

青海拉西瓦水电站右岸坝前果卜岸坡 变形体工程地质特征

杨天俊, 王启鸿, 杨芸

(中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065)

摘要: 果卜岸坡变形体位于黄河上游拉西瓦水电站库区内邻近右岸坝肩。蓄水后发现岸坡有新的变形迹象, 随即开始了多年的勘测研究工作。岸坡表面及深部布置了不同型式的变形观测点, 对岸坡变形进行了多年的连续观测。根据勘探和观测成果, 果卜岸坡变形体具有变形量大、体积大、位移速率大、岩性单一、坡面形态简单、变形范围高差大、无贯通性倾向坡外的断层型结构面等特征。对比分析早期未蓄水前照片可知, 果卜岸坡在拉西瓦水库下闸蓄水前就经历了多年的变形。本文对果卜岸坡的特征进行系统分析, 可供其他工程参考。

关键词: 变形体; 地质特征; 变形量; 位移速率; 分区分带

中图分类号: P642; TV74 **文献标识码:** A

ENGINEERING GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE GUOBU DEFORMATION BODY ON THE RIGHT SLOPE OF THE QINGHAI LAXIWA HYDROPOWER STATION IN FRONT OF THE DAM

YANG Tian-jun, WANG Qi-hong, YANG Yun

(Power China, Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: Guobu deformation slope is located in the upstream reservoir area on the right slope of the Laxiwa Hydropower Station on the Yellow River. After water storage, new signs of deformation were found on the right slope. Subsequently, years of survey work were carried out, and different types of deformation observation points were arranged on the surface and deep part of the slope, and their deformation was continuously observed for many years. According to the exploration and deformation observation results, the deformation body of the Guobu slope has characteristics such as large deformation, large volume, large displacement rate, single rock type, simple slope surface shape, large deformation range height difference, and no fault type structural plane inclined towards the outside of the slope. After collecting and analyzing early photos before water storage, it was found that the deformation of the Guobu slope began many years before the lower gate of the Laxiwa Reservoir was filled with water. This article provides a systematic analysis of the characteristics of the deformation body of the Guobu slope, which can be used as a reference for other engineering projects.

Key words: deformable bodies; geological characteristics; deformation amount; displacement rate; partition and zoning

拉西瓦水电站是黄河上游干流龙羊峡-青铜峡河段规划的第二个梯级电站,坝址位于青海贵德县境内的龙羊峡谷出口段,上距龙羊峡水电站 32.8 km,下距李家峡水电站 73 km,距西宁公路里程 134 km,距贵德县城公路里程 25 km。枢纽建筑物由双曲薄拱坝、坝身泄洪建筑物、坝后消能建筑物和右岸全地下厂房组成。果卜岸坡位于拉西瓦水电站坝址区右岸的石门沟上游-双树沟范围内,由多条冲沟及山梁组成。该岸坡在水库蓄水和运行中发生巨大变形,且变形持续发展。由于果卜岸坡距离大坝近,且规模较大,一旦发生失稳将对水电站造成毁灭性的破坏^[1]。因此,对果卜岸坡的工程地质特征进行分析并开展研究十分必要。

变形体的工程地质特征包括其空间分布和形态、成因机制以及变形破坏特征等方面。深入研究这些特征对于理解变形体的形成机制、评估其稳定性以及制定有效的工程治理措施具有重要意义。Zhang 等^[2]利用差分合成孔径雷达干涉测量技术和先进陆地观测卫星棱镜数据对果卜岸坡进行分析,发现岸坡在蓄水前未发生明显的变形,而在蓄水后一段时间内最大水平位移达到约 7.5 m。李振韬等^[3]采用合成孔径雷达对果卜岸坡变形体进行监测并发现了其变形机制。黄战库等^[4]基于分析变形过程与蓄水相关性对边坡变形机理进行分析,发现果卜岸坡的倾倒变形可以归结为非平衡演化中岩土体突变性非均匀大变形和结构失稳的问题。员海等^[5]以拉西瓦水电站区域地质环境条件研究为基础,并采用定性分析与定量指标相结合的方法确定果卜岸坡岩体卸荷深度。李聪华等^[6]采用 Sentinel-1 影像和 SBAS-InSAR 技术对果卜岸坡形变特征进行详细分析,发现岸坡的形变受到降水和水位的共同驱动,并存在一定的滞后性。贾逸等^[7]通过地质分析、数值模拟等方法对果卜岸坡倾倒变形的条件进行研究,发现果卜倾倒变形条件主要分为环境地质条件和坡体结构条件。宋杨等^[8]利用物理模拟和数值模拟对果卜岸坡的变形特征进行研究,发现岸坡变形会受到库水位的影响。

本文通过对果卜岸坡多年的连续观测,根据勘探和观测成果对果卜岸坡变形体的范围、分区、位移速率等特征进行详细分析,为其他工程提供参考。

1 概述

坐落于黄河上游的拉西瓦水电站,枢纽建筑物主要由坝高 250 m 的双曲拱坝和装机容量为 4 200

MW 的地下厂房组成。2009 年 3 月下闸蓄水,水位快速抬升到 2 370 m 高程。随后,经过多次蓄水抬升后,于 2015 年蓄水到正常水位至今。果卜岸坡变形体位于拉西瓦水电站右岸坝肩上游,在石门沟和双树沟之间。按果卜岸坡变形体坡顶高程位置起算,变形体上游侧距离大坝约 1 500 m、下游侧距离大坝约 500 m;按正常蓄水位位置起算,变形体上游侧距大坝约 2 500 m、下游侧距大坝约 900 m。正常蓄水位条件下的果卜岸坡变形体如图 1 所示。

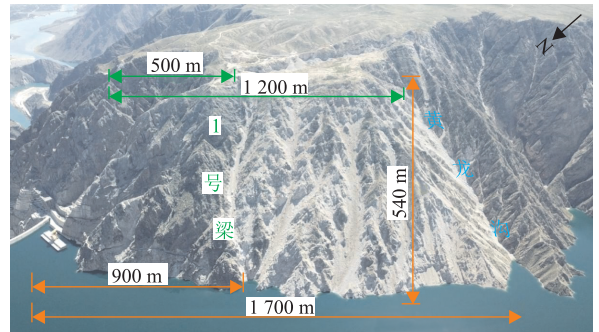


图 1 正常蓄水位条件下的果卜岸坡变形体

2 果卜岸坡基本地质特征

蓄水前,果卜岸坡处的黄河水位高程约 2 250 m,流向在 NE45°左右。岸坡坡面走向约为 NE30°,坡面向河谷凸出。边坡坡度下缓上陡,2 750 m 高程以上近 50°,2 750 m 高程以下为 33°~47°。果卜变形体边坡小冲沟、小山梁交错发育,岸坡顶部地形平坦(为果卜平台),冲沟和山梁编号及地面变形范围见图 2。在高程 2 930~2 950 m 位置,大致呈等腰三角形,顺河长约 850 m,最宽处约 300 m。水库设计的最高蓄水位为 2 452 m。果卜平台与河床的高差约 700 m,与正常蓄水位的高差约 530 m。果卜岸坡相对高差示意图 3。总体来看,果卜岸坡坡度较均一,坡度为中倾角,坡面走向较单一,具有沟梁相间特点。

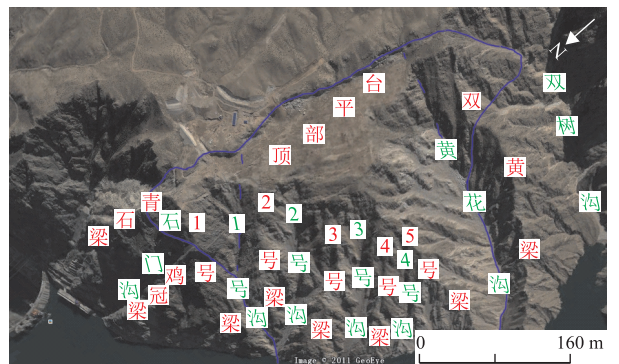


图 2 果卜岸坡冲沟和山梁编号及地面变形范围

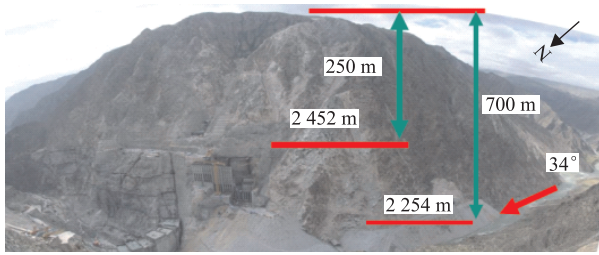


图3 果卜岸坡相对高差示意

果卜岸坡的岩性特征在拉西瓦断层处呈现明显的变化。上游地区由三迭系下统的变质砂板岩构成,而下游则是中生代印支期侵入的坚硬、易碎的花岗岩。这些花岗岩呈现出中等粗粒的结构,以块状形态为主,岩石密度高、坚硬耐磨,整体上具有较强的抗风化能力。果卜岸坡变形体的形成主要发生在拉西瓦断层下游,也就是断层的上盘区域内的花岗岩体中。

拉西瓦断层为区域性次级断层,紧邻果卜岸坡上游侧缘,从坡脚处切过,斜跨过双树沟,走向为NNW,倾向为NE,倾角约 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$,长约20 km。拉西瓦断层的破碎带宽在20~30 m,两侧影响带宽达100 m。

根据调查,果卜岸坡内存在4组控制性结构面。第①组产状为 $300^{\circ}\angle 60^{\circ}\sim 80^{\circ}$,倾坡外,与坡面走向一致,倾角大于坡角,和后缘陡坎LF1的产状接近。该组结构面发育密度大,延伸长度长,多以断层或裂隙密集带的形式出现。第②组产状为 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}\angle 60^{\circ}\sim 80^{\circ}$,主要出现在岸坡顶部,发育密度大、延伸长、开度大,和拉西瓦断层为同组。第③组倾向在 $300^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 之间,倾角小于 40° ,发育的规模和密度相较于另外3组较小,结构面中夹有少量岩屑,产状与之接近的断层也较为少见。第④组倾向为 $135^{\circ}\sim 225^{\circ}$ 、倾角为 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$,和大量缓倾角断层具有相同的产状,最典型的如HF104。

果卜岸坡的花岗岩受到了显著的风化和卸荷作用,导致其风化深度和程度都相当高。在岸顶平台部分,普遍出现连续的全风化层,而岸坡的各山梁部分则零星地露出全风化的迹象。变形区域显示出较强的卸荷拉裂、松动和松弛现象,表现为拉裂缝密布、深度深、间距窄。

果卜岸坡主要由花岗岩裂隙组成,这些裂隙潜水深度大,受到大气降水的补给并排入黄河。地表调查显示,该地区地下水发育不良。岸坡中的断层和裂隙密集带作为主要的水道,但并未发现地下水集中流出的迹象,这表明岩体的透水性较强,地表汇

水迅速渗透进入岸坡地下。在靠近岸坡表层的水平深度较浅的钻孔中,水位基本与正常蓄水位2452 m持平。

根据拉西瓦水电站主体工程地应力测试成果,果卜岸坡地段构造应力量级与方位与坝址区应基本一致,即最大主应力 σ_1 约9.2 MPa,方位 $NE40^{\circ}$ 左右。迭加岸坡自重应力场后,果卜岸坡最大主应力 σ_1 方向约 $NE40^{\circ}\sim NE50^{\circ}$,与岸坡近平行。

3 果卜变形体工程地质特征

3.1 变形区范围及特征

变形区范围涵盖了地表范围及深部范围。地表变形范围的确定可依据多种特征进行分析。首先,通过对研究区河谷的形成特征以及新构造运动的考察进行宏观划分。其次,需要根据坡体发育的断裂构造和不良地质现象的分布情况进行判断,并结合监测成果进行综合分析。另外,在确定范围时,需要考虑到后缘控制面的明显性,以及新裂缝的延伸情况。对于上游双黄梁侧缘,缺乏明显断裂结构面的控制,因此可以以新裂缝的表面分布和变形观测点的结果为依据。在上游侧缘沟内,是否存在塌方痕迹也是判定边界的依据之一。下游侧缘1#梁中上部的范围可根据最新裂缝的高程和变形观测点的结果来确定。而在下游侧缘中下部,则以明显的塌方痕迹为划定边界的依据。最后,在变形区下部,可以通过蓄水前地形特征、蓄水位以上的变形观测点综合位移倾角推测,并结合低高程部位的钻孔和平硐揭露的岩体特征进行分析。

深部范围主要根据平硐勘探、钻孔勘探确定。完成的勘探成果较清楚揭露了果卜变形岸坡深部变形边界。结合现场调查、勘探平硐资料以及监测成果来综合确定深部变形边界。其中,2750 m以上高程深部变形边界揭露较明显,好坏岩体界线明确;2750 m以下揭露岩体相间分布,呈现出一定的渐变过渡特点,从破坏拉裂岩体逐渐或相间性的过渡为完整岩体。总体确定原则包括:(1)勘探钻孔卡钻、岩芯破碎带、掉钻等现象;(2)勘探平硐中揭示的变形区岩体深部的变形破坏特征,上部平硐考虑变形范围界线与地表陡坎的关系,下部平硐需考虑明显的拉裂迹象;(3)区分拉裂迹象过渡带及影响区岩体特征;(4)综合考虑硐内变形监测及钻孔倾斜监测情况;(5)现场宏观判断及好坏岩体分界特征;(6)综合考虑钻孔和平硐中的物探成果。

按以上原则确定的果卜变形区特征,变形区的

顶部长度沿河流方向最长可达 1 251 m,而顶部平台的最大宽度为 295 m。变形区底部的高程在 3[#]梁下游侧为 2 350~2 370 m,而 3[#]梁以上游侧逐渐降至高程约 2 235 m 附近(接近现代河床高程),顶部高程为 2 950 m,高程差约为 700 m。在边界划分方面,变形区的上下游侧中下部以沟为界,上游以黄花沟为界,下游以 1[#]沟为界。而中上部则跨越山梁,上游跨越自双黄梁沟脑至双树沟下游支沟,下游跨越 1[#]梁。

通过以上确定的变形界线,变形区的平面面积约为 $103.83 \times 10^4 \text{ m}^2$,顶部平台面积约为 $13.7 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。中下部的最大水平深度约为 452 m 左右,中上部的水平深度约为 490 m 左右。整个果卜岸坡的变形体积根据实际勘探深度确定,累计约为 $10\,242.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3.2 变形体分区分带特征

根据裂缝展布特征和发育规模、变形速率和方向等因素将岸坡分为 3 个区域。首先是 I 区,位于 1[#]梁 2 770 m 高程以上至顶部平台,与 II 区在 2 690 m 高程附近相交,包括了石门沟顶部、1[#]梁上部、青草沟顶部一带。该区域的位移速率小于 0.1 mm/d,变位方向为 SW220°~SW250°,受 II 区大变形的影响显著。其次是 II 区,位于 2[#]沟-黄花沟库岸,变形最为严重,表部塌滑变形迹象极为显著。该区域的变形监测点综合变形速率均小于 1.5 mm/d,变位方向主要为 NW280°~300°。最后是 III 区,位于黄花沟-双树沟之间双黄梁的中上部,边界特征较明显。该区域的变形较 II 区微弱,但略强于 I 区,变形速率小于 1 mm/d,位移方向为 NW296°左右,与 II 区较为接近。果卜岸坡变形区分区分带体积如表 1。

表 1 果卜岸坡变形区分区、分带体积计算表

| 分区 | 分带 | 体积/ $\times 10^4 \text{ m}^3$ |
|-------------------|----|-------------------------------|
| 正常高蓄水位 2 452 m 以下 | | 905 |
| I 区 | | 512.4 |
| II 区 | 散体 | 1 164.3 |
| | 碎裂 | 2 284.4 |
| | 块裂 | 5 883.6 |
| III 区 | | 398.1 |
| 合计 | | 10 242.9 |

果卜岸坡岩体可以根据勘探平硐、钻孔和物探成果以及地表山梁的出露情况,将整体结构划分为散体结构、碎裂结构、块裂结构和镶嵌-次块状(块状)结构这 4 种类型。分别介绍如下:

(1) 具散体结构特点的包括表层松动岩体、崩

塌堆积体、覆盖松散土层和全风化花岗岩。分布主要在 II 区的 2[#]梁至 5[#]梁山脊和顶部平台表层附近。质量等级相当于 V_{1A} 级。结构特征方面,岩体破碎呈散体状,岩块之间夹有岩屑或泥质物,结构松弛且拉裂缝发育,易于坍塌。厚度上,水平厚度通常小于 30 m。稳定性特征看,岩体松动且容易失稳变形,需要全支护。波速小于 2 000 m/s。

(2) 具碎裂结构特点的位于散体结构带下方,岩块相对完整但呈板裂状倾倒。分布上,各山梁处较多。质量等级相当于 IV_{2A} 级,局部浅层属于 V_{1A} 级。结构特征方面,岩块之间有岩屑和泥质物填充,裂隙密集发育,方向紊乱,次生充填较多,深部的宽大拉裂带也属此类。厚度上,水平厚度在 2 750 m 高程以下通常为 40~60 m,以上则超过 100 m。稳定性特征看,裂隙较多,结构较松弛。波速为 2 000~2 500 m/s。

(3) 具块裂结构特点的分布在较深部,岩体完整性差。质量等级相当于 IV_{2A} 级。结构特征方面,岩块之间嵌合中等紧密,裂隙间隔 2~3 m,缝间岩体相对完整,有松弛现象。厚度上,水平埋深一般在 70~90 m,整体厚度为 50~80 m。稳定性特征看,裂隙较少且多为间隔性的,岩体相对较完整,是各变形区的主体。波速为 2 500~3 000 m/s。

(4) 具镶嵌-次块状(块状)结构特点的属于变形区以里的正常岩体,包括镶嵌结构和次块状结构。质量等级相当于 III~II 级。从结构特征看,镶嵌结构为较深部卸荷岩体以里的过渡带岩体,次块状结构则是弱风化下段未卸荷岩体。厚度上,镶嵌结构带厚度较小,多为 30~50 m。波速大于 3 000 m/s。

3.3 变形监测成果及特征

果卜岸坡自 2009 年 8 月 15 日起相继建立了多个变形观测点,包括 I 区的 GPS 自动观测、2 区的 GPS 自动观测、顶部平台 GPS 自动观测、顶部平台人工有棱镜观测、岸坡无棱镜观测及岸坡有棱镜的人工观测等。本文只针对顶部平台观测点特征进行分析。

果卜顶部平台的变形特征呈现明显的区域差异性。果卜岸坡 1[#]沟将其分为上游和下游两区,其中上游区的变形量明显高于下游区,后者的变形量仅为前者的 1/10~1/6。此外,上游区的位移量呈逐渐增大趋势,主要位移方向为西北西(NWW)。相比之下,下游区的主要位移方向则为西南(SW)。分析各剖面的观测数据显示,从前缘到后缘,综合位移速率呈递减趋势,而垂直位移速率较为稳定。特别是在上游区,从前缘的约 30°到后缘的近 60°,综合

变位倾角明显增大。在前缘观测点,有两个点的累计综合位移超过 44 m,而下游区的累计位移较小,且边缘观测点的变形速率通常超过平台内部。根据观测,位移速率与水库水位的变化密切相关,变化同步且无滞后现象。自 2011 年 1 月中旬以来,随着水

库水位的波动,综合位移速率先是减少,后呈现波动趋势。1# 梁在 2 800 m 高程以上的部分有轻微的变形,以下部分则保持稳定,显示下部岸坡岩体稳固,尽管雨季浅表层可能发生小幅移动。时间与位移速率的典型关系,见图 4 所示。

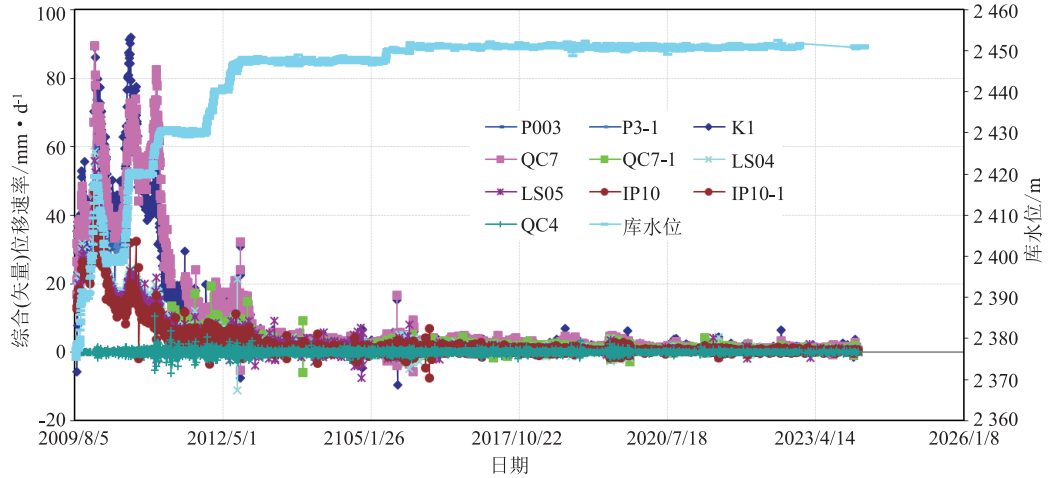


图 4 顶部平台观测点时间-位移速率关系曲线

3.4 位移速率变化及特征

拉西瓦水库自 2009 年 3 月 1 日下闸蓄水,经过多次抬升库水位、稳定库水位、下降库水位等多时段,但各时段时长变化很大。本文仅分析顶部平台

观测建立后到库水位在 2 420 m 左右的变形情况。该时间段典型观测点时间-位移速度关系曲线如图 5 所示。

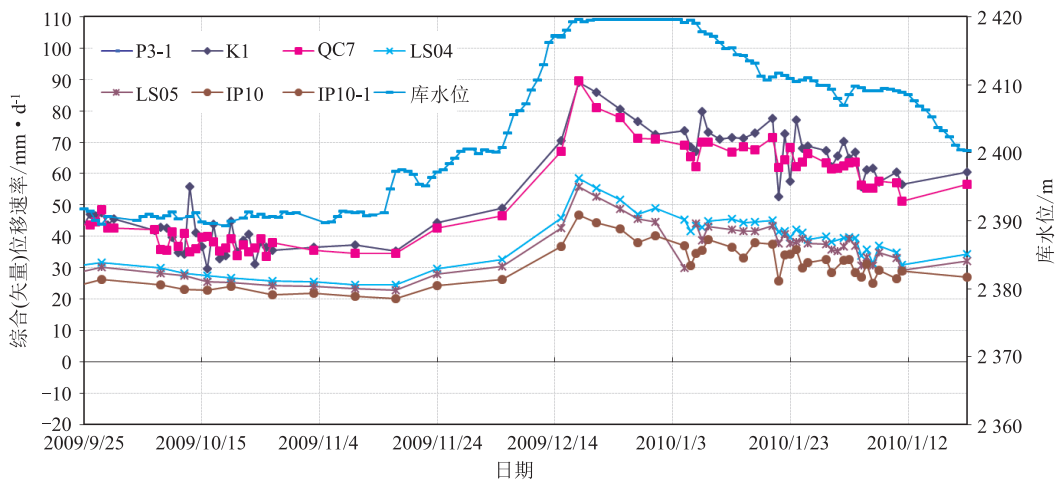


图 5 顶部平台观测点 2009 年 9 月 28 日~2010 年 2 月 12 日时间-位移速率关系曲线

在这个时间段内,库水位稳定在 2 390 m 高程时,观测点位移速率略有降低,但减缓较为缓慢。随着库水位从 2 390 m 迅速升至 2 420 m,位移速率也显著增加,平台前缘的 K1 和 QC7 观测点位移速率超过 90 mm/d,而平台中部的观测点速率在 46~56 mm/d 之间。当库水位保持在 2 420 m 时,K1 和 QC7 的速率快速下降至 62~65 mm/d,平台中部的观测点也降至约 30 mm/d。随着库水位从 2 420 m

回落至 2 400 m,前缘的 K1 和 QC7 观测点位移速率降至 51~53 mm/d,而平台中部观测点速率则在 27~32 mm/d 之间。总体特征:库水位稳定,位移速率降低;库水位抬升,位移速率上升;库水位下降,位移速率下降。并与水位抬升或下降速率有关,水位上升(下降)速率快(慢),观测点位移速率变化快(慢)。

3.5 果卜岸坡重新变形起始时间分析

重新变形起始时间可从顶部平台简易长期观测、拉西瓦水库蓄水前勘察阶段地形图控制点复测、顶部平台拉裂变形痕迹和卫星遥感解译几个方面进行分析。

(1) 顶部平台简易长期观测。为确定果卜错落体是否发生新的变形,在1991~1997年的前期勘测阶段,进行了7 a的简易监测。通过在陷落坑底部基岩裂缝两侧设置的简易观测桩进行观察,结果显示裂缝无明显的位移或变形。1990年4月的唐格木地震(震中烈度6.9级,对该区域的影响为5度)也没有引起裂缝的变化。综合判断,果卜错落体趋于稳定,岸坡整体的稳定性较好。

(2) 地形图控制点复测。2009年5月24日,地质巡查在右岸果卜岸坡发现了新的变形和破坏迹象,包括了顶部平台、上游和下游侧缘、前缘边坡以及后缘陡坎等区域。其中,后缘陡坎的垂直错距约为1.5 m,具有连续性。为了更准确地了解错落体之前的变形特征,利用1981年地形图中的测量点坐标作为参考,将现场按这些坐标定位并重新测量其高程。地形点选取包括了果卜错落体平台中前部、后缘稳定区。对总体特征作一概括:①果卜岸坡后缘稳定区的实测点位高差保持在1 m以内;②平台上未经人为改变、地形相对平坦的测点,其高程较早期地形图平均降低了约2.97 m;③原1:2 000地形图中位于小山包上的测点,其高程普遍降低,最大降幅为7.609 m,最小为5.085 m(9号测点);④在平台前缘的079号图根点,其实测坐标与原地形图坐标相比发生显著变化,显示果卜错落体存在明显的水平和垂直位移(图6),垂直高程降低3.508 m,水平位移8.47 m,方向为 294° ,表明它在朝向黄河河谷方向发生了较大水平位移。

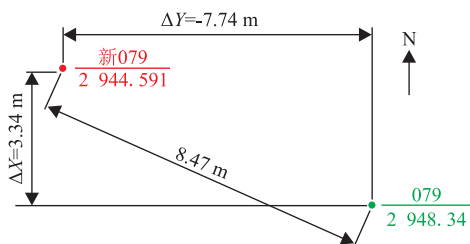


图6 079图根点1981年9月以后变化情况

(3) 顶部平台拉裂变形痕迹。果卜岸坡发现产生大变形后,重新收集了早期的卫星截图照片和地质工程师现场巡视照片如图7、图8。对比分析可知,果卜岸坡地段重新变形时间应在2005年以后,至少应在2007年之前,也就是拉西瓦工程蓄水前果

卜岸坡已开始了重新变形。

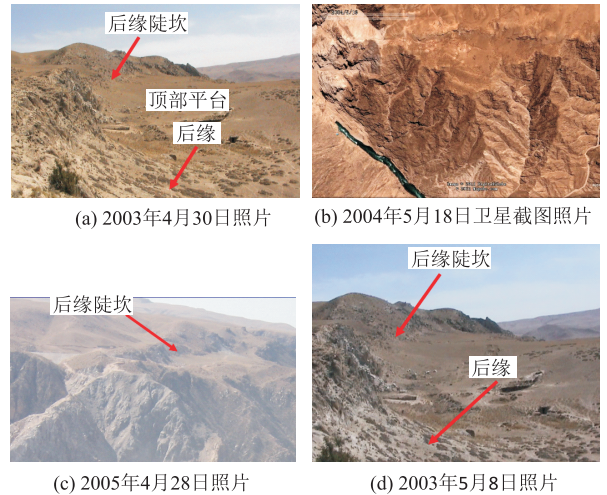


图7 拉西瓦水库蓄水前果卜岸坡顶部平台不同时期照片(一)

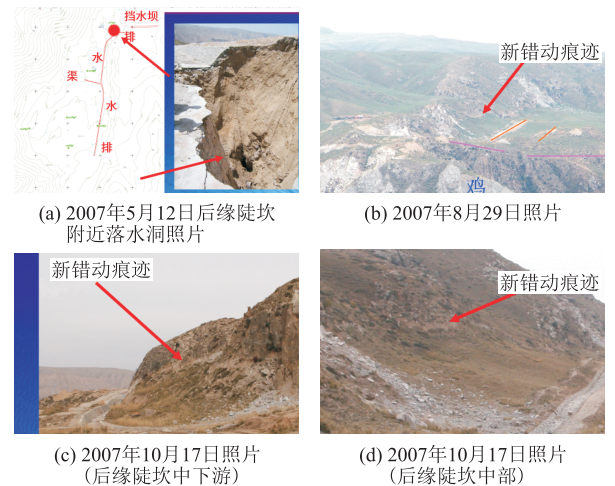


图8 拉西瓦水库蓄水前果卜岸坡顶部平台不同时期照片(二)

(4) 卫星遥感解译。遥感解译利用高分辨率卫星数据,分析果卜岸坡的地质构造和地层岩性特征,研究不同时间段内的变形破坏情况,以及不良地质现象的变化趋势。研究结果表明,从2004年、2005年和2008年的遥感解译来看,2004~2005年间果卜岸坡崩塌和松动岩体的分布基本稳定,但在2008年,这类现象显著增加。这说明果卜岸坡的变形至少从2005年开始加剧,而2008年的影像图显示5#梁前缘的河道明显加宽,坡体滑塌随着水位的变化显著加剧。

4 结论

(1) 果卜地段河流流向基本在 $NE45^\circ$ 左右,岸顶相对河床高差约700 m,坡向约 $NE30^\circ$,坡面倾角

整体 $37^{\circ}\sim 40^{\circ}$,岸坡坡度较均一,坡度为中倾角,坡面走向较单一,具沟梁相间特点。果卜变形体区岩性为中生代印支期侵入花岗岩,岩石致密坚硬;岩体中控制岸坡变形的结构面中无倾向坡外的断层型、贯通性长大中缓倾角结构面;岸坡花岗岩风化、卸荷深度大、程度高,变形区卸荷拉裂、松动、松弛程度较强;岸坡地下水不发育,岸坡表部水平埋深较浅的钻孔中水位基本与库水位相齐平;岸坡地段最大主应力 σ_1 方向与岸坡近平行。果卜变形区顺河长度最大1 251 m,顶部平台最大宽度295 m,底部高程在3[#]梁下游侧为2 350~2 370 m,3[#]梁以上游侧逐渐到2 235 m现代河床附近,高程差700 m。

(2) 果卜岸坡变形体可分为3个区,Ⅰ区平面面积约 $8.74\times 10^4\text{ m}^2$,体积 $512.4\times 10^4\text{ m}^3$,位移速率小于0.1 mm/d;变位方向为 $\text{SW}220^{\circ}\sim\text{SW}250^{\circ}$;Ⅱ区平面面积约 $84.74\times 10^4\text{ m}^2$,总体积 $9\ 332.3\times 10^4\text{ m}^3$,变形速率 $<1.5\text{ mm/d}$,变位方向 $\text{NW}280^{\circ}\sim 300^{\circ}$ 为主;Ⅲ区平面面积约 $10.35\times 10^4\text{ m}^2$,体积 $398.1\times 10^4\text{ m}^3$,变形速率 $<1\text{ mm/d}$,位移方向为 $\text{NW}296^{\circ}$ 左右。果卜岸坡岩体总体可分为散体结构、碎裂结构、块裂结构和镶嵌-次块状(块状)结构。

(3) 果卜变形体变形与水库水位的变化密切相关,顶部平台变形观测点数据显示的变形特征为:位移速率随库水位的抬升而上升,随库水位的下降而

减少;当库水位稳定时,位移速率降低;并与水位抬升或下降速率呈正相关。

(4) 果卜变形体重新变形时间应在2005年以后,至少应在2007年之前。

参考文献

- [1] 万宗礼,巨广宏,杨天俊,等.黄河拉西瓦水电站工程果卜岸坡勘察及研究报告[R].西安:中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,2020.
- [2] Zhang D, Wang G, Yang T, et al. Satellite remote sensing-based detection of the deformation of a reservoir bank slope in Laxiwa Hydropower Station, China[J]. Landslides, 2013, 10(2): 231-238.
- [3] 李振韬,王国强,杨晓琳,等.合成孔径雷达监测技术在黄河拉西瓦水电站果卜岸坡的应用[J].中国安全生产科学技术, 2022, 18(S1): 116-121.
- [4] 黄战库.拉西瓦水电站果卜边坡变形机制浅析[J].陕西水利, 2017, (2): 120-121, 131.
- [5] 员海.黄河拉西瓦水电站坝区右岸边坡岩体卸荷特征研究[D].成都:成都理工大学, 2018.
- [6] 李聪华.基于时序InSAR的果卜坡形变驱动因素定量分析[D].北京:北京建筑大学, 2024.
- [7] 贾逸.块状岩质斜坡倾倒变形条件研究[D].成都:成都理工大学, 2018.
- [8] 宋杨.拉西瓦水电站果卜岸坡岩体结构特征对边坡变形的控制效应[D].成都:成都理工大学, 2016.

作者简介: 杨天俊(1963—),男,正高级工程师,主要从事工程地质勘察工作。E-mail: yangtianjun@nwh.cn