

分叉型库盘变形及对特高拱坝变形性态的影响

吴邦彬^{1,2}, 顾冲时^{1,2}, 陈波^{1,2}, 何明明^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:由弹性理论推导了特高拱坝在库水压力作用下引起的库岸边坡表面横河向水平位移计算公式;利用有限元数值仿真方法模拟了分叉河道的库盘库型,开展了库型因子对库盘基岩和大坝变形的敏感性分析。理论分析和数值计算结果表明:库水位和岸坡坡角是谷幅收缩的主要影响因素,河道分叉处到坝前距离和库水位是影响库盘变形和坝体变形的显著因素;随着高程增加,库水面以下横河向岸坡变形先向两岸方向增大,然后一直减小,直至转向河谷方向,而库水面以上岸坡一直向河谷方向变形。

关键词:分叉型库盘;特高拱坝;谷幅变形;库盘变形

中图分类号:TV311 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)06-0031-06

The deformation of bifurcation reservoir basin and its influence on deformation behavior of a super-high arch dam//WU Bangbin^{1,2}, GU Chongshi^{1,2}, CHEN Bo^{1,2}, HE Mingming^{1,2} (1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract:The calculation formula of the transverse horizontal displacement of the bank slopes of a super-high arch dam caused by the reservoir hydraulic pressure was derived by elastic theory. Based on FEM, the reservoir type of the bifurcated channel was simulated and sensitivity analysis of the influencing factors on the reservoir basin and the dam was conducted. Theoretical analysis and numerical calculations indicate that the main influencing factors of the valley shrinkage are the reservoir water level and the bank slope angle. The distance from the river bifurcation to the dam and the reservoir water level are significant factors affecting the deformation of the reservoir basin and the dam. With the increase of elevation, the transverse deformation of the bank slope below the water surface increases on both sides of the banks and then decreases in the valley direction, while the bank slope above the water surface always deforms in the valley direction.

Key words: bifurcation reservoir; super-high arch dam; valley deformation; reservoir basin deformation

中国西南地区已建一批200 m级以上的特高拱坝,如锦屏一级(坝高305 m)、小湾(坝高294.5 m)、溪洛渡(坝高285.5 m)、拉西瓦(坝高250 m)、二滩(坝高240 m)、构皮滩(坝高232.5 m)等^[1],其建设水平已经达到世界领先水平^[2]。随着这批特高拱坝进入蓄水运行期,其安全问题愈加得到重视,尤其在初次蓄水阶段形成的巨型水库对坝体及近坝山体的安全状态的影响^[3]。通过对高坝大库的原型监测资料整理分析后发现,锦屏一级^[4]、小湾^[5-6]和溪洛渡^[7]等特高拱坝普遍存在库盘变形、谷幅缩窄、拱坝弦长缩窄等问题。其形成的机理以及是否对大坝的工作性态产生影响,目前还处于探索阶段,有待

工程界专家学者进一步研究。

拱坝是固定在基岩上的超静定结构,库盘基岩在巨大库水压力作用下,将产生库盘变形以及库岸边坡变形,并引起拱坝坝基变形,进而导致拱坝产生附加应力和变形。传统对于高拱坝工程的设计、计算及监测方面的研究工作多局限于近坝区范围,而远坝区库盘基岩变形往往被忽略,致使在高拱坝工作性态分析时,坝体变形的理论和数值计算结果与原型监测数据常存在较大差异。Stucky^[8]研究发现坝体变形的实测值比理论计算值要小,认为库底和两岸在库水压力作用下产生沉降变形是导致这种差异的原因之一。Herzog^[9]研究表明土石坝、重力坝

基金项目: 国家自然科学基金(51739003,51609074);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室基本科研业务费(2019025912)
作者简介: 吴邦彬(1986—),男,博士研究生,主要从事水工结构安全监控及数值仿真研究。E-mail: wubangbin1986@126.com
通信作者: 陈波(1986—),男,副教授,博士,主要从事水工结构安全监测和健康诊断研究。E-mail: chenbohhu@126.com

和拱坝都会受到库盘变形的影响,认为由库水重力产生的库盘沉降在坝上游一段距离处最大,引起坝基向上游转动,从而带动坝顶向上游倾斜,抵消了由坝面水压作用产生的坝体向下游变形和库水压力作用使河谷变宽引起的坝体向下游倾斜。吴中如等^[10]在对龙羊峡重力拱坝的工作性态分析中,认识到高坝大库存在库盘变形、谷幅收缩、拱坝弦长缩窄等问题,并就其对大坝工作性态的影响开展了一些探索性研究。杜小凯等^[11-12]研究了库盘变形对大坝变形性态的影响,提出了评价大坝工作性态必须考虑库盘变形影响的结论。对于谷幅收缩等现象,目前其机制解释比较少,且未形成统一的意见。杨杰等^[13]针对李家峡的谷幅变形分析认为其主要原因是裂隙岩体及其破碎带受压、渗透压力增大、岩体力学参数降低以及坝体与库岸边坡的互馈作用。刘有志等^[14]研究认为谷幅和弦长收缩变形的主要原因是库盘水压、库岸边坡开挖及蓄水扰动引起的蠕变变形。杨强等^[4]研究认为高拱坝谷幅变形机制是由于蓄水初期库水在高压作用下快速进入岩体的主要裂隙面,改变裂隙附近岩体的平衡状态,使岩体产生塑性变形引起的。

特高拱坝谷幅收缩、弦长缩窄的机理及其对工程服役安全的影响是坝工界亟待解析的关键问题之一,这与高坝大库的库盘库型有直接联系。上述研究可以证明库盘水压是引起谷幅变形的重要因素,但目前尚缺少不同库盘类型,尤其是河谷型态、河道分叉角、分叉点离坝长度等库盘因子对库盘基岩和大坝变形的量化影响机制解析。本文主要通过理论推导和数值模拟,分析分叉河道的库盘变形影响因子,探讨其对大坝变形的影响。

1 不同河道的分类型式

在实际工程中,由于河道的地形条件复杂多样,大坝建成开始蓄水后将形成多种类型的水库库型。总体上可以归纳为4类型式:直线型(三峡重力坝库型)、拐弯型(溪洛渡拱坝库型)、分叉型(小湾拱坝库型)、突扩型(龙羊峡重力拱坝库型)。

当边界条件对库盘变形影响比较小时,库盘基岩变形可由下式表示:

$$\delta = f(L, \theta_1, \theta_2, E, \mu, B/H, h) \quad (1)$$

式中(部分符号含义如图1所示): L 为大坝到河道分叉处的距离; θ_1, θ_2 分别为河道的两个分叉角; E 为库盘岩基的弹性模量; μ 为库盘岩基的泊松比; B/H 为河道的宽高比; h 为坝前水深。

从式(1)可以得出:①当 $\theta_1=0$ 且 $\theta_2=0$ 时, δ 表示直线型河道的库盘基岩变形;②当 $\theta_1>0, \theta_2\leq 0$ 或

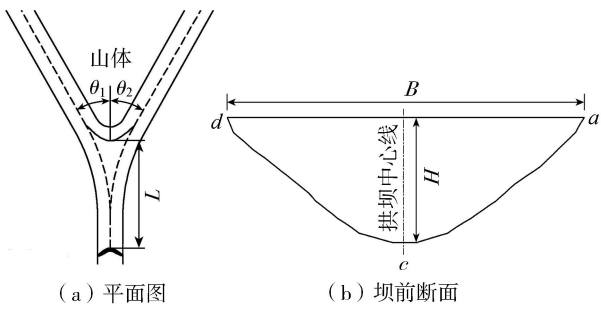


图1 复杂库型河道示意图

$\theta_2>0, \theta_1\leq 0$ 时, δ 表示拐弯型河道的库盘基岩变形;③当 $\theta_1>0$ 且 $\theta_2>0$ 时, δ 表示分叉型河道的库盘基岩变形;④当分叉处没有山体时, δ 表示突扩型河道的库盘基岩变形。

2 库岸边坡基岩表面横河向水平位移(谷幅变形)的理论推导

拱坝坝址通常处在高山峡谷中,河谷一般可简化为对称V型。拱坝在蓄水后上游库区承受库水压力而引起库盘基岩变形,在距拱坝一定距离时,库岸边坡基岩表面横河向水平位移属于平面应变问题。在库水压力作用下,对称V型河谷边坡基岩表面横河向水平位移(图2(a)),可近似分解为库水压力在垂直面投影引起基岩的切向变形(图2(a))和在水平面投影引起基岩的相对压缩变形(图2(c))的叠加。同时假定在水平库水压力作用下, c 点以下基岩的内力与上部库水压力分布相似。

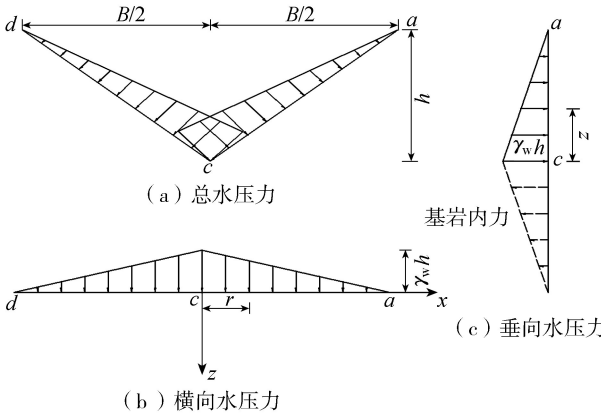


图2 库岸边坡库水压力作用分解图

根据弹性力学^[15]中半平面体在边界上受法向集中力作用得到切向位移进行积分可得到半平面体受对称三角形分布荷载作用的切向位移。因此,由图2(b)可推导得到库水压力在垂直面投影引起库岸边坡 ac 上任一点相对于 c 点的切向位移为

$$\delta_{x1}(r) = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{2E} \left[- \int_0^{B/2} \gamma_w h \left(1 - \frac{x}{B/2} \right) dx - \int_0^r \gamma_w h \left(1 - \frac{x}{B/2} \right) dx + \int_r^{B/2} \gamma_w h \left(1 - \frac{x}{B/2} \right) dx \right] =$$

$$\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{2E} \left[-2 \int_0^r \gamma_w h \left(1 - \frac{x}{B/2} \right) dx \right] = -\frac{(1+\mu)(1-2\mu)\gamma_w h}{E} \left(r - \frac{r^2}{B} \right) \quad (2)$$

式中: γ_w 为水的容重; α 为岸坡坡角, $\cot\alpha = \frac{B}{2h}$ 。由于 $\frac{r}{B/2} = \frac{z}{h} \Rightarrow r = \frac{zB}{2h} = z \cot\alpha$ (其中 z 为库岸边坡各点到谷底的垂直高度), 将其代入式(2)可得:

$$\delta_{x1}(z) = -\frac{(1+\mu)(1-2\mu)\gamma_w}{2E} \left(2rh - \frac{r^2 h}{2B} \right) = -\frac{(1+\mu)(1-2\mu)\gamma_w}{2E} (2z \cot\alpha h - z^2 \cot\alpha) = -\frac{(1+\mu)(1-2\mu)\gamma_w z \cot\alpha}{2E} (2h - z) \quad (3)$$

同理, 由图 2(c) 可得到库水压力在水平面投影引起库岸边坡 ac 上任一点相对于 c 的压缩变形为

$$\begin{aligned} \delta_{x2}(z) &= \frac{2(1-\mu^2)}{E\pi} \int_0^h \gamma_w h \left(1 - \frac{y}{h} \right) \ln \frac{y}{|z-y|} dy - \\ &\quad \frac{2(1-\mu^2)}{E\pi} \int_0^h \gamma_w h \left(1 - \frac{y}{h} \right) \ln \frac{y}{z+y} dy = \\ &\quad \frac{2(1-\mu^2)\gamma_w}{E\pi} \int_0^h (h-y) \ln \frac{y}{|z-y|} dy - \\ &\quad \frac{2(1-\mu^2)\gamma_w}{E\pi} \int_0^h (h-y) \ln \frac{y}{z+y} dy = \\ &\quad \frac{2(1-\mu^2)\gamma_w}{E\pi} \left[\frac{1}{2} h^2 \ln h + z \left(\frac{z}{2} - h \right) \ln z - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} (h-z)^2 \ln(h-z) - \frac{1}{2} hz \right] - \\ &\quad \frac{2(1-\mu^2)\gamma_w}{E\pi} \left[\frac{1}{2} h^2 \ln h + z \left(\frac{z}{2} + h \right) \ln z - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} (h+z)^2 \ln(h+z) + \frac{1}{2} hz \right] = \frac{2(1-\mu^2)\gamma_w}{E\pi} \left[-2zh \ln z + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} (h+z)^2 \ln(h+z) - \frac{1}{2} (h-z)^2 \ln(h-z) - zh \right] \quad (4) \end{aligned}$$

于是, 岸坡边坡 ac 在库水压力作用下产生的基岩表面横河向水平位移可由弹性理论推导得到:

$$\begin{aligned} \delta_x(z) &= \delta_{x1}(z) + \delta_{x2}(z) = \\ &\quad \frac{2(1-\mu^2)\gamma_w}{E\pi} \left[-2zh \ln z + \frac{1}{2} (h+z)^2 \ln(h+z) - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} (h-z)^2 \ln(h-z) - zh \right] + \\ &\quad \frac{(1+\mu)(1-2\mu)\gamma_w z \cot\alpha}{2E} (z-2h) \quad (5) \end{aligned}$$

令 $\delta_x(z) = 0$, 可求出库岸边坡基岩表面横河向水平位移由两岸方向变形转为河谷方向变形的分界

点 z_0 。从式(5)还可以得出, 分界点 z_0 的位置取决于岸坡坡角 α 、基岩变模 E 、泊松比 μ 以及库水位 h 。

以对称 V 型河谷为例, 当取坝前水深 $h = 300$ m, 基岩泊松比 $\mu = 0.25$, 基岩弹性模量为 15 GPa 时, 由式(5)可计算出不同岸坡坡角沿高程的基岩表面横河向水平位移(以向两岸方向为正), 其计算结果见图 3。从图 3 可以看出: ①库岸边坡基岩表面横河向的水平位移沿高程呈先向两岸方向增大后一直减小的变化趋势; ②不同岸坡坡角对基岩表面横河向的水平位移影响较大, 特别是高高程的水平位移随着岸坡坡角不同, 分界点 z_0 位置也不同; 随着坡角的增大, 分界点 z_0 位置上移, 直至不出现分界点, 以致库水位高程以下的河谷两侧整体向两岸方向变形。

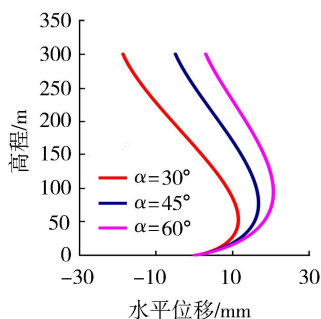


图 3 不同坡角库岸边坡基岩表面横河向水平位移随高程的变化

3 分叉库型的库盘变形对特高拱坝变形的数值分析方法

不同河道的高坝大库形成种类多样的库型, 且坝体、坝基及库盘之间在库水压力作用下存在复杂的互馈作用。为了研究库盘变形对特高拱坝的影响, 需要对坝体、坝基以及库盘进行整体分析, 而有限元法具有对复杂结构物及其边界进行模拟计算的优点。因此, 可采用有限元方法对大范围复杂库型的坝体、坝基及库盘进行联合建模来模拟计算库水压力引起的库盘变形。

3.1 库盘有限元建模范围的收敛准则

在对坝体、坝基及库盘进行有限元联合建模时, 除了保证有限元模型的精度外, 还要对建模范围进行合理的截取, 以保证库水压力作用下库盘变形的准确性。通常模型范围的截取可从两个方面来考虑: 一方面, 在逐渐扩大建模范围的同时, 以模型中某些典型特征点的前后两次计算相对位移差的百分比作为收敛标准(通常取 5%)^[16]; 另一方面, 结合弹性理论和有限元数值计算结果, 给出有限元基础建模范围的截取建议^[17-18], 这通常只适用于重力坝等平面应变问题。

针对 300 m 级特高拱坝复杂库型的库盘变形在巨大库水压力作用下其位移计算量级比较大,采用相对位移差的百分比作为控制标准时,前后两次计算位移差值较大,导致库盘变形的计算结果准确性较低;同时复杂库型的库盘有限元模型是属于三维模型,无法采用重力坝有限元模型截取范围的方式套用。因此,考虑到 SL 601—2013《混凝土坝安全监测技术规范》中对近坝区岩体和高边坡变形监测中水平位移和垂直位移的误差限值规定为 $\pm 2.0\text{ mm}$,拟定以下准则来确定库盘有限元模型截取范围:

$$\begin{cases} \left| \frac{\delta_{i+1} - \delta_i}{\delta_i} \right| \leq 2\% \\ |\delta_{i+1} - \delta_i| \leq 2\text{ mm} \end{cases} \quad (6)$$

式中: δ_i 为选择 i 次有限元模型的计算范围和约束条件时,所计算的测点位移; δ_{i+1} 为选择 $i+1$ 次有限元模型的计算范围和约束条件时,所计算的测点位移。

3.2 分叉库型因子对库盘基岩和特高拱坝变形的影响分析

不同类型的河道在蓄水期会形成不同的库型,在库水压力作用下,它们的库盘基岩变形是不同的,由此对特高拱坝变形的影响也是不同的。因此,需要针对不同河道类型开展库盘基岩和特高拱坝变形的敏感性分析,在此以分叉库型为例来寻求影响库盘基岩变形的显著因子。

当边界条件对库盘变形影响比较小时,由式(1)可知:影响库盘基岩变形的主要影响因素有 L 、 θ_1 、 θ_2 、 E 、 μ 、 B/H 、 h 。 B/H 对库盘基岩变形的影响可由式(2)得到;在实际工程中, μ 对库盘基岩的变形影响较小,一般不作考虑,可根据地勘资料选取; E 对库盘基岩的变形影响较大,可基于库盘变形实测资料反演得到,具体反演过程可参考相关文献^[19-22]。下面重点分析 L 、 θ_1 、 θ_2 、 H 4 个因子对库盘基岩和坝体变形影响的显著程度。

建立库盘有限元模型,模型的边界范围取为上游 21 km、下游 3 km、两岸 6 km、基础深度河床中心线以下 6 km;坝体为坝高 300 m 的双曲拱坝(图 4)。库盘模型采用的地质分层:按小湾工程库盘基岩地质特性进行分层,并且其力学参数是根据小湾库盘水准沉降和三角网水平位移实测资料反演得到的结果来确定^[23],具体分层示意图和模型参数选取如图 5 和表 1 所示;库盘模型采取的边界约束条件为:模型底部边界施加完全位移约束,4 个侧面边界施加链杆法向约束;库盘模型采取的荷载工况为:坝前水深 295 m。规定拱冠梁坝踵为坐标原点,变形计算结果规定顺河向以指向上游方向、横河向以指向右岸方向、沉降以垂直向下为正。

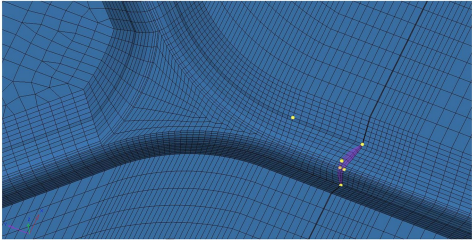
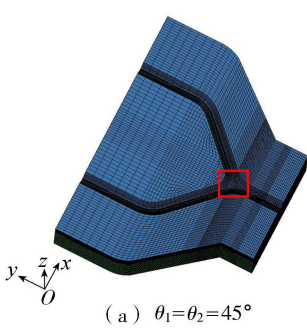


图 4 分叉型库盘有限元模型

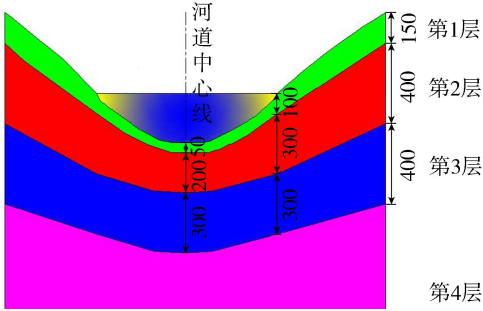


图 5 库盘模型地质分层示意图(单位:m)

表 1 库盘模型地质分层力学参数

地质分层	初始弹性模量/GPa	反演弹性模量/GPa	泊松比
第 1 层	0.6 ~ 5.0	3.134	0.25
第 2 层	5.0 ~ 20	13.640	0.23
第 3 层	20 ~ 30	25.760	0.20
第 4 层	30 ~ 40	35.760	0.20

3.2.1 河道的分叉角对库盘基岩和坝体变形影响的敏感性分析

选取 $L=3.5\text{ km}$ 、 $H=295\text{ m}$,等分叉角 $\theta_1=\theta_2=15^\circ$ 、 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 、 45° 、 50° 、 55° 、 60° 、 65° 、 70° 、 75° ,以及不等分叉角 $\theta_1=30^\circ$ 、 $\theta_2=45^\circ$, $\theta_1=30^\circ$ 、 $\theta_2=60^\circ$, $\theta_1=45^\circ$ 、 $\theta_2=60^\circ$ 共 16 个库盘有限元模型,计算结果见图 6 和图 7,可以看出,河道的分叉角度对库盘基岩变形以及引起拱坝变形的影响不显著。

3.2.2 河道分叉处到坝前距离对库盘基岩和坝体变形影响的敏感性分析

选取 $\theta_1=\theta_2=45^\circ$ 、 $H=295\text{ m}$ 库盘有限元模型,施加坝前不同河道距离 L 的库水压力,计算结果见图 8。从图 8 可以看出:①坝前上游河道距离对坝基表面沉降变形的影响比较敏感;②坝踵与坝趾沉降差与拱冠梁坝顶顺河向位移具有很好的相关性,

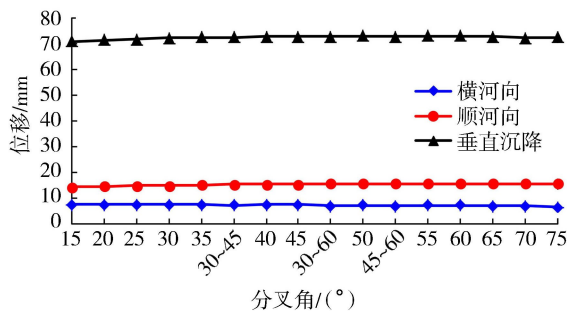


图6 距拱坝上游1 km左岸边坡300 m高程处不同分叉角河道库盘典型点变形分布

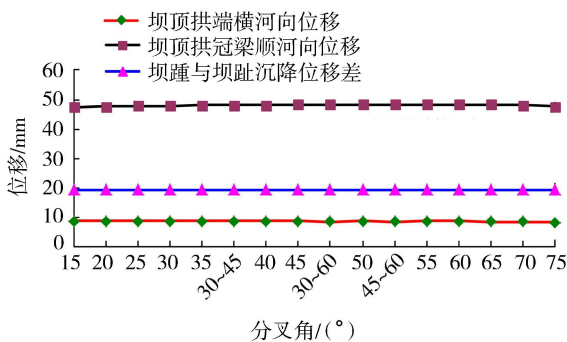


图7 不同分叉角河道库盘变形对拱坝典型点变形影响的分布

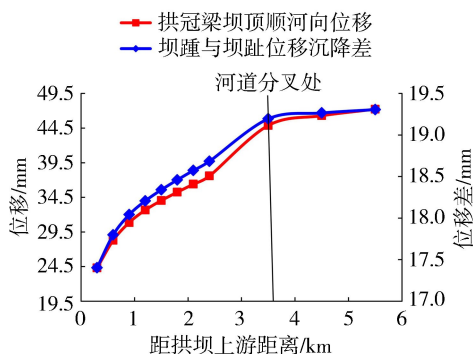


图8 坝踵与坝趾沉降差和拱冠梁坝顶顺河向位移随河道距离的变化

说明库盘基岩变形对坝体变形影响显著;③坝踵与坝趾沉降差与拱冠梁坝顶顺河向位移在库水压力超过河道分叉角处基本趋于收敛。

3.2.3 库水位对库盘基岩和坝体变形影响的敏感性分析

选取 $L=3.5\text{ km}$, $\theta_1=\theta_2=45^\circ$ 库盘有限元模型, 施加不同库水压力, 计算结果见图9~11, 从图中可以看出:①拱冠梁及坝基各高程点顺河向位移随库水位的升高基本呈线性增加变化;②距拱坝上游1 km处库岸边坡表面横河向水平位移随库水位的升高, 库水面以下岸坡沿高程是先向两岸方向增大后一直减小直至转向河谷方向的变化趋势, 库水面以上岸坡变形沿高程一直向河谷方向变形, 基本表现为刚体的变形;③拱坝下游面左拱端不同高程典型

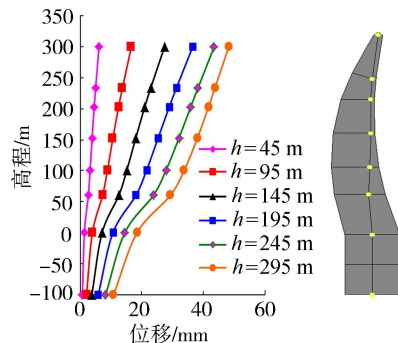


图9 拱冠梁及坝基不同高程点顺河向位移随库水位升高的变化规律

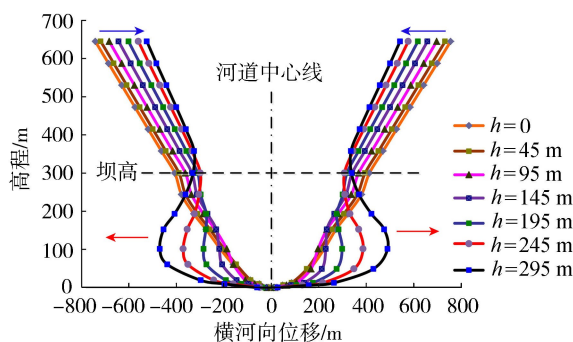


图10 距拱坝上游1 km处库岸边坡横河向位移随库水位升高的变形规律示意图 (横河向位移变化量放大1万倍)

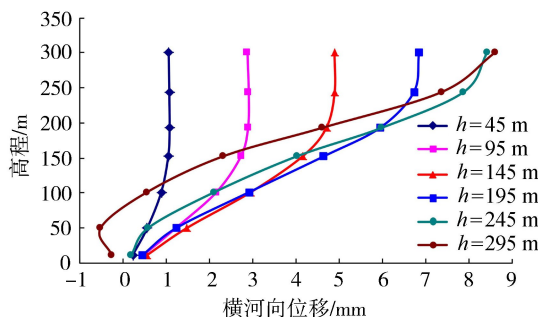


图11 拱坝下游面左拱端不同高程典型点横河向位移随库水位升高的变形规律

点, 坝前水位200 m以下随库水位升高整体向河谷方向变形, 坝前水位200 m以上低高程的典型点随着库水位升高逐渐由河谷方向变形转向两岸方向变形, 高高程测点随库水位升高总体还是向河谷方向变形但有减小的趋势。

4 结论

a. 由弹性理论推导了对称V型河谷两侧横河向表面水平位移的计算公式, 分析了谷幅变形的分布规律, 结果表明, 坝前水深和岸坡坡角对河谷两侧的水平位移影响较大。

b. 通过数值计算验证了分叉型库盘两侧横河向变形规律, 即随着高程增加, 库水面以下岸坡变形, 先向两岸方向增大后一直减小直至转向河谷方

向变化趋势,库水面以上岸坡一直向河谷方向变形。合理解释了蓄水期特高坝库区谷幅变形向河谷压缩的现象。

c. 利用有限元数值仿真方法模拟了分叉河道的库盘库型,开展了库盘变形因子对大坝变形的敏感性分析。结果表明,分叉角对近坝区库盘基岩变形及其对特高拱坝变形影响很小,坝前水深和河道分叉处到坝前距离是影响库盘变形和坝体变形的显著因素。高坝大库变形性态分析必须重视库盘基岩变形的影响。

参考文献:

- [1] 贾金生. 中国大坝建设 60 周年[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [2] 王仁坤. 我国特高拱坝的建设成就与技术发展综述[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):13-19. (WANG Renkun. Review of construction achievements and technological development of super-high arch dam in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(5):13-19. (in Chinese))
- [3] 蒋中明,李双龙,冯树荣,等. 向家坝水电站左岸近坝边坡抬升变形数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2018,38(4):64-69. (JIANG Zhongming, LI Shuanglong, FENG Shurong, et al. Numerical simulation of uplift deformation of left bank slope near dam of Xiangjiaba Hydropower Station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(4):64-69. (in Chinese))
- [4] 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,2015,24(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 & Engineering,2015,24(11):2258-2269. (in Chinese))
- [5] 张礼兵,沈静,赵二峰,等. 小湾高拱坝库盘变形作用效应研究与探索[J]. 水力发电,2014,40(12):90-93. (ZHANG Libing, SHEN Jing, ZHAO Erfeng, et al. Research and exploration on the action effects of reservoir basin deformation on Xiaowan high arch dam[J]. Water Power,2014,40(12):90-93. (in Chinese))
- [6] 胡波,刘观标,吴中如. 小湾特高拱坝首蓄期坝体变形特性分析及评价[J]. 水利水电科技进展,2015,35(6):68-72. (HU Bo, LIU Guanbiao, WU Zhongru. Deformation analysis and safety evaluation of Xiaowan ultra-high arch dam during first impoundment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(6):68-72. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] STUCKY A. Quelques problèmes relatifs aux fondations des grands barrages-réservoirs: barrages du Mauvoisin et de la Grande Dixence[M]. Suisse:Edition de la Société du Bulletin technique de la Suisse romande,1954.
- [9] HERZOG M. The influence of reservoir loading on dam stresses and deformations [J]. Water Power & Dam Construction,1989,41(7):26-28.
- [10] 吴中如,顾冲时. 大坝原型反分析及其应用[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1999.
- [11] 杜小凯,王民浩,党林才,等. 高拱坝库盘变形及大坝工作性态影响初探[J]. 水力发电,2016,42(1):40-44. (DU Xiaokai, WANG Minhao, DANG Lincui, et al. Preliminary study on high arch dam reservoir basin deformation and its effect on dam operating behavior[J]. Water Power,2016,42(1):40-44. (in Chinese))
- [12] 许焱鑫,郑东健,赵二峰,等. 高混凝土坝变形性态的库盘影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(4):319-323. (XU Yanxin, Zheng Dongjian, Zhao Erfeng, et al. Effect of reservoir basin on deformation behavior of high concrete dam [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2015,43(4):319-323. (in Chinese))
- [13] 杨杰,胡德秀,关文海. 李家峡拱坝左岸高边坡岩体变位与安全性态分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(19):3551-3560. (YANG Jie, HU Dexiu, GUAN Wenhui. Analysis of high slope rock deformation and safety performance for left bank of Lijiexia arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(19):3551-3560. (in Chinese))
- [14] 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:中国大坝协会 2014 学术年会论文集[M]. 郑州:黄河水利出版社,2014.
- [15] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [16] 顾冲时,郑东健,吴中如. 大坝及岩基的仿真有限元模型的精度分析[J]. 水电能源科学,2002,20(2):13-16. (GU Chongshi, ZHENG Dongjian, WU Zhongru. Precision analysis on simulational finite element model of dam and batholith[J]. Water Resources and Power,2002,20(2):13-16. (in Chinese))
- [17] 黄耀英,沈振中,吴中如,等. 混凝土坝及坝基分析中截取边界的影响[J]. 水利水运工程学报,2007,56(4):9-13. (HUANG Yaoying, SHEN Zhenzhong, WU Zhongru, et al. Intercepting boundary influence in analysing concrete dam and its rock foundation size[J]. Hydro-Science and Engineering,2007,56(4):9-13. (in Chinese))

(下转第 67 页)