

深埋软岩隧洞大变形机理与控制措施研究

张权

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i2.6082

[摘要] 本文聚焦深埋软岩隧洞大变形问题展开研究。开篇明确大变形定义,并通过典型案例阐述其对工程进度、成本及安全的危害。深入剖析发现,围岩特性、地应力作用、地下水影响和施工因素是导致大变形的主要原因。基于此,提出了优化支护结构、加强施工过程控制、改善围岩条件等应对措施。这些措施为解决深埋软岩隧洞大变形问题,提供了坚实的理论与实践依据。

[关键词] 深埋软岩隧洞; 大变形; 变形机理; 控制措施

中图分类号: TV543+.3 **文献标识码:** A

Study on large deformation mechanism and control measures of deep soft rock tunnel

Quan Zhang

China 11th Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau Co., Ltd.

[Abstract] This paper focuses on the large deformation of deep-buried soft rock tunnel. At the beginning, the definition of large deformation is clearly defined, and its harm to project progress, cost and safety is expounded through typical cases. In-depth analysis shows that the characteristics of surrounding rock, in-situ stress, groundwater influence and construction factors are the main causes of large deformation. Based on this, some countermeasures are put forward, such as optimizing supporting structure, strengthening construction process control and improving surrounding rock conditions. These measures provide a solid theoretical and practical basis for solving the large deformation problem of deep-buried soft rock tunnel.

[Key words] deep buried soft rock tunnel; Large deformation; Deformation mechanism; Control measure

引言

在深埋软岩地质条件下进行隧洞工程建设,时常面临隧洞大变形的难题。这不仅对工程的顺利推进构成巨大挑战,还威胁到工程的长期稳定性与安全性。国内外众多重大工程实例,如某大型水利工程的引水隧洞以及重要铁路干线的隧道,均因隧洞大变形遭遇了严重的施工阻碍与高昂的经济损失。深入探究深埋软岩隧洞大变形的机理,并制定有效的控制措施,对于保障工程质量、降低成本、确保施工人员安全具有至关重要的意义。本文将围绕这一核心问题展开全面而深入的研究。

1 深埋软岩隧洞大变形的概述

1.1 大变形的定义

在深埋软岩隧洞领域,大变形的定义在不同行业和研究中存在差别。铁路系统以围岩变形是否超过支护预留变形量作为判断标准,规定单线隧道初期支护位移若大于25cm,双线隧道大于50cm,便认定发生了大变形。从变形特性的角度,也有观点将其定义为:隧洞及地下工程围岩出现的一种具有累进性和明显时间效应的塑性变形破坏。这种变形与岩爆的脆性破坏不同,有别于围岩松动圈中受特定结构面控制的坍塌、滑动等破坏情况。

本文综合工程实际状况与变形特征,将深埋软岩隧洞大变形定义为:在深埋软岩的条件下,隧洞围岩由于受到高地应力、软弱岩性、地下水等多种因素的共同作用,产生了超出正常设计允许范围的塑性变形。该变形具有累进性和显著的时间效应,会对隧洞的稳定性、施工安全以及后续运营造成严重威胁^[1]。

1.2 典型案例及危害分析

国内外有不少深埋软岩隧洞工程遭遇过大变形问题。例如,某铁路隧道全长13.39公里,所处位置地质条件复杂,穿越多条大型断层破碎带。受高地应力影响,单点变形量达到1.2米,连续变形区段超过2000米。即便采用双层大型钢拱架支护,仍难以避免拱架扭曲变形甚至折断,同一施工段落换拱次数最多达3次,全隧累计换拱3000米以上。还有某水电站引水隧洞,在穿越特定岩石区段时,发生大规模塌方,塌方后变形持续,给后续施工带来极大风险。具体危害如表1所示:

2 深埋软岩隧洞大变形的机理分析

2.1 围岩特性影响

软岩的物理力学性质决定其在外荷载作用下极易发生大变形。以某隧洞软岩地层为例,其粉砂质泥岩弱风化带饱和抗压

强度仅3.55~7.58MPa, 饱和变形模量 E_0 为1.25~1.47GPa, 泊松比 μ 为0.26~0.27, 抵抗变形能力远低于硬岩。隧洞开挖后, 围岩应力重新分布, 在自身重力与高地应力共同作用下, 软岩易产生塑性变形和流变^[2]。

表1 深埋软岩隧洞大变形危害及影响

危害类型	具体表现
工程进度	施工停滞、延误工期, 如盐边隧道工期长达5年
工程成本	增加支护成本、处理费用, 如杉阳隧道多次换拱
安全风险	引发塌方、突泥等灾害, 威胁施工人员生命安全

软岩强度低, 在较小应力下就可能屈服, 引发塑性变形。弹性模量小, 受力时弹性变形大; 泊松比大, 导致横向变形显著, 隧洞周边围岩收敛变形增大。当围岩泊松比从0.2增至0.3时, 在相同应力条件下, 横向变形量约增加50%。

依据弹塑性理论的摩尔-库仑准则, 圆形隧洞周边塑性区半径计算公式为:

$$R_p = r_0 \left(\frac{2 \cos \varphi + \sigma_{r0} (1 - \sin \varphi)}{2 \cos \varphi + \sigma_r (1 - \sin \varphi)} \right)^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1)$$

其中 r_0 为隧洞半径, c 为围岩黏聚力, φ 为内摩擦角, σ_r 为塑性区半径处的径向应力, σ_{r0} 为初始径向应力。当围岩黏聚力 c 和内摩擦角 φ 因软岩特性较小, 塑性区半径 R_p 增大, 增加隧洞发生大变形的可能性^[3]。

2.2地应力作用

深埋隧洞常处于高地应力环境, 地应力由上覆岩层自重应力和构造应力组成。隧洞开挖打破围岩原始应力平衡, 应力重新分布, 洞周应力集中。若集中应力超过围岩强度, 围岩便发生塑性变形, 引发大变形。

以某深埋隧洞工程为例, 隧洞开挖前, 围岩应力平衡且分布均匀。开挖后, 洞周应力集中明显, 最大主应力在洞顶和洞底分别达初始应力的2.5倍和2.3倍。高地应力下, 围岩塑性变形显著, 塑性区范围不断扩大。当塑性区范围达洞径1.5倍时, 隧洞变形量急剧增加, 初期支护结构严重破坏。地应力大小与分布是影响大变形的关键因素, 且与围岩变形模量等参数相互作用。较低的围岩变形模量, 使围岩在承受地应力时更易产生变形^[4]。

2.3地下水的影响

地下水对软岩力学性质的弱化, 在深埋软岩隧洞大变形中作用显著。它降低软岩抗剪强度, 提升塑性与流变性。隧洞开挖时, 地下水因水位差产生的渗透压力, 额外作用于围岩, 加速其变形进程。软岩饱水后, 矿物颗粒与水发生物理化学反应, 致使颗粒间粘结力和摩擦力降低, 胶结物质溶解或软化, 岩石整体强度随之下降。某软岩干燥时单轴抗压强度为15MPa, 饱水后降至8MPa, 强度降低约47%。同时, 在深埋隧洞施工中, 地下水水位与隧洞内部的水头差致使地下水向隧洞渗透, 产生的渗透压力增

加围岩应力状态, 使其更易达到屈服条件。当水头差达10m时, 围岩所受渗透压力可达0.1MPa^[5]。

2.4施工因素

施工过程中, 开挖方法、支护时机与方式对隧洞围岩稳定性影响重大。不合理的施工方法会过度扰动围岩, 支护不及时或强度不足, 无法有效约束围岩变形, 进而引发大变形。某工程初期采用全断面开挖法, 对围岩扰动强烈, 隧洞周边围岩出现大量裂缝, 变形迅速发展。后改为台阶法开挖, 并及时施作初期支护, 围岩变形得到有效控制。支护的及时性至关重要, 若滞后于围岩变形发展, 围岩会逐渐失去自稳能力, 导致大变形。对于深埋软岩隧洞, 钢拱架与喷射混凝土联合支护能提高支护结构承载能力, 限制围岩变形。若支护强度不足, 如钢拱架间距过大、喷射混凝土厚度不够等, 支护结构无法承受围岩压力, 导致围岩变形失控, 引发大变形。

3 深埋软岩隧洞大变形的控制措施

3.1优化支护结构

优化支护结构是控制深埋软岩隧洞大变形的关键。常用支护结构有喷锚支护、钢支撑等。喷锚支护通过喷射混凝土和锚杆共同作用, 及时封闭围岩表面, 防止风化和松动, 锚杆将围岩与深部稳定岩体连接, 提高围岩自承能力。钢支撑强度和刚度, 能快速提供强大支撑力, 抵抗围岩变形压力。

在某深埋软岩隧洞工程中, 原采用普通喷射混凝土和锚杆支护, 施工中发现隧洞围岩变形大, 支护结构破坏明显。为控制大变形, 优化支护结构。增加钢拱架, 采用I20工字钢制作, 间距加密至0.8m, 与锚杆、喷射混凝土形成联合支护体系。同时, 提高喷射混凝土强度等级, 由C20提升至C25, 厚度从15cm加厚至20cm。通过这些措施, 隧洞围岩变形显著控制, 支护结构稳定性有效保障。优化后的支护结构使隧洞周边位移量从每天10~15mm降至3~5mm, 保证了施工安全与顺利进行。在考虑支护结构优化时, 需要结合围岩的力学参数。例如, 对于变形模量较低、泊松比较大的围岩, 需要增加钢支撑的强度和密度, 以更好地抵抗围岩的变形压力^[6]。同时, 根据围岩的黏聚力和内摩擦角等参数, 合理设计锚杆的长度和间距, 确保能够有效地将围岩与深部稳定岩体连接起来, 提高围岩的整体稳定性。

3.2加强施工过程控制

加强施工过程控制对控制大变形至关重要。合理开挖方法能减少对围岩扰动, 降低变形风险。常见开挖方法有台阶法、CD法、CRD法等, 选择时需综合考虑隧洞地质条件、断面尺寸、埋深等因素。

施工顺序影响围岩变形, 一般应遵循“先上后下、先拱后墙”原则, 避免不合理顺序导致围岩应力集中和变形过大。某深埋软岩隧洞工程初期采用全断面开挖法, 因一次开挖断面大, 对围岩扰动强烈, 隧洞周边围岩出现大量裂缝, 变形迅速发展。后改为台阶法开挖并及时施作初期支护, 围岩变形得到控制。这体现了合理开挖方法和施工顺序的重要性^[7]。

支护时机同样关键, 及时支护能在围岩变形初期约束变形,

防止其进一步发展。实际施工中,应根据围岩变形监测数据合理确定支护时机,当变形速率超过一定阈值时立即支护。此外,施工过程中的监测与反馈机制必不可少。通过实时监测隧洞围岩变形、支护结构应力等参数,及时了解隧洞稳定性状况,根据监测结果调整施工参数和支护措施,实现信息化施工,保障隧洞施工安全与质量。在施工过程控制中,要充分考虑围岩的参数变化。在不同的施工阶段,围岩的受力状态和变形情况会发生变化,其相应的参数也会有所变化。例如,在开挖初期,围岩的应力重新分布,可能导致其黏聚力和内摩擦角暂时降低,此时就需要根据监测数据及时调整支护措施,以适应围岩参数的变化,确保隧洞的稳定。

3.3改善围岩条件

改善围岩条件是控制大变形的重要手段。注浆加固是常用方法,向围岩注入浆液,填充裂隙和孔隙,提高围岩强度和整体性,增强承载能力。在某工程中,采用水泥-水玻璃双液注浆加固技术,对隧洞周边3m范围内的围岩注浆。注浆后,围岩单轴抗压强度提高30%-40%,从5-8MPa提升至7-11MPa,有效控制了围岩变形。

排水降压也是改善围岩条件的重要措施。设置排水系统,降低地下水水位,减小地下水对围岩的软化和渗透压力作用。深埋软岩隧洞施工中,可采用钻孔排水、导坑排水等方式。在某隧洞工程中,通过在隧洞底部设置排水盲沟,并在洞壁上钻孔排水,将地下水水位降低5-8m,减小了地下水对围岩的不利影响,隧洞围岩变形量明显减小。

以某深埋软岩隧洞工程为例,该隧洞穿越软弱破碎的页岩地层,地下水丰富,施工中出现严重大变形。为改善围岩条件,采用注浆加固和排水降压相结合的措施。选用42.5级普通硅酸盐水泥和水玻璃作为注浆材料,注浆压力控制在2-3MPa。通过注浆,围岩裂隙得到填充,强度提高。同时,在隧洞底部和两侧设置排水系统,包括排水盲沟和排水钻孔,将地下水水位降低约6m。经过这些措施,隧洞围岩稳定性显著改善,大变形得到有效控制,施工顺利进行。在改善围岩条件的过程中,注浆和排水等措施会

对围岩的参数产生积极影响。注浆可以提高围岩的黏聚力和内摩擦角,同时在一定程度上增加围岩的变形模量,使其抵抗变形的能力增强。排水降压则可以减少地下水对围岩参数的不利影响,保持围岩力学性质的相对稳定,从而降低大变形的发生概率。

4 结语

综上,深埋软岩隧洞大变形问题复杂且关键。本文对其机理与控制措施的研究,为工程实践提供重要参考。未来需在多方面深化研究,精准揭示复杂地质下多因素耦合机理,研发新型高效控制技术,尤其是智能支护材料与精准预测模型,发展高精度全方位监测手段,以更有效地应对这一难题,推动深埋软岩隧洞工程领域的发展。

【参考文献】

- [1]杨正基,杜宁,史林泉.深埋隧洞软岩变形控制和应力拱圈形成分析[J].云南水力发电,2024,40(04):29-32.
- [2]张建平,黄威,王环玲.深埋软岩隧洞让位支护原理及应用技术框架[J].三峡大学学报(自然科学版),2023,45(5):12-18+86.
- [3]张轩.深埋软岩隧道钢架+锁脚锚管力学特性与工程应用研究[D].西安工业大学,2023.
- [4]成远登.深埋软岩隧洞大变形机理与控制措施研究[D].昆明理工大学,2023.
- [5]田林昌.深埋软岩隧洞围岩及衬砌变形规律和应力特点研究[J].水利科技与经济,2023,29(03):64-67+88.
- [6]朱利平,章慧,姜海波.深埋软岩输水隧洞TBM施工监测预警与管片长期稳定性的研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2023,41(01):51-56.
- [7]陈长生,何林青,李银泉,等.深埋长隧洞软岩工程地质特性及变形预测研究[J].水利水电快报,2022,43(06):35-41.

作者简介:

张权(1984—),男,汉族,山西壶关人,中国水利水电第十一工程局有限公司,大学本科,高级工程师,研究方向:工程管理。