

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2009. 06. 016

透水模板布的分形特征

王 晓^{1 2} ,田正宏^{1 2} ,徐明波³

(1. 河海大学水利水电工程学院 江苏 南京 210098 ; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098 ; 3. 中铁十七局集团物资有限公司 ,山西 太原 030000)

摘要 :采用像素点覆盖法在 MATLAB 环境下实现对透水模板布(CPFL)淤堵前后 2 种状态下 SEM 图像分形计盒维数的计算 ,分析透水模板布淤堵前后的分形特征。研究发现 ,淤堵后过滤层表面分形计盒维数明显增高 ,淤堵前后过滤层断面的计盒维数都小于相应的排水层断面 ,过滤层和排水层断面淤堵后分形计盒维数降低 ,过滤层降低幅度更大。从分形的角度阐述了 CPFL 过滤层和排水层纤维组织结构的不同 ,以及 CPFL 淤堵前后组织结构的明显变化 ,提出了判断 CPFL 重复使用的量化评价方法。

关键词 :透水模板布 ;像素点覆盖法 ;计盒维数 ;分形 ;量化

中图分类号 :TU502 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)06-0063-04

Fractal properties of infiltrating formwork texture /WANG Xiao^{1 2} ,TIAN Zheng-hong^{1 2} ,XU ming-bo³ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,Nanjing 210098 ,China ; 3. China Railway 17 Bureau Group Materials Co ,Ltd. ,Taiyuan 030000 ,China)

Abstract : In the MATLAB environment , the fractal box-counting dimension of an SEM image before and after clogging were calculated with the pixel-covering method. The fractal properties of infiltrating formwork texture before and after clogging were analyzed. This study shows a significant increase in fractal box-counting dimensions on the surface of the filtering layer after infiltrating formwork texture clogging. The fractal box-counting dimensions of the section of filtering layer before and after clogging are both less than the corresponding dimensions of the drainage layer. A decline in fractal box-counting dimensions appeared on both the surface of the filtering layer and the drainage layer after infiltrating formwork texture clogging , and the decrease of the filtering layer is larger. From the fractal perspective , the difference of fiber structure between the filtering layer and the drainage layer of the infiltrating formwork texture is described. A new quantitative evaluation method for repeated use of infiltrating formwork texture is put forward.

Key words : infiltrating formwork texture ; pixel-covering method ; box-counting dimension ; fractal ; quantification

1 分形理论及透水模板布概述

1.1 分形理论

Mandelbrot^[1]在 1975 年首次提出了分形和分形几何的概念。分形主要用来分析自然界中无规则、杂乱的 自然现象。目前分形已经成为研究和处理众多学科领域中复杂性和非线性问题的重要理论工具^[2-3]。在多孔介质方面 ,对于复杂无序的介质结构和性能 ,分形理论实用性的优势已经逐渐显现 ,用分形维数定量表征其结构和性能差别 ,为客观准确地评价多孔介质提供了良好的途径。

1.2 透水模板布材料

透水模板布^[4](controlled permeability formwork liner ,以下简称 CPFL) ,在桥梁、码头、水利和一些清水混凝土工程中已逐步得到认可和推广使用 ,被证

明是改善混凝土表面成型质量的新技术材料。CPFL 是一种聚丙烯无纺纤维(PP) ,该纤维具有 2 层结构组织 ,表面为热致黏结面 ,形成过滤层 ;而内层主体为普通无纺织物结构层 ,充当排水层。过滤层小孔确保水能通过但水泥颗粒被截留住。使用时过滤层紧贴混凝土表面使多余空气和水分排出 ,降低混凝土表面水灰比 ,提高混凝土强度和耐磨性。此外 ,CPFL 还可为混凝土在养护期间提供相应湿度 ,减少裂缝的产生。

CPFL 重复使用的次数是有限的。一般工程实践中 ,施工单位为了节约成本 ,往往会多次重复使用 CPFL。但是 ,由于目前 CPFL 渗排、淤堵评价参数尚未形成 ,加之不同产品的渗排性能、施工时混凝土性能参数以及施工能力水平等具有很大的差异 ,导致在实际重复使用次数上存在较大的随意性及不可比

性。其实,若水泥浆体已经堵塞了排水层,那么 CPFL 将不能重复使用。目前工程中只是凭经验判断 CPFL 能否继续重复使用,缺乏科学根据。

材料结构特征表明 CPFL 是典型的多孔介质,因此本文对其滤层表面以及排水断面结构层进行分形研究,用分形计盒维数来刻画过滤层和排水层内部纤维结构特征及淤堵后纤维结构的改变,提出通过确定淤堵后 CPFL 分形计盒维数限值来判定其能否重复使用,应该是一种科学严谨的有效评价手段。

2 MATLAB 环境下 CPFL 分形计盒维数计算

2.1 SEM 图像的获取

取 CPFL 淤堵前后表面和断面各 2 个试样,进行镀金膜处理(避免测试时静电作用),然后在真空负压状态下通过 SEM 电镜扫描试验,得到不同倍率下模板布 BMP 格式的灰度图像。

2.2 图像二值化

1 副大小为 $m \times n$ 的图像实质是由 m 列 $\times$ n 行像素组成的矩形图,数字图像本质是通过数据存储。电子显微镜扫描得到的原始图像为 BMP 格式灰度图像,图像大小为 1280 像素 $\times$ 960 像素,在 MATLAB 中对灰度图像进行二值化处理,得到二值图像^[5-6],此时图像上的每一个像素点为黑和白 2 种颜色,在相应的矩阵中分别用 0 和 1 表示。

2.3 分形计盒维数计算

计盒维数可以被认为是表示一个集合能被相同形状的小集合覆盖的效率,是一种被广泛应用的分形维数^[7-9]。计盒维数常见的有网格覆盖法^[10]、像素点覆盖法等,其定义本质是相同的。下面介绍像素点覆盖法的分形维数求解。

像素点覆盖法^[11]求计盒维数的实现步骤如下:
①把图像进行二值化处理,得到一个仅含 0 和 1 的图像数据矩阵。
②用 $k \times k$ 分块矩阵去覆盖①中得到的数据矩阵,此处为无交叉完全覆盖,把所有包含 0 (或 1) 的块数记作 N_k (本文计算的 N_k 是含 0 的块数),通常取 $k = 1, 2, 4, \dots, 2^i$,即以 $1, 2, 4, \dots, 2^i$ 个像素点的尺寸为分块矩阵的边长进行划分,从而可以得到盒子数 $N_1, N_2, N_4, \dots, N_{2^i}$ 。
③像素点的尺寸 d 为图像的长度比图像一行中像素点个数,所以行和列都有 k 个像素点组成的矩阵块边长为 $d_k = kd$ ($k = 1, 2, 4, \dots, 2^i$);由于对于一个具体的图像, d 为常数,因此在具体计算时可以直接用 k 代替 d_k 。

在双对数坐标平面内,以最小二乘法用直线拟合数据点 ($\lg d_k, \lg N_k$), $k = 1, 2, 4, \dots, 2^i$, 所得直线斜率的负值即是该图像的分形计盒维数。本文计算时直接用数据点 ($\lg k, \lg N_k$) 拟合。

根据分形维数的定义,分块的尺寸越小,计算出的图像计盒维数越精确,但对于存储在计算机内的分形图像,只能分割到 1 个像素点尺寸就不能再继续分割下去了。因此当讨论图像的分形性质时,可以取单个像素点尺寸作为尺度下限,尺度上限视具体情况确定,但不能超过分形图像的最大尺寸。

3 CPFL 分形维分析

图 1 为 CPFL 淤堵前过滤层表面在放大 50 倍率下进行图像处理得到的数据点 ($\lg k, \lg N_k$) 拟合图。斜率 $k = -1.1569$, 则 1.1569 即为 50 倍率下 CPFL 淤堵前过滤层表面的分形计盒维数。

过滤层表面的分形维数计算结果列于表 1。

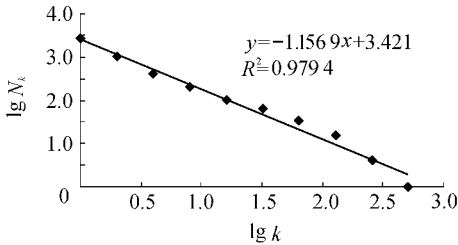


图 1 $\lg k$ 与 $\lg N_k$ 线性拟合图

表 1 CPFL 使用前后过滤层表面分形计盒维数

放大倍率	过滤层表面计盒维数	
	淤堵前	淤堵后
50	1.1569	1.9538
100	1.2718	1.9178
250	1.0333	1.9190

CPFL 淤堵前后在 50 倍率下过滤层表面原始灰度图像如图 2、图 3 所示,二值化图像如图 4、图 5 所示。



图 2 50 倍率下淤堵前过滤层表面灰度图

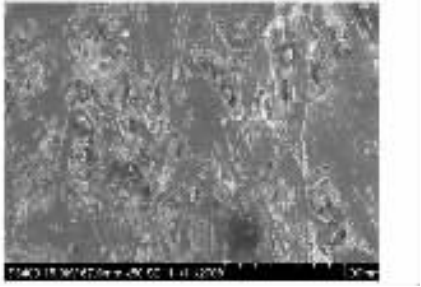


图 3 50 倍率下淤堵后过滤层表面灰度图

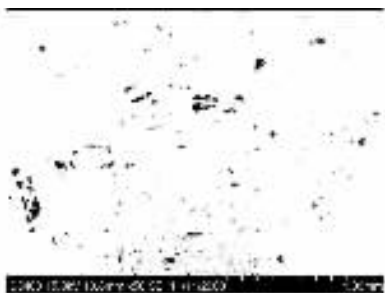


图 4 50 倍率下淤堵前过滤层表面二值化图

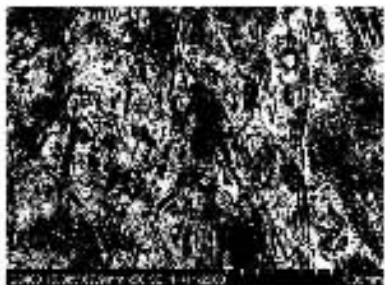


图 5 50 倍率下淤堵后过滤层表面二值化图

3.1 淤堵前后过滤层表面比较分析

表 1 显示出淤堵前过滤层表面在 50, 100, 250 等 3 个倍率下相对应的表面计盒维数都明显低于淤堵后表面计盒维数(由于试样的非均匀性无法克服, 所以倍率不同, 测试范围有所改变, 故此处不同倍率之间不具有可比性), 差别的主要原因在于: 过滤层表面经过特殊工艺压制而成, 平均等效孔径尺寸小于 $35\mu\text{m}$, 且孔隙分布范围较窄, 表面平滑; 对照淤堵前后的电镜扫描图像(图 2、图 3), 尤其是高放大倍率下过滤层表面淤堵前后对比(图 6), 可以发现淤堵后过滤层表面组织结构发生了明显的变化, 水泥浆体颗粒的填充严重破坏了表面结构, 淤堵之后水泥浆体颗粒分散进入整个过滤层表面, 使 CPFL 表

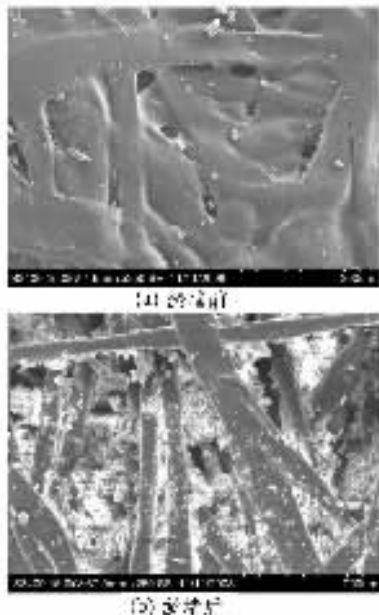


图 6 250 倍率下淤堵前后过滤层表面灰度图对比

层相对均匀光滑面很大程度地遭到破坏, 平滑的过滤层表面变得凹凸不平, 粗糙程度增强, 按照分形维数的意义, 表面分形计盒维数的增加, 即表明表面形状的复杂程度增加。CPFL 过滤层薄弱的表层被破坏进一步加剧了水泥浆体的淤堵, 水泥浆体颗粒透过过滤层, 堵塞排水层, 最终使 CPFL 失去效用。实际工程中 CPFL 不能多次反复使用的原因也在于此。

过滤层表面淤堵后计盒维数越大, 表明过滤层表面凹凸程度越严重, 水泥浆对表层均匀致密滤膜结构面的破坏越严重, 其原因在于过滤层表面薄如蝉翼的微孔透水膜很容易被混凝土浆液破坏。过滤层表面计盒维数的大小能够反映 CPFL 淤堵后表层的破坏程度, 可以作为衡量 CPFL 淤堵前后变化程度的一个指标。

3.2 CPFL 断面的变化

对 100 倍率下 CPFL 淤堵前后的 SEM 图像, 分别在靠近过滤层和排水层的二值化图像上取 256 像素 $\times$ 256 像素的部分进行分形计盒维数计算, 得到 CPFL 过滤层和排水层断面淤堵前的分形维数分别为 1.9369 和 1.9633, 淤堵后的分形维数分别为 1.7279 和 1.9557。

CPFL 过滤层确保滤除水泥细粒而不至于堵塞排水层, 排水层主要是排出混凝土中多余的水分, 提高混凝土表观质量。基于此作用机理, 过滤层和排水层内部组织呈现异构, 过滤层平均孔径应小于排水层平均孔径。图 7 为 CPFL 淤堵前的 SEM 图像, 图像左侧为排水层断面, 右边边缘为过滤层断面, 过滤层断面相对密实。图 8 为对应于图 7 的二值化图像。显然, 分形计盒维数计算可以定量揭示过滤层和排水层断面的结构差异。

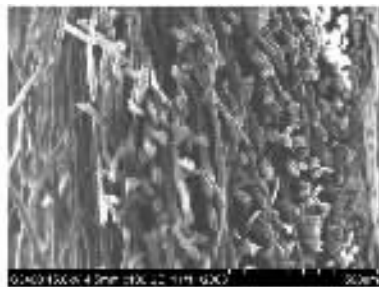


图 7 100 倍率下 CPFL 断面淤堵前 BMP 图像

淤堵之前, CPFL 过滤层断面分形维数比排水层小。机理是: 过滤层纤维组织比排水层密实, 组织间的孔隙结构比排水层少; CPFL 断面 BMP 图像黑白二值化后, 孔隙结构部分及相对凹陷部分呈现黑色。显然 CPFL 断面二值化图像中排水层 0 像素点数目(代表孔隙部分)明显多于过滤层, 对应相应的 k 统计出来的 N_k 也增加了, 所以排水层断面分形计盒维

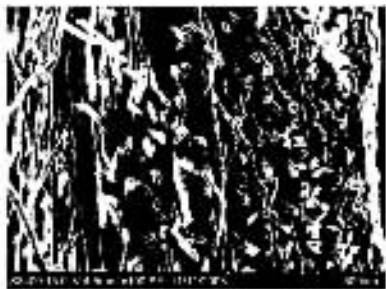


图8 100倍率下CPFL断面淤堵前二值化图像

数比过滤层断面大,由此说明与排水层断面相比,过滤层断面结构相对均匀简单。断面分形计盒维数可以用来定量分析CPFL孔隙结构的分布形态以及纤维组织的疏密程度。

淤堵后CPFL断面过滤层和排水层的分形计盒维数都比淤堵前减小了,其中过滤层减小幅度更大。分析原因是CPFL使用后,由于水泥浆体的填充,出现了不同程度的淤堵导致断面结构密实状态发生变化。过滤层断面平均孔径较小,孔隙结构因被绝大部分水泥浆体颗粒填充更加致密而趋于简单,因此其断面结构分形计盒维数明显减小;少量颗粒透过过滤层渗入到排水层,引起排水层断面结构的分形计盒维数减小,只是变化程度不及过滤层断面,因而其断面分形计盒维数减少幅度很小。由此可见,过滤层断面淤堵严重,淤堵后其断面分形计盒维数减小,且减小幅度很大;而与混凝土非接触的排水层,由于过滤层的阻挡作用,淤堵程度相对较轻,结构变化小,分形计盒维数改变幅度也相应较小。

CPFL断面分形计盒维数可以作为衡量CPFL纤维组织结构稀疏密实、孔径大小分布的一个重要指标。就本文的分形维实际意义,计盒维数越小,表征纤维组织结构越密实单一,孔径分布范围也越狭窄;计盒维数越大,纤维组织结构越复杂,孔径分布范围越大。过滤层断面计盒维数小,排水层断面计盒维数大,淤堵后也是如此。不过,就过滤层而言,这里要区分一下表面分形维和断面分形维的含义差别。从前分析可以看出,过滤层的表面分形维刻画了表面结构的破坏程度,而断面分形维则反映了过滤层断面纤维组织结构的疏密改变状况。本文计算所得到的两者变化相反的结论恰好说明了过滤层淤堵后其表面及内部结构变化的一致性。

CPFL在实际工程中使用过1次之后,由表及里即从过滤层表面一直到排水层都不同程度地被水泥浆体颗粒填充,CPFL内部结构因此有了很大改变,通常的认识仅仅局限于直观感觉,但借助计盒维数能够从分形理论的角度把淤堵前后CPFL结构改变的定性问题量化。

4 结 论

a. 淤堵前后的CPFL过滤层表面计盒维数有很大差别,淤堵后的过滤层表面计盒维数比淤堵前明显增大,表明表面凹凸程度严重,混凝土颗粒对CPFL原先平滑均匀的表面滤层破坏加重。

b. 研究表明,CPFL排水层、过滤层的断面分形计盒维数不同,前者比后者大,排水层断面分形维数大,表明排水层纤维组织结构孔隙复杂且孔径分布范围较大,过滤层分形维数小,表明过滤层断面纤维结构密实简单,孔径分布范围较小。

c. 淤堵前后CPFL断面分形维数改变,体现在淤堵之后过滤层的分形维数呈现绝对偏小现象,且降低幅度很大,而排水层相对淤堵程度低,因此断面分形维数改变分别表征了过滤层及排水层孔隙结构分布的改变效果。

d. 使用过的CPFL过滤层和排水层必然形成堵塞,影响重复使用效果,结合测试CPFL使用后淤堵渗透性参数的宏观表征差异性,采用SEM图形分析法测定过滤层表面、过滤层断面及排水层断面的分形计盒维数,定量评价CPFL堵塞程度是适宜、可靠的方法。

参考文献:

- [1] MANDELBROT B. B. Fractal: form, chance and dimension [M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1977: 1-10.
- [2] FERNANDEZ E., JELINEK H. F. Use of fractal theory in neuroscience: methods, advantages, and potential problems [J]. METHODS 2001, 24: 309-321.
- [3] 王培珍, 汪琴芳, 张代林. 焦炭图像分形维数的计算[J]. 安徽工业大学学报, 2007, 24(2): 199-201.
- [4] 田正宏, 白凯国, 朱静. 透水模板布改善混凝土表层质量试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(1): 146-150.
- [5] 王勇智. 数字图像的二值化处理技术探究[J]. 湖南理工学院学报: 自然科学版, 2005, 18(1): 31-33.
- [6] 王强, 马利庄. 图像二值化时图像特征的保留[J]. 计算机辅助与图形学学报, 2000, 12(10): 746-750.
- [7] 刘明芹, 张晓光. 一种计算图像分形维数的有效方法[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(3): 369-373.
- [8] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 二维数字图像分形维数的计算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(1): 19-24.
- [9] 杨书申, 邵龙义. MATLAB环境下图像分形维数的计算[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(4): 478-482.
- [10] 冯志刚, 周宏伟. 图像的分形维数计算方法及其应用[J]. 江苏理工大学学报: 自然科学版, 2001, 22(6): 92-96.
- [11] 丁保华, 李文超, 王福明. 分形图像分析与分形维数计算程序的设计[J]. 北京科技大学学报, 1999, 21(3): 304-307.

(收稿日期: 2009-08-22 编辑: 方字形)