

岩土参数随机场模型研究现状

韩宪军

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 介绍目前国内外岩土随机场理论及其应用的研究现状。首先介绍岩土参数随机场的基本理论, 从相关距离的求解及常用的离散方法两个方面进行比较和评述; 其次, 就随机场理论的应用情况进行综述, 并指出存在的问题; 最后, 对这一理论的发展前景提出了看法。

关键词 岩土参数 随机场 离散方法 相关距离

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1006-764X(2006)S1-0167-04

作为天然材料的岩土介质, 其物理力学参数的随机性早已为人们所熟知。传统上人们一般是采用随机变量来处理岩土参数的随机性问题^[1], 然而, 这一方法不能真实地反映岩土介质本身所具有的自相关性。为此, 随机场理论应运而生。所谓随机场是随机过程的概念在空间域上的推广。随机过程 $X(t)$ 的基本参数是时间变量 t , 而随机场 $X(u)$ 的基本参数是空间位置向量 u 。根据向量 u 所包含分量的数目不同, 随机场又可分为一维、二维和三维随机场。首先提出把土层看成随机场的是 Cornell, 其后是 Wu 和 Lumb, 再后来是 Vanmarcke 逐步完善了这套理论^[2]。1977 年, Vanmarcke 首次提出了土性剖面的随机场模型^[3], 其实质是用齐次正态随机场来模拟土性剖面, 用方差、相关函数、相关距离等数字特征来描述土体的空间变异性; 用方差折减系数将“点”的变异性与“空间”变异性联系起来。此后, 国内外许多研究者对其进行了大量的研究和应用, 并取得了丰富的研究成果^[4-9]。在实际研究中, 随机场的特性主要通过其数字特征来反映。在描述随机场的诸多数字特征中, 相关距离是一个重要参数, 它是衡量两个相隔一定距离的物理量之间的相关程度的基本距离, 相隔间距小于此距离的两点之间的物理量被认为是强相关的, 反之如果超过此距离则可认为是不相关的。确定相关距离是解决岩土工程可靠性问题的关键^[10], 一旦知道了相关距离, 就可以进行方差折减系数的计算, 从而实现“点”方差到“空间”方差的过渡。一般说来, 随机场的研究包括理论研究和应用研究两个方面。其中, 随机场的理论研

究主要围绕着相关距离的计算和随机场的离散两个方面展开, 本文将首先从这两个方面对现有方法进行比较和评述, 然后就其应用方面的研究进行分析, 综述并指出其中存在的问题, 最后再对这一理论今后的发展方向提出初浅的看法。

1 随机场相关距离的计算方法

相关距离的计算方法主要有空间递推平均法、相关函数法、半变异函数法、统计模拟法、平均零跨法等。下面对各种方法的特点分别进行评述。

1.1 空间递推平均法

空间递推平均法是根据离散、等间距采样的一组数据来估计土性的相关距离, 概念明确、计算方便。但是本方法使用过程中存在着两点不足:

a. “稳定点”难以确定, 带有很大的主观性。为此, Wickremesinghe 等^[7]提出了最大值法。该方法避开了“稳定点”的确定问题, 直接从相关距离的定义出发, 通过 $\Gamma^2(z)$ 曲线上的最大值来求相关距离(这里, z 和 $\Gamma^2(z)$ 分别为取样间距与相应的方差折减系数, 下同)。只要遵照采用间距与相关距离相近的原则进行迭代计算, 结果就比较稳定。因而该方法是一种值得推荐的计算方法, 已被其他研究者^[11-12]采用。此后, 研究者们又提出了曲线极限法^[13]和曲线拟合法^[14]。这两种改进方法的共同之处在于都采用曲线函数来拟合由递推空间平均法所得到的数据点 $(z, \Gamma^2(z))$, 简单明确, 易于实施; 但它们与最大值法并无本质上的不同。另外还有一种改进方法, 称为多项式拟合法^[15], 不太常用。

b. 具体的数学公式没有给出, 且递推次数 n 难

以确定、稳定性差。针对此局限,余跃心和张爱国^[16]提出了基于窗函数的滑动平均法,该法清晰简洁、较为实用,成为空间递推平均法的一个有益补充。另外,冷伍明^[17]、谭晓慧等^[18]也就此问题进行了讨论。

1.2 相关函数法

相关函数法是用一定类型的相关函数去拟合真实的相关曲线,求出相应的参数。徐斌等^[19]对采用相关函数法确定相关距离的计算过程中出现的各种问题(如计算方法的选择、异常数据的影响、样本容量的选取等)进行了分析,得出选取相关曲线的前半段拟合将优于全段拟合的结论,程强等^[20]也得出了类似的结果。应当指出的是,尽管本方法概念清楚,但其成功应用的关键在于相关函数的选取是否适当,同时,样本容量对拟合精度也有一定的影响。

1.3 半变异函数法

近年来,张征等^[21]和胡小荣等^[22]将地质统计学原理引入到岩土参数的评价中,用半变异函数模型来拟合岩土参数的空间变异性,模型中被称作变程的参数即为相关距离。这种方法与相关函数法相比,二者均可计算岩土参数的相关距离,前者描述了随距离增加变异性增加,后者描述了随距离增加相关性减弱。刘春原等^[23]分析和论证了它们之间的内涵和联系。

1.4 统计模拟法^[24]

从本质上讲,统计模拟法假定土性的自相关函数形式为指数函数,即 $R(\tau) = e^{-b\tau}$,确定出参数 b 的值后,进而求出相关距离。但是由于它确定参数时的理论依据及方法不同于相关函数法,因而使之成为一种独立的方法。其理论基础较为繁复,所得结果偏大,且变异性很大。

此外,计算相关距离的方法还有回归模拟法、平均零跨法等等,但当前应用最广泛的还是空间递推平均法和相关函数法。将随机场相关距离的求解方法进行汇总,如表 1 所示。

表 1 随机场相关距离求解方法

相关距离求解方法	递推空间法	最大值法
		曲线极限法
		曲线拟合法
		多项式拟合法
		滑动平均法
	相关函数法	
	半变异函数法	
	平均零跨法	
	统计模拟法	

2 随机场的离散方法

随机场的离散处理方法主要有中点法、局部平均法、插值法、加权积分法及随机场的正交展开等。

2.1 中点法

中点法是最简单的一种随机场离散方法^[25]。本法用随机场在每个单元中心点的值来表征该随机场在每个单元的属性,因而随机场在每个单元内部都是常量,且等于它在各个单元中心点的值。该方法适用于各种分布的随机场,程序易于实现,但本方法收敛速度慢,且所得到的解的方差较大,目前已经很少采用。

2.2 局部平均法

Vanmarcke^[26]首先提出了随机场局部平均的离散方法,该法将随机场在每个单元的属性用随机场在单元上的局部平均来表征。Zhu^[27]则进一步对向量随机场的局部平均问题进行了深入研究;陈虬等^[28]提出了正交化局部平均随机场模型;刘宁^[29]提出了三维可分向量随机场局部平均法。诸多文献^[8]表明局部平均法是一种十分有效的离散方法,它对原始数据的要求低,收敛快,精度高。

2.3 随机场的插值(形函数法)

局部平均理论适用于平稳随机场,如果随机场不满足平稳性假设,局部平均法就显得无能为力。此时,可采用 Liu^[30]提出的随机场的插值法。该法将随机场在单元内的值用单元节点处值的插值函数表示,从而随机场的统计特性可由各单元结点处随机变量间的统计特性近似反映。陈虬等^[28]对此进行了较深入的研究。

2.4 随机场的加权积分法

Takada 等^[31]提出了随机场加权积分的方法,他们在单元刚度矩阵的推导过程中,采用随机场在单元高斯点上的加权积分来表征该单元的随机特性。通过对比不难发现,局部平均法可以看作是加权积分法的一种特例,此时权系数全部相同。

2.5 最优线性估值法

对高斯随机场的整个区域,利用有限元网格,Li^[32]建议同时离散整个随机场,该法基于待定系数法,以满足无偏估计且方差最小为原则来确定未知系数。研究表明,这是一种方差最小的方法。

2.6 随机场的正交展开

Spanos 等^[33]提出了随机场的正交展开法,将材料特性参数随机场进行 Karhunen-Loeve(K-L)正交展开,并由此推导出刚度矩阵的级数展开式,进而获得位移、应力的统计特性。理论上,正交展开法可以根据需要随意控制精度,但由于本方法需要求解特征值问题的积分方程,且并非所有的随机场都可以轻易地求解,精度与效率之间很难协调。

为了避免 K-L 展开解积分方程的困难,Spanos 等^[34]建议对任意二阶随机场用混沌多项式展开,其

中的混沌多项式可由厄尔密特多项式来导出。刘天云等^[35]基于伽辽金投影方法,提出了一种新的离散方法:首先构造一组正交随机变量,然后将随机场用其在这组随机变量上的投影表示,这种方法具有级数展开法的特点,但不需要解积分方程。

在上述几种随机场处理方法中,前5种为空间离散法,即所谓的h法,这些方法需要将随机场在其定义域上剖分成网格,网格越精细则精度越高,但需要的计算量也就越大。最后一种方法(包括K-L展开法、混沌多项式展开法及伽辽金投影方法)是抽象的方法,即所谓的p法,不需要将定义域离散,级数保留的项数越多,精度越高。

由于结构几何或物理力学性质随机场一般是非负的,采用高斯分布不能准确地对它们进行表示,Grigoriu^[36]提出了Nataf模型。这样,上述第2~5种方法使用前还需要将随机场变换为等效的高斯随机场。

将随机场离散化方法进行汇总,如表2所示。

表2 随机场离散化方法	
随机场离散化方法	空间离散法(h法)
	中点法
	局部平均法
	插值法(形函数法)
抽象离散法(谱分解法,p法)	加权积分法
	最优线性估值法
	K-L法
	混沌多项式展开法
伽辽金投影法	

3 应用现状

经过国内外众多学者的努力,随机场理论有了长足的发展,目前已经成功应用于多个领域。庞小朝等^[9]将随机场谱表示模拟法与Monte Carlo法相结合,对某堤坡可靠性进行了分析;白顺果等^[12]讨论了在计算整体破坏的地基承载力可靠度时引入随机场理论的必要性问题;陈义元等^[37]采用随机场模拟求得场地地基基本量的统计特征值并用于CFG桩复合地基承载力的可靠度计算;吴长富^[38]应用随机场理论研究了杭州地区土性的概率特征,并将其应用到单桩承载力可靠度研究中;刘润等^[39]则将随机场理论用于海洋平台桩基础竖向承载力的可靠度分析中,并开发了“海洋工程地基可靠度分析系统”,在随机场数据库建立方面迈出了重要的一步。

综合已有的应用案例,可将随机场相关距离的一般应用方法总结为以下几步:①土性参数相关资料(如CPT曲线等)的收集及预处理。②建立土性参数随机场模型,根据前面介绍的方法求取相关距离等数字特征。③根据求得的有关参数,进行方差

折减系数计算,然后用折减后的方差来进行可靠度等相关分析计算;也可用以指导后序计算中所需的随机场剖分问题。

4 存在的问题

在总结已有研究成果的同时也应该看到,在随机场模型的具体应用过程中还有许多问题没有得到很好的解决,主要包括如下几个方面:

a. 相关距离作为随机场理论的一个重要概念,不同的方法得出的结果有时存在着较大的误差。这其中的原因主要是其确切概念目前还不太明确^[40],有待于进一步研究。

b. 目前常用的随机场离散化方法有多种,但是究竟哪些方法既能够充分表征岩土参数随机场的空间变异性,又具有较高的效率还不太清楚,精度与效率之间的矛盾依然存在。应对各种常用的离散方法的适用范围进行深入研究,以便工程人员可以根据具体的问题来合理选用。

c. 岩土参数有其自身的特点,一般是非负的,采用高斯随机场不能正确地表征其空间变化特点,这点并未引起大多数研究人员的注意。针对这一特点,岩土参数宜采用前述Nataf模型。

5 研究展望

针对岩土参数具有空间变异性的特点,将其模拟为随机场来进行研究是一个方兴未艾的课题。尽管近年来国内在随机场的理论与应用研究方面有了较大的发展,但与国际同行相比,仍有一定的差距,特别是在随机场基础理论的研究方面应该加强。今后随机场理论及其应用方面的研究有望在以下几个方面取得进展:

a. 进行随机场理论在岩体方面的建模研究,以进一步揭示因节理岩体破坏而引发的滑坡等自然灾害的规律,为生产实践服务。

b. 研究非正态分布条件下的随机场建模问题。

c. 加强随机场基础理论方面的研究。

d. 研究不同的随机场相关结构对计算结果的影响是另一个具有重要意义的方向。一方面,它可以揭示出不同的相关结构对计算结果的影响;另一方面,对具体的岩土参数而言,采用更加精确的相关结构进行建模有利于更好地认识结构系统自身的变化规律。

e. 研究随机场的两套描述方法(即Vanmarcke模型与半变异函数模型)之间的相互关系。

应当指出,有关随机场理论研究的文献浩如烟海,本文仅是对岩土参数随机场理论的国内外研究

现状作了一个简要的总结。

参考文献：

- [1] 王如路, 陈乃明, 刘宝琛. 用随机过程原理确定岩体力学参数[J]. 矿冶工程, 1994, 14(4): 16-19.
- [2] 钟文华. 岩土参数随机场特性及最优估计研究[D]. 河北: 河北工业大学, 2002.
- [3] VANMARCKE E. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. J of Geotech Engrg, 1977, 103(11): 1227-1246.
- [4] CHOWDHURRY R N. Simulation of risk progressive slope failure[J]. J Can Geotech, 1992, 29(1): 94-102.
- [5] 彭大鹏. 齐次随机场在分析土性指标中的应用[J]. 天津大学学报, 1992(2): 118-124.
- [6] MOSTYN G R. Probabilistic slope analysis-state-of-play[C]//LI K S, LO S-C R. Probabilistic methods in geotechnical engineering: Proceedings of the Conference on Probabilistic methods in geotechnical engineering. Canberra: Balkema, Rotterdam, 1993: 89-120.
- [7] WICKREMESINGHE D, CAMPANELLA R G. Scale of fluctuation as a descriptor of soil variability[C]//LI K S, LO S-C R. Probabilistic methods in geotechnical engineering: Proceedings of the Conference on Probabilistic methods in geotechnical engineering. Canberra: Balkema, Rotterdam, 1993: 233-239.
- [8] 刘宁. 可靠度随机有限元法及其工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 63-64.
- [9] 庞小朝, 周小文, 温庆博, 等. 向量随机场模拟及其在岩土工程中的应用[J]. 清华大学学报, 2003, 43(5): 706-709.
- [10] 包承钢. 关于岩土工程的可靠性问题[J]. 岩土工程师, 1992, 8(3): 601.
- [11] 张梅, 丁继辉, 宋向东. 对求解土性相关距离的空间递推平均法的分析与改进[J]. 河北农业大学学报, 1999, 22(1): 85-89.
- [12] 白顺果, 张鸿儒, 黄春霞. 考虑土性参数空间变异性的地基承载力可靠性分析[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(1): 32-34.
- [13] 冷伍明, 赵善锐. 土工参数不确定性的计算分析[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 68-74.
- [14] 丁继辉, 宇云飞, 张庆宏, 等. 土性相关距离计算的非线性曲线拟合法[J]. 勘察科学技术, 2000(3): 13-16.
- [15] 倪万魁, 牛富俊, 刘东燕. 黄土土性的空间自相关性研究[J]. 西安工程学院学报, 2002, 24(2): 4-8.
- [16] 余跃心, 张爱国. 移动平均法计算相关距离的分析与探讨[J]. 淮阴工学院学报, 2003, 12(1): 13-16.
- [17] 冷伍明. 基础工程可靠性分析与设计理论[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000: 7-9.
- [18] 谭晓慧, 王建国, 刘新荣, 等. 土性相关距离计算方法的分析探讨[J]. 合肥工业大学学报, 2004, 27(11): 1420-1424.
- [19] 徐斌, 王大通, 高大钊. 用相关函数法求静探曲线相关距离的讨论[J]. 岩土力学, 1998, 19(1): 55-59.
- [20] 程强, 罗书学, 彭雄志. 相关距离与土性参数的关系及计算方法[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(5): 496-500.
- [21] 张征, 刘淑春, 鞠硕华. 岩土参数空间变异性分析原理与最优估计模型[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(4): 40-47.
- [22] 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.
- [23] 刘春原, 闫澍旺. 随机场相关距离的研究[J]. 天津大学学报, 2003, 36(1): 58-62.
- [24] 闫澍旺, 贾晓黎, 郭怀志. 土性剖面随机场模型的平稳性和各态历经性验证[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(3): 1-9.
- [25] KIUREGHIAN D, KE J. Stochastic finite element method in structural reliability[J]. Probabilistic Engrg Mech, 1988, 3(2): 83-91.
- [26] VANMARCKE E. Random fields: analysis and synthesis[M]. Cambridge: MIT Press, Cambridge, 1983.
- [27] ZHU Wei-qiu, REN Yong-jian. Stochastic FEM based on local averages of random vector field[J]. J Engrg Mech, 1992, 118(3): 496-511.
- [28] 陈虬, 刘先斌. 随机有限元法及其工程应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- [29] 刘宁. 三维可分向量随机场局部平均的三维随机有限元及可靠度计算[J]. 水利学报, 1995(6): 75-82.
- [30] LIU W K, MANI A. Random fields finite element[J]. Int J of Numerical Methods in Engrg, 1986, 23(10): 1831-1845.
- [31] TAKADA T, SHINOZUKA M. Local integration method in stochastic finite element analysis[C]//Proc Int Conf on Struct Safety and Reliability. San Francisco: ASCE, 1989: 1072-1080.
- [32] LI Chun-ching, KIUREGHIAN D. Optimal discretization of random fields for SFEM/[C] Prob Mech and Struct and Reliability. Denver: ASCE, 1992: 29-32.
- [33] SPANOS P D, GHANEM R. Stochastic finite element expansion for random media[J]. J of Engrg Mech, 1989, 115(5): 1035-1053.
- [34] 秦权. 随机有限元及其进展: I. 随机场的离散和反应矩的计算[J]. 工程力学, 1994, 11(4): 1-10.
- [35] 刘天云, 伍朝辉. 随机场的投影展开法[J]. 计算力学学报, 1997, 14(4): 484-489.
- [36] GRIGORIU M. Crossing of non-Gaussian translation processes [J]. J of Engrg Mech, 1984, 110(4): 610-620.
- [37] 陈义元, 何思明. 复合地基承载力的可靠度分析[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(3): 95-97.
- [38] 吴长富. 杭州地区土性概率特征及单桩承载力可靠度研究[D]. 浙江大学, 2005.
- [39] 刘润, 闫澍旺. 渤海湾地基土随机场特性及可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 464-467.
- [40] 黄传志, 孙万禾. 土性参数概率分析中的几个问题[J]. 水运工程, 1994(4): 47-53.

(收稿日期: 2006-06-15 编辑: 高建群)