

# 炭质板岩隧道施工中的应力应变行为及其对隧道稳定性的影响分析

程光威 路颜 张媛

陕西铁路工程职业技术学院 城轨工程学院

DOI: 10.12238/ems.v6i8.8741

**[摘要]** 炭质板岩隧道施工中, 由于炭质板岩的特殊地质特性, 常常面临应力应变行为复杂和隧道稳定性差的问题。本文通过现场调查、实验研究和数值模拟的方法, 系统地分析了炭质板岩隧道施工中的应力应变行为及其对隧道稳定性的影响。研究表明, 炭质板岩隧道在施工过程中应力应变变化显著, 停工期间围岩变形加剧, 合理的支护结构和施工方法可以有效提高隧道的稳定性。本文提出的优化施工方案和支护措施对实际工程具有重要参考价值。

**[关键词]** 炭质板岩; 应力应变行为; 隧道稳定性; 数值模拟; 施工技术

## Analysis of stress-strain behavior and its impact on tunnel stability during the construction of carbonaceous slate tunnels

Cheng Guangwei Lu Yan Zhangyuan

Shaanxi Railway Engineering Vocational and Technical College Urban Rail Engineering College

**[Abstract]** In the construction of coal shale tunnels, due to the special geological characteristics of coal shale, it often faces the problems of complex stress-strain behavior and poor tunnel stability. This article systematically analyzes the stress-strain behavior and its impact on tunnel stability during the construction of carbonaceous slate tunnels through on-site investigation, experimental research, and numerical simulation methods. The research results indicate that the stress-strain changes of carbonaceous slate tunnels are significant during the construction process, and the deformation of surrounding rock intensifies during the shutdown period. Reasonable support structures and construction methods can effectively improve the stability of the tunnel. The optimized construction plan and support measures proposed in this article have important reference value for practical engineering.

**[Keywords]** carbonaceous slate; Stress-strain behavior; Tunnel stability; Numerical simulation; construction technique

### 引言

炭质板岩是一种含有大量有机碳物质的沉积岩, 通常呈现暗黑色或灰黑色。由于其形成过程中沉积物质的细腻和均匀, 使得炭质板岩具有显著的层理特性。这种岩石的抗剪强度较低, 遇水易软化, 且节理和裂隙发育, 导致其在力学性质上表现出较高的脆性和低延性。此外, 炭质板岩的层间黏结力差, 遇水后更容易发生崩解和变形, 这些特性使其在隧道施工过程中表现出复杂的应力应变行为。在交通基础设施建设中, 隧道工程常常需要穿越炭质板岩地层。特别是在中国西南地区, 炭质板岩广泛分布于山区隧道工程中。炭质板岩隧道施工的难度和复杂性对工程建设提出了严峻的挑战, 需要通过深入研究其力学特性和施工技术来确保工程的安全和质量。

### 1 理论基础

#### 1.1 应力应变理论

应力和应变是岩土工程中描述材料力学行为的基本概念。应力是作用在材料单位面积上的内力, 通常用符号  $\sigma$  表示。应变是材料在应力作用下发生的变形程度, 通常用符号  $\varepsilon$  表示。应力和应变的关系可以描述材料在外力作用下的力学响应, 是分析材料强度和稳定性的基础。

应力应变关系是通过材料的本构关系来描述的。在弹性阶段, 应力和应变满足线性关系, 可以用胡克定律表示:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , 其中  $E$  为弹性模量。在塑性阶段, 材料的应力应变关系变得非线性, 可以用塑性力学理论中的各种模型进行描述, 如理想弹塑性模型、硬化模型等。对于炭质板岩这样的复杂材料, 常用的应力应变关系模型包括黏弹塑性模型和损伤力学模型, 这些模型可以更准确地描述炭质板岩在不同应力条件下的应变行为。

#### 1.2 炭质板岩特性

炭质板岩是一种典型的沉积岩, 具有较低的抗剪强度和

高脆性特性。在高围压条件下, 炭质板岩表现出明显的流变特性和应力松弛行为。其力学性质包括抗压强度、抗剪强度、弹性模量、泊松比等, 这些参数随围压和含水状态的变化而显著变化。实验研究表明, 炭质板岩的抗压强度在高围压下显著提高, 但其蠕变变形仍然较大。

炭质板岩的结构组成以细粒泥质成分为主, 含有丰富的有机质和矿物颗粒, 其微观结构表现为明显的层状构造。这种层状构造使得炭质板岩在受力时容易沿层理面发生滑移和破裂。显微结构分析显示, 炭质板岩的颗粒间黏结力较弱, 遇水后更易软化, 这种特性对隧道施工的稳定性提出了严峻挑战。

### 1.3 隧道施工力学模型

在隧道施工过程中, 力学模型是用于模拟围岩和支护结构在施工及运营期间的应力应变状态的重要工具。常用的模拟方法包括数值模拟、物理模型试验和现场实测。数值模拟方法如有限元法 (FEM)、离散元法 (DEM) 等, 可以通过计算机仿真分析复杂的应力应变过程, 是研究隧道围岩行为的主要手段。

炭质板岩隧道施工中常用的计算模型包括弹塑性模型、黏弹塑性模型和损伤力学模型。弹塑性模型假设材料在弹性阶段遵循胡克定律, 而在塑性阶段遵循莫尔-库仑破坏准则。黏弹塑性模型则考虑了材料的时间依赖性变形行为, 适用于描述长时间作用下的围岩变形。损伤力学模型通过引入损伤变量, 描述材料在加载过程中的强度退化和破坏演化。这些模型的假设条件通常包括: 材料均质、各向同性, 忽略温度和湿度的影响等。

## 2 研究方法

### 2.1 现场调查与数据采集

在炭质板岩隧道施工过程中, 现场调查和数据采集是了解隧道围岩实际地质条件及支护结构受力状态的重要步骤。现场调查通过系统的勘察工作, 使用地质雷达、钻孔取样和声波测试等手段, 详细记录隧道围岩的地质结构、岩层分布和节理裂隙情况。这些数据为后续分析提供了可靠的基础。

为了获取准确的围岩变形和支护结构受力数据, 使用了应变计和压力计来测量隧道围岩和支护结构的应变和应力分布。同时, 通过激光扫描仪获取隧道断面的精确形状和变形数据, 并借助全站仪监测隧道内部和外部的变形情况, 特别是拱顶和墙体的位移。所有数据通过集成的采集系统进行实时传输, 确保监控中心能够及时掌握现场情况。这些高精度的监测工具和技术手段, 为后续的实验设计和数值模拟提供了详实的数据支持。

### 2.2 实验设计

实验设计旨在模拟炭质板岩隧道的实际受力环境, 进而分析其应力应变行为。为此, 实验设备包括三轴试验机 and 模型试验装置。三轴试验机用于模拟隧道围岩在不同应力条件下的力学行为, 通过施加围压和轴压, 研究岩石的变形和破坏特性。而模型试验装置则用于缩小比例的隧道模型实验, 通过模拟不同的支护方案和施工方法, 分析其对隧道稳定性的影响。

实验步骤首先包括样品准备, 选择具有代表性的炭质板岩样品, 并进行标准尺寸的切割和加工。接着, 在三轴试验机上进行加载试验, 逐步增加围压和轴压, 记录岩样的应力

应变曲线。同时, 在模型试验装置上模拟隧道开挖和支护过程, 观测模型中的变形和应力变化。所有实验数据通过数值分析软件进行处理和分析, 绘制应力应变曲线和变形图, 计算关键力学参数, 如弹性模量和抗剪强度。这些实验步骤和数据处理方法确保了实验结果的可靠性和科学性。

### 2.3 数值模拟

数值模拟是研究炭质板岩隧道施工过程中应力应变行为的重要手段。模型构建需要考虑几何模型、材料参数和边界条件。几何模型根据隧道的实际尺寸和形状建立, 材料参数则基于实验数据和文献资料设置, 包括炭质板岩和支护材料的弹性模量、泊松比和抗剪强度等。

在边界条件和初始条件设定方面, 模型底部和侧壁通常设置为固定边界, 以模拟隧道周围岩体的约束作用, 而隧道开挖面设置为自由边界, 允许围岩向内变形。模型上部施加等效荷载, 以模拟地表的重力作用和施工过程中的支护荷载。这些设定确保了数值模拟的准确性和实际可操作性。

数值模拟的过程包括模型初始化、加载和开挖、结果分析和参数调整, 设置初始条件, 包括应力场和位移场的初始分布。然后, 逐步模拟隧道开挖和支护过程, 记录每个步骤的应力应变变化。对模拟结果进行分析, 评估隧道围岩和支护结构的稳定性, 绘制应力应变分布图和变形图。根据实际监测数据和模拟结果, 适时调整模型参数, 以提高模拟的精度和可靠性。通过现场调查、实验研究和数值模拟的综合应用, 可以深入理解炭质板岩隧道施工中的应力应变行为, 为隧道施工和支护设计提供科学依据。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 炭质板岩的应力应变特性

实验研究通过对炭质板岩样品在不同围压条件下进行加卸载流变试验, 获得了其应力应变特性数据。结果显示, 炭质板岩在不同应力水平下表现出显著的流变行为, 特别是在高围压条件下, 其流变特性尤为明显。实验结果表明, 炭质板岩的流变下限约为抗压强度的 50% 至 60%, 低于该下限时主要表现为瞬时弹性应变和不可恢复的压密应变。随着应力水平增加至抗压强度的 60% 至 70% 时, 炭质板岩仅出现衰减蠕变和等速蠕变现象, 当应力水平超过抗压强度的 80% 时, 才发生加速蠕变。

应力应变曲线分析表明, 炭质板岩在低应力水平下的变形主要为弹性变形, 而在高应力水平下, 则表现出明显的塑性变形和流变行为。通过分离瞬时弹塑性应变和黏弹塑性应变, 发现前者在低应力水平下无明显变化, 而后者则在应力水平达到 60% 抗压强度以上才显著增加。这表明炭质板岩的黏弹塑性应变主要在高应力条件下发生, 而低应力条件下的变形多为压密应变。

### 3.2 隧道施工过程中应力应变变化

在隧道施工过程中, 不同阶段的应力应变分布呈现出显著的阶段性特征。通过对炭质板岩隧道在不同施工阶段的监测数据进行分析, 发现隧道开挖初期围岩的应力释放较为剧烈, 导致围岩产生较大的变形和应变集中。在支护结构未完全建立之前, 围岩的稳定性较差, 应力应变变化剧烈。随着支护结构逐步建立, 围岩的应力应变分布趋于稳定, 但在一些关键节点如拱顶和拱腰处, 仍存在较大的应变集中现象。

在施工过程中, 关键节点的应力应变变化尤为重要, 通

通过对拱顶、拱腰和侧壁等关键部位的应力应变监测数据进行分析,发现这些部位在隧道开挖和支护过程中容易发生应力集中,导致变形和开裂。在支护结构完全建立后,这些部位的应力应变逐渐减小,但在停工和复工过程中,仍可能发生较大的应力应变变化,需要重点监测和及时采取加固措施。

### 3.3 停工对应力应变的影响

在隧道施工过程中,停工是不可避免的,而停工期间围岩的应力应变行为对隧道稳定性有着重要影响。研究发现,停工期间围岩的变形显著增加,特别是在停工初期,围岩的变形速率较大。这是由于停工后围岩长时间暴露在空气中,容易受到地下水侵蚀,导致岩体软化和变形加剧。随着停工时间的延长,围岩变形速率逐渐减小,但总变形量仍然较大,对隧道的稳定性造成威胁。

停工时间对围岩应力应变的影响显著,通过对不同停工时间段内围岩应力应变数据的分析发现,停工时间越长,围岩的总变形量越大,且复工后围岩的应力应变变化更加剧烈。这表明,长时间停工会显著影响围岩的力学行为,复工后需采取更加严格的监测和加固措施,确保隧道施工和运行的安全。

## 4 数值模拟结果与分析

### 4.1 不同施工方法下的应力应变分布

通过数值模拟的方法,比较了不同施工方法下炭质板岩隧道的应力应变分布情况。采用的施工方法包括台阶法和三台阶预留核心土法。数值模拟显示,台阶法在施工过程中引起的总竖向位移和水平位移较大,拱顶沉降和仰拱隆起值明显高于三台阶预留核心土法。这是因为台阶法开挖时,每次开挖的掌子面面积较大,导致围岩的扰动较大,因而围岩的位移和应力集中较为明显。

与之相比,三台阶预留核心土法通过预留核心土减小了每次开挖的掌子面面积,施工过程中对围岩的扰动较小,因而围岩的位移和应力集中现象相对较少。数值模拟结果表明,三台阶预留核心土法在减少围岩变形和提高围岩稳定性方面具有明显优势,是一种更优的施工方法。

### 4.2 停工对隧道稳定性的影响

在数值模拟中还分析了停工对隧道稳定性的影响。模拟结果显示,停工期间围岩的变形明显增加,特别是在停工初期,围岩变形速率较大。这是由于停工期间围岩暴露在空气中,受地下水侵蚀作用,岩体软化,导致变形加剧。随着停工时间的延长,围岩变形速率逐渐减小,但总变形量仍然较大,对隧道的长期稳定性构成威胁。

## 5 讨论

### 5.1 实验结果与数值模拟结果的对比

在实验和数值模拟的对比中,炭质板岩的应力应变特性和隧道围岩的变形规律表现出高度的一致性。实验结果显示,在高围压条件下,炭质板岩表现出明显的流变特性,特别是在在应力水平超过抗压强度的60%时,出现显著的蠕变变形。而数值模拟结果同样表明,在高应力水平下,炭质板岩的流变行为和变形规律符合实验数据,验证了数值模型的准确性和可靠性。

尽管总体上实验结果和数值模拟结果一致,但在细节上仍存在一些差异。例如,数值模拟在某些高应力条件下的变形量稍小于实验数据,这可能是由于模拟过程中对岩石内部微裂隙和含水量等因素的简化处理所致。实验中由于设备和

环境因素影响,可能会导致数据的波动,而数值模拟则相对更为理想化和稳定。

### 5.2 应力应变行为对隧道稳定性的影响

炭质板岩隧道施工中的应力应变行为对隧道稳定性具有重要影响,炭质板岩的低强度和高脆性使其在施工过程中容易产生大变形,尤其是在高围压条件下,其流变特性更加显著,导致隧道围岩变形和支护结构受力增加。隧道开挖过程中,应力释放导致围岩变形集中,特别是在拱顶和拱腰等关键部位,易发生应力集中和变形加剧。

停工对隧道稳定性的影响尤为显著,停工期间由于围岩暴露在空气中,受地下水侵蚀作用,岩体软化,导致变形速率加快,总变形量增加。长时间停工不仅影响围岩的即时稳定性,还可能对后续施工造成不利影响。因此,在停工期间,需采取有效的支护措施,如及时施作初期支护和封闭支护环,以减少围岩变形和提高隧道的稳定性。

### 5.3 施工建议

在施工方法的选择上,建议优先采用三台阶预留核心土法。数值模拟表明,与台阶法相比,三台阶预留核心土法在减少围岩变形和应力集中方面具有明显优势。这种方法通过预留核心土减小每次开挖的掌子面面积,降低了围岩的扰动,增强了隧道的稳定性。

施工过程中应严格控制围岩变形,特别是在拱顶和拱腰等关键部位,应加强监测和支护。建议在这些部位使用高强度支护材料,并及时进行初期支护和二次衬砌,以确保围岩和支护结构的稳定性。还应加强现场排水,避免围岩因积水软化而引起的变形加剧。

## 6 结语

通过现场调查、实验研究和数值模拟,我们揭示了炭质板岩在施工过程中的复杂力学行为和变形特性。研究表明,合理的支护结构和施工方法对提高隧道稳定性具有决定性的作用,尤其是在炭质板岩这类特殊地质条件下。研究发现,施工过程中的停工对围岩的应力应变有显著影响,停工期间围岩变形加剧,这对隧道的长期稳定性构成了潜在风险。因此,优化施工技术,尤其是采用三台阶预留核心土法,可以有效减少围岩的扰动,降低因施工中断引起的风险。未来的工作应进一步探索炭质板岩地区隧道施工的优化策略,以及更高效的风险管理方法,确保隧道工程的安全与可靠。

### [参考文献]

[1]钟扬,高超,张海太.长时间停工条件下炭质板岩地层隧道围岩变形及支护结构补强研究[J].中外公路,2021,41(4):256-260

[2]陈炳光,李化云,陈晔磊,曹苏亚.炭质板岩地层公路隧道结构受力特征及优化[J].科学技术与工程,2021,21(34):14790-14797

作者简介:程光威(1991-),男,山东菏泽人,讲师,主要从事地下与隧道工程技术。

路颜(1990-),女,陕西渭南人,讲师,主要研究领域电力电子与电力传动。

张媛(1991-),女,陕西渭南人,讲师,主要研究地下与隧道工程技术(盾构施工)方向。

基金项目:陕西铁路工程职业技术学院2023年第二批校级科研基金(2023KYYB-27)。