

锚索支护技术在岩土工程中的应用及效果评价

李磊

重庆工贸职业技术学院建筑工程学院，重庆 408000

DOI:10.61369/ME.2025100021

摘要：锚索支护技术是一种岩土工程常用的主动加固方法，其应用效果对工程安全与经济效益至关重要。本文首先论述了锚索支护技术的基本原理，即通过预应力将荷载传递至深部稳定岩土体，并与锚固段、自由段及锚头共同构成受力体系；在此基础上，重点分析了其在软土基坑变形控制、高边坡整体加固及装配式支挡结构创新三大场景中的具体应用。研究建立了一套包含结构性能与安全、施工效率与经济性、环境适应性与社会效益的多维度量化评价体系，以期为该技术的优化选型与效果评估提供参考。研究表明，锚索支护技术可靠性好、经济性和环保性强，十分适合现代岩土工程。

关键词：锚索支护技术；岩土工程；技术应用；效果评价

Application and Effect Evaluation of Anchor Cable Support Technology in Geotechnical Engineering

Li Lei

School of Architectural Engineering, Chongqing Industry & Trade Polytechnic College, Chongqing 408000

Abstract : Anchor cable support technology is a commonly used active reinforcement method in geotechnical engineering, and its application effectiveness is crucial to engineering safety and economic benefits. This paper first discusses the fundamental principles of anchor cable support technology, which involves transferring loads to deep stable rock and soil masses through prestressing and forming a load-bearing system together with the anchored section, free section, and anchor head. Based on this, the paper focuses on analyzing its specific applications in three major scenarios: deformation control of soft soil foundation pits, overall reinforcement of high slopes, and innovation in prefabricated retaining structures. A multi-dimensional quantitative evaluation system encompassing structural performance and safety, construction efficiency and cost-effectiveness, environmental adaptability, and social benefits has been established to provide a reference for optimizing the selection and evaluating the effectiveness of this technology. The research indicates that anchor cable support technology exhibits good reliability, economic viability, and environmental friendliness, making it highly suitable for modern geotechnical engineering projects.

Keywords : anchor cable support technology; geotechnical engineering; technology application; effectiveness evaluation

引言

伴随着我国基础设施建设不断向岩土工程更深、更难、更险的地质条件深入，岩土工程面临的边坡稳定与基坑安全挑战日益严峻，传统的被动支挡结构已经无法满足有关高质量变形控制和节能环保的要求，发展更为先进的主动加固方式势在必行。其中锚索支护是其代表性的主动加固方式，可以对岩土体施加主动预应力，充分发挥岩土自稳能力。然而，当前研究多聚焦于特定案例的技术分析，缺乏对不同类型的应用场景的整体性归类，以及不同应用场景下的综合性能标准化评价体系尚未建立起来，为了解决上述问题，本文旨在立足现有技术实践，系统梳理了锚索支护从作用机理到典型应用的内在联系，然后有针对性地提出锚索支护综合效果评价多维度框架。

一、锚索支护技术的基本原理与分类

锚索支护技术是一种通过向岩土体深处植入高强度预应力钢绞线，使其与岩土体形成协同承载结构的主动加固技术，该技术主要是应用预应力来强制约束岩土体，使潜在的滑动体受到锚索的作用后转移到深部稳定的岩土体上，从而达到提高工程质量的效果。锚索支护的主要部分包括锚固段、自由段及锚头三部分：锚固段用浆体与岩土体粘结成整体，保证所需的抗拔力；自由段往往用防腐套管隔离预应力不能直接传递到锚固段；锚头借助垫板及锚具把锚索张拉之后固结于坡面或者支护桩内，完成受力体系。根据支护结构的形态与组合方式，锚索技术可划分为多种类型，例如锚索桩—排桩体系（即桩—锚体系）、锚索墙—地下连续墙体系（即墙—锚体系），以及这些系统分别与钻孔灌注桩联合组成锚索桩—土钉墙体系（即桩—墙—锚体系）。锚索是针对软土地基深基坑支护的一项很好的设计思路，可以通过调节锚索的相关参数，控制基坑变形幅度。另外，在边坡工程当中，锚索与钢筋混凝土框架梁结合成网状结构加固破碎岩土高边坡，达到了点面结合的效果^[3]。近年来，随着施工技术向工业化发展，诸如等截面装配式框架预应力锚索等新型结构已得到开发与应用。为满足城市建成区环境与节约资源的要求，大直径可回收锚索技术逐渐发展成熟，在锚索外表面安装可拆卸装置，实现服役到期将其取出，减少地下障碍物，符合绿色工程要求。锚索支护技术的科学分类和合理选型是保证锚索支护效果的前提，应根据具体的工程水文地质条件及工程安全要求，选择最适用的技术。

二、锚索支护技术在岩土工程中的应用

（一）在软土基坑变形控制方面的应用

软土基坑工程中，锚索支护技术通过主动施加预应力，能有效平衡土压力，抑制坑壁侧向位移。由于软土本身强度很低，具有较强的流变特性，传统的支护结构主要以被动支护形式存在，这就造成了变形控制能力较弱。而锚索主要是通过预先张拉锁紧锚索，使基坑开挖前就对潜在滑移面进行反向约束，让土体由主动受力变为相对静止，减少坑壁的侧向位移以及周边地面的沉降。双排桩—锚索支护是处理严峻变形情况的一种较好形式，通过前、后排桩+锚索组成的整体空间受力，利用锚索的预应力把前排桩所承担的土压力部分传递到更深的稳定土体或者后排锚固桩处，大大提高了支护体系的整体刚度以及抗倾覆稳定性，进而达到基坑变形精准控制的效果。针对在城市密集建筑物分布下，基坑变形和环境控制严格的要求，大直径可回收锚索技术有重大意义^[4]。大直径可回收锚索采用特殊的锚索结构和注浆工艺，达到基坑支护阶段需要的足够锚固力，并在主体结构完成后可通过预先设置的装置将锚索筋体从孔内收回，达到没有遗留地下障碍物，便于临近地块后续开发利用，无需消耗永久性支护材料的效果，实现绿色施工。可回收锚索的成功应用关键在于其回收工艺的可靠性，保证回收作业不影响已成结构及周边土体稳定。综上所述，在软土基坑变形控制中，锚索支护技术（无论

是传统形式还是创新形式）的核心优势均在于通过主动施加预应力，有效增强了对软土变形的约束能力。

（二）在高边坡整体加固方面的应用

对高边坡整体加固工程而言，锚索支护技术凭借强大的主动受力机制，成为了解决坡体深层失稳的关键性技术途径，尤其适用于地质条件比较破碎、自稳能力较差的高陡边坡。其岩土体结构松散，节理发育，潜在滑裂面位于地层深处，因此传统支挡结构难以有效抵抗巨大的土推力，而锚索则是将高强度钢绞线锚固于滑动面以下的稳定岩土层，通过对滑面以下岩土层施加预应力的方式，主动压紧滑体，从而增加滑面上的有效正应力，提高了滑面土体的抗剪强度，达到增加边坡整体稳定的功效。锚索锚杆框架梁支护结构正是这一思想的应用产物，它是将锚索深层锚固与钢筋混凝土框架梁表层护面紧密结合、融为一体的空间复合结构，利用钢筋混凝土框架梁抵抗混凝土结构层断裂的力学性能，使得锚索所发挥出的集中预应力能够通过框架梁的浇筑转化成一种平分力分布在整个坡面，不仅可以控制浅层岩土体的变形与剥落，而且还可以充分发挥坡面荷载通过锚索下传的作用。施工中，需通过钻孔、穿索和注浆等关键工序，确保锚固段与岩土体牢固粘结。保证钻孔质量、精确控制注浆压力与浆液配比是施工成败的关键。通常需采用跟管钻进等工艺确保成孔，并利用高压旋喷注浆等技术来保证锚固段的粘结强度。此外该复合结构安全储备高、梁体网格内的植被恢复，兼顾了工程安全与生态恢复双重效益。所以，锚索支护应用于高边坡加固上的最突出的优势就是通过锚索进行深层主动加筋和浅层被动护面来达到从局部到整体、从浅部到深部共同加固边坡的目的，并且可以使深层发生滑动变为沉降状态，以及使浅表处由变形变为相对稳定的状态，有利于保证高边坡工程的长久性稳定。

（三）在装配式支挡结构创新方面的应用

装配式支挡结构方面，锚索支护的集成化是岩土工程向着工业化、标准化的方向发展的标志。等截面装配式框架预应力锚索支护结构就是其中一种较为典型的集成应用方式^[2]，主要将预应力锚索与工厂化生产的预制钢筋混凝土框架构件相结合而成的一种模块化的支挡体系。它在工厂进行精密制作、保证混凝土的成型质量及尺寸精度，并运抵施工现场后通过螺栓连接或者预应力张拉方式进行拼装，极大地减少了现场湿作业和养护时间，极大地提高了施工速度，减少了对现场的影响程度。另外，预应力锚索作为支护系统中最重要的受力部分，实现了由张拉荷载通过装配式节点传至整个框架，并促使结构与土体提早进入共同工作，从而使变形得到严格控制，研究结果表明：通过装配式结构与预应力锚索的组合后，形成了具有明显线性弹性工作段且具有较好延性的承载性能，并且在最终破坏时，主要表现为锚索与土体之间的黏结失效或者锚索断裂而造成破坏，并没有出现结构的脆性破坏，有着较高的安全冗余系数，该种工艺可靠的算法程序已经过验证，数值模拟可以较好地反应出从施工到受荷全过程的力学过程。该种装配化方案在避免现浇结构存在施工周期较长、质量易受波动影响的同时，通过可以预期的结构性能为复杂地层条件下支护的设计提供了可靠的选择，在较严苛要求施工进度、保

护环境的边坡支护和基坑工程中有广泛的适用性。

三、锚索支护技术的效果评价体系

(一) 结构性能与安全效果评价

对锚索支护结构性能与安全效果的评价，必须基于一套可量化的关键性能指标，即在进行锚索支护工程时应着重于基于变形控制指标来进行评判，具体表现为利用高精度测量手段获取基坑壁顶的水平位移、竖向沉降以及深层土体的水平位移数据，在考虑条件限定的情况下要求其真实测量值不超过设计预警值及规范允许值，只有满足以上判定规则才是有效性的基本前提；同时要结合结构完整性指标的约束准则，通过对锚索预应力锁定后损失率和长期稳定性情况以及通过无损检测方法验证锚固段浆体饱满程度和长度情况，确保预应力得到良好传递；并以整体稳定安全系数来判断安全储备，该系数可通过锚索作用的极限平衡计算(如圆弧滑动法、平面滑动法)获得，大于规范要求的限值，而对类似双排桩—锚索等组合工况须以数值模拟反演其最危险滑裂面的方式加以校核^[1]；并且还能以整体稳定系数安全度(支护结构极限状态性能)作为指标判断支护结构自身所能够达到的状态，其具体体现就是锚索极限抗拔力设计值与其实际受力值的比值大小，直接关系到锚索支护结构的安全冗余度问题。以上述量化指标为核心，即可构建起锚索支护技术结构安全性能的科学评价体系。

(二) 施工效率与经济性效果评价

对施工效率及经济性的评价应建立基于数据的比较分析模型，其中评价效率需要考核的数据主要包括：每立方米工作量的工时消耗、每项工作的工期缩短率。比如用装配式预应力锚索支护与传统的现浇方法进行比较^[2]，在工厂内预制好后再运送到现场进行组装，则其工时消耗将减少30%以上，工期缩短的幅度是该项效率优势的关键，具有较大的市场竞争力。经济性的评价应使用全寿命周期的成本分析模型，要计算初始建造成本的同时也要量化运行期间产生的间接收益和处置成本，其中初始建造成本是指材料费、人工费、机械费；可回收锚索主要对可回收锚索的回收价值建模，量化材料回收率和残值收益、因避免了锚索变成地下障碍物而节省下来的后期处理费用来衡量；双排桩—锚索等

体系的经济性要引入风险成本规避的价值，即由于其优越的变形控制能力所避免出现的周边建筑物、管线破坏后的赔偿费用和维修费用等。该量化模型可通过对比不同技术方案的净现值或动态投资回收期，为方案比选提供客观依据。

(三) 环境适应性与社会效益评价

环境适应性与社会效益的评价需建立多维度的定性及半定量标准。其中，环境适应性的主要评价标准是指针对不同的地质情况(如在软土地区控制蠕变变形能力、在破碎岩体地区控制成孔、确保锚固稳定)的技术应对能力指数，这些指数可基于历史工程案例数据，通过其与特定地质条件的匹配度进行半定量评估得出；而环境影响的主要评价标准是根据实际情况来进行相应的排废气和资源消耗情况指数，比如施工期噪声分贝数、施工期粉尘的分层含量以及回收利用后的锚索减少产生的建筑垃圾、节约的钢材、水泥等资源数量，其中以回收锚索节省材料的数量作为参考项。另外在社会效益方面，安全性能度和社会干扰度是两个重要的评价标准，安全性能度即为工程本身以及周边环境无安全事故发生，社会干扰度即为施工期间对周边交通、居民生活造成的影响由有相应的问卷调查结果或投诉次数的变化来衡量。此外锚索—框架梁这种结构提供的绿化面积也是整个这套方案所产生的良好的生态效益的一个附加收益点。这套结合了具体监测数据、统计分析和社会调研的多维度标准，共同构成了系统性评价体系。

四、结语

本文以锚索支护技术的机理、应用、效果为出发点，剖析了该项技术的主动加固性质和它的技术应用核心价值所在。其次，阐明锚索支护技术能否发挥效用是基于不同的工程背景(如：软土路基与高边坡等)，采取针对性的选型和设计；锚索支护技术的效果可以用结构安全、经济效果和社会效益等3个方面对应的量化指标体系来判定。本文展望了未来锚索支护技术向工业化、智能化与绿色化的发展趋势，研发高性能材料和优化可回收装配式结构是今后锚索支护技术发展的主要方向之一；建立基于物联网的实时安全监控与信息反馈系统，提高锚索支护的现场应用性和可靠性则是锚索支护未来发展中必不可少的一个重要环节。

参考文献

- [1] 李典. 双排桩—锚索支护体系在软土地区基坑中的应用 [J]. 广州建筑, 2024, 52(02): 9–12.
- [2] 刘少龙, 赵一波, 赵剑峰, 等. 等截面装配式框架预应力锚索支护结构承载特性研究及其算法验证 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 2662–2667.
- [3] 赵常青, 燮占东, 冉黎明, 等. 破碎岩土高边坡锚索锚杆框架梁支护施工工艺 [J]. 公路, 2023, 68(05): 50–53.
- [4] 谢朋, 吴罡, 王权, 等. 大直径可回收锚索支护在武汉建成区软土中应用技术研究 [J]. 城市勘测, 2023, (01): 195–198.
- [5] 刘少龙, 赵一波, 赵剑峰, 等. 装配式框架预应力锚索支护结构及其承载特性 [J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(06): 149–154+187.