

江苏沿海滩涂地区 暗管排水土工布外包滤料的试验研究

王嘉诚¹, 罗 纨¹, 张大伟², 贾忠华¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225000; 2. 扬州市农业农村局, 江苏 扬州 225000)

摘要:暗管排水治理盐渍化问题是利用江苏省丰富沿海滩涂资源的有效途径,但由于土壤渗透性低、结构较差,暗管存在较大的淤堵风险,亟须筛选适合当地土质的土工布合成外包滤料。研究选取4种土工布外包滤料进行水力渗透试验,分析比较在2种土壤中的透水、反滤与防淤堵性能。结果显示,试验进行至70 d时,8组处理均达到稳定,渗透性能良好,土壤流失量均不超过1 g,淤堵率在6%~20%之间。4种土工布在砂粒含量较高的土壤A中能更快达到稳定,所形成的天然反滤层结构更佳,土工布SF44各性能表现均为更优。研究成果可为江苏省沿海滩涂地区暗管排水土工布外包滤料的选择提供理论支撑和技术参考。

关键词:暗管排水; 沿海滩涂; 土工布; 反滤层

中图分类号:TV138

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2024)09-0058-0006

Experimental study on geotextile wrapped filter material for concealed pipe drainage in coastal mudflat area of Jiangsu Province

WANG Jiacheng¹, LUO Wan¹, ZHANG Dawei², JIA Zhonghua¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China;

2. Yangzhou Agricultural and Rural Bureau, Yangzhou 225000, China)

Abstract: It is an effective way to treat the salinization problem by using the rich coastal mudflat resources in Jiangsu Province. However, due to the low permeability and poor structure of the soil, there is a great risk of silting in the concealed pipe, it is urgent to select the synthetic geotextile filter material suitable for the local soil. In this study, four kinds of geotextile filter materials were selected for hydraulic permeability test, and the performance of water permeability, reverse filtration and anti-silting in two kinds of soil was analyzed and compared. The results showed that after 70 days of experiment, all the 8 groups were stable, the permeability was good, the soil loss was less than 1 gram, and the siltation rate was between 6% and 20%. The four geotextiles can reach stability faster in soil A with higher sand content, and the natural inverted filter structure formed is better, and the performance of geotextile SF44 is better. The research results can provide theoretical support and technical reference for the selection of geotextile filter materials for underground drainage in coastal mudflat areas of Jiangsu Province.

Key words: concealed pipe drainage; coastal mudflat; geotextile; inverted filter

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52379050, 51979239)

作者简介: 王嘉诚(1999—),男,硕士研究生,主要从事农业水资源与环境保护研究。E-mail:jcwang952@163.com

通信作者: 罗纨(1967—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水资源管理与环境保护研究。E-mail:luowan@yzu.edu.cn

江苏省是中国沿海滩涂土地资源最为丰富的地区之一,沿海滩涂作为中国重要耕地后备资源,扮演着提供社会保障和承担地区经济发展的重要角色。条子泥围垦区位于东台市弶港镇东部,雨量集中,年平均降水量 1 061.2 mm,蒸发量约 882.8 mm。当地的海岸滩涂土壤普遍存在含盐量高、结构松散、土壤渗透性差等问题^[1]。围垦区域地下水位较高,用作耕地时降水较多需要及时排水。农田暗管排水技术具有改良土壤盐碱化^[2]、避免边坡坍塌与土壤侵蚀、不占用耕地等优点,因此该技术在沿海滩涂地区逐步得到发展。1959 年塑料暗管排水技术在荷兰首次采用,我国从 20 世纪 80 年代陆续开展暗管技术的试验示范工作,PVC 材质波纹暗管开始批量上市,暗管排水技术的应用面积大幅提高^[3]。

但江苏沿海滩涂土壤以粉砂淤泥质为主,粉细砂含量高、结构较差,土壤颗粒流失将对排水暗管造成淤堵。砂石滤料具备较强的适应性与稳定性,但许多地区受限于砂石材料的获取,逐渐将目光转向人工合成材料土工布,具备质轻运输成本低、施工方便、强度高等优点。土工布作为导水体充分发挥其作为反滤的重要作用被广泛应用,能够有效防止土颗粒流失,并允许土壤水透过织物自由排除^[4]。早在 1981 年 Dürst 等^[5]设计了测试外包材料水力特性的仪器(渗透仪),并提出了一些关键的指标参数。Stuyt 等^[6]专门针对地下排水系统材料,介绍了排水管及外包滤料的特性和适用性,提出了实验室和现场调查的实用指南。刘文龙等^[7]进行室内

试验对比两种土工布在黄河三角洲粉细砂土中的性能表现,提出了当地暗管排水外包滤料的选择建议。荣臻等^[8]以宁夏银北灌区土壤为例,基于室内土柱实验,筛选出适合该地区土壤特性的土工布。但针对沿海滩涂垦区暗管排水的外包滤料选取研究较少,现有的土工布选取经验适用性有待考证。

本文为筛选出适合沿海滩涂地区暗管排水外包滤料的土工布,选用 2 种具有代表性的滩涂土壤,4 种广泛投入各领域应用的不同厚度、孔径的土工布,交叉组合进行室内土柱试验,分别对它们的水力性能、反滤性和抗淤堵进行比较分析,以期为实际应用提供参考。

1 试验材料、仪器及方法

1.1 试验材料

2 种供试土壤取自江苏东台条子泥围垦区(120°53'E, 32°51'N),取地表以下 0.8~1.0 m 处,风干、研磨后使用 MS3000 激光粒度仪测定土壤粒径,土壤粒径分析结果如表 1 所示。根据美国农业部土壤质地分类标准,土壤 A 为砂质壤土,土壤 B 为黏砂壤土。土壤颗粒组成是外包滤料土工布选取的重要依据,Stuyt 等^[6]研究表明,当黏粒与粉粒含量之比大于 0.5 时,排水暗管不易被堵塞。土壤 A 与 B 的黏粉比分别为 0.05 与 0.04,均远小于 0.5;土壤 A 与 B 的不均匀系数 C_u 分别为 4.4 和 3.0,均小于对暗管稳定有利的值($C_u \geq 5$),土壤级配较差。这说明排水暗管在这 2 种土壤中使用受淤堵风险大。

表 1 土壤粒径分布

土壤类型	黏粒含量/%	粉粒含量/%	砂粒含量/%	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{60}/\mu\text{m}$	$d_{90}/\mu\text{m}$
土壤 A	2.26	47.22	50.52	15.5	68.2	125.0
土壤 B	2.10	50.44	47.46	21.0	63.3	97.0

排水暗管外包滤料的筛选原则为渗透性强、反滤性好且不产生淤堵。土工布外包滤料选择的主要控制因素为 O_{90}/d_{90} 、渗透系数 K 和厚度。其中, O_{90} 是外包滤料中 90% 的孔径都小于该值的开孔直径, d_{90} 是土壤颗粒中 90% 的土粒都小于该值的土壤颗粒粒径,建议 $2.5 \geq O_{90}/d_{90} \geq 1.0$,并且 O_{90}/d_{90} 的数值尽量接近可选择范围的上限。Nieuwenhuis 等^[9]建议外包材料的选择应符合 $K_f/K_s \geq 10$ (K_f 为土工布外包材料的渗透系数, m/d ; K_s 为被保护土壤的渗透系数, m/d)。本试验土壤 A 渗透系数为 0.14 m/d ,土壤 B 渗透系数为 0.26 m/d 。据此本试验选取了由美国杜邦

公司发明的 4 种进口热熔纺黏丝无纺土工布,其中 SF44 的 O_{90} 略小于土壤 A 的 d_{90} ,其他的孔径大小与渗透系数均能满足筛选要求,土工布具体参数如表 2 所示。

1.2 土工布渗透试验

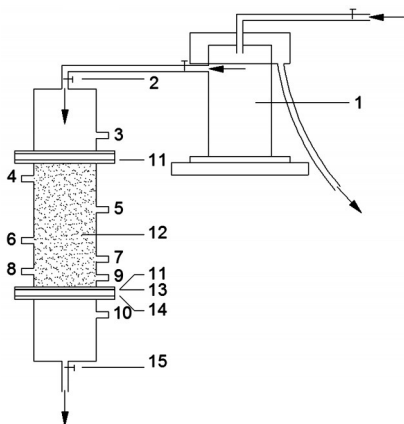
1.2.1 试验装置

为了探究 4 种土工布与 2 种土壤的配合使用时的水力性能、反滤性能以及防淤堵性能,2 类土壤与 4 种土工布交叉组合,设置 8 组试验进行。本试验装置为自制水力渗透仪,结构如图 1 所示。内径为 10 cm,高为 20 cm 的有机玻璃圆筒内放置土样,

表2 待测土工布参数

性能	克重/ (g/m ²)	厚度(在2 kN/m ² 压力下)/mm	孔径 O ₉₀ (湿)/μm	渗透系数/ (10 ⁻⁴ m/s)
SF20	68	0.35	227	4.4
SF27	90	0.38	180	3.6
SF32	110	0.41	140	3.0
SF44	136	0.45	120	2.2

上下分别有 10 cm 高圆筒与中部结构利用法兰相连,用于过水和排砂,以及保证水流稳定。利用马氏瓶提供常水头脱气水流,箭头为水流方向。试验开始前,将待测土工布放置并铺满在支撑网格上;分层装填供试土壤,装填完成后,自下而上缓慢加入由马氏瓶提供的常水头脱气水,直至土柱达到饱和;最后改为自上而下注水,待排水装置稳定后开始试验。渗透仪装有 8 个不同高度的测压管,分别距离土工布 1.5 cm、2.5 cm、4.5 cm、7.5 cm、12.5 cm 与 17.5 cm,用于读取土柱部分测压管水头,计算各部分的渗透系数。



1. 马氏瓶; 2. 进水阀; 3-10. 测压管; 11. 密封橡胶圈; 12. 供试土壤; 13. 待测土工布; 14. 支撑网格; 15. 出水阀

图1 渗透仪结构示意图

1.2.2 数据收集与分析

试验日期为2021年11月9日至2022年1月17日,历时 70 d。试验初期,记录时间间隔为 12 h,包括测压管水头和排水流量。试验数据相对稳定以后,测量时间间隔改为 24 h,直至渗透系数稳定试验结束。根据达西定律,渗透系数 K_s 利用下式计算:

$$K_s = \frac{QL}{(H_{in} - H_{out})A} \quad (1)$$

式中: K_s 为渗透系数, cm/s; Q 为透过土柱的流量, cm³/s; L 为流径, cm; H_{in} 为入流的测压管读数, cm;

H_{out} 为出流的测压管读数, cm; A 为土柱的截面积, cm²。

利用测压管 2、10, 可以计算土壤与土工布为整体的渗透系数; 测压管 9、10 可计算土工布部分(土工布+1.5 cm 的土壤)的渗透系数; 测压管 5、7 可计算土壤的渗透系数。拆除试验仪器后, 收集通过孔隙到达土工布下侧的土壤, 风干并称重, 得到各组土壤流失量, 并对土工布上侧表层土壤进行颗粒分析, 用作反滤指标。取出试验后的土工布, 测出其土壤淤堵量与淤堵率。

2 结果与讨论

2.1 渗透性分析

2.1.1 整体渗透性分析

整体渗透系数 K 是综合反映渗透能力的关键指标, 图 2 显示 2 种土壤类型的变化情况。8 组试验处理的整体渗透系数均是先上升后下降, 衰减速度不断变缓, 最后趋于稳定。图 2(a) 中, A-SF20~A-SF44 的渗透系数峰值均出现在试验开始后 13 d, 49 d 后 4 组处理相较于峰值分别下降了 0.116 m/d、0.125 m/d、0.125 m/d、0.146 m/d, 衰减率分别为 44.2%、50.0%、46.5%、46.1%。在 4 组处理中, 稳定渗透系数最大是 A-SF44, 为 0.171 m/d。图 2(b) 中, 土壤 B 的 4 组处理峰值出现在试验开始后 10 d, 52 d 后趋于稳定, 4 组处理相较于峰值分别下降了 0.193 m/d、0.205 m/d、0.218 m/d、0.313 m/d, 衰减率分别为 48.9%、50.7%、52.1%、57.1%。B-SF44 同样是整体稳定渗透系数最大的, 为 0.235 m/d。SF44 型号土工布在 2 种土壤中水力性能均表现最好。

2.1.2 局部渗透性分析

为深入了解土工布对渗透性的影响, 将土工布部分与土壤的渗透系数进行比较分析, 结果见图 3。如图 3 所示, 土工布部分渗透系数与土壤渗透系数差异较大, 试验开始后 20 d 内, 土工布部分渗透系数波动较大, 土壤 A 的 4 种处理土工布部分渗透系数都高于土壤; 而对于土壤 B 的 4 组处理, 土工布部分渗透系数在试验开始 30 d 内波动较大, 此时土壤渗透系数稍高于土工布部分, 与土壤 A 呈现相反趋势。

为量化土工布与土壤对整体系统的影响程度, 将每个处理中土工布部分与土壤的渗透系数作为自变量, 整体系统的渗透系数作为因变量, 进行多元线性回归分析。分析结果如表 3 所示, 对于该 8 组试验, t 检验中回归系数 P 值均远小于 0.01, 决定系

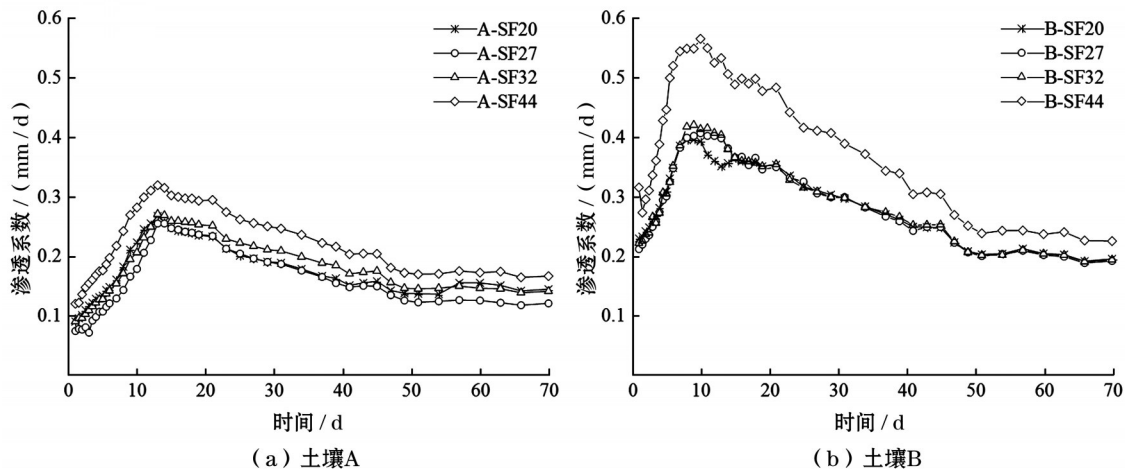


图2 试验组渗透系数变化

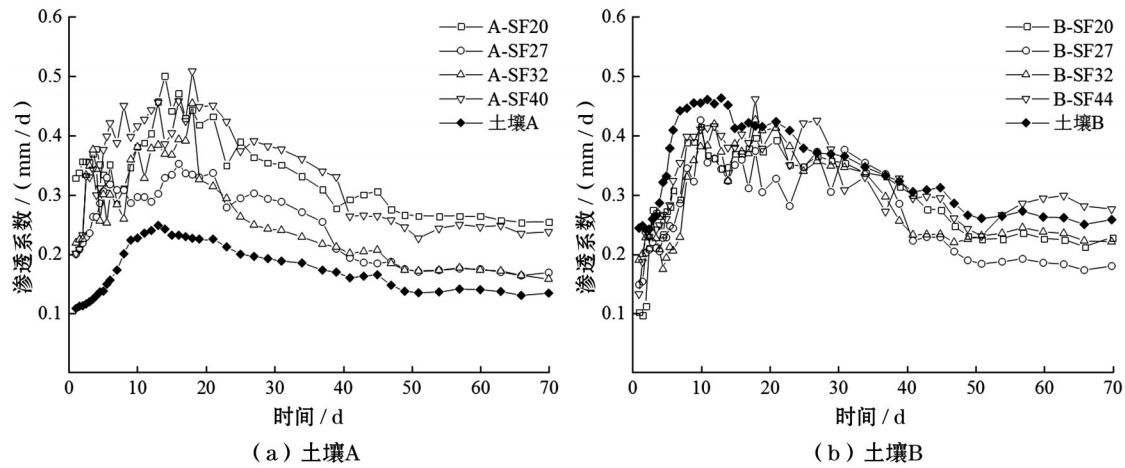


图3 土工布部分与土壤渗透系数变化

数 R^2 均达到0.8以上,说明土工布和土壤的渗透系数与整体系统的渗透系数有显著相关关系。土壤的标准化系数 $BeTa$ 较土工布更大,说明土壤对整体系统渗透系数的影响程度较大,土工布影响较小,与刘文龙等^[7]试验结果一致。

然而,4种土工布在土壤A与土壤B中的表现存在差异,在表3中A-SF的4组处理土工布部分的标准化系数 $BeTa$ 大于B-SF的4组处理,说明其土工布部分对整体系统的渗透系数正贡献度更大,提高了整体系统的水力性能。相反,B-SF的4组处理土

表3 多元回归分析结果

试验组别	回归方程	方差检验 F	决定系数 R^2	土壤(X_1)		土工布(X_2)	
				标准化系数 $BeTa$	t 值	标准化系数 $BeTa$	t 值
A-SF20	$Y=-0.008+0.820X_1+0.157X_2$	292.700**	0.930**	0.831	16.827**	0.205	4.158**
A-SF27	$Y=-0.037+0.791X_1+0.334X_2$	628.639**	0.966**	0.802	27.284**	0.052	12.383**
A-SF32	$Y=-0.061+1.728X_1+0.227X_2$	755.287**	0.972**	0.856	32.919**	0.337	12.965**
A-SF44	$Y=0.013+0.722X_1+0.213X_2$	992.363**	0.978**	0.750	23.749**	0.304	9.630**
B-SF20	$Y=0.005+0.893X_1+0.031X_2$	119.477**	0.843**	0.890	8.035**	0.038	0.341**
B-SF27	$Y=-0.003+0.797X_1+0.113X_2$	203.330**	0.902**	0.850	9.673**	0.119	1.355**
B-SF32	$Y=-0.027+0.968X_1-0.037X_2$	292.250**	0.930**	0.995	16.447**	-0.039	-0.648**
B-SF44	$Y=-0.008+1.272X_1-0.308X_2$	183.616**	0.892**	1.114	12.282**	-0.207	-2.278**

注:** $P<0.01$; X_1 和 X_2 分别为土壤和土工布部分的渗透系数, m/d; Y 为整体系统的渗透系数, m/d。

土工布部分对整体系统的水力性能提升较弱。土工布部分对整体系统的影响来源于土工布与其表层土壤形成的稳定结构。本试验最终得到了稳定的渗透系数,说明8组试验均形成稳定的水流结构,即土工布附近只有细小的土壤颗粒被冲走,就会留下一个较粗的土壤骨架,在排水管或围护结构的开口上架起桥梁,一段时间后,土工布附近的土壤会形成高渗透性的天然反滤层^[6],具有更强的水力传导能力。从标准化系数 $BeTa$ 得到土壤 A 的 4 组处理形成的此种反滤层结构要优于土壤 B 的 4 组处理,土壤 A 建立平衡系统时形成了渗透性更好的天然反滤层。

2.2 保土效果分析

2.2.1 保土性能

保土性能是反映土工布效果的重要指标,将土工布作为暗管排水外包滤料时,既要具有良好的过水性能,及时将农田多余水分排出,同时又要尽量减少土壤颗粒通过土工布孔隙进入暗管。表 4 中,对于同一种土壤,随着土工布厚度的增加,有效孔径的减小,土壤颗粒的流失量减小。土壤 A 的 4 个处理土壤流失量稍低于土壤 B,8 组试验土壤流失量均不到 1 g。排水系统应尽快在土壤-土工织物界面处建立平衡条件,防止土壤颗粒在不确定的时间

内通过土工合成材料输送。即天然反滤层建立得越快,迁移的颗粒数量就越少,土壤 A 的 4 组试验渗透系数早于土壤 B 达到稳定,同时土壤流失量也较小。整体来看 4 种土工布的保土性能均满足要求,其中孔径最小的 SF44 型号土工布在 2 种土壤中保土性能均表现最好。前人也通过大量试验验证,土工布越厚,有效孔径越小,拦截土壤颗粒的能力越强^[8,10]。

2.2.2 土工布表层土壤质地变化

将 8 组试验土工布表层土壤取出后进行颗粒分析,如图 4 所示。8 组处理中,粒径较小的黏粒其含量占比均降低至不到 1%。对于土壤 A,随着土工布厚度增加,孔径减小,土壤 A 的 4 组处理粉粒含量逐渐下降,砂粒含量不断上升, d_{10} 与 d_{90} 逐渐变大。对于土壤 B,随着土工布型号的变化,粉粒与砂粒含量、 d_{10} 与 d_{90} 均未出现明显的正相关或负相关变化。

当孔隙较大时,部分砂粒可通过土工布孔隙流失。在 A-SF20 中,砂粒比粉粒流失得更多,导致该处理中砂粒含量较低,粉粒含量较高。尽管从流失土壤质量来看,并没有出现大规模的土粒流失,但有益于构建反滤骨架的大颗粒部分流失,与反滤初衷相违背,应该尽量避免。而对于土壤 B 的 4 组处理,表层土壤未发生明显的质地变化,说明土工布对表层土壤的影响会因土壤本身质地的差异而变化,本试验 2 种土壤粉粒与砂粒的含量差异是造成土工布影响土壤差异的重要原因。在土壤 A 的环境下,土工布更易促成其表面土壤形成结构稳定、透水性强的天然反滤层。孔径最小的 SF44 型号土工布在 2 种土壤中均表现出较好的反滤性能。

2.3 土工布抗淤堵能力分析

为探究土工布淤堵情况,试验结束后取出土工

表 4 土壤流失量

土工布 型号	土壤 A		土壤 B	
	O_{90}/d_{90}	土壤流失量/g	O_{90}/d_{90}	土壤流失量/g
SF20	1.82	0.48	2.34	0.58
SF27	1.44	0.42	1.86	0.56
SF32	1.12	0.35	1.44	0.51
SF44	0.96	0.09	1.23	0.12

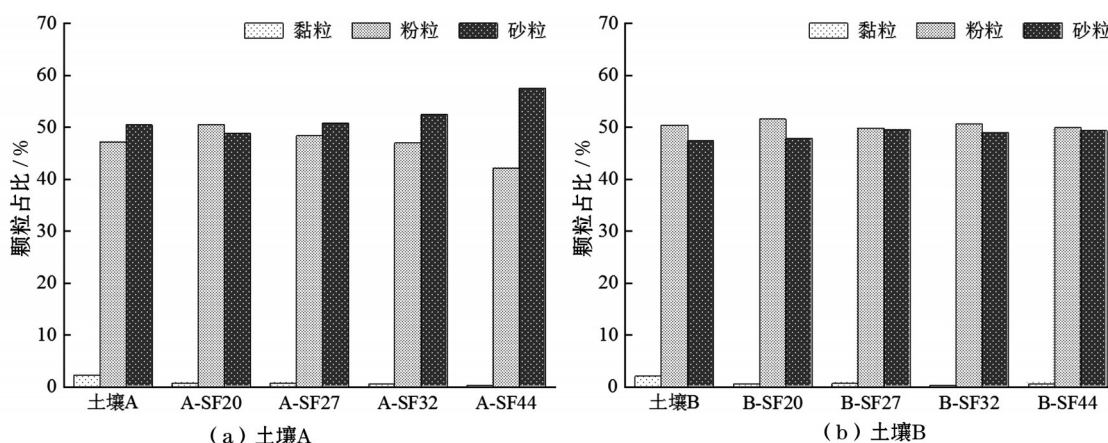


图 4 土工布表层土壤与供试土壤对比

布风干并称重,从而得到淤堵性能指标,如表5所示。8组处理中土工布的淤堵量均不超过1 g,淤堵率在6%~20%之间。鲍子云等^[11]在对暗管外包料应用效果的实地调查中发现,淤堵率在70%~80%的几种土工布依旧保持良好的透水性能,所包裹暗管仍能够满足田间排水需求,初步判断8组试验淤堵率均满足要求。

表5 土工布淤堵情况

试验编号	土工布 初始质量/g	试验后 质量/g	淤堵量/ g	淤堵率/ %
A-SF20	0.65	0.78	0.12	20.00
A-SF27	0.79	0.90	0.14	13.92
A-SF32	1.08	1.17	0.09	8.33
A-SF44	1.48	1.67	0.19	12.84
B-SF20	0.65	0.72	0.07	10.77
B-SF27	0.83	0.91	0.08	9.64
B-SF32	1.05	1.19	0.14	13.33
B-SF44	1.45	1.54	0.09	6.21

为更好地判别土工布内部淤堵形式,取土工布局部结构进行电子显微镜SEM成像观察,放大倍数为100倍,如图5所示。土壤A的4组处理中,显微成像显示土工布内并未出现大量土颗粒淤积的现象,而在土壤B中使用的4种土工布表面及内部均出现了土壤颗粒堆积,减少了有效过水面积,土工布存在些许淤堵情况。

在关于制定土工织物反滤层的渗透准则时,美国陆军工程兵团提出以梯度比 G_R 来进行量化。

$$G_R = i_1/i_2 \quad (2)$$

式中: i_1 为通过试样底部25.4 mm范围的织物和土层的水力坡降; i_2 为在其上且与之相邻的50.8 mm范围的土层的水力坡降。滤层的淤堵程度可用 G_R 是否稳定和大小进行判断,临界值为1.5。对于本试验 i_1 采用土工布表面15 mm范围的织物与土层的水力坡降, i_2 采用土工布上方45~125 mm高度范围内的土层的水力坡降。8组试验得到的 G_R 范围在0.59~1.45,均小于淤堵临界值1.5。综合上述淤堵率、局部显微结构与梯度比 G_R ,认为8组试验排水系统反滤层部分并未表现出明显的淤堵情况。

3 结 论

本研究的2种滩涂土壤经4种土工布处理后,整体渗透系数均呈现先上升后下降并趋于稳定,均符合透水性要求;淤堵量小,淤堵率在6%~20%之间,土工布抗淤堵能力强;土壤流失量均不到1 g,保土效果好。土壤A的整体渗透系数降幅较小且能够更快达到稳定状态。孔径最小、厚度最大的SF44在2种土壤中水力性能处于最高水平,土壤A与SF44配合使用的反滤效果最好,土壤砂粒相对含量由50.52%上升至57.53%,易于形成效果更佳的反滤层。对于试验所选择的2类具有代表性的沿海滩涂土壤,推荐SF44型号土工布作为排水暗管的外包滤料。由于供试土壤经过筛分处理,与田间实际情况存在差异,在将该土工布投入沿海滩涂地区暗管系统使用前,应首先在示范区内进行应用试点。

参考文献:

- [1] 陈诚,罗纨,贾忠华,等.江苏沿海滩涂农田高降渍保证

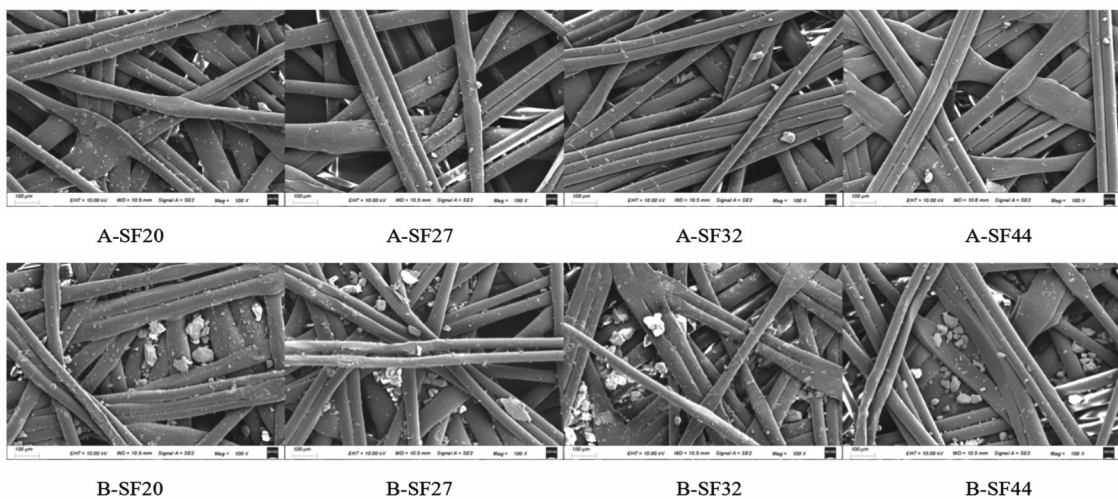


图5 试验后土工布显微图像

(下转第68页)

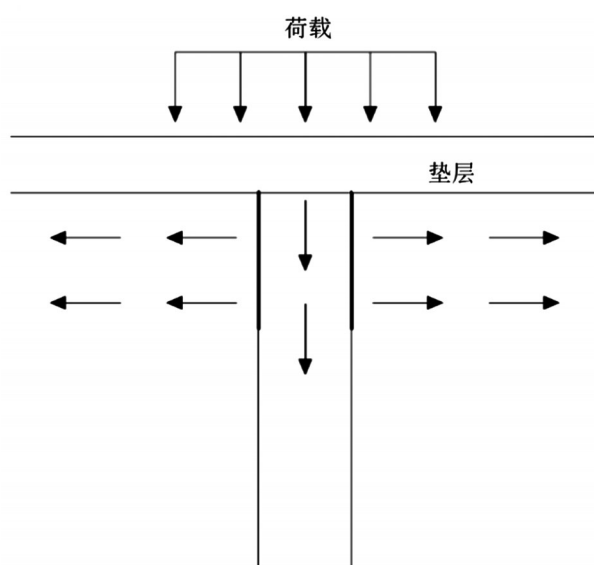


图7 碎石桩荷载传递路径示意

5 结 论

本研究以江苏省某软土地区道路修建工程为研究对象,对采用碎石桩协同水平垫层加固后的软基在道路堆填过程中的响应行为进行了分析,得出以下结论:

(1)采用碎石桩协同水平垫层对软土路基进行加固,加固后的路基极限承载力可达316.85 kPa,较天然地基极限承载力提高了约4倍。

(2)受非均布堆载影响,路堤填筑过程中会产生不均匀沉降,中心处沉降最大,自中心往两侧递

减,加设水平垫层可使最大沉降差降低约15%~17%。

(3)上部荷载作用下,碎石桩桩身会发生鼓胀变形,鼓胀位置受荷载大小、土体强度等因素影响;水平垫层的存在可降低桩身变形16%左右。

参考文献:

- [1] 龚逸,王良民. 基于案例的真空堆载联合预压法对软土路基加固效果分析研究[J]. 土工基础,2023,37(5):703-706,711.
- [2] 王永松. 数值模拟方法在软土路基沉降因素分析中的应用[J]. 土工基础,2020,34(5):580-582.
- [3] 徐红日,杨阳,吴文栋,等. 下卧隧道区段机场软土地基处理方案研究[J]. 科技通报,2022,38(3):85-89.
- [4] 徐昌兴. 滨海电厂深厚软土地基处理及桩基选型[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(S1):279-282.
- [5] 易耀林,刘松玉,朱志铎. 钉形搅拌桩在高速公路软土地基处理中的应用[J]. 常州工学院学报,2008,21(S1):19-22,36.
- [6] 缪婷婷,陈赞,齐金良,等. 异型复合桩在软土地基处理中的应用[J]. 建筑结构,2023,53(S1):2755-2758.
- [7] 严超群,雷叶,张齐. 挤密砂砾桩在公路软土地基处理中的应用[J]. 杨凌职业技术学院学报,2008(3):51-53.
- [8] 赵明华,陈庆,张玲,等. 加筋碎石桩承载力计算[J]. 公路交通科技,2011,28(8):7-12.
- [9] 杨宇. 双向增强体复合地基承载性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2006.
- [10] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [1] 率暗管排水系统布局[J]. 农业工程学报,2017,33(12):122-129.
- [2] 耿其明,闫慧慧,杨金泽,等. 明沟与暗管排水工程对盐碱地开发的土壤改良效果评价[J]. 土壤通报,2019,50(3):617-624.
- [3] 谭攀,王士超,付同刚,等. 我国暗管排水技术发展历史、现状与展望[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(4):633-639.
- [4] 杜春雪,徐超,彭善涛. 土工织物反滤作用研究进展[J]. 长江科学院院报,2022,39(2):108-114.
- [5] DÜST R, BUCHER F, SCHAERER C. Permeameter for investigating the hydraulic characteristics of fleotextiles[J]. Materiaux et Construction. 1981,7(14):319-324.
- [6] STUYT L, DIERICHX W, BELTRAN J M. Materials for subsurface land drainage systems[J]. FAO Irrigation and Drainage Paper,2005,60(1):5-19.
- [7] 刘文龙,罗纨,贾忠华,等. 黄河三角洲暗管排水土工布外包滤料的试验研究[J]. 农业工程学报,2013,29(18):109-116.
- [8] 荣臻,王少丽,郝瑞霞,等. 宁夏银北灌区排水暗管土工布外包料透水与防淤堵性能[J]. 农业工程学报,2021,37(8):68-75.
- [9] NIEUWENHUIS G, WESSELING J. Effect of perforation and filter material on entrance resistance and effective diameter of plastic drain pipes[J]. Agricultural Water Management,1979,2(1):1-9.
- [10] 胡玲玲,杨树青,梁志航,等. 河套灌区下游排水暗管外包料筛选试验研究[J]. 灌溉排水学报,2022,41(4):141-148.
- [11] 鲍子云,全炳伟,张占明. 宁夏引黄灌区暗管排水工程外包料应用效果分析[J]. 灌溉排水学报,2007(5):47-50.

(上接第63页)