

文章编号:1005-0523(2019)05-0001-09

新型抗滑结构研究现状与发展趋势

郑明新

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:在分析国内外已有抗滑结构研究现状基础上,针对目前滑坡治理主要抗滑桩结构——普通抗滑桩和预应力锚索抗滑桩等结构型式,分析了抗滑桩室内外试验、内力计算方法、桩间距的确定方法、桩位布置及锚固深度的确定方法研究现状,重点探讨了围桩-土耦合式抗滑桩和新型拱弦式耦合抗滑结构的研究现状及未来发展趋势。进一步提出滑坡防治效果后评价的思路与方法,强调在桩-土耦合发挥土自身强度的前提下,开展滑坡防治新理论和新技术的推广应用;结合高速铁路路基蠕滑治理要求提出了“零位移”控制的新型抗滑结构,为新型抗滑桩结构研究提出了新的思路和研究方向。

关键词:新型抗滑结构;拱弦式耦合抗滑结构;研究现状与发展趋势

中图分类号:TU416;U213

文献标志码:A

滑坡是一定自然条件下斜坡上部分岩土体,在重力作用下,由于自然及人为等因素的影响,沿一定的软弱面或滑动带,整体表现为缓慢的、个别快速的以水平位移为主的变形现象。滑坡常发生在铁路、公路等基础工程建设的路堑开挖中或不良斜坡地段,已给国民经济和人民生命财产造成了巨大损失,为世界各国所关注,早在1990年《国际减轻自然灾害十年》中把滑坡列为八大灾害之一,而我国是一个多山国家,地质条件复杂,滑坡灾害尤为严重,给我国各行各业,包括交通运输、厂矿、水库电站、水利设施、城乡建设等造成了巨大经济损失和灾害。人类历史上对滑坡灾害早有记载,但在19世纪以前仅限于灾害记录。19世纪中叶随着水运、交通和矿山等设施的建设,由于滑坡灾害直接影响人类经济活动^[1],使得西方国家首先开展对滑坡现象的研究。初期仅限于对滑坡现象的观测,如瑞士对一隧道滑坡和一湖岸滑坡分别观测了50年和55年。二次世界大战后,各国在经济大发展和工程建设中涉及更大领域,尤其是在开发山区和丘陵地带中遇到更多滑坡危害,从而促使滑坡研究系统而深入,如苏联学者A·M·伏罗洛夫1949年所著《土体及建筑物稳定性的保证措施》,对土体滑动成因及其防治方法做了较为详细的阐述。随着社会经济的发展,大量铁路、公路、航运等工程中出现的滑坡均要求整治,滑坡防治研究已不仅仅为工程地质学和岩土力学工作者所关注,已涉及交通运输、矿山、农田水利、森林、电站水库、输电通讯、工厂码头和城镇建设等各个方面,多部门、多学科开展研究已成为总趋势,工程地质学、岩土力学和地理学、地震学和气象学,以及数学和结构工程学家也不同程度地投入研究,学科之间的互相渗透日益明显,使各国进一步开展了滑坡整治方法和措施的研究,研制了大量滑坡防治的新工艺、新技术。随着人类改造自然能力的提高,人们对生存环境的要求也愈来愈高,可以治理滑坡的规模越来越大,治理滑坡的数量也越来越多。世界许多国家如中国、日本、美国等在滑坡防治方面均取得了较大成就,出版了不少有关滑坡的发生、发展、预测和防治的文献和专著^[2]。

早期对小型滑坡采取地表排水、削方减载、填土反压及抗滑挡土墙进行治理。我国从20世纪50年代开始,研发了一系列有效的滑坡防治办法,特别是20世纪70年代治理大型滑坡采用大尺寸人工挖孔抗滑桩从成昆铁路开始使用,由于抗滑桩具有布置灵活、施工简单、对滑坡扰动小等优点,得到推广应用,逐步形成

收稿日期:2019-06-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51568022);江西省自然科学基金项目(20171BAB206056)

作者简介:郑明新(1966—),男,教授,博士,博士生导师,主要研究方向为边坡稳定与道路工程病害整治。

以抗滑为主体工程、削方减载和截排水为辅的滑坡综合治理技术。目前滑坡治理抗滑桩结构型式主要有普通抗滑桩、椅式桩墙、门形或h形刚排架桩、微型桩群、预应力锚索抗滑桩等。在过去数十年中治住了数以千计的滑坡,同时也花费了巨资。例如1980年成昆铁路铁西车站滑坡治理费用就高达2300万元。我国每年施工的抗滑桩超过上万根,投资达数亿元^[3]。可见滑坡防治通常是一项重型工程,单个抗滑桩就达数万元甚至数十万元,整个工程动辄数百万;因此,如果能研发新型抗滑结构提高滑坡整治工程效果则效益巨大。有关滑坡防治技术的研究如火如荼,特别是预应力锚索抗滑桩等新型抗滑结构应用于工程实际,使桩-预应力锚索组成一个联合受力体系,用锚索拉力平衡滑坡推力,改变了悬臂桩的受力机制,使桩的弯矩大大减小,桩的埋置深度变浅,达到了结构受力合理降低工程费用,缩短工期的目的,大大提高了滑坡防治效果。虽然我国对滑坡防治研究起步较晚,但由于工程建设中大量滑坡需要治理,可以说我国滑坡研究水平与国外同步,在某些领域处于世界领先水平。

1 国内外传统抗滑桩研究概况

1.1 抗滑桩试验研究状况

国外学者 Gimzburg L K^[4]针对抗滑桩抗力、桩身弯矩及桩顶位移等开展了现场试验。Jamolkowski 等^[5], Rollins 等^[6]进行了水平受力桩现场试验并总结了侧向受力特征。Kim J B 等^[7]通过现场试验,分析了微桩群具有桩帽的水平受力特征。Hamilton 等^[8], Mcvay 等^[9-12], Ilyas T 等^[13]对水平受力单个桩体、多排桩体的变形、弯矩进行了离心试验,得到了水平受力群桩的受力规律并与理论解进行了对比分析。刘光代,于济民^[14]为探讨滑坡体推力图式,1967—1971年对铁路沿线3处堆积土滑坡抗滑桩安装土压力盒探讨了滑坡推力特征。徐良德等^[15]通过抗滑桩模型试验,实测各级荷载作用下滑体下滑力、桩前滑体抗力、桩身弯矩及桩顶位移,得到滑体分别为粘性土和石英砂时的桩前滑体抗力分布特征。励国良^[16]对预应力锚索抗滑桩的受力状态进行了室内大型模型试验,根据试验结果提出了考虑滑体位移的计算方法。熊治文^[17]就深埋式抗滑桩桩身受力分布规律开展抗滑桩模型试验,得到对于一般土类滑坡可省去全埋式普通抗滑桩滑体中桩长的20%是可行的,只要桩顶以上滑体不越顶、桩前滑体仍可保持稳定。曾云华,郑明新^[18]对预应力锚索抗滑桩的受力分布规律及治理效果开展了模型试验和数值分析。

1.2 水平桩受力计算方法的研究状况

水平受力桩和桩群的计算方法主要有压力法、位移法和有限元单元法。Poulos H G 等^[19]初步提出了水平受力桩的弹性计算方法。Evans L T 等^[20]提出简化方法。Brown D A 等^[21]针对砂土提出了群桩受水平力的弹性计算方法及修正方法。Duncan J M 等^[22]针对受水平力的单桩及灌注桩提出相应的内力计算方法。Mcvay M 等^[23]针对砂土从松软到密实三排桩群在水平力的受力特征。Ruesta P F 等^[24]对桥台受水平力作用下采用有限元及现场测试进行了分析评价。Huang A 等^[25]考虑桩体结构特征提出了受水平作用的计算方法。Ito^[26-27]基于塑性变形理论推导了单排抗滑桩因土体位移而受到的极限侧向力表达式。沈珠江^[28]根据散粒体的极限平衡理论推导了桩的绕流阻力计算公式。

事实上,这些方法都是基于理想极限状态得到的,抗滑桩与岩土体未必满足要求的极限状态,抗滑桩的设计还有待进一步完善。

1.3 抗滑桩桩间距的确定方法

工程实践和模型试验证明,只要抗滑桩设置合理就能形成土拱,滑坡推力的有效传递在很大程度上依赖于抗滑桩间距的设定。王成华等^[29]从方桩桩间土拱形成原理和力学特性出发,分析了桩间土拱的受力、变形、力的传递和土拱破坏瞬间的最大桩间距。周德培等^[30]在对桩土拱效应分析基础上,提出应以桩间静力平衡条件、跨中截面强度条件及拱脚处截面强度条件共同确定桩间距并给出了计算公式。梁文文等^[31]通过对非均布荷载作用下土拱的力学性质分析,根据轴向压应力与矢跨比的函数关系,利用M-C强度准则推导了土拱承载力与土拱净跨度和桩宽度的关系。肖淑君等^[32]从侧阻力条件和土拱强度条件两个方面对抗滑桩桩间距进行了计算。赵明华等^[33]建立了土拱计算模型并推导了圆形抗滑桩桩间距计算公式。日本建设省土木

研究所用试验证实了滑坡体进入极限平衡状态时的抗滑桩为被动桩,并据土拱效应概念推出了圆形桩极限阻力的计算公式。He G F等^[34]还针对桩间土拱效应通过平面应变有限元分析和采用正交试验法多级分析,确定了影响土拱效应各因素重要性排序,对于单排桩前三者是均布荷载、桩间距和界面强度参数;而对于双排桩,则桩间距、泊松比和排间距影响较大。

可见,抗滑桩设计及桩间距的确定除了受理论计算方法影响外,还受滑坡体形状、滑裂面深度、滑坡的土质参数及排桩的根数和位置等诸多因素制约,只有综合考虑这些因素,便可能设计出一个既科学合理又经济可行的抗滑桩方案。

1.4 桩位布置及锚固深度的确定方法

关于抗滑桩平面布置问题,雷文杰等^[35]采用有限元强度折减法对抗滑桩在不同设桩位置加固滑坡进行了数值模拟,得到不同桩位的抗滑效果。申永江^[36]在现场监测基础上,得到桩排距增大不利于前、后排抗滑桩同时发挥最佳的抗滑作用,在悬臂式双排桩和预应力锚索双排桩中桩排距取值不宜大于4倍桩截面高度;对于带连系梁的双排桩建议桩排距取2~3倍的桩间距。张志伟^[37]针对传统抗滑支挡结构局限性,通过理论分析、物理模型试验和数值分析,提出用弧形间隔排桩+桩顶连系梁抗滑结构更为有效。赵晓珂^[38]对梅花型布置双排抗滑桩成拱机理及其合理桩位进行了研究。Shen Y J和Wu Z J^[39]针对双排抗滑桩段不同长度和不同桩排距,通过数值模拟和物理试验提出了在桩前桩与桩后桩最大弯矩相等前提下,不同桩距下双排长-短组合体系后桩的最优长度。

关于抗滑桩的锚固深度问题,周春梅和殷坤龙^[40]针对滑动面为倾斜面桩前岩体中存在不利结构面时,通过计算得到抗滑桩的最小锚固深度。胡晓军和王建国^[41]基于强度折减法,考虑抗滑桩锚固深度的相关影响因素,利用抗滑桩内力分析的悬臂桩法推导了刚性抗滑桩锚固深度的计算公式。年廷凯等^[42]利用极限分析下限定理,考虑粘性土斜坡效应,利用弹性桩锚固深度公式确定抗滑桩锚固深度。林高原等^[43]针对抗滑桩锚固深度构建其可靠性分析模型,选取Fiessler可靠指标法探讨了合理的抗滑桩锚固深度。

当前对抗滑结构研究均集中于桩体本身变形特征,计算理论也多关注桩体及抗体的应力状态,主要前提条件是保证桩体不失效、桩身受力合理,对滑坡体本身变形量一般不做要求。郑明新等^[44-45]对滑坡治理现场监测表明,即使滑坡治理效果良好,其桩顶位移仍达到40~50 mm;其上部滑坡土体位移则达十几厘米。可见目前抗滑结构是基于坡体上不存在对变形敏感的构筑物为前提的,对滑体自身变形一般不做要求,只要治住滑坡、达到理论安全系数便可。而对于高速铁路路堤、桥梁墩台,倘若出现一定的变形或位移量,则注定路堤边坡蠕滑控制失败。如何实现“零位移”控制且又不妨碍高速铁路运营是亟待解决的问题,亟需开展新结构和新方法研究。

2 新型拱弦式耦合抗滑结构的提出

2.1 微型桩群等新型抗滑结构研究的发展

微型桩群是指采用多排直径较小的机械钻孔桩或钢管桩。微型桩桩径70~300 mm,长细比一般大于30,通过钻孔并插入钢筋束、钢管、型钢或钢轨,注入纯水泥浆、水泥砂浆或硅,平面布置多为多排网状或树根状。上个世纪50年代初由意大利Femando Lizzi等^[47]提出,随后又大量应用于桩基托换和锚钉工程中。日本在20世纪60—70年代曾大量使用钻孔钢管桩,Matlock H等^[48],Tomio等^[49]提出了网状微型桩加固斜坡的设计方法。孙书伟等^[50]通过室内试验对微型桩群与普通抗滑桩的抗滑特性进行对比分析,分析荷载作用下桩身挠曲变形及桩间土体塑性区发生交叉重叠特征。冯君等^[51]讨论微型桩体系加固顺层岩质边坡内力计算模式,表明微型桩有较好的抵抗水平荷载的能力,尤其是斜桩基础能有效地减小水平荷载引起的位移。可见,小直径单桩经过一定的组合可以承受较大的竖向荷载和横向荷载,已被应用到基坑支护和边坡防护中。

2.2 钢筋混凝土结构与土体和排水相结合的一些新型抗滑结构

秦睿,施艳秋^[52]提出混凝土连续墙段(板)与地基岩土形成空间复合结构,顶部通过顶板(梁)相连,与维护岩土体形成一种特殊的桩体。

陈颖骐,王全才^[53]提出截水导流式锚拉桩板墙,导流式锚拉桩板墙有利于坡体内部排水,更有利于坡体稳定性。

张志伟,邓荣贵^[54]提出了弧形间隔排桩-桩顶拱梁新型空间抗滑结构,即根据滑坡地形及地质条件弧形布设抗滑桩并桩顶设置连系梁,连系梁两端设置抗力桩形成空间结构以抵抗滑坡推力,从而可使空间抗滑结构中弧形连系梁的内力分布更加合理,弧形连系梁对抗滑桩的位移约束效果明显。

2.3 围桩-土耦合式抗滑桩的提出

鉴于普通“微型桩群”在滑面附近及桩顶均产生变形较大,不能真正形成桩-土耦合并发挥土自身强度的缺陷,郑明新等^[55]提出“围桩-土耦合式抗滑桩”,即采用钻孔桩6根(直径 ≥ 400 mm)与桩间岩土体共同合成正六方柱体,并将其顶部用刚性系梁牢固连接形成一个超静定框架结构,平面示意图如图1。它侧重于对地质体的改造和岩土体的有机组合。与普通抗滑桩及一般“微型桩群”有实质性的区别。其特点如下。

1) 围桩-土耦合提高了围桩的抗弯强度。从理论上讲6根围桩用刚性系梁耦合的抗弯强度足以超过6根直径之和为直径的大桩强度,若再加上与其耦合的岩土体强度,其抗剪、抗弯强度无疑是相等直径的大桩所不及的。

2) 通过压力注浆等使水泥浆体对岩土体充填、挤密,通过固化方式加固围桩周围岩土体、滑动带及滑床岩土体,使围桩及其周围的岩土体共同形成了一个耦合结构,可以承受很大剪切力与弯矩。

3) 围桩之间与土形成土拱效应构成了耦合结构,所围土体既不挤出也不挤入,围桩-土及刚性联系梁形成一种耦合的新桩型,这样既充分调动了岩土体强度又能排出地下水,提高了滑坡防治效果。

4) 布桩形式灵活,平面形状可成排或网状布置,也可单独使用或施加预应力锚索。施工机械化程度高、迅速安全,安装搬迁和成孔均很快捷。每个耦合桩的空间布置受限制较少,与地质环境和生态环境易于协调,综合经济效益高。

2007—2016年笔者与李培植^[56],徐典^[57],刘伟宏^[58],孔祥营^[59]合作,针对该新型抗滑桩从平面布置合理性、结构合理性、桩间距、抗弯刚度和锚固深度开展了理论分析、数值计算和模型试验以及现场应用,充分论证了围桩-土耦合式抗滑桩的作用机理,提出了内力计算方法和工程设计参数,基本完善了围桩-土耦合式抗滑桩设计方法及应用。

2.4 “零位移”新型“拱弦式耦合抗滑结构”的提出

根据前述高速铁路蠕滑治理的亟待解决问题,要求达到:①治理后变形“零位移”;②保护桥墩、桥台,不允许在其附近开挖大口径挖孔桩及爆破作业。而传统抗滑桩对大型、深层滑坡治理有效,而在高速铁路桥墩、桥台附近施作抗滑桩既不容许开挖又不能发挥其优点,考虑“围桩-土耦合式抗滑桩”难于做到治理后“零位移”变形;因此针对路基中浅层蠕滑机理研究,笔者提出的一种既不影响行车又可使路堤加固后微变形的“拱弦式耦合抗滑结构”,平面图见图2。该结

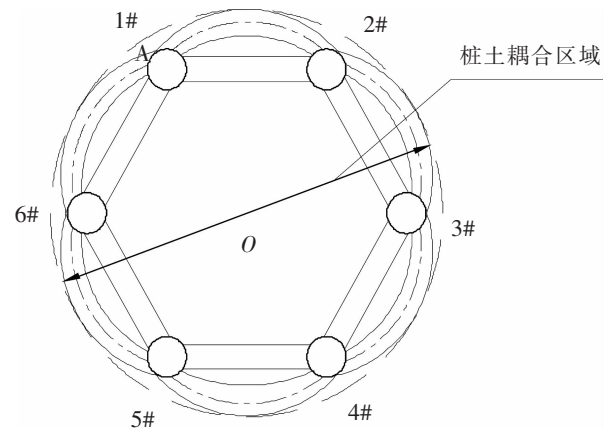


图1 耦合式桩结构平面示意图

Fig.1 Plan of the coupled pile-soil anti-slide structure

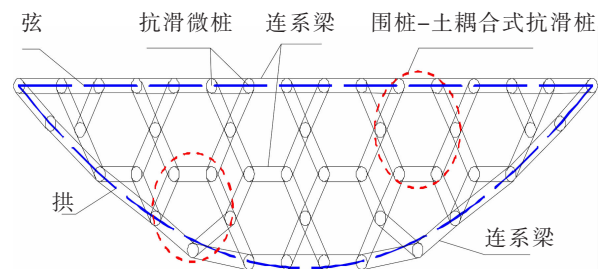


图2 “拱弦式耦合抗滑结构”平面图

Fig.2 Plan of "arch - chord coupled anti - slide structure"

构可将多个“围桩-土耦合式抗滑桩”通过刚性弦和刚性拱圈联系起来,构成刚度更大,抗弯、抗剪能力更强的新型抗滑结构。

该结构可以针对路堤蠕滑变形特征和对桥台挤压变形特征,是一种“零位移”控制的“新型拱弦式耦合抗滑结构”,今后有必要针对高速铁路路堤蠕滑机理和“零位移”新型抗滑结构开展探索,是滑坡防治的一种新理念,可为类似高速铁路路堤蠕滑治理提供研究思路和方法。该新型抗滑结构研究不仅具有较高的学术价值,还具有很好的社会效益和经济效益。

3 滑坡防治效果评价研究的现状

进入新世纪以来,极端天气不断增多使滑坡灾害有越来越频繁之势,滑坡治理研究工作显得更为重要。由于滑坡地质构造、地层岩性和地下水分布特征具有很大的随机性,加上不同地段滑坡地质体特征不同,即使一个滑坡体不同区段其滑带土强度差异亦较大,工程地质类比法所得强度参数与室内试验、反算法所得抗剪强度参数均存在差异,如何取得可靠的滑带土强度参数、滑坡推力计算中安全系数取多大适宜,滑坡设计所选参数是否合理、措施是否有效?特别是新型抗滑结构治理效果如何?通过对滑坡防治效果做出后评价,对于进一步完善抗滑结构创新和设计理论极为重要。

3.1 滑坡防治效果的评价研究现状

现有规范工程质量检定标准对抗滑、防滑工程及边坡防护工程的检验验收作了具体的规定。对于具体工程项目如挡土墙、锚喷支护、砌石工程、导流工程、抗滑桩工程等均提出了检验标准和检验方法,提出了施工质量的评价方法。而这些仅仅是对单项指标检验,忽略了对抗滑工程措施选择的评价及防治工程完成后滑坡稳定特征的评价,常存在对防治工程认识不足,对滑坡体特征判断不准,目前依据专家咨询意见来评价滑坡防治技术难度、经济性及治理后的稳定程度。

关于对滑坡防治效果的后评价研究方面,目前国内外有关滑坡治理后效果系统评价的文献也不多见。国外主要如落石防护^[60]及各类挡土墙室内受力试验分析^[61]方面,文献[62]对微型抗滑桩(桩径<300 m的插入桩或灌注桩)受力测试来分析加固效果。文献[63]针对抗滑桩抗力、桩身弯矩及桩顶位移等开展了现场试验来分析加固效果。原铁道部科学研究院西北分院等做了一定的工作。这些研究局限于滑坡防治工程中某种抗滑结构抗滑效果的研究,而对于防治后效果评价的研究很少。这主要由于:① 滑坡类型众多、成因复杂,滑带土强度参数的选择、滑坡推力受多因素影响而不易确定,而且抗滑结构设计也做了大量的简化。② 滑坡整治工点的数量和观测资料的限制,使得国内外长期以来迟迟未能开展这方面的研究^[2],对滑坡性质认识不足,易于造成防治失败效果显然差。③ 对一些治理难度大的滑坡采用“一次根治、不留后患”,防治工程往往偏于保守而造成治理费用过高。

3.2 滑坡防治效果的后评价研究

邓大力^[64]针对山西省公路边坡防护工程效果进行了研究。郑明新^[65-66]在针对滑坡推力计算中选择的准确性及具体的川藏公路二郎山 K2730 段 I # 滑坡治理工程效果进行了评估。这些主要局限于某一具体滑坡防治工程的某种抗滑结构进行评价,尚未开展系统的滑坡防治效果的后评价研究。庆幸的是近年来国内外一些学者认识到滑坡防治是一项系统工程,需要采用地质-工程一体化思维来防治滑坡,针对滑坡地质作用特征来设防,需要对大量已整治滑坡进行系统分析和后评估,尤其是评价滑坡地质体自身稳定能力是否得以发挥、抗滑结构的结构潜能是否得以发挥,以便指导类似滑坡进行优化防治。

滑坡防治效果的后评价过程实质上是收集、分析和反馈防治工程本身信息的过程。为此,郑明新^[67]通过从滑坡工程地质的观点出发,阐明了滑坡防治工程效果评价的特殊性和复杂性,探讨了滑坡防治效果的评价的主要内容,进而提出了评价原则和评价标准;进一步从滑坡的地质观、治理的工程观、现场测试与室内模型试验、数值分析,提出并阐明了滑坡整治工程效果的响应评价分析方法;最后在上述研究基础上,提出了滑坡防治效果的 11 项评价因子,采用模糊数学理论,首次提出了滑坡防治工程效果的模糊综合评判方法,实现了滑坡防治效果评价的综合评价。系统地探讨了滑坡防治效果的后评价问题,率先提出了滑坡防治

效果后评价体系,突破了传统滑坡治理效果评价以经验为主的瓶颈,提出了较为科学的滑坡防治工程效果的评价方法和评价标准,开拓并完善了滑坡防治理论,填补了国内外在该研究领域的空白。

滑坡防治工程效果后评价的具体研究思路见图3。

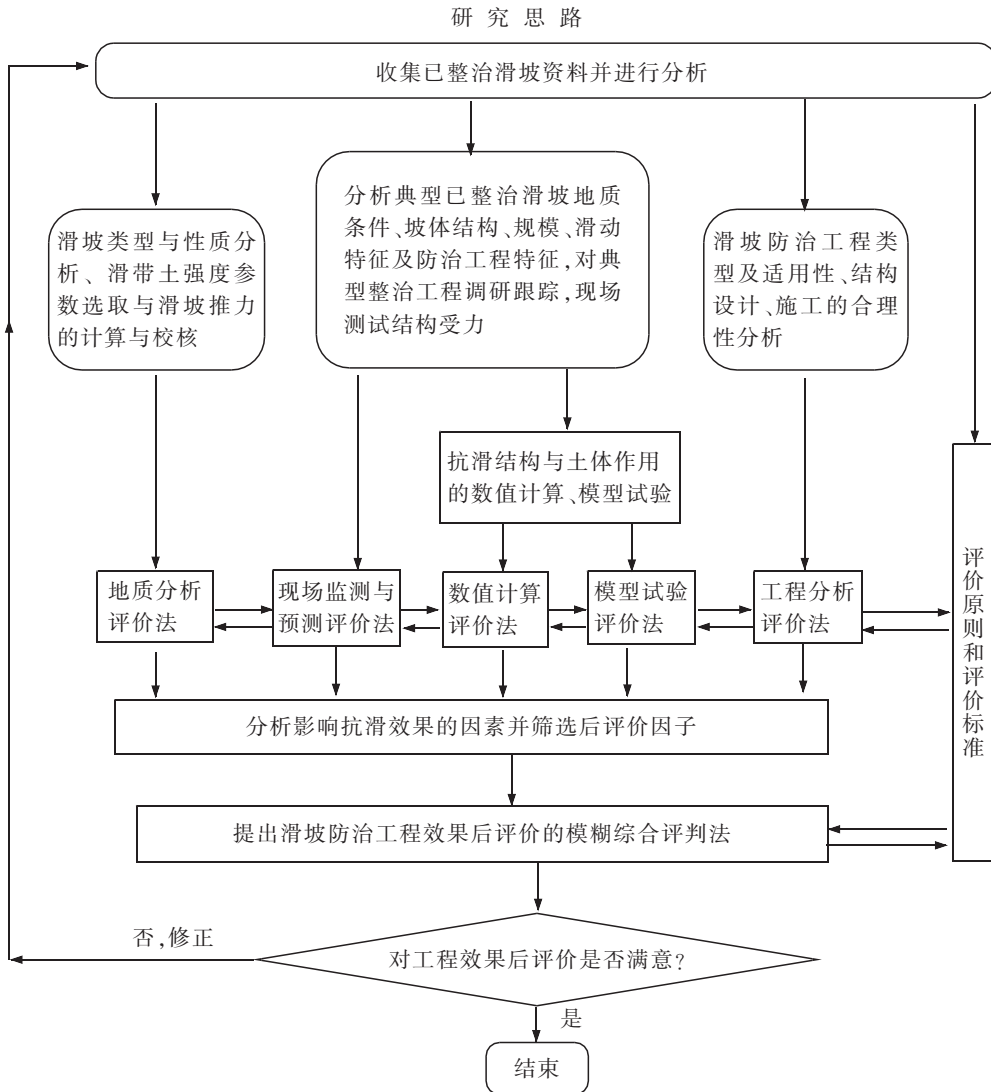


图3 滑坡治理工程效果后评价研究思路图

Fig.3 Thinking map of post-evaluation research on landslide control effect

4 主要结论与展望

1) 发挥滑坡岩土体强度并将其作为抗滑支挡结构的一部分,是滑坡防治的新思路、新思维。几十年滑坡治理工程实践证明,开展滑坡防治研究新理论、新技术和新思维的推广具有重要意义,滑坡治理要把对滑坡地质体特征的认识放在首位,充分考虑滑坡岩土体强度特征,甚至将其作为抗滑支挡结构的一部分,强调滑坡治理设计与环境相协调,促使滑坡防治安全、经济、合理。

2) 亟需针对高速铁路路堤蠕滑治理的新结构和新方法研究。目前抗滑结构是基于坡体上不存在对变形敏感的构筑物为前提的,对滑体自身变形一般不做要求,只要治住滑坡便可。随着高速铁路发展,对于高速铁路路堤、桥梁墩台,倘若出现一定的变形或位移量,则注定路堤蠕滑控制失败。传统抗滑桩对大型、深层滑坡治理有效,而在高速铁路桥墩、桥台附近施作抗滑桩既不容许开挖又不能发挥其优点,考虑“围桩-土耦

合式抗滑桩”难于做到治理后“零位移”变形。如何实现“零位移”控制且又不妨碍高速铁路运营是亟待解决的问题,亟需开展高铁路堤蠕滑治理的新结构和新方法研究。本文提出的“拱弦式耦合抗滑结构”为主体的防治思路,将桩和土作为一个整体增大了结构刚度和施工灵活性,是滑坡防治的一种全新理念。

3) 加强对已整治滑坡工程效果的科学后评价以探索更为科学实用的抗滑结构。以前虽然治住了数以千计的滑坡,防护了大量的路堑边坡,但工程耗资巨大,且方案的确定常以经验为主,使防治工程具有很大的经验性,特别是对抗滑结构对于地质体自稳能力是否得以充分发挥,治理措施是否经济、合理?尚需对滑坡防治开展更为深入的研究。

4) 新型抗滑结构需要加强新材料、新构件应用及新工艺的不断开发,如抗腐蚀加筋新材料、防腐蚀可再拉张锚索、高强耐久的护坡构件、坡体内部加固的新型灌浆工艺的研制与应用,以及滑坡防治工程中预应力锚固工程体系的推广成为滑坡防治研究的重点。

参考文献:

- [1] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京:中国铁道出版社, 2001.
- [2] 王恭先. 面向 21 世纪我国滑坡灾害防治的思考研究新进展[C]//兰州滑坡泥石流学术研讨会文集,兰州:兰州大学出版社, 1998:1-8.
- [3] 王化卿,廖正环. 预应力锚索抗滑桩—新一代抗滑挡结构,滑坡研究与防治[M]. 成都:四川科学技术出版社, 1996.
- [4] GINXBURG L K. Effectiveness of anti-landslide retaining structures[C]//Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides, Netherlands: A A Balkema Publishers, 1996.
- [5] JAMIOLKOWSKI M, GARASSINO A. Soil modulus for laterally loaded piles[C]//Proc Specialty Session on the Effect of Horizontal Loads on Piles, due to Surcharge or Seismic Effects, 9th Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 1977:43-58.
- [6] ROLLINS K M, PETERSON K T, WEAVER T J. Lateral load behavior of full-scale pile group in clay[J]. Geotech Geoenviron Eng, 1998, 124(6):468-478.
- [7] KIM J B, BRUNGRABER R J, SINGH L P. Pile cap soil interaction from full-scale lateral load tests[J]. J Geotech Eng Div, Am Soc Civ Eng, 1979, 105(5): 643-653.
- [8] HAMILTON J M, DUNNAVANT T W, MURFF J D, et al. Centrifuge study of laterally loaded pile behavior in clay[C]// Proc, Int Conf Centrifuge 91, Ko H Y, McLean F, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1991:285-292.
- [9] MCVAY M, BLOOMQUIST D, VANDERLAINE D, et al. Centrifuge modeling of laterally loaded pile group in sand[J]. Geotech Test J, 1994, 17(2):29-137.
- [10] MCVAY M, CASPER R, SHANG T. Lateral response of three row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing[J]. J Geotech Eng, 1995, 121(5):436-441.
- [11] MCVAY M, SHANG T, CASPER R. Centrifuge testing of fixed head laterally loaded battered and plumb pile groups in sand[J]. Geotech Test J, 1996, 19(1):41-50.
- [12] MCVAY M, ZHANG L, MOLNIT T, et al. Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands[J]. J Geotech. Geoenviron Eng, 1998, 124(10):1019-1026.
- [13] ILYAS T, LEUNG C F, CHOW Y K, et al. Centrifuge model study of laterally loaded pile groups in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(3):274-283.
- [14] 刘光代,于济民. 实测滑坡推力及其变化规律[J]. 滑坡文集, 1984(4):105-115.
- [15] 徐良德,尹道成,刘惠明. 抗滑桩模型试验第二阶段报告—滑体为粘性土时桩前滑体抗力的分布[J]. 滑坡文集, 1990(7):92-99.
- [16] 励国良. 锚索抗滑桩的设计计算及其试验验证[J]. 滑坡文集, 1993(10):121-131.

- [17] 熊治文. 深埋式抗滑桩的受力分布规律[J]. 中国铁道科学, 2001, 21(1): 48-56.
- [18] 曾云华, 郑明新. 预应力锚索抗滑桩受力状态的有限元分析[J]. 华东交通大学学报, 2004, 22(2): 24-27.
- [19] POULOS H G. Behavior of laterally loaded piles: II -pile groups[J]. J Soil Mech Found Div, 1971, 97(5): 733-751.
- [20] EVANS L T, DUNCAN JR J M. Simplified analysis of laterally loaded piles Rep No UCB/GT/82-04[M]. Berkeley, Calif: Univ of California at Berkeley, 1982.
- [21] BROWN D A, SHIE C F. Modifications of p-y curves to account for group effects on laterally loaded piles proc[C]//ASCE Geotechnical Congress, New York, 1991: 479-490.
- [22] DUNCAN J M, EVANS L T, OOI P S K. Lateral load analysis of single piles and drilled shafts[J]. J Geotech Eng, 1994, 120(6): 1018-1033.
- [23] MCVAY M, CASPER R, SHANG T I. Lateral response of three row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacings[J]. J Geotech Eng, 1995, 121(5): 436-441.
- [24] RUESTA P F, TOWNSEND F C. Evaluation of laterally loaded pile group at Roosevelt Bridge[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 1997, 123(12): 1153-116.
- [25] HUANG A, HSUEH C, O'NEILL M W, et al. Effects of construction on laterally loaded pile groups[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2001, 27(5): 385-397.
- [26] ITO TOMIO. Design method for the stability analysis of the slope with landing pier[J]. Soils and Foundation, 1979, 19(4): 43-57
- [27] ITO TOMIO. Design method for the stabilizing piles against landslide-one row of piles[J]. Soils and Foundation, 1981, 21(1): 21-37.
- [28] 沈珠江. 桩的抗滑阻力和抗滑桩的极限设计[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 51-56.
- [29] 王成华, 陈永波, 林立相. 抗滑桩桩间土拱力学特性与最大桩间距分析[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 556-559.
- [30] 周德培, 肖世国, 夏雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 132-135.
- [31] 梁文文, 王成. 抗滑桩的桩间土拱效应问题研究[J]. 地下空间与工程学报. 2010, 6(S2): 1632-1635.
- [32] 肖淑君, 陈昌富. 基于统一强度理论抗滑桩桩间距的计算[J]. 工程地质学报, 2011(2): 199-204.
- [33] 赵明华, 陈耀浩, 杨超炜. 考虑土拱作用抗滑桩合理桩间距确定方法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S2): 16-21.
- [34] HE G F, LI Z G, YUAN Y N. Optimization analysis of the factors affecting the soil arching effect between landslide stabilizing piles[J]. Atural Resource Modeling, 2018, 31(2): 202-207.
- [35] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡治理中抗滑桩桩位分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 950-954.
- [36] 申永江. 边坡工程中抗滑桩的效果评价与优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [37] 张志伟, 邓荣贵. 弧形间隔排桩-桩顶拱梁空间抗滑结构理论研究[J]. 岩土力学, 2013(12): 3403-3409.
- [38] 赵晓珂, 雷用, 张泽健, 等. 梅花型布置双排抗滑桩土拱效应分布研究[J]. 四川建筑科学研究, 2015(5): 60-64.
- [39] SHEN Y J, WU Z J. Physical test study on double-row long-short composite anti-sliding piles[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 13(4): 621-640.
- [40] 周春梅, 殷坤龙. 三峡库区滑坡治理中抗滑桩锚固深度的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(2): 38-41.
- [41] 胡晓军, 王建国. 基于强度折减的刚性抗滑桩锚固深度确定[J]. 土木工程学报, 2007, 40(1): 65-68.
- [42] 年廷凯, 栾茂田, 郑德凤, 等. 基于极限分析下限方法的抗滑桩锚固深度检算[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(8): 82-86.
- [43] 林高原, 何怀东, 李超. 基于 Fiessler 法抗滑桩锚固深度可靠性分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016(11): 62-65.
- [44] 郑明新, 殷宗泽, 吴继敏. 滑坡防治工程效果的模糊综合评价研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1224-1229.
- [45] 郑明新, 殷宗泽, 吴继敏. 抗滑结构稳定时间的预测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2150-2154.
- [46] HANNA T H. 锚固技术在岩土工程中的应用[M]. 胡定等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- [47] ZHU J H, ANDERSON S A. Determination of shear strength of Hawaiian residual soil subjected to rainfall-induced landslides[J]. Geotechnique, 1998, 48(1): 73-82.
- [48] MATLOCK H, INGRAM W B, KELLEY A E, et al. Field tests of the lateral load behavior of pile groups in soft clay[C]//Proc 12th Annual Offshore Tech Conf, OTC, Houston, 1980: 163-174.
- [49] ITO TOMIO. Design method for the stabilizing piles against landslide-one row of piles[J]. Soils and Foundation, 1992, 21(1): 21-37.
- [50] 孙书伟, 朱本珍, 马惠民. 微型桩群与普通抗滑桩抗滑特性的对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1564-1570.

- [51] 冯君,周德培,江南,等. 微型桩体系加固顺层岩质边坡的内力计算模式[J]. 岩石力学与工程学报,2006(2):284-288.
- [52] 秦睿,施艳秋. 组合板式抗滑结构受力规律的数值分析[J]. 甘肃科技,2018,34(8):76-78.
- [53] 陈颖骐,王全才. 新型截水导流式锚拉桩板墙排水抗滑性能分析[J]. 人民长江,2019,50(1):141-147.
- [54] 张志伟,邓荣贵. 弧形间隔排桩-桩顶拱梁空间抗滑结构理论研究[J]. 岩土力学,2013(12):3403-3409.
- [55] 郑明新,孔祥营,刘伟宏. 新型抗滑结构围桩-土的耦合效应分析[J]. 岩土力学,2013(6):1709-1715.
- [56] 李培植. 微桩-土耦合式抗滑桩计算方法研究[D]. 南昌:华东交通大学,2007.
- [57] 徐典. 耦合式抗滑桩模型试验及设计方法研究[D]. 南昌:华东交通大学,2009.
- [58] 刘伟宏. 围桩-土耦合式抗滑结构工作机理研究[D]. 南昌:华东交通大学,2012.
- [59] 孔祥营. 基于 FLAC3D 耦合式抗滑桩作用机理研究[D]. 南昌:华东交通大学,2013.
- [60] PEILA D, PELIZZA S, SASSUDELLI F. Evaluation of behavior of rockfall restraining nets by full scale tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998, 31(1):1-24.
- [61] HELWANY M B. Seismic analysis of segmental retaining walls(Model verification, effects of facing details)[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, ASCE, 2001, 127(9):741-756.
- [62] BRUCE D A. Ilan juranand aomar benslimace, slope stabilization by micro-pile reinforcement[J]. Landslides, 1996.
- [63] GINXBURG L K. Effectiveness of anti landslide retaining structures[J]. Landslides, Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides, 1996.
- [64] 邓大力. 山西省公路边坡防护工程效果[D]. 西安:长安大学,2002:82-87.
- [65] 郑明新. 滑坡推力特征及其对抗滑效果的评价[J]. 中国矿业. 2003, 12(8):58-61.
- [66] 郑明新. 预应力锚索抗滑桩工程效果的数值计算评价[J]. 岩土力学,2007,28(7):1381-1386.
- [67] 郑明新. 滑坡防治工程效果的后评价方法研究[M]. 南京:河海大学出版社,2007.

Research Status and Development Trend of New Anti-slide Pile Structure

Zheng Mingxin

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on the analysis of existing anti-sliding structure and the research status at home and abroad, according to the current main landslide anti-slide piles and prestressed anchor cable anti-slide pile structure of ordinary structure, this paper analyzes the anti-slide pile indoor and outdoor test, internal force calculation method, calculation method of pile spacing, pile method for determining the position and the anchoring depth research present situation. It discusses the circumference coupling anti-slide pile - soil and the structure of the new type arch string coupling anti-sliding research present situation and development trend in the future. Furthermore, the idea and method of post-evaluation of landslide prevention and control effect are put forward, and the popularization and application of new theory and technology of landslide prevention and control are emphasized on the premise that the pile-soil coupling gives full play to the soil's own strength. A new type of anti-sliding structure with "zero displacement" control is put forward according to the requirements of controlling creep slip of high-speed railway roadbed.

Key words: new anti-slide pile structure; arch chord coupling anti-slide structure; research status and development trend