

# 土工织物-非稳定土体反滤系统中滤饼的研究

徐俊

(武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

**【摘要】** 在土-土工织物组成的反滤系统中, 如果被保护土是非稳定土, 则在渗流作用下被保护土中会有大量细粒土发生移动, 很容易在织物与土层的交界面上形成一层薄滤饼, 滤饼的厚度及渗透系数成为影响系统反滤效果的重要因素。根据多孔介质中的渗流与沉积理论, 研究了在非稳定土体渗滤过程中, 随着细粒土的迁移滤饼的厚度与织物厚度及渗透系数、外部压力等因素之间的关系, 并给出了解析表达式。

**【关键词】** 非稳定土; 土工织物; 淤堵; 滤饼

**【中图分类号】** TV 44

## Study on Filter Cake in the Filtration System of Geotextiles-Unstable Soils

Xu Jun

(School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072 China)

**【Abstract】** In the soil-geotextile filtration system, a large amount of fine particles will migrate under the drag forces exerted by the flow if the soil is internally unstable. A layer of thin filter cake is prone to be formed between the interface of soils and geotextiles. The thickness and permeability coefficient of the cake become the important factors affecting the filtration effect. Based on the theory of seepage and sediment in the porous medium, the relations between the cake's thickness and other factors such as geotextiles thickness and permeability coefficient, outside pressure, fine particles content are studied during the migration of fine particles in the process of unstable soils' filtration. The analytical expressions are given.

**【Key Words】** unstable soils; geotextiles; clogging; filter cake

### 0 引言

在我国土工织物主要用于排水和反滤, 其用量已占各种应用之首。由于土工织物除具有传统粒状材料反滤层相似的功能外, 还具有其独特特点, 如产品种类较多、运输方便、造价低、强度高、整体性和耐久性较好等特点, 使得土工织物反滤在防洪减灾、跨流域调水、生态保护及城市建设等重要领域得到了广泛的应用。但是对土工织物反滤机理的研究却没有跟上其应用发展的步伐。在工程实践中, 土工织物滤层的淤堵成了影响其长期使用效果的大问题, 在堤防工程中, 有的部门甚至规定土工织物不得用于堤防的贴坡反滤排水<sup>[1]</sup>。观察取自现场的土工织物, 亦可发现迎水面已形成泥皮。尤其当被保护土为非稳定土的情况, 细粒在粗粒骨架内的运动对系统的淤堵产生了重要影响, 淤堵主要是由于细颗粒在穿越滤层过程中沉积于织物内部及其表面, 在土-土工织物界面附近形成了一层低渗透性的薄滤

饼, 从而使得渗水很难通过织物滤层, 导致反滤系统失效。

### 1 非稳定土体渗滤过程中滤饼形成的机理

根据 Giround 等人的观点, 级配不连续或内部有不稳定细粒组的土, 在渗滤过程中细粒土较易发生迁移, 大部分这种土属于内部非稳定土。在这种土中设置织物滤层后, 如果阻滞颗粒的滤层孔径合适, 在水流的拖曳力作用下, 大量细粒土会在土工织物内部及表面沉积。根据目前土力学的概念, 土体受荷(外荷或土层自重)时应力传播并不是均匀地分布到各土粒的, 而是按照应力枝传递的, 应力枝经过的土粒(或土团)为受荷的骨架, 而在应力枝内包含的土粒则基本上不受力, 那些不受力且粒径小于骨架孔隙的细粒称为自由土粒, 它们与水结合形成的悬浮液很容易在渗透力的推动下, 在土骨架组成的多孔介质中, 沿着水流向土工织物迁移。部分细粒将进入土工织物并被阻挡下来, 导致织物的渗透性

会有所下降,相应的水力坡降有所增加。由于总的水头不变,局部地区水头损失的增加使得相邻部位的水头损失有所下降,亦即是织物水头损失的增加导致相邻土层水力坡降的减少,随着细粒土在织物内部和表面越积越多,其水头损失继续增大,直至相邻土层的水力坡降减小到某一临界值,在该水力坡降下渗透力不足已带动土粒,细粒的迁移才趋于稳定。在内部不稳定的土层中,细颗粒随着渗滤的进行迁移更为频繁,以至于在织物表面更容易形成一层相对不透水的滤饼。

Bhatia(1991)等人的试验<sup>[3]</sup>表明,当土工织物的透水性降低而开始影响到系统的透水性之前,进入较厚的土工织物的细颗粒将比薄的要多,对于定量的细粒土,在土体和织物交界面上形成薄饼比等量的细粒土在织物内部淤积对土体-土工织物系统的透水性危害更大。由此可见,在织物外表面上形成的滤饼的渗透系数及其厚度成为影响系统渗透性能的重要因素。本文以多孔介质中的渗流与沉积理论<sup>[4,5]</sup>为基础,研究了在非稳定土体渗滤过程中,随着细粒土的迁移,在土体与织物交界面上形成的滤饼厚度与织物厚度及其渗透系数、外部压力等因素之间的关系进行了研究。

## 2 细颗粒的沉积和系统内的渗流方程

### 2.1 细颗粒的沉积

为了研究非稳定土体渗滤过程中滤饼厚度与其它因素的关系,由大于 0.5 mm 的中砂(文中称之为粗颗粒)和小于 0.075 mm 的粘性土(细颗粒)按比例混合而成的非连续级配土为研究对象,土样总质量为  $m_s$ ,其中细颗粒含量质量分数为  $m_s \cdot c$ (见图 1)。对由水饱和的土-土工织物系统,假定初始情况下细颗粒与水组成的悬浮液均匀地分布于粗颗粒所组成的骨架孔隙中,其孔隙体积  $V_w$  等于水的体积  $V_{sc}$  与细粒土体积之和

$$V_w + V_{sc} = V_{sG} \cdot e_G,$$

$$\text{即: } \frac{Wm_s}{\gamma_w} + \frac{cm_s}{d_{sc}\gamma_w} = (1-c) \frac{m_s}{d_{sc}\gamma_w} e_G \quad (1)$$

式中:  $m_s$  为土粒总的质量;  $V_{sG}$  为粗颗粒土的体积;  $V_{sc}$  为细颗粒土的体积;  $\gamma_w$  为水的重度;  $w$  为含水量;  $c$  为细颗粒占土粒质量的质量分数;  $e_G$  为粗颗粒孔隙比;  $d_{sc}$ 、 $d_{sG}$  为分别为细颗粒土与粗颗粒的相对体积质量。

式(1)可化简为

$$w + \frac{c}{d_{sc}} = (1-c) \frac{e_G}{d_{sG}} \quad (2)$$

式(2)即表示水和细颗粒在粗颗粒孔隙中所占体积的大小关系。

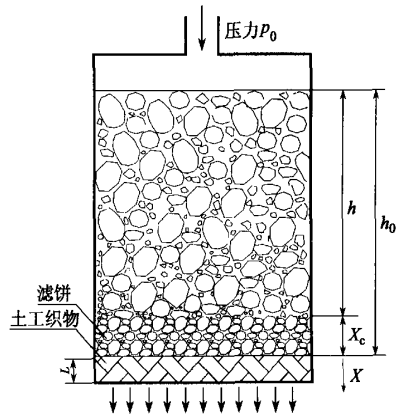


图 1 非稳定土渗滤示意图

由于悬浮液的密度大于水的密度,在渗滤过程中,随着水的渗出和细粒土不断向下迁移与沉积,土体上部粗颗粒孔隙逐渐被水充满,假定该悬浮液的平均密度近似保持不变,即这部分悬浮液中  $V_w$  在  $dt$  时间内减少  $dV_w$ ,  $V_{sc}$  则同时减少  $dV_{sc}$ 。设细粒土的体积分数为  $f_{sc} = \frac{V_{sc}}{V_{sc} + V_w}$

$$\text{则} \quad dV_{sc} = \frac{f_{sc}}{1-f_{sc}} dV_w \quad (3)$$

在渗滤过程中,部分细粒土沉积于织物内部孔隙中并与织物形成纤维胶结物,或以滤饼的形式沉积在织物外表面上,还有一部分随水流穿过滤层。令  $\delta A$  是其上有颗粒沉积的面积单元,  $dx_c$  是在时间  $dt$  内土颗粒沉积形成的滤饼厚度增量,当沉积主要集中在土工织物外表面上时,假设滤饼的孔隙率为  $n_c$ ,可得滤饼中细粒土的体积为

$$dV_{sc} = (1-n_c) \delta A dx_c \quad (4)$$

如果此区域是在土工织物的内部,则可认为滤饼是由细粒土和填满土粒的织物层组成,假设此时滤饼的孔隙率为  $n'_c$ ,则细粒土的体积为

$$(1-n'_c) \delta A dx_c$$

在  $dt$  内如果水流的某个体积流经面积  $\delta A$ ,设垂直于  $\delta A$  的单位面积的流速为  $v_n$ ,于是有

$$dV_w = v_n \delta A dt \quad (5)$$

本文对于细粒土在织物内部沉积以及随水流穿过滤层的情况暂不考虑,只研究在织物外表面上形成滤饼的情况,联立式(3)、式(4)、式(5)即可得该条件下滤饼厚度随时间变化的表达式

$$\frac{dx_c}{dt} = \frac{f_{sc}}{(1-n_c)(1-f_{sc})} \cdot v_n \quad (6)$$

$$\text{令 } \omega_e = \frac{f_{sc}}{(1-n_c)(1-f_{sc})} \quad (7)$$

式中:  $\omega_e$  定义为外沉积因子。

将  $f_{sc} = \frac{V_{sc}}{V_{sc} + V_w}$  代入上式可得,

$$\omega_e = \frac{V_{sc}}{(1-n_c)V_w} = \frac{1}{1-n_c} \times \frac{c m_s / d_{sc} \gamma_w}{\omega m_s / \gamma_w} \quad (8)$$

可知沉积因子与细粒土的质量分数成正比。

由于滤饼是弱可压缩的,  $n_c$  随着压力而变化, 对于同一土样  $\omega_e$  并不是严格意义上的常量, 但在恒定的压差下将其作为常量处理, 不会导致过大误差。将式(7)代入式(6)可得滤饼形成的速率为

$$\frac{dx_c}{dt} = \omega_e v_n \quad (9)$$

## 2.2 反滤系统内的渗流方程

在图1中, 流体在滤饼和土工织物内部的流动服从达西定律, 设  $h_0$  为土样的总厚度, 滤饼的渗透系数为  $k_c$ , 厚度为  $x_c$ , 织物的渗透系数为  $k_g$ , 厚度为  $l$ 。将滤液和滤饼视为不可压缩的, 则由达西定律有

$$q = -k_c A \cdot \frac{\partial \left( \frac{p}{\gamma_w} - x \right)}{\partial x} \quad (10)$$

式中:  $q$  为滤液单位时间内的体积流量,  $A$  为滤饼的截面积, 取图1坐标系时, 位置水头  $x$  在织物面以上取负值,  $g$  为重力加速度。若将  $k_c$  替换成  $k_g$ , 式(10)同样适合于土工织物内部流体的流动。因为流体不可压缩, 由连续性方程得

$$\frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$\text{则 } \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0$$

其解为:

$$\begin{cases} p = ax + b & -x_c \leq x \leq 0 \\ p' = a'x + b' & 0 < x < l \end{cases} \quad (12)$$

边界条件是

$$\begin{cases} -k_c \left( \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial p}{\partial x} - 1 \right)_{x=0} = -k_g \left( \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial p'}{\partial x} - 1 \right)_{x=0} \\ p(-x_c) = P_0 + \gamma_m h \\ p'(0) = p(0) \\ p'(l) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_0$  是土体上部压力, 在渗滤试验中常利用恒

定的水头差来获得;  $\gamma_m$  为细颗粒与水组成的悬浮液容重, 其大小等于  $\frac{\omega + c}{\omega + c/d_{sc}} \cdot \gamma_w$ ;  $h$  是滤饼上层土的厚度(即从土体上表面至滤饼表面的距离), 将式(13)代入式(12)可得

$$p = - \frac{P_0 + \gamma_m h + \left( 1 - \frac{k_c}{k_g} \right) \gamma_w l}{x_c + \frac{k_c}{k_g} l} \cdot x + b \quad (14)$$

再将式(14)代入式(10)可得

$$q = \frac{k_c A}{\gamma_w} \cdot \frac{P_0 + \gamma_w h + \left( 1 - \frac{k_c}{k_g} \right) \gamma_w l}{x_c + \frac{k_c}{k_g} l} \quad (15)$$

进而可以导出系统渗流速率:

$$v_n = \frac{q}{A} = \frac{k_c}{\gamma_w} \cdot \frac{P_0 + \gamma_m h + \left( 1 - \frac{k_c}{k_g} \right) \gamma_w l}{x_c + \frac{k_c}{k_g} l} \quad (16)$$

从式(16)可以看出, 渗流速率与压力、滤饼和织物的渗透系数及滤饼厚度变化之间的关系。压力  $P_0$  越大、织物渗透系数  $k_g$  越大, 则系统渗滤越快; 随着滤饼厚度  $x_c$  的增加, 渗滤过程渐缓。

将式(16)代入式(9)中, 且令  $h = h_0 - x_c$  可得滤饼形成的速率:

$$\frac{dx_c}{dt} = \omega_e k_c \cdot \frac{\frac{P_0}{\gamma_w} + \frac{\gamma_m}{\gamma_w} (h_0 - x_c) + \left( 1 - \frac{k_c}{k_g} \right) l}{x_c + \frac{k_c}{k_g} l} \quad (17)$$

式中: 假定土体在渗滤过程中总高度保持不变(即  $h_0$  一定), 由室内试验结果<sup>[7]</sup>可知, 织物的渗透系数远远大于滤饼的渗透系数, 即:  $k_g \gg k_c$ , 可假定  $1 - \frac{k_c}{k_g} \approx 1$ ,  $x_c + \frac{k_c}{k_g} l \approx x_c$ , 则可以将式(17)简化为

$$\frac{dx_c}{dt} = \frac{A}{x_c} - B \quad (18)$$

$$\text{其中 } \begin{cases} A = \omega_e k_c \left( \frac{P_0}{\gamma_w} + \frac{\gamma_m}{\gamma_w} h_0 + l \right) \\ B = \omega_e k_c \end{cases}$$

已知初始条件为:  $t = 0, x_c = 0$

将式(18)积分可得:

$$\frac{A}{B} \ln \left( \frac{A}{B} - x_c \right) - \left( \frac{A}{B} - x_c \right) + Bt = \frac{A}{B} \left( \ln \frac{A}{B} - 1 \right) \quad (19)$$

式(19)即表示在  $t$  时间内, 滤饼的厚度  $x_c$  与

物及滤饼渗透系数、外部压力、织物厚度等因素之间的解析关系。

为了检验该公式的合理性,现将实践中常遇到的非稳定土样及针刺无纺布物的参数代入上式。取  $h_0 = 100 \text{ mm}$  的土样,粗颗粒松散状态时可取  $e_c = 0.9, d_{sc} = 2.67$ ,细粒土组成的滤饼渗透系数相当于粘性土层的渗透系数,可取  $n_c = 0.4, k_c = 4.8 \times 10^{-9} \text{ m/s}, d_{sc} = 2.75$ ,细小颗粒占总重比例小于 30% 的土体不稳定,可取  $c = 20$ ,由式(2)可得  $w = 20$ ,由式(8)可得  $\omega_e = 0.61$ ;选用针刺无纺布物作为滤层,可取  $k_g = 4 \times 10^{-3} \text{ m/s}, l = 3 \text{ mm}$ ;假设在常水头  $\frac{P_0}{\gamma_w} = 350 \text{ mm}$  的水柱下进行渗滤,将以上参数代入 A、B 的表达式可得滤饼厚度  $x_c$  随时间变化的方程,由于式(19)是关于  $x_c$  的隐式方程,滤饼厚度随时间的变化关系曲线见图 2。

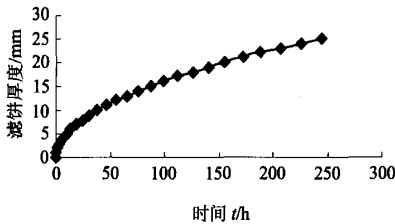


图 2 滤饼厚度随时间变化曲线

### 3 结论与建议

研究滤饼的形成造成非稳定土体中的淤堵问题,引入多孔介质中的渗流与沉积理论,推导出了滤饼厚度与外界压力、土样的组成、土工织物的厚度及渗透系数之间的解析关系,并引入实践中常见非稳定土体及无纺布物的参数进行验算,可得出以下结论

1)因为  $\omega_e$  与土骨架内可自由移动细粒土的含量成正比,由式(16)可知:细粒含量越多,则  $\omega_e$  越大,导致滤饼的形成速率也随之增大,说明在渗滤过程中,随着土样中所含自由移动细粒土的增加,系统发生淤堵的可能性也逐渐增大。

2)由式(16)可得: $P_0$  越大,则  $\nu_n$  值越大,即系统的渗滤随着作用在土-土工织物系统上的垂直荷

载增大而变快,亦即土-土工织物反滤系统在较大压力下,能在较短时间内达到渗流稳定状态,即可在较短时间内检测出土工织物工作的可靠性。

3)对于一般的非稳定土体,从图 2 可以看出滤饼厚度随时间的变化关系,其值在 24 h 内增长较快,可达 8 mm,其后趋缓,且经 10 d(约 240 h)渗滤后,其厚度可达 25 mm。

4)式(19)是建立在假定细颗粒与水组成的悬浮液始终保持相同密度、且在渗滤过程中系统内部始终满足达西定律的基础之上,该条件只能在渗滤前期具备,随着渗滤的进行滤饼厚度逐渐增加,细颗粒的迁移也渐趋于稳定时,方程会出现较真实值偏大的误差。

### 参 考 文 献

- 1 王 钊. 水利工程应成为土工合成材料应用的典范. 见: 全国第五届土工合成材料学术会议论文集. 香港: 现代知识出版社, 2000. 116~123
- 2 陆士强, 王 钊, 刘祖德. 土工合成材料应用原理. 北京: 水利电力出版社, 1994. 56~59
- 3 Bhatia S K, Mlynarek J, et al. Effect of Pore Structure of Nonwoven Geotextile on Their Clogging Behavior. Proceedings of Geosynthetic, 1991. 629~642
- 4 R. E. 科林斯. 流体通过多孔材料的流动. 北京: 石油工业出版社, 1984. 203~209
- 5 J 贝尔. 多孔介质流体动力学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983. 91~94
- 6 陈 轮, 童朝霞. 拉应变对土工织物-非连续级配土淤堵特性的影响. 水力发电学报, 2003(2): 97~102
- 7 陈星柏. 关于土工织物反滤层的渗透准则. 水利学报. 1990(9): 47~51
- 8 罗 茜, 徐新阳. 关于过滤与滤饼可压缩性的探讨. 过滤与分离. 1999(1): 1~7
- 9 崔中兴, 王志刚. 土工织物滤层的 P-K 与淤堵试验研究. 西北水资源与水工程, 1995, 12(3): 36~45
- 10 ThKossendey. Long-term Performance Assessed From Compatibility Tests Geotextiles and Geomembranes. 1999 (117): 281~298

收稿日期: 2005-07-27