

深埋高应力隧道软岩大变形开挖补偿控制研究

柴应诏

中国水利水电第七工程局有限公司 四川 成都 610000

摘要：本文聚焦深埋高应力隧道软岩大变形开挖补偿控制研究。先分析软岩特性、高应力环境影响及变形机理，接着探讨常用开挖方法及其适用性、开挖对变形的影响与方案优化思路。随后阐述支护结构、超前预加固、监控量测与反馈等补偿控制技术。最后通过两个工程案例，介绍不同隧道软岩大变形控制实践与治理措施，为深埋高应力隧道软岩施工提供理论与技术支持。

关键词：深埋隧道；高应力软岩；大变形控制

1 深埋高应力隧道软岩大变形的机理分析

1.1 软岩特性分析

软岩是一种具有特殊工程性质的岩石，其定义涵盖了多种特征。从力学性质上看，软岩通常单轴抗压强度较低，一般低于25MPa，这使得它在受力时容易发生变形和破坏。软岩的成分复杂，常含有黏土矿物，如蒙脱石、伊利石等，这些矿物具有吸水膨胀、失水收缩的特性，导致软岩的体积随含水率变化而显著改变，进而影响其力学性能。软岩的结构特征也十分独特，往往具有层理、节理、裂隙等不连续面。这些结构面的存在破坏了岩石的整体性，降低了岩石的强度，成为软岩变形的薄弱环节^[1]。在受力过程中，应力容易在这些结构面处集中，引发裂隙的扩展和贯通，最终导致软岩的破坏和变形。软岩的各向异性明显，不同方向的力学性质差异较大，这给隧道工程的设计和施工带来了极大的挑战。

1.2 高应力环境影响

深埋隧道处于高应力环境中，地应力主要由上覆岩层的自重应力和地质构造应力组成。随着隧道埋深的增加，上覆岩层厚度增大，自重应力也随之增大。同时，地质构造运动产生的构造应力在深部地层中可能更为显著，使得深埋隧道所处的高应力环境更加复杂。高应力对软岩的作用是多方面的。首先，高应力会直接导致软岩的压缩变形，使软岩的孔隙和裂隙被压缩，体积减小。当应力超过软岩的弹性极限时，软岩将进入塑性变形阶段，产生不可恢复的变形。其次，高应力会加速软岩的蠕变过程，蠕变是指软岩在恒定应力作用下，变形随时间逐渐增加的现象。在深埋高应力环境下，软岩的蠕变速率加快，变形量增大，严重影响隧道的稳定性。另外，高应力还会促使软岩中的裂隙扩展和贯通，降低软岩的强度，进一步加剧软岩的变形和破坏。

1.3 变形机理研究

深埋高应力隧道软岩大变形是多种因素共同作用的结果，其变形机理主要包括以下几个方面。（1）应力调整与重分布是软岩变形的重要原因之一。隧道开挖后，原始地应力场被破坏，围岩应力重新调整和分布。在高应力环境下，软岩围岩的应力集中现象更为明显，当应力超过软岩的承载能力时，就会发生塑性变形和破坏，导致围岩向隧道内变形。（2）软岩的流变特性也是大变形的重要机理。软岩具有明显的流变性质，包括蠕变、松弛和弹性后效等。在长期高应力作用下，软岩的蠕变变形不断积累，最终导致隧道围岩的大变形。此外，软岩的吸水膨胀特性也会加剧变形。在地下水的作用下，软岩中的黏土矿物吸水膨胀，使软岩体积增大，产生膨胀压力，进一步推动围岩向隧道内变形。（3）地质构造运动对软岩变形也有重要影响。深埋隧道往往穿越复杂的地质构造区域，如断层、褶皱等。地质构造运动产生的应力场与原始地应力场相互叠加，使软岩围岩的应力状态更加复杂，容易引发软岩的变形和破坏。

2 深埋高应力隧道软岩开挖技术分析

2.1 常用开挖方法及其适用性

在深埋高应力隧道软岩施工中，常用的开挖方法有全断面法、台阶法、分部开挖法等。全断面法是一次开挖成型的施工方法，具有工序简单、施工速度快、便于机械化作业等优点。但对于深埋高应力软岩隧道，全断面法开挖面积大，对围岩的扰动也大，容易引发围岩应力的急剧释放，导致围岩大变形和坍塌等事故。因此，全断面法一般适用于围岩条件较好、自稳能力较强的软岩隧道。台阶法是将隧道断面分成上下两个或多个台阶进行开挖的方法。该方法可以减小每次开挖的面积，降低对围岩的扰动，有利于围岩的稳定。台阶法又可分为长台阶法、短台阶法和超短台阶法。长台阶法适用于围岩较稳定的情况，短台阶法和超短台阶法则适用于围岩

自稳能力较差的深埋高应力软岩隧道^[2]。分部开挖法是将隧道断面分成多个部分，按一定顺序依次开挖的方法，如环形开挖预留核心土法、中隔壁法（CD法）、交叉中隔壁法（CRD法）等。分部开挖法可以进一步减小开挖对围岩的扰动，通过及时支护，能够有效地控制围岩变形，适用于围岩条件极差、自稳能力很弱的深埋高应力软岩隧道。

2.2 开挖过程对软岩变形的影响

开挖过程对软岩变形的影响主要体现在几个方面。开挖顺序和开挖步距对软岩变形有重要影响，不合理的开挖顺序和过大的开挖步距会导致围岩应力集中和变形不协调，增加围岩失稳的风险。爆破开挖产生的振动对软岩变形也有显著影响，爆破振动会使软岩中的裂隙扩展和贯通，降低软岩的强度和完整性，导致围岩变形增大。特别是在深埋高应力环境下，软岩本身就处于临界稳定状态，爆破振动可能成为引发围岩失稳的导火索。开挖速度也会影响软岩变形。开挖速度过快，围岩应力释放不及时，支护结构不能及时发挥作用，容易导致围岩变形过大；开挖速度过慢，则会延长施工工期，增加围岩暴露时间，同样会加剧围岩变形。

2.3 开挖方案的优化思路

为了有效控制深埋高应力隧道软岩开挖过程中的变形，需要对开挖方案进行优化。根据围岩条件和工程要求，合理选择开挖方法。对于围岩条件较好的软岩隧道，可以采用全断面法或台阶法，以提高施工效率；对于围岩条件较差的软岩隧道，应优先选择分部开挖法，确保围岩稳定。优化开挖顺序和开挖步距。采用合理的开挖顺序，使围岩应力逐步释放，避免应力集中和变形不协调。根据围岩的变形特性，确定合适的开挖步距，确保在围岩变形未达到危险值之前及时进行支护。控制爆破振动，采用光面爆破或预裂爆破技术，减少爆破对围岩的扰动。合理选择爆破参数，如炸药用量、装药结构、起爆顺序等，降低爆破振动强度。加强施工监测，在开挖过程中，实时监测围岩的变形情况，根据监测结果及时调整开挖方案和支护参数，确保施工安全。

3 深埋高应力隧道软岩大变形补偿控制技术

3.1 支护结构补偿控制技术

支护结构作为控制深埋高应力隧道软岩大变形的关键手段，发挥着不可替代的作用。常见的支护结构涵盖锚杆、钢架以及喷射混凝土等。锚杆凭借其独特的锚固作用，能将围岩与支护结构紧密连接成一个有机整体，显著提升围岩的自稳能力。在高应力软岩隧道这种复杂环境下，采用高强度、长锚杆十分必要，如此可充分挖

掘锚杆的支护潜能。同时，锚杆的间距和排距设置也至关重要，需依据围岩的具体特性、应力状态等因素综合考量，确保锚杆能构建起有效的支护体系，全方位保障围岩稳定。钢架具备强大的承载能力，能迅速承受围岩压力，有效控制围岩变形。在软岩大变形隧道中，可缩性钢架是常用之选，像U型钢可缩性支架等。这类钢架的独特之处在于，能在围岩变形过程中通过自身压缩变形释放部分能量，避免因围岩压力过大而遭受破坏，为隧道施工安全提供可靠保障。喷射混凝土可封闭围岩表面，防止围岩风化和剥落。而且，它与锚杆、钢架等支护结构协同作用，形成联合支护体系，大幅提升支护效果。在高应力软岩隧道中，采用早强、高强喷射混凝土，能使其尽快发挥支护作用，及时稳定围岩^[3]。

3.2 超前预加固补偿控制技术

超前预加固技术是在隧道开挖前对前方围岩进行加固的关键举措，旨在提高围岩强度和稳定性，减少开挖过程中的变形。常用的超前预加固方法主要有超前小导管注浆和超前管棚支护等。超前小导管注浆是在隧道开挖轮廓线外一定范围内钻孔，插入小导管后，通过小导管向围岩注入水泥浆或化学浆液。这些浆液能使围岩胶结固化，增强围岩的强度和自稳能力。该方法尤其适用于软弱破碎围岩，可有效控制围岩变形，防止坍塌事故发生，为隧道开挖创造安全条件。超前管棚支护则是在隧道开挖前，沿开挖轮廓线外按一定间距布置钢管，形成管棚支护体系。在隧道开挖过程中，管棚可承受部分围岩压力，减少围岩变形，为后续施工提供安全空间。该技术适用于极软弱围岩、断层破碎带等不良地质条件，能有效应对复杂地质带来的施工难题，保障隧道施工的顺利进行。

3.3 监控量测与反馈补偿控制

监控量测在深埋高应力隧道软岩大变形控制中占据重要地位。通过实时监测围岩的变形、应力、应变等关键参数，能够及时、准确地掌握围岩的稳定状态，为施工决策提供科学依据。常用的监控量测项目丰富多样，包括拱顶下沉、周边位移、地表下沉、围岩内部位移、锚杆轴力、钢架应力等。在监测过程中，必须严格按照监测规范操作，从监测点的布置、仪器的安装调试到数据的采集记录，每个环节都要严谨细致，确保监测数据的准确性和可靠性。依据监测结果，要及时反馈并调整施工方案和支护参数。若监测数据显示围岩变形过大或变形速率过快，应立即采取加强支护、调整开挖方法等有效措施，确保施工安全。通过对监测数据的深入分析和总结，不断优化施工工艺和支护设计，提高施工效率

和工程质量，实现深埋高应力隧道软岩大变形控制的最优化效果。

4 深埋高应力隧道软岩大变形开挖补偿控制工程案例分析

4.1 案例一：某深埋铁路隧道软岩大变形控制实践

某深埋铁路隧道在穿越软岩地层时，面临着极为严峻的挑战。该隧道埋深极大，地应力处于较高水平，复杂的地质条件如同隐藏在施工进程中的“定时炸弹”。在隧道开挖过程中，软岩大变形问题毫无征兆地爆发，围岩收敛变形急剧增大，竟达到数十厘米之巨。这一状况使得隧道空间被严重挤压，施工安全岌岌可危，进度也受到了极大的阻碍，每一米的推进都变得异常艰难。为有效应对这一棘手难题，施工团队迅速采取了一系列开挖补偿控制措施。在开挖方法上，经过审慎研究，决定采用分部开挖法。将隧道断面细致地分成多个部分，按照科学合理的顺序依次开挖。如此一来，每次开挖对围岩的扰动范围被大幅减小，围岩的自我稳定能力得以充分发挥，有效降低了变形风险。在支护结构方面，构建了高强度、多功能的联合支护体系。选用高强度锚杆，深入围岩内部，像无数根坚固的“钢筋”将松散岩体紧紧凝聚；可缩性钢架则具有独特的自适应能力，能根据围岩变形进行灵活调整；早强喷射混凝土迅速封闭围岩表面，形成一道坚实的防护屏障。三者相辅相成，大大提高了支护结构的承载能力和适应性。采用超前小导管注浆技术对前方围岩进行预加固，如同为隧道开挖提前铺设了一层“安全垫”，显著提高了围岩的强度和稳定性。在施工过程中，还加强了监控量测工作，安排专人实时监测围岩的变形情况。根据监测结果，及时、精准地调整支护参数和施工方法，确保施工安全始终处于可控状态。通过这些综合措施，成功有效地控制了软岩大变形，保障了隧道的顺利施工。

4.2 案例二：某水利深埋隧道软岩大变形治理案例

某水利深埋隧道在推进过程中，遭遇了棘手的软岩大变形问题。该隧道所处地质条件极为复杂，软岩中富含大量黏土矿物，这类矿物吸水膨胀性极强，在地下水的侵蚀下，围岩变形情况愈发严重，给施工带来了巨大挑战。为有效治理软岩大变形，施工团队采取了一系列

综合措施。在开挖环节，优化开挖方案至关重要。采用短台阶法开挖，通过缩短台阶长度，减小开挖面积和扰动范围，降低了对围岩的破坏程度，为后续支护创造有利条件^[4]。支护方面，构建了多重防护体系。运用长锚杆深入围岩内部，将松散岩体紧密连接；加厚喷射混凝土，形成坚固的表层防护；可缩性钢架则能根据围岩变形进行自适应调整，三者联合支护，显著增强了支护结构的整体性和稳定性。同时，采用超前管棚支护技术，在隧道开挖前，在掌子面沿隧道轮廓线打入管棚，形成一个坚固的支护棚架，有效阻挡了上方围岩的坍塌和变形。另外，加强排水措施也不容忽视。通过合理设置排水管和排水沟，构建起完善的排水系统，能够及时排除隧道内的地下水，降低软岩的含水率，从根源上减少软岩的吸水膨胀变形。通过以上全方位、多层次的综合治理措施，成功攻克软岩大变形难题，确保水利隧道的施工质量和安全，为工程的顺利推进奠定坚实基础。

结束语

深埋高应力隧道软岩大变形开挖补偿控制是复杂且关键的工程课题。本文从机理分析、开挖技术到补偿控制技术展开研究，并结合实际工程案例验证措施有效性。然而，软岩大变形受多种因素影响，控制技术仍需不断完善。未来应持续深入研究，结合新技术、新方法，提升控制水平，保障深埋高应力隧道软岩施工的安全与质量，推动隧道工程领域的发展。

参考文献

- [1] 郑勇,郭平,王丽军,等.云临高速大亮山隧道高地应力软岩大变形处治关键技术[J].隧道建设(中英文),2023,43(2):437-450.
- [2] 谭忠盛,赵金鹏,张宝瑾.超大埋深软岩隧道大变形机理及控制技术研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(12):2307-2315.
- [3] 朱建林,王立川,刘志强,等.考虑流变效应的软岩大变形隧道多层支护作用机理分析[J].现代隧道技术,2024,61(3):18-24.
- [4] 梁斌,李文杰.高地应力富水软岩铁路隧道变形机理及施工控制措施[J].科学技术与工程,2022,22(21):9364-9371.