有关火山破裂构造的工程地质问题
——谈官地电站坝基主要的工程地质条件

肖　强[1],刘立强[2]

(1.中国水电顾问集团成都勘测设计研究院地质处,四川 成都　610072;
2.二滩水电开发有限责任公司官地建设管理局,四川 成都　610056)

摘要:为了在高山峡谷的火成岩中选择合适的水电站坝址地基,根据官地电站前期地表地质调查和钻孔定向取芯揭示的节理、错动带发育分布情况,以及地应力松弛状况判断河谷水平卸荷松弛区域位于左岸,开挖揭示证实了水平卸荷松弛区域位于左岸 8 号、9 号坝段。为了减少开挖工程量和节约工期,设计上利用 8 号坝段下游山体作为抗力体,采取了对 7 ~ 10 号并缝措施,满足了大坝抗滑稳定要求。

关键词:重力坝;火成岩;层节理;横节理;纵节理;卸荷松弛区;官地电站
中图分类号:P64　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1006-7647(2012)S1-0070-04

1　工程概况

官地水电站位于四川省凉山彝族自治州西昌市和盐源县交界的打罗村境内。电站枢纽主要由拦河坝、泄洪消能建筑物、右岸引水发电建筑物等组成。水库正常蓄水位 1330 m,电站装机容量 2400 MW。拦河坝采用碾压混凝土重力坝,坝轴线方向 N12°E。坝顶高程 1334.00 m,坝顶长度 516.00 m,最低建基面高程 1166.00 m,最大坝高 168 m。共分 24 个坝段,左岸 1 ~ 9 号、右岸 16 ~ 24 号坝段为挡水坝段,河床中 10 ~ 15 号坝段为溢流坝段。坝段宽为 20.0 ~ 26.0 m。溢流坝段坝底长度最长达 153.2 m。坝段顶长 14.0 ~ 20.0 m。

2　坝区基本地质条件

官地电站在大地构造部位上位于鲜水河—安宁河—则木河—小江断裂带和金沙江—红河断裂带所围限的川滇巨型菱形断块内,盐源弧形构造东南端,矿山梁子断裂与小高山断裂所夹持的打罗地质块体之上。工程区在小的区域部位上为一不对称的紧密背斜靠核部的西翼,核部地层为震旦系—二叠系的地层,核部东翼古生界地层缺失,两翼为三叠系的地层。工程区紧靠的背斜核部西翼,区内断裂构造发育,主要为北北东向和近南北向断裂带。此外,还有次一级的北西向和北东东向断裂。这些断裂构成了川滇南北向构造和盐源弧形构造。枢纽区岩层产状为向西陡倾(总体产状为近 SN/W∠75° ~ 85°)。

坝区河流流向为 S75°E,出露的地层主要为二叠系上统玄武岩组($P_2\beta$),属海相喷发,根据岩性特征及喷发形式将该组分为上、中、下三段,即 $P_2\beta_1$,$P_2\beta_2$ 和 $P_2\beta_3$,$P_2\beta_1$ 分为 5 层,$P_2\beta_1^5$ 是枢纽区分布最广的地层,又分为 2 个小层,其中 $P_2\beta_1^{5\text{-}2}$ 为角砾集块熔岩,厚 186 ~ 284 m,性状较好,宜作为坝基。地层倾向右岸,产状 N10° ~ 20°W/SW∠70° ~ 80°。与坝基有关的断层及错动带主要有 F8,fx3706,f33,f34,见图 1。

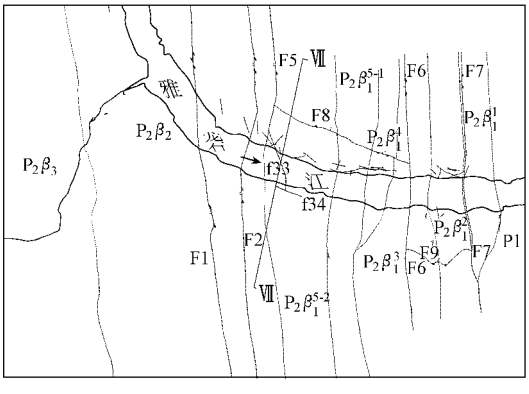


图 1　坝区平面地质示意图

作者简介:肖强(1963—),男,四川仪陇人,高级工程师,主要从事工程地质研究。E-mail:caoqah@163.com

综合地形地貌、两岸变形体发育情况、左岸缓倾角错动带发育的地质条件、水工布置，可研阶段对坝线、坝型进行了比较，选定了Ⅶ为坝轴线，重力坝型[1]，见图1。

3 坝基的主要工程地质问题

地表揭示缓倾角节理倾角多为5°～35°，倾左岸的有N10°～50°W/NE∠10°～30°和N60°～90°W/NE∠10°～30°两组；倾右岸的有N10°～50°W/SW∠10°～30°和N45°～85°E/SE∠5°～35°两组，此外还有零星发育的不规则的裂隙N0°～25°E/SE∠10°～35°和N10°～40°E/NW∠10°～25°。

为查明缓倾角结构面的空间展布方向，前期进行了钻孔定向取芯和物探电视全景图像拍摄，勘探揭示表明，在左岸8号、9号坝段1175.00 m高程附近结构面向河床两岸倾斜，形似背斜状，显示该处为卸荷松弛区，见图2。笔者分析认为，河床下切，所造成的岩体松弛，结构面产生了垂直方向的变形，为水平卸荷所致，具体见第5节卸荷松弛的机理。

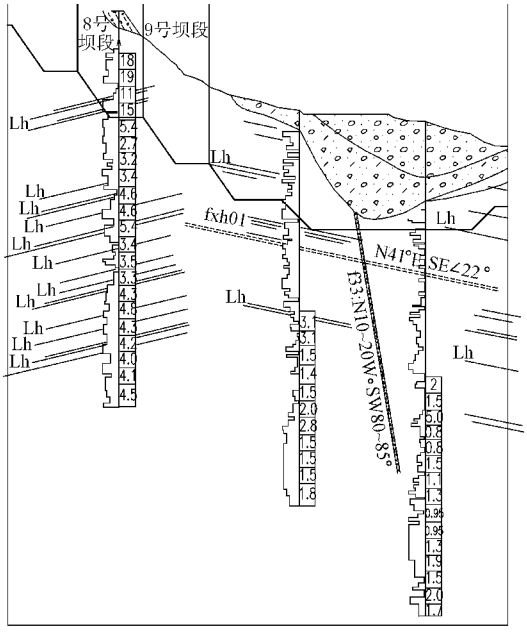


图2 8号和9号坝段结构面分布形似“背斜”坝轴线剖面示意图

官地电站进行了5组孔径法、6组孔壁法地应力测试。孔径法测试表明右岸厂房区最大主应力量级25.0～35.17 MPa。孔壁法测试表明最大主应力量级16.94～39.63 MPa。

其中，左岸坝线附近进行了2组孔径法测试，最大主应力σ_1分别为13.0 MPa(测点处水平埋深145 m、垂直埋深154 m)、22.1 MPa(测点处水平埋深240 m、垂直埋深236 m)，和右岸比较地应力量级较低，推测处于应力释放区。

水平卸荷意味着岩体松弛，岩体中充填有次生泥。重力坝主要靠坝体与坝基岩体的摩擦力维持稳定，岩体卸荷松弛将降低岩体类别，进而降低岩体的力学指标，需进行增加工程开挖或其他处理措施。8号、9号坝段卸荷松弛问题，是大坝主要工程地质问题。

4 工程开挖揭示的验证

官地地区地壳强烈抬升，雅砻江河谷下切速度快，造成两岸谷坡陡峻、岩体卸荷松弛问题，是大坝主要工程地质问题，卸荷是决定岩类因素之一，为了划分岩类提供岩体力学参数，满足大坝稳定复核计算，根据前期平硐勘探和工程开挖揭示的情况，本工程总结了岩体卸荷划分标准[2]，分成强卸荷和弱卸荷两类。强卸荷划分标准如下：

a. 一般情况下各方向裂隙都张开、表现为整体松弛，充填次生泥或次生泥夹岩屑。卸荷裂隙一般宽1～10 cm，大者可达30～60 cm，卸荷裂隙密度大，大于5 mm的次生夹泥频率为1～3 m 1条。

b. 随硐深的增加总体有张开宽度减小的趋势，一般都具有上宽下窄的特点，常可见平硐左右壁张开宽度有明显不同。

c. 岩体结构松散，硐形不规则，有时可见架空现象，平硐所经之处常塌顶掉块，最大塌顶高4 m，形成空缝。雨季多严重滴水，甚至流水，旱季干燥，该段平硐不能积水。岩体声波纵波速$v_p < 2\,000$ m/s。

d. 既有利用原有结构面卸荷张开，又有直接沿岩块内部卸荷张开的情形，追踪卸荷常见。

弱卸荷划分标准如下：

a. 裂隙多充填次生泥膜，部分段夹泥宽度可达1～3 cm，尤其是沿错动带或裂隙密集带张开较大，次生泥常具间隔充填的特点，即次生泥较多的岩体和次生泥较少的岩体往往相间分布，卸荷裂隙密度相对减小，大于5 mm的夹泥裂隙频率5～10 m 1条。

b. 岩体显松弛，但基本上不会塌顶，旱雨季地下水情况变化不大，该段平硐大多可积水，岩体声波纵波速变化大，$v_p = 2\,000 \sim 4\,500$ m/s。

c. 一般都利用原有结构面卸荷张开，特别是沿构造错动带卸荷比较强烈。

左岸挡水坝段坝基岩性为$P_2\beta_1^{5-2}$角砾集块熔岩，岩石坚硬。主要发育的断层和错动带有F8，fx3706，fxh10-4，fxh10-5，fx8-3，fx7-6，f7-3，fx10-6等，其岩类及错动带分布见图3。

左岸8号、9号坝段处于水平卸荷的地应力释放区，其断层的特点如下：

a. fxh10-4。产状N20°～40°E/SE∠10°～20°，坝0+60 m～下游段出露，面波状起伏，断层面上具有

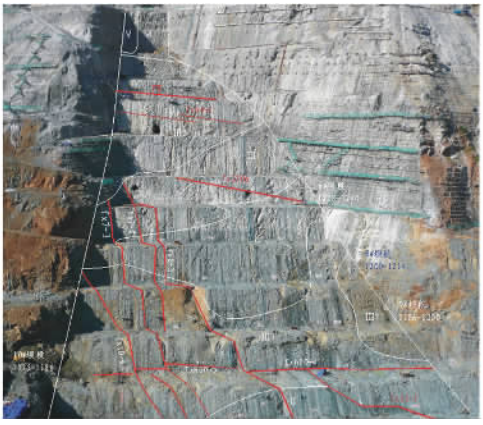


图 3　开挖揭示的错动带

明显的擦痕，擦痕方向 S15°～20°E。错动带宽度 5～20 cm，局部可达 30 cm，带内主要物质为青灰色断层泥、岩块、岩屑及少量糜棱岩，部分段分布有黄色次生泥，断层泥及次生泥处于饱水状态，具有隔水作用，沿错动带顶面局部有地下水渗出，错动带类型为泥夹岩屑型[2]。

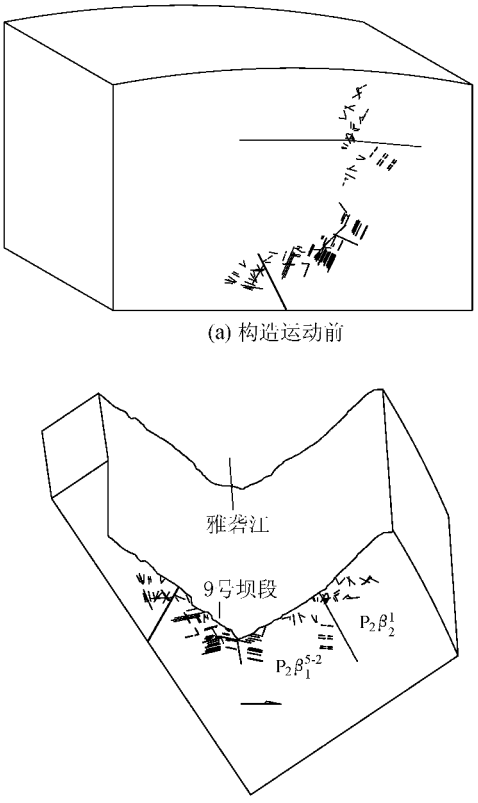
b. fxh10-5。性状同 fxh10-4（fxh10-5，fxh10-4 可能为同一条错动带），坝 0－20～0＋60 m 出露。其中，0－20～0－04 m 段分为两条，产状 N70°E/SE30°，带宽 10～20 cm，主要由次生泥、岩屑组成，带内物质松散，错动带类型为泥夹岩屑型。0－04～0＋8 m 段，错动带产状 EW/S∠10～15°，带宽 5～15 cm，主要由次生泥、岩屑组成，带内物质松散，错动带类型为泥夹岩屑型。0＋8～0＋60 m 段，错动带产状 EW/S∠10°～15°，带宽 10～30 cm，最宽达 50 cm，主要由次生泥、岩屑组成，带内物质松散，错动带类型为泥夹岩屑型[2]。

陡倾角错动带有 fx8-3，fx7-6，fx7-3、fx10-6，其产状 N5°～30°W/SW∠70°～85°，带宽 20～50 cm 不等，局部 5～10 cm，主要由压碎岩、角砾糜棱岩、岩屑及次生泥组成，错动带力学类型为岩屑夹泥型、岩块岩屑型两类[2]。

这些错动带的共同特点就是张开夹次生泥，显示岩体存在明显的卸荷松弛，属弱卸荷岩体。按照官地坝基岩体质量分类标准，岩体类别为 III_1 类。其中，错动带 fxh10-4 和 fxh10-5 松弛张开夹泥，为典型的水平卸荷结构面。

5　卸荷松弛的机理

层节理（L 节理）、横节理（Q 节理）、纵节理（S 节理）不仅仅是侵入岩晚期冷凝阶段的产物，这些破裂构造在喷出岩中也极为常见[3]。官地电站所处工程部位的玄武岩在经历强烈挤压的构造运动后成为靠近核部的岩层，层节理、岩流面变成陡倾结构面，横节理、纵节理变为缓倾结构面，其中 fxh10-4 和 fxh10-5 及 8 号、9 号坝段下的缓倾角结构面就是横节理或纵节理，fx8-3，fx7-6，fx7-3，fx10-6 等就是层节理。河流不断下切，不仅仅造成了岸坡岩体的垂直卸荷，也造成了水平卸荷。垂直卸荷的结果是岸坡岩体松弛拉裂，水平卸荷表现为河谷部位缓倾角结构面张开，岩体松弛，同时，陡缓倾角节理伴有次生泥的充填，卸荷松弛机理见图 4。



(a) 构造运动前

(b) 构造运动后

图 4　水平卸荷示意图

6　建基面开挖后岩体质量验收要求

重力坝靠坝体与地基岩体之间的摩擦力维持稳定，因此地基岩体（包括结构面）物理力学参数必须满足设计要求，为此，经复核提出了坝基岩体质量的设计要求。

6.1　岩体质量要求

a. 建基面岩体应满足下列要求：①河床及两岸中下部坝高大于 100 m 坝段建基岩体应为Ⅱ类及 III_1 类岩体；②两岸中上部坝高 100～50 m 坝段建基岩体可利用经有效处理措施后满足设计要求的 III_2 类、III_3 类岩体；③两岸上部坝高小于 50 m 坝段可部分利用经有效处理措施后满足设计要求的Ⅳ类岩体。

b. 对建基面下的岩体，要求采取有盖重固结灌浆为主的措施进行处理，使之达到建基岩体质量要求[4]。

6.2 灌浆处理后岩体质量验收标准要求

官地工程的灌浆质量验收采用声波测试为主，大坝地基固结灌浆处理后声波测试以坝段为验收单元、单孔为基础的原则进行验收，单孔验收以建基面表面岩类为准，验收标准见表 1；各坝段内孔段合格率在孔深 0～3 m 时应达到 90%以上，在孔深 3 m 以下时应达到 85%以上[4]。

表 1 灌浆处理后岩体声波纵波速度设计要求

岩类	孔深 0～3 m			孔深 3 m 以下		
	平均波速/(m·s⁻¹)	小于某波速所占百分比		平均波速/(m·s⁻¹)	小于某波速所占百分比	
		波速/(m·s⁻¹)	所占百分比/%		波速/(m·s⁻¹)	所占百分比/%
Ⅱ	≥5500	<5300	≤25	≥5800	<5300	≤25
$Ⅲ_1$	≥5200	<4500	≤20	≥5500	<4500	≤20
$Ⅲ_2$	≥5000	<4000	≤15	≥5300	<4000	≤10
$Ⅲ_3$	≥4300	<3400	≤15	≥4600	<3600	≤10
Ⅳ	≥3800	<3100	≤15	≥4000	<3300	≤10
Ⅴ	≥3100	<2600	≤10	≥3100	<2600	≤10

7 工程处理措施

官地电站坝基处理措施主要是对不满足大坝对地基要求的岩体部分进行下挖处理，对其他错动带进行刻槽处理，对影响坝体稳定的不利组合块体进行清除或加强处理，对地基岩体进行固结灌浆处理。特别针对 9 号坝段发育有 fxh10-4 和 fxh10-5 缓倾角错动带，延伸较长，性质较差，抗滑稳定问题突出，对 9 号坝段采取了由原设计的 1186.00 m 高程整体下挖至 1175.00 m 高程。8 号坝段建基面高程 1 200.00 m，坝高虽大于 100 m，且 fxh10-4 号 fxh10-5 在坝基下通过，考虑到下游有山体作为抗力体(见图 3)，仅对不满足坝基抗滑稳定的 $Ⅲ_2$ 类岩体进行了挖除，对 7 号、8 号、9 号坝段在高程 1245.00 m 以下并缝，9 号、10 号坝段在高程 1214.00 m 以下采取并缝处理措施。

fx8-3，fx7-6，fx7-3，fx10-6 其间的岩类虽为 $Ⅲ_1$ 类，但其间节理及其小错动带发育，对岩体强度起着决定性的控制作用，受其错动带影响，5～8 号坝段 fx8-3 上游坝踵部位岩体不满足建坝要求，因此进行了缺陷槽开挖处理。

缺陷处理和固结灌浆处理后经声波检测其各类岩体的平均值和最小值比例均满足表 1 中设计的要求、变形模量测试、孔内电视等也表明处理效果总体较好。经稳定复核计算，大坝满足抗滑稳定要求。

8 坝址选择应注意的问题

火成岩中的破裂构造经历了强烈地质构造运动后，其破裂构造面中的层节理与横、纵节理空间展布发生了相应的变化，往往山区河谷深切，在坚硬的岩石中表现为集中卸荷，产生松弛，不仅陡倾角结构面中充填次生泥，次生泥也沿陡倾角结构面通道进入到河谷部位一定深度的缓倾角结构面松弛部位。坝，特别是重力坝，对坝基岩体质量要求较高，坝址的选择应尽量避开这些卸荷松弛区域，在不能避让时，应尽量考虑少开挖加其他处理措施的方案，以节约工程量和工期，达到工程既安全又经济的效果。

9 结 语

在构造背景比较复杂的地质条件下，坝线的选择应注意构造的空间分布，在火成岩中，不仅仅是探明坝线附近的断层及错动带的分布，还应查明与破裂构造有关的河谷卸荷方式。通过地表调查及勘探，查明错动带、节理的分布规律，采用钻孔定向取芯和物探等手段查明坝基的构造情况，坝基地应力测试能进一步判断卸荷松弛区域，对查明大坝的主要工程地质问题非常必要。大坝建基面开挖前应有一个预判，开挖后应及时采取有效的处理措施。官地电站坝基岩性为玄武岩，其破裂构造面发育，加之经历过复杂的构造运动，岩层呈陡倾角，其层节理与横、纵节理倾角发生颠覆性的变化，层节理变为陡倾角结构面，横、纵节理变为缓倾角结构面，后期河谷下切，岩体沿这些破裂构造产生了卸荷松弛，其 8 号和 9 号坝段坝基结构面倾向左右两岸，开挖揭示，缓倾角错动带夹泥，表明该处河谷部位产生了水平卸荷。官地电站坝线虽然没有避开河谷水平卸荷的松弛带，但是选用重力坝坝型，利用 8 号坝段下游山体、9 号坝段下游部位山体作为抗力体，采用并缝措施，减少了开挖量，节约工程量和工期，满足了大坝稳定的需要。

参考文献：

[1] 雅砻江官地水电站可行性研究报告(重编)：3 工程地质[R]. 成都：中国水电顾问集团成都勘测设计研究院，2005.

[2] 雅砻江官地水电站大坝建基面开挖验收地质报告[R]. 成都：中国水电顾问集团成都勘测设计研究院，2009.

[3] 武汉地质学院，成都地质学院，南京大学地质系，等. 构造地质学[M]. 北京：地质出版社，1979：179-186.

[4] 雅砻江官地水电站枢纽工程蓄水安全鉴定：第二册 设计自检报告：第二分册 工程地质[R]. 成都：中国水电顾问集团成都勘测设计研究院，2011.

(收稿日期：2011-10-25 编辑：熊水斌)