

DOI: 10.11779/CJGE201912023

尾矿库中新型复合排渗管排渗特征试验研究

刘 胜^{1, 2}, 王 媛^{1, 2}, 冯 迪^{1, 2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210024)

摘 要: 尾矿库中排渗设施的淤堵是常见的现象, 也是影响其安全的重要因素。为提高排渗管的排渗能力和抗淤堵性能, 开发了一种新型复合排渗管, 新型复合排渗管在土工布和排渗花管之间增加了一层格构网。通过室内模型试验, 研究格构网的结构和花管开孔率对新型复合排渗管排渗特征的影响, 分析了新型复合排渗管的抗淤堵性能, 揭示了新型复合排渗管的排渗机理。试验结果表明: 外包格构网增加了排渗管的等效开孔面积, 优化了排渗管的排渗路径, 提高了排渗管的排渗能力。随着花管开孔率的增加, 外包格构网对排渗管排渗能力的影响减小。外包格构网提高了排渗管的抗淤堵能力, 随着土工布的淤堵, 传统外包土工布排渗管和新型复合排渗管的排渗量均有所降低, 传统外包土工布排渗管排渗量降低的程度更大。当单向连通格构网的连通方向与排渗管的纵向方向有夹角时, 排渗管的排渗能力不增反减。使用单向连通格构网时, 须保证格构网的连通方向与排渗管的纵向方向一致。

关键词: 尾矿库; 复合排渗管; 排渗特征; 试验研究

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)12-2360-07

作者简介: 刘 胜(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事排渗设施淤堵机理及其应对措施等方向的研究。E-mail: liusheng3131@163.com。

Experimental study on drainage characteristics of new composite drainage pipes in tailings pond

LIU Sheng^{1, 2}, WANG Yuan^{1, 2}, FENG Di^{1, 2}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The clogging of the drainage facilities in a tailings pond is a common phenomenon, and is also an important factor affecting its safety. In order to improve the drainage capacity and anti-clogging performance of the drainage pipes, new composite drainage pipes are proposed. A layer of lattice net is added between the geotextile and the perforated pipes in the new composite drainage pipes. The indoor model tests are carried out to study the influences of different lattice net structures and opening ratios of the perforated pipes on the drainage characteristics of the new composite drainage pipes. The anti-clogging performance of the new composite drainage pipes is analyzed, and their drainage mechanism is revealed. The results show that the drainage capacity of the composite drainage pipes increases because of larger equivalent opening area and optimized drainage path. With the increase of the opening rate of the perforated pipes, the influences of the lattice net on the drainage capacity of the drainage pipes become smaller. The outsourced lattice network improves the anti-clogging ability of the drainage pipes. With the clogging of geotextiles, the drainage capacities of the ordinary drainage pipes wrapped only with geotextiles and the new composite drainage pipes both decrease, and the reduction of the drainage capacity of the ordinary drainage pipes is more serious. When the connection direction of unidirectional connected lattice net is at an angle with the longitudinal direction of drainage pipes, the drainage capacity of the drainage pipes does not increase but decreases. When using the unidirectional connected lattice net, it is necessary to ensure that the connection direction of the lattice net is consistent with the longitudinal direction of the drainage pipes.

Key words: tailings pond; composite drainage pipe; drainage characteristic; experimental study

0 引 言

尾矿库是指筑坝拦截谷口或围地构成的, 用以堆存尾矿或其他工业废渣的场所。尾矿库是具有高势能

的人造泥石流危险源, 存在溃坝危险, 一旦失事, 容

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0804600)

收稿日期: 2018-11-05

*通讯作者(E-mail: wangyuanhhu@163.com)

易造成重特大事故,属于重大危险源。据不完全统计,全国有 12655 座尾矿库中,我国尾矿库安全形势不容乐观^[1]。目前我国尾矿库的特点是:普遍采用上游式筑坝,筑坝尾矿粒度细,尾矿库安全设计标准较低,我国尾矿库小型库居多^[2]。文献[3, 4]针对国内外尾矿库的主要病害事故进行了归纳总结,结果表明坝体浸润线过高造成的渗漏病害占到了 1/4。浸润线过高会产生坝面沼泽化、管涌,甚至溃坝等险情^[5]。尾矿坝的浸润线是尾矿坝的生命线,直接影响到尾矿坝的稳定与安全^[6-7]。因此通过各种排渗设施降低尾矿库的浸润线,加快尾矿固结,对提高尾矿库的安全性至关重要。

目前尾矿坝常用的渗流控制措施有管井法,虹吸管法、轻型井点法、垂直-水平排渗系统、水平排渗井、辐射井技术,排渗管法和排渗墙法等方法^[8]。排渗管因其具有构造简单,施工方便,价格低廉等优点,在水平垂直排渗系统^[9]和辐射井^[10]中被广泛应用,常用的排渗管是由 UPVC 花管外包土工布形成,Stuyt 等^[11]总结了排水管道和套管材料的穿孔形状和图案对排水性能的影响,并提出了颗粒材料和合成包膜的最新设计标准,杨春和等^[12]研究了土工织物用于尾矿坝排渗反滤的机理。这种排渗管也有一定局限性,排渗管开孔面积小,排渗能力低^[13],在细颗粒尾矿库中土工布易淤堵,导致排渗管的排渗效果降低甚至失效^[14-15]。为此一种新型槽孔管被提出,矩形槽代替传统排渗管中的圆孔,增大了渗水面积,用白钢网代替土工布,催化形成反滤层,提高了抗淤堵能力^[13, 16]。槽孔管的结构比传统排渗管的结构复杂。

为提高传统排渗管的排渗能力和抗淤堵性能,本文开发了一种新型复合排渗管,新型复合排渗管在土工布和花管之间增加了一层格构网,增加了排渗管的等效开孔面积,优化了排渗管的排渗路径。通过室内模型试验,研究了不同格构网结构(不连通格构网,单向连通格构网)和花管开孔率对新型复合排渗管排渗特征的影响,分析了新型复合排渗管的抗淤堵性能,揭示了新型复合排渗管的排渗机理。

1 试验装置、材料及方法

1.1 试验装置

为模拟尾矿库中排渗管的排渗过程,自行设计模型箱。模型箱内填筑尾矿砂,排渗管从模型箱侧面放入模型箱。通过加压系统在模型箱顶部施加水压。通过测量系统测量模型箱不同位置处的水压力,测量不同工况下排渗管排出的水量。为同时进行对比试验,模型箱左右两侧对称设计。

模型箱(如图 1 所示)左、右部分的内部净空尺寸为 397 mm×290 mm×300 mm(长×宽×高)。模型箱左右端面各开设一圆孔,直径为 96 mm,用以放置排渗管,开孔中心距模型箱底面的距离为 115 mm。排渗管通过端部连接板与模型箱固定,端部连接板通过螺栓与模型箱连接,端部连接板与模型箱端部之间通过止水橡胶止水。模型箱上顶板设有焊接管,焊接管为内径 20 mm 的内丝螺纹管,用来与加压系统和测量系统连接。上顶板与模型箱通过螺栓连接,上顶板与模型箱之间通过止水橡胶止水。整个装置由不锈钢板焊接而成。

加压系统:模型箱可通过恒压泵施加水压,恒压泵与模型箱之间通过水管连接。恒压泵的功率为 750 W(变频),电压为 220 V/50 Hz,最高扬程为 42 m 水头,适用范围为 0~36 m 水头,最大流量为 4.0 m³/h,额定吸程为 9 m,恒压泵有恒压的效果。

测量系统:通过模型箱顶面的焊接管接入水压测量装置(测压管或压力表),测量模型各个位置的水压力。压力表的量程为 4.0×10⁵ Pa,精度为 0.4 级,误差为±1.6×10³ Pa。通过台秤测量排渗管排出水的质量,换算成排渗管的流量。台秤的量程为 100 kg,精度为 0.01 kg。

将模型箱竖直放置,可作为径向渗透仪使用,测量排渗管的综合渗透系数。模型箱竖起后,由侧面上的焊接管接进水管,对排渗管施加径向外部水头。在排渗管上端开孔接溢流管,保持排渗管内部水头恒定,使用测压管测量排渗管内部和外部水头。利用布依裘 Dupuit 潜水完整井公式计算排渗管的综合渗透系数:

$$k = \frac{Q \ln(R/r)}{2\pi M(H_1 - H_2)}$$

(1)

式中, k 为综合渗透系数 (cm/s), Q 为排渗管流量 (mL/s), R 为排渗管中心至水边界的距离 (cm), r 为排渗管内半径 (cm), M 为排渗管高度, H_1 , H_2 为上下游水位 (cm)。

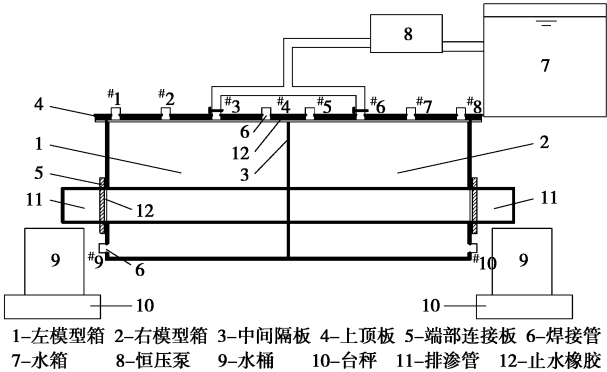


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

1.2 试验材料

(1) 尾矿

试验用尾矿砂在福建马坑尾矿库^[17](铁矿)取样,尾矿的颗粒级配见表 1,尾矿的相对密度为 3.15,200 目以下的尾矿颗粒占 65.24%。

表 1 尾矿砂粒径组成

Table 1 Grain-size composition of tailings sand				
粒径/mm	-0.5~ +0.3	-0.3~ +0.1	-0.1~ +0.075	-0.075
个别/%	5.96	9.63	19.17	65.24
累计/%	100.00	94.04	84.41	65.24

(2) 花管

试验用花管的材质均为 U-PVC 管材,相关参数见表 2。花管开孔为梅花形开孔,开孔直径 10 mm,编号为 HG-1 的花管的两开孔之间净距为 12 mm,编号为 HG-2 的花管的两开孔之间净距为 6 mm,花管的一端用有机玻璃片封堵。开孔长度为花管上两个开孔之间的最远距离,开孔率为开孔段开孔面积与总面积之比。该种花管已经普遍在尾矿库排渗工程中应用。

表 2 U-PVC 花管相关参数

Table 2 Related parameters of U-PVC perforated pipes							
花管 编号	外直 径 /mm	壁厚 /mm	内直 径 /mm	开孔 孔径 /mm	总长 度 /mm	开孔 长度 /mm	开孔 率/%
HG-1	75	1.75	71.5	10	500	360	16.9
HG-2	75	1.75	71.5	10	500	352	31.3

(3) 格构网

选用两种格构网(如图 2 所示),这两种格构网已经普遍应用在防滑、隔离等领域,是常见的工程材料。一种为不连通格构网,各个网格之间不连通,每个网格的形状为六边形,网格的棱宽度为 1.2 mm,棱厚为 3.5 mm,每个网格宽 5 mm,长 10 mm。另一种为单向连通格构网,每个网格的形状接近正四边形,边长为 6 mm,棱的宽度为 1.8 mm,网格厚 1.8 mm。

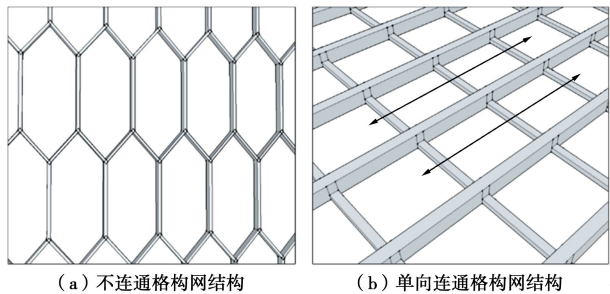


图 2 格构网结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of lattice net

(4) 土工布

选用土工布为无纺针刺土工布,单位面积质量为 150 g/m²,土工布厚度为 1.5 mm,渗透系数为 5.11×

10⁻¹ cm/s。

(5) 排渗管

新型复合排渗管由花管、格构网和土工布组合而成,具体参数见表 3。花管外层包裹一层格构网,花管上的每个开孔与多个格构网的网格连通,扩大了花管的开孔面积,增加了整个排渗管的等效开孔率。等效开孔率定义为与开孔段经格构网扩大之后的开孔面积与总面积之比。包裹单向连通格构网,使花管上各个开孔处彼此连接,花管等效开孔率为 100%(忽略棱的面积)。将土工布裁剪成长方形,包裹在花管上,包裹一层,有一定的重叠量,排渗管两端的土工布用细铁丝缠紧,中间用细尼龙绳缠绕,包证土工布紧贴在花管上。利用自制仪器进行径向渗流试验,测量排渗管的综合渗透系数。

1.3 试验方案

研究新型排渗管的排渗特征,揭示格构网结构和花管开孔率对排渗效果的影响,设计了 3 组对比试验(见表 4)。TEST-01 中排渗管 1 为包裹不连通格构网的排渗管,排渗管 2 作为对照,不包裹格构网,研究包裹不连通格构网排渗管的排渗效果。TEST-02 中,排渗管 3 和排渗管 4 采用的花管的开孔率为 31.3%,研究花管开孔率对新型复合排渗管排渗效果的影响,TEST-03 中的排渗管 5 为包裹单向连通格构网的排渗管,排渗管 6 作为对照,不包裹格构网,研究包裹单向连通格构网排渗管的排渗效果。

1.4 试验过程

填筑尾矿砂:逐层填筑尾矿砂,每层厚 20 mm。模型箱体较大,难以采用一般的饱和方法(负压法)进行饱和。首先向尾矿砂中加入过量水,使尾矿砂位于水面之下。轻轻搅拌使尾矿砂处于过饱和状态,再将饱和状态的尾矿砂逐层小心地加入模型箱内。尾矿砂设计填筑高度为 230 mm,设计填筑干密度为 2.05 g/cm³。将填筑好的尾矿砂静置一夜进一步饱和。在后期试验过程中从模型箱顶部施加水压力,会在一定程度上压密尾矿砂。试验结束后,在模型箱内取不扰动的尾矿砂样,测量尾矿砂最终的干密度和对应的渗透系数。尾矿砂填筑到一定高度后,从模型箱侧面放入排渗管,通过端部连接板将排渗管与模型箱连接固定,排渗管与端部连接管的周边使用玻璃胶密封。

接入加压和测量系统:使用水管将水箱、恒压泵与模型箱进行连接,进水管通过#3 和#6 焊接管与模型箱连接,为防止进水口处水流对尾矿砂的冲刷,在尾矿砂层顶面放置一层土工布,在土工布上顶面进水口对应处放置一透水石作为缓冲层。在#2 和#7 焊接管处接压力表,测量模型箱顶面水头。在排渗管出水口处放置水桶,在水桶下方放置台秤测量排出水的质量。

表 3 排渗管参数
Table 3 Related parameters of drainage pipes

排渗管编号	花管	格构网	土工布尺寸/cm	土工布重叠量/cm	花管等效开孔率	综合渗透系数/(cm·s ⁻¹)
排渗管 1	HG-1	不连通	43.0×29.0	4	31.3%	4.24×10 ⁻¹
排渗管 2	HG-1	无	39.5×26.5	3	16.9%	1.84×10 ⁻¹
排渗管 3	HG-2	不连通	42×29	4.5	59.1%	4.78×10 ⁻¹
排渗管 4	HG-2	无	39×26	3.5	31.3%	1.82×10 ⁻¹
排渗管 5	HG-1	单向连通	42.5×27.0	2.5	100.0%	6.11×10 ⁻¹
排渗管 6	HG-1	无	39.5×26.5	4	16.9%	1.90×10 ⁻¹

表 4 试验设计方案
Table 4 Experimental design schemes

试验编号	左侧	右侧
TEST-01	排渗管 1	排渗管 2
TEST-02	排渗管 3	排渗管 4
TEST-03	排渗管 5	排渗管 6

进行试验：开启恒压泵，对左右模型箱同时施加相同水压力（如图 3 所示），记录两侧排渗量随时间的变化，改变恒压泵的水压力进行试验，当排渗量稳定一段时间后停止试验。考虑到现场排渗管常见的埋置深度，设置恒压泵压力头的范围为 10~20 m。试验后，测量模型箱内不同深度处尾矿砂的原位干密度，使用变水头渗透仪测量尾矿砂对应干密度下的渗透系数。分层挖出模型箱内的尾矿砂，取出排渗管，测量排渗管使用后的综合渗透系数。由于时间原因，TEST-02 试验进行了两次，TEST-01 和 TEST-03 各进行了一次。



(a) 填筑尾矿砂



(b) 施加水压

图 3 试验过程

Fig. 3 Experimental process

的排渗管（排渗管 1），等效开孔率为 31.3%；右侧为不包裹格构网的排渗管（排渗管 2），开孔率为 16.9%。对比二者在相同水力边界下的排渗量，以研究包裹不连通格构网排渗管的排渗效果。压力泵的压力设定为 1.35×10^5 Pa，模拟现场排渗管处水头约为 13.5 m 的情况。试验后测量尾矿砂的平均填筑干密度为 2.11 g/cm^3 ，使用变水头渗透仪测量该干密度下尾矿的渗透系数为 $1.44 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

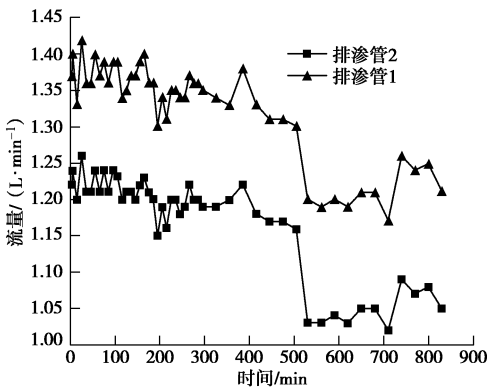


图 4 TEST-01 中排渗管排渗量随时间变化关系

Fig. 4 Relationship between discharge flow and time in TEST-01

绘制排渗管排渗量随时间变化的曲线（如图 4 所示），两排渗管的排渗量均随时间缓慢下降，即两排渗管随时间都发生了一定程度的淤堵。0~505 min，两排渗管排渗量差值基本不变，排渗管 1 的平均排渗量为 1.357 L/min，排渗管 2 为 1.204 L/min，差值为 0.153 L/min，排渗管 1 的平均排渗量比排渗管 2 高 12.7%。从 505 min 到 530 min，因试验过夜原因，恒压泵中间停机 9 h，排渗管发生一定程度淤堵，两排渗管排渗量都有一定程度骤降。530~830 min，排渗管 1 的平均排渗量为 1.212 L/min，排渗管 2 为 1.049 L/min，差值为 0.163 L/min，排渗管 1 的平均排渗量比排渗管 2 高 15.5%。试验结束时（830 min），排渗管 1 的排渗量较开始时降低 11.7%，排渗管 2 的排渗量较开始时降低 13.9%，排渗管 2 的排渗量降低的程度更大。由于时间关系，试验时间没有继续延长，从图 4 的趋势可知，随着时间的延长，两排渗管的排渗量可能会继续下降。

由图 4 可知：排渗管 1 的排渗能力大于排渗管 2，

2 复合排渗管排渗特征分析

2.1 不连通格构网排渗管排渗特征

(1) 排渗特征

在 TSET-01 中，模型箱左侧为包裹不连通格构网

排渗管 1 和排渗管 2 的排渗量随着时间的增加而减少, 两排渗管都发生一定程度的淤堵, 且排渗管 2 排渗量的降低程度大于排渗管 1。

(2) 花管开孔率对排渗特征的影响

在 TSET-02 中, 模型箱左侧为包裹不连通格构网的排渗管 (排渗管 3), 等效开孔率为 59.1%; 模型箱右侧为不包裹格构网的排渗管 (排渗管 4), 开孔率为 31.3%。研究花管开孔率对包裹不连通格构网排渗管排渗效果的影响。模型箱顶部水压力设置为 1.32×10^5 Pa 和 1.42×10^5 Pa。

由图 5 可知, 排渗管 3 的排渗量和排渗 4 相差不多。当模型箱顶部水压力为 1.32×10^5 Pa (0~40 min) 时, 排渗管 3 的平均排渗量为 1.06 L/min, 排渗管 4 为 1.04 L/min, 差值为 0.02 L/min, 排渗管 3 的平均排渗量比排渗管 4 高 1.9%。当模型箱顶部水压力为 1.42×10^5 Pa (40~60 min) 时, 排渗管 3 的平均排渗量为 1.23 L/min, 排渗管 4 为 1.17 L/min, 差值为 0.06 L/min, 排渗管 3 的平均排渗量比排渗管 4 高 5.1%。当花管的开孔率为 31.3% 时, 是否包裹格构网对排渗管的排渗量影响不大, 即花管开孔率由 31.3% 增大到 59.1%, 对排渗效果的影响不大。

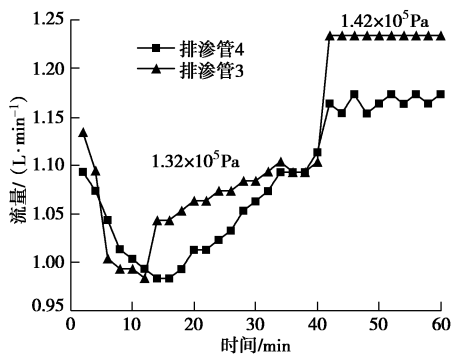


图 5 TEST-02 中排渗管排渗量随时间变化关系
Fig. 5 Relationship between discharge flow and time in TEST-02

(3) 土工布淤堵对排水能力的影响

为进一步研究包裹不连通格构网排渗管的整体抗淤堵性能, 将 TEST-02 方案进行第二次试验, 增加试验时间, 采用循环加水压的方式, 施加的水压力先增高后降低。由图 6 可知, 在 1.30×10^5 , 1.61×10^5 和 1.96×10^5 Pa 水压力下, 两排渗管的排渗量随时间缓慢下降, 两排渗管都发生了一定程度的淤堵。水压力均为 1.60×10^5 Pa 左右时, 从 146 到 415 min, 排渗管 3 的排渗量降低了 0.08 L/min, 降低 5.4%, 排渗管 4 排渗量降低了 0.18 L/min, 降低 11.3%, 排渗管 4 排渗量的降低程度更大。水压力均为 1.30×10^5 Pa 左右时, 从 1 min 到 445 min, 排渗管 3 的排渗量降低了 0.08 L/min, 降低 6.6%, 排渗管 4 排渗量降低了 0.12 L/min,

降低 9.6%, 排渗管 4 排渗量的降低程度更大。在试验过程中土工布均发生了一定程度的淤堵, 排渗管 4 排水能力降低程度比排渗管 3 大, 即土工布淤堵对排渗管 4 的影响更大。排渗管 4 和排渗管 3 的排渗量相差不多, 所以试验具有可重复性。

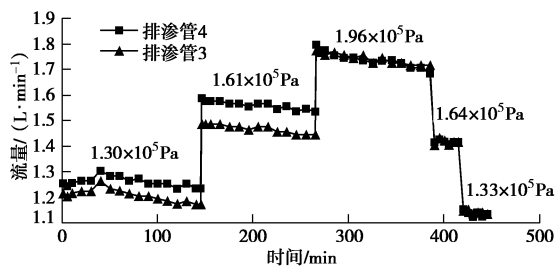


图 6 TEST-02 中排渗管排渗量随时间变化关系 (第二次试验)
Fig. 6 Relationship between discharge flow and time in TEST-02 (second experiment)

(4) 不连通格构网排渗管排渗机理

传统排渗管的排渗路径有两种 (见图 7), 路径 1 为排渗水垂直穿过土工布后, 直接经过花管上的开孔处进入排渗管内部, 路径 2 为排渗水进入土工布之后, 在土工布内部沿着土工布平面方向迁移, 迁移到花管上的开孔处进入排渗管内部。根据水流的优势路径, 路径 1 的排渗效率高于排渗路径 2。

新型排渗管在花管和土工布之间增加了一层格构网, 花管的一个开孔与格构网的多个网格接触, 扩大了花管的开孔面积, 增大了排渗管的等效开孔率。设置格构网后, 增加了排水路径 1 所占的比例, 提高了排渗管的整体排水能力。当土工布发生淤堵后, 土工布的渗透系数减少, 对排渗路径 2 的影响更为显著, 排渗路径 2 的排渗能力显著下降。由于外包格构网排渗管增加了排渗路径 1, 减少了排渗路径 2, 土工布的淤堵对其整体排渗能力的影响较小。

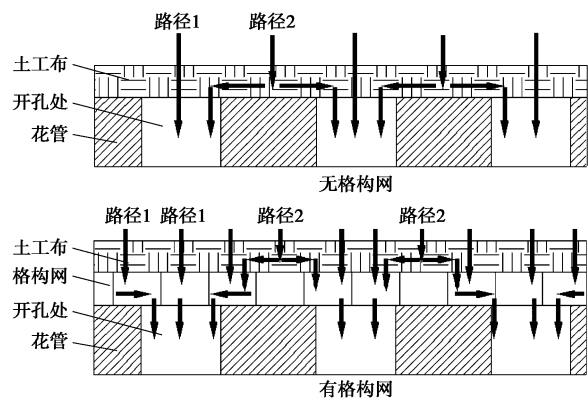


图 7 排渗管的排水路径
Fig. 7 Drainage paths of drainage pipes
2.2 单向连通格构网排渗管排渗特征
在 TSET-03 中, 模型箱左侧为包裹单向连通格构

网的排渗管（排渗管 5），等效开孔率为 100.0%；右侧为不包裹格构网的排渗管（排渗管 6），开孔率为 16.9%，对比二者在相同水力边界下的排渗量，研究包裹单向连通格构网排渗管的排渗效果。

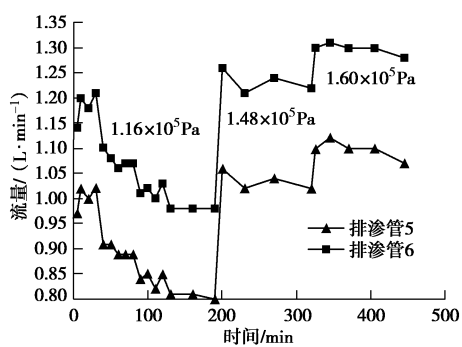


图 8 TEST-03 中排渗管排渗量随时间变化关系

由图 8 可知，排渗管 5 的排渗量小于排渗管 6。水压为 $1.16 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时，排渗管 5 的平均排渗量为 0.89 L/min，排渗管 6 的平均排渗量为 1.07 L/min，差值为 0.18 L/min，排渗管 6 的平均排渗量比排渗管 5 高 20.2%。水压为 $1.48 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时，排渗管 5 的平均排渗量为 1.10 L/min，排渗管 6 的平均排渗量为 1.30 L/min，排渗管 6 的平均排渗量比排渗管 5 高 18.2%。排渗管 5 的排渗能力小于排渗管 6，水压力越大，二者排渗量相差越大。

排渗管 5 包裹单向格构网，其排渗能力不增反减，这是由于其特殊的渗流路径导致的。由图 9 可知，单向连通格构网的连通方向与排渗管的纵向（沿着排渗管长度的方向）有夹角，排渗水透过外层土工布后因重力作用直接沿格构网连通方向流向排渗管的下侧，排渗水因不能及时被排走而降低了排水管的排水能力，可由排渗管内部的照片得证实（图 10）。由图 10 可发现，排渗管 5 内部积水面上侧的开孔处无水流流出，排渗管 6 的每个开孔处都有水流流出，说明排渗管 5 的排渗水透过外层土工布后，因重力作用直接沿格构网连通方向流向排渗管的下侧，没有透过花管上开孔处及时排出。

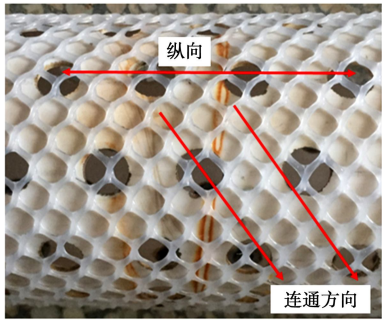
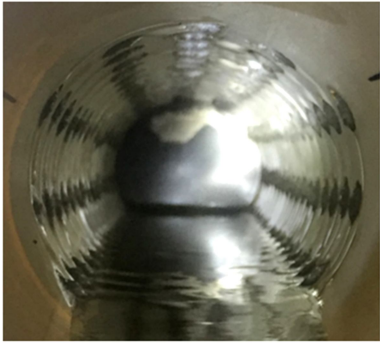


图 9 排渗管 5 外侧的单向连通格构网

Fig. 9 Unidirectional connected lattice net at outer side of drainage pipe No. 5



(a) 排渗管5



(b) 排渗管6

图 10 排渗管 5 和排渗管 6 的排渗管内表面水流情况

Fig. 10 Water flows inside drainage pipes of drainage pipe No. 5 and No. 6

在工程应用中，为保证排渗水及时通过花管开孔处导出，使用单向连通格构网时，须保证格构网的连通方向与排渗管的纵向一致，且不能使用所有网格全部连通的格构网。因为单向连通格构网的连通方向与排渗管的纵向有夹角时，排渗水透过外层土工布后会因重力作用直接沿格构网连通方向流向排渗管的下侧，排渗水不能及时被排走而降低了排水管的排渗效果。

3 结 论

通过室内模型试验对提出的新型复合排渗管的排渗特征进行了研究，得到以下结论：

- （1）新型外包格构网排渗管增加了排渗管的等效开孔面积，优化了排渗管的排渗路径，提高了其排渗能力，随着花管自身开孔率的增加，外包格构网对排渗管排渗能力的影响变小。
- （2）外包格构网排渗管增加了垂直透过土工布的排渗路径，提高了排渗管的抗淤堵能力，随着土工布的淤堵，传统排渗管和外包格构网排渗管的排渗量均有所减少，传统排渗管排渗量减少的程度更为严重。
- （3）当单向连通格构网的连通方向与排渗管的纵向方向有夹角时，排渗水透过外层土工布后因重力作用直接沿格构网连通方向流向排渗管的下侧，排渗管的排渗能力不增反减。使用单向连通格构网时，须保证格构网的连通方向与排渗管的纵向方向一致。

参考文献:

- [1] 于广明, 宋传旺, 潘永战, 等. 尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 1): 3238 - 3248. (YU Guang-ming, SONG Chuan-wang, FAN Yong-zhan, et al. Review of new progress in tailing dam safety in foreign research and current state with development trend in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S1): 3238 - 3248. (in Chinese))
- [2] 门永生, 柴建设. 我国尾矿库安全现状及事故防治措施[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, **5**(1): 48 - 52. (MEN Yong-sheng, CHAI Jian-she. The current safety situation of tailing reservoir in China and preventive measures[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, **5**(1): 48 - 52. (in Chinese))
- [3] RICO M, BENITO G, SALGUEIRO A R, et al. Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **152**(2): 846 - 852.
- [4] 敬小非. 尾矿坝溃决泥沙流动特性及灾害防护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011. (JING Xiao-fei. Study on flow characteristics of the sediment produced from tailings dam breach and disaster prevention[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese))
- [5] 王东, 沈振中, 陶小虎. 尾矿坝渗流场三维有限元分析与安全评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, **40**(3): 307 - 312. (WANG Dong, SHEN Zhen-zhong, TAO Xiao-hu. Three-dimensional finite element analysis and safety assessment for seepage field of a tailings dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, **40**(3): 307 - 312. (in Chinese))
- [6] SHAMSAI A, PAK A, BATENI S M, et al. Geotechnical characteristics of copper mine tailings: a case study[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2007, **25**(5): 591 - 602.
- [7] 尹光志, 魏作安, 万玲. 龙都尾矿库地下渗流场的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊 2): 25 - 28. (YIN Guang-zhi, WEI Zuo-an, WAN Ling. Numerical simulation analysis about seepage field of Longdu tail bay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S2): 25 - 28. (in Chinese))
- [8] 金松丽, 徐宏达, 张伟, 等. 尾矿坝排渗技术的研究现状[J]. 现代矿业, 2012(7): 35 - 38. (JIN Song-li, XU Hong-da, ZHANG Wei, et al. Research situation of drainage technology of tailings dam[J]. Modern Mining, 2012(7): 35 - 38(in Chinese))
- [9] 彭易华, 张明云. 垂直、水平联合自流排渗法加固坝体的研究[J]. 土工基础, 2000, **14**(2): 15 - 19. (PENG Yi-hua, ZHANG Ming-yun. Study on dam reinforcement by vertical-horizontal jointed artesian drainage[J]. Soil Engineering and Foundation, 2000, **14**(2): 15 - 19. (in Chinese))
- [10] 汪良峰, 朱君星, 项宏海, 等. 尾矿库排渗辐射井的设计探讨[J]. 金属矿山, 2010(2): 55 - 56. (WANG Liang-feng, ZHU Jun-xing, XIANG Hong-hai, et al. Discussion on design of radiation wells for tailings seepage drainage[J]. Metal Mine, 2010(2): 55 - 56. (in Chinese))
- [11] STUYT L C P M, DIERICKX W. Design and performance of materials for subsurface drainage systems in agriculture[J]. Agricultural Water Management, 2006, **86**(1): 50 - 59.
- [12] 杨春和, 阎金安. 土工织物在尾矿坝排渗处理中的应用[J]. 水力发电学报, 1991(4): 64 - 68. (YANG Chun-he, YAN Jin-an. Application of geotextile in the treatment of tailings dam drainage[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1991(4): 64 - 68. (in Chinese))
- [13] 金松丽, 徐宏达, 张伟, 等. 细粒尾矿坝槽孔管排渗机理及其计算方法[J]. 金属矿山, 2013(3): 42 - 44. (JIN Song-li, XU Hong-da, ZHANG Wei, et al. Calculation method and drainage mechanism of slotted pipe in fine-grained tailings dam[J]. Metal Mine, 2013(3): 42 - 44. (in Chinese))
- [14] KOERNER R M, KOERNER G R. Lessons learned from geotextile filter failures under challenging field conditions[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2015, **43**(3): 272 - 281.
- [15] 付文堂, 李湘滨, 李恒军, 等. 浅谈尾矿坝排渗管的埋设[J]. 金属矿山, 2010(增刊): 44 - 46. (FU Wen-tang, LI Xiang-bin, LI Heng-jun, et al. Discussion on embedment of drainage pipes for tailings dam[J]. Metal Mine, 2010(S): 44 - 46. (in Chinese))
- [16] 杨燕, 唐泽勋, 魏作安. 上向弯曲双向槽孔排渗管技术在新厂沟尾矿库的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, **24**(1): 65 - 69. (YANG Yan, TANG Ze-xun, WEI Zuo-an. Application of up-curved two-way hole-slot drainage tube technology into the Xinchanggou tailings dam[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, **24**(1): 65 - 69. (in Chinese))
- [17] 裴晓东, 钱有军, 高莉. 马坑磁铁矿石高压辊磨—湿式中磁预选—阶段磨选工艺试验[J]. 金属矿石, 2016(8): 81 - 84. (PEI Xiao-dong, QIAN You-jun, GAO Li. Experiment of HPGR crushing-wet mid intensity magnetic preconcentration-stage grinding and separation on a magnetite ore from makeng[J]. Metal Mine, 2016(8): 81 - 84. (in Chinese))