

基于随机响应面法的斜坡基桩水平承载可靠性分析

尹平保^{1,2†}, 王杰^{1,2}, 张建仁^{1,2}, 王康^{1,2}

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 桥梁工程安全控制教育部重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410114)

摘要: 斜坡效应和参数不确定性均会影响斜坡段桥梁基桩水平承载特性及安全可靠性。首先, 建立考虑斜坡效应的基桩简化受力模型, 推导其内力分析的有限差分解; 其次, 基于随机响应面法, 建立斜坡基桩水平承载可靠性分析的极限状态函数, 利用一次二阶矩法求解可靠度指标和失效概率, 并对理论方法和程序的合理性进行对比验证; 最后, 结合工程实例探讨桩径、地基抗力比例系数、桩身弹性模量和水平荷载等对基桩水平承载可靠性的影响。结果表明: 在水平位移失效模式下, 桩径的变异性对基桩水平承载可靠性影响最大, 基桩失效概率随斜坡效应折减系数增加而增大; 在材料屈服失效模式下, 基桩失效概率受参数变异性和斜坡效应的影响较小。对位于斜坡上的高桥墩基桩, 应增大变形安全余量, 确保基桩可靠。

关键词: 桥梁工程; 斜坡基桩; 随机响应面法; 可靠性; 水平承载特性

中图分类号: U443.15

文献标志码: A

Reliability Analysis on Horizontal Bearing of Pile Foundation in Sloping Ground Based on Random Response Surface Method

YIN Pingbao^{1,2†}, WANG Jie^{1,2}, ZHANG Jianren^{1,2}, WANG Kang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Key Laboratory for Safety Control of Bridge Engineering of Ministry of Education

(Changsha University of Science Technology), Changsha 410114, China)

Abstract: The horizontal bearing characteristics and reliability of the bridge foundation piles in the sloping ground are affected by the slope effect and parameter uncertainty. Considering the slope effect, a simplified model of the pile was first established and the finite difference solution of internal force analysis was derived. Based on the stochastic response surface method, the limit state function was proposed to analyze the horizontal bearing reliability of piles in sloping ground. The first order second-moment calculation method was used to solve the reliability index and failure probability, and the calculation results were compared with the Monte Carlo method and quadratic function response surface method to verify the rationality of the solution method and program. Finally, the influences of pile diameter, proportional coefficient of foundation resistance, elastic modulus of pile body and horizontal load on the horizontal bearing reliability of piles were discussed with the engineering example. The results show that the variability of

* 收稿日期: 2022-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078055, 52178311), National Natural Science Foundation of China(52078055, 52178311); 江西省交通运输厅科技项目(2021H0005), Science and Technology Fund of Transportation Department of Jiangxi Province(2021H0005); 湖南省教育厅科学研究项目(20A001), Scientific Research Fund of Education Department of Hunan Province(20A001)

作者简介: 尹平保(1984—), 男, 湖南邵阳人, 长沙理工大学副教授, 博士后

† 通信联系人, E-mail: pingbaby921@163.com

pile diameter has the greatest influence on the horizontal bearing reliability of piles under the failure mode of horizontal displacement. The failure probability of foundation piles increases with the increase of slope effect reduction factor. The slope effect and parameter variability have little influence on the failure probability of piles under the failure mode of materials yield. For bridge high pier pile located in the sloping ground, the deformation safety should be increased to ensure the reliability of the pile.

Key words: bridge engineering; in-sloping pile foundation; stochastic response surface method; reliability; horizontal bearing characteristics

为守护“绿水青山”、实现“碳中和、碳达峰”,在我国西部山区修建高速公路和铁路时,主要采用高架桥的方式跨越江河、峡谷或空洞等特殊地区.为此,不可避免地将桥梁基桩设置在高陡斜坡上.现有研究表明,对位于斜坡上的桥梁基桩,其水平承载特性与常规的平地基桩差异显著^[1],为确保斜坡段桥梁基桩的安全与稳定,很有必要对其水平承载机理及可靠性展开深入系统的研究.

有关斜坡基桩水平承载特性,已有部分学者对其展开了一些有益的研究,如:赵明华等^[2-3]根据高陡斜坡上桥梁基桩的受力特点,通过基桩水平承载极限分析,研究了斜坡坡度、地基抗力折减系数对桩身水平位移及承载力的影响;Zhuang等^[4]基于抗剪强度折减法,分析了斜坡坡度对基桩安全系数的影响;Sivapriya等^[5]通过室内模型试验与有限元分析,研究了斜坡坡度对基桩水平承载力的影响.上述研究均表明,斜坡坡度的存在对基桩水平承载特性的影响非常显著,很有必要对其展开深入研究.实际上,桩、土参数的不确定性对基桩水平承载性能的影响也不容忽视,因此,基于水平变形和材料屈服等失效模式,开展基桩水平承载可靠性研究非常重要.Chan等^[6]结合响应面法与神经网络法,分析了桩、土参数的相关性对基桩水平承载可靠性的影响;Kozubal等^[7]将气候作为随机变量,采用响应面法与多项式回归相结合的方法,开展了复杂环境下基桩水平承载可靠性分析;赵明华等^[8]克服极限状态方程无法收敛等难题,提出了改进响应面法,并将其用于倾斜荷载桩的可靠性分析;Chan和Low^[9]基于挠度和弯矩两种破坏模式,分析了桩长和桩径对水平受荷桩可靠性的影响.综上所述,目前有关基桩水平承载可靠性的研究多针对平地桩,而对斜坡基桩的分析显然不够.因此,为确保斜坡基桩的安全与稳定,进一步考虑斜坡坡度的影响,对其水平承载可靠性开

展深入研究显得尤其重要.

鉴于此,本文在现有研究基础上,首先分析斜坡效应对基桩水平承载特性的影响,建立基桩简化受力模型及挠曲微分方程,导得相应的理论解答;其次,基于随机响应面法,建立斜坡基桩水平承载可靠性分析极限状态函数,并通过编程求解可靠度指标;最后,结合已有算例,对比分析理论方法及程序的合理性,进而探讨参数不确定性和斜坡效应对基桩水平承载可靠性的影响.

1 考虑斜坡效应的基桩受力分析

1.1 简化受力模型及挠曲微分方程

对位于斜坡上的桥梁基桩,为研究斜坡坡度对其受力特性的影响,可沿桩身轴心方向将基桩划分为斜坡影响段(l_1)和嵌固段(l_2).在桩顶水平荷载 H 和偏心弯矩 M 的共同作用下,可建立如图1所示的简化受力模型^[10].

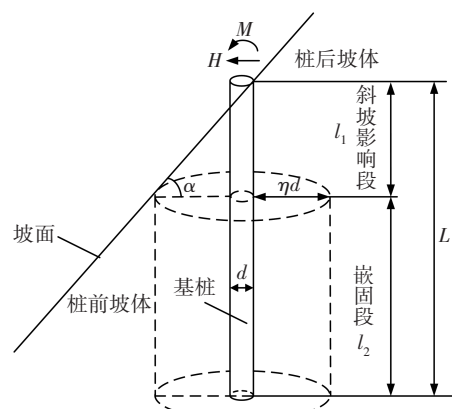


图1 斜坡基桩简化受力模型

Fig.1 The simplify model of piles in sloping ground

图1中,因存在斜坡坡度,桩前 l_1 深度范围内出现一临空面,使得基桩两侧岩土体不对称,桩前坡体

一定深度范围内的岩土体水平抗力有所减弱,此即所谓的“斜坡效应”^[11].其中, l_1 为斜坡效应影响深度,其计算表达式为:

$$l_1 = \eta d \tan \alpha \quad (1)$$

式中: η 为斜坡效应折减系数,现有研究表明^[10]斜坡效应影响范围为 3~5 倍桩径,即 η 可取 3~5; d 为桩径; α 为坡度.

根据图 1 所示的简化受力模型,通过受力分析,可建立考虑斜坡效应的基桩挠曲微分方程:

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} + C(z) b_1 x = 0 \quad (2)$$

式中: EI 为桩身抗弯刚度; x 为桩身水平位移; z 为计算点到桩顶的距离; $C(z)$ 为桩侧地基抗力系数; b_1 为桩身计算宽度.

根据 m 法,并综合考虑斜坡效应的影响,假定桩侧地基抗力系数 $C(z)$ 表达式为^[10]:

$$C(z) = \begin{cases} m \frac{z^2}{l_1}, & 0 \leq z < l_1 \\ m(z - l_1), & l_1 \leq z < L \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 为地基抗力比例系数,其他参数同前.

1.2 基桩受力分析的有限差分法

为求解基桩挠曲微分方程式(2),根据中心差分原理,可将基桩斜坡影响段(l_1)和嵌固段(l_2)共划分为段长均为 h 的 N 段,并在桩顶和桩端分别增加两个虚拟节点,即共生成 $(N+5)$ 个节点,各段间的差分节点布置如图 2 所示.

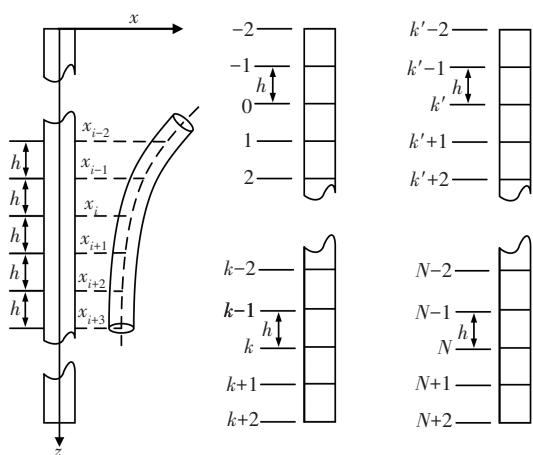


图 2 基桩差分点布置

Fig.2 Differential point arrangement of the pile

实际工程中基桩边界条件可分为自由、弹嵌、嵌固和铰支 4 种情况^[12].本文假定桩顶自由、桩端嵌固,其对应的边界条件差分格式为:

1) 桩顶自由

$$\begin{cases} x_2 - 2x_1 + 2x_{-1} - x_{-2} = \frac{2Hh^3}{EI} \\ x_1 - 2x_0 + x_{-1} = \frac{Mh^2}{EI} \end{cases} \quad (4)$$

2) 桩端嵌固

$$\begin{cases} x_{N-1} - x_{N+1} = 0 \\ x_N = 0 \end{cases} \quad (5)$$

对于基桩斜坡影响段 ($0 < z < l_1$), 节点 i ($i < K = l_1/h$) 处的控制差分方程为:

$$x_{i-2} - 4x_{i-1} + 6x_i - 4x_{i+1} + x_{i+2} + \frac{b_1 m i^2 h^6}{EI l_1} x_i = 0 \quad (6)$$

基桩桩身转角、弯矩和剪力的差分格式为:

$$\begin{cases} (x_{i+1} - x_{i-1})/2h = \varphi_i \\ (x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1})EI/h^2 = M_i \\ (-x_{i-2} + 2x_{i-1} - 2x_{i+1} + x_{i+2})EI/2h^3 = H_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_i 为节点 i 处的水平位移; φ_i 为节点 i 处的转角; M_i 为节点 i 处的弯矩; H_i 为节点 i 处的剪力.

由式(6)可得桩顶 ($i=0$) 处的控制差分方程为:

$$x_2 - 4x_1 + 6x_0 - 4x_{-1} + x_{-2} = 0 \quad (8)$$

将式(4)代入式(8)可得:

$$\begin{cases} x_{-1} = 2x_0 - x_1 + \frac{Mh^2}{EI} \\ x_0 = 2x_1 - x_2 + \frac{Mh^2}{EI} + \frac{Hh^3}{EI} \end{cases} \quad (9)$$

联合式(4)和式(6),并令 $i=1, 2, 3, \dots, K$,可得基桩斜坡影响段 ($0 < z < l_1$) 各节点的位移递推式:

$$x_i = a_i x_{i+1} - b_i x_{i+2} + c_i \quad (10)$$

根据 $i=0$ 和 $i=-1$ 时对应的 $a_{-1}, a_0; b_{-1}, b_0; c_{-1}, c_0$ 等值可得各节点参数的表达式为:

$$\begin{cases} a_i = \frac{a_{i-2} b_{i-1} + 4 - 4b_{i-1}}{d_i}; & b_i = \frac{1}{d_i}; \\ c_i = (-a_{i-2} c_{i-1} - c_{i-2} + 4c_{i-1})/d_i; \\ d_i = \left(a_{i-2} a_{i-1} - b_{i-2} - 4a_{i-1} + 6 + \frac{b_1 m i^2 h^6}{EI l_1} \right) \end{cases} \quad (11)$$

对于嵌固段 ($l_1 < z < L$), 节点 i ($K \leq i < N = L/h$) 处的控制差分方程为:

$$x_{i-2} - 4x_{i-1} + 6x_i - 4x_{i+1} + x_{i+2} + \frac{b_1 m (ih - l_1) h^4}{EI} x_i = 0 \quad (12)$$

联合式(5)和式(12),并令 $i=K, K+1, K+2, \dots, N$,可得嵌固段 ($l_1 < z < L$) 各节点的位移递推式:

$$x_i = a_i x_{i-1} - b_i x_{i-2} \quad (13)$$

根据 $i=N-1$ 和 $i=N-2$ 时对应的 $a_{N-1}, a_{N-2}; b_{N-1}, b_{N-2}$ 等值, 可得 $K \leq i \leq N-3$ 时的参数表达式为:

$$\begin{cases} a_i = \frac{a_{i+2}b_{i+1} + 4 - 4b_{i+1}}{c_i}; & b_i = \frac{1}{c_i}; \\ c_i = a_{i+2}a_{i+1} - 4a_{i+1} - b_{i+2} + 6 + \frac{b_1 m(ih - l_1)h^4}{EI} \end{cases} \quad (14)$$

由节点位移递推式(10)(13)以及节点参数表达式(11)(14), 即可求得交界点 K 及其邻近节点的位移; 然后, 通过节点位移递推式(10)(13)求得各节点位移; 进而将各节点位移代入式(7)即可求得各节点的转角、弯矩和剪力^[13].

2 斜坡基桩可靠性分析

构件截面抗力的随机性主要体现在材料性能、几何参数和计算模式等方面. 现有研究表明, 水平受荷桩的失效模式主要有桩顶水平位移过大和桩身材料屈服(桩身内力超过材料屈服强度)^[8]. 通常情况下, 对于变异性较小的参数, 可将其作为确定性参数, 而将变异性较大的参数当作随机变量. 假设随机变量为 $y_1, y_2, y_3, y_4, \dots, y_n$, 则对应的随机向量 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, y_3, y_4, \dots, y_n)$. 因此, 相应失效模式下基桩极限状态函数可表示为:

$$Z = [S] - S = g(\mathbf{Y}) = g(y_1, y_2, y_3, y_4, \dots, y_n) = 0 \quad (15)$$

式中: $[S]$ 为相应失效模式下参数容许值; S 为计算得到的最大值; Z 为安全余量.

2.1 极限状态函数的建立

关于基桩可靠性分析, 目前主要有蒙特卡罗法(MCS)、一次二阶矩法(JC)以及响应面法(RSM)等^[14-15]. 对于高阶非线性函数或隐式函数, 蒙特卡罗法的计算量较大, 实用性不强; 一次二阶矩法无法求解隐式函数; 响应面法和改进响应面法均是利用显式响应面函数拟合较复杂的极限状态函数, 两者虽可求解可靠度指标, 但收敛性很难保证, 且二者对高阶非线性极限状态函数的计算精度并不高^[15]. 为解决以上问题, 可采用随机响应面法(SRSM)拟合出相应的极限状态函数. 随机响应面法是通过展开的 Hermite 随机多项式来拟合随机变量之间的函数关系, 再根据隐式的极限状态函数, 利用一次二阶矩法(JC法)求解可靠度指标及失效概率^[16-19], 具体过程如下.

1) 首先根据需要展开的 Hermite 随机多项式阶

数 p 和随机变量个数 n 确定待定系数个数 N_a 、配点值 W 和选择的配点总数 N_b , 其计算表达式为:

$$\begin{cases} N_a = \frac{(n+p)!}{n! p!} \\ N_b = (p+1)^n \end{cases} \quad (16)$$

式中: $N_b \gg N_a$, 可采用线性无关原则选取所需的配点. 配点值 W 为 $p+1$ 阶一维 Hermite 多项式的根.

2) 将随机变量 y_i 转换成服从标准正态分布的随机变量 X_i , 其转换关系为:

$$X_i = \mu_{y_i} + \sigma_{y_i} W \quad (17)$$

式中: μ_{y_i} 和 σ_{y_i} 分别为随机变量 y_i 的均值和标准差.

3) 利用 Hermite 随机多项式将极限状态函数(15)展开, 可得安全余量 Z 为:

$$\begin{aligned} Z = & a_0 \Gamma_0 + \sum_{i_1=1}^n a_{i_1} \Gamma_1(U_{i_1}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n a_{i_1 i_2} \Gamma_2(U_{i_1}, U_{i_2}) + \\ & \dots + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n \dots \sum_{i_n=1}^n a_{i_1 i_2 \dots i_n} \Gamma_n(U_{i_1}, U_{i_2}, \dots, U_{i_n}) \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $a_0, a_{i_1}, a_{i_1 i_2}, a_{i_1 i_2 \dots i_n}$ 均为待定系数; $\mathbf{U}_i = (U_{i_1}, U_{i_2}, \dots, U_{i_n})$ 为服从标准正态分布的随机向量; $\Gamma_n(U_{i_1}, U_{i_2}, \dots, U_{i_n})$ 是 n 阶 Hermite 多项式:

$$\Gamma_n(U_{i_1}, U_{i_2}, \dots, U_{i_n}) = (-1)^n e^{\frac{1}{2}U^T U} \frac{\partial^n}{\partial U_{i_1} \partial U_{i_2} \dots \partial U_{i_n}} e^{-\frac{1}{2}U^T U} \quad (19)$$

4) 将步骤 1) 中选取的配点值 W 与步骤 3) 中的安全余量 Z 分别代入式(18), 求解 $a_0, a_{i_1}, a_{i_1 i_2}$ 等待定系数, 即可得到显式的极限状态函数.

2.2 可靠性分析

根据得到的极限状态函数, 采用一次二阶矩法(JC法)求解基桩水平承载可靠度指标及失效概率. 具体求解过程为:

- 1) 假定初始验算点 \mathbf{Y}^* , 一般可取 $\mathbf{Y}^* = \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{Y}}$.
- 2) 计算灵敏度系数 $\cos \theta_{Y_i}$ 和可靠度指标 β :

$$\cos \theta_{Y_i} = - \frac{\sigma_{Y_i} \frac{\partial g(\mathbf{Y}^*)}{\partial Y_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial g(\mathbf{Y}^*)}{\partial Y_i} \right]^2 \sigma_{Y_i}^2}} \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^n \cos \theta_{Y_i} \bar{Y}_i - \beta = 0 \quad (21)$$

式中: $\bar{Y}_i = (Y_i - \mu_{Y_i}) / \sigma_{Y_i}$ 为 Y_i 的标准化变量.

- 3) 确定新的设计验算点 \mathbf{Y}^* :

$$\mathbf{Y}_i^* = \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{Y}_i} + \beta \boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{Y}_i} \cos \theta_{Y_i} \quad (22)$$

- 4) 重复步骤 2) 至 4), 直至前后两次 $\|\mathbf{Y}^*\|$ 之差 $<$ 允

许误差 ε , ε 通常为 0.001.

5) 根据可靠度指标 β 计算失效概率:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\beta} \exp(-\frac{u^2}{2}) du \quad (23)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为服从标准正态分布的累计分布函数.

3 工程实例及可靠性分析

3.1 工程概况

湖南省张(家界)花(垣)高速公路泗溪河一桥采用桩柱式基础, 基桩设置在坡度为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的斜坡上. 该基桩采用 C25 混凝土, 桩长为 25 m; 桩径 d 均值为 2 m, 标准差为 0.04 m; 桩身弹性模量 E 均值为 28 GPa, 标准差为 0.56 GPa. 各土层地基抗力比例系数 m 均值为 60 MN/m⁴, 标准差为 12 MN/m⁴. 基桩纵筋为 46 ϕ 25 的 HRB335 钢筋, 通长配置. 桩顶弯矩 M 为 1 200 kN·m; 水平荷载 H 均值为 150 kN, 标准差为 30 kN; 桩顶容许水平位移为 6 mm; 桩身抗弯承载力为 4 561 kN·m.

3.2 基桩水平承载可靠性分析

1) 取等量差分段长 $h=0.05$ m, 斜坡效应折减系数 $\eta=5$, 坡度为 45° , 则斜坡效应影响深度 $l_1=10$ m.

2) 将桩身弹性模量 E 、桩径 d 、桩顶水平荷载 H 、地基抗力比例系数 m 值作为随机变量, 并假定各随机变量均服从正态分布, 且相互独立^[8], 则随机变量的个数 $n=4$, 其对应的随机向量为:

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4) = (E, d, H, m) \quad (24)$$

3) 根据式(17)(18)及(24), 即可建立随机变量的个数 $n=4$ 、最高阶数为 3 的 Hermite 随机多项式, 即将其按最高阶数展开得到基桩水平承载失效模式下的随机响应面函数为:

$$Z = [S] - S \approx a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i U_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} (U_i^2 - 1) + \sum_{i=1}^3 a_{iii} (U_i^3 - 3U_i) + \sum_{i=1}^2 \sum_{j>i}^3 a_{ij} (U_i U_j) + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ijj} (U_i U_j^2 - U_i) + \sum_{i=1}^2 \sum_{j>i}^2 \sum_{k>j}^3 a_{ijk} (U_i U_j U_k) \quad (25)$$

式中: $a_0, a_i, a_{ii}, a_{iii}, a_{ij}, a_{ijj}, a_{ijk}$ 为 35 个待定系数; U_i, U_j, U_k 均为服从标准正态分布的随机向量 (i, j, k 按式(25)进行取值).

4) 采用概率配点法选取 4 阶一维 Hermite 多项

式, 并将其根作为配点进行正态分布转换, 经计算得到 256 个安全余量 Z .

5) 选取 35 组配点及对应的安全余量 Z 可解 35 个待定系数, 并将其代入式(25).

6) 根据式(25)求解桩顶水平位移和材料屈服失效模式下的可靠度指标 β 和失效概率 P_f .

利用蒙特卡罗法(MCS)模拟 1×10^6 次, 改进响应面法(RSM)和随机响应面法(SRSM)计算得到的可靠度指标及失效概率如表 1 所示.

表 1 计算结果对比

Tab.1 Comparisons of calculation results

计算方法	水平位移失效			材料屈服失效		
	β	$P_f/10^{-3}$	误差/%	β	$P_f/10^{-3}$	误差/%
MCS	—	4.02	精确解	—	3.22	精确解
改进 RSM	2.67	3.79	-5.7	2.75	3.01	-6.5
SRSM	2.66	3.87	-3.7	2.71	3.36	4.3

由表 1 可以看出, 以 MCS 作为精确解, 由改进 RSM 计算得到的失效概率明显偏小. 相对而言, SRSM 的计算结果与 MCS 更接近, 从而可以验证 SRSM 方法及计算程序的合理性.

3.3 参数不确定性分析

以上述工程为例, 进一步分析了地基抗力比例系数 m 、水平荷载 H 、桩身弹性模量 E 以及桩径 d 等参数的不确定性对基桩可靠性的影响. 相应失效模式下, 各参数变异系数与基桩失效概率的关系曲线如图 3 和图 4 所示.

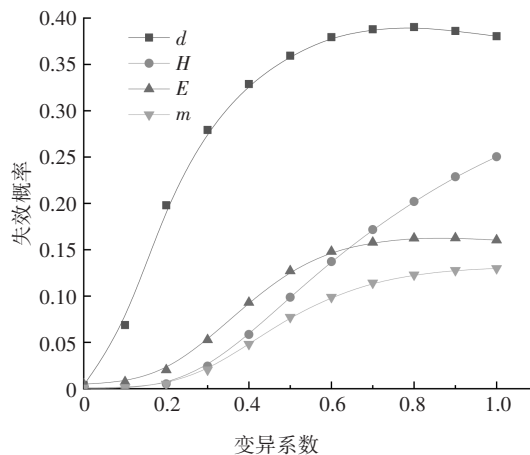


图 3 水平位移失效下变异系数对失效概率的影响
Fig.3 Influence of variation coefficient on failure probability under horizontal displacement failure

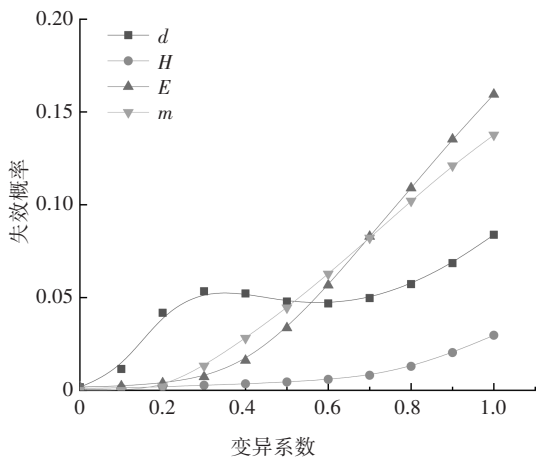


图4 材料屈服失效下变异系数对失效概率的影响
Fig.4 Influence of variation coefficient on failure probability under material yield failure

由图3和图4可以看出,在水平位移和材料屈服两种失效模式下,基桩失效概率均随变异系数增大而增大.在水平位移失效模式下,参数变异性对基桩失效概率的影响大小依次为 d 、 H 、 E 和 m .当变异系数为0~0.6范围内时, d 、 E 及 m 对应的失效概率均随变异系数近似呈非线性关系增加;而当桩径变异系数大于0.6后, d 、 E 及 m 对应的失效概率几乎保持不变,即对应的参数变异性对基桩可靠性的影响不明显.在材料屈服失效模式下,基桩失效概率受参数变异性的影响大小依次为 E 、 m 、 d 和 H .当桩径 d 和横向荷载 H 的变异系数均匀增加时,对应的基桩失效概率几乎不再随变异系数增加而有显著增大.综上所述可知,参数不确定性对基桩可靠性有较大影响,基桩水平位移失效主要受桩径 d 和桩顶水平荷载 H 控制,而桩身材料屈服失效主要受桩身弹性模量 E 和地基抗力比例系数 m 控制.

3.4 斜坡效应对基桩失效概率的影响

考虑桩顶水平位移和材料屈服两种失效模式下的容许值 $[S]$,可进一步分析斜坡效应(斜坡效应折减系数 $\eta=3$ 、 $\eta=4$ 和 $\eta=5$)对基桩水平承载可靠性的影响,相应失效模式的容许值 $[S]$ 与基桩失效概率间的关系曲线如图5和图6所示.

由图5和图6可知,两种失效模式下基桩水平承载失效概率均随容许值 $[S]$ 增大而减小.在相同的容许值 $[S]$ 和失效模式下,若不考虑斜坡效应的影响,即不对 l_1 深度范围内地基抗力比例系数 m 值进行折减而按平地桩计算斜坡基桩的桩身内力与位移,由此得到的基桩失效概率均比考虑斜坡效应(对 l_1 深度范围内地基抗力比例系数 m 值进行折减)的小.

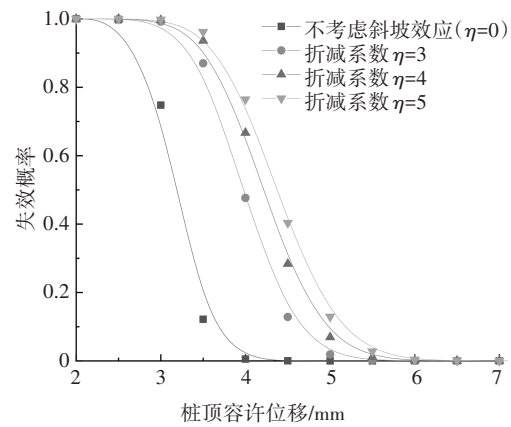


图5 水平位移失效下的失效概率
Fig.5 Failure probability under horizontal displacement

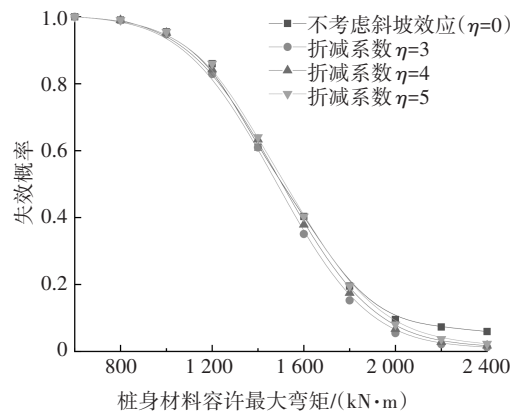


图6 材料屈服失效下的失效概率
Fig.6 Failure probability under material yield

图5显示,在水平位移失效模式下,当桩顶容许位移值 $[S]$ 介于3.0~4.5 mm之间时,考虑与不考虑斜坡效应对基桩失效概率的影响比较大,如:当 $[S]=3.5$ mm时,考虑斜坡效应($\eta=5$)与不考虑斜坡效应($\eta=0$)对应的基桩失效概率差值为0.84.在相同的容许值下,基桩失效概率随折减系数增加而增大.图6显示,在桩身材料屈服失效模式下,斜坡效应对基桩可靠性的影响较小,在相同的桩身材料容许弯矩下,基桩失效概率差值均小于0.12.可见,在水平位移失效模式下,斜坡效应对基桩水平承载可靠性影响较大,尤其是对变形较敏感的高墩桥梁基桩,忽略斜坡效应极有可能给基桩带来安全隐患.

3.5 斜坡效应对基桩安全余量的影响

为探讨斜坡效应对安全余量 Z 频数分布的影响,根据极限状态函数中随机向量 U 的分布类型,抽取 4×10^4 组服从标准正态分布的随机向量 U ,分别代入极限状态函数表达式,得 4×10^4 组安全余量 Z ,相应失效模式下其频数分布曲线如图7和图8所示.

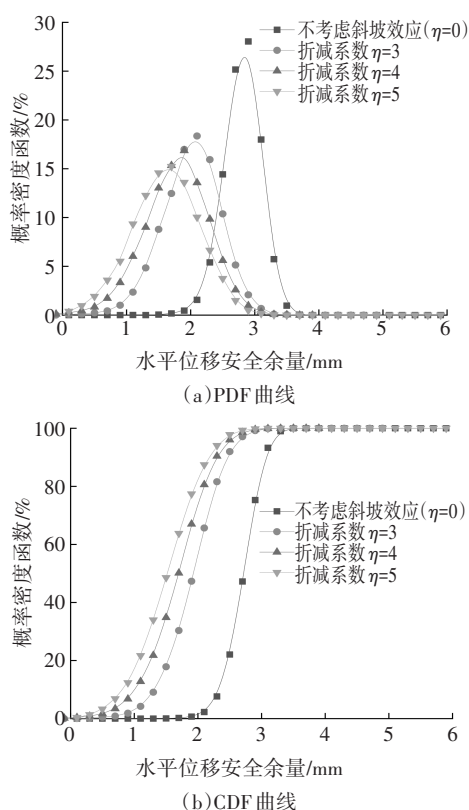


图 7 斜坡效应对水平位移安全余量频数分布的影响
Fig.7 Influence of slope effect on frequency distribution of displacement safety margin

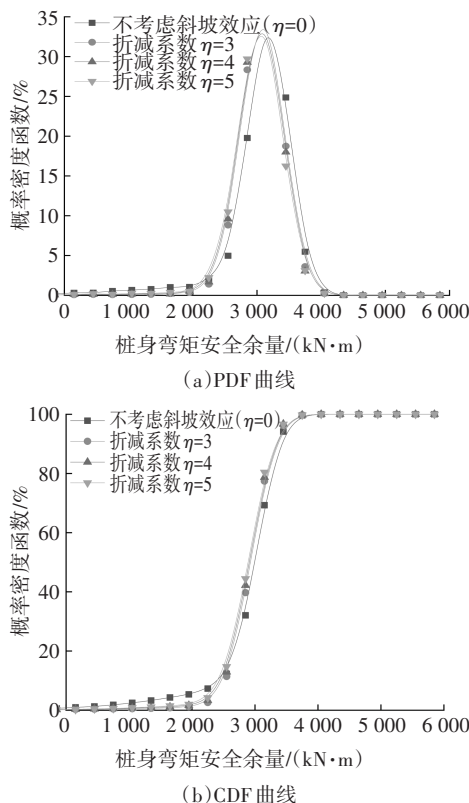


图 8 斜坡效应对桩身弯矩安全余量频数分布的影响
Fig.8 Influence of slope effect on frequency distribution of moment safety margin

由图 7 和图 8 可知,水平位移安全余量频数分布受斜坡效应的影响较大,而桩身弯矩安全余量频数分布则受斜坡效应的影响较小.在水平位移失效模式下,对比考虑斜坡效应($\eta = 5$)与不考虑斜坡效应($\eta = 0$)的 PDF 曲线,其峰值对应的安全余量差值为 1.3 mm,考虑斜坡效应时,基桩安全余量随斜坡效应折减系数增加而减小;对比两条 CDF 曲线发现,不考虑斜坡效应会导致位移安全余量更多地集中在较大区域,基桩失效概率明显偏小.类似地,在桩身材料屈服失效模式下,基桩 PDF 曲线和 CDF 曲线发展规律接近,斜坡效应对基桩失效概率的影响较小.总之,基于随机响应面法得到的极限状态函数,其安全余量频数分布规律与前述结论相符,再次验证理论模型及求解方法的合理性.

4 结 论

根据斜坡段桥梁基桩的承载特性,导得了基桩内力与位移计算的有限差分解答;基于桩身水平位移和材料屈服两种失效模式,将随机响应面法与基桩水平承载可靠性分析相结合,并编制了相应的计算程序;据此结合工程实例,进一步分析了地基抗力比例系数、水平荷载、桩身弹性模量及桩径等参数的变异性、斜坡效应对基桩水平承载可靠性的影响,得到的主要结论如下.

1) 分别利用蒙特卡罗法(MCS)、二次函数响应面法(RSM)和随机响应面法(SRSM)求解斜坡基桩水平承载可靠度指标和失效概率,验证了随机响应面法及计算程序的合理性.

2) 参数变异系数越大,基桩水平承载可靠性越差.在水平位移失效模式下,基桩失效概率随桩径、地基抗力比例系数及桩身弹性模量的变异系数先增大而后趋于稳定,相对而言,桩径对基桩水平承载可靠性的影响最大.而在材料屈服失效模式下,当变异系数小于 0.3 时,桩径的影响最大;当变异系数大于 0.3 后,桩身弹性模量和地基抗力比例系数对失效概率的影响更显著.

3) 斜坡效应对水平位移失效模式下基桩可靠性影响较大,当桩顶容许位移为 3.5 mm 时,考虑与不考虑斜坡效应对应的基桩失效概率差达 0.84,基桩失效概率随斜坡效应折减系数增加而增大;若不考虑斜坡效应,基桩位移安全余量会集中在较大区域,从而导致基桩失效概率偏小.相对而言,斜坡效应对材料屈服失效模式下基桩水平承载可靠性的影响较

小.对变形较敏感的高墩桥梁基桩,忽略斜坡效应极有可能给基桩设计带来安全隐患.

参考文献

- [1] 尹平保,赵明华,贺炜,等. 确定斜坡地基比例系数 m 值的模型试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(9):158-164.
YIN P B,ZHAO M H,HE W,*et al.* Model test study on identification of foundation proportional coefficient m in slope ground[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2017,44(9):158-164.(In Chinese)
- [2] 赵明华,尹平保,杨明辉,等. 高陡斜坡上桥梁桩基受力特性及影响因素分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2733-2739.
ZHAO M H,YIN P B,YANG M H,*et al.* Analysis of influence factors and mechanical characteristics of bridge piles in high and steep slopes [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2012,43(7):2733-2739.(In Chinese)
- [3] 赵明华,彭文哲,杨超炜,等. 斜坡地基刚性桩水平承载力上限分析[J]. 岩土力学,2020,41(3):727-735.
ZHAO M H,PENG W Z,YANG C W,*et al.* Upper bound analysis of lateral bearing capacity of rigid piles in sloping ground[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(3):727-735.(In Chinese)
- [4] ZHUANG Y,CUI X Y. An analytical method for a slope reinforced with rigid piles [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering,2016,169(4):368-380.
- [5] SIVAPRIYA S V,GANDHI S R. Soil-structure interaction of pile in a sloping ground under different loading conditions [J]. Geotechnical and Geological Engineering,2020,38(2):1185-1194.
- [6] CHAN C L,LOW B K. Probabilistic analysis of laterally loaded piles using response surface and neural network approaches [J]. Computers and Geotechnics,2012,43:101-110.
- [7] KOZUBAL J,PULA W,STACH M. Reliability assessment of a single pile in unsaturated substrate under climate factors influence [J]. Procedia Engineering,2014,91:310-316.
- [8] 赵明华,曾昭宇,苏永华. 改进响应面法及其在倾斜荷载桩可靠度分析中的应用[J]. 岩土力学,2007,28(12):2539-2542.
ZHAO M H,ZENG Z Y,SU Y H. Improved response surface method and its application to reliability analysis of piles under inclined loads [J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(12):2539-2542.(In Chinese)
- [9] CHAN C L,LOW B K. Reliability analysis of laterally loaded piles involving nonlinear soil and pile behavior [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2009,135(3):431-443.
- [10] 尹平保,赵明华,赵衡,等. 考虑斜坡效应的桩柱式桥梁基桩稳定性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(11):20-25.
YIN P B,ZHAO M H,ZHAO H,*et al.* Stability analysis of pile-column bridge pile considering slope effect [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2016,43(11):20-25.(In Chinese)
- [11] 尹平保,贺炜,张建仁,等. 斜坡基桩的斜坡空间效应及其水平承载特性研究[J]. 土木工程学报,2018,51(4):94-101.
YIN P B,HE W,ZHANG J R,*et al.* Study on spatial effect of slope and horizontal bearing behavior of piles in sloping ground [J]. China Civil Engineering Journal,2018,51(4):94-101.(In Chinese)
- [12] ZHAO H,YIN P B,LI X B. Mechanical response of bridge piles in high-steep slopes and sensitivity study [J]. Journal of Central South University,2015,22(10):4043-4048.
- [13] 戴自航,沈蒲生,张建伟. 水平梯形分布荷载桩双参数法的数值解[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(15):2632-2638.
DAI Z H,SHEN P S,ZHANG J W. Numerical solution of piles under lateral load of trapezoid-distribution by biparameter method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(15):2632-2638.(In Chinese)
- [14] 王景梅,肖芳,陈家俊,等. 基于贝叶斯理论和蒙特卡洛模拟的桩基可靠度分析[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(S1):85-90.
WANG J M,XIAO F,CHEN J J,*et al.* A reliability analysis method for pile foundation based on Bayesian theory and Monte Carlo simulation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2017,13(S1):85-90.(In Chinese)
- [15] 蒋水华,李典庆,方国光. 结构可靠度分析的响应面法和随机响应面法的比较[J]. 武汉大学学报(工学版),2012,45(1):46-53.
JIANG S H,LI D Q,PHOON K W. A comparative study of response method and stochastic response surface method for structural reliability analysis [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2012,45(1):46-53.(In Chinese)
- [16] 李典庆,周创兵,陈益峰,等. 边坡可靠度分析的随机响应面法及程序实现[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(8):1513-1523.
LI D Q,ZHOU C B,CHEN Y F,*et al.* Reliability analysis of slope using stochastic response surface method and code implementation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(8):1513-1523.(In Chinese)
- [17] MOLLON G,DIAS D,SOUBRA A H. Probabilistic analysis of pressurized tunnels against face stability using collocation-based stochastic response surface method [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2011,137(4):385-397.
- [18] ISUKAPALLI S S. An uncertainty analysis of transport transformation model [D]. New Brunswick, New Jersey: The State University of New Jersey,1999.
- [19] 蒋水华,李典庆,周创兵. 随机响应面法最优概率配点数目分析[J]. 计算力学学报,2012,29(3):345-351.
JIANG S H,LI D Q,ZHOU C B. Optimal probabilistic collocation points for stochastic response surface method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2012,29(3):345-351.(In Chinese)