

程海湖生态修复项目河门口治理工程设计

左安垠¹, 孙文召², 孙曙鸿³

(1. 永胜县林业和草原局红星桥木材检查站, 云南丽江 674200;

2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南昆明 650051;

3. 永胜县天然林保护工程管理办公室, 云南丽江 674200)

摘要:通过对程海湖生态修复项目(一期)工程入湖河道现场现状、洪水特性、地质等调查统计分析,对13条入湖河道河门口治理作出设计策略,根据调查统计分析及水力学计算结果,设计出堤防基础埋设深度、导流墙及固床坝等埋设深度、堤身结构等,成果经1a洪水冲刷无损毁,监测结果与设计理论相一致,具备设计要求的抗洪能力。

关键词:程海湖生态修复;河门口治理;防洪;生态设计

1 项目背景

由于社会、自然等原因,程海湖区域生态环境一度进入长期修复期。环湖截污、引水补水、生态修复是抢救性保护程海三大措施,由于干旱、干扰大、管控空间受限、土壤砂砾石含量高、污染等制约因素,如何通过生态修复的手段来改善与创造一个良好的生态环境,是近年来程海湖生态环境建设的重点和难点,在生态修复绿化过程中如何提高植物成活率及保存率,是目前面临的难题之一。2018年以来,实施了程海湖生态修复省级重大工程项目,分两期实施,一期投资1.94亿元、二期投资4.24亿元,包括植物工程、河门口治理工程、灌溉引水工程、生态管护廊道工程、防护网工程、土壤改良工程六大分部以及退耕还湿。为提高入湖河道的防洪能力,降低洪水对程海水质的影响,对程海湖生态修复项目(一期)工程水土流失严重的13条入湖河道河门口进行工程治理防洪生态防护科学设计,为二期13条入湖河道河门口治理设计提供了参考。

2 设计区域特性分析

2.1 暴雨洪水特性

项目区所在流域属于横断山脉纵谷区滇西北部金沙江河谷区,处于低纬高原区,具有较独特的高原山地季风气候特点,干湿季分明,冬春多旱,辐射强,夏季降雨量充沛,属中山山原亚区的中亚热带气候区。本地区暴雨洪水主要受延伸的西南和东南暖湿气流影响,多集中于6-10月,具有明显季节性。流域内

多年平均最大24h降雨量为73.5mm,实测最大24h降雨量为124.8mm(永胜气象站1989年7月27日)。每年6-8月间,以单点暴雨为主,暴雨时空分布不均。本地区洪水源于暴雨,地区分布及发生时间与暴雨一致,次

表1 项目区各治理河段设计洪水成果表

河门口 治理河道	频率			
	5%	10%	20%	50%
1#	7.93	6.55	4.75	2.15
	9.04	7.67	5.70	3.34
2#	11.8	9.73	6.95	3.12
	18.4	15.4	11.3	6.36
3#	23.1	19.1	14.0	6.52
	22.8	19.4	14.4	8.55
4#	7.24	5.99	4.39	2.02
	6.93	5.81	4.26	2.51
5#	37.9	31.3	22.7	10.6
	40.5	34.4	25.6	14.9
6#	27.2	22.5	16.5	7.74
	26.3	22.2	16.5	9.72
7#	7.08	5.87	4.33	2.01
	6.37	5.35	3.80	2.24
8#	16.8	13.9	10.2	4.74
	16.0	13.5	10.0	5.93
9#	19.3	15.9	11.6	5.40
	19.4	16.4	12.2	7.26
10#	53.1	43.8	31.7	14.6
	59.9	50.8	37.7	22.0
11#	30.8	25.5	18.7	8.86
	28.3	24.0	17.8	10.7
12#	26.6	22.0	16.1	7.59
	25.0	21.2	15.7	9.30
13#	21.5	17.8	12.9	5.94
	25.0	21.2	15.7	9.21

作者简介:左安垠,本科学历,高级工程师,主要从事园林、林业工程设计、施工、管理;林业科技项目实施。

洪历时与净雨历时一致，一般在16h左右。根据本流域暴雨洪水特性，结合设计流域属小汇水面积的具体情况综合考虑，确定设计洪水历时取值为24h。

2.2 洪水分析

根据谷歌地球仪量算流域特征值，各河道流域面积、河长、比降成果见表1。通过上述分析水库流域的点暴雨统计参数及流域特征值、产汇流参数，根据《云南省暴雨洪水查算图表实用手册》中的暴雨洪水计算方法，推求得到各河段设计洪水峰量成果见表1。

限于项目区无资料，并且汇水面积均较小，采用经批准的《云南省暴雨洪水查算图表实用手册》推求设计洪水符合《水利水电工程设计洪水计算规范》(SL44—2006)的有关规定。

由表1可看出，各频率设计洪水的峰值具有随频率数值增大而逐渐减小的趋势，符合一般水文规律。说明各频率设计成果之间无明显的矛盾。综上所述，在现有资料条件下，采用暴雨途径查图法推求的设计洪水成果是基本合理的。

2.3 地质分析及评价

工程区位于扬子准地台丽江台缘褶皱系鹤庆—

洱海褶皱束，断裂、褶皱发育，地质构造较复杂。工程区地处下关—剑川地震带边缘，北侧及南西侧为剑川—丽江及鹤庆—洱海大断裂，西侧金沙江—红河大断裂，北东侧分布程海—宾川大断裂。上述活动性大断裂至今仍有强烈活动。为较强震区边缘，地震活动频繁。因此工程区的区域构造稳定性较差。根据1:400万《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)工程区地震动峰值加速度为0.30g，地震反应谱特征周期为0.45s，对应地震基本烈度为Ⅷ度。

3 河门口治理设计

3.1 河门口治理策略

根据程海湖生态修复项目(一期)范围内地形地质条件及流域暴雨洪水特性，为提高入海河道的防洪能力，降低洪水对程海水质的影响，在各入湖河口采取工程措施，对水土流失严重的1#—13#入湖河道进行防护治理。其中，2#、3#、10#防护型式采用埋石混凝土挡墙，12#河道采用格宾石笼挡墙，其余部分采用底部防冲刷埋石混凝土挡墙，上部生态土堤，土堤靠河侧采用格宾石笼护坡，背河侧土堤植草护坡，设置埋石混凝土导流墙、固床坝。

表2 河门口治理措施表

河道编号	治理范围	治理措施					河道断面 宽(m) ×高(m)	
		亲水面河侧基础处理方式	亲水面河侧护坡方式	背水面河侧护坡方式	拦砂固床方式	固床坝间距(m)		
1#	1501m高程以上水平距离30m	埋石混凝土护脚	格宾石笼生态护坡	植草生态土堤护坡	设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	4×2
2#	1501m高程以上水平距离30m	埋石混凝土挡墙			设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	8×2
3#	1501m高程以上水平距离30m	埋石混凝土挡墙(右岸)			设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	/
4#	1501m高程至公路	前段埋石混凝土挡墙(左岸)后段埋石混凝土护脚	格宾石笼生态护坡	植草生态土堤护坡	设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	16×2
5#	1501m高程以上水平距离30m	埋石混凝土护脚	格宾石笼生态护坡	植草生态土堤护坡	设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	24×2
6#	1501m高程以上水平距离30m	埋石混凝土护脚	格宾石笼生态护坡	植草生态土堤护坡	设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	18×2
7#	1501m高程以上水平距离30m	埋石混凝土护脚	格宾石笼生态护坡	植草生态土堤护坡	设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	4×2
8#	1501m高程以上水平距离30m	埋石混凝土护脚	格宾石笼生态护坡	植草生态土堤护坡	设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	8×2
9#	1501m高程以上水平距离30m	埋石混凝土护脚	格宾石笼生态护坡	植草生态土堤护坡	设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	6×2
10#	1501m高程以上水平距离30m	埋石混凝土挡墙(左岸)			设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	/
11#	1501m高程以上水平距离30m	埋石混凝土护脚	格宾石笼生态护坡	植草生态土堤护坡	设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	8×2
12#	1501m高程以上水平距离30m	格宾石笼挡墙			设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	6×2
13#	1501m高程至公路	埋石混凝土护脚	格宾石笼生态护坡	植草生态土堤护坡	设置固床坝	15	设置埋石混凝土导流墙	16/24×2

3.2 河门口水力学计算

根据国标《防洪标准》(GB50201-2014),以乡村为保护对象,人口小于20万的防洪标准为10-20a,考虑经济、社会等多方面因素,确定河门口治理河段防洪标准为10a一遇。

依据河门口10a一遇标准流量,采用理正水力学计算模块(恒定非均匀渐变流)对治理河段进行水力学计算,拟定河宽按原有河宽,计算参数及结果见表3。

表3 河门口水力学计算表

河道编号	流量 (m ³ /s)	拟定河宽 (m)	纵坡	糙率	计算水深 (m)	最大流速 (m/s)
1 [#]	6.55	4	0.049	0.025	0.6	3.9
2 [#]	9.73	8	0.082	0.018	0.502	4.4
3 [#]	19.1	9	0.092	0.018	0.74	5.2
4 [#]	5.99	16	0.13	0.025	0.23	3.1
5 [#]	31.3	24	0.1	0.025	0.55	4.9
6 [#]	22.5	18	0.113	0.025	0.53	5
7 [#]	5.87	4	0.266	0.025	0.57	6.3
8 [#]	13.9	8	0.12	0.025	0.64	5.6
9 [#]	15.9	6	0.147	0.025	0.82	6.8
10 [#]	43.8	20	0.087	0.018	0.77	5.7
11 [#]	25.5	8	0.096	0.025	0.94	6.4
12 [#]	22	6	0.16	0.025	0.99	7.8
13 [#]	17.8	16	0.105	0.025	0.5	4.7

由计算结果可知,河门口计算水深为0.23-0.99m,考虑一定的超高(0.5m),堤顶高度为0.73-1.49m,考虑到各个河门口之间的断面协调、美观,格宾石笼生态土堤(下部为埋石混凝土护脚)河床以上高度为2m。

3.3 堤防基础埋置深度确定

根据《建筑地基基础设计规范》及相应结构设计规范的有关规定,干流河堤基础埋置深度应符合以下要求:

- 1) 基础不得置于有机土、泥炭、腐殖土及废弃垃圾上;
- 2) 河堤护脚埋置深度应满足抗冲刷和冻结深度的要求。

河门口治理工程堤基主要置于砂砾石地基上,河道堤线平顺地段,河堤与河道主流方向基本一致,按水流平行河道条件下考虑,冲刷深度计算根据《堤防工程设计规范》(GB50286-2013)附录D.2中的计

算公式进行计算:

$$h_s = H_0 \left[\left(\frac{U_{cp}}{U_c} \right)^n - 1 \right]$$

$$U_{cp} = U \frac{2\eta}{1 + \eta}$$

$$U_c = 1.08 \sqrt{gd_{50} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \left(\frac{H_0}{d_{50}} \right)^{1/7}}$$

式中: h_s —局部冲刷深度(m);

n —平面形状系数, $n=1/4 \sim 1/6$, 取 $n=1/4$;

U_{cp} —近岸垂线平均流速(m/s)。

U_c —泥沙起动流速(m/s),采用张瑞瑾公式计算;

U —行进流速(m/s);

H_0 —冲刷处水深(m);

η —水流流速不均匀系数,根据水流流向与岸坡交角确定。

根据项目治理河段各河道断面流速、水深及河床颗粒组成情况计算平行河道冲刷深度。

表4 河门口治理段冲刷深度

河门口编号	水深 (m)	行进流速 (m/s)	起动流速 (m/s)	近岸垂线平均流速 (m/s)	不均匀系数	冲刷深度 (m)
1 [#]	0.6	3.9	0.58	4.68	1.5	0.41
2 [#]	0.502	4.4	0.56	5.87	2	0.40
3 [#]	0.74	5.2	0.59	6.24	1.5	0.59
4 [#]	0.23	3.1	0.50	3.72	1.5	0.15
5 [#]	0.55	4.9	0.57	5.88	1.5	0.44
6 [#]	0.53	5	0.57	6.00	1.5	0.43
7 [#]	0.57	6.3	0.57	8.40	2	0.55
8 [#]	0.64	5.6	0.58	6.72	1.5	0.54
9 [#]	0.82	6.8	0.60	8.16	1.5	0.75
10 [#]	0.77	5.7	0.60	6.84	1.5	0.65
11 [#]	0.94	6.4	0.61	8.53	2	0.88
12 [#]	0.99	7.8	0.62	9.36	1.5	0.96
13 [#]	0.5	4.7	0.56	5.64	1.5	0.39

根据计算结果,河门口冲刷深度一般为0.15-0.96m。根据规范要求,堤防基础应置于最大冲刷深度以下0.5-1.0m,结合冲刷深度,考虑程海湖降雨经常有单点强暴雨的现状,河门口基础埋深取为2m。

3.4 堤身结构设计

3.4.1 挡墙稳定性计算

程海湖生态修复工程主要考虑采用埋石混凝土挡墙型式、埋石混凝土护脚加土堤。对两种挡墙形式的典型断面采用理正软件进行结构稳定计算。

型式1, C20埋石混凝土重力式挡墙, 墙高4m, 墙顶宽0.6m, 迎水坡坡比为1:0.2, 背水坡坡比为1:0.3, 墙后采用开挖料回填至地面。

型式2, 生态土堤底部防冲刷埋石混凝土挡墙, 墙高2m, 墙顶宽0.4m, 迎水坡坡比为1:0.2, 背水坡坡比为1:0.3, 土堤靠河侧坡比1:2, 采用格宾石笼护坡, 土堤背河侧坡比1:1.5, 采用植草护坡, 土堤顶宽3m。

主要的地质参数建议值见表5。

表5 计算参数值

名称	天然状态			渗透系数 (m/s)
	容重 (kN/m ³)	C (kPa)	Φ (°)	
1 土石回填	18	0	23.5	5e-5
2 格宾石笼	22	100	37	0.003
3 埋石混凝土护脚	23	200	40	1e-7
4 抛填块石	19	10	34	5e-3
地层1 Qh 粘土、砂、砾石	17	19	20	0.01
地层2 Pβ3 二叠系玄武岩组上段	20	200	25	1e-6

注: 计算参数取地质建议值的中值。

堤防稳定计算软件采用理正岩土计算模块, 主要计算参数及工况如下:

a.挡墙及墙后土石方填筑设计参数

埋石混凝土及C20混凝土容重 $\gamma = 23\text{kN/m}^3$;
土石方填筑相对密度 >0.6 。

土石方填筑内摩擦角为 23.5° , 粘聚力为 0kPa 。
基底摩擦系数 0.5 。

b.荷载

墙自重、墙背填土重、墙背土压力、水压力、扬压力。

c.运行情况及荷载组合

工况1: 正常运行——防洪墙背水侧水位为设计水位, 迎水面水位比背水侧水位低 1m , 荷载组合为自重+墙背土压力+土重+水压力+扬压力+人群或车辆

荷载;

工况2: 正常运行——防洪墙临水侧为汛期多年平均流量对应水位, 背水侧水位比临水侧水位高 1m , 荷载组合为防洪墙自重+墙背土压力+土重+人群或车辆荷载;

工况3: 非常情况——防洪墙临水侧水位为最低枯水位, 背水侧水位比临水侧水位高 1m , 墙后填土表面计入碾压机械荷载。

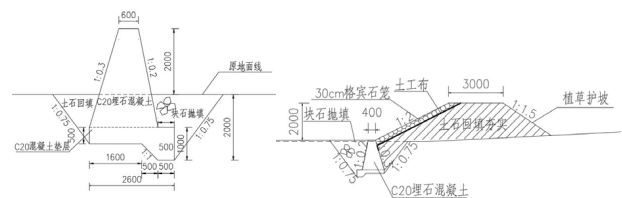


图1 埋石混凝土挡墙典型断面 图2 生态土堤典型断面

表6 挡墙稳定计算成果表

计算情况	抗滑稳定安全系数		抗倾覆稳定安全系数		基底压应力(KPa)			备注
	规范值[kc]	计算值kc	规范值[kc]	计算值kc	允许值[P]	最大值Pmax	应力比	
工况1	1.05	3.16	1.40	2.22	250	68	0.27	最大墙高4m
工况2	1.05	3.12	1.40	3.64	250	65	0.26	
工况3	1.00	3.18	1.30	4.85	250	76	0.3	

表7 生态土堤稳定计算成果表

计算情况	抗滑稳定安全系数		抗倾覆稳定安全系数		基底压应力(KPa)			备注
	情况	计算值kc	规范值[kc]	计算值kc	允许值[P]	最大值Pmax	应力比	
工况1	1.05	1.312	1.40	1.87	250	60	0.24	
工况2	1.05	1.3	1.40	1.544	250	70	0.29	
工况3	1.00	1.428	1.30	2.282	250	60.3	0.24	

注: 应力比=基底压应力/地基土承载力

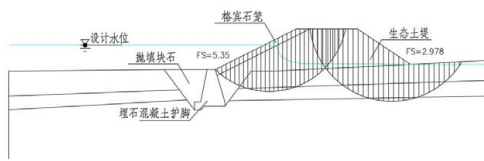


图3 工况1临、背河侧堤坡稳定计算结果

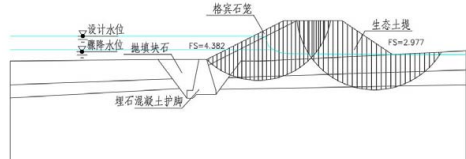


图4 工况2临、背河侧堤坡稳定计算结果

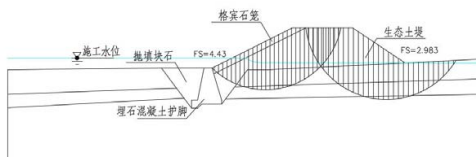


图5 工况3临、背河侧堤坡稳定计算结果

计算成果统计见表6-7。从表中可看出，在各种计算工况下，挡墙抗滑、抗倾稳定安全系数均满足规范要求。

3.4.2 渗流稳定计算

土堤背水侧为原地面，整体较为平缓，潜在滑坡为临水侧坡面，在设计洪水水位下对土堤断面进行渗

流计算，并按正常工况和非常工况进行边坡稳定计算。

(1) 正常工况

①设计洪水水位临水侧堤坡的稳定。

②设计洪水水位骤降至2年一遇常水位，临水侧堤坡的稳定。

(2) 非常工况

③施工期临水侧堤坡稳定

计算软件采用Autobank，渗流计算方法采用有限元分析法，稳定性分析采用简化毕肖普法，计算见图6，最大剖面上游在设计水位下，单宽渗透流量 $2.47 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ，渗流出口处最大渗透坡降0.023，土堤允许渗透坡降为0.5。计算成果见表8。从计算结果可看出，所拟土堤边坡稳定满足规范要求。

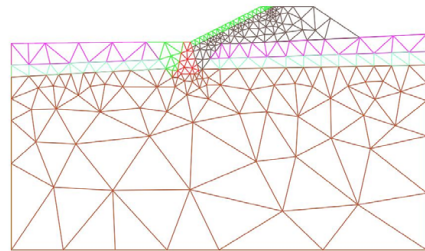


图6 生态土堤挡墙典型断面

表8 土堤边坡稳定计算成果表

计算工况	临/背水侧边坡稳定安全系数计算值	5级河堤规范值	备注
正常工况	①	5.35/2.978	1.20 常遇设计洪水水位
	②	4.382/2.977	1.20 非常运行设计洪水水位骤降至常水位
非常工况	③	4.43/2.983	1.10 施工期2年一遇水位

3.4.3 地基承载力

新建堤防重力式挡墙基础全部置于砂卵砾石层，基底应力计算成果见表6。从计算可看出，在各运行工况下，基底均不出现拉应力，其最大压应力为76kPa，其他均小于该值。最大应力比为0.3，地基允许承载力为250kPa，可见，各工况地基承载力均满足规范要求。

新建堤防地基承载力须不小于250kPa。

3.4.4 堤基处理

堤防的基础承载力不足的河段，对地基进行夯实后，用碎石进行基础换填。堤防基础施工时，临水面护脚基础埋置深度满足抗冲刷要求。

3.4.5 背河侧处理

上部生态土堤并植乔、灌、地被、草被护河堤、

土堤背河侧植草护坡，河堤设计断面参数见表9。

表9 河道防护设计参数表

河道编号	宽(m)×高(m)	靠河侧坡比	背河侧坡比	堤顶宽度(m)
1#	4×2	1:2	1:1.5	3
2#	8×2	1:2	1:1.5	3
3#	9×3	1:2	/	/
4#	16×2	1:2	1:1.5	3
5#	24×2	1:2	/	/
6#	18×2	1:2	1:1.5	3
7#	4×2	1:2	1:1.5	3
8#	8×2	1:2	1:1.5	3
9#	6×2	1:2	1:1.5	3
10#	20×2	1:2	/	/
11#	8×2	1:2	/	/
12#	6×2	1:2	1:1.5	3
13#	16×2	1:2	1:1.5	3

表10 程海区域监测点2019-2020年7月16日降雨情况

监测点	累计降雨量 (mm)		2019年24h≥40mm降雨强度		2020年24h≥20mm降雨强度	
	2019年1-12月	2020年7月16	日期	降雨量 (mm)	日期	降雨量 (mm)
程海政府	698.1	265	2019.07.18-19	69.8	2020.07.25-26	25.7
			2019.08.08-09	54.2		
			2019.06.24-25	53.9		
			2019.07.24-25	43		
兴义	848.9	191	2019.09.01-02	75.3		
			2019.09.05-06	92.7		
			2019.08.06-07	42.5		
管理局	654.3	202.9	2019.07.18-19	66.7	2020.07.12-13	40.6
			2019.08.08-09	53.1		
海腰	646.9	218.4	2019.08.08-09	54.4	2020.07.01-02	58.9
			2019.09.10-11	43.1		
崮峨	848.2	207.8				

4 成果抗洪能力监测结果

4.1 程海区域监测点2019全年及2020年1月1日-7月30日降雨强度

2019年单次24h内降雨40mm以上共计11次，最高降雨92.7mm；2020年7月30日止月单次24h内降雨20mm以上共计4次，最高降雨58.9mm。2019年年降雨量与正常年份一致。见表10。

4.2 成果抗洪能力监测结果

2019年年降雨量与正常年份一致情况下，13条河道治理段无洪水冲刷损毁。

表11 河门口治理段治理后抗洪能力监测结果

河门口编号	计算水深 (m)	计算垂线平均流速 (m/s)	计算不均匀系数	计算冲深 (m)	监测水深 (m)	监测流速 (m/s)	监测冲深 (m)
1#	0.6	4.68	1.5	0.41	0.52	4.3	0.40
2#	0.502	5.87	2	0.4	0.48	5.5	0.42
3#	0.74	6.24	1.5	0.59	0.7	6.0	0.55
4#	0.23	3.72	1.5	0.15	0.21	3.5	0.17
5#	0.55	5.88	1.5	0.44	0.51	5.2	0.48
6#	0.53	6	1.5	0.43	0.5	5.8	0.42
7#	0.57	8.4	2	0.55	0.52	8.2	0.53
8#	0.64	6.72	1.5	0.54	0.61	6.5	0.56
9#	0.82	8.16	1.5	0.75	0.80	8.1	0.72
10#	0.77	6.84	1.5	0.65	0.73	6.7	0.66
11#	0.94	8.53	2	0.88	0.9	8.4	0.85
12#	0.99	9.36	1.5	0.96	0.94	9.1	0.95
13#	0.5	5.64	1.5	0.39	0.45	5.2	0.36

5 结论

(1) 对程海湖生态修复项目(一期)工程水土流失严重的入湖河道河门口进行工程治理防护设计,对减少入湖河道水土流失、改善入湖水质、生态美

观、确保工程区内河道的防洪及拦截泥石流流入湖能力、改善入湖水质具有重要的作用和意义。

(2) 通过对程海湖生态修复项目(一期)工程入湖河道现场现状、洪水特性、地质等调查统计分析,对13条入湖河道河门口治理作出设计策略,根据调查统计分析结果及水力学计算结果,设计出堤防基础埋设深度、导流墙及固床坝等埋设深度、堤身结构等结论,成果经1a洪水冲刷无损毁,监测结果与设计理论相一致,具备设计要求的抗洪能力。总结经验撰写论文,为二期及类似工程项目设计提供参考。

(3) 工程区无洪水分析资料情况下,根据谷歌地球仪量算流域特征值,各河道流域面积、河长、比降成果,通过暴雨洪水特性分析的水库流域的点暴雨统计参数及流域特征值、产汇流参数,根据《云南省暴雨洪水查算图表实用手册》中的暴雨洪水计算方法,推求得到各河段设计洪水峰量成果,作为河道工程治理数据依据使用。

参考文献

[1] 路永珍. 某水电站高边坡稳定性分析及岩体强度参数反演[J]. 云南水力发电, 2019, 35 (5):33-35.
 [2] 邹佳成, 翟祥军, 陈旭东, 等. 排洪渠开挖对桥梁桩基影响及其边坡稳定性分析[J]. 云南水力发电, 2019, 35 (5):48-53.
 [3] 陈经纬. 镇康河防护堤设计分析[J]. 云南水力发电, 2018, 34 (5):158-160.
 [4] 钟延江, 郭家忠, 冯汉斌, 等. 胡家山水库左岸坝肩边坡稳定性分析[J]. 云南水力发电, 2017, 33 (5):102-106.