

# 城市雨水生态滤水带试验研究

金德钢,陈晶晶

(宁波市水利水电规划设计研究院,浙江 宁波 315192)

**摘要** 提出雨水生态化利用的概念,进行生态滤水带模型试验。根据模型自身条件和土样的渗透特性,试验设计了两种变水头方法。提出了合理的滤水带设计结构,通过模拟生态滤水带的渗流过程验证模型的可行性,并检验所选土样渗透能力能否满足设计要求。

**关键词** 雨水 生态实验 城市滤水带 宁波市

**中图分类号** X171.1      **文献标识码** B      **文章编号** 1004-6933(2008)S1-0106-04

现代意义上的城市雨水利用在我国起步较晚,尚处于初期发展阶段。目前城市雨水利用还主要在缺水地区进行小型、局部的非标准性应用,大中城市的雨水利用基本处于探索与研究阶段,尤其是城市雨水生态滤水带的研究,更是少之又少。一般生态滤水带采用过滤,延长停留时间和利用生物吸收营养物质来达到处理雨水的效果。生态滤水带的作用在于当地表径流向下渗流区时,将通过多层介质过滤地表径流。经处理过的水由穿孔管收集起来流向下游水路储存起来,以便再利用。在滤料层上产生一定量的积水可以提高处理效果,同时也增加了径流的过滤时间并提高处理径流的容量。滤料层上生长的植物可提高生态滤水带的功能。植物不仅能防止滤料层的流失,而且植物生长时连续性的分裂土壤能防止系统被阻塞。此外植物根系上生长的生物膜可吸附污染物。通常来讲,植物越密越高,过滤效果越好。

本文在宁波慈城新城建设中采用城市雨水生态滤水带设计,结合试验研究,提出合理的滤水带设计

结构。通过模拟生态滤水带的渗流过程,验证模型的可行性,并检验所选土样渗透能力能否满足设计要求,各层土样能否很好的相互保护。该系统也能使水流减速滞后,尤其是对于脱氮和去除其他可溶性及小颗粒污染物特别有效。

## 1 试验模型设计

采用 1:1 的比例建立生态滤水带模型。宽度为 2.3 m,长度为 5 m。生态滤水带包括一个扩展的植物储水层,滤料层,过渡层和排水层。

## 2 试验方法与步骤

### 2.1 试验方法的选择

渗透系数的测定方法就其原理而言,可分为常水头试验和变水头试验两种。前者适用于透水性强的无黏性土,后者适用于透水性弱的黏性土。表 1 给出了各种土适宜的渗透试验方法。

表 1 土的渗透试验方法适用范围

| 渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ |        |        |               |           |           |                                      |           |           |                  |           |           |           |
|----------------------------------------|--------|--------|---------------|-----------|-----------|--------------------------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|-----------|
| $10^2$                                 | $10^1$ | $10^0$ | $10^{-1}$     | $10^{-1}$ | $10^{-2}$ | $10^{-3}$                            | $10^{-4}$ | $10^{-5}$ | $10^{-6}$        | $10^{-7}$ | $10^{-8}$ | $10^{-9}$ |
| 渗透性能好                                  |        |        |               |           |           |                                      | 渗透性能不好    |           | 实际不透水            |           |           |           |
| 干净砾石                                   |        |        | 干净砂,干净砂砾混合物   |           |           | 极细砂,有机或无机粉土,砂、粉土和黏土的混合物,冰川沉积、层状黏土沉积等 |           |           | 不透水土,及风化区以下的均匀黏土 |           |           |           |
| 就地抽水试验测定 $k$                           |        |        |               |           |           |                                      |           |           |                  |           |           |           |
| 常水头渗透试验测定 $k$                          |        |        |               |           |           |                                      |           |           |                  |           |           |           |
|                                        |        |        | 变水头渗透试验测定 $k$ |           |           |                                      |           |           |                  |           |           |           |
| $k$ 由颗粒大小分布计算<br>(仅适用于无黏性砂和砾石)         |        |        |               |           |           |                                      |           |           | $k$ 根据固结试验成果计算   |           |           |           |

本次设计要求材料的渗透系数为 50 ~ 200 mm/h,即为  $1.39 \times 10^{-3} \sim 5.56 \times 10^{-3}$  cm/s,根据表 1 中的要求,选择变水头渗透试验。

2.2 试验步骤

试验严格按照 SL237—1999《土工试验规程》渗透试验中变水头试验的步骤进行。试验前,将土样进行充分饱和,保证土样在饱和状态下。

变水头试验 1:

①开进水阀,关出水阀,将试验箱内充满水;②调节进水阀,使试验箱内超出的水缓缓溢出,保持试验箱内水位不变并测得其水位值  $H$ ;③开动秒表,测计出水箱测压管时间  $t$  内的水位值  $H_1$  与  $H_2$ ,  $h_1 = H - H_1$ ,  $h_2 = H - H_2$ ;④用  $k_t = 2.3aL/At\lg(h_1/h_2)$  得渗透系数。

式中:  $k_t$  为水温为  $T^\circ\text{C}$  时试样的渗透系数,cm/s;  $a$  为变水头管的断面积,cm<sup>2</sup>;  $L$  为渗径,即试样高度,cm;  $A$  为试样截面积,cm<sup>2</sup>;  $t_1$ 、 $t_2$  为测读水头的起始和终止时间,s;  $H_1$ 、 $H_2$  为起始和终止水头。

变水头试验 2:

①开出水阀,排净出水箱的水;②开进水阀,关出水阀,将试验箱内充满水后关闭进水阀;③调节出水阀,使出水箱水位值  $H$  保持不变;④开动秒表,测计试验箱时间  $t$  内的水位值  $H_1$  与  $H_2$ ,  $h_1 = H_1 - H$ ,  $h_2$

$= H_2 - H$ ;⑤用  $k_t = 2.3aL/At\lg(h_1/h_2)$  得渗透系数。

3 试验材料选取

在选样阶段,委托方送样共计 30 种,其中滤料层 8 种,过渡层 17 种,排水层 5 种,建议采用选取以下几种土样进行此次试验:

滤料层:景观 2#, 龚文村样。过渡层:①奉化砂;②姜山淡化砂;③福建砂;④北仑淡化砂 2#。排水层:064281#, 060626#。

这几种土样的颗分曲线与级配具体数据请参考文献[1]。

本实验采用美国垦务局提出的反滤层级配要求作为反滤层的设计标准,即:

$$D_{15}/d_{85} \leq 5 \qquad D_{15}/d_{15} = 5 \sim 40$$
$$D_{50}/d_{50} \leq 25$$

式中:  $D_{15}$ ,  $D_{50}$  为滤料层颗粒级配曲线上小于含量 15%, 50% 的粒径,mm;  $d_{50}$  为被保护土颗粒级配曲线上小于含量 50% 的粒径,mm。

各箱反滤层的计算结果列于表 2~4。

由表 1~4 可以看出,除了表 4 中过渡层不能较好保护滤料层以外,其余均能满足要求,这正与试验结果相一致。在三号箱经过近一个半月的试验过程中,发现渗透系数越来越小,且完全不能满足设计的

表 2 一号箱滤层计算结果

| 粒径  |         | $d_{85}$ | $d_{50}$ | $d_{15}$ | $D_{15}/d_{85}$ | 结果 | $D_{15}/d_{15}$ | 结果 | $D_{50}/d_{50}$ | 结果 |
|-----|---------|----------|----------|----------|-----------------|----|-----------------|----|-----------------|----|
| 要求  |         |          |          |          | $\leq 5$        |    | 5~40            |    | $\leq 25$       |    |
| 滤料层 | 景观 2#   | 2.05     | 0.42     | 0.0092   | 0.179           | ✓  | 39.90           | ✓  | 4.3             | ✓  |
| 过渡层 | 奉化砂     | 3.40     | 1.80     | 0.3670   | 0.800           | ✓  | 7.41            | ✓  | 3.1             | ✓  |
| 排水层 | 064281# | 8.35     | 5.50     | 2.7200   |                 |    |                 |    |                 |    |

表 3 二号箱滤层计算结果

| 粒径  |         | $d_{85}$ | $d_{50}$ | $d_{15}$ | $D_{15}/d_{85}$ | 结果 | $D_{15}/d_{15}$ | 结果 | $D_{50}/d_{50}$ | 结果 |
|-----|---------|----------|----------|----------|-----------------|----|-----------------|----|-----------------|----|
| 要求  |         |          |          |          | $\leq 5$        |    | 5~40            |    | $\leq 25$       |    |
| 滤料层 | 景观 2#   | 2.05     | 0.420    | 0.0092   | 0.1659          | ✓  | 37              | ✓  | 1.6             | ✓  |
| 过渡层 | 姜山淡化砂   | 1.33     | 0.676    | 0.3400   | 2.0451          | ✓  | 8               | ✓  | 8.1             | ✓  |
| 排水层 | 064281# | 8.35     | 5.500    | 2.7200   |                 |    |                 |    |                 |    |

表 4 三号箱滤层第一次计算结果

| 粒径  |         | 结果 | $d_{85}$ | $d_{50}$ | $d_{15}$ | $D_{15}/d_{85}$ | 结果 | $D_{15}/d_{15}$ | 结果 | $D_{50}/d_{50}$ | 结果 |
|-----|---------|----|----------|----------|----------|-----------------|----|-----------------|----|-----------------|----|
| 要求  |         |    |          |          |          | $\leq 5$        |    | 5~40            |    | $\leq 25$       |    |
| 滤料层 | 景观 2#   |    | 2.05     | 0.42     | 0.0092   | 0.4390          | ✓  | 97.80           | ×  | 3.45            | ✓  |
| 过渡层 | 福建砂     |    | 1.88     | 1.45     | 0.9000   | 1.4468          | ✓  | 3.02            | ✓  | 3.79            | ✓  |
| 排水层 | 064281# |    | 8.35     | 5.50     | 2.7200   |                 |    |                 |    |                 |    |

表 5 三号箱第二次滤层计算结果

| 粒径  |         | $d_{85}$ | $d_{50}$ | $d_{15}$ | $D_{15}/d_{85}$ | 结果 | $D_{15}/d_{15}$ | 结果 | $D_{50}/d_{50}$ | 结果 |
|-----|---------|----------|----------|----------|-----------------|----|-----------------|----|-----------------|----|
| 要求  |         |          |          |          | $\leq 5$        |    | 5~40            |    | $\leq 25$       |    |
| 滤料层 | 龚文村样    | 2.23     | 0.150    | 0.0035   | 0.0422          | ✓  | 26.9            | ✓  | 1.2             | ✓  |
| 过渡层 | 北仑淡化砂 2 | 0.59     | 0.175    | 0.0940   | 3.3864          | ✓  | 21.3            | ✓  | 21.0            | ✓  |
| 排水层 | 060626# | 6.70     | 3.600    | 1.9980   |                 |    |                 |    |                 |    |

要求,只有进行换土重新试验(表 5)。

4 种植植物之前试验结果与结论

4.1 试验结果

模型建立后,在种植物之前,获得渗透系数试验共计 5 组(表 6)。

表 6 种植植物前试验结果

| 试验方法 | 试验时间       | 一号箱<br>渗透系数/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | 二号箱<br>渗透系数/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | 三号箱<br>渗透系数/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | 三号箱<br>二次试验<br>渗透系数/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | 三号箱<br>二次试验<br>渗透系数/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) |
|------|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 2    | 2006-05-31 | 291.360                               | 461.044                               | 365.401                               | 2006-06-29                                    | 482.438                                       |
| 1    |            | 271.836                               | 430.036                               | 358.308                               |                                               | 446.405                                       |
| 2    | 2006-06-02 | 160.226                               | 273.460                               | 103.541                               | 2006-07-04                                    | 371.230                                       |
| 1    |            | 148.104                               | 262.476                               | 82.872                                |                                               | 342.278                                       |
| 2    | 2006-06-08 | 145.602                               | 107.556                               | 40.382                                | 2006-07-05                                    | 245.101                                       |
| 1    |            | 142.208                               | 96.480                                | 37.188                                |                                               | 220.883                                       |
| 2    | 2006-06-10 | 108.441                               | 105.008                               | 39.540                                | 2006-07-06                                    | 141.033                                       |
| 1    |            | 107.352                               | 98.604                                | 38.952                                |                                               | 130.249                                       |
| 2    | 2006-06.13 | 108.972                               | 102.600                               |                                       | 2006-07-07                                    | 125.150                                       |
| 1    |            | 106.128                               | 98.172                                |                                       |                                               | 119.580                                       |

注 设计要求渗透系数介于 50 ~ 200 mm/h 之间。  
将同一天的两种不同方法测得的渗透系数进行平均,见图 1。

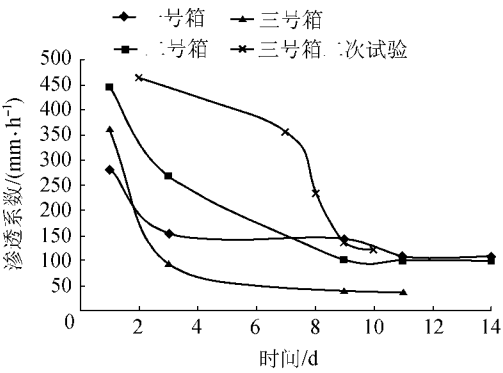


图 1 渗透系数变化趋势

从图 1 中可以清楚看出所有试验箱的渗透系数都是开始较大,随时间延长而逐渐趋于稳定。这是因为由于水的下渗形成渗流力,在渗流力的作用下,土样被逐渐压密,最后处于稳定状体,而所测得的渗透系数正好说明这一情况。一号、二号试验箱和三号箱二次试验所测得的稳定渗透系数均能满足设计要求。

通过试验可以观察到,一、二号箱与三号箱二次试验的 3 层土样分界面十分明显,而三号试验箱的 3 层分界面已经比较模糊,且过渡层与排水层的颗粒颜色已经变得浑浊,很明显已有滤料层的细颗粒的存在。在三号箱换土样过程中发现,接近过渡层的地方,滤料层形成了一个近 5 cm 的板结层,十分明显。

试验中还对水样做了一定的分析,在进水箱内

充入比较混浊的水,观察出水口出水。

采用光电测光仪测得所取水样的消光值与透光度,试验结果如表 7 所示。

表 7 进、出液体混浊程度测试

| 样号        | 浑浊液消光值 | 清水消光值 | 透光度 |
|-----------|--------|-------|-----|
| 1 号箱进水(1) | 128    | 59    | 69  |
| 1 号箱出水(1) | 71     | 57    | 14  |
| 1 号箱进水(2) | 115    | 57    | 58  |
| 1 号箱出水(2) | 72     | 58    | 14  |
| 2 号箱进水(1) | 118    | 58    | 60  |
| 2 号箱出水(1) | 102    | 58    | 44  |
| 2 号箱进水(2) | 106    | 57    | 49  |
| 2 号箱出水(2) | 102    | 58    | 44  |
| 3 号箱进水(1) | 160    | 58    | 102 |
| 3 号箱出水(1) | 71     | 58    | 13  |
| 3 号箱进水(2) | 150    | 58    | 92  |
| 3 号箱出水(2) | 71     | 58    | 13  |

由结果可以看出,出水比进水的混浊程度有所降低,其净水能力排序为 福建砂 > 奉化砂 > 姜山淡化砂。

4.2 试验结论

a. 虽然在宁波地区很难找到完全满足设计所建议的过渡层砂样,但是根据《水闸设计规范》所给出的反滤层的设计要求(采用美国垦务局提出的反滤层级配要求),找到满足设计要求的过渡层砂样。根据试验证明,这些砂样能够很好地保护滤料层,且被排水层保护。

b. 模型试验的稳定渗透系数除了福建砂略小以外,其余 3 个模型渗透系数均处于设计所要求的渗透系数范围之内,且从观察窗口看出,奉化砂,姜山淡化砂与龚文村土样所处的 3 个模型的 3 层固体颗粒分界面明显,尚没有形成堵塞和流失的情况,可以种植植物,继续进行试验。

c. 通过对土样的分析,可以看出在没有种植植物的情况下,进水和出水的混浊程度均有不同程度的改善。

d. 各种土样在水中经过 24 小时浸泡,其溶液的 pH 值均为 7 左右。

5 种植植物之后试验结果与结论

5.1 试验结果

种植植物后,每天浇水养护,经过 1 个月的生长,植物长势良好,试验结果见表 8 所示。

将同一天的两种不同方法测得的渗透系数进行平均,见图 2。

从表 8 与图 2 中可以观察到:在开始的一段时间里,由于植物还没有很好地长于土中,根系长势并不发达,所测渗透系数基本上还是土样的渗透系数。

表 8 种植植物后试验结果统计

| 试验方法 | 试验时间                | 一号箱<br>渗透系数/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | 二号箱<br>渗透系数/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | 三号箱<br>二次试验<br>时间     | 三号箱<br>二次试验<br>渗透系数/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) |
|------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|
| 2    | 2006-06-21<br>(1 周) | 105.778                               | 105.901                               | 2006-07-25<br>(1 周)   | 130.531                                       |
| 1    |                     | 103.876                               | 100.547                               |                       | 128.452                                       |
| 2    | 2006-06-22          | 105.500                               | 103.545                               | 2006-07-28            | 132.597                                       |
| 1    |                     | 103.002                               | 102.963                               |                       | 130.234                                       |
| 2    | 2006-07-20<br>(1 月) | 119.664                               | 109.368                               | 2006-08-24<br>(1 月)   | 277.884                                       |
| 1    |                     | 112.136                               | 104.544                               |                       | 249.875                                       |
| 2    | 2006-08-24<br>(2 月) | 218.053                               | 269.512                               | 2006-09-03<br>(1.5 月) | 280.351                                       |
| 1    |                     | 204.462                               | 250.453                               |                       | 258.433                                       |
| 2    | 2006-09-20<br>(3 月) | 212.070                               | 264.890                               | 2006-09-20<br>(2 月)   | 272.490                                       |
| 1    |                     | 209.905                               | 245.088                               |                       | 261.661                                       |

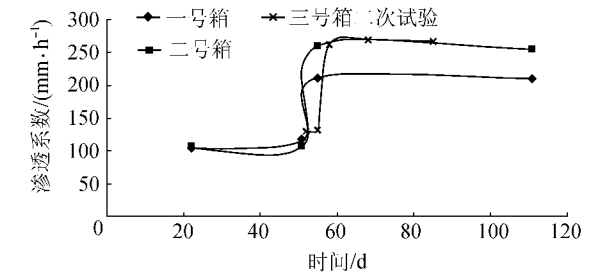


图 2 渗透系数与试验次数关系

在大概长到一个多月的以后试验中,所测渗透系数有了明显增大,且 3 个模型渗透系数的改变趋势基本一致,这是因为由于根系的生长发育,很多根系已经在土壤中延伸,有的甚至发展至过渡层,起到膨胀孔隙的作用。这样在试验过程中,水流可以顺着此根系所形成的渗流通道流动,速度加快。这一现象从玻璃观察窗口可以十分清楚地观察到。

5.2 种植植物之后试验结论

- a. 在所选择土样上种植植物,植物易于生长,经过一段时间的养护,长势很好,且根系生长发达。
- b. 经过近 4 个月的试验,所选土样从观察窗口看各层分界线十分明显,下层均起到保护上层的作用,且各箱渗透系数的变化趋势一致。这充分说明所选的滤料层,排水层土样尚好。
- c. 最后所测渗透系数比没有种植植物前大了许多,这是因为模型箱中种植植物后,植物根系打通了很多渗流通道,使得水流流速加快。
- d. 由于时间等因素,所选用植物均是易于生长的,景观性考虑较少。

6 结论与建议

经过近半年的时间,本模型试验完成了从试验方案、设计材料、选样、建立模型、到对模型进行试

验、室内试验进行比较、最后对试验结果进行分析等各个阶段。总的来说,试验结果比较令人满意,试验结果与理论对比一致,具有较高可信性。

- a. 按照设计的选样要求,在宁波地区寻找尽可能达到要求的土样。但由于宁波与国外土质不同,过渡层难以找到完全满足设计要求的土样,故最后按照中国《水闸设计规范》,对土样进行配比计算,找到可能满足要求的土样进行试验验证。通过模型试验结果证明,这种方法选出的土样可以达到设计要求。
- b. 在模型试验阶段,根据模型自身条件和土样的渗透特性,设计了两种变水头方法完成全部试验。其中从侧壁直接量测得到的数据均比从测压管读数的稍大,这是因为试验箱与出水箱的连接管处有微漏水情况,所以从测压管读得的数据比实际稍微小一些。
- c. 通过近 4 个月的试验,所选土样经过近十多次的渗透试验,3 层土样间相互保护能力较好,没有出现堵塞等不良现象。
- d. 随着试验的进行,所选土样在渗透力与天然自重的作用下被逐渐压实,其渗透系数逐渐减小,最后趋于稳定 种植植物以后,开始阶段植物的根系没有能够发挥作用,故其渗透系数与没有种植植物的相差不大,随着植物根系的生长,被压实的渗透通道又被打通,其渗透系数逐渐增大,最后又趋于稳定。这个孔隙变化过程与渗透系数的变化过程相一致的。
- e. 由于时间限制,在试验阶段所选植物类型均是生命力较为旺盛的植物,这些植物的景观性不一定很好,建议考虑生态滤水带的景观性能,选择一些更为美观的植物。

参考文献：

[1] 宁波市水利水电规划设计研究院. 慈城新区生态滤水带模型试验报告[R]. 宁波: 宁波市水利水电规划设计研究院, 2005.

(收稿日期 2008-06-22 编辑 高渭文)