

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0182

钢护筒涂层减阻桩隔离层试验研究

谭 飞, 林大伟, 焦玉勇, 于 锦

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 高陡边坡上桩基既要传递上部荷载, 又要承受侧向滑坡推力, 其受力复杂。为减小桩基竖向侧摩阻对边坡稳定性的不利影响, 通过在桩基外侧设置隔离钢护筒, 并在钢护筒内壁涂抹沥青涂层, 提出了一种钢护筒涂层减阻桩。通过推出试验, 研究桩侧摩阻力的分布规律及沥青涂层的隔离减阻效果。结果表明: 无沥青涂层的试件混凝土剪应力呈两端大、中间小的分布; 沥青涂层能够有效地减小桩的侧摩阻力, 并改变了钢-混凝土间的黏结机制, 使荷载集中地向下传递; 钢护筒涂层减阻措施能降低桩基对边坡稳定性的不利影响。

关 键 词: 高陡边坡; 桩基础; 钢护筒; 沥青涂层; 推出试验

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2022) 增刊 1-0229-08

Experimental study on isolation layer of steel casing coating pile

TAN Fei, LIN Da-wei, JIAO Yu-yong, YU Jin

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The pile foundation in high-steep rock slope has double functions, i.e., transferring loads from superstructure and bearing landslide thrust, and the mechanical behavior is very complex. In order to reduce the adverse effect of the pile friction to the slope stability, a steel casing coating pile (SCCP) is proposed, in which the isolation steel casing is set outside of the pile, and the inner of steel casing is coated by the asphalt. Based on the push-out test, the lateral friction distribution rule of pile and the isolation resistance-reducing effect of the asphalt coating are studied. The experimental results indicate that the shear stress of the concrete without asphalt coating is large at both ends and small in the middle, and the asphalt coating can effectively reduce the lateral friction of the pile, change the bonding mechanism between steel and concrete, and make upper loads transferred to deep rock mass. Based on numerical analysis, it is shown that the steel casing coating pile can reduce the upper friction of pile, and transfer the load to deep rock mass, and lessen the adverse effect of the pile lateral friction above the slope sliding surface to the stability of the high-steep slope.

Keywords: high-steep slope; pile foundation; steel casing; asphalt coating; push-out test

1 引 言

我国国民经济快速发展, 需要建设大量路桥、高层建筑等基础设施。由于选址需要, 部分桩基础可能不得不修建在斜陡坡地段。相比位于平地或缓坡上的桩基, 位于陡坡地段的桩基不仅需要传递上部荷载, 还要承受陡坡体的侧向推力, 其受力复杂^[1]。此外, 从桩基荷载传递机制分析, 上部结构竖向荷载通过桩基向下传递的过程中, 桩基会受到

桩周岩土体向上的侧摩阻力作用, 而桩侧岩土体会受到向下的桩基侧摩阻力的反作用。若高陡边坡处于临界稳定状态, 可能存在潜在滑动面, 坡体所受的向下的侧摩阻力相当于作用在边坡上的外荷载, 将对边坡的稳定性造成不利影响, 甚至会出现桩身对周边岩土体侧摩阻力过大而造成边坡失稳。因此, 有必要研究出一种减小潜在滑动面以上桩基侧摩阻力的隔离措施。

Pells 等^[2]对嵌岩桩进行现场试验和模型试验,

收稿日期: 2020-02-26

修回日期: 2021-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(No.51879245, No.11672360, No.41920104007); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No.CUGCJ1821, CUG170645)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51879245, 11672360, 41920104007) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China(CUGCJ1821, CUG170645).

第一作者简介: 谭飞, 男, 1985 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事边坡稳定性分析的教学与研究。E-mail: tanfei@cug.edu.cn

建立了极限侧阻和无侧阻抗压强度关系。Rowe 等^[3]对影响相交界面软化行为和桩侧摩阻力发挥作用的因素进行了总结。赵明华等^[1]基于现场试验和有限差分法,提出了桩后岩质边坡滑坡体推力计算模型,探讨了高陡边坡桥梁基桩的承载机制。杨明辉等^[4]考虑水平荷载与竖向荷载共同作用的复杂情况,建立了高陡边坡桥梁基桩的受力模型,并采用幂级数方法推导了其内力计算方法。张永杰等^[5]基于桩侧受均布力的基桩内力变形分析方法建立了陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础简化计算方法。采用典型工程案例系统分析了桩径、滑坡体厚度、剩余下滑力集度及地基水平抗力系数的比例系数等因素对基桩桩顶水平位移与桩身最大弯矩的影响规律。赵明华等^[6]根据陡坡段桥梁基桩承载特性,提出了一种可考虑桩土非线性作用的基桩内力与位移分析有限杆单元方法,可以看出:目前针对陡坡桥梁桩基的承载特性开展了较多研究。

本文提出在桩基外侧设置隔离钢护筒,并在钢护筒内壁涂抹沥青涂层,实现减小桩基上部侧摩阻力,将上部结构荷载传递到岩土体深部,从而降低边坡滑移面以上的桩基侧摩阻对边坡稳定性的影响。为研究桩基侧摩阻分布规律,分析其减阻效果,有必要研究钢-混凝土界面力学性能。Virdi 等^[7]首先提出推出试验的概念,该试验能较好地模拟使用状况下钢-混凝土的力学性能且易操作。Tao 等^[8]进行了一系列的推出试验,研究了不同截面形状(方形和圆形钢管)、不同截面尺寸、不同钢管材料(碳素钢和不锈钢)、不同龄期等对钢-混凝土黏结性能的影响。刘永健等^[9-10]比较了混凝土强度、钢管截面形状、钢管内表面状况及钢管混凝土构件受力状态对黏结强度的影响。陈宗平等^[11-12]通过推出试验研究了钢管再生混凝土界面黏结滑移的作用机制。李小刚等^[13]提出了钢管混凝土抗滑移刚度的概念,给出了均布荷载和集中荷载作用下钢管混凝土柱的轴力、界面剪应力、界面相对滑移等的解析解。本文通过室内推出试验,研究钢管混凝土受荷时界面应力分布规律及沥青涂层的减阻效果。

2 钢护筒涂层减阻桩

为减小桩基侧摩阻对边坡稳定性的影响,本文提出了一种钢护筒涂层减阻桩(如图 1 所示)。在桩孔内设置隔离钢护筒,隔离钢护筒内壁涂抹沥青涂层。桩身混凝土浇筑于钢护筒内,通过沥青涂层减小桩基侧摩阻力。钢护筒与桩孔一般不能保证完全贴合。为保证桩身稳定性,在钢护筒外壁与桩孔内

壁空隙间填充柔性材料。隔离段深度宜穿过边坡滑移面。

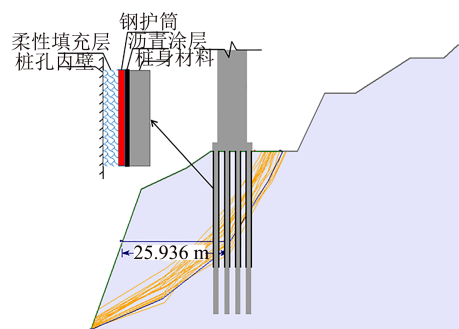


图 1 钢护筒涂层减阻桩

Fig.1 Steel casing coating pile (SCCP)

3 隔离减阻桩对边坡稳定性分析

3.1 数值模拟方案

利用 FLAC^{3D} 对高陡边坡进行稳定性分析,将模型进行简化后,分析以下 3 种工况:

- (1) 原状边坡稳定性;
- (2) 桩基荷载作用下边坡稳定性;
- (3) 采取隔离措施后桩基荷载作用下边坡稳定性。

3.2 计算模型及参数

模型网格见图 2,其边界条件为:固定模型左右两侧边界、前后两侧边界、底面边界。

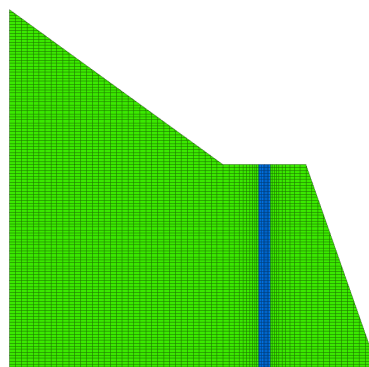


图 2 计算模型网格图

Fig.2 Computational model grid

岩土体采用摩尔-库仑模型,模拟岩质高边坡,微风化灰岩参数为:弹性模量 $E = 45 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$,黏聚力 $c = 120 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 36^\circ$,密度 $\rho = 2690 \text{ kg/m}^3$ 。

桩基采用线弹性模型,弹性模量 $E = 30 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.25$,密度 $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$;桩基荷载结

合实际经验取 2×10^4 kN。

参考丁永春等^[14]关于接触面单元计算方法的探讨,通过数值模拟说明了接触面单元计算的合理有效性。桩与岩土体接触采用 FLAC 中接触面单元,黏结力 c 、摩擦角 φ 为岩土体 0.8 倍,法向刚度 k_n 、切向刚度 k_s 计算公式^[15]为

$$k_n, k_s = 10 \max \left[\frac{k + 4G/3}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (1)$$

式中: $\Delta z_{\min}$ 为接触面最小尺寸; G 为剪切模量; k 为体积模量。

3.3 结果分析

通过上述模型分别对 3 种工况下边坡稳定性进行分析,各工况对应边坡安全系数见表 1。

表 1 各工况下边坡安全系数

Table 1 FOS of slope under various conditions

工况	原状边坡	桩基荷载下边坡	采取隔离措施桩基荷载下边坡
安全系数	1.50	1.25	1.45

数值分析结果表明,在桩基荷载作用下原有边坡安全性降低;采取隔离措施后减小了边坡潜在滑动面以上桩周土受力,降低了桩基荷载对原有边坡的不利影响。

4 推出试验

试件所用钢筒为卷制高频焊管,为保证其稳定性在钢筒底部焊接法兰盘。钢筒屈服强度为 326 MPa、极限强度为 460 MPa、弹性模量为 2.01×10^5 MPa、泊松比为 0.33,混凝土采用 C30 混凝土。试件参数见表 2,其中界面实际长度为钢筒中混凝土实际高度。

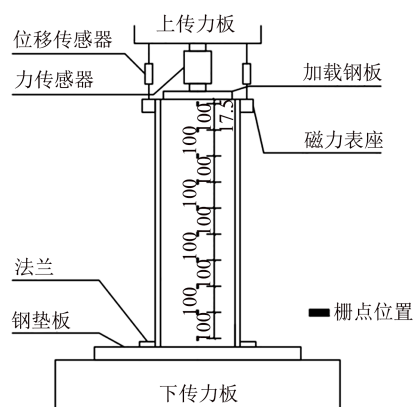
表 2 试件参数

Table 2 Parameters of test specimen

试件编号	钢筒尺寸/mm			界面实际长度/mm	沥青涂层厚度/mm
	外径	壁厚	高		
PT-1	325	5	950	858.5	0
PT-2	325	5	950	877.5	0
TC1-1	325	5	950	855.5	1
TC1-2	325	5	950	858.0	1
TC2-1	325	5	950	859.5	2
TC2-2	325	5	950	864.5	2

试验采用 YAW-1000J 型微机控制电液伺服试验机加载,加载速率为 30 N/s。在试件两侧设置 YHD-50 型位移计,加载钢板上方安置 BHR-430T

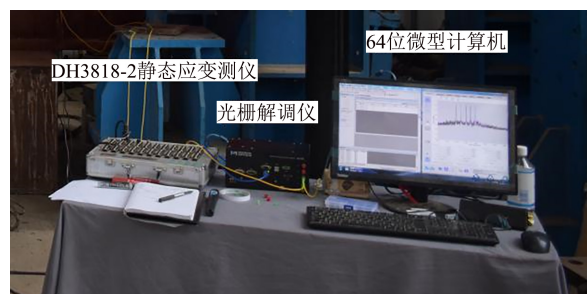
型力传感器,利用 DH3818-2 静态应变测仪实时采集位移计和力传感器数据。参考王永洪^[16]、白晓宇^[17]、孙阳阳^[18]、范成凯^[19]等在岩土工程利用光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, 简称 FBG) 获取数据的成功案例,为精确获取试件的应力分布,在钢筒外表面粘贴间距为 100 mm 的微型 FBG 应变传感器 (从上到下分别是编号 1~10 号共 10 个栅点) 测量钢筒应变,见图 3(a)。根据钢管和内部混凝土间的力学平衡原理,利用特征波长差得到钢管应变,利用应变差梯度,可推导出黏结应力及其分布规律。试验加载及采集系统见图 3。



(a) 传感器布置 (单位: mm)



(b) 加载装置



(c) 数据采集系统

图 3 试验装置

Fig.3 Test devices

5 试验结果及分析

5.1 试验过程描述

无沥青涂层的试件 (PT-1、PT-2), 加载初期荷载缓慢增加, 混凝土与钢筒之间无明显滑移, 荷载增加至 100 kN 左右, 试件加载端可观察到滑动迹象; 随着荷载增加, 位移逐渐变大, 钢筒-混凝土之间的相对滑移速度加快, 并伴随着轻微的“咔、咔”声 (这可能是钢筒-混凝土接触面混凝土被剪坏而发出的声音); 加载至最大荷载, 此时混凝土与钢筒间突然产生较大滑移, 并发出“咔”声, 荷载值迅速减小, 位移继续增大, 直到滑移至设计位置, 加载结束。

涂有沥青的试件 (TC1-1、TC1-2、TC2-1、TC2-2) 随荷载增大, 混凝土持续缓慢产生滑移, 加载至最大荷载后, 荷载值迅速减小, 位移持续增大, 直到滑移至设计位置, 加载结束。

试验结束后, 经仔细观察, 无沥青涂层的试件 (PT-1、PT-2) 最终破坏形态均是钢-混凝土接触面上混凝土被剪坏, 钢筒内表面有混凝土摩擦产生的擦痕。涂有沥青的试件 (TC1-1、TC1-2、TC2-1、TC2-2) 最终破坏时无混凝土剪破坏, 沥青层有滑移痕迹, 具体破坏形态见图 4。



图 4 推出试件破坏形态

Fig.4 Failure modes of specimens

5.2 试验结果

5.2.1 荷载-相对位移曲线

通过布置的力传感器和位移传感器, 采集了试件加载过程中混凝土与钢筒的力和相对位移, 如图 5 所示 (同组试件试验数据相近, 每组取其中一个试件数据)。由图可知, 各组试件的荷载-相对位移曲线主要有以下特点:

(1) 无沥青涂层的试件 (PT) 荷载-相对位移曲线大致分三阶段: 荷载上升阶段 oa 、滑移阶段 ab 、破坏阶段 bc ; 对于涂有沥青的试件 (TC1、TC2) 荷载-相对位移曲线大致分为三阶段: 滑移阶段 oa 、

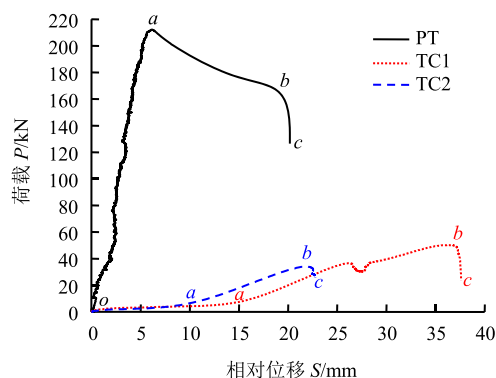


图 5 荷载-相对位移 $P-S$ 曲线

Fig.5 Load-relative displacement ($P-S$) curves

荷载上升阶段 ab 、破坏阶段 bc 。

(2) 无沥青涂层的试件加载初期随荷载增大, 位移逐渐增大, 曲线斜率变化小, 可看作是接触的“弹性阶段”; 涂有沥青的试件在荷载作用下持续缓慢地滑移, 荷载较小而滑移较大。

(3) 无沥青涂层的试件达到最大荷载之后, 相对位移突变, 荷载明显下降。涂有沥青的试件持续缓慢地产生滑移。

试验数据表明沥青涂层有较好的隔离效果。无沥青涂层的试件的最大荷载为 212.8 kN, 涂有沥青的试件的最大荷载分别为 50.3 kN (TC-1) 和 35.1 kN (TC-2)。可以看出, 沥青涂层具有非常明显的隔离效果, 最大能够减小钢-混凝土界面黏结力约 83.5%。

5.2.2 应变沿试件高度的分布

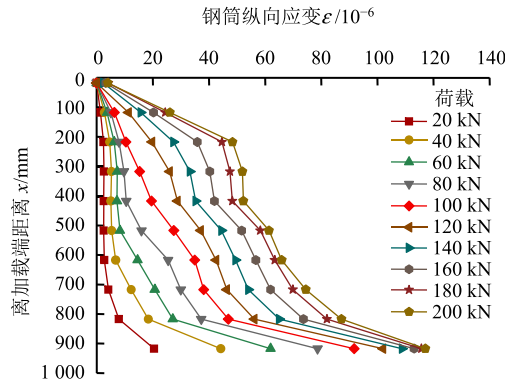
图 6 分别为 3 种类型试件 (无涂层、1 mm 厚沥青涂层及 2 mm 厚沥青涂层) 在各级荷载下, 钢筒外壁纵向应变沿试件高度方向的分布。从图中可以看出, 无沥青涂层的试件在加载初期, 钢筒表面纵向应变很小。随着荷载增大, 钢筒纵向应变值逐渐变大。曲线规律大致为距加载端边缘 0~200 mm 段应变呈直线剧增, 距加载端边缘 200~700 mm 段应变维持缓慢增加, 距加载端边缘 700 mm 以下应变呈指数型增长。

不同厚度沥青涂层的试件加载时钢筒外壁纵向分布规律基本相同, 在推出加载初期, 钢筒表面纵向应变很小。随荷载增大, 距加载端边缘 0~600 mm 段应变无明显变化且应变几乎为 0, 距加载端边缘 600 mm 以下应变随之增大。

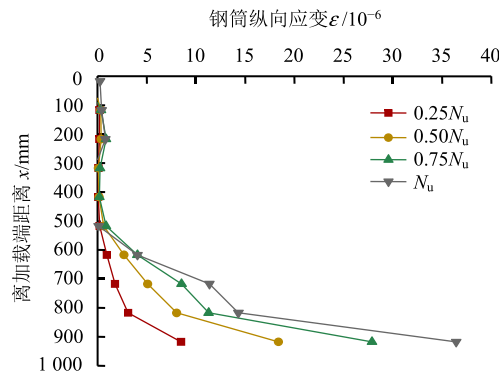
由此可见, 沥青涂层在减小钢-混凝土界面黏结力的同时, 改变了钢-混凝土界面传力规律。

5.3 核心混凝土摩阻力分析

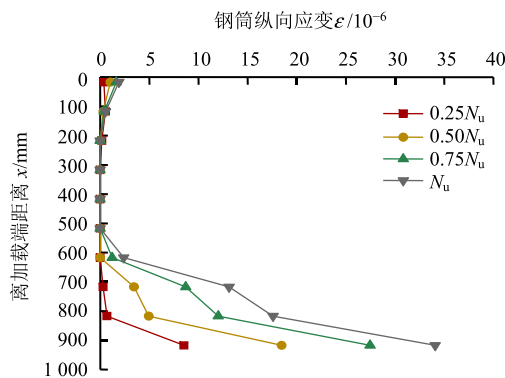
推出试验中, 荷载通过钢-混凝土之间的黏结



(a) 无涂层



(b) 1 mm 沥青涂层



(c) 2 mm 沥青涂层

图 6 不同类型试件加载时钢筒外壁纵向应变分布
Fig.6 Distributions of longitudinal strains on the outer wall of steel casing during loading of different types of specimens

作用传递给钢筒。为了研究核心混凝土在加载过程的摩阻力分布,利用钢筒表面应变推算出核心混凝土摩阻力分布。取相邻两光纤光栅测点间单元分析(如图 7 所示),建立平衡方程可得出两测点之间核心混凝土平均剪应力关系式。

平衡方程为

$$\sigma_s \pi (D_s^2 - D_c^2) + \pi D_c \cdot \Delta x \tau_a = (\sigma_s + \Delta \sigma_s) \pi (D_s^2 - D_c^2) \quad (2)$$

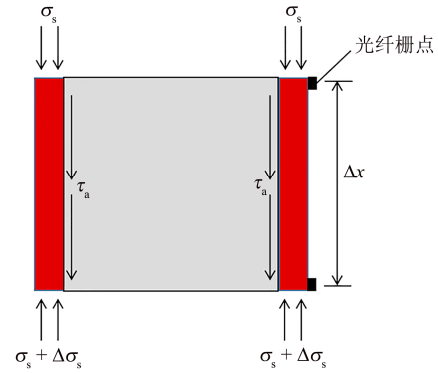


图 7 受力分析单元

Fig.7 Force analysis element

式中: σ_s 为钢筒正应力; D_s 为钢筒外径, 本试验中为 325 mm; D_c 为核心混凝土直径, 为 315 mm; Δx 为光栅测点间距离, 为 100 mm; τ_a 为两测点之间核心混凝土平均受阻应力; $\Delta \sigma_s$ 为钢筒正应力增量。

本构关系为

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad (3)$$

式中: E_s 为钢筒钢材弹性模量, 取 2.01×10^5 MPa; ε_s 为钢筒外壁纵向应变。

将式 (3) 代入式 (2) 可得 τ_a :

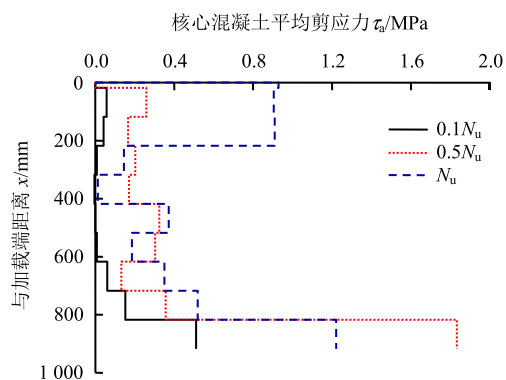
$$\tau_a = \frac{E_s \cdot \Delta \varepsilon_s (D_s^2 - D_c^2)}{D_c \cdot \Delta x} \quad (4)$$

式中: $\Delta \varepsilon_s$ 为钢筒外壁两测点间的纵向应变增量。

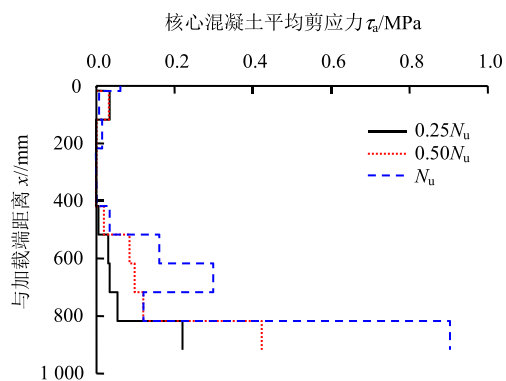
利用上述关系式得到 3 种类型试件 (试件无涂层、1 mm 厚沥青涂层及 2 mm 厚沥青涂层) 在推出试验下核心混凝土平均剪应力分布, 如图 8 所示。其中各曲线代表在各级荷载下, 核心混凝土平均剪应力。从图中可以看出, 无沥青涂层的试件在推出加载初期, 核心混凝土剪应力很小。随着荷载增大, 核心混凝土剪应力逐渐变大。极限荷载时, 核心混凝土剪应力曲线规律大致表现为靠近试件两端应力大, 中间应力小。

两组含沥青涂层的试件加载时核心混凝土剪应力分布规律基本相同, 在推出加载初期, 核心混凝土剪应力很小。随着荷载增大, 远离加载端的核心混凝土剪应力逐渐变大。核心混凝土剪应力分布靠近加载端 0~500 mm 段应力几乎可以忽略, 500 mm 以下核心混凝土剪应力呈上升趋势。

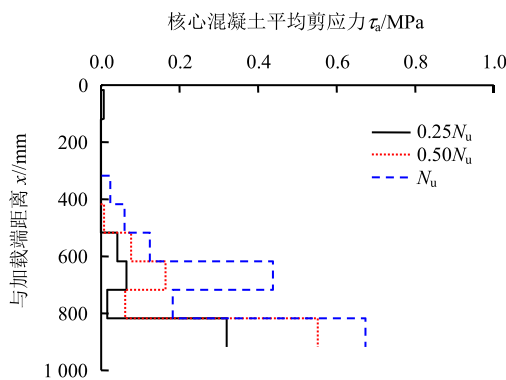
图 9 分别对比了无涂层与涂层试件在 30 kN 和



(a) 无涂层



(b) 1 mm 沥青涂层

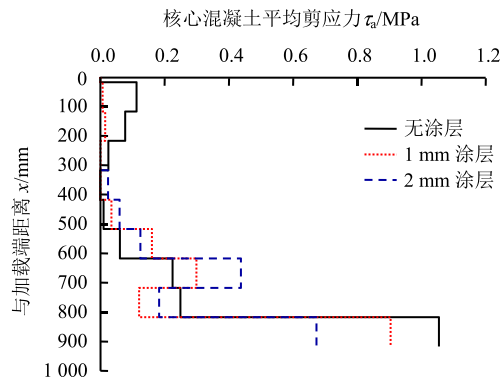


(c) 2 mm 沥青涂层

图 8 不同类型试件加载时核心混凝土剪应力分布
Fig.8 Distributions of core concrete shear stress during loading of different types of specimens

对应极限荷载 N_u 下核心混凝土剪应力分布,可见沥青涂层改变了钢-混凝土间的黏结机制,降低了核心混凝土剪应力且使剪应力集中在构件下半部分。

从受力状态分析,加载时钢管与核心混凝土界面上产生径向压力,钢管环向受拉,相应混凝土受到环向压力约束,黏结应力提高,进而核心混凝土剪应力增大。靠近加载端核心混凝土轴力越大,钢管的约束作用越强,混凝土剪应力也越大,因此靠近加载端核心混凝土受到的剪应力很大(距加载端



(a) 30 kN 作用下

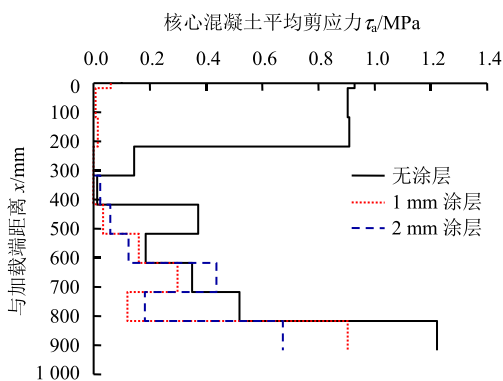
(b) 极限荷载 N_u 作用下

图 9 不同类型试件在其对应荷载下核心混凝土剪应力对比
Fig.9 Comparison of core concrete shear stress of different types of specimens under corresponding loads

边缘 0~200 mm)。

对于沥青涂层试件,由于沥青涂层阻断了混凝土与钢表面的化学黏结力、机械咬合力,同时也减少了钢管对混凝土的约束作用,因此减小了混凝土剪应力同时使混凝土剪应力集中分布于构件下半部分。

综上所述,沥青涂层起到了良好隔离作用,使荷载集中地向下传递至钢管混凝土下端。钢护筒涂层桩利用相同的原理减小桩基上部侧摩阻力、将上部荷载传递到岩土体深部,降低边坡滑移面以上的桩基侧摩阻对边坡稳定性的影响,对于在斜坡地区桩基础的建设有重要意义。

6 结 论

为减小桩基侧摩阻对边坡稳定性的影响,本文提出了一种钢护筒涂层减阻桩。通过室内推出试验,研究桩侧摩阻力的分布规律,主要得出以下结论:

(1) 无涂层的桩基混凝土剪应力呈两端大、中间小的分布;而沥青涂层可以降低钢护筒对桩基混凝土的横向挤压效应,减小混凝土与钢表面化学黏

结力、机械咬合力, 从而改变钢-混凝土间的黏结机制。

(2) 沥青涂层能有效减小钢-混凝土界面黏结力, 使荷载集中地向下传递至钢管混凝土下端; 涂层越厚, 减阻隔离效果越好。沥青涂层起到了良好隔离作用。

(3) 本试验结果表明, 所提出的钢护筒涂层减阻措施可较好地将混凝土上部荷载传递至钢管下部, 采用该种隔离措施的桩基, 可有效将桩基上部荷载传递至岩土体深部, 降低边坡滑移面以上的桩基侧摩阻对边坡稳定性的影响。

本文所提出的钢护筒涂层减阻桩已在湖南长沙桐溪桥高陡边坡桥梁桩基中进行了使用, 取得了较好的效果。

参 考 文 献

- [1] 赵明华, 刘建华, 杨明辉. 倾斜荷载下高陡边坡桥梁基桩内力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2352-2357.
ZHAO Ming-hua, LIU Jian-hua, YANG Ming-hui. Inner-force calculation of bridge pile foundation in high-steep rock slope under inclined loads[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(11): 2352-2357.
- [2] PELLIS P J N, TURNER R M. Elastic solutions for the design and analysis of rock-socketed piles[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1979, 16(3): 481-487.
- [3] ROWE R K, ARMITAGE H H. A design method for drilled piers in soft rock[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1987, 24(1): 126-142.
- [4] 杨明辉, 赵明华, 刘建华, 等. 高陡边坡桥梁基桩内力计算的幂级数解[J]. 中南大学学报, 2007, 38(3): 561-566.
YANG Ming-hui, ZHAO Ming-hua, LIU Jian-hua, et al. Power-progression solution for inner-force analysis of bridge pile foundation in steep slope[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2007, 38(3): 561-566.
- [5] 张永杰, 夏旖琪, 冯夏庭, 等. 陡坡段双桩-柱基础简化计算方法及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1705-1715.
ZHANG Yong-jie, XIA Yi-qi, FENG Xia-ting, et al. A simplified method and affecting factors for double pile-column foundation in abrupt slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1705-1715.
- [6] 赵明华, 陈耀浩, 杨超炜, 等. 基于有限杆单元法的陡坡基桩非线性分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 3020-3028.
ZHAO Ming-hua, CHEN Yao-hao, YANG Chao-wei, et al. Nonlinear analysis of pile in steep slope based on finite bar element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(8): 3020-3028.
- [7] VIRDI K S, DOWLING P J. Bond strength in concrete filled circular steel tubes[R]. London: CESLIC Report CC11, Department of Civil Engineering, Imperial College, 1975.
- [8] TAO Z, SONG T Y, UY B, et al. Bond behavior in concrete-filled steel tubes[J]. **Journal of Constructional Steel Research**, 2016, 120: 81-93.
- [9] 刘永健, 刘君平, 郭永平, 等. 钢管混凝土界面粘结滑移性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007, 27(2): 53-57.
LIU Yong-jian, LIU Jun-ping, GUO Yong-ping, et al. Bond-slip mechanics behaviors of structures concrete filled steel tubes[J]. **Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)**, 2007, 27(2): 53-57.
- [10] 刘永健, 刘君平, 池建军. 钢管混凝土界面抗剪黏结滑移力学性能试验[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(1): 17-23.
LIU Yong-jian, LIU Jun-ping, CHI Jian-jun. Shear bond behaviors at interface of concrete-filled steel tube[J]. **Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)**, 2010, 35(1): 17-23.
- [11] 陈宗平, 徐金俊, 薛建阳, 等. 钢管再生混凝土黏结滑移推出试验及黏结强度计算[J]. 土木工程学报, 2013, 46(3): 49-58.
CHEN Zong-ping, XU Jin-jun, XUE Jian-yang, et al. Push-out test on the interface bond-slip behavior and calculation on bond strength between steel tube and recycled aggregate concrete in RACFST structures[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2013, 46(3): 49-58.
- [12] 陈宗平, 徐金俊, 李卫宁, 等. 再生粗骨料含量对钢管再生混凝土黏结强度及失效性态的影响研究[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 70-78.
CHEN Zong-ping, XU Jin-jun, LI Wei-ning, et al. Influence of recycled coarse aggregate content on bond strength and invalidation mechanism between steel tube and recycled aggregate concrete[J]. **Engineering Mechanics**, 2014, 31(6): 70-78.

- [13] 李小刚, 童根树. 考虑抗滑移刚度的钢管混凝土柱的荷载传递[J]. 工程力学, 2017, 34(11): 89-101.
LI Xiao-gang, TONG Gen-shu. Load transfer in concrete-filled steel tubular columns considering slip stiffness[J]. **Engineering Mechanics**, 2017, 34(11): 89-101.
- [14] 丁勇春, 王建华, 陈锦剑. 接触面单元计算方法探讨[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊 1): 211-213.
DING Yong-chun, WANG Jian-hua, CHEN Jin-jian. Investigation on calculation methods for interface elements[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Suppl.1): 211-213.
- [15] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
CHEN Yu-min, XU Din-ping. FLAC/FLAC^{3D} foundation and engineering examples[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2009.
- [16] 王永洪, 张明义, 白晓宇, 等. 基于光纤光栅传感技术的静压沉桩贯入特性及影响因素研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4801-4812.
WANG Yong-hong, ZHANG Ming-yi, BAI Xiao-yu, et al. Study of penetration characteristics and influence factor of jacked pile based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(12): 4801-4812.
- [17] 白晓宇, 张明义, 匡政, 等. 光纤光栅传感技术在 GFRP 抗浮锚杆现场拉拔试验中的应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3891-3899.
BAI Xiao-yu, ZHANG Ming-yi, KUANG Zheng, et al. Application of fiber grating sensing technology in pull-out test on glass fiber reinforced polymer anti-floating anchor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(10): 3891-3899.
- [18] 孙阳阳, 王源, 张清华, 等. 模型相似材料内部应变光纤量测应变传递[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 759-764, 774.
SUN Yang-yang, WANG Yuan, ZHANG Qing-hua, et al. Strain transfer of internal strain of model similar materials with optical fiber measurement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 759-764, 774.
- [19] 范成凯, 孙艳坤, 李琦, 等. 页岩单轴压缩破坏试验的光纤布拉格光栅测试技术研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2456-2464.
FAN Cheng-kai, SUN Yan-kun, LI Qi, et al. Testing technology of fiber Bragg grating in the shale damage experiments under uniaxial compression conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(8): 2456-2464.
-
- 上接第 228 页
- [20] 孙召东, 李再兴, 宋洪庆, 等. 海绵城市建设中土水特征曲线对产流的影响[J]. 中国给水排水, 2020, 36(9): 117-122.
SUN Zhao-dong, LI Zai-xing, SONG Hong-qing, et al. Effect of soil-water characteristic curve on runoff in sponge city construction[J]. **China Water & Wastewater**, 2020, 36(9): 117-122.
- [21] 谭晓慧, 李丹, 沈梦芬, 等. 土水特征曲线参数的概率统计及敏感性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 34(6): 97-103.
TAN Xiao-hui, LI Dan, SHEN Meng-fen, et al. Probability statistics and sensitivity analysis of parameters of soil water characteristic curves[J]. **Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering**, 2013, 34(6): 97-103.
- [22] SILLERS W S, FREDLUND D G, ZAKERZADEH N. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models[M]//Unsaturated Soil Concepts and Their Application in Geotechnical Practice. Netherlands: Springer, 2001: 243-283.
- [23] PHOON K K, SANTOSO A, QUEK S T. Probabilistic analysis of soil-water characteristic curves[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(3): 445-455.
- [24] CHIN K B, LEONG E C, RAHARDJO H. A simplified method to estimate the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2010, 47(12): 1382-1400.
- [25] 谌文武, 毕骏, 马亚维, 等. MK 模型的拟合方程和预测方程在土-水特征曲线中的应用及参数敏感性分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3208-3214.
CHEN Wen-wu, BI Jun, MA Ya-wei, et al. Fitted and predicted equations of MK model for soil-water characteristic curve and their parametric analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(11): 3208-3214.