

# 小直径钢管灌注排桩在边坡抢险工程应用探讨

王延宁<sup>1,2</sup>, 王丰<sup>\*3</sup>, 张祥恒<sup>1,2</sup>

(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台 264004; 2. 山东省地矿局钻探工程技术研究中心, 山东烟台 264004;  
3. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川成都 610041)

**摘要:**我国是一个多山的国家,地形复杂,地质条件多样,每年汛期地质灾害发生频繁,易诱发滑坡、崩塌、泥石流等灾害,对国民经济建设、人员安全构成了巨大威胁。由于灾害发生正值主汛期,该类边坡的处治均为抢险工程,工期要求紧。小直径钢管灌注排桩具有施工速度快、开挖量小、对边坡扰动小的优点,特别适合对工期要求紧的抢险工程。本文以西南某公路挡墙病害抢险处治工程为例,分析了边坡挡墙变形机制,通过采用小直径钢管灌注排桩的处治方案,提高了挡墙的抗倾覆能力,有效解决了挡墙基础承载力不足及大规模开挖基坑引发边坡二次滑塌等次生灾害问题,可为类似工程提供参考和借鉴。

**关键词:**边坡工程;抢险工程;小直径钢管灌注排桩;变形机制;挡墙基础

中图分类号:P642; TU473 文献标识码:B 文章编号:2096-9686(2022)04-0152-06

## Application of small-diameter steel tube soldier piles in slope emergency works

WANG Yanning<sup>1,2</sup>, WANG Feng<sup>\*3</sup>, ZHANG Xiangheng<sup>1,2</sup>

(1.No.3 Exploring Institute of Geo-mineral Resources, Shandong Province, Yantai Shandong 264004, China;  
2.Drilling Engineering Technology Research Center of Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources,  
Yantai Shandong 264004, China;

3.Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd, Chengdu Sichuan 610059, China)

**Abstract:** China is a mountainous country with complex and diverse terrain and diverse geological conditions. Geological disasters occur frequently during the flood season each year, which is prone to induce landslides, collapses and mudslides, etc., posing a great threat to national economic construction and personnel safety. Since the disaster occurs during the main flood season, the treatment of the slopes in such conditions is all emergency projects, and the construction period is tight. The small-diameter steel tube soldier piles, due to its characteristics of fast construction speed, small excavation amount and small disturbance to slopes, is applicable to emergency works with tight deadlines. Taking a specific project as an example, this paper analyzes the deformation mechanism of the slope retaining wall, and describes the the treatment plan with small-diameter steel tube soldier piles. The treatment increased anti-overturning ability of the retaining wall, and effectively solved the problems of insufficient bearing capacity of the retaining wall foundation and the secondary disasters such as slope collapse caused by large-scale excavation of foundation., It can provide reference for similar projects.

**Key words:** slope engineering; emergency works; small-diameter steel tubular row piles; deformation mechanism; retaining wall foundation

收稿日期:2021-12-13; 修回日期:2022-05-06 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.04.023

第一作者:王延宁,男,汉族,1987年生,工程师,硕士,主要从事地质灾害治理及岩土工程研究工作,山东省烟台市芝罘区机场路271号,371908633@qq.com。

通信作者:王丰,男,汉族,1988年生,工程师,硕士,主要从事地质灾害治理及公路路基、边坡病害防治设计方面的研究工作,四川省成都市武侯区武侯祠横街1号,fengbaker@qq.com。

引用格式:王延宁,王丰,张祥恒.小直径钢管灌注排桩在边坡抢险工程应用探讨[J].钻探工程,2022,49(4):152-157.

WANG Yanning, WANG Feng, ZHANG Xiangheng. Application of small-diameter steel tube soldier piles in slope emergency works [J]. Drilling Engineering, 2022,49(4):152-157.

## 0 引言

我国是一个多山的国家,山地、高原和丘陵约占陆地面积的67%,地形复杂,地质条件多样,每年6~9月为主汛期,期间雨量充沛,暴雨频发。在此极端气候条件下,地质灾害发生频繁,易诱发滑坡、崩塌、泥石流等灾害,其中滑坡灾害发生频率高、范围广,对国民经济建设、人员安全构成了巨大威胁<sup>[1]</sup>。由于灾害发生正值主汛期,该类边坡的处治均为抢险工程,工期紧,任务重。

边坡抢险工程治理中,常用的治理方法主要为坡底被动区临时压重、坡顶主动区削坡减载、坡体快速注浆固结、快速锚杆(索)或钢管桩临时支护等措施<sup>[2-3]</sup>。20世纪50年代意大利人Lizzi首次将钢管微型桩应用于工程项目中<sup>[3]</sup>。近年来,国内对微型桩的应用研究也取得了较好的成果。如李舟等<sup>[4]</sup>建立了钢管桩加固边坡的三维力学模型并阐述了有限元解法,辛建平<sup>[5]</sup>通过大型模拟试验研究了土质边坡中小直径灌注抗滑桩的破坏机制及边坡的破坏模式,梁炯等<sup>[6]</sup>、向波等<sup>[7]</sup>通过模型试验对微型桩的受力变形与破坏特性进行了研究。

随着施工工艺及设备的发展,小直径钢管灌注桩凭借其施工迅速、场地适应性好、桩位布置灵活、对边坡扰动小、支挡能力强等优点,在边坡应急抢险工程中得到了广泛的应用<sup>[8-10]</sup>。小直径钢管灌注桩是在人工预成孔中插入小直径空心钢管,再由钢管底高压灌注水泥砂浆,形成钢管+水泥砂浆土复合体<sup>[7,11]</sup>,在应用于边坡处治中多以排桩的形式出现,桩顶采用横、纵联系梁连接,组合成空间整体框架。小直径钢管灌注排桩不仅能够承受水平方向的推力,更具有较强的竖向承载力。在陡坡路堤挡墙的修筑过程中,为控制挡墙基础的开挖,降低挡墙高度,已有相关学者采用小直径钢管灌注排桩加固挡墙地基,并取得了较好的效果<sup>[12-15]</sup>。作为一种新型支挡结构,小直径钢管灌注排桩在应急抢险工程中具有广阔的应用前景。

本文依托我国西南部某公路挡墙病害抢险处治工程,分析了挡墙的变形机制,通过方案比选和理论计算,采用了以小直径钢管灌注排桩为主的综合处治方案,取得较好的工后效果,可为类似工程提供参考和借鉴。

## 1 工程概况

该公路挡墙病害抢险治理区域西北侧边界处建有1排挡墙,挡墙总长度约30 m,挡墙修筑于斜坡上,地面线以上高约2~3 m,采用浆砌块石修筑,墙顶设高约3 m的围墙,斜坡坡脚为居民房。

2020年5月,受强降雨影响,原挡墙向临空方向倾倒,出现整体垮塌,墙后土体及埋入填土中的污水处理设备也向坡外发生倾倒(见图1)。由于正值主汛期,为防止墙后边坡在强降雨作用下再次发生滑塌,首先对垮塌后的挡墙及墙后滑塌土体进行了清方,并在原挡墙垮塌处重新修筑衡重式挡墙(见图2),修筑完成长度约11.4 m时,发现地面线以下3~4 m仍以可塑一软塑粘土为主,若按原方案继续修筑挡墙,挡墙有再次发生局部或整体向临空方向倾倒的可能。

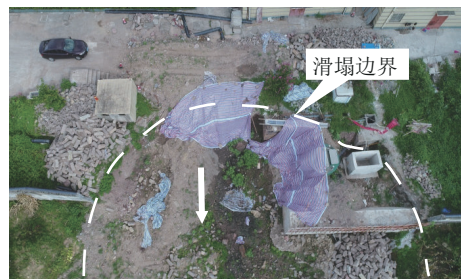


图1 西北侧挡墙垮塌区域无人机航拍图

Fig.1 Aerial photo by UAV of the collapse area of the northwest retaining wall



图2 新建长度11.4 m的衡重式挡墙

Fig.2 Newly constructed counterweight retaining wall with a length of 11.4m

## 2 挡墙变形机制

公路边坡抢险治理区域西北侧边界处挡墙在修筑前,此处为一缓倾斜坡地形,坡面倾角 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ,斜坡发育一冲沟,原挡墙跨冲沟而建。原挡墙垮塌后,在其垮塌处重新修筑衡重式挡墙,修筑完成长度

约11.4 m时,根据施工过程中挡墙基坑开挖情况,现地面线以下3~4 m仍以粘土为主,且局部粘土呈软塑状。为确保抢险工程挡墙施工质量和安全,安排地勘单位对场地进行了勘察。

根据地勘资料,拟建挡墙位置地面线以下覆盖层厚度最大达5.9 m,覆盖层上部为第四系人工填土及滑塌后的碎块石土,下部多以厚层粘土为主,其下基岩为侏罗系中统沙溪庙组粉砂质泥岩。

原挡墙基础位于粘土层中,受雨季强降雨影响,雨水下渗后从两侧汇集到沟内,加之挡墙墙后填土内污水处理设备罐体常年也有渗漏,墙后局部土体已饱和,土体容重增加,土压力也随之增大,同时水头较高,静水压力较大,直接导致作用于挡墙上的水平推力过大。其次,渗水顺墙背在墙底聚集,软化了挡墙的地基,降低了地基土的承载力和摩擦系数,导致墙体向临空方向倾倒,整体垮塌。

受原始地形影响,现地面线以下岩土界线两侧高、中间低,且中间覆盖层较厚。新建衡重式挡墙基础并未完全置于基岩上,且根据施工过程中挡墙基坑开挖情况及地勘资料,由于原挡墙墙底常年汇水,其下土体局部已呈软塑状,不能满足衡重式挡墙地基承载力要求,若在此基础上直接修筑挡墙,在今后降雨作用下,挡墙有发生局部或整体向临空方向倾倒的可能,将会对服务区及坡脚居民房屋、人员的安全构成重大威胁。

本研究区域边坡已发生滑塌变形,需进一步分析现有边坡的整体稳定性。本次仅对不利工况(暴雨工况)下的边坡稳定性进行分析,由于边坡滑体以填筑土及下伏粘土组成,取潜在滑体综合饱和重度为 $21.5 \text{ kN/m}^3$ ,通过对滑塌前边坡进行滑面力学参数的反算,进而对滑塌后边坡的稳定性进行分析计算,计算结果见表1。

由表1可知,滑塌后的边坡在不利工况(暴雨工

表1 边坡稳定性计算

Table 1 Calculation of slope stability

计算剖面	反算稳定系数	计算稳定系数	反算抗剪强度参数
滑塌前边坡 (暴雨工况)	0.98		$c=14.5 \text{ kPa}, \varphi=8.4^\circ$
滑塌后边坡 (暴雨工况)		1.092	$c=14.5 \text{ kPa}, \varphi=8.4^\circ$

况)下稳定系数为1.092,无法满足规范要求,有进一步下滑的风险,且正值主汛期,为避免再次发生滑塌灾害,需立即对边坡进行防护。

### 3 处治方案研究

通过对场地所处环境特征、地质结构条件及挡墙变形机制的分析,已建挡墙段靠近中部位位置局部存在地基承载力不足的问题,需要进行加固;未建挡墙段已不能沿用现有挡墙尺寸,需进一步论证。

#### 3.1 已建挡墙段加固措施方案

方案一:对已建挡墙段采用框架梁+压力注浆锚杆的方式进行加固,如图3所示。框架间距为 $2.5 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ ,框架横竖梁截面尺寸为 $30 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ ,采用C25钢筋砼进行浇注。锚杆采用 $\text{O}32 \text{ mm}$ 普通HRB400螺纹钢。锚杆倾角为 $25^\circ$ ,长度为 $22 \sim 27 \text{ m}$ 。

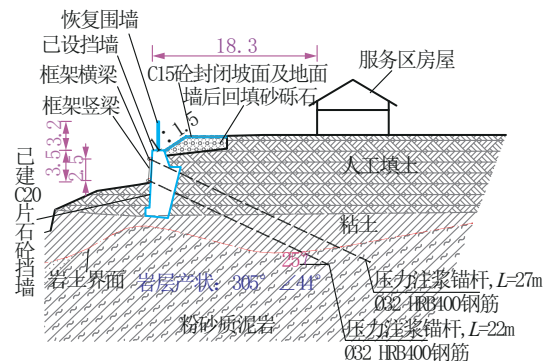


图3 框架梁+压力注浆锚杆加固方案

Fig.3 Reinforcement scheme of the frame beam and pressure grouting anchors

方案二:在已建挡墙段墙前采用钢管灌注桩+联系梁的方式进行加固,如图4所示。共设2排钢管桩,采用 $\text{O}140 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 无缝镀锌防腐钢管,桩长10 m,钢管桩沿挡墙纵向间距1.0 m,排距1.0 m,交错梅花形布置。桩顶设C25钢筋砼联系梁以增强钢管桩整体性,联系梁宽1.5 m,高2.0 m。

通过方案比选,方案一中锚杆以粉砂质泥岩作为锚固段,锚杆长度最长需达到27 m,施工工艺较复杂,施工质量难以达到设计要求。方案二中在已建挡墙外设钢管桩进行加固,可有效抵抗挡墙基础由于局部地基承载力不足,在受到水平推力所产生的外倾变形,可保证挡墙的自身稳定。其次钢管桩施工工艺较简单,施工速度较快,施工对原斜坡扰动



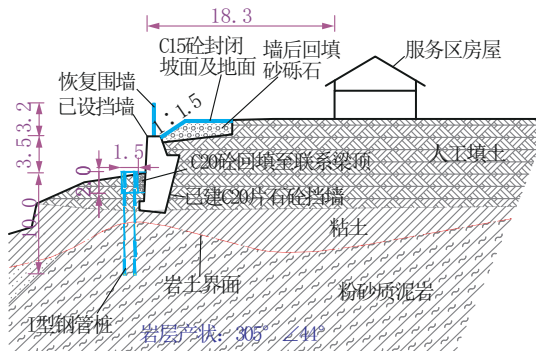


图 4 钢管桩+联系梁加固方案

Fig.4 Reinforcement scheme of steel pipe piles and connection beams

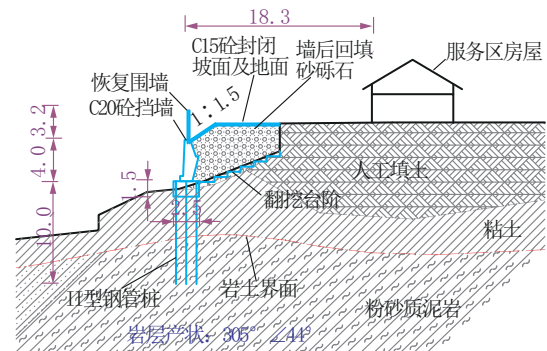


图 6 钢管桩+联系梁作为基础,联系梁上再修筑挡墙方案

Fig.6 Steel pipe piles+connecting beams are used as the foundation, and the retaining wall is built on the connecting beams

较小,安全性较高。

### 3.2 未建挡墙段支挡措施方案

方案一:直接采用高挡墙方案。根据地勘资料,现地面线下覆盖层较厚,最厚可达 5.9 m,且由于常年有水下渗,粘土层局部已呈软塑状,挡墙基础需置于基岩稳定持力层上,挡墙采用 C20 砼浇筑,最大高为 10 m,如图 5 所示。

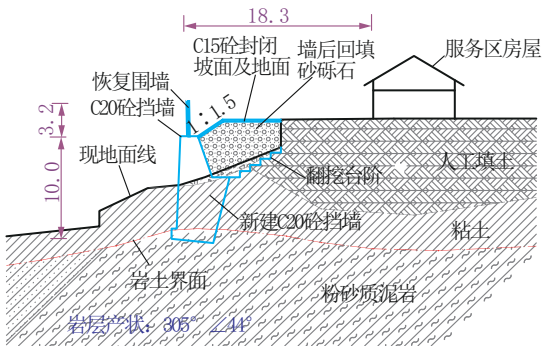


图 5 高挡墙方案

Fig.5 High retaining wall scheme

方案二:采用钢管灌注桩+联系梁作为基础,联系梁上再修筑挡墙。共设 3 排钢管桩,采用  $\text{O}140\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  无缝镀锌防腐钢管,桩长 8~10 m,钢管桩沿挡墙纵向间距 1.0 m,排距 1.0 m,交错梅花形布置。桩顶设 C25 钢筋砼联系梁以增强钢管桩整体性,联系梁宽 2.5 m、高度 1.5 m。联系梁顶修筑衡重式挡墙,挡墙采用 C20 砼浇筑,如图 6 所示。

通过方案比选,方案一中直接修筑挡墙虽然施工工艺简单,但挡墙基础埋置过深,挡墙高度最大达 10 m 以上,圻工量大,且基坑开挖有可能造成斜坡土体再次发生滑塌,引发次生灾害。方案二中以钢

管桩+联系梁作为基础,联系梁上再修筑挡墙,避免了地基土层过厚及地基承载力不足的问题,可使挡墙获得足够的稳定性和承载力,其次钢管桩施工对边坡扰动较小,安全性较高。

小直径钢管灌注排桩主要作用机理是通过高压注浆填充挤密下部岩土体,形成树枝网状结构加固复合体,能有效提高地基基础的承载力;其次通过桩顶钢筋混凝土联系梁将排桩组合,形成了桩-岩土体复合结构,克服了小直径钢管桩单桩长细比大导致柔性较大的缺点,将不稳定岩土体内部应力传递到下部稳定岩土体中,降低坡体内部应力集中,能有效起到提高基础承载力并兼顾水平推力的作用。

由于原挡墙垮塌时正值主汛期,为防止墙后边坡在降雨等不利因素下再次发生滑塌,需尽快将挡墙修筑完成,通过比选,对已建挡墙段采用钢管桩+联系梁方案进行加固,对未建挡墙段采用钢管桩+联系梁作为基础,联系梁上再修筑挡墙的方案。该方案施工速度快,开挖量小,对边坡扰动小,特别适合对工期要求紧的抢险工程。

### 4 钢管桩桩基承载力计算

由于原始地基承载力不能满足要求,采用小直径钢管灌注排桩+联系梁作为挡墙基础,实际是地基加固的一种方式,其主要是对挡墙提供竖向承载力,故需对钢管桩桩基承载力进行计算,以验证其是否满足挡墙地基承载力的要求。本次针对最不利工况下,进行钢管桩桩基承载力计算,选取计算断面如图 6 所示断面,即衡重式挡墙墙高为 4 m,钢管桩桩顶联系梁高 1.5 m,钢管桩长 10 m。

#### 4.1 考虑桩周及桩端岩土抗力所提供的单桩承载力

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008) 5.3.7<sup>[16]</sup>, 钢管桩单桩竖向极限承载力标准值的计算公式:

$$[Q_{uk}] = u \sum_{i=1}^m q_{sik} l_i + \lambda_p q_{pk} A_p \quad (1)$$

式中各参数的意义详见《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008) 5.3.7。

计算得出钢管桩单桩竖向极限承载力特征值  $R_a = 0.5 \times [Q_{uk}] = 243.66 \text{ kN}$ 。根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008) 5.2.5, 考虑承台效应的复合基桩竖向承载力特征值可按下式确定:

$$R = R_a + \eta_c f_{ak} A_c \quad (2)$$

最终得出考虑承台效应的复合基桩竖向承载力特征值  $R = 270.125 \text{ kN}$ 。

#### 4.2 考虑桩身材料强度确定的单桩承载力

根据《建筑地基处理规范》(JGJ 79-2012) 7.3.3<sup>[17]</sup>, 由桩身材料强度确定的单桩承载力计算公式为:

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (3)$$

通过计算得出由桩身材料强度确定的单桩承载力特征值  $R_a = 157.865 \text{ kN}$ 。

故钢管桩单桩竖向承载力由桩身材料强度控制, 其特征值为  $R_a = 157.865 \text{ kN}$ 。

根据理正软件 6.0 衡重式挡土墙模块的计算结果, 暴雨工况下挡墙墙趾处最大地基承载力为  $146.159 \text{ kPa}$ , 钢筋混凝土联系梁的重度取  $25 \text{ kN/m}^3$ , 则此时每延米联系梁上单根钢管桩承受竖向力:  $F = (146.159 \times 2.5 \times 1 + 25 \times 2.5 \times 1.5 \times 1) / 3 = 153.049 \text{ kN}$ , 小于上述所计算的单桩承载力特征值  $R_a$ , 故钢管桩承载力满足要求。

### 5 工程处治措施

根据方案比选及钢管桩桩基承载力的计算结果, 对该边坡进行了分段处治, 具体措施如下(参见图 7):

(1) 对已建挡墙段, 在距挡墙顶外侧  $1.7 \text{ m}$  处设置 I 型钢管排桩+联系梁进行加固。

(2) 对未建挡墙段, 设置 II 型钢管排桩+联系梁作为基础, 联系梁顶修筑衡重式挡墙, 根据覆盖层厚度, 挡墙分为 A 型挡墙(墙高为  $4 \text{ m}$ )及 B 型挡墙

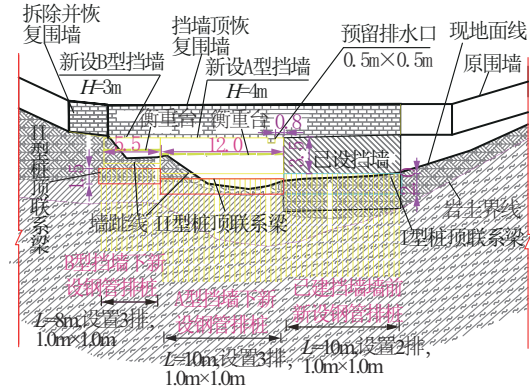


图7 工程处治措施立面图

Fig.7 Elevation of the treatment measures

(墙高为  $3 \text{ m}$ ), 挡墙基础与联系梁之间通过插筋增强联结。墙顶应与已建挡墙墙顶齐平等高, 且面坡应在一个平面内, 不得错开。A 型挡墙距离右侧边缘  $0.8 \text{ m}$  处预留排水口, 高  $0.5 \text{ m}$ , 宽  $0.5 \text{ m}$ , 以方便挡墙回填后坡面汇水的流出。

(3) 钢管桩注浆材料采用 M30 水泥砂浆, 采用二次灌浆施工工艺进行灌浆。

(4) 挡墙施工完成后, 墙背按设计坡比  $1:1.5$  进行回填, 回填至与邻近院坝地面线齐平等高。

(5) 在新建挡墙及已建挡墙顶部恢复围墙。

(6) 围墙内的斜坡及回填段地面采用 C15 砼进行封闭, 厚度  $20 \text{ cm}$ , 以作为护坡及地平表面。

小直径钢管灌注排桩作为挡墙的基础, 可有效解决挡墙地基承载力不足的问题; 墙前采用小直径钢管排桩进行加固, 增加了墙体的抗倾覆能力; 采用 C15 砼对墙背回填后的斜坡及回填段地面进行封闭, 可防止由于地表水及雨水下渗, 导致挡墙地基软化以及墙后土体容重增大, 产生较大的水平推力, 造成挡墙产生倾覆破坏。处治工程施工过程中及完成后未发现边坡有再次变形和滑塌的迹象, 取得了较好的工后效果。

### 6 结语

(1) 原挡墙所处边坡的地形条件及地质特征是诱发挡墙产生变形破坏的内因; 墙体自身排水不畅, 在强降雨作用下, 地表水下渗, 致使挡墙地基软化以及墙后土体容重增大, 产生较大的水平推力, 是导致墙体向临空方向倾倒、整体垮塌的主要原因。

(2) 通过比选, 对已建挡墙段和未建挡墙段分

别采用不同型式的钢管灌注排桩+联系梁方案进行加固和处治。

(3)由于原始地基承载力不能满足要求,采用小直径钢管排桩+联系梁对地基进行加固,对挡墙提供竖向承载力,通过不同的方法计算钢管桩的单桩承载力特征值,证明了其满足设计要求,方案可行。

(4)挡墙修筑完成后,采用C15砼对墙背回填后的斜坡及回填段地面进行封闭,可防止地表水及雨水下渗而造成墙体再次失稳。

(5)小直径钢管灌注排桩是将单根钢管灌注桩通过联系梁组合成空间整体框架,其具有施工速度快、开挖量小、对边坡扰动小的优点,特别适合对工期要求紧的抢险工程。在采用挡墙方案处治已发生滑塌的边坡时,采用小直径钢管灌注排桩的处治方式,可提高已建挡墙的抗倾覆能力;作为挡墙基础可有效解决大规模开挖基坑引发边坡二次滑塌等次生灾害问题。

#### 参考文献(References):

- [1] 王延宁,赵其华,韩刚.阶跃型位移特征滑坡的预测预报研究[J].人民黄河,2014,36(10):106-109.  
WANG Yanning, ZHAO Qihua, HAN Gang. Prediction study on landslides with step-style displacement characteristics[J]. Yellow River, 2014, 36(10): 106-109.
- [2] 陈仲超.对广东肇庆河岸滑坡应急治理工程的思考[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(4):89-94.  
CHEN Zhongchao. Thoughts about landslide geological disaster emergency management of river bank in Zhaoqing city, Guangdong[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(4): 89-94.
- [3] GB 50330—2013,建筑边坡工程技术规范[S].  
GB 50330—2013, Technical code for building slope engineering[S].
- [4] 李舟,姜暑芳,陈洋.钢管桩在滑坡治理工程中的应用[J].铁道建筑,2012,52(12):96-98.  
LI Zhou, JIANG Shufang, CHEN Yang. Application of steel pipe pile in landslide control engineering[J]. Railway Construction, 2012, 52(12): 96-98.
- [5] 辛建平,唐晓松,郑颖人,等.单排与三排微型抗滑桩大型模型试验研究[J].岩土力学,2015,36(4):1050-1056.  
XIN Jianping, TANG Xiaosong, ZHENG Yingren, et al. Large-scale model tests of single-row and triple-row anti-slide micropiles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 1050-1056.
- [6] 梁炯,门玉明,石胜伟.滑坡治理微型桩群配筋形式模型试验[J].地质灾害与环境,2013,24(1):74-79.  
LIANG Jiong, MEN Yuming, SHI Shengwei. A model experiment on the steel reinforcement of micro-pile groups in landslide control[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2013, 24(1): 74-79.
- [7] 向波,马建林,何云勇,等.小直径钢管排桩加固边坡的离心模型试验[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):2644-2652.  
XIANG Bo, MA Jianlin, HE Yunyong, et al. Centrifugal model test of slope reinforced by small-diameter steel pipe row piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 2644-2652.
- [8] 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 Baolong, HU Houtian, HANG Yufang, 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.
- [9] 姜春林,吴顺川,吴承霞,等.复活古滑坡治理及微型抗滑桩承载机理[J].北京科技大学学报,2007,29(10):975-979.  
JIANG Chunlin, WU Shunchuan, WU Chengxia, et al. Reinforcement of a revivatory ancient landslide and mechanism of mini-type anti-sliding piles[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(10): 975-979.
- [10] 邓小鹏,张晓娟.微型抗滑桩在滑坡处治中的应用研究[J].公路,2016,61(9):140-142.  
DENG Xiaopeng, ZHANG Xiaojuan. Research on the application of mini anti-slide piles in landslide treatment[J]. Highway, 2016, 61(9): 140-142.
- [11] 孙毅,向波,杨晓松,等.小直径钢管排桩支护结构抗滑机理及工程应用[J].路基工程,2012(3):57-60.  
SUN Yi, XIANG Bo, YANG Xiaosong, et al. Anti-slide mechanism and engineering application of small diameter steel tubular row piles as supporting structure[J]. Subgrade Engineering, 2012(3): 57-60.
- [12] 孙剑,范民浩,李鑫.护坡桩+微型钢管桩复合土钉墙联合支护体系研究应用[J].钻探工程,2021,48(10):116-124.  
SUN Jian, FAN Minhao, LI Xin. Combined supporting system of the slope protection pile and the compound soil nail wall with micro steel pipe piles[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10): 116-124.
- [13] 文丽娜,赵阳,向波,等.小直径钢管排桩做桩基托梁基础方案探讨[J].西南公路,2016(3):124-127.  
WEN Lina, ZHAO Yang, XIANG Bo, et al. Discussion on the scheme of using small diameter steel pipe piles as pile foundation supporting beam foundation[J]. Southwest Highway, 2016(3): 124-127.
- [14] 汪剑辉,张胜民,任新建,等.钢管桩挡墙技术在快速加固塌方边坡中的应用[J].施工技术,2007(S1):26-28.  
WANG Jianhui, ZHANG Shengmin, REN Xinjian, et al. Application of steel tube pile wall technology in quickly reinforcing landslide slope[J]. Construction Technology, 2007(S1): 26-28.
- [15] 唐正辉,陈川.钢管桩在陡坡路堤挡墙中的应用[J].西部交通科技,2017(10):10-13.  
TANG Zhenghui, CHEN Chuan. Application of steel-pipe pile in steep-slope embankment retaining wall[J]. Western China Communication Science & Technology, 2017(10): 10-13.
- [16] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].  
JGJ 94—2008, Technical code for building pile foundations[S].
- [17] JGJ 79—2012,建筑地基处理技术规范[S].  
JGJ 79—2012, Technical code for ground treatment of buildings[S].

(编辑 李艺)