

DOI: 10.11779/CJGE20250110

# JL 混凝土面板堆石坝面板破损机理反演分析研究

黄文斌<sup>1</sup>, 吴俊杰<sup>2</sup>, 米占宽<sup>\*1,3</sup>, 魏匡民<sup>1,3</sup>, 王芳<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;  
3. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** JL 面板堆石坝最大坝高 140.3 m, 采用花岗岩和石英斑岩填筑, 运行初期大坝出现了止水破坏和面板裂缝等问题, 从而出现严重渗漏现象, 严重影响大坝正常运行。基于大坝沉降观测数据和面板现场检测资料采用三维精细化数值模拟方法反演研究了 JL 大坝运行初期面板破损机理, 再现了堆石坝体变形过程和混凝土面板应力演化性状。研究认为, 大坝初次蓄水时发生的水位骤降导致了面板止水破坏, 渗水冲蚀垫层区引起面板脱空, 造成蓄水后面板在水压力作用下逐步破损和出现贯穿性裂缝。通过降低水位, 对水上破损面板采用覆盖修复、水下破损面板采用浇筑环氧混凝土和脱空区灌浆修复等措施, 大坝渗漏量得到有效控制。JL 大坝面板破案例给面板堆石坝设计施工以深刻的启示: 面板堆石坝设计施工应保证各坝体分区以及面板与垫层之间的变形协调; 运行期应避免水位骤降以防止内水外渗导致止水结构破坏和垫层料细颗粒流失; 垫层区、过渡区和堆石区之间应严格满足反滤准则, 避免面板开裂后垫层料细颗粒流失而导致的面板受力状态恶化。

**关键词:** JL 面板堆石坝; 面板裂缝; 精细化模拟方法; 面板破损机理

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)10-2106-11

作者简介: 黄文斌(2000—), 男, 博士研究生, 主要从事土石坝数值分析方面的研究。E-mail: wenbinhuang0@outlook.com。

## Back analysis on damage mechanism of concrete face slab of JL CFRD

HUANG Wenbin<sup>1</sup>, WU Junjie<sup>2</sup>, MI Zhankuan<sup>1,3</sup>, WEI Kuangmin<sup>1,3</sup>, WANG Fang<sup>1</sup>

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 3. Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** In this study, JL Concrete Faced-Rockfill Dam (CFRD) has a maximum height of 140.3 m and is constructed using granite and quartz porphyry rockfills. During its initial operation, the dam encountered issues such as water-stop damage, slab cracking, and excessive seepage, which affected its normal operation. This study analyzes the damage mechanism of the slab during the early operation based on settlement data and slab inspection records. By using a 3D refined numerical simulation method, the deformation process of the rockfill dam and the stress evolution of the concrete slab are reproduced. Research indicates that the sudden drop of water level that occurred during the initial impoundment led to the damage of the slab water-stops, seepage erosion of the cushion led to gaps between the slab and the rockfill, which further deteriorated the stress of the slab, resulting in progressive damage and cracks. After lowering the water level, the damaged slab is repaired and the gaps are treated with grouting. The leakage of the dam has been controlled. The case of JL CFRD gives a profound enlightenment to the design and construction of CFRDs: The design and construction of a CFRD should ensure that the deformation between the material zones is coordinated so that the slab is in intimate contact with the cushion. During operation period, sudden drop of water level should be avoided as much as possible to prevent waterstops damage and loss of cushion material. The filter criterion of the cushion zone, transition zone, and rockfill zone should be strictly satisfied to avoid the loss of fine particles of

基金项目: 陕西省科技计划项目(2024GX-YBXM-470); 国家自然科学基金项目(52350393); 西藏自治区“十四五”时期清洁能源科技重大专项项目(XZ202201ZD0003G); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y325003) This work was supported by Key Research and Development Program of Shaanxi Province (Grant No.2024GX-YBXM-470), National Natural Science Foundation of China (Grant No.52350393), Science and Technology Major Project of Xizang Autonomous Region of China (Grant No.XZ202201ZD0003G), Fundamental Research Funds for the Central Public Welfare Scientific Research Institutes (Grant No.Y325003).

收稿日期(Received): 2025-02-06 修回日期(Revised): 2025-05-27 接受日期(Accepted): 2025-06-04 网络出版日期(Online): 2025-06-05

\*通信作者 (E-mail: zkmi@nhri.cn)

cushion material once the slab cracked, which will lead to further damage of the slab.

**Key words:** JL CFRD; slab cracks; refined simulation method; damage mechanism of the slab

## 0 引言

面板堆石坝具有适应基础条件能力强、施工速度快、抗震性能好、维修方便等优势<sup>[1-3]</sup>, 国内外已建成一大批面板堆石坝, 这批工程总体运行性状良好, 但混凝土面板裂缝、挤压破坏等破损问题较为多见, 如水布垭面板堆石坝<sup>[4]</sup>、天生桥面板堆石坝、三板溪面板堆石坝<sup>[5]</sup>, 巴西 Campos Novos 面板堆石坝<sup>[6]</sup>和泰国 Khao Laem 面板坝<sup>[7]</sup>等, 影响了大坝正常运行。面板堆石坝设计建设中, 应及时汲取已有的工程经验教训, 应对这些问题和挑战。

混凝土面板破坏通常表现出局部化特征, 而常规的数值模拟方法难以模拟破损的局部化特征。近些年, 精细化模拟方法在面板堆石坝分析中得到逐步使用。周墨臻等<sup>[8-9]</sup>基于非线性接触力学的方法, 对面板、垫层采用精细化网格划分, 通过接触力学算法实现荷载传递, 应用于天生桥一级面板堆石坝。邹德高等<sup>[10]</sup>采用多边形比例边界有限元技术实现了面板坝结构跨尺度精细化分析, 已应用于多座高面板堆石坝工程分析。魏匡民等<sup>[11-12]</sup>将多点位移约束法应用于面板堆石坝精细化分析, 对 Nam Ngum 3、大石峡等多座面板堆石坝进行了精细化有限元计算分析。精细化模拟方法在面板堆石坝中的运用解决了传统方法对面板模拟精度不足的问题, 为面板破坏性态准确模拟提供了有力工具。

JL 面板堆石坝坝高 140.3 m, 在运行初期逐步出现了止水破坏、面板裂缝、渗漏量过大等问题, 业主组织相关单位开展了现场监测、检测、隐患探测、除险加固等工作, 获得了丰富的现场资料, 为研究面板破坏机理提供了宝贵的基础数据。本文基于精细化模拟方法反演分析了 JL 混凝土面板堆石坝施工、蓄水、运行期的应力变形性态, 重点研究了混凝土面板的破坏机理和发展过程, 研究结果可为同类工程建设和运行提供借鉴。

## 1 JL 大坝面板破坏和渗漏状况分析

### 1.1 工程概况

JL 大坝总库容 2.32 亿 m<sup>3</sup>, 正常蓄水位 752.0 m, 最大坝高 140.3 m, 属大(2)型Ⅱ等工程。该坝为高纬度严寒区的混凝土面板堆石坝工程, 坝顶高程 756.3 m, 坝长 446 m, 平面布置如图 1, 坝体分区和填筑过程如图 2。坝体从上游到下游依次为混凝土面板、垫层区、过渡区、主堆石区、次堆石区。坝料设计如下:

垫层料砾石含量 61.7%, 控制最大粒径 80~100 mm, 小于 5 mm 的含量为 35%~45%, 小于 0.075 mm 的含量不大于 5%; 过渡区砂砾石料  $D_{max} \leq 150$  mm, 小于 5 mm 含量 15%~25%, 小于 0.075 mm 含量 <5%, 级配连续; 堆石料采用花岗岩和石英斑岩石料,  $D_{max} \leq 800$  mm, 要求级配连续, 小于 5 mm 含量为 10%~20%, 小于 0.075 mm 含量 <5%。坝体分Ⅵ期填筑, 面板浇筑分为Ⅲ期。大坝于 2011 年 6 月开始填筑, 于 2012 年 7 月填筑至 720 m 高程后开始浇筑Ⅰ、Ⅱ期面板, 2012 年 10 月Ⅱ期面板浇筑完成, 2013 年 4 月 30 日坝体填筑至顶高程, 2013 年 8 月浇筑Ⅲ期面板, 并于 2013 年 9 月浇筑完成。

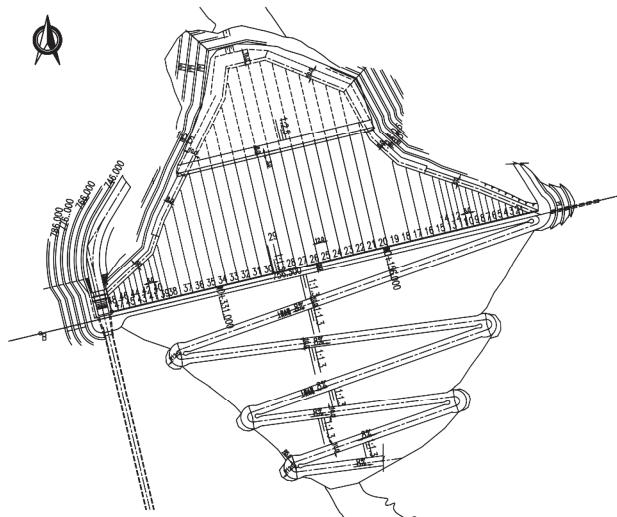


图 1 JL 大坝平面布置图

Fig. 1 Layout of JL CFRD

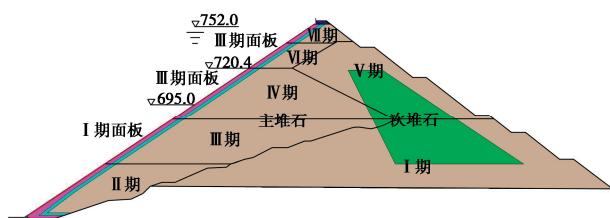


图 2 大坝材料分区及分期填筑示意

Fig. 2 Material zoning and construction schedule of JL CFRD

### 1.2 运行情况

JL 大坝竣工后于 2013 年 7 月底下闸蓄水, 11 月水库蓄水至 736.0 m 高程, 此时导流洞封堵闸门失稳, 水库蓄水经导流洞迅速下泄, 库水位约在 56 h 内快速降落 100 m, 导致坝前下部铺盖与盖重区滑塌、面板止水破坏、导流洞进出口结构破损, 修复后于 2014 年 1 月底重新蓄水。渗漏量监测数据表明, 在 2015

年 4 月之前渗漏量维持在 70 L/s 左右, 4 月底库水位从 736.0 m 增至 748.0 m 后, 渗漏量迅速增大, 5 月底库水位蓄至 748.8 m 时, 大坝下游坡脚和尾水渠右侧挡墙的三排排水孔出水量明显增大, 如图 3。6 月时渗漏量已上升至 250 L/s 左右, 之后随库水位下降而减小至 174 L/s。2015 年 10 月, 经对大坝面板 734.5 m 高程水下面板渗漏情况检测, 发现 1 处明显渗漏区和 4 个缓渗区<sup>[13]</sup>, 如图 4, 分别位于 II、III 期面板水平施工缝附近、左岸高程 687.0~693.0 m 面板和垂直缝、高程 627.0 m 趾板和面板附近、河床铺盖中部。



图 3 坝后渗排水现场图

Fig. 3 Site photos of seepage and damage behind dam

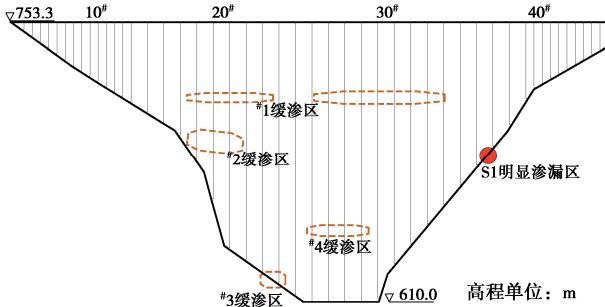


图 4 面板渗漏分布示意图

Fig. 4 Leakage areas of slab

2016 年 8 月至 10 月底, 随着库水位下降, 渗流量同步减小至 137 L/s。检测工作于 2016 年 8 月 22 日开始, 发现#19 面板靠近#18 面板一侧(高程在 689.1~695.0 m)有集中渗漏裂缝区域。2016 年 12 月以后, 渗流量与库水位存在着一定的相关性, 在 2017 年 4 月下旬的一段时间量水堰测得流量为零, 经现场查看确认没有流量, 这段时间库水位也较低(库水位约为 720 m), 之后当库水位上升时渗流量也显著增大, 基本在 230 L/s 上下。经声呐、雷达及潜水员水下渗漏源检查, 在左岸高程 690 m 的#19 面板附近探明一处主要集中渗漏区域, 随即对该区域进行了柔性应急处理。处理后大坝再次蓄至 743.0 m 时, 大坝总渗漏量从 230 L/s 降低至 200 L/s。

2018 年高水位运行时, 大坝渗漏量从 200 L/s 激

增至 265.08 L/s, 水下检查发现#19 面板高程 695~696.0 m 靠近左侧垂直缝存在一条近水平向裂缝; 高程 698.7~701.0 m 距离左侧垂直缝 1.0 m 处存在一条顺坡向的裂缝, 缝宽约 1.0 cm。此时裂缝已超出前一次修补区域, 还有部分新增区域。由于库水位无法降至该部位, 故对新发现的渗漏裂缝进行柔性应急处理, 处理于 2019 年 5 月全部完工。之后在同等水位下测试应急处理效果, 大坝总渗漏量从 265.08 L/s 仅降低至 237.92 L/s, 效果并不理想。

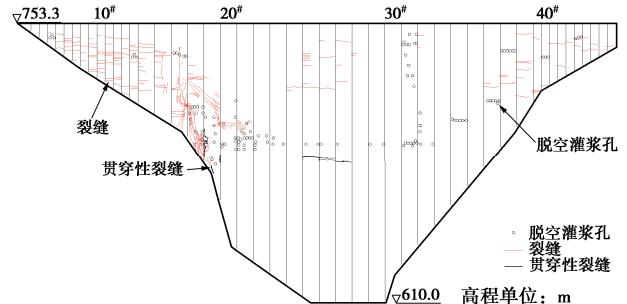


图 5 面板裂缝及脱空区分布

Fig. 5 Cracks and gaps between concrete slab and cushion

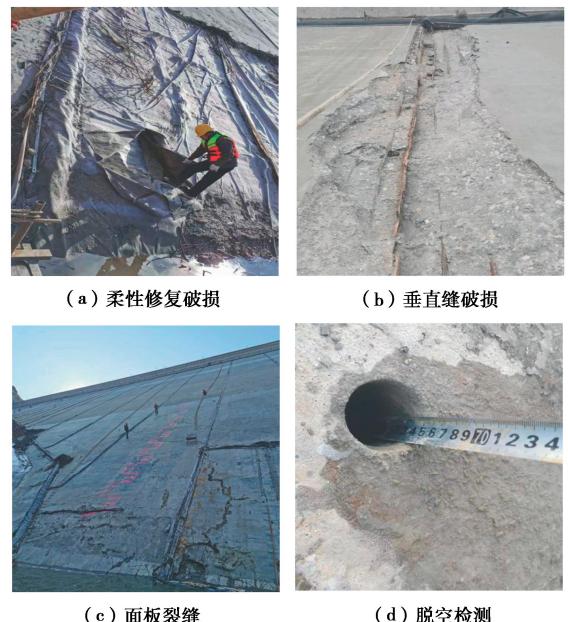


图 6 面板破损现场检测结果

Fig. 6 Site inspection photos of concrete face slab damage

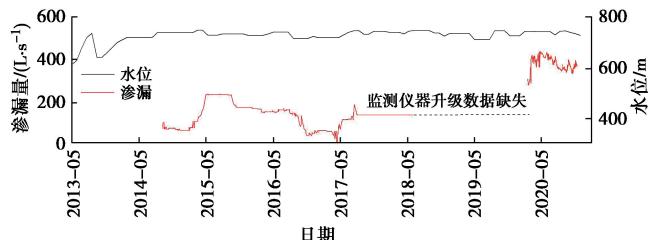


图 7 渗漏量时序过程曲线

Fig. 7 Curve of process of JL dam leakage

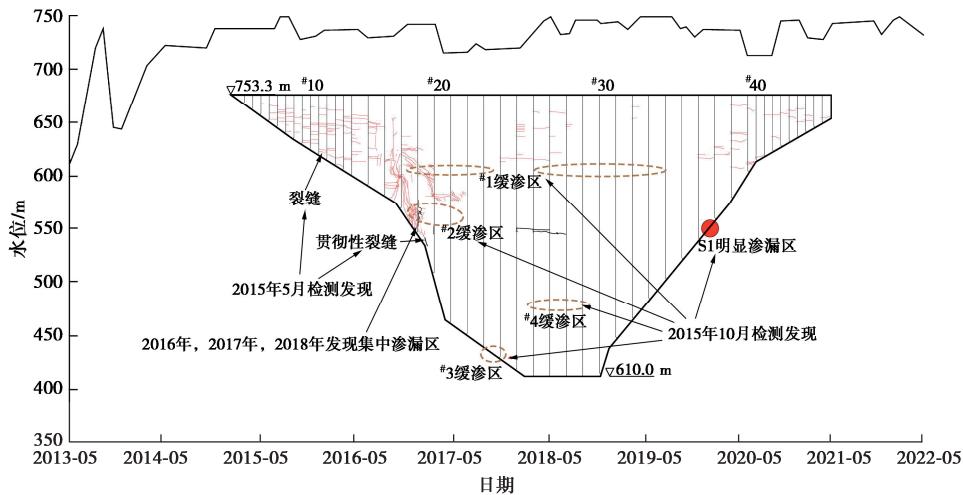


图 8 JL 大坝运行至 2020 年 10 月期间面板破坏情况

Fig. 8 Slab damages before October 2020

表 1 JL 大坝面板破坏情况统计表

Table 1 Slab damage statistics of JL CFRD

时间	水库运行情况	面板破坏现象
2013 年 7 月	开始蓄水	—
2013 年 11 月	库水位至 736 m 后迅速放空	面板止水破坏
2014 年 1 月	重新蓄水	—
2015 年 6 月	水位 748.0 m, 渗漏量上升至 250 L/s	—
2015 年 10 月	水位 734.5 m	检测 1 处明显渗漏、4 处缓渗
2016 年 9 月	水位 727.0 m	检测 #19 靠近 #18 面板侧集中渗漏裂缝区域
2017 年 4 月	水位 720 m, 渗漏监测为 0	—
2017 年	—	检测发现 #19 面板存在集中渗漏, 并进行柔性应急处理
2018 年	—	水下检查发现 #19 面板存在裂缝, 进行柔性应急处理
2020 年 3 月	水位 727.0 m	检测发现面板缺陷 240 处
2020 年 10 月	水位 695.0 m	水下检查发现 #18、#19、#25、#26 和 #27 面板破损处存在吸入区

2020 年 3 月—5 月对大坝综合检测共发现面板缺陷 240 处, 其中水上部分缺陷 214 处, 水下部分 26 处, 缺陷类型有裂缝、橡胶盖板破损、面板脱空和面板渗漏, 如图 5。图 6 为现场检测的柔性修复和垂直缝破损、面板裂缝和脱空等现象。根据 2020 年观测资料, 大坝渗漏量随库水位的升高而增大, 尤其是在库水位上升至 735 m 后, 渗漏量出现陡增趋势, 库水在 735 m 上升至 748 m 的过程中, 渗漏增加了近 110 L/s, 库水在 748 m (目前最高库水位) 左右时达到了最大值 403.36 L/s。2020 年 9 月 30 日, 降水至 695 m 高程后发现左岸 #18、#19 面板严重破损, 且前两次采用的柔性修复措施已完全失效。水下检查发现, #18、#19、#25、#26 和 #27 面板破损处存在明显的吸入效应。本文将 #18、#19 面板和 #25、#26、#27 面板破损处分别命名为区域 I、II。图 7 给出了 JL 大坝渗漏量的时序过程曲线, 图 8 和表 1 按时间详细汇总了 JL 大坝竣工后运行至 2020 年 10 月期间的蓄水过程和面板破坏发生情况。

## 2 数值模拟方法

### 2.1 有限元精细化模拟方法

本文采用基于位移约束点法的精细化有限元模拟方法, 该方法基本原理如图 9。单元  $e_1$  和  $e_2$  为稀疏网格单元, 单元  $e_3$  为密集网格单元, 可以得知,  $e_3$  单元的结点  $o', p', q', r'$  的三向位移均可由单元  $e_1$  和  $e_2$  结点位移表示, 其中结点  $o'$  的三向位移  $u_0, v_0, w_0$  可由结点  $i, j, m, n$  的位移表达,  $q'$  的三向位移可由结点  $m, k, i, n$  的位移表示。以结点  $o'$  为例, 采用等参单元插值方法, 其三向位移可表示为

$$\left. \begin{aligned} u_{o'} &= N_1 u_i + N_2 u_j + N_3 u_m + N_4 u_n, \\ v_{o'} &= N_1 v_i + N_2 v_j + N_3 v_m + N_4 v_n, \\ w_{o'} &= N_1 w_i + N_2 w_j + N_3 w_m + N_4 w_n. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $N_1, N_2, N_3, N_4$  为  $i, j, m, n$  平面局部坐标表示的形函数。单元结点  $o', p', q', r'$  的三向自由度均为“从自由度”, 结点  $i, j, m, n, l, k$  的三向自由度为“主自由度”。

### 2.2 几何模型

根据实际地形、材料分区、施工填筑次序建立大坝三维有限元模型。计算分析中面板及其附近区域网格单元过疏难以呈现破坏的局部化特征, 相较而言, 堆石区应力变形变化平缓, 单元可相对稀疏。本文建

立的 JL 大坝三维有限模型如图 10, 图 10 (a) 为大坝三维整体模型, 图 10 (b) 为防渗体及附近区域精细剖分, 本文计算分析中混凝土面板和垫层单元最大尺寸  $1\sim 2$  m, 堆石区单元尺寸  $5\sim 8$  m<sup>[11]</sup>。

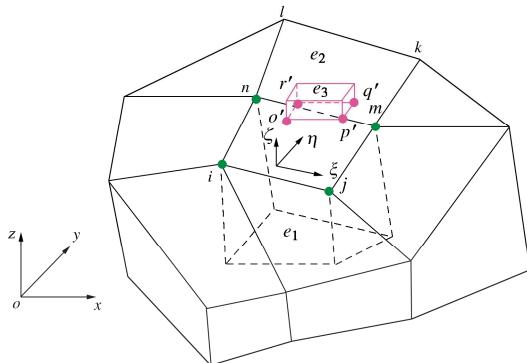
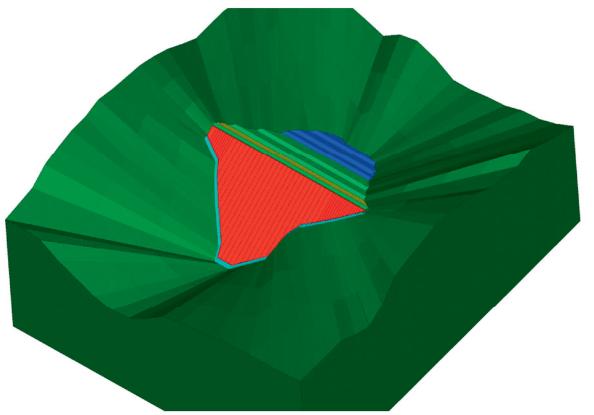


图 9 多点约束法三维示例

Fig. 9 3D example of the multi-point constraint refinement



(a) 整体模型

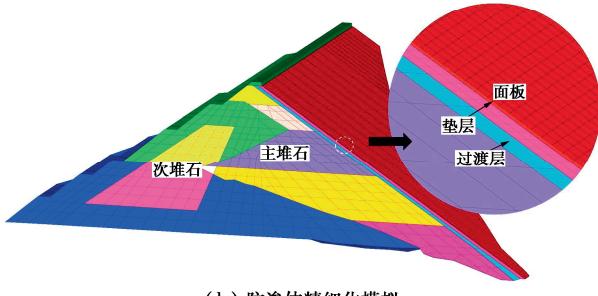


图 10 JL 大坝三维模型

Fig. 10 3D model for JL CFRD

## 2.3 本构模型

### (1) 堆石体瞬变模型

面板堆石坝应力变形分析时, 土体本构模型的选取至关重要, 本文计算中堆石体采用“南水”双屈服面弹塑性模型, 该模型由沈珠江提出<sup>[14]</sup>, 兼具了邓肯模型和剑桥模型的优点, 采用椭圆函数和幂函数组成的两个屈服面来描述土体的屈服特性, 可反映堆石体的非线性和剪胀剪缩性, 双屈服面形式写为

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= p^2 + r^2 q^2, \\ F_2 &= q^s / p. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $p$  为平均应力;  $q$  为广义剪应力;  $r$  和  $s$  为屈服面参数, 可取 2 或 3。

### (2) 堆石体流变模型

填筑及蓄水过程中, 堆石体不仅存在瞬时变形, 还存在时间相关的流变变形。沈珠江选用以指数量型衰减的 Merchant 模型来模拟常应力下的  $\varepsilon$ - $t$  流变发展曲线, 即

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_i + \varepsilon_f (1 - e^{-\alpha t}) \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_i$  为瞬时变形, 可假定由弹塑性模型求得;  $t$  为随时间发展的最终变形量。

本文采用改进的七参数流变模型<sup>[15]</sup>, 如下所示:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{vf} &= b \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{m_1} + c \left( \frac{q}{p_a} \right)^{m_2}, \\ \gamma_f &= d \left( \frac{S_1}{1 - S_1} \right)^{m_3}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  和  $m_3$  为模型参数;  $S_1$  为应力水平;  $q$  为广义剪应力。

### (3) 接触面模型<sup>[16]</sup>

面板与垫层接触采用无厚度 Goodman 模型, 如下所示:

$$K_t = k \cdot \gamma_w \left( \frac{\sigma_n}{P_a} \right)^n \left( 1 - \frac{R_f \tau}{C + \sigma_n \tan \varphi} \right)^2. \quad (5)$$

式中:  $k$ ,  $n$ ,  $R_f$  为材料参数;  $\gamma_w$  为水的重度;  $C$  和  $\varphi$  为咬合强度与摩擦角;  $P_a$  为大气压力。

## 3 面板破损过程反演分析

### 3.1 堆石料参数反演与大坝基本变形规律

本工程内部沉降可用的有效监测数据少, 使得坝料瞬变参数无法反演获取, 在设计阶段开展了较为系统坝料室内三轴试验数据, 堆石料“南水”模型参数均采用试验值, 如表 2。大坝表观监测数据符合一般规律, 可信度高, 因此, 流变参数反演主要依据坝顶测点沉降。考虑到堆石坝实际施工过程和变形机制的复杂性, 很难将流变变形与瞬时变形分开, 因此, 对静力本构模型和流变模型的参数进行综合反演<sup>[17]</sup>。采用自主研发的 TOSS3D 软件对 JL 大坝进行了全过程反演模拟, 坝顶测点 LD13、LD14、LD15 和 LD16 实测结果和反演结果如图 11, 可见, 计算值与实测值较为吻合, 反演参数基本能反映工程实际坝料的力学性质, 流变模型参数见表 3。

反演得到的下游坝坡的工后沉降分布如图 12, 图中标出了测点位置对应的监测值, 可看出计算沉降与监测沉降较为吻合。

表 2 堆石料“南水”模型参数

Table 2 Rockfill materials parameters of “NHRI” model

材料名称	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$c / \text{kPa}$	$\varphi_0 / (\text{°})$	$\Delta\varphi / (\text{°})$	$K$	$K_{ur}$	$n$	$R_f$	$c_d / \%$	$n_d$	$R_d$
垫层	2.25	0	47.5	6.5	990	1485	0.35	0.87	0.34	0.78	0.69
过渡层	2.22	0	48.5	8.2	900	1350	0.35	0.69	0.36	0.78	0.65
主堆石区	2.15	0	46.0	6.1	627	941	0.41	0.81	0.47	0.83	0.48
次堆石区	2.05	0	44.6	5.4	404	606	0.45	0.85	0.64	0.86	0.52

表 3 堆石料流变参数

Table 3 Rockfill materials parameters of creep model

材料名称	$\alpha$	$b / \%$	$c / \%$	$d / \%$	$m_1$	$m_2$	$m_3$
垫层	0.003	0.211	0.045	0.441	0.406	0.525	0.580
过渡层	0.003	0.223	0.048	0.535	0.406	0.525	0.580
主堆石区	0.002	0.399	0.099	1.106	0.441	0.453	0.720
次堆石区	0.001	0.933	0.231	2.625	0.431	0.480	0.710

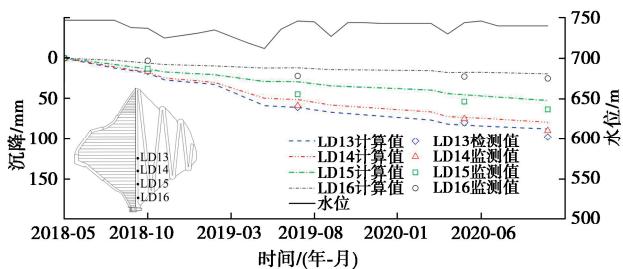


图 11 监测数据与反演结果对比

Fig. 11 Comparison of monitoring data with back analyzed results

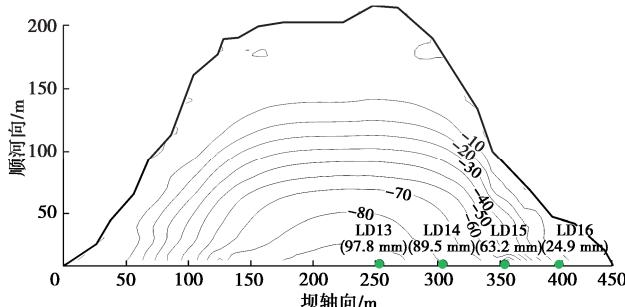


图 12 工后下游坝坡沉降

Fig. 12 Settlements of downstream dam slope after completion

反演得到的竣工期坝体变形如图 13, 最大沉降值为 128.6 cm, 发生在次堆石区。顺河向指向上游位移为 28.6 cm, 指向下游位移为 33.26 cm。根据国内外已建面板堆石坝实测沉降统计, 自 80 年代以来修建在基岩上采用现代碾压技术碾压的 150 m 级面板堆石坝竣工期坝体沉降率均值为 0.75%<sup>[18]</sup>, 本工程竣工期沉降率约为 0.90%, 处于中等偏上的水平。

图 14 为第一次蓄水至 736 m 高程时面板应力和坝体变形图, 此时面板轴向压应力最大值为 22.73 MPa、拉应力最大值为 1.22 MPa, 顺坡向压应力最大值为 21.89 MPa、拉应力最大值为 0.32 MPa。坝体沉降最大值为 139.62 cm, 发生在次堆石区, 顺河向指向上游位移为 22.66 cm, 指向下游位移为 40.41 cm。第

二次蓄水达最高水位 748.8 m 时, 分布规律与第一次类似, 面板轴向最大压应力增加至 25.66 MPa、拉应力最大值增加至 2.13 MPa, 顺坡向最大压应力增加至 24.52 MPa、拉应力最大值增加至 0.78 MPa, 坝体最大沉降达 159.4 cm。计算表明, 两次蓄水时, 在面板编号#24~#28 高程 715.0~720.0 m 部位轴向压应力偏大, 在面板编号#23~#30 高程 629.0~679.0 m 部位顺坡向压应力偏大, 但与实际出现裂缝区域不符, 这表明在面板与坝体接触状态良好时, 该量级的坝体变形并不会引起面板严重破损。

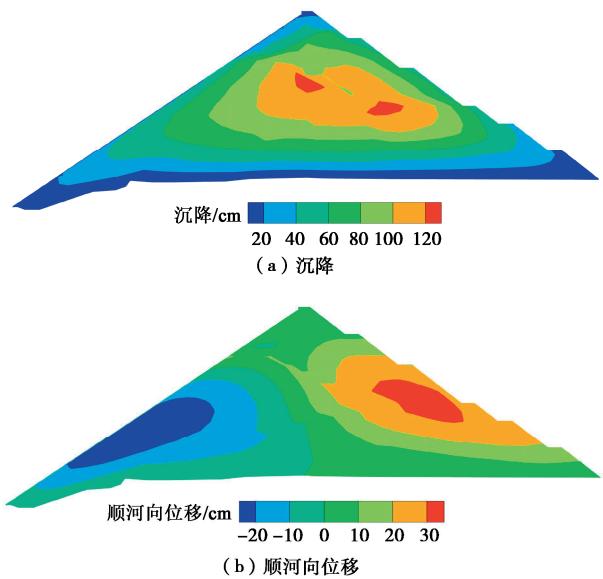
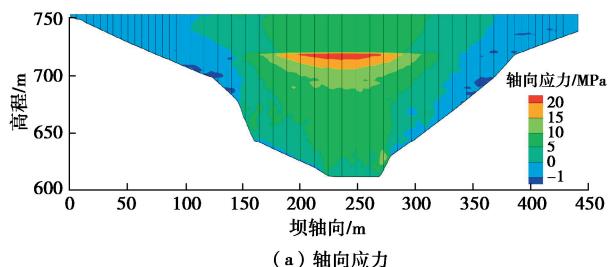


图 13 竣工期坝体位移图

Fig. 13 Displacement contour of dam at completion



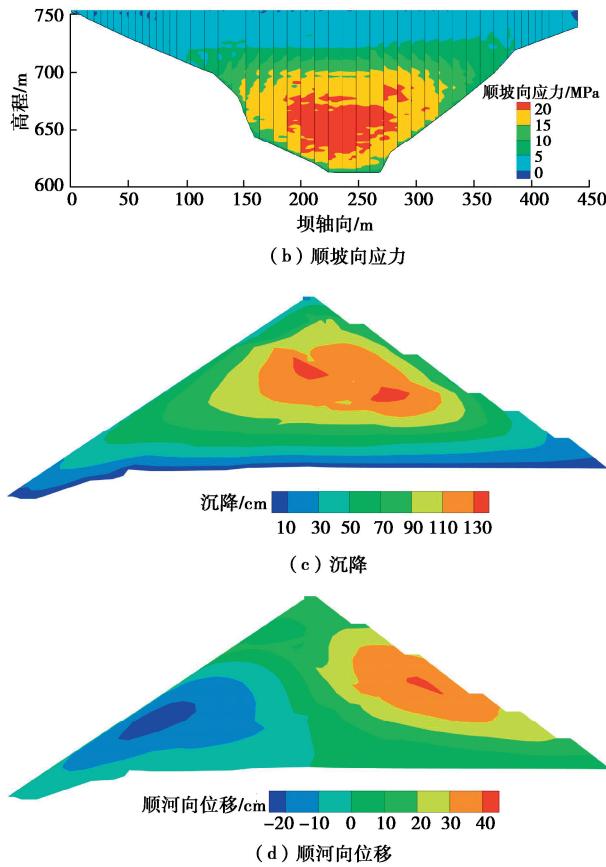


图 14 第一次蓄水至 736.0 m 面板应力和坝体位移图

Fig. 14 Stress contour of slab and displacement contour of dam body at the first impoundment at water level 736.0 m

### 3.2 面板破损性态和演化机制反演

3.1 节计算结果表明,若不考虑变形不均匀性引起的面板应力恶化,面板应力结果将与实际裂缝发生区位置不相符。本文根据面板裂缝和脱空区检测结果(图 5)反推面板破损形成的过程。根据水库的运行资料,面板脱空主要是由于止水破坏、库水渗漏导致的垫层料流失和流变导致的面板与垫层变形不协调引起。本文根据渗漏量和流变变形发展作为判断面板破损的基本依据。计算中设置了相应的脱空区的范围以反演该时间段内面板应力结果。

垫层料流失导致的面板脱空形态和范围均较为复杂,为简化计算,面板脱空模拟仍采用常规等参单元,计算时将局部脱空单元模量减小到一个很小值,因此脱空区应力将转化为节点荷载由附近单元承担,以近似模拟脱空。

根据现场检测结果,面板破裂首先发生于左岸#19面板靠近#18面板一侧(高程在 689.1~695.0 m),计算假定在该区域(#18、#19 面板,高程 691.0~704.0 m,面积约 111 m<sup>2</sup>)和出现面板断裂的区域 II (#25、#2#、#27 面板,高程 687.6~690.8 m,面积约 39 m<sup>2</sup>)首先出现面板脱空,计算所得的面板第二次蓄水至 748.8 m 时面板高应力区如图 15,计算结果表明区域 I 出现了

轴向高拉应力区和顺坡向高压应力区,但范围较小,这可能是 2 号缓渗区出现的初始阶段。

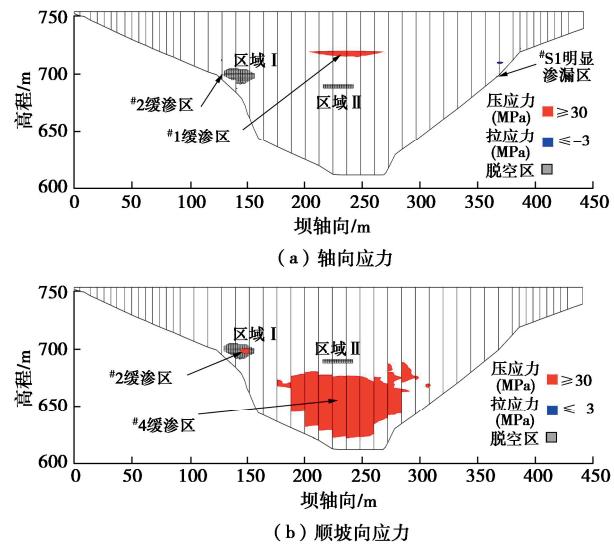


图 15 考虑脱空时运行 2 a 期面板高应力分布

Fig. 15 High stress areas after 2 years of operation when slab gap existing

区域 II 附近并未出现高应力区,但是河床部位面板下部存在大范围顺坡向高压应力区域、上部出现局部轴向高压应力区域,这可能是 1 号缓渗区和 4 号缓渗区产生的诱因。在 S1 号明显渗漏区处出现很小的轴向高拉应力区域,这可能是引起该处渗漏的原因。

运行 5 a 后,检测到区域 I 出现一条近水平向贯穿性裂缝和一条顺坡向贯穿性裂缝,推断是由于坝体变形与渗漏侵蚀的发展,导致面板脱空范围不断增大。反演计算时,在图 15 的基础上,进一步将区域 I 脱空范围扩大至 (#18、#19、#20 面板,高程 688.6~708.9 m,面积约 197 m<sup>2</sup>),区域 II 脱空范围扩大至 (#25、#26、#27 面板,高程 686.6~691.8 m,面积约 71 m<sup>2</sup>)。图 16 给出了此时面板脱空区范围以及高应力区分布,结果表明,区域 I 出现顺坡向高压应力区和轴向高拉应力区,与现场检测的裂缝(图中绿色线条)位置较为接近。

运行 7 a 后,面板现场检测破损区分布如图 5,根据检测脱空区域及孔深设置计算脱空区域如下:区域 I 脱空范围 (#18、#19、#20、#21 面板,高程 678.2~712.2 m,面积约 520 m<sup>2</sup>),区域 II 脱空范围 (#25、#26、#27 面板,高程 685.5~693.9 m,面积约 148 m<sup>2</sup>),此时面板轴向和顺坡向高应力区如图 17,结果表明,区域 I 部位的面板脱空会引起脱空中心区域压应力显著增大,边缘拉应力显著增大,表现为脱空中心区域面板裂缝呈现蛛网状,而脱空区域边缘面板裂缝走向与脱空边缘基本一致;区域 II 部位的裂缝基本为水平向,根据计算结果其为顺坡向压应力引起的面板破损,区

域 I、II 裂缝为结构性裂缝。图 5 面板高程 720.0 m 以上虽存在脱空区, 但因水位较低、荷载不大并未形成面板高应力区, 检测发现大量的横向裂缝应该为温度裂缝, 这是由于 JL 大坝位于高纬度严寒区温差较大, 上部温度裂缝对于结构防渗的危害不大<sup>[19]</sup>。

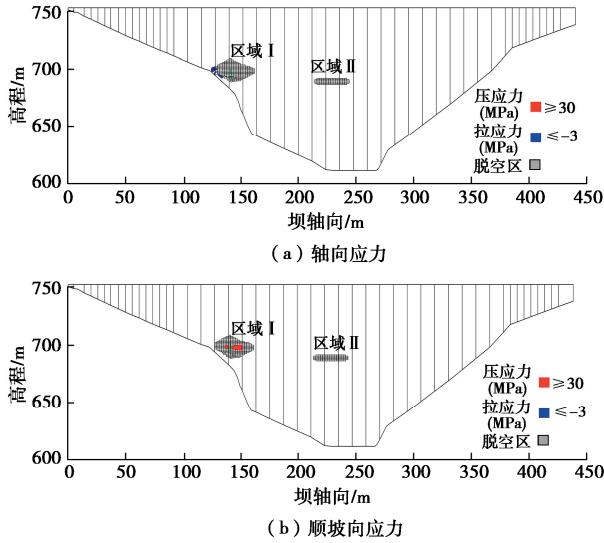


图 16 考虑脱空时运行 5 a 期面板高应力分布

Fig. 16 High stress areas after 5 years of operation when slab gap existing

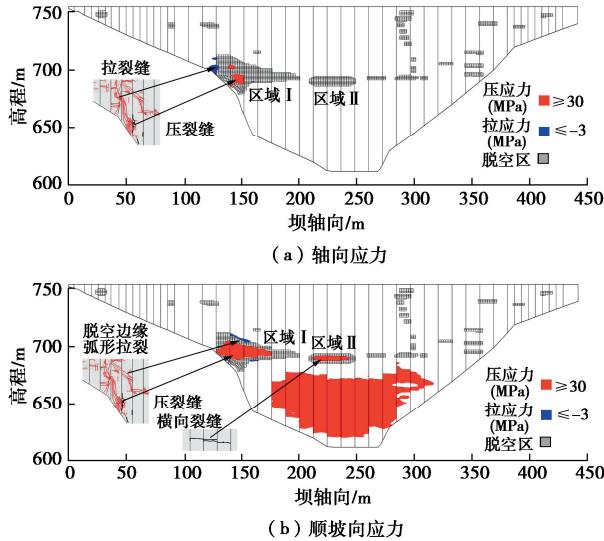


图 17 考虑脱空时运行 7 a 期面板高应力分布

Fig. 17 High stress areas after 7 years of operation when slab gap existing

由于区域 II 出现了横向贯穿性裂缝, 本文在该部位设置了一条水平缝模拟该贯穿性裂缝, 考虑贯穿性裂缝后面板应力如图 18, 结果表明, 出现贯穿性裂缝后, 面板河床底部高应力区消失, 这是由于贯穿性裂缝引起了应力释放, 同时发现裂缝两端出现了应力集中, 裂缝有向两端扩展的趋势, 同时发现区域 II 脱空边缘出现顺坡向高拉应力区, 反映了脱空边缘面板裂缝进一步发展的趋势。区域 II 贯穿性裂缝出现后对于区域 I 局部应力影响并不大, 只导致局部高拉应力区

减小, 依据运行期面板检测结果, 可推断区域 I 先出现局部贯穿性裂缝, 区域 II 后出现贯穿性裂缝。

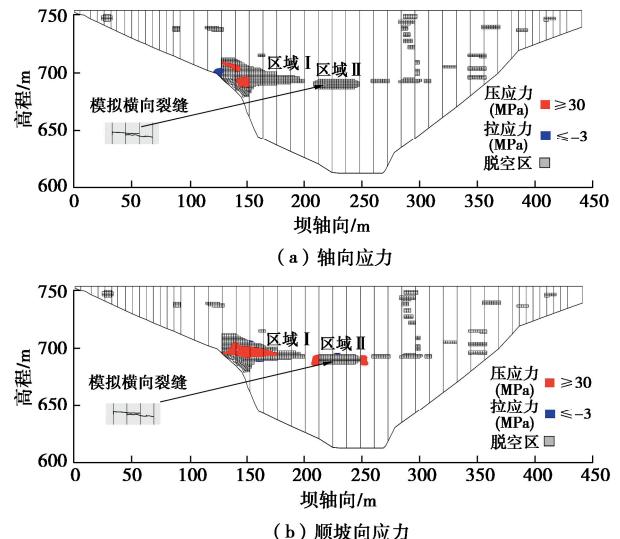
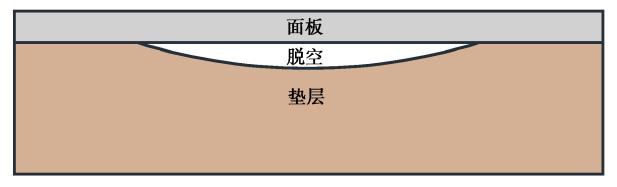


图 18 面板横向裂缝发生后高应力区分布

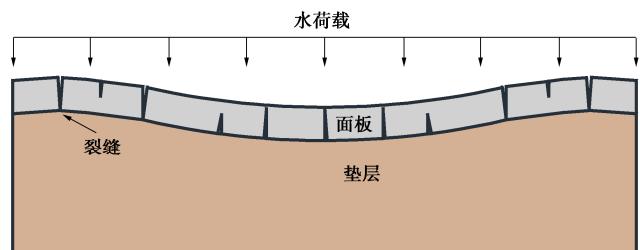
Fig. 18 Distribution of high stress areas after occurrence of transverse crack in slab

### 3.3 面板破坏机理分析

JL 大坝的堆石体变形处于中等偏大的水平, 根据数值模拟结果, 面板压裂风险较高区域位于面板#25、#26、#27 和#28, 高程 720 m 处, 拉裂风险最高区位于岸坡段面板底部, 与现场检测的面板破损模式不相符。通过现场检测结果可知, 面板破损区主要位于#18、#19 面板高程 695.0~703.0 m 处、#25、#26、#27 面板高程 685.0~690.0 处, 且发现该区域面板底部已出现大面积垫层料缺失和掏空导致面板受力状态恶化, 脱空引起面板破坏示意如图 19, 脱空区边缘面板上表面开裂, 脱空区内部面板底部开裂、上表面挤压破坏; 数值反演结果亦表明, 未考虑垫层脱空时该处不存在产生拉压破坏的力学条件。



(a) 面板脱空



(b) 面板开裂

Fig. 19 Schematic diagram of slab cracks caused by gap

垫层料流失的原因初步判定为2013年7月导流洞失稳,水位骤降引起的坝内渗流反压导致止水破坏,并冲蚀和带走垫层料,引起面板受力恶化和逐步破损;后续水库重新蓄水至高水位时,水压力作用下面板破损进一步发展,导致渗漏量急剧增大,此过程中可能存在垫层细料向坝内的流失与面板应力进一步恶化。

## 4 面板修复与运行状况

JL 大坝蓄水初期导流洞已封死,没有放空检修的条件,面板修复水位保持在泄洪洞底板高程 695.0 m。2020 年 9 月 30 日水位降低后发现#18、#19 面板采用的柔性防渗措施已完全失效,拆除后采用 C35 混凝土将水面以上破损区域进行覆盖修补。对#18、#19 面板水上 695.0~703.0 m 范围内集中裂缝、破损程度严重区域斜面浇筑厚度 20 cm 的 C30 混凝土,表面 5 cm 下埋设钢筋网并与插筋相连,并对浇筑区进行了分区以达到适应后期局部变形的目的。水面以上脱空区域,依据检测结果,采用钻孔灌浆修复。#25、#26、#27 水下面板破损采用环氧混凝土浇筑并预留脱空灌浆口,再进行水下脱空部位灌浆,面板修复过程如图 20 所示,面板修复全貌如图 21 所示。

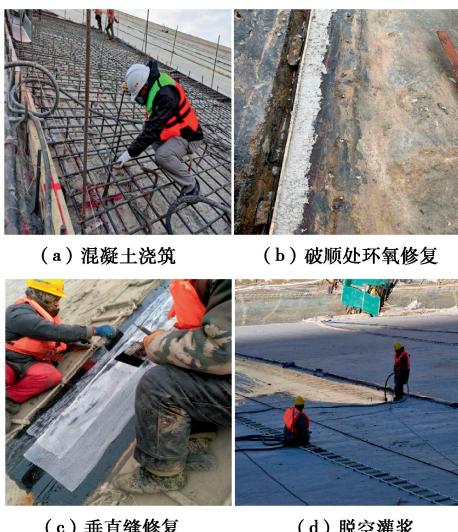


图 20 面板修补过程

Fig. 20 Repair process of the concrete slab



图 21 JL 大坝面板修复面貌

Fig. 21 Repair process of JL CFRD

图 22 为面板修复前后大坝渗漏量监测值,由于仪器改造升级 2019 年渗漏量数据缺失,由大坝渗漏量监测数据可以看出,修复后 1 a 渗漏量较历史最大值减少 80%,修复初期效果较为显著,运行 1 a 后,大坝渗漏量仍有增大的趋势,不排除面板后续破损发生的可能。

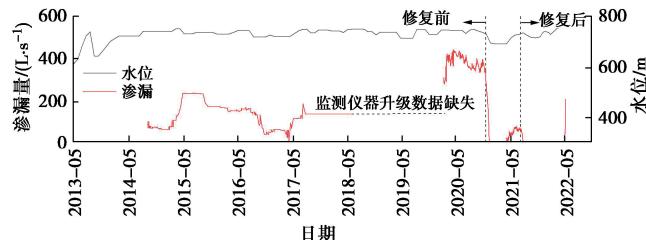


图 22 JL 大坝渗漏监测结果

Fig. 22 Leakage monitoring results of JL CFRD

## 5 结论与建议

本文基于 JL 面板堆石坝监测和检测数据,采用精细化有限元模拟方法,对大坝面板破损机理进行了反演分析研究,主要得到以下 3 点结论。

(1) JL 大坝坝体变形虽处于中等偏上的水平,但如不考虑面板脱空导致其受力不均匀的影响,面板不会发生结构性破损。

(2)根据运行期面板裂缝分布与脱空检测以及数值模拟结果判断,面板上部大范围横向裂缝均非结构性裂缝,而#18、#19 面板高程 695.0~703.0 m 处和#25、#26、#27 面板高程 685.0~690.0 处贯穿性裂缝为受水压力产生的结构性裂缝,其产生原因主要是运行初期水位骤降时内外渗导致止水破坏,随后垫层料中细颗粒被冲蚀带走,使得重新蓄水后在水压力作用下脱空处面板局部应力变形过大,破损区域逐步扩大。

(3) JL 大坝案例给工程技术人员以深刻的启示:面板坝设计和施工时应保证各坝体分区及面板和垫层间的变形协调;应避免运行期水位骤降以防止内外渗导致止水破坏、垫层料细颗粒流失和面板脱空;垫层区、过渡区、堆石区之间应严格满足反滤准则,避免面板开裂后在渗流作用下垫层料细颗粒的流失,造成面板脱空范围的进一步增大,导致面板受力状态恶化。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 魏匡民和黄文斌设计研究内容,吴俊杰提供研究资料,米占宽和王芳提供研究指导,黄文斌完成计算分析,黄文斌、吴俊杰、米占宽、魏匡民和王芳参

与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by WEI Kuangmin and HUANG Wenbin and supervised by MI Zhankuan and WANG Fang. Research materials were provided by WU Junjie. The numerical analyses were conducted by HUANG Wenbin. The manuscript was drafted and revised by HUANG Wenbin, WU Junjie, MI Zhankuan, WEI Kuangmin and WANG Fang. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

## 参考文献:

[1] 张光斗. 混凝土面板碾压堆石坝的设计和施工[J]. 水力发电学报, 1994, 13(1): 53-68. (ZHANG Guangdou. Design and construction of RCC rockfill dam with concrete face slab[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1994, 13(1): 53-68. (in Chinese))

[2] 孔宪京, 徐斌, 邹德高, 等. 混凝土面板坝面板动力损伤有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1594-1600. (KONG Xianjing, XU Bin, ZOU Degao, et al. Finite element dynamic analysis for seismic damage of slabs of concrete faced rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1594-1600. (in Chinese))

[3] 顾淦臣, 杜一鸣, 沈长松. 土石坝工程经验与创新[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. (GU Ganchen, SHU Yiming, SHEN Changsong. Experience and Innovation of Earth-Rock Dam Engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. (in Chinese))

[4] 朱晟. 水布垭面板堆石坝施工与运行性状反演研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊2): 3689-3695. (ZHU Sheng. Back analysis on construction and operation properties of shuibuya concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3689-3695. (in Chinese))

[5] 邓刚, 汪小刚, 温彦锋, 等. 混凝土面板坝面板变形模式与水平向挤压破损研究[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 396-404. (DENG Gang, WANG Xiaogang, WEN Yanfeng, et al. Study on conceptualization method of deformation pattern and horizontal breakage of face slab of concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 396-404. (in Chinese))

[6] 徐泽平, 郭晨. 巴西坎波斯诺沃斯面板堆石坝的经验和教训[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(3): 233-240. (XU Zeping, GUO Chen. Experience and lessons from Campos novos CFRD in Brazil[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007, 5(3): 233-240. (in Chinese))

[7] 陈宗梁. 国外混凝土面板堆石坝面板的裂缝及其补强措施[J]. 水力发电, 1991, 17(7): 67-69. (CHEN Zongliang. Cracks in foreign concrete face rockfill dams and their reinforcement measures[J]. Water Power, 1991, 17(7): 67-69. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 周墨臻, 张丙印, 王伟. 高面板堆石坝软缝接触计算模型及其数值实现[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 2803-2810. (ZHOU Mozhen, ZHANG Bingyin, WANG Wei. Algorithm and simulation methods for the soft longitudinal joint of the concrete faces in high concrete-faced rockfill dams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 2803-2810. (in Chinese))

[10] 邹德高, 陈楷, 刘锁, 等. 非线性比例边界有限元在面板坝分析中的应用[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(3): 11-18. (ZOU Degao, CHEN Kai, LIU Suo, et al. Application of nonlinear scaled boundary polygon element method in analysis of concrete face rockfill dam[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(3): 11-18. (in Chinese))

[11] 魏匡民, 陈生水, 李国英, 等. 位移多点约束法在面板堆石坝精细模拟中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(4): 616-623. (WEI Kuangmin, CHEN Shengshui, LI Guoying, et al. Application of displacement multi-point constraint refinement method in simulation of concrete-faced rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(4): 616-623. (in Chinese))

[12] 魏匡民, 周恒, 米占宽, 等. 面板堆石坝混凝土面板配筋计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(6): 1314-1322. (WEI Kuangmin, ZHOU Heng, MI Zhankuan, et al. Reinforcement calculation of concrete slab in concrete faced rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(6): 1314-1322. (in Chinese))

[13] 沈婷, 李国英. 新疆JBLK水电站工程大坝三维变形计

算分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2022. (SHEN Ting, LI Guoying. Calculation and Analysis of Three-Dimensional Deformation of Dam in Xinjiang JBLK Hydropower Station Project[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2022. (in Chinese))

[14] 朱百里. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990. (ZHU Baili. Computational Soil Mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1990. (in Chinese))

[15] 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 in concrete faced rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1712-1716. (in Chinese))

[16] 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. (GU Ganchen, SHEN Changsong, CEN Weijun. Earthquake Engineering for Earthrock Dams[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese))

[17] 马刚, 常晓林, 周伟, 等. 高堆石坝瞬变-流变参数三维全过程联合反演方法及变形预测[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1889-1895. (MA Gang, CHANG Xiaolin, ZHOU Wei, et al. Integrated inversion of instantaneous and rheological parameters and deformation prediction of high rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1889-1895. (in Chinese))

[18] 温立峰, 柴军瑞, 许增光, 等. 面板堆石坝性状的初步统计分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1312-1320. (WEN Lifeng, CHAI Junrui, XU Zengguang, et al. Preliminary statistical analysis of behavior of concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1312-1320. (in Chinese))

[19] 袁敏, 强晟, 岑威钧, 等. 堆石坝混凝土面板施工期裂缝成因及预防方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(4): 811-827. (YUAN Min, QIANG Sheng, CEN Weijun, et al. Causes and prevention of cracks in concrete slab of rockfill dam during construction[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(4): 811-827. (in Chinese))