

# 复杂地质特长隧道施工变形监测与稳定性评估

陈德蕊

深圳市勘测院(集团)有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v8i3.2181

**[摘要]** 随着交通基础设施建设的不断推进,复杂地质条件下的特长隧道工程日益增多。这类隧道施工面临诸多挑战,施工变形监测与稳定性评估对于保障施工安全、确保工程质量至关重要。本文详细阐述了复杂地质特长隧道施工变形监测的方法与技术,深入探讨了稳定性评估的指标与模型,并结合实际工程案例分析了监测与评估的应用效果,为同类工程提供了参考与借鉴。

**[关键词]** 复杂地质; 特长隧道; 施工变形监测; 稳定性评估

中图分类号: U455 文献标识码: A

## Deformation monitoring and stability assessment of complex geological long tunnel construction

Derui Chen

Shenzhen Survey and Mapping Institute (Group) Co., LTD

**[Abstract]** With the continuous advancement of transportation infrastructure development, long tunnels constructed under complex geological conditions are becoming increasingly common. These tunnel projects face numerous challenges during construction, where deformation monitoring and stability assessment play a crucial role in ensuring construction safety and project quality. This paper provides a detailed discussion on methods and technologies for deformation monitoring in long tunnels with complex geology, explores indicators and models for stability evaluation, and analyzes practical engineering case studies to demonstrate the application effects of monitoring and assessment. The findings offer valuable references and insights for similar engineering projects.

**[Key words]** complex geology; long tunnel; construction deformation monitoring; stability assessment

## 引言

复杂地质特长隧道由于穿越多种复杂地质区域,如断层破碎带、软弱围岩、高地应力区等,施工过程中围岩变形、坍塌等风险显著增加。施工变形监测能够实时获取隧道施工过程中的变形数据,而稳定性评估则依据监测数据判断隧道围岩及支护结构的稳定状态,二者对于优化施工方案、保障施工安全具有不可替代的作用<sup>[1]</sup>。

## 1 复杂地质特长隧道施工特点及挑战

### 1.1 地质条件复杂多样

复杂地质特长隧道往往穿越多种不同地质构造区域,岩石性质差异大。例如,在某些隧道工程中,会依次穿越坚硬的花岗岩、软弱的页岩以及断层破碎带。断层破碎带岩体破碎,节理裂隙发育,地下水丰富,极大地降低了围岩的稳定性。而不同岩石的力学性质,如弹性模量、抗压强度等各不相同,使得隧道在施工过程中面临复杂的受力状态。

### 1.2 施工周期长

特长隧道的长度较长,导致施工周期往往数年甚至更长。在漫长的施工过程中,受到地质条件的长期作用、施工工艺的连续性以及外部环境因素(如气候变化对地下水水位的影响)等多种因素影响,隧道围岩及支护结构的状态不断发生变化。长时间的施工也增加了施工过程中的不确定性,任何一个环节出现问题都可能对整个工程产生严重影响。

### 1.3 变形控制难度大

复杂地质条件下,隧道围岩的变形规律难以准确把握。高地应力区可能导致围岩产生大变形甚至岩爆,软弱围岩在开挖后容易出现塑性挤出变形。同时,由于隧道的长度和地质条件的变化,不同地段的变形特征也有所不同,这使得变形控制措施难以统一制定和实施。一旦变形失控,可能引发隧道坍塌、支护结构破坏等严重事故<sup>[2]</sup>。

## 2 施工变形监测方法与技术

### 2.1 传统监测方法

#### 2.1.1 水准测量

水准测量是通过水准仪建立水平视线,读取水准尺的读数来测定两点间高差,进而计算出监测点的高程变化。在隧道施工变形监测中,通常在隧道拱顶、边墙等关键部位设置水准基点和观测点。定期使用水准仪对观测点进行测量,将测量数据与初始值对比,从而得到观测点的沉降变形量。该方法测量精度较高,能满足一般隧道变形监测的精度要求,但测量效率较低,受地形条件限制较大,在隧道内狭窄空间作业时,测量视线容易受到遮挡。

### 2.1.2 全站仪测量

全站仪可以同时测量水平角、垂直角和距离,通过测量监测点与已知控制点之间的角度和距离,利用三角测量原理计算出监测点的三维坐标。在隧道施工变形监测中,全站仪可用于监测隧道周边收敛、拱顶下沉以及围岩内部位移等。通过在隧道断面周边布置监测点,定期使用全站仪进行测量,对比不同时期的坐标数据,即可得到监测点的变形情况。全站仪测量具有测量速度快、操作简便、可实现远距离测量等优点,但测量精度相对水准测量略低,且在复杂地质条件下,如隧道内粉尘较大、光线不足时,测量数据的准确性可能受到影响。

### 2.2 新型监测技术

#### 2.2.1 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术利用激光测距原理,快速获取被测物体表面大量密集点的三维坐标、反射率和纹理等信息,从而生成物体的三维点云模型。在隧道施工变形监测中,通过对隧道进行定期扫描,将不同时期的点云模型进行对比分析,能够全面、直观地了解隧道的整体变形情况,包括隧道的收敛变形、局部变形以及衬砌表面的缺陷等。该技术具有高精度、高密度数据采集的特点,能够获取毫米级精度的三维点云数据,为隧道的精确建模和变形监测提供可靠基础。同时,它还能实现全方位监测,避免了传统监测方法的局限性。但三维激光扫描技术设备成本较高,数据处理复杂,需要专业的软件和技术人员进行操作和分析。

#### 2.2.2 光纤光栅传感技术

光纤光栅传感器是利用光纤光栅的应变、温度等物理量变化会引起其反射光波长变化的特性来实现对结构物的监测。在隧道施工中,可将光纤光栅传感器埋设在隧道围岩、初期支护以及二次衬砌等关键部位,实时监测结构物的应变、应力和温度变化。通过解调仪对反射光波长进行解调,得到传感器所在位置的物理量变化值,进而分析隧道结构的受力状态和变形情况。光纤光栅传感技术具有精度高、抗干扰能力强、可实现分布式测量等优点,能够在恶劣的施工环境下稳定工作。而且,由于其采用光纤作为传输介质,不易受到电磁干扰,适合在隧道这种电磁环境复杂的场所使用。然而,该技术对安装工艺要求较高,传感器价格相对较贵,后期维护也需要专业技术支持<sup>[3]</sup>。

## 3 稳定性评估指标与模型

### 3.1 评估指标

#### 3.1.1 位移指标

位移是反映隧道围岩及支护结构稳定性的重要指标。拱顶

下沉和周边收敛是最常用的位移监测指标。拱顶下沉过大可能导致拱顶坍塌,周边收敛超出允许范围则表明隧道围岩压力增大,支护结构可能无法有效抵抗围岩变形。一般根据隧道的设计标准和工程经验,制定不同围岩级别下的拱顶下沉和周边收敛允许值。例如,对于III级围岩,拱顶下沉允许值可能为30mm,周边收敛允许值为20mm。实际监测过程中,当位移值接近或超过允许值时,需及时采取相应措施,如加强支护、调整施工方法等。

#### 3.1.2 应力指标

隧道围岩及支护结构的应力状态也是评估稳定性的关键指标。通过在围岩和支护结构中埋设压力盒、应变计等传感器,可监测其应力变化。当围岩应力超过其极限强度时,围岩会发生破坏;支护结构应力过大,则可能导致支护结构变形甚至失效。例如,初期支护中的钢拱架应力过大,会出现扭曲变形,喷射混凝土会产生开裂剥落。在稳定性评估中,需将实测应力值与设计计算的允许应力值进行对比,判断结构是否处于安全状态。

#### 3.1.3 变形速率指标

变形速率能够反映隧道变形的发展趋势。即使位移值尚未达到允许值,但如果变形速率持续增大,也表明隧道围岩及支护结构处于不稳定状态。例如,在某段时间内,拱顶下沉速率从每天1mm逐渐增大到每天5mm,这说明隧道变形在加速发展,可能即将发生坍塌等危险情况。一般规定,当变形速率超过一定阈值时,如拱顶下沉速率大于5mm/d,周边收敛速率大于3mm/d,需立即停止施工,进行分析和处理。

### 3.2 评估模型

#### 3.2.1 基于数值模拟的有限元模型

有限元模型是通过将隧道围岩及支护结构离散为有限个单元,利用数学力学方法求解各单元的力学响应,从而模拟隧道在施工过程中的力学行为。在建立有限元模型时,需考虑隧道的几何形状、地质条件、施工工艺以及材料特性等因素。通过输入监测数据对模型进行参数反演,使模型计算结果与实际监测数据相匹配,进而利用该模型预测隧道未来的变形和受力情况,评估其稳定性。例如,采用ANSYS、ABAQUS等有限元软件建立隧道模型,模拟不同施工阶段的围岩变形和支护结构受力,为施工决策提供依据。该模型能够较为全面地考虑各种因素对隧道稳定性的影响,但建模过程复杂,需要大量的计算资源和专业知识。

#### 3.2.2 基于机器学习的评估模型

近年来,机器学习技术在隧道稳定性评估中得到了广泛应用。基于机器学习的评估模型通过对大量监测数据和工程案例的学习,建立监测数据与隧道稳定性之间的映射关系。常用的机器学习算法有支持向量机、神经网络等。以神经网络为例,可将位移、应力、变形速率等监测数据作为输入层,将隧道的稳定状态(稳定、不稳定)作为输出层,通过训练神经网络模型,使其能够根据输入的监测数据准确判断隧道的稳定性。该模型具有自学习、自适应能力强的优点,能够处理复杂的非线性问题,但需要大量的高质量数据进行训练,模型的泛化能力也有待进一步提高。

## 4 工程案例分析

### 4.1 工程概况

某复杂地质特长隧道全长8km, 穿越多个断层破碎带、软弱围岩段以及高地应力区。隧道采用钻爆法施工, 初期支护采用喷射混凝土、锚杆、钢拱架联合支护, 二次衬砌为钢筋混凝土结构。

### 4.2 监测方案实施

在隧道施工过程中, 综合采用了传统监测方法和新型监测技术。利用水准测量和全站仪测量监测拱顶下沉、周边收敛等位移指标; 在关键部位埋设压力盒和应变计监测应力指标; 同时, 定期使用三维激光扫描技术对隧道进行整体扫描, 利用光纤光栅传感技术监测围岩和支护结构的应变。通过在隧道内设置多个监测断面, 每个断面布置多个监测点, 形成了全面、系统的监测网络。

### 4.3 稳定性评估结果

根据监测数据, 利用上述评估指标和模型对隧道稳定性进行评估。在穿越断层破碎带时, 监测数据显示拱顶下沉和周边收敛值迅速增大, 变形速率超过了允许值, 同时初期支护钢拱架应力也明显增大。通过有限元模型模拟分析, 预测如果不采取措施, 隧道可能发生坍塌。基于此, 施工单位及时调整了施工方案, 采用了超前支护、加强初期支护等措施, 有效控制了隧道变形, 使隧道稳定性得到恢复。在整个施工过程中, 通过持续的监测和稳定性评估, 保障了隧道施工的安全顺利进行。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

复杂地质特长隧道施工变形监测与稳定性评估是确保隧道施工安全和质量的关键环节。通过采用多种监测方法和技术,

能够全面、准确地获取隧道施工过程中的变形和受力数据; 利用合理的评估指标和模型, 能够及时、可靠地判断隧道围岩及支护结构的稳定性。在实际工程中, 应根据隧道的具体地质条件和施工要求, 制定科学合理的监测与评估方案, 并根据监测评估结果及时调整施工措施, 确保隧道施工的安全与顺利。

### 5.2 展望

未来, 随着科技的不断进步, 复杂地质特长隧道施工变形监测与稳定性评估技术将不断发展。一方面, 监测技术将向更加智能化、自动化方向发展, 如利用无人机、智能传感器等设备实现实时、高效的监测; 另一方面, 评估模型将更加完善, 能够更好地考虑复杂地质条件和施工过程中的不确定性因素, 提高评估的准确性和可靠性。同时, 还需加强对监测数据的管理和分析, 建立大数据平台, 为同类工程提供更多的经验和参考。

### [参考文献]

[1] 刘学增, 俞文生. 隧道稳定性评价与塌方预警 [M]. 同济大学出版社, 2022.

[2] 赵超英. 基于合成孔径雷达干涉测量技术的甘肃黑方台地区潜在黄土滑坡识别与监测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 10(2): 120-122.

[3] 付大喜, 李世鑫, 翁效林. 复杂工况下高地应力软岩隧道变形特征与影响机制 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(3): 345-354.

### 作者简介:

陈德蕊(1993--), 男, 汉族, 云南省宣威市人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 地铁变形监测。