

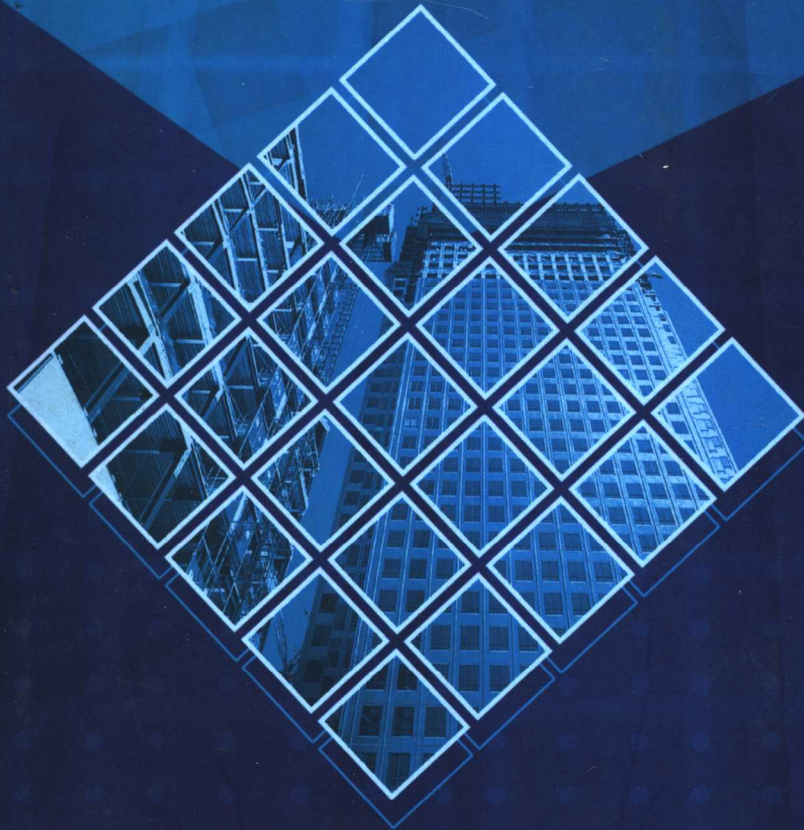


中国科学技术发展基金会欧维姆预应力技术发展基金资助

预应力结构

锚固-接触力学与工程应用

庄 茁 朱万旭 郑晓龙 著
彭文轩 谢正元



科学出版社

www.sciencep.com

中国科学技术发展基金会
欧维姆预应力技术发展基金资助

预应力结构锚固-接触力学与工程应用

庄 茁 朱万旭 彭文轩 著
谢正元 郑晓龙

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从弹-塑性力学和接触力学的基本概念和理论出发,建立锚固-接触力学的理论框架和有限元格式,给出有限元数值计算和分析的方法;结合锚具和构件的力学性能实验,以及土木和水利工程的预应力结构实际问题,给出锚具设计和工程锚固的具体例题。本书的目的是使读者在理论上可学、实验上可信和设计可用。

本书可供从事预应力结构科研、设计和施工的工程技术人员及高等院校土木和水利工程专业的教师和研究生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

预应力结构锚固-接触力学与工程应用/庄茁等著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-016603-5

I. 预... II. 庄... III. 预应力加筋锚固 IV. TU757.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第146075号

责任编辑:童安齐 何舒民 / 责任校对:刘彦妮

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2006年1月第一次印刷 印张:15 1/4

印数:1—3 000 字数:430 000

定价:38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新欣>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA03)

前 言

本书将锚固-接触力学的基本理论、非线性有限元的数值计算方法、工程试验和实际工程设计相结合,汇集本书著者近几年的科学研究和工程实践成果,系统介绍了锚固-接触力学的分析系统和设计方法。将锚固-接触力学的理论模型与非线性有限元分析方法、预应力锚具实验与预应力结构工程实践相结合,正是本专著的主要特色和独到之处。书中给出主要理论公式的推导和有限元编程,提高了可学性;描述预应力锚具的静/动载试验,提高了可信性;增加了预应力结构工程设计的实例,提高了可用性。

本书分为上、下两篇。上篇为锚固-接触的理论与分析方法;下篇为工程分析与应用。本书第一作者庄茁多年从事计算力学及其虚拟工程与科学的研究,撰写了第1章至第5章的主要内容,以及第6章的部分内容,并完成了全书的统稿工作。本书第二作者朱万旭近几年来进行了大量的理论模型探索、试验研究和工程应用,发展了高强度预应力锚具体系,并注册了国家专利,这些成果和第四、第五作者的工作反映在本书的第6章至第9章中。本书第三作者彭文轩多年从事预应力岩土锚固的理论研究和工程实践,其研究成果成为第1章和第2章的部分内容,以及第10章的主要内容。

借本书出版的机会,衷心感谢中国科学技术发展基金会欧维姆预应力技术发展基金的出版资助。感谢柳州欧维姆建筑机械有限公司的王守海教授始终不渝的鼓励和帮助,向他致以深深的敬意。我们相信通过本书的出版必将推动我国锚固-接触力学理论和数值分析的发展,以及预应力锚固体系的工程应用,并有助于发展我国的虚拟科学与工程事业。

庄茁 教授

2005年7月于清华园

目 录

前言

上篇 锚固-接触的理论与分析方法

第 1 章 工程结构中的锚固-接触问题	3
1.1 预应力钢筋混凝土结构	3
1.2 预应力混凝土锚具	4
1.3 锚固-接触力学的应用背景	6
1.4 预应力岩土锚固中的接触问题	8
1.5 本书的阅读指导	13
第 2 章 弹性锚固-接触的力学分析	14
2.1 Boussinesq 问题	14
2.2 赫兹接触问题	18
2.3 刚性平冲头的压入	20
2.4 弹性基础接触模型	22
2.5 岩土锚固中的接触力学模型	23
2.6 小结	30
第 3 章 强度失效判据与塑性力学基础	32
3.1 经典屈服准则回顾	32
3.2 塑性力学基础	39
3.3 小结	43
第 4 章 锚固-接触的非线性有限元	45
4.1 引言	45
4.2 接触界面方程	46
4.3 摩擦模型	53
4.4 弱形式	57
4.5 有限元离散	64
4.6 锚固-接触的显式方法	75
第 5 章 锚固-接触的有限元算例	80
5.1 ABAQUS 接触功能概述	80
5.2 定义接触面	80
5.3 接触面间的相互作用	82
5.4 在 ABAQUS/Standard 中定义接触	85
5.5 刚性表面的模拟问题	88
5.6 ABAQUS/Standard 例题:凹槽成型	90

5.7	在 ABAQUS/Explicit 中定义接触	111
5.8	在/Explicit 建模中需要考虑的问题	115
5.9	ABAQUS/Explicit 例题:电路板跌落试验	122
5.10	ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 的比较	140
5.11	小结	140

下篇 工程分析与应用

第 6 章	预应力混凝土锚具模型分析	145
6.1	锚固单元理论分析	145
6.2	锚固单元有限元分析	154
6.3	锚环有限元计算	160
6.4	小结	166
第 7 章	混凝土锚具下结构应力分析	168
7.1	锚下结构的理论分析	168
7.2	锚下结构的有限元分析	170
7.3	锚下结构的工程实例	180
第 8 章	锚具组件静/动载试验	185
8.1	试验概述	185
8.2	锚具组件静载试验	186
8.3	锚具组件动载试验	190
8.4	载荷传递试验	191
第 9 章	预应力混凝土锚固工程设计实例	195
9.1	锚垫板设计	195
9.2	锚下结构的工程分析实例	199
9.3	某型 18 孔锚垫板的锚下应力分析实例	206
9.4	小结	212
第 10 章	岩土锚固机理及其工程应用	213
10.1	岩土锚固内锚固段的数值计算	213
10.2	预应力锚杆的锚固机理研究	220
10.3	预应力锚杆的整体锚固效应研究	224
10.4	预应力岩土锚固的工程应用	228
参考文献		237

上篇 锚固-接触的理论与分析方法

第 1 章 工程结构中的锚固-接触问题

1.1 预应力钢筋混凝土结构

在几百年前,以木板条摆成桶状,再围绕环箍施加预应力,保证盛水不发生泄漏,这可能就是预应力结构的雏形,而今天的预应力钢筋混凝土结构则是典型的应用。

1886年,在美国的加利福尼亚诞生了预应力混凝土技术专利,而直到20世纪40年代,预应力混凝土技术才得到真正的发展。第二次世界大战后,百废待兴,大兴土木工程,此时钢材短缺,不得不大量采用钢筋混凝土类型的结构,将1t结构钢材应用于预应力混凝土中所能完成的建筑量是仅采用结构钢材建筑量的15倍。此后在北美,预应力钢筋混凝土的蓄水池、压力管道、桥桩基础、大型桥梁等相继问世。图1-1为我国近年建造的宏伟的南京长江二桥,桥型为双塔斜拉桥,桥面和桥塔为钢筋混凝土预应力结构。现在,预应力钢筋混凝土结构随处可见。图1-2为悉尼歌剧院,其贝壳屋面部分也是预应力钢筋混凝土结构。

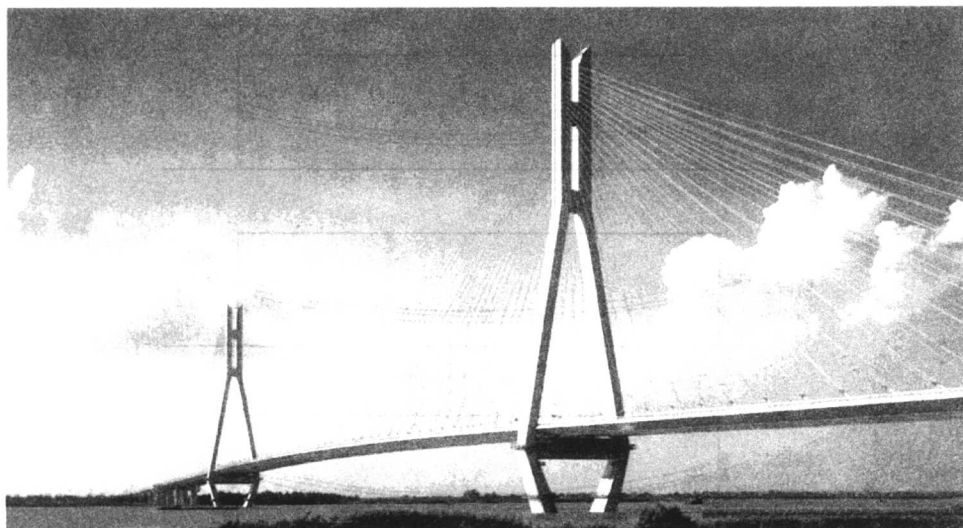


图 1-1 南京长江二桥

预应力结构的基本构件是梁和板,通过在端部应用锚具对钢筋施加预应力来改善构件的力学性能,提高混凝土的开裂强度,增加构件的变形刚度。预应力技术分为先张法和后张法施工。前者是先张拉钢筋,待混凝土初始硬化后再放松钢筋,由钢筋对混凝土构件施加预应力,其作用原理主要是通过钢筋与混凝土之间接触的握裹力将压力传递给混凝土;后者是在混凝土初始硬化后再张拉钢筋,通过放置在端部的预埋锚具对混凝土构件施

加预应力。图 1-3 为预应力钢筋混凝土梁的后张拉过程。

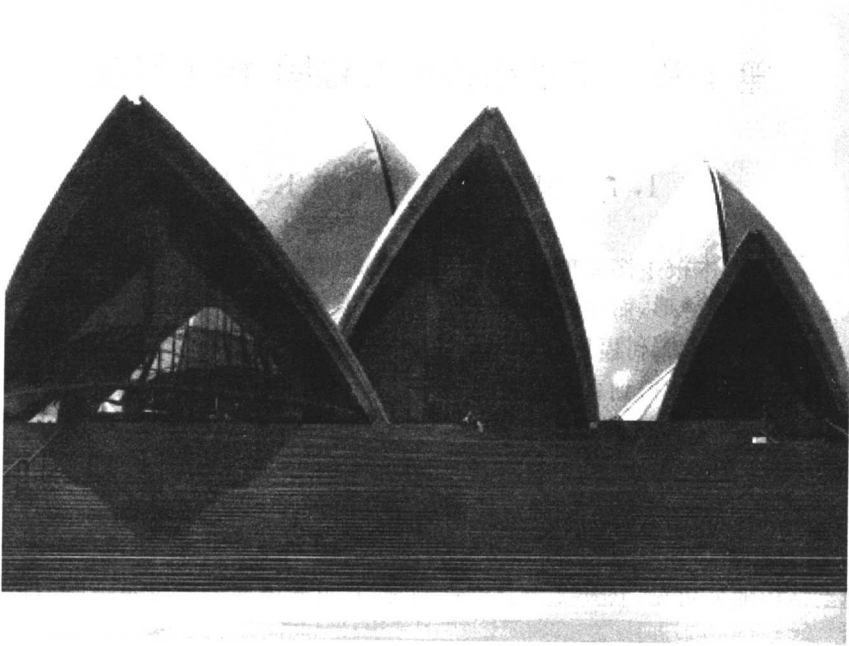


图 1-2 悉尼歌剧院

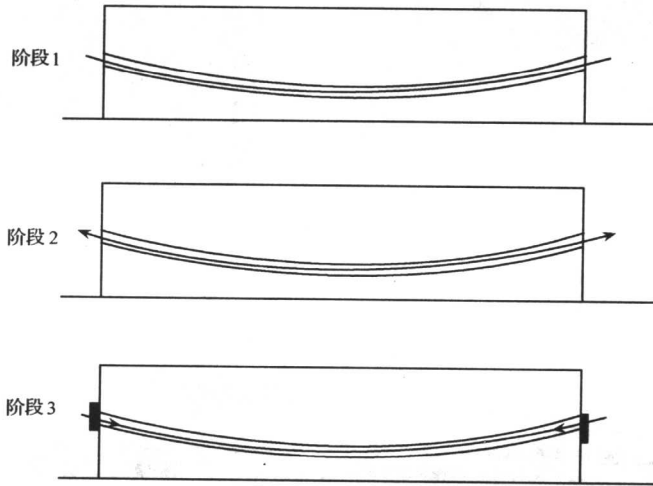


图 1-3 预应力钢筋混凝土梁的后张拉过程

1.2 预应力混凝土锚具

在钢筋混凝土构件中施加预应力,需要应用锚具,对预应力钢筋进行张拉,然后将钢筋固定于预埋的锚具中形成预应力。在钢筋与锚板和卡具之间存在接触力,在钢筋与混凝

土之间存在接触握裹力。通过接触面上的正应力和切应力传递载荷,使对构件的锚固得以实现。材料之间发生接触锚固,将引起材料发生弹-塑性变形。在预应力锚具内部,锚垫板、锚板、夹片和钢绞线之间的接触锚固作用如图 1-4 所示。

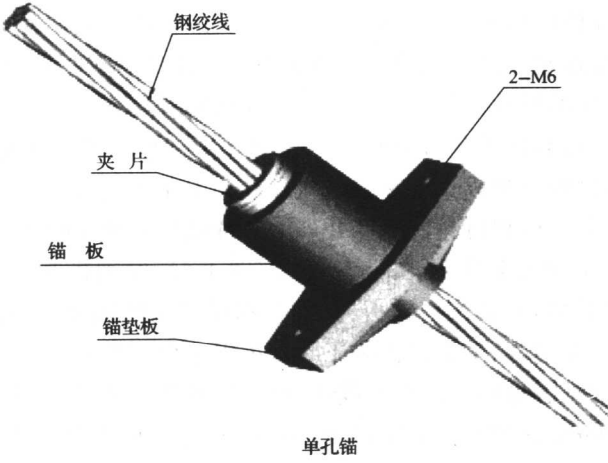


图 1-4 锚垫板、锚板、夹片和钢绞线之间的接触锚固作用

锚板和夹片的零件图与工作原理如图 1-5 所示。内口锥状的锚板套在夹片外面,使夹片逐渐收缩夹紧。夹片的丝牙咬进钢绞线,固定了钢绞线的位置,保证了张拉钢绞线的预应力。丝牙的第一道齿的高度一般低于其他齿,与第二道齿的间距大于其他的齿,以避免应力集中到第一道齿上。工业中,套管螺纹的齿形和齿距也类似于夹片的丝牙。夹片的丝牙对钢绞线的侵彻作用就是典型的压痕(刻痕)问题。除了锚具以外,在工业中还有很多构件与压痕问题密切相关,我们在这里不一一列举。

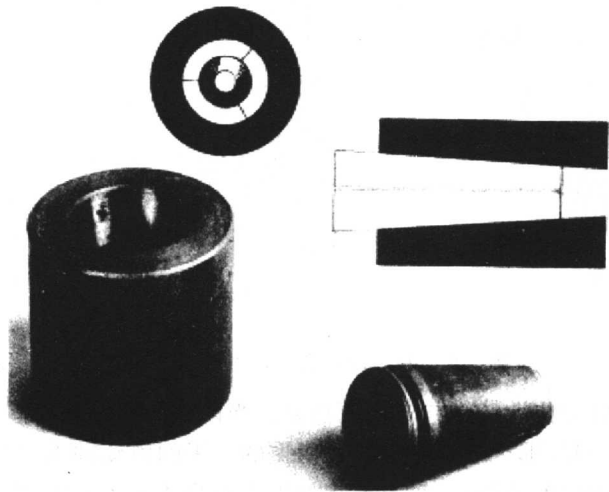


图 1-5 锚板和夹片的零件图与工作原理

将锚固-接触力学应用于预应力结构问题中,形成了新的接触力学应用分支,即预应力结构锚固-接触力学。

1.3 锚固-接触力学的应用背景

接触力学这门学科起源于 1881 年,是由当时年仅 24 岁的 H. R. Hertz 发表了他的经典论文“论弹性固体的接触”而开始的。当时 Hertz 在柏林大学作 Helmholtz 的研究助手,他的兴趣在于对玻璃透镜间光学干涉的实验。所提出的问题是,透镜在使它们相互接触的力作用下所发生的弹性变形是否对干涉条纹图形有显著的影响。通过观察干涉条纹和应用比拟法证明,接触压力的分布将在两个物体中产生与所提出的椭圆接触面相协调的弹性位移。之后,接触力学成为力学的一门学科分支而迅速发展,其生命力在于接触(边界)非线性的性能,与几何和材料非线性并列为三种最具挑战性的力学课题。

接触力学在工业中处处可见,如齿轮啮合(图 1-6),发动机叶片榫槽连接,在滚珠轴承中滚珠与座圈的接触,在锚具中锚板、夹片与钢丝之间的接触,螺栓和铆钉与构件的连接,微电子器件的固定,以及金属板冲压成型过程中板与模具之间的接触等。摩擦与滑动过程均是接触非线性(也称为边界非线性)的力学问题。早在 18 世纪,经典弹性力学就研究了最简单的 Hertz 接触和 Coulomb 摩擦,由于接触问题的高度非线性性质,应用解析的数学手段使得研究难以深入进行,更难以处理复杂的工程接触问题。随着今天计算机技术的发展,带动了计算力学,特别是有限元技术的发展,使得对这类问题具备了实际数值仿真的可能。但是,与材料非线性和几何非线性相比,有限元技术在求解接触和摩擦问题方面的发展还是相对滞后的。例如,摩擦接触是材料非线性和接触非线性的耦合问题,甚至发生大变形的几何非线性问题,目前仅能够处理相对简单的力学模型。这表明还有大量的接触非线性问题尚待解决。

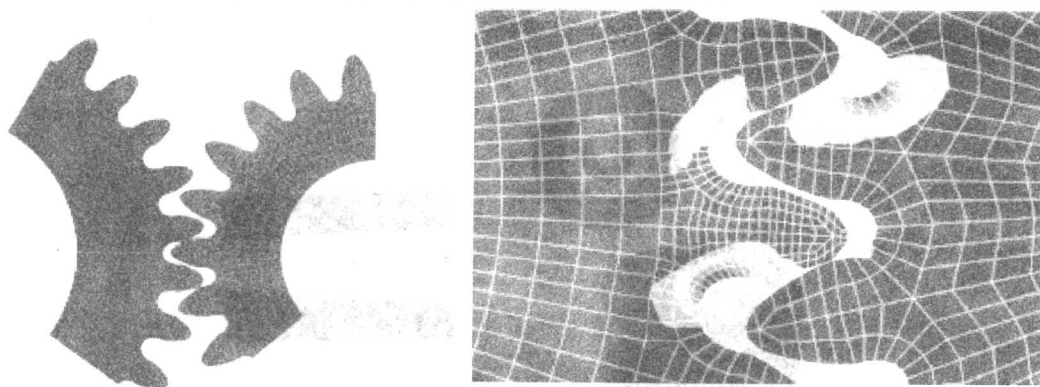


图 1-6 30°齿轮啮合接触中的应力状况

接触问题一般分为协调接触与非协调接触。当两个固体的表面在无变形时精确地或相当接近地黏合在一起,那么称这种接触是协调的。平的滑动轴承,减震器中橡胶与钢套的过盈配合都是协调接触的例子。具有不相似外形的物体称为非协调的,当无变形地接触时,它们将首先在一个点或沿一条线相碰,分别称为“点”接触或“线”接触。例如,在滚珠轴承中,滚珠与座圈为点接触,而在滚柱轴承中,滚柱与座圈为线接触;在钢板的轧制过程中,钢板与轧辊之间的接触也是线接触。当物体的外形在一个方向是协调的,但是在其垂

直方向上不协调时,就会发生线接触。与物体本身的尺寸相比,非协调物体之间的接触面积通常是很小的。在靠近接触面处,应力高度集中,并且不太受远离接触面的物体形状的影响。

压痕是接触问题之一,也是当前工程力学界的热门研究课题之一,在宏观、细观和微观领域中取得了许多成果。压头接触物体表面,评价材料的硬度性能。在科学研究中基本上是讨论对称压头的压痕问题,主要是轴对称压痕,目的是确定材料的硬度和具有尺度效应的塑性应变梯度等材料性质,如图 1-7(a)所示。无论是平面应变还是平面应力问题,鲜有报道关于平面压痕的研究。然而,在工业应用中,相当一部分问题都要涉及平面非对称压头的压痕问题,如图 1-7(b)所示,如锚固夹具、丝扣和刻痕等,压头的对称与否对压痕问题的力学特性有很大的影响。在本书下篇锚固接触问题的应用中,将讨论夹片的非对称丝牙对钢绞线的压痕作用。

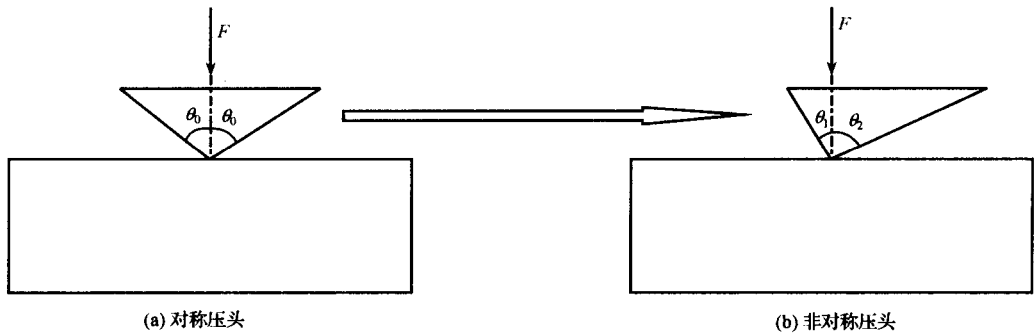


图 1-7 压头形状

在工业生产中,很多地方都需要应用连接件和固定件,这样就不可避免地应用锚具,如在斜拉桥拉索的两端固定处、在预应力钢筋混凝土梁式构件和铁路枕木的端部、在坝体、斜拉桥桥塔和隧洞的预应力钢筋连接和固定处,以及在机械和船舶制造等工业中的锚固措施中。在这些地方锚具发挥了关键作用,它们的材料、力学和工作性能关系到几乎所有大型工程的安全问题。在本书下篇的工程应用中,以广西柳州 OVM(或 HVM)建筑机械有限公司的产品为例,该公司是国内最大的预应力锚具研究和生产企业之一,它的锚具技术在国际上也属先进水平。在新一代 2000 级超高强预应力锚固体系的开发研制过程中,清华大学工程力学系参与了锚具数值仿真和齿形分析工作,为该项目通过部级鉴定起到一定的作用。图 1-8 是该锚具的简图。

锚具的工作原理就是利用夹片上的丝牙侵彻钢绞线,以达到固定钢绞线的作用。侵彻钢绞线的角度和深度直接关系到锚具的锚固效果,并且对钢绞线的强度造成很大的影响。钢绞线处于纵向受拉和环向局部受压的三向应力状态。由于夹片上的许多丝牙与钢绞线接触侵彻,为三维实体仿真带来计算的难度。在有限元计算过程中,搜索接触的计算量太大以至于无法收敛,而我们研究的重点是外力载荷、丝牙齿型的角度和侵彻深度对钢绞线强度、变形以及锚固质量的影响,因此我们的重点是研究单丝牙压痕的力学性能,这些内容将在本书的下篇中阐述。将丝牙对钢绞线的局部侵彻视为平面应变问题。目前我国的钢绞线强度等级是很高的,普遍为 1960~2000MPa。这里所研究的 2000 级钢绞线的强度

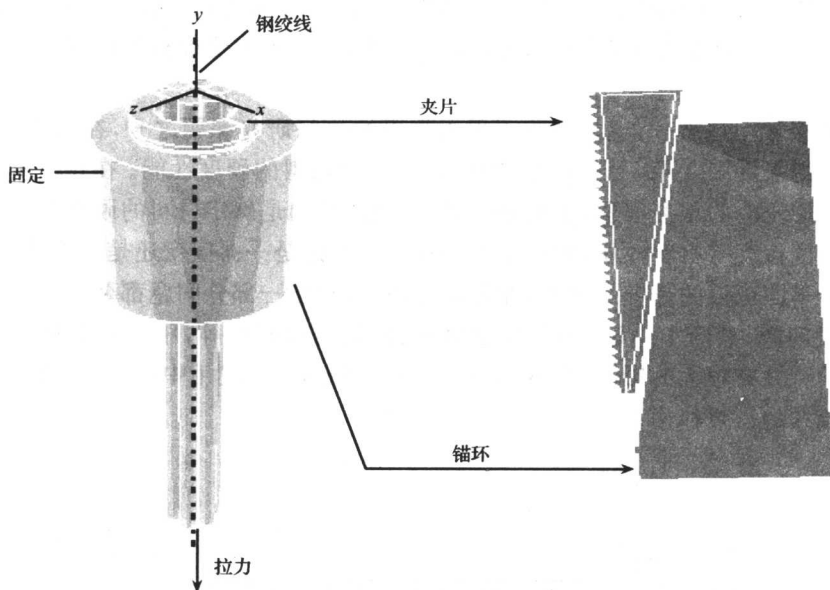


图 1-8 锚具简图

最高可达 2050MPa,因此在计算中,我们对受压基体(钢绞线)的强度选取的比较高。

在非对称压头情况下,受压基体中的应力和能量分布与对称压头情况下相比有很大的不同;对于平面问题,与轴对称问题相比也有较大的差异。为了满足工业的需要,我们将研究非对称压头下的平面压痕问题。在本书下篇中,我们通过理论推导和有限元计算的方法实现上述的研究目的,并采用一些实验数据进行定性和定量的验证。无论是预应力混凝土锚固构件,还是非预应力的锚固构件,由于锚具与构件接触界面的复杂性,经典的解析解答难以实现有效的计算分析,因此采用数值解法,尤其是应用非线性有限元方法求解是最佳的选择。

1.4 预应力岩土锚固中的接触问题

1.4.1 预应力岩土锚固技术的发展

对于岩土的预应力锚固是另一方面的重要应用。地层失稳是地质灾害的一个主要因素,关于对失稳地层的处理是土木工程的一个重要部分。经典的土力学理论一般采用被动支撑的方式对失稳地层进行支护,相应地,支护结构一般为重力式挡土墙和插入式桩墙等。目前,利用了地层自身的支撑能力,采用喷射混凝土结合地层锚杆的支护技术防止地层失稳,无论从技术上,还是从经济上,都是支护工程的一项重要进步。

早期喷锚支护采用的锚杆,一般是钢筋筋体和内注砂浆,即沿筋体全长注浆的砂浆锚杆。受钢筋材料强度的限制,当时喷锚支护的技术优势仅体现在处理浅层或是浅深层的地层滑移上。现在,除了应用普通的 II 级钢作为筋体材料外,III 级、IV 级碳素钢丝、高强钢绞线都能成为锚杆筋体,这样使锚杆的抗拉能力增加。锚杆技术已经广泛应用于控制大体积岩土的深层滑移,它的工程应用实例有丰满大坝坝基处理、漫湾和天生桥水电站高边坡

治理、长江链子岩五万方滑移山体治理等。另外,一些新型材料也被作为锚杆材料,如玻璃纤维和橡胶加筋带等,这些材料由于其特殊的力学和化学防腐性能,往往应用于具有特殊用途的锚固工程。

根据使用筋体材料的不同,在国内有些规范把使用柔性材料,如碳素钢丝和钢绞线作为筋体的锚固方式称为锚索。

锚杆根据其是否施加预应力分为预应力锚杆、非预应力锚杆。将由桥梁和工业建筑结构发展起来的预应力技术应用于锚固技术中,是锚固技术的一项重大进步。在锚固技术中引入预应力技术具有以下条件:首先由于在锚杆中采用高强精轧螺纹钢或钢绞线作为筋体材料,这些材料具有强度高的特点,精轧螺纹钢的强度可达到 900MPa,钢绞线的强度依次可达到 1570MPa、1770MPa、1860MPa 和 2000MPa 等级别;再者是这些材料的强度能够满足施加预应力所要求的端头锚固方式的施工条件,最重要的一个条件是这些材料的低松弛性能能够减少使用期内的预应力损失,使永久预应力锚固成为可能。预应力锚固除了能够对滑移体提供锚固力外,还能够通过调节预应力值来控制滑移体变形。

锚杆技术发展至今,在传统的锚固基础上也产生了很多分支类型。

(1) 土钉墙技术

在土体中设置密排锚杆。通过土体与锚杆的共同变形,改变土体内部应力结构,增加土体自身承载能力。

(2) 加筋土

在土体中设置加筋带。在土体变形过程中,加筋带受拉,对土体产生约束变形的作用,从而维持土体稳定。

(3) 环锚

利用锚索的索体柔韧性,通过施加预应力在结构的环形孔道内,或者在环形结构上产生环向锚固力。这项技术在支护水电站的压力隧洞、地下污水处理池、斜拉桥和悬索桥的索塔等工程中具有广泛的应用前景。已经竣工的小浪底水电站的引水隧洞内衬砌即采用了该锚固方式。

锚杆技术在其他领域上也有广泛的应用,如建筑结构的锚杆静压桩技术、桥梁锚碇、建筑物的稳定支撑和结构抗震等。

1.4.2 预应力岩土锚固的分类及常用结构形式

现有资料表明,国内外使用的锚杆种类有数百种,但是在工程中常见的锚杆种类是有限的。在工程中应用比较多的锚杆有砂浆锚杆、树脂药卷锚杆、快硬水泥卷锚杆、缝管锚杆和楔管锚杆等。

(1) 砂浆锚杆

砂浆锚杆是利用砂浆黏结材料,一般采用螺纹钢筋或钢绞线作为筋体。

(2) 树脂药卷锚杆

树脂药卷锚杆是利用药卷式高分子合成树脂为黏结材料,当药卷被反麻花锚杆体搅破后,不饱和聚酯树脂与固化剂立即起化学反应,一般在 5min 内能够完成固化过程。树脂锚杆具有锚固快、承载力大和适用性广等特点,但固化剂成本较高、储存期较短以及存在有毒和易老化等问题。

(3) 快硬水泥卷锚杆

快硬水泥卷的药卷有空心和实心两种形式,实心药卷锚杆的结构形式与树脂药卷锚杆相似,杆体头部是反麻花状的。空心药卷锚杆是靠水泥药卷为黏结材料,把锚杆固定在孔中以达到锚固目的。

(4) 缝管锚杆

缝管锚杆由前端制成锥体的开缝钢管、挡环和垫板组成。该锚杆的外径比钻孔直径略大,当锚杆被强行推入钻孔中后,管体受挤压,对孔壁产生弹性抗力,从而使锚杆体与孔壁间产生轴向摩擦力,以达到锚固的目的。另外,在锚杆安装完成后,弹性垫板紧压孔口岩面,使锚杆下端形成三向受压的梨形应力体,从而改善了岩体的应力状态,提高了岩体的自承载能力。该锚杆具有锚固可靠迅速、对岩体适应性广、抗动载性能好等特点,同时拥有屈服式锚杆的特征。在锚杆安装后由于孔壁的变形,锚固力会有不同程度的增加。该锚杆对孔径要求比较严格,长时间推送锚杆较困难,容易锈蚀,一般多用于临时加固。

(5) 楔管锚杆

楔管锚杆集中了倒楔锚杆和缝管锚杆的优点,锚固性能比缝管锚杆更可靠,锚固力更大,但加工成本也略高一些。

目前,在工程界应用较多的是砂浆锚杆,砂浆锚杆一般由内锚固段、自由段、锚下区三个部分组成。

- 1) 内锚固段。位于稳定地层,通过地层与锚杆砂浆体之间的结合提供锚固力。
- 2) 自由段。位于滑移地层区,通过杆体的变形向内锚固段与锚下传递锚固力。
- 3) 锚下区。包括锚下承台与锚垫板,它在锚固力与滑移地层之间传递荷载。

按照内锚固段的锚固方式的不同,预应力式锚杆可分为三种。

1) 摩擦式。摩擦式锚杆,通过锚杆筋体与砂浆体之间的摩擦提供锚固力,砂浆体与地层之间的结合以摩擦剪切为主。其结构形式如图 1-9 所示。

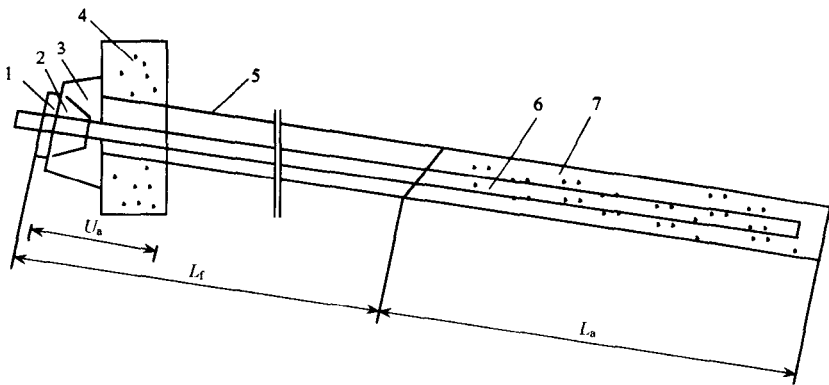


图 1-9 摩擦式锚杆结构图

1. 锚头;2. 锚下垫板;3. 承台;4. 支撑结构;5. 孔道;6. 筋体;7. 注浆体
 L_f : 自由段; L_a : 锚固段; U_a : 锚下部分

2) 压力式。压力式锚杆,通过机械式或爆破式扩孔,在注浆体底部形成端头,通过端头压缩地层提供锚固力。另外,锚固力还包括砂浆体与地层之间的摩擦力。其结构如

图 1-10 所示。

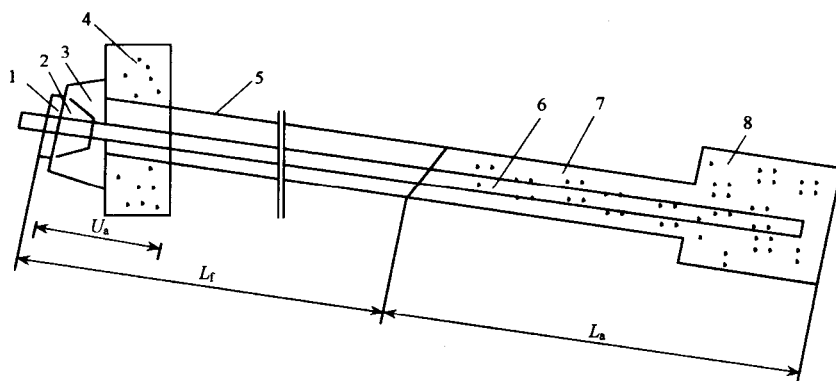


图 1-10 压力式锚杆结构图

1. 锚头; 2. 锚下垫板; 3. 承台; 4. 支撑结构; 5. 孔道; 6. 筋体; 7. 注浆体; 8. 爆破端头
 L_f . 自由段; L_a . 锚固段; U_a . 锚下部分

3) 压力分散式。压力分散式锚固是压力式锚固的发展, 通过在锚杆体上设置分散式的承载体, 使筋体上的荷载分散压缩砂浆体, 进而砂浆体与地层之间的结合也呈分散式。压力分散式锚杆结构如图 1-11 所示。

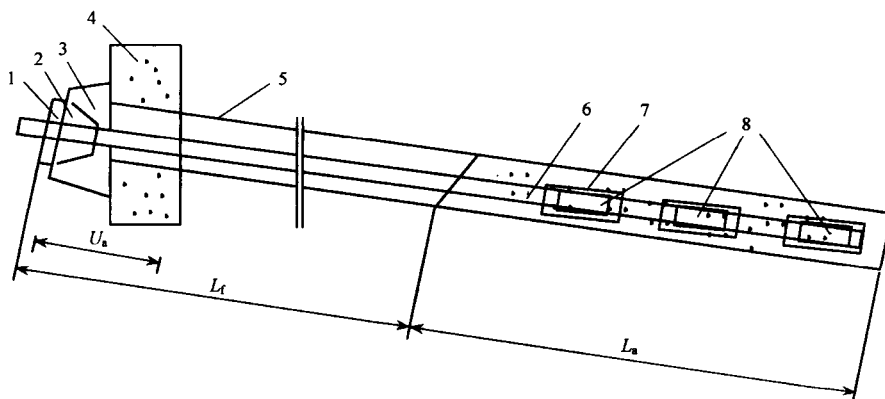


图 1-11 压力分散式锚杆结构图

1. 锚头; 2. 锚下垫板; 3. 承台; 4. 支撑结构; 5. 孔道; 6. 筋体; 7. 注浆体; 8. 承载体
 L_f . 自由段; L_a . 锚固段; U_a . 锚下部分

由于压力式和压力分散式砂浆锚杆对施工工艺有特殊要求, 比较常用的是摩擦式锚固方式。

1.4.3 岩土锚固技术中的接触力学问题

在预应力岩土锚固中, 涉及的主要接触力学问题为在预应力荷载作用下, 钢绞线与砂浆、砂浆与围岩之间接触面上的应力转移、屈服区的分布与扩展, 以及接触面的抗剪能力和失稳方式等。