

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.01.006

防渗土工膜的缺陷特性与缺陷渗漏研究进展

岑威钧,和浩楠,温朗昇

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要: 详细阐述土工膜用于防渗工程时出现缺陷的形式与测试方法、缺陷分析理论与计算模型、缺陷预防原则与措施、垫层属性与接触渗流、不同接触和垫层条件下的缺陷渗漏量、缺陷渗漏影响因素等方面的国内外研究现状,对现有的研究成果进行分析、归纳、总结和评价。总结表明,由于土工膜缺陷问题的复杂性和不确定性,现有研究以试验研究为主,辅以一定的理论分析和数值模拟,各方法和理论得到的成果存在一定的差异性。为此,建议了与土工膜缺陷相关的可进一步研究的若干重点问题,促使设计和研究人员对土工膜缺陷问题尽早得以较为全面的认识和有效的控制。

关键词: 土工膜;缺陷特性;测试方法;分析理论;缺陷渗漏;研究进展

中图分类号:TV441 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2017)01-0036-09

Research progress on defect property and defect-induced leakage of impermeable geomembrane

CEN Weijun, HE Haonan, WEN Langsheng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, research on defects of geomembrane (GM) used in practical engineering in China and abroad is summarized and evaluated from the aspects of geomembrane defect types and test methods, theory of defect analysis and defect calculation model, principles and measures of defect prevention, cushion layer properties and interface flow, the rate of leakage under different contact conditions and cushion layers, and factors of leakage induced by geomembrane defects. Analysis shows that, due to the complexity and uncertainty of geomembrane defects, current research is mainly based on experiments, accompanied by theoretical analysis and numerical simulation, producing different results from the theoretical results. Some key problems related to geomembrane defects that require further research are put forward so that an overall recognition and effective control of geomembrane defects can be realized as early as possible.

Key words: geomembrane; defect property; test method; analytical theory; defect-induced leakage; research progress

土工膜是一类由高分子聚合物制成的新兴工程防渗材料,具有防水性能好、厚度薄、施工速度快和造价优势明显等特点,已广泛应用于土石坝、堤防、围堰、库盆、蓄水池、渠道、垃圾填埋场等防渗工程。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中有26个漏水孔,其中15%为孔眼缺陷^[1]。Nosko等^[2]通过对300多处大约325万m²的土工膜进行质量检测,发现大小为0.5~10cm²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%。虽然上述工程中土工膜缺陷数量较多,但土工膜承受的防渗水头较小。然而在土工膜防渗土石坝中,尤其(较)高坝,土工膜的防渗水头较大,因此土工膜的缺陷及整体防渗性能引起设计者的特别重视。据国际大坝委员会(ICOLD)2010年不完全统计,全球已有167座大型土石坝采用土工膜防渗^[3]。土工膜既可作为新建坝的防渗体,也可以用于老坝

收稿日期:2016-10-18

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,浙江慈溪人,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

的渗漏修复。目前,我国已有一些较高新建堆石坝,例如云南省 53 m 高的塘房庙堆石坝^[4]、广西区 48 m 高的田村堆石坝^[5]、四川省 56 m 高的仁宗海堆石坝^[6]等,均采用复合土工膜防渗,至今运行良好。对于老坝渗漏问题,我国也有不少土石坝工程成功使用土工膜进行修复,其中土工膜防渗水头最大的为陕西省 85 m 高的石砭峪定向爆破堆石坝^[7]。虽然土工膜具有明显的防渗和价格优势,但几十年来国内坝工界依然未兴起采用土工膜防渗的热潮,尤其近些年来土工膜在新建高土石坝中的防渗应用更是寥若晨星^[8]。究其原因,笔者认为目前一些坝工设计师对土工膜这种新型防渗材料的各种力学和水力学等特性尚未深入掌握,“直观感觉”就是土工膜容易破损和老化。关于土工膜的耐久性,已有研究表明^[9-11],在合适的保护下土工膜的使用寿命在 100 a 以上,具体研究细节将另文撰述。本文重点阐述工程界关注的土工膜缺陷属性及缺陷引起的渗漏问题的国内外研究现状和研究成果,并指出现有研究存在的不足和需进一步研究的若干重点,期望能使大家对土工膜缺陷问题有较完整的认识,促使土工膜在高水头防渗工程中得以广泛应用。

1 土工膜缺陷特性及预防机理研究进展

1.1 缺陷特性及影响因素

土工膜缺陷包括细观缺陷和宏观缺陷 2 类。胡利文等^[12]利用光学显微镜和电镜分别对不同延伸率下土工膜的微结构进行研究,探讨了土工膜微观破损机理,认为颗粒杂质和材料塑性对土工膜破损有较大影响。对实际工程防渗应用来说,土工膜的细观缺陷一般不影响其宏观防渗性能,可不考虑,重点关注宏观缺陷(即土工膜的破损)。土工膜的宏观缺陷主要包括拉破、顶破、刺破、液胀破坏等因局部受力变形过大引起的破损,以及因焊接或胶接质量引起土工膜连接处的破损。后者的连接不完整性可以通过提高施工质量加以避免或减小,前者破损具有不确定性,影响范围大,因此是目前研究的重点,其中顶破、刺破、液胀破坏应尤为关注。柔性的土工膜在实际防渗工程中需有下垫层的支撑。下垫层一般多选用一定颗粒级配的土石料(亦有采用低透水性黏土或 GCL 等),要求其具备渗透性好,压缩性小,抗压强度高等特点。由于土石散粒料垫层表面在细观上凹凸不平,在(较大)水压力作用下土工膜会在垫层中某些突出颗粒或凹坑处发生局部变形。根据局部变形的大小,土工膜可能出现不同程度的局部损伤,乃至破坏,形成宏观缺陷,使得土工膜失去完整的防渗功能。岑威钧^[13]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宏观缺陷形式及其产生原因,但未涉及定量评价分析。Brachman 等^[14-15]利用厚度小于 0.2 mm 的压感纸在压力作用下其微型色囊发生破裂并在压感纸表面显色的原理记录土工膜与砾石之间的接触方式,发现土工膜与土石料之间的接触类型有:点式、边式、面式、轮廓式及复合式接触,其中点式接触最常见,约占总数的 40%,其次为边式接触。点式接触主要是由于在膜上压力作用下,膜下土石颗粒发生局部不均匀沉降,导致个别颗粒较大的砾石顶托土工膜,使土工膜在局部膜平面内产生拉应力。当局部拉应力足够大时,土工膜将出现顶破或刺破的宏观缺陷。

土工膜的顶破/刺破抵抗能力和下垫层颗粒形态有关。Stark 等^[16]通过 PVC 土工膜顶破/刺破试验表明,临界顶破高度越大土工膜越易破坏,因此土工膜垫层设计时应具有较好的平整度,避免存在较大凸起的砾石颗粒,可有效预防土工膜顶破/刺破。此外,实际工程调查表明,土工膜破损还与自身特性和施工方法等有关。Narejo^[17]对光面和糙面 HDPE 土工膜进行试验研究,结果表明,不同厂家生产的光面土工膜的抗顶破能力相似,但糙面土工膜的抗顶破能力与加糙工艺有关;且糙面土工膜的抗顶破能力低于光面土工膜,在工程应用中应采用密度较大的土工膜。Stark 等^[18]用试验方式测量施工机械和场地特征对垃圾填埋场中的土工膜作用力。试验表明施工机械作用在土工膜上的力要大于计算土压力(约大 2~5 倍,具体取决于上覆土层厚度和材料种类)和弹性理论解,且当土工膜上覆砂土厚度小于 0.1 m 时,土工膜发生破坏;随着施工机械行驶速度增加,压力值逐渐减小,并且砂土层的保护作用较粗砾石层明显。由此可见,施工机械及其运行特性对预防土工膜出现缺陷也有重要影响。

1.2 缺陷测试方法

为定量评价土工膜抵抗顶破/刺破的能力,国外常用 2 类试验进行模拟。一类是模拟土工膜现场工作条件,使用天然砾石垫层测量土工膜顶破/刺破抵抗能力;另一类采用人工顶破介质,测量土工膜的顶破/刺破抵抗能力。第一类试验方法的优点是真实模拟土工膜的局部受力条件,但现场试验条件不易精确复制,因此较难形成共性评价标准。第二类试验方法一般在室内实施,但目前还未建立不同形态的人工顶破介质与天

然土石料颗粒形态之间的关联,因此试验成果与实际情况有脱节。

在模拟现场条件时,Antoine 等^[19]提出了模拟现场条件砾石形态的人工砾石制备法。即利用图像分析原理计算垫层中天然砾石的角度和钝度,据此制作人工砾石垫层,模拟颗粒垫层条件下土工膜顶破/刺破抵抗能力。试验结果表明,在相同的密度下人工砾石法得到的抗顶破强度偏小。Athanassopoulos 等^[20]对现场条件下尖锐大粒径砾石垫层的土工膜顶破/刺破抵抗能力进行测试,发现土工膜除顶破/刺破外,还发生了不同程度的屈服现象。Hornsey 等^[21]利用激光扫描技术对散粒体垫层条件下土工膜应变进行了测量。相比人工统计因垫层砂石颗粒造成土工膜压痕的方法,该法能够客观描述土工膜在砾石作用下的真实受力变形状态,预测现场条件下土工膜的顶破/刺破抵抗能力。

关于人工顶破介质法,根据不同的试验器材,又包含不同的类型。目前土工合成材料测试规范给出 3 种标准室内试验测试土工膜抵抗局部顶破/刺破的能力,即胀破试验、CBR 顶破试验、刺破试验。3 种试验采用的试样、夹具以及顶杆的尺寸是固定的。Allen^[22]开展“抗刺破和拉伸测试方法 (FTMS 101C, Method 2065)”和“土工织物、土工膜及相关产品抗刺破指数测试方法 (ASTM D 4833)”对比分析,发现 2 种试验方法得到的顶破强度相差 15% ~ 35%。而实际工程中,垫层散粒体的颗粒大小、形状、堆积和排列呈随机分布,土工膜发生局部顶破/刺破的情形可能与上述标准试验条件差异性较大。为尽可能地模拟现场砾石形态对土工膜顶破/刺破的影响, Lee 等^[23]与 Sabir 等^[24]根据砾石的形状分别制作顶破介质,对土工膜(或土工织物)施加荷载,发现土工膜(或土工织物)顶破/刺破抵抗能力与施加荷载的顶破介质有很大的相关性。因此,用室内标准试验测试土工膜局部顶破/刺破抵抗能力应结合实际工程土工膜工作条件建立“标准化”土工膜缺陷室内测试方法,为定量评价土工膜抵抗局部破损能力奠定基础。

1.3 缺陷分析理论与计算模型

土工膜的破损是由于土工膜局部拉伸变形过大所致,因此土工膜防渗设计时常用土工膜拉伸试验成果评价土工膜的允许变形能力。目前,土工膜缺陷的一些分析理论和计算模型大多是紧密依托试验成果得到的。Ghosh^[25]通过改进的 CBR 试验研究了预加径向应变条件下土工织物顶破/刺破抵抗能力,并将其与宽条拉伸试验得到的破坏应变之间建立关系。试验结果表明,宽条拉伸试验破坏应变比 CBR 试验结果大得多。Lambert^[26]通过不同类型土工膜水力顶破(液胀)试验发现,土工膜在水力作用下根据自身变形能力有 2 种不同的破坏方式:顶破(接触点上)和胀破(接触点之间);并分别建立双轴拉伸试验、静力顶破试验与水力胀破试验之间的关系。试验结果表明,2 种关系在胀破破坏下呈线性关系。

为了建立土工膜室内顶破试验结果与现场土工膜破坏之间的联系, Wilson-Fahmy 等^[27]、Narejo 等^[28]和 Koerner 等^[29]分别从理论和试验方面研究 HDPE 土工膜的顶破抵抗能力。Wilson-Fahmy 等^[27]将试验模型中圆形土工膜四周固定,膜中心受顶部为球形的光滑圆柱体支撑,逐渐增加作用在膜上的水压至土工膜破损,建立了基于土工膜顶破理论的分析模型;根据变形后土工膜呈轴对称悬链形的假定,采用薄膜拉伸理论计算土工膜顶破抵抗能力,得出土工膜抗顶破能力随着土工膜厚度的增大呈线性增加,并且土工织物保护层的使用能使土工膜抗顶破能力显著提高。Narejo 等^[28]分别利用截顶圆锥和砾石对土工膜进行长期和短期顶破/刺破模拟试验,发现土工膜顶破/刺破抵抗能力随着土工膜及土工织物保护层密度的增加而增加。同时试验通过对比不同模拟条件(土工膜有否保护层、单个砾石与截顶圆锥、砾石层与单个砾石、静水压力与静土压力、长期荷载与短期荷载)下土工膜顶破/刺破强度,最终得出土工膜顶破/刺破强度经验计算公式。

Giroud 等^[30]建立了一个考虑土工膜与梯形顶破棒接触面积、土工膜厚度及拉伸特性的土工膜顶破强度计算模型,并与已有试验数据进行对比。结果表明,模型计算值最多低于试验值 20%,能够满足工程应用精度要求。同时,Giroud 基于室内试验建立了水压条件下铺设在均匀尺寸和形状的砾石层上的土工膜顶破/刺破抵抗能力表达式,并将该表达式推广应用到现场条件。Tognon 等^[31]对比了颗粒作用下土工膜局部应变的 3 种不同理论模型。结果表明拱伸长法和薄膜理论可以估算土工膜局部应变的大小,拱伸长法具有较大的主观性,而薄膜弯曲法可较客观地描述土工膜在颗粒作用下的局部应变分布。Stark 等^[16]为推广 Narejo 等^[28]提出的 HDPE 土工膜顶破/刺破强度经验计算公式,通过试验研究 PVC 土工膜临界顶破高度、顶破力及厚度之间的关系,将临界顶破高度引入上述公式,在计算模型的基础上提出 PVC 土工膜抵抗顶破/刺破的设计方法。Jiang 等^[32]基于 Giroud 提出的基本理论,考虑垫层颗粒的随机性及无序性排列,建立土工膜局部发生顶破/刺破与膜上压力和下垫层颗粒粒径关系的概率模型。土工膜上压力越大,垫层颗粒粒径越大,土

工膜发生顶破/刺破的概率越高。

1.4 保护层设计原则与措施

土工膜保护层是保证土工膜防渗工程(如土工膜防渗土石坝、垃圾填埋场等)长期运行的重要措施。Giroud^[33]在1984年首次提出采用针刺无纺土工布作为土工膜的保护层,讨论了土工织物对土工膜出现缺陷的预防作用,但并未提出相应的设计方法。Narejo^[34]分别从运行过程中土工膜能否发生屈服及是否发生顶破总结了国际上现行的3种不同的土工膜保护原则:(a)“德国保护原则”,即要求颗粒穿刺试验得到的土工膜局部应变应低至0.25%。(b)正常运行条件下土工膜不会产生屈服,要求土工膜能承受1.5~2倍的设计法向荷载(最少持续100h)。采用性能穿刺试验时土工膜若产生屈服迹象,则应提高土工膜保护层的密度。(c)对于不会危害环境的次要或临时的垃圾填埋场或其他一些防渗工程,可允许土工膜在使用过程中产生屈服。同样采用性能穿刺试验直到土工膜出现缺陷,此时应选取合适的系数将穿刺失效压力转变为现场允许压力值进行土工膜预防缺陷设计。

Hullings等^[35]与Brachman等^[36]分别利用标准试验和天然砾石垫层对保护层的作用进行试验研究,结果表明,采用无纺土工织物或细砂做保护层时能有效防止土工膜发生顶破,并且提高土工织物的密度或增大土工膜的厚度明显增强了土工膜的抗顶破能力。土工膜保护层种类有很多种,包括砂土、压实黏土、橡胶轮胎颗粒、土工织物和复合层。关于其作用,Dickinson等^[37]开展了专门的试验研究,结果表明:150mm厚的砂土保护层在250kPa竖直压力作用下保护能力最强,但考虑到砂土在水流作用下易流失的性质,在堤坝等挡水工程中使用并不适合;50mm厚的粗碎石在同等竖直压力作用下与150mm厚砂土具有同样的保护作用;150mm厚的压实黏土和150mm厚的橡胶轮胎颗粒可将土工膜局部应变降低至可接受范围内;多层复合土工织物保护层可将土工膜短期应变降低至3%以下。因此,对于防渗土工膜高土石坝,在保证坝坡稳定的情况下可考虑采用一定厚度的粗碎石、橡胶轮胎颗粒或多层复合土工织物作为保护层,最优厚度可根据实际水头进行换算。

1.5 需进一步研究的问题

防渗土工膜是一类柔性薄膜材料,工程中使用的厚度多在0.5~3mm,其抵抗顶破、刺破和胀破等各种缺陷产生的能力有限。工程实践表明,进行土工膜防渗应用时其缺陷是几乎不可避免的。因此,工程设计中应考虑采用“缺陷存在及可控”的设计理念,而不是一味地担心甚至害怕土工膜缺陷的出现而抵制采用土工膜进行防渗。由于土工膜缺陷问题的复杂性,目前有关土工膜破损的研究大多基于现场试验和室内模拟试验,且国内外学者之间的成果有一定差异性,尚未形成系统公认的研究成果及理论。为此,宜重点考虑对如下问题开展进一步研究:(a)定量评价土工膜发生顶破、刺破和胀破时的核心影响因素,确立主次;(b)建立考虑核心影响因素的土工膜局部变形特性的测试方法,定量建立土工膜破损的颗粒接触特性参数;(c)尽早建立“标准化”土工膜缺陷的现场模拟试验,使各家研究成果有可比和借鉴的基础;(d)在室内试验与现场试验基础上,建立土工膜缺陷的计算方法和预测模型;(e)研究预防和避免土工膜出现宏观缺陷的有效保护措施,使土工膜缺陷处于可控之中。

2 土工膜缺陷渗漏(渗流)研究进展

2.1 垫层属性与接触渗流

完好无损的土工膜渗透系数一般为 $10^{-11} \sim 10^{-13}$ cm/s,透水性微小。土工膜的细观缺陷多为生产过程中母材不均一性导致的细微孔眼,渗漏量微小,不会对工程安全造成影响。即使对于土工膜防渗土石坝等(较)高水头防渗工程,也无需关注土工膜的细观缺陷渗漏,而应重点考虑土工膜宏观缺陷引起的渗漏。防渗土工膜下垫层的设计通常包含2种不同的设计理念。一种是下垫层采用黏土、GCL等低透水性材料,与土工膜一起形成复合防渗层,以限制已有缺陷导致的缺陷渗漏;另一种是采用砂砾石等透水性较强的材料作为垫层,一旦土工膜出现破损渗漏,立刻将水排出,以降低膜后渗透压力。

土工膜与低渗透性土组成复合防渗层时,通过土工膜缺陷的水流会先在土工膜与下垫层间形成接触渗流,然后再渗透到下垫层中。Chai等^[38]开展大尺度、相对长期条件下土工膜缺陷渗漏试验,通过测量土工膜与下垫层之间的离子浓度,证实接触渗流的真实存在;Giroud等^[39-40]指出膜土接触条件的好坏是影响土工膜缺陷渗漏量的重要指标,由此提出不同接触条件下的渗漏量经验公式。为了简化接触条件,Rowe等^[41-42]

假设土工膜与下垫层间的接触厚度均匀一致,分别提出了圆形缺陷(轴对称条件)、褶皱并含缺陷(二维缺陷条件)条件下的渗漏量解析公式。实际工程条件下,土工膜表面的粗糙度^[43-44]不一,日照等原因引起温度变化导致的土工膜膨胀性能亦有差别,下垫层土石颗粒分布导致的突起或凹坑也有所不同,这些均使得土工膜与下垫层间的接触厚度并不均匀。Touze-Foltz 等^[45]和 Cartaud 等^[46]通过修正均匀接触厚度下的解析公式,提出非均匀接触厚度下渗漏量计算的解析方法,并对接触厚度是否均匀分布进行敏感性分析。指出忽视接触层的非均匀性会得到较大的渗漏量,考虑真实分布的水力传导率是非常重要的。并借鉴裂隙岩体开裂测量的方法,在室内试验条件下得到准确的接触层空间分布及接触渗流流量,同时采用数值模拟方法计算非均匀界面厚度下的接触渗流量。分析结果表明,液体在土工膜和下垫层接触界面不均匀间隙中形成流管,并且试验与数值模拟得到的接触渗流具有相似的水力特征。Mendes 等^[47]对缺陷土工膜与复合垫层(GCL 和压实黏土)之间的接触渗漏进行了专门的试验研究和数值模拟验证。结果表明,不同类型的 GCL 对接触层的透水率影响不大,但是接触特性对缺陷渗漏径向作用范围影响很大,试验达到“稳定”状态后接触渗漏量随时间不再发生明显变化。Giroud 等^[48]基于土工膜-低渗透土复合垫层条件下土工膜缺陷渗漏公式并结合理论分析,提出了 GCL 垫层条件下接触浸湿比(浸湿面积与总面积的比值)计算公式。计算结果表明,由土工膜缺陷渗漏导致的 GCL 湿化时间短(一般几天内)、湿化面积小,且 GCL 浸湿面积由历史最高水头控制。

2.2 不同接触和垫层条件下的缺陷渗流量

通过土工膜缺陷的渗透水流在形成接触渗流的同时,也在向下垫层扩散。向下垫层扩散的渗漏量与缺陷性态(类型、大小、数量等)、下垫层性质及接触条件等紧密相关。Giroud 等^[49-51]先后针对圆形缺陷和无限长缺陷渗漏量开展研究,提出能够满足工程计算精度要求且形式简单的经验公式。假设在严格的施工质量保证体系下,由施工等原因造成的土工膜缺陷大小约为 $3.14 \times 10^{-2} \sim 1 \text{ cm}^2$;当下垫层渗透系数大于 $10^4 \sim 10^5$ 倍土工膜渗透系数时可忽略下垫层对缺陷渗流的影响,此时渗漏量应按自由出流条件下的 Bernoulli 公式进行计算。Touze-Foltz 等^[52]指出在保证施工质量条件下设置 GCL 时,由于接触特性导致的渗漏量明显小于“良好”接触条件下的土工膜缺陷渗漏量,因此将此接触定义为“更优”的接触条件;通过对 Giroud 提出的经验公式和 Rowe 及 Touze-Foltz 提出的解析公式对比计算可知,圆形缺陷经验公式得到的渗漏量在接触“良好”和“不良”的情况下与解析公式渗漏量相近;而对其他缺陷类型和“更优”的接触条件,经验公式渗漏量却与解析公式渗漏量有较大差距;并且 Colucci 等^[53]及 Nosko 等^[2]通过电学探测法发现,土工膜缺陷大小要比 Giroud 等^[51]的推荐值大得多。基于以上原因,Touze-Foltz 等^[54-56]和 Giroud 等^[57-59]通过大量的算例,采用界面传导率量化土工膜与下垫层的接触方式,提出不同缺陷类型(小圆形缺陷、无限长度的缺陷缝、受损的褶皱、缺陷缝宽度)和接触条件(优、良、不良)下的复合防渗层缺陷渗漏量计算经验公式。同时,将 2~20 mm 小孔计算公式推广到 0.1~0.6 m 的大孔缺陷渗漏计算经验公式,并将无限长度的缺陷缝经验公式与圆形缺陷的经验公式相结合,得到有限长度下的渗流量表达式;通过对有限长度下的缺陷缝进行敏感性分析,得出如下结论:窄型缺陷、有限长缺陷缝的两端渗漏量占总渗漏量的比例很大,计算中不能忽略。

土工膜和土工垫层组成的复合垫层系统越来越多地应用于土工膜防渗工程中。使用复合垫层可结合 2 种不同材料的各自优点(水力、物理和耐久性等),因此可极大程度地降低土工膜含有缺陷时的渗漏量。Giroud 等^[58-60]利用经验公式对下垫层材料是否会由于土工膜缺陷渗漏而饱和从而影响渗漏液扩散的问题进行研究,并通过在低渗透下垫层经验公式和 Bernoulli 公式间插值得到半透水(即渗透系数介于 Giroud 提出的低渗透垫层和 Bernoulli 公式完全透水垫层渗透系数之间)垫层条件下的经验公式。计算结果表明:当土工膜布置在透水性材料中间、上覆材料渗透系数趋于无穷时,渗漏扩散速率与 Bernoulli 公式的计算结果接近,但总体而言要比 Bernoulli 公式的计算结果小(与上覆材料渗透系数有关);当下垫层由于土工膜缺陷渗漏导致缺陷周围的下垫层存在液体而达到饱和时,通过缺陷的水头损失会随之减小,渗漏扩散速率也会减小。Giroud 等^[61]根据水化时间和液体迁移速率 2 种不同方式提出一维和轴对称条件下土工膜封闭膨润土缺陷渗漏解析法。结果显示,由土工膜缺陷渗漏导致 GCL 剪切强度下降所需的时间很长。与黏土层或 GCL 相比,土工膜封闭膨润土中渗漏扩散速率更小,渗漏量更小。Abuel-Naga 等^[62]基于数值模型试验推导了 GM/GCL 复合垫层不同缺陷类型下土工膜缺陷渗漏经验公式。此外,Giroud 等^[63]得到了关于渗滤液搜集层的流动渗漏量解析解法和图解法,并建立土工膜缺陷渗漏量与渗滤液最大水头之间的关系,以及缺陷随机分布条件下浸湿面积和膜下搜集层渗中滤液的平均高度计算公式。

2.3 缺陷渗漏影响因素

土工膜的缺陷渗漏行为除受垫层特性及接触条件影响外,还与作用水头、膜上荷载、缺陷大小和数量、缺

陷形状、保护的织物等因素密切相关。Walton 等^[64]对缺陷土工膜进行了室内试验和数值模拟计算,结果显示当土工膜厚度大于缺陷大小时,在有效应力作用下缺陷呈现闭合趋势,使渗漏量减小。Chai 等^[38]发现采用复合防渗层时,膜上施加的法向荷载(非水压力)能较明显地限制土工膜的缺陷渗漏。Barroso 等^[65]进行了3个不同尺度的土工膜缺陷渗漏试验。研究表明,随着水头增加,缺陷渗流量增加。膜上施加的法向荷载(非水压力)能较明显地限制土工膜的缺陷渗漏。与大、中型尺度的试验相比,小尺度试验测得的渗漏量偏大,可以作为现场类似情况的上限值。

以上研究大多针对低水头情况,如垃圾填埋场渗滤液问题,而土工膜应用于土石坝工程时,其所承受水压力大幅度提高。Weber 等^[66-68]开展了0.3~60 m大跨度水头下的土工膜缺陷渗漏试验,期望将研究成果应用到高水头防渗工程中。试验再次验证膜与土的接触条件对缺陷渗流有很大影响,同时发现高水头下缺陷渗漏量也随之增大,但对接触性质的改善作用更为明显;当土工膜与GCL组成复合防渗层时,Bernoulli孔流方程和Rowe等^[42]提出的解析模型对渗漏量有较好的预测作用,但后者对界面透水率的选择依赖性较高。

Saidi 等^[69]对土工膜含有2个相邻的正方形缺陷孔时复合垫层的渗流行为进行数值模拟,从缺陷的间距、施加的水头、缺陷尺寸及膜土接触特性对结果进行敏感性分析,并与2个不发生相互作用的缺陷孔及以同等大小缺陷孔作为边界的长形缺陷的结果进行比较。研究表明:双缺陷孔的交叉效应并未明显减小渗漏量,缺陷下的渗漏区域近似呈“8”字形或椭圆形;一般而言,双缺陷时的流量和膜下渗漏区域小于缺陷缝时的流量和膜下渗漏区域,二者仅在缺陷距离较近时大致相同,且二者差异随着2个缺陷的间距增加而增加。Foosse 等^[70]分别采用三维模型模拟缺陷渗孔的渗漏量和二维模型模拟缺陷缝的渗漏量。通过将数值模拟结果与现有经验公式解及解析公式解对比,发现现有经验公式及解析公式都存在一定的适用性,不同方法计算得到的结果差异很大;基于数值模拟计算结果,给出了现有经验公式及解析公式的不同适用范围。

Cartaud 等^[71]对土工膜含有缺陷时土工织物作为界面保护时的渗流量开展了1 m尺度下的室内试验研究,试验反映了真实场地条件下不同压力作用时3种不同的土工织物保护下的缺陷渗流量。土工织物的水力特性不仅依赖于厚度,还依赖于织物的预水化和非饱和特性。当复合垫层中含有土工织物时采用标准试验测试手段得到的渗流量并不可靠。Bouazza 等^[72]建立了孔型缺陷条件下通过GM/GCL复合垫层的渗漏气体理论模型。当GCL含水量高于临界含水量时,理论模型预测值与试验值高度吻合;但是在低含水量条件下,预测值要高于试验值,这是由于GCL低含水量时受GCL渗气系数和交界面渗气系数比值控制所致。

2.4 需进一步研究的问题

土工膜的缺陷渗漏问题,对于不同的防渗对象来说其研究的侧重点有差别。对于垃圾填埋场,土工膜一旦出现缺陷,垃圾发酵产生的化学渗滤液可能对周边土体造成环境危害。而对于水利工程中的渠道、堤坝等,重点在于考察缺陷渗漏是否会引起工程的渗透安全问题,缺陷渗漏量只要在可控范围内即可。另外,不同防渗工程中土工膜承受的水头不同,水头的大小对土工膜防护对象的安全性及缺陷渗漏量的影响很大。现有研究大多是在试验基础上结合理论分析得到单个缺陷时的渗漏量估算方法,不同方法的计算结果差异很大,且对于土工膜缺陷渗漏的研究成果大多是在低水头条件下得到的,未能在高水头条件下进行系统验证。对于土工膜防渗土石坝之类的高水头挡水建筑物,已有成果能否直接借鉴应用还有待于进一步论证。为此,针对土工膜缺陷渗漏问题,可考虑开展如下研究:(a)进一步研究低透水性和(半)透水性垫层对缺陷渗漏的影响,同时研究不同的膜上荷载(非水压力)和作用水头对缺陷渗漏的定量影响;(b)研究高水头下的缺陷渗漏特性,验证与评价现有试验成果和计算方法的适用条件;(c)开展多缺陷时的渗漏交叉效应,获得缺陷影响范围;(d)开展高水头下缺陷渗流、缺陷扩展、膜后结构受力变形整体耦合研究,从本质上搞清楚土工膜缺陷的演化规律、缺陷渗漏特性及耦合效应。

3 结 语

土工膜作为性能优越的新型防渗材料,已广泛用于堤坝、库盆、垃圾填埋场等许多水利工程和环境工程中。实际工程土工膜防渗应用时,土工膜出现缺陷是难以避免的。通过对土工膜缺陷系列相关问题开展国内外研究现状及研究成果的阐述和评价,可以得出如下结论:(a)除焊接(或胶接)缺陷外,土工膜的宏观缺陷主要包括顶破、刺破、胀破等因局部拉伸变形(应变)过大引起的破损;(b)土工膜的缺陷产生受膜上压力、垫层颗粒形状及凸起程度等因素影响,设置保护层可有效预防和控制土工膜出现缺陷的概率;(c)土工膜缺陷渗流包括接触渗流和膜下扩散渗流,垫层属性及与土工膜的接触条件对缺陷渗漏量影响很大;(d)土工膜的缺陷渗流还与作用水头、膜上荷载、缺陷大小和数量、缺陷形状、保护的织物等因素密切相关。由于土工膜

缺陷问题的复杂性和不确定性,建议了今后进一步围绕土工膜缺陷的若干重点研究问题,期待对土工膜缺陷及相关属性有更深入全面的认识和掌握。考虑到土工膜缺陷研究目前主要还停留在试验和半理论、半经验分析的现状,实际工程防渗应用时土工膜的缺陷数量、缺陷大小及缺陷引发概率尚未完全清楚,为此提出现阶段考虑土工膜“缺陷存在及可控”的防渗设计理念,使土工膜能广泛用于土石坝等高水头防渗工程中。

致谢:本文曾受顾淦臣教授和沈长松教授的指导,在此深表感谢!

参考文献:

- [1] GIROUD J P. Design of geotextiles associated with geomembranes[R]. Las Vegas:Industrial Fabrics Association Inter, 1982.
- [2] NOSKO V, TOUZE-FOLTZ N. Geomembrane liner failure; modeling of its influence on contaminant transfer[C]//CANCELLI A, CAZZUFFI D, SOCCODATO C. Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference. Bologna:Patron Editore, 2000:557-560.
- [3] ICOLD. Geomembrane sealing systems for dams; design principles and return of experience (bulletin 135) [R]. Paris: The International Commission on Large Dams, 2010.
- [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. 复合土工膜或土工膜堤坝实例述评(续)[J]. 水利水电技术, 2003, 34(1):55-61. (GU Ganchen. Review of dams and dikes with composite geomembrane impervious structure[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(1):55-61. (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] 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))
- [8] 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))
- [9] USMAN M, GALLER R. Ageing and degradation of PVC geomembrane liners in tunnels international conference on chemical [R]. Singapore:International Institute of Chemical, Biological & Environmental Engineering, 2014.
- [10] ROWE R K, RIMAL S, SANGAM H. Ageing of HDPE geomembrane exposed to air, water and leachate at different temperatures[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(2):137-151.
- [11] ROWE R K, SANGAM H P. Durability of HDPE geomembranes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2002, 20(2):77-95.
- [12] 胡利文, 陈嘉鸥. 土工膜微结构破损机理分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(6):702-705 (HU Liwen, CHEN Jiaou. Analysis of damage for microstructure of geomembrane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6):702-705. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] BRACHMAN R W I, GUDINA S. Gravel contacts and geomembrane strains for a GM/CCL composite liner[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(6):448-459.
- [15] BRACHMAN R W I, SABIR A. Geomembrane puncture and strains from stones in an underlying clay layer[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(4):335-343.
- [16] STARK T D, BOERMAN T R, CONNOR C J. Puncture resistance of PVC geomembranes using the truncated cone test[J]. Geosynthetics International, 2008, 15(6):480-486.
- [17] NAREJO D B. A comparison of puncture behavior of smooth and textured HDPE geomembranes [J]. Geosynthetics International, 1995, 2(4):699-706.
- [18] STARK T D, PAZMINO L F, McDOWELL C J, et al. Equipment pressure applied to geomembrane in composite liner system [J]. Geosynthetics International, 2012, 19(6):416-425.
- [19] ANTOINE R, COURARD L. Perforation strength of geosynthetics and sphericity of coarse grains: a new approach [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1996, 14(10):585-600.
- [20] ATHANASSOPOULOS C, KOHLMAN A, HENDERSON M, et al. Evaluation of geomembrane puncture potential and hydraulic performance in mining applications[C]// The Organizing Committee of the 12th International Conference on Tailings and Mine Waste. Tailings and Mine Waste'08. London:Taylor & Francis, 2009:189-198.

- [21] HORNSEY W P, WISHAW D M. Development of a methodology for the evaluation of geomembrane strain and relative performance of cushion geotextiles[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 35(6):87-99.
- [22] ALLEN S. Index puncture testing of geomembranes[J]. *Geotechnical Fabrics Report*, 2000, 18(7):18-21.
- [23] LEE K Y, CHUNG C G, HWANG T J, et al. The stress-strain behavior of geotextiles under puncture loads in a liner system [R]. Kitakyushu:International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002.
- [24] SABIR A, BRACHMAN R W I. Design of a new test apparatus to simulate the long-term response of a geomembrane beneath a gravel contact[R]. Toronto:Pan-Am CGS 2011 Organizing Committee, 2011.
- [25] GHOSH T K. Puncture resistance of pre-strained geotextiles and its relation to uniaxial tensile strain at failure[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1998, 16(5):293-302.
- [26] LAMBERT S. Understanding and prediction of hydrostatic puncture resistance of geomembranes [C]//Gourc & Girard. *Geosynthetics-7th ICG*. Delmas;Swets & Zeitlinger, 2002:1391-1394.
- [27] WILSON-FAHMY R F, NAREJO D, KOERNER R M. Puncture protection of geomembranes part I:theory[J]. *Geosynthetics International*, 1996, 3(5):605-628.
- [28] NAREJO D, KOERNER R M, WILSON-FAHMY R F. Puncture protection of geomembranes part II:experimental [J]. *Geosynthetics International*, 1996, 3(5):629-653.
- [29] KOERNER R M, WILSON-FAHMY R F, NAREJO D. Puncture protection of geomembranes part III:examples [J]. *Geosynthetics International*, 1996, 3(5):655-675.
- [30] GIROUD J P, BADU-TWENEBOAH K, SODERMAN K L. Theoretical analysis of geomembrane puncture[J]. *Geosynthetics International*, 1995, 2(6):1019-1048.
- [31] TOGNON A R, ROWE R K, MOORE I D. Geomembrane strain observed in large-scale testing of protection layers[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(12):1194-1208.
- [32] JIANG Xiaozhen, SHU Yiming, ZHU Jungao. Probabilistic analysis of geomembrane puncture from granular material under liquid pressure[J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20:3256-3264.
- [33] GIROUD J P. Geotextiles and geomembranes[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1984, 1(1):5-40.
- [34] NAREJO D B. Three levels of geomembrane puncture protection[J]. *Geosynthetics International*, 1995, 2(4):765-769.
- [35] HULLINGS D, KOERNER R. Puncture resistance of geomembranes using a truncated cone test[R]. Atlanta:Industrial Fabrics Association International, 1991.
- [36] BRACHMAN R W I, ROWE R K, IRFAN H, et al. High-pressure puncture testing of HDPE geomembranes[R]. Toronto:Pan-Am CGS 2011 Organizing Committee, 2011.
- [37] DICKINSON S, BRACHMAN R W I. Assessment of alternative protection layers for a geomembrane-geosynthetic clay liner (GM-GCL) composite liner[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45(11):1594-1610.
- [38] CHAI J C, MIURA N, HAYASHI S. Large-scale tests for leachate flow through composite liner due to geomembrane defects [J]. *Geosynthetics International*, 2005, 12(3):134-144.
- [39] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes: part I. geomembrane liners [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1989, 8(1):27-67.
- [40] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes: part II. composite liners [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1989, 8(2):71-111.
- [41] ROWE R K. Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste:keynote paper[R]. Atlanta:International Conference on Geosynthetics, 1998.
- [42] ROWE R K, DUQUENNOI C. Liquid flow through composite liners due to geomembrane defects: analytical solutions for axisymmetric and two-dimensional problems[J]. *Geosynthetics International*, 1999, 6(6):455-479.
- [43] VALLEJO L E, ZHOU Y. Fractal approach to measuring roughness of geomembranes[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(5):442-446.
- [44] DOVE J E, FROST J D. A method for measuring geomembrane surface roughness[J]. *Geosynthetics International*, 1996, 3(3):369-392.
- [45] TOUZE-FOLTZ N, ROWE R K, NAVARRO N. Liquid flow through composite liners due to geomembrane defects: nonuniform hydraulic transmissivity at the liner interface[J]. *Geosynthetics International*, 2001, 8(1):1-26.
- [46] CARTAUD F, GOBLET P, TOUZE-FOLTZ N. Numerical simulation of the flow in the interface of a composite bottom liner[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2005, 23(6):513-533.
- [47] MENDES M J A, TOUZE-FOLTZ N, PALMEIRA E M, et al. Influence of structural and material properties of GCLs on interface flow in composite liners due to geomembrane defects[J]. *Geosynthetics International*, 2010, 17(1):34-47.
- [48] GIROUD J P, RAD N S, McKELVEY J A. Evaluation of the surface area of a GCL hydrated by leachate migrating through geomembrane defects[J]. *Geosynthetics International*, 1997, 4(3/4):433-462.
- [49] GIROUD J P, KHATAMI A, BADU-TWENEBOAH K. Evaluation of the rate of leakage through composite liners [J].

- Geotextiles and Geomembranes, 1989, 8(4):337-340.
- [50] GIROUD J P, BADU-TWENEBOAH K, BONAPARTE R. Rate of leakage through a composite liner due to geomembrane defects [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1992, 11(1):1-28.
- [51] GIROUD J P. Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to geomembrane defects[J]. Geosynthetics International, 1997, 4(3/4):335-348.
- [52] TOUZE-FOLTZ N, DARLOT O, BARROSO M. Experimental investigation of the influence of the pre-hydration of GCLs on the leakage rates through composite liners [C]//ZANZIGER H, KOERNER R M, GARTUNG E. Clay Geosynthetic Barriers. Nuremberg:CRC Press, 2002:265-274.
- [53] COLUCCI P, LAVAGNOLO M C. Three years field experience in electrical control of synthetic landfill liners[C]//HOGL W. Environmental Science & Pollution Research International. Sardinia:Ecomed, 1995:437-452.
- [54] TOUZE-FOLTZ N, GIROUD J P. Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to geomembrane defects[J]. Geosynthetics International, 2003, 10(6):215-233.
- [55] TOUZE-FOLTZ N, GIROUD J P. Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to large circular defects in the geomembrane[J]. Geosynthetics International, 2005, 12(4):205-207.
- [56] TOUZE-FOLTZ N, BARROSO M. Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through GCL- geomembrane composite liners[J]. Geosynthetics International, 2006, 13(2):73-82.
- [57] GIROUD J P, TOUZE-FOLTZ N. Equations for calculating the rate of liquid flow through geomembrane defects of uniform width and finite or infinite length[J]. Geosynthetics International, 2005, 12(4):191-204.
- [58] GIROUD J P, KHIRE M V, SODERMAN K L. Liquid migration through defects in a geomembrane overlain and underlain by permeable media[J]. Geosynthetics International, 1997, 4(3/4):293-321.
- [59] 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.
- [60] GIROUD J P, KHIRE M V, KING T D, et al. Rate of liquid migration through defects in a geomembrane placed on a semi-Permeable Medium[J]. Geosynthetics International, 1997, 4(3/4):349-372.
- [61] GIROUD J P, DANIEL D E. Liquid migration in an encapsulated bentonite layer due to geomembrane defects[J]. Geosynthetics International, 2004, 11(4):311-329.
- [62] ABUEL-NAGA H M, BOUAZZA A. Numerical experiment-artificial intelligence approach to develop empirical equations for predicting leakage rates through GM/GCL composite liners[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(3):236-245.
- [63] GIROUD J P, GROSS B A, BONAPARTE R, et al. Leachate flow in leakage collection layers due to defects in geomembrane liners[J]. Geosynthetics International, 1997, 4(3/4):215-292.
- [64] WALTON J, RAHMAN M, CASEY D, et al. Leakage through flaws in geomembrane liners[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(6):534-539.
- [65] BARROSO M, TOUZE N. Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(3):139-155.
- [66] WEBER C T, ZORNBERG J G. Leakage through liners under high hydraulic heads[C]//KOERNER R M, KOERNER G R, HSUAN Y G, et al. Geosynthetics Research and Development in Progress. Austin:American Society of Civil Engineers, 2005:1-7.
- [67] WEBER C T, ZORNBERG J G. Use of GCLs to control leakage through geomembrane defects under high hydraulic heads[R]. Las Vegas:North American Geosynthetics Society, 2005.
- [68] WEBER C T, ZORNBERG J G. Leakage through geosynthetic dam lining systems[R]. Austin:Association of State Dam Safety Officials, 2007.
- [69] SAIDI F, TOUZE-FOLTZ N, GOBLET P. Numerical modelling of advective flow through composite liners in case of two interacting adjacent square defects in the geomembrane[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(2):196-204.
- [70] FOOSE G J, BENSON C H, EDIL T B. Predicting leakage through composite landfill liners[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(6):510-520.
- [71] CARTAUD F, TOUZE-FOLTZ N, DUVAL Y. Experimental investigation of the influence of a geotextile beneath the geomembrane in a composite liner on the leakage through a hole in the geomembrane[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, 23(2):117-143.
- [72] BOUAZZA A, VANGPAISAL T, ABUEL-NAGA H, et al. Analytical modelling of gas leakage rate through a geosynthetic clay liner-geomembrane composite liner due to a circular defect in the geomembrane[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(2):122-129.