

西北某水电站泥石流发育特征及危险性评价

李鹏, 王有林, 李少平, 王启鸿

(中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065)

摘要: 西北某拟建水电站下库泥石流沟具有流域面积大、沟谷切割深、沟道长度大等特点。其中东沟穿该抽水蓄能电站拟设下库而过,若爆发泥石流,会对主体工程的安全运行造成严重威胁,因此有必要对该冲沟进行调查和泥石流评价。通过现场踏勘、试验,结合无人机解译和室内计算,对拟设电站下库东北侧泥石流沟发育特征及危险性进行分析和评价。研究表明:东沟沟道总长度 2.89 km,流域周长 7.37 km,流域面积 2.15 km²,流域内高差近 710 m,平均纵坡降约 220.64‰,河道整体弯曲系数 1.10;流域内物源总储量为 17.59×10⁴ m³,以坡面侵蚀物源为主,其次为崩塌堆积物源,再次为崩塌堆积物源,沟道堆积物源最少。按设计暴雨频率 1% 计算,在拟设工程枢纽位置处,泥石流流速 3.411 m/s,一次过流总量为 3286.53 m³,一次固体冲出物质 1250.88 m³,泥石流整体冲击力 15.34 kPa,设计暴雨频率下单块块石按 2 m 计算,最大冲击力 10.5 kN。东沟若发生泥石流,则将对下库工程及施工安全造成影响。

关键词: 泥石流;形成条件;发育特征;危险性评价

中图分类号: P642.23;P642;P694;TV74 **文献标识码:** A

DEVELOPMENT CHARACTERISTICS AND RISK ASSESSMENT OF DEBRIS FLOW IN A HYDROPOWER STATION IN NORTHWEST CHINA

LI Peng, WANG You-lin, LI Shao-ping, WANG Qi-hong

(POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: The debris flow gully in the lower reservoir of a proposed hydropower station in northwest China has the characteristics of large basin area, deep gully cutting and large gully length. The Dong gully passes through the planned storage of the pumped storage power station. If debris flow breaks out, it will pose a serious threat to the construction and safe operation of the main project. Therefore, it is necessary to investigate the gully and evaluate the debris flow. The development characteristics and risk of debris flow gully on the northeast side of the lower reservoir of the proposed power station were analyzed and evaluated through field survey and test, combined with UAV interpretation and indoor calculation. The results show that the total length of Dong gully Channel is 2.89 km, the basin circumference is 7.37 km, the basin area is 2.15 km², the elevation difference within the basin is nearly 710 m, the average longitudinal gradient is about 220.64‰, and the overall bending coefficient of the channel is 1.10. The total provenance reserves in the basin were 17.59×10⁴ m³, with slope erosion as the main source, followed by slope collapse

收稿日期: 2023-01-05 改回日期: 2023-02-17

基金项目: 中国电建集团西北勘测设计研究院重点科技项目《TBM 施工技术研究及应用》(XBY-ZDKJ-2020-03)

deposit, and then collapse deposit, and gully deposit was the least. Calculated according to the design rainstorm frequency of 1%, at the planned engineering hub location, the flow rate of debris flow is 3.411 m/s, the total amount of primary overflow is 3 286.53 m³, the primary solid outflow material is 1250.88 m³, the overall impact pressure of debris flow is 15.34 kPa, the design rainstorm frequency of a single block is 2 m, and the maximum impact force is 10.5 kN. If debris flow occurs in Dong gully, it will affect the engineering and construction safety.

Key words: debris flow; formation conditions; developmental characteristics; risk assessment

泥石流作为一种爆发性强、冲击力大的突发性地质灾害,是水电工程开发过程中亟需考虑的问题。近年来,有关泥石流发育特征及危险性评价的研究是水电行业的一个热门研究课题。如 He Songtang^[1]等设置不同的灌木丛参数,探讨其对泥石流的拦截效果; Abraham^[2]以中国银洞子沟泥石流为例,提出了一种 DFS^{2D}数值模型,从而有效解决了粗分辨率数值高程模型在泥石流数值模拟中的累计误差问题; Leng Xiaopen^[3]通过改进 LeNet-5 网络,得到了一种基于深度学习的泥石流次声信号识别方法;康业渊^[4]等通过模糊最优识别理论建立了适用于水电工程的泥石流危险性评价模型;余正江^[5]以德江县观音滩水库为例,通过因素分析法,分析了泥石流对水库运行的影响;崔承洋^[6]采用模糊数学方法对四川省岭南县延吉沟泥石流危险性影响因素进行综合评价,并根据不同危险性等级剔除相应的防治措施;杨建元^[7]等对高坡降小流域泥石流发育特征及危害性进行评价;袁国庆^[8]等对川西高原地区大中型水电站工程区泥石流沟基本特征做出了规律性的总结和分析。

工程区位于北祁连山低山丘陵区,流水侵蚀作用明显,主要为河流沟谷切割地貌。山脉整体走向 NNE 向,南部为西营河,北部为山区地貌,西营河河谷高程 2 000~2 100 m,两侧山顶高 2 800~2 900 m,整体切割深度约 800 m。工程区北侧山顶夷平面高程 2 753~2 890 m,南侧沟谷发育,南部靠近西营河段切割深度较大,一般 50~250 m,北部靠近山顶段切割深度相对较浅,一般 30~50 m。沟道前缘中部为夷平面,夷平面周侧局部有零星滑坡及松动体发育。以夷平面为界,西侧为罗圈沟,东侧为东沟。东沟主沟道走向 NE,沟底高程 2 192~2 390 m,坡降 10%~15%,多为洪积物质堆积。

东沟位于拟建工程下库东北侧,历史上有发生泥石流迹象。东沟穿抽水蓄能电站拟设下库而过,若爆发泥石流,会对主体工程施工和安全运行将造

成严重威胁,因此有必要对该冲沟进行调查和泥石流评价。

1 流域基本特征

1.1 流域形态

研究区为位于甘肃省张掖市肃南裕固族自治县皇城镇境内某水电站下库东北侧的东沟,东沟沟道总长度 2.89 km,流域周长 7.37 km,流域面积 2.145 km²。流域内地势东高西低、北高南低,最高点沟源山脊高程 2 870 m,最低点为沟口与西营河交汇处,高程约 2 162 m,流域内高差近 710 m,在 2 192 m 高程以下与下库西北侧罗圈沟交汇。东沟影像图见图 1。

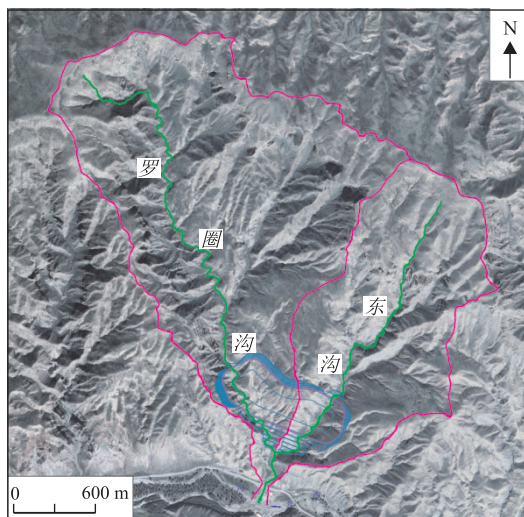


图1 西北某水电站下库东沟影像图

沟源处沟道较缓,坡度在 13°左右,沟道切割较浅,岸坡平缓,短小支沟发育较多。上游段沟道坡度较陡,坡度在 20°左右,上部地形开阔,沟道切割较浅,其余部分沟道切割较深,沟道两岸岸坡较陡。中上游段上部沟道切割较深沟道较窄,下部沟道切割较浅,沟道宽度有所增加,两岸岸坡坡度减缓。沟道中上游段上部发生明显偏转后于下部转回主流向,

总体流向无变化。中下游沟道切割较浅,沟道平缓,平均坡度在 6° 左右,沟道开阔,两岸岸坡陡峻。东沟在下游处汇入罗圈沟,两沟汇合处沟道宽缓,右岸岸坡陡峻,左岸相对较缓,整体形貌图如图 2 所示。

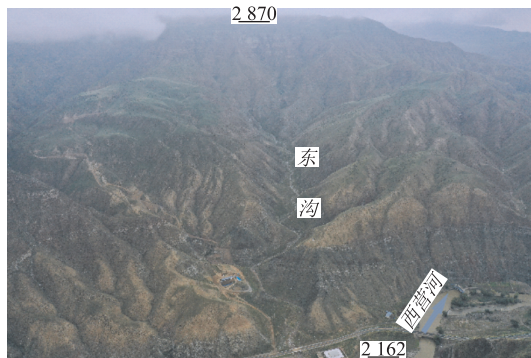


图 2 西北某电站下库东沟地形地貌特征

1.2 沟床比降特征

根据东沟主沟纵剖面(图 3)反映的沟床地形形态,按地形的陡缓特征分段统计沟床的比降,结果见表 1。

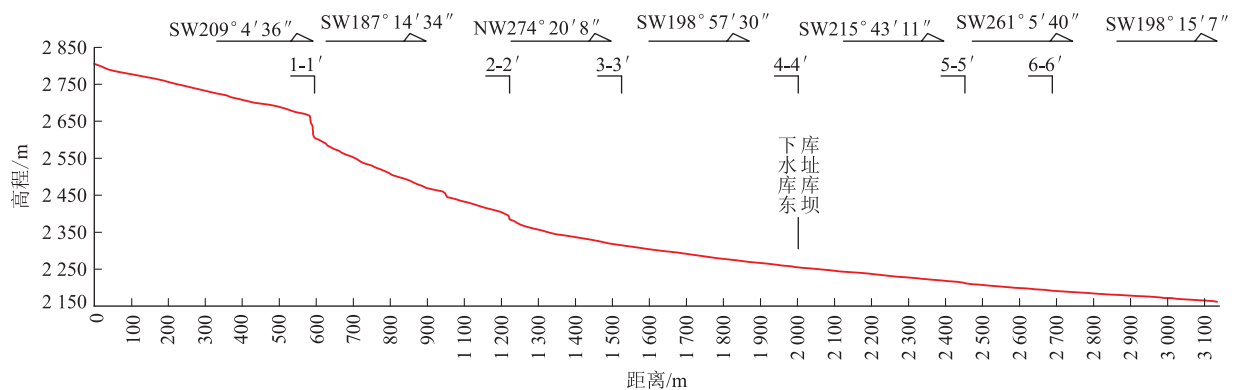


图 3 东沟主沟纵剖面

表 1 西北某水电站下库罗圈沟不同高程段河床比降统计结果表

分段	河床高程范围/m	沟长/m	沟道弯曲系数	比降‰
沟源	2 605~2 805	594.19	1.05	337
上游	2 385~2 605	528.43	1.09	416
中游	2 258~2 385	762.39	1.26	167
下游	2 192~2 258	713.99	1.19	94
堆积段	2 162~2 192	435.179	1.13	67
平均	—	—	1.10	221

2 泥石流形成条件分析

2.1 地形条件

西北某水电站位于北祁连山低山丘陵区,流水侵蚀作用明显,主要为河流沟谷切割地貌。山脉整体走向 NNE 向,南部为西营河,北部为山区地貌,

根据统计结果,结合现场实地调查资料可知,沟源地段(2 605 m 高程以上)沟道较为顺直,切割深度较大,由于沟源出口处有一跌水岩坎,导致沟床比降较大,达 337‰,除跌水岩坎外的沟道,沟床比降为 241‰,沟道无明显弯曲,弯曲系数接近于 1,为 1.05;上游沟床高程 2 385~2 605 m 沟段,沟床比降最大,为 416‰,沟道较为顺直,弯曲系数为 1.09;中游沟床高程 2 258~2 385 m 沟段,沟道坡度较缓,比降为 167‰,沟道存在明显弯曲,但总体流向未变,弯曲系数 1.26;下游沟床高程 2 192~2 258 m,沟道坡度较缓,沟道比降较小,为 94‰,沟道顺直,弯曲系数为 1.19;堆积段沟床高程 2 162~2 192 m 沟段,沟道开阔,地势平缓,沟床比降最小,为 67‰,该段沟道有明显偏转,弯曲系数为 1.13。皇城抽水蓄能电站东沟平均纵比降 221‰,整体沟源、上游段沟道坡度陡、比降大,其余各段沟道比降较低。沟道整体弯曲系数较小,为 1.10,沟道转弯较少。

西营河河谷高程 2 000~2 100 m,两侧山顶高 2 800~2 900 m,整体切割深度约 800 m。

水电站工程区北侧山顶夷平面高程 2 753~2 890 m,南侧沟谷发育,南部靠近西营河段切割深度较大,一般 50~250 m,北部靠近山顶段切割深度相对较浅,一般 30~50 m。沟道前缘中部为夷平面,夷平面周侧局部有零星滑坡及松动体发育。以夷平面为界,西侧为罗圈沟,东侧为东沟。其中东沟主沟道走向 NE,沟底高程 2 192~2 390 m,两岸岸坡陡峻,±坡降 10%~15%,多为洪积物质堆积。根据前述分析,东沟沟床平均纵比降 126.97‰,沟源段沟道坡度陡、比降大,其余各段沟道比降较低。沟道整体弯曲系数较大,为 1.30,沟道转弯较多。

两岸陡峻地貌及较大的沟床比降为泥石流物源汇集提供了良好的地形条件。

2.2 物源条件

泥石流固体松散物源按成因可分为坡面侵蚀物源、滑坡堆积物源、崩塌堆积物源以及沟床堆积物源等(如图4~图6)。根据研究区现场调查情况,东沟流域内,两岸岸坡表面仅有部分基岩裸露情况,草本类植物覆盖较多,因此坡面侵蚀程度相对较低,大范围分布的面状物源较少。同时,两岸岸坡整体稳定性较好,大规模的崩塌、滑坡形成的集中物源分布也相对较少。



图4 崩塌堆积物源特征



图5 崩塌堆积物源特征



图6 沟道堆积物源特征

东沟流域范围内分布的泥石流物源统计结果见表2。根据统计结果可知,流域内物源总储量为 $17.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,动储量约为 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。其中坡面

侵蚀物源总储量为 $13.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总量的76.8%,动储量约为 $2.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总动储量的75.5%;沟道堆积物源总储量为 $0.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总储量的4.2%,动储量约为 $0.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总动储量的10.4%;崩塌堆积物源总储量为 $0.84 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总量的4.8%,动储量约为 $0.12 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总动储量的4.12%;崩坡堆积物源总储量为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总量的14.3%,动储量约为 $0.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总动储量的9.96%。

即坡面侵蚀物源为泥石流最主要的物源,其次为崩坡堆积物源,再次为崩塌堆积物源,沟道堆积物源最少,这与沟域内植被覆盖程度、沟道特征等分析结果吻合。

表2 东沟物源统计结果表

物源类型	坡面侵蚀物源	沟道堆积物源	崩塌堆积物源	崩坡堆积物源	合计
总量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	13.5	0.73	0.8	2.5	17.6
动储量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	2.3	0.31	0.1	0.3	3.0

2.3 水源条件

水源条件是诱发泥石流的重要因素,岸坡堆积的松散物质在充水条件下有效应力大幅降低,下滑力增加,从而发生失滑现象。

在东沟流域属冷温带大陆性干旱气候,太阳辐射强、日照充足、降水稀少、蒸发量大;昼夜温差大,夏季短而炎热,冬季长而寒冷。

降水量年际变化大,且各月分布不均。最大年降水量251.3 mm(1993年),最小年降水量101.6 mm(1991年),年降水量分布自南向北随海拔高度的降低而减少。各月分配也很不均匀。冬季受西伯利亚冷高压的控制,降水稀少,从10月到第二年3月降水仅占全年的16%,其中12月份降水只有1.6 mm。从春季3月份开始降水逐渐增多,7月增加最快,从秋季9月开始减少,10月份减少最多。降水主要集中在4~9月。据统计,全区4~9月降水量占全年的82%~85%左右,其中7~9月3个月最多,占全年的60%左右。每年平均出现小雨46.3次,中雨3.6次,大雨0.5次,暴雨出现几率较少。沟道内未见有地下水出露,沟谷为干沟,若遇大暴雨时沟内将产生洪水,为泥石流形成提供了动力来源。研究区近50 a月平均降雨量图如图7。

3 泥石流发育特征

3.1 分区特征

根据前述集中物源分布特征的调查结果可知,

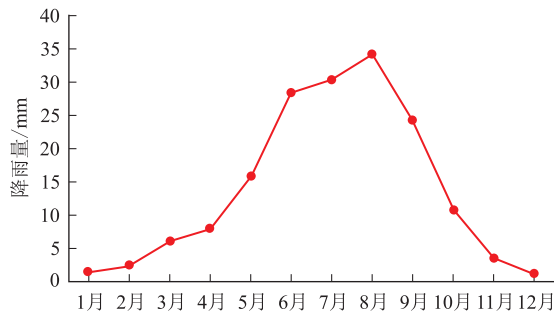
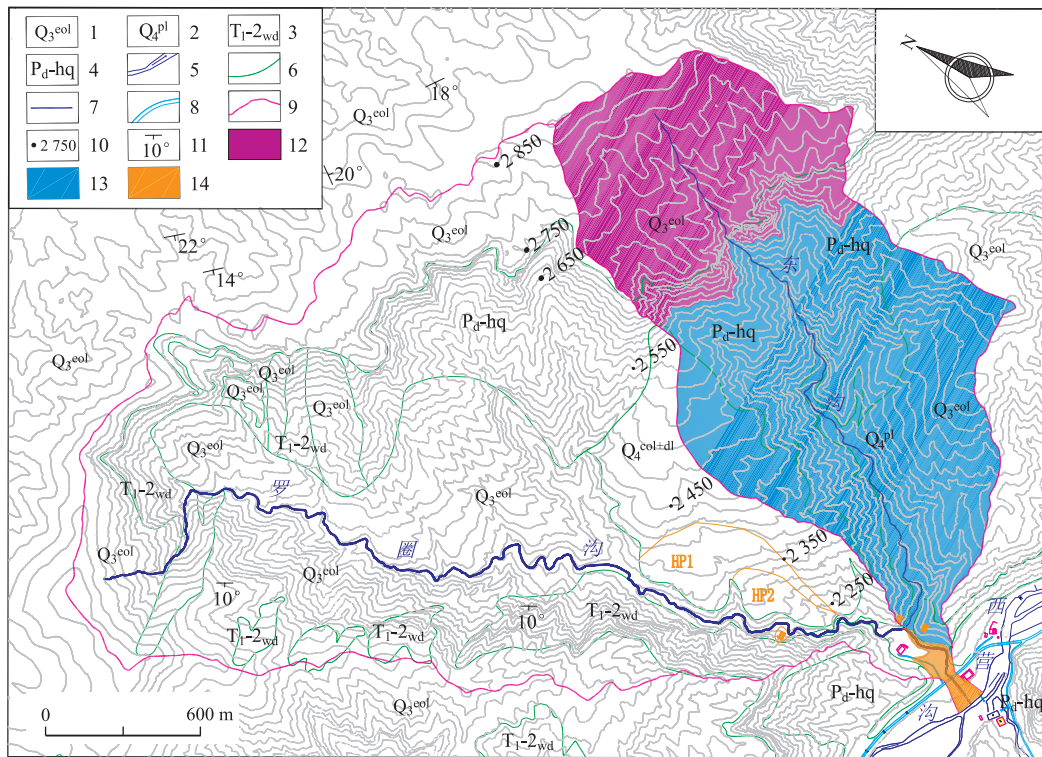


图7 皇城地区近50 a月平均降雨量图

在沟床高程 2 605 m 以上沟域,沟道较陡,比降较大,短小支沟多,汇水面积大,故将其划分为形成区。沟床高程 2 192~2 605 m,既有物源分布,也是泥石流流通的主要区域,因此将 2 192~2 605 m 沟床高程区域划分为泥石流的形成流通区。2 192 m 高程以下沟域,沟道变宽、变缓,各类物源堆积于沟道内部,将其划分为泥石流堆积区。泥石流分区平面特征见图 8,纵剖面泥石流分区结果见图 9。



1. 第四系风积物;2. 第四系坡积物;3. 三叠系;4. 二叠系;5. 河流;6. 基覆分界;7. 沟道线;8. 道路;9. 沟域线;
10. 高程点;11. 岩层产状;12. 形成区;13. 形成流通区;14. 堆积区

图8 东沟泥石流平面分区特征

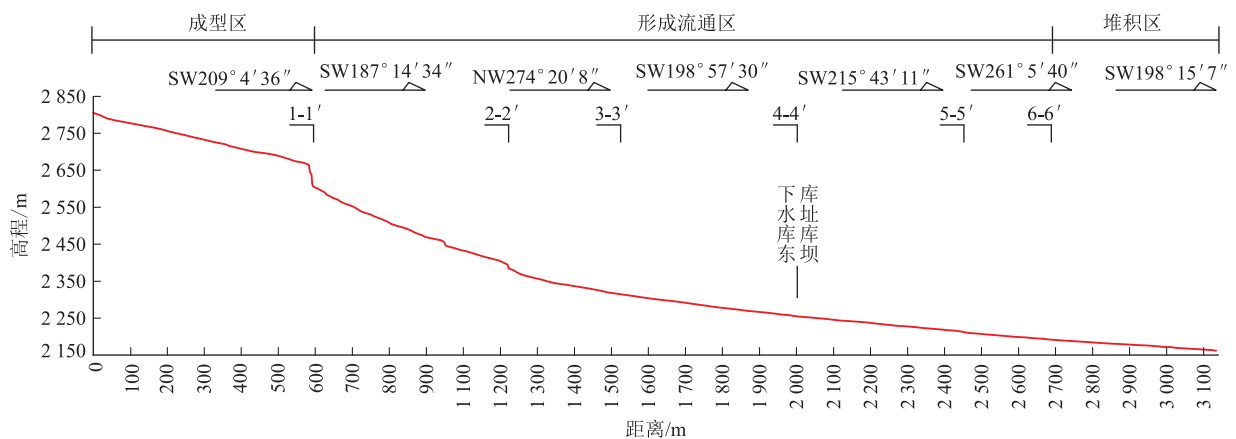


图9 东沟泥石流剖面分区特征

由图 8,图 9,结合现场调查可知,泥石流各分区冲淤特征如下:

形成区为沟床高程 2 605 m 以上区域,沟道长度 594.19 m,多条沟道汇集于一处,汇水面积较大,沟床比降大,为 336.6‰,沟道内无明显堆积物源,该段泥石流物质表现为以冲为主。

形成流通区为沟床高程 2 192~2 605 m 区域,沟道长度 2 004.81 m。该区域沟床高程 2 385~2 605 m 之间,沟道较为顺直,坡度较陡,比降较大,沟道内有植被覆盖,故该段泥石流物质表现以冲为主,淤为辅,冲淤结合;其余沟段沟道内无植被覆盖,沟道较为顺直,但沟道物源较多,沟道平缓,坡度小,比降小,故该段泥石流物质表现为冲淤结合。综上,形成流通区上游区段以冲为主,其余区段冲淤结合。

堆积区为河床高程 2 192 m 以下区域,沟道长度约 435.17 m。沟道平缓,坡度仅在 5°左右,比降小,为 69.3‰。沟道存在有两个较大的转弯,沟道宽度较宽。小坡度、小比降、宽沟道及大转弯,都使得泥石流物源部分堆积于此,其余部分冲入西营河。

3.2 堆积物特征

东沟沟口无明显泥石流堆积扇,各类物源在沟道内零散分布,直至西营河边。根据沟床高程 2 192 m 以下沟段沟道内堆积物的调查结果,泥石流堆积物的主要成分与物源区岩性有较好的对应关系。沟道表部堆积物粒径多在 30 cm 以下,块石磨圆度较好,典型特征见图 10。



图 10 东沟泥石流堆积物特征

泥石流堆积物的粒度组成、级配等特征既可以体现堆积物的均匀性和分选性,也反映了试验地段的水动力条件,同时在一定程度上表征了流体的性质,是泥石流流体性质判定和后续特征值计算的基本依据。有鉴于此,现场在堆积区选取具有典型特征的不同地段,开展了 3 组筛分试验,结果见表 3,颗粒分析曲线见图 11~13。

表 3 东沟泥石流堆积物筛分试验成果表

试验 编号	颗粒分布(单位:mm)							土石比
	>60	60~40	40~20	20~10	10~5	5~2	<2	
1	5.69	0.91	1.27	1.06	0.7	1.66	0.95	7.76:92.24
2	4.75	0.95	1.54	1.1	0.6	1.54	0.81	7.17:92.83
3	5.72	0.89	1.4	1.08	0.65	0.16	0.88	8.16:91.83

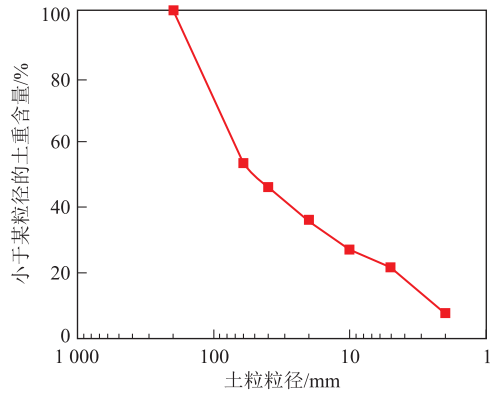


图 11 东沟 1# 试样泥石流堆积物颗粒分析曲线

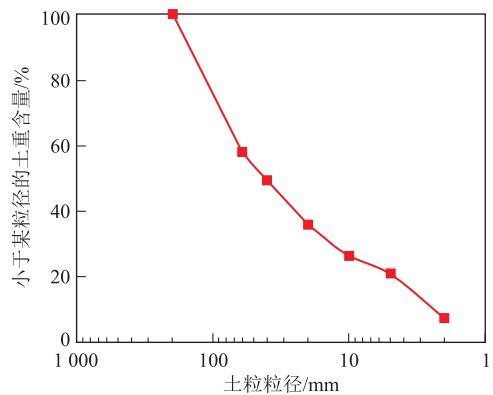


图 12 东沟 2# 试样泥石流堆积物颗粒分析曲线

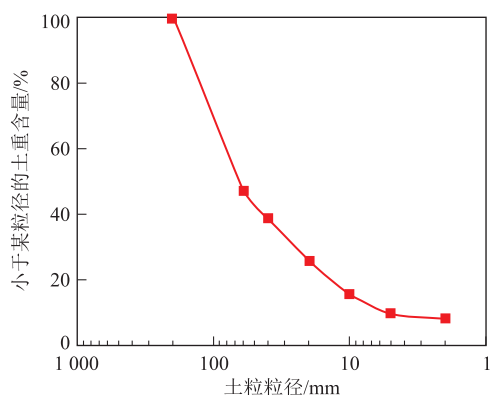


图 13 东沟 3# 试样泥石流堆积物颗粒分析曲线

由试验结果可知,皇城抽水蓄能电站东沟泥石流堆积物以 >60 mm 粒径组为主,3 组试验中,>60 mm 粒组含量均在 42% 以上,最高 53.06%。<2 mm 粒组含量第 3 组最少,占 1.48%。其余试样 2

~5 mm 粒组含量最少,均在 5.31%~5.72%。细颗粒物含量很少,土石比均在 7.174:92.826 以下,土石比较小,表明皇城抽水蓄能电站东沟水动力条件较大,将细颗粒物冲走,仅剩余粗颗粒物堆积。

4 泥石流动力学基本特征

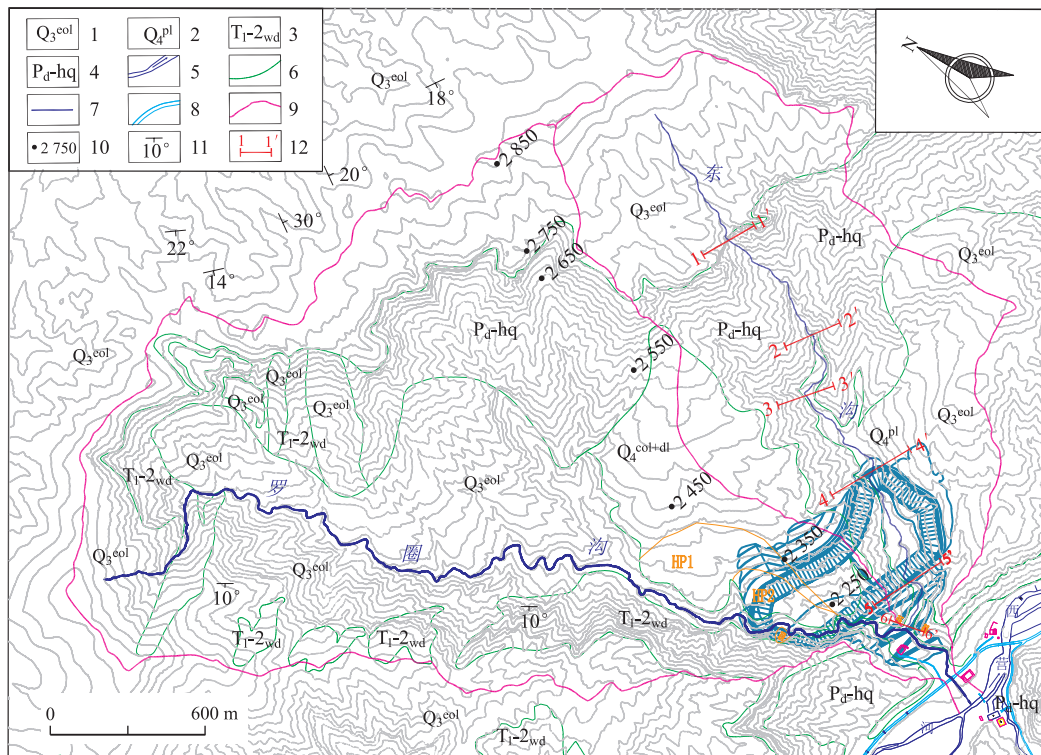
4.1 计算剖面设置

泥石流特征值计算所用剖面多布设于沟道比降

发生明显变化、拟设工程位置等处,根据规范与暴雨洪水计算手册相关公式,对东沟泥石流典型断面处进行泥石流动力学基本特征值的计算,计算剖面如图 14 所示。

4.2 泥石流重度

根据《泥石流灾害防治工程勘查规范》(T/CAGHP 006-2018)附录 I.1 进行易发程度评分,评分结果为 70 分,然后按附表 I.2 查表确定皇城抽水蓄能电站罗圈沟泥石流重度,其结果为 $\gamma_c = 1.481 \text{ g/cm}^3$ 。



1. 第四系风积物;2. 第四系坡积物;3. 三叠系;4. 二叠系;5. 河流;6. 基覆分界;7. 沟道线;8. 道路;9. 沟域线;
10. 高程点;11. 岩层产状;12. 计算剖面

图 14 东沟泥石流特征值计算位置示意图

4.3 泥石流流量

常用的泥石流流量计算方法为雨洪法,故对本次研究区东沟主要采用雨洪法来计算流量。因甘肃省无明确的泥石流计算手册,同时按《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》进行的泥石流计算已经经过多年的专家评审和使用,适用性和准确性被明确验证,故本次计算使用《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》所列公式,代入甘肃省相关参数进行计算,可以保证结果的准确性和可信度。暴雨洪水流量 Q_B 及泥石流洪峰流量 Q_c 计算公式如下:

$$Q_B = 0.278\psi \frac{s}{\tau^n} F \quad (1)$$

式(1)中, ψ 为洪峰径流系数, $\psi = f(\mu, \tau^n)$; $\tau^n = f(m,$

$s, J, L)$,其中 s 为暴雨雨力,mm/h; m 为汇流参数; J 为沟床平均纵比降; L 为沟道长度,km; n 为暴雨指数; F 为流域面积,km²; τ 为流域汇流时间,h; μ 为入渗强度,根据公式 $\mu = 3.6F^{-0.19}$ 计算,单位为 mm/h。

$$Q_c = (1 + \varphi)Q_B \cdot D_c \quad (2)$$

式(2)中, Q_c 为泥石流断面峰值流量(m³/s); φ 为泥沙修正系数; D_c 为泥石流堵塞系数。

4.4 泥石流流速

采用规范^[9]规定的流速公式计算:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\gamma_H \cdot \varphi + 1}} \cdot \frac{1}{n} \cdot H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, V_c 为泥石流流速(m/s); φ 为泥石流泥砂修正系数; γ_H 为泥石流固体颗粒密度(t/m^3); H_c 为平均泥深(m), 一般可用平均泥石流泥位深 H (m) 代替; I_c 为泥流水力坡度, 一般可用沟道纵坡率代替; $\frac{1}{n}$ 为清水河床糙率系数, 查当地水文手册或查铁路桥渡勘测设计规范(TBJ17-86)。

4.5 泥石流总量

(1) 一次过流总量

一次泥石流过流总量按照规范^[9]附录 I 提供的计算公式进行计算如下:

$$Q = 0.264TQ_C = KTQ_C \quad (4)$$

其中, T 为泥石流持续时间(s); K 值的变化随流域面积 F 的大小而变化, 根据规范: 当 $F < 5 \text{ km}^2$ 时, $K = 0.202$; $F = 5 \sim 10 \text{ km}^2$ 时, $K = 0.113$; $F = 10 \sim 100 \text{ km}^2$ 时, $K = 0.0378$; $F > 100 \text{ km}^2$ 时, $K < 0.0252$ 。

(2) 一次固体冲出物质总量

泥石流固体冲出物计算公式如下:

$$Q_H = Q(\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma_w) \quad (5)$$

式中, Q_H 为一次泥石流冲出固体物质总量(m^3); Q 为一次泥石流过程总量(m^3); γ_c 为泥石流重度(t/m^3); γ_w 为水的重度(t/m^3); γ_H 为泥石流固体物质的重度(t/m^3)。

4.6 泥石流冲击力

(1) 泥石流整体冲压力

$$\delta = \gamma \frac{\gamma_c V_c^2}{g} \sin \alpha \quad (6)$$

式中, δ 为泥石流整体冲压力, Pa; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; α 为受力面与泥石流冲压力方向所夹的角, °; λ 为受力体形状系数, 方形为 1.47, 矩形为 1.33, 圆形、尖端、圆端形为 1.00。

(2) 单块石最大撞击力

$$F_s = \gamma \cdot V_c \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{W}{C_1 + C_2}} \quad (7)$$

式中, F_s 为单块巨石的撞击力, Pa; γ 为动能折减系数, 正面撞击时取 0.3; α 为受力面与泥石流撞击面撞击角; C_1 、 C_2 为巨石与建筑物的弹性变形系数, 若采用船筏与桥墩台的撞击系数, $C_1 + C_2 = 0.005$; W 为块(漂)石重量(t)。

冲击力计算均考虑最危险情况, 即有关参数选取为冲击力最大的数值, 并只考虑正面撞击, 结合现场调查情况, 单块石直径选取 2 m。

4.7 爬高和最大冲起高度

泥石流最大冲起高度 ΔH 和爬高 ΔH_c 按式(8)和(9)计算。

$$\Delta H = \frac{V_c^2}{2g} \quad (8)$$

$$\Delta H_c = \frac{bV_c^2}{2g} \approx 0.8 \frac{V_c^2}{g} \quad (9)$$

式中, ΔH 为泥石流最大冲起高度(m); ΔH_c 为泥石流爬高(m); V_c 为泥石流平均流速(m/s); b 为泥石流迎面坡度的函数。

则东沟拟设工程位置处(即剖面 4-4')动力学特征基本参数计算结果见表 4。

表 4 东沟拟设工程位置(剖面 4-4')处流量计算表

设计暴雨频率 $P/\%$	0.5	1	2	5	10
洪水流量 $Q_B/m^3 \cdot s^{-1}$	7.59	6.20	4.40	2.53	1.30
泥石流峰值流量 $Q_C/m^3 \cdot s^{-1}$	14.36	11.73	8.33	4.79	2.47
断面平均流速/ $m \cdot s^{-1}$	2.69	2.15	1.47	0.80	0.38
一次过流总量/ m^3	3 479.7	2 842.9	2 017.9	1 161.8	598.4
一次固体冲出物质/ m^3	1 324.4	1 082.0	768.0	442.2	227.7
整体冲压力/kPa	23.87	15.34	7.71	2.56	0.72
单块石撞击力/kPa	1.64	1.31	0.93	0.54	0.29
爬高/m	0.90	0.58	0.29	0.10	0.03
最大冲起高度/m	0.56	0.36	0.18	0.06	0.02

5 泥石流危险性评价

东沟沟道两岸岸坡较陡、沟谷切割程度较小, 沟道较为宽缓, 沟床纵比降较小, 岸坡植被覆盖率一般, 物源分布类型与储量较多, 松散物源总储量丰富, 整个流域汇水面积较大, 在地形和物源条件综合作用下, 东沟暴发泥石流可能性较大, 属于易发型泥

石流。拟设工程断面位置的流速、冲出量均适中, 经实地调查判定该泥石流爆发规模属于小型。若爆发泥石流, 会产生一定的破坏性, 其泥石流冲出物质将正面冲击下水库拟设库坝, 对水电站下库造成一定危害。根据前述分析、计算结果可知, 在设计频率为 1% 的情况下, 泥石流的流速可达 7.17 m/s , 速度较快。泥石流一次过流总量达 $3 286.53 \text{ m}^3$, 一次固体冲出物质为 $1 250.88 \text{ m}^3$ 。速度快、冲出量大的泥石

流,会对下库坝体产生一定冲击。计算结果显示,沟口拟设坝址位置处泥石流在 $P=1\%$ 情况下最大冲起高度 0.36 m,爬高约 0.58 m,根据坝顶标高设计,泥石流物质冲起进入库区的可能性较小。

6 结论

结合现场踏勘、试验、室内计算、分析成果,本次研究主要得出以下结论:

(1) 东沟沟道总长度 2.89 km,流域周长 7.37 km,流域面积 2.15 km²,流域内高差近 710 m,平均纵坡降约 220.64‰,河道整体弯曲系数 1.10。

(2) 流域内物源总储量为 17.59×10^4 m³,以坡面侵蚀物源为主,其次为崩坡堆积物源,再次为崩塌堆积物源,沟道堆积物源最少。

(3) 按设计暴雨频率 1% 计算,在抽蓄下库库坝即 4-4' 剖面位置,泥石流流速 3.411 m/s,一次过流总量为 3 286.53 m³,一次固体冲出物质 1 250.88 m³,泥石流整体冲压力 15.34 kPa,设计暴雨频率下单块块石按 2 m 计算,最大撞击力 10.5 kN。

(4) 东沟若发生泥石流,则其冲出物质正面冲击下水库拟设库坝,对下库坝体产生一定冲击。建议在下库坝址上游处布设导流堤及导流洞,防止发生泥石流时对下库工程及施工安全造成影响。

参考文献

[1] He Songtang, Chen Wenle, Wang Daojie, et al. Experimental investigation of the effects of shrub filter strips on debris flow

trapping and interception[J]. International Journal of Sediment Research, 2023, 38(2): 265-278.

- [2] Abraham Minu Treesa, Satyam Neelima, Pradhan Biswajeet, et al. Debris flow simulation 2D (DFS 2D): Numerical modelling of debris flows and calibration of friction parameters [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(6): 1747-1760.
- [3] Leng Xiaopeng, Feng Liangyu, Ou Ou, et al. Debris Flow Infrasound Recognition Method Based on Improved LeNet-5 Network[J]. Sustainability, 2022, 14(23): 15925.
- [4] 康业渊, 张娜, 狄文龙. 基于模糊最优识别理论的水电工程泥石流危险性评价模型[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 56-60.
- [5] 余正江. 泥石流对某水电站水库运行的影响研究[J]. 建材与装饰, 2018, (32): 294-295.
- [6] 崔承洋. 延吉沟泥石流危险度评价及生态防治[D]. 华北水利水电大学, 2018.
- [7] 杨建元, 金忠良, 何桂凤, 等. 高坡降小流域泥石流特性与治理设计研究[J]. 科技通报, 2017, 33(2): 30-33+38.
- [8] 袁国庆, 高建祥, 李静. 川西高原大中型水电站工程区泥石流沟的基本特征及影响[J]. 水电站设计, 2016, 32(3): 52-55.
- [9] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘查规范(DZ/T 0220-2006)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [10] 范振飞. 水利水电工程中地质灾害预防策略探索[J]. 中国标准化, 2019, (2): 98-99.
- [11] 王立志, 巨广宏, 杨伟强. 黄河上游某水电站坝前泥石流沟特征研究[J]. 西北水电, 2020, (4): 33-36.
- [12] 王有林, 赵志祥, 许晓霞, 等. 西藏某水电站坝前大型冰水堆积体稳定性研究[J]. 西北水电, 2021, (6): 38-43.
- [13] 刘腾, 张文, 刘民生. 高寒山区西藏那曲地区某泥石流发育特征及形成机制分析[J]. 四川地质学报, 2022, 42(S2): 148-152.
- [14] 王越. 盐边县银家河沟泥石流发育特征及防治对策研究[J]. 四川地质学报, 2022, 42(S2): 130-134.

作者简介: 李鹏(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利水电工程地质方面研究工作。E-mail: lppanda@sina.com