



黄河水利职业技术学院

YELLOW RIVER CONSERVANCY TECHNICAL INSTITUTE



# 8-2 水工隧洞构造



李梅华

2020年12月26日

# 教学目标

## 素质目标

1. 激发学习兴趣，培养创新意识；
2. 树立追求卓越、精益求精的岗位责任，培养工匠精神；
3. 传承大禹精神、红旗渠精神、抗洪精神、愚公移山精神，增强职业荣誉感，民族自豪感。

## 知识目标

1. 了解水工隧洞进口建筑物分类、特点、适用条件；
2. 掌握水工隧洞的进口段组成、作用、结构；
3. 掌握水工隧洞洞身衬砌作用、特点、构造、使用条件；
4. 掌握水工隧洞的洞内消能及宽尾墩的方法、特点。

## 技能目标

1. 能识读水工隧洞设计图；
2. 能指出设计图中进口建筑物的型式。
3. 能讲述固结灌浆、回填灌浆的布置；
4. 能说出设计图中采用的消能方式；
5. 能指出设计图中进口段各个部位名称、型式。

# 主要内容



01 进口建筑物

02 进口段

03 洞身段

04 出口段

国之重器——白鹤滩水电站，创造了多项世界第一。

- (1) **单机容量100万kW居世界第一**。电站首次全部采用国产单机容量百万千瓦级水轮发电机组，使我国水电制造技术从“追赶”走向“引领”。
- (2) **地下洞室群规模世界第一**。电站各类洞室总长度达217km，洞室开挖量达2500万m<sup>3</sup>，是国内外水电工程中规模最大的地下洞室群。
- (3) **300m级高坝抗震参数世界第一**。电站最大坝高289m，属于300m级特高拱坝，抗震参数在300m级特高拱坝中居世界第一。
- (4) 首次在300m级特高拱坝全坝使用低热水泥混凝土。这在国际上尚属首例，其应用可保证大坝基本上不产生宏观裂缝，**打破了“无坝不裂”这个魔咒**。
- (5) **无压泄洪洞群规模世界第一**。电站3条泄洪洞均呈直线布置在左岸，最大泄量为12300 m<sup>3</sup>/s，单侧泄量世界第一。

# 白鹤滩水电站泄洪洞

## 案例

白鹤滩水电站布置的3条无压泄洪洞，工程规模世界第一，洞身具有高水头、大流量、高流速特点，是目前世界最大的无压泄洪洞群。2020年12月19日，泄洪洞工程顺利完工。3条泄洪洞最大泄量1.2万 $\text{m}^3/\text{s}$ ，流速47 $\text{m}/\text{s}$ ，18min能灌满西湖。

每条泄洪洞洞身均由进口渐变段、上平段、龙落尾段、挑流鼻坎4个部分组成，总长为6.7公里，洞身断面呈城门洞型。进水塔采用岸塔式结构，3个岸塔式进水口相对独立“一”字布置，塔顶高程834.0m，塔体尺寸40m $\times$ 28m $\times$ 69m(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。进口为短有压进水口，进水口底槛高程770.00m，塔顶高程834.0m（与大坝坝顶齐平）。



1 进水口。泄洪洞进水口位于左岸发电进水口与大坝之间，包括进水渠、进水塔和联系平台。3 个岸塔式进水口之间相对独立、“一”字齐平布置，从里到外依次编号为1#、2# 和3# 进水塔。每个进水塔之间通过混凝土联系平台连接交通和门机轨道，塔后回填混凝土与左岸坝顶平台衔接。

每个进水塔内都设置有一道事故检修闸门、一道工作闸门，其中检修闸门通过布置在进水塔顶部的门机进行启闭。检修闸门下游设2 个通气孔，对泄洪洞进水口段进行通气。弧形工作闸门由液压启闭机启闭，检修闸门至工作闸门之间的流道周边设钢板衬护。

2 泄洪洞洞身。鹤滩泄洪洞洞身部分为无压洞段，无压洞断面为圆拱直墙型，由上平段和龙落尾段两部分组成。龙落尾段位于上平段下游，由渥奇曲线段、斜坡段和反弧段三部分组成，洞身段采用预应力混凝土衬砌。基于**薄壁结构衬砌**混凝土的**智能温控技术**、施工缝无缝施工工艺，解决了衬砌混凝土

**“无衬不裂”的世界难题**，过流面不平整度小于3毫米，实现了衬砌混凝土**精准、平整光滑、无缺陷**，养护状态下呈现镜面映射效果，在行业内被誉为“**镜面混凝土**”。

3.出口段。采用挑流消能，反弧段直接与挑流鼻坎连接。

树立追求卓越、精益求精的岗位责任、工匠精神；

# 白鹤滩水电站

## 问题

- 1.白鹤滩水电站布置了几条泄洪洞？是有压洞还是无压洞？
- 2.泄洪洞进口的进水塔采用岸塔式结构？为什么？除了这种结构，还有哪些进口建筑物？
- 3.如图，白鹤滩水电站泄洪洞的进水口结构，请看图指出工作闸门、检修闸门、喇叭口、通气孔的位置。
- 4.白鹤滩水电站泄洪洞洞身断面为城门洞形，泄洪洞的洞身断面还有哪些？
- 5.该泄洪洞洞身采用混凝土衬砌，作用是什么？

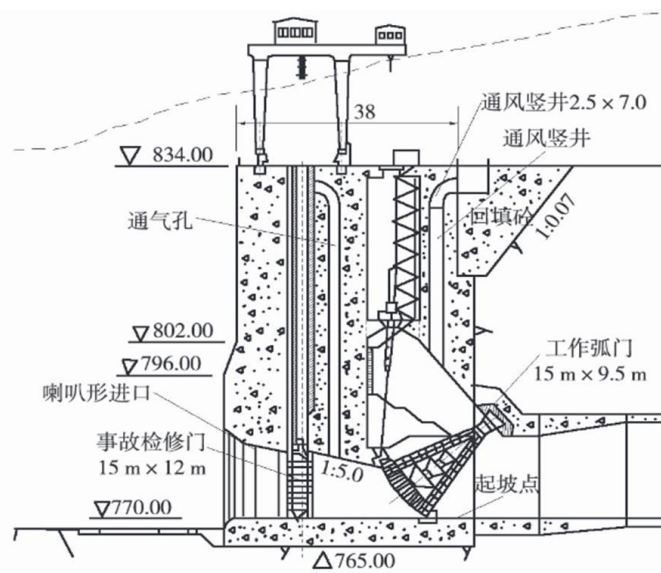
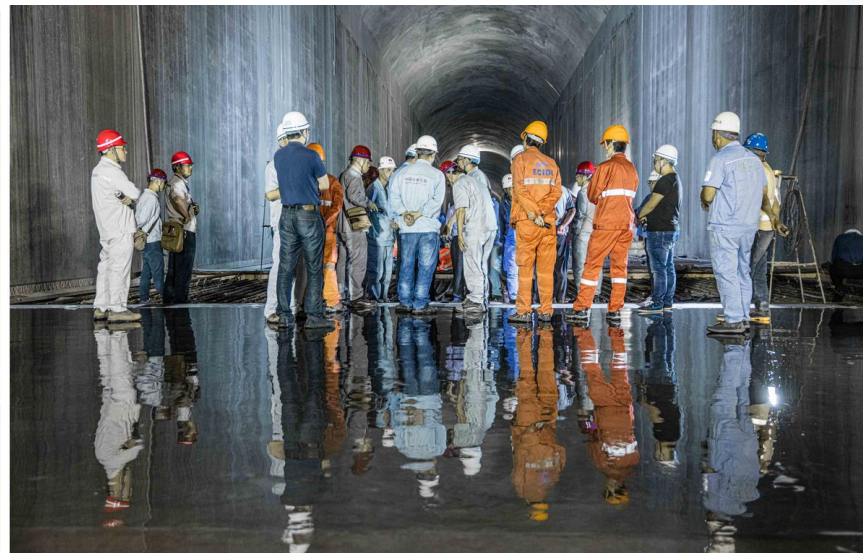


图1 进水口结构



泄洪洞“镜面”混凝土质量检查

# 一、进口建筑物

问题1：泄洪洞进口的进水塔采用岸塔式结构？为什么？除了这种结构，还有哪些进口建筑物？

## (1) 竖井式

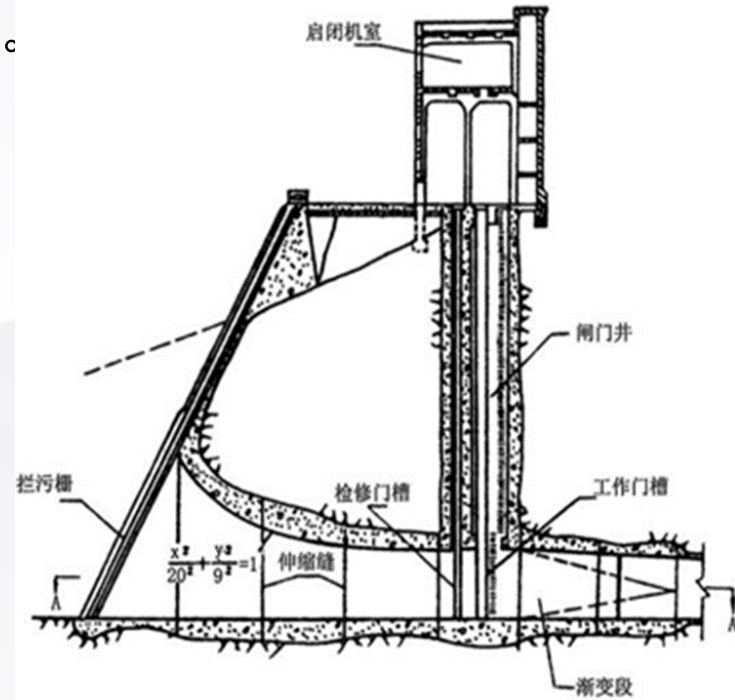
闸门竖井式进水口是岸式进水口的一种，在隧洞进口附近的岩体中开凿竖井，井顶布置启闭设备及启闭机室，进水口闸门井布置于山体竖井中，喇叭段入口设于岸坡上，喇叭段入口与闸门竖井之间流道为隧洞段，一般为有压水流。

**优点：**结构简单，节省工作桥，不受风浪和冰的影响，抗震及稳定性好。

**缺点：**竖井开挖困难，检修门前一段隧洞检修不便。

**适用：**河岸岩石坚固，开凿竖井无塌方危险。

{ 湿井：压力洞平面闸门的竖井，关门后有水。  
{ 干井：无压洞弧形闸门的竖井，关门后无水。





# 一、进口建筑物

## (1) 竖井式

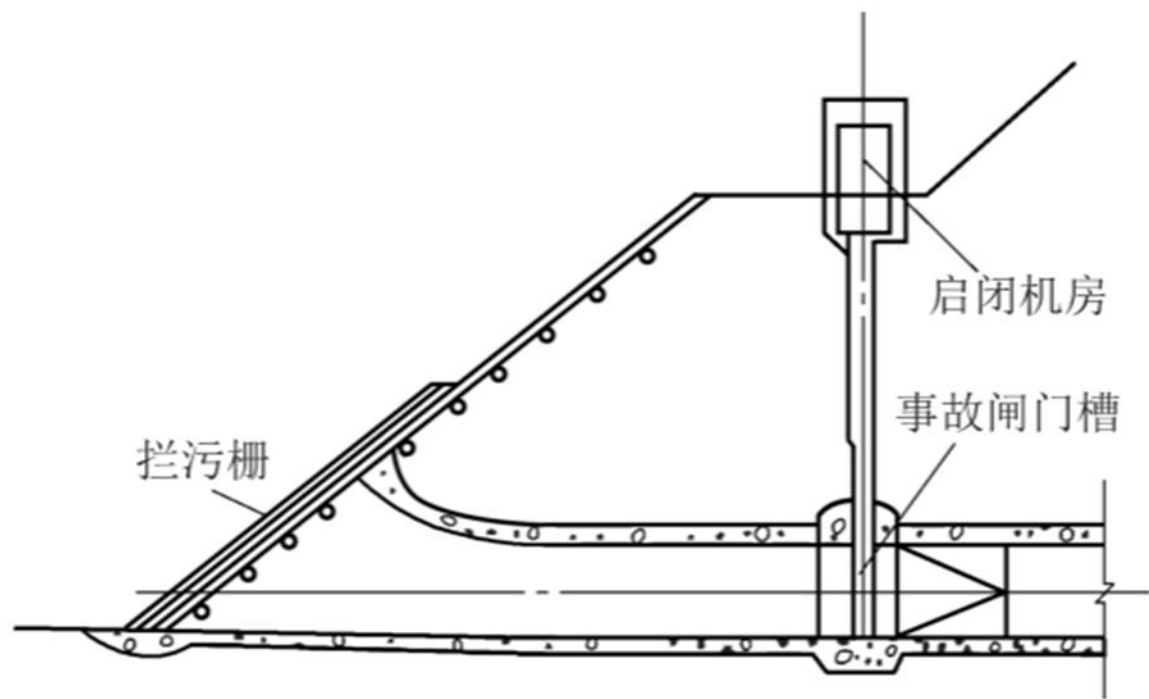


图 6 竖井式进水口

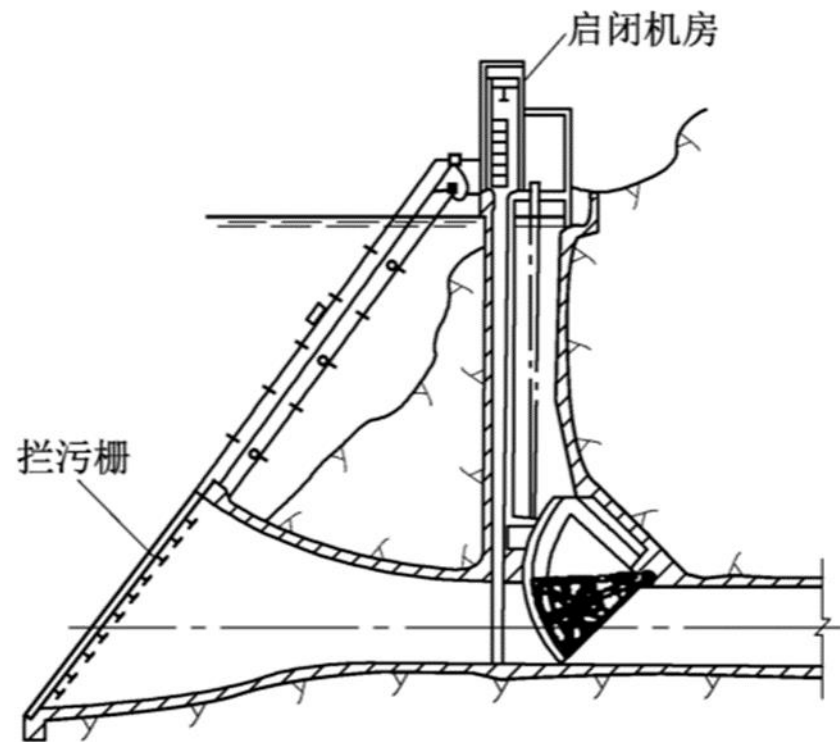


图 7 竖井式（泄水）进水口

# 一、进口建筑物

## (2) 塔式进口

塔式进口建筑物是独立于布置进水口。塔底设闸门，塔顶设检修平台和启闭机，用工作桥与岸坡相连。

优点：布置比较紧凑，闸门开启比较方便可靠。

缺点：受风浪、冰、地震的影响大，稳定性相对较差，需要较长的工作桥。

适用：河岸(库岸)地形过缓或因地质条件不宜在岸边设置进水口的引水工程。塔的结构形式有封闭式和框架式两种。

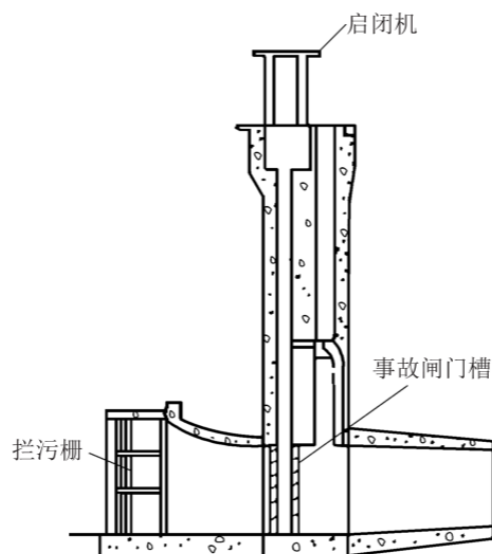


图 8 塔式进水口 (矩形)

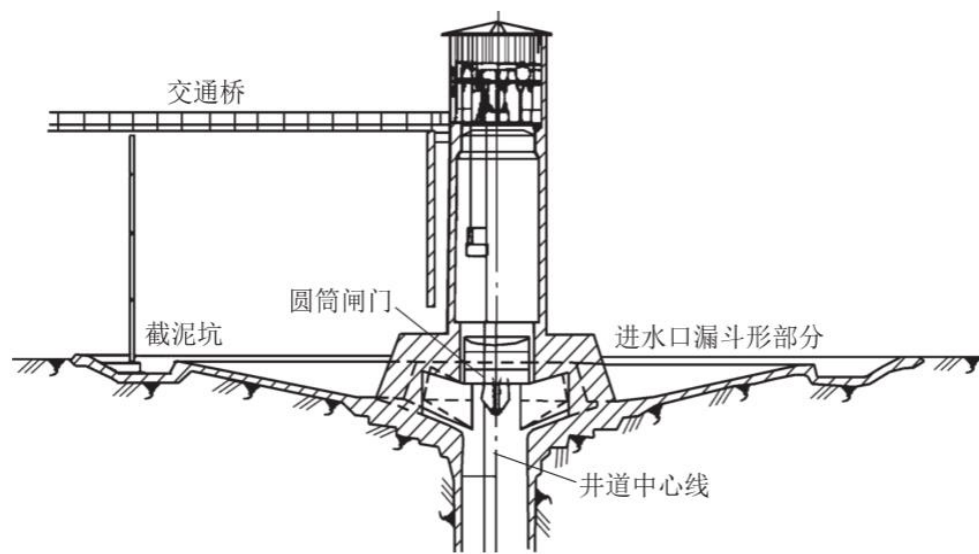
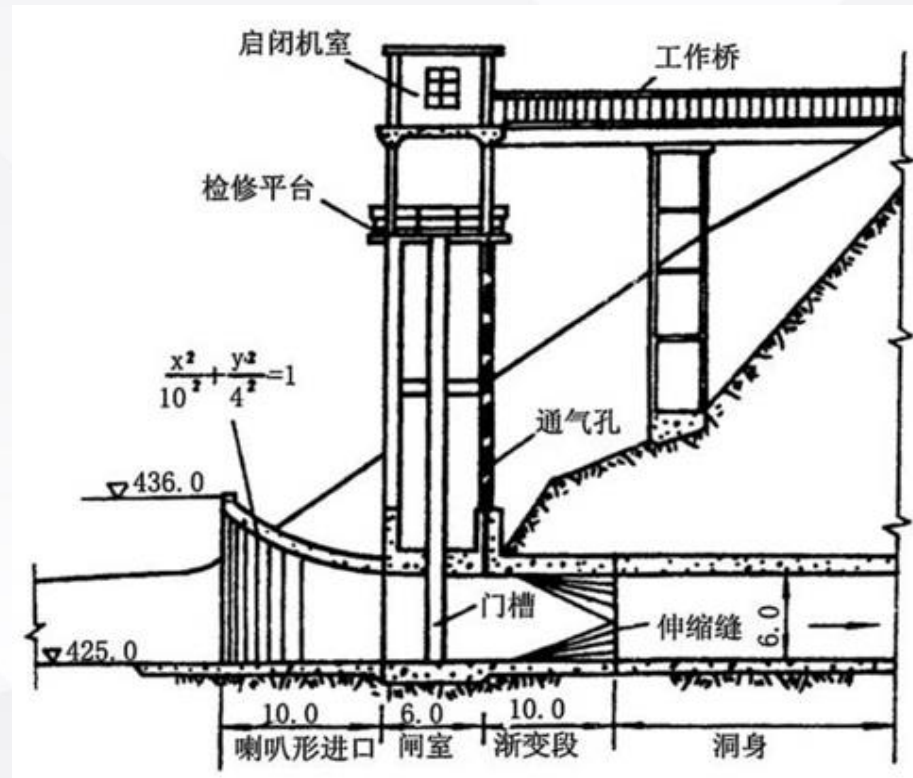


图 9 塔式进水口 (圆形)

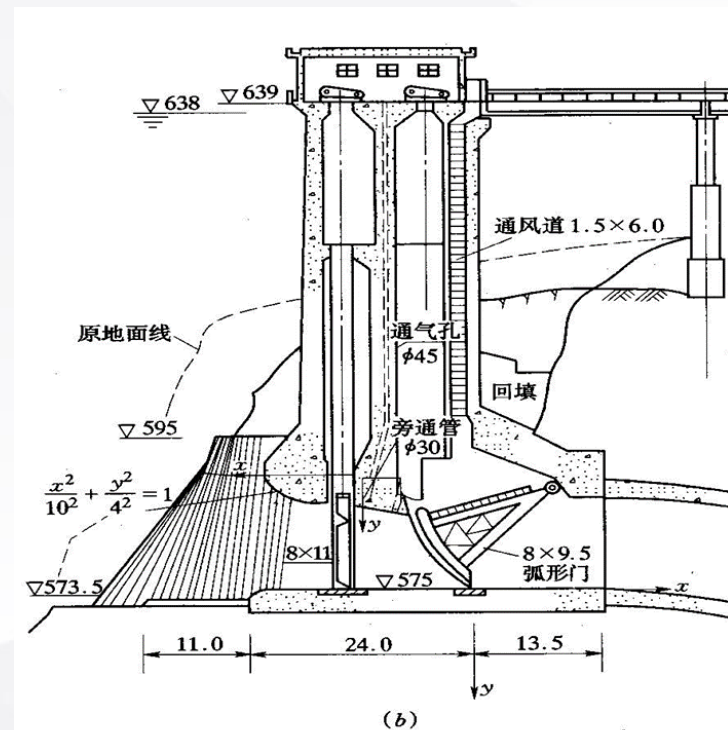
# 一、进口建筑物



陆浑水库输水洞进口建筑物



塔式进口建筑物（框架式）



塔式进口建筑物（封闭式）

## 一、进口建筑物

### (3) 岸塔式

靠在山体开挖后洞口岩坡上的进水塔，根据岩坡的稳定情况，塔身可以是直立的或倾斜的。其稳定性比塔式的好，还可对岩坡有一定的支撑作用，施工方便，不需要工作桥。适用于岸坡较陡、岩体比较坚固稳定的情况。

**优点：**稳定性比塔式好，造价比塔式省，施工方便，地形、地质条件许可时优先选用。

**缺点：**若倾斜，闸门也斜，启门力增加，不易靠自重关闭闸门。

**适用：**进口处岩石坚固，可开挖成近于直立的陡壁时。

# 一、进口建筑物

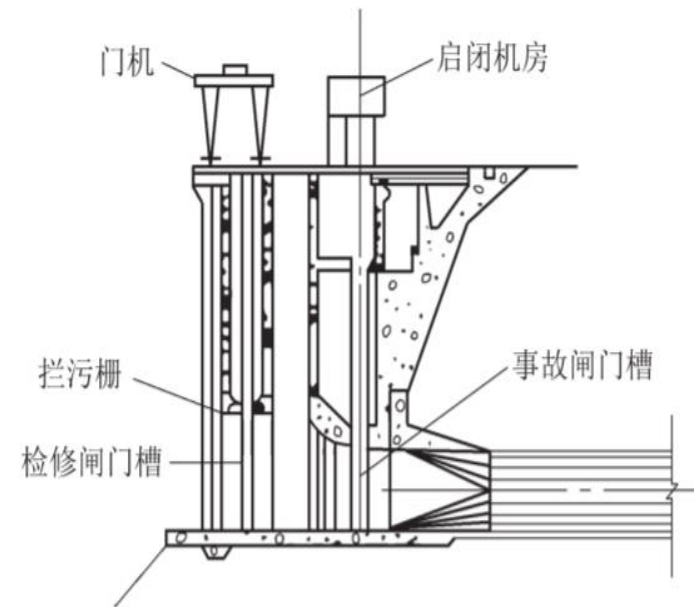
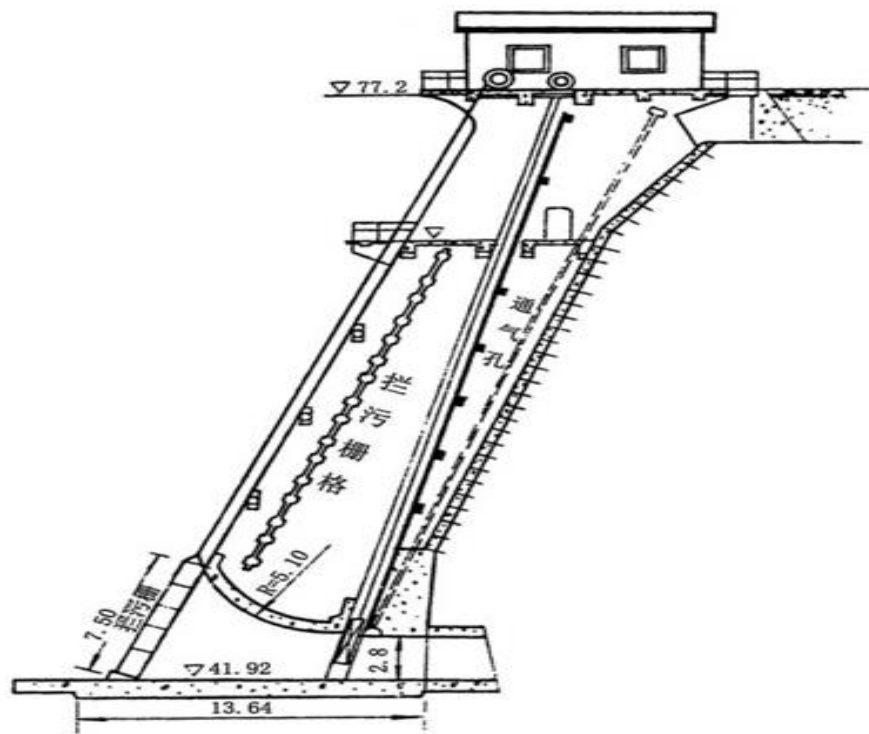


图4 岸塔式进水口

岸塔式进口建筑物

## 一、进口建筑物

### (4) 斜坡式

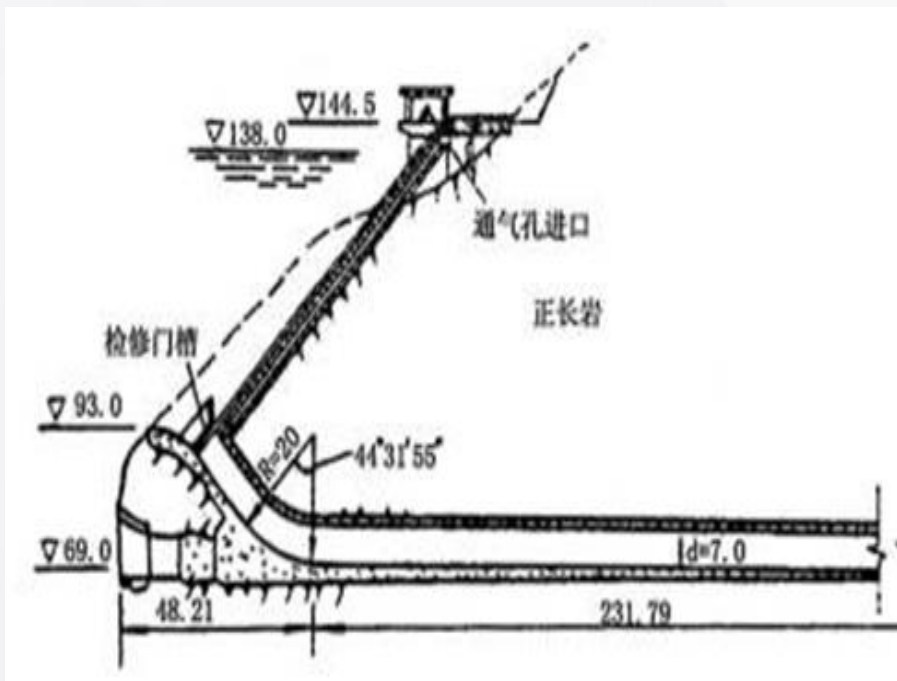
斜坡式进水口是在较完整的岩坡上进行平整、开挖、护砌而修建的一种进水口。闸门和拦污栅的轨道直接安装在斜坡的护砌上。

**优点：**结构简单，施工、安装方便，稳定性好，工程量小。

**缺点：**由于闸门倾斜，闸门不易依靠自重下降，闸门面积加大。

**适用：**斜坡式进口一般只用于中、小型工程，或只用于安装检修闸门的进口。

# 一、进口建筑物



斜坡式进口建筑物

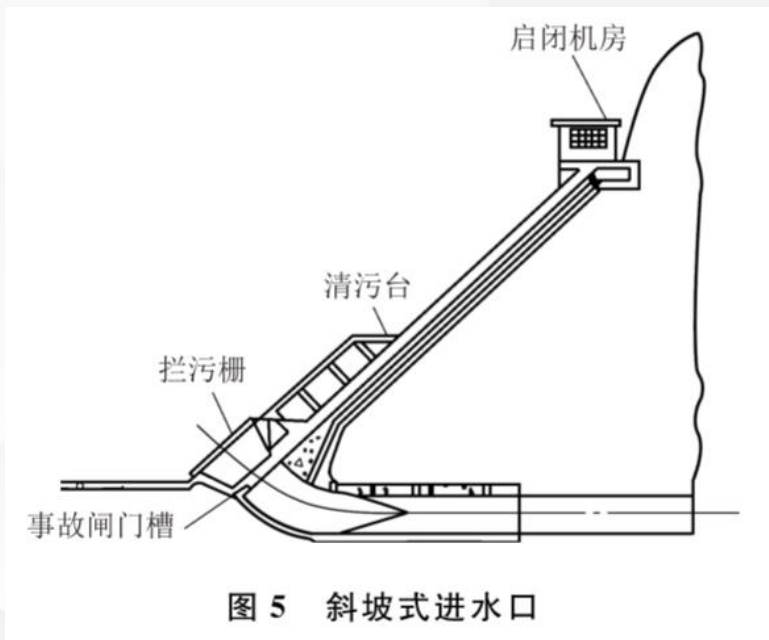


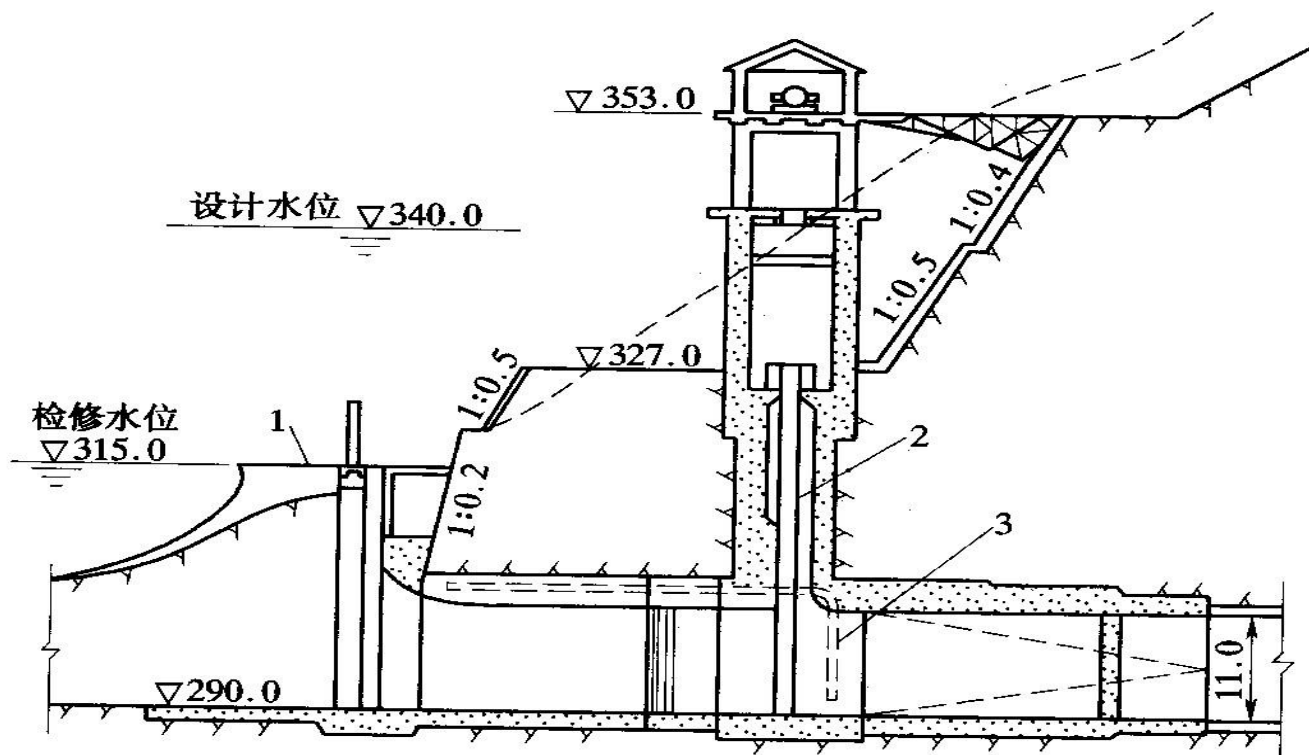
图5 斜坡式进水口



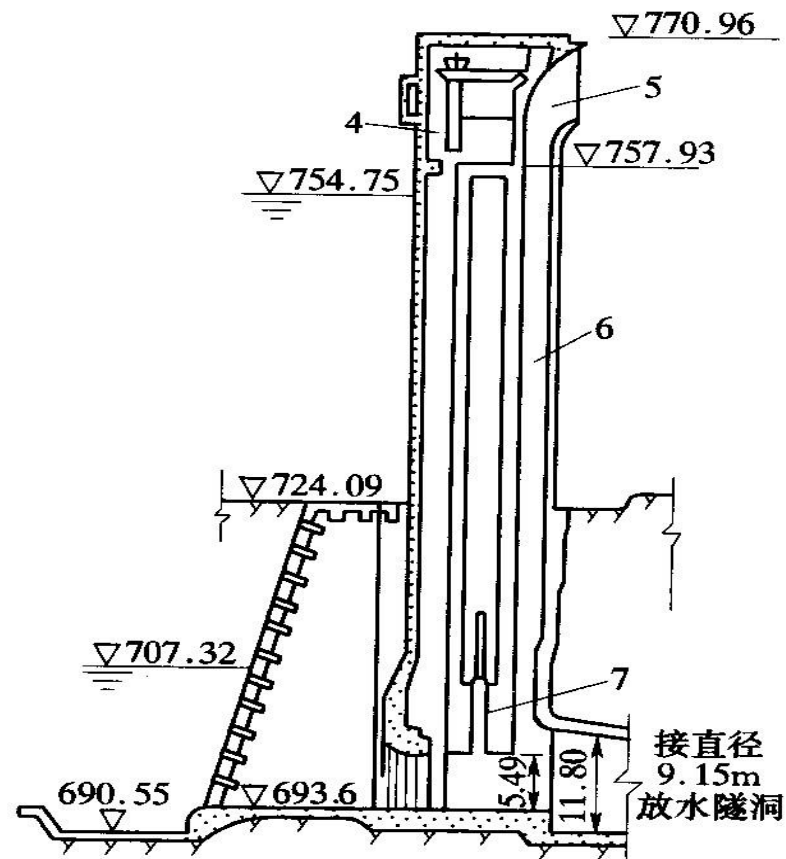
某水库斜坡式进口建筑物

# 一、进口建筑物

## 组合式进水口



(a) 三门峡泄洪洞进水口;

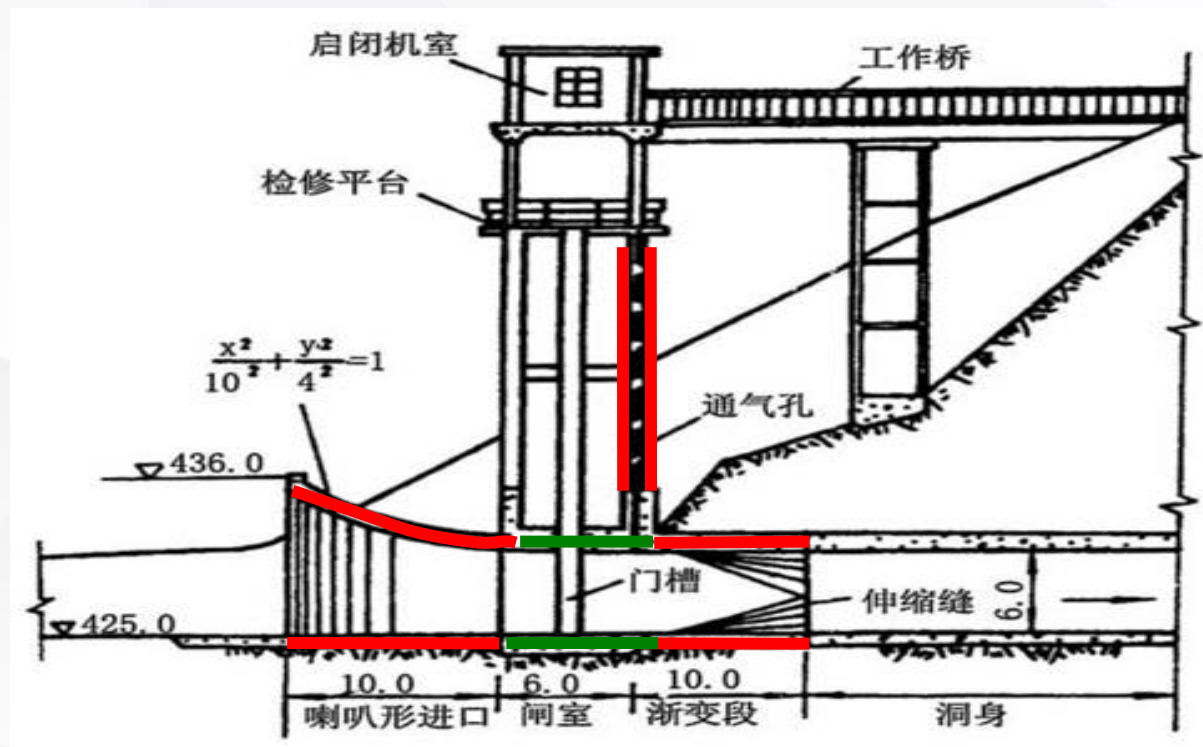
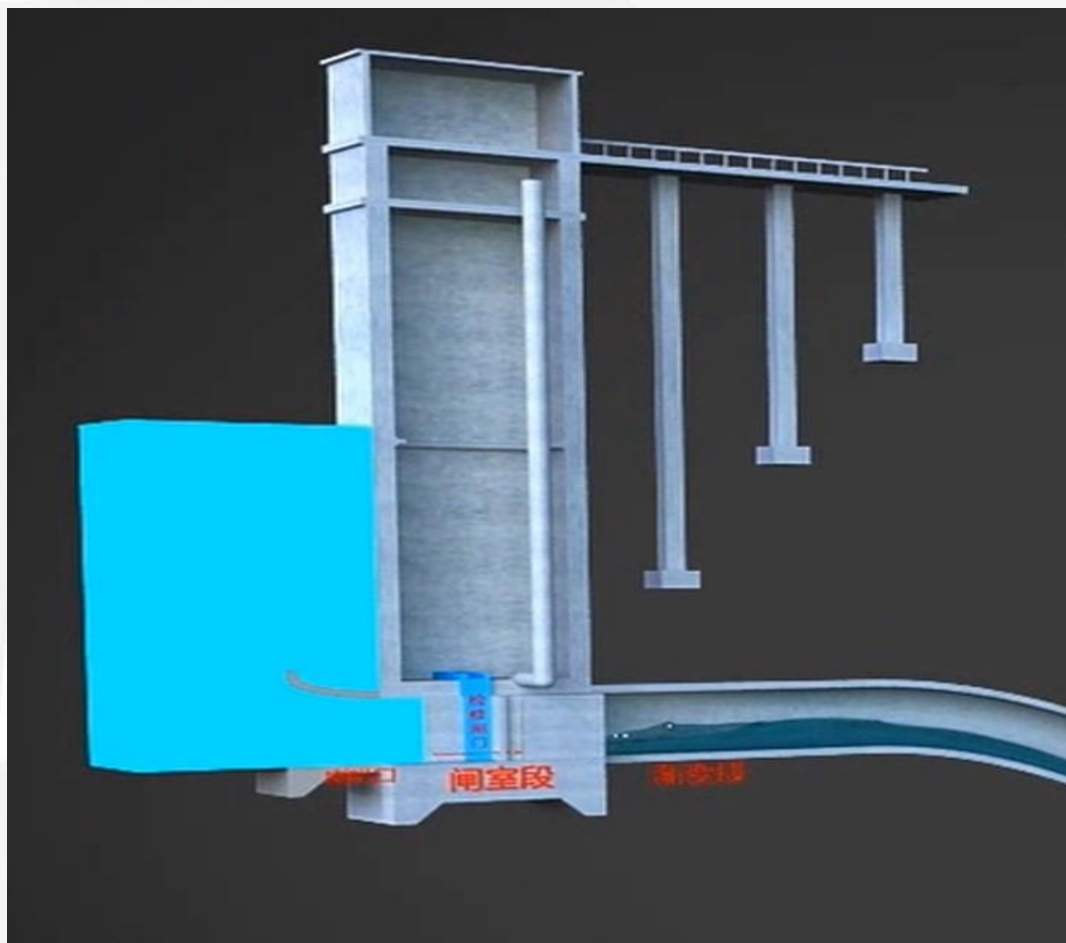


(b) 麦加放水隧洞进口



## 二、进口段

进口段的组成包括：进水喇叭口、闸门室、通气孔、平压管和渐变段。



## 二、进口段

### 水工隧洞的进口喇叭口



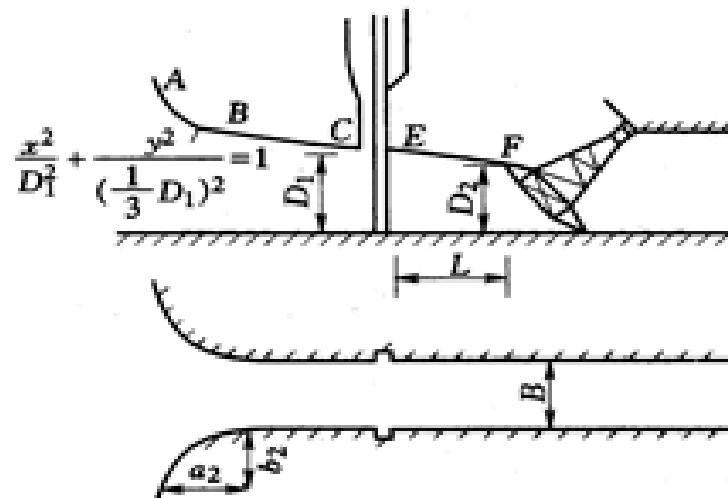
## 二、进口段

### (1) 进水喇叭口

进水口体形应与孔口水流的流态相适应，减小局部水头损失，以提高泄流能力。

隧洞进口常采用：顶板和两侧边墙顺水流方向**三向逐渐收缩的平底矩形断面**，形成喇叭口状。

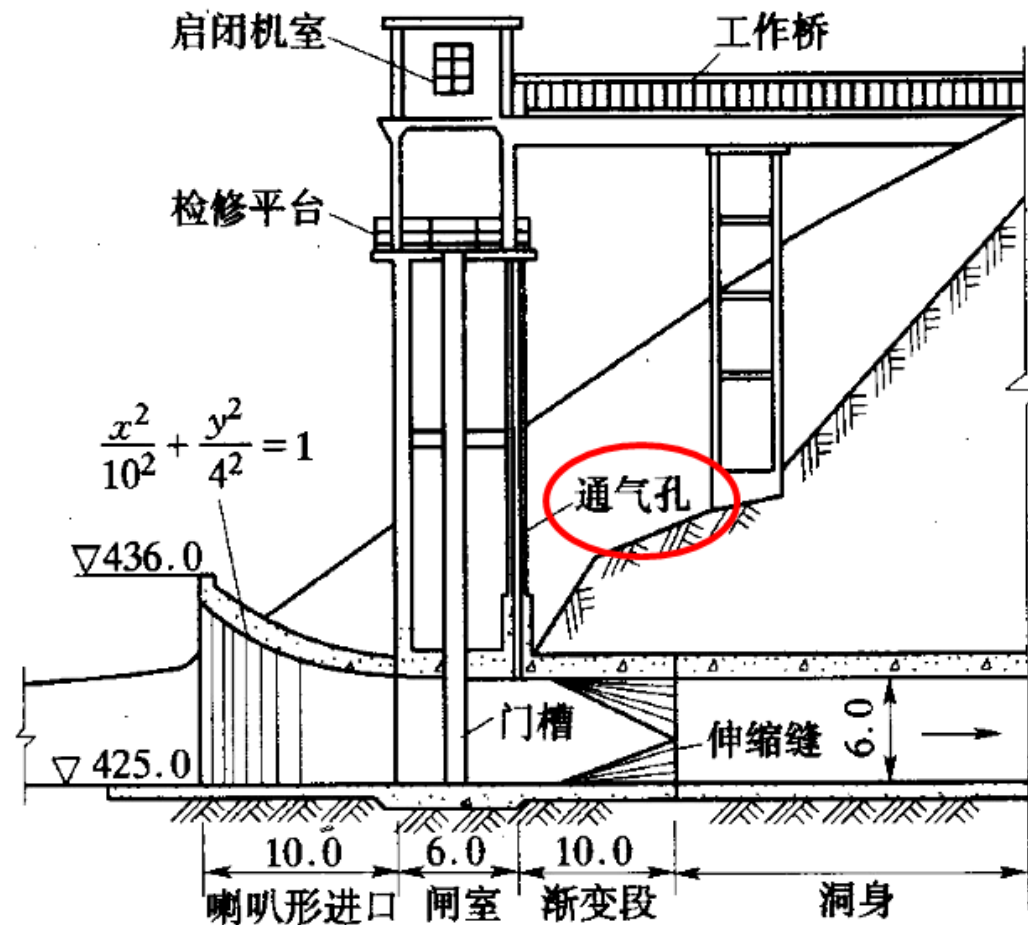
深式无压隧洞的进水口是一短管型压力段，为了增加压力段的压力，改善其压力分布，常在进口段顶部设置倾斜压坡。



## 二、进口段

### (2) 通气孔

通气孔承担着补气、排气双重任务。在工作闸门快速关闭时承担补气作用，以防产生负压，稳定流态，避免闸门振动。检修时，检修门下放洞内补气，检修完毕，平压管充水，通气孔排气。

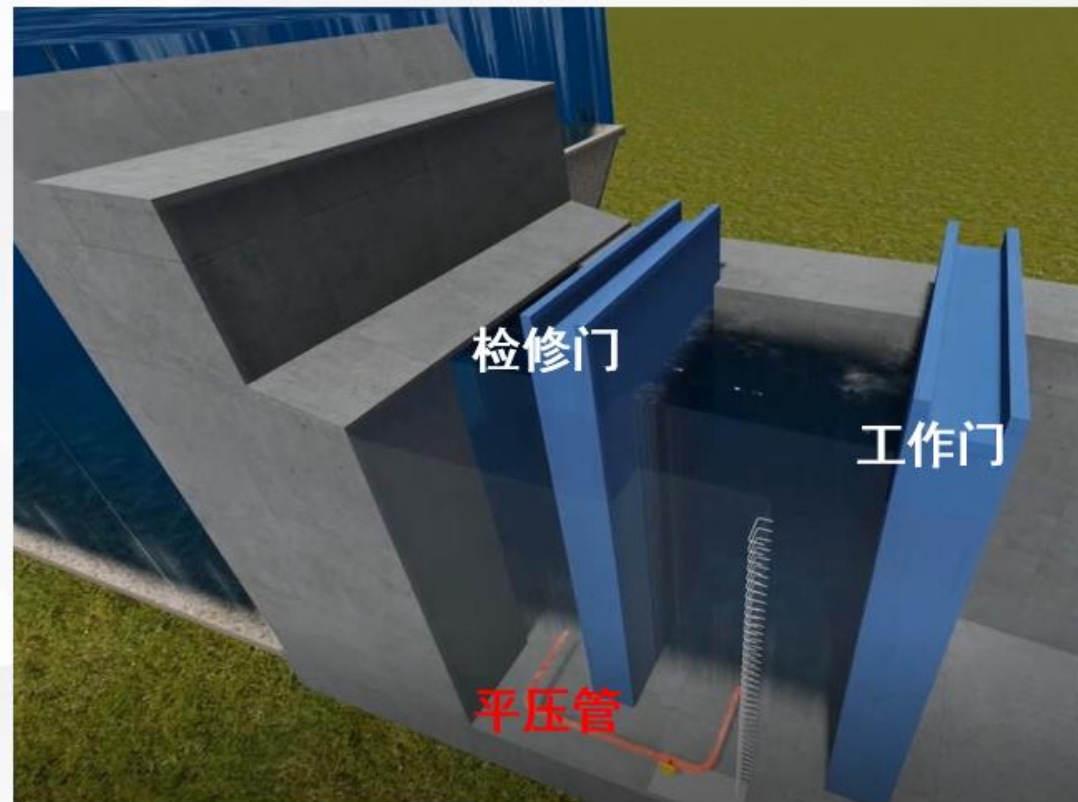
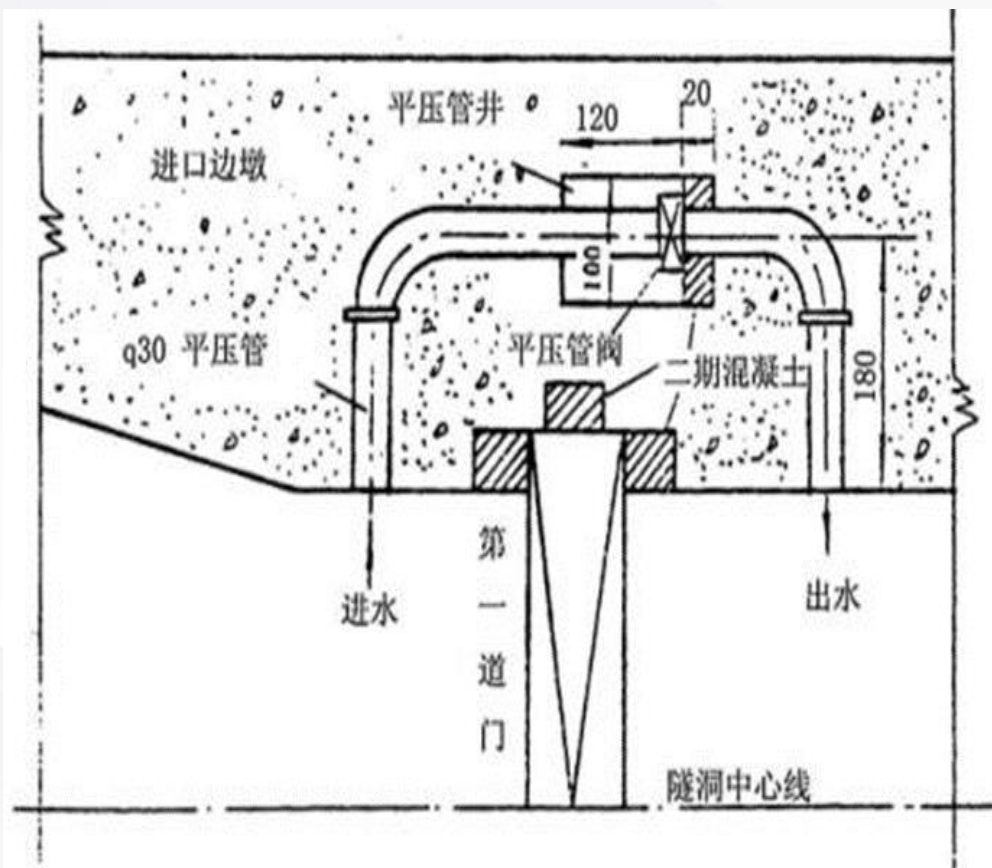


(a)

## 二、进口段

### (3)平压管

为了减小检修门的启门力，在检修门与工作门间设平压管，与水库相通，使检修门能在静水中开启。面积由充水时间决定。



## 二、进口段

### (4) 拦污栅

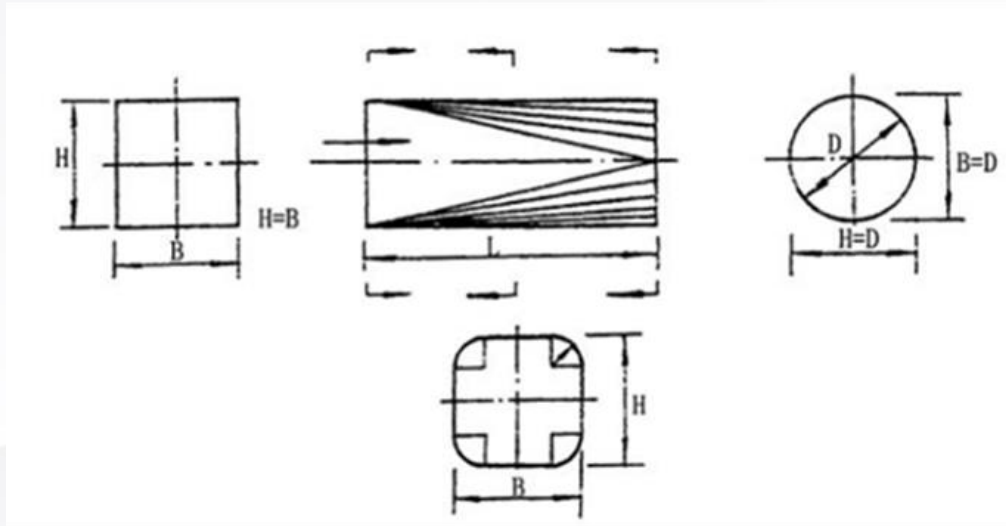
进口处的拦污栅是为了防止水库中的漂浮物进入隧洞而设置的。泄水隧洞一般不设拦污栅；引水发电的有压隧洞进口应设置较密的细格栅。



## 二、进口段

### (5) 渐变段

闸门断面为矩形断面需渐变为洞身段的圆型或城门洞形。需设渐变段。渐变段的长约为2 - 3倍洞径，收缩率小于1: 5 - 1: 8。





## 二、进口段

### (6) 闸室

#### a. 设弧形门情况：

不需门槽，水流平顺，启门力小，应力集中严重；止水设在前部，后部无水无压力；称为“**干井**”

#### b. 设平板闸门情况：

需门槽，槽中有回流，易空化、振动等；启门力大；止水设在后部，门井内有水称为“**湿井**”。



### 三、洞身段

#### 1. 洞身断面形式及尺寸

##### (1) 无压洞断面形式

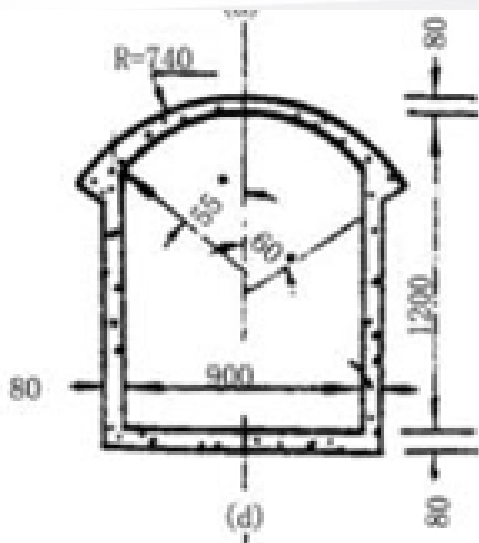
无压洞常为城门洞形，顶拱中心角 $90^{\circ}$  -  $180^{\circ}$  之间，断面高宽比为1-1.5。断面尺寸主要由泄流能力及洞内水面线确定；当侧向围岩压力较大时，也采用马蹄形断面。

##### (2) 有压洞断面形式

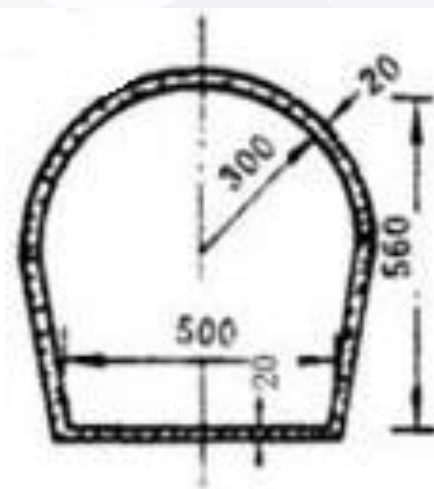
常采用圆形断面，圆形断面流态好，受力条件好，过水能力强。为保证洞内处于有压流态，由能量方程求出压坡线，洞顶一般保持2m以上的余幅。为减免空蚀，可通过缩小出口面积80%-85%增加压力。

### 三、洞身段

#### 无压洞



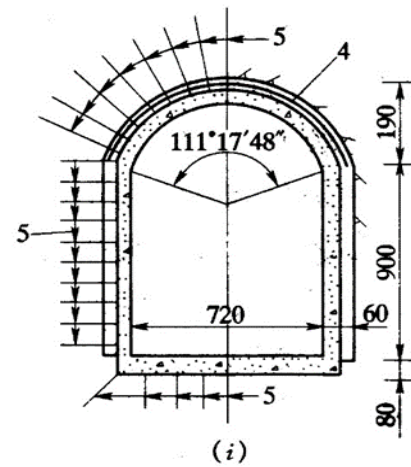
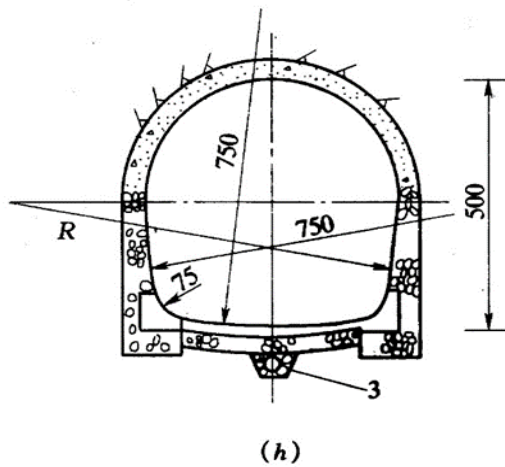
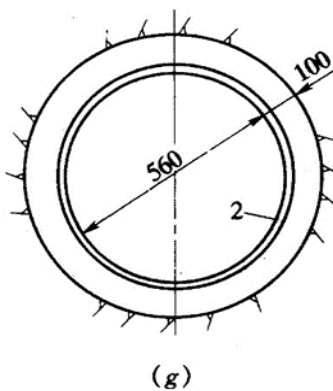
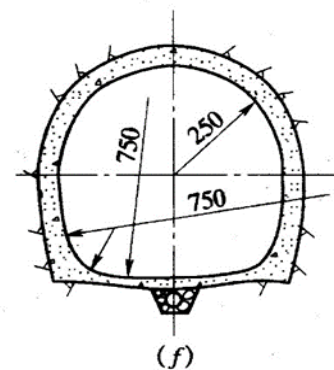
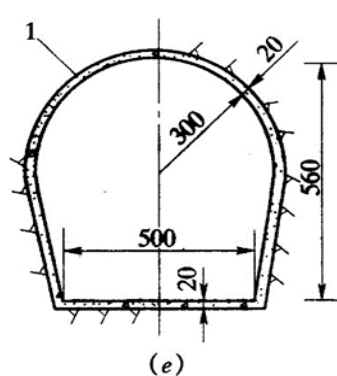
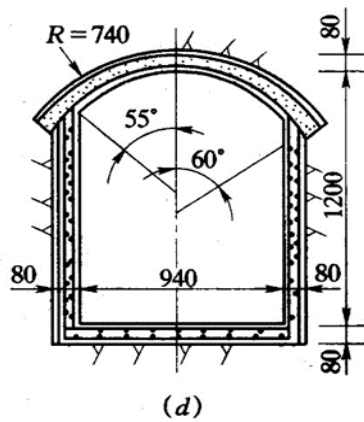
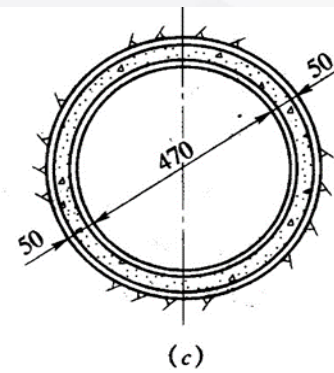
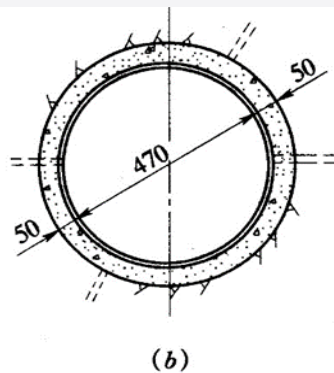
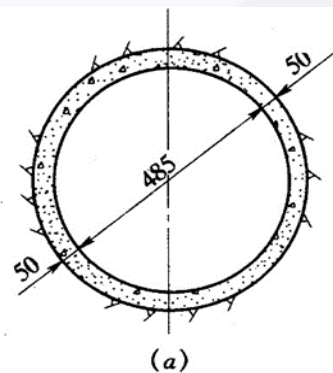
城门洞形断面



马蹄形断面

# 三、洞身段

## 洞身断面形式



### 三、洞身段

#### 2. 洞身衬砌的类型及构造

衬砌是指沿开挖洞壁而做的人工护壁，主要作用是：

- ① 阻止围岩变形的发展，保证围岩的稳定；
- ② 承受围岩压力、内水压力和其它荷载；
- ③ 防止渗漏；
- ④ 保护围岩；
- ⑤ 平整围岩，减小表面糙率，增大过流能力；
- ⑥ 满足环境保护的要求。



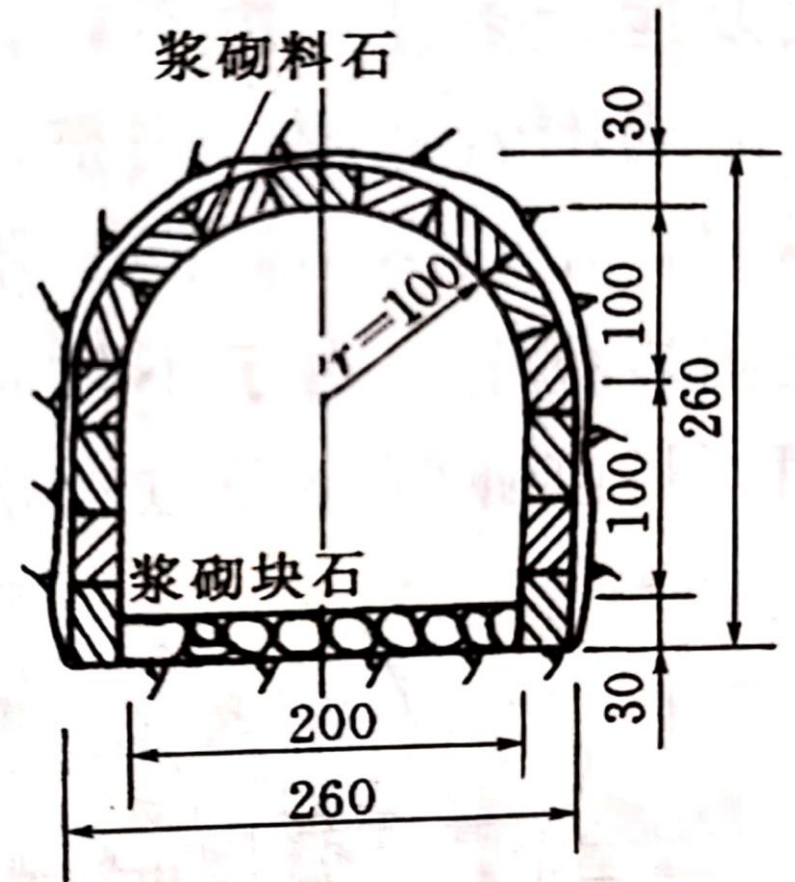
### 三、洞身段

#### (1) 平整衬砌

作用：减糙但不承载，防止渗漏，保护围岩。

材料：混凝土，喷混凝土（5~15cm）

适用于：水头低、岩层较好的情况



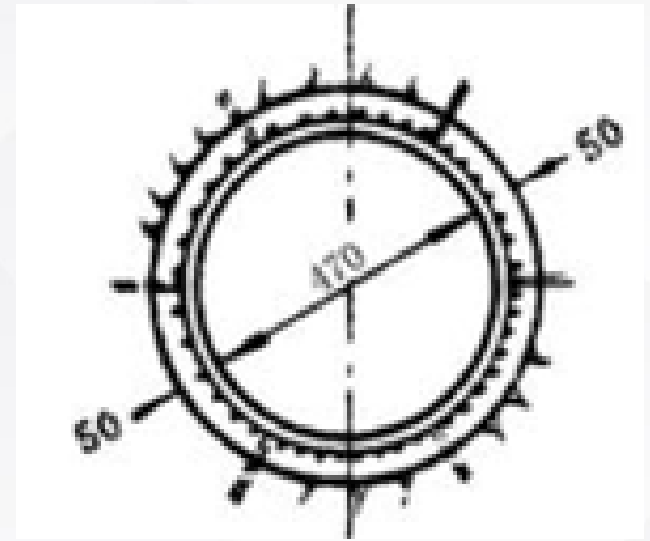
### 三、洞身段

#### (2) 单层衬砌（受力衬砌）

作用：承载、减糙、防冲防渗等；

材料：混凝土、钢筋混凝土（ $\geq 25\text{cm}$ ）；

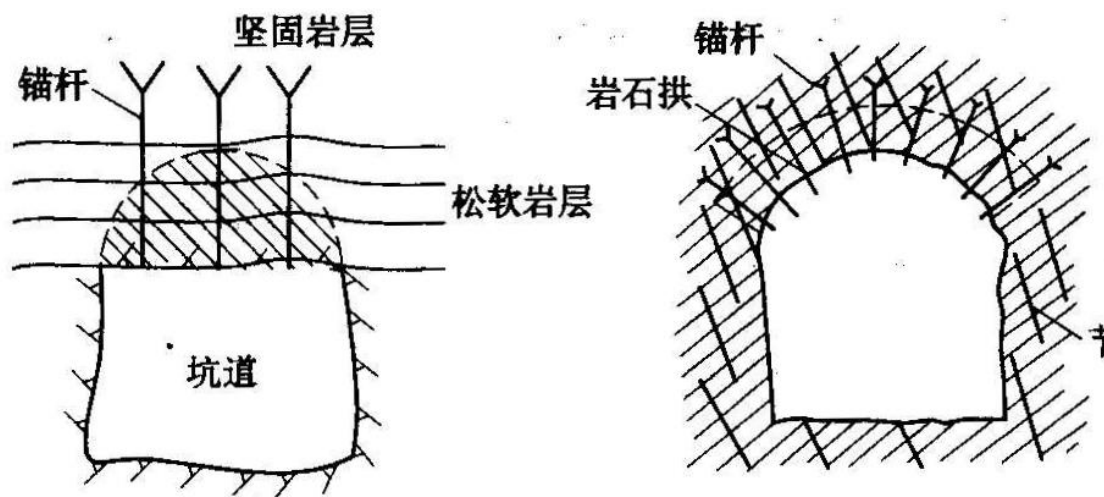
适用于：中等地质条件、断面较大、水头较高的情况



### 三、洞身段

#### (3) 锚喷衬砌

锚喷衬砌是利用锚杆和喷混凝土加固围岩的总称。



8月28日，白鹤滩左岸三号泄洪洞龙落尾段开挖支护形象 摄影：周吉

### 三、洞身段

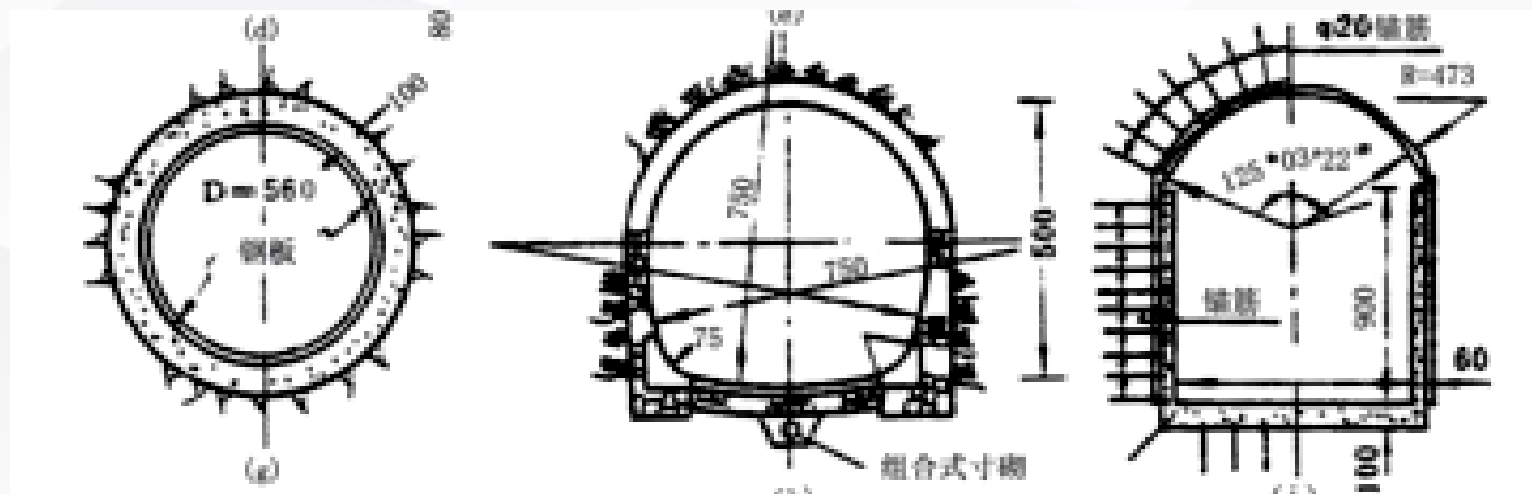
#### (4) 组合式衬砌

据开挖断面周边不同部位衬砌受力特点和运用要求，可采用衬砌材料组合而成。

组合 1：内层用钢板或钢丝网喷浆；外层用砼或钢筋砼

组合 2：顶部拱用砼；边墙用浆砌石

组合 3：顶部拱用喷锚支护；边墙、底板用混凝土





### 三、洞身段

#### (5) 预应力衬砌

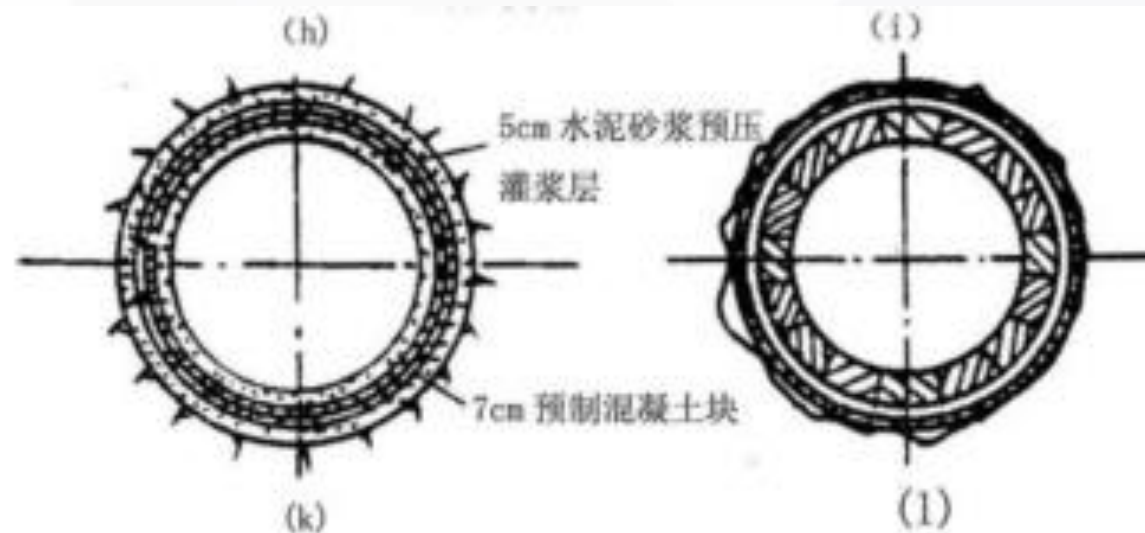
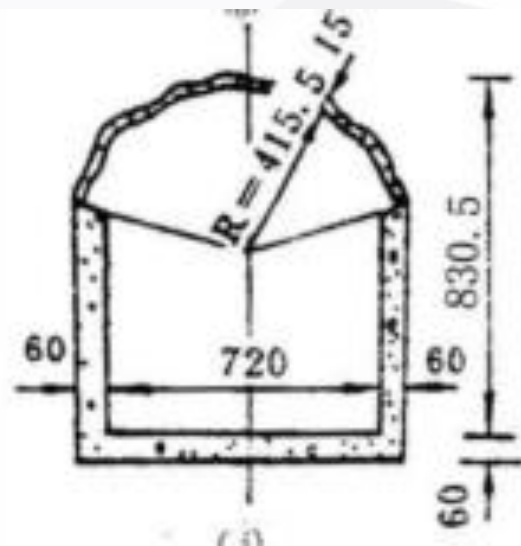
优点：抵消拉应力，减小衬砌厚度，增强抗裂等。

缺点：工序多，施工繁琐，技术要求高

方法：压浆式、钢箍式等，以前者用得较多

施工工艺：衬砌分两层，层间留有3~5cm空隙，以便灌浆预加应力，灌浆用膨胀水泥，对层间衬砌预加应力。

适用于：高水头圆形有压隧洞。



### 三、洞身段

#### 衬砌施工



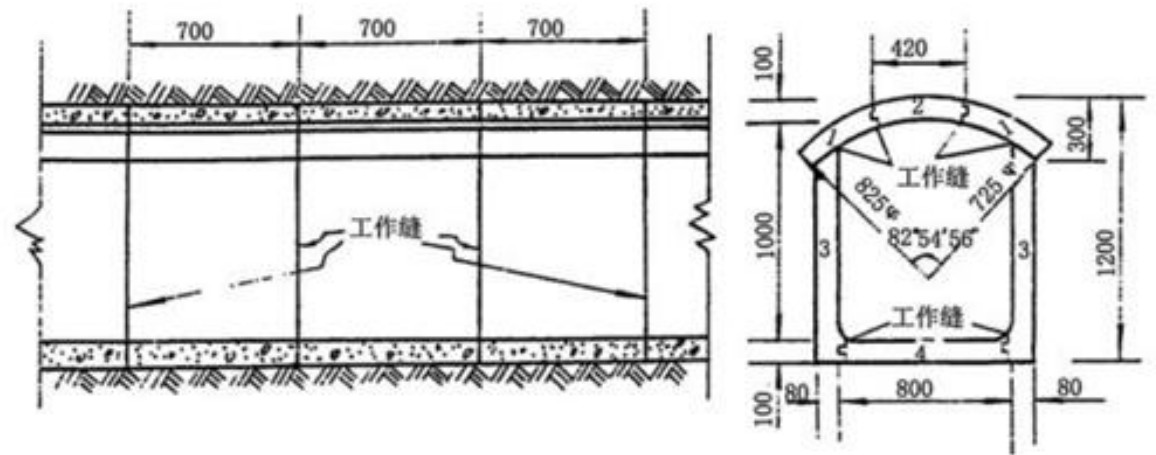
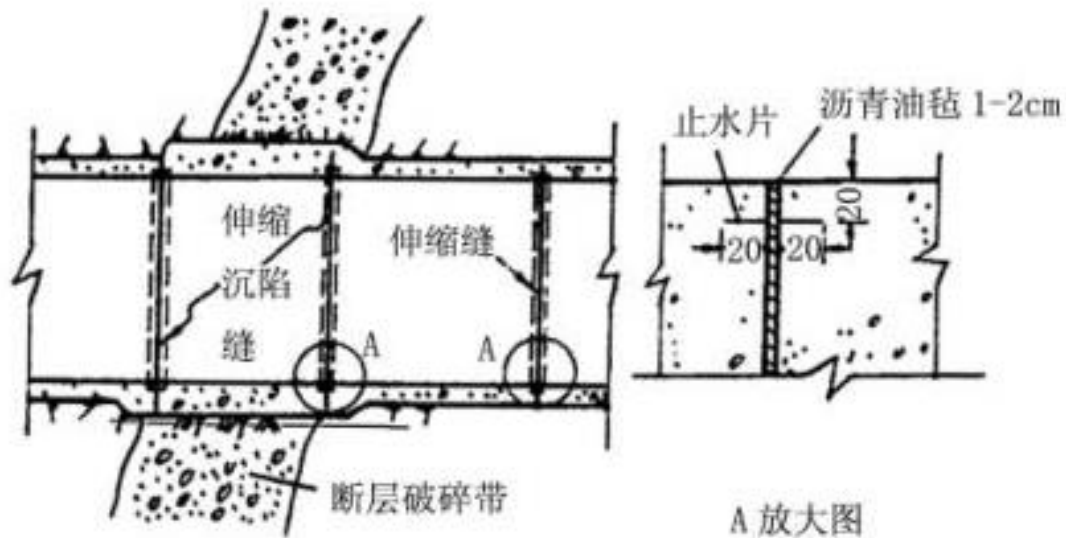
### 三、洞身段

#### (6) 衬砌的分缝及止水

为满足施工能力、防止不均匀沉陷，对衬砌应进行分缝。

**纵缝**——设在顶拱与边墙、底板的交界处；**横缝 (伸缩缝)**——间距一般为6~12m；

**沉陷缝**——设在地质条件较差的断层处或破碎带处；一般情况下各类缝内均应设止水。



### 三、洞身段

#### (7) 灌浆

##### 1) 回填灌浆

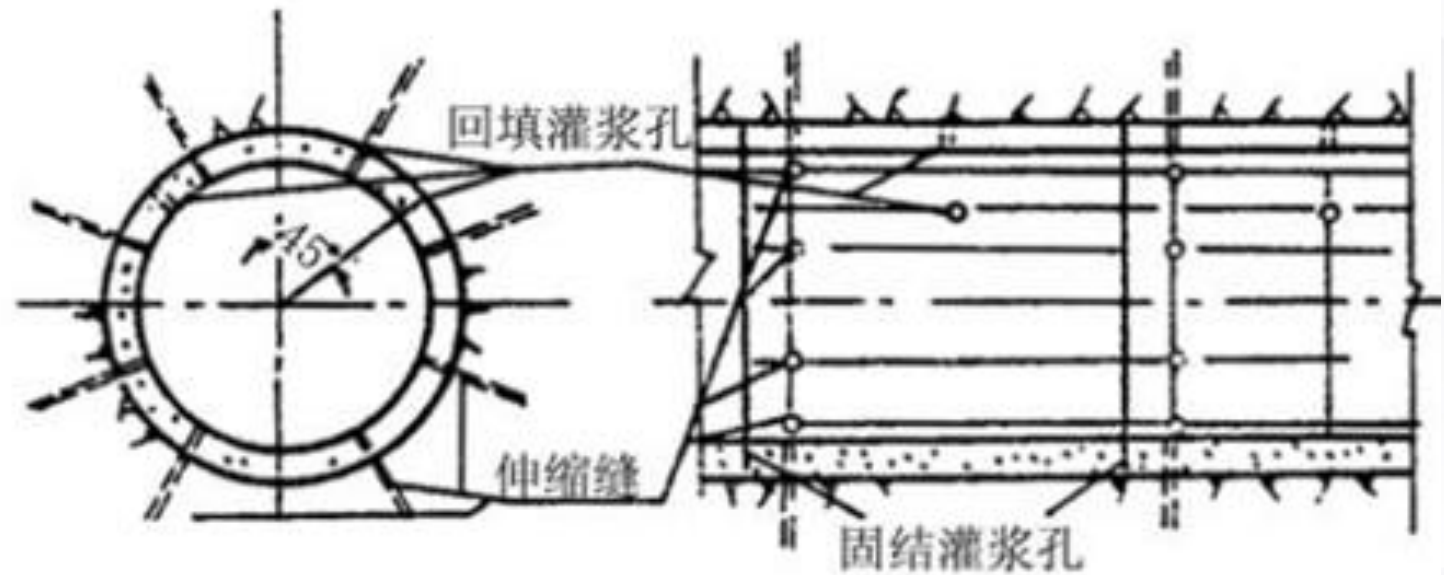
填充衬砌与围岩之间的空隙，使之紧密结合，共同受力，改善传力条件和减少渗漏。

灌浆范围：顶拱中心角 $90^{\circ}\sim 120^{\circ}$ ；

灌浆压力： $0.2\sim 0.3\text{Mpa}$ ；

孔排距： $2\sim 6\text{m}$ ；

深度：大于 $5\text{cm}$ 。



### 三、洞身段

#### 2) 固结灌浆

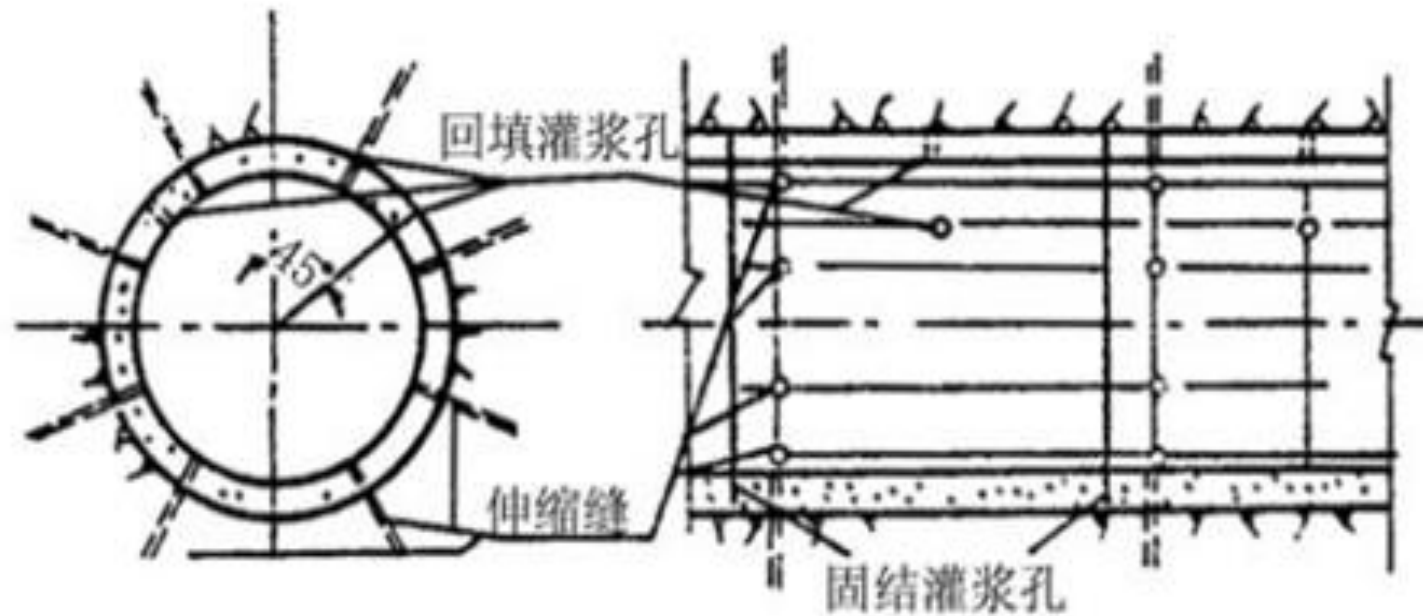
目的在于加固围岩，提高围岩整体性，减小围岩压力，保证围岩弹性抗力，减小渗漏。

灌浆范围：全断面；

灌浆压力：1.5~2.0倍内水压力；

孔排距：2~4m，每排不少于6孔；

深度：大于1倍洞径。



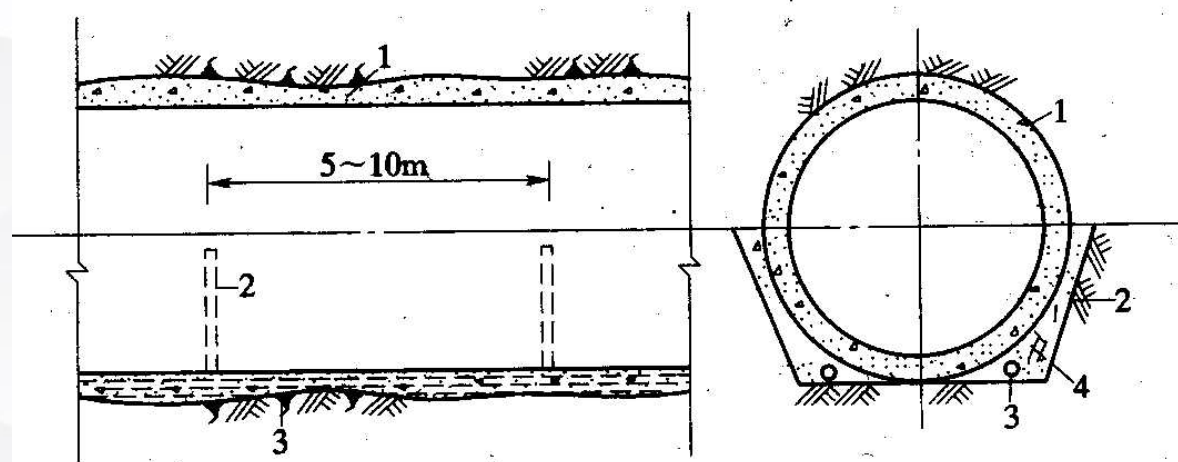
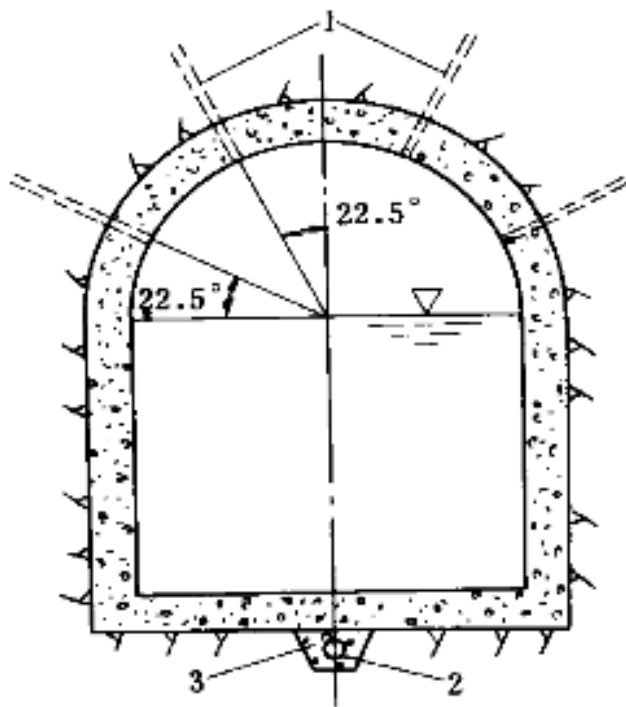
### 三、洞身段

#### (8) 排水

目的降低作用在衬砌外壁上的外水压力。

无压洞：采用径向排水管，将外水直接排至洞内。

有压洞：沿纵向设暗排水管，收集渗水排向下游。



## 四、洞出口段及消能设施

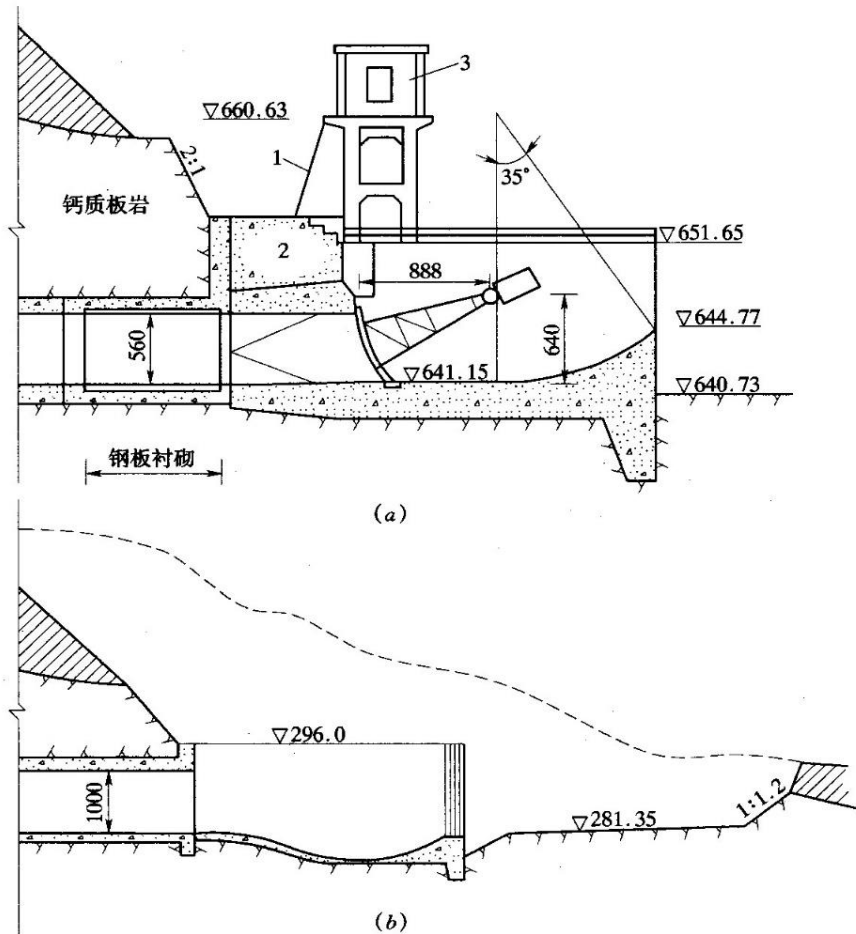
### （一）出口段结构体型

- 1.有压：出口处设闸门，因此设闸室，用以布置闸门及相应的启闭设备，门前设渐变段，门后接消能设施。
- 2.无压：出口处无闸门，因此其型式相对简单，仅设门框，以防洞脸及其上部岩体崩塌，洞身直接与消能设施相连。

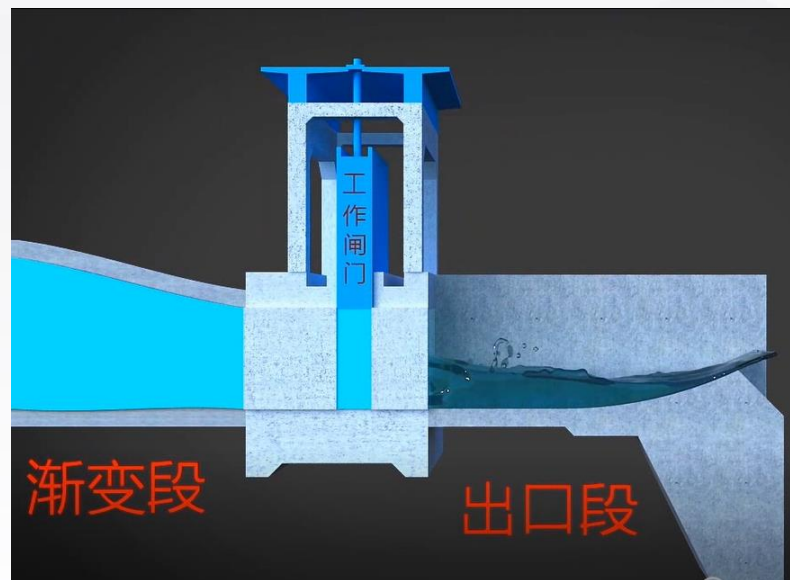
### （二）消能方式

- 1.挑流消能
- 2.底流消能
- 3.窄缝式挑坎消能
- 4.洞中突扩消能

## 四、洞出口段及消能设施



1—刚梯； 2—混凝土压重； 3—启闭机室

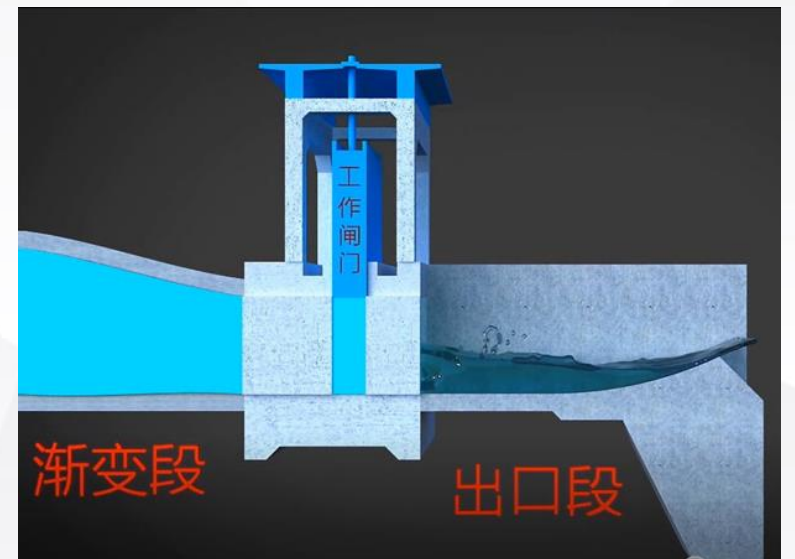
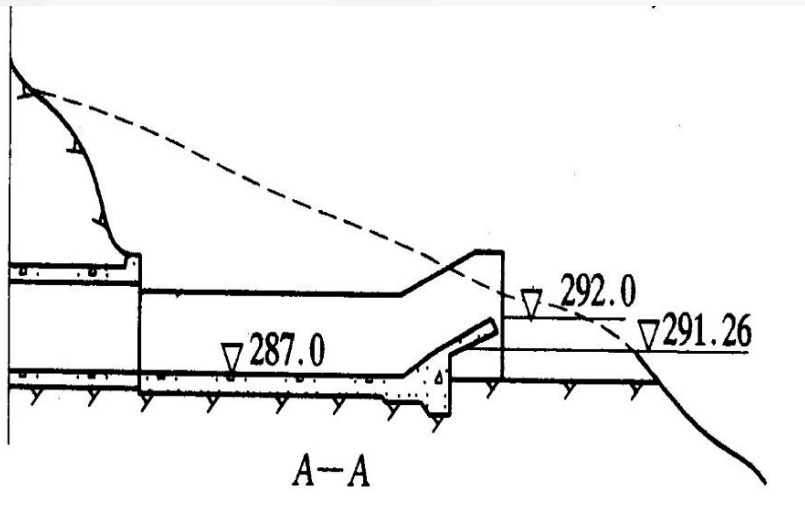




## 四、洞出口段及消能设施

### 挑流消能

当隧洞出口高程高于下游水位，且地形地质条件允许时，采用扩散式挑流消能比较经济合理。结构简单，施工方便。

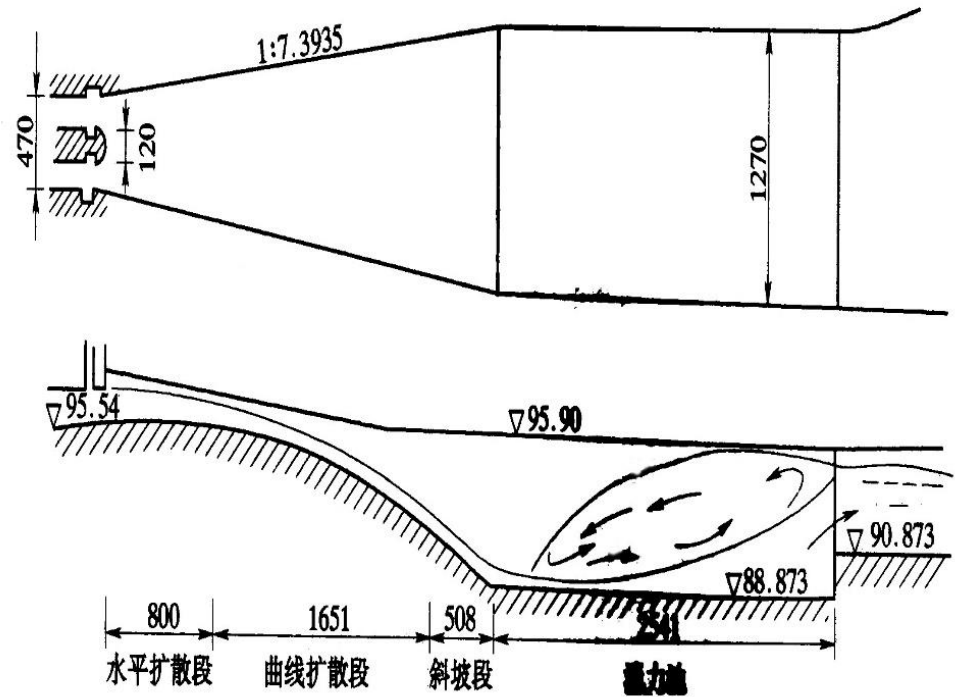


## 四、洞出口段及消能设施

### 底流消能

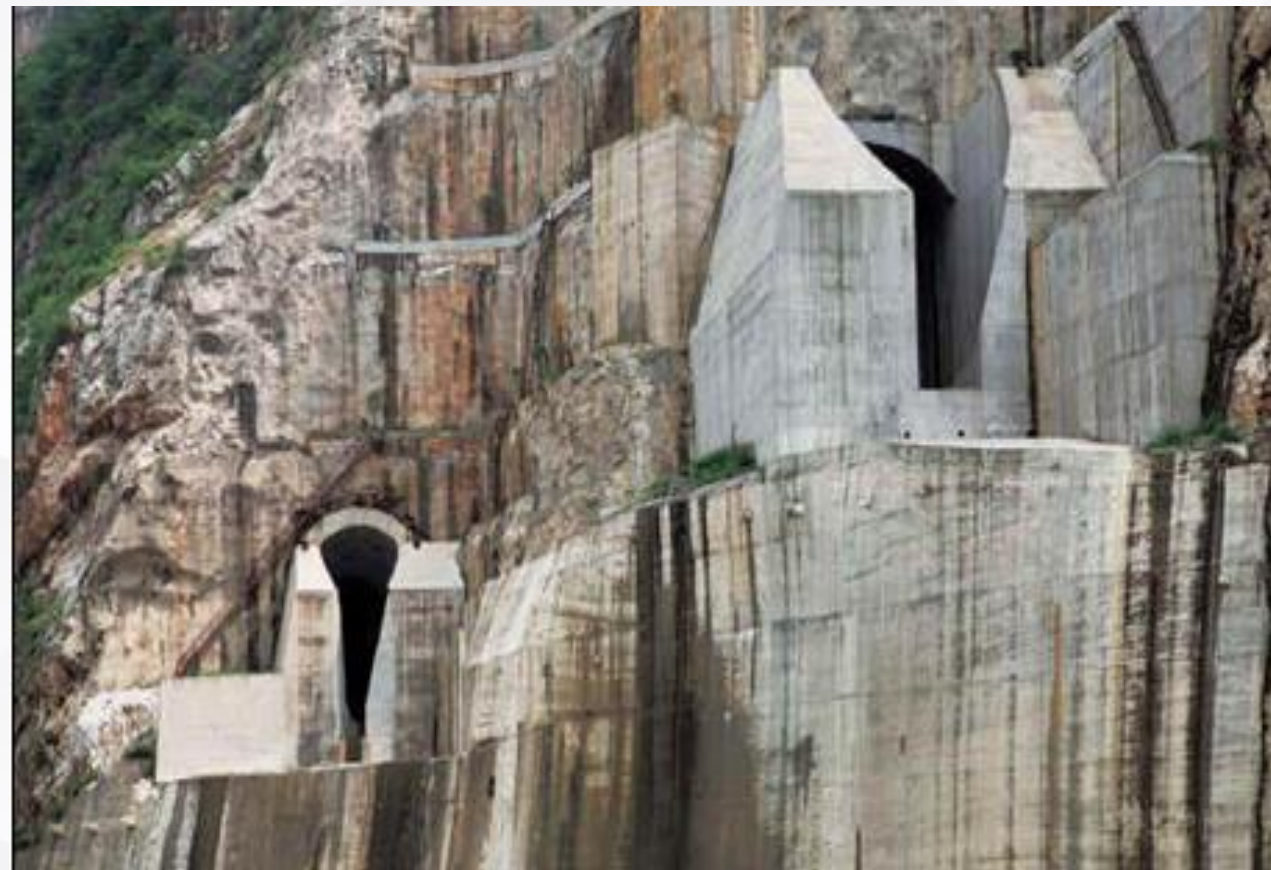
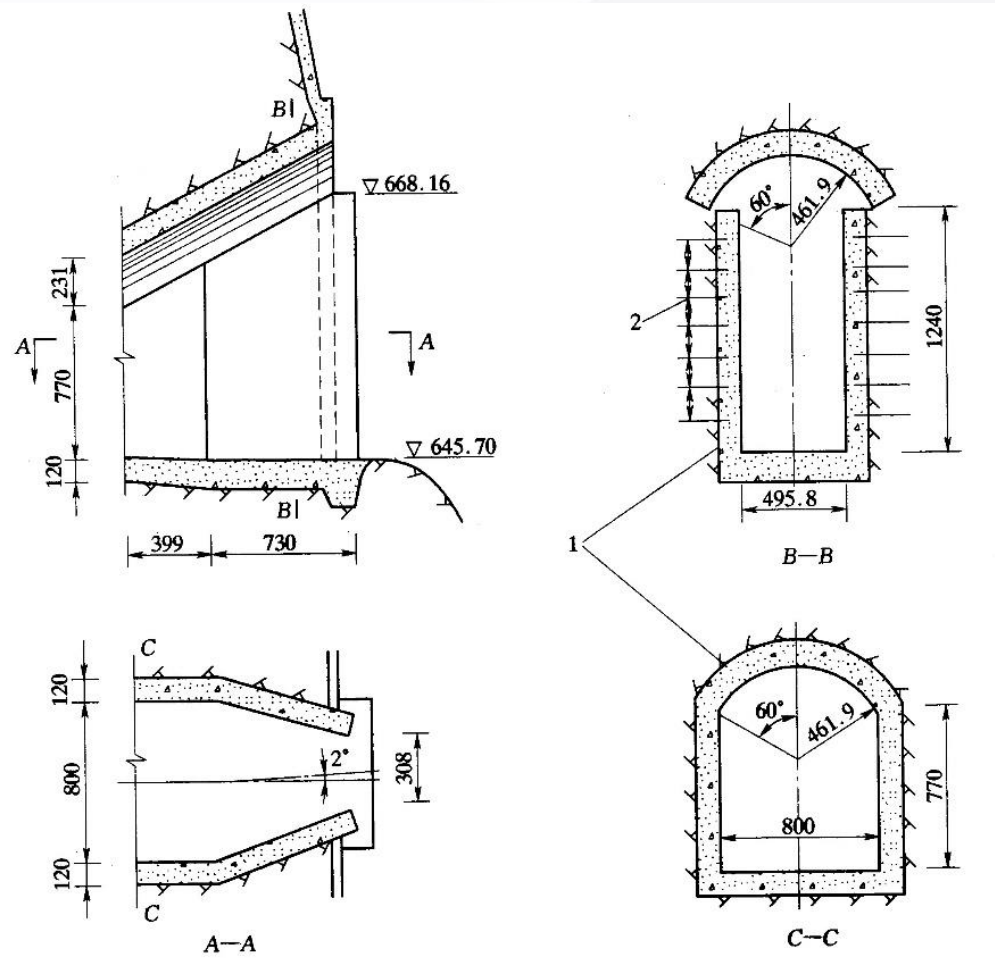
当隧洞出口高程接近下游水位时，也可采用扩散式底流水跃消能。

底流消能具有工作可靠、消能比较充分、对下游水面波动影响范围小的优点，但缺点是开挖量大、施工复杂、材料用量多、造价高



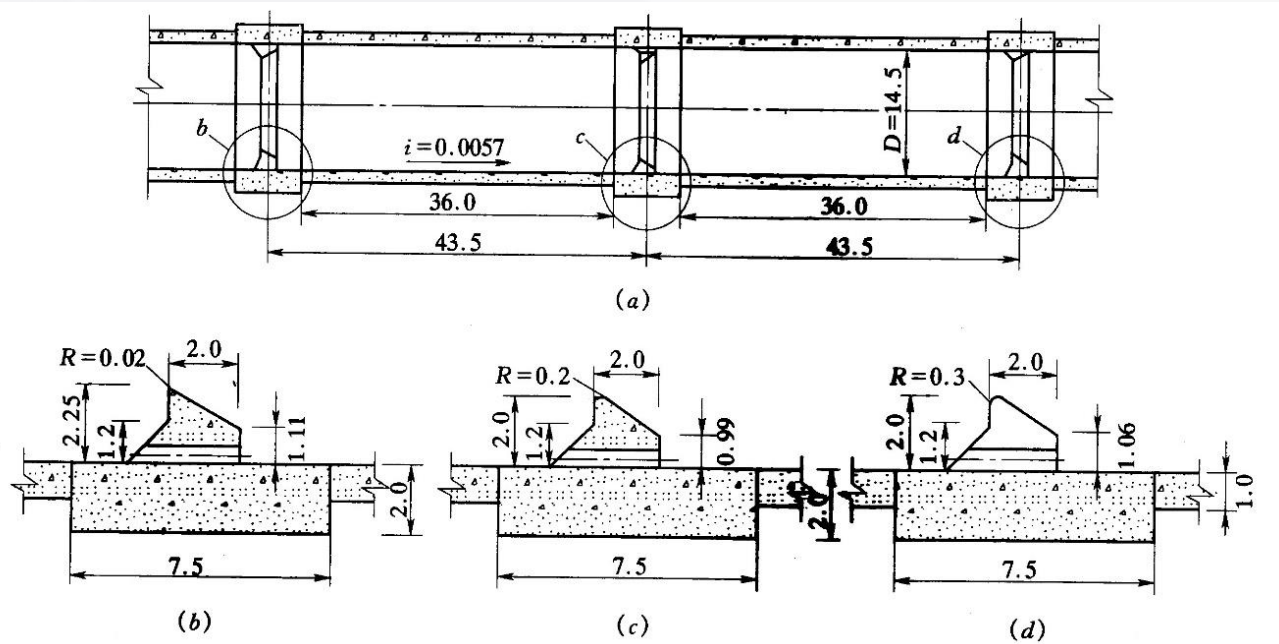
# 四、洞出口段及消能设施

消能



## 四、洞出口段及消能设施

### 洞内突扩式消能



黄河小浪底水利枢纽洞中突扩消能



# 总结

---

一、水工隧洞进口建筑物

二、进口段

三、洞身段

四、出口段

# 白鹤滩水电站

根据今天所学内容，回答下面问题

- 1.白鹤滩水电站布置了几条泄洪洞？是有压洞还是无压洞？
- 2.泄洪洞进口的进水塔采用岸塔式结构？为什么？除了这种结构，还有哪些进口建筑物？
- 3.如图，白鹤滩水电站泄洪洞的进水口结构，请看图指出工作闸门、检修闸门、喇叭口、通气孔的位置。
- 4.白鹤滩水电站泄洪洞洞身断面为城门洞形，泄洪洞的洞身断面还有哪些？
- 5.该泄洪洞洞身采用混凝土衬砌，作用是什么？

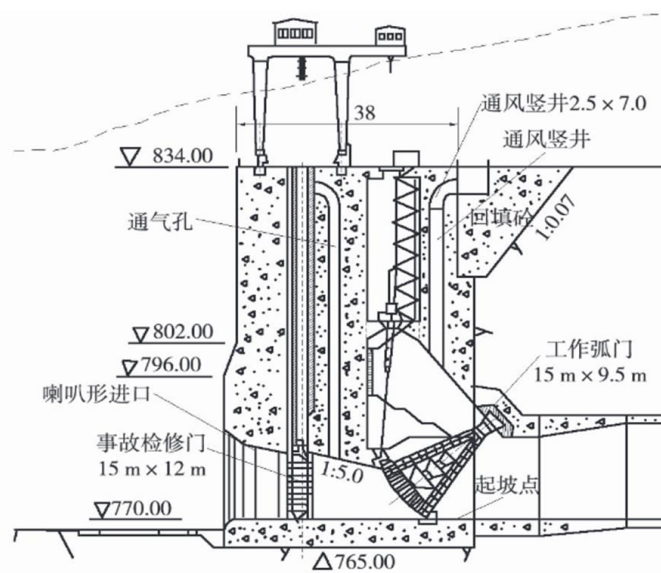


图 1 进水口结构



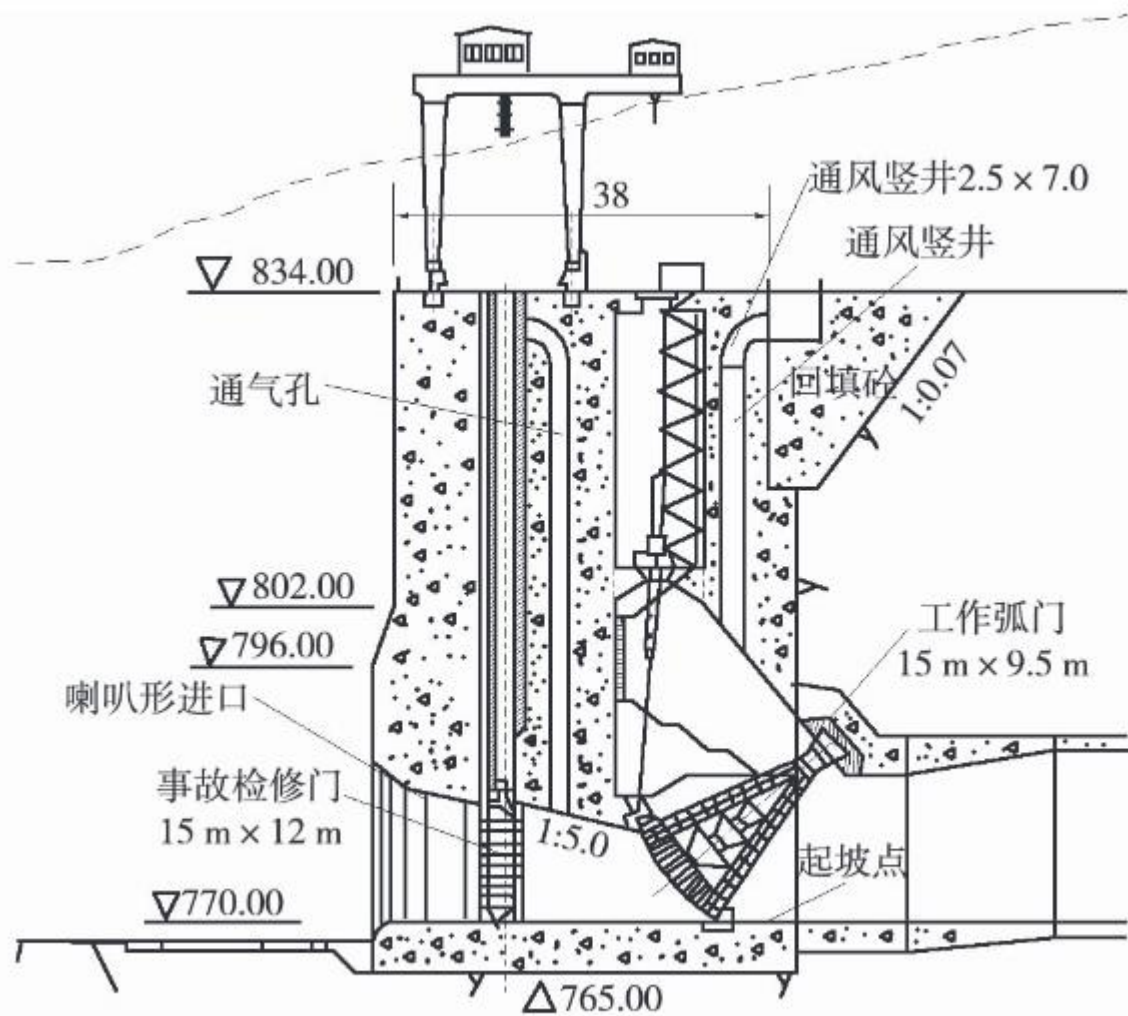


图 1 进水口结构



黄河水利职业技术学院  
YELLOW RIVER CONSERVANCY TECHNICAL INSTITUTE

敬 请 指 导

Thank You