

棕丝改良红黏土地层基桩承载特性试验研究

唐 黔^{1,2}, 蒋 成^{3,4}, 杨源浩^{5*}, 杨 柏⁴

¹湖南省地球物理地球化学调查所, 湖南 长沙

²中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

³桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 广西 桂林

⁴桂林电子科技大学南宁研究院, 广西 南宁

⁵百色学院土木建筑工程学院, 广西 百色

收稿日期: 2026年7月1日; 录用日期: 2026年7月22日; 发布日期: 2026年8月4日

摘 要

为研究棕丝加固红黏土地基中桩基承载特性, 进行了5根试桩的模型载荷试验, 分析了桩基在棕丝掺量(0~0.8%)加固红黏土中的承载机理和阻力发挥特性, 并采用不同方法对试桩极限承载力进行了计算, 将计算值与试验值进行了比较。结果表明: 随着棕丝掺量从0%逐步增加至0.8%, 红黏土粘聚力先增大后减小, 内摩擦角不断降低。试桩极限承载力随着棕丝掺量增加先急剧增大, 在0.2%~0.6%区间内趋于稳定, 后急剧降低。极限荷载条件下, 棕丝掺量逐步增大, 桩侧阻力占荷载比值由54.8%逐步提高至64.0%, 桩端阻力占荷载比值则由45.2%逐步降低至36.0%, 说明棕丝对桩侧阻力的增强效果更为显著。桩身阻力呈“R”型分布, 侧阻力峰值在150~200 mm范围内。分别采用摩尔-库伦理论、邓肯-张理论和现行规范对试桩极限承载力进行计算, 摩尔-库伦理论和邓肯-张理论计算值与试验值误差范围分别为-26.64%~-8.98%和-22.21%~7.68%, 而现行规范计算值与试验值误差偏大。

关键词

红黏土, 棕丝掺量, 竖向承载桩, 承载特性, 模型试验

Experimental Study on Bearing Characteristics of Piles in Sisal Fiber-Reinforced Red Clay Stratum

Qian Tang^{1,2}, Cheng Jiang^{3,4}, Yuanhao Yang^{5*}, Bai Yang⁴

¹Geophysical and Geochemical Survey Institute of Hunan Province, Changsha Hunan

²School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan

³School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin

*通讯作者。

文章引用: 唐黔, 蒋成, 杨源浩, 杨柏. 棕丝改良红黏土地层基桩承载特性试验研究[J]. 土木工程, 2026, 15(8): 23-35.
DOI: 10.12677/hjce.2026.158197

Guangxi

⁴Nanning Research Institute, Guilin University of Electronic Technology, Nanning Guangxi⁵School of Civil Engineering and Architecture, Baise University, Baise Guangxi

Received: July 1, 2026; accepted: July 22, 2026; published: August 4, 2026

Abstract

To investigate the bearing characteristics of piles in sisal fiber-reinforced red clay foundations, model pile load tests were conducted on five test piles. The bearing mechanism and resistance mobilization characteristics of piles in red clay with sisal fiber contents (0~0.8%) were analyzed. The ultimate bearing capacities of test piles were calculated using different methods, and the calculated values were compared with experimental results. The results indicate that as the sisal fiber content increased from 0% to 0.8%, the cohesion of red clay initially increased and then decreased, while the internal friction angle continuously declined. The ultimate bearing capacity of test piles increased sharply with rising fiber content, stabilized within the range of 0.2%~0.6%, and subsequently decreased rapidly. Under ultimate load conditions, the proportion of shaft resistance to total load increased from 54.8% to 64.0%, whereas the tip resistance decreased from 45.2% to 36.0%, demonstrating the more pronounced enhancement effect of sisal fibers on shaft resistance. The pile resistance exhibited an “R” shaped distribution, with peak shaft resistance occurring within 150~200 mm depth. Calculations based on the Mohr-Coulomb theory, Duncan-Chang model, and current design codes revealed errors between theoretical and experimental values ranging from -26.64% to -8.98% for the Mohr-Coulomb method, -22.21% to 7.68% for the Duncan-Chang model, while current code-based predictions showed larger deviations.

Keywords

Red Clay, Sisal Fiber Content, Vertical Bearing Pile, Bearing Characteristics, Model Test

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

桩基是支撑建(构)筑物并承担其荷载的重要构件,将荷载有效传递到地基深处。我国存在许多特殊土,这些土类的承载和变形特性往往给工程建设带来挑战。

红黏土具有高天然含水率、高孔隙比及高液限特征。目前该地层桩基的研究取得了丰富的成果。李春红[1]通过新模型模拟结果与实测值的对比,验证其所建立的桩-红黏土接触面温度效应模型的准确性和可靠性。Yuzhu Cheng [2]研究发现超固结改造红粘土的动力强度与超固结率、围压和循环压力成正比。Hangyu Yan [3]研究了红粘土的物理力学性质对桩基的承载特性。发现增加压实度或降低含水率对增加边阻的效果更为显着。Chunyang Liu [4]研究结果表明,未改良土壤中桩内的最大弯矩和剪切力发生在较大深度,而改良土壤中的最大弯矩和剪切力则发生在较浅的深度和改良区内。在纤维改良领域,马宏岩[5]通过干湿循环试验验证聚丙烯纤维掺量与长度对抗剪强度呈正相关,纤维在提高红黏土的黏聚力效果显著,而对于内摩擦角的提升有限。吴鹏[6]引入生物聚合物复合纤维对红黏土进行改良,发现生物聚合物复合纤维的加入使土体内部形成了致密的基质结构,减少了孔隙,同时通过胶结作用提升了土体的整体

强度和刚度。张运利[7]采用改性聚酯纤维提高了红黏土的无侧限抗压强度、抗剪切强度和黏聚力，并降低了线缩率。

现有研究主要集中于红黏土的改良方法、路基变形控制、抗崩解性能、物理力学性质等方面，为红黏土地基工程提供了宝贵的理论参考和实践指导。然而，对于加固红黏土地层的桩基础的系统分析较少。为此，本文采用模型载荷试验研究棕丝加固红黏土对桩基承载特性的影响。

2. 模型试验概况

2.1. 试桩及土层

红黏土的基本物理性质参数如表 1 所示。试桩尺寸及红黏土力学性质统计表如表 2 所示。

Table 1. Basic physical properties of red clay
表 1. 红黏土基本物理性质

天然 含水率(%)	比重	最优 含水率(%)	最大干密度 (g/cm ³)	液限(%)	塑限(%)	占比/%		
						细粒 0.0075~2 mm	粉粒 0.075~0.005 mm	黏粒 <0.005 mm
32.0	2.67	27.60	1.53	53.40	32.70	7.61	50.10	42.29

Table 2. Parameters of piles and red clays
表 2. 试桩尺寸及红黏土力学性质统计表

桩号	桩径 D (mm)	入土深度 z (mm)	棕丝掺量(%)	红黏土黏聚力/kPa	红黏土内摩擦角/(°)
TP1	35	350	0	15.12	9.14
TP2	35	350	0.2	23.95	7.71
TP3	35	350	0.4	28.61	7.13
TP4	35	350	0.6	25.34	6.42
TP5	35	350	0.8	23.15	5.12

模型箱尺寸为 315 mm × 315 mm × 500 mm，桩侧距模型箱侧壁的距离为桩径的 4 倍，符合边界效应的要求[8]。试桩全长 450 mm，埋入红黏土中 350 mm，桩径为 35 mm (0.1 倍桩长)，其中桩帽高 50 mm。

模型地基制备：将红黏土配制至目标含水率后静置 24 h，确保水分均匀分布。于模型箱内精确定位模型桩中心位置并标记，采用预制孔固定板稳固桩体，以螺钉将固定板锚固于箱体。根据目标压实度(88%)分层标定填土厚度，计算各层填料质量。分层填筑时，每层按设计比例均匀掺入棕丝，并以等质量红黏土填料，采用击实法压实至预设标高，过程中严格控制桩体位移。共分 10 层完成填筑与压实。

为保证棕丝在红黏土中分布均匀，提高试验可重复性，采取以下措施和控制标准：

(1) 棕丝预处理：将棕丝剪成 10 mm ± 1 mm 的均匀长度，在 40℃烘箱中干燥 2 小时去除表面水分，然后密封保存备用。

(2) 分层拌合工艺：按目标棕丝掺量(质量比，相对于干土)和含水率(27.6%)计算每层用土量及棕丝用量。采用“三阶段拌合”法。

干拌阶段：将定量红黏土与棕丝放入小型砂浆搅拌机中，干拌 2 分钟，使棕丝初步分散。

湿拌阶段：将计算好的蒸馏水通过喷雾器均匀喷洒至混合物中，继续搅拌 3 分钟。

人工搓揉阶段：对湿料进行人工搓揉约 1 分钟，检查有无可见纤维团簇，若有则用手撕开。

(3) 质量检验标准:

均匀性抽检: 每填筑 3 层后, 在剩余混合料中随机取样 3 份(每份约 50 g), 水洗分离出棕丝并烘干称重, 计算实际掺量, 要求实测值与目标值偏差 $\leq \pm 0.05\%$ 。若不合格, 则调整后续拌合工艺。

含水率控制: 每层填料前使用快速水分测定仪检测混合料含水率, 要求目标值偏差 $\leq \pm 1\%$ 。若偏差超标, 通过喷雾补或风干调整。

压实度控制: 采用分层击实法, 每层填土按计算质量均匀倒入模型箱, 用特制击实板(尺寸略小于模型箱内径)以相同落距和次数击实, 确保每层填土高度偏差 $\leq \pm 0.5\text{ mm}$, 压实度达到 $88\% \pm 1\%$ 。每层填筑后采用微型贯入仪抽查 2~3 点表面硬度, 保证层间一致性。

上述措施确保了不同试桩之间土体性质的统一, 使试验结果能够真实反映棕丝掺量单一变量的影响。

试桩由 ABS 树脂材料通过 3D 打印制成, 如图 1 所示。因 ABS 试桩桩身相对比较光滑, 为此, 对试桩表面涂抹水泥砂浆进行粗糙处理。试桩的岩土层剖面图见图 2 所示。



Figure 1. Model piles
图 1. 模型桩

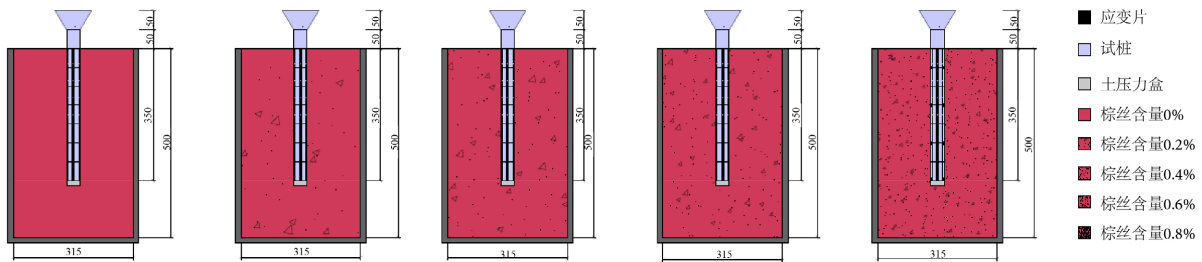


Figure 2. Profile of soil layer for the test pile (mm)
图 2. 试桩岩土层剖面图(mm)

2.2. 相似性分析

本试验采用缩尺模型研究原型桩基性状, 遵循相似理论。模型设计考虑几何相似和物理力学相似。

(1) 相似常数确定: 模型桩与原型桩的几何相似常数为 20 (原型桩径 0.7 m, 桩长 9 m)。根据量纲分析, 应力和重力加速度相似常数为 1。根据相似第二定理, 可得各物理量的相似常数: 内摩擦角、粘聚力、应变、泊松比相似常数都为 1, 荷载相似常数为 400。

(2) 相似程度与局限性: 本试验满足主要相似律。然而, 存在以下局限性: ① 尺寸效应: 模型桩径仅 35 mm, 土体颗粒粒径(最大 2 mm)与桩径比值相对较大, 可能导致颗粒效应影响测试结果。② 边界效应: 虽模型箱尺寸满足 4 倍桩径要求, 但刚性边界仍可能反射应力波, 对桩周土体变形产生轻微约束。

③ 时间效应：原型地基存在长期蠕变和固结过程，模型试验在较短加载时间内完成，无法完全模拟时间依赖性行为。④ 材料差异：ABS 桩身弹性模量与工程常用混凝土桩不完全匹配，虽经粗糙处理模拟桩 - 土界面，但桩身刚度特性与原型存在差异。

综上，本试验结果可定性反映棕丝改良红黏土地层中桩基承载特性的变化规律，用于不同掺量间的比较和机理分析；但在定量外推至原型工程时，需考虑上述相似偏差，建议结合现场足尺试验进行验证。

2.3. 试验装置及方法

本试验加载设备为XS(082)F 万能试验机，如图3所示，采用等贯入速率法加载，加载速率为1 mm/min。

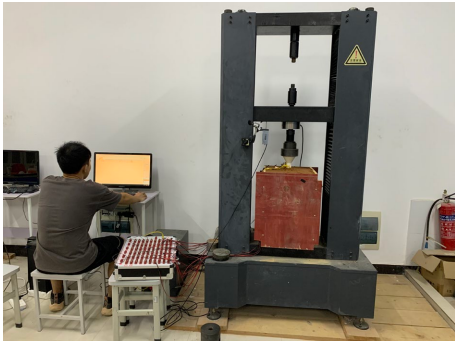


Figure 3. Test device
图 3. 试验装置图

试验中，采用位移计、土压力盒与电阻式应变片分别测量桩顶位移、桩端阻力和桩身截面应变。试桩桩身应变片布置详见图4。传感器的具体布置方式为：在桩侧四个方向开设宽4 mm、深3 mm 凹槽用于铺设应变片和引出应变片导线，后利用 AB 胶水将应变片按照图4所示的粘贴布置方式安装于凹槽内，以实现桩身截面处应变测量。

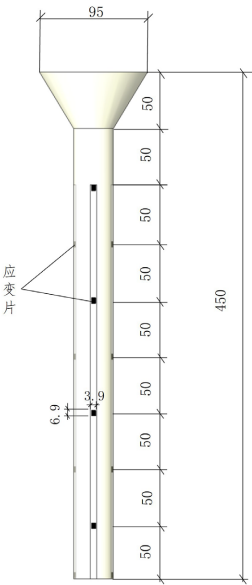


Figure 4. Layout diagram for pasting strain gauges on model piles (mm)
图 4. 模型桩应变片粘贴布置图(mm)

3. 试验结果及分析

3.1. 荷载位移曲线

在竖向向下压荷载作用下，桩顶荷载 - 位移关系曲线如图 5 所示。

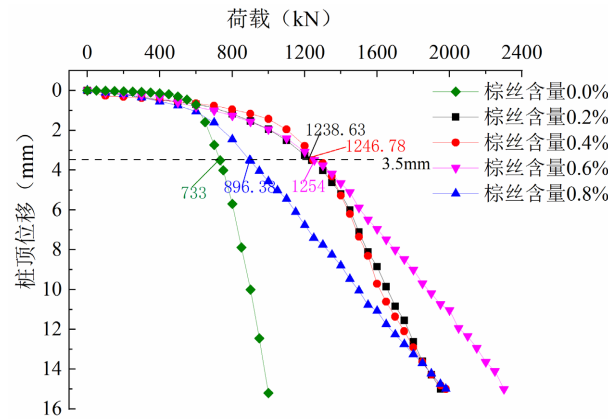


Figure 5. Load-displacement curve of pile top
图 5. 试桩荷载 - 桩顶位移曲线

如图 5 所示，在 5 根试桩中，棕丝掺量为 0.6%与 0.8%的试桩，其荷载 - 位移曲线呈现出缓变形特征。其原因可能是棕丝掺量的增加促使土体的变形与应力传递更为均匀，进而导致桩身位移相对较小。与此同时，其余 3 根试验桩的荷载 - 位移曲线则呈现出非线性的陡降型特征。在起始加载阶段(0~500 N)，位移的增加较为缓慢；随着荷载继续增大，桩顶位移的增长速率逐步增大，桩顶位移超过 3.5 mm (0.1 倍桩径)后，荷载 - 位移曲线呈现近线性变化。

本模型试验中试桩的极限承载力值取桩顶位移为 10%桩径时的荷载值。试验结果见表 3。

Table 3. Results of model pile tests
表 3. 模型桩测试结果表

桩号	最大试验荷载/N	最大桩顶位移/mm	极限承载力/N
TP1	1000	15.05	733
TP2	1950	15.00	1238
TP3	1980	15.01	1246
TP4	1980	15.02	1254
TP5	2300	15.00	896

由表 3 与如图 6 所示可知，随着棕丝掺量从 0.0%增加至 0.6%，试桩承载力有所增加；而从 0.6%增加至 0.8%，试桩承载力显著下降。0.8%棕丝掺量下承载力急剧下降的主要机理包括三个方面。(1) 纤维团聚与分布不均：过量的棕丝在机械搅拌过程中难以均匀分散，形成纤维团簇。这些团簇作为土体中的“软弱夹层”或“孔隙源”，降低了土体的整体性和密实度。(2) 土体结构被破坏：棕丝体积占比较大时，阻碍了土颗粒在击实过程中的相互靠近和重新排列，导致土体难以达到设计压实度(88%)，实际干密度降低。(3) 界面过剩与滑移面贯通：纤维 - 土界面虽然提供摩擦力，但过量的界面成为潜在的破坏面。在荷载作用下，纤维团聚体周围的破坏面更容易提前贯通，形成连续滑移带，导致土体发生脆性破坏。此时，纤维的加筋效应已无法弥补其破坏土体结构、降低密实度所带来的负面影响，导致整体承载能力劣化。

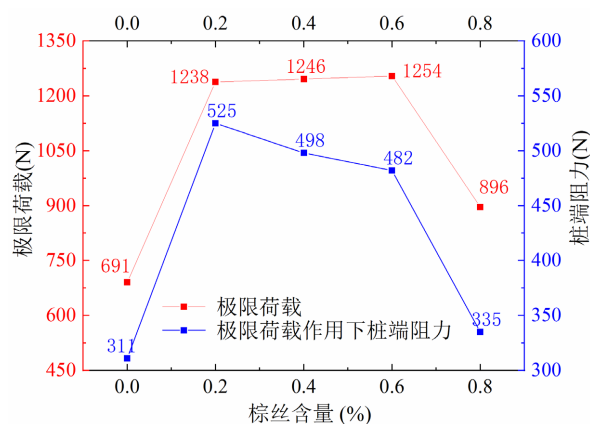


Figure 6. Relationship between compaction degree and ultimate bearing capacity of model piles

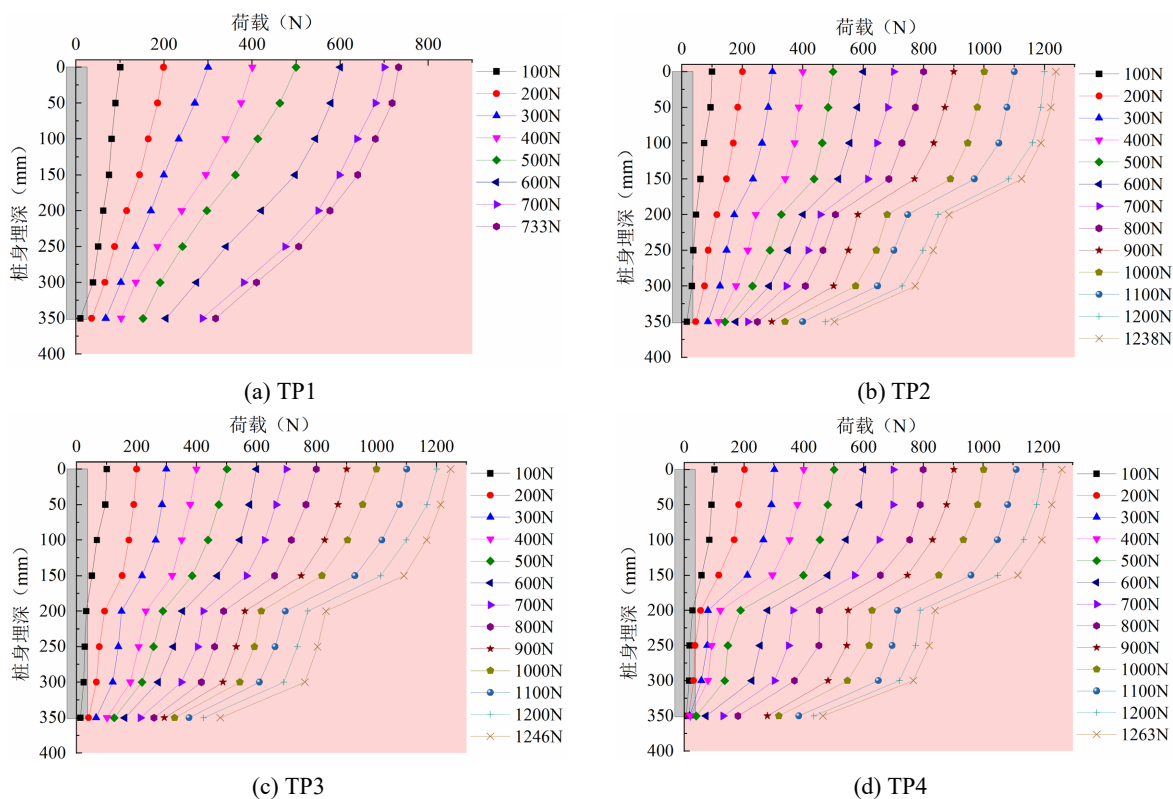
图 6. 棕丝掺量 - 试桩极限承载力及其桩端阻力关系曲线

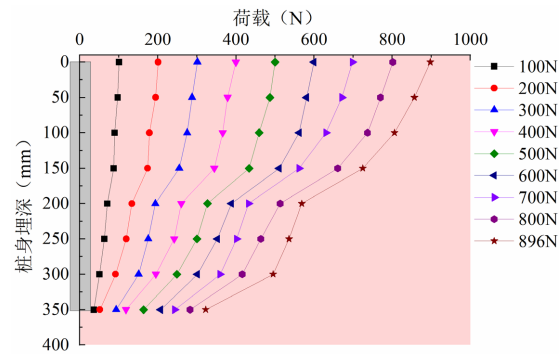
试桩的极限承载力及其桩端阻力呈现出先上升, 后下降的特点。说明掺入一定量的棕丝能提升红黏土的强度, 棕丝在和红黏土内部可产生一定的胶结作用, 增大棕丝与粘土颗粒的摩擦力, 使得土体的压实度发生变化, 进而影响桩基的极限承载力。

3.2. 桩身轴力曲线与桩侧阻力曲线

本模型试验采用应变片测量桩身截面应变, 根据应变计算桩身截面轴力, 后采用文献[8]中方法计算桩侧平均阻力。根据计算结果绘制桩身轴力 - 深度曲线和桩侧平均侧阻力 - 深度曲线。

模型桩在各级荷载下桩身轴力 - 深度曲线如图 7 所示。



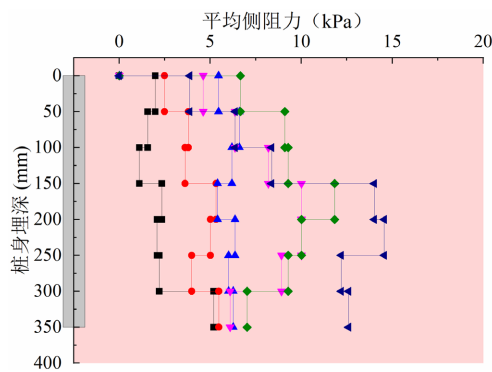


(e) TP5

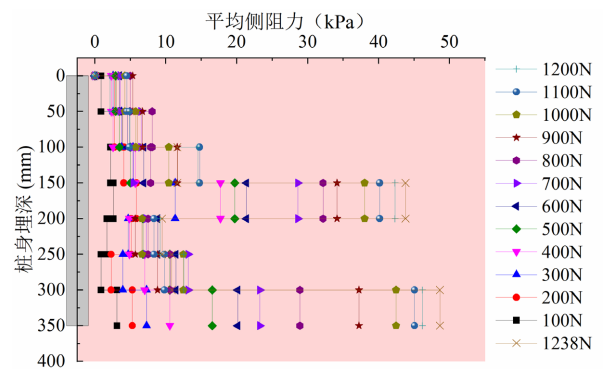
Figure 7. Axial forces distribution along model piles
图 7. 模型桩桩身轴力分布曲线

由图 7 可知, 五根试桩随着荷载增加, 桩身轴力逐步增大; 且任一级荷载下, 桩身从桩顶至桩底不断衰减。桩身埋深位于 150 mm~200 mm 和 300 mm~350 mm 范围内衰减速度较大, 表明荷载主要通过桩侧摩阻力和桩端阻力传递。这主要是因为红黏土在受压时容易发生脆性破坏, 但掺入韧性较强的棕丝后, 其破坏特性从脆性破坏转变为延性破坏, 从而提高了土体的抗压强度。在桩身弹性变形阶段, 轴力沿深度的衰减速率相对较小; 当桩身进入弹塑性或塑性变形阶段, 轴力的衰减速率开始增大; 最终, 在土体达到破坏阶段时, 轴力的衰减速率进一步增大。

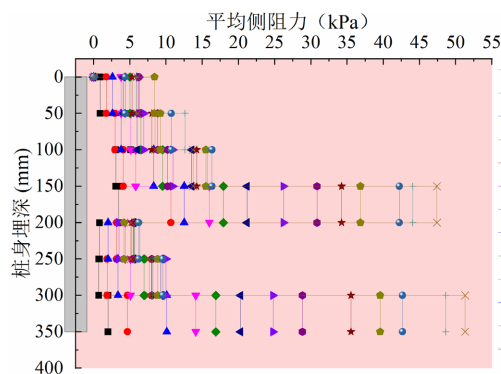
试桩在各级荷载作用下的桩侧阻力分布曲线如图 8 所示。



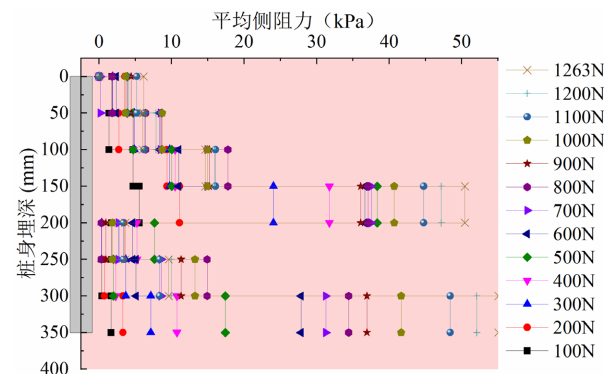
(a) TP1



(b) TP2



(c) TP3



(d) TP4

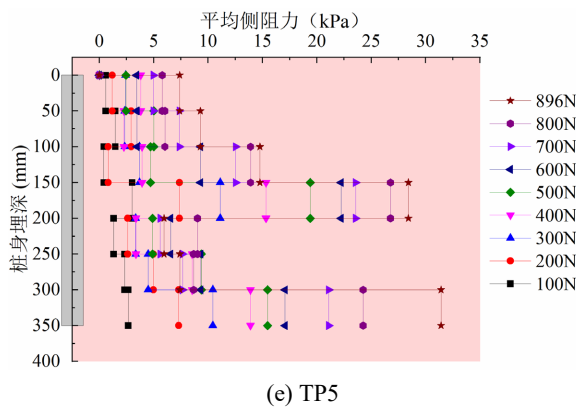


Figure 8. Side resistance distribution of model piles
图 8. 模型桩桩身侧阻力分布曲线

由图 8 中可知，五根试桩随着荷载的逐步增加，桩的侧阻力呈上升趋势；且试桩的侧阻曲线形态表现为“R”型形态，其峰值集中在 150 mm 至 200 mm 的埋深范围内以及桩底处。主要原因是，在加载初期，桩身上部首先产生相对位移，侧阻力迅速发挥。随着荷载增加，桩周土体进入弹塑性状态，在桩身中上部(150~200 mm 深度范围)形成了局部剪切带。由于棕丝网状结构的约束作用，该剪切带内的土体并未发生立即的软化和破坏，而是呈现应变硬化特征，使得侧阻力在此深度范围内持续增长并达到峰值。此后，随着剪切带进一步发展，上覆土压力较小不足以约束土体侧向隆起，侧阻力开始衰减。而在桩底附近(300~350 mm)，由于桩端阻力的发挥需要较大的桩土相对位移，其启动滞后。当桩身上部侧阻力充分发挥并衰减后，荷载向下传递，桩端附近土体在高围压作用下开始形成新的端部剪切带，同时桩身下部侧阻力因桩端“撑靴”效应而被动调动，形成侧阻力的二次峰值。因此，“R”型曲线本质上是桩周土体剪切带从桩身上部向桩端逐步演化的宏观反映。研究表明，在棕丝改良红黏土地基中，桩基承载特性表现为：受力时，土体与纤维因变形差异在接触界面产生摩擦阻力，限制土体变形，使内部孔隙减小、土颗粒压实，从而提升土体抗压强度；同时，纤维相互交织形成网状结构，强化了土体整体性，进而优化桩基承载性能[9]。随着桩身埋深增加，桩侧阻力会迅速增大并达到峰值，从而形成“R”型曲线中的峰值段。然而，当荷载达到特定水平后，桩周土的应力状态将发生改变，致使桩侧阻力逐渐减小。在此过程中，桩底处端阻的发挥相对滞后，直至桩侧阻力减小到一定程度，桩底处端阻才开始急剧增大。

3.3. 桩端与桩侧分担荷载比

所有试桩的桩端与桩侧分担荷载比例，见表 4 和图 9 所示。

Table 4. Statistical of load on the end and side of model piles
表 4. 模型桩桩端与桩侧承担荷载统计表

类型	桩号				
	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5
桩端阻力承担荷载 (N)	311 (45.2%)	525 (40.8%)	498 (38.4%)	482 (37.0%)	335 (36.0%)
桩侧阻力承担荷载 (N)	379 (54.8%)	733 (59.2%)	768 (61.6%)	790 (63.0%)	573 (64.0%)
比值	0.825	0.688	0.625	0.586	0.562

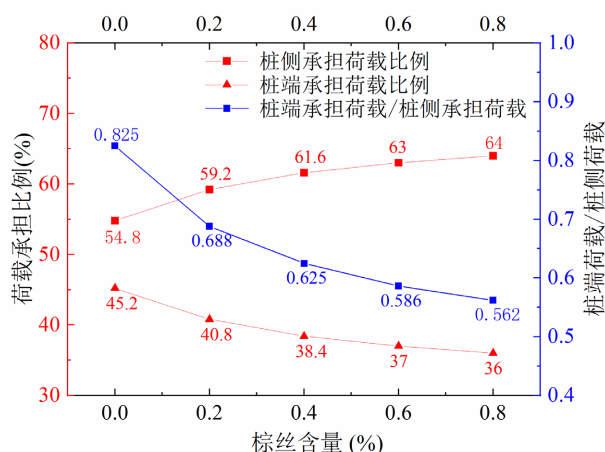


Figure 9. Distribution of ultimate load on model piles
图 9. 模型桩极限荷载承担分布规律

由表 4 和图 9 可知, 棕丝掺量由 0% 逐步增加至 0.8%, 桩侧所承担的荷载比例从 54.8% 逐步提高至 64.0%, 桩端所承担的荷载比例则从 45.2% 逐步降低至 36.0%。桩端承担荷载值与桩侧承担荷载比值也从 0.825 逐步降低至 0.562。说明棕丝的掺入有益于桩侧阻力的增加和发挥, 对于桩端阻力的作用相对较小。

4. 极限承载力计算方法比较

在岩土工程领域, 极限承载力的计算方法始终是核心研究问题之一, 其计算结果的准确性对工程的安全与稳定起着决定性作用。现挑选四个经典的承载力计算方法进行分析比较, 其中理论计算方法包括邓肯 - 张理论[10]与摩尔 - 库伦理论[11]; 现行规范法包括《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008) [12]与《港口工程桩基规范》(JTS167-4-2012) [13], 以下简称《建筑桩基规范》和《港口桩基规范》。以下将对这四种方法进行详细介绍, 并结合本研究的试验结果探讨哪一种方法更适用。

本试验中的桩基极限承载力计算综合考虑桩侧阻力和桩端阻力:

$$Q = Q_s + Q_e \quad (1)$$

式中: Q 为极限承载力; Q_s 为桩侧土体极限侧阻; Q_e 为桩端阻力。

本试验采用的红黏土为地基土层, c 、 φ 通过直剪试验测得。

4.1. 邓肯 - 张理论

在文献[10]中, 根据邓肯 - 张双曲线模型, 对土层部分桩侧荷载的非线性传递进行分析, 桩侧阻力 τ_s 与桩土相对位移 s 关系表达如下:

$$\frac{\tau_s}{s} = \frac{1}{a + bs} \quad (2)$$

积分可得:

$$\frac{d\tau_s}{ds} = \frac{a}{(a + bs)^2} \quad (3)$$

双曲线模型的初始条件: $s = 0$, $\frac{d\tau_s}{ds} = 0$ 。

待入式(2)得:

$$\tau_s = \frac{s}{\frac{1}{E_s} + \frac{s}{\tau_{ult}}} \quad (4)$$

式中: E_s 为初始刚度系数; τ_{ult} 为土的极限侧阻力, $\tau_{ult} = K_0 \sigma_s \tan \beta$; σ_s 为深度 y 下桩侧竖向有效应力; K_0 为水平土压力系数; β 桩-土界面摩擦角; σ_s 桩侧竖向有效应力。

4.2. 摩尔-库伦理论

土层中桩侧阻力计算如下式[11]:

$$Q_s = \sum_i^n u l_i q_{si} \quad (5)$$

式中: u 为桩基截面周长; l_i 为各土层厚度; q_{si} 为桩周土极限摩阻力标准值。

本文试桩的侧阻由土层与桩身的相对剪切而产生, 所以桩周土极限摩阻力标准值 q_{si} 考虑由库伦摩尔定律计算:

$$q_{si} = c + \sigma \tan \varphi \quad (6)$$

式中: c 为土的黏聚力; σ 为某桩深处法相应力(有效土压力); φ 为土的内摩擦角。

试桩桩侧受到的压力由土层提供, 所以 σ 可以采用土层中试桩的平均土压力:

$$\sigma = K_0 \gamma h \quad (7)$$

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (8)$$

$$\gamma = \rho_s g \quad (9)$$

式中: K_0 为静止土压力系数; γ 为土的重度; g 为重力加速度(取 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$); ρ_s 为土的密度。

在文献[10]中, 土层中桩端的阻力计算如下式:

$$Q_e = A q_{se} \quad (10)$$

$$q_{se} = c N_c + \sigma N_q \quad (11)$$

$$N_q = \frac{(\cot \varphi + \varphi + \pi/2)}{(\cot \varphi + \varphi - \pi/2)} \quad (12)$$

$$N_c = \frac{\pi \cot \varphi}{(\cot \varphi + \varphi - \pi/2)} \quad (13)$$

式中: A 为试桩截面积; q_{se} 为桩底阻力; N_c 和 N_q 为承载力系数, 均与有关 φ 。

本试验采用的红黏土为地基土层, c 、 σ 通过直剪试验直接测量; 各含水率和压实度红黏土层的 ρ_s 通过最大干密度换算。将各参数带入上式得到计算结果如表 2 所示。

4.3. 《建筑桩基技术规范》

现行《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)[12]中提出根据土的物理指标与承载力参数经验关系确定单桩竖向极限承载力标准值。

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p$$

式中, q_{sik} 为极限侧阻力标准值; q_{pk} 为极限端阻力标准值。

4.4. 《港口工程桩基规范》

现行《港口工程桩基规范》(JTS 167-4-2012) [13]中提出根据土的物理指标与承载力参数经验关系确定单桩竖向极限承载力标准值。

$$Q_d = \frac{1}{\gamma_R} (u \sum q_{fi} l_i + q_R A)$$

式中, γ_R , 为单桩轴向承载力分项系数; u 为桩身截面周长; q_{fi} , 为单桩第 i 层土的单位面积极限桩侧摩阻力标准值; q_R , 为单桩单位面积极限桩端阻力标准值。

4.5. 计算值与试验值比较

四种承载力计算方法所得结果与试验值的比较及其分布情况详见表 5。

Table 5. Comparison of ultimate bearing capacity results of test piles
表 5. 试桩极限承载力结果比较

试桩	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5
试验值(N)	690	1258	1466	1392	1130
摩尔 - 库伦理论(N)	623	1145	1133	1154	829
误差(%)	-9.71	-8.98	-22.71	-17.10	-26.64
邓肯 - 张理论(N)	743	1292	1156	1268	879
误差(%)	7.68	2.70	-21.15	-8.91	-22.21
《建筑桩基规范》	1106	1106	1106	1106	1106
误差(%)	60.29	-12.08	-24.56	-20.55	-2.12
《港口桩基规范》	962	962	962	962	962
误差(%)	39.42%	-23.53	-34.38	-30.89	-14.87

本文通过模型试验, 分析了摩尔 - 库伦理论和邓肯 - 张理论在预测极限承载力方面的性能, 并与《建筑桩基规范》及《港口桩基规范》中的计算方法进行了分析比较。

从表 5 可看出, 通过对棕丝加固红黏土地层极限承载力的计算分析可知, 在理论计算方法方面, 邓肯 - 张理论的误差范围在-22.21%~7.68%, 而摩尔 - 库伦理论计算值与试验值的误差范围在-26.64%~-8.98%, 可见后者虽能考虑土体非线性应力 - 应变关系, 但对棕丝与红黏土相互作用后的特性把握不够精准, 致使计算结果与试验值存在一定偏差, 相比之下前者在本研究范围内能更准确地描述棕丝加固红黏土地层的极限承载力特性。在现行规范法方面, 《建筑桩基规范》和《港口桩基规范》的极限承载力计算值均小于试验值, 误差范围分别为-24.56%~60.29%和-34.38%~39.42%, 这表明两种规范方法在本试验中的适用性存在一定局限, 可能是由于棕丝加固后的红黏土地层具有特殊的力学性质和结构特点, 而规范中的计算公式未能充分考虑这些因素, 进而导致计算结果与实际试验值出现较大偏差。

综上所述, 在本研究范围内, 邓肯 - 张理论计算桩基承载力最为精确, 摩尔 - 库伦理论次之, 而现行的《建筑桩基规范》和《港口桩基规范》的计算误差偏大。

5. 结论

(1) 随着棕丝比例从 0%增至 0.8%, 棕丝掺量的增加先提高了红黏土的黏聚力, 后降低了黏聚力, 同

时内摩擦角不断降低,土层的压实度发生变化,试桩极限承载力先递增后递减;桩侧分担荷载比逐步增加,从 54.8%逐步提高至 64.0%;而桩端所承担的荷载比例则相反,其比值也从 0.825 逐步降低至 0.562。棕丝掺量为 0.6%时,桩基的极限承载力最大。

(2) 试桩荷载-位移曲线特征包括非线性的陡降型和缓变型。桩身轴力曲线上,桩身轴力随着荷载逐步增加而递增。说明棕丝对桩侧阻力的增强效果更为显著。桩身阻力呈“R”型分布,侧阻力峰值在 150~200 mm 范围内。

(3) 采用 4 种方法计算棕丝加固红黏土试桩极限承载力,邓肯-张理论计算误差(-22.21%~7.68%)比摩尔-库伦理论误差(-26.64%~-8.98)更小;而《建筑桩基规范》的计算误差为(-24.56%~60.29%),《港口桩基规范》的误差范围为(-34.38%~39.42%)。

参考文献

- [1] 李春红,孔纲强,刘汉龙,等. 桩-红黏土接触面温控测试及应力-应变关系研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(S2): 89-94+101.
- [2] Cheng, Y., Yang, G., Long, Z., Yang, D. and Xu, Y. (2022) Dynamic Characteristics of Overconsolidated Remolded Red Clay in Southwest China: An Experimental Study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **81**, Article No. 176. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02683-2>
- [3] Yan, H., Long, J., Yang, Y., Shi, Q. and Yang, B. (2024) Model Test Study on Bearing Characteristics of Pile Foundation in Red Clay. *Buildings*, **14**, Article No. 2316. <https://doi.org/10.3390/buildings14082316>
- [4] Liu, C., Soltani, H., Muraleetharan, K.K., Cerato, A.B., Miller, G.A. and Sritharan, S. (2016) Cyclic and Seismic Response of Single Piles in Improved and Unimproved Soft Clays. *Acta Geotechnica*, **11**, 1431-1444. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0504-2>
- [5] 马宏岩,翁明胜,黄仁杰,等. 干湿循环下聚丙烯纤维改良红黏土抗剪强度特性及预测模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2025, 44(3): 33-39.
- [6] 吴鹏,刘瑾,车文越,等. 刺槐豆胶复合剑麻纤维改良红黏土力学性质及数值试验研究[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版), 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250206.0910.002>, 2026-07-28.
- [7] 张运利,唐海仙,黄仲钦,等. 改性聚酯纤维对岩土工程用红黏土的改良性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2025, 50(1): 19-24.
- [8] 曹以虎,杨柏,孙珍茂,等. 砂岩地层变截面桩抗拔承载特性现场试验研究[J]. 工程勘察, 2022, 50(5): 1-6+18.
- [9] 阮波,彭学先,马超,等. 玻璃纤维加筋石灰土无侧限抗压强度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(9): 2246-2251.
- [10] Duncan, J.M. and Chang, C. (1970) Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **96**, 1629-1653. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001458>
- [11] [美]达斯. 基础工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 175-177.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. JTS167-4-2012 《港口工程桩基规范》[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.