



中南大学教育基金会 熊辉女士资助出版

KANGHUAZHUANG DE ZUOYONG JILI
YU YOUHUASHEJI YANJIU

抗滑桩的作用机理 与优化设计研究

KANGHUAZHUANG DE ZUOYONG JILI
YU YOUHUASHEJI YANJIU

申永江 于洋 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

国家自然科学基金 (41102171)

资助出版



中南大学教育基金会

熊辉 女士

KANGHUAZHUANG DE ZUOYONG JILI
YU YOUHUASHEJI YANJIU

抗滑桩的作用机理 与优化设计研究

KANGHUAZHUANG DE ZUOYONG JILI
YU YOUHUASHEJI YANJIU

申永江 于洋 著



中南大学出版社

www.csupress.com.cn

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

抗滑桩的作用机理与优化设计研究/申永江,于洋著.
—长沙:中南大学出版社,2016.7
ISBN 978-7-5487-2371-4

I. 抗... II. ①申...②于... III. 抗滑桩-研究 IV. TU753.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 161674 号

抗滑桩的作用机理与优化设计研究

申永江 于 洋 著

☐责任编辑 刘 灿

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 湖南金太阳印刷有限公司

☐开 本 720×1000 1/16 ☐印张 13 ☐字数 255 千字

☐版 次 2016 年 7 月第 1 版 ☐印次 2016 年 7 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2371-4

☐定 价 38.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

中国幅员辽阔,山地和丘陵的分布十分广泛,地质灾害频发,其中滑坡灾害造成的危害尤为严重。如,2015年11月13日晚,浙江省丽水市莲都区雅溪镇里东村发生山体滑坡,造成38人死亡,1人受伤。2015年12月20日,广东省深圳市光明新区凤凰社区恒泰裕工业园发生山体滑坡,造成33栋建筑物被掩埋或不同程度受损,73人死亡,4人失踪,4人重伤,13人轻伤,直接经济损失8.81亿元。2016年7月1日凌晨,由于持续强降雨,导致贵州省大方县理化乡偏坡村金星组发生山体滑坡,导致23人遇难,7人受伤。随着社会经济的发展,越来越多的公路、铁路、水库和矿山等在山区修建,势必会诱发大量的滑坡灾害,因此,开展滑坡防治技术的研究具有重大的社会效益和经济效益。

抗滑桩是治理滑坡的有效措施之一,在大型滑坡的治理中常常会用到双排桩甚至是多排桩。目前,抗滑桩的设计并无规范可循,现有的单排桩设计计算方法还存在不足之处,而双排桩的设计更加不成熟。因此,设计人员为了顾及安全往往加大安全系数,使抗滑桩的设计偏于保守。如某滑坡抗滑桩工程施工完成以后,遇到历史上罕见的强降雨,出现了后级滑坡,前、后两级滑坡同时滑动,以超出设计滑坡推力一倍左右的推力作用到抗滑桩上,抗滑桩虽然发生了倾斜,但是没有出现断桩现象,并挡住了前后两级滑坡,滑坡体上的裂缝逐渐挤密闭合,滑坡又重新稳定了下来,之后十几年一直处于稳定状态。另外,由于滑坡的复杂性和抗滑桩设计中存在的不确定性,导致抗滑桩工程也时有失败的案例发生,如渝黔高速向家坡滑坡和攀枝花机场滑坡的抗滑桩工程。另外,滑坡治理中,抗滑桩的用量大,费用高,常常是控制工程治理费用的主导因素,投入到抗滑桩工程中的费用动辄数百万甚至上千万元。本书从抗滑桩工作机理的研究出发,评价其抗滑效果,优化其要素设计,提出新的桩型,并尝试优化双排桩的设计方法,以达到提高滑坡的治理水平和节约治理费用的目的。

本书源于国家自然科学基金项目(41102171)“双排桩与桩排间岩土体相互作用机理研究”。本书的出版得到了中南大学教育基金会熊辉女士的资助,在此表示衷心的感谢!同时非常感谢我的导师——浙江大学尚岳全教授、中南大学防灾科学与安全技术研究所徐志胜教授和李耀庄教授给予的大力支持。中南大学硕士生崔海浩、邓飏、文康、杨明、项正良和马菲等在试验、现场调研、文稿校阅等方面做了很多工作,对此谨致谢意。

由于时间仓促，著者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，恳请专家和读者批评指正。

著 者
2016 年 07 月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 研究背景与意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(4)
1.2.1 抗滑桩国内外应用现状	(4)
1.2.2 抗滑桩设计理论的研究现状	(5)
1.2.3 抗滑桩效果评价研究现状	(12)
1.2.4 双排抗滑桩的研究现状	(14)
1.3 抗滑桩研究中存在的问题	(18)
2 桩间及桩后土拱效应研究	(20)
2.1 土拱效应产生的条件	(21)
2.2 土拱效应的影响因素	(22)
2.3 土拱效应的发展特征	(23)
2.3.1 有限元分析模型	(23)
2.3.2 土拱效应的形成	(25)
2.3.3 土拱效应的发展过程	(28)
2.3.4 桩后土拱效应的影响因素分析	(34)
2.4 双排桩桩排间土拱效应研究	(52)
2.4.1 有限元分析模型	(53)
2.4.2 桩排间土拱效应的形成机制	(54)
2.4.3 桩排间土拱效应的发展规律	(56)
2.4.4 桩间距与桩宽之比对桩排间土拱效应的影响	(56)
2.4.5 桩排距对桩排间土拱效应的影响	(59)
2.5 本章小结	(60)
3 土拱效应的模型试验研究	(63)
3.1 五色土模型试验及监测结果分析	(63)
3.1.1 五色土模型试验介绍	(63)

3.1.2	桩后土体位移的发展规律	(65)
3.2	原色土模型试验及监测结果分析	(70)
3.2.1	原色土模型试验介绍	(70)
3.2.2	桩后土拱拱圈的破坏规律	(70)
3.2.3	桩后土拱拱圈的破坏机理分析	(72)
3.3	三维缩尺寸模型试验及监测结果分析	(75)
3.3.1	试验相似性设计	(75)
3.3.2	试验装置	(77)
3.3.3	试验过程及步骤	(80)
3.3.4	监测结果分析	(81)
3.4	本章小结	(84)
4	抗滑桩抗滑效果的评价方法研究	(85)
4.1	抗滑桩的工作状态	(85)
4.2	抗滑桩内力的计算	(87)
4.2.1	抗滑桩截面弯矩的计算	(87)
4.2.2	抗滑桩内力分布的计算	(88)
4.3	滑坡剩余下滑力的反演	(91)
4.3.1	优化反演分析的基本原理	(91)
4.3.2	反演分析结果的检验与评价	(91)
4.4	计算实例	(93)
4.4.1	工程概况	(93)
4.4.2	抗滑桩的内力计算	(94)
4.4.3	抗滑桩所受滑坡剩余下滑力的反演	(97)
4.4.4	抗滑桩工作状态的综合评价	(101)
4.5	本章小结	(101)
5	抗滑桩截面尺寸和桩间距的合理取值	(103)
5.1	土拱的力学分析	(104)
5.2	抗滑桩合理桩间距的计算	(107)
5.3	实例分析	(110)
5.3.1	杭金衢高速公路 K103 滑坡概况	(110)
5.3.2	K103 滑坡区域的水文地质条件	(115)
5.3.3	滑坡应急治理工程前后的稳定性分析	(116)
5.3.4	完成应急治理工程后的滑坡稳定性分析	(119)

5.3.5 桩间距合理取值的确定	(119)
5.4 本章小结	(120)
6 双排抗滑桩桩顶连接方式的优化设计	(122)
6.1 桩顶连接方式	(122)
6.2 分析方法与计算模型	(123)
6.2.1 双排桩桩顶连接方式的数值模拟方法	(123)
6.2.2 数值分析的三维有限元模型	(124)
6.3 桩顶连接方式对双排桩侧向位移和内力分布的影响	(125)
6.3.1 不同桩顶连接方式双排抗滑桩的侧向位移	(126)
6.3.2 不同桩顶连接方式双排抗滑桩的弯矩	(126)
6.3.3 不同桩顶连接方式双排抗滑桩的剪力	(127)
6.4 合理桩顶连接方式的选择	(128)
6.5 实例分析	(129)
6.5.1 桩顶为同排相连的实例分析	(129)
6.5.2 桩顶为前后排相连的实例分析	(130)
6.6 本章小结	(130)
7 双排抗滑桩桩排距的优化设计	(132)
7.1 桩排距对双排抗滑桩内力的影响研究	(133)
7.1.1 有限元分析模型	(133)
7.1.2 计算结果分析	(134)
7.2 连系梁对双排抗滑桩内力的影响	(142)
7.3 双排抗滑桩桩排距的合理取值	(147)
7.4 本章小结	(148)
8 门架式双排抗滑桩的计算方法研究	(150)
8.1 门架式双排抗滑桩计算模型	(151)
8.1.1 桩间土体应力计算	(152)
8.1.2 桩间土体模型参数的推导	(154)
8.1.3 基本假定和有限元模型	(156)
8.1.4 有限元计算模型参数	(157)
8.1.5 计算结果分析	(158)
8.1.6 弹性模型及计算结果分析	(159)
8.2 桩与锚固段岩土相互作用	(160)

4 / 抗滑桩的作用机理与优化设计研究

8.2.1 刚性桩与弹性桩	(160)
8.2.2 弹性地基梁法	(161)
8.2.3 弹塑性计算方法	(162)
8.2.4 算例	(167)
8.3 本章小结	(171)
9 双排长短组合桩的研究	(173)
9.1 有限元模型	(174)
9.1.1 基本假设、模型及其简化	(174)
9.1.2 材料参数设置	(175)
9.2 后排桩沉埋深度对双排桩内力及变形的影响分析	(175)
9.3 桩排距对双排长短组合桩后排桩最优沉埋深度的影响	(179)
9.4 双排长短组合桩与常见双排桩的对比	(184)
9.4.1 与大孔径单排抗滑桩的对比	(185)
9.4.2 与悬臂式双排抗滑桩的对比	(186)
9.4.3 与门架式双排抗滑桩的对比	(188)
9.5 本章小结	(189)
参考文献	(191)

1 绪 论

1.1 研究背景与意义

我国山地丘陵的面积约占国土总面积的 2/3，地质灾害频发，其中滑坡灾害是最主要的地质灾害之一。随着我国经济社会的发展，越来越多的经济活动在山区展开，比如筑路、开矿、修建水坝等，这样就涉及大量的以滑坡为主的边坡地质灾害问题。据统计，我国长江上游地区共有滑坡 15 万处，中等强度的泥石流分布面积 10 万 km²，有 200 多个城镇受到威胁，其中仅金沙江下游地区及毕节地区、嘉陵江上游地区、三峡库区等地就有危害较大的滑坡 16000 余处^[1]。截至 2002 年 3 月，浙江省共发生有记载的突发性地质灾害 2918 处，另有 2300 余处滑坡灾害隐患点处于不稳定状态，许多村庄和乡镇正在受到滑坡危险体的威胁^[2]。中国统计年鉴(2014)^[3]披露的资料显示，我国滑坡灾害的发生十分频繁，造成的直接经济损失十分严重，每年投入到地质灾害防治的资金呈逐年增加的趋势，见表 1-1。

表 1-1 2000—2013 年全国地质灾害情况统计资料

年份 地区	发生地质灾害数量/处					人员伤亡/人		直接经 济损失 /万元	地质灾 害防治 项目数 /个	地质灾 害防治 投资 /万元
	灾害 总数	滑坡	崩塌	泥石流	地面 塌陷	总伤 亡数	死亡 人数			
2000	19653	13431	2945	1958	347	27697	1179	494201	429	33197
2001	5793	3034	583	1589	554	1675	788	348699	999	44639
2002	40246	31247	3097	4976	521	2759	853	509740	1595	110022
2003	15489	10240	2604	1549	574	1333	767	504325	1815	166514
2004	13555	9130	2593	1157	445	1407	734	408828	2247	175231
2005	17751	9367	7654	566	137	1223	578	357678	3179	166860
2006	102804	88523	13160	417	398	1227	663	431590	2914	193570
2007	25364	15478	7722	1215	578	1123	598	247628	3492	244885

续表 1-1

年份 地区	发生地质灾害数量/处					人员伤亡/人		直接经 济损失 /万元	地质灾 害防治 项目数 /个	地质灾 害防治 投资 /万元
	灾害 总数	滑坡	崩塌	泥石流	地面 塌陷	总伤 亡数	死亡 人数			
2008	26580	13450	8080	843	454	1598	656	326936	5325	529939
2009	10580	6310	2378	1442	326	845	331	190109	28061	54268
2010	30670	22250	5688	1981	478	3445	2244	638509	28106	1159813
2011	15804	11504	2445	1356	386	413	244	413151	20871	928085
2012	14675	11112	2152	952	364	636	293	625253	26882	1024183
2013	15374	3288	9832	1547	385	929	482	1043568	36984	1235363

滑坡灾害常常给工农业生产和国家的经济建设造成影响,甚至给人们的生命财产造成严重损失。1963年意大利 Vaiont 水库近坝地段滑坡致使溃坝,激起的涌浪夺走了2600多人的生命;1982年7月,重庆市云阳县鸡扒子滑坡的整治费用高达1亿元^[4];1985年6月,湖北省秭归县新滩滑坡总方量达3000万 m^3 ,使新滩镇房屋全毁,激起的涌浪使64只木船和13艘小型机动船毁坏,并造成10名船员死亡^[5];2005年浙江省杭金衢高速公路K103滑坡的治理费用超过了2000万元,并对正常交通造成重大影响;浙江省上三高速公路下岩村滑坡群1.5 km的路段发生了大小6个滑坡,总治理费用高达1.2亿元^[6];2008年5月12日的汶川大地震导致了大量滑坡,掩埋了很多地震中受损的房屋,造成了重大的人员伤亡。世界上滑坡灾害严重的国家,如美国、日本、意大利、印度、中国等,每年因滑坡造成的损失均在10亿美元以上^[7]。全世界在1960—1990年期间共有300万人死于包括滑坡灾害在内的各种自然灾害^[4]。

既然滑坡造成的危害如此严重,那么对滑坡处置技术的研究具有重要的现实意义。目前,抗滑桩是治理滑坡灾害的主要工程措施之一,尤其是在大型滑坡的治理中,抗滑桩更是发挥了重要作用^[8-12]。但是抗滑桩的设计还存在很多不足之处,其中设计计算模型是對抗滑桩与桩周岩体这种复杂受力体系的一种简化,比如忽略了桩侧摩擦力,另外很多设计参数是根据经验数据获得,比如地基抗力系数。因此,抗滑桩的设计存在很多不确定性。我国用于滑坡治理的抗滑桩数量十分巨大,其中绝大多数都取得了成功,只有个别失败者,失败的主要原因是滑坡性质把握不准,如滑面位置、滑动范围、滑坡推力等,或者设计参数定得不准,如地基抗力系数等,造成抗滑桩的埋深不足而倾倒或被推断^[13]。因此,抗滑桩施工完成以后,对抗滑桩进行现场监测,进而评价抗滑桩的抗滑效果具有重要意义。

正是因为抗滑桩的设计存在很多不确定性,设计部门为了顾及安全往往加大安全系数,使设计偏于保守。例如某滑坡抗滑桩工程施工完成以后,遇到历史上罕见的强降雨,出现了后级滑坡,前、后两级滑坡同时滑动,以超出设计滑坡推力一倍左右的推力作用到抗滑桩上,使抗滑桩向前倾斜了一个角度,当人们认为工程可能失败时,抗滑桩停止了倾斜,也没有出现断桩现象,并挡住了前后两级滑坡,滑坡体上的裂缝逐渐挤密闭合,滑坡又重新稳定了下来,至今十几年一直处于稳定状态^[14]。已有的许多抗滑桩工程的桩身内力和桩顶位移的实测结果均远远小于设计允许值。这些工程实践资料反映的情况说明,抗滑桩在设计上安全储备过大,其抗滑效果并没有完全发挥出来,抗滑桩的设计还有很多需要优化的地方。另外,因为抗滑桩设计中存在的不确定性,也会出现由于安全系数不够导致抗滑工程失效的情况。渝黔高速公路向家坡滑坡 1998 年公路施工导致古滑坡复活,2000—2001 年采用预应力锚索抗滑桩等措施进行了治理,2004 年 7 月雨季期间,滑坡再次复活,抗滑桩弯曲、挡板鼓出,不得不进行进一步的治理^[15]。在大中型滑坡中,抗滑桩的使用数量一般较大,往往是控制工程治理费用的主导因素,投入到抗滑桩工程中的费用动辄上百万甚至上千万元,因此,在保证安全的前提下,加强抗滑桩的优化设计研究对提高滑坡治理水平,节约开支,具有重大的社会效益和经济效益。

在大型滑坡的治理中,由于桩间距和滑坡体宽度的限制,单排抗滑桩常常无法满足抗滑力的要求,若把多排抗滑桩分别布置到滑坡体的不同部位,有时因地形条件限制及征地困难等原因给滑坡治理带来很大困难。而采用双排桩,则既能提高抗滑力,又解决了平面布置困难问题及减少土地的征用(在土地资源紧缺的东南地区,征地常常成为大问题)。因此,当前在有些滑坡抗滑工程中就采用了双排桩,如杭金衢高速公路 K103 滑坡^[16]、东深供水改造工程 K13 滑坡^[17]、三峡库区巴东县红石包滑坡^[18]、渝黔高速公路向家坡滑坡^[19]等。双排抗滑桩支护结构与其他支护结构相比,具有刚度大、稳定性好、施工方便、不用设置横向支撑、挡土结构受力条件好等优点。但是双排抗滑桩系统十分复杂,对其研究还比较少,设计计算方法不够成熟,理论研究严重滞后于工程应用。目前,相关的国家标准或设计规范均没有对双排抗滑桩的具体设计计算原则和方法作出相应的说明和规定,各设计部门一般按照各自的计算方法并根据工程经验进行设计,设计计算方法差别较大,治理效果各异。

随着我国现代化进程的加快,对能源需求越来越大,对物流的要求越来越高,国家投入到矿业、水电、交通运输中的资金也越来越多。2008 年 11 月 11 日,铁道部发展计划司透露,未来三年我国铁路计划投资规模将超过 3.5 万亿元。经济建设飞速发展势必会遇到更多的滑坡灾害问题,亟须我们对滑坡防治对策进行研究。

综上所述,加强抗滑桩的现场监测,提出一种评价抗滑桩抗滑效果的方法,加强抗滑桩的设计理论研究,不断优化设计,制定相应的规范,是目前的一项紧迫工作。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 抗滑桩国内外应用现状

1. 抗滑桩在国外的应用现状

在国外,抗滑桩早在20世纪30年代便开始在滑坡工程中应用。第二次世界大战之后,随着各国经济的恢复和发展,在工程建设中出现了大量的滑坡,抗滑桩逐渐成为治理滑坡的主要手段之一。国外抗滑桩的发展大致经历了三个阶段^[13]:第一阶段为20世纪30年代到50年代,抗滑桩的初步应用阶段;第二阶段为20世纪60年代到70年代中期,抗滑桩设计理论的初步建立,迎来了抗滑桩在工程应用中的发展阶段;第三阶段为20世纪70年代中后期至今,抗滑桩设计理论不断发展,以及以锚索抗滑桩为代表的各种形式的抗滑桩结构的出现,实现了抗滑桩在工程应用中的快速发展。

第一阶段:初步应用阶段,以1931年11月12日美国工程新闻杂志刊登的《滑坡和桩的作用》为标志。直到二战之后,抗滑桩才开始较多地在工程中应用,但是该阶段属于抗滑桩的应用试验阶段,设计理论还没有建立,主要的抗滑支挡工程是抗滑挡土墙。

第二阶段:发展阶段,以20世纪60年代抗滑桩设计理论的初步建立为标志。该阶段抗滑桩工程逐渐取代抗滑挡土墙,但是抗滑挡土墙仍是主要的抗滑支挡工程。1964年由日本港湾技术研究所的久保浩一、林一宫岛等人提出了“港研法”。欧美国家和苏联多用钻孔钢筋混凝土灌注桩,直径1.0~1.5 m,深20~30 m,日本则多用钻孔钢管桩,钻孔直径400~550 mm,深20~30 m,孔中放入直径318.5~457.2 mm、壁厚10~40 mm的钢管,钢管内外灌入混凝土或水泥砂浆,有时在钢管中放入“H”型钢。为了增加桩的抗弯能力和群桩受力,常将两排或三排桩顶用承台连接,形成钢架受力。也有少数用打入桩。

第三阶段:广泛应用阶段,以抗滑桩设计理论的不断优化,多种形式抗滑桩结构的应用为标志。该阶段抗滑桩已成为主要的抗滑支挡工程。20世纪70年代后期以来,在小直径抗滑桩应用的同时,为治理大型滑坡,大直径的挖孔抗滑桩开始使用。20世纪70年代后期日本开始应用大直径的挖孔抗滑桩。如在大阪府的龟之瀬滑坡上采用直径5 m、深50~60 m的大型抗滑桩。另外,随着预应力锚索技术的发展,锚索抗滑桩开始在滑坡治理中大量使用。

2. 抗滑桩在国内的应用现状

我国铁路上最早应用抗滑桩是在 20 世纪 50 年代的宝(鸡)—成(都)铁路滑坡中^[20]。我国抗滑桩的工程应用和研究虽然起步比国外晚,但是其发展过程也经历了三个阶段^[13]:第一阶段为 20 世纪 50 年代到 60 年代中期,抗滑桩的初步应用阶段;第二阶段为 20 世纪 60 年代后期到 70 年代中期,抗滑桩设计理论的初步建立,迎来了抗滑桩在工程应用中的发展阶段;第三阶段为 20 世纪 70 年代后期至今,抗滑桩设计理论不断发展,以及以锚索抗滑桩为代表的各种形式的抗滑桩结构的出现,实现了抗滑桩在工程应用中的快速发展。

第一阶段:初步应用阶段,以 20 世纪 50 年代宝成铁路史家坝滑坡治理中抗滑桩的应用为标志。在史家坝滑坡中,用几根 3 m 长的抗滑桩埋置在滑动面上下,稳定住了滑坡。1965 年,川黔铁路楚米铺滑坡采用了 3 排打入式钢筋混凝土管桩,桩顶用钢筋混凝土水平桁架连接,形成桩群共同抗滑。

第二阶段:发展阶段,以 20 世纪 60 年代后期在整治成昆铁路沿线滑坡时初步建立的一套抗滑桩设计计算方法为标志。1966 年成昆铁路甘洛 2 号和沙北 1 号滑坡中首先采用了大截面的挖孔、灌注的排式单桩,同时,初步建立了一套相应的设计、计算方法。这种抗滑桩成为路基工程的一项重大技术革新,在滑坡整治工程中得到了推广,迅速改变了我国滑坡防治技术的面貌。20 世纪 70 年代初期,湘黔铁路贵州省境内,在 37 处滑坡中共设桩 478 根,累计长度达 4530 m;襄渝铁路在 27 处滑坡中共设桩 408 根,累计长度达 7796 m。该阶段抗滑桩主要应用于铁路滑坡中。

第三阶段:广泛应用阶段,以抗滑桩设计理论不断完善,多种形式抗滑桩结构的应用为标志。20 世纪 70 年代中后期,在深入研究抗滑桩的受力状态和设计理论的同时,又研究开发了排架桩、刚架桩,承台式抗滑桩和椅式桩墙等新的结构形式,改变了抗滑桩的受力状态,可以节省圬工和钢材。1979 年成昆铁路玉田车站三线大桥滑坡采用了排架抗滑桩。20 世纪 80 年代以来,随着预应力锚索技术的发展,锚索抗滑桩逐渐开始在滑坡治理中应用。该阶段抗滑桩已经广泛应用于铁路、公路、水电、建筑、矿业等领域的滑坡中,抗滑桩的设计理论和计算方法不断得到发展和完善。

1.2.2 抗滑桩设计理论的研究现状

由于抗滑桩外围土层的复杂性和易变性,桩土的相互作用问题短期内尚难完全搞清楚,所以,抗滑桩的设计理论和计算方法都亟待进一步的发展和完善,使之更接近实际。在抗滑桩设计中主要存在以下几个问题:①桩土相互作用问题(抗滑桩作用力系的假定及求解);②抗滑桩的要素设计;③设计计算方法的确定。第一个问题主要集中在滑坡推力和桩周岩土抗力的计算,以及桩土相互作用

机制的研究;第二个问题主要集中在抗滑桩平面位置、截面、间距和锚固深度等的确定,目前设计资料中给出的多为根据工程经验得到的参考值;第三个问题主要集中在水平荷载下抗滑桩最大内力的求解方法。

1.2.2.1 桩土相互作用研究

桩土相互作用问题是典型的非线性问题,主要表现在桩土材料的非线性和桩土接触界面的非线性。目前设计中多对桩土的相互作用进行简化,在一定假设条件下建立线性化的计算模型。如滑坡推力的计算多采用不平衡推力传递系数法,桩前岩土抗力一般在 Winkler 地基模型基础上采用弹性地基梁计算方法。滑坡推力和桩前岩土抗力的研究主要集中在分布形式和合力作用点位置确定的研究。如徐良德等(1988^[21],1990^[22])对滑坡体分别为松散介质和黏性土时桩前土体抗力的分布形式进行了研究。戴自航等(2002)^[23]总结各种试验资料,对各种滑坡岩土体的滑坡推力和桩前滑体抗力的分布规律进行了研究。刘小丽(2003)^[24]根据滑坡稳定性分析中各种极限平衡法的适用条件,推导出常见的五种滑动面形式的滑坡推力计算表达式。

对于桩土相互作用的非线性问题,很多学者做了大量探索研究。Ito 和 Matsui (1975)^[25]考虑桩土相互作用,从单桩出发,根据土体塑性变形理论,提出了抗滑桩由移动土体产生的桩侧作用力的计算方法,此后又对该方法进行了改进和完善。CTPO(1996)^[26]根据理想塑性理论提出了抗滑加固桩排所受滑坡推力的计算方法,并给出了计算公式。沈珠江利用散体极限平衡理论推导了土体沿水平方向绕桩滑动时桩身受到的绕流阻力公式。李仁平(2001)^[27]在 Ito 的理论的基础上,研究了软土地基中被动桩与土体相互作用问题。于清扬(2002)^[28]采用有限元方法来分析桩土相互作用的非线性特征。

桩间土体中土拱效应的研究是揭示桩土相互作用机制的重要内容。桩间土体土拱效应就是由于滑坡体在相邻两桩之间不同位置的位移不同引起的桩间土体与桩后土体抗剪能力的发挥而在土体中形成的“楔紧”作用^[29]。Wang(1974)^[30]最早对边坡工程中的桩间土拱效应进行了研究,将土拱的形状视为直线,推导了桩间土体的压力传递的计算公式。Kellogg(1987)^[31]认为根据不同的工程条件土拱的形状可以是抛物线形、半球形、圆顶形等形状。桩间土拱效应的极限桩间距为 8 倍桩径。Bosscher 等(1986)^[32]通过室内模型试验模拟砂性土边坡中的土拱效应,发现桩间距是影响桩间土拱效应最重要的因素,桩间距越小,土拱效应就越明显。常保平(1998)^[33]分析了桩间土拱产生的机制和抗滑桩的作用机理,运用结构力学和土力学方法,根据土体强度条件推导了桩间距的计算公式。王成华等(2001)^[34]从方桩桩间土拱形成的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。吕庆(2006)^[6]系统研究了抗滑桩桩后土拱效应的发育规律,分析桩后土拱的形状及其主要影响因素的影响规

律。郑学鑫(2007)^[35]研究分析了黏性土和无黏性土中抗滑桩桩间的土拱成拱机理及其主要影响因素。杨明(2008)^[36]在土工离心模型实验及振动台模型实验的基础上,结合数值模拟计算,研究了桩土相互作用机理及地震条件下的抗滑加固技术。彭帅(2013)^[37]采用 PFC2D 软件对土拱效应进行研究,研究表明圆形桩的土拱效应弱于方形抗滑桩,滑带以下土体和桩的锚固段深度对土拱效应有一定影响。桩间土拱效应的研究对揭示桩土相互作用的变化规律有重要作用,因此,对土拱效应的形成机制、发育规律及其影响因素的影响规律的研究有重要意义。由于监测技术的限制,很难通过现场实验对土拱效应进行研究,室内模型试验的研究也还很少,大都通过数值方法进行分析。目前桩间土拱效应的研究还不够深入,还需要对其形成发展过程、影响范围、受力机理等做进一步的研究。

1.2.2.2 抗滑桩的要素设计研究

抗滑桩的要素设计包括平面位置、截面、间距和锚固深度等的确定,目前设计中给出的多为经验值。抗滑桩的平面位置一般根据滑坡的地层性质、推力大小、滑动面坡度、滑坡体厚度和施工条件等因素综合考虑决定。抗滑桩的截面形状一般有矩形和圆形两种,截面尺寸一般根据下滑力大小、桩距以及锚固段的侧壁容许压应力等因素综合考虑。当采用人工挖孔桩时,桩的最小宽度一般不小于 1.5 m,截面尺寸以 2 m×3 m 最为常见。抗滑桩的间距需要考虑很多因素,目前还没有成熟的计算方法,设计时仍需根据桩的截面、锚固深度及锚固段的侧壁压应力等情况综合考虑。抗滑桩的锚固深度与稳定地层的强度、滑坡推力、桩的刚度、桩的截面和间距,以及桩前滑体的抗力等因素有关。目前工程上多从控制锚固段桩周地层的强度来考虑桩的锚固深度。

目前对抗滑桩平面位置的研究还不是很成熟,从经济合理原则出发,抗滑桩一般布置在滑动面较缓、下滑力较小或系抗滑地段、能提供一定桩前抗力的位置。王亮清等(2005)^[38]在深入研究剩余下滑力曲线的基础上,提出了抗滑桩分别位于抗滑段与下滑段的设计滑坡推力的确定方法。雷文杰等(2006)^[39]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,发现不同桩位影响滑坡的稳定安全系数、滑动面的位置和形状。武小菲等(2008)^[40]采用 FLAC 3D 大型有限元分析程序对抗滑桩不同桩位的抗滑效果进行分析,认为不违背设计原则的情况下应尽量将抗滑桩设置在坡脚或半坡中的陡缓交界处。

抗滑桩截面尺寸应保证抗滑桩在阻挡滑坡体位移时有足够的刚度,滑面以上桩悬臂长度与截面高度之比不宜过大,否则桩身会因为刚度不足而破坏,起不到抗滑作用,桩截面的高宽比不宜过大,否则会造成材料浪费,同时保证抗滑桩有一个最小宽度,如果桩宽太小,一方面可能会使抗滑桩的刚度太小,另一方面因桩间距太小而产生材料浪费。规范中对此已有规定,但是抗滑桩的最小宽度一般根据工程经验确定。

抗滑桩截面形状不同,抗滑桩两侧土体承受的极限水平荷载也不同。试验表明,不同尺寸的圆形桩和矩形桩,施加水平荷载时,直径为 d 的圆形桩与正面边长为 $0.9d$ 的矩形桩,在其两侧土体开始被挤出的极限状态下,其临界水平荷载值相等。另外,目前设计中为了简化计算而按平面问题考虑,没有充分考虑桩两侧土体实际受力状态的空间问题,抗滑桩的计算宽度偏小。李维树等(2005)^[41]通过抗滑桩实体原位水平推力试验,通过岩土混合体和岩体的水平位移、应力测量,研究抗滑桩在水平荷载作用下抗力岩土体的破坏形态,根据应力与水平位移沿着桩截面宽度的变化规律和实际破坏裂隙的分布,得到了抗滑桩的有效计算宽度的新公式。

桩间距的确定对抗滑桩的设计至关重要,关系到设计的成败以及资金的投入大小,学者们对桩间距的取值进行了大量研究。肖世卫和刘成宇(1993)^[42]采用以极限分析中的上限方法按空间问题分析求得抗滑桩的极限承力及其与桩间距的关系,根据目前抗滑桩设计中计算土体下滑力的方法结合算例给出了单排抗滑桩合理桩间距的确定方法。另外很多学者认为抗滑桩间距与桩间土体的土拱效应密切相关。王士川等(1997)^[43]认为合适的桩间距应该使桩间土体具有足够的稳定性,在下滑力的作用下,不至于从桩间挤出;在抗滑桩间距上限解的基础上,考虑了土拱效应与桩间土地摩擦力、黏聚力等因素的影响,利用杨森理论推导了抗滑桩间距的下限解计算公式。常保平(1998)^[33]根据土拱效应的强度条件建立了桩间距的计算公式,但未考虑桩两侧摩阻力与滑坡推力的静力平衡条件。王成华等(2001)^[34]从方桩桩间土拱形成的原理和力学特性出发,建立了土拱变形破坏和最大桩间距估算模型,分析了土拱的受力、变形、力的传递和土拱破坏瞬间的最大桩间距,并建立了最大桩间距平面计算模型。周德培等(2004)^[44]在对边坡工程中抗滑桩间土拱效应分析的基础上,提出应以桩间静力平衡条件、跨中截面强度条件以及拱脚处截面强度条件共同控制来确定桩间距,并给出了计算公式。张建华等(2004)^[45]在对桩间土体土拱效应研究的基础上,给出了合理桩间距的取值范围。卢坤林等(2006)^[46]从桩间土拱的研究中发现,影响桩-土荷载分担比的主要因素为土性和桩距,由此建立关系式得到最大桩距。桩间距受多种因素的影响,目前的研究还难以给出满意的结果。

抗滑桩的锚固深度不宜过小,也不宜过大,过小则稳定性差,过大则造成施工困难和资金浪费。目前设计中采用的方法有经验法、极限地基反力法和地基系数法。其中经验法具有较大的随意性;极限地基反力法常常会出现假定前提与结果的矛盾,理论上较为粗糙;地基系数法采用试算法和弹性长桩法,其中试算较为烦琐,而弹性长桩法过于保守。针对以上问题学者们做了大量研究工作。王士川等(1997)^[47]提出了抗滑桩锚固段的弹塑性设计模式,对弹塑性区空间破坏楔体进行了稳定分析,推导出抗滑桩锚固段弹塑性区临界深度的计算式,从而可对