

倾斜坡面土工膜缺陷电学法探测的有限元模拟

都旭煌^{1,2}, 岑威钧^{1,2}, 和浩楠³, 波兰汗·开肯^{1,2}

(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. 河北省水利水电第二勘测设计研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要:基于土工膜缺陷探测的双电极法,建立倾斜坡面含缺陷土工膜的三维有限元计算模型,获得土工膜表面缺陷附近的电位分布,分析不同探测线方向上的电位分布规律,探究探测线方向和位置对土工膜缺陷探测灵敏度的影响。结果表明:主电极的埋设位置应远离缺陷,以避免主电极对缺陷的屏蔽作用;当探测线垂直于缺陷和主电极连线时,探测线与缺陷中心距离不宜超过0.2 m;当探测线平行于缺陷和主电极连线时,探测线与缺陷中心距离不宜超过0.1 m。

关键词:土工膜缺陷;双电极法;电位分布;探测线方向;探测线位置;有限元模型

中图分类号:TV641 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)02-0076-05

Finite element simulation of electrical detection for geomembrane defects on a slope//DU Xuhuang^{1,2}, CEN Weijun^{1,2}, HE Haonan³, BOLANHAN Kaiken^{1,2} (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Research Center on Levee Safety and Disaster Prevention, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 3. The Second Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: A three-dimensional finite element numerical model was constructed to simulate a defected geomembrane on a slope based on the two-electrode method. The potential distribution near the surface defect was obtained and the potential distribution in different detection line directions was analyzed. The impact of the detection line direction and position on the leak detection sensitivity was further investigated. The results indicate that the positive electrode should be separated from the defect to prevent its shielding effect on the defect. The distance between the detection line and the defect center should not exceed 0.2 m if the detection line connected to the main electrode is in the direction perpendicular to the defect. The distance between the detection line and the defect center should not exceed 0.1 m if the detection line connected to the main electrode is in the direction parallel to the defect.

Key words: geomembrane defects; two-electrode method; potential distribution; direction of detection line; position of detection line; finite element model

土工膜作为一种新型柔性防渗薄膜材料,因其具有防渗效果好、变形能力强、造价低、施工便利等优点,已广泛应用于堤坝、库盘、蓄水池、渠道、围堰、垃圾填埋场等防渗工程^[1-5]。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),形成宏观缺陷^[6-7]。据统计,接缝不实形成缺陷的尺寸其等效孔径一般为1~3 mm,其他原因引起土工膜缺陷的等效孔径则高达5~10 mm^[8]。垃圾填埋场中,土工膜缺陷会引起渗滤液下渗进而污染周围环境^[9];蓄水工程中土工膜的缺陷渗漏除了造成水量损失外,还可能影响膜后填筑料的渗透稳定性,危及工程安全^[10-11]。因此,应采取高效的探测方法在土工膜施工和运行阶段进行缺陷的探测、定位和修补,以确保土工膜防渗工程安全运行。

电学检测方法能够发现土工膜潜在破损孔洞,对环境无污染,操作简便,已作为土工膜缺陷探测的基本方法并广泛应用于工程实践中^[12-13],其中双电极法能同时适用于施工期和运行期土工膜的缺陷检测,且准确度较高,已成为土工膜缺陷探测的主要方法。除

基金项目:水利部堤防安全与病害防治工程技术中心开放课题基金(2018004);江苏省研究生科研与实践创新计划(SJKY19_0496);中央高校基本科研业务费专项(2019B70014)

作者简介:都旭煌(1993—),男,硕士研究生,主要从事土工膜防渗土石坝研究。E-mail:1945620404@qq.com
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

了现场探测外,数值模拟不失为当前有效的分析方法。Parra 等^[14]对垃圾填埋场中土工膜缺陷探测进行了数值模拟,发现当探测线与缺陷中心距离超过 0.2 m 时,缺陷无法被探测到。岑威钧等^[15]基于双电极法对含缺陷的水平面防渗土工膜上电位分布进行了有限元模拟,获得了缺陷附近的电位分布特征,进而定位了缺陷位置。上述研究均只适用于利用双电极法探测垃圾填埋场中水平面上土工膜缺陷,而当土工膜用于堤坝、库盘、围堰等水利工程防渗时,常会倾斜铺设,工作条件更加复杂,因此有必要对倾斜铺设土工膜的缺陷探测特性进行数值模拟研究。

本文在已有研究成果^[15]的基础上,通过建立倾斜坡面含缺陷土工膜的三维电场有限元计算模型,计算获得土工膜表面的电位分布等值线图,通过分析异常电位分布位置对缺陷进行定位。同时,对探测线方向和探测位置进行探测敏感性分析,以期为实际工程土工膜的缺陷探测提供理论指导。

1 双电极法探测的基本原理

当土工膜两侧分别埋设正、负直流电极时,良好绝缘性能的土工膜完好时不会形成电流回路,而当土工膜存在缺陷时,电流通过缺陷流入膜下土层,在缺陷周围形成局部异常电位分布,通过异常电位差可判定缺陷位置。根据电场和渗流场相似原理,土工膜上介质中任一点电位 U 满足拉普拉斯方程,在圆柱坐标系 (r,φ,z) 中,该方程形式为^[16]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \tag{1}$$

式中: r 为任一点 M 距缺陷中心在覆盖层表面的投影长度; z 为渗漏点距任一点 M 的高度; φ 为方位角。

对于高度为 h 的膜上介质,其上、下表面的电位满足如下边界条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中: $z = 0$ 表示在土工膜表面; $z = h$ 表示离土工膜表面的距离为 h 。

当膜上介质中任一点与缺陷间的距离 $R = \sqrt{r^2+z^2}$ 趋近于 0 时,流过缺陷处的电流在膜上介质中产生的电位与点电源在半无限介质空间中形成的电位相同,即:

$$U = \frac{\rho I_0}{2\pi R} \tag{3}$$

式中: I_0 为通过土工膜缺陷的电流; ρ 为膜上介质的

电阻率。

因此,土工膜上介质中的电位为^[16]

$$U(r,z) = \frac{\rho I_0}{2\pi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r^2+z^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{r^2+(2nh+z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{r^2+(2nh-z)^2}} \right] \right\} \tag{4}$$

土工膜表面沿缺陷孔直径方向相邻两点的电位差 ΔU 为^[16]

$$\Delta U = \frac{\rho I_0}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{r+dr} - \frac{1}{r} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{(r+dr)^2+(2nh)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2+(2nh)^2}} \right] \right\} \tag{5}$$

式中: dr 为两点间的投影距离。

2 有限元计算

2.1 有限元计算模型

图 1 为倾斜坡面含缺陷土工膜的三维有限元计算模型。土工膜按坡比 1 : 1.73 倾斜铺设,厚度为 2 mm,在中心位置设置一直径 10 mm 的缺陷孔。膜下饱和土层的最大厚度为 5.3 m,最小厚度为 0.8 m。膜上覆盖有水层,最大水深为 5.1 m,最小水深为 0.6 m。饱和土层和水的电阻率分别取 300 $\Omega \cdot \text{m}$ 和 15 $\Omega \cdot \text{m}$ ^[17]。励磁电源电压为 50 V,主电极放置在膜上水层中,反馈电极埋设于膜下饱和土层中,表 1 给出了不同组合方式下主电极和反馈电极的位置坐标。

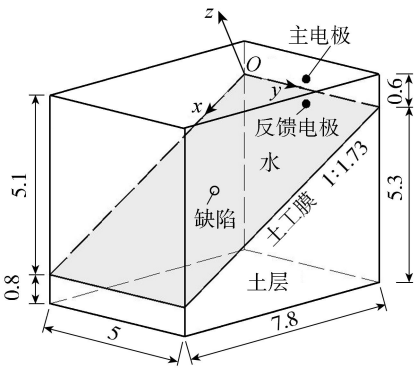


图 1 计算模型简图(单位:m)

表 1 主电极和反馈电极的位置坐标 m

组合方案	主电极坐标	反馈电极坐标
a	(0.5, 2.5, 0.3)	(0.5, 2.5, -0.3)
b	(4.5, 2.5, 0.3)	(4.5, 2.5, -0.3)
c	(8.5, 2.5, 0.3)	(0.5, 2.5, -0.3)

2.2 膜上电位分布特征

图 2 给出了不同主电极和反馈电极组合方式下(方案 a、b 和 c)土工膜表面的电位分布等值线。由图 2 可知,膜上电位从主电极向缺陷处逐渐降低,并

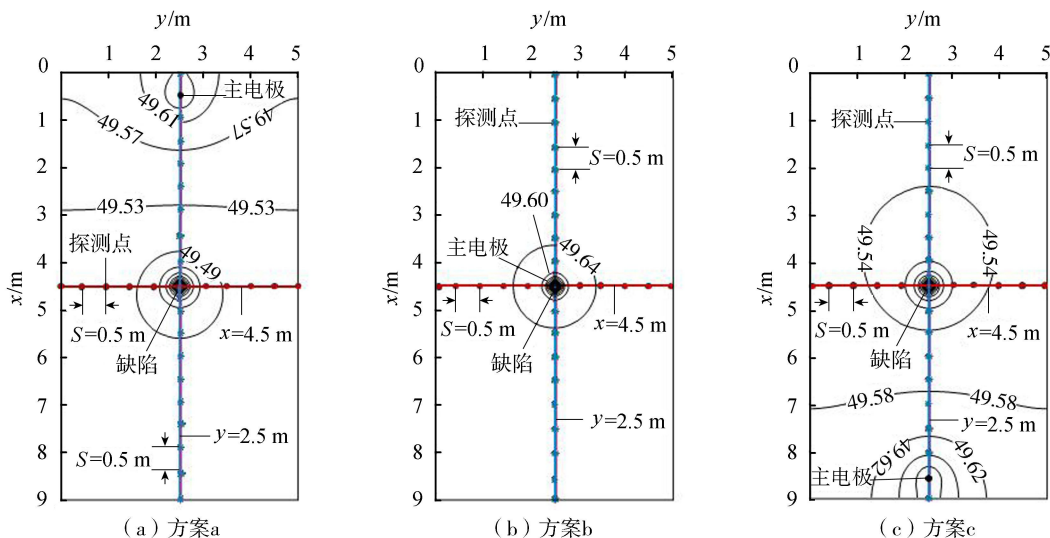


图2 不同电极位置组合时膜上电位分布(单位:V)

在主电极和缺陷附近表现出较大的电位梯度,而在远离主电极和缺陷的膜上电位基本为一定值。对比图2(a)和2(b)可知,膜上电位分布规律受励磁电源电极位置的影响明显,并且当主电极位于缺陷处时,主电极附近的异常电位分布会对缺陷产生屏蔽作用。

探测线最佳布置理论上应垂直或平行于缺陷和主电极的连线,如图2所示。以方案a为例,对不同探测线方向上的电位分布进行分析。图2(a)中红色探测线($x=4.5\text{ m}$)为一条通过缺陷中心的垂直于缺陷和主电极连线的探测线,其中相邻探测点间的间距 $S=0.5\text{ m}$ 。当探测电极逐渐靠近缺陷时,探测电极测得的电位差越来越大;当一侧电极位于缺陷处时,两电极间的电位差达到最大值;当两电极位于缺陷中心对称位置时,两电极电位差为0;若探测电极继续向前移动,电位差反向增大,直至另一侧电极位于缺陷处时到达最大值,探测电极继续前进时,电位差再逐渐减小。绘制沿探测方向探测电极两点之间电位差分布曲线,电位差分布会出现一个波峰和一个波谷,二者的中心即为缺陷的位置,如图3所示。

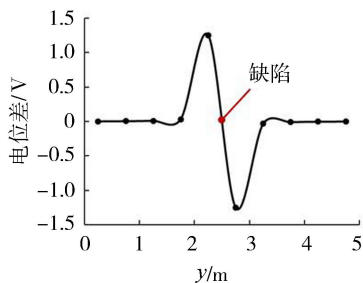


图3 探测线垂直于缺陷和主电极连线下电极电位差变化

图2(a)中蓝色探测线($y=2.5\text{ m}$)为一条通过缺陷中心的平行于缺陷和主电极连线的探测线,其

中相邻探测点间的间距 $S=0.5\text{ m}$ 。绘制电位差分布曲线,电位差分布在缺陷两侧会出现一个波峰和一个波谷,同时主电极两侧也出现波峰和波谷,如图4所示。因此实际工程探测过程中,为了避免电极附近的异常电位分布对缺陷定位造成干扰,应尽量使埋设的电极远离缺陷位置。

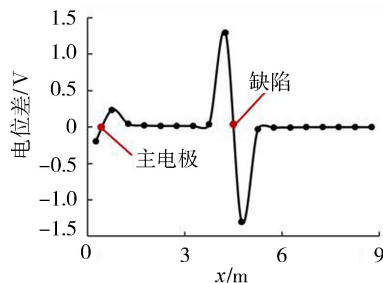


图4 探测线平行于缺陷和主电极连线下电极电位差变化

3 探测线位置对缺陷定位的影响

3.1 探测线垂直于缺陷和主电极连线

实际探测过程中,缺陷位置事先未知,探测线布置时可能不会恰巧通过缺陷中心。为了研究探测线垂直于缺陷和主电极连线时不同探测线位置的探测精度,分别选取50 V、100 V和200 V的输出电压,在方案a的电极组合方式下进行双电极法土工膜缺陷探测的有限元模拟。以探测电极间距 $S=0.5\text{ m}$ 并分别沿探测线 $x=4.50\text{ m}$ 、 4.55 m 、 4.60 m 、 4.70 m 、 4.80 m 方向测得电位差变化曲线,如图5所示。由图5可知,探测线位置离缺陷越远,探测精度越低。

Cheng等^[18]在分析探测间距对探测精度的影响时,将探测电极电位差变化曲线的幅值定义为探测灵敏度。本文为了进一步分析探测间距对探测精度的影响,考虑到探测电极电位差变化曲线存在一

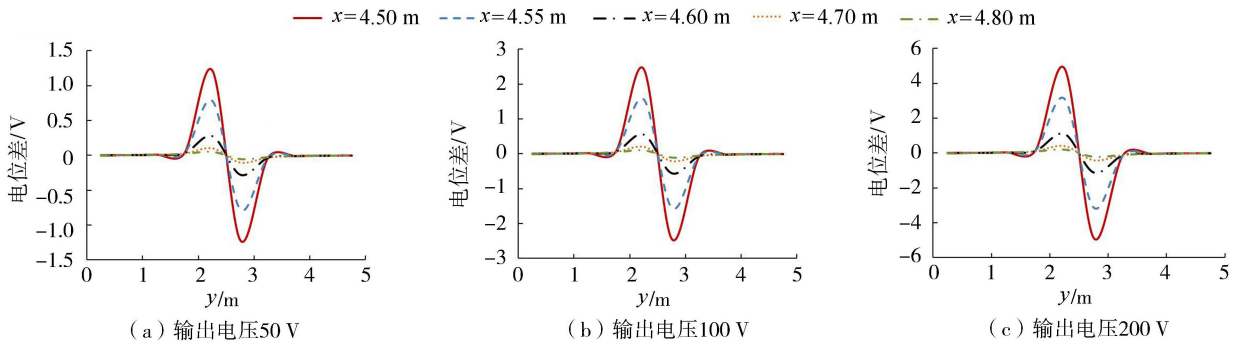


图5 不同输出电压和探测线位置时探测电极电位差变化

个波峰和波谷并关于缺陷成中心对称,因此定义探测灵敏度为电位差变化曲线波峰与波谷差值的1/2。图6给出了不同输出电压条件下探测灵敏度随探测线与缺陷中心距离的变化。由图6可知,在同一输出电压条件下,随着探测线与缺陷中心距离的增大,探测灵敏度快速降低;当探测线与缺陷中心距离超过0.2 m时,探测灵敏度几乎不再变化。因此,为了保证较高的探测精度,探测线位置应尽量靠近缺陷中心,探测线与缺陷中心距离不宜超过0.2 m。

3.2 探测线平行于缺陷和主电极连线

为了研究探测线平行于缺陷和主电极连线时不同探测线位置的探测精度,设定输出电压为50 V,分别在表1中3种电极组合方案下进行双电极法土工膜缺陷探测的有限元模拟。以探测电极间距 $S = 0.5\text{ m}$ 并分别沿探测线 $y = 2.50\text{ m}$ 、 2.55 m 、 2.60 m 、 2.70 m 方向测得电位差变化曲线,如图7所示。由图7可知,探测线位置离缺陷越远,探测精度越低。

图8给出了3种电极组合方案的探测灵敏度随探测线与缺陷中心距离的变化。由图8可知,在同一电极组合时,随着探测线与缺陷中心距离的增大,探测灵敏度快速降低;当探测线与缺陷中心距离超过0.1 m时,探测灵敏度几乎不再变化。因此探测线位置应尽量靠近缺陷中心,且探测线与缺陷中心距离不宜超过0.1 m。

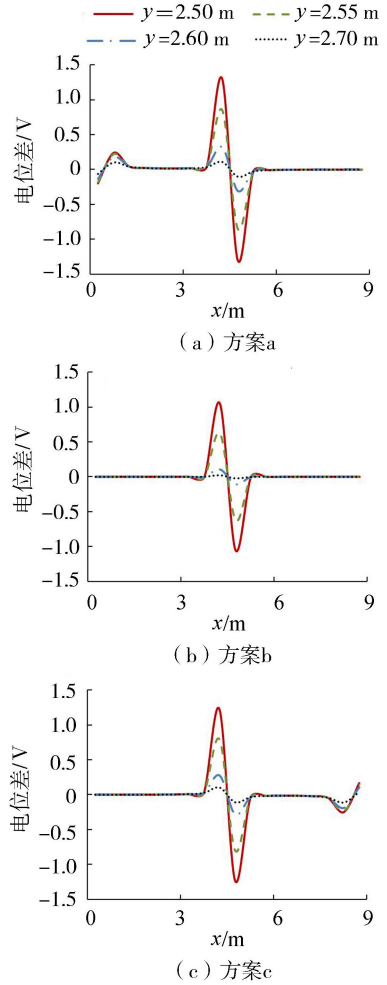


图7 不同电极组合方案和探测线位置时探测电极电位差变化

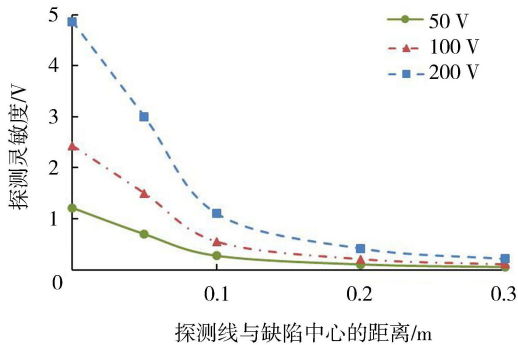


图6 不同输出电压下探测灵敏度随探测线与缺陷中心距离的变化

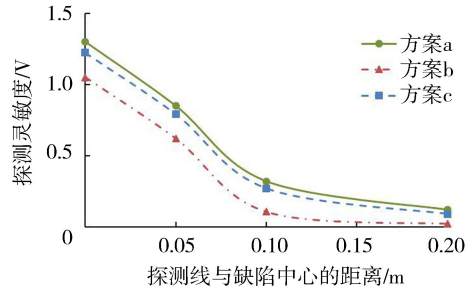


图8 不同电极组合方案的探测灵敏度随探测线与缺陷中心距离的变化曲线

4 结 论

- a. 有限元数值模拟表明电位等值线在缺陷附近产生异常集中,据此可以分析缺陷位置。
- b. 主电极附近的异常电位分布会对缺陷产生屏蔽作用,因此主电极的埋设位置应远离缺陷。
- c. 当探测线垂直于缺陷和主电极连线时,为了保证较高的探测精度,探测线位置应尽量靠近缺陷中心,探测线与缺陷中心距离不宜超过 0.2 m。
- d. 当探测线平行于缺陷和主电极连线时,探测线与缺陷中心距离不宜超过 0.1 m。

参考文献:

[1] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社,2000.

[2] 岑威钧,耿利彦,和浩楠. 防渗土工膜缺陷探测方法述评[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1): 43-51. (CEN Weijun, GENG Liyan, HE Haonan. Review of the defect detecting method of geomembrane for the seepage control[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1): 43-51. (in Chinese))

[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. (GU Ganchen. Experiment of applying geomembrance in reservoir seepage control[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 34-38. (in Chinese))

[4] MULLER W W. HDPE geomembranes in geotechnics [M]. Berlin: Springer, 2010.

[5] 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)) .

[6] 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): 16-22. (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): 16-22. (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 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))

[8] 王永芳,刘建,骆成杰,等. 填埋场高密度聚乙烯膜缺陷渗漏试验及计算模型研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018,29(4): 213-217. (SA Yongfang, LIU Jian, LUO

Chengjie, et al. Study on leakage test and calculation model of the defects high density polyethylene membrane at landfill [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(4):213-217. (in Chinese))

[9] van GREGORY P, STEPHEN K P, PATRICK H. Monitoring leaks from storage ponds using resistivity methods[J]. Geophysics, 2002, 56(8): 1267-1270.

[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 Sciences), 2017, 45(1): 36-44. (in Chinese))

[11] 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 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. (in Chinese))

[12] 史进,薛贵挺. 电学渗漏检测在防渗土工膜完整性检测中的应用[J]. 环境保护科学,2007(6): 78-80. (SHI Jin, XUE Guiting. Application of electrical leakage detection method in evaluate landfill geomembrane integrality [J]. Environmental Protection Science, 2007(6):78-80. (in Chinese))

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾填埋场防渗土工膜渗漏破损探测技术规程:CJJ/T 214—2016 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[14] PARRA, J O, OWEN T E. Model studies of electrical leak detection surveys in geomembrane-lined impoundments[J]. Geophysics,1988,53(11): 1453-1458.

[15] 岑威钧,罗佳瑞,都旭煌,等. 基于双电极法的土工膜缺陷探测数值模拟[J]. 长江科学院院报,2019,36(2): 97-100. (CEN Weijun, LUO Jiarui, DU Xuhuang, et al. Numerical simulation of defect detection of geomembrane based on dual-electrode method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(2): 97-100. (in Chinese))

[16] WAIT J R. Simple model for current leakage in insulating liner[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(2): 472-474.

[17] 刘松玉,查甫生,于小军. 土的电阻率室内测试技术研究[J]. 工程地质学报,2006,14(2): 216-222. (LIU Songyu, ZHA Fusheng, YU Xiaojun. Laboratory measurment techniques of the electrical resistivity of soils [J], Journal of Engineering Geology, 2006, 14(2): 216-222. (in Chinese))

[18] CHENG Hong, LIU Pengkun, WANG Yuling, et al. Determination of dipole spacing in electrical landfill leakage detection [J]. Advanced Materials Research, 2011, 171: 171-174.

(收稿日期:2019-05-07 编辑:雷燕)