

铜头电站坝区第三系砾岩岩溶研究及工程处理

纪 洪 华

(四川省水利水电勘测设计研究院勘察分院, 四川 郫县 611731)

摘 要: 铜头电站大坝是国内第一座在下第三系砾岩上建筑的双曲薄拱坝, 由于砾岩形成的时代新, 岩石成岩固结程度相对较差, 且砾石和胶结物均主要为碳酸盐类, 因此岩体中发育有岩溶, 岩溶成为大坝的主要工程地质问题。通过对坝区砾岩岩溶的分析研究, 阐明了坝区岩溶发育规律, 根据拱坝特点, 采取了一系列工程处理措施, 处理后效果显著。

关键词: 砾岩; 岩溶; 溶蚀裂隙; 溶孔; 溶蚀泥化夹层; 灌浆处理; 混凝土置换

中图分类号: P642

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2000)增-0013-04

铜头电站位于青衣江干流——宝兴河上, 是宝兴河梯级开发的最末一级电站。工程采用拱坝挡水, 坝型为混凝土双曲薄拱坝, 坝高 75 m, 正常蓄水位高程 760 m, 总库容 0.225 亿 m³, 左岸设圆形有压输水隧洞, 长 1.58 km, 地面式厂房发电, 总装机容量 4 × 20 MW。

该工程从 1992 年初开工, 于 1995 年底第一台机组开始发电。

1 坝区工程地质概况

工区位于四川盆地西部边缘, 区内出露地层属下第三系古始新统名山群, 为一套山前冲洪积扇相砾岩, 岩相厚度变化较大, 在坝区地层平缓, 根据岩性的差异, 其工程地质岩组自下而上划分为: E_{1-2m_n}、E_{1-2m_n}、E_{1-2m_n}、E_{1-2m_n} 四层。E_{1-2m_n}: 紫灰色厚层块状泥钙质砾岩夹中薄层状的泥质砾岩或泥质粉砂岩透镜体, 厚 60~140 m。E_{1-2m_n}: 紫红色厚层块状钙质砾岩夹中薄层状的泥质砾岩或泥质粉砂岩透镜体, 厚 60~130 m。E_{1-2m_n}: 浅紫色钙质砾岩, 厚 50~60 m。E_{1-2m_n}: 棕红色泥岩或泥质粉砂岩, 厚约 70 m。

各层岩组中的岩石物理力学指标见表 1。其中 E_{1-2m_n}、E_{1-2m_n} 层的岩体为坝基、坝肩持力层; E_{1-2m_n} 层位于坝顶高程以上, 为 III、IV 级阶地基座; E_{1-2m_n} 层位于 IV 级阶地的阶面以上, 为坝区两岸的相对隔水层。

表 1 坝区岩石物理力学指标

岩 性	干密度 /g·cm ⁻³	孔隙率 /%	吸水率 /%	干抗压 /MPa	湿抗压 /MPa	软化 系数	摩擦 系数
钙质砾岩	2.66	3.39	0.62	48.4	38.2	0.79	0.65
泥钙质砾岩	2.71	1.93	0.82	48.8	35.6	0.73	0.62
钙泥质砾岩	2.68	3.26	1.18	40.9	27.9	0.68	0.60
泥质砾岩	2.64	4.09	1.63	28.6	16.6	0.58	0.55
含砾泥质粉砂岩	2.59	5.05	2.15	26.6	14.6	0.55	0.52
泥质粉砂岩	2.58	6.50	3.46	53.4	32.6	0.61	/

收稿日期: 1998-11-09

区内构造简单, 地层平缓, 岩层产状 N10°~25° W/NW 5°。区域新构造运动以间歇性上升为主, 发育有 I~V 级阶地, 工区内无断层, 主要发育两组构造裂隙, 产状 N12°E/SE 85 和 N75°W/NE 84°。前一组规模较大, 其水平和垂直方向延伸长度均大于 100 m, 走向与河流大角度相交, 发育间距 20~80 m, 裂面有溶蚀现象, 溶蚀宽度一般 0.05~0.5 m, 该组裂隙在坝区有 L₁₁、L₁₂、L₁₃、L₄₇ 四条裂隙与工程有关, 后一组 NW 向裂隙发育短小, 在坝区少见, 见图 1。

坝区岩体中含水不均, 地下水一般储存于溶蚀裂隙或溶孔中, 主要受大气降水补给和季节性沟水补给, 以岩溶管道形式或沿 NNE 向溶蚀裂隙排泄于宝兴河, 地下水属重碳酸钙型水。

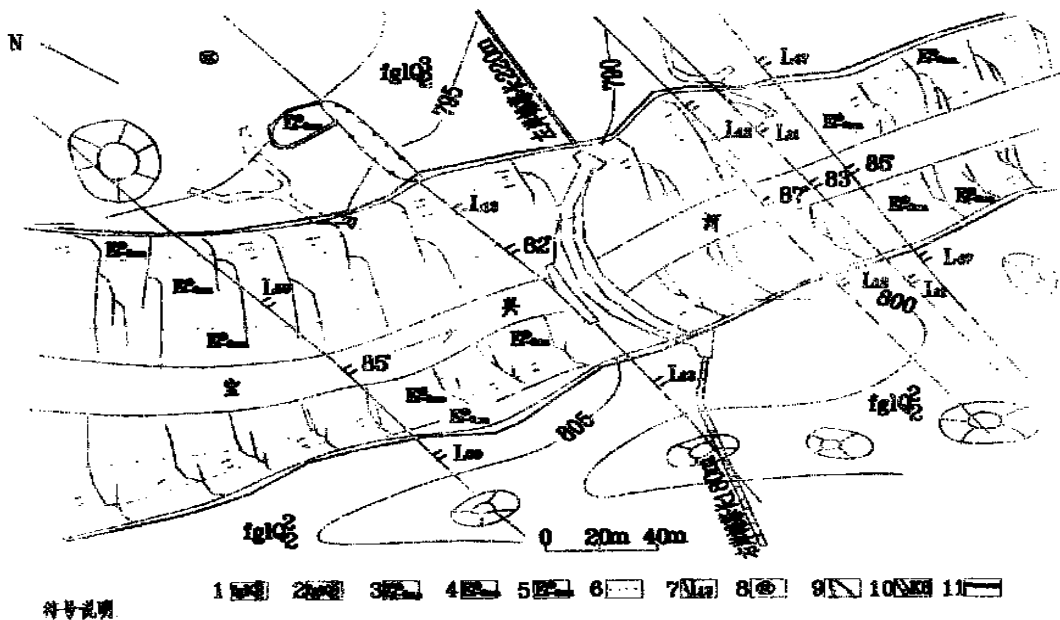
2 坝区岩溶的发育特征

坝区河谷呈“V”字型狭谷, 左岸坡高 88 m, 坡顶为 III 级阶地, 右岸坡高 103 m, 坡顶为 IV 级阶地。两岸阶面上均发育有漏斗, 形状多为椭圆形, 直径数米至数十米, 规模大小不一, 其分布多与 NNE 向裂隙有关(见图 1), 漏斗塌落深度 2~10 m, 漏斗内一般有阶地堆积覆盖, 河谷两岸陡崖上, 沿 NNE 向裂隙或层面发育有溶洞, 可测深度一般小于 40 m。

坝区地下岩溶主要表现为地下水沿构造裂隙, 层面和砾岩胶结物溶蚀, 岩溶形态可分为溶蚀裂隙, 溶洞及溶孔, 岩溶的发育主要受地质构造、岩性及地下水活动的影响, 其分布具有一定的规律。

2.1 区域新构造运动对岩溶的发育起控制作用

区域新构造运动是岩溶作用的内动力, 对岩溶的发育起着控制作用, 本区新构造运动以间歇性上升为主, 因此岩溶的发育具阶段性。地壳稳定期, 地下水排泄基准面附近, 地下水循环交替强烈, 岩溶相对发育, 地壳上升期, 溶蚀减弱, 岩溶不发育, 地下水



符号说明
 1 第四系中更新统早期冰水堆积, 2 第四系中更新统晚期冰水堆积, 3, 4, 5 下第三系名山群工区第三层 第四层 第五层;
 6 岩层界线; 7 溶蚀强度及编号; 8 漏斗; 9 溶沟; 10 溶洞及编号; 11 防渗帷幕。

图1 坝址区平面地质图

排泄基准面随地壳运动间歇性上升, 造成坝区岩溶的发育具有明显的水平分带。

根据钻孔及坝肩开挖揭露, 坝区岩溶的水平分带可与阶地相对应, 分A、B、C三个水平区带, 即III、IV级阶地对应A区带, II级阶地对应B区带, I级阶地及现代河床对应C区带, (见图2)

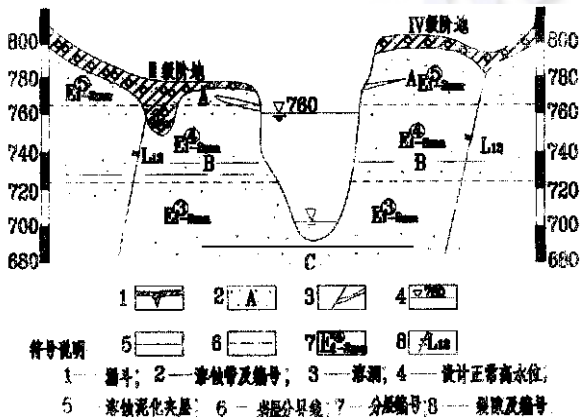


图2 坝区溶蚀带分区示意图

A区带: 位于设计正常高水位760m高程以上, 带内主要发育溶沟、溶槽及漏斗等地表岩溶, 在该带底部E1-2mn层与E1-2m层分界附近发育有水平溶洞, 溶洞均为干洞, 仅暴雨后有水流出。

B区带: 位于坝肩中部高程720~738m段, 该部位与库区内II级阶地高程相当, 带内溶孔相对较多, 孔径一般0.3~2cm, 呈不规则状沿砾岩充填物发育, 面积岩溶率一般0.8%~3%, 溶蚀泥化夹层的面积岩溶率最大可达13%, 带内透水率 q 一般为10~40Lu, 最大178Lu, 溶蚀带以外面积岩溶率一

般小于0.1%, q 值小于0.1Lu。

C区带: 位于坝肩下部的河床段, 高程690~704m, 该带位于坡脚和谷底, 为狭谷应力集中带, 岩体受卸荷作用, 产生有卸荷裂隙或沿层面产生蠕变, 溶蚀作用沿卸荷裂隙和蠕变带发育, 除局部溶孔密集外一般溶孔少见, 该带 q 值为2.2~29.6Lu, 大坝基坑开挖后, 沿层面和卸荷裂隙有地下水渗出, 总计流量约2.5L/s。

由于阶地的形成时间III、IV>II>I和现代河床, 其溶蚀带的发育强度和规模也呈A区>B区>C区, 各区带岩溶的发育均受当时地下排水基准面控制, 因此岩溶的发育从岸坡向山内逐渐减弱。

2.2 岩性的差异对岩溶发育的影响

坝区砾岩根据胶结物中泥钙质含量的差异可分为四种岩性, 即钙质砾岩, 泥钙质砾岩, 钙泥质砾岩和泥质砾岩, 其中钙质砾岩中的胶结物为钙质, 与砾石成分相同, 发育在该类岩石中的岩溶形态与灰岩中的岩溶相近, 其胶结物和砾石基本同步溶蚀, 溶蚀面平整。其它三类砾岩的胶结物中除钙质外均不同程度含有泥质, 泥质物的矿物成分以伊利石为主, 吸水后具微胀性, 易软化崩解, 在砾岩中由于充填物的孔隙率大于砾石的孔隙率, 当砾岩胶结充填不完全而使岩石具一定透水性时, 地下水沿充填物中孔隙渗流过程中, 溶解钙质物的同时, 泥质物也被软化、崩解, 形成粘土胶体被地下水带走, 充填物中的砂屑在失去胶结后也因此被潜蚀, 产生沿砾石间充填物发育的不规则状溶孔, 此类砾岩在溶蚀过程中泥质

物吸水后产生的变化加快了溶蚀速度,溶蚀过程实际包含了化学溶解、机械潜蚀及粘土水化作用,使充填物的溶蚀速度远大于灰岩砾石溶蚀速度,造成差异溶蚀现象,溶蚀作用沿充填物进行,溶蚀面凹凸不平,溶孔沿充填物发育,孔形呈不规则状,坝区砾岩中除少量灰岩砾石中有圆形小溶孔外,绝大部分溶孔均为此类溶孔。

当岩体具一定透水性时,砾岩胶结物中的泥质含量愈高,愈易软化崩解,溶蚀作用愈显强烈。在坝区 E_{1-2mn} 、 E_{1-2mn} 层中有多层泥质砾岩,在坝肩上泥质砾岩夹层出现间距为 1~3 m,其厚度 $0.2 \sim 0.6$ m,延伸长度一般 10~50 m,泥质砾岩胶结物以泥质为主,当泥质砾岩夹层中有透水通道时,地下水长期对泥质砾岩夹层产生溶蚀、泥化,形成溶蚀泥化夹层。在 B 区溶蚀带和 C 区溶蚀带中发育有 B_{2-1} 、 B_{2-1} 、 B_{2-2} 三层溶蚀泥化夹层,夹层溶蚀强烈,溶孔发育,孔内大部分充填次生软塑状粘土,面积岩溶率达 3%~13%,原泥质砾岩的泥质胶结物被泥化,呈可塑状粘土,溶蚀泥化夹层中砾石含量为 51.1%~80.5%,砂粒含量为 9.5%~20.0%,粘粒含量 10.0%~22.8%。

2.3 NNE 向构造裂隙对坝区岩溶发育的影响

在坝区厚层状砾岩中主要发育一组 NNE 向裂隙,该组裂隙规模大,延伸远,地下水沿裂面渗流过程中,裂面被溶蚀、扩宽,使裂隙透水通畅,不但与地表连通良好,对裂面两侧岩体中的地下水也起汇流作用,使裂隙含水丰富,沿裂面溶蚀强烈,岩溶发育,在地表沿裂面发育有溶沟、漏斗式落水洞,在地下裂隙呈溶蚀宽缝或沿裂面及附近两侧岩体中发育有树枝状小溶洞,局部地下水交替强烈地段,甚至出现溶蚀塌陷。

地下水沿裂面的溶蚀,主要表现为对砾岩中胶结物的溶蚀,砾石和充填中的砂屑在失去胶结后脱落,裂面呈凸凹不平的溶蚀面,脱落的砾石和砂及地下水带来的泥质物混杂,形成溶蚀裂隙中的充填物。坝区溶蚀裂隙中充填物组分砾石占 63.9%~91.6%,成分主要为灰岩,与砾岩的砾石成分相同,砂占 6.4%~27.9%,粘土占 8.2%~36%,此外,溶蚀裂隙中还沉积有钟乳石等钙化物。

坝区左岸 III 级阶地较宽,汇水面积大于右岸,因此,左岸裂隙的溶蚀强度明显大于右岸,在左岸 L_{11} 、 L_{12} 、 L_{13} 、 L_{47} 裂隙溶蚀宽度宽窄不均,一般宽 $0.05 \sim 0.3$ m,最大达 1.2 m,而在右岸仅 L_{11} 、 L_{13} 裂隙具溶蚀现象,溶蚀宽 $0.03 \sim 0.3$ m, L_{12} 、 L_{47} 裂隙的溶蚀微弱,大部分呈闭合状。裂隙溶蚀的不均匀性,反映了

不同位置地下水活动强度的差异,在裂隙的溶蚀发展过程中,地下水沿裂面的渗流最初呈漫散流方式,随着裂面被溶蚀扩宽,逐渐形成一些网状或树枝状小型岩溶管道系统,当溶蚀进一步发展,管道扩大,以致相邻管道相互串通而形成宽窄不均的溶蚀裂缝。因此,裂隙不同的溶蚀形态代表了裂面溶蚀发展中的不同溶蚀阶段,同一条裂隙在不同的部位,由于地下水活动的差异,使裂隙面上的溶蚀发展进程不同,造成裂面的溶蚀具不均匀性,裂面溶蚀宽窄不一。

综上所述:坝区第三系砾岩中的岩溶属于近代岩溶,岩溶的发育具水平分带性,透水强烈的 NNE 向溶蚀裂隙和水平溶蚀带构成坝基,坝肩渗漏的渗流网络,左岸岩溶的发育强度大于右岸,岩溶的发育自上而下,从岸坡向山内逐渐减弱。

3 坝区岩溶的工程处理

岩溶对工程的影响主要有两方面,一是渗漏问题,另一方面是破坏岩体的完整性,降低岩体强度。根据坝区岩溶发育特点,结合工程目的,防渗帷幕采用“堵”、“灌”相结合方法处理,对坝肩溶蚀带和溶蚀泥化夹层及坝后溶蚀裂隙进行混凝土置换和固结灌浆,以提高抗力岩体的完整性,增加岩体强度。

3.1 帷幕防渗处理

根据坝区岩溶的发育规律,帷幕设计的孔深一般 45~75 m,最深 100 m,均穿过溶蚀带伸入相对不透水层 5~10 m,两岸帷幕线延伸至阶地后缘,伸入山内不透水层 30~50 m,河床岸坡及帷幕线与 L_{12} 、 L_{13} 溶蚀裂隙相交附近采用双排孔,孔距 1.5 m,其它部位均为单排孔,孔距 2 m,帷幕线总长 535 m,共布置灌浆钻孔 304 个,总深度 152 826.6 m。

帷幕灌浆采用孔口封闭灌浆法分序施工。对双排帷幕,先施下游排后再灌上游排,灌浆压力一般 $0.2 \sim 3.0$ MPa。在设计压力下,吸浆量小于 0.4 L/min,持续 1 h 结束。在遇溶洞、溶蚀裂隙及溶蚀泥化夹层吸浆量较大时,采用间歇灌浆,灌注沙浆、混凝土及添加速凝剂等措施,对左岸距拱座 126~132 m 段的溶蚀塌陷破碎区,则采用混凝土防渗处理,其施工采用 $\Phi 25$ mm 口径钻机造孔后回填混凝土,形成长 6 m,深 11 m 的防渗墙,并使防渗墙与左右两侧帷幕和下部帷幕相连接。

在 I 序孔施工过程中,掉钻、漏水、串浆现象相对较多,水泥注入量较大, I 序孔累计耗灰量 45 860 t,占帷幕总耗灰量 94%, II 序孔中耗灰量较大的孔段主要集中在 L_{12} 、 L_{13} 溶蚀裂隙附近和 B 区溶蚀带的溶蚀泥化夹层中。

根据表 2、表 3 中的水泥单位注入量和 q 值频率统计分析,帷幕灌浆随灌浆次序的增加,水泥单位注入量大的孔段减小,透水率 q 值大的孔段也减小,符合灌浆规律。根据灌后检查孔 q 值频率统计, q 值大于 $1Lu$ 孔段仅占 1.6%,且最大值为 $1.7Lu$,检查结果满足设计要求,帷幕灌浆效果良好。

表 2 坝区帷幕灌浆单位注入量频率统计一览表

孔序	孔数 /个	(0~1.0)				(1.0~10.0)				(10~100)				>100			
		总段		频率		总段		频率		总段		频率		总段		频率	
		段数	频率	段数	频率	段数	频率	段数	频率	段数	频率	段数	频率	段数	频率	段数	频率
I 序孔	151	1579	922	58	58	647	40	98	6	0	698	6	22	1.4	100		
II 序孔	153	1037	63	63	36	5	4	0	29	99	7	5	0	3	100		
检查孔	39	421	398	94	5	23	5	5	100								

表 3 坝区帷幕灌浆吕荣值频率统计一览表

孔序	孔数 /个	(0~0.1)				(0.1~1.0)				(1.0~10.0)				>10			
		总段		频率		总段		频率		总段		频率		总段		频率	
		段数	频率	段数	频率	段数	频率	段数	频率	段数	频率	段数	频率	段数	频率	段数	频率
I 序孔	31	316	158	49	49	127	40	89	25	8	97	8	3	100			
II 序孔	30	323	197	61	61	110	34	95	16	5	100						
检查孔	39	421	261	62	62	153	98	4	7	1	6	100					

3.2 坝肩溶蚀带的处理

由于坝区溶蚀带中溶孔发育,并夹有较多的软弱夹层,施工中设计对拱坝增设了厚 3 m 的垫座,对坝肩岩体进行固结灌浆,灌浆孔距 3 m,呈梅花型布置,孔深 8 m,其中 B 区溶蚀带内孔深为 16 m,并对该溶蚀带内岩体水平超挖 4 m 后置换混凝土,以增加坝肩嵌入深度。

C 区溶蚀带中岩溶主要沿卸荷裂隙和溶蚀泥化夹层发育,对有卸荷裂隙、岩溶发育的岩体采用开挖清除,坝基开挖深度至挖穿卸荷带为准,并对溶蚀带内的岩体进行固结灌浆。

根据坝肩固结灌浆成果,两坝肩固结灌浆总耗灰量约 72 t,溶蚀带内耗灰量约 63 t,占总耗灰量 87%,其中 B 溶蚀带占 51%,C 溶蚀带占 36%,耗灰量的大小与坝肩岩体中岩溶发育强弱一致。灌后检查,岩体透水率 q 均小于 $1Lu$,岩体声波值 V_p 一般比灌前提高 4.5%~7.4%。

3.3 对坝肩溶蚀泥化夹层的处理

位于 B 区溶蚀带和 C 区溶蚀带的溶蚀泥化夹层,在建基面上的处理采用沿夹层掏槽 1~2 倍厚度的深度,浇筑混凝土,形成混凝土塞后垂直拱端面追踪夹层钻灌浆孔,孔距 1~2 m,孔深 25~30 m,终孔后用高喷管反复冲洗,直至回水变清,高喷管水压力 1~4 MPa,风压力 0.5~0.7 MPa,冲洗结束后对

夹层分序全孔灌浆,灌浆压力 0.4~1.0 MPa,坝肩溶蚀泥化夹层的处理情况见表 4。

表 4 坝肩溶蚀泥化夹层固结灌浆成果表

工程部位	夹层编号	高程 /m	孔数 /个	总孔深 /m	水泥注入量 /kg	灌浆压力 /MPa
左坝肩	B ₂₋₁	729	16	480	10 255	1.0
	B ₂₋₁	726	19	270	2 495	1.0
右坝肩	B ₂₋₁	727	10	300	1 187	0.5
	B ₂₋₁	725	11	330	9 761	0.5
右坝肩	B ₂₋₂	692	5	18	8 303	0.5
	B ₂₋₂	692	13	390	1 895	0.5

由于溶蚀泥化夹层中溶孔发育,高喷冲洗后可灌性好,水泥吸浆量大,灌浆效果显著。灌前沿夹层均有地下水渗出,透水率 q 值 10~40 Lu,灌后夹层不再有渗水现象,检查孔的 q 值均小于 $1Lu$ 。通过对溶蚀泥化夹层的处理,改善了夹层的力学性质,提高了坝肩岩体的抗滑稳定性。

坝后 L₁₁、L₁₂、L₄₇ 陡倾角溶蚀裂隙横切河谷,距拱座 50~90 m,因溶蚀裂隙变模低,受力后易产生变形,为确保坝肩岩体中的应力传递、扩散,增加坝肩岩体的稳定性,对坝后溶蚀裂隙采用混凝土置换和固结灌浆处理。左岸三条裂隙溶蚀严重,采取沿裂隙追踪,开挖清除裂隙中充填物后回填混凝土,在裂隙中形成长 30~45 m,高 62 m,厚约 1.5 m 的混凝土板墙,使裂面两侧岩体结合成整体,以利于岩体中应力传递。右岸的裂隙溶蚀相对较弱,仅对距拱座较近的 L₁₁、L₁₂ 裂隙进行处理,采用沿裂隙走向开挖平洞,对溶蚀裂隙灌浆后回填混凝土,并对处理洞进行回填灌浆。L₁₂ 在 702 m、725 m 和 745 m 设有三层处理洞,洞长 15~40 m,L₁₁ 在 725 m 和 745 m 设两层平洞,洞长 40 m,裂隙处理洞,混凝土板墙及灌浆用水泥均采用 MgO 微膨胀水泥,消除了混凝土在凝固过程中产生的收缩,使混凝土在裂隙中充填密实。

4 结语

通过对铜头电站坝区第三系砾岩岩溶的形成条件、发育特征及发育规律的研究,为工程设计提供了依据,使工程处理目的明确,针对性强,处理效果显著。蓄水后大坝排水孔中的渗水量较小,远小于设计量,坝肩岩体的变形也在设计允许范围之内,说明对铜头电站坝区岩溶的处理,达到了预期目的。

作者简介:

纪洪华(1964年-),男,四川芦山人,水利部四川水利水电勘测设计研究院勘察分院工程师,主要从事施工地质和地质监理工作。