

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.06.005

溪洛渡水电站谷幅变形成因与形成条件

周志芳,李鸣威,庄超,郭巧娜

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100)

摘要: 基于溪洛渡水电站地质环境,从水库蓄水引起的区域水文地质条件变化入手分析溪洛渡水电站谷幅变形的成因、研究谷幅变形的形成条件。结果表明:溪洛渡水电站水库蓄水引起的谷幅、库盘变形与电站位于永盛向斜盆地内、坝基玄武岩层下埋藏有厚层阳新灰岩承压含水层有关,谷幅、库盘变形规律与库区区域地质、水文地质条件和水库蓄水位、水库蓄水过程等密切相关;库盘变形、谷幅变形属于一种特殊的库岸变形。

关键词: 水库;谷幅变形;水文地质;承压含水层;库岸变形;溪洛渡水电站

中图分类号: TU122 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2018)06-0497-09

Impact factors and forming conditions of valley deformation of Xiluodu Hydropower Station

ZHOU Zhifang, LI Mingwei, ZHUANG Chao, GUO Qiaona

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: This study analyzes the causes and forming conditions of valley deformation based on the geological environment of Xiluodu hydropower station and the evolution of regional hydrogeological conditions induced by the impoundment. It reveals that the foundation and valley deformation are related to facts that the dam is located within the Yongsheng synclinal basin and the basalt layer consisting of the dam foundation situates above a thick confined aquifer consisting of Yangxin limestone. The patterns of valley and foundation deformation are closely related to the regional geological conditions, hydrogeological conditions and the reservoir impoundment process, etc. On such basis, internal and external factors of foundation and valley deformation are revealed. At the same time, it has been pointed out that the foundation and valley deformation belong to a special bank deformation. At last, definitions and classification of two deformation types are provided.

Key words: reservoir; valley deformation; hydrogeology; confined aquifer; reservoir bank deformation; Xiluodu Hydropower Station

金沙江下游段规划有乌东德水电站、白鹤滩水电站、溪洛渡水电站和向家坝水电站 4 座世界级巨型梯级水电站,总装机容量为 4 210 万 kW,年发电量为 1 843 亿 kW·h,规模相当于 2 个三峡电站。目前溪洛渡和向家坝水电站已经建成,乌东德和白鹤滩水电站正在紧张有序地建设之中。溪洛渡水电站装机容量 1 400 万 kW,年平均发电量 571 亿 kW·h,2005 年 12 月 26 日正式开工,2015 年完工。水电站自 2013 年水库蓄发电以来,在坝址上下游一定范围内布设的监测网同时监测到库盘垂直变形和谷幅变形,这一现象引起我国水电领域不同专业人员的广泛关注。尽管我国已建的水电工程,如锦屏一级、小湾、铜街子、江娅等,在坝址附近也监测到水库蓄水过程引起的库盘变形,但谷幅变形一般都很小或没有监测。溪洛渡水电站监测到的谷幅变形量大,上下游均表现为收缩变形^[1]。谷幅变形直接关系到溪洛渡水电站拱坝的安全运行^[2-3],

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91747204);中国长江三峡集团有限公司项目资助(20188019316)

作者简介: 周志芳(1962—),男,教授,主要从事水文地质研究。E-mail: zhouzf@hhu.edu.cn

引用本文: 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.

ZHOU Zhifang, LI Mingwei, ZHUANG Chao, et al. Impact factors and forming conditions of valley deformation of Xiluodu Hydropower Station[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(6):497-505.

引起人们高度关注的是自2012年11月16日导流洞下闸开始至今已完成了4个周期的库水位蓄至正常蓄水位600 m的过程,坝址上游、下游谷幅变形尽管在不断收敛,但并没有完全终止。

目前国内外对于水库蓄水引起的谷幅变形研究成果很少^[4-6]。伍法权等^[7]、王兰生等^[8]以江垭水库为工程背景研究了大坝及近坝山体抬升变形的形成机制与趋势;蒋中明等^[9]基于水库蓄水引起枢纽区产生抬升变形的现象提出了坝基及近坝库岸边坡产生抬升变形的水文地质结构模式;即坝址区存在倾向下游或两岸的相对隔水层,且相对隔水层下存在透水性较大的水文地质结构层,在此基础上采用流固耦合数值分析方法研究了相对隔水层产状要素变化对抬升变形空间分布规律的影响。溪洛渡水电站水库蓄水后,枢纽工程区所在的区域水文地质条件必然发生改变。变化了的水文地质条件对工程建筑物的影响已有较多研究,而且这些研究都局限在工程区(工程尺度)范围^[10-12],而从区域尺度研究水文地质条件变化对岸坡岩体变形规律的影响,认识上尚有不足。溪洛渡水电站坐落在深切雷波-永善盆地的金沙江上,水文地质条件特殊:盆地有3层较为连续的相对隔水层和3层透水层相间展布,天然条件下两岸山体地下水位低缓,坝基下部存在阳新灰岩承压含水层且与库水有直接水力联系^[13]。本文基于洛渡水电站所处的地质环境,从水库蓄水引起的区域水文地质条件变化入手分析溪洛渡水电站谷幅变形的成因,研究谷幅变形的形成条件,为认识溪洛渡水电站谷幅变形机理构建溪洛渡水电站谷幅变形计算分析模型,正确预测谷幅变形发展趋势提供科学依据,也为在建、待建水电工程计算、分析、预测可能发生的谷幅变形提供借鉴。

1 溪洛渡水电站地质环境

1.1 地质概况

金沙江溪洛渡水电站坝址区,在区域地貌上位于青藏高原和云贵高原向四川盆地过渡的斜坡地带,地势总体呈西高东低之势。区内山高谷深,海拔多在2000~3000 m以上。金沙江总体呈北东向流经本区,其切割深度大于1500 m,谷坡陡峻,河道狭窄,断面呈较对称的“V”字形,左岸坡度40°~75°,右岸坡度55°~75°,河床平均坡降约千分之一。坝区附近金沙江河床高程低于500 m,河谷两岸高程620~850 m的区域地形宽阔平缓,缓倾向下游和江边。

溪洛渡水电站坝址位于永盛向斜盆地内^[14],四周被背斜及叶竹坪隆起围限(图1(a)),向斜的轴向北东,其中北西翼地层平缓,倾角10°~15°,南东翼较陡,20°~35°,盆地北东长35 km,北西宽25 km,面积约750 km²,为一个没有被区域断裂切割的、宽缓且相对完整的构造向斜盆地(图1(b))。区内除局部发育有小规模断层外,主要是一套发育于岩流层层间和层内的构造错动带和构造裂隙。永盛向斜盆地内有3层较为连续的相对隔水层和3层透水层相间展布,相对隔水层有二叠系上统宣威组(P_{2x})砂页岩层、二叠系上统(P_{2βn})泥页岩层和志留系(S)页岩层,3层透水层有第四系(Q)松散堆积层、二叠系上统(P_{2β})峨眉山玄武岩层和二叠系下统上段茅口组(P_{1m})阳新灰岩层,各地层层间均为假整合接触,第四系不同成因的松散堆积物不整合于上述基岩之上(图1(b))。第四系松散堆积物(Q)在左岸谷肩上部主要为古滑坡堆积,右岸谷肩平台为冰水堆积、洪积物等。宣威组(P_{2x})为海陆交互相碎屑岩沉积,总厚度97 m,分布于坝区谷肩顶部。峨眉山玄武岩(P_{2β})为间歇性多期喷溢的陆相基性火山岩流,以溢流为主,总厚490~520 m,根据喷溢间断划分为14个岩流层。P_{2βn}为海陆交互相的泥页岩沉积层,一般厚2~3 m,部分地段缺失。茅口组石灰岩(P_{1m})为浅海相灰至深灰色厚层块状生物碎屑灰岩。

1.2 溪洛渡水电站水文地质特征

永盛向斜盆地区域的地下水赋存、动态规律主要取决于盆地的水文地质结构和边界条件^[14]。二叠系下统阳新灰岩连续分布于永盛盆地周边(图1(a)),盆地内除金沙江横切的个别地段有灰岩出露外,阳新灰岩连续深埋于盆地下部(图1(b)),在向斜轴部深埋河床下900 m,高程-500 m以下,谷肩以上埋深大于1600 m,坝址区上游灰岩部分出露,下游埋藏于玄武岩之下,灰岩顶板在坝区河床下的高程为220~300 m;阳新灰岩(P_{1y})上覆有峨眉山玄武(P_{2β})、宣威组砂页岩(P_{2x})和二叠系(T_{1f}~T_{3x})砂页岩、石灰岩等,总厚度逾1000 m,下伏为志留系泥页岩(S)相对抗水层。

总体上,永盛盆地岩体可分为阻水结构和透水结构两大类。其中阻水结构由分布于坝区谷肩顶部的宣威组(P_{2x})碎屑沉积岩,玄武岩流组P_{2β14}、P_{2β13}和P_{2β11}顶部的古风化壳,P_{2βn}泥页岩层和志留纪(S)页岩层组成。其中宣威组(P_{2x})的碎屑沉积岩和志留纪(S)页岩层,层厚稳定,在整个区域内连续分布,分别是顶

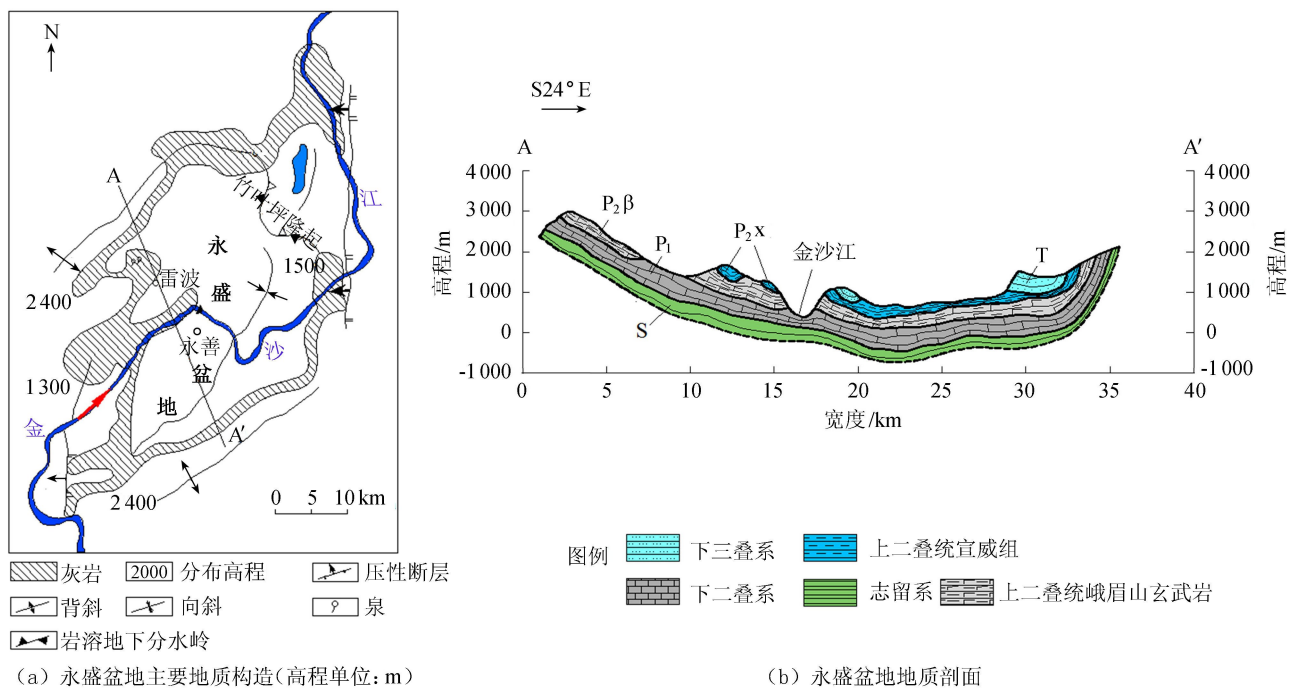


图1 永盛盆地主要构造分布与地质剖面

Fig.1 Geologic structure and geological section of Yongsheng synclinal basin

部孔隙含水层和深部阳新灰岩含水层的相对隔水底板,是整个永盛盆地的相对抗水层,对地下水运动起着边界控制作用(图1(b))。裂隙玄武岩和裂隙溶隙灰岩是盆地内最主要的透水结构。由于古风化阻水带的阻隔作用,表层孔隙地下水并未能在重力的驱动下迁移至下伏的玄武岩体中,天然条件下玄武岩体在河水位高程以上是干燥的。金沙江地表水与河水位以下玄武岩裂隙含水层有直接水力联系,在阳新灰岩出露区与阳新灰岩承压含水层有直接水力联系。水库蓄水前,金沙江作为区域侵蚀基准面,是区域地下水和地表水的排泄区。自上游阳新灰岩出露位置向下游,受区域地质构造的限制,阳新灰岩全部深埋于河床之下,处于承压状态。水库蓄水前河谷两岸钻孔长观资料显示玄武岩含水层和阳新灰岩承压水层中天然地下水位低缓^[14]。

区域地下水补给主要来源于二叠纪阳新灰岩地层出露区大气降水入渗。金沙江以远5~10 km的永盛盆地边缘,阳新灰岩地层出露地表,其高程大多为1500~2000 m。从永盛盆地东、南、西三侧边缘灰岩出露区降水入渗补给后地下水顺阳新灰岩经深部径流流向金沙江排泄区,区域地下水循环深度大,循环周期长,水量少,地下水矿化度和水温一般较高。钻孔揭示的谷肩两侧稳定的低地下水位线是区域地下水流系统在金沙江水位边界控制下的表现。钻孔揭示阳新灰岩含水层地下水的温度、水质、压力、水的年龄及补给高程有自身的特点^[13-15]。自1992年1月至1995年12月先后在两岸布设了8个地下水位长观孔,按5 d(有些孔逐日)观测地下水位、水温,通过地下水位、水温资料与同期江水位比较具有以下特点:阳新灰岩含水层地下水具有承压性,承压水头低缓;地下水与地表水动态一致,两者有直接的水力联系,地下水位随江水位同步性好、反应敏感;自河谷向两岸山体随着距离的增加地下水位受江水位影响的变幅逐渐减小;地下水动态分析法求得的地下水压力传导系数数值很大,观测孔地下水位变动为弹性升降^[16]。

2 溪洛渡水电站谷幅变形成因分析

2.1 溪洛渡谷幅变形特征

金沙江溪洛渡水电站自2013年水库蓄水发电以来,坝区上下游较大范围发生了谷幅变形,谷幅变形与水库蓄水过程关系密切。为了监测水库蓄水过程对坝址区库盆、库岸和大坝下游河谷变形的影响,在水库蓄水前布设了垂直变形和水平位移监测控制网(图2)。水平位移监测共布置9条测线,其中上游4条,下游4条,坝顶高程610 m灌浆平洞1条,分布在高程561.00~749.00 m之间,主要用于监测坝址附近上下游的谷幅变形。坝顶610 m高程的谷幅测线起测时间为2016年1月;布置在坝下游561 m抗力体排水洞(深入岩体约150 m)的谷幅测线起测时间为2014年7月;其他谷幅测线起测时间为2012年12月。水库蓄

水自2012年11月16日导流洞下闸开始,至2014年9月29日库水位第一次蓄至正常蓄水位600 m,截至2018年6月水库已经历了4个周期变化过程,各谷幅测线监测的谷幅变形历时曲线如3所示。

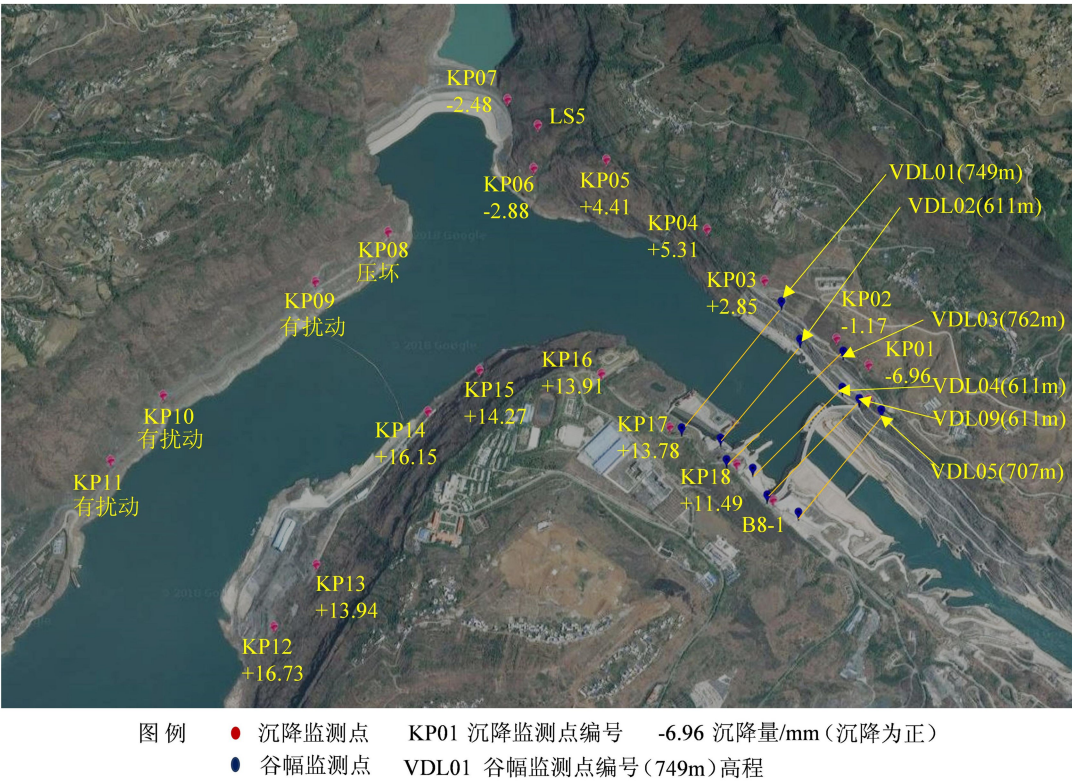


图2 库盘垂直变形和谷幅水平变形监测布置

Fig.2 Monitoring layout for the vertical deformation of reservoir foundation and the horizontal deformation of valley

水库蓄水以来,上下游谷幅均表现为收缩变形,累计变形量66.36~87.31 mm,VDL03-VDR03测线的累计收缩变形量最大。从图3可知,以2015年8月1日为界线将谷幅变形分为两个阶段,之前为第一阶段,之后为第二阶段。第一阶段谷幅的月平均变形速率明显大于第二阶段的月平均变形速率,且上下游各测线的变形速率相近,见表1。监测成果显示,谷幅变形主要发生在蓄水初期,且不同高程以及基岩内部的谷幅测线变形基本一致、变形量大致相当。经历了四次完整的蓄水、放水过程,谷幅收缩变形速率虽然在减少,但变形的绝对值仍在持续增长,表明谷幅变形相对于库水抬升具有滞后性或者叠加性。

垂直变形监测主要布置在水库左、右岸库盘位置(图2),共18个垂直变形水准点。2012年12月取得基准值,截至2017年7月共进行了9次观测。其中监测点KP08、KP09、KP10、KP11受损,不考虑^[17]。蓄水初期,库水的水重作用使左、右岸主要表现为沉降变形,且右岸沉降量比左岸大;第一次蓄至正常水位600 m

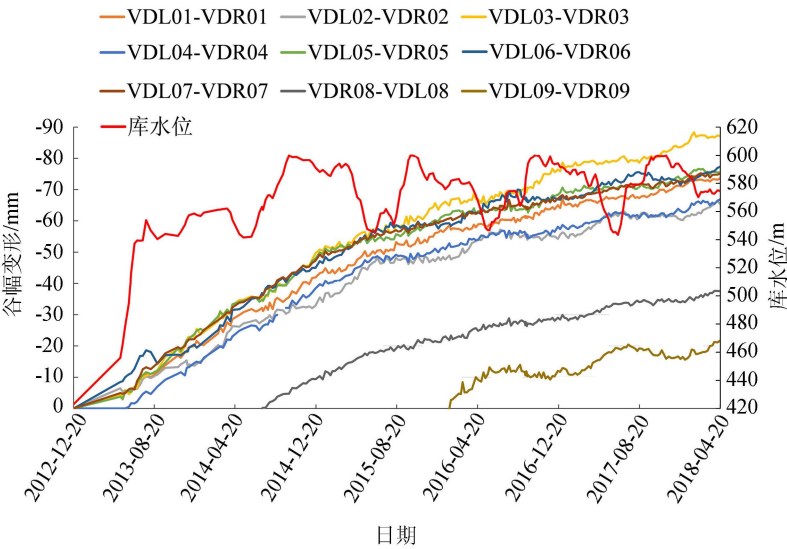


图3 谷幅变形历时曲线

Fig.3 Developing history of valley shrinkage deformation

后(2014 年 12 月),各测点出现同步平行上抬现象。第三次蓄至正常水位 600 m 后(2016 年12 月),垂直变形均趋于收敛。截至 2017 年 11 月,除左岸边坡个别点库盘累计表现为抬升外,左右岸大部分测点均表现为累计下沉^[17]。

表 1 谷幅收缩累计变形量与平均速率
Table 1 Cumulative amount and velocity of the valley shrinkage deformation

测线名称	起止时间		平均变形速率/(mm·月 ⁻¹)		累计变形量/ mm
	起测日期	截止日期	第一阶段	第二阶段	
VDL01-VDR01	2012-12-01	2018-04-02	1.69	0.70	73.16
VDL02-VDR02	2012-12-01	2018-04-02	1.53	0.59	66.36
VDL03-VDR03	2012-12-01	2018-04-02	1.94	0.95	87.31
VDL04-VDR04	2013-05-25	2018-04-02	1.84	0.56	66.49
VDL05-VDR05	2012-12-01	2018-04-02	1.88	0.67	75.55
VDL06-VDR06	2012-12-01	2018-04-02	1.84	0.51	76.95
VDL07-VDR07	2012-12-01	2018-04-02	1.90	0.58	74.79
VDL08-VDR08	2017-07-10	2018-04-02	1.44	0.56	37.74
VDL09-VDR09	2016-01-24	2018-04-02		0.70	21.16

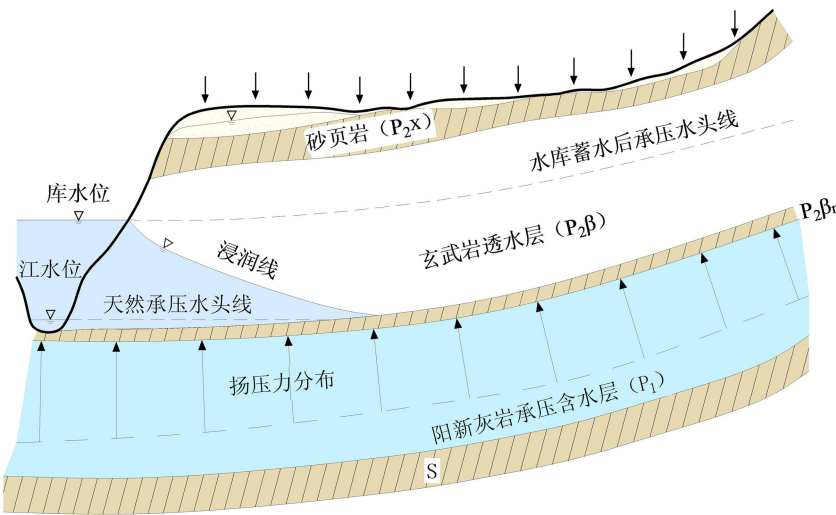


图 4 水库蓄水过程的含水层地下水头分布
Fig.4 Spatial distribution of aquifer hydraulic head during the impoundment process of reservoir

水库蓄水引起的谷幅、库盘整体变形规律为:以坝址为界库盘垂向变形,上游下沉、下游抬升,上游先沉后抬、总体下沉、右岸大于左岸;水平向谷幅变形,上游、下游不同高程同步收缩、变形速率先快后慢、变形具有滞后性或叠加性的特点。目前尽管谷幅变形年增量单调递减趋于收敛,但对于谷幅变形产生的机理有待进行深入研究。

2.2 溪洛渡谷幅变形成因分析

金沙江地表水在大坝的拦截下动能逐步转化为势能,水库的蓄水过程也是金沙江地表水体位置势能的增大过程。库盆增大的地表水体位置势能通过永盛向斜盆地含水层系统逐渐扩散影响到整个盆地区域。由于水库正常蓄水位 600 m,低于宣威组(P_{2x})碎屑沉积岩相对抗水层分布高程 700 m,因此水库蓄水过程直接与库水发生水力联系的含水层只有无压状态的峨眉山玄武岩含水层和有压状态的阳新灰岩含水层。

对于有压状态的阳新灰岩含水层,随着水库蓄水地表水体位置势能增大,库水在位置势能差的作用下通过大坝上游灰岩出露区域直接传递给阳新灰岩含水层,抬升阳新灰岩含水层地下水的压强势能。天然状态下阳新灰岩含水层水位动态与金沙江水位变化过程就表现出了很好的同步性,说明这种势能传递过程是通过压力传导的,传导迅速,而且并不需要太多的流量传输,主要是增大了阳新灰岩含水层原有地下水的压强势能(图 4)。具体压力传导的速度、压力分布、传输的流量与含水层压力传导系数有关,即与阳新灰岩含水层的导水系数和贮水系数的比值有关。

对于无压状态的峨眉山玄武岩含水层,随着水库蓄水地表水体位置势能增大,库水在位置势能差的作

用下通过库岸被淹没的峨眉山玄武岩露头区域直接流入玄武岩含水层,逐步饱和玄武岩含水层。由于非饱和玄武岩含水层逐步转化为饱和的过程是通过重力作用传导的,传导需要较长时间才能完成,与压力传导相比在时间上存在明显的滞后性,而且需要较多的流量传输来充满峨眉山玄武岩含水层空隙。与此同时由库岸向岸坡内玄武岩含水层地下水的势能逐步增加(图4)。最终库水位以下原来干燥的非饱和玄武岩含水层将全部被库水充满成饱和状态。具体非饱和玄武岩含水层逐步转化为饱和的过程、最终库水位以下原来干燥的非饱和玄武岩含水层全部被库水充满成饱和状态所需的时间、与压力传导相比存在的滞后时间以及传输的流量和玄武岩含水层重力传导系数有关,即与玄武岩含水层的渗透系数和给水度有关。

库盆增大的地表水体位置势能通过重力的方式作用库盆盆底围岩之上,引起库盆周边围岩下沉变形,这也是垂直沉降观测网监测到库盘下沉变形的主要原因(图4)。随着阳新灰岩含水层地下水压强势能的增加,其内部和上覆岩层应力状态必将产生变化。根据有效应力原理,阳新灰岩含水层内部孔隙水压力的增大,必将导致含水层岩体骨架的有效应力减小;在上覆荷载不变的情况下阳新灰岩含水层内部有效应力减小值理论上约等于对应部位孔隙水压力的增大值。由于水库正常蓄水600 m时,库水位抬升值为210~230 m,阳新灰岩承压含水层水头随之增大(图4),即内部有效应力减小2.1~2.3 MPa,由此永盛向斜盆地阳新灰岩含水层整体发生弹性膨胀变形,最大弹性膨胀变形的方向垂直于阳新灰岩含水层的层面向上方向。由于永盛向斜盆地阳新灰岩含水层总体倾向金沙江河谷,因此在永盛向斜盆地这种变形通过上覆岩层传递到地表的变形方向是向上倾向于河谷的。与此同时,由于受到 $P_2\beta_n$ 页岩层的隔水作用,阳新灰岩含水层地下水压强势能的增加对于上覆岩层产生浮托力(图4),同样浮托力通过 $P_2\beta_n$ 泥页岩层也会导致永盛向斜盆地的上覆岩层整体发生弹性变形,最大变形的方向总体垂直于层面向上方向倾向于河谷。两种变形叠加的最大变形方向在垂直方向的分量表现为永盛向斜盆地地表抬升变形,在水平方向的分量表现为库岸(河岸)收缩变形,即谷幅变形。

值得注意的是,在库盆及库盆周边由于库盆水体荷载和库盆周边玄武岩含水层重力地下水的输入,上覆荷载发生了改变,库盆和近库岸围岩一定范围内上覆荷载的改变量与阳新灰岩含水层内部孔隙水压力的增大量一致,因此阳新灰岩含水层在近库岸一定范围内发生弹性膨胀变形最早趋于稳定,而且这个“一定范围”随着库水输入玄武岩含水层的饱和过程而不断扩大(图4)。

由于永盛向斜盆地库岸两侧地层总体倾向金沙江河谷,岩层产状,左岸总体为 $N20^\circ\sim40^\circ/NE\angle4^\circ\sim7^\circ$,右岸为 $N15^\circ\sim30^\circ E/SE\angle3^\circ\sim5^\circ$ 。库岸两侧地层差别不大、倾角较小,因此最大变形在水平方向的分量在库岸两侧基本相等,即谷幅收缩变形基本对称。在永盛向斜盆地顺金沙江河向,以大坝为界向上游库区阳新灰岩含水层出露于库底,向下游阳新灰岩含水层缓倾下游偏左岸。因此在水库蓄水后大坝上游库盆、库盘由于库盆水体荷载作用以下沉变形为主,而大坝下游由于阳新灰岩含水层的弹性膨胀变形和浮托力作用河谷以上抬变形为主,这与监测结果完全吻合。

3 谷幅变形及其形成条件

3.1 谷幅变形定义、特点、类型

关于库盘、谷幅变形的研究成果虽然不多,但涉及库盘、谷幅的文献并不少。有关文献对库盘、谷幅并没有明确的指向或定义,尤其是对库盘在不同的文献中理解差别较大。在此,定义库盘指河谷左右库缘之间及其向两侧延伸一定距离的区域。两侧延伸的距离范围定义为库肩,大致等于左右库缘之间的距离。这样库盘从河谷地貌学上包括河床、河漫滩、谷坡及谷肩外侧部分区域,从水库横剖面结构上包括库盆、库岸和库肩组成的区间范围,如图5所示。

谷幅是指河流左右岸谷坡相同高程点之间的(最短)水平距离。库盘变形是指特定地质条件下由于水库蓄水引起的大坝上游库盘和下游河岸较大范围的变形(位移)现象,目前主要是指垂向变形。谷幅变形只是区域变形在水平方向上的变形表现。谷幅变形是指特定地质条件下由于水库蓄水引起的大坝上下游较大范围(区域尺度)库岸(河流谷坡)水平变形(位移)现象,它等于水库(河流)左、右岸谷坡相同高程点之间水平距离的变化量。

库盘变形、谷幅变形应该属于一种特殊的库岸变形,它不同于一般的库岸变形(谷坡变形)。一般的库岸变形是水库蓄水后在库水作用下引起的岸壁坍落(或滑坡),岸边淤积和岸坡变形等现象,库岸变形破坏的基本模

式是侵蚀型、崩塌型、滑移型。一般的库岸变形只是局部的,而且存在明显的岩体变形破坏。

库盘变形、谷幅变形的特点是变形量与库水变化有密切关系,库岸变形范围大,大坝上下游变形具有同步性,库岸山体大范围内不存在挤压、拉裂破坏现象,它主要是由于水库蓄水引起的区域尺度水文地质条件改变导致应力场调整相伴产生的地质体弹性-塑性变形现象。

库盘变形、谷幅变形的变形量、变形主体方向和变形速率与库区区域地质、水文地质条件和水库蓄水位、水库蓄水过程等密切相关。根据变形的方向不同,库盘变形类型可分为抬升变形、下沉变形,谷幅变形类型有收缩变形、扩张变形两种。库盘、谷幅变形综合变形类型有抬升-收缩变形、下沉-收缩变形、抬升-扩张变形、下沉-扩张变形等等。

一般而言,水库兴建都会改变水库周边岩体的原始应力状态,产生库盘和谷幅变形,当水库蓄水的水头不是很高或者水库蓄水对原有水库周边岩体地下水位影响不大时,由于水库周边岩体渗流场改变而引起的应力场变化也就不会很大,而由应力场变化导致的库盘和谷幅变形也就很小,自然对工程的影响也就很小,常常被忽略。但当水库蓄水的水头很高或者水库蓄水对原有水库周边岩体地下水位影响较大时,由于水库周边岩体渗流场改变而引起的应力场变化也就较大^[18],而由应力场变化导致的库盘和谷幅变形也就较大,这种较大的库盘和谷幅变形具有可能对工程的安全和稳定产生直接或间接的影响,这时必须高度重视库盘和谷幅的变形、变形的成因机制以及发展趋势。

纵观国内外已建和在建的高坝大库,有监测资料的出现对工程有影响的库盘、库岸和谷幅变形的案例也不少。但绝大多数属于库岸变形、破坏,是水库蓄水后在库水作用下引起的库岸变形、滑坡,是局部的且存在明显的岩体变形破坏。例如,建于 1956 年的意大利瓦伊昂拱坝,坝高 262 m,建成蓄水后库岸岩体中水位上升,上游古滑坡扬压力增大的同时土抗剪强度下降,滑坡开始不稳定,1960 年出现小滑坡,1963 年 10 月 9 日发生大滑坡引起库水涌浪冲向下游加蓝隆镇,造成 1925 人死亡的悲剧^[19]。我国已建高坝大库,由于水库蓄水引起的库岸变形、滑坡也时有发生,但绝大多数是局部小范围的。出现库盘、谷幅变形的案例主要有江垭、铜街子、锦屏一级、小湾和溪洛渡水电站^[20]。

3.2 谷幅变形成成条件

基于溪洛渡水电站库盘、谷幅变形特征和谷幅变形成因分析,结合电站坝址区域地层岩性、地质构造和水文地质条件分析发现,库盘、谷幅变形大小、特征和类型与水电站坝址区域的地形地貌、地层岩性、地质构造和水文地质条件有关,尤其是与坝址区域的水文地质结构、区域承压含水层埋藏条件、水库蓄水位、蓄水过程密切相关。地层岩性、地质构造和水文地质条件是发生库盘、谷幅变形的内在因素,而水库蓄水位、蓄水过程是诱发库盘、谷幅变形最重要的外在因素。外因通过内因而起作用。

谷幅变形成因的充分条件(内在因素)是库区两岸分布有层状或似层状地层、透水层与相对隔水层互层分布,坝址位于构造盆地内、坝基以下存在区域性承压含水层且与库水有直接水力联系。河谷两岸天然地下水位低缓会加大库盘、谷幅变形量,地形地貌条件会影响库盘、谷幅变形量的大小和分布。谷幅变形成因的必要条件(外在因素)是水库蓄水,相同内在因素条件下,水库蓄水位越高库盘、谷幅变形量愈大。至于库盘、谷幅变形发生的类型与坝址所处的地质构造部位有关。

已建成的溪洛渡、铜街子和江垭 3 座水电站都满足谷幅变形成因的充分条件,这 3 座水电站都出现了明显的库盘变形,溪洛渡电站同时监测到了显著的谷幅变形,铜街子和江垭水电站没有监测谷幅变形量。

谷幅变形是变形在水平方向上的度量,并不是所有发生库盘变形的工程都会同时发生能监测得到的谷

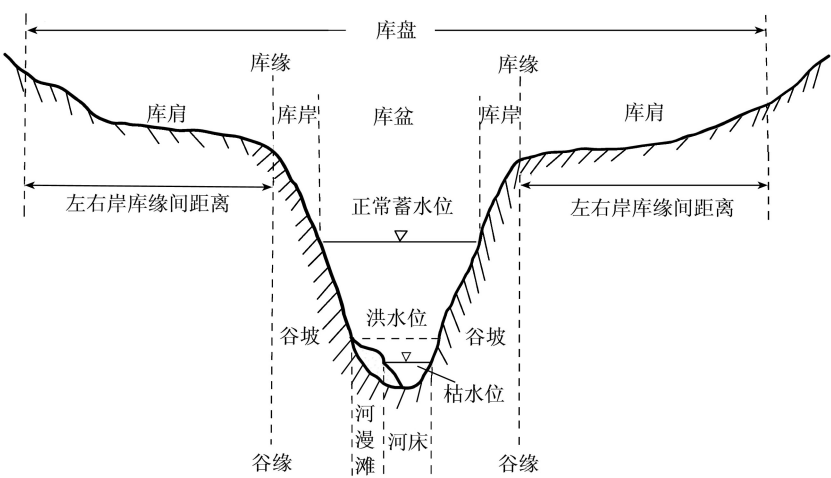


图 5 河谷-水库横剖面结构

Fig. 5 Schematic diagram of a river-reservoir valley

幅变形。发生谷幅变形与水库蓄水过程中水库周边岩体(库盘)整体受力状态有关,如果库盘受力扭曲,就会发生谷幅变形。库盘是否受力扭曲与构造盆地的形态和库盘位于构造盆地的具体部位以及地形地貌有关,例如,溪洛渡电站库盘、谷幅总体变形特征是以坝址为界上游沉降下游抬升,上游、下游谷幅同步收缩。这与溪洛渡电站位于向斜构造盆地近轴部,区域性阳新灰岩承压含水层总体由两岸倾向河谷,受力状态总体向上倾向河谷相吻合。

4 结 论

a. 溪洛渡水电站位于永盛向斜盆地内,坝基下埋藏有阳新灰岩承压含水层,天然条件下阳新灰岩承压含水层水头低缓,地下水与地表水动态一致,有直接水力联系。

b. 溪洛渡水电站水库蓄水引起的谷幅、库盘整体变形规律是以坝址为界库盘垂直方向的变形,上游下沉、下游抬升,上游先沉后抬、总体下沉、右岸大于左岸;谷幅水平方向的变形,上游、下游不同高程同步收缩、变形速率先快后慢,变形随库水周期性变化具有滞后性或叠加性。

c. 谷幅变形是指特定地质条件下由于水库蓄水引起的大坝上下游较大范围库岸水平变形(位移)现象,它等于水库(河流)左岸、右岸谷坡相同高程点之间水平距离的变化量。谷幅变形是区域变形在水平方向上的变形表现。

d. 库盘变形、谷幅变形属于一种特殊的库岸变形,它不同于一般的库岸变形(谷坡变形)。库盘变形、谷幅变形的特点是变形量与库水变化有密切关系,库岸变形范围大,大坝上下游变形具有同步性,库岸山体大范围内不存在挤压、拉裂破坏现象,这主要是由于水库蓄水引起的区域尺度水文地质条件改变导致应力场调整相伴产生的地质体弹性-塑性变形现象。

e. 库盘变形、谷幅变形的变形量、变形主体方向和变形速率与库区区域地质、水文地质条件和水库蓄水位、水库蓄水过程等密切相关。根据变形的方向不同,库盘变形类型可分为抬升变形、下沉变形,谷幅变形类型有收缩变形、扩张变形两种。库盘、谷幅变形综合变形类型有抬升-收缩变形、下沉-收缩变形、抬升-扩张变形、下沉-扩张变形等。

f. 谷幅变形成因的充分条件是库区两岸分布有层状或似层状地层、透水层与相对隔水层互层分布,坝址位于构造盆地内、坝基以下存在区域性承压含水层且与库水有直接水力联系。谷幅变形成因的必要条件是水库蓄水,相同内在因素条件下,水库蓄水位越高库盘、谷幅变形量愈大。至于库盘、谷幅变形发生的类型与坝址所处的地质构造部位有关。河谷两岸天然地下水位低缓会加大库盘、谷幅变形量,地形地貌条件会影响库盘、谷幅变形量的大小和分布。

必须指出的是天然情况下溪洛渡水电站阳新灰岩含水层揭示有温水存在^[15],干燥的玄武岩含水层原始地温也较高,水库蓄水后温度的改变也是影响应力调整变化的因素之一。本文只是从渗流场角度分析、认识谷幅变形的成因,研究谷幅变形的形成条件,为正确认识溪洛渡水电站谷幅变形机理提供地质和水文地质科学依据。建议今后研究应综合各因素构建溪洛渡水电站谷幅变形计算分析模型、探明各因素的主次关系,科学地计算预测谷幅变形发展趋势,为在建和待建的水电工程提供借鉴。

参考文献:

[1] 汤雪娟,张冲,王仁坤. 渗流场作用的地基变形对高拱坝结构的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增刊2): 645-650. (TANG Xuejuan, ZHANG Chong, WANG Renkun. Analysis on foundation deformation and its effect on of high-arch dam structure considering seepage filed[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(Sup2): 645-650. (in Chinese))

[2] 张冲,王仁坤,汤雪娟. 溪洛渡特高拱坝蓄水初期工作状态评价[J]. 水利学报, 2016, 47(1): 85-93. (ZHANG Chong, WANG Renkun, TANG Xuejuan. Safety evaluation of Xiluodu ultra-high arch dam during the initial impoundment period[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(1): 85-93. (in Chinese))

[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(2): 100-103. (LIU Youzhi, XIANG Jianfang, FAN Qixiang, et al. Stress impact analysis of valley shrinkage deformation on arch dam[J]. Water Resources and Power, 2017 (2): 100-103. (in Chinese))

[4] 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. (LIANG Guohe, HU Yu, FAN Qixiang, et al. Analysis on valley deformation of Xiluodu high arch dam during impoundment and its influencing factors [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(9): 101-110. (in Chinese))
- [5] 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. (YANG Qiang, PAN Yuanwei, CHENG li, et al. Mechanism of valley deformation of high arch dam and effective stress principle for unsaturated fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2258-2269. (in Chinese))
- [6] 邓建辉, CHAN D H, MARTIN C D,等. 一例由蓄水诱发的库岸边坡变形[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(1): 21-24. (DENG Jianhui, CHAN D H, MARTIN C D, et al. Impounding-induced deformation of reservoir banks, a case history [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(1): 21-24. (in Chinese))
- [7] 伍法权,祁生文. 江垭水库大坝及近坝山体抬升变形机理[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 295-300. (WU Faquan, QI Shengwen. Mechanism of uplift deformation of the dam foundation of Jiangya reservoir and the nearby mountains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 295-300. (in Chinese))
- [8] 王兰生,金德濂,骆诗栋. 江垭大坝山体抬升的形成机制与趋势分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1107-1115. (WANG Lansheng, JIN Delian, LUO Shidong. Formation mechanism and trend analysis of lifting of valley and dam in Jiangya hydraulic project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1107-1115. (in Chinese))
- [9] 蒋中明,李双龙,丁鹏,等. 水库枢纽区抬升变形水文地质结构模式研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2026-2033. (JIANG Zhongming, LI Shuanglong, DING Peng, et al. Modes of hydro-geological structure for uplift deformation near reservoir pivot[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2026-2033. (in Chinese))
- [10] 林鹏,刘晓丽,胡昱,等. 应力与渗流耦合作用下溪洛渡拱坝变形稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1145-1156. (LIN Peng, LIU Xiaoli, HU Yu, et al. Deformation stability analysis of Xiluodu arch dam under stress-seepage coupling condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1145-1156. (in Chinese))
- [11] 周创兵,陈益峰,姜清辉,等. 论岩体多场广义耦合及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1329-1340. (ZHOU Chuangbing, CHEN Yifeng, JIANG Qinghui, et al. On generalized multi-field coupling for fractured rock masses and its applications to rock engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1329-1340. (in Chinese))
- [12] 刘武,陈益峰,胡冉,等. 基于非稳定渗流过程的岩体渗透特性反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 362-373. (LIU Wu, CHEN Yifeng, HU Ran, et al. Back analysis of rock permeability with consideration of transient flow process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 362-373. (in Chinese))
- [13] 周志芳. 裂隙介质水动力学原理 [M]. 北京:高等教育出版社, 2007.
- [14] 周志芳,王锦国. 金沙江溪洛渡水电站环境水文地质综合评价[J]. 高校地质学报, 2002, 8(2): 227-235. (ZHOU Zhifang, WANG Jinguo. Comprehensive assessment of environmental hydrogeology in Xiluodu hydropower station[J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(2): 227-235. (in Chinese))
- [15] 周志芳,王锦国. 河流峡谷区地下水温度异常特征分析[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 62-66. (ZHOU Zhifang, WANG Jinguo. Abnormal characteristics analysis of groundwater temperature field in canyon areas[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(1): 62-66. (in Chinese))
- [16] 周志芳,杨建,杨建宏. 确定缓倾结构面渗透性参数的现场试验法[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4): 375-379. (ZHOU Zhifang, YANG Jian, YANG Jianhong. A field test method for determining permeability parameters of gently dipping structural face in rockmass[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(4): 375-379. (in Chinese))
- [17] 江汇,武明鑫,张楚汉. 金沙江溪洛渡水电站水库蓄水河谷-库坝变形机理研究[R]. 北京:清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 2018.
- [18] 盛金昌,速宝玉,赵坚,等. 渗流应力耦合分析在溪洛渡电站坝址区的应用[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 410-415. (SHENG Jinchang, SU Baoyu, ZHAO Jian, et al. Coupled stress and fluid flow analysis and concerned application in Xiluodu hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 410-415. (in Chinese))
- [19] 肖诗荣,刘德富,胡志宇. 世界三大典型水库型顺层岩质滑坡工程地质比较研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 52-59. (XIAO Shirong, LIU Defu, HU Zhiyu. Engineering geologic study of three actual dip bedding rockslides associated with reservoirs in the world[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 52-59. (in Chinese))
- [20] HE Xiufeng, JIA Dongzhen, SANG Wengang. Monitoring steep slope movement at Xiaowan dam with GPS multi-antenna method [J]. Empire Survey Review, 2011, 43(323): 462-471.