

隧道工程中软弱围岩大变形不稳定性分析与控制策略研究

周建军

北京通达监理有限公司（成都分公司），北京 620500

摘 要： 随着我国基础设施建设的快速推进和西部大开发战略的深入实施，公路、铁路以及地下工程项目如雨后春笋般涌现。在这些工程项目中，许多长大和深埋的隧道工程都陆续上马，频繁穿越高地应力区域，并常遇到软弱围岩的复杂地质条件。由于这些软弱围岩体的存在，隧道工程面临着严重的大变形问题，进而引发一系列地质灾害，威胁工程的安全和稳定。面对这种危险的情况，如何有效的防治和控制软弱围岩的大变形问题变得愈加紧迫和重要。

关 键 词： 软弱围岩；大变形；不稳定性；隧道工程；控制策略

Analysis And Control Strategy Of Weak Surrounding Rock In Tunnel Engineering

Zhou Jianjun

Beijing Tongda Supervision Co., LTD. (Chengdu Branch), Beijing 620500

Abstract： With the rapid development of China's infrastructure construction and the in-depth implementation of the western development strategy, highway, railway and underground engineering projects emerge like bamboo shoots after a spring rain. In these projects, many large and deep buried tunnel projects have been launched, frequently through the high ground stress area, and often encountered the complex geological conditions of weak surrounding rock. Due to the existence of these weak surrounding rock bodies, the tunnel engineering is faced with serious deformation problems, which leads to a series of geological disasters and threaten the safety and stability of the project. In the face of this dangerous situation, how to effectively prevent and control the large deformation of the weak surrounding rock has become more urgent and important.

Keywords： weak surrounding rock; large deformation; instability; tunnel engineering; control strategy

引言

由于我国国土面积中重丘和山岭占据较大比例，加上资金短缺、工程机械化程度不高以及隧道施工技术相对落后等原因，长时间以来，我们难以大规模进行隧道建设。在越过山岭时，通常选择建设蜿蜒曲折的盘山公路。然而，盘山公路的建设对山体造成了很大的扰动，导致山体植被破坏、边坡失稳和水土流失等问题。此外，在雨季和冬季，盘山公路路面易湿滑和结冰，增加了行车的不安全性。相比之下，隧道在缩短线路里程、改善线路特性方面具有显著优势。隧道不仅可以减少线路的弯曲度，提高行车的安全性和舒适性，还能降低对自然环境的破坏。对我国隧道工程建设现状进行分析，发现软弱围岩隧道的设计和施工技术问题仍是当前隧道建设者面临的主要困惑。这些问题包括如何有效地勘察软弱围岩的地质特性，设计合理的支护结构，以及在施工过程中采取适当的措施来控制软弱围岩的大变形和失稳。^[1]

一、软弱围岩大变形不稳定性的影响因素

（一）炭质片岩

引发隧道变形的原因主要与炭质片岩这一特殊的劣质岩体有关。炭质片岩具有独特的地质特性，它能够沿着片理面出现蠕

滑、流变和结构破损等现象。炭质片岩的强度和抗剪强度均较低，且其变形特性持续时间较长，对外界影响的敏感性也非常高。这些特性使其在隧道施工过程中极易发生变形。区域地质构造的复杂性进一步加剧了炭质片岩的变形问题。地质构造活动常常诱发地层结构的变形，导致大量致密接缝的产生。这些接缝和

作者简介：姓名：周建军，出生年月：1978年2月，性别：男，民族：汉，籍贯：四川省眉山市仁寿县，学历：本科，职称：中级工程师，研究方向：高原施工质量控制与软弱围岩大变形隧道工程施工

顺层摩擦镜面的出现，严重破坏了岩体的完整性，削弱了岩体的承载能力。而炭质片岩中常混杂有石英岩脉，这些石英岩脉的存在使得岩体内部结构更加复杂，进一步增加了变形的可能性和不可预测性。在隧道施工过程中，这些地质问题对工程的稳定性和安全性构成了重大威胁。炭质片岩的蠕滑和流变现象会导致隧道围岩发生大规模变形，影响隧道结构的稳定性。低抗剪强度使得围岩在受力时更容易发生剪切破坏，而长时间的变形特性意味着隧道在施工后仍可能面临持续的变形风险。

（二）遇水软化

岩体在遇水后会显著软化，往往在施工过程中以泥浆状形式存在。这种情况下，岩体的强度极低，容易引发塑性流动，导致围岩出现高收敛位移现象。特别是在隧道开挖过程中，炭质片岩的排布常常不均匀，加之其本身具有流变性，这些因素共同作用，使得隧道施工面临更大的挑战。^[2]当隧道开挖深度较大时，炭质片岩的流变性和低强度特性会更加显著，导致围岩顺层受偏压，并且局部节理容易发生破损。这种情况下，隧道围岩的整体稳定性大幅降低，变形风险显著增加。具体而言，炭质片岩在高埋深条件下，由于受力不均匀，容易产生顺层偏压，进一步引发局部节理破损。这些破损点成为隧道围岩变形的薄弱环节，进而引发更大范围的变形和失稳。^[3]

二、控制策略与技术手段

（一）变量问题

在隧道工程中，为应对软弱围岩的变形问题，特别是水平收敛变形，通常需要预留一定的变形量。对于软围岩隧道，预留的变形量一般为30厘米。然而，根据实际围岩的变形情况，对于地质条件相对均匀的地段，可以适当增大两侧的预留变形量，达到50厘米，而拱顶的预留变形量则可保持在30至50厘米之间。在地质条件左右不均匀的地段，需要更加灵活地调整预留变形量。一侧的预留变形量可以增大到70厘米，以应对较大变形的需求，而另一侧则保持不变，继续预留30厘米。这种做法能够更有效地适应不同地质条件下围岩的变形行为，确保隧道结构的安全和稳定。这种预留变形量的策略，目的在于通过合理分配变形量来缓解隧道施工中的压力集中现象。^[4]

（二）增加强度，控制深度

为了有效控制隧道施工中的变形量，可以采取增强钢拱架强度和严格控制开挖深度的措施。首先，在初期支护阶段，可以把钢拱架进行调整，以提高其强度，进而降低围岩的变形量。为进一步降低对围岩的影响，可以采用松动爆破技术，并严格控制每次循环开挖的进尺。在开挖完成后，应立即采用喷射混凝土封闭掌子面，以防止围岩暴露时间过长引发变形或失稳。通过这些措施，能够有效地控制隧道施工过程中围岩的变形量，提高施工的安全性和稳定性。这些技术手段不仅在理论上具有科学依据，而且在实际应用中也已被证明是行之有效的。在增强钢拱架强度方面，选择合适型号的钢材可以提供更强的支撑力，减少变形风险。在爆破施工中，严格控制打眼深度和装药量，结合松动爆破

技术，可以显著降低对围岩的扰动，保持围岩的完整性。同时，及时进行喷射混凝土施工，可以迅速封闭掌子面，防止围岩变形进一步加剧。^[5]

（三）排水设计

在隧道施工过程中，为了有效进行排水设计，可以采用在洞内上台阶处铺设钢管的方式进行初期支护背侧排水。^[6]这种方法能够有效引导和排除隧道内的水分，减轻围岩的压力。同时，还可以在隧道壁后进行注浆施工，并预设小型集水坑，以便及时收集和排除积水。炭质片岩岩体强度较低，通常在施工过程中呈粉末状存在，且遇水后会显著软化，导致围岩的粘结力下降。在这种情况下，云母等滑动结理面的存在进一步削弱了围岩的支持力，导致围岩对初期支护施加的压力增大。为了应对这一问题，需要在排水设计中考虑这些因素，采取有效的措施来降低围岩的含水量，增强其稳定性。通过合理的排水设计，不仅可以减少水对围岩的软化作用，还能有效降低初期支护的压力，提高隧道施工的安全性和稳定性。注浆施工和集水坑的预设，可以在发生水涌时迅速应对，防止水害对隧道工程的影响。这种综合的排水设计方法，能够在复杂地质条件下提供更加可靠的技术支持，确保隧道施工顺利进行。^[7]

（四）增强隧道拱脚的稳定性

为了增强隧道拱脚的稳定性，可以采用锁脚小导管措施。由于炭质片岩强度极低，在这种情况下，锁脚锚杆可以进行全长施工，且减少施工周期。炭质片岩的低强度使得隧道拱脚容易塌方，在处理废渣时容易出现二次失稳的情况。因此，需要使用砂袋及时稳固拱脚，同时预留注浆孔，进行挂网喷锚作业。为了减少围岩松动圈的产生，支护工作完成后应立即开始注浆固结施工。这样可以有效地提高围岩的整体稳定性。此外，需要布设集水坑，以防止隧道某些地段出现露水或渗水现象。为了进一步增强拱脚的稳定性，还应在拱脚边墙处搭设临时支墩，以增加摩擦力，确保结构的稳固。炭质片岩在隧道施工中面临的塌方风险较高，其强度极低，容易在施工过程中发生失稳。^[8]通过使用自进式中空锚杆和砂袋稳固拱脚，可以有效地应对这种挑战。此外，预留注浆孔和挂网喷锚作业，可以进一步提高围岩的稳定性，减少塌方和二次失稳的风险。

（五）监控量测

在隧道施工中，二次衬砌施工通常在围岩初期支护结构稳定后进行。然而，在某些局部地段，围岩收敛量可能会在一定时间内发生二次变形。硬岩在初期支护变形后，很短时间内就可能出现塌方现象。而对于炭质片岩，在初期支护变形后，可以通过注浆方式进行加固处理，以有效控制围岩产生二次扰动，从而防止塌方情况的发生。由于炭质片岩的特殊地质条件，常规数据分析方法无法完全满足其隧道施工的需求。因此，必须加大监控量测的力度，特别是对那些可能影响工序的施工环节进行重点监测。通过综合量测结果，可以合理推算出二次衬砌施工产生的变形总量，避免由于突变引起的塌方事故。加大监控量测力度包括实时监测围岩的变形情况、收集和分析各类监测数据，以便及时调整施工方案。

三、控制理念

（一）刚性控制理念

刚性控制理念在隧道施工中扮演着重要角色，特别是在隧道埋深较浅、地应力较低且围岩条件较差的情况下。此理念通过采用高刚度的初期支护结构，如钢拱架、混凝土衬砌等，以迅速提供强有力的支撑，稳定围岩，防止其发生大规模的变形。刚性支护能够有效地约束围岩，减少其位移，确保隧道断面的完整性和稳定性。此外，刚性控制理念强调对围岩应力的迅速释放和合理分布，避免局部应力集中引起的失稳或塌方。在实际应用中，这种方法不仅能够提高施工效率，还能减少因围岩变形导致的安全隐患和施工难度。通过精确的设计和施工管理，刚性控制理念在复杂地质条件下提供了可靠的技术保障，有助于隧道工程的顺利推进和长期稳定运行。^[9]

（二）柔性控制理念

柔性控制理念在隧道工程中尤为重要，特别是在隧道埋深较大、地应力较高的环境下。此理念通过采用柔性支护结构，如柔性支架、喷射混凝土、土钉墙等，使围岩能够在初期支护阶段允许一定程度的变形，以缓解围岩内的应力集中和释放压力。柔性支护允许围岩在支护体系内实现自平衡，逐步适应新的应力状态，从而减少应力集中引发的围岩失稳或塌方。柔性控制理念还注重围岩与支护结构之间的相互作用，确保支护结构能够适应围岩的位移和变形，提供持续的支撑效果。此外，柔性控制能够在围岩变形初期实现及时调整和修正，通过监测和反馈机制不断优化支护方案。在实际施工中，柔性控制理念不仅能适应复杂多变的地质条件，还能提高施工的安全性和灵活性，降低施工风险和成本。通过精确的设计和施工方法，柔性控制理念为隧道工程的稳定性和安全性提供了可靠的技术支持。

（三）刚柔结合控制理念

刚柔结合控制理念在隧道工程中是对刚性控制理念和柔性控制理念的综合应用，特别适用于地质条件复杂多变的情况。该理念通过在隧道施工中同时运用刚性和柔性支护技术，以最大程度地适应和控制围岩的变形。在初期阶段，采用刚性支护措施，如钢拱架或混凝土衬砌，以快速提供强有力的支撑，稳定围岩，防止大规模的变形和塌方。^[10]这种刚性支护能够有效地限制围岩的初期变形，快速稳定隧道断面，减少施工过程中可能出现的风险。随着施工的推进，柔性支护措施如喷射混凝土、土钉墙等逐渐发挥作用。这些柔性支护方法允许围岩在长期变形过程中逐步适应新的应力状态，减少刚性支护可能引起的二次变形和应力集中。柔性支护还能灵活应对围岩的持续变形，提供持续的支撑和调整，使支护结构与围岩之间保持良好的互动和稳定性。刚柔结合控制理念的核心在于通过结合刚性支护的稳定性和柔性支护的适应性，实现对围岩变形的全面控制。

四、结论

总的来说，在隧道工程的设计和施工过程中，必须深入了解软弱围岩的力学特性和变形机理，科学预测其在高应力条件下的变形行为，制定切实可行的工程对策。同时，合理应用先进的地质勘察技术、优化支护结构设计、有效控制地下水位，以及建立完善的监测与预警系统，都是确保隧道工程顺利实施的重要措施。随着基础建设的快速发展和隧道工程规模的不断扩大，研究并解决软弱围岩大变形问题对于提高工程安全性和可持续性至关重要。这不仅需要理论研究的深入和技术手段的创新，还需在实际工程中不断总结经验，形成行之有效的综合控制策略，为我国基础设施建设提供坚实保障。

参考文献

- [1]王兆林. 大跨径隧道软弱围岩浅埋段变形特性分析 [J]. 江西建材, 2023,(05):306-307+310.
- [2]熊小华, 赵军云, 翁贤杰, 等. 隧道穿越软弱围岩大变形区段初支锁脚大管棚注浆加固效果数值分析 [J]. 公路, 2023,68(04):392-400.
- [3]熊安正. 隧道软弱围岩大断面开挖支护施工工艺研究 [J]. 工程技术研究, 2023,8(17):23-25.
- [4]王兆林. 大跨径隧道软弱围岩浅埋段变形特性分析 [J]. 江西建材, 2023,(05):306-307+310.
- [5]张克宏, 吴红刚, 黄新宇. 甘青隧道软弱围岩大变形控制技术研究 [J]. 科技创新与应用, 2023,13(04):93-97.
- [6]谭忠盛, 李松涛, 王建军, 等. 中老铁路隧道软弱围岩大变形特征试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2021,42(04):98-106.
- [7]刘立明. 大跨度软弱围岩隧道变形控制技术 [J]. 四川建筑, 2021,41(03):208-210+214.
- [8]王伟, 李忠, 沈学军, 等. 软弱围岩隧道洞口浅埋段变形特征及控制措施研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2020,16(09):103-109.
- [9]刘方舒. 松潘隧道软弱围岩大变形特点及机理分析 [J]. 建材发展导向, 2020,18(08):86-88.
- [10]郑寰宇, 梁露, 黄春龙. 隧道软弱围岩大变形的分析与处治 [J]. 西部交通科技, 2019,(05):94-96.