

湿陷性黄土隧道变形机制 与安全预警研究

黄鑫¹, 于永堂^{1,2}, 何剑³, 郑建国^{1,4}, 代刚³, 曾华³

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055; 2. 中联西北工程设计研究院有限公司, 西安 710077;
3. 中铁城市发展投资集团有限公司, 成都 610218; 4. 机械工业勘察设计院有限公司, 西安 710021)

摘要: 针对湿陷性黄土地区运营地铁隧道的病害特征及变形机理, 通过对西安地铁9号线隧道开展长期变形监测与数值模拟, 系统评估各区间安全状态并揭示危险区段的致灾机制。监测数据表明, 研究线路隧道呈现以拱顶沉降为主导的拱顶下沉、结构扩张复合变形模式, 其中Z5~Z6区间因病害程度严重被评定为高风险区段。数值模拟发现该深埋盾构隧道在拱顶上方浸水时呈现“横鸭蛋”型扩张变形, 而拱底下方浸水时则引发整体沉降但结构扩张效应较弱。结合地质勘察与变形监测数据, 结构扩张变形监测值与模拟工况2(地下水位抬升)中4~8 m浸水深度的预测值吻合度较高, 证实拱底下老黄土浸水引发的压缩变形是该区段结构变形的要因。研究成果为湿陷性黄土地区轨道交通工程的安全运维提供理论支撑。

关键词: 城市轨道交通; 黄土地铁隧道; 变形监测; 变形原因

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)01-0096-10

Deformation Mechanism and Safety Early Warning of Collapsible Loess Tunnels

HUANG Xin¹, YU Yongtang^{1,2}, HE Jian³, ZHENG Jianguo^{1,4}, DAI Gang³, ZENG Hua³

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055; 2. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an 710077; 3. China Railway City Development and Investment Group Co., Ltd., Chengdu 610218; 4. China Jikan Research Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Xi'an 710043)

Abstract: To investigate the structural damage characteristics and deformation mechanisms of in-service metro tunnels in collapsible loess regions, this study conducted long-term structural deformation monitoring on a metro tunnel in Xi'an, China. Safety assessments of tunnel sections were performed based on monitoring data, with numerical simulations further revealing the causes of deformation in high-risk zones. The monitoring data show that the study line tunnels present a composite deformation pattern of arch subsidence and structural expansion dominated by arch subsidence. The Z5-Z6 interval was evaluated as a high-risk section due to the seriousness of the structural distress. Numerical simulations demonstrate distinct deformation

收稿日期: 2025-04-15 修回日期: 2025-10-13

第一作者: 黄鑫, 男, 博士研究生, 从事湿陷性黄土地铁隧道结构变形机理研究, huangxinxy@126.com

通信作者: 于永堂, 男, 博士, 正高级工程师, 从事岩土工程测试与监测技术、特殊土工程性质评价与地基处理技术的研发与应用, yuyongtang@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(42277151, 42307277); 陕西省重点研发计划项目(2023-YBSF-499); 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-086)

引用格式: 黄鑫, 于永堂, 何剑, 等. 湿陷性黄土隧道变形机制与安全预警研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(1): 96-105.

HUANG Xin, YU Yongtang, HE Jian, et al. Deformation mechanism and safety early warning of collapsible loess tunnels[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(1): 96-105.

mechanisms: saturation of the soil above the tunnel crown predominantly induces horizontal ovalization deformation (“horizontal egg-shaped” distortion), while saturation below the invert mainly triggers overall subsidence with minimal impact on structural dilation or surrounding rock pressure. By combining the geological investigation and deformation monitoring data, the monitored structural-expansion values match well with the predicted values for a 4–8 m flooding depth in simulation condition 3 (groundwater level rise), confirming that the compressive deformation triggered by the flooding of old loess beneath the invert is the main cause of structural deformation in this section. The findings provide valuable insights for the construction and operation and maintenance of urban rail transit systems in similar collapsible loess regions.

Keywords: urban rail transit; loess subway tunnel; deformation monitoring; reasons for deformation

近年来,随着西部大开发、中部崛起等国家战略的快速推进,在湿陷性黄土地区开展的城市轨道交通工程项目日益增多。目前黄土地区修建地铁隧道时多采用盾构法施工,由于施工工艺的限制无法对隧道拱底以下湿陷性黄土进行有效处理,且建设过程中也未消除隧道上部黄土的湿陷性,因此地铁运营过程中若出现地表水入渗、管线渗漏以及地下水位上升等情况,均有可能导致地层黄土产生湿陷变形,进而影响地铁车站以及隧道结构的稳定性^[1]。因此,在湿陷性黄土地区地铁运营期间,需要对隧道变形进行长期监测,便于及时发现安全隐患,采取相应的变形控制措施,避免事故的发生。

在隧道变形监测研究领域,既有成果主要涉及2个方面:外部工程活动对既有隧道的扰动响应研究构建了工程影响评价理论框架^[2-3];自动化监测系统的迭代升级推动了数据采集精度与效率的突破^[4-5]。然而,针对厚层湿陷性黄土区运营隧道的特殊工况,当前研究体系存在明显不足:其一,建设阶段监测元件布设密度不足导致运营期基础数据匮乏,制约了长期变形规律的深入解析;其二,传统安全评估方法多采用定性化病害描述^[6],在量化指标选取、权重分配等方面缺乏系统理论支撑,难以满足现代隧道智能化运维需求。值得关注的是,近年出台的多部行业规范^[7-8]通过建立包含衬砌变形量、结构沉降量、裂缝形态学参数等在内的量化指标体系,实现了安全等级评价从经验判断向数据驱动的模式转变。特别是衬砌变形与结构沉降这2个易获取、高敏感的核心指标,已成为反映黄土隧道结构健康状态的关键诊断参数。但规范体系在风险趋势预判维度仍显薄弱,而湿陷性黄土特有的水敏性变形机制决定了隧道风险具有动态演化特征,这要求评估体系必须集成现状诊断与趋势预测双重功能,从而支撑分级分类的精准运维决策。

针对湿陷性黄土-隧道结构相互作用机制,学者们通过模型试验^[9]、数值模拟^[10]和现场试验^[11]构建了浸

水条件下隧道响应的理论认知体系。研究揭示:地表水入渗会显著改变围岩压力分布,诱发“整体沉降-结构扩张”的复合变形模式;地下水位抬升则通过改变土体有效应力路径加剧结构劣化进程。这些发现不仅为隧道地基处理深度、剩余湿陷量控制等设计参数优化提供了理论依据,更凸显出土体含水状态监测在运营期风险管理中的特殊价值。但既有研究多聚焦建设期工况模拟,对运营期复杂环境耦合作用下的变形诱因识别仍存在局限。实际运营环境中,管线渗漏、降水入渗、地下水位波动等扰动常呈现时空交叠特征,其协同作用机制难以通过单一工况试验完全还原。这种理论认知与实践需求的错位,导致现有研究成果在指导运营维护决策时往往面临适用性瓶颈。

本研究立足黄土地区地铁隧道工程的运营维护需求,构建“特征分析—安全评估—机理诊断”的研究框架。首先基于隧道结构变形监测数据解析湿陷性黄土隧道典型变形模式;继而融合最新规范化指标与R/S分析法,对隧道结构变形的危险性趋势进行预测,确定线路中的危险区段;最后通过MIDAS-GTS NX数值模拟平台,分析危险区段变形过程中水土耦合作用机制,揭示不同浸水工况下的结构响应特征差异。

1 线路概况

1.1 隧道建设概况

西安地铁9号线全线共设车站15座,起点为Z1站,终点为Z15站。隧道施工方法以盾构为主,隧道管片采用通缝拼装,每环由1块封顶块(K型)、2块邻接块(B型)和3块标准块(A型)共6块拼装而成,纵缝沿隧道轴向对齐,并通过楔形管片调整线路曲率。管片设计强度等级为C50,拼装后的隧道外径6.2 m,内径5.5 m,每环宽度1 m,管片接缝处均采用M30螺栓连接。该线路地铁隧道穿越大厚度湿陷性黄土层(厚度大于15 m)的里程长度约占线路总里程的48%。该线路地铁隧道建设时通过线路设计的方式避免隧道结构

处于自重湿陷性黄土地层中,但由于部分区间湿陷性黄土层较厚(最大厚度达到 30 m),导致建设完成后线路中段部分区间隧道以下仍存在一定厚度的湿陷性黄土未进行处理。

1.2 工程及水文地质条件

全线隧道穿越湿陷性黄土地层的情况如图 1 所示,该地铁线路两端黄土湿陷性较小,湿陷等级一般为 I~II 级,线路中段黄土湿陷性较大,以自重湿陷为主,湿陷等级为 II~IV 级。该线路穿越湿陷性黄土厚度最大的区间段为 Z5~Z6,通过 ZK1、ZK2 两个地质钻探孔揭露的该区段内典型的地层分布如下:①填土 Q_4^{ml} (非自重湿陷性黄土)、②黄土状土 Q_4^{al+pl} (自重湿陷性黄土)、③新黄土 Q_3^{col} (自重湿陷性黄土)、④古土壤 Q_3^{el} (自重湿陷性黄土)、⑤老黄土 Q_2^{col+pl} (27.5 m 以上属于自重湿陷性黄土),各土层对应的自重湿陷系数分布如图 2 所示。水文地质特征表现为第四系孔隙潜水(埋深 16.20~45.50 m,年变幅 1.5~2.0 m),地下水具有弱结晶腐蚀性(SO_4^{2-} 60.0~126.1 mg/L、 Mg^{2+} 27.3~39.5 mg/L)。地下水补给主要有区外径流补给、大气降水及局部水管渗漏等,排泄方式主要为径流排泄、人工开采、潜水越流排泄及蒸发消耗等。

2 隧道结构变形特征分析

2.1 监测方案

本研究针对运营地铁隧道结构变形特征,系统

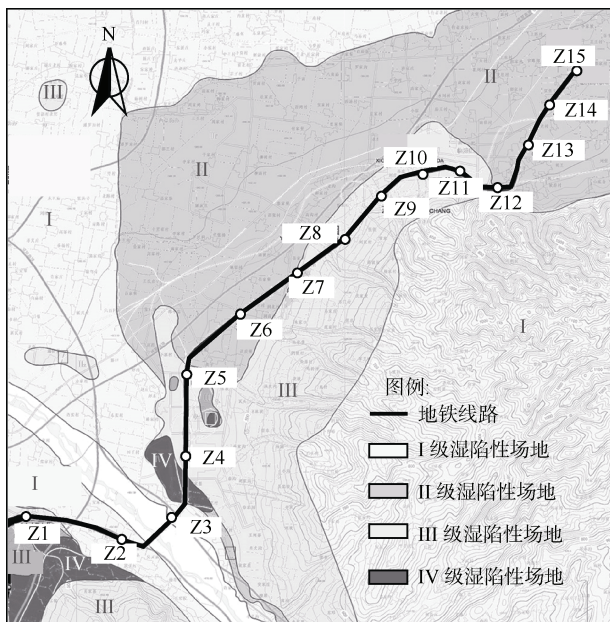


图 1 地铁线路穿越湿陷性黄土地层概况

Figure 1 Overview of the subway line crossing collapsible loess strata

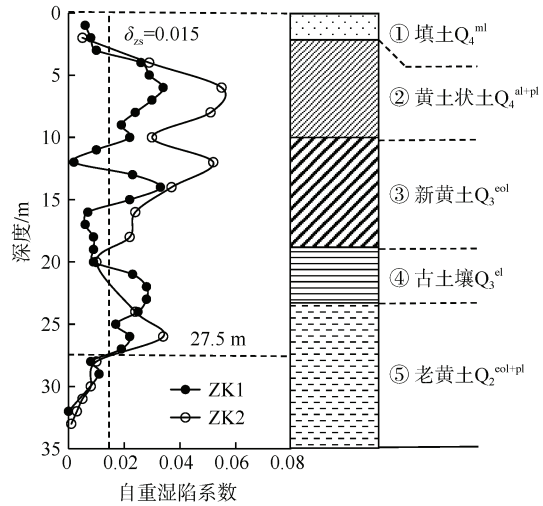


图 2 Z5~Z6 区间段黄土自重湿陷系数分布

Figure 2 Distribution of self-weight collapsibility coefficient of loess in the Z5~Z6 section

开展了拱顶沉降、结构扩张及道床沉降的长期监测,监测频率为半年 1 次,本次根据以下 3 次结构变形监测数据对隧道结构进行安全评价:第 1 次(2022/05/16)、第 2 次(2022/11/09)、第 3 次(2023/05/04)。监测体系共布设拱顶沉降与结构扩张监测点各 73 个(间距 300 m)、道床沉降监测点 243 个(间距 100 m),测点布置剖面详见图 3。其中拱顶沉降采用三角高程法测量高程变化,结构扩张通过极坐标法获取拱腰间距变化,道床沉降则采用几何水准测量法监测,所有测量均按二等监测精度控制。鉴于既有研究证实道床与隧道拱底间缺乏可靠连接,其沉降规律无法直接表征结构变形特性^[12],本次分析聚焦拱顶沉降(累计位移量)和结构扩张(横向形变)2 个核心指标,以准确揭示隧道本体结构的变形机制。

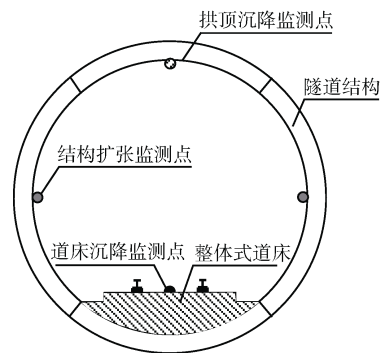


图 3 监测点位置剖面示意

Figure 3 Schematic layout of monitoring point profiles

2.2 拱顶沉降规律

监测数据显示,全线拱顶沉降空间分布呈现显著

差异性(见图 4(a)、(b)): 主要沉降集中于 Z3~Z10 区间, 其中 Z5~Z6 区段变形最为显著, 左右线最大累计沉降量分别达 23.71 和 23.97 mm; 而 Z10~Z12 区段则出现拱顶上浮现象, 左右线最大上浮量分别为 14.5 和 15.15 mm。沉降速率分析表明(见图 4(c)、(d)), Z4~Z9 区段左右线平均沉降速率从第 2 次的 0.006 和 0.007 mm/d 增至第 3 次的 0.021 和 0.017 mm/d, 增速显著。通过定义相邻点位沉降差值为沉降突变量(见图 5), 发现突变峰值多出现在车站与隧道衔接部位, 尤以 Z6~Z12 区段表现突出。值得注意的是, 此类纵向不均匀沉降若持续发展, 将引发衬砌错台、管片渗漏等连锁病害, 直接威胁隧道运营安全。

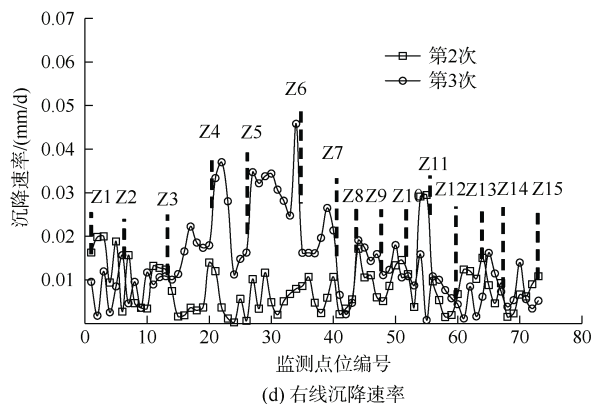
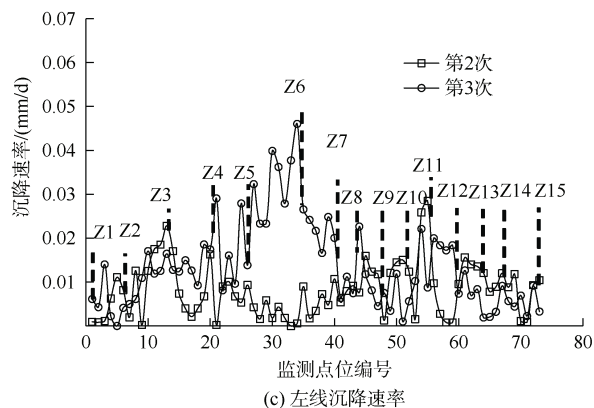
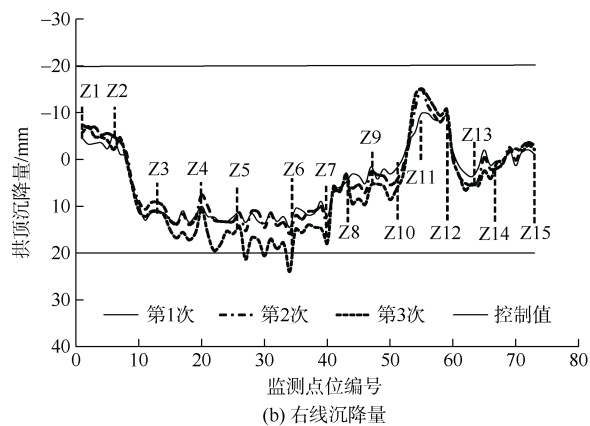
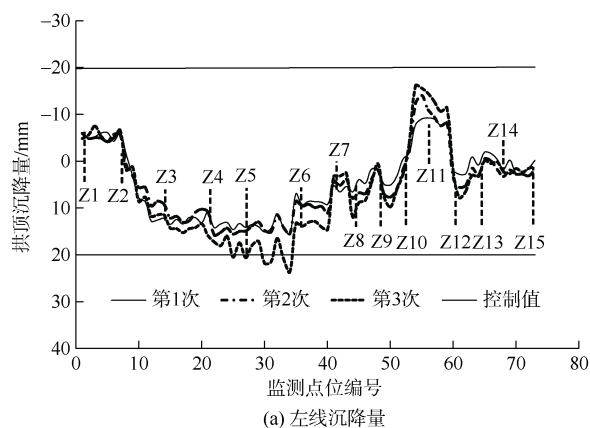


图 4 全线拱顶沉降量及沉降速率曲线

Figure 4 Crown settlement and settlement rate curves for the whole line

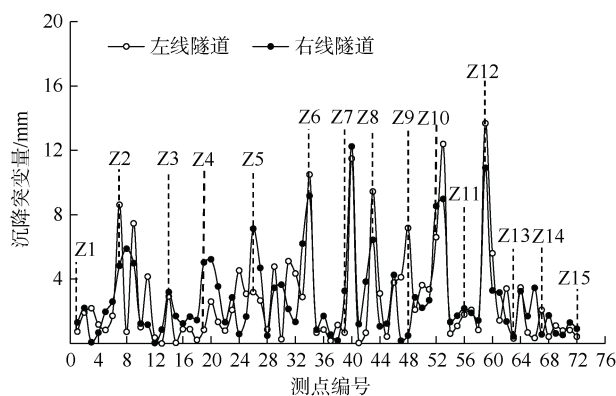


图 5 全线拱顶沉降突变曲线

Figure 5 Abrupt settlement curve of crown settlement for the whole line

2.3 结构扩张变形规律

结构扩张监测结果(见图 6(a)、(b))显示该线路隧道基本呈现扩张趋势(负值收敛变形值表征结构扩张), 其中左线 Z3~Z4 与右线 Z5~Z6 区段扩张最为显著, 最大值分别达 4.33 和 4.45 mm。变形速率分析表明(图 6(c)、(d)): 左线 Z4~Z5 区段平均扩张速率由第 2 次 0.002 mm/d 增至第 3 次 0.007 mm/d; 右线 Z5~Z7 和 Z13~Z15 区段平均速率分别从 0.003 和 0.002 mm/d 提升至 0.008 和 0.095 mm/d。监测数据表明, 全线隧道普遍呈现“整体沉降、结构扩张”复合变形模式, 且拱顶沉降速率显著高于结构扩张变形速率。

2.4 结构健康状态评价

依据《城市轨道交通地下结构健康检测监测技术规范》(T/CSPSTC 43—2019)^[8]要求, 运营隧道安全等级通过曲率半径变化指标划分为 4 个等级(见表 1)。隧道曲率半径变化量与监测断面间距 L 、结构收敛量 a 相关, 计算公式为:

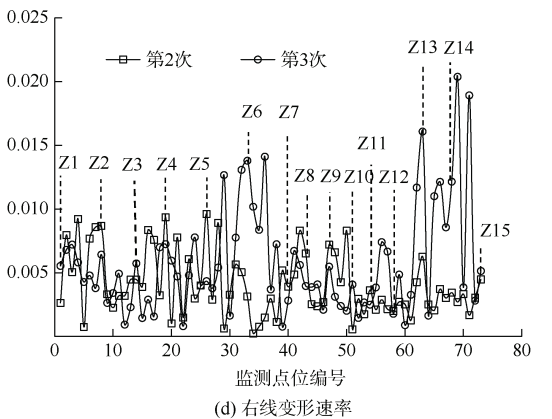
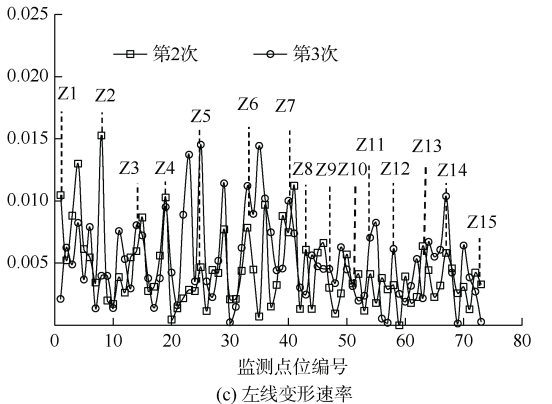
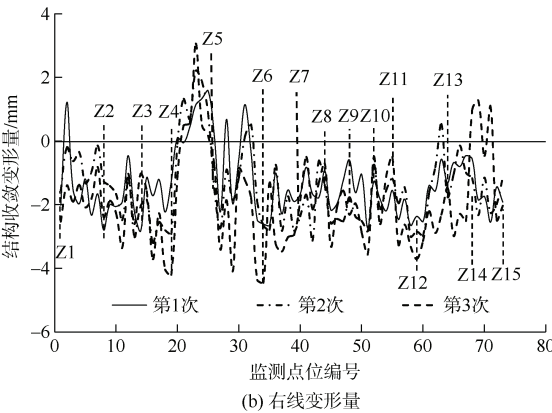
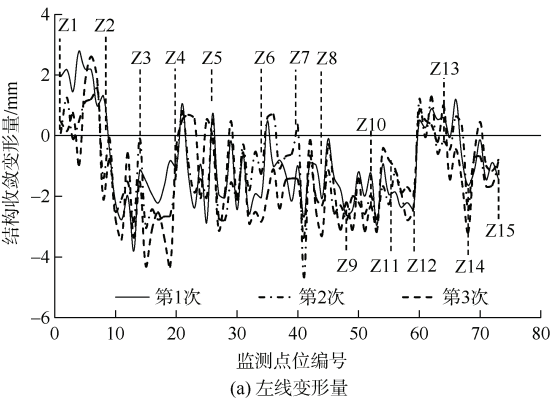


图 6 全线结构扩张变形量及变形速率曲线

Figure 6 Structural expansion and deformation rate curves or the whole line

表 1 运营地铁隧道结构安全等级判定

Table 1 Structural safety level determination table for operational subway tunnels

曲率半径 变化量/mm	等级	隧道 状态	病害 程度	发展 趋势	处置措施
<1/5000	1 类	好	无	无	不需要维修, 正常监测
[1/5000, 2/5000]	2 类	较好	轻微	趋于 稳定	正常使用, 需加强监测
[2/5000, 1/1500]	3 类	较差	中度	较慢	正常使用, 需维修
≥1/1500	4 类	差	严重	较快	根据结构安全和运营 性能评价结果判定 是否限制使用

$$\Delta\left(\frac{1}{R}\right)=\frac{4a}{L^2} \tag{1}$$

式中, $\Delta\left(\frac{1}{R}\right)$ 为曲率半径变化量, mm。

当计算竖直向曲率半径变化量时, 由于隧道拱底变形量无法直接监测, 因此本文只能通过道床沉降量间接反映拱底沉降量, 此时式(1)中的结构收敛量则取为拱顶、道床间距离的变化量, 如图 7 所示。本次

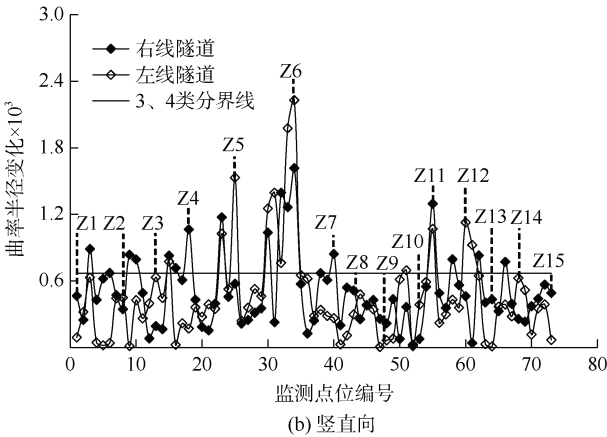
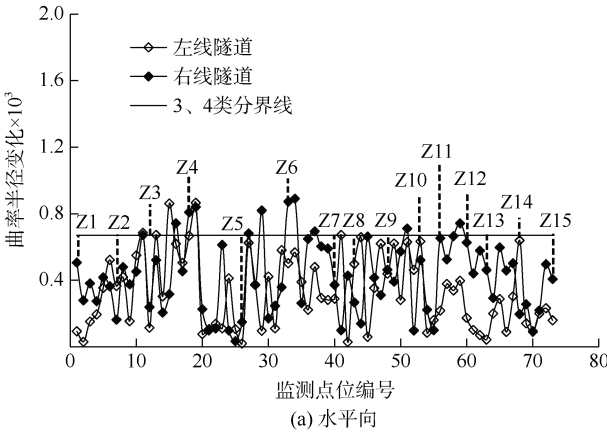


图 7 隧道结构曲率半径变化量

Figure 7 Change in the curvature radius of the tunnel structure

基于该标准对全线隧道进行水平向与竖直向健康状态评价发现：水平向曲率半径变化量显示左右线 Z3~Z4、右线 Z5~Z6 区段安全等级为 4 类，对应结构病害严重且变形发展迅速；竖直向评价则判定左线 Z3~Z4、Z5~Z6 及右线 Z5~Z6 区段达到 4 类标准。根据评价结果可知，Z5~Z6 区段为全线结构劣化最严重区域，故选定该区段开展地质勘察与数值模拟，以揭示变形机理并为加固方案制定提供依据。

3 隧道结构变形机制分析

3.1 工况设定

地质勘察数据显示，Z5~Z6 区间盾构隧道建于老黄土地层，施工时无法对衬砌底部地基进行处理，导致施工后拱底下方仍残留 2.4~13.6 m 未处理湿陷性黄土层。通过 ZK1、ZK2 钻孔对比 2014 年与 2024 年地层含水率分布(见图 8)发现：隧道拱底以下老黄土、拱顶以上新黄土及黄土状土含水率显著增加，其中 32 m 以下老黄土含水率接近饱和。基于此，数值模拟设定地表水入渗与地下水位上升 2 种工况，浸水路径按 2 m 间隔逐层扩展至 36 m 深度，以解析不同浸水模式下的地层-结构响应机制。

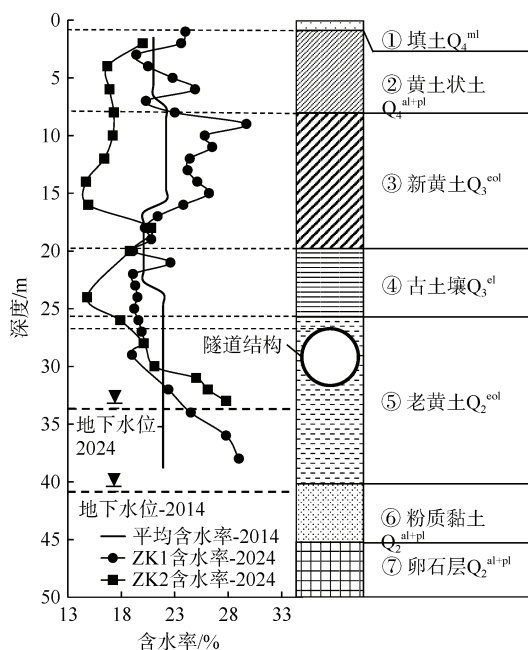


图 8 Z5~Z6 区间典型断面的地层含水率分布
Figure 8 Distribution of stratigraphic water content in a typical section of the Z5~Z6 section

3.2 模型参数的选取

本研究基于 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型构建

三维数值分析体系，该模型的屈服准则 F 为：

$$F = \tau - \sigma_n \tan(\alpha) - c \quad (2)$$

式中， τ 为土体抗剪强度，kPa； σ_n 为法向应力，kPa； c 为黏聚力，kPa； α 为内摩擦角，(°)。

模型采用关联流动法则描述塑性变形，弹性阶段通过弹性模量 E 和泊松比 ν 控制应力-应变关系。如图 9 所示，数值模型几何参数严格依据工程实际设定：双线盾构隧道中心埋深 24 m，外径 6 m，管片厚度 0.35 m，净距 13 m；计算域横向边界取隧道直径 4 倍(24 m)，纵向延伸 50 m，竖向深度 40 m(含基底 10 m 老黄土)，整体模型尺寸 80 m(长)×50 m(宽)×40 m(高)。浸水前后各土体本构参数 c 、 α 、 E 值均通过室内直剪试验、单轴压缩试验及勘察数据确定(见表 2)。分析时通过分层调整土体参数的变化(天然—饱和)模拟水分逐渐入渗的过程。

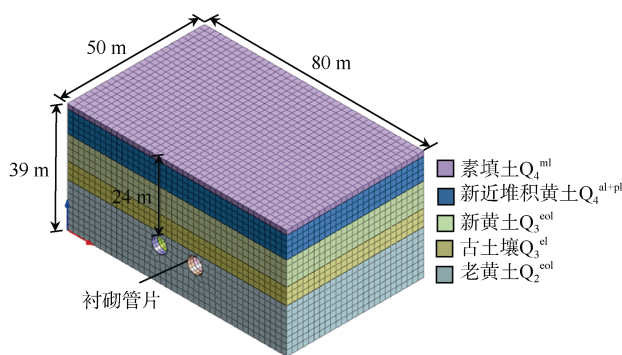


图 9 三维模型网格划分
Figure 9 Diagram of the mesh of the 3D model

表 2 隧道围岩及结构参数取值
Table 2 Table of values of surrounding rock and structural parameters

土层名称	状态	弹性模量 E_{1-2}/MPa	泊松比 ν	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 $c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	内摩擦角 $\alpha/(\text{°})$
素填土	浸水前	6.00	0.28	17.11	10.24	10.16
	浸水后	3.00	0.29	17.27	5.73	8.38
黄土状土	浸水前	25.21	0.24	16.73	38.32	24.82
	浸水后	23.15	0.25	18.99	21.35	22.10
新黄土	浸水前	30.72	0.25	15.76	36.73	24.16
	浸水后	25.13	0.27	18.30	21.81	21.24
古土壤	浸水前	32.95	0.24	17.65	50.46	25.31
	浸水后	26.95	0.26	19.41	40.13	18.47
老黄土	浸水前	36.54	0.22	18.41	47.87	24.86
	浸水后	33.91	0.24	20.11	31.13	24.77
衬砌管片	/	35 000.00	0.20	25.00	/	/

3.3 结果与分析

3.3.1 地表沉降特征

数值模拟揭示不同浸水模式对地表沉降影响显著(见图 10): 地表水入渗导致隧道轴线区域沉降量显著高于两侧, 浸水初期差异性沉降尤为突出。图 11 为 2 种浸水路径下地表累计沉降量变化特征, 由图 11 可见: 地表水入渗深度 < 24 m 时, 高湿陷性新黄土与黄土状土主导变形, 浸深达 24 m 时累计沉降占比达 85.49%; 而浸深 > 24 m 后因老黄土低湿陷性, 沉降增量趋缓。相反, 地下水位上升工况呈现“缓变-突变”特征: 水位上升 ≤ 16 m 时沉降仅占 17.52%, 超过该阈值后新黄土增湿变形引发沉降速率倍增。值得注意的是, 图 11 表明 2 种浸水路径虽存在变形时序差异(地表水自上而下、地下水自下而上), 但最终累计沉降量在相同浸水范围内呈现收敛特性, 印证了水土耦合作用对总沉降量的控制效应。

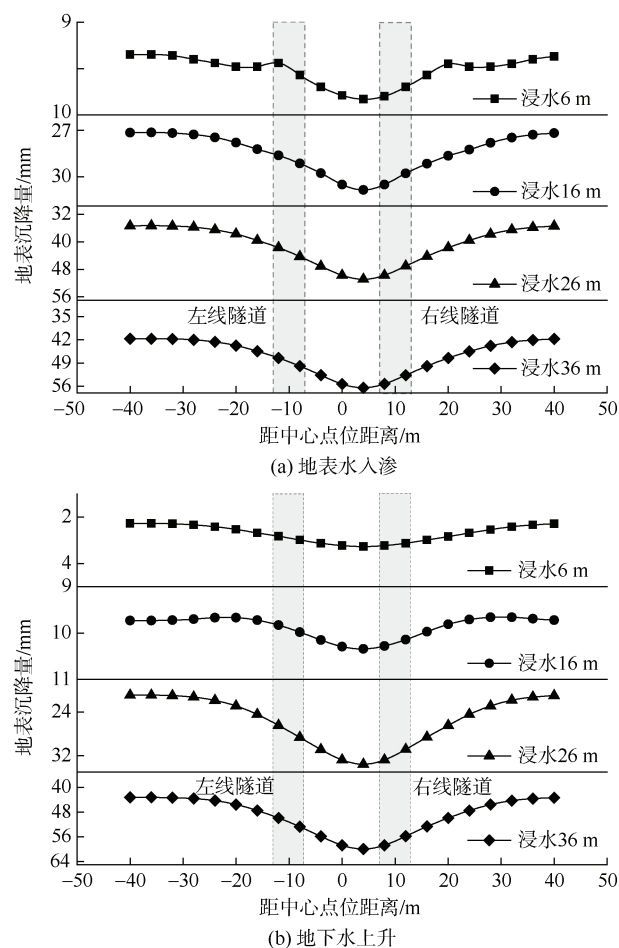


图 10 不同浸水方式地表沉降曲线

Figure 10 Surface settlement curves for different immersion method

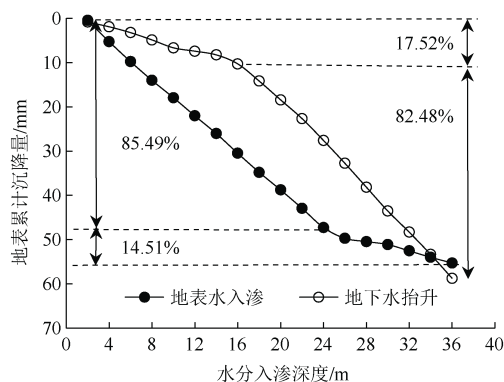


图 11 地表沉降特征及湿陷系数分布情况

Figure 11 Surface settlement characteristics and distribution of collapsibility coefficients

3.3.2 隧道结构变形特征

数值模拟结果表明, 深埋盾构隧道在地表水入渗与地下水位上升 2 种浸水工况下均呈现整体沉降与结构扩张的复合变形特征(见图 12)。当地表水入渗深度未达拱顶埋深(26 m)时, 拱顶沉降速率显著高于拱底, 差异沉降量最大达 19.98 mm, 诱发隧道横向扩张变形

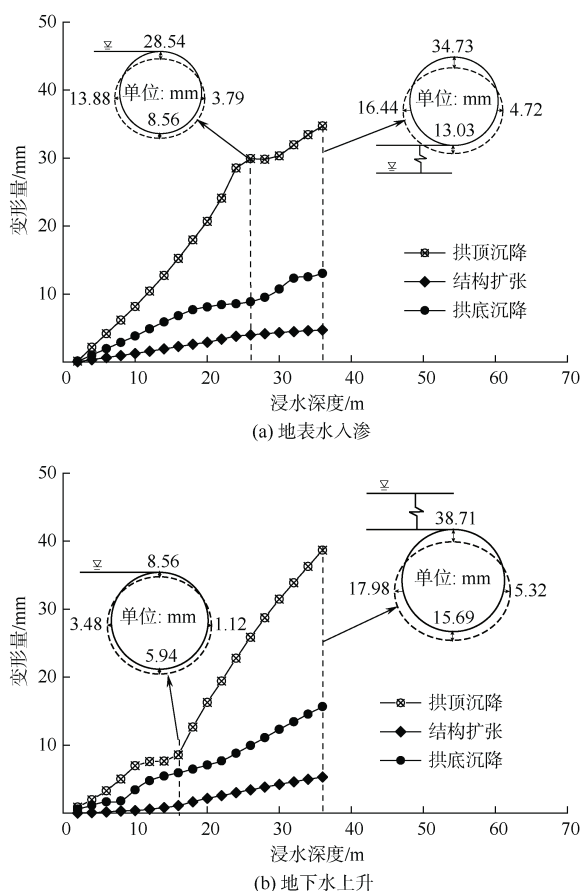


图 12 不同浸水方式隧道结构变形曲线

Figure 12 Deformation curves of tunnels under different flooding methods

量 17.67 mm; 当浸水深度超过 26 m 后, 拱顶、拱底沉降增量趋同, 结构扩张也随之趋于稳定。

上述现象的力学机理在于: 地表水入渗初期, 上部土体饱和和增重导致围岩形变压力增加, 而拱底下方未浸水老黄土承载力维持不变, 形成上覆荷载集中效应, 致使拱顶主导差异沉降; 当浸水深度突破 26 m 后, 拱底下方老黄土逐步软化, 承载力逐渐降低, 围岩应力重分布使拱顶、拱底沉降同步发展。反观地下水位上升工况, 当水位上升高度未达 16 m 时, 隧道拱顶、拱底差异沉降量仅 2.62 mm, 结构扩张量 4.60 mm; 水位上升高度超过 16 m 后, 拱顶土体含水率上升, 拱底老黄土长期饱和和软化, 拱顶、拱底的差异沉降量增至 23.02 mm, 结构扩张量提升至 23.3 mm。对比分析表明: 地表水入渗通过增强上部围岩荷载触发隧道结构早期横向扩张, 而地下水位上升则通过弱化拱底以下土体承载力引发后期扩张发展, 二者最终均导致 21.16 mm 与 23.30 mm 的累计扩张变形, 但作用路径呈现“自上而下”与“自下而上”时空分异特征。

3.3.3 隧道结构受力特征

数值模拟结果表明, 不同浸水工况下隧道围岩压力响应机制与结构变形存在显著关联(见图 13)。地表水入渗过程中: 当浸水深度 < 拱顶埋深(26 m)时, 各点位围岩压力增幅达初始值的 1.09~1.23 倍, 其中拱腰部位压力梯度变化最为显著; 浸水深度位于拱顶与拱底之间(26~36 m)时, 仅拱底、拱脚处压力小幅度增加; 浸水深度 > 36 m 后围岩压力趋于稳定。反观地下水位上升工况: 水位 < 36 m 时围岩压力无显著波动; 水位处于拱顶与拱底间时, 拱顶、拱底压力小幅度增加; 水位上升突破 26 m 后, 各点位压力急剧上升至初始值的 1.09~1.27 倍, 拱顶压力峰值达设计值的 127%。

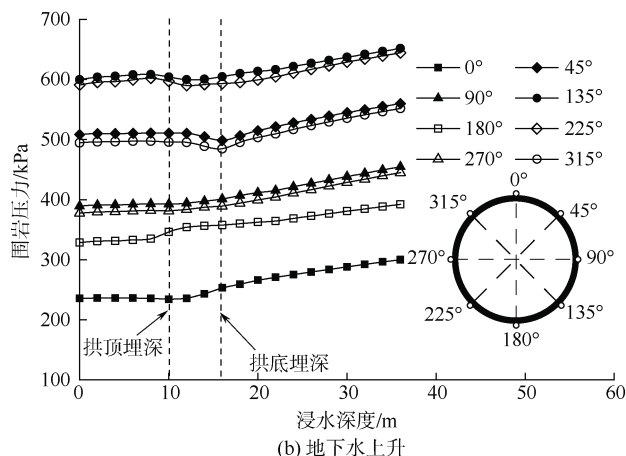
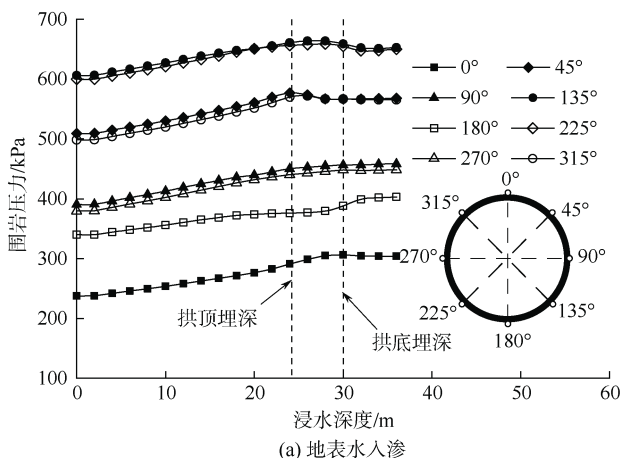


图 13 不同浸水方式隧道围岩压力变化曲线

Figure 13 Pressure change curves of surrounding rock in tunnels with different immersion methods

对比分析揭示: 拱顶上方土体浸水(地表水入渗或地下水位抬升至拱顶上方)通过土体饱和和增重与孔隙水压作用, 引发全断面围岩压力重分布, 进而驱动结构扩张变形; 而拱顶下方土体浸水(地表水浸深 > 26 m 或地下水位位于 26~36 m 区间)仅通过弱化基底承载力诱发整体沉降, 对围岩压力及结构扩张影响较小。该规律与隧道扩张变形特征高度耦合, 证实围岩压力空间演化是结构变形的主控因素, 其中拱顶上方水土耦合作用对压力-变形系统的敏感性显著高于基底浸水工况。

4 隧道变形原因分析

数值模拟与实测数据对比分析(见图 14)表明, Z5~Z6 区间运营期隧道结构变形机理与浸水作用存在显著关联。监测数据显示, 结构扩张变形值与模拟工况 2(地下水位抬升)中 4~8 m 浸水深度的预测值吻合度较高, 而拱顶、拱底沉降实测值与模拟值则呈现明显偏离。这种差异源于数值模型假设的单一浸水路径(地表水/地下水一次性饱和)与现场实际水土作用模式(地下水位反复波动、地表水干湿循环)的区别。值得注意的是, 地表水入渗工况的扩张变形相对误差(21.84%~42.35%)显著高于地下水位上升工况(3.44%~36.47%), 结合研究断面地质勘察数据(见图 8)揭示的拱底下 10 m 老黄土饱和现象, 可推断该区段结构扩张主控因素为隧道拱底以下 10 m 范围内老黄土含水率升高引发的土体软化效应。

此结论与数值模拟中拱顶下方浸水对结构扩张影响微弱的结论形成互证, 表明实际运营环境中长期地下水位波动通过渐进式弱化基底承载力, 持续驱动

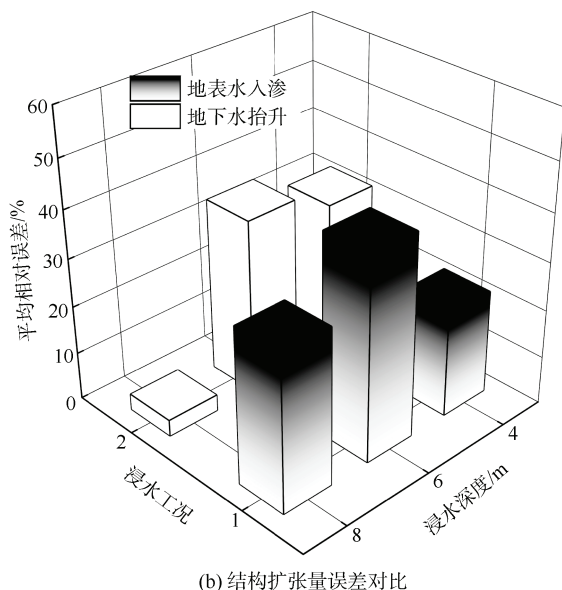
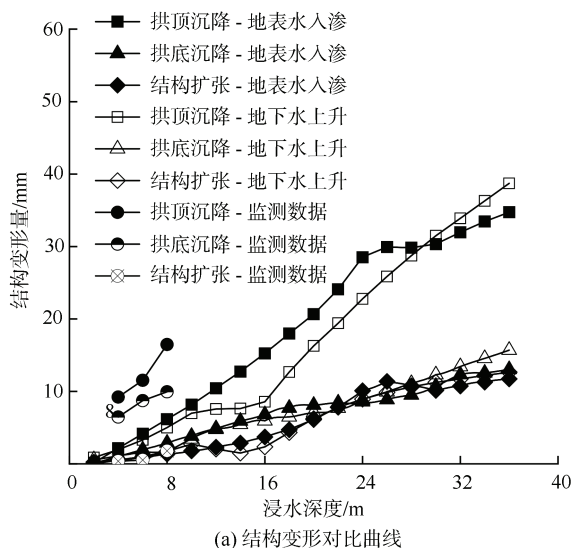


图14 不同浸水工况下计算值与实际监测值误差对比
Figure 14 Error comparison between calculated and measured values under different flooding conditions

结构横向扩张变形。而沉降数据偏差则反映出单一浸水模型难以复现实际复杂水岩相互作用：黄土状土与新黄土在干湿循环下的裂隙发育、渗透性各向异性等时变特性，导致实测沉降量显著超越理想化浸水模型的预测值。综合分析表明，研究区段隧道结构变形本质是深部老黄土长期浸水软化与浅层黄土反复湿胀干缩共同作用的复合结果，其中地下水位抬升导致老黄土地基含水率变化对结构变形的贡献率占主导地位。

5 结论

1) 隧道变形特征与安全状态评估：全线隧道呈现以拱顶沉降为主导的“沉降-扩张”复合变形模式，其

中Z5~Z6区段左右线最大累计沉降量分别达23.71 mm和23.97 mm。纵向不均匀沉降峰值出现在车站与隧道衔接部位，最大沉降突变量达4.2 mm，存在显著衬砌错台风险。

2) 危险区段安全等级判定：基于曲率半径变化量指标评价体系，Z5~Z6区段水平向与竖向安全等级均为4类，说明该区间隧道结构变形较大，属全线结构安全管控重点区段。

3) 浸水作用的结构响应机制：数值模拟表明拱顶上方土体浸水引发全断面围岩压力重分布，驱动结构扩张变形；而拱底下方浸水仅导致整体沉降，对结构扩张影响微弱。

4) 变形主控因素诊断：结构扩张变形监测值与模拟工况2(地下水位抬升)中4~8 m浸水深度的预测值吻合度较高，证实拱底下老黄土浸水引发的压缩变形是该区段结构变形的主因。

参考文献

- [1] 李骏. 黄土隧道围岩湿陷衬砌结构力学响应分析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(12): 91-97.
LI Jun. Analysis of mechanical response of loess tunnel lining structure to surrounding rock hydro-collapse[J]. Railway standard design, 2022, 66(12): 91-97.
- [2] 邓祥辉, 曹卫平, 杨东升. 降雨入渗对浅埋黄土隧道稳定性的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 45-55.
DENG Xianghui, CAO Weiping, YANG Dongsheng. Stability analysis of shallow loess tunnel considering rainfall infiltration[J]. Journal of civil and environmental engineering, 2020, 42(2): 45-55.
- [3] 范文昊, 谢盛昊, 周飞聪, 等. 新建双线盾构隧道下穿既有隧道近接影响分区及控制措施案例研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(4): 43-57.
FAN Wenhao, XIE Shenghao, ZHOU Feicong, et al. A case study on adjacent impact zoning and control measures for new double-line shield tunnel undercrossing existing tunnel[J]. Modern tunnelling technology, 2023, 60(4): 43-57.
- [4] 陈公军. 测量机器人在下穿既有地铁隧道变形监测中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(11): 212-214.
CHEN Gongjun. Application of measurement robots in deformation monitoring of underpasses of existing subway tunnels[J]. Geomatics & spatial information technology, 2024, 47(11): 212-214.
- [5] 廖海山, 李盈洲. 自动变形监测系统在运营地铁隧道监测中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(2): 193-195.

- LIAO Haishan, LI Yingzhou. Application of automatic deformation monitoring system on operational metro tunnel monitoring[J]. Geomatics & spatial information technology, 2021, 44(2): 193-195.
- [6] 黄俊, 张顶立, 梁文灏, 等. 服役期隧道结构安全控制技术综述[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(4): 1-19.
HUANG Jun, ZHANG Dingli, LIANG Wenhao, et al. Research status of safety control technology for tunnel structures during service period[J]. Railway standard design, 2024, 68(4): 1-19.
- [7] 北京市质量技术监督局. 城市轨道交通设施养护维修技术规范: DB11/T 718—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [8] 中国科技产业化促进会. 城市轨道交通地下结构健康检测监测: T/CSPSTC 43—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [9] 胡昆昆, 蔡国军, 闫超, 等. 浸水条件对浅埋湿陷黄土隧道受力性状影响的大型模型试验研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 12156-12166.
HU Kunkun, CAI Guojun, YAN Chao, et al. Large scale model test study on the influence of soaking conditions on the mechanical behavior of shallow buried collapsible loess tunnel[J]. Science technology and engineering, 2022, 22(27): 12156-12166.
- [10] 王武刚, 胡昆昆, 李又云, 等. 浸水湿陷黄土隧道加固地基受力与变形性状数值研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(6): 664-674.
WANG Wugang, HU Kunkun, LI Youyun, et al. Numerical study on stress and deformation characteristics of foundation reinforced by water soaked and collapsible loess tunnel[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2022, 44(6): 664-674.
- [11] 邵生俊, 李骏, 李国良, 等. 大厚度湿陷性黄土隧道现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1395-1404.
SHAO Shengjun, LI Jun, LI Guoliang, et al. Field immersion tests on tunnel in large-thickness collapsible loess[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2018, 40(8): 1395-1404.
- [12] 董飞. 地铁隧道衬砌结构破坏机理与安全性评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
DONG Fei. Failure mechanism and safety assessment of metro tunnel lining[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

(编辑: 傅依萱)

(上接第 86 页)

- [57] KANNANGARA K K P M, ZHOU Wanhuan, DING Zhi, et al. Investigation of feature contribution to shield tunneling-induced settlement using Shapley additive explanations method[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2022, 14(4): 1052-1063.
- [58] ZHAO Shisen, FENG Xianda, PENG Kefeng. Prediction and parameter optimization of surface settlement induced by shield tunneling using improved informer algorithm[J]. Applied sciences, 2025, 15(12): 6766.
- [59] ZHANG Pin, CHEN Renpeng, WU Huaina. Real-time analysis and regulation of EPB shield steering using Random Forest[J]. Automation in construction, 2019, 106: 102860.
- [60] 张孟喜, 范杰, 吴惠明, 等. 基于 AG-PSO 的泥水平衡盾构地表沉降掘进主控参数优化与应用[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(增刊 1): 223-233.
ZHANG Mengxi, FAN Jie, WU Huiming, et al. Optimization of Main Control Parameters for Ground Settlement during Slurry Balance Shield Tunnelling Based on AG-PSO and Its Application[J]. Modern tunnelling technology, 2024, 61(S1): 223-233.
- [61] 费瑞振, 邹洋, 彭立敏, 等. 考虑变形控制的盾构穿越高铁隧道掘进参数研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(6): 2703-2716.
FEI Ruizhen, ZOU Yang, PENG Limin, et al. Research on tunneling parameters of shield tunneling through high speed railway tunnel considering deformation control[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(6): 2703-2716.
- [62] 吴贤国, 冯宗宝, 刘俊, 等. 基于 RF-NSGA-II 的盾构施工地表沉降安全控制多目标优化[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 45-51.
WU Xianguo, FENG Zongbao, LIU Jun, et al. Multi-objective optimization of surface settlement safety control during shield construction based on RF-NSGA-II [J]. China safety science journal, 2022, 32(8): 45-51.
- [63] 吴贤国, 刘俊, 苏飞鸣, 等. 基于 CatBoost-MOEAD 的大直径泥水盾构施工多目标预测优化[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(6): 57-64.
WU Xianguo, LIU Jun, SU Feiming, et al. Multi-objective prediction optimization for large-diameter slurry shield tunneling construction based on CatBoost-MOEAD[J]. China safety science journal, 2024, 34(6): 57-64.

(编辑: 傅依萱)