

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.05.005

考虑土工膜缺陷的石渣坝三维渗流特性分析

岑威钧^{1,2},陈司宁¹,李邓军¹,龚道勇³

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心,河南 郑州 450003;
3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司,湖北 武汉 430010)

摘要:以某中型水库覆盖层上土工膜防渗石渣坝为例,重点考虑坝面土工膜缺陷不同的类型、大小及其分布等不利因素,采用有限元法对大坝及地基开展三维渗流场数值模拟,并根据大坝水头分布、渗流量和渗透坡降计算成果,对大坝防渗安全性进行分析评价。结果表明:坝面土工膜缺陷主要影响坝体部分渗流场,局部抬高了浸润线,对坝基及两岸影响小;流经坝体部分的渗流量有大幅提升;缺陷附近膜后垫层发挥了防渗作用,局部渗透坡降增加明显。总体上,该大坝渗控安全能够满足正常运行要求。

关键词:土工膜;缺陷形式;缺陷渗漏;水头分布;渗流量;渗透坡降;石渣坝

中图分类号:TV441 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)05-0413-06

Characteristic analysis of 3D seepage field of a geomembrane faced rockfill dam considering defects of geomembrane

CEN Weijun^{1,2}, CHEN Sining¹, LI Dengjun¹, GONG Daoyong³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Dike Safety and Disease Prevention Engineering Technology Research Center of Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China;

3. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: Taking a geomembrane faced rockfill dam on thick overburden of a medium-sized reservoir as an example, the finite element method is adopted to carry out the three-dimensional numerical simulation of seepage field of the dam and foundation, focusing on some influence factors, e. g., different types, sizes and distributions of geomembrane defects. According to the calculation results of dam head distribution, seepage discharge and seepage gradient, the dam seepage safety is analyzed and evaluated. The results show that when the geomembrane has defects, it mainly affects the partial seepage field of the dam body and locally raises the phreatic line, but has little effect on the foundation and abutments. The seepage discharge through the dam body has also been greatly increased. The cushion layer behind the membrane near the defect plays an anti-seepage role, and the corresponding local seepage gradient increases significantly. In general, the seepage prevention design can meet the requirements of normal operation of the dam.

Key words: geomembrane; type of defect; defect-induced leakage; head distribution; seepage discharge; seepage gradient; rockfill dam

土工膜是一类高分子聚合物制成的柔性薄膜材料,具有防水性能好、备货容易、施工速度快和经济优势明显等优点,已广泛应用于土石坝、堤防、围堰、库盆、蓄水池、渠道等各类水利工程的防渗^[1-3]。目前,我国有不少于50座新老土石坝工程采用土工膜防渗或进行渗漏修复^[4-6]。土工膜的渗透性极低^[7],但是厚度薄(常用厚度为0.8~1.2 mm),抵抗破坏能力弱。另外,在土工膜铺设及保护层(尤其是采用颗粒料垫层或上保护层)施工时,一些粗放式施工模式极易造成较大数量大小各异的破损。图1为已建两座土工膜防渗土石坝复查时发现的坝面土工膜破损情况。岑威钧等^[8-9]从产品质量、受力、施工、设计、运行等方面阐述了土石坝中防渗土工膜各类缺陷形式及其产生原因,并开展了缺陷渗漏模拟及其影响效应分析研究^[10-12]。在国

基金项目: 国家自然科学基金(51979089,51679073);水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放基金(2018004)
作者简介: 岑威钧(1977—),男,教授,博士,主要从事土工膜防渗与土石坝抗震研究。E-mail: hhuwuj@163.com
引用本文: 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 geomembrane faced rockfill dam considering defects of geomembrane[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(5):413-418.

外,有学者对某工程 28 处 20 万 m²土工膜进行质量检测,结果平均每 1 万 m²中有 26 个漏水点,其中 15% 为孔眼缺陷^[13]。Nosko 等^[14]通过对 300 多处大约 325 万 m²土工膜防渗工程质量检测,结果表明大小为 0.5~10 cm²的缺陷占总缺陷的 85.8%,其中由下垫层石块引起的顶破/刺破占缺陷总数的 71.17%。由此可见,实际工程应用土工膜防渗时,土工膜不可避免地会遭到不同程度的破坏(顶破、刺破、穿破、拉裂等),形成宏观缺陷。因此,在设计土工膜防渗土石坝时应充分考虑合理有限的土工膜缺陷,开展考虑缺陷渗漏条件下的大坝渗流特性及其潜在不利影响因素的计算分析^[15],进而定量评估大坝的渗控安全性,为工程设计、施工和安全运行提供必要的缺陷限制措施建议。

1 工程概况

某中型水库工程,正常蓄水位为 260.00 m,设计洪水位为 260.26 m,校核洪水位为 261.33 m,水库总库容 1 137.24 万 m³。拦河大坝采用复合土工膜防渗石渣坝,坝顶高程 262.50 m,坝顶不设防浪墙,坝顶长度为 131.00 m、宽度为 6.0 m,最大坝高为 26.8 m。坝体采用碾压石渣料填筑,大坝上游坝坡坡比为 1:3.5,表面铺设土工膜防渗,高程 250.00 m 以下与围堰结合布置。下游坝坡于高程 247.00 m 处设宽 2.0 m 马道一处,高程 247.00 m 以上坝坡坡比为 1:3.0,采用 C25 钢筋混凝土格构+草皮护坡;高程 247.00 m 以下为排水棱体,排水棱体上游坡比为 1:1.5,下游坡比为 1:2,下游侧表面采用 50 cm 厚干砌块石护坡。该工程坝基覆盖层较厚,最厚处为 11 m,主要为褐黄-褐灰色粉质黏土,可塑状,为中压缩性土,渗透系数 $9.3\times10^{-6}\sim3.6\times10^{-5}$ cm/s。两岸均为侏罗系上统遂宁组 J3s 泥岩,岸坡覆盖层较薄,两岸岩体强风化厚度一般为 0~0.60 m,岩体弱风化带厚度一般为 10.30~16.90 m,风化层范围较大。为了有效控制坝基渗流,对坝基覆盖层设置防渗墙,墙顶通过趾板与坝面复合土工膜连接,墙底与帷幕灌浆相连。河床段防渗墙最大深度为 15.3 m,帷幕最大深度为 11.3 m;两岸坝肩风化程度高,采用帷幕灌浆,其中左侧长约 179 m,右侧长约 188 m,最大深度为 24.4 m;土工膜、趾板、防渗墙和帷幕构成了整个坝体和坝基的防渗体系。

2 有限元计算模型及计算条件

2.1 有限元计算模型

根据坝址处地形地质条件、坝体结构及防渗设计方案,合理选取渗流计算域,并进行三维建模。剖分后的有限元网格见图 2,其中结点数 62 695 个,单元数 60 042 个。有限元建模时重点对大坝及坝基的渗控措施(土工膜+趾板+防渗墙+帷幕)进行精细模拟,其中土工膜等效为一定厚度的多孔介质材料,并对其渗透系数进行相应的调整^[16-17]。相关网格见图 3。

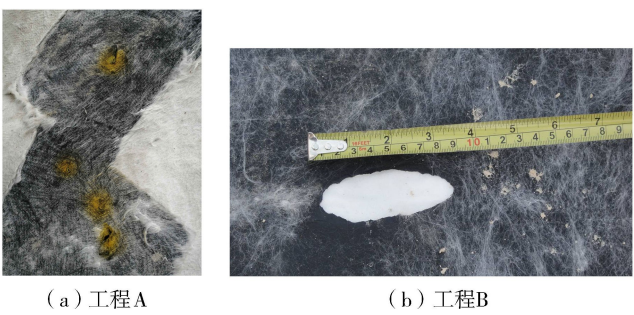


图1 坝面土工膜缺陷

Fig.1 Defects of geomembrane on dam surface

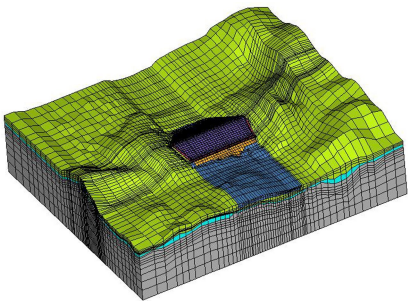


图2 大坝三维渗流场有限元计算网格

Fig.2 Three-dimensional finite element mesh of dam's seepage field

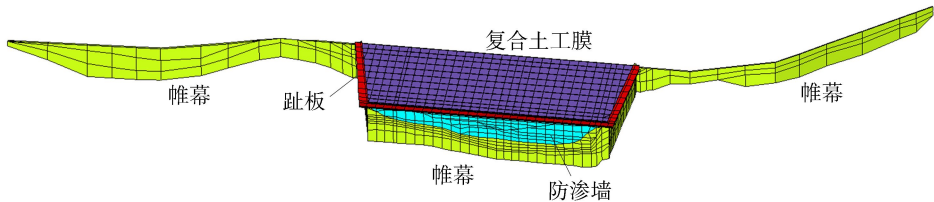


图3 大坝及坝基防渗体系有限元网格

Fig.3 Finite element mesh of seepage control system for dam and foundation

2.2 渗透系数取值

计算域内坝体及坝基各材料分区的渗透系数取值如下:混凝土趾板 1.00×10^{-7} cm/s,砂砾料垫层 1.00×10^{-3} cm/s,复合土工膜 1.00×10^{-10} cm/s,上游围堰(泥岩石渣料) 2.00×10^{-4} cm/s,坝体石渣料(泥岩石渣料) 5.00×10^{-4} cm/s,反滤层(灰岩料) 0.01 cm/s,排水棱体(灰岩料) 0.10 cm/s,防渗墙(混凝土) 1.00×10^{-7} cm/s,基岩帷幕灌浆 1.00×10^{-5} cm/s,强风化基岩(泥岩) 1.00×10^{-3} cm/s,弱风化基岩(泥岩) 1.00×10^{-4} cm/s,5Lu 线以下岩基(泥岩) 1.00×10^{-5} cm/s,坝基覆盖层(粉质黏土) 1.00×10^{-5} cm/s。

2.3 渗流计算工况

按照土石坝设计规范,渗流计算时应考虑不同的水位组合,一般包括正常蓄水位、设计洪水位、校核洪水位及上游最不利水位等组合。限于篇幅,仅列举正常蓄水位下的各种计算工况。

关于坝面土工膜缺陷特性,目前尚无理论推测分析方法或可靠的实测统计数据可供参考,但是可以借鉴垃圾填埋场中土工膜缺陷统计数据。根据相关文献^[12,18]中河北、重庆和江苏等一些垃圾填埋场土工膜缺陷探测的实测资料进行分析,可得缺陷尺寸小于 20 mm、20 ~ 50 mm、50 ~ 100 mm、100 ~ 200 mm、200 ~ 500 mm 及大于 500 mm 的缺陷个数平均占比分别为 31.3%、13.2%、7.2%、22.4%、9.6% 和 16.4%。按该统计数据,基本可进行缺陷大小及各自数量的确定,前期计算分析表明模拟方法较为合理可行^[12]。计算中,土工膜缺陷考虑孔状和缝状两种类型。孔状缺陷用于模拟土工膜因土石颗粒或外力等引起的集中顶破和刺破,尺寸大小不一,但相对较小;缝状缺陷用于模拟土工膜连接处焊接质量问题及与周边刚性建筑物连接时因不均匀沉降导致的缝状拉裂区,尺寸相对较大。国际统计资料^[13]表明,对于施工质量好的土工膜防渗工程,一般每 1 万 m²土工膜中有 26 个渗漏点。本工程坝面土工膜铺设面积约为 6 000 m²,据此可推算正常施工条件下坝面土工膜可能的缺陷数约为 16 处。根据统计数据,可以确定不同的缺陷特性,进而合理构造不同的缺陷计算工况,见表 2(表中 WH 代表土工膜完好,QX 代表土工膜有缺陷)。

表 1 计算工况及坝面土工膜缺陷属性
Table 1 Calculating schemes and defect properties of geomembrane on dam surface

工况编号	工况属性
WH	正常蓄水位,坝面土工膜完好无缺陷
QX1	16 个孔状缺陷,假设大小均为 50 mm×50 mm,位置随机分布,其余同工况 WH
QX2	16 个孔状缺陷,大小分别为 10 mm、35 mm、75 mm、150 mm、350 mm 和 500 mm,计算得到相应的个数分别为 5、2、1、4、2 和 2 个,位置随机分布,其余同工况 WH
QX3	16 个缝状缺陷,按统计数据设置大小分别为 25 mm、125 mm、350 mm 和 500 mm,计算得到相应的个数分别为 7、5、2 和 2 个,位置随机分布,其余同工况 WH
QX4	16 个缺陷孔和缺陷缝随机混合出现,其中缝状缺陷占比 15%,即大小为 10 mm、35 mm、75 mm、150 mm 的孔状缺陷分别为 6、2、2 和 4 个,500 mm 长的缝状缺陷 2 个,位置随机分布,其余同工况 WH

3 大坝三维渗流场特性分析

3.1 等水头线分布

根据有限元计算得到的大坝三维渗流场节点水头,绘制不同剖面的等水头线分布图。限于篇幅,仅给出两个典型工况的成果图,图 4 和图 5 分别为正常蓄水位下坝面土工膜完好(工况 WH)及考虑一定缺陷(工况 QX1)时的典型剖面等水头线图。由图 4 和图 5 可知,无论土工膜完好还是存在一定缺陷,总体具有如下特点:(a)整个大坝(含坝基)渗流场等水头线和渗流自由面(浸润线)分布合理,等水头线形态、走向和密集程度反映了相应区域材料渗透特性和(或)边界条件。(b)在土工膜、趾板、防渗墙和帷幕的联合防渗作用下,坝体内渗流自由面低,基本处于疏干区,渗透水流主要集中于坝基。土工膜、趾板、防渗墙和帷幕处等水头线密集,表明防渗作用显著,其他区域等水头线变化相对平缓,可见防渗体系对整个大坝渗流场的控制较为有效。(c)考虑坝面土工膜缺陷后,与土工膜完好时相比,整个大坝渗流等水头线分布规律总体相似。但是,由于库水通过土工膜缺陷直接流入坝体,防渗体系后的浸润线有所升高,在上游侧最大升高约 2.40 m,并沿渗透水流方向二者浸润线高差逐渐减小。由此可见,当坝面土工膜缺陷控制在目前施工质量能达到的合理数量时,缺陷渗漏对大坝渗流场水头分布的影响总体有限,仅对上游侧浸润线产生一定影响。

3.2 坝体和坝基渗流量

表 2 为各工况下大坝分区渗流量及总渗流量,以坝体左右岸边界为界,将坝基及坝肩分为左岸、河床和

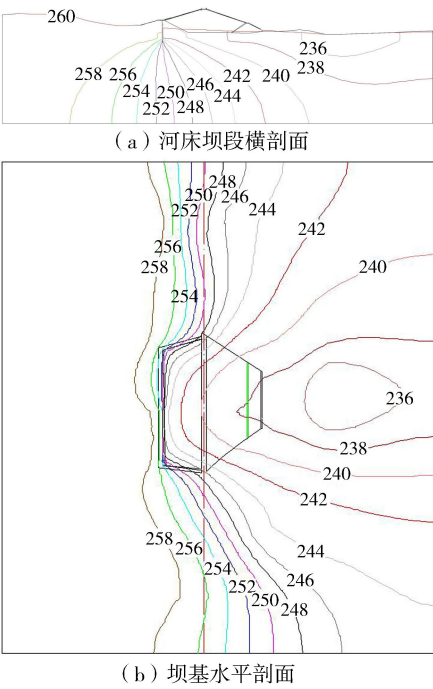


图 4 工况 WH 大坝等水头线分布(单位:m)

Fig.4 Isolines of water head for dam case WH(unit:m)

右岸 3 区。由表 2 可知,坝面土工膜完好时,在土工膜、趾板、防渗墙及帷幕组成的防渗体系作用下,整个大坝渗流场的渗透水流得到有效控制,总渗流量不大。其中,流经坝体部分的渗流量很小,渗流量基本集中于坝基(河床及两岸绕渗)。流经坝体、河床、左岸、右岸的渗流量分别约占总渗流量(314.53 m³/d)的 0.53%、10.35%、39.90% 和 49.22%。可见,土工膜完好时对坝体部分的渗控效果是非常理想的。然而事实上,由于多种原因土工膜缺陷在所难免。一旦出现缺陷,流经坝体部分的渗流量大幅上升,使大坝总渗流量明显增大,但坝基及两岸的渗流量变化不明显。各缺陷工况(QX1~QX4)下,大坝总渗流量与无缺陷情况(314.53 m³/d)相比,增幅分别为 30.53%、79.62%、47.38% 和 72.87%。其中,因土工膜缺陷导致坝体渗流量从 1.68 m³/d 依次升至 100.40 m³/d、268.30 m³/d、157.40 m³/d 和 247.60 m³/d, 占总渗流量的比例从 0.53% 分别增至 24.54%、47.49%、33.96% 和 45.54%。显然,不同的土工膜缺陷状态均显著增大了坝体渗流量。因此,从控制流量角度来说,确保坝面土工膜完好无损是非常有效且必要的。

3.3 渗透坡降

表 3 为各工况下大坝各分区最大渗透坡降计算值。由表 3 可知:(a)各工况下对坝体和坝基起防渗作用的复合土工膜、防渗墙和帷幕的渗透坡降较大,但均小于允许渗透坡降,渗控体系能够安全运行。(b)坝基覆盖层渗透坡降最大值为 0.41,小于允许坡降 0.45~0.56,因此不会发生渗透破坏。值得注意的是,如果坝基防渗墙出现劈叉等缺陷时,覆盖层渗透坡降一般会显著增大,因此施工时应确保坝基防渗体的质量。(c)坝面土工膜出现缺陷破损后,缺陷附近局部区域垫层承担主要的防渗作用,使其局部渗透坡降增加明显,同时还影响下部的坝体石渣料,其余部位渗透坡降整体变化不大。垫层渗透坡降从土工膜完好时的 0.27 分别增至 1.78、1.47、0.51 和 1.48(对应工况 QX1~QX4),均位于缺陷附近。总体而言,防渗体系完好时,坝体和坝基均不会出现渗透问题。一旦土工膜出现缺陷,其后垫层的局部渗透坡降会显著增大,需做好相应的反滤保护设计,以策安全。

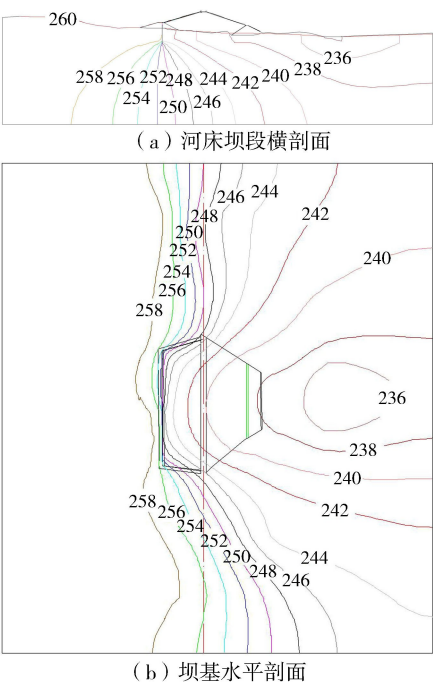


图 5 工况 QX1 大坝等水头线分布(单位:m)

Fig.5 Isolines of water head for dam case QX1(unit:m)

表 2 不同工况下坝体及坝基渗流量

Table 2 Seepage discharge of dam body and dam foundation for different cases

工况	渗流量/(m ³ ·d ⁻¹)				
	坝体	河床	左岸	右岸	合计
WH	1.68	32.55	125.50	154.80	314.53
QX1	100.40	30.16	125.90	154.10	410.56
QX2	268.30	26.37	119.80	150.50	564.97
QX3	157.10	29.45	122.50	154.20	463.55
QX4	247.60	26.43	118.40	151.30	543.73

表 3 不同工况下各分区最大渗透坡降

Table 3 Maximum seepage gradient of each zone for different cases

工况	土工膜	垫层	围堰	坝体石渣料	反滤层	防渗墙	帷幕	坝基覆盖层
WH	105.97	0.27	0.05	0.04	<0.001	21.36	21.39	0.41
QX1	105.46	1.78	0.04	0.40	0.01	19.75	21.12	0.32
QX2	97.00	1.47	0.04	1.42	0.02	15.39	17.09	0.28
QX3	101.96	0.51	0.04	0.84	0.01	18.03	18.87	0.31
QX4	98.64	1.48	0.04	1.31	0.02	16.02	16.56	0.27

4 结 论

- a. 在土工膜、趾板、防渗墙和帷幕的联合防渗作用下,整个大坝(含坝基)渗流场等水头线分布合理,坝内浸润线低。坝面土工膜有限数量的缺陷对整个渗流水头分布影响不大,主要对缺陷附近膜后局部范围内的浸润线有一定的作用。
- b. 从控制流量角度来说,确保坝面土工膜完整性是非常必要且有效的。对本文实例而言,坝面土工膜完好时,流经坝体、河床、左岸、右岸的渗流量分别约占总渗流量(314.53 m³/d)的 0.53%、10.35%、39.90% 和 49.22%,可见土工膜对坝体的渗控效果非常理想。一旦土工膜出现缺陷,坝体部分的渗流量大幅上升,增幅为 24.54%~45.54%,使大坝总渗流量明显增大,但坝基及两岸的渗流量变化不明显。
- c. 大坝防渗体系完好时,坝体大部分处于渗流疏干区,坝体和坝基渗透坡降均较小,不存在渗透破坏问题。若坝面土工膜出现缺陷,缺陷附近垫层及以下部分坝体局部渗透坡降会显著增大,需做好相应的反滤保护设计。建议考虑采用面板堆石坝中的垫层和过渡层设计方法,以确保渗透安全性。总体而言,在合理控制大坝施工质量、确保土工膜缺陷合理可控的前提下,整个大坝渗流特性能满足安全运行的要求。

参考文献:

[1] KOERNER R. Designing with geosynthetics (Vol. 1) [M]. Bloomington : Xlibris Corporation , 2012 .

[2] MULLER W W. HDPE geomembranes in Geotechnics [M]. Berlin : Springer , 2010 .

[3] 岑威钧,温朗昇,和浩楠. 水库工程防渗土工膜的强度、渗漏与稳定若干关键问题 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25 (6) : 1183-1192. (CEN Weijun, WEN Langsheng, HE Haonan. Strength, leakage and stability problems of impermeable geomembrane for reservoir project [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25 (6) : 1183-1192. (in Chinese))

[4] 顾淦臣. 复合土工膜或土工膜堤坝实例述评 [J]. 水利水电技术, 2002, 33 (12) : 26-32. (GU Ganchen. Review of dams and dikes with composite geomembrane impervious structure [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33 (12) : 26-32. (in Chinese))

[5] 顾淦臣,沈长松,吴江斌. 应用复合土工膜加固石砭峪沥青混凝土斜墙坝 [J]. 水利水电科技进展, 2004, 24 (1) : 10-14. (GU Ganchen, SHEN Changsong, WU Jiangbin. Reinforcement of Shibianyu asphalt concrete slope wall rockfill dam with composite geomembrane [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24 (1) : 10-14. (in Chinese))

[6] 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筑坝特性研究 [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 and Soil Mechanics, 2009, 30 (1) : 175-180. (in Chinese))

[7] 崔中兴,刘兰亭. 土工膜渗透特性测试试验研究 [J]. 西北水资源与水工程, 1994, 5 (4) : 30-35. (CUI Zhongxing, LIU Lanting. Experimental study on permeability of geomembrane [J]. Water Resources & Water Engineering, 1994, 5 (4) : 30-35. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 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))

[10] 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. (CEN Weijun, HE Haonan, LI Dengjun. Influence of the defect-induced leakage on the seepage property of geomembrane earth-rock dams and seepage control method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (3) : 61-65. (in

Chinese))

[11] 岑威钧,王辉,李邓军.土工膜缺陷对土石坝渗流特性和坝坡稳定的影响[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(7):589-595. (CEN Weijun, WANG Hui, LI Dengjun. Influence of geomembrane defects in earth-rock dam with different geomembrane layouts on seepage property and dam safety[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(7): 589-595. (in Chinese))

[12] 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 property of geomembrane faced earth-rock dams due to random multiple defects on geomembrane[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3): 60-65. (in Chinese))

[13] GIROUD J P. Design of geotextiles associated with geomembranes[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles. Las Vegas; NV, 1982:37-42.

[14] 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.

[15] GUO Wei, CHU Jian, ZHOU Bo, et al. Analysis of geomembrane failure due to liquid flow through composite liner[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(3): 247-253.

[16] 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. (JIE Yuxin, LI Guangxin. FEM calculation of seepage through geosynthetics[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 42-43. (in Chinese))

[17] 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))

[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:2020-02-20 编辑:胡新宇)

(上接第400页)

[12] DUAN Yihong, QIN Zenghao, LI Yongping. Influence of sea level rise on Shanghai astronomical tide and storm surge and estimation of probable water level[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1998, 16(4): 298-307.

[13] KARIM M F, MIMURA N. Impacts of climate change and sea-level rise on cyclonic storm surge floods in Bangladesh[J]. Global Environmental Change, 2008, 18: 490-500.

[14] TEBALDI C, STRAUSS B H, ZERVAS C E. Modelling sea level rise impacts on storm surges along US coasts [J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(1): 1-11.

[15] ZHAO Changjin, GE Jianzhong, DING Pingxing. Impact of sea level rise on storm surges around the Changjiang Estuary[J]. Journal of Coastal Research, 2014, 68 (Supl): 27-34.

[16] 潘存鸿,郑君,陈刚,等.杭州湾潮汐特征时空变化及原因分析[J].海洋工程,2019,37(3):1-11. (PAN Cunhong, ZHENG Jun, CHEN Gang, et al. Spatial and temporal variations of tide characteristics in Hangzhou Bay and cause analysis[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(3): 1-11. (in Chinese))

[17] 潘存鸿,韩曾萃.钱塘江河口保护和治理研究[M].北京:中国水利水电出版社,2017.

[18] 孙佳,王燕妮,左军成.江浙沿海台风特征分析[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(3):215-221. (SUN Jia, WANG Yanni, ZUO Juncheng. Characteristic analysis of typhoon along coastal areas of Jiangsu and Zhejiang provinces[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(3): 215-221. (in Chinese))

[19] 谢亚力,黄世昌,王瑞锋,等.钱塘江河口围涂对杭州湾风暴潮影响数值模拟[J].海洋工程,2007,25(3):61-67. (XIE Yali, HUANG Shichang, WANG Ruifeng, et al. Numerical simulation of effects of reclamation in Qiantang Estuary on storm surge at Hangzhou Bay[J]. The Ocean Engineering, 2007, 25(3): 61-67. (in Chinese))

[20] 韩树宗,潘嵩.杭州湾台风风暴潮增水过程的数值分析[J].中国海洋大学学报,2013,43(7):1-6. (HAN ShuZong, PAN Song. Numerical simulation and analysis of storm surge in the Hangzhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(7): 1-6. (in Chinese))

[21] 陈美香,左常圣,张雯皓,等.热带太平洋海平面年际和年代际变化研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(3): 249-255. (CHEN Meixiang, ZUO Changsheng, ZHANG Wenhao, et al. Research progress of inter-annual and multi-decadal sea level variability in tropical Pacific Ocean[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(3): 249-255. (in Chinese))

[22] 2018年浙江省海洋灾害公报[R].杭州:浙江省海洋与渔业局,2019.

(收稿日期:2020-01-20 编辑:胡新宇)