

复合土钉技术在深基坑支护工程中的应用

杨世雄

(安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要 为解决城市化进程中深基坑工程传统支护技术施工周期长、造价高、环境影响大等问题,对复合土钉技术在深基坑支护工程中的应用进行研究尤为重要。本文分析了复合土钉技术的理论体系,包括其组成、作用机理、适用范围;探讨了设计方法,涵盖土钉参数设计、面层结构设计及整体、抗倾覆、抗隆起稳定性分析;阐述了施工工艺及质量控制要点,包括工艺流程、关键技术、质量控制要点及常见问题处理措施。结合工程实例,验证了复合土钉技术在控制基坑变形、保障周边环境安全方面的有效性,以期同类工程提供参考。

关键词 复合土钉技术;深基坑支护工程;土钉成孔技术;注浆技术;喷射混凝土技术

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.016

0 引言

随着城市化进程不断加快和地下空间开发向纵深发展,深基坑工程规模也不断扩大、深度加深,对支护技术要求更高。传统的排桩支护、地下连续墙等技术虽成熟,但施工周期长、造价高、环境影响大。复合土钉技术作为新型支护技术,通过土钉、喷射混凝土面层与预应力锚杆的三维协同作用,形成“浅层加固—中层锚定—深层控制”的支护体系,具有地质适应广、施工效率高、成本低等优势^[1]。基于此,本文阐述复合土钉技术理论、应用,并结合实例分析,为同类工程提供参考。

1 复合土钉技术理论及应用

1.1 复合土钉技术概述

复合土钉技术是一种新型的深基坑支护技术,它将土钉、喷射混凝土面层、预应力锚杆等结构有机结合,形成协同作用的高效支护体系。根据支护形式的不同,可分为土钉—喷射混凝土面层复合支护、土钉—预应力锚杆复合支护以及土钉—格构梁复合支护等类型。其核心结构包括土钉、面层、锚杆及连接构件。该技术的作用机理主要体现在三个方面:土钉通过注浆加固土体,提高土体的抗剪强度和整体稳定性;喷射混凝土面层限制土体变形,防止局部坍塌;预应力锚杆提供主动支护力,进一步控制基坑变形。复合土钉技术具有施工便捷、经济高效、适应性强等特点,适用于软土、砂土、黏性土等多种地质条件,尤其在深基坑工程中表现出显著优势。其适用范围广泛,包括建筑基坑、地铁车站、地下停车场等地下空间开发工程,能够有效解决传统支护技术在高难度基坑工程中的局限性^[2]。

1.2 复合土钉支护设计方法

1.2.1 设计原则及流程

复合土钉支护设计应遵循安全可靠、经济合理、技术可行、施工方便的原则。安全系数需满足相关规范要求,《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012)规定,基坑整体稳定性安全系数一般不小于1.3。同时,要考虑周边环境对基坑变形的限制,确保邻近建筑物、地下管线等不受影响。

首先进行工程地质勘察,获取土体物理力学参数,如土的重度、黏聚力、内摩擦角等。根据勘察结果及基坑周边环境、开挖深度等条件,初步拟定复合土钉支护方案,包括土钉长度、间距、直径,面层厚度、混凝土强度等级,锚杆长度、间距、预应力等参数。然后进行稳定性分析和变形计算,若不满足要求,则调整设计参数重新计算,直至满足各项设计指标^[3]。

1.2.2 土钉参数设计

1. 土钉长度: 根据经验公式计算^[4], 如下所示:

$$L=KH \quad (1)$$

式(1)中, L 为土钉长度, K 为基坑开挖深度, H 为经验系数, 一般取 0.5 ~ 1.2。

2. 土钉间距: 一般在 1.0 ~ 1.5 m 之间, 可根据土体性质和基坑深度适当调整。土钉间距过大, 支护效果减弱; 间距过小, 施工难度增加且经济性降低。通过有限元分析可知, 在一定范围内, 减小土钉间距可有效降低基坑边坡位移。

3. 土钉直径: 常用的土钉直径为 100 ~ 150 mm, 采用钻孔注浆工艺时, 可根据土钉拉力和注浆压力确定。例如: 对于拉力较大的土钉, 可适当增大直径以满足承载要求。

1.2.3 面层结构设计

1. 面层厚度：一般为 80 ~ 150 mm，采用 C20 ~ C30 喷射混凝土。面层厚度需满足抗裂和抗冲切要求，通过计算混凝土面层在土压力作用下的内力，确定合理的厚度。例如：在土压力较大的部位，可适当增加面层厚度^[5]。

2. 钢筋网布置：钢筋网一般采用 HPB300 或 HRB400 钢筋，直径 6 ~ 10 mm，间距 150 ~ 300 mm。钢筋网的作用是增强面层的抗拉强度和整体性，通过计算钢筋网在混凝土面层中的应力，确定钢筋的直径和间距。

3. 加强筋设置：在土钉头部和面层交接处设置加强筋，一般采用直径 14 ~ 20 mm 的钢筋，与土钉和钢筋网焊接牢固，以增强节点处的承载能力。

1.2.4 稳定性分析

1. 整体稳定性分析：采用圆弧滑动法，如瑞典条分法、毕肖普法等。通过计算滑动面上的抗滑力矩和滑动力矩，得到整体稳定性安全系数。例如：采用瑞典条分法计算时，安全系数计算过程如下所示：

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i l_i + N_i \tan \varphi_i)}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (2)$$

式(2)中， c_i 、 φ_i 为第 i 条土条的黏聚力和内摩擦角， l_i 为第 i 条土条滑动面长度， N_i 、 T_i 分别为第 i 条土条滑动面上的法向力和切向力。

2. 抗倾覆稳定性分析：计算基坑支护结构绕某点的抗倾覆力矩和倾覆力矩，得到抗倾覆稳定性安全系数，一般要求不小于 1.5。抗倾覆稳定性与土钉长度、间距、面层厚度等因素有关，通过调整这些参数可提高抗倾覆稳定性。

3. 抗隆起稳定性分析：对于软土地基，需进行抗隆起稳定性分析。采用太沙基公式或其他经验公式计算基坑底部土体的抗隆起安全系数，确保基坑底部土体不发生隆起破坏。

1.3 复合土钉施工工艺及质量控制

1.3.1 施工工艺流程

1. 土方开挖：遵循“分层分段、严禁超挖”原则，每层开挖深度与土钉竖向间距相匹配，一般控制在 1.0 ~ 1.5 m，每段开挖长度根据现场实际情况确定，通常不宜超过 20 m。在开挖过程中，使用挖掘机进行作业，并配备人工进行修坡，保证边坡平整度和坡度符合设计要求。

2. 土钉成孔：根据设计要求，可采用人工洛阳铲成孔或机械钻孔方式。人工成孔适用于土质较好、深度较浅的情况；机械钻孔则适用于各类土质，效率较高。

成孔直径应满足设计要求，一般为 100 ~ 150 mm，成孔垂直度偏差不超过 1%。

3. 土钉安装：将加工好的土钉钢筋（常用 HRB400，直径 22 ~ 28 mm）插入孔中，土钉钢筋应顺直，表面无锈蚀、油污等。在土钉钢筋上每隔 2 ~ 3 m 设置一个对中支架，确保土钉位于钻孔中心。

4. 注浆：采用水泥浆或水泥砂浆进行注浆，水泥一般选用 P.042.5 普通硅酸盐水泥。注浆压力控制在 0.3 ~ 0.5 MPa，确保浆液充满钻孔。在注浆过程中，应注意观察浆液的返浆情况，若发现漏浆，应及时采取封堵措施。

5. 钢筋网铺设：在坡面上铺设钢筋网，钢筋网采用 HPB300 或 HRB400 钢筋，直径 6 ~ 10 mm，间距 150 ~ 300 mm。钢筋网与土钉钢筋应连接牢固，可采用绑扎或焊接方式，相邻钢筋网片之间的搭接长度不小于 300 mm。

6. 喷射混凝土面层：喷射混凝土强度等级为 C20 ~ C30，厚度 80 ~ 150 mm。喷射前，应先对坡面进行洒水湿润，喷射时，喷头应与坡面保持垂直，距离控制在 0.8 ~ 1.2 m，喷射顺序自下而上，分层喷射，每层厚度不超过 80 mm。

1.3.2 关键施工技术

1. 土钉成孔技术：在复杂地质条件下，如遇到砂层、卵石层等，可采用跟管钻进成孔技术，防止塌孔。对于含水量较大的土层，可先进行降水处理，再进行成孔作业。

2. 注浆技术：为提高注浆效果，可采用二次注浆工艺。第一次注浆完成后，待浆液初凝前，进行第二次高压注浆，压力控制在 1.0 ~ 1.5 MPa，以增强土钉与土体的粘结力。

3. 喷射混凝土技术：喷射混凝土时，可添加适量的速凝剂，以缩短混凝土的凝结时间，提高施工效率。同时，应控制好喷射混凝土的配合比，确保混凝土的强度和耐久性。

1.3.3 质量控制要点

在深基坑支护工程复合土钉技术应用中，质量控制极为关键。对于原材料，要对水泥、钢筋、砂、石等严格检验，每批进场都需提供证明文件并抽样检查。土钉施工时，需检查长度、间距、直径、倾角等参数，成孔深度比设计长 0.5 m 以上。注浆要控制压力、配合比和注浆量，完成后抽样检测。钢筋网和喷射混凝土也要检查铺设、搭接及强度、厚度等情况。

1.3.4 常见问题及处理措施

1. 塌孔：原因可能是土质松散、地下水丰富或成孔速度过快。处理措施为采用泥浆护壁、降低成孔速度、

增加护壁套管等方法,若塌孔严重,应回填后重新成孔。

2. 土钉抗拔力不足:可能是土钉长度不够、注浆不饱满或土体强度低。处理方法为增加土钉长度、进行二次注浆或对土体进行加固处理。

3. 喷射混凝土开裂:原因包括混凝土配合比不当、养护不及时或坡面不平整。处理措施是调整混凝土配合比,加强养护工作,在喷射前对坡面进行修整。

4. 漏浆:多因钻孔密封不严或注浆管破裂引起。可通过封堵钻孔、更换注浆管等方式解决,确保注浆过程顺利进行。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

某城市地下停车场深基坑工程,基坑深度 15 m,周边环境复杂,邻近建筑物和地下管线密集。地质勘察显示,场地土层主要为粉质黏土和砂层,地下水位较高,土体力学参数为:重度 $\gamma=18.5 \text{ kN/m}^3$,黏聚力 $c=25 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\phi=20^\circ$ 。针对土体稳定性差、变形控制难度大等问题,设计采用土钉—喷射混凝土面层复合支护形式,土钉长度 12~15 m,间距 1.2 m,直径 120 mm;喷射混凝土面层厚度 100 mm,强度等级 C25;钢筋网采用 HRB400 钢筋,直径 8 mm,间距 200 mm。经稳定性分析,整体稳定性安全系数为 1.35,满足规范要求。

2.2 施工过程及监测分析

2.2.1 施工工艺流程

在施工过程中,严格按照“分层分段、严禁超挖”原则进行土方开挖,每层开挖深度控制在 1.2 m,每段开挖长度 15 m。土钉成孔采用机械钻孔,成孔直径 120 mm,垂直度偏差控制在 0.8%。土钉钢筋(HRB400,直径 25 mm)插入孔中,每隔 2.5 m 设置一个对中支架。注浆采用 P.042.5 普通硅酸盐水泥,第一次注浆压力 0.4 MPa,第二次高压注浆压力 1.2 MPa。钢筋网铺设时,钢筋(HRB400,直径 8 mm)间距 200 mm,与土钉钢筋焊接连接,搭接长度 350 mm。喷射混凝土强度等级 C25,厚度 100 mm,分两层喷射,每层 50 mm。

2.2.2 施工质量控制

对原材料严格把关,每批水泥、钢筋等进场均按规范抽样检验。在土钉施工中,实际土钉长度偏差控制在 $\pm 0.3 \text{ m}$,间距偏差 $\pm 0.1 \text{ m}$,直径偏差 $\pm 5 \text{ mm}$,倾角偏差 $\pm 2^\circ$ 。注浆时,浆液配合比严格控制,注浆量比理论值增加 5%~10%,确保注浆饱满。钢筋网铺设间距偏差 $\pm 10 \text{ mm}$,搭接长度偏差 $\pm 20 \text{ mm}$ 。喷射混凝土厚度通过现场钻孔检测,平均厚度达到 102 mm,强度经检测达到 C26。

2.2.3 基坑变形监测及分析

在基坑周边共布置 10 个监测点,从基坑开挖开始至基础施工完成,进行了为期 3 个月的变形监测。监测数据如图 1 所示。

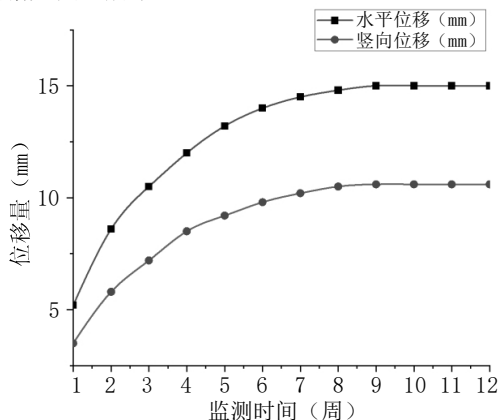


图 1 监测数据

从图 1 中的数据可知,基坑变形在开挖前期增长较快,随着复合土钉支护的逐步完成,变形逐渐趋于稳定。最终水平位移控制在 15 mm 以内,竖向位移控制在 10.6 mm 以内,均满足设计允许变形值要求,表明复合土钉支护技术在该工程中有效控制了基坑变形,保障了基坑及周边环境的安全。

3 结束语

复合土钉技术通过土钉、喷射混凝土面层与预应力锚杆的协同作用,能有效提升土体稳定性,控制基坑变形。其设计方法可根据地质条件与工程需求,精准确定支护参数,保障支护结构安全可靠。在深基坑支护工程应用中,严格的施工工艺与质量控制,使其在复杂地质及周边环境条件下仍表现出色。监测数据显示,基坑变形控制良好,验证了复合土钉技术在深基坑支护工程中的可行性与经济性,为同类工程提供了技术参考。

参考文献:

- [1] 荆鹏.房建工程深基坑支护施工技术探究[J].建材发展导向,2025,23(02):37-39.
- [2] 丁学聪.房建工程深基坑支护施工技术应用分析[J].大众标准化,2025(01):28-30.
- [3] 宋仁松.建筑工程中深基坑支护施工技术的应用[J].中国住宅设施,2024(12):122-124.
- [4] 黄瑞.土钉支护设计模型优化与可靠性分析[D].福州:福州大学,2020.
- [5] 丁钰玲.水泥混凝土路面结构设计分析[J].黑龙江交通科技,2020,43(09):258-259.