

# 面板堆石坝面板脱空现象成因分析及预防措施

沈长松<sup>1</sup>,李艳丽<sup>2</sup>,郑福寿<sup>3</sup>

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.浙江省水利水电勘测设计院,浙江 杭州 310002;  
3.江苏省水利厅,江苏 南京 210029)

**摘要** 利用三维有限元分析方法对影响面板脱空现象的各种因素进行了计算分析,并对在分期浇筑面板的高程、堆石体的材料及变形特性、垫层料的材料及变形特性以及不同的蓄水情况等因素影响下的脱空值及其规律进行了系统的比较分析.结果表明,低压缩性、高抗剪强度的垫层料和砾石材料变形较小,通过控制填筑高度及施工顺序、提高碾压质量等措施,可防止或减少面板脱空现象.

**关键词** 面板堆石坝 有限元分析 面板脱空 变形 分期蓄水 分期施工

**中图分类号** TV641.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2006)06-0635-05

目前,面板堆石坝的高度已从 100 m 级发展到 200 m 级甚至更高,由于受分期施工等因素的影响,使高面板堆石坝的坝体变形性状更加复杂,出现了一些坝面难以发现的问题,面板脱空就是其中之一<sup>[1-3]</sup>.所谓‘面板脱空’就是面板与垫层之间出现空隙.面板堆石坝在分期施工过程中,在二期坝体填筑完成二期面板浇筑之前,一期面板与一期坝体相接触的顶部发生一定范围的脱开现象,或在三期坝体填筑完工三期面板浇筑之前,二期面板与二期坝体相接触的顶部一定范围发生的脱开现象.但是,并不是只有高面板坝分期施工时才会出现面板脱空现象,中低坝若分期施工也同样存在这种现象,只不过其量值一般较小,从表面难以发现,故未能引起人们的注意.面板堆石坝是以支撑在堆石体上的面板作为防渗体,面板与垫层料之间出现脱空现象后,面板失去紧贴的支撑而使面板工作状况恶化,易产生裂缝,当裂缝贯穿大量漏水时即会影响大坝的安全<sup>[4-7]</sup>.因此找出产生面板脱空的原因及脱空值大小,如何避免脱空现象是目前所急需解决的问题.本文以广西某面板堆石坝为例,通过三维有限元仿真计算,模拟其施工程序和蓄水过程,分析出现脱空现象的相关影响因素及影响程度,为避免脱空提供科学依据.

## 1 计算模型

广西某混凝土面板堆石坝为一库一站的综合利用工程,库区地形自然封闭较好,无明显的不良地质现象.坝址岩石呈坚硬至中等坚硬,最低抗压强度为 25.6 MPa.拦河坝为碾压式混凝土面板堆石坝,坝顶高程 298.6 m,最大坝高 85.6 m,坝顶全长 210 m,坝顶宽 6 m,上下游坝坡均为 1:1.4.

根据总体设计规划和安排,堆石坝施工过程共分 34 级,如表 1 所示.网格剖分以 8 结点六面体空间等参单元为主,局部辅以 6 结点五面体单元.典型剖面有限元网格如图 1 所示.

表 1 加荷分级情况

Table 1 Stage loading

| 加荷<br>分级 | 相应<br>高程/m | 加荷类型      | 加荷<br>分级 | 相应<br>高程/m | 加荷<br>类型  |
|----------|------------|-----------|----------|------------|-----------|
| 1        | 219.0      | 坝体下部砂卵石层  | 16~32    | 298.6      | 二期坝体施工    |
| 2~13     | 275.0      | 一期坝体施工    | 33       | 298.6      | 二期混凝土面板浇筑 |
| 14       | 270.0      | 一期混凝土面板浇筑 | 34       | 295.0      | 二期蓄水      |
| 15       | 265.0      | 一期蓄水      |          |            |           |

计算时,将钢筋混凝土面板视为线弹性材料,垫层材料、堆石视为非线性弹性材料,采用邓肯 E-B 模型,以模拟堆石料非线性弹塑性性质.在垫层与钢筋混凝土面板之间设无厚度 Goodman 单元.有限单元仿真计算

采用中点增量法<sup>[8-10]</sup>.

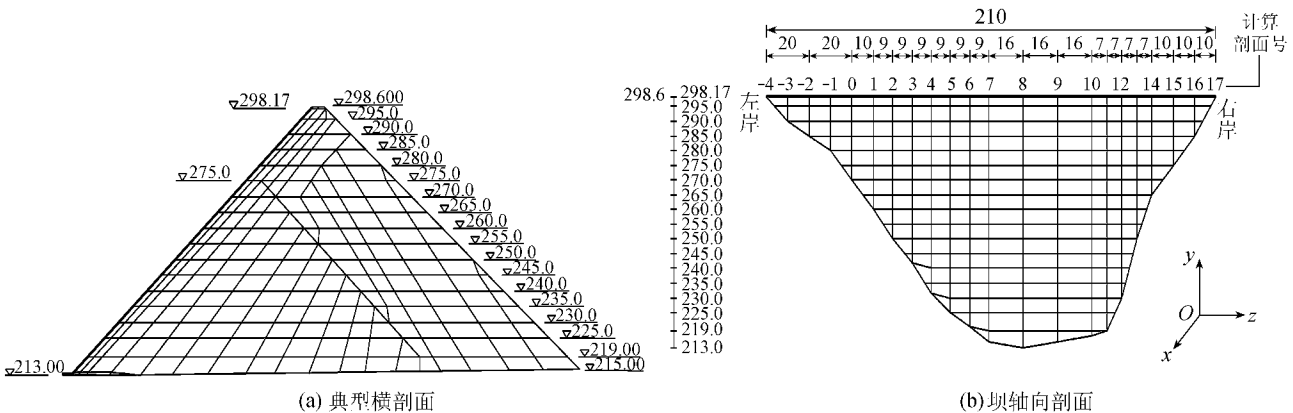


图 1 面板堆石坝典型横剖面和坝轴向剖面有限元网格(单位:m)

Fig.1 FEM meshes for typical cross section and axial section of concrete face rockfill dam

2 脱空现象成因分析

研究面板单元与垫层单元的变形协调问题,即研究面板单元与垫层单元两个面相对拉/压变形问题(以面板下表面与垫层上表面荷载分级位移量差值反映,“+”号表示接触面受拉“脱空”).影响面板脱空的因素较多,如分期面板的浇筑高程、垫层、堆石体材料变形特性(非线性、蠕变等)以及不同的蓄水过程等,本文就上述几种因素对脱空的影响、脱空值及脱空范围等进行较系统的仿真计算分析.

2.1 面板分期浇筑高程不同对面板脱空的影响

假定其他条件不变,研究不同的面板浇筑高程对面板脱空的影响.计算分两种工况:工况 A 为一期面板浇筑高程与一期坝体填筑高程相同,即都浇筑到 275 m 高程;工况 B 为一期面板浇筑高程比一期坝体填筑高程低一级(5 m).

图 2 为工况 A,B 面板脱空等值线.从图 2 可以看出:(a)在两种工况下,出现脱空的范围都集中在河床部位,靠两岸的部位一般不出现脱空现象.这是因为河床部位填筑体积大,变形亦大,两岸则相对较小,这和目前实际施工中发现的现象一致;(b)在 A,B 两种工况下,面板脱空最大值分别为 4.57 mm 和 3.59 mm,发生部位都是在  $y = 265.0\text{ m}$ ,  $z = 0.0\text{ m}$  处,按照一期面板浇筑高程低于一期坝体填筑高程 5 m 的施工程序,可以减小脱空值和脱空范围;(c)对比两种工况的计算结果发现发生面板脱空的部位都从一期填筑坝体的顶部向下 20 m 左右处开始,在其上部 2/3 处达到最大.因此,在面板堆石坝的分期施工中,应将一期面板浇筑高程与一期填筑坝体的顶部保持一定的高差,有利于减小面板脱空的范围及脱空值,以便将这部分变形协调性较差的坝体外露,便于二期面板浇筑前找平处理.

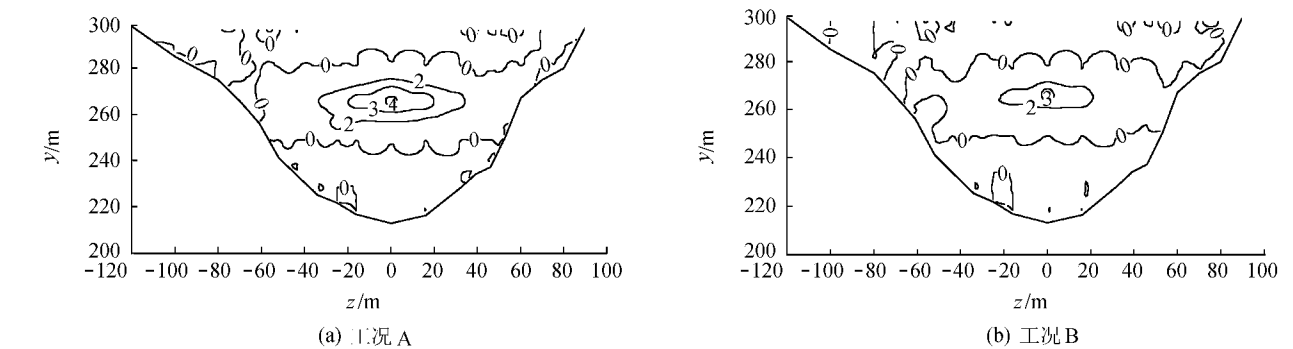


图 2 不同工况时的面板脱空等值线(单位:mm)

Fig.2 Isoline of interspace under working conditions A and B

2.2 垫层材料对面板脱空的影响

假定其他条件不变,研究不同垫层材料对面板脱空的影响.工况 A 为根据当地垫层材料的实际情况结合以往的工程经验选定的参数,工况 B 为将垫层材料的主要参数降低的情况.两种垫层料的模型参数见

表 2.

经计算,工况 A 的面板脱空等值线图 2(b),工况 B 的面板脱空等值线图如图 3(a)所示.比较图 2(b)及图 3(a)可以看出,面板脱空等值线的规律基本一致,面板脱空部位仍在河床部位.但由于垫层料的变化,变形模量降低,使得脱空区域及最大值都有增大,最大值达到 5.54 mm,脱空区域也扩大到高程 250~270 m.

表 2 两种垫层料的模型参数

Table 2 Model parameters for two kinds of cushion layers

| 工况 | $R_f$ | $K$ | $n$  | $K_b$ | $m$  | $K_{ur}$ | $n_{ur}$ | $\varphi_0/({}^\circ)$ | $\Delta\varphi/({}^\circ)$ | $c/\text{kPa}$ | $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ |
|----|-------|-----|------|-------|------|----------|----------|------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------------------|
| A  | 0.70  | 950 | 0.40 | 440   | 0.41 | 2000     | 0.26     | 51                     | 7                          | 0              | 2.20                                   |
| B  | 0.68  | 910 | 0.38 | 350   | 0.40 | 1800     | 0.25     | 48                     | 6                          | 0              | 2.10                                   |

注: $R_f$ 为破坏比; $K$ 为初始弹模基数; $n$ 为初始弹模指数; $K_b$ 为无因次的体积模量基数; $m$ 为无因次的体积模量指数; $K_{ur}$ 为卸荷再加荷时的弹性基数; $n_{ur}$ 为卸荷再加荷时的弹模指数; $\varphi_0$ 为内摩擦角; $\Delta\varphi$ 为 $\sigma=0.1\text{ MPa}$ 时 $\varphi$ 减小的度数; $c$ 为黏聚力; $\rho_d$ 为密度.

综上所述,低压缩性、高抗剪强度的垫层材料,产生的脱空值较小.这是因为在同样的荷载作用下,低压缩性和高抗剪强度的垫层材料产生的塑性较小,使得垫层与面板之间脱开的距离也小.因此,在实际工程中应特别注意垫层材料的密实度以及垫层材料的强度,施工中加强垫层的碾压程度,选择高抗剪强度的材料以保持垫层的平整度,并且在垫层区以下的堆石区不要有局部薄弱环节,同时合理确定面板浇筑高程,必要时还应参照以往的工程经验及进行必要的试验,以尽量减小或避免面板脱空.

2.3 堆石体材料对面板脱空的影响

与前述假定条件相同,研究不同堆石料对面板脱空的影响.工况 A 为根据当地堆石材料的实际情况结合以往的工程经验选定的参数,工况 B 为将堆石料参数降低的情况.两种堆石料的模型参数见表 3.

表 3 两种堆石料的模型参数

Table 3 Model parameters for two kinds of rockfills

| 工况 | $R_f$ | $K$ | $n$  | $K_b$ | $m$  | $K_{ur}$ | $n_{ur}$ | $\varphi_0/({}^\circ)$ | $\Delta\varphi/({}^\circ)$ | $c/\text{kPa}$ | $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ |
|----|-------|-----|------|-------|------|----------|----------|------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------------------|
| A  | 0.75  | 910 | 0.45 | 350   | 0.40 | 1900     | 0.25     | 52                     | 8                          | 0              | 2.15                                   |
| B  | 0.70  | 850 | 0.45 | 300   | 0.40 | 1500     | 0.25     | 45                     | 8                          | 0              | 2.15                                   |

工况 A 的面板脱空等值线图如图 2(b)所示,工况 B 的面板脱空等值线图如图 3(b)所示.比较图 2(b)及图 3(b)可以看出,面板脱空等值线的规律基本一样,面板脱空部位主要还是在河床部位,但由于堆石料的变化,变形模量降低,使得脱空区域及最大值都有增大.而且还可看出,堆石体对面板脱空的影响比垫层对面板脱空的影响大.垫层虽然是直接支撑面板的,但由于堆石体的体积大,其变形对面板部位的不协调性影响更大.

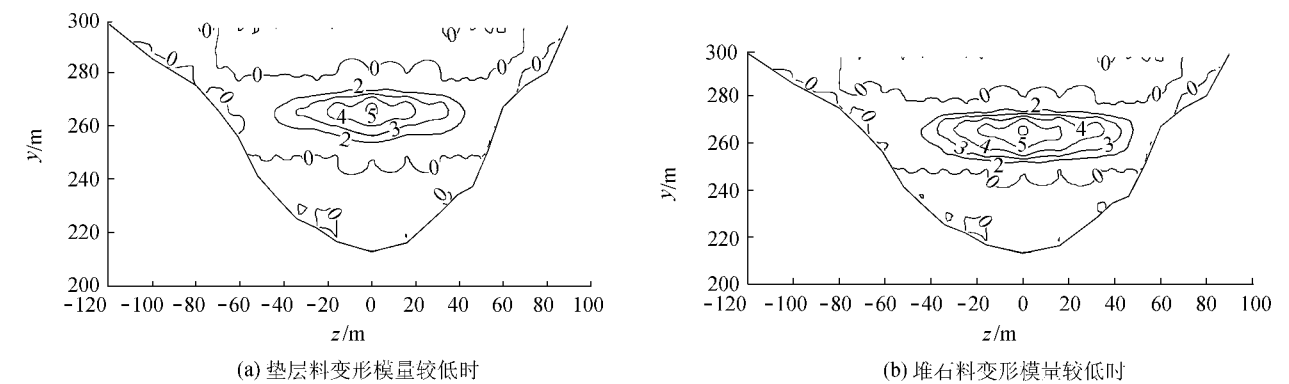


图 3 不同材料时的面板脱空等值线(单位:mm)

Fig.3 Isolines of interspace for different materials at low deformation modulus

2.4 分期蓄水位对面板脱空的影响

水荷载是影响坝体及面板变形的重要外荷载,它的变化及不同的蓄水过程将对面板脱空产生较大的影响.不少实际工程中都采用一期坝体度汛后退水,再进行后续工程施工的形式.若一期面板挡水后再退水,坝体及面板的变形就会和不退水直接进行后续工程施工明显不同,因此在前面研究的基础上再对其进行进一步的分析研究.

一期面板浇筑后直接挡水,不退水直接进行后续工程施工,此时的面板脱空等值线如图 2 (b) 所示.挡水后退水至坝底高程,然后再进行二期坝体施工时的面板脱空等值线如图 4 所示.将图 2 (b) 与图 4 比较可看出,脱空值有较大差异.挡水再退水后的面板脱空最大值为 6.98 mm,位置在  $y = 270.0\text{ m}$ ,  $z = 0.0\text{ m}$  处,比不退水时的最大值 3.59 mm 增大了 3.39 mm;且与前几种工况最大值出现在  $y = 265.0\text{ m}$ ,  $z = 0.0\text{ m}$  处不同.说明一期坝体的最上部受水位变化的影响最大,使得面板脱空部位的最大值的位置也发生了变化.

在实际工程中,一旦水库蓄水,坝体受力和变形就比仅受自重作用更为复杂.坝体在产生向下沉降的同时还产生向下游的变形.对于分期施工的面板堆石坝,当一期堆石体和面板作为临时度汛的挡水结构时,由于汛期水位较高,水压力也较大,使得面板和堆石体都产生较大的向下游的变形.其中面板的变形主要是弹性变形,堆石体的变形主要是塑性变形.当水位下降后,水压力减小,面板的变形能够大部分恢复,而堆石体的变形恢复量却很小,这时就有脱空现象产生.特别是当堆石体沉降尚未完成,此时由于度汛需要而浇筑了面板,在较大的水压力作用下,会产生更大的变形,脱空现象就会更明显.值得注意的是,对于一次性施工的面板堆石坝,如果在堆石体沉降未完成就进行面板的浇筑,此时也会发生面板脱空现象.

3 预防面板脱空的措施

由以上分析可知,坝体和面板的分期施工、垫层料、堆石体材料的压缩性能及抗剪强度、分期蓄水等因素都会对面板脱空值及其范围产生不同程度的影响.为减小乃至避免其影响,可采取如下措施:进行碾压试验获取合格的碾压参数,保证坝体各部位的填筑质量,必要时(尤其是高坝)应辅以三维有限元仿真计算.在实际工程中,为满足尽快发电和安全度汛等要求,分期施工、分期蓄水是工程施工中常采用的方式,因此,除对堆石料(垫层、堆石体)的性质和碾压质量需要按设计要求做出规定外,还需要设计合理的分期施工和分期蓄水程序,以减少混凝土面板的脱空值.大坝施工时,建议将一期面板的浇筑高程控制在坝体一期填筑高程以下 5 ~ 10 m,以便在二期面板浇筑之前,找平外露的一期坝体和部分二期坝体的上游面,然后浇筑面板,这样可将面板脱空值控制在最小范围内,保证面板能正常工作.

4 结 语

- a. 一期面板浇筑高程的不同会对面板脱空产生影响,当一期面板与一期坝体顶部保持一定高差时,面板脱空的范围与最大值都比较小.因此,面板堆石坝采用分期施工方案时,分期面板的顶部宜比相应的坝体顶部低 5 ~ 10 m.
- b. 垫层材料的性质不同,产生的脱空值也不一样.这是由于在同样荷载作用下,高压缩性、低抗剪强度的垫层材料会产生较大的塑性变形,进而使得面板与垫层之间产生的脱空值会较大.因此,在面板堆石坝的材料选择时,垫层料应选用低压缩性、高抗剪强度的材料.
- c. 与垫层的影响相同,低压缩性、高抗剪强度的堆石材料其变形亦较小,该种材料有利于减少面板脱空现象,而且由于堆石体的变形为面板坝的主要变形,所以堆石体的变形增加对面板脱空的影响较大,其影响程度超过垫层料.
- d. 分期施工、分期蓄水是工程施工中常采用的方式,因此大坝施工时,建议将一期面板的浇筑高程控制在坝体一期填筑高程以下 5 ~ 10 m,在二期面板浇筑之前,找平外露的一期坝体和部分二期坝体的上游面,然后浇筑面板,这样可将面板脱空值控制在最小范围内,以保证面板正常工作.

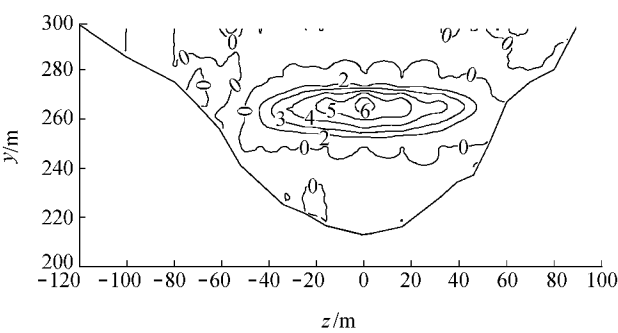


图 4 一期面板挡水后退水时的  
面板脱空等值线(单位: mm)

Fig.4 Isoline of interspace at water discharge after  
water holding by slab at the first stage

## 参考文献:

- [1] 刘英珍,王育阳.土石坝建设中的问题与经验[M].西安 陕西人民出版社,2002 :131-138.
- [2] 卢廷浩,袁俊平.面板堆石坝中面板‘脱空’的预测和防治[J].红水河.2004,23(1) :18-20.
- [3] 沈长松.现代坝工技术及其发展趋势(一)[J].水利水电科技进展,1999,19(5) :16-19.
- [4] 肖化文,杨清.对高面板堆石坝一些问题的探讨[J].水利水电技术,2003(2) :10-13.
- [5] 卢廷浩,鲍伏波.接触面模型在高面板堆石坝中的应用研究[J].红水河,2000,19(4) :12-15.
- [6] 赵魁芝,李国英,沈珠江.天生桥混凝土面板堆石坝面板原型观测资料分析[J].水利水运工程学报,2001(3) :40-46.
- [7] 傅志安,凤家骥.混凝土面板堆石坝[M].武汉 华中理工大学出版社,1993 :46-56.
- [8] 顾淦臣,束一鸣,沈长松.土石坝工程经验与创新[M].北京 中国电力出版社,2004 :245-255.
- [9] 姜弘道,赵光恒,向大润,等.水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序[M].南京 河海大学出版社,1992 :277-279.
- [10] 岑威钧,朱岳明,罗平平.面板堆石坝有限元仿真计算及参数敏感性研究[J].水利水电科技进展,2005,25(4) :16-18.

## Causes of formation of interspace between slab and cushion layer of CFRD and measures for its prevention

SHEN Chang-song<sup>1</sup>, LI Yan-li<sup>2</sup>, ZHENG Fu-shou<sup>3</sup>

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

2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China ;

3. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029 China)

**Abstract** :The 3-D FEM was used for analysis of the factors causing interspace between slab and cushion layer, with emphasis on the size of interspace and the regularity of its variation under the influences of the elevation of stage slab pouring, the materials of rockfill and cushion layer and their deformation characteristics, and the different water storage conditions. The result shows that the materials of rockfill and cushion layer with low compressibility and high shear strength are of small deformation. Finally, it is pointed out that interspace can be prevented by control of the height of pouring, adjustment of the construction order, and improvement of the quality of roller compaction.

**Key words** :concrete face rockfill dam ; finite element analysis ; interspace between slab and cushion layer ; deformation ; stage water storage ; stage construction