

某超高面板砂砾石坝面板缝局部失效渗流场有限元分析

张 丽^{1,2}, 沈振中^{1,2}, 赵 斌³, 李栋梁⁴

(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. 南京南瑞集团公司, 江苏 南京 211006;
4. 连云港水利规划设计院有限公司, 江苏 连云港 222006)

摘要:为了掌握高水头作用下面板缝止水局部失效时坝体和坝基特别其垫层局部饱和区的渗流特性, 针对拟建的某混凝土面板砂砾石坝, 采用饱和-非饱和渗流理论, 拟定不同失效缝长、缝宽、位置和垫层渗透系数等情况, 建立三维有限元模型, 计算面板缝失效情况下坝体和坝基的渗流场, 分析不同作用水头条件下面板缝不同失效程度对渗流场的影响。计算结果表明, 某处面板缝小范围失效只对失效部位附近的渗流场产生较大影响, 并导致局部渗透变形, 而对坝体渗流场全局的影响不大; 随着失效缝长、缝宽的加大, 失效缝位置的降低和垫层渗透系数的增大, 失效部位附近局部饱和区变大, 其中, 失效缝位置的影响最大, 失效缝长的影响次之, 失效缝宽的影响最小; 当超高水头作用下面板缝通长失效时, 坝体内浸润面显著升高, 因此设计时应严格控制面板缝可能失效的范围, 避免出现面板缝大范围失效。

关键词:混凝土面板砂砾石坝; 超高坝面板缝失效; 饱和-非饱和渗流理论; 三维有限元法

中图分类号:TV223.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)01-0067-06

Finite element analysis for seepage field of slab joint local failure of a superhigh concrete-faced sand-gravel dam// ZHANG Li^{1,2}, SHEN Zhenzhong^{1,2}, ZHAO Bin³, LI Dongliang⁴ (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. NARI Group Corporation, Nanjing 211006, China; 4. Lianyungang Water Resources Planning and Designing Institute Co., Ltd., Lianyungang 222006, China)

Abstract: We applied saturated and unsaturated theory to establish a three dimensional finite element model (FEM), based on a proposed concrete faced sand-gravel dam, aiming to simulate the seepage field of the dam and its foundation under the condition of slab joint local failure. The different length, width, and position of the slab joint local failure were combined in the simulation condition. Overall, the results showed that a single local failure of slab joint had large influence on the local seepage field around the slab joint failure and little influence on the entire seepage field. Additionally, the saturated field is enlarged by the increase of length and width of the slab joint failure and the decrease of the position, besides the seepage field is affected mostly by the position and minimally by the width. The results also revealed that the great increase of the saturated surface was caused by the slab joint full-length failure under the action of superhigh-head. Thus, these factors should be taken into consideration during the design in order to avoid large-scale failure of slab joint.

Key words: concrete-faced sand-gravel dam; slab joint local failure of a superhigh dam; saturated-unsaturated seepage theory; three-dimensional finite element method

混凝土面板堆石坝凭借造价低、工期短、就地取材等优势, 成为近年来运用最为广泛的坝型之一。随着筑坝技术的发展, 国内外建成了一批 200 m 级高面板堆石坝, 如我国清江水布垭面板堆石坝^[1], 其最大坝高为 233 m, 是目前世界上最高的面板堆石坝。由于建造条件限制, 混凝土面板砂砾石坝也已被大量采用, 该类坝坝体材料主要为砂砾石, 依靠面板挡水。天然砂砾料具有级配离散性、间断性和

施工易分离性, 其抗渗透破坏和抗冲蚀的能力较差, 导致坝体存在渗透稳定问题。面板砂砾石坝的坝体砂砾石填筑体与面板及止水防渗体相互依存, 较大的变形可直接导致止水破坏和坝体渗漏^[2]。此外, 随着坝高的不断攀升, 面板缝长度不断增加, 蓄水后变形加大, 易产生局部破坏, 而止水的破坏又将进一步增大坝体变形和渗漏量, 例如, 坝高 127 m 的 Golillas 坝在初次蓄水时的渗漏量曾达到 520 L/s。渗漏严重时

基金项目: 国家自然科学基金(51179062)

作者简介: 张丽(1989—), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事水工结构研究。Email: zhanglihhu@163.com

将导致溃坝。我国沟后面板砂砾石坝的溃坝事故造成了重大生命和财产损失^[3-4]。

根据已建面板堆石坝的监测资料,面板一般在河床受压区和两岸受拉区的变形较大,尤其在初次蓄水过程中,坝体沉降导致面板应变大幅提高^[5-6],且河床中部坝顶位置压应变显著,从面板顶部开始向下延伸^[7]。一旦面板缝局部失效,势必导致垫层直接承受高水头的作用,因此,分析面板缝局部失效情况下坝体坝基渗流稳定性就显得尤为重要。张嘎等^[8]在整体三维模型中分析了面板底部出现裂缝工况下的坝体渗流场,总结了一些渗流场特性,但假定的面板破损缝宽较大;张晓强等^[9]对面板缝出现破损的不同缝长、缝宽和位置的组合工况进行计算,给出了一般工况下失效缝尺寸等因素对渗流场的影响,但尚未进行定量分析;陈军强等^[10]建立了两级三维有限元模型,分区模拟面板缝破损工况下坝体的渗流场,但模型的最大坝高仅为111 m,未能考虑高水头作用下面板缝局部失效的渗流场。

堆石区砂砾石的渗透性能好,面板缝局部失效会导致失效缝周围垫层土体处于饱和状态,而垫层后的主砂砾石堆石区以及坝体内绝大部分区域仍处于非饱和状态,渗流场性态较为复杂^[11]。孙丹等^[12]采用非稳定饱和-非饱和渗流理论建立了复合土工膜防渗土石坝土工膜局部破损的三维有限元数值计算模型,分析了土工膜局部破损情况下坝体的渗流场。笔者采用三维饱和-非饱和渗流有限元法,针对某超高面板砂砾石坝建立数值计算模型,深入研究高水头作用下坝体面板缝失效时不同失效缝宽、失效缝长和失效缝位置以及垫层渗透系数对坝体渗流场的影响规律,分析各因素对超高面板砂砾石坝的面板缝止水失效后渗透流量等渗流要素变化量的影响幅度。

1 面板缝失效计算方案

1.1 某水电站混凝土面板砂砾石坝概况

某水电站位于新疆阿克苏市的库玛拉克河上。挡水建筑物采用混凝土面板砂砾石坝,坝顶高程为1716.00 m,河床趾板(混凝土高趾墙)建基高程为1460.00 m,最大坝高256.00 m,坝顶全长560.00 m,坝顶宽度12.00 m,坝顶上游侧设高6.20 m的“L”形混凝土防浪墙,防浪墙顶高程为1717.20 m。上游坝坡1:1.60,在1560.00 m高程以下的面板上加设上游压坡体,其中上游铺盖区顶宽为4.00 m,坡度为1:1.60,盖重区顶宽为6.00 m,坡度为1:2.00。下游坝坡局部实际坡度为1:1.4,综合坡度约为1:1.72。用于有限元建模的混凝土面板砂砾石坝标

准剖面简化示意图见图1。

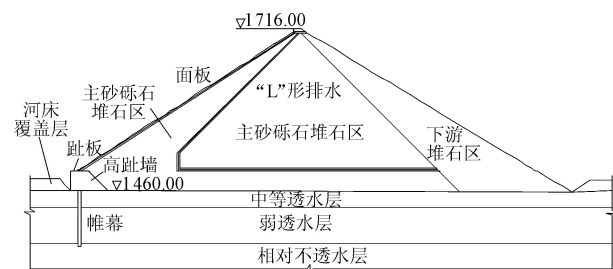


图1 混凝土面板砂砾石坝坝体标准剖面(单位:m)

1.2 面板缝失效模拟计算方案

以正常蓄水情况,即上游水位1710.00 m,下游水位1480.94 m来模拟计算。由于实际面板缝失效程度及位置难以具体确定,故全面考虑失效尺寸和位置的不同情况,采用不同失效缝宽、失效缝长和失效位置进行组合^[13-15],着重比较止水系统完好和局部失效后坝体和坝基渗流场的变化,分析渗透流量等渗流要素随3种因素的变化规律。各计算方案如表1所示,取止水完好为计算方案I-1;将失效缝宽1 mm、10 mm、30 mm、100 mm,失效缝长1 m、5 m,失效缝顶端位于坝体上部(相对坝基面高程235 m)、中部(相对坝基面高程125 m)和下部(相对坝基面高程35 m)进行组合,并分别取失效缝顶端从坝体中部(半长)和上部(全长)处开始向下连通失效,来模拟面板缝失效的极端情况,此外,在3处高程同时失效情况下,将垫层渗透系数分别缩小为原渗透系数的1/10、1/2,或放大为原渗透系数的5倍,进行垫层渗透敏感性分析。表1中所列为失效缝宽1 mm的情况,其余失效缝宽的工况以此类推。

表1 面板缝局部失效计算方案

工况	失效缝长/m	失效缝顶端相对坝基面高程/m	垫层渗透系数/ ($10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
I-2	1	35	3.55
I-3	5	35	3.55
I-4	1	125	3.55
I-5	5	125	3.55
I-6	1	235	3.55
I-7	5	235	3.55
I-8	1	35、125、235	3.55
I-9	5	35、125、235	3.55
I-10	174	<125	3.55
I-11	377	<235	3.55
⋮	⋮	⋮	⋮
I-42	5	35、125、235	0.36
I-43	5	35、125、235	1.78
I-44	5	35、125、235	17.75
⋮	⋮	⋮	⋮

2 三维有限元模型及计算参数

2.1 三维有限元模型

取混凝土面板砂砾石坝典型坝段进行分析,根

据坝体标准剖面建立三维有限元模型。根据失效面板缝和渗流场的对称性,以失效面板缝中线为起点,向左岸取半缝宽和4块面板,模拟8块面板中央面板缝局部失效的工况。计算坐标系以及有限元模型选取范围如下:以坝轴线与失效面板缝中线所在的横剖面在高程为0处的交点为坐标原点; x 方向为顺河流方向,从上游指向下游为正,分别向上下游截取900 m; y 方向从右岸指向左岸为正,自局部失效的面板缝中心线至第4块面板的边缘,坝段总长60 m; z 方向垂直向上为正,以高程为坐标,底高程截取至帷幕以下200 m(即截至高程1380.00 m)。

三维有限元模型的建立采用控制断面超单元自动剖分技术^[11,16],根据需要对上述计算区域切取控制剖面,并据此形成超单元。为了尽可能准确地模拟面板缝,并尽量减小计算规模,从面板缝开始沿 y 方向控制断面间距,使其随与面板缝之间距离的增大而不断增加,其中,断面 $y=0\sim 0.0005$ m(其余工况为0.005 m,0.015 m,0.05 m)表示半条面板缝,断面 $y=0.0005\sim 60$ m表示面板(每块面板宽度为15 m)。加密细分后形成有限单元网格,生成的三维有限元模拟结点总数为46170,单元总数为41514。三维有限元模型网格见图2。

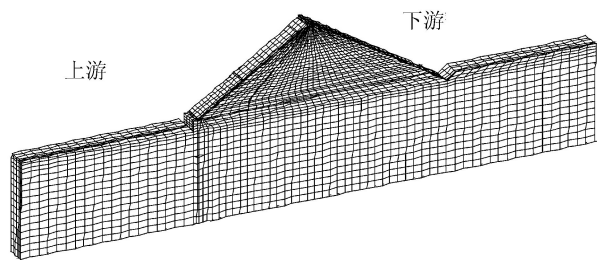


图2 三维有限元模型网格

对于不同的面板缝宽度,计算模型分别模拟了5 mm、15 mm和50 mm这3种情况,这里分别建立4个有限元模型,模拟面板缝宽度分别为1 mm、10 mm、30 mm和100 mm的4种情况。

计算模型的边界条件如下:根据对称性,右侧(失效面板缝中心)截取边界($y=0$ m)为不透水边界,左侧截取边界($y=60$ m)的距离较远,可忽略其影响,将其近似为不透水边界;河床上游侧截取边界($x=-900$ m)近似为不透水边界,下游侧截取边界($x=900$ m)近似为不透水边界处理;底部截取边界亦为不透水边界。已知水头边界包括河床顶面、上游坝面和下游水位以下坝面。出渗边界为上下游水位线以上暴露在空气中的坝体坝顶和部分上下游坡面。

2.2 坝体及坝基渗透参数

坝体各分区及坝基各料区渗透系数见表2,并按照压水试验所得吕荣值线将坝基划分为不同渗透系

数的地层,见表3。由于没有垫层料的试验资料,因此参考文献[12]所述的垫层料特性。垫层料的土水特征曲线和渗透系数函数见图3。实际工程中,面板缝止水破损失效处渗透系数应为无穷大,但在模型计算中只需要将止水破损处单元的渗透系数放大到1 m/s即可模拟其强渗透性,此时面板缝单元上下游侧节点的水头值均为1710.00 m,边界条件不用改变,达到模拟失效缝处垫层直接承受上游水头作用的效果。此外,由于混凝土面板的渗透系数非常小,面板后垫层和砂砾石渗透系数相对很大,故坝内绝大部分为非饱和区,只在垫层内出现局部渗透饱和区。

表2 坝体和坝基各料区渗透系数

坝料分区	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
面板	1.0×10^{-7}
垫层料	3.55×10^{-4}
垫层小区	1.70×10^{-4}
反滤料	0.925
排水料	0.225
主砂砾石堆石区3B	0.028
下游堆石区3C	0.125
坝基防渗帷幕	1.0×10^{-5}

表3 按吕荣值划分的土层及其渗透系数

地层	吕荣值/Lu	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
河床覆盖层		0.07
中等透水层	10 ~ 100	8.5×10^{-5}
弱透水层	3 ~ 10	7.5×10^{-6}
相对不透水层	<3	2.5×10^{-6}

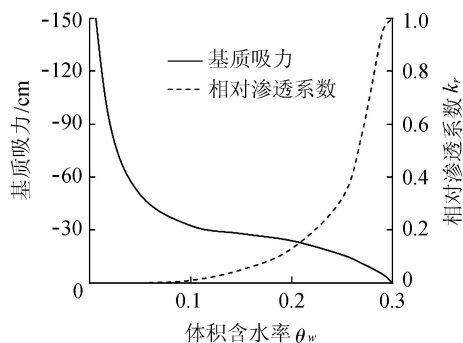


图3 垫层料土水特征曲线和渗透系数函数曲线

3 面板缝局部失效渗漏特性分析

3.1 混凝土面板砂砾石坝渗流场

面板缝完好的计算方案I-1沿面板缝中心横剖面的地下水位势分布如图4(a)所示。图4(a)中主要截取了坝体部分高趾墙后浸润面和等势线分布。垫层后坝体浸润面的最高点高程为1482.65 m,坝体内浸润面十分平缓,与下游水位1480.94 m相接;面板的最大平均渗透坡降为187.18,位于面板底部与高趾墙连接处,主砂砾石堆石区的最大平均渗透坡降为0.0027,下游堆石区的出逸坡降为0.0011,发生于

下游出逸处堆石区浸润面附近;坝体和坝基单宽渗透流量为 $3.37(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})/\text{m}$ 。

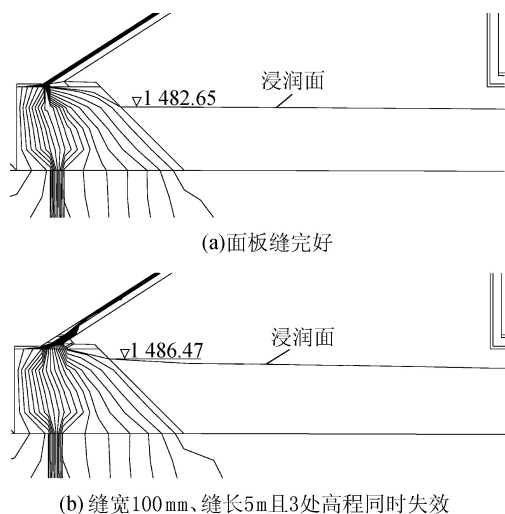


图4 方案 I-1、I-39 坝体沿缝中心横剖面的渗流等势线分布局部放大图(单位:m)

3.2 面板缝局部失效时坝体和坝基的渗流场

图4(b)以失效缝宽100 mm、缝长5 m且3处高程同时失效的计算方案 I-39 为例,此情况下局部破损尺寸最大,作用水头最高,在局部破损的计算方案中,与面板缝完好的方案 I-1 相比,其渗流场变化最大。该方案垫层后浸润面的最高点高程为1486.47 m,高趾墙后浸润面坡降稍大,坝轴线下游浸润面十分平缓,与下游水位1480.94 m 相接,单宽渗透流量为 $3.96(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})/\text{m}$ 。与方案 I-1 相比,失效缝中心剖面处浸润面抬升了3.82 m,坝体单宽渗透流量增大了17.32%。相较于250 m 高的水头而言,浸润面的抬升幅度很小。对于整个坝区的渗透流量而言,60 m 典型坝段精细模型中渗透流量的增量也很小。总体而言,局部小范围失效面板缝的渗漏能力有限,因此单独某一处或某几处的面板缝局部失效对混凝土面板砂砾石坝的渗流要素(浸润面、渗透坡降、渗透流量)影响不大,所以有必要关注失效面板缝周围的局部渗流场。

各计算方案垫层与砂砾石堆石区交接面处浸润面的最高点位置变化列于表4中,比较了失效缝长1 m 或5 m 情况下不同失效缝宽和失效缝位置对浸润面的影响大小。结果显示,随着失效缝宽、失效缝长的增大和失效缝位置的降低,通过失效缝的渗漏量增大,坝体渗透流量的变化有限,浸润线略微升高,面板、坝基地层的平均最大渗透坡降略微减小,砂砾石坝体内砂砾石堆石区最大渗透坡降和下游堆石区出逸坡降略微增大。在3种变化因素中,失效缝位置(即失效缝上作用水头)对浸润面的影响最大,失效缝位置越低,浸润面抬升的变化幅度越大;失效缝长的

影响次于失效缝位置的影响,失效缝宽的影响最小,浸润面随着失效缝长和缝宽的增加而升高。

表4 一般工况下垫层与砂砾石堆石区交接面处浸润面的最高点高程

失效缝长/ m	失效缝顶 相对坝基 面高程/m	浸润面最高点高程/m			
		失效缝宽 1 mm	失效缝宽 10 mm	失效缝宽 30 mm	失效缝宽 100 mm
1	235	1482.71	1482.71	1482.71	1482.71
	125	1482.91	1482.95	1483.04	1483.06
	35	1484.31	1484.71	1484.87	1484.93
5	35、125、235	1485.07	1485.24	1485.32	1485.72
	235	1482.71	1482.71	1482.72	1482.77
	125	1483.08	1483.31	1483.15	1483.19
	35	1485.62	1485.85	1485.89	1486.05
	35、125、235	1485.91	1486.01	1486.18	1486.47

表5 比较了面板缝完好情况与面板缝半长失效或通长失效的极端情况下浸润面的变化。当面板缝破损连通后,浸润面大幅抬升,渗透流量大幅增加,砂砾石堆石区的渗透坡降和下游堆石区的出逸坡降也大幅升高。此外,由表5亦可知失效缝宽与失效缝长对浸润面抬升幅度的影响远小于缝上作用水头的影响。垫层渗透系数变化时坝体垫层与砂砾石堆石区交接面处浸润面高程的变化列于表6。从表6可知,垫层渗透系数设计值可以较好起到二次防渗的效果,且垫层渗透系数减小时垫层阻渗能力提高,浸润面降低。此外,失效缝宽对浸润面抬升的影响幅度也很小,与之前的结论相符。

表5 极端工况下垫层与砂砾石堆石区交接面处浸润面的最高点高程

极端工况	浸润面最高点高程/m			
	失效缝宽 1 mm	失效缝宽 10 mm	失效缝宽 30 mm	失效缝宽 100 mm
半长失效	1500.68	1500.68	1500.73	1501.89
通长失效	1501.39	1501.35	1502.07	1502.97

表6 垫层渗透系数敏感性分析

垫层渗透系数/ ($10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	浸润面最高点高程/m			
	失效缝宽 1 mm	失效缝宽 10 mm	失效缝宽 30 mm	失效缝宽 100 mm
0.36	1483.12	1482.98	1483.11	1483.12
1.78	1484.55	1484.69	1484.75	1484.74
3.55	1485.91	1485.83	1486.38	1486.47
17.75	1496.47	1496.55	1496.95	1497.31

3.3 面板缝失效位置附近局部渗流场

由于混凝土面板的渗透系数很小,面板后垫层及坝体砂砾石的渗透系数相对较大。当面板缝局部失效时,通过失效缝的渗漏水量有限,渗透孔隙水压力也很快消散,仅在失效缝附近局部范围内形成饱和区,而坝体绝大部分为非饱和区。以局部失效时最危险工况 I-39,即3处高程同时有宽100 mm、长5 m 的面板缝失效为例,饱和区范围如图5所示,其

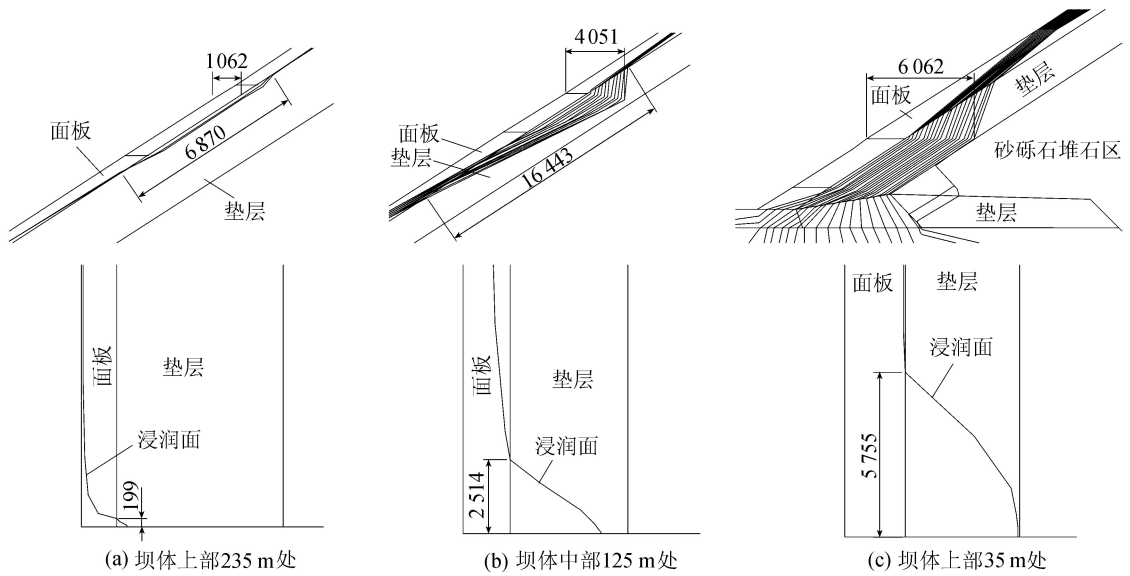


图5 方案 I-39 面板缝局部失效部位附近垫层内渗流饱和区(单位: mm)

中饱和区的形状受有限元网格形态影响较大。在沿缝中心垂直于坝轴线的横剖面上,除图 5(c)中在高水头作用下,相对坝高 35 m、缝长 5 m 处浸润面已部分进入垫层后砂砾石堆石区外,其余饱和区均在垫层范围内;在 3 处失效缝沿坝轴线方向水平剖面上,饱和区沿坝轴线方向长度随着缝上作用水头的增长而增大,最大范围为图 5(c)中的 5.755 m。但需要注意的是,在高水头的作用下,下部失效缝部位的垫层渗透坡降已达到 53.75,远大于其允许渗透坡降,此处垫层局部产生了渗透破坏。

研究面板缝失效产生的饱和区在沿坝轴线方向上对浸润面的影响时,选取面板缝通长失效的极端工况 I-11、I-21、I-31、I-41,沿坝轴线方向截取 $x = -320$ m 处剖面,其浸润面范围如图 6 所示,失效面板缝宽 1 mm、10 mm、30 mm、100 mm 时,失效缝中线处浸润面高程分别为 1 500.59 m、1 501.04 m、1 501.36 m、1 502.47 m,沿坝轴线方向的抬升影响范围不超过半块面板宽度(约 7.5 m),当面板缝局部失效并未连通时,浸润面的抬升范围也不会超过半块面板。需说明的是,建模时考虑失效面板缝及渗流场的对称性,仅建立了 4 块面板宽度范围内的坝

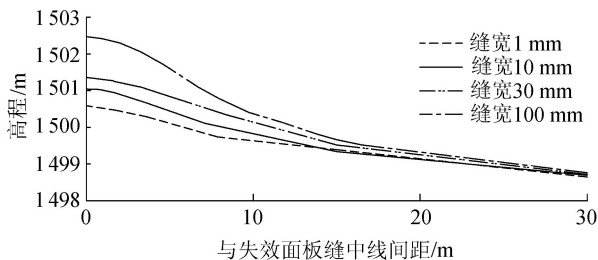


图6 方案 I-11、I-21、I-31、I-41 中 $x = -320$ m 处浸润面高程

体和坝基模型,故此沿坝轴线方向的影响范围是对所建半个模型而言的,仅是全部影响范围的一半。

由计算结果可见,局部饱和区主要存在于混凝土面板缝失效部位周围,影响范围仅限于垫层内部,且对失效缝附近的局部渗流场影响较大,对距离失效缝较远的地方影响较小。在高水头作用下,失效缝后垫层直接挡水,在高水头的作用下极有可能导致局部渗透破坏。

4 结 论

a. 面板缝局部失效对混凝土面板砂砾石坝渗流场的影响主要集中于局部失效面板缝附近,面板后垫层及坝体砂砾石的渗透系数远大于混凝土面板的渗透系数,故仅在局部失效面板缝周围垫层内部较小区域形成饱和区,渗水对坝体内部绝大部分的非饱和区影响微小。

b. 在面板缝局部失效的影响因素中,失效缝高程即失效缝上作用水头的影响最大,失效缝长的影响次之,失效缝宽的影响再次之。当超高水头作用下面板缝通长失效时,坝体内浸润面显著升高,故设计时应严格控制面板缝可能失效的范围,避免出现面板缝大范围失效。垫层在面板缝局部失效后成为第二道防渗层,其渗透系数对坝内渗流场有较大影响,应保证垫层渗透系数远小于砂砾石堆石区的渗透系数。

c. 当面板缝出现局部失效时,面板后垫层直接挡水,当作用水头很大时,垫层局部饱和区的梯度将远大于其允许渗透坡降,极有可能导致局部渗透破坏。

参考文献:

[1] 朱晟,徐胜. 现代混凝土面板堆石坝的进展[J]. 水利水

- 电科技进展,1999,19(2):19-21. (ZHU Sheng, XU Sheng. Advance in modern concrete faced rockfill dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,1999,19(2):19-21 (in Chinese))
- [2] 钮新强,徐麟祥,廖仁强,等. 株树桥混凝土面板堆石坝渗漏处理设计[J]. 人民长江,2002,33(11):1-4. (NIU Xinqiang, XU Linxiang, LIAO Renqiang, et al. Design on leakage treatment for Zhushuqiao concrete faced rockfill dam [J]. Yangtze River,2002,33(11):1-4(in Chinese))
- [3] 何秉顺,丁留谦,刘昌军. 面板砂砾石坝异常渗流及破坏机制探讨[J]. 自然灾害学报,2009,18(6):141-145. (He Bingshun, DING Liuqian, LIU Changjun. Research on abnormal seepage and failure mechanism of faced rockfill dam [J]. Journal of Natural Disaster,2009,18(6):141-145. (in Chinese))
- [4] 盛金保. 沟后坝溃坝渗流初步分析[J]. 大坝观测与土工测试,1996,20(5):11-15. (SHENG Jinbao. Preliminary seepage analysis of failure of the gouhou dam [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests,1996,20(5):11-15. (in Chinese))
- [5] HUNTER G, FELL R. Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dams [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2003,129(10):909-917.
- [6] SEO M W, HA I S, KIM Y S, et al. Behavior of concrete-faced rockfill dams during initial impoundment [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2009,135(8):1070-1081.
- [7] 郝巨涛,杜振坤. 高混凝土面板堆石坝面板接缝挤压破坏预防措施研究[J]. 水力发电,2008,34(6):41-44. (HAO Jutao, DU Zhenkun. Precaution measures for the spalling failure of the slab joint concrete in high CFRDs [J]. Water Power,2008,34(6):41-44. (in Chinese))
- [8] 张嘎,张建民,洪镛. 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):1-7. (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):1-7. (in Chinese))
- [9] 张晓强,卢廷浩,周爱兆. 面板垂直缝失效渗流场有限元模拟[J]. 水利科技与经济,2006,12(12):801-809. (ZHANG Xiaoqiang, LU Tinghao, ZHOU Aizhao. FEM seepage analysis of concrete faced rockfill dam under the cases of vertical joint inactivation [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy,2006,12(12):801-809. (in Chinese))
- [10] 陈军强,蔡新合,党发宁. 混凝土面板堆石坝垂直缝止水失效后的集中渗流场分析[J]. 西北水电,2009(1):16-20. (CHEN Junqiang, CAI Xinhe, DANG Fanning. Analysis of concentrated seepage field due to failure of CFRD vertical joint water stops [J]. Northwest Hydropower,2009(1):16-20. (in Chinese))
- [11] 江沅,沈振中,邱乾勇. 三维非稳定饱和-非饱和渗流有限元法改进及验证[J]. 水电能源科学,2008,26(3):54-56. (JIANG Hang, SHEN Zhenzhong, QIU Qianrong. Improvement of finite element method and its validation in 3-D unstable saturated-unsaturated seepage [J]. Water Resources and Power,2008,26(3):54-56. (in Chinese))
- [12] 孙丹,沈振中,崔健健. 土工膜缺陷引起的土工膜防渗砂砾石坝渗流数值模拟[J]. 水电能源科学,2013,31(4):801-809. (SUN Dan, SHEN Zhenzhong, CUI Jianjian. Seepage numerical simulation of geomembrane gravel dam caused by geomembrane defect [J]. Water Resources and Power,2013,31(4):801-809. (in Chinese))
- [13] 卢廷浩,周爱兆,刘尧. 高面板坝失效缝渗流模拟计算与讨论[J]. 四川大学学报:工程科学版,2007,39(增刊1):91-95. (LU Tinghao, ZHOU Aizhao, LIU Yao. Simulation and discussion on seepage analysis of CFRD joint failure [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2007,39(Sup1):91-95. (in Chinese))
- [14] 盛金保,李雷. 混凝土面板坝渗流分析方法初探[J]. 水利水运科学研究,2000(2):39-44. (SHENG Jinbao, LI Lei. Preliminary study on seepage analysis methods of concrete-face dams [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute,2000(2):39-44. (in Chinese))
- [15] 刘昌军,丁留谦,徐泽平,等. 面板裂缝对积石峡水电站大坝渗流场影响的数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2011,31(6):50-54. (LIU Changjun, DING Liuqian, XU Zeping, et al. Numerical simulation of influences of cracks on seepage fields of Jishixia Hydropower Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(6):50-54. (in Chinese))
- [16] 王东,沈振中,陶小虎. 尾矿坝渗流场三维有限元分析与安全评价[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(3):307-312. (WANG Dong, SHEN Zhenzhong, TAO Xiaohu. Three-dimensional finite element analysis and safety assessment for seepage field of a tailings dam [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2012,40(3):307-312. (in Chinese))

(收稿日期:2013-10-21 编辑:彭桃英)

