

# 狭窄河谷高面板堆石坝变形控制与结构安全

王建军<sup>1</sup>, 李卓<sup>2,3</sup>, 方艺翔<sup>2</sup>, 毕朝达<sup>2,3</sup>

(1. 宁夏六盘山水务有限公司, 宁夏 固原 756000; 2. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029; 3. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029)

**摘要:**以我国拟建的狭窄河谷区230 m级面板堆石坝为例,系统介绍了狭窄河谷区面板堆石坝变形控制理念和相应的工程措施,通过全面的坝料瞬变、流变和界面特性试验,确定了筑坝料的力学特性参数,对大坝施工填筑、蓄水、运行等状态进行数值模拟,重点评价了长期运行过程中混凝土面板、周边缝等关键部位的应力变形。结果表明,采用设置高趾墩、岸坡增模区、面板分缝优化、合理的预沉降期等措施后,保障了该坝的结构安全。

**关键词:**堆石坝; 狭窄河谷; 长期安全; 变形控制; 有限元

**中图分类号:** TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2022)04-0067-07

**Deformation control and structure safety of high concrete faced rockfill dams in a narrow valley**//WANG Jianjun<sup>1</sup>, LI Zhuo<sup>2,3</sup>, FANG Yixiang<sup>2</sup>, BI Chaoda<sup>2,3</sup> (1. Ningxia Liupanshan Water Industry Co., Ltd., Guyuan 756000, China; 2. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Dam Safety Management Center of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** A 230 m high concrete faced rockfill dam (CFRD) built in narrow valley was taken as an example, the deformation control concept and corresponding engineering measures of the CFRDs built in narrow valleys were systematically introduced. The mechanical parameters of the dam materials were determined via comprehensive dam material transient test, rheological test, and interfacial test. The dam behaviors in construction, water storage, and operation period were simulated. The stress and deformation safety of the key parts such as concrete slab, peripheral joints during long-term operation were mainly evaluated. The results show that, after adopting the high concrete plinth, setting high modulus zone, reducing the slab width, as well as proper pre-settlement periods, the structure safety of the dam can be guaranteed.

**Key words:** rockfill dam; narrow valley; long-term safety; deformation control; finite element

近些年,我国面板堆石坝筑坝技术发展迅速<sup>[1-4]</sup>,已建成一批世界级高坝,同时也面临着优良坝址不断减少,需在复杂河谷地形和地质条件下筑高坝的难题<sup>[5-6]</sup>。河谷地形是影响面板堆石坝应力变形的重要因素,宽阔河谷对坝体的约束效应较小,应力分布的三维效应较弱;狭窄河谷对坝体的约束效应强,坝体应力呈现明显的“拱效应”,该“拱效应”会导致施工期坝体变形较小而后期变形偏大。另外,由于狭窄河谷区坝体与坝基可能存在更强的剪切滑移和变形梯度,对面板和周边缝变形控制非常不利<sup>[7-8]</sup>。

20世纪70年代,国外几座修建在狭窄河谷区的面板堆石坝先后发生了渗漏事故。哥伦比亚1978年建成的Golillas大坝<sup>[9]</sup>,坝高125.0 m,河谷

宽高比仅为0.87。该坝1982年6月开始蓄水,第一阶段水位达到1/2坝高前渗漏稳定,但蓄水至2960 m高程时,渗漏急剧增加至520 L/s。缓慢降低库水位至2915 m高程时,渗漏量剧减到32 L/s,检查发现主要渗漏源位于周边墙及坝头岩石的接触面,并且面板的不均匀沉降导致了面板周边缝的止水被破坏。哥伦比亚Anchicaya坝也是修建在狭窄河谷上的一座面板堆石坝<sup>[9]</sup>,坝高140.0 m,河谷宽高比为1.86,水库于1974年10月19日开始蓄水,蓄水位达到溢洪道堰顶高程634 m时坝体渗漏持续增加,最大漏水量达到1800 L/s。经过检查发现,大部分渗漏发生在周边缝的局部位置,尤以大坝右岸为重。

以上工程案例表明,修建在狭窄河谷区的面板

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51979173)

作者简介:王建军(1973—),高级工程师,主要从事水利工程运行管理研究。E-mail:2474183334@qq.com

通信作者:李卓(1979—),正高级工程师,博士,主要从事寒区水工建筑物防冻胀研究。E-mail:slxliz@163.com

堆石坝由于坝体与地基存在较大的剪切变形梯度,容易引起坝肩与地基接触部位以及周边缝的破坏,坝体变形控制显得至关重要。本文以拟建的狭窄河谷区 230 m 面板堆石坝为例,系统介绍了狭窄河谷面板堆石坝变形控制技术,并采用三维有限元方法复核了该坝应力变形安全,以期能为同类型工程建设提供参考。

## 1 工程概况

正在筹划建设的某水利枢纽工程以调控生态输水、灌溉补水为主,结合防洪,兼顾发电等综合利用。推荐坝型为混凝土面板堆石坝,水库正常蓄水位高程 2 170.00 m,坝顶高程 2 175.50 m,最大坝高约 230.5 m,总库容 5.36 亿  $m^3$ ,为 II 等大(2)型工程。上游坝坡为 1:1.5,下游坝坡上部为 1:1.5,下部为 1:1.4。坝体填筑分区从上游至下游分别为上游盖重区、上游铺盖区、混凝土面板、垫层料区、过渡料区、堆石料区,典型剖面分区如图 1 所示。

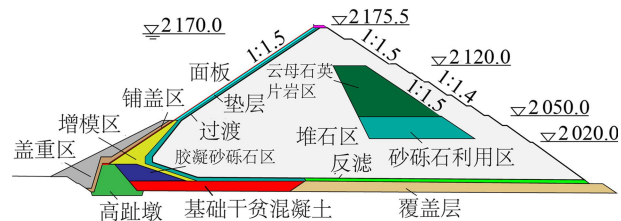


图 1 大坝典型材料分区(单位:m)

坝料各分区设计如下:①垫层料区,水平宽度 5 m,要求最大粒径  $D_{max} \leq 80$  mm,小于 5 mm 的含量(质量分数)为 35%~55%,小于 0.075 mm 含量不大于 8%,渗透系数为  $10^{-2} \sim 10^{-4}$  cm/s,设计孔隙率  $n \leq 15\%$ ;②过渡料区,水平宽度 5 m,  $D_{max} \leq 150$  mm,小于 5 mm 含量 20%~35%,小于 0.075 m 含量小于 5%,级配连续,  $n \leq 18\%$ ;③堆石区,最大粒径  $D_{max} \leq 600$  mm,小于 5 mm 粒径的颗粒含量不超过 20%,小于 0.075 mm 粒径的颗粒含量小于 5%,  $n \leq 18\%$ 。垫层料、过渡料、主堆石料均采用 P1 料场爆破堆石料,主要为志留纪花岗闪长岩、角闪(黑云母)二长花岗岩和英云闪长斑岩,岩石干密度 2.47~2.68  $g/cm^3$ ,自然吸水率 0.12%~0.63%,饱和吸水率 0.16%~0.72%,饱和抗压强度 42.7~94.2 MPa,软化系数 0.72~0.95,各项指标满足筑坝要求。

该坝位于狭窄河谷区,河谷宽高比为 2.17,尤其是河床部位有深切河槽,非常不利于面板和趾板布置,坝体平面布置如图 1 所示。该坝坝高达 230.0 m,库水位为 217.00 m,已接近世界第一高水布垭面板堆石坝<sup>[10]</sup>,但其地形条件较水布垭大坝更为复杂,且地震烈度更高。为了保障大坝结构安全,

设计中采取了一系列坝体变形控制措施。

## 2 狭窄河谷区面板坝变形控制措施

a. 河槽区设置混凝土高趾墩。如图 2 所示,该坝河床部位存在深切陡峭河槽,面板难以布置。一旦面板向下延伸至建基面必然导致面板宽度突变和陡峭的周边缝布设,不利于面板和周边缝结构安全。为了修补地形的缺陷,河槽底部设置一座 43 m 高重力式高趾墩,顶宽 17 m,上游坡比 1:0.3,下游坡比 1:0.85,顶部设计成趾板形式与混凝土面板连接,高趾墩三维布置如图 3。同时,为了保证高趾墩、混凝土面板、堆石料之间的变形协调,改善面板应力变形状态以及高趾墩顶部周边缝的变位,在高趾墩与堆石料之间设置了增模区,并且在高趾墩下游设置干贫混凝土区,如图 1 所示。

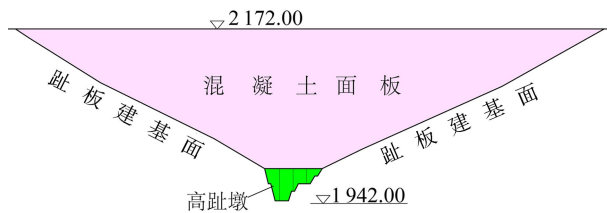


图 2 趾板展开示意图(单位:m)

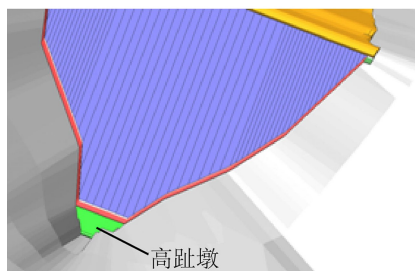


图 3 高趾墩三维布置

b. 岸坡增模区以及陡峭岸坡修补区。为了确保堆石与岸坡接触带变形均匀,减小陡峻岸坡的不利影响,两岸堆石体地基在趾板内侧到坝轴线范围出露的高陡壁均采用干贫混凝土修补整形,处理后的坡比不陡于 1:0.3~1:0.5,坝轴线下游区域也进行处理,保证处理后坡比不陡于 1:0.1~1:0.3。坝体与两岸接触带设置增模区,以避免坝体与岸坡接触带堆石料大颗粒集中,影响填筑质量。坝轴线上游增模区水平厚度设置为 3 m,下游增模区水平厚度设置为 2 m,如图 4 所示。

c. 面板分块设计。SL228—2013《混凝土面板堆石坝设计规范》<sup>[11]</sup>规定混凝土面板竖缝宽度一般为 8~16 m。由于狭窄河谷区两岸面板向河床部位的滑移趋势更为明显,为了缓解面板向河床滑移引起的拉应力,对两岸陡峭岸坡处面板宽度进行缩小,以更好适应变形。具体地,将左岸 0+0.0 m~0+



图4 大坝岸坡增模区布置

120.0 m 和右岸 0+360.0 m ~ 0+500 m 区域面板宽度缩减为 6 m, 并设拉性竖缝, 河床部位面板宽度设为 12 m, 并设压性竖缝。

**d. 周边缝设计。**一般 150 m 以上的面板坝周边缝应设底、顶部 2 道止水, 也可设底、中、顶部 3 道止水<sup>[11]</sup>, 考虑到在周边缝中部止水可能会影响面板混凝土的振捣密实, 所以只设置顶、底 2 道止水, 其中顶部止水采用 V 形槽口橡胶/PVC 棒+波形止水带+塑性填料止水的结构形式。考虑到该坝铺盖顶高程 2045.00 m 以上周边缝因变形过大可能发生剪切破坏, 在 2045.00 ~ 2082.00 m 之间沿周边缝设置无黏性自愈型填料。

**e. 合理的预沉降期。**为了克服狭窄河谷区大坝拱效应强、后期变形大影响面板浇筑的问题, 该工程采用 3 期面板浇筑, 并且 I 期、II 期、III 期面板浇筑前分别设置了 3 个月、3 个月和 5 个月的预沉降期, 保证浇筑面板前坝体沉降速率在允许范围以内。

### 3 狭窄河谷区面板坝变形控制有效性复核

#### 3.1 筑坝料力学性质室内试验

为了评估大坝设计的合理性, 本文采用三维有限元方法模拟了该面板堆石坝的应力变形性状。通过大型三轴压缩试验和流变试验测定了垫层区、过渡区、主堆石、次堆石以及覆盖层的瞬变、流变特性, 得到的坝料“南水”模型<sup>[12]</sup>参数见表 1, 坝料流变模型<sup>[13]</sup>参数见表 2。

#### 3.2 筑坝料与基岩界面特性试验

堆石区料与岸坡接触面特性试验在大型接触面

表 2 筑坝材料流变模型参数

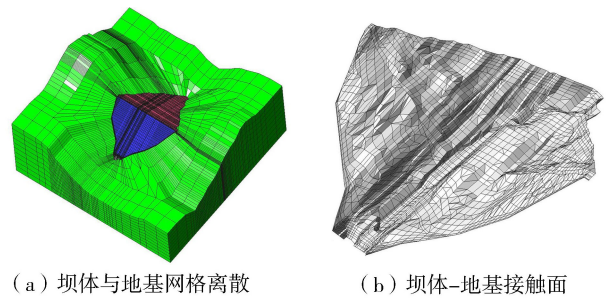
坝体分区	b/%	c/%	d/%	$m_1$	$m_2$	$m_3$
垫层区(增模区)	0.126	0.025	0.351	0.434	0.549	0.843
过渡区	0.138	0.035	0.394	0.441	0.551	0.884
主堆石区	0.120	0.021	0.334	0.428	0.547	0.807
次堆石区	0.131	0.031	0.376	0.440	0.550	0.877
次堆石区	0.118	0.019	0.330	0.425	0.541	0.801
覆盖层	0.195	0.046	0.560	0.462	0.567	0.893

注:  $b$  为体积变形系数;  $c$  为剪切引起的体积变形系数;  $d$  为剪切变形系数;  $m_1$  为体积变形指数;  $m_2$  为剪切引起的体积变形指数;  $m_3$  为剪切变形指数。

试验仪上进行。根据地勘提供的岩层粗糙度曲线, 取代表性起伏差值的均值作为在混凝土试块表面开凿相应凹槽的深度值, 并按照岩层粗糙度曲线的最大起伏数, 在混凝土试块表面均匀开凿相应数量的凹槽, 采用人工增糙的方法模拟现场边坡的粗糙面。通过大型接触直剪试验得到的 Duncan 和 Clough 接触面模型<sup>[14]</sup>参数: 干密度 2.17 g/cm<sup>3</sup>, 内摩擦角 36.6°, 黏聚力 70.8 kPa, 初始弹性模量系数 6605, 孔隙率为 0.38, 破坏比 0.71。

#### 3.3 数值模拟方法

本文建立的 230 m 级面板堆石坝几何模型如图 5 所示, 包括坝体、地基、高趾墩、坝体与地基之间的接触摩擦单元。面板堆石坝坝体填筑分为 7 期, 面板浇筑分为 3 期, 填筑过程示意如图 6 所示, 施工期约 650 d, 计算模拟至蓄水运行后 8 a。计算中基岩、高趾墩 (C25)、面板 (C30) 均采用线弹性模型, 坝料瞬变模型采用“南水”模型<sup>[12]</sup>, 参数见表 1, 坝料流变模型参见文献 [13], 参数见表 2, 止水接缝模拟方法见文献 [15-23], 坝体-地基接触面采用 Goodman 单元。



(a) 坝体与地基网格离散 (b) 坝体-地基接触面

图 5 面板堆石坝几何模型

表 1 筑坝材料“南水”模型参数

坝体分区	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	内摩擦角/ (°)	内摩擦角 减小值/(°)	弹性模量 系数	弹性模量 随围压变化 的指数	破坏比	最大体 缩系数/%	最大体缩 系数随围压 变化的指数	最大减缩体应变 对应的偏应力与 极限偏应力的比值
垫层区(增模区)	2.25	50.6	6.5	1291.5	0.29	0.61	0.35	0.49	0.60
过渡区	2.17	51.8	7.6	1107.3	0.28	0.60	0.48	0.48	0.55
主堆石区	2.17	53.0	8.7	1385.2	0.24	0.60	0.24	0.71	0.55
次堆石区	2.26	51.4	8.5	1197.2	0.24	0.60	0.36	0.60	0.55
次堆石区	2.33	49.5	6.4	1393.3	0.33	0.61	0.17	0.75	0.53
覆盖层	2.22	46.8	5.8	762.8	0.40	0.67	0.43	0.60	0.62

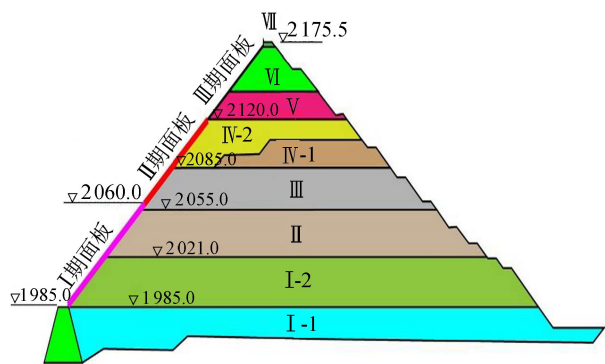
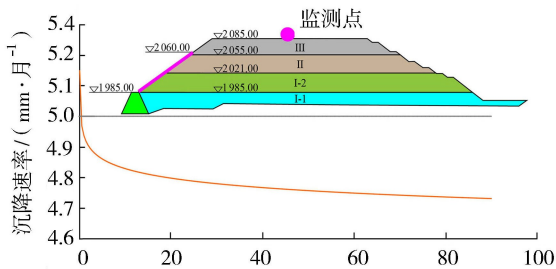


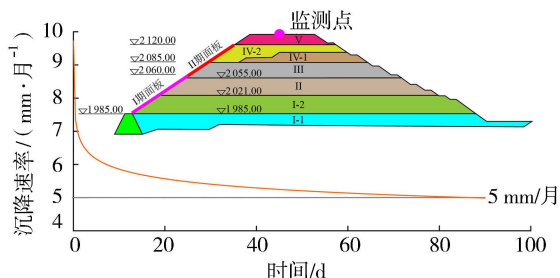
图6 面板堆石坝填筑次序(单位:m)

### 3.4 施工期坝体变形控制

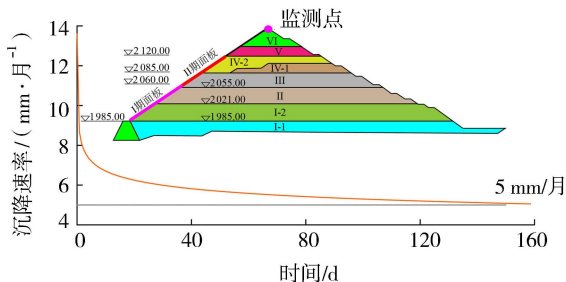
施工期坝体变形控制主要由面板浇筑期的变形速率控制。本工程中 I 期、II 期、III 期面板浇筑前分别设置 3 个月、3 个月和 5 个月的预沉降期,用于控制面板浇筑前沉降速率。图 7(a)~(c)分别给出了面板浇筑前堆石顶部结点沉降速率变化过程。可见本工程预沉降期可将沉降率控制在 4.6 mm/月、4.9 mm/月和 4.9 mm/月,在面板浇筑前,沉降速率均小于 5 mm/月,基本满足面板浇筑要求<sup>[16-21]</sup>。



(a) I 期面板



(b) II 期面板



(c) III 期面板

图7 3 期面板浇筑前堆石顶部结点沉降率过程线(高程单位:m)

### 3.5 蓄水、运行期坝体结构性状

竣工期、满蓄期、运行期坝体最大沉降分别为 183.6 cm、195.0 cm 和 202.5 cm,最终沉降量约占坝高的 0.88%。图 8 为计算的河床坝顶结点沉降过程,计算结果表明,在大坝填筑到顶后,随着水荷载、坝料流变效应的作用,坝顶沉降随时间不断增加,并在大坝蓄水运行 8 a 后变形基本收敛,坝顶最终沉降量为 36.6 cm。

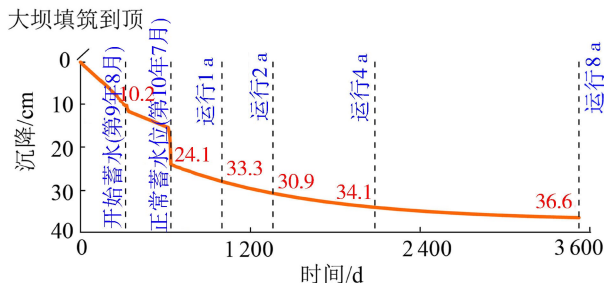


图8 坝顶结点典型沉降过程

本研究考虑了坝体-地基之间的接触摩擦效应,图 9 给出了运行期坝体相对基岩的接触摩擦位移,可以看出,接触摩擦变形较大区域位于窄河槽两岸部位,运行期最大滑移量达到了 7.03 cm,可见坝体与地基之间的接触摩擦变形较为明显,应在计算中予以考虑。

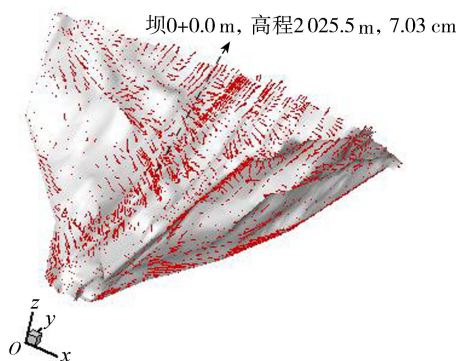
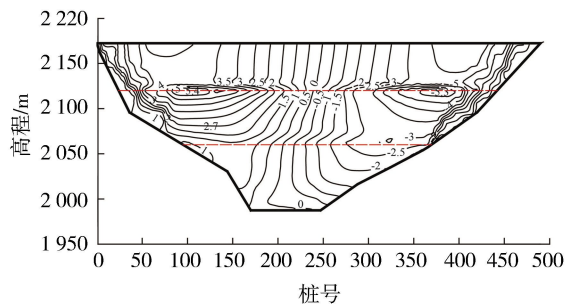
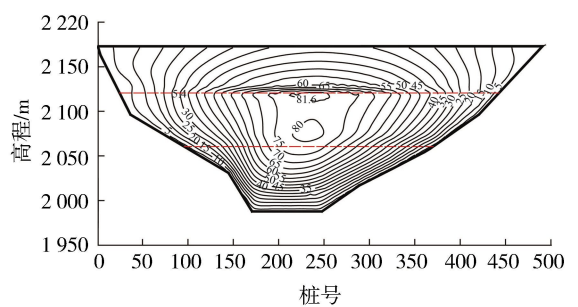


图9 运行 8 a 后坝体-地基接触摩擦位移矢量分布

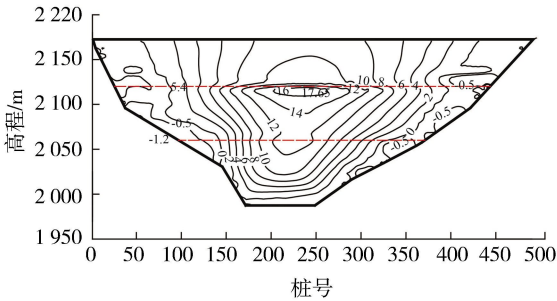
图 10 为运行期混凝土面板的应力与变形分布。图 10(a)为面板轴向位移分布,可以看出面板在坝轴向位移表现为由两岸指向河床的挤压变形,由于该坝位于狭窄河谷使得挤压效应更为强烈,右岸面板指向左岸位移最大值为 5.4 cm,左岸面板指向右岸的最大位移为 5.3 cm。图 10(b)为运行期面板挠度,最大值达到了 81.6 cm。图 10(c)为运行期面板坝轴向应力分布,可以看出,受水荷载和后期流变效应影响,面板中部发生了较大的压应力,最大值为 17.65 MPa,左右岸面板区域存在一定的拉应力,最大值为 1.20 MPa。图 10(d)为面板顺坡向应力分布,可以看出,由于低高程部位河谷非常狭窄导致顺坡向压应力最大值发生在河谷地形突变部位,最大



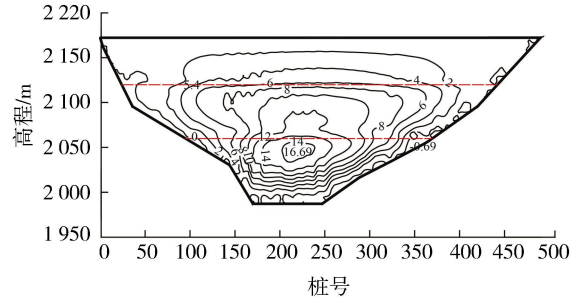
(a) 轴向位移 (单位: cm)



(b) 挠度 (单位: cm)



(c) 轴向应力 (单位: MPa)



(d) 顺坡向应力 (单位: MPa)

图 10 运行期 8 a 后混凝土面板应力与变形分布

值达 16.69 MPa, 而顶部混凝土面板顺坡向应力值较小。从计算结果来看, 该工程面板应力在材料允许的强度范围以内, 未发生拉、压破坏。但两岸面板的拉应力较大仍需重点关注。

在蓄水、运行过程中面板周边缝会发生三向变位, 即沿趾板走向的错动变位、指向坝内的沉降变位以及周边缝的张开变形。对于位于狭窄河谷区面板坝来说面板向河床部位滑动引起的周边缝错动位移危害最大。表 3 给出了运行期周边缝错动变位分布, 结果表明, 错动最大值为 32.3 mm, 位于 0+360 剖面。该工程中周边缝止水材料变位控制标准为: 张开 55 mm、沉降 70 mm、错动 55 mm, 可以看出, 周边缝错动变位仍在材料允许范围以内。

表 3 运行期周边缝错动变位分布

桩号	变形/cm	桩号	变形/cm
0+12	0.3	0+252	10.2
0+36	1.7	0+276	12.2
0+60	6.6	0+300	22.0
0+84	13.8	0+324	22.4
0+108	5.7	0+348	27.6
0+132	8.4	0+372	7.9
0+156	6.2	0+396	16.5
0+180	1.4	0+420	10.2
0+204	1.4	0+444	9.2
0+228	0.6	0+468	4.5

表 4 采取和不采取增模措施下坝体应力变形极值 (运行期)

措施	坝体位移/cm		面板位移/cm		面板应力/MPa		接缝变形/mm									
	沉降	顺河向		轴向	挠度	坝轴向		顺坡向		周边缝						
		负向	正向			正向	负向	拉应力	压应力	拉应力	压应力	错动	沉降	张开	张开	
采取增模措施	202.5	-17.7	52.3	32.0	-29.6	5.4	-5.3	81.6	17.65	1.20	16.69	-0.69	32.3	32.2	20.1	27.2
未采用增模措施	205.6	-19.2	54.5	33.7	-30.9	5.8	-5.6	85.7	17.89	1.26	18.45	-0.76	38.7	38.9	20.2	29.6

本文统计了已建的天生桥一级、洪家渡、水布垭、三板溪、Bakun 等一批 200 m 级面板堆石坝沉降率, 平均值约为 1.03%, 本文堆石坝运行期沉降率约为 0.88%, 小于已建堆石坝平均值; 已建的 200 m 级面板堆石坝的工后沉降率平均值为 0.155%, 本文 230 m 堆石坝坝顶工后沉降率约为 0.16%, 大于已建坝平均值。可见, 狭窄河谷区面板坝变形总量小但后期变形大。

为了验证工程措施的有效性, 本文同时比较分析了坝体内部不设置增模区、胶凝砂砾石区、基础干贫混凝土区、两岸岸坡增模区时大坝的应力变形性状。表 4 列出了采取增模措施、不采取增模措施下坝体应力变形极值。可以看出, 采用增模措施后坝体和防渗体的变形均有减小, 增模措施尤其对于面板顺坡向应力和周边缝的变位改善效果明显。需要指出的是, 周边缝是面板堆石坝的“生命线”, 尤其是狭窄河谷区的面板堆石坝, 周边缝变形控制是重中之重, 从表 4 看出, 增模措施设置对周边缝变形改善明显, 达到了增模措施设置的目的。另外可以看出, 局部增模区用于改善局部变形, 对大坝整体应力变形极值贡献有限。

## 4 地震期大坝安全评估

大坝抗震设计烈度为9度,设防类别为甲类,取基准期100a内超越概率为0.02地震动作为设计地震动,地震峰值加速度为411.0 gal。篇幅所限。计算结果表明,设计地震作用下坝轴向、顺河向和垂直向反应加速度分别为 $11.88\text{ m/s}^2$ 、 $12.17\text{ m/s}^2$ 和 $8.00\text{ m/s}^2$ ,相应加速度放大倍数分别为2.87、2.94和2.91。坝体轴向、顺河向永久变形分别为18.3 cm和52.7 cm,地震引起的面板坝轴向正向、轴向负向、法向增量变形分别为4.2 cm、-3.5 cm和81.7 cm,坝轴向静动叠加后面板压应力、拉应力分别为20.11 MPa和5.24 MPa,顺坡向静动叠加后面板压应力、拉应力分别为19.41 MPa和2.67 MPa,震后周边缝错动、沉陷、张开分别为37.0 mm、41.2 mm和20.8 mm,震后竖缝张开为30.4 mm。地震残余变形是反映土石坝地震安全比较直观的因素,与汶川地震中的紫坪铺面板坝相比,设计地震作用下该工程最大震陷比为0.34%,远小于汶川地震中的紫坪铺面板坝的震陷率0.64%。地震情况下面板压应力在C30材料允许范围内,不会出现压碎破坏,但左右两侧面板上部坝轴向拉应力以及右侧面板顶部顺坡向拉应力较大,出现拉裂破坏的可能性较大。震后面板止水接缝变位在允许范围以内。为保障大坝抗震安全,对地震反应强烈的大坝坝顶采用了土工格栅加固,土工格栅铺设范围为2172~2110 m高程坝顶及下游坝坡区域,从下游坡起向上游坝体内部分延伸,土工格栅沿坝高方向层间距设置为2.4 m。

## 5 结论

a. 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大,对面板和周边缝等防渗体系的应力变形性状影响尤为不利。

b. 狭窄陡峻河谷区面板堆石坝坝体与基岩之间存在不可忽略的接触变形,该变形可增加周边缝的不利变位,在实际计算中应予以考虑。

c. 数值仿真表明,本文案例中采用的河床高趾墩、岸坡增模区、面板分缝优化、周边缝特殊设计、合理的预沉降时间等措施,较好地保障了狭窄河谷区大坝的静、动力结构安全。这些措施可为同类型的面板堆石坝设计、建设提供参考。

## 参考文献:

[1] 关志诚. 高混凝土面板砂砾石(堆石)坝技术创新[J]. 水利规划与设计,2017(11): 9-14. (GUAN Zhicheng. Technological innovation of high concrete face gravel (rockfill) dam[J]. Water Resources Planning and Design,

2017(11): 9-14. (in Chinese))

- [2] 贾金生, 郦能惠. 高混凝土面板坝安全关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [3] 杨泽艳, 周建平, 王富强. 中国混凝土面板堆石坝发展30年[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(1): 1-5. (YANG Zeyan, ZHOU Jianping, WANG Fuqiang. The 30 years' development of concrete face rockfill dam in China[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2017, 3(1): 1-5. (in Chinese))
- [4] 邓刚, 徐泽平, 吕生玺, 等. 狭窄河谷中的高面板堆石坝长期应力变形计算分析[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 639-646. (DENG Gang, XU Zeping, LYU Shengxi, et al. Analysis on long term stress and deformation of high concrete face rockfill dam in narrow valley[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 639-646. (in Chinese))
- [5] 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 Kuangpeng. 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))
- [6] 宋文晶, 高连士. 窄陡河谷面板堆石坝坝肩摩擦接触问题研究[J]. 水利学报, 2005, 36(7): 793-798. (SONG Wenjing, GAO Lianshi. Frictional contact between abutment and CFRD in deep narrow valley[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7): 793-798. (in Chinese))
- [7] 魏匡民, 陈生水, 李国英, 等. 陡峻河谷高面板坝坝体与坝基接触效应[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3415-3424. (WEI Kuangmin, CHEN Shengshui, LI Guoying, et al. Influence of contact effect between dam body and dam foundation on behaviours of high concrete faced rockfill dam built in steep valleys[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(9): 3415-3424. (in Chinese))
- [8] 水利电力部科学技术司. 国外混凝土面板堆石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1988.
- [9] 熊泽斌, 杨启贵, 张运建. 水布垭高面板坝设计[J]. 人民长江, 2007, 38(7): 19-21. (XIONG Zebin, YANG Qigui, ZHANG Yunjian. Design of high faced dam for Shuibuya hydroproject[J]. Yangtze River, 2007, 38(7): 19-21. (in Chinese))
- [10] 刘志明. 混凝土面板堆石坝设计规范: SL228—2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [11] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
- [12] 李国英, 米占宽, 傅华, 等. 混凝土面板堆石坝堆石料流变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1712-1716. (LI Guoying, MI Zhankuan, FU Hua, et al. Experimental studies on rheological behaviors for rockfills[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1712-1716. (in Chinese))
- [13] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. Asce Soil Mechanics & Foundation Division Journal, 1971, 97(12): 1657-1673.

- [14] 顾淦臣,沈长松,岑威钧. 土石坝地震工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2009.
- [15] 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))
- [16] 朱晟,邓石德,宁志远,等. 基于分形理论的堆石料级配设计方法[J]. 岩土工程学报,2017,39(6): 1151-1155. (ZHU Sheng, DENG Shide, NING Zhiyuan, et al. Gradation design method for rockfill materials based on fractal theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(6): 1151-1155. (in Chinese))
- [17] 钟登华,刘东海,崔博. 高心墙堆石坝碾压质量实时监控技术及应用[J]. 中国科学(技术科学),2011,41(8): 1027-1034. (ZHONG Denghua, LIU Donghai, CUI Bo. Real-time compaction quality monitoring of high core rockfill dam[J]. Science China(Technological Sciences), 2011,41(8): 1027-1034. (in Chinese))
- [18] 贾金生,郝巨涛,吕小彬,等. 高混凝土面板堆石坝周边缝新型止水[J]. 水利学报,2001,32(2): 35-38. (JIA Jinsheng, HAO Jutao, LYU Xiaobin, et al. New type of waterstop for perimetric joints of high CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(2): 35-38. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 陈生水,李国英,傅中志. 高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(1):59-65. (CHEN Shengshui, LI Guoying, FU Zhongzhi. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock dams subjected to earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 59-65. (in Chinese))
- [21] 朱安龙,张胤,廖洁,等. 大角度折线型高面板堆石坝坝体和面板的应力与变形规律[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):48-55. (ZHU Anlong, ZHANG Yin, LIAO Jie, et al. Research on stress and deformation law of dam body and face slab of high concrete face rockfill dam with large angle broken line [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):48-55. (in Chinese))
- [22] 束一鸣. 高面膜堆石坝关键设计概念与设计方法[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):46-53. (SHU Yiming. Key design concepts and approaches of high membrane faced rock-fill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1):46-53. (in Chinese))
- [23] 魏国民,陈生水,马洪玉,等. 黏弹性方法用于面板堆石坝动力分析时必要的改进[J]. 岩土力学,2021,42(12): 3475-3484. (WEI Kuangmin, CHEN Shengshui, MA Hongyu, et al. A necessary improvement of the viscoelastic method for calculating the dynamic behaviors of the concrete faced rockfill dams [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3475-3484. (in Chinese))

(收稿日期:2021-09-23 编辑:刘晓艳)

(上接第54页)

- [4] 王永明,邓渊,任金明,等. 高土石围堰复合土工膜应变集中计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2016,35(增刊1): 3299-3307. (WANG Yongming, DENG Yuan, REN Jinming, et al. Research on the calculation method of strain concentration of composite geomembrane for high earth and stone cofferdam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(Sup1): 3299-3307. (in Chinese))
- [5] 张岚,单海年,潘琳. 某大型抽水蓄能电站上水库初蓄期安全运行性态分析[J]. 水电能源科学,2019,37(9):55-58. (ZHANG Lan, SHAN Haimian, PAN Lin. Analysis of upper reservoir operation state of a large pumped storage power station during initial impoundment [J]. Water Resources and Power, 2019,37(9): 55-58. (in Chinese))
- [6] 束一鸣,吴海民,姜晓桢,等. 高面膜堆石坝周边的夹具效应机制与消除设计方法[J]. 水利水电科技进展. 2015,35(1): 10-15. (SHU Yiming, WU Haimin, JIANG Xiaozhen, et al. Mechanism of anchoring influence at perimeter of high membrane faced rockfill dam and eliminating approach [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 10-15. (in Chinese))
- [7] 宁宇,喻建清,崔留杰. 软岩堆石高坝土工膜防渗技术[J]. 水力发电,2016,42(5):62-67. (NING Yu, YU Jianqing, CUI Liujie. Anti-seepage of geomembrane for high soft rock filling dam [J]. Water Power, 2016, 42(5):62-67. (in Chinese))
- [8] 李佳男,赖国伟,王义鹏. 基于子模型的高面板堆石坝周边缝变形分析[J]. 水电能源科学,2014,32(8):81-84. (LI Jia'nan, LAI Guowei, WANG Yipeng. Study on deformation regularity for peripheral joints of high concrete faced rockfill dam based on submodel method [J]. Water Resources and Power, 2014,32(8):81-84. (in Chinese))
- [9] 张志兴,邓长根,巩俊松. 基于子模型法的钢拱桥关键梁段精细化分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(20): 8656-8662. (ZHANG Zhixing, DENG Changgen, GONG Junsong. Refined analysis of the key beam segment of steel arch bridge based on sub-model method [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8656-8662. (in Chinese))
- [10] 曹学兴,何蕴龙,迟福东,等. 基于子模型法的高堆石坝坝基廊道抗震安全性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):87-93. (CAO Xuexing, HE Yunlong, CHI Fudong, et al. Seismic safety analysis of high rockfill dam foundation gallery using submodeling analysis method [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018,16(6):87-93. (in Chinese))

(收稿日期:2021-05-19 编辑:刘晓艳)