

与高速路桥立体交叉的水库溢洪道设计研究

帅世杰

中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081

[摘要]某高速在规划过程中未能有效识别某水库淹没区及工程建设区范围, 导致某高速桥的部分桥墩与某水库溢洪道相互交叉干扰。在水库溢洪道设计方案调整过程中, 充分考虑高速路桥的布置现实, 经过冲突主体两家设计单位充分研究沟通, 在满足溢洪道规划设计功能的前提下, 充分利用空间地形条件, 对溢洪道布置进行优化调整, 实现洪水不冲、过水不漫、基础不垮的必要条件, 为两个脱贫攻坚民生项目的同步开展创造条件。

[关键词]水库; 高速路桥; 规划冲突; 优化调整; 立体交叉

DOI: 10.33142/hst.v4i2.3774

中图分类号: TV651.1

文献标识码: A

Study on Design of the Reservoir Spillway Intersecting with Expressway Bridge

SHUAI Shijie

Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou, 550081, China

Abstract: In the planning process of a certain expressway, the inundation area and the scope of construction area of a certain reservoir were not identified effectively, which led to the cross-interference between some piers of the expressway bridge and the spillway of a reservoir. During the reservoir spillway design scheme adjustment, the layout of the highway bridge reality is taken into full consideration. After full study and communication between the two design units of the conflict subject, the layout of the spillway should be optimized and adjusted by making full use of the spatial and topographical conditions on the premise of meeting the spillway planning and design functions, so as to realize the necessary conditions of no flood, no overflow and no foundation collapse, create conditions for the simultaneous development of the two poverty alleviation and livelihood projects.

Keywords: reservoir; expressway bridge; planning conflict; optimization and adjustment; vertical crossing

引言

基础设施建设是推进城市化进程的必要保证, 对地区经济与社会发展具有重要作用。水利、交通等重点行业基础设施建设目前正蓬勃发展。但由于规划主体、行业标准和规划时间等不一致, 导致不同行业间基础设施规划存在冲突。贵州省某水库和某高速公路即是此类冲突的典型代表。

某高速在规划过程中未能有效识别某水库淹没区及工程建设区范围, 导致高速路桥的部分桥墩与水库溢洪道相互交叉干扰。两个项目面临用地冲突、交叉施工、结构稳定相互影响等问题。鉴于高速在水库两端的桥梁隧洞基础已经成型, 无法调整水库段高速路线, 上级主管部门要求水库调整溢洪道轴线, 以避免高速, 而高速则复核其桥面高程以及基础稳定性。

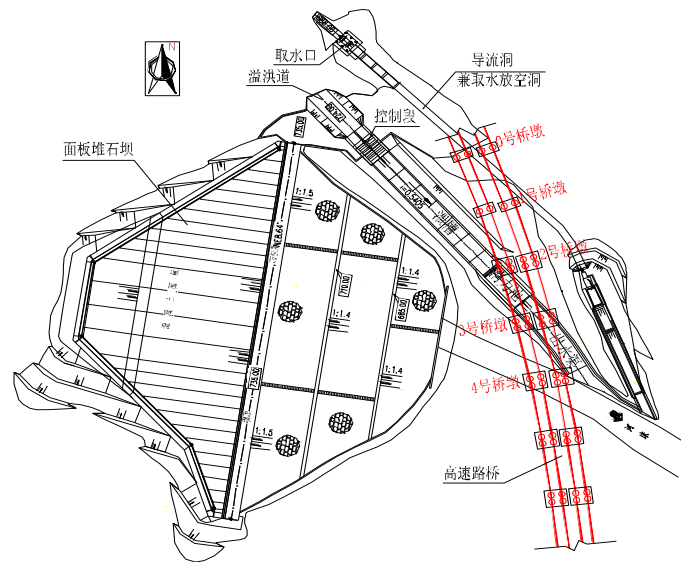


图1 某高速路桥与某水库溢洪道规划冲突示意图

1 设计思路

经水库和高速设计单位共同研究，水库溢洪道在满足原设计批准的泄洪功能的前提下，结合高速桥结构调整溢洪道布置，并对调整后的溢洪道关键指标进行验算，满足“不冲、不漫、不垮”。

不冲：针对高速路桥的2~4号桥墩坐落在某水库消力池及出水渠的情况，在高速路线无法调整的情况下，只有旋转溢洪道轴线，并重新布置消力池及延长出水渠，确保水流不对高速路桥基础造成冲刷，或因溢洪道挑流对高速公路造成雾化影响而危及行车安全。

不漫：在结构上避开了高速路建筑物后，还要保证溢洪道内的水流在最不利设计工况下能够安全归槽，确保洪水不会漫出消力池及出水渠，而对周边的高速路桥基础造成浸泡、掏蚀等影响，或是水库泄洪冲下的固体漂浮物翻越消力池或出水渠撞击高速桥桩而对桥桩造成损害。

不垮：由于溢洪道消力池及出水渠邻近高速路桥基础，设计应充分考虑消力池及出水渠开挖施工对高速路桥基础造成的临时影响，并且确保消力池及出水渠边墙的永久稳定。即在开挖临时基坑时边坡不垮，消力池及出水渠边墙永久建筑物在任何工况下稳固可靠。否则在消力池及出水渠临时基坑边坡或边墙永久建筑物垮塌后，水流将不断冲刷掏蚀高速桥基础，对高速路桥造成安全隐患。

2 设计与计算

2.1 防冲设计

要在空间上完全避开高速公路建筑结构，需在溢洪道布置上着手。

(1) 轴线调整

设计保持初设溢洪道进口、控制段、泄槽和消力池基本组合不变，将溢洪道轴向大坝一侧顺时针旋转，使整个溢洪道包括消能防冲区避开高速公路大桥桥墩，但由于消能防冲区距离下游桥墩仅20余米，消力池出水可能对桥墩及桥墩基础造成冲刷影响。为避免泄洪时水流冲刷高速公路桥墩及其基础，在消力池出口布置加长的出水渠穿过大桥，将消力池出水引至大桥的下游。调整后的溢洪道亦呈直线布置，轴线方位角为N25°W，整个溢洪道由引渠段、控制段、泄槽段、消力池及出水渠组成。

引渠段及控制段除方位角外其余设计参数与初设相同。调整后泄槽纵坡由1:1.85调整为1:1.5，经复核泄槽段最大流速34.68m/s（校核洪水P=0.1%工况）。

泄槽断面尺寸与初设一致，矩形底净宽12m，边墙净高2.6m，边墙厚1m，考虑到泄槽上部流速小，中下部流速较大，溢横0+64.43m以上采用C25混凝土，溢横0+64.43m以下采用C40混凝土，泄槽底板调整为1m厚。其余结构与初设相同。为降低泄槽底板扬压力，在泄槽底板设纵横向排水盲沟。

(2) 消能防冲方式

受上部高速路桥影响，溢洪道出口消能不宜采用挑流消能，而采用底流消能方式，消力池为矩形断面，长 41m，池深 4.2m；底板高程为 659m，厚 1.5m，边墙为重力式挡墙，顶宽 1.5m，背水面坡比 1:0.5。为降低非泄洪工况下消力池背侧的水压力，在左岸边墙设三排排水孔，右岸边墙设一排排水孔。

(3) 延长出水渠

消力池出口接出水渠，引导水流从桥墩之间通过，避免水流冲刷桥墩危及高速公路安全。出水渠走向为 N25° W 转 S83.77° E，沿 S49.04° E 归入原河道，转弯半径 30m，出水渠底板纵坡 2‰，渠长 126.47m，底宽 12m。

2.2 防漫设计

复核溢洪道在最不利工况下的水力学计算，保证溢洪道水流在任何情况均可归槽。

(1) 消能防冲计算

本工程消能防冲建筑物设计洪水标准为 20 年一遇 (P=5%)，消能方式采用底流消能。

跃后水深

$$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8F_r^2} - 1) \quad (1)$$

$$F_r = v_1 / \sqrt{gh_1} \quad (2)$$

式中 h_1 为收缩断面水深； h_2 为跃后水深； v_1 为收缩断面流速； F_r 为收缩断面弗汝德数。

① 消力池深度

$$\Delta z = \frac{Q^2}{2gb^2} \left(\frac{1}{\varphi^2 h_1^2} - \frac{1}{\sigma^2 h_2^2} \right) \quad (3)$$

$$d = \sigma h_2 - h_1 - \Delta z \quad (4)$$

式中 Δz 为消力池出口水面落差； b 为消能宽度，计算中取 $b=12m$ ； φ 为消力池出流的流速系数，计算中取 $\varphi=0.95$ ； σ 为水跃淹没度； h_1 为消力池出口下游水深。

② 消力池长

$$L_k = 0.8L \quad (5)$$

其中，当 $1.7 < F_r \leq 9.0$ 时， $L/h_1 = 9.5(F_r - 1)$ ；当 $9.0 < F_r < 16.0$ 时， $L/h_1 = 8.4(F_r - 9) + 76$ 。式中， L_k 为消力池长度； L 为水跃长度。

表 1 消能防冲计算成果

| 计算工况 | 洪水标准 | Q (m ³ /s) | 跃后水深 h ₂ (m) | 自由水跃长度 L (m) | 消力池长度 L _k (m) | 池深 s (m) | 出口流速 v (m/s) |
|----------------|------|-----------------------|-------------------------|--------------|--------------------------|----------|--------------|
| 校核洪水 | 0.1% | 337.50 | 11.12 | 68.60 | 54.88 | 5.25 | 3.79 |
| 下游高速公路大桥防洪标准洪水 | 1% | 190.80 | 8.05 | 50.51 | 40.41 | 3.69 | 3.67 |
| 溢洪道设计洪水 | 2% | 149.60 | 6.98 | 44.00 | 35.20 | 3.00 | 3.80 |
| 消能防冲设计洪水 | 5% | 96.6 | 5.33 | 33.84 | 27.08 | 1.83 | 4.93 |
| 常遇洪水 | 10% | 57.00 | 3.77 | 23.95 | 19.16 | 0.60 | / |

消能防冲区设计洪水工况下 (P=5%) 计算得消力池池长约为 27.08m，池深 1.83m，但考虑到下游为高速公路大桥的重要性，且距离消力池出口直线距离仅 20 余米，为防止水库泄洪情况下，水流不会冲刷破坏桥墩及其基础，将消力池长度和池深增加；考虑到下游高速公路桥的防洪标准为 P=1%，故消力池池长及池深采用 P=1% 洪水计算所得的池长和池深，消力池池长取 41m，池深取 4.2m (3.7m+0.5m 富裕)。

(2) 出水渠过流能力计算

采用明渠均匀流谢才公式进行复核：

$$Q = AC\sqrt{Ri} \quad (6)$$

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (7)$$

式中 Q 为明确均匀流流量； A 为过流断面面积； C 为谢才系数； R 为过流断面水力半径； i 为渠道纵坡； n 为渠道综合糙率，取 $n=0.02$ 。

经过计算，在百年一遇流量 $Q=190.9\text{m}^3/\text{s}$ ($P=1\%$ 大桥防洪标准)，计算所得正常水深 $h_0=3.99\text{m}$ (渠底宽度取 12m ，底坡 $i=0.02$)。结合地质条件及消力池尾坎高程综合考虑，出水渠边墙顶高程与最高渠底高程高差为 5.35m ，出水渠过流能力能满足百年一遇的过流要求。

(3) 出水渠转弯段水位差计算

弯道段最大横向水面差可按如下经验公式计算：

$$\Delta h = K \frac{v^2 b}{g r_0} \quad (8)$$

式中 Δh 为弯道外侧水面与中心线水面高程； b 为弯道宽度， 12m ； r_0 为弯道中心线曲率半径； K 为超高系数。

经过计算，在百年一遇流量 $Q=190.9\text{m}^3/\text{s}$ ($P=1\%$ 大桥防洪标准)，计算所得正常水深 $h_0=3.99\text{m}$ ，流速 $v=3.99\text{m}/\text{s}$ 。尾水渠转弯半径 30m ，水面超高 $\Delta h=0.65\text{m}$ 。转弯段边墙在原有基础上增加 0.7m 。

2.3 防垮塌设计

有些工程在结构设计中，对泄洪的特点和基础特性考虑不周，溢洪道下泄的高速水流具有很强的冲击力，由于急流的掺气和脉动现象十分显著，常会产生剧烈的震动。有些溢洪道采用低标号的浆砌石或砼砌护，且砌护厚度与边坡砌护高度都不能适应结构稳定要求，因而不能抵御高流速的冲刷而失稳。本工程调整后溢洪道出水渠边墙采用重力式混凝土挡墙，挡墙坐于强风化上部，并下挖 0.5m ，顶宽 1m ，迎水侧直立，背水侧 $1:0.5$ ，基础设 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 的基础扩大台阶。

(1) 抗滑稳定计算

$$K_c = \frac{f \sum G}{\sum H} \quad (9)$$

式中， K_c 为挡土墙沿基底面的抗滑稳定安全系数； $\sum H$ 为作用在挡土墙上全部平行于基底面的荷载； f 为挡土墙基底面与地基之间的摩擦系数。

(2) 抗倾覆稳定计算

$$K_0 = \frac{\sum M_v}{\sum M_H} \quad (10)$$

式中 K_0 为挡土墙抗倾覆稳定安全系数； $\sum M_v$ 为对挡土墙地基前趾的抗倾覆力矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)； $\sum M_H$ 为对挡土墙地基前趾的倾覆力矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)。

(3) 挡墙应力计算

$$P_{\max/\min} = \frac{\sum G}{A} \pm \frac{\sum M}{W} \quad (11)$$

式中 $P_{\max/\min}$ 为挡土墙基底应力的最大值或最小值； $\sum G$ ——作用在挡土墙上全部垂直于水平面的荷载； $\sum M$ ——作用在挡土墙上全部荷载对于水平面平行前墙墙面方向型心轴的力矩之和； A 为挡土墙基底面的面积； W 为挡土墙基底面对于基底面平行前墙面方向形心轴的截面距。

(4) 计算工况

计算工况包括基本组合下的正常蓄水位工况，特殊组合下检修工况和正常蓄水位遇地震工况

(5) 作用荷载

① 自重荷载

自重荷载按几何尺寸及容重计算，挡墙的容重取 $24\text{kN}/\text{m}^3$ 。

② 静水压力

$$P = \frac{1}{2} \gamma h^2 \quad (12)$$

式中 P 为水压力 (kN); h 为挡土墙迎水面水深 (m)。

③地震力

采用拟静力法进行地震力计算, 计算公式为:

$$F_i = \alpha_h \xi G_{Ei} \alpha_i / g \quad (13)$$

式中 F_i 为作用在质点 i 的水平向地震惯性力代表值; ξ 为地震作用的效应折减系数, 取 0.25; G_{Ei} 为集中在质点 i 的重力作用标准值; α_i 为质点 i 的动态分布系数; g 为重力加速度。

(6) 计算结果

①消力池挡墙计算成果

表 2 消力池挡墙抗滑稳定计算结果表

| 荷载组合 | 工况 | 抗滑力 (kN) | 滑动力 (kN) | 安全系数 K_c | 设计标准 |
|---------|----------|----------|----------|------------|------|
| 基本组合 | 正常蓄水位 | 503.13 | 330.5 | 1.522 | 1.05 |
| 特殊组合 I | 检修工况 | 470.802 | 445.221 | 1.057 | 1.00 |
| 特殊组合 II | 正常蓄水位+地震 | 503.13 | 357.703 | 1.407 | 1.0 |

表 3 消力池挡墙抗倾覆计算结果表

| 荷载组合 | 工况 | ΣM_v (kN·m) | ΣM_u (kN·m) | 安全系数 K_0 | 设计标准 |
|------|----------|---------------------|---------------------|------------|------|
| 基本组合 | 正常蓄水位 | 6100.668 | 3242.677 | 1.881 | 1.4 |
| 特殊组合 | 检修 | 6050.155 | 3638.248 | 1.663 | 1.3 |
| | 正常蓄水位+地震 | 6100.668 | 3638.248 | 1.823 | 1.3 |

表 4 消力池挡墙基底应力计算结果表

| 荷载组合 | 工况 | Pmax (kPa) | Pmin (kPa) |
|------|----------|------------|------------|
| 基本组合 | 正常蓄水位 | 254.28 | 24.308 |
| 特殊组合 | 检修 | 257.845 | 2.834 |
| | 正常蓄水位+地震 | 243.201 | 35.387 |

计算结果均满足设计标准要求, 说明挡墙断面设计合适。

②出水渠挡墙计算成果

计算成果如下表所示, 计算结果均满足设计标准要求, 说明挡墙断面设计合适。

表 5 出水渠挡墙抗滑稳定计算结果表

| 荷载组合 | 工况 | 抗滑力 (kN) | 滑动力 (kN) | 安全系数 K_c | 设计标准 |
|--------|----------|----------|----------|------------|------|
| 基本组合 | 正常蓄水位 | 326.791 | 295.917 | 1.104 | 1.05 |
| | P=5%洪水 | 254.391 | 41.019 | 6.202 | |
| 特殊组合 1 | P=1%洪水 | 230.791 | 155.333 | 1.486 | 1.0 |
| 特殊组合 2 | 正常蓄水位+地震 | 332.588 | 328.459 | 1.013 | |

表 6 出水渠挡墙抗倾覆计算结果表

| 荷载组合 | 工况 | ΣM_v (kN·m) | ΣM_u (kN·m) | 安全系数 K_0 | 设计标准 |
|------|----------|---------------------|---------------------|------------|------|
| 基本组合 | 正常蓄水位 | 2828.908 | 1243.895 | 2.274 | 1.4 |
| | P=5%洪水 | 3443.865 | 1672.295 | 2.059 | |
| 特殊组合 | P=0.1%洪水 | 4269.116 | 1813.895 | 2.354 | 1.3 |
| | 正常蓄水位+地震 | 2895.309 | 1329.153 | 2.178 | |

表 7 出水渠挡墙基底应力计算结果表

| 荷载组合 | 工况 | Pmax (kPa) | Pmin (kPa) |
|------|----------|------------|------------|
| 基本组合 | 正常蓄水位 | 280.735 | 10 |
| | P=5%洪水 | 128.742 | 83 |
| 特殊组合 | P=0.1%洪水 | 220.470 | 12 |
| | 正常蓄水位+地震 | 294.284 | 5 |

3 结论

在水库设计过程中，绝大多数溢洪道设计均只考虑一个方向的设计，即纵轴线布置设计，并围绕该轴线布置开展相关设计指标分析。

而某水库存在与高速路桥立体交叉的情况，除了需要调整溢洪道纵轴线以避免高速路桥基础外，还需避免采用挑流消能方式对溢洪道上空的高速路行车造成危害，在平面上要通过加长的引水渠将洪水引流穿过高速路桥范围，并且采取措施确保出水渠内水流不对高速路桥基础造成任何影响。经过设计应用，证明某水库溢洪道调整设计是可行的，在保障上部高速路桥的安全运行的同时，也充分发挥了溢洪道泄洪功能。

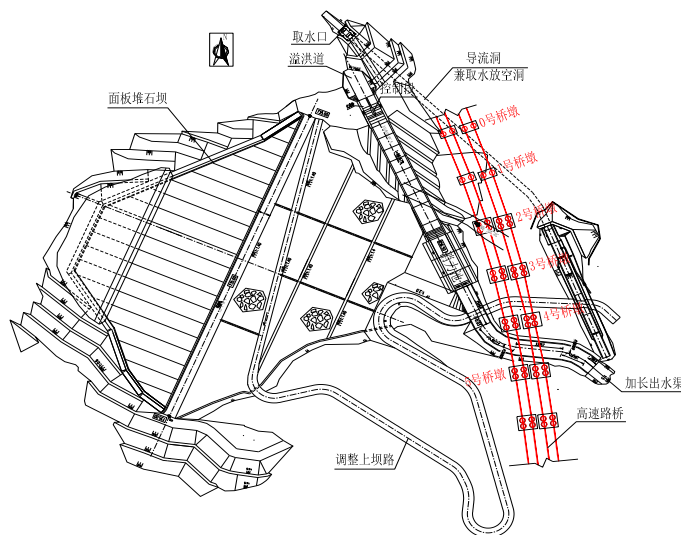


图 2 与某高速路桥立体交叉的某水库溢洪道布置调整设计

4 建议

在水利工程建设中，不乏有类似某水库这样与高速公路此类重要建筑物紧密交叉的情况，建议政府各有关职能部门充分利用信息时代大数据的作用，建立工程项目规划占地数据库，在新建项目规划审批时必须通过统一的数据库检查，确保不存在规划冲突后再予以批准建设。

但是部分信息化发展落后地区难免遇到此类问题时，除了要满足自身项目原设计标准的要求外，最重要的就是要兼顾到交叉对象的防护，至于对交叉对象的防护目标，应通过充分的论证确定设计目标任务。既然无法避开，就得采取方法相互协调，使其共同发挥作用，为国家的基础设施建设增砖添瓦。

[参考文献]

[1] 洪振国, 洪振权. 水库溢洪道结构及布置设计研究[J]. 海河水利, 2016(4): 26-29.
[2] 李长余, 王开成. 山区水库溢洪道和放水洞工程布置优化组合及型式选择[J]. 吉林水利, 2003(7): 4-5.
[3] 韩峰, 徐岗, 来妙法, 范晶晶. 方溪水库岸边式溢洪道布置及消能方式研究[J]. 浙江水利科技, 2013, 41(4): 47-48.
[4] 湖南省水利水电勘测设计研究总院. 溢洪道与汇洪隧洞分册-中小型水利水电工程典型设计图集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
[5] 向蕾. 浅析某水电站工程溢洪道消能设计[J]. 河南水利与南水北调, 2015(16): 10-11.

作者简介: 帅世杰 (1982-), 男, 现就职于中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 高级工程师。