

DOI: 10.11779/CJGE201708018

堆积碎石土斜坡浅表入渗的空间分布与变异性研究

董 辉^{1, 2, 3}, 黄润秋¹, 罗 潇², 罗正东^{2, 3}, 蒋秀姿²

(1. 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; 2. 湘潭大学土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105;
3. 岩土力学与工程安全湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 为探究强降雨下堆积体斜坡入渗参数的空间分布与空间变异性, 通过筛分试验及双环入渗试验分别对堆积体斜坡试验点不同粒径区间碎石质量分数、碎石土渗透系数、饱和渗透系数、不同深度碎石土含水率进行测量, 对数据进行普通 Kriging 插值统计分析, 运用交叉检验选定合理理论模型与参数, 获得其空间分布与变异性特征。研究结果表明: 测试区碎石土入渗符合 Kostiakov 模型; 不同粒径区间碎石质量分数采用高斯半变异函数理论模型空间插值精度最高, 碎石土渗透系数和不同深度碎石土含水率采用球状半变异函数理论模型空间插值精度最高; 粒径大于 10 mm 碎石主要分布于坡顶与坡腰区域且使该区域碎石土渗透系数的空间变异性相对较大, 细小碎石(粒径 2~10 mm)则聚积在坡脚位置, 碎石土渗透系数速率沿坡面由上至下呈逐渐减少的空间分布趋势; 浅土层(0~15 cm)坡腰含水率比坡顶、坡脚要高, 而深土层(15~25 cm)坡脚含水率比坡顶、坡腰要高, 且随深度增加缓慢上升。研究结果可作为碎石土滑坡降雨致滑的理论参考依据。

关键词: 滑坡; 堆积碎石土; 入渗特性; 空间变异性; Kriging 内插法

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)08-1501-09

作者简介: 董 辉(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境地质与灾害地质等方面的研究。E-mail: donghui@xtu.edu.cn。

Spatial distribution and variability of infiltration characteristics for shallow slope of gravel soil

DONG Hui^{1, 2, 3}, HUANG Run-qiu¹, LUO Xiao², LUO Zheng-dong^{2, 3}, JIANG Xiu-zi²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 3. Hunan Key Laboratory of Geomechanics and Engineering Safety, Xiangtan 411105, China)

Abstract: For accurate analysis of the spatial distribution and spatial variability of infiltration characteristics of aggregate gravel soil, the self-made double ring infiltration apparatus and gravel screening instrument have been used for testing gravel mass fraction of different particle size on slope, the permeability coefficient of gravel soil and different depth of gravel soil moisture content. Software is used for spatial interpolation of the discrete test data through the Kriging interpolation method. The cross tests are used to select a reasonable theoretical model, and the precise interpolation results are obtained. The results show that Kostiakov formula is used to simulate the infiltration process of gravel soil. The highest spatial interpolation precision about the gravel in different particle size sections is Gaussian semi-variable function theoretical model, and spherical model for the permeability coefficient of gravel soil and the moisture content of gravel soil at different depths. The gravels with particle size larger than 10 mm are mainly distributed in the top and middle slope regions, and the regional spatial variability of infiltration rate is relatively large. The small gravels (size of 2~10 mm) accumulate in the slope foot. The permeability coefficient of gravel soil along slope from top to bottom has a gradually decreasing spatial distribution trend. The moisture content at the slope waist is higher than that at the slope top and toe in shallow soil (0~15 cm), but that at the slope toe is higher than that at the slope top and toe in deep soil layer (15~25 cm). The water content of slope increases slowly with the increasing depth. The research results lay a theoretical foundation for the establishment of the prediction model for gravel soil.

Key words: landslide; aggregate gravel soil; infiltration characteristic; spatial variability; Kriging interpolation method

0 引言

堆积体滑坡在中国发生的滑坡类型中所占比例很

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108397); 湖南省自然科学基金项目(2015JJ2136); 湖南省教育厅优秀青年项目(16B255)

收稿日期: 2016-04-05

大, 其具有影响范围广、持续危害大、爆发频率高等特点^[1]。堆积碎石土作为堆积体滑坡的滑体物质具有透水性强、粒径范围广、大孔隙性等特点, 从而极易在强降雨条件下诱发滑坡灾害^[2]。室内三轴试验^[3]证明含水率是影响堆积碎石土剪切特性的关键因素, 且碎石土的黏聚力随含水率上升先增大后减小, 而内摩擦角随含水率增大逐渐减小。堆积碎石土坡表不同粒径的碎石因重力、搬运、剥蚀等地质作用, 在空间分布上存在明显空间变异性。不同粒径碎石的空间分布对碎石土渗透系数及水分的空间分布产生影响, 从而导致碎石土入渗参数存在空间变异性, 进而影响堆积碎石土斜坡不同区域的抗剪强度。因此, 深入研究强降雨过程中堆积碎石土斜坡浅表入渗(渗透系数及含水率)的空间分布与空间变异规律能更好的从细观角度明晰降雨致滑机理。

为探究土壤入渗参数的空间分布规律, 可对离散样本数据进行空间插值从而达到“以点带面”的结果。张春敏等^[4]利用地统计学 Kriging 空间内插法对高寒草甸型流域雨后土壤水分空间变异及分布情况进行了研究, 得出了相适应的土壤水分半方差函数模型, 揭示了土壤水分空间变异规律, 增强了对土壤水分空间格局影响生态过程的理解。武世亮^[5]进行了土壤入渗特性的空间变异性及与土壤物理特性的相关性研究, 为建立土壤入渗参数的土壤传递函数提供理论基础。王月玲等^[6]利用双环注水试验对全流域多点进行了土壤入渗速率实测, 得出了该流域土壤入渗速率具有坡面垂直变异规律, 即土壤稳渗率随着坡度的增加而增加。土壤入渗的空间分布与空间变异研究一直是水文学、土壤学研究的热点之一, 但对于堆积碎石土入渗规律空间分布与空间变异研究相对较少。蒋芳市等^[7]在崩岗崩积土体边坡进行了现场入渗试验, 通过最小二乘法拟合得出了适用于崩积土体的入渗模型。由于大部分学者仅通过现场入渗试验分析碎石土独立测试点的入渗规律, 并未将堆积碎石土入渗空间分布规律与降雨致滑联系起来分析。因此, 堆积碎石土入渗特性空间分布与该类滑坡体物质降雨致滑的相关性研究仍处于探索阶段, 该研究将为预测强降雨条件下滑坡灾害发生提供理论指导价值。

为此, 本文通过对湘水竹湾隧道出口处堆积碎石土边坡进行实地勘测(筛分试验与双环入渗试验), 运用地质统计学方法(Kriging 空间内插法和理论半变异函数)研究堆积碎石土不同粒径区间碎石质量分数、碎石土渗透系数及不同深度碎石土含水率的空间分布规律, 且分析其空间变异特征。该结果可为探究堆积

碎石土斜坡在强降雨下的动态变形机理提供理论依据。

1 室外碎石土入渗试验

1.1 仪器研制

为了在堆积碎石土斜坡上进行入渗试验, 设计了由入渗发生装置、恒压供水装置及支撑测量装置组成的自制双环入渗仪, 如图 1 所示。入渗发生装置采用大直径圆环(内外环直径分别为 35, 50 cm), 既保证合适内外径比且减少尺寸效应对渗透速率的影响^[8]。马氏瓶作为恒压供水装置分别为内外环供水, 并通过调整其补水阀、进气阀和加水阀的位置使供水装置补水连续、反应灵敏。为了既减少斜坡坡表区域扰动范围又确保各测试点供水压力统一且可调, 本文通过在斜坡上架设三脚架作为供水装置的支撑从而减少整平场地的面积, 三脚架亦能精确调节马氏瓶的高度保证各试验点供水压力统一。同时, 试验还利用电子秤测量马氏瓶内水的质量从而换算出不同时刻环内水的累积入渗量。该方法不但读数方便而且较常规方法提高了累积入渗量的测量精度。



图 1 自制双环入渗仪

Fig. 1 Self-made bicyclic infiltrometer

1.2 研究内容

鉴于湘潭市昭山地区的雨后堆积碎石土滑坡致灾较为严重, 将试验研究区选为湘潭市水竹湾隧道出口处堆积碎石土边坡(长约 40 m, 宽约 6 m)。试验主要内容为: ①通过 GPS 定位技术对边坡进行地形测量获取地形信息, 并分别在边坡坡脚、坡腰、坡顶处各布设 6 个试验点(纵向距离 8 m、横向距离 3 m), 共 18 个测试点; ②对测试点碎石进行筛分试验, 获得不同粒径区间碎石的质量分数(见表 1); ③根据试验规程^[9]对 18 个试验点运用自制双环入渗仪进行碎石土饱和入渗试验, 记录不同时间环内水的累积入渗量, 且测量试验水温以对渗透系数进行温度修正^[10]; ④入

渗试验结束后(历时 90 min)立即用洛阳铲对试验点碎石土进行采样, 并运用烘干法分别测出试验点不同深度(0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm、20~25 cm)堆积碎石土的含水率。为了确保含水率测定的精确性, 对每个试验点在不同位置分别取 3 组样点求平均值。

表 1 不同粒径区间碎石筛分结果

Fig. 1 Gravel screening results of different particle size ranges (%)

| 测点 | >60 mm | 40~60 mm | 20~40 mm | 10~20 mm | 5~10 mm | 2~5 mm |
|----|--------|----------|----------|----------|---------|--------|
| 1 | 24.71 | 6.17 | 13.66 | 16.54 | 14.55 | 24.37 |
| 2 | 30.66 | 8.95 | 13.86 | 15.48 | 11.43 | 19.61 |
| 3 | 21.05 | 10.04 | 15.02 | 15.77 | 14.88 | 23.23 |
| 4 | 23.45 | 11.96 | 23.28 | 14.93 | 11.01 | 15.38 |
| 5 | 22.81 | 11.53 | 22.18 | 14.80 | 11.13 | 17.56 |
| 6 | 11.76 | 16.30 | 28.46 | 18.20 | 10.08 | 15.20 |
| 7 | 9.75 | 20.49 | 20.31 | 16.39 | 13.88 | 19.18 |
| 8 | 16.62 | 16.40 | 24.12 | 18.23 | 10.17 | 14.47 |
| 9 | 31.31 | 8.02 | 18.18 | 15.69 | 11.12 | 15.67 |
| 10 | 15.26 | 17.01 | 27.21 | 15.37 | 9.69 | 15.46 |
| 11 | 21.88 | 14.75 | 25.94 | 16.89 | 9.16 | 11.38 |
| 12 | 34.72 | 12.45 | 16.26 | 11.61 | 9.66 | 15.31 |
| 13 | 22.89 | 15.23 | 21.23 | 14.26 | 8.15 | 18.25 |
| 14 | 27.72 | 17.22 | 27.45 | 12.36 | 6.46 | 8.80 |
| 15 | 36.87 | 5.78 | 12.34 | 14.14 | 10.73 | 20.14 |
| 16 | 48.41 | 6.46 | 15.59 | 11.43 | 7.48 | 10.63 |
| 17 | 12.76 | 9.98 | 28.25 | 21.85 | 12.41 | 14.75 |
| 18 | 16.33 | 11.42 | 30.44 | 19.14 | 10.57 | 12.09 |

1.3 数据处理与分析方法

据研究成果^[11]可知, Philip 模型^[12]与 Kostiakov 模型^[13]的实用性强, 在入渗计算过程中应用广泛。因此, 利用上述两个模型对 18 个测点入渗数据进行拟合, 将相关系数与均方根误差作为评价依据进行入渗公式优选, 确定各点渗透速率。为验证优选模型是否具备普适性, 同时在斜坡研究区域之外随机取 6 个测试点进行入渗试验并将入渗数据与研究区域入渗数据进行对比分析。由于碎石土斜坡不同粒径碎石对碎石土渗透特性影响很大, 数据离散很难对进行数理统计, 所以可运用灰色理论方法^[14]对有限的、表面无规律的数据进行处理, 挖掘数据背后的本质内涵, 进而根据均值化与区间值化两种量纲处理方法得到各因素相关度平均值, 以确定影响碎石土渗透系数的主要碎石粒径范围。

为获得连续的空间分布信息, Kriging 插值法既考虑已知数据点之间的相互联系, 又评估已知数据与待估数据的影响, 并通过变异函数来表征变量的空间结

构性^[15]。因此, 首先需对碎石土碎石土渗透系数、不同粒径碎石质量分数、不同深度堆积碎石土含水率进行相关性检验 (KS test)。若数据符合正态分布, 则可直接运用普通 Kriging 插值^[16]对研究数据进行空间插值并得出连续化空间分布图。同时, 在插值过程中需运用半变异函数理论模型(球状、高斯、指数)与 Kriging 预测法进行交叉验证^[17], 分析其平均误差(ME)、平均标准误差(ASE)和均方根误差(RMSE), 从而得出较为准确的理论插值模型, 进而确保插值精度。最后对研究数据在各方向进行空间变异性比较分析。

2 碎石土入渗特性分析

2.1 碎石土入渗公式优选

根据室外碎石土双环入渗试验, 利用 Philip 模型与 Kostiakov 模型对各测点入渗数据(见图 2)进行拟合, 将相关系数与均方根误差作为评价依据, 结果见表 2。其中两个入渗模型公式如下:

Philip 模型

$$I(t) = St^{0.5} + At, \quad (1)$$

式中, I 为累积入渗量 (cm), t 为时间 (min), S 为土壤吸渗率 ($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$), A 为稳渗率 (cm/min)。

Kostiakov 模型

$$I(t) = \frac{k}{\alpha} t^\alpha, \quad (2)$$

式中, k 为渗透系数 (cm/min), α 为经验入渗指数。

由表 2 可知, 研究区域内(18 个试验点)各测试点应用 Philip 公式的相关系数(R^2)均比利用 Kostiakov 公式拟合要小, 而 Philip 公式的均方根误差(RMSE)却比 Kostiakov 公式要大。同时, 在研究区域外随机选取的 6 个试验点应用 Kostiakov 公式也比 Philip 公式更接近实测入渗数据曲线。由此可知, 对于堆积碎石土而言, 采用 Kostiakov 公式描述其入渗过程效果较好且具有一定普适性, 即可将温度修正后的渗透系数视为碎石土渗透系数。

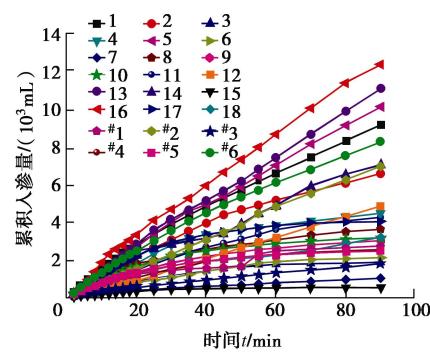


图 2 90 min 累积入渗量实测值

Fig. 2 Measured values of cumulative infiltration in 90 min

表 2 不同测点入渗公式拟合结果比较

Table 2 Comparison of fitting results of different infiltration functions at different test points

| 测点 | Philip 模型 | | | | Kostiakov 模型 | | | | 温度 /℃ | 碎石土渗透系数 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|----|--|--|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|--|
| | 吸渗率 /($\text{cm} \cdot \text{min}^{-0.5}$) | 稳渗率 /($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) | RMS | R^2 | 渗透系数 /($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) | 入渗指数 | RMS | R^2 | | |
| 1 | 0.310 | 0.075 | 0.116 | 0.998 | 0.3422 | 0.792 | 0.059 | 0.999 | 34 | 0.004192 |
| 2 | 0.302 | 0.049 | 0.214 | 0.988 | 0.3419 | 0.743 | 0.165 | 0.993 | 35 | 0.004102 |
| 3 | 0.196 | 0.004 | 0.119 | 0.961 | 0.2990 | 0.572 | 0.110 | 0.966 | 31 | 0.003891 |
| 4 | 0.311 | 0.025 | 0.362 | 0.942 | 0.3785 | 0.671 | 0.327 | 0.952 | 35 | 0.004542 |
| 5 | 0.175 | 0.100 | 0.116 | 0.998 | 0.2240 | 0.884 | 0.094 | 0.999 | 32 | 0.002856 |
| 6 | 0.134 | 0.014 | 0.117 | 0.971 | 0.1587 | 0.693 | 0.101 | 0.979 | 36 | 0.001905 |
| 7 | 0.078 | 0.004 | 0.019 | 0.996 | 0.1100 | 0.618 | 0.016 | 0.997 | 32 | 0.001403 |
| 8 | 0.378 | 0.005 | 0.138 | 0.982 | 0.6300 | 0.546 | 0.126 | 0.985 | 37 | 0.007560 |
| 9 | 0.278 | 0.009 | 0.143 | 0.976 | 0.4047 | 0.593 | 0.125 | 0.982 | 22 | 0.006361 |
| 10 | 0.381 | 0.001 | 0.188 | 0.962 | 0.6629 | 0.525 | 0.184 | 0.964 | 28 | 0.009203 |
| 11 | 0.207 | 0.033 | 0.182 | 0.982 | 0.2341 | 0.739 | 0.147 | 0.988 | 37 | 0.002809 |
| 12 | 0.058 | 0.063 | 0.022 | 0.999 | 0.0359 | 1.086 | 0.035 | 0.999 | 37 | 0.000431 |
| 13 | 0.124 | 0.114 | 0.119 | 0.999 | 0.2310 | 0.921 | 0.111 | 0.999 | 26 | 0.003637 |
| 14 | 0.249 | 0.054 | 0.261 | 0.982 | 0.2620 | 0.782 | 0.277 | 0.980 | 27 | 0.004746 |
| 15 | 0.098 | 0.003 | 0.041 | 0.945 | 0.1490 | 0.434 | 0.047 | 0.927 | 28 | 0.004766 |
| 16 | 0.224 | 0.122 | 0.136 | 0.999 | 0.2970 | 0.880 | 0.120 | 0.999 | 28 | 0.004686 |
| 17 | 0.475 | 0.003 | 0.344 | 0.934 | 0.4650 | 0.548 | 0.332 | 0.938 | 34 | 0.010395 |
| 18 | 0.202 | 0.016 | 0.129 | 0.980 | 0.2190 | 0.659 | 0.113 | 0.984 | 28 | 0.004614 |
| #1 | 0.222 | 0.010 | 0.147 | 0.965 | 0.3218 | 0.606 | 0.145 | 0.966 | 34 | 0.003942 |
| #2 | 0.002 | 0.082 | 0.065 | 0.999 | 0.0820 | 1.000 | 0.065 | 0.999 | 33 | 0.001025 |
| #3 | 0.077 | 0.013 | 0.020 | 0.999 | 0.0851 | 0.752 | 0.020 | 0.999 | 40 | 0.001021 |
| #4 | 0.206 | 0.017 | 0.270 | 0.965 | 0.2689 | 0.636 | 0.137 | 0.972 | 24 | 0.004078 |
| #5 | 0.317 | 0.002 | 0.879 | 0.965 | 0.5881 | 0.505 | 0.848 | 0.965 | 30 | 0.007822 |
| #6 | 0.272 | 0.070 | 0.152 | 0.996 | 0.3020 | 0.798 | 0.095 | 0.998 | 30 | 0.004017 |

2.2 碎石土渗透系数与不同粒径区间碎石质量分数灰关联分析

由于坡表碎石具有特定的空间分布规律, 其对碎石土渗透系数影响很大, 可通过灰关联方法分析影响碎石土渗透系数关键碎石粒径区间, 深入分析碎石土入渗规律。

灰关联相关公式表达如下:

(1) 确定参考数列与比较数列

$$\left. \begin{array}{l} x_0(k) \quad (k=1, 2, \dots, m), \\ x_i(k) \quad (k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n), \end{array} \right\}$$

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

(2) 将数据作量纲唯一化处理, 并分别进行平均值化与区间值化分析。

均值化

$$y_i = \frac{x_i(k)}{\sum_{k=1}^m x_i(k)/m} \quad (k=1, 2, \dots, m; i=0, 1, \dots, n). \quad (3)$$

区间值化

$$y_i = \frac{x_i(k) - \min x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (k=1, 2, \dots, m, i=0, 1, \dots, n). \quad (4)$$

(3) 关联系数的计算:

$$\xi_i(k) =$$

$$\frac{\min \left\{ \min_k |y_0(k) - y_i(k)| \right\} + \alpha \max \left\{ \max_k |y_0(k) - y_i(k)| \right\}}{|y_0(k) - y_i(k)| + \alpha \max \left\{ \max_k |y_0(k) - y_i(k)| \right\}}, \quad (5)$$

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 $y_0(k)$ 的相对差值。

(4) 灰关联度的计算公式为

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_i(k) \quad (k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n), \quad (6)$$

式中, r_i 为曲线 y_i 对 y_0 的关联度。

根据均值化与区间值化两种量纲处理方法得到各因素相关度平均值, 各参数与渗透系数的相关度均大于0.6, 对渗透系数影响程度由大到小的碎石粒径区间依次为10~20 mm、>60 mm、5~10 mm、20~40 mm、40~60 mm、2~5 mm(见表3)。由此说明不同粒径碎石与渗透系数的相关性大, 尤其是粒径区间在10~20 mm的碎石对碎石土中土与石或石与石之间的孔隙与连通性影响最大, 进而影响碎石土的渗透系数; 而大粒径碎石由于自身透水性差, 显著减少了雨水入渗过程过水断面的面积, 从而阻碍了雨水入渗。

表3 入渗试验灰关联分析结果

Table 3 Permeability test results of grey correlation analysis

| 碎石粒径区间 | 均值化 | 区间值化 | 相关度 |
|----------|-------|-------|-------|
| | 相关度 | 相关度 | 平均值 |
| >60 mm | 0.705 | 0.707 | 0.706 |
| 40~60 mm | 0.646 | 0.640 | 0.643 |
| 20~40 mm | 0.666 | 0.633 | 0.650 |
| 10~20 mm | 0.725 | 0.763 | 0.744 |
| 5~10 mm | 0.693 | 0.654 | 0.673 |
| 2~5 mm | 0.655 | 0.607 | 0.631 |

3 入渗特性的空间分布与空间变异性

3.1 数据检验

对18个测试点现场勘测数据进行了初步特征值计算以及KS值检验, 结果列于表4。各物理参数均为中等变异性, 其中渗透系数的变异程度最高。根据KS检验结果(显著水平为0.05), 实测数据的KS值均高于0.05, 故现场勘测的数据均符合正态分布条件。

表4 现场勘测数据统计特征值和KS检验

Table 4 Statistical characteristic values of field data and KS tests

| 项目 | 均值/% | 标准差/% | 变异系数 | KS值 |
|------------|----------------------|--------|------|------|
| 大于60 mm | 23.83 | 9.92 | 0.42 | 0.56 |
| 粒径40~60 mm | 12.23 | 4.31 | 0.35 | 0.46 |
| 粒径20~40 mm | 21.32 | 5.90 | 0.28 | 0.58 |
| 粒径10~20 mm | 15.73 | 2.63 | 0.17 | 0.45 |
| 粒径5~10 mm | 10.70 | 2.25 | 0.21 | 0.64 |
| 粒径2~5 mm | 16.19 | 4.15 | 0.26 | 0.68 |
| 0~5 cm深度 | 12.46 | 4.35 | 0.35 | 0.59 |
| 5~10 cm深度 | 12.55 | 5.33 | 0.42 | 0.55 |
| 10~15 cm深度 | 13.27 | 4.73 | 0.36 | 0.44 |
| 15~20 cm深度 | 12.54 | 5.41 | 0.43 | 0.59 |
| 20~25 cm深度 | 11.77 | 3.76 | 0.32 | 0.66 |
| 渗透系数cm/s | 4.6×10^{-3} | 0.0025 | 0.56 | 0.96 |

3.2 半变异函数理论模型优选

应用普通Kriging插值法在常趋势效应下分别运用球形、指数、高斯模型进行空间插值并交叉检验(见表5)。通过数据对比可知: 不同深度含水率、不同粒径区间碎石的质量分数、碎石土渗透系数的空间插值分别应用球状、高斯、球状半变异函数理论模型的RMSE值与ME值均最接近于零, RMSE值与ASE值也更接近, 故运用以上模型对离散数据进行空间插值最为精确。

表5 普通Kriging插值法的预测误差对比

Table 5 Comparison of related parameters of ordinary Kriging interpolation method

| 项目 | 模型类型 | 预测误差 | | |
|------------|------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | ME | RMSE | ASE |
| 0~5 cm深度 | 球状 | 0.081 | 4.512 | 4.431 |
| | 高斯 | 0.091 | 4.512 | 4.367 |
| | 指数 | 0.254 | 4.612 | 4.357 |
| 5~10 cm深度 | 球状 | 0.021 | 5.471 | 5.800 |
| | 高斯 | 0.031 | 5.466 | 5.787 |
| | 指数 | 0.041 | 5.456 | 5.770 |
| 10~15 cm深度 | 球状 | 0.044 | 4.757 | 4.598 |
| | 高斯 | 0.043 | 4.756 | 4.530 |
| | 指数 | 0.044 | 4.757 | 4.522 |
| 15~20 cm深度 | 球状 | 0.050 | 5.158 | 5.162 |
| | 高斯 | 0.049 | 5.138 | 5.176 |
| | 指数 | 0.052 | 5.178 | 5.147 |
| 20~25 cm深度 | 球状 | 0.025 | 3.205 | 3.272 |
| | 高斯 | 0.025 | 3.204 | 3.096 |
| | 指数 | 0.025 | 3.204 | 3.267 |
| 大于60 mm | 球状 | -0.276 | 12.113 | 10.872 |
| | 高斯 | -0.239 | 12.008 | 10.715 |
| | 指数 | -0.317 | 12.041 | 11.047 |
| 40~60 mm | 球状 | 0.261 | 4.559 | 3.604 |
| | 高斯 | 0.261 | 4.559 | 3.604 |
| | 指数 | 0.261 | 4.559 | 3.604 |
| 20~40 mm | 球状 | 0.267 | 7.195 | 5.107 |
| | 高斯 | 0.254 | 7.190 | 5.059 |
| | 指数 | 0.267 | 7.195 | 5.107 |
| 10~20 mm | 球状 | 0.075 | 4.908 | 4.398 |
| | 高斯 | 0.053 | 4.906 | 4.278 |
| | 指数 | 0.100 | 4.908 | 4.480 |
| 5~10 mm | 球状 | -0.017 | 3.776 | 3.362 |
| | 高斯 | -0.021 | 3.782 | 3.269 |
| | 指数 | -0.014 | 3.763 | 3.395 |
| 渗透系数 | 球状 | -5.21×10^{-6} | 2.55×10^{-3} | 2.74×10^{-3} |
| | 高斯 | 4.23×10^{-5} | 2.81×10^{-3} | 2.65×10^{-3} |
| | 指数 | 3.22×10^{-4} | 3.12×10^{-3} | 2.49×10^{-3} |

3.3 插值结果分析

基于上述研究, 根据碎石土斜坡现场测试数据,

应用最合适的理论模型及其相关参数, 经普通 Kriging 插值运算, 得到了该研究区域不同粒径碎石质量分数空间分布图(图 3)、坡表碎石土渗透系数空间分布图(图 4)和不同深度含水率空间分布图(图 5)。由于粒径大于 60 mm 碎石在斜坡上具有较强自稳定性, 受地质搬运作用影响较小, 在坡顶区域分布相对较多, 且占碎石总质量的 25%~29%, 而坡脚区域仅占 15%~20%(图 3(f))。粒径 10~60 mm 区间碎石在风化剥蚀和雨水冲刷作用下沿斜坡由上至下进行分选, 大量分布于坡顶与坡腰区域。粒径 40~60 mm 区间的碎石在坡腰区域比坡顶、坡脚区域要多 3%~8%(图 3(e)), 而粒径在 10~40 mm 区间的碎石坡腰与坡顶区域相差不大, 均比坡脚区域含量大(图 3(c)、3(d))。粒径区间在 2~10 mm 的碎石自稳定性很差, 细小颗粒在雨水冲刷与重力作用下逐渐向下迁移, 大多聚积在坡脚区域(图 3(a)、3(b))。由于影响渗透系数最

主要的因素为碎石土之间的大孔隙。坡脚处大量聚集粒径区间在 2~10 mm 的细颗粒堵塞孔道造成碎石土内部空隙减小, 致孔隙结构变复杂, 孔隙的扭曲程度提高, 空隙连通性减小, 表现为渗透性差。粒径 40~60 mm 和 2~10 mm 区间的碎石在坡腰区域比坡顶多, 从而导致坡腰碎石(透水性差)断面积比坡顶大且孔隙复杂, 渗透性相对较低。因此, 不同粒径级配碎石的空间分布对坡表碎石土入渗的空间分布产生影响, 在坡脚、坡腰、坡顶区域的渗透系数分别在 3.0×10^{-3} ~ 4.0×10^{-3} cm/s、 4.0×10^{-3} ~ 4.5×10^{-3} cm/s、 4.0×10^{-3} ~ 5.0×10^{-3} cm/s 的范围(图 4)。

由于坡顶粒径>60 mm 碎石含量大, 导致碎石土之间的空隙相对较大, 进而使碎石土饱和渗透系数相对较高, 而坡脚小粒径碎石(粒径 2~10 mm)含量多, 故碎石土渗透系数相对较小。 $0\sim25$ cm 5 层剖面碎石土水分空间分布图显示了双环入渗试验(即雨强

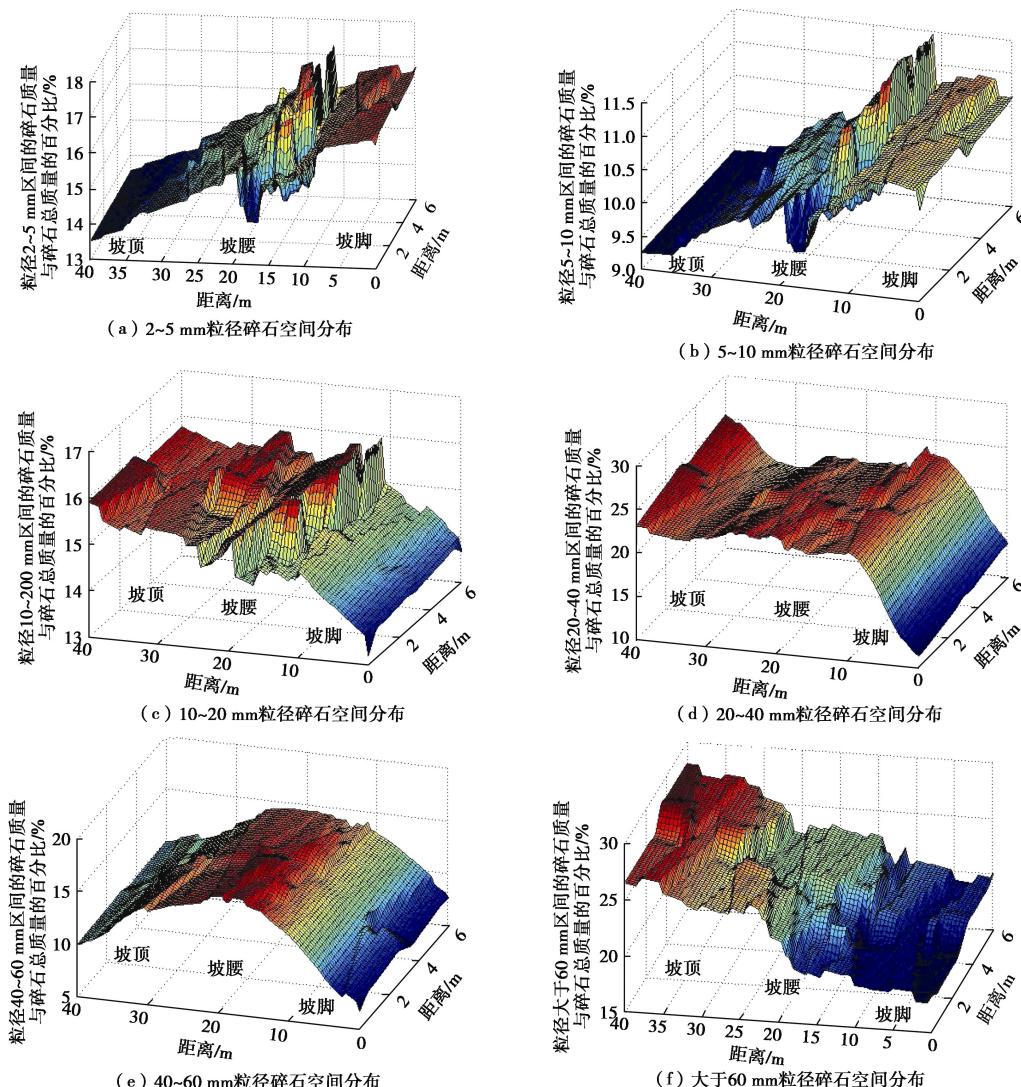


图 3 不同粒径碎石质量分数空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of gravel quality score with different particle sizes

大于碎石土饱和渗透系数且历时 90 min) 不同层次土壤水分的空间分布情况。0~15 cm 深度坡腰碎石土含水率比坡顶与坡脚要高, 这是由于坡腰区域坡表大多为粒径 10~60 mm 的碎石, 土与石或石与石之间连通性好、持水性强, 致含水率高 (12%~15%)。根据大量室内三轴试验可知^[3], 堆积碎石土内摩擦角随着含水率的增加而减少, 堆积碎石土黏聚力随着含水率的增加, 呈先增加后减少的趋势 (含水率达到 9% 左右黏聚力最大)。因此, 在强降雨条件下, 斜坡浅表后缘随着黏聚力与摩擦角的快速减小易先产生宽且长的变形裂缝, 从而导致碎石土体从坡顶向下滑动。随着湿润锋垂直向下迁移, 碎石土内部空气被封闭等作用影响, 雨水入渗的阻力增大, 故坡顶与坡腰的含水率随着土层深度加深逐渐减少。然而在重力的作用下, 雨水顺着斜坡方向发生了斜向迁移, 致 16~25 cm 深度的坡脚土层含水率比坡顶与坡腰含水率要高, 且坡脚的含水率随着深度的增加缓慢上升。坡脚含水率的上升导致坡脚的抗剪强度下降, 进而容易诱发大规模的滑坡。

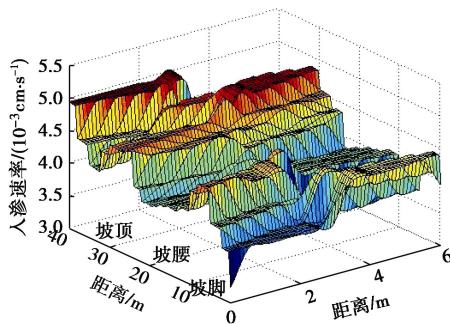


图 4 堆积碎石土渗透系数空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of the permeability coefficient of aggregate gravel soil

3.4 入渗特性空间变异性分析

由表 6 可知碎石土渗透系数在南北方向 (斜坡长轴方向)、东西方向以及坡顶、坡腰、坡脚区域的空间变异性均属于中等变异性。由于粒径大于 10 mm 的碎石广泛分布在坡顶与坡腰区域, 使坡顶与坡腰渗透系数的空间变异性相对较大 (变异系数分别为 45%, 77%)。因此, 在建立定量分析降雨下碎石土边坡稳定性模型时, 需重点区分坡顶与坡腰渗透系数的空间变异性, 从而更加精确地对滑坡灾害进行预测。碎石土含水率空间分布在南北方向 (斜坡长轴方向)、二维水平面和三维空间上表现为中等变异性, 其变异系数分别为 20%, 29%, 37%, 而垂直方向变异系数为 4%, 属弱变异性 (见表 7)。这说明含水率在空间整体分布下变异系数相对较大, 而在垂直方向水分分布的变异程度相对较小。

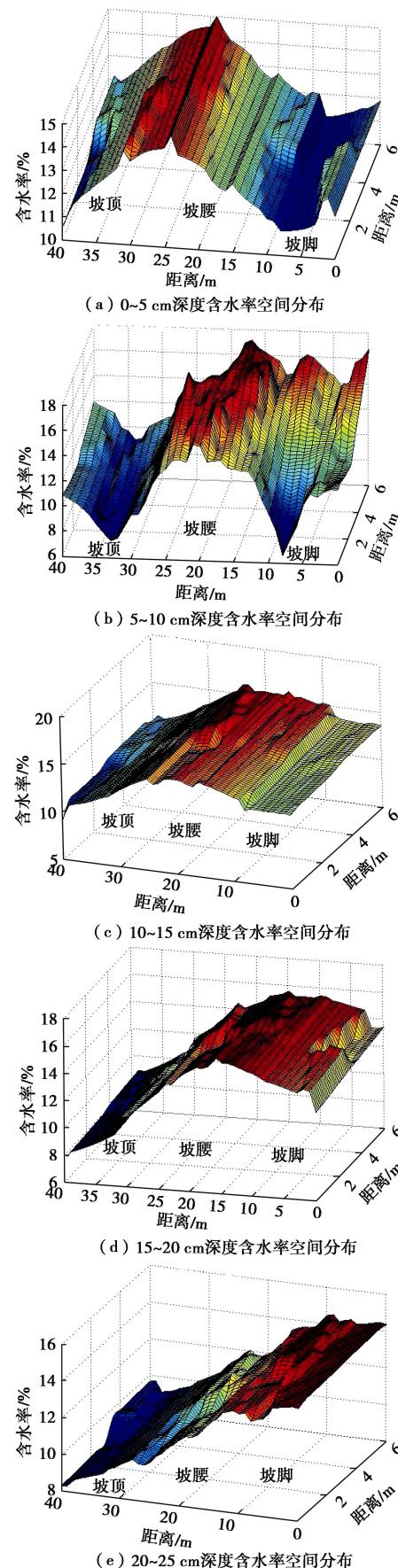


图 5 不同深度碎石土含水率空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of moisture content at different depths of gravel soil

研究结果表明运用普通 Kriging 插值方法以及合理的半变异函数理论模型真实的反映了堆积碎石土入渗性的空间分布特征, 该规律为完善可定量分析降雨条件下边坡稳定性的模型奠定了理论基础, 对预防滑坡灾害至关重要, 具有一定的科学意义和现实价值。

表 6 各方向碎石土渗透系数统计特征值

Table 6 Statistical results of infiltration rate of gravel soil in different directions

| 方位 | 样本数 | 渗透系数 平均数 | 标准差 | 变异 系数 |
|------|-----|-------------|-----------|----------|
| 南北方向 | 6 | 0.004214 | 0.0011750 | 0.26 |
| 东西方向 | 3 | 0.004214 | 0.0008760 | 0.19 |
| 坡顶 | 6 | 0.005474 | 0.0024488 | 0.45 |
| 坡腰 | 6 | 0.004628 | 0.0035736 | 0.77 |
| 坡脚 | 6 | 0.003581 | 0.0010001 | 0.28 |

表 7 各方向碎石土含水率统计特征值

Table 7 Statistical results of moisture content of gravel soil in different directions

| 方位 | 样本数 | 含水率 平均数% | 标准差 | 变异 系数 |
|------|-----|-------------|------|----------|
| 南北方向 | 6 | 12.52 | 2.45 | 0.20 |
| 垂直方向 | 5 | 12.52 | 0.53 | 0.04 |
| 二维方向 | 18 | 12.52 | 3.69 | 0.29 |
| 三维方向 | 90 | 12.52 | 4.67 | 0.37 |

4 结 论

(1) 对于堆积碎石土而言, 采用 Kostiakov 公式描述其入渗过程效果最好且具有普适性, 对渗透系数影响程度由大到小的碎石粒径区间依次为 10~20 mm、>60 mm, 5~10 mm, 20~40 mm, 40~60 mm, 2~5 mm。

(2) 现场勘察数据经 KS 检验符合正态分布, 适宜运用普通 Kriging 插值法对碎石土入渗特性参数进行空间插值, 确定高斯半变异函数理论模型能够准确地对不同碎石粒径区间的碎石土百分含量进行空间插值, 球状半变异函数理论模型能够准确地对碎石土渗透系数、不同深度碎石土含水量进行空间插值, 从而实现了不同研究对象离散数据的空间化应用。

(3) 大粒径碎石(粒径>10 mm)广泛分布于坡顶与坡腰区域, 而细小碎石(粒径 2~10 mm)则聚积在坡脚位置。碎石土渗透系数在坡面的空间分布由上至下随小粒径碎石百分含量增加呈减少的趋势。0~15 cm 深度坡腰土层含水率比坡顶与坡脚含水率要

高, 15~25 cm 深度的坡脚土层含水率比坡顶与坡腰含水率要高, 且坡脚的含水率随着深度的增加出现了缓慢的上升。

(4) 碎石土渗透系数与含水率空间分布在二维水平面和三维空间上表现为中等变异性, 粒径>10 mm 的碎石影响坡顶与坡腰渗透系数使其空间变异性相对较大(变异系数分别为 45%, 77%)。

参 考 文 献:

- [1] 贺可强, 周敦云, 王思敬. 降雨型堆积层滑坡的加卸载响应比特征及其预测作用与意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2665~2670. (HE Ke-qiang, ZHOU Dun-yun, WANG Si-jing. Features of load-unload response ratio and its significance in predication of colluvial landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2665~2670. (in Chinese))
- [2] 许建聪, 尚岳全, 王建林. 松散土质滑坡位移与降雨量的相关性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 2854~2860. (XU Jian-cong, SHANG Yue-quan, WANG Jian-lin. Study on relationship between slope-mass slide displacement and precipitation of loose soil landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2854~2860. (in Chinese))
- [3] 董辉, 陈玺文, 傅鹤林, 等. 堆积碎石土剪切特性的三轴试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(2): 59~66. (DONG Hui, CHEN Xi-wen, FU He-lin, et al. Triaxial test of shear properties of eluvial gravel soil[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(2): 59~66. (in Chinese))
- [4] 张春敏, 王根绪, 王军德, 等. 高寒草甸典型小流域雨后土壤水分空间变异特征[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 10~14. (ZHANG Chun-min, WANG Gen-xu, WANG Jun-de, et al. The spatial heterogeneity of soil moisture after raining in representative gully catchment of the alpine meadow[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6): 10~14. (in Chinese))
- [5] 武世亮. 土壤入渗特性的空间变异性及与土壤物理特性的相关性研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2014. (WU Shi-liang. Study on the spatial variability of soil infiltration properties and the spatial correlation with soil physical properties[D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese))
- [6] 王月玲, 蒋齐, 蔡进军, 等. 半干旱黄土丘陵区土壤水分入渗速率的空间变异性[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4):

- 52 - 55. (WANG Yue-ling, JIANG Qi, CAI Jin-jun, et al. Spatial variability of infiltration rate in the semiarid loess hilly and gully area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, **28**(4): 52 - 55. (in Chinese))
- [7] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 崩岗崩积体土壤渗透特性分析[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(3): 49 - 54. (JIANG Fang-shi, HUANG Yan-he, LIN Jin-shi, et al. Study on soil permeability of slumping deposits in Benggang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(3): 49 - 54. (in Chinese))
- [8] 治运涛, 伍靖伟, 王兴奎. 双套环测定土壤渗透系数数值模拟分析[J]. 灌溉排水学报, 2007, **26**(3): 14 - 18. (YE Yun-tao, WU Jing-wei, WANG Xing-kui. Numerical simulation of double-ring measurement on hydraulic conductivity[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, **26**(3): 14 - 18. (in Chinese))
- [9] SL345—2007 水利水电工程注水试验规程[S]. 2007: 6 - 9. (SL345—2007 Code of water injection test for water resources and hydropower engineering[S]. 2007: 6 - 9. (in Chinese))
- [10] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999: 114 - 123. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999: 114 - 123. (in Chinese))
- [11] KHANNA M, MALANO H M. Modelling of basin irrigation systems: a review[J]. Agricultural Water Management, 2006, **83**(1): 87 - 99.
- [12] PHILIP J R. The theory of infiltration: 1 the infiltration equation and its solution[J]. Soil Science, 1957, **83**(5): 345 - 358.
- [13] KOSTIAKOV A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration [C]// Transcations Communication International Society Soil Science 6th. Moscow, 1932, **6**: 17 - 21.
- [14] 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 Ju-long. Grey system theory course[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990: 33 - 63. (in Chinese))
- [15] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 21 - 35. (XU Jian-hua. Mathematical methods in modern geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 21 - 35. (in Chinese))
- [16] 胡先莉. 序贯条件模拟方法研究及应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2007. (HU Xian-li. Research and application of sequentially conditional simulation methods[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [17] 凌 辉, 武 伟, 王 润, 等. 小尺度下土壤重金属铬含量的空间插值方法比较研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, **29**(11): 93 - 99. (LING Hui, WU Wei, WANG Run, et al. A comparative analysis of various spatial interpolation methods for soil chrome content on a small scale[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2007, **29**(11): 93 - 99. (in Chinese))