

改进暗管排水技术淤堵防护措施试验研究

陶 园^{1,2} 王少丽¹ 许 迪¹ 瞿兴业¹

(1. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048; 2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 基于室内土柱试验,依据太沙基准则,考虑2种反滤体铺设方式、2种土工布类型以及3种土工布铺设位置,模拟改进暗管排水条件下反滤体或土工布的单一防护措施以及反滤体与土工布结合的组防护措施下排水流量的衰减过程,得到不同方案的土工布淤堵量及土壤流失量,提出改进暗管排水条件下反滤体及土工布的合理布局。研究结果表明,依据太沙基准则选择改进暗管排水的砂砾石规格是合理可行的;仅在暗管周围铺设土工布的分层和混合反滤体方案对防护土工布淤堵和土壤流失均有较好效果;综合考虑流量衰减过程、土工布淤堵量和土壤流失量,确保改进暗管排水的长期稳定运行,应优先考虑分层反滤体结合暗管周围铺设合理土工布的方案。

关键词: 改进暗排; 淤堵; 流量衰减; 反滤体; 土工布; 防护措施

中图分类号: S276 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0187-06

Experimental Study of Clogging Defense Measures for Improved Subsurface Drainage

Tao Yuan^{1,2} Wang Shaoli¹ Xu Di¹ Qu Xingye¹

(1. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China

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

Abstract: Clogging is one of the main factors for long-term stable operation of subsurface drainage systems. It also should be paid attention during the application and popularization of subsurface drainage system. The main issues of applying improved subsurface drainage are choosing specifications for filter, preventing clogging, lowering the attenuation of discharge and reducing soil losses. Based on soil column experiment, two filter paving patterns, two kinds of geotextile and three laying locations of the geotextile were considered, the attenuation of discharge process, mass of geotextile clogging and mass of soil losses were simulated under single defense measure of filter or geotextile, and defense measures of filter and geotextile were combined respectively, the reasonable distribution of filter and geotextile for improved subsurface drainage was proposed. The results indicated that Terzaghi criteria was reasonable and feasible for choosing specifications of gravel filter and it had good effect on preventing the attenuation of discharge for layered filter and mixed filter. By setting geotextile around the pipe, both layered and mixed filters worked well on slowing down the attenuation of discharge and clogging and soil losses. Furthermore, from the comprehensive view of attenuation of discharge and clogging and soil losses, considering the long-term safe and stable operation of the improved subsurface drainage, priority should be given to the combined measure of layered filter and geotextile around the pipe.

Key words: improved subsurface drainage; clogging; attenuation of discharge; filter; geotextile; defense measure

收稿日期: 2015-11-18 修回日期: 2016-01-19

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD08B00)、国家自然科学基金项目(51279212)和中国水利水电科学研究院博士学位论文创新研究项目

作者简介: 陶园(1988—),女,博士生,主要从事农业水土资源与环境研究,E-mail: taoyuanss.good@163.com

通信作者: 王少丽(1963—),女,教授级高级工程师,博士,主要从事农业水土环境及农田灌排理论研究,E-mail: shaoliw@iwhr.com

引言

暗管排水作为地下排水的一种方式,其淤堵问题是不容忽视的,也是暗管排水应用推广亟需解决的问题^[1-3]。一旦暗管淤积,其排水效果将越来越差,甚至完全失效,导致农田暗管排水设施形同虚设。常规暗管排水主要通过铺设外包滤料来防止或减缓暗管的淤堵过程^[4]。对于改进暗管排水^[5](以下简称改进暗排)而言,反滤体在增大暗管排水流量的同时,也承担着防止暗管淤堵的功能。常规暗管常用的外包滤料主要包括矿物(以级配砂砾石为主)、有机物及合成材料3种^[6],其中砂砾石外包滤料的使用年限最长,设计准则也相对完善,如太沙基准则、美国土壤保护局准则、美国垦务局准则及谢拉德准则等^[7-8]。改进暗排的砂砾石反滤体规格是否可以按照常规暗管外包滤料的设计准则进行选择,以及如何铺设反滤体或土工布以达到防止暗管淤堵的最佳效果都是值得研究的问题。

本文通过室内土柱试验,分析太沙基准则是否适用于改进暗排反滤体规格的选择,揭示反滤体或

土工布的单一防护措施以及反滤体与土工布结合的组合防护措施下暗管排水流量的变化规律、土工布淤堵以及土壤流失情况,提出相对合理的淤堵防护措施布局,为改进暗排的进一步应用和推广奠定基础,为丰富和发展我国农田排水理论和技术提供科学依据。

1 淤堵防护机理

对于土工布的防护机理,大部分学者认为土工布本身并不会起到挡土的作用,只起到催化剂的作用。在水流作用下,靠近土工布且粒径较小的土壤颗粒被带入土工布并向远离土工布的方向移动,逐渐形成由较粗颗粒组成的架空层。有效的土工布作用下可使架空层上方形成一层天然滤层,进而起到过滤作用(图1a)^[9]。

而反滤体主要利用自身孔隙来限制土壤颗粒的移动。有效的反滤体作用下(图1b),土壤颗粒受到水流的拖拽作用向反滤体方向移动,细颗粒可能进入反滤体,但土壤中较粗的颗粒会被限制,之后这些被限制的粗颗粒会形成更小的孔隙限制更小土壤颗粒的移动,最终形成稳定区^[10]。

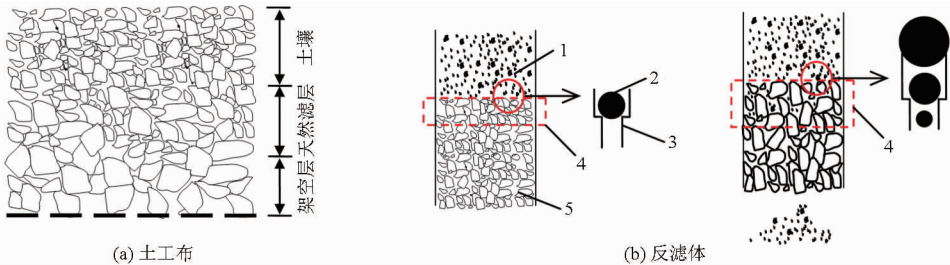


图1 土工布和反滤体防护机理示意图
Fig.1 Sketches of defense mechainism of geotextile and filter
1. 土壤 2. 土壤颗粒 3. 孔隙通道 4. 稳定区 5. 反滤体

2 材料与方法

2.1 土壤颗粒分析及反滤体制备

试验选择山东滨海地区土壤,根据联合国粮食与农业组织提供的粘土(粒径小于2 μm)、壤土(粒径2~50 μm)和砂土(粒径50~2 000 μm)分类^[6],通过土壤粒径分析(图2),得到该土壤的粘粒、粉粒和砂粒含量分别为0.04%、66.84%和33.12%(质量分数),粘粒含量远小于暗管不发生淤堵的临界值20%~30%^[11-14],且该土壤的不均匀系数为3.9,也说明埋设于该土壤的暗管极易发生淤堵^[6],应当采取措施进行防护。

选用太沙基准则作为分层和混合反滤体规格筛选的标准。太沙基准则要求在被保护土颗粒不均匀系数小于5时反滤料的控制粒径应满足 $D_{15} \geq 4d_{15}$

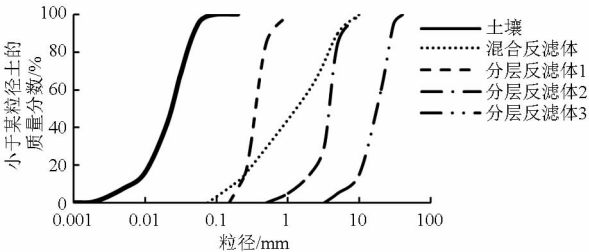


图2 土壤及反滤体级配曲线
Fig.2 Particle size distribution curves of experimental soil and filter

(透水准则)和 $D_{15} \leq 4d_{85}$ (保土准则)条件,其中 D_{15} 表示保护土壤颗粒含量小于15%时的颗粒直径, d_{15} 和 d_{85} 分别表示被保护土壤颗粒含量小于15%和85%时的颗粒直径。分层反滤体设置3层,并设定上层滤料为被保护土,而其下一层滤料作为保护土。综合考虑土壤筛分装置的规格,配制反滤料,绘制分

层和混合反滤体的级配曲线如图 2 所示,图中分层反滤体 1、2、3 分别代表分层反滤体的上层、中间层以及下层。

2.2 试验装置

改进暗排由暗管和反滤体两部分组成。以合理

级配的砂砾石作为反滤体,采用分层或混合的方法由暗管底高程向上铺设,并在反滤体上方回填 30 ~ 40 cm 原土作为耕作层,见图 3a。根据改进暗排的结构特点,参考国内外研究常规暗排外包滤料采用的试验装置^[6,15],设计本试验的装置见图 3b ~ 3d。

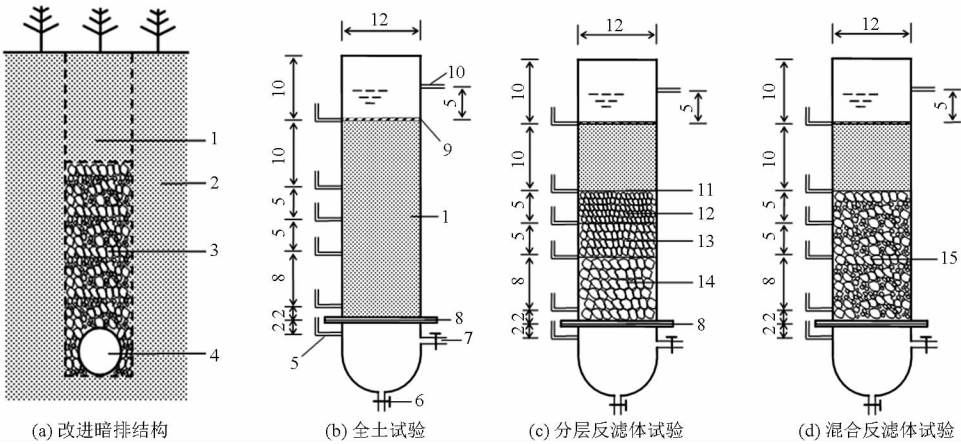


图 3 试验装置结构图(单位:cm)

Fig. 3 Sketches of test equipment (unit:cm)

1. 回填原土 2. 土壤 3. 砂砾石反滤体 4. 暗管 5. 测压管 6. 排砂孔 7. 出水孔 8. 下层土工布 9. 透水板 10. 溢流口 11. 上层土工布 12. 细颗粒反滤体 13. 中颗粒反滤体 14. 粗颗粒反滤体 15. 混合级配的反滤体

试验装置主体结构包括上、下两部分并通过法兰连接。上部为内径 11 cm、外径 12 cm、高 40 cm 的有机玻璃圆筒,用于放置土样及反滤体。下部为底部球形结构的圆柱筒,主要用于排水和排砂。上下结构间用带孔支撑板分隔,上部设置 5 个测压管,分别距离法兰 2、10、15、20、30 cm,下部距离法兰 2 cm 处设置 1 个测压管,用以测量筒内不同位置处的工作水头,紧贴筒壁内侧的测压管口设置滤网以防止土壤流失及淤堵而影响测压管工作。全土方案时铺设土壤高度 30 cm;分层反滤体方案则由下向上铺设 10 cm 厚粗颗粒、5 cm 厚中颗粒、5 cm 厚细颗粒 3 种反滤料,以及 10 cm 厚土壤;混合反滤体方案则铺设 20 cm 混合反滤料并覆盖 10 cm 土壤。上层土工布铺设于土壤与反滤体接触面,下层土工布铺设于法兰处。

2.3 试验设计与观测方法

根据国内波纹塑料管生产厂家提供的资料及以往实践,选取 A(38 g/m²) 和 B(70 g/m²)^[16] 2 种土工布,综合考虑反滤体铺设方式及土工布铺设位置,共进行 17 组试验,试验方案见表 1。

土壤介质分层填装,每次装填高度 5 cm,并控制一定容重;采用从下向上缓慢注水的供水方式使土壤饱和;土壤饱和后,改为自上向下供水,并通过溢流口控制稳定的积水深度,开启出水孔阀门,观测排水流量及测压管读数,每组试验持续 7 d 左右;试验期间每天收集出水孔排出的水体,并通过相同滤

表 1 试验方案			
Tab.1 Test design			
结构	序号	试验方案	土工布铺设位置
无反滤体	1	NN	无土工布
	2	NA	仅下方铺设土工布 A
	3	NB	仅下方铺设土工布 B
分层反滤体	4	LN	无土工布
	5	LAU	仅上方铺设土工布 A
	6	LAD	仅下方铺设土工布 A
	7	LAB	上、下方均铺设土工布 A
	8	LBU	仅上方铺设土工布 B
	9	LBD	仅下方铺设土工布 B
	10	LBB	上、下方均铺设土工布 B
混合反滤体	11	MN	无土工布
	12	MAU	仅上方铺设土工布 A
	13	MAD	仅下方铺设土工布 A
	14	MAB	上、下方均铺设土工布 A
	15	MBU	仅上方铺设土工布 B
	16	MBD	仅下方铺设土工布 B
	17	MBB	上、下方均铺设土工布 B

纸过滤;流量观测结束后,开启排砂孔,收集淤积于装置底部的土壤,并通过相同滤纸过滤,最后称量土工布的淤堵量以及滤纸上的土壤流失量。

3 结果与分析

3.1 流量衰减过程

3.1.1 单一防护措施

定义流量衰减度为某一时刻的排水流量与初始

流量的比值。图 4 为单一防护措施下流量衰减度的变化过程,开始排水的短时间内,土壤中的细颗粒在水流拖拽作用下逐渐下移填充孔隙,土壤颗粒重新分布,土壤不断密实,系统的排水流量也逐渐减小。由于土壤颗粒会使土工布发生局部的淤堵,铺设土工布的方案 NA 和 NB 的流量衰减程度大于无防护措施的方案 NN。排水后 150 h,NB、NA、LN 及 MN 方案的流量衰减度分别为 84%、79%、89% 和 81%,各方案均具有较好的防淤堵效果。铺设土工布的方案,NB 防止流量衰减的效果比 NA 好。铺设反滤体的方案中 LN 防止流量衰减的效果优于 MN,主要原因在于分层反滤体第一层的砂石颗粒粒径和孔隙均偏小,对土壤颗粒下移的限制作用更明显,使其防淤堵的效果优于混合反滤体。

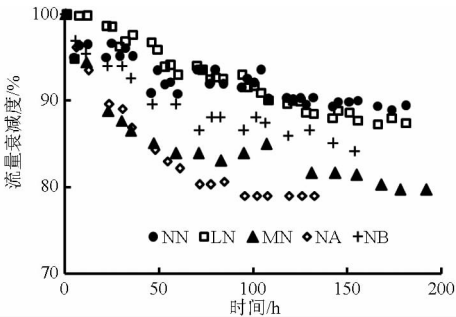
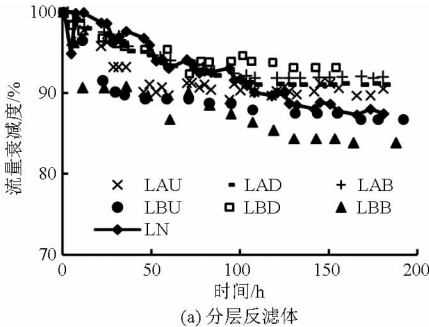


图 4 单一防护措施下的流量衰减度变化
Fig. 4 Attenuation processes of discharge with single defense measure

3.1.2 组合防护措施

组合防护措施的防淤堵效果是反滤体铺设方式、土工布铺设位置、系统的颗粒组成^[17-18]和水力梯度^[19-20]等因素综合作用的结果。图 5 为反滤体和土工布组合防护措施下流量衰减度随时间的变化。组合防护措施下,反滤体上部与土壤接触面附近的水力梯度较大,此处铺设较小孔径的土工布 B 易发生土壤细颗粒进入土工布产生局部淤堵或在土工布表面形成淤塞^[9]的现象,阻碍水流运动,加速了流量衰减的进程,如图中方案 LBB、LBU 和 MBU 的流量衰减明显大于单一反滤体铺设方案 LN 和



MN。图中还可以看到,暗管周围铺设土工布的方案 LAD、LBD、MAD、MBD 减缓流量衰减的作用优于方案 LN 和 MN,主要原因在于铺设反滤体后暗管附近的水力梯度较小,土工布不直接接触土壤,不易发生淤堵,同时可对反滤体中细颗粒的流失起到防护作用。此外,反滤体上部与土壤接触位置以及暗管周围均铺设较大孔径土工布的方案 LAB、MAB 与仅在暗管周围铺设土工布的方案 LAD 和 MAD 相比防护优势并不明显,且土工布需求量增加,从经济角度考虑不宜选用。而仅在反滤体上部与土壤接触位置铺设较大孔径土工布的方案 LAU、MAU 的防护作用不及方案 LAD 和 MAD,主要因为后者土工布不与土壤直接接触,不易被淤堵或淤塞。此外,与仅在暗管周围铺设土工布(可以铺设前预先制作)相比,反滤体上部与土壤接触位置铺设土工布的方案增加了施工质量控制难度。可见,无论分层还是混合反滤体,仅在暗管周围铺设土工布即可。从试验运行结果来看,混合反滤体方案 MAD 和 MBD 以及分层反滤体方案 LAD 和 LBD 均可作为备选方案。

3.1.3 流量衰减度预测

由于试验中填装的土壤渗透系数有一定差别,因此将观测的流量统一修正为相等渗透系数及作用水头下的流量,并用于预测流量衰减度。表 2 为不同方案下的流量衰减度预测结果。可以看到,各方案排水流量随时间的衰减过程均符合对数曲线关系,且决定系数 R^2 均大于 0.7,该结论与刘文龙等^[15]得到的单一土工布下排水流量衰减规律一致,且根据拟合公式排水 150 h 后的流量预测值与实测值吻合很好。

预测结果表明,混合反滤体条件下的流量衰减大于分层反滤体,且随着时间的增加,两者衰减度的差别越明显,运行 10 a 后,前者的排水流量为初始流量的 60% 左右,而后者超过 70%,二者流量相差达 10%。同时,暗管周围铺设合理土工布对于暗管长时间的安全稳定运行具有一定的正面效果,以分层反滤体为例,不铺设土工布的 LN 方案在运行 150 h

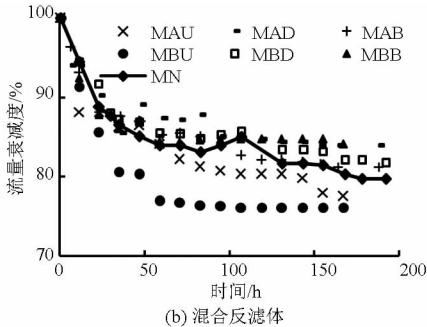


图 5 组合防护措施下的流量衰减度变化
Fig. 5 Attenuation processes of discharge with combined defense measure

表 2 流量衰减度预测
Tab.2 Attenuation prediction of discharge

试验方案	拟合公式	R ²	流量衰减度/%		运行 150 h 的流量/(cm ³ ·min ⁻¹)	
			150 h	10 a	预测值	实测值
NN	$y = -0.0217\ln x + 1.0122$	0.79	90.3	76.5	0.53	0.53
NA	$y = -0.0454\ln x + 1.0139$	0.90	78.6	49.7	0.42	0.43
NB	$y = -0.0293\ln x + 1.0097$	0.88	86.3	67.6	0.65	0.63
LN	$y = -0.0296\ln x + 1.0492$	0.71	90.1	71.2	2.18	2.14
LAU	$y = -0.0229\ln x + 1.0118$	0.82	89.7	75.1	1.98	2.01
LAD	$y = -0.0267\ln x + 1.0442$	0.96	91.0	74.0	2.32	2.32
LAB	$y = -0.0239\ln x + 1.0392$	0.94	91.9	76.7	2.35	2.35
LBU	$y = -0.0236\ln x + 0.9907$	0.93	87.2	72.2	2.19	2.20
LBD	$y = -0.0134\ln x + 1.0013$	0.87	93.4	84.9	2.43	2.42
LBB	$y = -0.0282\ln x + 0.9940$	0.90	85.3	67.3	2.20	2.54
MN	$y = -0.0356\ln x + 0.9940$	0.94	81.6	58.9	2.07	2.06
MAU	$y = -0.0375\ln x + 0.9837$	0.96	79.6	55.7	2.05	2.01
MAD	$y = -0.0291\ln x + 0.9904$	0.93	84.5	65.9	2.18	2.17
MAB	$y = -0.0357\ln x + 1.0007$	0.95	82.2	59.4	2.12	2.10
MBU	$y = -0.0460\ln x + 0.9816$	0.94	75.1	45.8	1.92	1.94
MBD	$y = -0.0322\ln x + 0.9945$	0.94	83.3	62.8	2.08	2.08
MBB	$y = -0.0278\ln x + 0.9758$	0.94	83.7	65.9	2.16	2.19

和 10 a 后的流量分别为初始流量的 90.1% 和 71.2%，期间流量减少了 18.9%，而暗管周围铺设土工布的方案 LAD 和 LBD 在排水后 150 h 到 10 a 间的流量分别减少了 17% 和 8.5%。从暗管长期运行来看,LBD 方案优于 LAD 方案。

铺设反滤体的方案在起到防止暗管淤堵作用的同时,与土工布最大的不同在于其极大地改善了暗管周围的渗流条件,增大了暗管排水能力,根据表 2 给出的运行 150 h 的流量可以得到,全土方案下的排水流量为 0.42 ~ 0.65 cm³/min,而对于增设反滤体的方案,其排水流量在 1.92 ~ 2.54 cm³/min 之间,为全土方案流量的 3 ~ 5 倍。

3.2 土工布淤堵量与土壤流失量

图 6 为各方案的土工布淤堵总量和土壤流失量。总体上,土工布淤堵总量越大,被土工布拦截的土壤越多,即土壤流失量越小;对于反滤体上部与土壤接触位置铺设土工布的方案,特别是上下均铺设土工布的方案,土工布淤堵总量较大,远大于土壤流失产生的风险,实际工程中应避免。而未做任何防护措施的全土方案,其土壤流失量为其他方案的 3 ~ 5 倍。因此,综合考虑土工布淤堵量及土壤流失量,方案 LN、LAD、LBD、MN、MAD 以及 MBD 均表现出良好的防淤堵效果,其中 MAD 方案土工布淤堵与土壤流失总量最小。

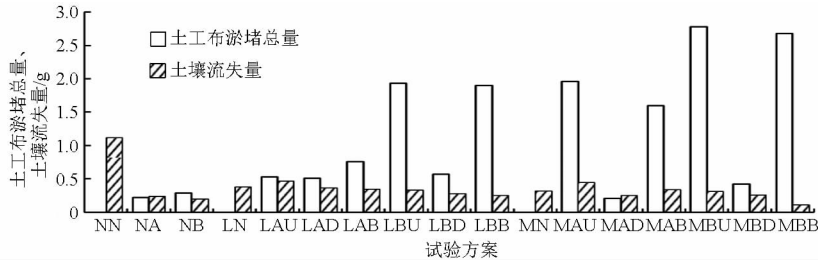


图 6 土工布淤堵总量和土壤流失量
Fig.6 Mass of geotextile clogging and soil losses

4 结论

(1)依据太沙基准则选择改进暗排的砂砾石规格是合理可行的;分层和混合反滤体的排水流量随时间的衰减过程均符合对数相关关系,且分层反滤体比混合反滤体防止或减缓流量衰减的效果更好。

(2)反滤体上部与土壤接触位置铺设土工布对减缓流量衰减作用不大,反而会增大土工布的淤堵几率。

(3)仅在暗管周围铺设土工布的分层和混合反滤体方案对防护土工布淤堵和土壤流失均有较好效果;综合分析流量衰减过程、土工布淤堵量及土壤流

失量,确保改进暗排的长期稳定运行,可优先选择分层铺设反滤体结合暗管周围铺设合理土工布的方案 LBD。若使用开沟铺管机械化作业,考虑到开沟、铺放砂石料以及铺管 3 道工序可一次完成,也可采用混合反滤料结合暗管周围包裹土工布的方案 MAD。

(4)室内试验结果可为田间实际应用提供有价值的参考,但野外条件复杂,实践中可能会面临一些

不可预见因素,因此,混合与分层反滤体田间应用效果及其防淤堵性能差别仍有待进一步的验证。为保证田间暗管防淤堵措施发挥效用,施工过程中应按照规定要求严格控制施工质量,避免由于施工不当导致额外的淤堵风险,如严禁水下铺管,以免浑水泥浆进管,造成淤堵;开挖断面一次到位,避免扰动土壤淤堵暗管的潜在威胁等。

参 考 文 献

- 1 RITZEMA H, NIJLAND H, CROON F. Subsurface drainage practices: from manual installation to large-scale implementation[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 86(1-2): 60-71.
- 2 SALEM H, DIERICKX W, WILLARDSON L, et al. Laboratory evaluation of locally made synthetic envelopes for subsurface drainage in Egypt[J]. *Agricultural Water Management*, 1995, 27(3-4): 351-363.
- 3 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*, 2007, 26(5): 47-50.
BAO Ziyun, TONG Bingwei, ZHANG Zhanming. Application effects of wrapped materials outside drainage pipe in Ningxia Irrigation Area of Yellow River[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(5): 47-50. (in Chinese)
- 4 李占柱,张凤英,李云京. 暗管排水裹滤料的研究简报[J]. *灌溉排水*, 1987, 6(1): 36-39.
- 5 陶园,王少丽,许迪,等. 改进暗管排水结构型式对排水性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 113-118.
TAO Yuan, WANG Shaoli, XU Di, et al. Effect of structure-type on improved subsurface drainage performance [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 113-118. (in Chinese)
- 6 STUYT L, DIERICKX W, BELTRAN J M. Materials for subsurface drainage system [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005.
- 7 STUYT L, DIERICKX W. Design and performance of materials for subsurface drainage systems in agriculture [J]. *Agriculture Water Management*, 2006, 86(1-2): 50-59.
- 8 SHERARD J, DUNNIGAN L, TALBOT J. Basic properties of sand and gravel filters[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, 110(6): 684-700.
- 9 易华强. 土工织物反滤系统土体结构稳定性试验研究[D]. 北京:清华大学, 2005.
- 10 INDRARATNA B, LOCKE M. Analytical modeling and experimental verification of granular filter behaviour[C] // *Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering*, Balkema, Rotterdam, 2000
- 11 SAFWAT A S, MOHAMED E S. Design practices of covered drains in agricultural land drainage system[C] // *Six Afro-Asian Regional Conference*, Cairo, Egypt, 1987.
- 12 CPVQ (Conseil des Productions Végétales du Québec). Drainage souterrain-cahier des normes[C] // *Ministère de l'Agriculture du Québec*, Canada, 1989.
- 13 VAN ZEIJTS T E J. Recommendations on the use of envelopes based on experiences in the Netherlands[C] // *Proceedings of 5th International Drainage Workshop*, 1992, 3: 5. 88-5. 96.
- 14 OJAGHLOO H, SOHRABI T, RAHIMI H, et al. Laboratory study of the soil clay percent influence of the need for subsurface drainage system envelopes[C] // *17th World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering*, 2010.
- 15 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.
LIU Wenlong, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Experimental study on geotextile envelope for subsurface drainage in Yellow River Delta[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(18): 109-116. (in Chinese)
- 16 丁昆仑,余玲,瞿兴业. 合成外包料用于排水暗管的试验研究[J]. *水利水电技术*, 1994(5): 58-62.
- 17 庄艳峰,陈轮,许齐,等. 循环往复水流对反滤系统的作用机理[J]. *岩土力学*, 2008, 29(7): 1773-1777.
ZHUANG Yanfeng, CHEN Lun, XU Qi, et al. Research on effect mechanism of cyclic flow on filtration system[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(7): 1773-1777. (in Chinese)
- 18 黄志全. 无粘性粗粒土渗透淤堵作用室内模拟试验及机理研究[D]. 长春:吉林大学, 2010.
- 19 王志刚,李爱芬,张红玲,等. 砾石充填防砂井砾石层堵塞机理实验研究[J]. *石油大学学报*, 2000, 24(5): 49-51.
WANG Zhigang, LI Aifen, ZHANG Hongling, et al. Experimental study on pore-blocking mechanism in gravel packs of sand control well[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2000, 24(5): 49-51. (in Chinese)
- 20 徐俊. 土工织物-非稳定土体反滤系统中滤饼的研究[J]. *岩土工程技术*, 2005, 19(5): 233-236.
XU Jun. Study on filter cake in the filtration system of geotextiles-unstable soil[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2005, 19(5): 233-236. (in Chinese)