

预应力锚杆复合土钉墙支护结构性能研究进展

李 冲

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年8月18日; 录用日期: 2025年9月8日; 发布日期: 2025年9月22日

摘 要

预应力锚杆复合土钉墙支护结构通过将被动受力的土钉与主动施加预应力的锚杆相结合, 显著提高了传统土钉墙对边坡的变形控制能力和整体结构的稳定性, 成为了基坑支护的重要支护形式。本文系统综述了其性能的研究进展: 预应力锚杆与土钉墙协同工作机理和性能特性; 复合支护结构稳定性分析方法; 复合支护结构关键设计参数对整体结构的影响等; 为实际工程和相关领域的研究提供理论参考, 对提高基坑工程的质量和安全性具有重要意义。

关键词

预应力锚杆, 复合土钉墙, 支护性能

Research Progress on the Performance of Prestressed Anchor-Reinforced Composite Soil Nailing Support Systems

Chong Li

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Aug. 18th, 2025; accepted: Sep. 8th, 2025; published: Sep. 22nd, 2025

Abstract

The prestressed anchor composite soil nailing wall support system significantly enhances deformation control capacity and overall structural stability of conventional soil nailing walls for slope stabilization by integrating passive-bearing soil nails with active prestressed anchors, establishing itself as a crucial support form for foundation pit engineering. This paper systematically reviews research advancements in performance: the synergistic mechanisms and behavioral characteristics between prestressed anchors and soil nailing walls; analytical methodologies for evaluating com-

posite support system stability; and the influence of critical design parameters on the overall structural performance. The findings provide theoretical references for practical engineering applications and related research fields, holding significant implications for improving the quality and safety of foundation pit construction projects.

Keywords

Prestressed Anchor Rods, Composite Soil Nail Walls, Support Performance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

预应力锚杆复合土钉墙支护结构因其显著的优势而受青睐，并在工程实践中得到推广。在支护结构体系中，土钉通过土体与钉体的摩擦作用提供被动抗力，预应力锚杆是主动施加预应力的方式，增强土体的整体性和稳定性。复合土钉墙可将两种工作方式的支护结构组合使用，看似矛盾，但实际工程实践当中，两者协同作用可以同时发挥其支护优势。柔性支护和刚性支护也在复合土钉墙支护结构中被结合起来。这种钉锚协同作用对基坑边坡安全稳定尤其重要。

本文旨在系统梳理预应力锚杆复合土钉墙支护结构的联合作用机理、分析方法以及性能影响因素。通过对相关文献归纳分析，希望对读者了解预应力锚杆复合土钉墙支护结构有所帮助。

2. 预应力锚杆复合土钉墙支护的基本原理与性能特性

2.1. 预应力锚杆与土钉的主要区别

土钉与预应力锚杆最大的区别为受力方式不同，土钉为被动受力，预应力锚杆为主动受力。与锚杆相比，也可称土钉为全长粘结性锚杆，土钉没有自由段及锚固段之分，土钉与预应力锚杆之间存在较大的区别。下面将详细分析土钉与预应力锚杆的区别：

1) 受力范围：土钉为全长受力，受力方向不同，以潜在破裂面为界，前半部分指向潜在滑裂面，后半部分背向滑裂面。预应力锚杆则前半部分为自由段不受力，后半部分为受力段。

2) 轴力变化：土钉为沿土钉长度变化，土钉轴力中间大两端小枣核状分布如图 1 所示。预应力锚杆则为自由段不变化，从自由段到锚固段接触点递减如图 2 所示[1]。

3) 工作机理：土钉为土体加筋技术，土体补强手段，提高边坡土体强度和自稳能力。锚杆安装后，通常对其施加预应力，锚杆作为主动约束构件来约束挡土结构的变形，土钉需要土体产生变形才能够进入工作状态并提供作用力。

4) 施工周期：锚杆长度一般大于等于 15 m，锚孔成孔直径一般大于 130 mm，需要一些较大的施工施备才能够保证施工质量，一般经历锚孔成孔、杆体入孔、注浆养护、拉拔锁定这几个施工周期；而土钉的长度较短，且土钉孔径较小，甚至有些土钉采用直接打入的施工方法，施工简单，施作速度较快，一般经历土钉成孔(打入式土钉没有此项)、土钉入孔、注浆养护。

5) 注浆工艺：锚杆的承载力设计值一般较大，为保证锚杆的抗拔承载力，往往在一次注浆结束一定时间后进行二次高压注浆进行补浆或者劈裂注浆；而土钉往往采用自上而下或者自下而上的重力式一次注浆，不会进行二次注浆。

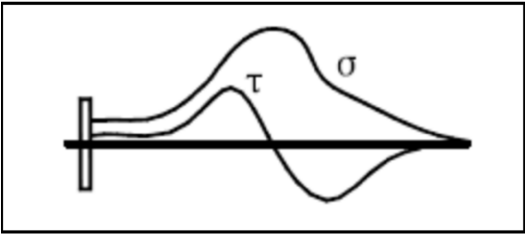


Figure 1. Distribution of soil nail axial force
图 1. 土钉轴力分布

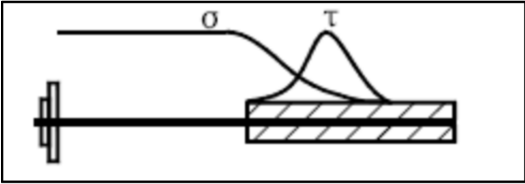


Figure 2. Distribution of axial force of prestressed anchor rods
图 2. 预应力锚杆轴力分布

2.2. 复合结构中土钉与预应力锚杆联合作用机理

预应力锚杆复合土钉墙支护结构中，土钉与预应力锚杆不仅可以分别发挥各自的支护作用，并且它们之间的协同效应能够增强整个支护结构的支护效果，提高基坑稳定性。其联合作用主要体现在荷载分配、变形协调等。在荷载分配方面，锚杆主动支护与土钉被动支护形成互补。王辉等人通过现场监测数据发现[2]，邻近预应力锚杆的土钉受力明显减小，在约 2 m 范围内，土钉拉力降幅可达 30%；而距离锚杆较远(>2 m)的土钉受力则可能增加 12%。这种“此消彼长”的现象反映了支护结构内部力的重分布过程。锚杆通过其强大的约束能力承担了更大比例的荷载，减轻了邻近土钉的负担。然而，当距离超过一定范围后，锚杆的影响减弱，土钉仍需承担较大荷载。预应力锚杆对临近土钉受力影响范围如表 1 所示。

Table 1. The influence range of prestressed anchor rods on the forces of adjacent soil nails
表 1. 预应力锚杆对临近土钉受力影响范围

土钉与锚杆距离(m)	土钉拉力变化率(%)	影响机制
0~1.0	-25%~-30%	强约束区，锚杆承担主要荷载
1.0~2.0	-15%~-25%	中等约束区，荷载部分转移
≥2.0	+5%~+12%	弱影响区，土钉承担正常荷载

变形协调机制表现为锚杆与土钉通过面层系统共同工作。面层作为连接构件，将锚杆施加的集中力转化为分布力传递至土体，同时协调不同位置土钉的变形差异。彭文祥等人通过模型试验表明[3]，注浆加固使锚杆-土体界面黏聚力提高约 18%，界面摩擦角提高约 10%，从而增强了锚杆与土体的协同工作能力。这种增强效应在软土地区尤为重要，可有效避免因局部变形过大导致的面层开裂问题。

2.3. 预应力锚杆对复合支护结构的稳定性增强机制

在较高的边坡支护中，预应力锚杆支护结构能够有效的提高边坡的稳定性。通过将锚杆与土钉间隔布置的方式，可以有效降低基坑支护成本。如图 3 所示。土钉与预应力锚杆支护结构间隔布置的复合形式在边坡支护工程中广泛运用。

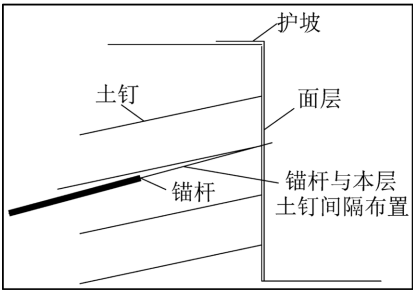


Figure 3. Schematic diagram of the prestressed anchor bolt combined soil nail wall support structure
图 3. 预应力锚杆复合土钉墙支护结构简图

郭院成等人通过实际基坑支护工程的数值模拟分析与施工过程监测结果的对比分析[4]，预应力锚杆参数对支护性能的影响规律如表 2。预应力锚杆的作用机理主要体现在以下三个方面，首先，预应力施加相当于在土体中增加侧向约束应力，根据摩尔 - 库伦强度理论，这直接提高了土体的抗剪强度指标。其次，锚杆改变了潜在滑裂面的空间分布特征，随着锚杆预应力值的增加，潜在滑裂面的倾角逐渐减小，对基坑整体稳定性的贡献呈先增大后减小的趋势。最后，锚杆的设置位置也影响其作用效果，研究表面，锚杆设置越低，增加预应力对基坑整体稳定性的提升效果越显著。

Table 2. The influence law of prestressed anchor rod parameters on the supporting performance
表 2. 预应力锚杆参数对支护性能的影响规律

设计参数	变化趋势	对整体稳定性的影响	对整体变形的影响	最有取值建议
预应力值	增大	先增强后减弱	显著减小位移	存在最优值，约为设计荷载的 70~80%
锚固段长度	增长	持续增强	减小位移，但边际效应递减	满足抗拔要求基础上增加 10~20%安全储备
设置位置	下移	增强效果提升	下部位移控制显著	重点加强中下部支护区域
设置层数	增加	增强效果提升	唯一减小，成本提高	一般基坑设置 2 层即可满足要求

程建华等人通过采用钉 - 锚 - 土共同作用模型，对纯土钉支护、加锚一层、加锚二层与加锚三层四种工作状态进行有限元分析[5]，得出在多数工程条件下，设置两层预应力锚杆即可满足优化设计理论要求，同时，锚杆的布置要求科学规划竖向间距，过于密集可能导致“群锚效应”，反而降低单根锚杆的效率。

3. 分析研究方法

3.1. 理论解析

理论分析方法是研究预应力锚杆复合土钉墙支护结构性能的基础工具。预应力锚杆复合土钉墙结构主要理论方法比较如表 3 所示。其中增量解析法因其能够精确反映施工过程而特别适用于基坑支护分析。郭院成等学者提出的增量解析法通过将分层开挖过程离散化，并将预应力施加作为独立工况处理，构建了考虑施工顺序的力学模型[4]。该方法基于平面滑裂面假设，通过逐阶段计算，建立了预应力锚杆符合土钉墙支护结构的增量解析法。

极限平衡法在传统土钉墙分析基础上引入了预应力锚杆的作用。惠趁意等人改进了条分法，将锚杆预应力视为作用于滑裂面的集中力，并假设滑裂面为抛物线形，通过几何关系和积分推导稳定性系数[6]。

其创新点在于采用遗传算法动态搜索最危险滑裂面，避免了局部极小值问题。该方法计算的安全系数较圆弧滑动法提高 10%~15%，更符合工程实际。

传统的杆系有限元法在分析柔性支护结构时常产生较大误差。针对这一问题，王辉等人改进的杆系有限元法引入了土 - 结构相互作用模型，将面层简化为弹性梁单元，土钉和锚杆简化为杆单元，并通过弹簧单元模拟土体约束[7]。该方法能准确计算分层支护结构的内力分布，其计算结果与现场实测数据的吻合度达 90%以上，特别适用于预应力锚杆复合土钉墙这类柔性支护结构的变形预测。

Table 3. Comparison of main theoretical methods for prestressed anchor rod composite soil nailing wall structure
表 3. 预应力锚杆复合土钉墙结构主要理论方法比较

理论分析方法	理论基础	适用场景及主要优势
增量解析法	分布加载理论	初步设计阶段参数分析，计算效率高
抛物线滑裂面极限平衡法	极限平衡理论 + 遗传算法优化	稳定性验算阶段，避免局部最小值，滑裂面更真实。
改进杆系有限元法	结构力学 + 土 - 结构相互作用	内力计算，考虑柔性变形，计算内力准确。

3.2. 数值模拟

数值模拟技术能全面反映预应力锚杆复合土钉墙的三维效应和施工过程，主要方法包括有限元法(FEM)、有限差分法(FLAC)和离散元法(DEM)。

FLAC3D 软件因其强大的岩土本构模型和接触面处理能力，成为该领域应用最广泛的工具。徐帮树等人建立了弹塑性实体单元与线性锚杆单元耦合模型，成功再现了分层开挖与支护的全过程[8]。该模型的创新点在于考虑了锚杆 - 土体界面行为，通过设置剪切耦合弹簧模拟灌浆体的作用。模拟结果显示，基坑最大水平位移发生在顶部 0.3 H (H 为基坑深度)范围内，而坑底隆起则以中心区域最为显著。

三维有限元模型能更精确地反映空间协同效应。赵庆强等人采用三维实体单元模拟土体，梁单元模拟面层，锚杆单元模拟土钉和锚杆，系统研究了锚索参数变化对支护性能的影响规律[9]。研究发现，在基坑转角处，由于空间约束效应，位移量比中间段小 40%~50%，这一现象被定义为“角效应”。此外，三维模型还能揭示群钉效应——密集布置的土钉群会形成“压力拱”，改变土体应力分布模式。

数值模拟的关键在于本构模型选择和参数标定。土体通常采用修正剑桥模型或摩尔 - 库伦模型；土钉 - 土体界面采用双曲线模型；预应力则通过初始应变法施加。通过反演分析标定计算参数，可使数值模拟结果与实测数据的吻合度达 90%以上，为复杂工程提供可靠预测。

3.3. 试验研究

试验研究为预应力锚杆复合土钉墙的工作机理提供直接证据，主要包括室内模型试验、现场测试和新型结构试验。

彭文祥等人开展的室内模型试验采用 1:10 相似比，通过对比纯土钉支护与预应力锚杆复合土钉支护的性能差异，揭示了复合支护的优越性[3]。试验装置创新点在于砂箱侧壁的多重润滑处理(机油 + 塑料薄膜 + 工业凡士林)，将边界摩擦系数降至 0.05 以下，有效减小了边界效应。试验结果表明：复合支护的坡面最大位移较纯土钉支护降低 14%；潜在滑裂面明显上移；邻近锚杆的土钉受力减小约 30%。

现场测试技术包括应变计监测、位移自动采集系统和预应力传感器。通过埋设于土钉和锚杆中的应变计，可实时监测支护构件的内力变化。杨志银等对多个工程现场的监测数据分析表明，预应力锚杆受力分为三个阶段[10]：施加后的初始阶段存在 10%~15%的预应力损失；开挖稳定期保持相对恒定；暴雨或邻近施工等外部扰动下则可能出现 20%的突变。这些监测结果为理论研究提供了重要验证。

新型结构试验以自适应预应力锚杆复合土钉墙为代表[11]。该结构通过装配式框架和自缩土钉设计,解决了传统结构中土钉与锚杆难以协同工作的问题。自缩土钉采用特殊构造,在土体变形时能自动调整受力状态,避免应力集中导致的过早破坏。试验表明,该结构在控制变形方面比传统结构提高约 25%,代表了未来发展方向。

4. 预应力锚杆复合土钉墙结构稳定性影响因素分析

4.1. 设计参数敏感性

预应力锚杆复合土钉墙支护结构的性能受多种设计参数影响,其中锚杆参数、土钉布置和几何构造是关键因素。徐帮树等人通过敏感性分析建立了参数影响程度的量化排序,为优化设计提供了依据[8]。锚杆位置与预应力值是影响支护效果的核心因素。研究表明,锚杆设置于基坑中下部(约 2/3 深度处)时对位移控制效果最佳,可使坑壁最大位移降低 26%。预应力值则存在最优区间:过小的预应力无法充分发挥锚杆作用;过大的预应力则可能导致浅层土体开裂或锚固段失效。郭院成等人通过增量解析法发现[4],锚杆预应力对稳定性的贡献呈先增后减的趋势,存在明显的峰值点。当预应力超过临界值后,继续增加预应力反而会使安全系数下降,这与土体应力状态改变导致潜在滑裂面上移有关。

赵庆强等人通过数值模拟研究表明[9],土钉参数受长度和间距的影响,土钉长度增加可提高抗拔力,但当长度超过 0.8 倍基坑深度后,继续增加长度对稳定性的提升作用有限。土钉垂直间距的减小可提高支护密度,但过密布置(<1.0 m)会产生“群钉效应”,降低单钉承载力利用率。土钉垂直间距从 1.5 m 减至 1.2 m 时,基坑最大位移减少约 18%;但当间距继续减至 1.0 m 时,位移减少幅度仅为 3%,经济效益显著降低。

4.2. 施工工艺影响

预应力锚杆复合土钉墙支护结构的性能受施工过程的显著影响,其中分层开挖控制、预应力施加时机和注浆质量是关键因素。

分层开挖过程需遵循“分段开挖,及时支护”的原则。每层开挖深度通常控制在 1.5~2.0 m 范围内,开挖后应立即施作土钉或锚杆并喷射面层。杨志银等人通过现场测试发现[10],当开挖后暴露时间超过 48 小时,基坑变形量可增加 30%~40%,表明时效性对控制变形至关重要。预应力锚杆的施加时机更需精确控制,过早施加可能导致预应力损失,过迟则无法有效控制变形。最佳时机为开挖后 12~24 小时内,此时土体变形已初步发展但尚未形成完整滑裂面。

注浆质量对支护性能的影响常被低估。彭文祥等人通过模型试验表明[3],高质量注浆可使土-钉界面黏聚力提高约 20%,摩擦角提高 5%~8%,从而显著提高结构承载力。其中注浆压力、水灰比和二次注浆是三个关键控制因素,注浆压力控制在 0.5~1.0 MPa 可保证浆液充分扩散;水灰比 0.45~0.55 时浆体强度最优;二次注浆则可使锚固体直径增加 30%~50%,大幅提高抗拔力。

4.3. 土体性质和地下水影响

土体类型和地下水条件是影响支护性能的自然因素。在砂性土层中,预应力锚杆复合土钉墙表现出最佳性能;而在软黏土中,其效果则受限于土体蠕变特性。

砂性土层中,土钉与锚杆能充分发挥摩擦加筋作用。韩森等人通过试验表明[12],在密实砂层中,土钉抗拔力可达黏性土中的 1.5~2.0 倍。地下水位上升则会导致双重不利影响:一方面降低土体有效应力,减小抗剪强度;另一方面软化土体,加速变形发展。特别是在粉细砂层中,渗流作用可能引发管涌风险,需配合降水或止水措施。

软黏土地层中的主要挑战是蠕变变形和强度时效。软黏土在剪应力作用下会产生长期蠕变,导致支护结构变形随时间持续发展。董诚等人的研究指出[13],在软土地区,复合土钉墙的长期变形可达初始变形的1.5~2.0倍。为解决这一问题,可采取增加锚杆密度、提高预应力值或设置二次补偿张拉等措施。

5. 结论

预应力锚杆复合土钉墙支护结构通过主动加固与被动支护的有机结合,显著提升了传统土钉墙的稳定性和变形控制能力。本文系统梳理了该支护结构的工作机制、分析方法以及性能影响因素等方面的研究进展,得出以下关键认识:

支护结构的协同工作机制是其性能优势的核心。预应力锚杆通过主动约束改变潜在滑裂面形态,使其倾角减小且位置上移;同时通过面层系统实现与土钉的荷载重分配,在邻近区域形成“应力阴影”,显著降低约30%的土钉拉力。这种协同效应使复合结构较纯土钉支护的位移控制能力提升14%~26%。

分析方法需理论研究、数值模拟和试验验证相结合。增量解析法和改进杆系有限元法能有效模拟分层施工过程;FLAC3D等数值工具可再现三维空间效应;模型试验则通过创新设计揭示内在机理。各种方法相互验证,计算精度将大大提升。

支护性能受多因素综合影响,其中锚杆设置位置与预应力值最为关键。锚杆位于基坑中下部(约2/3深度处)时效果最佳;预应力值存在最优区间,过低无法充分发挥作用,过高则可能导致浅层土体开裂。土钉参数中,垂直间距和长度影响显著,而面层厚度的影响相对较小。

未来研究需致力于理论体系完善、智能化应用和绿色技术开发,以推动该支护结构在复杂深基坑工程中的更广泛应用。后续的研究中可以针对土钉和锚杆的布置方式、复合土钉墙的施工工艺等更多因素对参数的影响进行分析,以期有更加精确的稳定性系数预测。

参考文献

- [1] 马嘉程. 预应力锚杆复合土钉墙支护的整体稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [2] 王辉, 程建华. 复合土钉墙的受力分析与变形计算[J]. 煤炭工程, 2014, 46(7): 46-48.
- [3] 彭文祥, 谢雨军, 徐松山, 等. 预应力锚杆复合土钉墙工作性状试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1468-1474.
- [4] 郭院成, 李明宇, 张艳伟. 预应力锚杆复合土钉墙支护体系增量解析方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(A1): 253-258+266.
- [5] 程建华, 王辉. 主被动复合支护结构的协同工作机制研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 228-231.
- [6] 惠趁意, 朱彦鹏, 叶帅华. 预应力锚杆复合土钉支护边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 325-329.
- [7] 王辉, 郭院成. 改进的杆系有限元法在预应力锚杆复合土钉支护中的应用[J]. 公路, 2014, 59(12): 1-4.
- [8] 徐帮树, 刘日成, 李连祥, 等. 复合土钉墙支护设计参数敏感性分析及边坡变形规律研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 393-400.
- [9] 赵庆强. 预应力锚索复合土钉墙数值模拟与优化分析[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2012.
- [10] 杨志银, 张俊, 王凯旭. 复合土钉墙技术的研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2005(2): 153-156.
- [11] 董建华. 一种自适应预应力锚杆复合土钉墙及施工方法[P]. 中国专利, CN201810193940.5. 2019-11-29.
- [12] 韩森. 预应力锚索复合土钉墙试验研究及数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [13] 董诚, 郑颖人, 陈新颖, 等. 深基坑土钉和预应力锚杆复合支护方式的探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3793-3796+3802.