

疏排桩—土钉墙组合支护技术 研究与应用

吴忠诚 著

中国建筑工业出版社

疏排桩-土钉墙组合支护技术 研究与应用

吴忠诚 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

疏排桩-土钉墙组合支护技术研究与应用/吴忠诚

著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 4

ISBN 978-7-112-19101-7

I. ①疏… II. ①吴… III. ①支护桩-研究

IV. ①TU473

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 033925 号

本书分析了疏排桩-土钉墙组合支护技术的作用机理, 推导出了相应的计算方法, 通过工程实践、数值模拟和理论计算的分析对比, 形成了一套从设计、施工到检测监测的完整支护新工法。全书共分为 7 章, 内容包括: 绪论, 疏排桩-土钉墙组合支护技术机理及影响因素、理论分析与计算、原位测试、数值计算、支护工法, 结论等。

本书适合从事岩土工程设计、施工技术人员以及高校师生学习参考。

责任编辑: 王 梅 杨 允

责任设计: 董建平

责任校对: 陈晶晶 张 颖

疏排桩-土钉墙组合支护技术研究与应用

吴忠诚 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

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

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 7½ 字数: 181 千字

2016 年 7 月第一版 2016 年 7 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-19101-7

(28414)

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

疏排桩-土钉墙组合支护技术是在综合了复合土钉墙支护技术及桩锚（撑）支护技术各自优缺点的基础上，充分调动了在位移可控的前提下土的内力对支护体系的贡献，大大的节约了成本并缩短了工期。

本书从拱理论、土压力、稳定性及变形等理论进行研究，在参考国内外文献的基础上，提出了一种新的疏排桩-土钉墙支护技术。本书通过几个深基坑的大型现场测试、三维有限元分析方法等手段，系统地研究了该支护技术的整体稳定性、内部稳定性、局部强度校核及土压力、塑性发展进程、破裂面及可能的破裂面形式等方面的问题；还探讨了该支护技术中各实体参数如疏排桩、土钉、锚索、止水桩等所起的主要作用、分布规律及相互关系；并在此基础上形成了一套从设计、施工到监测检测的完整且具有较高理论、实用价值的新工法体系（专利号：ZL 201220234163.2）。

深圳市鼎邦工程公司作为该专利技术的持有者，近几年来已在深圳市天利二期基坑、防城港基坑、深圳市假日广场基坑、泉州市万达广场基坑等项目中应用了该技术，总产值达 6000 万元，较桩锚支护法节省投资近 2000 万元，获得了很高的经济和社会价值。本技术荣获中冶集团科学技术奖二等奖，被评价为部分国际领先、整体国际先进，取得了行业内较高的认可。

本书在编写过程中获得很多老师、领导、师弟、同事及朋友们的关心与帮助。首先要感谢尊敬的博士生导师汤连生教授，本书从选题、写作到最后的分析修改都得到了汤教授的悉心指导；还要感谢以前单位的领导杨志银教授，杨院长从资金、试验方案、理论基础等方面都给予无私的支持与指导，对此我将铭记于心；还有李春光博士在有限元计算方面给予了指点；师弟廖化荣、张庆华、廖志强、凌造，吴少勇，同事汪新平、李良祥、衣惠辉、袁卫春等在编辑、现场试验等过程中提供了无私帮助。感谢天利集团的陈永刚总经理、益田房地产集团初总工、防城港胡健总等在现场提供的大量方便协助，保证了试验的顺利进行。最后，要特别感谢我的父母与亲人，正是你们无私的奉献、亲切的关怀和谆谆教导使我能够在二十余载的寒窗苦读中孜孜不倦，不断进取。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 土钉墙支护技术	1
1.2 疏排桩支护技术	4
1.3 土拱效应	5
1.4 疏排桩-土钉墙组合支护	7
第 2 章 疏排桩-土钉墙组合支护技术机理及影响因素	8
2.1 疏排桩-土钉墙组合支护的构成	8
2.2 疏排桩-土钉墙组合支护的作用机理	11
2.3 疏排桩-土钉墙组合支护的影响因素	13
2.4 小结	16
第 3 章 疏排桩-土钉墙组合支护的理论分析与计算	17
3.1 土压力特性研究与计算	17
3.2 稳定性分析及计算	28
3.3 变形特性分析及计算	34
3.4 小结	38
第 4 章 疏排桩-土钉墙组合支护的原位测试	39
4.1 测试项目及目的	39
4.2 测试依据及标准	39
4.3 假日广场基坑工程原位测试	40
4.4 天利中央商务广场（二期）基坑工程原位测试	48
4.5 卓越皇岗世纪中心基坑工程原位测试	62
4.6 疏排桩-土钉墙组合支护性能分析	72
4.7 小结	73
第 5 章 疏排桩-土钉墙组合支护的数值计算	74
5.1 数值计算目的	74
5.2 FLAC-3D 的适用性	74
5.3 模型的建立	75
5.4 FLAC-3D 模拟结果及对比分析	79

5.5 桩后土压力、桩身位移、桩身弯矩及土钉拉力随开挖深度变化特性分析·····	86
5.6 桩间距、桩嵌固深度、土钉拉力、土层性质与土压力及变形的敏感性分析·····	87
5.7 小结·····	89
第6章 疏排桩-土钉墙组合支护工法 ·····	91
6.1 疏排桩-土钉墙组合支护技术·····	91
6.2 疏排桩-土钉墙组合支护技术的设计计算与实用程序·····	94
6.3 疏排桩-土钉墙组合支护技术的实施·····	100
6.4 疏排桩-土钉墙组合支护监测及检验·····	101
6.5 小结·····	101
第7章 结论 ·····	102
参考文献 ·····	106

第 1 章 绪 论

1.1 土钉墙支护技术

1.1.1 土钉支护的发展与应用

土钉 (Soil Nailing) 支护技术是 20 世纪 70 年代才发展起来的一种支护技术, 虽然其应用时间并不长, 但近几十年来已在国内外得到迅速发展, 其广泛的应用大大推动了对该技术的研究。目前国内外已在土钉支护技术方面取得了大量的研究成果^[1-4]。

最早对土钉支护技术进行系统研究的是德国, 法、美、英等国也先后开展了这方面的研究。在工程中应用土钉支护技术始于 1972 年, 法国著名的承包商 Bouygues 将新奥法隧道施工的经验推广用于边坡开挖以保持边坡稳定, 在法国凡尔赛附近为拓宽一处铁路路基的边坡开挖工程中, 采用了喷射混凝土面层并在土体中置入钢筋形成临时支护取得了成功。整个开挖和支护工作是分步进行的。开挖的边坡坡度为 70° , 长 965m, 最大坡高 21.6m。土钉的长度为上部 4m、下部 6m, 共用了 25000 多根钻孔注浆锚索, 面层的喷射混凝土厚 50~80mm。这是有详细记载的第一个土钉支护工程。德国和美国在 20 世纪 70 年代中期也开展了土钉技术的应用。美国最早应用土钉支护在 1974 年, 一项有名的土钉支护工程是匹兹堡市的 PPG 工业总部的深基坑开挖。1979 年, 德国在 Stuttgart 建造了第一个永久性土钉工程 (高 14m)。并进行了长达 10 年的工程监测, 获得了许多有价值的数据。稍后采用土钉支护技术的国家还有英国、西班牙、巴西、匈牙利、印度、新加坡、南非和日本等。

1986 年法国发表的报告表明, 该国每年约有 50 个工程采用土钉墙技术, 其中, 约有 10% 用作永久支护设施。据法国 1992 年的调查, 土钉支护在该国每年仅用在公共工程中就有约 $1 \times 10^5 \text{ m}^2$ (按支护面层的面积计算), 此外尚有数以百计的私人小型建筑等在施工时用了土钉。据 1992 年调查, 德国已成功地采用土钉支护技术建成 500 个工程。土钉支护技术在法国、德国应用非常广泛, 已成为一种常规技术, 应用范围已推广到铁路和公路边坡的永久性挡墙。

我国在土钉支护技术方面的研究和应用起步较晚。最早研究土钉支护的是煤炭部太原设计研究院王步云教授, 此后, 冶金部建筑研究总院、北京工业大学、清华大学、广州军区建筑工程设计院和总参工程兵三所等单位陆续开展了对土钉支护技术的研究和应用工作^[1]。1980 年的山西柳湾煤矿的边坡工程是应用土钉支护工程的首例。20 世纪 90 年代, 随着城市建设的加快, 大量的边坡、路堤和基坑围护都需要支护加固, 使土钉支护技术在我国开始得以迅速推广, 北京、深圳、广州和武汉等许多城市都有许多成功的事例见诸报道。1992 年在深圳文锦广场基坑支护中采用了土钉支护, 是国内首次将土钉支护技术应

用于城区的深基坑支护中。尽管土钉的应用在我国开始稍晚,但由于国内的建设规模巨大,土钉支护的应用数量估计现已超过其他国家^[1]。

1.1.2 土钉支护的优点与不足

作为一种原位加筋体,土钉支护技术不同于挡墙复合体和挡土结构,也不同于一般土质边坡。同传统的支护技术相比,土钉支护技术具有自身的特点。

1. 土钉支护与其他的挡土技术或支护技术相比,有许多优点:

(1) 材料用量小,施工速度快。不仅可节省钢筋和混凝土的用量,而且能改善施工条件和缩短工期。

(2) 施工设备轻便,操作方法简单、作业空间不大,各种施工场地都可选用。

(3) 结构轻巧,柔性大,有很好的延性,且即使破坏,一般不会彻底倒塌。

(4) 成孔、土钉制作和安置均不需要复杂技术和大型机械,施工时噪声和振动均很小,可以减少对环境的干扰,适合于城市地区施工。

(5) 可以发挥土体的自承能力。传统支护技术,多是把被支护或围挡的土体完全视为纯粹的荷载,属于被动支护方法。而土钉将被支护土体看成具有承载能力的结构体,通过插入土钉起骨架约束、摩阻、锚固、连接等作用,充分发挥土体本身的自承自稳及挡土能力。土钉与土体共同作用形成一个具有支护作用的柔性结构体,共同承担基坑外围土体的侧压力并维护本身的稳定性,变被动支护为主动支护。

(6) 安全可靠性较好。土钉支护施工采用边开挖边支护工艺,安全性易于保证,当个别土钉出现质量问题时对整个稳定影响较小。此外土钉墙技术的另一重要优点是可以根据需要随时修改土钉间距和长度,以免出现事故。

(7) 工程造价低、经济效益好。国内统计资料表明,土钉支护可比排桩法、钢板桩节省造价约 25%~40%,可比灌注桩节省造价 1/3~1/2。国外资料表明对开挖深度在 10m 以内的基坑,土钉比锚索支护可节省造价 10%~30%,经济效益良好。

2. 土钉支护与其他的挡土技术相比,有着许多独特的优点。但是,土钉支护也有它的局限性,使得土钉支护的应用受到一定的限制:

(1) 现场需有允许设置土钉的地下空间。虽然在边坡稳定中不存在这个问题,但是在采用土钉支护进行基坑支护时,由于高层建筑一般都是建造在建筑物密度较高的市区,当基坑附近有地下管线或建筑物基础,施工时就会相互影响,甚至不能采用土钉支护。

(2) 土钉支护是边开挖边支护,在加固施工前需要土体有一定的自稳能力。土钉支护通常仅适用于地下水位较低的、自立性较好的地层,不宜用于含水量丰富的粉细砂层、砂卵石层和淤泥质土层中,一般也不能应用于没有临时自稳能力的饱和黏土,在这类土层中必须与其他的土体加固支护方法相结合,而且土钉在这类土层中的抗拔力低,故在饱和黏性土及软土中设置土钉支护须特别谨慎。

(3) 土钉支护的施工是先开挖后支护,未支护的开挖边坡由于卸荷作用所引起的应力释放,会在土钉和面层施工期间产生一定位移,而且土钉施工完后需要土坡产生微小的变形使其发生作用。这样多个开挖支护层位移累积的结果,会使边坡的整体位移较大。

(4) 土钉墙支护边坡位移较大且没有成熟的理论可以估算。土钉支护前的土体会释放应力,土钉的作用发挥、边坡土体的失水固结及土体本身蠕变都会引起边坡位移的增大。

因此土钉墙支护形式较其他支护形式位移偏大,且现在还处于无法合理估算的状态。

1.1.3 复合土钉支护的发展与应用

单一的土钉支护,其适用范围有限,行业性的国家或地方规范,均对土钉支护的适用范围做了说明。《深圳地区建筑深基坑支护技术规范》中明确规定^[6]:“当支护变形须严格限制且在不良土中施工时,应联合其他支护形式形成复合支护结构”、“深圳地区土钉墙支护基坑开挖深度限制在5~12m范围内”。

土钉支护技术的一些不足,促进了复合土钉墙支护技术的出现和发展。

复合土钉支护技术是以土钉支护为主,辅以其他补强措施以保持和提高土坡稳定性的复合支护形式,是近年来我国在软土地区深基坑支护实践中,于土钉支护技术基础上改进和发展起来的一种体现地方特色的土钉支护技术。

到目前为止,国外对复合土钉支护的研究开展得较少,国内也只有一些学者在进行该方面的研究,造成理论研究大大落后于工程实践。

复合土钉支护变形性能尚未有成熟的分析方法。杨志明^[7]等采用杆系有限单元法,结合支护土钉滞后的施工动态分析来求解。张明聚^[8]等考虑土的非线性应力-应变关系、土钉和土体的相互作用以及每步施工过程通过建立三维有限元模型来分析。杜飞^[9]等基于非线性平面应变有限元模拟方法,对复合土钉支护在分步开挖、分步支护过程中的变形性能进行研究。李本强^[10]应用人工神经网络方法,利用土钉支护变形观测数据,建立用于对支护系统未来变形进行预测的网络模型。曾庆响^[11]等应用灰色系统理论方法建立了土钉支护变形的GM(1,1)预测模型。李海坤^[12]等对土钉支护的变形影响因素进行分析和简化,通过与土钉支护稳定性分析影响因素比较,得出两者在参数上的近似一致性,利用土钉支护工程的位移监测资料及其稳定性分析结果,总结出工程意义上的土钉支护稳定性安全系数和变形之间的关系曲线。

林希强、蒋国盛^[13]等通过对广州地区的钢管桩加土钉和预应力锚索的复合土钉支护工程的受力和变形全过程监测,分析和讨论了该复合支护形式的受力和变形性状,并用有限元方法进行了研究。李象范、徐水根等^[14]根据对复合土钉支护机理的研究,提出采用单排或双排水泥土桩形成帷幕后再施作土钉支护,以解决边坡挡墙的隔水、防渗及临时自稳能力,总结了与软土地层相适应的施工工艺,并对该组合类型的复合土钉支护结构的适用条件及形式、变形性状进行了研究,同时提出了相应的设计计算模式。杨林德等^[14]建立并采用了带转动自由度的Goodman单元,对搅拌桩加土钉的复合土钉支护技术进行了非线性有限元研究,并通过与工程实例的对比验证这一方法的合理性。宋二祥等^[15]采用有限元方法,分析了预应力锚杆-土钉、超前微桩-土钉两种复合土钉支护的变形特性,并就其设计计算方法提出了建议。武汉水利水电大学的肖毅等通过钉锚结合支护的模型试验,对边坡土体的位移、应变场和应力场及土钉土锚轴力分布规律进行了研究,并对钉锚结合的机理进行了一定的阐述。

1.1.4 复合土钉支护的优点与不足

1. 目前复合土钉支护技术的加固部分主要有土体超前加固法和结构加固法。它针对不同的场地条件和地质条件,采取因地制宜、灵活多变的组合支护结构,保持了传统土钉

支护的优点,克服了传统土钉支护技术的固有缺陷,给土钉支护在软土地区深基坑支护中的应用以新的生命力,具有广阔的应用前景。

(1) 适用范围更宽

复合土钉支护突破了现有有关规定的禁区,开始在软土、流砂、厚杂填土、厚砾石层中大量应用,所取得的经济技术效果也更加显著。随着对复合土钉支护设计方法的不断深入,复合土钉支护会应用到更多的不良地质中。

(2) 应用地区更广

目前,复合土钉支护应用最多的是在沿海地区软弱土层中,但在内陆地区也出现了许多成功的应用实例。比如有效控制相邻建筑物的沉降裂缝、减小基坑侧壁水平位移、增加基坑开挖深度等。复合土钉支护作为一种成熟的技术应用到更多的地区。

(3) 应用领域更大

复合土钉支护从主要应用在建筑工程扩展到交通、水电、人防等部门。随着这项技术的不断完善,它将在防护工程、防洪、冶金、煤炭等领域得到推广应用。

2. 但是,复合土钉支护技术主要存在以下几方面的不足:

(1) 理论滞后于实践。复合土钉支护与一般的土钉支护有着不同的作用机理,不同方法的复合土钉支护的工作机理也不相同。目前,对于复合土钉支护的作用机理的认识还不是很清楚,缺乏必要的设计分析方法。复合土钉支护是一个三维问题,而现有理论和方法大都是将复合土钉简化为平面问题来研究。对于复合土钉支护结构中复合加固部分的作用机理的研究,只有深层搅拌桩有人涉及,对于超前微型桩、预应力锚索、冠梁、腰梁和面层的作用机理目前研究甚少。

(2) 采用有限元方法分析复合土钉支护的受力和变形,结果不是很理想。由于复合土钉支护结构的破坏形式和破坏判据研究不成熟,土的本构模型、钉土粘结受力模型以及计算参数取值难以定得合适,这方面的研究仍然有许多工作需要开展。

(3) 复合土钉支护试验或现场测试研究工作开展较少。理论分析的正确性必须要依靠全面准确的试验或现场测试数据来验证,而目前这方面的数据资料极为有限。

另外土钉墙对变形有效的控制手段较少,虽然可以通过锚杆较好地限制变形的发展,但对于较复杂地层来说,坡面的抗弯及抗剪强度较弱,通常会沿软弱的地层发生剪切滑动破坏,变形还是较难控制。

1.2 疏排桩支护技术

1.2.1 疏排桩的发展与应用

排桩支护是指深入土体,按一定间隔布置钢筋混凝土挖孔、钻(冲)孔灌注桩等形式的桩作为主要挡土结构的一种支护技术。

最早使用的桩为木桩,在新石器时代、古罗马时代即有应用^[16]。19世纪20年代,开始使用铸铁板桩修筑围堰和码头,到20世纪初,美国开始使用各种形式的型钢等桩基用于基础、围堰和码头等工程。同时,20世纪初钢筋混凝土预制构件的问世,开始出现了各种厂制和现场预制的钢筋混凝土桩^[16],使得桩基和桩支护技术获得极大的飞跃。其

中,很有代表性的是 SMW 工法,也称劲性水泥土搅拌桩法。该工法于 1976 年在日本问世,并得到很大推广,广泛应用于海底隧道工程、地铁等重大项目以及各类高层建筑的深基坑开挖支护工程等^[17]。

我国上海 20 世纪 30 年代修建的一些高层建筑,开始采用沉管灌注混凝土桩,20 世纪 50 年代开始生产预制混凝土桩和预应力钢筋混凝土桩。随着大型钻孔机械的发展,出现了钻孔灌注混凝土或钢筋混凝土桩。从 20 世纪 50 年代到 60 年代,我国的铁路和公路,都开始采用钻孔灌注混凝土桩和挖孔灌注桩。钻孔灌注桩柱列式挡土墙最早在北京、广州、武汉等地开始使用,以后逐渐推广到沿海软土地区。1994 年,同济大学会同上海基础工程公司把 SMW 工法首次应用于上海软土基坑,取得了成功的经验^[17]。

柱列式间隔布置包括桩与桩之间有一定净距的疏排布置形式和桩与桩相切甚至相搭接的密排布置形式。桩与桩之间有一定净距的疏排布置形式,即为疏排桩支护。

1.2.2 疏排桩的优点与不足

1. 疏排桩是对常规密排桩支护技术的一个重大改进,其具有以下一些优点:

(1) 施工简单。桩支护一般是通过压入、振入或锤击等,将预制桩结构置入土体。对于现场制作的桩体,一般是通过挖孔、钻孔后进行浇灌或喷注,施工流程及其思路较为简单。疏排桩一般按间隔 2~3 倍桩径间距进行布置,减少了排桩桩数,使得工程量相应地减小。

(2) 刚度较大。用于挡土结构的桩,多为钢、混凝土或钢筋混凝土结构,其刚度和强度均要大得多。

(3) 造价比较低。除纯钢支护桩外,桩体的材质一般为素混凝土或钢筋混凝土,成本较低。加之按一定间距布设的疏排桩,大大减少了支护桩的数量,相应地减少了支护的成本。

(4) 可利用土拱效应。疏排桩按一定的间距排列,桩后土体和桩间土体的不均匀变形,形成土拱效应,能充分调动土体的自稳自承能力,从而在减少工程量的情况下,同样达到较好的变形控制效果。

2. 疏排桩支护技术也存在以下一些不足:

(1) 防水抗渗漏能力较差。疏排桩支护,由于桩间有一定的间距,地下水可以通过桩间空隙渗漏出来,防水效果较差,需要设止水措施。

(2) 可能有噪声、振动和挤土效应。桩在施工过程中,可能产生噪声、振动挤土效应,对周围环境带来负面影响。

(3) 在开挖扰动程度较大时,支护能力有一定的限度。在开挖扰动程度较大、需要挡土支护能力较高时,单一的疏排桩支护就显得不足。桩间土体会由于土拱的支撑能力不足而滑落出来,疏排桩也会发生踢脚或转动甚至断裂,对被支护体系构成较大的安全隐患。此时,就需要采用各种辅助措施或者组合支护形式,取长补短,共同作用,以最大限度地确保被支护体系的安全和可靠。

1.3 土拱效应

在土力学领域,土拱是用来描述应力转移的一种现象,这种应力转移是通过土体抗剪

强度的发挥而实现的。

早在 1884 年,英国科学家 Roberts 首次发现了“粮仓效应”:粮仓底面所承受的力在粮食堆积高到一定程度后达到最大值并保持不变,这就是通常所说的土拱效应^[18]。德国工程师 Janssen 用连续介质模型对其进行了定量解释。Terzaghi^[19-21]通过活动门试验证实了土拱效应的存在,并在对土拱的应力分布进行描述的基础上,得出土拱效应存在的条件。

到 20 世纪末、21 世纪初,在岩土工程领域,与土拱效应有关的实测数据、试验模型及理论研究越来越多,对以前无人问津的拱体几何参数与力学参数的研究也层出不穷。

其中影响最大的是普罗托奇扬科诺夫提出的普氏卸荷拱^[35,36]。普氏以结构拱代替坑道顶部稳定的介质,考虑到结构拱的力学平衡和支座面介质的屈服条件且留有适当的安全储备,可以确定卸荷拱的几何和力学参数。普氏卸荷拱的拱跨和矢高只与坑道尺寸和坑道周围土的松散体综合摩擦角 φ' 有关,而与坑道的埋深无关。作用在坑道上的土压力仅为稳定介质以下破裂带所产生的压力。这能解释一个普遍的力学现象,当坑道埋深大于一定的限值后,坑道支撑上的压力与埋深无关,但是这种卸荷拱是一种假想的拱,它不能真实地反映卸荷拱应力传递作用。

国内外其他学者也开展了大量的研究,张建华等^[34]利用有限差分方法讨论了土拱效应产生的条件。吴子树等^[25]结合土工离心模型试验、理论分析和实地调查,综合研究了土拱效应的形成机理及存在条件。贾海莉等^[26]根据土拱的不同形成机制,指出拱脚的存在形式有直接拱脚、摩擦拱脚、土体拱脚及二异拱脚四种。Finn^[38]利用弹性理论对土拱效应进行了研究。但弹性理论仅适用于位移和应变很小的情况,而土拱效应往往伴随很大的变形。Ono 等^[39]假定土为刚塑性,且满足 Mohr-Coulomb 屈服条件,将问题简化为平面问题状态,对挡土墙后土体及隧道周围土体进行了土拱效应分析,并将所得结果与试验结果进行了对比分析。Handy^[40]在前人研究的基础上,分析了沟槽中介质由于土拱效应而引起的应力重分布,认为土拱效应可以用近似悬链线的小主应力轨迹来描述,并提出了土拱效应的发展分两步:第一步是主应力方向的偏转;第二步是墙底附近水平和竖直应力的减小。Park^[41]假定小主应力拱形状为圆弧,对挡土墙后土拱效应进行了分析。Adachi 等^[42]将拱区定义为等边三角形。Kellogg^[44]认为在不同的工程实践中,拱区还可以是其他形状,例如抛物线形、半球形、圆顶形等。Osscher 等^[42]通过室内模型试验研究发现,桩间距是影响桩间土拱效应最重要的因素,桩间距越小,土拱效应就越明显。试验数据显示,当桩间距为 3 倍桩径时,荷载转移的比例约为 30%。

由于桩的支承作用,桩支护结构后面的土体亦易形成以桩体为拱脚的土拱。对桩后土拱效应的认识,目前也有不少的研究。

张建勋等^[34]利用有限元研究了被动桩中土拱效应形成机理,并分析了桩间距、土层性质、桩与土间摩阻力等对土拱的影响,结果证明桩间距是关键因素。韩爱民等^[44]借助平面有限元数值方法,对黏性土及无黏性土中被动桩中土拱效应形成机理作了研究和分析,认为剪胀角、泊松比、桩土接触特征对土拱效应影响最明显。Wang 等^[38]考虑土拱效应来设计抗滑桩,得到了如下结论:(1)最大平均拱压力等于静止状态的土压力;(2)其他条件不变, c' 、 φ' 值越大,土拱效应越明显;(3)提出了极限桩间距的存在,一旦超过极限桩间距,就不存在土拱效应;(4)砂土和黏性土边坡中均存在土拱效应。Chen 等^[45]

通过模型试验研究表明：当桩间距大于或等于 8 倍桩径时，将不存在群桩效应。Adachi 等^[42]关于土拱效应的模型试验也得到了相近的结论：桩间土拱效应的极限桩间距为 8 倍桩径。胡敏云^[46-48]应用土拱原理对桩侧的土压力进行计算分析，通过控制桩间土体允许剥落范围，提出了间隔布桩时护壁桩间距确定方法。叶晓明^[28]根据卸载拱原理推导出了柱板结构挡土墙墙板上的土压力计算公式，计算结果表明，作用在板上的侧压力并不随埋深线性增长。王成华等^[49]从方形桩桩间土拱形成的原理、力学特性论证入手，较全面地分析了桩间土拱的受力、变形、力的传递和土拱破坏瞬间的最大桩间距，并建立了最大桩间距的平面计算模型。Chen 等^[45]用有限差分法程序 FLAC 对桩周土拱效应进行了研究，结果发现土拱的形成和拱区的形状是桩的排列方式、桩土相对位移、桩形状、桩土接触面摩擦特性以及土的剪胀角的函数。朱碧堂等^[50,51]采用拱形梁法对基坑开挖和支护中土层拱效应作了初步的理论分析，推导出了支护排桩的最大间距的理论公式，并从理论上证明了在支护桩间采用板墙等柔性支护的情况下，土拱能有效地减小板墙上的土压力，将相应的土压力转移到支护桩上。安关峰等^[52]从方形桩间土拱形成的机理、力学特性入手，将广泛应用于隧道工程的普氏系数引入抗滑桩最大桩间距的计算分析中，并根据桩间土拱的静力平衡，建立了相应的计算模型。周德培等^[53]提出应以桩间静力平衡条件、跨中截面强度条件以及拱脚处截面强度条件共同控制来确定桩间距，得到了较为合理的桩间距的计算公式；定量地说明了在其他因素不变的情况下，桩间距随桩后土体黏聚力或内摩擦角的增大而增大，却随着桩后坡体推力的增大而减小。张建华等^[37]通过计算表明，当桩间距适当时，桩后土体将产生土拱效应。同时分析了土拱产生的机理和产生的条件，对抗滑桩间距的设计有一定的参考价值。

1.4 疏排桩-土钉墙组合支护

疏排桩-土钉墙组合支护技术是一种将被动受力支护结构和主动受力支护结构组合在一起应用于边坡（基坑）支护工程中的组合支护技术。被动受力结构——疏排桩（拱脚桩）锚（撑）承受桩后土水压力及桩间由土拱作用传递过来的土水压力的合力，主动受力结构-土钉墙（复合土钉墙）承受桩间土部分土压力，将土拱前自由脱落的土压力传递到土拱及土拱后稳定土体上，同时对土拱及拱后土体进行加固。

疏排桩-土钉墙组合支护技术早于 2000 年已有应用。王家道等在海口汇隆大厦中有所应用，他对于其作用机理、主要构件组成、主要优点及经济效益等方面都作了一定的探讨，认为其是一种比较经济、安全、解决挡土止水的一项有效技术措施。

周群建在总结杭州十余项深基坑工程成功应用的基础上，介绍了该支护方式的结构形式、设计思路及计算方法。但他只是对于桩与土钉墙分别采用朗肯土压力计算，并没有提及土拱作用等该支护方式的核心技术特点。

第2章 疏排桩-土钉墙组合支护技术机理及影响因素

疏排桩-土钉墙支护可以有效地控制基坑变形，提高基坑边坡的稳定性。对疏排桩-土钉墙支护结构的组成、机理及其影响因素的清醒认识，对于发挥该支护方法的支护效果、有效控制变形具有重要意义。

2.1 疏排桩-土钉墙组合支护的构成

疏排桩-土钉墙组合支护结构，主要由土钉、锚索、疏排桩、面层以及环梁支撑等部分组成，如图 2-1 所示。

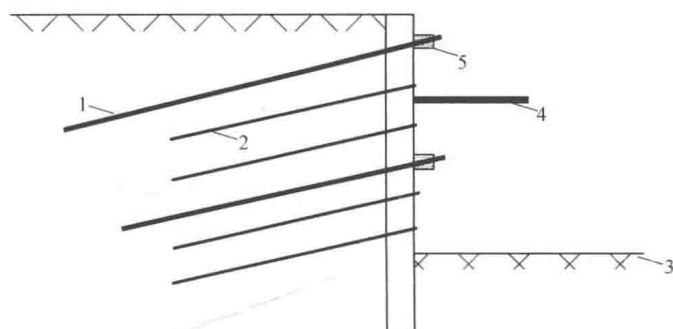


图 2-1 疏排桩-土钉墙组合支护典型结构

1—锚索；2—土钉；3—疏排桩（面层）；4—支撑；5—环梁

2.1.1 疏排桩

疏排桩是疏排桩-土钉墙组合支护的主要受力构件之一，可以是人工挖孔桩、机械钻孔桩、预制桩、钢板桩、钢管桩等形式的桩或多种形式桩的组合物。

桩体材料可以是纯钢、钢筋混凝土、碎（砂）石混凝土、素混凝土等，具体适合于何种材料，根据工况条件和强度要求决定。在强度要求高、变形控制严格、施工作业空间限制较大的区域，宜采用强度较高的材料，如纯钢、钢筋混凝土等，反之，宜用单位体积强度较低的素混凝土等。

排桩的连接形式，可以是桩与桩之间按一定间距直接进行连接，也可以在钻孔灌注桩间加素混凝土树根桩、素混凝土桩、水泥土桩等刚度相对钢筋混凝土桩较小的结构体把钻孔灌注桩连接起来，或用挡土板置于钢板桩及钢筋混凝土板桩之间形成围护结构。为保证结构的稳定和具有一定的刚度，可设置内支撑或土钉锚杆。

按基坑开挖深度及支挡结构支撑情况,疏排桩支护结构可分为悬臂(无支撑)支护结构、单支撑支护结构、多支撑支护结构等。根据上海地区的经验:对于开挖深度 $<6\text{m}$ 的基坑可选用 $\phi 600\text{mm}$ 密排悬臂钻孔桩,桩与桩之间可用树根桩密封,也可在灌注桩后注浆或用水泥搅拌桩作防水帷幕;对于开挖深度在 $4\sim 6\text{m}$ 的基坑,根据场地条件和周围环境可选用预制钢筋混凝土板桩或钢板桩,其后注浆或加搅拌桩防渗,设一道围檩和支撑,也可采用 $\phi 600\text{mm}$ 钻孔桩,后面用搅拌桩防渗,顶部设一道圈梁和支撑;对于开挖深度 $6\sim 10\text{m}$ 的基坑,常采用 $\phi 800\sim 1000\text{mm}$ 的钻孔桩,后面加深层搅拌桩或注浆防水,并设 $2\sim 3$ 道支撑,支撑道数视土质情况,周围环境及对围护结构变形要求而定;对于开挖深度大于 10m 的基坑,上海地区采用 $\phi 800\sim 1000\text{mm}$ 钻孔桩,采用深层搅拌桩防水,多道支撑或中心岛施工方法。

其他还有更多的分类角度,如排桩布置形式、桩体材质、桩体直径或埋藏深度等。

以柱列式钻孔灌注桩对疏排桩结构的构造进行说明。钻孔灌注桩一般直径不宜小于 $400\sim 500\text{mm}$,悬臂式桩直径不宜小于 600mm ,人工挖孔桩的直径不应小于 800mm 。桩间距应根据排桩受力及桩间土稳定条件确定,一般不大于桩径的 1.5 倍。在地下水位较低的地区,当墙体没有隔水要求时,中心距还可大些,但不宜超过桩径 2 倍。为防止桩间土塌落,可采用在桩间土表面抹水泥砂浆钢丝网混凝土护面,或对桩间土注浆加固等措施予以保护。在地下水位较高地区采用钻孔灌注桩围护墙时,必须在墙后设置隔水帷幕。墙体顶部必设圈梁(冠梁)与桩相连,冠梁为钢筋混凝土矩形梁,宽度(水平方向)不宜小于桩径,梁高(竖直方向)不宜小于 400mm 。桩与冠梁的混凝土等级宜大于 $\text{C}20$;当冠梁作为连系梁时可按构造配筋。

2.1.2 土钉

土钉也是疏排桩-土钉墙的主要受力构件之一,其类型主要有注浆式土钉、击入式土钉和气动射入式土钉三种。

钻孔注浆土钉是最常用的土钉,整个土钉由钉体和外裹的注浆体组成。钉体材料一般采用 $\phi 16\sim 32\text{mm}$ 的Ⅲ级或Ⅱ级热轧变形钢筋和 $\phi 48\delta 3.5\text{mm}$ 钢管以及自钻式锚杆组成。注浆体材料为水泥砂浆或纯水泥浆;钻孔孔径为 $\phi 75\sim 150\text{mm}$ 。与其他类型的土钉相比,在砾石土、硬胶结土和松散砂土施工时具有独特的优越性。

在软土、地下水丰富的地层中,一般采用由 $\phi 48\delta 3.5\text{mm}$ 钢管制作的注浆击入式土钉钉体。其中出浆孔眼间距 $1000\sim 2000\text{mm}$,直径 $5\sim 10\text{mm}$ 。在出浆孔眼处有倒刺,既可以保护出浆孔眼又可以加强钉体与注浆体的结合。

击入式土钉,最传统的是用角钢、圆钢或钢管作土钉。设置这类土钉一般不用预先钻孔,施工极为快速,在密实的砂土中的效果要优于黏性土,但不适用于砾石土、硬胶结土和松散砂土。

气动射入式土钉,用高压气体作为动力,发射时气体压力作用于土钉的扩大端。该类土钉为英国开发,钉径有 25mm 和 38mm 两种,目前国内较少应用此类土钉。

2.1.3 锚索

和土钉类似,锚索也是复合土钉墙的主要受力构件之一,通过锚索及土钉对疏排桩及

周围土体的锚固张拉作用,被支护体的变形趋势可以得到良好的控制。

锚索结构一般由内锚头、锚索体和外锚头三部分共同组成。内锚头又称锚固段或锚根,是锚索锚固在岩体内提供预应力的根基,按其结构形式分为机械式和胶结式两大类,胶结式又分为砂浆胶结和树脂胶结两类,砂浆式又分二次灌浆和一次灌浆式;外锚头又称外锚固段,是锚索借以提供张拉吨位和锁定的部位,其种类有锚塞式、螺纹式、钢筋混凝土圆柱体锚墩式、墩头锚式和钢构架式等;锚索体,是连结内外锚头的构件,也是张拉力的承受者,通过对锚索体的张拉来提供预应力,锚索体由高强度钢筋、钢绞线或螺纹钢筋构成。

目前在加固工程中使用的锚索类型种类繁多,按不同的分类方法可将锚索划分为不同的类型。按内锚固段受力状态科学地分为:拉力型、压力型、荷载分散型;荷载分散型又分为拉力分散、压力分散、拉压分散型。按外锚头的结构形式分为 VSL 锚、QM 锚、XM 锚、JM 锚、OVN 锚等;按锚索体种类分为钢绞线束锚索、高强钢丝束锚索、精轧螺纹钢筋束锚索等。

2.1.4 面层

面层包括支护面层和防水面层。

支护面层是复合土钉支护系统中的重要组成部分,它的主要作用为承受水土压力、土钉端部拉力、地面超载引起的荷载以及限制土体坍塌等。支护面层的类型主要有钢筋网、钢筋混凝土、碎(砂/卵)石混凝土、素混凝土等。

防水面层的主要作用是防止雨水冲刷和流蚀。在防水面层上一般布设有排水孔,在防水面层的约束和排水孔的疏导下,又可以使得被支护体内部的水流得到较为有序的渗透。防水面层的类型主要有素混凝土、碎(砂/卵)石混凝土等。

2.1.5 辅助结构

疏排桩-土钉墙组合支护常见的辅助支护结构为环梁、支撑等。

环梁的主要作用是,将疏排桩部分或全部连接成一个统一的整体,增大支护系统的刚度和协调变形控制能力,此外,也可以为土钉锚索以及支撑提供更为可靠的支点。环梁按布设位置可分为冠梁、腰梁等。环梁一般采用钢筋混凝土和素混凝土等材质。

支撑的主要作用是,支挡住围护结构,使得支撑范围内的围护结构及周围土体的变形得到减缓或抑制。支撑系统按材料性质可以分为钢支撑(钢管支撑和型钢支撑等)、钢筋混凝土支撑、素混凝土支撑及以上支撑的组合形式等,按受力形式可以分为压杆式支撑(单跨压杆式支撑、多跨压杆式支撑、双向多跨压杆式支撑)、水平桁架式支撑、水平框架式支撑、大直径环梁及边桁架相结合的支撑、斜撑等。支撑的材料多为钢材、钢筋混凝土或素混凝土。

在疏排桩-土钉墙组合支护中,支撑结构,尤其是复杂的支撑系统并不常用,环梁结构也多采用冠梁。

辅助支护结构是相对更为临时的结构,既要求能方便施工,又要安全可靠。另外,相对于支护系统其他部分而言,辅助支护结构的投资一般较大,制作和安设也较为麻烦,设计时有较大优化的空间可以考虑。

2.2 疏排桩-土钉墙组合支护的作用机理

2.2.1 土拱效应的机理

土拱效应是由于介质的不均匀变形所引起的。在疏排桩-土钉墙组合支护作用下,在不平衡土压力作用下,坑壁土体有向侧向移出的趋势,但疏排桩桩体附近的土体,由于受刚度较大桩体的阻挡,侧向移出变形的发展受到抑制,而疏排桩之间的土体,近似为临空自由面或受到的抑制作用较小,侧向移出变形的趋势较大。随着桩间土体侧向变形的增大,靠近临空侧的桩间土体便逐渐脱离其后面的土体,桩间远离临空侧的、被脱离的土体,丧失了前面土体的支挡作用,在剪应力的作用下,其内部应力便向变形较小的两侧发生偏移以获取平衡,这样一来,在被支护体中便形成了土拱。随着开挖扰动的增加,不平衡土压力逐渐增大,由于土体不均匀变形引起的应力偏转逐渐增加,最后,应力被传递至刚度较大的疏排桩桩体上,在疏排桩后面,形成了一系列以疏排桩为支撑拱脚的土拱。

土拱的形成改变了介质中的应力状态,引起应力重新分布,把作用于拱后或拱上的压力传递到拱脚疏排桩及周围稳定介质中去,对控制临空侧的变形具有很好的效果。

2.2.2 疏排桩的作用机理

疏排桩是疏排桩-土钉墙组合支护的主要受力构件之一,其作用机理主要在于3个方面:挡土作用、支点作用、承力作用。

挡土作用,主要体现在疏排桩自身对开挖扰动后临空或松懈土体的支挡作用。根据岩土条件,按一定间距排列布置的疏排桩,多属刚度强度较大的材质和结构,在嵌入岩土一定深度时,无论有否撑锚,自身也可阻挡住桩后一定范围内土体的变形和移动。

支点作用,主要体现在,土钉锚索可以利用疏排桩的强度和刚度,一侧拉紧固定在疏排桩上,进而增大对被支护体的锚固效果;支撑也可以以疏排桩为支点,更好地发挥支撑效果。即深入土体的土钉锚索和刚度强度也很大的支撑,可以以疏排桩为支点,更大程度地发挥其支护效果。

承力作用,是指疏排桩可以作为拱脚,使得坑周土体内部容易出现土拱。在疏排桩作用下,桩身后面土体的变形受到桩体的抑制,变形较小,桩间土体由于尚无支护或支护结构的刚度强度较桩体的刚度强度小,变形很大。土体不均匀变形,使得土体内的应力发生偏移进而形成土拱,最后偏移后的土体应力被传递至疏排桩,使得疏排桩起到拱脚的作用,承担土拱背侧更多的土压力。

2.2.3 土钉的作用原理

土钉的作用是基于一种主动加固的机制,土钉与土体的相互作用能改变基坑的变形和破坏形态,其作用机理大致可概括为土钉分担作用、骨架箍束作用、应力扩散和传递作用以及坡面变形约束作用等4个方面。

1. 分担作用

土钉的分担作用可以减小土体上的应力,改善土中应力分布,阻止滑裂面的形成。众