

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.04.004

坝基廊道开裂对心墙坝渗流特性的影响

朱瑞恒^{1,2}, 岑威钧¹, 薛 阳³, 赵 琳³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 三峡集团上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200080;
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: 以某 110 m 高的沥青混凝土心墙堆石坝为例, 采用有限元数值模拟方法对大坝开展三维渗流分析, 研究心墙底部廊道出现不同深度、长度以及位置的裂缝对大坝渗流特性的影响。结果表明: 廊道浅表裂缝对大坝渗流场基本无影响, 但当廊道顶部出现贯穿性裂缝时, 附近区域渗流场的分布规律显著改变, 且渗流量加大; 而廊道底部贯穿性裂缝对渗流量影响相对较小; 当廊道产生多条贯穿性裂缝时, 渗流量增加明显, 同时会引起上游侧地层和过渡区渗透坡降的增大, 需引起重视。

关键词: 心墙堆石坝; 廊道裂缝; 渗流特性; 有限元分析

中图分类号: TV641.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2024)04-0022-07

Influence analysis of dam foundation gallery cracks on seepage characteristics of core dam

ZHU Ruiheng^{1,2}, CEN Weijun¹, XUE Yang³, ZHAO Lin³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Three Gorges Group Shanghai Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200080, China;
3. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: A three-dimensional seepage field analysis of the dam was carried out using the finite element numerical simulation, by taking the example of a 110 m-high asphalt concrete core rockfill dam. The research focuses on investigating the influence mechanism of different depths, lengths, and positions of cracks in the bottom gallery of the concrete faceplate dam on the dam's seepage characteristics. The simulation results reveal that superficial cracks in gallery have little effect on the seepage field of dam, while the emergence of penetrating cracks at the top of the gallery significantly alters the distribution of the nearby seepage field and substantially increases the dam's seepage volume. On the other hand, cracks at the bottom of the gallery have a relatively minor impact on the seepage volume. In regions where the tensile stress in the gallery exceeds the concrete's tensile strength, multiple penetrating cracks tend to concentrate, leading to a rapid surge in seepage volume. This also triggers an increase in the permeability gradient within the strata and the transitional zone I, warranting close attention.

Key words: core rockfill dam; gallery cracks; seepage characteristics; finite element analysis

高心墙堆石坝工程中, 心墙底部往往设有混凝土廊道, 该廊道不仅具有连接作用, 还兼具灌浆和排水等功能。廊道顶部支撑着防渗心墙, 下部受到防渗墙顶托作用(覆盖层上心墙坝河床段), 在两岸处深入基岩, 周围受岩土体约束作用。由于廊道与周围材料性质差异较大, 在周围约束、水压力和围岩压力的共同作用下, 易产生应力集中与不均匀沉降, 从而产生开裂破坏, 降低整个防渗系统的抗渗性能, 进而可能危及整个工程的防渗安全^[1-2]。瀑布沟心墙坝^[3-4]左岸廊道产生与坝轴线呈 45°角贯穿拱顶的裂缝, 左岸渗流量为 40 ~ 50 L/min; 狮子坪心墙坝^[5]廊道底板出现总长超 80 m 的纵向贯穿性裂缝, 裂缝深度由河床中央向河两岸逐渐增大, 局部出现渗水; 黄金坪心墙坝^[6]廊道内部顶拱及底板存在 40 多条裂缝, 底板多为纵向贯穿裂缝, 大部分裂缝处存在渗水现象。诸多此类工程实例表明, 高心墙坝底部廊道较为普遍地存在不同大小和位置的

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3090103)

作者简介: 朱瑞恒(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水工渗流分析与控制研究。E-mail: zrhnb66@hhu.edu.cn

通信作者: 岑威钧(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事水工渗流分析与控制及土石坝抗震研究。E-mail: hhucwj@163.com

引用本文: 朱瑞恒, 岑威钧, 赵琳, 等. 坝基廊道开裂对心墙坝渗流特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 22-28.

ZHU Ruiheng, CEN Weijun, XUE Yang, et al. Influence analysis of dam foundation gallery cracks on seepage characteristics of core dam [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(4): 22-28.

表面裂缝和贯穿性裂缝,引发不同程度的渗漏问题。因此,研究廊道裂缝对大坝渗流特性的影响,对确保工程的长期稳定运行具有重要意义。

为了深入探究廊道裂缝对大坝渗流特性的影响,以某沥青混凝土心墙堆石坝(坝顶高程 787.00 m,最大坝高 110.00 m,坝顶宽度 10.00 m)为例,借鉴岑威钧等^[7-14]研究面板坝、心墙坝以及隧洞等类似工程防渗体系开裂或缺陷分析的方法,针对该沥青混凝土心墙堆石坝工程,假设出现瀑布沟、狮子坪及黄金坪等工程类似的廊道裂缝,研究裂缝深度、大小和位置对大坝渗流场的水头分布、渗流量、渗透坡降等渗流要素的影响规律,以期能为大坝防渗设计和安全运行提供理论指导,同时也为类似工程渗流特性研究提供参考。

1 三维有限元模型与计算参数

由于廊道裂缝往往出现在拉应力超过混凝土抗拉强度区域^[15-16],且出现的裂缝多呈水平通向分布^[17]。为了较好地模拟廊道裂缝,有限元模型中将廊道单元沿径向厚度方向等分为 4 份,在有限元网格剖分时把裂缝简化为 0.2 m×2.0 m 的长条缝状单元,并将其预设于 680、700、720、740、760 m 等不同的高程位置。图 1(a) 为大坝三维有限元计算网格,其中节点数为 87 124,单元数为 87 460。图 1(b) 和(c) 为廊道裂缝预设位置和加密剖分后的廊道示意图。

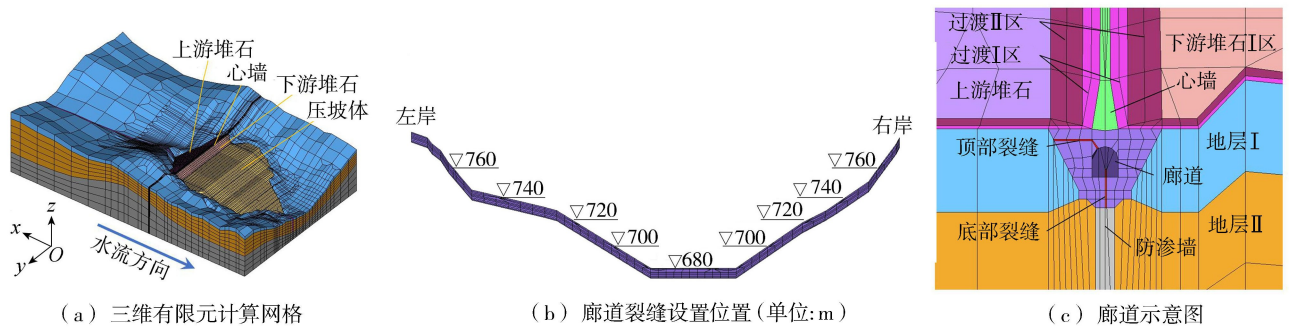


图 1 沥青混凝土心墙堆石坝模型

Fig. 1 Model of asphalt concrete core rockfill dam

采用直接赋予裂缝单元参数法模拟廊道开裂时的渗流状态。在有限元计算模型中,侧面及底部设为不透水边界,而上游坝面和地基施加 780.0 m 水头边界条件,下游坝面及地基设为渗流逸出边界。

针对不同材料分区设置不同的渗透系数,其中廊道混凝土渗透系数为 1.00×10^{-7} cm/s,基于等效处理方法^[18],将 0.2 m×2.0 m 的长条缝状单元等效为 0.02 m×2.0 m 为基准的廊道裂缝,将廊道裂缝假定等高渗透系数($k=1.50\times10^{-1}$ cm/s)的等效连续渗透介质;弱透水层和相对不透水层渗透系数分别取 7.5×10^{-5} cm/s 和 1.0×10^{-5} cm/s。其他计算参数见表 1。

2 廊道完好时大坝渗流场特性

图 2 给出了廊道完好时大坝及廊道附近的等水头线分布(图中红线为浸润线)。由图 2 可知,在沥青混凝土心墙、廊道、防渗墙及帷幕共同作用下,防渗作用显著,有效削减了水头。在心墙上游和下游出现了浸润面突降现象,防渗墙前后水头降低了 116.2 m,占总水头的 87.25%。在廊道保持完好时,坝体各分区和坝基地层的最大渗透坡降均小于相应的允许渗透坡降,大坝渗流量为 53.02 L/s。因此,廊道完好时坝体和坝基的渗透稳定性均能够满足要求,大坝渗流量较小。

3 廊道开裂对大坝渗流场的影响

3.1 模拟方案

为了全面分析两种常见廊道裂缝类型(顶部、底部裂缝)对大坝渗流场的影响,从裂缝深度、长度、位置等方面构建计算方案。在分析裂缝深度对渗流场影响时,假设廊道裂缝基准尺寸为 0.02 m×2.0 m,设置不同

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameter		
材料	渗透系数/(cm/s)	允许坡降
过渡Ⅰ区	5×10^{-3}	
过渡Ⅱ区	3.95×10^{-2}	0.23
堆石Ⅰ、Ⅱ区	1.00×10^{-1}	0.50
堆石Ⅲ区	2.01×10^{-4}	1.12
弃渣	1.78×10^{-5}	2.30
沥青心墙	5.93×10^{-9}	
防渗墙	1×10^{-7}	80
帷幕灌浆	1×10^{-5}	12~20
地层Ⅰ	1×10^{-4}	
地层Ⅱ	7.5×10^{-5}	
地层Ⅲ	1×10^{-5}	

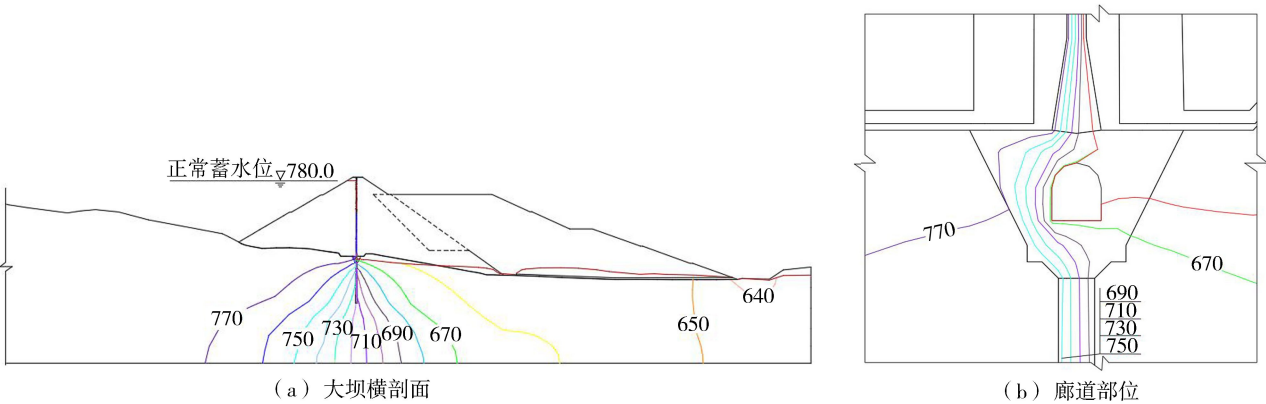


图 2 廊道完好条件下坝体典型断面等水头线分布(单位:m)

Fig. 2 Distribution of typical cross-section potentials of dam body in intact conditions of gallery(unit:m)

裂缝深度百分比(0%、25%、50%、75%和100%);在分析贯穿性裂缝(裂缝深度为100%)长度对坝体渗流影响时,裂缝长分别设为2、4、6、8 m;在分析不同位置裂缝对坝体渗流影响时,设置了5种廊道裂缝高程,即680、700、720、740、760 m,并将岸坡段680 m与河床段680 m廊道裂缝进行对比分析。

3.2 裂缝深度的影响

由图3可知,在未出现贯穿性裂缝之前,廊道顶部的渗透坡降随着裂缝深度的增加而略微增大。但周围地层、防渗墙以及灌浆帷幕等的渗透坡降、坝体渗流量以及廊道后浸润线高度变化微小。因此,当裂缝未贯穿时,廊道上游面最大水头聚集在裂缝处,水头会集中消散于剩余厚度的廊道混凝土上,不会对坝体造成集中渗漏影响。而一旦形成贯穿性裂缝,水流由上游侧过渡Ⅰ区以及地层经裂缝涌入廊道,形成集中渗流通道,导致廊道上游侧过渡Ⅰ区以及地层水力梯度显著增加。例如图3(a)中河床段680 m位置的裂缝,坝体的渗流量从53.02 L/s增大至55.57 L/s,同时过渡Ⅰ区渗透坡降从0.18增大到0.50,上游侧周围地层的渗透坡降从7.06增大到23.38。由此可见,廊道裂缝是否贯穿对大坝渗流安全性有显著影响。

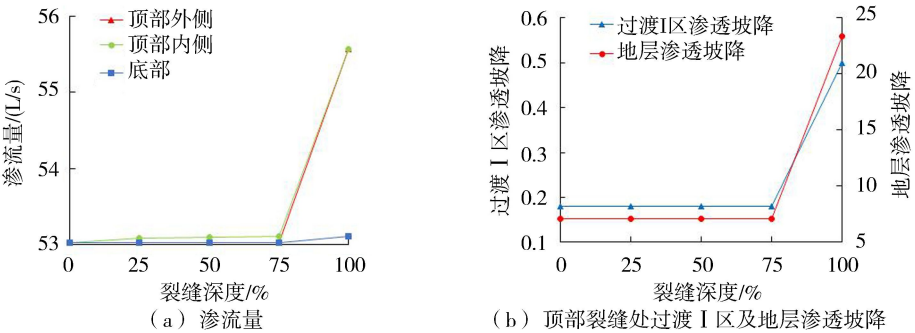


图 3 河床段 680 m 高程处廊道逐层开裂时大坝渗流要素变化规律

Fig. 3 Changing law of seepage elements in dam with galleries cracking layer by layer at 680 m elevation

图4为河床段680 m高程处廊道产生贯穿性裂缝时等水头线分布(图中红色加粗部分为裂缝,红线为浸润线)。由图4(a)可知,顶部裂缝贯通后,水流从裂缝处进入廊道,等水头线分布呈下垂的兜状,浸润线在裂缝处断开。随着廊道底部裂缝深度的开展,等水头线聚集在裂缝上游处,浸润线经裂缝处下垂的深度逐步加大,如图4(b)所示。当廊道底部产生贯穿性裂缝时,经心墙及廊道削弱后的剩余水头,直接作用于裂缝后的防渗墙及帷幕顶部,致使防渗墙和帷幕处的渗透坡降加大。相较于顶部贯穿性裂缝,廊道底部裂缝对坝体及坝基其他部位渗透坡降和渗流量影响较小,但对防渗墙和帷幕影响较大。

3.3 裂缝长度的影响

由图5可知,随着廊道顶部沿坝轴线裂缝的长度增大,通过坝轴线断面的渗流量逐步增大,同时,过渡Ⅰ区以及裂缝附近地层的渗透坡降也随之逐步增大,但防渗墙渗透坡降减小。裂缝长度为2、4、6、8 m情况下,坝轴线断面通过的渗流量与廊道完好时相比分别增大了4.68%、7.32%、8.65%、10.72%,廊道处渗流量分别增大了2.55、3.88、4.58、5.68 L/s;过渡Ⅰ区渗透坡降分别增大了177.76%、300.00%、361.10%、

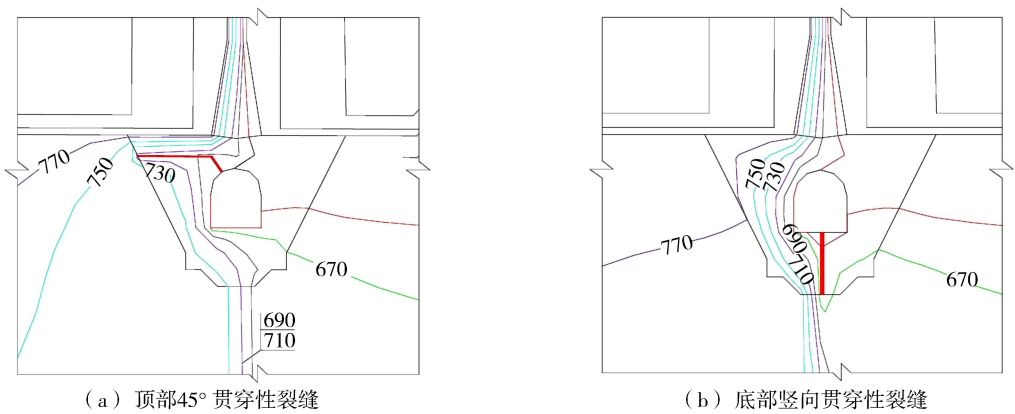


图 4 河床段 680 m 高程处廊道产生贯穿性裂缝时等水头线分布(单位:m)

Fig.4 Distribution of isopotential line during gallery penetration cracking in riverbed section at 680 m elevation(unit:m)

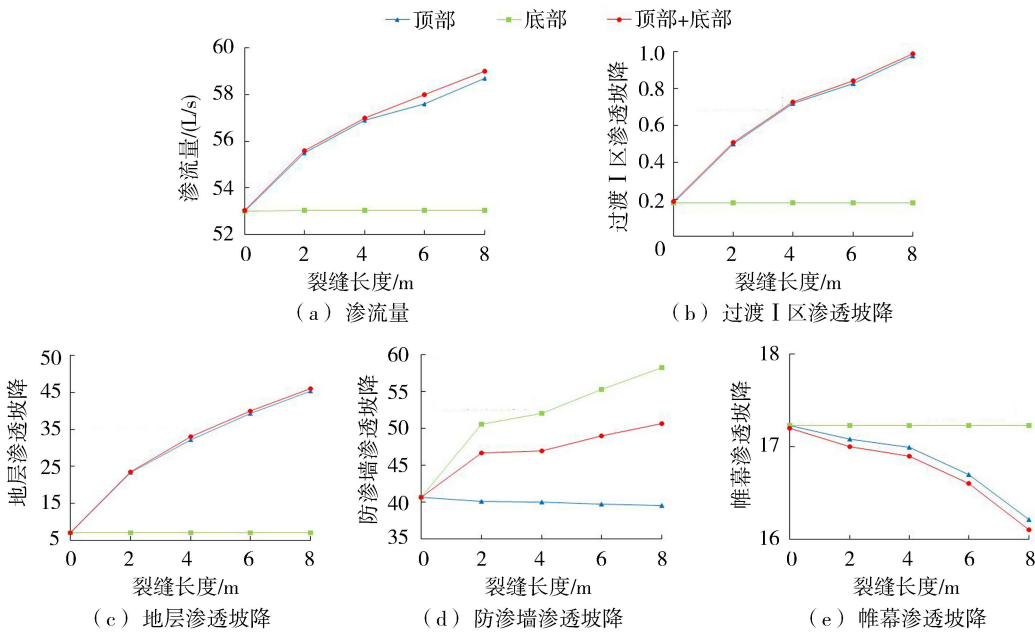


图 5 河床段廊道产生不同长度贯穿性裂缝时大坝渗流要素变化规律

Fig.5 Changing law of seepage elements in dam under different lengths of penetration cracks in riverbed galleries

444.44%,地层渗透坡降分别增大了231.16%、356.94%、457.51%、541.36%。这是由于部分渗透水流会经由裂缝进入廊道,随着裂缝长度增大,涌入廊道的水流量加大,受影响的上游侧过渡I区及地层岩土体范围加大,导致渗透坡降进一步加大;而经过防渗墙和帷幕水流量减小,防渗墙和帷幕的渗透坡降逐步减小。

相较于廊道顶部完全开裂,廊道底部贯穿性裂缝随着沿坝轴线开裂尺寸的增大,通过坝轴线断面的渗流量增加微小,防渗墙顶部渗透坡降逐步增大。裂缝长度为2、4、6、8 m 情况下,较廊道未开裂时防渗墙渗透坡降分别增大了24.33%、27.94%、35.85%、43.25%,但坝体及坝基各部位渗透坡降受到的影响相对较小。这是因为随着裂缝尺寸加大,直接作用于裂缝后的防渗墙及帷幕顶部的剩余水头加大,致使防渗墙和帷幕处的渗透坡降加大。

相较于廊道顶部完全开裂,当河床段廊道顶部和底部同时存在裂缝时,随着裂缝尺寸的增大,由于底部裂缝对渗流量影响较小,其渗流量的变化值与顶部开裂情况几乎相同,防渗墙顶部渗透坡降逐步增大,但对比底部完全开裂时又略微减小。这是由于进入廊道及以下防渗墙、帷幕的水流部分涌入廊道,部分经廊道削弱后作用在防渗墙及帷幕之上。因此,当顶部底部同时开裂时,防渗墙、帷幕顶部渗透坡降相较于底部开裂时略有减小,而相较于顶部开裂时增大。

3.4 裂缝位置的影响

由图6和图7可知,当河床段廊道底部产生裂缝时,渗透坡降的增大主要发生在防渗墙顶部。两岸段廊道底部仅有帷幕的作用,因此相较于河床段,底部裂缝渗流量会稍微增大,并且坡降的增大主要发生在帷幕顶部。尽管在两岸680 m高程处存在裂缝,但由于距离河床段的防渗墙较近,因此其对防渗墙的影响较大。同高程处左、右岸裂缝相较于河床段裂缝,通过坝轴线的渗流量分别增大了6.68%、3.45%,廊道处渗流量增大了3.54、1.83 L/s。此外,随着高程的增加,由于水头作用的减小,渗流量和渗透坡降均逐渐减小。以左岸为例,当顶部+底部贯穿性裂缝分别出现在680、700、720、740、760 m高程时,较廊道完好情况,通过坝轴线渗流量分别增大了6.68%、5.89%、4.55%、3.54%、1.23%,廊道处渗流量增大了3.54、3.13、2.41、1.88、0.55 L/s,过渡Ⅰ区最大渗透坡降分别增大了294.44%、238.89%、161.11%、77.78%、61.11%,地层最大渗

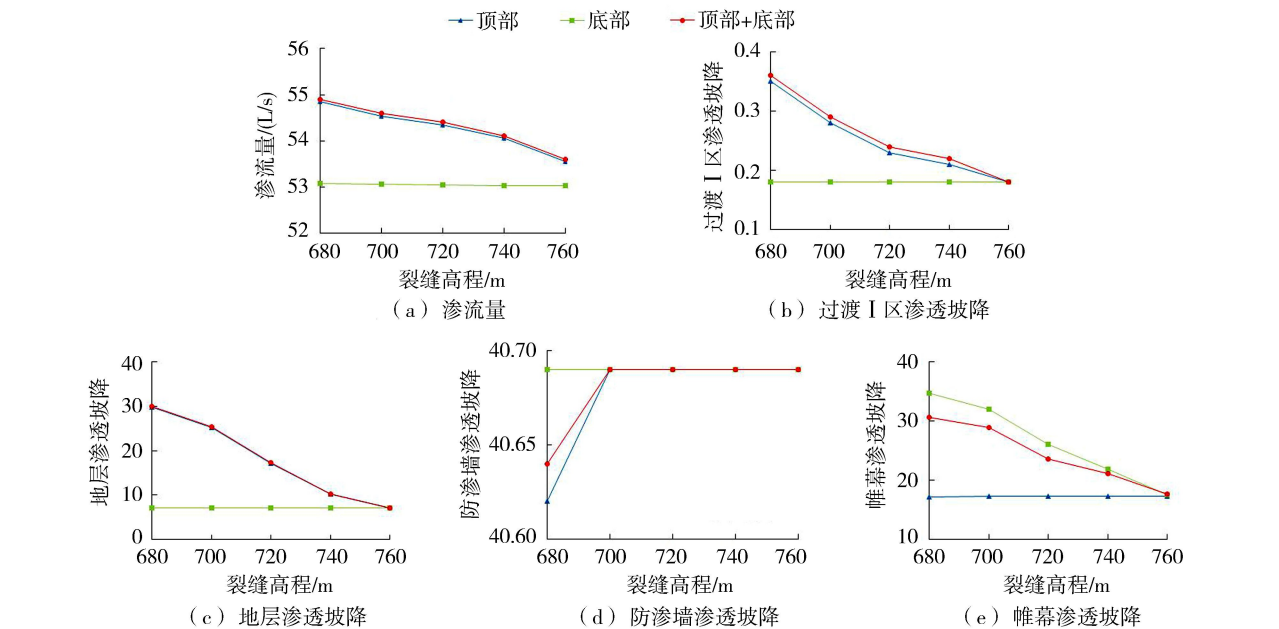


图6 不同高程下右岸廊道产生贯穿性裂缝时大坝渗流要素变化规律

Fig. 6 Changing law of seepage elements in dam with gallery penetration crack of right bank under different elevations

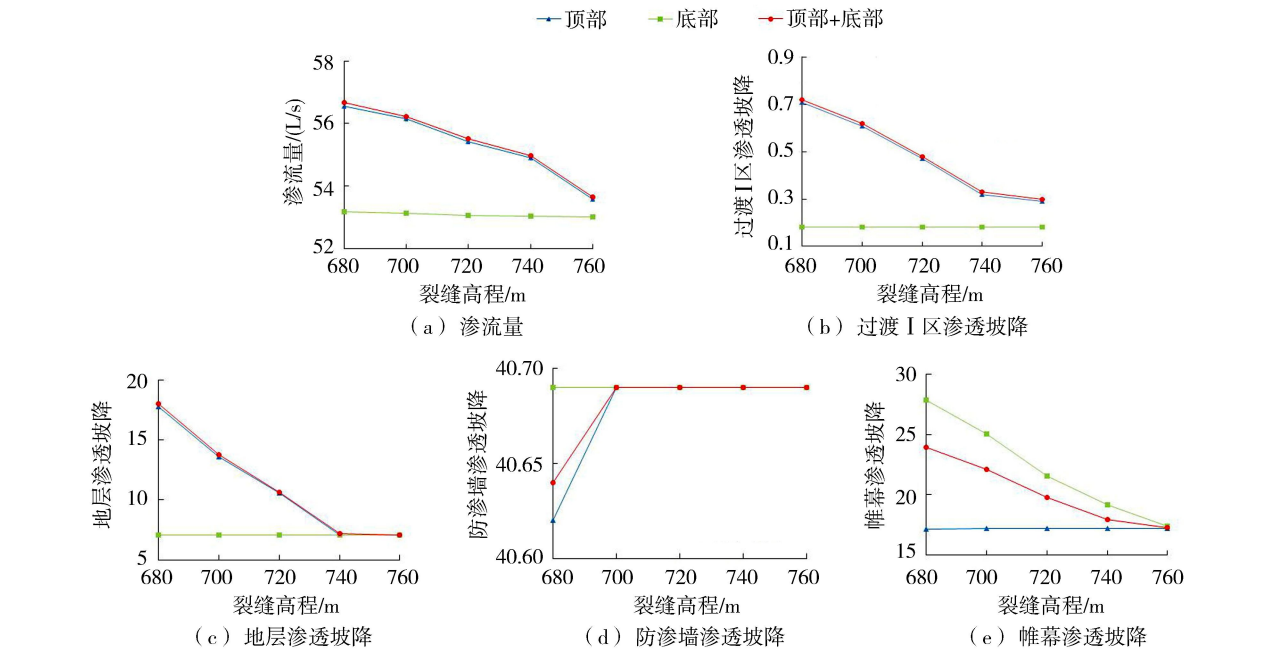


图7 不同高程下左岸廊道产生贯穿性裂缝时大坝渗流要素变化规律

Fig. 7 Changing law of seepage elements in dam with gallery penetration crack of left bank under different elevations

透坡降分别增大了 151.58%、92.49%、49.57%、0.42%、0.10%,帷幕最大渗透坡降分别增大了 38.94%、28.21%、14.80%、4.06%、0.35%。对比同高程裂缝时,发现其对过渡Ⅰ区、地层影响最为显著,这是由于上游水流经裂缝上游侧过渡Ⅰ区及地层汇入廊道,水头集中消散在过渡Ⅰ区、地层处。左、右岸相同高程处出现裂缝时,渗流量及坡降略有差别,这与地层分布及坝体材料分区有关,总体上左右岸的变化趋势是相似的。

4 廊道多裂缝对大坝渗流场的影响

在实际工程中,廊道裂缝往往不会单独产生,常见为多条裂缝同时产生。在研究多裂缝对大坝渗流特性影响时,常常考虑多条贯穿性裂缝时最为不利。当设置裂缝时,参考廊道应力分布规律将多条贯穿性裂缝设置在廊道拉应力超过混凝土抗拉强度的区域。为此,本文设置了 3 种计算工况:①工况 1。包含多处不同位置的顶部 45°贯穿性裂缝,位置分别位于河床段高程 680 m 及左右岸高程 680、700、720、740、760 m,裂缝形状参见图 1(c)顶部裂缝大样;②工况 2。包含多处底部竖向贯穿性裂缝,位置分别位于河床段高程 680 m 及左右岸 680、700、720、740、760 m,裂缝形状参见图 1(c)底部裂缝大样;③工况 3。同时包含了多处不同位置的顶部 45°贯穿性裂缝和底部竖向贯穿性裂缝,位置分别位于河床段 680 m 及左右岸 680、700、720、740、760 m。

表 2 为廊道出现多条贯穿性裂缝时的计算结果。当多条贯穿性裂缝集中分布于廊道拉应力超过混凝土抗拉强度的区域时,大坝渗流量会显著变化。顶部+底部存在贯穿性裂缝时的渗流量比廊道完好时增大了 38.88%。同时地层和过渡Ⅰ区的渗透坡降也有所增大,分别增大了 318.70% 和 300.00%。

表 2 极端条件下廊道存在裂缝时渗流场计算结果
Table 2 Calculation results of seepage field in the presence of cracks in the gallery under extreme conditions

工况	最大渗透坡降				渗流量/ (L/s)
	过渡Ⅰ区	地层	防渗墙	帷幕	
1	0.74	29.56	40.07	17.07	73.63
2	0.20	7.09	50.57	34.69	53.49
3	0.76	29.64	46.39	30.26	73.96

5 结 论

- a. 在廊道顶部裂缝未贯穿时,廊道周围的地层及防渗体系依旧保持完好,坝体渗流场未发生明显变化。然而,一旦廊道产生贯穿性裂缝,局部渗流场要素会发现显著变化,以本文拟定的计算方案大小裂缝为例,大坝渗流量增大了 4.68%,渗透坡降最大增大了 231.16%,尤其是在裂缝上游侧过渡Ⅰ区及地层。相比之下,廊道底部出现贯穿性裂缝时对渗透坡降的影响较小。
- b. 随着廊道顶部裂缝尺寸增大,渗流量逐步增大,裂缝长度达到 8 m 时增大了 10.72%;同时地层渗透坡降也随之增加,最大增大了 541.36%。廊道底部的贯穿性裂缝会导致防渗墙顶部渗透坡降增大,最大增大了 43.25%,而对坝体其他部位的影响较小。同时考虑廊道顶部与底部开裂时,由于底部裂缝对大坝整体渗流量的影响微小,整体渗流量较顶部贯穿裂缝时变化较小。
- c. 在廊道顶部与底部同时出现多裂缝情况下,渗流量将显著增大,增幅为 38.88%,地层和过渡Ⅰ区的渗透坡降分别增大了 318.70% 和 300.00%。

参考文献:

[1] ZHANG H,JING Y,CHEN J,et al. Characteristics and causes of crest cracking on a high core-wall rockfill dam:a case study [J]. Engineering Geology,2022,297:106488.

[2] LIN P,NING Z,SHI J,et al. Study on the gallery structure cracking mechanisms and cracking control in dam construction site [J]. Engineering Failure Analysis,2021,121:105135.

[3] 尤士介,袁长海,王林,等. 瀑布沟水电站坝基廊道结构缝渗水处理[J]. 人民长江,2011,42(24):38-40. (YOU Shijie, YUAN Changhai,WANG Lin,et al. Water seepage treatment of structural joints of dam foundation gallery in Pubugou Hydropower Station[J]. Yangtze River,2011,42(24):38-40. (in Chinese))

[4] 姚福海. 深厚覆盖层上土石坝基础廊道的结构形式探讨[J]. 水力发电,2010,36(6):54-55. (YAO Fuhai. Study on foundation gallery structure and type of embankment dam on heavy overburden [J]. Water Power,2010,36(6):54-55. (in Chinese))

[5] ZHANG H,CHEN J,HU S,et al. Deformation characteristics and control techniques at the Shiziping earth core rockfill dam[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2016,142(2):04015069.

[6] 尹海东. 黄金坪水电站坝基廊道裂缝成因分析[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(增刊2):199-204. (YIN Haidong. Cause analysis of cracks in dam foundation gallery of Huangjinping Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2021,52(Sup2):199-204. (in Chinese))

[7] 岑威钧,都旭煌,耿利彦,等. 随机多缺陷条件下土工膜防渗土石坝渗漏特性[J]. 水利水电科技进展,2018,38(3):60-65. (CEN Weijun, DU Xuhuang, GENG Liyan, et al. Seepage properties of geomembrane faced earth-rock dams under random multiple defects[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(3):60-65. (in Chinese))

[8] 岑威钧,陈司宁,李邓军,等. 考虑土工膜缺陷的石渣坝三维渗流特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):413-418. (CEN Weijun, CHEN Sining, LI Dengjun, et al. Characteristic analysis of 3D seepage field of a geome-mbrane faced rockfill dam considering defects of geomembrane[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(5):413-418. (in Chinese))

[9] 潘正阳,岑威钧,刘波. 面板开裂对大坝渗流特性影响的有限元分析[J]. 水电能源科学,2022,40(3):118-121. (PAN Zhengyang, CEN Weijun, LIU Bo. Finite element analysis of influence of slab cracking on seepage characteristics of concrete faced rockfill dam[J]. Water Resources and Power,2022,40(3):118-121. (in Chinese))

[10] 张嘎,张建民,洪铨. 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. (ZHANG Ga, ZHANG Jianmin, HONG Di. FEM seepage analysis of concrete-faced rockfill dam under the condition of cracked face plate[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2005,36(4):420-425. (in Chinese))

[11] XU Bin,ZOU Degao,KONG Xianjing,et al. Dynamic damage evaluation on the slabs of the concrete faced rockfill dam with the plastic-damage model[J]. Computers and Geotechnics,2015,65:258-265.

[12] 徐力群,赵邵峰,沈振中,等. 特高土心墙堆石坝坝基防渗体渗流-溶蚀特征研究[J]. 水利学报,2023,54(8):942-954. (XU Liqun,ZHAO Shaofeng, SHEN Zhenzhong, et al. Seepage and dissolution analyses for impervious structure of dam foundation in super-high rockfill dams with soil core[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(8):942-954. (in Chinese))

[13] 万文新,沈振中. 防渗墙裂缝对沥青心墙坝坝基渗流的影响[J]. 水电能源科学,2015,33(12):85-88. (WAN Wenxin, SHEN Zhenzhong. Effects of anti-seepage wall crack on seepage field of dam foundation of asphalt core wall dam[J]. Water Resources and Power,2015,33(12):85-88. (in Chinese))

[14] 甘磊,吴健,戴寿晔,等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):85-90. (GAN Lei, WU Jian, DAI Shouye, et al. Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(1):85-90. (in Chinese))

[15] 冯蕊,何蕴龙,曹学兴,等. 深厚覆盖层上高土石坝坝基廊道安全性研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2023,56(5):513-523. (FENG Rui, HE Yunlong, CAO Xuexing, et al. Safety of gallery in high rockfill dam on thick overburden layer[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2023,56(5):513-523. (in Chinese))

[16] 冯蕊,伍小玉,何蕴龙,等. 深厚覆盖层上超高心墙堆石坝坝基廊道非线性开裂分析[J]. 四川大学学报(工程科学版),2015,47(1):60-67. (FENG Rui, WU Xiaoyu, HE Yunlong, et al. Nonlinear cracking analysis of foundation gallery of high core wall rockfill dam on thick overburden layer[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2015,47(1):60-67. (in Chinese))

[17] 冯蕊,何蕴龙. 深厚覆盖层高坝坝基防渗系统地震反应规律研究[J]. 人民长江,2023,54(7):121-127. (FENG Rui, HE Yunlong. Seismic response of dam foundation seepage control system of a high dam on thick overburden layer[J]. Yangtze River, 2023,54(7):121-127. (in Chinese))

[18] ODA M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses[J]. Water Resources Research,1986,22(13):1845-1856.

(收稿日期:2023-08-22 编辑:刘晓艳)