

张晓忠, 刘文杰, 卢鹭, 等. 基于贝叶斯优化 XGBoost 模型陡坡桥梁桩基变形可靠性分析方法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2025, 40(1): 45–54. doi:10.13582/j.cnki.1672–9102.2025.01.007

ZHANG X Z, LIU W J, LU A, et al. Reliability Analysis of Piles Foundation of Steep Slope Bridge Based on Deformation Surrogate Model of Bayesian Optimization XGBoost Algorithm [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(1): 45–54. doi:10.13582/j.cnki.1672–9102.2025.01.007

基于贝叶斯优化 XGBoost 模型陡坡桥梁 桩基变形可靠性分析方法

张晓忠^{1,2}, 刘文杰¹, 卢鹭², 唐仁华^{3*}, 陈昌富¹, 钟专²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410000;
3. 长沙学院 土木工程学院, 湖南 长沙 410022)

摘要: 陡坡桥梁桩基的变形(沉降和水平位移)是影响桥梁运营安全的关键因素,为解决按变形控制的陡坡桥梁桩基可靠度计算问题,较全面地考虑地层、桩基和荷载各方面的不确定性因素,引入 XGBoost 模型构建桩基变形代理模型,提出了一种按变形控制的陡坡桥梁桩基可靠性分析方法.首先,采用均匀试验设计法设计陡坡桥梁桩基数值模拟计算方案;然后,按计算方案建立相应的三维有限元数值模型,并由计算结果得到桩顶沉降和水平位移样本数据集;其次,基于样本数据集,采用贝叶斯优化的 XGBoost 算法构建桩基的沉降和水平位移代理模型;最后,基于变形代理模型,采用蒙特卡洛直接抽样法对陡坡桥梁桩基进行可靠性分析计算.结果表明:基于贝叶斯优化的 XGBoost 构建的桩基竖向和水平变形代理模型的拟合和测试验证效果良好,在训练集和测试集上的可决系数 R^2 均达到了 0.95 以上;提出的方法有效地提高了陡坡桥梁桩基沉降和水平位移可靠度计算效率.研究成果可为陡坡桥梁桩基的设计和计算提供更加科学的理论支撑.

关键词: 桩; 沉降; 水平位移; 代理模型; 均匀设计; 机器学习

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672–9102(2025)01–0045–10

Reliability Analysis of Piles Foundation of Steep Slope Bridge Based on Deformation Surrogate Model of Bayesian Optimization XGBoost Algorithm

ZHANG Xiaozhong^{1,2}, LIU Wenjie¹, LU Ao², TANG Renhua³, CHEN Changfu¹, ZHONG Zhuan²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha 410000, China;
3. School of Civil Engineering, Changsha University, Changsha 410022, China)

Abstract: The settlement and horizontal displacement of bridge pile foundations on steep slopes are critical factors that impact the safety of bridge operations. To address the reliability calculation issue associated with deformation-controlled bridge pile foundations on steep slopes, this study comprehensively considers uncertainties related to strata, pile foundations, and loads. It introduces an XGBoost model to develop a proxy model for foundation pile deformation. Additionally, it presents a reliability analysis method for bridge foundation piles on

收稿日期: 2024–07–18

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年科学研究项目资助(24B0790); 国家自然科学基金面上项目资助(52278349); 中国建筑第五工程局有限公司技术开发项目资助(中建 050120220539020)

* 通信作者, E-mail: tangrh@ccsu.edu.cn

steep slopes controlled by deformation. This method utilizes the uniform test design approach to establish a numerical simulation calculation scheme and corresponding three-dimensional finite element numerical model for bridge foundation piles on steep slopes. Subsequently, sample data sets of pile top settlement and horizontal displacement are obtained from the calculation results. Based on these data sets, a proxy model for settlement and horizontal displacement of foundation piles is constructed using the Bayesian optimization XGBoost algorithm. Finally, the Monte Carlo direct sampling method is employed to analyze and calculate the reliability of bridge foundation piles on steep slopes based on the deformation proxy model. The results demonstrate that vertical and horizontal deformation proxy models based on Bayesian optimization XGBoost exhibit excellent fitting and prediction effects, with coefficient of determination R^2 values above 0.95 for both training set and test set scenarios. This proposed method effectively enhances the efficiency of reliability calculations for pile settlement and horizontal displacement in bridge foundation construction on steep slopes. The research findings can offer enhanced scientific theoretical backing for the design and computation of bridge foundation piles situated on steep slopes.

Keywords: piles; settlement; horizontal displacement; surrogate model; uniform design; machine learning

桩基础因承载力高、变形小、适应性强等优点,作为山区陡坡公路、铁路桥梁的基础被广泛应用^[1].陡坡桥梁桩基不仅受到来自上部结构的竖向和水平向荷载作用,还可能受到潜在的滑坡推力作用,由此产生的变形,尤其是水平变形,是危害桥梁工程安全与可靠性的最重要因素之一,因此,开展陡坡桥梁桩基的变形可靠性分析与评价,具有重要的理论和工程实际意义.

在评估桩基安全性时,可靠度分析方法具有明显优势,并已被国内外学者广泛关注.在水平地基中基桩变形可靠度研究方面,赵明华等^[2]结合确定性有限杆单元法和二次函数响应面法,对基桩在桩顶大位移失效模式下的可靠性进行了研究;苏永华等^[3]将数值模拟计算和二次响应面相结合,提出了一种按沉降控制基桩可靠度分析方法;BIAN等^[4]采用双曲线描述桩的荷载-沉降关系,考虑荷载沉降模型、荷载和桩承载力的不确定性,基于均值一次二阶矩法得到了基桩沉降可靠度指标计算公式;唐利斌^[5]则采用二水平正交试验法设计有限元数值模拟计算方案,并基于高阶响应面法研究了灌注桩沉降可靠度计算方法;晏文等^[6]采用6因素9水平正交试验表设计三维有限元数值模拟方案,并基于计算结果引入机器学习建立沉降代理模型,提出了一种基于人工智能基桩沉降可靠性分析方法;KUMAR等^[7]结合分组数据处理方法、最小二乘支持向量机和基于高斯过程回归方法研究了群桩的可靠性分析方法;DONG等^[8]采用荷载传递法分析群桩的荷载-位移关系,并据此分析了群桩的沉降可靠性.此外,YIN等^[9]考虑时变特性,建立了桩可靠度分析的极限状态函数,并采用二次响应面法得到了水平位移破坏模式下桩的可靠度指标.

对于倾斜地基上基桩变形可靠度的分析与计算研究成果很少.赵明华等^[10]将有限杆单元法和高次响应面法结合,研究了倾斜荷载下基桩的水平变形可靠性;JIANG等^[11]以桩顶位移和桩的最大弯矩作为性能准则,提出了考虑桩顶位移和最大弯矩破坏模式下斜坡地基中侧向荷载桩的可靠度分析方法;成滢^[12]和尹平保等^[13]通过利用线弹性地基反力法中 m 法计算桩顶水平位移来构建功能函数,提出了一种基于JC法倾斜地基上桥梁基桩水平变形可靠度计算方法.

基桩变形的影响因素远比承载力的复杂^[14],导致基桩变形的理论计算方法相对不成熟.以往的基桩变形计算方法,如弹性理论方法、荷载传递法、剪切位移法和有限杆单元法,不能较全面地考虑各影响因素,而三维有限元法能够较全面地考虑各种因素影响,且可一次性得到桩基的竖向和水平变形(即桩顶沉降和水平位移),是一种高效的计算方法.而且,许多学者通过将基于ABAQUS有限元数值计算得到的桩基沉降和水平位移结果与试验结果进行对比分析,验证了三维有限元计算方法的准确性^[15-16].但如果考虑随机参数较多时,直接采用传统的随机有限元法^[17]来计算桩基的变形失效概率,将面临巨大的计算工作量.代理模型法是一种常用的高效近似计算方法,尤其适用于复杂的工程问题^[18].随着机器学习方法的快速发展,其高预测精度、快计算速度和强适应能力等优势愈发显著.机器学习方法通过大量数据训练模型,能捕捉变量之间的复杂关系,实现了对新数据的准确预测.结合有限元模拟结果与机器学习技术,可以构建出高效准确的代理模型,为后续陡坡桥梁桩基可靠度研究提供了新的思路^[19].

本文首先在分析确定陡坡桥梁桩基变形的影响因素及其取值范围的基础上,采用均匀试验设计法设

计陡坡桥梁桩基数值模拟计算方案;再基于模拟计算方案,采用三维有限单元法计算桩基的变形(即桩顶沉降和水平位移),据此构建出桩基变形样本数据集;然后,基于样本数据集,采用贝叶斯优化的 XGBoost 算法分别构建桩顶的沉降和水平位移代理模型;最后,基于构建的沉降和水平位移代理模型,采用蒙特卡洛直接抽样法对陡坡桥梁桩基的沉降和水平位移进行可靠性分析研究.

1 陡坡桥梁桩基有限元模拟计算

1.1 陡坡桥梁桩基变形影响因素的确定

针对陡坡桥梁桩基受力变形特点,根据工程勘察资料和工程调研结果,选取岩土体的重度 γ_s 、弹性模量 E_s 、泊松比 ν_s 、内摩擦角 φ 和黏聚力 c ,桩的重度 γ_p 、弹性模量 E_p 、泊松比 ν_p 、长度 L 和直径 D ,桩基所受水平荷载 H 、竖向荷载 V 和弯矩 M ,以及桩土界面摩擦系数 r 、边坡坡面倾角 θ ,共 15 个影响因素进行有限元计算方案的设计,各因素的取值范围如表 1 所示.

表 1 桩基变形影响因素及其取值范围

影响因素	符号	单位	取值范围	影响因素	符号	单位	取值范围
岩土体重度	γ_s	$\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	18.5~22.5	桩的弹性模量	E_p	GPa	25.4~38.0
岩土体弹性模量	E_s	MPa	50~500	桩的泊松比	ν_p	—	0.10~0.25
岩土体泊松比	ν_s	—	0.24~0.36	桩长	L	m	15~75
岩土体内摩擦角	φ	($^{\circ}$)	25~40	桩径	D	m	1.0~2.5
岩土体黏聚力	c	kPa	50~500	桩顶水平荷载	H	kN	0~200
桩-土界面摩擦系数	r	—	0.1~0.7	桩顶竖向荷载	V	MN	5~50
边坡倾角	θ	($^{\circ}$)	0~60	桩顶弯矩	M	$\text{kN} \cdot \text{m}$	0~5 200
桩的重度	γ_p	$\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	24~27				

1.2 陡坡桥梁桩基数值模拟计算方案

采用均匀试验设计方法设计模拟计算方案.对于多因素、多水平的试验,均匀试验设计具有独特优势,它能将各个因素的不同水平均匀地分布在各个组合中并能保证各因素之间相互独立,从而可有效地探索各个因素的影响^[20].均匀试验设计的实施相对简单,提高了试验的效率和可靠性.兼顾有限元数值计算精度和工作量,对上述 15 个影响因素均匀取 7 个水平,构造均匀试验设计表 $U_{70}(7^{15})$ (其中 U 表示均匀设计表,70 表示所需试验次数,7 表示水平数,15 表示因素数),由此设计出陡坡桥梁桩基数值模拟计算方案,表 2 列出了部分计算方案,详见附表 1.

表 2 陡坡桥梁桩基数值模拟计算方案及计算结果(部分)

影响因素	模拟计算方案编号						
	1	2	3	.....	68	69	70
岩土体重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	18.50	19.16	19.82	.....	21.14	21.80	22.50
岩土体弹性模量/MPa	500	125	200	.....	200	275	125
岩土体泊松比	0.30	0.34	0.32	.....	0.24	0.36	0.34
岩土体内摩擦角/($^{\circ}$)	30.0	25.0	27.5	.....	37.5	32.5	27.5
岩土体黏聚力/kPa	350	500	125	.....	500	125	350
桩-土界面摩擦系数	0.6	0.4	0.2	.....	0.6	0.1	0.5
边坡倾角/($^{\circ}$)	60	20	0	.....	30	50	50
桩的重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	26.5	26.0	25.0	.....	25.5	24.0	25.5
桩的弹性模量/GPa	27.5	38.0	33.8	.....	27.5	29.6	25.4
桩的泊松比	0.15	0.25	0.15	.....	0.20	0.25	0.25
桩长/m	65	55	65	.....	25	45	25
桩径/m	2.50	2.25	1.25	.....	2.25	2.50	1.25
桩顶水平荷载/kN	166.65	99.99	0	.....	133.32	0	66.66
桩顶竖向荷载/MN	42.5	27.5	20.0	.....	42.5	50.0	42.5
桩顶弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	1 733.32	5 200.00	4 333.30	.....	0	2 599.98	4 333.30
桩顶沉降/cm	2.708 8	1.114 5	2.567 1	.....	9.623 9	6.077 6	15.625 4
桩顶水平位移/mm	0.4492	1.507 5	2.799 0	.....	0.792 0	1.476 2	3.878 3

1.3 陡坡桥梁桩基数值建模与计算

基于 ABAQUS 有限元数值分析平台建立陡坡桥梁桩基数值计算模型.为减小边界效应对计算结果的影响,取计算模型底部长和宽均为 100 m,桩位于模型中心,桩顶距模型底面 120 m,如图 1 所示.模型约束条件:约束底部水平和竖直位移,侧面仅约束水平位移.土体和基桩均采用三维节点线性六面体单元(C3D8)进行网格划分.

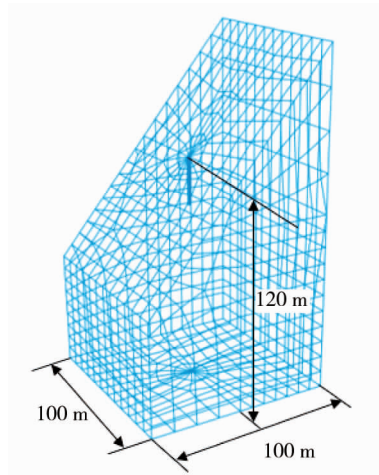


图 1 陡坡桥梁桩基数值计算模型

基桩采用弹性本构模型,岩土体选用 Mohr-Coulomb 本构模型,基桩和土体界面采用 ABAQUS 自带接触单元.根据均匀试验法设计的 70 个数值模拟计算方案进行有限元建模计算,并提取每个计算方案中桩顶中心点的竖向和水平位移计算结果(部分计算结果见表 2).

2 基于贝叶斯优化的 XGBoost 变形代理模型

2.1 基桩变形代理模型构建思路

2.1.1 样本数据集构建

由前面基于均匀设计得到的 70 组陡坡桥梁桩基数值模拟计算结果作为训练数据样本集.同时,再采用蒙特卡洛抽样方法对表 1 中 15 个因素在其取值范围内随机抽样产生 14 组(训练集的 20%)计算参数值,并输入到相应的 ABAQUS 有限元计算模型,计算得到陡坡桥梁桩基的桩顶竖向和水平位移值,由此构成测试数据样本集.

2.1.2 样本数据归一化

由于样本存在多个维度,每个维度具有不同的量纲或者数量级,若直接用原始指标值进行分析,就会增大数值较高的特征在综合分析中的影响程度,同时削弱数值水平较低特征的影响程度.为保证分析结果可靠性,本文采用最小值-最大值缩放(Min-Max Scaling)法^[21]对原始指标数据进行归一化处理.

2.1.3 基桩变形代理模型的建立

将 15 个影响因素作为输入,桩顶沉降或水平位移结果作为输出,输入基于贝叶斯优化的 XGBoost 算法编制的程序,就可训练出陡坡桥梁桩基的桩顶沉降或水平位移代理模型.

2.2 贝叶斯优化 XGBoost 模型的基本原理

2.2.1 XGBoost 模型

XGBoost 是“极端梯度上升”的简称,是一类由基函数与权重进行组合形成对数据拟合效果佳的合成算法^[22],与传统的梯度提升决策树(GBDT)不同,给损失函数增加了正则化项,且由于有些损失函数是难以计算导数的,XGBoost 使用损失函数的二阶泰勒展开作为损失函数的拟合.

XGBoost 的目标函数可表示为

$$\text{Obj}(t) = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{t=1}^T \Omega(f_t); \quad (1)$$

$$\Omega(f_k) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \sum_{j=1}^T w_j^2. \quad (2)$$

式中: y_i 为第 i 个样本的真实值; $\hat{y}_i$ 为第 i 个样本的预测值; l 为第 i 个样本的损失函数; $\Omega(f_i)$ 为正则化项; t 为树的数量; γ 和 λ 为正则项 Ω 的复杂度参数; w_j 为叶节点 j 的权重; T 为树中叶节点的数量.

XGBoost 接着对目标函数进行二阶泰勒展开,去掉常数项,得到目标函数的表达式为

$$\text{Obj}(t) = \sum_{i=1}^n \left\{ g_i f_t(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_t(x_i)^2 \right\} + \Omega(f(t)). \quad (3)$$

式中: g_i 为损失函数的一阶导数求和; h_i 为损失函数的二阶导数求和.去掉常数项后可知,目标函数仅与误差函数的一阶和二阶导数相关,若树的结构部分 q 已知,可使用目标函数寻找最优 w_j ,并得到最优目标函数值,其本质可归为二次函数的最小值求解问题.

XGBoost 通过对损失函数进行二阶泰勒展开,使目标函数仅与损失函数的一阶和二阶导数相关,从而可以更高效地找到最优的模型参数.正则化项的引入进一步防止了过拟合,提升了模型的泛化能力.这些特性使得 XGBoost 在各种数据场景下表现出色,成为广泛应用的机器学习算法之一.

2.2.2 贝叶斯优化

在机器学习中,需要对超参数进行优化,以提高学习的性能和效果^[23].由于本文数据点有限,不适用于遗传算法和粒子群算法等群体优化算法,同时网格搜索算法由于要遍历参数的所有组合,因此优化效率不高.而贝叶斯优化具有全局搜索能力,不容易陷入局部最优,能在有限的采样点下尽可能地接近目标函数的真实分布,避免了随机搜索或穷举搜索的低效率问题,可实现对 XGBoost 模型超参数的高效优化.贝叶斯优化的核心思想是基于贝叶斯定理来建立对目标函数的后验分布,从而选择下一个样本点以最大化收益,贝叶斯定理可用式(4)表示.

$$p(f|D_i) = \frac{p(D_i|f)p(f)}{p(D_i)}. \quad (4)$$

式中: f 为未知目标函数; $D_i = (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 为已观测集合; $p(D_i|f)$ 为 D_i 的似然分布; $p(f)$ 为 f 先验概率分布; $p(D_i)$ 为边际化 f 的边际似然分布; $p(f|D_i)$ 为 f 的后验概率分布.

在贝叶斯优化中,选择合适的收益函数是至关重要的.常见的收益函数包括改善概率(PI)、期望改善函数(EI)、高斯过程置信上界(GP-UCB)等.这些收益函数在权衡探索和利用的过程中,帮助选择下一个样本点,使得目标函数在有限的试验次数下能够尽快找到最优解.

2.2.3 模型的验证分析

为验证本文基于贝叶斯优化的 XGBoost 模型的优越性,采用 70 组基桩竖向变形(即沉降)数据样本(表 2)作为训练数据集,分别建立 4 种机器学习模型:即 BP 神经网络模型、梯度提升决策树(GBDT)模型、随机森林(RF)模型和基于贝叶斯优化 XGBoost 模型.所建 4 种机器学习模型的可决系数 R^2 分别为 0.678, 0.370, 0.433 和 0.982.

本文基于贝叶斯优化 XGBoost 模型的可决系数 $R^2 (=0.982)$ 明显高于其他机器学习模型,这是由于 XGBoost 模型本身就具备高效、准确、处理缺失值能力强等优点,再采用贝叶斯优化法对模型超参数进行优化,模型的性能又会得到进一步提升.

2.3 基于贝叶斯优化的 XGBoost 变形代理模型建立

2.3.1 基桩沉降代理模型

根据 2.1 节基桩变形代理模型构建思路,以 15 个影响因素作为输入变量,基桩竖向变形(沉降)作为输出变量,将前面 70 组基桩竖向变形训练数据样本(表 2)输入编制的基于贝叶斯优化 XGBoost 算法程序,即可训练出陡坡桥梁桩基的桩顶沉降代理模型,模型的拟合和测试效果如图 2 所示.所建模型在训练集和测试集的可决系数 R^2 分别为 0.982 和 0.996,测试值(即代理模型在测试点的沉降计算值)与实际值(即采用有限元数值模拟计算得到的测试点沉降值)误差较小,说明基于贝叶斯优化的 XGBoost 算法建立的桩顶沉降代理模型具有良好的拟合和测试精度,泛化能力较强.

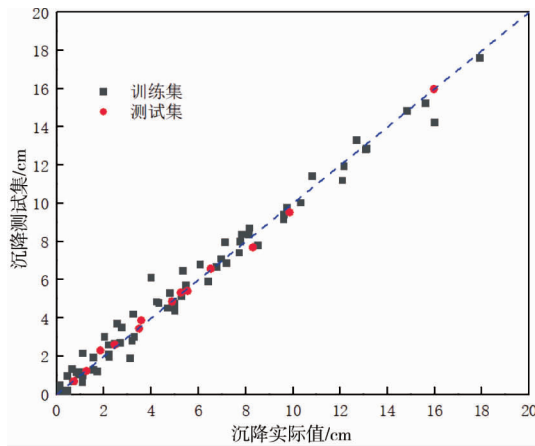


图2 XGBoost 模型对沉降的训练效果和性能评价结果

模型评价参数	样本集	
	训练集	测试集
可决系数(R^2)	0.982	0.996
平均绝对误差(MAE)	0.471	0.180
均方根误差(RMSE)	0.609	0.252
均方误差(MSE)	0.370	0.064

2.3.2 基桩水平位移代理模型

同理,以 15 个影响因素作为输入变量,基桩水平位移作为输出变量,将前面 70 组基桩水平位移训练数据样本(表 2)输入编制的基于贝叶斯优化 XGBoost 算法程序,即可训练出陡坡桥梁桩基的桩顶水平位移代理模型,模型的拟合和测试效果如图 3 所示.所建模型在训练集和测试集的可决系数 R^2 分别为 0.979 和 0.977,测试值(即代理模型在测试点的水平位移计算值)与实际值(即采用有限元数值模拟计算得到的测试点水平位移值)误差较小,说明基于贝叶斯优化的 XGBoost 算法建立的桩顶水平位移代理模型同样具有良好的拟合和测试精度,其泛化能力也较强.

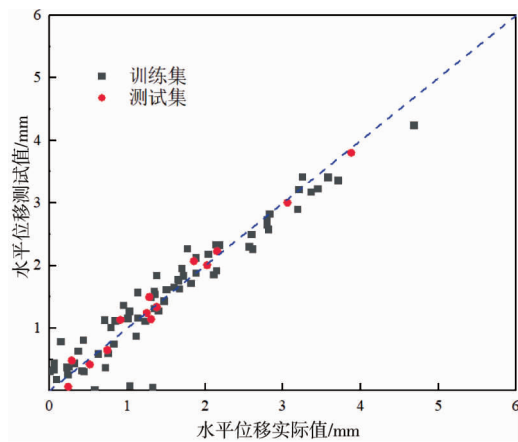


图3 XGBoost 模型对水平位移的训练效果和性能评价结果

模型评价参数	样本集	
	训练集	测试集
可决系数(R^2)	0.979	0.977
平均绝对误差(MAE)	0.004	0.003
均方根误差(RMSE)	5.224×10^{-3}	4.261×10^{-3}
均方误差(MSE)	2.729×10^{-5}	1.815×10^{-5}

3 基于贝叶斯优化的 XGBoost 变形代理模型陡坡桥梁桩基可靠性分析

3.1 陡坡桥梁桩基极限状态方程

上文确定了基于贝叶斯优化 XGBoost 陡坡桥梁桩基的竖向变形(沉降)和水平位移代理模型,由此便可开展陡坡桥梁桩基变形可靠性分析.下面就根据建立的代理模型构建按桩顶(竖向和水平的)变形控制的极限状态方程.

按桩顶竖向变形(沉降)控制极限状态方程:

$$Z_v = g_v(\mathbf{X}) = [s_v] - s_v(\mathbf{X}). \quad (5)$$

式中: Z_v 为桩顶竖向变形状态变量; $g_v(\mathbf{X})$ 为功能函数; $\mathbf{X}$ 为随机向量, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_{14}, x_{15}) = (\gamma_s, E_s, \nu_s, \dots, H, V, M)$; $s_v(\mathbf{X})$ 为桩顶竖向变形(沉降)计算值,由上文建立的基于贝叶斯优化 XGBoost 桩顶竖向变形代理模型计算得到; $[s_v]$ 为允许桩顶竖向变形(沉降)限值,按行业规范取值^[22-23],对沉降敏感的陡坡桥梁桩基可取 $[s_v] = 2 \sim 5$ cm.

按桩顶水平位移控制极限状态方程:

$$Z_h = g_h(\mathbf{X}) = [s_h] - s_h(\mathbf{X}). \quad (6)$$

式中: Z_h 为桩顶水平变形状态变量; $s_h(\mathbf{X})$ 为桩顶水平变形计算值,由上文建立的基于贝叶斯优化 XGBoost 桩顶水平变形代理模型计算得到; $[s_h]$ 为允许桩顶水平变形(位移)限值,按行业规范取值^[24-25],一般取 $[s_h] = 6 \sim 10 \text{ mm}$,对水平特别敏感的陡坡桥梁桩基可取 $[s_h] = 6 \text{ mm}$.

3.2 设计计算参数统计特性

湖南省湘西某高速公路桥梁桩基建于坡角为 40° 的山坡上,根据钻探揭露,场地内埋藏的地层有人工填土层、第四系全新统滑坡堆积层、第四系冲积层及残积层、下部基岩为白垩系泥质粉砂岩.山坡地层性质以及桩基的几何尺寸和所受荷载等参数见表 3.综合分析工程勘察报告和当地经验数据,可推断出各计算参数服从正态分布,其变异系数见表 3.

表 3 计算参数统计特性

计算参数	均值	变异系数	计算参数	均值	变异系数
岩土体重度	$19.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$	0.05	桩的弹性模量	31 GPa	0.05
岩土体弹性模量	45 MPa	0.2	桩的泊松比	0.2	0.05
岩土体泊松比	0.3	0.05	桩长	45 m	0.05
岩土体内摩擦角	21°	0.15	桩径	2 m	0.05
岩土体黏聚力	100 kPa	0.2	桩顶水平荷载	65 kN	0.1
桩-土界面摩擦系数	0.5	0.1	桩顶竖向荷载	6 MN	0.1
边坡倾角	40°	0.05	桩顶弯矩	$900 \text{ kN} \cdot \text{m}$	0.1
桩的重度	$25.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$	0.05			

3.3 陡坡桥梁基桩可靠性分析

确定了计算参数的统计特性,便可通过蒙特卡洛直接抽样方法来进行桥梁基桩的可靠性分析.蒙特卡洛直接抽样方法的基本步骤为确定随机变量 X 的概率分布 $f(x)$,按 $f(x)$ 对随机变量 X 进行随机抽样,用所得样本值 x 计算功能函数 Z 的值,若 $Z < 0$,则结构失效了一次^[26].若总共进行了 N 次模拟, $Z < 0$ 出现了 n_f 次,由概率论的大数定律中的 Bernoulli 定理可知:随机事件 $Z < 0$ 在 N 次独立试验中的频率 n_f/N 依概率收敛于该事件的概率 P_f ,于是结构的失效概率为

$$P_f = \frac{n_f}{N}. \quad (7)$$

对应失效概率 P_f 的可靠指标 β 可由式(8)计算得到.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f). \quad (8)$$

式中: Φ^{-1} 为标准正态分布的逆累积分布函数.

于是,按上述方法对 15 个随机变量进行蒙特卡洛抽样,随机抽取 N 次,将抽取的 N 个样本分别代入本文建立的桥梁桩基沉降代理模型和水平位移代理模型中,分别计算出 N 个基桩的沉降和水平位移,并分别批量输入到式(5)和式(6)的极限状态方程中计算得到相应的功能函数值,再依据功能函数值小于零的次数,就可由式(7)和式(8)分别计算得到陡坡桥梁基桩的沉降失效概率 P_{fv} 和水平位移失效概率 P_{fh} 以及相应的可靠指标 β_v 和 β_h .

按上述步骤,随机抽样 1 000 次(即 $N=1\,000$),最终计算出 3.3 节所述陡坡公路桥梁桩基在不同允许桩顶沉降值下的沉降失效概率 P_{fv} 和相应的可靠性指标 β_v ,如图 4 所示.由图 4 可知:即便允许桩顶沉降限值 $[s_v]$ 分别严格控制到 2,3,4,5 cm 时,桩的沉降可靠指标 β_v 也分别可达到 2.50,3.81,4.60 和 5.00,这说明该桩基的桩顶沉降变形失效概率低,可靠性高,完全能满足工程要求.

同样,按前述步骤随机抽样 1 000 次(即 $N=1\,000$),也最终可计算出 3.3 节所述陡坡公路桥梁桩基在不同允许桩顶水平位移值下的水平位移失效概率 P_{fh} 和相应的可靠性指标 β_h ,如图 5 所示.由图 5 可知:当允许桩顶水平位移限值 $[s_h] = 6 \text{ mm}$ 时,桩的水平位移可靠指标 β_h 已达到 3.3;当 $[s_h] \geq 7 \text{ mm}$ 时,有 $\beta_h \geq 5.0$,说明该桩基的桩顶水平位移的失效概率很低,可靠性高,完全能满足工程要求.

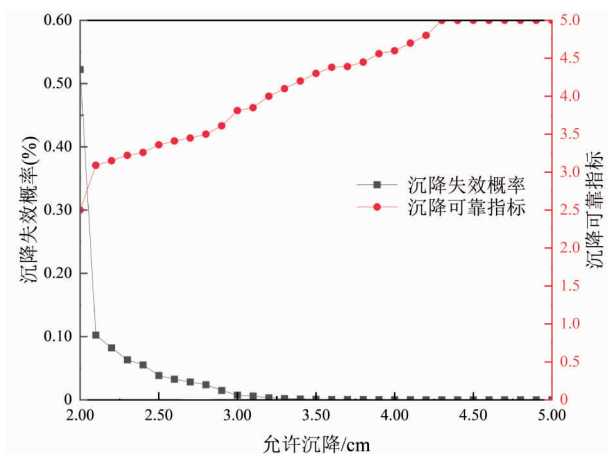


图4 不同桩顶允许沉降对应的失效概率和可靠指标

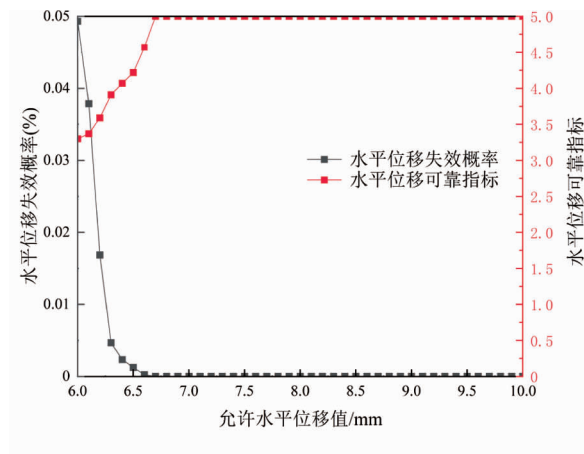


图5 不同桩顶允许水平位移对应的失效概率和可靠指标

4 结论

1) 基于陡坡桥梁桩基设计计算参数的不确定性,采用均匀试验方法,设计了模拟计算方案,有效减少了计算次数,并利用 ABAQUS 数值模拟软件,计算并建立了桩基沉降和水平位移数据库,再由 XGBoost 模型构建陡坡桥梁桩基变形代理模型,计算桩基的沉降和水平变形可靠性指标,促进了基于机器学习变形代理模型的可靠度计算方法在桥梁桩基工程中的应用。

2) 采用贝叶斯优化后的 XGBoost 算法对桥梁桩基的沉降和水平位移进行建模,该算法在训练集和测试集上的拟合和测试效果均较为良好,测试结果与实际值之间的误差较小.通过构建的桩基沉降和水平位移的代理模型,能够快速、准确地测试不同设计参数和工况下的桩基沉降和水平位移,提高了设计和分析的效率。

3) 基于蒙特卡洛直接抽样法以及沉降和水平位移 XGBoost 代理模型,计算得到了桥梁桩基的失效概率和可靠性指标随桩基允许沉降和允许水平位移的变化关系。

参考文献:

- [1] 龚先兵,杨明辉,赵明华,等.山区高陡横坡段桥梁桩基承载力机理模型试验[J].中国公路学报,2013,26(2):56-62.
- [2] 赵明华,曾昭宇,刘晓明,等.考虑轴向横向荷载共同作用的桩基可靠度[J].建筑科学与工程学报,2005,22(2):57-60.
- [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] BIAN X Y, ZHENG J J, XU Z J, et al. Target reliability index for serviceability limit state of single piles[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(1): 310-316.
- [5] 唐利斌.考虑高阶相关性的灌注桩沉降可靠度分析[J].福建工程学院学报,2020,18(1):53-56.
- [6] 晏文,唐仁华,王克强,等.基于人工智能沉降代理模型的桥梁桩基可靠性分析[J].铁道科学与工程学报,2024,21(11):1-10.
- [7] KUMAR M, SAMUI P. Reliability analysis of settlement of pile group in clay using LSSVM, GMDH, GPR[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(6): 6717-6730.
- [8] DONG X L, TAN X H, LIN X, et al. Reliability analysis and design of vertically loaded piles in spatially variable soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(10): 04023175.
- [9] YIN P B, WANG K, CHEN L, et al. Horizontal bearing capacity and reliability of piles in coastal soft soil considering the time-varying characteristics[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(2): 247.
- [10] 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.
- [11] JIANG C, LI T B, ZHOU K P, et al. Reliability analysis of piles constructed on slopes under laterally loading[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1955-1964.
- [12] 成滢.桩-柱式桥基变形可靠性分析及其工程应用研究[D].长沙:湖南大学,2015.

[13] 尹平保,贺炜,成滢,等.山区桩柱式桥梁基桩水平变形可靠性分析研究[J].岩土工程学报, 2015, 37(增刊1): 120-124.

[14] 边晓亚,郑俊杰,徐志军.考虑参数和模型不确定性的基桩正常使用极限状态可靠度分析[J].岩土力学,2014,35(11): 3317-3322.

[15] 尹武先,姚文娟,程泽坤.轴-横向荷载作用下超长桩数值模拟[J].水利水运工程学报,2009,(2):15-20.

[16] 赵明华,彭文哲,杨超炜,等.基于 ABAQUS 的水平受荷桩应变楔分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(9): 2199-2206.

[17] 傅旭东,茜平一,刘祖德.单桩沉降可靠度的随机有限元分析[J].铁道学报,2002,24(1):70-75.

[18] 毛凤山,陈昌富,朱世民.代理模型方法及其在岩土工程中的应用综述[J].地基处理,2020,1(4):295-306.

[19] 陈昌富,李欣,龚晓南,等.基于支持向量机沉降代理模型复合地基优化设计方法[J].铁道科学与工程学报,2018,15(6):1424-1429.

[20] 杜双奎.试验优化设计与统计分析[M].2 版.北京:科学出版社,2020.

[21] 张威.机器学习从入门到入职:用 Sklearn 与 Keras 搭建人工智能模型[M].北京:电子工业出版社,2020.

[22] SU J, WANG Y Z, NIU X K, et al. Prediction of ground surface settlement by shield tunneling using XGBoost and Bayesian Optimization[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 114: 105020.

[23] 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(增刊1):85-90.

[24] 中华人民共和国建设部.建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

[25] 中华人民共和国交通运输部.公路桥涵地基与基础设计规范:JTG 3363—2019[S].北京:人民交通出版社,2020.

[26] 贡金鑫.工程结构可靠度计算方法[M].大连:大连理工大学出版社,2003.

附表 1:陡坡桥梁基桩数值模拟计算方案及计算结果(全部)

计算 方案 编号	岩土 体重 度/ (kN/m ³)	岩土 体弹 性模 量/ MPa	岩土 体内 摩擦 角/ (°)	岩土 体黏 聚力/ kPa	岩土 体泊 松比	桩-土 界面 摩擦 系数	桩的 重度/ (kN/m ³)	桩的 弹性 模量/ GPa	桩的 泊松 比	地面 倾角/ (°)	桩长/ m	桩径/ m	桩顶 水平 荷载/ kN	桩顶 竖向 荷载/ kN	桩顶 弯矩/ (kN·m)	桩顶 沉降/ cm	桩顶 水平 位移/ mm
1	18.50	500	30.0	350	0.3	0.6	26.5	27.5	0.15	60	65	2.50	166.65	42.5	1 733.32	2.708 9	0.449 2
2	19.16	125	25.0	500	0.34	0.4	26.0	38	0.25	20	55	2.25	99.99	27.5	5 200.00	1.114 6	1.507 6
3	19.82	200	27.5	125	0.32	0.2	25.0	33.8	0.15	0	65	1.25	0	20.0	4 333.30	2.567 1	2.799 1
4	20.48	50	27.5	425	0.26	0.3	26.5	33.8	0.10	40	35	2.25	166.65	35.0	1 733.32	9.610 1	0.585 0
5	21.14	350	32.5	125	0.24	0.6	26.0	38	0.15	10	25	2.00	166.65	5.0	4 333.30	0.303 5	1.601 1
6	21.80	200	30.0	275	0.36	0.1	25.5	38	0.15	60	35	1.5	200.00	35.0	3 466.64	13.124 7	3.208 9
7	22.50	425	27.5	200	0.3	0.5	27.0	31.7	0.22	0	25	2.25	66.66	35.0	5 200.00	3.299 1	1.727 0
8	18.50	50	25.0	125	0.36	0.4	26.5	25.4	0.12	30	35	1.75	33.33	5.0	1 733.32	2.210 2	0.724 1
9	19.16	275	25.0	200	0.32	0.3	27.0	38	0.10	60	45	1.25	133.32	27.5	0	7.129 7	0.849 1
10	19.82	500	30.0	500	0.32	0.3	27.0	29.6	0.25	10	35	1.75	0	20.0	866.66	1.712 0	1.329 1
11	20.48	350	35.0	200	0.36	0.7	26.5	25.4	0.17	0	45	1.5	200.00	35.0	866.66	5.480 8	0.224 0
12	21.14	125	32.5	200	0.26	0.3	24.0	35.9	0.10	0	25	1.75	33.33	42.5	2599.98	10.820 6	1.309 4
13	21.80	425	35.0	50	0.32	0.3	24.0	27.5	0.15	50	25	1.5	66.66	12.5	866.66	9.765 6	1.888 3
14	22.50	50	32.5	500	0.36	0.6	24.0	31.7	0.17	0	15	1.00	133.32	27.5	1 733.32	13.100 3	2.819 9
15	18.50	200	32.5	425	0.26	0.2	24.5	29.6	0.15	0	35	2.5	99.99	20.0	5 200.00	2.027 7	1.348 0
16	19.16	50	37.5	125	0.3	0.4	25.0	33.8	0.12	60	15	2.00	133.32	50.0	4 333.30	12.102 3	3.582 5
17	19.82	125	37.5	200	0.34	0.7	24.5	35.9	0.25	40	25	1.75	166.65	20.0	2 599.98	6.786 3	2.139 8
18	20.48	50	35.0	200	0.24	0.1	27.0	27.5	0.17	50	55	1.5	66.66	20.0	5 200.00	7.190 7	2.147 5
19	21.14	500	25.0	50	0.24	0.2	26.5	29.6	0.17	40	35	1.75	133.32	50.0	3 466.64	7.840 5	1.140 8
20	21.80	275	25.0	500	0.24	0.5	26.0	25.4	0.12	30	65	1.50	200.00	20.0	2 599.98	2.199 6	0.715 6
21	22.50	425	25.0	350	0.36	0.3	25.0	29.6	0.12	10	25	2.5	66.66	42.5	3 466.64	6.413 4	1.774 4
22	18.50	275	35.0	50	0.24	0.4	25.0	31.7	0.25	0	75	1.50	133.32	35.0	866.66	8.526 7	2.570 0
23	19.16	50	32.5	50	0.32	0.5	26.0	31.7	0.1	20	65	1.50	99.99	50.0	0	7.728 4	0.829 6

续附表 1

计算 方案 编号	岩土 体重 度/ (kN/m ³)	岩土 体弹 性模 量/ MPa	岩土 体内 摩擦 角/ (°)	岩土 体黏 聚力/ kPa	岩土 体泊 松比	桩-土 界面 摩擦 系数	桩的 重度/ (kN/m ³)	桩的 弹性 模量/ GPa	桩的 泊松 比	地面 倾角/ (°)	桩长/ m	桩径/ m	桩顶 水平 荷载/ kN	桩顶 竖向 荷载/ kN	桩顶 弯矩/ (kN·m)	桩顶 沉降/ cm	桩顶 水平 位移/ mm
24	19.82	50	25.0	125	0.26	0.7	24.5	29.6	0.20	10	55	1.25	99.99	12.5	3 466.64	4.928 1	2.614 3
25	20.48	425	40.0	500	0.28	0.2	24.5	35.9	0.15	50	55	1.75	99.99	50.0	0	5.276 3	0.422 4
26	21.14	350	35.0	275	0.32	0.3	26.5	35.9	0.22	30	55	2.50	200.00	50.0	4 333.30	1.573 0	1.013 1
27	21.80	125	30.0	50	0.28	0.3	25.5	27.5	0.22	30	65	2.25	200.00	5.0	4 333.30	0.941 1	1.235 1
28	22.50	275	37.5	350	0.26	0.7	26.5	33.8	0.20	30	15	1.50	0	35.0	5 200.00	4.011 2	3.453 5
29	18.50	50	35.0	425	0.3	0.3	24.5	38	0.22	60	65	1.25	0	35.0	2 599.98	14.846 5	2.602 3
30	19.16	200	30.0	275	0.34	0.2	24.5	25.4	0.20	10	15	2.00	166.65	35.0	0	8.167 3	0.1520
31	19.82	425	32.5	200	0.34	0.3	26.0	25.4	0.25	40	75	1.00	133.32	12.5	3 466.64	4.233 1	2.190 8
32	20.48	200	37.5	425	0.28	0.4	24.0	38	0.17	20	75	2.50	200.00	20.0	0	0.857 7	0.759 1
33	21.14	125	35.0	350	0.34	0.5	26.5	33.8	0.15	10	55	2.25	0	12.5	0	0.317 8	0.013 1
34	21.80	425	40.0	275	0.28	0.1	27.0	25.4	0.12	20	15	2.00	133.32	20.0	2 599.98	1.571 0	1.037 3
35	22.50	500	35.0	125	0.3	0.1	25.5	35.9	0.12	10	75	2.25	166.65	27.5	2 599.98	4.796 0	1.351 2
36	18.50	275	37.5	200	0.34	0.1	24.5	29.6	0.10	30	65	2.25	99.99	5.0	866.66	0.002 0	0.324 6
37	19.16	500	25.0	350	0.3	0.1	24.0	35.9	0.22	30	45	1.50	133.32	12.5	5 200.00	1.094 2	1.821 0
38	19.82	425	32.5	425	0.34	0.7	27.0	38	0.12	30	45	1.25	33.33	50.0	3 466.64	3.121 5	1.885 3
39	20.48	350	27.5	350	0.3	0.7	25.0	27.5	0.10	0	55	1.75	133.32	12.5	0	0.454 3	0.062 9
40	21.14	350	40.0	500	0.36	0.5	25.0	31.7	0.17	50	35	2.25	166.65	5.0	5 200.00	0.466 4	3.197 3
41	21.80	125	30.0	350	0.24	0.2	25.0	35.9	0.12	40	45	1.00	166.65	5.0	866.66	6.976 0	0.630 9
42	22.50	500	40.0	125	0.36	0.6	25.5	35.9	0.22	20	65	1.75	66.66	42.5	1 733.32	2.764 3	1.405 2
43	18.50	275	30.0	500	0.32	0.7	24.0	33.8	0.10	40	75	2.00	66.66	35.0	5 200.00	0.978 9	3.368 2
44	19.16	200	40.0	50	0.28	0.6	26.0	25.4	0.10	10	45	2.50	0	27.5	3 466.64	1.106 6	1.032 0
45	19.82	275	27.5	500	0.28	0.1	26.0	31.7	0.17	60	15	1.75	0	5.0	3 466.64	0.242 7	1.383 6
46	20.48	125	40.0	125	0.28	0.4	27.0	29.6	0.22	50	25	1.25	200.00	27.5	866.66	17.923 6	1.709 2
47	21.14	275	40.0	50	0.34	0.2	25.5	38	0.20	20	35	1.00	33.33	27.5	5 200.00	16.012 8	4.687 1
48	21.80	500	27.5	200	0.24	0.5	24.5	38	0.15	30	15	2.25	0	27.5	866.66	0.644 8	1.141 8
49	22.50	200	32.5	275	0.26	0.6	27.0	38	0.25	50	65	2.00	66.66	12.5	1 733.32	0.461 4	0.094 9
50	18.50	350	32.5	50	0.28	0.5	24.0	27.5	0.12	40	55	1.25	166.65	42.5	5 200.00	7.778 4	3.715 1
51	19.16	350	37.5	350	0.24	0.2	25.5	31.7	0.22	60	25	2.5	33.33	12.5	1 733.32	0.145 5	0.437 4
52	19.82	125	25.0	200	0.28	0.7	25.0	31.7	0.17	50	75	2.5	33.33	42.5	866.66	2.472 3	1.118 0
53	20.48	425	25.0	275	0.3	0.6	25.5	33.8	0.20	50	35	1.00	33.33	5.0	0	5.348 0	1.667 1
54	21.14	125	37.5	425	0.3	0.1	26.0	27.5	0.15	10	45	1.00	66.66	50.0	1 733.32	12.699 6	0.241 1
55	21.80	50	40.0	275	0.3	0.5	24.0	27.5	0.25	20	45	2.00	33.33	5.0	3 466.64	0.137 6	1.672 6
56	22.50	50	40.0	350	0.32	0.2	27.0	31.7	0.20	0	75	1.75	166.65	42.5	3 466.64	4.331 2	1.361 8
57	18.50	500	35.0	425	0.26	0.7	24.5	25.4	0.22	60	45	2.00	99.99	27.5	4 333.30	0.695 5	2.115 9
58	19.16	500	35.0	425	0.32	0.4	25.5	31.7	0.10	20	15	1.25	200.00	12.5	4 333.30	3.251 8	3.256 4
59	19.82	350	30.0	125	0.26	0.1	26.0	33.8	0.25	20	15	1.00	99.99	42.5	0	10.350 2	0.059 1
60	20.48	500	40.0	275	0.26	0.4	25.0	29.6	0.10	40	55	1.00	33.33	35.0	1 733.32	8.129 4	1.653 0
61	21.14	350	27.5	425	0.36	0.2	26.0	27.5	0.20	40	75	2.00	33.33	27.5	866.66	4.983 2	0.254 3
62	21.80	350	30.0	275	0.24	0.4	24.5	25.4	0.17	20	75	1.50	0	50.0	4 333.30	5.009 6	2.799 3
63	22.50	275	27.5	425	0.28	0.6	25.0	33.8	0.22	10	35	1.00	200.00	50.0	2 599.98	12.173 3	2.833 5
64	18.50	425	37.5	500	0.26	0.4	26.5	35.9	0.20	0	65	1.25	66.66	5.0	2 599.98	2.226 4	0.958 9
65	19.16	200	30.0	50	0.32	0.7	27.0	35.9	0.17	40	15	2.50	99.99	12.5	2 599.98	3.198 5	0.372 6
66	19.82	200	37.5	275	0.36	0.6	26.5	29.6	0.12	60	75	1.00	99.99	20.0	4 333.30	4.700 2	2.044 8
67	20.48	425	27.5	50	0.34	0.5	24.0	33.8	0.20	60	55	2.00	200.00	20.0	1 733.32	2.504 3	1.824 8
68	21.14	200	37.5	500	0.24	0.6	25.5	27.5	0.20	30	25	2.25	133.32	42.5	0	9.624 0	0.792 0
69	21.80	275	32.5	125	0.36	0.1	24.0	29.6	0.25	50	45	2.50	0	50.0	2 599.98	6.077 7	1.476 2
70	22.50	125	27.5	350	0.34	0.5	25.5	25.4	0.25	50	25	1.25	66.66	42.5	4 333.30	15.625 4	3.878 3