

基于水-土相互作用理论的土工织物渗透稳定性性能判别方法及应用

张昭^{1,2*}, 马浩¹, 张远傲¹, 张钊³, 周子豪¹, 沈栢萱¹

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048;
3. 中建三局一公司马来西亚公司, 马来西亚 吉隆坡 50000)

摘要: 如何同时满足土工织物滤土、透水性能及其淤堵程度的要求, 是协同发挥其作为反滤料时的渗透稳定性性能的关键。为此, 先通过物性试验选取4种典型的无纺土工织物为研究对象, 进而在常水头条件下开展16组含土工织物土柱的水力坡降比试验, 通过测算其渗透系数、平衡时的水力坡降比和细粒冲刷流失量评估其渗透稳定性性能; 其次, 基于水-土相互作用理论, 以被保护土的粒径和土工织物的孔径为随机变量, 提出用失效概率表示的土工织物滤土性能判别方法, 进而依据现有文献和本文试验评估的85组含土工织物土柱数据划分滤土性能界限; 最后, 采用土工织物淤堵后的渗透系数比值判定其表面形成桥接结构时的透水性能及其局部淤堵程度, 并将提出的土工织物性能判别方法应用于反滤料设计中, 结果表明: 提出的方法对性能有效和堵塞或闭塞型失效的划分准确度优于现有方法, 在设计时建议选取单位面积质量较大的聚丙烯纤维长丝土工织物作为反滤料。

关键词: 土力学; 土工织物; 渗透稳定; 滤土; 透水; 淤堵; 反滤料

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2026)02-0594-19

***通信作者:** 张昭(1983-), 现任教授, 主要从事非饱和土与特殊土的细-宏观水力与力学特性方面的教学与研究工作。E-mail: zhangzhao_1983@126.com

An approach to assess the seepage stability of geotextile filters based on soil-water interaction theory and its application

ZHANG Zhao^{1,2*}, MA Hao¹, ZHANG Yuan'ao¹, ZHANG Zhao³, ZHOU Zihao¹, SHEN Yuexuan¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Shaanxi, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Shaanxi, Xi'an 710048, China; 3. China Construction Yangtze River (Malaysia) SDN BHD, Kuala Lumpur 50000, Malaysia)

Abstract: How can the essential requirements of retention, hydraulic conductivity, and clogging for geotextile filters be simultaneously satisfied? Coordinating the assessment of their seepage stability performance is crucial. To achieve this, sixteen soil-geotextile column hydraulic gradient ratio tests were conducted using four typical geotextiles. The seepage stability was evaluated based on hydraulic conductivity, stable hydraulic gradient ratio, and the washout of soil fines observed during the tests. Additionally, both the grain size of the soil and the constriction size of the geotextile were treated as random variables. Utilizing soil-water interaction theory, a retention assessment approach was proposed based on the probability of ineffective retention. The performance limits of retention were determined using data from eighty-five experimentally assessed soil-geotextile columns. Furthermore, a hydraulic conductivity assessment approach was developed, considering the partial clogging of the

收稿日期: 2025-07-21; **修回日期:** 2025-09-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42372336, 41877278)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42372336 and 41877278)

geotextile due to the formation of a bridging structure. The results indicate that the proposed design criterion surpasses previously published criteria in effectively distinguishing between clogging or blinding in ineffective and effective systems. It was found that polypropylene long-filament geotextiles with a high mass per unit area are particularly well-suited for use as filters.

Key words: soil mechanics; geotextile; seepage stability; retention; hydraulic conductivity; clogging; filter

***Corresponding author:** ZHANG Zhao (1983 -), professor, is engaged in meso-macro scopic hydraulic and mechanical behavior for unsaturated soils and special soils. E-mail: zhangzhao_1983@126.com

1 引言

土工构筑物内的渗流作用会将细粒带走而诱发失稳破坏^[1]。反滤料既能控制渗透侵蚀, 同时也能确保水不受阻碍地流动。土工织物因其具有经济、可持续使用等优点, 已广泛应用于反滤料设计中^[2-3]。土工织物的渗透稳定性能应满足滤土性能、透水(亦称排水减压)性能和淤堵程度 3 个基本要求^[4]。滤土透水性能判别方法与粗粒反滤料类似^[5]; 淤堵程度评估方法需要保证土工织物在结构设计全寿期内透水性能不失效。现有研究大多孤立地采用特征粒径判别土工织物的渗透稳定性能, 然而, 土工织物的上述 3 个基本要求是相互制约的^[4]。因此, 在设计土工织物时, 如何同时满足这 3 个基本要求是协同发挥其渗透稳定性能的关键, 有助于提升土工织物在土工构筑物中的安全服役性能。

土工织物的滤土性能主要取决于被保护土的颗粒级配分布和土工织物的孔径分布^[6-7]。粗粒先被土工织物保留, 而细粒通过粗粒堆积形成的稳定骨架结构(下文简称桥接结构)被保留^[8-9]。因此, 滤土性能判别方法的核心内容在于估算能形成桥接结构的被保留粒径。太沙基针对粗粒反滤料提出的滤土性能判别方法可推广至土工织物: 即土工织物的特征孔径 O_{95} 需小于滤土比 ϑ 与被保护土特征粒径 d_y (颗粒级配曲线上过筛率为 $y\%$ 对应的粒径) 的乘积。学者们依据 d_y , O_{95} 和 ϑ 的不同取值提出了相应的判别方法: S. K. Bhatia 和 Q. Huang^[10]取 $d_y = d_{85}$, 并依据曲率系数 C_c 、土工织物的孔隙率 $n_{(gt)}$ 和 ϑ 的 3 个取值范围进行判别; 加拿大基础工程手册 (Canadian Foundation Engineering Manual, 简称 CFEM 方法)^[11]基于 J. Lafleur^[6]的试验研究, 针对不同形状的颗粒级配曲线、4 个 d_y 值、3 个 ϑ 值进行判别; J. P. Giroud^[9]对颗粒级配曲线进行线性化, 采用相对密实度 D_r 和修正后的特征粒径、不均匀系数 (d'_{85} , C'_u) 进行判别。这些方法皆通过试验观测或将粗粒反滤料的孔径转换为土工织物的等效孔径提

出的。

关于土工织物的透水性能判别方法, 若土工织物截面的渗透系数 $k_{(gt)}$ 与被保护土的渗透系数 $k_{(s)}$ 之比不小于经验常数 γ , 则表明水流可以畅通无阻地通过土工织物。至于 γ 的建议取值, 依据试验研究可分别取 1 ^[3, 12], 10 ^[12], 100 ^[13], $10i_{(s)}$ ^[14] 和 $i_{(s)}$ ^[9] ($i_{(s)}$ 为被保护土的水力坡降)。值得注意的是, 这种判别方法适用于内部稳定土, 此时土工织物不易发生淤堵。然而, 对内部不稳定土是否适用, 值得深入研究。

关于土工织物的淤堵机制, 桥接结构的形成会阻止细粒的运移, 从而在土工织物内部产生局部淤堵。本文主要研究土工织物在工程实际中广泛出现的物理淤堵。这种淤堵形式主要表现为闭塞和堵塞, 前者表现为细粒积聚在土工织物表面形成透水性低的“滤饼”引发的淤堵, 后者表现为细粒随水流进入土工织物内部并被截留造成的淤堵^[15-17]。

关于土工织物的淤堵程度判别方法, 常通过室内试验评估, 以水力坡降比试验应用较为广泛^[18]。这种试验主要测定被保护土-土工织物系统在不同水力坡降条件下的渗透系数和水力坡降比 HGR 。理想条件下, 被保护土-土工织物系统的 HGR 值应小于 1, 而 HGR 值远小于 1 表明被保护土出现潜蚀。反之, HGR 值远大于 1 表明土工织物出现堵塞或闭塞。土工织物能够接受轻微程度的淤堵, 但 HGR 值必须小于 3^[9, 18]。R. D. Holtz 等^[2]依据临界条件下的水力坡降比试验结果提出了被保护土-土工织物系统出现淤堵的判别方法。除试验评估方法外, K. H. Kim 等^[19-22]将数值模拟与试验分析相结合, 不仅能判别土工织物的淤堵程度, 还可估算其孔径。D. Cazzuffi 等^[23]在土工织物设计中考虑了被保护土的内部稳定性, 而 A. Miskowska 等^[24-25]通过试验研究了收缩层数对被保护土-土工织物系统的影响。N. Moraci 等^[26]为评价土工织物与内部稳定、不稳定土的兼容性, 提出了几何、试验和微观结构方法。

综上所述, 现有滤土性能判别方法大多仅考虑

被保护土的特征粒径和土工织物的特征孔径，并未考虑被保护土的颗粒级配分布和土工织物的孔径分布。实质上，这2种分布均属随机变量，故而在判别土工织物的滤土性能时，可采用概率统计方法进行进一步研究随机直径土粒进入随机直径孔隙的概率。现有透水性能和淤堵程度的判别方法大多基于土工织物和被保护土的初始性质，未考虑被保护土-土工织物系统性能的极限状态和被保护土的内部稳定性。此外，土工织物的渗透稳定性能如何在滤土和透水的基础上同时满足淤堵程度的要求，亟待深入研究。值得注意：被保护土-反滤料系统的渗透稳定性能本质上是水-土相互作用的结果^[27-28]。水-土相互作用理论和试验研究方法可用于评估该系统在渗流作用下的长期服役性能^[28]。

为此，先开展含土工织物土柱在常水头条件下的水力坡降比试验，通过测算其渗透系数、平衡时的水力坡降比和细粒冲刷流失量来评估其渗透稳定性能；其次，以水-土相互作用理论为基础，将土的粒径和土工织物的孔径作为随机变量，通过引入反滤路径中的土工织物孔隙分布，将滤土性能失效的概率与面向透水性能和淤堵程度要求的土工织物渗透系数建立关系，兼顾考虑土工织物厚度及其局部淤堵的影响，研究同时适用于内部稳定土和内部不稳定土的土工织物渗透稳定性能判别方法；最后，结合已有文献和本文的试验结果，验证、评价本文方法在判别土工织物滤土、透水性能及其淤性程度时的有效性与适用性，并将其应用于反滤料设计中。

2 含土工织物土柱在常水头条件下的水力坡降比试验

2.1 试验材料、装置和方法

(1) 被保护土的选取

土工织物的滤土、透水性能和淤堵程度会受到与之接触的被保护土类显著影响。为此，依据粗、细粒含量选取了4种典型土来模拟可能发生的被保护土-土工织物系统性能失效或渗透破坏的极限状态。为简化起见，依据每种土的细粒或粗粒含量将其分别编为细-3号、细-15号、细-60号和粗-70号。前三者表示粒径为0.075 mm时的过筛率(即细粒含量)，分别为3%、15%、60%；粗-70号土表示其粗粒含量为70%。依据标准^[29]可确定这4种土分别为级配不良砂、粉土质砂、含砂细粒土和级配

不良粗砂，相应的颗粒级配曲线和基本物性参数分别如图1和表1所示。表1中， d_{10} 为有效粒径， C_u 为不均匀系数， C_c 为曲率系数， G_s 为土粒相对密度，这4种土的最大、最小孔隙比(e_{max} 和 e_{min})依据标准^[30]所述的相对密实度试验方法测得。

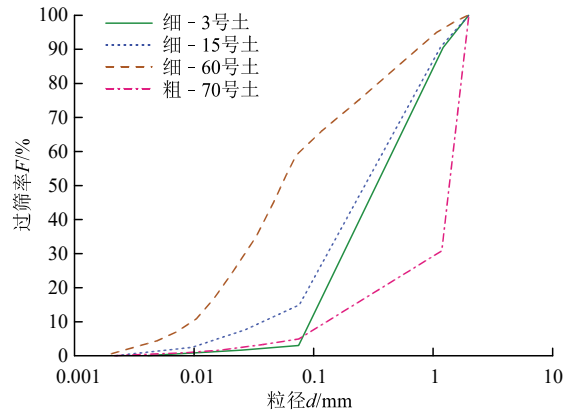
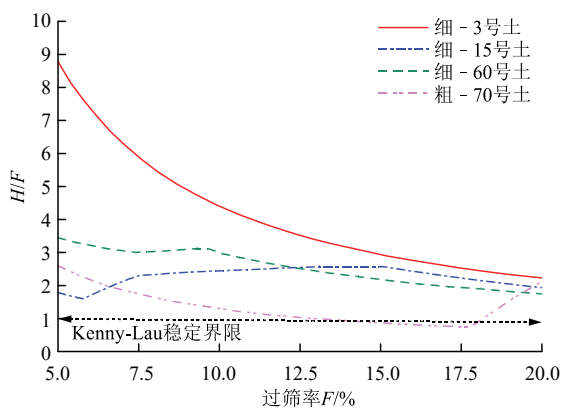


图1 4种试验用土的颗粒级配曲线
Fig.1 Particle size distribution curves of four types of test soils

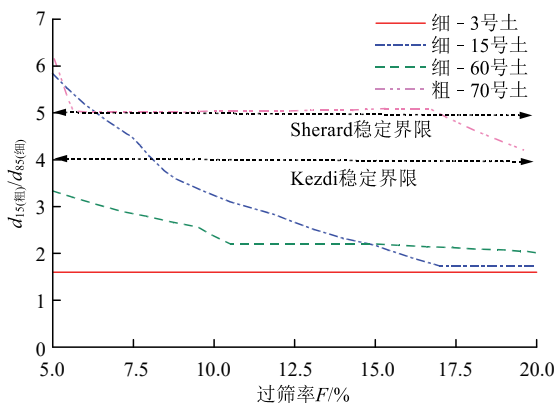
表1 4种试验用土的基本物性参数
Table 1 Index physical properties of four test soils

试样编号(sample No.)	d_{10} /mm	C_u	C_c	G_s	e_{max}	e_{min}
细-3号土	0.09	4.81	0.73	2.61	0.78	0.43
细-15号土	0.04	9.98	1.72	2.61	0.68	0.35
细-60号土	0.01	8.06	0.98	2.61	0.65	0.30
粗-70号土	0.13	11.50	6.59	2.61	0.71	0.41

至于这4种土的内部稳定性的试验评估结果，可对其土柱试样开展常水头条件下的向上渗透试验，通过流速随水力坡降变化的曲线形态获得(试验装置、方法和步骤详见张钊^[31])。具体而言，当流速随水力坡降呈线性递增趋势时，土内部是稳定的；当流速与水力坡降呈非线性递增趋势时，土内部是不稳定的^[32]。此外，还可采用几何方法——Kenney-Lau方法^[33]、Kezdi方法^[34]和Sherard方法^[35]评估这4种土的内部稳定性，如图2所示。Kenney-Lau方法^[33]规定 $(H/F)_{min} < 1$ 时、Kezdi方法^[34]和Sherard方法^[35]分别规定 $(d_{15(粗)}/d_{85(细)})_{max} > 4$ 和5时，土的内部是不稳定的(其中， d 为任意粒径； F 为粒径0~ d 的土粒所占质量分数，即过筛率； H 为粒径 $d \sim 4d$ 的土粒所占质量分数； $d_{15(粗)}$ 和 $d_{85(细)}$ 分别为粗粒组和细粒组中过筛率为15%和85%对应的粒径)。利用上述3种几何方法对4种土的内部稳定性判定结果如表2所示，Kenney-Lau方法^[33]与试验评估结果吻合——细-3号土、细-15号土、细-60号土属内部稳定土，而粗-70号土属内部不稳定土。



(a) 依据 Kenney-Lau 方法
(a) Based on Kenney-Lau approach^[33]



(b) 依据 Kezdi 方法^[34]和 Sherard 方法^[35]
(b) Based on Kezdi approach^[34] and Sherard approach^[35]

图 2 基于 3 种几何方法对 4 种试验用土的内部稳定性判别
Fig.2 Internal stability assessment of four test soils based on three geometrical approaches

表 2 4 种试验用土的内部稳定性判定结果

Table 2 Internally stability assessment of four test soils

试样编号 (sample No.)	Kenney-Lau 方法 (Kenney-Lau approach) ^[33]	Kezdi 方法 (Kezdi approach) ^[34]	Sherard 方法 (Sherard approach) ^[35]	试验评估 (experimental assessment)
细 - 3 号土	稳定	稳定	稳定	稳定
细 - 15 号土	稳定	不稳定	不稳定	稳定
细 - 60 号土	稳定	稳定	稳定	稳定
粗 - 70 号土	不稳定	不稳定	不稳定	不稳定

(2) 土工织物的选取

本文以无纺土工织物为试验对象，原因在于：这种材料不仅具有良好的延展性、力学性能和反滤性能，而且生产效率较高、成本较低，故其应用率占土工织物的 70%^[36]。通过综合考虑这种材料的加固与成网方法、原料与单位面积质量 $\eta_{(gt)}$ ，比选了 10 种土工织物，如表 3 所示，每种织物的编号以短横线划分为 3 个部分信息：① 表示原料——PET 表示聚酯纤维，PP 表示聚丙烯纤维，原因在于：这 2

种合成纤维在土工织物中广泛使用^[37]；② 表示加固与成网方法，依据 R. Koerner^[36]选取 3 种方法——D 表示短丝针刺，C 表示长丝针刺，R 表示热熔黏合；③ 数字表示单位面积质量(g/m^2)。

这 10 种土工织物的基本物性参数测定依据如下规范：① 特征孔径 O_{95} 依据规范^[38]测得；② 渗透系数 $k_{(gt)}$ 依据规范^[39]测得；③ 纤维密度 $\rho_{(fb)}$ 依据规范^[40]中密度梯度法测得；④ 纤维直径 $d_{(fb)}$ 依据规范^[41]所述扫描电镜法测得；⑤ 依据规范^[42]所述方法测得土工织物在 2 kPa 压力下的厚度 $t_{(gt)}$ 。

依据这 10 种土工织物的基本物性参数，即可算得相应的孔径分布曲线(计算方法详见下文)，如图 3 所示。对比图 1 和 3 所示 4 种试验用土的颗粒级配曲线可知，热熔黏合的土工织物(PET-R - 100, PET-R - 200)孔径和渗透系数过小，难以满足土工织物作为反滤料的透水要求，故可不考虑；此外，短丝针刺的聚丙烯纤维土工织物(PP-D - 200, PP-D - 400)在表 3 所示的物性参数与长丝针刺的聚丙烯纤维土工织物(PP-C - 200, PP-C - 400)相近的条件下，前者的力学性能远不如后者，且后者的应用范围更广^[43]，故本文试验不选取 PP-D - 200, PP-D - 400 号土工织物。

需注意：本文还将探讨土工织物的基本性质(原料、加固与成网方法、单位面积质量)对其渗透稳定性能的影响，故在选取土工织物时需对比其不同性质的影响，为此，先对比加固与成网方法对土工织物性能的影响，选取 PET-D - 400 和 PET-C - 400 号土工织物；再对比原料对土工织物性能的影响，选取 PET-C - 400 和 PP-C - 400 号土工织物；最后，对比单位面积质量对土工织物性能的影响，选取 PP-C - 200 与 PP-C - 400 号土工织物。综上所述，本文最终选取了 4 种土工织物(PET-D - 400, PET-C - 400, PP-C - 200 和 PP-C - 400)，在表 3 中用上标▲进行标注。

(3) 试验装置和方法

采用如图 4 所示试验装置，对选取的 4 种被保护土与 4 种土工织物构成的土柱开展了 16 组常水头条件下的水力坡降比试验，旨在判别这 4 种土工织物的渗透稳定性能。试样筒的内径和高度分别为 190 和 100 mm；其顶部和底部采用法兰分别与盖板和流失土粒收集槽连接；其盖板上设置排气阀排除筒内的气泡，以消除气泡对试验结果可能产生的不

表3 本文比选的10种土工织物的基本物性参数
Table 3 Index physical properties of ten geotextiles compared

原料(raw material)	加固与成网方法(manufacture method)	$\eta_{(gt)}$ /($g \cdot m^{-2}$)	土工织物(geotextile)	O_{95}/mm	$t_{(gt)}/mm$	$d_{(fb)}/mm$	$\rho_{(fb)}$ /($g \cdot cm^{-3}$)	$k_{(gt)}$ /($cm \cdot s^{-1}$)
聚酯纤维	短丝针刺	200	PET-D-200	0.081	2.23	0.020 3	1.344	0.200 0
		400	PET-D-400 [▲]	0.072	3.47	0.020 5	1.368	0.290 0
	长丝针刺	200	PET-C-200	0.108	2.75	0.014 8	0.273	0.260 0
		400	PET-C-400 [▲]	0.075	5.29	0.016 8	0.134	0.190 0
	热熔黏合	100	PET-R-100	0.053	0.42	0.012 2	0.486	0.002 2
		200	PET-R-200	0.048	0.41	0.013 7	0.683	0.002 5
聚丙烯纤维	短丝针刺	200	PP-D-200	0.061	2.61	0.027 3	0.894	0.280 0
		400	PP-D-400	0.052	3.59	0.021 7	0.931	0.160 0
	长丝针刺	200	PP-C-200 [▲]	0.124	3.48	0.032 9	0.872	0.160 0
		400	PP-C-400 [▲]	0.125	3.85	0.036 2	0.623	0.090 0

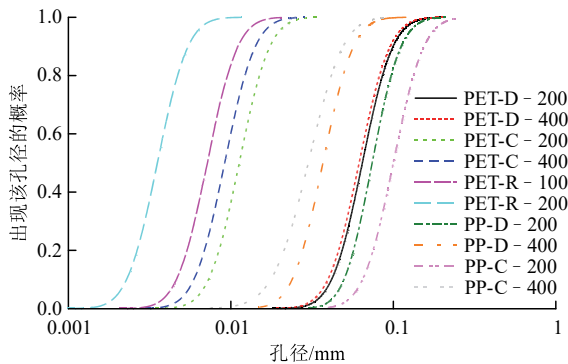
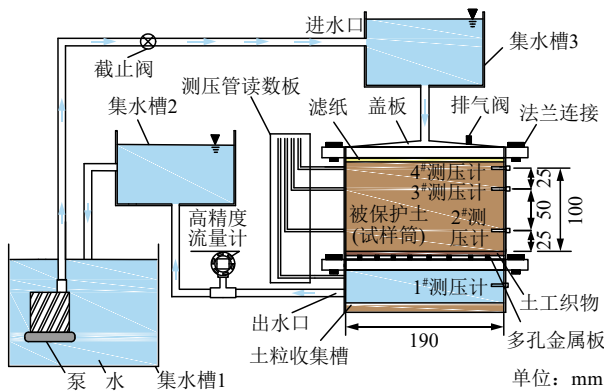


图3 10种土工织物的孔径分布曲线

Fig.3 Void size distributions of 10 kinds of geotextiles

良影响。在开展试验前,需将4种土工织物裁剪成与土柱底面直径相同的圆片试样,进而将其放置在土柱底部之下、多孔金属板之上。在进、出水口处设置常水头条件以控制水流在土柱内的向下渗透过程,在其出口处设置高精度流量计来测定含土工织物土柱内的流量。沿土柱高度设置一组测压管^[18](在读数板上)与测压计,取这2种装置读数的平均值为土柱在不同高度处的压力水头。



(a) 仪器原理图

(a) Schematic of testing apparatus



(b) 实物总装图

(b) General assembly image

图4 常水头条件下含土工织物土柱的水力坡降比试验装置
Fig.4 An apparatus of hydraulic gradient ratio test for soil-textile column under constant head

不仅如此,在试验前还需预先制备含水率为5%的试样,以防止在压实过程中出现颗粒分离现象,随后将土样分3次等量装入试样筒内,并使用振捣锤均匀压实(控制筒内各层土深度)至设定的相对密实度 $D_r = 0.5$ 。随后,确保试验装置连接无误,再给土柱中加入无气水,并在100 cm的常水头条件下静置24 h后饱和。通过在进、出水口保持常水头差来模拟向下渗透过程。试验开始后,采用升降台调节出水口处的压力水头分别施加水力坡降为2, 5, 8。依据标准^[30],每组开展3次平行试验。试验施加的水力坡降明显高于内部稳定土、内部不稳定土发生渗透侵蚀时的临界水力坡降(分别采用太沙基公式和张钊^[31]所述公式算得)。在施加了每级水力坡降后,实时测定距土柱底部不同高度处的压力水头,同时采用高精度流量计测定土柱出水口处的流量。试验结束后,从收集槽集取从土工织物流出的细粒

并烘干称重。

2.2 试验结果分析

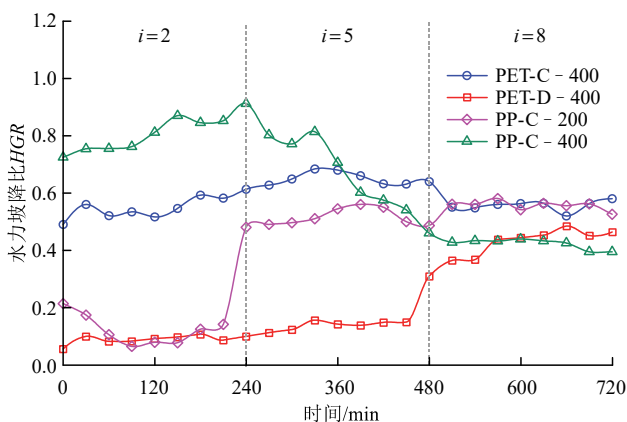
整理 16 组含土工织物土柱的渗透系数 k 及其水力坡降比 HGR 随时间的变化曲线如图 5 所示(图中, i 为水力坡降)。本文所选的 4 种土工织物对细 - 3 号土、细 - 15 号土和细 - 60 号土的 HGR 在试验过程中始终小于 1; 含这 4 种土工织物的细 - 3 号土、细 - 15 号土 k 在试验开始约 4 h 内虽有小幅下降(对 PET-D - 400 和 PP-C - 200 号土工织物), 但随后均趋于稳定, 表明含这 4 种土工织物的细 - 3 号土、细 - 15 号土内未出现淤堵; 含这 4 种土工织物的细 - 60 号土 k 在试验开始时总体先增大, 直至约 8 h 后稳定。究其原因可能在于: 细 - 60 号土的细粒含量对应的土粒直径远小于土工织物的特征孔径, 致使水流对这种土在试验前 8 h 内的冲刷程度强烈。综上所述, 这 4 种土工织物对细 - 3 号土、细 - 15 号土和细 - 60 号土性能是有效的; 在其与土工织物的分界面处, 可能有土粒搭接形成了桥接结构。值得注意: 对这 3 种土柱, 当增大水力坡降时, 其 HGR 与 k 均不同程度地出现了突变现象, 表明这 3 种土柱对水力加载和水流特征变化是灵敏的。反

之, 这 4 种土工织物对粗 - 70 号土的 HGR 均大于 3 且持续增长, 同时其渗透系数 k 持续减小, 这表明土工织物内出现淤堵。对比粗 - 70 号土的颗粒级配分布和这 4 种土工织物的特征孔径可以看出, 其淤堵状态更接近闭塞。此外, 亦可整理含土工织物土柱的细粒冲刷流失量、 HGR 稳定值和试验评估结果, 如表 4 所示, 细粒冲刷流失量均小于 J. Lafleur^[6]所述发生潜蚀破坏的临界值 $2\ 500\ \text{g}/\text{m}^2$, 表明本节试验的土工织物滤土性能均未失效。

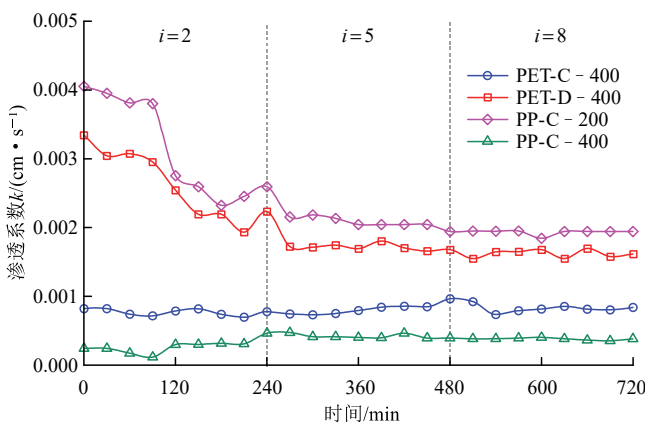
3 基于概率统计对土工织物滤土性能的判别

3.1 土工织物滤土性能失效概率的定义

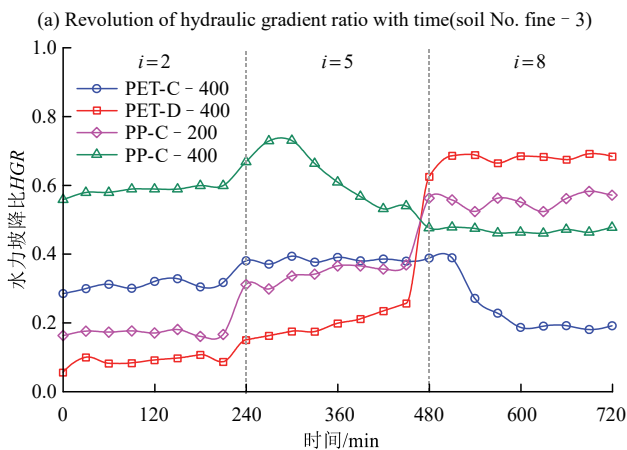
节 1 所述现有滤土性能判别方法大多是围绕被保护土的特征粒径和土工织物的特征孔径所提出的。然而, 在土工织物的过滤过程中, 随机直径的土粒会渗入随机直径的孔隙内, 可见被保护土的粒径和土工织物的孔径均为服从特定分布的随机变量。因此, 在判别土工织物的滤土性能时, 需采用概率统计方法考虑这种随机现象。



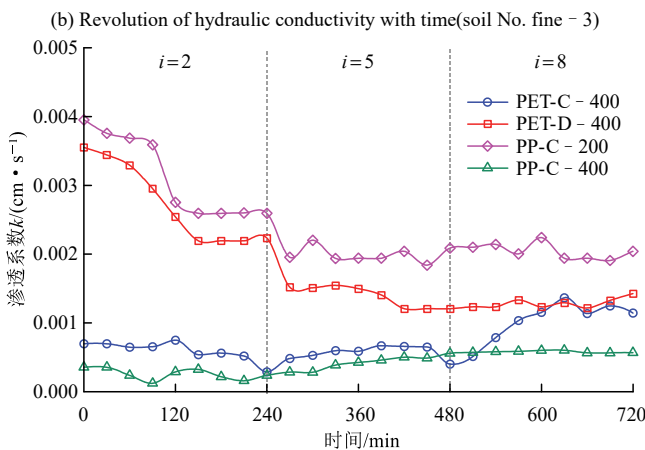
(a) 水力坡降比随时间的变化曲线(细 - 3 号土)



(b) 渗透系数随时间的变化曲线(细 - 3 号土)



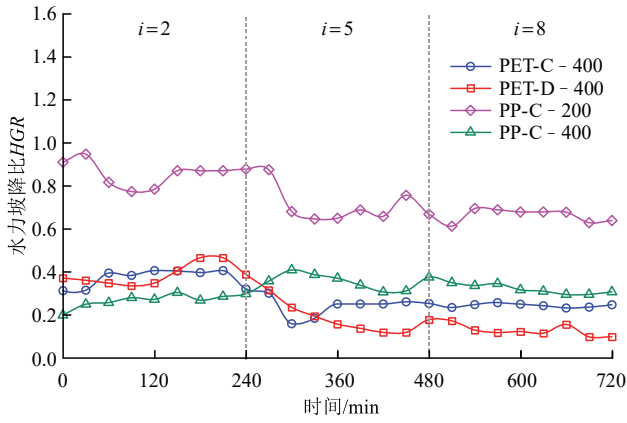
(c) 水力坡降比随时间的变化曲线(细 - 15 号土)



(d) 渗透系数随时间的变化曲线(细 - 15 号土)

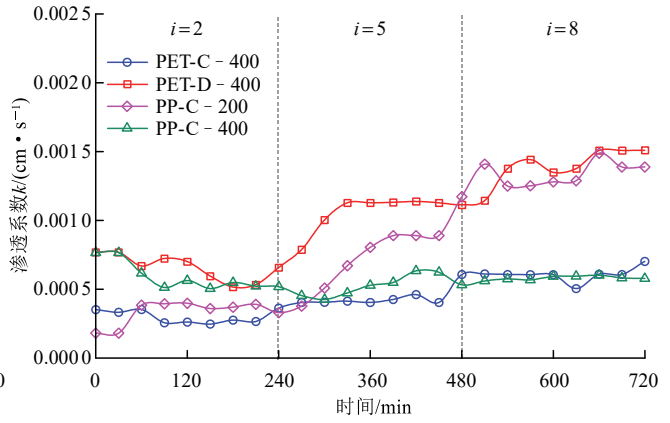
(c) Revolution of hydraulic gradient ratio with time(soil No. fine - 15)

(d) Revolution of hydraulic conductivity with time(soil No. fine - 15)



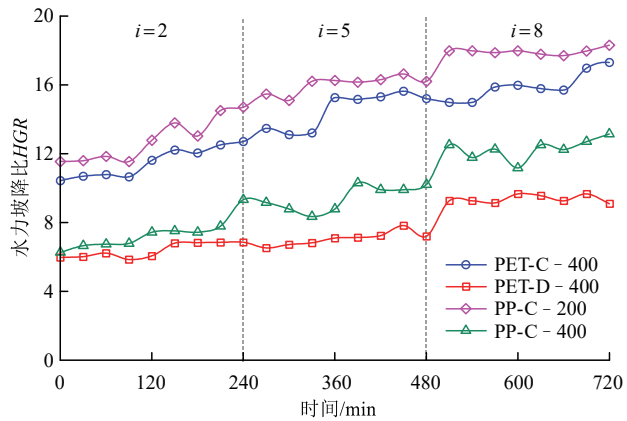
(e) 水力坡降比随时间的变化曲线(细 - 60 号土)

(e) Revolution of hydraulic gradient ratio with time(soil No. fine - 60)



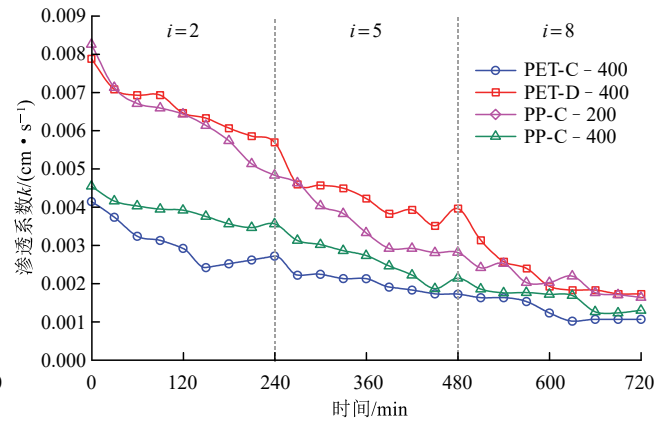
(f) 渗透系数随时间的变化曲线(细 - 60 号土)

(f) Revolution of hydraulic conductivity with time(soil No. fine - 60)



(g) 水力坡降比随时间的变化曲线(粗 - 70 号土)

(g) Revolution of hydraulic gradient ratio with time(soil No. coarse - 70)



(h) 渗透系数随时间的变化曲线(粗 - 70 号土)

(h) Revolution of hydraulic conductivity with time(soil No. coarse - 70)

图 5 含土工织物土柱的水力坡降比和渗透系数随时间的变化曲线

Fig.5 Revolutions of hydraulic gradient ratio and hydraulic conductivity with time for soil-textile columns

依据毛昶熙等^[27-28]所述的水 - 土相互作用机制可知,在水流作用下,均匀直径土粒渗入反滤料(由粗粒料或土工织物构成)内均匀直径孔隙的过程与筛分过程类似。这种相似关系可通过引入面向滤土要求的安全裕度极限状态函数 $M_s(G, V)$, 推广至随机直径土粒渗入随机直径孔隙的情况:

$$M_s(G, V) = G_i - V_j \quad (1)$$

式中: G_i , V_j 分别为取自被保护土颗粒级配分布和土工织物孔径分布的样本。当 $M_s \geq 0$ 时,土工织物的滤土性能有效;当 $M_s < 0$ 时,土工织物的滤土性能失效。

由于 G_i 和 V_j 为随机变量,则存在与每个变量值相关的概率。因此,土工织物滤土性能失效的情况是由所有大于被保护土粒径的收缩层孔径集合导致的。要生成颗粒级配曲线和孔径分布曲线的样本,可先在 0~1 的区间内生成均匀分布的随机数(u_i, u_j),再过该随机数的水平线与颗粒级配曲线和孔径

分布曲线相交所得交点的横坐标即为所求样本,如图 6 所示(以粗 - 70 号土和 PET-D - 400 号土工织物为例)。

当被保护土的级配极好或级配不连续时,则需考虑细粒从被保护土的桥接结构中随水流迁移至被保护土 - 土工织物分界面的情况,这是“滤饼”的主要成因^[9]。为此,可通过构成桥接结构的细粒组和粗粒组的分离粒径 d^* 对被保护土重新分级,将小于 d^* 的土粒过筛率与 d^* 对应的过筛率相除,求得重新分级后的颗粒级配曲线。本文对不连续级配土在拐点处进行重新分级;对内部不稳定的宽级配土在最大收缩孔径($d_{v(max)}$)处重新分级。此外,对由砾石和卵石构成的土料,可采用 $d^* < 2 \text{ mm}$ 的约束条件限定 d^* 。

至于最大收缩孔径 $d_{v(max)}$ 的计算,可依据 Y. Wang 等^[44-45]将粗粒土简化为四颗粒集合体,通过张昭等^[45]所述方法算得不同相对密实度(D_r)和最

表 4 含土工织物土柱的细粒冲刷流失量、HGR 稳定值和试验评估结果

Table 4 The amount of washout fines, HGR at equilibrium, and experimental assessment for soil-textile columns

试样编号 (sample No.)	土工织物 (geotextile)	HGR 稳定值 (HGR stable value)			细粒冲刷流失量 (washout of soil fines)/ (g · m ⁻²)	试验评估结果 (experimental assessment)
		i = 2	i = 5	i = 8		
细 - 3 号土	PET-C - 400	0.45	0.62	0.57	88	有效
	PET-D - 400	0.11	0.12	0.43	126	有效
	PP-C - 200	0.12	0.50	0.56	154	有效
细 - 15 号土	PP-C - 400	0.80	0.63	0.45	131	有效
	PET-C - 400	0.29	0.35	0.21	127	有效
	PET-D - 400	0.10	0.19	0.63	165	有效
细 - 60 号土	PP-C - 200	0.18	0.31	0.53	264	有效
	PP-C - 400	0.56	0.60	0.49	198	有效
	PET-C - 400	0.40	0.27	0.26	176	有效
粗 - 70 号土	PET-D - 400	0.39	0.18	0.18	648	有效
	PP-C - 200	0.86	0.66	0.65	872	有效
	PP-C - 400	0.29	0.41	0.40	525	有效
粗 - 70 号土	PET-C - 400	11.92	15.07	15.84	144	闭塞/堵塞
	PET-D - 400	6.14	6.26	9.21	528	闭塞/堵塞
	PP-C - 200	13.28	16.23	17.88	850	闭塞/堵塞
	PP-C - 400	7.25	9.64	13.34	633	闭塞/堵塞

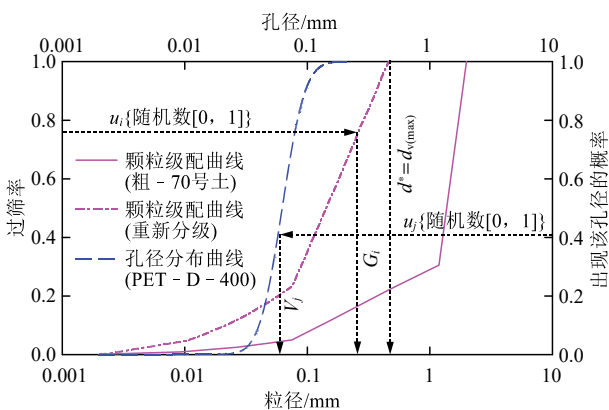


图 6 由被保护土的颗粒级配曲线和土工织物的孔径分布曲线生成样本的原理示意

Fig.6 Approach to generate samples from grain-size distribution of soil and void-size distribution of geotextile

大粒径(d_{100})条件下的孔径分布曲线, 进而估算出 $d_{v(max)}$ 。然而, 这种方法未能给出 $d_{v(max)}$ 的显式计算公式, 但值得注意的是, d_{100} 和 D_r 共同影响 $d_{v(max)}$ ^[44-45]。为在本文的渗透稳定性判别方法中能够实现对于 $d_{v(max)}$ 的简便计算, 在 DESIGN-EXPERT 软件环境中, 采用响应曲面法求取 $d_{v(max)}$ 与 d_{100} 和

D_r 之间的函数关系。具体步骤如下: (1) 将 d_{100} 和 D_r 作为输入变量, 将 $d_{v(max)}$ 作为输出变量; (2) 在 $d_{100} = 0.075 \sim 60 \text{ mm}$ 和 $D_r = 0 \sim 1$ (依据土力学对粗粒土粒组及其密实程度的界定) 的取值范围内选取 10^4 种 d_{100} 和 D_r 的组合数据; (3) 依据上述估算方法求得不同组合下的 $d_{v(max)}$ 值; (4) 利用响应曲面法进行回归分析、比选, 求得相关系数 R^2 值最大 ($R^2 = 0.9905$) 的含二阶交互项的回归方程如下:

$$d_{v(max)} = \beta_1 d_{100} - \beta_2 d_{100} D_r \quad (2)$$

式中: β_1 和 β_2 均为回归方程参数, 且 $\beta_1 = 0.2728$, $\beta_2 = 0.1697$ 。需注意, 这 2 个参数是通过方差分析确定的, 依据 P 值检验, 由于式(2)等号右边第 1 和 2 项的 P 值均小于 0.01 的显著性水平, 因此这两项是显著的。式(2)没有 D_r 的一阶项, 原因在于该一阶项的 P 值大于 0.01, 表明该项是不显著的, 故应在式(2)中删除该项。采用式(2)可绘制出 $d_{v(max)}$ 关于 d_{100} 和 D_r 的响应曲面, 如图 7 所示, 由于式(2)是在 $d_{100} = 0.075 \sim 60 \text{ mm}$ 和 $D_r = 0 \sim 1$ 的范围求取的, 因此该式对粗粒土是适用的。

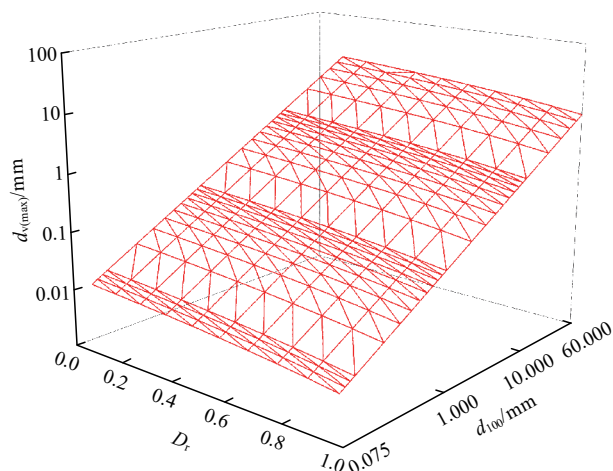


图 7 $d_{v(max)}$ 关于 d_{100} 和 D_r 的响应曲面

Fig.7 Response surface for $d_{v(max)}$ as a function of d_{100} and D_r

土工织物滤土性能失效的概率 $p_{(ir)}$ (下标(ir)表示滤土失效, 下文相同) 既可定义为土工织物孔径大于被保护土粒径的概率, 亦可定义为土工织物无法保留的土粒含量占比。 $p_{(ir)}$ 可通过对式(1)所示安全裕度极限状态函数 M_s 进行蒙特卡洛模拟后采用下式算得, 其计算结果会随样本数 N 增大而收敛:

$$p_{(ir)} = \text{次数}(M_s < 0) / N \quad (3)$$

如节 1 所述, 桥接结构的形成主要受收缩层孔径和土工织物厚度影响。土工织物由若干个平行的收缩层组成, J. P. Giroud^[14] 给出了收缩层数 m 的计

算公式如下：

$$m = (t_{(gt)} / d_{(fb)}) \sqrt{n_{(gt)} - 1} \quad (4)$$

式中： $d_{(fb)}$ 、 $t_{(gt)}$ 和 $n_{(gt)}$ 分别为土工织物的纤维直径(mm)、厚度(mm)和孔隙率。依据 J. P. Giroud^[9]， $n_{(gt)}$ 可表示为

$$n_{(gt)} = 1 - \eta_{(gt)} / (\rho_{(fb)} t_{(gt)}) \quad (5)$$

式中： $\rho_{(fb)}$ 为土工织物的纤维密度(g/m^3)， $\eta_{(gt)}$ 为土工织物的单位面积质量(g/m^2)。式(4)和(5)仅适用于各向同性、均质且无制造缺陷的土工织物。

本文假定每个收缩层的孔径分布相同，则过滤路由多个收缩孔径组成，故可将收缩孔径视为随机变量。因此，当收缩层的孔径较小或较大时，通过设置较少或较多的收缩层，均可实现对土粒的保留。然而，要使土工织物同时满足透水性能要求，还需使收缩孔径足够大，此时可能出现细粒的冲刷流失，渗透侵蚀程度随之增强，直至发生渗透破坏。

为限制细粒的过度冲刷流失，从被保护土渗入土工织物的细粒应尽可能地被保留在土工织物中，因此通过能从分界面渗入土工织物的被保护土细粒含量占比亦可算得 $p_{(ir)}$ 。渗入土工织物的细粒在其厚度范围内的迁移过程中，既可能会被更小的收缩孔隙保留，也可能流失。由此可见，在被保护土 - 土工织物系统中，随着被保留的土粒逐渐增多， $p_{(ir)}$ 会沿着过滤路径在每个收缩层中逐渐减小，故而在判别土工织物的滤土性能时，需计算第 m 个收缩层处的 $p_{(ir)}$ ，计算流程如图 8 所示(图中，GSD 为颗粒级配曲线，VSD 为孔径分布曲线)。

以含 PP-C - 200 号织物的粗 - 70 号土为例，其 $p_{(ir)}$ 值随收缩层数的变化曲线如图 9 所示，被保护土 - 土工织物分界面处的 $p_{(ir)} = 0.26$ ，并在前几个收缩层中骤减，之后随着收缩层数量增加而逐渐减缓；此外，被保护土 - 土工织物系统很难完全保留细粒，即 $p_{(ir)} \neq 0$ 。此外，通过调用 MATLAB 软件中的 ecdf 函数，可求得保留在土工织物内土粒样本的经验累积分布函数，从而求得淤堵土粒的级配曲线。以含 PET-D - 400 号织物的粗 - 70 号土为例，被保护土流失的和土工织物内淤堵的土粒级配曲线如图 10 所示。

3.2 土工织物孔径分布曲线的估算

土工织物孔径分布曲线的试验测定方法可分为 2 类：其一是测定特征孔径的试验方法，包括干筛法、湿筛法和水力筛分法^[46]，通过干筛法和湿筛法

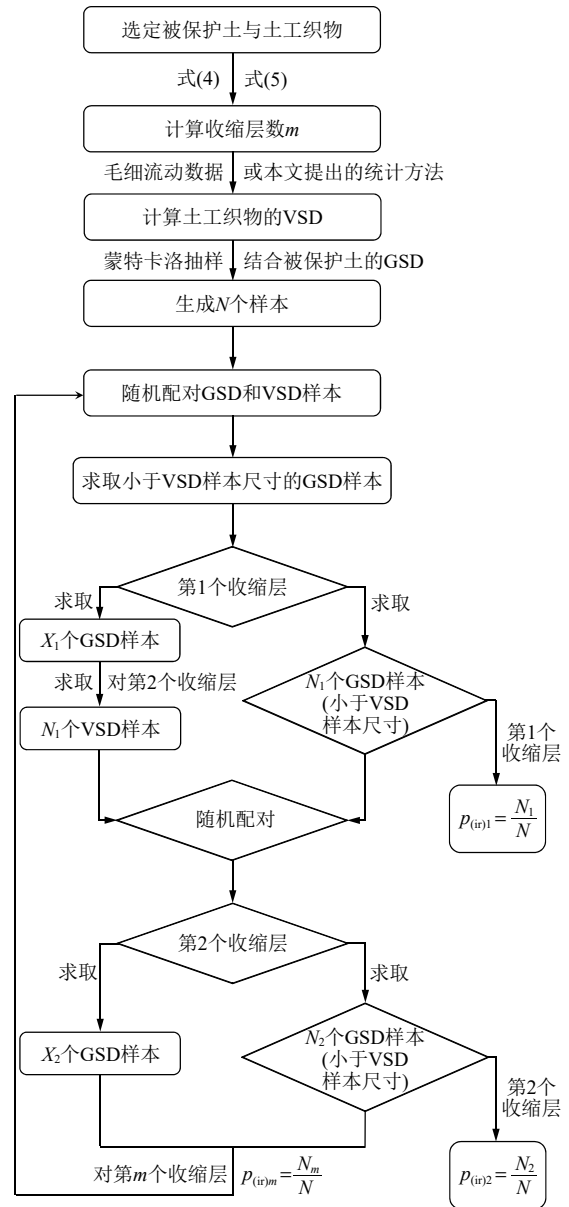


图 8 第 m 个收缩层的滤土失效概率 $p_{(ir)m}$ 计算流程
Fig.8 Flowchart to calculate $p_{(ir)m}$ at m constriction layer

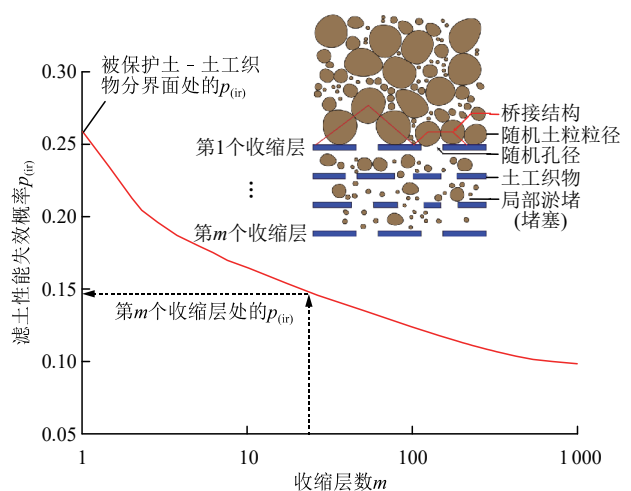


图 9 收缩层数 m 对 $p_{(ir)}$ 的影响
Fig.9 Effect of number of constriction layers (m) on $p_{(ir)}$

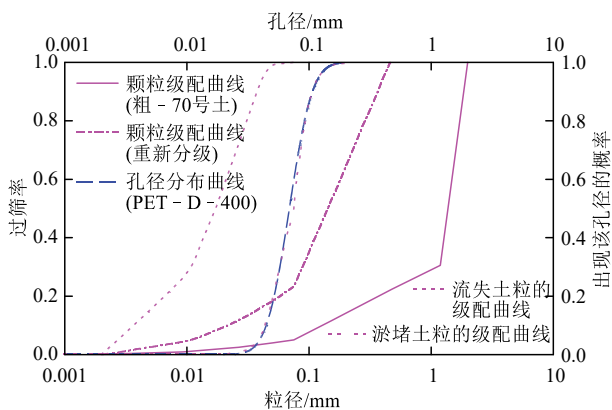


图 10 被保护土流失的和土工织物内淤堵的土粒级配曲线
Fig.10 Washout and clogged soil grain-size distribution for a soil-geotextile

测得的孔径，即特征孔径 O_{95} 已广泛用于大多数滤土性能判别方法之中，但其准确度仍有待提升^[14]。其二是测定完整孔径分布曲线的试验方法，主要包括压汞试验、毛细流动试验和图像分析法^[46]，其中以毛细流动试验测得的特征点，即气泡点 O_{98} 相较于其他 2 种方法更为准确^[47]。

除试验测定方法外，J. P. Giroud^[14]根据土工织物的物性参数提出了其孔径 O_F 的估算公式：

$$O_F = d_{(tb)} \left[\frac{\delta}{\sqrt{1-n_{(gt)}}} - 1 + \frac{\xi n_{(gt)} d_{(tb)}}{t_{(gt)} (1-n_{(gt)})} \right] \quad (6)$$

式中： δ 和 ξ 均为参数，依据 J. P. Giroud^[14]，当采用水力筛分法估算 O_F 时， δ 和 ξ 可分别取 1 和 10。

M. G. Gardoni 和 E. M. Palmeira^[48]发现，从水力坡降比试验所用的无纺土工织物中流失的土粒最大粒径与 $\xi = 15$ 时采用式(6)所估算的 O_F 密切相关。E. M. Palmeira 和 H. L. Trejos Galvis^[49]发现 O_F 估算值与 O_{98} 实测值吻合度最优时的参数 δ 和 ξ 值取决于聚合物类型和纤维约束。当土工织物较轻时 ($\eta_{(gt)} < 300 \text{ g/m}^2$)，聚丙烯纤维土工织物的最优参数组合为 $\delta = 1$ 和 $\xi = 12.5$ ，聚酯纤维土工织物的最优参数组合为 $\delta = 1$ 和 $\xi = 15$ ；当土工织物较重时 ($\eta_{(gt)} > 300 \text{ g/m}^2$)，最优参数组合为 $\delta = 1.34$ 和 $\xi = 15$ 。由此可见， O_{98} 可通过土工织物的物性参数(如 $t_{(gt)}$ 和 $\eta_{(gt)}$)以式(6)所示半经验公式估算得到。

由 A. H. Aydilek 等^[7]可知，土工织物的孔径分布大多服从对数正态分布。因此，只要确定对数正态分布中的 2 个参数(μ 和 σ)，则可算得土工织物的孔径分布曲线。对数正态分布的累积分布函数可表示为

$$F_x(x) = \Phi[(\ln x - \mu) / \sigma] \quad (7a)$$

$$\mu = \ln O_{98} - \sigma \Phi^{-1}(0.98) \quad (7b)$$

$$\sigma = \sqrt{\ln(1 + COV^2)} \quad (7c)$$

式中： Φ 为标准正态分布的累积分布函数。由式(6)可知，当其中的参数 δ 和 ξ 采用 E. M. Palmeira 和 H. L. Trejos Galvis^[49]所述建议值时， $O_F \approx O_{98}$ ，进而可通过式(6)计算 O_{98} ，再将 O_{98} 值代入式(7b)即可确定参数 μ 。此外，由式(7c)可知，参数 σ 可由变异系数 COV 确定。

整理 N. Fatema 和 S. K. Bhatia^[50]所述针刺无纺土工织物的毛细流动试验数据与相应的孔径分布拟合曲线如图 11 所示，拟合曲线与试验数据吻合度良好。当 $COV = 35\%$ 时，对数正态分布拟合曲线的参数为 $\mu = -2.24$ 和 $\sigma = 0.33$ 。为搜索 COV 的最优估算值，可从 N. Fatema 和 S. K. Bhatia^[50]中提取 29 种无纺土工织物的毛细流动试验数据，绘制了 COV 的箱型图，如图 11 所示， COV 在 26%~42% 的范围变化，其平均值为 35%。综上所述，当 $COV = 35\%$ 且对 O_{98} 估算后，即可估算得土工织物的孔径分布曲线。

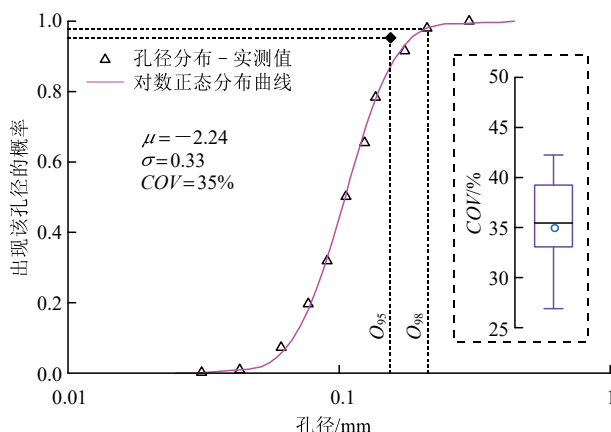


图 11 对数正态分布对 N. Fatema 和 S. K. Bhatia^[50]所述毛细流动试验所得孔径分布实测值的吻合度以及 COV 变化
Fig.11 Goodness of fit of Lognormal normal distribution to the measured data of void-size distribution and variation of COV for the capillary flow test data from reference^[50]

4 对土工织物透水性能及其淤堵程度的判别

土工织物除需满足滤土性能要求之外，还需满足透水性能与淤堵程度的要求。张 钊^[31]基于水 - 土相互作用原理^[27-28]和水动力学理论推导出了粗粒反滤料透水性能的判别公式 $k_{(f)}/k_{(s)} \geq i_{(s)}$ ，本文将其

推广至淤堵不显著的内部稳定土 - 土工织物系统:

$$k_{(gt)} / k_{(s)} \geq i_{(s)} \quad (8)$$

式中: $k_{(gt)}$ 为初始土工织物的渗透系数, $k_{(s)}$ 为初始被保护土在重新分级前的渗透系数, $i_{(s)}$ 为被保护土的水力坡降。

若在被保护土和土工织物分界面处形成桥接结构后, 这两者的渗透系数可测得, 则式(8)亦可推广至内部不稳定土。由 T. Nishigata 等^[17]所述试验研究表明: 对内部不稳定土而言, 当其与土工织物的分界面处形成桥接结构或“滤饼”时, 被保护土内土粒运动显著的区域较薄(<10 mm)。由于被保护土层的厚度(>100 mm)相对于土粒显著运动区域更大, 故而在式(8)中考虑初始被保护土的渗透系数是合理的。然而, 土工织物的淤堵程度与其滤土效能和渗透特性密切相关。可见, 在判别内部不稳定土 - 土工织物系统的透水性能时, 还需考虑土工织物内的局部淤堵, 故这里将式(8)中的 $k_{(gt)}$ 更换为 $k_{(gc)}$ 得到:

$$k_{(gc)} / k_{(s)} \geq i_{(s)} \quad (9)$$

式中: $k_{(gc)}$ 为局部淤堵的土工织物渗透系数。

关于初始的无纺土工织物的渗透系数 $k_{(gt)}$, J. P. Giroud^[14]通过 Kozeny-Carman 公式推得其计算公式可表示为

$$k_{(gt)} = \lambda \rho_w g n_{(gt)}^3 d_{(tb)}^2 / [16 \eta_w (1 + n_{(gt)})^2] \quad (10)$$

式中: ρ_w 和 η_w 分别为水的密度和黏度; g 为重力加速度; λ 为考虑孔隙连通和迂曲程度的量纲一参数, 对无纺土工织物取 0.1。由 J. Giroud^[51]可知, 当无纺土工织物出现局部淤堵时, 假定淤堵土粒松散地分布于土工织物内, 则其渗透系数可表示为

$$k_{(gc)} = \frac{\lambda \rho_w g (n_{(gt)} + \chi n_{(s)} - 1)^3}{\eta_w [4(1 - n_{(gt)}) / d_{(tb)} + 6(1 - \chi n_{(s)}) / d_{(c)}]} \quad (11)$$

式中: $d_{(c)}$ 为淤堵土粒直径; $n_{(s)}$ 为被保护土的孔隙率, B. Åberg^[52]基于通过颗粒介质的无限条平行直线相交的随机概念, 推导出了土孔隙率的理论计算公式, 综合考虑了土颗粒级配曲线、土粒形状和相对密实度 D_r 的影响, 如下式所示:

$$n_{(s)} = \frac{2c_g (A_0 / B_0) + 2d_g}{1 + 2c_g (A_0 / B_0) + 2d_g} \quad (12a)$$

$$A_0 = \int_0^1 \{y / [x(y)]\} dy \quad (12b)$$

$$B_0 = \int_0^1 [x(y)]^{-1} dy \quad (12c)$$

式中: x 和 y 分别为颗粒级配曲线中的粒径和相应的过筛率; d_g 为与相对密实度 D_r 有关的参数, 当 $D_r = 0$ 和 1 时, d_g 分别取 0 和 0.18; c_g 为与土粒形

状有关的参数, 对球体颗粒 $c_g \approx 0.6$, 对河砂 $c_g \approx 0.75$, 对碎石 $c_g \approx 1$ ^[52]。 χ 为从被保护土的孔隙率 $n_{(cs)}$ 到土工织物内的淤堵土粒孔隙率 $n_{(gs)}$ 的修正系数, 该参数随土工织物的孔隙率 $n_{(gt)}$ 及其滤土失效概率 $p_{(ir)}$ 变化。为此, 本文依据以下 3 个约束条件: (1) $n_{(cs)}$ 应小于 1; (2) 当淤堵程度最小(即 $p_{(ir)} = 0$)时, $n_{(cs)}$ 最大; (3) 当 $n_{(gt)}$ 最大时, $n_{(cs)}$ 最小, 求得了参数 χ 的经验公式如下:

$$\chi = 1.35 - 0.35 p_{(ir)} n_{(gt)} \quad (13)$$

至于被保护土的渗透系数 $k_{(s)}$, 本文采用祝良玉^[53]所述基于水 - 土相互作用理论推导出的渗透系数理论公式进行计算:

$$k_{(s)} = \left[C_s n \gamma_w \int_{r_{min}}^{r_{max}} g(r) r^4 dr \right] / \left[8 \mu_w \int_{r_{min}}^{r_{max}} g(r) r^2 dr \right] \quad (14a)$$

$$C_s = 1.5 / (C_c^{0.386} C_u) \quad (14b)$$

式中: $g(r)$ 为孔径分布密度函数, r_{max} 和 r_{min} 分别为孔隙的最大、最小半径(μm); n 为孔隙率; μ_w 为水动力黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$); γ_w 为水的容重(N/m^3); C_s 为描述土孔隙界面不规则形状和几何特征的参数。式(14a)所示计算渗透系数 k 的理论公式, 取决于孔径分布和孔隙率。至于被保护土的孔径分布曲线, 可采用张钊^[31]所述方法, 通过易测的颗粒级配曲线和相对密实度估算得到。

5 对土工织物滤土、透水性能及淤堵程度的判别方法验证及其界限划分

5.1 对滤土性能的判别

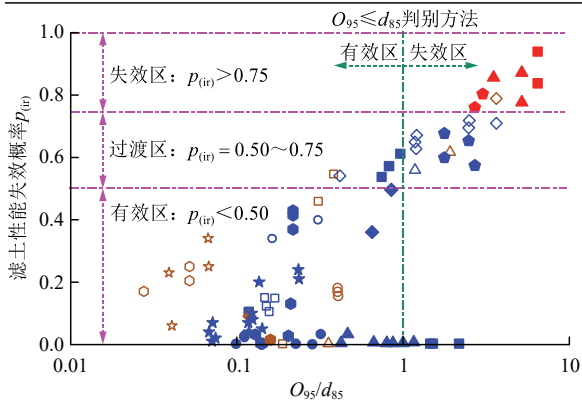
$p_{(ir)}$ 是被保护土 - 分界面处能否形成桥接结构的关键性能指标。通过计算已进行试验评估的含土工织物土柱的 $p_{(ir)}$, 可确定桥接结构形成过程中出现破坏的界限状态。计算 $p_{(ir)}$ 所需的数据包括被保护土的颗粒级配曲线和相对密实度 D_r 、土工织物的单位面积质量 $\eta_{(gt)}$ 、厚度 $t_{(gt)}$ 、纤维密度 $\rho_{(tb)}$ 、纤维直径 $d_{(tb)}$ 。

通过对 16 组含土工织物的土柱在常水头条件下的水力坡降比试验结果, 并结合 J. Lafleur 等^[6, 8, 17, 25, 54-55]所述不同种含土工织物的土柱试验结果验证本文提出的滤土性能判别方法的有效性。随着试验时间的推移, 若 k 持续减小或 HGR 逐渐增大超过 3, 则表明该织物内发生了堵塞或闭塞, 即可判定其透水性能失效; 若 k 与 HGR 持续增大或减小, 且集取的细粒冲刷流失量大于 $2\ 500\ \text{g}/\text{m}^2$, 则表明该土柱出现严重潜蚀, 土工织物的滤土性能失效; 若观测到土

柱的 HGR 始终小于 3 并处于稳定状态, 则表明其与土工织物的分界面处形成了有效的桥接结构且未发生淤堵, 从而满足性能要求, 属性能有效。

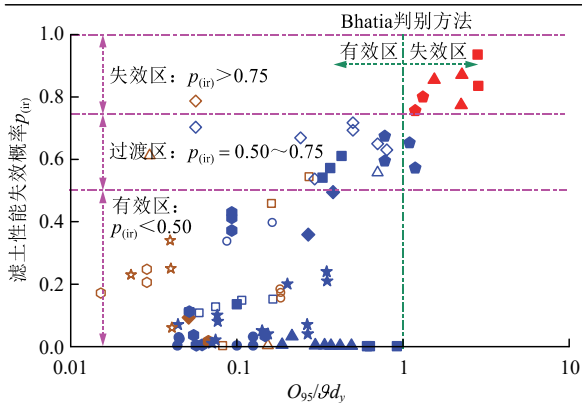
J. Lafleur 等^[6, 8, 17, 25, 54-55]提供了 69 组试验数据, 包括 48 组性能有效、14 组发生堵塞或闭塞、7 组发生潜蚀的数据, 用于划分土工织物滤土性能失效概率 $p_{(ir)}$ 的界限。对这 69 组与本文 16 组试验数据可算得不同 O_{95}/d_{85} 对应的滤土性能失效概率 $p_{(ir)}$, 如图 12 所示, 每个数据点的颜色表示其试验

内部不稳定			内部稳定			来源
有效	堵塞/闭塞	潜蚀	有效	堵塞/闭塞	潜蚀	
△	△	△	▲	▲	▲	J. Lafleur等 ^[6]
□	□	□	■	■	■	R. Fannin等 ^[8]
○	○	○	●	●	●	T. Nishigata等 ^[17]
◊	◊	◊	◆	◆	◆	A. Markiewicz等 ^[25]
◇	◇	◇	♦	♦	♦	Y. S. Hong和C. S. Wu ^[54]
◊	◊	◊	◆	◆	◆	M. Khan等 ^[55]
☆	☆	☆	☆	☆	☆	本文试验



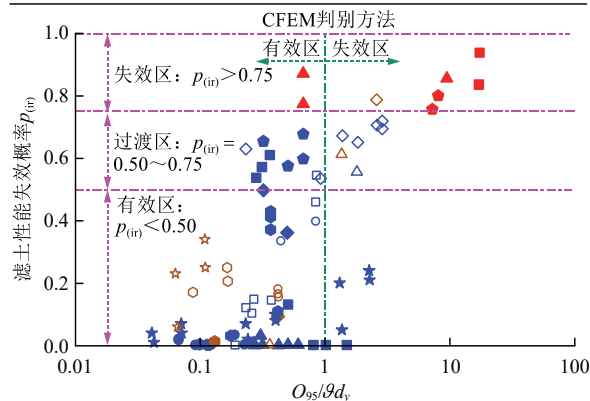
(a) 本文方法与 $O_{95} \leq d_{85}$ 方法^[10]判别效果对比(确定滤土性能界限)
(a) The proposed approach versus $O_{95} \leq d_{85}$ approach^[10](estimation of the limit state of retention)

内部不稳定			内部稳定			来源
有效	堵塞/闭塞	潜蚀	有效	堵塞/闭塞	潜蚀	
△	△	△	▲	▲	▲	J. Lafleur等 ^[6]
□	□	□	■	■	■	R. Fannin等 ^[8]
○	○	○	●	●	●	T. Nishigata等 ^[17]
◊	◊	◊	◆	◆	◆	A. Markiewicz等 ^[25]
◇	◇	◇	♦	♦	♦	Y. S. Hong和C. S. Wu ^[54]
◊	◊	◊	◆	◆	◆	M. Khan等 ^[55]
☆	☆	☆	☆	☆	☆	本文试验



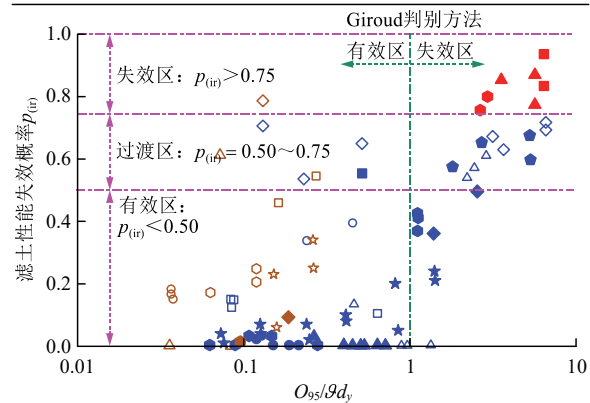
(b) 本文方法与 Bhatia 方法^[10]的判别效果对比
(b) The proposed approach versus Bhatia approach^[10]

内部不稳定			内部稳定			来源
有效	堵塞/闭塞	潜蚀	有效	堵塞/闭塞	潜蚀	
△	△	△	▲	▲	▲	J. Lafleur等 ^[6]
□	□	□	■	■	■	R. Fannin等 ^[8]
○	○	○	●	●	●	T. Nishigata等 ^[17]
◊	◊	◊	◆	◆	◆	A. Markiewicz等 ^[25]
◇	◇	◇	♦	♦	♦	Y. S. Hong和C. S. Wu ^[54]
◊	◊	◊	◆	◆	◆	M. Khan等 ^[55]
☆	☆	☆	☆	☆	☆	本文试验



(c) 本文方法与 CFEM 方法^[11]的判别效果对比
(c) The proposed approach versus CFEM approach^[11]

内部不稳定			内部稳定			来源
有效	堵塞/闭塞	潜蚀	有效	堵塞/闭塞	潜蚀	
△	△	△	▲	▲	▲	J. Lafleur等 ^[6]
□	□	□	■	■	■	R. Fannin等 ^[8]
○	○	○	●	●	●	T. Nishigata等 ^[17]
◊	◊	◊	◆	◆	◆	A. Markiewicz等 ^[25]
◇	◇	◇	♦	♦	♦	Y. S. Hong和C. S. Wu ^[54]
◊	◊	◊	◆	◆	◆	M. Khan等 ^[55]
☆	☆	☆	☆	☆	☆	本文试验



(d) 本文方法与 Giroud 方法^[9]的判别效果对比
(d) The proposed approach versus Giroud approach^[9]

图 12 对滤土性能界限的确定及本文方法与 J. P. Giroud 等^[9-11]所述方法的判别效果对比

Fig. 12 Estimation of the limit state of retention and comparison of proposed approach with published approaches in reference^[9-11]

评估的结果: 蓝色为性能有效, 棕色为堵塞或闭塞 (失效), 红色为潜蚀 (失效); 数据点形状代表了不同文献来源, 其中空心和实心符号分别表示土柱内部不稳定与内部稳定。图 12(a)中还列出了 $O_{95} \leq d_{85}$ 判别方法(如 S. K. Bhatia 和 Q. Huang^[10]所述)对这 85 组试验的判定结果, 并与本文判别方法进行了对

比。需注意的是，关于特征粒径 d_{85} 的确定，依据 J. P. Giroud^[9]可知，当被保护土属于宽级配型或不连续级配型时，该粒径分别取自 4.75 mm 或最小间断粒径处重新分级的颗粒级配曲线。

对这 85 组数据进行判别的目的在于确定已形成桥接结构的有效土工织物的 $p_{(ir)}$ 界限，以便在设计土工织物时提供重要的参考建议。依据 J. Lafleur^[6]开展的土-反滤料试验结果所总结出的被保护土发生潜蚀破坏的判据(适用于土工织物和粗粒反滤料)——当细粒冲刷流失量大于 $2\ 500\ \text{g/m}^2$ 时，可认为反滤料的滤土性能失效。基于此界限值，通过蒙特卡洛模拟方法求得相应的滤土失效概率约为 0.75，故而将 $p_{(ir)} > 0.75$ 划分为反滤料的滤土失效区；此外，依据 K. K. Phoon^[56]可知，岩土工程可靠度分析和设计方法一般将失效概率 = 0.5 定义为工程安全界限，故而将 $p_{(ir)} < 0.5$ 设置为有效区，基于该界限值通过蒙特卡洛模拟方法算得细粒冲刷流失量约为 $1\ 000\ \text{g/m}^2$ 。如图 12(a)所示，依据滤土失效概率可划分 3 个区域，即有效区($p_{(ir)} < 0.5$)、过渡区($p_{(ir)} = 0.5 \sim 0.75$)和失效区($p_{(ir)} > 0.75$)，其中过渡区表示细粒冲刷流失量超过 $1\ 000\ \text{g/m}^2$ 而又小于 $2\ 500\ \text{g/m}^2$ ，此时对土工织物性能判别的有效性还受其他因素影响，需依据具体试验观察进行验证。

如图 12(a)所示， $O_{95} \leq d_{85}$ 方法^[10]采用 $O_{95}/d_{85} = 1$ 所示竖向分界线来判别滤土性能，分界线的左侧区域为有效区、其右侧区域为失效区。而本文方法所有潜蚀型失效的数据点均位于 $p_{(ir)} = 0.75$ 所示分界线上，且性能有效的数据点大部分在 $p_{(ir)} = 0.5$ 以下，少部分位于 $0.5 \sim 0.75$ 范围。对 $O_{95} \leq d_{85}$ 判别方法，虽然所有性能失效的数据点位于 $O_{95}/d_{85} = 1$ 所示竖向分界线的右侧，但同时有 15 个性能有效的数据点被该方法判定为滤土性能失效，这与 $O_{95} \leq d_{85}$ 判别方法是相悖的。可见，本文方法在划分性能有效和潜蚀型失效的准确程度优于 $O_{95} \leq d_{85}$ 方法。

此外，还可对比分析本文方法与 Bhatia 方法^[10]、CFEM 方法^[11]和 Giroud 方法^[9]在判别滤土性能时的有效性，如图 12(b)~(d)所示，因这 3 种判别方法根据被保护土的颗粒级配曲线、相对密度 D_r 和土工织物的物性参数有关，判别公式中的变量 ∂d_y 取值方法见 J. P. Giroud 等^[9-11]，故图 12(b)~(d)中的横坐标轴均为 $O_{95}/(\partial d_y)$ ，进而采用 Bhatia 方法^[10]、CFEM 方法^[11]和 Giroud 方法^[9]中的 $O_{95}/(\partial d_y) = 1$ 所示竖向分界线划分滤土性能的有效区

和失效区，亦如图 12(b)~(d)所示。Bhatia 方法^[10]仅将 2 个性能有效的数据点判定为失效；CFEM 方法^[11]将 2 个性能失效的数据点判定为性能有效，将 13 个性能有效的数据点判定为性能失效；Giroud 方法^[9]将 20 个性能有效的数据点判定为性能失效，均与这 2 种判别方法相悖。

不仅如此，还可对比本文方法与这 4 种现有方法的判别结果偏差率，如图 13 所示。本文方法在判别这 85 组含土工织物土柱滤土性能时未出现判别偏差；其他 4 种方法均存在 2.4%~23.5%的总偏差率，甚至 CFEM 方法^[11]还存在 2.4%的性能失效判别偏差率，其主要原因在于：这 4 种现有方法均未考虑被保护土的颗粒级配曲线和土工织物的孔径分布曲线，仅以这两者的特征粒径和特征孔径的不同形式比值进行判别。相比之下，本文方法综合考虑了被保护土的颗粒级配曲线和土工织物的孔径分布曲线形状，并结合概率统计分析，有效提升了对滤土性能的判别准确度。

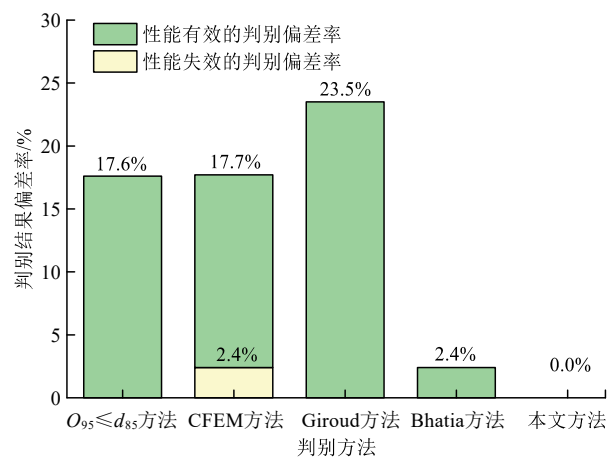
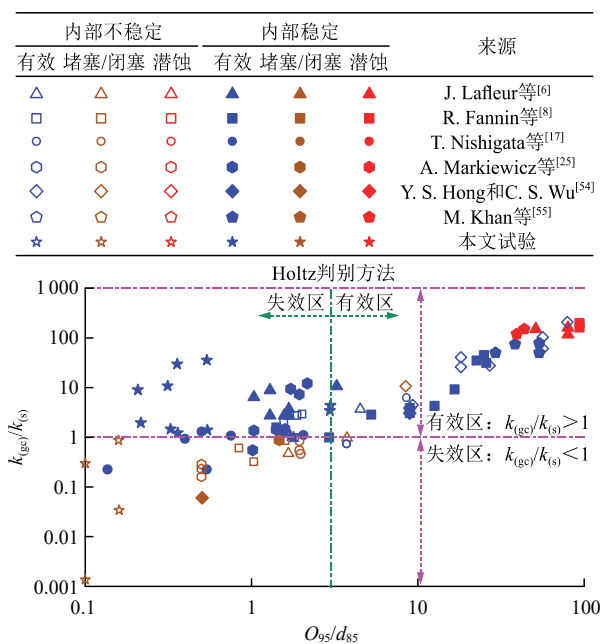


图 13 本文和 4 种现有方法对滤土性能的判别结果偏差率
Fig.13 The deviation rates of the discriminant results of the filter soil performance by the approach in this paper and the four published approaches

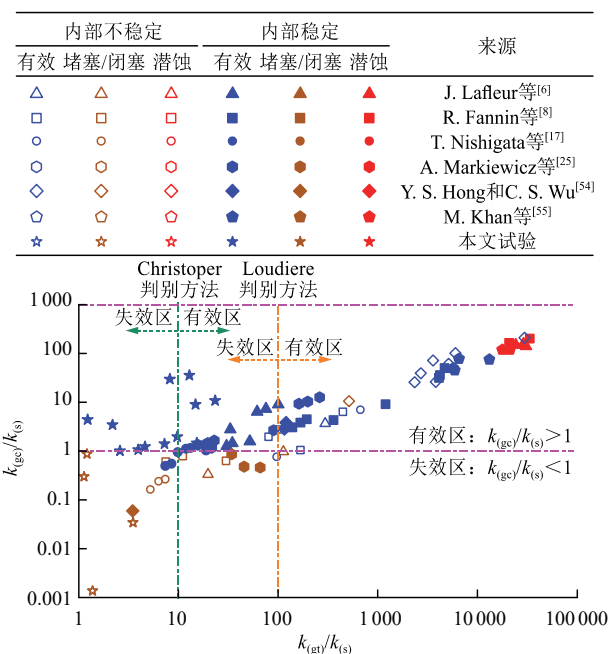
5.2 对透水性能和淤堵程度的判别

由式(9)可知，若含土工织物的土柱满足 $k_{(gc)}/k_{(s)} \geq i_{(s)}$ 的条件，则可满足其透水性能和淤堵程度的要求。因此，对上述 85 组已进行试验评估的含土工织物土柱，通过估算其 $k_{(gc)}/k_{(s)}$ 值来确定其透水性能的界限状态(即堵塞或闭塞的发生)，进而分别采用式(11)和(14a)计算 $k_{(gc)}$ 和 $k_{(s)}$ ，再整理不同 O_{95}/d_{15} 对应的 $k_{(gc)}/k_{(s)}$ 值，如图 14 所示。

从图 14(a)可以看出，当 $k_{(gc)}/k_{(s)} < 1$ 时，含土工织物的土柱会出现堵塞或闭塞。然而，这些含土工织物的土柱是水力坡降在 2~8 范围进行试验评估



(a) 本文方法与 Holtz 方法^[2]的判别效果对比
(a) The proposed approach versus Holtz approach^[2]



(b) 本文方法与 Loudiere 方法^[13]、Christopher 方法^[12]的判别效果对比
(b) The proposed approach versus Loudiere^[13] and Christopher^[12] approaches

图 14 对透水性能界限的确定及本文方法与 R. D. Holtz 等^[2, 12-13]所述方法的判别效果对比

Fig.14 Estimation of the limit state of hydraulic conductivity and comparison of proposed approach with published approaches in reference^[2, 12-13]

的。因此，当设定的水力坡降 <8 时，若 $k_{(gc)}/k_{(s)}>1$ ，则可认为堵塞或闭塞是有限的。图 14(a)中 $O_{95}/d_{15}=3$ 处的竖向分界线描述了 Holtz 淤堵判别方法^[2]，分界线的左侧区域为性能失效区、其右侧区域为性能有效区。不仅如此，除一组数据外，其余出现堵塞

或闭塞的含土工织物土柱数据均低于 $k_{(gc)}/k_{(s)}=1$ 的界限。然而，Holtz 淤堵判别方法将 2 组出现堵塞或闭塞的数据判定为性能有效，将 36 组性能有效的数据判定为失效。这与该判别方法是相悖的。相比之下， $k_{(gc)}/k_{(s)}$ 可更为准确地将区分性能有效和堵塞或闭塞型失效。此外，还可对比分析本文方法与 Loudiere 方法^[13]、Christopher 方法^[12]在判别透水性能和淤堵程度时的有效性，如图 14(b)所示，本文方法因考虑了出现局部淤堵的土工织物渗透系数 $k_{(gc)}$ ，对性能有效和堵塞或闭塞型失效的划分准确度，优于仅考虑初始土工织物渗透系数的方法 $k_{(gt)}/k_{(s)}>\gamma$ 。

不仅如此，还可对比本文方法与这 3 种现有方法的判别结果偏差率，如图 15 所示，本文方法对这 85 组含土工织物土柱的透水性能进行判别时，以 5.9%的总偏差率和 1.2%的性能失效判别偏差率均低于其他 3 种方法；其他 3 种方法不仅总偏差率较高，而且存在 2.4%~9.4%的性能失效判别偏差率，其主要原因在于：现有方法仅考虑被保护土特征粒径、土工织物特征孔径或土工织物的初始渗透系数。而本文方法进一步引入土工织物出现淤堵后渗透系数，显著提升了透水性能的判别准确度。

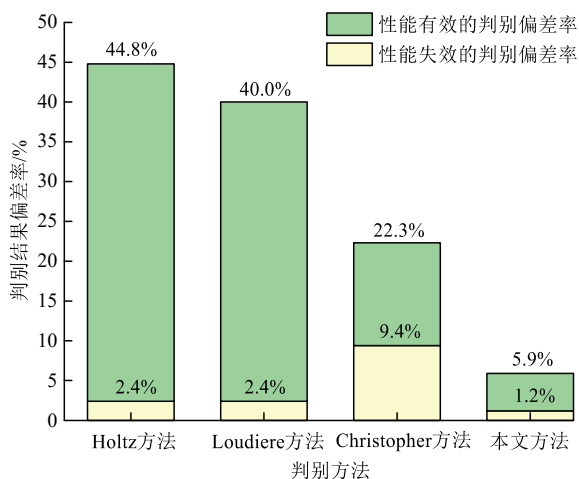


图 15 本文和 3 种现有方法对透水性能的判别结果偏差率

Fig.15 The deviation rates of the discriminant results of proposed approach and three published approaches on the performance of filter soil

6 判别方法在土工织物反滤料设计中的应用与讨论

6.1 设计流程

土工织物作为反滤料需要同时满足滤土、透水

性能和淤堵程度的要求，其设计内容主要包括对土工织物的特征孔径 O_{95} 、单位面积质量 $\eta_{(gt)}$ 、厚度 $t_{(gt)}$ 的选取，旨在满足本文判别方法所提出的渗透稳定性要求—— $p_{(ir)} < 0.75$ 和 $k_{(gc)}/k_{(s)} > 1$ 。基于本文判别方法对土工织物的设计流程如图 16 所示(d_g 为间断粒径)，主要以被保护土的颗粒级配分布和土工织物的孔径分布为基础，具体从以下 4 个步骤实现：

(1) 依据被保护土的颗粒级配曲线和相对密实度，先判断其内部稳定性：若其内部稳定，则分离粒径 d^* 取最大粒径 d_{100} ；若其内部不稳定，再判断颗粒级配是否连续，若连续，则 d^* 取最大孔径 $d_{v(max)}$ ；若不连续，则 d^* 取间断粒径 d_g 。进而在小于 d^* 的范围内对颗粒级配曲线重新分级。

(2) 土工织物的孔径分布曲线可通过毛细流动试验或统计方法求得，若采用概率统计方法，则可

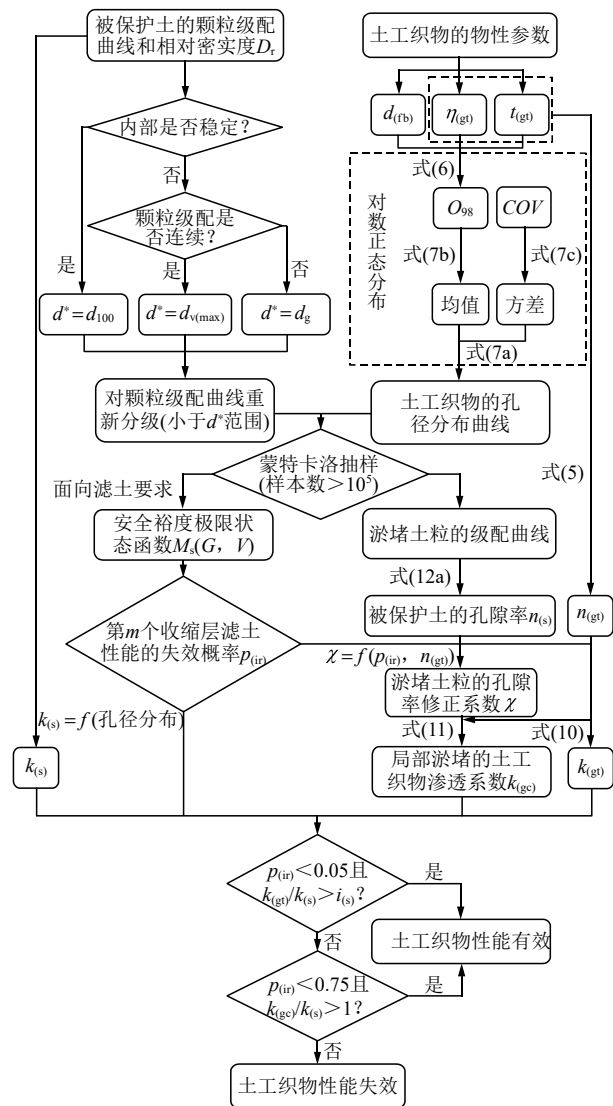


图 16 基于本文判别方法设计土工织物的流程

Fig.16 Design flowchart of geotextile based on proposed assessment approach

假定土工织物的孔径分布服从式(7a)所示对数正态分布，进而分别采用式(7b)和(7c)计算均值 μ 和方差 σ 。

(3) 从被保护土重新分级的颗粒级配曲线和土工织物的孔径分布曲线中提取样本 ($> 10^5$)，采用蒙特卡洛模拟分别确定被保留的、淤堵在土工织物第 m 个收缩层之内的、冲刷流失的土粒样本，通过 m 个收缩层未能保留的土粒样本数与模拟样本总数之比算得滤土性能失效概率 $p_{(ir)}$ 。

(4) 通过求取土工织物内土粒样本的累积分布经验函数，即可确定淤堵土粒的级配曲线。假定土工织物内的土粒呈松散分布，进而采用式(11)求得出现淤堵的土工织物的渗透系数 $k_{(gc)}$ 。初始的土工织物和被保护土的渗透系数 ($k_{(gt)}$ 和 $k_{(s)}$) 分别采用式(10)和(14a)算得。最后依据式(8)和(9)所示透水性能及淤堵程度的判别公式，结合滤土失效概率 $p_{(ir)}$ 的界限值，综合判别所选土工织物的渗透稳定性是否满足要求。

依据节 5 所述 85 组已进行试验评估的含土工织物的土柱数据，验证本文判别方法的设计结果有效性，如图 17 所示，依据判别方法将 $k_{(gc)}/k_{(s)}-p_{(ir)}$ 坐标系划分为 6 个区域：性能有效区、过渡区、潜蚀区、潜蚀或淤堵区、堵塞区和闭塞区。性能有效区内的含土工织物土柱可同时满足滤土、透水性能和淤堵程度的要求；潜蚀区的含土工织物土柱不稳定，其细粒冲刷流失量将超过 2500 g/m^2 时，不满足滤土

内部不稳定			内部稳定			来源
有效	堵塞/闭塞	潜蚀	有效	堵塞/闭塞	潜蚀	
△	△	△	▲	▲	▲	J. Lafleur等 ^[6]
○	○	○	●	●	●	R. Fannin等 ^[8]
○	○	○	●	●	●	T. Nishigata等 ^[17]
○	○	○	●	●	●	A. Markiewicz等 ^[25]
◇	◇	◇	◆	◆	◆	Y. S. Hong和C. S. Wu ^[54]
○	○	○	●	●	●	M. Khan等 ^[55]
☆	☆	☆	★	★	★	本文试验

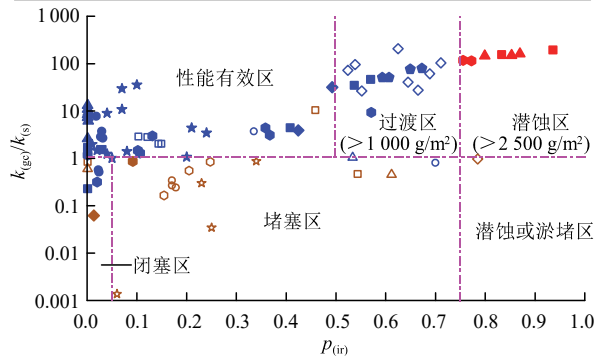


图 17 基于渗透稳定性失效界限的土工织物设计分区

Fig.17 Regions identified based on limit states of seepage stability performance for geotextile

性能要求; 过渡区的含土工织物土柱可能略微不稳定, 其细粒冲刷流失量可能超过 $1\ 000\ \text{g}/\text{m}^2$; 堵塞区或闭塞区内的含土工织物土柱的水力坡降比 HGR 可能超过 3, 并因土工织物可能出现淤堵而使其流速显著减小; 在潜蚀或淤堵区, 含土工织物土柱的失效类型取决于试验观测结果; 闭塞区采用 $p_{(ir)} < 0.05$ 和 $k_{(ge)}/k_{(s)} < 1$ 确定, 表明被保护土的粒径几乎大于土工织物的孔径, 难以进入土工织物内部故积聚在其表面, 而发生堵塞和潜蚀的可能性很小, 该区域内的含土工织物土柱的透水性能受式(8)所示 $k_{(gt)}/k_{(s)} \geq i_{(s)}$ 控制。

6.2 判别方法对土工织物设计的适用性讨论

基于本文判别方法对土工织物的设计同时适用于内部稳定土和不稳定土。该方法是以被保护土的颗粒级配曲线和土工织物的孔径分布曲线为基础, 对现有判别方法进行了改进。因此, 该方法不仅受被保护土的颗粒级配曲线形状影响, 而且也受土工织物的厚度、单位面积质量和纤维直径等物性参数影响。除此之外, 本文假定土工织物每个收缩层的孔径分布是相同的, 又因孔径是随机变量, 故过滤路由多个收缩孔径构成。该假定是通过随机直径的土粒渗入随机直径的收缩孔隙过程类比得到的, 而构成过滤路径的多个收缩孔径样本是由实测或统计估算的孔径分布曲线生成的。

基于本文判别方法的设计目的在于选取位于图 17 所示性能有效区内($p_{(ir)} < 0.5$ 且 $k_{(ge)}/k_{(s)} > 1$)的土工织物。若土工织物满足 $k_{(gt)}/k_{(s)} \geq i_{(s)}$, 则位于闭塞区的土工织物也是可以接受的。若被保护土-土工织物系统可能出现内部侵蚀, 则建议选取同时满足透水性能要求和 $p_{(ir)} < 0.5$ 条件的土工织物, 方可使细粒冲刷流失量低于 $1\ 000\ \text{g}/\text{m}^2$ 。

采用式(10)和(11)对无纺土工织物渗透系数的计算时, 假定土工织物的约束条件是相同的^[5], 因此在本文判别方法中未考虑土工织物约束条件的影响, 有待进一步研究。

6.3 判别方法与不同工程实际的差异性讨论

本文方法虽对土工织物的物理淤堵程度的判别准确度较现有方法做了改进, 却未考虑土工织物的化学或生物淤堵。然而, 在干旱地区的农田暗管排水^[57]、垃圾填埋场的渗滤液收集系统^[58]等工程措施中, 土工织物作为反滤料常遇到盐分沉淀造成的化学淤堵或微生物的附着、生长和繁殖引起的生物淤堵。在暗管排水过程中, 由于物理淤堵与化学淤堵之间存在相互促进作用^[57], 因此在淤堵程度的评判

过程中, 如何综合考虑这两者的相互影响, 值得深入研究。不仅如此, 在渗滤液的收集系统中, 生物膜的形成对土工织物的渗透稳定性影响显著, 而且生物堵塞现象实质上是微生物活动的结果^[58], 因此, 在本文的判别方法中, 如何量化生物淤堵程度, 同样值得深入研究。

此外, 如张 昭等^[45]所述, 土工织物作为反滤料在实际工程中还可能承受循环往复水流这种动态水力荷载, 多发生在护坡、护岸、码头等工程中, 土工织物常处于诸如波浪荷载或水位频繁涨落的工况下, 此时, 在被保护土-土工织物分界面处不易形成桥接结构, 土粒更易发生移动, 从而削弱土工织物的渗透稳定性, 更易诱发被保护土的渗透侵蚀破坏。本文虽未考虑循环往复水流条件, 但这种水力荷载下的含土工织物土柱水力坡降比试验是值得深入研究的。由于这种循环往复水流和单向水流差异显著, 故应对本文的水力坡降比试验装置进行改进, 旨在可施加循环往复水流条件, 从而研究循环往复水流作用下, 含土工织物土柱在不同周期和水力坡降下的渗透稳定性判别方法。

6.4 本文试验所选土工织物渗透稳定性的差异性讨论

节 2 试验所选取的 4 种土工织物的渗透稳定性能所存在的差异主要表现为以下 3 方面:

(1) 关于原料: 对比本文选取的 PP-C-400 和 PET-C-400 两种土工织物, 当其加固与成网方法和单位面积质量相同时, PP-C-400 织物具有更大的纤维密度、纤维直径、等效孔径, 同时孔隙率也略大于 PET-C-400 织物, 从而使前者的孔径分布曲线高于后者, 可保留更多的土粒而不发生淤堵。如表 4 所示, 虽然在 4 种土的试验评估结果中, PP-C-400 织物的细粒冲刷流失量略大于 PET-C-400 织物, 但都远小于发生潜蚀的流失量($2\ 500\ \text{g}/\text{m}^2$)。不仅如此, 聚丙烯纤维(PP)因其疏水性能优于聚酯纤维(PET)^[59]而更易透水。此外, 虽然 PP-C-400 织物在试验前的渗透系数低于 PET-C-400 织物, 但由节 2.2 试验结果可知: 当这 2 种织物发生淤堵时, 前者的 $k_{(ge)}$ 明显高于后者, 并且如图 5(g)所示, 而后的水力坡降比(HGR)增幅大于前者。土工织物若以 PP 为原料, 相较于 PET 为原料时的强度更高、耐酸腐蚀性、耐磨性和耐低温性更优、芯吸效应更显著、透水性更强、比重更轻、相同质量时的纤维更多^[43]。因此, PP-C-400 的综合性能优于 PET-C-400。

(2) 关于加固与成网方法: 对比本文选取的 PET-D-400 和 PET-C-400 两种土工织物, 这两者分别采用了短丝和长丝工艺, 前者相较于后者的纤维密度更大、厚度更小、孔隙率更大。此外, 前者因其纤维更短致使其孔径分布更不均匀, 其纤维之间更易发生接触和摩擦而使其表面更为粗糙, 故由表 4 可知, 前者较后者更易于吸附细粒、形成“滤饼”、产生闭塞。当水力坡降较大且使用时间较长时, 前者的渗透稳定性会受到更为显著的不良影响, 故而远不如后者^[43]。相比之下, 长丝土工织物使用寿命长, 适用于对于土工织物性能要求严格且维护周期长的工程。

(3) 关于单位面积质量, 对比本文所选取的 PP-C-400 和 PP-C-200 两种土工织物, 由表 4 可知, 虽然 2 种土工织物与细-3 号土、细-15 号土和细-60 号土的试验结果均为性能有效, 但实际效果却差异显著。采用后者在与细粒含量较多的细-60 号土和内部不稳定的粗-70 号土开展试验后, 其 HGR 稳定值和细粒冲刷流失量均明显高于前者, 这与本文判别方法计算的 $p_{(ir)}$ 也相符合。可见, 试验结果与本文判别方法均表明: 土工织物的单位面积质量越大, 则其滤土性能越强、淤堵程度越小。究其原因在于: 土工织物的密度和厚度随其单位面积质量增大均呈递增趋势, 从而使细粒穿过土工织物时被保留的概率显著增大, 既减小冲刷流失量, 也不积聚在其表面。此外, 土工织物因其厚度增加而使其所能容纳的土粒含量显著增多, 降低了对其透水性能的影响。

综合本文方法的判别与试验结果, PP-C-400 号土工织物在所比选的 10 种织物中, 渗透稳定性最优、耐久性最强, 不仅能协同发挥其滤土和透水效能, 将其淤堵程度控制在工程实际可接受的范围内, 而且增大其单位面积质量能够提升其性能。可见, 聚丙烯纤维长丝土工织物在高水力坡降、长服役周期等复杂水环境中能够有效提升工程的整体性能、延长其使用寿命。因此, 在对反滤料性能要求严格且服役周期长的复杂工程中, 建议优先选取单位面积质量较大的这类土工织物。

7 结 论

土工织物已广泛应用于反滤料设计中, 然而, 在判别土工织物的渗透稳定性能时, 如何同时满足其滤土和透水性能及其淤堵程度的要求, 亟待深入

研究。为此, 本文以水-土相互作用理论为基础, 采用土工织物的物性试验、土柱的渗透试验、概率统计分析等手段开展研究, 主要得出以下结论:

(1) 通过土工织物的物性试验选取了 4 种典型的无纺土工织物为研究对象, 进而在常水头条件下开展了 16 组含土工织物土柱的水力坡降比试验, 通过测算其渗透系数、平衡时的水力坡降比和细粒冲刷流失量, 从试验角度判定其渗透稳定性能。

(2) 以被保护土的粒径和土工织物的孔径为随机变量, 提出了基于失效概率 $p_{(ir)}$ 的土工织物滤土性能判别方法, 进而依据现有文献和本文试验评估的 85 组含土工织物土柱数据划分了滤土性能界限, 结果表明: $p_{(ir)}$ 应小于 0.75, 方可保证细粒冲刷流失量超过 $2\ 500\ \text{g/m}^2$ 的潜蚀不会发生。

(3) 当土工织物表面形成桥接结构时, 采用其内部出现淤堵后的渗透系数比值 $k_{(gc)}/k_{(s)}$ 判定其透水性能及其局部淤堵程度, 结果发现: 若被保护土-土工织物系统的 $k_{(gc)}/k_{(s)} > 1$, 则可认为该系统很难出现堵塞和闭塞; 当 $p_{(ir)} < 0.05$ 时, 该系统可能发生闭塞, 此时的透水性能需满足 $k_{(gt)}/k_{(s)} \geq i_{(s)}$ 的要求。

(4) 将 $p_{(ir)}$ 和 $k_{(gc)}/k_{(s)}$ 相结合的土工织物性能判别方法应用于反滤料设计中, 结果表明: 本文方法对性能有效和堵塞或闭塞型失效的划分准确度优于现有方法, 在设计时建议选取单位面积质量较大的聚丙烯纤维长丝土工织物作为反滤料。

参考文献(References):

- [1] LIU Y J, YIN Z Y, YANG J. Micromechanical analysis of suffusion in gap-graded granular soils considering soil heterogeneity and non-uniform seepage flow[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 159: (Suppl. C): 1 - 19.
- [2] HOLTZ R D, CHRISTOPHER B R, BERG R R. Geosynthetic design and construction guidelines-participant notebook[M]. Arlington: Federal Highway Administration, 1998: 31 - 44.
- [3] PALMEIRA E M, SOUZA M V, SANTOS D S, et al. Study on the hydraulic properties of internally unstable soil-nonwoven geotextile systems: boundary values and preliminary estimates[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2025, 53(2): 588 - 606.
- [4] AYDILEK A H. Filters and drains[C]// SHUKLA S K. Handbook of Geosynthetic Engineering: Geosynthetics and Their Applications. London: ICE Publishing, 2012: 67 - 87.
- [5] ASTM. Standard test methods for determining apparent opening size of a Geotextile: ASTM D4751 - 20[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

- [6] LAFLEUR J. Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1999, 17(5/6): 299 - 312.
- [7] AYDILEK A H, OGUZ S H, EDIL T B. Constriction size of geotextile filters[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(1): 28 - 38.
- [8] FANNIN R, VAID Y, SHI Y. Filtration behaviour of nonwoven geotextiles[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4): 555 - 563.
- [9] GIROUD J P. Development of criteria for geotextile and granular filters[C]// *The 9th International Conference on Geosynthetics*. Guarujá, Brazil: [s. n.], 2010: 4 564.
- [10] BHATIA S K, HUANG Q. Geotextile filters for internally stable/unstable soils[J]. *Geosynthetics International*, 1995, 2(3): 537 - 565.
- [11] Canadian Geotechnical Society Staff. *Geosynthetics[C]// Canadian Foundation Engineering Manual*. Vancouver: BiTech, 2006: 351 - 352.
- [12] CHRISTOPHER B R, HOLTZ R D. *Geotextile engineering manual report No. FHWATS - 86/203[R]*. Washington: US Federal Highway Administration C, 1985.
- [13] LOUDIERE D, FAYOUX D, HOUIS J, et al. L'utilisation des geotextiles dans les barrages enterre[C]// *Proceedings of 14th International Congress on Large Dams Rio de Janeiro Brazil*. Paris: International Commission on Large Dams, 1982: 935 - 962.
- [14] GIROUD J P. Granular filters and geotextile filters[C]// *Proceedings of Geofilters'96*. Tokyo: CiNii Research, 1996: 565 - 680.
- [15] PALMEIRA E, GARDONI M. The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems[J]. *Geosynthetics International*, 2000, 7(4/6): 403 - 431.
- [16] PALMEIRA E M. A review on some factors influencing the behaviour of nonwoven geotextile filters[J]. *Soils and Rocks*, 2020, 43(3): 351 - 368.
- [17] NISHIGATA T, FANNIN R J, VAID Y P. Blinding and clogging of a nonwoven geotextile[J]. *Soils and Foundations*, 2000, 40(4): 121 - 127.
- [18] ASTM. *ASTM D5101-12 Standard test method for measuring the filtration compatibility of soil-geotextile systems[S]*. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [19] KIM K H, PARK N H, KIM H J, et al. Modelling of hydraulic deterioration of geotextile filter in tunnel drainage system[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(2): 210 - 219.
- [20] WU S L, CHEN Y L, ZHU Y Y, et al. Study on filtration process of geotextile with LBM-DEM-DLVO coupling method[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(1): 166 - 179.
- [21] IBRAHIM A, MEGUID M A. CFD-DEM modeling of geotextile clogging in tunnel drainage systems[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, 50(5): 932 - 945.
- [22] FATEMA N, BHATIA S K. Comparisons between geotextile pore sizes obtained from capillary flow and dry sieving tests[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2020, 43(4): 853 - 876.
- [23] CAZZUFFI D, IELO D, MANDAGLIO M C, et al. Recent developments in the design of geotextile filters[C]// *Proceedings of the 2nd International GSI—Asia Geosynthetics Conference*. Seoul: [s. n.], 2015: 1 - 12.
- [24] MISZKOWSKA A, KODA E, KRZYWOSZ Z. Effect of the number of constrictions on the filtration behaviour of a soil-geotextile system[J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2020, 28(1): 87 - 92.
- [25] MARKIEWICZ A, KIRAGA M, KODA E. Influence of physical clogging on filtration performance of soil-geotextile interaction[J]. *Geosynthetics International*, 2022, 29(4): 356 - 368.
- [26] MORACI N, MANDAGLIO M, BILARDI S. Soil/geotextile filter compatibility: a geometrical, experimental and micro-structural approach[J]. *Geosynthetics International*, 2023, 30(1): 29 - 46.
- [27] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 1 - 10.(MAO Changxi. *Seepage calculation, analysis and control[M]*. 2nd ed. Beijing: China Water and Power Press, 2003: 1 - 10.(in Chinese))
- [28] 张 昭. 水土作用机理的细-宏观多尺度研究[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 131 - 148.(ZHANG Zhao. *Fine-macro multi-scale research on the mechanism of soil and water action[M]*. Beijing: Science Press, 2021: 131 - 148.(in Chinese))
- [29] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. *GB/T 50145—2007 Engineering classification standard for soil[S]*. Beijing: China Planning Press, 2007.(in Chinese))
- [30] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. *GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical test methods[S]*. Beijing: China Planning Press, 2019.(in Chinese))
- [31] 张 钊. 基于水-土相互作用理论的粗粒土-反滤料系统渗透侵蚀机理及其滤土-排水性能评估方法[硕士学位论文][D]. 西安: 西安理工大学, 2024.(ZHANG Zhao. *Mechanisms of seepage erosion of coarse grained soil-filter system and its performance evaluation based on the theory of interactions between water and soil[M. S. Thesis][D]*. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.(in Chinese))
- [32] SKEMPTON A, BROGAN J. Experiments on piping in sandy gravels[J]. *Geotechnique*, 1994, 44(3): 449 - 460.
- [33] KENNEY T C, LAU D. Internal stability of granular filters[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, 22(2): 215 - 225.
- [34] KEZDI A. *Increase of protective capacity of flood control dikes[R]*. Budapest: Technical University, 1969.
- [35] SHERARD J L. Sinkholes in dams of coarse broadly graded soils[C]// *Proceedings of the 13th Congress on large Dams*. Paris: ICOLD, 1979: 25 - 35.
- [36] KOERNER R. *Geotextiles: from design to applications[M]*.

- Cambridge: Woodhead Publishing, 2016: 3 - 12.
- [37] WIEWEL B V, LAMOREE M. Geotextile composition, application and ecotoxicology—a review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 317: 640 - 655.
- [38] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 17634—2019 土工布及其有关产品有效孔径的测定——湿筛法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 17634—2019 Determination of effective pore size of geotextiles and related products-wet sieve method[S]. Beijing: China Standards Press, 2019.(in Chinese))
- [39] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 15789—2016 土工布及其有关产品无负荷时垂直渗透特性的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 15789—2016 Determination of vertical permeability characteristics of geotextiles and related products without load[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.(in Chinese))
- [40] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 30019—2013 碳纤维密度的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 30019—2013 Determination of carbon fiber density[S]. Beijing: China Standards Press, 2013.(in Chinese))
- [41] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 29762—2013 碳纤维纤维直径和横截面积的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 29762—2013 Determination of carbon fiber diameter and cross-sectional area[S]. Beijing: China Standards Press, 2013.(in Chinese))
- [42] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 13761.1—2022 土工合成材料规定压力下厚度的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 13761.1—2022 Geosynthetics-determination of thickness at specified pressures[S]. Beijing: China Standards Press, 2022.(in Chinese))
- [43] 赵俊豪, 封 严, 李洪振, 等. 聚丙烯非织造土工布研究进展及应用[J]. *化工新型材料*, 2024, 52(10): 248 - 252.(ZHAO Junhao, FENG Yan, LI Hongzhen, et al. Research progress and application of polypropylene nonwoven geotextile[J]. *New Types of Chemical Materials*, 2024, 52(10): 248 - 252.(in Chinese))
- [44] WANG Y, DALLO Y A. On estimation of the constriction size distribution curve for cohesionless soils[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2014, 18(6): 683 - 698.
- [45] 张 昭, 张 钊, 马 浩, 等. 协同发挥滤土和排水减压效能的粗粒反滤料渗透稳定性判别方法[J]. *土木工程学报*, 2025, <https://doi.org/10.15951/j.tmgxcb.24110914>.(ZHANG Zhao, ZHANG Zhao, MA Hao, et al. Assessment approaches to exploit coordinately the performances of retention and hydraulic conductivity for seepage stability of coarse-grained filters[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2025, <https://doi.org/10.15951/j.tmgxcb.24110914>.(in Chinese))
- [46] CAZZUFFI D, IELO D, MANDAGLIO M C, et al. Recent developments in the design of geotextile filters[C]// *Proceedings of the 2nd International GSI—Asia Geosynthetics Conference*. Seoul: [s. n.], 2015: 1 - 12.
- [47] AYDILEK A H, D'HONDT D, HOLTZ R D. Comparative evaluation of geotextile pore sizes using bubble point test and image analysis[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2007, 30(3): 173 - 181.
- [48] GARDONI M G, PALMEIRA E M. Microstructure and pore characteristics of synthetic filters under confinement[J]. *Geotechnique*, 2002, 52(6): 405 - 418.
- [49] PALMEIRA E M, TREJOS GALVIS H L. Opening sizes and filtration behaviour of nonwoven geotextiles under confined and partial clogging conditions[J]. *Geosynthetics International*, 2017, 24(2): 125 - 138.
- [50] FATEMA N, BHATIA S K. Comparisons between geotextile pore sizes obtained from capillary flow and dry sieving tests[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2020, 43(4): 853 - 876.
- [51] GIROUD J. Quantification of geosynthetic behavior[J]. *Geosynthetics International*, 2005, 12(1): 2 - 27.
- [52] ÅBERG B. Void ratio of noncohesive soils and similar materials[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 118(9): 1 315 - 1 334.
- [53] 祝良玉. 表征水在均质土中流动特性的理论模型与试验研究[硕士学位论文][D]. 西安: 西安理工大学, 2023.(ZHU Liangyu. Theoretical and experimental modelling water flow behavior in homogeneous soil[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.(in Chinese))
- [54] HONG Y S, WU C S. Filtration behaviour of soil-nonwoven geotextile combinations subjected to various loads[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29(2): 102 - 115.
- [55] KHAN M, DAWSON A, MARSHALL A. A dynamic gradient ratio test apparatus[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46(6): 782 - 789.
- [56] PHOON K K. Reliability-based design in geotechnical engineering: computations and applications[M]. London: Taylor and Francis, 2008: 76 - 133.
- [57] QIN S, GUO C Y, WU J W, et al. The effect of physical-chemical combined clogging on the area density and permeability of geotextile envelopes for subsurface drainage systems in arid regions[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2025, 53(6): 1 332 - 1 342.
- [58] GEYCOECHEA J, MONTORO M A, GLATSTEIN D A, et al. Biological clogging of geotextiles under discontinuous fermentation scenario[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2025, 53(1): 188 - 202.
- [59] SATHISHKUMAR G K, IBRAHIM M, MOHAMED AKHEEL M, et al. Synthesis and mechanical properties of natural fiber reinforced epoxy/polyester/polypropylene composites: a review[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2022, 19(13): 3 718 - 3 741.