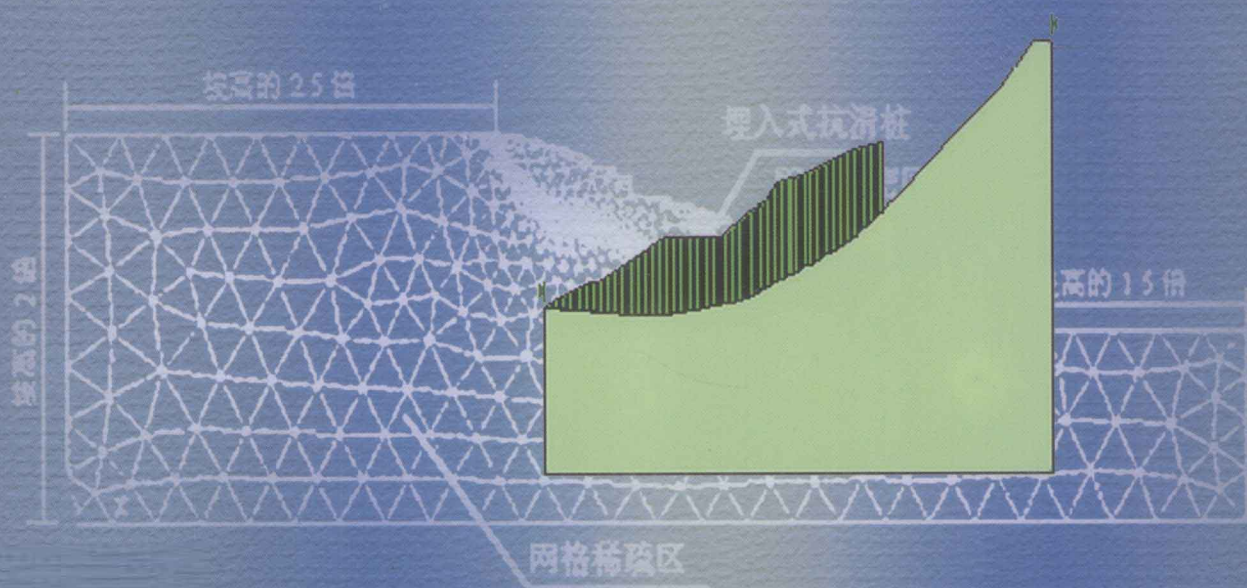


沉埋桩的工作机制与 工程加固设计

雷文杰 唐晓松 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

沉埋桩的工作机制与 工程加固设计

雷文杰 唐晓松 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以三峡库区滑坡特征为基础,结合作者参与设计、咨询、考察的滑坡治理工程,提出沉埋桩设计以有限元法为基础,针对沉埋桩加固边(滑)坡的关键问题(如桩长、桩位、桩间距、桩身内力等),系统研究沉埋桩加固的可行性、适用范围,以静力、动力加载模型揭示沉埋桩加固工作机制,并通过奉节隧道出口滑坡采用单排桩加固、武隆政府滑坡采用双排桩加固工程设计实例介绍沉埋桩的设计分析方法,供工程设计、科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

沉埋桩的工作机制与工程加固设计 / 雷文杰, 唐晓松编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2012.2
ISBN 978-7-5084-9459-3

I. ①沉… II. ①雷… ②唐… III. ①三峡工程—滑坡—沉埋法施工②三峡工程—滑坡—加固—设计 IV. ①P642.22②TV632.719

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第020263号

书 名	沉埋桩的工作机制与工程加固设计
作 者	雷文杰 唐晓松 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13.75印张 326千字
版 次	2012年2月第1版 2012年2月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

抗滑桩是一种常用于防治滑坡的工程建筑物。其抗滑能力强，桩位灵活，可以将抗滑桩埋设在最有利抗滑的位置。经过多年的工程实践，在单排抗滑桩和多排抗滑桩加固滑坡体的基础上，相继开发出埋入式抗滑桩、沉埋桩、变截面抗滑桩、推力传递桩、预应力锚索抗滑桩、板桩墙等多种联合抗滑方式。

沉埋桩作为一种新型抗滑结构形式，其典型特征就是桩顶没有延伸至坡顶，桩顶与坡面部分填土，沉埋桩只承担部分滑坡推力，桩身内力较全埋式抗滑桩低，可以减小桩身截面和嵌岩段长度，在减少材料、降低圬工、降低工程成本等方面有着普通抗滑桩不可比拟的优越性。

本书以三峡库区滑坡特征为基础，结合作者参与设计、咨询、考察的滑坡治理工程而编写，全书共分为7章，第1章介绍普通抗滑桩和沉埋桩的发展现状及其趋势；第2章介绍从本构模型、收敛准则和极限状态判据角度介绍有限元强度折减法的基本组成要素，分析屈服准则及其相互转化、流动法则、模型计算范围与网格划分对计算精度的影响；第3章通过平面应变和三维有限元分析确定沉埋桩桩长、计算桩后推力和桩前抗力，并讨论在库水位变化的情况下边坡稳定性，确定沉埋桩加固动力作用边坡的有效性；第4章重点介绍沉埋桩加固的几个关键问题（双排桩的工作机制、桩位加固效果和抗滑桩的结构参数诸如嵌岩深度、桩头约束、桩长和桩间距）；第5章主要从静力、地震阻尼加载等角度论证沉埋桩模型工作原理，静力加载单排沉埋桩模型试验由无桩边坡、全长桩、四分之三长桩、半长桩、三分之一长桩等五组试验组成，分析不同桩长对滑坡体的加固效果，通过对模型设置不同类型、幅值、频率的地震波和白噪声激励，探索研究沉埋桩的动力与振动响应规律；第6章主要介绍沉埋桩的适用性及其优化设计，从滑体强度、滑面形状、滑体厚度、桩前滑体坡面形状对沉埋桩加固效果的适用性进行分析，提出沉埋桩有限元设计方法，针对滑坡体目标安全系数，以滑坡推力为评价指标，采用支持向量机和遗传算法全局优化，确定合理桩长、桩位；第7章介绍沉埋桩加固奉节分界梁隧道出口大型堆积层老滑坡和武隆县政府滑坡两个滑坡工程实例。

本书由河南理工大学雷文杰和重庆市地灾中心唐晓松共同编著，第1章，第3章的3.1、3.2节，第4章的4.1、4.2节，第5章的5.1、5.2节，第6

章的 6.3 节由雷文杰完成，第 2 章，第 3 章的 3.3、3.4 节，第 4 章的 4.3、4.4 节，第 5 章的 5.3 节，第 6 章的 6.1、6.2、6.4 节和第 7 章由唐晓松完成，全书由雷文杰统稿。本书在撰写过程中得到郑颖人院士和冯夏庭研究员多年的悉心教导和帮助，并提出了很多建设性的建议，在此表示衷心的感谢。本项研究得到国家自然科学基金面上项目“沉埋桩坡体破坏模式及其设计原理”（资助号：40872191）资助。

由于作者水平有限，错误或不当之处还请读者批评指正。

编者

2012 年 1 月

目录

前言

第1章 引言	1
1.1 普通抗滑桩的关键问题	1
1.2 沉埋桩工程应用的技术瓶颈	5
1.3 本书的主要内容和创新点	7
第2章 有限元强度折减法的原理与操作	9
2.1 概述	9
2.2 屈服准则及计算精度	15
2.3 有限元强度折减法的应用实例与操作	24
第3章 沉埋桩加固的可行性	47
3.1 概述	47
3.2 单排沉埋桩在滑坡治理工程中的应用	47
3.3 沉埋桩在水库岸坡治理工程中的应用	64
3.4 地震作用下沉埋桩在滑坡治理工程中的应用	72
第4章 沉埋桩加固工程设计计算的相关问题	83
4.1 多(双)排抗滑桩的工作机制	83
4.2 桩位变化的数值模拟	99
4.3 影响抗滑桩治理效果的结构参数	104
第5章 沉埋桩静力和动力加载模型的工作机理	111
5.1 概述	111
5.2 静力加载沉埋桩的模型试验	112
5.3 地震环境下沉埋桩的模型试验	158
第6章 沉埋桩的适用性及优化设计	168
6.1 概述	168
6.2 沉埋桩的适用条件	168
6.3 沉埋桩的有限元设计方法	175
6.4 沉埋桩的优化设计方法	181
第7章 典型滑坡治理工程的沉埋桩加固设计	189
7.1 单排沉埋桩加固工程设计	189
7.2 多排沉埋桩加固工程设计	197
参考文献	206

第 1 章

引 言

抗滑桩是防治滑坡常用的一种工程建筑物，一般埋设在滑坡体中一定的位置，可以完全埋设在坡体表面以下，也可以部分露于地面以上，其共同特征是抗滑桩必须有一段持力层，保证桩身在滑坡推力作用下，抗滑桩不会随着滑坡体变形而桩身整体也发生移动；没有持力层，设抗滑桩就完全没有意义，就不能起到抗滑的作用。抗滑桩四周都被滑坡体包围时为埋入式抗滑桩，如果埋入式抗滑桩抗滑段只是部分滑体厚度、桩顶至坡体表面部分需要回填时为沉埋桩。由于桩与周边滑体相互作用，将滑坡推力传递到稳定层，利用滑床的锚固作用、被动抗力或桩前土体的抗力，来平衡滑坡推力；滑坡体由于抗滑桩的抗滑作用，滑坡体的稳定状态得以改善，这样滑坡体的变形就得以控制。

抗滑桩加固滑坡体有着其他抗滑工程不可比拟的优点：抗滑能力强，在滑坡推力大、滑带位置较深的情况下，可以克服挡土墙难以克服的困难；桩位灵活，可以将抗滑桩埋设在最有利抗滑的位置，可以单独加固，也可以联合锚索、锚杆和格构梁等其他建筑物；可以适用于某些特定滑坡区域，如文物保护、线路选址、重要建筑物已经不能变更其空间位置时，不能通过挖方填方维持滑坡体稳定；在滑坡体已经处于稳定期时施工不会恶化滑坡状态，通过间隔开槽挖孔，可以校核工程勘察给出的地层、地下水的分布和滑坡体的组成，可以及时变更勘察和设计文件，使抗滑措施切合实际，确保滑坡体加固措施行之有效。

1.1 普通抗滑桩的关键问题

1.1.1 抗滑桩加固滑坡的设计方法

抗滑桩可以提高滑坡体稳定性，国内外都有不少的研究成果。国外有很多研究者从事抗滑桩加固滑坡体研究（如 Sommer 1977，Esu 和 D'Elia 1974；Ito 和 Matsui 1975，Ito 等 1982；Nethero 1982；Morgenstern 1982；Gudehus 和 Schwarz 1985；Reese 等 1992；Rollins 和 Rollins 1992）。尽管这种加固方式已经广泛应用，但是抗滑桩的设计方法也是不尽相同。Poulos HG 与 Viggani 都采用相近的设计思路，其主要设计步骤为：①计算出将安全系数提高到需要值所需的剪力；②计算每根桩在阻止边坡潜在失稳部位移动时所能提供的最大剪力；③选择桩型、桩的数量和坡体中最合适的布桩位置。第 1 步可用稳定分析来估算稳定所需的附加剪力。第 2 步分析桩对水平移动土体的反应，同时可以算出作为桩径、桩身柔度、与桩长有关的运动土体的相对厚度等参数的函数的桩所发挥的抗剪力。第 3 步系与第 1、第 2 两步分析结果相关联的桩结构、桩位等参数。Poulos (1997) 还介

绍了该方法在澳大利亚纽卡斯尔地区一条公路支线边坡加固的应用。

目前我国各种规范规定滑坡加固中抗滑桩的设计步骤大体如下。

首先搞清滑坡体所处的地形地貌、地质构造、岩土体的组成和相对位置、滑坡体各组成元素的物理力学性质、地下水的分布及滑坡体的渗透性能，了解滑坡发生的机理，从而可以分析滑坡体当前所处的稳定性状态，可以估计滑坡体继续移动趋势。

根据勘察提供的报告，绘出滑坡体纵断面图，根据勘察钻取的岩芯和其他物探方法，判定滑面位置；均质土坡还可以通过极限平衡方法求出滑面。根据室内和现场直剪试验直接给出滑面，或由滑坡体自身、滑坡体中已有结构物所处的状态反算得出滑面（滑带）的抗剪强度。计算滑坡体纵向不同位置的剩余下滑力，从而可以求出设桩断面的滑坡推力。

根据滑坡体地形、施工条件和抗滑桩分级治理滑坡体的范围等因素确定抗滑桩的设桩位置和加固范围；在明确设桩位置以后，可以确定桩后承受的滑坡推力，选取桩前土体抗力，据此确定桩的截面大小、桩间距和桩的锚固段长度，从而可以计算出滑面以上桩身剪力和弯矩。

根据地基系数和桩的截面尺寸，判定抗滑桩为刚性桩或弹性桩；根据桩底的边界条件采用相应的公式计算桩身变形、内力（剪力和弯矩）和侧壁应力，并求出最大弯矩、剪力及其相应的位置。

校核地基强度，调整桩的锚固段长度；进行抗滑桩的配筋设计。

抗滑桩已经在工程上广泛应用，并成功治理许多各种形式的滑坡。实际上，抗滑桩的计算与设计并不能完全与抗滑桩实际受力与变形结果一致。

1.1.2 抗滑桩的抗滑段所受滑坡推力及其分布

国外加固滑坡主要采用钢管桩，考虑抗滑桩的受力状态，主要是为了求得抗滑力。抗滑桩加固滑坡体时，由于抗滑桩的刚度比土体高出很多，而且抗滑桩还有锚固段，因此认为抗滑力与构成滑坡土体的性质有关。土体紧密，桩周就会产生很大的应力集中。如果土体为松软具有流动性的黏土，桩间土体受到挤压，就不会产生很大的抗滑力。如果将土体看成黏性流体或塑性体时，产生的抗滑力就会有所不同。计算抗滑力的方法有多种。包括 Lamb 公式、White 公式、Hennes 公式和日本土木研究所公式。

Lamb 公式未考虑桩间距，没有考虑桩群效应，黏性流体产生压缩，从而使滑坡体发生变化，用这种公式计算的抗滑力比实际要小。White 公式建立在 Lamb 公式基础之上，考虑桩间距的作用。以上两种计算公式都将滑坡体看成黏性流体，只适用于老年期泥流状滑坡，特别是黏性系数，一般认为其大小为 $10^5 \sim 10^{14}$ ，实测很困难，误差很大，因而这两种公式除了特殊情况外都不很实用。

Hennes 公式虽然考虑了滑坡体滑动方向的直径，但没有考虑抗滑桩截面的高度（即垂直于滑动方向桩的直径），将抗滑桩看成在设桩断面上为一薄平板，没有考虑土体的压缩和剪切变形。滑坡体被认为是黏性土，没有考虑滑体强度的内摩擦角，实际上，滑坡体内摩擦角在 $10^\circ \sim 30^\circ$ ，产生的抗滑效果有时比黏聚力还要明显，显然内摩擦角是不能忽视的。

日本土工研究所公式中，将桩后土体产生的被动土压力作为抗滑桩所受的推力。认为在被动极限状态下，桩后土体发生被动破坏。

对于人工挖孔竖井抗滑桩,设计方法多采用 Engel 公式。将滑面以下的地基反力,作为二次抛物线分布考虑,根据力与力矩平衡就可求出最大抗力和弯距。

国内抗滑桩大多采用人工挖孔桩,抗滑桩桩后推力一般都被认为是桩后断面的滑坡推力的水平分力,这个结论是具有共同认识的。对于桩前滑坡体的抗力而言,如果桩前无滑坡体支挡时,一般按照悬臂桩考虑就可以了,认为抗滑桩桩前无抗力,由抗滑桩承担全部滑坡推力;如果桩前有滑坡体,如全埋式抗滑桩,桩前受力目前还没有定论。桩前滑坡体的抗力有三种计算方法,一种是桩前按照弹性抗力考虑,即按照滑体地基系数和桩前土体的变形来计算;另一种按照桩前滑体最大被动抗力计算,假定由于桩身变形,桩前滑体出现被动屈服面,根据被动土压力理论计算桩前抗力;其次就是桩前剩余下滑力,即无抗滑桩加固时滑坡体处于极限状态时的剩余下滑力的水平分力。为安全起见,抗滑桩设计中通常取这三种桩前抗力的最小值,这在一定程度上取决于经验。

抗滑桩推力计算的目的是为了求得桩身最大弯矩和最大剪力,其中最大剪力只是验算抗滑桩截面的剪切强度,是设计的参考值,最大弯矩才是抗滑桩结构设计的关键部分。计算桩身弯矩,还要了解桩身推力以何种方式分布到桩上。目前桩身推力分布方式的类别主要假设为三角形、矩形、梯形和抛物线形。国内外针对桩身推力分布采用不同的方式。国外多将滑坡体视为散体,采用三角形分布;国内多用矩形分布,合力作用点位于滑面以上桩顶一半高度位置。两者造成的倾覆力矩很大。尤其对于推力较大的滑坡,更是如此,因而影响抗滑桩结构的截面大小和埋深。日本学者认为滑坡滑动时,滑坡推力主要集中在滑面以上 1~2m 处,推力分布采用三角形比较合适。我国某些文献建议:当滑体是黏聚力较大的地层(如黏土、土夹石、岩石等),其推力分布可近似按矩形考虑;如果滑体是一种以内摩擦角为主要抗剪特性的堆积体(如砂土),其推力分布可近似按三角形考虑;介于二者之间,按梯形分布。当然,桩上推力为三角形分布时桩身推力重心降低,弯矩计算结果偏小,经济上最为合理。

1.1.3 抗滑桩的内力计算方法

目前抗滑桩内力计算理论基础为 Winkler 弹性地基梁,计算方法来自桥梁、码头受水平推力的桩基内力计算方法。按照桩的变形特点,又分为刚性桩和弹性桩。刚性桩是指抗滑桩由于滑坡推力作用绕滑面以下某一固定点转动,桩身没有弹性变形,转动形式为刚体转动。弹性桩同样由于滑坡推力作用,抗滑桩桩身不仅发生转动,而且桩身发生弹性变形。刚性桩的计算相对简单,弹性桩的计算方法又有多种计算方法。

抗滑桩受荷段与锚固段的受力是单独计算还是将整根桩整体考虑,又可分为悬臂桩法和地基系数法。悬臂桩计算方法是受荷段当做悬臂梁考虑,剪力和弯矩根据滑坡推力分布,按照材料力学中悬臂梁计算剪力和弯矩。对于刚性桩,锚固段的内力计算主要是求出转动中心。弹性桩锚固段内力计算根据弹性地基梁理论计算。地基系数法是先计算锚固段的变形和内力,根据弹性地基梁理论计算抗滑段的变形和内力,然后根据桩底的边界条件求出桩顶变形和内力,进而求出每个截面的变形和内力。由于适用条件不同,地基系数法又分为单参数法(如 m 法、 k 法、 c 法等),多参数法(如我国学者吴恒立提出的双参数法)。

m 法适用于滑面上、下地层为一般土层和严重风化的岩层,即地基系数随深度成正

比例增加的情形。 k 法适用于岩层地区，即地基系数为常数的情形。 $m-k$ 法适用于滑面以上地层地基系数随深度成正比例增加，滑面以下地层地基系数为常数的情况，如滑面以上为土层、滑面以下为岩层的情况。

弹性桩的计算方法较为复杂，需要求解 4 阶微分方程。国外，常将滑面以上（抗滑段）当做悬臂梁考虑，滑面以下采用线弹性地基系数法，即 $p-y$ 曲线法，通过有限差分法计算锚固段的内力。国内目前抗滑桩设计软件种类也很多，如理正、同济曙光等，克服了传统抗滑桩设计计算查表的繁琐。国内运用地基系数法研究抗滑桩内力计算的成果也不少，很多研究成果用于滑坡治理，并且取得不错的经济和社会效果。

戴自航等指出运用地基系数法计算抗滑桩内力存在一些问题。对此，根据刚性桩的受力和变形特性，提出运用地基系数法计算刚性桩内力的数值方法；并根据弹性抗滑桩的受力和变形特性，运用有限差分法推导出了弹性抗滑桩内力计算的数值方法。戴自航等进一步研究了这种线弹性计算模式，运用有限差分法进行全桩的内力分析，提出相应的计算模式，并将该研究成果计算工程实例。比较分析认为提出的计算方法符合理论分析和现场试桩规律相同，该方法的最大弯矩计算结果比常规计算方法显著减小，证明运用该方法设计抗滑桩更显经济、实效。杨佑发等运用地基系数法中的 $m-k$ 法，提出锚索抗滑桩中的抗滑桩内力计算的有限差分法，并编写了该法的计算与图形处理程序，该程序还可以优化抗滑桩的结构设计。魏作安等提出多段地基系数法，其优点是可以适合地基系数不同的多层岩土层，还可用于桩身为变截面的抗滑桩计算。周春梅等运用双参数法计算抗滑桩的内力，并将该方法用于湖北省秭归县水田坝乡下土地领滑坡中的抗滑桩设计，通过与传统方法比较，发现双参数法能够提高抗滑桩设计的经济性和安全性。

有限元法也可以计算抗滑桩的内力。张友良等运用杆件有限元和 Winkler 假设，建立求解抗滑桩单桩、预应力锚索抗滑桩和刚架抗滑桩的力学模型，应用实例表明杆件有限单元法准确实用。郑颖人等运用有限元强度折减法，抗滑桩用有限元中梁单元建模，不用作任何假定，直接可以计算出滑坡推力及其分布、抗滑桩的内力包括剪力和弯矩。有限元法克服了传统计算方法计算抗滑桩内力的计算繁琐，显得更为简单实用。

1.1.4 抗滑桩结构形式的变化

我国目前抗滑桩加固滑坡体的结构形式为矩形桩，截面大，对于岩质、滑坡体整体性较好的滑坡体可以起到良好的支挡效果。经过多年的工程实践，在单排抗滑桩和多排抗滑桩加固滑坡体的基础上，相继开发出埋入式抗滑桩、沉埋桩、变截面抗滑桩、推力传递桩、预应力锚索抗滑桩、板桩墙等多种联合抗滑方式。

骆银辉等通过对松散土的滑坡体活动特点及抗滑桩受力分析，提出异型抗滑桩的设计方案，如梯形截面抗滑桩。这种抗滑桩不但经济，桩间土由于滑坡推力作用下被挤密，与桩形成一道桩土墙。马辉等分析抗滑桩的受力性质和工作状态后，提出两种新型抗滑桩结构及其实践应用的可行性，即变截面抗滑桩和推力传递抗滑桩，从根本上改变了传统的抗滑桩的力学性质和桩身受力状态，值得深入研究、推广和应用。

预应力锚索抗滑桩改变了传统抗滑桩的受力状态，变悬臂梁为简支梁，使桩身内力大幅下降，节省了工程造价。改变了桩的受力机制。传统抗滑桩为被动式，即在滑体位移后才起作用，而预应力锚索抗滑桩则为主动式，人为地通过锚索给滑体

预应力,提高了滑坡稳定性,对于滑体上有重要建筑物的滑体加固来讲,优点明显。预应力锚索抗滑桩可灵活地与其他加固方式,如格栅状梁体系通过锚索设于交点处联成整体,组成一个加固支挡体系,同时起到深浅部共同加固的作用。自从1983年重庆金鸡岩滑坡使用预应力锚索抗滑桩方案以来,已经成功地用于山体滑坡加固、公路滑坡治理、桥梁墩台与基础的偏移及防治、国道319线上杭吊钟岩古滑坡体综合治理、高速公路路堑滑坡治理、混凝土重力坝加固。

预应力锚索抗滑桩的受力状态和设计方法也在不断地深入研究。田景贵等介绍了预应力锚索抗滑桩的抗滑机理和设计方法。刘小丽等提出预应力锚索抗滑桩的动态设计法。杨佑发等提出锚索抗滑桩内力计算的有限差分“K—K”法。曾云华等进行了预应力锚索抗滑桩的受力模型试验。

1.2 沉埋桩工程应用的技术瓶颈

悬臂式抗滑桩就是桩前没有滑坡体,处于临空状态,桩前坡体不提供抗力。埋入式抗滑桩设置在滑坡体中部,桩前、桩后都由滑坡体组成,桩顶一直延伸至坡体表面,桩后承担滑坡推力、桩前提供抗力。沉埋桩的埋设位置一般位于滑坡体中部,与埋入式抗滑桩主要差别是桩顶没有延伸至坡顶,桩顶与坡面部分填土。沉埋桩和桩顶坡体共同承担滑坡推力,桩身推力比埋入式抗滑桩低,根据坡体稳定性需要选择沉埋桩的抗滑段长度,优化桩身内力、桩身截面和嵌岩长度,这就较埋入式抗滑桩有着典型的优越性。

沉埋桩作为一种新型抗滑结构形式,已经在工程上开始应用。成昆线毛头马1号隧道进口段(K284+180—430)及路基段(K284+030—180)位于古错落体上,隧道和路基刚好位于滑面以上位置,滑体厚度大,刷方以后,隧道出口处滑面深度至少有40m左右,路基滑面深度也有25m左右。如果采用全埋式抗滑桩,抗滑桩长度至少需要70~80m,这在抗滑桩设计中是不可思议的,而且工程施工也很不方便。铁道科学研究院西北分院采用沉埋桩,抗滑桩长度最长才有50m,工程施工后至线路运营至今,该段没有发生滑坡问题。2002年,铁道第二勘察设计院在重庆市涪陵区黄桷碛滑坡治理工程当中使用了31根(共五种桩型)下沉式抗滑桩(即沉埋桩)治理了大约200万 m^3 的滑坡。

埋入式抗滑桩可以达到加固滑坡体的目的,对于厚大的滑坡体(如古滑坡体上覆较厚的堆积层,滑体厚度达到50~80m),其桩长就会达到100m左右,这种情况下采用普通全埋式抗滑桩污工量就很大。根据我国各行业的勘察设计规范,滑坡体加固后只要达到一定的稳定性就可以达到工程要求(如三峡库区地质灾害防治规范要求滑坡体加固后安全系数达到1.15就满足稳定性要求),因而可以减少抗滑桩的长度,这样就可大大降低抗滑桩的混凝土和钢筋用量,从而可以降低工程造价,这无疑也是今后滑坡治理的一个发展方向。

刘惠明针对滑体为松散体时,抗滑桩为全埋式和桩的抗滑段长度为滑面深度的3/4进行了两类模型试验,发现抗滑段长度变化,桩身最大弯矩位置没有变化,全埋式抗滑桩的桩顶弯矩很小,在保证滑坡体不越顶的情况下,可适当减短抗滑段的长度,减短部分的下滑力和滑体抗力由桩的顶部承担。

熊治文在介绍深埋桩(与沉埋桩特征相同)相关试验的基础上,说明了深埋桩的受力

分布规律、适用条件，以及深埋桩受到的滑坡推力大小与桩顶埋深之间的关系。试验结果认为桩顶埋深率（桩顶至坡体表面长度与滑坡体厚度比例）低于 20%，深埋桩承担全部的滑坡推力；埋深率 35% 时，深埋桩承担全部滑坡推力的 80% 以上；埋深率 54% 时，深埋桩承担全部滑坡推力的 60% 左右。

重庆市地质灾害治理规范编写组为验证沉埋桩简化计算公式是否合理安全反映埋入式抗滑桩的阻滑效果，为实际工程设计提供理论依据，进行沉埋桩的模型试验。沉埋桩抗滑段长度为滑体厚度的 1/2、1/3、1/4，试验结果表明滑体强度较高时、桩长长度合适时完全可以采用沉埋桩治理滑坡。

重庆市地方标准《地质灾害防治工程设计规范》（DB 50/5029—2004）对沉埋桩提出了简化参考计算方法，该计算方法假定桩后滑体滑移路线将沿被动土压力破裂面进行，同时为了保证抗滑要求，还假定滑块 $EBCD$ 不沿 EG 面滑动（图 1-1），滑体土与桩计算宽度范围内的接触压力应小于滑体土水平承载力的特征值，并由此假定来展开计算和公式推导。桩顶与滑坡体表面还有一定的距离，认为抗滑桩抗滑段 $\overline{AB}$ 承担全部滑坡推力，图 1-1 中的 $\overline{BC}$ 段的滑坡推力经桩顶传至桩身为一倒三角形分布，而图 1-1 中的 $\overline{AB}$ 段的滑坡推力传至桩身为一矩形分布，具体形状见图 1-2。规范中给出控制沉埋桩抗滑段最短长度的关系式，据此确定桩的长度。

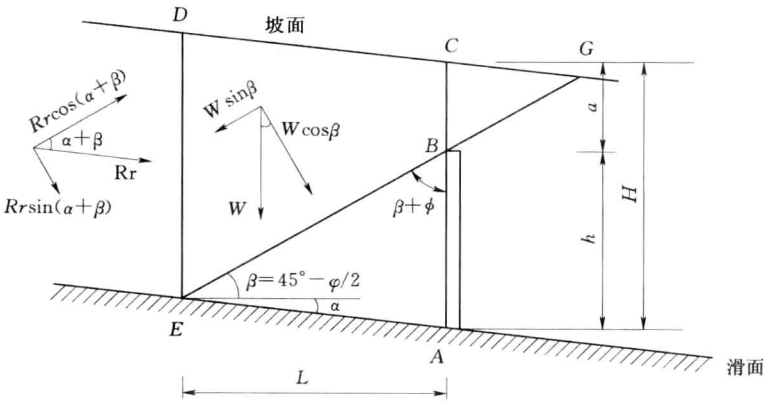


图 1-1 沉埋桩简化计算图

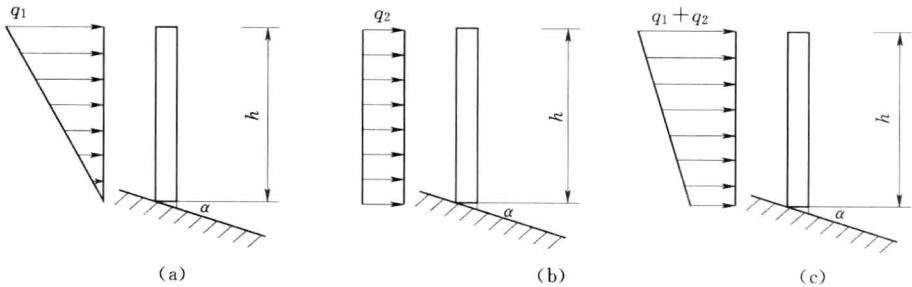


图 1-2 沉埋桩负荷图

该简化计算方法的滑移路线认为是被动破裂面，而前提假定又规定滑体不沿该被动破

裂面滑动，计算中所取滑面刚好为被动破裂面，上述情形假设滑面倾角近似水平或缓倾的地层，实际情况不尽相同。试验和数值分析结果表明沉埋桩加固滑坡体后滑面形状有四种，包括从桩顶以上、桩后某个位置和桩顶滑出以及被动面，而且这四种滑面形状都可以使滑坡体达到足够的稳定性。工程应用中有时滑面倾角很陡，采用沉埋桩加固滑坡体仍然可以达到抗滑、稳定坡体的作用。

在满足边（滑）坡稳定性的基础上，沉埋桩只承担部分滑坡推力，桩身内力较全埋式抗滑桩低，可以减小桩身截面和嵌岩段长度，在减少材料、降低圬工、降低工程成本等方面有着全埋式抗滑桩不可比拟的优越性；然而沉埋桩却未能在工程上广泛应用，主要是因为抗滑工作机制和设计方法仍然还不成熟，没有系统研究沉埋桩的可行性、适用性，缺乏对沉埋桩的关键问题（桩长、桩位、嵌岩段长度、桩间距等）深刻的认识，没有形成基于桩土相互作用的设计方法，造成工程界没有统一认识、工程设计无据可依。

1.3 本书的主要内容和创新点

以三峡库区滑坡特征为基础，结合作者参与设计、咨询、考察的滑坡治理工程，提出沉埋桩设计以有限元法为基础，针对沉埋桩加固边（滑）坡的关键问题（如桩长、桩位、桩间距、桩身内力等），系统研究沉埋桩加固的可行性、适用范围，以静力、动力加载模型揭示沉埋桩加固工作机制，并通过奉节隧道出口滑坡采用单排桩加固、武隆政府滑坡采用双排桩加固工程设计实例介绍沉埋桩的设计分析方法，供工程设计、科研人员参考。本书从六个方面展开介绍沉埋桩的研究成果。

第2章介绍从本构模型、收敛准则和极限状态判据介绍有限元强度折减法的基本组成要素，分析屈服准则及其相互转化、流动法则、模型计算范围与网格划分对计算精度的影响，并通过实例操作步骤介绍如何实现有限元强度折减法。

第3章通过平面应变和三维有限元分析确定沉埋桩桩长、计算桩后滑坡推力和桩前抗力，并讨论在库水位变化的情况下沉埋桩加固边坡稳定性的变化，根据动力作用下有限元强度折减法工作原理确定沉埋桩加固边坡的有效性。

第4章重点介绍沉埋桩加固的几个关键问题，如双排桩的工作机制、抗滑桩不同桩位的加固效果和抗滑桩的结构参数诸如嵌岩深度、桩头约束、桩长和桩间距对边坡治理效果的影响。

第5章主要从静力、地震阻尼加载等角度论证沉埋桩模型工作原理。静力加载单排沉埋桩模型试验由无桩边坡、全长桩、四分之三长桩、半长桩、三分之一长桩等五组试验组成，通过测试土中、桩身压力和位移分析不同桩长对滑坡体的加固效果；通过对模型设置不同类型、幅值、频率的地震波和白噪声激励，探索研究沉埋桩的动力与振动响应规律。

第6章主要介绍沉埋桩的适用性及其优化设计。从滑体强度、滑面形状、滑体厚度、桩前滑体坡面形状对沉埋桩加固效果的适用性进行分析，提出设计步骤、加固效果分析等组成的沉埋桩有限元设计方法；针对滑坡体目标安全系数，以滑坡推力为评价指标，采用支持向量机和遗传算法全局优化，确定合理桩长、桩位。

第7章介绍沉埋桩加固两个滑坡工程实例。奉节分界梁隧道出口为一大型堆积层老滑坡，采用单排沉埋桩和一排预应力锚索框架方式加固，判断不同桩长滑坡体的稳定性、滑

坡推力和桩前抗力；武隆县政府滑坡主要原因是地表水渗透和乌江水位涨落导致滑坡体强度降低，初步设计中滑体中后部采用双排沉埋桩、滑体中部采用单排桩、滑体前缘采用单排桩，经有限元优化设计，滑体中部采用单排桩、其他两部位维持不变，并滑体中部单排桩桩位进行优化。

第 2 章

有限元强度折减法的原理与操作

2.1 概述

2.1.1 有限元强度折减法的基本思想

所谓有限元强度折减法,就是在弹塑性有限元模型中,通过强度降低或者增大荷载,使模型达到极限破坏状态,从而获得模型的破坏状态和相应的安全系数。在边坡稳定分析中,结合边坡稳定安全系数的定义,可以分为有限元强度折减法与有限元超载法。

边坡工程中常采用有限元强度折减法,该方法通过不断降低边坡岩土体抗剪切强度参数直至达到极限破坏状态为止,程序自动根据弹塑性有限元的计算结果形成滑面,强度折减系数就是边坡的稳定安全系数。由于这种方法十分贴近工程设计,使边坡稳定分析进入到一个新的时代。

对于莫尔—库仑材料,强度折减安全系数可表示为式(2-1):

$$\tau = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{\omega} = \frac{c}{\omega} + \sigma \frac{\tan \varphi}{\omega} = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (2-1)$$

所以有,
$$c' = \frac{c}{\omega}, \tan \varphi' = \frac{\tan \varphi}{\omega} \quad (2-2)$$

这种强度折减安全系数的定义与边坡稳定分析的极限平衡条分法安全系数的定义是一致的,都属于强度储备安全系数。它表示整个滑面达到了极限状态,因而是滑面的平均安全系数,而不是某个应力点的安全系数。一般情况下无需求出滑面,可以通过剪应变云图中明显看到滑面,或者采用力学判断方法求出准确的滑面。

1975年,英国力学家 Zienkiewicz 提出在有限元中采用增加外荷载或降低岩土强度的方法来计算岩土工程的安全系数,实质上它就是有限元强度折减法。由于当时有限元法尚在发展阶段,因而该方法没有得到广泛的接受,但目前这一情况已经有了根本的改变,有限元强度折减法已被绝大多数学者与工程人员认可。该方法的计算精度得到较大提高,并应用于岩质边坡和边(滑)坡支挡结构的计算,以及扩展到地基基础承载力与隧道稳定安全系数的计算中,极大地扩展了有限元强度折减法的应用范围。

2.1.2 有限元强度折减法的优势

有限元强度折减法的主要优势是它能够对复杂地貌、地质的边坡进行计算,不受边坡几何形状、边界条件以及材料的不均匀性限制,并在不假定滑面的情况下,求出边坡的稳定安全系数。此外,地基承载力的计算问题:对层状土与非均质土地基、加筋土地基的承载力或稳定安全系数等情况,传统方法无法计算,而采用数值极限分析方法,如有限元强

度折减法或有限元超载法就可顺利求得。其次,该方法能够模拟土体与各种支挡结构的共同作用。在有支护的情况下,如有抗滑桩情况下,传统方法无法求得有桩情况下的边坡安全系数及桩上的推力,而数值极限方法不受这种条件的限制。应当注意,有桩情况下,求得的桩上推力不一定全是极限状态下的推力,即主动土压力,而是桩土共同作用下的推力,这一推力考虑了桩土的共同作用,更符合实际受力情况。再次,传统极限分析方法无法求出岩土体的位移与塑性区,以及真正的滑面,而数值极限分析方法可以求出岩土体内各点的应力、位移、塑性区与滑面。最后,采用数值极限方法能考虑岩土工程开挖、支护的施工过程,以及岩土地应力的释放过程等,而传统极限分析方法很难做到这点。

2.1.3 应用有限元强度折减法需要满足的条件

应用有限元强度折减法进行稳定性分析需要满足以下条件:

- (1) 要有一个成熟可靠和功能强大的有限元程序。
- (2) 计算范围、边界条件、网格划分等要满足有限元计算精度要求。
- (3) 可供实用的岩土材料本构模型和强度准则。

关于本构模型的选择,岩土材料具有复杂的结构特性,边坡的稳定分析主要关心的是力和强度问题,而不是位移和变形问题,因而对于本构关系的选择不必十分严格,可采用理想弹塑性本构模型。但必须选择合适的强度准则,以前该方法计算精度不高,多数是由于强度准则选择不当所致。

2.1.4 理想弹塑性增量本构模型

在有限元强度折减法中,岩土体材料采用理想弹塑性模型,在有限元计算的每一个迭代过程中,任意一个单元的应变增量由弹性应变和塑性应变两部分组成:

$$\{\mathrm{d}\epsilon\} = \{\mathrm{d}\epsilon_e\} + \{\mathrm{d}\epsilon_p\} \quad (2-3)$$

其中,弹性部分可根据虎克定律计算:

$$\mathrm{d}\sigma = [D_e]\{\mathrm{d}\epsilon_e\} \quad (2-4)$$

当采用关联流动法则时,塑性部分根据塑性位势理论采用增量法计算:

$$\{\mathrm{d}\epsilon_p\} = \mathrm{d}\lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (2-5)$$

理想塑性材料的加载准则要求应力增量矢量 $\mathrm{d}\sigma$ 相切于屈服面,而流动法则要求塑性应变增量矢量 $\mathrm{d}\epsilon$ 的方向与塑性位势函数 Q 的梯度方向一致,即塑性势面的法线方向。塑性应变增量矢量的大小由一致性条件决定,塑性变形时,应力点停留在屈服面上,这个条件叫做一致性条件,用数学式子表示为:

$$f(\sigma) = 0, f(\sigma + \mathrm{d}\sigma) = f(\sigma) + \frac{\partial f}{\partial \sigma} \mathrm{d}\sigma = \frac{\partial f}{\partial \sigma} \mathrm{d}\sigma = 0 \quad (2-6)$$

其中,

$$\mathrm{d}\sigma = [D_e](\{\mathrm{d}\epsilon\} - \{\mathrm{d}\epsilon_p\}) \quad (2-7)$$

可以得到:

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma} \mathrm{d}\sigma = \frac{\partial f}{\partial \sigma} [D_e] \left(\{\mathrm{d}\epsilon\} - \mathrm{d}\lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \right) = 0 \quad (2-8)$$

经过变换得到:

$$d\lambda = \frac{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D_e] \{d\epsilon\}}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D_e] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\}} \quad (2-9)$$

所以：

$$d\sigma = [D_e](\{d\epsilon\} - \{d\epsilon_p\}) = ([D_e] - [D_p])\{d\epsilon\} = [D_{ep}]\{d\epsilon\} \quad (2-10)$$

其中， $[D_{ep}] = [D_e] - [D_p]$ ，称为弹塑性刚度矩阵。

$$[D_p] = \frac{[D_e] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D_e]}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D_e] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\}} \quad (2-11)$$

以上就是采用关联流动法则时，理想弹塑性材料的应力增量和应变增量之间的关系式，对于一个给定的应变增量 $d\epsilon$ ，可以利用上式计算出相应的应力增量 $d\sigma$ 。

当采用非关联流动法则时，也可得到相应的关系式，这里不再赘述。国际通用软件中，都有采用关联流动法则和非关联流动法则的相应程序。

2.1.5 弹塑性增量应力—应变本构模型有限元计算过程

这里以国际通用有限元程序 ANSYS 为例，说明弹塑性增量应力—应变本构模型有限元的计算过程。ANSYS 程序采用的是一种理想弹塑性增量应力—应变本构模型的有限元计算方法—欧拉法，也称为欧拉应力拉回技术 (Euler backward scheme)。欧拉应力拉回技术通过执行一致性条件，确保应力点停留在屈服面上，其计算过程如下：

(1) 根据当前的应力状况以及材料参数计算屈服强度。

例如，在 Drucker—Prager 屈服准则中，对于不同的屈服圆面， σ_y 有不同的表达式，对于外接圆：

$$\sigma_y = \frac{6cc\cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} \quad (2-12)$$

(2) 试算初始应力。

如前所述，对于一个给定的应变增量，可以计算出唯一的应力增量，然而，我们不能唯一地建立逆关系，目前的做法是由试算应变增量计算出应力增量，再根据一致性条件来调整应力和应变。

对于施加荷载增量后，尚不知道其应力是处于弹性还是处于塑性状态，只好暂时忽略材料的塑性，假设发生弹性变形，先计算初始应变 (trial strain)，再由初始应变计算出试算应力。初始应变等于总的应变减去上一步计算后的塑性应变：

$$\{\epsilon_{n+1}^r\} = \{\epsilon_{n+1}\} - \{\epsilon_n^p\} \quad (2-13)$$

所以，初始试算应力：

$$\{\sigma_{n+1}^r\} = D\{\epsilon_{n+1}^r\} \quad (2-14)$$

(3) 根据屈服准则计算等效应力。

对于 Drucker—Prager 准则， $\sigma_e = \alpha I_1 + \sqrt{J_2}$ 。

如果 σ_e 小于 σ_y ，即 $F(\sigma_{n+1}^r) < 0$ ，说明材料处于弹性状态，没有塑性应变发生。

如果 σ_e 大于 σ_y ， $F(\sigma_{n+1}^r) \geq 0$ ，说明应力点超过了屈服面，需要将应力拉回到屈服面，