

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221148

# 面板堆石坝垂直缝失效后集中渗流特性研究

乔 蓓<sup>1</sup>,江德军<sup>2</sup>,柳玉兰<sup>2</sup>

(1. 成都大学实验室与设备管理处,四川 成都 610106; 2. 国能大渡河流域水电开发有限公司,四川 成都 610000)

**摘要:** 面板坝结构缝是大坝防渗体系的重要组成部分,也是最薄弱环节,其一旦失效对大坝安全影响巨大。以某面板堆石坝为例,运用有限元计算方法,对垂直缝失效位置、缝宽、缝长及垫层区渗透系数等典型特征进行模拟分析,分析了止水失效后渗流场规律及其渗透稳定性。结果表明,单缝失效时,垂直缝位置、缝宽、缝长及垫层渗透系数等与各渗流控制要素呈正相关,其中缝长及垫层渗透系数的相关性最显著;多缝同时失效时,开裂面板处流量可应用单缝失效结果求和计算而得,且结果偏于安全。同时,建议垫层渗透系数宜取 $1 \times 10^{-5}$  m/s 或略小。结果可为类似工程设计、施工提供参考。

**关键词:** 面板堆石坝;垂直缝失效;裂缝;有限元;渗透稳定性

**中图分类号:** TV223

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)04-0123-04

## 1 引言

面板堆石坝结构缝是大坝防渗体系的重要组成部分,尤其是在深覆盖层、高寒及强震等复杂地质条件下,其垂直缝、周边缝与水平缝等止水结构失效后,会出现集中渗流甚至导致渗透破坏。当面板接缝止水出现裂缝,将导致面板坝局部或整体渗透特性改变。王瑞骏等<sup>[1]</sup>用层流等宽运动特性,研究了面板坝极端工况的渗流问题;潘少华等<sup>[2]</sup>结合金川面板坝,采用无厚度平面单元研究止水接缝失效时渗流场规律特性;张嘎等<sup>[3]</sup>研究了非常情况下公伯峡横纵向裂缝对渗流场的影响。本文在系统分析既有研究面板坝裂缝成因及

特性的基础上,以某面板坝为例,考虑实际工程中开裂位置及裂缝宽度等因素,采用数学解析算法估算裂缝处材料渗透系数,运用有限元对面板坝垂直缝失效位置、缝宽、缝长及垫层区渗透系数等典型特征进行模拟分析,对止水失效后渗流场规律及其渗透稳定性展开研究,分析不同垂直缝失效对坝体水头等值线分布、面板开裂处渗流量及各关键部位最大水力坡降的影响规律,可为类似工程提供参考。

## 2 面板坝裂缝成因分析

面板堆石坝裂缝一般分为结构性和非结构性裂缝。本文统计了典型面板坝开裂案例,见表1。

表1 面板坝裂缝案例统计

Tab. 1 Crack cases statistical of face dam

坝名	坝高/m	开裂位置	裂缝宽度/mm	裂缝长度/m	开裂原因
白溪水库	124.4	面板中上部	0.10~0.60		堆石体变形
玛热勒苏	79.0	面板中部	最大0.46	总长2 593.50	天气温度高、砼水化热
公伯峡	132.2	水面以上	最大0.60	裂缝最大长12.00	堆石体变形、温度应力
水布垭	233.0	面板底部及顶部	最大0.63	总长3 113.59	堆石体变形、温度及干缩应力
天生桥一级	178.0				堆石体变形、温度及干缩应力
夹岩	154.0	面板下部	最大0.14	503.01	浇筑时水化热、环境温度
阿尔塔什	164.8		0.10~0.30	1 414.20	
红星	46.5	面板中下部	0.20~1.00	600.85	塌落度大、养护差、碾压施工不合理
小井沟	87.6	坝体中部挤压段	0.06~0.94	1 915.50	地震、水化热、温降、沉降等
十三陵抽水蓄能		岩石多于坝坡段,弯段多于直线段	0.20~0.40	6 444.40	温度应力

收稿日期: 2022-05-30,修回日期: 2022-07-08

基金项目: 四川省科技计划重点研发项目(2021YFG0100)

作者简介: 乔蓓(1988-),女,硕士研究生,研究方向为岩土工程及水工结构数值分析,E-mail:beiqiaonuannuan@163.com

通讯作者: 江德军(1988-),男,工程师,研究方向为岩土工程数值仿真与大坝安全管理,E-mail:jiangdejunxaut@163.com

由表 1 可知,接缝作为面板坝防渗体系中的薄弱环节,出现开裂等情况较多。从统计结果看,目前我国已建成投运的超百米级面板坝中,有近 12.5% 存在渗漏问题<sup>[4]</sup>。开裂已成为影响面板坝安全稳定运行的关键因素。同时,裂缝位置可分布在面板上、中、下部,数量多且分布不均匀,缝宽一般均在毫米量级,缝长从数米至数千米均有发生。

### 3 裂缝渗透系数解析算法

面板为混凝土结构,其渗透系数约为  $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 。由表 1 可知,面板开裂基本在毫米量级,远小于面板厚度(即渗径)。基于传统等效连续介质法,可视裂缝为一个平行板状的窄缝,即缝宽沿同一方向基本相同,裂缝表面光滑。因此,裂缝单宽流量  $q$  计算公式<sup>[5]</sup>为:

$$q = b v_b = g b^3 J / (12 \nu) \quad (1)$$

式中,  $b$ 、 $v_b$ 、 $\nu$ 、 $J$  分别为缝宽、裂缝位置流速、运动粘滞系数、水力坡降。

结合达西定理,得出裂缝处渗透系数  $k$  为:

$$k = g b^2 / (12 \nu) \quad (2)$$

按实体单元研究失效缝,失效缝渗透系数参考式(2)进行估算,综合考虑裂缝处有细颗粒填充及垫层的反滤作用,本文失效缝渗透系数取值为  $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,为垫层料的 100 倍。

## 4 数值模型与方案

### 4.1 工程概况及参数

某混凝土面板坝最大坝高 122 m,坝顶宽 10 m,上游坝坡坡比为 1 : 1.4,下游坝坡综合坡比为 1 : 1.79,上游正常蓄水位为 3 992.0 m,下游河床水位为 3 897.92 m,大坝典型剖面图及分区见图 1。大坝分区共 13 种材料,其渗透系数根据工程经验并参考其他工程<sup>[6]</sup>确定,见表 2。

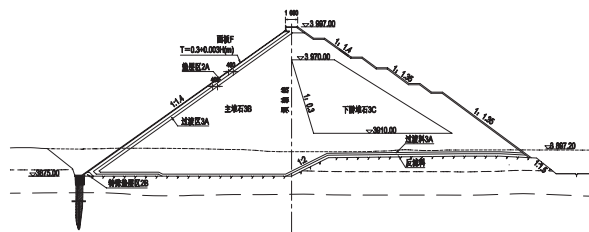


图 1 面板坝典型剖面图

Fig. 1 Typical profile map of face dam

### 4.2 数值模型

考虑裂缝宽度均在毫米级,建立局部有限元模型,横河向( $X$ 轴)指向左岸为正,顺河向( $Z$ 轴)指向下游为正,竖向( $Y$ 轴)向上为正。局部模

表 2 主要分区材料参数

Tab. 2 Main material parameter

分区	渗透系数	临界坡降	分区	渗透系数	临界坡降
面板	$1.0 \times 10^{-7}$	200	覆盖层	$5.0 \times 10^{-2}$	0.12~0.15
垫层	$1.0 \times 10^{-3}$	70	>10 Lu 基岩	$1.0 \times 10^{-3}$	
特殊垫层	$1.0 \times 10^{-4}$		5~10 Lu 基岩	$1.0 \times 10^{-4}$	
过渡层	$1.0 \times 10^{-1}$	15	3~5 Lu 基岩	$6.0 \times 10^{-5}$	
主堆石体	$1.0 \times 10^{-1}$		<3 Lu 基岩	$1.0 \times 10^{-5}$	
下游堆石	$1.0 \times 10^{-1}$	0.19	防渗帷幕	$5.0 \times 10^{-5}$	30~35
反滤层	$1.0 \times 10^{-3}$				

型范围:① $X$ 向。取 4 块标准剖面面板宽度,总长 48 m;② $Z$ 向。分别沿趾板和下游坡脚向上游和下游延伸 200 m;③ $Y$ 向。沿帷幕底部下延 150 m。模型左右两侧及底部施加不透水边界,上游施加 3 992.00 m 水头,下游施加 3 897.92 m 水头。模型网格采用六面体等参单元网格,控制网格长宽比为 2 : 1 内。有限元模型网格见图 2。实际节点数、网格数分别为 204 120、190 788 个。

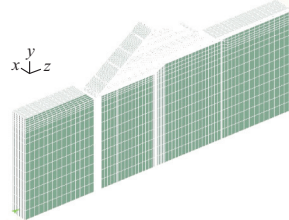


图 2 有限元模型网格图

Fig. 2 Mesh figure of finite element model

### 4.3 失效缝特征

结合表 1 统计结果,选取垂直失效缝长为 5 m,缝宽分别取 10、20、30、40、50 mm,均自坝基高程起算,对应位置为: # 1 缝为坝基以上 5~10 m 范围; # 2 缝为坝基以上 25~30 m 范围; # 3 缝为坝基以上 50~55 m 范围; # 4 缝为坝基以上 75~80 m 范围; # 5 缝为坝基以上 100~105 m 范围。拟定垂直缝失效方案为 # 1~# 5 缝分别单独失效、# 1~# 5 缝同时失效、# 1~# 5 缝以上分别通长失效,垂直缝通长失效下垫层渗透系数分别为  $5 \times 10^{-7}$ 、 $2 \times 10^{-6}$ 、 $1 \times 10^{-5}$ 、 $5 \times 10^{-5}$ 、 $2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。

## 5 面板堆石坝垂直缝失效后集中渗流特性分析

### 5.1 水头分布情况分析

图 3 为局部水头分布。由图 3 可知,垂直缝失效会对垫层区水头分布产生一定影响,水头等势面向下游移动。单缝失效时,裂缝位置对水头等势面影响不大;随着缝宽的增加,水头等势面影响范围小幅扩大;单缝失效对渗流场的影响范围基本在 5 m 左右,当两失效缝相距较大时,其渗流场交叉影响很小。可见,对于单缝失效情况,大

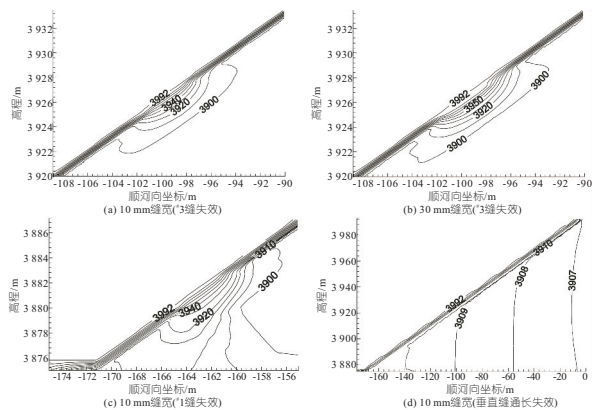


图 3 局部水头分布

Fig. 3 Local water head distribution

坝防渗控制体系可正常起到防渗作用。垂直缝通长失效时,随着缝宽的增加,水头等势面影响范围有小幅扩大;相比单缝失效,垂直缝通长失效时面板无法发挥防渗作用,导致渗漏量较大,坝体内产生“雍水”现象,水头等势面下移到堆石体中,使堆石体达到饱和。

### 5.2 渗流量变化分析

(1)缝位置影响。单缝失效时失效缝流量与缝位置关系曲线。由图 4(a)可看出,当缝宽一定时,通过裂缝处流量会随缝位置的升高而减少(≠1 缝除外),平均减少比例均在 9% 以内,而≠1 缝虽然出现在大坝下部,压力水头最大,但此处渗流量最小,主要是由于特殊垫层区大大增加了其渗透路径所致。

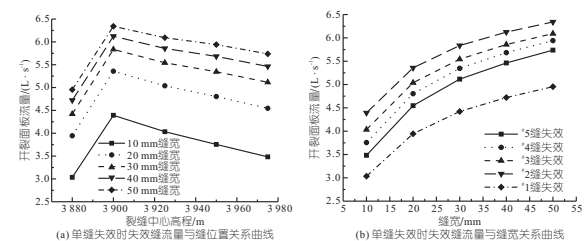


图 4 单缝失效时失效缝流量与缝位置、缝宽关系曲线

Fig. 4 Relation curves of flow and seam position, slit width when single seam fails

(2)缝宽影响。单缝失效时失效缝流量与缝宽关系曲线。由图 4(b)可看出,当裂缝位置一定时,裂缝处流量随缝宽增大而增大。仅≠3 缝失效时,缝宽从 10 mm 加大至 20 mm 时,流量增加梯度为 0.11,20 mm 到 30 mm 流量增加梯度为 0.051,30 mm 到 50 mm 流量增加梯度为 0.027 5,所以增长过程并非线性增长,而是逐步递减,这说明渗流量受缝边缘边界效应影响随缝宽增大而越来越弱。

(3)缝长影响。图 5(a)为失效缝流量与缝长关系曲线。由图 5(a)可看出,缝宽一定时,裂缝处

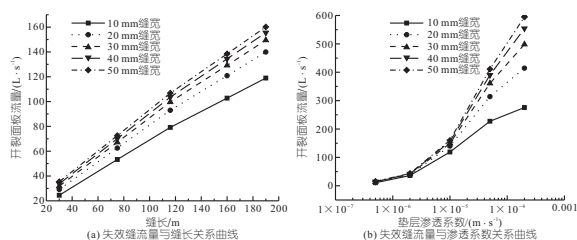


图 5 失效缝流量与缝长、渗透系数关系曲线

Fig. 5 Relation curves of flow and seam length, permeability coefficient when vertical seam all fails

流量与缝长呈正相关,缝长对集中渗流场影响较大。

(4)垂直缝通长失效极端情况下垫层渗透系数影响。图 5(b)为失效缝流量与渗透系数关系曲线。由图 5(b)可看出,开裂面板处流量与垫层渗透系数呈显著非线性正相关,缝宽、渗流量的影响效应与垫层渗透系数也表现为正相关。因此,垫层渗透系数是敏感性因子,且垫层作为面板坝的第二控渗体系,要同时满足防渗和排水要求,必须对垫层的设计和施工高度重视。

(5)边界效应影响。各裂缝处渗流量见表 3。由表 3 可看出,五缝同时失效时各开裂面板处流量略小于单缝失效,但受渗流场边界效应的影响,并非简单叠加,所以在实际工程中利用单缝失效流量结果简单求和推求对应位置多缝失效渗流量具有借鉴性,且结果偏于保守。

表 3 各裂缝处渗流量

Tab. 3 Seepage flow through fracture in every failure condition

裂缝位置	失效方案	10 mm	30 mm	50 mm
≠1 缝	五缝同时失效/≠1 缝失效	2.99/3.03	4.33/4.42	4.83/4.95
≠2 缝	五缝同时失效/≠2 缝失效	4.34/4.39	6.02/5.84	6.23/6.34
≠3 缝	五缝同时失效/≠3 缝失效	3.98/4.03	5.44/5.54	5.97/6.09
≠4 缝	五缝同时失效/≠4 缝失效	3.70/3.76	5.25/5.35	5.82/5.94
≠5 缝	五缝同时失效/≠5 缝失效	3.43/3.48	5.01/5.11	5.61/5.74

### 5.3 水力坡降变化分析

单缝失效、垂直缝通长失效时各关键部位最大水力坡降见表 4。

表 4 单缝失效、垂直缝通长失效时各关键部位最大水力坡降

Tab. 4 Maximum hydraulic gradient of each key position when single joint failure and vertical seam all fails

缝宽 /mm	部位	失效部位			垫层渗透系数/( $m \cdot s^{-1}$ )		
		≠1 缝	≠3 缝	≠5 缝	$5.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-4}$
10	垫层	17.990	25.070	22.230	33.46	25.68	3.27
		24.290	33.620	30.680	39.03	31.71	5.88
		26.080	34.940	33.260	40.22	32.93	8.06
10	过渡层	0.120	0.090	0.080	0.03	0.14	0.28
		0.160	0.120	0.110	0.04	0.17	0.51
		0.180	0.130	0.120	0.05	0.19	0.61
10	渗流出口	0.008	0.009	0.008	0.01	0.12	0.22
		0.009	0.010	0.010	0.01	0.15	0.42
		0.010	0.012	0.011	0.02	0.16	0.45
10	防渗帷幕	32.910	32.860	32.890	29.87	27.89	24.32
		32.760	32.710	32.730	29.63	27.36	16.69
		32.570	32.550	32.590	29.51	27.02	13.39

由表 4 可知:①单缝失效时缝位置影响。垫层、过渡层及渗流出口处最大水力坡降均随缝位置的升高而降低,但 $\#1$ 缝由于受特殊垫层区影响结果恰好相反,也正是由于特殊垫层区周围集中渗流场的影响, $\#1$ 缝失效时过渡层最大水力坡降增幅较大;单缝失效时,垫层区最大水力坡降约为 35,而过渡层仅约为 0.17,说明垫层起到了很好的渗控作用;单缝失效时帷幕处最大水力坡降随裂缝位置的升高而小幅增大( $\#1$ 缝除外),主要是由于单缝失效时流量较小导致帷幕下游浸润面变幅小,此时在渗径不变的情况下,上游侧压力水头随缝位置的升高而较大幅度减少,致使帷幕上下游水头差减小;参考表 2 中的临界坡降,各关键部位最大水力坡降均在允许范围内,均满足要求。②单缝失效时缝宽影响。缝长及缝位置一定时,垫层、过渡层及渗流出口处最大水力坡降随缝宽单调递增,且增长梯度逐渐减小,当缝宽增加到一个临界值时,最大水力坡降将保持不变,但缝宽增大会导致渗流量增大;坡降大小并不受缝宽影响,所以各关键部位坡降值的差异是模型边界效应所致,且边界效应随缝宽的增大而减弱;缝宽对防渗帷幕处的坡降影响很小,单位缝宽引起帷幕坡降变化梯度约为 0.01。③垂直缝通长失效极端情况下垫层渗透系数影响。垂直缝通长失效时各关键部位最大水力坡降相对于单缝失效时变化很大,且随垫层渗透系数的变化发生大幅变化,说明缝长及垫层渗透系数是集中渗流的敏感影响因子;渗流出口处水力坡降随垫层渗透系数的增大呈显著的非线性正增长,当垫层渗透系数超过  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  时,渗流出口处最大渗透坡降基本超出覆盖层临近坡降 0.15 范围,从而导致大坝发生渗透破坏,因此本文垫层渗透系数取值应在  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  范围内;对于防渗帷幕,当垫层渗透系数大于  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  时,其坡降随垫层渗透系数的增大而大幅减小,当小于  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  时,其渗透坡降随垫层渗透系数的减小小幅增大,此时,垫层渗透系数为  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  是一个临界点。

## 6 结论

a. 单缝失效时水头等势线分布基本相似,通过开裂面板处渗流量及各关键部位最大水力坡降变幅不大,关键部位水力坡降未超过允许坡降,大坝防渗体系可发挥正常作用。

b. 垫层渗透系数及缝长对于各要素变化最敏感,缝宽和裂缝位置影响较小;裂缝处流量及关键部位水力坡降均随裂缝位置的降低而增大,应更加重视面板下部开裂情况。

c. 多缝同时失效时,开裂面板处流量可应用单缝失效结果求和计算而得,且结果偏于安全。

d. 当垫层渗透系数超过  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  时,渗流出口处最大渗透坡降基本超出覆盖层临近坡降 0.15,导致大坝发生渗透破坏,所以垫层作为大坝第二道防渗体系,其渗透系数的选取至关重要,建议垫层渗透系数宜取  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  或略小。

e. 应警惕施工期与运行期面板失效缝过长叠加垫层渗透系数设计不合理的情况,重视面板与接缝止水的设计。

### 参考文献:

- [1] 王瑞骏,吕海东,李炎隆. 堆石坝混凝土面板裂缝的渗流形态及计算模型[J]. 水资源与水工程学报, 2008,19(1):15-18.
- [2] 潘少华,毛新莹,白正雄. 面板坝垂直缝及止水失效渗流场有限元模拟[J]. 岩土力学, 2008,29(增刊1):145-148,154.
- [3] 张嘎,张建民,洪镭. 面板堆石坝面板出现裂缝工况下的渗流分析[J]. 水利学报, 2005,36(4):420-425.
- [4] 田金章,向友国,谭界雄. 综合检测技术在面板堆石坝渗漏检测中的应用[J]. 人民长江, 2018,49(18):103-107.
- [5] 王瑞骏,吕海东,陆丽. 混凝土面板堆石坝面板接缝的渗流计算模型研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006,34(9):171-175.
- [6] 保华富,谢正明,忧蓉. 垫层料的压实性及渗流稳定性试验研究[J]. 云南水力发电, 2008(3):76-81.

## Study on Concentrated Seepage of Face Rockfill Dam After Vertical Joint Failure

QIAO Bei<sup>1</sup>, JIANG De-jun<sup>2</sup>, LIU Yu-lan<sup>2</sup>

(1. Laboratory and Equipment Management Department, Chengdu University, Chengdu 610106, China;

2. Dadu River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

**Abstract:** The structural joints of face rockfill dam are the most important part and the weakest link of the seepage control system of dams. Taking a face rockfill dam as an example, the position, width, length of vertical failure joints and permeability coefficient of cushion area were simulated by finite element method. And then the seepage field law and permeability stability after water stop failure were studied. The results show that in the case of single fracture failure, the position, width, length of fracture and permeability coefficient of cushion are positively correlated with control factors of seepage flow, and the length of vertical fracture and permeability coefficient of cushion are the most significant. When multiple joints fail simultaneously, the seepage flow at cracked panel can be calculated by summing the failure results of single joints, and the results are safety. At the same time, it is suggested that the permeability coefficient of cushion should be  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  or slightly smaller. The results can provide reference for the design and construction of similar projects.

**Key words:** face rockfill dam; vertical joint failure; cracks; finite element; permeability stability