

缺陷和损伤土工膜的拉伸特性试验

岑威钧¹, 波兰汗·开肯¹, 刘凤茹²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 深圳市广汇源环境水务有限公司, 广东 深圳 518001)

摘要: 为了研究局部缺陷和损伤对土工膜拉伸特性的影响, 对3种厚度的高密度聚乙烯(HDPE)土工膜试样分别设置圆孔、横缝、竖缝、斜缝缺陷, 以及不同长度和深度的刻痕损伤, 采用电子万能拉力机开展拉伸试验, 获得拉伸曲线、抗拉强度和伸长率等主要力学指标, 分析了不同缺陷和损伤及其几何属性对土工膜拉伸特性的影响。结果表明: 圆孔、横缝、斜缝形式的缺陷及刻痕损伤对土工膜拉伸力学特性有着不同程度的削减作用, 总体上横缝影响最为明显, 斜缝其次, 圆孔较小; 刻痕越长, 损伤深度比越大, 土工膜力学特性衰减越显著; 沿着拉伸方向的竖缝对土工膜拉伸特性的影响很小, 基本可忽略。

关键词: 土工膜; 缺陷; 损伤; 拉伸试验; 抗拉强度; 伸长率

中图分类号: TV41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2021)01-0069-05

Experimental study on tensile properties of defective and damaged geomembranes//CEN Weijun¹, BOLANHAN Kaiken¹, LIU Fengru² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shenzhen Guanghuiyuan Environment & Water Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: To investigate the influence of local defects and damages on the tensile properties of geomembranes, different defects, e. g., circular hole, horizontal seam, vertical seam and oblique seam, as well as damages of different lengths and depths were considered for HDPE geomembrane specimens of three thicknesses, respectively. Tensile tests were carried out by using an electronic universal tensile apparatus to obtain the major mechanical indexes such as tensile curves, tensile strength and elongation. Furthermore, the influences of different defects and damages on tensile properties were compared and analyzed. The results show that circular, horizontal and oblique defects or damages have significant reduction on the tensile properties of geomembranes, with the horizontal seam having the most significant effect on the whole, circular hole being the second, and oblique seam being the least. The greater the damage degree is, the more significant the attenuation of geomembrane mechanical properties is. The vertical seam along the stretching direction has little effect on the tensile characteristics of geomembranes, which can be basically ignored.

Key words: geomembrane; defect; damage; tensile test; tensile strength; elongation

土工膜是一类由高分子聚合物制成的新型工程防渗材料,具有防水性能好,施工速度快和造价低等特点,已广泛应用于水利、环境及岩土工程的防渗之中^[1]。试验测试表明,土工膜自身的渗透性很低^[2],在完好无损条件下能达到非常理想的防渗效果。由于土工膜厚度很薄,其抵抗力学变形的能力较弱^[3],一旦出现破损,就会产生可能危害工程安全的缺陷渗漏^[4-8]。实际工程采用土工膜防渗时,土工膜两侧一般都需要设置垫层(保护层),且多采用砂土、砂卵石等颗粒材料,此时土工膜的受力行为与两侧垫层的接触特性^[9-11]、颗粒或所受水压的顶托作用等有关,土工膜会发生局部变形,从细观层面可看似为拉伸变形^[12]。因此,工程设计中非常有必要

考虑土工膜的局部变形和抵抗受拉破坏的能力。无论是常见的堤坝工程还是垃圾填埋场,土工膜因拉伸、顶破、刺破、液胀等引起的局部变形过大导致的破坏和损伤在所难免^[13]。一旦土工膜出现缺陷或损伤,势必会对其抗拉性能产生影响^[14]。因此非常有必要开展相关试验,研究缺陷或损伤下土工膜的抗拉特性,为合理开展土工膜防渗设计时的力学性能复核提供必要的理论参考。本文对3种厚度的高密度聚乙烯(HDPE)土工膜试样分别设置圆孔、横缝、竖缝及斜缝,以及不同长度和深度的刻痕,通过拉伸试验获得抗拉强度和伸长率等力学指标,并与完好土工膜成果进行比较,确定不同缺陷和损伤(缺陷指贯穿土工膜厚度的孔和缝,损伤为非贯穿

性的刻痕)属性对土工膜拉伸特性的定量影响程度,以供相关设计时参考。

1 试验材料与试验方案

按照 SL 235—2012《土工合成材料测试规程》(下文简称《规程》),土工膜拉伸试验中试样形状为哑铃状,其有效拉伸区域宽度只有 6 mm。由于尺寸很小,不宜在试样上设置相关缺陷或损伤。为此,本文对缺陷和损伤土工膜开展拉伸试验时按上述《规程》中的窄样条法^[15]进行试样制样,即采用 200 mm×50 mm 的矩形试样。其中,土工膜有效拉伸区域尺寸为 100 mm×50 mm,两端夹具各夹持 50 mm 长。根据《规程》要求,对整卷土工膜按照梯形取样法进行裁剪,剔除整幅土工膜中靠近边缘(不小于 100 mm)、弯折严重、凹凸不平以及有明显瑕疵或损伤的部位,制成一系列上述尺寸的完好土工膜试样。其次,在这些试样中心位置用专门工具制作不同形式的缺陷或损伤。缺陷形式包括圆孔、横缝、竖缝及与拉伸方向成 45°夹角的斜缝,均贯穿整个土工膜厚度;损伤采用横向和斜向的刻缝,刻缝深度小于土工膜厚度。将刻缝深度与膜厚之比定义为损伤深度比。对于缺陷试样来说,其损伤深度比为 100%。试验选用膜厚 $d = 1.0\text{ mm}$ 、 1.5 mm 、 2.0 mm 的 3 种光面 HDPE 土工膜,其完好试样的基本拉伸力学指标见表 1。

表 1 完好土工膜基本拉伸特性指标

膜厚/ mm	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	屈服抗拉强度/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	屈服 伸长率/%	断裂抗拉强度/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	断裂 伸长率/%
1.0	0.94	10.51	18.33	12.18	688.90
1.5	0.94	18.74	17.66	19.64	587.32
2.0	0.94	26.22	15.68	26.80	550.56

表 2 给出了不同缺陷和损伤土工膜的拉伸试验方案。影响因素包含了 3 种膜厚、4 种缺陷类型、3 种缺陷尺寸及 4 种损伤深度比,以尽量反映实际工程中土工膜可能存在的缺陷和损伤形式。试验拉伸速率为 20 mm/min。同一种试样重复做 5 次,结果取平均值。

表 2 土工膜拉伸试验方案

方案	膜厚/m	缺陷 尺寸/mm	损伤 深度比/%	缺陷形式
1	1.0、1.5、2.0	15	100	圆孔、横缝、斜缝、竖缝
2	1.0、1.5、2.0	10	25、50、75、100	横向刻痕、斜向刻痕
3	1.0、1.5、2.0	5、10、15	50	横向刻痕、斜向刻痕

注:刻缝和刻痕由特制薄刀片制成,其缝宽可视为零。

2 试验结果与分析

2.1 缺陷形式的影响

方案 1 主要考察不同类型的缺陷对土工膜拉伸性能的影响。缺陷形式包括横缝、斜缝、竖缝与圆

孔,缺陷尺寸均为 15 mm。通过拉伸试验,可得缺陷土工膜拉力和伸长率关系曲线(试样宽 50 mm),见图 1。为提高试验数据分析的可靠性,选用 3 种厚度土工膜试样进行平行对照试验。因完好土工膜试样的断裂伸长率很大(大于 500%,见表 1),图 1 中曲线未完整显示。图 2 给出了不同拉伸阶段横缝、

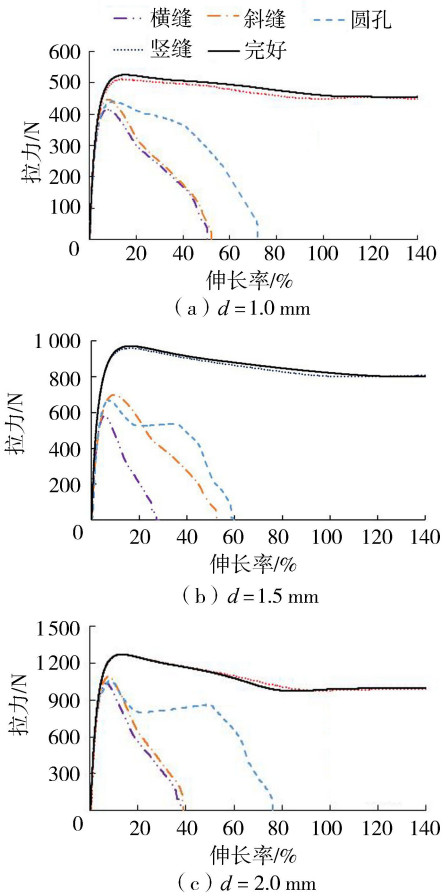


图 1 不同厚度土工膜的拉伸曲线

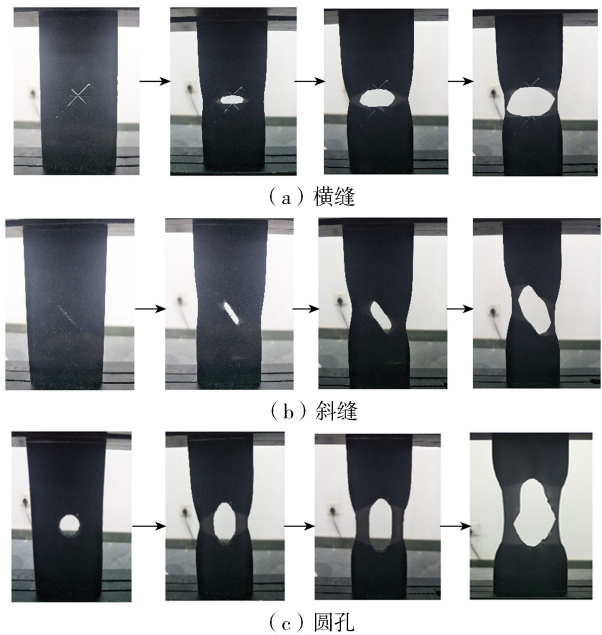


图 2 1.5 mm 厚土工膜缺陷拉伸扩展过程

斜缝、竖缝的缺陷变形扩展过程。根据拉伸试验曲线,可得到缺陷土工膜的屈服抗拉强度(简称抗拉强度)与相应的伸长率及断裂伸长率,见表3,其中屈服抗拉强度为拉伸曲线中峰值拉力与试样宽度50 mm之比,峰值拉力点对应的伸长率为屈服伸长率,简称伸长率。

表3 不同缺陷形式的土工膜拉伸力学指标

缺陷形式	膜厚/mm	屈服抗拉强度/(N·mm ⁻¹)	屈服伸长率/%	断裂伸长率/%
竖缝	1.0	10.43	117.20	682.71
	1.5	18.66	18.76	584.32
	2.0	26.18	15.56	546.37
横缝	1.0	8.34	8.06	50.39
	1.5	11.62	5.67	27.22
	2.0	20.78	6.64	37.64
斜缝	1.0	8.92	7.97	52.11
	1.5	14.03	9.71	52.44
	2.0	21.81	7.85	39.01
圆孔	1.0	8.82	10.63	71.91
	1.5	13.31	7.47	59.78
	2.0	21.0	7.53	44.83

由图1和表3可知,无论完好试样,还是缺陷试样,拉伸曲线均存在明显的峰值点。当拉力超过峰值点后继续拉伸试样,除竖缝试样外,其他几类缺陷(圆孔、横缝及斜缝)试样在拉伸过程中缺陷不断扩张,导致拉力显著降低,直至试样拉断破坏。而完好无缺陷试样,拉力超过峰值点后降低较小,出现一个平缓的过渡性直线段,在试样断裂之前拉力再次增大,直至断裂,断裂伸长率大于500%(表1)。由于竖缝与拉伸方向一致,竖缝缺陷试样表现的拉伸特性与完好试样很接近。由图2可见,圆孔缺陷在拉伸过程中逐渐扩展为椭圆形,由于有效断面不断减小,试样最终在椭圆两侧发生拉伸断裂。与缝状缺陷试样相比,圆孔缺陷试样拉力在峰值点后下降较缓,断裂伸长率更大。对于横缝与斜缝缺陷试样,变形集中在缺陷附近区域,缝端应力集中,使得试样撕裂加快,其断裂伸长率均小于圆孔缺陷试样。横缝缺陷试样抗拉强度总体上小于斜缝,峰值点后拉力下降相对稍快,这是由于横缝在垂直于拉伸方向的有效尺寸大于斜缝之故。

图3为完好和缺陷土工膜试样的抗拉强度和断裂伸长率与膜厚之间的关系曲线。由图3可见,各类土工膜试样的抗拉强度均随膜厚的增加显著增加,近似呈线性关系。除竖缝缺陷试样的抗拉强度基本与完好试样接近外,斜缝、圆孔及横缝缺陷试样的抗拉强度相比完好试样均有不同程度的降低,最大降幅为38.00%。断裂伸长率总体上随膜厚的增加有所减小。相比完好土工膜,各类缺陷试样的断裂伸长率大幅减小,其值不超过72%(完好样大于

500%),其中横缝缺陷试样降幅最为显著。由此可见,土工膜一旦出现缺陷,其断裂伸长率会显著降低,即破坏前的拉伸变形会大幅减小。

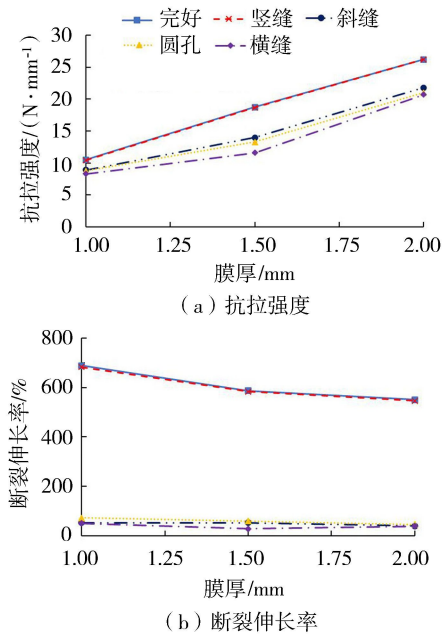


图3 土工膜抗拉强度和断裂伸长率与膜厚关系

2.2 损伤深度比的影响

在完好土工膜试样上分别制作横向刻痕和斜向刻痕,刻痕长10 mm,损伤深度比分别设置为25%、50%、75%和100%(方案2),其中损伤深度比100%意味穿透土工膜,即2.1节中的横缝和斜缝缺陷。限于篇幅,不再逐一给出损伤试样的拉伸曲线。图4展示了3种厚度的土工膜损伤试样的抗拉强度和

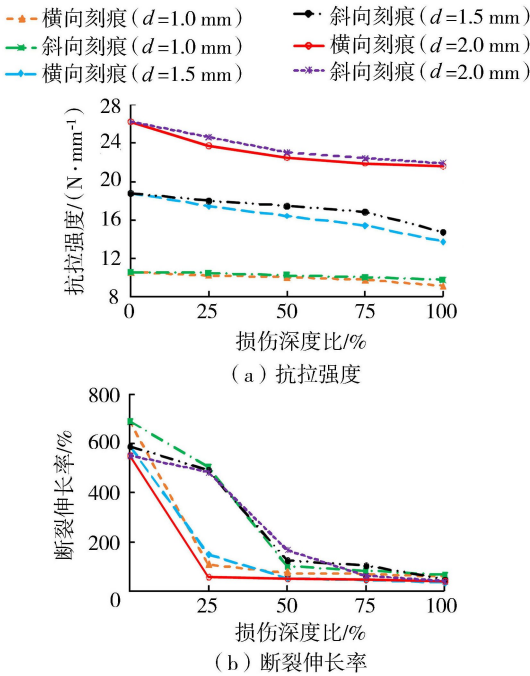


图4 损伤土工膜抗拉强度和断裂伸长率与损伤深度比的关系

和断裂伸长率随损伤深度比的衰减关系,两图中同时给出完好试样(损伤深度比0%)的试验值。由图4可见,随着土工膜试样损伤深度比的增大,其抗拉强度与断裂伸长率逐渐减小。对于损伤深度比25%的斜向刻痕试样,在拉伸过程中损伤部位有一定的扩张变形,但损伤并未发展成贯穿性的缝状缺陷,其拉伸曲线形状与完好试样比较接近,因此其抗拉强度与断裂伸长率均略小于完好试样。而对于损伤深度比为50%和75%的斜向刻痕试样,在拉伸过程中刻痕均发生明显的扩张变形,最终演化为缝状缺陷,其拉伸特性展现出与缝状缺陷土工膜相似的特点,抗拉强度降低明显。3种厚度土工膜的横向刻痕试样在25%损伤深度比下,其断裂伸长率相比斜向刻痕试样呈现大幅降低,而在50%、75%、100%损伤深度比下两者之间的差距较小。

2.3 刻痕长度的影响

对3种厚度损伤深度比为50%的土工膜试样,分别设置长度为5 mm、10 mm和15 mm的横向和斜向刻痕,测试刻痕长度对土工膜拉伸特性的影响(方案3)。图5给出了不同厚度损伤土工膜抗拉强度和断裂伸长率与刻痕长度的关系曲线。由图5可见,刻痕长度越长,抗拉强度与断裂伸长率越小。以横向刻痕为例,相比完好试样,刻痕长度分别为5 mm、10 mm和15 mm时,1.0 mm厚土工膜的抗拉强度分别降低了2.86%、4.76%和7.62%,1.5 mm厚土工膜的抗拉强度分别降低7.68%、11.95%和

17.82%,2.0mm厚土工膜的抗拉强度分别降低11.13%、14.19%和13.39%。此外,3种刻痕长度下,横向刻痕土工膜的抗拉强度均小于斜向刻痕试样的对应值。可见,与拉伸方向垂直的横向刻痕损伤对土工膜抗拉强度降低的影响更大。对于断裂伸长率,5 mm刻痕长度时,横向刻痕试样的断裂伸长率相比斜向刻痕试样大幅降低,而10 mm和15 mm刻痕长度时,横向刻痕试样的断裂伸长率相比斜向刻痕试样的下降幅度较小。

3 结 论

a. 除竖缝缺陷外,无论是缺陷试样还是损伤试样,其拉伸曲线在峰值前的起始段与完好试样接近,超过峰值后拉力会显著降低,直至试样断裂,相应的断裂伸长率大幅降低。总体上,缺陷试样和损伤试样的拉伸曲线与完好试样差异显著,主要体现在抗拉强度和断裂伸长率的降低。竖缝由于平行于拉伸方向,其拉伸曲线近似同完好试样,缺陷对土工膜拉伸特性的影响基本可忽略。

b. 除竖缝缺陷外,圆孔、横缝和斜缝缺陷在拉伸过程中缺陷逐渐扩展,有效拉伸断面不断减小,试样最终在缺陷两侧附近发生断裂。由于横缝与斜缝试样在缝端应力集中现象明显,因此抗拉强度和断裂伸长率降低更为显著。相比之下,圆孔缺陷试样的断裂伸长率稍大些。由此可见,实际土工膜防渗工程中为土工膜安全计,尽量避免出现与拉伸方向垂直的缝状缺陷。

c. 随着土工膜损伤深度比的增大,其抗拉强度及断裂伸长率均减小,其中横向刻痕较斜向刻痕降低更为明显。随着土工膜刻痕长度的增加,其抗拉强度及断裂伸长率亦不断减小。因此,实际工程中应尽量保护好土工膜(如采用复合土工膜),使土工膜少出现划痕损伤,以免降低拉伸力学特性。

参考文献:

[1] KOERNER R M. Designing with geosynthetics[M]. 5th ed. Englewood Cliffs: Regents/Prentice Hall, 1994.
[2] 崔中兴,刘兰亭. 土工膜渗透特性测试试验研究[J]. 西北水资源与水工程, 1994, 5(4): 30-35. (CUI Zhongxing, LIU Lanting. Experimental study on permeability of geomembrane[J]. Water Resources & Water Engineering, 1994, 5(4): 30-35. (in Chinese))
[3] 岑威灼,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

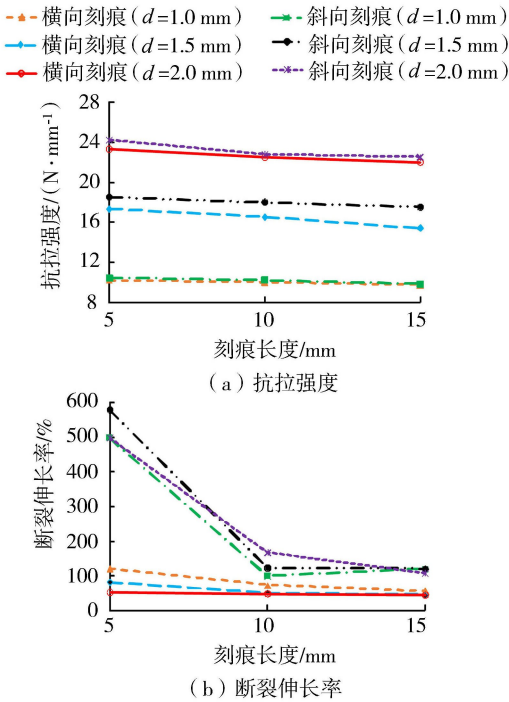


图5 损伤土工膜抗拉强度和断裂伸长率与刻痕长度的关系

project[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(6): 1183-1192. (in Chinese))

[4] 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))

[5] 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))

[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): 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))

[7] 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 the defect-induced leakage on the seepage property of geomembrane earth-rock dams and seepage control method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (3): 61-65. (in Chinese))

[8] 都旭煌,岑威钧,和浩楠,等. 倾斜坡面土工膜缺陷电学法探测的有限元模拟[J]. 水利水电科技进展,2020, 40(2):76-80. (DU Xuhuang,CEN Weijun,HE Haonan, et al. Finite element simulation of electrical detection for geomembrane defects on a slope[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(2):76-80. (in Chinese))

[9] CEN Weijun, WANG Hui, SUN Yingjie. Laboratory investigation of shear behavior of high-density polyethylene geomembrane interfaces [J]. Polymers, 2018, 10 (7): 734.

[10] CEN Weijun, WANG Hui, RAHMAN M S, et al. Response of HDPE geomembrane-sand interfaces under cyclic shear loading: laboratory investigation [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20 (2): 04019166-1.

[11] CEN Weijun, WANG Hui, SUN Yinjie, et al. Monotonic and cyclic shear behavior of geomembrane-sand interface [J]. Geosynthetics International, 2018, 25 (4): 369-377.

[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 Jia'ou. Analysis of damage for microstructure of geomembrane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 23 (6): 702-705. (in Chinese))

[13] 周琼,王春宁,潘江. 土工膜损伤特性及其应用研究[J]. 红水河, 2003(2):31-35. (ZHOU Qiong, WANG Chunning, PAN Jiang. Study on the damage characteristics of geomembrane and its engineering application[J]. Hongshui River, 2003 (2): 31-35. (in Chinese))

[14] 徐光明,章为民,彭功勋. HDPE 膜的力学特性受损伤影响初步研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32 (1): 76-80. (XU Guangming, ZHANG Weimin, PENG Gongxun. Effect of damage on mechanical behavior of HDPE geomembrane[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32 (1): 76-80. (in Chinese))

[15] 中华人民共和国水利部. 土工合成材料测试规程:SL 235—2012[S]. 北京:中国水利水电出版社. (收稿日期:2020-02-21 编辑:雷燕)

(上接第 29 页)

[20] 李丽,王加虎,王建群,等. 自适应随机搜索算法在河网数学模型糙率反演中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (5): 64-67. (LI Li, WANG Jiahu, WANG Jianqun, et al. Application of adaptive random search algorithm in roughness inversion of mathematical model for river networks[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(5):64-67. (in Chinese))

[21] 辛小康,刘刚,张向东,等. 基于遗传优化的河网数学模型糙率参数反演[J]. 水利水电科技进展,2009, 29 (6): 21-24. (XIN Xiaokang, LIU Gang, ZHANG Xiangdong, et al. Investigation on parameter identification for river network model by using genetic algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009,29(6):21-24. (in Chinese))

[22] AYVAZ T M. A linked simulation-optimization model for simultaneously estimating the Manning' s surface roughness values and their parameter structures in shallow water flows [J]. Journal of Hydrology, 2013,500:183-199.

[23] 杨开林,汪易森. 南水北调中线工程渠道糙率的系统辨识[J]. 中国工程科学,2012,14(11):17-23. (YANG Kailin, WANG Yisen. System identification of channel roughness for middle route project of south-to-north water diversion[J]. Strategic Study of CAE,2012,14(11):17-23. (in Chinese))

(收稿日期:2020-01-11 编辑:郑孝宇)