

膨润土复合层的渗透性影响因素

孟思宇¹,季丽君²,田正宏¹

(1. 河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098 ;2. 河海大学环境科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 分析影响环保型土工合成材料膨润土复合层渗透性能变化的因素,如复合层界面剪切强度、覆膜皱缩、覆膜面破损等。结合国内外现有研究现状,对土工复合层的主要影响因素进行较深入的探讨,并提出相应的解决措施,为土工合成材料膨润土复合层的制作、施工工艺、试验研究以及工程应用提供了依据。

关键词 土工合成材料 ;复合层 膨润土 ;界面剪切强度 ;覆膜皱缩 ;膜面破损

中图分类号 :TV443+.3 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2009)S1-0192-04

近年来,随着人们对环境保护的日益重视,环保型土工合成材料膨润土垫(GCL)已广泛应用于各类防渗工程,如垃圾填埋场、水渠河道、人工湖、地下建筑物、储油库及化学液容器等防渗工程。但传统的单层 GCL 已不能满足现行防渗标准和环保要求,尤其在垃圾填埋场、储油库等工程中。欧盟委员会以及美国环保局均建议在垃圾填埋场使用复合层防渗。中国国家环境保护总局亦已发布《危险废弃物安全填埋处置工程建设技术要求》(环发[2004] 75 号),要求危险废物填埋场的防渗系统必须采用双人工衬层。

实际应用中,复合防渗系统通常采用 GM/GCL 或 GM/CCL(compact clay liner,压实黏土,简称 CCL),GM/GCL 复合层结构见图 1。这类组合层是双层填埋系统中的主要形式,较 GM/CCL,GM,GCL,CCL 等更具优越性,其渗透量显著减少,很多工程中渗流量接近零。国内近期在杭州市第二垃圾填埋场使用了 GM/GCL 复合层防渗系统,应用效果良好^[1]。

周正兵等^[2]把用于垃圾填埋场中的 2 种复合防渗系统 GM/GCL 和 GM/CCL 进行比较,指出 GM/GCL 较 GM/CCL 具有低渗漏量、施工简易、与

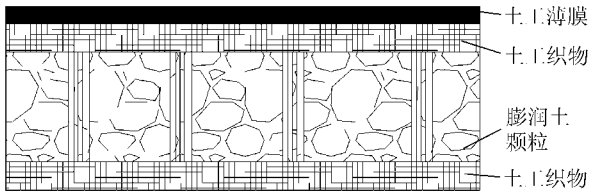


图 1 GM/GCL 复合层结构示意图

GM 结合程度好、抗不均匀沉降和抗冻融循环能力强、节省填埋场空间及施工成本低等优点。吕宏洋^[3]研究的结果亦证明了上述观点。

尽管 GM/GCL 复合层优势明显,但仍存在颇多问题。诸如 GM 与 GCL 界面间的剪切作用造成边坡不稳定 ;复合层在移动或挤压过程中,膨润土被挤出,从而影响其整体防渗效果 ;由于施工程序的不规范,导致复合层发生刺破、撕裂或膨润土流失 ;作为顶盖铺设层,复合层亦会发生不均匀沉降而导致起皱变形 ;此外也应考虑基底层和保护层的影响。上述因素都会不同程度地影响 GM/GCL 复合层的防渗性能^[4]。目前国内外文献大部分仅是针对影响 GM/GCL 复合层渗透性能的个别因素如界面剪切、起皱变形等单独进行研究,笔者拟对上述研究观点及结论进行归纳分析,以便更好地了解及探讨 GM/GCL 复合层的渗透性能。

1 褶皱对复合层渗透性能的影响

GM/GCL 复合层上部 GM 通常会在运输及铺设过程中受到光、热等外界因素的影响,或作为垃圾填埋场顶盖铺设层,发生不均匀沉降导致起皱变形以影响复合层的整体抗渗性能。GM 起皱变形将引发作用于复合层上的压力重新分布,褶皱两侧压力增加,褶皱正下方处压力减小至零^[5]。压力重新分布改变了 GM 的拉伸应变状态,若局部拉伸应变过大则会导致 GCL 发生开裂,最终将膨润土挤出^[6] ;同时 GCL 厚度也发生变化,即褶皱两侧 GCL 厚度值减

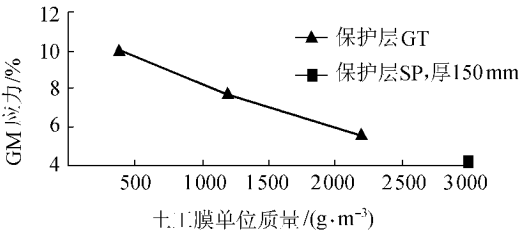
小,褶皱下方厚度增加,GCL 内部膨润土随之横向移动,向低压力区域转移,破坏 GCL 内部膨润土的均匀分布状态,削弱 GCL 防渗的整体稳定性^[7-8]。

影响 GM 起皱变形的因素是多方面的,如保护层、基底层、GCL 含水量、加载压力等^[9]。故应着重从解决上述多因素入手,减小和消除 GM 的起皱变形。譬如加大作用于 GM 上的压力荷载值,以加载压力限制 GM 的变形,减少已产生褶皱的尺寸。Sonng 等^[10]将压力加载时间及作用于 GM 的正压力分别加大到 1 000 h 和 1 100 kPa,发现在长时间以及高压作用下褶皱的宽度及高度均有所减少,但最终未能消除。

另外,选取适宜的保护层可限制膨润土的移动,减缓压力变化、减小正应力不均匀分布以及限制应变大幅度变化。受力作用点处压力及应力剧增会引起 GCL 厚度值减小、膨润土向低应力及低压力处转移等,致使低应力区厚度增加,GCL 局部产生锯齿状凹陷,进一步加剧应力集中效应,加速膨润土的运动^[11]。而适宜厚度的铺砂保护层(通常可取 150 ~ 200 mm 厚、级配优良的砂层或黏土)可有效控制 GM 的应变变化并将其限制于短期 3% 或长期 6% 允许范围内。

Dickinson 等针对不同保护层即不同单位面积质量土工布、150 mm 厚砂层、无保护层等对减小 GM 褶皱的影响及有效性进行试验。试验证明,在同一应力(250 kPa)作用下,150 mm 厚砂层可有效限制膨润土移动,GCL 表面较平整,整体厚度略有减小;而土工布与无保护层则出现 GCL 面层凹凸不平、膨润土移动明显等现象。

Brachman 等则对上述保护层对复合层起皱变形前后 GM 应变峰值的作用结果进行了对比研究,指出 150 mm 厚的中砂层可有效减少局部拉伸应变,将其限制在 1% 以内。而土工布尽管可使拉伸应变减小,但减小程度未达到指定的标准范围(见图 2)。



(SP 表示中砂,GT 表示土工布)

图 2 保护层对无褶皱 GM 应变峰值的影响

GM 变形后褶皱恢复程度则取决于基底层刚度,因为较软基底层内部颗粒可随褶皱部分变形而改变其分布情况,接受褶皱变形,最大限度地减少 GM 褶皱尺寸。但刚度较大的基底层将对褶皱的变

化产生反作用力,限制其尺寸改变。Brachman 等曾针对基底层对复合层起皱变形前后 GM 应变峰值的作用结果进行了对比研究(表 1)。试验结果表明,基底层为硬砂层相比采用较软黏土层,褶皱尺寸整体缩小的幅度较小。

表 1 不同基底层对 GM 起皱变形褶皱尺寸变化的影响

序号	基底层	GCL 含水量/%	$\frac{H}{H_0}/\%$	$\frac{W}{W_0}/\%$
1	SP	7.0	69	52
2	SP	7.0	69	52
3	SP	7.0	67	52
4	CCL	7.0	67	71
5	CCL	148.0	76	77

注:H 和 W 分别为褶皱最终高度及宽度, H_0 和 W_0 分别为褶皱原始高度和宽度。

控制膨润土含水量也是解决 GM 起皱变形的有效措施之一。GCL 含水量过高将使膨润土易发生移动变形。由表 2 可知,GM 局部应力随 GCL 含水量的增加而增加,因此尽可能控制 GCL 的含水量以最大限度的限制 GM 应变,可以避免局部应力较大而产生应力开裂及膨润土挤出问题。根据工程实际条件,建议 GCL 含水量应控制在 5% 以下。

表 2 GCL 含水量对 GM 应力峰值的影响

序号	基底层	GCL 含水量/%	GM 拉力峰值/%
1	SP	7.0	13.0
2	SP	128.0	17.0
3	SP	170.0	20.0

2 界面剪切对复合层渗透性能的影响

GM/GCL 复合层设计中,评估边坡及其平台在短期或长期荷载作用下内部及界面的抗剪切强度极为重要。织物间界面剪切强度一般较低,易引起滑坡并严重影响复合层整体防渗性能及整个防渗系统的稳定。

实验室模拟复合层界面剪切现象,剪切强度受到复合层承载正应力与 GCL 水化与否等因素的影响。在不同正应力作用下,加载压力越大,膨润土挤出量越多^[12];而处于相同正应力作用下,水化 GCL 的膨润土在剪切过程中会部分挤出,这类胶凝体进一步对剪切过程起润滑作用,进而使交界面剪切强度急剧降低。而未水化 GCL 在同一过程中并未发现膨润土挤出。故未水化 GCL 的剪切强度大于其水化后的剪切强度^[13]。因此对于复合层界面而言,其剪切强度及界面摩擦力会随着 GCL 含水量的增加而大幅度减小。GCL 含水量过高,膨润土产生蠕变滑移,不具备固态强度及摩擦力而发生移动,致使界面更易发生滑动,导致滑坡等问题。

Vukelic 等^[14]针对不同压力、水化与未水化 GCL

剪切下膨润土被挤出的程度进行了研究。试验表明,膨润土挤出量随 GM/GCL 界面剪切强度的增大而减小,对未水化样本进行剪切,膨润土流失量近似为零,而水化后样本剪切后普遍存在膨润土挤出现象,且流失量随作用于复合层上部的正应力增大而增加。GM/GCL 界面剪切过程中,若膨润土挤出,则 GCL 厚度值也会发生变化,在简化一维渗透试验中单位渗透量存在以下关系^[15] :

$$V = K \left(\frac{H + T}{T} \right)$$

式中: V 为一维稳定流量,即单位时间内通过的单位线流量, m/s ; K 为饱和状态下水力渗透系数, m/s ; H 为垫层上水头高度, m ; T 为 GCL 厚度, m 。

由于膨润土挤出导致 GCL 内部膨润土发生移动且质量重新分布,致使 GCL 厚度不再均匀,且其密度也发生改变,导致厚度薄弱处局部渗透系数大幅度增加,流量增大,严重削弱了 GCL 的整体防渗性能。

3 表面刺破对复合层渗透性能的影响

复合衬层用作填埋场或其他工程中均受 GM 缺陷、GM 与 GCL 接触质量及施工质量的影响,同时亦受冻融、外界环境温度及不均匀沉降等条件制约。现场 GM 若存在质量缺陷,容易导致淋滤液从 GM 缺陷处突破,一部分沿接触面扩散,一部分直接向下渗漏,若 GM 与 GCL 接触界面不密实,则会因吸力作用而导致更多淋滤液经由 GM 缺陷处渗漏。渗滤液沿接触界面处侧向流动,增大了向下渗漏机会,导致复合层水力渗透性增大并加大垃圾填埋场封盖层下方污染气体外溢的可能性。

就液体渗漏而言,破损复合层渗透性能受到诸如破损孔洞数量、GCL 含水量、界面传导率和作用水头等因素的影响。Saidi 等^[16]研究了破损孔间距、水头、破损孔洞数量等因素对复合层渗透性能的影响,发现两相邻缺口复合层渗透率与两单独缺口复合层渗透率叠加结果相比,并未呈现很大差异且最大差仅为 24%。随着 GM 两缺口间距离的增加,GCL 渗透区域将增大。Kooerner 等^[17]则针对不同水头下破损复合层渗透性能进行试验,试验表明,破损复合层渗透系数随水头的增加而增大。Harpur 等^[18]对多种覆膜复合层在 7 kPa 和 70 kPa 正应力作用下界面的导水率进行研究,发现 GM/GCL 界面导水率在 $3 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 左右,GCL 土工布界面导水率为 $6 \times 10^{-12} \sim 2 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$,两界面导水率最终趋于一致。Barroso 等^[19]就不同含水量的复合层在 50 ~ 200 kPa 下的渗透系数进行研究,指出水化样本渗透率随着

水头的增加而增大,而水头变化对未水化样本渗透率的影响不大。这是由于水化后的膨润土强度低,受荷载下的 GCL 厚度减小,渗透系数增加较大。

值得注意的是,复合层刺破试验通常是在实验室模拟完成的,但此类小型试验所得结果具有尺寸效应。Barroso 对复合层 GM/GCL (GM 具有一个圆形孔洞) 在 3 种不同规模试验下的渗透性能研究结果表明,有关破损复合层渗透性能的小型试验所测数据偏大,应作为复合层渗透率上限参考。

在气体渗透方面,复合层渗透性能受到气压、GCL 含水量、复合层密实程度以及破损孔洞直径等因素耦合影响。气体通过 GCL 内部向上渗透,通过 GM 与 GCL 界面传至 GM 缺口处。气体渗漏率随着气压值的增加而增加,随着 GCL 含水量的增加而减小。与液体渗透不同,GCL 含水量越高,其内部膨润土形成整体胶凝体,以致可供气体通过的孔隙越少,气体渗透率越小。除此之外,复合层密实度也是影响复合层气体渗漏的重要指标。GM 与 GCL 界面接合紧密,即可减少气体传导的途径,增加 GCL 阻挡气体渗漏的能力^[20]。因此,综合考虑气体、液体的渗透特点,应将 GCL 含水量控制在一定的合理范围内,譬如 3% ~ 5% 左右是适宜的。

总之,严格控制 GCL 的含水量,加大复合层界面密实度,对限制气、液综合渗透系数十分有效,从而可同时保持对气体和液体的良好阻挡作用。同时,施工时应尽量去除回填层以及底基层中的块石等大颗粒坚凸物,避免膜面摩擦,减少因荷载增加时复合层 GM 被上部保护层刺穿或刮破的可能性。

4 结 语

导致复合层性能变化原因是多方面的,诸如起皱变形、界面剪切、GM 破损等。根据上述分析,得出如下结论: ①对于 GM 起皱变形问题,应采用级配良好、厚度适宜的材料如细砂作为保护层,建议砂层厚度 150 ~ 200 mm。选取与砂垫层柔度匹配的基层如黏土层作为基层。控制 GCL 的含水量,以限制 GM 应变。从上述 3 方面减少褶皱对复合层渗透性能影响。②复合层界面剪切强度及界面摩擦力随 GCL 含水量的增加而减小,应控制 GCL 的含水量,增大界面剪切强度及摩擦力,减少膨润土流失及复合层有效厚度的衰减。③实验室针对复合层上部 GM 刺破渗透的试验存在尺寸效应,所得数据偏大,应将其作为复合层渗透率上限参考。根据已有试验,工程中综合考虑抑制气体及液体渗漏,GCL 的含水量在 3% ~ 5% 较为适宜。④膨润土复合层的渗透影响因素耦合作用明显,进行不同尺度下的试验研究和建

立合理的复合层变形渗透模型、开展数值模拟分析是深入研究其机理的基础。

参考文献：

[1] 徐超,黄亮,李志斌.影响土工织物膨润土垫水力和力学特性的因素[J].新型建筑材料,2006(11):42-43.

[2] 周正兵,王钊,费香泽.用于固体废弃物填埋场中的两种复合防渗系统的比较[J].环境工程,2002,20(3):55-59.

[3] 吕宏洋.膨润土防水毯 GCL 和土工膜 GM 作为危险废物填埋场复合场衬垫系统的研究[J].有色冶金设计与研究,2007,28(23):131-140.

[4] KOERNER R M. 土工合成材料膨润土垫 (GCL) [M]. 王维,夏启星,孙秋菊摘译.产业用纺织品,2002,142(20):35-38.

[5] BRACHMAN R W I, GUDINA S. Geomembrane strains from coarse gravel and wrinkles in a GM/GCL composite liner[J]. Geotextiles and Geomembrane,2008,26:488-497.

[6] ROWE R K, QUIGLEY R M, BRACHMAN R W I, et al. Barrier systems for waste disposal facilities [M]. London: Taylor&Francis Books Ltd(E&F N Spon),2004:587.

[7] DICKINSON S, BRACHMAN R W I. Deformations of a geosynthetic clay liner beneath a geomembrane wrinkle and coarse gravel[J]. Geotextiles and Geomembranes,2006,24(5):285-298.

[8] FOX P J, De BATTISTA D J, MAST D G. Hydraulic performance of geosynthetic clay liners under gravel cover soils[J]. Geotextiles and Geomembrane,2000,18:179-201.

[9] GUDINA S, BRACHMAN R W I. Physical response of geomembrane wrinkles overlying compacted clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,2006,132(10):1346-1353.

[10] SOONG T Y, KOERNER R M. Laboratory study of high density polyethylene geomembrane waves [C]//Proceedings of Sixth International Conference on Geosynthetics, vol 1. Atlanta: Industrial Fabrics Association International,1998:301-306.

[11] 陈小红,王协群.土工合成材料膨润土垫层性能探讨[J].长江科学院院报,2007,24(4):53-54.

[12] TRIPLETT E J, FOX P J. Shear strength of HDPE geomembrane/geosynthetic clay liner interfaces[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,2001,127(6):543-552.

[13] 陈小红.GCL 室内剪切试验研究及在垃圾填埋场的应用[D].武汉:武汉理工大学,2007.

[14] VUKELIC A, SZAVITS-NOSSAN A, KVASNICKA P. The influence of bentonite extrusion on shear strength of GCL/geomembrane interface [J]. Geotextiles and Geomembrane,2007,26:82-90.

[15] FITZSIMMONS J H, STARK T D. Theoretical effect of bentonite migration on contaminant transport through GCLs

[C]//Proceeding of Seventh International Conference on Geosynthetics,Nice,France,September,23,2002:757-760.

[16] SAIDI F,TOUZE-FOLTZ N,GOBLET P. Numerical modeling of advective flow through composite liners in case of two interacting adjacent square defects in the geomembrane [J]. Geotextiles and Geomembrane,2008,26:196-204.

[17] KOERNER G R, KOERNER R M. Geomembrane leakage arising from broken needles with GCLs [C]//Proceedings of the International Symposium on Geosynthetic Clay Barriers, Nuremberg, Germany,2002:209-217.

[18] HARPUR W A, WILSON-FAHMY R F, KOERNER R M. Evaluation of the contact between geosynthetic clay liners and geomembranes in terms of transmissivity [C]// WILSON-FAHMY K. Geosynthetic Liner Systems: Innovations, Concerns and Design. Proceedings of a Geosynthetic Liner Systems Seminar held in Philadelphia, USA,1993:143-154.

[19] BARROSO M, TOUZE-FOLTZ N, Von MAUBEUGE K, et al. Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner [J]. Geotextiles and Geomembrane,2006,24:139-155.

[20] BOUAZZA A, VANGPAISAL T. Laboratory investigation of gas leakage rate through a GM/GCL composite liner due to a circular defect in the geomembrane [J]. Geotextiles and Geomembranes,2006,24(2):110-115.

(收稿日期:2009-07-30 编辑:高建群)

(上接第 187 页)

- c. 采用两布一膜复合土工膜,在施工过程中不易发现土工膜的缺陷,在以后的工程运用中,宜研究下列方式的可行性:采用一布一膜,铺设时,膜在上面,其下覆设 1 层布,用胶等将布与一布一膜处理形成整体。
- d. 薄膜理论的曲线交会法是针对坝基或坝体存在裂缝或不同级配的卵石情况下推得的,该方法适用于砂砾石坝基有裂缝情况下膜厚的选择,但没有考虑到土石坝蓄水后坝体及坝基沉降变形对复合土工膜应力应变的影响。事实上,对于以复合土工膜防渗的土石坝来说,坝体及坝基蓄水后沉降变形将影响复合土工膜的变形,采用曲线交会法求解其精度将受到影响,采用计入坝体坝基变形的有限单元法进行计算更能反应实际。

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[S]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2000.

(收稿日期:2009-07-28 编辑:高建群)