

江垭水库大坝及近坝山体抬升变形机理

Mechanism of uplift deformation of the dam foundation of Jiangya reservoir and the nearby mountains

伍法权, 祁生文

(中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室, 北京 100029)

摘要: 首先介绍了坝区的地质背景以及大坝及近坝山体抬升变形现象及其规律, 然后对可能引起大坝和附近山体抬升的5种原因进行了详尽分析, 明确指出了承压热水含水层水头的变化是引起大坝及近坝山体抬升的根本原因。

关键词: 江垭; 大坝; 抬升变形; 机理

中图分类号: TV 223.31

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)04-0449-06

作者简介: 伍法权(1955-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为工程地质和岩体力学, 系统提出统计岩体力学理论体系。

WU Fa-quan, QI Shang-wen

(Key Lab. of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China)

Abstract: The geological background of Jiangya reservoir and the phenomena and regularity of uplift deformation of the dam foundation and the nearby mountains are introduced. Five possible reasons that lead the phenomena are analyzed respectively in details. This paper points out that change of head of hot water aquifer is the predominant reason leading the uplift deformation.

Key words: Jiangya; dam; uplift deformation; mechanism

0 引言*

江垭水利枢纽工程位于湖南省慈利县境内澧水一级支流—娄水的中游, 水库正常蓄水位 236 m, 死水位 188 m, 下游河床水位 125 m。大坝为全断面碾压混凝土重力坝, 建基面高程 114 m, 坝顶高程 245 m, 坝高 131 m, 坝顶总长 368 m, 右起第 5~7 坝段为溢洪坝段。大坝主体工程于 1995 年 7 月开工, 至 1999 年底基本建成, 投入试运行。库水位于 1998 年 8 月蓄至 170 m, 并于 2000 年 11 月接近水库正常高水位, 达到 235.7 m。根据坝区安全监测网 1998 年 8 月至 2000 年 12 月的 5 次观测, 近坝山体抬升位移达到 3.63~19.08 mm; 而坝底 120 m 高程灌浆排水廊道内 4~8 号坝段水准观测资料表明, 在 1998 年 12 月至 2001 年 4 月的 13 次监测中, 大坝抬升变形量达到 28.4~32.6 mm。

大坝及近坝山体产生如此规模的普遍抬升现象, 在国内外水电工程中是少见的。前苏联英古里水电站高拱坝曾有过类似报道^[1], 但抬升位移量仅几个毫米。江垭电站大坝与近坝山体的抬升变形、发展趋势及其对大坝安全的影响问题引起人们的严重关注。本文详细分析了大坝及近坝山体抬升变形现象以及规律, 列出了可能引起大坝及附近山体抬升的 5 种原因, 并分别进行了分析, 阐明了大坝及近坝山体的抬升变形机理。

1 坝区地质背景

坝区位于宽缓的江垭向斜 NW 翼, 岩层走向与河

流方向近于正交, 倾向下游, 平均倾角 38°左右(图 1)。近坝库区主要出露泥盆系砂页岩建造和二叠系碳酸盐岩建造。从老到新, 即自上游向下游出露如下岩组: ①小溪组(D_{2x})砂质页岩、砂岩及石英砂岩, 厚 200 m 以上。②云台观组(D_{2y})石英砂岩夹薄层砂泥质页岩, 厚 173 m, 层顶面出露于坝前 160~310 m。砂岩中构造裂隙发育, 构成区内主要的含水层, 且为一承压热水含水层。③黄家蹬组(D_{3h})~下二叠统栖霞组(P_{1q})砂岩、页岩及泥质灰岩等, 厚度 67 m, 构成底部隔水层。④栖霞组 P_{1q}^{2~6}厚层灰岩与白云质灰岩, 厚 376 m, 构成裂隙岩溶含水层。由于本层出露于坝基及坝下游大片区域, 并有良好的坝基排水系统, 其地下水渗流对坝基及近坝山体的变形与稳定性影响不突出。⑤吴家坪组(P_{2w})、大隆组(P_{2d}): 硅质、白云质灰岩、页岩及石煤层等。本区地震基本烈度为 VI 度, 在构造上属于相对稳定的地块。

勘探表明 D_{2y}承压裂隙热水含水层富水性好, 其透水性是其它地层的 3~5.8 倍^[2]。已证实云台观组(D_{2y})热含水层分布受江垭向斜构造控制, 在顺河向剖面上呈现“U”型形态特征(图 1)。含水层在高程约 1000 m 的向斜 SE 翼露头区接受降水补给, 沿含水层运移 20~24 km 至库内排泄, 补给区与排泄区高差约为 875 m, 流量集中于含水层中上部, 隔水层隔热性能较好, 热水水量交换极弱, 具有良好的隔水性。据垂直于岩

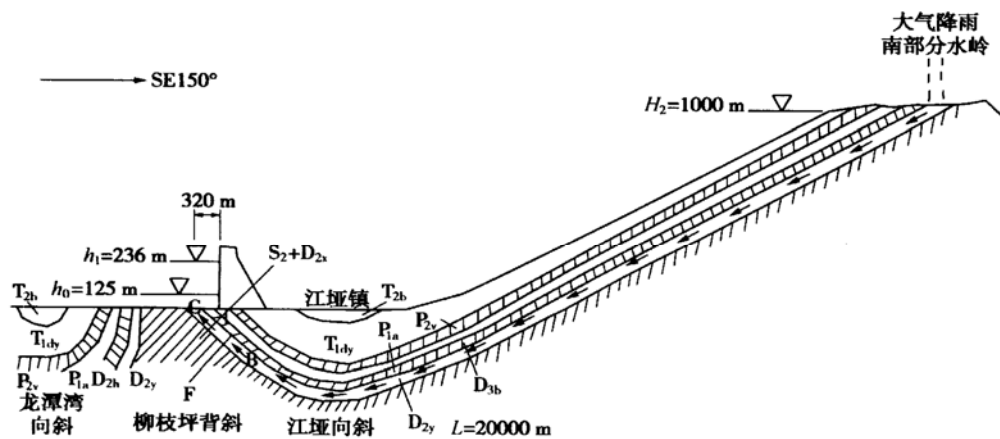


图 1 坝区地质结构示意图
Fig. 1 Geological structure of dam site

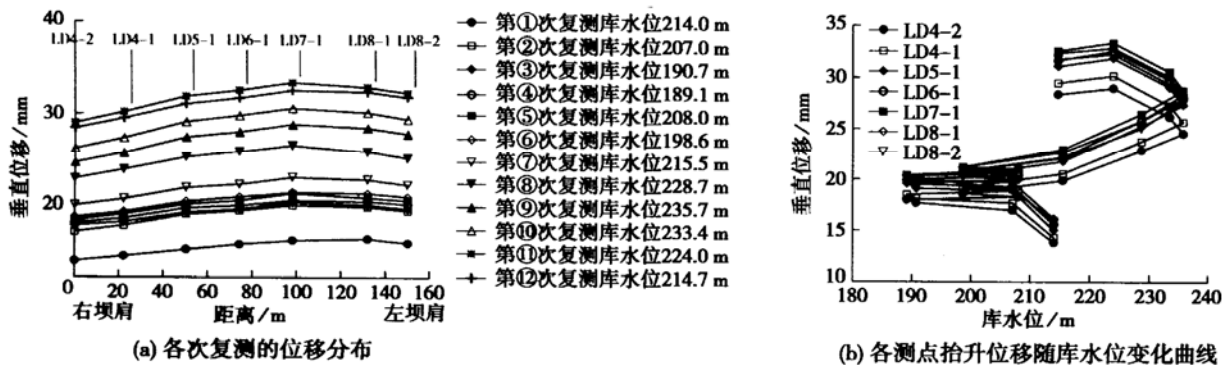


图 2 EL120 廊道各测点的位移
Fig. 2 Displacement of points at EL120 aisle

层走向的热水勘探剖面揭露,在向斜核部水温可以达到 70℃以上,而在坝前排泄区,自下而上温度逐步降为 53~ 36℃^[2]。

2 大坝及近坝山体抬升变形特征

为了保证大坝安全运营,在近坝山体、大坝上下游两岸山体一定范围内布设安全监测网,在大坝底层 120 m 高程灌浆排水廊道及坝顶布设水准观测线。变形监测情况见表 1,表中各类监测数据均以首测值为 0 作为基准值。监测结果见图 2~ 4。

图 2 是 EL120 廊道上布置的 LD4- 2 LD4- 1 LD5- 1 LD6- 1 LD7- 1 LD8- 1 LD8- 2 等 7 个监测点的监测结果,代号中 LD 代表廊道,数码 4~ 8 代表坝段号,1 和 2 分别为各坝段的测点号。图 2(a)为首测后 12 次复测的测点抬升位移曲线,每条曲线对应于一次监测及其相应库水位条件下的抬升位移分布。图 2(b)为 EL120 廊道各测点抬升位移随库水位变动的变化规律。可见自 1998 年 12 月首测后,各坝段坝基抬升基本同步,位于左岸的 7 坝段抬升量较大,达到 32.6 mm,较右岸的 4 坝段大出 4.2 mm。

表 1 大坝及近坝山体抬升变形监测情况

Table 1 Monitoring condition					
监测项目	监测方法	测点数量	布点区域	测次	测点抬升位移/mm
安全监测网	一等水准网	24	大坝上下游 1300 m 以内岸坡,左岸 11 个点,右岸 13 个点	1998 年 8~ 9 月首测	0
				1999 年 8~ 9 月第 1 次复测	1. 01 ~ 7. 65
				2000 年 12 月第 4 次复测	3. 63 ~ 19. 08
120 廊道	一等水准	7	大坝 120 灌浆排水廊道内,右起 4~ 8 各坝段	1998 年 12 月首测	0
				1999 年 10~ 11 月第 1 次复测	13. 8 ~ 16. 2
				2000 年 3~ 4 月第 12 次复测	28. 4 ~ 32. 6
坝顶	一等水准	13	坝顶,各坝段	2000 年 6 月首测	0
				2001 年 3 月第 6 次复测	8. 0 ~ 12. 4

2000 年 6 月在各坝段坝顶布设了 13 个一等水准点,从右坝端起分别为 BD- 01~ BD- 12。图 3(a)为不同测次坝顶抬升位移分布图,由下至上依次为 4 次复测曲线。图 3(b)为各测点抬升位移随库水位变化的曲线,两图反映出与图 2 相似的特征。综合分析图

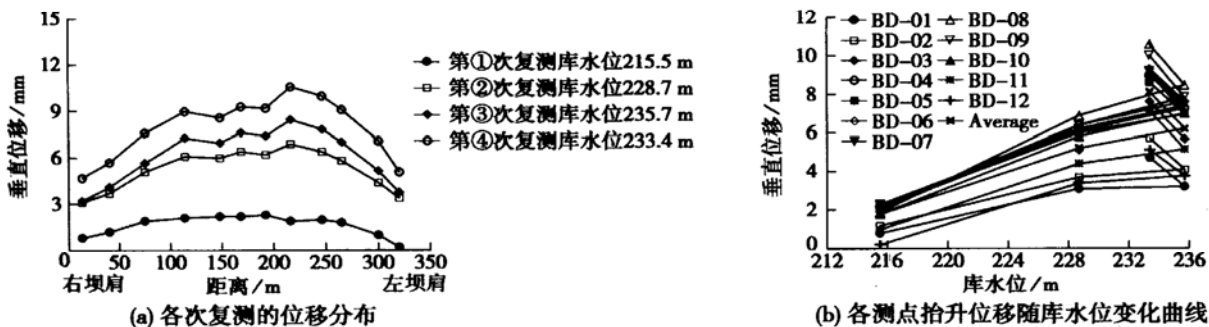


图3 坝顶各测点的位移

Fig. 3 Distribution of uplift deformation on top of the dam

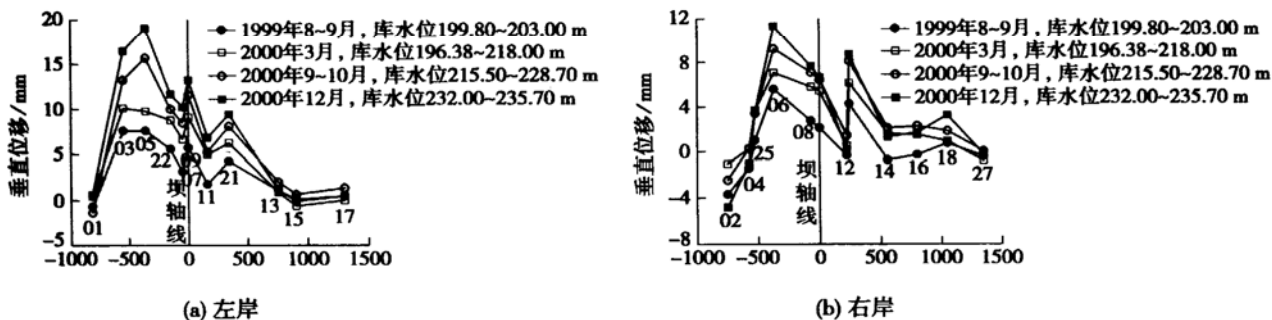
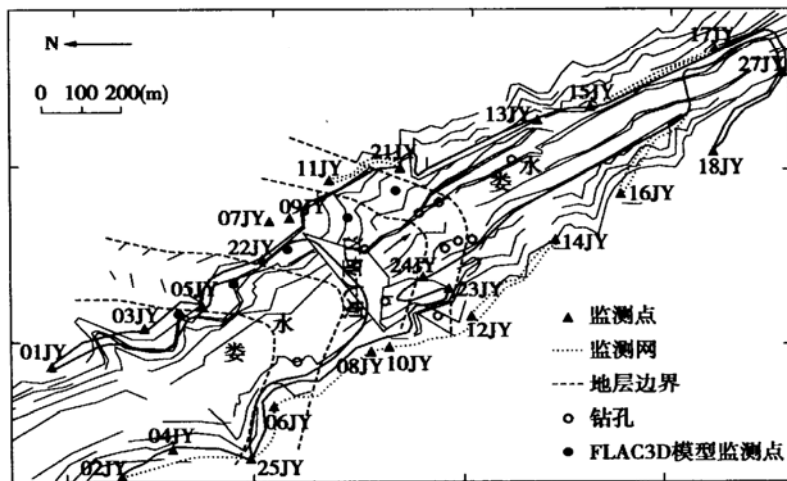


图4 坝区监测网各监测点抬升位移分布

Fig. 4 Uplift displacements of monitored points at four water levels



岸 13~15 测点和右岸 16~18 号测点后垂直位移基本收敛。03~05 号测点分别布置在坝轴线上游 550 m 和 360 m 处, 04~06 号测点分别布置在坝轴线上游 580 m 和 380 m 处。从两岸纵剖面图来看, 这个位置对应于热水含水层云台观组 (D_{2y}) 和其上隔水层黄家蹬组 (D_{3h}) 接触的部位。也就是说, 热水含水层隔水顶板部位是山体抬升最显著的部位。②对比左岸和右岸对应位置的垂直位移可以发现, 除个别点外, 左岸垂直位移明显大于右岸。例如, 左岸 5 号监测网点最大垂直位移达到 19.08 mm, 而右岸监测点最大垂直位移则为 11.04 mm。③与前述大坝抬升位移规律相似, 监测网点的垂直位移变化和库水位的变化具有良好的相关性, 表现为库水位增加, 垂直位移增大。这也反映了近坝山体的抬升变形与大坝变形有较好的一致性。可以推断, 大坝与近坝山体的抬升变形具有整体性特征, 不会因差异变形而造成局部破坏; 两者的抬升变形来自于相同的原因。

3 大坝及近坝山体抬升变形机理分析

针对大坝和近坝山体异常抬升变形的成因, 近年来开展了一系列研究工作和专家咨询, 提出了 5 种可能影响因素: ①水库蓄水改变热水含水层排泄区附近热力学环境, 岩体增温引起岩体的热膨胀效应; ②坝基岩体水文地质条件的变化引起岩体遇水膨胀变形; ③构造应力的作用; ④库水位上升, 坝基浅部扬压力增大造成大坝抬升; ⑤承压含水层对其上部隔水顶板岩体的扬压力作用随库水位的升高而增大, 导致隔水顶板产生抬升变形; 水库蓄水引起承压含水层岩体中孔隙水压力增加, 有效应力减小, 从而导致承压含水层产生回弹变形。但是这些因素中哪些是本质的和控制性的, 尚需进行更深入的分析。只有找出控制性因素, 才能使工程处理措施的选择和设计更有针对性。下面首先简要分析 ②、③、④三个因素, 然后重点讨论因素 ①和因素 ⑤。

首先, 由于坝基及两岸 130 m 高程以下的岩体在水库蓄水前就长期位于地下水位以下而处于饱水状态, 水库蓄水后这部分岩体的含水条件是没有变化的, 因此这部分岩体不会因水库蓄水而产生膨胀矿物遇水膨胀变形问题。其次, 水云母是遇水膨胀性较弱的矿物类型, 加之含水云母矿物的岩层厚度极其有限^[2], 即使发生膨胀变形, 其变形量值与现有大坝抬升变形量相比是微小的, 可以认为由膨胀矿物引起大坝及坝基岩体抬升变形的可能性不大。

地应力测量资料表明残余构造应力场在区内地应

力场中占据重要地位^[2], 但是构造应力场对地形变的作用通常具有区域性和变化相对缓慢的特点, 这与大坝及近坝山体抬升变形明显的局部性特征以及快速波动特征不相符, 因此构造应力作用作为影响本区局部抬升的主要因素是不合适的。

水库蓄水后, 可能产生一定的坝下和绕坝渗流, 如果坝下防渗帷幕后没有有效的排水系统, 将会导致坝基浅部扬压力增大, 引起大坝的抬升变形。事实上, 坝基防渗帷幕深入到底部隔水层, 两岸向上游转折, 形成了良好的封闭条件。图 6 是 1998 年 10 月至 1999 年 12 月之间大坝中部第 5 坝段坝基扬压力与库水位关系曲线。可以看出, 幕前扬压力随库水位变化呈现明显的相关波动, 水头值低于库水位约 20 m, 幕后扬压力随库水位波动基本维持不变, 稳定水头值约为 130 m, 这表明坝下防渗帷幕较好的封闭性和幕后排水系统的有效性。坝基扬压力不会成为引起抬升变形的主要原因。

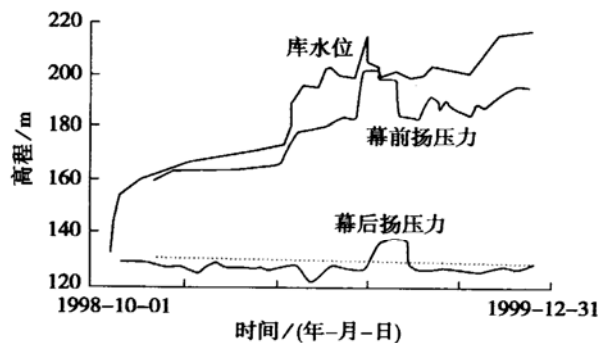


图 6 第五坝段坝基浅部扬压力与库水位的关系

Fig. 6 Uplift pressure of the fifth dam section at the shallow dam foundation vs. water level in the reservoir

3.1 岩体热膨胀效应成因可能性分析

引起岩体热膨胀效应有如下 3 种可能: ①库水位抬高使得云台观组热水含水层排泄区水头值增高, 由于该层在向斜南翼远程补给区的水头基本上为定值, 因此热水承压含水层的水力梯度将降低, 导致热水层的水交替速度减缓, 进而引起含水层和隔水顶板岩体增温, 产生热膨胀变形; ②热水承压含水层排泄区水头值增高, 向隔水顶板的渗透压力增大, 隔水顶板中裂隙系统被高压渗流挤劈张开, 使得热水越流增强, 导致隔水顶板岩层增温而发生热膨胀变形; ③水库蓄水在热水含水层排泄区增加覆盖水层, 阻碍了热水层热量的扩散, 导致排泄区附近一定范围内岩体增温而发生热膨胀变形。下面就这 3 种情况略作分析。

取一维热弹性模型为例分析, 若岩体热膨胀系数为 α , 岩体温度增量为 ΔT , 增温岩层厚度为 H (α , ΔT 和 H 的单位分别为 K^{-1} , K 和 m), 则岩体热膨胀变

形量为 $u = \alpha \Delta TH$ 。本区岩石热膨胀系数一般为 10^{-6}K^{-1} 量级(见表2), 要使坝基岩体产生数十毫米的热膨胀变形, 增温岩层厚度需达到数百米, 且温度增量需大于 10°C , 这对于本区是极其困难的。因此, 由温度场改变引起几十个毫米的热膨胀变形, 可能性不大。再加上由于建库前热含水层水力梯度较大, 地下热水以较快的速度排泄, 源源不断的热量补给保证了含水层排泄区及其邻域维持在一个稳定温度场。而水库蓄水后含水层水力梯度变小, 地下水运移速度将减缓, 由于排泄区岩体中地温梯度远比热含水层沿程地温梯度大, 热水会有更长的时间发生热散失而降低岩温。因此热水交替速度减缓不仅不会引起岩体增温而导致热膨胀变形, 反而会发生岩体降温。这一结论已得到地温监测资料的证实。

表2 岩石热膨胀系数实测区间值表

Table 2 Thermal expansion coefficient of rock 10^{-6}K^{-1}

温度/ $^\circ\text{C}$	灰岩	砂岩	页岩
30	0.55~13.4	0.55~15.2	2.5~11.1
40	0.55~8.9	1.0~14.5	4.1~11.5
50	0.55~6.0	1.6~13.0	5.1~11.5
60	0.55~7.2	2.3~11.9	5.5~11.0
70	0.55~5.1	1.7~11.5	

注: 引自武汉理工大学材料研究与测试中心 2001-05 和 2001-102 号报告测试数据。

建库前后的地温观测孔的观测对比发现, 建库后热水层隔水顶板中 P_{1q}^{1-1} 及其以上的地层岩温比建库前低, 地温降低了 $3\sim 5^\circ\text{C}$ ^[3]。自 1996 年 10 月至 2000 年 3 月连续监测的基岩温度曲线显示, 随着时间的推移, 基岩温度逐渐有所降低, 基岩温度自 1996 年 10 月的 27°C 左右降低到 2000 年 3 月的 26°C 左右。此外, 坝基 EL120 廊道各排水孔水温监测资料显示, 自 1998 年 11 月至 2001 年 6 月近 3 年中, 库水位波动幅度达 106 m, 曾于 2000 年末接近正常蓄水位 236 m 并维持近 2 个月, 而 EL120 廊道各排水孔水温却持续稳步下降, 水温由 1998 年 11 月的 $27\sim 32^\circ\text{C}$ 下降到 2001 年 6 月的 $17\sim 26^\circ\text{C}$ 。这种水温降低主要是由于防渗帷幕下游侧大量的排水孔增大了坝基岩体的水交替而引起的。上述资料表明, 坝基岩体的温度在稳步下降。热水含水层承压水头增大引起越流增强不会引起热增量而导致热膨胀变形。

库水温的监测资料表明发现库水温度随着深度的变化差别不大, 一般温度在 $12\sim 14^\circ\text{C}$ 左右, 而且多表现出水面温度略高于深部温度的特征^[3]。因此库水覆盖阻热作用是不存在的, 由此不会引起基岩热膨胀变形。

综上所述, 水库蓄水导致岩体增温实际上是微不

足道的; 由此引起的岩体增温和热膨胀变形是可以不考虑的。

3.2 承压热水含水层水头变化对变形的影响分析

从观测资料知道, 大坝及近坝山体的抬升位移与水库作用有如下相关性^[4]: ①变形分布空间规律的相关性。抬升变形相对集中于坝前地带, 并与承压热含水层地下水对隔水顶板的扬压力作用有密切的联系。②变形动态规律的相关性。抬升变形与库水位波动有密切的相关性。大坝抬升对库水位上升反映较为敏感, 但对库水位的回落的反映一般有 2 个月或更长时间的滞后期。这种抬升变形对库水位波动的密切关系是说明水库蓄水引起大坝抬升的重要依据。上述相关性表明水库蓄水是引起大坝与坝基岩体抬升变形的控制性因素。

根据图 1 的简化力学分析图, 可以计算得到: ①蓄水后排泄点 C 和坝下方热含水层顶板处的水压力增量分别为 1.11 MPa 和 1.087 MPa; ②由于坝线上游热含水层顶板单位宽度岩层所承受的地下水扬压力 $F = \frac{1}{2}(p_c + p_B)L_B \times 1$, 可以计算得到蓄水前后扬压力差值 $\Delta F \approx 40640 \text{ t}$ 。如此巨大的扬压力增量对坝基岩体来说的确是一个不可忽视的作用因素。

根据前面分析可以推断, 热含水层扬压力可能通过如下 2 种方式引起上部岩体的抬升变形, 即 ①库水位上升引起热含水层扬压力增加, 扬压力增量导致隔水顶板及其上部岩体的掀斜变形(见图 7)。事实上, 这是一种在不均匀分布力作用下的不等厚悬臂梁模型。在承压水含水层隔水顶板上, 扬压力垂直于层面作用, 且压力随深度而增加; 隔水顶板以上的岩层厚度向下游迅速增大, 因而变形刚度也迅速增大。这两方面因素的共同作用决定了上部岩体的抬升变形量在盖层厚度较小的上游段较大, 而向下游逐步减小。②热含水层中裂隙水压力增加, 岩体有效应力降低, 导致岩体发生回弹变形。考察热含水层中任意一点, 取一面平行于隔水顶板的六面体, 设水库蓄水前后裂隙水压力差为 Δp , 则六面体垂直于隔水顶板的侧面上总应力差值为 $\Delta \sigma = \Delta p$, 岩体变形模量为 E , 热含水层参与变形的层厚为 H , 则根据有效应力原理, 水库蓄水引起的岩体回弹变形量 $u = \frac{\Delta \sigma}{E}H = \frac{\Delta p}{E}H$ 。若云台观组地层变形模量取为 $E = 11 \text{ GPa}$, 由于库水位自 125 m 抬升至 236 m 引起的热含水层坝前段平均裂隙水压力增量为 $\Delta p = 1.1 \text{ MPa}$, 则有 $u = 1H \times 10^{-4}$ 。对于 173 m 厚的岩层, 垂直于层面方向的回弹变形量约为 17.3 mm。分析表明, 当水库蓄水时, 作用于热含水层顶板

的荷载的减小量值 $\Delta\sigma$ 正是热含水层中裂隙水压力的增量 Δp 。因此,用弹性力学方法分析所得的结果与有效应力原理分析所得的结果将完全相同。事实上,上述 2 种变形相互协调,正是热含水层中裂隙水压力的增高,扬压力造成的掀斜作用使得热含水层有了卸荷回弹变形的余地;反过来说,正是热含水层的回弹变形导致了对上部岩层的掀斜作用。上述 2 种作用方式从本质上来讲是一致的。

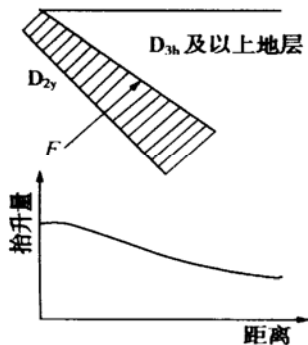


图 7 顺河方向抬升机理分析图

Fig. 7 Mechanism of uplift along the river

根据坝前地质结构和热含水层扬压力作用方式,作为定性分析,可以把抬升变形问题在横河方向上概化为两端约束的固端梁的横弯作用。梁为热含水层顶板地层,在梁的下侧是基本均匀分布的热含水层扬压力;而梁的上侧则是不均匀分布的压重作用,河床部位地层厚度最小,因而压重最小;两端则由于山体逐渐雄厚而重压约束变强(见图 8)。显然,这种横弯作用将导致坝体的中间部位抬升变形大于两端。以上分析与大坝及近坝山体抬升变形的监测资料是吻合的。综上所述可见,水库蓄水引起坝前热含水层中地下水压力水头增高,是导致大坝与坝基岩体抬升变形的控制性因素。

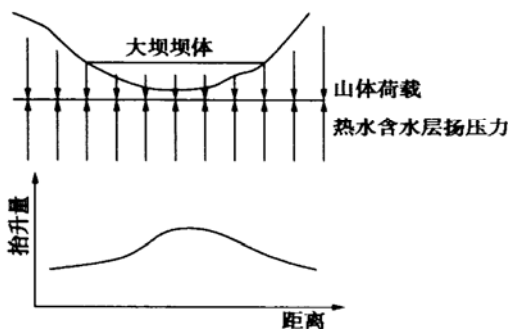


图 8 横河方向抬升机理分析图示

Fig. 8 Mechanism of uplift along transverse direction

4 结 论

本文交代了江垭水利枢纽大坝和近坝山体的抬升情况,列出了导致大坝坝体和附近山体抬升的五种可能原因,在此基础上进行了详尽的分析得出如下结论:

(1) 大坝各坝段基本同步抬升,变形属整体变形;各坝段的抬升位移与库水位变化密切相关,并且对库水位抬升反应敏感,而对库水位下落则较迟钝。

(2) 近坝山体抬升变形从上游到下游总体上表现为先增大,然后逐渐减小的过程,热水含水层隔水顶板的位置抬升量最大;以河流为界,两岸对应点的抬升是左岸略大于右岸,并且近坝山体的抬升变形也与库水位变化密切相关。

(3) 水库蓄水引起坝前热含水层中地下水水头增大是导致大坝坝体和附近山体抬升的本质原因。热承压含水层水头的增大一方面导致了上部隔水层的扬压力的增大,同时导致了热水含水层中有效应力的减小,前者导致了隔水层顶板的掀斜,后者导致承压含水层卸荷回弹,这两者从本质是一致的,二者的协同作用导致了大坝及附近山体的异常抬升,这就是大坝和附近山体抬升的机理。

本项目工作合作过程中,得到了水利部湖南水利水电勘察研究院汪士同高工、张汝强高工、澧水开发公司柳胜东经理、唐国进教授、骆诗栋高工,水利部水利规划研究总院李广诚教授等大力协助。同时项目咨询过程中王思敬院士、张宗祜院士、谭靖夷院士、薛愚群院士、王三一院士、陈德基大师、林昭大师、曹征齐教授、徐瑞春教授、马国彦教授、王兰生教授、金德濂教授、陈祖安教授等提出了许多建设性意见。特此致谢。

参考文献:

- [1] Чоговадзе Г. И., Мгебришвили И. М., Ломов И. Е. 英古里水电站[M]. 郑顺伟, 译, 陈宗梁, 校. 中国电力企业联合会科技工作部, 1990.
- [2] 湖南省水利水电勘察研究院. 湖南省江垭水利枢纽工程地质勘察报告[R]. 长沙: 湖南省水利水电勘察研究院, 1991.
- [3] 中国科学院地质与地球物理研究所地质工程中心. 湖南省江垭水利枢纽工程大坝与近坝山体抬升变形研究报告[R]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所地质工程中心, 2001.
- [4] 国家地震局广州地震大队. 湖南慈利(江垭水库)地震基本烈度鉴定意见[R]. 广州: 国家地震局广州地震大队, 1975.