

多次分段注浆钢花管单桩抗滑性能模型试验研究

周文皎¹, 魏少伟², 张玉芳²

(1. 中国铁道科学研究院, 北京 100081; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘要: 采用现场原型试验, 从滑坡推力、桩身土压力、桩身弯矩等方面研究了多次分段注浆钢花管单桩的抗滑性能, 分析了多次分段注浆钢花管注浆效果和破坏模式。试验结果表明: 采用多次分段控制注浆技术, 钢花管周边形成“树根状”水泥柱复合抗滑体, 这种结构可以有效提高桩周土体抗剪强度, 有效地增强了钢花管单桩结构的抗滑性能。6.0 m 桩长的多次分段注浆钢花管, 与常规钢花管相比, 单桩水平抗滑力提高了 35 kN, 其水平承载力相比常规钢花管提高约 50.72%, 更好地阻止了滑坡的产生, 钢花管在滑坡推力作用下发生弯曲破坏, 最大弯矩值出现在滑面附近, 因此, 建议在结构设计中加强滑面附近的桩体配筋设计, 以增强滑面附近的抗弯破坏能力, 从而达到更好的抗滑效果。

关键词: 钢花管; 多次分段注浆; 抗滑性能; 模型试验

中图分类号: U 213.1+52.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 11-4412-09

Model test study on anti-sliding performance of multiple segment grouting steel-tube

ZHOU Wen-jiao¹, WEI Shao-wei², ZHANG Yu-fang²

(1. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;

2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on field prototype tests, the anti-sliding performance of single pile with steel-tube grouted for multiple times is studied. The steel-tube is analyzed in aspects of landslide thrust, soil pressure and bending moment of pile body, and the grouting effect and failure mode. The test results show that the root shaped anti-sliding bodies composited by cement column are formed by multiple sectional control grouting technology. This structure can effectively improve the shear strength of the soil around the pile, and enhance the anti-sliding performance of the steel-tube single pile structure effectively. Compared with the conventional steel pipe, the horizontal anti-sliding force of single pile is increased by 35 kN, and the horizontal bearing capacity is increased by about 50.72% compared with the conventional steel-tube, and better prevents landslide. The bending failure of the steel-tube occurs under the action of landslide thrust, and the maximum bending moment appears near the slip surface. It is suggested that the reinforcement ratio of the piles near the sliding surface should be properly enhanced to improve the anti-sliding ability.

Keywords: steel-tube; splitting grouting; anti-sliding mechanism; model test

1 引言

近年来, 滑坡灾害的频发造成了很多重大事故和人员伤亡, 如道路中断、河道堵塞、良田被毁以及建构物的破坏等。国内外对于滑坡灾害防治进行了多年的研究和探索, 应用了锚索、抗滑桩、预应力锚索地梁等诸多手段防治并取得了良好的工程效果和理论突破。但采用上述手段治理滑坡也面临着施工工期长、治理成本大、施工安全难以保证、

特殊地层适用性不强等突出问题。

基于上述状况, 快速安全、经济合理的新型防治技术成为防治领域的新热点。微型桩技术便是一个极具前景的加固手段。微型桩是一种小孔径的钻孔灌注桩, 它有着施工工艺简单、工期较短的特点。近年来诸多学者对微型桩开展了多方面的研究。Richards 等^[1]研究了微型桩的横向受载工作性状, 证实了微型桩能够有效抵挡横向荷载, 分析表明微型桩的横向受载性状与土体类型及距桩顶深度为

2~5 m 的土体抗剪强度有较大关系;Awad^[2]通过现场试验研究了作用在单根微型桩上的横向荷载与所需桩长的关系;孙书伟等^[3]基于强度折减技术研究了微型桩群加固边坡安全系数的数值方法,并对微型桩群加固均质土坡和含软弱夹层土坡的稳定性进行了对比分析;龚建等^[4]在软土地基中对微型桩及微型桩群进行单桩水平荷载试验,验证了其有较好型试验,研究了微型桩与滑体相互作用时桩的受力特征和破坏模式。

由于微型桩界面尺寸小,抗滑作用弱,一定程度上限制了该技术的应用。近年来钢花管多次分段控制注浆技术逐渐兴起,是通过注浆方法和微型桩方式结合使用的一种新技术,即在钢花管内部进行多次分段劈裂注浆,浆液在压力作用下对岩土体可起到挤密及填充作用,一方面增强了桩间及桩周土体的强度;另一方面通过注浆可以使钢花管和周围的土体形成一个整体,起到共同抗滑的作用。它相比于微型桩而言加固效果更好。近些年来被一些学者研究和分析^[5-6]。

陈强等^[7]通过离心模型试验,从坡顶位移、坡面位移以及坡内部位移分析了注浆钢花管的控制效果;但试验模型尺寸仅为 60 cm×40 cm×40 cm,难以很好地反映实际中桩体的受力特性;谭文勇^[8]通过在碎石土地层开展的全段注浆和分段注浆的工艺对比试验,对比分析了两种注浆方式的注浆效果;朱宝龙等^[9-10]采用钢花管压力注浆技术对京珠高速公路 K108 滑坡进行加固,通过现场监测和分析,证明滑坡得到了有效治理,并说明钢花管压力注浆技术是一个可行的治理方法;王华俊等^[11]通过对浙江省某高速公路 K298 边坡挡墙采用钢花管注浆技术的现场试验研究,确定了合理的注浆压力、扩散半径及注浆孔间距;闫金凯等^[12]通过室内物理模型试验(模型尺寸 3.0 m×1.8 m×2.2 m)及有限元数值模拟等相结合的方法,对不同配筋形式的单桩在滑坡防治中的受力变形特性进行了研究,得出钢花管抗滑作用机制及桩的受力特性。

总体来说,近年来多数国内外学者针对钢花管压力注浆的技术展开了一些试验研究^[13-23],但基本为室内的小型模拟试验,这种缩小比例的室内模拟试验结果与原型桩的实际受力结果有较大的差别,难以模拟浆液扩散等,试验结果具有局限性。本研究研发了新型的注浆钢花管结构和工艺,依托大比例模型试验槽(模型尺寸 6.0 m×1.5 m×6.5 m),针对竖向钢花管多次注浆抗滑体防治新技术及其作用机制开展试验研究,并对试验结果进行了分析。

2 多次分段注浆的钢花管技术

2.1 技术分类

根据注浆方法的不同,将钢花管桩分成 2 类:

①一次注浆型:仅在管内外常规注浆;②二次压力劈裂注浆型:在重力或低压作用下在管外一次注浆;8~16 h(注浆间隔时间与钢管长度、孔内是否含水等密切相关)后,即管外一次浆液达到初凝,进行二次压力劈裂注浆,注浆压力一般为 2~6 MPa,此时管外凝固浆液成为二次劈裂注浆的通道。

以上两种注浆方式,①类为常规注浆,注浆仅在钢花管周围形成水泥柱,起到保护层作用;②类为压力注浆,可通过注浆改善桩体周边岩土体强度,特别适用于破碎岩石地层,且岩土体内节理发育、裂隙较大。

本文研究的多次分段注浆的钢花管技术为②类注浆型。该技术的创新之处在于:对钢花管桩进行多次分段控制注浆,在钢花管周边形成扩散面积较大的注浆体,可提高单根钢花管桩承载力;同时对桩间土体起到加固作用,改善钢花管桩群结构受力性能,提高其整体抗弯能力。

2.2 单根控制注浆钢花管的结构型式

单根控制注浆钢花管结构是由钢花管、对中环、三角形底托架、一次注浆管、二次劈裂注浆管、橡胶注浆枪头等组成,如图 1 所示。一次注浆由孔底向上返浆。劈裂注浆先将注浆枪头置于指定注浆位置,对橡胶注浆枪头进行加压,橡胶棒在压力作用下膨胀,并与管壁贴近密封,形成封闭注浆空间,保证劈裂注浆在高压下正常进行。通过对钢花管与钻孔间一次常压注浆、对滑动软弱部位在钢花管内多次分段高压劈裂注浆,在钢花管周边形成扩散面积较大的类似“树根状”注浆体,实现钢花管桩支

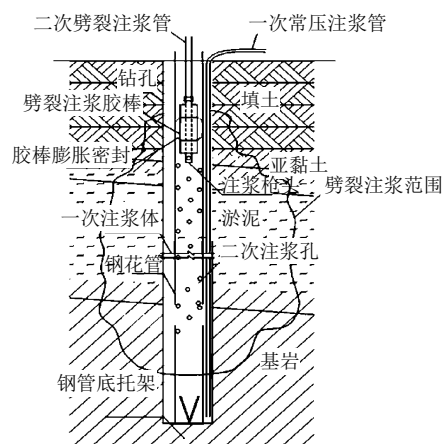


图 1 多次分段注浆钢花管示意图

Fig.1 Grouting steel-tube structure diagram

3.3 试验流程

以单桩多次分段控制注浆钢花管试验(第 3 组)为例,将试验方法简述如下:

(1) 土样制备:将砂土与黏土按照 5:1 比例拌制为试验的坡体材料,含水率控制在 10%~15%,经过室内直剪试验可以得到:黏聚力 $c = 5 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 34^\circ$;利用饱和软黏土(成分为全风化页岩)模拟滑面,厚度为 15~20 cm,经室内直剪试验得到 $c = 15 \text{ kPa}$, $\varphi = 21^\circ$,滑面厚为 15~20 cm。如图 6 所示。



图 6 现场饱和软黏土制备

Fig.6 Preparation of saturated soft clay

(2) 填土:将拌制好的土体材料以每 20 cm 为一级分层填筑并压实,按 1:1 放坡,并在相应位置埋置土压力盒。

(3) 加工钢花管:选用外径为 89 mm,壁厚为 4.5 mm 钢管为模型桩,在其上钻注浆孔,间距约 10 cm,孔径为 8 mm,为保证一次注浆管内不进浆液,同时二次注浆浆液易劈开注浆孔,采用玻璃胶对注浆孔封孔。将应变计通过支座焊接于钢管外侧,为保证应变计不受管外水泥影响,在应变计外焊接马口铁保护盒,并使用 302 胶水密封,如图 7 所示。

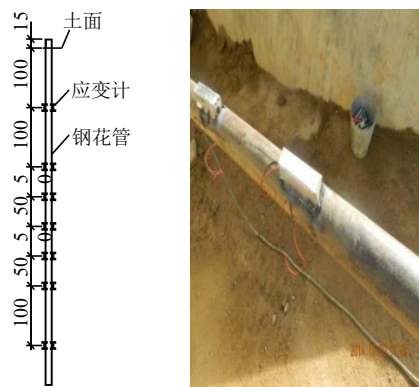


图 7 桩应变计位置及马口铁保护盒示意图(单位:cm)

Fig.7 Pile strain gauge position and tinfoil protection box diagram (unit: cm)

(4) 钢花管安装:模型槽填土完成后,使用风钻设备打孔,打孔过程中使用铅垂线调整钻杆垂直度,以确保钻孔垂直;钻孔完毕直接下管。为保证钢花管底部不动,提前在模型槽底部设置混凝土墩,钻孔打穿混凝土墩后,钢花管直接插入混凝土墩内。

(5) 一次注浆及二次劈裂注浆:试验主要的注浆设备包括:注浆机、搅拌箱及浆液箱。试验过程首先将水泥与水以固定的配合比倒入搅拌箱(尺寸为 1.2 m×1.0 m×0.3 m)进行搅拌,浆液搅拌均匀后倒入浆液箱。浆液箱与注浆机通过注浆管相连,注浆机开动,在压力驱动下浆液将通过注浆枪头注入钻孔(一次注浆)或钢管内(二次注浆)。在钢花管安装完毕后,应及时进行一次管外注浆;二次注浆(劈裂注浆)时,由于注浆压力较大,钢花管管口需加钢盖密封。

本试验采用千斤顶加载的方式模拟滑坡推力,即认为千斤顶加载的力即为滑坡推力的大小。在试验过程中,采取位移控制加载的方式,即在加载过程中保持加载板水平移动,并且加载板上下位移差值不超过 3 mm,以加载板水平位移 1~5 cm 为一次加载,在试验前期加载板位移较小,约 1~3 cm,后期位移较大,约 4~5 cm。试验将在土体进入塑性状态后停止,即约连续 3 次加载推力基本保持不变。试验过程二次注浆压力通过连接于管中的压力表量测。二次劈裂注浆结束依据为:注浆压力超过注浆机与注浆管容许压力(8 MPa)或漏浆现象,立即停止二次注浆。

3.4 量测系统

本试验量测系统由监测元件以及数据采集装置两部分组成。具体监测内容及方式见表 2 所示,具体仪器布置见图 3、4 所示。

表 2 试验仪器监测内容及方式
Table 2 Content and method of monitoring test instrument

试验内容	测量方式	仪器数量
水平推力	在千斤顶上安装的压力表	8 个
加荷板位移	百分表	2 个
土压力	在土体中埋设土压力盒	6 组
钢管桩身弯矩	量测钢花管两侧的应变计读数并经理论计算获得	7 组
土体深部位移	测斜管	3 根
坡面水平位移	百分表	5 个
坡顶表面位移	全站仪及钢尺	2 台

4 试验成果

4.1 二次注浆现象及分析

本次试验中,第3组试验为多次分段控制注浆钢花管试验,1、2次注浆时间间隔为7.5 h,注浆孔设置在桩顶以下2.5~4.0 m之间(滑面为3.0 m)。如图8所示,二次劈裂压力在劈裂开始后30 s内达到5.8 MPa,随后压力迅速下降至0~2 MPa,表明一次注浆体被劈裂成功。此次试验劈裂时间持续13 min,进浆超过12 kN。

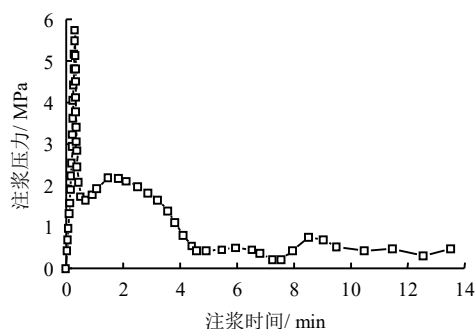


图8 第3组试验二次劈裂注浆压力曲线
Fig.8 Splitting grouting pressure curve in second test

在试验过程中也发现了需要改进的地方,第1次注浆体被劈裂成功后,之后的注浆压力没有达到约5 MPa,这可能是与下部注浆体劈裂破碎后,形成了压力释放口和注浆通道,同时也反映该试验方法的注浆效果和扩散范围明显,劈裂浆液从加荷板底部及斜坡面下部同时冒出(如图9所示),上部二次劈裂注浆的压力难以达到预期要求,上部劈裂效果不明显。但底部流出的浆液可以对钢花管锚固段端部起到锚固加固的作用,同时也加强了钢花管的抗滑性能,对钢花管的抗滑力起到了增强作用。



图9 浆液从加荷板底部及斜坡面下部同时冒出
Fig.9 Slurry flow out from the bottom plate and slope bottom

试验结束后将模型槽中填土挖除,发现浆液主

要分布在滑面下部,这也与以上分析相符,在注浆压力作用下,浆液将土体劈裂,在桩体下部形成“树根状”水泥柱,局部厚度达10 cm,如图10所示。



图10 二次劈裂浆液在桩体下部形成“树根状”水泥柱
Fig.10 Split slurry to form a "root" in the cement column pile bottom

4.2 滑坡推力特征分析

将3组试验监测的加载板位移与滑坡推力变化情况进行比较。

第1组试验为无钢花管试验,土体上部施加推力,直至水平推力基本保持不变,而加载板位移持续增大,在进行到第20次加载后,土体进入塑性状态,停止试验,此时水平推力达到729 kN(如图11所示)。此推力即认为是无钢花管状态下试验边坡土体达到塑性破坏所需要的滑坡推力。

第2组试验为单桩一次注浆钢花管试验,该组试验共进行了20次加载,在土体进入塑性状态后,水平滑坡推力为798 kN。与第1组试验相比较,水平滑坡推力增加了69 kN,也就是说,单根一次注浆钢花管提供了69 kN的水平抗滑力。

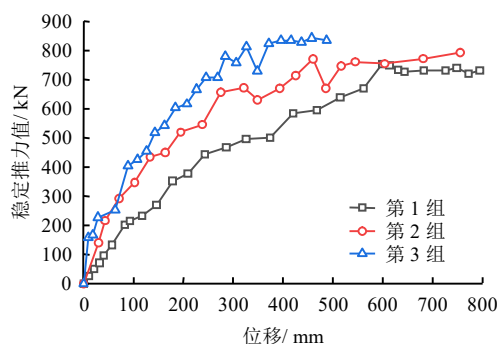


图11 3组试验千斤顶推力与位移关系图
Fig.11 Relationships between thrust force and displacement test in all test

第3组试验为单桩多次分段控制注浆钢花管试验,该组试验共进行了21次加载,在土体进入塑性状态后,水平滑坡推力为833 kN。与第1组试验相

比较,水平滑坡推力增加了 104 kN,可以认为,单根多次分段控制注浆钢花管提供了 104 kN 的水平抗滑力。与第 2 组试验相比较,水平滑坡推力增加了 35 kN,可以认为,二次劈裂注浆提高了注浆钢花管的抗滑力。在本次试验条件下,多次分段控制注浆钢花管较一次注浆钢花管提高了 35 kN 的水平抗滑力。

由以上水平滑坡推力分析和比较可知,该试验条件下,在土体中设置注浆钢花管后,多次分段控制注浆钢花管比一次注浆钢花管抗滑能力提高 35 kN,其水平承载力相比一次注浆钢花管提高约 50.72%。可见,二次劈裂注浆能明显改善坡体及钢花管的受力性能,显著提高边坡水平抗滑力,较一次注浆桩而言抗滑性能更优。

4.3 土压力分析

本次试验采用位移控制加载的方式,试验在土体进入塑性临界状态后停止。将进入塑性状态时的土压力值称为临界土压力值。

通过埋置在试验模型槽内的土压力盒,可以测得土体中土压力的分布。在第 1 组试验中,在距离加载板分别为 1、2、3 m 的地方设置土压力盒,每一排土压力盒埋深分别为 1.0、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、5.0 m。在第 2、3 组试验中,由于在距离加载板 1 m 处设置了钢花管,因此在钢花管前、后两侧距钢花管 25 cm 处埋设土压力盒,同时在距离加载板 2、3 m 处也埋设了土压力盒,埋设位置和第 1 组试验相同。

图 12~14 给出了各组试验临界土压力分布图。可以看出,位移控制加载条件下,滑面以上(−3 m 以上)土压力分布基本呈现三角梯形分布,3 组试验的土压力值随着深度变化均有一个拐点值,其最大值都发生在埋深约 2~3 m 处附近。在拐点后(埋深约为 3 m 以下),土压力随深度增加而逐渐减小,并且在 5 m 处达到最小值。

图 12 所示的是第 1 组试验加载到第 20 次的临界状态土压力分布图。此时加载板最大位移是 726.3 mm,最大土压力值为 320.1 kPa;图 13 所示的是第 2 组试验加载到第 20 次的临界状态土压力分布图,加载板最大位移是 752.7 mm,钢花管顶最大位移为 716.5 mm,桩前最大土压力值为 584.1 kPa;第 1 组和第 2 组试验相对比,在距离加载板 1 m 处,设置钢花管后,钢花管前、后土压力值明显提高,从 320.1 kPa 提高至 584.1 kPa;在距离加载板 2、3 m 处,土压力变化也很小。这说明设置钢花管后,随着推力的增大,钢花管有效承担了部分滑坡推力。

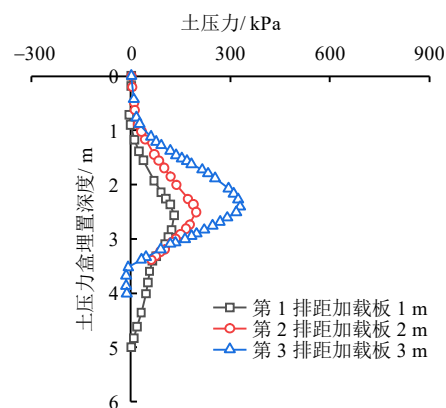


图 12 第 1 组试验塑性临界状态土压力分布
Fig.12 Plastic critical state soil pressure distribution in the first test

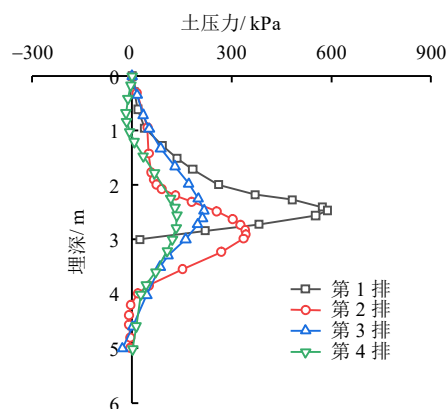


图 13 第 2 组试验塑性临界状态土压力分布
Fig.13 Plastic critical state soil pressure distribution in the second test

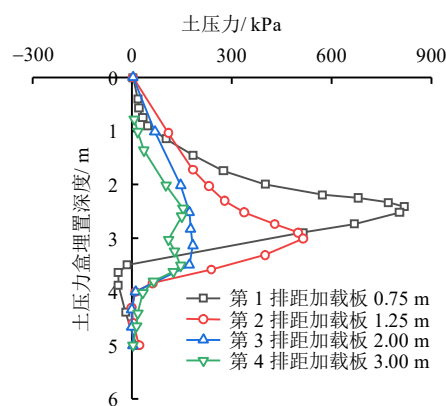


图 14 第 3 组试验塑性临界状态土压力分布
Fig.14 Plastic critical state soil pressure distribution in the third test

图 14 所示的是第 3 组试验加载到第 21 次的临界状态土压力分布图。加载板最大位移是 413.6 mm,钢花管顶最大位移为 373.7 mm,桩前最大土压力值为 818.5 kPa。第 2 组与第 3 组试验相对比,在钢花管前后土压力值增大较明显,钢花管前土压力值增

大 234.4 kPa, 钢花管后土压力值增大 176.0 kPa, 同样在距离加载板 2、3 m 处土压力值变化很小。这说明在钢花管采用多次分段控制注浆之后, 钢花管处抗滑能力进一步提高, 而钢花管前土压力值增幅较大, 说明钢花管承担了更多的推力。

4.4 钢花管弯矩分析

4.4.1 桩身弯矩计算

本次试验通过在桩体模型的两侧设置的钢筋计, 在试验过程中采集到了桩体受力时的应力变化值, 可通过应力值反推出桩身弯矩值, 从而更好地了解桩体的受力特性。

本试验钢花管为 $\Phi 89 \times 5$ mm, 钻孔直径为 130 mm。注浆材料采用 P.O 42.5 级水泥配制的纯水泥浆, 水泥强度等级为 42.5 MPa。

根据《混凝土结构设计规范》^[24] (GB50010—2010) 附录 E.0.4 圆形截面混凝土受弯承载力公式:

$$N \leq \alpha \alpha_1 f_c A \left(1 - \frac{\sin \pi 2\alpha}{2\pi\alpha} \right) + (\alpha - \alpha_1) f_y A_s \quad (1)$$

$$Ne_i \leq \frac{2}{3} \alpha_1 f_c A r \frac{\sin^3 \pi \alpha}{\pi} + f_y A_s r_s \frac{\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha_1}{\pi} \quad (2)$$

$$\alpha_1 = 1.25 - 2\alpha \quad (3)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (4)$$

$$Q = Q_c + Q_s = \frac{\pi d^2}{4} f_t + \frac{\pi (d_1^2 - d_2^2)}{4} f_v \quad (5)$$

式中: A 为圆形截面面积; A_s 为全部纵向普通钢筋的截面面积; f_c 为浆体弯曲抗压强度设计值, 取 19.1 MPa; r 为圆形截面半径, 取 65 mm; r_s 为钢管截面重心所在圆周半径; e_0 为轴向压力对截面重心的偏心距; e_a 为附加偏心距; α 为受压区截面面积的在圆心角 (rad) 与 2π 的比值; α_1 为受拉钢管截面面积的与全部钢管面积的比值; N 为钢管轴向力设计值; f_y 为钢管抗拉强度设计值; e_i 为初始偏心距; Q 为受剪承载力; Q_c 为浆体的剪力值; Q_s 为钢管的剪力值; f_t 为浆体抗剪强度设计值; f_v 为钢管抗剪强度设计值; d 为钻孔直径, 130 mm; d_1 为钢管外径, 89 mm; d_2 为钢管内径, 79 mm。

解式 (1) 得 $\alpha = 0.3657$, $\alpha_1 = 0.5186$, 将其代入式 (2)、(3), 根据《混凝土结构设计规范》附录 E0.5 规定, 在该计算中, 式 (2) 取等号, 并由 M_u 代替 Ne_i , 得到钢花管的受弯承载力 $M_u = 24.30 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 受剪承载力 $Q = 260.07 \text{ kN}$ 。

4.4.2 弯矩分析

本试验在第 2 组和第 3 组试验中使用了钢花管注浆技术。通过使用以上计算方法, 反算推出了钢

花管桩体弯矩, 如图 15、16 所示。从图中可以看出, 两组试验中弯矩分布相似, 基本呈 S 型, 滑面上部靠近加荷板一侧受压, 滑面下部靠近加荷板一侧受拉。滑面以上最大弯矩分布在距顶部 2.0~2.5 m 处; 滑面以下最大弯矩分布在距顶部约 4.0 m 处。

第 2 组试验钢花管在第 7 次加载 (加载位移为 197.9 mm, 钢花管顶位移为 168.2 mm) 时弯矩达到极限弯矩值, 此时钢花管受弯破坏; 第 3 组试验钢花管在第 8 次加载 (加载位移为 144.2 mm, 钢花管顶位移为 115.3 mm) 后应变计损坏, 此时钢花管桩身最大弯矩值发生在距顶部 4 m 位置, 其值约 13.3 kN·m。

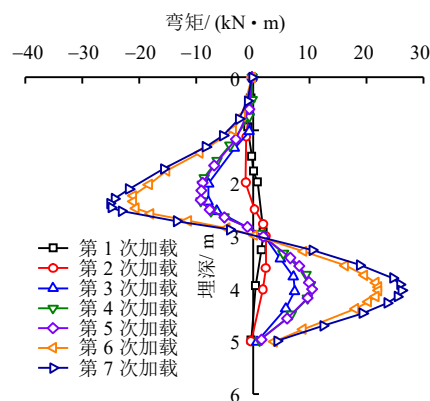


图 15 第 2 组试验钢花管弯矩图
Fig.15 Steel-tube bending in the second test

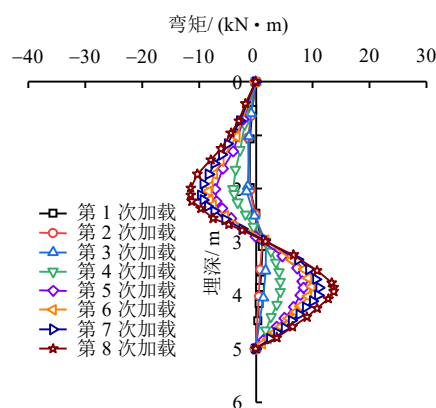


图 16 第 3 组试验钢花管弯矩图
Fig.16 Steel-tube bending in the third test

4.5 钢花管破坏模式分析

试验结果表明, 一次注浆与多次分段控制注浆钢花管桩在水平推力作用下均为受弯破坏, 钢花管表现为只弯不断, 即在滑面附近表现为弯曲。单桩一次注浆钢花管 (第 2 组试验), 最大负弯矩 (加载侧受压) 出现在桩顶以下 2.5 m 处; 正弯矩 (加载侧受拉) 出现在桩顶以下 4.0 m 处, 负弯矩值大于

正弯矩值 (见图 17)。单桩多次分段控制注浆钢花管 (第 3 组试验), 最大负弯矩出现在桩顶以下 2.0 m 处, 最大正弯矩出现在桩顶以下 4.0 m, 正弯矩值大于负弯矩值 (见图 18)。

在试验完成后, 对模型进行了剖面开挖, 得出钢花管于滑面附近发生受弯破坏。



图 17 第 2 组试验钢花管破坏现场照片

Fig.17 Steel-tube damage diagram in the second test



图 18 第 3 组试验钢花管破坏现场照片

Fig.18 Steel-tube damage diagram in the third test

5 结 论

(1) 本文研究了一种新型的钢花管多次分段控制注浆的方法, 通过多次分段控制注浆, 钢花管桩与周围土体结合形成了“树根桩”抗滑复合体, 可以有效地提高土体的抗滑力和支挡作用。

(2) 在大比例原型试验槽内开展滑坡模拟试验, 单桩注浆试验的水平位移较无桩空推试验的位移有所减少, 钢花管前的土压力值明显提高, 而钢花管后土压力值基本不变, 说明钢花管承担了部分滑坡推力, 使得土体的抗滑能力得到了明显的提高。

(3) 在一次注浆和多次分段控制注浆的试验中, 一次注浆钢花管提供了 69 kN 的水平抗滑力, 多次分段控制注浆钢花管提供了 104 kN 的水平抗滑力。抗滑力分别提高了 9.5% 和 14.3%; 多次分段控制注浆钢花管较一次注浆钢花管提高了约 35 kN 的水平

抗滑力, 说明多次分段控制注浆能明显改善坡体及钢花管的受力性能, 显著提高边坡水平抗滑力。

(4) 在注浆钢花管的试验中, 在滑面附近的钢花管由于受到弯距大的影响, 发生了受弯破坏。产生了桩体的倾斜, 建议在设计中加强滑面附近的桩体配筋设计, 提高滑面附近的抗弯破坏能力, 以达到更好的抗滑效果。

参 考 文 献

- [1] RICHARD J F, CATALINA O P, MICHELE C. Compaction-grouted micropiles at the Northwestern University NGES[C]//Benost Jean ed. National Geotechnical Experimental Sites. New York: Geotechnical Special Publication, ASCE, 2000: 235—249.
- [2] AWAD M D R. Lateral load tests on mini-piles[J]. *Is-lamic University Journal*, 1999, 7(1): 15—33.
- [3] 孙书伟, 陈冲, 丁辉, 等. 微型桩群加固土坡稳定性分析[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(12): 2306—2314.
SUN Shu-wei, CHEN Chong, DING Hui, et al. Stability analysis of earth slopes reinforced with micro piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(12): 2306—2314.
- [4] 龚健, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 微型桩原型水平荷载试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004(20): 3541—3546.
GONG Jian, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Prototype testing study on micro piles under lateral loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(20): 3541—3546.
- [5] 闫金凯, 殷跃平, 门玉明, 等. 滑坡微型桩群桩加固工程模型试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(4): 120—128.
YAN Jin-kai, YIN Yue-ping, MEN Yu-ming, et al. Model test study of landslide reinforcement with micro pile groups[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(4): 120—128.
- [6] 闫金凯, 门玉明. 基于模型试验的滑坡防治微型桩设计方法[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(3): 355—361.
YAN Jin-kai, MEN Yu-ming. Model tests based design method of micro piles for landslide reinforcement[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(3): 355—361.
- [7] 陈强, 陈炜韬, 刘世东, 等. 注浆钢管微型桩加固滑坡的试验研究[J]. *西南交通大学学报*, 2011, 46(5): 758—763.
CHEN Qiang, CHEN Wei-tao, LIU Shi-dong, et al. Model test on application of grouting steel-tube micro piles to landslide reinforcement[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2011, 46(5): 758—763.
- [8] 谭文勇. 钢花管分段注浆工艺试验与检测[J]. *施工技术*, 2016, 45(6): 122—128.

- TAN Wen-yong. Tests and detection of multi-section grouting technique of steel grouting pipes[J]. **Construction Technology**, 2016, 45(6): 122—128.
- [9] 朱宝龙, 胡厚田, 张玉芳, 等. 钢管压力注浆型抗滑挡墙在京珠高速公路K108滑坡治理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 399—406.
- ZHU Bao-long, HU Hou-tian, ZHANG Yu-fang, et al. Application of steel-tube bored grouting anti-sliding retaining wall to treatment of landslide K108 in Beijing-Zhuhai expressway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(2): 399—406.
- [10] 朱宝龙, 杨明, 胡厚田, 等. 类土质边坡锚固特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1923—1927.
- ZHU Bao-long, YANG Ming, HU Hou-tian, et al. Experimental research on behaviors of anchor in similar soil slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1923—1927.
- [11] 王华俊, 徐洪科, 董理金. 钢花管注浆加固在高速公路边坡挡墙病害防治中的应用研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2016, 27(3): 92—95.
- WANG Hua-jun, XU Hong-ke, DONG Li-jin. Application of grouted steel floral tube in preventing diseases of slop retaining wall in highway[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 2016, 27(3): 92—95.
- [12] 闫金凯, 殷跃平, 门玉明. 微型桩单桩加固滑坡体的模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 669—674.
- YAN Jin-kai, YIN Yue-ping, MEN Yu-ming. Model test study on landslide reinforcement with single micro pile[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2009, 17(5): 669—674.
- [13] 何永华, 李治国. 钢花管劈裂注浆施工技术[J]. 施工技术, 2008(增刊 1): 254—256.
- HE Yong-hua, LI Zhi-guo. Construction technology of split grouting for steel flower pipe[J]. **Construction Technology**, 2008(Suppl.1): 254—256.
- [14] 成尚锋, 张海燕. 钢花管注浆技术在填方路基病害处治中的应用[J]. 中外公路, 2007(4): 36—39.
- CHENG Shang-feng, ZHANG Hai-yan. Application of pipe grouting technology in treatment of filling subgrade diseases[J]. **Journal of China and Foreign Highway**, 2007(4): 36—39.
- [15] 孙祺华. 钢花管微型桩在路基边坡加固防护中的应用[J]. 公路交通技术, 2013(5): 17—20.
- SUN Qi-hua. Application of steel floral tube micro piles in reinforcement and protection of roadbed slopes[J]. **Technology of Highway and Transport**, 2013(5): 17—20.
- [16] 王春生. 高等级公路建设高塹坡病害防治[J]. 公路交通科技, 2005(增刊 1): 69—71.
- WANG Chun-sheng. Prevention of high cutting slope failures of high-grade highway[J]. **Technology of Highway and Transport**, 2005(Suppl.1): 69—71.
- [17] 陈质彬. 惠澳公路高边坡监测方法探讨[J]. 广东公路交通, 2005(3): 48—50, 53.
- CHEN Zhi-bing. Discussion on high slope monitoring method of Hui-Ao highway[J]. **Highway and Transport of Guangdong**, 2005(3): 48—50, 53.
- [18] 谢晓华, 刘吉福, 庞奇思. 微型桩在某滑坡处治工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2001(2): 110—111.
- XIE Xiao-hua, LIU Ji-fu, PANG Qi-si. Application of micropiling in a landslide treatment[J]. **West-China Exploration Engineering**, 2001(2): 110—111.
- [19] 张志强, 黄兴. 广清高速公路北段 K6+600~+770 煤层高边坡防护设计与施工[J]. 广东公路交通, 2004(2): 49—51.
- ZHANG Zhi-qiang, HUANG Xing. Design and construction of K6+600-+770 coal seam high slope protection in the north section of Guangqing expressway[J]. **Highway and Transport of Guangdong**, 2004(2): 49—51.
- [20] 和昆, 蒋楚生. 云南元磨高速公路路堑高边坡及滑坡整治工程[J]. 路基工程, 2004(1): 49—51.
- HE Kun, JIANG Chu-sheng. High slope and landslide regulation project of Yuanmo expressway in Yunnan province[J]. **Subgrade Engineering**, 2004(1): 49—51.
- [21] BRUCE D A, JURAN I, DIMILLIO A F. High capacity grouted micropiles: the state of practice in the United States[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 851—854.
- [22] 魏少伟, 隋颜阳, 杨建民. 圆形与矩形截面抗滑桩抗滑性能模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 951—961.
- WEI Shao-wei, SUI Yan-yang, YANG Jian-min. Model tests on anti-sliding mechanism of circular and rectangular cross section anti-sliding piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 951—961.
- [23] 黄明华, 赵明华, 陈昌富. 锚固长度对锚杆受力影响分析及其临界值计算[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4033—4041, 4062.
- HUANG Ming-hua, ZHAO Ming-hua, CHEN Chang-fu. Influence of anchorage length on stress in bolt and its critical value calculation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(11): 4033—4041, 4062.
- [24] 中国建筑科学研究院. GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- China Academy of Building Research. GB50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing. China Architecture & Building Press, 2011.