



无纺布淤堵指标的评价模型研究*

王春平

(长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430040)

摘要: 针对无纺布淤堵指标的评价问题, 通过对航道整治工程岸坡反滤层中常用的短纤针刺非织造土工布的淤堵指标的透水准则和梯度比准则进行研究, 找出两者之间的关系结合点: 标准排水边坡的水力梯度值和梯度比限值, 并基于此结合点开展无纺布的淤堵试验, 对淤堵指标的评价模型进行探索研究, 拟合出航道整治工程岸坡反滤层中无纺布淤堵指标的评价模型公式, 以期指导计算无纺布能正常发挥反滤功能的时间期限。成果填补了该领域研究的空白, 奠定了该领域研究的基础, 为今后促进该领域的研究具有重要的价值和意义。

关键词: 短纤针刺非织造土工布; 透水准则; 梯度比准则; 淤堵指标评价模型

中图分类号: U 614

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)12-0148-05

Evaluation model about clogging index of non-wovens

WANG Chun-ping

(Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute, Wuhan 430040, China)

Abstract: In view of the evaluation question of the non-woven clogging index, this paper studies the permeation criterion and the gradient ratio criteria about the clogging index of the nonwoven geotextile commonly used in the slope filter layer of the channel regulation project, and finds out the relationship between the two points: the hydraulic gradient of the standard drainage gradient and gradient ratio limit. Based on this combination point, this paper carries out a series of non-woven clogging tests, and explores the evaluation model of non-woven clogging index to fit the evaluation formula of the non-woven clogging index in the anti-filtration layer of the bank slope and guide the calculation of the time period for non-woven fabric to function properly. The results fill the gaps in the field of research, lay the foundation for the study in this field, and have important value and significance for the future to promote the study of the field.

Keywords: staple acupuncture non-woven geotextile; permeation criterion; gradient ratio criterion; clogging index evaluation model

在长江航道整治及其他的护坡工程中, 短纤针刺非织造土工布(简称“无纺布”)是反滤层结构及盲沟中普遍采用的一种土工合成材料^[1-2], 在工程中可起排水、反滤、隔离、防护等作用^[3], 为促进岸坡土体排水、维持岸坡稳定性等方面发挥着重要作用。但在实际应用中, 无纺布往往会

产生不同程度的淤堵, 并且与水力梯度、垫层砂厚度、砂的粗细、土质类别及无纺布孔径等因素都有影响^[4-5], 从而降低无纺布的排水或反滤功能。有研究人员围绕这些影响因子分析研究了其中的原因, 并提出了一些有针对性的改善措施^[6], 分别体现在垫层用砂的含泥量、垫层用砂的级配、

收稿日期: 2017-04-29

*基金项目: 长江航道局重点科技项目 (cjjjhdex20140017)

作者简介: 王春平 (1965—), 女, 硕士, 成绩优异的高级工程师, 从事岩土工程勘测及工程试验检测。

垫层用砂的厚度及无纺布的孔径等方面。

无纺布在应用中会产生淤堵，就有必要对其淤堵指标进行评价，在前期研究成果中有两个评价准则即透水准则和梯度比准则^[7-9]，透水准则中既要允许水尽可能自由通过，又要防止土颗粒流失，梯度比准则是将 $GR \leq 3$ 作为土工织物能满足滤层要求的标准，这两个准则中既有理论支撑、也有判别标准，但两者之间是基本分离的，缺少对无纺布淤堵指标评价模型的研究，缺少对反滤层中无纺布使用寿命的评估。

因此，本文针对航道整治工程中常见的粉质黏土岸坡及常用的规格为 400 g/m^2 的无纺布进行淤堵试验，将透水准则和梯度比准则紧密结合，对无纺布淤堵指标的评价模型进行探索研究，既可指导计算无纺布能正常发挥反滤功能的时间期限，也填补了该领域研究的空白，对今后促进无纺布在该领域的应用研究等具有很重要的价值和意义。

1 无纺布淤堵指标的评价准则

1.1 透水准则

Giroud(1996 年)提出了一个独立的针对孔隙水压力的设计准则：与没有滤层时的情况相比，滤层的存在，即使它是透水的，也会搅乱紧邻滤层上游土体内的流态，这就要求所选择的滤层应对原流态的扰动影响小到可以接受的范围内。通常这种扰动能影响到土体中孔隙水压力和流速，用来判定这两个方面的透水准则。

1) 孔隙水压力要求：与没有滤层时相比，滤层的存在增加了基土中的孔隙水压力。设置滤层后，土体中孔隙水压力变化小于土体压应力的 10% 是可以接受的，按此导出的滤层透水准则可以用下式表示：

$$K_F > 10K_s i_s \quad (1)$$

式中： K_F 为土工织物滤层的渗透系数； K_s 为土体的渗透系数； i_s 为临近土工织物滤层基土中的水力梯度。有关邻近土工织物滤层基土中的水力梯度 i_s 的典型值见表 1。

表 1 工程应用中邻近土工织物滤层基土中的典型水力梯度

| 应用部位 | 典型的水力梯度值 i_s |
|-----------|----------------|
| 标准的排水边坡 | 1.0 |
| 垂直墙排水 | 1.5 |
| 路肩排水 | 1.0 |
| 填土表面水集中系统 | 1.5 |
| 大坝黏土心墙处 | 3~10 |
| 黏土围堰 | >10 |

2) 流速要求：与没有土工织物滤层情况相比，滤层的存在，即使其透水性很好，也会使流体的流速降低。如果要求有滤层时的流速降低程度小于 10%，则可导出下面的透水准则：

$$K_F > K_s \quad (2)$$

1.2 梯度比准则

采用观测土体和土工织物整个系统中水头损失的变化情况来代替长期的渗透试验的方法，即梯度比 (GR) 试验。梯度比：淤堵试验中，土工织物试样至其上方 25 mm 土样的水力梯度 i_1 与土工织物上方从 25~75 mm 之间土样的水力梯度 i_2 的比值^[10]，即

$$GR = i_1 / i_2 \quad (3)$$

美国陆军工程师兵团通过大量的梯度比试验，比较得出，当梯度比 $GR > 3$ 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滤层的要求。因此美国陆军工程师兵团制定的指导性规范中将 $GR \leq 3$ 作为土工织物能满足滤层要求的标准，即梯度比准则。

2 试验方案及试验数据

2.1 试验用土的基本物理性质参数

在典型粉质黏土岸坡中采取土样，进行天然密度、天然含水率及天然密度条件下的渗透系数等试验。试验结果见表 2。

表 2 试验用土的物理性质参数

| 岸坡土类 | 天然湿密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 天然干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 天然 含水率 $\omega / \%$ | 天然密度下 的渗透系数/ ($10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|------|---|---|----------------------------|---|
| 粉质黏土 | 1.87 | 1.46 | 28.0 | 8.16 |

2.2 试验用砂的基本物理性质参数

航道整治工程岸坡中一般常用的滤层砂为粗砂，本次试验用砂也是选用粗砂，其基本物理参数见表3。

表3 试验用滤层砂的物理性质参数

| 细度模数 | 级配区 | 表观密度/ (kg·m ⁻³) | 堆积密度/ (kg·m ⁻³) | 总含泥量/% | 泥块含量/% |
|------|-----|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------|
| 3.2 | I | 2 650 | 1 340 | 1.8 | 0.1 |

2.3 试验用无纺布的基本物理性质参数

航道整治工程岸坡滤层中一般常用的无纺布规格为400 g/m²，所以本次试验也是选用同样规格的无纺布，其基本物理参数见表4。

表4 无纺布的物理性质参数

| 无纺布类型 | 单位面积质量/ (g·m ⁻²) | 厚度/ mm | 垂直渗透系数/ (cm·s ⁻¹) | 等效孔径 O ₉₀ /mm |
|--------------------------|---------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------------------------|
| 400 g/m ² 无纺布 | 432 | 4.22 | 0.448 | 0.049 |

2.4 基于透水准则和梯度比准则的无纺布淤堵试验

航道整治岸坡护岸工程中一般采用的反滤层结构形式为：首先对陡坎岸坡进行削顶压脚，并对岸坡土质进行一定程度的夯实，接着在夯实后的岸坡坡面上均匀铺一层厚度10 cm的垫层砂，然后在砂层上铺一层规格为400 g/m²的无纺布，最后在无纺布上整体均匀压一层钢丝网石笼(图1)。

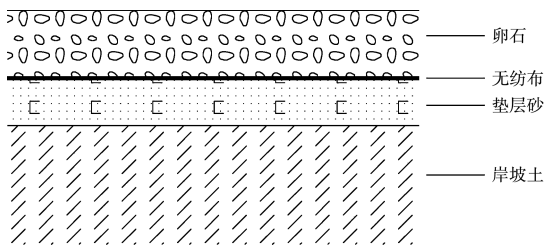


图1 航道整治护岸工程反滤层结构形式

无纺布的淤堵发展是一个相对较长的过程，由于本课题研究周期相对较短，室内模拟淤堵试验的周期也很短，因此对已经完工工程的现场取样进行类似图1结构形式的室内淤堵试验。航道整治工程岸坡基本均为土质边坡，其稳定性受岸坡土体内的含水量影响很大，为确保岸坡稳定性，

在岸坡工程中设置了反滤层、盲沟及明沟等，以利于岸坡排水，航道整治岸坡主要为排水边坡，因此利用透水准则中表1中排水边坡的典型水力梯度*i*=1和梯度比准则中GR度比的界限进行评价探索试验，通过淤堵试验计算梯度比GR。

试验用土为航道整治工程典型岸坡采取的粉质黏土，在室内进行淤堵试验时均以粉质黏土的天然干密度1.46 g/cm³及天然含水率28.0%为控制指标；取样地点工程所用无纺布均为规格400 g/m²的，试验用布也选此规格，且工程取样地点岸坡滤层砂也为粗砂；垫层用砂选用级配连续粗砂。试验结果见表5。

表5 室内淤堵试验和现场取样淤堵试验结果

| 取样地点 | 自然淤堵时间/月 | <i>i</i> =1.0条件下的淤堵试验24 h 稳定梯度比GR |
|-----------|----------|-----------------------------------|
| 室内模拟 | 1 | 1.23 |
| | 2 | 1.34 |
| | 3 | 1.42 |
| | 4 | 1.48 |
| 江陵河段 | 8 | 1.67 |
| | 13 | 1.85 |
| | 18 | 1.97 |
| | 21 | 2.11 |
| 湖广—罗湖洲河段 | 15 | 1.91 |
| | 19 | 2.04 |
| | 23 | 2.14 |
| | 26 | 2.17 |
| 界牌水道二期 | 35 | 2.19 |
| | 40 | 2.23 |
| | 45 | 2.27 |
| 新洲—九江河段 | 48 | 2.28 |
| | 37 | 2.21 |
| | 42 | 2.25 |
| 瓦口子—马家嘴河段 | 47 | 2.26 |
| | 50 | 2.30 |
| | 51 | 2.31 |
| | 56 | 2.33 |
| | 61 | 2.34 |
| | 64 | 2.34 |

3 无纺布淤堵指标的评价模型

3.1 评价模型公式拟合

针对现场取样的淤堵试验，通过对水力梯度 $i=1.0$ 条件下的梯度比与时间的关系分析及拟合 (图 2)，拟合值 $R^2=0.9878$ ，说明此公式 $y=-2 \times 10^{-7}x^4+4 \times 10^{-5}x^3-3 \times 10^{-3}x^2+9.25 \times 10^{-2}x+1.0774$ (其中 x 为淤堵时间， y 为 $i=1.0$ 条件下的 24 h 稳定梯度比 GR) 达到高度拟合。

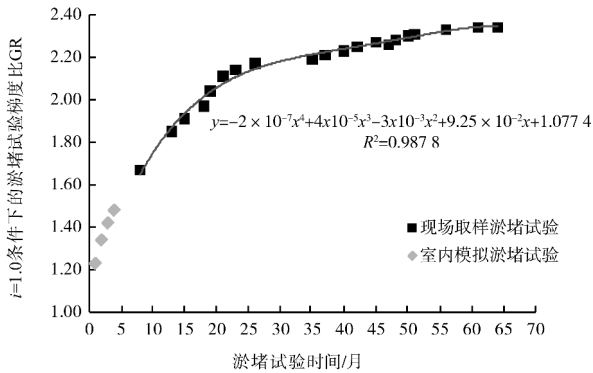


图 2 梯度比-时间变化关系拟合

3.2 评价模型合理性分析

1) 室内模拟淤堵试验验证。

针对室内模拟淤堵试验进行了淤堵时间 1~4 个月试验，其他试验条件与现场取样的淤堵试验相同，试验结果见表 4，试验结果与现场取样的淤堵试验结果进行了叠加 (图 2)。将试验结果代入上述拟合公式，结果比对见表 6。结果显示相差百分比很小，从图 2 和表 6 中可以看出，拟合公式在很大程度上代表了规格为 400 g/m^2 的无纺布在航道整治工程岸坡反滤层一般结构形式中的淤堵时间进程。

表 6 室内模拟试验结果与拟合公式计算结果比对

| 淤堵时间/月 | $i=1.0$ 条件下的淤堵试验 24 h 稳定梯度比 GR | | 相差百分比/% |
|--------|--------------------------------|----------|---------|
| | 室内模拟试验结果 | 拟合公式计算结果 | |
| 1 | 1.23 | 1.17 | 4.9 |
| 2 | 1.34 | 1.25 | 6.7 |
| 3 | 1.42 | 1.33 | 6.3 |
| 4 | 1.48 | 1.40 | 5.4 |

2) 淤堵时间零点验证。

由拟合公式可知，当 $x=0$ 时， $y=1.0774$ ，即淤堵时间为 0 时，梯度比 GR 近似等于 1。根据梯度比 GR 的定义和式 (3)，理论分析可以得出，当淤堵时间为 0 也就是滤层结构中还未产生任何淤堵时，无纺布上方土体中的水力梯度 i 是均匀相同的，梯度比 GR 等于 1，这与由拟合公式分析的“ $x=0, y \approx 1$ ”是吻合的，也验证了拟合公式的基本合理性。

因此，通过该评价模型公式可大致推导出梯度比准则中以 $GR=3$ 为界限的淤堵时间，也就是无纺布能正常发挥反滤功能的时间期限。

4 结论

1) 无纺布淤堵指标的评价准则中透水准则需要的试验时间很长，而梯度比准则需要的试验时间相对较短，并且比较直观、易理解，本文将透水准则和梯度比准则相结合，以排水边坡的典型水力梯度 $i=1$ 作为控制条件，开展梯度比试验。

2) 通过在工程现场取无纺布样品进行的室内淤堵试验，拟合出了无纺布淤堵指标的评价模型公式 $y=-2 \times 10^{-7}x^4+4 \times 10^{-5}x^3-3 \times 10^{-3}x^2+9.25 \times 10^{-2}x+1.0774$ ，并通过室内模拟淤堵试验和淤堵时间零点的 GR 值验证了拟合公式的基本合理性，表明评价模型公式在很大程度上代表了规格为 400 g/m^2 的无纺布在航道整治工程岸坡反滤层一般结构形式中的淤堵时间进程。

3) 本文中无纺布淤堵指标的评价模型研究是一个创新性的探索，对促进该领域的研究具有重要意义。由于研究时间和周期较短，采集的试验数据点数量有限，建议后续结合实际工程继续开展试验，进一步研究无纺布的工程淤堵性能。

参考文献:

- [1] 熊荣军,李恒,孙爱国,等.短纤针刺非织造土工布拉伸试验影响因素研究[J].水运工程,2013(9):6-10.
- [2] 常坤,伊青,唐正涛,等.航道整治原材料检测与工程质量控制分析[J].中国水运,2015(5):41-43.
- [3] 中国纺织科学研究院.土工合成材料 短纤针刺非织造土工布:GB/T 17638—1998[S].北京:中国标准出版社,1998.
- [4] 唐正涛,孙爱国,熊荣军,等.模拟现场工况条件下的无纺布淤堵试验研究[J].水运工程,2017(5):87-91.
- [5] 唐正涛,李恒,孙爱国,等.无纺布的室内常规淤堵试验研究[J].人民长江,2017,48(S1):246-248.
- [6] 唐正涛.反滤层中无纺布的淤堵原因分析及改善措施建议[J].中国水运,2017(3):191-193.
- [7] GIROUD J P,吴昌瑜,丁金华.粒状滤层与土工织物滤层[C]//中国土工合成材料工程协会.全国第五届土工合成材料学术会议论文集.北京:现代知识出版社,2000:62-68.
- [8] 崔中兴,王志刚.土工织物滤层的P-K与淤堵试验研究[J].西北水资源与水工程,1995(3):36-39.
- [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] 交通部公路科学研究院.公路工程土工合成材料试验规程:JTG E50—2006[S].北京:人民交通出版社,2006.

(本文编辑 王璁)