

白龙江某水电站枢纽区顺向河谷岸坡变形特征及其形成机理研究

程 岩¹, 张文栋², 刘艳领³, 慕焕东⁴

(1. 陕西地矿物化探队有限公司, 陕西 西安 710032;

2. 西安市地质环境监测站, 陕西 西安 710016;

3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;

4. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘 要: 水库蓄水坝址区边坡变形稳定可对水电工程产生困扰和影响, 分析并查明枢纽区岸坡变形破坏的类型、规模、分布差异对水电工程安全设计具有重要意义。文章以白龙江某水电站为研究对象, 通过现场调查方法对其枢纽区基本工程地质条件、岸坡结构类型、岸坡不良地质灾害发育特征进行了分析, 从地形地貌、岩性特征、岩体结构、岸坡应力场等方面总结出岸坡变形破坏特征及其破坏模式, 在此基础上通过数值模拟方法揭示了岸坡结构变形破坏形成机理。研究表明: 顺向河谷中, 发育有层状同向结构岸坡、层状反向结构岸坡、层状横向结构岸坡及层状斜向结构岸坡 4 种类型; 左岸不良地质灾害分布密度小但发育有大规模滑坡和变形体, 右岸不良地质灾害分布密度大但多为小型倾倒体和松动体; 枢纽区内岸坡呈现出剪切-滑移型、倾倒弯曲型、拉裂型变形破坏特征; 岸坡结构变形破坏受岸坡地形地貌、岩性特征、岩体结构面、应力变形特征的综合作用。研究成果可为其他类似工程提供借鉴。

关键词: 白龙江水电站; 枢纽区; 河谷岸坡; 变形破坏特征

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)04-0135-07

Deformation Characteristics and Formation Mechanism of the Bank Slope Along the Valley of a Bailongjiang Hydropower Station

CHENG Yan¹, ZHANG Wendong², LIU Yanling³, MU Huandong⁴

(1. Shaanxi Geological and Mineral Exploration Team Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China;

2. Xi'an Municipal Environmental Monitoring Station, Xi'an, Shaanxi 710016, China;

3. PowerChina Northwest Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China;

4. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Deformation and stability of the slope in the reservoir impoundment dam site may cause troubles and constraints to hydropower projects. Analyzing and identifying the type, scale and distribution of slope deformation and damage in the pivot area is of great significance to the safety design of hydropower projects. By taking a hydropower station in Bailong River as the research object, the basic engineering geological conditions, the type of bank slope structure, and the development characteristics of adverse geological disasters on the bank slope are analyzed through the method of on-site investigation. On this basis, the deformation and failure mechanism of the bank slope structure was revealed by numerical simulation method. The results show that in the contiguous river valley, there are four types of reverse bank slope structure, layered lateral bank slope structure and layered oblique bank slope structure. The dis-

收稿日期: 2022-04-11

修稿日期: 2022-05-08

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划一般项目(2022JQ-289); 陕西省教育厅科学研究计划专项项目(20JK0801)

作者简介: 程 岩(1986—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害减灾防灾方面的研究工作。E-mail: 516018421@qq.com

通讯作者: 慕焕东(1989—), 男, 硕士, 实验师, 主要从事地质灾害减灾防灾方面的研究工作。E-mail: mhd3373@126.com

tribution density of adverse geological hazards on the left bank is low, but large-scale landslides and deformed bodies are developed, while the right bank has a high distribution density of adverse geological hazards but mostly small dumping and loose bodies. The bank slope in the hub area presents the characteristics of shear-slip type, dumping and bending type, and tensile crack type deformation and failure. The comprehensive effect of slope topography, lithological characteristics, rock mass structural plane, and stress and deformation characteristics. The research results can provide reference for other similar projects.

Keywords: Bailongjiang hydropower station; water conservancy projects; valley bank; deformation characteristics

在高山峡谷地区进行水电工程建设时因地质条件复杂、河谷深切、地质构造作用突出,往往会存在的高陡岸坡,其不仅会影响工程选址,还对开挖建造、工程运营不可避免产生影响,已成为大型流域水电工程建设面临的主要工程地质问题之一。在水电工程枢纽区,边坡变形稳定除受复杂地质条件控制外,还面临开挖、爆破、地震、降雨、泄洪雾化雨的多重潜在影响^[1]。因此,水库蓄水坝址区边坡变形稳定不可避免的会对水电工程产生困扰和制约影响,在大岗山、小湾、溪洛渡、白鹤滩、乌东德、锦屏一级等众多大型水利水电工程中已经发现坝址区边坡变形会显著影响库区的安全稳定^[2-9]。顺向河谷是顺原始地面或构造面发育的河谷,如在海滨倾斜平原、火山锥、背斜或向斜两翼顺岩层倾向中发育形成的河谷,在水电工程较为常见。顺向河谷两岸通常发育有典型的高陡层状同向、层状反向岸坡结构;但因河流流向的局部变化,还会形成层状横向、层状斜向岸坡结构。当水电工程枢纽区布置于顺向河谷时,两岸不同结构的岸坡变形破坏也会呈现明显差异,对工程会产生不同的潜在影响。

对于水电工程枢纽区岸坡变形稳定,学者和工程技术人员长期以来开展了大量有益的分析研究和探索总结。王金龙等^[2]采用有限元法模拟了雾化雨入渗条件下坡体饱和区范围及压力水头的变化规律,研究表明随着入渗补给量的持续增加,在阻水部位压力水头会逐渐升高;李韬等^[3]利用离散元法分析了白鹤滩水电站左岸坝肩开挖边坡稳定性分析,研究表明左岸边坡变形破坏与结构面密切相关,在开挖卸荷作用下主要表现为沿错动带的压剪破坏和陡倾断层的张拉破坏;邓忠文等^[4-5]通过对大岗山水电站关键工程地质问题的研究,查明了大岗山水电站的工程地质条件,对关键工程地质问题进行了准确评价;林锋等^[6]分析了小湾河谷形成演化动力学过程及机制,研究表明由于河谷形成过程中的卸荷作用及风化作用,在不同层次和方向上易形成不同的边坡结构类型;李攀峰等^[7]以溪洛渡水电站为

研究对象,对水利工程中岸坡治理、岸坡岩体质量分类、危岩体调查及处理进行了较为系统地讨论;李滨等^[8]以金沙江下游乌东德水电站坝区右岸水垫塘高陡边坡为例,研究了 500 m 高陡边坡地质灾害调查识别与监测预警技术;李思滢等^[9]采用模型试验与数值模拟方法对白鹤滩水电站顺层岩质高边坡的稳定性进行评价,研究表明缓倾软弱结构面与陡倾裂隙相互切割形成潜在滑块体,边坡的破坏模式为顺层的滑移-拉裂破坏;安晓凡等^[10]在总结国内外边坡倾倒失稳案例的基础上,阐述了岩质边坡倾倒变形的分类和破坏机理;刘金水等^[11]通过分析黄河上游某水电站坝址区顺层岩质斜坡的变形破坏特征,初步探究其力学机理,研究表明顺层岩质斜坡的变形破坏模式为弯曲-倾倒;邱俊等^[12]对层状反倾和顺倾边坡倾倒变形形成条件及发育规模特征进行了研究,表明顺倾边坡若发生倾倒,通常表现为坡高大于 100 m,边坡坡角大于 35°,岩层倾角大于 60°;反倾边坡当坡角大于 30°及岩层倾角大于 30°就可能发生倾倒;胡荣兵等^[13]以某水电站左岸坝基为例,对坝基松弛机制进行了研究,研究表明该水电站左岸坝基卸荷松弛现象是由爆破作用所产生的瞬时调整以及开挖之后出现的时效性应力调整两者共同作用所导致;贺林林等^[14]建立了岸坡稳定性简化计算模型,提出了水位骤降影响下岸坡稳定性简化分析方法;马斌等^[15]等对窄深河谷近坝库区可能发生整体大体积滑坡工况进行试验研究,表明库区涌浪类型属于有限水深波,坝前相同位置的浪高和相位基本吻合;不同体积、速度和形状下,涌浪波动趋势大致相同,滑块入水体积变化对浪高影响更大。

上述学者对特定地质环境条件下边坡变形破坏的主导因素、变形机理、动态发展、破坏模式等方面取得深入认识。但研究成果多针对枢纽区单个重点边坡开展深入探讨,对岸坡变形破坏差异、发育特征、分布规律的系统总结报道不多,而分析查明枢纽区岸坡变形破坏类型、规模、分布差异是水电工程勘察阶段一项极为重要的任务。

以白龙江某水电站为研究对象,对水电站枢纽区基本工程地质条件进行了全面分析,并对其岸坡结构类型、岸坡不良地质灾害发育特征进行了研究,提出了岸坡变形破坏特征,从地形地貌、岩性特征、岩体结构、岸坡应力场等方面揭示了不同岸坡变形破坏模式差异成因机理,研究成果可为类似工程提供借鉴。

1 工程地质概况

白龙江流域某水电站位于甘肃省文县境内白龙江中游河段,以发电为主,坝型为混凝土面板堆石坝。该水电站大坝设计坝高 111 m,坝顶高程 805 m,正常蓄水位 800 m 时,库容 2.68 亿 m^3 ,总装机容量 240 MW,设计年发电量 9.07 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。水电站主要建筑物包括混凝土面板堆石坝、右岸引水发电洞、泄洪排沙洞和左岸导流(溢洪)洞及右岸岸边地面厂房等。水电站枢纽区属于典型的高山峡谷地貌,河谷呈“V”型,平水期河水面高程 700 m ~ 710 m,水面宽约 30 m ~ 40 m,当正常蓄水位 800 m 时,谷宽 32 m,两岸坡高约 400 m,平均坡度 $42^\circ \sim 45^\circ$ 。枢纽区岩性较为单一,基岩为长城系碧口群厚层状变质凝灰岩,间夹砂质板岩和泥质板岩。岩层走向 $\text{NW}275^\circ \sim 300^\circ$,倾向 SW,倾角 $45^\circ \sim 55^\circ$,走向与河流方向基本一致。凝灰岩为厚层状结构,板岩为薄层-极薄层状结构。此外,在河床、各冲沟沟口、坡脚、岸坡等普遍分布有冲积、洪积、崩(坡)积和滑坡堆积的第四系松散堆积物等。

枢纽区位于碧口-太平川复式倒转背斜北倒转翼,岩层呈单斜构造倾向左岸偏下游。断层、裂隙可归纳为三组:①层面组:走向 $\text{NW}275^\circ \sim 300^\circ$,倾向 SW,倾角 $40^\circ \sim 60^\circ$, $185^\circ \sim 210^\circ \angle 45^\circ \sim 55^\circ$,以顺层断层、层间挤压带为主;②NW 组:走向 $\text{NW}305^\circ \sim 330^\circ$,倾向 NE,倾角 $40^\circ \sim 60^\circ$,以小裂隙为主;③NE 组:走向 $\text{NE}40^\circ \sim 70^\circ$,倾向 NW(少量 SE),倾角 $50^\circ \sim 85^\circ$,长大裂隙为主。其中①、③组是控制岸坡岩体稳定的主要软弱结构面。

2 岸坡结构与变形破坏特征

2.1 岸坡结构特征

白龙江水电站在枢纽区上游以 $\text{SW}194^\circ$ 转向 $\text{SE}130^\circ$ 流入,在枢纽区下游转向 $\text{NE}53^\circ$ 流出,根据河流流向和岩层的交切关系,岸坡结构主要分为四类,分别为层状同向结构岸坡(I)、层状反向结构岸坡(II)、层状横向结构岸坡(III)、层状斜向结构岸坡

(IV),其中斜向结构岸坡分为层状斜向倾内结构(IV1)和层状斜向倾外结构(IV2)两个亚类,岸坡结构在枢纽区的分布图如图 1 所示。

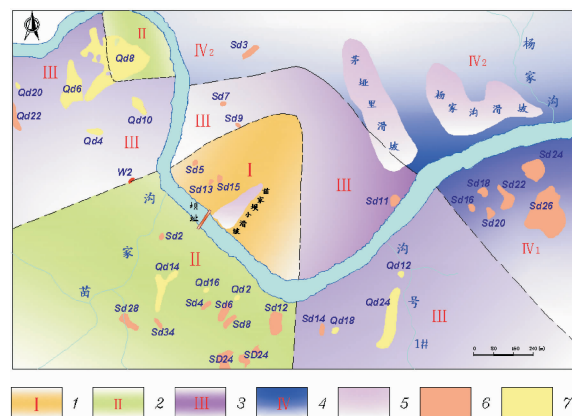


图1 枢纽区结构岸坡分布图

由图 1 并结合水电站勘察资料可知,岸坡结构具有如下特征:

(1) 层状同向结构岸坡:分布于坝址左岸的坝轴线附近,长 680 m 左右,岸坡高程 706 m ~ 1 176 m,平均坡度为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 。

(2) 层状反向结构岸坡:发育有两段,一段分布于右岸坝轴线上游 740 m 左右,长 680 m 左右,岸坡高程 720 m ~ 1 020 m;另一段分布于坝址右岸的坝轴线附近,长 680 m 左右,岸坡高程 706 m ~ 1 160 m。

(3) 层状横向结构岸坡:分布于区内三面临空的半圆形凸起山梁的两侧,即河流呈“Ω”型蜿蜒的岸段,由上至下共有五段:第一段位于坝址上游约 900 m 右岸凸起山梁的 NW 侧,长 340 m 左右,岸坡上陡下缓呈凹面型,平均坡度 $50^\circ \sim 55^\circ$;第二段位于坝址上游约 500 m 右岸凸起山梁的 SE 侧,长 430 m 左右,岸坡呈凸面型,平均坡度 $36^\circ \sim 48^\circ$;第三段位于三面临空凸出山梁的 NW 侧,与第二段隔岸相对,长 360 m 左右,岸坡呈凹面型,平均坡度 $48^\circ \sim 55^\circ$;第四段位于左岸坝轴线所在的三面临空凸出山梁的 SE 侧,以分水岭为界与第三背向而对,长 710 m 左右,岸坡呈凸面型,平均坡度 $40^\circ \sim 46^\circ$;第五段位于右岸坝轴线下游,与第四段隔岸相对,长约 760 m,岸坡呈凹面型,平均坡度 $46^\circ \sim 52^\circ$ 。

(4) 层状斜向结构岸坡:分布于坝线下游的左、右两岸,根据岩层倾向与岸坡走向的关系,又划分为层状斜向倾内边坡与层状斜向倾外边坡两个亚类。层状斜向倾内边坡位于坝线下游的右岸,岸坡处于凸岸段,长 590 m 左右,坡面总体呈凸型坡,平均坡

度 $52^{\circ} \sim 58^{\circ}$ ，局部为近直立的陡崖。层状斜向倾外边坡在区内出露两段且均位于白龙江左岸的凹岸部位，第一段分布于上坝线附近，岸段长 350 m 左右，岸坡呈凹型坡，平均坡度 $40^{\circ} \sim 56^{\circ}$ ，第二段分布于下坝线附近，岸段长 660 m 左右，平均坡度 $38^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ，坡面上陡下缓略具凹面特征。

2.2 岸坡不良地质灾害发育特征

图 1 所示枢纽区广泛发育有水库蓄水诱发不良地质灾害(如滑坡、变形松动体、倾倒体)。通过对枢纽区库岸 40 处不良地质灾害(3 处滑坡、2 处变形体、11 处倾倒体、24 处松动体)进行分析,可以得到枢纽区岸坡不良地质灾害发育特征如下:

(1) 从结构岸坡类型看,枢纽区层状同向结构岸坡、层状反向结构岸坡、层状横向结构岸坡及层状斜向结构岸坡均发育有不良地质灾害。

(2) 从不良地质灾害发育规模看,左岸发育 11 处,右岸发育 29 处;大规模滑坡、变形体发育 5 处,均分布在左岸;倾倒、松动体以小型为主(32 处),个别中型(3 处),均分布在右岸。

(3) 从不良地质体发育条件看,大规模滑坡、变形体以同向和斜向结构岸坡为主,倾倒体以反向结构岸坡为主,松动体以斜向内倾、反向结构岸坡为主,少量为横向结构岸坡。

2.3 岸坡变形破坏模式及其影响因素

依据岸坡不良地质灾害特征,可概化枢纽区内岸坡破坏模式为剪切—滑移型、倾倒弯曲线、拉裂型。

2.3.1 剪切—滑移型破坏模式

根据滑移控制面的不同,可进一步分为平面剪切—滑移型和楔体剪切—滑移型两种。

(1) 平面剪切—滑移型。平面剪切滑移在顺层状同向结构岸坡中最为典型。对于岩层倾角大于岸坡坡角的情况,坡脚遭受侵蚀或开挖切脚时,岩层通常会沿揭露的层面产生滑移。此外,当岸坡中存在中、陡倾外结构面走向与坡向平行且倾角小于坡角时,也容易产生该类变形破坏。该类变形破坏模式的发育在很大程度上取决于侧向临空面或侧向裂隙的切割状况,当侧向临空条件较差或无较大的侧向裂隙切割时,即使由于坡脚开挖而导致岩体层面或倾外结构面出露地表,也不会产生剪切滑移,图 2 (a)、图 2(b)分别为层面控制型滑移和倾外结构面控制型滑移。

(2) 楔体剪切—滑移型。楔体剪切滑移主要受两组倾坡外结构面的控制,两组倾向坡外的节理组

相互交切或层面与一组倾向坡外节理组交切后与临空面组合可形成楔形体,若其交线的倾角小于天然坡角时,此时楔形体可能沿结构面交线产生剪切滑移破坏(见图 3)。

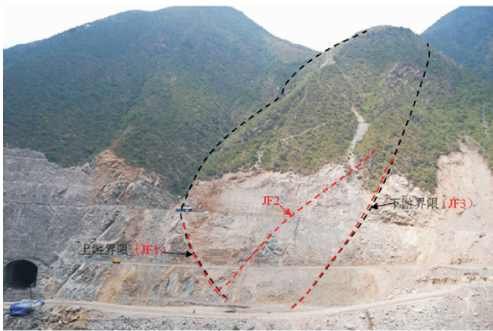


(a) 左岸顺层状同向岸坡结构滑移



(b) 倾外结构面控制的右岸边坡变形破坏

图 2 平面剪切—滑移型变形破坏模式



(a) 断层控制的楔体剪切-滑移破坏



(b) 倾外结构面控制的右岸边坡变形破坏

图 3 楔体剪切—滑移型变形破坏模式

2.3.2 倾倒弯曲型变形破坏模式

倾倒弯曲型变形破坏发育在边坡坡度较陡或临空条件较好的情况下,特别是在三面临空时(见图 4(a))。薄层状板岩在上覆岩体厚度较大时或处于边坡中下部时也容易产生该类变形破坏(见图 4(b))。

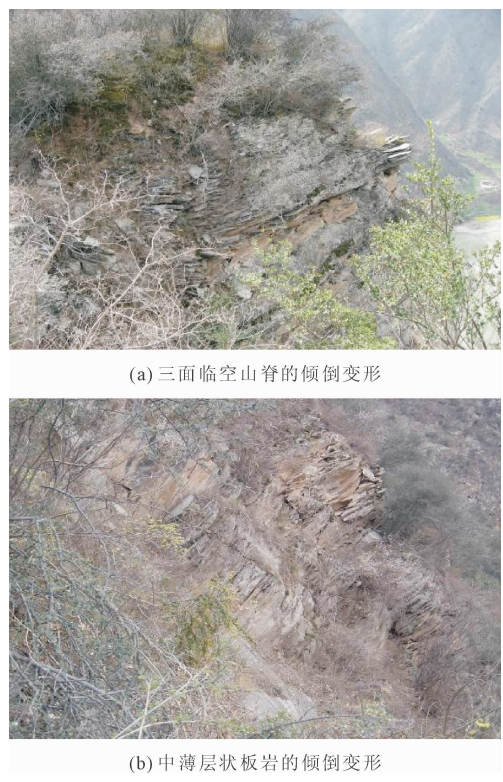


图 4 倾倒弯曲型变形破坏模式

2.3.3 拉裂型变形破坏模式

拉裂型变形破坏主要受临空条件及与临空面走向近于一致的结构面控制,其特点是在斜坡应力场作用下产生垂直走向与临空面一致的节理的张开变形(见图 5(a))。此外,受层面控制的倾倒岩体中也存在拉裂变形(见图 5(b)),其在各种岸坡结构类型中均有分布,但以反向和斜向内倾岸坡段为主。

2.3.4 影响岸坡变形破坏模式的影响因素

(1) 地形地貌的影响。枢纽区左岸以层状同向结构岸坡、层状斜向外倾结构岸坡为主,地形的形成总体受较大层间断层、挤压带的控制。形成岸坡坡面相对平顺,坡度略缓于控制性结构面倾角,突兀地形少。但受河流流向和河谷下切影响,同向结构岸坡段形成凸岸地形,反向内倾结构岸坡段在河谷冲沟切割下形成山梁地形。凸岸与山梁地形为层间挤压夹层或软弱带的自由滑移提供了自由边界,为岸坡发生平面剪切—滑移型、楔形剪切—滑移型破坏

模式提供了有利条件。



图 5 拉裂型变形破坏模式

右岸以横向结构岸坡、反向结构岸坡和斜向内倾结构岸坡为主,坡度明显陡于左岸。河谷形成过程中,由于频繁而活跃的风化、卸荷等浅表生作用,岸坡逐渐形成较为小规模陡峭、突兀的山梁。右岸岸坡的结构使其不易发生大型滑移变形,但因地形具有良好的临空条件,易发生倾倒、拉裂变形。

(2) 岩性特征的影响。枢纽区岩性单一,以坚硬的中厚层变质凝灰岩为主,间夹少量薄层的砂质板岩。砂质板岩因强度低、层薄、抗风化能力弱,构成了天然的层间软弱带。对于岸坡变形破坏的形成和发育,砂质板岩的潜在影响来自两个方面,一是作为潜在滑移面,其二是易弯曲变形为倾倒提供软弱基座。

薄层砂质板岩夹于厚层凝灰岩之间,形成的层间软弱带。在同向或斜向外倾结构岸坡中,砂质板岩夹层为顺坡向倾向,在坡体变形过程中,该夹层既可作为底滑面使岸坡发生顺层剪切—滑移破坏,也可作为楔形体的一组控制结构面,与其他结构面共同作用,使岸坡发生楔形剪切—滑移破坏。

在软硬相间岩层的反向或斜向内倾坡体结构岸坡中,软弱岩层在上覆岩层重力作用下,砂质板岩发生弯曲变形,为上覆坚硬厚层凝灰岩变形提供了良好的软弱基座条件。随着砂质板岩弯曲、折断,凝灰

岩因而向临空侧倾倒。

(3) 岩体结构面的影响。岩体结构面对岩质边坡的变形破坏具有控制性作用。如前所述,走向 NW275°~300°,倾向 SW 的①组和走向 NE40°~70°,倾向 NW 的③组是两组控制性结构面。其中,①组结构面对同向结构和斜向外倾结构岸坡变形破坏起控制作用,③组结构面则是反倾结构、横向结构、斜向倾内结构岸坡变形破坏的控制结构面。总体上,控制性结构面规模、数量差异,是导致不同结构岸坡破坏模式、规模及分布存在明显差异的主要原因。

①组控制结构面为层间断层、层间挤压带,多属于Ⅲ级结构面,少量为Ⅱ级结构面。该组结构面延伸一般达数百米,结构面宽度由 0.5 m 至 3 m~5 m,连通性好,贯穿局部山体。其中,断层带中多有软弱充填物,较大范围山体的稳定性具有控制作用。在坝址左岸滑坡体中,断层带是作为底部滑移面控制变形破坏的;而在其他两处滑坡中,则是作为楔形体的切割面发挥控制作用。

③组控制结构面多为长大裂隙,以Ⅳ级结构面为主。该组结构面延伸数米至数十米,连通性差,对局部岩体具有较强的切割作用,但多受两侧岩体的约束,控制局部块体的稳定性。该组裂隙结构面主要对反倾结构、横向结构、斜向倾内结构岸坡变形起控制作用。相对而言,裂隙密度大、规模小,在三类岸坡结构主要作为切割结构面对倾倒、松动变形破坏起控制作用。

3 岸坡结构变形破坏形成机理分析

根据地应力反演分析确定坝址位置的河谷岸坡应力条件,模拟河谷形成过程的应力变形特征,分析岸坡结构变形破坏形成机理。建立的河谷形成过程中谷坡应力状态的模型如图 6 所示。

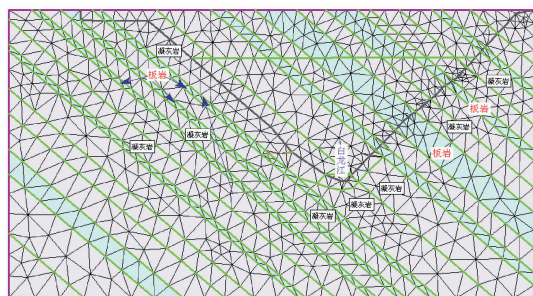
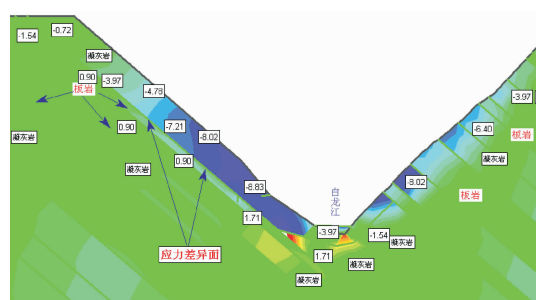


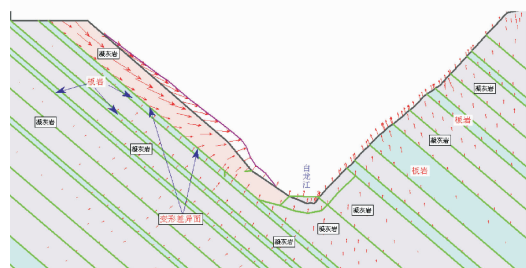
图 6 数值模拟模型

数值模拟结果如图 7 所示。由图 7 可知,枢纽

区河谷段的最大主应力方向与河流近平行,大主应力 σ_1 达到 10 MPa 左右,小主应力 σ_3 为 4.6 MPa。表明河谷形成后,左岸同向结构岸坡卸荷应力(负值)分布连续,在界面外的岸坡表层卸荷应力达到 7 MPa~8 MPa,界面以内坡体卸荷应力 0.9 MPa~1.7 MPa,左岸顺向斜坡的位移矢量的趋势在坡表呈弯曲形状,谷坡向临空面的变形量大,且在前缘剪出口位有明显的减小,其变形差异是导致剪出口形成,变形破坏模式为剪切—滑移型。右岸反向结构的岸坡局部最大卸荷应力约 6 MPa~8 MPa,卸荷应力分布不连续,卸荷范围小于左岸且集中在局部,变形破坏模式为倾倒弯曲型及拉裂型(见图 8)。



(a) 河谷典型断面卸荷应力量值分布图



(b) 河谷斜坡回弹变形量值矢量分布

图 7 河谷两岸卸荷应力、卸荷回弹变形

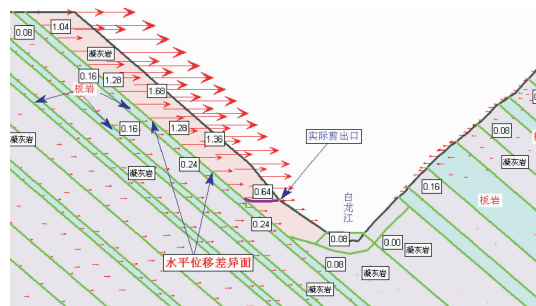


图 8 岸坡水平位移矢量图

4 结 论

通过对白龙江某水电站枢纽区顺向河谷岸坡变形破坏特征及其形成机理研究,得出以下主要结论:

(1) 顺向河谷中,发育有层状同向结构岸坡、层

状反向结构岸坡、层状横向结构岸坡及层状斜向结构岸坡4种类型。

(2) 左岸不良地质灾害分布密度小但发育有大规模滑坡和变形体,右岸同不良地质灾害分布密度大但多为小型倾倒体和松动体。

(3) 枢纽区内岸坡呈现出剪切—滑移型、倾倒弯曲型、拉裂型变形破坏特征;岸坡结构变形破坏受岸坡地形地貌、岩性特征、岩体结构面显著影响。

(4) 左岸顺向斜坡的位移矢量的趋势在坡表呈弯曲形状,右岸卸荷范围小且集中在局部,左岸变形破坏模式为剪切—滑移型,右岸变形破坏模式为倾倒弯曲型及拉裂型。

参考文献:

- [1] 张雄,杨泽艳.我国水电工程边坡治理若干问题的思考与研究[J].水力发电,2018,44(8):23-27,46.
- [2] 王金龙,张家发,李少龙,等.乌东德水电站水垫塘边坡雾化雨入渗数值分析[J].岩土力学,2012,33(9):2845-2849,2856.
- [3] 李韬,徐奴文,戴峰,等.白鹤滩水电站左岸坝肩开挖边坡稳定性分析[J].岩土力学,2018,39(2):665-674.
- [4] 邓忠文,马行东,王修华,等.大岗山水电站枢纽区右岸边坡坡体结构分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(S2):985-989.
- [5] 邓忠文,李思嘉.大岗山水电站关键工程地质问题研究[J].水力发电,2015,41(7):47-51.
- [6] 林锋,黄润秋,严明,等.小湾电站深切河谷边坡

演化动力学过程及机制研究[J].工程地质学报,2010,18(5):766-773.

- [7] 李攀峰,肖华波,张运达.溪洛渡水电站边坡的几个关键施工地质问题探讨[J].四川地质学报,2011,31(S2):62-67.
- [8] 李滨,张青,王文沛,等.金沙江乌东德水电站坝区高陡边坡地质灾害监测预警研究[J].地质力学学报,2020,26(4):556-564.
- [9] 李思滢,陈媛,张林,等.白鹤滩水电站典型顺层岩质高边坡稳定性评价[J].水电能源科学,2018,36(5):102-105.
- [10] 安晓凡,李宁,孙闻博.岩质边坡倾倒变形机理及稳定性研究综述[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(3):1-11.
- [11] 刘金水,李璐,孙诚,等.黄河上游某水电站坝址区顺层岩质斜坡变形破坏模式及成因机制分析[J].防灾减灾学报,2019,35(4):1-6.
- [12] 邱俊,任光明,王云南.层状反倾—顺倾边坡倾倒变形形成条件及发育规模特征[J].岩土力学,2016,37(S2):513-524,532.
- [13] 胡荣兵,任光明,刘晓宇.某水电站左岸坝基岩体卸荷松弛特征与形成机制[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(5):139-144.
- [14] 贺林林,周莉,梁越.水位骤降影响下岸坡稳定性简化分析[J].水利水运工程学报,2021(3):16-24.
- [15] 马斌,刘永玺,李会平,等.窄深河谷近坝库岸滑坡涌浪特性及传播规律[J].水利水运工程学报,2021,189(5):120-128.

《水利与建筑工程学报》编辑部声明

《水利与建筑工程学报》是由教育部主管,西北农林科技大学主办,国内外公开发行的学术性科技期刊(双月刊)。《学报》全面反映我国水利工程与建筑工程领域科研新成果、工程新技术以及国内外最新研究进展,立足于解决旱区、寒区水利与建筑工程建设中的重大科学技术问题,产学研有机结合,加强学术交流,服务广大科技工作者和高校师生。

《水利与建筑工程学报》投稿方式:

在线投稿:<http://slyjzgcbx.paperonce.org/>;邮箱投稿:sjxb@nwsuaf.edu.cn

联系电话:029-87082937;工作手机:18892020615

学报QQ:1378118253;学报微信:18892020615

编辑部郑重声明:本刊从未委托任何校外中介机构或个人代理接收、处理作者稿件事宜,提醒广大作者一定要通过学报官方网站或者电子邮箱投稿,切勿轻信任何第三方投稿渠道,以免使您蒙受经济损失,影响论文正常发表。编辑部鼓励广大作者、读者对冒充本刊编辑的不法人员、虚假网站积极举报,共同构筑合法合规、风清气正的期刊出版新生态。

《水利与建筑工程学报》编辑部