

# 地铁暗挖隧道穿越强风化闪长岩入岩深度可靠性研究

Study on Reliability of Rock Penetration Depth of Subway Underground Tunnel Through Strongly Weathered Diorite

毕研超<sup>1</sup>, 王建涛<sup>2,4</sup>, 宋佳<sup>2</sup>, 赵广资<sup>3</sup>

- (1. 济南市交通工程质量与安全中心, 山东 济南 250014; 2. 济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南 250014;  
3. 中铁十八局集团第三工程有限公司, 河北 涿州 072750; 4. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 为探讨地铁暗挖隧道穿越强风化闪长岩入岩深度的可靠性, 基于济南隧道实例, 调研了隧道沉降规律, 并利用 Ansys 数值模型与可靠度分析模块, 结合蒙特卡洛抽样方法, 将岩土参数设为随机变量, 分析隧道嵌入强风化闪长岩最小深度时的地表沉降特征。结果表明: 地表沉降最大垂直位移不超过 25 mm 的概率高达 0.942, 满足安全标准。该研究为地铁暗挖隧道穿越复杂地层提供了科学的可靠性评估方法, 有助于优化设计与施工策略, 确保隧道结构稳定, 降低施工风险, 对地铁工程建设具有重要实践意义。

**关键词:** 暗挖隧道; 强风化闪长岩; 入岩深度; 可靠度

中图分类号: U455.4 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 06-0063-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.012

BI Yanchao<sup>1</sup>, WANG Jiantao<sup>2,4</sup>, SONG Jia<sup>2</sup>, ZHAO Guangzi<sup>3</sup>

(1. Ji'nan Traffic Engineering Quality and Safety Center, Ji'nan 250014, China;

2. Ji'nan Rail Transit Group Co., Ltd., Ji'nan 250014, China;

3. China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou 072750, China;

4. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The study aims to assess the reliability of the excavation depth for subway tunnels constructed by the cut-and-cover method during their crossing of highly weathered diorite formations. A tunnel in Jinan, China, was used as a case study to investigate tunnel settlement behavior. Ansys numerical modeling and reliability analysis modules, in combination with Monte Carlo sampling techniques, were utilized. Geotechnical parameters were treated as random variables to analyze surface settlement characteristics when the tunnel was embedded to a minimum depth within the highly weathered diorite. The results show that the maximum vertical displacement of surface settlement not exceeding 25mm had a high probability of 0.942, meeting safety standards. A scientific reliability assessment method is provided for subway tunnels constructed by the cut-and-cover method when crossing complex geological formations. It aids in the optimization of design and construction strategies, ensuring tunnel structural stability and reducing construction risks. The study holds significant practical implications for subway engineering projects.

**Keywords:** underground tunnel; strongly weathered diorite; rock depth; reliability

作者简介: 毕研超 (1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 市政工程。

通信作者: 王建涛 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 隧道及地下工程。

收稿日期: 2023-08-16

# 岩土力学

## 0 引言

随着城市轨道交通的快速发展,地铁隧道施工工法持续进步与创新,暗挖法以其良好的地层适应性和对周边环境的低影响性<sup>[1]</sup>,逐渐受到青睐。然而,在地铁隧道穿越复杂地质条件,尤其是强风化闪长岩这类力学性质多变的地质时,确保隧道稳定性和施工安全成为重大挑战。此外,隧道掘进过程中,地层条件往往导致隧道底部侵入岩层的现象频发。

目前,国内外许多学者对隧道围岩稳定性进行研究。余俊等<sup>[2]</sup>针对江西萍莲高速莲花隧道,深入研究不同管棚注浆加固参数,揭示了这些参数对隧道开挖过程中围岩稳定性的影响机制,为隧道加固设计提供了理论依据;许黎明<sup>[3]</sup>针对过海盾构隧道穿越破碎岩层的复杂地质条件,从施工风险和可实施性角度出发,对比分析了多种施工方案,为类似工程提供了决策支持;郑可跃等<sup>[4]</sup>在考虑围岩松动效应的基础上,对高地应力构造破碎带隧道围岩的稳定性进行了深入分析,并据此对支护结构进行了优化设计,提高了隧道施工的安全性和稳定性;吉凌等<sup>[5]</sup>以赣-深高铁龙南隧道1#斜井大断面隧道为工程实例,采用数值模拟与现场测试相结合的方法,揭示了隧道开挖爆破作用下围岩的振动响应特征,为隧道爆破施工提供了安全评估依据;张小伟等<sup>[6]</sup>结合北京地铁8号线三期前门站下穿既有建筑的工程实践,以变更控制为核心目标,提出了包括管幕施工、导洞施工、桩基沉降及后期沉降控制等一系列变形控制关键技术,有效保障了施工安全和既有建筑的稳定;曹智淋等<sup>[7]</sup>通过数值模拟与理论分析,研究了卸荷作用对超大断面暗挖隧道各导洞压力拱深度的影响规律,对现有隧道过程荷载计算方法进行了改进,为隧道设计提供了更为准确的力学模型;李俊杰<sup>[8]</sup>以某暗挖隧道下穿既有盾构区间隧道为背景,提出了既有线注浆加固土体的方案,并详细阐述了施工降排水、管棚及小导管注浆等施工要点,为隧道穿越既有线提供了有效的加固措施;赵鹏<sup>[9]</sup>针对某浅埋暗挖隧道上跨既有盾构隧道的工程难题,提出了注浆预加固、沙袋反压回填、二衬跳槽施作以及短段施工等变形控制方案,有效降低了施工对既有盾构隧道的影响,确保了工程安全。这些研究

成果不仅丰富了隧道围岩稳定性的理论体系,也为实际工程提供了宝贵的参考和借鉴。

当前,暗挖隧道施工对地层变形影响的研究多侧重于数值模拟与现场监测,而鲜有纳入岩土参数随机性的可靠度分析。实际施工中,地铁暗挖隧道底部入岩深度的确定主要依据工程经验,其可靠性验证则依赖于现场监测数据。鉴于入岩深度是确保隧道稳定性和施工安全性的关键参数,对其穿越强风化闪长岩的可靠性进行深入研究,对于优化隧道设计、指导施工实践及降低风险具有重要意义。以济南某暗挖隧道工程为例,研究利用Ansys可靠度(PDS)模块,充分考量岩土参数的随机性,将其作为随机输入变量,地表竖向位移作为随机输出变量,并基于蒙特卡洛随机抽样理论,详细探究了地表沉降的随机分布特征,旨在为同类工程设计施工提供有价值的参考。

## 1 工程概况

济南轨道交通某单洞双线隧道区间隧道,隧道埋深10.8~25.7 m,隧道开挖跨度约12.5 m,高度约9.3 m。隧道主要穿越粉质黏土、强风化闪长岩,V级围岩。隧道底部侵入强风化闪长岩约6.5~9.7 m。暗挖隧道全长约156 m,拱顶覆土约10.3~18.5 m。断面开挖跨度10.5 m,高度9.8 m,开挖面积101.2 m<sup>2</sup>,开挖方法为台阶法。隧道衬砌断面如图1所示。

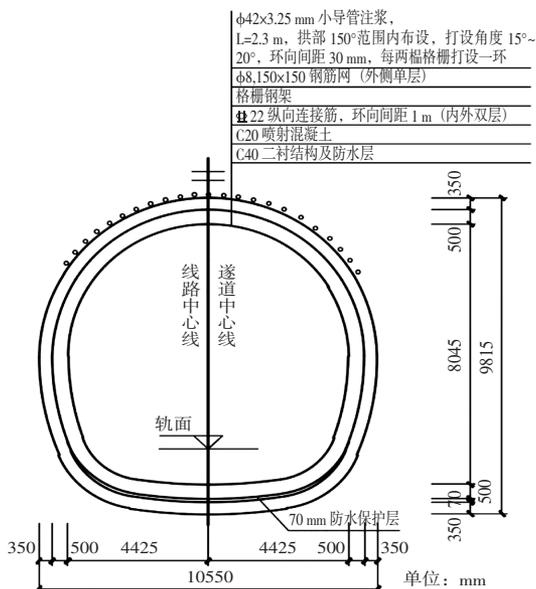


图1 隧道衬砌断面图

Fig. 1 Tunnel lining section map

根据监测方案,选取隧道底部侵入强风化闪长岩深度为 6.5 m (入岩深度最小)的断面,对该断面的拱顶沉降进行实时监测,拱顶沉降累积变形时程曲线和变形速率如图 2 所示。

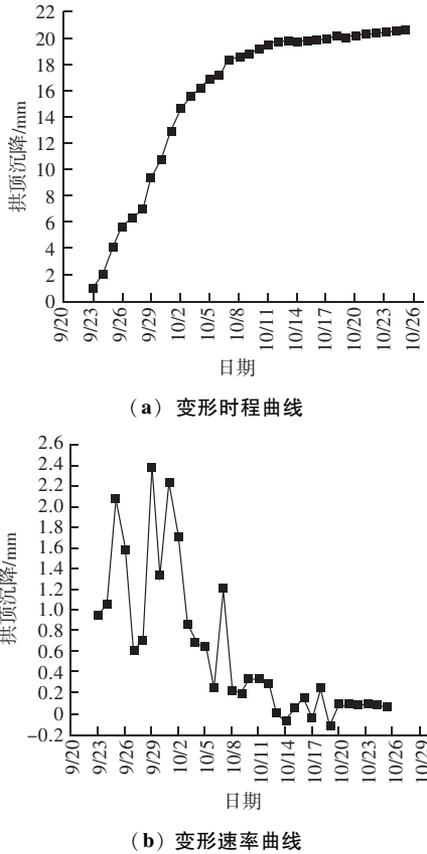


图 2 拱顶沉降累积变形时程和变形速率曲线

Fig. 2 Cumulative deformation time history and deformation rate curve of arch crown settlement

在台阶法施工过程中,拱顶沉降初期变形速率较大,累积沉降持续增加;20 d 之后,拱顶沉降速率变缓,累积变形缓慢发展,并最终趋于稳定。拱顶沉降收敛值在 20.5 mm。拱顶沉降速率收敛于 0。

同时,对该断面的地表沉降进行实时监测,地表沉降曲线如图 3 所示。地表沉降最大值出现在东西线隧道中线正上方位置。地表沉降最大值为 23.8 mm。通过分析该工程的监测数据,拱顶沉降和地表沉降均满足变形控制标准。考虑该工程隧底侵入强风化闪长岩深度较大,当隧底底部入岩深度小于此深度时,拱顶沉降和地表下沉存在不确定性,有必要对最小入岩深度 4.5 m 时的可靠性进行研究。

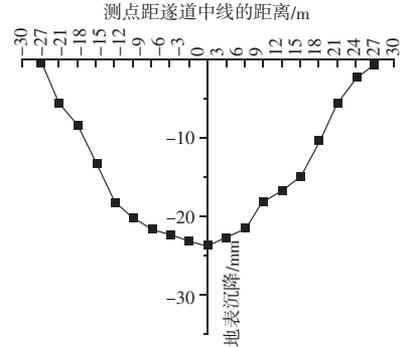


图 3 地表沉降曲线图

Fig. 3 Surface settlement curve

## 2 入岩深度可靠性分析

### 2.1 计算模型

采用 Ansys 有限元软件构建了有限元分析模型,旨在探究地表沉降的分布特征,其中岩土参数被视为随机输入变量,地表竖向位移则被设定为随机输出变量<sup>[10]</sup>。基于蒙特卡洛随机抽样理论,以隧底最小入岩深度 4.5 m 为具体案例进行深入分析。Ansys 软件内置的 Probabilistic Design System (PDS) 模块被用于计算可靠性指标与失效概率。为模拟隧底侵入强风化闪长岩 4.5 m 的情境,建立了二维平面应变模型,该模型横向宽度为 100 m,竖向高度为 70 m,具体计算模型如图 4 所示。材料力学参数参见表 1。

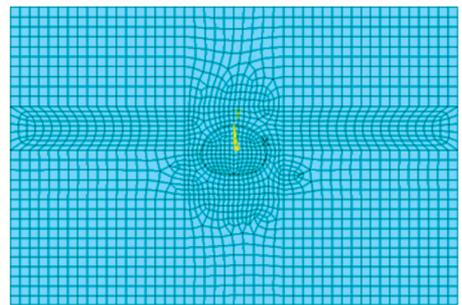


图 4 计算模型

Fig. 4 computational model

表 1 材料力学参数表

Table 1 Material mechanical parameters

材料	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 φ/(°)	黏聚力/ kPa
粉质黏土	1 940	0.004	0.30	13.6	38.6
强风化闪长岩	2 360	0.180	0.20	35.0	150.0
初期支护	2 300	33.5	0.20		

在模型约束条件设置上,模型底端采用了固定端约束,而模型周边的四个面则施加了滑动端法向约束,以确保分析的准确性和合理性。

## 岩土力学

围岩材料的本构模型采用摩尔-库仑模型,隧道围岩及衬砌采用 PLANE 42 单元进行模拟。初期支护采用 BEAM 3 梁单元模拟,注浆加固区通过提高地层参数考虑,并考虑格栅拱架间距折算给混凝土弹性模量,计算公式为:

$$E_h = E_c + \frac{E_g L_g S_g}{S_c L} \quad (1)$$

式中:  $E_h$  为折算后衬砌弹性模量;  $E_c$  为喷射混凝土弹性模量;  $E_g$  为拱架弹性模量;  $S_c$  为喷射混凝土截面积;  $S_g$  为拱架截面积;  $L_g$  为拱架翼缘长;  $L$  为拱架间距。

### 2.2 计算方法

#### (1) 随机输入变量

计算入岩深度的可靠度时,采用蒙特卡罗法根据岩土参数的随机性,设定 10 个随机输入变量:粉质黏土层弹性模量  $E_1$ 、黏聚力  $C_1$ 、内摩擦角  $\varphi_1$ 、密度  $\rho_1$ 、泊松比  $\mu_1$ , 强风化闪长岩弹性模量  $E_2$ 、黏聚力  $C_2$ 、内摩擦角  $\varphi_2$ 、密度  $\rho_2$  及泊松比  $\mu_2$ 。

在 Ansys 中只需输入随机变量的平均值和标准差,程序会自动计算其对数平均值和对数标准差,对数正态分布的表达式为

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - \zeta}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$\delta = \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma}{\mu} \right)^2 + 1} \quad (3)$$

$$\zeta = \ln \mu - 0.5\delta \quad (4)$$

式中:  $\mu$ ,  $\sigma$  分别为随机变量  $X$  的均值和标准差;  $\zeta$ ,  $\delta$  分别为对数平均值和标准差。

#### (2) 随机输出变量

沿着地表(模型上表面)定义一条水平路径,共 37 个节点。在程序中设定随机输出变量为地表 35 个节点的竖向位移 UY。

#### (3) 进行蒙特卡罗有限元模拟

针对以上 10 个随机输入变量随机选取样本,进行蒙特卡罗随机抽样模拟 100 次,得出各随机变量的样本值,设置置信水平为 95%。

### 3 可靠性分析结果

采用 37 个随机输出变量的平均值作为地表沉降

的统计代表值。各随机输出变量的统计特征如图 5 所示。分析该图,可以观察到隧道穿越强风化闪长岩时,地表沉降呈现出一定的规律。具体而言,隧道横断面中轴位置的地表沉降最大,且随着距离隧道中轴线距离的增大,地表沉降逐渐减小。这一规律与 peck 沉降曲线相吻合,表明隧道施工对周围地层的影响是可控的,且符合预期的变形模式。当隧底入岩深度为 4.5 m 时,地表沉降平均值曲线的峰值为 18.98 mm,表明地层稳定性良好。

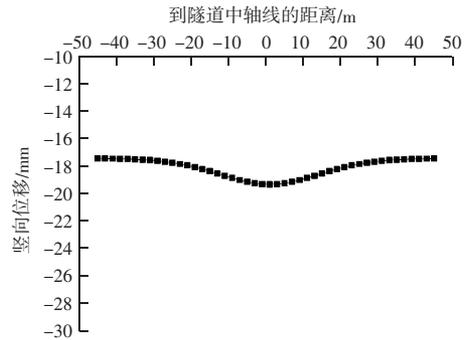


图 5 竖向位移的统计值

Fig. 5 statistical value of vertical displacement

对于地铁区间隧道,对周围环境和地面建筑物的保护要求较高,地表沉降要求严格,地表沉降允许值为 25 mm,可以将其视为允许范围内的地层抵抗变形的最大能力。

根据 Ansys 可靠度分析结果,可得地表最大垂直位移不超过 25 mm 的概率为 0.942,失效概率为 0.058,计算对应的可靠性指标 1.58,介于 0.85 和 2.17 之间,满足规范要求。

### 4 结语

研究通过工程实例分析,揭示了暗挖隧道底部侵入强风化闪长岩深度对地表及隧道结构变形的影响。在 6.5 m 侵入深度下,拱顶沉降累积变形、沉降速率及地表沉降均能有效控制在监测标准内。针对实际工程中隧底最小侵入深度 4.5 m 的情况,考虑岩土参数的随机性,采用蒙特卡罗随机抽样方法,将粉质黏土层与强风化闪长岩的岩土参数作为随机输入变量,评估了地表竖向位移的响应。结果表明,隧底侵入 4.5 m 时,地表沉降最大垂直位移不超过 25 mm 的概率高达 0.942,可靠性指标为 1.58,满足工程安全要求,为同类工程的设计、施工及风险控制

制提供了科学依据和参考。

### 参 考 文 献

- [1] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [2] 余俊, 翁贤杰, 樊文胜, 等. 松散地层隧道进洞段管棚注浆加固效应分析 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2020, 50 (6): 9.
- [3] 许黎明. 国内首条过海地铁盾构隧道关键技术攻关研究 [J]. 都市轨道交通, [J]. 都市轨道交通, 2017 (6): 51-55.
- [4] 郑可跃, 施成华, 雷明锋, 等. 考虑松动效应的高地应力构造破碎带隧道稳定性分析及大变形支护设计优化 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (8): 1603-1613.
- [5] 吉凌, 周传波, 张波, 等. 大断面隧道爆破作用下围岩动力响

应特性与损伤效应研究 [J]. 铁道学报, 2021, 43 (7): 8.

- [6] 张小伟, 张丽, 韩亚飞, 等. 大断面平顶地铁暗挖车站下穿既有建筑方案研究及变形控制: 以北京地铁 8 号线三期前门站工程为例 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (6): 979-987.
- [7] 曹智淋, 谢强, 宋战平, 等. 卸荷作用对超大断面隧道围岩压力的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39 (S1): 2882-2891.
- [8] 李俊杰. 暗挖区间隧道近接既有地铁隧道施工变形影响及控制措施研究 [J]. 现代隧道技术, 2019, 56 (4): 168-174.
- [9] 赵鹏. 浅埋暗挖隧道上穿既有盾构变形控制研究 [J]. 铁道建筑技术, 2021 (11): 137-141.
- [10] 梁庆国, 房军, 贺谱. 基于现场监测统计的隧道围岩压力特征分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16 (2): 555-566.

(上接第 47 页)

离子渗透性能以及抗硫酸盐侵蚀性能的改善作用开始放缓, 故保护剂的最佳涂刷方式为两层底漆 + 两层面漆。

(4) 根据耐久性试验结果, 推荐采用氟碳类保护剂作为清水混凝土的保护剂, 且最佳涂刷方式为两层底漆 + 两层面漆。

### 参 考 文 献

- [1] 陈金平, 邵津琛, 何静, 等. 清水混凝土配合比正交试验和质量控制 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (5): 72-76, 110.
- [2] 张笈玮, 樊博琅, 杨辉, 等. BIM 在异形薄壁混凝土风洞工程施工中的应用研究 [J]. 施工技术, 2014, 43 (21): 17-20.
- [3] 孟书灵, 卢霄, 艾洪祥, 等. 桥梁清水自密实混凝土的工

作性能及早期抗裂性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (5): 5-9.

- [4] 张云鹏, 张志增, 李芳. 清水混凝土保护剂对混凝土抗氯离子侵蚀的影响研究 [J]. 河南城建学院学报, 2019, 28 (3): 44-48.
- [5] 张志增, 张云鹏, 李松凡, 等. 清水混凝土保护剂对混凝土抗冻性能的影响研究 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45 (11): 134-138.
- [6] 张云鹏, 张志增, 李松凡, 等. 清水混凝土保护剂对混凝土的抗碳化性能试验研究 [J]. 现代涂料与涂装, 2018, 21 (8): 1-4, 11.
- [7] 李芳, 张云鹏, 李松凡, 等. 清水混凝土保护剂对混凝土吸水率的影响 [J]. 河南科学, 2018, 36 (7): 1075-1079.
- [8] 《清水混凝土应用技术规程》. 北京市, 中国建筑股份有限公司, 2012-01-01.

(上接第 53 页)

对滑坡体稳定性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005 (19): 56-60.

- [7] 向玲, 王世梅, 王力. 动水压力型滑坡对库水位升降作用的响应: 以三峡库区树坪滑坡为例 [J]. 工程地质学报, 2014, 22 (5): 876-882.
- [8] 史振宁, 戚双星, 付宏渊, 等. 降雨入渗条件下土质边坡含水率分布与浅层稳定性研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41 (3): 980-988, 1085.
- [9] VIRATJANDR C, MICHALOWSKI R L. Limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43 (8): 802-814.
- [10] JIA G W, ZHAN T L T, CHEN Y M, et al. Performance of a

large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels [J]. Engineering Geology, 2009, 106 (1-2): 92-103.

- [11] 罗先启, 刘德富, 吴剑, 等. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005 (14): 2476-2483.
- [12] 贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (9): 1798-1803.
- [13] 詹美礼, 踪金梁, 严飞, 等. 堤外水位升降条件下非稳定渗流模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (增刊1): 91-96, 111.
- [14] 李子阳, 马福恒, 张湛, 等. 水位骤变下土石坝非稳定渗流及稳定分析 [J]. 人民黄河, 2019, 41 (1): 106-110.
- [15] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998: 112-119.