

基于多点位移计的黄金峡水利枢纽 施工期边坡实测变形特征分析

江跃^{1,2}, 程琳^{1,2}, 马春辉^{1,2}, 杨杰^{1,2}, 李波³

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 3. 长江科学院工程安全与灾害防治研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要: 黄金峡水利枢纽左岸边坡在施工期发现了多组结构面, 监测资料显示边坡出现了多次变形突变现象, 且变形大多发生在 20~30 m 范围内, 多点位移计深度区间位移最大值超过 80 mm。为此, 结合多点位移计监测成果, 从时空变化规律、特征值统计、位移速率等方面综合分析了边坡岩体的变形特征。结果表明: 爆破开挖和结构面是导致边坡产生较大变形的主要因素; 边坡主变形区与结构面 fz39、L920 和 fz15 的位置吻合, 坡体变形主要受上述结构面控制。与其他同类工程相比, 目前边坡位移量级基本处于正常范围。随着加固措施的逐步实施, 边坡已基本趋于稳定, 应重点关注 I 区和 IV 区边坡坡脚部位的变形情况, 并加强支护和排水措施。

关键词: 边坡变形; 岩体结构面; 施工期; 多点位移计; 黄金峡水利枢纽工程

中图分类号: TV698.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)03-0201-07

Deformation characteristics of a slope in the Huangjinxia Water Conservancy Project during construction period based on multi-point displacement meters

JIANG Yue^{1,2}, CHENG Lin^{1,2}, MA Chunhui^{1,2}, YANG Jie^{1,2}, LI Bo³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Engineering Safety and Disaster Prevention Center, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Multiple sets of structural planes were found on the left bank slope of the Huangjinxia Water Conservancy Project during the construction period. The monitoring data showed that the slope had multiple deformation mutations, and most of the deformation occurred in the range of 20–30 m, with the maximum interval displacement detected by the multi-point displacement meters exceeding 80 mm. Regarding to this problem, the deformation characteristics of slope rock mass are comprehensively analyzed from the aspects of spatio-temporal variation law, eigenvalue statistics and displacement rate, based on the monitoring data of the multi-point displacement meters. The results show that blasting excavation and structural planes are the main factors leading to large deformation of the slope; the main deformation zone of the slope is consistent with the position of the structural planes of fz39, L920 and fz15, so the slope deformation is mainly affected by the above structural planes. Compared with other similar projects, the current slope displacement magnitude is basically in the normal range. With the gradual implementation of reinforcement measures, the slope has basically stabilized, so attention should be paid to the deformation of slope toe in area I and IV, and the support and drainage measures should be strengthened.

Key words: slope deformation; rock mass structural plane; construction period; multi-point displacement meter; Huangjinxia Water Conservancy Project

收稿日期: 2022-08-03; 修回日期: 2022-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409205、52039008); 陕西省自然科学基金基础研究计划-引汉济渭联合基金项目(2019JLM-55)

作者简介: 江跃(1998—), 男, 四川泸州人, 硕士研究生, 研究方向为边坡安全监控。

通讯作者: 程琳(1986—), 男, 山东济宁人, 副教授, 研究方向为大坝安全智能监控、光纤智能传感和无损检测技术。

1 研究背景

在大型水利工程建设中,通常在工程开挖后会形成地质情况复杂的高陡边坡。在施工期,边坡常因开挖卸荷、爆破振动、降雨、岩体蠕变等多种因素干扰而发生变形和失稳破坏,对水利工程以及人民生命财产安全造成巨大威胁^[1-3]。安全监测是掌握边坡动态、确保边坡安全的重要手段之一。在针对水利工程高边坡的各种安全监测项目中,变形监测最为直观和重要,是直接表征边坡安全状态的方法之一,利用变形监测资料来评价边坡安全稳定状况对于水利工程安全运行具有重要意义^[4-6]。

学者们在边坡变形特征分析方面取得了很多研究成果,并基于此对边坡的安全稳定状况进行了深入分析^[7-13]。例如,黄秋香等^[14]结合多点位移计监测资料,从时间和空间的角度综合分析了坡体的变形特征;彭绍才等^[15]结合多种监测资料分析了乌东德水电站左岸尾水出口边坡的主要变形部位,阐释了监测成果与开挖支护的相关性;Fan等^[16]结合监测资料分析了三峡工程船闸高边坡的变形情况,揭示了变形量与开挖深度的相关性;Zhang等^[17]利用变形监测数据分析了金沙江某水电站高边坡的稳定性和时空变形分布规律,并通过数值模拟得出边坡的变形破坏特征;Song等^[18]通过多点位移计监测资料分析了岩质边坡变形特性受结构面力学性能和几何分布的影响。上述学者通过监测资料或数值模拟对边坡变形特征进行了分析,然而工程施工期边坡岩体常常出现变形突增的现象,需要单独对施工期边坡实测变形资料进行深入研究。根据实测变形资料可以掌握施工期边坡的变形情况^[19],分析引起位移变化的主要影响因素,从而对施工和支护方案进行动态调整^[20-21]。

本文以黄金峡水利枢纽工程左岸边坡为例,根据多点位移计监测资料对边坡变形情况进行综合分析。结合时空变化规律、位移速率、特征值统计、变形量级等方面综合分析施工期边坡的变形特征,并结合施工过程和地质资料分析边坡变形的主要影响因素以及主要深度范围。通过分析多点位移计监测资料揭示施工阶段高边坡的变形特征,有助于制定加固措施并动态调整开挖方案。

2 边坡地质条件与监测布置

2.1 边坡地质条件

黄金峡水利枢纽工程位于汉江干流上游峡谷段,地处陕西省南部汉中盆地以东的洋县境内,为引

汉济渭工程的主要水源之一,也是汉江上游干流河段规划中的第1个开发梯级。黄金峡水利枢纽工程左岸坝肩自然边坡走向约 315° ,倾向约 225° ,坡顶高程为695.0 m,地形坡度为 $37^\circ \sim 39^\circ$ 。左岸边坡高达300 m、长度超过400 m,为大型特高边坡,上、下游两侧发育较大规模的柳树沟和戴母鸡沟,相距约750 m,沟深为10~40 m,常年有水。边坡地层岩性为元古代青白口期闪长岩,后有多期长英质岩脉、二长花岗岩脉侵入。边坡每隔15 m高度设置3 m宽的马道,开挖坡比为1:0.3~1:1.2。左岸边坡分为I~IV区,I区为泵站进水口边坡,II~IV区分别为左岸挡水坝段边坡、电站厂房和电站尾水边坡。图1为黄金峡水利枢纽工程左岸边坡分区、主要结构面及测点布置示意图。

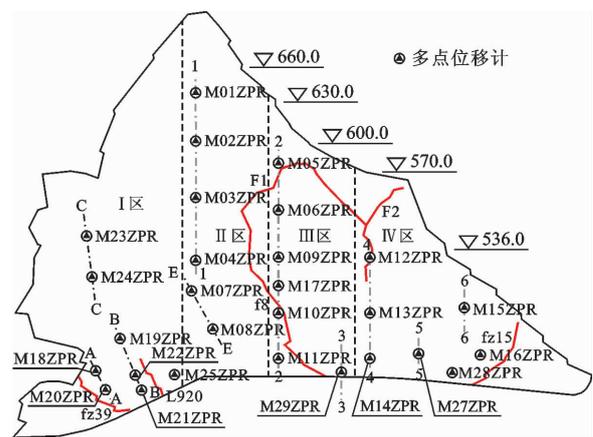


图1 黄金峡水利枢纽工程左岸边坡分区、主要结构面及测点布置立面示意图

如图1所示,左岸边坡开挖过程中揭示到多组软弱结构面,影响边坡的稳定安全。左岸I区边坡岩体发育多组结构面,以走向NNW、NEE组为主,共发育14条断层,一般为裂隙性断层,其中fz39断层规模较大,斜贯II区高程502.0 m以下边坡。L920裂隙所属的走向NNW、倾向SW组裂隙是I区边坡较发育的一组结构面,发育于高程为455.0~502.0 m的边坡。左岸II~IV区边坡岩体发育多组结构面,以走向NNW、NEE组为主,共发育80条断层,一般为裂隙性断层,规模较大的断层有F1、F2、f8、fz15。

2.2 多点位移计监测布置情况

黄金峡水利枢纽大坝左岸边坡布置了30套多点位移计,除M26ZPR、M30ZPR无监测信息以外,其余28套多点位移计均正常在测,布置位置见图1。边坡变形均以向坡外为正,向坡内为负。

由多点位移计监测资料可知,变形主要发生在I区和IV区边坡局部区域,II区和III区边坡变形量

整体较小。因此,本文选取 I 区边坡多点位移计 M18ZPR、M22ZPR 和 IV 区边坡多点位移计 M16ZPR

的区间位移监测数据进行分析。表 1 为多点位移计 M18ZPR、M22ZPR 和 M16ZPR 的埋设位置信息。

表 1 多点位移计布置位置信息

编号	部位	高程/m	孔深/m	始测日期
M16ZPR	IV 区边坡	471.50	30	2018-09-20
M18ZPR	I 区边坡 A-A 监测断面	503.00	45	2018-06-13
M22ZPR	I 区边坡 B-B 监测断面	486.00	55	2018-12-21

3 边坡变形的监测成果与分析

3.1 多点位移计典型监测部位变形特征分析

3.1.1 多点位移计 M18ZPR 监测成果分析 图 2 为 A-A 监测断面多点位移计布置剖面图。多点位移计 M18ZPR 呈水平方向布置在 I 区边坡 A-A 监测断面上,埋设高程为 503.0 m,边坡坡比为 1:0.7。

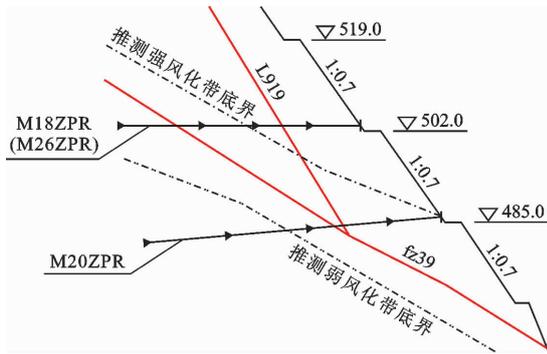


图 2 A-A 监测断面多点位移计布置剖面图

图 3 为多点位移计 M18ZPR 不同深度区间位移过程线。图 3 中 t_1 为 2018 年 7 月 9 日, I 区边坡爆破开挖; t_2 为 2018 年 10 月 27 日, I 区边坡高程 455.0 ~ 470.0 m 爆破开挖; t_3 为 2019 年 2 月 28 日, 由施工过程可知, 2019 年 1 月 28 日至 2 月 28 日期间对 I 区边坡高程 455.0 ~ 470.0 m 进行爆破开挖; t_4 、 t_5 分别为 2019 年 4 月 21 日和 2019 年 6 月 23 日, I 区边坡爆破开挖。

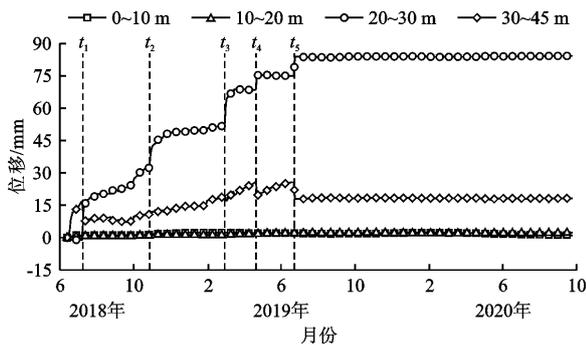


图 3 施工期多点位移计 M18ZPR 不同深度区间位移过程线

由图 3 可以看出,随着边坡爆破开挖的推进, M18ZPR 出现了多次位移测值突变,基本呈阶梯状跳跃增长^[22],突增时间点与爆破开挖时间点密切相关。边坡变形主要发生在 20 ~ 30 m 深度区间。由于 M18ZPR 埋设部位穿过了裂隙 L919 和断层 fz39 (图 2),而 20 ~ 30 m 部位的岩体位于裂隙 L919 和断层 fz39 之间,故岩体变形主要受上述结构面控制,且开挖卸荷对结构面力学特性的扰动较大。因此,爆破开挖和软弱结构面的出现是导致 M18ZPR 位移测值突增的主要因素。I 区边坡高程 455.0 ~ 470.0 m 爆破开挖后,边坡变形明显。2019 年 3 月,设计单位调整了 I 区边坡加固处理方案:①加大边坡高程 538.0 m 以上开挖减载范围;②加大边坡高程 455.0 ~ 470.0 m 锚索吨位;③增加边坡高程 470.0 ~ 485.0 m 大吨位锚索加固。2019 年 7 月之后,随着加固方案的实施, M18ZPR 测值已趋于稳定。选取 2018 年 10 月 27 日、2019 年 2 月 28 日、2019 年 3 月 8 日、2019 年 4 月 21 日和 2019 年 6 月 23 日作为典型日,绘制多点位移计 M18ZPR 的位移-边坡深度关系曲线,如图 4 所示。

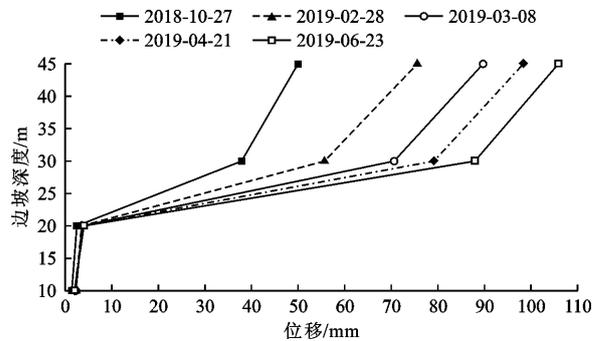


图 4 不同日期多点位移计 M18ZPR 位移-边坡深度关系曲线

由图 4 可以看出,20 ~ 30 m 深度区间是坡体变形集中段,前文已述,该部位的岩体变形受裂隙 L919 和断层 fz39 控制。各条曲线在 30 ~ 45 m 深度段接近平行,表明 30 ~ 45 m 深度范围内的岩体基本保持同步变形。

3.1.2 多点位移计 M22ZPR 监测成果分析 图 5 为 B-B 监测断面多点位移计布置剖面图。多点位移计 M22ZPR 布置在 I 区边坡 B-B 监测断面上,埋设高程为 486.0 m,边坡坡比为 1:0.7。

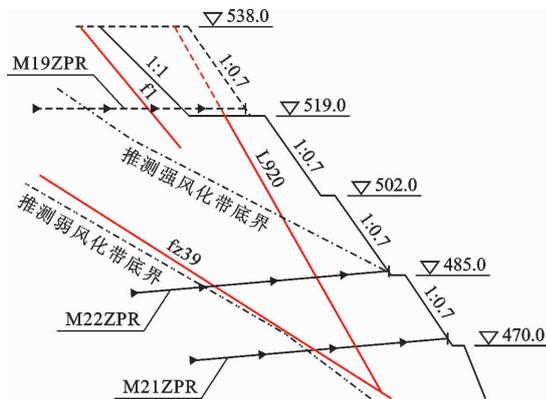


图 5 B-B 监测断面多点位移计布置剖面图

图 6 为多点位移计 M22ZPR 不同深度区间位移过程线。图 6 中 $t_1 \sim t_2$ 为 2019 年 1 月 28 日至 2 月 28 日, I 区边坡高程 455.0 ~ 470.0 m 爆破开挖; t_3 为 2019 年 3 月 1 日, 高程 472.0 m 的 1 处锚墩封锚盖出现破裂, 坡面横向裂缝宽度显著增加, 高程 471.0 m 以上坡面喷混凝土沿裂缝出现鼓包, 岩体有破裂现象; t_4 为 2019 年 3 月中旬, 开始实施 I 区边坡高程 538.0 ~ 637.0 m 减载和高程 455.0 ~ 470.0 m、470.0 ~ 485.0 m 两级边坡的深层支护措施; t_5 为 2019 年 5 月中旬, I 区边坡高程 455.0 ~ 485.0 m 混凝土面板及锚索开始施工。

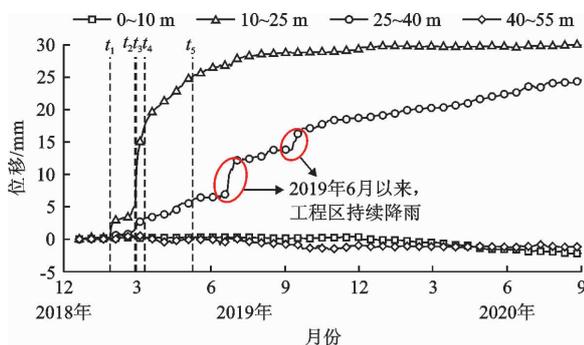


图 6 施工期多点位移计 M22ZPR 不同深度区间位移过程线

由图 6 可以看出, 多点位移计 M22ZPR 测值突增集中在 2019 年 2 月中上旬, 突增时间点与爆破开挖时间点相吻合。边坡变形主要发生在 10 ~ 40 m 深度范围。由于 M22ZPR 埋设部位穿过了裂隙 L920 和断层 f239(图 5), 而 10 ~ 40 m 深度的岩体位于上述结构面之间, 故岩体变形主要受结构面控制。40 ~ 55 m 深度的岩体没有出现明显变形。2019 年 6 月以来, 工程区持续降雨, 雨水下渗到坡体内部, 使岩体变形有

所增加, 表明强降雨对边坡变形也有显著的影响。因此, 爆破开挖、降雨以及软弱结构面是导致多点位移计 M22ZPR 测值突增的主要因素。2019 年 7 月以后, 随着 I 区边坡支护措施的逐步实施, M22ZPR 在 10 ~ 25 m 深度区间的测值已基本稳定, 在 25 ~ 40 m 深度区间的测值仍有缓慢增大趋势。

选取 2019 年 2 月 28 日、2019 年 3 月 1 日、2019 年 3 月 12 日、2019 年 5 月 10 日和 2019 年 7 月 1 日作为典型日, 绘制多点位移计 M22ZPR 的位移-边坡深度关系曲线, 如图 7 所示。

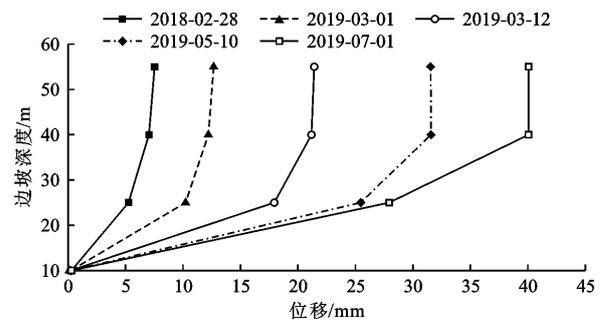


图 7 不同日期多点位移计 M22ZPR 位移-边坡深度关系曲线

由图 7 可以看出, 10 ~ 40 m 深度区间是坡体变形集中段, 前文已述, 该部位的岩体变形受 L920 裂隙控制。各条曲线在 40 ~ 55 m 深度段接近平行, 表明 40 ~ 55 m 深度范围内的岩体基本保持同步变形。

3.1.3 多点位移计 M16ZPR 监测成果分析 图 8 为多点位移计 M16ZPR 布置剖面图。多点位移计 M16ZPR 呈水平方向布置, 埋设高程为 471.5 m, 边坡坡比为 1:0.9, 预设位置在桩号 0 + 182 m 处, 实际埋设在桩号 0 + 194 m 处。

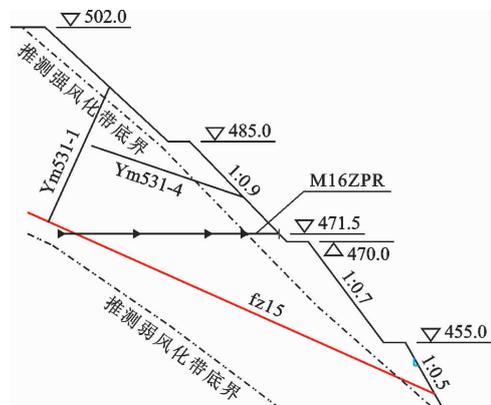


图 8 多点位移计 M16ZPR 布置剖面图

图 9 为多点位移计 M16ZPR 不同深度区间位移过程线。图 9 中 t_1 为 2019 年 4 月下旬, IV 区边坡桩号 0 + 185 m 附近的断层 f215 上部岩体出现松弛变形, 降雨后坡面沿 f215 断层有渗水迹象; t_2 为 2019

年 5 月底,在 IV 区边坡高程 470.0 m 以下沿断层 fz15 一线发现喷混凝土出现裂缝,且裂缝有明显扩展、延伸趋势; t_3 为 2019 年 6 月初,在 485.0 m 马道上发现裂缝,裂缝向 470.0~485.0 m 高程段边坡上延伸了约 2 m; t_4 为 2019 年 8 月初,上述沿断层 fz15 的裂缝已基本贯通。

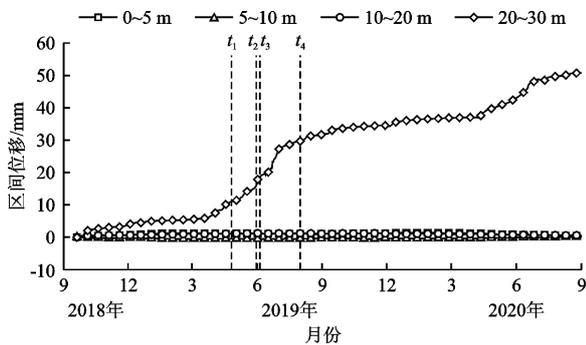


图 9 施工期多点位移计 M16ZPR 不同深度区间位移过程线

由图 9 可以看出,边坡变形主要发生在 20~30 m 深度区间。由于 M16ZPR(20~30 m 深度区间)穿过了断层 fz15(图 8),故该部位的岩体变形受上述结构面控制。2019 年 4—6 月,边坡沿断层 fz15 一线的岩体发生松弛变形,导致坡面出现裂缝。因此,软弱结构面是导致 M16ZPR 位移测值加速增长的主要因素。2019 年底,设计单位对断层 fz15 进行加固处理设计:①在 470.0 m 至 1 号公路之间布置 61 束 2 000 kN 锚索,锚索穿过断层 fz15,长度为 35~45 m;②在 417.6 m 沿断层 fz15 布置 1 条抗剪洞,断面尺寸为 3.0 m×3.5 m。2020 年以后,M16ZPR 在 20~30 m 深度区间的位移仍有缓慢增长趋势,应加强安全监测。

选取 2019 年 2 月 2 日、2019 年 4 月 26 日、2019 年 6 月 5 日、2019 年 8 月 1 日和 2019 年 12 月 5 日作为典型日,绘制多点位移计 M16ZPR 的位移-边坡深度关系曲线,如图 10 所示。

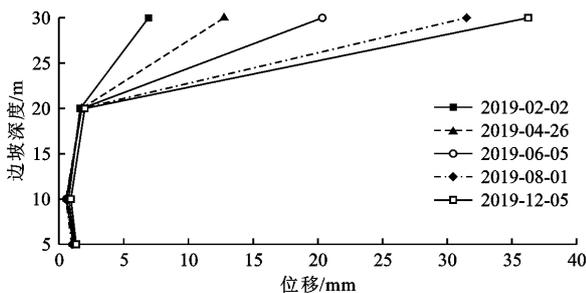


图 10 不同日期多点位移计 M16ZPR 位移-边坡深度关系曲线

由图 10 可以看出,20~30 m 深度区间是坡体变形集中段,前文已述,该部位的岩体变形受 fz15

断层控制。

3.1.4 多点位移计位移速率分析 分别选取 2018 年 6 月—2019 年 10 月、2018 年 12 月—2019 年 9 月、2019 年 2 月—2019 年 10 月为典型时间段,相应绘制多点位移计 M18ZPR(20~30 m 深度区间)、M22ZPR(10~25 m 深度区间)和 M16ZPR(20~30 m 深度区间)测点的位移速率图,如图 11 所示。

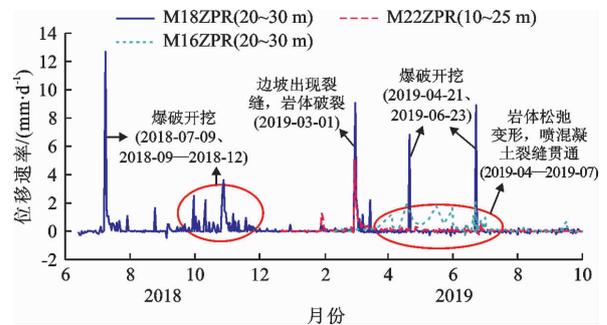


图 11 3 个多点位移计测点典型时段位移速率变化曲线

由图 11 可以看出,边坡的位移速率发生了多次突增现象,每一次爆破振动都会造成坡体位移速率突增。2019 年 3 月 1 日,边坡高程 471.0 m 附近坡面横向裂缝宽度显著增大,高程 471.0 m 以上坡面喷混凝土沿裂缝出现鼓包,岩体有破裂现象,而 M18ZPR 和 M22ZPR 分别位于 503.0 和 486.0 m 高程,推测是由于下部坡体产生横向裂缝导致上部坡体位移速率增大。2019 年 4—7 月,M16ZPR(20~30 m 深度区间)位移速率呈波动变化,期间边坡岩体出现松弛变形,沿断层 fz15 一线出现喷混凝土裂缝。因此,边坡爆破开挖和岩体松弛变形是导致边坡位移速率突增的主要影响因素。通过对比 3 个测点的位移速率可以看出,爆破振动对多点位移计 M18ZPR(20~30 m 深度区间)和 M22ZPR(10~25 m 深度区间)的影响显著;M16ZPR(20~30 m 深度区间)主要受岩体松弛变形的影响,其位移速率呈小幅度波动变化。

3.2 多点位移计测点位移特征值变化规律分析

图 12 为多点位移计 M18ZPR、M22ZPR 和 M16ZPR 的不同深度区间位移特征值变化规律。

由图 12 可以看出,M18ZPR 的 20~30 m 深度区间边坡位移最大值和最大年均值均超过 80 mm,表明边坡主要变形部位位于 20~30 m 深度的深部岩体。由前文分析可知,M16ZPR 位于 IV 区边坡下部,变形主要受结构面 fz15 控制;M18ZPR、M22ZPR 位于 I 区边坡中下部,变形主要受结构面 fz39 和 L920 控制。由于上述软弱结构面的存在,导致多点

位移计埋设部位的岩体稳定性较差,受爆破开挖的扰动更大,故上述几支多点位移计在某个深度区间内的位移明显大于其他区段。

3.3 边坡位移空间变化规律分析

选取2019年3月2日、2019年12月5日为典型日,绘制边坡多点位移计测点累计位移等值线图,如图13所示。

由图13可以看出,边坡主要变形部位集中在I区边坡下部和IV区边坡坡脚处,整体来看,I区边坡变形明显大于II~IV区边坡。从开挖进度与坡体变形发展情况来看,I区边坡爆破开挖引起的岩体变

形显著,坡体的变形发展与施工过程有直接关系。

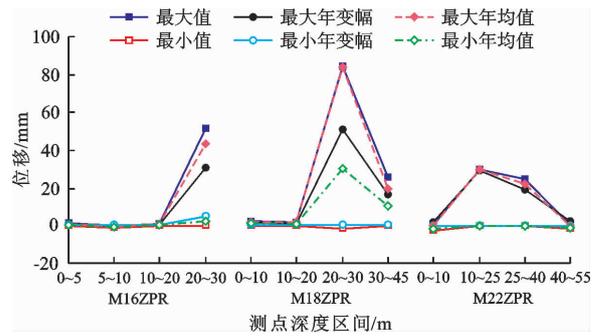


图12 3个多点位移计不同深度区间位移特征值变化规律

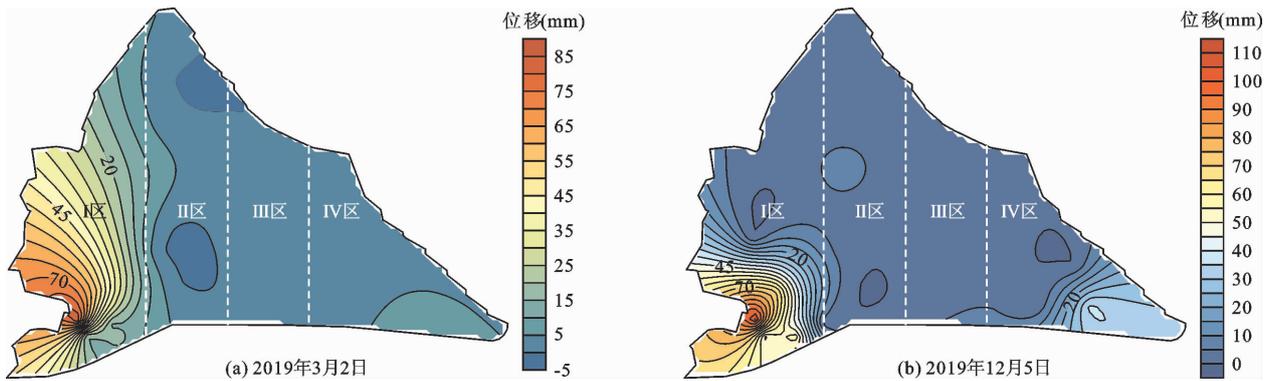


图13 典型日边坡多点位移计测点累计位移等值线

4 讨论

黄金峡水利枢纽工程左岸边坡岩体的变形主要表现为结构面变形,坡体主变形区由fz39、L920、fz15等大型结构面的张开或错动变形所导致。爆破是岩质边坡开挖的主要方式^[23],施工期爆破振动加速了大型结构面的变形,期间多点位移计测值基本呈台阶状跳跃增长,并且每一次大的爆破都会造成坡体位移速率突增。从地质勘察资料来看,边坡深层变形区域与上述揭露的大型结构面位置吻合,并且大多位于20~30 m深度的深部岩体。根据多点位移计累计位移的空间变化规律可以看出,主变形区位于I区边坡下部和IV区边坡坡

脚部位,其余区域未出现较大变形,表明变形部位与结构面位置密切相关,这与施工期乌东德水电站左岸尾水边坡变形特征相似。在多点位移计开始监测之前,设计单位已采取混凝土格构梁、混凝土锚喷支护等加固措施,故边坡表面位移量较小而深部位移较大,与岩滩水电扩建工程进水口边坡、糯扎渡水电站枢纽区边坡等典型边坡工程相比,多点位移计监测成果并未呈现出岩体变形的一般规律。

为评价黄金峡水利枢纽工程左岸边坡位移量是否属于正常范围,本文对国内外同类边坡工程进行了统计和对比,表2为国内外多个同类工程高边坡的变形情况^[15-16, 24-28]。

表2 若干同类工程边坡变形量级对比

工程名称	国家	开挖高度/m	边坡变形情况
黄金峡水利枢纽工程左岸边坡	中国	300	多点位移计区间位移最大值为84.55 mm
乌东德水电站左岸尾水边坡	中国	110	向坡外的表面位移最大为104.00 mm,多点位移计孔口位移最大为74.30 mm
三峡工程五级船闸高边坡	中国	170	南坡向闸室的最大位移为74.27 mm
锦屏一级水电站左岸高边坡	中国	530	向临空面的最大累积位移为205 mm
糯扎渡水电站消力塘边坡	中国	235	表面位移最大值为72.90 mm
黄登水电站左岸缆机边坡	中国	150	表面位移最大值为131.80 mm,深部变形最大值为47.80 mm
黄金坪水电站进水口边坡	中国	205	多点位移计孔口累计最大位移为79.06 mm
阿莱瓦水电站厂房后边坡	巴基斯坦	163	多点位移计累计位移最大值为103.38 mm

由表2可以看出,国内外同类工程边坡位移量基本在70~150 mm之间。黄金峡水利枢纽工程左岸边坡区间位移最大值为84.55 mm,与其他同类工程相比目前位移量级处于正常范围。

5 结论

以黄金峡水利枢纽工程左岸边坡为例,结合多点位移计监测成果、地质资料及施工过程对边坡变形特征进行了综合分析,主要可以得出如下结论:

(1)边坡变形受爆破开挖、软弱结构面、岩体松弛变形、工程区降雨等多种因素的影响,其中爆破开挖和软弱结构面是导致坡体变形的主要因素。

(2) I区边坡变形主要发生在开挖爆破阶段,施工期间多点位移计测值基本呈阶梯状跳跃增长, I区位移突变时间点与爆破开挖时间点相吻合、坡体主要变形部位与结构面fz39和L920位置吻合,故I区边坡变形主要受结构面fz39和L920控制。II~IV区边坡整体稳定,局部岩体存在松弛变形,主要变形部位集中在IV区边坡坡脚部位,总体上表现为边坡因断层fz15被开挖而导致断层带及上盘岩体局部卸荷和应力调整。故结构面fz15是控制IV区边坡岩体变形的关键因素。

(3)在边坡多点位移计开始监测之前,设计单位已采取混凝土格构梁、混凝土锚喷支护等加固措施,故边坡表面位移量较小而深部位移量较大,多点位移计监测成果并未呈现出岩体变形的一般规律。

(4)随着边坡上部削坡减载、下部大吨位锚索、抗剪洞和排水洞等综合处理措施的逐步实施,边坡变形已基本趋于稳定。多点位移计测值显示局部区域深层岩体仍有持续变形趋势,应重点关注M22ZPR(25~40 m)、M16ZPR(20~30 m)等测点的变形情况,并加强支护和坡体内部排水措施。

参考文献:

[1] 陈波,刘庭赫,黄梓莘,等.库岸边坡运行的实时风险率量化模型和预警方法[J].水利学报,2022,53(3):333-347.

[2] 吴旭敏,杨溢,叶志程.岩土体边坡在降雨入渗作用下的稳定性及影响因素分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(5):189-199.

[3] 李险峰.三峡库区蔡坡堆积体库水位联合降雨工况下的渗流特性及边坡稳定性研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(6):194-200.

[4] DONG Kai, YANG Dewei, CHEN Jiankang, et al. Monitoring-data mechanism-driven dynamic evaluation method for slope safety[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 148:

104850.

[5] 杨杰,马春辉,程琳,等.高陡边坡变形及其对坝体安全稳定影响研究进展[J].岩土力学,2019,40(6):2341-2353+2368.

[6] 陈波,詹明强,黄梓莘.基于时空聚类挖掘的库岸边坡多测点位移监测数据约简[J].水利水运工程学报,2022(5):94-101.

[7] 刘甲奇,万磊,肖小玲,等.岩滩扩建工程进水口边坡多点位移计监测资料分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2017,39(6):20-24.

[8] 邓建华,邱山鸣,杨弘.锦屏水电站变形拉裂体施工期安全监测及分析[J].长江科学院院报,2014,31(11):177-181+188.

[9] 张顺,程辉,罗志刚.龙羊峡水电站东山嘴边坡变形机制分析[C]//中国建筑学会工程勘察分会.第十四届全国边坡工程技术大会论文集,2022.

[10] 孙鹏昌,卢文波,杨招伟,等.白鹤滩坝肩边坡开挖爆破损伤预测研究[J].水力发电学报,2022,41(10):30-41.

[11] 谭尧升,陈文夫,王克祥,等.白鹤滩坝肩边坡施工期变形规律与控制因素分析[J].中国农村水利水电,2022(4):193-200.

[12] 徐李达,李永芳,侯迪,等.夹岩水利枢纽工程左岸边坡施工期变形分析[J].水电能源科学,2022,40(6):175-178+170.

[13] 梁靖,裴向军,罗路广,等.锦屏一级水电站左岸高边坡变形监测及稳定性分析[J].水利水电技术(中英文),2021,52(4):180-185.

[14] 黄秋香,汪家林,邓建辉.基于多点位移计监测成果的坡体变形特征分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2667-2673.

[15] 彭绍才,郑栋,韦国书.施工期乌东德水电站左岸尾水边坡实测变形及支护受力特性[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(2):131-143.

[16] FAN Qixiang, ZHU Hongbing, GENG Jun. Monitoring result analyses of high slope of five-step ship lock in the Three Gorges Project[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(2): 199-206.

[17] ZHANG Xu, ZHOU Shaowu, ZHANG Cheng, et al. Deformation and reinforcement monitoring analysis of tail water outlet slope in a hydropower station[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019.

[18] SONG Danqing, CHEN Jundong, CAI Jianhua. Deformation monitoring of rock slope with weak bedding structural plane subject to tunnel excavation[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11: 251.

[19] WANG Yaqiong, ZHANG Shaobing, CHEN Longlong, et al. Field monitoring on deformation of high rock slope

(下转第224页)

- 795 - 807.
- [24] 贾钰莹,刘欣芳,刘晓丽,等. 辽宁省玉米品种耐旱性评价及耐旱指标鉴定[J]. 种子,2020,39(8):131 - 136.
- [25] AVRAMOVA V, NAGELA K A, ABDELGAWAD H, et al. Screening for drought tolerance of maize hybrids by multi-scale analysis of root and shoot traits at the seedling stage[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2016, 67(8): 2453 - 2466.
- [26] 马国胜,薛吉全,路海东. 不同类型饲用玉米品种干物质的积累与运转规律研究[J]. 玉米科学,2005,13(4):66 - 69.
- [27] 朱韵哲,马国胜,张仁和,等. 不同产量水平玉米品种光合产物的积累与分配比较[J]. 西北农业学报,2013,22(5):20 - 24.
- [28] 白向历,孙世贤,杨国航,等. 不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响[J]. 玉米科学,2009,17(2):60 - 63.
- [29] 赵辉,庞桂斌,丛鑫,等. 不同灌溉定额下施加生物炭对夏玉米光合特性及产量的影响[J]. 节水灌溉,2022(8):16 - 23.
- [30] 张银锁,宇振荣,DRIESSEN P M. 环境条件和栽培管理对夏玉米干物质积累、分配及转移的试验研究[J]. 作物学报,2002,28(1):104 - 109.
- [31] 李文娟,陈桂平,柴强. 交替灌溉小麦间作玉米干物质的累积与分配规律研究[J]. 甘肃农业大学学报,2014,49(4):40 - 46.
- [32] 马玉平,孙琳丽,马晓群. 黄淮海地区夏玉米对干旱和涝渍的生理生态反应[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(4):85 - 93.
- [33] 孟凡超,刘明,于吉琳,等. 水分胁迫对玉米产量及干物质分配的影响[J]. 江苏农业科学,2011,39(3):96 - 98.
- [34] 谭方颖,李昊,王建林,等. 华北夏玉米干物质分配系数对干旱胁迫的响应[J]. 应用生态学报,2019,30(1):217 - 223.
- [35] 于志青,于卫卫,谭秀山,等. 水分胁迫对夏玉米干物质积累与分配的影响[J]. 华北农学报,2009,24(S2):149 - 154.
- [36] JONES C A, KINIRY J R, FARMER D B, et al. CERES - Maize: a simulation model of maize growth and development [M]. San Marcos: Texas A and M University Press, 1985.
- [37] 豆静静,郑志伟,王仰仁,等. 水分胁迫下冬小麦光合产物分配与转移的模拟研究[J]. 节水灌溉,2022(5):7 - 13.

(上接第207页)

- during highway construction: a case study in Wenzhou, China [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2019, 15(12): 155014771989595.
- [20] YANG Panpan, WANG Nianqin, JIANG Zhongyan, et al. Overview of slope monitoring technology [C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019.
- [21] LIU Xin, SHEN Yupeng, ZHANG Peng, et al. Deformation characteristics of anti-dip rock slope controlled by discontinuities: a case study [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 80: 905 - 915.
- [22] 曹双利,胡中平,丁秀丽,等. 黄金峡水利枢纽大坝左岸I区结构面控制型边坡变形机制及稳定性分析[J]. 水电能源科学,2021,39(2):114 - 118.
- [23] DENG Ke, CHEN Ming. Blasting excavation and stability control technology for ultra-high steep rock slope of hydro-power engineering in China: a review [J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2020, 54(2): 92 - 106.
- [24] 陈晓鹏,陈太乙. 锦屏一级水电站坝肩边坡及谷幅变形分析[J]. 四川水力发电,2022,41(1):99 - 104.
- [25] 韦庆华,余金凤,刘俊宏,等. 水电站厂房高后边坡施工期安全监测及成果分析[J]. 企业科技与发展,2020(7):112 - 114.
- [26] 刘伟,邹青. 糯扎渡水电站枢纽区边坡监测成果分析[J]. 水电与新能源,2020,34(3):5 - 8.
- [27] 郭严,王利鸿,邹兴宏. 黄登水电站左岸缆机边坡变形监测与成果分析[J]. 云南水力发电,2016,32(5):66 - 69.
- [28] 龚静,袁有仓,董瑜斐. 基于多点位移计和外部变形观测墩监测成果的高边坡开挖期变形深度分析[J]. 四川水力发电,2013,32(3):164 - 168.