

# 巴山水电站高折线面板堆石坝运行性状研究

王登银, 陈振文, 汤 旻, 齐立景

(中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘 要:** 以巴山水电站填筑及运行期的原型观测资料为依据, 反演分析了坝体堆石料的非线性邓肯 E-B 模型参数, 用观测资料验证了参数的合理性; 以反演参数为依据, 采用三维黏弹性有限元仿真计算了坝体开始填筑至经历 7.10 洪水后面板的应力变形情况, 计算分析了面板连接缝变形和面板脱空、垫层料亏坡情况, 分析了三期面板局部挤压破坏和裂缝的原因。分析表明: 浇筑面板时堆石体沉降未收敛和初次蓄水时涨水过快是三期面板局部挤压破坏和裂缝的主要原因; 经历洪水后连接板附近未出现拉应力区域, 面板垂直缝及周边缝变形较小, 三期面板顶部出现了轻微的脱空; 面板折线处与周围变形协调性好, 没有出现应力变形突变现象, 设置连接板改善了面板的变形及受力状态, 效果良好。  
**关键词:** 巴山水电站; 折线面板堆石坝; 应力变形; 面板脱空; 面板裂缝

中图分类号: TU431; TV641 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2011)09 - 1483 - 06

**作者简介:** 王登银(1982 - ), 男, 湖北随州人, 河海大学水工结构专业硕士研究生, 从事水工建筑物设计研究。E-mail: wang\_dy3@ecidi.com。

## Behaviors of high broken line concrete face rockfill dam of Bashan Hydropower Station

WANG Deng-yin, CHEN Zhen-wen, TANG Yang, QI Li-jing

(HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The back analysis of the nonlinear Duncan E-B model parameters is carried out based on the prototype observation data of Bashan concrete face rockfill dam during the filling and operation periods. The observed data are employed to validate the rationality of the parameters. According to the back analysis parameters, three-dimensional viscoelastic finite element simulation is performed to calculate the stress and deformation of faceslab during the period from the filling of the dam to the end of flood 7.10. The deformation of connecting panel seam, the separation between concrete slab and cushion layer and the insufficient cushion materials are calculated. The causes for the third-stage concrete face cracks and locally compressive damage are analyzed. Analysis shows that the settlement of rockfill placement does not converge, and the initial storage is too fast. They are the main reasons for the cracks and the damage. After the flood, there is no major tensile stress area in the dam. The deformation of vertical and peripheral joints is small, and the three-phase panel at the top has a slight separation between concrete slab and cushion layer. The broken line of concrete face is satisfactorily coordinated with the surrounding deformation, and there is no abrupt stress or deformation. The connecting plate to improve the deformation and stress state of the concrete face is effective.

**Key words:** Bashan Hydropower Station; high broken line concrete face rockfill dam; stress and deformation; separation between concrete slab and cushion layer; face slab crack

## 0 引 言

巴山水电站位于重庆市最北端城口县境内的任河干流上, 距城口县城 36.0 km。本电站是任河流域水电梯级开发规划中的一座重要骨干电站。坝址以上流域面积 1712 km<sup>2</sup>, 水库校核洪水位 683.66 m, 总库容 3.154 亿 m<sup>3</sup>; 正常蓄水位 680 m, 相应库容 2.93 亿 m<sup>3</sup>; 死水位 650 m, 调节库容 1.43 亿 m<sup>3</sup>。电站装机容量

2×70 MW, 是一个以发电为主的一等大(II)型水电枢纽工程。本工程枢纽由拦河坝、溢洪道、引水系统、发电厂房、生态电站、升压开关站等组成。大坝平面布置图见图 1。

拦河坝为国内最高的混凝土折线面板堆石坝, 坝

折线处采用混凝土连接板的方式，最大坝高 155 m，坝顶高程 685.00 m，坝顶宽 10 m，坝顶长度为 477.00 m，上游坝坡 1 : 1.40，下游坝坡分为 1 : 1.3 和 1 : 1.4。混凝土面板厚度 0.30~0.823 m。大坝上游面高程 595.00 m 以下设置粉煤灰、粉土、石渣填筑区。

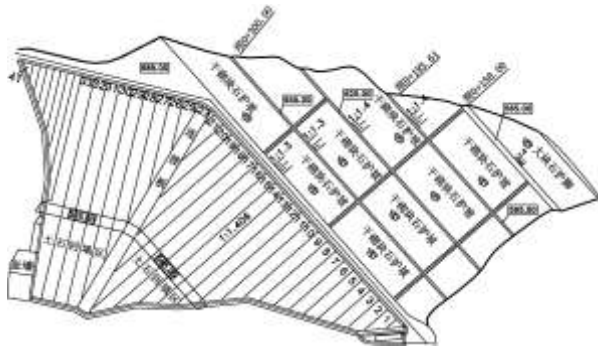


图 1 巴山面板堆石坝平面布置图

Fig. 1 Plan of Bashan concrete face rockfill dam

巴山水电站大坝 2006 年 12 月开始坝体填筑，2008 年 9 月底大坝填筑到顶(此时右岸坝前缺口填筑到 774 m 高程)，施工进度见图 2。



图 2 坝体施工进度图

Fig. 2 Progress of dam construction

大坝三期面板 2009 年 4 月中下旬浇筑完毕，4 月 28 日水库下闸蓄水，库水位逐渐升高，到 5 月 15 日库水位达 622 m 高程，随后经历了 7.10 洪水(50 年一遇)，库水位达 675.5 m 高程，库水位的变化见图 3。2009 年 7 月 22 日库水位达到 675.5 m 高程时，距坝体三期面板浇筑到顶不到 3 个月时间。洪水退后，发现三期面板出现了大量的水平裂缝、#13 至#17 面板间垂直缝周围出现挤压破坏情况。

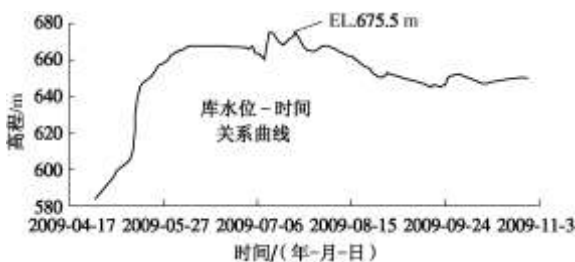


图 3 库水位变化曲线

Fig. 3 Curve of water level

为分析面板破损的原因，探索坝体的运行性状。本文以大坝原型观测资料为依据，反演分析主堆和次堆石料的非线性邓肯 E-B 模型参数，用此参数仿真坝体填筑及快速蓄水过程中面板的应力变形，对坝体运行情况作出科学的判断。

### 1 堆石料参数的反演分析

由于筑坝堆石料最大粒径一般在 60~80 cm，室内试验只能通过对试样粒径等量替换、等比级配法或者两者综合的方法进行缩小，然后进行试验；由于尺寸效应以及颗粒破碎机理的不同，使得室内试验得到的力学参数难以合理反映原级配粗粒料的力学特性。为此，本文结合巴山水电站大坝的填筑及运行期原型观测资料，反演分析得到邓肯 E-B 模型的力学参数。

坝体瞬变及反演计算中力学模型为邓肯非线性 E-B 模型，面板与垫层间设置 goodman 接触单元，面板与趾板间设置缝单元，整个网格模型中单元总数为 7928，节点总数为 8531。

坝体中部有一层砂砾石，由于此处观测设备起测较晚，且大部分观测设备施工中损坏，剩余设备测值波动较大，鉴此，只反演坝体主堆和次堆石料的参数，其它采用室内试验参数<sup>[1]</sup>。为消除观测设备的起测误差，此次采用增量反演，时段选取 2008 年 4 月至 2008 年 9 月，此时坝体从 640 m 高程填筑到顶。

观测资料显示<sup>[2]</sup>，坝体停工期变形仍在发展，这是堆石料的流变现象<sup>[3-4]</sup>。为考虑流变对反演参数的影响，准确反演出坝体的瞬变力学模型参数，本次反演中坝体应力变形数值采用黏弹性有限元计算得到，其中流变模型采用沈珠江<sup>[3]</sup>等人在堆石料流变试验基础上推导的三参数模型，流变参数见文献[5]。

#### 1.1 参数反演

考虑到坝体堆石料力学性质复杂，力学模型参数较多，一般反演分析算法不能体现多目标、多参数的全局优化问题，因此本文用基于全局搜索的免疫遗传算法<sup>[6]</sup>。该方法的目标函数：

$$F(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (u_{ij}^c / u_{ij}^m - 1.0)^2 \quad (1)$$

式中  $m$  为反演分析时段总数； $n$  为测点总数； $\omega_{ij}$  为测点权重系数， $u_{ij}^c$  为计算的变形、应变或应力值， $u_{ij}^m$  为相应的实测值。

反演分析测点选取 0+158 断面 617 m 高程、646.5 m 高程的两排水管式沉降仪，如图 4。主堆参数反演选取 V/H-7~9、V/H-11~15，次堆选取 V/H-10、V/H-16，砂砾石层选取 V/H-17~21；617 m 高程、580

m 高程测点受此时段坝体填筑影响较小, 权重系数取 0.75; 646.5 m 高程测点受此时段坝体填筑影响较大, 权重系数取 0.25。

堆石体坝料采用邓肯 E-B 模型时, 坝料基本特性参数重度、凝聚力和内摩擦角通过室内三轴试验确定; 反演计算时, 认为坝料基本特性参数可靠, 只反演  $K, n, R_f, K_b, m$  值, 即

$$X = \{K, n, R_f, K_b, m\} \quad (2)$$

以上 5 个参数的反演范围参照巴山电站筑坝材料静力实验<sup>[1]</sup>结果选取。反演结果见表 1。

表 1 参数反演分析结果

Table 1 Results of back analysis of parameters

坝体分区	$K$	$N$	$R_f$	$K_b$	$m$
主堆石料	963.5	0.31	0.72	396	0.22
次堆石料	862.8	0.29	0.68	275	0.29
砂砾石料	1173.3	0.27	0.71	725	0.15

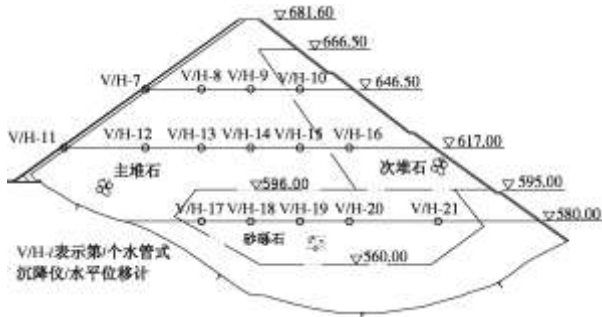


图 4 0+158.00 剖面观测设备布置

Fig. 4 Layout of observation equipments for profile 0+158.00

### 1.2 反演参数的验证性分析

选取反演时段中 0+158 剖面 617 m 高程的水管式沉降仪测值进行增量验证, 以及坝折线处 0+300 断面 580 m 高程、620 m 高程两排固定式测斜仪的观测值进行全量验证, 如图 5 和图 6。

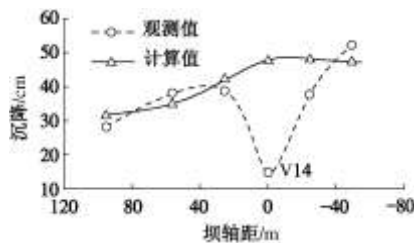


图 5 0+158 断面 617 m 高程沉降分布

Fig. 5 Distribution of settlement for profile 0+158.00 (EL.617 m)

由图可见: 除个别测点观测值离散性较大以外, 其余各点计算值和实测值变化规律一致, 拟合较好。说明以坝体原型观测资料为依据, 通过免疫遗传算法反演分析得出的坝体主次堆石体力学模型参数是可靠的, 能够反映筑坝材料的运行性状。

## 2 坝体运行性状分析

本节以反演参数为依据, 采用黏弹性有限元仿真计算坝体填筑至经历 7.10 洪水后坝体的运行状态, 分析三期面板局部挤压破坏及裂缝的原因, 计算面板连接缝的变形、面板的脱空和垫层料亏坡情况, 对洪水后坝体运行进行科学的判断。

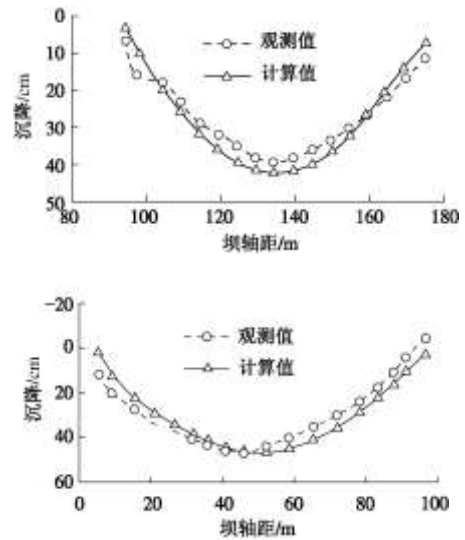


图 6 0+300 断面沉降分布

Fig. 6 Distribution of settlement for profile 0+300.00

### 2.1 引起面板裂缝原因

混凝土面板堆石坝面板的破损和很多因素有关, 诸多学者做过相关的研究并取得实用的成果<sup>[7-10]</sup>。本文结合巴山面板坝坝型及填筑蓄水等特点, 分析巴山面板坝在经历洪水后三期面板出现破损的原因, 为在建同类坝型提供参考。

原因一: 浇筑面板时堆石体沉降速率较大。按照面板坝的施工经验<sup>[8]</sup>及巴山面板堆石坝设计要求<sup>[11]</sup>, 为减少面板混凝土后脱空、混凝土裂缝及挤压破坏, 浇筑面板混凝土时, 坝体沉降速率一般应小于 3~5 mm/月。而本工程在浇筑三期面板时, 观测资料显示坝体沉降最大为 31.2 mm/月, 与设计要求差距较大。

天生桥一级水电站建成后面板出现了大量的结构性裂缝和面板脱空现象, 专家研究<sup>[8]</sup>认为设置堆石预沉降周期和控制沉降速率使之收敛后再拉面板, 是防止面板产生结构性裂缝的重要措施。

原因二: 坝体初次蓄水时涨水过快。巴山水电站经历 50 a 一遇洪水时, 水势凶猛, 加上水库调节库容小, 库水位上升很快, 最快涨水速度为 7 m/d。坝体初次蓄水时如此快的涨水速度在国内外均属罕见。

坝体变形由瞬变和流变组成, 在填筑和蓄水运行中这两种变形同时存在<sup>[3-4]</sup>。瞬变是在荷载下不受时间影响的变形; 流变是时间的函数, 随着时间的增加坝体变形不断发展。在坝前快速涨水时, 水荷载的分量引

起坝体瞬变是直观的，而水位快速增涨对流变影响，只能通过半定量的分析得出结论。

为说明蓄水速率对流变的影响，选取坝折线右侧最大剖面（坝 0+193.61）600 m 高程紧靠过渡层的主堆石料单元，分析坝前不同蓄水速率（1 m/d、3 m/d、5 m/d）对该单元流变的影响程度。结果如图 7，可见：蓄水速度对堆石体流变影响明显，5 m/d 蓄水速度下初始流变速率最快，1 m/d 初始流变速率最慢，随着时间的推移，不同蓄水速度下单元最终的流变量趋向一致。堆石料在快速蓄水下的加速流变，使得坝体整体变形加速，将导致面板的加速变形。

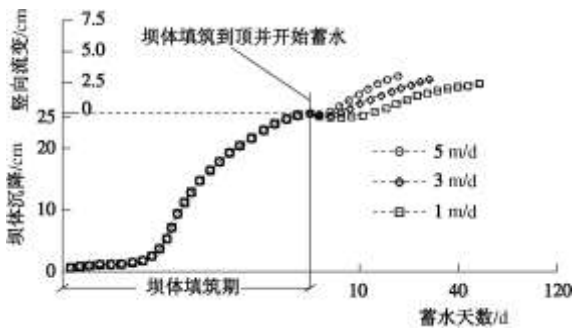


图 7 蓄水速度对堆石料流变影响

Fig. 7 Impact of water flow rate on rheological state of rockfill

混凝土面板作为坝体的防渗体，其重要性不言而喻。在快速蓄水下面板能否完好并发挥挡水防渗功效是我们最为关注的问题。为探索不同蓄水速率下面板的应力变形情况，下面比较分析 1m/d 和 5m/d 蓄水速率下面板的运行状态。

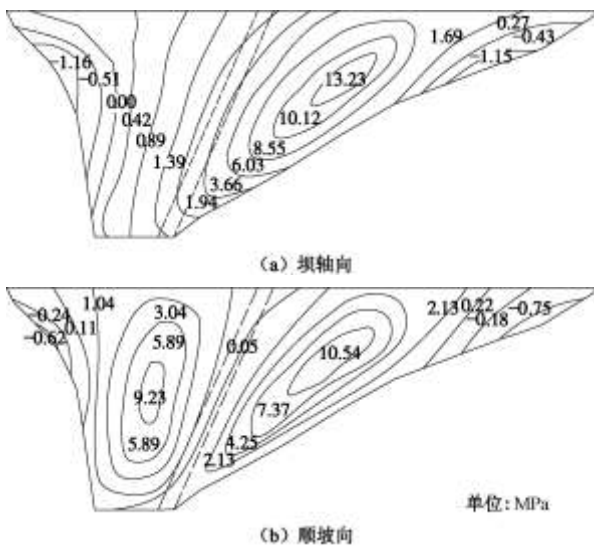


图 8 1 m/d 蓄水速率下面板应力等值线分布

Fig. 8 Contours of face slab stress under water rate of 5 m/d

图 8, 9 为 1 m/d 和 5 m/d 蓄水速率下面板的应力分布，模拟时以坝体填筑到顶时开始下闸蓄水，水位达正常蓄水位 680 m 高程为止，计算此时面板的应力状态。可见，快速蓄水下面板轴向和顺坡向的应力均有不同程度的增大，最大受力区域向四周有明显的扩

展趋势，从而使得面板在快速蓄水下可能发生破坏的区域增大；在 5 m/d 蓄水速率下连接板附近出现了一定范围的拉应力，说明快速蓄水下面板有被拉裂的可能性。

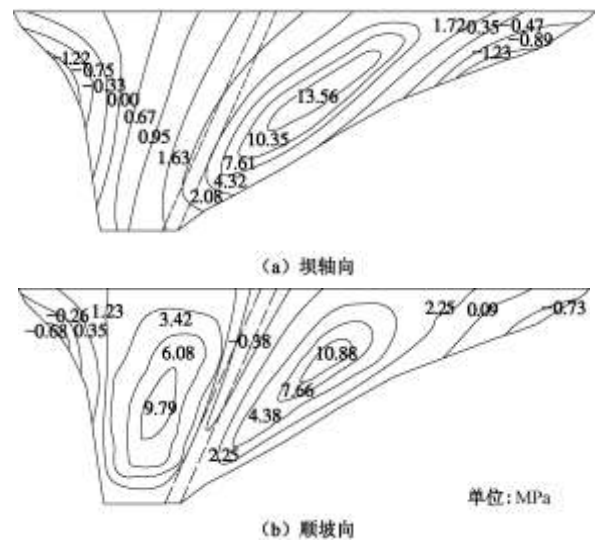


图 9 5m/d 蓄水速率下面板应力等值线分布

Fig. 9 Contours of face slab stress under water rate of 5 m/d

5 m/d 蓄水速率下面板坝轴向和顺坡向应力极值分别为 13.56 MPa、10.88 MPa，主要集中在#12 至#17 面板中上部。规范<sup>[12]</sup>给出面板 C30 混凝土的轴心抗压强度为 14.3 MPa，当坝前涨水更快或蓄水位更高时，面板应力进一步增大，可能达到或超过面板的抗压强度，从而导致#12 至#17 面板及向周围扩展的区域出现裂缝、挤压破坏等，使面板发生渗漏，因此危机坝体的安全运行。大坝经历 7.10 洪水时出现挤压破坏、裂缝的位置集中在#13 至#17 面板中部位置，这和有限元仿真计算的结果比较吻合。

### 2.2 洪水后坝体运行状态

为探讨洪水后坝体的运行性状，本节选取坝体 2006 年 12 月份开始填筑至洪水后的 2009 年 9 月底，采用黏弹性有限元仿真计算坝体的填筑、蓄水、退水的全过程，对坝体的运行现状进行分析。

#### (1) 面板应力与变形

如图 10 为面板坝轴向和挠度的位移分布，可见：洪水过后，面板坝轴向位移呈现两侧出向河床中部挤压的趋势，左侧面板向右岸偏移 5.3 cm，右岸面板向左岸偏移 3.7 cm，数值不大。面板挠度最大值出现在折线右侧，其为 36.2 cm，面板挠度在折线处过渡较好，只有轻微的突变现象。由于坝体填筑的原因(堆石体右岸的缺口在其它部位填筑到顶后，再进行此缺口的填筑)，因此该区域面板挠度等值线较密，数值较同一高程其它部位大些。

水压力作用抑制了堆石料的侧向鼓胀效应，使得面板的挠度均指向坝体内部，没有出现指向坝外的翘

首现象。

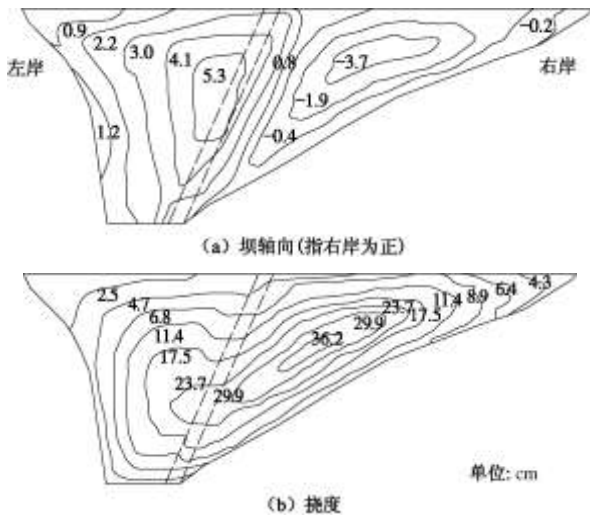


图 10 面板变形等值线

Fig. 10 Contours of face slab deformation

图 11 为运行状态下面板坝轴向和顺河向的应力分布, 可见: 面板均以压应力为主, 顺坡向应力在连接板附近较小, 最小值为 0.07 MPa。

面板坝轴向应力最大值出现在折线处右侧面板中上部, 极值 11.91 MPa, 折线处左侧面板压应力不大; 在面板左右岸坡附近出现了拉应力区域, 其中左岸最大拉应力为 1.13 MPa, 右岸为 1.09 MPa。

面板顺坡向应力大致以面板折线处为界, 在两侧出现了各自的最大压应力区, 左侧最大值出现在面板的中下部, 极值为 8.67 MPa, 右侧出现在面板中上部, 极值为 9.83 MPa, 折线处面板没有出现拉应力。

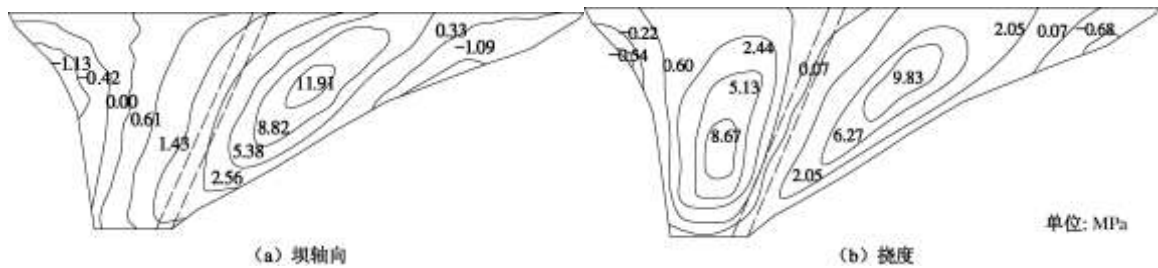
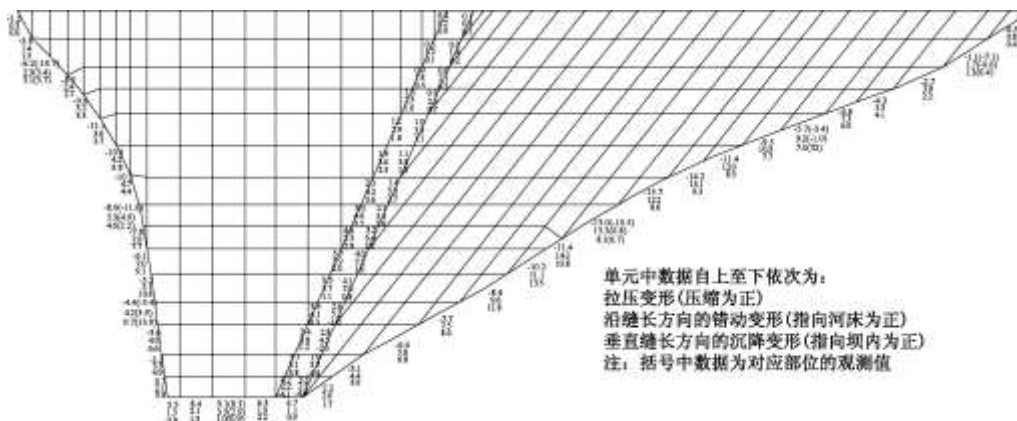


图 11 面板应力等值线分布

Fig. 11 Contour of face slab stress



(2) 面板接缝变形

面板周边缝及连接板两侧接缝的变形如图 12, 可见: 周边缝除面板底部受压外, 其余部位均为受拉状态, 最大压缩变形为 9.1 mm; 周边缝在 575~635 m 高程区域张开最明显, 折线右侧最大张开 15.7 mm, 左侧最大张开 11.1 mm。周边缝的张开度与岸坡的陡峭平缓程度有关, 这在左岸周边缝的变形中容易看出。

连接板两侧接缝及周边缝的错动均指向河床, 其中连接板两侧接缝最大值出现在一期面板顶部附近, 其值为 7.2 mm; 周边缝错动变形最大值左右岸分别为 7.9 mm 和 15.3 mm。

周边缝垂直缝长方向的沉降变形均指向坝内, 最大值在一期面板中上部, 左岸极值为 10.8 mm, 右岸极值为 13.5 mm; 连接板两侧接缝的垂直缝长方向沉降变形在一期面板内基本指向坝外, 在二、三期面板中垂直缝长方向沉降变形均指向坝内。

(4) 面板脱空及垫层亏坡

巴山面板堆石坝共有面板 41 块, 分三期浇筑, 一期面板顶高程 600 m, 2008 年 2 月中旬开始浇筑, 此时坝体填筑到 624 m 高程左右; 二期面板顶高程 640 m, 2008 年 9 月初开始浇筑, 此时坝体基本填筑到顶(右岸未到顶); 三期面板 2009 年 2 月中下旬开始浇筑。

计算结果显示三期面板顶部的#14~#18 面板有轻微的脱空现象, 最大脱空出现在#15 面板顶部, 脱空开口最大宽度为 1.2 cm, 深度 2.2 m。洪水退后巡视发现三期面板#16、#17 顶部出现了脱空, 脱空开口宽度

图 12 面板周边缝及折线处两侧接缝变形

Fig. 12 Deformation of peripheral joints of face slab and connecting joints at both sides of broken line

在 3~4 cm。这与计算得出的坝体脱空部位基本一致。其余部位面板均和垫层料呈挤压状态，故不存在面板脱空及垫层料的亏坡现象。

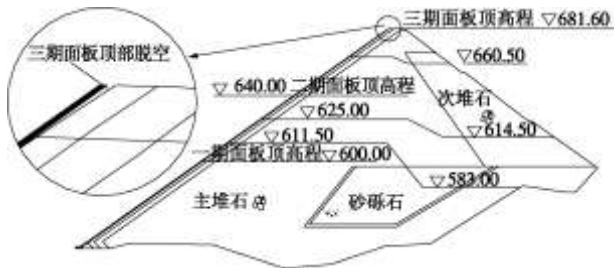


图 13 #15 面板脱空情况

Fig. 13 Separation of face slab No.15

### 3 结 论

(1) 以大坝现场原型观测资料为依据，反演得出堆石料本构模型参数，克服了室内三轴实验确定参数的局限性，更能体现坝体堆石料运行的力学特征。

(2) 从计算结果显示：面板折线处与周围变形协调性好，没有出现应力突变等现象，折线处设置连接板改善了坝体的变形及受力状态，效果良好。

(3) 计算结果显示：坝体初次蓄水时的快速涨水，会加速堆石体沉降，使面板挠度在短时间内达到较大值，当此值超过了面板所能承受范围时，将造成面板破损等。因此应采取合理的手段，控制初次蓄水时的涨水速度。

(4) 工程经验和实践证明：控制坝体沉降速率使之收敛后再拉面板，是保证面板不出现裂缝的重要手段。

(5) 计算结果表明坝体一、二期面板顶部没有出现脱空的现象，主要原因是一期面板超高 25 m 以上，二期面板在坝体基本填筑到顶后再浇筑，超高 40 m。

#### 参考文献：

- [1] 李国英, 赵魁芝, 陈铁林, 等. 巴山水电站面板堆石坝筑坝材料静力特性试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2004. (LI Guo-ying, ZHAO Kui-zhi, CHEN Tie-lin, et al. Bashan concrete face rockfill dam materials Experimental study of static[M]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2004. (in Chinese))
- [2] 张玉龙. 巴山水电站工程原型观测资料分析报告[R]. 昆明: 昆明勘测设计研究院, 2008. (ZHANG Yu-long. Bashan Hydropower Project prototype observation data analysis report[R]. Kunming: KunMing Institute of Survey and Design, 2008. (in Chinese))
- [3] 沈珠江. 土石料的流变模型及其应用[J]. 水利水运科学研
- [4] 米占宽, 沈珠江, 李国英. 高面板堆石坝坝体流变性状[J]. 水利水运工程学报, 2002(2): 35 - 41. (MI Zhan-kuan, SHEN Zhu-jiang, LI Guo-ying. Rheological models for high concrete face rockfill dam[J]. Hydro-science and Engineering, 2002(2): 35 - 41. (in Chinese))
- [5] 王登银, 梁现培. 巴山水电站堆石料流变特性研究[J]. 水利学报, 待刊. (WANG Deng-yin, LIANG Xian-pei. Bashan station rheological properties of rockfill[J]. Journal of Hydraulic Engineering, in Press. (in Chinese))
- [6] 朱 晟, 王永明, 胡祥群. 免疫遗传算法在土石坝筑坝粗粒料本构模型参数反演中的应用研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 962 - 966. (ZHU Sheng, WANG Yong-ming, HU Xiang-qun. Application of immune genetic algorithm to back analysis for arameters in model of rockfill dam coarse grain material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 962 - 966. (in Chinese))
- [7] 曹克明, 汪易森, 张宗亮. 高混凝土面板堆石坝的设计与施工[J]. 水力发电, 2001(10): 49 - 52. (CAO Ke-ming, WANG Yi-sen, ZHANG Zong-liang. High concrete face rockfill dam design and construction[J]. Hydropower, 2001(10): 49 - 52. (in Chinese))
- [8] 马洪琪, 曹克明. 超高面板坝的关键技术问题[J]. 水利水电施工, 2008(1): 12 - 17. (MA Hong-qi, CAO Ke-ming. The key technical issues high concrete face rockfill dam[J]. Water Resources and Hydropower Construction, 2008(1): 12 - 17. (in Chinese))
- [9] 曹克明, 徐建军. 超高面板坝面板临界挠度探讨和设计改进[J]. 水力发电, 2008(11): 98 - 102. (CAO Ke-ming, XU Jian-jun. Critical deflection of ultra-high concrete face rockfill dam panel and design improvements[J]. Hydropower, 2008(11): 98 - 102. (in Chinese))
- [10] 白旭宏, 黄艺升. 天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝设计施工及其认识[J]. 水力发电学报, 2002(2): 108 - 123. (BAI Xu-hong, HUANG Yi-sheng. TSQ-concrete face rockfill dam design and construction of knowledge[J]. Hydroelectric Engineering, 2002(2): 108 - 123. (in Chinese))
- [11] 陈振文, 齐立景, 高礼洪. 重庆巴山水电站施工进度控制[R]. 杭州: 华东勘测设计研究院, 2007. (CHEN Zhen-wen, QI Li-jing, GAO Li-hong. Chongqing Bashan Hydropower construction schedule control[R]. Hangzhou: East China Investation & Design Institute, 2007. (in Chinese))

- [12] DL/T 5057—2009 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009. (DL/T 5057 — 2009 Design specification for hydraulic concrete structures[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009. (in Chinese))