

基于非侵入式方法的抗滑桩加固边坡最优桩位确定

蔡凤珍¹, 文嘉辉¹, 李亮^{1,*}, 王超¹, 李辉², 李堂飞³, 于广明¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青建集团股份有限公司, 青岛 266071; 3. 青岛新华友建工集团股份有限公司, 青岛 266101)

摘要: 为合理确定抗滑桩加固边坡中的最优桩位, 在 PLAXIS-2D 中建立抗滑桩加固边坡模型, 利用 Python 编程实现了 PLAXIS-2D 模型的非侵入式调用, 基于提出的非侵入式方法, 构建了不同桩位与嵌固比下加固边坡安全系数与土体参数之间的二次多项式函数响应面, 最终提出了基于非侵入式方法与响应面相结合的抗滑桩加固边坡可靠度分析方法。所提方法在某均质土质边坡中进行了应用。分析了不同桩位与嵌固比下, 加固边坡可靠度指标的变化规律。研究结果表明: 在某一桩位下, 随嵌固比的增加, 加固边坡可靠度指标 β 呈现先增大后略微减小的趋势, 最高 β 所对应的嵌固比介于 0.6~0.8。不考虑桩长因素时, $P=0.5$ (抗滑桩位于边坡中部) 时, 加固效果最优 (β 最大)。考虑桩长因素时, 当目标 β 较小 (≤ 1.75) 时, 最优桩位在 $P=0.3$ (抗滑桩位于边坡中下部); 当目标 β 较大 (≥ 2.0) 时, 最优桩位在 $P=0.5$ (抗滑桩位于边坡中部); 随坡顶荷载增加, 最优桩位向坡顶靠近。该方法对抗滑桩加固边坡优化设计具有较强的指导意义。

关键词: 边坡稳定; 抗滑桩; 强度折减; 响应面; 蒙特卡罗法

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)02-0049-09

The determination of optimal pile location for pile-reinforced slope stability using non-intrusive method

CAI Fengzhen¹, WEN Jiahui¹, LI Liang^{1,*}, WANG Chao¹, LI Hui², LI Tangfei³, YU Guangming¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingjian Group Co., Ltd., Qingdao 266071, China;

3. Qingdao Xinhua Construction Engineering Group Co., Ltd., Qingdao 266101, China)

Abstract: In order to reasonably determine the optimal pile location for pile-reinforced slope. A pile-reinforced slope model is established in PLAXIS-2D, and the non-intrusive implementation of the PLAXIS-2D model is realized by Python programming. Based on the proposed non-intrusive method, the quadratic polynomial response surface functions are constructed to simulate the relationships between the safety factors and the soil parameters of the reinforced slope under different pile locations and embedded ratios. Finally, an analysis method of the pile-reinforced slope reliability is proposed by combining the non-intrusive method with the response surface. The proposed method is then applied to a homogeneous soil slope and the variation trends of the reliability index of the reinforced slope are analyzed under different pile locations and embedded ratios. The results show that under a specific pile location, the

收稿日期: 2023-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(52171264)

作者简介: 蔡凤珍(1998—), 女, 四川巴中人。硕士, 研究方向为边坡稳定性。E-mail: cai13038268028@163.com。

* 通信作者: 李亮(1977—), 男, 山东济南人。博士, 教授, 主要从事岩土工程防灾减灾等方面的研究。E-mail: liliang@qut.edu.cn。

reliability index β of the reinforced slope increases at first and then decreases slightly with the increase of the embedded ratio. The embedded ratio corresponding to the highest β is between 0.6 and 0.8. Neglecting the factor of pile length, the optimal reinforcement (leading to maximum β) is achieved when the pile is located in the middle of the slope (i. e., $P = 0.5$). Considering the factor of pile length, when the target β is smaller (≤ 1.75), the optimal pile location is $P = 0.3$ (i. e., the pile is located in the middle and lower part of the slope). When the target β is larger (≥ 2.0), the optimal pile location is $P = 0.5$ (i. e., the pile is located in the middle of the slope). The optimal pile location exhibits an up-toward trend as the surcharge loading at the slope top increases. The method could act as an effective tool for the analysis and optimal design of pile-reinforced slope stability.

Key words: slope stability; pile; strength reduction; response surface; Monte Carlo method

由于扰动小,加固效果良好等优点,抗滑桩广泛应用于边坡加固。在我国,自抗滑桩首次在宝成铁路边坡治理中得到应用^[1]以来,抗滑桩加固边坡的实践、理论以及设计方法得到了广泛关注^[2-4]。年廷凯等^[5]运用有限元强度折减法建立抗滑桩加固边坡三维模型,研究了抗滑桩加固边坡中模型尺寸、桩间距、桩位、桩长、桩底接触模式等因素对抗滑桩加固边坡稳定安全系数的影响,并给出了充分发挥土拱效应的桩间距以及最合理嵌固深度。王聪聪等^[6]运用有限差分强度折减法,研究了抗滑桩加固边坡中,桩位、桩长、桩的弹性模量等因素对抗滑桩加固边坡稳定性的影响。文献综述表明,抗滑桩加固边坡设计中桩位与嵌固深度是两个重要的参数。但上述研究均基于确定性分析,且均是先确定最优桩位,进而对桩长进行研究,并未同时考虑两者的影响。胡晓军等^[7]基于强度折减的摩尔-库伦强度准则进行桩侧应力验算,根据不同的边坡等级选用不同的强度折减系数推导了合理嵌固深度计算公式。李长冬等^[8]在给定桩截面尺寸与桩间距的条件下,利用黄金分割法对锚固比进行了优化设计寻求既满足安全需求又最经济的锚固比。马显春等^[9]基于物理模型试验结果,将抗滑桩锚固段进行了分类并应用弹性力学推导了各段长度和锚固段总长度的计算公式。上述研究未能结合可靠度指标深入研究抗滑桩的桩位、嵌固比等重要参数。再者,不同目标可靠度条件下,最优桩位以及桩长的变化规律亦值得探讨。

鉴于岩土体强度参数存在的不确定性,抗滑桩加固边坡的稳定性宜选用可靠度分析方法^[10]。ZHANG等^[11]采用极限平衡方法对抗滑桩加固边坡中存在的多个危险滑动面进行了研究,并探讨了桩位对危险滑动面以及边坡稳定性的影响。为更合理考虑桩与边坡土体之间的相互作用,本文采用有限元强度折减方法对抗滑桩加固边坡稳定性进行分析,采用可靠性指标来评价抗滑桩加固效果,研究了不同桩位与嵌固比对边坡可靠性指标的影响,结合一典型抗滑桩加固边坡,对最优桩位进行了探讨。

1 非侵入式抗滑桩加固边坡可靠度分析

1.1 基于有限元强度折减的抗滑桩边坡稳定性分析

为合理评价抗滑桩加固边坡的稳定性,基于有限元的强度折减法是常用的方法之一^[12-14]。常用的同步强度折减法的基本原理是:将土体的抗剪强度参数黏聚力和内摩擦角不断同步折减,然后进行有限元应力应变分析,直至边坡达到临界状态,此时的折减系数即为抗滑桩加固边坡的稳定安全系数。本文应用软件 PLAXIS-2D 进行有限元强度折减计算。

图1为基于 PLAXIS-2D 的抗滑桩加固边坡稳定性分析流程。第1步确定抗滑桩加

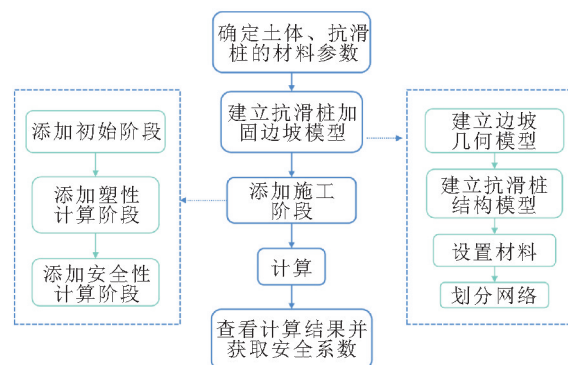


图1 基于 PLAXIS-2D 的抗滑桩加固边坡稳定性分析流程

固边坡模型所需的材料参数;第 2 步分别建立边坡几何模型以及抗滑桩结构模型并赋值相关的材料参数;第 3 步通过添加施工阶段以完成后续计算,其中包括添加初始阶段、添加塑性计算阶段以及安全性计算阶段;第 4 步对所建立的抗滑桩加固边坡模型进行计算;最后进入后处理程序对计算结果进行查看,并获取安全系数。

1.2 基于非侵入式方法与响应面法的抗滑桩加固边坡功能显式函数建立

本文采用稳定安全系数建立抗滑桩加固边坡功能函数以进行可靠度分析,其功能函数 $G(X)$ 如下:

$$G(X) = F_s(X) - 1 \quad (1)$$

式中: X 为影响抗滑桩加固边坡稳定性的随机变量,比如土体抗剪强度参数黏聚力与摩擦角等, $X = (x_1, \dots, x_m)$, m 为随机变量的个数; $F_s(X)$ 为抗滑桩加固边坡稳定安全系数,由 PLAXIS-2D 进行有限元强度折减分析得到,本文采用非侵入式方法进行。

为实现自动批处理计算,本文称之为非侵入式方法。如图 2 所示,首先通过 MATLAB 对随机变量进行抽样,将抽样结果放入 Excel 表格中;其次通过 Python 读取 Excel 中数据,再使用 Python 编程以实现目标模型的调用、对目标模型的参数替换、对目标模型的计算以及对目标模型的计算结果获取并输出的目标,以 Excel 表格中的数据全部替换完毕作为批量计算的结束标志。

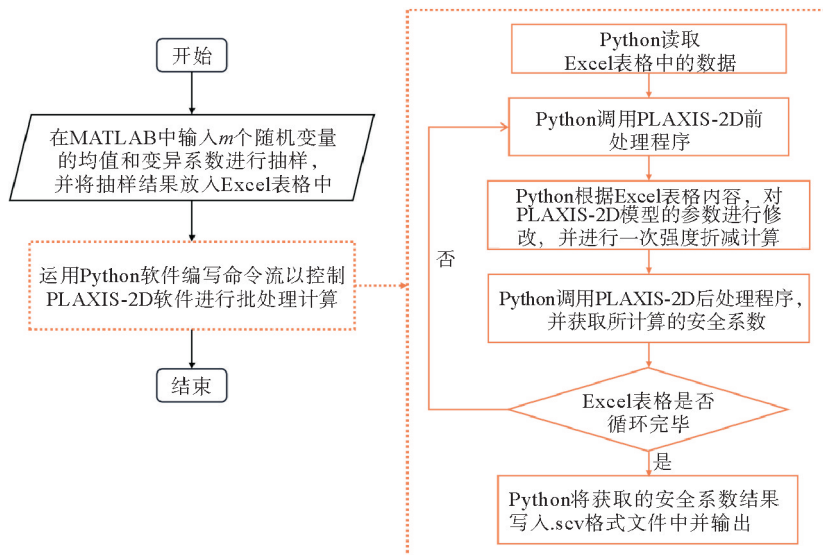


图 2 非侵入式方法的抗滑桩加固边坡批处理计算流程

在结合蒙特卡罗抽样方法进行可靠度分析时,需要计算大量抽样样本下的功能函数值,即进行大量的 PLAXIS-2D 有限元强度折减分析。为了提高抗滑桩加固边坡可靠度分析的效率,本文采用二次多项式函数构建响应面法对式(1)中的功能函数实现显式化:

$$F_s(X) \approx b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^m b_{m+i} x_i^2 \quad (2)$$

响应面法是由数学家 BOX 和 WILSON 在 1951 年提出^[15],其主要思想是用一个显式函数来近似地代替隐式目标函数(式(1))。如式(2)所示,为构建不含交叉项的二次多项式函数响应面,需要确定 $2m+1$ 个常系数 b_0, \dots, b_{2m} 。本文采用中心复合设计(Central Composite Designs, CCD)法确定 $2m+1$ 个样本点,然后采用非侵入式方法计算样本点的功能函数值,如此构建 $2m+1$ 个关于 b_0, \dots, b_{2m} 的线性方程,最终确定 $2m+1$ 个常系数。

1.3 抗滑桩加固边坡可靠度分析

本文提出的基于非侵入式方法与响应面法的抗滑桩加固边坡可靠度分析方法流程如图 3 所示。首先确定表征土体参数不确定性的随机变量,并确定这些随机变量的均值与标准差,随机生成 N 个样本;接着将生成的样本值输入按 1.2 节所述的方法而建立的响应面代理模型中进行计算;最后根据蒙特卡罗法计

算边坡失效概率 P_f 。蒙特卡罗法计算精度与抽样次数有关,当目标失效概率较小时,所需抽样次数多,反之亦然。抽样次数可由下式初步确定:

$$C_{P_f} = \sqrt{\frac{1-P_f}{N \times P_f}} \tag{3}$$

式中: C_{P_f} 为计算所得失效概率的变异系数; N 为抽样次数; P_f 为目标失效概率。

由式(3)可见,若保证计算结果的变异系数不大于 0.1,所需抽样次数应不小于 $100/P_f$ 。除采用失效概率外,亦可选用可靠度指标 β 来衡量边坡的可靠性,可由式(4)来估算。

$$\beta \approx \frac{\mu_{G(X)}}{\sigma_{G(X)}} = \frac{\mu_{F_S(X)}^{-1}}{\sigma_{F_S(X)}} \tag{4}$$

式中: $\mu_{G(X)}$ 为 $G(X)$ 的均值; $\sigma_{G(X)}$ 为 $G(X)$ 的标准差; $\mu_{F_S(X)}$ 为 $F_S(X)$ 的均值; $\sigma_{F_S(X)}$ 为 $F_S(X)$ 的标准差。

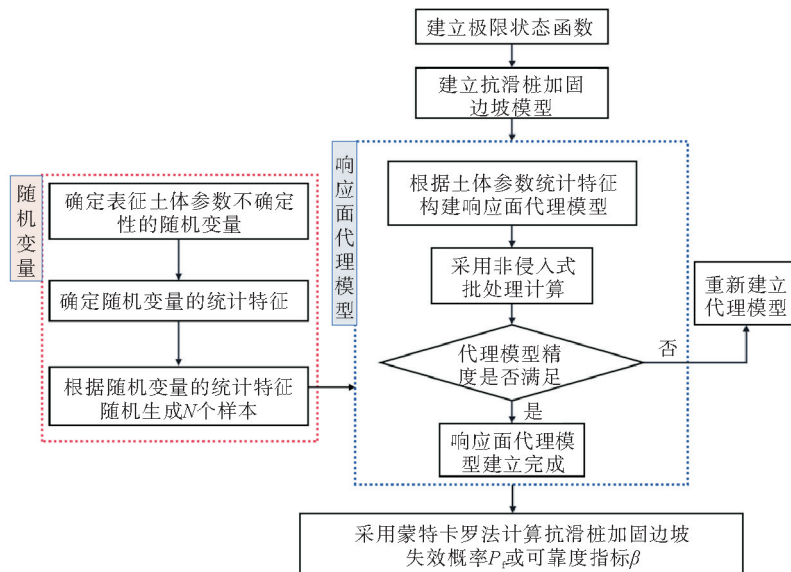


图3 基于非侵入式方法与响应面法的抗滑桩加固边坡可靠度分析流程

2 算例分析

2.1 有限元分析模型

考虑文献[16]的二维边坡模型,如图4所示,抗滑桩的桩位记为 $P = D_x / D$, D_x 为坡脚到桩位的水平距离; D 为坡脚至坡肩的水平距离。嵌固比 E_r 为抗滑桩位于滑动面以下的距离 L_y 与抗滑桩桩长 L 之比。在 PLAXIS-2D 中采用板单元模拟抗滑桩,抗滑桩设置为弹性桩。考虑桩土相互作用,在板单元上添加了正界面与负界面,界面的材料模式选择“从相邻土体”选项, R_{inter} 值表示的是界面的粗糙程度,取值范围为 $0 \sim 1$,数值越接近于 1 表示接触面越粗糙,当数值为 1 时,代表着界面单元属性与土体完全相同。参考 PLAXIS-2D 使用手册,将 R_{inter} 的值设置为 0.67。边坡模型左右两边法相固定,边坡底部完全固定;土体为均质土体, $c_{\text{土体}}$ 服从均值为 10 kPa、变异系数为 0.3 的对数正态分布, $\varphi_{\text{土体}}$ 服从均值为 20° 、变异系数为 0.2 的对数正态分布,土体材料模型为摩尔-库伦模型,桩与土体的计算参数见表 1。

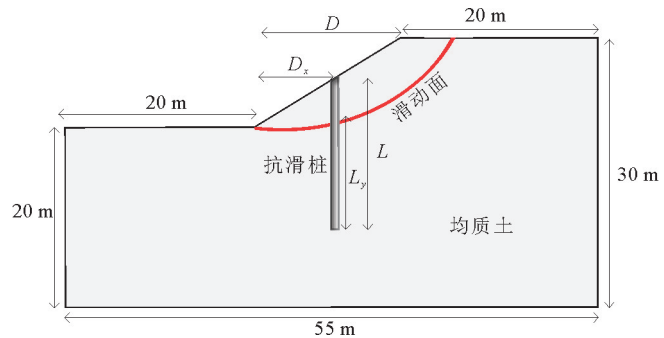


图4 加固边坡模型

为保证非侵入式方法的计算精度,首先开展网格尺寸敏感性分析。图 5 给出了 4 种网格尺寸下,未加固边坡的稳定性分析结果。由图 5 可知,高粗糙度网格、粗糙网格、中等网格、细网格的安全系数分别为:1.111、1.106、1.098、1.093,随着网格密度的增加,安全系数逐渐趋于稳定;观察图 5 中的各个滑动面可知,随着网格密度的增加,边坡滑动带的宽度不断趋于稳定,其中,中等网格和细网格下,安全系数以及滑动带宽均相差甚微,综合考虑计算精度与计算时间,本文算例分析采用中等网格尺寸。

表 1 加固边坡计算参数

参数	均值	变异系数	标准差
黏聚力 c_{\pm} /kPa	10	0.3	3.0
内摩擦角 $\varphi_{\pm}/(^{\circ})$	20	0.2	4.0
重度 $\gamma_{\pm}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	20	—	—
弹性模量 E_{\pm}/kPa	2×10^4	—	—
泊松比 ν_{\pm}	0.3	—	—
重度 $\gamma_{\text{桩}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	23	—	—
弹性模量 $E_{\text{桩}}/\text{kPa}$	1.6×10^7	—	—
泊松比 $\nu_{\text{桩}}$	0.2	—	—
截面直径 $d_{\text{桩}}/\text{m}$	0.5	—	—

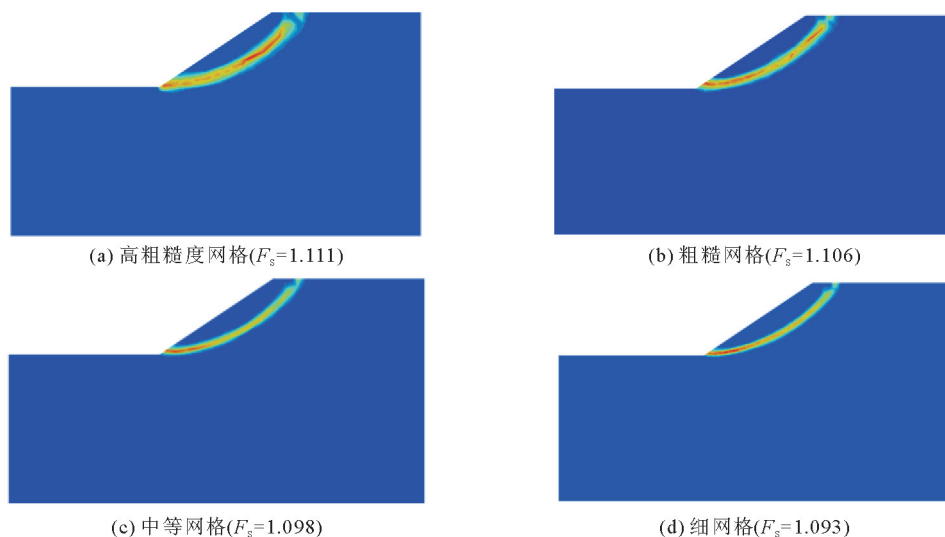


图 5 未加固边坡网格尺寸敏感性分析

2.2 响应面建立

已有研究表明,岩土体参数的不确定性对工程设计有显著影响^[17],本文考虑土体参数的不确定性,将土体参数黏聚力 c_{\pm} 与内摩擦角 φ_{\pm} 视为随机变量。采用响应面代理模型来提高计算效率,建立边坡安全系数 F_s 与随机变量黏聚力、内摩擦角之间的二阶响应面关系。

根据前文所述响应面的构建以及求解过程,本文选取的采样因子 ω 为 1。分别在边坡的 $P=0.3$ 、 $P=0.5$ 、 $P=0.7$ 、 $P=0.9$ 共计 4 个桩位,每个桩位的嵌固比 E_r 分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 以及抗滑桩打入边坡底部所对应的嵌固比处建立响应面函数。响应面的构建过程在 MATLAB 中实现。为了验证响应面的精度,随机抽取 100 个验算点,绘制以 PLAXIS-2D 计算结果为纵坐标,响应面预测结果为横坐标的散点图,以决定系数 R^2 判断响应面的精度,其值越接近于 1,说明所建立的响应面函数越精确。所绘制的散点图如图 6 所示,限于篇幅,仅展示 4 个响应面的精度验证图,其余 32 个响应面精度验证的决定系数都大于 0.95,因此所构建的 36 个响应面函数都可以作为代理模型使用以提高计算效率。

2.3 抗滑桩加固边坡可靠度分析

2.3.1 蒙特卡罗抽样个数敏感性分析

在桩位 $P=0.5$,嵌固比 $E_r=0.7$ 处,绘制可靠度指标 β 随抽样次数变化曲线(图 7)。由图 7 可知,当抽样个数小于 10^3 时, β 波动性较大;当抽样个数在 $1\times 10^3\sim 1\times 10^5$ 时, β 波动较小;当抽样个数大于 1×10^5 时, β 基本平缓。本文采用抽样次数为 10^6 。

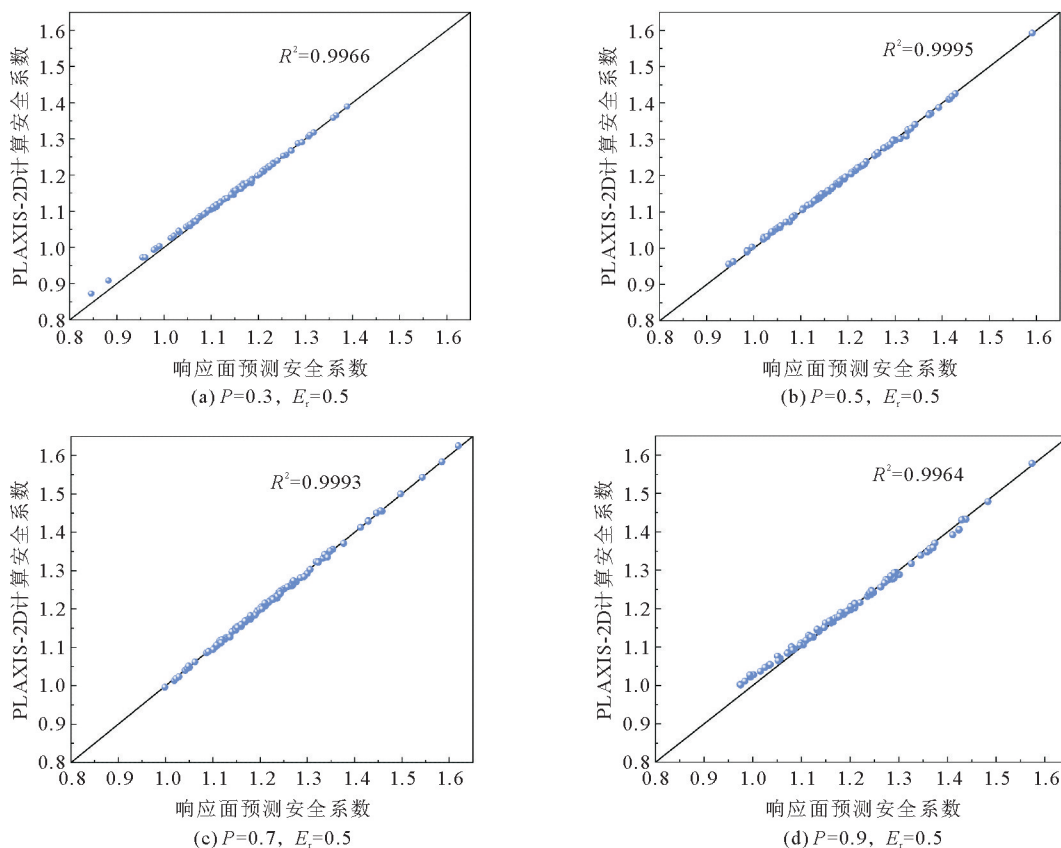


图6 响应面精度验证

2.3.2 桩位 P 以及嵌固比 E_r 对 β 的影响

利用 2.2 节建立的 36 个响应面函数,分别计算 $P=0.3, P=0.5, P=0.7, P=0.9$, 嵌固 $E_r=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ 以及抗滑桩打入边坡底部时,加固边坡的可靠度指标 β 。以嵌固比 E_r 为横坐标,可靠度指标 β 为纵坐标,绘制不同桩位时, β 随嵌固比的变化曲线(图 8)。由图 8 可知,在 $P=0.3$ 时, $E_r=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.88$ 时的 β 分别为 0.90、0.93、1.04、1.15、1.30、1.70、1.98、2.37、2.26,由此可见,当嵌固比自 0.1 增加至 0.8 时,可靠度指标 β 逐渐增大,当嵌固比大于 0.8 后, β 略微降低。在其他 3 个桩位下, β 随嵌固比均呈现出先增大后略微减小的趋势,这是因为:随着嵌固比的增加,抗滑桩嵌入滑动面以下的长度不断增加,抗滑桩桩长随之增加,抗滑桩越长其加固效果越好,因此 β 越大,但是当抗滑桩的长度达到某一数值时,其加固效果不再明显增加。观察图 8 结果可以发现,在

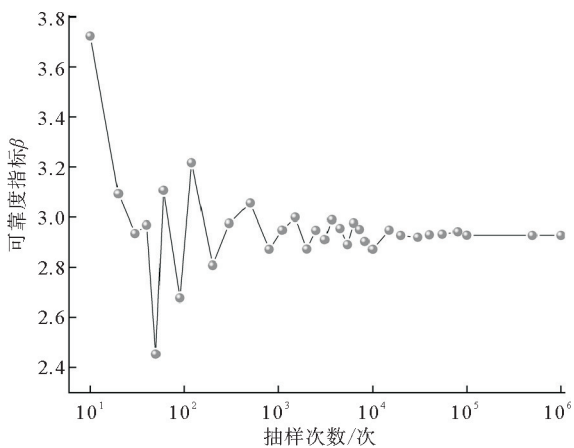


图7 抽样次数敏感性分析

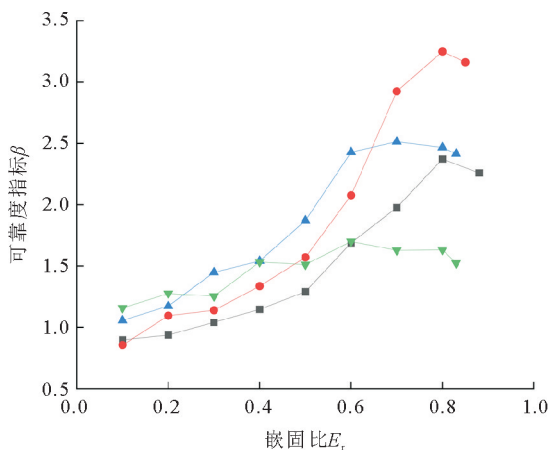


图8 P 与 E_r 对 β 的影响

—■— $P=0.3$; —●— $P=0.5$; —▲— $P=0.7$; —▼— $P=0.9$

不同桩位下,最大 β 值对应的嵌固比不同,当 $P=0.3$ 和 0.5 时,最大 β 所对应的嵌固比为 0.8 ;当 $P=0.7$ 和 0.9 时,最大 β 所对应的嵌固比分别为 0.7 和 0.6 。仅从最大 β 值来看,当 $P=0.5$ (抗滑桩位于边坡中部) 时,其加固效果最优,这与文献[18]的研究结果一致,其次为 $P=0.7$ (抗滑桩位于边坡中上部) 和 $P=0.3$ (抗滑桩位于边坡中下部),当 $P=0.9$ (抗滑桩靠近坡顶) 时,其加固效果最差。由图 8 可知,最优加固效果对应的嵌固比介于 $0.6\sim 0.8$ 。

2.3.3 目标 β 下抗滑桩最优桩位确定

在上节中,仅从 β 值的大小确定了最优桩位,考虑到抗滑桩加固边坡工程实践中,加固边坡设计通常给定预期(或目标)可靠度指标 β 。因此,在满足目标 β 的前提下,最优桩位的确定还应考虑桩长因素。本文中,在满足某一预期 β 前提下,最短桩长对应的桩位为最优桩位。选定目标可靠度 β 分别为: 1.50 、 1.75 、 2.00 、 2.25 ,根据图 8 所得的计算结果,可确定满足目标 β 的前提下,每一桩位所对应的桩长。绘制某一目标 β 下,桩长随桩位的变化曲线(图 9)。由图 9 可知,不同目标可靠度下的桩位、桩长曲线变化规律不尽相同,当目标 β 较小(≤ 1.75) 时,桩长随 P 的增加(桩位从坡脚到坡顶变化)总体呈现出变长的趋势,即当目标 β 较小(≤ 1.75) 时,最优桩位在 $P=0.3$ (抗滑桩位于边坡中下部)。但是当目标 β 较大(≥ 2.00) 时,桩长随桩的加固位置从坡脚到坡顶变化,呈现出先变短后变长的规律,且当 $P=0.5$ (桩的加固位置位于边坡中部) 时桩长最短,即最优桩位在 $P=0.5$ (抗滑桩位于边坡中部)。这是因为:目标可靠度较小时,较短的桩长就能满足加固效果,当加固位置位于边坡下部时,抗滑桩较容易穿过滑动面进入下部岩土体以达到抗滑桩加固效果;当目标可靠度较大时,为满足其加固效果,需要较大的桩长,当加固位置位于中部时,抗滑桩能以最短的桩长达到相比于其他位置更好的加固效果。

2.3.4 坡顶荷载对最优桩位的影响

根据 2.3.2 节所获得的每个桩位下的最优嵌固比,研究最优嵌固比下,坡顶荷载对最优桩位的影响。分别选取坡顶荷载为: 10 、 20 、 30 kPa,并计算各个荷载下抗滑桩加固边坡的可靠度指标 β ,绘制不同坡顶荷载下桩位 P 与 β 的曲线(图 10)。由图 10 可知,当坡顶荷载较小时(10 kPa),抗滑桩位于边坡中部($P=0.5$) 处的 β 值最大,为 2.12 ;当坡顶荷载较大时(30 kPa),抗滑桩位于中上部($P=0.7$) 处的 β 值最大,为 1.81 。坡顶荷载越大,最优桩位从边坡中部逐渐向中上部转移。当坡顶荷载变化时,抗滑桩靠近坡顶处($P=0.9$) 的 β 值基本不变,这是因为:作用于坡顶处的荷载,对坡顶附近的土体有较大影响,当荷载较小时,这种影响较小,边坡中部成为了最优加固位置;随着荷载逐步增大,坡顶附近土体更容易发生破坏,抗滑桩于靠近坡顶位置的加固效果愈加明显,抗滑桩最优加固位置也变成了边坡的中上部。

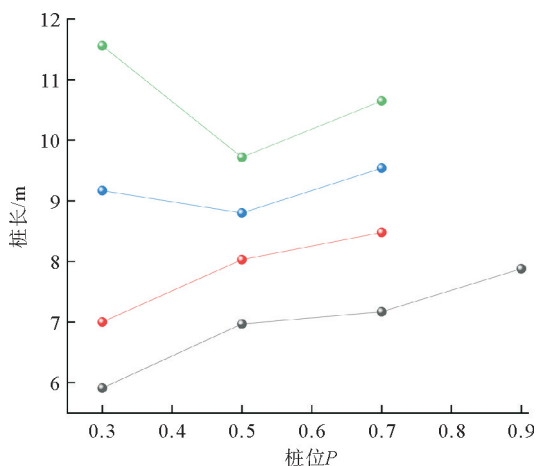


图 9 不同 β 下桩长随桩位变化曲线

—●— $\beta=1.50$; —●— $\beta=1.75$; —●— $\beta=2.00$; —●— $\beta=2.25$

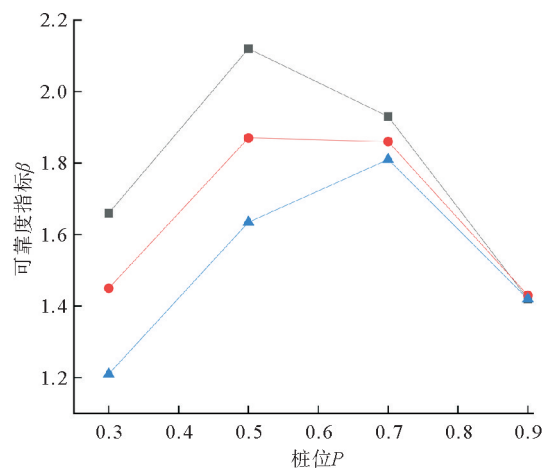


图 10 不同坡顶荷载下可靠度指标随桩位变化

—■— 10 kPa; —●— 20 kPa; —▲— 30 kPa

3 结论

抗滑桩最优桩位的确定对于抗滑桩加固边坡设计尤为重要。为了合理确定抗滑桩最优桩位,本文提

出了非侵入式方法,实现了自动调用 PLAXIS-2D 有限元模型,通过在不同桩位与嵌固比下构建响应面函数,实现了抗滑桩加固边坡可靠度分析。所提方法在一典型土质边坡加固中进行了应用。分析了不同桩位与嵌固比下,加固边坡可靠度指标的变化规律。所得结论如下:

1) 在某一桩位下,随嵌固比的增加,加固边坡可靠度指标 β 呈现先增大后略微减小的趋势。在不同桩位下,最大 β 值对应的嵌固比不同,当 $P=0.3$ 和 0.5 时,最大 β 所对应的嵌固比为 0.8 ;当 $P=0.7$ 和 0.9 时,最大 β 所对应的嵌固比分别为 0.7 和 0.6 。最高 β 所对应的嵌固比介于 $0.6\sim 0.8$ 。

2) 不考虑桩长因素时, $P=0.5$ (抗滑桩位于边坡中部)时,加固效果最优(β 最大)。

3) 考虑桩长因素时,当目标 β 较小(≤ 1.75)时,最优桩位在 $P=0.3$ (抗滑桩位于边坡中下部);当目标 β 较大(≥ 2.00)时,最优桩位在 $P=0.5$ (抗滑桩位于边坡中部)。

4) 坡顶荷载对抗滑桩最优位置的选取有一定的影响,当荷载较小(10 kPa), $P=0.5$ (抗滑桩位于边坡中部)时,加固效果最优(β 最大);当荷载较大(30 kPa), $P=0.7$ (抗滑桩位于边坡中上部)时,加固效果最优(β 最大)。

抗滑桩最优桩位的影响因素有很多,本文未能考虑桩径、桩间距等因素对结果的影响。此外,降雨引起的渗流压力、边坡内部渗流等因素对抗滑桩最优桩位选取的影响,也是值得继续探讨的问题。

参考文献(References):

- [1] 申永江. 边坡工程中抗滑桩的效果评价与优化设计[D]. 杭州:浙江大学,2009.
SHEN Yongjiang. Effect evaluation method and optimization design of anti-slide pile in slope engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2009.
- [2] 赵尚毅,郑颖人,邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003(2):254-260.
ZHAO Shangyi,ZHENG Yingren,DENG Weidong. Stability analysis on jointed rock slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003(2):254-260.
- [3] 陈建峰,郭小鹏,田丹,等. 抗滑桩锚固长度对均质边坡滑动面及抗滑能力影响研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2022,50(1):42-49.
CHEN Jianfeng, GUO Xiaopeng, TIAN Dan, et al. Effect of anti-slide piles anchorage lengths on slip surface and anti-slide capacity of homogeneous slope[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2022,50(1):42-49.
- [4] 饶平平,童磊磊,师响巍. 基于拟动力法的抗滑桩加固边坡地震稳定性分析[J]. 世界地震工程,2020,36(1):189-196.
RAO Pingping, TONG Leilei, SHI Yunwei. Seismic stability analysis of slopes reinforced with anti-slide piles based on pseudo-dynamic method[J]. World Earthquake Engineering,2020,36(1):189-196.
- [5] 年廷凯,徐海洋,刘红帅. 抗滑桩加固边坡三维数值分析中的几个问题[J]. 岩土力学,2012,33(8):2521-2526.
NIAN Yankai, XU Haiyang, LIU Hongshuai. Several issues in three-dimensional numerical analysis of slopes reinforced with anti-slide piles[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(8):2521-2526.
- [6] 王聪聪,李江腾,廖峻,等. 抗滑桩加固边坡稳定性分析及其优化[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(1):231-237.
WANG Congcong, LI Jiangteng, LIAO Jun, et al. Stability analysis of slope reinforced with pile and optimization[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2015,46(1):231-237.
- [7] 胡晓军,吴延枝. 抗滑桩锚固深度的可靠度与参数敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(1):49-53.
HU Xiaojun, WU Yanzhi. Reliability and parametric sensitivity of anchorage depth of anti-slide piles[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2011,39(1):49-53.
- [8] 李长冬,唐辉明,胡新丽,等. 黄金分割法在抗滑桩锚固比优化设计中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2008(11):133-135.
LI Changdong, TANG Huiming, HU Xinli, et al. Application of golden section method on anchorage ratio optimum design for anti-slide pile[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2008(11):133-135.
- [9] 马显春,罗刚,邓建辉,等. 陡倾滑面堆积层滑坡抗滑桩锚固深度研究[J]. 岩土力学,2018,39(S2):157-168.
MA Xianchun, LUO Gang, DENG Jianhui, et al. Study of anchorage depth of anti-sliding piles for steep-sliding accumulation landslides[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(S2):157-168.
- [10] 吴坤铭. 边坡及其抗滑桩加固工程可靠性分析方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2011.
WU Kunming. Research on the reliability analysis of slope and their reinforced with anti-slide piles[D]. Hefei: Hefei University of Technology,2011.
- [11] ZHANG J, WANG H, HUANG H W, et al. System reliability analysis of soil slopes stabilized with piles[J]. Engineering Geology, 2017,229:45-52.

- [12] 郑颖人,赵尚毅.用有限元强度折减法求边(滑)坡支挡结构的内力[J].岩石力学与工程学报,2004,23(20):3552-3558.
ZHENG Yingren,ZHAO Shangyi. Calculation of inner force of support structure for landslide/slope by using strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(20):3552-3558.
- [13] 曾锦秀.板连式束筋微型抗滑桩群加固边坡机制与计算理论研究[D].成都:西南交通大学,2019.
ZENG Jinxiu. Study on mechanism and computation theory of group of combined stabilizing micro-piles used to reinforce slope[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2019.
- [14] 王桂萱,黄平,赵杰.锚杆支护边坡预警阈值研究及智能监测系统开发[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(4):668-675.
WANG Guixuan,HUANG Ping,ZHAO Jie. Research on warning threshold and development of intelligent monitoring system of rock bolt supporting slope[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science),2021,37(4):668-675.
- [15] BOX G E P,WILSON K B. On the experimental attainment of optimum conditions[J]. Statistics,1951,13(1):1-45.
- [16] 朱泳,朱鸿鹄,张巍,等.抗滑桩加固边坡稳定性影响因素的参数分析[J].工程地质学报,2017,25(3):833-840.
ZHU Yong,ZHU Honghu,ZHANG Wei, et al. Parametric analysis on factors influencing stability of slopes reinforced by anti-slide piles[J]. Journal of Engineering Geology,2017,25(3):833-840.
- [17] 李典庆,唐小松.水工岩土工程可靠度与风险控制领域基础研究回顾与展望[J].中国科学基金,2021,35(3):440-450.
LI Dianqing,TANG Xiaosong. Review and prospect of basic research in the field of reliability and risk mitigation in hydraulic geotechnical engineering[J]. China Science Foundation,2021,35(3):440-450.
- [18] 徐斌.抗滑桩加固边坡的可靠度评价与设计优化[D].杭州:浙江大学,2019.
XU Bin. Reliability evaluation and design optimization for a slope reinforced with stabilizing piles[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2019.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)

(上接第24页)

- [9] CHAN J L Y,LO S H. Stability design of system scaffold with differential settlement[J]. Structures,2020,27:1467-1478.
- [10] 胡长明.扣件联接钢结构的试验及其理论研究[D].西安:西安建筑科技大学,2008.
HU Changming. Studies on experiment and theory of steel construction connected with fasteners[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2008.
- [11] 陆征然,陈志华,王小盾,等.扣件式钢管满堂支撑体系稳定性的有限元分析及试验研究[J].土木工程学报,2012,45(1):49-60.
LU Zhengran,CHEN Zhihua,WANG Xiaodun, et al. Experimental and theoretical study of the bearing capacity of fastener steel tube full-hall formwork support system[J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(1):49-60.
- [12] 陆征然.扣件式钢管满堂支撑体系理论分析与试验研究[D].天津:天津大学,2010.
LU Zhengran. Experimental and theoretical study on fastener steel tube full hall formwork support system[D]. Tianjin:Tianjin University,2010.
- [13] 周康喆.碗扣式钢管模板支架承载力试验与分析[D].天津:天津大学,2010.
ZHOU Kangzhe. Test and analysis on load-bearing capacity of steel tubular falsework with bowl-button-type connection[D]. Tianjin:Tianjin University,2010.
- [14] JGJ/T 231—2021,建筑施工承插型盘扣式钢管脚手架安全技术标准[S].
JGJ/T 231—2021,Technical standard for safety of disk lock steel tubular scaffold in construction[S].
- [15] 张志超,陈向荣,林冰,等.脚手架立杆套管接长下轴压稳定性研究[J].建筑结构学报,2022,43(1):228-238.
ZHANG Zhichao,CHEN Xiangrong,LIN Bing, et al. Study on stability of casting-extended scaffolding steel pipe under axial compression[J]. Journal of Building Structures,2022,43(1):228-238.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)