

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.007

防渗土工膜缺陷探测方法述评

岑威钧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: 针对土工膜防渗工程在各个阶段不可避免的土工膜缺陷问题,在阅读整理国内外相关文献的基础上,介绍适用于不同阶段的土工膜缺陷探测(含质量检测和渗漏监测)方法,重点对各类电学探测方法的优缺点及适用范围进行阐述评价。最后,归纳总结各种缺陷探测方法的适用性,提出若干土工膜缺陷处理技术建议。总结表明:电学法与其他探测方法相比,具有适用性强和精度高等优势,是未来进一步重点发展的土工膜缺陷探测主流方法;电学法若与缺陷处理技术相结合,可形成一套有效的土工膜缺陷预防和处理措施,以提高土工膜防渗体系的完整性。

关键词: 防渗材料;土工膜;缺陷探测;质量检测;渗漏监测;述评

中图分类号:TV441 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2018)01-0043-09

Review of the defect detecting method of geomembrane for the seepage control

CEN Weijun¹, GENG Liyan¹, HE Haonan²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. The Second Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: During the different stages of anti-seepage engineering using geomembrane, the defect is almost inevitable. According to many related literatures at home and abroad, the paper introduced some detecting methods of geomembrane defect including the examining and monitoring. In particular, the advantages and disadvantages of various detecting methods and their application scope were analyzed and evaluated in detail. After summarizing the applicability of various detecting methods, the paper lists the various repair technologies of geomembrane defects during the different stages of anti-seepage engineering. The study indicates that, compared with other detecting methods, the electrical method has strong applicability, high accuracy, and easy operation, which will attract more attention and development in the future. The combination of the electrical detecting method and the relevant defect repairing will be helpful for the forming of an effective prevention system of the geomembrane defect and the integrity improvement of geomembrane impervious system.

Key words: impermeable material; geomembrane; defect detection; quality examination; leakage monitoring; review

土工膜是一类新型柔性防渗材料,因其具有防渗效果好、变形能力强、造价低、施工便利等优点,已广泛应用于堤防、库盘、蓄水池、渠道、大坝、围堰、垃圾填埋场等防渗工程^[1-2]。目前,常用土工膜的厚度一般在0.5~2 mm,因此在土工膜的生产、施工及工程运行过程等各个环节均易造成不同程度的破损,形成宏观缺陷^[3-4]。Nosko等^[5-6]通过对16个国家300多处场地大约325万m²土工膜的质量检测统计数据进行分析,发现土工膜缺陷中24%的破损发生在铺设阶段,73%的破损发生在膜上保护层铺设阶段,3%的破损出现在

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: hhucwj@163.com
引用本文: 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. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.007.

运行期等其他阶段。土工膜一旦出现缺陷,工程运行后会在缺陷处形成集中渗漏。对于垃圾填埋场而言,渗漏液下渗将污染土壤及地下水源^[7];而对蓄水工程而言,渗漏除了造成水量损失外(如蓄水池、渠道等工程),还可能影响膜后填筑料的渗透稳定性,进而危及工程安全(如堤防、围堰、土石坝等工程)^[8-10]。因此,为了尽可能地确保土工膜防渗屏障的完整性,除了提高土工膜生产和施工的质量标准外,可采取的预防措施就是对各阶段土工膜进行及时有效的缺陷探测及修补。

笔者在阅读整理国内外相关文献的基础上,对土工膜缺陷探测的含义进行拓展,将其广义理解为土工膜质量检测、缺陷渗漏监测及狭义的土工膜缺陷探测的总称。同时,对土工膜广义缺陷探测方法按防渗工程的施工期和运行期进行分类阐述。在此基础上,详细介绍各时期不同阶段土工膜缺陷探测的一些常用方法,并进行相应的比较评析。其中,电学探测法因具有原理明确、操作简便、定位准确等优点,适用于土工膜防渗工程施工期及运行期各阶段^[11-14],因此重点对其包含的各种子方法的优缺点及适用性进行详细阐述和评价。最后,汇总各类探测方法,并给出一些土工膜缺陷修补技术,供施工和运行阶段修补土工膜时参考选择。

1 施工期土工膜缺陷探测

根据 Darilek 等^[15]和 Line 等^[16]的调查统计,在施工期,尤其在土工膜的铺设、焊接(包括胶接,下同)和膜上保护层铺设压实阶段,土工膜的破损概率较大,易产生宏观缺陷。Nosko 等^[17]指出,施工期土工膜缺陷的产生除了与气候条件、应用范围、场地条件等客观因素有关,还与施工人员的技能、态度以及器械使用等主观因素密切相关。因此,在工程施工期除应严控各施工环节的每一个细节,提高土工膜施工质量外,还需同时辅以必要的缺陷探测(检测)技术,确保土工膜防渗系统的完整性,降低工程渗漏隐患。

1.1 土工膜铺设和焊接阶段

在土工膜铺设和焊接阶段,土工膜缺陷的产生主要包括两部分,一部分是焊接区土工膜由于焊接质量不过关导致的缺陷,另一部分则是非焊接区土工膜在未覆盖保护之前因暴露在场地上受到各种扰动产生的缺陷。由于缺陷产生原因、尺寸大小、分布规律等均有差异,这两类土工膜缺陷的探测(检测)方法也有所不同。

土工膜在铺设和焊接过程中,焊接人员的操作程序及器械设置参数等因素都可能导致焊接质量问题,出现虚焊、脱焊及漏焊等现象,在焊缝处产生“缝状”缺陷。国外曾对投入运行的 28 处 20 万 m^2 土工膜进行质量检测,结果表明平均每 1 万 m^2 约有 26 个漏水孔,其中 69% 出现在焊缝处^[18]。因此,土工膜在拼接焊接后必须进行焊接质量的检测。常用的检测方法包括视觉检查、焊缝破坏性测试及焊缝无损检测等。视觉检查是对土工膜焊缝质量进行目测评估,是一种较为粗略的评判方法^[19];破坏性测试通过剪切和(或)拉伸试验对焊接区土工膜试样进行强度测试,检测结果可反馈指导相关焊接形式和参数的设置^[20];无损检测包括真空箱测试法及空气压力测试法,能有效检测双焊缝条件下土工膜的焊接质量^[21-22]。工程实践表明,上述几种土工膜缺陷探测(检测)方法虽然能对土工膜焊接质量进行有效检测,但检测速度、精度、效率及自动化程度均较低,不适合大范围、微小缺陷的探测。

土工膜除在焊接区容易出现可能的各类缺陷外,在铺设、拖拽和拼接过程中容易受到施工机械、膜下土石颗粒的顶破和刺破作用,在非焊接区亦可能产生数目众多、尺寸较小且分布随机的缺陷或潜在缺陷(损伤),若不及时探测并加以适当处理,则有可能在后期施工或运行阶段发展为危害性更大的缺陷。对于非焊接区未铺设保护层之前的裸露土工膜,缺陷探测一般首选电学探测方法,具体包括电火花法、水枪法和电弧法等。(a)电火花法将供电电极一端通过接地垫放置在被测土工膜上,另一端接入检测装置,探测途经缺陷处时,通过观察高压电流产生的电火花和探测仪发出的声音信号来判断渗漏点位置。Youngblood 等^[23]利用导电土工膜对某海水净化池工程进行实地缺陷探测,证实电火花法在暴露土工膜缺陷探测中具有较高的精度。(b)水枪法^[24]探测时供电电源的一侧电极埋设于膜下导电层,另一电极与水枪和检测装置相连,工作时边洒水边探测,利用水的导电性,当膜上移动的水枪遇到缺陷时就会形成电流回路,电流测试仪就会出现“报警”提示。Beck 等^[25]用金属滚条的形式代替传统水枪法的水枪喷头,在实地探测中既可以对土工膜缺陷情况进行探测,又可以借此发现土工膜膜下不良接触或尖锐凸起。(c)电弧法同样将供电电极一端接入膜下土层中,另一端与探测装置相连,当探头遇到缺陷时就会产生连续且明亮的电弧。Nosko 等^[17]对欧洲近 500 万 m^2 暴露土工膜的电弧法探测结果进行统计分析,指出电弧法适用于各种非导电土工膜(PE、PVC、PP

等),且探测灵敏度可达毫米级。高康等^[26]总结国内 10 年间 100 多处垃圾填埋场及矿山等工程开展的土工膜缺陷探测实践,证实利用改进的电弧漏洞检测技术可使检测精度和准确度大幅度提高。

上述几种电学探测方法适用于大面积非焊接区土工膜微小缺陷的探测,其探测精度和灵敏度均较高。实际工程应用时,电火花法与水枪法也有一定的限制。例如,电火花法仅适用于造价相对较高的导电土工膜;水枪法由于采用低电压,其探测精度相对较低,不适用于高湿度环境下微小缺陷的探测。此外,水枪法不宜对较陡的斜坡铺设的土工膜进行缺陷探测,因为顺坡而下的水流可能不通过缺陷^[25],同时产生的表面张力会“掩盖”微小孔洞,此时水枪法的探测灵敏度会大幅度降低。相比之下,电弧法的优势在于缺陷探测时不依赖常规的信号传输介质(导电土工膜或水),适用于普通非导电土工膜,具有较高的探测精准度,因此在土工膜铺设焊接且裸露时推荐使用。

1.2 膜上保护层铺设阶段

土工膜完成铺设和焊接后,一般需铺设砂、砂砾石等土石料作为膜上保护层。根据 Nosko 等^[5-6]的调查统计,在土石料保护层铺设和压实过程中,土工膜产生损伤或缺陷的概率远大于焊接阶段,这是由于施工过程中覆盖材料穿刺以及重型机械碾压等均易造成土工膜出现破损^[27]。覆盖保护层后,土工膜的缺陷难以通过肉眼直接观察发现,通常利用电学法进行该阶段土工膜缺陷的探测。

与无上保护层时的裸膜缺陷探测不同,对有上保护层的土工膜,缺陷探测可采用电学探测法中的双电极法和偶极子法。双电极法早在 1985 年由美国 Leak Location Services 公司^[28]提出,其工作原理^[29]是在土工膜上、下垫层中分别布置供电电极,连接高压直流电的正负极,若土工膜完好无损,因土工膜的高阻特性,两电极之间不能形成电流回路;而当土工膜存在缺陷时,缺陷将为电流提供通路从而使串联在回路中的电流表指数发生改变。双电极法仅通过供电电极之间是否产生电流回路来判断缺陷的存在,而不能对缺陷位置及数目进行确定,且场地中诸多可导电的因素都会对探测结果造成干扰。为此,对传统双电极法进行改进,形成了偶极子法(又称电极-偶极子法或改进双电极法),其工作原理^[30]是在双电极法形成电流回路后,利用一对间距固定的探测电极(即偶极子)在土工膜膜上介质(土料或水等)表面进行移动探测。当土工膜完好无损时,膜上介质中无电流,偶极子检测不到信号;而当土工膜存在缺陷时,膜上介质中形成电位场,此时若在偶极子的探测路线上土工膜存在缺陷,随着从土工膜完整区域接近缺陷位置,偶极子间的电位差将逐渐增大;当偶极子的前端电极位于缺陷处,此时两探测电极间的电位差达到最大值;当两探测电极位于缺陷中心对称位置时,两电极电位差为零;若继续向前移动,电位差将反向增大,直至后端探测电极位于缺陷处时到达最大值;探测电极继续前进时,电位差将逐渐减小。在探测电极的移动过程中,可连续记录电位(差)变化过程,绘制沿探测方向电位(差)变化曲线,其中电位差分布曲线会出现一个波峰和一个波谷,二者的中点即为缺陷的位置。Parra^[31]最早对电极-偶极子法进行深入研究,并确定了其工程实用价值。至 20 世纪 90 年代末,已有几百个填埋场利用电极-偶极子法进行了缺陷渗漏检测^[32]。Hansen 等^[33]利用偶极子法对不同保护层形式的两处垃圾填埋场进行缺陷探测,成功地探测到 0.6 m 厚覆盖层下直径小于 5 mm 的缺陷。高康等^[26]利用偶极子法成功地对上海某垃圾填埋场进行实地缺陷探测,并总结了造成土工膜缺陷产生的原因。在实际工程中,膜上保护层的厚度一般比较薄,在保证保护层材料具有一定导电性的条件下,偶极子法具有较高的探测灵敏度,可以对保护层覆盖下毫米级的土工膜缺陷准确定位,是一种有效的缺陷精细探测方法。

2 运行期土工膜渗漏监测和缺陷探测

当土工膜完成施工、进入运行期后,地基不均匀沉降、膜上水压力以及动植物破坏等因素可能对其造成损伤破坏,同时土工膜在上覆盖层(土料或水等)或滤液溶解等长期作用下,可能会出现应力开裂或环境应力开裂现象^[34-35]。与施工期受到强烈外界干扰产生直接破损不同,运行期土工膜缺陷更多是由外部荷载、内部应力和环境等因素的长时间累积效应造成的,Nosko 等^[5-6]的调查统计证实运行期土工膜产生缺陷的概率相对较小。因此,在工程运行期评价土工膜防渗体系完整性的主要手段在于开展有效的缺陷渗漏监测分析,尤其像垃圾填埋场等可能引起环境污染的工程,缺陷渗漏情况的有效监控显得尤为重要。

2.1 在建工程的缺陷渗漏监测布设

对于在建工程,若想对工程运行期土工膜的完整性进行监测,一般需要在土工膜铺设之前将相应的监测装备提前布置在膜下土层中,根据不同的工作原理,现有的运行期缺陷渗漏监测方法可分为常规监测方法和

电学监测方法两类。

常规监测方法包括地下水检测法、扩散软管法以及化学试剂追踪法等。(a)地下水检测法^[36]需要在场地四周布置集水井,通过监测集水井中的地下水中某些成分或浓度的变化来判断场地是否发生渗漏。该方法主要适用于地下水位较高的地下防渗工程。(b)扩散软管法^[37]需要提前将透气性管道网格预埋在土工膜下土壤中,通过渗透扩散进软管中的气体成分及浓度变化判断场地是否发生渗漏。该方法主要适用于存在易汽化渗漏液的场地。(c)化学试剂追踪法^[38]需要在场地周围布设采集探针,通过监测采集探针与注入场地中某种易挥发的化学跟踪剂的反应判断场地是否发生渗漏。该方法主要适用于垃圾填埋场项目。在实际应用中,地下水检测法和化学试剂追踪法仅能判断土工膜是否存在缺陷,无法确定缺陷的具体位置及数目;扩散软管法虽然可以确定缺陷的位置及数目,但其实际探测精度与布置的软管数量密切相关。上述土工膜缺陷渗漏监测方法主要用于垃圾填埋场工程,不适用于水利工程,尤其对于化学试剂追踪法,化学试剂的剂量过少容易被库水稀释降低探测灵敏度,而剂量过多又会对库水造成污染。Hix^[39]曾对市场上常用的土工膜缺陷探测方法进行分类比较后指出,扩散软管法和化学试剂追踪法由于技术水准高、费用昂贵,在实际工程中使用并不普遍。

常规监测方法往往基于某一类工程的固有特性,因此限制了其大范围推广应用。相比之下,电学监测方法利用土工膜的绝缘性和缺陷渗漏前后场地土壤介电常数、电阻率等电学指标的变化开展相应的缺陷渗漏监测,具有更广的适用性。例如,用砂土作为膜下垫层料,干的砂土电阻率约为 $10^5 \Omega \cdot \text{m}$,而当土工膜产生缺陷,膜下土层将因渗漏作用逐渐饱和,饱和砂土的电阻率则约为 $10 \Omega \cdot \text{m}$ ^[40],通过缺陷附近砂土电阻率的差异对土工膜缺陷进行定位,因此电学监测方法可以适用于各类土工膜防渗工程的渗漏监测。此外,电学监测方法的自动化程度和探测精度都要优于常规监测方法,其应用推广已成为现代工程运行期土工膜完整性监测的发展趋势。

电学监测方法有电容传感器法、电化学传感电缆法、电阻率法及电极格栅法等。(a)电容传感器法是在土工膜铺设前将电容传感器埋设在场区内,通过渗漏液引起缺陷附近土壤介电常数的改变来判断土工膜是否存在缺陷。该法需事先埋设大量电容传感器,造价较高,而且场地中地下水等因素也可能会引起局部土壤介电常数改变,对探测结果干扰较大。(b)电化学传感电缆法是将电化学传感电缆预埋在场地土壤内,根据渗漏液中某些成分能够引起传感电缆发生物理或化学反应来判断土工膜是否产生缺陷。Rumer等^[41]从环境保护的角度对各类工程防渗体系控制技术进行分析评估,指出由于不同场地产生的渗漏液成分不尽相同,因此使电化学传感电缆法的适用性受到较大限制。(c)电阻率法^[42-43]则是在土工膜下提前预埋探测电极,利用渗漏发生后漏洞附近土壤电阻率降低的特性来判断土工膜是否产生缺陷。Phaneuf等^[44]对纽约州多处利用电阻率法进行缺陷探测的垃圾填埋场进行调查研究,证明电阻率法在工程运行期间保证防渗体系完整性方面发挥了关键作用,但不足之处在于如果对土工膜缺陷进行修补后膜下土壤的电阻率并不能完全随之恢复,将会对后期缺陷探测结果造成干扰。(d)电极格栅法^[45-47]将探测电极以格栅形式提前预埋在土工膜下的土壤中,定期对场地进行通电检测,根据膜下土壤的电势等值线图来确定土工膜缺陷的数目及位置。Oh等^[48-50]在电极格栅法基础上提出一种格栅电导率测量系统,并进行模型试验,通过改变土壤含水率和电极间距来估计监测系统的灵敏度,试验证明该系统能够准确识别缺陷的位置,并可以定性地评估渗漏液体是垃圾渗滤液还是纯净水。Ben等^[51]采用电缆和电子灯的大型并联电路代替传统的各类电子传感器格栅,大幅度降低了监测系统的成本投入,适用于工程缺陷渗漏的基础监测。上述各类方法均可以精确地确定土工膜的缺陷位置,自动化程度较高,投入使用后可以对工程运行期土工膜的缺陷情况进行永久监测,特别适用于垃圾填埋场等场地条件复杂、运行环境恶劣、腐蚀污染严重的土工膜防渗工程。当然,上述方法中各类传感器、探测电极以及与之配套的监测系统,其造价与成本往往较高,因此在实际工程中还需根据经济性和工程重要性选择合适的渗漏监测方法。

2.2 完建工程的缺陷探测

对于未布置土工膜缺陷渗漏监测系统的已建工程,可利用电学探测方法中的偶极子法进行缺陷探测。根据国内外学者对电学探测方法的模型研究和数值模拟结果可知^[52-55],膜上覆盖层材料的厚度及导电性影响覆盖层表面的电位分布。膜上覆盖层越厚,表面电位分布越微弱,探测灵敏度越低。

为了便于偶极子法在运行期有覆盖材料情况下进行土工膜缺陷探测的应用与推广,国内外学者对偶极

子法做了大量的研究与优化。Beck 等^[25]对美国市场上已有的电学探测设备与技术进行了调研统计,认为深厚填充物探测、“镜子”电荷以及交流滤波等技术的出现,可有效提高偶极子法在各种复杂覆盖情况下的探测精度。Beck^[56]对现有的偶极子法探测设备进行改进,为直流电源提供了电噪声消除功能,为偶极子探针提供 GPS 数据记录和定向指示器功能,极大地提高了偶极子法的探测精度,且能有效降低探测电压,确保探测安全。Xiao 等^[57]利用偶极子法对垃圾填埋场渗漏检测进行了试验研究,探究了砾石大小、缺陷尺寸、渗滤层模型以及水(或渗滤液)入渗等因素对垃圾填埋场渗漏检测的影响。Peggs 等^[58]和 Ramsey 等^[59]对传统衬垫和新型导电衬垫分别进行渗漏检测调查对比分析,证实了导电衬垫在渗漏检测中的实用性。Youngblood 等^[60]、Abigail 等^[61]、Ng 等^[62]通过一系列实地场地测试,证实了导电衬垫的优越性——可用于使用传统非导电衬垫时很难或不可能探测情况下的渗漏检测,例如膜上有深厚保护层覆盖、衬垫与下垫层接触不良、焊接不良以及土工膜有褶皱等情况。Sirieix 等^[63]利用电阻率层析成像技术对导电衬垫进行渗漏探测,并对偶极子阵列和温纳-斯伦贝谢两种不同阵列下的结果进行对比分析,最终通过 PSO 取样解决了低电阻率、超薄垫层下土工膜缺陷的探测问题。通过新技术、新材料以及新设备的不断引入和改进,有效提高了偶极子法在运行期土工膜缺陷探测的适用性和探测精度。Prota 等^[64]对安第斯山脉高海拔地区矿石堆浸项目进行调研,证实改进的偶极子探测设备可以实现对大面积区域的快速扫描,以快速评估土工膜的破损状况。Nosko 等^[17]利用电弧测试法和偶极子法联合工作,实现了对施工期和运行期不同尺寸土工膜缺陷的精确探测,为土工膜防渗工程“零渗漏”的目标提供可能。

已有研究与工程实践表明,偶极子法是一种优越的土工膜缺陷探测方法,与以电极格栅法为代表的永久监测系统相比,偶极子法具有灵活便携、操作简单、成本低廉等优势,适用于未安装监测系统的已建工程。此外,相比土石料而言,库水具有较高的电导率,可以使偶极子法获得更高的探测精度,且偶极子的探头可以在库水中沿土工膜或保护层表面进行放置与拖动^[25],因此偶极子法也适用于土工膜防渗土石坝工程运行期土工膜完整性的探测。

3 土工膜缺陷探测方法汇总及修补技术

3.1 缺陷探测方法汇总

在各类土工膜缺陷探测方法工作原理及优缺点详细介绍的基础上,归纳分析不同方法在不同工程中的适用情况,从而根据不同阶段、不同工程特性进行合适的土工膜缺陷探测方法选择,见表 1。

表 1 缺陷探测方法适用性对比

Table 1 Comparison of the defect detecting methods									
方法	适用阶段	能否定位缺陷位置	是否适用已建工程	特点	方法	适用阶段	能否定位缺陷位置	是否适用已建工程	特点
目测	施工期	能		粗略确定	扩散软管法	运行期	能	否	成本过高
真空箱测试法	施工期	能		焊缝检测	化学试剂追踪法	运行期	否	否	有二次污染威胁,不适用于水利工程
压力箱测试法	施工期	能		焊缝检测	电容传感器法	运行期	能	否	适用永久监测
剪切/张力拉伸测试	施工期	否		焊缝检测	电化学传感电缆法	运行期	能	否	适用永久监测
水枪法	施工期	能		不适用土工膜 防渗土石坝	电阻率法	运行期	能	否	适用永久监测
电火花法	施工期	能		需要导电土工膜	电极格栅法	运行期	能	否	适用永久监测
电弧法	施工期	能		适用各种土工膜	偶极子法	保护层铺设/运行期	能	是	探测精度高,应用广泛
地下水检测法	运行期	否	否	适用垃圾填埋场					

由表 1 可见,无论是施工期还是运行期,相比常规探测方法,电学探测方法的适用范围更广。对于施工期末铺设保护层的裸露土工膜,电弧法具有探测精度高、适用范围广的特点,值得推荐。对于运行期需要实时监控的在建工程,如垃圾填埋场及矿石堆浸等,可以考虑建立电极格栅法为代表的永久监测系统。偶极子法既适用于施工期膜上保护层铺设后的缺陷探测,又适用于运行期不需要永久渗漏监测的完建工程,尤其对于以土工膜防渗土石坝为代表的水利工程,值得推荐使用。

3.2 土工膜缺陷处理技术

在做好各阶段土工膜缺陷探测(含检测和监测)的同时,对发现的土工膜缺陷应进行必要的处理。由于施工期和运行期土工膜缺陷产生原因及工程运行条件不同,相应的土工膜缺陷处理技术也有所不同。

在施工期,当土工膜缺陷探明后,工程中常用的修补方法包括点焊、打补丁和加盖^[65-66]。其中,点焊用来修补小型表面刮痕、较小的局部瑕疵或土工膜厚度减少的部位;打补丁用来修补大型孔洞、撕裂等形式的破损,并要求每个补丁至少比缺陷各边长出 150 mm 且必须采用圆角;加盖即使用长条土工膜修补较长的不合格焊缝。如果修补后仍达不到工程质量运行要求,应将破损的土工膜移除并用新的土工膜进行替换。利用这些方法对施工期出现的土工膜缺陷加以修补,可提高土工膜防渗体系的完整性。

对于已经投入使用的土工膜防渗工程,由于修补条件复杂,土工膜缺陷修补要求很高,一般需要无水或无垃圾填埋的修补施工条件,同时需将膜上的覆盖材料去除。合适条件下,也可考虑在覆盖层上再铺设一层质量完好的土工膜^[67],但工程代价高。

除了上述的常规修补技术之外,Darilek 等^[68]提出了土工膜缺陷修补的电泳法,利用带电黏土颗粒在电场作用下会向缺陷处移动的原理,对土工膜缺陷处进行自动封堵,进而限制缺陷渗漏的进一步发展。Kambham 等^[69]提出一种模拟电泳块封堵渗漏的数学模型并进行了仿真模拟,分析表明电泳块的形成过程与电压梯度和黏土的压缩系数密切相关。Darilek 等^[70]和 Yeung 等^[71]分别用室内试验和大尺度试验证实了电泳法封堵缺陷的有效性,室内试验中 8 ~ 10 mm 的椭圆形缺陷在电泳法作用下渗漏量明显大幅度减小。Corapcioglu 等^[72]通过试验验证了电泳法封堵缺陷的有效性,并指出了电压、电极面积、悬浮液初始浓度与电泳块生成效率的关系;较高电压或较大的电极面积会加速电泳块的生成,同时电泳封堵缺陷时电极应尽可能靠近液体表面。Han 等^[73]和 Kim 等^[74]进行了三维泄漏模拟试验,评价了电泳法封堵缺陷的现场适用性,并对影响因素进行了评价。电泳法理论上可以解决工程运行期土工膜缺陷修补的难题,实际工程实施效果还有待于进一步的应用和考证。

无论施工期还是运行期,当完成土工膜缺陷修补(含修复)后,一般需要对修补部分进行复检。如果依然有缺陷(渗漏)问题,需要进行二次处理,确保修补效果安全可靠。

4 结 语

土工膜作为一种柔性薄膜防渗材料,在实际工程防渗应用时因各种原因导致的缺陷难以避免。本文总结了国内外土工膜缺陷探测(含质量检测和渗漏监测)的研究成果及现状,对各类探测方法进行分阶段分类阐述与对比分析,分析认为电学探测(监测)法具有原理明确、操作简便、定位准确等优点,适用于土工膜防渗工程施工期及运行期的缺陷探测,可考虑优先选择使用。当然,由于土工膜缺陷问题具有复杂性和不确定性,现有的一些缺陷探测方法还有待于进一步深入研究和实践检验,以提高探测的便利性和精度,降低探测成本。

参考文献:

[1] MÜLLER W W. HDPE geomembranes in geotechnics[M]. Berlin: Springer, 2007.

[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] 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))

[4] 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))

[5] NOSKO V, ANDREZAL T, GREGOR T, et al. Sensor damage detection system (DDS): the unique geomembrane testing method[R]. Rotterdam: Proceedings of Geosynthetics: applications, design and construction, 1995.

[6] NOSKO V, TOUZE-FOLTZ N. Geomembrane liner failure: modeling of its influence on contaminant transfer[R]. Bologna: Eurogeo Geosynthetics, 2000.

[7] 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]. Environment Sanitation Engineering, 2008, 16(1): 16-18. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 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))
- [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, 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))
- [11] LAINE D L, DARILEK G T. Locating leaks in geomembrane liners of landfills covered with a protective soil[R]. St. Paul: Proceedings of Geosynthetics, 1993.
- [12] BINLEY A, DAILY W. The performance of electrical methods for assessing the integrity of geomembrane liners in landfill caps and waste storage ponds[J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2003, 8(4): 227-237.
- [13] THIEL R, DARILEK G, LAINE D. Cutting holes for testing vs. testing for holes[J]. Geotechnical Fabrics Report, 2003, 21(5): 20-23.
- [14] SMITH B, DARILEK G, LAINE D. Enhanced geomembrane CQA through proper application of geomembrane leak location surveys[R]. Washington DC: Geosynthetics 2007, 2007.
- [15] DARILEK G, MENZEL R, JOHNSON A. Minimizing geomembrane liner damage while emplacing protective soil[R]. Nashville: Proceedings of Geosynthetics, 1995.
- [16] LINE D L, MIKLAS M P. Detection and location of leaks in geomembrane liners using an electrical method: case histories[R]. Washington DC: Proceedings 10th National Conference, 1989.
- [17] NOSKO V, CROWTHER J. Can the holy grail of the geosynthetics industry “zero leakage” be achieved by arc testing[R]. Portland: Proceedings of Geosynthetics, 2015.
- [18] GIROUD J P. Design of geotextiles associated with geomembranes[R]. Roseville: Proceeding 2nd International Conference on Geotextiles, 1982.
- [19] TOMES P, FISHER G, WAY W. Geomembrane liner reduces leakage in underground reservoir[J]. Public Works Puwoah, 1988, 119(10): 20-32.
- [20] NEEDHAM A D, SMITH J W N, Gallagher E M G. The service life of polyethylene geomembrane barriers[J]. Engineering Geology, 2006, 85(1): 82-90.
- [21] OVERMANN L K. Geomembrane seam nondestructive tests: construction quality control (CQC) perspective[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1990, 9(4): 415-429.
- [22] MCQUADE S J, NEEDHAM A D. Geomembrane liner defects: causes, frequency and avoidance [J]. Geotechnical Engineering, 1999, 137(4): 203-213.
- [23] YOUNGBLOOD J, WARD B. The technical background and successful field experience of spark testing a conductive liner[J]. GSE Technical Document, 2009(3): 135-138.
- [24] ROLLIN A L, JACQUELIN T. Geomembrane failures: lessons learned from geo-electrical leaks surveys[J]. Lessons Learned From Failures Associated with Geosynthetics, 2000, 17: 332-341.
- [25] BECK A, LAFERTE J. Advancements in leak location technologies for the control of geomembranes [R]. Bangkok: Environmental and Water Resources Institute (EWRI), 2009.
- [26] 高康, 兰吉武. 土工膜漏洞检测经验总结[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(3): 110-113. (GAO Kang, LAN Jiwu. Experience in leak location survey of geomembrane [J]. Environment Sanitation Engineering, 2017, 25(3): 110-113. (in Chinese))
- [27] SCHEIRS J. A guide to polymeric geomembranes: a practical approach[M]. Chichester UK: John Wiley & Sons, 2009.
- [28] U. S. EPA. Survey of technologies for monitoring containment liners and covers[R]. Washington DC: U. S. Environment Protection Agency, 2004.

- [29] WHITE C C, BARKER R D. Electrical leak detection system for landfill liners; a case history[J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 1997, 17(3): 153-159.
- [30] LAINE D L, DARILEK G T. Detecting leaks in geomembranes[J]. *Civil Engineering*, 1993, 63(8): 50.
- [31] PARRA J O. Electrical response of a leak in a geomembrane liner[J]. *Geophysics*, 1988, 53(11): 1445-1452.
- [32] KAREN H. Leak detect for landfill liners; overview of tools for vadose zone monitoring[R]. Washington DC: Environment Protection Agency, 1998.
- [33] HANSEN R, BECK A. Electrical leak location surveys for landfill caps[R]. Bangkok: Environmental and Water Resources Institute, 2009.
- [34] ROWE R K, QUIGLEY R M, BRACHMAN R W I, et al. Barrier systems for waste disposal facilities[M]. London: E & FN Spon, 2004.
- [35] ROLLIN A L. Long term performance of polymeric geomembranes[R]. Quebec: ICCD GÉOTECHNIQUE, 2004.
- [36] BUKET Y N, ELFEKI A M, VAN D A. New approach for ground water detection monitoring at lined landfills[J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 2006, 26(2): 79-86.
- [37] STAMMLER M B. Evaluation of methods for monitoring landfill barriers[C]//Anon. Conference on Contaminated Soil. Berlin: Springer, 1986: 477-500.
- [38] WILLIAMS C V, DUNN S D, LOWRY W E. Tracer verification and monitoring of containment systems (II)[R]. Florida: The International Containment Technolog, 1997.
- [39] HIX K. Leak detection for landfill liners overview of tools for vadose zone monitoring[M]. Washington D C: Diane Publishing, 1998.
- [40] 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 measurement techniques of the electrical resistivity of soils[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(2): 216-222. (in Chinese))
- [41] RUMER R, MITCHELL J. Assessment of barrier containment technologies; a comprehensive treatment for environmental remediation applications[M]. Baltimore: International Containment Technology Workshop, 1995.
- [42] SHULTZ D W, DUFF B M, PETERS W R. Electrical resistivity technique to assess the integrity of geomembrane liners[R]. Washington D C: Southwest Research Inst Report, 1984.
- [43] VAN G P, PARK S K, HAMILTON P. Monitoring leaks from storage ponds using resistivity methods[J]. *Geophysics*, 1991, 56(8): 1267-1270.
- [44] PHANEUF R, PEGGS I. Landfill construction quality lessons learned from electrical resistivity testing of geomembrane liners [J]. *Geotechnical Fabrics Report*, 2001, 19(3): 28-35.
- [45] NOSKO V, GANIER P. Damage detection system; the new tool for in situ testing of integrity of geomembrane; comparison and results in two days seminar of landfill interest group[R]. Cap Town: Institute of Waste Management, 1999.
- [46] LAINE D L, BINLEY A M, DARILEK G T. Locating geomembrane liner leaks under waste in a landfill[R]. California: Proceedings of Geosynthetics, 1997.
- [47] TAYLOR S B, WHITE C C, Barker R D. A comparison of portable and permanent landfill liner leak detection systems[R]. Atlanta: Proceedings of Symposium on Field Instrumentation for Soil and Rock, 1999.
- [48] OH M H, LEE J H, YOON G L, et al. Pilot-scale field model tests for detecting landfill leachate intrusion into the subsurface using a grid-net electrical conductivity measurement system[J]. *Environmental Geology*, 2003, 45(2): 181-189.
- [49] OH M H. Development of detection system for subsurface contamination based on electrical properties of soil[D]. Seoul: Seoul National University, 2005: 157-174.
- [50] OH M, SEO M W, LEE S, et al. Applicability of grid-net detection system for landfill leachate and diesel fuel release in the subsurface[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2008, 96(1): 69-82.
- [51] BEN O, BOUASSIDA M. Detecting defects in geomembranes of landfill liner systems; durable electrical method[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 7(2): 130-135.
- [52] PARRA J O, OWEN T E. Model studies of electrical leak detection surveys in geomembrane-lined impoundments[J]. *Geophysics*, 1988, 53(11): 1453-1458.
- [53] 杨萍, 能昌信, 杨公训, 等. 填埋场渗漏检测高压直流电法的正演解析[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2006, 25(4): 567-570. (YANG Ping, NENG Changxin, YANG Gongxun, et al. Analytical model for landfill high voltage DC leak detection[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, 25(4): 567-570. (in Chinese))

- [54] 杨萍, 能昌信, 董路, 等. 人工合成衬层渗漏检测高压直流电法漏洞电流模型[J]. 环境科学学报, 2005, 25(10):1361-1364. (YANG Ping, NENG Changxin, DONG Lu, et al. Leak current model in leakage detection of HDPE liner using high voltage DC method[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(10):1361-1364. (in Chinese))
- [55] 管绍朋, 潘俊峰, 能昌信, 等. 电法填埋场渗漏检测供电电极接地电阻研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(6): 39-42. (GUAN Shaopeng, PAN Junfeng, NENG Changxin, et al. Grounding resistance of electrode in landfill leakage detection using electrical method[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(6): 39-42. (in Chinese))
- [56] BECK A. Technical improvements in dipole geoelectric survey methods[R]. Dallas: Advances in Geotechnical Engineering, 2011.
- [57] XIAO K, XUE Q, LIU K. Influence factor analysis of the electricity-dipole method for landfill leakage detection on HDPE membrane[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(7): 6225-6232.
- [58] PEGGS I D. On Site-Liner integrity/leak-location survey: the significance of boundary conditions-case history examines survey of new landfill[R]. Washington DC: Geosynthetics 2007, 2007.
- [59] RAMSEY B J, PEGGS I, GALLAGHER D. New electrically conductive geomembrane for post-installation liner integrity surveys [R]. Valencia: European Geosynthetics, 2012.
- [60] YOUNGBLOOD G D J, RAMSEY B. New electrically conductive geosynthetics in support of post installation liner integrity surveys[C]//Anon. Proceeding of Geosynthetics Americas. Japan: Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2012: 1-4.
- [61] ABIGAIL B, DAVID G, ERIK K. Leak location liner performance evaluation[R]. California: Geosynthetics, 2013.
- [62] NG H, ZHENG Y. Electrically conductive geomembrane enhances construction quality assurance at post installation[J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2016, 2(70): 2401-2405.
- [63] SIRIEIX C, MARTÍNEZ J L F, RISS J, et al. Electrical resistivity characterization and defect detection on a geosynthetic clay liner (GCL) on an experimental site[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 90(3): 19-26.
- [64] PROTA S, PARRA D, BECK A. Maximizing productivity in heap leach pads through dipole electrical leak location[R]. Vancouver: Proceedings Heap Leach Solutions, 2014.
- [65] 李超, 张长万, 侯云强. 膨胀土地质条件下的土工布、土工膜施工技术[J]. 四川水力发电, 2014, 33(增刊1):124-127. (LI Chao, ZHANG Changyun, HOU Yunqiang. Construction technology of geotextile and geomembrane under expansive solid [J]. Sichuan Water Power, 2014, 33(Sup1):124-127. (in Chinese))
- [66] 冯雁, 大宁水库土石坝复合土工膜防渗关键技术[D]. 北京:清华大学, 2010.
- [67] LANDRETH R E. Locating and repairing leaks in landfill/impoundment flexible membrane liners[R]. Springfield: National Technical Information Service, 1988.
- [68] DARILEK G T. Electricity seals impoundment leaks[J]. Environmental Protection, 1991, 2(3):44-47.
- [69] KAMBHAM K K R, TUNCAY K, CORAPCIOGLU M Y. A semi-analytical analysis of compressible electrophoretic cake formation[J]. Water Resources Research, 1995, 31(5): 1421-1428.
- [70] DARILEK G T, CORAPCIOGLU M Y, YEUNG A T. Sealing leaks in geomembrane liners using electrophoresis[J]. Journal of Environmental Engineering, 1996, 122(6): 540-544.
- [71] YEUNG A T, CHUNG M, CORAPCIOGLU M Y, et al. Impoundment liner repair by electrophoresis of clay[J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, 123(10): 993-1001.
- [72] CORAPCIOGLU M Y, KAMBHAM K K R, TUNCAY K. Electrophoretic repair of impoundment leaks: Analysis and verification with experimental data[J]. Environmental Science & Technology, 1998, 32(23): 3778-3784.
- [73] HAN S J, KIM J Y, KIM B I, et al. The 3-D simulation of electrophoresis method in leachate system for repairing of leaks in waste landfill geomembrane liner[J]. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 2010, 30(1C): 17-25.
- [74] KIM J Y, HAN S J, KIM S S. The enhanced electrophoresis method in leachate system for repairing of leaks in waste landfill geomembrane liner[J]. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 2010, 30(1C): 7-15.

(收稿日期:2017-08-16 编辑:高建群)