

深埋隧道软岩大变形控制技术研究

彭 巍

湖北交投建设集团有限公司桥隧分公司 湖北 武汉 430200

【摘要】：在深埋隧道工程中，软岩大变形是影响施工安全和后期稳定的主要因素之一。软岩的高变形性和不稳定性给隧道建设带来了巨大的挑战。通过对软岩大变形机理的深入分析，提出了一种基于地质特征和工程要求的控制技术方案。该方案结合了岩土工程学、隧道施工技术与新型材料的应用，提出了适应不同地质条件下的优化设计。研究表明，通过合理的设计和施工手段，能够有效地控制软岩大变形，确保隧道的施工安全与使用功能。此外，本研究对软岩隧道的未来发展和技术应用进行了展望，并提出了优化建议，以期对相关工程项目提供理论支持和技术参考。

【关键词】：深埋隧道；软岩；大变形；控制技术；岩土工程

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.039

引言

深埋隧道工程是现代地下工程中常见的类型之一，尤其在地质条件复杂的区域，软岩层的存在往往导致隧道发生严重变形，影响施工进度和安全性。软岩的物理性质和力学特征使其在高地下水位或高压环境下容易发生大范围的变形，严重时甚至可能导致隧道坍塌。如何有效控制软岩在深埋隧道施工中的变形，是岩土工程技术领域亟待解决的关键问题。针对这一问题，采用了多种控制技术和优化设计方法，以期减少变形带来的不利影响，并确保隧道的长期稳定性。通过对软岩大变形控制技术的研究，可以为未来更多隧道建设项目提供理论依据和技术支持。

1 软岩大变形的形成机理分析

深埋隧道软岩大变形的形成机理涉及多个因素，其中软岩的力学性质和外部环境对隧道变形起着决定性作用。软岩通常具有较低的抗压强度和较高的变形性，特别是在高地应力或湿润环境下，这些岩体在承受外部荷载时，往往表现出显著的塑性变形。软岩层的孔隙度较高，岩石内部结构松散，因此其力学强度和稳定性较差。这些岩体在隧道开挖过程中，受到周围地质压力的影响，容易发生较大幅度的变形，进而引起隧道的局部失稳。

软岩的变形机理主要可以归结为两方面：一是岩体本身的物理力学性质，如弹性模量低、孔隙率高，导致其在受力时容易发生较大的形变；二是外部环境的影响，包括地下水位、地震活动、气候变化等因素^[1]。这些因素共同作用，使得软岩在深埋隧道的施工过程中容易发生不均匀的变形，甚至出现大规模的滑移或坍塌现象。尤其是在深埋隧道的开挖过程中，随着施工进度的推进，隧道周围的岩土体应力发生重新分布，岩体的卸压效应和应力集中现象进一步加剧了变形的发生。

软岩的应力释放特性也是造成大变形的一个重要因素。隧道开挖过程中，原有的围岩应力被局部卸除，这种应力的释放会引起岩体的变形，特别是在软岩层中，岩体的塑性变形表现

得尤为明显。高地下水位的存在也加剧了软岩的变形。当水分渗透到岩体中，岩石的颗粒间隙被填充，导致岩石体积发生膨胀，进一步引起变形的加剧。在这些因素的共同作用下，软岩大变形的发生是一个多重因素交织的复杂过程。了解软岩变形的具体机理，有助于在实际施工中采取针对性的控制措施，从而有效减少隧道的变形，确保隧道的结构安全和长期稳定性。

2 深埋隧道软岩变形控制的关键技术

深埋隧道软岩变形的控制需要采用多种技术手段，以应对软岩大变形所带来的各种挑战。核心技术之一是精确的地质勘探和实时监测，这对于了解软岩层的物理力学性质、变形特征以及其在不同施工阶段的应力变化至关重要。通过采用先进的地质雷达、地震波勘测等手段，可以在施工前就明确隧道沿线的地质分布情况，识别潜在的软岩变形风险。实时监测系统则可在施工过程中持续追踪岩体的变形情况，及时反馈数据，为施工过程中的应变控制提供支持。

在施工过程中，支护结构的设计与优化是控制软岩变形的关键。软岩隧道的支护设计需要根据实际的地质条件进行合理选择，常见的支护结构包括喷射混凝土衬砌、钢支撑、钢拱架等^[2]。喷射混凝土衬砌通过加固围岩，提高其抗压强度和稳定性，从而有效抵御软岩在开挖过程中产生的变形。而钢支撑和钢拱架则在隧道开挖过程中提供临时支撑，减缓岩体的变形速度，避免瞬间发生大规模坍塌。适应性施工方法也是控制软岩变形的一个重要方面。在软岩条件下，传统的爆破施工方式可能会引起过大的震动和应力集中，导致岩体的二次破坏。采用软岩隧道的软爆破技术和机械化开挖技术成为一个解决方案。这些方法通过精确控制爆破参数或采用机械设备进行精准开挖，避免了对围岩的过度破坏，减小了软岩变形的风险。

加固技术也在软岩变形控制中发挥着重要作用。注浆加固是一种常见的软岩加固方法，通过注入水泥浆、化学浆或高压浆液，可以有效提高软岩的抗剪强度，减小其变形量。通过改良软岩的物理性质，注浆不仅能加强岩体的整体稳定性，还能改善围岩的透水性，减少地下水对软岩的侵蚀作用。复合加固

技术,如结合钢筋网和注浆技术的联合加固,也能在不同地质条件下实现更为有效的变形控制。在深埋隧道软岩变形控制中,综合利用以上技术手段,并根据不同隧道的具体情况进行灵活调整和优化,能够显著提高隧道施工的安全性和稳定性。通过全方位的技术措施,在软岩变形问题上形成有效的控制体系,保证隧道的顺利施工与长期运行。

3 控制技术的实际应用与效果评估

在深埋隧道的实际应用中,软岩变形控制技术的实施效果直接影响着工程的进展与安全性。通过精确的地质勘探与施工监测,软岩变形控制措施能够根据不同的地质条件和施工阶段进行调整。在一些具有代表性的隧道项目中,应用了综合性的变形控制技术,取得了较为显著的效果。在软岩隧道的支护系统设计中,通过合理选用喷射混凝土、钢支撑以及复合材料等技术手段,能有效应对开挖过程中产生的软岩大变形,避免了岩体的过度变形和局部失稳。针对不同类型的软岩,支护结构的设计也进行了相应的调整,确保了隧道在长期使用过程中的稳定性。

为了评估控制技术的实际效果,项目通常会采用实时监测系统来跟踪隧道的变形情况。通过安装自动化的位移监测仪器,可以在开挖过程中及时获取围岩变形数据。根据监测结果,相关技术人员能够在第一时间调整施工方案,进行必要的加固或修正,避免了潜在的风险^[3]。在一些深埋隧道项目中,实时数据的反馈使得施工人员能够根据围岩变形的趋势及时进行加固作业,减缓了变形进程,有效提高了隧道的稳定性。结合注浆加固技术,注入浆液后的效果得到了验证,软岩层的强度和抗剪能力得到了显著提高。

除了支护设计与加固技术,软爆破与机械化开挖技术的应用也显著改善了软岩变形的控制效果。在某些具有高水位的软岩隧道施工中,传统的爆破方法可能会引发围岩的二次破坏,导致变形失控。通过优化爆破参数、减少震动幅度,软爆破技术有效地避免了这些问题。在机械化开挖方面,采用了高效的掘进机,这种设备能够精确控制开挖进度,减少对围岩的破坏,并有效降低了施工过程中的应力集中,避免了过度的岩体变形。

这些控制技术的应用不仅保证了施工过程中的安全,还显著提高了隧道的长期稳定性和使用寿命。在一些项目的后期评估中,隧道的围岩变形均保持在设计的安全范围内,且没有出现大规模的坍塌或滑坡现象。通过综合评估各项技术手段的实际效果,可以看出,软岩变形控制技术的合理应用不仅提升了施工效率,还大大降低了隧道建设过程中因变形引发的安全风险。

4 不同地质条件下的控制技术优化方案

在不同地质条件下,软岩隧道的变形控制面临的挑战各

异,因此需要对控制技术进行有针对性的优化。在软岩层条件下,尤其是软弱土层和复杂地质带中,岩体的强度和稳定性较差,施工时容易发生严重的变形。基于不同地质条件,必须选择合适的支护结构、加固方法和施工方案,以确保隧道的安全性与稳定性。在地质条件较为松软的区域,软岩层中水分渗透性较强,岩土结构松散,承载能力差。对于这类区域,采用喷射混凝土与钢支撑相结合的支护系统是常见的优化方案。喷射混凝土不仅能够提高岩体的局部强度,还能有效减少水分对岩体的侵蚀作用,从而增强隧道的稳定性。钢支撑的安装则可以在开挖过程中为围岩提供支撑,减缓变形速度,确保施工过程中的岩体稳定。在这些区域,注浆加固技术也得到了广泛应用,通过注入水泥浆液、化学浆液等材料,提高软岩的抗剪强度和抗压能力,减少岩体的塑性变形。

对于存在地下水丰富的软岩区域,水对岩体的影响尤为显著。高地下水位会使得软岩的孔隙度增大,从而导致岩体的膨胀和软化。在这种条件下,采取注浆加固和复合支护结构是优化技术方案的关键^[4]。注浆技术能够显著降低岩层的渗透性,防止水分进一步侵蚀软岩,并能通过提升岩体的强度,增强其承载能力。复合支护结构在这种环境下具有更高的适应性,通过结合多种材料如钢筋网、钢板、钢拱架等,不仅能够加强岩体的整体稳定性,还能适应不均匀变形的需求。这样可以在施工过程中最大限度地减少软岩变形带来的风险。

在一些复杂的地质带中,软岩常伴随着断层、裂隙和滑坡等地质现象,这些因素进一步增加了隧道施工的难度。在这种情况下,除了常规的支护与加固措施外,施工过程中还需要加强地质监测和动态调整。采用先进的地质雷达与地震波探测技术对隧道前方的岩层进行实时监测,能够及时发现潜在的地质灾害风险并采取应对措施。通过根据实时数据调整施工方案,可以有效规避可能的变形风险。在遇到断层或裂隙的区域,施工时应采取分段爆破、机械化开挖等技术,减少对围岩的扰动,避免引起大规模的岩体变形。不同地质条件下的软岩隧道变形控制技术优化方案需要结合具体的岩土特性、地下水情况以及施工环境,进行灵活调整。通过采用不同的控制措施与技术手段,可以在保证隧道安全的前提下,提高施工效率,减少不必要的成本和风险。在实际应用中,这些优化方案在多个项目中得到了成功验证,为软岩隧道的稳定施工提供了有力保障。

5 软岩隧道大变形控制技术的未来发展趋势

软岩隧道大变形控制技术的未来发展趋势将主要集中在提高技术的精确性、适应性和智能化方面。随着隧道建设需求的不断增长,特别是在地质复杂、环境恶劣的区域,现有的控制技术面临着新的挑战。为应对软岩隧道大变形的复杂性,未来的发展将朝着更高效、更精细的方向迈进,注重提升技术的多功能性与综合性,以应对日益复杂的地质环境。实时监测技术的进一步创新将是未来软岩隧道变形控制的重要方向。当前

的监测系统已经能够提供隧道变形的基础数据,但随着人工智能、大数据分析等技术的发展,未来的监测系统将变得更加智能化,能够实时进行数据的自动处理与分析,提前预警潜在的变形风险。这些先进的监测系统能够提供更加全面和精确的变形趋势预测,从而在施工过程中进行精准调整,确保隧道施工的安全性。

隧道支护和加固技术的不断进步也将推动软岩隧道大变形控制技术的发展。在支护系统设计中,智能材料的应用将成为未来的一大趋势。通过将传感器、监测设备嵌入支护结构中,可以实现支护系统的自我感知与动态调节^[5]。智能钢筋、复合材料以及自愈合材料的出现,将为隧道支护系统提供更强的适应能力,能够在隧道开挖过程中应对复杂地质条件下的变形问题。这些新型材料不仅能够提高支护系统的稳定性,还能在一定程度上降低维护成本,延长隧道的使用寿命。

随着施工技术的不断发展,机械化与自动化施工也将在软岩隧道变形控制中发挥越来越重要的作用。高效的隧道掘进

机、机器人开挖技术以及自动化爆破技术的应用将大大减少人工操作带来的不确定性。未来,隧道施工将更加依赖于自动化设备进行精确开挖,避免过度扰动围岩,减少变形的发生。开挖技术的不断优化还将进一步减小对岩体的扰动,从而减缓软岩的变形速率,确保施工过程中的岩体稳定。随着软岩隧道变形控制技术不断创新,未来的技术体系将呈现出高度集成化与智能化的特点。通过智能监测、智能支护系统、先进的施工设备及优化设计手段的综合应用,可以更好地应对软岩大变形带来的挑战,从而提高隧道施工的安全性、稳定性和可持续性。

6 结语

软岩隧道大变形的控制技术在不断发展和优化过程中,已逐步实现了更加精确、智能和适应多变地质条件的目标。随着技术的不断进步,尤其是在监测、支护材料以及施工方法上的创新,软岩隧道的施工安全性和稳定性得到显著提升。未来,集成化与智能化的技术系统将更加高效地解决深埋隧道中的变形问题,为隧道工程的可持续发展提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 张凯.软岩深埋单线铁路隧道初支裂损原因及对策研究[J].国防交通工程与技术,2025,23(06):86-90+71.
- [2] 朱正超,孙意,赵何霖,等.城市深埋软岩隧道压力拱演化规律试验研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(09):38-43+50.
- [3] 吕芳,冯斌,滑杰.超高性能混凝土加固深埋软岩隧道的支护结构参数研究[J].混凝土,2025,(06):230-233+239.
- [4] 刘勇,田野,宋玉香,等.深埋软岩隧道纵向塌落拱形态特征及影响因素研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2025,38(02):50-57.
- [5] 罗亦洲,周明,宋文超.深埋软岩公路隧道路面隆起成因及处治方案研究[J].工程技术研究,2025,10(09):131-134.D.