

河谷坡度对高面板堆石坝应力变形特征的影响

甘磊^{1,2}, 沈振中^{1,2}, 肖钧升³, 张开来^{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; 3 上海核工程研究设计院, 上海 200233)

摘要:以玛尔挡水电站面板坝工程为例,建立了不同河谷坡度方案下的面板坝三维有限元模型,研究不同河谷坡度下高面板堆石坝坝体的静动位移和应力分布情况,分析了河谷坡度对坝体应力变形特征的影响,探讨了地震工况下河谷坡度对坝体结构稳定性的影响。结果表明:河谷坡度为 50° 时堆石体内部将会出现较明显的应力拱效应现象,河谷边坡陡缓临界值近似为 50° ;坝体沉降与坡度变化之间呈负相关关系;地震作用未对拱效应存在下的坝体产生显著的不利影响。

关键词:高面板堆石坝;河谷坡度;拱效应;有限元;地震

中图分类号:TV331

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2017)05-0078-06

Effect of valley slopes on stress and deformation characteristics of a high concrete face rockfill dam//GAN Lei^{1,2}, SHEN Zhenzhong^{1,2}, XIAO Junsheng³, ZHANG Kailai^{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; 3. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: Arching effects easily occur for a concrete face rockfill dam (CFRD) built in a narrow valley. In this paper, the Maerdang power station engineering was used for a case study. 3D finite element models of the CFRD under different valley slope schemes were established. Distributions of the static and dynamic displacement, stress of the dam under different slope angle schemes were obtained by finite element (FE) analysis. In addition, the effect of slope angles on the stress and deformation characteristics of the dam was analyzed. Meanwhile, the influence of the valley slopes on the structure stability of the dam under earthquake action was studied. Results indicate that the valley slope is approximately 50° when evident stress arch effect occurs inside the rockfill of the dam so that the critical angle of the valley should be 50° . A negative correlation is observed between the slope angles and the dam settlement. In the situation of arching effect, the earthquake action has no significant negative effects on the dam.

Key words: High CFRD; valley slopes; arching effect; FE; earthquake

混凝土面板堆石坝是以混凝土面板为防渗主体并通过堆石体受力的一种土石坝^[1]。随着坝工技术的发展^[2-3],堆石体变形过大的问题得到解决,促使一大批 100~300 m 级的高堆石坝建设进入快速发展阶段^[4-5]。一般大坝正常的安全运行可以得到保障,然而我国高堆石坝建设主要位于西南强震区域,且建造于狭窄河谷地带,其坝体结构安全和稳定性问题更为突出。因此,研究河谷坡度对高面板堆石坝坝体的应力和变形分布的影响,探讨地震工况下河谷坡度对坝体结构稳定性的影响具有重要的工程研究意义。

针对狭窄河谷中的高面板坝堆石坝,徐泽平

等^[6]基于洪家渡面板堆石坝,研究了狭窄、不对称河谷地形条件下高面板堆石坝在施工期和蓄水运行期的应力和变形分布规律;朱晟等^[7-8]结合一座拟建中的河谷宽高比为 1.88 的高面板堆石坝(高 225 m),研究了狭窄河谷的拱效应对大坝的变形和应力的影响;党发宁等^[9]提出用河谷宽度系数、边坡陡缓系数和非对称系数 3 个动态参数来描述河谷的几何特性,分析了河谷形状参数对面板堆石坝变形特性的影响;狄文龙等^[10]针对建造于狭窄河谷中的拉哇面板堆石坝,进行拱效应机理及三维有限元分析,研究了河谷宽高比对高堆石坝拱效应的影响情况。河谷形状是混凝土面板堆石坝拱效应产生的主要原因,

程嵩等^[11-13]研究了河谷地形、河谷宽高比等对面板堆石坝应力应变特征的影响。但以上研究大部分是基于静力作用开展的坝体应力和变形分析,未讨论地震作用对拱效应^[14]存在下的坝体的应力变形的影响情况。

本文在对玛尔挡水电站面板坝有限元分析的基础上,建立狭窄河谷中的普遍面板坝模型,通过三维有限元数值计算,研究静动力情况下大坝在不同河谷坡度方案下的位移、应力分布,分析河谷坡度的陡缓程度对坝体应力变形特性的影响,确定狭谷中面板坝内部出现应力拱效应现象的极限河谷坡度,探讨地震工况下不同河谷坡度对坝体结构稳定的影响。

1 工程概况

玛尔挡水电站以发电为主,为大(1)型水电工程,水库正常蓄水位为 3 275.00 m,相应库容为 15.02 亿 m³,水电站装机容量为 2 200 MW,多年平均发电量为 72.39 亿 kW·h。枢纽工程主要包括混凝土面板堆石坝、右岸 3 孔溢洪道+1 孔泄洪洞和右岸地下厂房等。

混凝土面板坝最大坝高 211 m 左右,坝顶长约 359.9 m,顶宽 12 m,上游坡度为 1:1.4,下游坝坡 1:1.61,最大底宽 630.0 m。坝体填筑主要分为 8 个区。两岸面板块间距为 6 m,其余面板缝间距为 12 m。大坝标准剖面如图 1 所示。

2 计算模型和参数

2.1 有限元模型

坝体单元、坝基及两岸采用超单元自动剖分形成有限元网格,离散后三维有限元模型节点总数为 26 152 个,单元总数为 24 996 个,三维有限元模型如图 2 所示。计算模型边界截取如下:①左、右坝端分别向外延伸 400 m 作为两岸边界;②河床最大横断面上下游坡脚分别向上下游延伸 2 倍坝高(约 500 m)作为上下游边界;③基岩往下 1.5 倍坝高(约 300 m)取作模型底边界。计算坐标系规定为:坐标零点定

为右坝肩坝轴线处;顺河向为 x 轴,指向下游为正; y 轴为坝轴线的方向,指向左岸为正;垂直向为 z 轴,向上为正,并与高程保持一致^[12]。

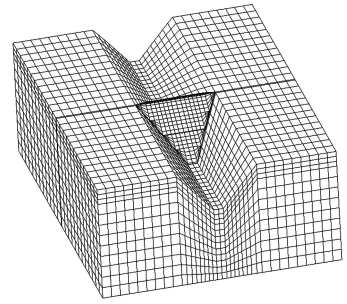


图 2 三维有限元模型

2.2 荷载分级

计算考虑面板的布置与分级加载,模拟坝体逐层浇筑以及面板施工与蓄水过程等。坝体施工及蓄水过程共分 21 级,具体如表 1 所示。

表 1 分级加载及蓄水过程

加载级数	部件	填筑高程或水位/m	加载级数	部件	填筑高程或水位/m
1	基岩及覆盖层	/	12	坝体	3 199.71
2	坝体	3 088.85	13	坝体	3 211.71
3	坝体	3 100.85	14	坝体	3 223.71
4	坝体	3 112.85	15	坝体	3 237.00
5	坝体	3 124.85	16	坝体	3 249.00
6	坝体	3 136.85	17	坝体	3 261.00
7	坝体	3 148.85	18	坝体	3 273.00
8	坝体	3 159.85	19	坝体	3 278.70
9	坝体	3 172.85	20	二期面板、防浪墙、坝体至坝顶	3 284.20
10	一期面板	3 172.85	21	蓄水	3 275.00
11	坝前铺盖、盖重及坝体	3 184.85			

2.3 计算参数

坝体堆石料及坝基覆盖层静力计算采用邓肯-张(E-B)模型,计算参数如表 2 所示,混凝土及基岩的参数采用线弹性模型,计算参数见表 3。

动力计算假定堆石体为黏弹性体,采用等效剪切模量 G 以及等效阻尼比 λ 体现土的动应力应变关系的非线性和滞后性两个基本特性^[15],动力特性

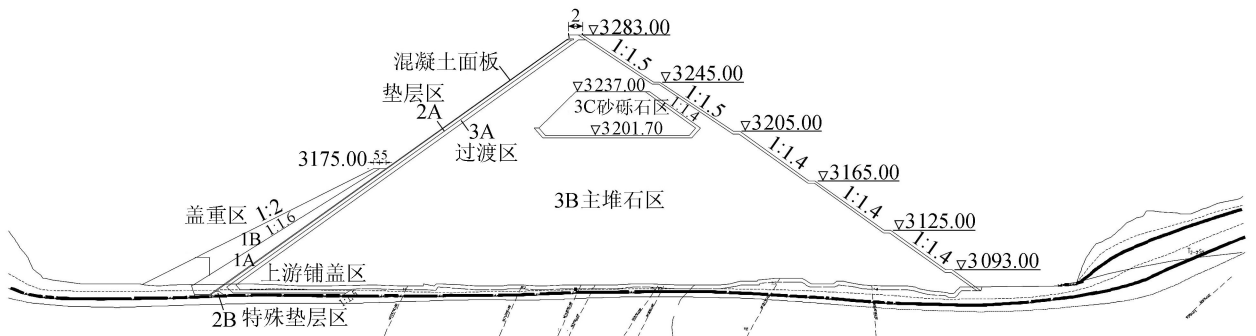


图 1 坝体材料分区(单位:m)

参数如表4所示。表中 ρ 为密度; c 为黏滯力; φ 为内摩擦角; $\Delta\varphi$ 为内摩擦角修正; K 为初始弹模基数; k_{ur} 为卸荷模量基数; n 为初始弹模指数; R_f 为破坏比; k_b 为体积模量基数; m 为体积模量指数。

表2 堆石料及覆盖层静力计算参数

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	c	$\varphi/(\text{°})$	$\Delta\varphi/(\text{°})$	K	K_{ur}	n	R_f	k_b	m
坝基										
砂砾石	2.10	0	40	9	500	600	0.35	0.60	400	0.45
主堆石	2.22	0	54	13	850	1200	0.43	0.70	350	0.59
次堆石	2.13	0	50	10	800	1000	0.30	0.60	300	0.40
垫层	2.33	0	51	10	600	900	0.35	0.60	400	0.43
过渡料	2.27	0	52	10	770	950	0.48	0.70	340	0.33

表3 混凝土与基岩参数

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
混凝土	2.40	28000	0.167
基岩	2.71	20500	0.167

表4 坝料最大动剪模量试验参数

坝料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	K	n
垫层料	2.33	1657	0.417
过渡料	2.27	2560	0.404
主堆石料	2.22	2265	0.430
下游堆石料	2.13	1812	0.430

地震反应计算考虑了正常蓄水位叠加校核地震工况,顺河向、坝轴向和垂直向同时输入地震加速度,水平向地震峰值加速度为 $0.363g$,地震动反应谱特征周期为 0.45 s ,其水平向输入的地震加速度时程曲线如图3所示,坝轴向和垂直向地震加速度取为水平向的 $2/3$ 。

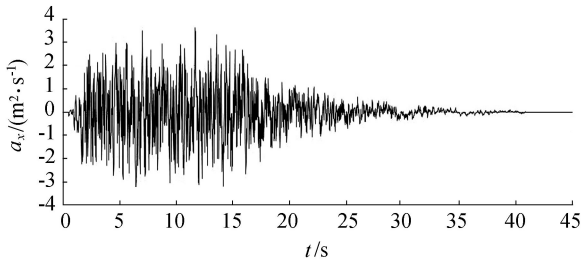


图3 水平向输入的地震加速度时程曲线(校核工况)

3 计算成果分析

3.1 河谷坡度对坝体主应力的影响

假定河谷底宽和河谷深度不变,分别为 48 m 和 211 m ,变化河谷坡度,对称分布,分析河谷坡度 α 分别为 30° 、 40° 、 50° 、 60° 和 70° 时,大坝应力分布情况。图4为坝体坝轴线断面第一主应力等值线分布图,可以看出,堆石体的应力等值线分布随着河谷坡度的改变而有所不同。在河谷坡度为 30° 时,堆石体的第一主应力等值线基本为水平向分布,最小值出现在坝顶,主应力大小随着深度的增大而有所增

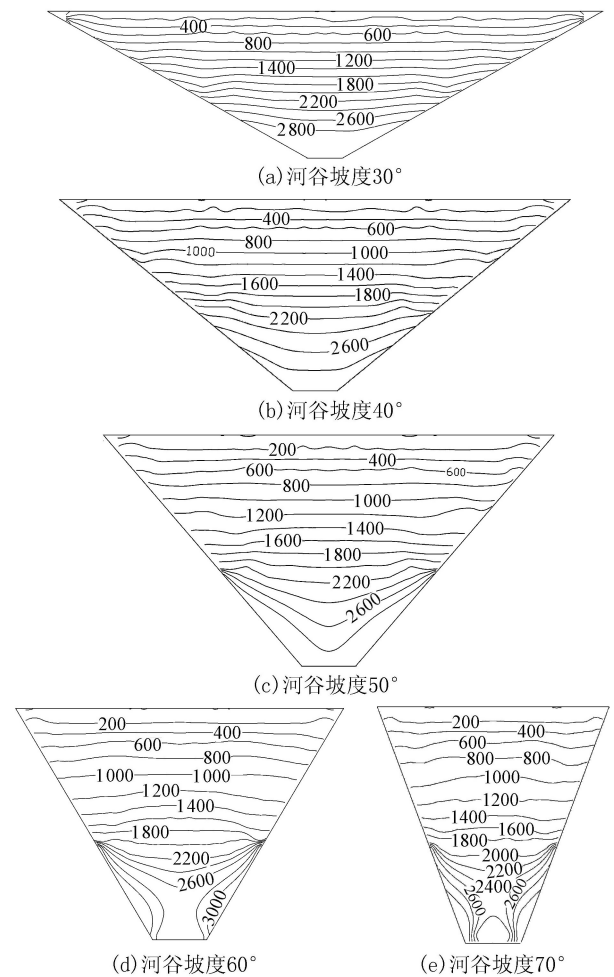


图4 坝轴线剖面第一主应力等值线分布(单位:kPa)

大并在坝体底部出现最大值,但坝体底部并未产生应力拱效应,应力状态良好。在河谷坡度为 40° 时,坝体堆石体的主应力分布规律与 30° 时分布规律基本一致,只是第一主应力最大值有所减小,坝体底部仍未产生应力拱效应。当坡度增至 50° 时,堆石体的应力等值线分布规律与 40° 时有显著的不同,上部堆石体内第一主应力等值线依旧为水平向分布,其数值随深度增大而逐渐变大,下部堆石体内第一主应力等值线分布发生了明显的凹型弯曲,堆石体内部最大第一主应力有所减小,坝体底部开始出现拱效应。当河谷坡度为 60° 和 70° 时,下部堆石体内应力等值线分布弯曲程度更为强烈,已出现了比较明显的拱效应现象,并且在河谷坡度逐渐增大的过程中,坝体底部的应力拱效应也越来越强。

图5给出了堆石体最大第一主应力以及最大第一主应力与河谷坡度的关系曲线,由图5可知,随着河谷坡度的逐渐增大,堆石体内部最大第一主应力逐渐减小,在地震作用下,由于两岸山体的约束作用,随着河谷坡度的逐渐增大,堆石体内部最大第一主应力有所增大,但数值与第一主应力相比均不大。另外,在河谷较陡的情况下,大坝堆石体与两岸

山体接触面的应力集中现象比较明显。

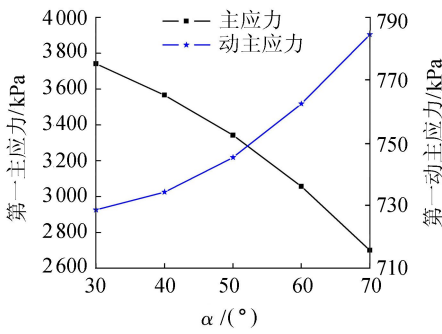


图5 堆石体主应力与河谷坡度关系曲线

计算表明,在 $\alpha = 50^\circ$ 的情况下,坝体堆石体内部将会出现比较明显的应力拱效应现象。河谷坡度较缓时,坝体应力呈水平向分布,几乎不会出现拱效应;当 $\alpha > 50^\circ$ 时,大坝堆石体内部易产生拱效应,且坡度越陡,拱效应现象越明显。

3.2 河谷坡度对坝体位移的影响

3.2.1 顺河向位移

图6为坝体顺河向最大位移及最大动位移和河谷坡度之间的关系曲线。随着河谷逐渐变陡,堆石体最大位移逐渐变小,随着河谷坡度从 30° 增加到 70° ,坝体倾向上游侧位移从 307.3 mm 减小到 129.7 mm ,倾向下游位移从 758.0 mm 减小到 436.8 mm ,表明堆石体倾向上游的水平位移值均小于倾向下游的水平位移值,且水平位移的极大值均发生在约 $1/2$ 最大坝高处并且靠近坝体上下游侧表面。在地震作用下,随着河谷逐渐变陡,顺河道方向堆石体最大动位移从 201.9 mm 减小到 103.6 mm 。

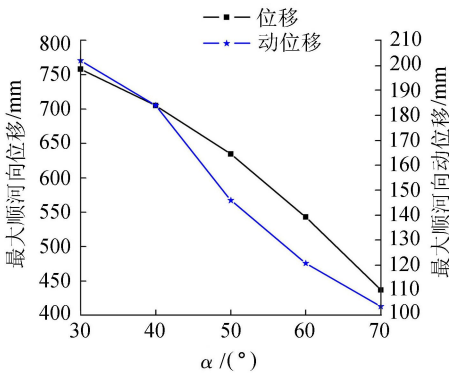


图6 坝体顺河向位移与河谷坡度的关系曲线

从图6可看出,随河谷坡度的增大,两岸岩体对大坝堆石体的位移约束有所增强,导致顺河向最大位移随着边坡变陡而逐渐减小。地震工况下,顺河向最大动位移随河谷坡度增大而减小,与顺河向最大位移相比,动位移数值均较小。由于陡河谷边坡的约束影响,坝体在前期运行以及地震期间的顺河向位移均较小,一定程度上导致在长时间的运行过程中,坝体堆石体的沉降量会随时间而有所增大。

3.2.2 坝轴线向位移

图7为坝轴线向堆石体最大位移及最大动位移与岸坡坡度之间的关系曲线。由图7可知,堆石体轴线向位移等值线分布在河谷左右岸基本对称,其数值大小从两岸往河谷中心逐渐减小,随河谷坡度逐渐变陡,堆石体坝轴线向位移极值逐渐变小,在河谷坡度从 30° 增至 70° 过程中,坝轴线向最大位移从 282.4 mm 减小到 191.9 mm ; 随岸坡坡度逐渐变陡,坝轴线向堆石体最大动位移也有所减小,从 132.4 mm 减小到 46.0 mm 。在河谷边坡较缓的情况下,轴线向堆石体位移变化幅度较小,在河谷边坡较陡的情况下,坝体轴线向位移变化幅度较大,说明在陡河谷边坡情况下两岸岩体对坝体的约束力较强。

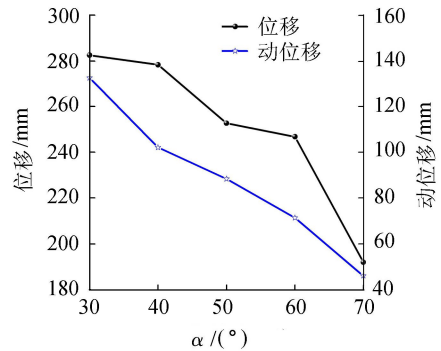


图7 坝轴线向位移与河谷坡度的关系曲线

3.2.3 垂直向位移

图8为坝体垂直向最大位移和地震永久沉降与河谷坡度的关系曲线,由图8可知,在河谷坡度变化过程中,堆石体垂直向位移等值线分布随河谷坡度变化改变不大。坝体垂直向最大位移与河谷坡度接近为线性关系,坡度越大,面板坝两岸岩体对堆石体沉降的抑制作用也越明显,从而导致最大沉降量减小。沉降极大值均出现在堆石体中部约 0.5 倍最大坝高处。各河谷坡度方案下坝体最大沉降量有所不同,随河谷坡度的增大,堆石体沉降量极大值有所减小,最大值从 1632.4 mm 减小到 1250.1 mm ,表明堆石体的沉降大小受岸坡坡度的变化影响较大。坝体垂直向最大位移与河谷坡度接近为线性关系,坡度

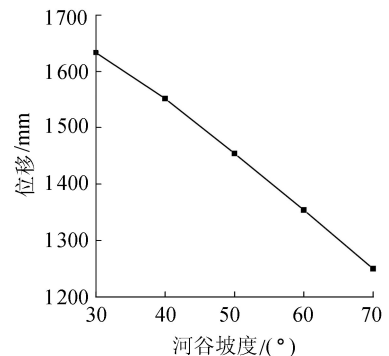


图8 坝体垂直向最大位移与河谷坡度关系曲线

越大,面板坝两岸岩体对堆石体沉降的抑制作用也越明显,从而导致最大沉降量减小。

3.3 河谷坡度对坝体稳定性的影响

3.3.1 地震永久变形

大坝地震永久变形分布规律随河谷坡度变化改变不大,永久变形极大值均出现在河床断面接近坝顶处,但各个方案下坝体地震永久沉降量受坡度影响而有所变化。图9为坝体地震永久变形极值与河谷坡度的关系曲线,由图9可知,随着河谷坡度从30°增至70°,坝体最大永久沉降量逐渐减小,从1255.8 mm减小到824.4 mm,以最大坝高为211 m计算,对应的沉降率从0.60%减小到0.39%,均小于最大坝高的1%。

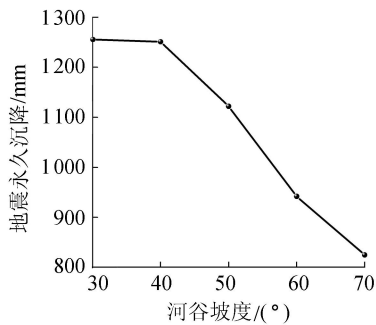


图9 坝体地震最大永久沉降与河谷坡度关系曲线

随河谷逐渐变陡,地震永久沉降量有所减小,在河谷坡度较缓时,地震永久沉降量变化趋势较缓,在河谷坡度较为陡峭时,永久沉降量变化幅度较大,这是由于在河谷坡度较陡时,两岸岩体对坝体的约束力也逐渐增强,阻碍了地震期间坝体的沉降,根据地震中坝体最大永久沉降与最大坝高的比值来进行判别坝体稳定性时,无论河谷坡度大小,坝体沉降率均小于最大坝高的1%,表明坝体在地震工况下均处于稳定状态。

3.3.2 可靠度动力安全系数

为了能够较好地考虑地震过程中坝坡的稳定性,分析在地震过程中坝坡发生动力破坏的概率,采用可靠度动力安全系数法^[16]对坝坡在地震工况下的稳定性进行计算分析,同样为安全起见,将面板坝失效的概率取为0.01,计算成果见表5。

表5 不同河谷坡度方案下坝体下游坡可靠度安全系数

河谷坡度/(°)	平均值 μ_F	标准差 σ_F	动力安全系数 F_R
30	1.430	0.123	1.143
40	1.435	0.129	1.134
50	1.463	0.143	1.130
60	1.495	0.166	1.108
70	1.544	0.197	1.085

从表5可知,随着河谷坡度的增大,地震期间下游坡滑块的平均安全系数有所增大, μ_F 从1.430增加到1.544,各方案下的动力安全系数概率分布均

近似呈正态分布,但随着坡度的增大,概率分布逐渐分散,标准差 σ_F 从0.123增加到0.197,从而导致可靠度动力安全系数 F_R 随着坡度增大反而略有减小,从1.143减小到1.085,但各方案下的可靠度动力安全系数均大于1.0,表明在地震期间坝体下游坡均能满足稳定要求,地震作用未对拱效应存在下的坝体产生显著的不利影响。

4 结论

a. 河谷坡度的大小会对坝体主应力产生一定的影响。随坡度的逐渐增大,堆石体最大第一主应力有所减小,最大第一主应力有所增大;坡度较缓时,坝体应力呈水平向分布,几乎不会出现拱效应,陡河谷条件下坝体内部易产生应力拱效应,且拱效应现象在坡度越陡的情况下表现越强烈,河谷边坡陡缓临界值近似为50°。

b. 随着河谷坡度的增大,顺河向坝体水平位移以及地震工况下的动位移均有所减小;坝轴向堆石体位移有所减小,且其受影响程度随边坡变陡而有所增大;坝体最大沉降值与河谷坡度变化之间呈负相关关系。

c. 坝体最大地震永久沉降量随河谷坡度的增大逐渐减小,沉降率从0.60%减小到0.39%,可靠度动力安全系数随坡度增大从1.143减小到1.085,各工况下坝体稳定均能满足要求,地震作用未对拱效应存在下的坝体产生显著的不利影响。

参考文献:

- [1] 杨泽艳,周建平,蒋国澄,等.中国混凝土面板堆石坝的发展[J].水力发电,2011,37(2):18-23. (YANG Zeyan, ZHOU Jianping, JIANG Guocheng, et al. Development of concrete faced rockfill dam in China[J]. Water Power, 2011, 37(2): 18-23. (in Chinese))
- [2] 杨泽艳,周建平,苏丽群,等.300 m级高面板堆石坝适应性及对策研究综述[J].水力发电,2012,38(6):25-29. (YANG Zeyan, ZHOU Jianping, SU Liqun, et al. Review on the research of adaptability and countermeasures of 300 m-level high CFRD [J]. Water Power, 2012, 38(6): 25-29. (in Chinese))
- [3] GAN Lei, SHEN Zhenzhong, XU Liqun. Long-term deformation analysis of the Jiudianxia concrete-faced rockfill dam. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(3): 1589-1598.
- [4] 岑威钧,张自齐,周涛,等.覆盖层上高面板堆石坝的极限抗震能力[J].水利水电科技进展,2016,36(2):1-5. (CEN Weijun, ZHANG Ziqi, ZHOU Tao, et al. Maximum seismic capacity of a high concrete-face rockfill dam on alluvium deposit [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 1-5. (in Chinese))
- [5] 朱敏,邓华锋,许晓亮.基于子模型法的面板堆石坝三维应力变形分析[J].水利水电科技进展,2012,32

- (6):27-30. (ZHU Min, DENG Huafeng, XU Xiaoliang. 3D stress-deformation analysis of CFRDs based on sub-model method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(6):27-30. (in Chinese))
- [6] 徐泽平, 邵宇, 胡本雄, 等. 狭窄河谷中高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(5): 30-33. (XU Zeping, SHAO Yu, HU Benxiong, et al. Study on stress and deformation properties of high concrete face rock-fill dam in narrow valley [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(5): 30-33. (in Chinese))
- [7] 朱晟, 闻世强, 黄亚梅. 一座200m级高面板坝的变形和应力计算研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 631-634. (ZHU Sheng, WEN Shiqiang, HUANG Yamei. Deformation and stress calculation for a 200 m high CFRD [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(6): 631-634. (in Chinese))
- [8] 朱晟, 欧红光, 殷彦高. 狭窄河谷地形对200m级高面板坝变形和应力的影响研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(4): 73-77. (ZHU Sheng, OU Hongguang, YIN Yangao. Influence of narrow-valley formation on the mechanics property of the 200 m high CFRD [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(4): 73-77. (in Chinese))
- [9] 党发宁, 杨超, 薛海滨, 等. 河谷形状对面板堆石坝变形特性的影响研究[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 435-442. (DANG Fanning, YANG Chao, XUE Haibin, et al. The effect of valley topography on deformation properties of CFRD [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 435-442. (in Chinese))
- [10] 狄文龙, 屈楚杰, 蒋宽鹏. 狭窄河谷高面板堆石坝拱效应计算分析[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(6): 7-12. (DI Wenlong, QU Chujie, JIANG Kuanpeng. Analysis of arch effect of high CFRD built in narrow valley [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2016, 22(6): 7-12. (in Chinese))
- [11] 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, 27(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, 27(5): 53-58. (in Chinese))
- [12] 丁遥, 沈振中, 李琛亮, 等. 复杂地形对面板坝面板应力和变形的影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 33-35. (DING Yao, SHEN Zhenzhong, LI Chenliang, et al. Effect of complex topography on deformation and stress of face slab for a CFRD [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 33-35. (in Chinese))
- [13] 王瑞骏, 刘伟, 卢志男. 河谷宽高比对面板堆石坝应力变形的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 227-234. (WANG Ruijun, LIU Wei, LU Zhinan. Effect of valley width/height ratio on stress deformation of rock-fill dam [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2014, 42(6): 227-234. (in Chinese))
- [14] 周伟, 常晓林, 胡颖, 等. 考虑拱效应的高面板堆石坝流变收敛机制研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 604-608. (ZHOU Wei, CHANG Xiaolin, HU Ying, et al. Study of creep convergence mechanism of high concrete face rockfill dam with consideration of rockfill arch action [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 604-608. (in Chinese))
- [15] 孔宪京, 娄树莲, 邹德高, 等. 筑坝堆石料的等效动剪切模量与等效阻尼比[J]. 水利学报, 2001, 32(8): 20-25. (KONG Xianjing, LOU Shulian, ZOU Degao, et al. The equivalent dynamic shear modulus and equivalent damping ratio of rockfill material for dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(8): 20-25. (in Chinese))
- [16] 周奕琦, 任华春. 某抽水蓄能电站上库面板坝极限抗震能力研究[J]. 水力发电, 2015, 41(11): 59-63. (ZHOU Yiqi, REN Huachun. Study on ultimate seismic capacity of CFRD for the upper reservoir of a pumped storage power station [J]. Water Power, 2015, 41(11): 59-63. (in Chinese))

(收稿日期:2016-09-05 编辑:郑孝宇)

(上接第73页)

- [11] 边永欢, 孙双科, 张国强, 等. 竖缝式鱼道90°转弯段水力特性的数值模拟[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(1): 53-59. (BIAN Yonghuan, SUN Shuangke, ZHANG Guoqiang, et al. Numerical simulation of flow in the 90° turn of a vertical slot fishway [J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(1): 53-59. (in Chinese))
- [12] 边永欢, 孙双科, 郑铁刚, 等. 竖缝式鱼道180°转弯段的水力特性与改进研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(1): 90-96. (BIAN Yonghuan, SUN Shuangke, ZHENG Tiegang, et al. Study on hydraulic characteristic and improvement of flow in 180° turning pools for vertical slot fishways [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(1): 90-96. (in Chinese))
- [13] 徐体兵, 孙双科. 竖缝式鱼道水流结构的数值模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1386-1391. (XU Tibing, SUN Shuangke. Numerical simulation of the flow structure in vertical slot fishway [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11): 1386-1391. (in Chinese))
- [14] 张国强, 孙双科. 竖缝宽度对竖缝式鱼道水流结构的影响[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 151-156. (ZHANG Guoqiang, SUN Shuangke. Effect of slot width on the flow structure of vertical slot fishway [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(1): 151-156. (in Chinese))
- [15] 曹庆磊, 杨文俊, 陈辉. 异侧竖缝式鱼道水力特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 698-703. (CAO Qinglei, YANG Wenjun, CHEN Hui. Experimental study on hydraulic characteristics of vertical slot fishway from side to side [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(6): 698-703. (in Chinese))
- [16] 边永欢. 竖缝式鱼道若干水力学问题研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015. (收稿日期:2016-08-28 编辑:熊水斌)