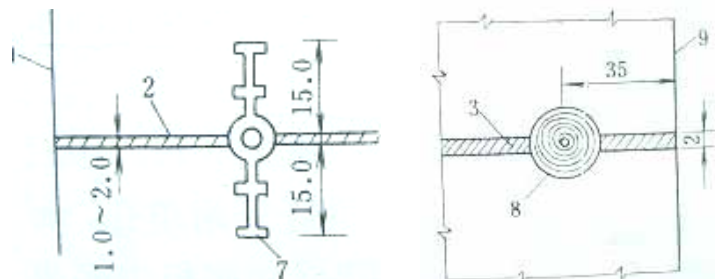
四. 交通桥及工作桥



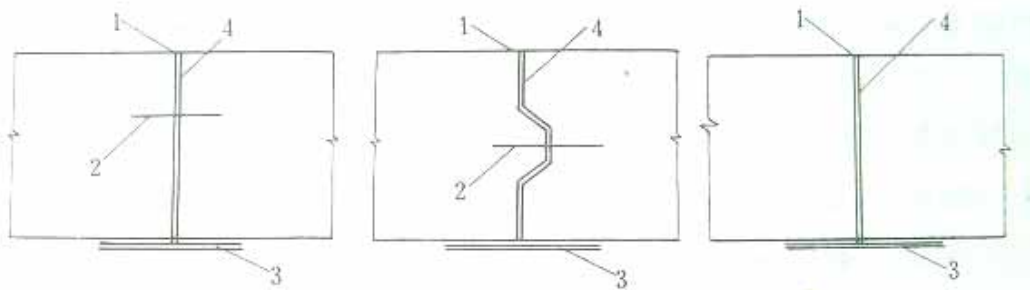
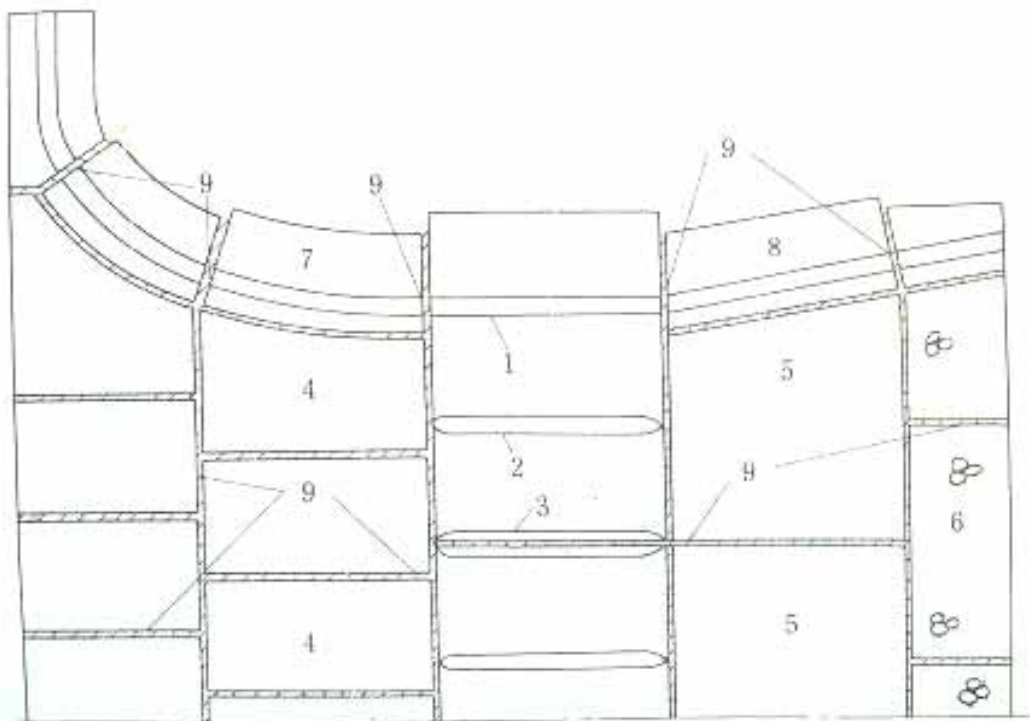
19 8:02 AM

PPS158PS
766

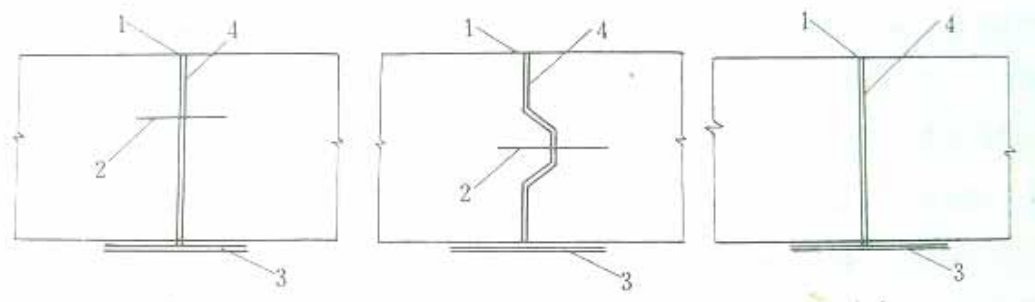
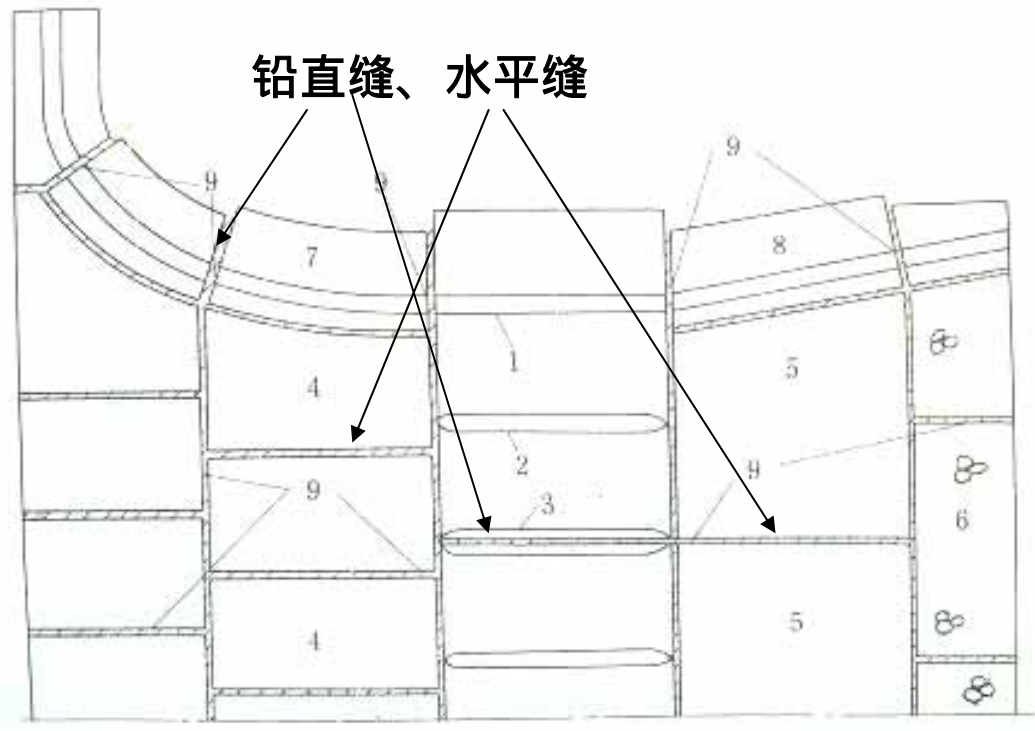
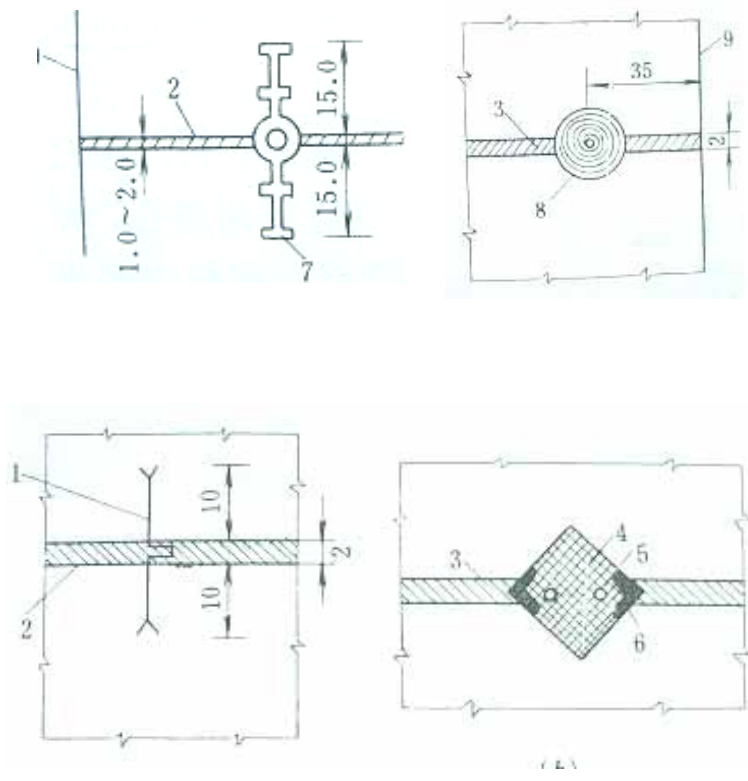
五. 分缝及止水设备



(2)



五. 分缝及止水设备



第六节 闸室稳定分析、沉降计算和地基处理

一. 闸室稳定分析

闸室基底应力：
$$\sigma = \frac{\sum W}{A} \pm \frac{6 \sum M}{AB}$$

沿闸室基底面的抗滑稳定：
$$K_c = \frac{f \sum G}{\sum H}$$
$$K_c = \frac{tg \varphi_0 \sum G + c_0 A}{\sum H}$$

★ 各种计算情况下，基底应力应不大于地基承载力；
抗滑稳定安全系数应满足规范要求。

基底应力、抗滑稳定安全系数，对岩基和土基要求不同。

荷载及荷载组合

荷载组合	计算情况	荷载										说明			
		自重	水重	静水压力	扬压力	土压力	淤沙压力	风压力	浪压力	冰压力	土的冻胀力		地震荷载	其他	
基本组合	完建情况	✓	—	—	—	✓	—	—	—	—	—	—	—	✓	必要时,可考虑地下水产生的扬压力
	正常蓄水位情况	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—	—	✓	按正常蓄水位组合计算水重、静水压力、扬压力及浪压力
	设计洪水位情况	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—	—	—	按设计洪水位组合计算水重、静水压力、扬压力及浪压力
	冰冻情况	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓	—	—	✓	按正常蓄水位组合计算水重、静水压力、扬压力及冰压力
特殊组合	施工情况	✓	—	—	—	✓	—	—	—	—	—	—	—	✓	应考虑施工过程中各个阶段的临时荷载
	检修情况	✓	—	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—	—	✓	按正常蓄水位组合(必要时可按设计洪水位组合或冬季低水位条件)计算静水压力、扬压力及浪压力
	校核洪水位情况	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—	—	—	按校核洪水位组合计算水重、静水压力、扬压力及浪压力
	地震情况	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—	✓	—	按正常蓄水位组合计算水重、静水压力、扬压力及浪压力

二. 沉降计算

分层总和法

天然土质地基：

最大沉降量，不宜超过允许值15cm

相邻部位的最大沉降差，不宜超过5cm。

三. 地基处理

地基应满足稳定及沉降的要求。

岩基

土基

预压加固、换土垫层、桩基础、沉井基础、振冲砂石桩、强夯、爆炸振密、高速旋喷等。

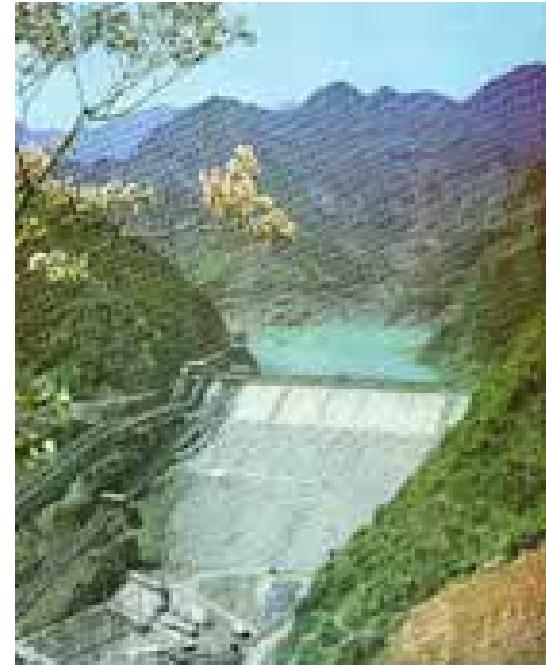
思考题

1. 水闸的组成部分及其作用。
2. 什么是波状水跃、折冲水流？
3. 水闸的消能设计为什么采用底流式？若尾水位不够，应采取什么措施？
4. 什么是地下轮廓线？你能否从闸下轮廓线的布置判断出闸基的土质？
5. 闸下渗流分析方法及适用条件。
6. 海漫的作用及对海漫的要求。
7. 水闸设计的内容包括哪些？

第七章 岸边溢洪道

第一节 概述

溢洪道是一种常见的泄水建筑物。



什么情况下需设置溢洪道？

混凝土重力坝：采用坝体泄洪——溢流坝

土石坝或某些轻型坝
或河谷狭窄而泄洪量大 } 利用溢洪道或泄水隧洞泄洪

对溢洪道的要求 { 具备足够的泄流能力；
在工作期间，应保证其自身的安全性；
保证下泄水流与原河道水流妥善衔接。

溢洪道不经常使用，只有当库容容纳不下，或来水量超过其它泄水建筑物的泄流能力时，才启用溢洪道。

岸边溢洪道
常用型式：正槽溢洪道、侧槽溢洪道、井式溢洪道和虹吸式溢洪道

第二节 正槽溢洪道

尼尔基水利枢纽平面布置图

名称	备注
1. 溢流堰	
2. 泄槽	
3. 出口消能段	
4. 尾水渠	
5. 引水渠	
6. 控制段	

名称	备注
1. 溢流堰	
2. 泄槽	
3. 出口消能段	
4. 尾水渠	
5. 引水渠	
6. 控制段	

由引水渠、控制段、泄槽、出口消能段和尾水渠等组成。

溢流堰轴线与泄槽轴线正交，过堰水流流向与泄槽轴线方向一致。

正槽溢洪道：由引水渠、控制段、泄槽、出口消能段和尾水渠等组成，溢流堰轴线与泄槽轴线正交，过堰水流流向与泄槽轴线方向一致。

一. 引水渠

作用：将库水平顺地引向溢流堰。

平面布置：

轴线应使进水顺畅，渠线较短；渠底宽宜与控制段等宽。

目的是尽量减少水头损失，并调整水流流态，使进水水流均匀。

纵剖面：渠底一般水平

横剖面：矩形(岩基)、梯形(土基)

导水墙：溢流堰边墩向上游延伸形成。高度高于最高水位

衬砌：根据地质、流速、渠线长度等确定（混凝土、浆砌石）

二. 控制段

包括：溢流堰及两侧连接建筑

——是控制溢洪道泄流能力的关键部位

(一) 控制段的平面布置

应设在较好的地基上，要满足强度、稳定和抗渗的要求。

地形上：宜尽量靠近水库，以缩短进水渠长度。

靠近大坝时，控制段宜布置在坝轴线上或其附近

——便于交通道路布置及防渗设施的布置。

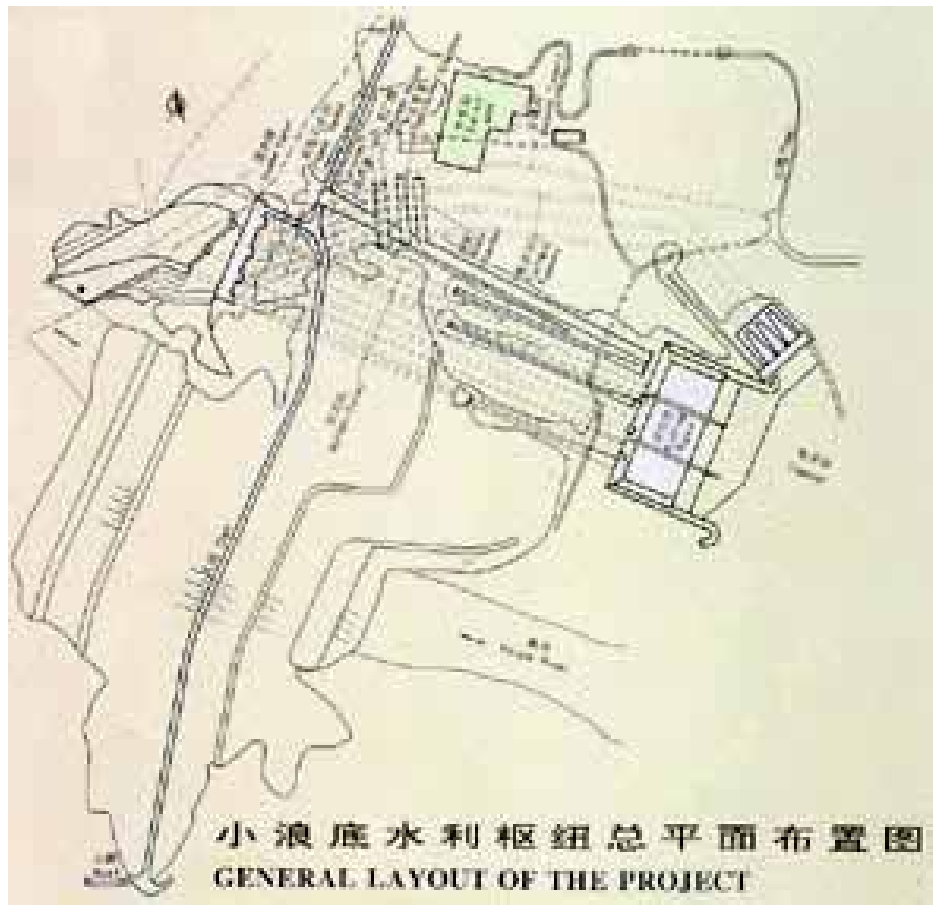
(二) 闸门和堰顶高程

不设闸门 ——堰顶挡正常蓄水位

设闸门 ——堰顶高程需通过方案比较，选用能满足泄洪要求而造价最低的方案。

高大闸门、大单宽流量 ($b=15-20m$, $h=15-20m$)

伊朗卡隆坝：溢洪道3孔，闸门宽15m、高21.28m, $q_{\max} = 335m^3 / s \cdot m$



[返回](#)



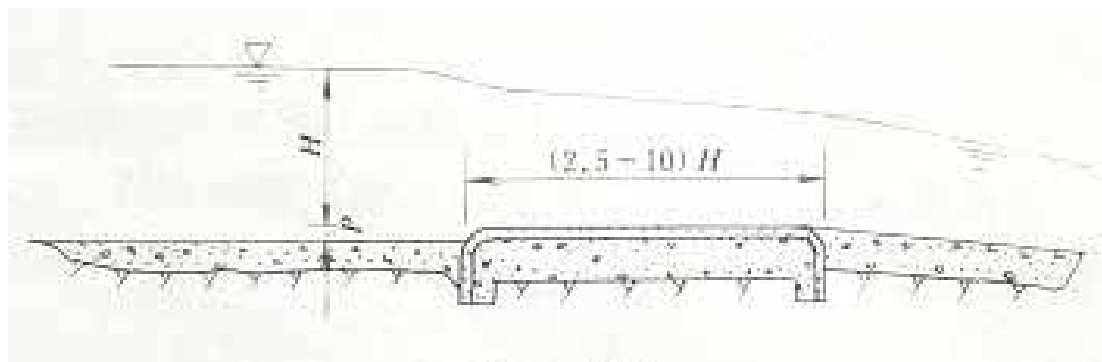
(三) 溢流堰的形式和堰高

常用形式： 宽顶堰、实用堰、驼峰堰、折线形堰

溢流堰体形设计的要求 { 尽量增大 m
泄流时，不产生破坏性的空蚀和振动。

1. 宽顶堰

特点：结构简单，施工方便；流量系数 m 小



适用于泄流量小的工程

2. 实用堰

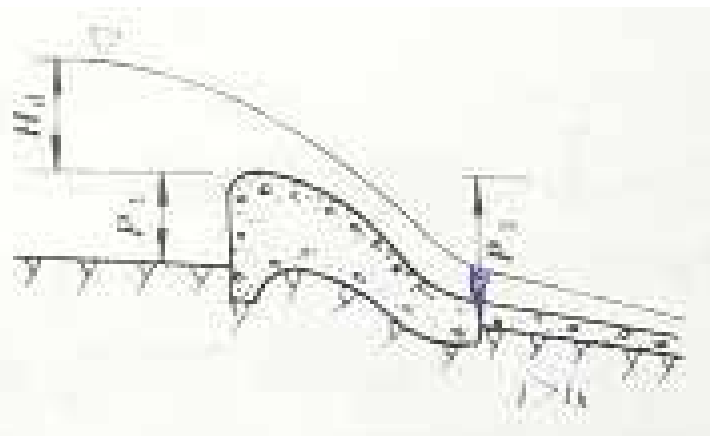
优点： m 比宽顶堰大 缺点：施工复杂

适用于：大中型工程，特别是岸坡较陡时，多采用此种形式。

流量系数 m 介于混凝土溢流坝
与宽顶堰之间

为尽可能提高 m ，应合理选用：

定型设计水头 H_d 、堰高 P 、堰面曲线

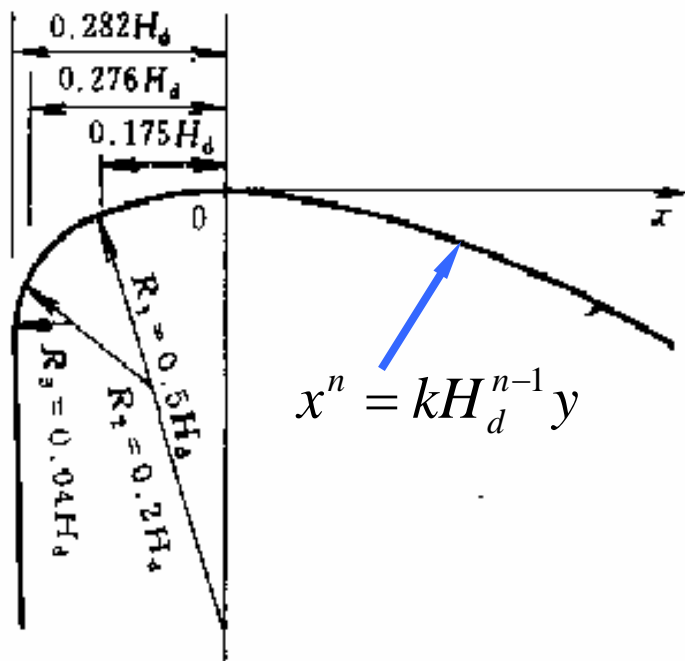


(1) 堰面曲线

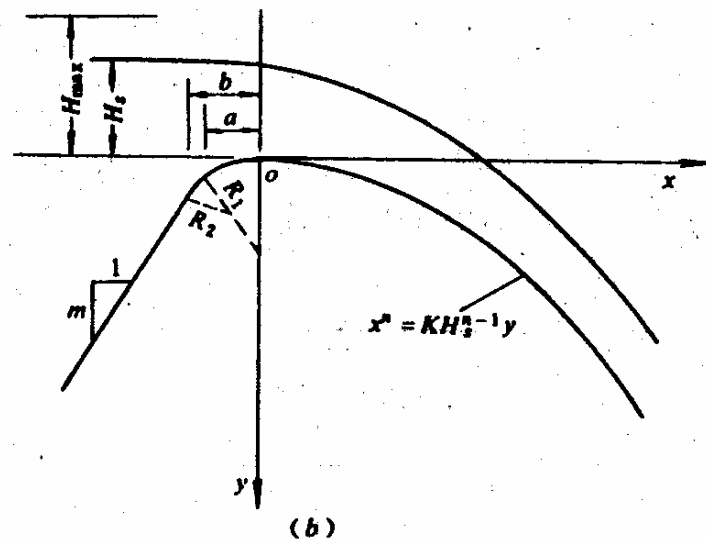
堰顶下游堰面曲线，宜优先选用WES曲线

上游堰头曲线可采用：双圆弧、三圆弧或椭圆

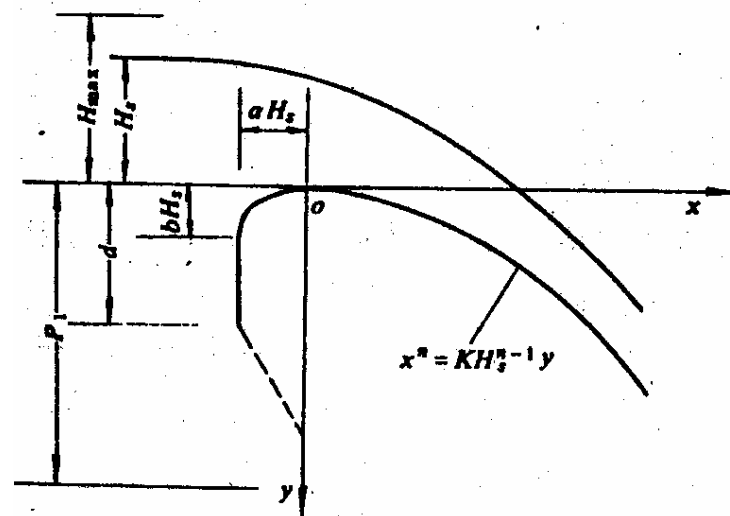
下游堰面均为WES曲线



上游堰面为三圆弧



上游堰面为双圆弧

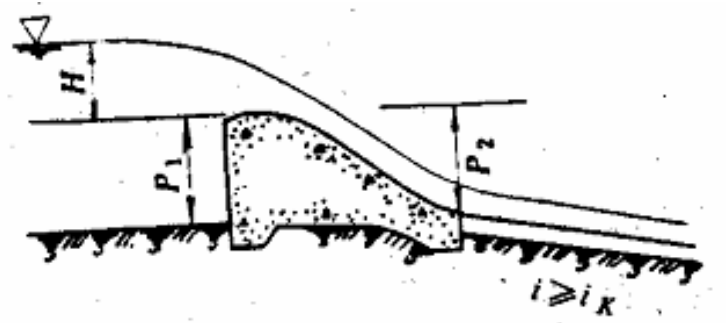


上游堰面倒悬，为椭圆

(2) H_d

高堰 $P_1 \geq 1.33H_d$
 $H_d = (0.75 \sim 0.95)H_{\max}$

低堰 $P_1 < 1.33H_d$
 $H_d = (0.65 \sim 0.85)H_{\max}$



(3) 堰高 P_1 、 P_2

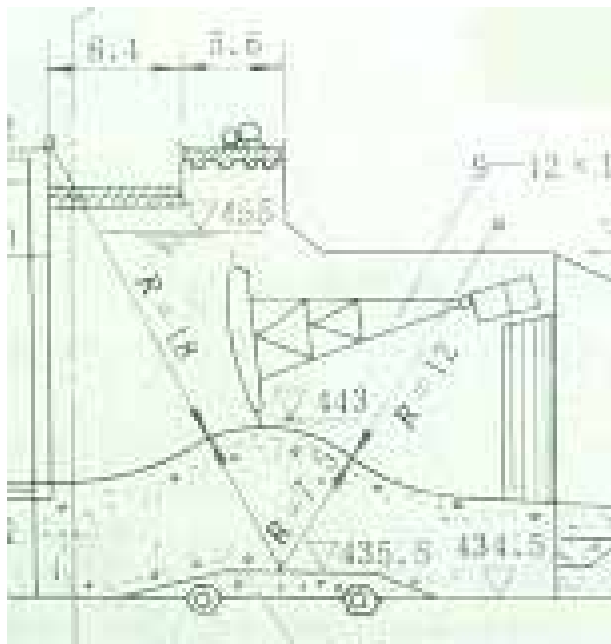
——对 m 影响较大

对于低实用堰： $P_1 \geq 0.3H_d$ $P_2 \geq 0.6H_d$

(4) 溢流堰顶部曲线长度对 m 有影响

堰面曲线下接直线段，其坡度宜陡于 1:1

3. 驼峰堰

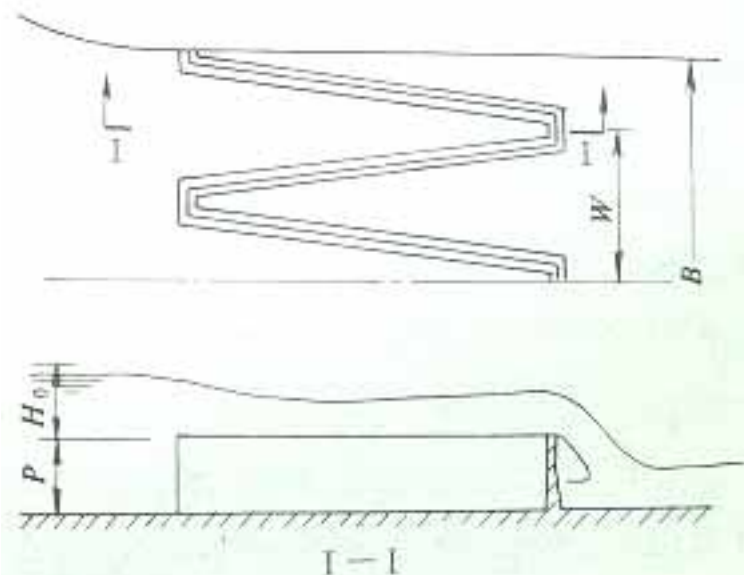


堰高 <3 米时，可采用驼峰堰

特点：堰体较低、 m 大，设计施工方便，对地基要求低。

适用于较差地基

4. 折线型堰



特点：溢流前缘长

结构简单、工作可靠

适用于小型水库不设闸门情况

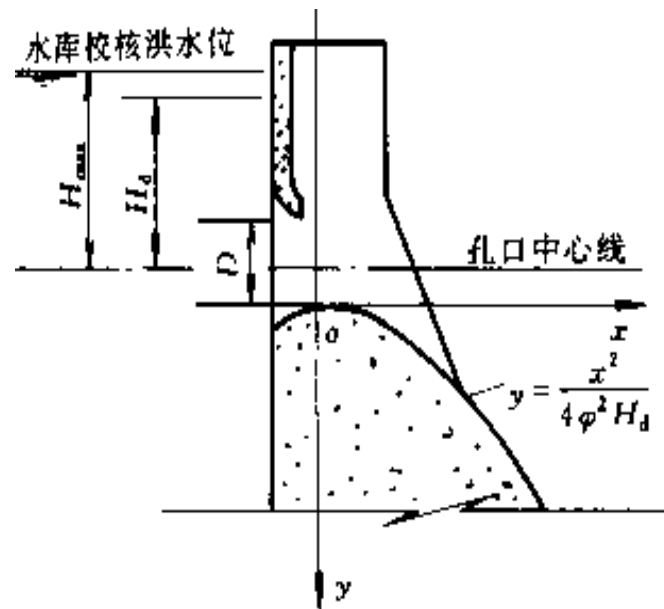
带胸墙的孔口

堰顶高程可降低，可以预泄洪水。

堰面曲线采用抛物线 $H_d = (0.56 \sim 0.77)H_{max}$

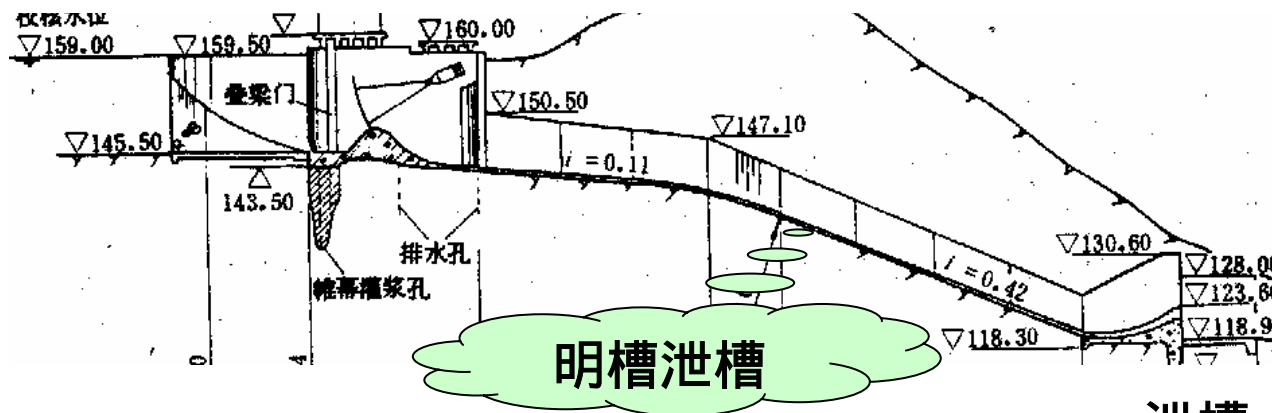
(四) 溢流孔口尺寸

设计方法同溢流重力坝



三. 泄槽

过堰水流通过泄水陡槽和出口消能段，将洪水安全地泄向下游河道。



泄槽 - 明流泄洪洞

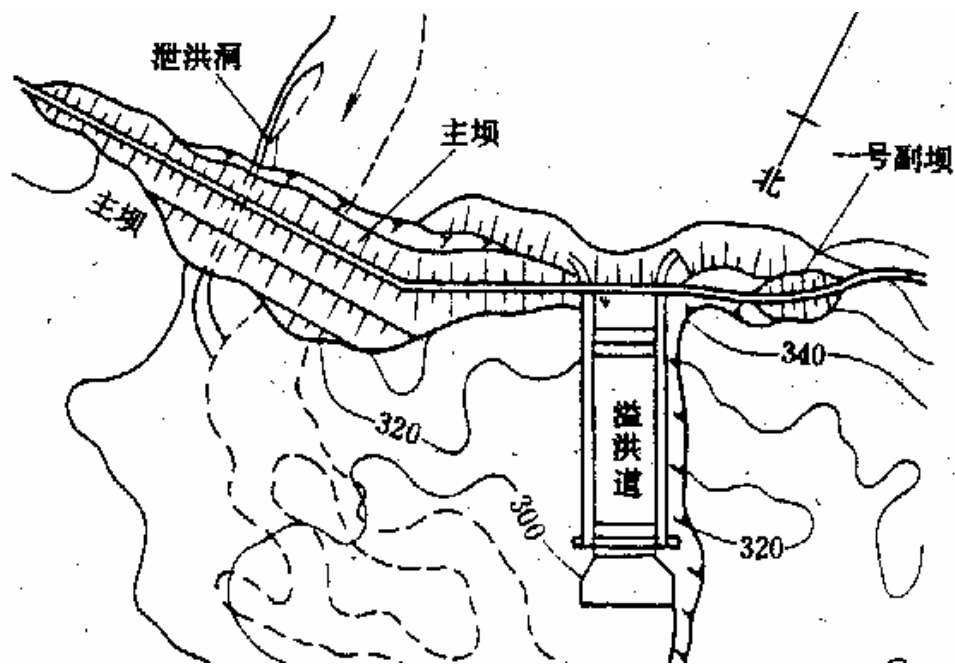
泄槽的布置和体形，应根据地形、地质和水力学条件综合考虑确定。

(一) 泄槽的平面布置

泄槽轴线最好为直线

平面上：应尽可能采用直线、等宽、对称布置，可使水流平顺、结构简单、施工方便。

收缩段、扩散段、弯曲段



(二) 泄槽纵断面 —— 纵坡*i*

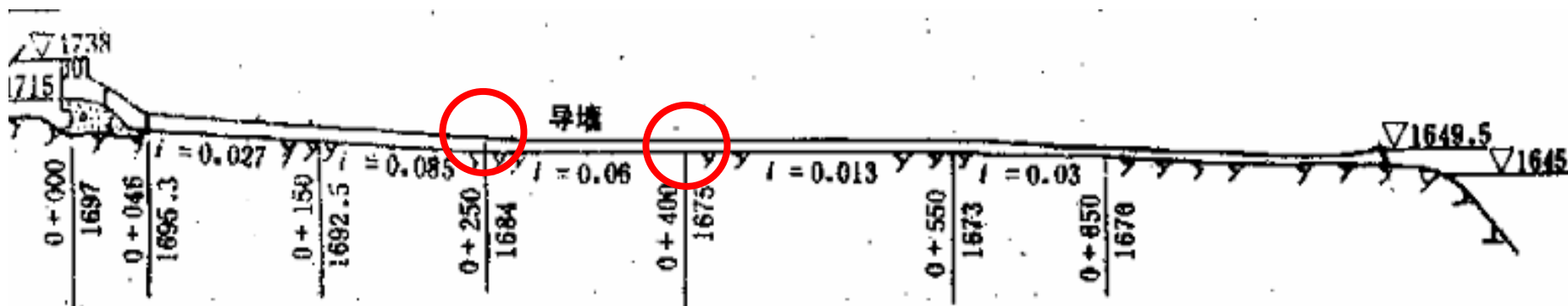
应根据地形地质条件、水力学条件及结构稳定等条件经技术经济比较来确定。

！！泄槽纵坡应大于临界坡度

纵坡以一次坡较好，水力学条件简单。

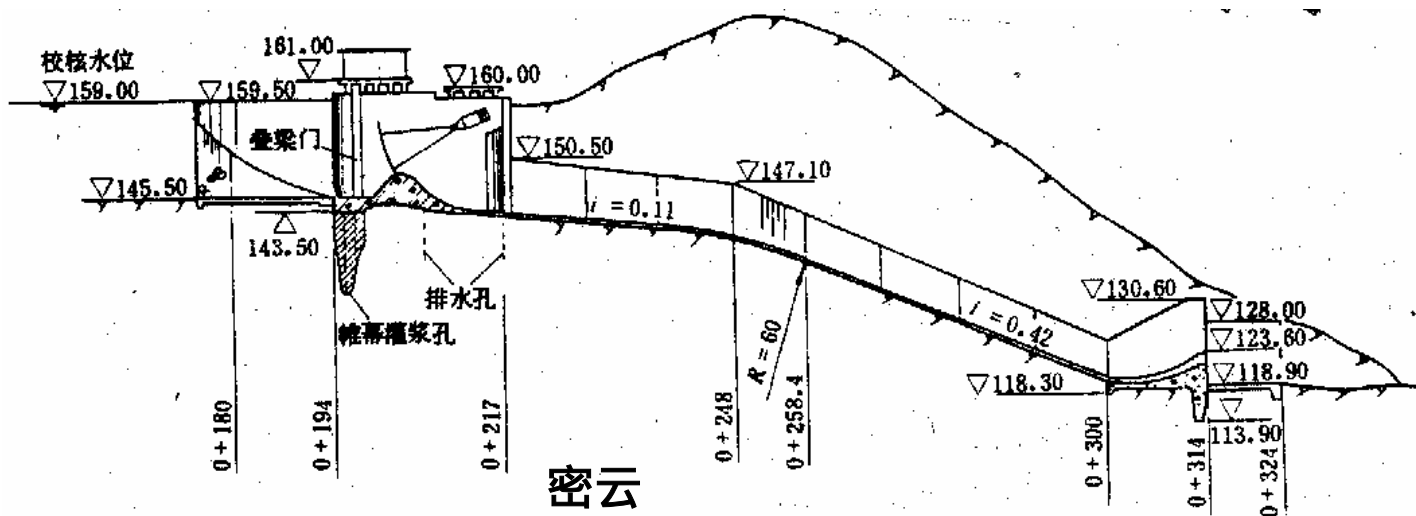
常用 $i=1\% \sim 5\%$ ，有时可达 $10\% \sim 30\%$ ，甚至更大。

泄槽也可随地形地质条件**变坡**，但变坡处要用平滑曲线连接。



！！讨论：当控制段位置和出口消能段位置确定后，泄槽的纵断面布置可有几种主要方式？哪种方式更合理？

变坡宜先缓后陡



开挖工程量小。

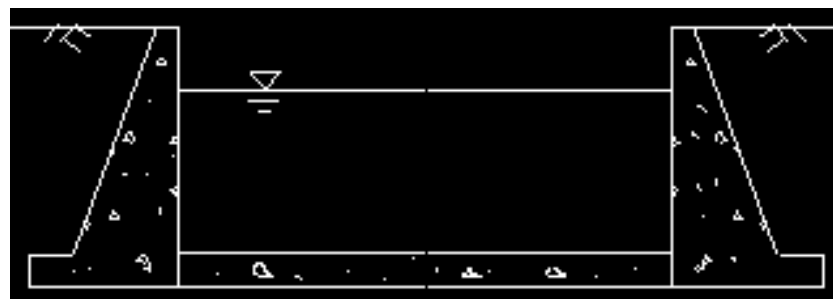
流速不会迅速增大，防冲、防空蚀要求不用太高。

(三) 泄槽的横剖面形式

矩形：断面流速分布均匀、流态好


梯形：坡度不缓于1:0.25

泄槽需衬砌

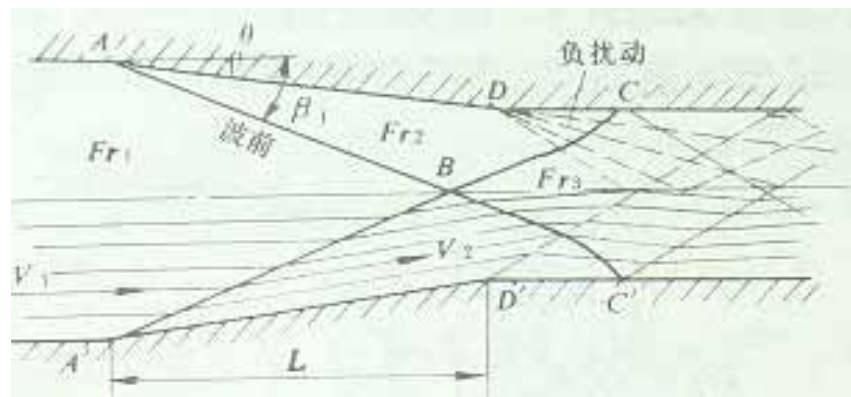


(四) 收缩段、扩散段和弯曲段

在急流中，高速水流遇到边界变化时，会产生冲击波。

高速水流受扰后，造成的水面局部壅高（图）。

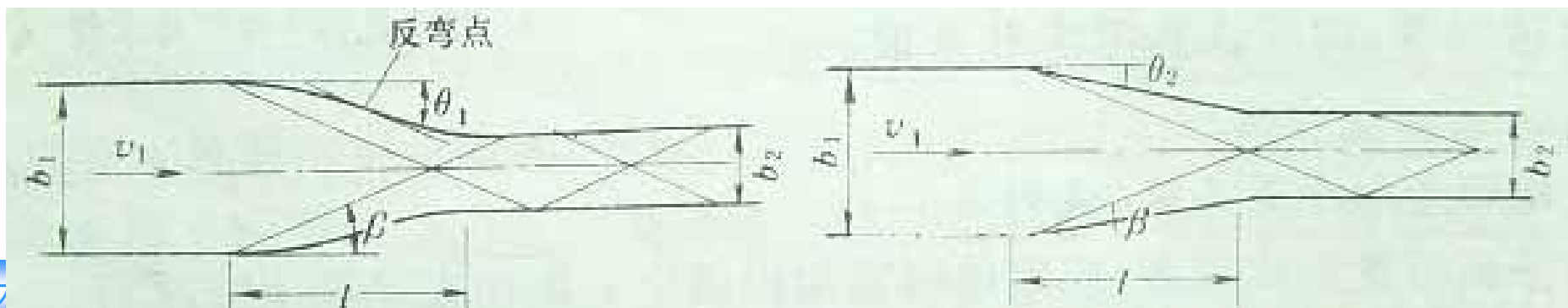
为使水流受扰最小，需合理确定收缩段、扩散段的长度、收缩（扩散）角的大小。



1. 收缩段

原则 { 引起的冲击波高度最小；
对收缩段以下泄槽中的水流扰动减至最小。

冲击波最大波高：取决于侧墙偏转角，偏转角越大，波高越高，而与边墙的偏转曲率无关。





[返回](#)

为使收缩段下游泄槽内水流扰动最小

理想的收缩段应满足以下条件：

根据动量守恒原理：

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg}(\beta_1 - \theta)} \quad \frac{h_3}{h_2} = \frac{\operatorname{tg} \beta_2}{\operatorname{tg}(\beta_2 - \theta)}$$

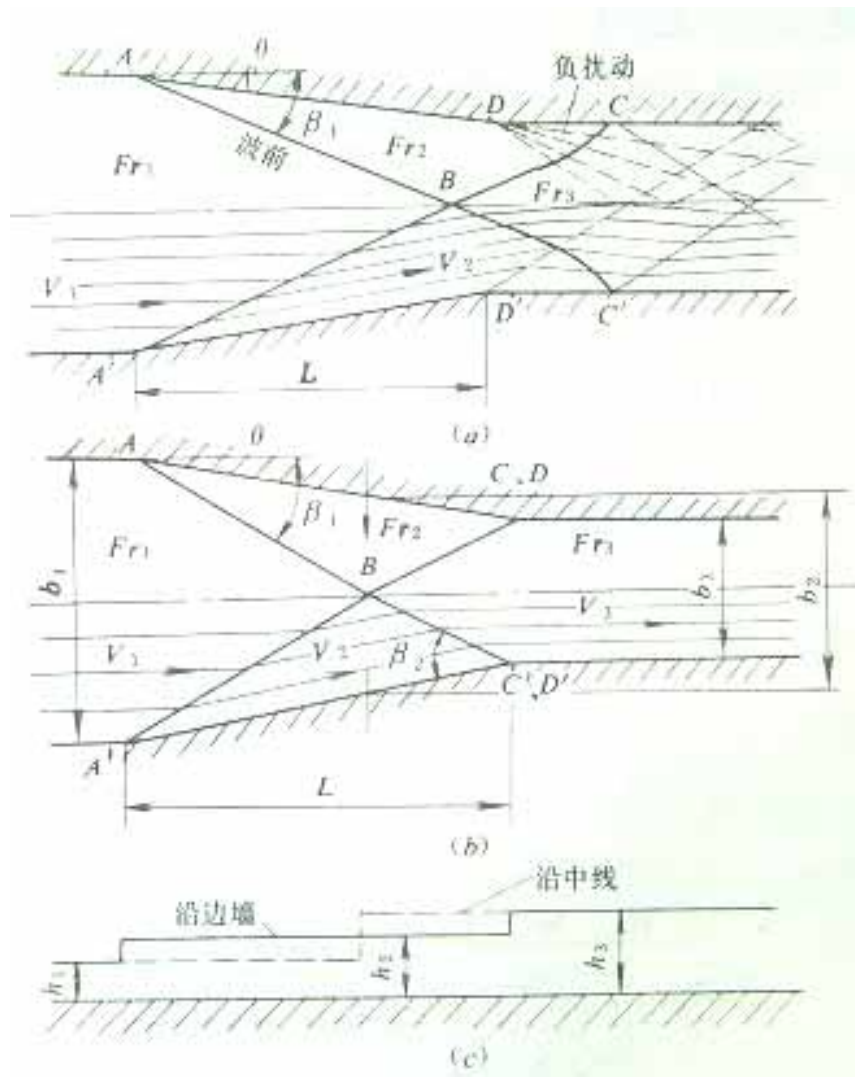
根据水跃共扼

$$h_2 / h_1 = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8F_{r1}^2 \sin^2 \beta_1} - 1)$$

$$h_3 / h_2 = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8F_{r2}^2 \sin^2 \beta_2} - 1)$$

根据入口及出口的连续条件：

$$\frac{b_1}{b_3} = \left(\frac{h_3}{h_1}\right)^{3/2} \left(\frac{F_{r3}}{F_{r1}}\right)$$

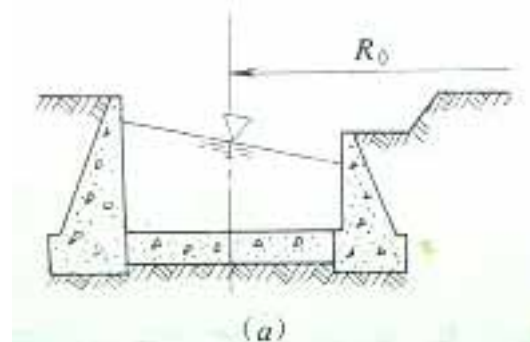


工程中一般取 8° ，当 $< 6^\circ$ 可不进行冲击波计算。

2. 扩散段

设计时，以水流不脱离边墙为原则。

$$\operatorname{tg} \varphi \leq \frac{1}{KF_r} \quad F_r = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (\text{起止断面的平均弗氏数})$$

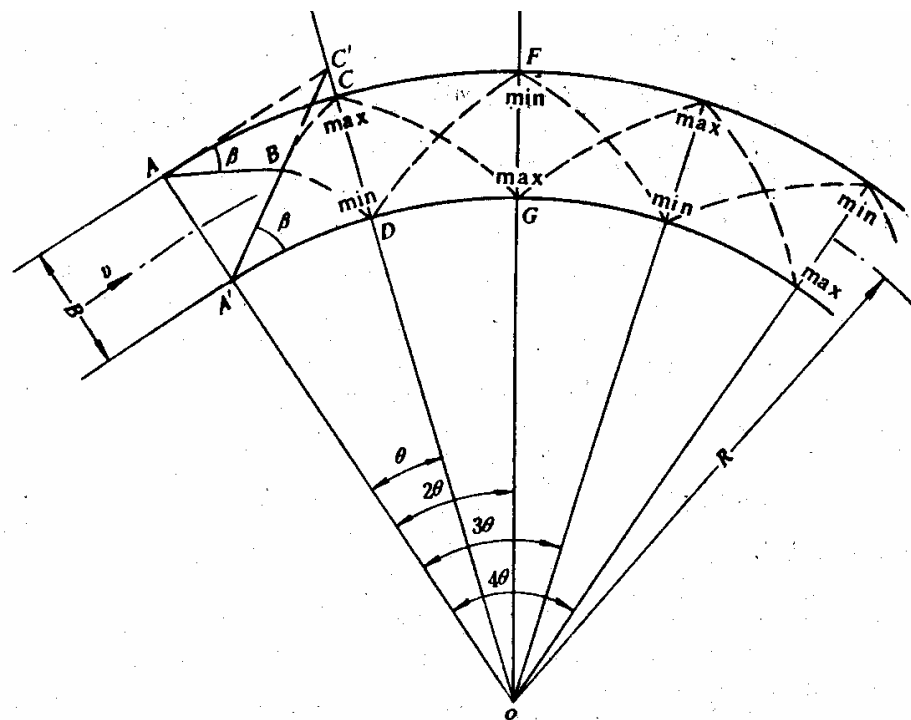


按直线扩散的扩散角不宜大于 $6^\circ \sim 8^\circ$ 。

3. 弯曲段

设计的主要任务是：

使断面内的流量分布趋于均匀，消除或抑制冲击波。



3. 弯曲段

设计的主要任务是：使断面内的流量分布趋于均匀，消除或抑制冲击波。

渠底超高法：



复曲线弯道 —— 在圆弧曲线弯道的前后，各设一段缓和曲线，使产生一种与原干扰大小相等相位相反的扰动，达到消除原扰动的目的。

缓和曲线段，采用圆弧，轴线半径： $r = 2r_c$

长度： $L = b / \operatorname{tg} \beta$

超高系数 $C=1.5$

(五) 掺气减蚀

当流速 $v > 15\text{m/s}$ ，可能发生空蚀。

抗空蚀的措施：

掺气减蚀、优化体形、控制溢流表面的不平整度、采用抗空蚀材料。

当流速在 30m/s 左右，可考虑设置掺气装置。

当流速大于 35m/s ，则必须设置掺气装置。

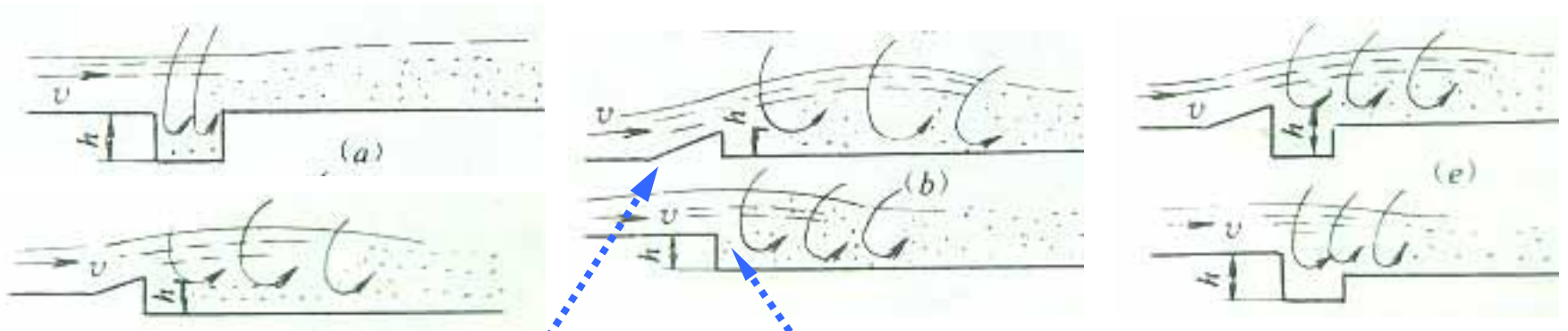
掺气装置

组成

掺气空间：借助于低挑坎、跌坎或掺气槽，在射流下面形成一个掺气空间。

通气系统：为射流下面的掺气空间补给空气。

类型：掺气槽式、挑坎式、跌坎式、挑坎与掺气槽联合式、跌坎与掺气槽联合式、突扩式等

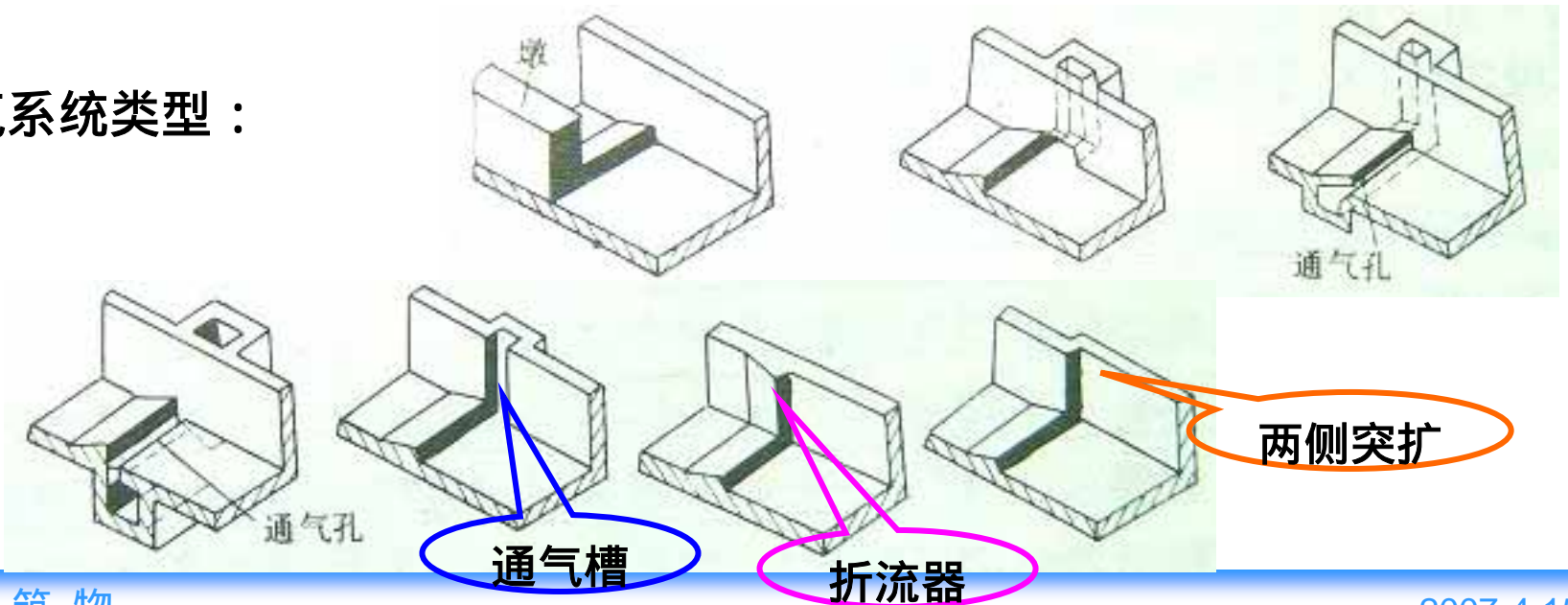


挑坎高度：0.1~0.2m；

跌坎高度：0.6~2.75m

挑角 $5^{\circ} \sim 7^{\circ}$ ；坡度1:10

通气系统类型：



通气槽

折流器

两侧突扩

(六) 泄槽的衬砌

衬砌应达到的要求

衬砌材料能抵抗水流冲刷
各种荷载作用下，能保持稳定。
表面光滑，不致引起不利的负压和空蚀。
做好底板排水
做好接缝止水
温度影响

1. 岩基上的衬砌

混凝土、水泥浆砌条石或块石、石灰浆砌块石水泥浆勾缝

流速 $<15\text{m/s}$ 中小型水库溢洪道

流速 $<10\text{m/s}$ 小型水库溢洪道

衬砌厚度 $30\sim 60\text{cm}$

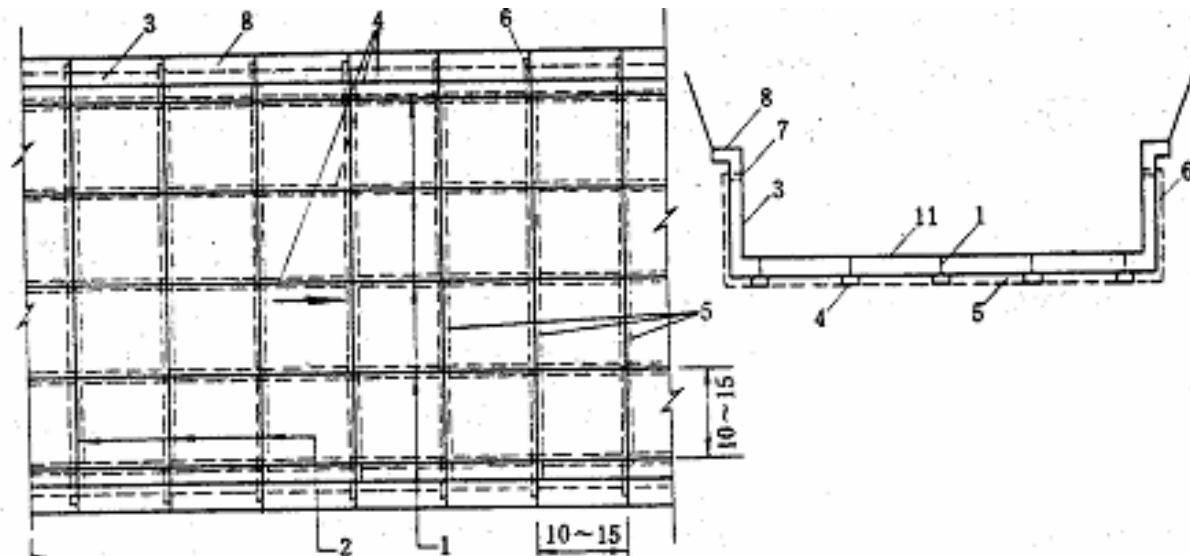
大中型水库溢洪道，通常流速较高，一般采用混凝土衬砌。
衬砌厚度不小于 30cm

温度钢筋：含筋率 0.1% (表面)

混凝土衬砌

纵横缝：

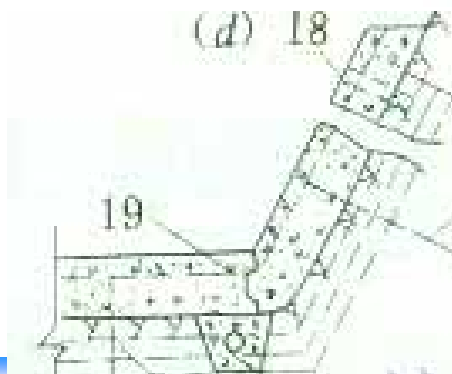
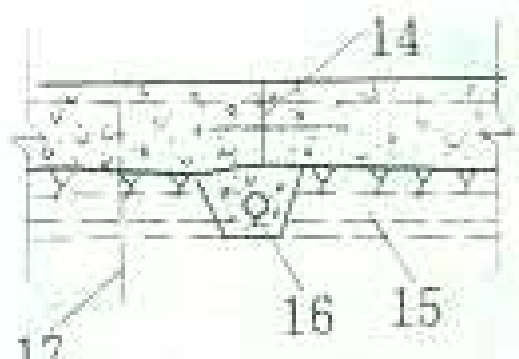
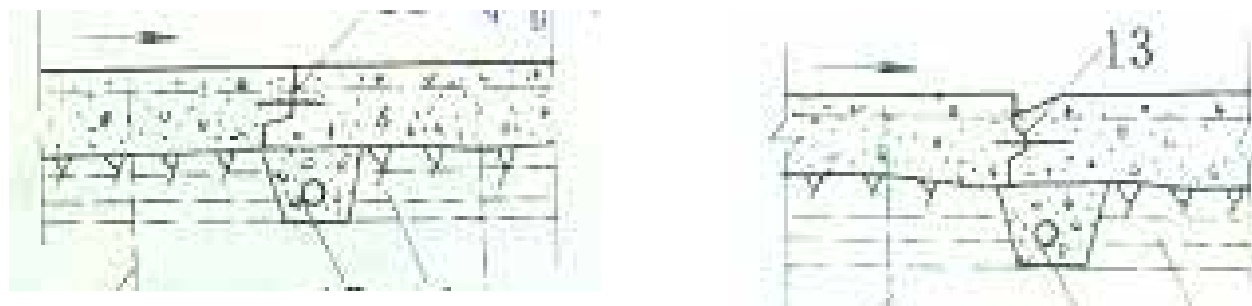
间距10~15m



缝处理：

横缝要求比纵缝高

排水：



岩基处理： 表面风化破碎岩石挖除

锚筋： $d = 25\text{mm}$ ，间距 $1.5\sim 3.0\text{m}$ ，深度 $40\sim 60d$

泄槽边墙

基岩良好——衬砌同底板

基岩软弱——重力式挡土墙

边墙只设横缝，并需做好排水，与底板下横向排水管连通。

2. 土基上的衬砌

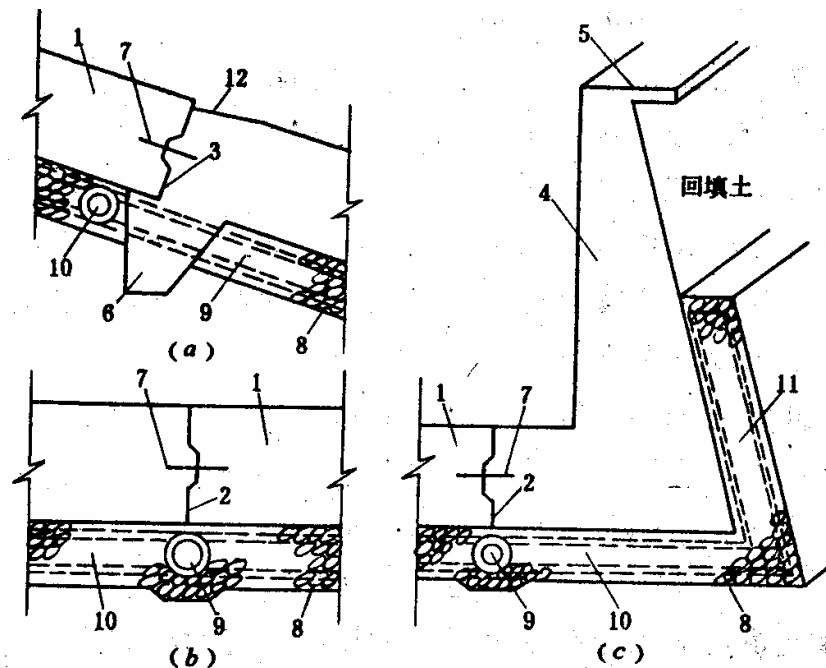
混凝土衬砌，厚度大于 0.45m

缝间距大， $20\sim 25\text{m}$

纵横缝均采用搭接缝或键槽缝

排水：面层排水

边墙——重力式挡土墙

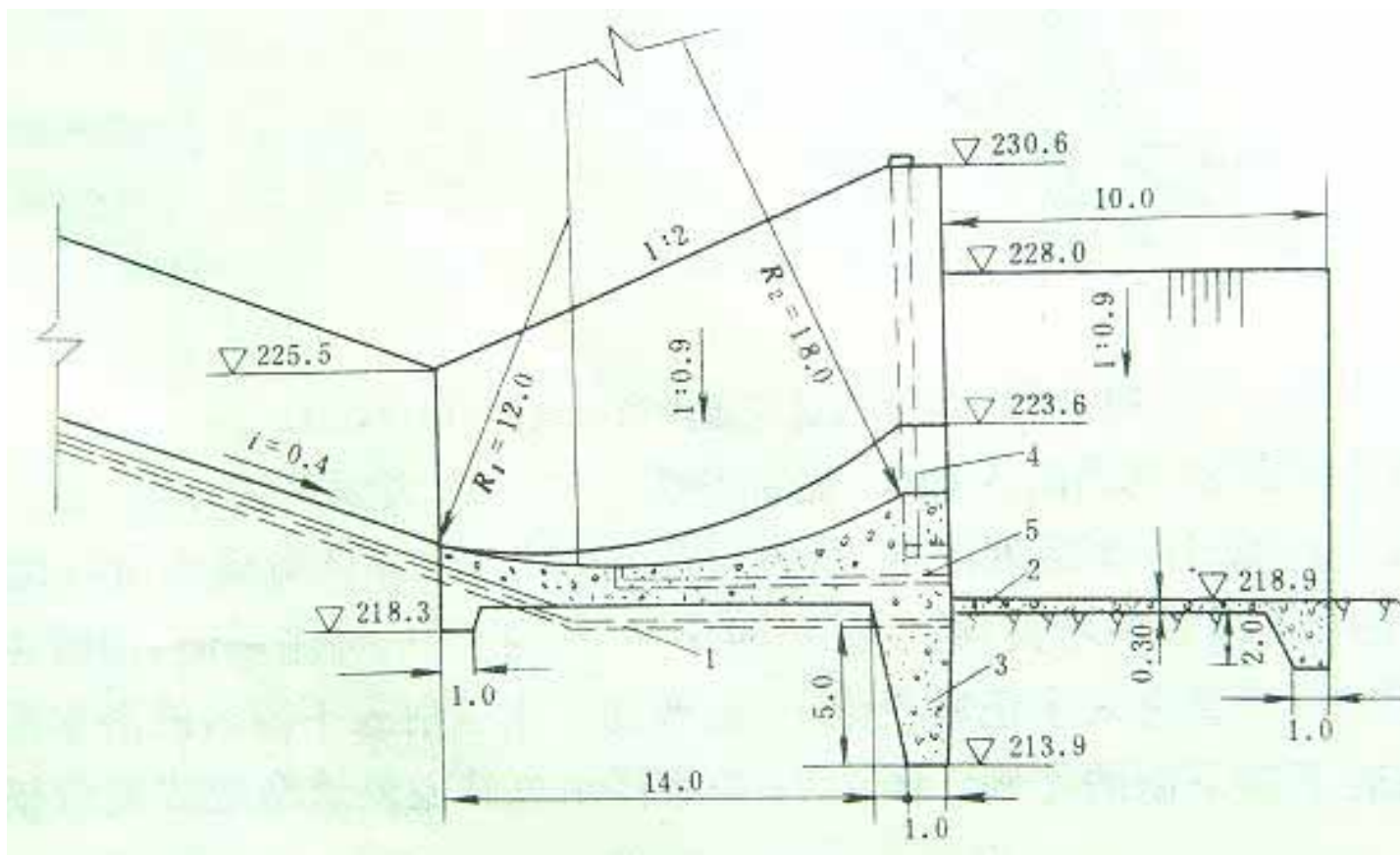


四. 出口消能段及尾水渠

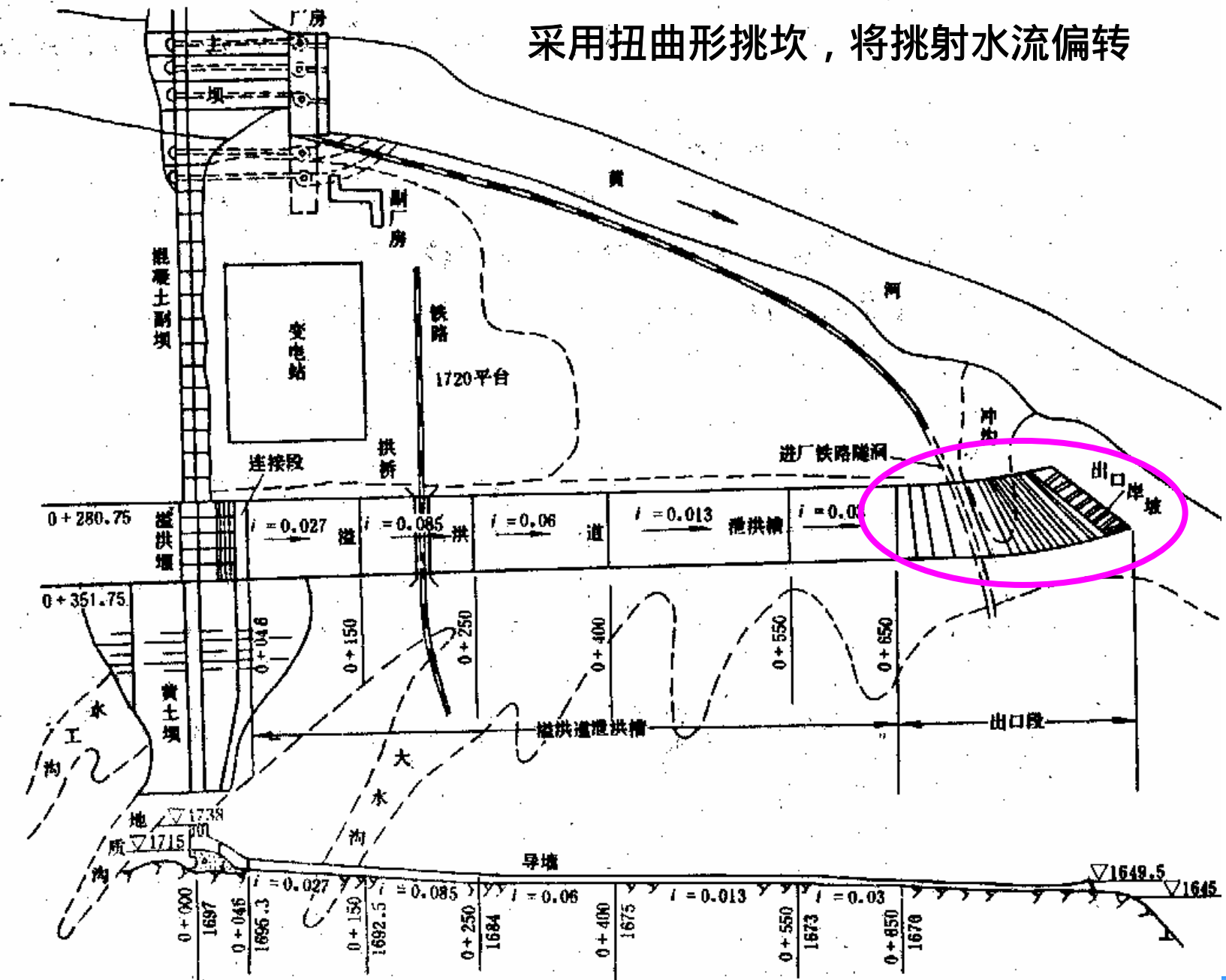
挑流
底流

设计方法同重力坝

$R=(6\sim 12)h$, 挑角 $15^\circ \sim 35^\circ$



采用扭曲形挑坎，将挑射水流偏转



尾水渠

出口应离大坝和其它建筑物有一定距离，防止水流或回流的冲刷而影响建筑物的安全。

底坡：不宜过陡，宜接近下游河道坡度，以防冲刷。

断面尺寸：按明渠均匀流设计

应保证能宣泄溢洪道下泄的流量

第三节 其它形式溢洪道

一. 侧槽溢洪道

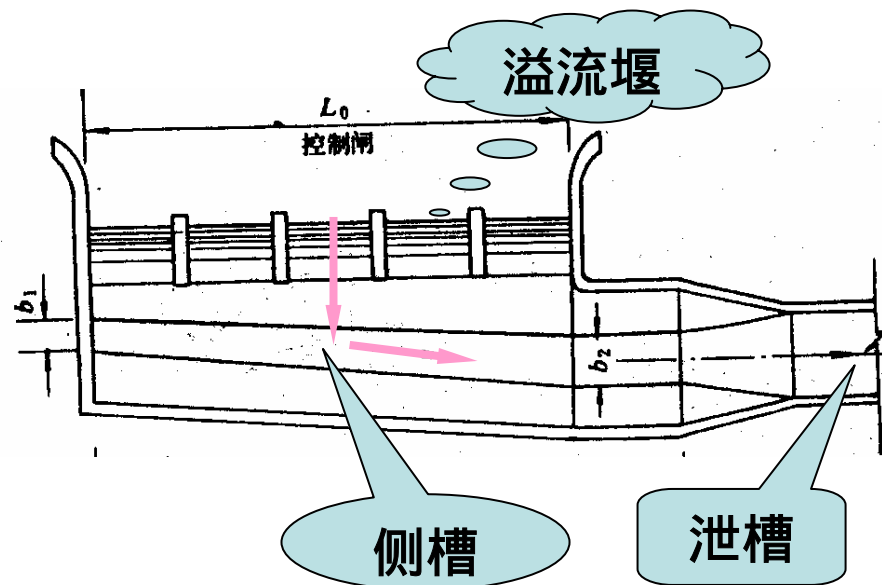
1. 组成及特点

组成：溢流堰、侧槽、泄水道
(泄槽或泄水隧洞)、出口消能段和尾水渠

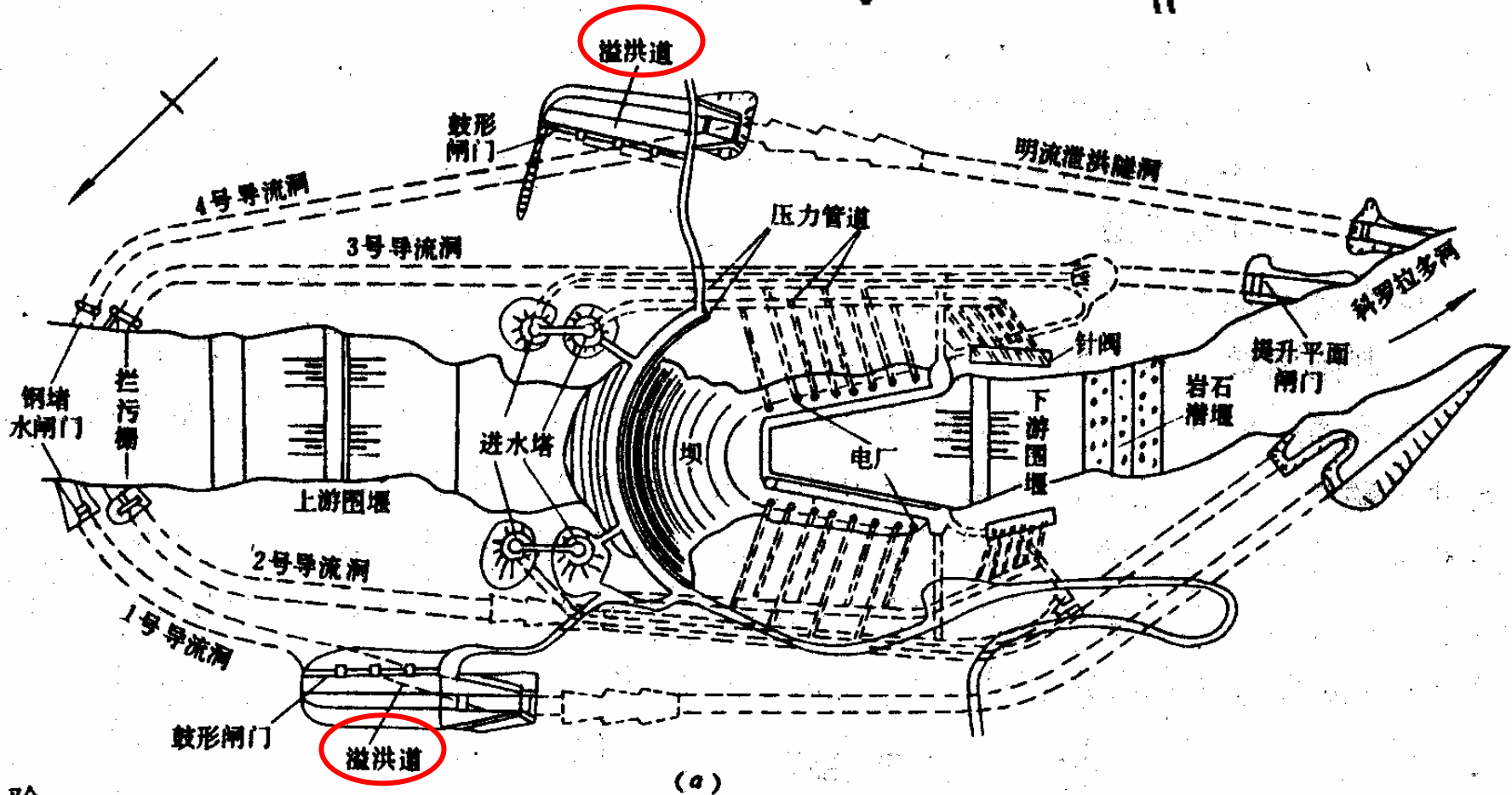
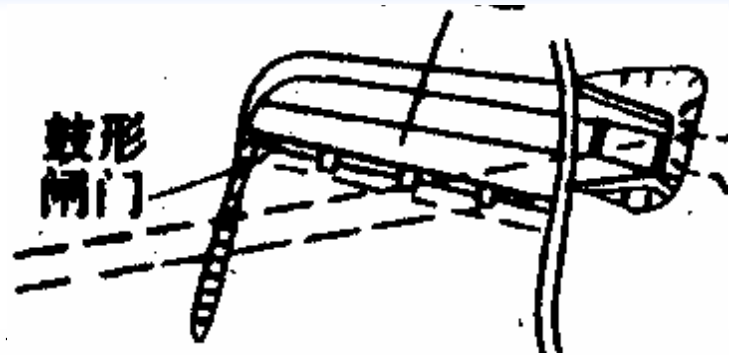
特点：溢流堰大致沿岸边等高线布置

过堰水流 → 侧槽 → 水流转向90° 泄向下游

适用条件：陡峭的河岸、基岩完整坚硬



美国 胡佛拱坝



(a)

1/2 7A

2. 侧槽设计

侧槽宽度由窄渐宽

——满足泄量沿程均匀增加要求

$$b_0 / b_l = 1/4$$

侧槽断面为窄深式。为什么？

槽底有一定坡度

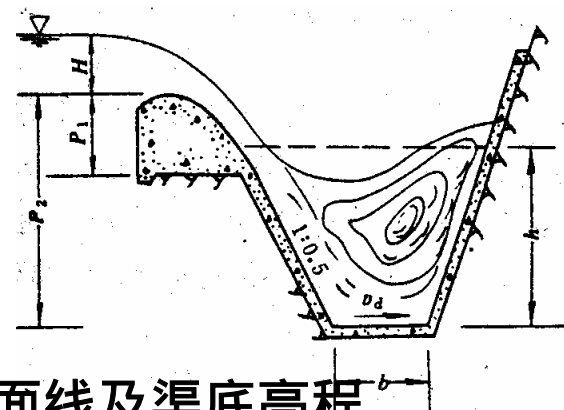
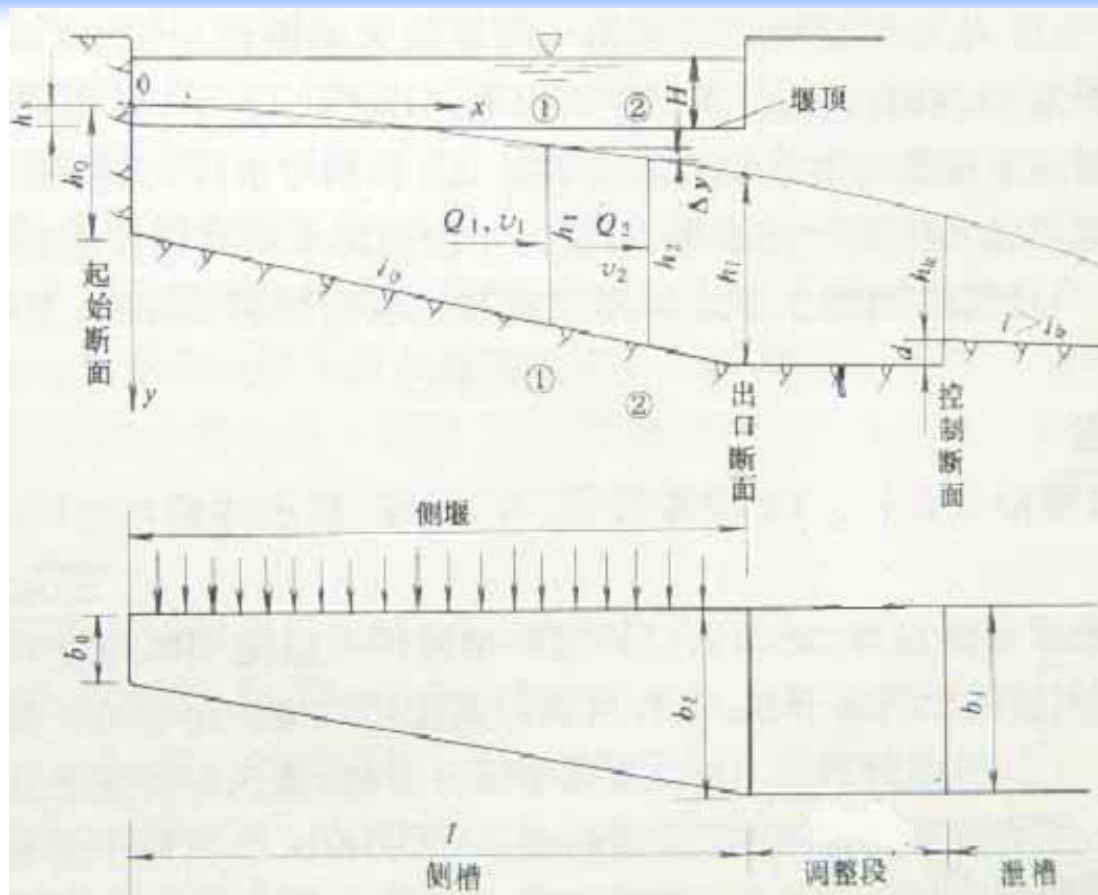
$$i = 0.01 \sim 0.05$$

缓流 —— 保证水流稳定
调整段

溢流堰出流为自由出流

$$h_s / H = 0.5 \quad h_l = (1.2 \sim 1.5)h_k$$

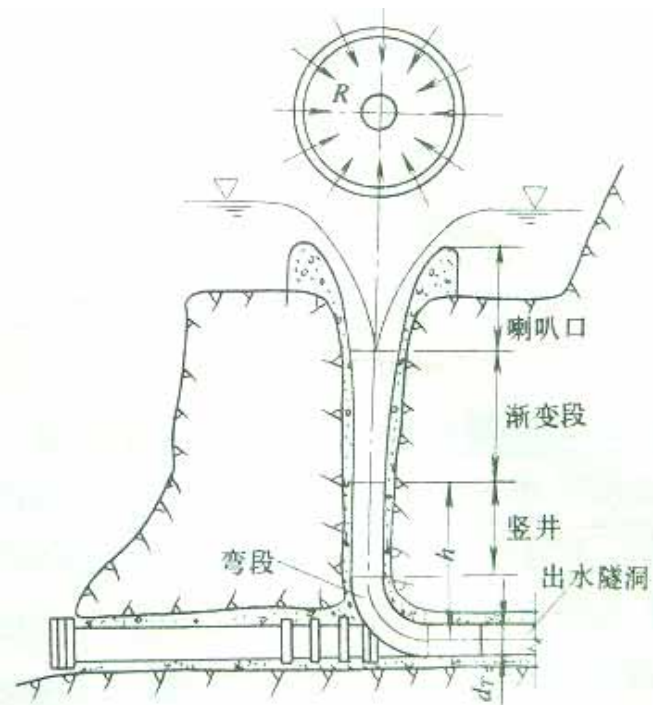
初拟侧槽断面后，即可进行侧槽的水力计算：求水面线及渠底高程



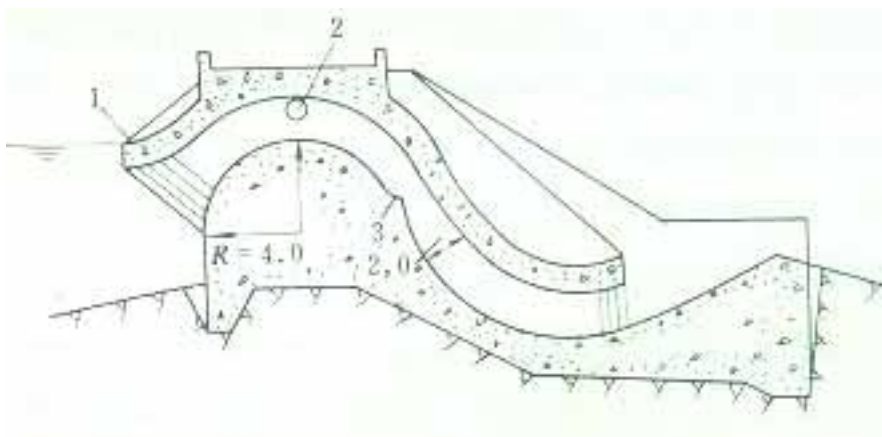
二. 井式溢洪道

组成：溢流喇叭口、渐变段、弯段、泄水洞及出口消能段等。

适用条件：岸坡陡峭、地质条件良好，且有适宜地形布置环形溢流喇叭口。



三. 虹吸溢洪道



特点：较小的堰顶水头可得到较大的泄流量；能自动调节上游水位。

结构复杂、易空蚀

适用条件：水位变化不大和需要随时进行调节的水库。

总结与思考

1. 正槽溢洪道的组成、特点
2. 正槽溢洪道溢流堰的形式、特点及适用条件
3. 为尽可能增大实用堰的流量系数，设计时应如何考虑？
4. 泄槽的平面布置、纵断面设计及横剖面型式
5. 泄槽纵坡改变时，为什么多采用“先缓后陡”的方式？
6. 收缩段、扩散段及弯曲段的设计原则是什么？
7. 收缩段采用直线连接与反曲线连接，哪个更好，为什么？
8. 侧槽溢洪道中侧槽的设计特点

第八章 水工隧洞

第一节 概述

一. 水工隧洞的类型

按功能划分为：泄洪洞、引水发电和尾水洞、灌溉和供水隧洞、放空和排沙隧洞、施工导流洞

按水流流态为：有压隧洞

无压隧洞

前有压后无压（三门峡排沙泄洪洞）



第二节 水工隧洞的布置及线路选择

一. 总体布置及线路选择

(一) 总体布置

1. 应根据枢纽承担的任务，对泄水建筑物进行总体布置。
2. 在合理选定洞线方案的基础上，根据地形、地质及水流条件，选定进口位置及结构形式，确定闸门在隧洞中的位置。
3. 确定洞身纵坡及洞身断面形状和尺寸。
4. 根据地形、地质、尾水位等条件及建筑物之间的相互关系选定出口位置、高程及消能方式。

(二) 洞线选择

1. 沿线地质构造简单、岩体完整稳定、水文地质条件有利及施工方便的地区。

洞线与结构面交角应大；高地应力区洞线与最大水平地应力方向一致。

2. 洞线在平面上力求短直

$v < 20\text{m/s}$ ，无压隧洞转弯半径应大于5倍洞径，有压隧洞转弯半径应大于3倍洞径，转角不宜大于60度。

高流速无压隧洞不应设曲线段；高流速有压隧洞设曲线段应通过试验确定其转弯半径和转角。

3. 应有一定的埋藏深度（围岩厚度）

4. 洞身段设置竖向曲线

低流速无压隧洞竖向曲线半径不小于5倍洞径或洞宽，有压洞可适当降低要求。

5. 纵坡，应便于与下游河道水流衔接。

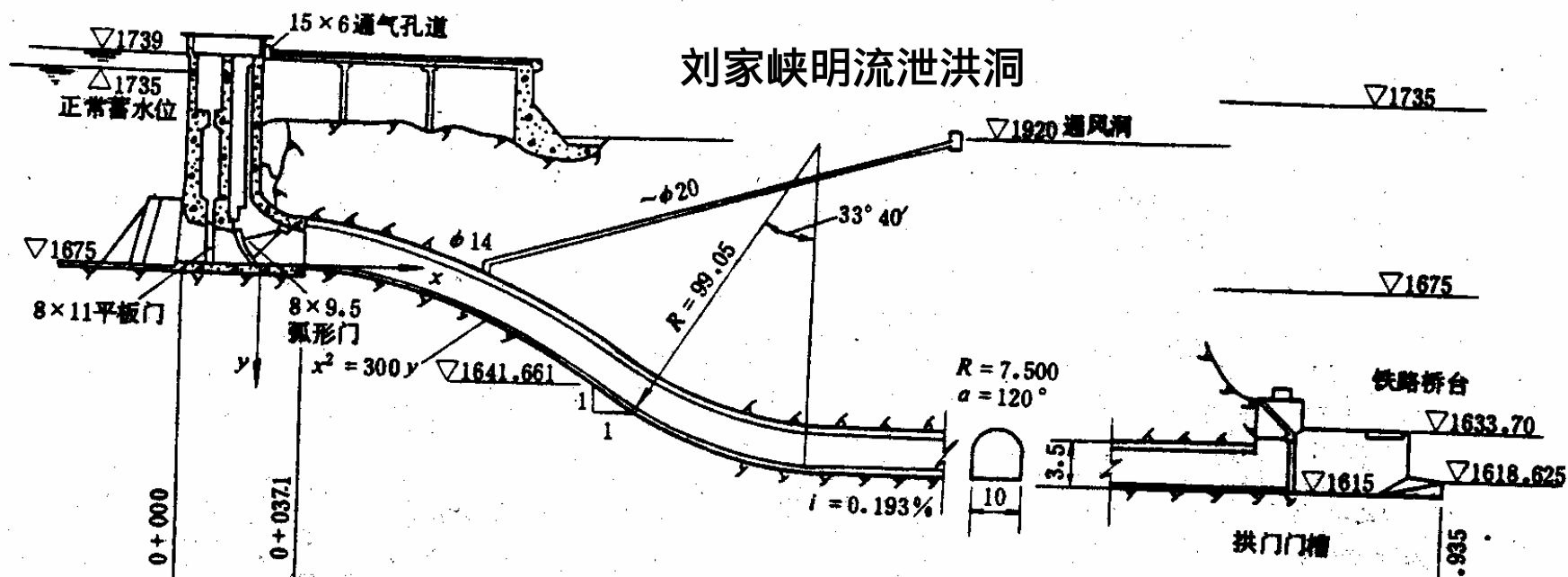
无压隧洞：应大于临界坡度

有压隧洞：取决于进出水口高程。要求全线洞顶在最不利的条件下，保持不小于2米的压力水头。

不宜设置平坡和避免反坡(检修排水不便)

二. 闸门在隧洞中的位置

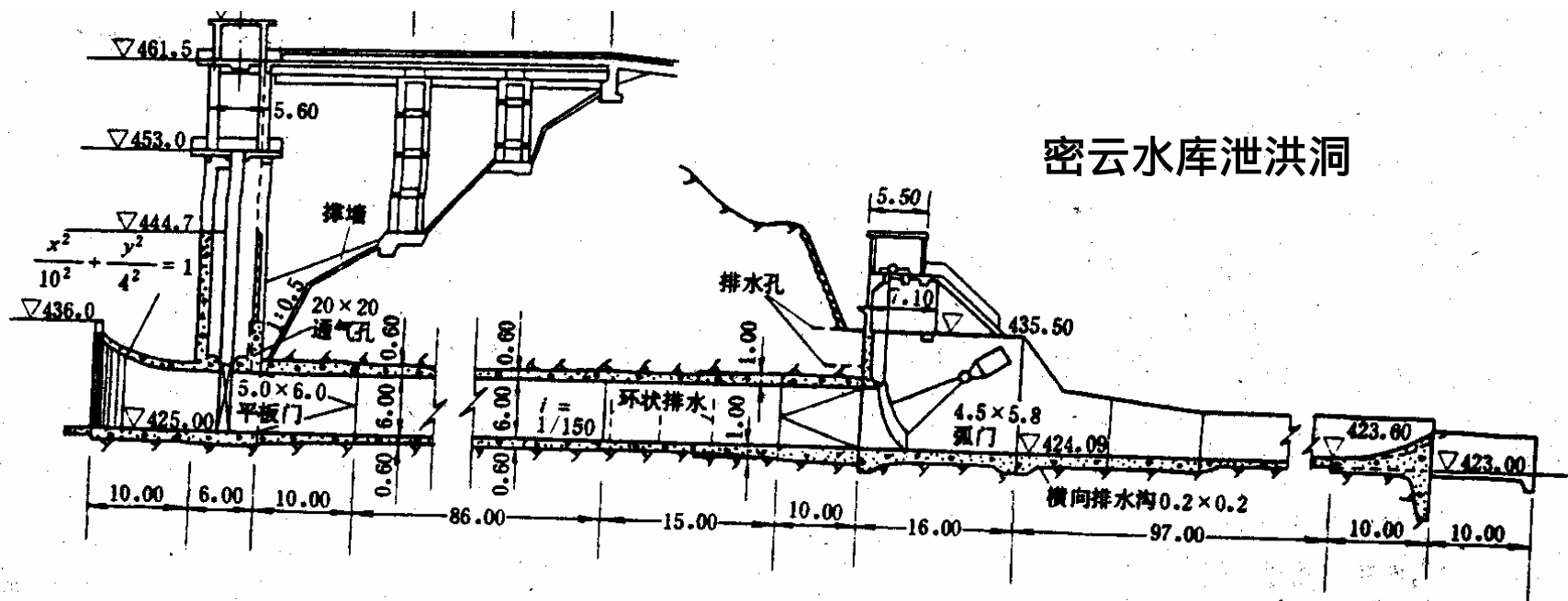
1. 工作闸门在进口



优点：检修门、工作门均在首部，运行管理方便；洞内不受压力水流作用，有利岩体稳定；易于检修。

缺点：过流边界水压力小，易空蚀。

2. 工作闸门在出口

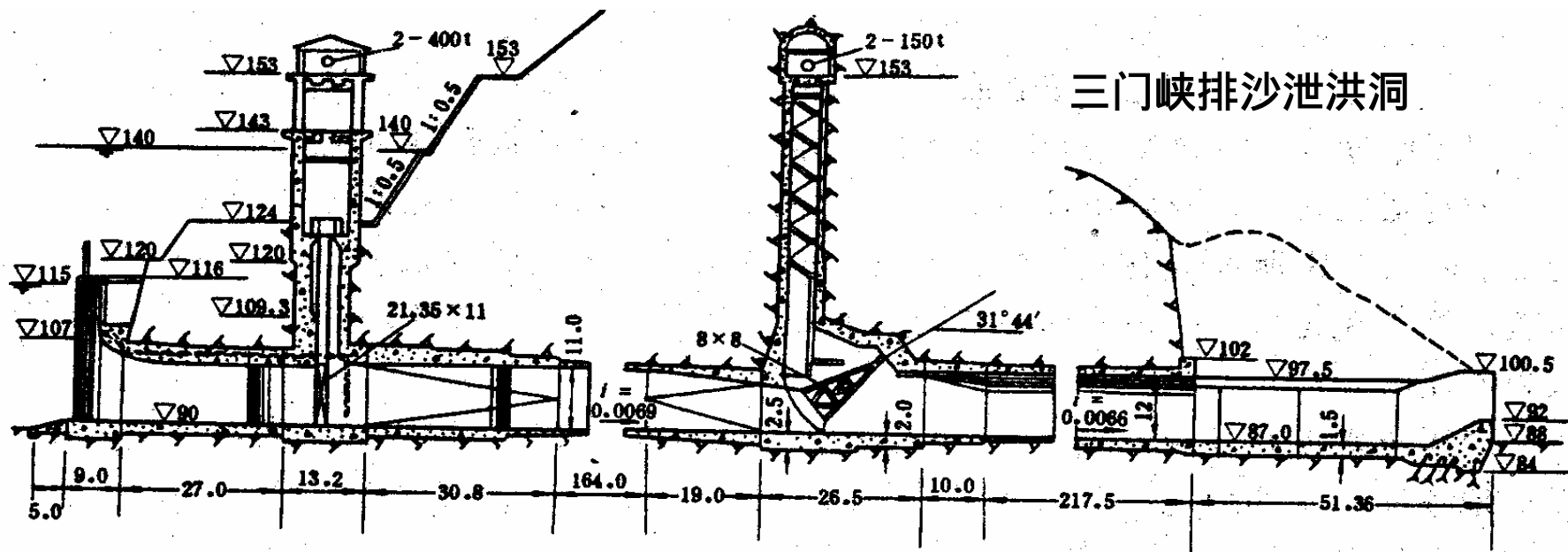


优点：

- 洞内流态平稳；
- 门后大气，便于闸门部分开启；
- 工作闸门控制结构较简单；
- 隧洞线路布置适应性强。

缺点：洞内承受较大内水压力，一旦衬砌漏水，对岩坡及土石坝等建筑物的稳定将产生不利影响。

3. 工作闸门在洞内



工作闸门前为有压洞段、闸门后为无压洞段

隧洞线路需转弯，为满足水流条件要求，将工作门设在弯道后的直线段。

洞内地质条件比出口处的好，可利用较强的岩体承受闸门传来的水推力。

三. 多用途隧洞布置

第三节 进口段

一. 进水口形式

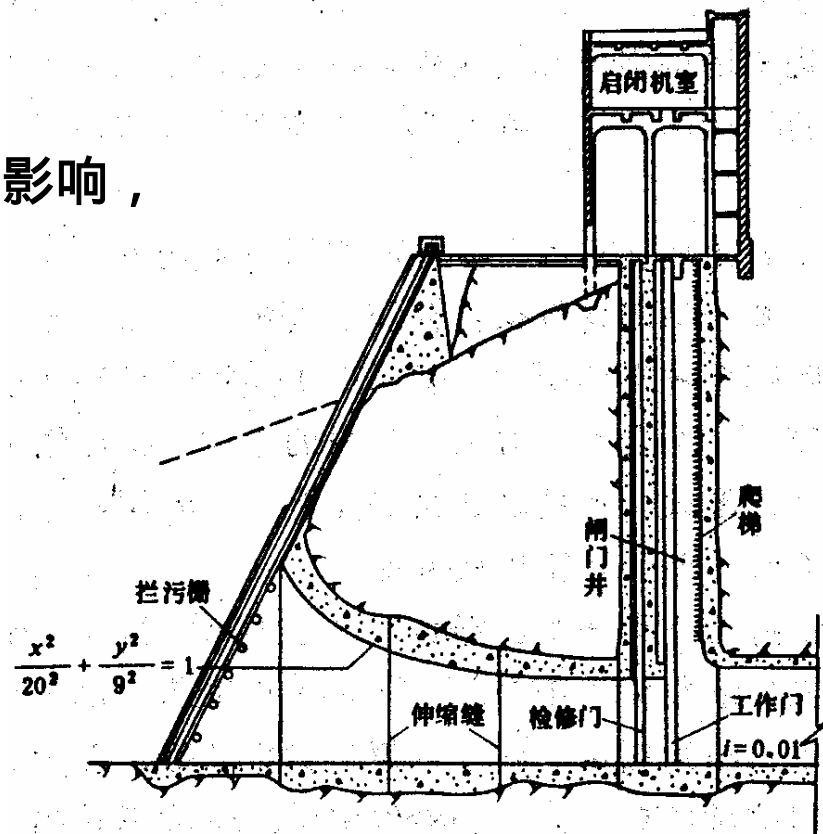
竖井式、塔式、岸塔式、斜坡式

1. 竖井式

优点：结构简单，不受风浪和冰的影响，抗震和稳定性好。

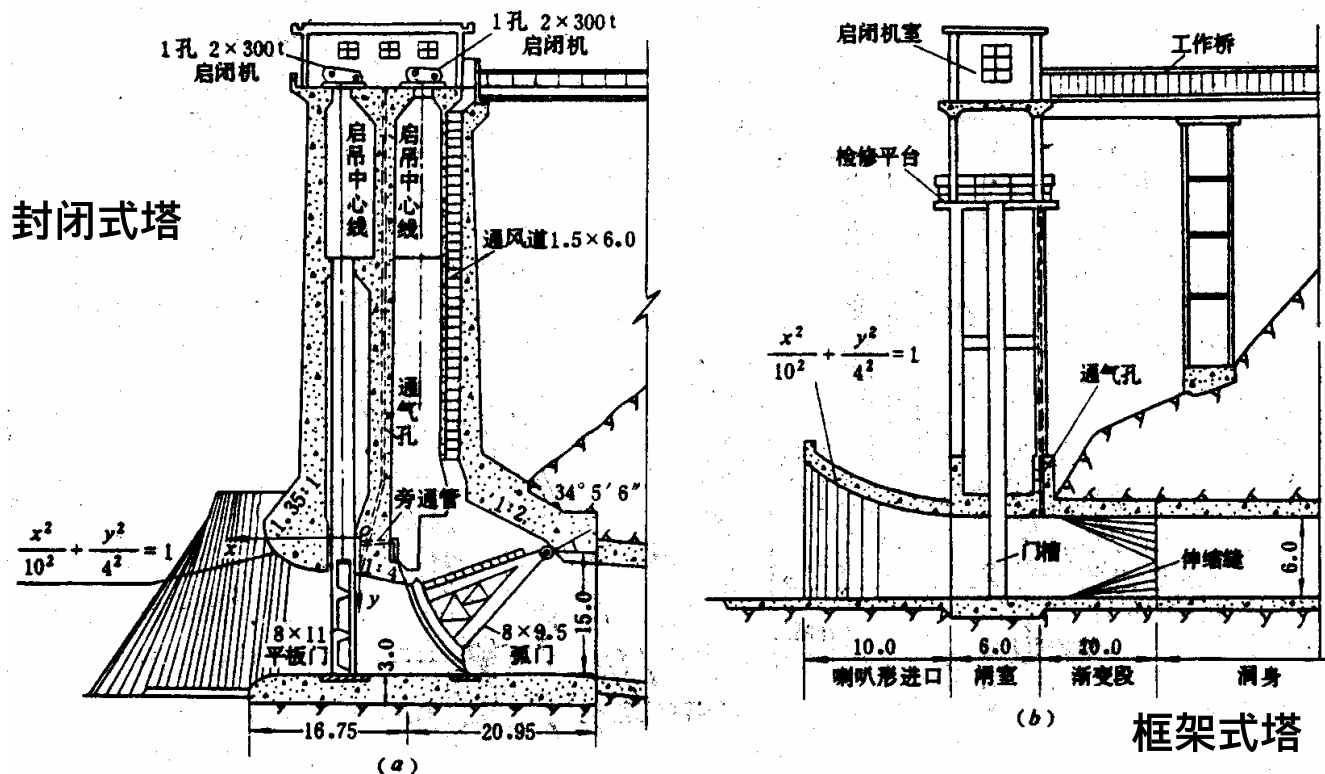
缺点：竖井开挖较困难，竖井前的隧洞检修不便。

适用条件：地质条件好、岩体比较完整的情况。



2. 塔式

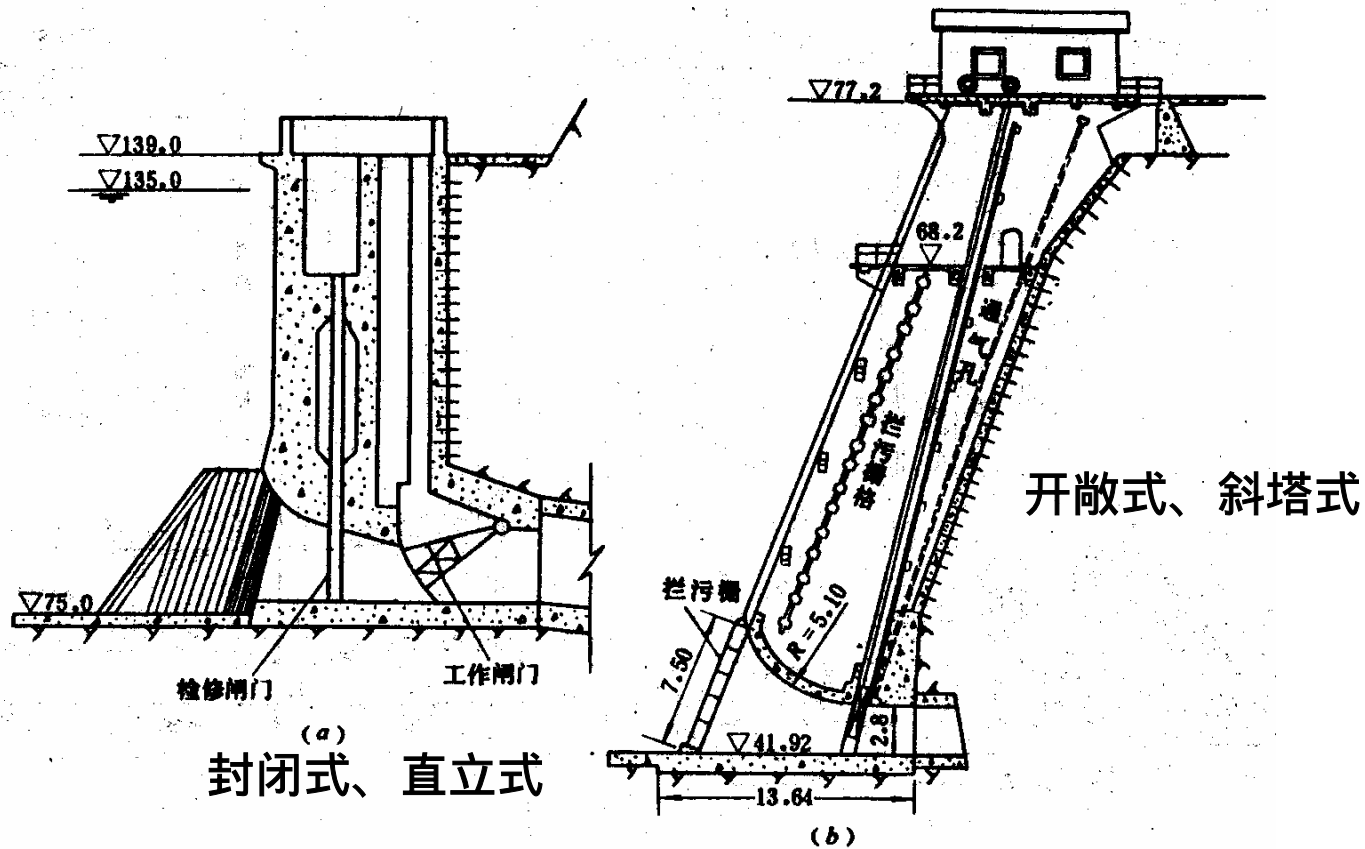
不依靠岩坡的封闭塔式或框架式塔，独立于隧洞首部。



缺点：受风、浪、冰、地震影响大，稳定性相对差；
需较长的工作桥与岸相连。

适用于：岸坡岩石较差，覆盖层较厚，不宜采用靠岸进水口的情况。

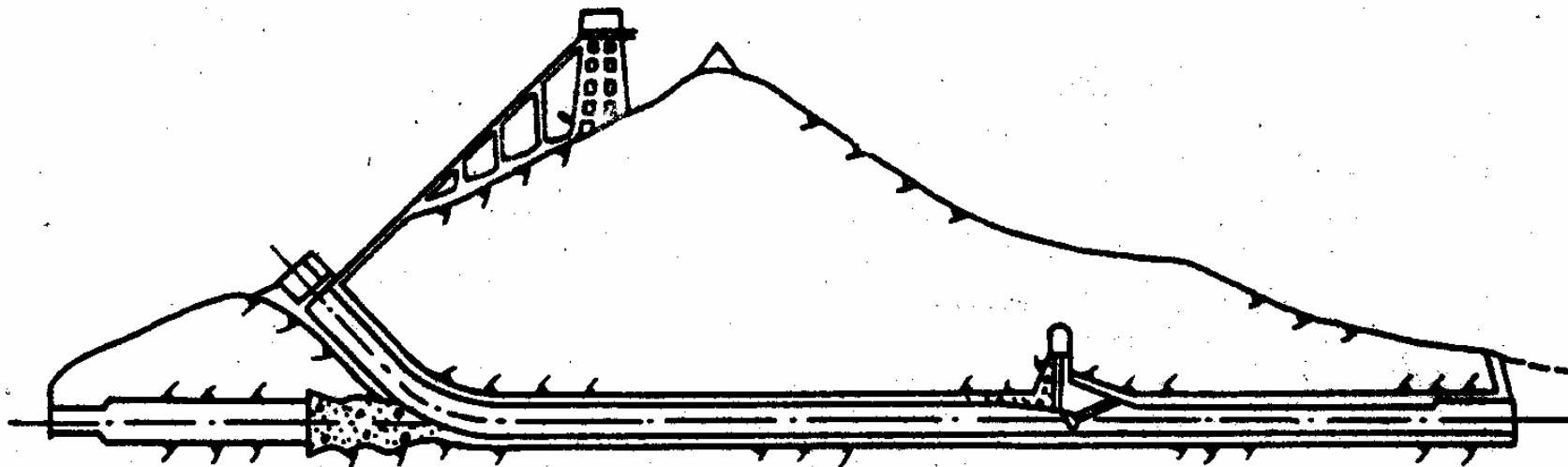
3. 岸塔式



进口靠在开挖后洞脸岩坡上，稳定性比塔式的好，并可对岩坡起一定的支撑作用，无需接岸桥梁。

适用于：岸坡较陡，岩体比较坚固稳定的情况。

4. 斜坡式



优点：结构简单，施工、安装方便，稳定性好，工程量小。

缺点：闸门不易靠自重下降；如进口不倾斜抬高则闸门面积将加大。

只用于：中小型工程或只安设检修闸门的进水口。

二. 进口段的组成

包括：进水喇叭口、闸门室、通气管、平压管和渐变段

1. 进水喇叭口

采用：顶板和边墙顺水流方向三面收缩的平底矩形断面。

其体形 { 应符合孔口泄流形态
避免产生不利负压和空蚀破坏
尽量减少局部水头损失，提高泄流能力。

顶板和边墙多采用椭圆曲线： $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$

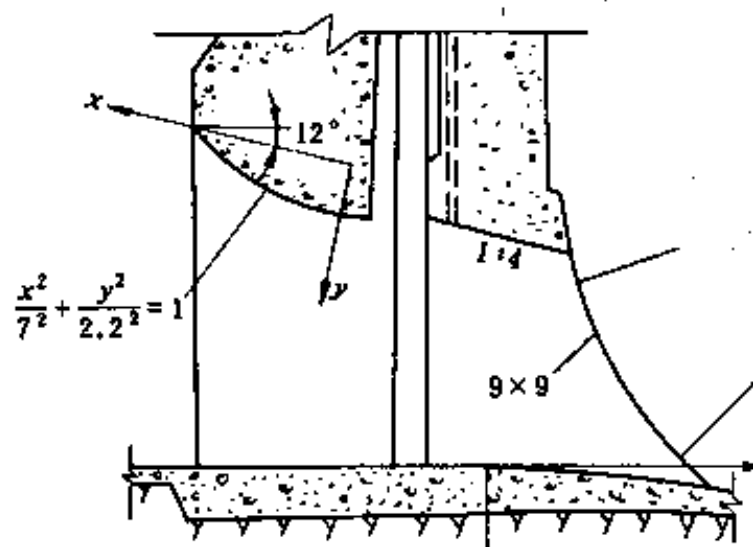
顶板： $a=H$ ， $b=H/3$

边墙： $a=B$ ， $b=(1/3\sim 1/5)B$

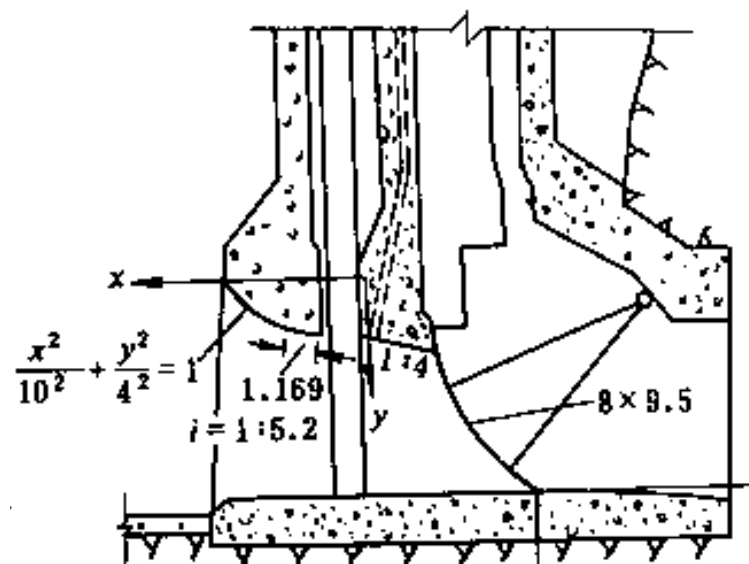
有压隧洞：顶板为长轴水平的1/4椭圆曲线。

无压隧洞：

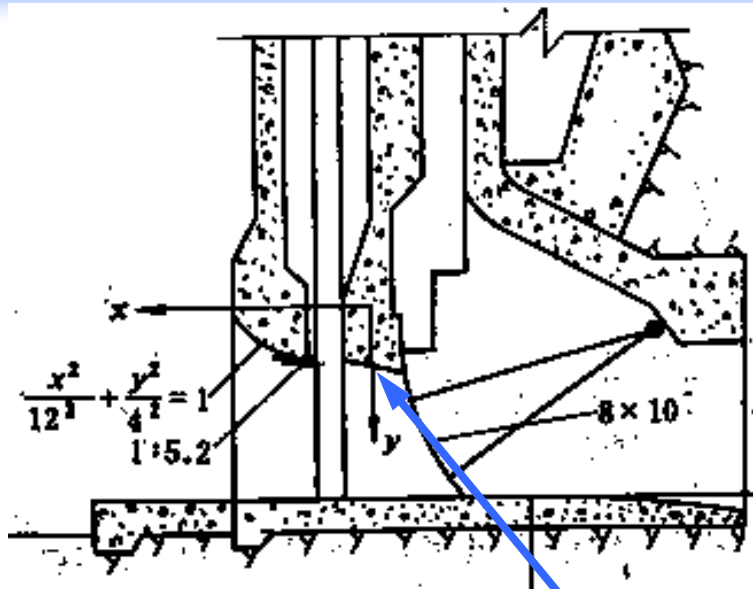
进水口为一短的压力管，顶板曲线与有压隧洞不同。



长轴倾斜（乌江渡）



长轴水平接倾斜直线段
（刘家峡）



长轴水平但检修门槽上游边缘切线斜率不缓于1:10（碧口）

2. 通气孔

压坡段（1:4~1:6）

设置在进水口或中部闸门后

目的 { 工作闸门后补气，可降低门后负压，稳定流态，避免振动和空蚀。
放空洞水时补气——检修
开启检修门时，可排气。

3. 拦污栅

4. 渐变段、闸门室及平压管

（同泄水重力坝）

第四节 洞身段

一. 洞身断面形式

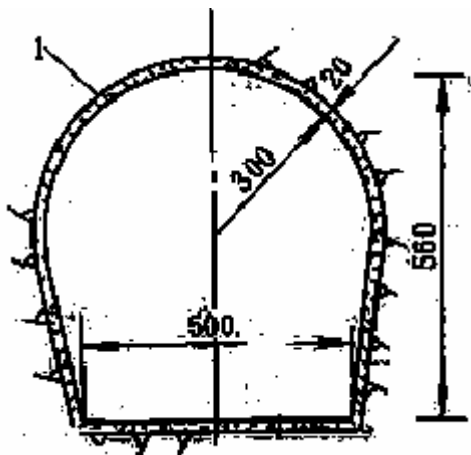
取决于水流流态、地质条件、施工条件及运行要求。

1. 无压隧洞的断面形式

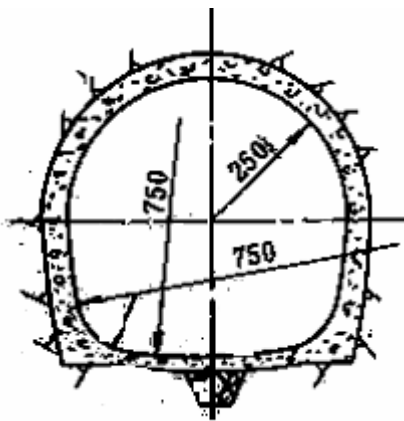
城门洞型：适宜承受铅直围岩压力，便于开挖和衬砌。

顶拱中心角： $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$

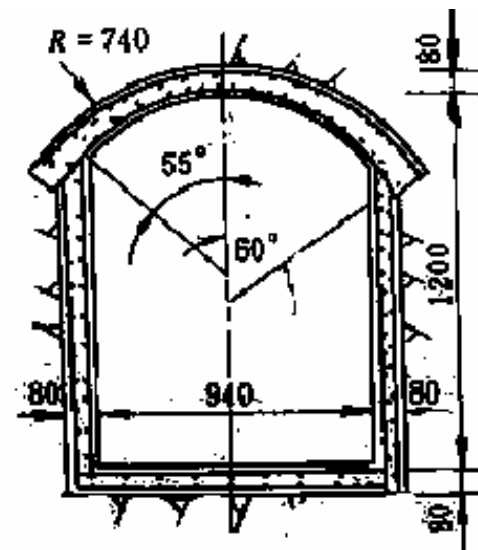
断面高宽比： $1 \sim 1.5$



水平地应力大于铅直地应力



围岩条件差



圆形断面：围岩条件差，且有较大外水压力采用

2. 有压隧洞的断面形式

圆形——水流条件和受力条件较好

二. 洞身断面尺寸

根据运用要求、泄流量、作用水头及纵剖面布置，通过水力计算确定。

水力计算的主要任务

- 有压隧洞：核算泄流能力及沿程压坡线
- 无压隧洞：核算泄流能力和水面线

1. 有压隧洞

泄流能力 $Q = \mu A \sqrt{2gH}$

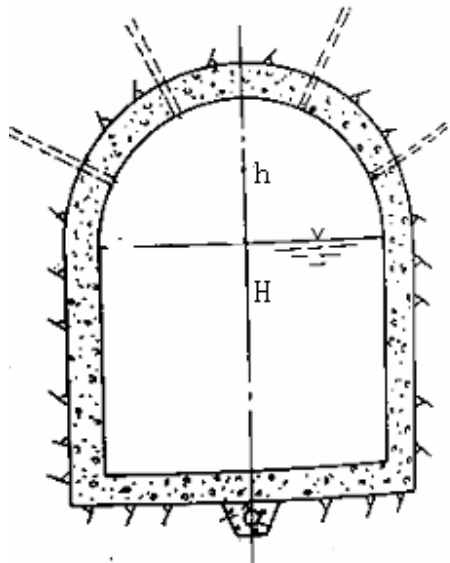
压坡线——根据能量方程分段推求，全线洞顶至少有2m的水头余幅。

2. 无压隧洞

泄流能力：堰流、管流（上式）

水面线——能量方程求解

流速大于15~20m/s，高速水流问题



城门洞形

要求：净空断面积不小于洞身断面积的15%，
高度不小于40cm。

h/H 15% ~ 25%，水面线在直墙范围内

刘家峡：龙抬头斜坡段 $h/H=25%$ ；
水平段 $h/H=63%$ 。

最小断面尺寸：圆形内径1.8m，非圆形断面1.5m × 1.8m

三. 洞身衬砌

1. 衬砌的作用

限制围岩变形、保持围岩稳定
承受围岩压力、内水压力等荷载
防止渗漏、减小表面糙率

保护岩石免受水流、空气、温度、干湿变化等的冲蚀破坏作用

2. 衬砌的类型

(1) 平整衬砌

不承受作用力，只起减小糙率、防止渗漏及保护岩石不受风化的作用。

混凝土、浆砌石或喷混凝土

适用于：围岩条件较好，能自行稳定，且水头低、流速小的情况

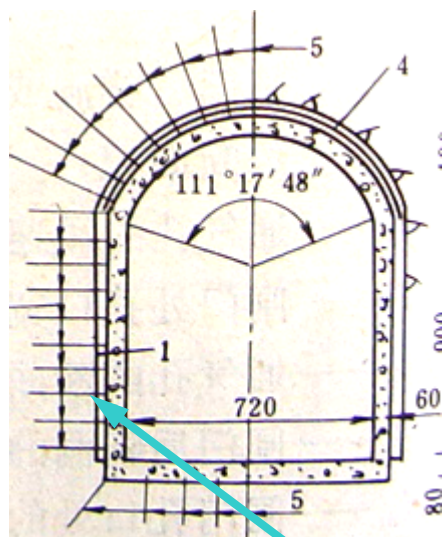
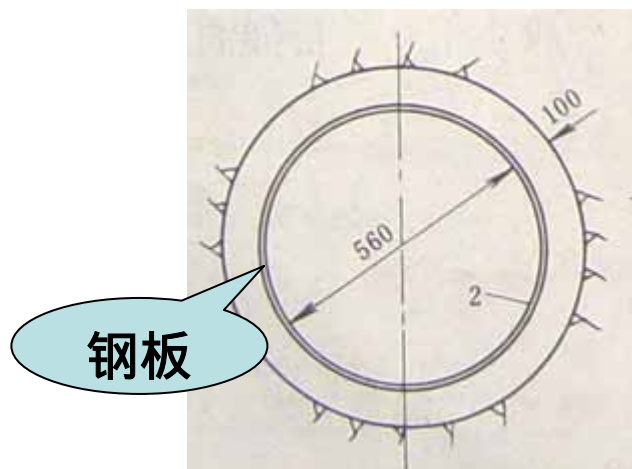
(2) 单层衬砌

混凝土、钢筋混凝土或浆砌石

适用于：中等地质条件，断面大、H大、v较高情况

$t=(1/8\sim 1/12)R$ 或 B ，且不小于25cm，衬砌计算确定

(3) 组合衬砌



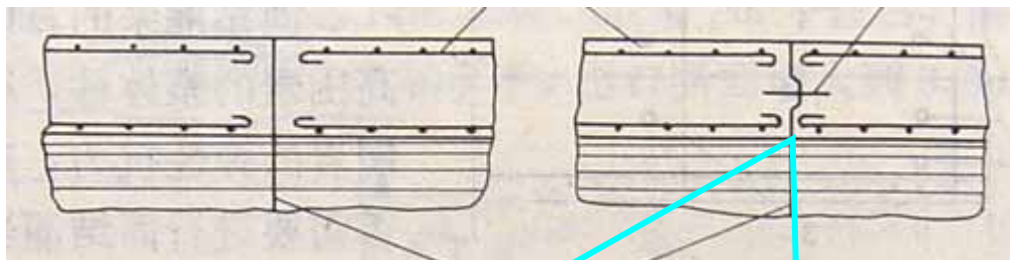
对于软弱破碎的岩体，其自稳能力差、易塌方，可先喷锚支护、再混凝土或钢筋混凝土衬砌。

衬砌类型选择：

应根据隧洞的任务、地质条件、断面尺寸、受力状态及施工条件等确定。

3. 衬砌分缝

环向伸缩缝：6~12m

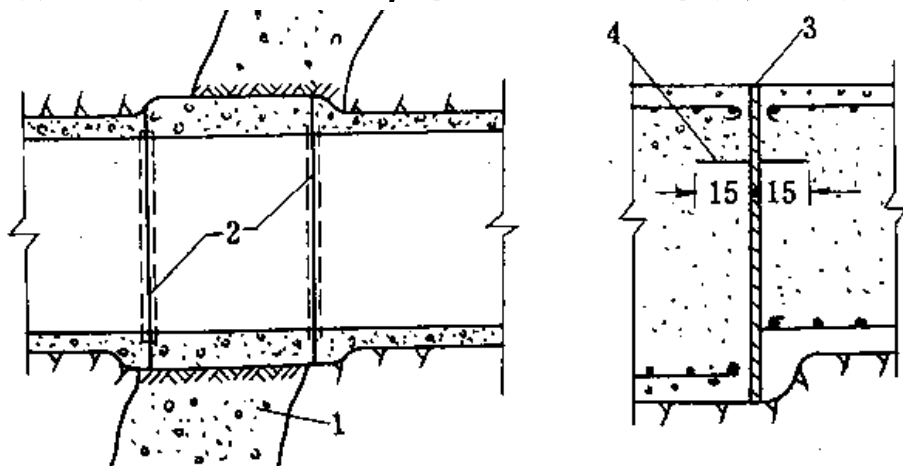


有压洞及有防渗要求的无压洞

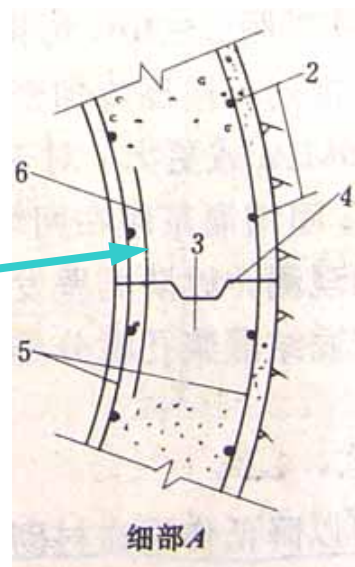
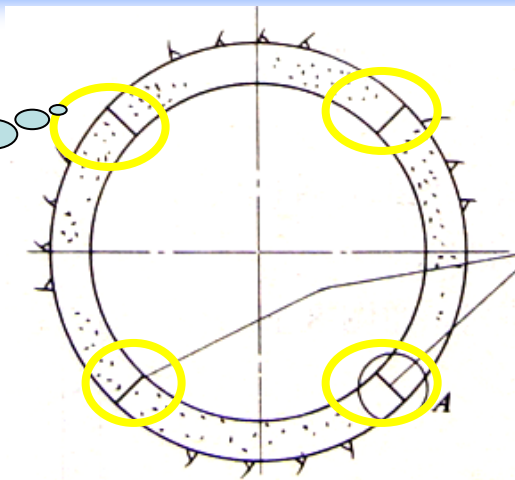
纵向施工缝

设在拉应力、剪应力小的部位

纵缝需凿毛处理，有时增设插筋加强整体性，必要时设止水。



纵向施工缝



闸室、渐变段、洞身交接处及衬砌形式、厚度改变，可能发生相对位移的部位，应设环向伸缩缝。

4. 灌浆

回填灌浆、固结灌浆

回填灌浆目的：

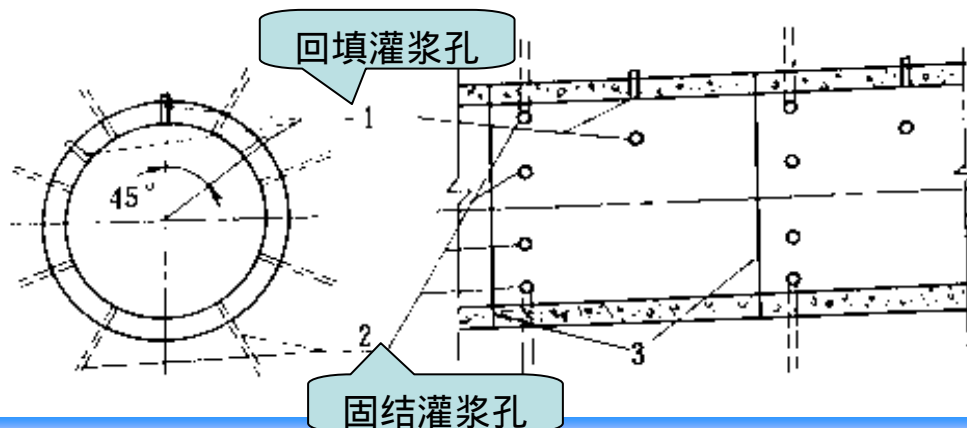
充填衬砌与围岩之间的空隙，使之结合紧密、共同受力，发挥围岩的弹性抗力作用，并减少渗漏。

范围：顶拱中心角 $90 - 120^\circ$ 内，孔、排距 $2 - 6\text{m}$ ，孔深入围岩 50mm 以上

固结灌浆目的：

加固围岩，提高围岩的整体性，减小围岩压力，保证围岩的弹性抗力，减少渗漏。

每排不少于6孔，孔位对称布置，排距 $2 - 4\text{m}$ ，灌浆深度可取 0.5 倍洞径



1. 围岩压力（山岩压力）：

隧洞开挖后，由于围岩变形或崩塌，作用在支护或衬砌上的压力。围岩压力是相对衬砌或支护而言的。

?? 没有支护或衬砌，是否存在山岩压力？

2. 弹性抗力

衬砌受到内水压力后，会朝向围岩变形，围岩对衬砌呈现出的一种被动抗力。

弹性抗力的存在，说明衬砌与围岩共同作用，从而可减小由荷载（内水压力）产生的衬砌内力，对衬砌是有利的。

5. 排水

径向排水孔

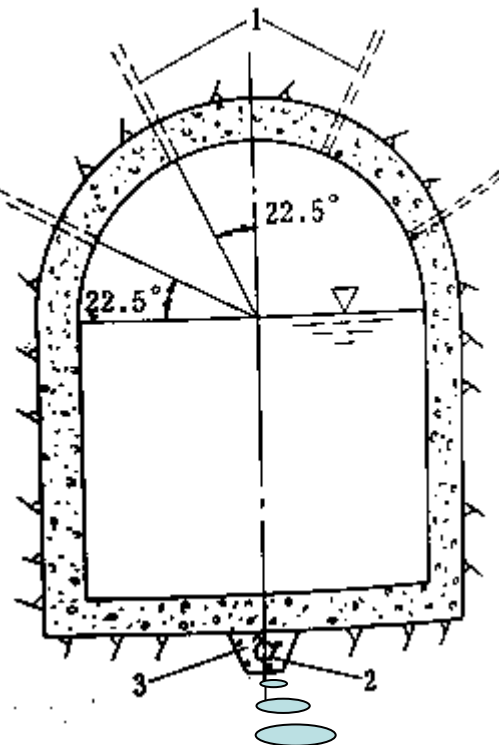
目的：降低作用在衬砌上的外水压力

有压隧洞：外水压力一般不控制衬砌设计。

当外水位很高，对衬砌起控制作用时，可在衬砌底部设纵向排水管，通至下游。

城门洞形无压隧洞：

外水压力对衬砌的结构应力影响很大，可在洞底设排水管，在洞内水面以上，通过衬砌设排水孔（排水孔间距2 - 4m，孔深可深入岩石2 - 4m）。



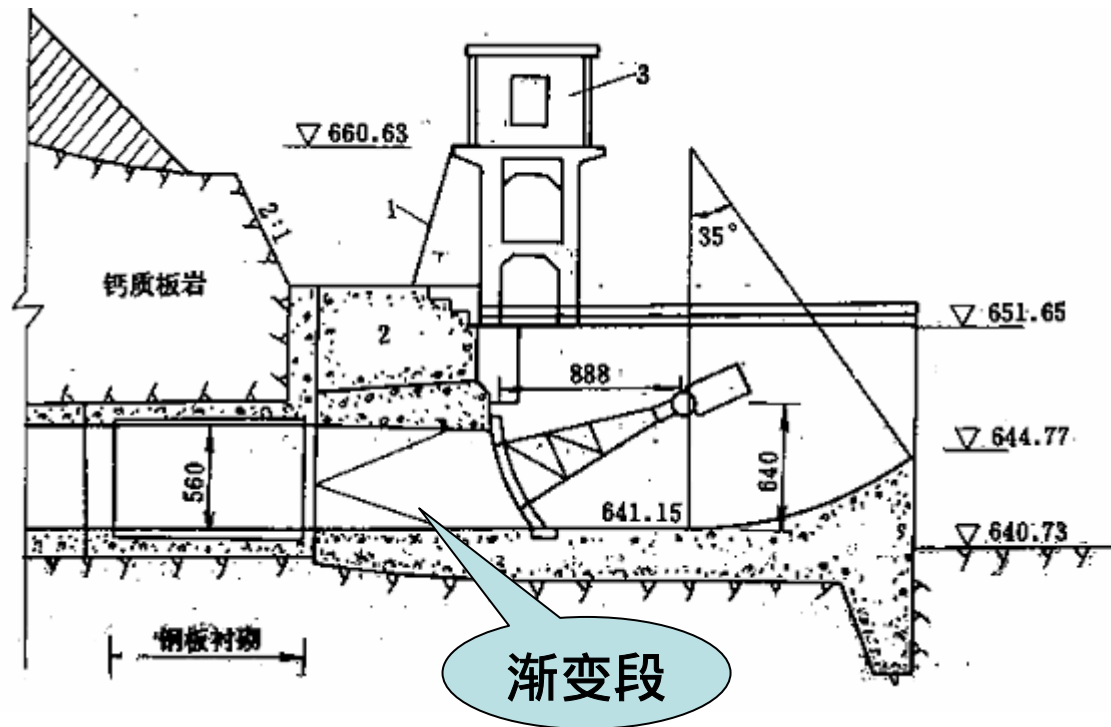
纵向排水管

第五节 出口段及消能设施

一. 出口段的结构布置

1. 有压隧洞出口：

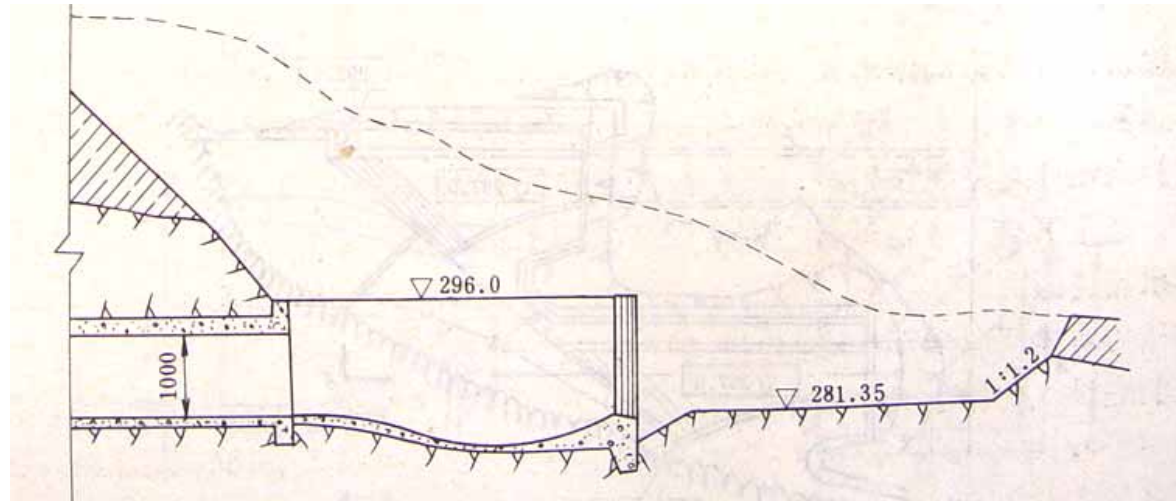
设有工作闸门及启闭设备、渐变段（圆形——矩形）、消能设施



!! 出口渐变段，以顶板、侧墙三面收缩、底板水平为好，否则洞顶会出现负压。

2. 无压隧洞

出口仅设门框



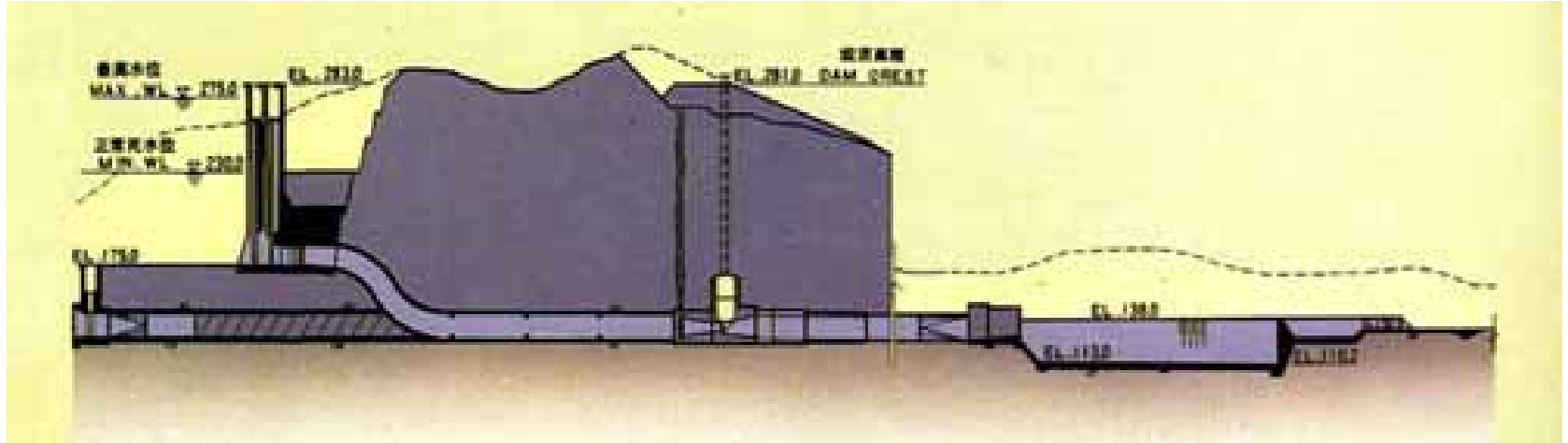
防止洞脸及上部岩石崩塌，并与消能设施的两侧边墙相衔接。

二. 消能设施

- 挑流
 - 扩散式挑流
 - 收缩式窄缝挑流
- 底流

3. 洞中突扩消能

小浪底泄洪洞，为了解决导流洞改建为永久泄洪洞带来的高压力、高流速、强磨蚀问题，在国内首次采用了多级孔板消能这一新型的消能工。



消能后， $v=35\text{m/s}$

总结与思考

1. 如何进行隧洞的线路选择
2. 隧洞进水口的结构形式、特点及适用条件
3. 进口段的组成、设计特点
4. 洞身断面形式、特点及断面设计
5. 有压隧洞出口闸门前的渐变段，宜采用顶板侧墙三面收缩而底板水平的布置形式，为什么？
6. 衬砌的作用、类型及适用条件。
7. 隧洞固结灌浆及回填灌浆的目的是什么？
8. 什么是山岩压力、弹性抗力？
9. 隧洞的消能设施有哪些形式？

第九章 水工建筑物的管理

一. 概述

水利工程管理：利用工程措施，对天然径流进行实时的时空再分配，即合理调度，满足各种需要。



水工建筑物管理：保持建筑物和设备经常处于良好的技术状况。

正确使用工程措施、调度水资源发挥工程效益、防止工程事故

以大坝为中心的水利工程的“安全监测和检查”属于水工建筑物的技术管理。

主要工作：检查与观测、养护修理、调度运用、水利管理自动化系统的运用（大坝安全自动监控系统、防洪调度自动化系统等）、实验研究、积累分析技术资料并建立技术档案。

二. 水工建筑物监测

包括：现场检查和仪器监测

1. 现场检查

检查内容 { 土工建筑物：边坡或坝(堤)脚的裂缝、渗水、塌陷等
混凝土建筑物：坝顶、坝面、廊道、消能设施等的裂缝、渗漏、表面脱落、侵蚀等

经常检查、定期检查、特别检查

2. 仪器监测

(1) 变形观测

水平位移、铅直位移

(2) 裂缝观测

永久性伸缩缝——测缝计

(3) 应力（应变）及温度观测

应力（应变）计、钢筋计、土压力计等

(4) 渗流观测

主要内容：渗漏量、扬压力、孔隙水压力、浸润线、绕坝渗流、
渗水透明度等

土石坝：渗漏量、坝体孔隙水压力、浸润线、绕坝渗流、
渗水透明度等

混凝土建筑物：

渗漏量、坝基扬压力、坝体内部渗透压力、绕坝渗流

(5) 水流观测

水位、流速、流向、流量、流态、水跃和水面线等

总结与思考

1. 水工建筑物仪器监测的内容
2. 土石坝渗流观测的内容
3. 混凝土建筑物渗流观测的内容