

https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.617



基于饱和渗透系数空间变异结构的斜坡渗流及失稳特征

张 抒¹, 唐辉明^{1,2*}, 刘 晓¹, 谭钦文², 夏侯云山¹

1. 中国地质大学教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 以往研究一般采用单随机变量方法(SRV)或基于水平或垂直方向波动范围生成的空间变异随机场来模拟岩土参数的空间变异性,对具有倾斜定向特征的空间变异随机场未有涉及。基于条件模拟相关理论和非侵入式随机有限元的理论框架,提出了利用序贯高斯模拟方法进行斜坡参数条件随机场模拟并运用有限元方法进行斜坡渗流和稳定性分析的方法。针对理想边坡,对各向同性和几何各向异性的共 7 种空间变异结构的饱和渗透系数(K_s)各进行了 200 次条件随机场模拟,基于条件随机场模拟结果进行了有限元渗流和稳定性计算,对每种空间变异结构多次计算结果进行了统计分析。结果表明:本文所提出的方法不仅再现了研究区域参数的空间二阶统计特性,通过设定变异函数参数进行不同空间变异类型、变异程度、变异定向性的随机场模拟,同时利用现场观测数据对随机场模拟结果进行条件限制,从而提高了随机场的赋值精度; K_s 的空间变异结构对孔隙水压力的分布规律、地下水位线变化范围、稳定性系数和最危险滑动面分布特征均有一定程度的影响。本研究为库岸斜坡稳定性评价提供方法支撑。

关键词: 空间变异结构;条件随机场;序贯高斯模拟;非侵入式随机有限元;饱和渗透系数;工程地质。

中图分类号: P642.22

文章编号: 1000-2383(2018)02-0622-13

收稿日期: 2017-12-16

Seepage and Instability Characteristics of Slope Based on Spatial Variation Structure of Saturated Hydraulic Conductivity

Zhang Shu¹, Tang Huiming^{1,2*}, Liu Xiao¹, Tan Qinwen², Xiahou Yunshan¹

1. Three Gorges Research Center for Geo-hazard of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In the previous studies, the spatial variability of geotechnical parameters was simulated based on single random variable approach (SRV) or random field approach (RF) according to the horizontal or vertical fluctuation range. The spatial variable conditional random field with slant directional characteristics was not involved. Based on the conditional modelling theory and the framework of non-intrusive stochastic finite element method, an original method has been proposed to study the slope seepage and instability characteristics considering spatial variation structure of K_s . This method firstly simulates the conditional random fields of slope parameters taking advantage of sequential Gaussian simulation method (SGS). The K_s random field realizations of a hypothetic slope has been generated in terms of seven different spatial variation structures repeatedly for 200 times. The considered scenarios involved isotropic structure with various ranges (a) and geometric anisotropic structure with various maximum correlation orientations. Seepage and stability analysis was then performed repeatedly according to the assignment random field using finite element method (FEM). According to the FEM analysis results, statistical analysis was then carried

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos.41230637;41572279;41502290);中国博士后科学基金(No.2016M592411);中央高校基本科研业务费专项资金(No.CUG160841)。

作者简介: 张抒(1985-),女,助理研究员,博士,主要从事岩土体不确定性及边坡稳定性的研究。ORCID:0000-0001-5448-4336。E-mail:suzy923@foxmail.com

* 通讯作者: 唐辉明, ORCID:0000-0002-0385-8155。E-mail:tanghm@cug.edu.cn

引用格式: 张抒,唐辉明,刘晓,等,2018.基于饱和渗透系数空间变异结构的斜坡渗流及失稳特征.地球科学,43(2):622-634.

out to find the seepage and instability characteristic of the considering seven spatial variation scenarios. The results, on the one hand, show that the proposed method has the priority of reproducing the second-order spatial statistical characteristic of parameters within the study area by the means of changing the variogram parameters to simulate random fields with different spatial variation types, degrees and orientations. The uncertainty of the random field value assignment adjacent to the measurement locations is also much reduced due to the constraints of field measurements. On the other hand, the results show that the spatial variation structure of K_s has a certain impact on pore-water pressure distribution, phreatic line variation bound, factor of safety and most critical slip surface distribution. This research provides methodology support for reservoir slope stability evaluation.

Key words: spatial variation structure; conditional random field; sequential Gaussian simulation; non-intrusive stochastic finite element method; saturated hydraulic conductivity; engineering geology.

0 引言

由于物质组成、沉积条件、构造运动及内外动力地质作用等因素的影响,大部分工程岩土体为非均质体(葛云峰等,2016),其物理力学参数具有很强的空间变异性(Rahardjo *et al.*, 1995, 2012).这种空间变异性具有随机性和结构性的二重特征(张征等,1996),结构性即参数的空间变异结构的内涵,包括空间变异的类型(各向同性或各向异性)、程度和定向性等.

目前,国内外学者在斜坡稳定性分析中模拟岩土体参数的不确定性主要采用两类方法.第一类是单随机变量方法(single random variable approach, SRV),这类方法通过一个单随机变量隐性地模拟岩土参数的不确定性,整个研究区域的岩土体被赋予一个通过岩土参数概率分布确定的随机参数值.常用的可靠度分析方法,如一阶可靠度法(Cho, 2007; Low *et al.*, 2007)、二阶可靠度法(der Kiureghian *et al.*, 1987)、蒙特卡洛模拟方法(Ching *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011)、响应面分析方法(Ji and Low, 2012; Zhang *et al.*, 2013)等一般都采用这类方法.然而,SRV方法没有考虑参数的空间变异的结构性,不仅造成单元体参数赋值随意性较大(胡小荣, 2002),而且在分析过程中通常需要指定滑动面,无法根据参数的空间分布搜索出最危险滑动面(Griffiths *et al.*, 2009).第二类是随机场方法(random field approach, RF),即通过随机场理论(Vanmarcke, 1984)显性地模拟研究区域土性参数的空间相关特征,因而岩土体参数在空间上有所区别.基于RF方法的随机有限元(差分)方法近年来取得了较大发展(Griffiths and Fenton, 2004; Griffiths *et al.*, 2009; 谭晓慧等, 2009; 李典庆等, 2013; 蒋水华等, 2013; 祁小辉等, 2013; Jiang *et al.*, 2014; Kasama and Whittle, 2015).这些方法生成的随机场中,岩土参数的空间变异结构通过波动范围(也称相关距离)来描述,在波动范围内土体性质相互关联.目前对各向

同性的随机场研究较多,祁小辉等(2013)和 Zhu *et al.*(2013)亦通过设定水平和垂直方向的波动范围来重现岩土参数的各向异性空间变异结构.然而这种随机场生成方法对于具有定向性的各向异性随机场存在局限,且忽视了研究区域场地(钻孔)观测数据,造成了对具体场地岩土参数空间变异性的过高估计(Li *et al.*, 2017).针对以上问题,有学者尝试通过随机场理论描述地质结构的各向异性(Zhu and Zhang, 2013),也有学者将现场监测数据作为约束条件,运用条件随机场描述地质结构的各向异性(胡小荣, 2002; Li *et al.*, 2017).Liu *et al.*(2017)对比了考虑强度参数条件随机场与非条件随机场的斜坡稳定性计算结果,认为考虑条件随机场的模拟偏差更小,最危险滑动面的变化范围也更小.

工程斜坡中的土体渗透系数对斜坡降雨入渗过程和失稳破坏都具有重要影响(Rahardjo *et al.*, 1995; Zhang *et al.*, 2011; 唐扬等, 2017),通常表现为强变异性(Benson *et al.*, 1999).学者们针对渗透系数空间变异性对斜坡失稳的影响进行了一些研究,如 Srivastava *et al.*(2010)、Zhu *et al.*(2013)、Cho(2014)、Dou *et al.*(2015)和 Cai *et al.*(2016)研究了饱和渗透系数空间变异性对斜坡渗流过程和破坏模式的影响,但这些研究一般采用SRV方法或者基于水平和垂直方向波动范围生成空间变异随机场来模拟岩土参数的空间变异性,对具有倾斜定向特征的空间变异随机场及条件随机场均未涉及.

针对目前研究现状,本文的研究目标为:(1)提出一种基于高斯序列条件模拟随机场的非侵入式随机有限元分析方法,首先依据参数空间变异结构对研究区域内不同变异类型、变异程度和变异定向特征的岩土参数进行条件随机场模拟,然后将条件随机场与现有有限元软件相结合进行分析;(2)依据上述方法研究土体饱和渗透系数不同空间变异结构对斜坡降雨渗流特征、稳定性和变形破坏形式的影响.

1 基于半变异函数的空间变异结构

1.1 协方差函数与变异函数

协方差函数和变异函数是进行地质统计学条件随机场模拟的基础(刘爱利等,2012;刘双等,2014). $Z(x)$ 为区域化随机变量, $Z(x)$ 的协方差函数为 x 和 $(x+h)$ (h 为两样本点间距的向量)处的随机变量 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$ 的二阶混合中心距,记为 $C(x, x+h)$;半变异函数为 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$ 差的方差的一半,记为 $\gamma(x, x+h)$.假设 $Z(x)$ 满足(准)二阶平稳假设,即 $Z(x)$ 的空间分布规律不因位移而改变,协方差函数和变异函数仅仅依赖于距离 h 而与位置 x 无关时, $C(x, x+h)$ 和 $\gamma(x, x+h)$ 可分别表示为:

$$C(x, x+h) = C(h) = \frac{1}{N(h)} \cdot \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - \bar{Z}(x_i)] [Z(x_i+h) - \bar{Z}(x_i+h)], \quad (1)$$

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

其中: $Z(x_i)$ 、 $Z(x_i+h)$ 分别为 $Z(x)$ 在空间点 x_i 处、 x_i+h 处的样本值 [$i=1, 2, \dots, N(h)$]; $N(h)$ 为分隔变量为 h 时的样本对数; $\bar{Z}(x_i)$ 和 $\bar{Z}(x_i+h)$ 分别为 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 的样本平均数.

因此,协方差函数和变异函数可作为一个距离的函数,半变异值随着距离增大而增大,协方差随着距离增大而减小(图 1).在图 1 中有 2 个非常重要的点,距离为 0 时的点和半变异函数趋近平稳时的拐点,由这 2 个点产生 3 个相应的参数:变程(a)、基台值(C)、块金值(C_0).其中, a 表示了在某观测尺度下空间相关性的作用范围,即类似于随机场中相关距离的概念;在变程范围内,样点间的距离越小空间相关性越大,当两点间距离 $|h| \geq a$ 时, $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$ 间不再具有空间相关性.变异函数与协方差函数之间的近似关系表达式为 $C(h) = C(0) - \gamma(h)$.

1.2 空间变异结构

不同方向上的 $\gamma(h)$ 能反映出 $Z(x)$ 的空间变异结构性(刘爱利等,2012),变程方向图可显示变程随各个方向的变化.如图 2 所示,变程方向图为一包围原点的光滑曲线,其上每一点到原点的距离代表以原点为起点、以该点为终点方向上的变异函数

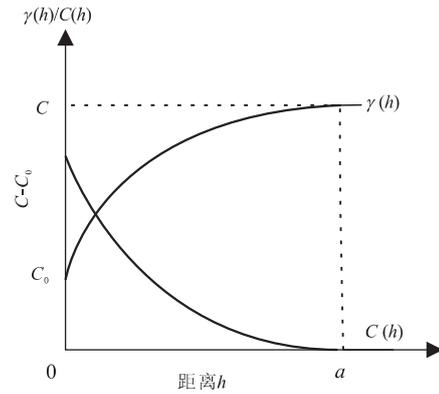


图 1 典型的半变异函数与协方差函数

Fig.1 Representative diagrams of semi-variogram and covariance

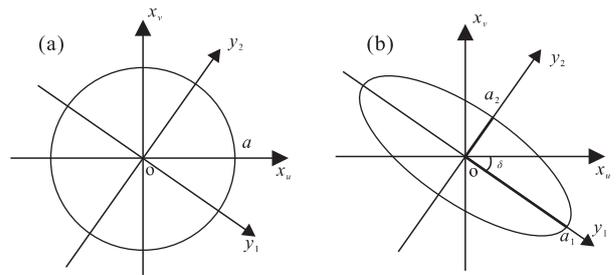


图 2 变程方向

Fig.2 Range directional diagrams

a.各向同性;b.几何各向异性

理论模型的变程.当变程方向图为近似于半径为 a 的圆形(图 2a)时,表示 $Z(x)$ 的空间变异类型为各向同性、变异程度为 a ;当变程方向图近似为一个椭圆,表示 $Z(x)$ 的空间变异结构为几何各向异性(图 2b),简称几何异性.其中,椭圆短轴方向是空间变量变化最剧烈的方向,长轴方向是变化最缓慢的方向,即空间相关主方向;空间相关主方向与 x 轴的夹角 δ 表示空间变异的定向性;各向异性比 k (椭圆长轴 a_1 /短轴 a_2)表示几何异性的变异差异性程度.当变程方向图不能被二次曲线拟合时指示 $Z(x)$ 为带状各向异性,但由于运算的复杂性,本文暂不作讨论.

将几何异性结构变程方向图上不同方向的变程进行线性变换,再乘以各向异性比,便可将其转化为各向同性结构进行运算.设 h 为二维空间的任一向量,其原始坐标为 (h_u, h_v) ,变换后的坐标为 (h'_u, h'_v) : $(h'_u, h'_v) =$

$$\begin{bmatrix} \cos^2 \delta + k \sin^2 \delta & (1-k) \sin \delta \cos \delta \\ (1-k) \sin \delta \cos \delta & \sin^2 \delta + k \cos^2 \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_u \\ h_v \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\gamma(h_u, h_v) = \gamma'(\sqrt{h'^2_u + h'^2_v}), \quad (4)$$

其中, γ' 为各向同性的变异函数.

2 序贯高斯条件模拟随机场生成

条件模拟是地质统计学中一个重要的随机模拟手段,该方法可提供多个可选的模拟结果,不仅要求实测点处的变量值与模拟值保持一致,同时保持了变量的空间变异性,提高了单元赋值的精确性(Chilès and Delfiner, 1999);与传统根据波动范围的随机场模拟方法相比,在理论和应用上都有其优越性.这种方法在矿藏开发、水文地质、生态环境等领域应用较为广泛,在岩土工程领域涉及相对较少.

2.1 序贯高斯条件模拟随机场生成方法

本文采用序贯高斯模拟方法进行条件随机场的模拟,其中,序贯的方式是指对未知点进行逐点模拟,在模拟过程通过建立局部累计条件概率分布(ccdf)来实现最终结果.以图 3 模型为例,矩形区域为研究对象,红色单元数据为现场实测硬数据,具体模拟步骤如图 4 所示.

(1)确定研究的参数对象,读取已知点位硬数据,保证模拟的区域化变量满足正态分布.如渗透系数一般被认为呈对数正态分布(Santos *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2013; Cho, 2014),需对其进行正态变换.

(2)将研究区域离散化为网格系统,依据创建的随机模拟路径序贯地读取路径上的单元网格节点,每个网格节点处随机变量是服从条件化的正态分布,网格节点值完全由均值和方差 2 个参数确定.

(3)依据协方差或者变异函数表达的克里格方程进行求解计算该结点处的均值和方差,确定该结点处变量的正态分布,采用相应的抽样方法得到该结点处的一个样本.求解克里格方程组时的条件数据包括原始硬数据和先前模拟的数据.

(4)采用步骤(2)、(3)对研究区域内的所有需要模拟的网格进行模拟,得到条件随机场的一次实现.如步骤(1)中进行过正态变换,则将随机场数据进行正态逆变换.

(5)将以步骤(2)~(4)进行 n 次,即可获得研究区域条件随机场的 n 次实现.

(6)根据模型轮廓线对条件随机场中轮廓线外的单元进行去除,即可获得计算模型条件随机场.如图 3 模型中将坡面连线上部的单元(蓝色单元)去除,即可获得如图斜坡的条件随机场.

序贯高斯条件模拟过程中需预设的数据有空间观测点的硬数据、空间变异结构参数即各方向半变异函数、均值和方差.以上过程采用开放软件包 Stanford Geostatistical Modeling Software (SGeMS)(Remy *et al.*, 2009)实现.

2.2 序贯高斯条件模拟随机场模拟结果

本文对图 3 所示模型进行序贯高斯条件随机场模拟.采用的半变异函数为块金值为 0 的标准球状模型,表示为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0; \\ \frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{a^3}, & 0 < h \leq a; \\ 1, & h > a. \end{cases} \quad (5)$$

此处引入了归一化变程 a_n (定义为变程与坡高的比值,即 $a_n = a/H$) 表示斜坡相关参数的空间变异程度.本文模拟了各向同性和几何异性 2 种不同空间变异类型共 7 种空间变异结构的参数条件随机场,如图 5 所示,图中左边所示为归一化变程方向图,右边为随机场模拟结果.其中,各向同性结构(a~c)模拟了 3 个不同的 a_n 值,分别为 0.5、5 和

271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300
241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270
211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

图 3 斜坡随机场模拟示意图
Fig.3 Simulated random field diagram of slope
图中数字编号为 SGeMS 系统给每个单元分配的序号

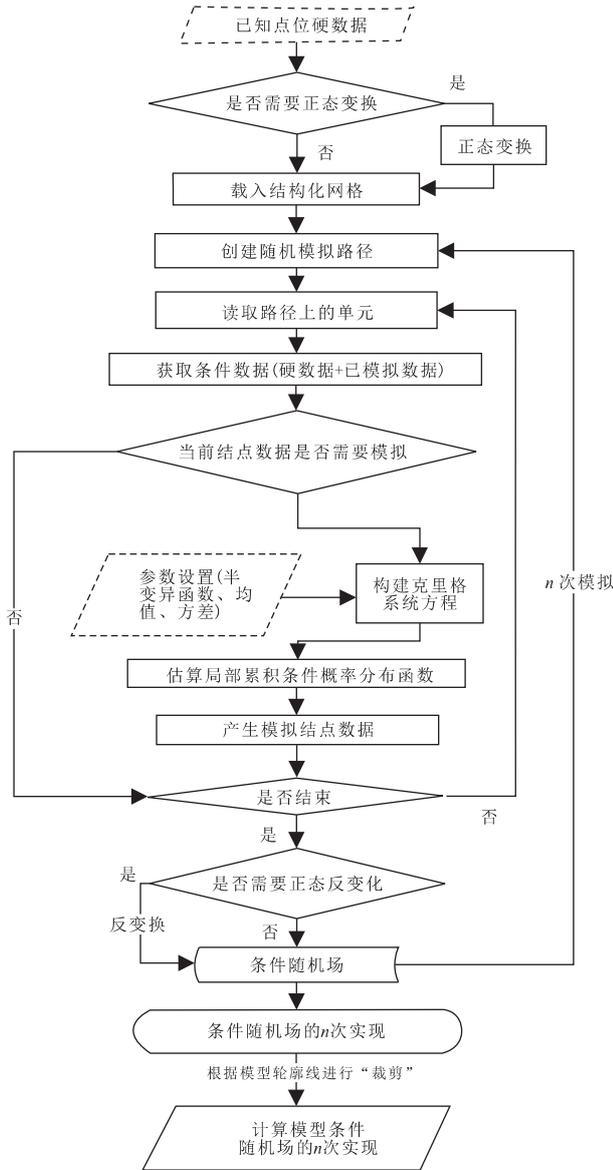


图 4 序贯高斯模拟条件随机场流程

Fig.4 Flow chart of sequential Gaussian conditional random field simulation

10;几何异性结构(d~g)模拟了 $a_{n1} = 5$ (a_{n1} 为归一化变程方向图的椭圆长轴), $k = 10$, 空间变异主方向(δ)分别为垂直、与坡面平行、与坡面相交和水平的 4 种情况。

因此,对于坡高为 H 、坡角为 β 的斜坡,对于 $h' \in [0, a_n H]$ 区间内任意一点 $h(h_u, h_v)$, 变异函数可用以下式表示:

$$\gamma(h_u, h_v) = \frac{3}{2} \cdot \frac{h'}{a_n H} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h'}{a_n H}\right)^3, \quad (6)$$

其中: 各向同性参数变异类型中, $h' = \sqrt{h_u^2 + h_v^2}$; 几何异性参数变异类型中,

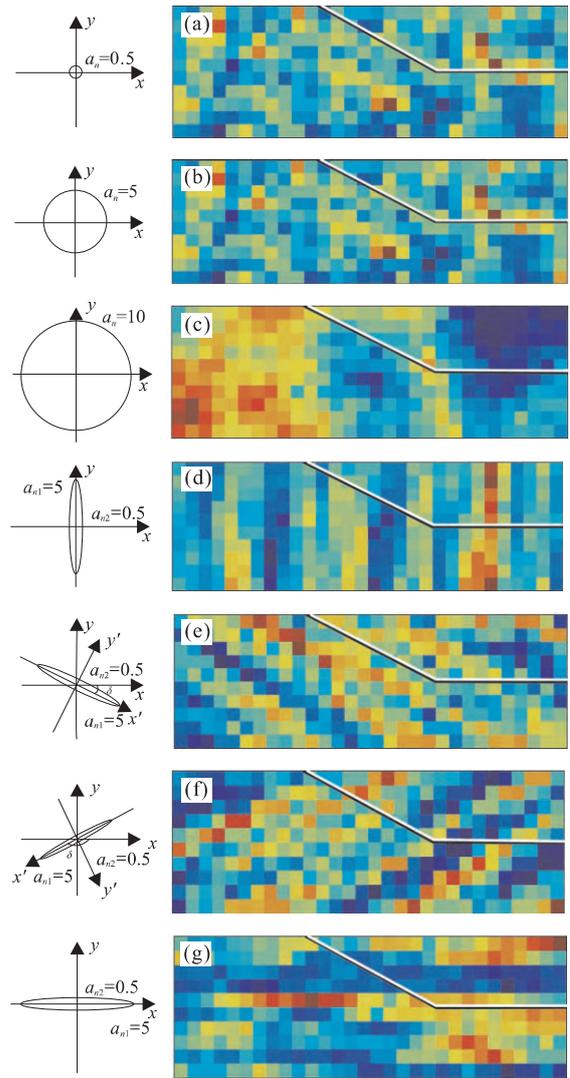


图 5 不同空间变异结构的土性参数随机场模型

Fig.5 Random field of parameters with different spatial variation structure

a.各向同性; b.各向同性; c.各向同性; d.几何异性, $\delta = 90^\circ$; e.几何异性, $\delta = \beta$; f.几何异性, $\delta = 180^\circ - \beta$; g.几何异性, $\delta = 0^\circ$

情况 d: $h' = \sqrt{(kh_u)^2 + h_v^2}$,

情况 e:

$$h' = \{h_u^2 [\cos^4 \beta + k^2 \sin^4 \beta + (1+k^2) \sin^2 \beta \cos^2 \beta] + h_v^2 [k^2 \cos^4 \beta + \sin^4 \beta + (1+k^2) \sin^2 \beta \cos^2 \beta] + h_u h_v [(1-k^2) \sin 2\beta]\}^{1/2},$$

情况 f:

$$h' = \{h_u^2 [\cos^4 \beta + k^2 \sin^4 \beta + (1+k^2) \sin^2 \beta \cos^2 \beta] + h_v^2 [k^2 \cos^4 \beta + \sin^4 \beta + (1+k^2) \sin^2 \beta \cos^2 \beta] + h_u h_v [(k^2 - 1) \sin 2\beta]\}^{1/2},$$

情况 g: $h' = \sqrt{h_u^2 + (kh_v)^2}$.

随机场模拟结果中每个单元被赋予了不同的参数, 红色表示的岩土参数值较大, 蓝色表示的岩土参

数值较小.需要指出的是,图中的颜色仅用于示出相对值,各变异结构之间的显色并不具比较性.图 5 显示,各向同性结构类型中,参数呈块状分布, a_n 越大参数相似的团块越大;几何异性结构类型中,土性参数呈条带状分布,4 种结构类型分别类似竖向坡、顺向坡、逆向坡和横向坡.

3 斜坡渗流及失稳特征非侵入式随机分析方法

一般意义上的随机有限元,如 Taylor 展开法随机有限元和摄动法随机有限元实质为侵入式的随机有限元,即通过直接改动有限元控制方程中的控制量,如刚度矩阵来实现随机变量的有限元分析(Griffiths and Fenton, 2004; Griffiths *et al.*, 2009; 谭晓慧等, 2009).这种方法在编程上较为复杂,且计算精度对随机变量的变异系数较为敏感(秦权等, 2006).与此不同,非侵入式随机分析方法的基本思想是随机场生成过程与确定性分析分开单独进行,互不耦合,在进行随机分析时只需要直接调用通用有限元程序,将其视为黑箱,无需对其进行修改,从而实现了确定性分析和随机分析一体化(蒋水华等, 2013; 李典庆等, 2013; 祁小辉等, 2013).其中,蒙特卡洛随机有限元法是常见的一种非侵入随机有限元的实现方式,是最直观、最精确、对非线性问题最有效的计算统计方法,在一定程度上提高了随机分析结果的可信度(秦权等, 2006).本文采用非侵入式随机分析方法进行考虑土性参数空间变异结构的斜坡渗流过程分析.

3.1 非侵入式随机有限元分析方法

本文基于非侵入式随机分析方法的原理,实现了二维条件模拟随机场与 GEO-SLOPE/W (GEO-SLOPE International Ltd.)、SLOPE/W (GEO-SLOPE International Ltd.) 模块有限元分析及稳定性计算一体化,主要步骤如图 6 所示.

(1) 建立计算模型.利用岩土工程分析软件 GEOSTUDIO 中的 SEEP/W 模块建立斜坡渗流有限元计算模型.该部分包括模型建立、结构化网格划分、定义材料属性、设定边界条件等步骤.注意结构化网格与条件模拟网格尺寸的一致性,且在定义不确定性材料时根据需求精度确定材料属性数,作为赋值依据.最后将建立的模型文件另存为扩展名为 xml 的接口源文件.

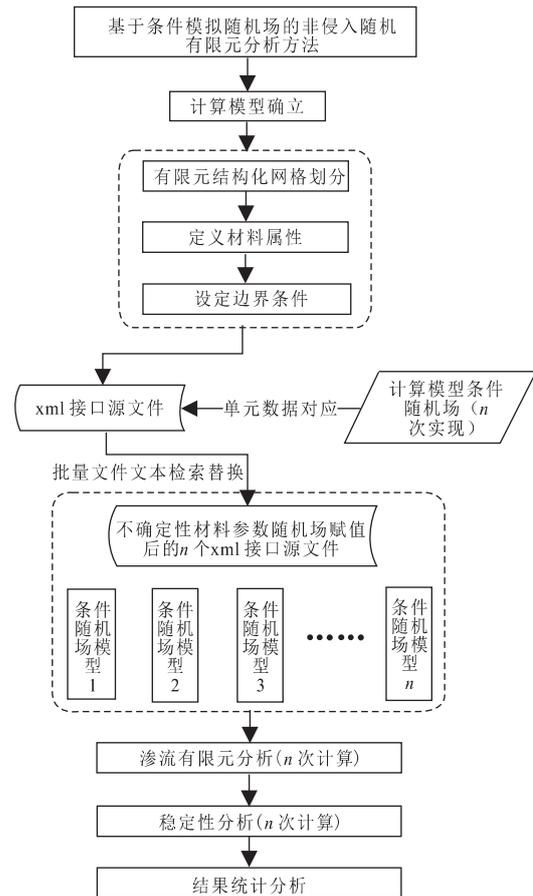


图 6 基于条件随机场的非侵入式随机有限元分析方法流程

Fig.6 Flow chart of non-intrusive finite element analysis method based on conditional random field simulation

(2) 建立新的输入计算文件.基于 2.1 节中所述方法生成计算模型参数随机场的 n 组数据,将有限元模型中的单元序号与随机场模型的单元序号进行一一对应,编写批处理代码将(1)中的 xml 接口源文件中关于不确定性参数赋值部分的语句替换为依据随机场数据进行赋值的语句,从而实现有限元计算模型随机场赋值,得到 n 个新的 xml 输入源文件.

(3) 批量计算.利用批处理软件对上述步骤生成的 n 个输入 xml 源文件导入 SEEP/W 进行渗流有限元分析,得到相应的计算结果文件;将得到的孔隙水压力结果导入到 SLOPE/W 进行稳定性计算.

(4) 提取结果并统计分析.利用批处理软件提取每个相关结构类型每组随机场模型计算的孔隙水压力分布结果、地下水位线、稳定性系数和最危险滑动面的坐标信息,进行统计分析,总结规律.

3.2 斜坡渗流特征及稳定性确定性分析

本文拟解决考虑 K_s 空间变异结构的渗流问

题,故进行二维稳定流分析.根据达西定理,控制方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} &= 0 \\ q &= -K \nabla h \\ h &= \Psi + y \end{aligned} \quad (7)$$

其中: q 为流量, K 为非饱和渗透系数, h 为总水头, Ψ 为压力水头, y 为位势水头.

求解控制方程需确定斜坡土体的水力特征函数.本文根据给定的土体颗粒分曲线,对土体的土水特征曲线进行估算,此处不作赘述.然后,采用 Leong and Rahardjo(1997)提出的指数方程(式(8))对土体的非饱和渗透系数函数进行确定:

$$K = K_s \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^p, \quad (8)$$

其中: θ_w 为体积含水率, θ_s 为饱和体积含水率, θ_r 为残余体积含水率; p 是与土体类型有关的常数(Ta-mi *et al.*, 2004),此处取 3.

由式(8)可知,在其他土性参数不变的情况下,渗透函数的空间变异性取决于 K_s 的空间变异性.给定 K_s ,即可估算出土体的渗透函数.

孔隙水压力影响着土体的有效抗剪强度,从而影响斜坡稳定性.本文采用改进的库伦-摩尔判据(式(9))进行斜坡稳定性的确定性分析(Vanapalli *et al.*, 1996):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b, \quad (9)$$

其中: τ 为抗剪强度, c' 和 φ' 为有效黏聚力和内摩擦角, u_a 为孔隙气压力, u_w 为孔隙水压力, φ^b 为剪胀角且 $\tan \varphi^b = \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi'$.

基于极限平衡理论,采用 Morgenstern-Price 法对斜坡的稳定性计算,并搜索出最危险的滑动面,用于统计分析.

4 算例模型建立

本文选取一高为 50 m,坡比为 1:2 的均质土坡作为计算模型(图 7).为模拟库岸滑坡降雨条件下的渗流和变形破坏,笔者在斜坡右侧(FHE)设置定水头 $h_1 = 60$ m,左侧(AGB)设置定水头 $h_2 = 80$ m; AFH 为降雨边界,垂直降雨量为 q ; 两侧边界和地面视为不透水边界.为研究斜坡在降雨条件下水库滑坡的渗流特征,笔者分别在坡顶和坡面设置了 2

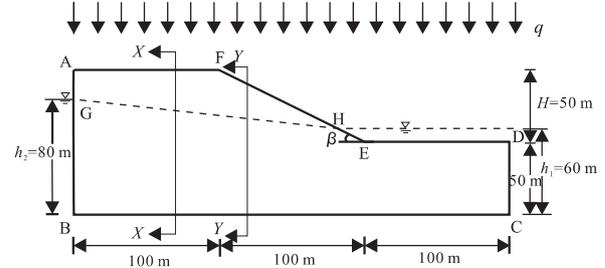


图 7 理想土坡算例及边界条件

Fig.7 Hypothetic slope study case and boundary condition

表 1 理想斜坡计算模型参数

Table 1 Parameters for the hypothetic slope study cases

参数(单位)	值
坡高 H (m)	50
坡角 β ($^\circ$)	27
垂直降雨量 q (m/s)	5×10^{-7}
饱和渗透系数 K_s 均值(m/s)	5×10^{-5}
有效粘聚力 c' 均值(kPa)	12
有效内摩擦角 ϕ' 均值($^\circ$)	26
K_{sA} (m/s)	8×10^{-5}
K_{sF} (m/s)	5×10^{-5}
K_{sE} (m/s)	3×10^{-5}
K_{sD} (m/s)	4×10^{-5}

注: K_{sA} 、 K_{sF} 、 K_{sE} 和 K_{sD} 分别代表 A、F、E 和 D 处的 K_s .

个监测剖面(XX 和 YY),对孔隙水压力进行监测.

算例涉及的相关参数如表 1 所示.其中,为研究渗透系数不同空间相关结构对斜坡渗流特征的影响,将抗剪强度参数设为确定值,仅模拟 K_s 的随机场.算例模型的土体为三峡库区典型堆积层滑坡中滑体部分崩塌积层的粉质粘土夹碎石,综合参考相关资料(简文星等, 2013; 胡新丽等, 2014; Wang *et al.*, 2015),对计算模型参数进行赋值.设定 K_s 的均值为 5×10^{-5} m/s,变异系数为 50%,其中,模型 A、F、E 和 D 处的 K_s 具有观测数据.在进行 K_s 随机场模拟时,假设 K_s 符合对数正态分布,即 $\ln K_s$ 符合正态分布,对 $\ln K_s$ 进行条件随机场模拟,再进行逆变换.

5 结果与讨论

5.1 孔隙水压力分布特征

理论上说,模拟次数越大,进行确定性分析所得的统计结果越有说服力.根据 Zhu *et al.*(2013)对模拟次数与稳定性系数平均值关系的分析,本文对前文提及的 7 种空间相关结构进行 200 次的 K_s 条件模拟,并进行渗流分析.

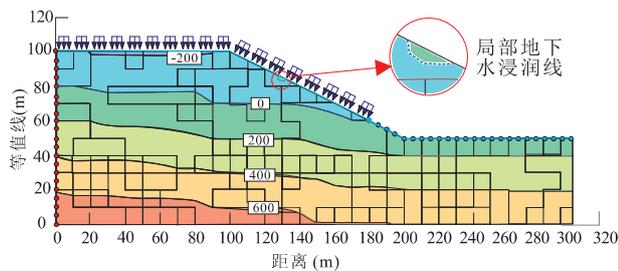


图 8 K_s 空间变异结构 b 的渗流模拟结果

Fig.8 Seepage simulation result of a representative realization (spatial variation structure b)

图中数字表示孔隙水压力(kPa)

其中,空间变异结构 b 一个随机场实现的渗流模拟结果如图 8 所示.可以看出,与一般的渗流分析不同,由于渗透系数的空间变异分布,地下水浸润线及孔隙水压力等值线均呈折线.此外,在坡体表面局部地区出现地下水浸润线,这与实际工程中的上层滞水相类似.而实际上,本文设置的降雨量 q 远小于斜坡土体的平均饱和渗透系数,一般这种情况下潜水面以上逐渐饱和,不会形成坡表积水.因此,渗透系数的空间变异性对斜坡的渗流特征影响很大.

为研究 K_s 空间变异结构对孔隙水压力渗流特征的影响,本文对每个 K_s 空间变异结构情况 XX 和 YY 剖面上不同深度的孔隙水压力进行分析.笔者整理数据后发现,相同空间变异结构相同深度的孔隙水压力值分布不均匀,比较离散,因此,若采用常用的期望值作为统计指标难以反映数据的统计规律.为了描述多次计算结果的总体特征,本文选取每个空间变异结构所有实现中监测坡面不同高度上的孔隙水压力中位数作为统计指标,与确定性分析结果进行对比研究(图 9,10).由于考虑的空间变异结构情况较多,故将其分为各向同性与几何异性 2 类

空间变异类型分别进行对比.同时,由于本文的关注点在坡体的渗流特征,故只取高程 50 m 以上的斜坡部分进行对比分析.

结果表明, K_s 各向同性的变异类型中,在坡顶产生了比确定性分析更大的负孔隙水压力,且不同变程之间的结果差异不大;坡面的中位数分析结果与确定性分析结果差异不明显,但总体上随着 K_s 变程的增大,负孔隙水压力减小.Zhu *et al.*(2013)基于各向同性随机场进行了类似的研究,结果与本文相同,且认为当波动范围达到 100 倍的坡高时,坡体参数达到完美相关,所获得的孔隙水压力剖面不再变化.

K_s 几何异性的变异结构中,在坡顶产生了比确定性分析更大的负孔隙水压力,坡面上规律不明显;而且孔隙水压力剖面曲线显得更为曲折,尤其是 f 和 g 变异结构类型.原因在于这 2 种结构类型在坡体表面产生相对独立的隔水层或者含水层的可能性较大,使得统计值离散性增大.同时值得注意的是,在坡面和坡顶处,空间变异结构类型 d 与其他结构类型相比产生的负孔隙水压力最小.这种类似于竖向坡的结构在竖直方向上的监测结果类似于各向同性类型下变程很大的情况,与前面的分析结果吻合.

本文还采用了负孔隙水压力四分位距 (Inter Quartile Range, 简称为 IQR)作为另一个指标来探讨渗透系数不同空间变异结构对斜坡渗流特征的影响.IQR 由斜坡表面 (XX、YY 剖面顶部) 负孔隙水压力较小四分位数 Q_1 与较大四分位数 Q_3 之间的差值、即坡面每个空间变异结构所有实现的孔隙水压力值由小到大排列后分别排第 25% 和 75% 的数字之间的差值计算确定.IQR 可用于表征每种空间相关结构类型孔隙水压力的变化范围,反映了斜坡表面基质吸力的不确定性范围.如表 2 所示,考虑

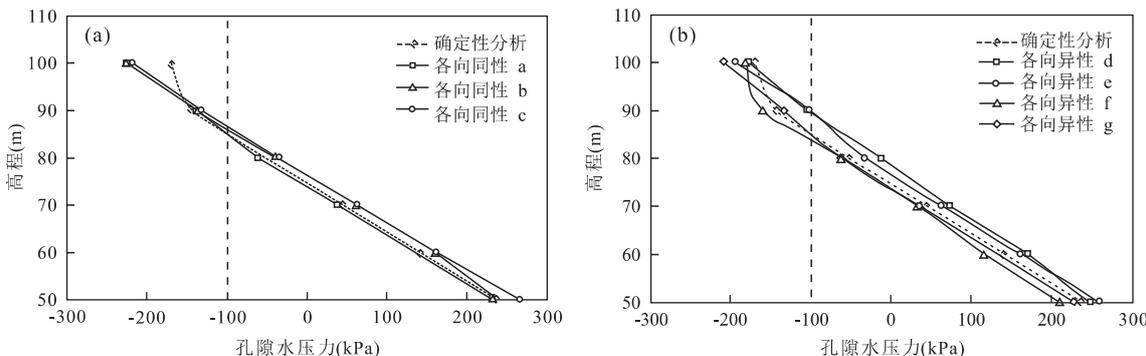


图 9 XX 孔隙水压力中位数剖面

Fig.9 Median value of pore water pressure along section XX

a.各向同性情况与确定性分析;b.几何异性情况与确定性分析

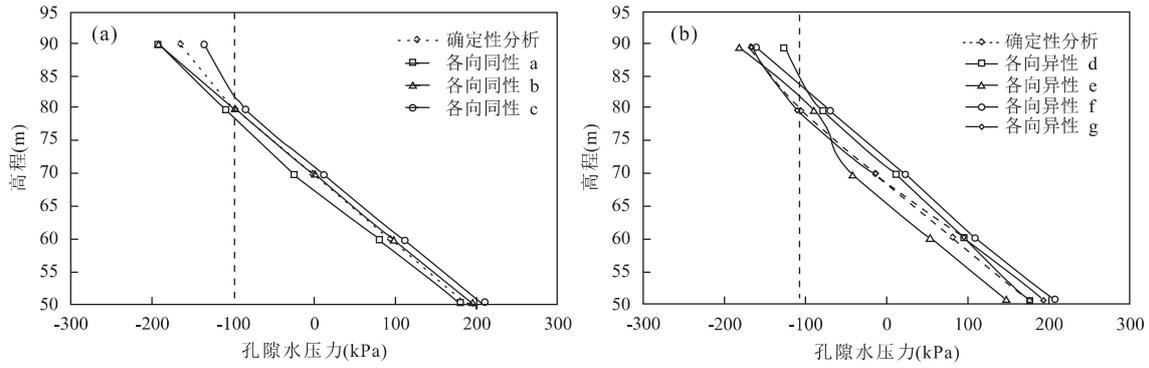


图 10 YY 孔隙水压力中位数剖面

Fig.10 Median value of pore water pressure profiles along section YY

a.各向同性情况与确定性分析;b.几何异性情况与确定性分析

表 2 负孔隙水压力界限值

Table 2 Inter quartile range values of negative pore water pressure

IQR(kPa)	各向同性类型			几何异性类型			
	a	b	c	d	e	f	g
XX	15.29	20.77	37.58	31.00	29.09	22.62	86.21
YY	17.30	20.38	44.25	31.30	84.10	53.40	55.58

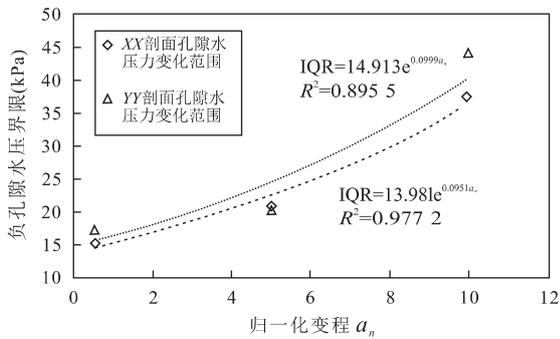


图 11 负孔隙水压力界限与归一化变程相关关系

Fig.11 Correlation between bound of negative pore water pressure and normalized range

K_s 空间变异性的计算结果产生了 15~86 kPa 的负孔隙水压力变化范围。 K_s 各向同性的相关结构中, 不论是坡顶还是坡面, 随着变程的增大负孔隙水压力的变化范围呈指数关系增大(图 11)。与之相比, 各向异性的相关结构产生负孔隙水压力变化范围都比相同变程各向同性类型 b 的大。其中, 坡顶和坡面的最大变化范围分别出现在类型 g 和 e, 均为与表面平行的情况。这表明层状分布的 K_s 相对低值单元构成了相对隔水层, 阻止了降雨入渗过程, 从而使得模拟结果产生较大的不确定性。

5.2 地下水位变化范围

本文针对不同空间变异结构的地下水位变化范

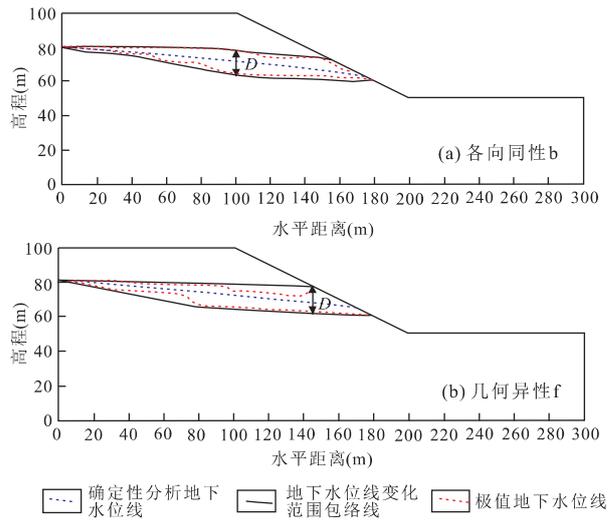


图 12 地下水位变化范围

Fig.12 Bounds of groundwater table

表 3 地下水位变化范围 D

Table 3 Bounds of groundwater table D

参数	各向同性			各向异性			
	a	b	c	d	e	f	g
D(m)	12.61	14.73	18.75	19.15	17.60	15.07	14.93

围进行了一定的探讨。图 12 列出了各向同性 b 和各向异性 f 两个空间变异结构的计算结果, 其中, 蓝色虚线是确定性分析的地下水位线; 红色虚线是模拟的所有实现中地下水位线最高和最低的情况, 与确定性分析不同, 呈弯弯曲曲的折线; 黑色实线是根据所有实现的模拟结果绘制的包络线, 用上下两条包络线之间的最大距离 D 来表示地下水位的波动范围。各变异结构的地下水位波动范围均达十多米(表 3), 对于高度仅为 50 m 的边坡而言, 是相当可观的。因此, 渗透系数的空间变异结构对斜坡的稳定性的

影响不容忽视.与此同时,各向同性的变异类型中,随着 a_n 的增大地下水位的变化范围相应增大,主要表现为最高地下水位的抬升,且 a_n 与 D 呈线性相关(图 13).当 a_n 大于 10 时与 D 的相关关系需进一步探讨.几何异性的变异类型中,地下水位的变化范围比各向同性的情况下大,表明几何异性产生的不确定性强于各向同性.

除此之外,可以观察到为数不少的计算结果中,尤其是各向异性的情况更容易出现局部地下水浸润线(图 8),这种情况与 Cai *et al.* (2016) 的研究结果相同.

5.3 稳定性系数变化特征

根据输入不同空间变异结构的渗透系数随机场模拟计算获取的孔隙水压力,保持有效抗剪强度参数不变,笔者采用 Morgenstern-Price 法进行稳定性分析;对每个变异结构的所有稳定性系数 (F_s) 计算结构求均值,与确定性分析的 F_s 结果进行对比(图 14). F_s 均值的变化范围为 1.03~1.15,与确定性分析结果(1.125)相比差距不大.各向同性的变异类型中,随着变程的增大, F_s 在一定程度上有所减小.根据 5.2 节的分析,变程越小地下水位的变化范围也相应减小,模拟的地下水位与确定性分析值相近,因此计算的 F_s 与确定性分析结果相近.随着变程的增大,地下水位的波动范围增大,地下水位的抬升引起 F_s 减小,从而使 F_s 平均值也相应减小.几何异性的变异类型中,规律不甚明显.但是大多数变异结构 F_s 的计算结果要小于确定性分析结果,因此,忽略斜坡土体渗透系数的空间变异性进行稳定性计算可能造成对 F_s 的过高估计.

5.4 最危险滑动面空间分布特征

最危险滑动面反映了斜坡最易发生的变形破坏模式(Zhang and Huang, 2016),因此本文研究了渗

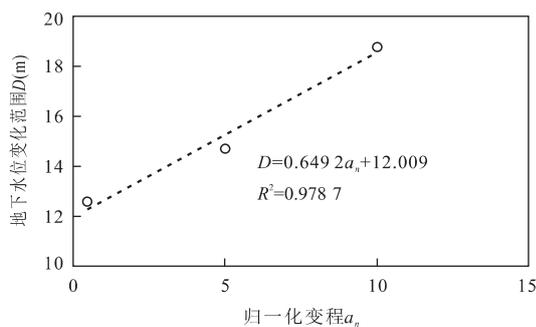


图 13 地下水位变化范围与归一化变程相关关系
Fig.13 Correlation between bound of groundwater table and normalized range

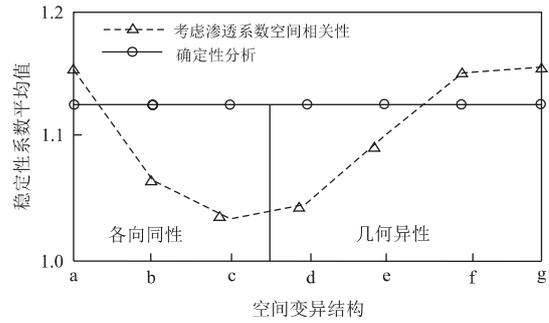


图 14 不同渗透系数空间变异结构的稳定性系数平均值

Fig.14 Mean value of stability coefficient under various spatial variation cases of K_s .

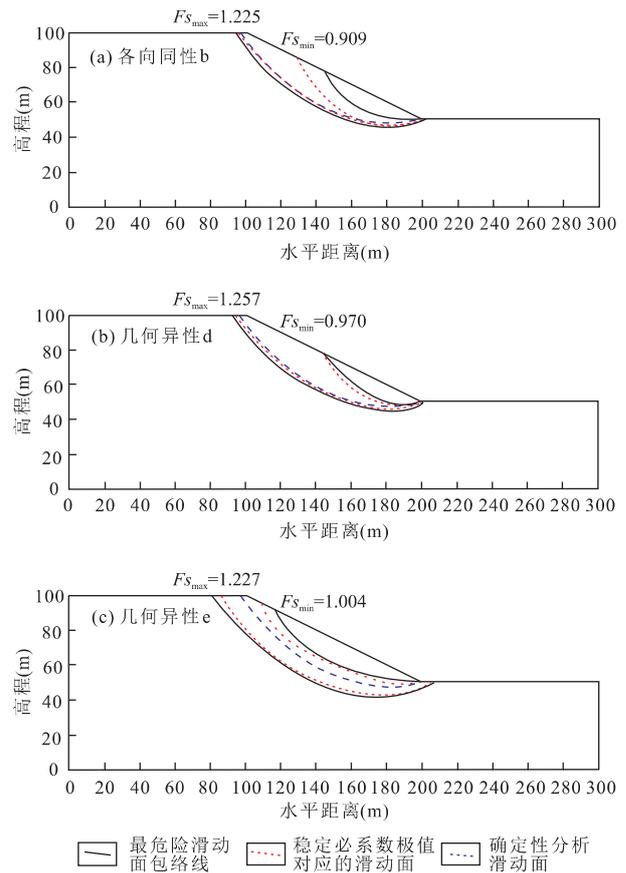


图 15 最危险滑动面变化

Fig.15 Critical slip surface variation of the realizations

透系数不同空间变异结构下的最危险滑动面空间分布特征.对于渗透系数条件随机场的每一次实现,都可搜索出形态各异的最危险滑动面,反映的破坏模式为局部滑动或整体滑动.将每个类型的变异结构的最危险滑动面绘制在一张图上则表现为簇曲线.为便于分析,本文绘出了所有实现最危险滑动面的包络线(图 15),用上下两条黑色虚线标记,表示

最危险滑动面的空间分布范围,若包络线在斜坡表面,表示局部滑动;若包络线在斜坡深部,表示整体滑动.为便于比较,同时在图 15 中将每个类型空间变异结构计算结果中最大、最小稳定性系数的实现搜索获得的最危险滑动面用红线表示,在图 15 中分别用 $F_{s_{\max}}$ 与 $F_{s_{\min}}$ 标出;确定性分析获得的最危险滑动面用蓝线表示.

本文列出了其中 3 种相关结构类型的计算结果(图 15).结果表明,渗透系数的空间变异特征对斜坡变形破坏的影响与抗剪强度(祁小辉等,2013)相比并不明显,这是由于最危险滑动面与抗剪强度、尤其是边坡的软弱带的抗剪强度直接相关,而渗透系数对抗剪强度的影响十分有限.各向同性和几何异性 d 与 f 的最危险滑动面包络线的下边界均与确定性分析相当接近,而上边界一般在坡体下方的局部区域,表明斜坡的破坏模式以坡体下方局部变形破坏为主.几何异性类型 e 与 g 的情况易于在斜坡中产生平行于坡面或水平分布的软弱条带,从而斜坡的破坏模式表现为大规模的整体滑动,且最危险滑动面分布范围和规模也较大.

6 结论

(1)本文提出了一种基于高斯序贯条件模拟随机场的非侵入式随机有限元分析方法.这种方法首先利用高斯序贯模拟方法对研究区域内不同空间变异结构的岩土参数进行条件随机场模拟,然后将条件随机场与现有有限元软件相结合进行分析.这种条件随机场生成方法不仅再现了研究区域参数的二阶统计特性,通过调整变异函数的参数进行不同空间变异类型、变异程度、变异定向性的随机场模拟,同时利用现场观测数据对随机场模拟结果进行条件限制,提高了赋值精度,进而提高了利用随机场进行分析结果的可靠性.

(2)斜坡土体渗透系数的空间变异结构对斜坡降雨条件下的孔隙水压力分布和地下水位都有显著影响.各向同性的变异类型中,在坡面产生比确定性分析大的负孔隙水压力,负孔隙水压力的变化范围随变程增大呈指数关系增大,地下水位变化范围随变程增大呈线性增大.几何异性的变异类型中,斜坡产生负孔隙水压力和地下水位的变化范围均比各向同性的情况大,当空间相关主方向水平或与坡面方向平行时,孔隙水压力变化范围显著增大.

(3)斜坡土体渗透系数的空间变异结构对斜坡

降雨条件下的失稳特征也有一定的影响,但与强度特征参数相比影响有限.各向同性的变异类型中,随变程增大稳定性系数有所减小,最危险滑动面的分布范围较小,且易在斜坡下部发生局部变形.几何异性的变异类型下,稳定性系数变异规律不明显,当在斜坡中产生平行于坡面或水平分布的软弱带时,易发生整体大规模的变形破坏.

References

- Benson, C. H., Daniel, D. E., Boutwell, G. P., 1999. Field Performance of Compacted Clay Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125 (5): 390 – 403. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1999\)125:5\(390\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1999)125:5(390))
- Cai, J. S., Zha, E. Y., Yeh, T. C. J., et al., 2016. Effects of Heterogeneity Distribution on Hillslope Stability during Rainfalls. *Water Science and Engineering*, 9 (2): 134 – 144. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2016.06.004>
- Chilès, J. P., Delfiner, P., 1999. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. John Wiley & Sons, New York. <https://doi.org/10.1002/9780470316993>
- Ching, J. Y., Phoon, K. K., Hu, Y. G., 2009. Efficient Evaluation of Reliability for Slopes with Circular Slip Surfaces Using Importance Sampling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (6): 768 – 777. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000035](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000035)
- Cho, S. E., 2007. Effects of Spatial Variability of Soil Properties on Slope Stability. *Engineering Geology*, 92 (3 – 4): 97 – 109. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.03.006>
- Cho, S. E., 2014. Probabilistic Stability Analysis of Rainfall-Induced Landslides Considering Spatial Variability of Permeability. *Engineering Geology*, 171: 11 – 20. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.12.015>
- der Kiureghian, A., Lin, H., Hwang, S., 1987. Second-Order Reliability Approximations. *Journal of Engineering Mechanics*, 113 (8): 1208 – 1225. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1987\)113:8\(1208\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1987)113:8(1208))
- Dou, H. Q., Han, T. C., Gong, X. N., et al., 2016. Reliability Analysis of Slope Stability Considering Variability of Soil Saturated Hydraulic Conductivity under Rainfall Infiltration. *Rock and Soil Mechanics*, 37 (4): 1144 – 1152 (in Chinese with English abstract).
- Ge, Y. F., Tang, H. M., Li, W., et al., 2016. Evaluation for Deposit Areas of Rock Avalanche Based on Features of Rock Mass Structure. *Earth Science*, 41 (9): 1583 – 1592 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.117>

- Griffiths, D. V., Fenton, G. A., 2004. Probabilistic Slope Stability Analysis by Finite Elements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(5): 507—518. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2004\)130:5\(507\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:5(507))
- Griffiths, D. V., Huang, J. S., Fenton, G. A., 2009. Influence of Spatial Variability on Slope Reliability Using 2-D Random Fields. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(10): 1367—1378. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000099](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000099)
- Hu, X. L., Sun, M. J., Tang, H. M., et al., 2014. Creep Tests of Gravel-Soil of Majiagou Landslide in Three Gorges Reservoir Area. *Soil and Rock Mechanics*, 35(11): 3163—3169, 3190 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. R., Yu, M. H., Tang, C. A., 2002. Heterogeneity of Rocks and Soils and Estimations of Rock Mechanics Parameters by Conditional Simulation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(1): 13—17 (in Chinese with English abstract).
- Ji, J., Low, B. K., 2012. Stratified Response Surfaces for System Probabilistic Evaluation of Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(11): 1398—1406. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000711](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000711)
- Jian, W. X., Yang, J., 2013. Formation Mechanism of No.1 Part Slide of Huangtupo Landslide in the Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 38(3): 625—631 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.063>
- Jiang, S. H., Feng, X. B., Li, D. Q., et al., 2013. Reliability Analysis of Slope Using Non-Intrusive Stochastic Finite Element Method. *Rock and Soil Mechanics*, 34(8): 2347—2354 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. H., Li, D. Q., Zhang, L. M., et al., 2014. Slope Reliability Analysis Considering Spatially Variable Shear Strength Parameters Using a Non-Intrusive Stochastic Finite Element Method. *Engineering Geology*, 168: 120—128. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.11.006>
- Kasama, K., Whittle, A. J., 2015. Effect of Spatial Variability on the Slope Stability Using Random Field Numerical Limit Analyses. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 10(1): 42—54. <https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1077973>
- Leong, E. C., Rahardjo, H., 1997. Permeability Functions for Unsaturated Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(12): 1118—1126. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1997\)123:12\(1118\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1997)123:12(1118))
- Li, D. Q., Jiang, S. H., Zhou, C. B., et al., 2013. Reliability Analysis of Slopes Considering Spatial Variability of Soil Parameters Using Non-Intrusive Stochastic Finite Element Method. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35(8): 1413—1422 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. Y., Zhang, L. M., Gao, L., et al., 2017. Simplified Slope Reliability Analysis Considering Spatial Soil Variability. *Engineering Geology*, 216: 90—97. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.11.013>
- Liu, A. L., Wang, P. F., Ding, Y. Y., 2012. An Introduction to Geostatistics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, L. L., Cheng, Y. M., Zhang, S. H., 2017. Conditional Random Field Reliability Analysis of a Cohesion-Frictional Slope. *Computer and Geotechnics*, 82: 173—186. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.10.014>
- Liu, S., Hu, X. Y., Liu, T. Y., 2014. Characteristics and Application of Variogram for Gravity and Magnetic Fields. *Earth Sciences*, 39(11): 1625—1634 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.156>
- Low, B. K., Lacasse, S., Nadim, F., 2007. Slope Reliability Analysis Accounting for Spatial Variation. *Georisk*, 1(4): 177—189. <https://doi.org/10.1080/17499510701772089>
- Qi, X. H., Li, D. Q., Zhou, C. B., et al., 2013. Stochastic Analysis Method of Critical Slip Surfaces in Soil Slopes Considering Spatial Variability. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35(4): 745—753 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Q., Lin, D. J., Mei, G., 2006. Structure Reliability Random Finite Element Method. Tsinghua University Press, Beijing (in Chinese).
- Rahardjo, H., Lim, T. T., Chang, M. F., et al., 1995. Shear-Strength Characteristics of a Residual Soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(1): 60—77. <https://doi.org/10.1139/t95-005>
- Rahardjo, H., Satyanaga, A., Leong, E. C., et al., 2012. Variability of Residual Soil Properties. *Engineering Geology*, 141—142: 124—140. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.05.009>
- Remy, N., Boucher, A., Wu, J. B., 2009. Applied Geostatistics with SGeMS. Cambridge University Press, Cambridge.
- Santoso, A. M., Phoon, K. K., Quek, S. T., 2011. Effects of Soil Spatial Variability on Rainfall-Induced Landslides. *Computer and Structures*, 89(11—12): 893—900. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.02.016>
- Srivastava, A., Babu, G. L. S., Haldar, S., 2010. Influence of Spatial Variability of Permeability Property on Steady State Seepage Flow and Slope Stability Analysis. *Engineering Geology*, 110(3—4): 93—101. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.11.006>
- Tami, D., Rahardjo, H., Leong, E. C., 2004. Effects of Hyster-

- esis on Steady-State Infiltration in Unsaturated Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(9): 956–967. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2004\)130:9\(956\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:9(956))
- Tan, X.H., Wang, J.G., Hu, X.J., et al., 2009. Fuzzy Random Finite Element Reliability Analysis of Slope Stability. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 31(7): 991–996 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y., Yin, K.L., Wang, Y., et al., 2017. The Landslide Rain Infiltration Based on the Improved Mein-Larson Model. *Earth Science*, 42(4): 634–640 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.050>
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., et al., 1996. Model for the Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3): 379–392. <https://doi.org/10.1139/t96-060>
- Vanmarcke, E. H., 1984. *Random Fields: Analysis and Synthesis*. MIT Press, Cambridge.
- Wang, J.E., Xiang, W., Wang, S., 2015. Study on Morphological Characteristics of Coarse Particles in Sliding Zones of Huangtupo Landslide in Three Gorges Reservoir Area, China. In: Wu, W., ed., *Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flows*. Springer, Berlin.
- Wang, Y., Cao, Z.J., Au, S.K., 2011. Practical Reliability Analysis of Slope Stability by Advanced Monte Carlo Simulations in a Spreadsheet. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(1): 162–172. <https://doi.org/10.1139/t10-044>
- Zhang, J., Huang, H. W., 2016. Risk Assessment of Slope Failure Considering Multiple Slip Surfaces. *Computers and Geotechnics*, 74: 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.01.011>
- Zhang, J., Huang, H. W., Phoon, K. K., 2013. Application of the Kriging-Based Response Surface Method to the System Reliability of Soil Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(4): 651–655. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000801](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000801)
- Zhang, L. L., Zhang, J., Zhang, L. M., et al., 2011. Stability Analysis of Rainfall-Induced Slope Failure: A Review. *Geotechnical Engineering*, 164(5): 299–316. <https://doi.org/10.1680/geng.2011.164.5.299>
- Zhang, Z., Liu, S.C., Ju, S.H., 1996. The Optimum Estimation Model and the Principle of Spatial Variability Analysis of Rock and Soil Parameters. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 18(4): 40–47 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H., Zhang, L.M., 2013. Characterizing Geotechnical Anisotropic Spatial Variations Using Random Field Theory. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(7): 723–734. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0345>
- Zhu, H., Zhang, L. M., Zhang, L. L., et al., 2013. Two-Dimensional Probabilistic Infiltration Analysis with a Spatially Varying Permeability Function. *Computers and Geotechnics*, 48: 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.07.010>

附中文参考文献

- 豆红强, 韩同春, 龚晓南, 等, 2016. 降雨条件下考虑饱和渗透系数变异性的边坡可靠度分析. *岩土力学*, 37(4): 1144–1152.
- 葛云峰, 唐辉明, 李伟, 等, 2016. 基于岩体结构特征的高速远程滑坡致灾范围评价. *地球科学*, 41(9): 1583–1592. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.117>
- 胡小荣, 俞茂宏, 唐春安, 2002. 岩土体的非均质性及力学参数的条件模拟赋值. *岩石力学与工程学报*, 21(1): 13–17.
- 胡新丽, 孙森军, 唐辉明, 等, 2014. 三峡库区马家沟滑坡滑体粗粒土蠕变试验研究. *岩土力学*, 35(11): 3163–3169, 3190.
- 简文星, 杨金, 2013. 三峡库区黄土坡滑坡 I 号崩滑体成因. *地球科学*, 38(3): 625–631. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.063>
- 蒋水华, 冯晓波, 李典庆, 等, 2013. 边坡可靠度分析的非侵入式随机有限元法. *岩土力学*, 34(8): 2347–2354.
- 李典庆, 蒋水华, 周创兵, 等, 2013. 考虑参数空间变异性的边坡可靠度分析非侵入式随机有限元法. *岩石力学与工程学报*, 35(8): 1413–1422.
- 刘爱利, 王培法, 丁园圆, 2012. *地统计学概论*. 北京: 科学出版社.
- 刘双, 胡祥云, 刘天佑, 2014. 重磁场的变差函数特征与应用. *地球科学*, 39(11): 1625–1634. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.156>
- 祁小辉, 李典庆, 周创兵, 等, 2013. 考虑土体空间变异性的边坡最危险滑动面随机分析方法. *岩土工程学报*, 35(4): 745–753.
- 秦权, 林道锦, 梅刚, 2006. *结构可靠度随机有限元*. 北京: 清华大学出版社.
- 谭晓慧, 王建国, 胡晓军, 等, 2009. 边坡稳定的模糊随机有限元可靠度分析. *岩土工程学报*, 31(7): 991–996.
- 唐扬, 殷坤龙, 汪洋, 等, 2017. 斜坡降雨入渗的改进 Mein-Larson 模型. *地球科学*, 42(4): 634–640. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.050>
- 张征, 刘淑春, 鞠硕华, 1996. 岩土参数空间变异性分析原理与最优估计模型. *岩土工程学报*, 18(4): 40–47.