

堆积碎石土细观孔隙空间特征对其渗透特性的定量影响

董辉^{1,2}, 罗潇¹, 李智飞¹

(1. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭, 411105;

2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都, 610059)

摘要: 堆积碎石土作为滑体物质往往因其细观结构差异对雨水入渗产生影响。基于 CT 扫描宏观孔隙特征, 以自制渗透仪研究级配(坡顶区域、坡腰区域、坡脚区域)、干密度(1.65, 1.75 和 1.85 g/cm³)、含石率(30%~70%)等条件下碎石土的渗透规律。采用“最小累积差值”阈值选取方法对 CT 图像进行阈值分割, 提取图像碎石和空隙形态, 利用灰关联分析法定量分析各因素(碎石面积比率、空隙面积比率等)对渗透系数的影响。研究结果表明: 空隙面积比率是影响渗透系数的主要因素; 考虑含石率作为主要影响条件时, 随着含石率的减少(从 70%减至 30%), 空隙面积变异系数、空隙周长变异系数及空隙分形维数均呈现先增加后减少的趋势, 存在 1 个含石率阈值使其碎石土的渗透系数最小; 根据空隙面积比率(x)与碎石面积比率(y), 获得渗透系数(k)拟合函数, 其为运用图像处理技术估算滑坡坡表碎石土渗透系数提供简明有效的新途径。

关键词: 碎石土; 滑坡; 渗透; CT 图像; 灰关联分析

中图分类号: O35

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2017)05-1367-09

Quantitative influence of meso-porosity space features of aggregate gravel soil on its permeability characteristics

DONG Hui^{1,2}, LUO Xiao¹, LI Zhifei¹

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

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Given different internal mesoscopic structures, aggregate gravel soil which are considered to be the landslide materials tend to influence on rainwater infiltration. Based on macro and micro-pore characteristics observed via CT scan, the experimental research employed homemade permeameter to explore permeation law of the gravelly soil with different gradations (slop crest, mid slope, the toe of slope), different dry densities (1.65, 1.75 and 1.85 g/cm³) and different stone contents (30%–70%). Meanwhile, further study utilized the minimum cumulative scores threshold selection method to extract images gravel and void morphology by segmenting CT image. The gray relational analysis method was applied to analyze the effects of different factors (stone area ratio, void area ratio) on permeability coefficient. The results show that surface void ratio is the most significant factor that affects the permeability coefficient. Simultaneously, with the reduction of containing stone rate (70%–30%), the void area variation coefficient, void perimeter variation coefficient,

收稿日期: 2016-07-12; 修回日期: 2016-09-28

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51108397, 51308485); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2136); 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(16B255) (Projects(51108397, 51308485) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2015JJ2136) supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province, China; Project(16B255) supported by Youth Foundation of Education Department in Hunan)

通信作者: 董辉, 博士, 副教授, 从事环境地质与地质灾害等方面的研究; E-mail: aneurin.h.d@gmail.com

void fractal dimension firstly decrease and then increase. When the containing stone rate decreases to something, the permeability coefficient reaches the minimum. It is assumed that surface void ratio(x) and surface stone ratio(y), fit the permeability coefficient(k) formula, which provides a concise and effective new way to use image processing techniques to estimate gravel soil permeability on the landslide slope.

Key words: gravel soil; landslide; permeability; CT image; grey relational analysis

我国是滑坡灾害频发的国家, 据资料显示, 我国有新老滑坡约 3×10^5 处, 其中具有灾害性的约 1.5×10^4 处, 每年损失高达 100 亿元以上^[1]。堆积碎石土作为坡体物质或滑体物质广泛分布于我国构造运动强烈的西南及西北地区。许建聪等^[2]研究结果表明, 一定强度的长时间连续降雨或强降雨是诱发碎石土滑坡失稳的关键因素。渗透系数作为堆积碎石土渗透特性的综合指标, 决定了不同降雨条件下降雨入渗模型的选取, 进而影响边坡稳定性估算^[3]。因此, 探究堆积碎石土的渗透规律对预测长历时、强降雨条件下滑坡、泥石流等地质灾害发生具有理论指导意义。近年来, 土石混合体渗透性能研究已取得了不少成果。为探究影响堆积碎石土渗透系数的主要因素, 许建聪等^[4]采用数理统计分析方法对碎石土的渗透特性进行研究, 得出以粉粒和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。周中等^[5]利用正交试验的方法, 测定了土石混合体的渗透系数, 分析了不同因素(含石率、孔隙比和颗粒形状)对土石混合体渗透系数的影响, 确定了每种因素对土石混合体渗透系数影响大小, 得出了含石率与孔隙比对土石混合体渗透系数影响显著。为了减小尺寸效应, 周小军等^[6]通过研制大尺寸渗透测试设备, 对云南蒋家沟泥石流物源的宽级配砾石土体进行渗透试验, 得出渗透系数与孔隙比成线性正相关关系, 而与土体细颗粒含量存在负幂函数关系。上述研究主要分析了碎石土中一些宏观物理力学参数对渗透系数的影响。鉴于堆积碎石土物质组成复杂性, 结构分布不规则性, 还可利用 CT 扫描成像技术探究其细观特征(如石与石、黏粒间、土石间存在的空隙以及含石断面大小等)对碎石土渗透性能的影响, 进一步从宏观和细观 2 个方面共同探究不同因素对堆积碎石土渗透规律的影响。为此, 本文作者针对堆积碎石土渗透特性, 研制了渗透仪, 并选用湖南省长株潭城际铁路湘潭段水竹湾隧道洞口斜坡具有级配代表性堆积碎石土进行室内一维渗透正交试验。然后, 运用 CT 扫描成像技术快速精确地检测出碎石土土柱内部结构的细微变化。再以 CT 图像为研究对象, 运用图像处理技术, 统计并分析了不同等效半径

的空隙断面积、含石断面积的累积百分比的变化规律, 采用“最小累积差值”阈值选取方法^[7]确定含石断面以及空隙断面占土柱断面的百分比, 从而得到碎石土内部细观特征参数。最后用灰色关联度分析法对碎石土物理力学参数及细观参数进行分析, 进而得出各参数对渗透系数的影响程度, 并拟合出碎石土渗透系数计算公式。研究结果将为降雨引起堆积碎石土滑坡变形的动态机理与探求滑坡启动预报模型提供理论依据。

1 碎石土渗透试验

1.1 仪器研制

根据试验要求, 设计了由马氏瓶供水装置、渗流发生装置和测量装置 3 个部分组成的渗透仪。为了确保马氏瓶补水连续且反应灵敏, 试验使用的马氏瓶相比常规马氏瓶对进气阀门、补水阀门和加水阀门位置进行调整且增设了排气阀门。试验证明, 改进后的马氏瓶对水位控制更准确、灵敏度高且补水均匀连续便于量测。马氏瓶之间可相互串联, 亦适用于连续测量且供水量大的野外试验。渗流发生装置由内径 200 mm, 高度 400 mm 的有机玻璃圆筒制成。测量系统测量水头压力和渗透流量。由于试验压力不大, 故选用测量精度高的玻璃测压管测量水头压力。流量测量主要采用质量法^[8]。

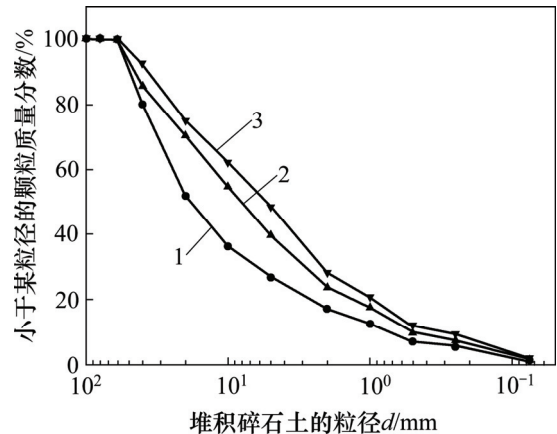
1.2 材料选取

室内实验测定的碎石土的基本物理指标见表 1。通过现场勘察, 沿斜坡最长纵轴从上往下每隔 4 m 依次编号采样, 测得坡顶、坡腰和坡脚 3 个区域的级配曲线, 图 1 所示为碎石土级配曲线。所选取的土样中, 最大颗粒粒径为 60 mm。邱贤德等^[9]要求试样的直径应大于试料最大直径的 5~6 倍。朱国胜等^[10]研究粗粒料渗透试验尺寸效应规律, 得出渗透仪直径与试验材料 d_{85} 之比不宜小于 6(d_{85} 为粒径曲线纵坐标上小于某粒径含量为 85%所对应的粒径)。综合以上研究成果, 选择粒径小于 40 mm 的土样符合试验要求。在此将

表 1 碎石土的基本物理指标

Table 1 Physical parameters of gravel soil

取样 区域	干密度/ (g·cm ⁻³)	天然 含水率/ %	相对 密度 G _s	孔隙率/ %	最大干 密度/ (g·cm ⁻³)	最佳 含水率/ %	饱和 含水率/ %	粒径小于 0.075 mm 颗粒 质量分数/%	含石率/ %	不均匀 系数	曲率 系数
坡顶	1.85	5.0	2.56	27.66	2.08	8.0	14.95	1.16	82.94	33.52	2.33
坡腰	1.77	5.2	2.43	27.16	2.04	8.3	15.34	1.63	76.14	25.50	1.33
坡脚	1.73	5.2	2.32	25.43	1.98	8.2	14.70	1.93	71.77	28.00	1.67



1—级配 I (坡顶区域); 2—级配 II (坡中区域);
3—级配 III (坡脚区域)。

图 1 碎石土级配曲线

Fig. 1 Gradation curves about gavel soil

大于 2 mm 的固体颗粒定义为粗料, 土样按比例等质量替换超粒径颗粒^[8]。

1.3 方案设计

表 2 所示为试验方案。本次室内试验主要考虑干密度、碎石含量和级配 3 个因素对堆积碎石土渗透系数的影响。为了精简试验组数, 首先根据每种因素拟考虑 3 个水平, 选取 L₉(3⁴) 正交表进行正交试验设计 (见表 2 中试验方案 1~9)。然后, 为进一步探究碎石土内部空隙对渗透系数的影响, 设计了天然状态下不同级配以及相同级配含石率为 30%~70% 的试验方案 (见表 2 中试验方案 3 和 9~14)。

试验步骤为: 首先依据试验要求配置试样, 并将其分层装入圆筒内, 每层土样之间进行刮毛, 保证土样的均匀性与整体性, 让其静置 24 h。然后, 对试样进行 CT 扫描。最后, 组装各系统, 对土样由下至上进行低水头饱和, 待试样充分饱和后静置 12 h, 测量渗透系数 *k*, 并进行温度校正。调整上下水头差, 重复测试渗透系数, 求取平均值。

表 2 试验方案

Table 2 Test scheme

试验 方案	含石量/ %	干密度/ (g·cm ⁻³)	级配类型
1	30	1.65	级配 I (坡顶区域)
2	30	1.75	级配 II (坡腰区域)
3	30	1.85	级配 III (坡脚区域)
4	50	1.65	级配 II (坡腰区域)
5	50	1.75	级配 III (坡脚区域)
6	50	1.85	级配 I (坡顶区域)
7	70	1.65	级配 III (坡脚区域)
8	70	1.75	级配 I (坡顶区域)
9	70	1.85	级配 II (坡腰区域)
10	40	1.85	级配 III (坡脚区域)
11	50	1.85	级配 III (坡脚区域)
12	60	1.85	级配 III (坡脚区域)
13	70	1.85	级配 III (坡脚区域)
14	70	1.85	级配 I (坡顶区域)

2 CT 图像处理

2.1 CT 扫描原理

CT 是以测定 X 线穿透物体层面衰减信息为基础, 由计算机处理, 按一定算法得出某剖面上的衰减系数分布矩阵, 再转变为灰度分布矩阵, 从而实现扫描断面密度分布成像的现代成像技术^[11]。X 线穿过某一组混合物质后 X 线的强度衰减规律可表达为^[12]

$$I = I_0 e^{-\int_D \mu(x) dx}$$
 (1)

式中: *I* 为通过物质衰减后 X 线的强度; *I*₀ 为入射 X 线的强度; *μ* 为物质的 X 线衰减系数; *D* 为物质的厚度。

Hounsfield 通过研究空气、水和其他物质对 X 线

的吸收衰减规律,提出了反映物质对 X 线的相对吸收程度公式^[13]:

$$H = \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} t + \alpha$$

(2)

式中: H 为 CT 值,物质对 X 线的相对吸收程度; μ_w 为水对 X 线的吸收系数; t 为标定的 CT 值; α 为物质常数。

2.2 图像阈值选取

图 2 所示为碎石土 CT 图像;图 3 所示为不同 L 处理的二值化图像。本次试验共完成 14 个碎石土试样的 CT 扫描,运用 MedExplorer 软件自动调窗功能浏览各试样 CT 原始数据(图 2)。为了解碎石土试样内部

空隙特征,须分清 CT 图像中碎石、黏土以及土石之间空隙的准确边界。由于碎石、黏土与空隙间存在密度差异,而 CT 图像中密度差异由 CT 值表征,可通过二值法分割图像,获取碎石土孔隙与颗粒组成及形态特征信息。二值法的核心是各物质 CT 数阈值的选取。由于窗口技术中窗位 L 等于 CT 图像中 CT 值,而窗宽 W 为 CT 图像所显示的 CT 值范围。为此,本文依据相关资料^[14],利用窗口技术将二值化图像与自动调窗图像进行对比,确定了与实际含石断面图像及空隙断面图像相近的窗宽 W 与窗位 L 的取值范围。随着窗位 L 的增加,二值化图像中含石断面面积略微减少,而空隙断面积略微增加,每个 L 范围内的二值化图像

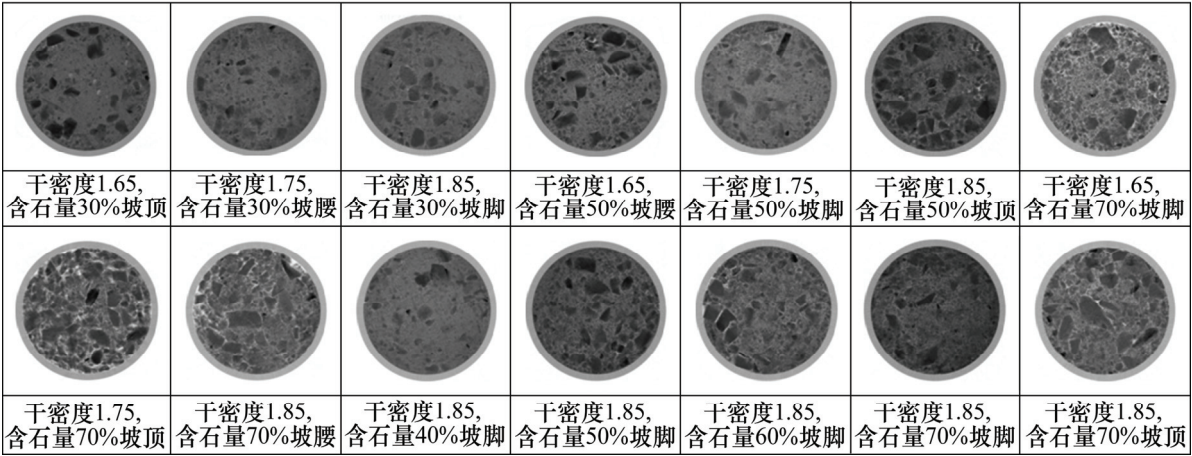
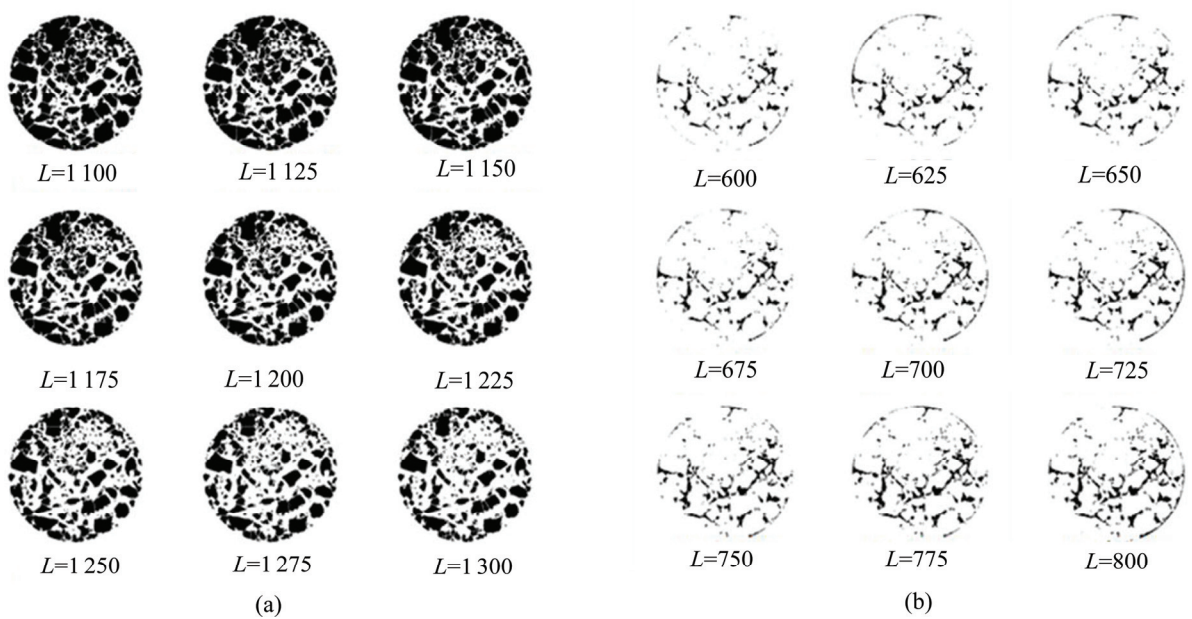


图 2 碎石土 CT 图像

Fig. 2 CT image about aggregate gravel soil



(a) 二值化含石断面图; (b) 二值化空隙断面

图 3 不同 L 处理的二值化图像

Fig. 3 Binary images of different L

均变化不大(见图 3(a)、3(b))。其中, 干密度为 1.65, 1.75 和 1.85 g/cm³ 试样对应的含石断面图中窗宽为 200, 窗位的取值范围分别为 900~1 100, 1 100~1 300 和 1 300~1 500; 而对应的空隙断面图中窗宽为 0, 窗位的取值范围为 400~600, 600~800 和 800~1 000。对已确定窗位值范围内的二值化图像借助 ImageJ 软件进行中值滤波、分水等处理, 得出试样内部结构参数值。然后统计各试样等效含石半径(r_1)与等效空隙半径(r_2)的面积累计分数。

$$r_1 = \sqrt{S_1 / \pi} \tag{3}$$

$$r_2 = \sqrt{S_2 / \pi} \tag{4}$$

式中: r_1 为等效含石半径, mm; r_2 为等效空隙半径, mm; S_1 为含石面积, mm²; S_2 为空隙面积, mm²。

由于在试样确定的窗位取值范围内存在某个 L 对应的累积差最小(即与它相邻 L 的各等效半径的面积累积百分数之间的差总和最小)。故认为当累积差最小时, 图像成像的各种不确定因素随着窗位 L 的变动对试样内部结构的变化影响最小, 即与实际情况最接近。因此, 可根据各试样每个扫描断面对应的等效含石半径(r_1)及等效空隙半径(r_2)的面积累计百分数, 求出各断面图像所对应的累积差, 并按照不同干密度对各试样累积差取平均值。最终确定累积差最小时所对应的 L , 通过最佳 L 生成二值化图像进而准确计算试样内空隙面积比率(x)和碎石面积比率(y)。

$$x = S_1 / S \tag{5}$$

$$y = S_2 / S \tag{6}$$

式中: x 为空隙面积比率; y 为碎石面积比率; S 为土柱横断面积, mm²。

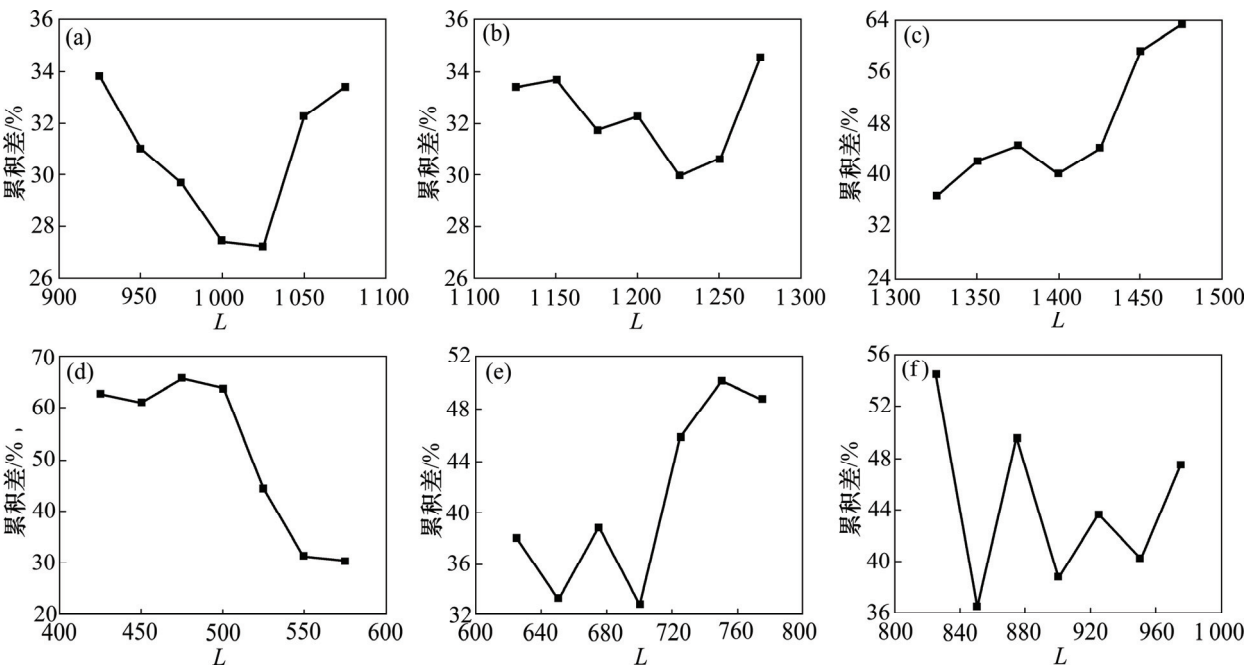
3 结果与分析

3.1 图像阈值处理结果

根据图像阈值选取方法, 其统计结果见表 3。图 4 所示为不同 L 的累积差关系曲线。随着 L 的变化, 累积差发生了上下波动(图 4)。整体而言, 含石断面累积差波动幅度相比空隙断面累积差波动幅度要小, 相

表 3 阈值处理结果

Table 3 Result of threshold processing				
干密度/ (g·cm ⁻³)	类型	最佳 窗位	最小 累积差/%	累积差 波动率/%
1.65	含石断面	1 025	27.24	6.59
1.75	含石断面	1 225	29.99	4.57
1.85	含石断面	1 325	36.76	26.45
1.65	空隙断面	575	30.23	33.63
1.75	空隙断面	700	32.81	17.32
1.85	空隙断面	850	36.48	17.98



(a) 含石断面, $L=1.65$; (b) 含石断面, $L=1.75$; (c) 含石断面, $L=1.85$;
(d) 空隙断面, $L=1.65$; (e) 空隙断面, $L=1.75$; (f) 空隙断面, $L=1.85$

图 4 不同 L 的累积差关系曲线

Fig. 4 Relationship of cumulative scores value of different L in different dry densities

邻 L 之间等效半径与面累积百分数关系曲线的距离也小。累积差波动率越小,说明二值化图像随 L 变化越小,在该 L 范围内所选取的二值化图像更精细。由于统计的最大波动率均不超过 35%,属于合理波动范围。由此表明每个试样确定的 L 范围都比较合理。不同于密度(1.65, 1.75 和 1.85 g/cm³)试样二值化含石断面图中最小累积差所对应的最佳窗位分别为 1 025, 1 225 和 1 325;而二值化空隙断面图中最小累积差对应的最佳窗位依次为 575, 700 和 850。

3.2 渗透性能正交试验分析

为了探究含石率、干密度、级配 3 个因素在不同水平下对碎石土渗透系数的影响,利用研制仪器进行渗透试验,得出 V - J 关系曲线。然后通过直线拟合得出渗透系数,再对其进行正交试验的极差分析,正交试验的极差分析表见表 4。

表 4 极差分析结果
Table 4 Range analysis result

试样号	因素			渗透系数/ (cm·s ⁻¹)
	含石量	干密度	级配类型	
1	1(30%)	1(1.65 g/cm ³)	1(级配 I)	2.073×10 ⁻⁴
2	1	2(1.75 g/cm ³)	2(级配 II)	1.927×10 ⁻⁵
3	1	3(1.85 g/cm ³)	3(级配 III)	1.161×10 ⁻⁵
4	2(50%)	1	2	7.376×10 ⁻⁴
5	2	2	3	2.949×10 ⁻⁴
6	2	3	1	1.017×10 ⁻⁴
7	3(70%)	1	3	1.837×10 ⁻²
8	3	2	1	1.939×10 ⁻²
9	3	3	2	7.529×10 ⁻⁴
K_1	2.382×10 ⁻⁴	1.931×10 ⁻²	1.970×10 ⁻²	
K_2	1.134×10 ⁻³	1.970×10 ⁻²	1.510×10 ⁻³	
K_3	3.851×10 ⁻²	8.662×10 ⁻⁴	1.867×10 ⁻²	
$\overline{k_1}$	7.940×10 ⁻⁵	6.437×10 ⁻³	6.566×10 ⁻³	
$\overline{k_2}$	3.781×10 ⁻⁴	6.568×10 ⁻³	5.032×10 ⁻⁴	
$\overline{k_3}$	1.284×10 ⁻²	2.887×10 ⁻⁴	6.224×10 ⁻³	
R	1.276×10 ⁻²	6.279×10 ⁻³	6.063×10 ⁻³	

由表 4 可以看出:对碎石土渗透系数影响的主次顺序为:含石率,干密度,级配类型。随着含石率增加以及干密度减小,碎石土渗透系数逐渐增大。当含石率为 30%、干密度为 1.85 g/cm³、级配 II(坡腰区域)

时渗透系数最小,其为控制工程需要的渗透系数提供指导依据。

为了区分试验结果的差异是由于试验误差引起的,还是因素水平不同引起的,采用正交试验的方差分析法对试验数据进行分析,对影响碎石土渗透系数的各因素的显著性水平给予精确的数量评估,分析结果如表 5 所示。结果表明:1) 试验结果的差异是由因素水平不同引起;2) 含石率对碎石土渗透系数的影响显著,而干密度与级配类型对碎石土渗透系数的影响不显著。

表 5 方差分析结果
Table 5 Results of variance analysis

方差来源	偏差平方和 S'	自由度 F	均方 V	f	显著性
含石量	3.181×10 ⁻⁴	2	1.59×10 ⁻⁴	4.355	显著
干密度	7.723×10 ⁻⁵	2	3.86×10 ⁻⁵	1.057	不显著
级配	6.960×10 ⁻⁵	2	3.48×10 ⁻⁵	0.953	不显著
误差	7.304×10 ⁻⁵	2	3.65×10 ⁻⁵		
$F_{0.25}(2,2)=3$		$F_{0.1}(2,2)=9$		$F_{0.05}(2,2)=19$	

3.3 碎石土渗透系数与细观参数灰关联分析

由于影响碎石土渗透特性的因素多且复杂,数据离散性很大,很难对这些数据进行数理统计处理,并找出影响渗透系数的主要因素。灰色理论方法^[15]可对有限的、表面无规律的数据进行处理,从而找到系统本身具有的特征。灰关联分析的基本思想是根据各参数几何曲线的相似程度来判断其联系是否密切;相似程度应用关联度描述,关联度描述了各个因素对结果的影响程度,关联度越大,影响程度越大。

1) 确定参考数列与比较数列

$$\begin{cases} x_0(k); k=1,2,\cdots,m \\ x_i(k); k=1,2,\cdots,m; i=1,2,\cdots,n \end{cases}$$

式中: $x_0(k)$ 为参考因素序列; $x_i(k)$ 为比较因素序列。

2) 将数据作量纲一化处理,并分别进行平均值化与区间值化分析。

均值化为

$$y_i = \frac{x_i(k)}{\sum_{k=1}^m x_i(k)/m}; k=1,2,\cdots,m; i=0,1,\cdots,n \quad (7)$$

区间值化为

$$y_i = \frac{x_i(k) - \min x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)}, \quad k = 1, 2, \dots, m; \quad i = 0, 1, \dots, n$$

(8)

3) 关联系数的计算式为

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \left\{ \min_k |y_0(k) - y_i(k)| \right\} + \alpha \max_i \left\{ \max_k |y_0(k) - y_i(k)| \right\}}{|y_0(k) - y_i(k)| + \alpha \max_i \left\{ \max_k |y_0(k) - y_i(k)| \right\}}$$

(9)

式中: α 为分项系数, 一般取 0.5; 关联系数 $\xi_i(k)$ 为第 i 个因素在第 k 个点的比较曲线 $y_i(k)$ 与参考曲线 $y_0(k)$ 的相对差。

4) 灰关联度的计算公式为

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_i(k); \quad k = 1, 2, \dots, m; \quad i = 0, 1, \dots, n$$

(10)

式中: r_i 为曲线 y_i 对 y_0 的关联度。

通过已确定的阈值(L)对 CT 图像进行处理, 获取试样各个断面的空隙面积比率 x 、碎石面积比率 y 、空

隙面积 S 以及空隙周长 C 。为了从形态学特征对碎石土的细观空隙结构进行研究, 一般选用空隙形态分形维数^[16]作为描述碎石土细观空隙结构形态变化的定量参数。其从本质上揭示孔隙特征的复杂性, 通常利用孔隙中面积与其周长存在的自相关性, 定量地评定孔隙自相似的分形结构特征。图像中孔隙的实际面积 S 和实际周长 C 之间存在下面关系:

$$\lg C = D/2 \times \lg S' + A$$

(11)

式中: A 为常数; D 为该图像对应的孔隙形态分形维数。 D 的取值范围为 1~2, D 越大, 孔隙结构越复杂, 且孔隙的空间形态特征偏离光滑表面的程度越大。

根据均值化与区间值化 2 种量纲处理方法得到各因素相关度平均值, 其对渗透系数的影响程度由大到小依次为: 空隙面积比率、不均匀系数、含石率、碎石面积比率、曲率系数、空隙面积变异系数、空隙周长变异系数、空隙形态分维数、粒径小于 0.075 mm 颗粒质量分数、干密度(见表 6), 其与正交试验分析的结果基本一致。上述排序结果说明:

1) 土与石或石与石之间的大孔隙是影响渗透系

表 6 渗透试验灰关联分析结果

Table 6 Permeability test result about grey relational analysis

试样 编号	渗透系数/ (cm·s ⁻¹)	干密度/ (g·cm ⁻³)	含石率/ %	空隙 面积 比率/%	碎石 面积 比率/%	不均匀 系数	曲率 系数	粒径小于 0.075 mm 颗粒 质量分数/%	空隙 面积 变异系数	空隙 周长 变异系数	空隙 形态 分维数
1	2.073×10 ⁻⁴	1.65	30	0.679	25.818	12.364	1.739	4.779	1.833	0.994	1.186
2	1.927×10 ⁻⁵	1.75	30	0.147	25.639	30.827	0.977	4.779	1.743	0.990	1.184
3	1.161×10 ⁻⁵	1.85	30	0.652	20.988	28.800	2.222	4.779	1.758	1.039	1.233
4	7.376×10 ⁻⁴	1.65	50	3.521	31.488	12.364	1.739	3.413	1.295	0.885	1.197
5	2.949×10 ⁻⁴	1.75	50	1.176	29.371	26.541	1.135	3.413	1.136	0.688	1.187
6	1.017×10 ⁻⁴	1.85	50	3.090	34.912	56.600	1.131	3.413	2.233	1.375	1.234
7	1.837×10 ⁻²	1.65	70	10.789	37.049	12.364	1.739	2.048	1.520	0.806	1.201
8	1.939×10 ⁻²	1.75	70	14.611	37.275	44.887	0.671	2.048	1.506	0.799	1.174
9	7.529×10 ⁻⁴	1.85	70	5.180	38.678	32.640	1.961	2.048	1.514	0.934	1.197
10	7.801×10 ⁻⁶	1.85	40	1.298	23.278	16.909	1.456	4.096	2.464	1.076	1.236
11	2.153×10 ⁻⁵	1.85	50	0.890	29.446	26.316	1.128	3.413	1.741	1.068	1.231
12	4.695×10 ⁻⁴	1.85	60	3.432	37.531	30.759	1.130	2.731	1.663	0.945	1.229
13	5.012×10 ⁻⁴	1.85	70	4.691	41.651	26.866	2.109	2.048	1.630	0.936	1.220
14	8.895×10 ⁻³	1.85	70	9.932	43.806	52.107	0.959	2.048	1.433	0.844	1.200
均值化相关度		0.671	0.697	0.821	0.688	0.720	0.675	0.655	0.668	0.665	0.671
区间值化相关度		0.471	0.653	0.811	0.599	0.696	0.581	0.514	0.568	0.552	0.522
相关度平均值		0.571	0.675	0.816	0.644	0.708	0.628	0.585	0.618	0.608	0.596

数最主要的因素之一。水在试样入渗过程中,随着空隙面积比率增加,孔隙连通性增加而渗流阻力大大减小,碎石土的渗透系数逐渐增大。

2) 不均匀系数与曲率系数对碎石土渗透系数影响程度较高,其相关度均大于 0.6 分别排在第 2 与第 4 位。由试样 9, 13 和 14(取土斜坡坡腰、坡脚、坡顶的级配曲线)可知:经长期地质搬运作用,坡表碎石土沿坡面向下细颗粒逐渐增加,细颗粒堵塞孔道造成碎石土内部空隙减小,空隙面积比率由 9.932% 降至 4.691%, 而不均匀系数(26.866~52.107)、曲率系数(0.959~2.109)、空隙面积变异系数(1.433~1.630)以及空隙周长变异系数(0.844~0.936)均增加,致空隙结构变复杂,空隙的扭曲程度提高,空隙连通性减小,骨架空间作用降低,渗透系数从 $8.895 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 减至 $5.012 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。水竹湾隧道洞口斜坡不同位置碎石土的渗透系数由大到小依次为:坡顶、坡腰、坡脚。

3) 含石率与碎石面积比率作为不透水物质在试样中的百分比对碎石土渗透系数的影响很大。相同条件下(干密度、级配)随着含石率从 70% 减至 30%, 碎石面积比率由 41.651% 呈线性减少至 20.988%, 而碎石土渗透系数呈现先减少后增加的趋势。当含石率达到 40% 时, 试验测得的碎石土的渗透系数最低仅为 $7.801 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。这是由于当含石率从 70% 降至 40%, 空隙面积变异系数(1.630~2.464)、空隙周长变异系数(0.936~1.076)、空隙分形维数(1.220~1.236)逐渐增加, 而碎石土中土与石间的大空隙逐渐降低, 空隙连通性减小, 空隙结构复杂度提高, 孔隙的空间形态特征偏离光滑表面的程度增大使水流阻力增加, 从而导致渗透系数减少; 当含石率从 40% 减至 30% 时, 虽然饱水试样土石间的空隙逐渐减少, 但面积变异系数、周长变异系数、空隙分形维数减小, 导致水流阻力减小渗透系数出现略微增大。因此, 在考虑含石率作为主要影响条件时, 存在一个含石率阈值使得碎石土的渗透系数最小。

3.4 渗透系数与细观参数之间的关系

由于试样的细观参数(空隙面积比率 x 与碎石面积比率 y)对碎石土渗透系数影响程度显著, 为了寻求运用图像处理技术估算出滑坡坡表碎石土渗透系数的方法, 从而减少大量渗流实验的工作量。因此, 运用 1stopt 软件对细观参数进行拟合, 获得渗透系数的拟合函数:

$$k = 0.0328x^{1.8245}y^{-1.4633} \quad (12)$$

式中: k 为堆积碎石土的饱和渗透系数, cm/s ; x 为空隙面积比率, %; y 为碎石面积比率, %。

图 5 所示为试验数据与拟合数据的关系曲线。式(12)的相关系数 R 为 0.958 93, 其相关系数 R 大于 $r_{0.001}$, 拟合函数数据与试验实测数据基本一致(图 5)。由拟合函数可得: 渗透系数是由碎石面积比率与空隙面积比率相互作用下得出的。随着空隙面积比率的增大, 渗透系数增长速率逐渐增大, 而碎石面积比率增大, 渗透系数降低的趋势逐渐减缓。

斜坡的残坡积物在空间上存在物质结构变异性, 这制约了长时降雨、间歇降雨等复杂外因下的致滑机理和失稳模式的研究。式(12)体现了细观结构的孔隙特征与渗透系数的定量关系, 有助于从坡体空间角度, 明晰坡体渗流场的形成、软弱滑动面的演化、碎石土强度指标降低变化等滑坡灾害问题。同时, 也可通过摄影获取现场图像信息, 进行图像处理, 进而利用拟合公式估算出滑坡坡表碎石土渗透系数。

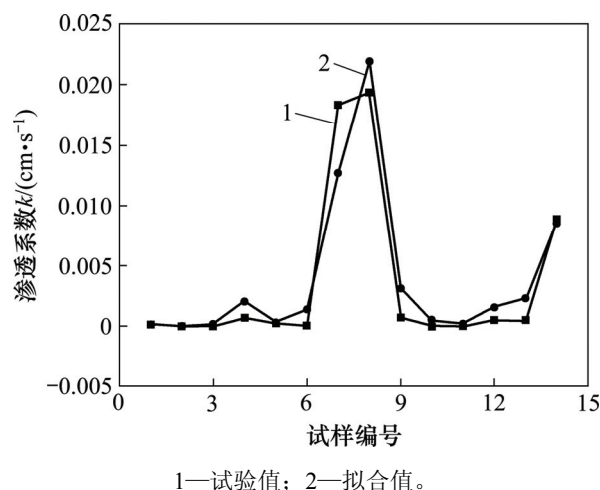


图 5 试验数据与拟合数据的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve of experiment data and fitting data

4 结论

1) 图像处理阈值选取过程中, 利用“最小累积差”法确定 L , 为 CT 图像处理技术提供理论依据, 运用该方法获得的二值化图像符合实际情况。

2) 由灰关联分析法所获得各影响因素对渗透系数影响程度的排序结果由大到小依次为: 空隙面积比率、不均匀系数、含石率、碎石面积比率、曲率系数、空隙面积变异系数、空隙周长变异系数、空隙形态分形维数、粒径小于 0.075 mm 颗粒质量分数、干密度。

3) 水竹湾隧道洞口斜坡在不同位置的碎石土渗透系数由大到小依次为: 坡顶、坡腰、坡脚。在考虑含石率作为主要影响条件时, 随着含石率的减少(从

70%减至30%),空隙面积变异系数、空隙周长变异系数及空隙分形维数呈现先增加后减少的趋势,存在一个含石率阈值使得碎石土的渗透系数最小。

4) 基于CT图像处理得到的空隙面积比率与碎石面积比率,建立了细观孔隙特征与渗透特性的定量描述,其可作为探究复杂降雨条件下的坡体空间失稳破坏模式和运用图像处理技术估算滑坡坡表碎石土渗透系数的理论基础。

参考文献:

- [1] 刘新喜,晏鄂川,王鹏飞,等. 滑坡稳定性评价的非线性方法[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(1): 34-36.
LIU Xinxi, YAN Echuan, WANG Pengfei, et al. Nonlinear method for evaluating the landslide stability[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(1): 34-36.
- [2] 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): 106-113.
XU Jiancong, SHANG Yuequan. Study on mechanism of disintegration deformation and failure of debris landslide under rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 106-113.
- [3] 李宁,许建聪,钦亚洲. 降雨诱发浅层滑坡稳定性的计算模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1485-1490.
LI Ning, XU Jiancong, QIN Yazhou. Research on calculation model for stability evaluation of rainfall-induced shallow landslides[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1485-1490.
- [4] 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.
XU Jiancong, SHANG Yuequan. Influence of permeability of gravel soil on debris landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2264-2271.
- [5] 周中,傅鹤林,刘宝琛,等. 土石混合体渗透性能的正交试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1134-1138.
ZHOU Zhong, FU Helin, LIU Baochen, et al. Orthogonal tests on permeability of soil-rock-mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1134-1138.
- [6] 周小军,崔鹏,李战鲁. 泥石流源区砾石土渗透沉降综合测试设备研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1281-1289.
ZHOU Xiaojun, CUI Peng, LI Zhanlu. Development and application of integrated test equipment for permeability and settlement of gravelly soil in triggering area of debris flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1281-1289.
- [7] 樊成意,梁收运. 土体 SEM 图像处理中阈值的选取[J]. 工程地质学报, 2012, 20(S): 718-723.
FAN Chengyi, LIANG Shouyun. Selection of the threshold of SEM images in process of studying soil microstructure[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(S): 718-723.
- [8] SL237—1999, 土工试验规程[S].
SL237—1999, Specification of soil test[S].
- [9] 邱贤德,阎宗岭,刘立,等. 堆石体粒径特征对其渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 950-954.
QIU Xiande, YAN Zongling, LIU Li, et al. Effect of particle-size characteristics on seepage property of rockfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 950-954.
- [10] 朱国胜,张家发,陈劲松,等. 宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应及边壁效应研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2569-2574.
ZHU Guosheng, ZHANG Jiafa, CHEN Jinsong, et al. Study of size and wall effects in seepage test of broadly graded coarse materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2569-2574.
- [11] 吕士展,汪稔,胡明鉴,等. 玉龙雪山西麓原状冰碛土 CT 扫描试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1593-1600.
LÜ Shizhan, WANG Ren, HU Mingjian, et al. Computerized tomography (CT) scanning test research on intact moraine soil on west side of Yulong snow mountain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1593-1600.
- [12] 周虎,李文昭,张中彬,等. 利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1226-1230.
ZHOU Hu, LI Wenzhao, ZHANG Zhongbin, et al. Characterization of multi-scale soil structure with X-ray computed tomography[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(6): 1226-1230.
- [13] 周念清,宋玮,大谷顺,等. 应用 CT 扫描研究非饱和砂土中污染物的迁移规律[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 97-101.
ZHOU Nianqing, SONG Wei, JUN Otani, et al. A study of the pollutant migration in unsaturated sand by CT scanning[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(6): 97-101.
- [14] ASTM E1935 — 1997(2008), Standard test method for calibrating and measuring CT density[S].
- [15] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 33-63.
DENG Julong. Grey system theory course[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990: 33-63.
- [16] MOORE C A, DONALDSON C F. Quantifying soil microstructure using fractals[J]. Geotechnique, 1995, 11(45): 105-116.

(编辑 陈爱华)