

随机多缺陷条件下土工膜防渗土石坝渗漏特性

岑威钧¹, 都旭煌¹, 耿利彦¹, 和浩楠²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河北省水利水电第二勘测设计研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 由于土工膜缺陷渗漏可能对土工膜防渗土石坝的防渗安全性造成隐患, 采用饱和-非饱和渗流有限元理论, 对坝面防渗土工膜多缺陷随机分布下的典型土石坝进行三维渗流场有限元模拟, 合理考虑土工膜缺陷的数量、类型、位置、大小及其分布, 重点分析土工膜的渗透量和缺陷渗漏量及膜后浸润面的变化规律。结果表明: 与单缺陷条件下大坝渗流特性相比, 坝面完好部分土工膜的渗透量变化不大, 但多缺陷引起的渗漏量明显增大, 导致大坝的总渗流量大幅增加。多缺陷会引起膜后坝体浸润面整体抬升, 但局部浸润面高度变化与缺陷位置和数量明显相关, 所在剖面缺陷位置越低, 数量越多, 浸润面抬升越明显。另外, 膜后垫层水头局部分布规律与相邻缺陷渗漏的交叉效应相关。

关键词: 土石坝; 土工膜; 缺陷渗漏; 孔状缺陷; 缝状缺陷; 随机分布

中图分类号: TV441; TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2018)03-0060-06

Seepage properties of geomembrane faced earth-rock dams under random multiple defects // CEN Weijun¹, DU Xuhuang¹, GENG Liyan¹, HE Haonan² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Second Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Defect-induced leakage of geomembranes may have negative effect on the anti-seepage safety of geomembrane faced earth-rock dams. Finite element theory of saturated-unsaturated seepage was employed for the 3D simulation of the seepage field of a typical geomembrane faced earth-rock dam in the condition that defects are in random distribution on the upstream dam surface. The quantity, types, location, sizes and distribution of geomembrane defects were considered reasonably, and the change rules of infiltration capacity, defect-induced leakage and phreatic line were analyzed emphatically. The results indicate that in the condition that the geomembrane is intact, the seepage flux changes little for both single and multiple defects on the geomembrane. However, when the geomembrane is under multiple defects, the defect-induced leakage increases significantly, leading to the increase of total seepage flux. Multiple defects will raise the phreatic surface in the dam body, and the variation of local phreatic surface height is related to the quantity and location of the defects. The more and lower the defects are, the more obvious the uplift of the phreatic surface can be. Further, the local distribution of water head behind the geomembrane is related to the cross effect of leakage of adjacent defects.

Key words: earth-rock dam; geomembrane; defect-induced leakage; hole defect; seam defect; random distribution

由高分子聚合物制成的土工膜具有质地柔软、延伸率大、适应变形强、防渗性好等特性, 且与传统的防渗结构相比还具有设计简单、施工速度快、造价低廉等优势, 因此近几十年来国内外已将土工膜广泛应用于堤防、围堰、蓄水池、渠道、混凝土坝(修复)、垃圾填埋场等各类防渗工程^[1-5], 同时也用于土石坝等(较)高水头防渗工程中。截至2010年, 国际上已有160余座大型堆石坝采用土工膜防渗^[6]。然而, 由于制造工艺和施工条件等因素的影响, 实际防渗工程中土工膜不可避免地遭到不同程度的破坏(顶破、刺破、穿破、拉裂等), 形成不同形

状的缺陷。岑威钧^[7]从产品质量、受力、施工、设计、运行等方面详细阐述了土石坝中防渗土工膜各类缺陷形式及其产生原因, 认为施工是引起土工膜缺陷的主要原因。Nosko等^[8]通过对300多处大约325万m²土工膜的质量检测, 发现土工膜在施工阶段产生破损的比例最大, 达到73%, 而大部分缺陷是由土工膜下垫层和施工机械引起。国外曾对某工程28处20万m²土工膜进行质量检测, 结果表明平均每1万m²约有26个漏水孔, 其中69%出现在焊缝处^[9]。土工膜一旦出现缺陷, 水就会在缺陷处形成集中渗漏, 即缺陷渗漏。岑威钧等^[10]对土工膜缺

陷特性与缺陷渗漏的国内外研究进展进行了较为深入的阐述和评价,并提出一系列尚需进一步研究的相关问题。Giroud 等^[11-14]依托室内模型试验和垃圾填埋场实测数据,对土工膜缺陷渗漏计算方法做了不少研究,提出了一些半理论半经验公式,适用于低水头土工膜渗漏计算。对于土工膜防渗土石坝,土工膜缺陷会破坏大坝防渗屏障的完整性,缺陷处的集中渗漏可能对大坝的防渗安全性造成隐患。笔者在文献[15]中就坝面土工膜单个缺陷(孔状,缝状)在不同位置(坝面上部,中部和底部)条件下对土工膜防渗土石坝进行三维渗流场分析,得到大坝渗流场基本特性。本文是在该文基础上进一步研究随机多缺陷条件下土工膜防渗土石坝的渗流(渗漏)特性,其中土工膜缺陷的数量、位置、大小和分布尽量反映实际工程情况,相关计算结果可供工程设计及安全运行评价时参考。

1 计算理论与分析对象

笔者曾采用饱和多孔介质渗流理论及饱和-非饱和和多孔介质渗流理论对土工膜防渗土石坝进行渗流分析^[16],其中土工膜按流量等效原则将其厚度进行适当放大^[17],计算结果表明两种渗流理论得到的计算结果相差不大,饱和-非饱和和多孔介质渗流理论能更加合理地反映大坝的实际渗流性态。土工膜在施工和运行过程中容易产生缺陷,且缺陷形状、位置和尺寸都具有一定的随机性。缺陷主要有孔状和缝状两种类型,其中孔状缺陷是施工中土石料或施工机械对土工膜的局部损伤破坏造成的,缝状缺陷一般是由土工膜拼接或连接处出现脱焊或虚焊等造成的。为了便于有限元建模,将土工膜缺陷概化为面积等效的正方形孔洞或矩形长条缝。采用放大缺陷单元渗透系数法模拟缺陷单元处的渗漏。相关理论及处理细节本文不再一一赘述,可参考文献[15][16]。

本文仍选取文献[15]中的典型土工膜坝面防渗土石坝作为分析对象。该坝坝高 56 m,上、下游坝坡比均为 1 : 1.7,左右两岸的岸坡比为 1 : 1,上下游计算水位分别为 53 m 和 1 m。坝面土工膜通过混凝土趾板与坝基相连,膜下设垫层、过渡层和堆石区。有限元建模时,将厚度 1 mm 的土工膜等效为 30 cm 厚的多孔介质防渗层。为了提高计算精度,建模时对坝面土工膜网格进行加密,尽量使土工膜单元在 3 个方向上的尺度处于同一量级,大坝有限元模型见图 1,同时给出经局部网格处理后的两种类型的坝面土工膜缺陷单元(图中红色区为缺陷土工膜单元,蓝色区为完好土工膜单元)。

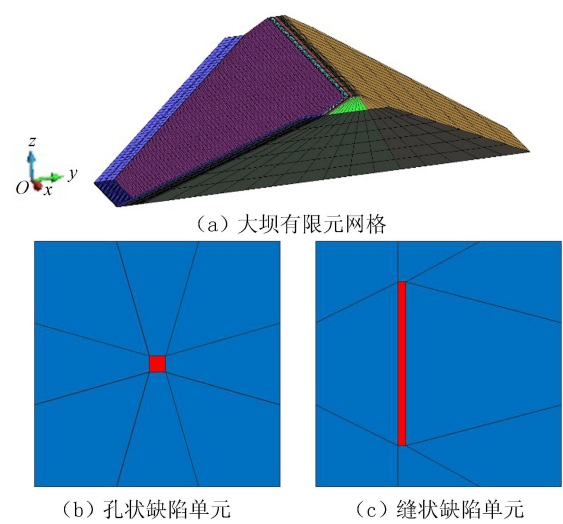


图 1 土工膜防渗土石坝三维有限元网格及缺陷单元示意图

厚度放大后的土工膜等效渗透系数取 3×10^{-9} cm/s,按饱和材料处理。坝体垫层料、过渡料及堆石料的饱和渗透系数分别取 1×10^{-4} cm/s、 2×10^{-3} cm/s 和 2×10^{-1} cm/s,相应的非饱和和渗流特性曲线见图 2。

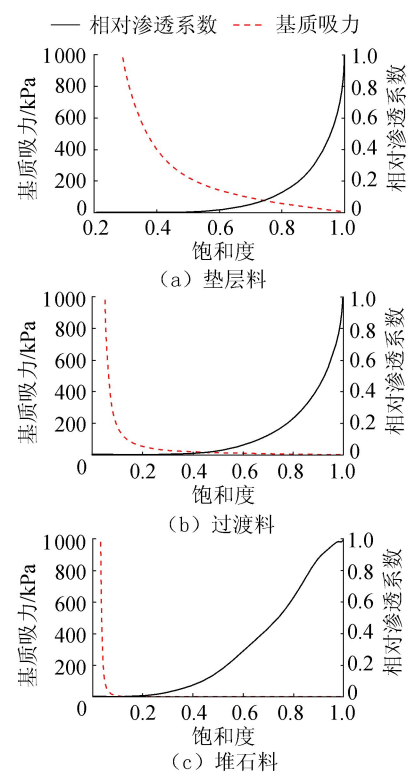


图 2 坝体土石料非饱和和渗流特性曲线

2 土工膜缺陷的数量及分布

目前,采用土工膜防渗的水利工程尚未公开报道其土工膜缺陷统计的详细资料,而采用土工膜防渗的垃圾填埋场中土工膜缺陷检测的资料相对较多,因此本文借鉴垃圾填埋场中土工膜缺陷统计数据,用

于土工膜防渗土石坝缺陷渗漏分析。上海某公司曾对河北、重庆和江苏等地的一些垃圾填埋场进行检测,其土工膜破损孔洞数量及尺寸分布见表1^[18]。

表 1 垃圾填埋场土工膜破损孔洞数量统计

孔洞 尺寸/ mm	孔洞数量(比例)			孔洞 比例平 均值
	河北某垃圾 填埋场	重庆某垃圾 填埋场	江苏某垃圾 填埋场	
<20	9(47.4%)	18(21.4%)	34(25.0%)	31.3%
[20,50)	3(15.8%)	7(8.3%)	21(15.4%)	13.2%
[50,100)	0	10(11.9%)	13(9.6%)	7.2%
[100,200)	6(31.6%)	15(17.9%)	24(17.7%)	22.4%
[200,500)	0	13(15.5%)	18(13.2%)	9.6%
≥500	1(5.2%)	21(25.0%)	26(19.1%)	16.4%

对于图 1 所示的土工膜防渗土石坝,其坝面土工膜铺设面积约为 11 500 m²。根据每 1 万 m² 土工膜中约有 26 个漏水孔的统计数据^[9],计算得到该坝因各种原因产生的土工膜缺陷约为 30 处。目前,国内外对土工膜完整性现场检测得到的结果主要为某一区域出现的缺陷数量、缺陷类型及不同方式(下垫层砾石、机械、人工、漏焊等)引起土工膜破损的概率,而在特定区域内土工膜缺陷服从何种分布尚不清楚。为了研究多缺陷对土工膜防渗土石坝渗流特性的影响,假设该坝土工膜 30 处缺陷按几何位置随机均匀分布在坝面。参考垃圾填埋场土工膜不同大小缺陷所占比例的统计结果,设置 5 组不同的计算工况,其中每组工况进行 3 次坝面土工膜缺陷随机分布计算,以尽可能合理地模拟多缺陷对土工膜防渗土石坝渗流特性的影响。各工况下土工膜缺陷设置如下:工况 1 设置 30 个孔状缺陷,大小均为 10 cm×10 cm;工况 2 设置 30 个缝状缺陷,缝长均为 100 cm;工况 3 按比例生成 30 个不同大小的缺陷孔,具体设置见表 2;工况 4 按比例生成 30 个不同长度的缺陷缝,具体设置见表 3;工况 5-1、工况 5-2、工况 5-3 总缺陷数 30 个,其中缝状缺陷分别占总缺陷数的 10%、20% 和 30%,具体设置见表 4。

各工况下土工膜缺陷属性设置说明如下:根据表 1,尺寸超过 100 cm 的孔洞占总缺陷的 50% 左右,因此工况 1 假设土工膜因垫层砾石顶破、刺破引起的孔状缺陷尺寸为 10 cm×10 cm。目前,国内外的统计资料中因焊接或胶接质量引起的土工膜缝状缺陷很少,出于工程安全考虑,工况 2 假设缝状缺陷长度为 100 cm。工况 3 按表 1 所示的比例平均值分别生成相应数量不同尺寸的缺陷,具体布设要求见表 2,缺陷大小取各孔洞范围的中间值。工况 4 考虑不同长度的缝状缺陷,由于缺乏相应的统计资料,以表 1 中统计数据为基准,生成 30 个不同长度的缺陷缝,见表 4。由于实际工程中各种原因引起的缺陷孔和缺陷缝是随机混合出现的,缺陷缝相对较少。

为了合理模拟实际工程中缺陷组合的可能情况,工况 5 分别假设缺陷缝占缺陷总数的 10%、20% 和 30%,剩余的孔状缺陷数量分布参照表 1 中的比例,以此对坝面土工膜随机生成孔缝组合缺陷,缺陷尺寸分布见表 4。

表 2 工况 3 缺陷属性设置

缺陷孔 大小/mm	采用缺陷孔 大小/mm	所占比例/%	数量/个
[0,20)	10	31.3	9
[20,50)	35	13.2	4
[50,100)	75	7.2	2
[100,200)	150	22.4	7
[200,500)	350	9.6	3
≥500	500	16.4	5

表 3 工况 4 缺陷属性设置

缺陷缝 长度/mm	所取缺陷缝 长度/mm	所占比例/%	数量/个
[0,50)	25	44.4	13
[50,200)	125	29.6	9
[200,500)	350	9.6	3
≥500	500	16.4	5

表 4 工况 5 缺陷属性设置

缺陷 类型	缺陷大小/ mm	所取缺陷 大小	各子工况不同类型缺陷数量/个		
			工况 5-1	工况 5-2	工况 5-3
孔状	[0,20)	10	11	10	9
	[20,50)	35	5	4	4
	[50,100)	75	3	3	2
	[100,200)	150	8	7	6
缝状	≥500	500	3	6	9

3 大坝缺陷渗流特性分析

3.1 单缺陷下的渗流特性

为了与坝面土工膜单缺陷的情况进行对比,先计算单缺陷条件下的大坝渗流场。表 5 给出了坝面土工膜不同位置 and 不同大小单缺陷下大坝渗流量及过缺陷处膜后浸润线高度。假定缺陷分别位于河床中间剖面的上部、中部和下部。各种缺陷条件下,大坝浸润面分布规律相近。图 3 给出了坝面中部土工膜存在 10 cm×10 cm 大小缺陷孔时过缺陷处坝体剖面的浸润线分布。总体而言,单个缺陷对大坝渗流

表 5 土工膜单缺陷时的渗流场计算结果

缺陷 位置	缺陷 大小	土工膜渗透量/ (m ³ ·d ⁻¹)	缺陷渗流量/ (m ³ ·d ⁻¹)	总渗流量/ (m ³ ·d ⁻¹)	浸润线 高度/m
无		39.15		39.15	1.329
坝面	10 cm×10 cm	38.74	2.58	41.32	1.335
上部	100 cm	38.75	4.04	42.79	1.337
坝面	10 cm×10 cm	38.78	3.77	42.55	1.343
中部	100 cm	38.76	6.15	44.91	1.346
坝面	10 cm×10 cm	38.78	7.75	46.53	2.425
底部	100 cm	38.78	10.60	49.38	2.583

注:表中 10 cm×10 cm 表示缺陷孔的大小;100 cm 表示缺陷缝的长度。

量及浸润面的整体影响有限,缺陷渗漏仅改变缺陷附近局部水头等值线的分布。

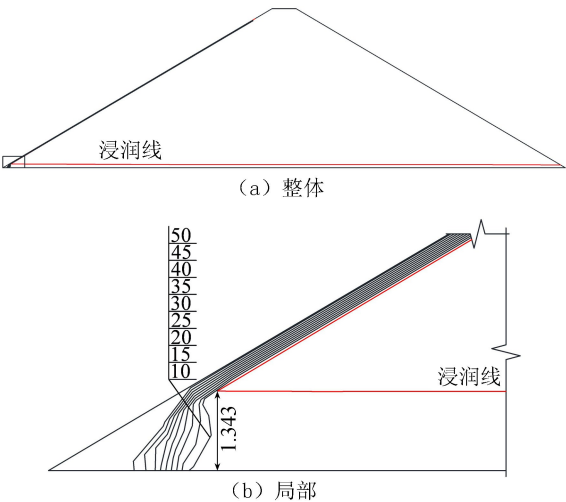


图3 缺陷位于坝面中部时膜后水头分布(单位:m)

3.2 多缺陷下的渗流特性

表6统计了不同计算工况下通过坝面土工膜的渗透量、缺陷渗漏量和总的渗流量。由表6可知,不同计算工况下通过完好土工膜(即缺陷以外处的土工膜)的渗透量较小,为38.59~38.79 m³/d,变化幅度仅为0.2 m³/d,与无缺陷时的坝体总渗流量39.15 m³/d相比,变化微小,也与单缺陷情况下坝面土工膜渗透量接近,因此引起大坝总渗流量变化的因素主要为土工膜缺陷渗漏量。对比工况1和工况2可知,土工膜缺陷三次随机分布下,由30个100 cm长的缝状缺陷引起的缺陷渗漏量大于由30个大小为10 cm×10 cm的孔状缺陷引起的缺陷渗漏量;而缺陷大小及各段数量均随机分布的工况3和工况4则规律相反;对比工况5-1~工况5-3可知,随着缺陷缝所占比例的增加,缺陷渗漏量降低。可见,相同缺陷数量下,大坝的缺陷渗漏量与缺陷的类型、大小及分布特性密切相关。

限于篇幅,本文仅给出工况1和工况5-1的膜后垫层区水头分布云图,见图4和图5,由图可见,由于完好土工膜优越的防渗性能,渗流(渗漏)主要发生在缺陷处,因此缺陷处水头集中分布现象明显,

缺陷附近区域因缺陷渗漏而产生局部饱和区。当两个相邻的孔状缺陷和缝状缺陷间距较小时,缺陷间的交叉渗漏作用使膜后局部水头随着缺陷间距的变化呈现出不同的形状。当缺陷间距小于1.5 m时,两缺陷处膜后局部水头分布呈椭圆形;当缺陷间距为2.0 m时,水头分布呈“8”字形;而当两缺陷间距较大时,缺陷渗漏不再发生交叉作用,此时由孔状缺陷和缝状缺陷引起的膜后局部饱和区呈圆形和长条形。当缺陷较小并且所处位置较高(即缺陷处水头较小)时,由于其影响范围较小,通过膜后水头分布云图将不太容易观测到其引起的局部饱和区。

表6 各工况下大坝渗流量统计 m³/d

计算工况		土工膜渗透量	缺陷渗漏量	总渗流量
工况1	分布1	38.59	258.45	297.03
	分布2	38.59	261.06	299.59
	分布3	38.56	276.82	315.38
工况2	分布1	38.51	304.55	343.06
	分布2	38.52	301.87	340.39
	分布3	38.52	301.34	339.85
工况3	分布1	38.60	252.18	290.78
	分布2	38.59	252.88	291.47
	分布3	38.59	255.66	294.25
工况4	分布1	38.68	209.18	247.86
	分布2	38.69	206.52	245.21
	分布3	38.67	209.86	248.53
工况5-1	分布1	38.73	186.28	225.01
	分布2	38.72	188.86	227.59
	分布3	38.72	192.97	231.70
工况5-2	分布1	38.76	177.99	216.75
	分布2	38.75	181.67	220.42
	分布3	38.75	181.32	220.07
工况5-3	分布1	38.79	167.27	206.06
	分布2	38.78	171.71	210.49
	分布3	38.79	171.97	210.76

根据大坝渗流场计算结果,在河床坝段沿坝轴线从左至右选取9个典型剖面用于统计膜后浸润线高度,剖面位置如图6所示。

限于篇幅,仅选取工况1和工况5-1进行分析,各剖面处膜后浸润线高度见图7。由工况1下缺陷随机分布1和分布2时的浸润线变化可知,当缺陷与大坝最底部的距离小于6 m(即位于水位高程3 m以下)时,缺陷附近的浸润线将突然升高;而由于随

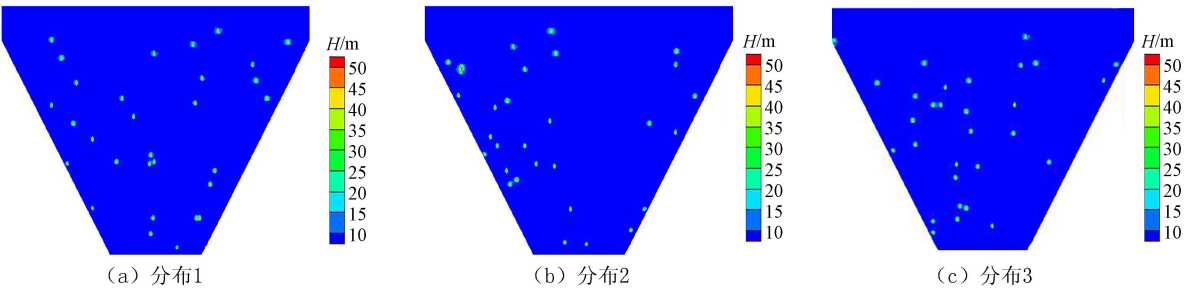


图4 孔状缺陷随机分布(工况1)下膜后水头分布云图

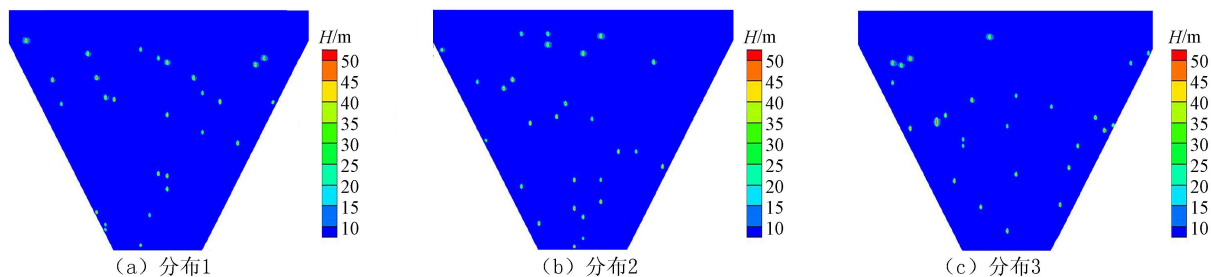


图5 孔状、缝状缺陷随机分布(工况 5-1)下膜后水头分布云图

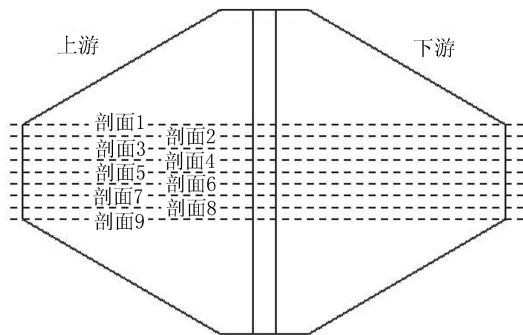


图6 典型剖面设置

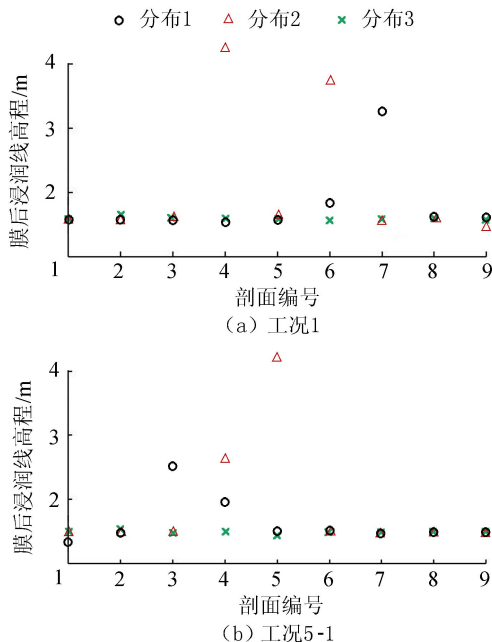


图7 膜后浸润线高度随剖面变化关系

机分布 3 中各缺陷高度均在水位高程 3 m 以上,因此膜后浸润线高度变化较为均匀;不同工况下膜后水头分布云图及相应的膜后浸润线高度变化曲线呈类似规律。多缺陷条件下大坝渗流量大幅增加,因此坝体浸润面整体有所抬升,若坝面底部无缺陷存在,各典型剖面浸润线高度抬升相对均匀,若底部存在缺陷,此处的浸润线将突然升高,抬升高度随缺陷位置的降低而增大。

4 结 论

a. 与坝面土工膜单缺陷情况相比,多缺陷条件

下通过土工膜缺陷的渗漏量明显上升,使得整个大坝的渗流量大幅增加,因此有效控制缺陷数量对限制大坝渗流量至关重要。

b. 与单缺陷情况不同,多缺陷条件下由于大坝渗漏量的大幅提升,膜后坝体浸润面整体有所抬升,但局部浸润线高度变化主要与该剖面处缺陷位置有关,缺陷位置越低,浸润线局部抬升越明显。

c. 多缺陷条件下,膜后垫层水头局部分布规律与缺陷渗漏的交叉效应相关,交叉效应与相邻缺陷之间的距离有关。

参考文献:

- [1] MULLER W W. HDPE geomembranes in geotechnics [M]. Berlin: Springer, 2010.
- [2] 《土工合成材料工程应用手册》编委会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [3] 顾淦臣. 土工膜用于水库防渗工程的经验[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29 (6): 34-38, 40. (GU Ganchen. Experience of applying geomembrane in reservoir seepage control[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29 (6): 34-38, 40. (in Chinese))
- [4] 束一鸣. 我国水库大坝土工膜防渗工程进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (5): 20-26. (SHU Yiming. Progress in geomembrane barriers for seepage prevention in reservoirs and dams in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (5): 20-26. (in Chinese))
- [5] 岑威钧, 沈长松, 童建文. 深厚覆盖层上复合土工膜防渗堆石坝坝填特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30 (1): 175-180. (CEN Weijun, SHEN Changsong, TONG Jianwen. Study of construction behavior of composite geomembrane rockfill dam on thick alluvium deposit[J]. Rock-soil Mechanics, 2009, 30 (1): 175-180. (in Chinese))
- [6] ICOLD. Geomembrane sealing systems for dams: design principles and return of experience (Bulletin 135) [R]. Paris: The International Commission on Large Dams, 2010.
- [7] 岑威钧. 土石坝防渗(复合)土工膜缺陷及其渗漏问题研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (1): 1-7.

- (CEN Weijun. Advances in research of defects and leakage of (composite) geomembrane in earth-rock dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 1-7. (in Chinese))
- [8] NOSKO V, TOUZE-FOLTZ N. Geomembrane liner failure; modeling of its influence on contaminant transfer [C]//Proceedings of the 2nd Eurogeo Geosynthetics Conference. Bologna: [s. n.], 2000: 557-560.
- [9] GIROUD J P. Design of geotextiles associated with geomembranes [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles. Las Vegas: NV, 1982: 37-42.
- [10] 岑威钧,和浩楠,温朗昇. 防渗土工膜的缺陷特性与缺陷渗漏研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017,45(1): 36-44. (CEN Weijun, HE Haonan, WEN Langsheng. Research progress on defect property and defect induced leakage of impermeable geomembrane[J]. Journal of Hohai University(Nature Science), 2017, 45(1): 36-44. (in Chinese))
- [11] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes-part: I [J]. Geomembrane liners, Geotextiles and Geomembranes, 1989, 8(1): 27-67.
- [12] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes-part: II [J]. Geomembrane liners, Geotextiles and Geomembranes, 1989, 8(2): 71-111.
- [13] GIROUD J P, KHIRE M V, MCKELVEY J A. Rate of leachate migration through a defect in a geomembrane underlain by a saturated permeable medium [J]. Geosynthetics International, 1997, 4(3/4):323-334.
- [14] ELOY-GIORNI C, PELTE T, PIERSON P. Water diffusion through geomembranes under hydraulic pressure [J]. Geosynthetics International, 1996, 3(6):741-769.
- [15] 岑威钧,和浩楠,李邓军. 土工膜缺陷对土石坝渗流特性的影响及控制措施[J]. 水利水电科技进展,2017,37(3): 61-65, 71. (CEN Weijun, HE Haonan, LI Dengjun. Influence of geomembrane defect on seepage property of earth-rock dams and measures of seepage control [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 61-65, 71. (in Chinese))
- [16] 岑威钧,王蒙,杨志祥. (复合)土工膜防渗土石坝饱和-非饱和渗流特性[J]. 水利水电科技进展, 2012,32(3): 6-9. (CEN Weijun, WANG Meng, YANG Zhixiang. Partial saturated seepage properties of (composite) geomembrane earth-rock dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 6-9. (in Chinese))
- [17] 介玉新,李广信. 有限元计算中土工合成材料渗流问题的处理[J]. 水利水电科技进展,2009,29(6):42-43, 62. (JIE Yuxin, LI Guangxin. FEM calculation of seepage through geosynthetics [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 42-43,62. (in Chinese))
- [18] 高康,兰吉武. 电学渗漏探测法用于垃圾填埋场防渗土工膜施工的破坏分析[J]. 环境卫生工程,2008,16(1):16-18. (GAO Kang, LAN Jiwu. Analysis about construction destruction of impervious geomembrane using electrical seepage measurement method in waste landfill sites[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2008,16(1):16-18. (in Chinese))

(收稿日期:2017-06-15 编辑:骆超)

(上接第 53 页)

- [15] 陆健辉,阮龙飞,王永庆. 长江口软土地基水库围堤的防渗体结构探讨[J]. 岩土工程学报,2016,38(增刊1): 195-202. (LU Jianhui, RUAN Longfei, WANG Yongqing. Impervious structure of reservoir embankment in soft soil foundation of Yangtze Estuary [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup1): 195-202. (in Chinese))
- [16] 张海龙,马斌,梁亚平. 充填袋装砂围堰防渗结构研究[J]. 陕西水利,2017(1):102-104. (ZHANG Hailong, MA Bin, LIANG Yaping. Study on anti-seepage structure of filled sand-bag cofferdam [J]. Shaanxi Water Resources,2017(1):102-104. (in Chinese))
- [17] MULLER L. 岩石力学[M]. 李世平,冯震海,译. 北京:煤炭工业出版社,1981:276-278.
- [18] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005:115-118.

(收稿日期:2017-05-24 编辑:熊水斌)

(上接第 25 页)

- [16] 吉飞,李志伟,赵汗青. 水动力作用下泥沙对磷的吸附特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(1): 56-62. (JI Fei, LI Zhiwei, ZHAO Hanqing. Characteristics of adsorption of phosphorus by sediment under hydrodynamic action [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(1):56-62. (in Chinese))
- [17] 肖洋,余维维,成浩科,等. 淮中游泥沙对磷吸附/解吸规律[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(4):307-312. (XIAO Yang, YU Weiwei, CHENG Haoke, et al. Phosphorus adsorption and desorption behavior of sediments in midstream of Huaihe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(4): 307-312. (in Chinese))

(收稿日期:2017-06-06 编辑:熊水斌)