

不对称发育深卸荷地质力学模式

韩 刚^{1, 2}, 赵其华^{1, 2*}, 彭社琴^{1, 2}

(1. 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; 2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘 要: 揭示不对称发育深卸荷空间分布规律、变形破坏类型及地质力学模式。以白鹤滩水电站深卸荷为典型实例, 基于现场调查、精细描述, 分析深卸荷空间分布特征、变形破坏特征、变形破坏类型, 结合河谷演化历史, 揭示深卸荷岩体能量演化过程, 从能量存储、释放角度建立不对称发育深卸荷地质力学模式。研究表明: 深卸荷分布于距边坡表面水平、垂向深度均为 50~150 m 空间范围, 均处于历次谷底高应力集中影响范围; 深卸荷变形破坏类型可划分为 3 类: 继承性拉张型、新生性张剪型与错动扩展型; 偏移-下切河谷演化使左岸岩体经历多次循环加卸载过程, 能量演化过程具有区别于右岸的三高特点: 储存量高, 耗散量高, 强度劣化程度高, 这是深卸荷不对称分布的根本原因; 深卸荷地质力学模式可概括为先期沿结构面与岩桥拉裂, 以及后期沿缓倾角错动带产生的滑移-拉裂; 深卸荷形成过程可概括为 3 阶段: 损伤加剧与强度劣化阶段、局部拉应力形成阶段、错动扩张阶段。

关键词: 岩石力学; 深卸荷; 不对称发育; 地质力学模式; 能量演化

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)11-2123-08

作者简介: 韩 刚(1978-), 男, 吉林省吉林人, 博士, 主要从事岩石高边坡方面的研究工作。E-mail: gang_han@126.com。

Geomechanical model for asymmetric distribution of deep-seated crack

HAN Gang^{1, 2}, ZHAO Qi-hua^{1, 2}, PENG She-qin^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China; 2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The spatial distribution, deformation type and geomechanical model of asymmetric deep-seated crack (DSC) are analyzed. Taking Baihetan Hydropower Station as a typical example, the spatial distribution characteristics, deformation characteristics and deformation types are investigated by means of the integration methods of field investigation and fine description. Furthermore, a geomechanical model for DSC is proposed based on the view of energy evolution process. The spatial distribution range of DSC is between about 50 m and 150 m in vertical direction and horizontal direction from the surface of rock slope, and is located in the influence range of stress concentration of valley bottom. According to the deformation characteristics, the deformation types of DSC can be divided into three ones: tensile type, tensile-shear type and slippage-splitting type. The rock mass of the left bank has experienced several cyclic loading-unloading processes accompanied by the migration-incision evolution process of Jinsha River at dam site. Different from that of the right bank, the energy evolution process of the left bank has three significant differences: high storage, high dissipation and high strength degradation degree, which are the primary reason of asymmetric distribution of DSC. The formation-driving force of DSC is the tensile stress caused by differential rebound or stress concentration, and the slippage of shear belt makes DSC remarkable. The geomechanical model of asymmetric DSC can be divided into two types: one type is based on tectonic discontinuities and intact rock bridge; and the other is based on shear belt slippage. The formation process can be summarized into three stages successively: damage and strength degradation, local tensile stress formation and slippage splitting.

Key words: rock mechanics; deep-seated crack; asymmetric distribution; geomechanical model; energy evolution

0 引 言

在中国西南深切河谷地区, 岸坡深部发育有一类特殊的岩体破裂现象——深卸荷 (deep-seated crack, DSC)^[1], 通常位于岸坡卸荷带以里, 微新岩体内部, 破裂面多新鲜, 无充填, 呈明显张性, 且多具有不对

称性^[2] (集中分布于一侧岸坡岩体内部, 而另一岸发

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272333); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2011CB013501)

收稿日期: 2013-01-05

*通讯作者

育较少或不发育)。深卸荷不仅可造成地质体的非连续性、应力场的变异性,也进一步影响岸坡岩体的稳定性评价、参数取值与工程利用,已成为一类制约大型工程建设的主要工程地质问题。

国内深卸荷研究始于 20 世纪 80 年代中期,在大柳树、苗家坝等大型水电站地质勘察过程中,岸坡深部相继揭露有一系列岩体破裂现象,引起工程界的广泛关注,但由于当时深卸荷概念尚未形成,称之为“松动岩体”。韩文峰等^[3]在详细调查大柳树“松动岩体”基本特征基础上,认为重力地质作用与地震力地质作用是其形成的驱动力,而王兰生等^[4]则认为这是由于区域性剥蚀和河谷下切卸荷回弹造成原有构造断裂的体积型拉裂错动而形成;杨永明^[5]研究苗家坝坝址区边坡深部破裂的基本特征后,认为破裂体系在重力蠕滑前已经受长期局部深卸荷变形。20 世纪 90 年代初期,随着西南地区大型水电基础设施建设逐步开展,深卸荷在多处水电工程边坡勘察过程中均有揭露,其中较为著名的是锦屏一级水电站坝址区左岸深卸荷现象,一度成为制约坝址选择的重大工程地质问题,成因机理一直是工程界争论的焦点。王士天等^[6-7]、黄润秋等^[8]、严明等^[9]通过分析深部裂缝的分布规律、规模、性状、结构、充填物等特征,采用地质过程机制分析与数值模拟方法,认为锦屏深部裂缝是在特定边坡结构条件下,伴随河谷快速下切、坡体应力强烈释放,沿坡体内原有结构面卸荷拉裂的产物。祁生文等^[10-15]、伍法权等^[16]通过研究深部裂缝的变形模式、分布规律、分级特征、控制因素等,采用工程地质类比法与数值模拟方法,结合影响卸荷分布的边坡形态效应、尺寸效应、水平构造应力效应分析,认为锦屏深部裂缝是自重和构造复合应力场卸荷的结果,未超出常规卸荷范畴。李愿军^[17]、李珏等^[18]认为锦屏深部裂缝与强地震作用时岩体构造动力效应密切相关,是地震作用产生的弹性波形成拉张应力超过岩体抗拉强度所导致,是一种地震构造样式。安关峰等^[19]、谭成轩等^[20]、荣冠等^[21]基于数值模拟、实测地应力资料分析后认为,锦屏深裂缝是伴随河谷下切过程中,岸坡岩体局部应力集中超过岩体强度进而屈服所导致。王小群等^[22]、王兰生^[23-25]根据锦屏一级水电站所处构造部位及深部裂缝变形特征、分布规律等,提出向斜滑脱扩容机制,并采用物理模拟方法再现深部裂缝形成演化过程,认为锦屏深裂缝是伴随河谷下切过程中向斜核部坚硬岩层应变能释放作用产生滑脱形成。近年来,在瀑布沟、白鹤滩等水电站建设过程中也揭露有深卸荷现象。陈鸿等^[26-27]、王瑜等^[28]在研究深卸荷变形特征、分布规律后,认为深卸荷是伴随河谷下切过程中,坡体内

原有结构面遭受浅表生生改造的产物。

目前,较为统一的认识是深卸荷属卸荷产物,但对卸荷方式的理解有所不同:①一种认识是河谷地貌形成演化过程中岸坡应力场转化为以重力场控制的卸荷产物,在自重应力场驱动下,往往叠加有后期时效变形^[6-16];②另一种认识是在河谷地貌形成演化过程中,处于地壳浅表部岩体在区域性剥蚀卸荷过程中,随应变能释放而逐步形成的具有时效性的浅生改造变形破裂体系^[22-29]。然而,部分学者仍对卸荷观点提出质疑,认为难以解释在谷坡深达 200~300 m,已超出卸荷波及范围却仍可见深卸荷现象^[30],也难以阐明表部卸荷带、紧密挤压带与深卸荷之间的连续关系^[17-18]。已有研究从特定岩体结构条件的卸荷^[6-9]、工程地质条件^[10-16]、构造储能—卸荷^[22-25]等方面探讨深卸荷的形成及不对称性,但均忽视河谷演化过程中两岸岩体能量存储—释放过程的差异。

为揭示不对称深卸荷本质属性,本文以白鹤滩水电站所揭露的典型现象为例,在现场调查、精细描述的基础上,探讨深卸荷空间分布特征、变形破坏特征、变形破坏类型,结合河谷演化历史,揭示深卸荷赋存环境的宏观能量演化过程,从能量存储—释放角度建立不对称发育深卸荷地质力学模式。

1 地质环境概况

白鹤滩水电站位于云南省巧家县以北约 45 km 处金沙江呈近 SN 向河段上,金沙江由 S 向 N 流过坝址区,岸坡高陡、河谷深切,河床高程约 580 m。左岸为陡壁、缓坡相间地貌,三级缓坡高程约 660, 720, 830 m,坡顶高程约 930 m,坡高约 350 m。右岸为约 75° 左右平顺基岩陡壁,坡顶面高程约 1190 m,坡高约 610 m,呈不对称“V”型河谷(图 1, 2)。

主要出露三叠系上统飞仙关组砂泥岩(T_3f)与二叠系峨眉山玄武岩($P_2\beta$),之间呈假整合接触。根据喷溢间断与爆发次数,可将玄武岩划分为 11 个岩层,每岩层自下向上包含斜斑玄武岩、隐晶(微晶)玄武岩、杏仁玄武岩、角砾熔岩及凝灰岩,岩层产状 $N20^\circ \sim 60^\circ E$, $SE \angle 15^\circ \sim 20^\circ$,缓倾上游偏右岸。除凝灰岩性软易于风化外,其余岩性均属坚硬岩,强度较高。岩体风化卸荷深度随高程增加呈逐渐加深趋势,弱卸荷底界一般约 20~60 m。

经历燕山期与喜山期两期多次构造运动形成走向 $N40^\circ \sim 60^\circ W$ 与 $N30^\circ \sim 50^\circ E$ 陡倾平面“X”型节理系,且表现为 NW 向节理较为优势,并在此基础上形成 NW 与 NE 向走滑断层(图 1, 2)。坝址区应力水平较高,且表现以水平向构造应力为主的潜在走滑

型应力场, 最大主应力为 NE 向。据现场地应力实测资料反映, 左岸应力平稳带内最大主应力量级约 15~18 MPa, 倾角约 $10^{\circ} \pm 5^{\circ}$, 右岸略高, 约 20~22 MPa, 倾角约 $20^{\circ} \pm 5^{\circ}$, 略陡于左岸。

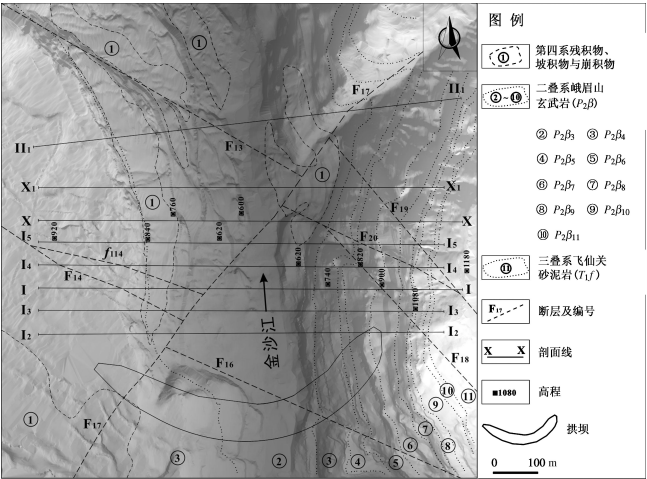


图 1 白鹤滩水电站工程地质平面图
Fig. 1 Geological plan of Baihetan hydropower station

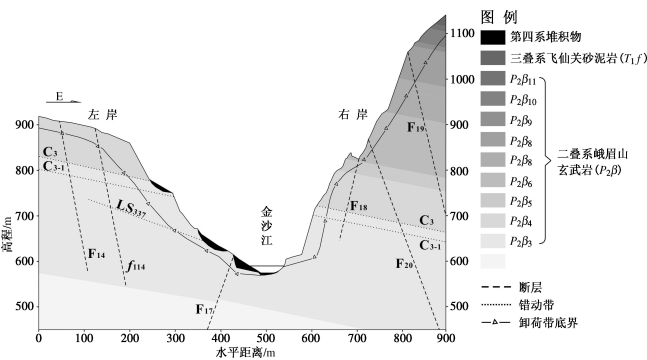


图 2 典型剖面图 (据文献[29], 有修改)
Fig. 2 Typical profile of Baihetan Hydropower Station

2 不对称发育深卸荷分布特征

区别于连续分布的岩体常规卸荷, 深卸荷仅局限于某一空间范围, 统计 13 个平硐共 80 处深卸荷, 具有如下特征:

- (1) 集中分布于左岸 F_{14} 断层下游侧至勘 X_1 线之间 (图 3), 右岸数量极少。
- (2) 位于高程 650~860 m 之间 (图 3), 并集中位于 720~790 m 范围 (图 4), 约 $0.4 \sim 0.6h$ 之间 (坡高 $h=350$ m)。
- (3) 分布于距边坡表面水平、垂向深度均为 50~150 m 空间范围 (图 5), 以水平、垂向深度均为 100 m 为界, 可划分为两个亚区: ①水平、垂向深度均为 50~100 m 区域; ②水平、垂向深度均为 100~150 m 区域。
- (4) 不同高程深卸荷空间分布范围存在差异 (图

5)。低高程深卸荷水平深度较小, 约为 50~80 m, 中高程、高高程水平深度大致相当, 约为 50~150 m, 并不具随高程增加水平向卸荷深度逐渐增大趋势; 而垂向深度均位于 50~150 m 之间, 与河谷底部高应力包影响范围基本一致 (西南地区深切河谷底部高应力包深度约 150~200 m^[31])。

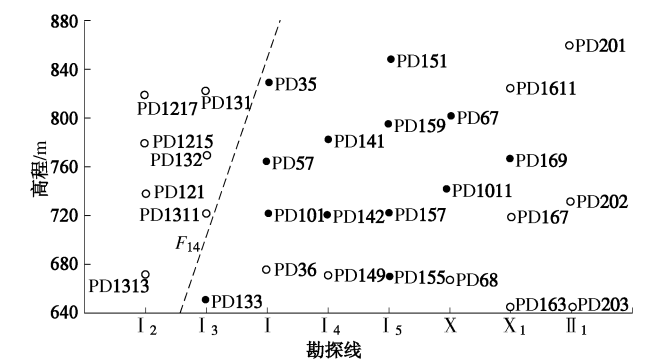


图 3 深卸荷分布示意图 (据文献[29], 有修改)
Fig. 3 Distribution map of DSC

3 深卸荷变形破坏特征

深卸荷优势方向可分为 3 组 (图 6): ① $N45^{\circ} W$, NE (SW) $\angle 80^{\circ} \sim 85^{\circ}$; ② $N15^{\circ} W$, NE (SW) $\angle 80^{\circ} \sim 85^{\circ}$; ③ $N25^{\circ} E$, SE (NW) $\angle 80^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。其中, NW 向深卸荷产状与构造节理优势方向基本一致 ($N20^{\circ} \sim 60^{\circ} W$, NE (SW) $\angle 80^{\circ} \sim 85^{\circ}$), 而 NE 向深卸荷走向则与岩层走向近平行 (岩层产状 $N20^{\circ} \sim 60^{\circ} E$, SE $\angle 15^{\circ} \sim 20^{\circ}$)。

根据破裂面张开宽度 (W) 将深卸荷划分为 4 级: I 级 ($W>10$ cm), II 级 ($5<W<10$ cm), III 级 ($1<W<5$ cm), IV 级 ($W<1$ cm)。统计表明 (表 1), 深卸荷以 III, IV 级为主, I, II 级数量较少。III, IV 级深卸荷在各高程均有分布, 而 I, II 级深卸荷仅分布于层间、层内错动带较发育的中高程、高高程。

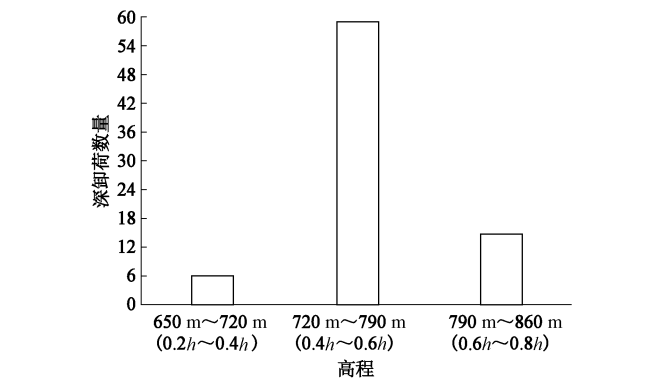


图 4 不同高程深卸荷分布直方图
Fig. 4 Histogram of distribution of DSC at different elevations

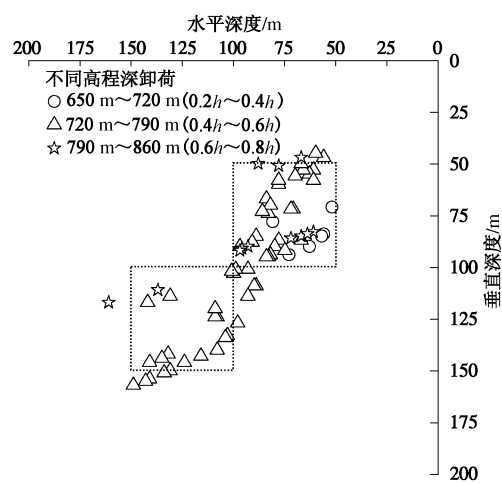


图 5 深卸荷水平深度与垂向深度关系图

Fig. 5 Relationship between horizontal depth and vertical depth of DSC

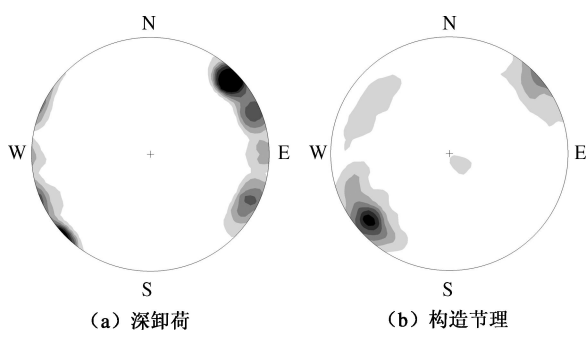


图 6 赤平投影图（上半球投影）

Fig. 6 Stereographic projection (upper hemisphere)

深卸荷集中发育的中高程、高高程对应于 $P_2\beta_3^3$ 亚层，发育多条缓倾角顺层错动带，现场调查表明，部分深卸荷与缓倾角错动带相伴生，位于缓倾角错动带上盘（图 7），未切穿错动带向下延伸，张开宽度一般约 5~10 cm，最大可达约 20~30 cm，多为 I，II 级。

表 1 不同高程各级深卸荷统计表

Table 1 Statistical values of DSC distributed at different elevations				
高程/m	I 级	II 级	III 级	IV 级
650~720			1	5
720~790	3	5	18	33
790~860	1	2	5	7
总计	4	7	24	45

不同级别深卸荷优势方向存在区别，I 级、II 级深卸荷以 $N25^\circ E$ ， $SE(NW) \angle 80^\circ \sim 85^\circ$ 为主（图 8 (a)），而 III 级、IV 级深卸荷则以 $N45^\circ W$ ， $NE(SW) \angle 80^\circ \sim 85^\circ$ 为主（图 8 (b)），且性状上存在明显差异。NW 向深卸荷较为平直（图 9），部分破裂面一侧或两侧可见方解石脉附着，为继承原构造节理形成，

部分深卸荷仅在平硐一壁发育节理段张开，而另一壁则不可见，表明该类深卸荷空间展布受节理空间延展性所限制。而 NE 向深卸荷则较为粗糙，锯齿状起伏不平（图 10），部分破裂面可见后期钙华附着，为新生性破裂。



图 7 深卸荷与缓倾角错动带示意图(据文献[29])

Fig. 7 DSC and shear belt

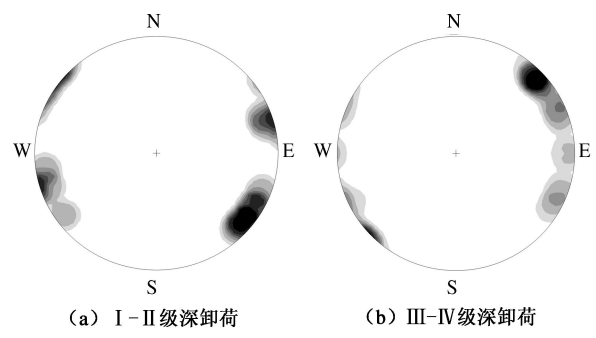


图 8 赤平投影图（上半球投影）

Fig. 8 Stereographic projection (upper hemisphere)

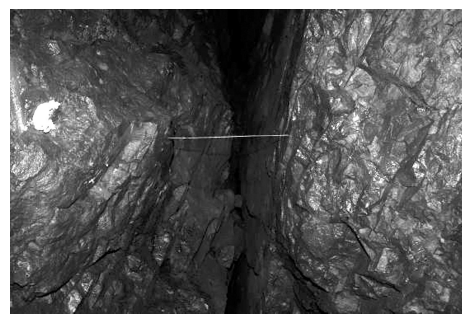


图 9 NW 向深卸荷特征

Fig. 9 Characteristics of NW-oriented DSC

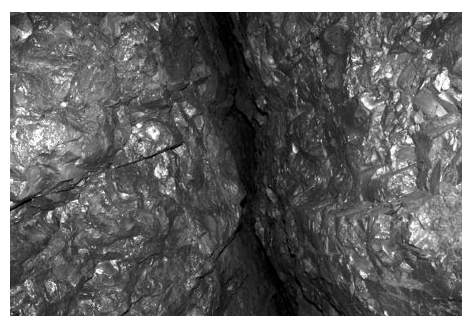


图 10 NE 向深卸荷特征

Fig. 10 Characteristics of NE-oriented DSC

4 深卸荷变形破坏类型

根据破裂面结构、性状特征将深卸荷划分为 3 类：继承性拉张型、新生性张剪型、错动扩张型。

4.1 继承性拉张型

继承原 NW 向构造节理拉张所形成，与 I 型裂纹类似，张开位移方向均指向节理面法向方向，破裂面较平直，张开宽度多小于 1 cm，为 IV 级深卸荷。

该类深卸荷的形成受节理控制，其形成的驱动力为卸荷条件下差异回弹所产生的残余拉应力^[32-33]。发育深卸荷岩性以隐晶玄武岩、杏仁状玄武岩等弹模高、强度大硬岩为主，而分布其中的 NW 向节理则多充填厚度约 0.5~1 cm 的方解石，强度极低。由于材料特性差异，卸荷过程中将在岩石与节理面交接处产生残余拉应力，一旦超过节理抗拉强度，则产生纯张性破裂。

4.2 新生性张剪型

多表现为完整岩体断裂，部分破裂面追踪 NW 向深卸荷扩展，在平面上呈 NW-NE-NW 首尾相接、大角度相交的折线状形态（夹角约为 50°~70°），破裂面锯齿状，较为粗糙，张开宽度多为 1~5 cm，类似 I-II 型复合裂纹，具明显张剪性，多为 III 级深卸荷。

该类深卸荷形成的力学机制为压应力条件下的拉剪破坏。当主应力方向与裂隙（节理）夹角满足一定关系时（约为 $\beta=30^{\circ}\sim40^{\circ}$ ），节理端部将产生局部拉应力集中区，首先出现分支拉张破裂并逐步扩展，形成与 NW 向节理大角度相交（夹角约为 $2\beta=60^{\circ}\sim80^{\circ}$ ）的 NE 向拉张破裂。随着破裂的扩展，岩桥锁固段剪应力集中程度不断增高，法向拉应力又进一步削弱法向应力并使抗剪强度进一步降低，当剪应力超过抗剪强度时，锁固段被剪断并与分支拉张破裂连接，形成与 NW 向深卸荷首尾相接的 NE 向张剪性深卸荷。

4.3 错动扩张型

实际上，由缓倾角错动带剪切错动所形成的深卸荷数量较少，缓倾角错动带的主要贡献是使已有 NW、NE 向深卸荷再次扩张，张开宽度一般约 5~10 cm，最大可达约 20~30 cm，部分破裂面宽度下大上小，呈倒“V”字型，宏观地质特征与压制拉裂^[33]较为类似，但在力学机理上存在明显区别。形成压制拉裂面的最大主应力方向应大体与坡面近于平行，应力场以重力场为主。而实测地应力表明，深卸荷发育区域位于紧密挤压带以里，应力场为构造应力与重力场共同作用的复合应力场^[29]，应力环境并不相同。

使缓倾角错动带产生错动的驱动力实质也为卸荷差异回弹。错动带产状与岩层产状近平行（倾向 SE），

在边坡形成演化过程中，随着前缘剪出口出露地表，上盘岩体将发生向临空面方向回弹，由于岩体与错动带物质力学性质的差异，将在交接部位产生残余拉应力，使已经存在的 NW、NE 向破裂再次扩张，张开宽度较大，多为 I 级、II 级深卸荷。

5 不对称发育深卸荷地质力学模式与形成演化过程

岩体在变形破坏过程中始终不断与外界进行物质与能量的交换，是一个能量耗散的损伤演化过程，能量耗散导致岩体强度劣化，能量释放引发岩体破坏，岩体变形破坏是能量耗散与能量释放的综合结果^[34-37]。

白鹤滩坝址区金沙江河谷呈明显不对称“V”型深切河谷形态，左岸为陡壁、缓坡相间地貌，三级缓坡高程约 660，720，830 m，而右岸为约 75° 左右平顺基岩陡壁，三级缓坡所处高程与 2 级至 4 级阶地（T₂，T₃，T₄）对应（表 2），表明该河段金沙江河谷具有由左岸向右岸逐渐偏移一下切的演化模式（图 11）。相对于右岸岩体单纯卸荷，左岸岩体经历历次谷底高应力集中导致的加载过程，以及侧向临空面出现产生的卸荷过程，深卸荷发育区岩体应力演化过程并非单纯卸载，而实际上是多次循环加卸载过程。

表 2 峡谷期河谷演化阶段(据文献[29])

标志性地貌	河拔高度/ m 海拔高度/ m	形成年代	
		地质年代	绝对年龄/ka
低级剥蚀面	600/1180	Q _{p1}	700
IV 级阶地	250/830	Q _{p2}	180
III 级阶地	140/720	Q _{p2}	150
II 级阶地	80/660	Q _p	40
I 级阶地	20/600	Q _h	11

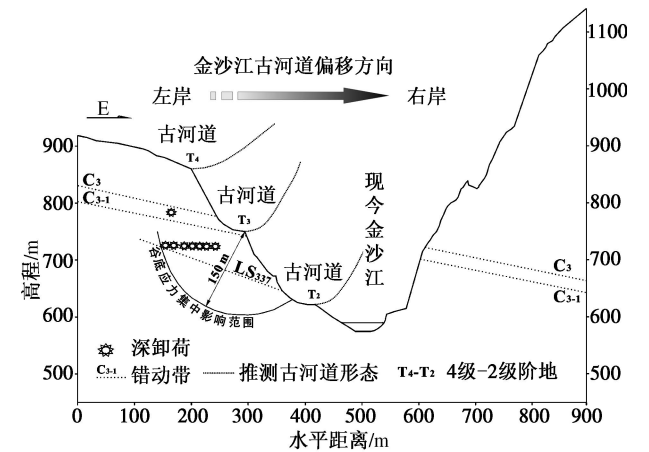


图 11 河谷演化与深卸荷形成模式图

Fig. 11 Valley evolution mode of Jinsha River and formation of DSC at Baihetan Hydropower Station

结合深卸荷空间分布特征、变形破坏特征、变形破坏类型以及河谷演化模式,可将白鹤滩水电站不对称深卸荷的形成演化过程可划分为3个阶段:

(1) 损伤加剧与强度劣化阶段: 谷底高地应力集中效应使左岸岩体具有不同于右岸岩体的能量演化过程。应力集中效应使左岸岩体内能量存储量增高,而多次加卸载过程使岩体能量耗散量高、损伤加剧,进一步使强度劣化程度增高。

(2) 局部拉应力形成阶段: 深卸荷形成的驱动力是局部的拉应力,而广泛发育的NW向节理是深卸荷形成的结构基础。由于能量存储量高、强度劣化程度高,一旦具备有利的卸荷条件,由于材料属性的差异,将产生差异回弹,导致残余拉应力形成,致使NW向继承性拉张型深卸荷出现。随着破裂的扩展,位于NW向节理之间的岩桥段剪应力集中程度不断增强,当剪应力超过抗剪强度时,锁固段被剪断,形成与NW向深卸荷首尾相接的NE向新生性张剪型深卸荷。

(3) 错动扩张阶段: 河谷不断下切致使错动带前缘剪出口出露地表而形成有利卸荷空间,错动带上盘岩体存储的应变能剧烈释放,将发生向临空面方向回弹,由于材料属性差异,将在错动带与岩体交切部位产生差异回弹残余拉应力,使已经存在的NW、NE向破裂再次扩张。

6 结 论

本文以白鹤滩水电站深卸荷为典型实例,在总结空间分布规律、变形破坏特征、变形破坏类型基础上,结合河谷演化模式,探讨不对称深卸荷地质力学模式,可以得到以下5点结论。

(1) 不对称深卸荷分布于距边坡表面水平、垂向深度均为50~150 m空间范围,不具随高程增加水平向卸荷深度逐渐增加趋势,垂向深度均位于河谷底部高应力包影响范围。

(2) 深卸荷以张开宽度较小的Ⅲ级、Ⅳ级为主,Ⅰ级、Ⅱ级数量较少,且仅分布于层间、层内错动带较发育的中高程、高高程。

(3) 根据破裂面结构特征、变形破坏特征可将深卸荷划分为继承性拉张型、新生性张剪型与错动扩展型3类。

(4) 偏移一下切河谷演化使左岸深卸荷岩体经历多次循环加卸载过程,岩体能量演化过程具有区别于右岸的3高特点: 储存量高、耗散量高、强度劣化程度高,这是深卸荷不对称分布的根本原因。

(5) 结合深卸荷空间分布特征、变形破坏特征、变形破坏类型及河谷演化模式,可将不对称深卸荷地

质力学模式概括为两类: 先期由拉应力集中所导致的沿结构面与岩桥拉裂,以及后期沿缓倾角错动带产生的滑移—拉裂。形成演化过程可划分为3个阶段: 损伤加剧与强度劣化阶段、局部拉应力形成阶段、错动扩张阶段。

参考文献:

- [1] GB—50287—2006 水力发电工程地质勘察规范[S]. 2008. (GB—50287—2006 Code for hydropower engineering geological investigation[S]. 2008. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 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))
- [4] 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))
- [5] 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))
- [6] 王士天, 严明, 黄润秋. 高边坡变形破坏机制及稳定性评价[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1994. (WANG Shi-tian, YAN Ming, HUANG Run-qiu. High slope deformation and failure mechanism and stability evaluation[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1994. (in Chinese))
- [7] 王士天, 黄润秋, 李渝生, 等. 雅砻江锦屏水电站重大工程地质研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1998. (WANG Shi-tian, HUANG Run-qiu, LI Yu-sheng. Major engineering geology research of Jinping hydropower station at Yalong River[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1998. (in Chinese))
- [8] 黄润秋, 严明, 陈龙生, 等. 复杂反倾向岩质高边坡深部

- 裂缝形成机理分析[J]. 成都理工学院学报, 2001, **28**(增刊): 321 - 327. (HUANG Run-qiu, YAN Ming, CHEN Long-sheng, et al. A study on the mechanism of deep unloading fissures in a high slope with anti-dipping rock beds[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, **28**(S0): 321 - 327. (in Chinese))
- [9] 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, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2005, **32**(6): 609 - 613. (in Chinese))
- [10] 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缝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 station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(5): 596 - 599. (in Chinese))
- [11] 祁生文, 伍法权. 锦屏一级水电站普斯罗沟左岸深部裂缝变形模式[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))
- [12] 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缝的形成[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))
- [13] QI Sheng-wen, WU Fa-quan, ZHANG Yan-fu, et al. Mechanism of deep cracks in the left bank slope of Jinping first stage hydropower station[J]. Engineering Geology, 2004, **73**: 129 - 144.
- [14] QI Sheng-wen, WU Fa-quan, ZHOU Yuan-de, et al. Influence of deep seated discontinuities on the left slope of Jinping I Hydropower Station and its stability analysis[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2010, **69**: 333 - 342.
- [15] 祁生文, 伍法权, 宋胜武, 等. “锦屏深裂缝”现象及其工程地质意义[C]// 第三届全国水工岩石力学学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 2010. (QI Sheng-wen, WU Fa-quan, SONG Sheng-wu, et al. Deep-seated crack of Jinping first hydropower station and engineering geological significance[C]// The 3rd National Conference on Hydraulic Rock Mechanics Academic. Shanghai: Tongji University Press, 2010. (in Chinese))
- [16] 伍法权, 祁生文, 刘 彤. 高地应力条件下边坡岩体卸荷变形的两种表现形式[J]. 工程地质学报, 2007, **15**(增刊 2): 60 - 67. (WU Fa-quan, QI Sheng-wen, LIU Tong. Two types of unloading deformation of rock slopes under high geostress condition[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, **15**(S2): 60 - 67. (in Chinese))
- [17] 李愿军. 深部裂缝带——一种新的地震构造样式[J]. 中国工程科学, 2006, **8**(4): 12 - 19. (LI Yuan-jun. Deep-seated rupture zone: A new seismotectonic style[J]. Engineering Science, 2006, **8**(4): 12 - 19. (in Chinese))
- [18] 李 珏, 李愿军, 杨美娥, 等. 雅砻江普斯罗坝址深部裂缝带成因的探讨[J]. 中国工程科学, 2007, **9**(3): 11 - 20. (LI Ping, LI Yuan-jun, YANG Mei-e, et al. Discussion on the origin of deep-fissure zones at the site of Pusluo dam, Yalongjiang River[J]. Engineering Science, 2007, **9**(3): 11 - 20. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 谭成轩, 张 鹏, 郑汉淮, 等. 雅砻江锦屏一级水电站坝址区实测地应力与重大工程地质分析[J]. 工程地质学报, 2007, **16**(2): 162 - 168. (TAN Cheng-xuan, ZHANG Peng, ZHENG Han-huai, et al. An analysis on in-situ crustal stress measurements and major engineering geology issues at the dam site area of Jinping first stage hydropower station[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, **16**(2): 162 - 168. (in Chinese))
- [21] 荣 冠, 朱焕春, 王思敬. 锦屏一级水电站左岸边坡深部裂缝成因初探[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))
- [22] 王小群, 王兰生, 徐 进. 西南某水电站岸坡深裂缝形成机制的物理模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(3): 389 - 392. (WANG Xiao-qun, WANG Lan-sheng, XU Jin.

- Physical experiments on the formation mechanism of the deep seated fracture at abutment slope of a southwest hydropower station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(3): 389 - 392. (in Chinese))
- [23] 王兰生. 地壳浅表圈层与人类工程[M]. 北京: 地质出版社, 2004. (WANG Lan-sheng. Epigenetic sphere of earth crust and human being project[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. (in Chinese))
- [24] 王兰生. 地壳的浅表生改造与时效变形[M]//中国工程地质世纪成就. 北京: 地质出版社, 2004. (WANG Lan-sheng. Epigenetic time-dependent structure and deformation[M]// Achievement of the Engineering Geology of China in the 20th Century. Beijing: Geological Publishing House, 2004. (in Chinese))
- [25] 王兰生, 李文纲, 孙志云. 岩体卸荷与水电工程[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(2): 145 - 154. (WANG Lan-sheng, LI Wen-gang, SUN Zhi-yun. Rock mass unloading in hydroelectric project[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(2): 145 - 154. (in Chinese))
- [26] 陈 鸿, 赵其华, 陈卫东. 瀑布沟水电站库首右岸深部裂缝成因分析[J]. 工程地质学报, 2005, **13**(3): 289 - 293. (CHEN Hong, ZHAO Qi-hua, CHEN Wei-dong. On the genetic of the deep fractures of the Pubugou hydropower station[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, **13**(3): 289 - 293. (in Chinese))
- [27] 陈 鸿, 赵其华, 陈卫东. 某水电站库首右岸拉裂变形体形成机理研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, **25**(1): 25 - 29. (CHEN Hong, ZHAO Qi-hua, CHEN Wei-dong. Forming mechanism of the tension-displaced body of a hydropower station slope[J]. Journal of Disasters Prevention and Mitigation Engineering, 2005, **25**(1): 25 - 29. (in Chinese))
- [28] 王 瑜, 赵其华. 某电站坝区左岸深部裂缝特征及成因机理浅析[J]. 长江科学院院报, 2010, **27**(4): 49 - 52. (WANG Yu, ZHAO Qi-hua. Features and Formation mechanism of deep fracture in left bank slope of some hydropower station dam site[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, **27**(4): 49 - 52. (in Chinese))
- [29] 韩 刚, 赵其华, 彭社琴. 白鹤滩水电站坝区岩体深部破裂特征及成因机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, **41**(2): 498 - 504. (HAN Gang, ZHAO Qi-hua, PENG She-qin. Characteristics and formation mechanism of rock mass deep Fractures at dam area of the Baihetan hydropower station[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2011, **41**(2): 498 - 504. (in Chinese))
- [30] 王思敬. 地球内外动力耦合作用于重大地质灾害的成因初探[J]. 工程地质学报, 2002, **10**(2): 115 - 117. (WANG Si-jing. Coupling of earth's endogenic and exogenic geological processes and origins on serious geological disasters[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, **10**(2): 115 - 117. (in Chinese))
- [31] 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 dynamitic evolution[J]. Advances in Earth Science, 2005, **20**(3): 292 - 297. (in Chinese))
- [32] LAJTAI E Z. A mechanistic view of some aspects of jointing in rocks[J]. Tectonophysics, 1977, **38**(3/4): 327 - 338
- [33] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994. (ZHANG Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lan-sheng. Engineering geological analysis principle[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese))
- [34] 谢和平, 彭瑞东, 鞠 杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(21): 3565 - 3570. (XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(21): 3565 - 3570. (in Chinese))
- [35] 谢和平, 彭瑞东, 鞠 杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(15): 2603 - 2608. (XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang, et al. On energy analysis of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(15): 2603 - 2608. (in Chinese))
- [36] 谢和平, 鞠 杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(17): 3003 - 3010. (XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(17): 3003 - 3010. (in Chinese))
- [37] 谢和平, 鞠 杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(9): 1729 - 1740. (XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(9): 1729 - 1740. (in Chinese))