

均匀设计在岩土工程概率分析中的应用

黄 靓, 易伟建, 汪 优

(湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 基于神经网络的响应面蒙特卡罗方法, 通过引入均匀设计来安排 RBF 神经网络的训练样本集, 将均匀设计和 RBF 网络的优势有机地结合起来: 一方面尽量减少训练样本点的数量; 另一方面, 训练样本点均匀地充满参数空间, 有利于提高具有较强局部逼近能力的 RBF 网络的预测精度。应用该方法进行挡土墙结构抗滑移稳定性的概率分析, 结果表明该方法与直接蒙特卡罗模拟的结果相当吻合, 能够满足实际工程的精度要求。分析还表明, 随机因素对挡土墙结构抗滑移稳定性的影响程度由大到小依次为基底摩擦系数、填土摩擦角、填土重度和填土对挡土墙墙背的摩擦角。

关 键 词: 均匀设计; 蒙特卡罗模拟; RBF 神经网络; 挡土墙; 稳定性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Application of uniform design in probability analysis of geotechnical engineering

HUANG Liang, YI Wei-jian, WANG You

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082 China)

Abstract: In the method of response surface Monte-Carlo based on artificial neural network, the uniform design, a kind of design of computer experiments, is introduced to arrange training samplings set of RBF neural network that combines the advantages of uniform design and RBF neural network organically. On the one hand, it may decrease the number of training samples as fully as possible, and on the other, it fills training samples into the parameter space uniformly, and enhances the prediction accuracy of RBF neural network which has strongly local approximate capacity. In the probability analysis of retaining wall stability against sliding, for example, the results of the proposed method are very consistent with those of the direct Monte-Carlo simulations. And in addition this probability analysis shows that friction coefficient of the wall base f , the inner friction angle φ , unit weight γ of filled soils, and the friction angle of the soils against wall back δ have influences on the retaining wall stability against sliding from high to low in turn.

Key words: uniform design; Monte-Carlo simulation; RBF neural network; retaining wall; stability

1 引 言

传统上确定性的岩土工程分析方法, 由于忽略了岩土自身的变异性质以及其他设计参数(荷载、尺寸等)的不确定性, 难以真实、科学地反映客观实际情况, 因此有必要将主要的影响因素视为随机变量, 对问题进行概率分析^[1-4], 获取响应量的概率特征以及各种极限状态下的可靠度。这样可以更深入地了解问题的本质, 更有效地满足实际工程的需要。

岩土工程中最直接有效的概率分析方法就是蒙特卡罗模拟。蒙特卡罗方法的优点是适用于各种

复杂情况下的概率分析, 不受变量维数和分布类型的限制, 在抽样次数足够多时, 其结果趋于精确; 但缺点是计算量太大, 计算效率不高。岩土工程中大多数的问题都是隐式的, 难以给出明确的解析解, 因此, 每一次抽样计算都需要进行一次相当耗时的数值求解, 从而限制了直接该方法的应用。目前, 常用的解决办法是利用替代模型进行间接蒙特卡罗模拟, 即构造响应量的响应面, 通过响应面预测来代替数值求解过程。

响应面蒙特卡罗方法的关键在于选择合适的样本点, 构造能够满足预测精度要求的响应面。常用的响应面有多项式响应面、回归响应面和神经网络

系数 ρ_{XY} 计算式为

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

式中： X_i 为随机参数 X 的第 i 次抽样值； $\bar{X}$ 为随机参数 X 的 n 次抽样平均值； Y_i 为利用各随机参数的第 i 次抽样值得到的响应值； $\bar{Y}$ 为响应 Y 的 n 次抽样平均值； n 为随机参数的抽样次数。

5 工程应用

5.1 挡土墙抗滑移稳定性

挡土墙结构的稳定性是岩土工程中研究的重要问题之一^[9-11]。本文对挡土墙结构的抗滑移稳定性进行概率分析。值得指出，挡土墙抗滑移稳定系数具有解析式，但这只是为了方便本文方法与直接蒙特卡罗模拟的比较，而省去繁复的数值求解过程。由于该解析表达式具有高度非线性，因此并不妨碍检验本文方法有效性。

如图 1 所示，挡土墙抗滑移稳定系数为

$$K_s = \frac{(G + E_y)f}{E_x} = \frac{\left[G + \frac{1}{2} \gamma h^2 k_a \cos(\alpha - \delta) \right] f}{\frac{1}{2} \gamma h^2 k_a \sin(\alpha - \delta)} \quad (5)$$

其中，

$$k_a = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin^2 \alpha \sin^2(\alpha + \beta - \varphi - \delta)} \square$$

$$\left\{ k_q [\sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \delta) + \sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \delta)] + \right.$$

$$2\eta \sin \alpha \cos \varphi \cos(\alpha + \beta - \varphi - \delta) -$$

$$2 \left[(k_q \sin(\alpha + \beta) \sin(\varphi - \beta) + \eta \sin \alpha \cos \varphi) \right.$$

$$\left. (k_q \sin(\alpha - \delta) \sin(\varphi + \delta) + \eta \sin \alpha \cos \varphi) \right]^{1/2} \Bigg\};$$

$$k_q = 1 + \frac{2q \sin \alpha \cos \beta}{\gamma h \sin(\alpha + \beta)}; \quad \eta = \frac{2c}{\gamma h}$$

式中： G 为挡土墙每延米自重 (kN/m)； f 为基底摩擦系数； E_x 、 E_y 为别为墙背主动土压力的水平与垂直分力 (kN/m)； k_a 为主动土压力系数； h 为挡土墙高度 (m)； γ 为填土的重度 (kN/m³)； c 为填土的黏聚力 (kPa)； φ 为填土的内摩擦角 (度)； δ 为填土对挡土墙墙背的摩擦角 (度)； q 为地表均布

荷载，(kN/m)； α 为墙背与水平面的夹角，(度)； β 为填土表面与水平面的夹角 (度)。

当 $K_s > 1$ 时，挡土墙处于可靠状态，当 $K_s < 1$ 时，挡土墙处于失效状态。根据大量的工程实践可知，影响挡土墙抗滑移稳定性的主要随机参数为 φ 、 f 、 γ 和 δ 等，通常这 4 个随机参数都可认为服从正态分布。

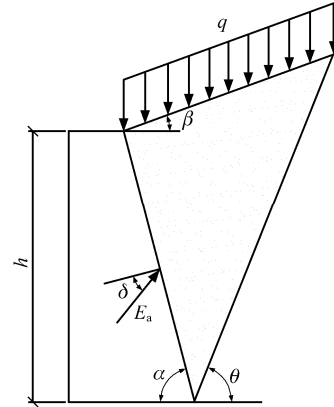


图 1 挡土墙示意图
Fig.1 Sketch of retaining wall

5.2 实例分析

某边坡挡土墙结构如图 1 所示，将试验数据进行统计分析，得到各随机变量的统计参数如表 1 所示。其他参数： $h=4$ m， $G=157.28$ kN/m， $c=6.15$ kPa， $q=8$ kN/m， $\alpha=90^\circ$ ， $\beta=1^\circ$ 。每个随机参数考虑高、较高、中、较低、低 5 个水平，其取值分别对应 $\bar{X} + 2\sigma_X$ ， $\bar{X} + \sigma_X$ ， $\bar{X}$ ， $\bar{X} - \sigma_X$ ， $\bar{X} - 2\sigma_X$ ，其中 $\bar{X}$ 、 σ_X 分别为该随机变量的均值和标准差。采用 4 因素 5 水平均匀设计表 $U_n(5^4)$ 安排 RBF 网络的训练样本点。取训练样本点数为 25，则相应的均匀设计表 $U_{25}(5^4)$ 见表 2，表中数字 1~5 分别对应随机因素水平的低、较低、中、较高、高。

表 1 随机变量的统计参数

Table 1 Statistic parameters of random variables			
变量名称	平均值	标准差	变异系数
f	0.5	0.1	0.2
$\varphi / (^\circ)$	21	3.15°	0.15
$\delta / (^\circ)$	8	0.96°	0.12
$\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	18.6	0.93	0.05

然后，利用训练好的 RBF 网络，进行蒙特卡罗模拟，预测抗滑移稳定系数 K_s 的响应值。采用本文方法和直接蒙特卡罗模拟，抽样次数 10^5 ，得到 K_s 的均值和标准差以及结构失效概率列于表 3。从相对误差看，本文方法和直接蒙特卡罗方法的结果十

分接近。虽然 K_s 的均值为 1.552 7>1.30, 但其失效概率却达到 7.5 %, 并不是足够安全的, 可见对其进行概率分析, 弥补确定性分析的不足, 是非常必要的。各随机变量对 K_s 的相关系数如表 4 所示。与直接蒙特卡罗模拟的结果相比, 本文方法的相对误差除了 ρ_{δ, K_s} 为 15.36 % 以外, 其余误差远小于 5 %, 能够满足实际工程的精度要求。从各相关系数的绝对值和正负号可知, 随机变量 f 、 φ 、 γ 和 δ 对挡土墙抗滑移稳定性的影响程度依次减小; 增大 f 、 φ 和 δ 或者减小 γ 均有利于提高挡土墙的抗滑移可靠性,

其中是增大 f 值的效果最明显, 其次是增大 φ 值, 最不明显的是增大 δ 值。

6 结 论

(1) 引入均匀设计安排 RBF 神经网络的训练样本集, 将两者的优势有机地结合起来。一方面可以大幅度降低训练样本点的数量; 另一方面又能全面考虑所有可能出现的参数组合, 使训练样本点均匀地分布在参数空间, 提高响应面的精度。

(2) 挡土墙结构抗滑移稳定性的概率分析表明, 本文方法与直接蒙特卡罗模拟的结果十分接近。基于均匀设计的 RBF 响应面蒙特卡罗模拟较直接蒙特卡罗模拟可大幅减少数值求解的次数, 并且具有较好的计算精度。

(3) 挡土墙结构稳定性的概率分析可以弥补确定性分析的不足, 更深入了解结构的安全性。分析表明, 对挡土墙结构抗滑移稳定性影响最明显的随机因素是基底摩擦系数 f 和填土的内摩擦角 φ , 其次是填土的重度 γ , 最不明显的随机因素是填土对挡土墙墙背的摩擦角 δ 。

参 考 文 献

- [1] 申玉生, 赵玉光. 双连拱隧道围岩稳定性的模糊概率分析研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1 358—1 361.
- [2] 邱骋, 王纯祥, 江崎哲郎, 等. 基于边坡单元的公路沿线滑坡危险度概率分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1 731—1 736.
- [3] 苏永华, 刘晓明, 赵明华. 摩擦桩承载稳定性的概率分析方法[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 433—438.
- [4] 洪昌华, 龚晓南, 温晓贵. 深层搅拌桩复合地基承载力的概率分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 279—283.
- [5] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] 方开泰. 均匀试验设计的理论、方法和应用——历史回顾[J]. 数理统计与管理, 2004, 23(5): 69—80.
- [7] 张润楚, 王兆军. 关于计算机试验的设计理论和数据分析[J]. 应用概率统计, 1994, 10(4): 420—436.
- [8] 方再根. 计算机模拟和蒙特卡罗方法[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988.
- [9] 张建仁. 挡土墙结构稳定性的可靠度分析[J]. 中国公路学报, 1997, 10(3): 53—58.
- [10] 刘芳, 何本贵, 高谦. 挡土墙模糊可靠性分析[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(5): 217—219.
- [11] 郑刚. 水泥土重力式挡土墙倾覆破坏的分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 192—194.

表 2 均匀设计表 $U_{25}(5^4)$
Table 2 Uniform design table $U_{25}(5^4)$

样本序号	φ	δ	f	γ
1	3	5	1	4
2	3	2	5	5
3	5	3	2	4
4	5	5	4	5
5	5	2	3	2
6	1	1	1	2
7	3	1	4	1
8	3	4	2	2
9	4	5	3	1
10	2	4	4	3
11	4	4	5	4
12	2	3	1	5
13	1	5	2	3
14	5	4	1	1
15	4	2	1	3
16	2	1	3	4
17	4	3	4	2
18	1	4	3	5
19	4	1	2	5
20	5	1	5	3
21	2	2	2	1
22	3	3	3	3
23	1	3	5	1
24	1	2	4	4
25	2	5	5	2

表 3 概率分析结果
Table 3 Results of probability analysis

参数	直接蒙特卡罗模拟	本文方法	相对误差/%
K_s 均值	1.5527	1.5569	0.01
K_s 标准差	0.4202	0.4250	1.14
失效概率	0.0751	0.0774	3.06

表 4 相关系数分析
Table 4 Analysis of correlation coefficients

相关系数	直接蒙特卡罗模拟	本文方法	相对误差/%
ρ_{φ, K_s}	0.603 0	0.599 3	-0.61
ρ_{δ, K_s}	0.057 4	0.048 6	-15.36
ρ_{f, K_s}	0.746 8	0.746 9	0.02
ρ_{γ, K_s}	-0.242 0	-0.245 7	1.52