

DOI: 10.11779/CJGE2016S1027

# 黏性土渗透淤堵室内模拟试验及分析

翟超<sup>1</sup>, 郭伟峰<sup>2</sup>, 严驰<sup>2</sup>

(1. 天津市勘察院, 天津 300191; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 从黏性土的级配、土工织物的孔径大小、水力梯度和黏性土干密度等因素考虑, 根据淤堵试验得出的梯度比的数据, 分析土工织物在不同孔径大小、不同黏粒含量、不同黏性土干密度、不同水力梯度条件下的淤堵情况, 根据所得试验结果, 为今后不同工程对土工织物的选择提供一定参考。

**关键词:** 梯度比; 等效孔径; 水力梯度; 干密度

中图分类号: TU415 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S1-0147-05

**作者简介:** 翟超(1988-), 男, 河北沧州人, 工程师, 主要从事岩土工程中基坑、地铁结构以及真空预压工程的监测工作。E-mail: zhaichao1222@126.com。

## Laboratory model tests and mechanism of infiltration clogging effect of clayey soil

ZHAI Chao<sup>1</sup>, GUO Wei-feng<sup>2</sup>, YAN Chi<sup>2</sup>

(1. Tianjin Institute of Geotechnical Investigation Surveying, Tianjin 300191, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The gradation of clay, pore sizes of geotextiles, hydraulic gradient and soil compaction are preliminarily studied. According to the test results of clogging gradient, the clogging situations of geotextiles are analyzed under different apertures, clay contents, dry densities and hydraulic gradients. Through model tests, it may provide reference for future practice of geotextiles in different projects.

**Key words:** gradient ratio; equivalent diameter; hydraulic gradient; dry density

## 0 引言

土工合成材料已广泛应用于围海造陆、公路、铁路、水利、港口等工程, 其作用包括排水、防渗、过滤、隔离、加筋与防护等6个方面<sup>[1-3]</sup>, 其中在围海造陆领域主要应用的是其过滤功能, 土工织物用于围海造陆过滤材料时, 需满足3方面的要求, 即挡土、渗透、防淤堵3个准则<sup>[1-5]</sup>。塑料排水板加固软土地基在中国已取得许多工程经验和研究成果。在以往的地基处理中, 排水板的滤膜孔径一般都比较小, 认为滤膜孔径较小可以有效地防止土颗粒流失, 但从实际工程来看效果并不好, 含细小土颗粒的水通过孔径后, 会使一部分颗粒堵塞孔径, 造成淤堵现象, 阻碍水体渗透, 最终导致黏性土加固效果差的结果。如果滤膜孔径过大, 又会引起土颗粒的大量流失, 影响地基的加固效果。因此土工织物的淤堵问题成为制约真空预压技术发展的一个重要因素, 同时土工织物的淤堵问题成为当今急需解决的一个关键难题<sup>[6-9]</sup>。

本文设计了淤堵试验的室内模拟装置, 选用了不同孔径的土工织物和不同黏粒含量的黏性土在不同条

件下进行了土工织物的淤堵试验。对比了相同孔径的土工织物在不同黏粒含量黏性土的条件下梯度比的变化规律, 以及相同黏粒含量的黏性土在不同孔径的土工织物条件下梯度比的变化规律。给出不同黏粒含量的黏性土在一定条件下获得最佳加固效果应该选用的具有特定孔径的土工织物类型。

## 1 土工织物淤堵机理

土工织物的淤堵主要是指在渗流作用下被保护黏性土中的细小颗粒逐渐进入到土工织物内部的孔隙中或者滞留在土工织物表面, 经过一定的时间, 积累在土工织物表面和进入到土工织物孔隙内部的细小颗粒逐渐增多, 从而降低土工织物渗透性的现象<sup>[10-13]</sup>。

淤堵作用的产生从其原因或机理来说可以分为3种类型: ①机械淤堵, 指细小颗粒土在渗流作用的带动下, 在土工织物与相邻土层所形成的滤层中滞留下来, 严重减小滤层渗透性的现象。②化学淤堵, 指存

在于水体中的铁离子在某些微生物的作用下,发生化合反应生成不溶于水的氧化铁,并且这些化合物沉积在土工织物过水通道的表面或者内部,而堵塞了过水通道的现象。<sup>③</sup>生物淤堵,指某些细菌、真菌类的微生物在某些条件下在土工织物孔隙的内部和表层繁殖,一定程度上阻碍了过水通道<sup>[14-17]</sup>。一般机械淤堵的发生概率更大且造成的影响更严重,所以在工程实际中更应该注意机械淤堵的发生与否。

机械淤堵又可以细分为以下3种情况:<sup>①</sup>淤堵,指土体中的细小颗粒停留在土工织物孔隙的内部区域,使土工织物的渗透性减弱。比如一些厚度较大的无纺织物,其垂直方向上的孔隙过道相对较长,这种情况下,黏性土中的细小颗粒就容易淤堵在比较窄的断面处。<sup>②</sup>闭塞,指土体颗粒因为土工织物的过滤作用沉积在土工织物表面,形成了一层类似于薄饼的土层。<sup>③</sup>阻塞,指与土工织物表面孔隙的孔径相差不大的土颗粒,不容易进入到土工织物内部孔隙中,但却可以沉积在土工织物孔隙的起始位置,使有效过水面积减少,降低了土工织物的渗透性,产生堵塞的情况<sup>[18-19]</sup>。上述3种机械淤堵的情况并不是彼此单独存在的,而是相辅相成同时存在的,但一般发生淤堵作用时,都是以某种情况为主<sup>[20-21]</sup>。

## 2 室内淤堵试验

### 2.1 淤堵试验方案设计

淤堵试验装置如下图1所示,将装有土工织物和被保护土的渗透仪连通常水头装置,待渗流稳定以后,每间隔一定的时间,测读各测压管水位,同时计算出不同部位水力梯度,最终选取渗流稳定24 h以后的水力梯度计算梯度比 $G_R$ :  $G_R = i_1 / i_2$ <sup>[22]</sup>。 $i_1$ 为土工织物及其上方25 mm高度土样的水力梯度; $i_2$ 为土工织物上方25~75 mm高度的水力梯度。

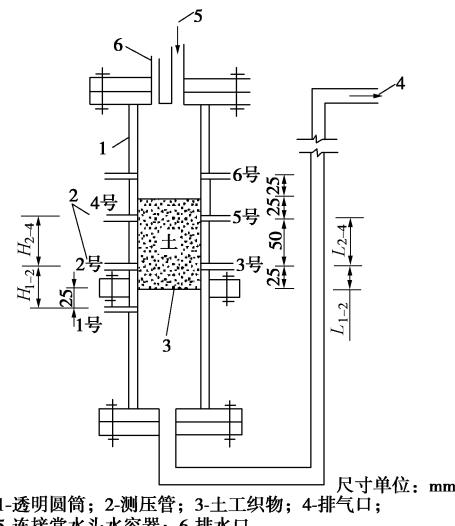


图1 梯度比试验装置图

Fig. 1 Test device for gradient ratio

淤堵试验持续的时间较短,通过观测固定几个点的水位的高度替代渗透系数的观测,该方法比较方便。通过大量的淤堵试验,比较得出,当梯度比 $G_R > 3$ 时,土工织物滤层将产生较严重的淤堵,渗透系数大幅度下降,此时土工织物已经不能满足过水性的要求。因此美国陆军工程师兵团制定的指导性规范中将 $G_R = 3$ 作为土工织物能满足滤层要求的标准。十多年来,国内出现了许多对比试验的文章,很多研究者也对梯度比试验进行了评价<sup>[23-24]</sup>。

### 2.2 试验材料

本次试验的黏性土取自两个地方,一是塘沽东疆港,在塘沽东疆港取了两种土样;二是来自浙江温州地区。

通过直接选取和不同土样之间的调配,最终本试验所用的试验土的黏粒含量分别为20.20%, 30.10%, 43.50%, 51.00%。

本试验选取了3种不同孔径的土工织物,并在天津港湾工程研究院做了等效孔径的检测,3种土工织物的规格和等效孔径表1所示<sup>[25]</sup>。

表1 本试验滤膜的命名

Table 1 Naming of membranes

等效孔径	普通膜/mm	防淤堵膜1/mm	防淤堵膜2/mm
$O_{95}$	0.045	0.081	0.129
$O_{90}$	<0.045	0.072	0.109

## 3 试验结果分析

本研究在2级水力梯度、3种黏性土干密度条件下用3种土工织物、4种不同黏粒含量的黏性土进行了48组试验。分别为在水力梯度 $i=7$ 时的24组试验;水力梯度 $i=17$ 时的24组试验。

### 3.1 土工织物淤堵试验梯度比 $G_R$ 与土工织物孔径大小的关系

选取当水力梯度 $i=7$ ,黏性土干密度 $\rho = 1.35 \text{ g/cm}^3$ 时的12组试验结果进行分析。

本组试验选取了水力梯度 $i=7$ 时,3种土工织物在2种相同黏粒含量、相同干密度条件下的梯度比,见图2。从上述曲线图中可以看出,在黏粒含量相同的情况下,梯度比随着土工织物孔径的增加而减小。分析原因如下:随着土工织物孔径的增加,黏性土中较细小的颗粒更容易通过土工织物而从渗流出口流出,土工织物更不容易淤堵,土工织物的淤堵量越小,经计算所得的梯度比越小,直到黏土试样形成稳定的结构进行渗流,梯度比将保持一个稳定的数值。

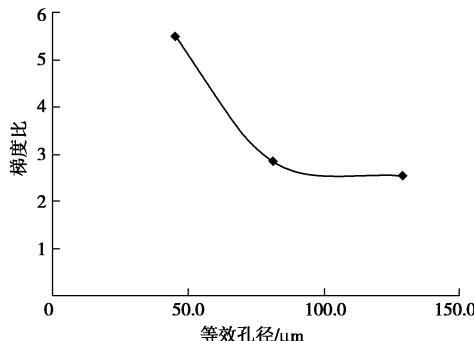


图 2 梯度比与等效孔径的关系

Fig. 2 Relationship between gradient ratio and equivalent aperture

### 3.2 土工织物的梯度比 $G_R$ 与黏性土中黏粒含量的关系

选取当水力梯度  $i=7$ , 黏性土干密度  $\rho=1.35 \text{ g/cm}^3$  条件下, 3 种土工织物分别在 4 种黏粒含量的黏性土条件下的 12 组试验, 如图 3~5 所示。

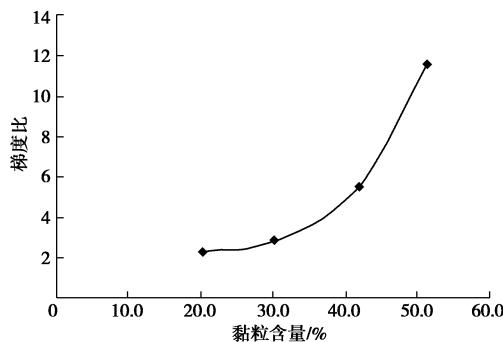


图 3 普通膜梯度比与黏粒含量的关系

Fig. 3 Relationship between gradient ratio and clay content

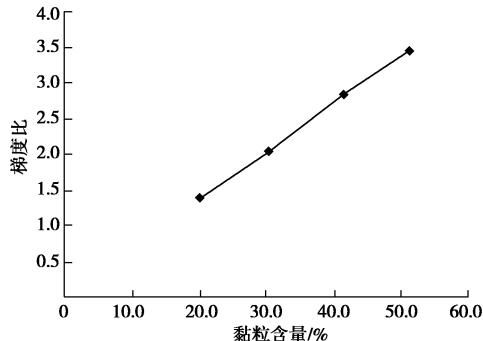


图 4 防淤堵膜 1 梯度比与黏粒含量的关系

Fig. 4 Relationship between gradient ratio and clay content

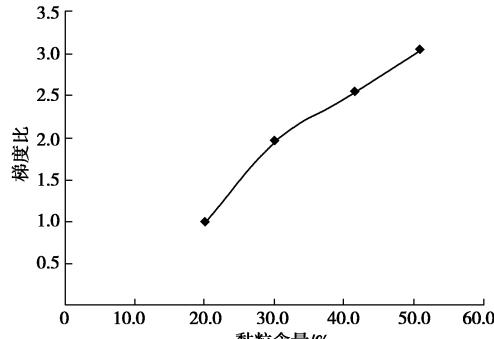


图 5 防淤堵膜 2 梯度比与黏粒含量的关系

Fig. 5 Relationship between gradient ratio and clay content

从图 3~5 中曲线图中可以看出, 相同土工织物情况下, 梯度比随着黏性土中黏粒含量的增加而逐渐增加。分析原因如下: 黏性土中黏粒的含量越大, 通过土工织物的细小颗粒越多, 细小颗粒淤堵在土工织物中的概率就越大, 所以越容易淤堵, 相应的梯度比就越大。

### 3.3 土工织物的梯度比 $G_R$ 与黏性土干密度和水力梯度的关系

选取水力梯度分别为  $i=7$ ,  $i=17$ , 黏性土的黏粒含量为 20.20% 的普通膜在 3 种不同干密度条件下的 6 组试验, 如图 6 所示。

从图 6 中可以看出, 相同水力梯度、相同黏粒含量下, 同一种土工织物的梯度比随着试样的干密度和水力梯度的增加而增加。淤堵试验中的土样的相对干重可由填土施工的要求确定; 不同的研究也可以取不同的水力梯度。笔者制备了 3 种不同干密度的相同黏粒含量黏性土, 用  $i=7$  持续进行试验 24 h, 然后增大到  $i=17$  再持续 1 h, 结果见图 6。可见相对干重大的土, 24 h 后梯度比  $G_R$  大, 且梯度比变化幅度较小, 同时受水力梯度  $i$  变化的影响较小。水力梯度对中密和松散的土有明显的影响, 大的渗流力使土密实, 故大的水力梯度测得的梯度比增加。

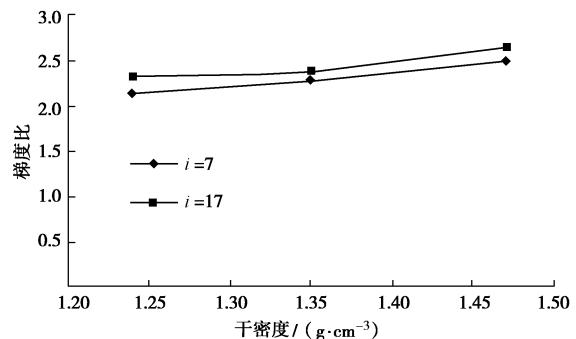


图 6 梯度比与黏性土干密度的关系

Fig. 6 Relationship between gradient ratio and dry density of soil

## 4 结论

本研究分别以水力梯度、黏粒含量、等效孔径、干密度为变量进行大量的淤堵试验, 得出了梯度比与上述 4 个变量间一些关系, 总结得出以下 6 点结论。

(1) 在黏性土干密度、水力梯度、土工织物等效孔径相同的前提下, 梯度比  $G_R$  与黏性土中的黏粒含量有一定关系。从上文的分析可以得出, 黏性土中黏粒含量越多, 梯度比越大。因为黏粒含量越多, 黏性土中自由颗粒的数量就越多, 在渗流力作用下移动到土工织物处的黏粒数量就多, 堵塞织物表面和淤堵织物内部的概率就越高, 发生淤堵的可能性就越大, 所

以梯度比  $G_R$  就越大。

(2) 在黏性土干密度、水力梯度、黏性土中黏粒含量相同的前提下, 梯度比  $G_R$  随着土工织物等效孔径的增加而减小。因为土工织物等效孔径越大, 黏性土中的自由颗粒就越容易通过土工织物而不会淤堵在孔隙内部, 淤堵作用就相对不容易发生, 所以对应的梯度比就越小。

(3) 在黏性土干密度、黏性土中黏粒含量、土工织物等效孔径相同的前提下, 梯度比  $G_R$  随着试验中所设水力梯度的增加而增加。因为水力梯度的增加对应着渗透力的增加, 导致试样中一些稳定的颗粒在更大渗透力作用下移动变成自由颗粒, 自由颗粒的增多导致土工织物更容易淤堵, 所以相应的梯度比  $G_R$  就变大。

(4) 在水力梯度、黏性土中黏粒含量相同、土工织物等效孔径相同的前提下, 在本试验研究的范围内, 梯度比  $G_R$  随着试验中所用黏性土密度的增加而增加。黏性土干密度的增加, 导致水流通过试样时, 单位厚度试样中损失的机械能增加, 自由颗粒在通过土工织物时, 较小的机械能不足以带动自由颗粒通过而滞留在土工织物表面或者内部, 导致淤堵的发生。

(5) 根据试验数据, 分析得出黏性土中黏粒含量与土工织物等效孔径两个变量对梯度比  $G_R$  的影响更大, 所以后工程实践中, 可以主要考虑这两个因素对梯度比  $G_R$  的影响, 并以此为依据对梯度比试验进行设计。

(6) 梯度比的大小与土工织物的淤堵与否息息相关, 可以以此为依据, 对不同的黏性土分别进行分析, 根据所得的梯度比结果, 可以选取适当的土工织物进行处理, 可以一定程度上避免试验失败的可能性。

## 参考文献:

- [1] 王宏硕, 翁情达. 土工建筑物[M]. 北京: 水利水电出版社, 1990. (WANG Hong-shuo, WENG Qing-da. Geotechnical structures[M]. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press, 1990. (in Chinese))
- [2] 谢任之. 溃坝水力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1993. (XIE Ren-zhi. Dam hydraulics[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1996. (in Chinese))
- [3] KOERNER R M, WSLSH J P. Designing with geotextiles[M]. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [4] LAWSON C R. Filter criteria for geotextiles: relevance and use[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division 1982, **108**(10): 1300 - 1317.
- [5] CALHOUN C C. Development of design criteria and acceptance specification for plastic filter cloth[R]. Vicksburg: Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, 1972.
- [6] SUITS L D, RG Carrou J, CHRISTOPHER B R. ASTM geotextiles committee testing update[J]. Geotechnical Testing Journal, 1985, **8**(4): 15.
- [7] KOERNER R M, KO F K. Laboratory studies on long-term drainage capability of geotextiles[C]// Proc 2nd Int Conf Geotextiles. Las Vegas, 1982.
- [8] HALIBURTON T A, WOOD P D. Evaluation of U S army corps of engineers gradient ratio test for geotextile performance[C]// Proc 2nd Int Conf Geotextiles. Los Vegas, 1982.
- [9] 伍碧秀, 钟翠华. 土工织物水力特征试验[C]// 中国土工织物学术会议论文选集, 1987. (WU Bi-xiu, ZHONG Cui-hua. Geotextiles hydraulic characteristics test[C]// Chinese Geotextiles Academic Conference Papers Anthology, 1987. (in Chinese))
- [10] SCHOBER W. Filter-criteria for geotextiles, design parameters in geotechnical engineering[C]// BGS. London, 1979.
- [11] DIERICKX W. Model research on geotextile blocking and clogging in hydraulic engineering[C]// Proc 3rd Int Conf Geotextiles. Vienna, 1986.
- [12] SHERARD J L, DUNNIGAN L P, TALBOT J R. Filters for silts and clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1982, **110**(6): 701 - 718.
- [13] GIROUD J P. 土工织物滤层的设计准则[J]. 海河科技, 1987(3/4). (GIROUD J P. The design of the geotextile filter criteria[J]. Haihe River Science and Technology, 1987(3/4). (in Chinese))
- [14] 陈星柏. 无黏性散粒体的渗透性及试验中应注意的问题 [J]. 东北水利水电, 1987(11): 17 - 21. (CHEN Xing-bai. The permeability of non-viscous grain body and should pay attention to the problems in the experiment[J]. The Northeast Water Conservancy and Hydropower, 1987(11): 17 - 21. (in Chinese))
- [15] 克里门托夫. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1958. (KERRY GATE. Groundwater dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. (in Chinese))
- [16] 朱崇辉. 粗粒土的渗透特性研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2006. (ZHU Chong-hui. Coarse grained soil permeability characteristics of the research[D]. Shanxi: Northwest Agriculture and Forestry University of Science

- and Technology, 1996. (in Chinese))
- [17] 土裕宜. 泥石流体结构与流变特性[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2001: 15 - 21. (TU Yu-yi. Debris flow structure and rheological properties[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Publishing House, 1996. (in Chinese))
- [18] 刘杰, 张雄. 多级配砾石土反滤设计方法试验研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 1 - 9. (LIU Jie, ZHANG Xiong. Multistage experimental study with gravel soil filter design method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(6): 1 - 9. (in Chinese))
- [19] 周中, 付鹤林, 刘宝深. 粗粒土渗透性能的试验研究[C]// 第一届中国水利水电岩土力学与工程学术研讨会. 昆明, 2006. (ZHOU Zhong, FU He-lin, LIU Bao-shen. Experimental study of coarse grained soil permeability[C]// The First Session of China's Water Resources and Hydropower in Geotechnical Mechanics and Engineering. Kunming, 2006. (in Chinese))
- [20] 吴良平. 粗粒土组构试验研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2007. (WU Liang-ping. Experimental study coarse grained soil fabric[D]. Wuhan: Master Degree Theses of Master of the Yangtze River Academy of Sciences, 1996. (in Chinese))
- [21] NOETINGER B. The effective permeability of a heterogeneous porous medium[J]. Transport in Porous Media 1992, 15: 99 - 127.
- [22] DAGAN G. Analysis of flow through heterogeneous random aquifers by the method of embedding matrix-1: Steady flow[J]. Water Resources Research, 1981, 17: 107 - 122.
- [23] VAUGPAN P R, SOARES H F. Design of filters for clay cores of dams[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1982(6): 17.
- [24] HALIBURTON T A, WOOD P D. Evaluation of U S army corps of engineers gradient ratio test for geotextile performance[C]// Proc 2nd Int Conf Geotextiles. Los Vegas, 1982.
- [25] DIERICKX W. Model research on geotextile blocking and clogging in hydraulic engineering[C]// Proc 3rd Int Conf Geotextiles. Vienna, 1986.

(本文责编 孙振远)