



HR(E)95-001

输水隧洞病害及处理

中国水利水电科学研究院水力学研究所

一九九四年九月

北 京

工程试验报告
水力学研究所 研究论文 审批表

题目名称		输水隧洞病害及处理	
签字栏	所 长	何少苓 (签名)	1994 年 10 月 7 日
	总工程师	潘水波 (签名)	1994 年 9 月 29 日
	室 主 任	王念慎 (签名)	1994 年 9 月 12 日
	项目负责人	邵嫒嫒 (签名)	1994 年 9 月 12 日
	技术负责人	邵嫒嫒 (签名)	1994 年 9 月 12 日
	项目参加人	邵嫒嫒 (签名)	1994 年 9 月 12 日
	报告编写人	邵嫒嫒 (签名)	1994 年 9 月 12 日

目 录

一、前 言

二、输水隧洞的组成

三、输水隧洞病害的工程实例

四、输水隧洞病害的分类

五、输水隧洞病害的处理措施

六、结 语

参考文献

输水隧洞病害及处理^①

一、前言

输水隧洞是水利枢纽和灌区中的重要建筑物。隧洞工程的选线,与水利枢纽和灌区整体工程规划、地形、地质情况有着密切的关系,必须进行详细的调查研究,经过必要的技术经济比较,最后选出合理的方案。按其用途可分为发电、灌溉、供水、泄洪、排沙、放空以及施工导流隧洞等。通常输水隧洞是在河岸岩体中开凿一定断面形状的洞子。在节理发育或较破碎的岩体中开凿输水隧洞,通常要用混凝土、钢筋混凝土等材料进行衬砌,以防止冲刷、坍塌及渗漏。

本文着重讨论中小型输水隧洞由于水流作用引起的病害,并对病害分类、病害原因及处理进行了分析。

二、输水隧洞的组成

输水隧洞一般由进口段、洞身段和出口段三部分组成。

1、进口段

输水隧洞的进水口种类繁多。按其水流形态可分为开敞式(明流)和深式两种^[1]。

(1) 开敞式进水口下接明流(无压)隧洞,如冯家山水库泄洪洞和毛家村水库泄洪洞进水口见图1(a)、(b)。

(2) 深式进水口,按其洞内流态可分为深式明流输水洞和深式有压输水洞进水口两类;常见的布置型式有竖井式、塔式、斜坡式、岸塔式和半竖井式五种,具体工程布置实例见图2(a)~(c)。

①深式明流输水隧洞进水口

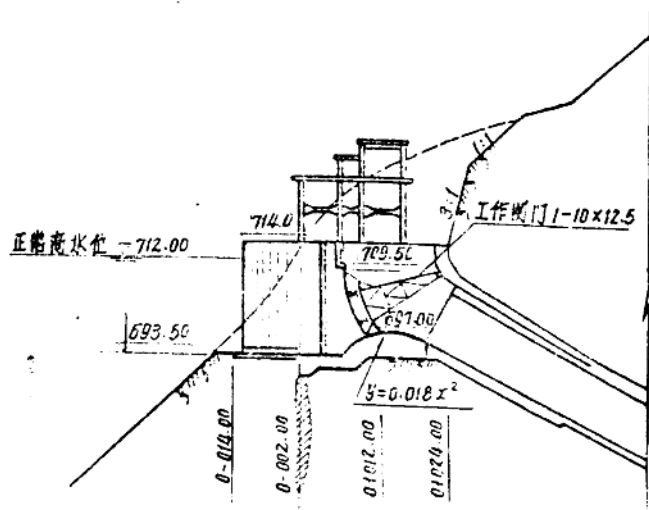
这类进水口的压力段一般都短于两倍孔口高度,属典型的“短管型进水口”。我国近年来修建的一些大型泄洪洞,如刘家峡泄洪洞、碧口右岸泄洪洞,都是采用这种型式。这类已建工程进水口布置型式为岸塔式和塔式。

②深式有压输水隧洞进水口

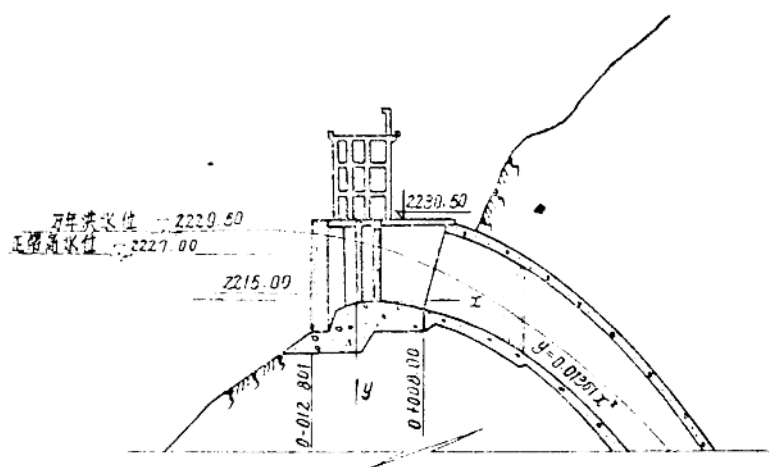
深孔有压输水隧洞是在进水口后接有压隧洞。有些布置是从进口至出口皆为有压流的单一式,如响洪甸泄洪洞、花凉亭泄洪洞及南水泄洪洞等;有些是在平面弯道以前为有压流,弯道后为明流的混合式,如碧口左岸泄洪洞、新丰江泄洪洞等。其进水口布置型式见图2例举的五种型式:竖井式、塔式、斜坡式、岸塔式和半竖井式。

灌区中的输水隧洞,从布置和使用情况看,系为进、出口均为不淹没的明流隧洞(无压隧洞),其水面衔接示意图见图3(a)、(b)。隧洞进、出口应尽可能平顺地与上、下游渠道连接,以减少水头损失。进出口连接段一般采用扭曲面或八字墙两种型式。灌区无压隧洞一般不设控制闸门。

^①本文是国家自然科学基金重点项目成果

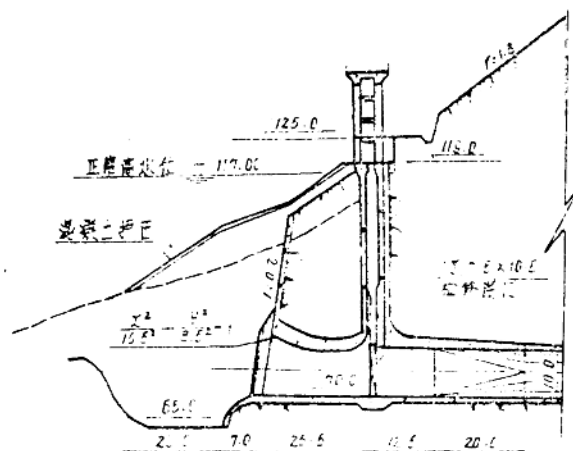


(a) 冯家山水库泄洪洞进水口(堰上水头 15.0m)

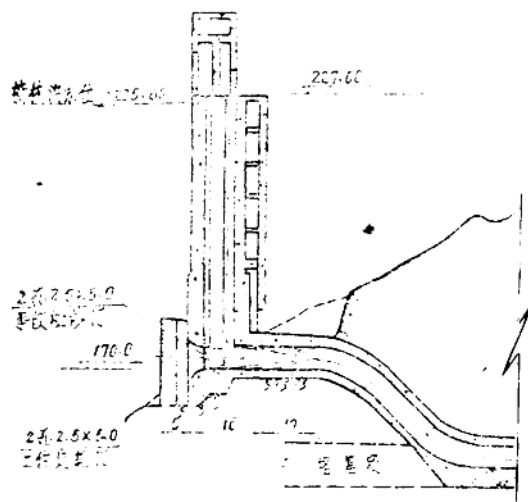


(b) 毛家村水库泄洪洞进水口(堰上水头 14.0m)

图1 开敞式(明流)泄洪洞进水口工程布置实例

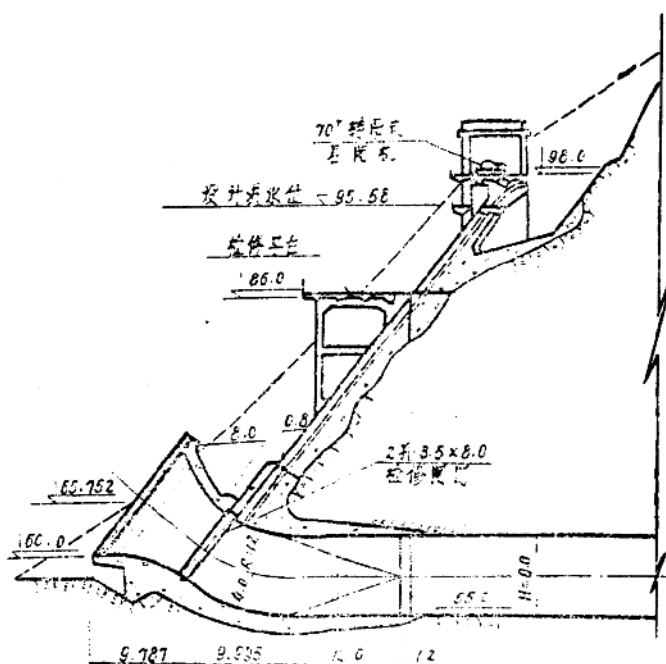


(a) 竖井式(新丰江增建泄洪洞进水口)、堰上水头 51.6m

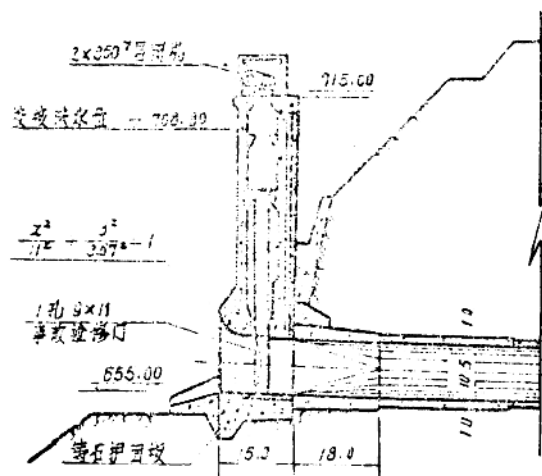


(b) 塔式(南水水电站泄洪洞进水口)、堰上水头 55.0m

图 2(a)(b) 深式有压泄洪洞进水口工程布置实例

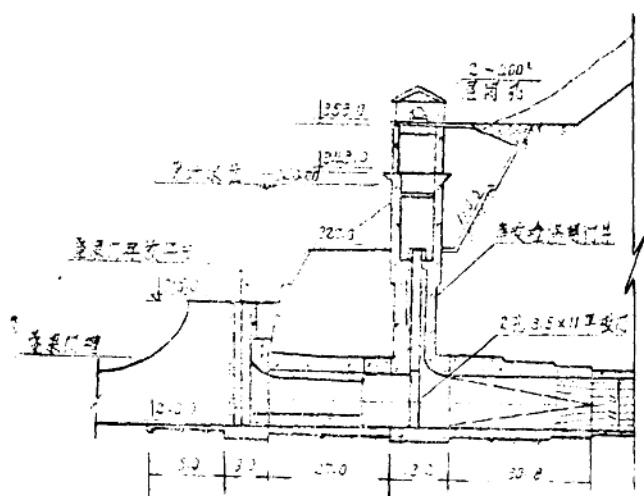


(c) 斜坡式(花凉亭水库泄洪洞进水口)、堰上水头 37.61m



(d) 岸塔式(碧口水电站左岸泄洪洞进水口)、堰上水头 55.8m

图 2(c)(d) 深式有压泄洪洞进水口工程布置实例



(c) 半竖井式(三门峡一号排沙洞进水口)、堰上水头 50.0m

图 2(c) 深式有压泄洪洞进水口工程布置实例

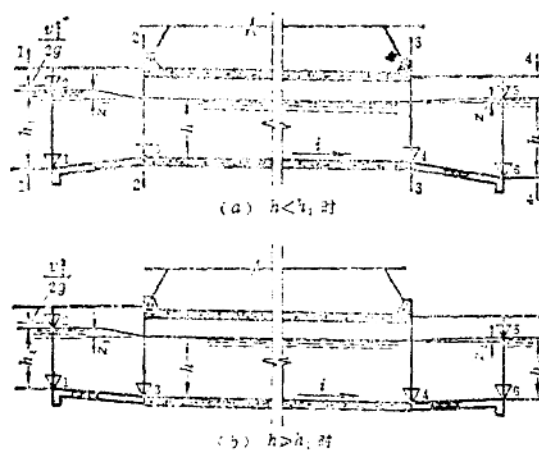


图 3 无压隧洞水面衔接示意

2. 洞身段

输水隧洞进口段与洞身段之间通常设一渐变段。长度一般为隧洞洞身断面宽度的 2~3 倍, 进口和洞身不同断面间用曲线连接。

输水隧洞洞身断面有多种型式, 应根据水流条件, 工程地质和施工条件等因素而定。一般有压隧洞大部分采用圆形断面, 见图 4(a)。为了施工方便, 也可采用马蹄形, 见图 4(b); 无压隧洞断面型式很多, 常用的有圆形、圆门形、平拱矩形、马蹄形以及高拱形等见图 4(a)~(e)。

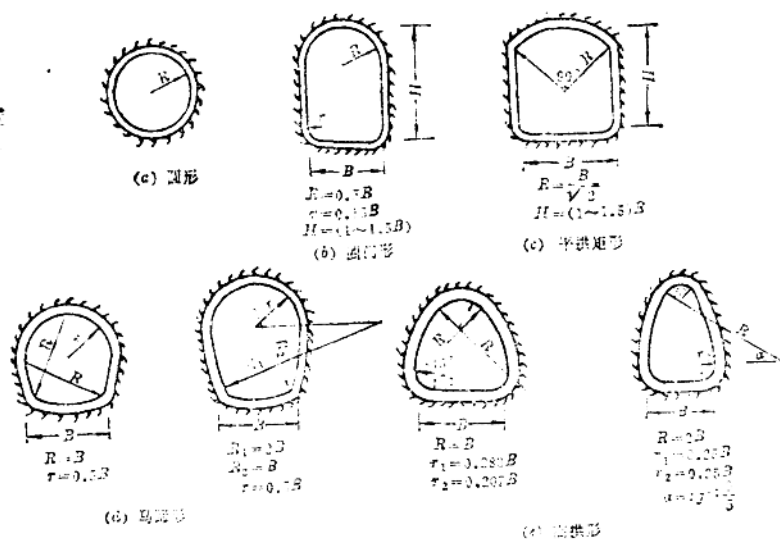


图 4 输水隧洞洞身断面型式

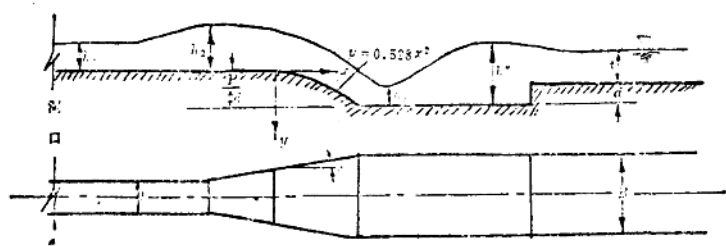
3. 出口段

灌区无压隧洞的出口流速不大, 一般约 $1.5 \sim 2.5 \text{ m/s}$, 在出口不需设置消能设施。对于土渠为了防止出口水流可能由于扩散不均匀发生回流, 引起对渠道的淘刷, 可根据情况在下游连接段后再铺设一段干砌石或浆砌石护底及护坡, 长度 10m 左右。

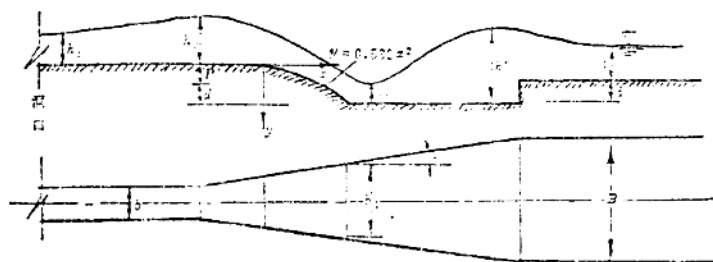
水库的输水隧洞出口单宽流量大、流速高、能量集中, 因此必须设置消能设施。常见的出口消能型式有矩形消力池、扩散式消力池和挑坎式消力池三种, 其型式见图 5(a)~(c)。对于岩石河床则常采用挑流消能型式, 但狭窄河谷采用挑流消能时, 平面扩散水舌往往易冲击岸坡, 尤其是泄洪洞出口距枢纽建筑物较近时, 将对枢纽建筑物, 尤其是大坝的安全造成极不利的影响。为了适应狭窄河谷枢纽布置的需要, 对于高水头输水隧洞近期开始采用窄缝式新型消能工, 它可减轻对下游的冲刷。

三、输水隧洞病害的工程实例

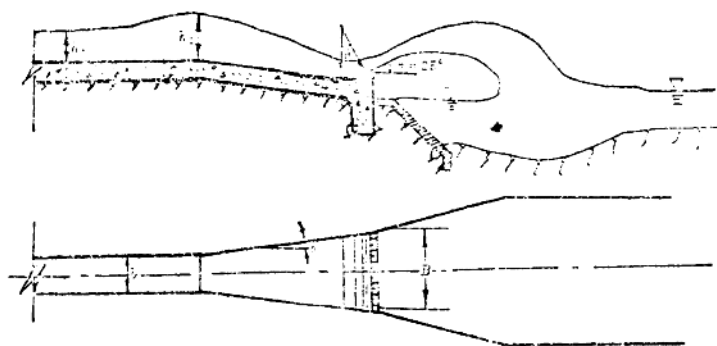
本节将介绍 28 座输水隧洞的病害实例, 并讨论在设计、施工和运行管理中存在的问题。



(a) 矩形消力池



(b) 扩散式消力池



(c) 鱼状式消能

图 5 输水隧洞出口消能型式

1、雾溪水库隧洞^[5] 雾溪水库位于浙江省云和县境内，系一座以灌溉为主兼顾防洪、发电的中型水利工程。水库隧洞由泄洪洞和发电支洞组成，全长 151.34m，除出口段采用钢板衬砌外，全洞均用 C20 级混凝土衬砌。鉴于泄洪洞出口段及发电支洞处山体单薄，且有风化夹层，洞内衬砌混凝土质量也较差，1969 年春在距泄洪洞出口 5.5m 处的衬砌混凝土发生环向裂缝，致使洞外山坡冒水，后采用缩小洞径，内衬钢筋混凝土和钢板作加固处理。1988 年 4 月，泄洪洞背山坡再次发生冒水，经检查发现泄洪洞出口段原内衬砌钢板与混凝土结合处发生拉裂，且距出口 27.3m 处出现环向裂缝，均有水渗出，此外，发电支洞也出现数条环向裂缝，其缝宽为 1mm，渗水量较大。

2、陆浑水库输水洞^[6] 该洞于 1965 年建成，主要起灌溉、放水和发电引水的作用。该洞横穿灰绿色玄武玢岩及紫红色安山玢岩，洞径 $\phi 3.5\text{m}$ ，全长 320.7m，衬砌混凝土标号为 C17 级，厚度为 0.85~1.00m，洞身比降为 1/300，伸缩缝止水采用白铁皮代替紫铜片。

1985 年元月该洞出口顶部坝后坡发现新的渗流泉，经观测，渗流量为 1.48L/s，库水位为 312.0m 时，最大渗流量 1.87L/s，无混水。根据两次进洞观察，发现 32 条伸缩缝漏水比较严重，原灌浆孔大部分没有封堵。初步统计有 152 个孔均有不同程度的回水，个别孔如同喷泉一样。

3、吉林大山渔场引水洞^[7] 它为两个宽 1.5m 和高 2m 的长方形洞。因厂房沉陷造成三条裂缝，最大一条缝在厂房与洞体的交接处，下宽上窄，最大缝宽 5cm。另两条缝在中部是上宽下窄，缝宽 1~2cm。洞体周围上体被水冲刷后，洞基下陷坝面塌坑。

4、吉林小椅山水库发电引水洞^[7] 它为钢筋混凝土及部分钢板衬砌结构，总长约 100m，最大直径 $\phi 2\text{m}$ ，最小直径 $\phi 1.7\text{m}$ 。经检查发现七处漏水带。漏水原因是洞体混凝土质量较差，漏水面积大、不集中，但也有较大漏水孔，如竖井段 5 号底板的漏水孔直径达 $\phi 10\text{cm}$ 。

5、引滦入津输水隧洞^{[8][9]} 它位于河北省迁西县和遵化县的交界处，是跨流域调水的关键工程，全长 12.39km，洞高 6.25m、洞宽 5.70m，为无压洞。衬砌形式有钢筋混凝土和锚杆挂网混凝土。

建成于 1983 年，运用至今，发挥了重大作用。由于隧洞洞线绝大部分处在微风化片麻岩地区内，地质情况复杂，存在较多断层。隧洞位于地下水位以下，施工时地下水多处涌出，施工难度大，加之工期又紧，致使工程存在混凝土质量较差等问题。自运行以来，洞内陆续出现混凝土溶蚀现象，尤以侧墙和顶拱发展较快。随着运行年限的增长，衬砌混凝土出现一些破坏，其中约占 1/3 底板呈现冲坑、麻面、骨料裸露，平整度差。侧墙墙体不断有水渗出，有的地方甚至形成连续的水流。

6、湖北白莲河引水发电隧洞^[10] 它位于大坝左岸，为单管三分岔式，主洞内径 $\phi 8\text{m}$ ，支洞内径 $\phi 3.4\text{m}$ ，总长 293m，埋藏于细粒花岗岩中，分段用钢筋混凝土和混凝土衬砌，并回填灌浆。但由于混凝土质量不好和分缝处理不当，当水头为 43m 时，漏水流量为 22.3L/s，严重地影响洞上方的山坡稳定和隧洞的耐久性。

7、湖北花山水库引水隧洞^[10] 它由主洞、岔洞和支洞组成，内径分别为 $\phi 3.0\text{m}$ 、 $\phi 1.5\text{m}$ 、 $\phi 1.2\text{m}$ 。混凝土衬砌厚度为 60~80cm。在内水压力为 0.355MPa 时，漏水流量高达 83.3L/s。产生漏水的原因是止水失效；出口段有宽 2mm 的环向裂缝；混凝土中有孔

洞、蜂窝以及灌浆孔封堵不严密。

8、湖北温峡水库底孔^[10] 温峡水库是一座以灌溉为主的大型水库。1966~1969年修建。底孔全长284m，座落在50m宽的断层破碎带上。由于混凝土质量不好，底孔管身出现裂缝350余条，漏水点多达270多处。有的地方甚至混凝土脱落，钢筋裸露。总漏水量达58.9L/s，严重地威胁大坝安全。

9、海南松涛水库导流洞^[11] 松涛水库大坝右侧有一座施工导流隧洞，长451.5m，直径 $\phi 5m$ ，最大泄量 $298m^3/s$ 。导流洞闸室于1959年建成。经过20年运行后，闸室胸墙在高程180.5m至181m间有2条水平的漏水带，漏水量约2.5L/s；146m高程右边闸门顶部约10cm范围有8处漏水。此外，胸墙高程183m、175m和149.5m出现不同程度渗漏，竖井后墙和侧墙有多处水平缝漏水和一些局部漏水，墙面除有大量白色碳酸钙沉积物外，还有很多红色的氢氧化铁沉积物。主要漏水原因：(1)施工质量差，冷缝缝面漏水，受渗水长期影响，有些缝逐渐掏空扩大而成射流； $Ca(OH)_2$ 从缝中不断流失造成水泥化产物硅酸盐的分解破坏而溶蚀；(2)混凝土内部脱空部位和蜂窝、麻面慢慢积水承压，逐渐破坏发展而成大的漏水点；(3)1期和2期混凝土接合部位浇筑质量差。

10、广东龙井水库输水洞进口段^[1] 由于进口体型不合理，产生空蚀。被剥蚀的面积达 $1\sim 2m^2$ ，蚀深30cm见图6。

11、浙江皎口水库底孔进口段^[12] 进口段为压力段。检修门槽置于上唇圆弧范围内见图7。1974年初建成，经多次放水运行，最大流量接近设计流量 $173m^3/s$ 。74年冬检修时，发现紧接门槽下游之上唇有明显空蚀破坏，螺纹钢筋裸露，深度达22cm，门槽下游两侧已有空蚀痕迹。

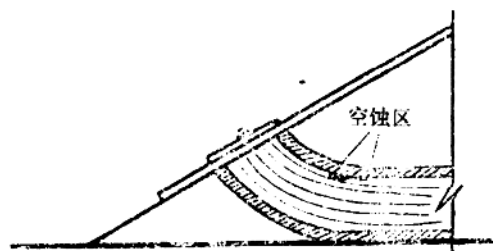


图6 广东龙井水库输水洞
进口空蚀示意

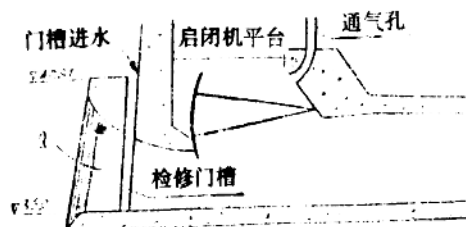


图7 浙江皎口水库坝内
底孔进口布置

12、黄河王圪堵水库泄洪排沙洞^[4] 它为城门形明流隧洞，宽4.5m、高6.75m、洞长258m，底坡1/96，进水口底高程1004m。平底压力进口段设有平板事故闸门和弧形工作闸门。喇叭口顶部为椭圆曲线，其方程为 $\frac{x^2}{4.02^2} + \frac{y^2}{1.22^2} = 1$ 。曲线段后为一水平段直

至出口。当库水位为 1037m 时, 椭圆曲线顶板下游有大片负压区, 最大负压为 -2.57m 水柱。同时椭圆曲线上压力分布也不均匀。

13、陕西桥峪水库输水洞^[13] 桥峪水库坝高 55.2m, 是以灌溉为主的小型水利工程。泄水建筑物有溢洪道和左、右输水洞。左输水洞全长 231m, 洞身断面为城门型洞, 输水洞最大泄量为 $19\text{m}^3/\text{s}$ 。输水洞闸室见图 8(a)。

1975 年 5 月投入运行。当闸门局部开启时, 通气孔外听到噼噼啪啪的空穴炸破声和咚咚的响炮声。输水洞门槽为矩形门槽, 宽 $W=45\text{m}$, 深 $D=45\text{cm}$, 宽深比 $\frac{W}{D}=1.0$, 下游没有错距。通过模型试验发现, 在左右两侧的门槽内, 形成一对称立轴旋涡, 引起闸门下游的空蚀; 在这种门槽的下游, 还有分离型空穴存在。在两种空穴的共同作用下, 在检修门槽和工作门槽之后以及渐变段内各有大小不等、深度不同的空蚀坑。门槽转角处角钢未见空蚀破坏, 紧接角钢的混凝土发生了破坏。1975 年详细统计了空蚀坑的深度和范围, 其结果见图 8(b)。破坏原因: 一是门槽和扩散段设计不合理; 二是闸门后洞身按明流设计, 实际运行时不能保证在各级流量时都是明流流态。

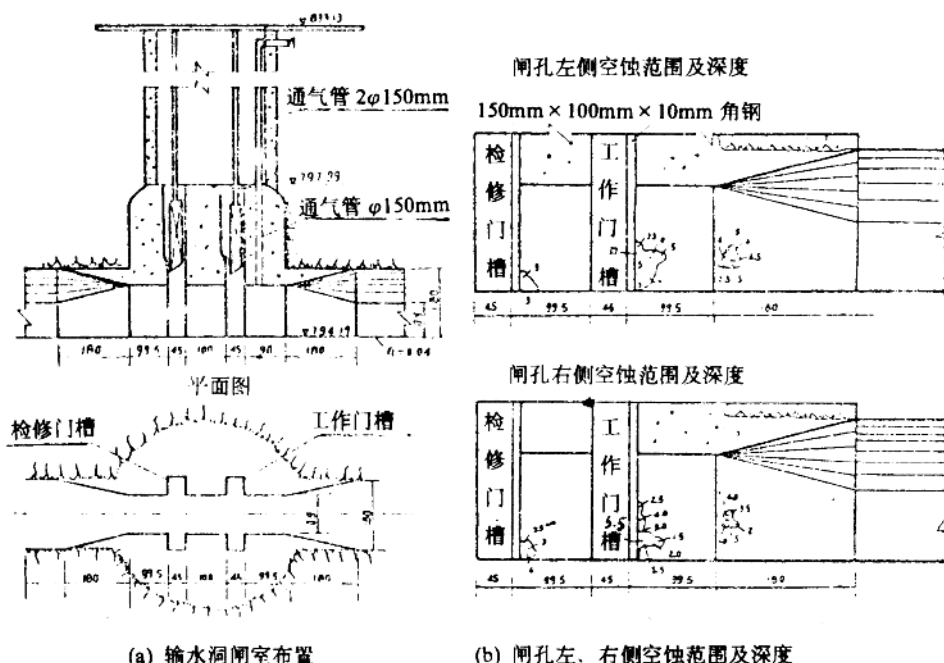


图 8 陕西桥峪水库输水洞 (单位:cm)

14、陕西羊毛湾水库泄水底孔^[13] 羊毛湾水库位于陕西乾县境内, 总库容 1.07 亿 m^3 , 坝高 48m。

在坝的右端有一泄水底孔，孔径 $\phi 2.5\text{m}$ ，长 203m 。水库于 1969 年建成。1970 年泄水孔首次放水，从通气孔发出如枪炮一样的声响，伴随着声响，闸室振动剧烈。1981 年至 1983 年泄水孔再次运用时又发生同样的现象，通气孔的声响更大，闸室的振动也更明显。塔壁浆砌石亦有漏水和局部砌缝有射水现象。被迫以检修门代替工作门。因止水相继损坏后处于无法检修状态，致使半年漏水量达 1500 多万 m^3 。

泄水底孔存在的主要问题是：洞身是园断面，闸室是方断面，闸室与洞身之间没有渐变段。这种不平顺的衔接方式，导致闸后流态紊乱，原设计闸后为明流，实际上是水气混合流。闸后两个直径 $\phi 20\text{cm}$ 的通气孔模型风速： 40m/s 以上（换算至原型风速可达 140m/s ），模型通气孔内已经发出嘟嘟声。原型通气孔发出的是噼噼拍拍空穴爆破声和咚咚的响炮声。另外一个问题是闸门槽的宽深比为 1.17 ，处于强旋涡区内。在左右两侧的门槽内形成一对立轴旋涡。这种旋涡型空穴不断地产生、溃灭。

15、河南石包头水库泄洪洞^[4] 设计为明流，平面滑动闸门为 $0.6\text{m} \times 1.2\text{m}$ ，设计水头为 30m 。门槽为矩形方角，其宽深比为 1.33 （宽 20cm 、深 15cm ）。1967 年建成运行，门槽发生空蚀破坏，后将钢筋混凝土改为钢板衬护，又遭破坏。

16、磨子潭水电站泄洪隧洞^{[14][15]} 泄洪洞自 1974 年至 1992 年累计运行 1405.7 小时。1991 年 7 月 11 月库水位超过设计洪水位 1.34m ，洞泄量为 $400\text{m}^3/\text{s}$ 左右。

该洞自 1959 年至 1973 年 5 月共运行约 510 小时。1973 年 4 月 6 日检查发现空蚀破坏，5 月 6 日在闸门 $1/3$ 开度下又放 88 小时，破坏仍在发展。其破坏部位在进口门槽下游顶部及侧墙约为 $2 \sim 3\text{m}$ 范围内，最大蚀坑深度约为 57cm 。中墩左侧受力筋裸露 11 根，温度筋裸露 4 根，中墩右侧受力筋裸露 10 根，温度筋裸露 3 根，顶部钢筋也已裸露（但尚未脱离混凝土）。

空蚀破坏范围及深度分布示意图 9。

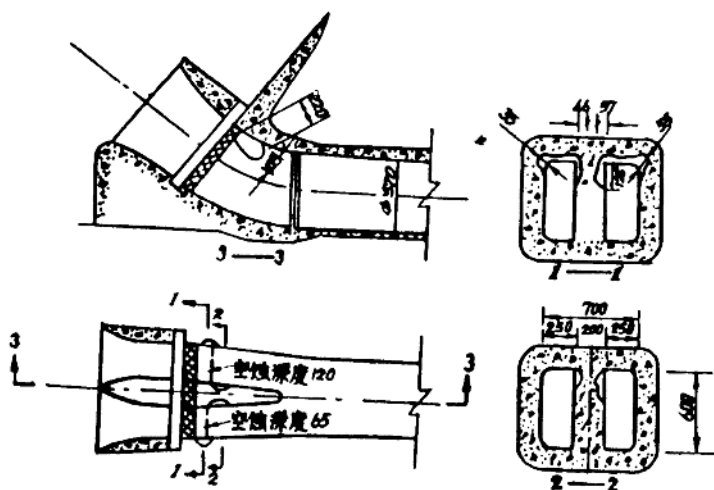


图 9 磨子潭泄洪洞进口段破坏示意 (单位: mm)

破坏的主要原因是由于闸门槽进水，闸槽后布置不能适应收缩水流上缘轨迹，促使水流分离，压力降低，造成空蚀破坏。

17、山东雪野水库放水洞^[16] 廊道式钢筋混凝土衬管，于1959年建成。泄量 $10.6\text{m}^3/\text{s}$ ，洞直径 $\phi 1.9\text{m}$ ，洞长 142.6m 。1982年进行检查，发现竖井下闸槽空蚀深达 $5\sim 20\text{cm}$ ，埋件破坏；闸后渐变段空蚀深 $23\sim 25\text{cm}$ ，闸后管内衬的 6mm 厚钢板锈蚀 $1\sim 3\text{mm}$ 。主要破坏原因是闸槽及渐变段附近体型设计不合理，未设通气装置等。

18、安徽沙河集水库输水洞^[1] 闸门由于局部开启，门后发生水跃，使闸门下游两侧及底部均发生空蚀破坏。

19、河北西大洋水库泄洪洞岔洞^[12] 在接近主洞出口布置岔洞见图10。西大洋水库临时泄洪时，关闭泄洪支洞弧形闸门，由发电支洞临时过水，泄洪流速 17.5m/s 时发现输水洞有较大震动，出口水流不稳定。汛后检查，看出分岔处混凝土剥蚀严重；剥蚀深度一般为 $10\sim 20\text{cm}$ ，最大达 30cm ，受剥蚀共五处，其中一处达 5m^2 ，见图11。

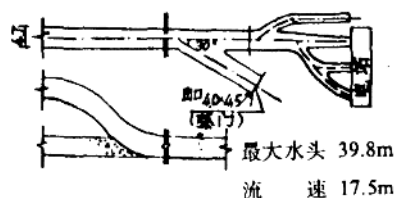


图10 河北西大洋工程布置

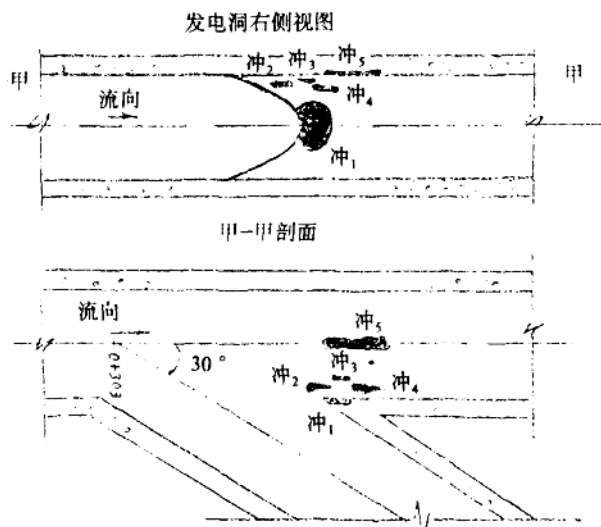


图11 河北西大洋水库泄洪洞发电洞右侧破坏情况

说明：

1. 冲₁：高 2.5m 、宽 2m ，
外露 12 根钢筋，最大淘深 30cm ，一般剥蚀 $10\sim 20\text{cm}$ ；
2. 冲₂：面积 0.16m^2 ，剥蚀 $5\sim 6\text{cm}$ ，外露 1 根钢筋；
3. 冲₃：面积 0.08m^2 ，最大剥蚀 $5\sim 6\text{cm}$ ；
4. 冲₄：面积 2.25m^2 ，最大剥蚀 13cm ，外露钢筋 1 根；
5. 冲₅：面积 1.5m^2 ，最大剥蚀 $7\sim 8\text{cm}$ 。

20、响洪甸水电站泄洪隧洞^[14] 洞径 $\phi 7.0\text{m}$ ，最大泄量 $618\text{m}^3/\text{s}$ 。1964年5月泄洪洞全开 23 小时后，发现工作闸门门槽下游严重空蚀。后用钢板衬护，空蚀现象仍存在。侧墙空蚀面积 0.8m^2 ，最大蚀深 150mm 。主要原因是压力洞出口体型设计不当和原门槽侧墙衬护材料不佳。

21、云南某中型水库有压输水隧洞^[4] 洞断面为圆形，出口设平面工作闸门。闸门后有一段方形短管。水流过闸后受到强烈的扰动，水舌破碎，水体中大量掺气，而闸后管道高度过低，水流封堵通气孔，形成低压区，从而造成空蚀。主要破坏原因是体型设计不

当。

22、云南渔洞底孔压力隧洞^[14] 隧洞内径 $\phi 4.5\text{m}$ ，压力洞长 410m，设计水头 70m，出口渐变段为圆变方，四面收缩，出口有 2m 平段，下游衔接长 10m、宽 3.5m 的平底矩形槽，再接扩散段。出口虽收缩比已达 77%，但由于出口有 2m 平段，再加洞底反坡与下游平底明槽衔接，形成类似下跌的水流，故该段洞顶出现很大负压。

23、柘林水电站泄空洞^[14] 它为压力隧洞，直径 $\phi 8.5\text{m}$ ，自 1972 年运用以来，消力池每年运行后均发生不同程度的破坏。破坏部位在左、右导墙、趾墩、消力池背水坡及护坦等处。此外，还有大面积的麻面，露筋达 6~19cm。消力池各部位破坏情况见照片 1。原设计泄洪洞下游消能为一级消力池，因流态差，消能不充分。后通过试验改为两级消能。因消力池长度不足及消能不充分，在两级消力池首部加设梳齿，池内加设消力墩。在陡槽末端布置五个矩形梳齿，二级池中设四个梯形消力墩。建成后曾多次泄洪，在高速水流作用下一级消力池池内的边墙、底板、梳齿及消力墩等消能设施反复发生空蚀破坏，并危及工程安全。这主要是消能设施体型不当造成的。

24、碧口水电站右岸泄洪洞^[14] 它是利用施工导流洞改建的“龙抬头”泄洪洞，出口设有一个扭鼻坎。1971 年 3 月截流过水。由于施工期紧迫、洞身混凝土质量差、洞子的体型尺寸较设计值相差较大，一般为 10~20cm 之间。底板浇筑高程控制不严，致使混凝土表面平整度差，各浇筑块之间错台严重，灌浆管头、钢筋头、混凝土残渣废弃物很多。经 5 年导流过水，1975 年 12 月下旬蓄水后进洞检查，发现洞底板遭严重破坏，除局部麻面外，混凝土表面砂浆几乎全部被冲刷、大骨料外露，大部分磨损 2~10cm，洞身右侧

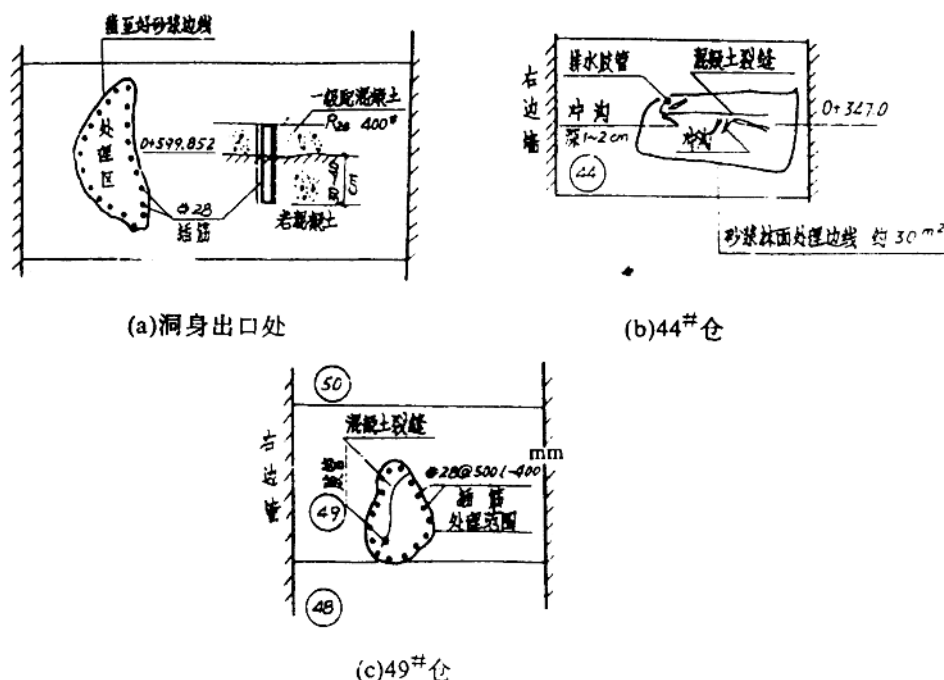
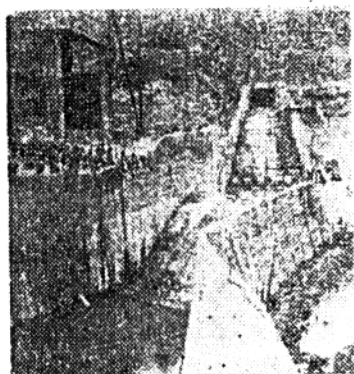
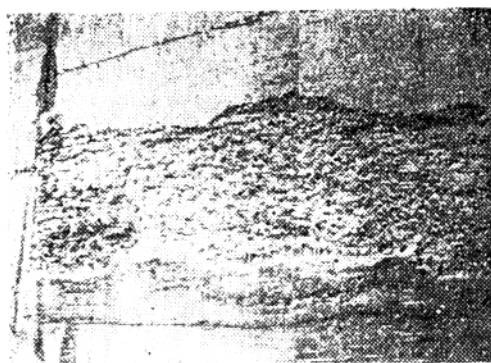


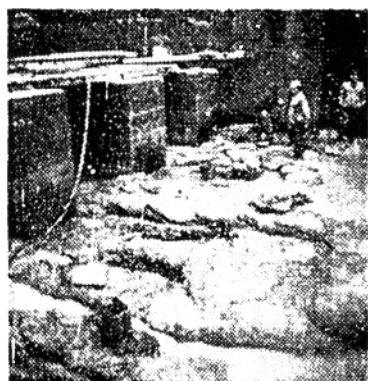
图 12 碧口右岸泄洪洞局部破坏和修补情况



(a)消力池全景



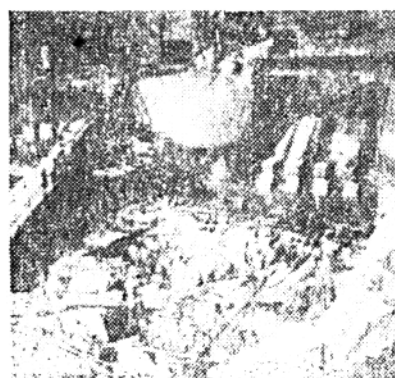
(b)左导墙破坏情况



(c)(d)趾墩下游护坦破坏情况



(e)消力墩下游坡破坏情况



(f)二级消力池后河床破坏情况

照片 1 柘林泄空洞消力池导墙、护坦及消力墩后破坏情况