

基于图像识别的粉煤灰渗透率计算方法

何伟[†],任孟健,肖尧

(湖南大学 土木工程学院,湖南长沙,410082)

摘要:为提高粉煤灰渗透率计算的准确性,利用显微数码成像技术和专业图像处理技术获取粉煤灰试件中孔隙和颗粒的直径、数量,并绘制得到孔隙和颗粒的频率直方图,通过最小二乘法,拟合得到孔隙指数分布函数和颗粒瑞利分布函数。将孔隙和颗粒分为 3 个等级,计算得到其特征粒径,并按从小到大的顺序进行排列。基于无放回摸球过程,采用 Matlab 编程模拟孔隙和颗粒在 5 倍最大颗粒当量圆直径的方格中随机排列,计算得到孔隙的连通率。在此基础上,推导出考虑孔隙连通率的粉煤灰渗透率公式,与其他文献结果进行了比较和分析,吻合度很好,证明了本文方法的可行性。

关键词:道路工程;粉煤灰;渗透率;连通;图像处理

中图分类号:U414

文献标志码:A

Calculation Method of Fly Ash Permeability Based on Image Recognition

HE Wei[†], REN Mengjian, XIAO Yao

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of fly ash permeability calculation, firstly, the diameter and number of pores and particles in fly ash specimens are obtained by using microdigital imaging technology and professional image processing technology. Then, the frequency histogram of pore and particle is plotted, and the pore exponential distribution function and particle Rayleigh distribution function are fitted by the least square method. Secondly, the pores and particles are divided into three grades, and their characteristic particle sizes are calculated and arranged in order from small to large. Finally, based on the ball-touch process without dropping back, Matlab programming was used to simulate the random arrangement of pores and particles in a square with a diameter of 5 times the maximum particle equivalent circle, and the connectivity of pores was calculated. On this basis, the formula of fly ash permeability considering the porosity connectivity is derived, which is compared and analyzed with the results of other literatures. The good agreement proves the feasibility of the method in this paper.

Key words: road construction; fly ash; permeability; connection; image processing

* 收稿日期:2020-05-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678231), National Natural Science Foundation of China(51678231)

作者简介:何伟(1973—),男,江西萍乡人,湖南大学工程师

[†] 通讯联系人, E-mail: hw98219@163.com

粉煤灰是燃煤锅炉及电厂排放的一种工业废渣。由于其组织疏松,具有球形颗粒特征及良好的渗透性,因而被广泛应用于道路工程的路堤填筑^[1]。粉煤灰的渗透性能与路堤的压实度和稳定性等力学性能密切相关^[2-3],因而研究粉煤灰的渗透性能成为粉煤灰路基填筑的关键问题。国内外学者对粉煤灰渗透率做了一定的研究。如 Bros 等^[4]对灰坝的渗流控制进行研究,得出粉煤灰渗透系数的各向异性比值为 2~6;陈愈炯等^[5]对粉煤灰的物理、化学及力学性质作了初步研究,得出粉煤灰的渗透系数约为 10^{-3} ~ 10^{-5} cm/s;黄敬如^[6]通过现场试坑注水试验,对粉煤灰坝体的渗透性能进行了初步探讨,测得粉煤灰坝体的渗透系数为 $(2\sim 10)\times 10^{-4}$ cm/s,并指出水平向渗透系数大于垂直向渗透系数。这些研究大多停留在试验阶段,对粉煤灰渗透率的理论研究还不够深入。赵明华等^[7]基于分形理论推导了粉煤灰渗透率与孔隙分维数的关系式,评价了孔隙分维数对粉煤灰渗透率的影响。实际上,孔隙和颗粒在粉煤灰试件中是随机分布的,孔隙之间存在连通和不连通的情况,只有相互连通的孔隙才与试件的渗透率有关,因而,孔隙率并不是影响渗透率的最主要因素。Abbas^[8]明确指出,试件的渗透性与孔隙率相关,渗透性高低取决于内部孔隙的连通状况。因此考虑粉煤灰孔隙的连通性的渗透率研究意义重大。然而,以往的研究中考虑粉煤灰孔隙的连通性对渗透性能影响的定量分析鲜有报道。

鉴于此,本文将首先采用显微数码成像技术获取粉煤灰试件孔隙和颗粒分布函数。然后,基于 Matlab 编程,根据无放回摸球过程产生随机数,计算粉煤灰试件的孔隙连通率。在此基础上,推导得到粉煤灰渗透率的计算公式。最后,通过与其他文献结果的对比验证本文方法的正确性。

1 孔隙结构图像识别原理与方法

近年来,随着对岩土工程领域问题认识的不断深入,国内外学者开始将岩土工程领域中的问题向微观结构进行拓展,在这种趋势下图像识别技术及图像处理技术的应用得到了快速发展。在各类图像识别技术中,数码光学显微镜由于强大的图像区域选取、图像区域处理以及图像分析结果输出功能而得到了广泛应用。洪宝宁等^[9]在对岩土工程材料的力学模型探究和本构关系分析中,引用了长距离显微镜,并通过数字图像处理软件的辅助,实现了图像识

别、图像处理以及图像数据的输出,实现了对试验土样的孔隙率、孔隙面积、孔隙数目以及颗粒定向度等微观结构力学参数的分析。基于此,本文使用数字图像技术对粉煤灰微观结构的图像进行分析,在考虑孔隙连通影响条件下建立粉煤灰渗透率公式,其试样制备和图像采集方法如下。

1.1 试样的制备

首先,按最优含水率采用轻型击实的方法制作粉煤灰试样。采用内径为 61.8 mm 的不锈钢薄壁取土器取样,经低温冷冻干燥后用锋利的小刀削去表层土,并用橡皮球吹去试件表面的扰动颗粒,使其暴露出新鲜的表面供研究。

1.2 图像采集

采用体式显微镜选取粉煤灰试件的 4 个不同位置进行拍照,放大倍数为 150 倍,图片大小为 352×352 (单位:像素),每 1 个单位像素代表 $1.425\ \mu\text{m}$ 。将获得的 4 张真彩色原始显微图像,利用专业图像处理软件进行去噪声、对比度增强、背景平滑等初步处理,使图像更加清晰,然后将其转换成灰度图像,再通过直方图均衡化、弱化等处理,使粉煤灰孔隙结构特征更加明显。采用目视法对图像进行阈值分割,形成二元图像,白色为固体颗粒,黑色为孔隙,图 1 表示典型的图像处理过程。最后利用图像分析软件统计孔隙和颗粒的分布情况。

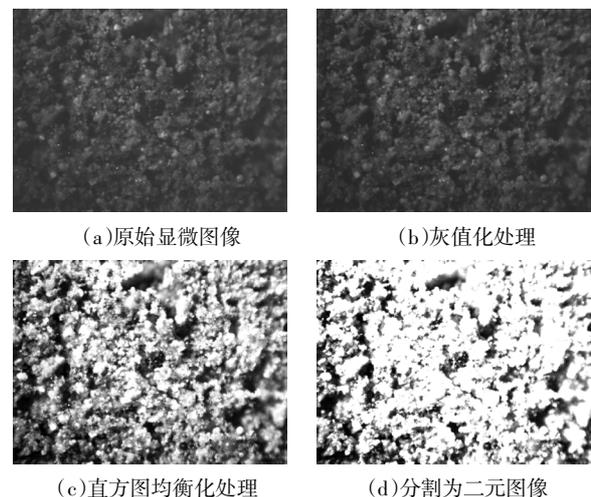


图 1 粉煤灰试样的显微图像处理典型过程

Fig.1 Typical process of microscope image processing on fly ash samples

2 确定孔隙颗粒分布函数

根据图像软件分析结果,不同尺寸的孔隙总数目为 875,按照组距为 $9.5\ \mu\text{m}$ 把孔隙分为 12 个组,

各组的孔隙累计数量和频率见表1,以孔隙直径为横坐标,以频率/组距为纵坐标的粉煤灰孔隙直径分布见图2.颗粒总数目为551,按照组距为12 μm,把颗粒分为14个组,各组的颗粒累计数量和频率见表2,粉煤灰颗粒直径分布见图3.

表1 粉煤灰试件孔隙分布

Tab.1 Pore distribution of fly ash specimen

孔隙直径/μm	累计数量	频率	孔隙直径/μm	累计数量	频率
1.5~11	358	0.409	58.5~68	12	0.014
11~20.5	182	0.208	68~77.5	9	0.010
20.5~30	139	0.159	77.5~87	8	0.009
30~39.5	95	0.109	87~96.5	4	0.005
39.5~49	40	0.046	96.5~106	2	0.002
49~58.5	23	0.026	106~115.5	3	0.003

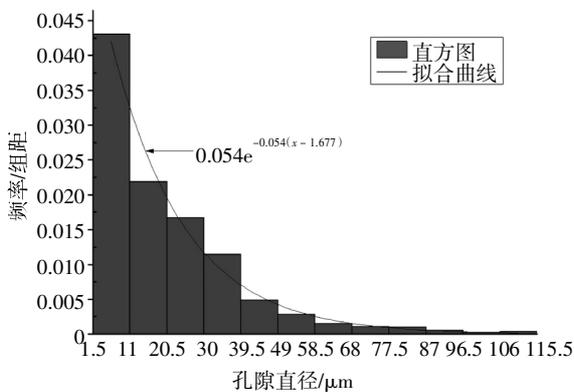


图2 粉煤灰孔隙直径分布

Fig. 2 Pore diameter distribution of fly ash

表2 粉煤灰试件颗粒分布

Tab.2 Particle distribution of fly ash specimen

颗粒直径/μm	累计数量	频率	颗粒直径/μm	累计数量	频率
2~14	27	0.049	86~98	35	0.064
14~26	61	0.110	98~110	20	0.036
26~38	94	0.171	110~122	9	0.016
38~50	95	0.172	122~134	7	0.013
50~62	86	0.156	134~146	3	0.005
62~74	63	0.114	146~158	2	0.004
74~86	47	0.085	158~170	2	0.004

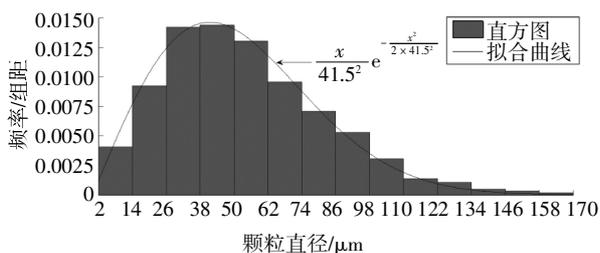


图3 粉煤灰颗粒直径分布

Fig. 3 Particle diameter distribution of fly ash

从图2可看出,粉煤灰孔隙分布符合指数分布.

$$p_e(R) = \lambda e^{-\lambda(R-\mu)} \quad (1)$$

通过非线性最小二乘拟合,确定指数分布参数 $\lambda=0.054, \mu=1.677$.粉煤灰颗粒分布符合瑞利分布:

$$p_R(R) = \begin{cases} \frac{R}{\beta^2} e^{-\frac{R^2}{2\beta^2}}, & R \geq 0 \\ 0, & R < 0 \end{cases} \quad (2)$$

通过非线性最小二乘拟合,确定瑞利分布参数 $\beta = 41.5$.

3 粉煤灰孔隙连通系数的确定

粉煤灰孔隙连通情况与不同尺寸的孔隙和颗粒的排列密切相关.根据图像分析软件得到的孔隙和颗粒的分布,按照吴恩江等^[10]对孔隙大小的分级标准,将孔隙和颗粒分为3个等级.

1)微孔隙:孔径在1~10 μm之间,在较高压力下水可渗流,但渗透率较低.

2)小孔隙:孔径在10~100 μm之间,在自然状态下,有一定的水头压力时,水可以通过其渗流,渗透性较好.

3)大孔隙:孔径大于100 μm,地下水可以在其内较顺畅地渗流.

每个等级的孔隙和颗粒的特征粒径为:

$$R_c = \frac{\int_{R_i}^{R_j} f(x) x dx}{\int_{R_i}^{R_j} f(x) dx} \quad (3)$$

式中: $f(x)$ 为密度函数,对于孔隙采用式(1),颗粒采用式(2); R_i 和 R_j 分别为该等级粉煤灰孔隙和颗粒直径的最小值和最大值.各等级孔隙和颗粒的特征粒径和数量见表3.

表3 孔隙和颗粒特征粒径和数量

Tab.3 Characteristic particle size and quantity of pores and particles

等级	孔隙		颗粒	
	特征粒径/μm	数量	特征粒径/μm	数量
1~10 μm	5.7	341	6.5	7
10~100 μm	30.1	529	49.6	494
>100 μm	114.6	5	116.4	50

将孔隙和颗粒按特征粒径从小到大的顺序编为1~6号.为了更好地模拟孔隙和颗粒随机分布的情况,按照孔隙和颗粒的相对比例,把各个特征粒径的

孔隙和颗粒数量按表 3 扩大 10 倍,按编号 1~6 的顺序依次排列. 基于无放回摸球过程采用 Matlab 编程,产生随机数,随机数的产生流程见图 4. 在 5 倍的最大颗粒特征粒径的方格网中按照产生的随机数顺序依次排列孔隙和颗粒. 孔隙和颗粒的排列见图 5.

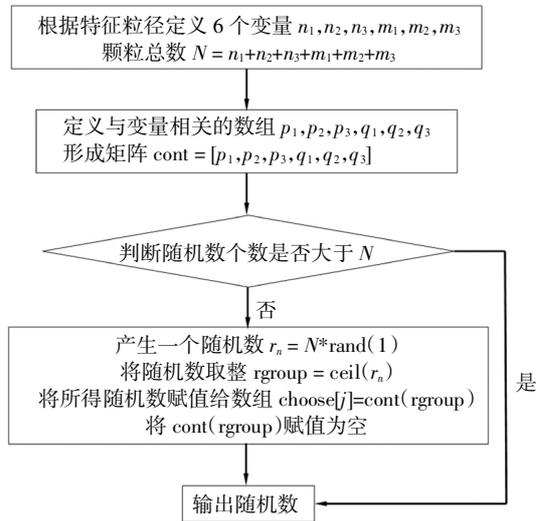


图 4 模拟无放回摸球过程产生随机数流程图
Fig.4 Flow chart of generating random number

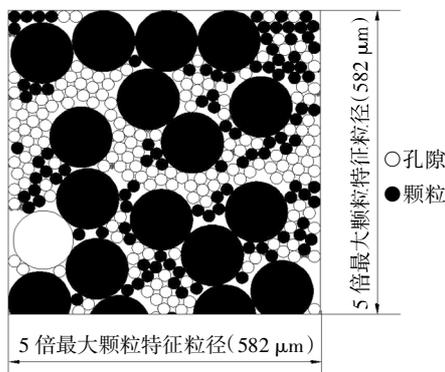


图 5 粉煤灰孔隙和颗粒分布图

Fig.5 Distribution plan of pores and particle

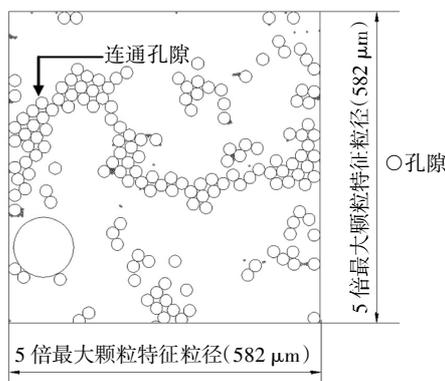


图 6 粉煤灰连通孔隙分布图

Fig.6 Distribution plan of connected pores of fly ash

定义连通系数 C_f 为:

$$C_f = \frac{\text{研究区域连通孔隙面积和}}{\text{研究区域内孔隙面积和}} \quad (4)$$

按照图 6,粉煤灰的连通系数为 0.55.

4 粉煤灰渗透率公式推导

假设有一根长为 L ,内径为 R 的毛细管,其流体黏度为 μ ,在压力差 $(P_1 - P_2)$ 下作层流流动,单根毛细管中的渗流流量为^[11-12]:

$$q(r) = \pi R^4 (P_1 - P_2) / 8\mu L \quad (5)$$

通过某个单元截面 A 的总流量 Q 为:

$$Q = \int_{R_1}^{R_2} q(R) P_c(R) dR = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\mu L} 0.054 e^{-0.054(R-1.677)} dR = \frac{\pi (P_1 - P_2)}{8\mu L} [e^{-0.054R_1} (1.09R_1^4 + 80.93R_1^3 + 4496.27R_1^2 + 166528.36R_1 + 3083858.58) - e^{-0.054R_2} (1.09R_2^4 + 80.93R_2^3 + 4496.27R_2^2 + 166528.36R_2 + 3083858.58)] \quad (6)$$

式中: R_1 和 R_2 分别为最小和最大孔隙半径.

根据 Darcy 定律,可得粉煤灰渗透率为:

$$K = \frac{\mu L Q}{(P_1 - P_2) A} = \frac{\pi}{8A} [e^{-0.054R_1} (1.09R_1^4 + 80.93R_1^3 + 4496.27R_1^2 + 166528.36R_1 + 3083858.58) - e^{-0.054R_2} (1.09R_2^4 + 80.93R_2^3 + 4496.27R_2^2 + 166528.36R_2 + 3083858.58)] \quad (7)$$

考虑孔隙连通系数 C_f 的粉煤灰渗透率为:

$$K_c = C_f \cdot K = 0.55K \quad (8)$$

5 讨论

由于本文中粉煤灰试件制作方法和数码体式显微镜的分辨率与文献[7]一致,因此两者得出的渗透率结果具有可比性. 本文中数码体式显微镜所能识别的最小孔隙半径 R_1 为 $0.8 \mu\text{m}$,研究区域面积 $A = 2486402 \mu\text{m}^2$. 最大孔隙半径 R_2 按 $40 \sim 100 \mu\text{m}$ 取值,计算结果见表 4. 从表 4 可看出,文献[7]和本文得出的渗透率结果在一个数量级,且结果十分接近. 将本文渗透率计算结果和文献[7]的结果进行对比,如图 7 所示.

表4 文献[7]和本文的渗透率结果比较

	reference [7] and this paper						$10^{-2} \mu\text{m}^2$
$R_2/\mu\text{m}$	40	50	60	70	80	90	100
文献[7]	2.7	4.3	6.2	8.6	11.3	14.5	18.1
本文	1.8	3.7	6.1	8.8	11.6	14.3	16.8

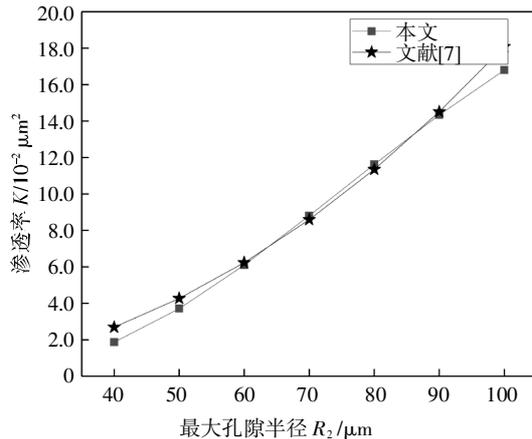


图7 本文和文献[7]渗透率结果对比图

Fig.7 Comparison of permeability results between this paper and reference [7]

由图7可知,基于分形理论的渗透率计算结果同本文使用的基于粉煤灰孔隙连通率公式计算结果十分接近,图中甚至存在部分数据点重合,且渗透率同最大孔隙半径之间的变化趋势一致,均随着最大孔隙半径的增大而不断增大.这也从另一个角度对本文公式的有效性进行了充分的印证.

6 结论

本文通过图像识别技术得到了粉煤灰试件的孔隙分布和颗粒分布规律,基于无放回摸球过程,采用Matlab编程模拟孔隙和颗粒在5倍最大颗粒当量圆直径方格中的随机排列,得出了孔隙的连通率,并在此基础上建立了粉煤灰渗透率公式,将渗透率的计算公式变量缩减为3个,极大地简化了渗透率的计算.本文使用的基于粉煤灰内部结构孔隙连通率的计算公式计算结果与基于分形理论下粉煤灰渗透率的计算结果非常接近,吻合度高,变化趋势相一致,粉煤灰的渗透率随着最大孔径的增加而逐渐增大.

参考文献

[1] 钱觉时.粉煤灰特性与粉煤灰混凝土[M].北京:科学出版社,

2002:1—20.

QIAN J S. Characteristics of fly ash and fly ash concrete [M]. Beijing: Science Press, 2002: 1—20. (In Chinese)

- [2] 李耕,查其明.粉煤灰修筑路堤的研究[J].路基工程,1988(6):39—49.
- LI G, CHA Q M. Study on embankment construction with fly ash [J]. Subgrade Engineering, 1988(6): 39—49. (In Chinese)
- [3] 岳祖润,周宏业,汪春杰,等.粉煤灰在铁路工程中的应用研究[J].铁道学报,1998,20(5):132—136.
- YUE Z R, ZHOU H Y, WANG C J, *et al.* Study on utilization of fly ash in railway construction [J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20(5): 132—136. (In Chinese)
- [4] BROS B, PARYLAK K. Seepage control from ash lagoons [C]//Proceedings of XIICSMFE Sanrancisco, 1985, 3: 1183—1184.
- [5] 陈愈炯,俞培基,李少芬.粉煤灰的基本性质[J].岩土工程学报,1988,10(5):3—16.
- CHEN Y J, YU P J, LI S F. Fundamental properties of fly ash [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(5): 3—16. (In Chinese)
- [6] 黄敬如.粉煤灰坝体渗透性能的初步探讨[J].岩土工程学报,1988,10(5):135.
- HUANG J R. Preliminary exploration on permeability of fly ash dam [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(5): 135. (In Chinese)
- [7] 赵明华,戴杰,张玲,等.基于分形理论的粉煤灰渗透率研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(1):75—80.
- ZHAO M H, DAI J, ZHANG L, *et al.* Fractal theory-based study of the permeability of fly ash [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(1): 75—80. (In Chinese)
- [8] ABBAS A. Permeability of mortars and the degree of saturation [R]. Paris: Lerrecontre Internationale de Toulouse, 1998: 19—24.
- [9] 洪宝宁,赵维柄.利用图像序列测量土工模型位移场的数学模型[J].土木工程学报,1999,32(3):61—65.
- HONG B N, ZHAO W B. Mathematical model of measuring displacement field in model experiment of soil engineering with image array [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(3): 61—65. (In Chinese)
- [10] 吴恩江,韩宝平,王桂梁,等.山东兖州煤矿区侏罗纪红层孔隙测试及其影响因素分析[J].高校地质学报,2005,11(3):442—452.
- WU E J, HAN B P, WANG G L, *et al.* Pore structure test of Jurassic red-bed in Yanzhou mining area, Shandong province, and its affecting factors [J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(3): 442—452. (In Chinese)
- [11] 陈永平,施明恒.基于分形理论的多孔介质导热系数研究[J].工程热物理学报,1999,20(5):608—612.
- CHEN Y P, SHI M H. Determination of effective thermal conductivity for porous media using fractal techniques [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1999, 20(5): 608—612. (In Chinese)
- [12] YU B M, CHENG P. A fractal model for permeability of bi-dispersed porous media [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2002, 45(14): 2983—2993.