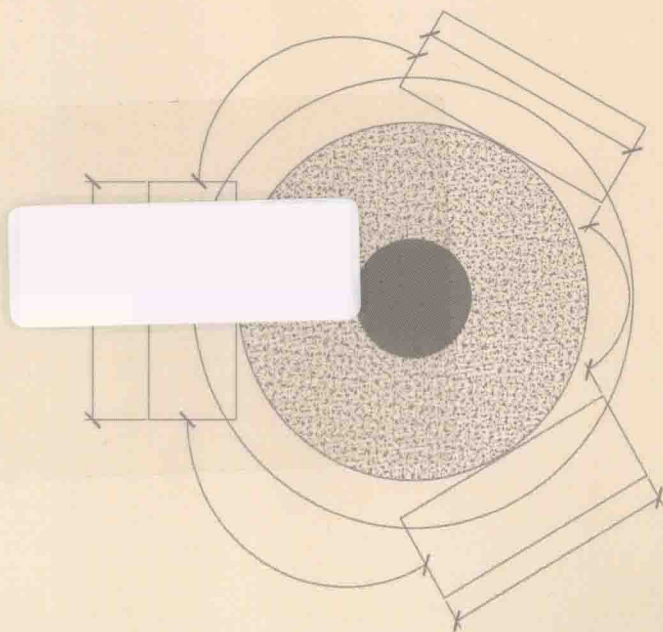




土遗址 锚固机理初探

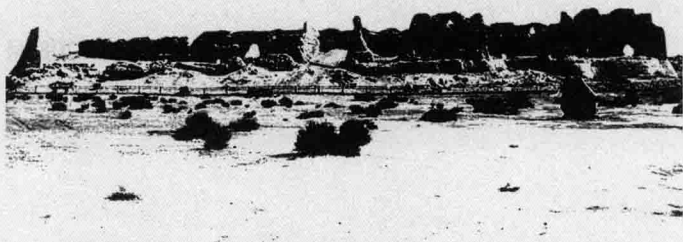
张景科 郭青林 李最雄 谌文武 / 著

TUYIZHI MAOGU JILI CHUTAN



兰州大学出版社

本书受到“国家科技部十二五科技支撑计划课题‘干旱环境下
土遗址保护成套技术集成与应用示范’(2014BAK16B02)”资助



土遗址 锚固机理初探

■ 张景科 郭青林 李最雄 谌文武 / 著

TUYIZHI MIAOGU JILI CHUTAN



兰州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土遗址锚固机理初探 / 张景科等著. —兰州: 兰州
大学出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-311-04540-1

I. ①土… II. ①张… III. ①土质—文化遗址—锚
固—研究 IV. ①K878.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 202208 号

策划编辑 施援平 王曦莹
责任编辑 郝可伟 施援平 王曦莹
封面设计 管军伟

书 名 土遗址锚固机理初探
作 者 张景科 郭青林 李最雄 谌文武 著
出版发行 兰州大学出版社 (地址: 兰州市天水南路 222 号 730000)
电 话 0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心)
0931-8914298(读者服务部)
网 址 <http://www.onbook.com.cn>
电子信箱 press@lzu.edu.cn
印 刷 兰州大众彩印包装有限公司
开 本 710 mm × 1020 mm 1/16
印 张 18.5
字 数 272 千
版 次 2014 年 9 月第 1 版
印 次 2014 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-311-04540-1
定 价 55.00 元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)

前 言

我国有五千多年的文明史，在这漫长的历史长河里中华民族创造了光辉灿烂的历史文化，留下了灿若群星、独具特色的文化遗产。保护好、传承好、利用好这些文化遗产，对于继承和发扬中华民族优秀传统文化具有重大意义。

古遗址是我国优秀文化遗产的主要组成部分，它是历史上遗留下来的人类房居和进行生产、文化、宗教、军事防御等活动的建筑遗迹。古遗址分土建筑遗址、石窟寺、墓葬等，但土遗址和石窟寺是古遗址中数量最大、最重要的两类。

土遗址是以土做建筑材料的遗址，它遍布全国，尤以西北干旱半干旱区为最多，它具有重大历史、科学和艺术价值。然而长期以来受到自然界诸因素，如温湿度变化、冻融、风蚀、雨蚀等环境因素及人类活动的影响，大部分土遗址处于濒危状态，亟待抢救加固。

土遗址保护作为一个新兴的学科，还未形成科学、系统的理论体系，目前主要依靠初步的室内实验研究、现场试验及工程实践经验，实施以抢险为主要目的的加固工程。

本研究选择土遗址抢险加固中最核心的工程措施——锚固作为研究对象，基于工程实践总结出土遗址加固系列锚杆；通过现场拉拔测试分析，揭示各类型锚杆锚固系统界面力学传递特征与极限锚固力；根据锚固系统拉拔进程中的阶段性，引用最新锚固理论开展各类锚固系统破坏界面的理论分析，并与现场试验相比较，探讨锚固理论的科学与不足，为土遗址保护提

供科技支撑。

本研究的主要结论及亮点如下：

(1) 竹木杆材是我国古建筑中的主要建筑材料，这是中国、日本、韩国等东亚国家古建筑的一大特征，有别于欧美国家，这与材料本身特性、结构特性、气候环境和文化特征密切相关；充分证明了竹木杆材在土遗址加固的适宜性；基于现有的一些考古调查资料、加固研究成果和大量的土遗址锚固工程实践经验，尝试建立土遗址加固系列锚杆体系、各类锚杆的选材及锚固工艺，初步实现土遗址锚固的规范化，避免加固工程中锚固的随意性。

(2) 木锚杆和改型木锚杆锚固试验测试分析表明：锚固系统失效位于杆体—浆体界面，以杆体拔出的形式出现；最大剪应变在距孔口一定距离的位置，在受力过程中界面出现剪胀作用；锚固系统具有非常强大的延性；从加荷到破坏，杆体—浆体界面经历了弹性变形—塑性变形—脱黏—黏滑—破坏等力学过程；极限荷载可达 100 kN；以上研究结论充分证实了传统工艺的科学性。

(3) 楠竹锚杆锚固试验测试分析表明：锚固系统失效位于杆体—浆体界面，以杆体拔出的形式出现；杆体—浆体界面经历了弹性变形—塑性变形—脱粘—破裂等力学过程。相对木锚杆系统，楠竹锚杆的锚固力较小，这也是在北方土遗址中竹材运用较少的原因。

(4) 复合锚杆锚固试验测试分析表明：复合锚杆锚固系统失效主要位于加筋—复合材料界面，同时杆体—浆体界面也出现了一定的滑移；极限锚固力为 80~408 kN；各界面层的剪应力分布非均匀，在较低荷载下，剪应力大致沿着锚固深度衰减，但在较高荷载下出现了峰值及其转移现象；各界面层在受力过程中出现了剪胀作用；部分锚固段出现轴向压型剪应力；剪应力存在横向传递现象；加钢绞线复合锚杆锚固系统多以钢绞线拉断而失效，说明各界面层剪切刚度极大；各类型复合锚杆界面剪应力的性质和分布不尽相同，足见复合锚杆受力机制的复杂性。

(5) 玻璃纤维锚杆锚固试验测试分析表明：PS-(C+F) 浆体与玻璃纤维

锚杆锚固力极低，两者的兼容性较差，该锚固系统不适宜用于土遗址锚固；采用水泥砂浆极限锚固力可达 46~120 kN，杆体—浆体界面剪应力沿着锚固深度呈衰减趋势，锚固系统失效模式主要为浆体—土体界面破坏；因此这种新型锚杆结合水泥砂浆浆体适宜用于土遗址载体的锚固。

（6）基于 Mindlin 弹性解、界面两线型和三线型剪滑本构模型，从理论上分析了各类锚固系统界面力学传递特征，并与现场试验相对比，发现弹性阶段下与实际较为吻合，在软化—黏滑阶段理论分析与试验结果差距较大，因此对于脱黏后界面的力学传递理论还需深入研究。

以上研究成果为土遗址锚固的规范化和科学化提供了科技支撑，初步揭示了各类锚固系统界面力学传递特征及锚固机理，锚固理论与试验对比分析为锚固理论的深入研究开拓了方向。

目 录

1	绪论	1
1.1	研究背景与研究意义	1
1.1.1	研究背景	1
1.1.2	研究意义	4
1.2	研究内容与研究路线	6
1.2.1	研究内容	6
1.2.2	研究路线	6
1.3	关键技术问题及创新点	8
1.3.1	关键技术问题	8
1.3.2	创新点	8
2	岩土锚固现状综述	9
2.1	岩土锚固的起源及发展	9
2.2	岩土锚固机理概述	10
2.3	全长黏结型锚杆锚固机理研究现状	14
2.3.1	锚固试验	15
2.3.2	锚固理论	20

2.3.3	锚固数值模拟	25
2.4	土遗址锚固研究现状	26
3	土遗址加固用系列锚杆锚固系统	28
3.1	概述	28
3.2	竹木材料在古遗址建造中的地位	29
3.3	土遗址加固用系列锚杆锚固系统	35
3.3.1	竹签微型锚杆锚固系统	36
3.3.2	楠竹锚杆锚固系统	39
3.3.3	木锚杆锚固系统	41
3.3.4	复合锚杆锚固系统	43
3.3.5	GFRP锚杆锚固系统	49
4	交河故城试验区工程地质条件与锚固试验方案	51
4.1	遗址试验区及工程地质条件	51
4.1.1	遗址试验区概况	51
4.1.2	交河故城工程地质条件	52
4.2	锚固原位拉拔试验方案设计	63
4.2.1	试验场地概况	63
4.2.2	试验仪器设备	64
4.2.3	试验方案	64
5	锚固试验结果与分析	82
5.1	竹木锚杆	82
5.1.1	竹签锚杆	82
5.1.2	木锚杆	83
5.1.3	改进型木锚杆	93
5.1.4	楠竹锚杆	99

5.2 复合锚杆	102
5.2.1 F16复合锚杆	102
5.2.2 F18复合锚杆	124
5.2.3 F20复合锚杆	148
5.2.4 F22复合锚杆	160
5.2.5 F5复合锚杆	180
5.2.6 F8复合锚杆	193
5.3 玻璃纤维锚杆	219
5.3.1 BL22-1 锚固系统	220
5.3.2 BL25-2 锚固系统	223
5.4 小结	226
6 锚固理论分析	228
6.1 基于弹性状态下系列锚杆锚固系统受力过程	228
6.1.1 锚固系统受力过程的弹性理论	228
6.1.2 木锚杆锚固系统	230
6.1.3 楠竹锚杆锚固系统	231
6.1.4 复合锚杆锚固系统	232
6.1.5 玻璃纤维锚杆锚固系统	233
6.2 基于两线型剪滑本构模型的锚固系统受力过程理论分析	235
6.2.1 锚固系统受力过程的弹塑性理论	235
6.2.2 木锚杆锚固系统	241
6.2.3 楠竹锚杆锚固系统	242
6.2.4 复合锚杆锚固系统	243
6.2.5 玻璃纤维锚杆锚固系统	244
6.3 基于三线型剪滑本构模型的锚固系统受力过程分析	246
6.3.1 三线型剪滑本构模型锚固理论	246
6.3.2 木锚杆锚固系统	253

6.3.3 楠竹锚杆锚固系统254

6.3.4 复合锚杆锚固系统255

6.3.5 玻璃纤维锚杆锚固系统258

6.4 小结259

7 结论与展望261

7.1 主要结论261

7.2 展望263

参考文献.....265

1 绪论

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

文化是一个民族的根与魂，影响着民族的发展道路和前进方向^[1]。当今世界，文化与经济和政治相互交融，在综合国力竞争中的地位和作用日益突出^[2]。对一个国家而言，文化可以创造生产力、提高竞争力、增强吸引力、形成凝聚力。文化事关立国之本、治国之道、兴国之路。作为一种软实力、一种精神的力量，文化直接关系到一国的国际影响力、国际竞争力和国际地位^[3]。当今世界，文化在综合国力竞争中的地位和作用愈加凸显。各国把提高国家文化软实力作为主要发展战略，千方百计增强本国文化的整体实力和国际竞争力，力求在日益激烈的综合国力竞争中赢得主动权^[4]。所谓“软实力”是指一国的文化、价值观念、社会制度、发展模式的国际影响力与感召力。作为文化事业的重要组成部分，我们祖先留下的文化遗产博大精深、一脉相承、连绵不绝，是我国软实力的重要资源和基础^[5]。因此，在当今强调国家文化竞争力的国际背景下，文化遗产的价值早已超越其本身^[6]。

在当今世界，文化与经济和政治相互交融的形势下，文化在综合国力竞争中的地位和作用日益突出。维护国家文化安全任务更加艰巨，增强国家文化软实力和国际影响力要求更加紧迫。国家“十二五”时期文化改革发展规划纲要的重点之一为“加强文化遗产保护传承与利用”，内容中特别强调提高物质文化遗产保护水平和提升科技创新能力。

中国具有五千多年的文明史，勤劳智慧的中华民族创造了光辉灿烂的历史文化，留下了璀璨而独特的文化遗产。这些珍贵的文化遗产是中华民族悠久历史的见证，是民族智慧的结晶、民族精神的象征，是民族生命力和创造力的重要体现，也是人类文明的财富^[7]。保护好、传承好、利用好、发展好文化遗产，对于继承和发扬中华民族优秀的传统文化，弘扬以爱国主义为核心的民族精神和以改革创新为核心的时代精神，维护国家统一和民族团结，推动社会主义文化大发展大繁荣，促进国际文化交流和人类共同发展，具有十分重要的意义。在此背景驱动下，文化遗产保护的领域不断扩大，也促使从业者从更广阔的视野、更深入的角度，探索建立新的文化遗产类型及其相应的保护体系，从而呈现出新的发展趋势^[8]。

近年来，文化遗产保护科技进入了蓬勃发展的时期，国家先后启动实施了一大批重点科研项目，获得了一批具有自主知识产权的共性技术和大量关键技术研究成果。文化遗产保护的科学水平和创新能力显著提高，已有成果在考古研究、文物保护、博物馆展示等领域得到了广泛应用，解决了若干制约文化遗产事业发展的重点、难点和瓶颈问题^[9]。近年来，我国文化遗产保护领域重点开展了两项跨部门、跨学科、跨行业、跨系统的大规模系统科研工程：一是指南针计划，即中国古代发明的价值挖掘与展示；二是中华文明探源工程^[10]。无疑，这样的系统研究会使我们的五千年文明实实在在地展现于世界。

今天，文化遗产保护已发展成为开放的复杂巨系统，涉及经济社会发展的各个方面，对科学技术提出了更加迫切的要求，必须依托跨学科、跨行业、跨部门、跨区域、跨国界的通力合作，一切适用的科学发现和技术发明都将被考虑和尝试应用于文化遗产保护，科学技术在文化遗产保护中的支撑和引领作用愈加明显。同时，文化遗产保护也成为衡量民族责任感的标尺之一，成为评价国家综合实力的重要因素，得到了科学技术领域更多的关注和支持，促使科学技术界和文化遗产保护界的融合，进而共同担负着保护文化遗产的责任，承担着复兴民族文化、振兴民族精神的历史使命。无疑，科学技术在悠久的历史 and 现代文明之间发挥着桥梁作用^[11-15]。

我国的土遗址上至石器时代，下至明清皆有分布，据统计，唐代以前土遗址占总数的85.5%。截至第六批全国重点文物保护单位，现已公布的国家级重点文物保护单位的土遗址共计378个，分布于全国30个省、市、自治

区,最著名的有陕西的汉长安城、西安半坡仰韶时期的原始村落遗址、临潼的秦兵马俑坑土遗址、陕北明长城,甘肃秦安的大地湾仰韶村落遗址、定西地区的战国秦长城遗址、敦煌近郊的玉门关及河仓城、汉长城、安西的锁阳城遗址、高台的骆驼城、嘉峪关明长城,内蒙古额济纳旗的黑水城遗址,宁夏规模宏伟的西夏王陵,新疆吐鲁番的交河故城、高昌古城、楼兰故城、苏巴什佛寺遗址等^[16]。

我国土遗址种类丰富、类型全面。按照土遗址的使用性质可分为:古人类居住遗址、古城、长城、关隘、烽燧及土塔、陵墓、出土的坑、穴、窑、窖、古化石地层遗址、革命遗址及革命纪念建筑物及其他;根据保护形式可分为:露天遗址和室内遗址;根据赋存环境可分为:干旱区土遗址和潮湿区土遗址等;根据出土条件可分为:地面上土遗址和地面下土遗址;根据建造工艺可分为:生土、夯土、土坯、垛泥等土遗址。全国重点文物保护单位分类中涉及土遗址的类型主要有古遗址、古墓葬、石窟寺、近现代建筑及革命历史建筑,其中古遗址和古墓葬占有绝大多数。

根据最新统计,我国西北古丝绸之路国务院公布的第六批以前国家级重点文物保护单位的土遗址有102处,石窟寺有28处。省级重点文物保护单位的土遗址有近500处,石窟寺有600多处。

我国丰富的土遗址承载着五千年的历史、文化、宗教等各种珍贵的历史信息,然而受到自然作用和人类活动的影响,土遗址所面临的境况不容乐观,广泛发育有变形、裂隙、风化等各种病害,如不得到及时的保护,将面临消失的威胁。尤其在我国西北干旱半干旱区,丝绸之路沿线是我国土遗址分布最多的地区,种类多、赋存环境复杂,具有炎热,年较差和日较差较大,干燥少雨,偶有极端降雨,大风、沙尘暴时有发生,构造运动剧烈和地震频繁等特点,造成土遗址病害类型复杂、规模大、程度重。因此,只有真正保护好文化的载体——遗产,使其延年益寿,才能谈得上传承和发展^[17]。

土遗址保护研究较晚,还没有形成具有自身特色的完整保护理念,其保护理念部分采用的还是古建筑、古遗址的保护理念和思想。目前已采取在遵循我国文物保护“保护为主、抢救第一、合理利用、加强管理”方针下,注重日常维护,遵循文化多样性原则,运用一切有利技术,在不改变原状的前提下,对土遗址进行整体保护的理念。我国土遗址保护开始于20世纪80年代末,开始在几个遗址点进行试验性加固。经过20多年的发展,在保护手段

上,逐渐开展了土遗址风化机理的研究,新型勘察手段的研发,表面防风化加固材料、锚固灌浆材料与工艺的研发等。此外,随着国家对文化遗产保护投入的增加,相继开展了交河故城、高昌故城、北庭故城、锁阳城、骆驼城、甘肃明长城等土遗址的抢险加固工程,取得了巨大的社会效益。

因我国土遗址数量大、病害发育严重,相应的保护工作仍然处于“抢险加固”阶段,遵循“先救命后治病”的文物保护原则,当前主要开展以“救命”为目的的文物保护,防止近期内发生大规模的坍塌而造成文物历史信息的永久丧失。从加固技术的角度而言,主要是力学稳定性控制问题。基于文物保护的理念和准则,目前被普遍接受的技术为隐蔽性的力学稳定性控制技术——锚固。作为土遗址力学稳定性控制的关键技术之一,锚固从最初薄壁钢管的尝试,到白蜡杆、楠竹锚杆、复合锚杆、GFRP等,经历了筛选试验研究和工程实践,同时出现了文化遗产保护领域新的研究热点——“传统工艺的科学化研究”,最终业界普遍认为采用传统的木、楠竹及在此基础上研发的复合杆体材料适宜于土遗址锚固。但锚固机理研究的严重滞后,阻碍了土遗址锚固技术的发展。单凭实践经验和参照其他岩土加固领域的规范和标准进行土遗址加固的勘察、设计与施工,已不能适应正在大规模开展的土遗址抢险加固工程。如今,科学技术的研究不能满足日益增长的土遗址加固需求,无法体现科学技术在文化遗产保护方面的支撑作用。因此,开展土遗址锚固机理研究,可以有效地防止出现“保护性破坏”,进而为我国土遗址的保护奠定理论基础,拓展土遗址保护学的深度和广度,实现土遗址保护学科的系统性。

1.1.2 研究意义

目前在其他岩土工程加固领域,锚固技术得到了广泛的应用,相应的实践经验和理论研究都取得了大量成果。但这些研究成果直接移植到土遗址锚固中是不合适的,因为土遗址不是简单的岩土体,它是具有丰富历史、艺术、科学价值信息的文物,即它兼有文物和岩土体材料两个属性,而且第一属性为文物或文化遗产。在此前提下,现有其他岩土工程领域的锚固技术并不适宜于土遗址加固,具体体现在成孔工艺、注浆材料与工艺、杆体材料与结构、锚固系统体系及其兼容性等方面^[18,19]。由于长期以来我国土遗址加固缺乏标准、规范,不同文物保护单位结合自己的专长采取了不同类型的锚固技

术,造成了无序的局面。近年来,经过大量的工程实践和现场试验,在锚固技术的选材方面基本达成了共识,即传统土建筑中的竹木杆材或其衍生材料较为适宜于土遗址加固。基于前期的研究成果,对杆体系列进行适度规范化显得尤为必要。因此,建立土遗址锚固用系列锚杆体系,为后续土遗址锚固技术的规范编制提供技术支撑,也为规范我国土遗址的科学保护奠定基础,成为燃眉之急。

锚杆是传递主体结构拉应力到周围介质系统的核心结构物。土遗址加固用的锚杆均为全长黏结拉力型,其力学传递过程为:由锚杆杆体传递至黏结材料,再由黏结材料传递至基体。因此从力学稳定性的角度而言,锚杆与浆体的黏结作用、浆体与周围介质的黏结作用是决定锚固系统承载性能的主要因素。一旦黏结作用失效,整个锚固系统就会破坏,从而导致遗址体的坍塌。所以,锚固系统界面力学传递机理成为锚固技术研究中的重点。

界面力学传递机理是一种复杂的相互作用,这种传递作用属于细观界面问题,破坏机理复杂,影响因素非常多,应力、应变分布状态复杂,又存在试验技术等方面的原因,因此锚固系统的力学传递机理研究还没有形成一套完整的体系。对于土遗址锚固,除了对个别锚固系统的力学传递机理进行了探索性研究外,目前的研究还是基于传统宏观的“平均剪应力”理念开展的,这与锚固系统的力学过程不一致,这种思路没有考虑到界面脱粘—裂隙扩张的过程,不能正确地反映界面力学分布和传递的特征。尤其对于在竹木杆体基础上研发的复合锚杆,杆体自身就含有两个界面,进一步增加了锚固系统界面力学传递的复杂性。而现在对于锚固系统中各界面的黏结—滑移本构关系还不尽完善,而且对第二胶结界面和第三胶结界面的界面应力量测问题仍未解决,给理论分析也造成了极大的困难,所有这些问题都阻碍了对锚固系统力学机理的认识。

鉴于此,本研究尝试确立了土遗址加固用系列锚杆体系,明确了不同杆体的结构形式、加固工艺与适用范围,尝试对土遗址锚固进行标准化。基于现场拉拔试验和界面应变监测,获得了不同锚固系统界面力学传递的特征、锚固系统失效的模式等。基于最新锚固理论,探索了不同锚固系统的理论依据,为锚固系统的优化和新型锚固技术的研发奠定了理论依据。

1.2 研究内容与研究路线

1.2.1 研究内容

本研究基于我国西北干旱半干旱区土遗址锚固工程实践的现状和发展趋势,选用土遗址保护中常用的系列锚杆作为研究对象,基于现场拉拔及界面微应变测试,揭示不同类型锚杆锚固系统界面的力学传递特征;基于锚固系统力学传递理论分析了各锚固系统的界面传递特征,并与试验结果进行了对比分析。

主要研究内容包括:

(1) 揭示竹木杆材作为传统锚固材料的科学性,建立土遗址锚固锚杆体系,尝试对土遗址锚固技术进行标准化和规范化;

(2) 基于现场循环荷载、单级荷载、位移控制等方式对各类锚固系统进行拉拔试验,并获得了界面层各点的应变监测数据;查明了锚固系统真实的受力状态;

(3) 通过拉拔试验测试数据整理分析,揭示了各类锚固系统的破坏模式,查明了在不同荷载下界面剪应力传递的特征和规律,掌握了锚固系统受力至破坏全过程中各界面层的受力特性和变化进程;

(4) 基于锚固系统受力过程,采用基于 Mindlin 弹性解、界面两线型和三线型剪切-滑移本构关系,推导了各锚固系统不同受力状态下的理论解,并与试验测试结果进行对比分析。

1.2.2 研究路线

本文从查阅大量相关文献开始,经历了试验方案制定、场地选择调查与布置、锚杆制作及应变监测系统安设、锚固施工、拉拔试验测试、数据整理分析、理论分析并与试验数据对比等历程,具体的技术路线如图 1-1。

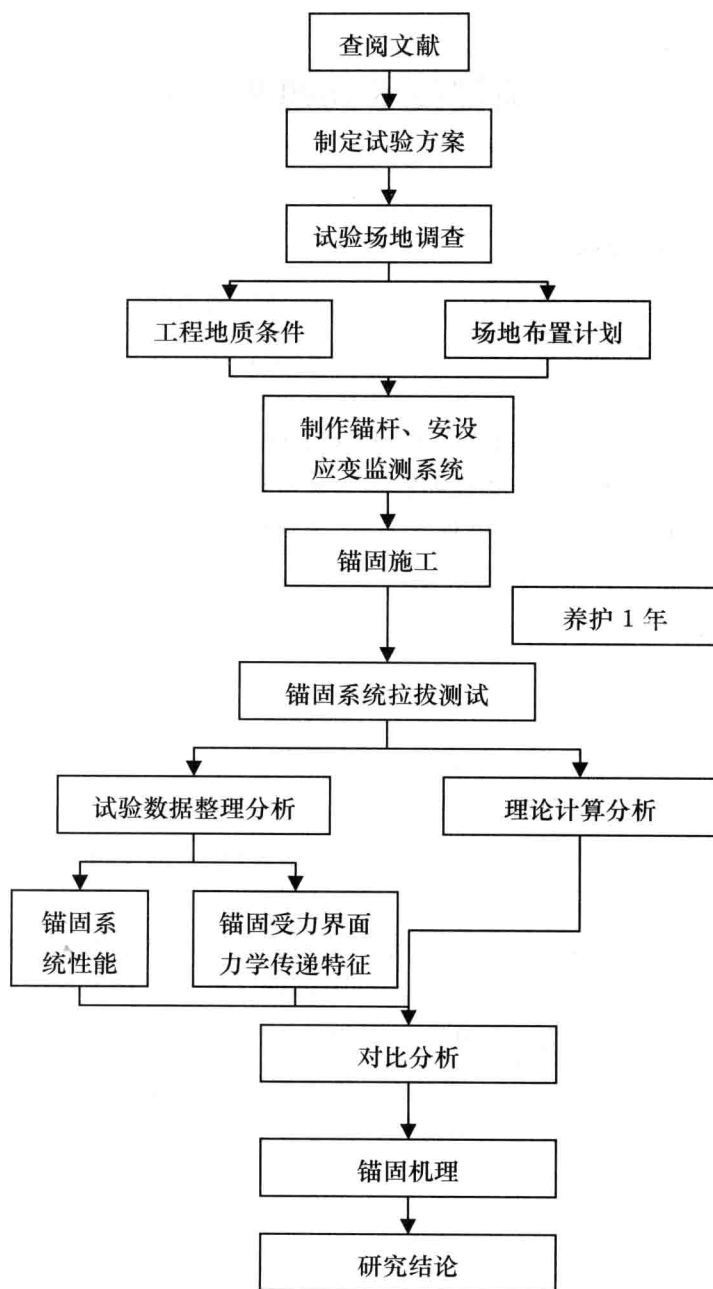


图 1-1 研究路线图