

DOI:10.12170/20200424001

韩吉伟, 刘晓明, 杨月红, 等. 考虑土体强度空间变异性的单桩水平承载力研究 [J]. 水利水运工程学报, 2020(6): 108-114. (HAN Jiwei, LIU Xiaoming, YANG Yuehong, et al. Study on the horizontal bearing capacity of single pile foundation considering spatial variability of soil strength[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(6): 108-114. (in Chinese))

考虑土体强度空间变异性的单桩水平承载力研究

韩吉伟¹, 刘晓明¹, 杨月红¹, 黎冰², 鲍安琪²

(1. 内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 空间变异性是土体的固有天然属性, 在确定桩基础承载力时应考虑土的这一特性。应用已有的土体参数随机模拟方法, 考虑不同的变异系数和相关距离, 通过数值方法研究了土体强度的空间变异性对单桩水平承载力的影响。研究发现: 确定性分析得到的单桩水平承载力明显大于考虑土体强度空间变异性后的单桩水平承载力均值, 应用规范方法设计的单桩基础仍有失效的可能; 相关距离对单桩水平承载力均值无明显影响, 但承载力标准差随相关距离的增大而增大; 随着变异系数的增大, 单桩水平承载力均值随之减小, 但承载力标准差随之增大。因土体强度空间变异性导致单桩承载力的不确定性, 其分布规律可以用对数正态分布进行描述, 据此规律可获得任一荷载下单桩基础的失效概率。

关键词: 桩基础; 空间变异性; 随机场; 水平承载力

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)06-0108-07

空间变异性是土的天然属性。自从 Vanmarcke^[1] 在 1977 年提出采用随机场来模拟土体参数的空间变异性以来, 国内外学者对土体参数的自相关距离、分布规律、随机场模拟方法等做了一系列的研究。随着计算机技术的进步, 研究人员将有限元法与蒙特卡罗法相结合以分析结构的可靠性, 该方法被称为 RFEM (Random Finite-element Method)。1993 年, Griffiths 等^[2] 首次将 RFEM 应用于岩土工程领域, 并分析了土体的空间可变渗透率对地下水渗流的影响。后来, 这种方法逐渐被应用于分析边坡的稳定性^[3-5]、浅基础的沉降变形^[6-8]、复合地基^[9] 和桩基础的承载特性等方面。

桩基础方面, Pula 等^[10] 在考虑土性参数空间变异性的基础上, 提出并讨论了刚性桩水平承载力问题的解决思路。Teixeira 等^[11] 分别用一次二阶矩法和蒙特卡罗模拟法对竖向受荷桩进行了分析。杨剑等^[12] 也分析了土体空间变异性对单桩竖向承载力的影响。Chenari 等^[13] 基于随机场理论, 利用 RFEM 法研究了土体参数空间变异性对桩筏基础承载力的影响。Haldar 等^[14-15] 通过数值方法研究了具有空间变异强度特性土中水平受荷桩的承载力, 但只考虑了竖向相关距离而未考虑水平向相关距离, 而已有研究显示水平相关距离和竖向相关距离的差距是很大的^[16-21], 此外论文设定的变异系数不全。

由上述分析可知, 已有关于土体空间变异性对桩基水平承载特性影响的研究成果很少, 且存在参数设置不全的问题。本文采用 RFEM 研究在具有空间变异性的黏土中单桩的水平承载力, 将黏土的不排水抗剪强度作为随机变量, 重点研究变异系数、水平向和竖向相关距离对单桩水平承载力的影响, 为桩基础的设计提供参考。

收稿日期: 2020-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578145); 内蒙古电力(集团)有限责任公司 2019 年科技项目(2019097)

作者简介: 韩吉伟(1989—), 男, 内蒙古赤峰人, 工程师, 硕士, 主要从事电力岩土工程方面研究。

E-mail: han_jiwei@yeah.net

1 数值模型与工况设定

1.1 数值模型

针对水平荷载作用下的单桩基础, 采用 Abaqus 软件开展二维模拟分析, 模型宽 20 m, 高 24 m, 如图 1 所示。钢筋混凝土桩长 16 m, 直径 0.8 m, 弹性模量为 30 GPa, 泊松比为 0.2, 密度为 2.5 g/cm³, 在二维模型中依据抗弯刚度等效原则对桩体模量进行调整; 土体为黏性土, 密度为 1.3 g/cm³, 弹性模量为 30 MPa, 泊松比为 0.45, 不排水强度为 30 kPa。桩体采用线弹性本构模型, 土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。

桩体的网格按 0.5 m×0.4 m 划分, 土体网格按 0.5 m×0.5 m 划分, 并按图 2 所示进行编号。土体网格共有 1 856 个, 随机模拟分析时, 采用谱表示法离散随机场, 生成 1 856 个均值为 30 kPa 的土体强度值, 再分别赋值给每个网格单元, 以体现土体强度的空间变异性。

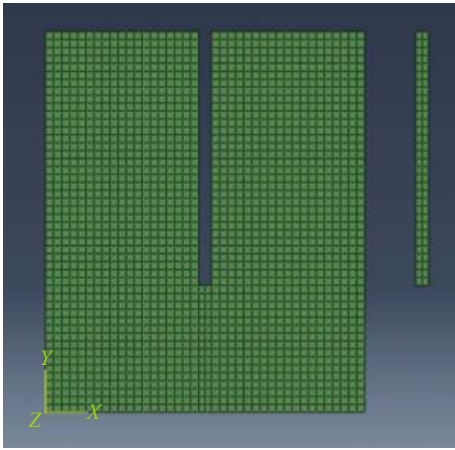


图 1 模型示意
Fig. 1 Model sketch

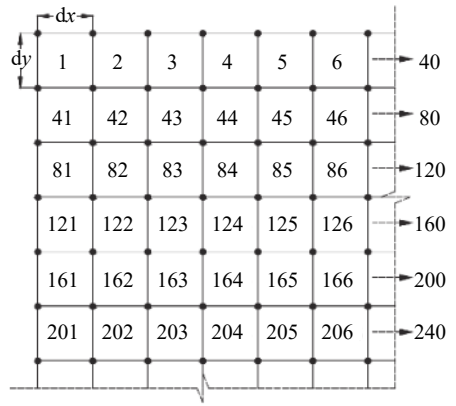


图 2 网格划分与编号
Fig. 2 Finite element meshing

对于桩土之间的接触属性, 切向行为类型为“罚”, 法向行为类型为“硬接触”。设定模型的左右两侧边界无水平位移, 底部无位移。模拟过程中, 在桩顶分级施加大小为 50、100、150、200、300、400、500、600、700 和 800 kN 的水平荷载。

1.2 模型验证

文献 [22] 对单桩基础开展了现场试验和数值模拟。为了确认本文所建模型的正确性, 依据文献 [22] 中的数据建模计算并与文献结果进行对比验证。该单桩为管桩, 桩长 12.8 m, 直径 0.319 m, 壁厚 12.7 mm, 弹性模量 200 GPa, 泊松比 0.25; 地基土为黏土, 重度为 20 kN/m³, 不排水抗剪强度为 32 kPa, 弹性模量为 6.4 MPa, 泊松比为 0.495。按照 1.1 节中的方法建模计算得到桩基的荷载-位移曲线, 并将其与文献 [22] 中的试验和数值结果进行对比(图 3)。从图 3 可以看出, 按照本文建模方法得到的结果与文献中的试验结果及数值模拟结果都比较接近, 变化趋势也一致, 说明本文建模方法是正确的。

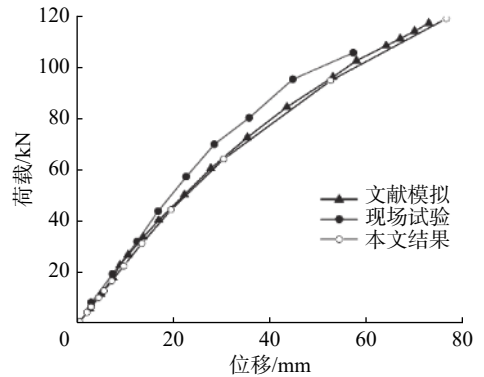


图 3 荷载-位移曲线对比
Fig. 3 Comparison of different load-displacement curves

1.3 工况设置

为了研究土体强度的空间变异性对单桩水平承载力的影响, 除了开展确定性分析(土体是均质的)外,

设置了11组随机模拟分析工况,其中变异系数变化范围为0.1~0.5;水平相关距离为8 m和16 m,竖向相关距离为4 m和8 m,具体工况如表1所示。每组工况中,应用蒙特卡罗法对地基土的不排水强度进行1 000次的随机模拟,得到1 000个不同的随机场模型,这1 000个模型中土体不排水强度的基本统计特征值相同,但每个模型中土体强度的空间分布不同,所以依据这些随机模型模拟得到的单桩承载力结果必然不同,这样即可呈现因土体强度空间变异性导致单桩水平承载力的不确定性。

表1 工况设置

Tab. 1 Test programs

编号	相关距离/m		变异系数	编号	相关距离/m		变异系数
	水平	竖向			水平	竖向	
HX8Y4Cov1	8	4	0.1	HX8Y8Cov4	8	8	0.4
HX8Y4Cov3	8	4	0.3	HX8Y8Cov5	8	8	0.5
HX8Y4Cov5	8	4	0.5	HX16Y8Cov1	16	8	0.1
HX8Y8Cov1	8	8	0.1	HX16Y8Cov3	16	8	0.3
HX8Y8Cov2	8	8	0.2	HX16Y8Cov5	16	8	0.5
HX8Y8Cov3	8	8	0.3				

2 计算结果与分析

数值模拟计算后,提取水平荷载与对应的桩顶水平位移数据,绘制荷载-位移曲线,结果显示在本文工况下桩基的水平荷载-位移曲线皆为缓变型,未出现明显的转折点。由于本文主要是单桩水平承载特性规律性的研究,而破坏标准的限值大小并不会改变规律,因此为了确定单桩的水平承载力,采用文献[15]中的破坏标准,即水平位移达到0.050 8 m对应的荷载为单桩水平极限承载力。

为了说明每组工况模拟1 000次所得结果的可靠性,对1 000次模拟得到的单桩水平承载力结果进行了样本容量分析。以工况HX8Y4Cov1和HX8Y8Cov3为例,数值模拟得到的单桩水平承载力均值和标准差随样本容量的变化曲线如图4所示。观察图4中的曲线变化趋势可以发现,当样本数较少时,单桩承载力均值和标准差的数值不稳定,不足以反映总体规律;当样本数量超过500后,承载力均值和标准差的浮动均在1%之内,表明此时样本数已足够多。因此本文选择1 000个样本数已满足样本大小的要求。

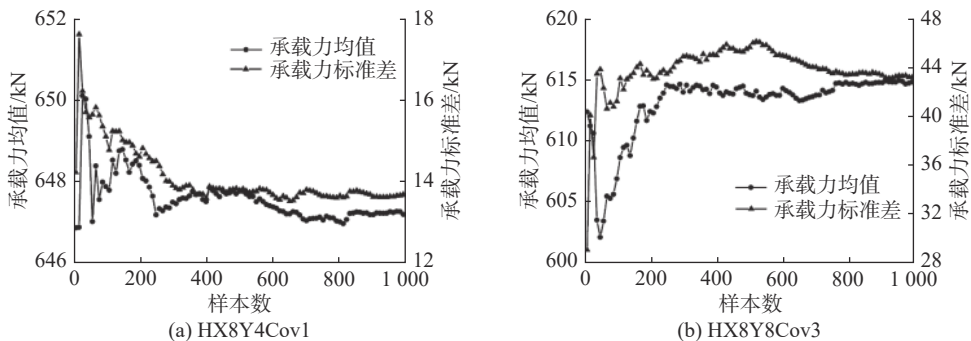


图4 样本容量对极限承载力均值和标准差的影响

Fig. 4 Mean and standard deviation of horizontal bearing capacity with sample capacity

2.1 确定性分析与随机场模拟结果对比分析

为了对比随机场模拟和确定性分析得到的单桩水平承载性状,将两者的荷载位移曲线画在同一张图中,如图5所示(以工况HX8Y8,变异系数0.1、0.3和0.5为例)。图5中的灰色曲线是从1 000条随机场模

拟得到的荷载-位移曲线中随机选出的 100 条曲线,未将 1 000 条曲线全部画出是因为曲线太密,会模糊一片;红色曲线为 1 000 条荷载-位移曲线中的中值曲线,中值曲线的含义是单桩水平承载力大小排在 1 000 个承载力中的第 500 位。计算显示由中值曲线得到的单桩水平承载力十分接近承载力的均值,以工况 HX8Y8Cov3 工况为例,依据中值曲线得到的单桩水平承载力为 611.35 kN,1 000 个单桩承载力的均值为 606.87 kN,两者相差不超过承载力的 1%,所以用中值曲线代替均值曲线。蓝色曲线是确定性分析得到的荷载-位移曲线。

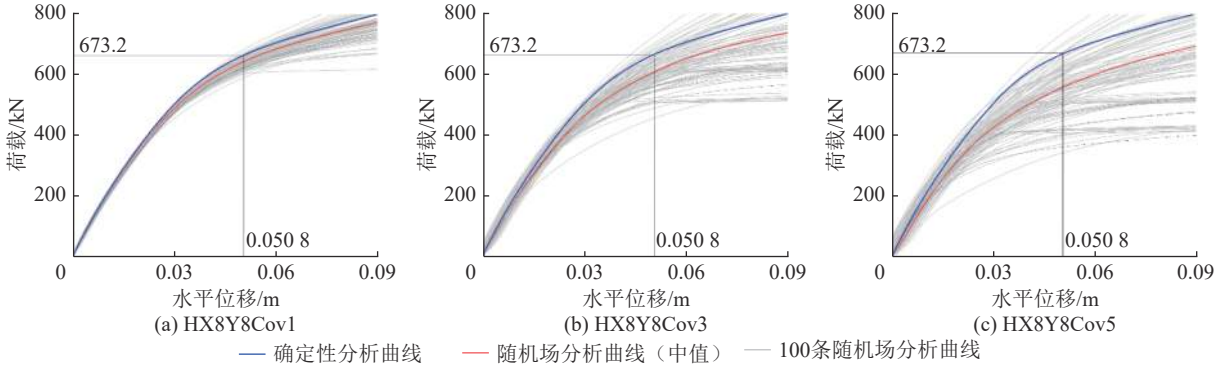


图 5 随机场分析与确定性分析得到的单桩水平荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of single pile foundation of random field analysis and deterministic analysis

图 5 显示,不论何种工况,确定性分析得到的荷载-位移曲线位于绝大多数随机模拟分析得到的曲线之上,这说明考虑了土体强度的空间变异性之后,单桩的水平承载力降低了。由图 5 可见,随着变异系数从 0.1 增大到 0.5,随机场模拟分析得到的单桩荷载-位移曲线越来越分散,说明单桩水平承载力差异越来越大;除此之外,观察图中红色曲线与蓝色曲线之间的相对位置,可以发现两者的距离也越来越大,这说明考虑土体强度的空间变异性之后,单桩水平承载力随变异系数的增大而逐渐降低,对于工况 HX8Y8,变异系数为 0.1、0.3 和 0.5 对应的单桩水平承载力均值分别为 646.1、614.7 和 564.8 kN,显然单桩水平承载力均值是逐渐降低的,且与确定性分析结果 673.2 kN 的差距越来越大。

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中规定,在计算桩基承载力时所采用的抗剪强度参数应取标准值 ϕ_k ,具体计算方法如下:

$$\phi_k = \gamma_s \phi_m \quad (1)$$

$$\gamma_s = 1 \pm \left(\frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) \delta \quad (2)$$

式中: ϕ_m 为岩土参数的平均值; γ_s 为统计修正系数; n 为样本数量; δ 为岩土参数的变异系数。式(2)中的正负号按不利组合考虑,对抗剪强度指标的修正系数应取负值。

取不同的强度参数样本数量分别为 4、9、25 和 49,结合 0.1~0.5 不等的变异系数,按照式(1)和(2)对土的不排水强度进行修正。然后根据修正后的不排水强度开展单桩基础的确定性分析,得到单桩水平承载力(见表 2)。从表 2 可以看出,依据样本数量和变异系数修正后的强度计算得到的单桩承载力与随机场分析得到的单桩承载力均值相比,两者的大小关系取决于土体强度参数样本数量的多少和变异系数的大小,但即使对土体强度进行修正后,各工况下确定性分析得到的单桩承载力皆大于随机场分析得到的单桩承载力最小值,这说明按照规范方法设计单桩基础仍存在失效的可能,具体的失效概率还需结合不同的工况进一步分析研究。

表 2 不同条件下单桩的水平承载力
Tab. 2 Horizontal bearing capacity under different conditions

变异系数	单桩的水平承载力/kN				随机场分析 均值/kN	随机场分析 最小值/kN
	样本量4	样本量9	样本量25	样本量49		
0.1	617.1	636.7	646.5	650.2	646.1	593.7
0.2	569.0	613.5	634.3	641.5	634.2	540.1
0.3	511.5	588.0	621.5	632.9	614.7	461.5
0.4	442.5	560.2	608.4	623.8	590.9	405.7
0.5	364.2	529.4	594.4	614.7	564.8	350.3

2.2 单桩水平承载力累计分布规律

对每组工况中 1 000 次模拟得到的单桩水平承载力进行统计分析,横坐标为水平承载力,纵坐标为小于某承载力的模拟次数占总数 1 000 的百分比,累计概率分布见图 6(以工况 HX8Y8Cov1 和 HX8Y8Cov3 为例)。对图 6 中的蓝色数据点用对数正态分布曲线拟合,发现两者非常吻合。因此,当模拟次数足够多时,就可以根据对数正态分布曲线获取该工况下任一水平荷载作用下单桩基础的失效概率,这与竖向受荷单桩基础的规律^[14]是相同的。

2.3 变异系数和相关距离对单桩水平承载力的影响

考虑土体强度的空间变异性后,单桩水平承载力随变异系数的大小而改变,图 7 描述了单桩水平承载力均值和标准差随变异系数的变化规律。分析图 7 可以发现,不论是多大的相关距离,单桩水平承载力均值都随土体不排水抗剪强度变异系数的增大而降低,但承载力标准差则随变异系数的增大而增大。单桩水平承载力的均值和标准差这种随变异系数的变化规律,对于桩基础的承载力而言都是不利的,所以在实际工程中应给予土体变异性以足够的重视。

对比图 7 中的 3 条承载力均值曲线可以发现,3 个工况下的单桩水平承载力均值差异很小,特别是在变异系数较小时,这说明相关距离对单桩水平承载力均值的影响较小。而图 7 中承载力标准差对应的 3 条曲线有明显的差异,在相同的变异系数条件下,工况 HX16Y8 的承载力标准差最大,工况 HX8Y4 的承载力标准差最小,这说明单桩水平承载力的标准差随相关距离的增大而增大。

3 结 语

为了研究土体的空间变异性对单桩水平承载力的影响,将土体强度作为随机变量,建立土体随机场模

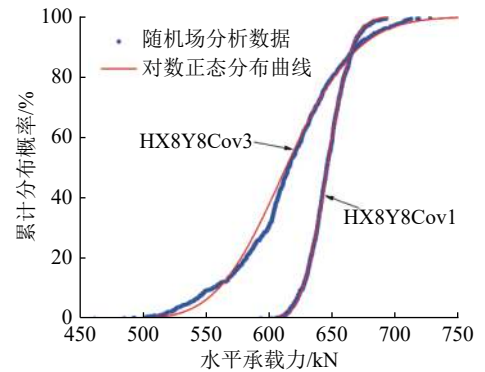


图 6 单桩水平承载力累计分布曲线

Fig. 6 Cumulative distribution curves of horizontal bearing capacity of pile

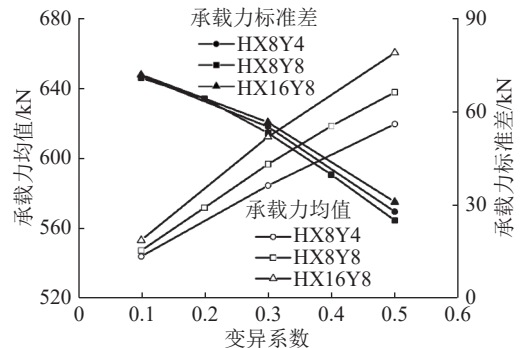


图 7 水平承载力均值和标准差与变异系数的关系曲线

Fig. 7 Mean and standard deviation of horizontal bearing capacity versus coefficient of variation

型,通过数值模拟分析了不同工况下单桩水平承载性能的变化规律,得到如下结论:

(1)单桩水平承载力均值随土体强度变异系数的增大而降低,且承载力标准差逐渐增大。若不考虑土体强度的空间变异性,确定性分析得到的单桩承载力是偏高的。工程中需特别注意土体空间变异性大的工况。

(2)因土体强度空间变异性导致的单桩承载力的不确定性,其分布规律可以用对数正态分布进行描述。因此,当模拟次数足够多时,可以根据对数正态分布曲线获取任一水平荷载作用下单桩基础的失效概率。

(3)在本文的相关距离条件下,相关距离对单桩水平承载力均值影响很小,但承载力的标准差随相关距离的增大而增大。

参 考 文 献:

- [1] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1977, 103(11): 1227-1246.
- [2] GRIFFITHS D V, FENTON G A. Seepage beneath water retaining structures founded on spatially random soil[J]. *Géotechnique*, 1993, 43(4): 577-587.
- [3] GRIFFITHS D V, FENTON G A. Probabilistic slope stability analysis by finite elements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(5): 507-518.
- [4] LIU L L, DENG Z P, ZHANG S H, et al. Simplified framework for system reliability analysis of slopes in spatially variable soils[J]. *Engineering Geology*, 2018, 239: 330-343.
- [5] 冯斌,孙宏磊,蔡袁强,等.海底滑坡对海洋单桩冲击力试验研究[J].*海洋工程*, 2019, 37(6): 114-121. (FENG Bin, SUN Honglei, CAI Yuanqiang, et al. Experimental study of submarine landslide impact on offshore wind power piles[J]. *The Ocean Engineering*, 2019, 37(6): 114-121. (in Chinese))
- [6] GRIFFITHS D V, FENTON G A, MANOHARAN N. Bearing capacity of rough rigid strip footing on cohesive soil: probabilistic study[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(9): 743-755.
- [7] CHO S E, PARK H C. Effect of spatial variability of cross-correlated soil properties on bearing capacity of strip footing[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, 34(1): 1-26.
- [8] 刘振宇,王立忠,国振,等.可渗透海床上单桩所受孤立波破碎波浪力数值研究[J].*海洋工程*, 2019, 37(5): 57-67. (LIU Zhenyu, WANG Lizhong, GUO Zhen, et al. Numerical investigation of breaking solitary wave force on vertical monopile on porous seabed[J]. *The Ocean Engineering*, 2019, 37(5): 57-67. (in Chinese))
- [9] 洪昌华,龚晓南.基于稳定分析法的碎石桩复合地基承载力的可靠度[J].*水利水运科学研究*, 2000(1): 30-35. (HONG Changhua, GONG Xiaonan. Reliability of bearing capacity of composite foundation based on stabilization analysis[J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research institute*, 2000(1): 30-35. (in Chinese))
- [10] PUŁA W, RÓŻAŃSKI A. Reliability of rigid piles subjected to lateral loads[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2012, 12(2): 205-218.
- [11] TEIXEIRA A, HONJO Y, GOMES CORREIA A, et al. Sensitivity analysis of vertically loaded pile reliability[J]. *Soils and Foundations*, 2012, 52(6): 1118-1129.
- [12] 杨剑,黎冰,鲍安琪,等.考虑土性参数空间变异性的单桩竖向承载力分析[J].*水利水运工程学报*, 2019(5): 85-90. (YANG Jian, LI Bing, BAO Anqi, et al. Analysis of vertical bearing capacity of single pile foundations considering spatial variability of soil parameters[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(5): 85-90. (in Chinese))
- [13] CHENARI R J, GHORBANI A, ESLAMI A, et al. Behavior of piled raft foundation on heterogeneous clay deposits using random field theory[J]. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 2018, 51(1): 35-54.
- [14] HALDAR S, BABU G L S. Effect of soil spatial variability on the response of laterally loaded pile in undrained clay[J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35(4): 537-547.
- [15] EL-RAMLY H, MORGENSTERN N R, CRUDEN D M. Probabilistic stability analysis of a tailings dyke on presheared clay-

- shale[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(1): 192-208.
- [16] 蒋水华, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑自相关函数影响的边坡可靠度分析[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(3): 508-518. (JIANG Shuihua, LI Dianqing, ZHOU Chuangbing, et al. Slope reliability analysis considering effect of autocorrelation functions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(3): 508-518. (in Chinese))
- [17] 李小勇, 谢康和. 土性参数相关距离的计算研究和统计分析[J]. *岩土力学*, 2000, 21(4): 350-353. (LI Xiaoyong, XIE Kanghe. Numerical studies and statistic analyses on correlation distances of soil character parameters[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(4): 350-353. (in Chinese))
- [18] 孙天霆, 王树鹏, 潘军宁, 等. 考虑局部冲刷的跨海桥梁桩基基础波流力[J]. *水科学进展*, 2019, 30(6): 863-871. (SUN Tianting, WANG Shupeng, PAN Junning, et al. Study on wave-current force for pile foundation of sea-crossing bridge considering local scouring[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(6): 863-871. (in Chinese))
- [19] 武海斌, 黄焱, 李伟. 大直径单桩风机基础冰荷载模型试验研究[J]. *海洋工程*, 2018, 36(2): 83-91. (WU Haibin, HUANG Yan, LI Wei. Experimental study on the ice load of large-diameter monopile wind turbine foundations[J]. *The Ocean Engineering*, 2018, 36(2): 83-91. (in Chinese))
- [20] 隋侗侗, 张弛, 高玉峰, 等. 波浪作用下单桩基础周围海床液化机制研究[J]. *海洋工程*, 2018, 36(4): 88-96. (SUI Titi, ZHANG Chi, GAO Yufeng, et al. Wave-induced seabed liquefaction around an inserted mono-pile foundation[J]. *The Ocean Engineering*, 2018, 36(4): 88-96. (in Chinese))
- [21] 程永舟, 吕行, 王文森, 等. 波浪作用下大直径淹没圆柱局部冲刷试验研究[J]. *水科学进展*, 2019, 30(6): 872-881. (CHENG Yongzhou, LYU Xing, WANG Wensen, et al. Experimental study on local scour around large-diameter submerged cylinders under combined waves and current action[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(6): 872-881. (in Chinese))
- [22] AHMADI M M, AHMARI S. Finite-element modelling of laterally loaded piles in clay[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, 2009, 162(3): 151-163.

Study on the horizontal bearing capacity of single pile foundation considering spatial variability of soil strength

HAN Jiwei¹, LIU Xiaoming¹, YANG Yuehong¹, LI Bing², BAO Anqi²

(1. Inner Mongolia Power Research Institute, Hohhot 010020, China; 2. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Spatial variability is the inherent nature of soil, which needs to be considered when calculating the bearing capacity of piles. Different coefficients of variation and correlation distance will be considered. Based on the numerical method, the existing simulation method of random field will be used to generate soil parameters so as to study the effect of spatial variability of soil strength on the horizontal bearing capacity of a single pile. The results show that after considering the spatial variability of soil strength, the average value of the single pile horizontal bearing capacity is significantly less than that obtained by the deterministic analysis, and the single pile foundation designed by the standard method is still possible to fail; the correlation distance has no significant effect on the average value of the single pile horizontal bearing capacity, but the standard deviation of bearing capacity increases with the increase of the correlation distance; with the increase of the coefficient of variation, the average value of the horizontal bearing capacity of the pile foundation decreases, while the standard deviation of the bearing capacity increases. The distribution law of horizontal bearing capacity of the pile foundation considering the spatial variability can fit log-normal distribution. According to this law, the failure probability of the pile foundation under any load can be obtained.

Key words: pile foundation; spatial variability; random field; horizontal bearing capacity