

陡坡导流隧洞进口体型试验研究

石教豪^{1a}, 刘毅^{1b}, 段春荣², 盛君^{1a}

(1. 长江科学院 a. 水力学研究所; b. 长江工程建设监理有限责任公司;
2. 长江水利委员会 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010)

摘要:陡坡导流隧洞由于坡度较陡,洞内流态不好控制,进口体型优化比较关键。针对某项目施工导流工程进行了1:85水工整体模型试验,通过对进口、洞身流态进行比较,提出了隧洞进口布置形式的推荐方案,结果表明:方案一进口顶部采用椭圆形式,虽然在2级流量下,上游水位大大降低,但在导流设计流量条件下洞身形成明满流交替现象,对洞身安全不利;方案二隧洞进口采用锐缘形式,使导流洞的泄流能力、进口及洞内流态、压力特性均满足设计要求,可确保在各级导流流量下,洞身段均为明流,故建议将其作为推荐方案。研究成果可供设计参考应用。

关键词:导流;隧洞;进口;流态;体型

中图分类号:TV135.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-5485(2013)08-0037-03

1 工程背景

陡坡导流洞具有洞身流速大、明满流交替区间较大等特点,而明满流交替流态将使洞内水流的动水压力、流速等发生周期性的变化,且极易产生空化空蚀破坏,危及隧洞结构,从而影响建筑物的运行安全。因此,为了保证建筑物的安全,很有必要对陡坡导流洞的明满流交替流态以及控制措施进行研究。

某山区河道施工导流工程隧洞坡度较陡($i = 7.6\%$),施工导流采用一次性拦断河床、围堰全年挡水、隧洞泄流的方式。围堰挡水标准按10年一遇洪水设计,相应全年最大瞬时流量 $Q = 286 \text{ m}^3/\text{s}$,设计方案上游围堰轴线长约150 m,堰顶高程369 m,最大高度约50 m,截流流量 $Q = 225 \text{ m}^3/\text{s}$ 。施工导流平面及剖面图见图1。

导流隧洞进口底板高程为350 m,出口高程为265 m。导流隧洞断面形式选用施工方便的城门洞

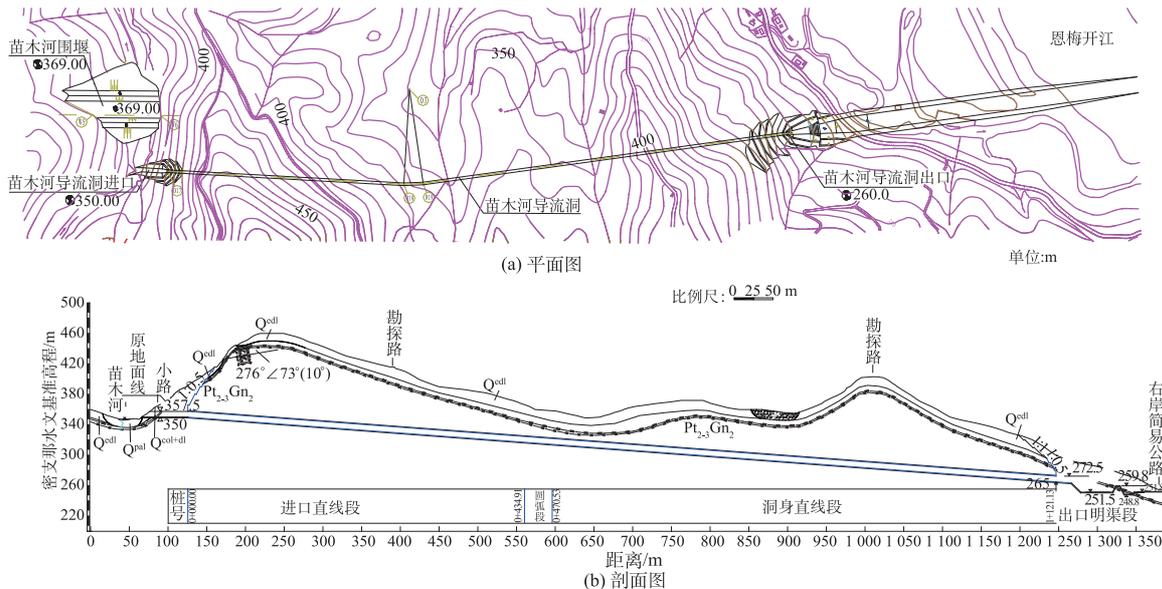


图1 某工程施工导流平面及剖面图

Fig. 1 Plan and profile of the diversion work for project construction

型,隧洞尺寸 5 m × 6 m (宽 × 高),高宽比为 1.2,顶拱半径 2.89 m,中心角 120°。导流隧洞洞身由进口直线段、圆弧段及出口直线段组成,长度为 1 124.35 m。

进口明渠:底高程 350.0 m,长约 60 m,渐变段长 10 m。出口明渠:翼墙段两侧扩散角为 6°,渐变段长 10 m。出口明渠底板高程为 260 m,鼻坎高程为 260 m,高过下游可能的最高水位 259.74 m,确保隧洞出流为自由挑流,下接挑流鼻坎,反弧半径 25 m,挑角 30°。

由于隧洞坡度较陡 ($i = 7.6\%$),陡坡隧洞水力学问题较复杂,具有洞身流速大、明满流交替区间较大等特点,目前尚无类似工程可循^[1]。根据工程等级及其隧洞坡度较陡、运行期长(5 年)的特点,依据相关规程规范的要求,应开展水工整体模型试验研究隧洞体型及下游消能防冲布置方案,并验证围堰设计高程的合理性,确保隧洞运行安全。由于隧洞出流为自由出流,下游水位不会影响洞内流态,故本试验关键是隧洞进口体型优化。

2 模型设计

模型按重力相似准则设计,为正态水工整体模型,模型比尺为 1:85。模型相应参数比尺如下:时间比尺为 $\lambda_t = \lambda_1^{1/2} = 9.220$;流量比尺为 $\lambda_Q = \lambda_1^{5/2} = 66\ 611.21$;流速比尺为 $\lambda_v = \lambda_1^{1/2} = 9.220$;糙率比尺为 $\lambda_n = \lambda_1^{1/6} = 2.097$ 。

模型模拟上游地形长约 400 m,最高高程模拟至 390 m,模拟下游地形长约 640 m,高程模拟至 270 m。模型宽度 5 m,长度 25 m,包含导流洞及上下游地形及工作平台。模型制作和安装精度均满足 SL155—95《水工(常规)模型试验规程》、SL156—165—95《水工(专题)模型试验规程》要求。

为了更精确地量测过流量,试验采用三角堰量测流量,采用水位测针量测水位^[2]。

3 试验成果及分析

3.1 方案一

该方案隧洞进口顶部采用典型的椭圆形式,椭圆方程(见图 2)为

$$\frac{x^2}{7.5^2} + \frac{y^2}{2.5^2} = 1. \quad (1)$$

为增大进口流速,降低水深,尽量避免洞内明满流的发生,上游明渠底板高程为 350.8 m,高于隧洞

进口底高程 350 m。导流隧洞断面形式不变,长度为 1 149.88 m。

试验观测了导流洞进口、洞内流态。试验测得上游水位与流量的关系见表 1。泄流能力见图 3。

表 1 方案一上游水位与流量关系

Table 1 Relation between upstream water level and discharge flow in scheme 1

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	H _上 /m	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	H _上 /m
48.56	352.85	286.00	357.67
88.90	353.80	289.77	357.70
128.37	354.95	362.45	358.40
189.01	356.55	434.79	359.14
225.00	357.33	539.20	360.55
243.33	357.36		

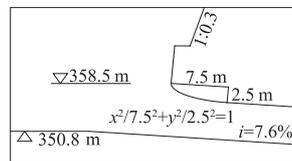


图 2 方案一进口大样图
Fig. 2 Detailed drawing of the inlet in scheme 1

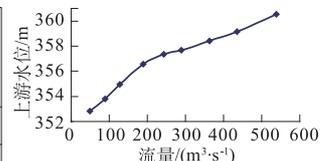


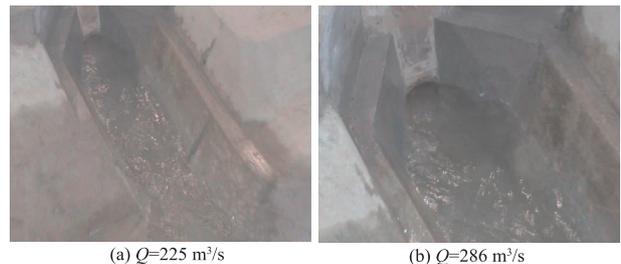
图 3 方案一泄流能力曲线
Fig. 3 Curve of discharge capacity in scheme 1

实测设计流量 $Q = 286 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, $H_{上} = 357.67 \text{ m}$ 。 $H_{上}/a = (357.67 - 350)/6 = 1.28, 1.2 < H_{上}/a < 1.5$,进口为半有压流或不稳定流流态(其中, a 为洞高^[3])。观测结果如下。

(1) 进口:库水位随着流量增大而逐步抬高,当 $Q \geq 243.33 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,隧洞进口被淹没,同时伴随有串通吸气漏斗漩涡产生。

(2) 洞内:当 $Q \geq 243.33 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,洞内开始形成明满流交替流态,且流量区间很大,在 $Q = 539.20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,洞内仍为明满流交替流态。

(3) 在流量 $Q = 225 \text{ m}^3/\text{s}$ 、下游水位 $H_{下} = 248.67 \text{ m}$ 时,进口未被淹没,洞内均为明流状态。在流量 $Q = 286 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $H_{下} = 248.67 \text{ m}$ 时,进口被淹没,伴随有串通吸气漏斗漩涡产生,洞身为明满流交替形态。2 级流量进口流态见图 4。



(a) $Q=225 \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $Q=286 \text{ m}^3/\text{s}$

图 4 方案一进口流态

Fig. 4 Flow pattern at the inlet in scheme 1

方案一试验成果表明:进口顶部采用椭圆形式,在设计流量 $Q = 286 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,上游水位较低,但洞身

在 $Q = 243.33 \sim 539.20 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量区间内形成明满流交替形态,同时进口有串通吸气漏斗漩涡产生。为避免上述不利流态,进口体型需要进行优化。

3.2 方案二

由于进口顶部采用典型的曲线型式,洞内流态不佳,考虑到隧洞坡度较陡较长,隧洞进口采用锐缘形式,以期产生水流封闭进口而洞内产生明流流态,见图 5。

试验观测了导流洞进口、洞内流态,测得方案二上游水位与流量的关系见表 2,泄流能力曲线见图 6。

表 2 方案二上游水位与流量关系

Table 2 Relationship between upstream water level and discharge flow in scheme 2

流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$H_{\text{上}}/\text{m}$	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$H_{\text{上}}/\text{m}$
36.38	352.57	282.53	365.81
46.34	352.75	286.00	366.11
83.27	353.73	357.47	372.8
142.70	355.49	430.15	380.31
186.20	358.16	470.00	383.62
225.35	361.04		

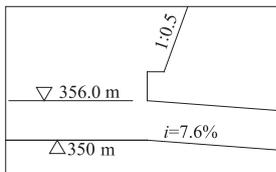


图 5 方案二进口大样图
Fig.5 Detailed drawing of the inlet in scheme 2

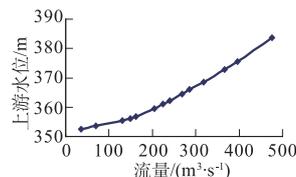


图 6 方案二泄流能力曲线
Fig.6 Curve of discharge capacity in scheme 2

实测设计流量 $Q = 286 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, $H_{\text{上}} = 366.01 \text{ m}$ 。
 $H_{\text{上}}/a = (366.01 - 350)/6 = 2.67, H_{\text{上}}/a > 1.5$, 进口为有压流^[3]。观测成果如下。

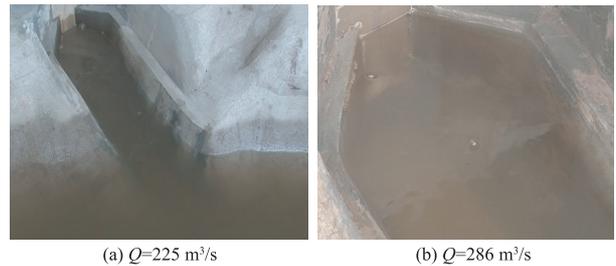
(1) 进口: $Q = 34.94 \sim 130.09 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 进口均未被淹没, 洞内呈明流, 出口呈自由出流, 随着流量增大, 上游水位逐步抬高, 当 $Q \geq 148.94 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 隧洞进口被淹没。

(2) 洞内: 当 $Q \geq 148.94 \text{ m}^3/\text{s}, H_{\text{上}} \geq 356.00 \text{ m}$ 时, 由于进口顶部为锐缘, 且隧洞底坡较陡, 导流洞进口段形成闸孔出流形态, 虽过进口后有一水面跌落, 随后水面壅起, 但水面未触及洞顶, 进口后的洞身段均为明流。

(3) 当 $Q = 225, 286 \text{ m}^3/\text{s}$ 两级流量下, 进口均被淹没, 偶有漩涡产生, 进口段之后均为明流。两级流量进口、洞身流态见图 7。

4 结论和建议

通过 2 种典型方案的试验分析可知: 方案一进口顶部采用典型椭圆形式, 虽然在 2 级常遇流量下上游



(a) $Q=225 \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $Q=286 \text{ m}^3/\text{s}$

图 7 方案二进口流态

Fig.7 Flow pattern at the inlet in scheme 2

水位大大降低, 但在导流设计流量条件下洞身形成明满流交替现象, 对洞身安全不利, 明渠内流速不大; 方案二隧洞进口采用锐缘形式, 上游进口未见表面漩涡, 洞内流态大大改善, 导流洞的泄流能力、进口及洞内流态均满足设计要求。考虑到河道狭窄, 围堰工程量较小, 故建议进口顶部采用锐缘形式。由于锐缘进口跟流态的关系目前尚无成熟的理论来支撑, 一般通过试验来分析, 本文试验成果如下:

(1) 在围堰挡水设计标准流量 $Q = 286 \text{ m}^3/\text{s}$ (洪水频率 $P = 10\%$) 时, 上游水位为 366.11 m , 低于围堰堰顶高程 369 m , 表明导流洞泄流能力满足要求。

(2) 在 $Q \geq 186 \text{ m}^3/\text{s}, H_{\text{上}} \geq 358.16 \text{ m}$ 时, 进口开始淹没, 偶有漩涡产生; 在 $Q = 286, 225 \text{ m}^3/\text{s}$ 两级流量时, 进口均被淹没, 洞身进口段类似闸孔出流流形态, 洞身为明流。

(3) 由于进口顶部采用锐缘形式, 局部损失较大, 对泄流能力有较大影响, 进口形式与泄流能力、导流洞坡度以及流量与洞内流态的关系还需做进一步探索。

参考文献:

- [1] 清华大学水力学教研组. 水力学(下册)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980. (Hydraulics Research Team of Tsinghua University. Hydraulics (the Second Volume) [M]. Beijing: People's Education Press, 1980. (in Chinese))
- [2] 李学海, 石教豪, 曾正春. 马来西亚沐若水电站施工导流 1:80 水工整体模型试验成果报告[R]. 武汉: 长江科学院, 2009. (LI Xue-hai, SHI Jiao-hao, ZENG Zheng-chun. Report on the 1:80 Hydraulic Model Test for the Diversion Work of Muruo Hydropower Station in Malaysia [R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [3] 武汉大学水利水电学院水力学流体力学教研组. 水力计算手册(2 版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (Hydraulic Fluid Mechanics Teaching and Research Team of School of Water Resources and Hydropower Engineering of Wuhan University. Manual of Hydraulic Calculation (Second Edition) [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))