

# 泥石流条件下的水库库区桥梁设计与计算探究

胡寿长

中绎建设科技集团有限公司

**摘要:**当桥梁直接跨越泥石流沟时,大多采用两种方案:一种是在泥石流沟中不设桥墩,直接采用一跨大跨径桥梁跨越泥石流沟;另一种是将落在泥石流沟中的桥墩设置为大尺寸实心墩,基础一般采用扩大基础或群桩基础。当水库上游与泥石流沟相交时,水库库区中的桥梁也会受到泥石流的影响;但是,水库库区河道一般较宽,水深较深,采用上述方案会导致技术难度增大且造价较高,使项目实施难度增大;同时,与直接通过泥石流沟的桥梁不同,库区中桥梁受到泥石流的冲击不是直接的,因此会在一定程度降低对桥墩的冲击力。本文选取的案例为四川甘孜州某水库库区桥梁建设项目,该水库上游有多条较大泥石流沟,通过计算分析证明,该桥采用单桩圆柱式桥墩仍能满足结构安全要求<sup>[1]</sup>。

**关键词:**泥石流;水库库区;桥墩抗撞计算

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.19.044

## 引言

泥石流是山区地形中一种常见的地质灾害,认识并采取适当工程措施处理泥石流是路桥设计必须要面对的问题。在涉及泥石流的桥梁工程案例中,当桥梁直接跨越泥石流沟时,设计人员大多采用了以下两种方案:一种是采用大跨径桥梁,用一跨桥梁直接跨越泥石流沟;另一种是采用小跨径桥梁,但是在泥石流沟中设置防撞性较好的大尺寸实体墩;理论和大量工程实践证明,此两种方案可靠性高,保障了人民群众的生命和财产安全。

当水库上游有泥石流沟时,水库库区的桥梁建设必然也会受到泥石流的影响;为保证桥梁运行的安全,库区桥梁建设也可以参照跨越泥石流沟的桥梁建设方案。然而,库区桥梁与跨越泥石流沟的桥梁建设条件差别极大,盲目照搬可能会导致建设成本上升较多;当项目建设资金受限时,可能会导致项目无法实施。另外,在与泥石流沟相交的水库中,沟中形成的泥石流并不会直接冲击库区桥梁的桥墩,而是会先汇入水库库区,被水库中的水稀释并减速,泥石流固体颗粒堆积在沟口处水库中;当水库上游发生较大洪水时,堆积在水库中的固体颗粒可能被快速流动的洪水带着往下游移动,形成二次泥石流,然后再与库区中桥梁桥墩产生作用;泥石流对桥墩的冲击作用将在一定程度上被削弱。基于上述两个原因,从定性分析来看,库区中桥梁设计方案可能有优化的空间<sup>[2]</sup>。

本文以四川甘孜州某扶贫桥梁建设项目为例,探究与泥石流沟相交的水库库区桥梁建设的方案,并按照泥石流灾害相关规范中的公式定量计算泥石流对桥墩的冲击力,验算桥墩的安全性。

## 一、项目概况

该项目位于四川省甘孜州,桥梁跨越某水电站库区,位于坝址以上约1.5km处;建桥处河流宽约85m。拟

建桥梁南接水库沿岸的省道,北接对岸村庄,其建设目的是为了更方便水库北岸居民人员与货物的流通,促进其经济发展。该桥梁宽8.5m,按三级公路标准设计。

## 二、主要建设条件

### (一)水文条件

该桥所跨库区河流宽约85m,水深约10m;水电站夏季泄洪发电频率较高,有时为1天1次,泄洪发电时水流速度最大可达到5~6m/s。

### (二)场地限制

拟建桥梁南接省道,该省道沿水库河岸而设,与河岸无缓冲空间,省道道路挡墙即为库岸;改道沟通协调极为困难。因此,南侧交叉口处的转弯弧线只能设于水库范围内<sup>[3]</sup>。

### (三)不良地质作用

桥址区上游约1km处有一泥石流沟;该泥石流沟为老泥石流沟,与拟建桥梁所在水库相交,并于近年多次发生过较大泥石流。

## 三、泥石流调查分析

### (一)地形条件

通过调查发现,该泥石流沟沟域由主沟及9条大支沟组成,沟域平面呈长条形,流域面积约67.8km<sup>2</sup>;沟源最高点高程4810m,沟口最低高程为2093m,高差2717m。主沟长18.8km,弯道较多,平均纵坡降为133%;支沟两侧陡峭,呈“v”字形,平均纵坡降为255%~557%,较陡。

### (二)水源条件

气象资料显示,该处降雨量较大,且流域中上游4~5月份又有冰雪融水汇集,为泥石流的形成提供了充足的水源。

### (三)物源条件

该泥石流沟域固体物源点共56处;其中:主沟道中静储量约 $145.26 \times 10^4 \text{m}^3$ ,可能参与泥石流活动的动储量约 $29.35 \times 10^4 \text{m}^3$ ,支沟道中静储量约 $133.67 \times 10^4 \text{m}^3$ ,支沟道中可能参与泥石流活动的动储量约 $40.19 \times 10^4 \text{m}^3$ 。由于主沟沟道纵坡较缓,支沟中固体物质进入主沟后,转化为主沟沟道物源,主要堆积于支沟沟口与主沟交汇处,部分侵占主沟道,估计仅约1/5能二次启动,因此该沟域总静储量约为 $185.43 \times 10^4 \text{m}^3$ ,动储量约 $37.39 \times 10^4 \text{m}^3$ <sup>[4]</sup>。

### (四)泥石流暴发特征

#### (1)堆积物颗粒特征

据调查,泥石流堆积物主要分布在沟内流通区及堆积区,这两个区中的堆积物各具特征:流通区内堆积物主要为块碎石土,粒径一般300~2000mm;沟口堆积区内堆积物主要为碎块石土,一般粒径200~300mm,含量约为60%~70%,可见最大粒径100cm。

#### (2)泥石流流体重度

按照《泥石流灾害防治工程勘查规范》(dz/

t0220-2006)，综合考虑泥石流流体性质，确定主沟泥石流重度约为 $1.641\text{t}/\text{m}^3$ ，易发程度数量化评分为104分。

### (3) 泥石流流速

采用形态调查法，求得泥石流流速约为 $3.32\text{m}/\text{s} \sim 5.84\text{m}/\text{s}$ 。

### (五) 泥石流危险度评价及发展趋势

该泥石流可能发生于每年的7~9月，多与强暴雨有关。该泥石流属于稀性泥石流，流速可高达 $5.84\text{m}/\text{s}$ ，流量可达 $165.92\text{m}^3/\text{s}$ ，尚处在发展期，属于中度危险的泥石流。近年来随着人类工程经济活动如采矿、森林的过度砍伐、筑路修房削坡等，使得沟谷两侧的松散物源增多，具备了爆发中等规模泥石流的松散物源条件，该泥石流有再次发生的趋势。

### 四、泥石流对拟建桥梁的影响分析

泥石流主沟与水库相交，泥石流冲入水库后，受水库水流稀释及缓冲的影响，其流速大大降低，对桥墩的直接冲击的风险较小。但是，泥石流中固体颗粒会大量堆积在泥石流沟口处的水库中；该水库所在河流坡降极大，当水库上游发生较大洪水时，堆积物可能会被洪水向下游带走，在水库中形成二次泥石流并冲击桥墩。

### 五、桥梁方案设计

#### (一) 备选方案

基于上述关于库区泥石流的分析，上游泥石流沟可能会对拟建桥梁桥墩形成冲击；因此，桥梁设计方案必须考虑泥石流的影响，采取工程措施保证桥梁安全<sup>[4]</sup>。

为防止泥石流破坏桥墩，设计人员提出了三种桥梁设计方案，分别如下。

#### 方案一：

该方案采用一跨大跨径梁跨越库区，水中不落桥墩。上部结构采用一跨66m钢桁架梁桥，下部结构桥台采用肋板式桥台；桥梁采用8.5m等宽。南岸桥台设于水库河道内，桥台背墙离河岸距离约5m，台后设挡墙；交叉口转弯弧线设于台后搭板范围内。

#### 方案二：

该方案采用 $3 \times 25\text{m}$ 小箱梁跨越库区，为加强桥墩防撞性能，水中桥墩采用矩形墩，桥墩接承台群桩基础。南岸桥台紧贴省道，并加设一跨12m异形现浇箱梁，交叉口转弯弧线设于异形箱梁桥跨范围内。

#### 方案三：

该方案采用小跨径桥梁跨越库区，跨径组合为 $12+3 \times 25\text{m}$ ；上部结构第一跨为异形现浇箱梁，第2~4跨采用25m预应力混凝土预制小箱梁。

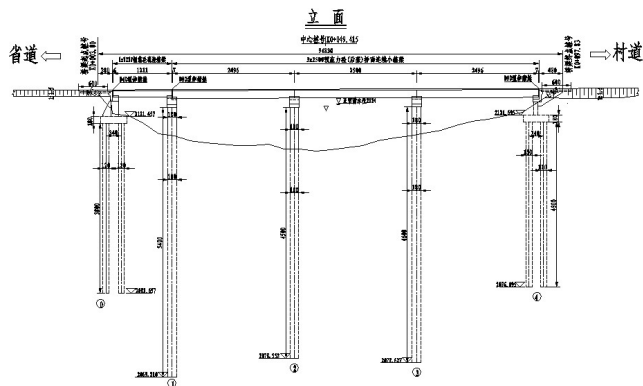
桥墩仍按常规桥梁设计，采用圆柱式桥墩，桩接盖梁；为应对泥石流的影响，桩基尺寸适当加大，并将施工桩基的钢护筒留作永久使用，以避免水库流水中泥沙对桩柱表面的磨损。

南岸桥台紧贴省道，台后搭板设于省道内，交叉口转弯弧线设于异形箱梁桥跨范围内。

#### (二) 方案评价及分析

方案一：该方案在水中不设桥墩，可以完全避免泥石流对桥梁的影响，保证了桥梁的运行安全，可靠度高。该方案存在的问题有：

(1) 通过深化设计及估算，该方案工程造价大约



方案三立面图

为2000万，超出业主预算较多，项目落地难度较大。

(2) 该方案上部结构采用跨径为66m的钢桁架，跨径较大，结构型式较复杂，需要资质等级较高的施工单位才能完成；该项目体量较小，满足资质条件的大施工单位可能不愿意投标，项目实施难度大。

(3) 南侧桥台侵占水库河流过流断面较多，水电站运营方及水务管理部门不同意方案，项目无法实施。

基于上述原因，因资金受限及技术力量的原因，导致该方案实施难度较大，因此不宜采用。

方案二：该方案采用小跨径跨越，上部结构施工简单；下部结构桥墩采用矩形实心墩，基础采用群桩基础，墩柱防撞性能好，也能较可靠地保证桥梁运行安全<sup>[6]</sup>。

该方案存在的问题有：

(1) 矩形墩加群桩基础的工程造价较高。

(2) 该水库库区水深大约为10m，且水库泄洪发电的频率较高，发电时水流流速较大；群桩基础、承台及矩形墩施工难度较大，既需要较专业的设备，对施工队伍的技术水平要求也较高；而且，该方案的施工措施费也较高，进一步推高了工程总造价。

基于上述原因，因造价较高及资金受限，该方案落地难度也较大。

方案三：该方案采用小跨径跨越，上部结构施工简单；下部结构桥墩柱柱式墩，桩基接盖梁，下部结构造价较低，而且施工方便。

该方案存在的问题是：桥墩刚度较小，不容易简明的判断桥墩的抗泥石流冲击的能力，因此无法直接简明的判断桥梁的安全性。

综合所述，方案一及方案二工程造价过高，技术难度较大，实施难度大；方案三造价较低，且施工方便，但需要进一步对桥墩抗泥石流冲击能力进行定量计算。

### 六、泥石流冲击桥墩的定量计算

#### (一) 计算原理

泥石流对桥墩冲击主要分成两部分：一部分是泥石流整体作为一种流体，对桥墩的整体冲击力；第二部分是泥石流中的大块石对桥墩的撞击力。计算时，应先将整体冲击力及大块石撞击力分别计算，最后再进行组合。

本项目中水库库区中形成的二次泥石流，因被水稀释，其整体比重相对原发泥石流较小，计算时不应按原

发泥石流比重取值；因该水库河道坡降很大，在大洪水的作用下，泥石流中的大块石也可能被洪水带至下游桥位处，撞击桥墩，因此也需要计算大块石撞击力。

**(二) 大块石撞击力计算**

(1) 计算公式

根据《泥石流灾害防治工程设计规范》，大石块的冲击力为：

$$F = \sqrt{\frac{3 \times EJ \times V_c^2 \times Q}{g \times L_t^3}} \quad (\text{对于工程建筑物墩、台和柱}) \quad (1)$$

$$F = \sqrt{\frac{48 \times EJ \times V_c^2 \times Q}{g \times L_t^3}} \quad (\text{对于工程建筑物为坝体等}) \quad (2)$$

本项目桥墩为柱式构筑物，因此选取公式(1)进行计算。

- 其中，F -- 大石块冲击力 (kN)；
- E -- 结构物弹性模量 (KPa)；
- J -- 结构物截面中心惯性矩 (m<sup>4</sup>)；
- V -- 大石块移动速度 (m/s)；
- W -- 大石块重力 (kN)；
- L -- 结构物长度 (m)；
- g -- 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)。

(2) 参数确定

E：墩柱采用C35混凝土，按《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362-2018查询，其值为  $3.15 \times 10^7$  Kpa；

- J：取桥墩柱径为1.6m，其惯性矩为0.322m<sup>4</sup>；
- L：取墩柱高度约为8m；
- g：取9.8m/s<sup>2</sup>。
- V：按以下公式计算：

$$V_s = a \sqrt{d_{max}}$$

- 其中，Vs -- 大石块移动速度 (m/s)；
- d<sub>max</sub> -- 泥石流松散物中最大石块粒径 (m)；
- a -- 参数，综合考虑河床坡度、容重、石块比重，地域特性等条件得到，取值范围为3.5~4.5，平均取值为4.0。

本项目a值取4.0，d<sub>max</sub>取1m，求得Vs = 4m/s。

(3) 计算结果：通过计算，得到大石冲击力为1600kN。

**(三) 整体冲击力计算**

(1) 计算公式

根据中铁二院关于泥石流整体冲击力的计算公式：

$$\delta = \lambda * \gamma_c / g * V_c^2$$

- 其中，δ -- 泥石流整体冲击压力 (Pa)；
- g -- 重力加速度 (9.8m/s<sup>2</sup>)；
- λ -- 建筑形状系数，圆形取1.0；
- γ<sub>c</sub> -- 泥石流重度，此项目取14kN/m<sup>3</sup>；
- V<sub>c</sub> -- 泥石流流速，取5.8m/s。

(2) 计算结果：通过计算得知，泥石流作用在桥墩上的整体压强 δ = 50kPa。

取桥墩受冲击力冲击高度为8m，算得泥石流作用在桥墩上的整体压力约为650kN。

**(四) 桥墩强度验算**

泥石流对桥墩的冲击力为：整体冲击力+大块石撞击力=1600+650=2250KN。

(1) 抗弯计算

桥墩采用双柱墩，在横向形成门式框架结构，抗弯能力较强；在纵向，桥墩为悬臂梁，抗弯能力较弱，但大块石在纵向撞击力小很多；因此，从定性分析可知，桥墩抗弯能力不控制计算。通过有限元分析软件建模进行计算得知，桥墩抗弯强度富余度较大，桥墩抗弯承载能力满足要求。

(2) 抗剪计算

桥墩虽然采用双柱墩，但是大块石撞击时剪力由单柱承担，因此按单柱尺寸验算抗剪承载能力。

桥梁规范中无圆柱截面柱的抗剪计算公式，笔者在计算时采取了两种计算方法：(1) 参照《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362-2018中的矩形截面柱的抗剪计算公式，其中边长取半径0.8倍圆柱直径；(2) 按《混凝土设计规范》GB50010-2019中圆形截面柱的抗剪计算公式进行计算，并将承载能力计算结果除以1.1的系数，以提高安全储备。

(3) 验算结果

通过计算可知，当桥墩采用D160cm圆柱式桥墩，螺旋箍筋采用直径为12mm的HRB400钢筋时，桥墩承载能力满足要求。方案三可行。

**七、结束语**

综上所述，当水库上游与大型泥石流沟相交时，库区桥梁建设方案应考虑泥石流的影响。但是，水库库区河道宽度很大且水深很深，若盲目照搬桥梁跨越泥石流沟的设计方案，势必导致施工技术难度大或者工程造价过大，造成不必要的浪费；当项目资金受限时，甚至可能导致项目无法落地实施<sup>[7]</sup>。

通过计算得知，库区桥梁建设可按常规桥梁方案进行设计，当桥梁跨径较小时，可采用施工方便且造价低的圆柱式桥墩。为保证桥墩墩柱的抗泥石流冲击能力，应适当加大墩柱的尺寸，并采用定量计算的方式验算桥墩抗冲击能力；同时，保留桩基施工的钢护筒作永久使用，以防止水中泥沙对墩柱的磨损。通过此种方案优化，可降低项目工程造价，避免工程浪费，使项目更易实施。

**参考文献**

[1] 李明辉, 郑万模, 陈启国. 丹巴县地质灾害发育特征及成因探讨[J]. 自然灾害学报, 2008 (1): 49-53

[2] 谢航, 易加强, 高攀. 四川丹巴县卡垭沟泥石流发育特征及其发展趋势研究[J]. 西部探矿工程, 2017 (07): 8-11

[3] 张海泉, 何文秀, 赵波, 覃浩坤. 四川丹巴县‘6.17’梅龙沟泥石流-阿娘寨滑坡灾害链现场调查与监测分析[J]. 科学技术与工程, 2021 (29): 12481-12489

[4] 吴建杰, 吕士英. 泥石流整体冲击力简化计算公式[J]. 河北地质, 2016 (4): 29-32

[5] 周明慧, 熊海贝, 赵书平, 曹纪兴. 泥石流冲击力计算方法[J]. 山地学报, 2017. 35 (02): 187-194