

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.

LIANG Jing, PEI Xiangjun, LUO Luguang, et al. Deformation monitoring and stability analysis of left bank highslope at Jinping I Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(4): 180-185.

锦屏一级水电站左岸高边坡变形监测及稳定性分析

梁靖¹, 裴向军¹, 罗路广¹, 刘明¹, 杨静熙²

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

2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要: 受复杂地质条件和高陡地形等因素影响, 锦屏一级水电站左岸高边坡在水库蓄水运行阶段仍出现持续缓慢变形, 其稳定性问题受到高度关注。为此, 基于现场调查与最新监测结果数据, 从监测反馈和地质角度揭示了边坡变形破坏特征及机制, 并以此分析边坡稳定性。分析结果表明: 左岸边坡的表观与深部累计位移变形仍呈现缓慢增长趋势, 但历经变形调整后速率有一定减缓, 可将变形机制归纳为“上部持续倾倒-深部张裂-表部锁固体松弛-下部与坝体协调”; 目前左岸高边坡受库水位影响而变形仍未收敛, 但变形较为平稳且无异常现象, 满足安全控制标准; 由于边坡长期变形发展趋势的影响因素复杂, 尚存不确定性, 仍需持续监测以及进一步研究。

关键词: 锦屏一级水电站; 高边坡; 变形监测; 稳定性分析

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.04.019

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV 223.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)04-0180-06



听语音
聊科研

Deformation monitoring and stability analysis of left bank highslope at Jinping I Hydropower Station

LIANG Jing¹, PEI Xiangjun¹, LUO Luguang¹, LIU Ming¹, YANG Jingxi²

(1. State Key Laboratory of Geo-Hazards Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, Sichuan, China)

Abstract: Under the influences from the factors, i. e. complicated geological condition, high-steep terrain, etc., the continuous deformation of the left bank at Jinping I Hydropower Station still occurs during the impounding and operation phase, and then its stability is highly concerned. Therefore, the characteristics and mechanism of the deformation and failure of the slope are revealed herein from the aspects of the monitoring feedback and the geological condition therein based on the in situ investigation and the latest monitoring data, from which the slope stability is analyzed. The analysis result shows that the apparently and deeply accumulated displacement deformation of the left bank slope still exhibits a slowly increasing trend, but the deformation rate is slowed to a certain extent after experiencing the relevant deformation adjustment, while the deformation mechanism can be summarized as “continuous toppling of the upper part — deeply tension-cracking — surface locking solid body relaxation — the coordination between the lower part and the dam body”. At present, the deformation is still not converged under the influence of reservoir water, but it becomes relatively stable without any abnormal phenomena, thus can meet the relevant safety control standards. As the influencing factors of the long-term deformation development trend of the slope are complicated with some uncertainties, the relevant

收稿日期: 2020-08-06

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401908); 国家创新性集体基金(41521002); 川藏铁路重大工程风险识别与对策研究项目(2019YFG0460)

作者简介: 梁靖(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害评价与预测研究。E-mail: 370918252@qq.com

通信作者: 裴向军(1970—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 从事地质灾害、工程边坡稳定性评价与工程治理研究。E-mail: peixj0119@tom.com

continuous monitoring and further study concerned are still necessary to be carried out.

Keywords: Jinping I Hydropower Station; high slope; deformation monitoring; stability analysis

1 工程概况

锦屏一级水电站为雅砻江中下游的控制性巨型水库梯级, 具有边坡开挖高、规模大以及稳定条件复杂等特点。左岸坝肩岩层产状为 $N14^{\circ} \sim 36^{\circ}E/NW \angle 31^{\circ} \sim 46^{\circ}$, 属典型的反倾坡体。坝区出露杂谷脑组 (T_{2-3Z}) 灰白色、灰黑色大理岩与千板岩, 岩层厚度变化大、变形强。边坡开挖揭露有 f_2 、 f_5 、 f_8 、 f_{42-9} 等断层、煌斑岩脉 (X)、深部拉裂结构面及长大陡倾溶蚀裂隙。由此可见, 左岸边坡不良地质体发育, 有必要对其变形及稳定性进行研究。长期以来, 大型水电工程高边坡的稳定性评价主要以理论分析、专家评估、监测系统及数值模拟为主^[1-3]。赵明华等^[4]对小湾电站高边坡监测与分析, 揭示了边坡变形原因及稳定性发展趋势。张世殊等^[5]通过归纳溪洛渡水电站库岸边坡的倾倒变形体特征与蓄水之间的相关性, 提出了其在蓄水作用下的进一步发展演化机制。朱继良等^[6]研究发现高边坡开挖与变形具有同步性, 并将变形可归纳为: 浅表松弛型、协调渐变型和回弹错动型。同时, 孙元等^[7]也以某城区开挖支护边坡为例,

结合监测数据预测了其变形趋势。裴向军^[8]、黄志鹏等^[9]研究了锦屏一级水电站左岸边坡开挖与蓄水期间的变形响应特征。而李程等^[10]将三维电子罗盘测量法应用于边坡变形监测, 为研究边坡变形及破坏模式提供了新思路。此外, 沈辉等^[11]基于非线性有限元分析, 对蓄水后高边坡变形及稳定性开展了数值模拟分析。

本文基于锦屏一级电站已有的各阶段研究成果, 结合最新监测资料收集、变形调查以及针对性的排查分析等手段, 深入研究左岸高边坡的影响因素、变形特征及机理等, 并宏观定性评价边坡稳定性, 为复杂坝肩加固处理效果评价、工程运行阶段高边坡稳定性及大坝安全评估提供基础资料和建议。

2 监测布置

锦屏一级左岸边坡开挖以来, 变形速率虽逐渐减缓, 但监测显示浅表与深部的变形仍未收敛。本文选取截止 2020 年 2 月的表观变形监测与深部拉裂监测进行变形与稳定性分析。如图 1 所示, 表观变形监测共设立 80 个观测墩, 可分别监测水平和垂向位移变



图 1 左岸边坡分区及表观监测布置

Fig. 1 Left bank slope zoning and apparent monitoring layout

形。此外, 根据坡体结构及变形特征将左岸边坡划分为 6 个宏观变形区, 此处选对坝肩影响较大的 1—4 区监测成果数据进行分析。

深部变形监测的目的是分析深部拉裂缝在边坡开挖和蓄水运行期的变形响应, 并用于评价边坡的安全稳定性。左岸边坡布设深部石墨杆收敛计监测仪器的平洞有 PD42、PD44、PD54 及 1915 mL2C 排水洞, 此处选取数据采集较完整的 PD44、PD42 进行分析(见图 2), 布置测点共计 33 个, 其中 PD44 有 13 个, PD42 有 20 个, 监测点主要记录坡内横河向(水平)位移。

3 稳定性监测成果分析

3.1 表观变形监测

如图 3(a) 所示, 变形 1 区总位移累计曲线显示, 自蓄水以来的位移增长较为显著, 最新监测数据表明, 变形量值仍呈缓慢增长趋势, 最大累计位移可达 220 mm, 最小为 50 mm。同时, 蓄水对总位移曲线的变形趋势影响较小, 仅在增长过程中表现出一定程度波动性, 而在运行期后其波动幅度越来越小, 变形速率也有不断减缓(见表 1)。进一步深入分析可知, 该区总体以下沉变形为主, 呈现上部变形大、下部变形小的特点, 这也与上部倾倒变形体的变形规律吻合。

如图 3(b) 所示, 2 区变形整体小于 1 区, 但蓄水后仍以下沉变形为主, 局部呈上抬变形, 且与库水升降具有较强相关性, 其变形累计位移最大约 105 mm, 曲线在增长的同时呈现出一定程度的波动, 并同水位升降保持着同步性。在经历初蓄期增长后, 运行期的变形速率有所降低(见表 1), 运行 4 期平均

速率为 0.38 mm/月。细化来看, 运行期库水位下降阶段变形速率较大, 而上升阶段则相对较小。

如图 3(c) 所示, 变形 3 区总体以上游偏河床沉降变形为主, 变形比高位倾倒变形区要小, 受库水位升降的影响较明显, 该区的总位移累计变化集中在 70~120 mm, 呈现缓慢增长趋势, 但随时间增长也表现出一定波动性, 整体变形速率呈现持续降低(见表 1)。

如图 3(d) 所示, 4 区变形相对最弱, 该区的总位移累计变形集中在 37~74 mm, 变形速率仅为 0.21 mm/月(见表 1)。该区运行期总体较平稳, 体现出“波动-调整”的特征, 但总位移调整幅度远小于水平位移, 说明其水平向位移受库水位波动影响较大。进一步分析监测资料发现, 该区蓄水期后高高程部位的竖向变形以沉降为主, 而低高程部位主要为抬升。

3.2 深部变形监测

对于布置在平洞内的深部变形监测点, 统计各测点的累计变形监测成果如图 4 所示。由图 4 可见, PD42 与 PD44 平洞反映的深部变形以水平方向位移为主, 整体位移矢量方向均由坡内指向坡外。从揭示的深部变形与蓄水动态关系来看, 左岸平洞 PD42 累计位移量值达到 42 mm [见图 4(a)], 其中上支洞变形量较大, 下支洞在蓄水后的变形已趋于收敛, 除初蓄期有变形激增外, 运行期内影响均不显著。PD44 受煌斑岩脉 X、断层 f42-9 以及坡体内部系列小断层和深拉裂缝影响, 累计位移量值最大达到 85 mm [见图 4(b)], 平洞 122 m 以外洞段对首次蓄水响应明显, 对运营期蓄水还处于适应调整阶段。

进一步分析可知: ①初期蓄水阶段, 特别是高水位首次降低时引起的变形明显突跃; ②对低高程部

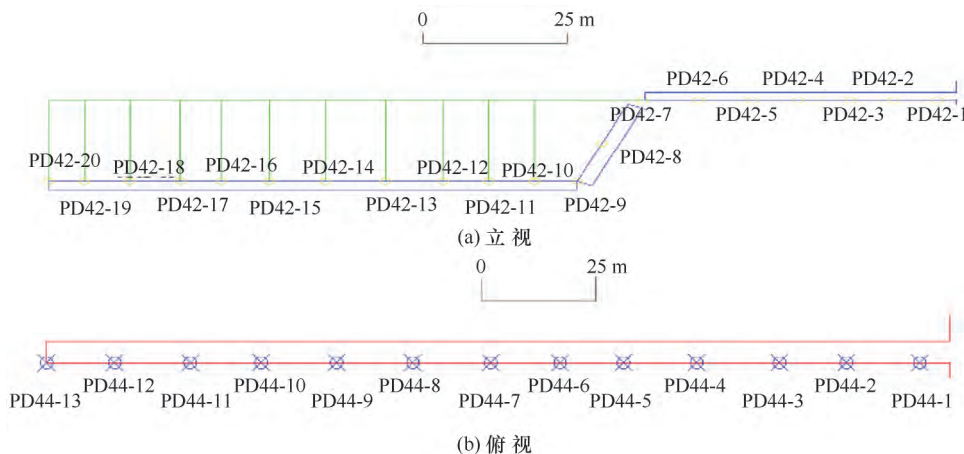


图 2 边坡深部变形监测布置

Fig. 2 Deep deformation monitoring layout

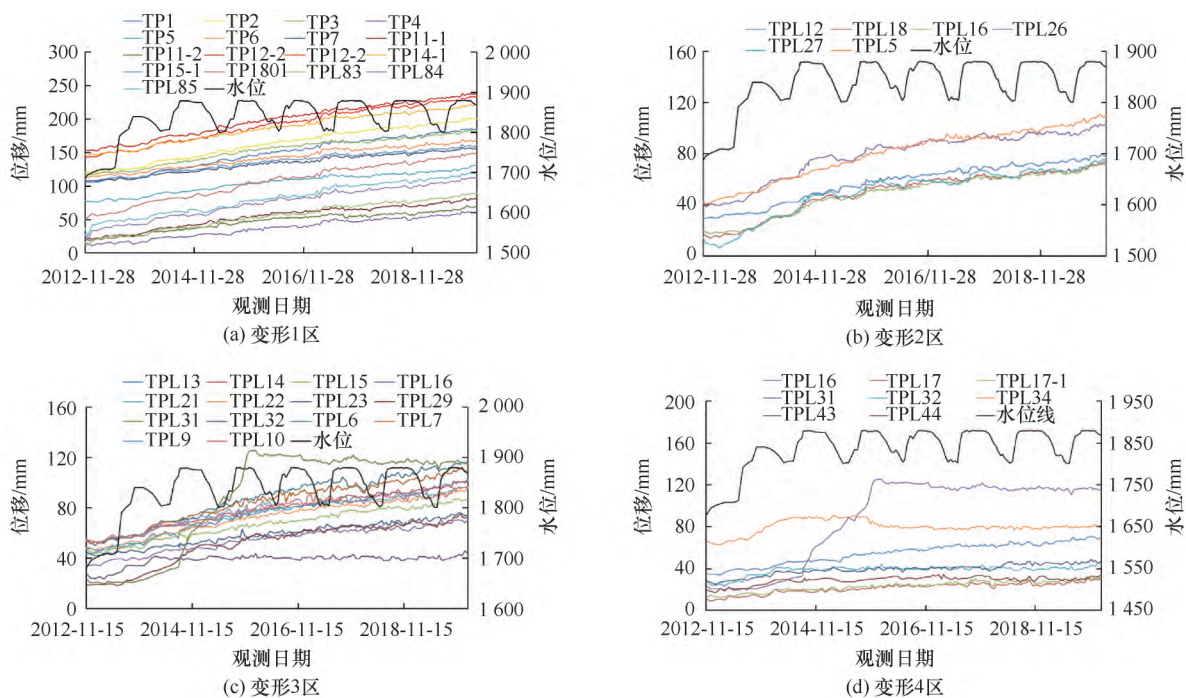


图3 表观变形区总位移累计曲线

Fig. 3 Cumulative total displacement curve of apparent deformation area

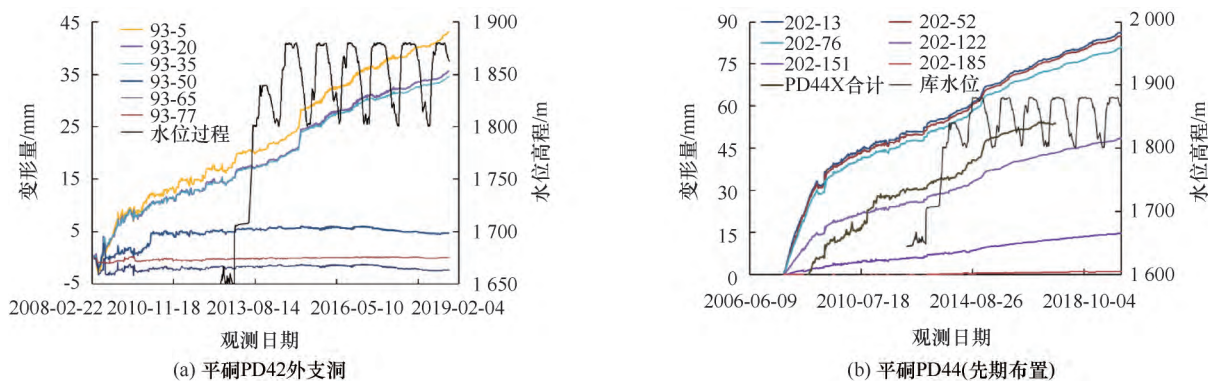


图4 平洞测点相对洞底的累计位移曲线

Fig. 4 Cumulative displacement curve of adit

表1 变形区不同时期平均位移速率变化

Table 1 The average displacement rate in different periods in the deformation region

变形分区	不同时期平均位移速率/mm·月 ⁻¹				
	初蓄期	运行1期	运行2期	运行3期	运行4期
1区	1.07	0.84	0.69	0.67	0.6
2区	0.98	0.67	0.63	0.44	0.38
3区	0.72	0.67	0.62	0.46	0.36
4区	0.24	0.55	0.57	0.45	0.21

注: 初蓄期为2014-08-24—2015-09-28; 运行1期为2015-09-29—2016-09-28; 运行2期为2016-09-29—2017-09-28; 运行3期为2017-09-29—2018-09-28; 运行4期为2018-09-29—2019-09-28

位, 库水影响体现在高水位时的位移量增加明显;

③对高高程平洞, 运行期水位的季节性变化对其变形影响明显减弱。

综合表观与深部的变形监测成果及特点, 可知左岸边坡在现阶段的变形仍在缓慢增长, 局部变形态势还未收敛。经过初期蓄水的变形调整后, 运行期变形速率呈现一定缓减。可以看出, 左岸边坡的稳定性仍需基于监测数据从机制与稳定性来深入分析。

4 变形机制与稳定性分析

4.1 变形破坏模式及机制

考虑到边坡地质结构、变形分区特征以及蓄水等因素影响, 认为左岸边坡的长期变形总体属于蓄水动

态变化与工程结构荷载下产生,受“反倾层状结构+深部裂缝+外倾缓带分割”控制的变形调整响应。结合各区变形特征,将变形模式概括为“上部持续倾倒-深部张裂-表部锁固体松弛-下部与坝体协调”,并初步归纳出变形机制:

(1) 上部持续倾倒主要是软硬互层的岩性组合、陡倾的反向坡体结构及开口线以上浅部坡体卸荷所共同导致,2区是受开挖卸荷以及 f5、f8 断层所控制。同时,库水位升降又使得岩体及软弱带不断发生饱水和干湿循环,导致力学性质弱化,进而持续引发倾倒变形。

(2) 深部张裂主要为 f42-9 断层上盘、煌斑岩脉 X 深部裂缝的持续张拉变形,加之蓄水后软弱层带软化导致 3 区深部变形持续增加。此外,库水位下降导致深部累计位移曲线有较大幅度的抬升,初步分析为坡体内部受到向外的渗透压力而产生水平向位移,且在软弱结构以及深拉裂缝处变形更为明显。

(3) 表部锚墙的整体锁固作用使得回弹变形不断向深部传递,同时锁固的部分坡体浅表也会整体性侧向松弛变形,主要表现为间次性地向外鼓胀、岩脉或小断层等陡倾结构面附近呈现集中性拉裂。

(4) 下部与坝体协调一是指边坡自身变形对大坝的加载作用,二是指坝肩推力对边坡的反作用。这种协调是动态发展的,即有利于坝体应力改善,也会威胁大坝安全。主要表现为在库水位抬升产生的推力使得部分坡体压密与抬升,下降时推力减小又导致坝体应力加载状况改变,呈现出随水位动态变化的趋势,这也是 4 区的变形机制所在。

4.2 稳定性评价

从宏观上看,左岸开挖边坡运行期的持续变形是在蓄水新常态下由特定地质结构控制的一种自适应调整变形。开口线以上高位倾倒变形区(1区)变形尚未收敛,拱肩槽上游开挖边坡(2区)仍处于变形调整期,潜在“大块体”区域(3区)的表观、多点位移计等监测成果显示无整体趋向的滑移现象,坝肩边坡、拱坝抗力体边坡(4区)则处于相对稳定状态。此外,抗剪洞与围岩之间变形协调过程已近完成,但 f42-9 断层软弱带的垂向压缩-侧向扩容过程受边坡与坝体协调作用影响,存在周期性活动,这也是深部持续变形的主要原因。

实际监测成果与理论分析表明,锦屏一级左岸高边坡受库水位影响而处于变形调整期,边坡岩体继续向坡外变形,尚未收敛,但变形较为平缓,且无异常变形情况,变形量级满足安全控制标准,边坡整体较

稳定。

5 结 论

针对锦屏一级水电站左岸高边坡的变形与稳定性问题,本文结合最新变形监测成果从地质角度进行了宏观定性评价。结果表明:

(1) 左岸边坡受库水位影响仍处于变形调整期。其中 1 区、2 区、3 区及深部平洞变形速率虽处于较低水平,但累积位移仍缓慢增长,无明显收敛趋势。与此相反,4 区变形速率则趋于平稳,整体较为稳定。

(2) 左岸边坡的长期潜在破坏模式主要有三类,即大块体的整体性块体失稳、沿主控性底滑面的剪切失稳及部分区域剪断岩体而呈圆弧式的滑动失稳。并将变形机制概括为“上部持续倾倒-深部张裂-表部锁固体松弛-下部与坝体协调”。

(3) 从整体变形上看,左岸边坡受库水位影响仍处于蓄水运营调整阶段,变形尚未收敛。边坡岩体持续变形,但变形较为平稳且无异常现象,现阶段左岸边坡岩体表面变形总体稳定,但仍需持续监测与关注。

参考文献(References):

- [1] 吕建红,袁宝远,杨志法,等. 边坡监测与快速反馈分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),1999,27(6): 98-102.
LU Jianhong, YUAN Baoyuan, YANG Zhifa, et al. Study on slope monitoring and quick feedback[J]. Journal of Hohai University (natural science edition), 1999, 27(6): 98-102.
- [2] 王成虎,何满潮,郭啟良. 水电站高边坡变形及强度稳定性的系统分析研究[J]. 岩土力学,2007,28(S1): 581-585.
WANG Chenghu, HE Manchao, GUO Qiliang. Systematic analysis of deformation and strength stability of high slope of hydropower station [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 581-585.
- [3] SUN Yuke, LEE Jianguo. Engineering geological studies of the stability of slope in rock[J]. Chinese Journal of Geology(Scientia Geologica Sinica), 1965(4): 330-352.
- [4] 赵明华,刘小平,冯汉斌,等. 小湾电站高边坡的稳定性监测及分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S1): 2746-2750.
ZHAO Minghua, LIU Xiaoping, FENG Hanbin, et al. Monitoring and analysis of a high-slope stability in Xiaowan Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2746-2750.
- [5] 张世殊,裴向军,母剑桥,等. 溪洛渡水库星光三组倾倒变形体在水库蓄水作用下发展演化机制分析[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S2): 4091-4098.
ZHANG Shishu, PEI Xiangjun, MOTHER Cambridge, et al. Evolution mechanisms analysis of Xingguangsanzu topping deformation bodies under condition of impound water of t Xiluodu Hydropower

- Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4091-4098.
- [6] 朱继良, 黄润秋, 张诗媛, 等. 某大型水电站高位边坡开挖的变形响应研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 784-791.
ZHU Jiliang, HUANG Runqiu, ZHANG Shiyuan, et al. Deformation response of high-order slope excavation of a large hydroelectric station in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 784-791.
- [7] 孙元, 田维强, 林德洪, 等. 开挖边坡变形监测及稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(9): 81-87.
SUN Yuan, TIAN Weiqiang, LIN Dehong, et al. Deformation monitoring and stability analysis of excavation slope [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2019, 38(9): 81-87.
- [8] 裴向军, 何如许, 朱利君, 等. 锦屏一级水电站左岸边坡蓄水变形响应研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(10): 139-147.
PEI Xiangjun, HE Ruxu, ZHU Lijun, et al. Research on the deformation response of left slope of Jinping I Hydropower Station influenced by impoundment [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(10): 139-147.
- [9] 黄志鹏, 董燕军, 廖年春, 等. 锦屏一级水电站左岸开挖高边坡变形监测分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(S2): 235-242.
HUANG Zhipeng, DONG Yanjun, LIAO Nianchun, et al. Deformation monitoring and analysis of left bank high slope at Jinping I Hydropower Station [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 235-242.
- [10] 李程, 宋胜武, 陈卫东, 等. 基于三维电子罗盘的边坡变形监测技术研究: 以溪洛渡水电站 179 库区岸坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 101-110.
Li Cheng, Song Shengwu, Chen Weidong, et al. A monitoring method of slope deformation using three-dimensional electronic compass: an example of Xiluodu Reservoir bank [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1): 101-110.
- [11] 沈辉, 罗先启, 李野, 等. 乌东德拱坝坝肩三维抗滑稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 1026-1033.
SHEN Hui, LUO Xianqi, LI Ye, et al. Three-dimensional stability analysis of the dam abutment of Wudengdong Arch Dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 1026-1033.

(责任编辑 陈小敏)