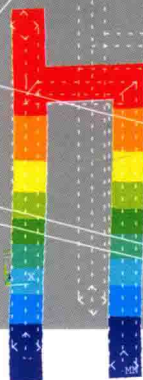


H XING ZUHESHI
KANGHUA ZHIDANG JIEGOU
JILI YANJIU YU YINGYONG



h型组合式抗滑支挡结构 机理研究与应用

王 羽 柴贺军 阎宗岭 唐胜传 熊卫士 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

H XING ZUHESHI KANGHUA ZHIDANG JIEGOU JILI

h 型组合式抗滑支挡结构机理

YANJIU YU YINGYONG

研究与应用

王 羽 柴贺军 阎宗岭 唐胜传 熊卫士 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

普通抗滑单桩作为悬臂结构,受力情况简单,在工程中得到广泛使用,但其抗滑能力有限,自身刚度小,整体技术经济性较低。h 型组合式抗滑桩属于空间 h 型组合抗滑结构体系,可以通过改变前后排桩的排距、樁桩距、连接位置等结构形式,调节其力学性能。在进行 h 型组合式抗滑桩结构分析中,因涉及因素较多,受力机理复杂,十分有必要进行深入地研究。本书针对 h 型组合式抗滑桩这种新型抗滑结构形式,从其受力特点及工程适宜性入手,进行荷载分析与结构计算,并对结构参数进行影响性分析,同时通过数值模拟和模型试验,进一步建立了 h 型组合式抗滑桩设计计算方法。

本书内容丰富,系统全面,可供土木工程、地质工程领域研究人员、工程设计人员及大专院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

h 型组合式抗滑支挡结构机理研究与应用 / 王羽等著

— 北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.1

ISBN 978-7-114-13628-3

I. ①h… II. ①王… III. ①抗滑桩—组合结构—研究 IV. ①TU753.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 009997 号

书 名:h 型组合式抗滑支挡结构机理研究与应用

著 作 者:王 羽 柴贺军 阎宗岭 唐胜传 熊卫士

责任编辑:钱 堃 王景景

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:15.5

字 数:367 千

版 次:2018 年 1 月 第 1 版

印 次:2018 年 1 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-13628-3

定 价:55.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

我国西部山区自然地理和地质构造复杂,地质环境脆弱,地形切割剧烈,地质灾害类型多样,发生频度高。地质灾害发生后,用于滑坡和高边坡治理的费用很高。目前在地质灾害防治问题上,支挡工程技术手段与形式的理论研究严重滞后于工程实践需要。传统支挡结构设计合理性有待改善,对新型支挡结构的探索和应用尚缺乏有效可靠的理论指导作为基础,一定程度地制约了地质灾害防治技术的创新和进步。

普通抗滑桩作为最普遍采用的滑坡支挡措施之一,其最主要的缺点是抗弯能力有限,桩身水平位移大且难以控制。对于推力较大的滑坡,采用普通抗滑桩往往无法满足要求,即使采用大截面设计,其技术经济性也较差。预应力锚索抗滑桩具有主动、柔性支护的特点,但易出现应力松弛、锈蚀和使用受地质环境限制的三大问题。中大型滑坡的防治,必须兼顾结构的稳定性、耐久性,同时,需避免截面尺寸过大带来的施工问题和成本增加。h型组合式抗滑桩属于空间组合抗滑结构体系,可以通过改变前后排桩的排距、樁桩距、连接位置等结构形式,调节其力学性能。在进行h型组合式抗滑桩结构分析中,因涉及因素较多,受力机理复杂,十分有必要进行深入的研究。

在国家科技支撑计划“西南山区干线公路路基灾变过程控制理论与动态调控技术研究”(编号:2015BAK09B00)、交通运输部建设科技项目“新型组合式抗滑支挡结构机理研究”(编号:2013318814180)和国家自然科学基金“基于桩土作用效应的h型组合式抗滑桩全过程受力机理与试验研究”(编号:51408086)的支持下,本书作者对以h型组合式抗滑桩和门架式抗滑桩为代表的组合式抗滑结构进行了大量研究,从h型组合式抗滑桩受力特点及工程适宜性入手,进行荷载分析与结构计算,并通过数值模拟、大型结构模型试验等方法,全面揭示了h型组合式抗滑桩的工作机理与结构性能,进一步建立了h型组合式抗滑桩设计计算方法,研发出了适宜于我国西部山区滑坡防治的新型结构,为地质灾害防治提供了新的工程技术手段。

本书共分为 11 章,由重庆交通大学王羽教授,重庆交通建设(集团)有限责任公司熊卫士教授级高级工程师(以下简称高工),招商局重庆交通科研设计院有限公司柴贺军研究员、阎宗岭研究员、唐胜传研究员共同撰写,其中王羽撰写第 2 章~第 8 章,熊卫士撰写第 10 章、第 11 章,柴贺军撰写第 1 章,阎宗岭、唐胜传撰写第 9 章。全书由王羽教授统稿。成都理工大学许强教授,重庆市交通规划勘察设计院冯玉涛高工,重庆市设计院吴明生高工,重庆建工集团龚文璞高工、张庆明高工、赵波工程师,重庆交建集团张昶高工,重庆交通大学硕士生翟永超、于远志、王富强、付有为、徐航、杨军等为本书做了大量的工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2017 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 主要研究内容	13
第 2 章 h 型组合式抗滑桩受力特性与结构特征	15
2.1 h 型组合式抗滑桩结构受力特点研究	16
2.2 h 型组合式抗滑桩支挡机理分析	22
2.3 h 型组合式抗滑桩结构受力计算思路分析	28
2.4 h 型组合式抗滑桩工程适应条件分析	31
2.5 本章小结	37
第 3 章 h 型组合式抗滑桩荷载分析与结构计算	38
3.1 荷载分析	38
3.2 基于三次超静定图乘法的 h 型组合式抗滑桩受荷段求解	43
3.3 h 型组合式抗滑桩滑面以下锚固段计算研究	46
3.4 h 型组合式抗滑桩整体稳定验算	60
3.5 本章小结	61
第 4 章 h 型组合式抗滑桩结构承载力计算与配筋设计	63
4.1 设置原则与设计内容	63
4.2 h 型组合式抗滑桩结构承载力设计计算	65
4.3 h 型组合式抗滑桩配筋设计的相关要求	72
4.4 本章小结	73
第 5 章 h 型组合式抗滑桩结构特征与支挡机理数值研究	75
5.1 h 型组合式抗滑桩数值模拟研究背景	75
5.2 基于桩—土作用的 h 型组合式抗滑桩有限元模型	75
5.3 h 型组合式抗滑桩结构特征数值模拟研究	81
5.4 桩土作用下组合式双排桩土拱效应研究	85
5.5 本章小结	97

第 6 章 h 型组合式抗滑桩参数影响性研究 98

6.1 排距 Z 对 h 型组合式抗滑桩的影响 98

6.2 h 型组合式抗滑桩土拱效应分析与合理桩间距确定 102

6.3 桩间土变形模量对 h 型组合式抗滑桩结构的影响 110

6.4 桩顶约束条件对 h 型组合式抗滑桩的影响 112

6.5 悬臂段长度变化对 h 型组合式抗滑桩的影响 115

6.6 本章小结 117

第 7 章 h 型组合式抗滑桩大型结构模型试验研究 119

7.1 模型相似比设计 119

7.2 试验设备及抗滑桩模型制作 122

7.3 h 型组合式抗滑桩试验模型结构计算 123

7.4 h 型组合式抗滑桩结构模型试验 131

7.5 门架式抗滑桩试验模型结构计算 142

7.6 门架式抗滑桩结构模型试验 149

7.7 本章小结 155

第 8 章 h 型组合式抗滑桩大型三维地质力学模型试验 157

8.1 试验目的 157

8.2 试验设备 157

8.3 试验准备内容 162

8.4 试验步骤 164

8.5 结果分析 165

8.6 本章小结 179

第 9 章 h 型组合式抗滑桩施工工艺与施工质量控制 181

9.1 h 型组合式抗滑桩桩帽的制作 181

9.2 h 型组合式抗滑桩施工工序研究 183

9.3 h 型组合式抗滑桩施工作业控制要点 188

9.4 h 型组合式抗滑桩施工质量控制 195

9.5 施工常见问题及关键技术措施 197

9.6 本章小结 202

第 10 章 重庆南川—贵州道真高速公路石坝沟滑坡防治工程 203

10.1 项目背景 203

10.2 南道高速 TJ2 工区工程地质概况 204

10.3 石坝沟滑坡特征及稳定性分析 207

10.4 防治工程设计..... 208

10.5 两种治理方案技术比较..... 212

10.6 两种治理方案工程经济性比较..... 214

10.7 h 型组合式抗滑桩施工中其他说明 216

10.8 本章小结..... 217

第 11 章 重庆市渝澳大桥至两路口分流道边坡防护工程 218

11.1 项目背景..... 218

11.2 工程地质概况..... 221

11.3 堡坎基坑规模与变形机理分析..... 223

11.4 主要工程设计..... 225

11.5 本章小结..... 233

参考文献..... 234

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

滑坡,即一定自然条件下的斜坡,由于地下水活动、河流冲刷、人工切坡或地震等诱因影响,使部分岩体和土体在重力作用下沿着一定的软弱面(或软弱带),整体、间歇性、分散地顺坡向下滑动的变形现象。易滑地层,即具备发生滑动的地层岩性条件、地质构造条件、水文地质条件,并在内外地质营力作用下易于发生滑坡等地质灾害的地层。从岩性上讲,易滑地层涉及呈区域性分布的黏土、泥岩、泥灰岩、页岩、硬质岩的软弱岩地层、泥质含量较多的岩浆岩和某些浅变质的板岩、千枚岩、片岩等。我国西部山区,广泛发育着众多易滑地层,在各种因素的作用下,此地区时常发生规模大、危害重的各类滑坡,对该区域的滑坡预测与防治提出了巨大的挑战。

根据国外 E N Bromhead 等人进行过的粗略统计,地质灾害发生后用于滑坡和高边坡治理的费用占总工程费用的 30% ~ 55%。由于我国西部山区自然地理和地质构造复杂、地质环境脆弱,地形切割剧烈、岩土体支离破碎,地质灾害类型多样,发生频度高,加之不科学的人类建设活动,薄弱的经济基础和较差的承受灾害能力,成为影响和制约我国基础设施建设的瓶颈。我国在地质灾害的治理上,目前仍存在各种不足,集中体现于地质灾害发生频率高、破坏性大。

以三峡地区为例,在该地区广泛出露的侏罗系香溪组、沙溪庙组、遂宁组、三叠系巴东组和第四系堆积层等地层,由于外营力的作用,很容易失稳发生滑动。通过调研发现,该地区 52% 以上的路基边坡灾害都集中在上述地层中,故应将这些地层作为该地区主要的易滑地层进行重点研究。加强滑坡等地质灾害研究,特别是易滑地层灾害防治技术研究,对确保路基质量,保障区域交通建设与运营,不断提高公路工程的社会、经济综合效益,具有很大的现实意义。本书通过总结作者相关研究成果,提出并设计适宜我国西部山区易滑地层的新型抗滑结构,力争将易滑地层地质灾害防治技术提高到一个新的台阶,实现减灾防灾的目的。

作为目前应用最普遍的一种滑坡支挡措施,抗滑桩(Slide-resistant Pile)是凭借桩与周围岩、土的相互嵌制作用,把滑坡推力传递到稳定地层,即利用稳定地层的锚固作用和被动抗力,来平衡滑体的剩余下滑力,加固稳定滑坡的工程结构物。抗滑桩具有许多优点,具体如下:

(1) 结构抗滑能力强,能够发挥比抗滑挡墙更好的抗滑效果。同时,设桩位置机动灵活,能根据工程实际需要,将桩设置在抗滑效果最佳的位置,大大提升其运用的适宜性和有效性。

(2) 抗滑桩既可单独使用,也可与格构梁、锚杆、锚索等其他滑坡防治措施组合使用。设置时,可分排进行,这样能够把大体积的滑体划分为局部分散的块体,发挥分而治之的功效。

(3) 抗滑桩施工作业面小, 桩孔间隔开挖, 通常不会恶化滑坡状态, 既可用于支挡正在活动中的滑坡, 也可用于抢修工程和运营线路中的滑坡, 不影响线路正常运行。

(4) 在开挖过程中, 可以根据现场的地层岩性和地下水状况及时调整变更勘察设计, 使之更符合实际工程需要。

(5) 抗滑桩施工简单快捷, 不需要特殊机具设备。一般采用机械化或半机械化施工, 成桩后能迅速发挥抗滑作用。

(6) 桩身配筋是根据弯矩大小进行合理的考虑, 设计时, 相对于不能分段设置钢筋用量的桩(如钢管桩、打入桩)更经济, 有利于优化设计。

(7) 与防治滑坡的传统措施相比, 抗滑桩具有圬工量小、施工速度快捷、抗滑效果佳等特点, 因而受到广泛的重视, 并得到了迅速的发展与应用。

不过, 普通抗滑桩的缺点也非常明显: 其抗弯能力有限、桩顶水平位移大且难以控制、施工面狭窄等。对于一些剩余下滑力很大的滑坡, 采用普通抗滑桩往往无法满足要求; 某些情况下, 由于桩身围岩横向容许承载力的不足, 普通抗滑桩设计必须增加桩长或将其设计成大截面来达到强度标准, 这样, 既加大了施工难度和工程造价, 也影响了工期, 不能保证治理措施的有效性和及时性。

组合式抗滑桩作为一种新型的结构形式, 不仅能有效地克服普通抗滑桩的不足, 还能大幅提高抗滑效能。由于钢筋混凝土连梁的构造设计, 能强化前、后排桩的整体连接, 形成双排桩支护结构体系, 大大增加结构整体刚度和稳定性, 大幅提升抗滑支护能力。经初步估算: 在相同的滑坡推力作用下, 组合式抗滑桩最大弯矩仅为普通抗滑桩的 $1/3$, 受力性能大为提高, 同时增加了施工工作面。若使两者实现相同的抗滑效果, 则组合式抗滑桩工程费用能节省 30% 左右, 故其具有很高的应用价值, 是一种很具开发潜力的滑坡治理结构形式。但是, 作为一种新型抗滑结构, 目前, 国内外对 h 型组合式抗滑桩的受力和变形机理研究甚少, 对桩—土共同作用、桩距、排距、桩径等对支护结构的刚度影响尚未做深入分析; 组合式抗滑桩的抗滑效果也未得到有效的计算与工程验证, 因此, 对组合式抗滑桩进行深入研究具有十分重要的现实意义和价值。

截至 2016 年底, 我国西部地区有超过 3000km 的高速公路修筑在易滑地层之上, 尚有 10000km 以上在建或规划建设的高速公路。如在建的云阳—奉节高速公路, 公路设计全长

69.5km, RK97 + 781 ~ RK98 + 011 段右线右侧的肖家包滑坡(图 1-1)由于路堑挖方, 导致前部滑动。滑坡纵长 124m, 平行线路最大宽度 231m, 平均厚度 15m, 滑坡区上覆第四系残坡积的碎石土, 下覆基岩为三叠系巴东组泥岩、灰岩。由于认识上的不足, 未及时采取防治措施, 使得滑坡滑动后后部岩体松动, 滑坡范围进一步扩大, 致使后续治理措施花费巨大。此高速公路施工过程中, 仅由边坡变形破坏和路基失稳而新增的治理费用就超过 2.3 亿元, 其中 $2/3$ 的费用增加发生在 B1 ~ B14 合同段(易滑地层出露地段)。本书总结了作者相



图 1-1 肖家包滑坡

关研究成果,这些成果可用于在设计阶段的预防护及指导路基工程出现变形和破坏后的防护工程优化,经初步估计,可以节省约一半的造价。若将本技术用于我国西部山区所有规划建设的位于易滑地层的高速公路、高速铁路及其他基础设施建设工程中,将产生巨大的经济和社会效益,需求前景广阔。

本书通过探索和研发适宜于我国西部山区滑坡及高边坡支挡的新型结构,为滑坡与高边坡防治技术和手段提供新的结构类型,从而降低基础设施建设成本,逐步改变易滑地层分布地区及滑坡多发段的地质灾害频发的不利局面。同时,通过成果的应用,提升我国西部山区地质灾害防治技术综合水平,真正提高山区的灾害处治能力,有效提升设计方法的有效性和针对性的目的。

1.2 国内外研究现状

抗滑桩(Shide-resistant Pile)是穿过滑坡体深入于滑床的桩柱,用以支挡滑体的滑动力,起稳定边坡的作用,适用于浅层和中厚层的滑坡,是一种抗滑处理的主要措施。抗滑桩在施工时土方量小,施工需有配套机械设备,工期短,是广泛采用的一种抗滑措施。抗滑桩对滑坡体的作用是利用抗滑桩插入滑动面以下的稳定地层,利用对桩的抗力(锚固力)平衡滑动体的推力,增加其稳定性。当滑坡体下滑时,受到抗滑桩的阻抗,使桩前滑体达到稳定状态。

国外学者 De Beer 依据桩周岩土体与桩的相互作用,把桩分为两类:第一类为“主动桩”,是直接承受外荷载并主动向桩周岩土体传递荷载的桩;第二类是“被动桩”,是由于桩周岩土体在自重和外荷作用下产生变形而使桩间接承受荷载。显而易见,抗滑桩属于侧向受荷被动桩。

抗滑桩的类型划分形式多样,可以从以下几个角度来考虑。由于抗滑桩的力学性质属于侧向受荷结构,按照桩的变形条件,可以分为弹性桩和刚性桩;根据桩的埋置情况和受力状态,可分为全埋式桩和悬臂式桩。此外,抗滑桩根据所用材料不同,可分为木桩、钢桩和钢筋混凝土桩;根据施工工艺不同,可分为钻孔桩、挖孔桩和打入桩;根据桩身的截面形式不同,可分为管形桩、矩形桩、圆形桩等。公路常见抗滑桩如图 1-2 所示。

统计资料显示,目前运用得最普遍的滑坡及高边坡支挡措施主要为大直径抗滑桩、锚索、微型抗滑桩,即通常所说的“一大、二锚、三小”。此三类别在目前的设计和施工中运用得相对比较广泛。如专门针对抗滑桩结构形式进行划分,具体地讲,可以划分为以下几类:

(1) 普通抗滑单桩:普通抗滑桩是穿过滑坡体深入于滑床的桩柱,利用滑动面以下的稳定地层对桩的抗力来抵抗滑体下滑力的一种悬臂抗滑结构。如图 1-3 所示。

(2) 预应力锚索抗滑桩:是将预应力锚索和抗滑桩进行组合,在抗滑桩桩顶及部分桩身处设置预应力锚索,在发挥抗滑桩阻滑能力的同时,依靠锚索的主动锚拉力使抗滑桩的变形受到限制,大幅度改善桩顶位移和桩身的应力状态,能较好地提升抗滑桩的抗滑效果。如图 1-4 所示。

(3) 门架式双排桩:是通过设置前、后排桩竖向桩并用连系梁将前后排桩桩顶进行连接的一种组合抗滑桩结构。其刚度大,抗滑能力强,变形小,一般用于深基坑工程和大推力滑坡治理中。如图 1-5 所示。

(4) 排架式抗滑桩:在门架式双排桩的基础上,增加一根连系梁,由此更强化其抗滑刚度,但此种结构构造复杂,施工难度大。如图 1-6 所示。

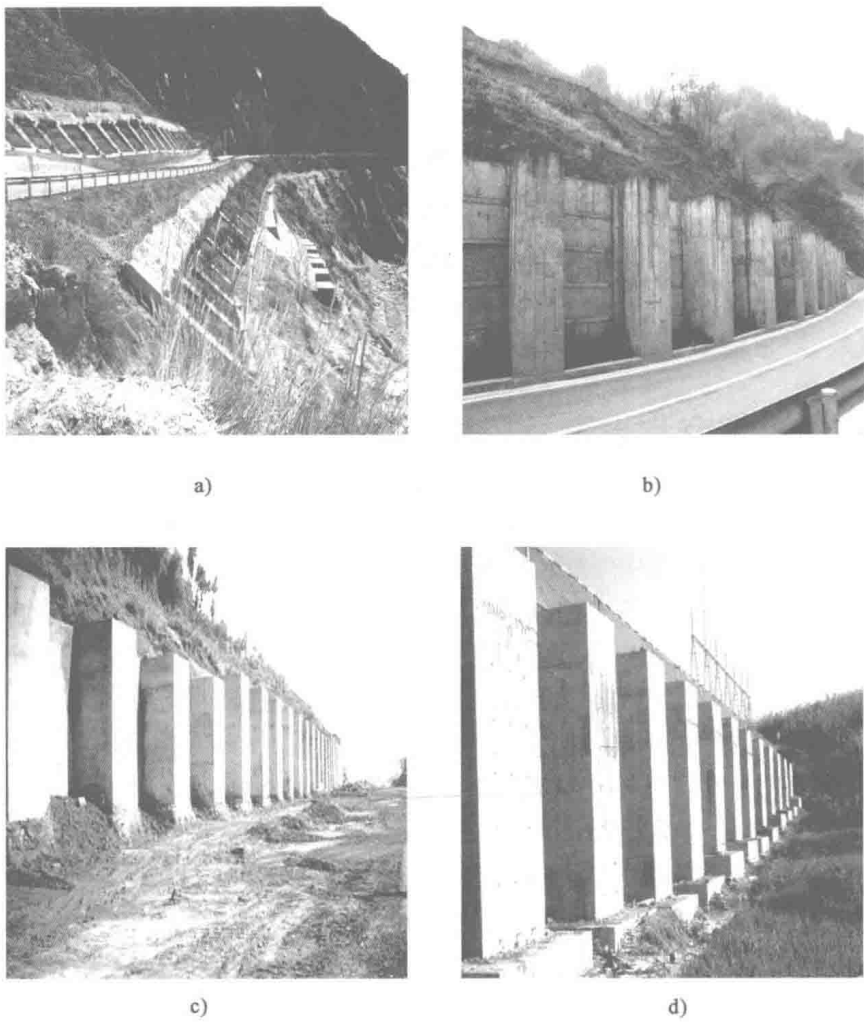


图 1-2 公路常见抗滑桩

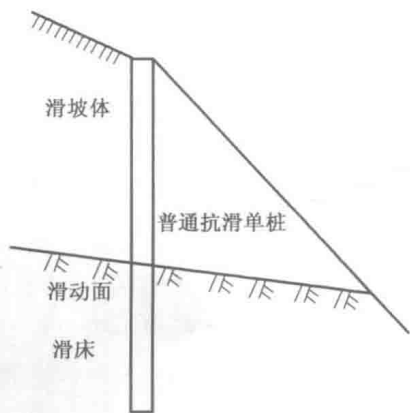


图 1-3 普通抗滑单桩

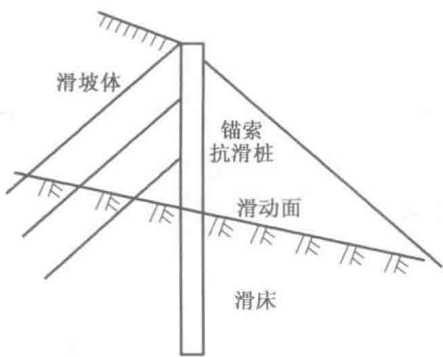


图 1-4 锚索抗滑桩

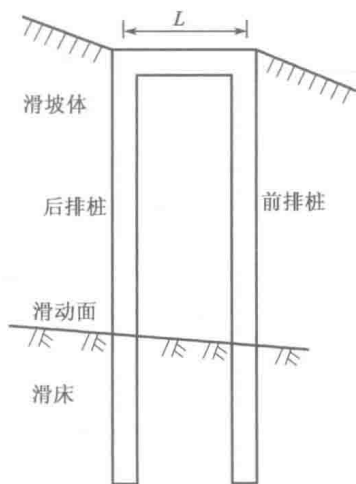


图 1-5 门架式双排桩

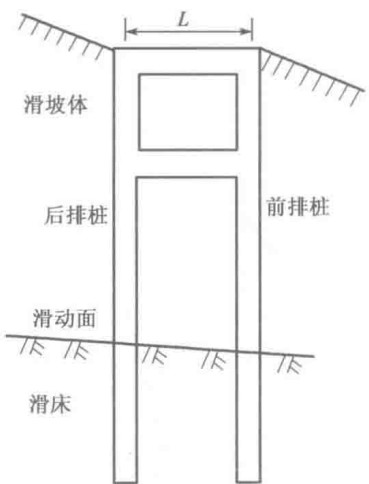


图 1-6 排架式抗滑桩

(5)座椅式桩墙组合:由后排桩、前排桩、连系梁、拱板四部分组成,类似座椅,此种结构抗倾覆能力强,但构造复杂,施工困难。如图 1-7 所示。

(6)微型桩群加锚索:由微型桩(每根桩内放钢筋或钢轨,桩内注水泥砂浆)、预应力锚索、桩顶混凝土 L 形压顶梁组成。如图 1-8 所示。

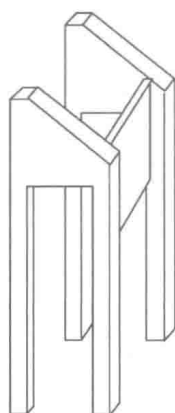


图 1-7 座椅式桩墙组合

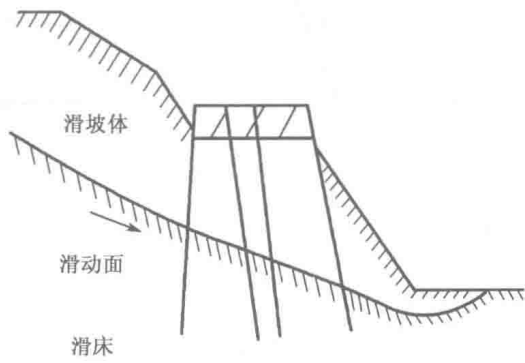


图 1-8 微型桩群加锚索

从目前国内外的研究与工程实践看,在各种桩型的选择上,应根据工程地质条件和滑坡推力大小灵活考虑。普通抗滑单桩是最常用的结构形式,也是抗滑桩的基本形式,其受力简单明确,应用广泛。而预应力锚索抗滑桩,由于预应力锚索的存在,可改变普通单桩的悬臂受力状况,使桩不必完全依靠桩侧岩土抗力来抵抗滑坡推力,可以大大降低桩的截面设计面积和锚固段长度,是一种较为科学合理的桩型。不过,锚索抗滑桩的应用有其局限性,其锚固端必须要具备良好且较坚硬的岩层以提供有效的锚拉力才能正常工作。

当在大推力滑坡防治中,单桩承载力不足或设计的技术经济性较差时,应考虑门架式或座椅式桩等组合桩型。这样的组合式抗滑桩相对于普通抗滑单桩和预应力锚索抗滑桩来说,特别适合应用于软弱地层和剩余下滑力大的滑坡,此时,能充分发挥其抗弯能力强、抗倾覆能力强、桩身弯矩小、桩—土结构变形小、适应地层多样的优势。纵观全国的以抗滑桩为主的滑坡支护措施中,普遍采用的是单排抗滑桩和锚索抗滑桩的支挡形式,双排抗滑桩

及其衍生的组合式抗滑桩,由于现有研究成果较少,尚未得到充分的认识和重视,限制了其在滑坡治理和支护中的应用。结合本书主要研究内容,对国内外研究现状简要分析如下。

1.2.1 抗滑桩力学机理的研究现状

抗滑桩是滑坡防治中的主要工程措施之一,在工程中已得到广泛的运用。有关抗滑桩的研究工作也已经大量开展,其研究工作主要集中在滑坡推力大小和分布的确定、抗滑桩结构内力计算方法、合理锚固深度和优化设计等方面。以下对抗滑桩力学机理方面的研究工作进行简要归纳。

抗滑桩在边坡治理工程中,其承受的主要荷载就是滑坡推力,因此滑坡推力计算结果是否准确将决定抗滑桩的设计的成败与否。目前最常用的滑坡推力计算方法是基于极限平衡原理的传递系数法,但是该方法只能确定滑坡推力的大小,而对于滑坡推力的分布则只能根据经验假定。因此,研究者们对滑坡推力大小和分布的确定进行了大量的研究工作。

San Shyan Lin 利用桩土系统的能量守恒原理,引进傅立叶级数函数和西沙洛平均方法,通过测斜数据来反演抗滑单桩的受力。Begemann H-K S 提出计算由地面荷载产生、作用于桩上的荷载时,可近似地认为桩是刚性的,土体侧向位移和水平应力分布用弹性方法计算,桩按等值板墙考虑。

魏作安等利用专门设计的物理模型试验装置,通过改变抗滑桩的几何尺寸、布桩间距和滑移面角等参数,研究了抗滑桩与坡体的相互作用,获得了不同参数条件下抗滑桩的受力情况和作用在抗滑桩上的滑坡推力,并推导了分布函数。

戴自航等在现场采用千斤顶对抗滑桩分别近似按三角形、矩形、抛物线形施加水平分布荷载,实测了抗滑桩的内力与变形。认为当作用在抗滑桩上的滑坡推力较小时,不同形式分布的滑坡推力对内力计算结果影响不大。

Ito 在 1975 年提出了基于刚性抗滑桩分析计算得到的滑坡推力计算方法,而且提出钻孔灌注桩加固土坡稳定分析的普通条分法,在安全系数算式中包含了桩在临界滑动面处所增加的阻滑力。

许江波对滑坡推力计算的极限分析法和有限元强度折减法进行了对比分析,认为在安全系数较小的情况下,两者的计算结果会有一定的差距,但是随着安全系数的不断增大,两者的计算结果将趋于一致,而且有限元强度折减法在计算出滑坡推力大小的同时能得出推力的分布形式。

肖世国根据对似土质滑体的水平微层段的极限平衡分析,推导了桩后滑坡推力的近似解析表达式。计算结果显示,桩后滑坡推力呈抛物线分布,与室内试验结果相吻合,验证了该方法的正确性。

Cheng Jian-jun 对滑坡推力计算的三种方法进行了分析,认为随着计算理论不断发展,传递系数法必将被更为先进的方法所取代。总的来说,有限元方法不仅能准确计算滑坡推力的大小,还能同时计算出抗滑桩的内力,建议在工程实践中广泛应用该方法。

1.2.2 抗滑桩计算与设计方法研究现状

目前,国内关于抗滑桩的内力计算有许多方法,其中最常用的是弹性桩法和刚性桩法,其区别在于根据桩的变形状态和桩周土体性质采取不同的计算模型和条件假设。其中,在计算滑动面以下地基抗力时,地基系数法应用得尤为广泛,根据不同的应用条件,地基系数法可细分为单参数法(包括“C法”“K法”“M法”)和多参数法。《建筑基坑支护技术教程》中建议的计算方法是“M法”,“M法”在计算过程中是将桩周土体对桩体位移的约束通过等效压缩刚度的土体弹簧来模拟,能部分反映土体与桩的相互作用关系,但该方法不能完全反映土体的本构特征,有一定的局限性。采用多参数法计算出的地基系数,相对比较准确,通过它能够计算出桩身任意位置的变形和内力图,对于滑动面处的剪力、弯矩及变形值,用该方法得出的结果与实际较为相符。

国外关于抗滑桩的内力计算常划分为两部分来进行,一般用悬臂梁法来计算滑动面(带)以上的抗滑段,滑动面(带)以下锚固段则运用线弹性地基系数法(P - y 曲线法),利用 P - y 曲线法求出桩身内力与位移。

在抗滑桩设计方面,由于工程实践较多,国内抗滑桩的设计方法是比较成熟和可靠的,大致有以下几个设计程序:

(1)掌握滑坡的规模、性质、原因和所处的工程地质环境,判断滑坡体的稳定程度及趋势预估。

(2)依据滑带岩土抗剪强度等指标,计算出桩断面的滑坡推力值。这个值是后续设计的重要指标。

(3)依据工程地质条件确定设桩位置和区域。

(4)根据滑坡推力,初步设计出桩身截面尺寸、悬臂段长度和锚固段长度、桩间距和排距等要素。

(5)确定桩的计算宽度和地基系数,运用弹性桩(刚性桩)法,结合桩底边界条件,计算桩身弯矩、剪力、内力和桩侧应力。

(6)校核地基强度和锚固段长度,根据最大弯矩、最大剪力值进行配筋。

国外抗滑桩设计从20世纪70年代开始,经历了漫长的发展过程,其设计思路与国内有所不同,一般有以下几个步骤:

(1)根据人为设定的安全系数来反推此时的剪力值。

(2)计算单根抗滑桩能够提供的阻止滑坡滑移的最大剪力值。

(3)设计出桩身截面尺寸、悬臂段长度和锚固段长度、桩间距和排距等要素,并校核设计结果。

抗滑桩计算方法与设计步骤多样,使用得最多的是“压力法”“位移法”“有限单元法”。在实际工程设计计算中,“压力法”应用最为普遍,其原理简单,能方便地计算出桩的变形和内力的数值解,但“压力法”对滑坡推力的分布形式和桩—土作用关系对最终桩体计算结果的影响考虑得比较粗糙,有一定误差。“位移法”相对来说避免了上述问题,但是,在无支撑的情况下,确定较复杂岩(土)体侧向变形是其不足。随着数值模拟技术的发展,对于抗滑桩的计算,目前学者们一般推荐采用“有限单元法”。“有限单元法”既能考虑结构、材料等因素,也能充

分考虑桩—土相互影响作用关系,并能进行过程控制,该法虽考虑因素比较多,但计算精度较高。特别是郑颖人院士提出的有限元强度折减法,用梁单元来模拟抗滑桩,可以很快地计算出抗滑桩的应力应变状况与桩—土作用关系,大大简化了计算程序。

1.2.3 双排抗滑桩力学机理研究现状

组合式桩一直是基坑支护工程的主要技术措施,国内外学者在此应用领域研究众多,成为近年来研究的热点。20世纪70~80年代,国外部分学者开始提出门架式双排桩的概念,并进行了较初步的探讨:例如 Duncan J M 在1970年尝试性地分析了门架式双排桩基坑工程开挖中的支护运用,依据 winkler 假设和经典土压力理论构建计算模型进行计算,得到了近似的数值结果;Nicu、Oteo 和 Stewart 等人利用现成测量与成果统计,归纳出门架式双排桩桩周土体位移与桩身内力之间的定量关系,由此提出了土压力法、结构变形法等计算方法,对此种结构进行设计计算。Mana A I 在1997年首次较深入地研究了门架式双排桩的结构性能,利用平面有限元法对模型进行计算,并提出了桩间土压力的计算方法,考虑了桩—土共同作用,其计算结果较为理想和准确。

我国在20世纪90年代,中国建筑科学院何颐华、杨斌、龚晓南、金宝森等人开始研究此类组合结构,并进行了室内物理模型试验。模型试验采用两种排距($L=D$ 及 $L=2D$,其中, L 为排距, D 为桩距)的双排护坡桩,并与普通单桩进行比较(双排桩总桩数与单排桩总桩数相等,其中双排桩间距两倍于单排桩)。试验桩数50根,桩径为30mm,桩长为1800mm,单排桩桩距 $D_{\text{单}}=60\text{mm}$,双排桩桩距 $D_{\text{双}}=120\text{mm}$,排距 $L_{\text{双1}}=D=120\text{mm}$, $L_{\text{双2}}=2D=240\text{mm}$,嵌固深度为400mm。最终试验测试两个指标。①桩顶位移:单排桩为44.8mm,双排桩($L=120\text{mm}$)为18.0mm,双排桩($L=240\text{mm}$)为13.1mm。②桩身最大弯矩:单排桩为 $34.2\text{N}\cdot\text{m}$,双排桩($L=120\text{mm}$)桩中最大弯矩为 $20.9\text{N}\cdot\text{m}$;双排桩($L=240\text{mm}$)桩中最大弯矩为 $19.8\text{N}\cdot\text{m}$ 。由此得到结论,双排桩的刚度大、双排位移变形小、桩身整体弯矩值也大幅降低,双排组合桩的支护能力大大优于单排桩。

北京市方庄花园六号楼支护工程中采用了双排组合桩设计,建筑科学研究院地基所对其进行了现场测试。测试显示:钢筋的应力曲线数值与分布规律基本与室内试验接近,证明了室内试验的结果具有较大的指导性。同时,国内个别科研院所与机构也陆续对此种结构的应用情况进行观测与统计,测试指标涉及桩间土压力、钢筋应力应变、桩身(顶)位移、围岩压力等,均得出了双排桩支护效果相对于单排桩更佳的结论。不过,由于此种结构在国内外室内试验与工程实测中均较少,许多数据指标还处于空白状态,有待进一步深入的研究。

国内近年来对以门架式抗滑桩为代表的组合式抗滑桩的研究成果越来越深入,陆培毅、杨靖等采用二维数值模拟探讨了双排桩在深基坑工程软弱地质条件下的应用效果与经验总结;崔宏环等采用三维有限元软件对抗滑桩悬臂式支护结构的力学状态和桩—土效应进行了分析;蔡袁强等采用非线性弹性单元分析法,研究了前、后排桩的应力应变状态及结构位移变化情况,建立了前后排桩变形协调方程,并初步对比了基坑工程中双排组合式抗滑结构相对于单排桩的性能提升幅度。王湛等运用弹塑性分析法将门架式组合结构的桩和桩间土看作整体,推导出桩间土压力的计算式,并通过工程实例进行验证。应宏伟分析建立横撑—排桩—连梁—岩土之间力学影响机制,提出横撑排桩支护结构具有良好的工作性能。戴智敏、万智等通

过三维分析,构建了门架式双排桩的力学模型,探讨了桩间距产生的土拱效应,计算得出了圈梁在控制桩顶位移中的作用和功能;此外,平扬等建立了门架式双排桩位移反分析计算方法,以此可以综合考虑结构各部分的协同工作效应,满足实际设计的需要。曹均坚通过变形协调原理构建了前、后排桩的变形协调方程,在考虑连系梁对组合桩空间作用影响的基础上,提出门架式抗滑桩的力学计算模型;黄凯重视压顶梁和围檩对结构的影响,提出准空间概念,推导出基坑护桩的力学解析解,利用数值软件,计算了支撑围檩、压顶梁对排桩性能的作用,得到一些初步结论,具有一定实际价值。

以上研究的对象均集中于以门架式双排桩为代表的组合桩在基坑工程支护中的应用,不过,门架式双排桩由于其受力机理复杂,前后排桩间土对结构的作用很难确定,故其运用于大型滑坡和高边坡工程并不普遍,特别是结合国内公路工程建设实践,关于此类结构的相关的研究成果较少。王旭、晏鄂川、吕美君采用有限元法计算了滑坡推力在两排桩之间的分布,研究了抗滑双排桩的内力分配,通过构建模型计算了两排桩的剪力和弯矩分布规律,分析了前后排桩排距对桩身内力的影响。探索性地将研究成果应用于三峡库区巴东县中环路内侧某由于路基开挖引发的古滑坡复活治理中。周翠英、刘祚秋等将前排桩和后排桩受到的地基土的抗力简化为弹性支承,将门架式抗滑桩前、后排桩及中间连系梁和桩间土视为一个整体,在前、后排桩的受力状态中必须考虑桩间土的主动土压力和附加土压力的共同作用,提出了桩间土对前排桩的弹性作用模式及桩间土对后排桩的计算分析模型,并将其研究理论应用于东深改造工程 K13 + 785 ~ K13 + 885 区段边坡治理中。蒋楚生计算了椅型抗滑桩的结构内力并进行了变形分析,将设计结果应用于枝柳路 K621 + 823 ~ K621 + 955 地段滑坡治理工程中,初步探讨了此种椅型抗滑结构的力学机理,为其他相似结构的计算提供了参考。杨波、郑颖人、赵尚毅等提出了基于强度折减的有限单元法,在 ANSYS 环境中,分析了在不同的折减系数下组合排桩随滑坡推力、桩前抗力、排距、桩距等变化下的力学状态。刘金龙、王吉利等对比了梅花形布置方式和平行布置方式下,双排抗滑桩的抗滑效果,认为在合适的桩距下,梅花形布置方式可充分发挥前排桩与后排抗滑桩土拱效应,以此实现设计的技术经济最优化。徐风鹤、王金生采用“Finite Difference Method”对刚架式抗滑桩进行计算,并与其他数值模拟方法进行计算结果的对比,证明了该方法在计算精确程度上能够满足要求,并可以满足工程应用的需要,最后,将有关计算结果应用于罗依溪抗滑刚架桩的设计与施工中。

h 型组合式抗滑桩是在门型双排桩基础上创新发展而成,由于结构形式新颖,目前关于 h 型组合式抗滑桩的结构原理与实践探讨的相关论述极少,仅有赵海玲、肖世国等个别研究者对其进行过初步探讨。赵海玲把滑坡岩土体视为弹塑性材料,构建了平面有限元模型,采用 ANSYS 数值分析软件对 h 型组合式抗滑桩进行二维弹塑性有限元模拟,研究其受力状态和前后排桩变形情况,简单地对 h 型组合式抗滑桩受力状态与同等截面的单桩受力状态进行比较,发现 h 型组合式抗滑桩具有更大的抗滑能力。肖世国初步地研究分析了 h 型组合式抗滑桩工作的作用机理,根据其结构特征,建议按滑动面以上和滑动面以下两个部分分别计算,按上下两部分设计步骤进行设计,并尝试性地用于四川省广巴高速公路一大型堆积体路堑边坡工程中,取得了一定的实际效果。

在我国,使用最多、最广泛的也是排式单桩,即在滑坡的适当位置,每隔一定距离挖掘一竖井,再放置钢筋或型钢,最后灌注混凝土,形成了一排或数排的若干单桩。这是我国抗滑桩的