

复杂软岩超长浅埋大断面隧道控制开挖 与支护关键技术研究

吴旺, 周祥

浙江交工金筑交通建设有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ETQM.2025100037

摘 要 : 本文通过综合运用理论分析、数值模拟以及现场监测等手段, 深入研究了该类隧道的控制开挖与支护关键技术。首先, 对浅埋偏压软弱围岩隧道洞口段施工技术进行剖析, 提出了针对性的施工策略; 其次, 探究大断面软岩隧道开挖围岩卸荷机制, 揭示围岩应力应变的变化规律; 再者, 对大断面软岩隧道变形特性进行分析并构建预测分级体系; 同时, 研究大断面软岩隧道支护结构施工期力学行为, 为支护设计提供理论支撑; 最后, 整合各项技术形成复杂软岩超长浅埋大断面隧道控制开挖与支护施工技术体系。研究成果对于指导同类隧道工程的设计与施工, 提高工程安全性与经济性具有重要意义。

关 键 词 : 复杂软岩; 超长浅埋; 大断面隧道; 控制开挖; 支护技术

Research on Key Technologies for Controlled Excavation and Support of Complex Soft Rock Ultra long Shallow Buried Large Section Tunnels

Wu Wang, Zhou Xiang

Zhejiang Jiaogong Jinzhu Transportation Construction Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : This article deeply studies the key technologies of controlled excavation and support for this type of tunnel through the comprehensive application of theoretical analysis, numerical simulation, and on-site monitoring. Firstly, an analysis of the construction technology for the entrance section of shallow buried and biased weak surrounding rock tunnels was conducted, and targeted construction strategies were proposed; Secondly, explore the unloading mechanism of surrounding rock during excavation of large section soft rock tunnels, and reveal the variation law of surrounding rock stress-strain; Furthermore, analyze the deformation characteristics of large section soft rock tunnels and construct a predictive grading system; At the same time, studying the mechanical behavior of the support structure during the construction period of large section soft rock tunnels provides theoretical support for support design; Finally, integrate various technologies to form a complex soft rock ultra long shallow buried large section tunnel control excavation and support construction technology system. The research results are of great significance for guiding the design and construction of similar tunnel projects, improving engineering safety and economy.

Keywords : complex soft rock; ultra long shallow burial; large section tunnel; control excavation; supporting technology

引言

在交通基础设施持续建设的过程当中, 复杂软岩且超长、浅埋以及大断面的隧道工程逐渐增多。这类隧道, 由于围岩性质较差、埋深相对较浅、断面尺寸大, 所以在施工时, 就会碰到诸如围岩失稳、变形不好控制等一系列棘手的难题。以往常规的施工技术, 在面对这些复杂情况时存在着诸多局限, 所以当下迫切地需要探究创新型的控制开挖以及支护技术。本文把多学科的相关理论综合加以运用, 同时将数值模拟和现场实践紧密结合, 以突破现有的技术瓶颈, 从而为同类型隧道工程能够安全且高效地开展建设, 打下坚实的理论与实践基础。

一、浅埋偏压软弱围岩隧道洞口段施工技术

（一）工程特性分析

浅埋偏压软弱围岩隧道的洞口段呈现出独特的工程特性。从地质层面来看，其围岩强度较低，完整性欠佳，大多是呈现破碎状态的岩体或者土体，如常见的软岩、砂土以及粉质土等等，这类围岩的抗剪强度以及承载能力均较为有限。浅埋致使隧道顶部的覆盖层相对较薄，难以形成具备足够承载作用的拱，围岩压力便会直接施加于支护结构之上。而偏压，是因为地形、地质构造等因素，使得隧道两侧的围岩压力出现不平衡的状况，往往是一侧的压力显著地大于另一侧，进一步加大了隧道结构在受力复杂程度^[1]。例如，在山区的隧道当中，一侧是山体，而另一侧则是经由填方或者挖方所形成的临空面，这种情形造成了明显的偏压。

（二）施工技术要点

就上述这些特性而言，在洞口段展开进洞施工时，多个关键技术需要加以把握。在洞内进行超前支护时，常用到的手段有超前小导管注浆，即通过注入水泥浆或者化学浆液的方式，填充存在的空隙，以此让围岩的稳定性能得以增强；管棚支护是沿着轴线打入大直径的钢管，从而形成类似棚架的结构，这样就能承托住上部的围岩，防止出现坍塌。而在洞外的地表部分，要借助削坡以及运用锚杆、锚索、挡土墙等相关措施对边仰坡进行加固处理，避免因开挖作业而引发滑坡或者坍塌等危险状况。开挖的方法则要依据围岩的具体条件做出选择。若遇到极软弱的围岩，要采用双侧壁导坑法、CRD法等这类分步开挖的方式，如此可以减少对围岩的扰动；若围岩条件相对较好，那么可以选择台阶法，它能兼顾施工速度和变形控制。另外，初期支护工作需要及时开展，要采用喷混、钢拱架、钢筋网联合的形式，其中喷混能够起到封闭表面防止松动的作用，钢拱架可以承担重量，钢筋网则能抵抗开裂。等到初期支护稳定之后，再施作二次衬砌，增强工程的耐久性。在施工的各个环节当中，都要严格遵守相关的规范要求，确保施工过程安全。

二、大断面软岩隧道开挖围岩卸荷机制

（一）理论基础

岩体卸荷力学以及围岩变形空间效应理论，构成了探究大断面软岩隧道开挖时围岩卸荷机制的关键根基。就岩体卸荷力学而言，在隧道开挖的进程当中，围岩原本所具有的应力状态会被打破，应力出现重新分布的情况，使得围岩出现卸荷变形现象。这种变形并非仅仅取决于岩体自身的力学性质，实际上，开挖方式、开挖顺序等一系列施工因素，也都和它有着紧密的关联。围岩变形的空间效应主要体现在围岩变形在空间维度上表现出显著的非均匀性特征以及明显的时效性特征，也就是说，不同位置的围岩，其变形程度以及速率都是存在差别的，并且这种变形还会顺着时间的流逝持续不断地发展。

（二）数值模拟研究

借助 FLAC3D 构建大断面软岩隧道的三维数值模型，能够很

好地对围岩卸荷机制展开研究。在该模型里，要精准地对诸如台阶法、CD 法等不同开挖方法，还有支护时机以及参数等各类工况加以模拟，通过监测点追踪拱顶、边墙等关键部位的应力以及位移所发生的变化。模拟的情况表明，在开挖开始时，围岩应力会迅速地释放，拱顶与边墙会有应力集中的现象出现，并且会随着开挖的不断推朝着深部转移；从位移方面来看，拱顶下沉的情况以及边墙收敛的情况都比较明显，在开挖面附近的变形速率可观。通过对分析结果的研究，能够清楚地了解围岩应力应变在空间上的变化过程，揭示出在不同施工条件之下荷载释放的机制，为理解失稳机理以及优化施工和支护设计给予一定的参考^[2]。

三、大断面软岩隧道变形特性及预测分级

（一）变形特性分析

典型的软岩隧道存在着多种多样的变形破坏模式。就水平层状软岩隧道来讲，因为层面所产生的影响，隧道的顶部与底部是较易出现拉伸破坏，而其边墙则是有发生剪切破坏的可能性，致使隧道断面的形状出现改变，呈现出顶沉、底鼓以及边墙内挤等一系列的现象。斜倾软岩隧道以及陡倾软岩隧道，它们的变形破坏情况更为繁杂。除了上述所提到的破坏形式之外，还极有可能因为岩层的倾斜而引发偏压效应，从而使得隧道的一侧变形程度明显要比另一侧更大。通过岩石力学试验能够发现，软岩有着变形模量比较低、泊松比偏大的特点，在受到力的作用时就很容易产生相对较大的塑性变形。与此同时，软岩所具有的流变特性也较为显著，即便在恒定荷载持续作用的情况下，它的变形也会随着时间的推移而不停地发展变化，给隧道的长期稳定性带来了相当大的挑战。

（二）预测分级指标构建

为了能切实对大断面软岩隧道的变形情况做出有效预测，提出大变形预测分级指标，此指标适用于处在高地应力环境下的层状软岩隧道。该指标把多个因素都综合加以考量，如围岩所具有的物理力学参数，包含岩石强度、变形模量以及泊松比等；隧道自身的几何参数，比如断面尺寸、埋深；地应力的大小以及其方向情况；施工因素如开挖采用的方法、支护选择的时机等等。经过对大量工程案例展开细致分析以及进行数据的详尽统计之后，建立各因素和隧道变形之间存在的量化关系，并且以数学模型或经验公式的形式呈现。例如，可以运用多元线性回归分析方法，构建回归方程，在方程里把围岩强度、地应力大小以及开挖方法作为自变量，而将隧道变形量作为因变量。依据所提出的这个预测分级指标，能够把隧道变形划分成不同的等级，如轻微变形、中等变形以及严重变形等。针对这些不同的变形等级，分别制定与之相对应的预警机制以及处理措施，便可以给隧道施工过程中的变形控制提供具有科学性的依据，从而能够提前采取有效的加固以及支护手段，确保隧道施工能够安全开展，让隧道的结构

始终保持稳定状态^[3]。

四、大断面软岩隧道支护结构施工期力学行为

（一）现场测试研究

挑选诸多具有典型性的隧道类别，如穿越断层破碎带的隧道、围岩软弱的隧道、浅埋偏压隧道、存在高地应力的硬岩隧道以及高地应力的软岩隧道等，针对支护结构受力状况展开现场测试研究。在隧道的支护结构中埋入传感器，土压力盒用于对围岩和支护结构彼此间的接触压力予以测量，混凝土应变计则可对混凝土结构的应变情形加以监测，而钢筋轴力计能够对钢筋的受力状态进行检测。通过长期且不间断的监测，得到不同种类隧道在施工期间其支护结构所呈现出的受力数据。

（二）影响因素分析

对测试结果展开的对比性分析，清晰地呈现多种因素给隧道支护结构力学行为带来的明显影响。软弱围岩的强度偏低，其自稳能力较差，会让支护结构承受较大的围岩压力，使得支护结构出现变形，其内力也随之增大。断层破碎带使围岩的完整性遭受严重的破坏，在开挖的过程当中，易出现围岩坍塌，对支护结构形成冲击荷载，让支护结构受力的复杂程度有所增加^[4]。地形偏压会导致隧道两侧的围岩压力不均匀，致使支护结构受力呈现出不对称的特点，容易引发支护结构局部出现破坏现象。在高地应力的环境之下，无论是硬岩隧道还是软岩隧道，支护结构都得承受较大的地应力作用，特别是软岩隧道，鉴于软岩所具有的高压缩性以及流变特性，支护结构的变形以及应力会随着时间的推移而持续地增长。层理构造会对围岩的力学性质以及破坏模式产生影响，进一步影响到支护结构的受力状态。对这些影响因素有所了解，能够有助于在支护结构设计以及施工环节当中采取具有针对性的措施，以提升支护结构的安全性及可靠性，确保隧道在施工期间以及运营期间都能保持稳定状态。

五、复杂软岩超长浅埋大断面隧道控制开挖与支护施工技术

（一）技术体系整合

综合前文提及的各类技术，应构建完备的复杂软岩超长浅埋大断面隧道控制开挖以及支护施工技术体系。在正式施工之前，务必要针对隧道工程地质条件展开详尽的勘察工作，如围岩的岩性状况、结构特点、地下水情形、地应力状态等等方面，都需细致考察。与此同时，还要对隧道的各项设计参数加以分析，例如

断面的具体尺寸、埋深程度、线路的走向等方面。依据勘察结果，合理挑选施工工法。对于浅埋偏压且围岩软弱的路段，应当优先选用契合实际的分部开挖办法，并和有效的超前支护举措相结合。在开挖作业开展期间，务必要严格依照“短进尺、弱爆破、强支护、快封闭、勤量测”的原则执行，以减少对围岩产生的扰动，而且要及时施作支护结构，从而确保围岩能够保持稳定状态。借助数值模拟技术针对施工过程实施动态模拟操作，依据模拟结果来对施工参数以及支护方案做出相应调整。除此之外，还要进一步强化现场监测工作，通过对监测数据的反馈情况加以分析，从而能够实时掌握围岩以及支护结构所承受的力以及变形状况，一旦发现异常情况出现，就要即刻采取加固处理措施^[5]。

（二）工程应用验证

依托实际工程，对这一技术体系展开应用验证工作。在某复杂软岩且超长、浅埋以及大断面的隧道工程里，运用上述技术体系来开展施工活动。在洞口那区域，依照针对浅埋偏压且围岩软弱的隧道洞口段施工所设定的技术要求，实施了有效的超前支护措施，同时也对边仰坡进行了加固处理，从而顺利实现进洞施工的目标。在隧道进行开挖的过程当中，依据对围岩卸荷机制以及变形特性所取得的研究成果，挑选合理的开挖方法与支护参数，并且借助数值模拟的方式来加以优化完善。从现场监测所获取的数据能够看出，隧道围岩发生的变形的得到了有效的把控，支护结构所承受的力处于安全的范围之内，施工过程进展顺利，并没有出现围岩失稳以及坍塌事故情况。这一工程得以成功实施，充分证实了针对复杂软岩、超长、浅埋且大断面隧道的控制开挖以及支护施工技术体系具备合理性与可行性，给类似的工程贡献了宝贵的实践经验以及可资借鉴的范例，对推动该技术在隧道工程领域广泛地应用以及进一步的发展起到了助力作用。

六、结束语

论文聚焦于复杂软岩且呈现超长浅埋状况的大断面隧道，全面且细致地对诸多内容展开了剖析，包含洞口段施工直到支护结构所呈现出的力学行为等各个环节。清晰地明确了处在浅埋偏压状况下且围岩软弱的隧道，其洞口段在施工时所涉及的关键技术要点。同时，揭示了大断面软岩隧道在开挖过程当中围岩出现卸荷的机制，并构建了一套用于变形预测的分级体系，切实地掌握了支护结构在施工期间其力学行为所遵循的规律。在此基础上，进一步形成了一套完备的施工技术体系，而且这一体系经过相关的工程应用实践，也得到了有效的验证。

参考文献

- [1] 韩宇豪，王海军，马媛. 高地应力软岩隧道开挖及支护技术优化设计 [J]. 中华建设，2025，(08): 189-191.
- [2] 李俊. 高地应力软岩小近距隧道支护变形控制技术研究 [J]. 低温建筑技术，2025，47 (06): 74-77+86. DOI:10.13905/j.cnki.dwjz.2025.6.017.
- [3] 胡美华. 富水软岩隧道复合式衬砌支护施工关键技术与质量控制 [J]. 交通世界，2025，(18): 95-97. DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2025.18.032.
- [4] 胡祺. 大凉山1号隧道软岩大变形处置研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版)，2025，(18): 136-138. DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202518046.
- [5] 李晓渭. 软岩隧道变形特征及其施工控制技术研究 [J]. 科学技术创新，2025，(15): 95-98.