

DOI: 10.11779/CJGE201703014

# 叶巴滩水电站坝址区深部变形破裂特征

刘恋嘉, 赵其华\*, 韩刚

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

**摘要:** 深入研究叶巴滩水电站坝址区对称发育的深部变形破裂的分布规律、地质特征、类型和控制因素, 为进一步评价深部变形破裂岩体质量及可利用性奠定基础。基于野外调查、地震层析成像(CT)、平硐波速测试( $V_p$ )和工程地质类比等方法, 揭示深部变形破裂分布规律与宏观地质特征, 划分深部变形破裂类型, 探讨对称分布的深部变形破裂的控制因素。研究表明: 深部变形破裂分布于距边坡表面水平深度约80~140 m范围, 具有随高程的升高水平分布深度逐渐增加的规律, 两岸均未形成贯通性破裂面; 深部变形破裂大多继承早期构造节理形成, 具有明显的张性特征, 局部受地下水影响, 破裂面表层风化加剧; 深部变形破裂类型可分为轻微松弛型、中等松弛型和强烈松弛型; 地壳抬升、河谷演化和高地应力等区域因素与边坡形态、边坡物质基础及微地貌共同控制深部变形破裂的形成和分布。

**关键词:** 深部变形破裂; 对称性分布; 地质特征; 松弛; 地震层析成像

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)03-0501-08

作者简介: 刘恋嘉(1992-), 女, 硕士研究生, 从事地质工程、岩土工程方面的学习科研工作。E-mail: 463878095@qq.com。

## Characteristics of deep-seated crack in dam site of Yebatan Hydropower Station

LIU Lian-jia, ZHAO Qi-hua, HAN Gang

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China)

**Abstract:** There is a series of symmetric deep-seated cracks (DSC) in the abutment slope of Yebatan Hydropower Station. The special geological phenomenon is analyzed to provide a scientific basis for a comprehensive analysis on rock mass quality and availability evaluation. Through particular field survey, seismic tomography (CT) and sonic wave testing ( $V_p$ ), the spatial distribution characteristics and macroscopic geological features of DSC are summarized. Additionally, DSC is divided into different types. According to these analyses, the controlling factors of DSC are studied completely by using the engineering geologic analogy method. The spatial distribution range of DSC ranges between 80 m and 140 m in horizontal direction from the surface of rock slope. The horizontal depth of DSC is positively correlated with the elevation of abutment slope, but there are not any connected cracks at two sides. The majority of DSC inherits early tectonic joint formation with tensile characteristics, and the weathering of rock is strengthened because of underground water. The slackness extent of DSC can be divided into three types: slightness, medium and severity. The formation and distribution of DSC are controlled by the regional factors and other factors such as the slope shape, the material foundation of the slope and the micro topography. The crust upward, incised valley and magnitude of the tectonic stress are the prerequisite for DSC. Furthermore, the rock property and complex slope structure provide material foundation for DSC. These are reasons for the symmetric distribution of DSC.

**Key words:** deep-seated crack; symmetrical distribution; geological characteristic; rock relaxation; seismic tomography

## 0 引言

深部变形破裂是发育在深切河谷高陡边坡常规卸荷带以里新鲜岩体内的一系列裂缝或松弛带, 多呈不对称性分布<sup>[1]</sup>。深部变形破裂不仅可降低岩体质量, 也可影响边坡稳定, 甚至造成水库渗漏、滑坡涌浪、堵江等大规模的灾害, 是大型水利工程建设过程中边坡支护、硐室开挖和枢纽布置等亟需解决的问题<sup>[2-3]</sup>。

国内深部变形破裂的研究始于20世纪80年代中

期, 主要认识如下。韩文峰等<sup>[4]</sup>认为大柳树水电站坝址区“松动岩体”是重力和地震力共同作用下的产物。王兰生等<sup>[5]</sup>提出大柳树“松动岩体”受区域性剥蚀与河谷下切回弹影响, 沿原有构造断裂拉裂错动形成。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772177); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB013501)

收稿日期: 2016-01-07

\*通讯作者 (E-mail: zhqh@cdut.edu.cn)

杨永明<sup>[6]</sup>依据苗家坝水电站坝址区深部拉裂缝特征, 提出楔形体产生蠕滑—拉裂前已经受长期局部深卸荷。20世纪90年代起, 位于国内环青藏高原周边地区的多处水电站岸坡均揭露深部变形破裂, 引起学者广泛关注。其中, 锦屏深部变形破裂较为典型, 具体研究如下。祁生文等<sup>[7-9]</sup>研究锦屏一级水电站左岸深部裂缝的空间发育规律和变形特征, 结合工程地质类比法、力学分析法及数值模拟法, 认为深部裂缝是在自重应力和构造应力的复合应力场作用下形成的, 属于常规意义下边坡卸荷的结果。黄润秋<sup>[10]</sup>、严明等<sup>[11]</sup>基于地质分析和数值模拟分析后提出, 锦屏深部破裂是在高地应力环境中, 伴随河谷快速下切, 反倾边坡发生深部卸荷的产物, 是一种稳定的变形破裂结构。安关峰等<sup>[12]</sup>、荣冠等<sup>[13]</sup>结合锦屏坝址区工程地质条件和地应力测试等资料, 采用数值模拟方法得出, 深部裂缝是在河谷快速下切过程中, 局部应力集中导致岩体发生屈服破坏的结果。此外, 瀑布沟、深溪沟和白鹤滩水电站岸坡也出现一系列深部变形破裂。陈鸿等<sup>[3]</sup>研究瀑布沟和深溪沟水电站深部破裂的发育分布及变形破坏特征后, 指出大渡河中下游典型岸坡岩体中深部裂缝是浅生改造的产物。韩刚等<sup>[14]</sup>根据白鹤滩水电站深部破裂基本特征及河谷演化模式, 提出深部破裂是岩体经历岩体损伤加剧与强度劣化、局部拉应力形成和错动扩张后形成的。已有研究中, 关于深部变形破裂呈不对称分布的认识主要分为: 在复杂的区域地质条件下, 需具备一定的坡体结构和岩性组合条件<sup>[7-9]</sup>; 在特定边坡结构条件下卸荷的结果<sup>[10-11]</sup>; 局部应力集

中超过岩石强度产生破裂<sup>[12-13]</sup>; 偏移一下切河谷演化导致岸坡能量存储—释放过程存在差异<sup>[14]</sup>。

国外类似深部破裂的地质现象是斜坡深层重力变形<sup>[15-19]</sup>, 不同于斜坡表层岩体的风化卸荷和构造作用形成的构造形迹。在地表处可形成双脊地貌、陡壁、反坡陡坎、拉线槽等。在坡体内部则可以形成褶皱、断裂和裂隙等。

以金沙江叶巴滩水电站坝址区对称性分布的深部变形破裂现象为基础, 采用野外调查、地震层析成像、平硐波速测试和工程地质类比等方法, 揭示深部变形破裂分布规律及宏观地质特征; 根据裂缝张开度、破碎带宽度、CT 和  $V_p$  等划分深部变形破裂类型; 与锦屏一级水电站工程地质条件及深部变形破裂特征对比, 结合坝址区所处的区域环境条件、边坡形态、边坡物质基础和微地貌, 探讨对称发育的深部变形破裂的控制因素。

## 1 地质环境背景

叶巴滩水电站位于四川省白玉县以西约 75 km 的金沙江河段上, 坝址区位于左岸一级支流降曲河河口下游约 4.5 km 的河段上, 金沙江由 N 向 S 流经坝址区, 枯期江面高程约 2720 m。地貌上, 坝址区两岸岸坡高程大于 4000 m, 岸坡高差大于 1000 m, 呈典型对称“V”型峡谷, 左岸坡度约为 45° ~ 55°, 右岸坡度约为 40° ~ 45°, 斜坡两岸微地貌发育, 可见多条近 EW 向的浅沟和少数 NEE 向深沟。坝址区分布的地层为华力西期侵入岩和第四系覆盖层(图 1)。岩石

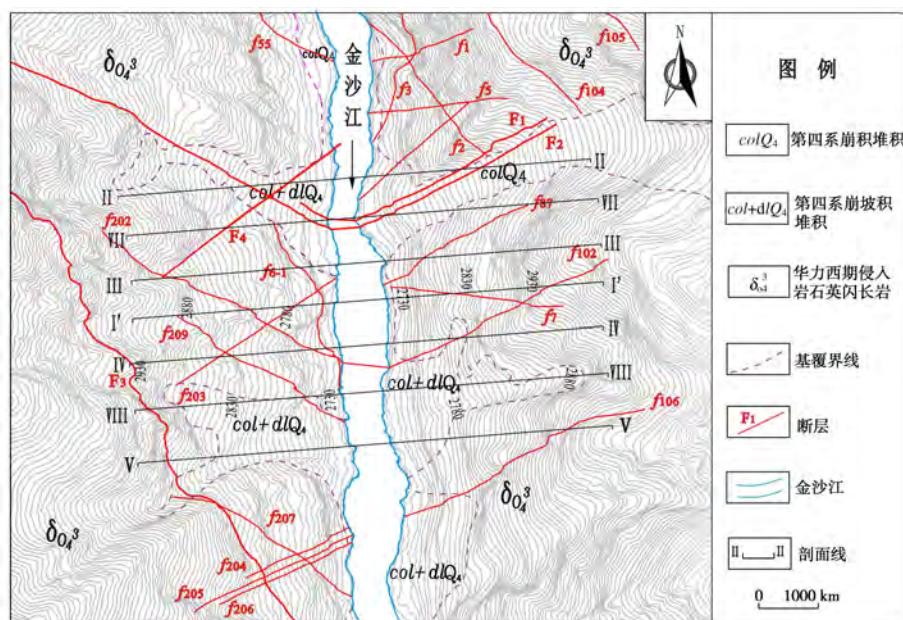


图 1 坝址区工程地质平面图

Fig. 1 Geological plan of dam site

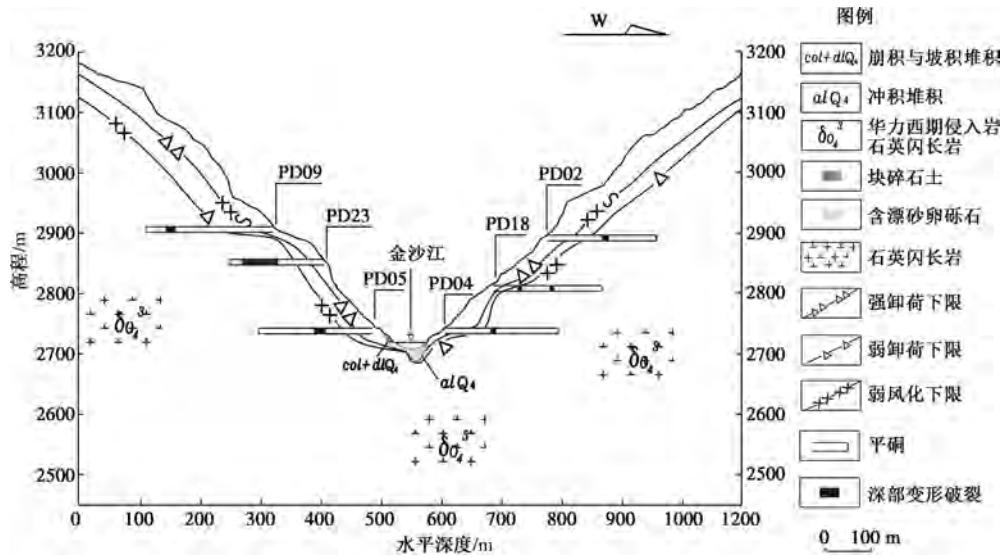


图2 坝址区典型剖面

Fig. 2 Typical profile of dam site

岩性较为单一, 为石英闪长岩 ( $\delta\sigma_4^3$ ), 平均单轴干抗压强度为 124.6 MPa, 属坚硬岩, 抗风化能力较强, 边坡常规卸荷带底界约为 50~80 m (图 2); 第四系覆盖层主要为现代河流冲积物以及分布于两岸谷坡的崩积、崩积及少量冲沟内的洪积物。由于坝址区位于竹英—山岩断裂和竹英—贡达断裂围限的金沙江缝合带断块内, 断裂构造较发育, 无区域性断裂通过, 多为浅表层的脆性断裂, 以中陡倾角断层和随机分布的节理、裂隙为主, 节理优势方向为  $NE50^\circ$  /  $SE\angle60^\circ$  和  $EW/S\angle50^\circ$  (平面 X 节理)。河谷演化过程中, 中更新世晚期以来, 地壳发生强烈抬升。实测地应力表明, 坝址区最大主应力方向为  $NE60^\circ\sim70^\circ$  (与河流走向近于正交), 最大主应力量级为 15~20 MPa。由于河流走向与最大主应力方向近于正交, 导致坝址区形成局部高地应力, 具体表现为坝址区出现一系列的河床岩芯饼化与平硐片帮现象。

## 2 深部变形破裂特征

### 2.1 空间分布特征

不同于常规卸荷破裂, 深部变形破裂间隔发育在微新岩体中, 空间分布具有特殊性。叶巴滩水电站坝址区 27 个勘探平硐位于岸坡高程 2720~2920 m 之间 (图 3), 现场调查表明, 各平硐均揭露深部变形破裂 (共 140 条), 分布范围较广。

深部变形破裂的空间分布特征为: ①左岸集中分布在 F1、F2 断层下游侧至勘Ⅳ线之间, 右岸集中分布在勘Ⅲ线至勘Ⅷ线之间; ②位于两岸岸坡高程 2730~2910 m 之间, 其中左岸集中位于 2790~2850 m 范围, 右岸集中位于 2850~2910 m 范围 (图 4); ③发育的水平深度约 80~140 m (图 5), 左、右岸发育

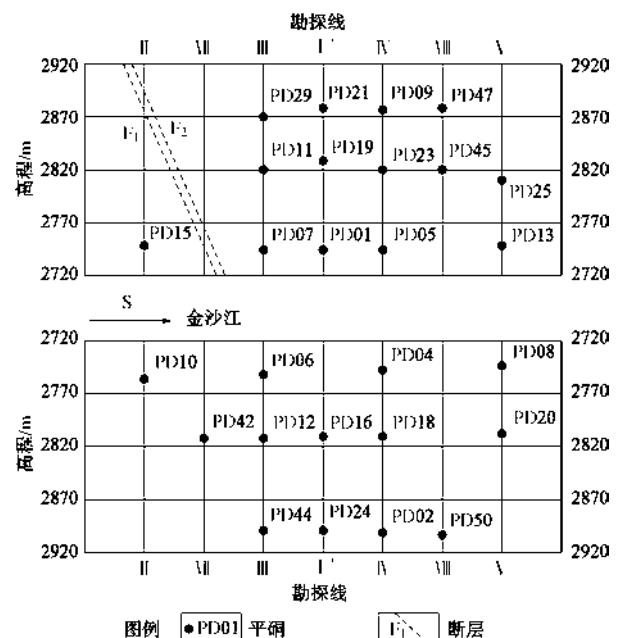


图3 坝址区平硐分布示意图

Fig. 3 Distribution of adits in dam site

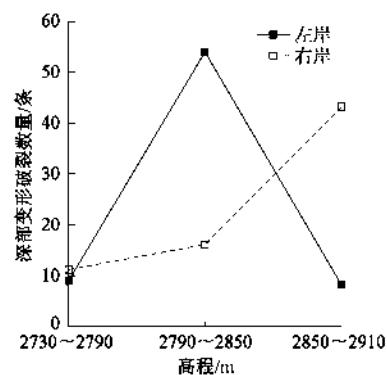


图4 深部变形破裂随高程变化的曲线

Fig. 4 Variation of DCS with increase of elevation

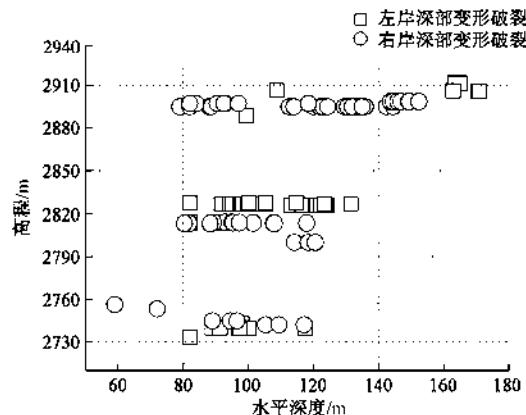


图 5 深部变形破裂水平深度与高程的关系图

Fig. 5 Relationship between horizontal depth of DCS and different elevations

的水平硐深下限分别约为 180 m 和 150 m; ④深部变形破裂的水平分布深度随高程的升高而增加, 但不同高程的深部变形破裂的分布范围存在差异(图 5), 左岸低、中高程深部变形破裂分布较集中, 约为 80~140 m, 高高程零星分布在 100~120 m 和 160~180 m, 右岸低、中高程水平深度大致相同, 约为 80~120 m,

高高程发育深度较大, 约为 80~160 m; ⑤地震层析成像结果(CT)表明, 两岸深部变形破裂在水平和垂向范围具有不同程度的延伸, 但均未形成贯通性破裂面, 其中左岸水平延伸范围较小, 低、中高程的垂向延伸范围较大(图 6), 与左岸相比, 右岸深部变形破裂水平延伸范围大, 垂向延伸范围随高程的降低有减弱的趋势(图 7)。

## 2.2 宏观地质特征

坝址区深部变形破裂宏观地质特征包括以下内容: 优势方向及破裂面性状; 张开度及充填情况; 风化程度及地下水状态。

统计表明, 深部变形破裂的优势产状有 3 组(图 8): ①N50° E/NW  $\angle$  76°~85°; ②N25° E/NW  $\angle$  48°~58°; ③N25° E/SE  $\angle$  54°~61°。破裂面以陡倾角为主, 中倾角次之, 走向可分为 2 种: N50° E 向深部变形破裂产状与构造节理优势方向(N34~76° E/NW  $\angle$  63°~86°)基本相同, N25° E 向深部变形破裂与坝址区 EW 向构造节理近正交。

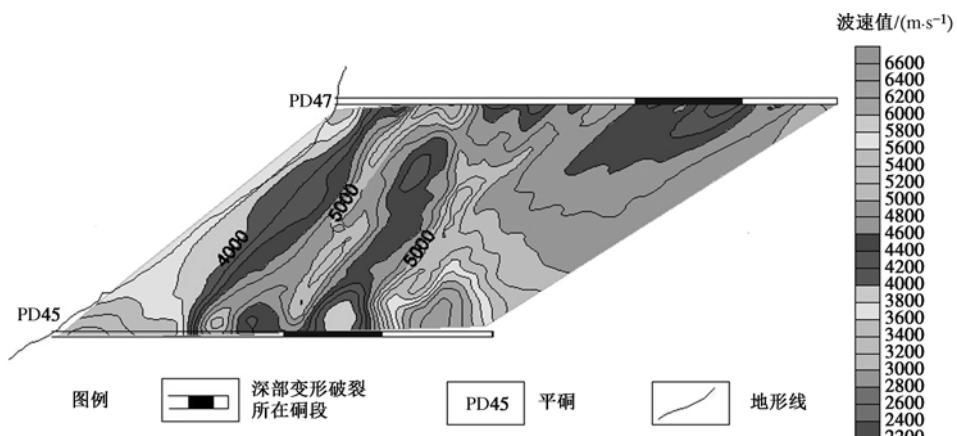


图 6 PD47-PD45 深部变形破裂垂向延伸范围

Fig. 6 Vertical extension range of DCS in PD47-PD45

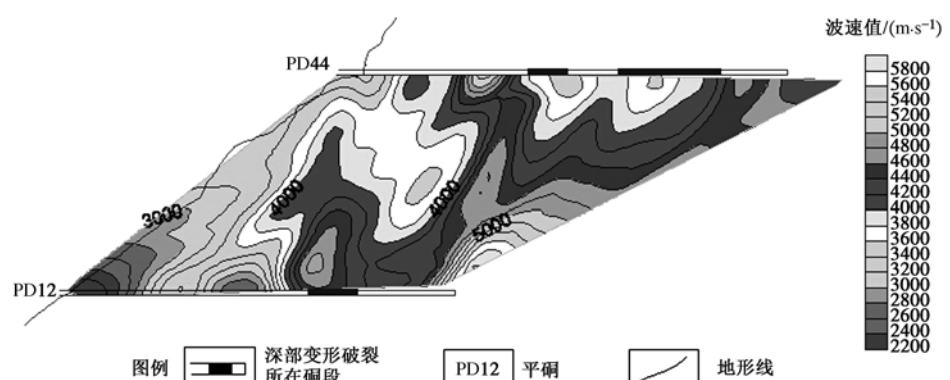


图 7 PD44-PD12 深部变形破裂垂向延伸范围

Fig. 7 Vertical extension range of DCS in PD44-PD12

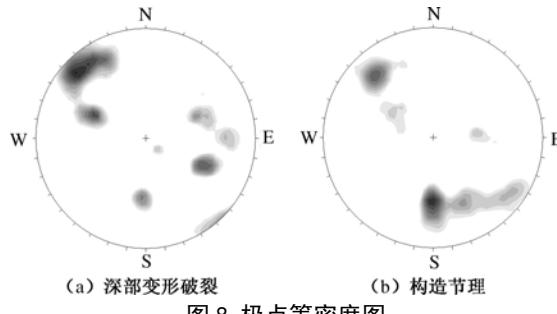


图 8 极点等密度图

Fig. 8 Isodense diagram of poles

不同走向的深部变形破裂, 形态结构和破裂方式存在差异。N50° E 向深部变形破裂, 破裂面平直粗糙, 部分可见附着 1~2 mm 方解石脉或石英脉(图 9), 为继承早期构造节理形成; N25° E 向深部变形破裂, 破裂面起伏粗糙或较为平直, 可连接不同裂隙(图 10), 空间展布多受断层或长大结构面限制, 可见擦痕, 为追踪原构造结构面扩展或完整岩石断裂形成。

深部变形破裂以单条裂缝或带状形式展布, 具有明显张性特征。裂缝张开宽度为小于 1 cm 或 1~10 cm, 缝内多无充填, 部分充填少量岩屑, 结合较松散, 硐壁或硐顶偶见架空; 带状展布的深部变形破裂可分为张裂带和破碎带, 张裂带宽为 3~5 cm, 由多条裂缝组合而成(图 10), 破碎带宽 5~20 cm, 带内可见少量泥质或“砂糖状”岩屑(图 11), 带与带之间岩体完整。



图 9 PD19 硐深 0+130 m 下游壁 N50°E 裂缝附着石英脉

Fig. 9 N50°E orientation crack filled in quartz vein at downstream wall of PD19 at depth of 130 m



图 10 PD24 硐深 0+88—0+89 m 上游壁的 N25°E 裂缝破裂特征

Fig. 10 Characteristics of N25°E orientation DSC at upstream wall of PD24 at depth of 88~89 m



图 11 PD05 硐深 0+98 m 上游壁发育破碎带 (含岩屑)

Fig. 11 Zone of crack at upstream wall of PD05 at depth of 98 m

坝址区深部变形破裂岩体风化程度较弱, 以弱下风化—微风化为主, 少量为弱上风化, 局部受地下水影响, 破裂面风化程度加深, 表面锈染呈红褐色(图 12)。深部变形破裂发育硐段, 地下水较为活跃, 一般表现为潮湿—滴水, 局部表现为线状流水。



图 12 PD11 硐深 0+105m 上游壁深部变形破裂岩体特征

Fig. 12 Characteristic of DSC rock at upstream wall of PD11 at depth of 105 m

### 3 深部变形破裂类型划分

为系统研究深部变形破裂特征及其对岩体的影响, 基于叶巴滩水电站坝址区深部变形破裂的空间分布特征及宏观地质特征, 按照岩体松弛程度, 将深部变形破裂分为 3 类: 轻微松弛型、中等松弛型和强烈松弛型。松弛程度的定量评价标准以裂缝和破碎带宽度为主, 结合地震波层析成像结果(CT)、纵波波速值( $V_p$ )、岩体完整性指数( $K_v$ )和岩石质量指标(RQD)等。

#### 3.1 轻微松弛型

该类型深部变形破裂张开宽度小于 1 cm, 为张性空缝, 破裂面两侧岩体较完整, 表现为局部集中性松弛(图 12)。

主要分布于左岸 F1、F2 断层冲沟下游侧、中高程勘 III 线—勘 I' 之间, 距岸坡表面水平深度约 90~130 m, 沿硐深方向分布宽度较窄(小于 15 m), 水平和垂向延伸范围较小, 两岸零星发育, 左岸中高程发育数量最多, 右岸数量极少(表 1)。

表 1 各类深部变形破裂分布情况

Table 1 Distribution of various types of DSC

岸别	高程	数量/条			总计/条
		轻微松弛型	中等松弛型	强烈松弛型	
左岸	低高程	1	7	1	71
	中高程	19	21	14	
	高高程	3	5	—	
右岸	低高程	5	6	—	69
	中高程	—	11	5	
	高高程	—	9	33	

轻微松弛型深部变形破裂以单条裂缝形式, 沿近EW向发展, 与相邻冲沟及EW向断层走向近于平行, 或继承N45°E走向的构造节理发育, 倾角为中—陡倾角(表2), 多无充填, 破裂处岩体呈弱上风化状态, 地下水普遍为潮湿—滴水, 受地下水影响, 部分岩体表面有小于1cm呈红褐色的风化层, 部分硐段岩体板裂化, 其余部位岩体新鲜完整,  $V_p$ 大于4800m/s,  $K_v$ 大于0.64, RQD大于75%。

表 2 各类深部破裂优势方向

Table 2 Predominant directions of different types of DSC

轻微松弛型	中度松弛型	强烈松弛型
NW80°/SW60°	NE55°/NW80°	NE25°/SE60°
NE45°/NW80°	NW82°/SW56°	SN/E65°

### 3.2 中等松弛型

该类型深部变形破裂呈带状展布, 破碎带宽5~20cm(极少数宽度大于20cm), 表现为剪胀性破坏, 破碎带两侧1~2m范围岩体较破碎, 松弛程度较高(图11)。

主要位于勘IV线、勘VIII线突出山脊处, 多分布在水平深部约80~140m, 沿硐深方向分布宽度变化范围为3~35m, 水平和垂向延伸范围较大, 两岸深部变形破裂数量相差不大, 均集中发育在中高程(表1)。

中等松弛型深部变形破裂为坝址区构造节理改造而成的破碎带, 带内含“砂糖状”岩屑、灰褐色泥质条带, 错动较剧烈处团块状富集, 岩体呈弱下风化, 地下水状态为干燥—潮湿,  $V_p$ 为3600~4800m/s,  $K_v$ 为0.36~0.64, RQD为50%~75%。

### 3.3 强烈松弛型

该类型深部变形破裂向有利卸荷方向张开, 张开宽度为1~10cm(少数大于10cm), 形成宽约3~5m的张裂带, 带内岩体较破碎—破碎, 呈普遍松弛(图10)。

多位于水平硐深约80~120m, 沿硐深方向分布宽度约15m, 水平和垂向延伸范围大, 两岸普遍发育, 多集中分布于右岸高高程, 左岸发育数量较少(表1)。

破裂面走向近SN向(表2), 与坡面近于平行,

或与硐段内断层走向近于正交, 破裂面表现为较平直或起伏粗糙, 单条裂缝无充填, 两侧岩体未见明显错位迹象, 微风化, 潮湿,  $V_p$ 小于3600m/s,  $K_v$ 小于0.36, RQD小于50%。

## 4 各坝址区工程地质条件及深部变形破裂特征比较

为揭示“对称”分布与“不对称”分布深部变形破裂特征及形成条件的差异, 基于前述内容, 运用工程地质类比法, 对比分析叶巴滩与锦屏一级水电站坝址区工程地质条件(表3)及深部变形破裂特征。

各坝址区工程地质条件对比结果(表3)表明, 叶巴滩坝区岸坡较锦屏坝区岸坡坡度稍缓; 各岸坡都具有坚硬岩性, 其中锦屏坝区左岸具有上软下硬的岩性结构; 叶巴滩水电站两岸与锦屏水电站左岸发育复杂的构造结构面, 对边坡起控制作用; 各坝区共同经历中更新世晚期以来地壳的强烈抬升, 岸坡存在或局部存在高地应力。

表 3 工程地质条件对比表

Table 3 Comparison of engineering geological conditions

水电工程	叶巴滩水电站	锦屏一级水电站	
		左岸	右岸
地形地貌	两岸坡度稍缓	下部陡峻, 上部稍缓	陡崖和缓坡相间
地层岩性	石英闪长岩	大理岩、砂岩、板岩	大理岩
地质构造	脆性断裂、X节理发育	NE向节理、断层、X结	NW向结构面发育
河谷演化	中更新世晚期以来, 地壳强烈抬升	中更新世晚期以来, 地壳强烈抬升	
最大主应力	方向NE60°~70°, 量值15~20MPa	方向NW50°, 量值20~30MPa	

锦屏深部变形破裂基本特征如下: 集中发育于左岸, 水平分布深度最大约200m, 发育程度随高程降低而降低, 变形程度顺河流方向表现为次强—较弱—强的特征; 锦屏深部变形破裂呈带状展布, 带与带之间有相对完整的“板梁”; 深部变形破裂优势产状为N50°~70°E/SE50°~80°和N30°~40°E/SE60°, 与构造裂隙产状基本一致; 深部变形破裂可分为拉裂型和剪胀型; 裂缝两侧可见方解石和钙膜, 未见次生泥。对比可知, 各水电站深部变形破裂都间隔发育在微新岩体中, 多具有继承性, 力学机制基本相同, 形成过程中受地下水的影响。

## 5 深部变形破裂的控制因素

深部变形破裂是特定边坡条件下, 长期卸荷作用的产物, 主要受区域性因素、边坡形态、岩性条件、

岩体结构和微地貌等因素的影响。河谷演化过程中, 高地应力地区特殊的卸荷形式为深部变形破裂的形成提供了驱动力。边坡形态(高度和坡度), 进一步影响卸荷的范围, 同时, 坝址区两岸具有一定的岩性和岩体结构条件, 因此叶巴滩水电站坝址区形成对称分布的深部变形破裂。

(1) 由于河流走向与最大主应力方向近于正交, 导致坝址区形成局部高地应力环境, 平硐内片帮发育的硐段与深部变形破裂所处硐段位置大致相同, 表明早期深部变形破裂应赋存于局部高地应力环境。近期以来, 伴随地壳隆升, 河谷经历多次快速下切, 先期高地应力区差异回弹卸荷作用更为强烈。

(2) 边坡的形态对深部变形破裂的空间分布有重要影响。随着边坡高度增高, 深部变形破裂发育的水平硐深逐渐增大。

(3) 坝址区岩性为华力西期石英闪长岩, 属坚硬岩, 储存的残余应变能多, 应变能释放过程中对岸坡卸荷的影响大, 因此, 坝址区深部变形破裂的形成具有良好的岩性条件。

(4) 两岸广泛发育平面X节理和控制性断层为深部变形破裂的对称发育提供结构条件。轻微松弛型深部变形破裂走向与X节理走向近于一致, 沿平行断层发育的裂隙多见张开, 受地下水侵蚀, 岩体表面局部呈红褐色; 中等松弛型深部变形破裂的空间分布多受限于断层或长大结构面, 破裂面走向与坝址区优势构造结构面走向相同, 与断层多呈伴生关系; 强烈松弛型深部变形破裂位于断层挟持部位, 呈雁列式或交汇式发育, 破裂面走向平行于岸坡或垂直于断层走向。

(5) 坝址区两岸微地貌发育, 岸坡三向临空, 具有较好的临空条件, 有利于卸荷的发生。深部变形破裂分布和发育程度受微地貌影响, 但左右岸影响程度存在差异。相对于右岸, 左岸受地表冲沟影响强烈, 深部变形破裂发育水平硐深较大, 其中位于冲沟附近和山脊部位的深部变形破裂相比, 后者的卸荷深度较大。

## 6 结 论

本文从叶巴滩水电站对称发育的深部变形破裂现象为入手, 在总结空间分布规律与宏观地质特征基础上, 结合岩体松弛程度, 划分类型, 对比分析锦屏一级水电站坝区工程地质条件及深部变形破裂, 探讨深部变形破裂的控制因素, 主要结论如下。

(1) 深部变形破裂位于两岸边坡高程2730~2910 m之间, 距边坡表面水平深度约80~140 m范围, 具有随高程的升高水平分布深度逐渐增加的趋势, 在

水平和垂向空间范围有不同程度的延伸, 但均未形成贯通性结构面。

(2) N50°E向破裂平直粗糙, 为继承早期构造节理形成, N25°E向破裂起伏粗糙或较为平直, 为追踪原构造结构面扩展或完整岩石断裂形成; 深部变形破裂表现为狭小裂缝、张裂带和破碎带, 其中裂缝多无充填, 张裂带由多条裂缝组合形成, 破碎带内含岩屑和泥; 深部变形破裂岩体风化程度较弱, 局部受地下水侵蚀, 破裂面表层锈染呈红褐色。

(3) 依据破裂面和破碎带宽度, 结合CT,  $V_p$ ,  $K_v$ 与RQD, 将深部变形破裂分为轻微松弛型、中等松弛型和强烈松弛型。

(4) 河谷演化过程中, 高地应力地区卸荷作用强烈, 边坡形态进一步影响卸荷范围; 在具备坚硬石英闪长岩的基础上, 两岸广泛发育平面X节理和断层, 控制深部变形破裂的分布范围和发展演变趋势; 岸坡冲沟发育地段, 临空条件好, 有利于卸荷的发生; 这就是坝址区深部变形破裂呈对称分布的原因。

## 参 考 文 献:

- [1] 宋胜武, 冯学敏, 向柏宇, 等. 西南水电高陡岩石边坡工程关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 1-22. (SONG Sheng-wu, FENG Xue-min, XIANG Bai-yu, et al. Research on key technologies for high and steep rock slopes of hydropower engineering in Southwest China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 1-22. (in Chinese))
- [2] 祝介旺, 刘建友, 伍法权, 等. 锦屏一级水电站左岸深部卸荷裂隙的加固方案及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(12): 2541-2548. (ZHU Jie-wang, LIU Jian-you, WU Fa-quan, et al. Study on reinforcement technology of deep unloaded fissures in left bank of Jinping first stage hydropower station and its numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(12): 2541-2548. (in Chinese))
- [3] 陈 鸿. 大渡河中下游典型岸坡深部裂缝形成机制及工程效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2005. (CHENG Hong. A study on the formation mechanism and engineering effects of deep crack in typical slopes of middle and lower research of the Dadu River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [4] 韩文峰. 黄河黑山峡大柳树松动岩体工程地质研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993. (HAN Wen-feng. Research on the geology engineering of dynamo-relaxed rock mass at Heishan Gorge on Yellow River[M]. Lanzhou: Gansu

- Science and Technology Press, 1993. (in Chinese))
- [5] 王兰生, 李天斌, 赵其华. 浅生时效构造与人类工程[M]. 北京: 地质出版社, 1994. (WANG Lan-sheng, LI Tian-bin, ZHAO Qi-hua. Epigenetic time-dependent structure and human engineering[M]. Beijing: Geology Press, 1994. (in Chinese))
- [6] 杨永明. 苗家坝水电站坝区边坡典型楔形体的变形破坏特征[J]. 甘肃电力, 1995, 2: 28 - 33. (YANG Yong-ming. Deformation characteristics of typical wedge block of Miaojiaba hydropower station[J]. Gansu Electric Power, 1995, 2: 28 - 33. (in Chinese))
- [7] 祁生文, 伍法权. 锦屏一级水电站普斯罗沟左岸深部裂隙变形模式[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 817 - 820. (QI Sheng-wen, WU Fa-quan. Deep fracture deformation models of pusiluogou left abutment slope at Jinping first stage hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 817 - 820. (in Chinese))
- [8] 祁生文, 伍法权, 兰恒星. 锦屏一级水电站普斯罗沟左岸深部裂隙成因的工程地质分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 596 - 599. (QI Sheng-wen, WU Fa-quan, LAN Heng-xing. Study on the mechanism of the deep fractures of the left abutment slope at the Jinping first stage hydropower[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 596 - 599. (in Chinese))
- [9] 祁生文, 伍法权, 丁振明, 等. 从工程地质类比的角度看锦屏一级水电站左岸深部裂隙的形成[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1380 - 1384. (QI Sheng-wen, WU Fa-quan, DING Zhen-ming, et al. Study on mechanism of deep fractures of Jinping first stage hydropower station by engineering geology analogy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1380 - 1384. (in Chinese))
- [10] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 292 - 297. (HUANG Run-qiu. Main characteristics of high rock slopes in Southwestern China and their dynamic evolution[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 292 - 297. (in Chinese))
- [11] 严明, 黄润秋, 徐佩华. 某水电站坝前左岸高边坡深部破裂形成机制分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(6): 609 - 613. (YAN Ming, HUANG Run-qiu, XU Pei-hua. Research on the deep-seated deformation mechanism of the left bank slope in the front of a dam[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2005, 32(6): 609 - 613. (in Chinese))
- [12] 安关峰, 伍法权. 锦屏水电站左坝肩岩体深卸荷带成因分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 300 - 303. (AN Guan-feng, WU Fa-quan. Formation cause analysis of deep unload band of rock mass in left dam shoulder of Jinping hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 300 - 303. (in Chinese))
- [13] 荣冠, 朱焕春, 王思敬. 锦屏一级水电站左岸边坡深部裂隙成因初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊1): 2855 - 2863. (RONG Guan, ZHU Huan-chun, WANG Si-jing. Primary research on mechanism of deep fractures formation in left bank of Jinping first stage hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2855 - 2863. (in Chinese))
- [14] 韩刚, 赵其华, 彭社琴. 不对称发育深卸荷地质力学模式[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2123 - 2130. (HAN Gang, ZHAO Qi-hua, PENG She-qin. Geomechanical model for asymmetric distribution of deep-seated crack[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2123 - 2130. (in Chinese))
- [15] DRAMIS F, SORRISO-VALVO M. Deep seated slope deformations, related landslides and tectonics[J]. Engineering Geology, 1994, 38: 231 - 243.
- [16] STEAD D, EBERHARDT E, COGGAN J S. Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques[J]. Engineering Geology, 2006, 83: 217 - 235.
- [17] JAN HRADECKÝ, TOMÁŠ PÁNEK. Deep-seated gravitational slope deformations and their influence on consequence mass movements (case studies from the highest part of the Czech Carpathians)[J]. Natural Hazards, 2008, 45: 235 - 253.
- [18] WILLERICH S, THURO K, MAIR V. Integration of large deep-seated, creeping mass movements in a regional hazard mapan approach to determinate it's probability of occurrence[J]. Austrian Journal of Earth Sciences, 2009(2): 61 - 68.
- [19] CROSTA G B, FRATTINI P, AGLIARDI F. Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps[J]. Tectonophysics, 2013(605): 13 - 33.