

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2017.03.010

土工膜缺陷对土石坝渗流特性的影响及控制措施

岑威钧, 和浩楠, 李邓军

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 由于土工膜因缺陷导致的渗漏问题可能对土工膜防渗土石坝工程安全造成隐患, 为此模拟不同的土工膜缺陷大小和位置, 分别采用剔除单元法和渗透系数放大法对存在缺陷的土工膜坝面防渗土石坝进行饱和-非饱和和三维渗流场有限元数值仿真计算, 分析土工膜不同缺陷条件下大坝整体及局部渗流场变化规律。计算结果表明: 土工膜缺陷渗漏仅对缺陷附近坝体局部渗流场分布产生较大影响, 对大坝其他部位影响不大; 土工膜缺陷位置越低, 缺陷处水头越大, 缺陷渗漏量增加越明显, 并使缺陷处膜后坝体浸润线局部抬高。最后, 针对土工膜缺陷渗漏提出了若干工程设计控制措施。

关键词: 土工膜缺陷; 流量等效原则; 缺陷渗流模拟方法; 渗漏控制措施; 土石坝

中图分类号: TV441; TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2017)03-0061-05

Influence of geomembrane defect on seepage property of earth-rock dams and measures of seepage control//CEN Weijun, HE Haonan, LI Dengjun (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Geomembrane defect-induced leakage may cause potential hazards to an earth-rock dam with geomembrane on the dam surface used for seepage control. Therefore, three-dimensional saturated-unsaturated seepage fields with different sizes of geomembrane defects occurring at different locations on the surface of an earth-rock dam were simulated with the finite element method. The laws of variations of the entire and local seepage fields with different geomembrane defects were analyzed. The seepage behavior induced by geomembrane defects was simulated using the methods of removing defect elements and amplifying the permeability, respectively. Results show that defect-induced leakage has significant influence on the local seepage field near the defects and little influence on other parts of the dam body. With the low position of geomembrane defects, the head at defects will increase, leading to significant increases of the total seepage flow and local elevation of phreatic lines across the defects. Finally, some methods were proposed for control of defect-induced leakage in engineering design.

Key words: geomembrane defect; principle of equivalent seepage flow; simulation method of defect-induced leakage; measure of seepage control; earth-rock dam

品质完好的土工膜或复合土工膜具有优越的防渗性能和较好的延伸性, 且具有施工速度快和造价低廉等优点。目前, (复合) 土工膜已广泛应用于土石坝、堤防、围堰、库底、蓄水池、渠道等防渗工程中^[1-4]。然而现有条件下, 土工膜在实际工程防渗应用时很难避免各类缺陷的产生。岑威钧^[5]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, 其中施工引起的缺陷占很大比例。国外曾对某工程 28 处共 20 万 m² 土工膜进行质量检测, 发现平均每 1 万 m² 中有 26 个漏水孔, 其中 69% 出现在焊缝处^[1]。我国对土工膜施工工艺研究较晚, 目前还缺乏施工相关的规范或导则等施工技术条文, 同时还

缺乏有经验的施工队伍, 因此土工膜可能更易出现各种施工缺陷。其他如变形不协调导致的土工膜撕裂, 水压或气压引起的局部胀破等也是工程中较为普遍存在的。由于缺陷成因和类型的复杂性, 为了便于定量描述与比较, 学术界习惯将实际各种形状的缺陷按照面积等效的原则当量处理成圆形缺陷和缝状缺陷两大类。国际著名的土工合成材料专家 Giroud 和其合作者、Eloy-Giorni, Jayawickrama 等学者^[6-10]对土工膜缺陷渗漏做了不少研究, 这些研究基本上是开展室内试验或推导半理论半经验公式, 相关成果主要适用于垃圾填埋场等低水头渗漏问题。对于土石坝等高水头防渗工程, 目前尚无成熟的试验或理论研究成果可供直接使用。土工膜缺陷

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20141418); 国家自然科学基金(51679073); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(YS11001)

作者简介: 岑威钧(1977—), 男, 副教授, 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: hhuwcj@163.com

的存在,破坏了大坝防渗屏障的完整性,缺陷处成为集中渗漏点,势必影响坝体渗流场分布特性,可能对大坝的防渗安全性造成隐患。为此,采用三维饱和-非饱和渗流有限元理论,针对典型的土工膜防渗土石坝建立有限元计算模型,分别采用两种方法对土工膜缺陷渗漏行为进行模拟,重点研究土工膜不同缺陷条件(缺陷大小和缺陷位置)对坝体渗流场的影响规律,分析评价缺陷渗漏对大坝防渗安全性的影响程度。最后,针对缺陷渗漏问题提出了工程设计控制措施。

1 土工膜渗透和渗漏行为的模拟方法

1.1 完好土工膜的渗透模拟

性能完好的土工膜渗透系数一般在 $10^{-11} \sim 10^{-13} \text{ cm/s}$ 之间,比混凝土材料具有更低的渗透性。用于土石坝防渗的土工膜厚度一般在 $0.5 \sim 2.0 \text{ mm}$ 之间。由于土工膜厚度很小,用常规有限元法对土工膜防渗土石坝进行网格剖分和计算时,不易模拟厚度仅为毫米级的土工膜的渗流行为。通常的处理方法是将土工膜放大处理成具有一定厚度的等效多孔介质^[11-12],并假定其满足达西渗流定律。岑威钧等^[13]采用流量等效原则进行了模拟和比较分析,即将土工膜的厚度增大 n 倍,在土工膜厚度方向上渗透系数增大 n 倍,同时平面内的渗透系数减小为原先的 $1/n$ 。这样将原先渗透各向同性的土工膜等效成渗透系数各向异性的等效渗透多孔介质。该方法计算结果表明,不同土工膜厚度放大倍数下,浸润线仅在土工膜厚度等效区内有较大区别,膜后坝体部位基本保持不变;而渗流量虽随着土工膜厚度放大倍数的增大稍有减小,但在同一量级内变化微小,说明按流量等效原则将土工膜放大处理是可行的。由于质量良好的土工膜渗透系数已达到 10^{-11} cm/s ,且大坝渗流主要为垂直于土工膜平面方向,因此土工膜平面内的渗透系数的减小对渗流场结果的影响完全可忽略。所以,厚度放大的土工膜依然可以简化成各向同性渗透介质,避免了各向异性时渗透张量的旋转问题,这种处理使得常规各向同性的渗流计算程序依旧可以用于分析土工膜防渗土石坝的渗流问题。

1.2 缺陷土工膜的缺陷渗漏模拟

土石坝坝面防渗土工膜出现的缺陷大致可归类为形状不规则的孔(洞)状缺陷和长条形的缝状缺陷。孔状缺陷一般可用面积等效的圆形缺陷来描述,直径大多在厘米级。缝状缺陷大多位于相邻两幅土工膜拼接处、土工膜与刚性建筑物连接处及土工膜两岸锚固处,缺陷长度可在几厘米至几十厘米范围,个别虚焊(或脱胶)处甚至达数米。关于土工

膜缺陷渗漏行为的模拟,从渗流分析角度可以采用剔除缺陷处土工膜单元的方法(剔除单元法),即在缺陷处直接施加相应的作用水头。也可以保留缺陷处土工膜单元,通过放大渗透系数的方法考虑其渗漏特性。但这种情况下计算结果可能与缺陷土工膜单元局部渗透系数的放大倍数有关,目前尚无理论确定方法,主要依赖于计算经验。本文通过大量的数值模拟,分析比较这两种方法的差异性。

2 土工膜缺陷渗漏的有限元模拟

2.1 计算条件

计算模型为岩基上的土工膜防渗土石坝,坝高 56 m ,上、下游坝坡比均为 $1:1.7$,左右岸坡比均为 $1:1$,坝顶全长 136 m ,上游水位 53 m ,下游水位 1 m 。土工膜铺设在上游坝面。土工膜在坝基及两岸通过混凝土趾板与基岩相连。土工膜下设垫层、过渡层和堆石区。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。为了便于计算分析,有限元网格剖分时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,并将缺陷位置分别假设位于坝面底部、中部和上部3处。通过改变缺陷尺寸,近似模拟不同缺陷条件下的等效渗流场。计算时,将缺陷尺寸分别等效为边长为 3 cm 的小孔、边长为 10 cm 的大孔及长度为 25 cm 、 100 cm 、 200 cm 的缺陷缝。其中孔状缺陷用于模拟施工中土石料或施工机械对土工膜的局部损伤破坏,缝状缺陷用于模拟土工膜拼接或连接处出现的脱焊或虚焊等不良施工条件。

2.2 有限元建模及计算参数

按上述信息对土工膜防渗土石坝进行三维建模,坝体分区从上游向下游依次为土工膜、垫层、过渡层、堆石区。根据流量等效原则,将厚度 1 mm 的土工膜等效为 30 cm 厚的多孔介质防渗层。如果按照目前土石坝网格主流剖分习惯,其等效厚度依然远小于土工膜单元在坝面内的尺度。为了提高计算精度,建模时应使等效后的土工膜单元在3个方向上的尺度尽量处于同一量级,同时缺陷单元与周围单元的大小也尽量接近。为此,在初始土石坝网格的基础上对等效后的土工膜防渗区域进行二次剖分,在坝面2个方向上加密剖分数,使之与厚度接近。局部缺陷土工膜单元在坝面内按实际尺寸建模,并与周边单元进行过渡连接。加密剖分后的有限元模型见图1,其中节点数为74402,单元数为71756。土工膜不同的缺陷预设位置见图2。

对大坝进行三维饱和-非饱和渗流场计算,分别采用两种不同的土工膜缺陷渗漏行为模拟方法:当

表 1 土工膜存在缺陷时的渗流场计算结果

计算方案	缺陷位置	缺陷大小/cm	缺陷附近渗透坡降		渗漏量/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)	膜后浸润线高度/m
			土工膜等效区	垫层区		
A0			162.88 (上部)	0.01 (上部)	408.84	5.10
			164.04 (中部)	0.25 (中部)		
			126.53 (底部)	3.03 (底部)		
A1	坝面上部	3×3	87.69	96.31	410.10	5.17
A2	坝面上部	10×10	88.26	98.84	410.29	5.17
A3	坝面上部	25	87.62	96.14	410.31	5.17
A4	坝面上部	100	87.35	95.58	410.83	5.17
A5	坝面上部	200	86.94	94.86	411.67	5.17
B1	坝面中部	3×3	45.20	44.32	416.38	5.21
B2	坝面中部	10×10	45.12	44.33	418.59	5.21
B3	坝面中部	25	44.59	42.10	418.65	5.23
B4	坝面中部	100	44.95	41.72	420.90	5.24
B5	坝面中部	200	45.15	42.11	423.93	5.23
C1	坝面底部	3×3	37.80	45.11	424.72	5.37
C2	坝面底部	10×10	38.00	46.16	425.77	5.38
C3	坝面底部	25	39.04	45.56	425.80	5.38
C4	坝面底部	100	40.83	45.83	429.36	5.44
C5	坝面底部	200	40.75	44.05	434.23	5.49

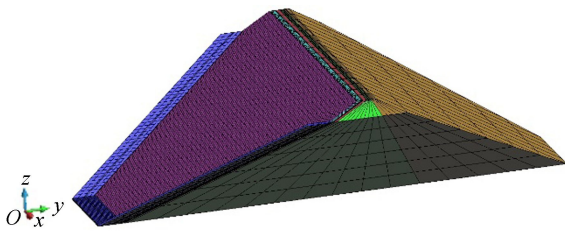


图 1 土工膜防渗土石坝三维有限元网格

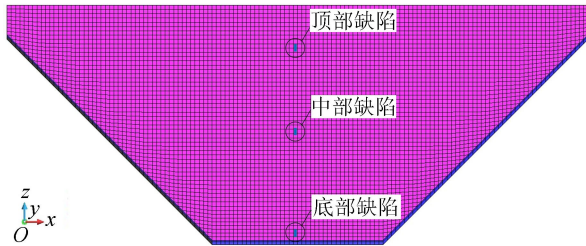


图 2 坝面土工膜缺陷位置示意图

采用剔除缺陷单元法时,将相应的水头值直接作用在缺陷边界的下垫层上;当保留缺陷土工膜单元时,为了模拟缺陷处的强透水性,缺陷单元的渗透系数分别放大至 10^{-2} cm/s 、 10^{-1} cm/s 和 1 cm/s ;坝面其余部位完好土工膜区域等效渗透系数取 $3.0 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ 。垫层、过渡层及堆石区的饱和渗透系数分别取为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、 $2.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 和 $2.0 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$,其中垫层和过渡层渗透系数随基质吸力的变化曲线借鉴一般面板坝中垫层和过渡层的非饱和渗流特性曲线作适当调整后得到。

2.3 土工膜缺陷渗漏影响分析

2.3.1 缺陷渗漏下的坝体渗流场

为了分析土工膜缺陷大小和缺陷位置对坝体渗流场的影响,根据不同组合建立多组计算方案。采用剔除单元法模拟得到各计算方案的缺陷附近土工膜等效区与垫层区的渗透坡降、坝体渗流量及膜后浸润线高度,见表 1。

由于各组方案计算所得的等水头线分布规律相似,仅浸润线高度有所差别,限于篇幅,本文仅给出土工膜完好无损(方案 A0)及坝面底部土工膜发生 200 cm 长缺陷缝(方案 C5)时过缺陷孔(缝)中心横剖面坝体等水头线分布,见图 3。

比较分析不同缺陷尺寸(3 cm×3 cm、10 cm×10 cm、25 cm、100 cm、200 cm)以及不同缺陷位置(上部、中部、底部)下大坝渗流场基本特性(表 1)可知:①随着缺陷孔(缝)尺寸的增大和缺陷缝位置的降低,通过缺陷孔(缝)的渗流量逐渐增大,但较坝体无缺陷时的渗流量增幅较小,这是因为缺陷后的垫层起到了很好的辅助防渗作用,对缺陷渗流起到了限制作用。②由于缺陷处垫层的限渗作用,缺陷后坝体浸润面只在缺陷附近内小幅度升高,其中缺陷

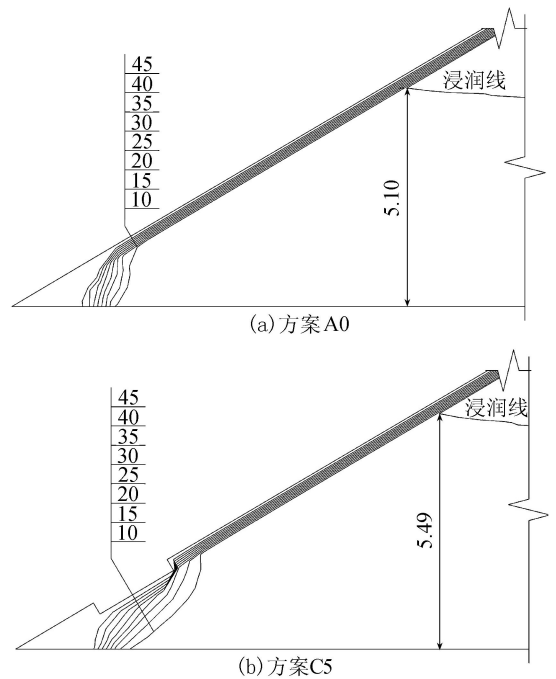


图 3 方案 A0、C5 过缺陷剖面(局部)大坝等水头线分布(单位:m)

孔(缝)位置对膜后浸润面的影响较大,位置越低浸润面抬升的幅度越大;缺陷孔(缝)尺寸大小对膜后浸润面的影响甚小。③土工膜一旦出现缺陷,缺陷孔(缝)附近土工膜等效区的渗透坡降明显减小,膜后垫层区的渗透坡降急剧增大,说明水头损耗由土工膜转嫁于垫层中,使得垫层发挥限渗作用,起到了第 2 道防渗体的作用。④单个缺陷孔洞(缝)渗流能力有限,其对坝体浸润面和渗流量的影响均不显

著,所以更应该关注土工膜缺陷附近的局部渗流场及垫层区渗透坡降的变化。各缺陷方案下缺陷附近垫层的渗透坡降增大明显,应做好下面过渡层对其的反滤保护设计。研究表明,随着垫层渗透性的增加或厚度增大,其渗透坡降可明显减小^[14]。因此,合理设计垫层,确保自身不出现渗透破坏在土工膜防渗土石坝设计中是非常重要的。

2.3.2 土工膜缺陷附近局部渗流场

对于土工膜防渗土石坝而言,坝体土石料的渗透系数一般较大,因此土工膜正常防渗情况下坝体浸润线较低,绝大部分坝体处于非饱和区。当土工膜存在缺陷时,通过土工膜缺陷处的渗透水的渗透压力会向远处坝体较快扩散和消散,在缺陷附近局部范围内出现或维持饱和区,但坝体绝大部分区域依旧处于非饱和区。图4为典型计算方案缺陷附近

坝体等水头线分布情况(过缺陷中心线剖面的局部放大图)。由图4可见,缺陷附近局部饱和区范围随着缺陷上作用水头和缺陷尺寸的增大而增大。土工膜缺陷附近局部饱和区主要影响范围仅限于膜后垫层区,尚未扩展到过渡层内,进而导致垫层区的渗透坡降增大明显,因此过渡层应做好对垫层的反滤保护,以免垫层发生局部渗透破坏。

2.3.3 两种缺陷模拟方法下坝体渗流场对比

对于土工膜缺陷渗漏行为,剔除缺陷单元直接施加作用水头的处理方法在理论上是合理的。为了进一步简化计算,尝试采用放大缺陷处土工膜单元的渗透系数进行对比验证计算。计算时,缺陷土工膜单元分别取 10^{-2} cm/s、 10^{-1} cm/s 和 1 cm/s 这3种不同的放大渗透系数。计算结果表明3种不同渗透系数下结果差别甚微。这主要是由于缺陷土工膜单元的渗透系数取值远大于其后垫层的渗透系数,所以相对垫层而言缺陷单元已无阻水作用。计算表明,两种缺陷模拟方法得到的渗流量几乎相同。图5为方案B(坝面中部出现缺陷)两种缺陷模拟方法得到的大坝压力势等值线分布(图中蓝色代表剔除单元法,黑色代表渗透系数放大法)。由图5可见,两种模拟方法得到的压力势等值线几乎重合,膜后浸润线(零压力势线)高度最大相差不到1 cm。因此,当土工膜存在缺陷时,两种模拟方法的计算结果是一致的,其中放大系数法计算更为简便。

3 预防和控制土工膜缺陷渗漏的工程措施

目前,客观存在的土工膜缺陷很大程度上限制了设计人员对其的防渗应用。预防土工膜缺陷的产生是控制土工膜缺陷渗漏最为有效的措施。这当中除了需要土工膜本身性能良好外,更应该在设计形式、铺设、焊接(胶接)、锚固土工膜等环节做到精心设计,细致施工和及时保护,方可有效减小土工膜缺陷破损发生的概率。另外,由于两岸锚固边界及与刚性建筑物连接处等某些变形差较大部位土工膜出现缺陷破损的概率较大,可借鉴面板坝周边缝附近特殊垫层的设计思想,在这些可能缺陷发生区域的下垫层进行局部抗渗加强处理。一旦出现缺陷渗漏,局部抗渗加强的垫层能起到明显的限渗作用,进而抑制浸润线的抬高和渗流量的增大。此外,坝面土工膜铺拼接处若焊接或胶接质量不可靠,也极易成为“人为设置的可能缺陷区域”。由于这些部位在土工膜拼接设计时事先是知道的,因此可以预先采取一些限渗控制措施。根据渗流有限元计算结果^[14],建议在接缝底部1 m 宽度范围内垫层进行增厚加厚处理,其限渗效果较局部提高垫层的抗渗性

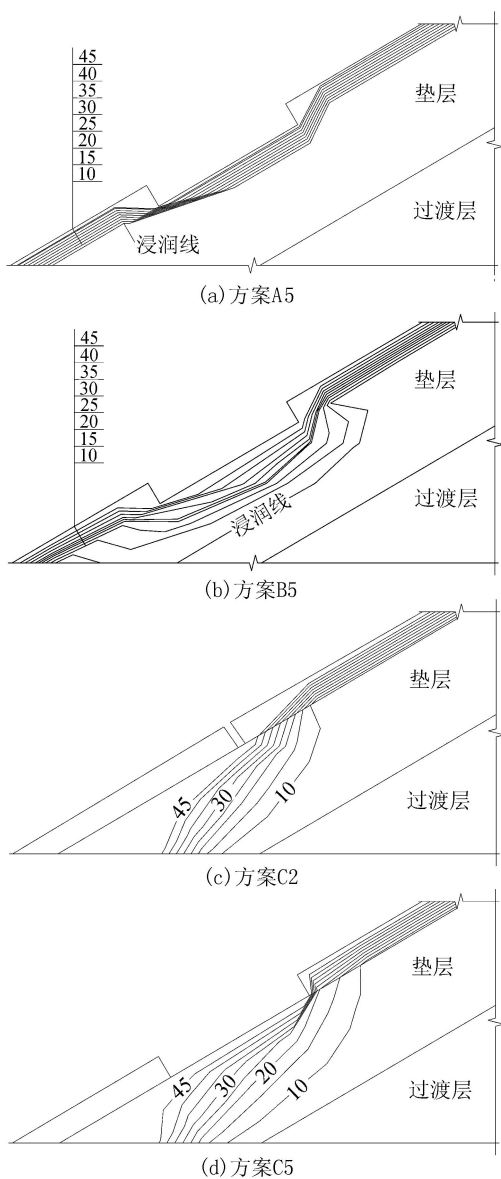


图4 典型计算方案过缺陷剖面(局部)大坝等水头线分布(单位:m)

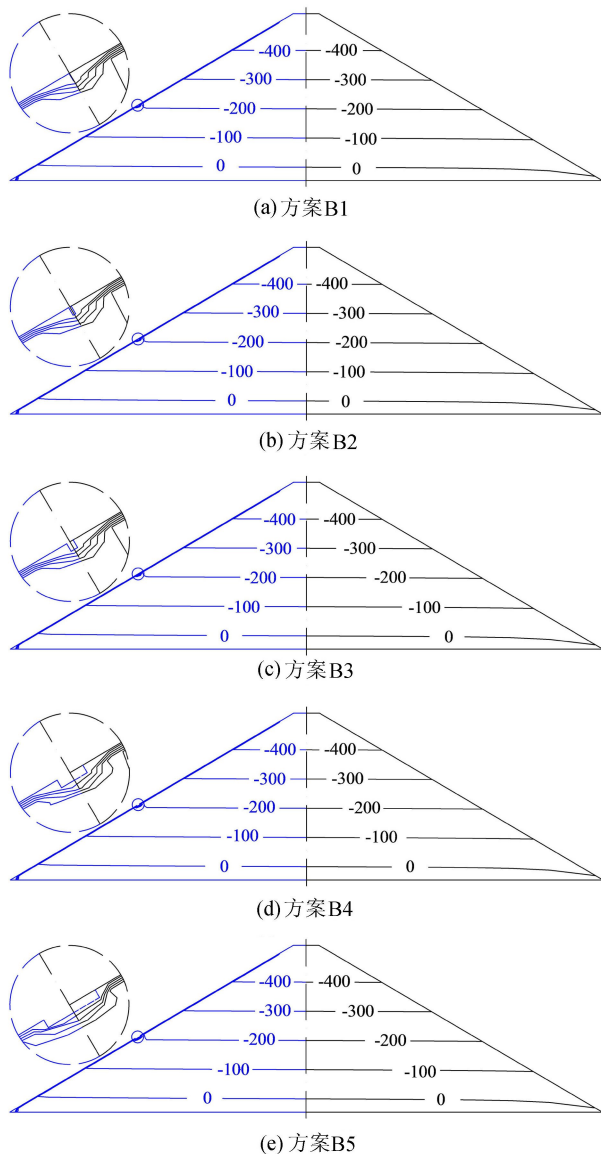


图5 两种缺陷模拟方法得到的大坝压力势等值线分布(单位:kPa)

好很多,且这种方法在施工时也较易实施和控制。至于坝面其余部位土工膜,由于各种原因导致的缺陷一般多为孔洞形式,面积一般较小,且具有随机性,目前尚无有效措施进行事先预防或控制。只要加强施工质量监控,缺陷数量是可控的。根据前文渗流场计算成果,这些局部的缺陷对坝体渗流场影响不大。在做好下垫层的反滤保护的前提下,产生渗透破坏的可能性很小。

4 结论

a. 土工膜缺陷渗漏对土工膜防渗土石坝渗流场的影响主要集中于缺陷附近局部区域,在缺陷周围垫层局部区域形成渗流饱和区,渗漏水对坝体其余部分的非饱和区影响很小。

b. 放大渗透系数法和剔除单元法均可有效模

拟土工膜缺陷渗漏行为,两种方法得到的坝体渗流场结果几乎一致,前者在计算时更为简便。

c. 土工膜下垫层宜按半透水性设计,在土工膜出现局部缺陷渗漏时起到辅助防渗作用,其抗渗(及透水)性能应进行细致的设计,而经过下垫层的渗透水应尽快从坝体排出。

d. 在两岸锚固边界、土工膜与刚性建筑物连接处及土工膜拼接处,设计时可采用局部范围内将垫层增倍加厚的预防处理方法,可有效抑制缺陷渗漏对坝体渗流场的影响,控制渗流量。其余部位土工膜若出现缺陷渗漏,目前尚无有效的预测或控制措施,只能采取加强施工质量监控等方法事先预防。

本文的计算模拟仅考虑了河床处坝面土工膜出现一处缺陷的情况,实际工程中坝面土工膜缺陷数量和位置有很强的随机性,土工膜多缺陷情况下的大坝渗流特性及变化规律有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 《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: 118-127.
- [2] 顾彦臣. 土工薄膜在坝工建设中的应用[J]. 水力发电, 1985, 11(10): 43-50. (GU Ganchen. Application of geomembrane in dam construction [J]. Water Power, 1985, 11(10): 43-50. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 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))
- [5] 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))
- [6] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes; part I [J]. Geomembrane Liners, Geotextiles and Geomembranes, 1989, 8(1): 27-67.

(下转第71页)

reservoirs on fluvial hydrological processes for the East River Basin using statistical modeling technique [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(4): 684-695. (in Chinese))

[8] BIEMANS H, HADDELAND I, KABAT P, et al. Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(3): W03509.

[9] YIGZAW W, HOSSAIN F, KALYANAPU A. Impact of artificial reservoir size and land use/land cover patterns on probable maximum precipitation and flood: case of Folsom Dam on the American River [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 18(9): 1180-1190.

[10] 陈甜,董增川,贾本有,等. 考虑上游梯级水库群调度的小南海水电站坝址设计洪水分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(6): 476-480. (CHEN Tian, DONG Zengchuan, JIA Benyou, et al. Analysis of design flood of dam site of Xiaonanhai Hydropower Station considering flood control operation of upstream cascade reservoir group [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(6): 476-480. (in Chinese))

[11] 包为民,万新宇,荆艳东,等. 基于主成分分析的河流洪水系统聚类法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(1): 1-5. (BAO Weimin, WAN Xinyu, JING Yandong, et al. Flood clustering method based on principal component analysis [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2008, 36(1): 1-5. (in Chinese))

[12] WAN X Y, ZHONG P A, CHEN X, et al. Computer simulation of flood scheduling in large scale flood control systems [C]//GUO H. 2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering. Harbin: Elsevier Ltd., 2012: 3267-3275.
(收稿日期:2016-03-27 编辑:郑孝宇)

+++++

(上接第 65 页)

[7] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes: part II [J]. *Geomembrane Liners, Geotextiles and Geomembranes*, 1989, 8(2): 71-111.

[8] GIROUD J P, KHIRE M V, Mc KELVEY 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.

[9] ELOY-GIORNI C, PELTE T, PIERSON P. Water diffusion through geomembranes under hydraulic pressure [J]. *Geosynthetics International*, 1996, 3(6): 741-769.

[10] JAYAWICKRAMA P, BROWN K W, THOMAS J C, et al. Leakage rate through flaws in geomembrane liners [J].

Journal of environmental engineering, ASCE, 1988, 114(6): 1401-1420.

[11] 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 and Water Resources*, 2009, 29(6): 42-43. (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漏数值模拟[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(4): 69-73. (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): 69-73. (in Chinese))

[13] 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 and Water Resources*, 2012, 32(3): 6-9. (in Chinese))

[14] 岑威钧,王蒙. 土石坝防渗土工膜缺陷成因及渗漏特性探析[C]//第八届中国土工合成材料学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2012: 340-344.
(收稿日期:2016-06-07 编辑:骆超)

+++++

· 简讯 ·

**第 1 届中国水工程安全交流大会将于
2017 年 5 月 26—28 日在南京召开**

第 1 届中国水工程安全交流大会将于 2017 年 5 月 26—28 日在南京河海大学召开。会议由河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心主办。

会议主要议题包括:中国水工程安全战略,安全监测、预警、防灾减灾技术,安全分析评价和反馈理论及实验,水工程高新监测设备研制和应用,水利水电工程数字化技术,结构损伤病变仿真和检测技术,水利水电工程健康诊断和寿命评估、风险评价、信息管理技术,补强加固高新材料、新技术在设计、施工和安全管理方面的应用,安全监测系统设计及更新改造设计技术,安全监测仪器设备及自动化系统的研发和应用,安全监测施工管理,监测仪器设备的埋设、安装、维护和观测的技术和经验,水工程安全运行、维护与管理经验等。

(本刊编辑部供稿)