

软岩隧道施工过程中大变形机理与控制技术探讨

周通 刘鹏程 程澍

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司 湖南 长沙 410000

摘要: 本文系统探讨了软岩隧道大变形的核心机理,从软岩的物理力学本质出发,深入剖析了其遇水软化、时间效应(流变)及高地应力环境下的非线性破坏特征,并阐述了围岩-支护结构相互作用失衡是导致大变形发生的直接原因。在此基础上,论文全面梳理并评述了当前主流的大变形控制技术体系,包括“主动”与“被动”相结合的支护理念、以新奥法(NATM)为核心的动态设计与信息化施工方法,以及具体的工程措施如超前预加固、强韧支护结构、预留变形量、分步开挖与及时封闭等。研究表明,对软岩大变形机理的深刻理解是制定有效控制措施的前提,而采用“防、放、抗、让”相结合的系统性、动态化控制策略,是确保软岩隧道工程安全与成功的关键。

关键词: 软岩隧道;大变形;变形机理;流变特性;控制技术

引言

随着我国基础设施建设向西部山区、深部地层及复杂地质区域不断延伸,隧道工程所面临的地质条件日益严峻。其中,穿越泥岩、页岩、千枚岩、炭质板岩、断层破碎带等软弱围岩地层的隧道工程占比显著增加。这类软岩具有强度低、胶结差、遇水易软化崩解、流变性显著等典型特征,在高地应力、高地下水压等不利因素耦合作用下,极易在隧道开挖后发生持续、剧烈且难以收敛的变形,即“大变形”灾害。软岩隧道大变形不仅会导致初期支护结构(如钢拱架扭曲、喷射混凝土开裂剥落)甚至二次衬砌的严重损毁,还可能引发掌子面失稳、塌方等地质灾害,造成工期严重延误、工程成本急剧攀升,甚至威胁施工人员生命安全。例如,兰渝铁路、拉林铁路、川藏铁路等国家重大工程中,均曾因软岩大变形问题遭遇前所未有的挑战。因此,深入探究软岩隧道大变形的发生机理,并发展行之有效的控制技术,已成为当前隧道与地下工程领域亟待解决的核心科学与技术难题。

1 软岩的定义、分类与基本特性

理解软岩隧道大变形,需先明确“软岩”内涵,它是工程地质概念,指在工程力作用下能产生显著塑性或流变变形的岩石。按成因和力学行为,软岩可分为低强度软岩(如泥岩等,单轴抗压强度通常低于30MPa,内部结构面发育、力学强度低)、膨胀性软岩(富含亲水性粘土矿物,吸水后体积膨胀)、高应力软岩(本身强度尚可,高地应力下屈服强度易被突破)和复合型软岩(兼具多种特性,如炭质千枚岩)^[1]。软岩低强度与低弹性模量,使其抵抗外力弱、变形模量小;有强烈流变性,开挖扰动结束后变形仍会持续;遇水会软化/崩解,施工中的爆

破等因素会加速这一过程;还具有各向异性与非均质性,易沿软弱结构面剪切滑移,这些特性决定了其大变形的必然性。

2 软岩隧道大变形机理分析

2.1 围岩应力重分布与塑性区形成

隧道开挖打破了原始地应力场的平衡状态,围岩应力发生重分布。在洞室周边形成应力集中区,切向应力显著增大。对于软岩而言,其屈服强度较低,当重分布后的应力超过其屈服强度时,围岩便从弹性状态进入塑性状态,形成塑性松动圈(或称塑性区)。塑性区的范围和深度是决定变形量级的关键。根据芬纳(Fenner)-卡斯特纳(Kastner)理论,塑性区半径与原岩应力、支护反力、岩体粘聚力和内摩擦角密切相关。对于软岩,和值较小,导致极大。在高地应力条件下,值很高,进一步加剧了塑性区的发展。这个巨大的塑性区是后续持续变形的能量来源和物质基础。

2.2 软岩流变效应的主导作用

与瞬时弹性或塑性变形不同,软岩的大变形往往是一个长期、持续的过程,这正是其流变特性的体现。流变效应在大变形中扮演着核心角色:初始蠕变阶段:开挖后,围岩应力迅速重分布,塑性区形成,产生较大的瞬时变形。稳定蠕变阶段:在支护结构提供的约束下,变形速率逐渐减缓,趋于稳定。理想的支护设计应使围岩尽快进入此阶段。加速蠕变阶段:若支护强度不足或刚度不匹配,无法有效抑制围岩变形,围岩内部微裂纹会不断扩展、贯通,导致变形速率再次加快,最终可能导致支护结构失稳破坏。软岩的流变模型(如Burgers模型、西原模型等)能够较好地描述这一全过程。在实际工程中,由于地下水、施工扰动等因素的影响,软岩的

流变参数（如粘滞系数）会发生劣化，使得流变变形更为剧烈和不可控。

2.3 遇水软化与损伤劣化的耦合效应

水是诱发和加剧软岩大变形的“催化剂”。施工过程中，无论是天然地下水还是施工用水，一旦与软岩接触，便会引发一系列物理化学反应：一是物理软化：水填充孔隙和裂隙，产生孔隙水压力，有效应力降低，同时润滑结构面，降低摩擦阻力。二是化学软化：水与粘土矿物发生水化、水解等反应，改变矿物成分和微观结构，导致岩石强度永久性损失。这种遇水软化过程伴随着围岩的损伤演化^[2]。开挖扰动造成的初始损伤，在水的作用下会加速扩展，形成新的损伤区，进一步降低围岩的整体强度和刚度，形成“开挖扰动→损伤→遇水软化→强度降低→变形加剧→损伤扩展”的恶性循环。

2.4 围岩-支护结构相互作用失衡

隧道的稳定性最终取决于围岩与支护结构共同组成的承载体系。大变形的发生，本质上是该体系失衡的表现。①“抗”而不“让”：传统的刚性支护理念试图通过极高的支护刚度来完全约束围岩变形。然而，对于流变性强的软岩，这种“硬抗”方式会使支护结构过早承受巨大的、持续增长的变形压力，极易导致钢架扭曲、混凝土开裂，最终丧失承载能力。②“让”而不“抗”：反之，如果支护过于柔弱，无法提供必要的约束力，围岩将自由变形，塑性区无限制扩张，同样会导致失稳。因此，理想的支护策略应在初期允许围岩发生一定程度的、可控的变形（“让压”），以释放部分高地应力，使围岩应力状态得到调整和优化；同时，在关键时期又能提供足够强大的支撑力（“抗压”），阻止变形进入加速阶段，维持围岩的长期稳定。这种“刚柔并济”的动态平衡是控制大变形的核心思想。

3 软岩隧道大变形控制技术体系

3.1 核心理念：“主动”与“被动”相结合

成功的控制策略必然是以主动支护为主，被动支护为辅，两者有机结合。主动支护是指在围岩发生显著变形之前，通过超前地质预报、超前预加固等手段，预先改善围岩的物理力学性质或建立超前承载拱，将变形控制在萌芽状态。这是最经济、最安全的控制方式，因为它从根本上改变了围岩的受力环境，使其具备更强的自稳能力。而被动支护则是指在围岩已经发生变形后，依靠支护结构自身的强度和刚度来抵抗变形压力^[3]。在软岩大变形中，纯粹的被动支护往往是事倍功半的，因为它是在围岩已经劣化、能量已经释放的情况下进行“亡羊补牢”，不仅成本高昂，而且效果难以保证。因此，现代

软岩隧道工程强调将工作重心前移，通过主动干预来规避风险。

3.2 方法论基础：新奥法（NATM）与信息化施工

新奥法强调充分利用围岩的自承能力，通过监测数据指导设计和施工。在软岩大变形控制中，其精髓体现在动态设计与信息化施工两个方面。动态设计意味着初始设计仅为预案，必须根据现场揭示的真实地质条件和监测反馈的变形信息，实时调整支护参数（如钢架间距、喷层厚度、锚杆长度与密度等），使设计始终与工程实际保持同步。信息化施工则要求建立完善的监控量测体系，对拱顶沉降、周边收敛、围岩压力、钢架内力等关键指标进行高频次、高精度监测。通过对这些海量监测数据的回归分析、趋势预测和反演计算，工程师可以提前预警大变形风险，精准判断围岩的稳定状态，从而为决策提供科学依据，实现从“经验驱动”到“数据驱动”的转变。

3.3 具体工程控制措施

3.3.1 超前地质预报与预加固

超前地质预报与预加固是主动控制的第一道防线。在开挖前，必须采用TSP、地质雷达、超前水平钻探等多种手段，准确探明掌子面前方的岩性、构造、地下水等情况，为预加固方案提供可靠依据。在此基础上，实施针对性的超前预加固措施至关重要。对于一般的软弱围岩，常采用超前小导管或管棚注浆，在开挖轮廓线外形成一个加固圈，以提高围岩的整体性和强度，同时起到堵水、止水作用。对于富水断层破碎带等极端不良地质，往往需要采用超前帷幕注浆，通过大范围、深孔注浆，在隧道周围形成一个封闭的防水、加固帷幕，彻底隔绝地下水对围岩的侵蚀。在极软弱、富水的地层中，水平旋喷桩则能形成高强度的柱状固结体，提供强有力的超前支撑，为后续开挖创造安全条件。

3.3.2 强韧、可缩的初期支护结构

初期支护是控制变形的主力军，其设计理念需从“刚性”转向“强韧性”。首先，应采用高强度、可缩的钢架，如H型钢、U型钢等代替传统的工字钢，其截面惯性矩更大，抗弯、抗扭能力更强。更重要的是，通过设置可缩接头（如U型钢的搭接结构），允许钢架在巨大压力下发生可控的、均匀的收缩变形，从而吸收大量的变形能量，避免因应力集中而导致的突然失稳。其次，喷射混凝土应采用厚层、纤维增强的形式。增加喷层厚度以提高整体刚度，同时掺入钢纤维或合成纤维，能显著改善喷射混凝土的韧性、抗裂性和抗冲击性能，防止其在围岩持续变形过程中过早开裂、剥落，从而保证支护结构的整体

性和耐久性。此外,系统锚杆的布置也需优化,在软岩中,普通砂浆锚杆效果有限,应普遍采用全长粘结的中空注浆锚杆,通过高压注浆,既能加固锚固段围岩,又能封堵裂隙,改良地层,形成更可靠的锚固体系。

3.3.3 合理预留变形量与二次衬砌时机

合理预留变形量与把握二次衬砌施作时机是控制大变形的关键环节。在设计开挖轮廓线时,有意识地外放一定尺寸(如30-80cm,甚至更大),为围岩的初期流变变形预留充足的空间。这一举措可以有效避免初期支护因变形受挤压而破坏,是“让压”思想的具体体现。预留量的大小并非随意确定,而需基于详细的地质条件评估、历史工程经验和实时监测数据进行综合研判^[4]。与此同时,二次衬砌作为永久承载结构,其施作时机必须谨慎把握。不宜过早施作,否则会使二次衬砌承受不必要的后期流变压力,导致开裂。一般应在围岩变形速率明显减缓(如日变形速率小于0.5mm/d或0.2mm/d),并通过监测数据分析确认其已趋于稳定后,再进行浇筑,以确保结构的长期安全。

3.3.4 优化开挖工法与快速封闭成环

优化开挖工法与快速封闭成环是控制围岩扰动、维持稳定的重要手段。针对大断面软岩隧道,应坚决放弃全断面开挖法,转而采用CD法、CRD法或双侧壁导坑法等分步开挖工法。这些方法通过将大断面分解为多个小断面依次开挖,显著减少了单次开挖对围岩的扰动范围和应力释放强度,有利于控制变形。在施工组织上,必须坚持“短进尺、快循环”的原则,严格控制每循环的开挖进尺(通常不超过1-1.5榀钢架间距),并做到“快

挖、快支、快封闭”。其中,仰拱(或临时铺底)的及时施作尤为关键。初期支护尽早闭合成环,能有效约束围岩的底部鼓胀变形,将原本的平面受力状态转变为三维空间受力状态,形成完整的、高效的承载环,从而极大提高整个支护体系的整体稳定性和承载能力。

4 结语

软岩隧道大变形是工程地质、岩石力学与施工技术交叉领域的复杂难题,其核心机理在于软岩特性与高地应力环境耦合致围岩-支护结构体系动态失衡,有效控制需采用系统工程方法。结论有:机理认知是前提,要理解软岩相关规律与机制;主动控制是关键,超前预报与预加固可防范大变形;动态设计是保障,依托信息化施工实现设计与施工实时优化;强韧支护是核心,初期支护结构要兼具多种特性;综合施策是路径,需有机结合各环节形成闭环控制体系。展望未来,将结合大数据等构建智能预警预测模型,实现“事前预控”;研发新型高性能智能支护材料;探索先进可缩、让压支护结构形式;深化多场耦合数值模拟,为设计提供更精准理论支撑。

参考文献

- [1]杨银桂.软岩富水大断面隧道开挖施工围岩变形模拟研究[J].建筑技术开发,2025,52(11):33-35.
- [2]王安民,李佳龙,江国伟,等.隧道软岩大变形处治技术[J].公路,2025,70(10):417-425.
- [3]闫江.高地应力软岩变形环境下隧道开挖技术及施工风险分析[J].建筑技术开发,2025,52(10):78-81.
- [4]何伊琦.高地应力软岩隧道大变形控制技术研究[J].科技创新与应用,2025,15(26):99-102.