

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.01.010

考虑高阶相关性的灌注桩沉降可靠度分析

唐利斌

(中铁十九局第七工程有限公司, 广东珠海 519026)

摘要: 为精准确定灌注桩的沉降, 将桩周土体参数看作随机变量, 并采用响应面法对桩基可靠度进行研究。由于与桩沉降相关的多个土体参数之间高阶项可能存在高度相关性, 基于高阶正交原理提出了新型非相关响应面法, 以克服传统响应面法不考虑高阶参数高阶相关性的难题。结合实际工程计算发现, 提出的新型响应面法比传统响应面法得到的值更为保守。可见, 如果不考虑参数的高阶相关性, 可能导致高估的计算结果。

关键词: 高阶相关性; 灌注桩; 响应面法; 可靠度指标

中图分类号: TU4

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2020)01-0053-04

Reliability analysis of settlement of cast-in-place piles considering high-order correlation

TANG Libin

(7th Engineering Co., Ltd. of China Railway 19th Bureau Group, Zhuhai 519026, China)

Abstract: In order to determine the settlement of cast-in-place piles accurately, the soil parameters around the piles were treated as random variables, and the response surface method was used to study the reliability of pile foundations. However, pile settlement is related to multiple soil parameters and the high-order terms of soil parameters may be highly correlated to each other. In order to overcome the problem that the traditional response surface method does not consider the high-order correlation of high-order parameters, a new non-correlation response surface method is proposed based on the principle of high-order orthogonality principle. Results in combination with actual engineering calculation show that the new response surface method is more conservative than the traditional one. It can be seen that if the high-order correlation of parameters is not considered, the results may be overestimated.

Keywords: high-order correlation; cast-in-place piles; response surface method; reliability index

由于桩周土体的非均质性和不确定性, 目前仍无法反映桩基真实沉降值。桩基沉降计算有很多种, 如荷载传递分析法、弹性理论法、剪切变形位移法和边界元法等^[1-2]。王卫东等^[3]基于 Mindlin 位移解与 Poulos 弹性理论方法提出了三桩模型方法。谭晨^[4]通过变深度、全深度剪切弹簧约束模型, 对复合弹性模量系数进行了修正, 并结合现场试验与室内模型试验, 总结了桩基沉降的变化量规律。潘军等^[5]考虑桩身非线性压缩, 推导了其解析解, 并通过工程实例进行对比验算,

认为考虑桩身的非线性压缩对单桩沉降有一定影响, 但桩侧土破坏比、抗剪强度是影响更为显著。综上发现, 桩的沉降涉及各种经验系数, 且系数的取值多为范围值, 存在模糊性。这主要是因为岩土参数的变异性, 导致很多情况需引入系数进行更正。可见, 要判断桩基础稳定与否, 需将桩周土体参数看作随机变量, 并采用可靠度分析理论对桩基稳定性进行评估, 才有更好的现实意义。

近些年, 雒红丽^[6]首先统计分析黄土地区 23 个灰土挤密桩的统计参数及其分布类型, 并采用

收稿日期: 2019-11-22

作者简介: 唐利斌(1971-), 男, 辽宁辽阳人, 工程师, 研究方向: 铁路工程施工及管理。

当量正态化法和贝叶斯更新的方法获得了可靠的概率特性参数,为工程可靠度分析和设计中的概率分布参数确定提供了可靠方法。张飞龙和曹子君^[7]基于 Monte-Carlo 的扩展可靠度设计方法对钻孔桩进行设计,并考虑岩土参数固有空间变异性方式,对两种方法的设计结果进行对比分析。刘雪莹等^[8]研究了随机变量的分布类型变化对桩基可靠度指标的影响,发现参数为极值 I 型分布时计算的失效概率最低。马克生等^[9-11]采用相关的概率方法对桩基沉降可靠度指标也进行了分析、验证。然而,由于桩基沉降本身就没有统一的计算公式,因而上述学者构造的功能函数本身就存在缺陷。

响应面法基于实验设计原理,可构造近似功能函数,因而具有实践性。为更精确研究灌注桩沉降,将桩周土体参数作随机变量处理。同时,为克服传统响应面法不考虑高阶参数的高度相关性,基于高阶正交原理提出了新型非相关响应面法,最后结合实际工程对提出的新型响应面法准确性进行了验证。

1 新型响应面法

传统响应面法是根据试验设计原理演变而来的可靠度分析方法。根据多个试验设计,对应多个响应值,然后基于回归分析方法建立最佳拟合回归函数,并结合线性规划知识确定最大值或最小值。如图 1 所示,主要包括 3 种试验设计样本点,即角点、轴点和均值点。样本点的取值如表 1 所示。

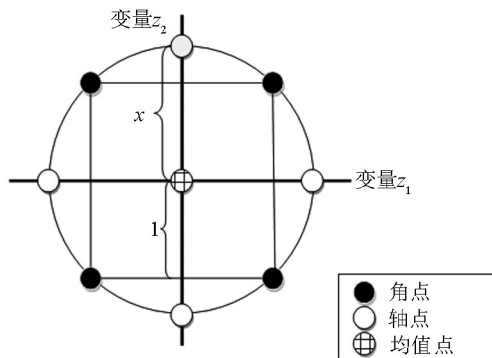


图 1 传统响应面法实验设计点分布

Fig.1 Distribution of design points in classic RSM

由于桩基涉及的参数众多,在进行实验设计时,对应的随机变量需满足正交性,即参数直接互

不相关,才可以进行响应面法。一般通过向量之间相乘之和为 0 来表征正交性,即

$$\sum_{i \neq j} z_i z_j = 0 \quad (1)$$

响应面法的回归方程可表示为

$$\hat{y} = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i z_i + \sum_{j < i} \beta_{ij} z_i z_j + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} z_i^2 + \varepsilon, j = 1, 2, \dots, n-1 (j \neq i) \quad (2)$$

其中, z_i 和 z_j 为随机变量, α 为常数项, $\{\beta_i\}$ 、 $\{\beta_{ij}\}$ 和 $\{\beta_{ii}\}$ 分别为一阶项、交互项和高阶项的回归系数, ε 为残差。

残差是表示回归方程拟合程度的重要指标。残差越小,拟合值与实际值越接近,而参数之间若满足正交性,往往得到的残差越小。因而,若设计矩阵满足正交,则回归方程精度越高。对于一阶项,根据表 1 可发现,试验矩阵满足正交性;但是当把二次项和交互项考虑进来时,存在

$$\sum_{i \neq j} z_i^2 z_j \neq 0 \left(\text{或} \sum_{i \neq j} z_i z_j^2 \neq 0 \right) \quad (3)$$

表 1 4 变量的响应面法样本点布置

Tab.1 Distribution of sampling points in response surface method with 4 variables

编号	z_1	z_2	z_3	z_4	备注
1	1	1	1	1	角点
2	1	1	1	-1	
3	1	1	-1	1	
4	1	1	-1	-1	
5	1	-1	-1	-1	
6	1	-1	1	-1	
7	1	-1	-1	1	
8	1	-1	1	1	
9	-1	1	-1	1	
10	-1	-1	1	-1	
11	-1	-1	1	1	
12	-1	-1	-1	1	
13	-1	1	1	-1	
14	-1	1	-1	-1	
15	-1	-1	-1	-1	
16	-1	1	1	1	
17	0	0	0	0	均值点

续表 1

编号	z_1	z_2	z_3	z_4	备注
18	2	0	0	0	
19	-2	0	0	0	
20	0	2	0	0	
21	0	-2	0	0	
22	0	0	2	0	轴点
23	0	0	-2	0	
24	0	0	0	-2	
25	0	0	0	2	

需要指出的是,响应面法的轴点设计长度 χ 可变,如果能获取一个合理 χ 值,使得二阶参数也满足正交性,将获取高精度回归方程。

为此,首先需要对整个设计矩阵归一化和中心化,即

$$z'_{ij} = z_{ij}^2 - \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} z_{ij}^2 = z_{ij}^2 - \frac{1}{N_a} (m_c + 2\chi^2) \quad (4)$$

其中 z'_{ij} 为中心化的平方项; z_{ij} 指的是一次项; N_a 是试验设计的总次数。若要满足高阶正交性,则

$$\sum_{i=1}^N z'_i z'_j = 0 \quad (5)$$

将式(4)带入式(5)中,得到

$$m_c - \frac{1}{N_a} (m_c + 2\chi^2)^2 = -\frac{4}{N_a} \left[\chi^4 + m_c \chi^2 - \frac{1}{2} m_c \left(m + \frac{1}{2} m_0 \right) \right] = 0 \quad (6)$$

其中, m_0 指的是均值点的试验次数,通常情况下只进行一次; m_c 指的是角点的试验次数; m 指代变量个数。将式(6)求解可得到新的轴点长度,为

$$\chi = \sqrt{\frac{\sqrt{(m_c + 2m + m_0)m_c} - m_c}{2}} \quad (7)$$

假设 $m=4$,且析因设计采用 $1/2$ 实施,因而,角点设计次数 m_c 是 $2^{4-1}=8$ 。而试验总次数 N_a 为 $2^{m-1}+2m+1$ 为17次。通过公式(7),可计算得到 χ 等于1.353。

2 工程应用

2.1 工程简介

扩建柳州火车站位于广西柳州市柳南区南站路西侧,为大型铁路旅客车站,建筑面积约20 000 m^2 。工程为既有客站改扩建工程,柳州站站房扩

建工程位于柳江侵蚀河谷Ⅱ级阶地上,阶地地势平缓,表层为土层覆盖,上覆第四系全新统(Q_{4ml})人工填筑土,上更新统(Q_{3al})黏土,下伏石炭系中统大埔组(C_{2d})白云岩。本工程钻孔灌注桩桩径: $\Phi 250$ cm、 $\Phi 210$ cm、 $\Phi 180$ cm、 $\Phi 150$ cm、 $\Phi 125$ cm、 $\Phi 100$ cm。钻孔采用旋挖钻机成孔,并采用泥浆护壁,经过二次循环清孔后下导管浇注水下混凝土成桩。

2.2 单桩沉降可靠度分析

可靠度分析方法如图2所示。基本步骤是:1、确定随机变量,考虑桩基受到桩侧阻力和桩端阻力影响,分别将土体剪切模量、泊松比、桩端阻力值和土体刚度作为4个随机变量。2、根据公式(7)确定轴点长度,并获取设计矩阵;3、根据响应值构建近似功能函数,采用ABAQUS建模计算,4、计算桩基可靠度指标,本文不考虑群桩。

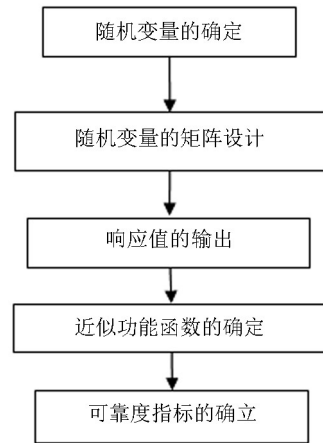


图2 单桩沉降可靠度分析流程图

Fig.2 Flowchart of reliability analysis of a single pile's settlement

灌注桩的容许沉降可通过规范获取 S_0 ,实测值为 S ,则其功能函数为 $G(x) = S_0 - S$ 。可靠度指标是通过Haosfer-Lind计算方法确定,即

$$\min \beta = \|Y\| = \sqrt{Y^T C Y} = \sqrt{\sum_{j=1}^n C \left(\frac{x_j - \mu_j}{\sigma_j} \right)^2},$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} G(x) = 0 \\ x_{\min} \leq x_j \leq x_{\max} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其中, Y 为响应值, C 为参数相关矩阵(本文为正交矩阵,故不相关), x_{\min} , x_{\max} 分别为随机参数的最大值和最小值。

同时为验证计算结果,采用 MATLAB 生成高度相关的样本点和正交性的样本点,然后基于 Monte-Carlo 法进行验证, Monte-Carlo 法的每个样本为 10^4 , 计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知,考虑参数高度相关性时,本文所提出的响应面方法可靠度指标与考虑高度相关性

Monte-Carlo 法基本一致,从而说明本文计算方法是正确可行。另一方面,考虑高度相关性所得计算结果普遍低于不考虑参数高度相关性的结果,从而证明传统响应面法计算桩基可靠度指标时计算结果高估。

表 2 不同桩号桩基沉降的可靠度指标
Tab.2 Reliability index of settlement of different piles

桩编号	可靠度指标			
	考虑高阶相关性的响应面法	传统响应面法	正交性情况下 Monte-Carlo 法	高度相关情况下 Monte-Carlo 法
G5	2.70	2.79	2.81	2.72
G14	2.69	2.81	2.80	2.75
G21	2.23	2.34	2.33	2.24
G22	2.54	2.64	2.63	2.56
G42	2.68	2.79	2.80	2.67

3 结论

1) 根据正交性原理,通过改变轴点长度,构建了高阶正交性的新型响应面法,并采用 Monte-Carlo 法验证了新方法准确性。

2) 通过工程实例计算发现,考虑高度相关性所得计算结果普遍低于不考虑参数高度相关性的结果。不考虑参数高度相关性直接计算桩基可靠度指标,将带来高估的计算结果。

参考文献:

- [1] RANDOLPH M. Design method for pile group and piled raft [C]//Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1994,5: 61-82.
- [2] ZHANG Q Q, ZHANG Z M. Study on interaction between dissimilar piles in layered soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(1): 67-81.
- [3] 王卫东,王阿丹,吴江斌,等. 考虑群桩加筋效应的桩基沉降计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(6): 212-218.
- [4] 谭晨. 湛江组结构性黏土中桩基础沉降计算与模型试验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
- [5] 潘军,杨小平,刘庭金. 考虑桩身非线性压缩的单桩沉降解析算法[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1579-1584.
- [6] 雒红丽. 黄土地区灰土挤密桩复合地基承载力可靠度分析及概率极限状态设计[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [7] 张飞龙,曹子君. 考虑空间变异性的桩基础可靠度设计方法比较研究[J]. 现代交通技术, 2018, 15(1): 46-47, 70.
- [8] 刘雪莹,谭晓慧,胡木子,等. 变量概率分布类型对桩基可靠指标的影响[C]//《工业建筑》2018 年全国学术年会论文集. 北京, 2018: 211-214, 220.
- [9] 马克生,杨晓军,龚晓南. 空间随机土作用下的柔性桩沉降可靠性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2000, 34(4): 366-369.
- [10] 刘峰. 基于 Rosenblueth 方法的桩基沉降稳定可靠性分析[J]. 中外建筑, 2010(6): 191-193.
- [11] 丁继辉,袁满,王岩. 基于 Boussinesq 应力解和位移解的复合地基沉降可靠度分析[J]. 工程力学, 2011, 28(S1): 35-39.

(责任编辑: 方素华)