

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2020.0083

徐岗,裴向军,刘明,等.锦屏一级水电站库区谷幅时变特征及因素[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(4):159-166,177. XU G, PEI X J, LIU M, et al. Time-varying characteristics and factors analysis of the valley area of Jinping I Hydropower Station[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 159-166, 177. (in Chinese)

锦屏一级水电站库区谷幅时变特征及因素

徐岗¹,裴向军¹,刘明¹,何如许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, 成都 610059;
2. 中国电建集团 成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072)

摘要:锦屏一级水电站为世界最高的双曲拱坝,为了保证坝体的安全运行,以库区谷幅伸缩变形为研究对象,分别分析谷幅在前期开挖阶段、初期蓄水阶段和长期蓄水阶段的伸缩变形特征以及主要影响因素。研究表明:在前期开挖阶段,谷幅处于收缩变形加速期,变形速率在每月 -0.65 mm左右,变形量达到 40 mm;初期蓄水阶段,谷幅的收缩变形速率在每月 -0.5 mm左右,变形速率有减小的趋势;长期蓄水阶段,库区蓄水水位在 $1\ 880$ m— $1\ 800$ m— $1\ 880$ m循环了4个周期,从前2个周期可以看出库区谷幅的伸缩变形与水位的变化表现出一定的滞后特征;随着蓄水时间的增长,谷幅逐渐只产生微量的收缩-拉伸变形。分析谷幅变形的主要影响因素可以发现,在前期开挖阶段谷幅变形主要由开挖后的卸荷回弹造成,后期蓄水阶段谷幅伸缩变形主要由左岸坡体的结构变形所产生。

关键词:锦屏一级水电站;库区谷幅;谷幅测线;收缩变形

中图分类号:TV221.1 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Time-varying characteristics and factors analysis of the valley area of Jinping I Hydropower Station

XU Gang¹, PEI Xiangjun¹, LIU Ming¹, HE Ruxu¹, YANG Jingxi²

(1. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chengdu Engineering Corporation Limited, Power China, Chengdu 610072, China)

Abstract: Jinping I Hydropower Station is a world's highest double-curved arch dam. In order to ensure the safe operation of the dam body, the deformation of the valley area was taken as a research objective. The telescopic deformation characteristics and main influencing factors of valley amplitude in the early excavation stage, the initial water storage stage and the long-term water storage stage were analyzed. The current research indicated that: in the early stage of excavation, the grain width was in the shrinkage deformation during the accelerated period, the deformation rate was about -0.65 mm/m, while the deformation amount was 40 mm, respectively; in the initial stage of water storage, the shrinkage deformation rate of the grain width was about -0.5 mm/m, and the deformation rate had a tendency to decrease; during the long-term water storage stage, the storage area in the reservoir area had experienced four cycles between $1\ 880$ m— $1\ 800$ m— $1\ 880$ m, during the first two periods of the variation characteristics, the deformation of the valley area showed a certain hysteresis characteristic to the change of water level; with the increase of water storage time, the grain width gradually and experienced a slight shrinkage-stretching phenomenon, while the overall deformation value did not greatly change. Preliminary analysis of the main influencing factors of grain deformation could be found that the deformation of the grain in the early excavation stage was mainly caused by the unloading rebound

收稿日期:2019-06-27 修回日期:2019-08-28 网络出版时间:2019-09-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190911.1625.008.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401908);国家创新性集体基金(41521002)

作者简介:徐岗(1992—),男,四川眉山人,主要从事地质灾害评价与预测研究。E-mail:1193645065@qq.com

通信作者:裴向军(1970—),男,四川成都人,教授,博士生导师,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

after excavation. In the later stage of water storage, the valley amplitude telescopic deformation was mainly caused by the structural deformation of the left bank slope.

Key words: Jinping I Hydropower Station; valley scale of reservoir area; valley line; shrinkage deformation

社会的迅速发展对于资源的需求变得更加紧张,为合理利用我国水资源,越来越多的大型水电站应运而生。水电站的修建势必对于区域内的地下水分布产生一定的影响,进而引起库区边坡滑坡、水库诱发地震以及水岩作用造成的溃坝等一系列地质灾害,一直以来受到工程和科研人员的重视^[1]。

库区蓄水引起的两岸坡体产生相对位移^[2]即谷幅的伸缩变形是大坝安全预防的研究重点^[3-4]。国内外对于谷幅变形而造成的大坝安全隐患事件都有相关报道,一些学者^[5-7]也针对特定的大坝安全进行了分析,如:瑞士的 Zeuzier 双曲拱坝^[8-9],库区蓄水后因坝肩边坡的挤压作用导致坝体向上游变形量达到 120 mm 左右;意大利的 Vaiont 水库^[10]库区蓄水后引起坝肩左岸边坡的大规模滑坡,造成 250 m 的涌浪,使得上游村庄受灾;国内的溪洛渡水电站^[11-14]谷幅测线监测数据表明坝体上下游均有较明显的收缩变形,主要原因是库区蓄水引起的区域内水文地质条件的改变,进而造成的库岸变形。由此可见,谷幅的伸缩变形特征对于库区的安全监测有着重要的反馈作用。

本文通过锦屏一级水电站库区的变形监测数据,结合坡体的结构特征,分析前期坝址区开挖引起的谷幅变形特征和库区蓄水后谷幅的变形特征及影响因素,总结锦屏一级水电站蓄水后谷幅的伸缩变形规律,为坝体的安全监测提供参考依据。

1 工程概况

锦屏一级水电站位于雅砻江上游区域,未蓄水前坝区河面高程在 1 640 m 左右,左岸坡体为反向坡,右岸为顺向坡,坡体最大开挖高度达 530 m,库区坝体为混凝土双曲拱坝,坝高达 305 m,其正常蓄水水位线到 1 880 m 左右,蓄水落差达 240 m,是三峡大坝蓄水高度的 1.5 倍。大规模的蓄水改变了区域的地下水分布,对部分岩土体产生影响,为了保证库区防洪安全以及满足发电需求,库区水位会在 1 800~1 880 m 变化,水位变化幅度达 80 m。

1.1 工程地质条件

库区位于雅砻江大拐弯的锦屏山断裂西侧 2 km,根据开挖出露判别库区岩性主要为大理岩

(含绿片岩条带)与变质砂板岩相组合的岩层,其中:大理岩为灰-白色的碳酸盐岩、岩块-砾屑碳酸盐岩夹玄武质凝灰岩、含凝灰质和铁泥质、泥云质灰岩透镜状层,层厚一般在 230~780 m;变质砂板岩层厚在 144~430 m,主要由钙泥质、炭质、铁泥质的细砂岩-粉砂岩-泥岩组成,总体呈现深灰色-灰黑色。右岸为顺向坡,高程 1 870 m 以下主要为厚层状大理岩组成,岩体质量在 II 级,处于较好状态;高程 1 870 m 以上岩体主要由中厚层大理岩组成,岩体质量基本处于 III 级,但是均一性较差。左岸为反向坡:高程 1 880 m 以下为中厚层大理岩;高程 1 880 m 以上主要为砂板岩互层结构,厚度一般小于 100 m。同时,通过开挖坡面发现,左岸 1 640 m 以上具有 f5、f8 断层、煌斑岩脉(X)、f42-9 断层等规模较大的软弱结构面以及 90 余条小断层。

研究区属于谷坡浅表地下水体系,补给来源主要由大气降水和外围地下水,通过坡体开挖现象表明,在江水位以上岩体多干燥,地表水的入渗较为困难;江水面以下普遍存在沿裂隙滴水现象,但地下水位较低而平缓,与江面基本持平^[15]。坡体中局部存在强透水带,受到浅表卸荷及深部卸荷带的作用而排泄良好。

1.2 谷幅测线

为了更好地监测库区两岸坡体的相对位移变化特征,分别在坝体上下游不同位置布置了 7 条测线,测线分布见图 1。由于开挖时间以及蓄水等因素的影响,测线监测数据的起始时间各不相同,见表 1。

表 1 谷幅测线

Tab. 1 Valley amplitude line

谷幅编号	谷幅测线	高程/m	监测时间	部位
1	PD44-TP11	1 930	2008 年 9 月—2019 年 1 月	坝前
2	PD42-PD21	1 930	2007 年 5 月—2019 年 1 月	坝前
3	PDJ1-TPL19	1 917	2008 年 9 月—2019 年 1 月	坝前
4	KLT1 829-1	1 829	2010 年 10 月—2019 年 1 月	坝后
5	EL. 1 670 左岸排水洞到右岸抗力体排水洞	1 670	2012 年 11 月—2019 年 1 月	坝后
6	PD54-PD55-1	1 825	2008 年 9 月—2010 年 6 月	坝前
7	EL. 1 670 左右岸坝基排水洞平距	1 670	2012 年 4 月—2019 年 1 月	坝后



图1 谷幅测线布置

Fig. 1 Layout map of valley width measuring line

1.3 库区蓄水

随着库区蓄水运行,其水位与时间变化曲线见图2,水位变化特征可以分为3个阶段:第一阶段开挖期,时间从坡体开挖到2012年5月;第二阶段为初期蓄水,水位在1 645~1 880 m,时间段为2012年5月—2014年8月;第三阶段为长期蓄水期,水位在1 800~1 880 m 循环变化,时间段为2014年8月—2019年1月。

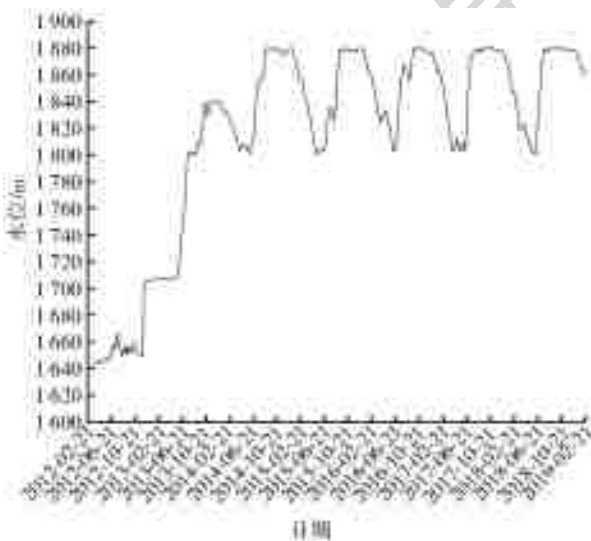


图2 水位变化曲线

Fig. 2 Water level variation curve

2 蓄水前后谷幅变形监测分析

2.1 前期开挖阶段谷幅变形分析

根据谷幅监测数据,开挖期间谷幅的伸缩变形

曲线见图3。从图3可以看出,随着库区两岸坡体的开挖,谷幅表现为压缩状态,坡体产生回弹变形,变形特征主要分为回弹加速阶段和稳定阶段:在2008年8月—2010年11月时间段内,坡体处于变形加速阶段,谷幅测线1、2、3变形速率在每月 -0.65 mm左右,其中由于受到开挖过程的影响,测线4和6的变形速率最大为每月 -1.72 mm;在2010年1月—2012年4月时间段内,坡体变形处于稳定阶段,通过谷幅监测数据可以发现,其变形速率在每月 $-0.62\sim 0.13$ mm范围内波动,可以判断在未蓄水阶段内,谷幅在前期开挖后收缩较明显,随着开挖的结束,谷幅收缩速率逐渐减小,其收缩变形主要是由于坡体开挖后岩体卸荷回弹产生^[15]。

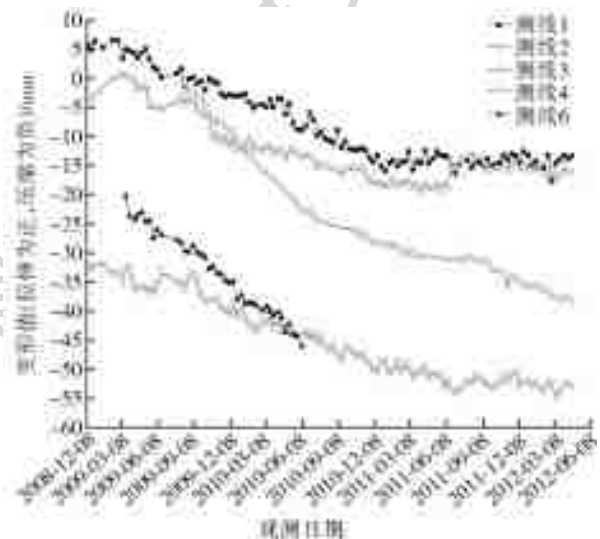


图3 谷幅开挖期伸缩变形曲线

Fig. 3 Expansion and deformation curve during valley excavation period

2.2 初期蓄水谷幅变形分析

在2012年5月—2014年8月时间段内为蓄水初期,水位从1 645 m 升高到1 880 m 水位,其变化量达到240 m。根据坡体两侧谷幅伸缩监测曲线(图4)可以看出,随着库区水位的逐渐上升,谷幅测线呈现出收缩状态,收缩速率在2012年5月—2013年11月期间为每月 -0.5 mm左右,在2013年11月—2014年8月时间段内收缩速率为每月 -0.2 mm左右,其中谷幅测线7表现出拉伸状态。

在初期蓄水阶段谷幅伸缩变形主要延续了开挖之后的稳定收缩变形特征,随着库区水位的增加,谷幅的收缩速率趋近于平缓,没有明显的跳动特征,该阶段可概括为初期蓄水平衡期,其主要是由于库区水压力作用于两岸的坡体,与岩体卸荷回弹产生一定抵消作用。

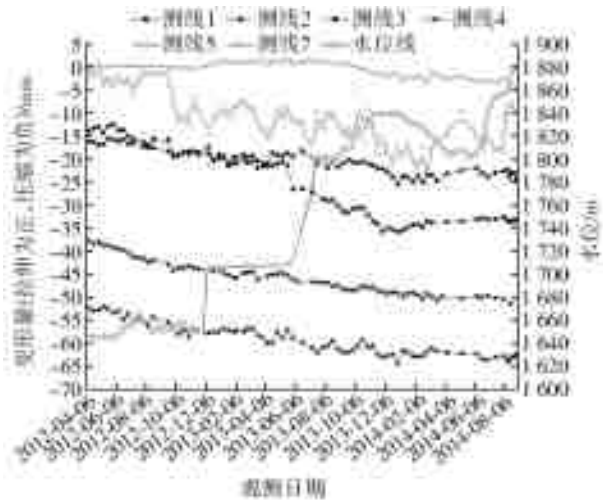


图 4 初期蓄水状态下谷幅伸缩变形曲线
Fig. 4 Expansion and deformation curve of grain amplitude under initial impoundment

2.3 长期蓄水谷幅变形分析

库区正常水位在 1 880 m,死水位在 1 800 m,其水位变化幅度达 80 m,根据监测数据绘制在长期蓄水状态下谷幅的伸缩变形曲线见图 5。由图 5 可知,库区水位在每一年内都经过从 1 880 m—1 800 m—1 880 m 的循环周期,从运行至今一共经历了 4 个周期,同时每个周期内谷幅的伸缩变形特征与库水位变化表现出一定的差异性。为了进一步认识谷幅在高水位下的变形特征,分别对各个周期内的谷幅伸缩变形进行对比分析。

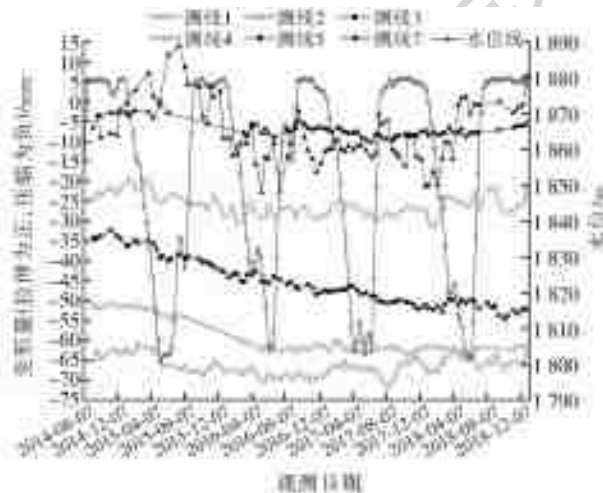


图 5 长期蓄水状态下谷幅伸缩变形曲线
Fig. 5 Expansion and deformation curve of grain amplitude under long-term water storage

第 1 个蓄水周期从 2014 年 8 月至 2015 年 11 月,由图 6(a)可以看出:库水位在 2015 年 1 月至 2015 年 6 月从 1 880 m 逐渐降低到 1 800 m,对应谷幅从 2015 年 4 月左右开始产生收缩变形,其变形收缩与水位相比具有滞后性,分析监测数据得到收缩变形

速率平均为每月 -3.8 mm,收缩速率较大,但是不具有持续性,其中变形不协调谷幅为 5 测线,表现为先拉伸后收缩状态,总体上变形量并未增加;库区水位在 2015 年 6 月到 2015 年 10 月从 1 800 m 上升到 1 880 m,根据谷幅的监测数据可以发现,随着水位的上升,谷幅产生较小的拉伸量,其变形速率总体小于每月 0.7 mm,其中谷幅测线 5 为前期较大拉伸,后期逐渐收缩,最终变形量为拉伸了 3.7 mm 左右。

第 2 个蓄水周期从 2015 年 11 月至 2016 年 11 月,由图 6(b)可以看出:在 2016 年 1 月至 2016 年 6 月库水位从 1 880 m 下降到 1 800 m,分析谷幅的伸缩曲线可以发现,随着库水的逐渐降低,谷幅的变形与库水位具有相似的波动特征,主要表现为库水位阶梯状下降过程中谷幅收缩和拉伸交替产生,但是最终产生较小的收缩量;在 2016 年 6 月至 2016 年 9 月库水从 1 800 m 上升到 1 880 m,通过谷幅伸缩曲线可以发现,在水位上升过程中,谷幅基本未产生变形现象,其中在 2016 年 8 月库水产生了一定的下降段,对应谷幅变形特征为收缩现象。

第 3 个蓄水周期从 2016 年 11 月至 2017 年 10 月,由图 6(c)可以看出:在库水位的下降过程中,部分谷幅先产生较小的拉伸量,而后发生压缩现象,整个监测周期内大部分的监测曲线比较平稳;监测曲线 5 随着库水位的上升出现较大的拉伸现象而后逐渐产生压缩,最终恢复至原来的压缩状态;监测曲线 2 则在库水位上升过程中先出现压缩后出现拉伸现象。

第 4 个蓄水周期从 2017 年 10 月至 2019 年 1 月,由图 6(d)可以看出:在库水位升降过程中,谷幅监测曲线有微小的拉伸和压缩现象交替产生,变形的量值没有发生较大的变化,库区处于与库水压力相互协调平衡阶段,谷幅处于调整稳定周期。

2.4 蓄水前后谷幅空间特征分析

由库区谷幅测线的空间分布,以高程分类可以将谷幅划分为低高程(1 670 m)、中高程(1 825 m)、高高程(1 930 m)等 3 类,按照相对坝体位置可以分为坝前和坝后 2 类,下面分别从 2 种分类方法比较谷幅的伸缩变化特征。

根据不同高程谷幅伸缩变形曲线(图 7)可以发现:低高程(1 670 m)谷幅的变化量主要在一 15~5 mm,其伸缩监测数据主要从蓄水期后开始,在蓄水前期测线的收缩波动较大,速率为每月 -0.36 mm,后期波动逐渐减小,变形速率每月 -0.1 mm;中高程(1 825 m)谷幅的伸缩变化量主要在一 60 mm 左右,在开挖期变形速率为每月 -1.2 mm,蓄水后变形速率为每月 -0.27 mm;高高程(1 930 m)谷幅的

变化量从-30~-70 mm 波动,其共性主要为开挖期收缩变形大,蓄水期收缩变形小,在开挖期最大

变形速率为每月-1.6 mm,蓄水期最大伸缩变形速率为每月 0.44 mm。

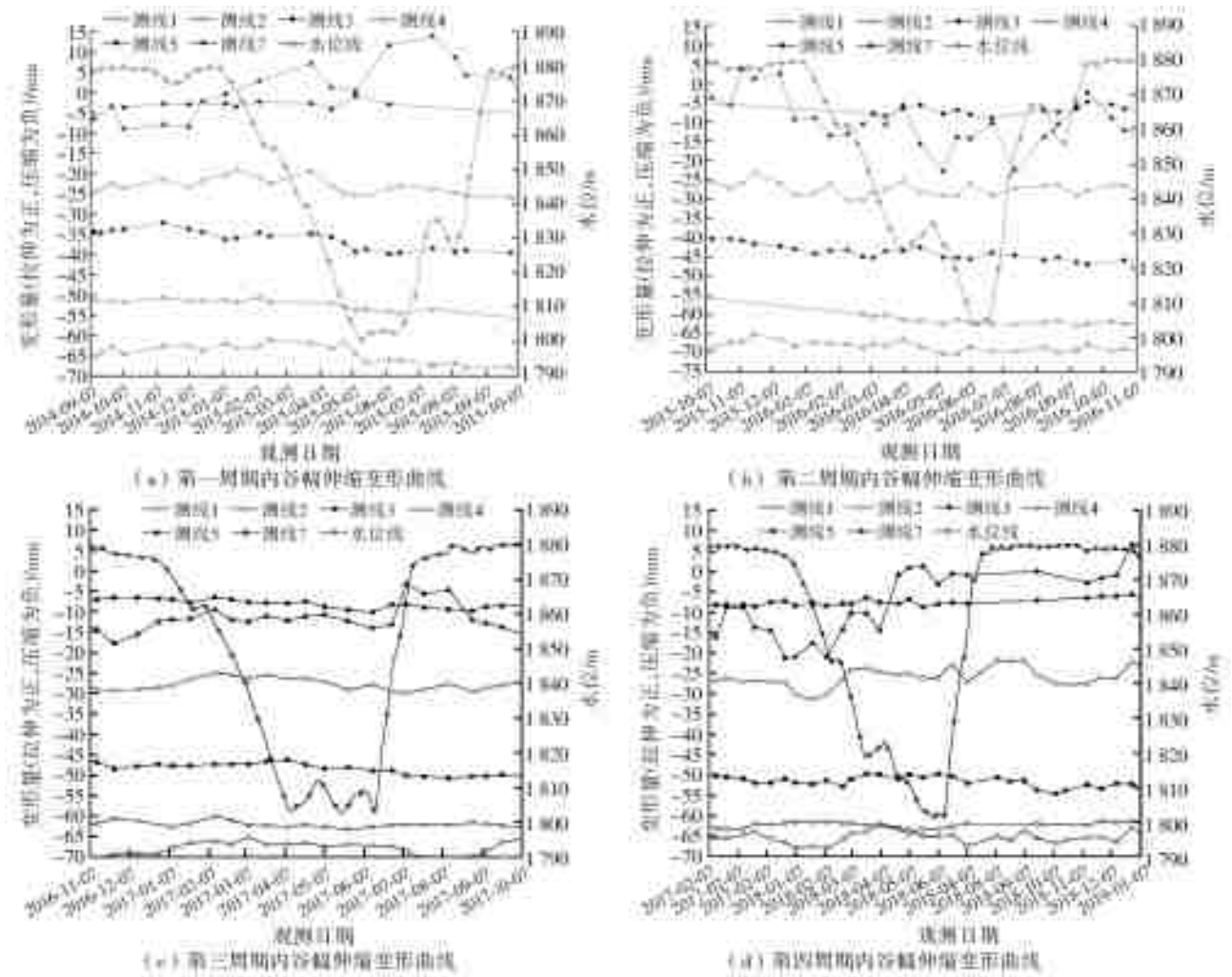


图 6 稳定蓄水阶段各周期内谷幅伸缩变形曲线

Fig. 6 Expansion and deformation curve of valley amplitude in each cycle of stable water storage stage

对比坝前与坝后的谷幅测线(图 7)可以发现: 坝前主要监测1 800 m以上的谷幅变化特征,其变化

量值都超过-30 mm;坝后主要监测低高程的谷幅变化特征,其变化量值较小。

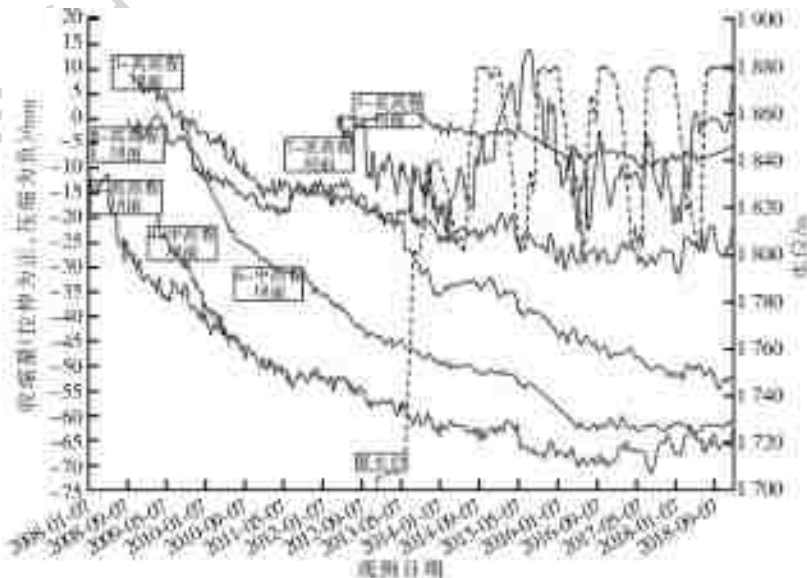


图 7 不同高程谷幅伸缩变形曲线

Fig. 7 Telescopic deformation curve of valley at different elevations

由此可以发现,库区谷幅的变化量值与坡体高程呈现相关特性,随着高程的增加谷幅的变形量逐渐增加,同时蓄水前期对于谷幅的收缩变形影响较大,随着蓄水时间的增长变形影响逐渐减小。

3 谷幅收缩变形机理初探

3.1 变形主控因素分析

3.1.1 坡体表观变形特征

根据左右岸坡体表观位移(X方向垂直于河流

流向)变形监测数据^[16-17](见图 8)可知:右岸坡体的位移变形量值随着时间的增长逐渐趋于平稳,量值在-25~25 mm 的范围内,随着库区水位的变化,右岸的位移变形量出现波动,其范围在 10 mm 左右;左岸的位移变形则呈现先递增后逐渐趋于平稳的特征,其变形量值为-15~-70 mm,其中最大变形量达到-72 mm,随着库区水位的变化,左岸变形具有逐渐增加的趋势,蓄水后位移变形量最大增加了 30 mm 左右。

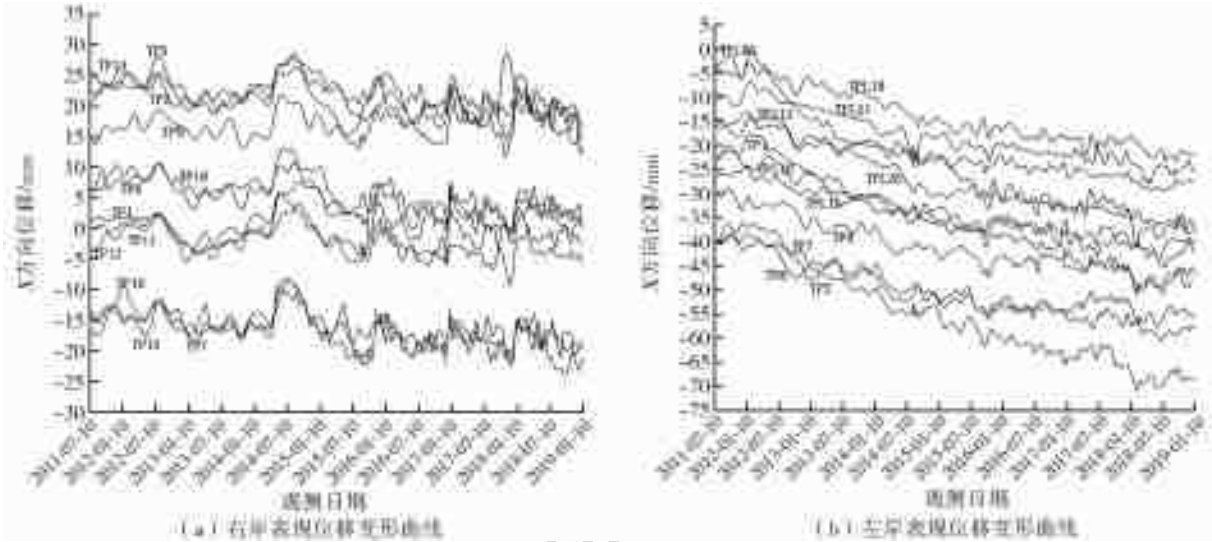


图 8 表观位移变形曲线

Fig. 8 Apparent displacement deformation curve

3.1.2 谷幅测线洞室变形特征

选取 2 条典型谷幅测线中左右岸洞室的位移变形量进行对比分析(见图 9)。由图 9 可知,在谷幅的收缩过程中,其左右岸所发生的位移变形量值有所差别,根据前文谷幅测线 2(1 930 m)的变化量值

达到 70 mm 以上。从图 9(a)可以得知:其左岸坡体所发生的位移变形量值达到了 50 mm 以上,右岸只提供了 4 mm 左右的量值;同理,测线 5(1 670 m)的收缩变形量值主要由左岸提供,右岸的变形值在 1 mm 左右。

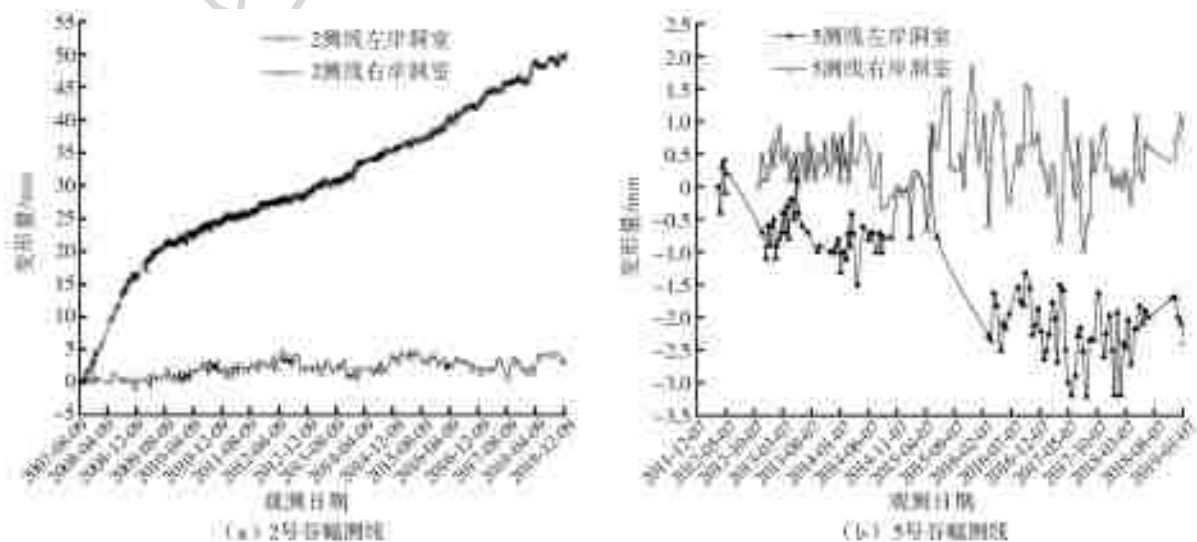


图 9 不同谷幅左右岸洞室位移变形曲线

Fig. 9 Displacement deformation curve of left and right caverns in different valleys

3.1.3 变形迹象分析

根据左岸坡体排水洞素描图可以发现(图 10),在 1 915 m 高程 L2C 排水洞可统计的 40 m 范围内,总变形量达 65 mm,其中主要开裂变形发生 18~24 m 的煌斑岩脉出露带和 30~35.5 m 的 f42-9 断层范围内。

煌斑岩脉出露带的裂纹宽度主要集中在 1~

3 mm,最大开裂到 5 mm,部分裂缝呈现左低右高的特性。f42-9 断层处的裂纹特征为开度大、贯通程度好、间距密集的特征。

结合以上对左右岸坡表变形量、谷幅测线洞室的变形量以及坡体内部的变形迹象分析,可以初步判断左岸坡体的结构变形在谷幅的伸缩变形中起着控制性作用。

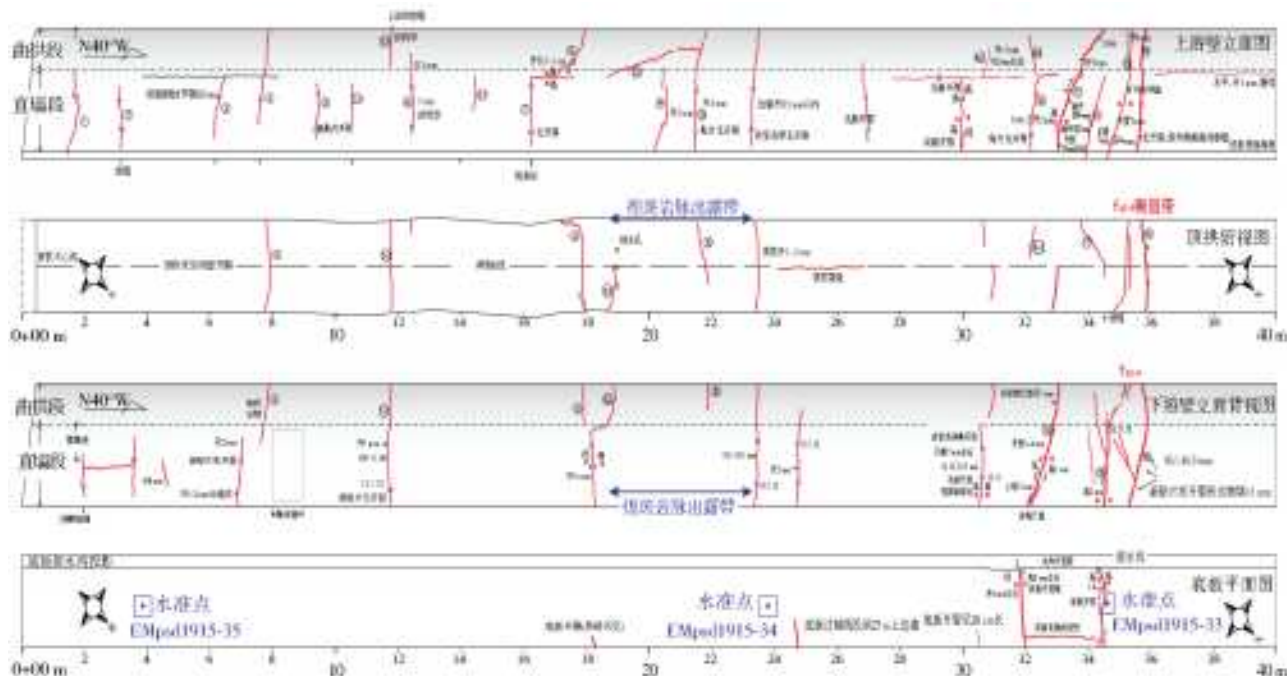


图 10 1 915 m L2C 排水洞素描

Fig. 10 1 915 m L2C drainage cave sketch

3.2 变形机理初探

左岸坡体结构较为复杂,根据刘明等^[18]、荣冠等^[19]、黄志鹏等^[20]和王继敏等^[21]学者对坡体开挖之后的研究,左岸坡体结构分区可划分为受倾倒变形破坏影响的高位倾倒区,由 f5 和 f8 断层影响的残留体变形区,由煌斑岩脉、深拉裂缝和 f5、f42-9 断层所围限的“大块体”区域,以及拱坝坝肩边坡区域。

对左岸 PD44 和 PD42 号平洞铺设的石墨杆计监测仪的监测数据进行处理,分别叠加各段石墨杆计监测点的沉降值和水平位移值得到如图 11 的监测点位移变形方位图。根据图 11(a)可以发现,在石墨杆计节点 10 之前,坡体的水平变形量值最大为 10 mm 左右,在经过监测点 10 和 9 之间的断层 f42-9 后,各监测点的变形与断层表现出较大的相关性,监测点的水平位移和沉降值急剧增大,同时其变形矢量方向与断层近似平行,从 2009 年到 2019 年水平位移累计最大达到 48.7 mm。根据图 11(b)可以发现,在石墨杆计未经过断层 f42-9 之前,各段的水平变形量最大为 13.7 mm,变形矢量也方向各异,当

跨过断层后,监测点变形量出现激增达到 34.7 mm,其变形矢量也近似与断层一致。

结合平洞在 f42-9 断层两侧的变形特点,无论从量级还是从矢量倾角,均有明显的区别,表明了 f42-9 断层上盘的岩体特别是深拉裂岩体是边坡深部变形的活跃部位,且石墨杆计的数据表明上盘岩体的水平变形量达到了 40 mm 以上。

进一步对坡体进行分析^[22-25],可以发现左岸坡体的变形是在蓄水和工程结构荷载共同作用下产生,抗剪洞-围岩之间的变形协调过程已近完成,但 f42-9 断层软弱岩带的垂向压缩-侧向膨胀(扩容)过程受边坡与坝体协调作用影响,存在周期性活动,这是深部变形持续发展的主要原因,总体上左岸坡体的变形模式可概括为上部倾倒体持续变形-深部张裂蠕滑的变形机制。

4 结论

(1)锦屏一级水电站谷幅变形过程可分为 3 个阶段:开挖变形加速阶段、初期蓄水平衡阶段、长期蓄水调整阶段。

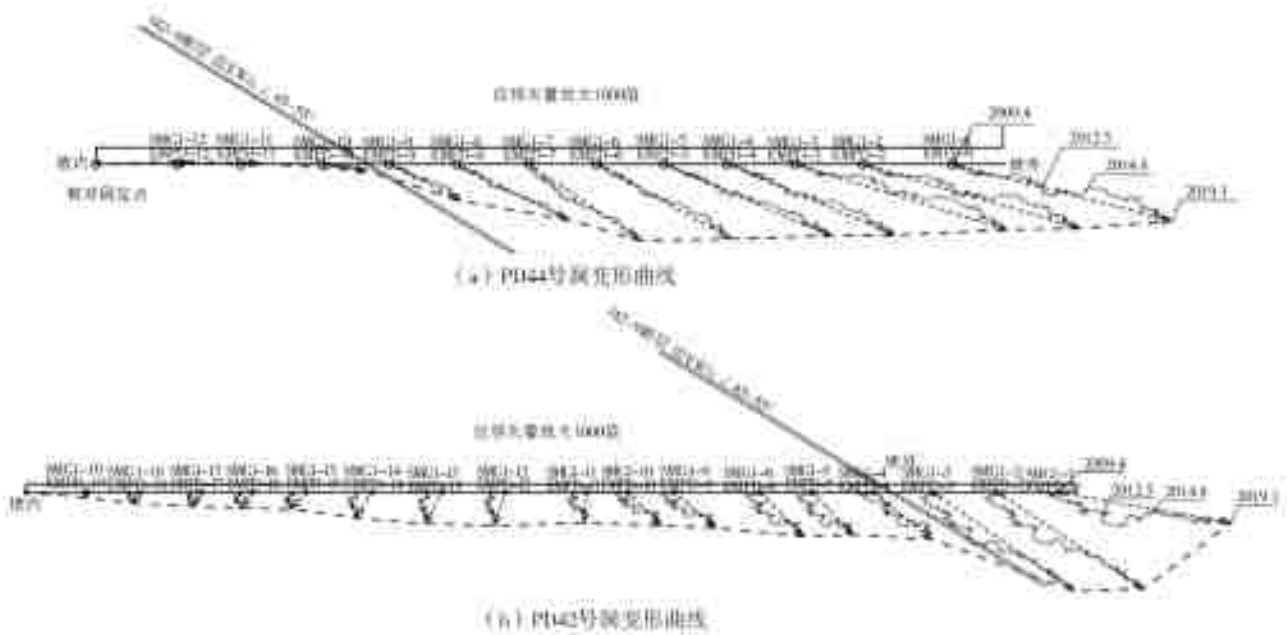


图 11 石墨杆计位移变形方位

Fig. 11 Graphite rod meter displacement deformation orientation map

(2)库区谷幅处于收缩状态,且随着时间增长,收缩量趋于平稳状态,从空间上看,谷幅与坡体高程表现出相关性,随着高程的增加,收缩量逐渐增加。

(3)库区长期在高水位下运行,蓄水位变化前期对谷幅收缩变形影响较明显且表现为一定的滞后性,后期水位波动对谷幅的影响逐渐减弱,具体表现为较小的收缩-拉伸波动特征。

(4)谷幅初期收缩变形主要由开挖后岩体的卸荷回弹产生,后期随着库区蓄水,谷幅收缩变形主要由左岸坡体变形起主要作用,总体上左岸趋于稳定,其变形机理可概括为上部倾倒体持续变形-深部张裂蠕滑变形。

参考文献:

[1] 王士天,刘汉超,张倬元,等. 大型水域水岩相互作用及其环境效应研究[J]. 地质灾害与环境保护,1997(1): 70-90.

[2] 邓华锋,李建林. 库水位变化对库岸边坡变形稳定的影响机理研究[J]. 水利学报,2014,45(S2):45-51. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2014.S2.008.

[3] 刘有志,相建方,樊启祥,等. 谷幅收缩变形对拱坝应力状态影响分析[J]. 水电能源科学,2017,35(2):100-103. DOI:CNKI;SUN;SDNY.0.2017-02-024.

[4] 杨强,潘元炜,程立,等. 蓄水期边坡及地基变形对高拱坝的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S2):3979-3986. DOI:CNKI;SUN;YSLX.0.2015-S2-043.

[5] 钟大宁,刘耀儒,杨强,等. 白鹤滩拱坝谷幅变形预测及不同计算方法变形机制研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(8):1455-1463.

[6] 杨强,潘元炜,程立,等. 高拱坝谷幅变形机制及非饱和

裂隙岩体有效应力原理研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(11):2258-2269. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2015.0972.

[7] 刘有志,张国新,程恒,等. 特高拱坝谷幅缩窄成因及对大坝变形和应力的影响分析[C]. 中国大坝协会,2014:51-60.

[8] LOMBARDI G. The FES rock mass model, Part 1[J]. Dam Engineering,1992(3):49-76.

[9] LOMBARDI G. The FES rock mass model, Part 2: Some examples[J]. Dam Engineering,1992(3):201-221.

[10] 樊启祥,李文伟,翁文林. 欧洲水坝考察纪实[J]. 中国三峡,2010(3):39-49.

[11] 杨学超,高克静,赵文光,等. 谷幅收缩变形对溪洛渡拱坝的安全影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(1):72-78. DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.01.013.

[12] 周志芳,李鸣威,庄超,等. 溪洛渡水电站谷幅变形成因与形成条件[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):497-505. DOI:CNKI;SUN;HHDX.0.2018-06-005.

[13] 高克静,赵文光,王仁坤,等. 谷幅收缩对高拱坝变形及应力状态的影响[J]. 科学技术与工程,2018,18(16):92-100. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2018.16.015.

[14] 梁国贺,胡昱,樊启祥,等. 溪洛渡高拱坝蓄水期谷幅变形特性与影响因素分析[J]. 水力发电学报,2016,35(9):101-110.

[15] 刘明. 锦屏一级水电站左岸边坡大规模开挖的地质-力学响应研究[D]. 成都:成都理工大学,2014.

[16] 张金龙,徐卫亚,金海元,等. 大型复杂岩质高边坡安全监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(9):1819-1827. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2009.09.012.

(下转第 177 页)

- 萨克自治州州长库尔玛什·斯尔江[J]. 中国国情国力, 2018(9): 6-9. DOI: 10. 13561/j. cnki. zgqggl. 2018. 09. 002.
- [13] 新疆地质矿产局第一水文地质工程地质大队. 新疆伊犁地区区域水文地质普查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆地质矿产局第一水文地质工程地质大队, 1985.
- [14] 新疆地质矿产局第一水文地质工程地质大队. 巩留-新源地区区域水文地质普查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆地质矿产局第一水文地质工程地质大队, 1984.
- [15] 靳书贺, 姜纪沂, 迟宝明, 等. 基于环境同位素与水化学的霍城县平原区地下水循环模式[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 43-51. DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2016. 04. 08.
- [16] 姜海宁. 新疆伊犁芦草沟盆地地下水循环模式研究[D]. 北京: 防灾科技学院, 2017.
- [17] WANG S, ZHANG M, HUGHES C E, et al. Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions: an observation network in the Tianshan Mountains, central Asia [J]. *Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology*, 2016, 68(sup1): 289-299. DOI: 10. 3402/tellusb. v68. 26206. DOI: 10. 3402/tellusb. v68. 26206.
- [18] 王明君. 双辽市地表水与地下水转化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [19] 管春兴. 玛纳斯河流域地表水-地下水转化的水化学及同位素证据[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [20] 杨闪. 干旱地区水循环过程中的地下水化学特征研究: 以蒙古国前巴音铝矿水源地为例如[J]. 地下水, 2018, 40(6): 40-42. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2018. 06. 012.
- [21] 程中双, 李英, 陈宗宇, 等. 银川平原潜水氟分布特征与年龄[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 139-145. DOI: CNKI; SUN; GHZH. 0. 2019-02-021.
- [22] 张敏. 同位素技术刻画安阳河流域地表水与地下水相互作用[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [23] 张兵, 宋献方, 张应华等. 基于氟和 CFCs 的三江平原浅层地下水更新能力估算[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1859-1868. DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2014. 11. 005.
- [24] CHAMBERS L A, GOODDY D C, BINLEY A M. Use and application of CFC-11, CFC-12, CFC-113 and SF₆ as environmental tracers of groundwater residence time: A review [J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10(5): 1643-1652. DOI: 10. 1016/j. gsf. 2018. 02. 017.
- [25] LV H, WANG Y, SU X S, et al. Combined ¹⁴C and ^{δ¹³}C analysis of petroleum biodegradation in a shallow contaminated aquifer [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 431-438. DOI: 10. 1007/s12665-015-4049-8.
- [26] 肖勇. 柴达木盆地南缘地下水循环演化模式及其变化趋势研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [27] 王琳. 卫宁平原地下水资源及地下水循环研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.

(上接第 166 页)

- [17] 武明鑫, 江汇, 张楚汉. 高混凝土坝蓄水河谷-库坝变形规律[J]. 水力发电学报, 2019, 38(8): 1-14.
- [18] 刘明, 黄润秋, 严明, 等. 锦屏一级左岸垫座以下坝基地质缺陷初步评价[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 933-939. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-9665. 2010. 06. 019.
- [19] 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(S1): 2855-2863.
- [20] 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.
- [21] 王继敏, 段绍辉, 胡书红. 锦屏一级水电站左岸坝肩复杂地质条件高陡边坡处理[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1597-1605.
- [22] 卢书强, 张国栋, 易庆林, 等. 三峡库区白家包阶跃型滑坡动态变形特征与机理[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 144-149. DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 03. 025.
- [23] 张登项. 锦屏一级水电站坝址区左岸高边坡稳定性分析及失稳破坏预警研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- [24] 吴超凡, 邱占林, 肖树焯, 等. 雅砻江右岸某巨型滑坡变形机理及稳定性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 110-113, 119. DOI: 10. 3724/sp. J. 1201. 2013. 06110.
- [25] 宋胜武, 向柏宇, 杨静熙, 等. 锦屏一级水电站复杂地质条件下坝肩高陡边坡稳定性分析及其加固设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 442-458.