

黄土地层微型桩水平承载力研究

张 奎¹, 韩晓雷²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 对于微型桩水平承载力, 在目前的研究中尚未有统一的并被工程界普遍接受的表达式, 本文就此问题进行了研究. 首先选用西安地区黄土作为试验模型的滑坡介质, 在假定干密度保持不变的前提下, 选择土体饱和度和桩径和桩间距作为影响因素, 每个因素选取三个试验水平, 按照正交试验方案, 对微型桩进行了室内试验, 得到了不同影响因素和试验水平下的水平承载力大小关系, 并借助 MATLAB 数据拟合功能, 对水平承载力进行了一次线性和二次非线性函数的回归分析, 对回归函数系数分别运用假设检验的相关原理进行了评价, 最后将二次非线性回归函数应用于工程实例中和原设计方案进行了对比. 试验结果表明微型桩的水平承载力与饱和度呈反比、与桩径呈正比关系, 且三个因素对水平承载力影响大小的排列顺序依次为饱和度>桩径>桩间距; 回归结果展示了二次非线性回归函数相比一次线性能较好地吻合试验结果, 且具有较高的拟合精度; 实例对比结果显示了二次非线性回归函数能够满足设计抗滑力的要求.

关键字: 微型桩; 水平承载力; 室内试验; 回归分析; 假设检验

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)05-0694-07

Research on micropile horizontal bearing capacity in the loess stratum

ZHANG Kui¹, HAN Xiaolei²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch.& Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: To start with, this article assumes that loess in Xi'an is regarded as the slide mass and soil dry density is kept constant. Soil saturation, pile diameter and pile spacing are chosen as three experimental factors and there are three levels for every factor, so orthogonal experimental plan is made; and the micropile horizontal bearing capacity was obtained by indoor test under this plan. Secondly, with the aid of MATLAB, the linear and quadratic nonlinear function of regression analysis are obtained, and the coefficients of two regression functions are evaluated by the application of relevant principle of hypothesis test; Finally, the quadratic non-linear regression function is applied to an engineering example and compared with the original design scheme. The experimental results indicate that the horizontal bearing capacity has an inverse relationship with soil saturation and a positive relationship with the pile diameter, and the descending order is soil saturation, pile diameter and pile spacing according to the significant effect of these factors on horizontal bearing capacity. Furthermore, the analysis result shows that the quadratic polynomial fitting trend can well fit the test results compared with linear polynomial and the quadratic nonlinear polynomial can have higher fitting accuracy, However the scheme manifests that it can meet the requirements of the design of sliding resistance.

Key words: micropile, horizontal bearing capacity, indoor experiment, regression analysis, hypothesis testing

微型桩是指直径小于 300 mm 的桩, 通常条件下微型桩直径介于 70~300 mm, 长细比大于 30, 桩体采用钻孔或压力注浆工艺的混凝土灌注桩或插入桩, 为提高抗弯-剪承载力, 加筋材料采用钢筋束、钢管等材料. 自上世纪 50 年代面世以来, 其不断应用在滑坡治理、边坡支护及基础加固等领域^[1-4]. 在滑坡治理等应用中, 微型桩主要承受水平荷载的作用, 因此水平承载力的计算往往是工程设计的关键.

Cadden^[1]和 Armour^[2]较为详细地论述了微型桩的应用. 陈正等^[3]考虑到微型桩水平承载力现场荷载试验的困难, 利用 ABAQUS 有限元软件分析了桩

身和土体参数对微型桩水平承载力的影响规律, 观察到较大的桩径和内摩擦角可以显著地提高微型桩的水平承载力. Richards 等^[5]进行了微型桩水平承载力的现场载荷试验, 并与几种理论计算方法计算结果进行了对比, 认为在桩身上部 2~5m 的地方水平承载力对土的类型和强度最为敏感. Bo Xiang 等^[6]进行了两组带连梁形式的群桩 (2×5 和 3×5) 现场载荷试验及 Plaxis 3D 有限元分析, 探讨了桩土共同作用的机理, 研究了桩的排数、间距、排距等因素对桩后土压力分布大小及位移的影响, 并得到了桩后土压力的分担比. John R.Wolosick 等^[7]做了若干个灌注微型桩的承载力试验, 得到了极限锚固

应力的结果，并与 Armour^[2]的相关数值进行了比较。杨文智^[8]从水平微型桩的平衡微分方程入手推导了响应分析法的有限差分解答，并编写了考虑变刚度等问题的统一程序。孙书伟等^[9]根据梁柱理论和弹塑性地基系数法中的 $P-y$ 曲线法推导了应用于边坡的微型桩水平抗力分析模型，得到了微型桩截面极限弯矩和最大抗剪力的迭代分析法。苏荣臻等^[10]分析了不同的成桩方式对微型桩水平承载力的影响规律，并初步研究了杆塔基础中的单桩及群桩的水平承载力计算方法，与现场试验进行了对比验证了其合理性。

以上所述理论成果都在一定程度上促进了对微型桩的认识，尤其在水平承载力计算方面取得了一些进步。但这些研究主要是基于各种假设，再从应力-应变关系推导出来的一些理论公式，不可避免地存在一些局限性，到目前为止尚未有统一和工程界普遍接受的水平承载力表达式。另外通过数据回归来拟合微型桩水平承载力表达式的方法至今尚未见到报道。本文对微型桩水平承载力进行了室内试验，并对试验结果加以分析并对其进行回归分析，得到了简单实用的公式。最后将该公式应用于工程实例中并与原方案进行了对比。

1 室内试验设计

1.1 桩体设计荷载的定义

假定桩体的下沉位移超过桩径的 0.6~0.7 倍时，即认为桩加固作用失效，试验停止加载；此时得到的承载力定义为极限承载力，取安全系数 $K=3$ ，设计荷载=极限荷载/ K 。

1.2 试验原理

当微型桩加固滑坡时，由于降雨或其他原因导致了土体的含水率上升；一方面使桩后土体的饱和度增大甚至呈流塑状，增加了滑体重量，并加大了下滑力。另一方面致使滑带土粘聚力或内摩擦角降低，减小了土体的抗剪强度，从而边坡稳定系数下降，并可能打破原有的平衡状态，土体会从桩间流失。另外，在动荷载或静荷载作用下若桩的直径及间距设计不合理，不足以保持桩间土体的稳定，并产生下滑，土体也会从桩间流失。此过程若以桩为参照物，认为土体是运动的，但若以滑体为参照物那么是桩的受荷段嵌入到了滑体中（如图 1 所示）。本文主要研究桩的受荷段能够嵌入土体一定位移时桩的承载能力，基于上述原理设计了室内水平式微型桩加载模型试验，此试验的特点：

(1)模型制作简单，操作方便，加载量小，成本低，所需岩土材料较少，故配制一定干密度或含水率土体的时间较短，获取试验结果的周期也就较短。

(2)试验过程直观，试验原理简单，可以从另一种角度研究探讨微型桩应用在边坡或滑坡中的加固机理，为研究微型桩的方法多样化提供一个范例。

试验中将两根桩作为一个计算单元，这样既能够考虑桩间距桩数对微型桩水平承载力 Q 的影响，又能够考虑桩数对其的影响。并通过假定压实系数 $\lambda_c=0.95$ ，从而保持干密度不变，通过调节含水率的变化来控制饱和度 S_r 的大小。室内试验所采用的因素与水平列于表 1 中，其中桩径比例系数 $\gamma=6$ ，默认桩间距是指与桩径的倍数。

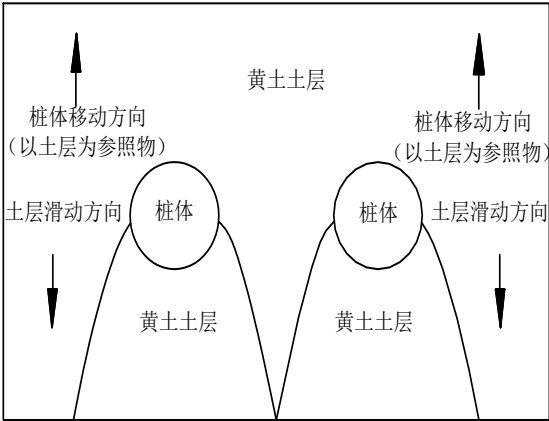


图 1 试验原理示意图
Fig.1 Experimental principle scheme

表 1 因素与水平表
Tab.1 Factors and levels

序号	土体饱和度 $S_r/\%$	桩径 d/mm	桩间距 s
1	75	32	4
2	85	40	5
3	90	50	6

注：桩间距是指与桩径的倍数。

正交试验是从全面试验中挑选出部分具有代表性的点进行试验，这些代表点应具有“均匀”和“整齐”的特点。基于表 1 和正交表的设计原则，选用了 3 个影响因素和 3 水平，总数为 9 的试验方案，即 $L_9(3^3)^{[11]}$ ，见表 2。

1.3 试验装置

试验所采用的装置为 1 000 mm×600 mm×600 mm 的小比例尺试验箱，见图 2。为保证微型桩受到的是均布力，特别设计了一个 500 mm×350 mm×100 mm 金字塔形的传力架，见图 3。

表 2 试验方案
Tab.2 Experimental plan

序列号	土体饱和度 $S_r/\%$	桩径 d/mm	桩间距 s
1	1 (75)	1 (32)	1 (4)
2	1 (75)	2 (40)	2 (5)
3	1 (75)	3 (50)	3 (6)
4	2 (85)	1 (32)	2 (5)
5	2 (85)	2 (40)	3 (6)
6	2 (85)	3 (50)	1 (4)
7	3 (90)	1 (32)	3 (6)
8	3 (90)	2 (40)	1 (4)
9	3 (90)	3 (50)	2 (5)

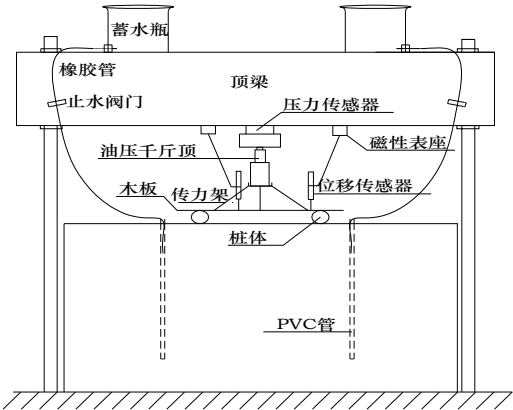


图 2 试验示意图
Fig.2 Experimental schema

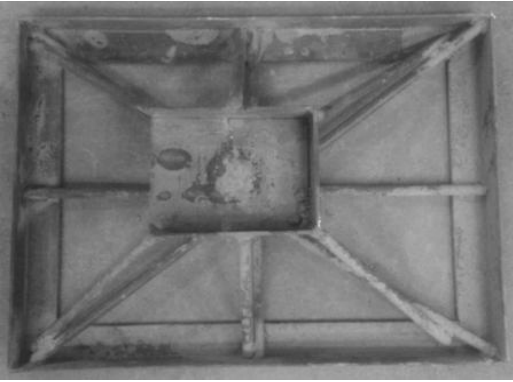


图 3 传力架
Fig.3 Frame of transmission force

1.4 岩土材料

岩土材料取自西安地区黄土, 对其进行了土工常规试验, 获得了黄土的基本土性参数列于表 3, 并通过文献^[12]列出的湿陷性黄土比重与塑性指数的统计关系得到了比重的大小.

表 3 黄土的基本物理性质指标
Tab.3 The basic physical properties of loess

名称	比重 G_s	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_l/\%$	塑性指数 I_p	最大干密度 $\rho_{dmax}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	湿陷系数 δ_s/mm
黄土	2.71	20.21	30.62	10.40	1.75	0.017

1.5 桩体模拟

微型桩均采用 M15 等级的水泥砂浆, 并在三种不同直径的 PVC 管中浇制而成, 如图 4 所示. 在水泥砂浆中添加水泥质量 6.5 % 的 UEA 膨胀剂, 并与水泥砂浆搅拌均匀. 在水泥砂浆浇筑过程中振捣密实, 制作完成后在混凝土标准养护室中养护 28 d.

1.6 量测系统

试验的加载装置采用 4 t 油压式千斤顶, 压力和位移的测量分别采用压力传感器和位移传感器. 利用 PID 智能控制算法无纸记录仪和 JLFX100 数据处理系统来记录、处理数据.



图 4 三种直径的微型桩
Fig.4 Micropiles of three different pile diameters

2 试验方法

以表 1 所示的第 1 组方案为例简述试验方法:

(1) 黄土配制成较低含水率的坡体材料, 密封静置 24 h.

(2) 坡体材料分若干次装入试验箱中, 每次装入 5 cm 左右, 用振捣器压实至所需的干密度, 分层填到设计高度. 在压实过程中, 在适当的位置分别插入两根底部密封的直径 16 mmPVC 管, 沿 PVC 管长度方向按照土层深度 3 等分用记号笔刻线以标注每层注水量的大小, 并每个 5 cm 在周长的 3 等分点钻孔.

(3) 为达到试验所要求的含水率, 对坡体材料进行注水, 注水装置如图 2 及 5 所示. 具体方法是计算出配制饱和度 75 % 所需的用水量, 平分到两个蓄水瓶中, 沿水深高度方向三等分用记号笔刻线以标注每层注水量的大小, 通过止水阀门控制水流速度, 缓慢地向两个预插在土体中的小直径 PVC 管注水, 观察蓄水瓶的刻度线, 第一层注完后关闭止水阀, 将 PVC 管缓慢地上提一个预先刻画的刻度线, 进行第二次注水试验, 这样依次逐层饱和土体, 注水完成后拔掉 PVC 管, 密封静置土体 24 h, 最后通

过 50 cm 长的螺旋钻杆对土体不同位置及不同深度处随机取样测试含水率, 当含水率相差 1%之内时即认为土体饱和成功. 此方法既能避免土体被水冲散进而影响土体的干密度和“橡皮土”的出现, 又可保证土体含水率分布均匀.

(4) 微型桩按照 4 倍的桩径平放在土体上. 安装加载装置和量测装置. 在桩上依次放置一块厚实的木板、传力架(见图 3)、千斤顶和力传感器, 其中力传感器顶在一块刚梁上, 利用磁性表座将位移传感器固定在钢梁上, 连接 PID 记录仪并清零. 试验布置见图 2 和 6.

(5) 缓慢地启动千斤顶, 记录微型桩下沉时位移随时间的大小, 判断是否满足假设条件, 当满足假定条件时停止加载, 用 JLFX100 数据处理系统提取并处理数据. 表 2 中其余组方案遵循第 1 组方法依次进行.

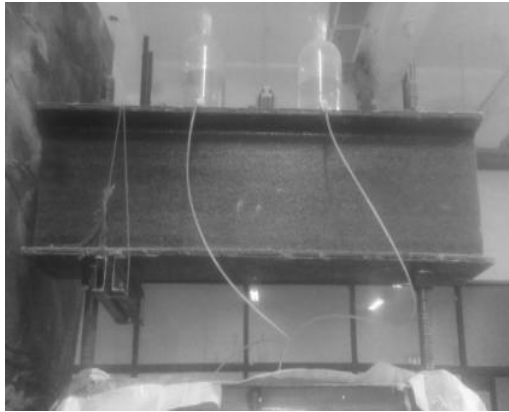


图 5 注水装置图
Fig.5 Water injection equipment



图 6 试验布置图
Fig.6 Experimental equipments layout

3 试验结果与分析

3.1 室内试验结果

按照表 2 所示的方案和第 2 节的试验方法进行试验, 得到结果如表 4 所示.

表 4 水平承载力结果
Tab.4 Value of horizontal bearing capacity

序号	土体饱和度 $S_r/\%$	桩的直径 d/mm	桩的间距 s	水平承载力 Q/kN
1	75	32	4	4.01
2	75	40	5	4.38
3	75	50	6	4.78
4	85	32	5	3.71
5	85	40	6	3.96
6	85	50	4	4.35
7	90	32	6	2.11
8	90	40	4	2.65
9	90	50	5	3.69

3.2 平均值和极值分析

根据某一因素所有水平平均值按照水平排列的顺序可以判断出试验结果随各因素变化的关系, 并且也可以通过比较所有因素极差值的大小判断出所有因素对试验结果影响程度的主次关系. 某一因素某一水平的平均值可以通过某一因素下该水平的全部结果加权平均得到, 某一因素的极值为该因素下平均值的最大值与最小值的差值. 依据此算法, 表 5 列出了诸因素在不同水平下的平均值及极值, 图 7 描绘了水平承载力与三因素在同一个图上的关系.

表 5 各因素不同水平的平均值及极值
Tab.5 Average and extreme value of three factors and levels

水平承载力	土体饱和度 S_r	桩径 d	桩间距 s
一水平平均值 $\bar{1}_i$	4.39	3.28	3.67
二水平平均值 $\bar{2}_i$	4.01	3.66	3.93
三水平平均值 $\bar{3}_i$	2.82	4.27	3.62
极值 R_i	1.57	0.99	0.31

注: i 代表因素 1、2、3, 表中数值单位: kN.

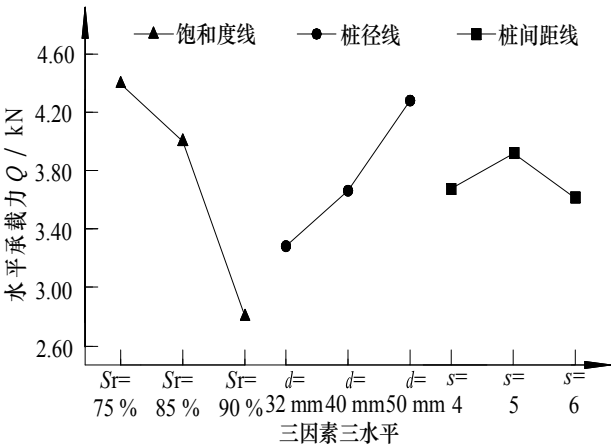


图 7 水平承载力与三因素的关系图
Fig.7 Relation between horizontal bearing capacity and three factors

由表 5 和图 7 可以看出, 微型桩的水平承载力随饱和度的增大而减小、随桩径的增大而增大, 由于饱和度的变化会直接影响土性力学参数的大小,

所以当饱和度增大时土的力学参数会降低进而造成抗剪强度的降低, 试验中测得微型桩的水平承载力就会降低. 桩径增大引起土与桩作用面积增大, 从而微型桩的水平承载力增大.

水平承载力与桩间距的关系相对比较复杂, 由图 7 可知, 当桩间距为 5 倍的桩径时曲线出现了转折, 这是因为当桩间距为 6 倍的桩径时恰好处在临界桩间距附近, 因此会有所下降, 但是桩间距为 4 和 6 的桩径时水平承载力大小相差不大, 说明桩间距为 6 倍的桩径时, 水平承载力下降的并不明显, 因此土拱效应的临界桩间距至少大于 6 倍的桩径^[13].

由表 5 可以看出饱和度的极值最大, 桩径的次之, 桩间距的最小, 因此可以判断三个因素中对水平承载力的影响大小依次是饱和度>桩径>桩间距, 因此微型桩工程设计及数值模拟成败的关键更多的是取决于土性参数能否合理地取值.

3.3 MATLAB 回归分析

3.3.1 一次线性回归分析

利用 MATLAB 自带的 regress 函数^[14]进行多元线性回归模拟, 对于多元线性模拟需要强调的是能够进行此种模拟的前提条件是因素构成的矩阵为一个满秩矩阵, 列向量间的变量线性无关, 不存在多重共线性问题和自变量间不存在序列相关.

对于变量间为何种数学函数的问题, 通常的处理仅仅是假定各变量之间的函数关系, 为了判断这种假设或者验证所得到的函数关系就必须对它们进行显著性检验. 其实判断一个函数关系能否满足变量间的数学模型是一个复杂的过程, 还需要更高级的判断方法和原理, 本文只是运用了一些常规的数理统计假设检验的相关原理进行显著性评价, 一般情况下这就可以满足问题的精度要求.

分别输入表 4 中的数值进行线性回归分析, 其结果见表 6-表 8, 回归效果图见图 8-图 9.

表 6 线性回归系数
Tab.6 Linear regression coefficients

常数项	S_r	d	s
9.558	-9.538	0.056	-0.027

根据表 6 线性回归函数表达式可以写成:

$$Q_1 = 9.558 - 9.538 \times S_r + 0.056 \times d - 0.027 \times s \quad (1)$$

由表 7 可以看到 $F=6.892$, 在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下, 查 F 分布表得: $F_{1-\alpha}(3, 5) = 5.41 < 6.892$ 因此在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下线性回归函数有显著意义; 也从中可以看到 $p=0.032 < 0.05$, 此时的线性回归在

统计数上有意义.

表 7 线性回归的方差分析
Tab.7 Linear regression analysis of variance

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	p 值
回归	3.000	4.697	1.566	6.892	0.032
残差	5.000	1.136	0.227		
总计	8.000	5.833			

表 8 线性回归的判定系数
Tab.8 Linear regression adjusted R-sq

均方根误差	判定系数	因变量 均值	调整的判定 系数 R^2
0.477	0.805	3.738	0.688

由表 8 可以看到判定系数 $R^2=0.805$, 代表线性回归函数得到在饱和度和桩径、桩间距等因素组合下的承载力数值是同等试验条件下的承载力数值的可能性变异为 80.53 %, 此值偏小会导致拟合值与真实值之间偏差比较大.

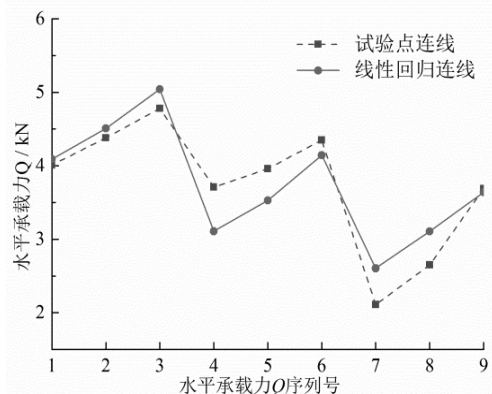


图 8 线性回归效果图
Fig.8 Linear regression rendering

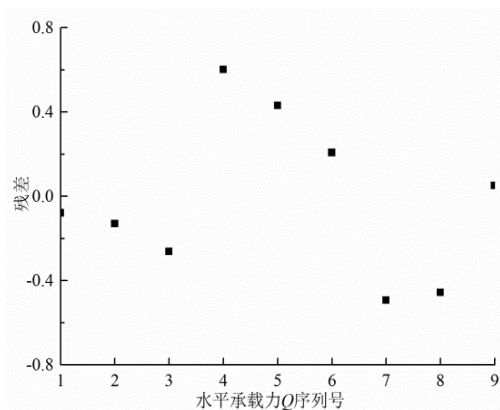


图 9 线性回归残差效果图
Fig.9 Linear regression residual rendering

由图 8 可以观察到试验点的连线与线性拟合的承载力连线偏差较大, 并且几乎没有拟合出相近的点, 因此线性回归并不能反映出试验点连线的趋势.

由图 9 可以发现残差的结果最大值甚至超过了试验点的 16 %, 同时发现散点在零点上下不均匀波动, 这在暗示水平承载力与各因素间包含着更高阶

次的项, 应该用二次非线性函数来近似地描述这种关系.

3.3.2 二次非线性回归分析

从 3.3.1 节对多元线性公式的显著性假设检验可知, 线性拟合公式在统计学上是有意义的并且各参数是显著的, 但从回归效果图和残差分布效果图来看线性回归不能很好地拟合出试验结果的关系. 因此应该选用更高阶次非线性公式来进行拟合.

利用 MATLAB 进行二次多项式函数非线性拟合. 这种函数主要是考虑参数平方项的影响和实现更高阶次和非线性关系的目的.

分别输入表 4 中的数值进行二次非线性回归分析, 其结果见表 9-表 11, 效果图见图 10-图 11.

表 9 非线性回归系数
Tab.9 Nonlinear regression coefficients

常数项	S_r	d	s	S_r^2	d^2	s^2
-85.461	209.144	-0.002	2.807	-133.111	0.001	-0.283

根据表 9 二次非线性回归函数表达式可以写成:

$$Q_2 = -85.461 + 209.144 \times S_r - 0.002 \times d + 2.807 \times s - 133.111 \times S_r^2 + 0.001 \times d^2 - 0.283 \times s^2$$

(2)

表 10 非线性回归方差分析
Tab.10 Nonlinear regression analysis of variance

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	p 值
回归	6.000	5.718	0.953	16.610	0.058
残差	2.000	0.115	0.057		
总计	8.000	5.833			

表 11 非线性回归调整的判定系数
Tab.11 Nonlinear regression adjusted R-sq

均方根 误差	判定系数	因变量 均值	调整的判定系数 R^2
0.240	0.980	3.724	0.921

同理线性函数显著性假设检验的方法进行二次非线性回归函数的显著性评价. 由表 10 可以看到 $F=16.610$, 在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下, 二次非线性回归函数有显著性意义; 也从中可以看到 $p=0.058>0.05$, 此时的 p 值大于显著性水平, 但是相差不大, 为了实际的拟合效果可以适当放宽.

由表 11 可以看到调整的判定系数 $R^2=0.921$, 可以看到二次非线性回归函数的调整的判定系数比一次线性的回归要大, 说明回归效果较为理想.

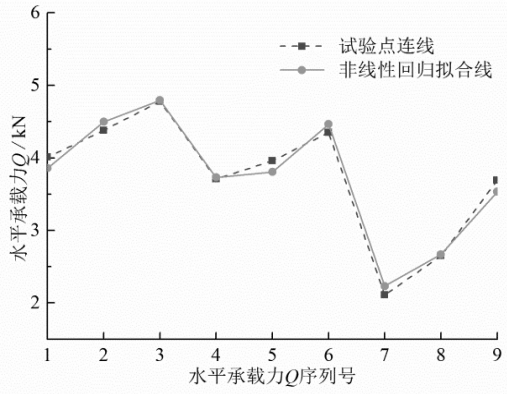


图 10 非线性回归的效果图

Fig.10 Nonlinear regression rendering

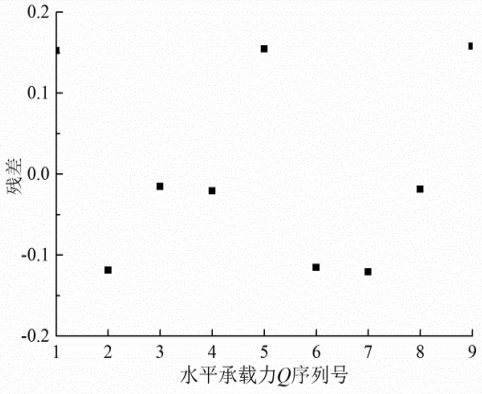


图 11 非线性回归残差效果图

Fig.11 Nonlinear regression residual rendering

由图 10 可以观察到试验点的连线与拟合的承载力连线偏差较小, 拟合相近点的数量明显比线性回归的要多, 因此二次非线性回归能够描述出试验点连线的趋势.

由图 11 可以发现残差的结果在零点上下较为均匀地波动, 残差的值也较小, 甚至接近 0, 并在变化幅值不大的水平带状区域内分布.

4 实例分析

2013 年下半年延安地区遭遇到了百年不遇的暴雨, 此次降雨造成一处名人故居受到了滑坡的威胁. 该滑坡地址地貌主要为黄土堆积地貌和黄土侵蚀地貌. 主要的岩土层依次是坡积土、黄土、古土壤. 根据现场勘察报告得知滑裂面处土体饱和度 $S_r=0.97$.

原方案针对一处危险坡面采用带连梁的双排微型桩形式, 微型桩桩径 300 mm, 桩长 9~9.3 m, 受荷段长 4 m, 桩间距 1 200 mm, 排距 800 mm. 折算成本文室内试验的微型桩尺寸为直径 50 mm, 间距为 4 倍的桩径. 由计算可以得到桩位处单位宽度下滑力 141.5 kN, 忽略连梁的作用且根据文献^[4]结论知微型桩双排单桩结构形式沿着滑坡方向第一

排桩与第二排桩的滑坡推力分配比 1:0.53~1:0.50, 本文选取滑坡推力比 1:0.50, 则第一排每根桩承担的滑坡推力 113.77 kN. 按照本文思路, 2 根桩承担的滑坡推力 227.54 kN, 根据相似比滑坡推力折算为 6.32 kN. 假定滑坡推力沿桩矩形分布, 实例中受荷段长 4 m 承受 6.32 kN, 而本文的桩体长 500 mm 承受了 0.79 kN.

将以上有关数据代入公式 (2), 得出桩的设计荷载 1.07 kN>0.79 kN, 可以看到用公式 (2) 得到的承载力能够满足抗滑力的要求.

5 结论

制定了三因素三水平的正交试验方案, 进行了微型桩室内试验得到了不同因素和水平下的水平承载力大小, 对试验结果进行了平均值和极值分析并借助 MATLAB 数据拟合的功能对水平承载力进行了回归分析, 最后将拟合的公式应用于工程实例中和原设计方案进行了对比, 最终得到了以下结论:

(1) 微型桩的水平承载力随饱和度的增大而减小、随桩径的增大而增大.

(2) 三个因素中对水平承载力的影响大小依次是饱和度>桩径>桩间距, 因此在微型桩工程设计及数值模拟中更应该注重土性参数取值的合理性.

(3) 二次非线性回归效果不论是在判定系数的大小、回归效果图、残差效果图等方面都要比线性的回归效果要好, 更能够反映出试验结果的趋势, 并且二次非线性多项式能够具有较高的拟合精度.

(4) 将回归出的二次非线性函数应用于一处滑坡工程中, 计算得到的水平承载力能够满足抗滑力要求.

参考文献

References

- [1] CADDEN A, GOMEZ J, BRUCE D, et al. Micropiles: recent advances and future trends[C]. Current Practices and Future Trends in Deep Foundations. ASCE, 2004: 140-165.
- [2] ARMOUR T, GRONECK P, KEELEY J, et al. Micropile design and construction guidelines implementation manual[R]. USA: publication NO.FHWA-SA-97-070. 2000.
- [3] 陈正, 梅岭, 梅国雄. 柔性微型桩水平承载力数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32 (7): 2219-2224
CHEN Zheng, MEI Ling, MEI Guoxiong. Numerical simulation of lateral bearing capacity of flexible micropile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 219-2224.
- [4] 胡毅夫, 王庭勇, 马莉. 微型抗滑桩双排单桩与组合桩抗滑特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7):1499-1505.
HU Yifu, WANG Tingyong, MA Li. Research on anti-sliding of single characteristics double-row and composite anti-slide micropiles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1499-1505.
- [5] ROTHBAUER M J, Richards Jr T D. Lateral loads on pin Piles (micropiles)[C]. GeoSupport 2004: Innovation and Cooperation in the Geo-Industry, 2004.
- [6] XIANG B, ZHANG L M, ZHOU L R, et al. Field lateral load tests on slope-stabilization grouted pipe pile groups[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014.
- [7] WOLOSICK J R. Ultimate micropile bond stresses observed during load testing in clays and sands[J]. Proc., GeoFlorida 2009: Contemporary Topics in Deep Foundations, 2009: 12-22.
- [8] 杨文智. 微型桩水平承载力性状研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011: 73-74.
YANG Wenzhi. Behavior of laterally loaded micropile foundation[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011:73-74.
- [9] 孙书伟, 朱本珍, 郑静. 基于极限抗力分析的微型桩群加固土质边坡设计方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1671-1677.
SUN Shuwei, ZHU Benzhen, ZHENG Jing. Design method of micropile group for soil slope stabilization based on ultimate resistance of analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 671-1677.
- [10] 苏荣臻, 鲁先龙, 郑卫锋. 微型桩杆塔基础水平承载力试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42 增刊:381-384.
SU Rongzhen, LU Xianlong, ZHENG Weifeng. Experimental study on horizontal bearing capacity of micropile foundation for transmission tower[J]. Industrial Construction, 2012, 42(Suup.): 381-384.
- [11] 方开泰, 马长兴. 正交及均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
FANG Kaitai, MA Changxin. Orthogonal and Uniform Experimental Design[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [12] 钱鸿缙, 王继唐, 罗宇生, 等. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
QIAN Hongjin, WANG Jitang, LUO Yusheng, et al. Collapsible Loess Foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1985.
- [13] 张奎. 黄土地层微型桩桩土共同作用模型试验及数值模拟分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014:57-58.
ZHANG Kui. The model test and numerical analysis research about the interaction of micropile and soil in the loess stratum[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014:57-58.
- [14] 周品, 赵新芳. MATLAB 数理统计分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 270-287.
ZHOU Pin, ZHAO Xinfang. Matlab Mathematical Statistical Analysis[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009:270-287

(编辑 沈波)