

谷幅变形对白鹤滩水电站反拱底板 水垫塘应力状态的影响分析

李琪¹, 徐建荣², 赵兰浩¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 目前, 国内外一些高拱坝工程在蓄水后已有谷幅变形的现象产生, 谷幅变形不但影响拱坝性态变化, 已有实例还表明其可能影响到下游消能建筑物的正常运行。为分析谷幅变形对白鹤滩水电站消能建筑物运行状态的影响, 运用边界位移法进行有限元分析, 模拟不同谷幅变形量作用下反拱底板水垫塘无水检修工况及正常运行工况的应力状态, 分析弹性结构缝的不同布置方式对水垫塘在谷幅变形作用下应力状态的影响。结果表明: 随着谷幅变形量的增加, 水垫塘的应力也不断增大; 当水垫塘顶部的谷幅变形量不大于 50 mm 时, 无缝结构水垫塘的安全是可控的, 且蓄水可以减小谷幅变形对水垫塘结构不利应力的影响, 设置弹性结构缝可能会增大其不利应力。

关键词: 谷幅变形; 反拱底板水垫塘; 应力状态; 弹性结构缝; 白鹤滩水电站

中图分类号: TV223.2⁺1; TV741

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)04-0178-07

Influence of valley deformation on the stress state of Baihetan plunge pool with an inverted-arch slab

LI Qi¹, XU Jianrong², ZHAO Lanhao¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: At present, some high arch dam projects in the domestic and overseas have already experienced the phenomenon of valley deformation after impoundment, which not only affects the change of arch dam properties, but also has been proven to affect the normal operation of the downstream energy dissipation buildings. In order to analyze the effect of valley deformation on the operation of energy dissipation buildings in Baihetan Hydropower Station, we adopted the boundary displacement method for the finite element analysis, simulated the stress state of the plunge pool with an inverted-arch slab under maintenance condition (no water) and normal operation condition with different valley deformation amplitudes, and analyzed the effect of different arrangements of elastic joints on the stress state of the plunge pool under the effect of valley deformation. The results show that with the increase of valley deformation, the stress of the pool also increases; when the valley deformation of the top of the pool is less than or equal to 50 mm, the safety of the plunge pool with a seamless structure is in control, and the impoundment can further reduce the influence of valley deformation on the adverse stress of the pool structure, whereas the setting of elastic joints may increase its adverse stress.

Key words: valley deformation; inverted-arch plunge pool; stress state; elastic joint; Baihetan Hydropower Station

1 研究背景

高拱坝工程坝址地质条件复杂, 受开挖卸载、地下水升降等因素的影响^[1], 岩体物理力学特性和边

坡变形状态可能发生变化, 产生“谷幅变形”现象。在一些工程的蓄水期变形监测过程中发现, 坝址区随库水位上升出现了不同程度的谷幅变形^[2], 例如, 意大利的 Beaugard 拱坝^[3] 在蓄水后, 坝体受到左岸边坡

收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-12-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407102)

作者简介: 李琪(1996-), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 从事水工结构抗震方面的研究。

通讯作者: 赵兰浩(1980-), 男, 山东临沂人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事水工结构抗震和水利工程流固耦合方面的研究。

挤压导致上、下游面出现裂缝;广东溪流河拱坝^[4]上游边坡也于蓄水后出现不可逆的水平位移;锦屏一级拱坝^[5-7]、乌东德拱坝^[8-10]、溪洛渡拱坝^[11-16]均出现了不同程度的谷幅变形现象,且坝区边坡的谷幅变形监测表现均为收缩特征,对高拱坝及其坝后消能建筑物的安全运行带来较大困扰,引起了坝工界和学术界的高度关注。杨杰等^[17]、贾金生等^[18]、刘有志等^[19-20]、周志芳等^[21]、程恒等^[22]分别对谷幅变形的成因进行了相关研究,认为岩体变形是谷幅变形的主导因素;Zhang等^[8-10]比较了乌东德拱坝数值模拟结果与谷幅变形监测结果,总结了谷幅变形的时空分布规律和影响因素;赵代鹏等^[1]基于边坡监测数据,采用有限元计算分析了乌东德水电站坝后水垫塘谷幅变形特征与稳定性;赵振军等^[23]监测到白鹤滩水电站在开挖期间,两岸边坡已出现一定程度的谷幅收缩,且右岸边坡谷幅变形量大于左岸边坡。

目前,国内外对高拱坝的研究较多,但关于谷幅变形对坝后消能建筑物的影响以及建筑物如何适应谷幅变形的研究十分少见。水垫塘作为坝身泄洪的消能载体,若坝址区发生一定程度的谷幅变形,消能建筑物的正常运行可能会受到影响,甚至导致其结构发生变形破坏。白鹤滩拱坝下邻溪洛渡水电站,溪洛渡水库已因蓄水期谷幅变形而引起了下游的水垫塘开裂,导致坝体破坏^[3],白鹤滩水垫塘在水库蓄水后也可能出现相同的现象。因此,有必要针对白鹤滩反拱底板水垫塘在谷幅变形作用下的受力状态以及相关的工程措施开展研究。

本文以白鹤滩水电站反拱底板水垫塘为例,运用边界位移法^[16],采用有限元单元法进行计算,分

析了水垫塘在不同谷幅变形量作用下的应力响应,以及谷幅变形重点影响区域,并且分析了弹性结构缝的不同布置方式对水垫塘适应谷幅变形的作用,可为相关工程提供一定的参考。

2 工程概况

白鹤滩拱坝坝高达289 m,坝后设反拱型消能水垫塘和重力式二道坝。水垫塘边墙采用左缓右陡的不对称布置,反拱底板以上的左岸边墙坡比为1:1,右岸边墙坡比为1:0.4。水垫塘底板最低高程为560.00 m,边墙顶高程为635.00 m,水垫塘长度为360 m。水垫塘断面型式为反拱型底板复式梯形断面,反拱为圆弧形,半径为107.02 m,圆心角为74.796°,弦长为130 m,拱端高程为582.00 m,矢高为22 m。在两岸拱端处设拱座,拱座基底高程为578.82 m。在两边墙606.00 m高程处设宽度为5 m的马道,水垫塘顶宽为210 m。二道坝坝顶高程为608.00 m,高出水垫塘底板48 m。

反拱底板水垫塘顺水流方向长度为334 m,共分13段(拱圈),标准段长15 m,每个拱圈垂直水流方向分为9块,板块弧长均为15.52 m(上表面)。拱座底宽9.20 m,拱座和边墙顺水流方向分缝与底板相同。两岸边墙在高程593.12、615.00、625.00及632.00 m处设置分缝,分缝垂直于结构混凝土表面;在马道高程606.00 m中间设铅直伸缩缝。水垫塘共设置3条顺河向弹性结构缝,分别位于左、右岸马道(606.00 m高程)和左岸边墙与拱座连接处(593.12 m高程),缝宽均为2 cm,缝内填充三元乙丙橡胶板,具体设计见图1。

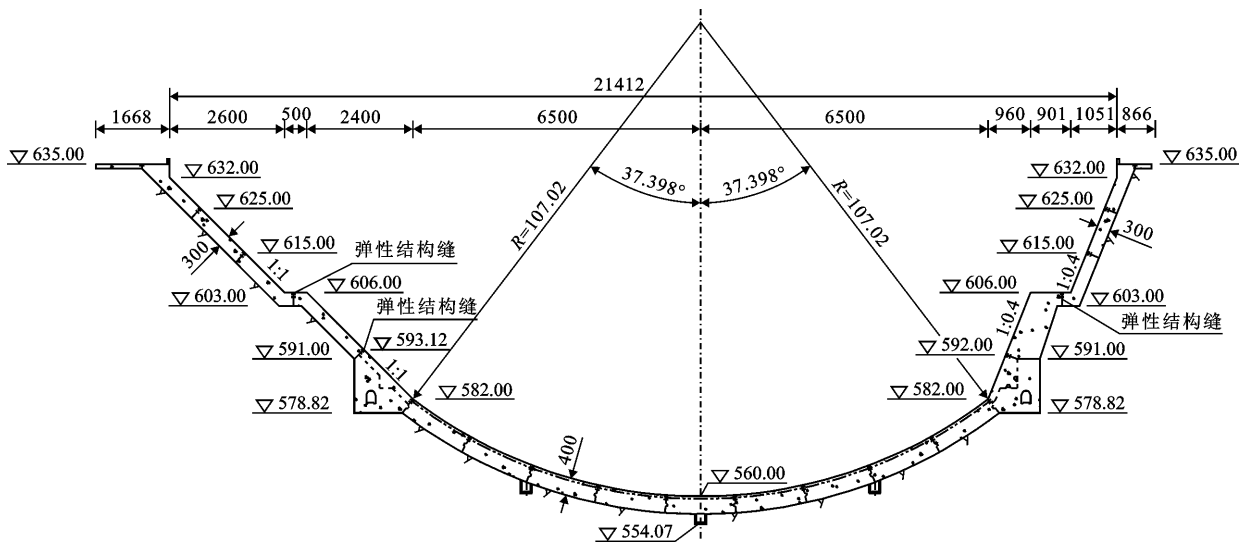


图1 白鹤滩拱坝反拱底板水垫塘结构设计典型横断面图(尺寸单位:cm;高程单位:m)

3 模型建立与计算工况

3.1 二维有限元模型

建立白鹤滩水电站反拱底板水垫塘的有限元模型,模型包括水垫塘典型断面、两岸地基和山体等结构。对于地基模拟,左、右岸各延伸55 m,深度方向延伸50 m,为简化计算,地基按均质岩体假定,不考虑错动带。地基与两岸山体相连,水垫塘各部位之间设零宽度的结构缝,采用拉格朗日乘法计算不同部位间的接触效应。模型整体坐标系采用右手坐标系,取沿坝轴线方向从左岸到右岸为 x 轴正向,竖直向上为 y 轴正向,整体模型左下角为坐标原点。模型竖直向总高度为148 m,横河向总长度为370 m,最低高程为506.00 m。有限元模型如图2所示,模型各部位均采用平面四结点四边形单元,反拱底板水垫塘整体模型包括7 973个结点,共7 524个单元。

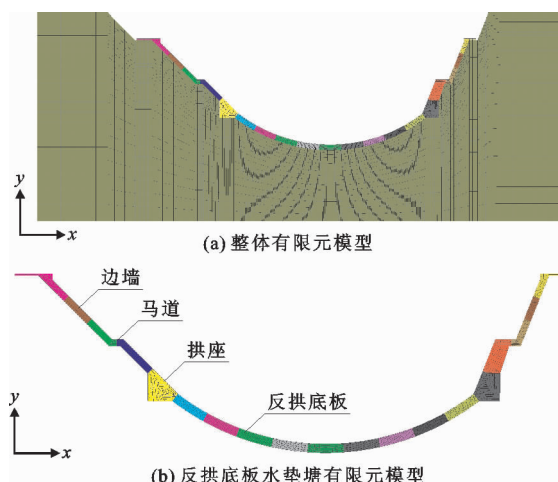


图2 白鹤滩水电站反拱底板水垫塘有限元模型示意图

3.2 边界位移法

由于无法对大坝蓄水期边坡变形场进行准确地模拟预测,并且当前阶段还没有相应的监测数据,一些学者提出采用边界位移法来间接地模拟谷幅变形,从而进一步分析拱坝稳定性^[24]。该方法主要通过解除部分边界简支约束,以某种模式的位移条件代替,使边坡产生相应的变形^[16]。

本文在水垫塘左、右岸边界处施加三角形分布的单位位移荷载,求得水垫塘底高程556.00 m处的变形值 u_1^d 和顶高程635.00 m处的变形值 u_1^t ;同理,再施加相反的三角形分布的单位位移荷载,求得水垫塘底高程556.00 m处的变形值 u_2^d 和顶高程635.00 m处的变形值 u_2^t 。谷幅变形模拟示意图见图3,计算方程如下所示:

$$a \cdot u_1^d + b \cdot u_1^t = u_1 \quad (1)$$

$$a \cdot u_2^d + b \cdot u_2^t = u_2 \quad (2)$$

式中: u_1^d 和 u_1^t 分别为施加正向三角形单位位移荷载时水垫塘底高程556.00 m处和顶高程635.00 m处的变形值,mm; u_2^d 和 u_2^t 分别为施加反向三角形单位位移荷载时水垫塘底高程556.00 m处和顶高程635.00 m处的变形值,mm; u_1 和 u_2 分别为底高程556.00 m处和顶高程635.00 m处的预估谷幅变形值,mm; a 和 b 分别为正向三角形和反向三角形单位位移荷载的系数。

确定谷幅变形量后,由方程式(1)、(2)计算所得 a 和 b 系数乘以对应的单位位移荷载,叠加后可得到边界位移荷载值。通过此方法即可模拟水垫塘底高程到顶高程近似三角形分布的谷幅变形值。

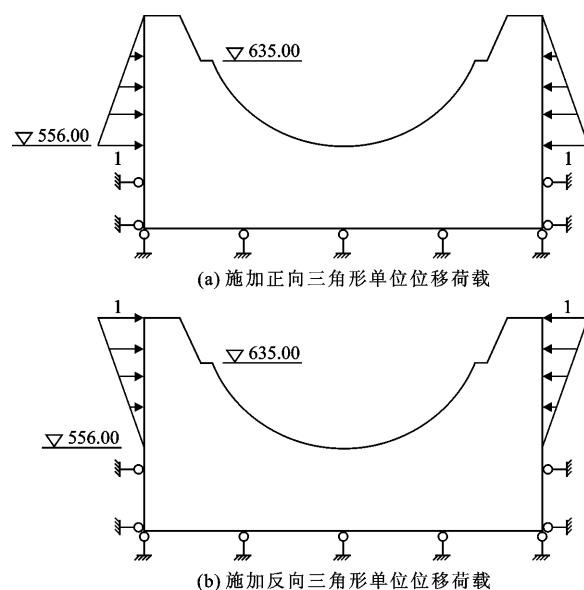


图3 采用边界位移法模拟谷幅变形示意图(单位:m)

3.3 计算参数与工况

白鹤滩水电站的水垫塘结构主要采用C50与C40混凝土,地基主要为Ⅲ2类的玄武岩和角砾熔岩。为简化计算,水垫塘结构按统一材料、地基按均质岩体假定,不考虑错动带。在有限元计算中,水垫塘及地基均按线弹性材料处理。各种材料的物理力学参数见表1。

表1 模型各种材料的物理力学参数

| 材料 | 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
|--------|--|----------|-------|
| 混凝土 | 2500 | 24.0 | 0.167 |
| 地基 | 2600 | 9.0 | 0.270 |
| 三元乙丙橡胶 | 870 | 7.8 | 0.470 |

为了清楚地反映水垫塘在不同谷幅变形量、蓄水程度以及不同分缝措施下的应力状态,有限元计算主要考虑了6种工况进行对照分析,各工况计算条件见表2。工况1和2不设置弹性结构缝;工况3和4采用分缝措施,在两岸马道处以及左岸边墙与拱座连接处设置垂直方向的弹性结构缝;工况5和6将两岸马道处的弹性结构缝方向改为水平方向,其他条件同工况3和4。

根据国内已建高拱坝的变形监测数据,李家峡水电站拱坝在正常蓄水后最大谷幅变形值为35 mm^[11];锦屏一级水电站运行期坝顶两岸边坡的谷幅变形量为30 mm^[25];溪洛渡水电站蓄水初期坝顶某测线谷幅变形量为62.45 mm^[26]。由于白鹤滩水电站拱坝还处于建设期,当前阶段的谷幅变形实测值不能反映其运行

期的谷幅变形量,因此参考国内已建高拱坝谷幅变形数据,通过敏感性分析及与设计单位讨论,最终取水垫塘顶高程635.00 m处谷幅变形值为30、40、50 mm。计算工况按照水垫塘底高程556.00 m处谷幅变形值为0,顶高程635.00 m处谷幅变形值分别为30、40、50 mm的三角形分布模拟谷幅变形。根据工程概况,弹性结构缝宽度为2 cm,缝内填充物为三元乙丙橡胶。模型计算工况如表2所示。

4 结果与分析

本文就水垫塘顶部谷幅变形量为30、40、50 mm时,分别对水垫塘在各工况下的应力状态进行分析比较,表3为各工况水垫塘相关区域最不利应力特征值统计表。

表2 有限元模型计算工况

| 计算工况 | 弹性结构缝布置方式 | 作用荷载 | 备注 |
|------|-----------|--------------|--|
| 工况1 | 无弹性结构缝 | 自重+谷幅变形 | 水垫塘顶部谷幅变形量均取30、40、50 mm;正常运行工况时,蓄水深度为48 m。 |
| 工况2 | 无弹性结构缝 | 自重+谷幅变形+静水压力 | |
| 工况3 | 2 cm垂直缝 | 自重+谷幅变形 | |
| 工况4 | 2 cm垂直缝 | 自重+谷幅变形+静水压力 | |
| 工况5 | 2 cm水平缝 | 自重+谷幅变形 | |
| 工况6 | 2 cm水平缝 | 自重+谷幅变形+静水压力 | |

表3 各工况水垫塘相关区域最不利应力特征值统计表

| 谷幅变形量/ mm | 工况 | 左岸马道 最大拉应力/MPa | 左岸边墙与拱座连接处 最大压应力/MPa | 右岸底板与拱座连接处 最大压应力/MPa | 右岸马道 最大拉应力/MPa |
|--------------|----|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| 30 | 1 | 0.16 | 2.04 | 5.28 | 0.56 |
| | 2 | 0.14 | 1.89 | 4.69 | 0.46 |
| | 3 | 0.62 | 2.61 | 6.79 | 1.64 |
| | 4 | 0.56 | 2.57 | 6.20 | 1.43 |
| | 5 | 0.76 | 2.63 | 5.26 | 0.54 |
| | 6 | 0.65 | 2.59 | 4.66 | 0.43 |
| 40 | 1 | 0.52 | 2.69 | 6.87 | 0.81 |
| | 2 | 0.43 | 2.63 | 6.27 | 0.66 |
| | 3 | 0.85 | 3.43 | 6.79 | 2.26 |
| | 4 | 0.79 | 3.39 | 6.20 | 2.06 |
| | 5 | 1.05 | 3.46 | 6.83 | 0.76 |
| | 6 | 0.93 | 3.42 | 6.23 | 0.65 |
| 50 | 1 | 0.67 | 3.34 | 8.45 | 1.04 |
| | 2 | 0.30 | 3.28 | 7.85 | 0.88 |
| | 3 | 1.08 | 4.26 | 8.35 | 2.87 |
| | 4 | 1.02 | 4.22 | 7.76 | 2.67 |
| | 5 | 1.33 | 4.29 | 8.41 | 0.99 |
| | 6 | 1.21 | 4.25 | 7.80 | 0.88 |

4.1 无缝条件下的应力状态

以水垫塘顶部 30 mm 谷幅变形量为例,对无弹性结构缝(工况 1、2)的水垫塘结构应力状态进行分析,图 4 为工况 1、2 水垫塘结构的应力云图。

由无缝条件下的水垫塘结构应力计算结果可知,谷幅变形对水垫塘应力的不利影响主要体现在以下几个方面:(1)两岸马道处。在谷幅变形作用下,两侧马道处拉应力值较大,最大拉应力出现在 606.00 m 高程处的右岸马道处,但应力值相对较小。(2)右岸底板与拱座连接处。在谷幅变形作用下,由于右岸拱座与反拱底板连接处形状突变,折角较小,底板与拱座连接处发生了挤压,压应力值较大。(3)随着谷幅变形收缩量的增加,最大拉应力与最大压应力也增大,但最大拉应力的值较小,为 1.04 MPa,而最大压应力的值较大,为 8.45 MPa。

(4)相比于无水检修工况,蓄水后反拱底板受水自重的影响,整体压应力有所增大。但在静水压力的作用下,两岸边坡横向的位移值减小,抵消了一部分谷幅收缩变形量,变形量水垫塘的最大拉应力与最大压应力均有所改善。

4.2 垂直缝条件下的应力状态

由水垫塘无缝结构在不同谷幅变形量作用下的应力状态可知,在一定的谷幅变形量作用下,水垫塘结构的最大拉应力较小,最大压应力较大。根据设计资料,对水垫塘采取的适应谷幅变形的措施为:在左、右岸马道和左岸边墙与拱座连接处各设置 1 条 2 cm 宽的弹性结构缝,两岸马道处的弹性结构缝沿垂直方向布置(工况 3、4)。以水垫塘顶部 30 mm 谷幅变形量为例,分析垂直弹性结构缝条件下水垫塘结构的应力状态,图 5 为工况 3、4 水垫塘结构的应力云图。

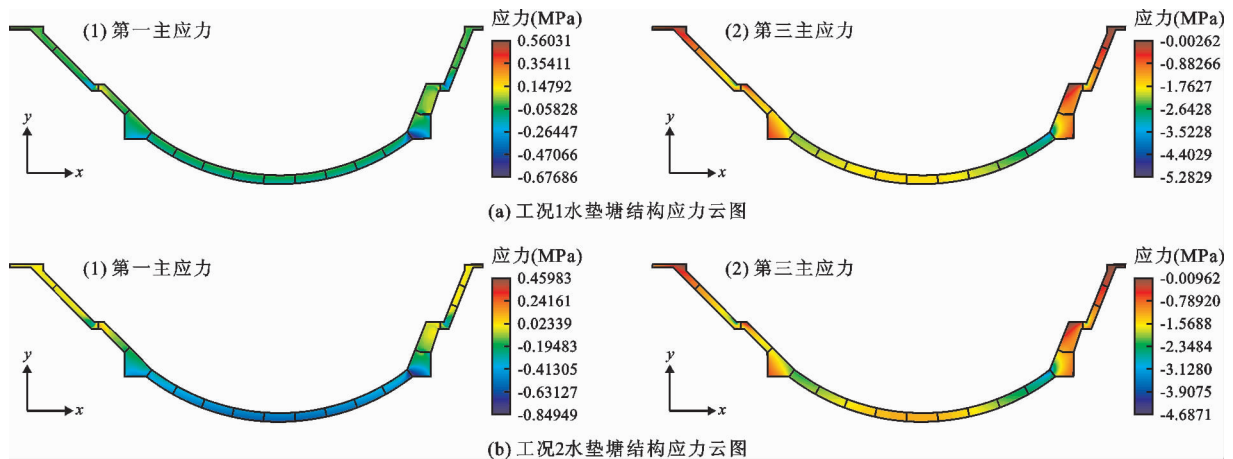


图 4 无弹性结构缝(工况 1、2)的水垫塘结构应力云图(谷幅变形量为 30 mm)

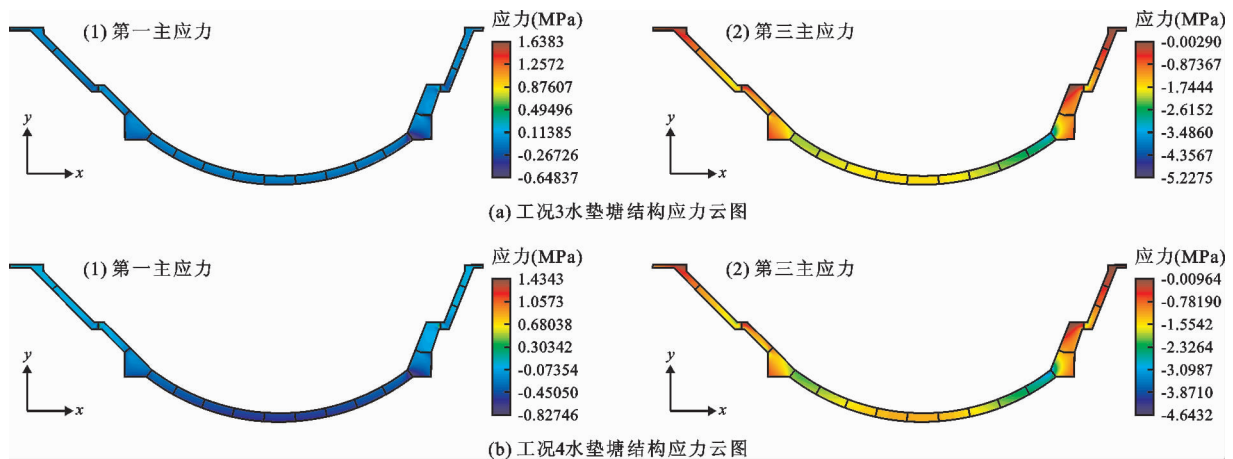


图 5 垂直弹性结构缝(工况 3、4)的水垫塘结构应力云图(谷幅变形量为 30 mm)

垂直缝条件下的水垫塘结构应力计算结果表明:(1)设置垂直方向的分缝不能减小结构的拉应力,甚至会增大左、右两岸马道处的拉应力,无缝结

构和设置垂直弹性结构缝后马道处的最大拉应力均位于马道外侧。因为在无缝结构中,左、右岸马道受上、下边墙变形影响出现弯曲变形,导致马道外侧受

拉,上边墙与马道连接处受压。设置垂直弹性结构缝之后,马道的结构发生改变,导致马道与下边墙连接处以及马道内侧受压,马道外侧受拉。(2)设置弹性结构缝后,会增大左岸边墙与拱座连接处的压应力。因为在无缝结构中,左岸边墙与拱座连接处受边墙向内侧变形的影响,此处挤压变形较小;设置弹性结构缝后,左岸边墙与拱座连接处受边墙的影响减小,挤压变形增大,压力值增大。(3)最大拉应力和最大压应力的位置与无缝结构相同,分别出现在右岸马道及右岸底板与拱座连接处。(4)随着谷

幅变形量的增加,其拉应力与压应力也会相应增大,变化规律与无缝结构类似。(5)与无缝结构的结果类似,蓄水后反拱底板整体压应力有所增大,但水垫塘的最大拉应力与最大压应力均有所改善。

4.3 水平缝条件下的应力状态

在左、右岸马道和左岸边墙与拱座连接处各设置1条2 cm宽的弹性结构缝,将两岸马道处的弹性结构缝改为沿水平方向布置(工况5、6)。以水垫塘顶部30 mm谷幅变形量为例,对水垫塘应力进行分析,图6为工况5、6水垫塘结构的应力云图。

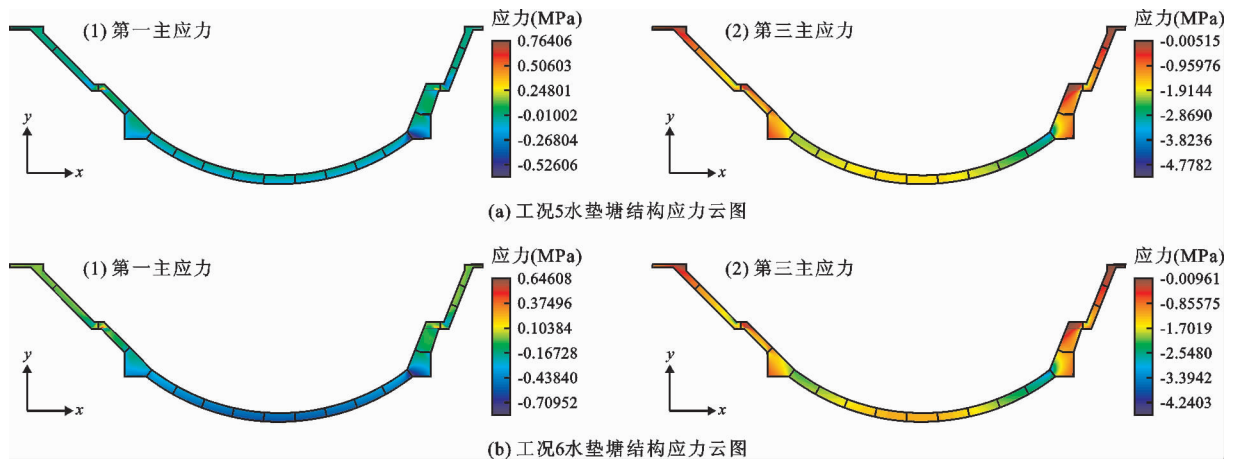


图6 水平弹性结构缝(工况5、6)的水垫塘结构应力云图(谷幅变形量为30 mm)

分析图6并与图5进行比较可知,水平缝条件下的水垫塘结构应力计算结果与垂直缝条件下的水垫塘结构应力状态差别不大:(1)设置水平方向的弹性结构缝对右岸马道拉应力的减小作用甚微,甚至会增大左岸马道处的拉应力,无缝结构中马道处的最大拉应力位于马道外侧,设置弹性结构缝后最大拉应力出现在左岸马道与边墙连接处。设置水平方向的弹性结构缝之后,下边墙对马道的影响变小,受上边墙的变形影响,马道外侧出现弯曲变形,导致马道与上边墙连接处受压,马道与下边墙连接处受拉。(2)设置弹性结构缝后,会增大左岸边墙与拱座连接处的压应力。与工况3相同,设置水平弹性结构缝后左岸边墙与拱座连接处受边墙的影响变小,挤压变形增大,压力值增大。(3)最大压应力与无缝结构相同,出现在右岸底板与拱座连接处;最大拉应力出现在左岸马道,右岸马道处的拉应力较无缝结构有所减小。(4)随着谷幅变形量的增加,其拉应力与压应力也会相应增大,变化规律与无缝结构类似。(5)与无缝结构的结果类似,蓄水后反拱底板整体压应力有所增大,但水垫塘的最大拉应力与最大压应力均有所改善。

5 结论

本文运用边界位移法模拟谷幅变形,分析了白鹤滩水电站的水垫塘在不同谷幅变形量作用下,无缝结构及设置弹性结构缝后结构的最不利应力特征值变化,得到如下主要结论:

(1)水垫塘顶部谷幅变形为50 mm及以下时,水垫塘的应力均在安全范围内;谷幅变形对水垫塘结构的不利影响主要体现在两岸的马道处以及底板与拱座连接处;随着水垫塘顶部谷幅变形量的增大,水垫塘的不利应力也不断增大,最大拉应力和最大压应力均出现在水垫塘顶部谷幅变形为50 mm时的无水检修工况,最大拉应力出现在右岸马道处,其值为1.04 MPa,最大压应力出现在右岸底板与拱座连接处,其值为8.45 MPa。

(2)考虑静水压力之后,水垫塘的应力仍然在安全范围内。相比于无水检修工况,蓄水后会增大水垫塘反拱底板整体的压应力,但能减小谷幅变形对水垫塘结构不利应力的影响。

(3)设置弹性结构缝后,对水垫塘最大拉应力及压应力的减小作用甚微,甚至可能会改变结构的

受力与变形,增大结构的不利应力。水垫塘顶部谷幅变形为 50 mm 及以下时,结构的不利应力较小,可不考虑设置弹性结构缝。

(4)在水垫塘后续运行过程中,仍然需要重点关注谷幅变形的趋势,对压应力较大处的水垫塘右岸底板与拱座连接处进行实时监测。

参考文献:

- [1] 赵代鹏,占清华,张旭. 坝后水垫塘边坡谷幅变形及稳定性研究[J]. 大坝与安全,2019(3):50-55.
- [2] 刘才华,陈从新,冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机制研究[J]. 岩土力学,2005,26(5):769-773.
- [3] 辛长虹,赵引. 考虑非饱和渗流的谷幅变形对高拱坝影响分析[J]. 水利水运工程学报,2021(4):36-45.
- [4] 武明鑫,赵全胜. 谷幅变形对拱坝工程安全影响案例分析及有关启示[J]. 水力发电,2021,47(1):68-72+89.
- [5] 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.
- [6] 周绿,刘明昌. 锦屏一级水电站运行期左岸边坡稳定性分析[J]. 水利水电快报,2021,42(6):26-30.
- [7] 周绿,刘明昌,李小顺. 锦屏一级水电站运行期谷幅变形特性与影响因素分析[J]. 水力发电,2021,47(3):79-83.
- [8] ZHANG Xu, ZHOU Shaowu, LIN Peng, et al. Valley deformation and slope seismic analysis near tail water outlet of a hydropower station [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 237(3): 032077.
- [9] ZHANG Xu, ZHOU Shaowu, DUAN Haiibo, et al. Valley deformation and stability assessment of plunge pool slope [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(3): 032032.
- [10] ZHANG Xu, XIAO Jiandong, LIN Yifeng, et al. Valley deformation analysis for a high arch dam in Jinsha river, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14: 1374.
- [11] 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.
- [12] YANG Xuechao, GAO Kejing, ZHAO Wenguang, et al. Analysis of the influence of valley deformation on the safety of Xiluodu Arch Dam [J]. Destech Transaction on Engineering and Technology Research, 2017. DOI:10.12783/dtetr/ecame2017/18458.
- [13] 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.
- [14] PAN Jianwen, WANG Jinting. Effect of abutment movements on nonlinear seismic response of an arch dam [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(8): 1-15.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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状态分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(19):3551-3560.
- [18] 贾金生,纪进旭,李洪泉,等. 高坝建设与运行管理的技术进展——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.
- [19] 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[M]//贾金生,纪进旭,李洪泉,等. 高坝建设与运行管理的技术进展——中国大坝协会2014学术年会论文集. 郑州:黄河水利出版社,2014.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 程恒,张国新,廖建新,等. 高拱坝谷幅变形特征及影响因素分析[J]. 水利水电技术,2020,51(5):65-70.
- [23] 赵振军,于胜利. 白鹤滩水电站施工期谷幅变形监测分析[J]. 岩土工程技术,2020,34(2):102-105.
- [24] FRIGERIO A, MAZZA G. The rehabilitation of Beaugard dam: The contribution of the numerical modeling [C]//12th International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, Vienna, Austria, 2013: 343-352.
- [25] 杨弘,董燕君. 锦屏一级大坝首次蓄水过程监测成果分析[J]. 大坝与安全,2015(3):34-40.
- [26] 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.