

# 土工布对砂质土渗透特性影响规律的试验研究\*

唐国航 王乃东<sup>†</sup> 陈 维 徐东晖

(北京航空航天大学交通科学与工程学院, 100191, 北京)

**摘要** 设计了由马氏瓶和渗透仪组成的常水头渗透试验系统, 展开了不设置土工布与设置土工布的对照试验, 分别研究了土工布放置位置和层数对土体渗透性能的影响规律; 土工布上部荷载对土工布自身渗透系数的影响。试验结果表明: 土工布可以有效减小土体的渗透系数, 增大其临界渗透破坏水头高度, 从而提升土体的渗透稳定性。但土工布上部荷载的增加, 会导致土工布自身渗透系数的变大。通过对试验数据的处理, 发现渗透系数随着土工布位置的增高与土工布层数的增多而减小, 临界渗透破坏水头高度随着土工布层数的增多而增大; 在设置单层土工布的情况下, 土工布放置于土体中间位置处时, 临界渗透破坏水头高度达到最大, 土体的渗流稳定性最好。使用本文所推导的公式, 可以较好地计算土体内土工布设置的埋深与土体渗透系数的对应关系。

**关键词** 砂质土; 土工布; 渗透系数; 渗透破坏

**中图分类号** TV41

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2021128

## 0 引言

土工布根据类型的不同, 能实现加固、隔离、排水、防护、预防渗透破坏等多种功能<sup>[1]</sup>, 使其在水利建设工程、环境工程、基础建设工程中的应用都十分广泛<sup>[2-3]</sup>。例如, 有学者将土工布用于土坝上游护坡, 并优化了护坡的设计参数<sup>[4]</sup>; 土工布在软土海堤加固中增加了海堤的稳定性<sup>[5]</sup>; 土工布还被用于治理低填浅挖路基的工程病害<sup>[6]</sup>。

对于土的渗透特性, 砂质土渗透系数的值远大于黏性土<sup>[7]</sup>, 而在水工结构的破坏模式中, 砂质土也比黏性土更容易发生管涌<sup>[8-9]</sup>、流土、潜蚀等渗透破坏现象<sup>[10]</sup>。Ma 等<sup>[11]</sup>在对渗流侵蚀的研究中, 将侵蚀产沙过程分为成长期、稳定期、衰退期和停滞期 4 个阶段, 细颗粒的流失决定 4 个阶段的发展。周健等<sup>[12]</sup>通过高倍数的奥林巴斯体显微镜发现, 无黏性土渗透破坏时, 土中大小颗粒分离: 大颗粒支撑荷载传递应力; 小颗粒不承担荷载就被渗流水带走。许波琴等<sup>[13]</sup>发现: 无黏性土的孔隙通道在渗流过程中, 因细颗粒被渗流水带走而形成多处分散性的细小裂缝; 当分散性细小裂缝互相连通时, 就会形成渗漏通道, 从而加速渗透破坏。土工布能够拦截渗流时被带走的细颗粒, 因此具有预防渗透破坏的功能, 使其广泛应用于砂质土边坡稳定<sup>[14-15]</sup>和地基处理<sup>[16]</sup>等工程问题。George

等<sup>[17]</sup>将土工布运用到海岸线防护工程后, 发现土工布为土体提供了“保护壳”, 同时仍然允许水通过。张达德等<sup>[18]</sup>进行了多组不同颗粒级配的标准砂渗流试验, 研究了土工布在反滤机制下的孔隙结构变化。段国军等<sup>[19]</sup>研究了土工布孔径对无黏性土反滤保土效果的影响。

综上, 在砂质土中设置土工布, 可有效减少细小颗粒的流失, 对防止砂质土的渗透破坏具有积极作用。但目前的研究着重于土工布孔径对渗透特性的影响, 对土工布放置的位置及放置的层数, 以及对渗流特性影响等研究相对较少, 因此本文通过室内试验的方法, 分别研究了在砂质土中不同的位置放置土工布, 对砂质土渗透系数及临界渗透破坏水头的影响等。

## 1 砂质土的渗透试验研究

**1.1 试验材料** 本次试验所采用的土样为北京市昌平区某基坑开挖后的地下砂质土, 含有一定量的细粒土, 如图 1 所示。

试样土的相对体积质量为 2.67。利用标准筛分试验获得砂质土的颗粒级配曲线(采用半对数坐标, 横坐标为对数坐标), 如图 2 所示。

试验选用的土工布为无纺布材质的土工布, 如图 3 所示, 土工布厚度为 0.06 cm, 有效孔径为 80~120  $\mu\text{m}$ 。

\* 国家自然科学基金资助项目(51978028)

<sup>†</sup> 通信作者: 王乃东(1981—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。研究方向: 土的本构和土中水汽迁移。E-mail: wangnd@buaa.edu.cn  
收稿日期: 2021-05-19



图 1 试验选用的砂质土土样

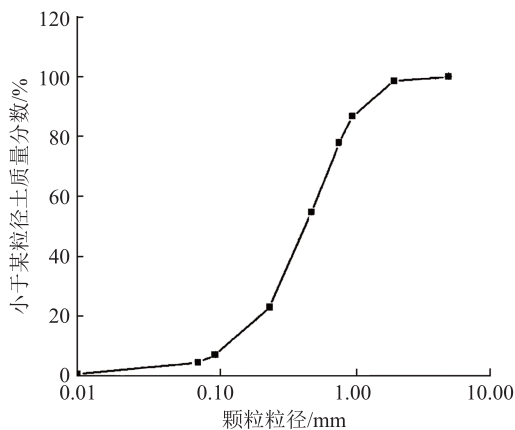


图 2 颗粒级配曲线



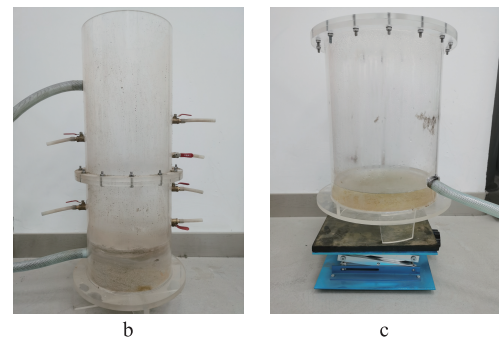
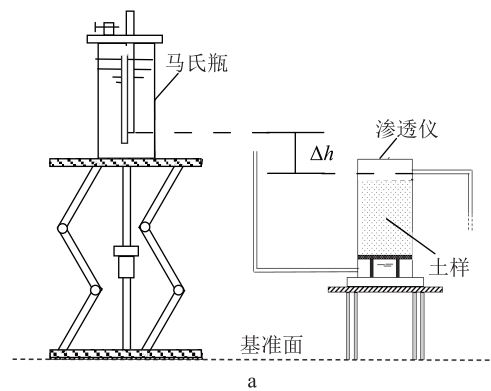
图 3 试验选用的土工布

**1.2 试验仪器** 渗透仪的材质为亚克力有机玻璃 (PMMA), 其外观为圆柱体, 如图 4 所示. 渗透仪的外径为 25 cm、内径为 23.36 cm, 筒壁的厚度为 0.82 cm, 高度为 68 cm; 渗透仪的底部为水室, 高度为 10 cm, 内部设置有支撑架, 距离水室底部 3 cm 处设置有进水口, 由导管和马氏瓶相连; 水室的上方为土样室, 高度为 40 cm; 土样室的上方设置有排出口, 距离土样室的顶部为 8 cm.

常水头供水采用马氏瓶, 马氏瓶底部设置有可以调节高度的升降台. 利用升降台调节好目标水头

高度后, 马氏瓶就可以为整个渗透过程与渗透破坏过程的试验提供稳定水头高度, 即马氏瓶进气管底端与渗透仪的排水口之差  $\Delta h$ . 马氏瓶内径为 30 cm, 储水高度为 40 cm, 最大储水质量为 28.27 kg.

渗透仪由马氏瓶供水, 马氏瓶内的水由水头差  $\Delta h$  的作用, 通过与渗透仪相连的导管进入位于渗透仪底部水室的进水口, 待水室内充满水后, 水室中的水开始由水室上方的土体样本室的底部流入, 自下而上对土样室内的土体样本进行渗透, 最终由土体样本的顶部流出, 从土样室上方的排水口排出. 渗透试验系统与实物如图 4 所示.



a 渗透试验系统示意; b 渗透仪实物; c 马氏瓶实物

图 4 渗透试验系统

将制备完成的土样放置在渗透仪内的土样室, 按照分层压实法进行装样, 确保每次装样的干密度为定值  $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

在研究土工布放入位置高度对渗透规律影响的试验过程中, 分别在 5 个不同埋置深度设置单层土工布, 距离试样顶部分别为 32.5、27.5、20.0、12.5 和 7.5 cm, 如图 5 所示.

在研究放置土工布层数对渗透规律影响的试验过程中, 分别设置 1~5 层土工布, 用以研究所放置土工布层数对渗透特性的影响规律. 多层土工布的放置位置与单层土工布设定的放置位置一致, 即距离试样顶部分别为 32.5、27.5、20.0、12.5 和 7.5 cm. 设置

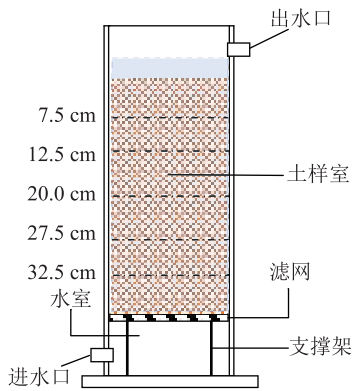


图5 研究用渗透仪示意

1层土工布时,土工布的放置位置为试样埋深32.5 cm处;设置2层土工布时,土工布的第1层放置位置位于试样埋深32.5 cm,第2层位于试样埋深的27.5 cm处;放置3层土工布时,土工布的第1层放置位置位于试样埋深的32.5 cm,第2层位于试样埋深27.5 cm,第3层位于试样埋深20.0 cm处;放置4~5层土工布时的放置位置如图5所示。

**1.3 渗透破坏临界水头测定** 渗透破坏的临界水头是判定土体渗流稳定性的重要指标,本文通过控制土工布在土体内的放置位置与土工布的放置层数,来研究土工布对土体渗透破坏临界水头的影响。

试验具体步骤:

1)使用量筒采集由排水口流出的1 min内的渗流水体积,连续3次测量,测量间隔为3 min;

2)判断渗流是否趋于稳定,即当3次测量与平均渗流量的差值小于其平均渗流量的1%时,视为稳定渗流;

3)当渗流趋于稳定时,缓慢提升马氏瓶的高度,每次提升1 cm后等待5 min,观察渗透仪中试样是否发生渗透破坏现象;

4)当出现渗透破坏现象时,停止提升马氏瓶的高度,此时所测得的 $\Delta h$ 即为该试样的临界渗透破坏水头。

**1.4 土体渗透系数测定** 常水头稳定水头高度为25 cm.试验开始后,使用量筒采集由排水口流出的1 min内的渗流水体积,连续3次测量,测量间隔为3 min.当3次测量与平均渗流量的差值小于其平均渗流量的1%时,视为稳定渗流。

通过获得的稳定渗流量,根据达西定律计算渗透系数,即

$$k = \frac{Vl}{A\Delta ht}, \quad (1)$$

式中: $V$ 为渗流水流出的渗透量, $\text{cm}^3$ ;  $t$ 为时间, $\text{s}$ ;  $k$ 为渗透系数, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $l$ 为流线长度, $\text{cm}$ ;  $\Delta h$ 为水位差, $\text{cm}$ ;

$A$ 为试样的截面积, $\text{cm}^2$ 。

**1.5 土工布上部荷载与渗透系数关系测定** 当土工布受到荷载而发生压缩变形时,其渗透性能也会受到影响<sup>[20]</sup>。

当土工布设置在土体内部,受到上部土体荷载作用,就可能发生变形,从而影响土工布自身的垂直渗透系数.原因是土工布在土体内设置的位置,会对土体的渗透系数造成影响.为了进一步探究土工布放置的位置对土体渗透系数的影响,测量上部土体荷载对土工布的影响是十分必要的。

试验具体步骤:

1)将土样按 $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的干密度放置在渗透仪内的土样室,高度5 cm,在土层上平整铺设1层土工布;

2)在土工布上按 $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的干密度依次放置目标高度(7.5、12.5、20.0、27.5和32.5 cm)的土样,并进行 $\Delta h=5 \text{ cm}$ 的常水头渗透试验,渗流稳定后,记录稳定渗流量,计算渗透系数;

3)比较不同高度的土样荷载下土工布的渗透系数,绘制土工布渗透系数随上部土体荷载变化的曲线图。

## 2 试验结果与分析

**2.1 土工布对砂质土渗透破坏临界高度的影响** 当水头增加至一定高度,渗透力大于土体的有效容重,土体中的较细颗粒在渗透力的作用下发生移动,逐渐破坏土体内部的稳定,造成土体结构变松,孔隙增大,形成孔洞、断层和表层塌陷,如图6所示。

通过在砂质土土体内不同的位置埋置不同层数的土工布,观察土工布埋置的位置与层数对土体渗透破坏的临界水头高度的影响.试验结果如表1所示。

通过表1可以看出,没有土工布的情况下所测得的渗透破坏的临界水头高度为50.5 cm,低于所有设置了土工布试验的情况下,所测得的渗透破坏临界水头高度.这表明,土工布具有“保土滤水”的能力,阻止了土中细颗粒的运动,从而阻止了渗透破坏的发生.因此,设置土工布对砂质土的渗流稳定性起到了一定的保障作用。

将表1中的数据分别绘制单层土工布的埋深与多层土工布的层数对砂质土渗透破坏临界水头的影响,如图7~8所示。

通过图7可以看出,土工布埋置在试样20.0与12.5 cm深度处,临界渗透破坏水头达到最大,即土工布设置在靠近试样中心位置时临界渗透破坏水头较大;而在靠近试样底部与顶部位置处设置土工布时,试样的临界渗透破坏水头最小.所以,将土工布设置

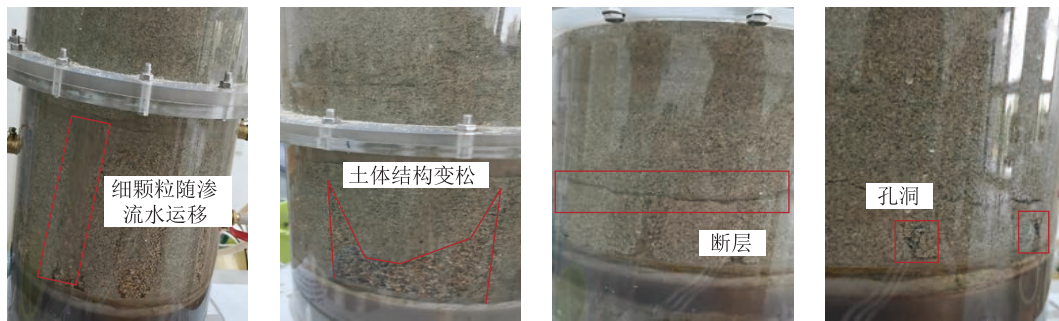


图 6 试样渗透破坏时产生的现象

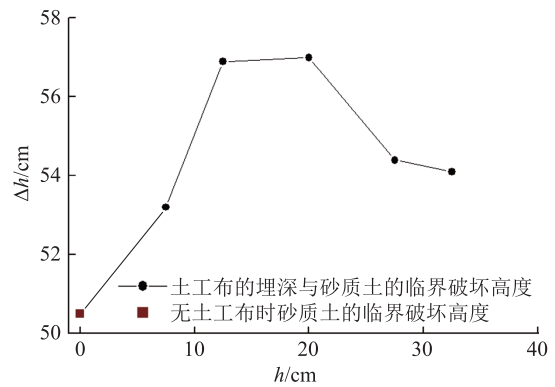
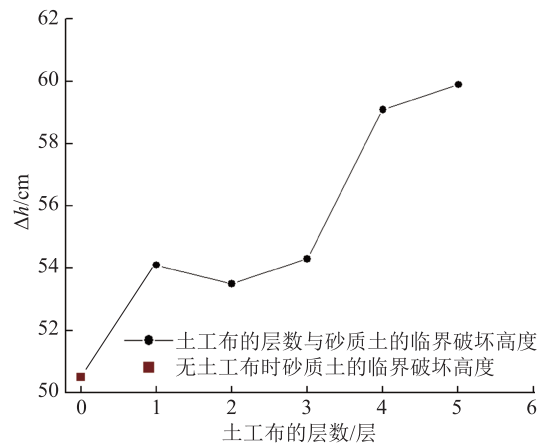
表 1 土工布埋深、层数与砂质土的临界渗透破坏水头 ( $\Delta h$ )

土工布设置的埋深与层数/cm					$\Delta h/cm$
7.5	12.5	20	27.5	32.5	
无土工布					
0	0	0	0	0	50.5
单层土工布					
0	0	0	0	1	54.1
0	0	0	1	0	54.4
0	0	1	0	0	57.0
0	1	0	0	0	56.9
1	0	0	0	0	53.2
多层土工布					
0	0	0	0	1	54.1
0	0	0	1	1	53.5
0	0	1	1	1	54.3
0	1	1	1	1	59.1
1	1	1	1	1	59.9

在靠近试样中心处的位置时,可以减少细小颗粒的流失量,同时阻碍了土体由于水流冲刷形成连贯的孔隙通道,因此可以有效延缓土体发生破坏,在一定程度上提升了土体的稳定性。

从图 8 可以看出,放入 1~3 层土工布时临界渗透破坏高度较为接近,但当放入 4 层土工布后,临界渗透破坏水头明显增大。总体来说,临界渗透破坏水头与土工布层数呈正相关:放入土工布层数越多,土体试样的临界渗透破坏水头越高,渗透过程历时也越长;在放入 5 层土工布时,临界渗透破坏水头最高达 9.9 cm;土工布放入的层数越多,水流就越难冲刷土体,以防形成大量的孔隙通道;只有当水位差足够大时,土工布发生变形、翻卷,造成土工布的功能性失效,土工布无法阻止土颗粒流失时,渗透破坏现象便会发生,如图 9 所示。

## 2.2 土工布对砂质土渗透系数的影响 通过在砂质

图 7 土工布埋深 ( $h$ ) 与临界渗透破坏水头 ( $\Delta h$ )图 8 土工布层数与临界渗透破坏水头 ( $\Delta h$ )

土土体内不同的位置埋置不同层数的土工布,观察土工布埋置的位置与层数对土体渗透系数的影响。试验结果如表 2 所示。

通过表 2 可以看出,没有土工布的情况下,所测渗透系数为  $0.02848 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,大于所有设置了单层土工布或多层土工布试验条件下所测得的渗透系数。这表明,由于土工布的存在,水在砂质土试样中的流动受到了一定的限制,土工布可以在一定程度上对排水造成阻滞,减小砂质土的渗透系数。

根据表 2 中的数据,分别绘制单层土工布的埋深与多层土工布的层数对砂质土渗透系数的影响曲线,如图 10~11 所示。



图 9 试样内设置多层土工布时发生的渗透破坏

表 2 土工布埋深、层数与砂质土的渗透系数 (k)

土工布设置的埋深与层数/cm					k/(cm · s <sup>-1</sup> )
7.5	12.5	20.0	27.5	32.5	
无土工布					
0	0	0	0	0	0.02848
单层土工布					
0	0	0	0	1	0.02765
0	0	0	1	0	0.02704
0	0	1	0	0	0.02734
0	1	0	0	0	0.02621
1	0	0	0	0	0.02556
多层土工布					
0	0	0	0	1	0.02765
0	0	0	1	1	0.02626
0	0	1	1	1	0.02556
0	1	1	1	1	0.02504
1	1	1	1	1	0.02444

由图 10 可以看出: 土工布埋置在试样 32.5 cm 处所测得的渗透系数最大, 而埋置在试样 7.5 cm 深度处所测得的渗透系数最小; 土工布埋置在试样 20.0 与 27.5 cm 处所测得的渗透系数较为接近, 但总体上呈现出土工布设置的深度越浅, 渗透系数越小的规律。

从图 11 可以看出: 不设置土工布时所得渗透系数最大; 随着放入试样的土工布层数的增多, 渗透系数也相应减小, 放入 5 层土工布时, 渗透系数减小到

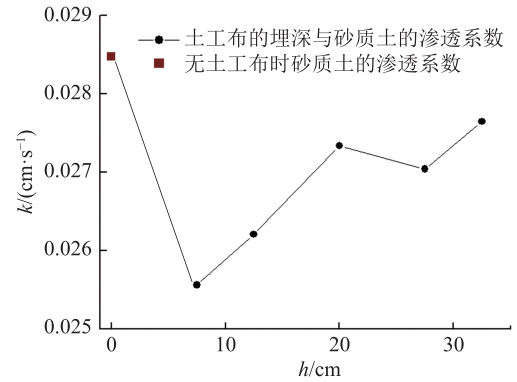


图 10 土工布埋深 (h) 与渗透系数 (k)

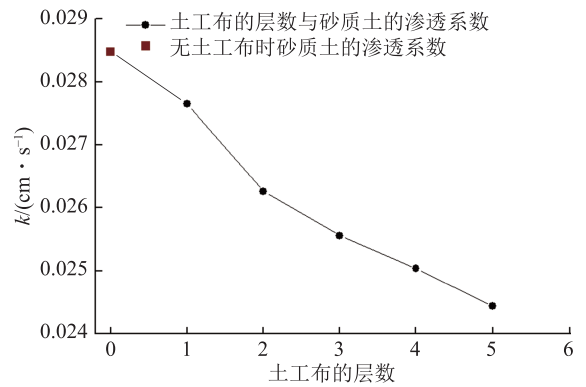


图 11 土工布层数与渗透系数 (h)

0.02444 cm · s<sup>-1</sup>, 这说明增加土工布层数能有效削弱土体的透水性, 显著降低土体的渗透系数. 另外, 从图 11 还可以观察到渗透系数与土工布层数之间具有较强的线性相关性。

**2.3 土压力对土工布渗透系数的影响** 通过在土工布顶部施加不同土压力荷载, 测定土压力荷载对土工布渗透系数的影响. 因为渗流的方向是自下而上, 因此土工布实际受到的上部荷载是土工布顶部土的有效容重减去土的渗透力. 设土工布下方土体高度  $h_1=5$  cm; 上方土体高度为  $h_2$ ; 上部荷载  $F$  可表示为

$$F = \frac{d-1}{1+e} \gamma_w \cdot h_2 - \frac{\Delta h}{h_1+h_2} \cdot h_2 \cdot \gamma_w, \quad (2)$$

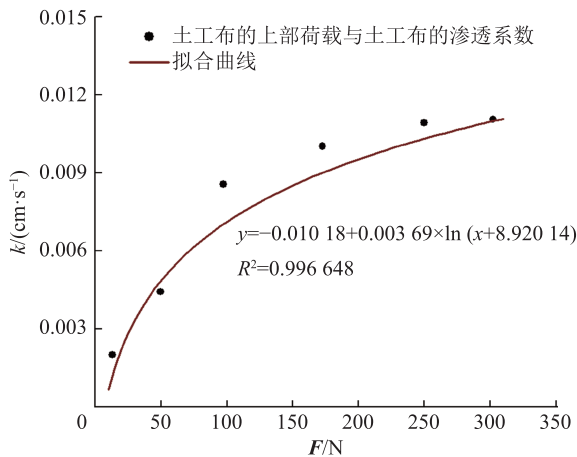
式中:  $d$  为土的相对体积质量;  $e$  为孔隙比;  $\gamma_w$  为水的容重,  $N \cdot cm^{-3}$ .

通过式 (2) 对试验结果进行处理, 得到土工布  $F$  与  $k$  的关系, 如表 3 所示。

从表 1 可以看出: 当土工布上部土体高度仅为 3.0 cm 时, 土工布的上部荷载较小, 土工布的渗透系数较大; 当土工布上部土体高度达到 32.5 cm 时, 土工布上部荷载达到最大, 同时土工布的渗透系数也达到最大. 根据表 3 的数据, 绘制土工布上部荷载与渗透系数的关系曲线, 如图 12 所示。

表 3 土工布的上部荷载 ( $F$ ) 与土工布的渗透系数 ( $k$ )

土工布上部土体高度/cm	$F/N$	$k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
3.0	13.1489	0.002008
7.5	49.7472	0.004430
12.5	97.1977	0.008569
20.0	172.6592	0.010030
27.5	250.0987	0.010942
32.5	302.2378	0.011071

图 12 土工布上部荷载 ( $F$ ) 与土工布渗透系数 ( $k$ )

由图 12 可以看出, 土工布的上部荷载与土体的渗透系数之间呈现对数关系, 这可能是因为本文选取的土工布较薄, 仅为 0.06 cm. 在较高的上部荷载作用下, 土工布的上部荷载会导致土工布本身变形, 使土工布的有效孔径增大. 当土工布的有效孔径增大时, 土颗粒和渗流水更容易穿过土工布, 导致土体的渗透系数随之增大. 因此, 在土内布置土工布时, 要特别注意土工布的位置, 避免土工布上部荷载过大, 从而影响土工布的渗透系数.

**2.4 土工布的埋深对土体渗透系数影响的计算** 当土工布布置在土体内部时, 可以将土工布看作是 1 个渗透系数较低的成层土. 因为渗流水的方向是自下而上, 当渗流达到稳定状态以后, 土体在垂直渗流过程中各层流量是相等的, 也就是说土工布内的渗流水量与砂质土土层内的渗流水量是一致的. 因此, 根据达西定律可知, 各土层水头差之和是马氏瓶与渗透仪的水头差, 即总水头差  $\Delta h$ . 垂直面积流量  $q$  可表示为

$$q = ki, \quad (3)$$

式中  $i$  为水力坡降. 各层流量相等, 因此有

$$q_1 = k_1 \frac{\Delta h_1}{b_1} = q_2 = k_2 \frac{\Delta h_2}{b_2}, \quad (4)$$

式中:  $q_1$  为通过土工布的垂直面积流量, mL;  $q_2$  为通过土的垂直面积流量, mL;  $k_1$  为土工布的渗透系数,  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $k_2$  为素土的渗透系数,  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta h_1$  为土工布层的水头差, cm;  $\Delta h_2$  为素土层的水头差, cm;  $b_1$  为土工布厚度, cm;  $b_2$  为素土层厚度, cm.

土工布与砂质土水头差之和即为总水头差, 因此埋置有土工布的砂质土的渗透系数  $k$  可表示为

$$k = \frac{\Delta h}{\sum \frac{b_1}{k_1} + \sum \frac{b_2}{k_2}}, \quad (5)$$

根据前章土工布上部荷载与土工布渗透系数的关系, 得到拟合方程

$$k(F) = -0.01018 + 0.00369 \times \ln(F + 8.92014). \quad (6)$$

将式(2)与(6)代入式(5)中, 则可得到土工布在土体中的放置方式与土体渗透系数关系的表达式, 即

$$k = \Delta h / \left( \sum b_1 / -0.01018 + 0.00369 \times \ln \left( \frac{d-1}{1+e} \gamma_w \cdot h_2 - \frac{\Delta h}{h_1+h_2} \cdot h_2 \cdot \gamma_w + 8.92014 \right) + \sum \frac{b_2}{k_2} \right). \quad (7)$$

利用式(7)可以计算出本文选用的无纺布土工布在土中布置任意位置和任何层数时, 整段砂质土的渗透系数.

**2.5 计算值与试验值的对比** 代入本文试验条件到式(7): 土的相对体积质量  $d=2.67$ 、土工布厚度  $b_1=0.06$  cm、总水头差  $\Delta h=25$  cm、孔隙比  $e=0.5706$ 、素土的渗透系数  $k=0.02848$   $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $h_1$  与  $h_2$  取表 2 中单层土工布布置的位置, 得到在土体中布置单层土工布的位置与土体渗透系数的关系, 与表 2 中的试验结果对比, 结果如图 13 所示.

从图 13 可以看出, 式(7)与试验值有较好的拟合结果, 可以较好地反映土工布的埋深与土体渗透系数的对应关系. 土工布受到的上部荷载为上部土体荷载减去渗透力, 土工布的设置位置反映了土工布的上部荷载. 因此, 当土工布的埋置深度变深时, 土工布受到的上部荷载相应增大, 而土工布的上部荷载会使土工布发生变形, 影响自身的渗透性能. 本研究使用的土工布, 自身渗透系数与受到的上部荷载呈对数关系, 即当土工布受到的上部荷载增加时, 土工布自身的渗透系数增大, 从而造成整段土体的渗透系数增大. 因此在土体中埋置土工布时, 需要特别注意土工布在受到上部荷载发生变形后引起土工布自身渗透系数的改变.

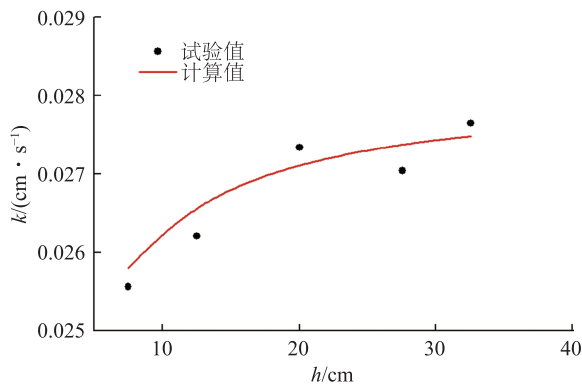


图 13 试验值与计算值的对比(单层土工布埋深 ( $h$ ) 与土体渗透系数 ( $k$ ) 的关系)

### 3 结语

本研究在自主设计了试验仪器与试验方案的条件下,主要探究了土工布对砂质土渗透特性的影响规律、土工布自身渗透系数与所受上部荷载之间的对应关系,比较了土工布层数、放置位置对渗透破坏临界水头高度和渗透系数产生的影响,推导了相应公式,与试验结果进行对比,结论如下:

1) 土工布在改善砂质土渗透性能方面具有一定的作用,在土体中设置土工布,可以有效阻滞渗透排水过程,减小砂质土的渗透系数,同时阻碍土体中水流的冲刷所形成的连贯孔隙通道,延缓渗透破坏进程,增强了土体的稳定性。

2) 仅设置单层土工布时,在一定的高度范围内,土工布的放置埋深越浅,土体的渗透系数越小,而土工布放置于土体的中间位置时,在提升临界渗透破坏水头上效果最明显。

3) 将土工布分开放置到土体的不同位置处时,土工布的放置层数与渗透系数呈现负相关的线性关系,而与土体的临界渗透破坏水头则呈现正相关关系;放置的土工布层数越多,细小颗粒的运动范围受到的限制越大,对土体渗透系数与临界渗透破坏水头的影响越显著。

4) 本研究所使用的土工布自身的渗透系数与所受上部荷载呈对数关系。使用本研究所推导的公式可以较好地拟合土工布在土体内设置的埋深与土体渗透系数的对应关系。

### 4 参考文献

[1] 靳向煜,吴海波,任慕苏,等.我国土工织物技术及应用前景[J].东华大学学报(自然科学版),2014,40(2):157  
 [2] 陈善民,周洪峰,孟松兔,等.海堤工程软基土工布加筋的抗滑作用分析[J].岩土力学,2003,24(4):661

[3] 张嘎,罗方悦,刘扬,等.水位骤降环境土工织物加固土坡的离心模型试验[J].清华大学学报(自然科学版),2017,57(7):728  
 [4] 吴美鸿.土工聚合物在北溪引水工程加固中的应用[J].人民长江,2003,34(1):31  
 [5] 潘炳成,金德钢.土工织物在软土海堤加固中的应用分析[J].人民长江,2015,46(增刊1):80  
 [6] 徐欢乐,巩宁,党铁虎.东北季冻区复合土工布处治低填浅挖路基病害技术研究[J].公路,2020(6):157  
 [7] WAN C F, FELL R. Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(3): 401  
 [8] TOMLINSON S S, VAID Y P. Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1): 1  
 [9] 毛昶熙,段祥宝,吴良骥.砂砾土各级颗粒的管涌临界坡降研究[J].岩土力学,2009,30(12):3705  
 [10] MOFFAT R, FANNIN R J. A hydromechanical relation governing internal stability of cohesionless[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(3): 413  
 [11] MA D, DUAN H, Li X, et al. Effects of seepage-induced erosion on nonlinear hydraulic properties of broken red sandstones[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2019, 91: 102993  
 [12] 周健,白彦峰,姚志雄.管涌型土滤层防治的细观试验研究[J].水利学报,2010,41(4):390  
 [13] 许波琴,陈建生,梁越.细砂管涌破坏试验及渗透变形分析[J].水电能源科学,2012,30(6):66  
 [14] 吴庆华,张家发,武金博,等.非饱和导排结构控制降雨入渗的边坡物理模型试验[J].岩土工程学报,2017,39(1):154  
 [15] LIU Z Z, YAN Z X, REN Z H, et al. Reasonable selection of yield criteria for quantitative analysis of unsaturated soil slope stability[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(7): 1304  
 [16] 向继华,曹琰,祁先涛.竹网+土工织物在软土地基浅表层处理中的应用[J].水运工程,2015(8):158  
 [17] GEORGE R, ROBERT M. Geotextile tube assessment using a hanging bag test[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, 24(2): 129  
 [18] 张达德,丁元皓,程家玲.反滤机制下土工布孔隙结构变化研究[J].岩土工程学报,2004,26(4):500  
 [19] 段国军,张顺福,介玉新.滤网孔径和层数对反滤保土效果的影响分析[J].水利水电技术,2020,51(1):39  
 [20] 王向钦,倪冰选,张鹏.长丝纺黏针刺非织造土工布的垂直渗透性能[J].东华大学学报(自然科学版),2014,40(2):234

## Geotextiles impact on sandy soil permeability

TANG Guohang WANG Naidong<sup>†</sup> CHEN Wei XU Donghui

( School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, 100191, Beijing , China)

**Abstract** A permeation test system of constant water head composed of Mariotte flash and permeation instrument was designed to study effect of geotextile placement position and layer number on soil permeability, and upper load influence on permeability coefficient of geotextiles. Geotextile was found to reduce effectively permeability coefficient of soil but increase height of critical seepage failure water head, thus improving permeability stability of soil. However, increase in upper load of geotextile was found to increase permeability coefficient of geotextile itself. Permeability coefficient was found to decrease with enhanced position of geotextile and increased layer numbers. Seepage failure critical water head height increased with increasing geotextile layers. For monolayer geotextile, when geotextile was placed in middle position of soil, seepage failure critical water head height reached a maximum, seepage stability of soil was the best. With the formula derived in this work, a relationship between permeability coefficient of soil and buried depth of geotextile in soil can be calculated.

**Keywords** sandy soil; geotextile; permeability coefficient; penetration damage

【责任编辑: 陆有忠】