

堆积碎石土中细小黏粒的细观孔隙特征

董辉^{1,2}, 李智飞¹

(1. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 湘潭大学 流变力学研究所, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 孔隙特征(多孔性、变异性、复杂性)对雨水入渗的具有重要影响。应用图像处理技术对具有级配代表性的湖南省湘潭市昭山区某堆积碎石土斜坡中细小黏粒的细观孔隙特征进行了试验研究。研究结果表明,相同质量的细小黏粒土体的孔隙度与含水率存在二次曲线关系,试验土体在含水率为 10.41% 时压实性最好;孔隙数目、孔隙复杂度以及孔隙变异度随着含水率的增加而减小,表明含水率越小孔隙的扭曲程度越高,孔隙就越复杂,且孔隙数含量越多,越有利于表层雨水下渗;不同含水率下孔隙定向角在 10°~20°, 50°~60°, 100°~110°, 140°~150° 这 4 个方位上分布相对密集,且含水率越小,孔隙定向性相对较明显;孔隙定向角分布具有辐射状,含水率为 15% 时最为明显,有利于水分的水平渗透迁移。

关键词: 碎石土; 孔隙特征; 变异性; 复杂度; 图像处理

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0173-05

中图分类号: TU361, S152.5

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.048

Microscopic Pore Characteristics of Fine Clay Particals in Eluvial Gravel Soil

DONG Hui^{1,2}, LI Zhi-fei¹

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan, Hu'nan 411105, China;

2. Institute of Rheological Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan, Hu'nan 411105, China)

Abstract: Due to the influence of pore characteristics (porosity, variability and complexity) on rain infiltration, the microscopic pore characteristics of fine clay in eluvial gravel soil with representative grade of a slope in Zhaoshan Zone in Xiangtan City of Hu'nan Province were studied through image processing technology. The results show that there is a quadratic curve relationship between porosity and moisture content in fine clay particals under the same quality, and the experiment soil has the best compaction when the moisture content is 10.41%; the pore number, the pore tested and the pore variability decreases with the increase of the moisture content variation degree, its indicate that the smaller of the pore moisture content, the higher level of distortion and the more complex of pore, and the more pore number, the more beneficial to infiltration for surface water; the pore orientation angle under different moisture content are concentrated in 10°~20°, 50°~60°, 100°~110°, and 140°~150°, and the less moisture content, the more obvious pore directionality is; the distribution of the pore's angle shows a radial structure, and the description is most evident when the moisture content is 15%, and is advantageous to the level osmosis migration of moisture.

Keywords: gravel soil; pore feature; variability; complexity; image processing

全球气候异常变化使地质灾害的防治面临着更大的挑战。近 3 a 的地质灾害统计分析表明,我国的地质灾害类型以滑坡、崩塌和地面塌陷为主,约占总体的 85.3%。自然因素引发(以降雨为主)的地质灾害是其中的主体,如 2013 年 1—4 月全国 552 起地质灾害中,降雨引发 460 起,占总数的 83.3%。降雨诱发型滑坡多为浅层堆积滑坡,堆积物一般表现为风化卸荷、残坡积和冲洪积等复杂成因形成的第四纪土与石块的二重介质混合体。由于土石体物质组成的复杂

性、结构分布的不规则性给其工程性质与力学性质的研究带来了较大的困难。而降雨诱发浅层堆积体滑坡,既表现为雨中和雨后短历时的失稳,也存在反复干湿交替作用下的长时累积效应失稳。针对降雨对堆积坡体的影响,许多学者从宏观角度研究了降雨作用下碎石土(土石体)滑坡解体破坏机理^[1-3]。

碎石土渗透性与其孔隙特征的相关性显著,其中碎块石粒组的含量和以粉粒、黏粒为主的细粒土粒组的含量对碎石土渗透系数影响最大^[3]。研究其孔隙

收稿日期:2013-09-08

修回日期:2013-09-23

资助项目:国家自然科学基金资助项目“基于新颖核机器的堆积碎石土滑坡非平稳变形行为研究”(51108397)

作者简介:董辉(1976—),男(汉族),湖南省安乡县人,博士,副教授,主要从事智能岩土信息技术、滑坡防灾减灾等方面的研究。E-mail: an-eurin. h. d@gmail. com。

特征(孔隙变异度、孔隙复杂度和孔隙度等)对浅层堆积体雨水入渗有着重要的意义。至 1973 年 Tovey^[4] 等利用电子显微试验结果对土微观结构进行定量分析尝试以后,国内外学者在岩土体微观孔隙结构方面开展了大量的研究工作,获得了卓有成效的研究成果。基于砂岩的微观孔隙结构研究,证明了砂岩孔隙具有分形特性^[5]。针对黄土、膨胀土浸水前后微观结构,分析了湿陷的过程中孔隙的变化,获得浸水后大孔隙孔隙含量减少,中、小孔隙的孔隙含量增加的结论^[6]。在岩土微观孔隙结构的分形特征领域,验证了黏性土微观结构中土颗粒的分布符合分形特征,并指出分形维数在 1~2 之间^[7-9]。同时,基于描述颗粒和孔隙分布特性的颗粒分维数、孔隙分维数和谱维数,总结出多孔介质渗透系数的一种预测公式^[10]。随着研究方法改进,以扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)、X 线计算机断层摄影(computed tomography, CT)等为手段分析了包括重塑黏性土的孔隙结构 SEM 图像特征^[11],以及溶蚀作用下土体孔隙变化规律^[12]的微观研究成果。

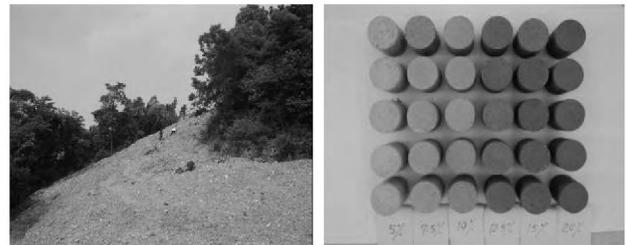
已有研究主要集中在一般土体孔隙的固有特征,而对于包含有土石间的空隙,碎石与土体自身的孔隙,以及在坡积和聚集作用下存在碎石土质量密度、碎石含量和土体压实度空间变异性的土石混合介质,目前在影响渗透性的碎石土中细小黏粒的孔隙特征描述方面还相对缺乏,同时,考虑降雨入渗的影响,研究不同含水率水平下的孔隙特征也有利于从细观角度支撑已有降雨入渗过程中和入渗后滑坡解体破坏机理。本研究针对连续强降雨雨后残坡积(堆积)碎石土滑坡失稳破坏的灾害问题,以湖南省湘潭市昭山区某失稳斜坡为研究对象,试图采用高倍电子光学显微镜及数字图像技术对堆积碎石土中细小黏粒的变异度和复杂孔隙特征进行细观定量研究,并分析含水率与孔隙特征的相关关系,为类似降雨入渗引起滑坡失稳机理研究提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 原材料选取与制样

对已有碎石土研究成果,统计其碎石土的级配特征,将具有较好代表性的湖南省昭山区某斜坡堆积碎石土作为试验原材料,其天然状态含石量为 69.3%,含黏粒量为 21.7%,含水率为 8.7%,母岩为粉质砂岩,黏粒为红黏土,图 1 为取土坡体,材料级配曲线如图 2 所示。将原状土取回实验室,经烘干、筛分后,选取粒径小于 2 mm 的细小黏粒作为试验用料,考虑到土体孔隙特征与含水率有关,试验中按含水率不同分

别配制 5%,7.5%,10%,12.5%,15%和 20%共 6 组试样,每组制备 5 个,共 30 个试样,如图 1 所示。试样均用 39.1 mm 的套筒压实成形,高度为 4 cm,土粒相对密度 G_s 为 2.72,干密度 ρ 为 1.75 g/cm³。



现场取土坡体

不同含水率的试样

图 1 采样坡体和试验样品

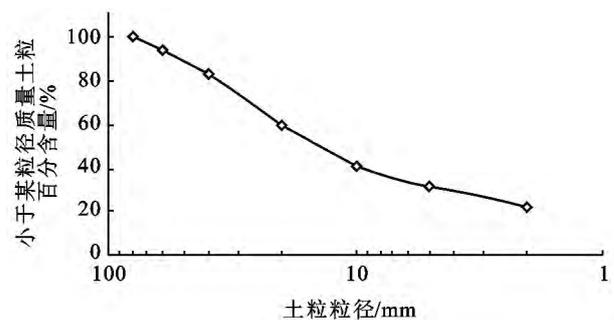


图 2 碎石颗粒级配曲线

1.2 孔隙细观形态的获取与处理

为了获得土样孔隙的细观特征,采用奥林巴斯高倍光学显微镜(Olympus-BX51M)放大 200 倍后对切片表面进行观察,拍摄图像(像元)面积为 1 280 × 1 024。

应用图像处理技术对拍摄的图像进行处理,包括去除背景(消除噪声和部分阴影)、灰度化(去除色彩信息)、高斯模糊(增强图像中目标信息)、二值化(分割图像为目标和背景)等,从图形中提取孔隙的面积、周长、圆度、长轴、角度和孔隙度等基本参数。面积 A 表示二值图像中区域标记为“1”的像素个数;周长等于 π 乘以广义方向直径的平均数 $P = \pi D_m$,二值图像中 D_m 的计算公式为:

$$D_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_{\theta_i}(0,1) \Delta p_{\theta_i} \quad (1)$$

式中: $n_{\theta_i}(0,1)$ ——沿着与 n_{θ} 正交的方向 $\theta_i - \frac{\pi}{2}$ 的扫描线与区域截交入口(像素标记由“0”转为“1”)的交点数; Δp_{θ_i} ——扫描线的间距。

1.3 孔隙特征的研究方法

孔隙定向性是由测量对象定向角(长轴与水平线

的夹角)的分布 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$, 用一定的角密度 $\Delta\theta$, 一般将 180° 分成 18 个定向角区间, 计算定向角落入每个区间的频率^[13-14]。用 $F(\alpha)$ 来代表各定向角区间的结构单元体或孔隙的频率, 计算公式为:

$$F(\alpha) = \frac{n_\alpha}{n} \quad (2)$$

式中: n_α, n ——定向角落入 $[\theta_n, \theta_{n+1}]$ 的测量对象数量和总的测量对象数量。孔隙的定向性影响着水分定向入渗迁移, 定向角在各区间分布越不均匀, 越有利于水分的水平渗透迁移。定向角频率统计结果详见表 1, 定向频率可用玫瑰图如图 3 所示。

表 1 试样的定向角频率统计结果

角度区间	含水率 ϵ_a					角度区间	含水率 ϵ_a				
	5%	7.5%	10%	12.5%	15%		5%	7.5%	10%	12.5%	15%
$0^\circ \sim 10^\circ$	4.7	4.4	7.8	6.8	2.4	$90^\circ \sim 100^\circ$	5.6	4.0	3.9	7.2	5.4
$10^\circ \sim 20^\circ$	10.8	11.2	7.8	10.6	9.3	$100^\circ \sim 110^\circ$	7.1	7.0	6.7	7.2	6.8
$20^\circ \sim 30^\circ$	6.5	5.6	5.5	5.1	7.3	$110^\circ \sim 120^\circ$	5.2	7.9	4.7	5.9	3.9
$30^\circ \sim 40^\circ$	5.4	3	3.5	4.2	5.4	$120^\circ \sim 130^\circ$	5.2	4.4	3.5	5.9	5.4
$40^\circ \sim 50^\circ$	4.1	5.1	6.7	3.4	5.4	$130^\circ \sim 140^\circ$	3.0	6.1	7.8	5.5	2.9
$50^\circ \sim 60^\circ$	6.0	7.5	7.1	8.1	8.3	$140^\circ \sim 150^\circ$	6.5	4.9	6.3	5.1	7.3
$60^\circ \sim 70^\circ$	3.2	4.0	5.5	8.5	4.9	$150^\circ \sim 160^\circ$	5.8	4.7	2.4	3.4	2.9
$70^\circ \sim 80^\circ$	5.2	3.0	5.1	3.8	5.9	$160^\circ \sim 170^\circ$	4.9	5.4	5.1	2.5	5.4
$80^\circ \sim 90^\circ$	2.8	5.6	7.5	5.1	7.3	$170^\circ \sim 180^\circ$	8.2	6.1	3.1	1.7	3.9

孔隙变异度 E 用土壤切片上、下相对表面的孔隙度 P 之间的相对差异作为评价指标。孔隙变异度 E 表达式为^[15]:

$$E = \frac{2 \times (P_{\text{上}} - P_{\text{下}})}{P_{\text{上}} + P_{\text{下}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $P_{\text{上}}, P_{\text{下}}$ ——各切片的上、下表面的孔隙度。 E 值越高, 说明孔隙变异度越大。

土体实际上是具有统计意义上的自相似的分形结构特征^[14], 采用统计自相似的方法来定量的描述复杂的孔隙分布特征, 可以揭示土体孔隙特征对雨水入渗的影响。孔隙复杂度可以用孔隙维数 D 来描述, 即利用孔隙的周长与面积之间的关系来定量评价^[15], 计算公式为:

$$D = 2 \log_2 P / \log_2 A \quad (4)$$

式中: D, P, A ——孔隙分数维数、孔隙周长和孔隙面积(孔隙所占像元数)。 D 值越高, 说明孔隙的扭曲程度越高, 孔隙就越复杂。需要指出的是, 在此研究中 D 值反映的是整幅图像中孔隙的复杂度, 不具体涉及图像中单个的孔隙。

2 孔隙特征分析

2.1 含水率对孔隙度的影响

土体的孔隙度定义为图像处理二值化后, 黑色面积与图像总面积的百分比, 其数值大小影响着土体的结构及其密实度、强度等物理力学性质。对不同含水率试样的图像进行处理, 得到各含水率条件下的土体的孔隙度。观察发现, 当含水率(20%)较高时, 试样

表面已形成水膜, 很难用显微镜准确观测到切片表面孔隙结构, 因此只考虑含水率在 15% 以下的情况。

表 2 为不同含水率条件下试样的孔隙度。分析表 2 可知: (1) 不同含水率试样切片面的孔隙度比下表面的孔隙度高, 表明圆柱土样由上至下越来越密实, 这是分层击实的结果; (2) 不同含水率下试样的孔隙度值位于 30% 左右, 含水率不同的土体, 尽管初始孔隙比相同, 在同等外力作用下所产生的压缩变形有很大差别, 一般在最优含水量附近随着压实含水量的增大, 土体的压缩变形也增加, 孔隙度减小; (3) 土体压缩后的孔隙度与含水率关系密切, 土体的孔隙度随着含水率的增加呈现先增加后减小的趋势。为了更好地描述在不同含水率下孔隙度的变化特征, 对其数据进行了多项式拟合, 表达式为:

$$P = -0.12937\epsilon_a^2 + 2.69463\epsilon_a + 19.49$$

式中: P ——孔隙度; ϵ_a ——含水率。由拟合公式可以得出在含水率为 10.41% 时土体孔隙度出现峰值为 33.52%, 表明在此含水率土体还可以继续压实达到最佳密实状态。

表 2 试样的孔隙度统计结果

含水率/%	孔隙度 P (上)/%	孔隙度 P (下)/%	孔隙度 P 平均值/%
5.0	30.40	28.83	29.62
7.5	33.31	31.67	32.49
10.0	34.80	33.10	33.95
12.5	33.09	31.49	32.29
15.0	31.73	30.40	31.06

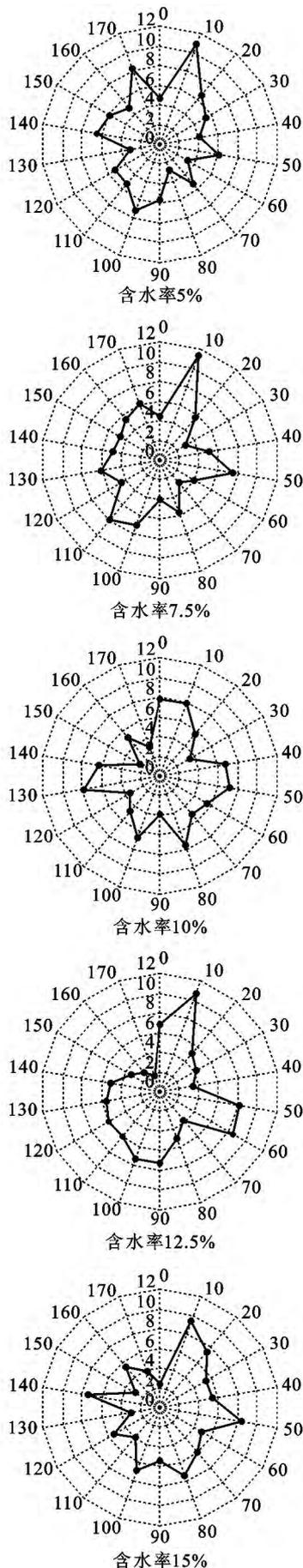


图 3 不同含水率的定向性玫瑰图

2.2 孔隙定向性分析

从表 1 和图 3 可见: (1) 不同含水率下, 孔隙定向角在各个区间都有不同几率的分布, 且在 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$, $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$, $100^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 和 $140^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 这 4 个区间内分布相对密集, 其中含水率为 15% 时最大, 定向角频率达 31.7%; (2) 随着含水率的增加, 孔隙定向性由发散趋于定向然后又转向发散, 含水率为 7.5% 和 12.5% 时, 孔隙定向角在 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$, $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 两个区间内的分布相对较多, 累计分别达 28.8% 和 33.3%, 表现出较明显的定向性, 其他区间内分布比较均匀; 当含水率为 10% 时, 孔隙定向角在 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$, $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$, $80^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 和 $130^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 这 4 个区间内定向性明显表现突出; 当含水率为 15% 时, 孔隙定向角在各个区间都有不同几率的分布, 分布相对不均匀, 辐射状最为明显, 利于水分的水平渗透迁移。分析其原因, 主要是随着含水率的增加, 孔隙度先增加后减少, 且大孔隙相对增加, 而多孔介质的渗透性与孔隙度之间存在非线性关系, 在相同孔隙度的情况下孔径越大则多孔介质的渗透性越好。

2.3 孔隙变异度与复杂度分析

表 3 和图 4 为各含水率下试样的孔隙数目、孔隙变异度和复杂度的统计结果。

(1) 土体孔隙数目随着含水率的增加而减少, 这是由于土体结构是三相体系, 相同体积相同质量的土颗粒下, 随着含水率的增加土颗粒之间的胶结作用增强, 从而减少了孔隙的数目。

(2) 土体孔隙变异度数值位于 4.19~5.16 之间, 且随着含水率的增加呈现出减小的趋势; 含水率在 7.5%~12.5% 之间, 变异度对含水率不敏感, 其原因是含水率为 10% 左右, 土体的压实性好; 在含水率 12.5% 处, 孔隙变异度下降曲线出现明显转折, 斜率变小, 表明含水率超过 12.5% 后, 土颗粒可塑性增强, 土体软化程度加剧, 压缩系数变大。

(3) 土样切片的孔隙复杂度值位于 1.625~1.675 之间, 变化区间不大, 只有 0.05, 表明含水率对孔隙复杂度的影响不大; 不同含水率下, 土样的孔隙复杂度随着含水率的增加而先降低后趋于平缓, 这是由于随着含水率的增加, 颗粒团粒化加剧, 孔隙数目减少, 且大孔隙数量相对较多, 微观孔隙变得单调、简单, 因而孔隙复杂度减小, 即含水率越小, 孔隙的扭曲程度越高, 孔隙就越复杂, 且孔隙数含量多, 越有利于表层雨水下渗。

(4) 一般孔隙复杂度愈大, 渗透性愈好, 这是含水率越小, 孔隙的扭曲程度越高, 孔隙连通性大, 且吸附在土颗粒表面上的束缚水越少, 液体流动的阻力也

随之减小的缘故;孔隙的变异度实质是孔隙度在垂直空间上的变化程度,一般渗透性随有效孔隙度的增加

而增强,即孔隙度越高,且连通性好,流体渗透能力愈好。

表 3 试样孔隙特征统计数据

含水率/ %	孔隙数/个		孔隙数 平均值/个	孔隙度/%		孔隙变异 度/%	面积		周长		复杂度 <i>D</i>		复杂度 <i>D</i> 平均值
	上	下		上	下		上	下	上	下			
5.0	451.0	460.4	456	30.40	28.83	5.16	398 456	377 907	46 974	46 787	1.668	1.675	1.671
7.5	367.4	385.8	377	33.31	31.67	4.92	431 662	420 002	45 717	47 935	1.654	1.665	1.659
10.0	275.2	260.2	268	34.80	33.10	4.87	456 072	433 867	44 024	44 329	1.641	1.648	1.644
12.5	233.2	206.6	220	33.09	31.49	4.84	434 054	412 418	40 046	35 660	1.633	1.621	1.627
15.0	211.0	201.4	206	31.73	30.40	4.19	418 478	401 036	37 097	35 561	1.626	1.624	1.625

注:周长、面积均以像元计,即空隙所占像元总数。

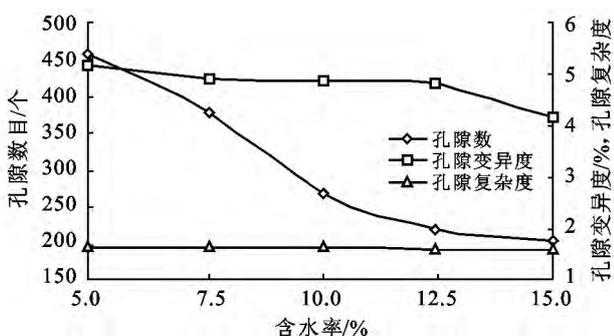


图 4 孔隙特征与含水率相关曲线

3 结果讨论

土体的孔隙作为渗流通道,其孔隙的大小及其连通性、曲折性等因素直接影响土体的渗透性,即土体的渗透特性主要取决于土的孔隙度和孔隙尺度分布以及孔隙微观特征^[16]。细小土颗粒作为堆积碎石土的重要组成部分,其微观孔隙结构影响着土石体的渗透性能及其雨水的渗透运移。

雨水入渗实质上是水分在土体饱气带中的运动,是一个涉及两相流的过程,即水在下渗过程中驱替空气的过程。一般情况下饱和度愈低,渗透性愈差,这是因为低饱和土的孔隙中存在较多气泡会减小过水断面,甚至堵塞细小孔道。孔隙度是孔隙结构的重要特征之一,土壤孔隙度随着含水率的变化而变化,由不同含水率与孔隙度的二次拟合结果可以看出,孔隙度随着含水率的增加先增加后减少。孔隙度增加使土的过水断面增加,但土体的渗透性不一定增强,渗透性还与孔径的大小、孔隙复杂度、孔隙定向性等相关。当孔隙度相同的条件下,孔径越大,渗透性越好。由图 3 可知,当含水率为 15% 时,孔隙定向角分布相对不均匀,辐射状最为显著,有利于水分的水平渗透迁移。孔隙的变异度实际是孔隙度在垂直空间上的变化程度,孔隙复杂度与孔隙自身的二维面积和周长相关,表征了孔隙自身的复杂程度,孔隙的扭曲程度

越高,孔隙就越复杂,且孔隙含量多,越有利于表层雨水下渗。由表 3 可知,不同含水率下,孔隙数目位于 206~456 之间,孔隙变异度位于 4.19~5.16 之间,孔隙复杂度位于 1.625~1.675 之间,变化区间不大,只有 0.05,说明含水率对孔隙数目影响较大,对孔隙的变异度和复杂度影响相对不明显;由图 4 可见,孔隙数目、孔隙复杂度以及孔隙变异度都随着含水率的增加而减小,表明含水率越小,吸附在土颗粒表面上的束缚水越少,液体流动的阻力愈小,孔隙大小分布分形维数越大,孔隙占据的面积越大,孔隙数目越多,更易入渗。

4 结论

(1) 相同质量的细小黏粒土体的孔隙度与含水率存在二次曲线关系,且得出试验土体在含水率为 10.41% 压实性最好。孔隙度增加土体的过水断面,但碎石土中细小黏粒的渗透性增强,还与孔径的大小、孔隙复杂度、孔隙定向性等相关。

(2) 细小黏粒的微观结构分形维数与其结构具有密切的关系,含水率越高,试样的团粒化越高,则孔隙数目及其分形维数越小,孔隙复杂度越低。

(3) 孔隙数目、孔隙复杂度以及孔隙变异度随着含水率的增加而减小,表明含水率越小,孔隙的扭曲程度越高,孔隙就越复杂,且孔隙数含量越多,越有利于表层雨水下渗。

(4) 不同含水率下孔隙定向角在 10°~20°,50°~60°,100°~110°和 140°~150°这 4 个方位上分布相对密集,且含水率越小,孔隙定向性相对较明显;统计出孔隙方向分布具有辐射状,含水率为 15% 最为明显,有利于水分的水平渗透迁移。

[参 考 文 献]

[1] 许建聪,尚岳全.降雨作用下碎石土滑坡解体变形破坏机制研究[J].岩土力学,2008,29(1):106-112,118.

(下转第 183 页)

(3) 根据潮白河不同河岸带断面类型的划分结合河岸植被缓冲带现状,提出了不同断面类型的植被缓冲带恢复对策,并选择了适宜的植物种。

[参 考 文 献]

- [1] Naiman R J, Decamps H, Pollock M. The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity [J]. *Ecological Applications*, 1993, 3(2):209-212.
- [2] 张建春. 河岸带功能及其管理[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(6):143-146.
- [3] 夏继红, 严忠民. 生态河岸带的概念及功能[J]. *水利水电技术*. 2006, 37(5):14-17, 24.
- [4] Correll D L, Jordan T E, Weller D E. Nutrient flux in a landscape: Effects of coastal land use and terrestrial community mosaic on nutrient transport to coastal waters[J]. *Estuaries*, 1992, 15(4): 431-442.
- [5] Lowrance R, Altier L S, Newbold J D, et al. Water quality functions of riparian forest buffers in Chesapeake Bay watersheds[J]. *Environmental Management*, 1997, 21(5): 687-712.
- [6] Mayer P M, Reynolds S K, Mccutchen M D. Meta-Analysis of nitrogen removal in riparian buffers[J]. *Journal of Environmental Quality*. 2007, 36(4):1172-1180.
- [7] Castelle A J, Johnson A W, Conolly C. Wetland and stream buffer size requirements: A review [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(5):878-882.
- [8] Dillaha T A, Reneau R B, Mostaghimi S, et al. Vegetative filter strips for agricultural nonpoint source pollution control[J]. *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*, 1989, 32(2):513-519.
- [9] Lee P, Smyth C, Boutin S. Quantitative review of riparian buffer width guide lines from Canada and the United States [J]. *Environmental Management*, 2004, 70(2): 165-180.
- [10] Woessner W W. Stream and fluvial plain ground water interactions; Rescaling hydrogeologic thought [J]. *Ground Water*, 2000, 38(3):423-429.
- [11] 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 等. 河岸植被缓冲带的功能及其设计与管理[J]. *林业科学*, 2010, 46(2):45-47.
- [12] 王劲修, 齐实, Zhang Yaoqi, 等. 山西沁河上游河岸植被缓冲带评价与恢复重建研究[J]. *湖南农业科学*, 2011(11):115-119.
- [13] 张峥. 京杭大运河宿豫段河岸植被缓冲带综合评价[J]. *农业科技与信息*, 2013, 10(3):42-49.
- [10] Shi Minglun, Cheng Yongping. Determination of permeability using fractal method for porous media [J]. *Science in China(E): Technological Sciences*, 2001, 44(6):625-630.
- [11] 熊承仁, 唐辉明, 刘宝琛, 等. 利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数[J]. *中国地质大学学报*, 2007, 32(3): 415-419.
- [12] 吴恒, 张信贵, 易念平. 水土作用与土体微观结构研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(2):199-204.
- [13] 施斌, 李生林. 黏性土微观结构 SEM 图像的定量研究[J]. *中国科学(A): 数学*, 1995, 25(6):666-672.
- [14] 赵安平, 王清, 李杨, 等. 长春季冻区路基土微观孔隙特征的定量评价[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(02):233-238.
- [15] 李德成, Velde B, 张桃林. 利用土壤切片的数字图像定量评价土壤孔隙变异度和复杂度[J]. *土壤学报*, 2003, 40(5):678-682.
- [16] 闫小庆, 房营光, 张平. 膨润土对土体微观孔隙结构特征影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(8): 199-204.

(上接第 177 页)

- [2] 宁万辉, 宁健, 俞美华, 等. 降雨对碎石土边坡稳定性的影响分析[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(1):83-85.
- [3] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(11):2264-2271.
- [4] Tovey N K. Quantitative analysis of electron micrographs of soil structure [C]// Minter national Symposium on Soil Structure. Stockholm; Swedish Geotechnical Institute, 1973.
- [5] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone Pores; Implications for conductivity and Pore formation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 54(12):1325-1328.
- [6] 方祥位, 申春妮, 汪龙, 等. Q_2 黄土浸水前后微观结构变化研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(5):1319-1324.
- [7] 王宝军, 施斌, 刘志彬, 等. 基于 GIS 的黏性土微观结构的分形研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(2):244-247.
- [8] 黄丽. 饱和软黏土微观孔隙的定量分析及其分形研究[D]. 湖北 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [9] 许勇, 张季超, 李伍平. 饱和软土微结构分形特征的试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(S):49-52.