

尾矿库对高速公路桥梁工程安全的影响及对策研究

柴啸龙, 张杰

(河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 穿越伏牛山北麓的栾卢(栾川—卢氏)高速公路沿线分布有 30~40 处尾矿库,采取有效措施把尾矿库对桥梁工程的影响降至最低是急需解决的关键技术问题。文中分析了沿线尾矿库分布情况及尾矿库溃坝对高速公路桥梁工程的破坏形式;以尾矿库溃坝模型为基础,采用有限元软件对溃坝条件下桥墩应力状况进行数值模拟分析,并针对不同工况提出安全对策。

关键词: 桥梁;尾矿库;溃坝;安全对策

中图分类号:U447

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)03-0155-05

尾矿库由尾矿料堆积形成,沉积规律复杂,各区的渗透系数、固结度、密实状态差别较大,库体中分布有多层细粒夹层,为千层饼状堆积体,一般为高饱和的细砂及粉土。作为一种重大危险源,尾矿库溃坝在国际灾害事故排名中排第 18 位,对下游居民及设施的安全构成严重威胁。目前高速公路规划、设计中基本以避让方式为主,当在狭窄走廊带内不可避免发生穿越时,针对高速公路穿越尾矿库区桥梁工程的安全性分析不够。河南栾卢(栾川—卢氏)高速公路路线走廊带内分布有 30~40 处尾矿库,为典型的穿越尾矿库区高速公路,如何处理尾矿库与桥梁工程安全之间的关系尤为重要。该文结合该工程,开展尾矿库对桥梁工程安全性影响研究,以尾矿库溃坝理论为基础,对 18 处尾矿库撞击桥墩进行有限元模拟计算,针对不同工况提出安全对策。

1 沿线尾矿库分布状况及特征

近些年来,中国矿业得到较大发展,尾矿库数量

与日俱增,但存在规模不一且较分散、管理混乱等问题。据统计,在 2 233 座申报库容规模正确的尾矿库中,正常库且达到安全管理基本要求的仅占 1.34%,达不到安全管理基本要求或存在各类安全隐患的尾矿库高达 98%,尾矿库安全状况不容乐观。尾矿库事故时有发生,如 2000 年广西南丹县大厂镇酸水湾鸿图选矿厂尾矿库溃坝、2008 年山西省临汾市襄汾县陶寺乡塔山铁矿尾矿库溃坝,对人民生命财产安全和周边环境带来巨大灾难。栾卢高速公路所在地栾川县矿业经济发达,全县有 280 余处尾矿库(其中 90%为钼矿和铅锌矿尾矿库),该项目沿线分布有 30~40 处,其中 18 处尾矿库对桥梁工程安全有影响。

该项目处于伏牛山北麓,沿线库区属中低山地貌,山势陡峻、地形相对高差大。沿线尾矿库以山谷型为主,库区所在沟谷为两岸不对称 V 形,矿渣成分以钼矿和铁矿为主。沿线尾矿库分类及主要特征见表 1,典型尾矿库见图 1、图 2。

表 1 栾卢高速公路沿线尾矿库分类及主要特征

尾矿库编号	里程桩号	矿渣性质	类型	现状等级	坝高/m	库容/万 m ³
1	K0+685	钼矿矿渣	山谷型	5	23.30	23.600
2	K19+152	铁矿矿渣	山谷型	5	1.50	0.400
3	K19+638	钼矿矿渣	山谷型	4	66.20	72.000
4	K23+800	铁矿矿渣	山谷型	4	45.20	20.130
5	K24+050	铁矿矿渣	山谷型	3	83.25	300.000
6	K24+100	铁矿矿渣	山谷型	4	46.57	35.000
7	K24+500	铁矿矿渣	山谷型	4	56.00	63.272
8	K25+000	铁矿矿渣	山谷型	4	20.20	5.000
9	K25+500	铁矿矿渣	山谷型	4	46.00	12.230
10	K26+500	铅锌矿矿渣	山谷型	3	80.00	380.000

续表 1

尾矿库编号	里程桩号	矿渣性质	类型	现状等级	坝高/m	库容/万 m ³
11	K27+200	铁矿矿渣	山谷型	5	25.40	9.700
12	K27+400	铁矿矿渣	山谷型	3	27.00	8.740
13	K28+100	铁矿矿渣	山谷型	4	45.00	46.820
14	K28+350	铁矿矿渣	山谷型	5	21.50	9.670
15	K29+000	铁矿矿渣	山谷型	5	16.50	2.890
16	K30+000	铁矿矿渣	山谷型	5	28.10	14.100
17	K30+200	铁矿矿渣	傍山型	4	46.10	12.830
18	K31+000	铁矿矿渣	山谷型	4	35.30	10.870

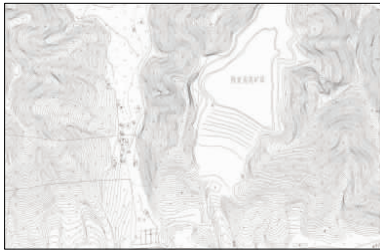


图1 栾卢高速公路沿线3#陈家沟尾矿库(山谷型)

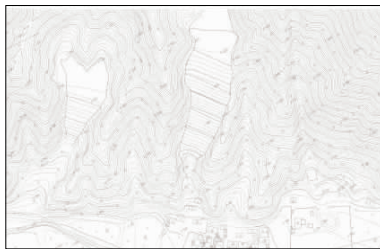


图2 栾卢高速公路沿线17#上河南尾矿库(傍山型)

2 尾矿库溃坝对桥梁工程的破坏方式

2.1 尾矿库溃坝过程

既有研究归纳出尾矿库溃坝的主要失事模式有洪水漫坝、渗透破坏、边坡失稳和地震险情等。尾矿库的溃坝是多方面因素共同作用的结果,受外界环境如地震、降雨、洪水、坝基沉陷、尾矿库增高加载等多种因素的影响,尾矿库中应力场和渗流场发生变化,导致尾矿坝发生破坏失稳。

尾矿库溃坝下泄流体不同于一般的水流,其为尾矿砂和水的混合物,类似于泥浆流动。溃坝过程主要分为尾矿坝在一定条件下开始失稳、失稳过程中尾矿砂和水相互作用形成具有高能量的泥石流、高能泥石流向下游演进3个阶段。在尾矿库溃坝过程中,尾矿坝可能发生多次垮塌失稳,导致以上3个阶段反复出现,相互交叉影响作用,使溃坝过程更加复杂(见图3)。

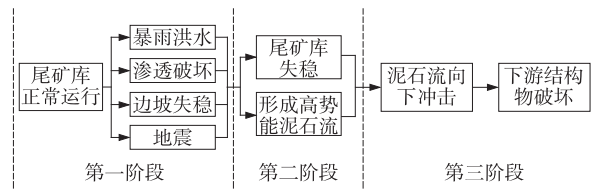


图3 尾矿库溃坝发展过程示意图

2.2 对桥梁工程的破坏方式

尾矿库溃坝泥石流对高速公路及桥梁产生巨大破坏,其中对桥梁工程的破坏方式主要有冲击、冲刷、堆积、磨蚀等。

(1) 冲击。泥石流的冲击作用主要分为泥石流浆体的冲击力、大石块冲击力和在泥石流冲击作用下的爬高及弯道超高等。泥石流容重较大,高速流动的巨大石块具有强大的冲击力,是造成公路桥梁损坏的主要原因。当泥石流冲起爬高时,大量浆体冲出沟岸,对桥面造成严重损坏,还可能导致沟岸堤防溃决,出现泥石流串流现象。当泥石流驶入弯道时,凹岸变宽,流量迅速增加,凹岸下方出现强烈局部冲刷,对凹岸桥墩造成破坏。

(2) 冲刷。泥石流的冲刷作用对上游段造成下切侵蚀破坏,沟床沟槽被流体逐渐刷深,转化为堆积体,经泥石流冲刷后沟槽进一步加深;泥石流冲刷对中游段造成冲刷旁蚀破坏;泥石流冲刷对下游段造成局部冲刷等,使桥墩基础暴露在外,对桥梁结构造成严重影响。

(3) 堆积。泥石流在中、上游沟段的局部堆积会加大后续泥石流的峰值流量,抬高沟床,增加泥石流暴发概率和破坏程度。在下游沟道的堆积使泥石流比降减小,沟道逐渐变宽,两侧山坡束狭作用减小、消失,并因此产生大面积、大规模的堆积现象。当泥石流沟道流量远大于主河流量时,会因堵塞而形成堰塞湖,淹没并损毁桥梁。

(4) 磨蚀。泥石流损坏桥梁的方式还有磨蚀、振动、砸击等。泥石流包含的大量沙石会强烈磨蚀并破坏桥梁的墩面、桥面等;高速流动下的黏性泥石流产生的振动会使桥梁结构产生裂痕,降低结构的破坏临界强度;泥石流流动过程中大量石块呈自由落体状态砸击桥梁结构。

3 尾矿库溃坝泥石流对桥梁工程的破坏理论

3.1 对桥梁冲击作用影响的指标选取

采用泥石流理论分析尾矿库溃坝后泥石流的演进规律时,考虑到其影响因素较多,采用 4 个主要因素作为计算指标。

(1) 泥石流容重。泥石流容重是影响泥石流冲击力的重要参数。由于构成泥石流流体成分所占比重不同,不均匀系数大,目前对容重的计算方法多来自各地观察分析的经验公式。陈宁生等对常用的 10 种泥石流容重计算公式进行归纳,通过分析泥石流浆体容重和细颗粒含量与泥石流浆体上限粒径大小的关系,得到基于泥石流浆体的容重计算公式:

$$\gamma_c = 1 + \frac{\rho_s - 1}{1 + w(\rho_s - \gamma_f)/(\gamma_f - 1)}$$

式中: γ_c 为泥石流流体容重; ρ_s 为固体物质的密度; w 为细颗粒的质量分数; γ_f 为泥石流浆体容重。

(2) 泥石流流速。泥石流流速是研究泥石流冲击力的另一重要参数。其大约有 10 种计算公式,一般根据以下两种方法获得:一是按水力学的谢才公式,根据野外实际观测资料,用统计学方法确定相关系数,得出泥石流流速计算公式;二是根据推理或试验资料,并与野外资料相结合,用数学分析方法建立泥石流流速公式。

(3) 泥石流冲击力。泥石流是固、液两相复杂

介质,其冲击破坏来自于泥石流浆体的冲击和泥石流固相颗粒集中荷载的耦合,如何准确计算泥石流的冲击力是实现泥石流对桥墩冲击作用研究的关键。目前大多认为泥石流的冲击力由泥石流流体的整体冲击力 F_s 和大块石的冲击力 F_b 组成,主要采用理论推导法和公式法计算泥石流冲击力。

(4) 泥石流冲击高度。泥石流冲击桥墩时,高速流动的泥石流浆体会在遇到建筑物时冲起爬高,大量石块和泥沙冲上桥面,破坏梁体,设计时需考虑泥石流冲起爬高高度,以免对建筑物产生危害。泥石流最大冲击高度可用下式计算:

$$H = \frac{v^2}{2g}$$

式中: H 为泥石流冲击高度; v 为泥石流流速。

3.2 尾矿库溃坝泥石流流变特性

泥石流流变特性依赖于众多因素,如砂粒石块的浓度、水的浓度、粘度、砂粒石块的大小形状及分布、砂粒石块与流床的摩擦及泥石流的水压力。目前建立的泥石流流变模型主要有牛顿流变模型、宾汉流变模型、膨胀模型、Herschel-Bulkley 模型和双线性流变模型等,其中宾汉流变模型应用最广泛,其表达式为:

$$\tau = \tau_B + \eta \frac{du}{dy}$$

式中: τ 为剪应力; τ_B 、 η 分别为刚度系数和宾汉极限剪应力; du/dy 为切变率。

3.3 有限元模拟计算

使用有限元软件 ANSYS 对尾矿库附近的桥墩进行冲击计算,模拟分析泥石流冲击荷载作用下桥墩的力学性能及桥梁的整体响应。尾矿库溃坝泥石流对桥梁的冲击作用见表 2,其中容重统一按照 1.6 t/m^3 进行计算。

表 2 柴卢高速公路尾矿库溃坝对桥梁的冲击作用

尾矿库 编号	泥石流 流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泥石流 冲击力/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	大石块 冲击力/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泥石流冲 击高度/ m	尾矿库 编号	泥石流 流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泥石流 冲击力/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	大石块 冲击力/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泥石流冲 击高度/ m
1	11.2	223.3	274.7	6.3	10	12.5	277.0	229.5	7.8
2	5.1	47.5	1 530.0	1.3	11	12.8	236.7	1 369.0	8.1
3	14.8	384.6	228.7	10.9	12	13.2	306.7	343.4	8.7
4	6.9	86.4	237.5	2.4	13	10.9	209.3	266.0	5.9
5	10.0	177.3	417.6	5.0	14	10.2	185.0	217.8	5.2
6	10.5	194.9	460.1	5.5	15	11.8	245.5	500.0	6.9
7	10.1	179.9	217.4	5.1	16	11.9	252.0	352.4	7.4
8	10.4	192.4	215.6	5.4	17	13.6	214.0	1 320.8	9.3
9	11.5	134.5	337.6	6.6	18	12.6	270.8	1 005.3	8.0

假定桥梁基础处在泥石流流区,桥墩为柱式墩,使用C30砼,弹性模量为 3×10^4 MPa,高度为23 m,截面半径为0.8 m,上部有盖梁(见图4)。泥石流整体冲击力设置为从墩底到桥墩中间部位,采用均布面荷载加载;大石块冲击荷载作用于桥墩中间部位,采用节点荷载加载。有限元模型见图5(a)。该项目沿线18处尾矿库泥石流撞击桥墩的应力及变形计算结果见图5(b)、(c)和表3。

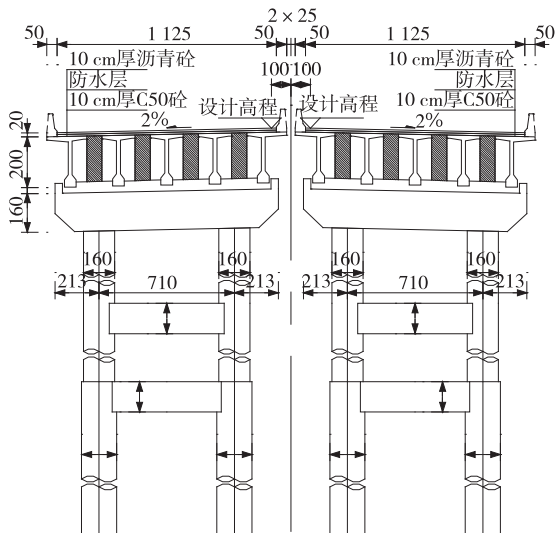


图4 桥梁横截面示意图(单位:cm)

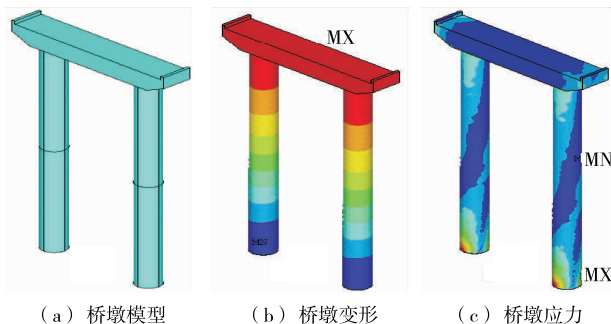


图5 桥墩变形及应力

由表3可知:溃坝对该项目沿线桥墩冲击应力最大的为11[#]、3[#]、12[#]尾矿库,分别为33.8、25.4、18.8 MPa;冲击变形最大的为3[#]、12[#]、16[#]尾矿库,分别为34.3、8.96、7.32 mm。

4 安全对策

为保证该项目沿线桥梁工程的安全,结合沿线18座尾矿库的现场调查、桥墩模拟冲击计算结果和设计文件,提出如下安全对策:

(1)对存在不安全因素的尾矿库进行整改。着

表3 泥石流撞击桥墩有限元计算结果

尾矿库 编号	坝高/ m	库容/ 万m ³	墩径/ m	最大应 力/MPa	最大变 形/mm
1	23.30	23.600	2.0	7.45	2.15
2	1.50	0.400	1.6	0.61	0.09
3	66.20	72.000	1.8	25.40	34.30
4	45.20	20.130	2.0	2.16	0.37
5	83.25	300.000	2.0	3.61	0.77
6	46.57	35.000	2.0	4.82	1.02
7	56.00	63.272	1.6	5.91	1.77
8	20.20	5.000	1.6	7.41	2.38
9	46.00	12.230	1.6	9.66	3.53
10	80.00	380.000	2.0	10.60	5.19
11	25.40	9.700	1.6	33.80	0.49
12	27.00	8.740	1.6	18.80	8.96
13	45.00	46.820	2.0	5.72	1.33
14	21.50	9.670	2.0	4.31	1.37
15	16.50	2.890	1.6	8.61	3.47
16	28.10	14.100	1.6	9.33	7.32
17	46.10	12.830	1.4	8.12	0.37
18	35.30	10.870	1.6	14.10	0.91

力从源头抓起,敦促相关部门规范尾矿库的日常维护和监管,结合高速公路建设,对存在不安全因素的尾矿库进行整改,整改费用可纳入高速公路建设防护工程。

(2)优化道路线形。设计中以尾矿库为主要控制点,线位尽量避让,有条件时桥梁选址尽量远离。如针对路线穿越10[#]、11[#]尾矿库制定A、B两个线位(见图6),A线从10[#]尾矿库下游与11[#]尾矿库上游以桥梁通过,平曲线半径为1500 m;B线分别从10[#]、11[#]尾矿库下游以桥梁通过,平曲线半径为870 m。考虑到10[#]尾矿库380万m³的超大库容,从安全角度出发,推荐采用线形指标偏低的A线。

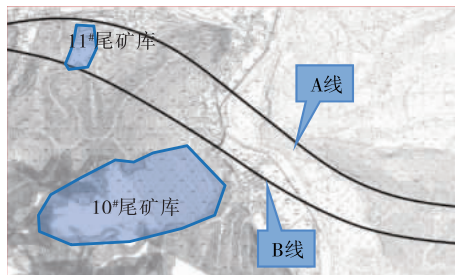


图6 10[#]尾矿库与路线方案关系示意图

(3)设置底埋隧道。公路从尾矿库堆积体内横向穿越,建成后尾矿库溃坝从底埋隧道顶部渲泄,确

保公路的正常运营。如针对路线穿约3[#]尾矿库制定C、D两个线位(见图7),C线从3[#]尾矿库下游100 m采用(65+110+65) m变截面连续刚构穿越;D线从3[#]尾矿库下游150 m采用112 m底埋隧道穿越。根据上述模拟计算结果,3[#]尾矿库对桥墩的冲击应力为25.4 MPa、变形为34.3 mm,其溃坝对桥梁结构受力的影响偏大,从结构安全出发,推荐采用D线底埋隧道方案。

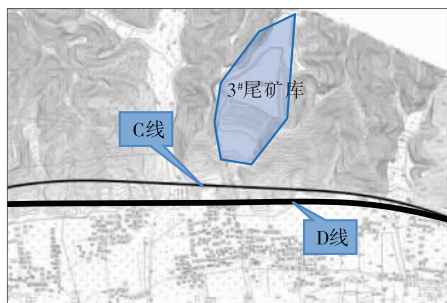


图7 3[#]尾矿库与路线方案关系示意图

(4) 采用大跨径桥梁结构。针对与桥址距离很近且无法避让,溃坝后果非常严重的尾矿库,采用大跨径桥梁跨越,避免尾矿库泥石流冲击。如11[#]尾矿库对桥墩的冲击应力达33.8 MPa,采用常规30 m T梁存在较大安全隐患,优化后采用80 m变截面连续梁一跨跨越库区(见图8)。另外,10[#]、16[#]尾矿库下游也采用80 m变截面连续梁结构跨越。

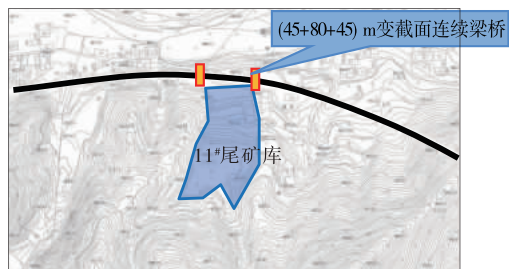


图8 11[#]尾矿库与桥梁方案关系示意图

(5) 增强桥墩防护,设置导流坝、桥墩防护挡墙等(见图9)。针对与桥址距离较近但安全性高,溃坝会造成较严重后果的尾矿库,根据情况选取大跨径桥型,采取导流坝、桥墩防护等措施确保桥梁安全。如16[#]、17[#]、18[#]尾矿库采用防护桥墩方案。

(6) 提高桥梁墩柱设计标准。针对与桥址距离较远且失事所造成的危害不大的尾矿库,通过适当提高桥梁墩柱设计标准进行预防。如7[#]、9[#]、10[#]、12[#]、18[#]尾矿库采取该措施。

(7) 对于与桥址距离较远且失事所造成的危害

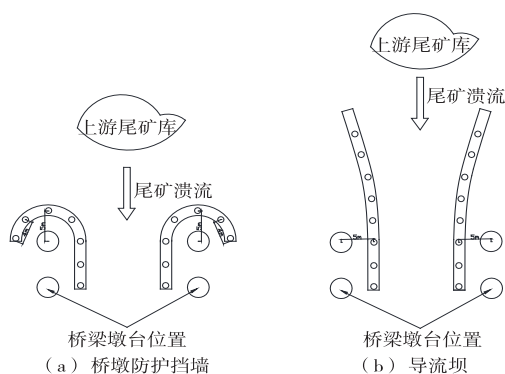


图9 桥墩防护方案

小的尾矿库,如1[#]、2[#]、8[#]、13[#]、14[#]尾矿库,可按常规标准进行桥梁设计。

5 结论

(1) 尾矿库溃坝会对沿途高速公路桥梁产生巨大破坏,主要破坏方式为冲击、冲刷、堆积和磨蚀。

(2) 尾矿库溃坝对栾卢高速公路沿线桥墩冲击应力最大的为11[#]、3[#]、12[#]尾矿库,冲击变形最大的为3[#]、12[#]、16[#]尾矿库。

(3) 可针对不同工况采取措施预防尾矿库溃坝影响桥梁工程安全:对存在不安全因素的尾矿库进行整改;优化道路线形;设置底埋隧道;采用大跨径桥梁;增强桥墩防护,设置导流坝、桥墩防护挡墙等;提高桥梁墩柱设计标准;采用常规标准进行设计。

参考文献:

- [1] 李志磊.王城高速公路穿越尾矿库路堤沉降分析[D].西安:长安大学,2013.
- [2] 于广明,宋传旺,潘永战,等.尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1).
- [3] 李书娜.尾矿坝溃坝模型及数值模拟研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [4] 张剑.繁峙至大营高速公路绕避尾矿库路线方案设计[J].山西建筑,2013,39(30).
- [5] 袁湘民.下水湾尾矿库安全评价及溃坝模拟分析[D].长沙:中南大学,2008.
- [6] 邢皓晨,王保民.解析某高速公路与尾矿库的相互影响[J].安全,2015,36(5).
- [7] 张力霆.尾矿库溃坝研究综述[J].水利学报,2013,44(5).
- [8] 张津嘉.尾矿库溃坝模式分析及风险指标体系的研究[J].有色金属:矿山部分,2010,62(5).