

文章编号: 1008-2786-(2015)1-88-06

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000012

降雨影响下堆积体边坡的空间变异性

阮永芬¹, 王飞², 申林方¹, 黄兴周³, 王熙东¹

(1. 昆明理工大学土木工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051;
3. 保山学院物理系, 云南 保山 675800)

摘 要: 利用空间变异理论对堆积体边坡降雨引起变形的特点进行分析后, 拟合出变异函数理论模型。因模型参数确定非常困难, 利用遗传算法在求解非线性问题时具有全局寻优的特点, 结合遗传算法拟合出变异函数理论模型参数。依据降雨时监测的小湾水电站左岸堆积体边坡的变形数据, 进行降雨条件下的时间及空间变异性分析, 得出边坡的变形特点。为能充分反映降雨引起堆积体边坡变形的空间方向变异性, 构造出方向综合变异指标 O_v , 对其进行定量描述。最后通过实例验证了降雨条件下堆积体的时间及空间变异性分析及综合变异指标 O_v 理论的正确性。这种研究方法对堆积体边坡的相关研究提供了一种新的分析方法和思路。

关键词: 降雨; 参数估计; 时间空间变异性; 变异指标; 遗传算法; 堆积体边坡

中图分类号: P642, TU43

文献标志码: A

堆积体边坡是由第四系松散或相对松散的岩土体构成。因其组分、结构以及节理裂隙损伤等在其中分布的不均匀性和局部性, 边坡具有不连续性、非均质性和各向异性等复杂特性, 在力学上可描述为具有一定空间变异的几何体, 但这种空间变异性不是随机的, 而是具有整体的结构性和局部的随机性^[1], 因此应把堆积体边坡看成一个空间随机场, 对其进行空间变异性分析。国内不乏大型堆积体边坡的工程实践, 但以往主要集中于斜坡堆积体形成过程及现状评价^[2-4]的研究。近年来, 有关岩土参数的空间变异性研究已取得了一些成果, 而且已被成功的应用于实际工程中^[5-8]。但到目前为止, 几乎没有专门从堆积体边坡变形参数的空间变异性进行研究的文章。本文首先分析降雨引起堆积体边坡变形的特点后, 拟合出变异函数理论模型, 再结合遗传算法, 对变异函数的理论模型参数进行拟合。然后构造出方向综合变异指标 O_v , 定量描述降雨引起堆积体边坡变形的空间方向变异性。最后通过饮

水沟堆积体边坡降雨条件下监测资料的分析, 来验证理论分析的正确性。

1 地质统计学方法的基本理论

地质统计学是以区域化变量理论为基础, 区域化变量为主要研究对象, 变异函数为主要工具, 研究分布于空间中, 并显示出一定结构性和随机性的自然现象的一种数学地质方法。在优化采样方案、处理不规则采样及最优化插值计算等方面具有明显的优点。

1.1 变异函数的定义

变异函数的特点是通过随机性反映区域化变量的结构性, 故变异函数也叫结构函数。变异函数 $\gamma(h)$ ^[9], 可用下式表示

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \quad (1)$$

式中 $Z(x_i)$ 、 $Z(x_{i+h})$ 分别是偏离 h 的两点的区域

收稿日期(Received date): 2014-03-25; 改回日期(Accepted): 2014-05-07。

基金项目(Foundation item): 云南省中青年学科带头人项目(编号: 10918038), 昆明理工大学人才培养基金项目(编号: 639420040011)。[Supported by Young and Middle-aged Leading Projects in Yunnan Province(NO. 10918038) and Kunming University of Science and Technology Talent Training Project(NO. 639420040011).]

作者简介(Biography): 阮永芬(1964-), 女(汉), 云南宣威市人, 博士、教授, 主要从事岩土工程方面的研究。[Ruan Yong fen(1964-), female, Ph.D. professor, mainly engaged in the research of geotechnical engineering.]E-mail: ryy64@aliyun.com

化变量实测值 $N(h)$ 是距离等于 h 的点对数。不同 h 可以算出相应的 $\gamma(h)$ 。但实际上理论变异函数 $\gamma(h)$ 是未知的,往往要从有效的空间取样数据中去估计,因此,要用一个理论模型去拟合一系列的 $\gamma(h)$ 值。其中球状模型是常用的既能满足实际需求,又满足条件半负定要求的模型。

1.2 球状模型

球状模型^[9]亦称马特隆模型,它的一般公式为

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ c_0 + c \left(\frac{3}{2} \times \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \times \frac{h^3}{a^3} \right) & 0 < h \leq a \\ c_0 + c & h > a \end{cases} \quad (2)$$

式中 c_0 : 块金值,反映变量连续性的优劣。 $h \rightarrow 0$ 时, c_0 是 $\gamma(h)$ 的极限值; c : 拱高,表征区域化变量 $Z(x)$ 空间结构变化的极大值; $c_0 + c$: 基台值,反映一定方向上 $Z(x)$ 结构与随机变化的总的最大变化幅度; a : 变程, a 是 $\gamma(h)$ 达到基台值时的间隔距离。当 $h \leq a$ 任意两点间的观测值有相关性,这个相关性随 h 的增大而减小,当 $h > a$ 时 $Z(x)$ 的空间相关性消失。

2 遗传算法拟合变异函数参数

2.1 遗传算法的基本原理

遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机全局搜索算法,具有并行随机自适应寻优的独特功能,且对模型是否线性、连续、可微等不作限制;也不受优化数目、约束条件的束缚。遗传算法将“优胜劣汰,适者生存”的生物进化原理引入优化参数形成的编码串联群体中,按所选择的适配值函数并通过遗传中的复制、交叉和变异,对个体进行筛选,使适配值高的个体被保留下来,组成既继承了上一代信息又优于上一代的新群体。这样周而复始,群体中的适应度不断提高,直至满足一定的条件^[10]。

2.2 遗传算法拟合球状模型参数

基本遗传算法有 4 个参数需要预先设定 M 、 T 、 F 、 B_i , M 为群体大小,即群体中所含个体的数量,一般取为 20~100; T 为终止进化代数,一般取为 100~500; F 为交叉概率,一般取为 0.4~0.99; B_i 为变异概率,一般取为 0.001~0.01。遗传算法的理论步骤见文献^[11]。

据变异函数的球状模型,针对式(2)中第二式进行拟合,第二式经转化后变为

$$y = c_0 + \frac{3}{2} \frac{xc}{a} - \frac{1}{2} \frac{x^3 c}{a^3} \quad (3)$$

$$y = f(c_0, a, c; x) \quad (4)$$

式中 c_0, a, c 为 f 的待定参数, x 为 f 中的自变量。

已知 i 组自变量 $x_i, i=1, 2, \dots, n$ 对应的观察函数值为 $y_i, i=1, 2, \dots, n$ 。根据上面的遗传算法原理对参数 c_0, a, c 的求解步骤为:

1. 对式(3)进行处理,变为

$$\frac{c_0 + \frac{3}{2} \frac{xc}{a} - \frac{1}{2} \frac{x^3 c}{a^3}}{y} - 1 = 0$$

用矩阵来表示为

$$\frac{\begin{bmatrix} c_0 & \frac{3}{2} \cdot \frac{c}{a} & \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{a^3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ x^3 \end{bmatrix}}{[y]} - 1 = 0$$

式中 $\frac{X}{y} = D$;

2. 对 c_0, a, c 进行编码得到初始种群;

3. 对初始种群进行解码;

4. 计算适应度值 $F(s)$ 。 $F(s)$ 表示第 s 个体的适应值

$$F(s) = \frac{1}{c_0 \times D(1) + 1.5 \times c \times D(2) / a - 0.5 \times c \times D(3) / a^3 - 1}$$

5. 进行遗传操作。使用遗传算子选择、交叉进行遗传操作。

6. 设定遗传终止条件。若满足条件,遗传终止,输出 $F(s)$ 最大时对应的个体编码并解码得到参数 c_0, a, c ; 若不满足,则返回(3)继续运算。

3 降雨变形下的时间变异性分析

小湾水电站左岸饮水沟堆积体边坡,紧临坝基,总体呈上宽下窄的狭长条形,其平面形态似舌形,规模巨大。堆积体铅直厚度一般为 33~37 m,最大厚度 70 m,分布高程在 1130~1600 m,沿 SN 向即河向水平发育深度约 80~200 m,EW 向即横河向最大水平发育深度达 180 m,垂直发育深度约 160 m,总体积约 $4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。堆积体主要由块石、特大孤石夹碎石质粉土或碎石层组成,碎石土不成层,主要填塞于块石缝隙间。碎块石成分为黑云母花岗片麻岩,碎、块石含量约 70%。堆积物底部与下伏基岩接触面附近普遍存在厚约 0.15~2.45 m 的坡积层(由碎石质砂壤土、砂土夹块石组成),在局部地段有洪积层。堆积体内发育裂隙潜水和脉状裂隙承压水,岩层透水性强,钻孔内涌水受季节性降水补给影响较大^[12]。堆积体 A-A'地质剖面图见图 1。

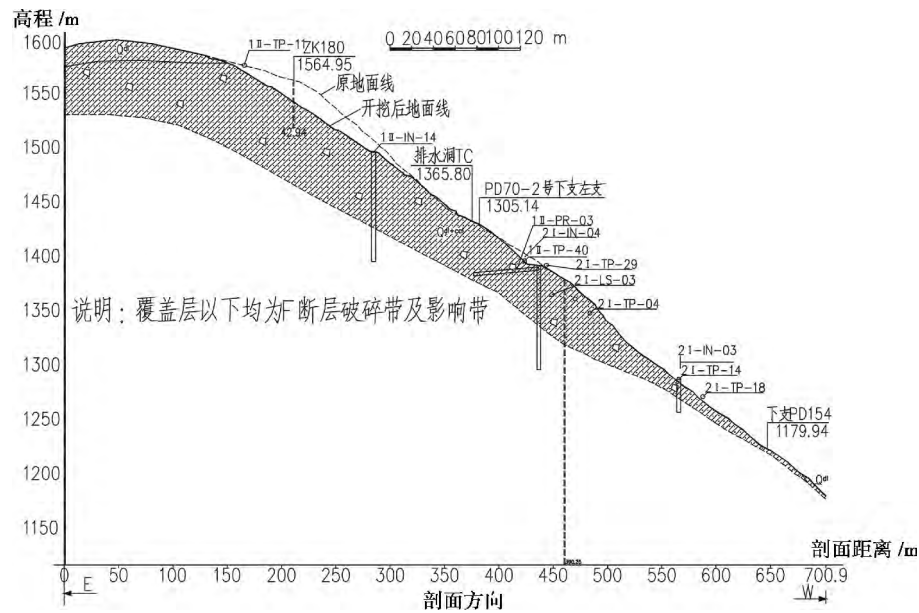


图 1 左岸堆积体边坡 A - A'地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of talus slope A - A' on the left bank

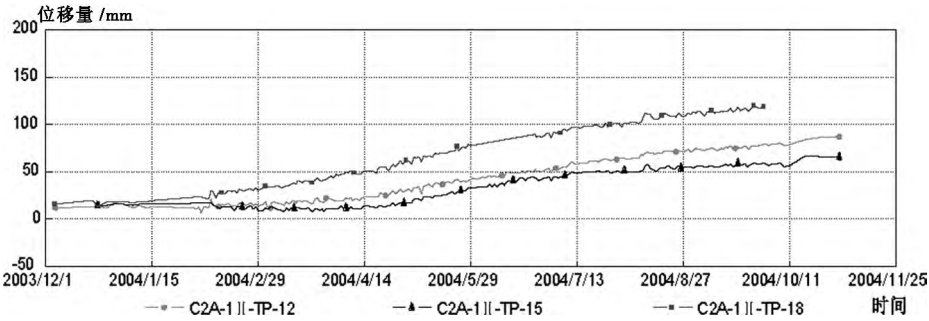


图 2 水平位移变化曲线

Fig. 2 horizontal displacement changing curve

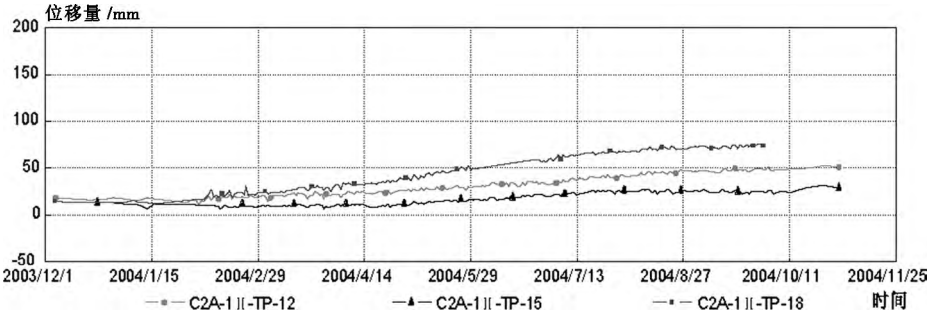


图 3 垂直位移变化曲线

Fig. 3 Vertical displacement of changing curve

开挖边坡走向约 N18°E,开挖坡度 45°,开挖至 1 276 m 高程后,于 2003 - 12 - 14 监测发现堆积体边坡出现变形。2004 - 01 - 09 下雨后,变形加速,1 月 9 日是降雨变形的分界点。左岸饮水沟堆积体边

坡主要是卸荷变形,降雨对变形起了加速作用。2# 山梁 II 区表面测点位移 - 时间过程线见图 2、图 3 所示。

降雨变形监测仪器布置见图 4。因仪器破坏,

只有部分监测点在监测 ,用这些监测点数据进行分析。降雨时变程由 1 变到 14 ,用式(1) 逐个求出对应变异函数值。取球状模型式(2) 的第二式进行拟合 ,用遗传算法求得观测点时间系列的变异函数参数见表 1。

从表 1 可以看出: 1. 极限变程 a 从小到大的顺序为: 22 < 11 < 17 < 15 < 12 < 18 < 16; 降雨条件下各

点变形程度从小到大的排序及各点稳定性从强到弱的排序是一致的 ,即 16 点在降雨情况下 ,变形值变化幅度最大。在其他因素不变的前提下 ,只要 16 点是稳定的 ,则其他点也就是稳定的。2. 各点变异程度从小到大的顺序为: 11 < 12 < 22 < 17 < 15 < 16 < 18 ,其中 18 点的变异程度最大 ,说明 18 点的随机变化最强。

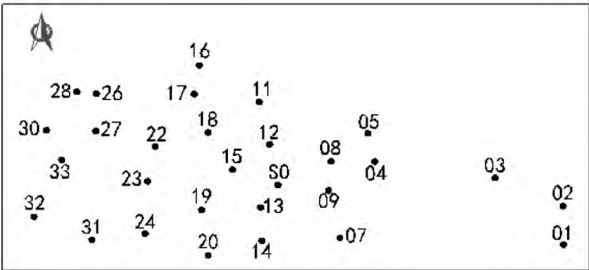


图 4 2#山梁堆积体边坡表观位移监测点布置图
Fig. 4 Layout chart of measuring points' apparent displacement for the accumulation body of 2 # mountain ridge

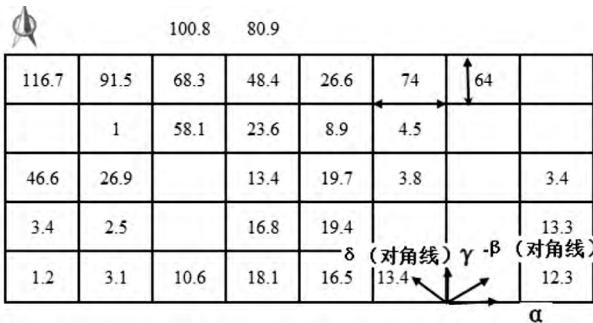


图 5 降雨下二维区域化变量网格图
Fig. 5 Grid chart of regionalization variable $Z(x)$ of two dimension under rainfall

表 1 降雨条件下时间系列变形的球状模型参数

Table 1 The spherical model parameters of temporal variability under rainfall

点号 Point number	块金常数 Nugget constant (C_0)	极限变程 Limit becomes (a)	拱高 High arch (c)	基台值 Sill ($c_0 + c$)	变异程度 Variability ($c_0 / c_0 + c$)
11	0. 754 6	6. 890 5	2. 440 5	3. 195 1	0. 236 2
12	1. 002 0	11. 003 9	2. 968 8	3. 970 8	0. 252 3
15	1. 378 4	10. 452 1	2. 353 9	3. 732 3	0. 369 3
16	28. 527 9	11. 572 6	15. 495 8	44. 023 7	0. 648 0
17	7. 338 9	7. 803 3	17. 195 3	24. 534 2	0. 301 4
18	3. 318 2	11. 232 4	1. 043 1	4. 361 3	0. 760 8
22	3. 749 0	6. 206 3	8. 772 3	12. 521 3	0. 299 4

4 降雨变形下空间变异性分析

将边坡在降雨条件下的变形速率看作区域化变量 ,利用空间变异理论对小湾水电站左岸饮水沟堆积体边坡降雨变形的监测数据进行空间变异性分析。分析时需对图 4 做网格处理才能利用式(1) 进行计算。工作中观测点的布置并不完全呈网格状 ,在求某个方向上的实验变异函数时 ,监测孔不一定完全位于这个方向的同一条直线上。现采用角度误差限(取 10°) 和距离误差限(取 20 m) 来调整处理。如计算 90°方向上的实验变异函数 ,则从某一点出

发 ,位于 80° ~ 100° 间扇形区域内的任何一点都可以看成该点 90° 方向上的点; 在要求的基础上下调整 20 m 在 α 方向上为 54 ~ 94 m 在 γ 方向上为 26 ~ 66 m。经过处理后二维区域化变量数据网格线图 5。方形网格上有若干已知网格化数据。小方形长 $a = 74$ m ,宽 $b = 46$ m。为揭示堆积体边坡降雨变形的空间变异性 ,用区域化理论 ,经过计算 ,可以得到空间变异球状模型参数及具有代表意义的 α (东西方向) 、 β (对角线) (东北方向) 、 γ (南北方向) 和 δ (对角线) (西北方向) 四个方向上的实验变异函数值。

对方向 α ($|h| = a$) (图 5) 据式(1) 有

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \\ &= [(100.8 - 80.9)^2 + (116.7 - 91.5)^2 + \dots + (13.4 - 16.5)^2] \div (2 \times 19) \\ &= 209.03\end{aligned}$$

同理, 求出各方向上的实验变异函数值见表 2。利用公式(1) 根据表 2 中数据, 用遗传算法来拟合变异函数的理论模型参数, 如表 3 所示。(其中 $a = 74$ m $b = 46$ m $c = \sqrt{a^2 + b^2} = 87$ m)

表 2 降雨条件下实验变异函数计算值

Table 2 Calculated value of experiment variation function under rainfall

	h	a	$2a$	$3a$	$4a$
α 方向	$\gamma(h)$	209.029	440.804	877.52	1 058.805
	h	c	$2c$	$3c$	$4c$
β 方向	$\gamma(h)$	295.627	767.702	539.783	
	h	b	$2b$	$3b$	$4b$
γ 方向	$\gamma(h)$	387.153	557.123	972.862	1 617.933
	h	c	$2c$	$3c$	$4c$
δ 方向	$\gamma(h)$	854.606	1 776.169	4 704.5	

表 3 降雨条件下空间变异球状模型参数及不同方向上变异指标

Table 3 The spherical model parameters of spatial variation and variation index of different directions under rainfall

方向 Direction	$C_0(C_{0a})$	$a(A_a)$	c	$c_0 + c(B_a)$	$c_0/c_0 + c$	o_v
α 方向	351.156 6	174.360 8	855.051 2	1 206.207 8	0.291 1	0.124 0
β 方向	353.133 9	146.815 8	456.384 8	809.518 7	0.436 2	0.126 4
γ 方向	370.160 7	131.533 9	958.412 5	1 328.573 2	0.278 6	0.210 0
δ 方向	1 590.200 0	254.401 6	2 155.400 0	3745.600 0	0.424 6	0.500 0

5 参数空间变异性的评价指标

经典统计学方法通常采用均值、标准差、变异系数等特征值来表征离散性随机变量的总体特征。但这些特征不能反映空间局部范围和特定方向上堆积体参数的变化特征, 只能反映某一给定范围内参数值的大小及总体集中离散程度等。这种缺陷是由经典统计学假设堆积体为同一均值体, 将其参数视为无空间变化的纯随机变量造成的。因此, 用经典统计学方法及其特征值无法取得堆积体参数的空间变化信息。

为了能够充分体现出堆积体边坡的空间方向变异性, 构造一个方向综合变异指标, 对所研究的堆积体参数的方向变异性做出定量评价

$$O_v = \frac{\frac{c_{o\alpha}}{b_{\alpha}} \cdot \left(\frac{b_{\alpha}}{b_{\max}}\right)^2}{\frac{c_{o\max}}{b_{\max}} \left[\left(\frac{b_{\alpha}}{b_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{a_{\alpha}}{a_{\max}}\right)^2\right]} \quad (5)$$

式中 $c_{o\alpha}$ 、 a_{α} 、 b_{α} —沿 α 方向的块金值、变程值和基台值; $c_{o\max}$ 、 a_{\max} 、 b_{\max} —所有计算方向中变量的最大块金、最大变程和最大基台值。

据表 3 中数据利用公式(5) 可以求出方向综合变异指标 O_v , 见表 3 最后一栏。那个方向的 O_v 值愈大, 表示在该方向上堆积体参数值间的相关性越弱, 其综合变异程度愈大, 工程中应重视此方向的位

移变化情况。从表 3 中可看出, 降雨条件下 δ 方向上综合变异指标 O_v 最大, 而其他三个方向上相差不大, 所以 δ 方向上受到降雨影响最大, 该方向最可能先发生破坏, 应引起重视。这 and 实际监测的结果一致。

6 结 论

1. 用地质统计学理论可以很好的对堆积体边坡降雨变形进行研究。采用遗传算法拟合变异函数理论模型参数, 简便可行, 解决球状模型参数拟合困难的问题, 也提供了一种新思路。

2. 构造出方向综合变异指标 O_v 来定量描述堆积体边坡的方向变异性是可行的, 分析结果与实际情况相吻合。

3. 堆积体边坡的变形是非常复杂的, 可采用时间、空间变异性函数来进行分析。通过实例分析降雨变形的结论与实际监测结果一致。

参考文献 (References)

- [1] Hu Xiaorong, Tang Chunan. The spatial variability analysis of geotechnical parameter random field and study of unit mechanical parameter assignment [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 59-63 [胡小荣, 唐春安. 岩土力学参数随机场的空间变异性分析及单元力学参数赋值研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 59-63]
- [2] Chen Hongqi, Huang Runqiu, Lin Feng. Research on the engineer-

- ing space effect of large talus slope [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 323–328 [陈红旗, 黄润秋, 林峰. 大型堆积体边坡的空间工程效应研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 323–328]
- [3] Liu Hengqiu, Hu Ruiling. Internal and external Coupling Preliminary of large and complex talus slope [J]. Engineering Geology 2008, 16(3): 291–297 [刘衡秋, 胡瑞林. 大型复杂松散堆积体形成机制的内外动力耦合作用初探[J]. 工程地质学, 2008, 16(3): 291–297]
- [4] Yang Jihong, Jin Yu, Chen Yapeng, et al. Formation Mechanism Analysis and Stability assessment of a hydropower reservoir talus slope [J]. Journal of Engineering Geology 2008, 16(3): 311–318 [杨继红, 金玉, 陈亚鹏, 等. 某水电站库区堆积体边坡的成因机制分析及稳定性评[J]. 工程地质学报, 2008, 16(3): 311–318]
- [5] Hu Xiaorong, Tang Chunan. Discrete study of Geotechnical parameters random field [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 450–455 [胡小荣, 唐春安. 岩土力学参数随机场的离散研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 450–455]
- [6] Tan Wenhui, Wang Jiachen, Zhou Rudi. Spatial variability analysis of Rock strength parameters [J]. Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 546–549 [谭文辉, 王家臣, 周汝弟. 岩体强度参数空间变异性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 546–549]
- [7] Hong Changhua, Gong Xiaonan, Zhao Liangrong. Statistical modeling of spatial variability in soil properties [J]. Journal of Zhejiang University, 2000, 34(5): 527–530 [洪昌华, 龚晓南, 赵良荣. 土性空间变异的统计模拟[J]. 浙江大学学报, 2000, 34(5): 527–530]
- [8] Wu Changfu, Zhu Xiangrong, Liu Xuemei. Variability of Hangzhou typical indicators of soil shear strength [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 94–99 [吴长富, 朱向荣, 刘雪梅. 杭州地区典型土层抗剪强度指标的变异性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 94–99]
- [9] Sun Hongquan. Geostatistics and its application [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990. [孙洪泉. 地质统计学及其应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.]
- [10] Li Minqiang, Kou Jisong, Lin Dan. The basic theory and application of genetic algorithms [M]. Beijing: Science Press, 2002. [李敏强, 寇纪松, 林丹. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.]
- [11] Ruan Yongfen, Huang Xingzhou, Li Shisheng, et al. Genetic algorithms fitting parameter of variation function [J]. Journal of Yunnan University, 2009, 31(2): 140–145 [阮永芬, 黄兴周, 李仕胜, 等. 遗传算法拟合变异函数的参数[J]. 云南大学学报, 2009, 31(2): 140–145]
- [12] Li Shisheng, Zhao Hua, Dong Zerong, et al. Warning analysis of drinking water ditch emergency reinforcement works monitoring results [J]. Hydro, 2006, 32(11): 71–74 [李仕胜, 赵华, 董泽荣, 等. 饮水沟堆积体抢险加固工程监测成果预警分析[J]. 水力发电, 2006, 32(11): 71–74]

Spatial Variations of Talus Slope under Rainfall

RUAN Yongfen¹, WANG Fei², SHEN Linfang¹, HUANG Xingzhou³, WANG Xidong¹

(1. Faculty of civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Hydrochina Kunming Engineering Corporation, Kunming 650051, China;

3. Department of Physics Baoshan College Yunnan 675800, China)

Abstract: The previous method uses the theory of spatial variation to analyze the deformation characteristic of the talus slope under the rainfall and then fit the theoretical model of variation function. But it is very difficult in this model to fit the parameters. the genetic algorithm is applied to fit the parameter of spherical model variation function, because the genetic algorithm have the advantage on seeking priorities in fully exert when use it to solves the non-linear problems. Then analyzing temporal and spatial variability of talus slope under rainfall by combining with the data of the high talus slope on the left bank in Front of Xiaowan Hydro Plant Dam in Yunnan is employed to calculate and test as an example. And the deformation characteristic of talus slope under rainfall is obtained. Finally based on spatial analysis of regional variable parameters that the directional synthetic variance index O_v are present, then using this index quantitative description the directional variation of talus slope. The result demonstrates the accuracy of the theory of analysis to talus slope temporal and spatial variability under rainfall and direction variation index. It provides a new analytical method and ideas for the deformation research of talus slope.

Key words: rainfall; parameter estimation; temporal and spatial variability; variation index; Genetic Algorithm; talus slope