



工业和信息化部“十二五”规划专著

锚杆锚固系统的瞬态动力响应特性

Characteristics of Transient Dynamic Response on Bolt Anchoring System

● 孙冰 曾晟 陈振富 丁德馨 著

 哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



工业和信息化部“ ”

锚杆锚固系统的瞬态动力响应特性

Characteristics of Transient Dynamic Response on Bolt Anchoring System

● 孙冰 曾晟 陈振富 丁德馨 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容提要

本书在国内外学者研究成果的基础上,基于应力波理论、模型相似理论等,采用理论分析、实验室模型试验、现代信号处理等相结合的手段,提出了一种多点布测的试验测试方法,研究是否加载情况下锚杆锚固系统的低应变动力响应特征,揭示锚杆锚固系统中激发应力波的传播规律和特性,阐述基桩与锚杆锚固系统的动测技术的差异,探讨加载情况下完整与缺陷锚杆的应力分布及发展,动态信号、基频、阻尼比及动刚度的变化,分析荷载对锚杆瞬态动力响应的影响。本研究将为锚杆锚固系统在施工及使用过程中的无损检测提供科学指导。

本书可供国防、土木、采矿、水利、交通工程及相关领域的科研人员、工程技术人员以及高等院校的教师、本科生和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

锚杆锚固系统的瞬态动力响应特性/孙冰等著.

—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.10

ISBN 978-7-5603-5646-4

I. ①锚… II. ①孙… III. ①锚杆—研究②锚固—研究

IV. ①TU94②TV223.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 234176 号

策划编辑 王桂芝

责任编辑 李长波

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 12.25 字数 290 千字

版 次 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-5646-4

定 价 39.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

锚固技术是一种结构简单的主动支护,能最大限度地保持围岩的完整性、稳定性,能有效地控制围岩变形、位移和裂缝的发展,充分发挥围岩自身的支撑作用,把围岩从荷载变为承载体,变被动支护为主动支护,且具有运输施工方便、效率高,有利于加快施工进度,施工成本低、支护效果好、施工噪声小等优点。因此在边坡稳固工程、隧道与地下支护工程、大坝坝体加固工程、地面高塔或高架结构的加固、道桥基础加固工程、井巷与矿山支护及现有结构补强与加固等领域中得到了广泛的应用。然而由于材料、施工、地质条件等因素的影响,锚固结构系统在施工和使用过程中必然存在许多缺陷。随着这些缺陷的产生、积累,会使具有永久支护的岩土工程失效。所以,对锚固工程的缺陷识别、质量诊断以及实时检测、补强,一直是岩土工程界广泛关注的问题,锚杆无损检测技术的研究对国家基础设施建设及国防科技发展具有重要的意义。

许多学者对锚杆无损检测进行了大量的理论分析和试验研究,并取得了一些成果,但仍不能满足锚固技术日益发展的要求,而且该方法从理论机理到室内试验、处理分析手段及实际应用,还存在一些不足,如:理论上存在的不确定性,会导致实际应用时的随机性;室内试验的内容较少,没有统一成熟的试验方法和方案;动测信号的随机性大,信号处理技术有待完善;确定锚杆锚固质量的关键参数即应力波速需要深入研究;锚杆锚固质量的无损检测借鉴了基桩动测技术,为避免部分研究和工程技术人员易将它们混淆,需要对比二者间的差异;锚杆在安装和使用过程中都是在一定的荷载条件下进行的,目前的研究大多忽略了荷载的影响。上述问题是进行锚杆锚固系统无损检测中最难和最迫切需要解决的一些关键问题,因此本书主要采用理论分析、实验室模型试验、现代信号处理等相结合的手段,研究是否加载情况下锚杆锚固系统的低应变动力响应特征,揭示锚杆锚固系统中激发应力波的传播规律和特性,阐述基桩与锚杆锚固系统的动测技术的差异,其中大部分内容已经在国内外重要学术期刊上发表,是作者近年来研究工作的总结、提升和发展。本研究为锚杆锚固系统在施工及使用过程中的无损检测提供了科学指导。

本书第1章绪论部分主要阐述了研究背景及意义、国内外的研究现状及存在的问题,提出了自己的研究思路。第2章主要分析了锚杆锚固系统的锚固作用原理及应力波在锚固系统中的传播、衰减及透反射规律。第3章主要介绍了本书中试验所采用的方法、测试系统、各类试件的制作。第4章采用理论分析与试验研究的方法,在不同龄期下,通过锚杆体与锚固介质中对应测点的动测信号、时间差、应力波协调需要的锚固长度等的对比分析,研究不同龄期下应力波在锚杆体与锚固介质中传播的同步性。第5章主要采用理论计算与试验分析的方法,在非加载状态下,通过不同龄期下锚杆与基桩中应力波的不同变化特征,探讨二者检测技术间的差异。第6章依据第5章完整锚杆中所得应力波速,判断不同围岩中缺陷锚杆的锚固质量,并采用快速傅里叶变换(FFT)和短时傅里叶变换(STFT)进行锚杆锚固系统的频谱分析。第7章主要考虑锚固介质对锚杆产生的动态与静态阻尼力的影响,在不同约束情况下,列出力的平衡微分方程进而得到一维波动情况下的锚杆波动方程,对方程进行求解,得出锚杆在不同约束条件下的动力响应。第8章提出了一种多点布测的试验测试方法,同时结合小波多尺度分析的信号处理技术,实现了应力波速的有效量化及锚杆缺陷位置的准确判断,为加载等级下锚杆的瞬态动力响应研究提供了试验手段与数据分析的依据。第9章依据第7章的理论分析结果及第8章的试验与数据分析方法,在加载状态下,通过完整锚杆的应力分布及发展,动态信号、基频、阻尼比及动刚度的变化,分析荷载对完整锚杆动力响应的影响。第10章在第9章的基础上,在加载状态下,通过缺陷锚杆的应力分布及发展,动态信号、基频、阻尼比及动刚度的变化,分析荷载对缺陷锚杆动力响应的影响。第11章对本书的研究成果进行了系统的总结,并对后期的研究工作进行展望。

本书的研究内容是在工业和信息化部“十二五”规划专著、国家自然科学基金项目(51204098)、湖南省“十二五”土木工程重点学科、湖南省自然科学基金项目(11JJ6045)、南华大学“十二五”科技创新团队项目(2012NHCXTD12)等的支持与联合资助下完成并出版的,作者在此深表谢意。

本书由南华大学资助出版。本书的试验都是在南华大学土木工程基础试验中心完成的,感谢结构实验室、材料实验室和岩土实验室的杨晓峰、张志恒、王小波、秦志谦、雷林等老师给予的大力帮助和支持,感谢南华大学城市建设学院各位领导与建筑工程系全体老师的关心与支持,感谢中南大学资源与安全工程学院的李夕兵、曹平、吴超、周科平、薛振纲等教授对本人的帮助与关怀。感谢我的同学宫凤强、李地元、高峰、林杭、王斌、何利文等所给予的诸多帮助! 特别感谢课题组研究生郑绪涛、刘巍、张海峰、袁登、邓显石、张宋秋阳、郭闪闪

等在试验及全书统稿过程中所做的工作。

由于本书的部分内容是开创性的研究,有些观点和结论还有待进一步深入研究。另外,由于作者水平有限,难免有疏漏和不足之处,恳请各位读者批评指正,并予赐教。

作 者

2015 年 8 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 问题的提出及研究意义	2
1.3 基桩应力波检测理论在国内外的发展和应用	4
1.4 锚杆及其检测技术的现状与发展趋势	5
1.5 主要研究内容	11
1.6 技术成果和创新点	12
第2章 锚杆锚固系统的锚固作用原理及应力波传播规律	14
2.1 锚杆锚固系统的锚固作用原理	14
2.2 一维杆件中应力波传播规律	19
2.3 本章小结	23
第3章 锚杆的无损检测模型试验	24
3.1 模型试验的相似理论	24
3.2 试验方法	25
3.3 测试系统	26
3.4 试件制作	28
3.5 本章小结	33
第4章 应力波在锚杆体与锚固介质中传播的同步性	34
4.1 引言	34
4.2 锚杆中应力波传播理论	34
4.3 锚杆中应力波传播同步性检测的测试依据	37
4.4 试验结果与分析	37
4.5 本章小结	51

第5章 非加载状态下锚杆与基桩中应力波传播速度的变化特征	52
5.1 引言	52
5.2 应力波速的计算方法	53
5.3 试验结果的测试与分析	56
5.4 本章小结	81
第6章 非加载状态下锚杆的锚固质量检测及频谱分析	83
6.1 引言	83
6.2 非加载状态下缺陷锚杆的锚固分析	84
6.3 非加载状态下锚杆的信号处理与分析	93
6.4 本章小结	104
第7章 动静阻尼对锚杆瞬态动力响应影响分析	106
7.1 引言	106
7.2 瞬态动力响应的波动方程	106
7.3 锚杆瞬态动力响应的解析解	109
7.4 本章小结	113
第8章 多点布测下锚固缺陷诊断的小波多尺度分析	114
8.1 引言	114
8.2 小波变换的基本原理	114
8.3 测点布置及波速测定	115
8.4 锚杆的动测信号特征分析	117
8.5 锚杆原始信号的小波多尺度分析	118
8.6 应力波速大小及变化特征	122
8.7 进行多点布测及小波多尺度分析的原因	122
第9章 荷载作用下完整锚杆应力分布及动测参数的变化特征	124
9.1 引言	124
9.2 模型试验	124
9.3 完整锚杆应力分布及发展	124
9.4 完整锚杆动测参数的变化特征	128

9.5 本章小结	145
第 10 章 荷载作用下缺陷锚杆应力分布及动测参数的变化特征	146
10.1 引言	146
10.2 缺陷锚杆应力分布及发展	146
10.3 缺陷锚杆动测参数的变化特征	149
10.4 本章小结	166
结论	167
展望	169
参考文献	170
名词索引	182

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

随着岩土锚固技术的发展,锚固技术已经广泛地应用于岩土工程的各个领域,是一种重要的加固手段。它是一种结构简单的主动支护,能最大限度地保持围岩的完整性、稳定性,能有效地控制围岩变形、位移和裂缝的发展,充分发挥围岩自身的支撑作用,把围岩从荷载变为承载体,变被动支护为主动支护,具有运输施工方便、效率高,有利于加快施工进度,且施工成本低、支护效果好、施工噪声小等优点。欧洲国家较早采用了锚杆加固技术,1872年,英国最早采用锚杆加固北部威尔士露天页岩矿;1912年,德国最先在井下采用锚杆加固巷道。我国的锚杆加固技术起步于20世纪50年代中期,至今已有超过半个世纪的应用历史。该技术主要的应用领域按工程类型概括如下:边坡稳固工程,包括岩石或岩土边坡的加固、斜坡挡土墙、锚固挡墙以及滑坡防治;隧道与地下支护工程,包括铁路、公路隧道、地下输水隧道、地下铁道、地下结构等的临时性或永久性支护;深基坑支护工程,指单独或与其他支护相结合,利用锚杆或锚索进行开挖基坑的护壁、稳坡,以维护基坑在施工期间的稳定;大坝坝体加固工程,防止大坝坝体出现拉应力、整体倾覆等;地面高塔或高架结构的加固,对于如输电桩塔基加固、高架桥防倾倒、挡土墙抗倾覆工程的加固;道桥基础加固工程,如防止桥墩基础滑动、大跨度拱形结构稳固、悬臂桥锚固;井巷与矿山支护,如地下开拓工程巷道、地下维修洞室、采场进路、地下破碎洞室、地下停车场等;现有结构补强与加固,主要是利用锚固技术对已产生变形、裂缝和滑移等破坏或潜在破坏的已建工程的加固和补强。

在岩土工程中,其都是修建在岩土体中或以其为依托的建筑物,其特点是为结构物和周围岩土体紧密结合形成共同体,它们相互作用,唇齿相依,而锚杆在其中扮演了重要的角色。锚杆设计的主要目的是希望通过锚杆将破碎或不稳定岩体、结构物与牢固稳定的岩层连锁在一起,以提高整体的稳定性。锚杆支护实质上是把锚杆安装在巷道的围岩中,使层状的、软质的岩体以不同的形态得到加固,形成完整的支护结构,提供一定的支护抗力,共同阻抗其外部围岩的位移和变形。但由于锚杆是地下隐蔽工程,其破坏有可能带来巨大的财产损失和人员伤亡。锚杆的锚固质量和其破坏密切相关也直接关系到洞室围岩、边坡和基坑等岩土工程的稳定,必须对锚杆的锚固质量进行控制和检测。锚杆锚固质量的好坏不但与锚杆的整体抗拔力有关,而且还与各段的锚固力、砂浆饱满程度、锚固长度等因素有关,这就需要对锚杆进行合理的检测。

按检测的手段和检测加力方式不同,锚杆锚固质量检测方法可分为静力法检测和动力法检测两大类。锚固质量静力法检测的特点是施力时间长、检测试验周期长、加载大,是传统的方法。动力法检测的特点则是施力时间非常短、检测快速、加载小,是现代的检测方法。静力法检测主要是采用拉拔试验法和取芯法。拉拔试验法测定的抗拔力只是反映锚杆的整体抗拔能力,它不能指明锚杆各段的锚固力。液压千斤顶拔出测试是一项耗时、费力、破坏

性的测试方法。它仅仅能对数量很少的锚杆进行检测。更为重要的是对于锚固长度较长的锚杆无法用这种方法去检测其锚固质量。一般来说 30 cm 长且锚固质量较好的锚固体强度就远大于锚杆本身的强度,因此在测出锚杆的极限承载力之前锚杆本身已经被拉断。因此液压千斤顶拉拔检测法的测试深度小于 30 cm。总体来说,拉拔试验主要是确定锚杆的极限承载力、变形特征、设计合理性、施工质量等。其具有很多缺陷:是一种破坏性的检测方法;抽检的样本数十分有限,难免以偏概全;不能对锚杆的锚固质量做充分的肯定;不能检测锚杆的实际长度,抗拔力不能完全反映锚杆的质量状况;钢筋沿锚杆的应力分布也是不均匀的;锚杆的锚固剂对锚杆包裹情况无法检测。取芯法是用取芯钻沿平行锚杆的方向把锚杆、锚固介质以及部分岩石整体取出来,用目测的方法对锚固质量进行评价。虽然取芯可以提供非常有用的信息,但它不仅是一个破坏性的检测手段,而且受到许多因素的制约,如取芯过程很麻烦,非常昂贵,保持取芯钻与锚杆同心很困难,有些地方的锚杆无法接近取芯,使得该方法无法成为常规的检测手段。这两种检测方法都具有很大的局限性,因此静力法在工程实践中将逐步被无损的动力检测方法所替代。

锚杆锚固质量的动态无损检测方法借鉴了基桩动测原理。基桩是一种重要的基础形式,由于桩基础工程的造价通常占土建工程造价的 1/4 以上,且基桩工程属于隐蔽工程,从表面上无法直接观测其质量情况,同时由于受岩土工程条件、基础与结构设计、桩土体系相互作用、施工以及专业技术水平和经验等关联因素的影响而具有复杂性外,桩的施工还具有高度的隐蔽性,发现质量问题难,事故处理更难,这就给基桩质量控制带来了较大的隐患。桩基础工程的质量直接关系到整个建筑物的安危,因此,基桩检测工作是整个基桩工程中不可缺少的环节,只有提高基桩检测工作的质量和检测评定结果的可靠性,才能真正地确保基桩工程的质量与安全。基桩检测工作包括:施工前的试验,目的是为设计及施工方案提供校核、修改的依据;施工中的检测,目的是监督施工过程,保证施工质量,达到设计要求;施工后的检测,目的是对施工质量进行验收、评估和对质量问题的处理提供依据。基桩检测的主要内容为基桩的设计深度、桩底清底情况、入岩深度、完整性、混凝土质量及基桩承载力。在基桩完整性检测中,目前主要采用以一维应力波理论为基础的应力波反射法。应力波反射法是以应力波在桩身中的传播反射特征为理论基础的一种方法。该方法将桩假定为连续弹性的一维截面均质杆件,并且不考虑桩周土体对沿桩身传播应力波的影响。当在桩顶施加一瞬态激振力,将在桩内激发应力波,桩与桩周土之间的波阻抗差异悬殊时,应力波的大部分能量将在桩内传播,桩可以近似看作一维杆件,应力波在桩内传播可以采用一维杆波动方程计算。当桩内存在有波阻抗差异界面时,波将产生反射和透射,反射波将沿桩身反向传播到桩顶,而透射波继续向下传播。桩底、桩身的缺陷均可以根据反射波的相位、振幅和频率特性,辅以地层资料、施工记录以及经验,从而达到桩身质量评判的目的。动力法具有施力时间非常短、检测快速、加载小的特点,是现代的检测方法。

然而正是由于锚杆锚固质量检测的动测法借助了基桩动测原理,使得二者检测具有一定的相似性,部分研究和工程技术人员易将它们混淆,这样就可能造成实际工程检测中的误判,而实际上,二者有着许多不同之处。

1.2 问题的提出及研究意义

由于材料、施工、地质条件等因素的影响,锚固结构系统在施工和使用过程中必然存在许多缺陷,主要缺陷有:锚杆体本身缺陷,如材质不均匀,存在裂缝、孔洞,杆体锈蚀;胶结体

缺陷,如胶结体密实度不够,内部有孔洞、裂隙、“蜂窝”等;胶结体与锚杆体、围岩的胶结不好;另外还包括地质界面、软弱地层对锚固质量的影响。具有这些缺陷的锚杆-围岩结构系统,简称为“缺陷锚杆”。随着这些缺陷的产生、积累,会使具有永久支护的岩土工程失效。所以,对锚固工程的缺陷识别、质量诊断以及实时检测、补强,一直是岩土工程界广泛关注的问题。重大工程结构,如重要的桥梁、大坝、河堤、高层建筑、高速公路与铁路等,在发生地震、飓风、洪水等自然灾害时会因年久失修而危机四伏。这些结构中埋设的锚杆存在的内部缺陷,往往具有很大的危险性,会使整座建筑物倒塌,造成巨大的经济损失。四川宜宾悬索桥的垮塌正是由于锚索的失效而导致的灾难性后果。有关结构健康问题是举世瞩目的重大科技、经济和社会问题。由于结构都是按照力学原理设计的,没有生命、没有智能,不能感知自然灾害的作用,不能做出适当响应保护自己,因此为了保障安全,设计者往往采用保守设计,即增大结构的尺寸与质量,从而增加了人力、财力与资源的消耗。因此,如何通过一定的检测手段就可以判断结构的健康状况是当前国际上的一个研究热点。避免结构发生事故,延长结构的使用寿命,提高结构的可靠性、安全性是经济建设中无法回避的问题,这个问题的解决要靠广泛采用性能优异、准确可靠、方便实用的检测技术来实现。

因此对锚杆现场检测技术的研究是岩土工程界一个急需解决的课题,它对于安全生产、保障施工质量具有重要意义和广阔的应用前景。可以预料只要检测水平达到一定程度,锚固技术将以独特的经济效益,简便的工艺,广泛的用途,经济的造价,在矿业采掘与岩土工程领域中显示其旺盛的生命力。它的应用,能够解决现场专家不足的问题,早期发现结构潜在的缺陷,减少判断故障的时间,避免或减少事故的发生,对损失结构的剩余寿命进行科学的评价,保证结构的安全性。健康监测与智能诊断系统有可能把目前广泛使用的离线、静态、被动的检查转变为在线、动态、实时健康监测与控制,将导致安全监控和性能改善产生质的飞跃。

若取锚杆作为研究对象,其受力情况非常复杂,现场条件也非常复杂,影响锚杆锚固质量的因素非常多,而且锚杆、锚固介质、围岩之间存在相互作用,导致锚杆的理论分析非常困难,虽然前人进行了大量的理论分析研究,仍不能满足锚杆无损检测研究的要求。目前,对基桩完整性的检测,因反射波法具有经济、快速、简便和准确性较高等优点,是应用最为广泛、最具代表性的一种动测方法。借鉴基桩动测原理,利用反射波法进行锚杆锚固质量检测是解决锚杆锚固质量的实时、快速无损检测问题的有效途径。根据一维杆波动理论,在锚杆外露端头置一自激式加速度传感器,测得锚杆-围岩相互作用体系在激发荷载作用下的速度或加速度响应,通过波形识别和参数分析,可以准确测定锚杆的有效锚固长度,判断锚固端与围岩之间的支承连接情况,估算锚杆的极限承载力。国内外学者在这方面进行了大量研究工作,取得了可喜的研究结果,有的研究成果已进入实用阶段。许多学者对该方法进行了大量的理论分析和试验研究并取得了一些成果,但仍不能满足锚杆无损检测研究的要求,而且这些方法从理论机理到室内试验、处理分西手段及实际应用,还存在一些不足,如:

(1)理论上存在的不确定性,会导致实际应用时的随机性。对于锚杆检测的理论研究还处于起步阶段,许多理论问题,如锚杆周围介质对应力波传播的影响、各种波形的应力波在锚杆中传播规律的异同、应力波激发方式与波的传播规律的相互关系等,都还没有完全解决。

(2)关于室内试验的内容较少,没有统一成熟的试验方法和方案,室内锚杆锚固系统试

验构件的围岩形式单一。

(3)对于岩土工程锚固技术而言,不但包括岩层锚杆,而且包括土层锚杆,而大多数的锚杆无损检测无论是现场试验还是室内试验都针对岩层锚杆进行研究,而关于土层锚杆的无损检测相对较少。

(4)锚杆锚固系统中的应力波速是进行锚固质量判断的最基本也最难准确确定的参数,关于该波速与时间、锚固介质强度、锚固质量等参数间的变化关系研究较少,另外,是否有新的思路确定该波速的研究也有待开展。

(5)锚杆锚固质量的无损检测借鉴了“低应变动力测桩技术”,正由于这个原因,使得二者具有很多相似之处,部分研究和工程技术人员易将它们混淆,这样就可能造成实际工程检测中的误判。实质上,锚杆检测与基桩检测虽然存在相似之处但也有较大差异。二者相同之处是大多均采用一维弹性杆件的波动理论。但二者有着许多不同之处:首先,受力方式不同,基桩检测主要关注的是抗压承载力,而锚杆检测主要关注的是抗拔承载力;其次,检测对杆件本身质量定位不同,基桩本身的不均匀、扩缩径、长度等是质量检测的主要内容,而锚杆检测中的被测锚杆本身可以认定为均匀、没有质量问题的;再次,缺陷类型、特点不同,基桩缺陷还包括桩底缺陷,锚杆锚固质量缺陷主要反映在锚杆周边的握裹形式和强度;另外,研究深度不同,基桩检测从方法、理论到试验实践已研究得全面、深入、系统,而锚杆检测目前处于实践和经验总结阶段,理论研究不够全面和深入。

(6)由于锚杆的隐蔽性,其设计、施工与管理及工作环境都存在很大的不确定性,随着环境的作用和变迁,整个系统也在不断地调整变化或者产生病害,而且其受力情况非常复杂。总之,影响锚杆锚固质量的因素非常多,某一因素的变化将导致测试信号的变化,使其测试理论分析非常困难。许多学者通过理论分析和试验研究取得了大量的成果,但仍不能满足实际工程需要。如锚杆无损检测技术中的应用还存在应力波传播规律不明确,锚杆周围非线性阻尼对应力波传播的影响、底端反射难确定等问题。

(7)锚杆在安装和使用过程中都在一定荷载条件下进行,目前的研究大多忽略了荷载的影响,对荷载的认识不够,在讨论锚杆锚固质量时未考虑荷载对参数的影响,引起对锚固质量的判断不准确。本书对不同锚固质量锚杆在不同荷载下分别进行应力波检测,对检测信号进行小波分解,提取各种动测参数,分析了其变化情况,对实际工程有一定的指导意义。

上述问题是进行锚杆锚固系统无损检测中最难和最迫切需要解决的一些关键问题,如何有效解决这些问题是一项具有重要理论意义和实践价值的研究工作,如可以避免工程人员对基桩和锚杆的质量检测产生误判,可以实现锚杆锚固系统经济、便捷、实时、快速、准确的无损检测。基于此,本书对其中的部分问题进行初步的探讨和研究,为锚杆锚固质量实时无损检测技术在实际工程中的有效推广应用提供更多的参考依据。

1.3 基桩应力波检测理论在国内外的发展和应用

早在20世纪30年代,应力波理论就被用于分析打桩工程,1931年Isaacs首先指出,桩顶受到桩锤冲击后,冲击能量是以波动形式传至桩底,可用一维波动方程来描述,但其解过于复杂,只能用于极简单的边界条件,难以进入实用阶段。1950年A. Smith对锤—桩—土体系提出了用一系列质块、弹簧和阻尼器组成的离散化计算模型。从1964年至1975年,美

国的 G. Goble 领导的研究小组进行了基桩应力波检测测量技术和理论分析的系统研究,取得了丰富的成果。荷兰、法国等也研制出了自己的基桩动测设备和相应分析程序。从 1980 年以来,“应力波理论在基桩工程中应用”的国际会议的召开,对交流基桩应力波检测理论的研究成果和促进基桩应力波检测理论的发展和工程应用起到了积极作用^[1-9]。在我国,唐念慈^[10]等于 1978 年在渤海 12 号平台试桩工程中首次使用了波动方程法进行打桩分析,并设计了 BF81 计算程序。江礼茂^[11]等 1990 年提出拟合法中土阻力的双线性模型,并以波动理论为基础编制了计算单桩承载力的计算机程序。陈凡^[12]给出了考虑土的加工硬化或软化的土阻力模型,研制了 FEIPWAPC 特征线基桩波动分析程序。袁建新^[13]等给出了土性质参数调整的一个优化方法。其他一些学者^[14-18]也做了很多研究,对丰富应力波理论工程应用起到了积极作用。

1.4 锚杆及其检测技术的现状与发展趋势

1.4.1 锚杆的特点、分类及失效

1. 锚杆的特点

工程上所指的锚杆,通常是对受拉压构件所处的锚固体系的总称。它包含锚固体、拉杆及锚头三个基本组成部分,如图 1.1 所示。锚杆支护兼有支架和加固两种作用,与靠重力作用而使结构维持稳定的通常方式相比而言,其具有许多更为鲜明的特征^[19]。

(1) 在岩体和土体开挖以后,便提供支护力,对保护岩土体的自身强度、控制岩土体变形的进一步扩展以及提高整个施工过程的安全性都具有明显作用。

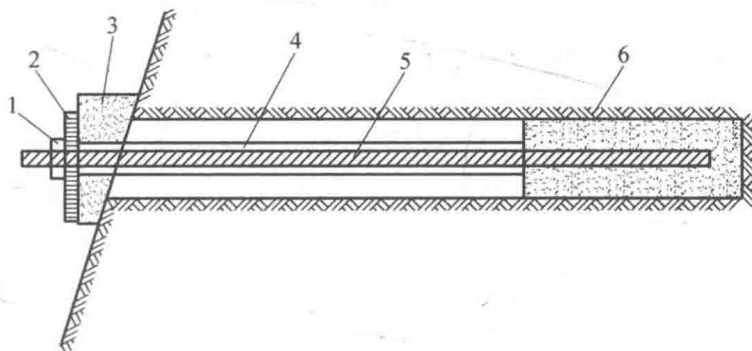


图 1.1 锚杆锚固系统结构示意图

1—禁锢器;2—承压板;3—台座;4—套管;5—拉杆;6—锚固体

(2) 可以有效改善岩土体的原始应力状态,从而进一步提高岩土体的稳定性。

(3) 可以有效加强岩土体薄弱结构面抗剪强度,从而改善岩土体的其他方面的力学性能。

(4) 将结构物与岩土体紧密地作用在一起,形成共同抵抗外力作用的体系。

(5) 对锚杆的作用部位、密度、结构参数、方向和施作时机等可进行方便的调整和设定,从而以最小的支护力,获得最佳的稳定效果。

(6) 随着结构物体积的减小,可以显著节约工程材料、减低造价,可以更有效地利用土地,经济效益十分显著。

2. 锚杆类别

为了满足各种地质条件和实际工程条件下工程结构稳定性的要求,工程与科研人员研制出了许多种类的锚杆,当前在国内外已经使用的锚杆种类有 100 多种,而目前在实际工程中常用的锚杆还比较有限,按照不同的划分标准可以把锚杆划分为如下种类^[20]。

(1)按荷载作用位置的不同从而使得锚杆和土体产生的相对运动不同,分为被动锚杆和主动锚杆。

(2)按内锚段锚固所作用介质的不同可分为岩石锚杆和土层锚杆。

(3)按是否施加预应力分为预应力锚杆和非预应力锚杆。

(4)按锚杆内部拉筋和水泥浆体传力方式的不同,可分为压力型、拉力型、压力分散型、拉力分散型和拉压分散型等。

其次,按锚固方式划分为机械锚固式锚杆、黏结锚固式锚杆和摩擦式锚固锚杆等,按锚固长度的不同划分为全长锚固锚杆和端头锚固锚杆,按材料的不同划分为钢筋锚杆、玻璃纤维锚杆、木锚杆和竹锚杆等。根据以上内容并做相应补充,锚杆的大致种类如图 1.2 所示。

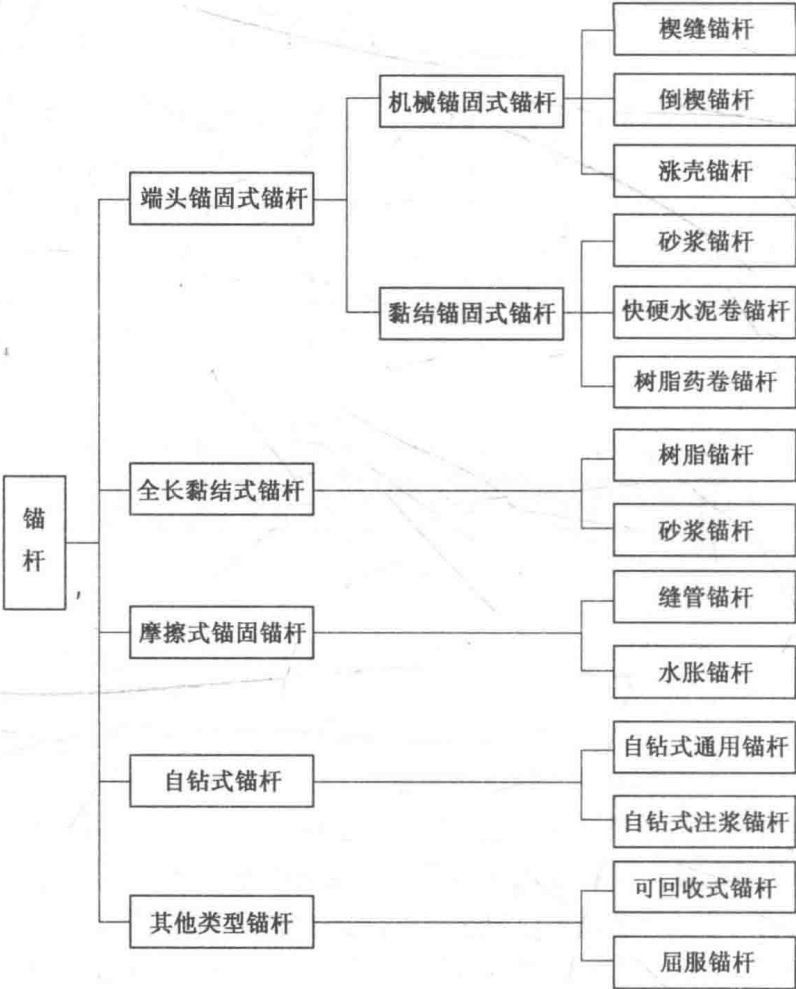


图 1.2 锚杆类别汇总图

3. 锚杆破坏形式

锚杆常见的破坏形式有锚杆的抗拉承载力不足引起的破坏、锚杆在岩体滑动面处或者节理面处的剪切破坏以及岩土体破坏,锚杆可能出现的其中一种或几种破坏^[21]形式:

(1) 锚杆的抗拉承载力不足引起的破坏主要包括锚杆被拉断破坏、钢筋和灌浆体的结合面黏结破坏、灌浆体和岩土体的结合面黏结破坏和灌浆体的破坏。

(2) 锚杆在滑动面处或者节理面处的剪切破坏。在许多工程事故中,锚杆存在较多的局部被剪切破坏。大量的剪切试验也证明在节理岩体中加锚节理面的抗剪强度随剪切位移的增大而增大,当节理面产生较大滑移时,锚杆就可能会被剪断或发生较大的剪切变形从而使得锚杆加固失效。

(3) 岩土体破坏主要包括锚固段底端有锚定板或膨胀体的锚杆内部岩土体的剪切或受压破坏、群锚效应引起的岩土体的破坏和锚固段顶端岩体的破坏。

1.4.2 锚固技术的发展

锚固技术在实际工程中的应用大约始于19世纪,英国北威尔士露天页岩矿在1872年就首次应用锚杆加固边坡^[22]。1911年,美国Aberschlesin的Friedens煤矿首先将岩石锚杆用于支护矿山巷道顶板^[23]。1918年,在美国西利西安矿首次将锚索支护用于该矿的开采。1934年,在阿尔及利亚Cheurfas大坝的加高工程中首次采用了预应力锚杆来保持加固后坝体的稳定^[24]。此后,在印度的坦沙坝、南非的斯登不拉斯坝、奥地利的斯布列西斯坝和英国的亚格尔坝采用了预应力锚杆加固技术,同时也取得了极大的成功^[25]。到20世纪50年代,锚杆锚固技术在实际工程中的应用得到了迅速有效的发展。1958年,土层锚杆用于法国Bauer公司。20世纪60年代,低预应力短锚杆(张拉锚杆)和高预应力长锚杆相结合的支护形式用于捷克斯洛伐克的Lipno电站的主厂房、原西德的Wadeck II地下电站主厂房等大型地下洞室。1974年,锚固技术也应用于纽约世界贸易中心深开挖工程中,950 m长、0.9 m厚的地下连续墙穿过有机质粉土、砂和硬土层直达基岩,开挖从地面至地下21 m深处,同时设置6排锚杆背拉,锚杆的工作荷载均为3 000 kN,锚杆倾角均为45°。20世纪80年代,英国、日本等国研发了一种新型的单孔复合锚固技术,该锚固技术改善了锚杆的传力机制,有效地提高锚杆的极限承载力和耐久性^[26]。综上所述,锚杆支护技术的发展大致经历了如下历程:20世纪40年代,对机械式锚杆进行了研究并在实际工程中得到应用;20世纪50年代,机械式锚杆广泛应用于采矿工程中,同时开始对锚杆支护系统进行研究;20世纪60年代,树脂锚杆开始推出并在矿山采掘业得到应用;20世纪70年代,缝管式锚杆、胀管式锚杆开始出现并在实际工程中得到应用,与此同时科学技术的进步使得新的加固方法不断涌现,诸如混合锚头锚杆、桁架锚杆、组合锚杆和特种锚杆等,同时这些锚杆也在工程中得到应用,与此同时树脂材料也得到改进^[27]。目前,国内外各种类型锚杆已达600余种,每年在实际工程中所使用的锚杆数量已逾10亿根。美国、澳大利亚等岩土工程技术发展比较完善的国家把锚杆作为围岩加固、地下开采工程中普遍应用的常规手段。随着岩土技术的发展,锚固技术不断发展,锚杆不仅种类越来越多,而且越来越先进,性能也越来越好,在国际上对单根预应力锚杆施加的锚固力已达13 000 kN。

在国内,锚固技术发展较晚,20世纪50年代后期,锚固技术开始应用于实际工程中,与此同时楔缝式锚杆支护技术在京西矿务局、河北龙烟铁矿、湖南湘潭锰矿等矿山巷道中得到

了应用。进入 20 世纪 60 年代,除了矿山巷道中使用锚固技术之外,在边坡工程、铁道隧道、地下工程、水库大坝等岩土工程中也大量地使用了锚固技术。1964 年,首次将 30 ~ 47 m 的预应力锚索用于安徽梅山水库加固坝基,主要为了提高坝基抗滑移的稳定性,此预应力锚索的单根最大张拉极限荷载达到了 3 240 kN。20 世纪 70 年代,土层锚杆开始在深基坑支护工程中得到应用,比如先后在北京国际信托大厦、王府井宾馆、京城大厦、上海太平洋饭店、上海展览中心、沈阳中山大厦等基坑工程中采用了土层锚杆进行基坑稳定性维护^[28]。1989 年,我国首台 6 000 kN 级预应力锚杆及预应力张拉设备研制成功,并将其应用于丰满大坝的加固工程,同时,预应力锚杆在石泉大坝加固工程应用成功。到 20 世纪 90 年代,10 000 kN 级预应力锚杆在龙羊峡水电工程中试验成功,并在多个工程中获得应用^[29]。据统计,在我国,每年仅深基坑工程和边坡加固工程锚杆的使用量按长度计就有 3 000 ~ 3 500 km,同时,在煤矿和金属矿山巷道中锚杆的年使用量也超过了 2 600 km。以举世瞩目的三峡水利枢纽工程为例,将 4 千余根长为 25 ~ 61 m 不等的设计承载能力为 3 000 kN(其中也有部分设计承载能力为 1 000 kN)的预应力锚索和近 10 万根 8 ~ 14 m 不等的高强度锚杆,用于高 170 m、长 1 607 m 的船闸边坡处于风化程度不等的闪云斜长花岗岩中作为整个系统加固和局部加固,这些锚杆对改善边坡的应力状态使其向有利方向发展、阻止不稳定块体的进一步塌滑、抑制塑性区的继续扩展以及提高边坡的整体稳定性发挥了举足轻重的作用^[30]。近年来,我国岩土锚固工程的发展及其应用尤为迅速,其应用几乎已涉及矿山井巷、铁路隧洞、地下洞室支护、岩土边坡加固、坝基稳定、深基坑支护、结构抗浮与抗倾、悬索建筑的地下受拉结构等土木工程各个领域,如在三峡水利工程中,永久船闸两侧全部用数十万根高强锚杆进行预锚加固,无论是锚杆的长度或是其强度都达到了前所未有的状态,创造了当今世界水利工程的奇迹。

在我国,随着锚固技术的发展,相应的规定和规范也日趋完善,有关部门已编写了与锚固技术相关的规定和规范等。1990 年 11 月,《土层锚杆设计与施工规范》被中国工程建设标准化协会批准;1994 年,《水工预应力锚固施工规范》被水利部批准为部颁标准;1998 年 6 月,《水工预应力锚固设计规范》也被水利部批准为部颁标准。

从国内外锚固技术的发展历程不难预料,锚固技术将以其显著的优势诸如独特的效应、广泛的用途、简便的工艺、经济合理的工程造价等在岩土工程界显示其旺盛的生命力和可观的发展前景。

1.4.3 检测技术的历史及现状

随着岩石动力学的深入和其在岩土工程中的应用的不断扩展,同时由于方便高效现代计算机处理技术的广泛应用,使得无损探伤技术用来监测锚杆锚固质量不再是岩土工程界难以解决的问题,其将使锚杆锚固系统的质量监测发生历史性的飞跃。对锚杆而言,无论从理论角度上来分析,还是从其几何特性、材料性质以及承受荷载情况等方面来探讨,其比基桩都更符合一维弹性杆件的波动理论,以目前在煤矿上广为使用的锚杆形式为例,其相对长度(主要用长度与截面直径相比衡量)较基桩小得多;其次,从信号接收的角度来讲,因其应力波的能量衰减较小,锚杆的信号接收更容易一些。基于此,可以借鉴基桩动测技术比如反射波法等测定锚杆的锚固长度、缺陷位置及长度、锚固质量等锚杆的实际锚固状态。本书对锚杆的检测技术的发展做如下简单阐述。