

# 隧道衬砌受力变形及地表沉降的分析和控制

刘娟

天津市宁河区房产服务中心, 天津 301500

**[摘要]**隧道工程作为交通建设中不可或缺的部分, 其衬砌受力变形及由此引发的地表沉降问题, 直接关系到隧道的安全与施工的顺利进行。这篇文章借助理论与案例, 详细探讨了隧道衬砌结构于不同施工条件下的受力特性及形变特征, 特别讨论了地层沉降的原因及其影响因素。结合现代工程技术手段, 文中提出了解决方案多种切实可行的缓解和抑制地表沉降对策, 涵盖合理安排施工流程、采用新型建材和实时监控等手段, 旨在为隧道建设给出技术指南和操作建议。

**[关键词]**隧道衬砌; 受力变形; 地表沉降; 变形控制; 优化施工

DOI: 10.33142/ucp.v1i3.13944

中图分类号: U455.4

文献标识码: A

## Analysis and Control of Stress Deformation and Surface Settlement of Tunnel Lining

LIU Juan

Tianjin Ninghe District Real Estate Service Center, Tianjin, 301500, China

**Abstract:** As an indispensable part of transportation construction, tunnel engineering is directly related to the safety of tunnels and the smooth progress of construction due to the deformation of lining under stress and the resulting surface settlement problems. This article uses theoretical research and case studies to explore in detail the stress and deformation characteristics of tunnel lining structures under different construction conditions, with a particular focus on the causes and influencing factors of ground settlement. Combining modern engineering techniques, the article proposes various practical and feasible solutions to alleviate and suppress surface subsidence, including reasonable arrangement of construction processes, adoption of new building materials, and real-time monitoring, so as to provide technical guidelines and operational recommendations for tunnel construction.

**Keywords:** tunnel lining; deformation under stress; surface subsidence; deformation control; optimize construction

### 引言

隧道开挖作业作为都市交通基础设施、铁路运输体系及水资源开发与应用项目的重要组成部分。其施工安全保障施工品质与效率直接影响工程总体效果, 隧道衬砌是关键的部分, 主要功能是抵抗地壳压力, 保障隧道的整体稳定。在隧道工程中建设和使用过程中, 隧道壁经常面临多种外力威胁, 导致各种变形状况, 从而影响隧道结构的稳固性。在同一时间, 地层下降也是地下盾构施工普遍问题, 尤其是在城市区域地下隧道和较浅层地下隧道中, 地层下沉会影响到周边建筑物, 也可能对施工的安全性和隧道运行的稳定性构成挑战。所以, 探究地下隧道支撑体系构成受力状况变化和地面下沉原因和调控手段, 具备很大理论意义和实践意义。

### 1 隧道衬砌受力变形的理论

隧道衬砌需承受的力学负担及其形态变化是隧道施工的关键环节, 直接影响隧道的结构稳固与长期耐久性保障。衬砌作为隧道的承载结构, 其受力情况复杂多变, 受众多因素制约, 主要涉及围岩的压迫力、挖掘深度、地质状况、施工方法和选用的支持材料等。岩石压力是支护结构承受主要作用因素, 一般而言由隧道挖掘完成后岩石内部应力调整和自身重量导致。对于浅埋隧道, 地表附加荷载和地下水压力也会显著影响衬砌的受力状态。不同的围

岩等级对衬砌的支撑要求不同, 各种岩石种类对洞穴地块结构支撑需求呈现区别。在脆弱或断裂带的岩石层内, 岩石承载力相对较低, 衬砌结构需要承受附加压力载荷, 而在相对稳定的岩石构造体中, 隧道支撑体系承担压力比较低, 但设计不恰当, 还是会引引起受力过度集中现象, 导致隧道加强构件产生形变或损坏<sup>[1]</sup>。

随着隧道埋深的增加, 围岩压力成倍增长, 这对衬砌的抗压和抗剪能力提出了更高要求。潜藏在地底管道内, 支护构造必须承受巨大垂直与水平力矩荷载, 维持全面结构稳固特性, 而地下隧道则遭遇地壳变动、建筑物震动众多挑战。这些外部因素时常引起隧道壁的承重能力变得复杂。在此同时, 地下隧道施工技术的选用也直接作用于隧道衬砌承载力。以现今地下管线通道工程技术典型为代表的当代隧道施工技术着重提出“依靠围岩自身的支撑能力”, 即借助管理开挖步骤、逐渐加固等方式, 切实利用围岩自身的稳定能力, 降低衬砌所承受的压力。而注入锚固棒强化技术手段方式则依赖迅速加强, 避免地下的隧道工程挖掘之后发生周围岩石层过分移动, 因此缓解衬砌结构的压迫承载压力。其中之一地质条件的差异是作用于地下通道支护结构变形关键因素。在坚固的岩石层构造环境下, 支持结构承受力相对较为平衡, 变化幅度较小范围; 而在松软或潮湿土层中, 支护结构时常会遭受不平衡外影

响力作用,引起各个部分承受力分布不均,出现非均匀形变,特别在地下水储量充足的地区,地下水压力作用会通过渗透效应对支撑墙体形成引起附加压力,加大形变的可能性。在此种背景下,隧道衬砌体的防水构思及抗渗策略尤为关键,需要保障衬砌体的结构在长期使用过程中能有效抵御水压,防止长期浸泡引起的导致的结构劣化或损坏<sup>[2]</sup>。

选择材料的决定和施工的质量同样衬墙结构的承载能力在变化过程中相关因素的影响不容忽视。现在地下的通道建造时期,普遍应用支护系统建造建材涵盖水泥混凝土、钢筋混凝土和预制品等,各种材质的坚硬度、弹性系数、持久性等特性不同直接地作用于衬料的承重力 and 形变特点。先进坚固材质能够显著增强承载材质的承载力,降低因外界外力影响引起的形变。但是,材料属性不只受制于其理论值,还受施工技术影响因素,如果施工时段出现状况频繁混凝土浇筑呈现不均匀性、预制组件组装不精细等瑕疵,可能引发衬砌部分应力聚焦甚至可能造成裂缝生成,从而恶化衬砌在承压时的形变情况。所以,保障工程质量在隧道衬砌工程施工变形检测中非常重要。衬砌的形态变化多种多样,主要涉及弯曲形变、压缩形变和剪切形变等。其中,弯曲形变常出现在隧道的拱顶或墙角部位,尤其是在不均匀荷载作用下,衬砌可能会产生明显的弯曲应力,导致局部开裂或破损。压缩形变主要体现在隧道两侧墙体或拱脚部位,受围岩压力或地表附加荷载影响,衬砌材料会发生压缩变形,若超过材料的抗压强度,则可能发生结构失效。而剪切形变则常出现在隧道转角或断层带等特殊地质条件下,局部的剪切力会导致衬砌沿某一平面发生滑动,产生裂缝或错位<sup>[3]</sup>。

数值模拟技术为分析隧道衬砌受力变形提供了重要手段。使用分析工具,能够构建地下管线和周围岩层的三维图像,模仿隧道在各种地质条件、各种施工情况所承受的力学状态,数值解析能够计算隧道衬砌结构承载力,进而为改进方案提供支持参考数据。举例来说,借助仿真分析能够识别出若干设计预案相关应力集中区,接着执行调整衬砌厚度值、改进支撑体系等手段,降低减轻由应力分布情况引起的风险损失。在同步条件下,数值模拟也有助于建筑行业企业预估施工期间的地基沉降状况,为控制地基变形参考依据,地下通道结构的承压与形变表现出一种包含众多因素的复杂特性,其决定性因素不仅涉及岩石压力、开挖深度、地质状况等自然因素,也涉及建造技术、所用的支撑物料和建设质量标准等工程要素,实施适宜策划与施工流程管控。尤其普遍使用计算模型,可以精确预测并调整衬砌结构的形变,保障地下隧道的长期稳定与稳定特性。

## 2 地表沉降的成因

隧道开凿过程中,围岩内部的应力状态发生调整,原本坚固的岩壁,若缺乏支撑,可能会出现松动甚至坍塌,特别是在地质结构较脆弱的地层内,隧道开挖完成后,岩

壁迅速向开挖面接近,导致地面上方发生沉降,因此矿物质边界变化导致下沉常常表现出不断扩散态势。伴随挖掘面积增加,地面的下沉幅度同样扩大。与此同时,岩石周围特性对地层下沉作用同样极为重要,如果地下管道穿越过地质状况相对复杂,如松散土壤层、松散土层或潮湿土层,周边岩石的稳定性不足的区域,隧道挖掘过程中时常会发生出现大规模移动和坍塌,而在相对硬度较高的岩石层深处,周围岩石相对稳定,地表沉降规模大小以及程度则较为微小<sup>[4]</sup>。

以盾构法和新奥法(NATM)为例,盾构法因其能够在开挖过程中同步进行支护和封闭,对围岩扰动较小,因此地表沉降相对可控。然而,盾构机推进过程中,如果出现超挖或盾尾间隙过大等问题,也可能导致开挖面周围围岩过度变形,从而引发地表沉降。而新奥法施工过程中,由于依赖分步开挖和逐步支护,开挖面暴露时间较长,围岩失稳的风险较大,尤其是在软弱围岩或富水地层中,极易导致地表出现较大沉降。因此,合理的施工组织 and 支护措施在控制地表沉降中至关重要。为了减少沉降风险,施工过程中通常采用分层开挖、小导管注浆、预加固等技术,增强围岩的稳定性,同时避免大面积暴露开挖面导致的沉降。在地下水丰富的区域,隧道开挖时常常需要进行地下水的抽排工作,以避免施工区域内积水过多影响工程进度和安全。但是,过分地下水抽取会引起土壤间大量水分流失,地面由于持水能力进而产生压缩状况,这造成地面前下沉,这种由地下水水位下降引起的沉降时往往表现出来明显的长期性,有时隧道建设完成之后仍会发生持续出现。所以,在地下水资源充足的地区,施工团队习惯于运用高效率的排水及回灌手段,需要确保施工场地保持干燥状态,同时尽力降低对地下水循环的影响,避免地下水水位显著降低导致地面塌陷现象。

地下工程常常在城市或其他居民区,这些地区的地表通常分布着众多建筑群、道路以及其他公共设施,这些建筑物自身的重量会对地下施工过程导致地下工程造成附加压力,导致地层的承载力上升,引起地面下沉。另外,在地下通道建造期间,若缺少恰当处置地基加固工程与两者之间互相影响。建筑物的下沉或倾斜问题也可能引起加大地下通道周边地面的下沉<sup>[5]</sup>。所以,在设计、施工至运营全过程,工程技术人员时常会对隧道周边建筑执行详尽的负荷检测与评估。基于建筑种类、地质情况实施适宜的加固方案,例如水泥浆灌浆强化、打桩加固技术等方法,用来减轻降低由建筑额外负荷引发的地面下沉问题,地壳构造的演变和人类行为的作用可能导致地表下沉的现象发生,比如说,在城市发展阶段,剧烈的土地挖掘、基础设施搭建等许多工程时常会对地下岩石和土壤层造成变动,破坏地质结构的稳定性,从而导致地面下沉。同样,地下的空白区域的利用与发展,如地下管道网络、地铁设

施、地下停车设施等建设项目,往往伴随着隧道工程交织进行,这会增加地面下沉的风险。

### 3 隧道施工过程中地表沉降的监测与控制

隧道施工过程中地表沉降的监测与控制是保障隧道及其周边建筑物安全、稳定的重要环节。地表沉降通常伴随隧道开挖导致的岩体压力缓解及地层形变,所以对沉降的实时跟踪监控,配合恰当的控制手段,可以及时规避和降低可能的工程危险。地面沉降的监控与调整主要涉及技术监测方案的选择及相应调控措施的执行。尖端技术性管控方法不但能够提供建设过程提供即时数据,并且帮助在建设过程中调整和改善给予数据支撑。利用地表布设多个观测点,随时间完成测量高度,能够准确记录下相关区域的下沉状况,伴随连续下管道工程的进展,水平观测的资料会呈现出下沉现象的累积影响因子,即时显示施工地段地面的下沉状况,对比于常规水准测量, GPS 测定同样地可以获得精确的沉降数据。然而该系统的优势表现在实现连续性监测、实时数据收集,适用于广阔地域地面沉降观测<sup>[6]</sup>。

一般来说,监测点的安排应彻底顾及地下通道开挖区域、地质状况、地面建筑的散布等因素。通常情况下,监测点同步部署于地下隧道施工地点正上方,并且还需涵盖施工周边区域,用于全面监控施工导致的地表下沉区域,特别在松散土壤层或潮湿土壤层中,测量密度需要适量提升,用来更为准确反映下沉数值差异的微小变化。同时,地下管道施工阶段各个阶段也必须适时调整监测位置设置数量。举例来说,在地下隧道挖掘初始阶段,考虑到岩石稳定性较差的较大可能性,观测点需要相对密集地设置,随着工程逐渐推进和岩石逐渐变得稳固,观测点之间的距离可以逐渐拉大。另外,针对该区域内建筑和其他特定地点,监测点的设置要考虑到结构形态的变化、承载状况和基础性质的不同,重点将监测点布置在建筑周围和基础部位设置监测点,能够精确监测到结构的下沉和形变,保障建筑物结构的安全与稳定。在对地壳变动状况进行持续观测中,搜集数据与解析极其关键,降落跟踪的旨在是借助数据波动实时呈现地面降落的走向和影响区域,所以,收集监测数据必须具备持续性与时效性。依照地下管道施工

进度和地质状况,监测频率以及周期应依据实际情况适当调整,针对初期变化显著的阶段特征,提议增加观测频次,实现每日甚至实时数据收集。当下落速度逐渐接近稳定状态,观测时间能够适度缩短。收集获得资料历经整理与解析后,需要实施立刻比对,制作地层厚度图表,清晰展示减薄区走势,这些资料可用于项目建设过程中的调整和优化<sup>[7]</sup>。

### 4 结语

综上所述,隧道衬砌受力变形及地表沉降的分析与控制是一项复杂而系统的工程技术任务,涉及多学科的理论知识与技术手段。通过对衬砌受力特性及地表沉降成因的深入研究,结合科学的监测与控制措施,能够有效降低施工风险,确保隧道及其周边环境的安全与稳定。未来实施地下通道施工工作中,伴随先进科技持续进步及运用,支护结构的承载状况和地面下沉观测和调整将逐渐向着精确化和智能进步,为地下建筑项目安全保障给予更加稳固的支持体系。

#### [参考文献]

- [1] 严中华, 邹嘉伟, 陈美鹏, 等. 断层错动对高速铁路隧道衬砌结构受力变形特性的影响研究[J]. 价值工程, 2023, 42(34): 133-135.
  - [2] 汪勤民, 何国辉, 汪飞. 隧道复杂结构受力变形特征及加固效果研究[J]. 公路, 2023, 68(8): 406-410.
  - [3] 董振国, 唐明. 大断面黄土隧道衬砌结构受力变形特征研究[J]. 地下水, 2023, 45(4): 179-181.
  - [4] 李丹丹. 隧道衬砌厚度不足对结构受力变形的影响及处治[J]. 福建交通科技, 2023(3): 41-44.
  - [5] 张健. 寒区隧道局部存水冻胀特性及对衬砌结构的影响[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
  - [6] 刘登新. 接缝倾斜角度对水工隧道衬砌管片受力影响研究[J]. 陕西水利, 2022(1): 14-17.
  - [7] 李世麟. 城市人工杂填土隧道围岩特性及结构受力行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- 作者简介: 刘娟(1982.12—), 毕业院校: 天津理工大学, 专业: 工程管理, 单位: 天津市宁河区房产服务中心, 职称: 工程师。