

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.007

凸起地形对面板堆石坝面板应力变形特性的影响

李瑞平^{1,2}, 徐建伟³, 刘啸宇^{1,2}, 毛航宇^{1,2}, 王柳江^{1,2}

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 大坝长效特性及环保修复技术中西联合实验室, 江苏 南京 210098;
3. 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: 依托某建于凸起地形上的面板堆石坝, 采用三维非线性有限元分析方法, 研究左岸凸起地形及其 2 种开挖方案对面板堆石坝面板应力变形特性以及接缝变形的影响。通过坝轴向和顺坡向的面板挠度曲线解释了面板拉应力分布规律, 提出了面板拉裂风险指标, 并对开挖方案进行了效果评价。结果表明: 凸起地形对面板应力变形和接缝变形有较大影响, 相较于凸起地形完全挖除方案, 凸起地形对堆石体和面板具有较强的约束和支撑作用, 导致凸起地形处的面板坝轴向位移和挠度减小, 拉应力区增大, 垂直缝张开数量增多, 然而, 面板拉应力、垂直缝张开量以及周边缝张开和错动均有所减小; 凸起地形上游侧按 1:1.5 开挖后, 面板变形协调性明显改善, 面板拉应力区面积和垂直缝张开数量减少, 有效降低了面板拉裂风险。

关键词: 面板堆石坝; 复杂地形; 面板应力; 接缝变形; 开挖方案

中图分类号: TV641.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)06-0053-08

Impact analysis of convex terrain on stress-strain and deformation characteristics of CRFD

LI Ruiping^{1,2}, XU Jianwei³, LIU Xiaoyu^{1,2}, MAO Hangyu^{1,2}, WANG Liujiang^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. International Joint Laboratory of Long-term Behaviour and Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies on Dams, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: To study the influence of the convex terrain in the left bank and excavation schemes on the stress-deformation characteristics of concrete slab and joints displacement of concrete face rockfill dams (CFRD), a three-dimensional nonlinear FEM analysis was conducted on a CRFD built on the foundation with local convex terrain. The distribution law of tensile stress on the concrete face was explained according to the deflection curves of concrete slab along the dam axis and the slope direction. Besides, the risk index of the concrete face cracking was proposed, which was used to evaluate the effect of excavation schemes. The results show that the convex terrain in the left side of dam has a great influence on the stress deformation of concrete slab and joints displacement. Compared with the completely excavated scheme, the convex terrain has the effect of constraint and support for rockfill materials and concrete slab in the left side of the dam, which leads to the decrease of the dam axial displacement and deflection of the concrete slab, increase of the tensile area of the concrete slab, and increase of the number of tension joints. However, the maximum tensile stress of the concrete slab, opening of the vertical joints, as well as the opening and dislocation of the peripheral joints are reduced. As the upstream side of the convex terrain excavated at the slope of 1:1.5, the deformation coordination of the concrete can be improved. The tensile area and the number of tensile vertical joints are reduced, which can effectively reduce the risk of cracking of concrete slab.

Key words: CRFD; complex terrain; concrete slab stress; joint displacement; excavation scheme

为实现“双碳”目标, 大力发展风电、太阳能等清洁能源, 我国电力系统需要建设大规模的抽水蓄能电站^[1]。由于混凝土面板堆石坝具有施工不受季节影响、对地形地质条件适应性强、就地取材以及抗震性能强等优点, 在抽水蓄能电站建设中被广泛采用^[2-4]。与常规面板堆石坝不同, 抽水蓄能电站主坝通常建于沟

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0105000); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52209160, 52009036)
作者简介: 李瑞平(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事土石坝有限元分析研究。E-mail: hhlurp@163.com
通信作者: 王柳江(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事土石坝筑坝技术研究。E-mail: 15850514642@163.com
引用本文: 李瑞平, 徐建伟, 刘啸宇, 等. 凸起地形对面板堆石坝面板应力变形特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 53-60.
LI Ruiping, XU Jianwei, LIU Xiaoyu, et al. Impact analysis of convex terrain on stress-strain and deformation characteristics of CRFD[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6): 53-60.

源洼地,地形条件复杂,如溧阳抽水蓄能电站上水库大坝沿轴线方向坝基地形呈“W”形,沟谷地形相对高差达 30 ~ 50 m,垂直坝轴线方向,坝基以约 17°倾向下游^[5]。因此,研究复杂地形条件对面板堆石坝应力变形特性的影响,对抽水蓄能电站面板堆石坝的设计施工具有重要参考意义。

关于地形对面板堆石坝应力变形特性的影响,已有不少学者开展过相关研究。例如:程嵩等^[6]探讨了不同宽高比河谷对面板堆石坝应力变形的影响,认为河谷宽高比减小能够减小面板坝轴向拉应力,而坝轴向压应力则呈先减小后增大的趋势,面板周边缝张开量明显减小;宋文晶等^[7]通过对复杂地形条件下已建面板坝工程实际性状的调研分析,发现河谷地形对面板防渗体系的不利影响主要体现在基坑开挖形状突变以及坝肩岸坡转折部位,并通过数值模拟解释了面板在岸坡转折处发生破坏的原因;潘家军等^[8]分析了贴坡型面板堆石坝的坝体变形规律,发现其与常规面板堆石坝有较大不同;杨杰等^[9]研究了不规则“W”形河谷地形对高面板堆石坝面板应力变形和接缝变形的影响;杨超等^[10]则定义了河谷宽度系数、河谷边坡陡缓系数、河谷非对称系数对河谷形状进行定量描述,并分析了这些参数对面板坝应力变形的影响;杨超等^[11]揭示了峡谷地区面板堆石坝坝体内部应力拱效应的形成机理,给出了坝体底部应力拱效应合理拱轴线的分布形态及范围;王建军等^[12]发现受河谷效应影响,狭窄河谷区面板堆石坝变形总量较小,但后期变形较大,对面板和周边缝等防渗体系不利;梁勐等^[13]研究了河床中部凸起地形对面板堆石坝应力变形的影响,发现凸起位置的面板受拉,且垂直缝张开,对面板防渗系统不利,但未对其成因及影响进行深入探讨和评价。

某抽水蓄能电站下水库面板堆石坝坝址位于狭窄“V”形的沟谷,坝体左侧存在凸起地形。为利用地形条件并减少开挖量,工程拟利用左侧凸起地形的天然坡面,清除地表强风化、破碎岩石和倒悬体,贴岩坡填筑堆石料,坝体右侧则按照常规填筑方式。考虑到凸起地形局部出现且离面板较近,可能会对面板防渗系统造成不利影响,本文采用非线性有限元计算方法,着重研究左岸凸起地形对面板堆石坝面板应力变形以及接缝变形的影响,并结合面板挠度曲线解释面板的拉应力分布规律;同时提出 2 种凸起地形开挖方案,分析局部开挖和整体挖除对面板拉应力以及接缝变形的影响,以期工程设计提供参考。

1 计算模型及参数

依托左岸存在凸起地形的某抽水蓄能电站下水库面板堆石坝,本文采用非线性有限元计算方法,分析凸起地形及其开挖方案对面板应力变形以及接缝变形的影响。采用河海大学刘斯宏课题组自主开发的土石坝静动力有限元分析软件 SDAS 进行计算。

1.1 工程概况

某抽水蓄能电站下水库面板堆石坝最大坝高 122.0 m,坝顶长 304.52 m,大坝上游坝坡坡比为 1 : 1.4,下游坝坡坡比 1 : 1.4,坝后设有压坡体,混凝土面板厚度为 0.4+0.002H(H 为计算断面至面板顶部的垂直距离)。下水库坝址区位于金丝坑沟下游,沟谷呈狭窄“V”形,坝体左侧存在明显凸起地形。由图 1 可见,2 个剖面的地形条件差异十分明显。

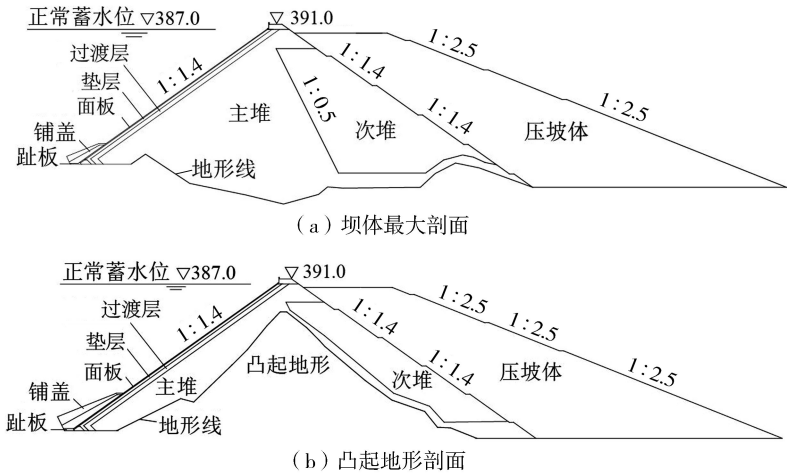


图 1 坝体典型剖面(单位:m)
Fig. 1 Typical section of dam body(unit:m)

1.2 本构模型

坝体填筑材料的本构模型采用邓肯 E-B 模型,其切线弹性模量、卸荷弹性模量和体积弹性模量分别为

$$E_t = K p_a (\sigma_3/p_a)^n \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right] \tag{1}$$
$$E_{ur} = K_{ur} p_a (\sigma_3/p_a)^{n_{ur}} \tag{2}$$
$$B = K_b p_a (\sigma_3/p_a)^m \tag{3}$$

其中

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \log(\sigma_3/p_a)$$

式中: E_t 为切线弹性模量; E_{ur} 为卸荷弹性模量; B 为体积弹性模量; K 、 n 分别为切线弹性模量系数和切线弹性模量指数; p_a 为大气压力; σ_1 为大主应力; σ_3 为围压; R_f 为破坏比; K_{ur} 为卸荷模量系数,通常取 $K_{ur}=1.5K$; n_{ur} 为卸荷模量指数,通常取 $n_{ur}=n$; K_b 为体积模量系数; m 为体积模量指数; c 、 φ 为线性强度参数,分别为黏聚力和内摩擦角; φ_0 为 $\sigma_3=100\text{ kPa}$ 时内摩擦角; $\Delta\varphi$ 为围压相对于标准大气压增大 10 倍时的内摩擦角递减量。

混凝土面板和基岩采用线弹性模型;面板周边缝和垂直缝采用接缝单元;面板与垫层,趾板与垫层界面采用 Goodman 接触模型^[14]。

1.3 计算网格

根据地形条件、坝体和蓄水过程建立三维有限元网格,如图 2 所示,单元形式以六面体单元及其退化单元为主,本模型包括基岩,网格结点数为 24 153,单元数为 22 558。为便于计算结果分析,定义坐标系方向如下: x 为坝轴向,指向右岸为正; y 为顺河向,指向下游为正; z 为竖向,向上为正;应力则压为正,拉为负。

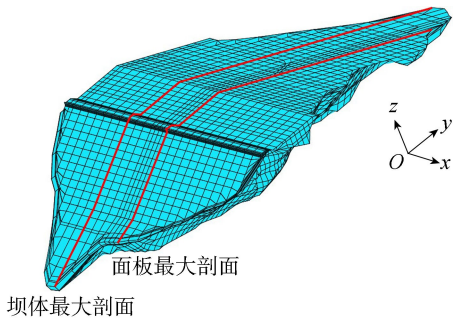


图 2 三维有限元网格模型

Fig.2 3D finite element mesh model

1.4 本构模型参数

填筑料的 E-B 模型参数通过南京水利科学研究院的坝料三轴试验确定,结果见表 1。面板和趾板采用 C30 混凝土浇筑,采用线弹性模型,弹性模量 $E=30\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.2$;基岩为白垩系下统西山头组第三段(K1x3)流纹质含砾晶屑熔结凝灰岩,岩质坚硬,取 $E=24\text{ GPa}$, $\nu=0.2$;面板接缝模型、接触面模型参数均参考文献^[15]。

表 1 静力计算模型参数

Table 1 Model parameters in static calculation

材料	R_f	K	n	K_b	m	$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	$\gamma_d/(\text{kN/m}^3)$
主堆石	0.67	1263.1	0.25	770.8	0.10	53.7	10.0	21.3
次堆石	0.65	897.9	0.26	460.2	0.23	51.3	9.1	21.0
垫层料	0.66	1 119.9	0.33	730.1	0.24	53.7	8.6	22.0
过渡料	0.65	1 330.9	0.25	928.9	0.05	54.8	10.1	21.7
坝后压坡体	0.76	157.7	0.52	72.6	0.37	35.9	5.4	14.4

注: γ_d 为干容重。

2 计算结果与分析

2.1 面板应力与变形

由图3可知,蓄水后左右岸面板往中间坝体最大剖面方向变形,这是由于堆石体在自重和水压力作用下,产生的位移会对面板施加指向坝体中间最大剖面的摩擦力,带动两岸面板往坝体最大剖面方向变形。由于左侧岸坡较右侧岸坡陡,左岸面板指向右岸的位移分布范围及最大值均大于右岸面板指向左岸的。值得注意的是,左岸面板坝轴向位移最大值位置高程较右岸低,结合图 1 可知,主要是由于左岸凸起地形上游

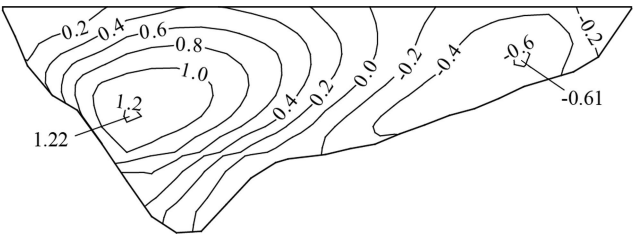


图 3 面板沿坝轴向位移等值线(单位:cm)

Fig.3 Contour of displacement of panel along the dam axis (unit: cm)

面与面板间距随高程增加而减小,使得凸起地形对左岸顶部堆石体的约束作用增强,因而左岸面板顶部的坝轴向往移减小,且最大值发生位置往下偏移。

由图4可知,挠度最大值位于靠近坝体最大剖面的中下部,面板挠度自最大挠度位置向外逐渐减小,与一般面板坝的面板挠度分布规律一致。值得注意的是,以面板最大剖面为界,其右侧面板靠近趾板的挠度变形梯度较大,这主要是因为其右侧坝体建基面往下游倾斜(图1),使得面板最大挠度位置靠近趾板,且由于趾板对面板的约束作用,使得该部位的面板挠度变形梯度明显增大。此外,受左岸凸起地形的支撑作用,在靠近坝顶的相同高程上,左岸面板挠度明显小于右岸面板。

蓄水后,面板坝轴向以压应力为主(图5),最大压应力位于面板最大剖面右侧的面板中下部,拉应力为左右岸面板靠近坝肩位置,其中左岸面板的拉应力区域明显大于右岸面板。选取图5中的L1测线绘制沿坝轴向的面板挠度曲线,如图6所示。受库水压力以及面板与垫层间摩擦作用的影响,面板产生挠度变形以及往坝体最大剖面方向的位移,在面板垂直缝上出现转动接触挤压效应,使得面板出现挤压破坏现象^[16]。由图6可以看出,对于面板挠度较大部位,面板表面表现为转动挤压,而对于两岸面板挠度较小部位,面板表面则表现为转动张开。此外,凸起地形对左岸面板具有支撑作用,左岸面板的顶部挠度变形明显小于右岸面板,导致左岸面板顶部的张拉区面积较大。

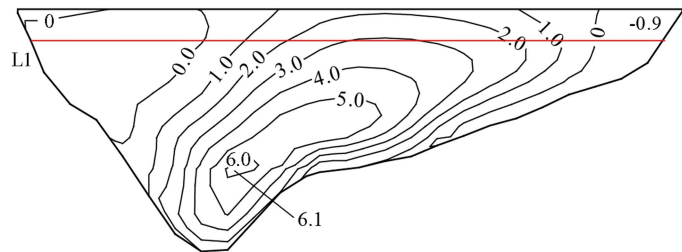


图5 面板坝轴向应力等值线(单位:MPa)
Fig. 5 Contour of axial stress of face dam (unit: MPa)

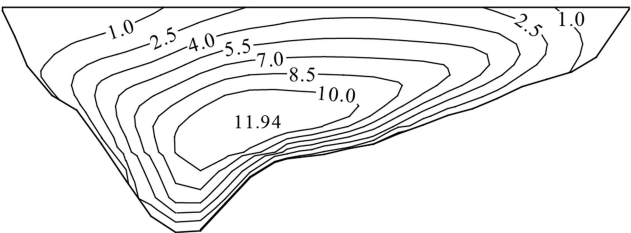


图4 面板挠度等值线(单位:cm)
Fig. 4 Deflection contour of panel (unit: cm)

蓄水后,面板坝轴向以压应力为主(图5),最大压应力位于面板最大剖面右侧的面板中下部,拉应力为左右岸面板靠近坝肩位置,其中左岸面板的拉应力区域明显大于右岸面板。选取图5中的L1测线绘制沿坝轴向的面板挠度曲线,如图6所示。受库水压力以及面板与垫层间摩擦作用的影响,面板产生挠度变形以及往坝体最大剖面方向的位移,在面板垂直缝上出现转动接触挤压效应,使得面板出现挤压破坏现象^[16]。由图6可以看出,对于面板挠度较大部位,面板表面表现为转动挤压,而对于两岸面板挠度较小部位,面板表面则表现为转动张开。此外,凸起地形对左岸面板具有支撑作用,左岸面板的顶部挠度变形明显小于右岸面板,导致左岸面板顶部的张拉区面积较大。

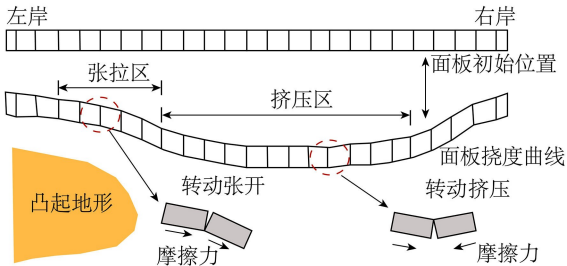


图6 面板沿坝轴向挠度曲线
Fig. 6 Deflection curve of panel along the dam axis

由图7可知,蓄水后面板顺坡向应力同样以压应力为主,仅在右岸面板底部及左岸面板顶部出现局部拉应力区。选取图7中的L2测线绘制沿面板长度方向的挠度曲线,如图8所示。由于左岸凸起地形与面板的水平距离随高程增加而减小,凸起地形对面板上部的支撑作用较面板下部强,导致面板上部挠度小于面板下部,面板上部沿面板法向向上游侧弯曲,而面板下部沿面板法向向下游侧弯曲,根据连续梁的弯曲变形特点,靠近坝顶的面板表面承受拉应力,而中下部面板表面承受压应力。

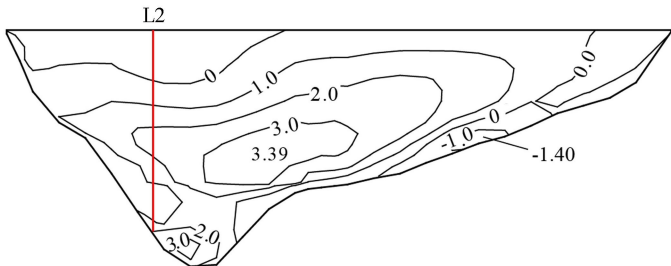


图7 面板顺坡向应力等值线(单位:MPa)
Fig. 7 Stress contour along the slope of panel (unit: MPa)

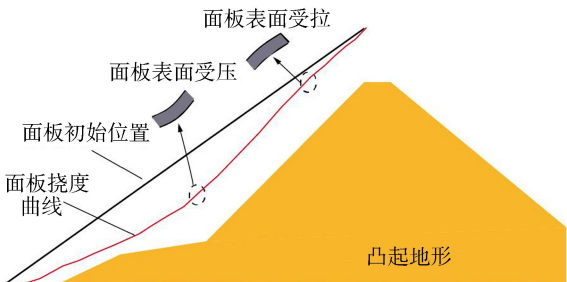


图8 面板顺坡向挠度曲线
Fig. 8 Deflection curve of panel along the slope

2.2 面板接缝变形

图9为面板接缝变形计算结果。蓄水后面板垂直缝以压性闭合缝为主,靠近两岸坝肩的面板垂直缝局部受拉,与面板坝轴向拉应力分布规律基本一致。受凸起地形支撑作用,凸起地形处的面板垂直缝张开数量较多,最大张开量为6.0 mm;右岸张开缝张开数量较少,最大张开量为2.6 mm。对于周边缝三向变形,由于左岸

面板受凸起地形的支撑作用,其挠曲变形明显小于右岸面板,因而左岸周边缝的张开和错动小于右岸周边缝。

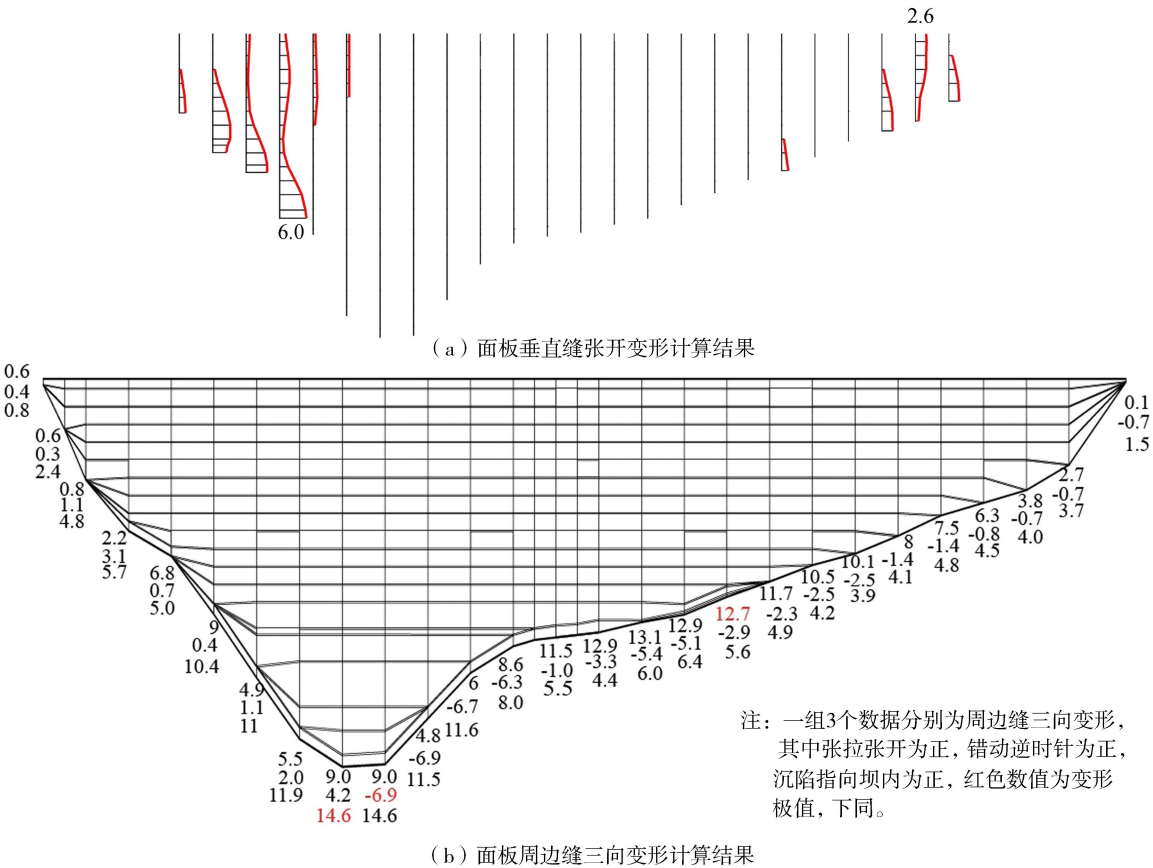


图 9 面板接缝变形计算结果(单位:mm)

Fig. 9 Calculation results of joint deformation of panel (unit: mm)

3 凸起地形开挖方案分析

为分析左岸凸起地形对面板应力变形特性的影响,提出了 2 种开挖方案,其中,开挖方案 1 是左岸凸起地形上游侧按照 1 : 1.5 的坡度开挖,开挖方案 2 是左岸凸起地形全部挖除,如图 10 所示。

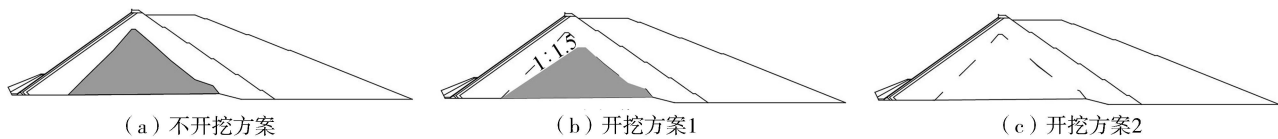


图 10 开挖方案示意图

Fig. 10 Schematic diagram of excavation schemes

3.1 面板拉应力

由图 11 可知,凸起地形开挖对左岸面板拉应力分布区域及最大值影响十分显著,而对右岸面板基本没有影响。当左岸凸起地形上游侧按 1 : 1.5 开挖后,左岸面板顶部挠度增大,左岸面板顶部局部区域由转动

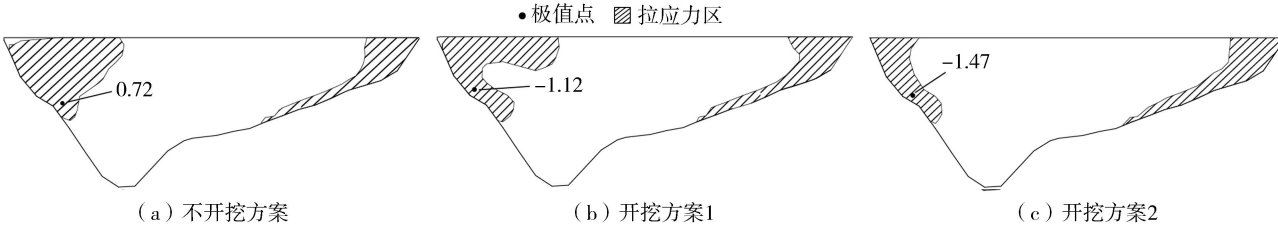


图 11 坝轴向面板拉应力分布(单位:MPa)

Fig. 11 Tensile stress distribution along the dam axis(unit: MPa)

张开变为转动挤压(图6),坝轴向拉应力区有较为显著的减小,但最大拉应力从0.72 MPa增加到1.12 MPa(图11);而对于左岸凸起地形全部挖除方案,左岸面板顶部仅在靠近岸坡位置有局部拉应力,但最大拉应力增加到1.47 MPa,较不开挖方案增大了近1倍。

由图12可知,凸起地形开挖对左岸面板的顺坡向拉应力分布区域和最大值同样有较为显著的影响,但对右岸面板几乎没有影响。当凸起地形上游侧按1:1.5坡度开挖后,左岸面板沿顺坡向的挠度变形梯度显著减小,使得面板顶部的顺坡向拉应力区域有所减小,且拉应力极值由0.44 MPa减小到0.37 MPa。当左岸凸起地形全部挖除后,左岸面板顶部的顺坡向拉应力区均变为压应力区,但在面板中下部靠近趾板位置出现“条带状”分布的拉应力区,且最大值为1.68 MPa,较凸起地形不开挖方案显著增大。

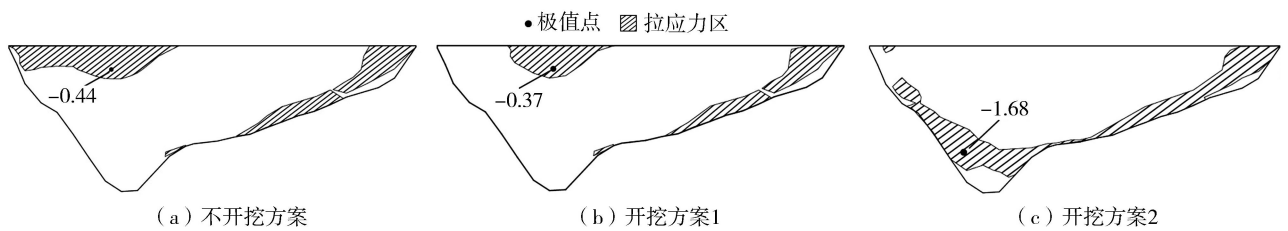


图12 顺坡向面板拉应力分布(单位:MPa)
Fig. 12 Distribution of tensile stress along slope (unit: MPa)

3.2 开挖方案综合评价

由面板拉应力分布特征可知,凸起地形开挖能够减小左岸面板的拉应力分布区域,但对应的拉应力极值有所增大,因而需要对凸起地形的开挖方案进行综合评价。考虑到拉应力是导致混凝土面板开裂的主要成因,面板拉应力区和拉应力极值的增大都会增加面板拉裂风险。为此,本文提出面板拉裂风险指标对凸起地形开挖方案进行评价:

$$I_F = \sum_{i=1}^{n_1} w_i \frac{\sigma_{T,i}}{\sigma_s} \frac{S_i}{S_F}$$

(4)

式中: I_F 为面板拉裂风险指标; n_1 为面板表面受拉单元数量; $\sigma_{T,i}$ 为面板表面受拉单元*i*的拉应力; σ_s 为混凝土抗拉强度设计值; S_i 为面板受拉单元*i*迎水面面积; S_F 为混凝土面板迎水面总面积; w_i 为影响放大系数,当 $\sigma_{T,i} > \sigma_s$ 时, $w_i = 2.0$,反之, $w_i = 1.0$ 。

由于凸起地形主要影响左岸面板,本文取面板最大剖面以左的左岸面板统计其拉裂风险指标。由表2可知,对于坝轴向面板拉应力,凸起地形不开挖方案对应的 I_F 值最大,完全挖除方案次之,局部开挖方案最小;而对于顺坡向面板拉应力,局部开挖方案对应的 I_F 略小于不开挖方案,完全挖除方案比局部开挖和不开挖方案显著增大。综上对比可知,将左岸凸起地形上游面按照1:1.5坡度开挖对于降低面板拉裂风险是有效的。

3.3 面板接缝变形对比

由图13可知,当凸起地形上游侧按1:1.5开挖后,左岸面板上部挠度变大,左岸面板张拉区变为挤压区(图6),使得左岸面板上部的垂直缝由张性缝变为压性缝,垂直缝张开数量明显减少。当凸起地形完全挖

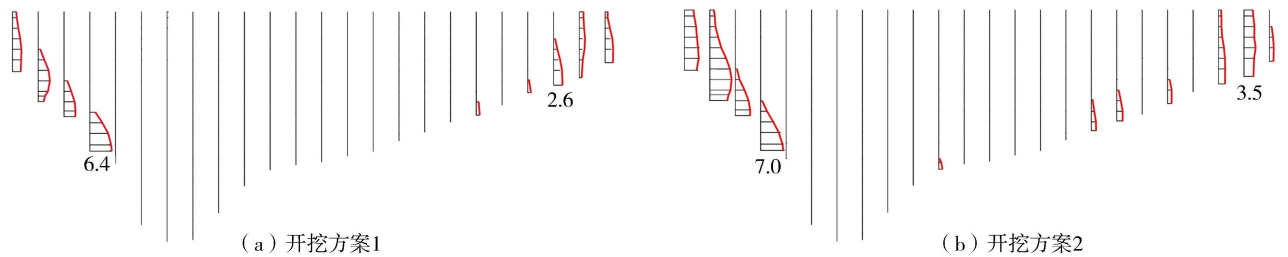


图13 不同开挖方案垂直缝变形计算结果(单位:mm)

Fig. 13 Calculation results of vertical joint deformation under different excavation schemes (unit: mm)

表2 左岸面板开裂风险评价指标对比
Table 2 Comparison of risk assessment indexes for cracking of the left bank panel

面板拉应力	I_F		
	不开挖方案	开挖方案1	开挖方案2
坝轴向面板拉应力	0.108	0.084	0.097
顺坡向面板拉应力	0.052	0.044	0.217

除后,左岸堆石体及面板失去了凸起地形的约束作用,其坝轴向位移增大,使得左岸面板垂直缝的张开量有所增大。与此同时,右岸堆石体及面板也失去了凸起地形的支撑作用,其往左岸的坝轴向位移也有所增大,使得右岸面板垂直缝的张开数量以及张开量比局部开挖方案有所增大。由此可知,对左岸凸起地形进行局部开挖对于减少面板垂直缝张开同样是有利的。

由图 14 可知,由于局部开挖方案主要挖除凸起地形的顶部,对底部面板底部变形影响较小,其对应的趾板周边缝三向变形较不开挖方案基本不变。当凸起地形全部挖除后,左、右岸堆石体和面板失去了凸起地形的约束和支撑作用,其沿坝轴线方向的水平位移以及面板挠曲变形增加显著,导致左岸趾板周边缝的张开和错动增大,但沉陷的变化量较小。

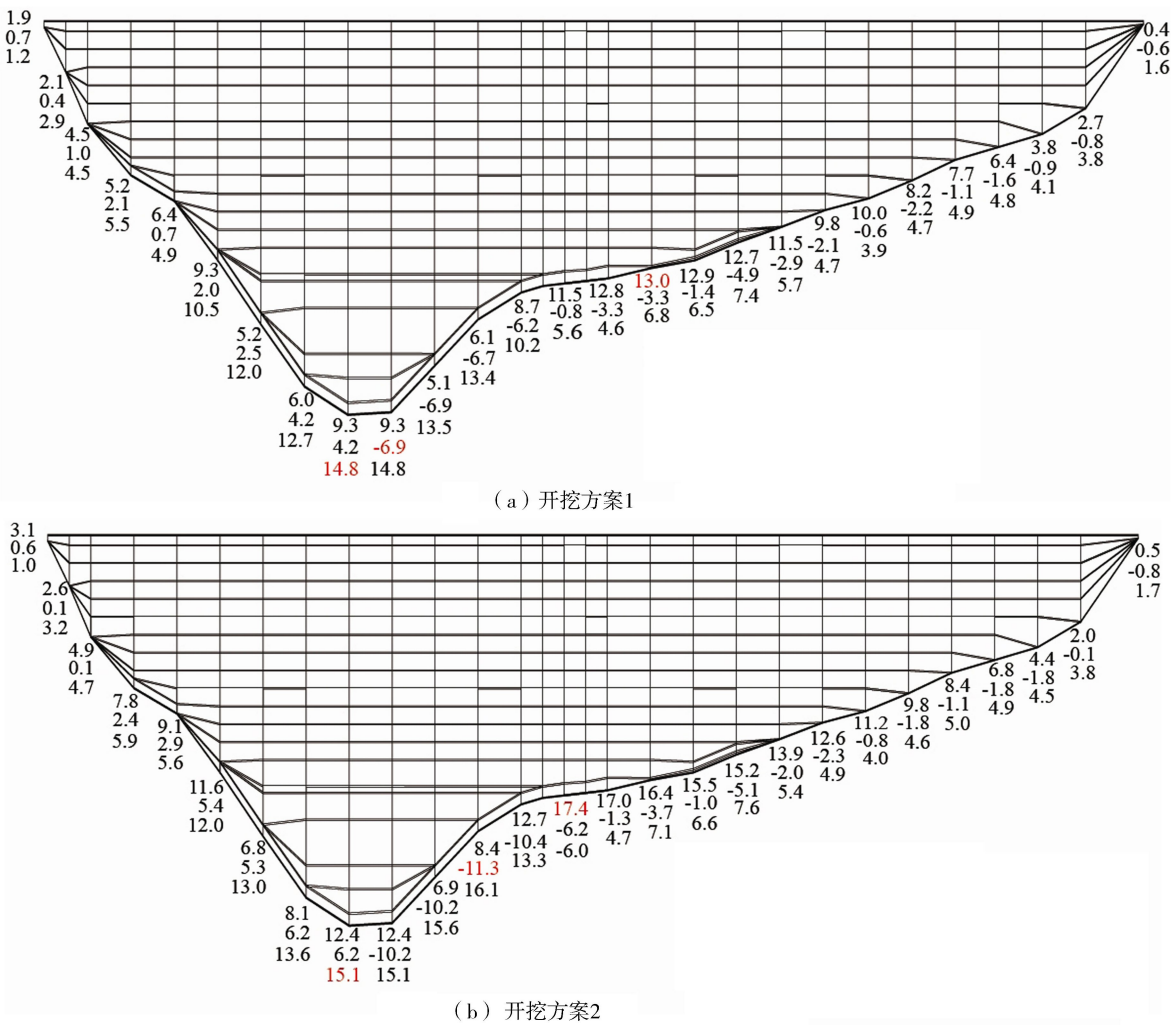


图 14 不同开挖方案周边缝变形计算结果(单位:mm)

Fig. 14 Calculation results of deformation of peripheral joints under different excavation schemes (unit: mm)

4 结 论

- a. 受局部凸起地形的约束和支撑作用,面板应力变形规律与常规混凝土面板堆石坝有较大不同,凸起地形处的面板坝轴向位移和挠度较小,面板表面产生局部拉应力区,且对应的面板垂直缝张开数量增加,周边缝张开和错动减小。
- b. 较凸起地形全部挖除方案,不开挖方案和凸起地形上游侧按 1 : 1.5 坡度开挖方案对应的面板顺河向拉裂风险显著降低,且凸起地形处的面板垂直缝张开量、周边缝张开量和错动量也有较为显著的减小。
- c. 当凸起地形上游侧按 1 : 1.5 坡度开挖时,面板拉应力区面积、垂直缝张开数量较不开挖方案有较为显著的降低,凸起地形上游侧的开挖坡度应尽量接近上游坝坡坡度。
- d. 通过对凸起地形进行局部开挖,保证面板的变形协调性,可有效降低工程开挖量,并充分利用凸起地

形减小面板开裂风险,后续有必要对局部凸起地形的位置、形状、开挖方式等进行深入研究。

参考文献:

- [1] 王柳江,赵志杰,刘斯宏,等. 宜兴抽水蓄能电站上库主坝重力挡墙位移影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021,49(4):358-365. (WANG Liujiang,ZHAO Zhijie,LIU Sihong,et al. Analysis of influence factors on gravity retaining wall displacement of main dam for the upper-reservoir of Yixing Pumped Storage Hydropower Station[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):358-365. (in Chinese))
- [2] 沈扬,李明昊,任秋兵,等. 面板堆石坝水平位移监测统计模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):89-97. (SHEN Yang,LI Minghao,REN Qiubing,et al. Statistical model for horizontal displacement monitoring of concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):89-97. (in Chinese))
- [3] 王芳,郑东健,何勇军,等. 黏土心墙堆石坝变形协调评判指标与各区渗透性能影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021,52(2):81-88. (WANG Fang,ZHENG Dongjian,HE Yongjun,et al. Study on evaluation index of deformation compatibility and influence of permeability of each filling zone of rockfill dam with clay core[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2021,52(2):81-88. (in Chinese))
- [4] 王樱峻,赵琳,雷显阳. 某抽水蓄能电站高面板堆石坝坝体分区优化[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):47-52. (WANG Yingjun,ZHAO Lin,LEI Xianyang. Dam zoning optimization for a high concrete face rockfill dam of a pumped storage power station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(5):47-52. (in Chinese))
- [5] 宁永升. 溧阳抽水蓄能电站上水库面板堆石坝关键技术研究[J]. 水力发电,2013,39(11):103-106. (NING Yongsheng. Research on key techniques for constructing upper reservoir's CFRD of Liyang Pumped-storage Power Station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2013,39(11):103-106. (in Chinese))
- [6] 程嵩,张嘎,张建民,等. 河谷地形对面板堆石坝应力位移影响的分析[J]. 水力发电学报,2008(5):53-58. (CHENG Song,ZHANG Ga,ZHANG Jianmin,et al. Effect of foundation topography on the stress-displacement response of concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2008(5):53-58. (in Chinese))
- [7] 宋文晶,王彭煦. 河谷地形对面板坝防渗体系安全性的影响[J]. 水力发电学报,2008(4):94-100. (SONG Wenjing,WANG Pengxu. Influence of valley topography on the safety of CFRD anti-seepage systems[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2008(4):94-100. (in Chinese))
- [8] 潘家军,徐远杰. 岩坡开挖形态对贴坡型堆石坝变形与应力的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2008(增刊2):3950-3955. (PAN Jiajun,XU Yuanjie. Influence of excavation form of rock slope on deformation and stress of fitting-slope concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008(Sup2):3950-3955. (in Chinese))
- [9] 杨杰,李国英,沈婷. 复杂地形条件下高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(4):775-781. (YANG Jie,LI Guoying,SHEN Ting. Stress-deformation properties of super-high CFRDs under complex terrain conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(4):775-781. (in Chinese))
- [10] 杨超,党发宁,薛海斌,等. 河谷形状对沥青混凝土心墙坝变形特性的影响[J]. 水利水运工程学报,2016(4):54-62. (YANG Chao,DANG Faning,XUE Haibin,et al. Influences of valley topography on deformation properties of asphalt concrete core wall dam[J]. Hydro-Science and Engineering,2016(4):54-62. (in Chinese))
- [11] 杨超,薛海斌,党发宁,等. 狭窄河谷面板堆石坝坝体底部应力拱效应的形成机理及影响范围研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(增刊1):214-218. (YANG Chao,XUE Haibin,DANG Faning,et al. Mechanism and influence range of stress arching effect of CFRD in narrow valley regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(Sup1):214-218. (in Chinese))
- [12] 王建军,李卓,方艺翔,等. 狭窄河谷高面板堆石坝变形控制与结构安全[J]. 水利水电科技进展,2022,42(4):67-73. (WANG Jianjun,LI Zhuo,FANG Yixiang,et al. Deformation control and structure safety of high concrete faced rockfill dams in a narrow valley[J]. Advances in Science and Technology of Water resources,2022,42(4):67-73. (in Chinese))
- [13] 梁勐,孙屹,吴平,等. 河床地形对面板堆石坝应力变形影响分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2022,44(2):24-29. (LIANG Meng,SUN Yi,WU Ping,et al. Analysis on stress-deformation effect of riverbed topography on concrete faced rockfill dam[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences),2022,44(2):24-29. (in Chinese))
- [14] 邹德高,尤华芳,孔宪京,等. 接缝简化模型及参数对面板堆石坝面板应力及接缝位移的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1):3257-3263. (ZOU Degao,YOU Huafang,KONG Xianjing,et al. Research on joint simplified model and effects of joint parameters on panel stress and joint displacements of faced rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(Sup1):3257-3263. (in Chinese))
- [15] 刘京茂,孔宪京,邹德高. 接触面模型对面板与垫层间接触变形及面板应力的影响[J]. 岩土工程学报,2015,37(4):700-710. (LIU Jingmao,KONG Xianjing,ZOU Degao. Effects of interface models on deformation of interface between slab and cushion layer and slab stress of concrete faced rock fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(4):700-710. (in Chinese))
- [16] 周墨臻,张丙印,张宗亮,等. 超高面板堆石坝面板挤压破坏机理及数值模拟方法研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(8):1426-1432. (ZHOU Mozhen,ZHANG Bingyin,ZHANG Zongliang,et al. Mechanisms and simulation methods for extrusion damage of concrete faces of high concrete-faced rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(8):1426-1432. (in Chinese))