

土钉支护 理论与设计

杨育文 ◎ 著

Soil Nailing
from Theory to Design

中国建筑工业出版社

ISBN 7-112-04111-1

土钉支护理论与设计

Soil Nailing from Theory to Design

杨育文 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土钉支护理论与设计/杨育文著. —北京: 中国建筑
工业出版社, 2018. 10
ISBN 978-7-112-22560-6

I. ①土… II. ①杨… III. ①土钉支护-研究②土
钉支护-设计 IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 186596 号

本书总结了土钉技术起源和发展的近 50 年来国内外研究成果, 介绍了土钉支
护设计方法, 分析了设计案例, 试图建立一套从基本理论到设计方法的完整体系。
本书可供岩土工程及相近专业本科生、研究生及从业技术人员学习参考。

责任编辑: 刘瑞霞 牛 松 李笑然
责任校对: 姜小莲

土钉支护理论与设计

杨育文 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

大厂回族自治县正兴印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15½ 字数: 374 千字

2018 年 12 月第一版 2018 年 12 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-22560-6

(32629)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

土钉技术起源于 20 世纪 70 年代的欧洲, 20 世纪 90 年代前后传入我国。这一时期我国正开始大规模基础建设, 房地产市场异常火热。由于这一技术具有施工速度快、施工机械简单、造价低等优点, 深受工程界的重视, 特别是在基坑工程领域中得到了广泛的应用和快速发展, 由最初的土钉和面层组成的土钉墙结构, 衍生出复合土钉墙、组合土钉墙等, 积累了丰富的工程经验, 发展了基坑支理论, 取得了很好的经济和社会效益。从土钉支护技术发展速度和工程应用规模这两个方面来看, 这一技术在我国处于国际领先地位。但同时, 也存在着理论与工程脱节、理论落后于工程实践等问题。我国曾发生过多起大型土钉支护基坑滑塌事故, 教训沉重。

本书主要是为岩土工程及相近专业本科生、研究生及从事勘察、设计、施工、监测方面的技术人员和科研工作者编写的。全书共分 9 章, 介绍了土钉技术中稳定性、承载力、土压力和渗流等方面的基本理论和现行国家规范《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120《复合土钉墙基坑支护技术规范》GB 50739《铁路路基支挡结构设计规范》TB 10025 中的相关计算方法, 探讨了研究难点和热点问题, 从理论和实际案例分析中总结出土钉支护设计理念和方法。

本书编写过程中, 得到了多个科研、工程、高等院校及出版社的大力支持, 在此表示衷心的感谢。向为本书提出过中肯建议和意见的学者、专家、同事致以崇高的敬意。

由于本人知识和认识水平的局限性, 书中难免存在疏漏和不妥之处, 恳望读者提出宝贵意见, 以便及时更正。

目 录

第1章 概论	1
1.1 土钉技术及特点	1
1.2 起源与发展	2
1.3 土钉支护技术面临的挑战	6
1.4 本书主要内容	10
参考文献	11
第2章 土体的自稳性分析	18
2.1 概述	18
2.2 经典理论	18
2.3 渗流条件下边坡的自稳性	22
2.3.1 公式推导	22
2.3.2 工程应用	24
2.4 规范推荐的方法	24
2.5 设计中土体的自稳性	28
参考文献	29
第3章 侧向土压力计算	30
3.1 经典理论	30
3.1.1 朗肯土压力理论	30
3.1.2 库仑土压力理论	33
3.2 土钉支护中土压力的产生	34
3.3 土压力的研究	36
3.4 规范推荐的方法	37
3.5 土压力计算方法	37
3.5.1 公式推导	37
3.5.2 工程应用	39
3.6 须进一步探讨的问题	42
参考文献	44
第4章 钉—土相互作用	46
4.1 土钉受力分析	46
4.2 规范推荐的方法	47
4.3 土钉极限粘结强度	50
4.4 土钉支护中的构件单元	52
参考文献	53

第5章 土钉支护稳定性计算 55

5.1 概述 55

5.2 由边坡稳定分析衍生的方法 55

5.2.1 经典条分理论 55

5.2.2 土钉支护整体稳定分析 58

5.3 土钉墙内部稳定性 62

5.3.1 Davis 法 63

5.3.2 折线滑动面法 66

5.3.3 楔体滑动破坏法 67

5.3.4 王步云方法 68

5.3.5 抛物线滑动法 69

5.3.6 三维稳定分析 71

5.3.7 渗流作用下土钉支护基坑的稳定性 73

5.4 规范推荐的方法 77

5.5 关于失稳模式的讨论 79

参考文献 81

第6章 变形分析方法 83

6.1 概述 83

6.2 土钉墙 84

6.2.1 实例库 84

6.2.2 变形分析 88

6.3 复合土钉墙 92

6.3.1 实例库 92

6.3.2 变形分析 94

6.4 关于变形和预警值的讨论 98

参考文献 99

第7章 土钉支护机理研究 101

7.1 概述 101

7.2 数值模拟方法 101

7.2.1 土钉墙边界元法 102

7.2.2 土钉墙桩排组合支护 106

7.3 工作性状测试 115

7.3.1 土钉墙 115

7.3.2 复合土钉墙和组合土钉墙 122

7.3.3 测试结果分析 130

7.4 滑塌分析 132

7.4.1 土钉墙 132

7.4.2 复合土钉墙 138

7.4.3 滑塌现象分析 143

参考文献 144

第8章 实例与设计 147

8.1 概述 147

8.2 失事实例统计分析 147

8.2.1 实例库 147

8.2.2 实例概况 156

8.2.3 地质条件的影响 157

8.2.4 设计方案的影响 158

8.2.5 失事原因统计分析 161

8.2.6 补救措施 163

8.2.7 教训与反思 164

8.3 设计思路与设计方案 168

8.3.1 基本设计方法 168

8.3.2 地质条件的影响 170

8.3.3 典型设计方案 174

8.3.4 设计案例 189

参考文献 216

第9章 地下水控制方法 219

9.1 概述 219

9.2 经典理论 220

9.2.1 渗流分析 220

9.2.2 渗透力 227

9.3 计算方法 229

9.3.1 集水明排 230

9.3.2 降水 230

9.3.3 截水 235

9.4 规范推荐的方法 236

9.4.1 降水井 236

9.4.2 土体渗透稳定性 238

9.4.3 降水引起的沉降 239

参考文献 240

第1章 概论

1.1 土钉技术及特点

土钉 (soil nail) 是指插入土体中作为传力构件的细长加筋体 (如螺纹钢筋、花管等), 土钉技术 (soil nailing) 特指一门岩土加固技术, 土钉墙 (soil nail wall) 则是采用这门技术构建的挡土结构。这三个概念相互关联, 但有本质的区别。

维基百科 (http://en.wikipedia.org/wiki/Soil_nailing) 中对土钉技术作如下定义: 土钉技术是用于加固不稳定的自然边坡或维持过于陡峭土坡安全的构建技术, 它涉及将相对细长的加筋体土钉插入土体中的一门施工工艺。通常先将土钉放入预设钻孔中, 然后单个孔逐一进行压力注浆。若采用空心花管土钉, 则可以钻孔与压力注浆同时进行。为了全程注浆方便, 土钉要略微向下倾斜插入土体。土钉头在坡面均匀布置, 与喷射混凝土面层或单个土钉头面板相连接。面板下也可在设置柔性的钢筋网保护坡面土体。对有环境要求的永久性土钉墙, 防免铁丝网 (rabbit proof wire mesh) 和环境腐蚀控制织物 (environmental erosion control fabrics) 宜于与柔性面层联合使用。土钉技术也可以作为工程补救措施, 用来提高挡土墙或边坡的稳定性。

Soil nailing 是英国土木工程师协会使用的关键词之一, 指土钉技术。美国称用这一技术形成的结构为 soil nail wall^[1], 即土钉墙。英文文献中, 也有将它称为 soil nailing wall 或 soil-nailed wall 等。以这一技术为基础, 随后发展成了复合土钉墙、组合土钉墙等。由于这门技术与新奥法有关, 在该技术引进之初, 国内有的将它称为喷锚网支护法^[2], 后来改为土钉支护技术^[3-6]。

与重力式、嵌固式挡土墙相比, 土钉墙主要依靠土体的自稳能力维持稳定, 是一种新的挡土墙形式, 工程造价低是它最突出的优点。从挡土机理、施工、工作性能等方面来看, 土钉墙的主要优点包括:

(1) 土钉墙刚度小, 允许被支护土体发生一定的侧向变形, 土体自稳能力可以得到较充分的发挥。侧向土压力小, 较薄的面层就可以保持土体的稳定, 这是土钉墙较经济的主要原因。土钉墙造价一般要比可比的桩锚支护低 20%^[1]。

(2) 施工中不需要大型机械, 小型施工设备就可以满足要求, 施工噪声小、震动小, 施工中几乎没有废水、废渣污染物排出, 对周边环境影响小。施工机械可在狭小空间作业, 移动方便, 能灵活地适应不同施工场地。

(3) 土钉墙中土钉比桩锚支护中的锚杆要短很多, 钻孔中受地下障碍物影响小。根据施工条件, 土钉墙容易调整设计方案。

(4) 土钉墙是柔性支护, 大多情况下滑塌前将发生较大变形或有明显的滑塌征兆, 利于及早发现, 尽快采取补救措施^[7]。

(5) 基坑工程中,采用边开挖边支护的施工方式,速度快,大多施工工序可人工完成。

与其他支护方式类似,土钉墙并非十全十美。基坑工程中,它存在如下缺点:

(1) 作为土钉的钢筋等金属材料伸入到临近地带,短时间内不会被腐蚀掉,它们将长期占用临近地带一定范围内的地下空间,影响其他工程建设。若土钉超过了建设红线,要得到其他业主的许可。

(2) 与传统的桩排支护等相比,基坑发生的变形要大一些,增加了引起相邻建(构)物、道路、地下管网、设施等损坏的风险。过大位移可能导致地下水管破损、水体渗漏,引发土体渗透破坏。有时即使土钉墙本身稳定,也可能由于土体渗透破坏而失稳。

(3) 土钉技术采用的是边开挖边支护的施工方法,要求土体在短期内能保持 1~2m 的自稳高度,软土、砂性土等将无法满足这一要求。另外,在富含地下水的土层(如细砂层、砂砾层等)中钻孔时,容易引起塌孔、土体渗透破坏,灌浆效果也差。

(4) 当土钉墙墙底附近存在软土层时,由于软土承载力不足,有可能发生较大变形或坑底发生隆起破坏。

土钉技术起源于 20 世纪 70 年代,至今有近 50 年的历史。当该技术传入我国时,正好赶上了我国大规模的土木工程建设时期,在岩土工程(特别是基坑工程领域)中广泛应用,取得了很好的经济和社会效益。该技术已经从“土钉+面层”的土钉墙结构发展成能灵活适应不同地质条件、周边环境要求的多种新型结构。例如,将土钉墙中部附近部分土钉替换成预应力锚杆,土钉和锚杆共同工作,能有效地限制过大侧向变形,形成了预应力锚杆复合土钉墙;当浅部土层强度较高,坑底附近存在软土时,基坑上部采用土钉墙挡土,而下部则采用传统的内支撑桩排支护等来维持基坑整体稳定,出现了土钉墙桩排组合支护。但是,不得不指出的是,土钉技术在我国基坑工程领域应用中,曾发生过多起大型的基坑滑塌事故,教训沉重。

1.2 起源与发展

土钉技术来源于新奥法(New Austrian Tunneling Method, NATM),是将被动筋体(passive steel reinforcement)和喷射混凝土面层(reinforced shotcrete)相结合的方法用于加固岩土边坡。这里,所谓的被动筋体,就是指土钉。这是因为土钉要依赖被加固土体的侧向位移来调动位于被动区土钉的锚固力等抗力来维持主动区潜在滑动土体的稳定。因此,土钉的抗滑作用来源于土体的位移,是“被动”产生的。与此相反的是,锚杆则是主动加筋体,因为锚杆在安装之后就施加预应力,这时被加固土体几乎还没有发生位移,锚杆就可以通过预应拉力维持潜在滑动土体的稳定。因此,锚杆是“主动”发挥抗滑作用的。但是,从另一个角度来看,土体中密布土钉形成的复合体,提高了潜在滑动土体的承载能力,抗滑作用是“主动”的。土钉技术最初只涉及土钉和面层两种构件单元,它们组成一个传力系统,发挥挡土作用。

据维基百科介绍(http://en.wikipedia.org/wiki/New_Austrian_Tunnelling_method),新奥法最初是 1957 至 1965 年间在奥地利发展起来的,是利用围岩的应力来使隧道本身稳定。奥地利学者 Rabcewicz、Müller 和 Pacher 提出用喷射混凝土面层(shot-

crete) 和岩栓 (rockbolting) 组成柔性的结构, 用来支护隧道开挖面岩土。但是, 也有人认为, 新奥法不是新方法, 因为在这之前奥地利人就已经在欧洲其他地方使用过。

在北美, Mason 根据他监管的土钉墙工程, 在 1970 年 4 月申请了土钉技术的美国专利^[1]。在欧洲, 分别在西班牙 (1972 年)、法国 (1972 至 1973 年) 和德国 (1976 年) 应用土钉技术加固铁路边坡或临时性的建筑基坑。在 1972 至 1973 年间, 法国建筑商 Bouygues 采用这一技术加固 18m 高、70°坡角的 Fontainebleau 砂质边坡, 用于加宽靠近 Versailles 的铁路。开挖边坡长 965m, 最大坡高 21.6m。现场土体内摩擦角 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$, $c = 20\text{kPa}$, 每步挖深为 1.4m。采用了喷混凝土面层并在土体中置入钢筋作为支护, 土钉的钻孔直径为 100mm, 其水平和竖向间距均为 0.7m, 土钉向下倾角为 20° , 上部土钉的长度为 4m、下部为 6m, 面层喷混凝土厚 50~80mm, 如图 1-1 所示^[8]。在钻孔前先用钢筋网挡住坡面, 在每一钻孔中放入 2 根直径为 10mm 的钢筋后注浆, 共用了 25000 多根钢筋。该工程被认为是土钉技术第一次成功的应用^[1-8]。

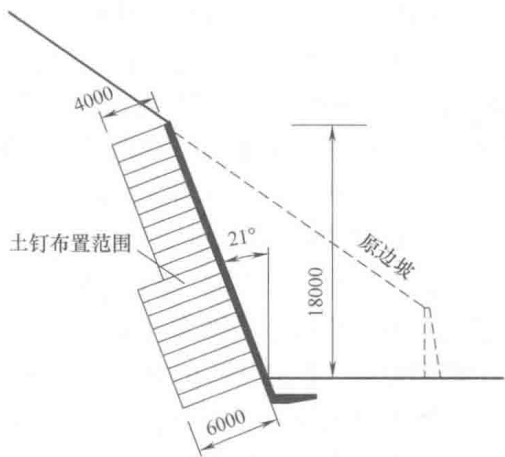


图 1-1 第一个土钉墙工程
(法国, 1972 年) (单位: mm)

这一技术具有施工速度快、造价低等优点, 引起了工程界的重视。为了交流土钉技术, 1979 年在巴黎召开了国际会议^[8]。美国在 1976 年应用这一技术加固最大深度为 13.7m 的中密到密实的粉砂土的基坑, 无地下水。这一工程中, 土钉墙施工工期是传统的支护方式的 50% 至 80%, 工程造价也减少了 30%。在 1975 至 1981 年间, 德国的 Karlsruhe 大学开展了第一个关于土钉技术的研究项目。法国在 1986 年也启动了 500 万美元的研究土钉墙的设计方法的项目。随着实际工程经验的积累和这些研究项目的开展, 土钉技术逐步作为一门独特的岩土加固技术, 在全球范围内推广和应用。1995 年以前, 土钉技术主要用于强度较高、无地下水的基坑、临时或永久的边坡加固。对自稳能力较差的无黏性土、砾土、软土、易受冻融影响的冻土和膨胀土等土层, 认为不适合采用土钉技术加固。加固这类土层边坡, 土钉墙必须与其他挡土结构联合起来, 这将增加工程费用, 土钉墙就不再具有较经济的优点。土钉技术除了可用来维护岩土边坡稳定外, 当其他挡土结构失稳时, 也可以作为一种补救加固措施。从土钉技术的出现到目前为止, 历经近 50 年, 该技术发生了根本变化。下面以十年为间隔, 将土钉技术分成五个发展阶段, 分析它们的一些特点。

第一阶段 (1975 年以前), 是土钉技术创立阶段。随着新奥法技术逐步成熟和大量工程应用, 新奥法的思想和施工工法从地下围岩加固延伸到岩土边坡, 出现了土钉技术, 在西方少数几个国家先后各自独立地采用这一技术构建了土钉墙这一新的挡土结构。法国在 1972 年成功地采用这一技术加固了高 18m 边坡^[8]。

第二阶段 (1975~1984 年), 发展了土钉墙稳定分析方法, 是土钉技术的探索阶段。这期间, 由于认识到土钉墙具有较传统的挡土结构经济、施工方便、工期短的一些优点, 多个西方发达国家和日本开始研究和应用这一技术。德国启动了第一个土钉技术研究项目。

目。土钉墙工程数量增加,积累了不少工程经验。为了交流和研究土钉技术,1979年在巴黎召开了土加固(soil reinforcement)国际会议,充分认识到土钉墙的稳定安全性问题,发展了土钉墙稳定计算方法。

第三阶段(1985~1994年),土钉技术逐步成熟,国际上以着重研究土钉墙设计、施工方法、积累工程经验为特征^[9-16]。法国启动了 Clouterre 研究项目,英国和美国也开展了大量的研究工作。世界范围内,土钉技术趋向成熟,发展了多种土钉墙稳定分析方法,很多国家和地区开始应用这一技术,已出现了水泥土挡墙复合土钉墙新的支护方式。在这期间内,土钉技术已经传入我国,在边坡、基坑工程领域有一些应用^[17-19],由于这一技术来源于新奥法,多被称为“喷锚网支护”^[2]。一方面,由土钉和面层构成的土钉墙的施工工法日趋成熟;另一方面,国内外已经发展了十几种土钉墙稳定分析方法,基本解决了土钉墙设计中的稳定安全性问题。这一阶段内,国内公开发表的文献较少。

在前三个阶段 20 多年的时间里,国外在土钉技术理论、设计、施工等多个方面进行了探索,为土钉技术的发展打下了基础。

第四阶段(1995~2004年),20 世纪 90 年代开始,我国开始了大规模的土木工程建设。由于土钉墙具有较其他传统挡土结构经济、施工速度快、不需要大型施工机械等优点,它成了最受欢迎的支挡方式之一,在基坑、道路、铁路工程中大量应用,是土钉技术发展的鼎盛时期,取得了很好的经济效益和社会效益。这期间,“喷锚网支护”作为专业术语还在继续使用^[20-21],但逐步被“土钉墙”“土钉支护”等取代了。在基坑工程领域,国家、地方纷纷出台了包含有土钉支护技术条文的规范、指南、规程等。这一阶段,国内发表了大量的文献,集中在土钉支护机理研究^[2,22-32]、设计与工程应用^[33-52]等多个方面。国际上,这一阶段集中研究土钉支护力学机理^[53-60]、设计与应用^[61-62]等。

在这一阶段内,土钉技术的研究与应用的开展已经从国外转移到国内,特别是在实际工程应用方面发展较快。它的应用从强度较高土层扩展到存在软土、地下水的地质环境条件中,土钉墙与水泥土挡墙、预应力锚杆、微型桩等多种挡土结构相结合,形成了复合土钉墙或组合土钉墙等新的支护方式,土钉支护技术得到了快速发展。

不得不看到的是,在这一阶段内实际工程应用远远超过理论研究。由于缺乏针对软土、地下水等所产生工程问题的分析方法,土钉支护的适宜性问题没有彻底解决,加之有些工程盲目追求施工速度、经济效益等原因,导致基坑工程滑塌事故频发。土钉墙与其他支护方式的结合,增加了工程总造价,有些甚至超过了传统的桩排支护,丧失了土钉支护经济性的优势。

第五阶段(2005 年及以后的十多年时间),总结经验与教训,土钉技术逐步提高。2005 年前后,土钉技术在我国基坑工程领域应用处于鼎盛时期,但出现的问题也最多^[63]。随后,多个地方建设管理部门相继出台了一些规定,例如土钉不能超越建筑红线使用,或禁止土钉墙在繁华的商业区使用,土钉技术的应用大幅减少。2005 年以后,我国工程界在认识到土钉技术优点的同时,也认识到它的缺点,单纯的“面层+土钉”这种传统土钉墙结构较少采用,复合土钉墙应用较多,逐步从盲目转向理性。在这一阶段,我国工程界发表了大量的论文、出版了多部专著、国家和地方出台了包含有土钉墙、复合土钉墙的多个技术规范、规程。这些文献主要集中在土钉支护机理研究^[64-78]、计算方法^[79-100]、设计^[101-106]等,发表了大量的工程应用方面的文献^[107-114]。从这些文献可以看出,尽管 2005

年以后土钉支护在基坑工程中的应用有所减少，但该技术的研究与发展在这一阶段却成了我国工程界的热点，反映了理论研究往往滞后于实际工程需要这一现象。

在我国不少地区，当土层强度较高、地下水位较低或允许将地下水水位降低到基坑坑底以下、基坑周边建构筑物离基坑开挖较远或允许发生一定变形的情况下，土钉支护技术一直是优先采用的挡土结构之一。

国外文献中，第五阶段集中于土钉机理研究^[115-125]、应用^[126-128]等方面，在土钉与土体之间摩阻力机理研究方面有较大进展。

从以上发展过程来看，土钉技术起源和成熟的前三个阶段以西方发达国家为主，基本解决了土钉墙稳定安全性分析的问题。从 1995 年开始的第四、五个阶段，土钉技术的改进、构建新的土钉挡土结构等，则主要是我国技术人员完成的。

土钉技术发展到了 1995 年之前的三个阶段，土钉墙的设计施工进入成熟阶段。但是，这只是一个较低层次上的成熟。1995 年以后，土钉技术在我国应用范围扩大到软土、与其他挡土结构结合后，出现了新的挡土结构和新的技术问题，如软土、地下水对复合、组合土钉墙整体稳定性的影响、变形评估等，它们直接关系到挡土结构的安全性和对周边环境的影响等，这些问题一直没有较好解决。因此，进入第五个阶段之后，面对新的问题，需总结工程经验，提高设计技术，重新经历技术探索精进，上升到高层次的成熟，这一过程需要 20 年甚至更长的时间。

基坑工程中，典型的土钉支护设计方案示意图如图 1-2、图 1-3 所示。

随基坑开挖分层设置的、纵横向密布的土钉群、喷射混凝土面层及原位土体所组成的支护结构即为土钉墙（图 1-2）。

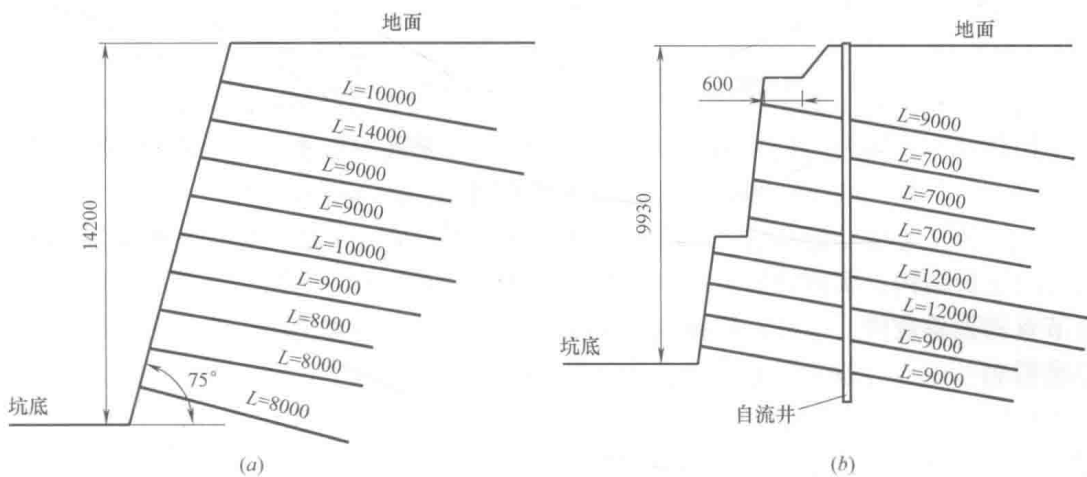


图 1-2 土钉墙设计（单位：mm）

图 1-2a 是典型的土钉墙结构，墙高 14.2m^[129]；图 1-2b 中土钉墙，土钉与水平方向倾角为 10°，为了控制地下水，增设了 16m 深的自流井^[130]。

复合土钉墙指土钉墙与预应力锚杆、微型桩、旋喷桩、搅拌桩中的一种或多种组成的复合型支护结构。图 1-3a 是粉土中止水帷幕复合土钉墙设计方案^[131]。图 1-3b、c 均为微型桩复合土钉墙方案，但微型桩材料不相同。图 1-3b 中，微型桩是 $\phi 108$ 钢管^[132]，图 1-3c 是淤泥质黏土中的双排毛竹作为微型桩的复合土钉墙设计方案，基坑开挖深度 4.8m，最

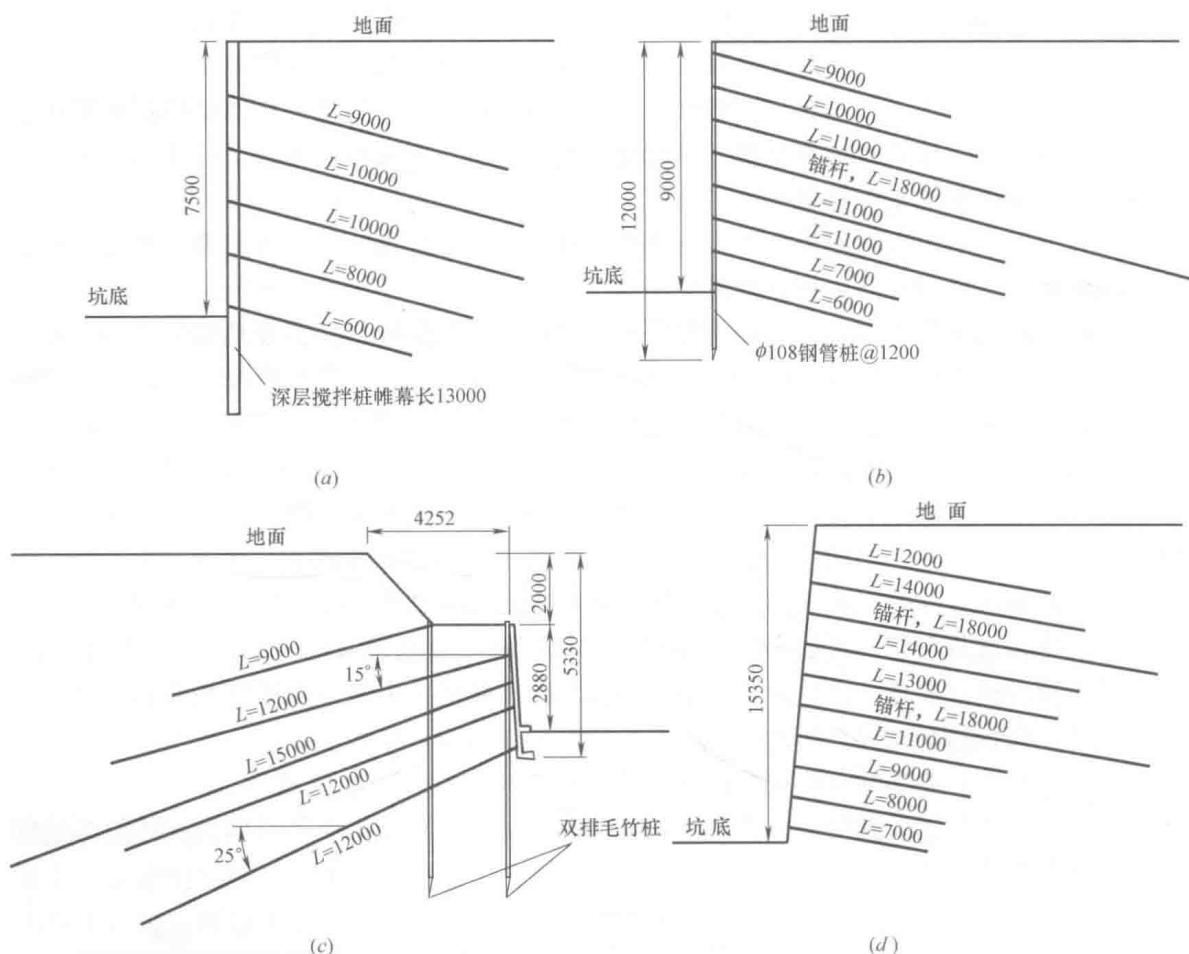


图 1-3 复合土钉墙设计 (单位: mm)

大水平位移发生在地表附近, 为 22mm^[133]。图 1-3d 是砂质粉土中的预应力锚杆复合土钉墙, 土钉空间布置 1500×1500mm², 最大水平位移为 14mm^[134]。

组合桩排土钉墙, 指基坑上部由土钉墙或复合土钉墙, 下部由桩排这两种支护方式组合而成的支护结构, 实例分析见第 8.3 节。这种组合结构最大的优点是能减少桩排嵌固深度, 节省工程总造价。另外, 桩排支护能较好地控制基坑侧向位移。当下部桩排发生位移时, 将影响上部土钉墙的稳定, 两者是一个承载整体。

1.3 土钉支护技术面临的挑战

据报道, 2009 年 3 月 19 日 13 时 35 分, 西宁市商业巷南市场的佳豪广场 4 号楼施工现场发生坍塌事故, 基坑东侧边坡坍塌, 8 人遇难。类似的事在这之前发生过多起。因此, 有人认为土钉墙面层就是一块遮羞布, 土钉墙根本就不能发挥多少挡土作用, 基坑之所以安全, 得益于土体本身的自稳性以及设计中土层参数取值过小而带来的工程本身的安全储备。显然, 这一看法过于悲观, 对土钉支护抗滑机理缺乏了解。

传统的桩排支护刚度大, 桩排能调动坑底下被动区土体的抗力, 支护结构既能承受较大土压力, 又可限制基坑侧向位移, 安全可靠, 是应用较广泛的支护方式之一。桩排支护

也可利用主动区土体的抗滑自稳能力来维持基坑的稳定,但基坑将发生较大的变形,失去了桩排支护刚度大的优势,设计中一般不采用。因此,桩排、地下连续墙等支护方式设计的基本原则为“保稳定,控变形”,“保稳定”,就是确保基坑渗流稳定的条件下,支护结构须储备足够的抗滑力,稳定性好,其本身有足够的强度刚度,不发生破坏;“控变形”,即通过优化支护设计方案控制基坑过大变形,避免开挖对基坑相邻环境和坑内主体工程的不利影响(尽管目前还无法完全实现,但无疑是一个努力的方向)。土钉墙则为柔性支护,面层薄,无法承受较大土压力,只能依靠主动区土体自身抗滑能力来维持基坑稳定,土钉支护结构只发挥了“辅助”的作用。这就是土钉支护与传统桩排等支护方式的主要区别。

土钉技术构建的承载挡土结构允许被支护土体发生一定的变形,能充分地调动(mobilizing)土体本身的抗滑能力,具有经济性的特点。但是,这也是土钉技术固有的缺点,因为过大变形将影响基坑相邻环境,也不利于基坑本身的稳定。

基坑工程领域,土钉技术应用范围不断扩大,地质条件越来越复杂,周边环境对基坑变形要求越来越严格,为了适应这些变化出现了新的挡土结构,由此产生了一系列新的工程问题。在今后的发展中,土钉技术如何既能发挥它的经济性特点,又能安全可靠、技术先进、施工方便和环境安全、工程绿色环保,它将面临如下多个方面的挑战。

1. 适宜性

基坑工程设计中支护选型无疑是重要工作之一,是首要问题。一个基坑工程,有多种支护方式可适用。适宜性,是指选择既能确保基坑安全,又具有经济性、技术性、施工质量可靠和对周边环境影响小的支护方式,是一个支护选型优化问题。土钉支护的适宜性问题从土钉技术的出现就存在,一直延续到现在。随着复合土钉墙、组合土钉墙结构方式的出现,这一问题变得越来越复杂了。

土钉支护中,不少基坑发生过大变形或滑塌事故是由地下水引起的。从场址土层类别、地下水赋存条件、开挖深度、周边环境要求等方面,多个规范对土钉技术的适用性进行了规定。一般情况下,土钉技术适用于二、三级基坑的支护。

土钉墙、复合土钉墙等有不同的适用条件。例如,对水泥土复合土钉墙,由于水泥土墙既有一定的隔渗作用,也可发挥超前支护、挡土作用,因此它适用于存在地下水,甚至软土等地质条件,而这些地段则不建议采用土钉墙。

支护选型时,宜比较基坑开挖深度和土体临界自稳高度。土钉支护面层较薄,不能承受较大土压力,这不同于传统的支护(例如桩排支护)。砂性土黏聚力小,土体自稳临界高度小,当基坑开挖深度超过土体临界自稳高度过大时,若设计不采用缓坡,则过大土压力有可能撕裂面层而导致土钉支护失稳。

对地质条件较差的基坑,可用瑞典圆弧法计算基坑整体稳定安全系数 F_s 。若 $F_s < 0.5$,则不宜单独采用土钉墙。

若土钉布置空间内存在大块石、管道等障碍物,不具备设置土钉的条件,则不宜采用土钉支护。当土钉超出建筑红线时,多地规定禁止采用土钉技术。

20 世纪 50 年代国家经济困难、钢材紧缺、急需住房,武汉青山区建设二路以“竹筋”代替钢筋建起了一批三层砖混结构的房屋。“竹筋”主要用在跨度小于 3m 的房梁和接触水分较少的房间楼层水泥预制板中,而厕所、厨房的楼板还是用钢筋浇筑的。建造时预计使用寿命为 30 年,而这批房屋实际使用已有 55 年。基坑工程为临时性工程,设计使用期

限短。在一年或两年的时间内，木材、竹材等力学性质能保持稳定，木桩、竹材土钉等可以用于基坑支护。对于二、三级基坑，在进行严格科学的论证后，可以减少钢材、水泥等人工建材的用量，用竹材、木材等天然材料替代。在倡导绿色环保、低碳节能的今天，年轻的技术人员应多借鉴前辈工程经验，大胆创新。

2. 对基坑相邻环境的影响

基坑开挖、降水将不可避免地引起相邻土体的变形，而过大变形将影响基坑周边建筑物和坑内主体建筑基础的安全。基坑支护首先应具有防止基坑的开挖危害周边环境的功能，其次应保证工程自身主体结构安全和施工条件，能为主体地下结构施工提供正常施工的作业空间及环境，提供施工材料、设备堆放和运输的场地、道路条件，隔断基坑内外地下水、地表水以保证主体工程地下结构和防水工程的正常施工。

基坑过大变形损坏基坑周边环境时有发生，挤歪基坑内工程桩的事件也不鲜见，其根本原因是基坑变形可预测性差。在确保基坑稳定安全的前提条件下，这一问题将成为基坑领域中最重要的问题。

3. 设计方案的优化

土钉支护结构布置的总体原则为“稳坡脚，控中间”。也就是说，支护结构须首先确保坡脚的稳定，其次才是控制基坑中部附近土体的过大位移，两者缺一不可。

从目前的一些设计方案来看，大多能确保基坑的稳定安全，但设计方案是否优化、基坑开挖对周边环境的影响程度如何这类问题考虑不多。例如，土钉长度和布置五花八门。有的长度相等，有的上长下短，有的下长上短等。显然，这些设计方案都有一定的合理性，但也可能存在不足。在既能满足基坑稳定要求，又能使支护工程较经济、对周边环境的影响小的前提条件下，如何优化土钉、超前支护构件等的布置，需要进一步研究。

4. 理论分析

基坑工程一般涉及岩土、水、支护结构三方面的作用。针对具体的工程问题，如基坑稳定性，研究岩土、水、支护结构性质和相互作用，建立力学模型，这就是理论分析方法。目前土钉支护设计中，以承载力极限状态分析为主，其中土钉墙圆弧滑动稳定分析最为成熟。下面从土钉支护的稳定、变形、渗流等几个角度，提出一些理论问题。

(1) 稳定分析

1) 基坑有可能发生圆弧滑动、直线滑动、折线滑动、平滑滑动等，如何判定？

2) 如何考虑地下水对基坑稳定的影响（特别是土体发生了渗透破坏情况下）？降水雨水入渗对基坑稳定的影响如何？

3) 当土层黏聚力小、坡度较陡时，面层上有可能承受较大的土压力。面层承载力如何验算？

4) 土钉是边开挖边支护。上层土钉受力对下层有影响，土钉的受力实际上是一个动态变化过程。稳定分析如何考虑土钉的这种受力的动态变化？

5) 基坑边界凹、凸几何形状对基坑稳定的影响程度如何？

6) 土钉、面层、超前支护构件等构件单元组成复合土钉支挡系统中，构件单元与土、水相互作用机理如何？构件单元如何布置才能有效地发挥它的挡土作用？

7) 组合土钉墙中，下部支挡结构的变形将影响上部土钉墙的稳定，它们是一个整体的受力体系。如何考虑下部结构变形对土钉墙稳定的影响？

8) 如何确定软土、膨胀土、冻土等特殊土对土钉支护稳定的影响?

9) 由于土体的开挖, 基坑临空面附近地面分布着大小不一的裂纹。常出现这种情况: 基坑变形大, 接近预警值, 地面产生大量裂纹, 一定量的地下水从坑底渗出, 但基坑并没有发生滑动破坏。这种情况下抗剪强度指标如何选取? 如何验算基坑的稳定性?

土钉墙整体稳定性采用圆弧滑动条分法进行验算, 由安全系数 K_s 大小确定。对安全等级为二级、三级的基坑, 规范要求 K_s 分别不应小于 1.3、1.25。这一方法固有的缺点是计算中无法考虑计算参数等的不确定性, 计算结果不是失效概率, 而是安全系数, 这与工程实际不符。例如, 土层剪切参数 c 、 φ 是符合一定分布的随机变量。用可靠度理论替代传统的安全系数设计方法, 是土钉支护设计发展的一个方向。

(2) 变形分析

基坑稳定性与支护结构变形大小是相关的, 这方面的问题有很大的探讨空间。目前土钉支护设计中, 正常使用极限状态考虑较少。过大变形会破坏周边环境, 也可引起地下水管渗漏, 使土体发生渗透破坏等。目前我国基坑工程设计的基础是经典力学理论 (如土力学等)。经典理论计算变形 (特别是水平位移) 误差较大, 很难满足设计要求, 数值模拟方法则是一个较好的途径。目前有限元法、差分法等多种商用软件可应用于岩土工程, 具备用数值模拟方法评估基坑变形的条件, 必须积累经验, 逐步引入土钉支护设计中。分析基坑竣工资料, 确定变形影响因素和变形趋势, 是另外一条途径。

土力学这类固体力学中, 由于 19 世纪末建立的摩尔—库仑准则 (Mohr-Coulomb failure criterion) (也有人称为库仑准则。据维基百科介绍, 这一准则最初是由库仑在 1773 年提出的), 使得承载力极限分析方法迅速发展, 并在岩土体稳定、承载力、土压力等多个领域中广泛应用。1856 年, 达西发现了达西定律 (Darcy's law), 推动了渗流理论、固结沉降理论的发展。遗憾的是, 对于非线性岩土体, 经典理论中还没有类似摩尔—库仑准则、达西定律这种简单但实用的伟大发现用于分析变形。与其他挡土结构相比, 土钉支护变形计算则更为重要, 是今后一个主要研究方向。

(3) 其他

土钉墙面层上作用的侧向土压力不符合经典土压力理论适用条件。一般情况下, 土压力较小。对主要土层黏聚力 c 小 (例如, $c \leq 5 \text{ kPa}$)、坡度较陡 (例如, 坡角大于或等于 80°) 的基坑, 面层上作用的土压力有可能超过经典土压力值, 须引起重视。

土钉支护结构构件单元包括土钉、面层、锚杆 (索)、水泥土桩 (墙)、微型桩等。土—结构单元相互作用 (soil-structure interaction) 中, 钉—土相互作用研究得较为成熟。

岩土工程计算中, 存在着岩土参数值不易获得或设计中采用的参数值与实际工程条件不相符、计算方法中假设条件过多等问题, 导致有些分析结果不能反映基坑的实际状况。

土钉技术中遗留的理论问题很多。以上列举的只是冰山一角, 有兴趣的读者可以继续探讨。目前岩土工程规范起草和修订的基础是经典理论、科研成果和工程实践, 以工程经验为主。须指出的是, 年轻的岩土工程从业者应在注重积累工程经验的同时, 多对工程经验进行归纳总结, 将其中的技术要点提升到理论高度, 注重多用理论解决实际工程问题, 特别要探索用新理论解决工程问题的方法。

科学可以解释世界, 也可用于改造世界, 两者不可偏废。土钉技术的生命在于创新。必须根据基坑具体工作条件, 不断地提出新的支护结构形式, 优化布置, 研究抗滑、变形

机理等，发展新的理论和设计方法。

5. 动态设计方法

土钉支护是柔性支护，从稳定发展到滑塌要经历一个过程。基坑滑塌之前，一般伴随主动区土体发生较大的变形，基坑周边地表土体会出现大小不一的裂缝。基坑监测可提供实时监测数据来指导施工，通过监测数据可了解基坑的安全性，及时修改设计方案。但是，若出现了滑塌征兆，如基坑变形速率突然增加、地面裂缝突然加宽、增多等，则滑塌将很快发生，有可能没有时间采取工程补救措施。目前理论上一些问题尚不能解决的情况下，依据施工监测数据进行动态设计则是确保基坑工程安全的最后一道屏障。

1.4 本书主要内容

- 土钉支护设计必须遵循“安全性、经济性、科学性”这一总体原则。具体要求如下：
- (1) 安全性。设计方案必须首先确保施工过程中和使用期限内基坑抗滑、抗渗的稳定性和支护结构本身的可靠性，基坑工程诱发的变形没有影响到基坑周围相邻建构筑物、地下设施、坑内主体工程的正常使用，对它们不构成威胁。另外，设计方案必须利于基坑施工安全。
 - (2) 经济性。在确保基坑安全的前提条件下，工程造价低。
 - (3) 科学性。将先进的科学技术应用到场地环境评估、勘察、设计、施工、监测、检测、监理各个技术环节以及基坑工程项目管理全过程，做到技术可行，施工方便，施工质量和工期有保障，工程绿色环保。

除放坡开挖外，以上也是基坑工程设计的总体原则。对放坡开挖，基坑稳定依靠岩土体的自稳能力，多不布置支护结构。即使设置少量的抗滑桩等，也只是作为安全储备，不考虑它们的作用。

岩土工程及相近专业本科生和研究生，虽然已经掌握了从事岩土工程设计的绝大部分理论知识，但不一定就能成为优秀的设计工程师，因为教科书上的基本理论往往要经过“变形”后才能在实际工程中应用。例如，三轴试验或直剪试验确定的土层参数 c 、 φ 值，须由统计学区间估计理论确定一定置信概率（如 $\alpha=95\%$ ）的标准值，然后除以分项系数得到设计值，由“试验值”转化为“设计值”之后才可以用于设计计算。土钉支护设计涉及岩土工程多个方面的知识，其结构如图 1-4 所示。若考虑完整性，设计报告中还需要包括基坑应急抢险措施、工期和工程预算等方面的内容。

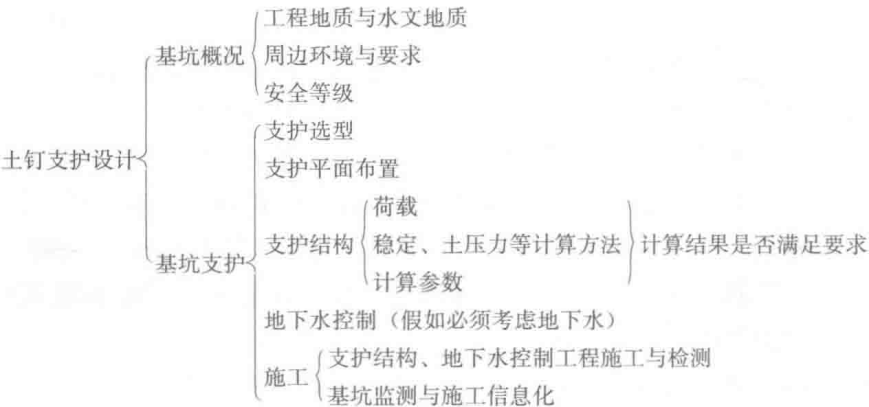


图 1-4 土钉支护设计中概化知识结构