

文章编号: 1008 - 2786 - (2014) 1 - 74 - 07

用于狭陡沟谷泥石流防治的坝基钢管桩初探 ——以小岗剑沟泥石流治理工程为例

杨东旭^{1 3} 王伟国² 陈晓清^{1*} 游 勇¹ 李德基¹

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,四川 成都 610041;

2. 中国路桥工程有限责任公司,北京,100011; 3. 中国地质科学院探矿工艺研究所,四川 成都 611734)

摘 要: 以四川绵竹小岗剑泥石流应急治理工程 1# 拦砂坝的基础设计、施工工艺、泥石流过流运用为依据,探讨了狭陡沟谷重力式拦砂坝钢管桩基础的设计和施工技术。针对狭陡型泥石流沟道的特殊地形及其带来的设计施工方法、材料和设备运输受限的问题,分析了钢管桩基的适用性和有效性,通过结构组成、布置构造和分析方法的创新,探索了复合桩基的实施要点,提出了钢管桩基受力分析的“折算断面法”。1# 拦砂坝为重力式板基,下部碎石土持力层设钢管桩群,桩间土压力灌浆构成复合桩基,用于提高地基承载力并阻止坝下冲刷淘蚀。根据 2012 年汛期过流时坝下沟道剧烈冲刷引起的坝基淘刷与临空状况,进一步探讨了有关钢管桩基础设计优化等问题。

关键词: 狭陡型泥石流; 拦砂坝; 钢管桩; 复合桩基; 小岗剑泥石流

中图分类号: P642. 23

文献标志码: A

“5·12”汶川大地震之后,Ⅷ度以上高烈度影响区内的泥石流活动显著加强,比较相同量级雨强下其暴发次数、规模和频率均比震前大幅提高,对震区人民的生命财产安全构成重大威胁^[1-3]。为保障灾后重建工作的顺利实施,2008 至 2011 年,仅四川省规划的泥石流灾害治理点就达 800 处^[4],其中相当部分的泥石流特小流域为狭陡型沟道。本文所称狭陡型沟道是指以沟道狭、纵坡陡、两侧岸坡高、冲刷侵蚀发育、防治技术难度大为特征的一类特殊的泥石流沟道。

在对强震影响区汶川县—映秀—卧龙、都江堰市龙池—虹口、绵竹市清平、北川县苏保河流域、安县千佛山等典型区域的泥石流流域进行现场调查和

资料分析的基础上,将汶川地震区狭陡型沟道泥石流定义为:流域岭脊(谷)狭窄、沟床纵坡陡峻、地表土层深厚的发展期泥石流。根据此定义,狭陡型沟道泥石流的主要特征为:1. 流域面积 $F \leq 5 \text{ km}^2$,沟床平均纵坡 $I \geq 200\%$,流域完整系数 $\delta \leq 0.4$,平面形态呈狭长型,沟道横断面形态以“V”型为主;2. 发育环境为流域高差 $\Delta H \geq 1\,000 \text{ m}$ 的中高山区,区内断裂发育、新构造活动(地震)频繁;3. 沟底松散覆盖层深厚,流域内单位面积上的物源量丰富;4. 区域强降雨集中;5. 泥石流发育阶段处于发展期,活动旺盛^[5]。清平乡小岗剑沟和映秀镇烧房沟即为两条典型的狭陡型泥石流沟。

由于狭陡型泥石流具有流体容重高、流速快、冲

收稿日期(Received date): 2013 - 07 - 11; 改回日期(Accepted): 2013 - 08 - 05。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助国家科技支撑计划(2011BAK12B03)和国家重点基础研究发展计划“973”计划(2011CB409903)资助。[This research is supported by National Key Technology R & D Program (2011BAK12B03) and National Basic Research Program "973" Program (2011CB409903).]

作者简介(Biography): 杨东旭(1985 -),男,河南南阳人,硕士,助工,主要从事泥石流防治技术研究及相关勘查设计。[Yang Dongxu, male, born in 1985, Nanyang of Henan province, Master, mainly engaged in debris flow prevention and mitigation.] E-mail: dxyang@imde.ac.cn

* 通信作者(Corresponding author): 陈晓清(1974 -),男,四川遂宁人,博士,研究员,研究方向为泥石流滑坡减灾理论与技术。[Chen Xiaoqing, male, born in 1974, Suining of Sichuan province, Doctor, professor, mainly engaged in mountain hazards prevention and mitigation.] E-mail: xqchen@imde.ac.cn

蚀力强烈等显著特征(高势能转化为高动能),在其防治工程拦挡坝设计中,常会遇到地基承载力不足或坝下冲刷深度过大的问题。在陡峻场地环境下,因受坝基开挖范围和深度限制,板式坝基将难以满足控制基底应力或抵抗坝下冲刷的要求;拱式坝基则因沟道两侧无坚硬持力点而无法实施。因此,需探索适用于震后陡峻型沟道条件且有效提高地基承载力和抗冲刷能力的地基处理技术。在复杂险峻的场地和危险的施工环境下,无论机械成孔桩或人工挖孔桩均存在施工难度高和安全风险大的问题(不具备设备转运和场地布置条件)。基于小直径钢管桩土方挖填量小、工效高、施工安全便捷、与灌浆结合可形成强度较高的复合地基等优点,采用了复合钢管桩基进行初步应用。

1 管柱桩基础发展沿革

钢管桩是在管柱桩基础上发展起来的一种有效的地基处理技术。我国管柱基础创始于20世纪50年代的武汉长江大桥墩下桩基^[6],经数十年的理论研究和工程实践,管柱桩技术不断地改进与创新,现已广泛应用于水利水电、港口码头、高层建筑、公路、铁路桥梁和隧道等大型建筑的地基处理工程,取得了相当数量的研究成果^[7]。

1957年建成通车的京广线武汉长江大桥,开创了我国使用钢筋混凝土管柱桩作为基础型式的先例^[8]。在当时的施工环境下,由于管柱桩解决了深水作业风险大、基岩开挖困难、工期不连续等难题,其技术适应性和工效经济性获得了高度赞誉,并在随后建造的数十座大桥中推广应用,包括宜宾岷江桥、郑州黄河新桥、南京长江大桥等,管柱直径由1.55 m发展至3.0 m、3.6 m、5.8 m,管材由装配式钢筋混凝土管发展至预应力钢筋混凝土管、钢管。

随着管柱桩基础技术的进步,其他行业也逐渐引入这种基础型式,并结合应用行业特性,得到进一步的发展。在水务和港口工程中^[9],河南周口地区桥口油压管柱桩水闸、武汉阳逻造船厂水下滑道、山东烟台某港码头均采用了钻孔管柱桩结构;1978年动工兴建的宝钢厂房,地基处理大量使用了钢管柱基础,其后,管柱基础开始在工业与民用建筑行业继续发展。华南地区自1984年开始研制和应用预应力管柱桩^[10],在之后的十余年内普遍应用于广东等地的高层建筑中,并形成了成熟的设计、施工方法及工厂生产线,颁布了《预应力混凝土管桩基础技术

规程》DBJ/T15-22-98等地方标准。

在地质灾害治理行业,目前已有部分边坡工程选择了管柱桩结构,用作滑坡抗滑桩等形式^[11],但尚未见到应用于泥石流防治工程的相关报道。

2 钢管桩结构、承载模式与应用条件

2.1 结构与布置

应用于陡沟道泥石流防治的复合钢管桩,对管柱桩原有承载机制、结构组成和施工工艺均进行了二次开发和技术创新。在钢管桩结构与布置方面,首先,由于陡峻型泥石流沟道地形条件的限制,施工设备和材料只能采用人工运送至沟内,从而桩径和桩长均严格受限,需采用极具针对性和创新性的桩基材料和结构布置方案;其次,受柔性变形(受压屈曲)限制,单桩长细比必须满足压杆稳定的要求;另外,在纵坡陡峻、冲蚀强烈的应用条件下,桩基整体抗冲刷和总变形控制也是一大难点,需改进群桩的布置与联接方式;最后,群桩与桩周岩层之间由于材料强度与变形模量的巨大差异,在承受竖向荷载和侵蚀冲刷时难以实现协调变形,需通过岩层加固措施组成复合地基。因此,管材只能采用小直径的薄壁细管,管内构筑钢芯并浇筑碎石砼形成灌注桩,桩基首尾嵌固联接,桩群横竖向三排多行呈交错梅花形布置,以便形成空间联接的多次超静定整体结构,同时,既解决沿桩长方向的变形限制,又可抵抗下游强烈冲刷带来的失稳问题。

基于上述分析,采用的复合钢管桩基主要结构为小直径钢管($\phi 108$ mm),辅助结构为钢管内安置的钢筋芯和外扩压力灌浆形成的水泥柱,钢筋芯和压力灌浆用以增加薄壁钢管桩的刚度,三者结合作为竖向增强体,与地层孔隙内固结的水泥灌浆结石和碎石土体共同构成“钢管桩-加强钢筋芯-水泥浆结石-土层”多层、多材的复合地基。桩群布置方式为梅花状或簇状。复合钢管桩结构样式见图1~2。

2.2 受力分析

用于陡峻型沟道泥石流拦砂坝基础下的复合钢管桩,其主要受力状态为两端固定的弹性阶段受压杆件,因为钢管桩并未替代坝基底板的作用,上部坝体自重及坝前回淤泥石流体的重力大部分仍由坝基底板承担,而泥石流冲击力和侧向土压力等水平荷载完全由底板和两侧坝肩与岩层之间的嵌固力和摩擦力承担;钢管桩的功能是分担坝基底板以下因地基

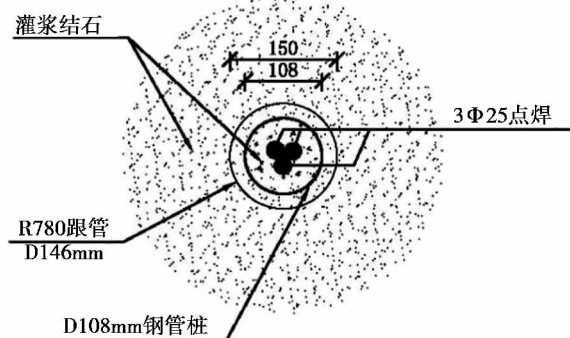


图1 复合钢管桩横断面图

Fig. 1 Cross-sectional view of composite steel pipe pile

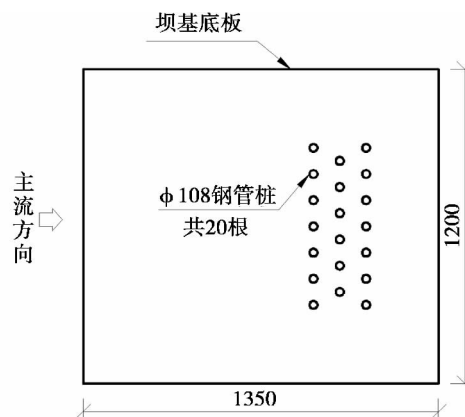


图2 钢管桩群平面布置图

Fig. 2 Floorplan of steel pipe piles foundation

承载力低于基底应力而引起的那部分竖向荷载,并传递给桩侧岩层和桩端密实持力层。群桩内各桩顶与坝底板钢筋相连接,桩底嵌固于密实持力层,形成多次超静定结构,有利于结构整体稳定性和荷载传递及变形协调。钢管桩、钢筋芯与桩周灌浆固化物的应变满足弹性力学三维变形协调方程(Saint-Venant方程),如式(1)所示

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} & 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} & 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial z} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z} & 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial x \partial y} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

钢材的弹性模量为混凝土材料弹模的10~12倍,而复合钢管桩中钢材断面面积占复合桩总断面面积的75.01%,由广义Hooke定律(式(2))推知,可按照材料弹模比例,通过折算受压断面面积,将钢管和钢筋芯的断面折算为混凝土断面,折算后的受压面积约为原受压面积的775.9%,抗压能力约可提高7.7倍。此分析方法可称为复合钢管桩受压的“折算断面法”

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] & \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在遭遇超大规模泥石流而引起拦砂坝下游沟道强烈下切、坝下冲刷坑溯源侵蚀至基底的极端不利情况下,钢管桩周围的土体可能被淘蚀,桩体可能临空而出现局部受弯,这时需验算屈曲稳定性。根据冲刷坑深度将受弯段限制在一定长度内。

2.3 作用机制

复合钢管桩的作用机制主要为三类:1. 通过桩土相互作用提高地基承载力。复合桩的抗压强度和刚度远大于基底土体,在土体中形成骨架作用,通过桩与土之间的刚度比分担坝底板传递来的竖向荷载,并将荷载传至深部较密实的土层,发挥竖向增强体的作用。2. 抵抗水平位移。拦挡挤密桩间土体,通过合理设计群桩间距形成桩间土拱效应,改善土体的整体稳定性,阻止坝下冲刷在溯源侵蚀作用下向基底发展。3. 限制沉降和调整不均匀沉降。桩体骨架可调整基底土体的附加应力状态,增加基底刚度,减小坝基以下的沉降变形,通过桩体的调平效应,协调由土层自身强度差异造成的不均匀沉降。

2.4 应用条件

狭陡型泥石流沟坝基钢管桩的最小嵌入深度(桩长)宜以0.5h(h为净坝高,即溢流段高度)为限,并不小于坝下冲刷坑计算深度。受细长杆件受压屈曲的影响,其桩长并不是愈长愈好,应根据基底地质条件、承载力参数和坝下冲刷深度综合确定。在纵坡较陡的沟道($J > 150\%$),若因下游冲刷溯源侵蚀而危及桩基体,应于 $l = (1.5 \sim 2.0)h$ 处,另建副坝或护坦,两者联合作用,共同消能防冲刷。

3 钢管桩用于狭陡沟道泥石流坝基的适用性

3.1 险要的地形条件

由于强震区狭陡型泥石流的特殊活动特征带来的高容重、高流速和强烈侵蚀效应,常引起沟道地形的剧烈变化,表现为:1. 沟道狭窄深陡,纵坡大于

15°, 两侧岸坡接近或超过松散体的自然休止角; 2. 跌坎陡崖较多, 沟床局部落差可达 10 ~ 20 m; 3. 沟床及岸坡松散堆积体分布广, 厚度深, 稳定性差(图 3)。这种特殊的地形条件, 决定了在坝基设计中需着重考虑两个因素: 一是能有效提高地基承载力和抵抗坝下剧烈的冲刷淘蚀, 二是具备快速、轻便、少扰动的实施工艺。

3.2 复杂的岩土地基

泥石流沟道内上部堆积物质一般为第四系泥石流堆积物(Q_4^{sef})、第四系崩坡积物(Q_4^{col+dl})、第四系滑坡堆积层(Q_4^{del})、第四系残坡积层(Q_4^{el+dl}), 下伏基岩或密实土层。表层松散堆积体厚度从 2 m 至 20 m 不等, 结构松散 – 稍密 – 密实, 块石含量高, 大块石分布集中, 粒径大(可达 3 ~ 5 m)。基底物质组成为碎块石夹粉质粘土, 碎块石含量约占 40% ~ 60%, 一般粒径 15 ~ 40 cm, 最大可达 3.0 m。土体力学性质为: < 4.0 m 地基土为稍密碎石, 测试 N120 锤击数标准值为 5.3 击/10 cm; > 4.0 m 地基土为中密碎石, 连续性和稳定性好, N120 锤击数标

准值为 8.3 击/10 cm, 低压缩性。地基土承载力特征值约为 180 ~ 550 kPa, 局部存在承载力偏低或下部存在软弱夹层的情况。复杂的岩土地基条件, 决定了单靠板式浅基础难以满足承载力和抗侵蚀下切的要求, 需在板式坝基以下采用合适的桩基。

3.3 特殊的施工环境

陡陡泥石流沟道险要的地形条件和复杂的岩土地基, 以及由路、电、水、通讯等的不通畅造成的材料供应和机械转运困难, 决定了治理工程坝基设计与施工的特殊困难。在实际工程中, 可供选择的地基设计方案有加大基础埋深、调整基础底板型式(如拱基或地梁板)、设桩基(人工挖孔或机械成孔灌注桩基)、钢管桩复合地基等。几种方案的适用性对比如表 1。

从以上地形地质条件、施工安全性、工期、投资效益比等方面进行比较, 得出如下结论: 对于沟道狭窄、岸坡高陡、地层松散的泥石流治理工程, 钢管桩复合地基方案实施难度最小、施工安全性最高、工期较有保证。



图 3 典型陡山坡泥石流沟地形条件
Fig.3 Terrain conditions of typical narrow – steep gully

表 1 几种地基设计方案对比简表

Table 1 Comparison of possible proposals for foundation design

比选方案	实施条件	施工安全性	工期	造价
加大基础埋深	挖填量大、运输困难	开挖垮塌风险高	较长	高
拱式基础	难以找到坚固支承点	开挖垮塌风险较高	较短	适中
地梁 + 板基	持力层弱、无支承点	安全性较好	较短	适中
人工挖孔灌注桩	块石多、难以掘进	孔壁坍塌、落石风险很高	长	高
机械成孔灌注桩	场地狭窄、转运困难	机械振动垮塌风险很高	较长	较高
钢管桩复合地基	挖填方小、运输轻便	安全性好	短	适中

表 2 1#拦砂坝地基土主要力学指标

Table 2 Mechanical index of 1# check dam foundation soil

岩 土 名 称	密度 γ /(kN/m^3)	压缩模量 E_s /(MPa)	变形模量 E_o /(MPa)	粘聚力 C /(MPa)	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	承载力特征值 f_{ak}/kPa	基底摩擦 系数 μ	极限侧阻力 标准值/(kPa)	极限端阻力 标准值/(kPa)
稍密碎石	21.0	30	22.0	10	23	350	0.45	150	2 000
中密碎石	22.0	35	30.0	15	30	550	0.50	160	2 500

4 工程应用实例

4.1 使用环境

四川省绵竹市清平乡小岗剑沟,在“5·12”汶川地震以后多次暴发大规模泥石流,致使清平乡的生命线——绵(竹)茂(县)路汉(旺)清(平)段多次中断^[12-13]。其在一定程度上可代表汶川地震影响区泥石流沟的共性,与震前泥石流沟相比具有以下独特之处:1. 沟道纵坡大,沟岸陡峭松散。沟床平均纵坡达412‰,岸坡高度30~50 m,坡度一般在30°~70°,局部为陡崖,为狭陡型泥石流沟。2. 流域单位面积产生的物源量巨大。流域面积仅1.36 km²,松散堆积体总方量达334.3×10⁴ m³,可能参与泥石流活动的动储量达156.8×10⁴ m³。3. 降雨量丰富。多年平均降雨量1 086.4 mm,6—9月均可出现100 mm以上的一日最大降水量。4. 泥石流暴发频率高。从2008-05-12至2011-09-05,共发生10余次泥石流。复合钢管桩应用于小岗剑沟1#拦砂坝基底,坝址处的地基土主要力学指标见表2。

4.2 设计参数

主沟1#拦砂坝为重力坝,有效拦蓄高度为12.50 m,坝顶轴线全长38.20 m,坝身采用C20混凝土。坝基础底板厚度为2.0 m,顺沟道方向长13.50 m,横向宽12.00 m,采用C25钢筋混凝土结构。进行宽、深修正后的地基允许应力 $[\sigma]$ 为470.0 kPa。基底利用天然地基时,计算各工况下坝体抗滑、抗倾覆稳定以及地基应力:空库过流时墙趾处压应力554.2 kPa,半库过流时墙趾处压应力542.6 kPa,均大于470.0 kPa,即地基承载力不足。

根据前述钢管桩用于狭陡型泥石流沟的适用性及有效性分析,在基础底板以下采用钢管桩复合地基。钢管桩设计3排,共计20根桩,梅花形布置,桩长为8.0 m,桩径为0.15 m,桩间距和排距均为1.0 m。钢管桩为花管形式,底端开小孔作为灌浆通道。钢管桩内放置3根 $\varphi 25$ 钢筋,点焊成束,每隔2 m设

置一处固定点。钢管桩及钢筋安装就位后进行灌注水泥浆,浆液水灰比采用5:1、3:1、1:1、0.8:1、0.5:1五个等级,灌浆压力采用0.1 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa、0.7 MPa四个等级。

钢管桩竖向承载力设计值根据《建筑桩基技术规范》JGJ 94-2008计算^[14],计算公式为

$$R = R_a + \eta_c \cdot f_{ak} \cdot A_c \quad (3)$$

$$R_a = \frac{Q_{sk}}{\gamma_s} + \frac{Q_{pk}}{\gamma_p} \quad (4)$$

式中 承台效应系数 η_c 取0.07;桩侧阻力分项系数 γ_s 取1.65;桩端阻力分项系数 γ_p 取1.65。总竖向荷载 F 包括承台以上的坝体自重、迎水面回淤泥石流流体重力和坝顶溢流流体重力;承台重 G 即坝基底板自重。计算结果如表3。

表 3 桩基承载力验算结果

Table 4 Checking results of pile foundation capacity

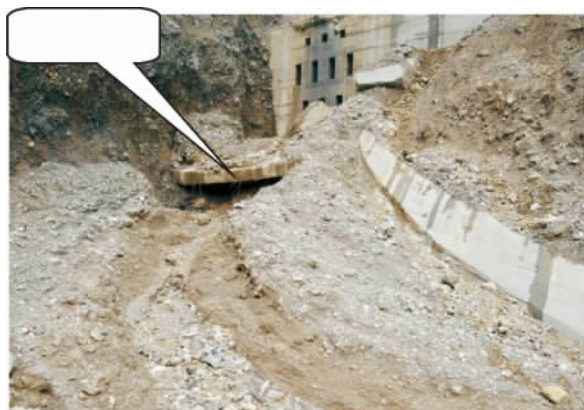
参数	总竖向荷载 F/kN	承台(基础底板) 重 G/kN	单桩受力 /kN	复合桩基竖向承载 力设计值 R/kN
结果	3 748	4 617	418.25	585.08

4.3 施工工艺

施工过程主要包括以下六道工序:钻孔跟管、下设钢管桩、拔出套管、下设钢筋束、压力灌浆、封孔。钻孔机械采用70型潜孔钻;套管采用R780地质钢管,外径146 mm,壁厚5 mm,拔管设备采用60 t级液压千斤顶;钢管桩外径108 mm,壁厚3 mm,管壁开直径8 mm的小孔,作为灌浆浆液通道。

4.4 效果检验

小岗剑沟1#拦砂坝于2012-02-26开始施工,坝基钻孔3月28日完成钢管桩灌浆施工。2012-07-26—2012-08-18,小岗剑沟先后暴发8场泥石流。在8月18日凌晨超设计校核标准规模的泥石流冲刷下(大块石粒径达7~8 m),1#拦砂坝护坦被毁坏,坝下冲刷坑发育,基础底板下游端悬空达3.2 m,冲刷坑溯源侵蚀至第一排钢管桩位置处停止(图4)。钢管桩排有效的阻挡了冲刷侵蚀继续发展,



(a) 8月17日 护坦下游端悬空



(b) 8月19日 坝基钢管桩出露

图4 坝下冲刷发展过程和钢管桩基运行效果

Fig.4 Development of scour and run effect of steel pipe piles foundation

形成直立的陡壁,沟道中间部位的5根钢管桩出露,但桩间土体未受淘蚀,桩体未出现破坏性变形或损伤。钢管桩经受住了极端不利工况的考验,对遏制坝基土体侵蚀和保护整个坝体的安全发挥了重要的作用。

5 结论与讨论

本文通过理论分析、具体工程设计和实际运行情况,探讨了钢管桩复合地基在陡型泥石流沟谷中的适用性和有效性,以及其涉及的设计与施工相关问题。重点介绍了钢管桩应用于泥石流防治坝基的结构组成与施工技术的二次开发和技术改进。初步得到以下结论:

1. 钢管桩复合地基是在管柱桩基础上发展而来的,是传统桩基技术在物资运送困难、机械设备选择受限的特定施工环境下,因地制宜地将钢管桩基进行优化的结果,对于陡型泥石流的治理工程具有良好的适用性。

2. 陡型泥石流坝基钢管桩设计中,桩的受力性状按受压杆件考虑,逐一地解决了细长柔性受压杆→单桩→群桩→复合桩基的结构、布置、承载及抵抗冲刷等问题,经计算,复合钢管桩基承载能力较混凝土桩可提高约7.7倍。

3. 通过汛期过流的实际运行状况,证明钢管桩对于支承坝底板、阻挡坝下冲刷坑向上游发展、防止坝基土体被泥石流淘蚀效果显著。

钢管桩除了因其强度高和刚度大的特点可作为提高地基承载力、阻挡坝下冲刷的增强体之外,还可通过进一步优化设计来挖掘其承载和抗冲刷潜能。

其承载-抗冲刷能力受钢管桩的直径、间距、布置方式、灌浆的浆液材料、浓度、灌浆压力、施工顺序等诸因素调节,在具备施工条件时,可根据承载力要求和抗冲刷需要,灵活调整相关设计参数,因此是适应性较好的一种地基处理方式,赋存的承载-抗冲刷潜能较大。本次应用虽已取得一定的经验,但若要在泥石流防治工程中广泛推广,尚有不少工作需要加深认识,例如钢管桩优化设计参数定量和评价标准问题,完全封闭状态、半临空状态和完全临空状态下各个受力阶段的内力和变形计算问题,将需进一步深入研究。

参考文献(References)

- [1] Cui Peng, Wei Fangqiang, Chen Xiaoqing, et al. Geohazards in Wenchuan earthquake area and countermeasures for disaster reduction [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences 2008 23(4): 317-323 [崔鹏, 韦方强, 陈晓清, 等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J]. 中国科学院院刊 2008 23(4): 317-323]
- [2] Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhu Yingyan, et al. The Wenchuan Earthquake (12 May 2008), Sichuan Province, China, and Resulting Geohazards [J]. Nature Hazards 2011 56: 19-36
- [3] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Zhao Wanyu. Optimal Timing for the Control of Debris Flow in Wenchuan Earthquake Area [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition 2009 41(3): 125-130 [陈晓清, 崔鹏, 赵王玉. 汶川地震区泥石流灾害工程防治时机的研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版 2009 41(3): 125-130]
- [4] Compile team of The Special Planning for Prevention and Control of Geological Disasters in Post-Earthquake Restoration and Reconstruction. The planning report of special planning for prevention and control of geological disasters in post-earthquake restoration and reconstruction of Sichuan Province (2008-2011) [R]. 2008. [四川省“5·12”特大地震灾后恢复重建地质灾害防治专项规划编写

- 组. 四川省“5·12”特大地震灾后恢复重建地质灾害防治专项规划(2008—2011年) [R]. 2008.]
- [5] Yang Dongxu. Key technologies of treatment for debris flow in narrow-steep gullies in Wenchuan Earthquake Areas: a case study for Xiaogangjian debris flow in Mianzhu County [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences 2013. [杨东旭. 汶川地震区狭陡型泥石流工程治理关键技术研究——以绵竹市小岗剑泥石流治理工程为例 [D]. 北京: 中国科学院大学 2013.]
- [6] Editorial Committee Office of “Bridge History”. Colonnade foundation [J]. Bridge Construction, 1985, (4): 70–79 [《桥史》编委会办公室. 管柱基础 [J]. 桥梁建设, 1985, (4): 70–79]
- [7] Zhang Jianxin. Application of anchoring tubular column foundation in wharf engineering [J]. Port & Waterway Engineering, 2004, (12): 39–40, 75 [张建新. 锚岩管柱基础在码头工程中的应用 [J]. 水运工程, 2004, (12): 39–40, 75]
- [8] Translated by Major Bridge Engineering Co. of China Ministry of Railways. Colonnade Foundation [M]. Shanghai: Science and Technology Health Press, 1959. [H. M. 戈洛铎夫, K. C. 西林等著, 铁道部大桥工程局译. 管柱基础 [M]. 上海: 科技卫生出版社, 1959.]
- [9] Xu Zengtian. Investigation report of drilling colonnade foundation [J]. Port Engineering, 1983, (3): 57–61 [许增田. 钻孔管柱基础调查报告 [J]. 港口工程, 1983, (3): 57–61]
- [10] Cai Changgen. Application of prestressing tubular pile in constructional engineering [J]. Guangdong Civil Engineering & Construction, 1998, (04): 2–11 [蔡长庚. 预应力管桩在建筑工程中的应用 [J]. 广东土木与建筑, 1998, (04): 2–11]
- [11] Shi Shengwei, Liang Jiong. Study on mini anti-slide piles based on soil arch effect [G] // The 9th National Engineering Geological Congress Qingdao 2012, 10 [石胜伟, 梁炯. 基于土拱效应微型组合抗滑桩距径比的研究 [G] // 第九届全国地质工程大会论文集. 青岛: 2012, 10]
- [12] You Yong and Chen Xiaoqing (Eds.). Feasibility study report of Xiaogangjian debris-flow mitigation in Mianzhu County [R]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 2011. [游勇, 陈晓清主编. 绵茂路汉清段小岗剑泥石流应急治理工程可行性研究报告 [R]. 成都: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2011.]
- [13] Yang Dongxu, Chen Xiaoqing, You Yong et al. The debris flow development trend of in Xiaogangjian Gully in Mianzhu County, Wenchuan Earthquake Zone [J]. Mountain Research, 2012, 30(6): 701–708 [杨东旭, 陈晓清, 游勇, 等. 汶川地震区绵竹小岗剑泥石流发展趋势 [J]. 山地学报, 2012, 30(6): 701–708]
- [14] China Ministry of Construction. JGJ94–2008. Technical Code for Building Pile Foundations [S]. Beijing: China Architecture and Building Press 2008. [中华人民共和国建设部. JGJ94–2008. 建筑桩基技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社 2008.]

Steel Pipe Piles Used for Countermeasures in Narrow-steep Debris Flow Gullies:

A Case Study of Xiaogangjian Debris Flow Control

YANG Dongxu^{1,3}, WANG Weiguo², CHEN Xiaoqing¹, YOU Yong¹, LI Deji¹

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes/Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China; 2. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China; 3. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, China)

Abstract: This article basing on the facts of design, construction and running against debris flows of 1# check dam foundation in Xiaogangjian Gully, discussed the design and construction technologies of steel pipe piles used for debris flow countermeasures in narrow-steep gullies. The applicability and availability of steel pipe piles for mitigation works in narrow-steep gullies was analyzed, and the main points of composite pile foundation were discussed by innovating on structure composition, arrangement and analytical method. Sectional area converting method was put forward for force analysis. Plate foundation and steel pipe piles, which were reinforced by cement grouting with sub-grade soils, were designed under the 1# check dam, taking the role of improving foundation bearing capacity and resisting scour under the dam. Combining with the situation of strong scour and dam base outcropping caused by debris flows during flood season in 2012, further studies were put forward.

Key words: narrow-steep gully; debris flow check dam; steel pipe piles foundation; Xiaogangjian debris flow